제 출 문

국토교통부 장관 귀하

이 보고서를 “PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량개발” 과제의 최종 보고서로 제출합니다.

2015년 1월 27일

주관연구기관명 : (주) 에이스이엔씨

주관연구책임자 : 김 철 호

연구원 : 김 현 기

연구원 : 김 동 조

연구원 : 이 희 종

협동연구기관명 : (주) 이 산

협동연구책임자 : 유 성 근

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>12TRPI
-C063240-01</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td>2013. 5. 1.
~ 2014. 10. 31</td><td>단 계 구 분</td><td>(3차년도)
/ (3차년도)</td></tr>
<tr><td>연 구 사 업 명</td><td colspan="5">국토교통 기술사업화 지원사업</td></tr>
<tr><td rowspan="3">연 구 과 제 명</td><td>최 상 위
과 제 명</td><td colspan="4">PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">단위과제명</td><td colspan="4">(주관) PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량의 제작·시공기술개발 및 검증</td></tr>
<tr><td colspan="4">(공동) PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량의 설계기술 개발</td></tr>
<tr><td>연 구 책 임 자</td><td>김 철 호</td><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 9 명
내부 : 5 명
외부 : 4 명</td><td>총 연구비</td><td>정부 : 384,600천원
기업 : 450,168천원
계 : 834,768천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">(주) 에이스이엔씨
기술연구소</td><td>참여기업명</td><td colspan="2">(주) 이 산</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명 :</td><td colspan="2">상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td colspan="4">요 약</td><td>보고서면수</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="6">하천이나 도로 횡단과 같은 형하고 제약이 있는 경우에 가설되는 교량에 강합성 라멘교나 프리플랙스교와 같은 고가의 교량형식이 적용되고 있다. 자중이 작고 저형고 실현 공법으로 중공슬래브 교량이 대안이 될 수 있으나, 중공부 시공이 어렵고 복잡한 균열거동으로 인해 적용성이 떨어졌다.
본 연구는 중공슬래브 형식의 단점을 극복하기 위해 기존의 PSC-I 거더를 개선하여 중공부를 효과적으로 형성시키는 조립식 중공슬래브 교량개발을 목표로 PSC-I거더를 이용한 중공슬래브교량의 해석 및 설계기술 개발과 제작 및 시공기술개발로 구분하여 수행되었고, 아래와 같은 결과를 얻었다.
첫째, 설계기준 검토로 최적 거더단면을 산정하고 합리적인 연결방안을 제시하였다.
둘째, 상세해석과 구조설계를 수행하여 설계 성과품을 작성하고 설계지침(안)을 개발하였다.
셋째, 거더 제작과 시공순서 검토를 통해 문제점을 개선하고 시공지침(안)을 개발하였다.
넷째, 실물 재하실험을 통해 거더의 정·동적 안전성 평가를 수행하였다.
다섯째, 적용성 확대를 위한 일체식교량화 연구를 수행하고 구조성능 실험으로 검증 하였다.
본 연구를 통해 개발된 경제적인 중공슬래브 교량은 검증결과를 바탕으로 사업화를 통해 교량 형식 선정 폭을 확대시키고 국가예산 절감에 기여할 것이다.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="4">중공, 조립식 거더, 프리스트레스트 콘크리트, 경제적, 미관</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="4">Void, Precast Girder, PSC, Economic, Aesthetic landscape</td></tr>
</table>

요 약 문

Ⅰ. 제 목

PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량개발

Ⅱ. 연구개발과제 개요

본 연구개발 과제는 기존의 PSC-I 거더의 개념을 도입하여 상부구조 형식으로 사용되고 있는 슬래브 교량의 구조로 단면을 최적화하고 합리적인 설계 및 시공방법과 관련된 것이다. 하천이나 도로 횡단과 같은 형하고 제약이 있는 경우에 가설되는 교량에 강합성 라멘교나 프리플랙스교와 같은 고가의 교량형식이 적용되고 있다. 자중이 작고 저형고 실현 공법으로 중공슬래브 교량이 대안이 될 수 있으나, 중공부 시공이 어렵고 복잡한 균열거동으로 인해 적용성이 떨어졌다.

교량계획 기술자들의 선택 폭을 넓힐 수 있고 보다 경제적인 교량형식의 필요에 따라 본 연구는 중공슬래브 형식의 장점을 활용하고 여러 가지 단점을 극복하기 위해 프리캐스트 공법 및 모듈화로 공기단축과 품질향상, 그리고 시공성을 획기적으로 개선할 수 있도록 기존의 PSC-I 거더의 상하부 플랜지부분을 개선하여 최적단면을 결정하고 중공부를 효과적으로 형성시키는 조립식 중공슬래브 교량개발을 목표로 수행되었다.

PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량의 현장 적용을 위한 교량의 설계 및 시공과 관련된 제반 항목, 즉 구조계획, 구조해석, 설계, 제작 및 시공에 관한 일련의 연구를 통해 요소기술 및 현장적용 기술을 도출하고, 교량의 상부구조로서 요구되는 구조안전성 및 사용성 그리고 제작기술에 대한 실물 재하실험 및 구조상세부 성능시험을 통해 품질을 검증하였다.

실용화 및 사업화가 가능하도록 국내 건설시장에 적용될 실물교량의 개발을 위해 연구범

위는 크게 “PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량의 해석 및 설계”와 “PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량의 제작 및 시공기술”의 분야로 구분되며, 연구내용 및 범위는 다음 표로 요약된다.

연 구 목 표	주요 연구내용
PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량의 해석 및 설계기술개발	▪ 설계기준 및 기존공법 비교 분석 ▪ 최적단면 산정을 위한 변수연구 ▪ 거더간 합리적 연결방안 연구 ▪ 상세해석을 통한 구조안전성 검증 ▪ 설계지침(안) 개발 ▪ 설계편람 및 표준도면 작성
PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량의 제작 및 시공기술 개발	▪ 횡방향 연결에 대한 신뢰성 검토 ▪ 시작품 및 강재거푸집 제작 검토 ▪ 제작 및 시공순서에 따른 문제점 검토 ▪ 시공지침(안)개발 ▪ 실물거더 재하시험을 통한 안전성 검토 ▪ 적용성 확대를 위한 구조상세 성능실험

건설시장의 원자재 가격상승 콘크리트교가 선호되는 추세를 고려 해 볼 때, 동일한 중소규모의 지간장 또는 형하고 제약이 있을 경우 선택할 수 있는 교량 형식으로 강합성 거더 또는 합성형 라멘교를 대체할 수 있는 공법이 개발 된다면 경제적 환경적 효과를 거둘 것으로 예상된다. 또한, 교량 건설시 상부구조형식의 선정은 시공여건을 고려하여 경제성과 경관성 등을 종합적으로 검토하여 결정되는데, 동바리나 거푸집의 설치 해체가 필요 없고, 저형고 거더를 모듈화를 통한 조립식 교량 기술 개발을 통해 실현한다면 국가정책에 부합하는 예산절감과 전반적인 SOC 산업에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

Ⅲ. 연구개발 수행내용 및 결과

기존 폐합단면 중공슬래브와 달리 개단면의 PSC-I 거더의 결합으로 폐합 형태의 중공단면을 구현함으로써 구조적 장점을 극대화하고, 기존 중공 슬래브 교량의 적용성 또한 증대하여 20~35m 경간의 적용성을 가진 교량구조를 개발하기 위한 기본 방안은 다음과 같다.

. 프리캐스트 공법의 도입으로 품질향상, 공사기간 단축

. 기존 폐합단면 중공슬래브 양생시 발생하는 후프텐션(Hoop Tension) 균열 배제

. 합리적 형상의 중공부 형성

. 향후 무조인트(Integral Abutment) 교량화를 위한 적용성 확보

본 연구를 통해 개발된 거더를 PCB-SLAB(Prestressed Concrete Box-Slab)로 명명하였으며 연구내용별 세부사항은 아래 표와 같다.

연구개발 내용	세부수행 내용
거더의 구성 및 기존공법 분석	▪ 연구방향 및 개념설계 ▪ 기존공법 사례분석
PCB-SLAB 거더 단면 최적화	▪ 최적 거더 단면 연구 ▪ 조립식 거더의연결방안 검토 ▪ 최적 형고검토
예비해석 및 경제성 검토	▪ 구조해석 및 모델링 ▪ 종방향, 횡방향 구조해석 및 검토 ▪ 개략 공사비 검토
지간별 구조해석 및 안전성 검토	▪ 지간별 단면설정 ▪ 구조해석 및 모델링 ▪ 경제성 분석
적용성 확대를 위한 일체식 교량화	▪ 개발 개념 및 구성요소 정립 ▪ 일체화 방법 검토 ▪ 구조상세 실험항목 선정
PCB-SLAB 거더제작 및 시공법 개발	▪ 거더 제작순서 검토 ▪ 거푸집 제작 검토 ▪ 병력시공 및 작업대차 검토
거더 실물모형 재하실험	▪ 실험 대상교량의 설계 ▪ 실험체 제작방법 검토 ▪ 계측기 센서배치 검토 ▪ 실험결과 분석
구조상세 성능실험	▪ 접속슬래브 설치기준 검토 ▪ 실험체 제작 및 실험방법 검토 ▪ 계측기 및 센서배치 검토 ▪ 실험결과 분석 ▪ 일체식 교량화 공법 연결부 실험 및 결과분석

실물 거더 모형에 대해 정·동적 재하실험을 실시한 결과 횡방향으로 연결된 두 개의 PSC-I 거더는 일체화되어 거동하며, 실험체의 휨강도는 설계 단계에서 예측한 휨강도에 비해 큰 것으로 나타나 차량 윤하중에 대해 충분한 강도를 가지며 안정성이 검증되었다.

적용성 확대를 위한 일체식 교량화 공법 연구내용 중 접속슬래브 배근상세에 대해 구조적 개념을 실제적으로 확인하고 기 개발 완료한 PCB-Slab에 직접 적용 가능한 3가지 연결철근 형상에 대한 구조실험을 실시하였으며, 일체거동의 경우 부모멘트 철근의 배치가 어렵지 않고 시공성도 용이하고 명확한 구조거동이 보장되어 추천 할 수 있다.

한편, L형 흉벽을 이용한 반일체식 교량화 공법의 구조성능 실험 결과, 전체적으로 연결철근의 강도는 본 구조물인 거더와 비교해도 일체로 거동할 수 있는 충분한 강성을 확보한 것으로 평가할 수 있으며, 일부과다 배치된 연결상세 철근은 제거하고 효과적인 배치를 통해 최적의 성능 발현이 가능한 것으로 평가되었다.

Ⅳ. 최종 연구성과 및 적용실적

기존의 중공슬래브교의 단점을 극복하고 바닥판 슬래브가 없는 프리캐스트 조립식 거더를 개발하여 중공슬래브를 형성하여 저형고 거더를 개발하기 위한 연구목표에 맞추어 새로운 형식에 대한 구조해석 방법에 대한 연구와 설계 수행 후 설계지침(안)을 제시하였다.

최적화 단면에 대하여 거더 제작과 시공의 단계별 문제점 검토와 시공여건을 고려한 경제적인 시공방법 검토가 수행되었고, 시공지침(안)을 개발하여 최종 개선방향을 제시하였다. 또한, 개발된 PCB-SLAB 거더의 실물 재하실험을 통해 검증하였고, 신축이음이 없어 주행성이나 유지관리에 유리한 반일체식 교량으로의 적용성 확대를 위해 개발된 중공슬래브교량의 구조상세를 제시하였고, 실험을 통해 검증한 후 추천(안)을 제시하였다.

주요 연구성과는 아래 표와 같다.

수행일	성과명	제목 / 내용	저자 /수행기관	비고
2014년 12월 (예정)	논문 게재	일체식 교량의 접속슬래브 연결철근 형상에 따른 연결부 구조거동에 대한 실험적 연구	유성근, 김나연, 김호섭, 김영호	한국복합신소재구조학회
2014년 10월	학술 대회	PSC-I 거더를 이용한 조립식 중공슬래브의 휨거동	이상윤, 김정호, 김철호	2014 가을 학술대회
2013년 12월	기술 기사	구조재료의 효율적 이용과 제작 결함의 사전배제를 위한 중공슬래브 실용 기술개발	어기택, 정의용, 김나연, 김철호, 장석윤	한국복합신소재구조학회
2013년	특허 출원	전단키를 구비한 무바닥판 프리캐스트 거더교 및 그 시공방법	(주)에이스이엔씨	출원번호 10-2013-0161029
2014년	특허 등록	프리캐스트 교대흉벽을 이용한 반일체식 교량 및 그 시공방법	(주)에이스이엔씨	등록번호 10-1452178
2013년	시제품 제작	PCB-SLAB 단경간 교량 모형 시제품 (1/50 크기의 실물축소모형)	(주)에이스이엔씨	시공순서 검토 및 홍보활용
2014년 4월	실험	PSC-I 거더를 이용한 조립식 중공슬래브 교량 실물모형 재하실험	(주)에이스이엔씨	한국건설기술연구원
2014년 8월	실험	PCB-SLAB 거더 구조상세 성능실험	(주)이산	명지대학교 하이브리드 구조실험센터
2014년 4월	홍보	공개재하실험(초대장 작성 및 배포)	(주)에이스이엔씨	관련업체
2014년 8월	전시 홍보	PCB-SLAB 홍보 브로슈어 제작 및 배포	(주)에이스이엔씨	건설교통 신기술대전

Ⅴ. 연구목표 달성 및 효과

본 과제 수행 결과 당초 목표했던 정량적 성과지표는 모두 달성되었으며, 특허 1건과 학술회의 1건 등 성과 목표치를 추가 달성 하였다.

연구개발 효과는 살펴보면, PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량의 경우 시공 시 기존 슬래브 교량 형식에서 슬래브 타설을 위한 동바리 및 거푸집의 설치 및 해체가 필요 없어

공기가 단축되고 시공이 간단한 장점이 있다. 또한, 후프 텐션에 의해 발생되는 균열을 근본적으로 해결하였고, 형하고 확보를 위해 주로 적용되는 강합성 라멘교량이 공사비 증대와 이산화탄소 발생과 같은 환경적인 문제점을 발생시키게 되어, 본 기술을 통해 PSC빔 교량 및 강교의 단점을 개선하고, 강재 사용을 배제하여 저 형고·장 지간의 교량기술을 확보함과 동시에 친환경적인 기술로서 그 기대효과가 클 것으로 예상된다.

한편, 그동안 교량의 계획에서 저형고의 실현을 위해 시공기간이 길고 기술적 한계로 채택되지 못하던 중공슬래브 교량을 대체하여 기술자들의 선택의 폭을 넓히는 동시에 발주처의 예산절감 기조도 확보할 수 있는 명분이 될 것이다. 또한, 본 연구개발의 성과로 인해 교량의 신공법 개발이 가속화 되는 계기가 될 것이며, 정부의 새로운 교량개발 투자를 기대할 수 있다.

최종성과 목표치와 달성내용을 아래 표에 나타내었다.

연차	핵심 성과물 (level1)	단위 성과물 (level2)		최종 성과목표				해당 기관	예산 (백만)	정량목표
				질적목표(측정방법)		목표치	검증방법			
1	PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량의 설계 및 시공 기술 개발	1-1	학술기사 게제	①	개제논문수	1건	논문집			학술기사 : 1 건
		1-2	연구개발 관련 홍보	①	정기간행물 발간 건수	1건	간행물			간행물 : 1 건
		1-3	기술수준 향상도	①	수준 향상정도	100%	구조 계산서			계산서 : 1 건
2	PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량의 설계 및 시공 기술 개발	2-1	연구개발 홍보 건수	①	홍보물 제작건	1건	카다로그			홍보물 : 1 건
		2-2	학회지 게재 논문	①	게재 논문수	1건	논문집			논문 : 1 건
		2-3	특허출원	①	특허출원서류	1건	출원서류			특허 : 출원 1 건
		2-4	시작품 제작	①	시작품 (축소모형 및 관련제품)	1건	시작품			시제품 : 제작 1 건
		2-5	강재거푸집 제작	①	강재거푸집 등록현황	1건	실물 및 사진대장			거푸집 : 제작 1 건
3	PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량의 설계 및 시공 기술 개발	3-1	실물 빔 제작	①	재하시험용 실물 빔	1건	실물 및 사진대장			실물빔 : 제작 1 건
		3-2	실물재하시험	①	시험결과 보고서	1건	보고서			보고서 : 작성 1 건
		3-3	적용성 확대를 위한 시험연구	①	시험결과 보고서	1건	보고서			보고서 : 작성 1 건
		3-4	특허출원	①	특허출원서류	1건	출원서류			특허 : 등록 1 건
		3-5	학술회의	①	발표논문	0건	논문집			논문 : 1 건
계					특허 : 출원 1 건 , 등록 1 건, 학술기사 : 1 건 , 학술회의 : 1 건 , 논문 : 1 건 시제품 : 1 건 , 간행물 : 1 건 , 홍보물 : 1 건 거푸집 : 1 건 , 실물빔 : 1 건 , 계산서 : 1 건, 보고서 : 2 건					

Ⅵ. 연구성과 활용계획

본 연구개발 과제의 목적은 PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량의 개발과 실용화에 그 목적이 있다. 중공 슬래브교를 구성하는 핵심기술인 중공부의 중앙부분을 수직분할 블록화 하여 현장으로 이동 후 조립 및 설치하는 방법으로 간편한 시공성과 경제성을 확보하여 저형고 장지간 교량 시장에 미칠 파급 효과가 클 것으로 예상된다. 또한, 종래 폐쇄적이고 획일적인 단면 형상을 탈피하여 중공부 단면의 높이와 폭이 각기 서로 반대방향으로 테이퍼 형태로 변하는 단면으로 구성하여 최근 그 요구가 증대되는 경제성 확보 및 경관설계의 취지에 적합한 공법으로 건설공사 활용에 긍정적일 것으로 기대된다.

주관연구기관인 (주)에이스이엔씨은 PSC-I형 거더의 설계와 시공을 전문으로 하는 건설회사로서 본 과제 결과물인 PCB-SLAB교량과 보유기술력으로 실제 적용이 가능하도록 자체 영업망을 구축하고 수주활동을 진행하여 사업활 할 수 있는 최선의 조건을 갖추고 있다. 공동 연구기관인 (주)이산 또한 토목분야 종합설계업체로 수자원 및 하천분야에 있어 국내업체를 대표하고 있어 설계에 반영할 수 있도록 발주처에 홍보하고 설계를 수행할 수 있는 역량을 갖고 있어 사업화에 최선의 조건을 갖고 있다.

본 기술은 교량 건설시장의 발전에 국한된 것이 아니라 관련 산업의 발전을 함께 기대할 수 있는 시장을 가지고 있다. 주 사용 재료인 콘크리트 및 철근은 국내에 상당한 시장규모를 가지는 산업으로서 본 기술의 폭넓은 현장 적용에 따라서 관련 산업의 발전에 상당부분 기여할 수 있으며, 공장 제작 후 현장까지의 운반을 위한 운송, 제작 및 가설을 위한 건설인부, 운송수단 및 가설크레인 시장에 이르기 까지 국내 산업 발전에 미치는 긍정적인 영향이 클 것으로 기대된다.

SUMMARY

Strong momentum exists for the growing use of precast elements in bridge construction as a means to speed construction and minimize disruption to traffic and commerce. Precast construction also offers higher quality control compared to on-site concrete casting and can reduce the impact of bridge construction on the environment through the elimination of formwork.

Bridge type of steel concrete composite rahmen or pre-flex has been applied where required the lower depth girder due to vertical clearance restrictions caused by crossing of rivers and roads. However, because these type are not only complicated to manufacture and construction but also required expensive cost, The void slab bridges may be an alternative if overcome the disadvantages such as difficulty of construction and complex crack behavior. The void slabs are frequently used in order to reduce the seif weight of the structure which are used in the construction of short and medium span slab bridges.

Since the PSC I-type girders have been one of the most popular structural forms for the superstructures of bridges due to low construction cost and maintenance fee, this research project was used the prefabricated PSC-I shape girder in order to make effectively void slab and determined for an optimized girder section to improve the upper and lower flanges. In addition, It was derived field applicable technology including design elemental technology that is

related to design and construction like a kind that planning, analysis, manufacture and construction method. Furthermore, full scale girder model loading tests and structural details performance tests was carried out in order to evaluate of structural safety, serviceability, rationality of manufacture as required in superstructure of bridge.

A research scope was setting for development of more economical bridge type and expanding the choice of planning engineers ; It was carried out into the ‘ analysis and design technology’ and ‘fabrication and construction techniques’ about the development of void slab bridges using PSC-I girders.

This report contains the design and construction guidelines which have been developed as results of structural analysis, design, fabrication, experiment for evaluation of prefabricated void slab bridge, including recommendation of approach slab connection to abutment for extension of the applicability in the integral abutment bridges.

The results of this study will be applied to the field through the commercialization and will bring environmental and economic effects; More to the point, will contribute greatly to reducing the national budget and will develop the SOC industry.

CONTENTS

Chapter 1. Overview of Research and Development Project

1. Purpose of R&D Project ····· 1
2. Necessity of R&D Project ····· 3
3. Content and Scope of Research ····· 7
4. Current State of the Technical Developments in the Domestic and Overseas ····· 22
5. Occupy Positions of the Results in the Relevant Field ····· 25

Chapter 2. Contents and Results of Research and Development Project

1. Strategies and Method ····· 29
2. Research Details ····· 31
3. Results and Validation ····· 118

Chapter 3. Final Results and Track Record

1. List of Outcomes ····· 202
2. Prototype Manufacturing and Mock-Up Test ····· 209
3. Market Outlook for Results of Technical Development in the Domestic and Overseas ····· 214

Chapter 4. Objectives Achievement and Impacts

1. Objectives Achievement ····· 222
2. Impact of R&D Results ····· 228

Chapter 5. Application scheme of Results and Further Study

1. Application Scheme of R&D Results ····· 230
2. Necessity of Further Study ····· 234

Chapter 6. Reference ····· 238

목 차

제1장 연구개발과제 개요

1. 연구개발의 목적 ····· 1
2. 연구개발의 필요성 ····· 3
3. 연구내용 및 범위 ····· 7
4. 국내외 기술개발 현황 ····· 22
5. 연구개발결과의 관련분야 위치 ····· 25

제2장 연구개발 수행 내용 및 결과

1. 연구개발 추진 전략 및 방법 ····· 29
2. 연구개발 주요내용 ····· 31
3. 연구결과 및 검증 ····· 118

제3장 최종 연구성과 및 적용실적

1. 연구성과 ····· 202
2. 시작품 제작 및 실물실험 ····· 209
3. 기술개발 성과의 국내외 시장 전망 ····· 214

제4장 연구목표 달성 및 효과

1. 연구개발 최종목표 달성도 ····· 222
2. 연구개발 성과의 파급 효과 ····· 228

제5장 연구개발결과의 활용 및 추가연구 필요성

1. 연구성과 향후 활용방안 ····· 230
2. 추가연구 필요성 ····· 234

제6장 참고문헌 ····· 238

제 1 장 연구개발과제 개요

1. 연구개발의 목적

본 연구개발은 기존의 PSC-I 거더의 개념을 도입하여 상부구조 형식으로 사용되고 있는 슬래브 교량의 구조로 단면을 최적화하고 합리적인 설계 및 시공방법과 관련된 것이다. 슬래브교는 건설공사에서 가장 보편화된 공법의 하나이며, 오랜 기간 널리 사용되어 온 RC 구조물이지만 수많은 장점을 보유하고 있음에도 불구하고 큰 자중으로 인한 부재 크기 증가와 현장콘크리트 양생에 따른 긴 공사기간, 균열을 발생하는 문제를 해결해야 하는 구조 시스템이다. 이와 같은 단점을 보완하기 위해서 고정하중 감소와 거푸집 공사의 단순화를 통한 공기절감 효과를 위해 중공 슬래브교가 사용되고 있다.

교량 건설공사에 있어서 중공슬래브 교량은 설계 및 시공 상에 많은 문제점이 있는 것으로 파악되었고, 1996년 도로교 표준시방서의 관련 조항의 개정 등을 통해 그 동안의 논란이 되었던 중공 슬래브 교량의 해석, 설계 및 시공에 관한 문제점들을 검토, 분석하고 이를 바탕으로 이론적인 연구와 실험적인 연구를 통해 중공슬래브 교량과 관련한 제반 문제점들을 개선시키는 방법을 찾는데 노력하고 있다.

이러한 노력은 형하고가 제한된 경우 중공슬래브 교량의 구조적, 경제적, 미관에 있어서의 장점들을 충분히 활용할 수 있는 체계적인 연구과정이지만, 경간장을 증대시키는 데는 한계가 있는 실정이다.

이에 반해 도로 및 철도교량에 널리 시공되고 있는 PSC-I 거더는 1950년대 초 미국에서 처음 건설된 이후, 1960년대 말 국내에 도입되어 지금까지 중, 소 경간장의 교량에 널리 시공되고 있는 대표적인 교량 상부구조 형식이며, 비교적 간편한 설계 및 시공성, 경제성을 장점으로 하여 국내 도로교의 경우 단경간에 있어서 경간장 30 ~ 35m, 철도교의 경우에는 경간장 20 ~ 25m의 제한적 범위에서 사용되고 있다.

PSC-I 거더는 외력에 의하여 콘크리트에 발생하는 인장응력을 소정의 한도까지 상쇄시킬 수 있도록 거더 제작 시 미리 PS-강선에 긴장력을 도입하여 압축응력을 발생시켜 고정하중 및 활하중 등의 설계하중에 저항할 수 있도록 구성된 기술로서, 현장에서 거푸집을 이용하여 거더를 제작하고 PS-강선을 긴장, 정착시킨 후 교대나 교각 등에 가설되는 비교적 단순한 공정으로 이루어져 있다. 최근에는 고강도 콘크리트를 이용하여 경간장 40m까지 늘린 PSC-I 거더가 개발되는 등 다양한 시도가 이루어지고 있다.

그러나, 이러한 PSC-I 거더교는 형고가 높아 형하고 제약이 없는 곳에는 경간장의 확대로 경제적인 적용이 가능하지만, 단지나 하천 등 형하고 제약이 따르는 곳에는 그 적용성이 떨어질 수밖에 없으므로, 기존의 라멘교에 강재를 합성시킨 강합성 라멘교 형식이 주로 사용되고 있다. 이 공법은 제작에 소요되는 주재료가 고가의 강재이기 때문에 콘크리트 계열의 교량 형식 보다 경제성이 떨어진다.

따라서, 본 연구를 통해 기존의 중공슬래브의 장점을 이용하고, PSC-I 거더 단면의 구조적개념을 도입하여 최적화함으로써, 형고를 축소하고 거더 상부 플랜지가 기존의 슬래브 역할을 대체하는 새로운 형태의 교량 거더 기술개발이 목적이다. 또한, 개발된 기술은 그동안 여러 가지 제약으로 사용되지 못했던 중공 슬래브교의 적용을 확대할 것으로 기대된다.

2. 연구개발의 필요성

가. 기술적 측면

슬래브교는 상부구조가 슬래브 형식의 바닥판으로 이루어진 교량으로 주로 10~15m이하의 짧은 지간장에 널리 사용되며, 일반 거더교에 비해 상부구조의 형고가 작아 형하공간의 제약을 받는 곳에 유리하게 적용할 수 있는 교량이다. 통상 적용지간은 단순교의 경우 5~15m, 연속교인 경우 10~30m 정도이며, 슬래브 두께는 보통 지간장의 1/16~1/20 정도로 설계된다.

슬래브교의 종류는 슬래브의 구조에 따라 RC슬래브, 중공슬래브, PSC슬래브교 등이 있으며, RC슬래브교는 장경간일 경우 고정하중이 증가되어 경제성이 떨어지게 되어 자중을 경감하기 위해 슬래브 내부에 빈공간을 형성시킨 것이 중공슬래브 교량이다. 또한, 슬래브의 교축방향으로 프리스트레스를 도입하여 30m 이하의 지간에 적용하기도 하는데 이것이 PSC슬래브 교량이다.

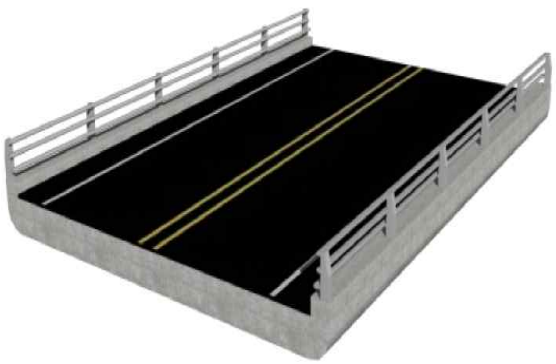


그림 1-1 슬래브교

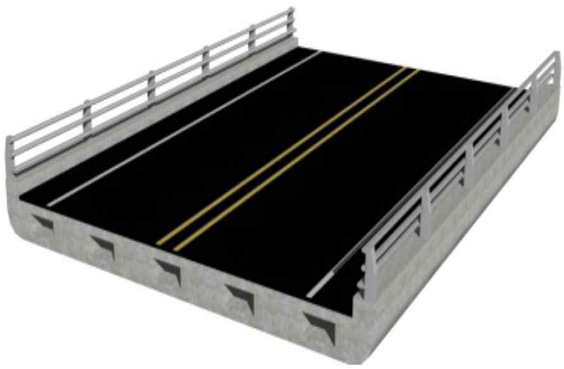


그림 1-2 중공슬래브교

거더교의 경우 바닥판 슬래브를 시공하는 방법은 거더를 프리캐스트로 공장제작하거나, 현장타설에 의해 제작된후, 교대 및 교각위에 거치하고 그 상부에 현장타설 콘크리트로 바닥판을 시공하게 된다. 그러나, 중공슬래브를 포함한 슬래브 교량의 경우는 현장에서 상부

를 지지하는 동바리를 설치한후 슬래브를 현장타설함에 따라 이와같은 종래의 시공방법은 아래와 같은 많은 문제점을 갖고 있다.

① 교량 시공시 현장에서 콘크리트를 타설하고 양생하는데 소요되는 시간이 길어 전체적인 공사기간의 장기화를 초래한다.

② 콘크리트 현장타설로 인한 균열발생과 시공품질을 설계자가 요구하는 사양대로 정확하게 관리하기 어렵다.

③ 동바리 설치로 인하여 교통통제, 소음, 유수의 소통에 지장을 초래하고, 시공중 상당한 가설하중을 부담하는 동바리 시스템의 안정성을 정확하게 확보하기 어렵다.

④ 양호한 콘크리트의 품질관리와 타설 면의 평탄성 확보 및 타설시 침하, 붕괴, 추락등 사고발생 대책등 고도의 시공관리가 요구된다.

⑤ 동바리 설치부의 지반이 연약해지기 쉬워 지반침하에 유의하여야 하고, 면밀한 구조검토가 요구된다.

⑥ 콘크리트의 양생시 건조수축에 의해 교좌장치에 변위가 중립축에서 벗어나게 되어 시공완료후 교량인상을 통해 교좌장치 재배치 사례가 다수 보고되 있다.

상기와 같이 현장타설에 의한 슬래브교의 시공방식은 여러 가지 문제점을 초래하기 때문에 본연구를 통해 구조물의 품질개선과 안전성이 확보되는 향상된 기술을 개발하고, 저형고 장지간 적용이 가능한 새로운 슬래브 교량형식이 필요하다.

나. 경제 · 산업적 측면

슬래브교는 보편적인 공법으로 알려져 있고, 외국의 경우 시공사례를 쉽게 찾을 수 있으나 국내의 경우 여러 가지 문제점들로 인해 보편화 되었다고 보기는 어렵다. 중공슬래브교의 경우에도 마찬가지로 볼수 있으나 기술적인 단점을 극복하게 된다면 충분히 활용도를 높일수 있는 교량형식임에 틀림없다. 종래의 강합성 라멘이나 PF빔의 경간장 및 형하고 제약을 극복하고 구조적인 장점을 근본적으로 개선하여 시공성이 향상되면 경제적인 공법일

뿐만 아니라 향후 부가가치가 매우 높은 기술로 평가될 수 있을 것이다.

최근 프래캐스트 교량 또는 모듈화, 조립식 이란 용어로 대표되는 연구개발 동향을 감안하면 시공이 간편하고 공기단축과 품질향상을 가져올 수 있는 교량이 개발을 통해 국가예산을 절감하고 해외시장도 확보 할수 있는 계기가 될 것이다.

건설시장의 원자재 가격상승으로 인해 예산 절감이 화두가 된지 오래다. 강박스교량이나 강합성 라멘교 보다는 콘크리트교가 선호되는 추세의 이유이기도 하다. 심지어 기설계된 교량의 경우 실시설계 단계에서 콘크리트 교량으로 교체되기도 한다. 동일한 중소규모의 지간장 또는 형하고 제약이 있을 경우 선택할 수 있는 교량의 형식을 볼 때 강합성 거더 또는 라멘교가 계획될 경우 이것을 대체할 수 있는 공법이 개발 된다면 상식적인 수준에서도 강재 사용 배제로 인한 경제적 환경적 효과를 거둘 것으로 예상된다.

교량 건설시 상부구조형식의 선정은 시공여건을 고려하여 경제성과 경관성 등을 종합적으로 검토하여 결정되는데 슬래브교로 반드시 계획되어야 하는 교량이라면 기존공법에서 콘크리트 타설을 위한 동바리나 거푸집등 가설재의 설치가 반드시 필요하게 되고 현장에서 양생기간을 충분히 가져야하므로 공기가 늘어날 수 밖에 없다. 이런 부분들은 모두 경제성을 낮게 만드는 원인으로 볼수 있으므로, 동바리나 거푸집의 설치 해체가 필요없이 공기단축이 가능하며 바닥판 슬래브의 시공이 별도로 필요없게 하고, 저형고 거더의 실현과 모듈화를 통한 조립식 교량 기술이 개발 된다면 국가 SOC 산업에 크게 기여할 수 있을 것이다.

다. 사회 · 문화적 측면

종래의 슬래브교 단면은 외관상 획일적이 모습일 수 밖에 없다. 산업화 시대의 교량들은 목적하는 시설물 본연의 기능만을 강조하거나 진보된 기술없이 불확실한 하중에 대하여

안전율만 높여 시공되어 온 것이 사실이다. 따라서, 대부분의 교량들이 미적요소가 결여되어 투박한 것을 볼수 있다. 그러나, 최근은 구조해석 기술의 발달로 정형화되지 않은 기하형상을 도입한 구조물이나 교량의 계획이 일반적으로 이루어지고 구조설계 기술의 발달로 안전성이 확보되는 단면계획이 되고 있다. 심지어 국내의 경우에도 사장교나 현수교와 같은 특수 교량도 세계 유수의 설계나 시공사 못지않은 기술력을 확보하고 있다. 이러한 고도의 교량의 설계와 시공기술은 결과적으로 교통의 흐름을 이어주는 단순한 교량 기능을 벗어나 지역의 랜드마크 역할과 관광자원으로 까지 활용되는 경우도 흔히 볼 수 있다. 이런 대형 교량을 제외하더라고 중소지간 혹은 소규모 단경간 교량도 발주처나 설계 기술자의 의식 수준이 자연과의 조화를 이루거나 보행이나 주행 관점에서 외적 경관이 수려한 교량이 건설되어야 한다는 인식이 많다.

시공기간을 고려해 볼 때 공사중에도 많은 가설재의 설치는 도시미관이나 자연경관을 해치는 원인이 될수 있어 조립식 교량과 같이 공기를 최소화 하는 공법이 필요하고, 완공후 변단면 도입으로 미관을 향상시키고 곡선미를 통한 주변 경관과의 조화를 도모할 수 있는 기술개발이 필요하다. 특히 형고가 높아 형하고 확보에 문제가 되고 있는 PSC빔 교량 및 강교의 단점을 극복하기 위한 대체 공법으로 적용되는 라멘교의 경우 지간의 확대를 위해 콘크리트와 강재를 합성시킨 강합성 라멘교량이 적용되고 있는 추세이나 강재사용에 따른 공사비의 증가를 초래하므로 PSC의 강점을 최대한 이용하고 중공슬래브의 장점을 활용하는 공법 개발이 필요하다.

3. 연구내용 및 범위

가. 사업화 대상기술 개요

(1) 기술개발 환경 및 필요성

교량을 구성하는 요소를 하중전달 과정으로 크게 분류하면 통행차량 및 사람과 같은 하중을 지지하는 바닥판과 바닥판 하중을 부담하는 거더를 상부구조로 통칭하고, 상부구조의 하중을 지지하는 교대, 교각 및 기초슬래브를 하부구조로 구분할 수 있다.

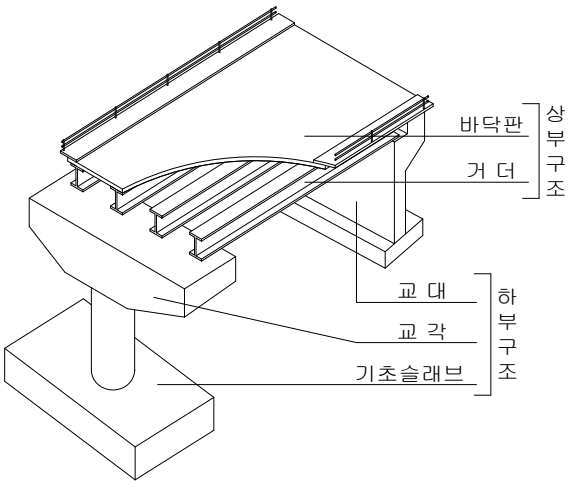


그림 1-3 교량의 구성

교량의 상부구조는 교면의 위치, 용도, 사용재료 및 구조형식에 따라 다음과 같이 분류할 수 있다.

표 1-6 교량의 분류

구 분	종 류
사용재료	목교, 석교, 강교, 철근콘크리트(RC교), 프리스트레스트 콘크리트교(PSC교), 복합재료 교량
사용목적	도로교, 철도교, 보도교, 수로교, 운하교, 군용교
교면위치	상로교, 중로교, 하로교, 복층교량
구조형식	슬래브교, 거더교, 라멘교, 트러스교, 아치교, 특수교(현수교, 사장교) 등

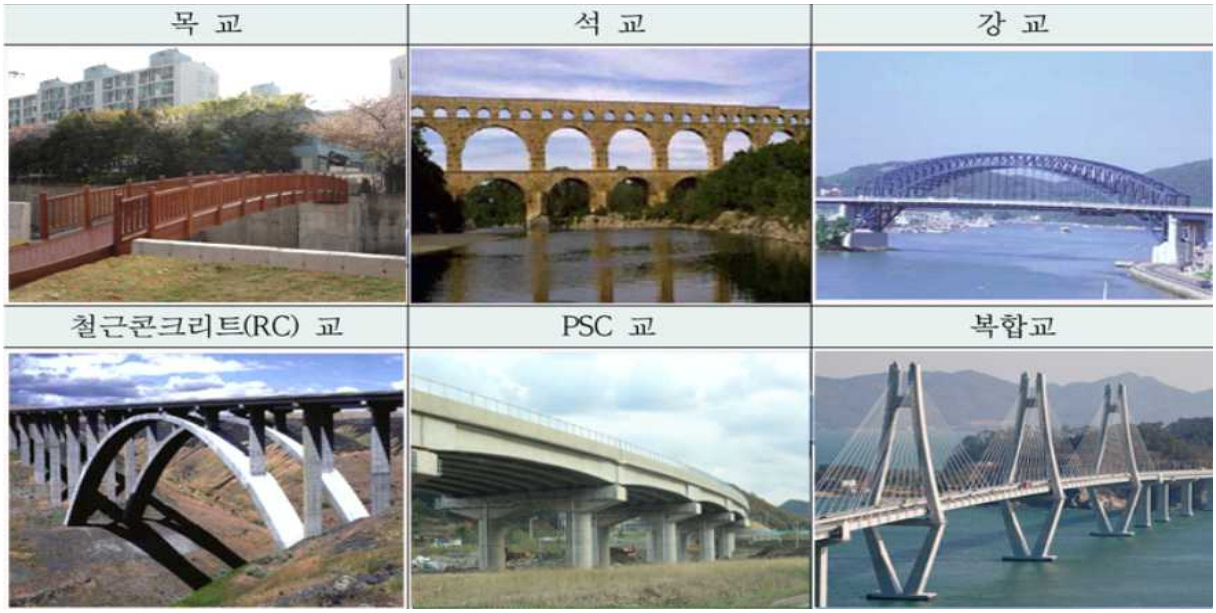


그림 1-4 사용재료에 의한 교량의 분류



그림 1-5 사용목적에 의한 교량의 분류



그림 1-6 교면위치에 의한 교량의 분류

통상적으로 교량의 종류를 분류하는 또 다른 상용적 방법은 상부구조형식에 따른 분류이다.

교량의 상부구조는 바닥판(slab)과 거더(girder), 세로보(stringer) 그리고 가로보(cross beam)의 개별적인 하중전달 구성요소들로 이루어지는 거더교와 현장 타설에 의한 슬래브만으로 이루어진 슬래브교, 상부와 하부구조물이 일체화 되어 건설 된 라멘교 등이 있다.

슬래브교는 상부구조가 슬래브 형식의 바닥판으로 이루어진 교량이다. 주로 10~15m 이하의 짧은 지간장에 널리 사용되며, 가장 큰 특징이라면 일반 거더교에 비해 상부구조의 높이(형고)가 작다는데 있어, 형하공간(다리밑공간)의 제약을 받는 곳에 적용이 유리한 교량이다. 통상적인 적용지간은 단순교의 경우 5~15m, 연속교인경우 10~30m 정도이며, 슬래브의 두께는 보통 지간장의 1/16~1/20 정도로 설계되어 진다.

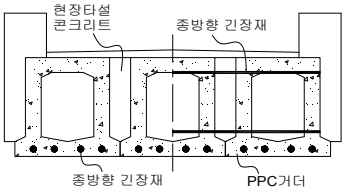
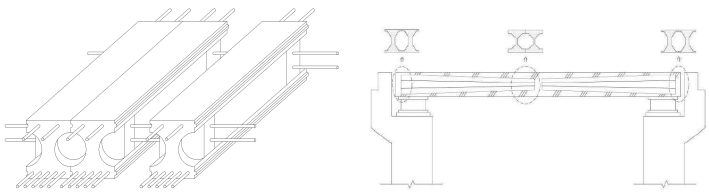
슬래브교의 종류는 슬래브의 구조에 따라 RC(철근콘크리트)슬래브, 중공슬래브, PSC 슬래브교 등이 있으며, RC슬래브교인 경우 장경간일 경우 자중(고정하중)이 증가하여 경제성이 떨어지는데 자중을 경감시키기 위하여 슬래브에 빈 공간을 만든 것이 바로 중공 슬래브교이며, 또한 슬래브에 프리스트레스를 가하여 장지간(30m이하)에 적용하기도 하는데 이것이 바로 PSC 슬래브교이다.

거더 교량의 경우 바닥판(슬래브)을 시공하는 방법은 거더를 프리캐스트(precast)로 공장에서 제작하거나, 현장타설에 의해 제작된 후, 교대 및 교각 위에 거치하고 그 상부에 현장 타설 콘크리트로 슬래브를 시공함으로써 이루어진다. 중공 슬래브를 포함한 슬래브 교량의 경우는 현장에서 상부를 지지하는 동바리를 설치한 후 슬래브를 현장 타설함으로써 이루어진다.

현장타설에 의한 슬래브 시공방식은 여러 문제점을 초래하는 바 본 연구에서는 구조물의 품질개선 및 안전성에 더욱 향상된 기술을 확보하고, 저형고 장지간 적용이 가능한 새로운 슬래브 교량형식이 필요하다.

(2) 기술개발 연혁

표 1-2 기술개발 연혁 및 주요 진행내용

개발과정	일 자	주요 진행내용	개발주체
개발동기	2007.01	• 교량 상부구조 개발시 중공형태의 교량은 역학적 이론을 충족하는 가장 합리적인 형식임에 불구하고 기존 공법의 시공상 어려움과 품질 확보에 문제가 있어 사용을 제한하고 있는 실정 • 지점부에서는 전단력, 중앙부에서는 휨모멘트에 대한 저항력을 극대화하고 중공부를 변단면으로 형성하여 구조, 재료적 이점을 최대한 확보 가능한 형식 • 또한 하천 횡단 등과 같이 형하 공간의 확보에 설계 주안점이 있는 경우 형고를 낮게 하고 공기를 최대한 단축할 수 있는 교량의 필요	㈜이산
시장조사	2007.05	• 개발동기에 맞는 교량형식으로 기존의 중공 슬래브 교량형식을 개선한 ㈜삼표의 PPC 교량(건설신기술 464호) 존재 활용 中  • 사각형태의 중공부를 갖는 PPC 거더의 경우 제작시 중공 부의 품질 및 완성후 이동 거치 시 예상하지 못한 응력이 발생할 수 있어 균열발생, 제작시 품질 보증을 획기적으로 개선 할 수 있는 개념 도출이 필요	㈜이산
특허 출원 등록	2008.12	• 중공부의 형성시 기존과 다른 혁신 개념의 I 단면을 활용  • “조립식중공슬래브 및 이를 시공하는 방법” 특허등록번호 10-0889140	㈜이산
기술검토	2010	• 개방형태의 중공 형성으로 품질확보 / 합리적 구조개념 • 중공슬래브 전단연결부의 시공성 개선방안 필요 • 거푸집 제작 방안 및 합리적 표준단면 도출연구 필요 • 라멘 형식으로 적용성 확대 검토	㈜이산 ㈜에이스이엔씨
특허 등록	2012	• 공동특허등록	㈜이산 ㈜에이스이엔씨
개발협약	2012.04	• 시공기술 개선방안 검토 • 구조적 성능에 대한 검토	㈜이산 ㈜에이스이엔씨

(3) 보유기술 내용

(가) 보유기술의 개요

본 과제 수행기관이 보유한 기술은 PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량개발에 관한 것으로서, 더욱 상세하게는 중공부 중앙을 수직 분할하여 I형상 조립식 모듈을 선제작하여 이를 현장 연결하여 중공부를 형성하는 중공슬래브 교량의 제작과 시공기술이다. 종래의 현장 타설 중공슬래브 공법은 원형 또는 사각형 모양의 폐쇄형 중공모양의 단면을 프리캐스트(precast) 혹은 현장 제작하여 병렬 연결한 중공 슬래브 공법이다. 이러한 중공 슬래브 교량의 기존 공법은 중공형태를 원형 또는 사각형, 기타 다각형 형태로 하여 중공부를 형성하여 폐단면 블록을 제작하고, 이러한 블록들을 프리캐스트 제작하여 제품화한 후 현장에서 다시 조립하여 프리캐스트 중공 슬래브로 형성하는 것이다.

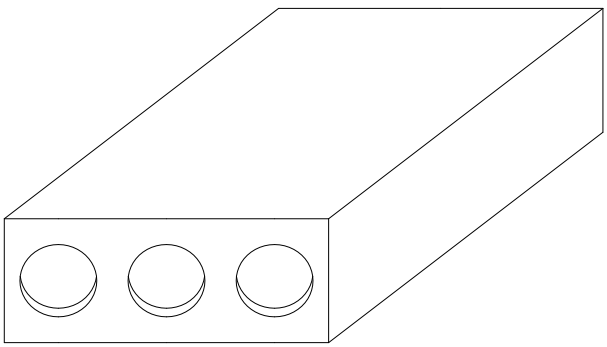


그림 1-7 기존의 중공슬래브 단면 형상

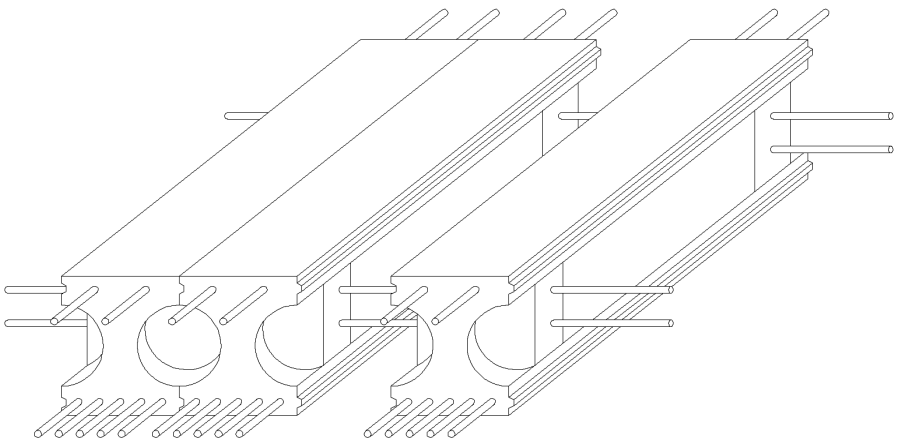


그림 1-8 PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량의 단면 형상

(나) 보유기술의 특징

종래의 중공 슬래브의 중공부 단면은 지간단부에서 중앙부까지 일정하게 형성되지만, 신청인이 개발한 기술은 그림9와 같이 PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량의 단면 형성 시 단면의 최적화를 통해 전단력 및 휨모멘트에 대한 저항성을 극대화 함으로써, 중공 슬래브 종단면이나 횡단면에서 볼 때 중공부 단면의 높이와 폭이 각기 서로 반대방향으로 테이퍼(taper)형태로 변하는 단면 형상을 갖도록 한다. 그리고 격벽을 설치하는 부분은 중공부가 없는 형태가 되도록 한다.

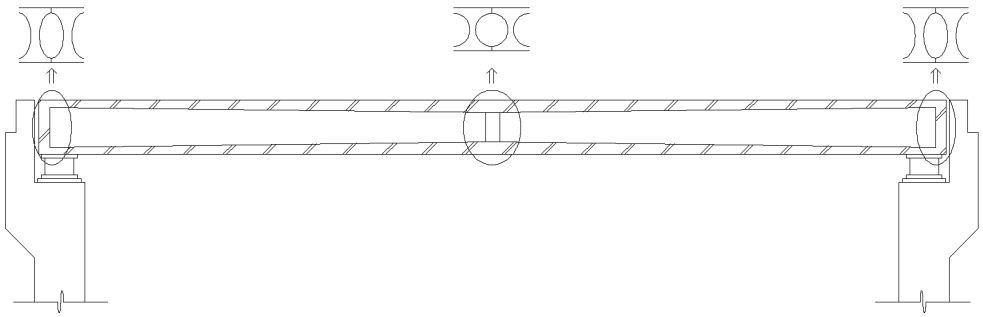


그림 1-9 하중별 단면변화가 고려된 PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량

(다) 보유기술의 장점

PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량은, 조립식 교량의 상부 구조체를 시공할 때 현장 콘크리트 타설이 전혀 필요하지 않으며, 동바리 설치가 필요하지 않기 때문에, 교량의 공사기간이 실질적으로 단축되며 교량의 상부 구조체의 시공 품질은 제작장에서 일괄 관리하므로 설계자가 의도하는 대로 정확하게 관리할 수 있다는 장점이 있고, 자연재해로 인하여 교량의 상부 구조체가 유실된 경우 신속하고 간단하게 교량의 바닥판 슬래브를 복구할 수 있으며, 교통소통이 많은 지역 또는 유량이 많은 지역의 교량 가설이나 보수공사 시에 매우 유용하다는 장점이 있다.

(라) 보유기술의 효과

종래의 폐쇄형 중공부를 가진 콘크리트 현장타설 교량 상부 구조체가 가지는 문제점들을 해결하기 위해 원형, 사각형 또는 다각형의 중공부를 수직 분할함으로써 블록화 하고, 이러한 단위블록을 프리캐스트(Precast) 제작하여 제품화 한 후, 현장에서 다시 조립하여 본래의 프리캐스트 중공슬래브를 형성하는 것이다.

이러한 블록들은 슬래브 중량을 감소시키고 단면의 두께를 얇게 할 수 있는 중공형 슬래브가 가지는 장점을 충분히 활용하면서도, 중공부 단면 주위로 콘크리트 양생시 발생할 수 있는 후프텐션(hoop tension)에 의해 균열이 발행하는 종래의 폐쇄형 중공 슬래브의 문제점을 해결하는 큰 효과가 있으며, 변단면 테이퍼에 의한 단면 형상으로 전단력 및 휨모멘트에 대한 저항성 증대와 함께 미관을 향상시키는 큰 효과가 있다.

(4) 이론적 배경

중공슬래브를 이용한 교량은 슬래브교의 한 종류로 구조적 역학의 효율성이 떨어지는 단면의 중립축 주위에 원형 중공(Cylindrical Void)을 설치하여 고정하중을 줄임으로써 구조적 효율을 증대시킨 교량 형식이다.

중공슬래브를 이용한 교량은 바닥판에 직접 작용하는 차륜하중을 분산하는데 매우 효과적이라는 장점을 극대화하고, 지간이 약 15m를 넘는 경우 고정하중이 증대되는 구조적인 단점을 최소화 하고, 복잡한 수직, 수평곡률, 사각(Skew)을 갖는 지형적 조건에 비교적 쉽게 적용할 수 있으며, 단면의 본래 특성상 휨 강성(Bending Rigidity)과 비틀림 강성(Torsional Rigidity)이 우수하여 형하고에 제약이 있는 도시 및 고속도로 인터체인지 등에 적절한 교량형식이다.

중공슬래브를 이용한 교량은 건설비가 비교적 저렴하고 일반 슬래브 교량에 비해 미관이 수려한 장점을 가지고 있으므로 캐나다와 미국 등지에서 활발히 건설되었으며, 특히 일본

에서는 고속도로의 고가교 형식으로 채택된 것을 시초로 고가도로는 물론 도로의 입체교차부 등에 대단히 많이 사용되었다.

국내에서도 1980년대 이후 1995년 까지 설계 및 시공이 활발히 이루어졌으며 기시공된 중공슬래브 교량의 문제점이 제기되어, 이후 중공 슬래브 교량의 문제점을 개선하고 그 장점을 이용할 수 있도록 보완하여, 형하고 높이가 제한이 된 경우에 설계자에게 교량 형식 선택의 폭을 넓혀줄 필요가 있다.

기 시공된 철근콘크리트 중공 슬래브 교량에서 가장 심각한 문제점으로 지적되고 있는 사항은 일반 콘크리트 교량에 비하여 균열이 매우 심하게 발생하였다는 사실이다. 철근콘크리트 구조물의 균열거동은 여러 변수들에 의해 영향을 받는데, 중공슬래브 교량은 중공관이 콘크리트 내부에 배치됨으로써 일반적인 철근콘크리트 구조물의 균열 거동보다 더욱 복잡한 거동을 보인다. 그러나, 중공슬래브 교량의 설계시에는 콘크리트 단면 내부에 원형의 공간이 있는 단면으로만 취급하고 일반적인 철근콘크리트 부재에 대한 단면해석이론과 설계방법을 그대로 적용함으로써(도로교설계기준, 2000년) 중공관에 의한 영향을 무시하고 있다. 이에 본 신청기술의 기초가 되는 “조립식 중공 슬래브 및 이를 시공하는 방법, (특허등록 10-2008-0105588)” 기술은 중공부를 수직 분할함으로써 블록화 하여 중공슬래브를 형성함으로써 발생되는 균열의 원인을 원천적으로 제거하여 기존의 중공슬래브 건설 기술을 보완할 수 있는 기술이다.

(5) 기존 기술과의 비교

현재 국내에서 사용되고 있는 철근콘크리트 바닥구조 시스템의 기술로는 여러 가지가 있으나, 고정하중 감소 및 공기단축 등 기존의 바닥구조 시스템을 개선한 대표적인 방법으로는 중공슬래브(Void Slab), 플랫플레이트 슬래브(Flat Plate), 데크플레이트 슬래브(Deck Plate Slab) 등이 있다.

그러나 기존 기술이 가지고 있는 장점만으로는 국내 건설현장에서 요구되는 여러가지 조건에 만족하기가 어렵고 각 기술의 장점과 새로운 기술의 도입으로 국내 실정에 맞는 기술개발이 필요하다.

표 1-8 기존공법 개요 및 문제점

구분	명 칭	공 법 사 진	개 요 및 문 제 점
1	중공슬래브		슬래브에 중공관을 넣어 슬래브의 경량화를 유도하는 공법으로 일방향 슬래브이므로 이방향 슬래브에 적용할 수 없고, 보가 필요한 시스템으로 층고절감의 효과를 기대할 수 없으며, 콘크리트 타설 시 시공성 확보와 슬래브의 두께를 고려할 경우 중공률이 높지 않아 중공효과가 크지 않다.
2	플랫플레이트		보가 없이 슬래브가 기둥에 직접 연결되는 공법으로 층고 절감 및 거푸집 공사의 단순화를 통해 공기단축 효과를 기대할 수 있지만, 슬래브 두께의 증가로 인해 부재의 자중이 커져서 초기처짐 및 장기처짐이 과다하게 발생할 수 있고 거푸집 및 동바리의 존치기간이 장기화 되는 단점을 갖고 있다.
3	데크플레이트 슬래브		래티스 철선과 아연도 강판을 일체화시킨 슬래브로 거푸집이 필요 없고 공기단축의 효과가 있으나, 기존의 중공 슬래브에 비해 가격이 비싸고 추가의 구조물이 필요한 시스템이므로 시공성 및 경제성의 단점을 갖고 있다.

나. 연구내용 및 범위

(1) 연구목표 및 설정근거

(가) 기술개발 목표

본 연구는 기존의 PSC-I 빔의 개념을 도입하여 단면을 최적화 한 중공슬래브 개념을 도입하여 구조적 장점을 극대화하여 기존 슬래브 교량의 적용성을 높여서 경간장 30~40m 정도의 교량구조를 개발하고, 이를 제작하는 시공 방법과 합리적 설계방법을 개발하여 교량으로서 적용하는 것을 최종목표로 하고 있다.

개발 성과물의 현장 적용을 위해 교량 가설에 관련된 제반 항목, 즉 구조계획, 구조해석, 설계, 제작방법 및 시공에 관한 일련의 연구를 통해 요소기술 및 현장 적용기술을 도출하고, 교량 구조물로서의 요구되는 구조적 안전성, 사용성 등 주요 항목에 대해서는 성능시험을 통해 품질을 검증하고자 한다.

특히, 제작된 빔 가설시 접합방법, 교면의 평탄성 유지 방안에 대해서는 상세 유한요소해석 또는 모형실험을 통해 발생응력에 대한 메카니즘(Mechanism) 등을 규명하여 실 교량의 구조상세로서 제시하고자 한다.

위와 같은 연구로부터 그동안 기술적 단점으로 인해 국내 건설 시장 적용에 미흡했던 중공 거더교의 활발한 적용과 함께 최근 사회적으로 그 요구가 증대되고 있는 저형고의 장지간 거더교의 실용화와 여기에 더불어 미관을 향상시킨 신기술로서 기존의 형식을 대체할 수 있는 신공법 형식으로 적용성 확대를 목표로 한다.

(나) 목표설정 근거

① 연구기간 및 연구비

본 연구의 연구기간은 당초 총 1.5년(18개월), 연구비는 총 7.78억 (정부지원금 3.85억원)이었으나, 교량 적용성 확대를 위한 일체식 교량화 공법의 실험적연구를 3차년에 추가하게 되어 2차년도 이월금액을 포함하여 총 2년2개월(26개월), 연구비는 총 8.35억원(정부지원금 3.85억원)으로 책정되었다.

연구는 기존의 기초적인 연구를 바탕으로 기초 문헌조사, 전체 구조계에 대한 매개변수 구조해석, 상세 구조해석, 설계공정 작성, 시작품 제작, 실물모형 재하시험 등을 통해 성과를 도출하였으며, 개발교량의 규모 및 진행상태를 감안할 때 신청 연구기간 및 연구비로서 충분한 성과를 거둘 수 있다고 판단된다.

② 연구기관의 구성 및 연구자 역량

본 연구를 위해 교량 제작 및 가설 전반에 걸친 공정을 포함하는 분야의 전문회사인 (주)에이스이엔씨와 토목분야 종합설계 업체인 (주)이산을 연구기관으로 구성하였으며, 참여 연구원은 현재까지 교량 전문회사에서 설계와 시공을 담당해온 연구원들을 실무진에 배치하고, 관련된 전문분야의 실무경험이 15년 이상인 연구원들을 수석급으로 구성하여 개인의 역량을 최대한 발휘할 수 있도록 구성하였다.

(주)에이스이엔씨는 그동안 국토부 과제를 성실하게 수행하여 사업화 해온 경험을 가진 연구개발을 중심으로 성장하고 있는 회사로 충분한 경험을 보유하고 있어며 본 과제의 주관을 맡아 진행하였다. (주)이산은 설계를 전문으로 하는 회사로 본 과제의 해석과 설계부분을 맡아 많은 실적을 바탕으로 실용적인 경험을 적용하여 연구개발을 수행하였다. 이와 같은 연구진의 구성 및 역량은 본 연구과제의 최종목표 달성에 적합하다고 판단된다.

③ 현 단계의 기술수준 한계

중공슬래브 교량는 이미 해외에서 활발하게 설계 및 시공이 이루어지고 있으나, 국내에서는 중공슬래브 교량에 대한 취약한 기술수준으로 인해 교량 건설공사에 적용이 사실상 중단된 상태이다. 국내에서 기 시공된 중공슬래브 교량의 가장 심각한 문제점으로 지적되고 있는 사항은 일반 철근콘크리트 교량에 비해 균열이 매우 심각하게 발생 하였다는 사실이다. 철근콘크리트 구조물의 균열거동은 여러 변수들의 영향을 받는데, 중공슬래브 교량은 중공관이 콘크리트 내부에 배치됨으로써 일반적인 철근콘크리트 구조물의 균열거동보다 더욱 복잡한 거동을 보인다. 그러나 중공슬래브 교량의 설계시 콘크리트 단면 내부에 원형의 공간이 있는 단면으로만 취급하고 일반적인 철근콘크리트 부재에 대한 단면해석이론과 설계 방법을 그대로 적용함으로써, 중공부의 영향이 무시되고 있다. 이와 같은 문제점으로 경제적이고 시공성이 우수한 중공슬래브 교량의 적용이 활성화되지 못하고 상부슬래브와 빔을 각각 분할하여 제작한 후 합성 시키는 교량 시공 방법이 채택되어 국내에 적용되고 있는 실정이다.

(2) 최종성과 목표

(가) 성과목표 및 지표

본 연구는 기존의 PSC-I 거더 단면의 형상을 개선하여 최적 단면 및 제작을 고려한 합리적 형상을 고안하여 중립축 주위에 중공부를 효과적으로 형성하는 구조적인 장점을 가진 조립식 중공 슬래브 교량 개발이 목적이며 연구결과로 경간장 30~40m 정도의 중소 규모의 교량의 건설에 적합한 교량구조를 개발하고, 이를 현장에 실교량으로서 적용하는 것을 최종 연구목표로 하고 있다.

교량은 설계, 제작, 시공 과정이 유기적으로 결합되어 완성되는 구조물로서 각 단계마다 구조물의 특성에 부합하는 요소기술, 지침 등 제반항목이 적절히 구비되어야 한다. 특히,

본 연구대상 교량과 같이 새로운 형식인 경우에는 다양한 실험 및 해석을 통해 구조성능이 검증되어야 하며 교량으로서의 기능 및 역할을 확보할 수 있다.

표 1-9 최종 성과 목표 및 성과지표

구분	핵심 성과물 (level1)		단위 성과물 (level2)		최종 성과목표				해당 기관	예산 (백만)	정량목표
					질적목표(측정방법)		목표치	검증방법			
1세부	1	PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량의 설계 및 시공 기술 개발	1-1	학술지게재 논문	①	게재논문수	1건	논문집			논문 : 1 건
			1-2	연구개발 관련 홍보	①	정기간행물 발간 건수	1건	간행물			간행물 : 1 건
			1-3	특허출원건수	①	특허출원 건수	1건	출원서류			특허 : 출원 1 건
			1-4	연구원당 특허출원건수	①	특허출원 건수	0.111건/인	출원서류			특허 : 출원 1 건
			1-5	연구비당 특허출원건수	①	특허출원 건수	0.167건/6억	출원서류			특허 : 출원 1 건
			1-6	기술수준 향상도	①	수준 향상정도	100%	구조 계산서			계산서 : 1 건
	2	PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량의 설계 및 시공 기술 개발	2-1	연구개발 홍보 건수	①	홍보물 제작건	1건	카다로그			홍보물 : 1 건
			2-2	학회지 게재 논문	①	게재 논문수	1건	논문집			논문 : 1 건
			2-3	특허출원건수	①	특허출원서류	1건	출원서류			특허 : 출원 1 건
			2-4	시작품 제작	①	시작품 (축소모형 및 관련제품)	1건	시작품			시제품 : 제작 1 건
			2-5	강재거푸집 제작	①	강재거푸집 등록현황	1건	실물 및 사진대장			거푸집 : 제작 1 건
	3	PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량의 설계 및 시공 기술 개발	3-1	실물 빔 제작	①	재하시험용 실물 빔	1건	실물 및 사진대장			실물빔 : 제작 1 건
			3-2	실물재하시험	①	시험결과 보고서	1건	보고서			보고서 : 작성 1 건
			3-3	적용성 확대를 위한 시험연구	①	시험결과 보고서	1건	보고서			보고서 : 작성 1 건
계											특허 : 출원 1 건 논문 : 1 건 시제품 : 1 건 간행물 : 1 건 계산서 : 1 건 홍보물 : 1 건 거푸집 : 1 건 실물빔 : 1 건 보고서 : 2 건

따라서, 본 연구의 최종 목표 달성을 위한 성과목표를 개발대상 구조물의 특성을 고려하여 설계 부분과 시공부분을 이원화하여 목표를 설정하였으며, 각각의 성과목표 달성을 위해 설정 가능한 여러 가지 성과지표 중 본 연구개발과제의 특성을 감안하여 최우선의 목표는 기술성능 목표 달성과 기술 선진화로 설정하였다.

(나) 연구목표 및 내용

PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량의 현장 적용을 위해 교량의 설계 및 시공과 관련된 제반 항목, 즉 구조계획, 구조해석, 설계, 제작 및 시공에 관한 일련의 연구를 통해 요소기술 및 현장적용 기술을 도출하고, 교량의 상부구조로서 요구되는 구조안전성 및 사용성 그리고 제작기술에 대한 성능시험을 통해 품질을 검증하고자 한다.

실용화 및 사업화가 가능하도록 국내 건설시장에 적용될 실물교량의 개발을 목표로 하는 본 연구는 크게 “PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량의 해석 및 설계”와 “PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량의 제작 및 시공기술”의 분야로 구분되며, 각각의 기술개발에 대한 연구내용 및 범위는 다음 표와 같다.

표 1-10 연구목표 및 주요 연구내용

연 차	연구목표	주요 연구내용
1차년도	■ 기초문헌 조사	• 본 연구와 관련된 제반 참고자료를 조사
	■ 기존 공법에 대한 사례 연구	• 중공 슬래브교의 문제점 및 사례 연구 • 기존 강합성 라멘교의 원리 및 경제성 분석
	■ 단면의 최적화 산정	• PSC-I빔의 단면변화를 통한 최적화 단면도출 • Bulb-Tee 형태의 단면특성 연구 • 적절한 거더간격 및 경간장별 형고 산출 • 정착구 위치 및 쉬스관 배치에 대한 연구 • 긴장력 도입 방안 연구 • 중공라멘교 적용단면 개발
	■ 구조물의 합리적인 연결방안	• 재령에 따른 솟음량 관리 기준안 도출 • 거더간 합리적인 횡방향 연결방법 도출 • 횡방향 긴장재를 이용한 연결방안 연구
	■ 상세해석을 통한 구조안전성 검증	• 도출된 단면에 대한 구조물 상세 해석
	■ 설계기준(안) 개발	• 교량관련 설계기준에 대한 적합성 여부 • 개발 거더의 설계기준(안) 개발
	■ 설계편람 및 설계도면 작성	• 설계 성과품 작성을 위한 표준화 작업 • 구조계산서, 거더도면, 상세도면 작성
2차년도	■ 홍보물 제작	• 카다로그 제작 및 배부 통한 홍보
	■ 학회지 논문 게재	• 학회지 논문 게재를 위한 이론적 연구
	■ 특허출원	• 관련 기술의 특허 출원
	■ 시작품 제작	• 개발 거더의 축소모형 제작
	■ 강재거푸집 제작	• 실물 빔 제작을 위한 강재거푸집 제작
3차년도	■ 실물 빔 제작	• 정적거동 평가를 위한 실물모형 제작 및 시험 • 동적거동 평가를 위한 실물모형 제작 및 시험
	■ 실물 재하시험	• 정적, 동적거동 평가 • 실험결과를 통한 보고서 작성
	■ 적용성 확대를 위한 시험 연구	• 일체식교량(Integral Bridge)화 연구

4. 국내외 기술개발 현황

가. 국내 산업동향 및 기술개발 현황

(1) 국내 산업동향

국토교통부에서는 매년 고속도로, 일반국도, 지방도 등 전국 도로상의 교량 및 터널에 대한 기초현황과 통계자료를 분석한 “도로교량 및 터널 현황조서”를 발표하고 있으며 그 현황은 아래와 같다.

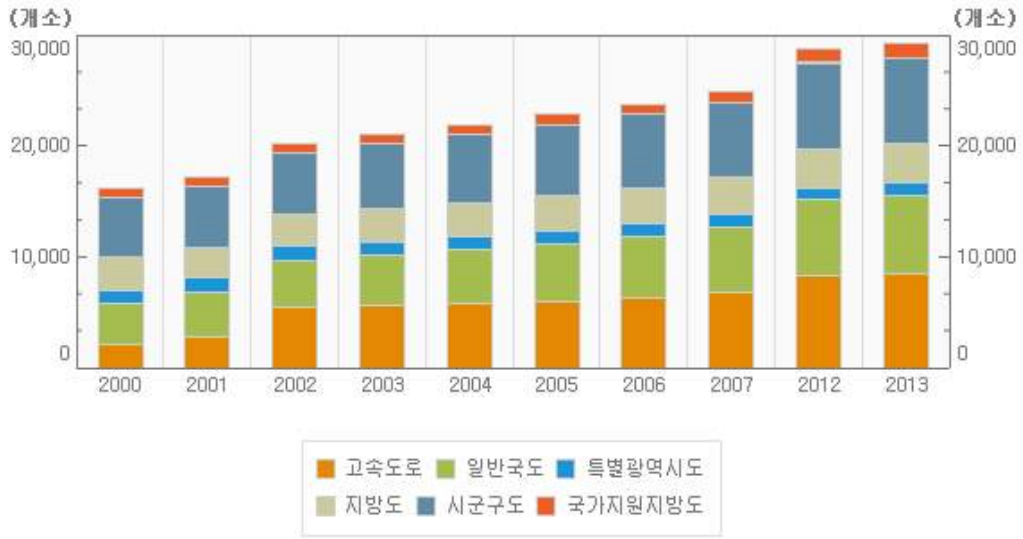


그림 1-10 도로교량 및 터널 현황조서

표 1-6 연도별 교량개소 및 연장 현황

[단위 : 개소, km]

구 분	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
교량개소	21,117	21,906	22,871	23,805	24,923	25,792	26,920	27,381	28,152	28,713	29,190
교량연장	1,764	1,882	1,987	2,139	2,289	2,389	2,567	2,618	2,721	2,792	2,851

상기 표와 같이 2013년 말 기준 총 교량개소가 29,190개소, 연장이 2,851km로 조사 되어 2010년 대비 1,809개소, 연장 233km가 증가한 것으로 나타났으며, 10년 전 인 2003년 대비 해서는 8,073개소(38%), 연장 1,087km(62%)가 증가하여 연평균 교량 수는 3.8%, 연장은 6.2% 꾸준히 증가한 것을 알 수 있다.

사회간접자본에 대한 투자는 지속적으로 이루어지고 있으며, 많은 신형식 교량구조물들은 기존의 공법들을 개량하여 구조적 안전성을 증진시키고, 공사비를 감소시키는 경제적인 구조물 건설을 위하여 기술을 개발하고 있다.

(2) 국내 기술개발 현황

최근에는 교량 건설공사는 하천을 횡단하거나 단지 내에 건설되는 교량이 증가하는 추세로 형하고 제약이 많아 낮은 형고의 거더 공법이 주로 적용되고 있으나 개량형 PSC빔 계열의 경우 형고가 높아 적용이 불리하여 불가피하게 고가의 강합성 교량 형식이 적용되고 있는 상황으로 이는 교량 건설공사의 공사비 증대를 초래하고 있는 실정이다.

경간장 20~30m의 소규모 교량에 적용할수 있는 저형고의 경제성을 가진 교량형식의 필요성이 부각 됨에 따라 기술개발이 이루어 지고 있으나 개발 교량의 실 교량 적용 실적은 미미한 실정이며 그 현황은 아래와 같다.

표 1-12 기존기술 현황

구분	기존기술명 (지적재산권 명)	개발자 (개발년도)	비고
1	조립식 프리케스트 콘크리트 중공슬래브 교량 시스템 (신기술464호)	(주)삼표 (2005)	
2	프리스트레스트 콘크리트 중공슬래브교 및 이의 제작방법 (특허10-0572931)	우경건설 (2006)	
3	격자형으로 배치된 중공을 가진 덱크슬래브 (특허출원10-2008-0056986)	포항산업과학연구원 (2006)	

본 기술개발은 국내 산업의 발전과 더불어 교량에 대한 건설 공사 또한 증가 추세에 있으며 이에 따라 경제적이고 시공성 및 경관미가 우수한 교량형식의 수요에 적합한 교량형식으로 적용성이 우수할 것으로 판단된다.

나. 국외 산업동향 및 기술개발 현황

중공슬래브 교량은 건설비가 비교적 저렴하고 일반 슬래브 교량에 비해 미관이 수려한 장점을 가지고 있어 캐나다와 미국 등지에서 활발히 건설되었으며, 특히 일본에서는 고가교 형식으로 채택된 것을 시초로 고가도로는 물론 각종 도로의 입체 교차부 등에 대단히 많이 사용되고 있으며 그 현황은 아래와 같다.

표 1-13 해외 기술개발 현황

구 분	기술 내용
유럽 ADDTEK 단면	• 적용 지간에 따라 단면의 기하학적 형상자체와 시공방법이 상이 • 콘크리트 및 몰탈 타설 시 상부에 치우침 • 횡방향 체결 방식이 상이 • 최외측 거더의 단면은 별도로 제작
미국 AASHTO 박스 단면	• 적용지간이 상대적으로 길기 때문에 전체적으로 단면이 큼 • 상부에 치우친 전단키 • 채움 콘크리트 타설 시 상부 전단키까지만 타설 • 지역별 단면과 횡방향 체결방식이 상이
일본 JS 단면	• 지간이 증가할 경우 분절공법 및 연속화 방안에 대한 제시 없음 • 전단키가 설치되어 있지 않음 • 횡방향 긴장재의 위치가 상부로 치우쳐 있어 구조계의 비대칭 • 국내와의 상이한 하중조건으로 인해 단면의 치수가 상이함

국내에 해외기술 도입 후 기술의 취약성으로 많은 문제점이 제기되어 현재는 중공슬래브교의 건설이 사실상 중단되어 있는 실정이다.

이러한 여건을 고려하여 본 기술인 PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량은 종래 중공슬래브 교량의 장점을 더욱 향상시키면서 기존 국내의 중공 슬래브 교량에서 발생하던 문제점을 근본적으로 해결하고 제작방법을 더욱 단순화하고, 불필요한 공정의 배제로 구조적 안전성 확보, 시공성 및 경제성을 갖춘 기술로 국내 건설현장 적용에 적합한 공법으로 선진화 된 해외기술을 대체할 수 있는 신기술로 부각될 것이다.

5. 연구개발 결과가 관련분야에서 차지하는 위치

가. 기술의 우수성

슬래브 교량 중 구조역학적으로 최적의 단면을 형성하기 위하여 단면의 저항력에 불필요한 부분을 중공화한 중공슬래브 교량은 상부구조의 자중을 저감하는 동시에 바닥판에 직접 작용하는 차륜하중을 분산효과를 유지하고 슬래브 교량의 미관을 유지할 수 있는 많은 장점을 보유한 교량이다. 추가로 초기 건설비가 저렴하고 상대적으로 일반 슬래브 교량에 비해 장지간 할 수 있는 장점 때문에 해외에서는 그 적용이 활발한 실정이다. 그러나 종래의 현장 타설 공법을 적용시 원형 또는 사각형 모양의 폐쇄형 중공의 거푸집을 매설하여 중공부를 형성함에 따라서 시공시 배근의 복잡성 및 콘크리트 타설시의 중공부 부력등으로 그 품질을 보증함에 국내의 경우 많은 기술적 어려움이 존재하는 실정이었다.

본 연구개발 기술은 이러한 중공 슬래브의 역학적 장점을 유지하는 동시에 다양한 형태의 중공(원형, 포물선, 사각, 다각형 형태)이 자유롭게 제작이 가능토록 중공부의 중앙부분을 수직 분할하여 블록화하고, 블록화 된 부분을 프리캐스트 프리스트레스 I 거더의 형태로 제작하여 제품화 한 후, 현장에서 블럭 거더를 조립하여 최종의 목적물로 프리캐스트 프리스트레스 중공 슬래브 교량을 건설하는 공법이다.

일반적인 중공 슬래브교의 중공부 단면은 전지간에 대하여 동일한 단면의 중공부가 되지만, 본 신청기술은 전단력이 주로 작용하는 지간 단부에서는 복부단면을 크게 하기 위하여 중공부 단면 적용시 폭방향 길이는 감소시키고 높이방향 길이는 증대하여 전단력 저항에 합리적인 단면이 되도록 하고, 모멘트가 크게 작용하는 지간 중앙부에는 상하부 플랜지 유효단면을 증대시키기 위하여 중공부의 폭방향 길이는 증대하고 높이 방향 길이는 감소하여 휨모멘트 저항에 효과적인 단면을 매우 효과적으로 적용할 수 있다. 중공부가 슬래브 종단면이나 횡단면으로 중공부 단면의 높이와 폭이 각기 서로 반대반향으로 변단면의 형태로 변하는 중공 단면 형상을 갖도록 하고, 격벽을 설치하는 부분은 중공부가 없는 형태가 되도록 구성 할 수 있는 최적의 구조 시스템의 채택이 가능하다.

추가로 본 기술은 폐쇄형 중공부를 가지는 종래의 기술에서 콘크리트 양생시 중공부 주위에서 후프텐션에 의해 균열이 발생하는 단점을 근원적으로 해결하였으며 또한 운반 및 거치시 폐단면의 특성으로 발생하는 부정정력에 의한 균열도 손 쉽게 제어가 가능하다. 슬래브 교량 형에서 사하중를 최대한 감소하여 최적 단면을 가진 중공 슬래브의 장점을 활용하는 동시에, 실제적으로는 구조적 효율이 증명된 개단면 형태의 프리스트레스 I 거더를 제작하여 횡방향으로의 긴장력으로 최종 목적 구조물을 형성하는 구조역학적으로 안정적이며, 경제적인 공법이다. 또한, 슬래브 역할을 하는 상부플랜지부의 유효길이 및 구성부재의 단면을 최적화하여 합리적인 거더간격 으로 중공슬래브 상부구조가 충분한 강성을 확보함으로써 기술적으로 더욱 향상된 새로운 공법으로 확립될 것이다.

이와 같은 기술적 우수성으로 인해 현재 국내 건설 시장에서 주로 적용되는 강합성 라멘교, Preflex-빔 교량의 적용 범위를 적용조건에 따라서 대체할 수 있는 경제성, 안정성, 시공성을 보유한 조립식 중공형 슬래브교량이 될 것으로 판단된다.

표 1-9 경쟁 공법 및 비교

구 분	PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량	강합성 라멘교	Preflex 빔교
적용 지간	30~40m	20~50m	30~50m
시 공 성	• 공장제작 및 현장조립으로 품질이 양호 • 동바리 설치가 불필요하여 시공이 간단	• 공장제작 및 현장조립으로 품질이 양호 • 강재 및 기타 부속 자재 사용으로 시공이 복잡	• I-Girder 조립 및 PF 하중도입에 따른 Camber 관리 난해
구조안전성	• 중앙부로부터 단부로 테이퍼되는 변단면 형태로 구조적으로 유리한 단면 효과 • 중공부에 발생가능한 다양한 원인의 균열 제어가능하여 품질 보장	• 다수의 보강부재에 대한 용접으로 피로에 불리 • 상부와 벽체에 대한 1, 2차 타설로 균열발생 우려 • 우각부 단면증가로 모멘트 집중 및 균열 발생	• 하부플랜지 인장응력 허용으로 균열 발생 • 슬래브 연속화로 연속 지점부 균열 발생 우려
사 용 성	• 합리적인 단면구성으로 내구성 및 진동특성 개선	• 콘크리트 빔에 비해 처짐 및 진동에 불리	• 진동이 커 사용성에 불리
경 관 성	• 낮은 형고로 미관개선	• 획일적인 단면 형상과 우각부의 두께증가로 경관이 불량	• 획일적 단면 형상으로 경관이 불량
경 제 성	• 현장 콘크리트 타설 및 동바리 설치가 불필요하여 공기 단축 및 제성 우수	• 강재 사용으로 공사비 고가	• 강재 사용으로 공사비 고가

나. 기술의 차별성

현재 교량 건설 시에는 빔 및 슬래브 제작 시 현장타설 방법에 의하여 제작된다. 그러나 본 신청기술인 PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량은 중공슬래브의 원리를 응용하여 조립되는 프리스트레스 콘크리트 교량이다.

또한, 빔 가설 이후 슬래브 공사를 위해 추가의 거푸집 및 동바리가 설치되어 공사가 이루어지고 있는 국내 실정과 달리 PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량은 추가의 슬래브 공사가 필요하지 않으므로 동바리나 거푸집의 설치 및 해체 공정이 없어 교량의 공사기간이 실질적으로 단축되며, 시공이 간단하다.

원형, 사각형 또는 다각형의 중공부를 수직 분할함으로써 블록화하고, 이러한 블록들은 슬래브 중량을 감소시키고 단면의 두께를 얇게 함으로써 중공슬래브교의 장점을 충분히 활용하면서, 종래의 폐쇄형 중공부 부위에서 콘크리트 양생 시 후프텐션에 의해 균열이 발생하기 쉬운 문제점을 근본적으로 해결하였다.

또한, 종단면이나 횡단면에서 볼 때 중공부 단면의 높이와 폭이 각기 서로 반대 방향으로 테이퍼 형태로 변하는 단면 형상을 갖도록 하고, 격벽을 설치하는 부분은 중공부가 없는 형태로 하여 기존의 획일적인 단면 형상을 탈피하였다.

표 1-10 기존 기술의 특징 및 차이점 비교

구분	기존기술명 (지적재산권 명)	개발자 (개발년도)	기술내용	보유기술과의 차이
1	조립식 프리케스트 콘크리트 중공슬래브 교량 시스템 (신기술464호)	(주)삼표 (2005)	단면 중앙부에 전단키를 갖는 PPC 거더를 하부구조 위에 거치한 후, 횡방향 프리스트레싱으로 일체화시켜 조립하는 중공슬래브 교량 시스템	PPC 거더의 체결을 통한 일체화 방식으로 본 기술의 중공부 수직분할과는 차이점이 발생
2	프리스트레스트 콘크리트 중공슬래브교 및 이의 제작방법 (특허10-0572931)	우경건설 (2006)	중공 내부에 다양한 재질의 중공관을 삽입하며 일반 철근콘크리트 슬래브교와 PSC 중공슬래브교 및 중공슬래브교로 구분된다.	복잡하고 다양한 재질의 중공관 사용과 종방향만의 PC 강재와 중공관 적용 및 상하부의 단계별 콘크리트 타설에 의한 차이점이 발생
3	격자형으로 배치된 중공을 가진 덱크슬래브 (특허출원 10-2008-0056986)	포항산업 과학연구원 (2006)	철근일체형 평텍크와 슬래브의 두께 중간에 가로 및 세로 방향으로 중공생성용 구조물을 설치하고, 중공생성용 구조물을 격자형 철근의 접합부에 연결하고, 철근일체형 텍크를 거더위에 설치한 후, 상부철근과 와이어메쉬를 강결시켜, 콘크리트 타설	중공 구조물을 격자형 철근과 접합부에 고정 및 상부철근과 와이어메시 등을 강결시키는 방법으로 여러 단계에 걸친 시공과 복잡한 사용재료 사용으로 본 기술과는 시공성 및 경제성에서 차이

제 2 장 연구개발 수행 내용 및 결과

1. 연구개발 추진 전략 및 방법

가. 기술개발 추진체계

중공슬래브의 이론적 근거를 바탕으로 저형고형 PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량 개발을 위하여 본 연구과제에 참여하는 연구진을 다음 표와 같이 기관별로 2개의 팀으로 구성하여 개개 연구원을 특화된 전문분야에 배치함으로써 연구 효율을 극대화하고, 각 팀 간 유기적인 연계가 이루어지도록 하였다. 또한, 연구진행과정에서 발생할 수 있는 오류를 최소화하고 내실 있는 연구성과를 도출하기 위해 자체기관의 전문가로 구성된 자문회의를 개최하고, 기술전시회, 기술세미나 및 논문발표 등을 통해 연구성과를 대외적으로 홍보할 계획이다. 본 연구과제의 기본적인 추진방향은 아래 표와 같다.

표 2-1 연구과제 추진방향

구 분	연 구 활 동	비 고
자료수집	국내 · 외 연구기관을 통한 정보 수집	
	인터넷 및 정보 데이터베이스를 활용한 자료 수집	
사례분석 및 현황 검토	기존 공법들에 대한 조사 연구, 기술현황에 대한 면밀한 검토	
전문가 활용	산학연 각 계의 전문가를 활용한 기술적 검토 및 자문	
사업화 추진	이론 및 실험연구를 통한 연구성과 실용화 및 사업화 추진	
	관련기관과의 유기적인 교류 및 협력체계 구축	

구 분	주관연구기관	공동(위탁)연구기관	참여기업
1,2,3차년도 (2012. 7) ~ 2014.10)	• 기초문헌 조사 • 기존 공법에 대한 사례 연구 • 단면의 최적화 산정 • 구조물의 합리적인 연결방안 • 시작품 제작 • 실물모형 제작 및 시험 • 시공지침서(안) 개발	• 상세해석을 통한 구조안전성 검증 • 설계기준(안) 개발 • 설계편람 및 설계도면 작성 • 적용성 확대 실험적 연구	

나. 세부추진 계획 및 방법

당초의 계획에서 추가적인 연구개발 항목으로 중공슬래브 교량의 실용화를 위해 ‘적용성 확대를 위한 일체식 교량화 공법의 실험적 연구‘ 항목이 추가되었음.

표 2-2 연구개발 내용 및 세부추진 계획

일련번호	연구개발내용	세부추진 계획 및 방법	해당 기관
1	■ 기초문헌 조사	• 본 연구와 관련된 제반 참고자료 조사	전체 연구진
2	■ 기존 공법에 대한 사례 연구	• 중공 슬래브교의 문제점 및 사례 연구 • 기존 강합성 라멘교의 원리 및 경제성 분석	(주)에이스 이엔씨
3	■ 단면의 최적화 산정	• PSC-I빔의 단면변화를 통한 최적화 단면도출 • Buib-Tee 형태의 단면특성 연구 • 적절한 거더간격 및 경간장별 형고 산출 • 정착구 위치 및 쉬스관 배치에 대한 연구 • 긴장력 도입 방안 연구 • 합리적 거푸집 형상 및 표준안 개발 • 라멘 형식 교량으로의 기술 발전	(주)에이스 이엔씨
4	■ 구조물의 합리적인 연결방안	• 재령에 따른 솟음량 관리 기준안 도출 • 거더간 합리적인 횡방향 연결방법 도출 • 횡방향 긴장재를 이용한 연결방안 연구	(주)에이스 이엔씨
5	■ 상세해석을 통한 구조안전성 검증	• 도출된 단면에 대한 구조물 상세 해석	(주)이산
6	■ 설계기준(안) 개발	• 교량관련 설계기준에 대한 적합성 여부 • 개발 거더의 설계기준(안) 개발	(주)이산
7	■ 설계편람 및 설계도면 작성	• 설계 성과품 작성을 위한 표준화 작업 • 구조계산서, 거더도면, 상세도면 작성	(주)이산
8	■ 시작품 제작	• 개발 거더의 실물(전단키)모형 제작	(주)에이스 이엔씨
9	■ 실물모형 제작 및 시험	• 정적거동 평가를 위한 실물모형 제작 및 시험 • 동적거동 평가를 위한 실물모형 제작 및 시험 • 실험결과를 통한 보고서 작성	(주)에이스 이엔씨
10	■ 시공 지침서(안) 개발	• 현장적용을 위한 시방서 작성 • 시공관련 작업 지침서 작성	(주)에이스 이엔씨
11	■ 적용성 확대를 위한 일체식 교량화 공법의 실험연구	• 반일체식 교량 공법 개발 • 구조상세부 성능실험 • 실험 보고서 작성	전체 연구진

2. 연구개발 주요 내용

가. PCB-SLAB 거더의 구성

(1) 연구방향 및 구성

(가) 개요

토목 구조물 중 교량 상부구조는 저형고인 동시에 장경간 구현이 가능한 기술이 지속적으로 개발되어 사용되고 있다. 적용성의 증대와 더불어 경제성 확보를 위하여 시공성 고려시 보편화 된 PSC(Prestressed Concrete) 거더의 개량 형식이 주로 적용되고 있으나, 이와 같은 개발 노력에 불구하고 필수적 형고 적용의 제약조건을 극복하기 위하여 강합성 형식이 사용되고 있다. 경간장 확보 측면에서 구조적 제한이 존재하나 구조적 원리의 효율성을 반영한 중공을 가지는 슬래브의 경우 미관성 확보측면에서 우수한 장점을 보유하게 되나 균열 제어를 포함한 시공관리의 어려움이 있어 적용성이 떨어진다.

최근 국내의 경우 폐합 박스 형태의 중공 형식이 다수 개발 되어 사용되고 있다. 개발기술의 장단점을 검토한 결과 중공 슬래브의 단점을 완전하게 극복하지 못한 것으로 판단된다. 이러한 사유로 형고와 미관의 우수성을 개선하고 동시에 제작의 편의성을 증대한 중공을 보유한 교량의 기술에 경제성 증대 개념을 추가하는 방안에 대한 기술개발 검토를 실시하였다. 중공부를 폐합 단면으로 사전 제작되어 설치하는 종래의 방법과 다르게 본 기술은 두 개 이상의 개단면 PSC-I 거더 단면의 결합으로 중공 폐합단면 구현하도록 하여, 최적 개단면 및 제작을 고려한 합리적 형상을 고안하고 중립축 주위에 중공부를 효과적으로 형성하는 조립식 중공 슬래브 교량의 실용적 기술 개발과 더불어, 적용대상 시설물을 경간장 25~35m 정도의 중.소규모 교량으로 한정하여, 현장에 실교량 건설시 필요한 기술개발을 위해 연구가 수행되었다.

기술 개발 성과물의 실적용을 위하여 사전 구조계획, 구조해석, 설계, 제작방법 및 시공에 관한 검토를 실시하여 필수 요소기술 및 제작, 시공방법을 도출하고, 구조 안전성 사용성 , 등 주요 항목에 대한 합리적인 실물 성능시험을 실시하여 이를 분석 검토하여 품질보장이 가능하도록 기술개발 계획을 수립하였다. 또한, 본 연구를 통해 개발된 거더를 PCB-SLAB(Prestressed Concrete Box-Slab)로 명명하였다.

(나) PCB-SLAB의 개념 및 구성

기존 폐합단면 중공슬래브와 달리 개단면의 PSC-I 거더의 결합으로 폐합 형태의 중공단면 구현함으로써 구조적 장점을 극대화하고 기존 중공 슬래브 교량의 적용성 또한 증대하여 25～35m 경간의 적용성을 가진 교량구조를 개발함에 있어서 아래의 특징을 최대한 반영하기 위한 기본 방안을 설정하였다.

. 프리캐스트 공법의 도입으로 품질향상, 공사기간 단축
. 기존 폐합단면 중공슬래브 양생시 발생하는 후프텐션(Hoop Tension) 균열 배제
. 합리적 형상의 중공부 형성
. 향후 무조인트(Integral Abutment) 교량화를 위한 적용성 확보

I 형 개단면을 병렬 조립하여 중공을 형성하는 제작방안 적용시 거푸집 작업의 원활성으로 중공 형태는 원형, 사각형, 다각형 등의 다양한 형상 구현이 가능하며, 아래 그림과 같이 길이방향으로도 중공부 형상의 변단면 제작 또한 가능하게 되어 구조성능을 효율적으로 향상 시킬 수 있는 장점을 가지게 된다.

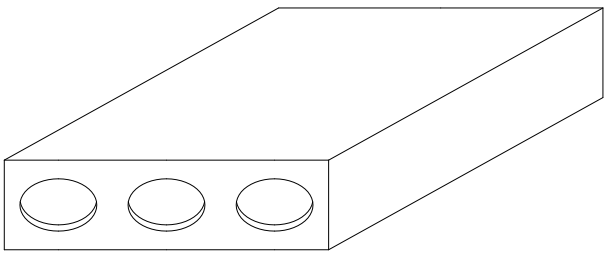


그림 2-1 기존의 중공슬래브교량의 단면

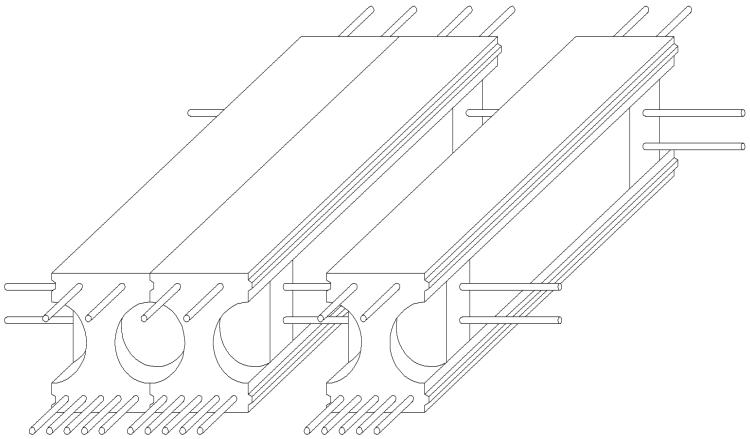


그림 2-2 PCB-SLAB 거더 단면의 기본 개념(특허등록 제10-0889140호)

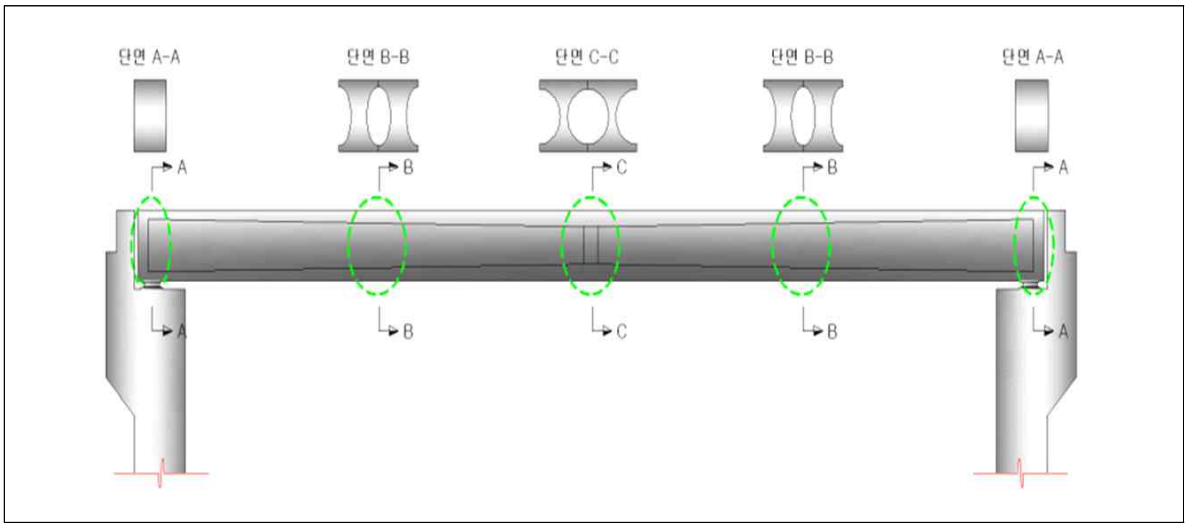


그림 2-3 기술개발 대상 교량의 개념도

(2) 기존 공법 사례 분석

현재 국내에서 사용되고 있는 철근콘크리트 바닥구조 시스템의 기술로는 여러 가지가 있으나, 고정하중 감소 및 공기단축 등 기존의 바닥구조 시스템을 개선한 대표적인 방법으로는 중공슬래브(Void Slab), 플랫플레이트 슬래브(Flat Plate), 데크 플레이트 슬래브(Deck Plate Slab) 등이 있다.

슬래브교는 건설공사에서 가장 보편화된 공법의 하나이며, 오랜 기간 널리 사용되어 온 RC구조물이지만 수 많은 장점을 보유하고 있음에도 불구하고 큰 자중으로 인한 부재 크기 증가와 현장콘크리트 양생에 따른 긴 공사기간, 균열을 발생하는 문제를 해결해야 하는 구조 시스템이다. 이와 같은 단점을 보완하기 위해서 고정하중 감소와 거푸집 공사의 단순화를 통한 공기절감 효과를 위해 중공 슬래브교가 사용되고 있다. 대표적인 공법으로 기존의 중공슬래브 교량형식을 개선한 PPC 교량공법이다. 그러나, 제작시 중공부의 품질 및 완성 후 이동거치 시 예상하지 못한 응력이 발생할 수 있으므로 균열이 발생할 수 있어 제작시 품질보증을 획기적으로 개선할 수 있는 개념도출이 필요하다.

표 2-3 바닥판 구조 시스템 개선 사례

구분	명 칭	공 법 사 진	개 요 및 문 제 점
1	중공슬래브		슬래브에 중공관을 넣어 슬래브의 경량화를 유도하는 공법으로 일방향 슬래브이므로 이방향 슬래브에 적용할 수 없고, 보가 필요한 시스템으로 층고절감의 효과를 기대할 수 없으며, 콘크리트 타설 시 시공성 확보와 슬래브의 두께를 고려할 경우 중공률이 높지 않아 중공효과가 크지 않다.
2	플랫플레이트		보가 없이 슬래브가 기둥에 직접 연결되는 공법으로 층고 절감 및 거푸집 공사의 단순화를 통해 공기단축 효과를 기대할 수 있지만, 슬래브 두께의 증가로 인해 부재의 자중이 커져서 초기처짐 및 장기처짐이 과다하게 발생할 수 있고 거푸집 및 동바리의 존치기간이 장기화 되는 단점을 갖고 있다.
3	데크플레이트 슬래브		래티스 철선과 아연도 강판을 일체화시킨 슬래브로 거푸집이 필요 없고 공기단축의 효과가 있으나, 기존의 중공 슬래브에 비해 가격이 비싸고 추가의 구조물이 필요한 시스템이므로 시공성 및 경제성의 단점을 갖고 있다.

표 2-4 기존공법 검토(1)

<table>
<tr><th colspan="2">구 분</th><th>PPC SLAB & Rahmen</th></tr>
<tr><td colspan="2">개 요</td><td>고강도콘크리트(fck=50Mpa)를 사용하여 공장제작 또는 현장에서 규격화(하부폭:160cm)하여 제작된 BOX형 포스트텐션&프리텐션 거더를 병렬로 인접하여 거치 후 횡방향 거더들을 일체화 시킨 공법</td></tr>
<tr><td colspan="2">형 고</td><td>
<table>
<tr><td rowspan="2">최대
경간장</td><td colspan="5">형고기준(4차선/B=24.3m, 슬래브 포함)</td></tr>
<tr><td>20m</td><td>25m</td><td>30m</td><td>35m</td><td>40m</td></tr>
<tr><td>L≤40</td><td>0.80</td><td>1.00</td><td>1.55</td><td>1.85</td><td>2.15</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td colspan="2">공법특징</td><td>


• 중공박스 형태의 Multi-Girder System
• 종방향 · 횡방향 프리스트레싱을 적용하여 거더간 거동의 일체화
• 별도의 바닥판 타설공정 없음(거더가 바닥판 역할)
• 연속지점부 거더간 철근연결 연속처리(2 Shoe)
</td></tr>
<tr><td rowspan="4">특징
분석</td><td>구조안전성</td><td>■ 플랜지가 슬래브를 겸용, 손상시 주형 동시손상 우려</td></tr>
<tr><td>시 공 성</td><td>■ 바닥판 타설공정이 없어 시공성 양호</td></tr>
<tr><td>유지관리성</td><td>■ 박스 내부 균열시 유지보수 대책이 없음</td></tr>
<tr><td>경 제 성</td><td>■ 원거리 운반시 공사비 대폭 증가로 경제성 저하</td></tr>
</table>

표 2-5 기존공법 검토(2)

<table>
<tr><th colspan="2">구 분</th><th>합성형 라멘교</th></tr>
<tr><td colspan="2">개 요</td><td>정모멘트(경간 중앙부)는 Preflex빔을 사용하고 부모멘트부(벽체,우각부,교각부)는 철골, 철근콘크리트 구조로 일체화 시켜 교량받침과 신축이음을 배제한 Preflex 라멘교 형식</td></tr>
<tr><td colspan="2">형 고</td><td>
<table>
<tr><td rowspan="2">최대
경간장</td><td colspan="5">형고기준(4차선/B=24.3m, 슬래브 포함)</td></tr>
<tr><td>25m</td><td>30m</td><td>35m</td><td>40m</td><td>45m</td></tr>
<tr><td>L≤50</td><td>1.00</td><td>1.10</td><td>1.20</td><td>1.30</td><td>1.50</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td colspan="2">공법특징</td><td>


• Preflex 빔을 벽체 또는 교각에 일체화 시킨 공법
• 벽체 또는 교각에 철골구조를 매설하고 Preflex 빔을 연결하여 구체 타설
• 교좌장치와 신축장치가 없어 유지관리가 용이함
• 라멘교 형식으로 다경간 연속구조가 안됨
</td></tr>
<tr><td rowspan="4">특징
분석</td><td>구조안전성</td><td>■ 응력집중부(우각부, 교각부) 균열발생 우려</td></tr>
<tr><td>시 공 성</td><td>■ Preflex공정과 철공부재연결, 구체 콘크리트 타설 공정이 복잡</td></tr>
<tr><td>유지관리성</td><td>■ 하부플랜지 콘크리트에 인장응력을 허용</td></tr>
<tr><td>경 제 성</td><td>■ Preflex제작과 철골 연결부 시공으로 공사비 고가</td></tr>
</table>

표 2-6 기존공법 검토(3)

<table>
<tr><th colspan="2">구 분</th><th>IPC Girder</th></tr>
<tr><td colspan="2">개 요</td><td>빔 제작시 시공단계별 하중증가를 고려하여 단계적으로 긴장력을 도입하여 형고를 줄이거나 장지간 가설이 가능한 PSC공법</td></tr>
<tr><td colspan="2">형 고</td><td>
<table>
<tr><td rowspan="2">최대
경간장</td><td colspan="5">형고기준(4차선/B=24.3m, 슬래브 포함)</td></tr>
<tr><td>30m</td><td>35m</td><td>40m</td><td>45m</td><td>50m</td></tr>
<tr><td>L≤50</td><td>1.30</td><td>1.60</td><td>1.90</td><td>2.30</td><td>2.60</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td colspan="2">공법특징</td><td>


• 일반 PSC 빔과 달리 시공단계별 하중증가를 고려하여 단계적으로(1,2차) 긴장력을 도입(일반 PSC 빔보다 형고를 낮추고, 장경간 가능)
• 전경간 연속 배치된 2차 강선이 연속부강선 역할을 겸용
• 2차 정착구(쉬스관)에 같이 매설된 비부착 강선 유지관리 강선 역할
</td></tr>
<tr><td rowspan="4">특징
분석</td><td>구조안전성</td><td>■ 2차강선의 전경간 연속으로 PS 유효율 감소</td></tr>
<tr><td>시 공 성</td><td>■ 2차 긴장재 삽입시공이 어려움(전경간 일괄 삽입)</td></tr>
<tr><td>유지관리성</td><td>■ 단면대비 유지관리용 강연선량 부족(최대 4가닥)</td></tr>
<tr><td>경 제 성</td><td>■ 추가 인장작업으로 인한 공사비 증가</td></tr>
</table>

표 2-7 기존공법 검토(4)

<table>
<tr><th colspan="2">구 분</th><th>DR Girder</th></tr>
<tr><td colspan="2">개 요</td><td>PSC 빔단면과 반단면 프리캐스트 바닥판을 이용하여 비합성 상태에서 긴장력을 도입하여 강선의 도입 효율을 높이고, 연속화 강선의 편심량을 극대화하여 구조적 효율성 및 경제성을 추구한 공법</td></tr>
<tr><td colspan="2">형 고</td><td>
<table>
<tr><td rowspan="2">최대
경간장</td><td colspan="5">형고기준(4차선/B=24.3m, 슬래브 포함)</td></tr>
<tr><td>30m</td><td>35m</td><td>40m</td><td>45m</td><td>50m</td></tr>
<tr><td>L≤50</td><td>1.30</td><td>1.60</td><td>1.90</td><td>2.30</td><td>2.70</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td colspan="2">공법특징</td><td>

빔 제작
단계별 긴장력 도입
(2차강선 연속처리)

Precast 무재사용
Precast 바닥판
조립식 가로보 사용

2차긴장 / 유지관리
전부 비부착강선 사용
긴장력 조절로 유지관리

• 시공 단계별 하중증가를 고려하여 단계적으로(1,2차) 긴장력을 도입
• 제작장 1차 긴장 후 슬래브 비합성 상태에서 2차긴장 (허용치의 50-60%)
• 전경간 연속 배치된 2차강선이 연속부강선 역할을 겸용(2 Shoe)
• 내하력 저하 시 2차 PS강선으로 추가긴장
</td></tr>
<tr><td rowspan="4">특징
분석</td><td>구조안전성</td><td>■ Precast 바닥판과 거더합성 불량(들뜸)으로 Slab균열우려</td></tr>
<tr><td>시 공 성</td><td>■ 반단면 Precast Slab+조립식가로보+현장타설 혼용</td></tr>
<tr><td>유지관리성</td><td>■ 비부착 강선의 Relaxation으로 재긴장 효율저하</td></tr>
<tr><td>경 제 성</td><td>■ Precast 바닥판 적용으로 공사비 상승</td></tr>
</table>

나. PCB-SLAB 거더 단면 최적화

(1) 거더단면 최적화 연구

최적의 단면을 구성하기 위해 우선적으로 도로교 설계기준 및 콘크리트 설계기준에 만족하는 PSC-I빔의 단면형상을 산정하였으며, 우선적으로 시공이 가능한 교량의 제원을 바탕으로 단면을 산정하기 위하여 경간장 30m를 기준으로 국도 2차로 표준폭원(B=11.4m)을 가정하여 횡단구성을 하여, 단면 산정에 따른 검토를 수행하였다.

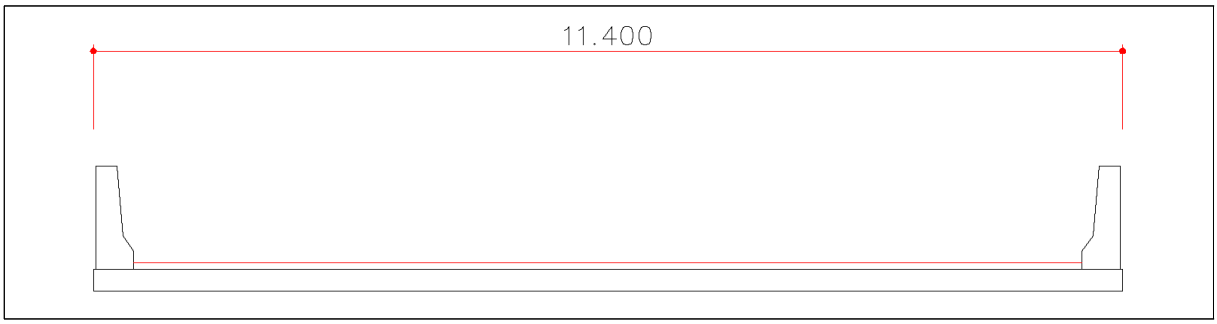


그림 2-4 표준폭원(국도2차로)

(가) PSC-I 거더 단면 설정

① 상부플랜지 두께 산정

표 2-8 차도부분 바닥판의 최소두께(mm)

바닥판의 구분 \ 바닥판 지간의 방향(주)			차량진행 방향에 직각	차량진행 방향에 평행
1등교, 2등교 및 3등교	단 순 판		40 L + 130	65 L + 150
	연 속 판		30 L + 130	50 L + 150
	캔 틸 레 버 판	L ≤ 0.25	280 L + 180	240 L + 150
		L > 0.25	80 L + 230	

- 철근 콘크리트 바닥판 : 220mm 또는 표 값 중 큰 값 이상

- 프리스트레스트 콘크리트 바닥판 : 200mm 또는 표값의 50% 이상

- 프리스트레스트 콘크리트 박스거더 순경간의 1/30로 한다. 200mm 이상[도.기 4-184p]

- 철근 콘크리트 박스거더 바닥판의 최소 두께는 복부 또는 복부헌치 사이 순경간의 1/16로 한다. 그러나 220mm 이상[도.기 4-184p]

- 상하플랜지의 두께는 복부나 헌치 사이의 순간격의 1/30 이상이어야 하고, 만일 이보다 두께가 얇을 경우에는 복부사이의 순경간과 같은 간격으로 횡방향 리브를 두어야 한다.[도.기 4-231p]

- 복부나 헌치 순간격이 4.5m 이상일 때는 적절한 방법으로 횡방향 프리스트레싱 도입여부를 검토하여야 한다. 횡방향 프리스트레싱을 도입할 경우 상부 플래지의 두께는 230mm 이상이어야 한다.

- 플랜지 두께 산정

플랜지 폭 2.5m, 캔틸레버 0.55m

바닥판의 두께산정 : 40 X 2.5 + 130 = 230mm

30 X 2.5 + 130 = 205mm

80 X 0.55 + 230 = 274mm → PC : 274 X 50% =137mm

2200 X 1/30 = 73.3mm (최소 200mm이상) → 200mm

횡방향 텐던 : 230mm → 최소두께 230mm이상 필요

∴ 플랜지 최소두께 250mm로 결정

② 상부플랜지 폭 산정

- T형 거더의 압축 플랜지 유효폭

a. 16t + bw, 양쪽 슬래브 중심간 거리, 거더 지간의 1/4가운데 가장 작은값

(16 X 250 + 300 = 4300, 2500, 30,000 / 4 = 7500 → ∴ 2500mm)

- 여러 개의 독립된 보를 프리스트레스로 일체화한 구조의 설계에서는 플랜지폭이 복부폭의 15배를 초과해서는 안되고, 모든 설계하중에 대해 적절한 폭 이어야 한다.[도.기 4-114p]

a. 2500mm, 15 X 300=4500mm → ∴ O.K

③ 하부플랜지 두께 산정

- 프리스트레스트 콘크리트 박스거더 하부플랜지의 최소두께는 복부 또는 복부헌치 순경간의 1/30로 한다. 그러나 140mm 이상이어야 한다.

a. bw=300mm, 2500 / 30 = 83mm, 140mm → ∴ 200mm

- 철근 콘크리트 박스거더 하부플랜지의 최소두께는 복부 또는 복부헌치 순경간의 1/16로 한다. 그러나 140mm 이상이어야 한다.

a. bw=300mm, 2500 / 16 = 156mm, 140mm → ∴ 200mm

④ 하부플랜지 폭 산정 : 상부플랜지 폭과 동일

⑤ 복부 폭 검토[도.기 4-33p]

- 폭부의 폭은 철근, PS강재 및 PS강재의 정착구를 배치하기에 충분하도록 표 값 이상으로 하여야 한다. → ∴ 300mm로 가정

표 2-9 복부의 최소두께(mm)

보의 종류	복부의 최소 두께(mm)
현장치기 철근콘크리트 보	250
현장치기 프리스트레스트 콘크리트 보	150
프래캐스트 보	150

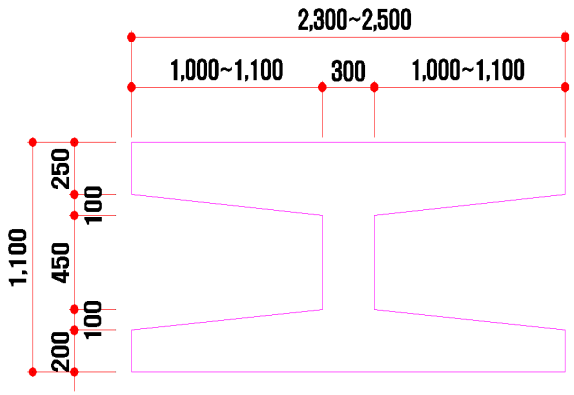
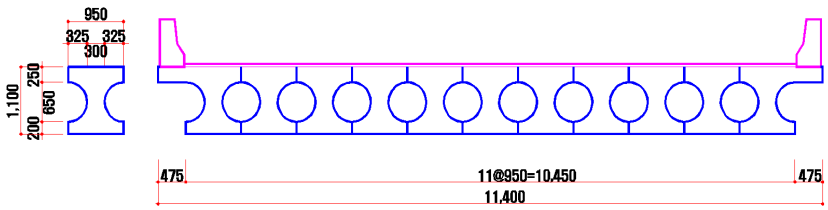
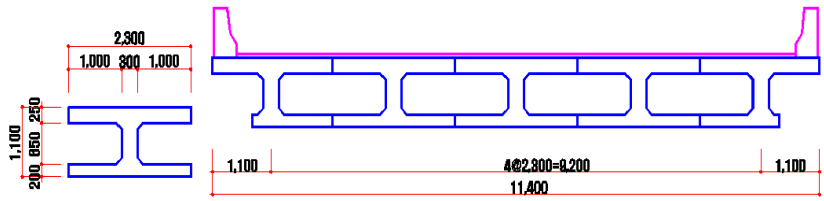
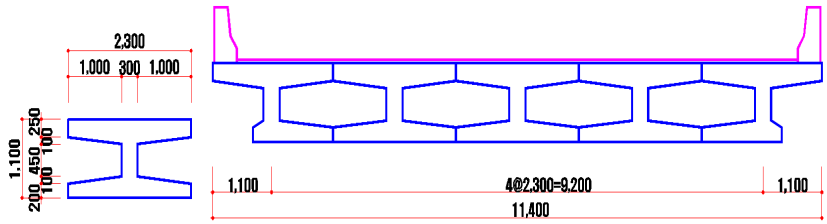


그림 2-5 복부단면 치수

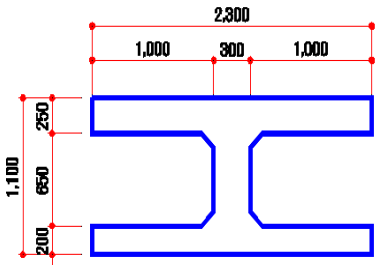
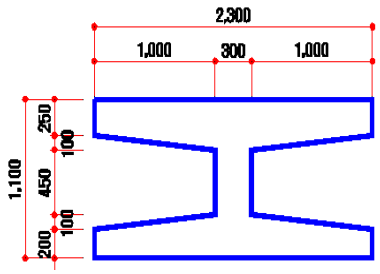
산정된 PSC-I 거더의 단면의 형상에 따라 구조적 특성이 달라지기 때문에 다양한 형태의 단면을 구성하여 실 시공이 가능한 시공성과 최소한의 물량으로 구조적 기능을 확보할 수 있는 단면형상들을 도출하여 비교하였다.

(나) PSC-I 거더 구조 특성

거더 자중을 최소화 할 수 있으며, 구조적으로도 본 연구개발의 목표와 근접할 수 있는 구조로 다중박스거더 형태로 슬래브를 통해 하중 이 분배되는 이방성 판구조로 다음의 같이 비교하여 단면형태를 선정하였다.

구 분	단 면 형 상	비 고
등방성 판구조	 ■ A=10.45 X 1.1 - π X 0.325^2 X 10EA + 0.475 X 0.25 X 2EA = 8.414 (210.35kN) ■ 속빈 슬래브교의 최소치수 규정을 만족하는 구조	100%
이방성 판구조	 ■ A=11.4 X 1.1 - 0.7575 X 2EA - 1.280 X 4EA = 5.905 (147.63kN) ■ 일체화된 다중박스거더로서 슬래브를 통해 하중이 분배되는 구조	70.2%
격자 구조	 ■ A=11.4 X 1.1 - 0.710 X 2EA - 1.10 X 4EA = 6.720 (168.00kN) ■ 분리된 거더와 가로보의 격자구조로 하중이 분배되는 구조	79.8%

(다) 이방성 판구조와 격자구조 형태 비교

구 분		이방성 판구조	격자 구조
단면도			
설계기준	상부 플랜지	■ 최소두께 : 230mm(도.기 4-231p) ■ 16t+Bw, 슬래브 중심간거리 지간의 1/4 ➡ 2300mm	■ 최소두께 : 230mm(도.기 4-231p) ■ 캔틸레버 : 80L+230=310mm ■ 16t+Bw, 슬래브 중심간거리 지간의 1/4 ➡ 2300mm
	복부	■ 최소두께 : 150mm ➡ PSC빔, 강성 등을 고려하여 300m적용	
	하부 플랜지	■ 최소두께 : 140mm(도.기 4-184p)이상이면 기준 만족 ➡ 200mm적용 (횡텐던 적용 시 헌치 적용) ■ 폭원의 경우 상부 플랜지와 동일(폐합단면)	
특 징		■ 일체화된 다중 박스거더로서 슬래브를 통해 하중이 분배되는 구조	■ 분리된 거더와 가로보의 격자구조로 하중이 분배되는 구조
장 · 단점		■ 상부슬래브 연속으로 플랜지두께최소화 ■ 상부슬래브에 일정간격 횡방향강선도입 (중간 가로보 불필요) ■ 슬래브 연결부 전단키 등 연결구조 필요 ■ 슬래브 연속으로 포장균열 억제 ■ 자중 최소화	■ 상부플랜지 캔틸레버 구조로 두께 증가 ■ 중간가로보에 집중하여 강선도입 ■ 슬래브 연결 전단키 불필요 ■ 거더간 상대처짐으로 포장균열 발생 ■ 자중 증가(14%)

(2) 조립식 거더의 연결방안 검토

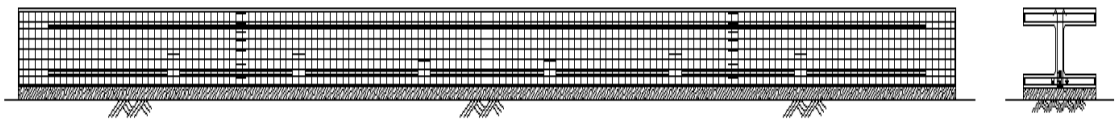
(가) 시공순서도

표 2-10 PSC-I거더를 이용한 중공슬래브 시공순서도(1)

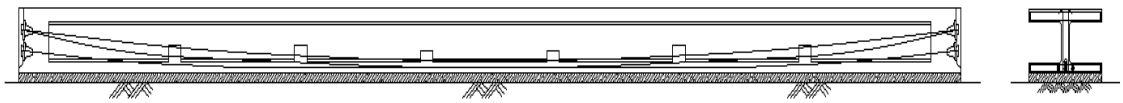
1. 제작장 부지 및 제작대 설치



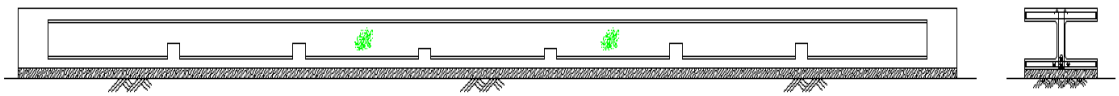
2. 철근 가공조립



3. 쉬스관 조립 설치



4. 거푸집 설치 및 콘크리트 타설



5. 인장작업

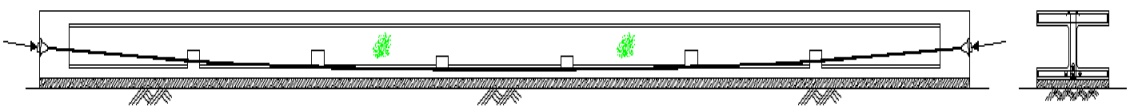
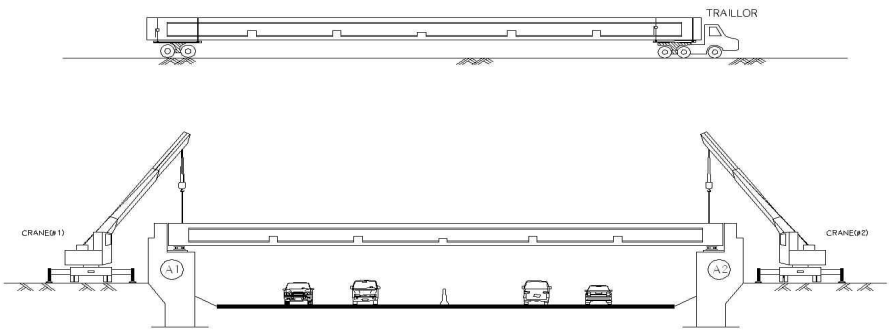
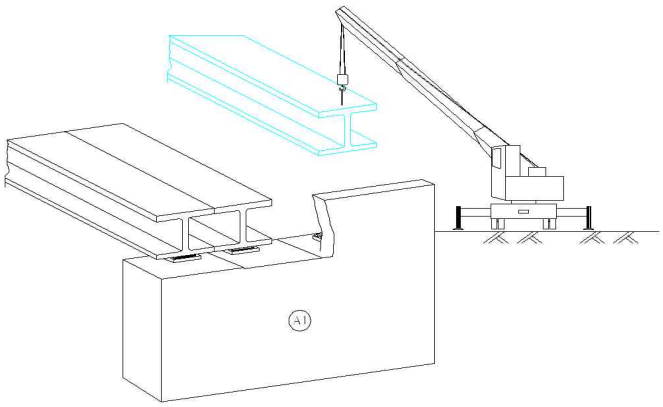


표 2-11 PSC-I거더를 이용한 중공슬래브 시공순서도(2)

6. 거더 운반 및 가설



7. 빔 연결작업



(나) 전단키(Shear Key)에 의한 횡방향 접합 검토

프리캐스트 블록의 이음부에 전단키(Shear Key)를 설치하여 블록을 접합시키는 방법으로 이러한 전단키(Shear Key)는 블록의 접합 기능뿐 아니라 전단력에 대해서도 저항하도록 설계되어 진다.

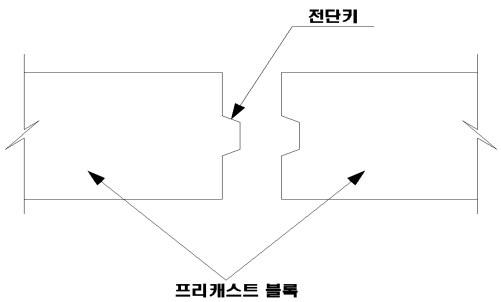


그림 2-6 전단키의 형상

위와 같은 원리에 의해 본 연구 중인 중공슬래브교에 대해서도 전단키(Shear Key)를 적용할 경우 다음과 같이 접합을 시킬 수 있다.

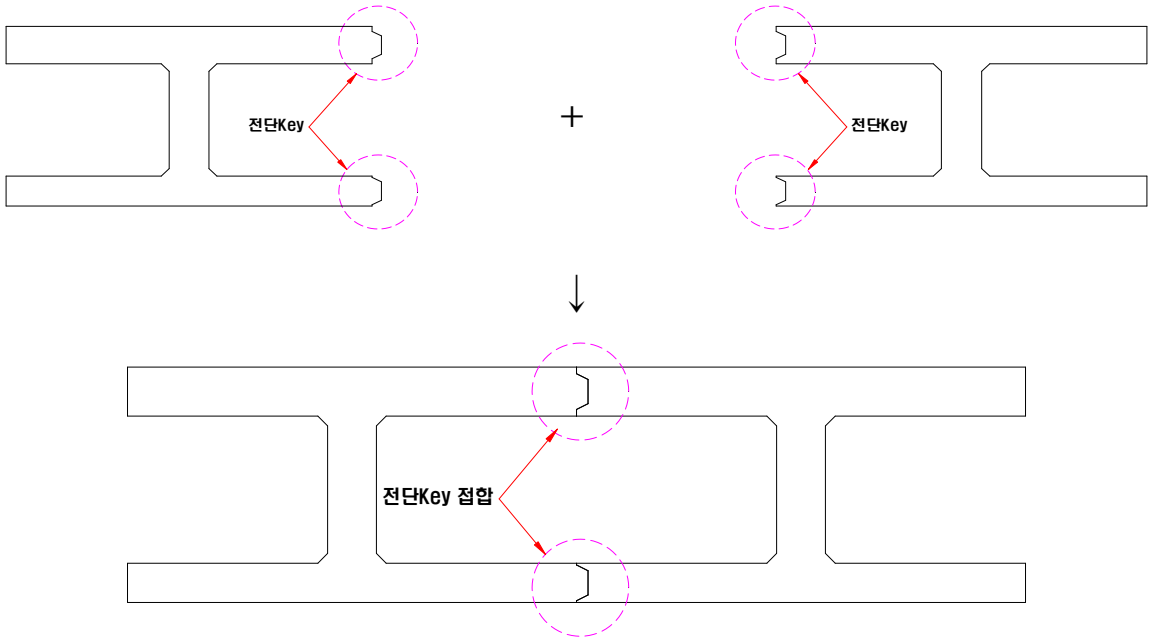
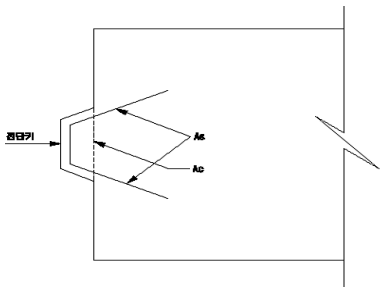


그림 2-7 전단키로 접합되는 거더 개념도

캔틸레버식 가설공법에 의하는 경우에는 복부에 붙이는 전단키의 설계는 콘크리트 전단응력을 아래 식에 의해 계산하고 콘크리트의 허용전단응력 $0.08\sqrt{fck}$ 이하인 경우에는 가외철근을 배치할 정도의 보강을 하면 된다. $\nu = V / A$

콘크리트의 전단응력이 허용전단응력 $0.08\sqrt{fck}$를 초과하고, $0.68\sqrt{fck}$(최대값)이하인 경우에는 계산된 철근량을 전단키(Shear Key)에 배치하여야 한다.



As : 전단키에 배치되는
접합면의 철근 단면적(mm^2)

Ac : 전단키의 단면적(mm^2)

그림 2-8 전단키 철근상세

상기 원리에 근거하여 횡방향 접합 시 전단키(Shear Key)를 이용하여 빔과 빔을 횡방향으로 결속시키는 시공 방안에 대해 구조안전성 검토를 수행한 결과는 다음과 같다.

① Plate(Shell) 해석

아래 그림과 같이 폭원 11.4M와 연장 30M에 대한 중공슬래브교를 모델링하여 DB-24하중에 대해 3차선 재하로 고려하였으며, 차량의 폭원을 고려하여 차의 축이 전단키(Shear Key) 부분에 하중이 재하 되도록 검토하였음.

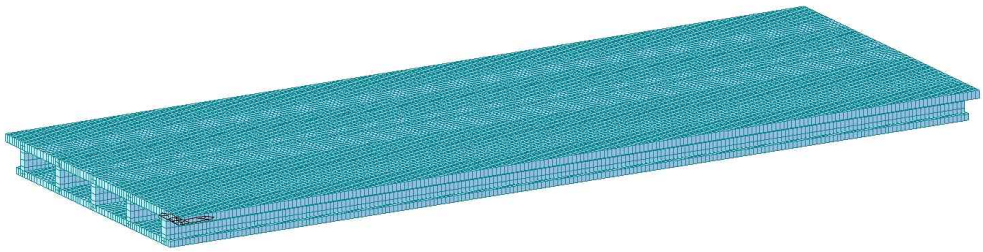
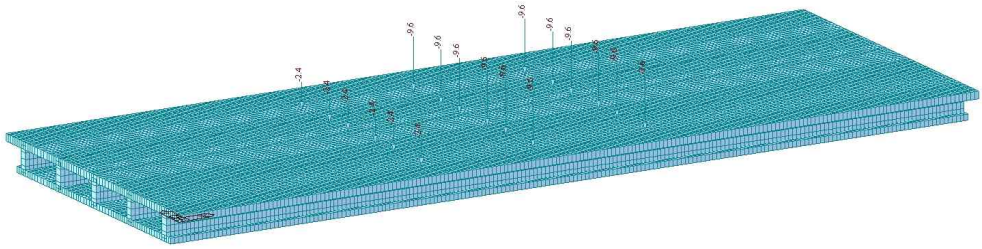
구 분	Plate(Shell) 해석
모델링	
하중 재하	

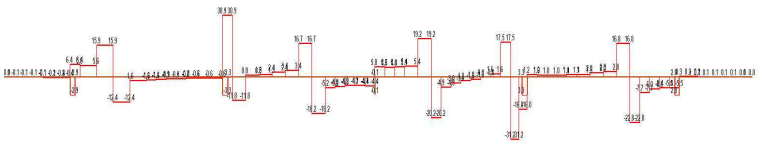
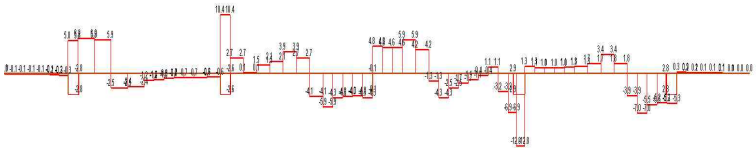
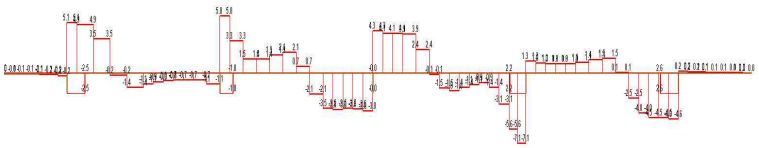
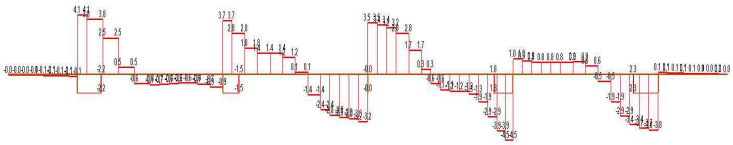
그림 2-9 모델링 및 하중재하도(Shell)

□ 전단력 산정

상기와 같이 모델링 및 하중재하를 통해 전단력을 산정하였으며, Shell 해석 특성상 위치마다 단면력 값이 차이가 나므로, 하중 재하 지점 및 하중해하 지점으로부터 ±0.15m,

±0.30m 및 ±0.45m에 대한 전단력을 산정하여 평균 값에 대해 검토함.

표 2-12 전단력 해석결과

구 분	해석 결과	전단력 (tonf)
하중 재하지점		20.2
하중재하지점으로부터 ±0.15m 위치		4.3
하중재하지점으로부터 ±0.30m 위치		1.5
하중재하지점으로부터 ±0.45m 위치		1.2

상기와 같이 산정된 전단력에 대해 평균전단력을 산정하면,

(1.2 + 1.5 + 4.3 + 20.2 + 4.3 + 1.5 + 1.2) / 7 = 34.2 tonf

34.2 tonf / 7EA = 4.88 tonf

위와 같이 하중 재하 작용점에 대해 각각의 전단력을 산정하여 평균하면, 전단Key 위치에서의 전단력은 4.88tonf가 산정 되었다.

② Frame 해석

아래 그림과 같이 연장 30M에 대해 단위 M당 전단력을 산정하기 Frame으로 모델링 및 하중재하를 실시하였음.

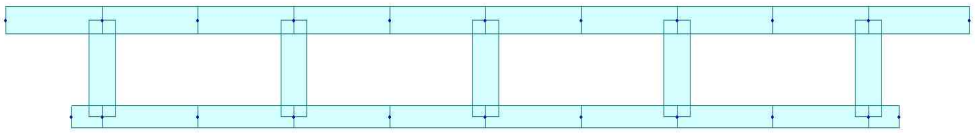
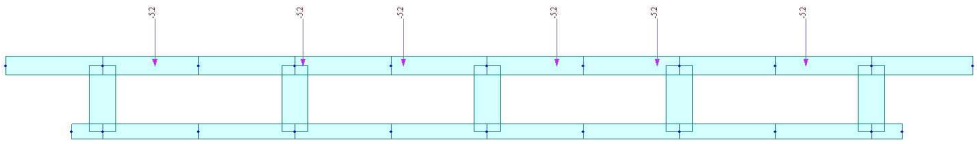
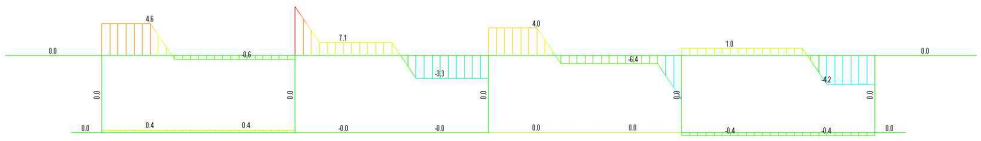
구 분	Frame 해석
모델링	
하중 재하	
전단력 해석결과	 3.3 tonf

그림 2-10 Frame 모델링 및 해석결과

③ 응력검토

상기의 해석 결과와 같이 Plate(Shell) 해석과 Frame 해석시 전단력이 각각 4.88 tonf와 3.3tonf로 산정되었으며, 이 중 더욱 불리한 4.88tonf에 대해 단면 및 응력에 대한 검토를 수행하였음.

Plate(Shell) 해석으로 산정된 4.88tonf의 전단력에 대해 단위폭(1m) 당 응력을 산정하면 다음과 같고, 전단 Kye의 최소 폭원을 10cm로 가정하였음.

응력 f = v / a = 4880kgf / (100 X 10) = 4.88kgf/cm^2

또한, 설계기준에 명시된 콘크리트의 허용응력 fa는 다음과 같다.

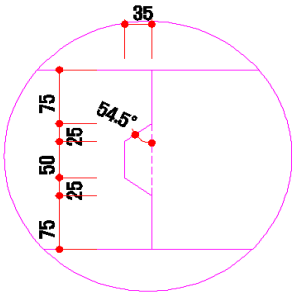
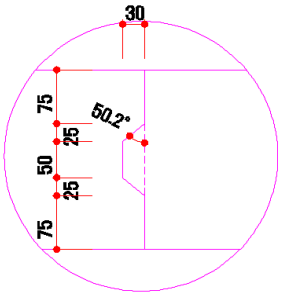
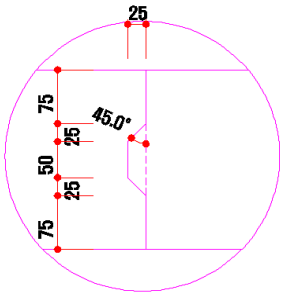
fa = 0.25=5.3kgf/cm^2

그러므로, 발생된 4.88kgf/cm2의 응력은 허용응력인 5.3kgf/cm^2 이내임을 확인할 수 있으며, 전단키(Shear Key)의 최소 폭은 허용응력을 고려하여 최소 10cm 이상을 확보하는 것이 타당하다는 결과를 도출할 수 있다.

④ 단면검토

상기의 해석 결과와 전단Key의 폭을 10cm 이상 확보할 경우 전단Key 부분에서 발생되는 응력이 허용응력 이내로 확보가 가능하므로 전단Key의 폭을 10cm로 유지하고 시공성을 고려할 때 다음과 같은 단면의 적용이 가능하다.

표 2-13 적용단면 CASE

구 분	TYPE “A“	TYPE “B“	TYPE “C“
단면도			

타 공법에서도 다음과 같이 전단키를 설치하여 시공되고 있다.

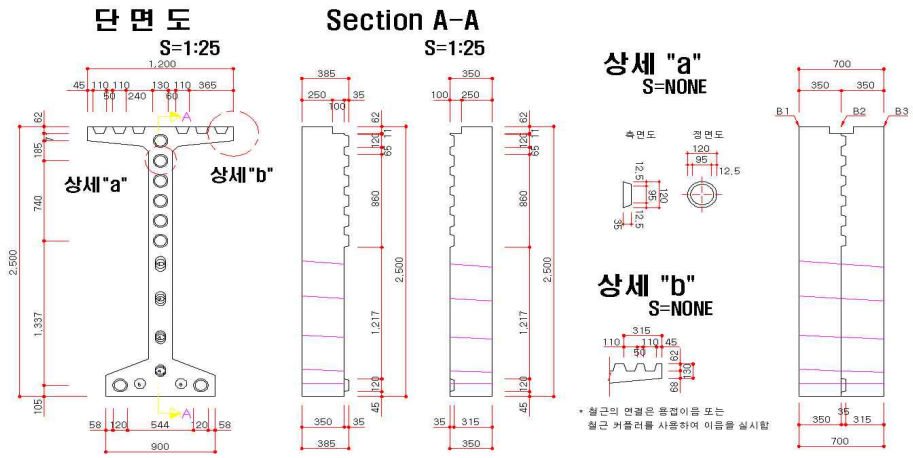


그림 2-11 전단키 적용 사례

그러나, 전단키(Shear Key)를 설치하여 빔과 빔을 접합시키는 방법은 프리스트레스트 빔의 경우, 제작 후 인장작업에 따른 솟음량의 차이에 의하여 전단키(Shear Key) 접합부를 정확히 일치시키기 어려운 단점이 있다.

(다) 접착제에 의한 횡방향 접합 검토

프리캐스트 부재의 접합에 이용하는 접착제는 소요의 강도, 내구성 및 수밀성을 갖고 접합부의 시공 조건에 적합한 것이 아니면 안된다. 다음의 표는 일반적으로 요구되는 접착제의 품질규격의 표준을 나타낸다.

표 2-14 접착체의 품질규격

품질항목		단 위	품질규격	시험조건	양생조건
미경화 접착제	외 관	-	유해한 이물질의 혼입이 없고 재료분리가 발생되지 않은 것	-	-
	비 중	-	1.2~1.6	상온	
	점 도	CP_1	1×10^4 ~5×10^4	사용시 규준 온도	
	사용가능 시간	시 간	2 이상	사용시 규준 온도	
	도포 최소두께	mm	0.3 이상	사용시 규준 온도	
경화한 접착제	인장강도	kgf/㎠	125 이상	재령7일 상온	상온
	압축강도	kgf/㎠	700 이상	재령7일 상온	상온
	접착강도	kgf/㎠	60 이상	재령7일 상온	상온

콘크리트와 콘크리트의 접합에 사용되는 접착제로서 에폭시 수지가 주로 사용되고 있다. 에폭시 수지 접착제는 다른 접착제와 다르게 용제의 증발에 의해 건조 경화하는 것이 아니라 접착에 이용한 액체상태의 물질이 100% 고화된다. 접착 작업상의 주의사항은 다음과 같다.

① 시공 유의사항

□ 피착제 표면의 세정 정리

콘크리트의 표면은 와이어 브러시 등으로 먼지와 레이턴스를 제거해야 하며 표면이 유지분 등으로 더럽혀져 있거나 분진 등이 고착되어 있는 경우에는 신나 등으로 청소해야 한다. 또한, 접착제 도포 후 접합까지의 작업을 사용 가능 시간 내에 완결할 필요가 있다.콘크리트의 표면은 건조상태를 유지하도록 주의하여야 한다.

□ 작업 온도

접착제를 사용할 때의 온도는 5℃~30℃가 적합하며, 30℃ 이상으로 되면 사용 가능 시간이 매우 짧게 되어, 사용하기 어렵게 되므로 반죽 후는 가능한 한 빠른시간 내에 사용해야 하고 40℃이상이 되는 것은 피해야 한다.

□ 접착제의 배합

에폭시 수지접착제는 보통 주제와 경화제의 두 액체의 혼합형으로 되어 있기 때문에 배합비는 최적의 효과를 낼 수 있도록 시험에 의해 확인해 두는 것이 필요하다. 점도를 낮게 하기 위해서 용제 등을 첨가하는 일이 있으나 강도를 저하시킬 염려가 있고 또한 위험성 물질(화기)이기 때문에 사용할 때는 소요의 품질을 확인함과 동시에 충분히 주의할 필요가 있다.

□ 시공

접착제의 도포는 일반적으로 고무솔에 의해 손으로 칠하여 균일하게 도포한다. 두 피착제를 접합하는 경우 그들의 양면 각각에 접착제를 도포한다. 적당한 힘으로 압축력을 가해서 부분적인 과부족이 없도록 균일하게 가한다.

□ 도포 두께

도포 두께는 너무 두꺼워도 너무 얇아도 좋지 않다. 너무 얇으면 피착제의 표면이 凹凸에 의해 균일한 두께를 갖는 것이 곤란하고 접착되지 않는 부분이 발생하며, 너무 두꺼우면 접착제의 간극과 그것에 따른 피착제의 오차 문제, 재료의 손실이 많게 되는 등의 결점이 있다.

보통 도포 두께는 1mm 정도가 적당하며(개략 1.5kg/㎡), 또한 1회의 혼합량은 온도, 면적, 용기, 작업인원 등에 따라 다르지만 손반죽은 1.0~2.0kg, 기계 반죽은 2~10kg 정도가 적당하다.

□ 보관

에폭시 수지 접착제는 열경화성 수지 접착제이기 때문에 충분히 주의해서 보관할 필요가 있다. 피부에 묻어도 위험은 없으나 바닥에 떨어져 달라 붙은 경우에는 용제를 사용해서 닦아내는 것이 바람직하다.

② 적용 상세

본 연구과제인 PSC-I거더를 이용한 중공 슬래브교에 대해서도 접착제를 사용하여 횡방향 접합이 가능하며 그 방법은 다음과 같다.

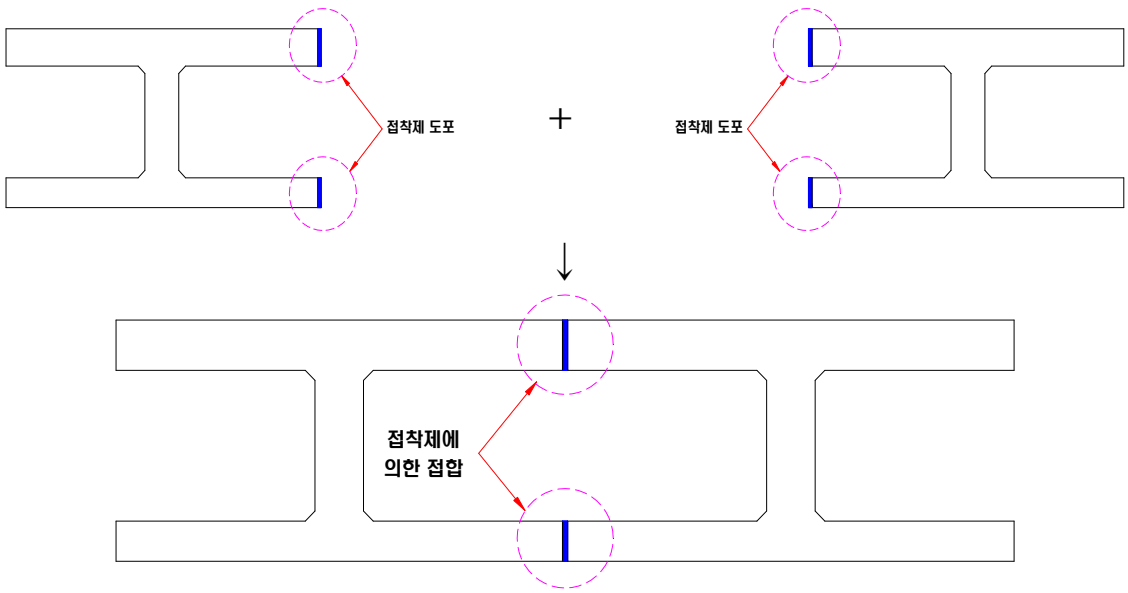


그림 2-12 접착제로 접합되는 거더 개념도

상기와 같이 상단 및 하단 플랜지 면에 접착제를 도포하여 가설 후 접착제 부분을 맞닿도록 하여 접착에 의해 접합을 시키는 방법으로 전단키(Shear Key) 설치에 의한 접합방법보다 시공이 간단하고 오차를 줄여 횡방향 접합에 효과적일 수 있다.

횡방향 연결방안에 관해 앞의 두 가지의 방법은 거더 가설 후 두 부재의 연결에 있어서 횡방향 강선에 의한 압축응력 없이 상재하중에 의한 전단력에 저항할 수 있는 부재의 단면과 부착력에 의한 검토가 수행하였다. 그러나, 상부플랜지가 슬래브의 기능과 단면의 축소를 위해서라도 횡방향 강선에 의한 연결방법은 필연적이지 않을까 판단된다. 추가적인 연구는 이를 위한 합리적인 시공방안에 초점을 맞추어 진행될 것이다. 기존 공법에서 선행된 작업을 최적화하고 소요되는 재료나 장비들을 최소화하는 것을 목적으로 하고자 한다.

다음의 추가적인 방법은 횡방향 강선에 의한 연결방법을 대체할 수 있는 방법으로 Key Segment를 이용하는 방법이다. 이미 강교의 경우에서 사례를 찾아볼 수 있으며, 인장작업을 배제하므로서 경제성을 보완할 수 있는 방법으로 대략적인 개요에 대해 검토하였다.

(라) Key Segment 처리

앞에서 언급된 두 가지의 연결방안은 거더 가설 후 인접거더를 결속시키는 동시에 Slab 거동 확보를 위한 상·하부 플랜지 횡방향 텐던에 의한 압축력 도입이 필요하다. 하지만, 횡방향 강선 도입을 가정할 경우 정확한 설계에 의해 시공이 이루어 진다 하여도 현장여건, 재료의 불균일성, 시공 허용오차 등으로 정밀한 시공을 기대하기에는 추가적인 검토가 이루어져야 할 것이다. 또한, 횡방향 강선도입을 배제하고 충분한 강성확보와 추가 인장작업에 대한 경제성을 보완할 수 방안을 검토 할 필요가 있으며, 이에 본 연구를 통해 Key Segment를 이용한 연결방안에 대하여 검토하였다.

① 횡방향 강선 도입에 대한 문제점

- 거더 가설 후 횡방향 강선의 인장작업을 위한 작업 대차가 필요

☞ 시공성 저하, 안전작업에 대한 문제점 발생

- 인접 거더의 맞닿는 부분에 횡방향 텐던 쉬스관의 이격 발생 우려

☞ 시공이 곤란

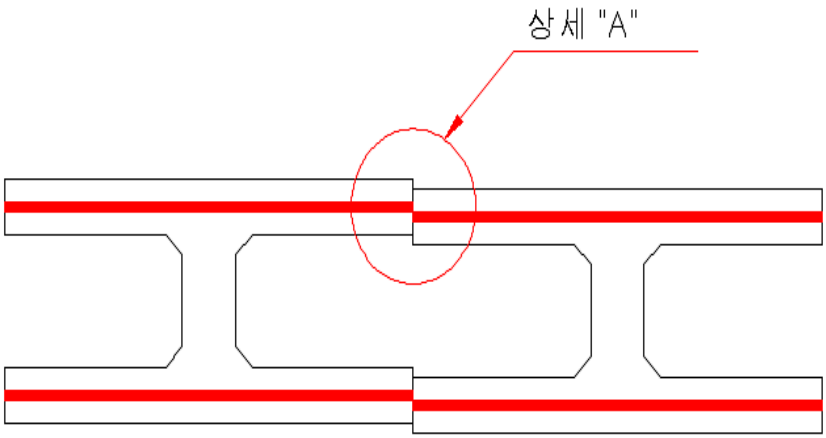


그림 2-13 횡방향 강선도입 개념도

- 하부 플랜지 종방향 텐던과의 간섭으로 횡방향 텐던 배치의 설계가 복잡

☞ 설계 및 시공성 저하

- 거더간 접합부 마감처리 시공 곤란 (상세 “A“) ☞ 시공성 저하, 품질 하자 발생 요인

② 개선(안) 검토

- 횡방향 텐던 배치를 배제하고, 거더를 철근 및 콘크리트(무수축몰탈)을 이용하여 상호 결합시키는 방안으로 횡방향 텐던 시공 생략. ☞ 시공성 향상, 경제성 향상

- 횡방향 상·하 플랜지 접합부 Key Segment 처리. ☞ 횡방향 철근 연결 및 콘크리트(무수축 몰탈) 채움 연결

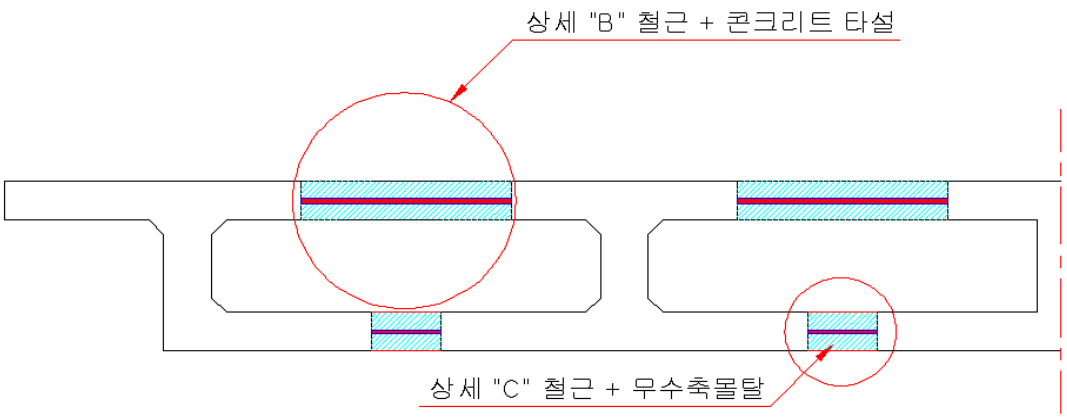


그림 2-14 개선안 개념도

③ 횡방향 연결 Key Segment

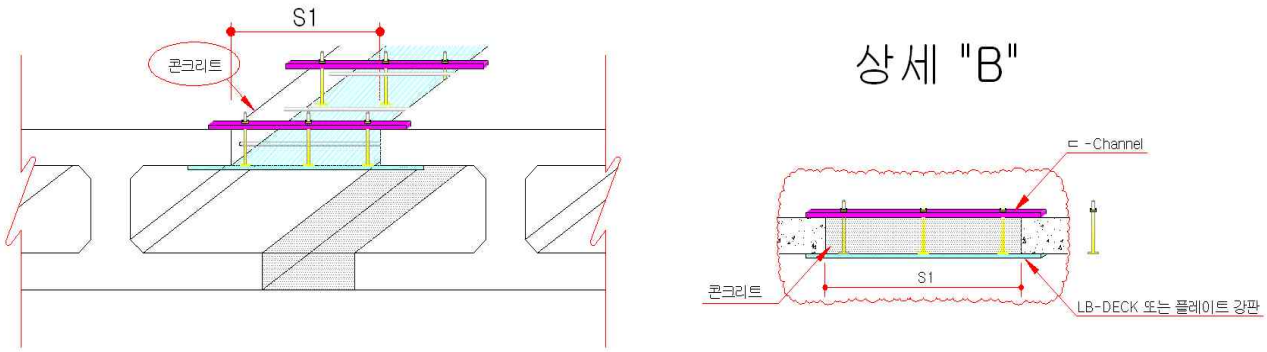


그림 2-15 상부 플랜지 접합 시공 개요도(1)

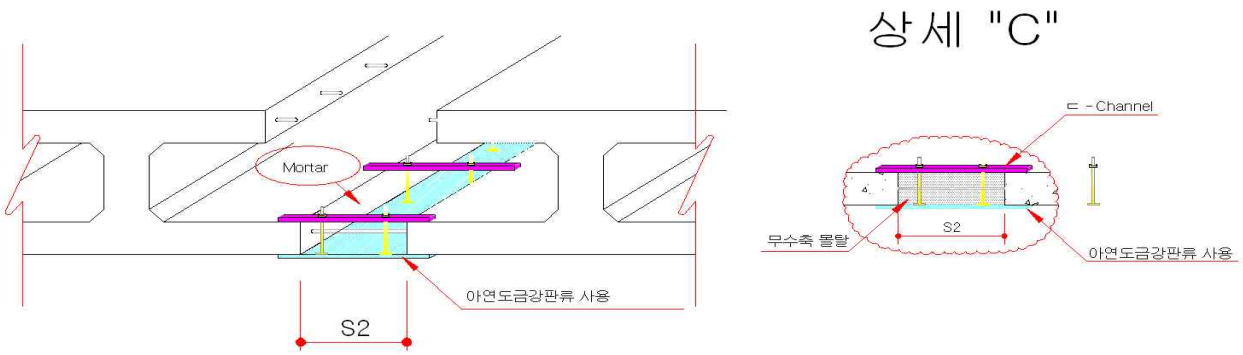


그림 2-16 상부 플랜지 접합 시공 개요도(2)

④ 횡방향 연결 Key Segment 처리 장·단점

- 횡방향 텐던 생략 가능
- 거더간 횡방향으로 강결 접합 가능 ☞ Slab 거동 확보
- 거더간 횡방향 단차부 원만한 처리 가능
- 별도의 전단키 불필요

⑤ 횡방향 텐던 시공상세

거더 가설이후 상·하부 플랜지에 Flat Type의 정착구와 덕트를 이용하여 텐던에 의한 긴장력을 도입하는 방법으로 국내외 프리캐스트 공법에 일반적으로 적용되는 방법이다.

최종적으로 개발하려는 중공슬래브교는 상부플랜지를 슬래브화 하여 기존의 PSC-I거더 대비 형고 저감효과를 최대화 할수 있으며, 상부플랜지의 텐던에 의한 압출력 도입으로 충분한 강성을 확보 할수 있을 것이다. 따라서, 시공상의 오차를 감안하여 횡방향 텐던 연결방법에 대해 시공방법을 검토하였다.

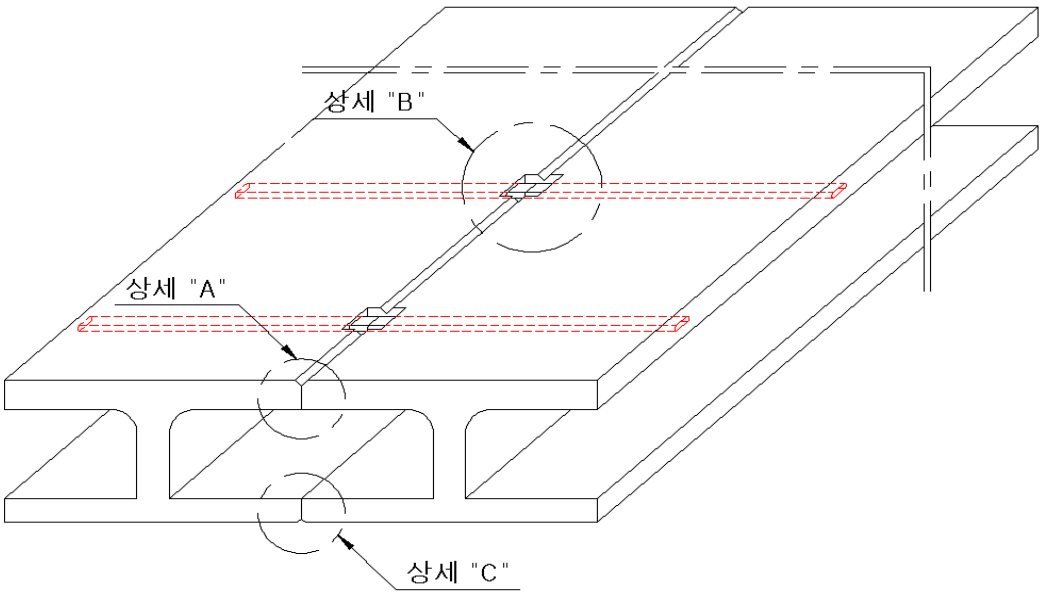


그림 2-17 상부 플랜지 접합 및 덕트 배치 개념도

□ 상부플랜지 연결방법

상부 플렌지 접합은 방수를 고려해서 상세 “A“와 같이 모따기를 하여 에폭시 도포 후 몰탈 처리를 하여 누수에 의한 방지를 하고, Flat 쉬즈관은 상세” B“처럼 접합부에 블록아웃을 구성하여 쉬스관을 연결하여 테이핑 처리 할 수 있도록 한다.

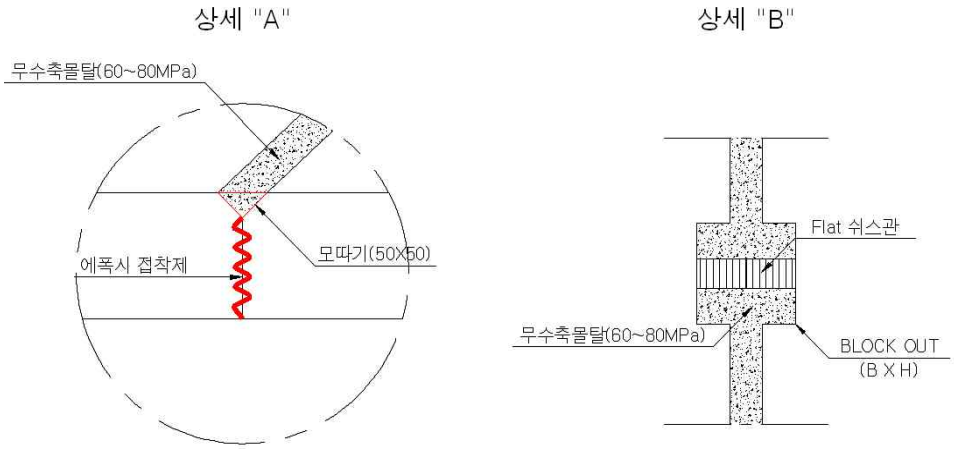


그림 2-18 상부 플랜지 시공상세

□ 하부플랜지 연결방법

플랜지 하단의 접합은 거더 간 솟음량의 차이 등 시공오차에 의해 발생하는 종방향 이격을 최소화 할 수 있도록 하며, 접합부의 외관을 향상시키기 위해 모따기 형 태로 면처리를 한다. 쉬스관의 연결을 상부플랜지와 같이 접합부에 블록아웃을 설치하여 쉬스관을 연결하는 경우 하부플랜지 상면은 작업공간의 확보가 어렵기 때문에 거더 제작시 소정의 공간을 확보하여 비부착 강연선에 의한 인장작업으로 연결성을 확보하고자 한다.

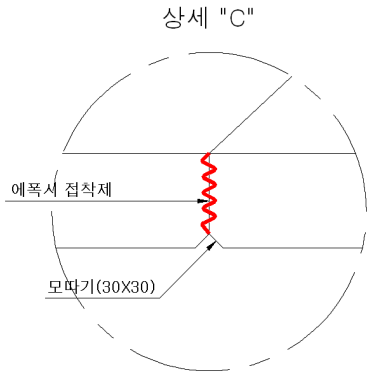


그림 2-19 하부 플랜지 시공상세

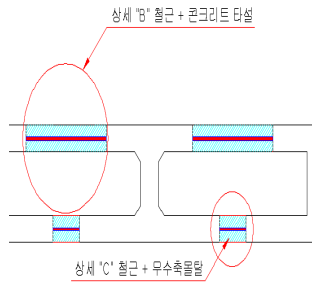
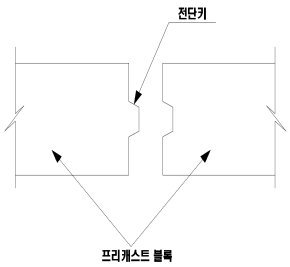
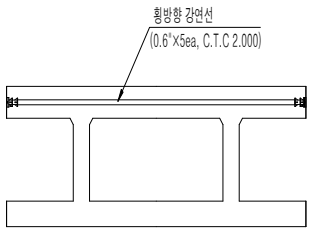
한편, 거더간 연결부에는 접착제(에폭시)를 사용하여 연결부의 수밀성을 확보하고 상재하중의 부등변위 시 발생할 수 있는 전단력에 저항할 수 있는 구조적 안전성을 추가적으로 확보하였다.

프리캐스트 부재의 접합에 이용하는 접착제는 소요의 강도, 내구성 및 수밀성을 갖고 접합부의 시공 조건에 적합하여야 하며, 다음의 표는 일반적으로 요구되는 접착제의 품질규격 표준을 나타낸다.

표 2-15 접착제 품질규격

품질항목		단 위	품질규격	시험조건	양생조건
경화한 접착제	인장강도	kgf/㎠	125 이상	재령7일 상온	상온
	압축강도	kgf/㎠	700 이상		
	접착강도	kgf/㎠	60 이상		

(라) 횡방향 연결방안 검토 요약

구분	Key Segment	전단키	횡방향 강연선
개요도			
특징	- 현장타설에 의한 거더간 철근연결 - 현장타설로 시공복잡 및 공기지연으로 시공성 불리 - 철근 겹이음 위치 기준 적용시 KEY SEG 구간 확대	- 연결부 안전성 우수 - 빔 긴장 후 솟음 등 시공오차에 따른 전단 홈 불일치로 시공성 불리 - 전단키 설치와 횡방향 긴장의 조합으로 시공 다수	- 연결부 압축력 도입으로 구조 안전성 가장 우수 - 연결부 쉬스관 연결을 위한 BLOCK OUT 필요 - 거더가설 후 긴장 작업 필요
검토	- 본 연구과제 수행 중 거더 간의 횡방향 연결이 바닥판을 타설하지 않는 본 교량의 특성상 안전성, 시공성, 경제성 확보를 위한 중요한 부분임을 확인하였으며 그 방법에 대한 상세한 검토를 수행 하였다. - 횡방향 긴장을 통하여 접합부에 압축력 도입 및 활하중에 대한 강성을 구조안전성을 확보하며 또한, 접합부에 에폭시 접착제를 도포하여 시공성과 충분한 안전성을 확보는 방안을 적용하였다.		

(3) 최적 형고 검토

(가) 유사 형식 연장별 적용형고 검토

표 2-16 형식별 적용 형고

구 분	RC Rahmen (10~15m)	RC Slab (10~15m)	PPC SLAB (20~40m)	합성형Rahmen (20~45m)	비 고
10m	0.7	0.6			
15m	1.0	0.9			
20m			0.8		
25m			1.0	1.0	
30m			1.55	1.1	

* 본 과제의 적용 가능 연장은 종래의 RC 교량의 적용 경간장을 확대하고 30M까지는 합성형 라멘교를 대체할 수 있도록 형고를 0.9~1.2M 범위로 한정한다.

(나) PCB-SLAB 최소형고 검토

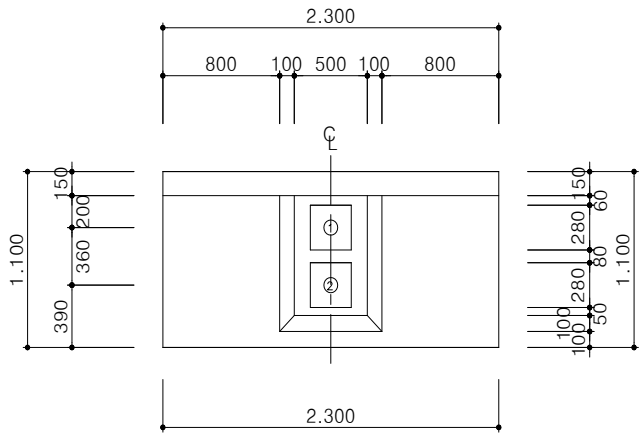


그림 2-30 L=20m PCB-SLAB 거더의 단부 단면 치수

- 신축이음 Block OUT : 150mm
- 정착판 SIZE : 280mm
- 정착판 최소간격 : 360mm

- 구조검토 결과 L=20m의 경우, H=0.9m 까지 형고를 낮출수 있으나 신축이음 Block OUT, 정착판 등을 고려하여 최소 형고는 1.1m를 적용하였음.

(다) 연장별 PCB-SLAB 최적 형고 검토

표 2-17 연장별 최적 형고

구분	20M	25M	30M	비고
형고(H)	1.10	1.10	1.20	
강연선	0.6 “-15EA × 2	0.6 “-15EA × 3	0.6 “-15EA × 4	
발생응력 (중앙부 거더하연)	0.598 MPa (압축)	0.663 MPa (압축)	0.435 MPa (압축)	
검토	O.K	O.K	O.K	

본 교량의 형고 검토 결과 RC 교량의 형고를 적용하여 지간을 확대하며 시공성을 고려하고 적용 합성형 라멘교를 대체할 수 있는 최적 형고는 1.1~1.2m로 검토됨.

다. 예비 해석 및 경제성 검토

기존의 PSC-I 거더의 개념을 도입하여 단면을 최적화 하였고, 거더간 연결방안 검토를 구행하였다. 거더의 합리적인 연결방안에 대해서는 추가적인 실험을 통해 문제점을 개선하여 시공성과 경제성을 고려할 수 있는 최적의 방법이 도출되어야 한다.

완성계의 구조물의 안전성을 검토하기 위해 경간장 30m를 기준으로 국도 2차로 표준 폭원(B=11.4m)에 대해 구조계산서를 작성하고 구조적 안전성 검토와 설계기준에 적합여부를 확인하였다. 구조해석에는 상용 프로그램인 MIDAS CIVIL 프로그램이 사용되었다.

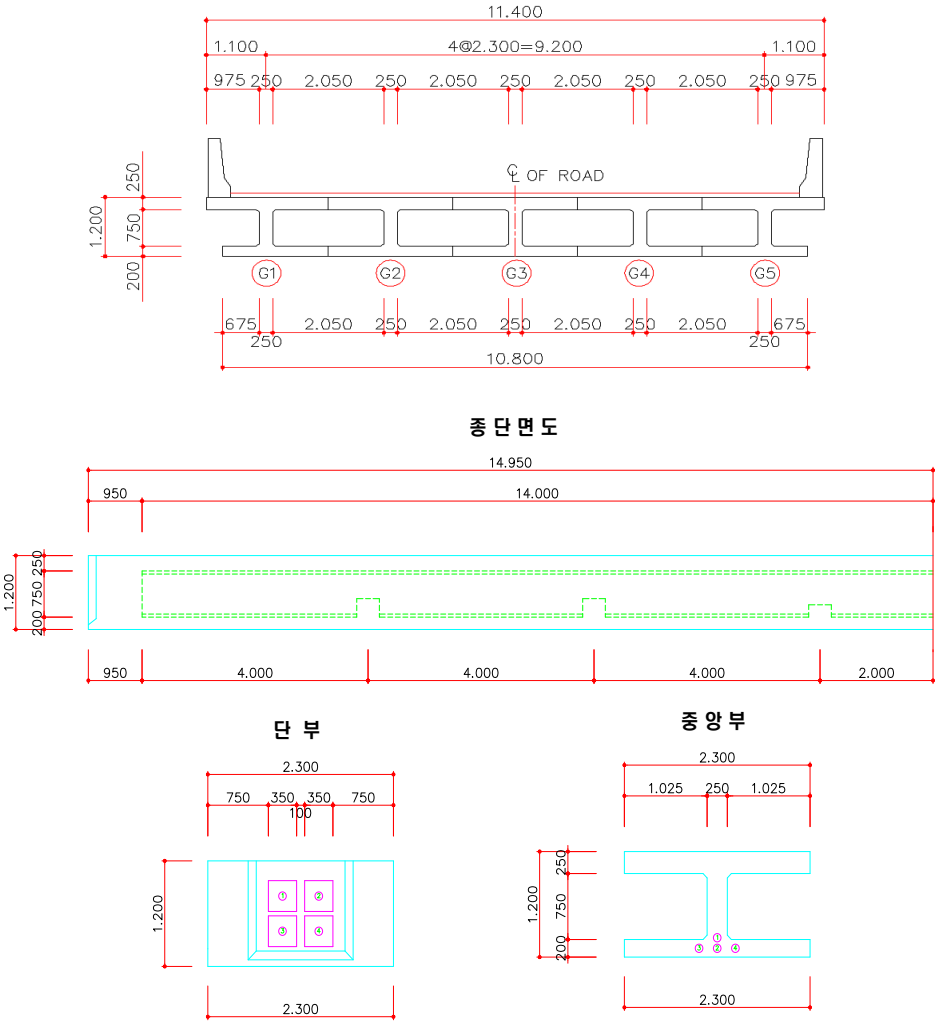


그림 2-31 구조해석을 위한 가정단면

(1) 구조해석 개요

(가) 교량 제원

형 식	PSC-I거더를 이용한 중공슬래브 교량
교량연장	1@29.900 = 29.900m
교량폭원	11.400m (외측빔(2개소) 2.250m, 내측빔(4개소) 2.300m)

(나) 사용재료

콘크리트	설계기준강도(fck)	40MPa (32MPa)주1)
	탄성계수(Ec)	3.089x10⁴ MPa (2.907x10⁴ MPa)주1)
철 근	항복강도(fy)	400MPa
	탄성계수(Es)	2.000x10⁵MPa
P.C 강선	Φ0.6 "-17 Multi-Strand Tendon	
	인장강도(fpu)	1900 MPa
	항복강도(fpy)	1600 MPa
	단면적(Ap)	2357.90 mm²

주1) ( )는 프리스트레스 도입시의 콘크리트 압축강도 및 탄성계수임.

(다) 허용응력

허용 휨 압축응력	프리스트레스 도입직후	19.200MPa
	설계하중 작용시	18.000MPa
허용 휨 인장응력	프리스트레스 도입직후	1.414MPa
	설계하중 작용시	3.162MPa

(2) 구조해석 모델링

구조해석 모델링은 MIDAS CIVIL 프로그램을 사용하여 격자로 구성하였다.

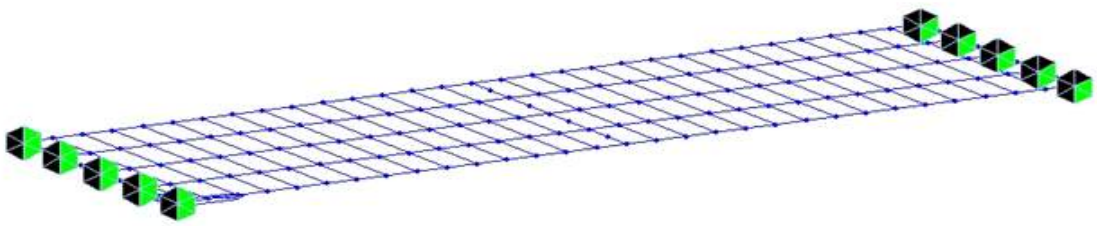


그림 2-32 구조해석 모델링

(3) 하중산정

(가) 고정하중

- 1차 고정하중 : 빔 자중

- 2차 고정하중 : 포장 및 방호벽

(나) 활하중 : DB24(3차선)

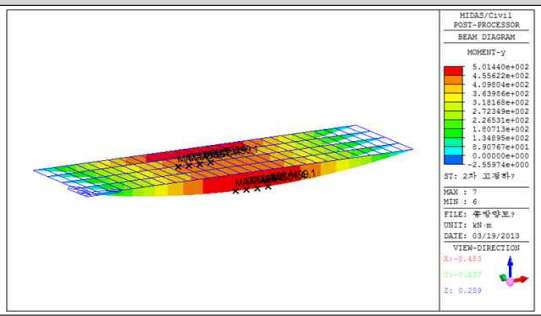
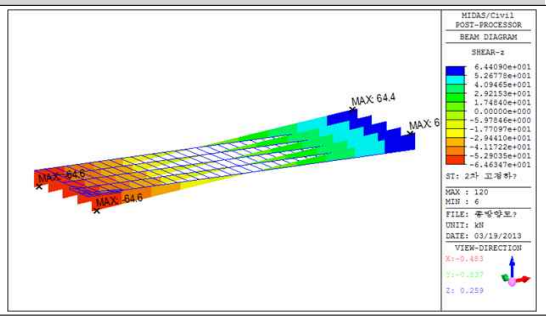
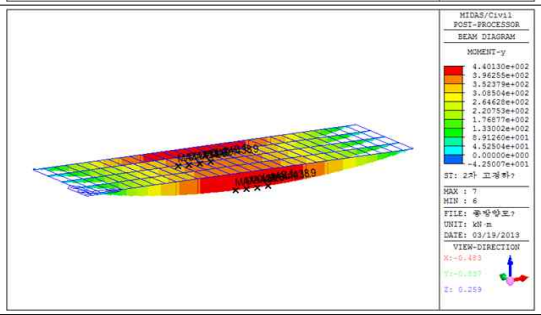
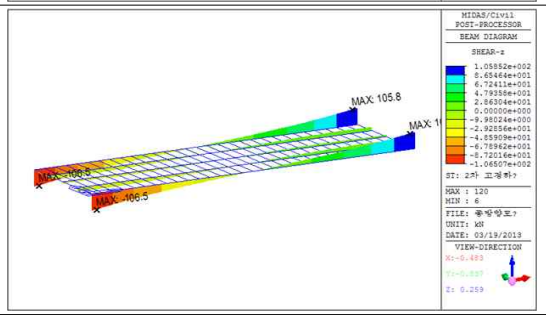
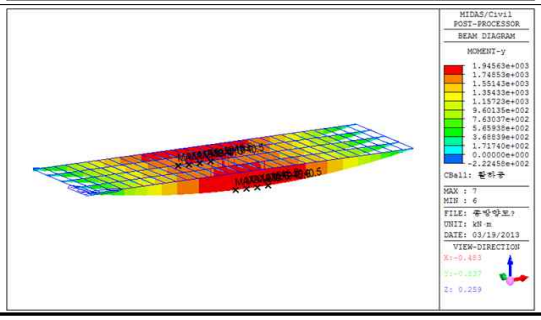
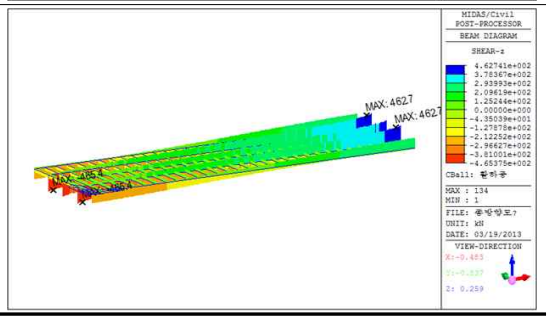
(다) 기타하중 : 거더 연결시 오차보정하중(200kN)

(라) 텐던 및 긴장력

Φ0.6 “-17 텐던 4set 적용(빔 1개소당), 텐던 긴장력 1296.0MPa

(4) 종방향 구조해석 결과

(가) 단면력

구 분	모멘트도	전단력도
2차 고정 하중 (포장)		
2차 고정 하중 (방호벽)		
차량 활하중		

구 분		1차 고정하중	2차 고정하중	활하중	기타하중
외측빔	모멘트(KN.m)	3466.087	941.420	1945.630	295.066
	전단력(KN)	535.866	171.140	281.430	19.737
내측빔	모멘트(KN.m)	3723.537	827.590	1795.960	301.623
	전단력(KN)	575.948	84.880	465.380	20.175

(나) 응력검토

구 분		프리스트레스 도입 직후 (MPa)			설계하중 작용시 (MPa)		
		프리 스트레스	빔 자중	계	유효프리 스트레스	총하중	계
외측빔 중앙부	상연	-3.792	8.126	4.334	-3.132	15.793	12.661
	하연	23.824	-9.365	14.459	19.676	-19.259	0.417
내측빔 중앙부	상연	-2.934	8.151	5.217	-2.480	14.696	12.216
	하연	20.507	-8.618	11.889	17.333	-16.378	0.955
허용응력		-1.414 < 계 < 19.20 → OK			0.00 < 계 < 18.00 → OK		

주) (-)는 인장, (+)는 압축임.

(다) 휨강도 검토

구 분	계수모멘트(KN.m)	공칭휨강도(KN.m)	판단
외측빔 중앙부	9912.86	13653.41	OK
내측빔 중앙부	9777.78	13688.47	OK

(라) 전단강도 검토

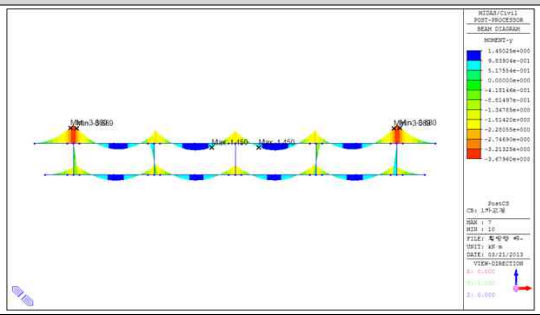
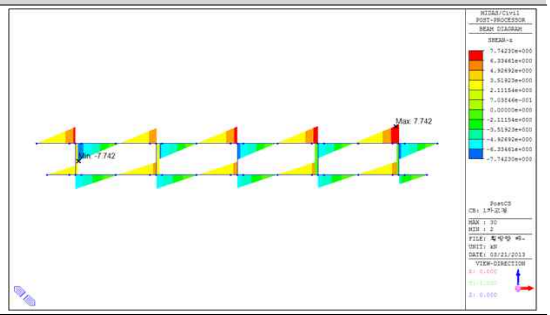
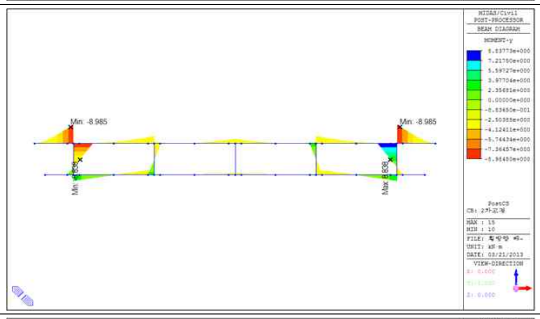
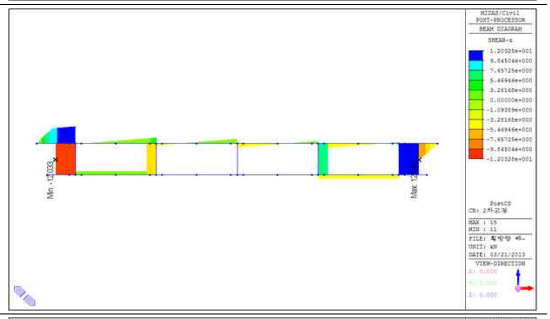
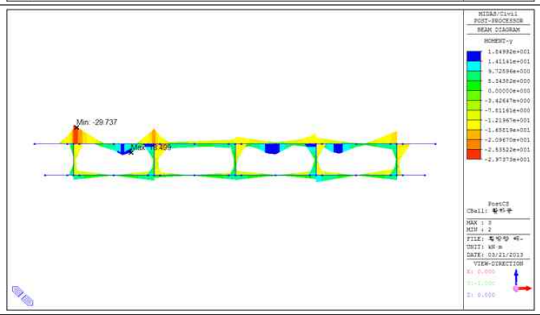
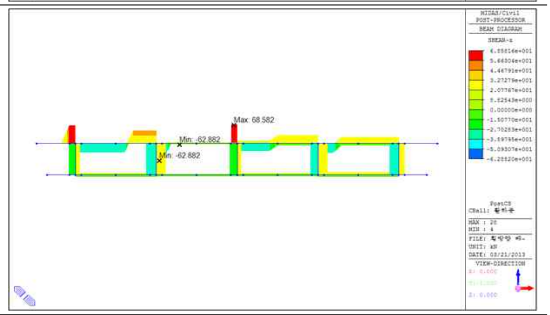
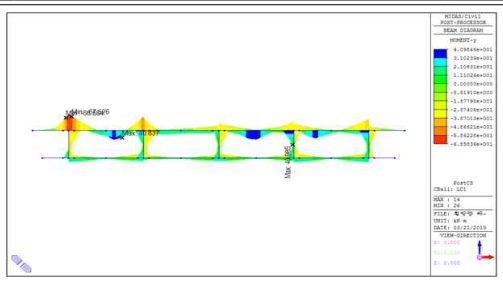
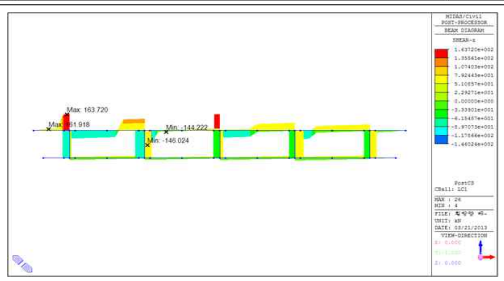
구 분		계수전단력 (KN)	콘크리트가 부담하는 공칭전단강도(KN)	전단철근이 부담하는 공칭전단강도(KN)	판단
외측빔	A단면	1524.20	4163.67	3972.00	OK
	B단면	1432.70	2802.33	3972.00	OK
	C단면	1089.60	1089.61	1986.00	OK
	D단면	755.80	721.83	1986.00	OK
내측빔	A단면	1859.60	4952.53	3972.00	OK
	B단면	1626.80	3717.39	3972.00	OK
	C단면	1265.90	1762.33	1986.00	OK
	D단면	949.80	789.10	1986.00	OK

(5) 횡방향 구조해석 결과

(가) 횡방향 텐던 배치

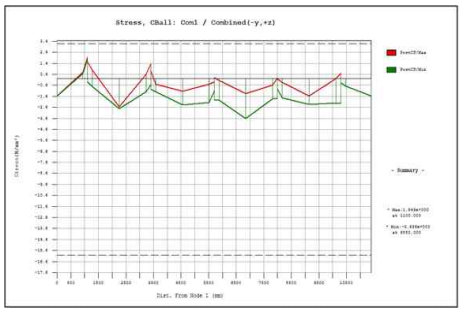
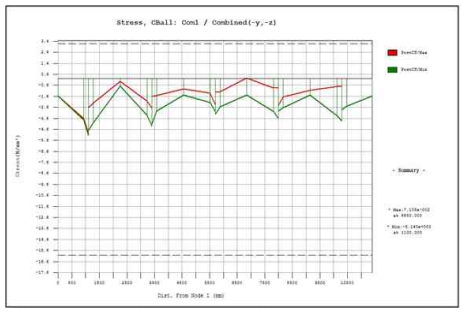
구 분	제 원	단면적(mm²)	긴장력(MPa)	배치간격(m)
상부슬래브 텐던	Φ0.6 “-5	693.50	1440.0	2.0
하부슬래브 텐던	Φ0.6 “-5	693.50	1440.0	4.0

(나) 단면력

구 분	모멘트도	전단력도
1차 고정 하중		
2차 고정 하중		
차량 활하중		
극한 하중 조합		

(다) 응력검토

① 상부슬래브

상연응력(MPa)	하연응력(MPa)	비 고
		· 허용휨압축응력 : 18.000MPa · 허용휨인장응력 : 3.162MPa (단, 빔연결부의 허용인장응력은 0.000MPa임.)

② 하부슬래브

상연응력(MPa)	하연응력(MPa)	비 고
		· 허용휨압축응력 : 18.000MPa · 허용휨인장응력 : 3.162MPa (단, 빔연결부의 허용인장응력은 0.000MPa임.)

(라) 강도검토

구 분		계수모멘트(KN.m)	공칭휨강도(KN.m)	판단
상부슬래브	지점부(헌치부)	68.584	89.827	OK
	지점부(일반부)	52.807	61.878	OK
	중앙부	40.651	61.878	OK
하부슬래브	지점부(헌치부)	22.724	42.492	OK
	지점부(일반부)	18.432	27.542	OK
벽체	외측	43.891	68.930	OK
	내측	53.078	68.930	OK

(6) 경제성 검토

교량형식의 경제성은 제품의 구성요소 및 시공방법에 의해 차이가 많이 나는데, 본 연구에 적용된 30m 중공 슬래브교와 비교할 때, 합성형 라멘교의 경우 가장 큰 특징으로 Preflex공정과 강재사용에 따른 공사비 증대 요인이 있다고 앞에서 언급한 바 있다.

현재 설계되고 있는 합성형 라멘교 30m의 경우 본당 공사비가 7천2백만원으로 이는 본 중공 슬래브교에서 산정된 3천5백만원에 비해 2배 이상 고가의 공법임을 알 수 있다. 다음은 본 연구에 적용된 L=30M, H=1.2M의 중공슬래브교의 본당 설계가이다.

표 2-18 중공슬래브교 일위대가 총괄표(L=30M, H=1.2M)

공 종		규 격	단위	수량	재 료 비		노 무 비		경 비		합 계		비고
					단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액	단가	금 액	
NO. 1	BEAM 제작대	B = 2.3M	10M	3	268,702	806,106	393,935	1,181,805	-	-		1,987,911	
NO. 2	철근가공조립	복잡	TON	5.281	12,080	63,794	511,521	2,701,342	10,230	54,024		2,819,160	
NO. 3	PC. STRAND 구입 및 운반	φ 15.2MM	TON	2.421	1,742,750	4,219,197	-	-	38,182	92,438		4,311,635	
NO. 4	쉬이스관 조립	φ 90MM	M	119.690	4,771	571,040	7,743	926,759	-	-		1,497,799	
NO. 5	PC. STRAND 정착공	17가닥용	개소	8	229,528	1,836,224	32,422	259,376	-	-		2,095,600	
NO. 6	강재 거푸집	T = 4MM	M^2	172.041	2,013	346,318	36,514	6,281,905	22	3,784		6,632,007	
NO. 7	콘크리트 타설	19-45-15	M^3	44.712	-	-	29,549	1,321,194	413	18,466		1,339,660	
NO. 8	인장작업		개소	8	10,734	85,872	49,728	397,824	13,620	108,960		592,656	
NO. 9	GROUTING		본	1	244,509	244,509	282,912	282,912	7,962	7,962		535,383	
NO.10	몰탈	1 : 3	M^3	0.645	91,775	59,194	81,443	52,530	-	-		111,724	
NO.11	SOLE PLATE 제작 및 설치	650 × 800	개소	2	128,369	256,738	355,283	710,566	1,130	2,260		969,564	
	BEAM 제작 계					8,488,992		14,116,213		287,894		**22,893,099**	
NO.12	BEAM 가설 및 전도방지공		본	1	350,053	350,053	408,215	408,215	1,010,349	1,010,349		**1,768,617**	
NO.13	PC. STRAND 구입 및 운반	φ15.2MM	TON	0.572	1,742,750	996,273			38,182	21,828		1,018,100	
	쉬이스관 조립	φ 60MM	M	81.200	1,901	154,326	7,744	628,809				783,135	
	PC. STRAND 정착공	5가닥용	개소	46	32,008	1,472,347	27,735	1,275,787				2,748,134	
	인장작업		개소	46	10,734	493,781	49,729	2,287,525	12,552	577,403		3,358,708	
	횡방향 핸딘 계					3,116,727		4,192,121		599,230		**7,908,078**	
NO.14	**에폭시 접착제**		kg	80.730	30,000	2,421,900	4,887	394,493				**2,816,393**	
	계					14,377,672		19,111,042		1,897,473		**35,386,187**	

상기와 같이 그동안 형하고 제약시 저형고 형식의 공법을 적용하기 위해 고가의 공사비임에도 불구하고 사용할 수 밖에 없었던 합성형 라멘교에 비해 절반 수준의 경제성을 확보하고 있다. 그러나, 개량형 PSC-I빔 공법과 비교할 때 형고를 줄일 수 있는 장점은 있으나, 경제성에서는 다소 떨어지는 경향이 있다. 하지만, 이는 시공성에 있어서 추가적인 연결방안에 대한 연구가 진행되면서 그 차이를 좁힐 수 있을 것이라 판단되며, 현 공사비에서 15 ~ 20% 정도의 절감을 기대할 수 있다.

표 2-19 합성형 라멘교의 특징 및 공사비

구 분	합성형라멘교
공법개요	 정모멘트(경간중앙부)는 Preflex빔을 사용하고 부모멘트부(벽체 우각부 및 교각부)는 철골, 철근콘크리트 구조로 일체화 시켜 교량받침과 신축이음을 배제한 Preflex 라멘교
특성	◙ Preflex 빔을 벽체 또는 교각에 일체화 시킨 공법 ◙ 벽체 또는 교각에 철골구조를 매설하고 Preflex 빔을 연결하여 구체타설 ◙ 교좌장치와 신축이음이 없어 유지관리가 용이
장단점	◙ 연장 40m이상 공용실적이 없어 안전성 검증 불투명 ◙ 응력집중부 균열 발생 우려 ◙ 라멘교 형식으로 다경간 연속 조가 불가능 ◙ 여러공종구성에 따른 시공이 복잡 ◙ 하부플랜지 인장응력 허용 ◙ Preflex 제작과 철골 연결부 시공으로 공사비가 고가
공사비(30M)	7천2백만원

표 2-20 PSC e-슬래브교의 특징 및 공사비

구 분	합성형라멘교
공법개요	 기존 PSC 슬래브교의 양측면에 편심유발 콘크리트 Edge 블록을 설치하여 2차 긴장을 함으로써 슬래브 형고를 줄이고 장경간을 실현한 공법
특성	◙ 슬래브교 + Edge 블록으로 구성 ◙ 편심유발 콘크리트 Edge 블록 설치 후 2차긴장을 통해 슬래브 형고 최소화 및 장경간 실현 ◙ 슬래브 시공 시 강재벤트와 H빔 지지시스템 도입으로 시공성 및 안전성 향상
장단점	◙ 기존 슬래브교의 양측면에 편심유발 Con'c Edge 블록을 설치하여 2차 긴장을 함으로써 슬래브 형고 축소 및 장경간화 실현 ◙ 슬래브 시공 시 강재벤트 및 H빔지지 시스템 도입으로 시공이 복잡 ◙ Edge 블록 및 2차인장과 H빔 사용으로 공사비가 고가
공사비(30M)	6천1백만원

표 2-21 CPI BEAM교의 특징 및 공사비

구 분	합성형라멘교
공법개요	 I-형 압연강재의 상하부 플랜지에 고강도 Plate를 접합하여 프리스트레스를 도입한 공법으로 저형고 및 장경화가 가능한 공법
특성	◙ 낮은 형고로 형하공간 확보가 용이 ◙ 제작부지 및 가설여건에 대한 제한이 적음 ◙ I-형강에 Cover Plate 부착
장단점	◙ 현장내 별도 대규모 제작장 불필요 ◙ 용접부 피로균열 우려 ◙ 진동 및 처짐에 대해 불리 ◙ 도장에 대한 유지 관리가 필요 ◙ 형강 사용으로 공사비가 고가 ◙ 공장제작 후 현장운반으로 공기지연 및 공사비 고가
공사비(30M)	6천8백만원

라. 지간별 구조해석 및 안정성 검토

(1) 구조해석 개요

(가) 교량 제원

형 식	PSC-I거더를 이용한 중공슬래브 교량
교량폭원	11.500m (본당 폭 : 2.3m)

(나) 횡단면도

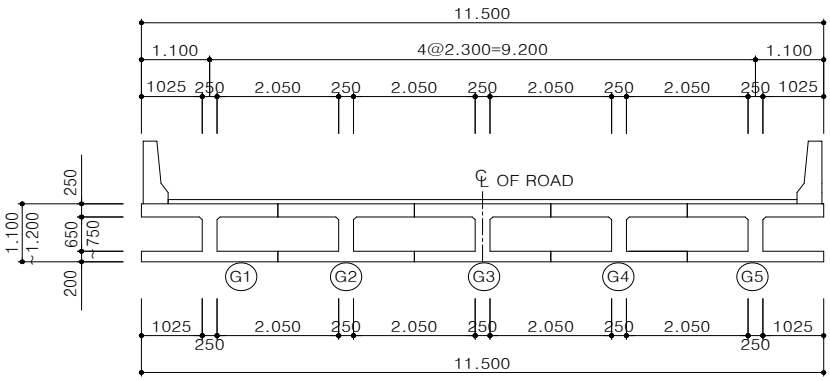


그림 2-33 표준 횡단면도

(다) 허용응력

허용 휨 압축응력	프리스트레스 도입직후	19.200 MPa
	설계하중 작용시	18.000 MPa
허용 휨 인장응력	프리스트레스 도입직후	1.414 MPa
	설계하중 작용시	3.162 MPa

(2) 구조해석 Modeling

Midas Civil 프로그램을 사용하여 격자로 모델링

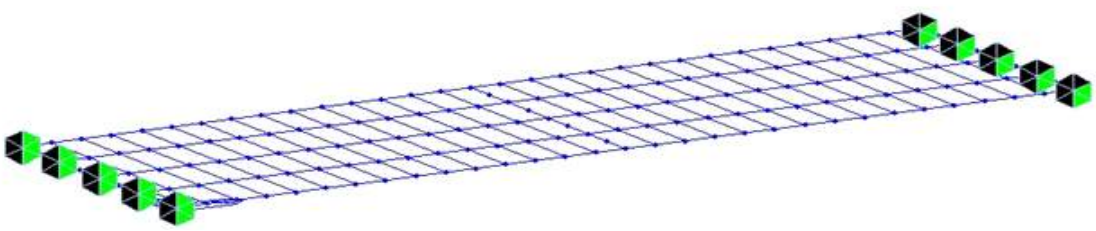


그림 2-34 구조해석 격자 모델

(3) 하중산정

① 고정하중

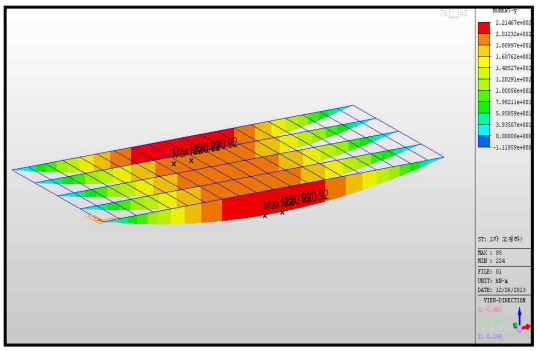
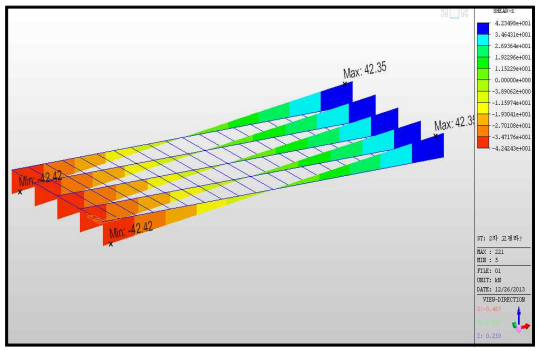
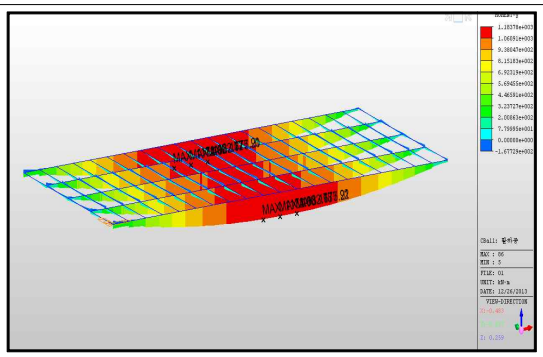
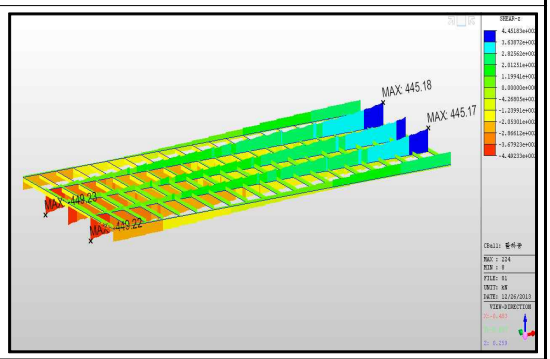
- 1차 고정하중 : 빔 자중

- 2차 고정하중 : 포장 및 방호벽

② 활하중 : DB-24(3차선)

(4) 종방향 구조해석 결과

① 단면력도

구 분 (L=20m)	모멘트도	전단력도
2차 고정 하중		
차량 활하중		

② 부재력 집계

구 분			1차 고정하중	2차 고정하중	활하중	기타하중
L=20M	외측빔	모멘트(KN.m)	1469.292	428.574	1183.767	199.000
		전단력(KN)	295.335	126.241	236.057	20.000
	내측빔	모멘트(KN.m)	1469.292	361.659	1130.825	199.000
		전단력(KN)	295.335	49.222	449.233	20.000

구 분			1차 고정하중	2차 고정하중	활하중	기타하중
L=25M	외측빔	모멘트(KN.m)	2288.059	658.610	1567.300	249.000
		전단력(KN)	367.560	149.474	261.044	20.000
	내측빔	모멘트(KN.m)	2288.059	571.239	1466.820	249.000
		전단력(KN)	367.560	66.462	459.218	20.000

구 분			1차 고정하중	2차 고정하중	활하중	기타하중
L=30M	외측빔	모멘트(KN.m)	3351.289	941.420	1945.630	299.00
		전단력(KN)	448.333	171.140	281.430	20.000
	내측빔	모멘트(KN.m)	3351.289	827.590	1795.960	299.000
		전단력(KN)	448.333	84.880	465.380	20.000

③ 응력 검토 : (-)는 인장, (+)는 압축임.

구 분			프리스트레스 도입 직후 (MPa)			설계하중 작용시 (MPa)		
			프리 스트레스	빔 자중	계	유효프리 스트레스	총하중	계
L=20M	외측빔 중앙부	상연	-1.866	3.858	1.992	-1.676	8.410	6.734
		하연	10.827	-4.181	6.646	9.724	-9.126	0.598
	내측빔 중앙부	상연	-1.866	3.858	1.992	-1.675	8.109	6.434
		하연	10.827	-4.181	6.646	9.714	-8.799	0.916
	허용응력		-1.414 < 계 < 19.20 → O.K			0.00 < 계 < 18.00 → O.K		

구 분			프리스트레스 도입 직후 (MPa)			설계하중 작용시 (MPa)		
			프리 스트레스	빔 자중	계	유효프리 스트레스	총하중	계
L=25M	외측빔 중앙부	상연	-2.920	6.038	3.118	-2.556	12.389	9.833
		하연	15.952	-6.471	9.481	13.964	-13.301	0.663
	내측빔 중앙부	상연	-2.920	6.038	3.118	-2.553	11.907	9.354
		하연	15.952	-6.471	9.481	13.945	-12.783	1.163
	허용응력		-1.414 < 계 < 19.20 → O.K			0.00 < 계 < 18.00 → O.K		

구 분			프리스트레스 도입 직후 (MPa)			설계하중 작용시 (MPa)		
			프리 스트레스	빔 자중	계	유효프리 스트레스	총하중	계
L=30M	외측빔 중앙부	상연	-3.758	8.213	4.455	-3.228	15.876	12.649
		하연	20.263	-8.760	11.503	17.406	-16.971	0.435
	내측빔 중앙부	상연	-3.745	8.213	4.468	-3.231	15.243	12.012
		하연	20.197	-8.760	11.437	17.423	-16.292	1.131
	허용응력		-1.414 < 계 < 19.20 → O.K			0.00 < 계 < 18.00 → O.K		

④ 휨강도 검토

구 분		계수모멘트(KN.m)	공칭휨강도(KN.m)	판단
L=20M	외측빔 중앙부	5099.22	6189.29	O.K
	내측빔 중앙부	4898.40	6189.29	O.K

구 분		계수모멘트(KN.m)	공칭휨강도(KN.m)	판단
L=25M	외측빔 중앙부	7287.26	8909.01	O.K
	내측빔 중앙부	6957.64	8909.01	O.K

구 분		계수모멘트(KN.m)	공칭휨강도(KN.m)	판단
L=30M	외측빔 중앙부	9850.52	12328.98	O.K
	내측빔 중앙부	9380.75	12328.98	O.K

⑤ 처짐 검토

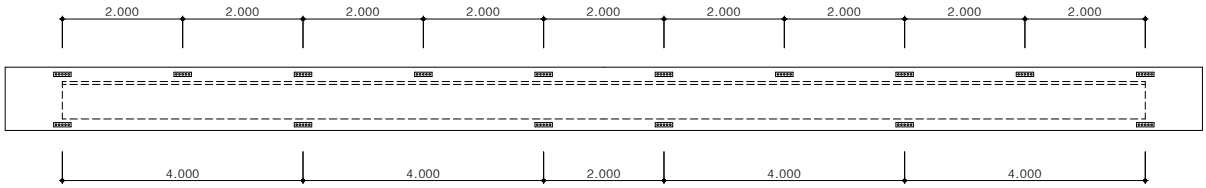
구분	20M	25M	30M
발생 처짐	6.897mm	13.457mm	22.046mm
허용 처짐	23.625mm	29.875mm	36.125mm
비 고	발생처짐 < 허용처짐 (O.K)		

(5) 횡방향 구조해석 결과

① 횡방향 텐던 제원

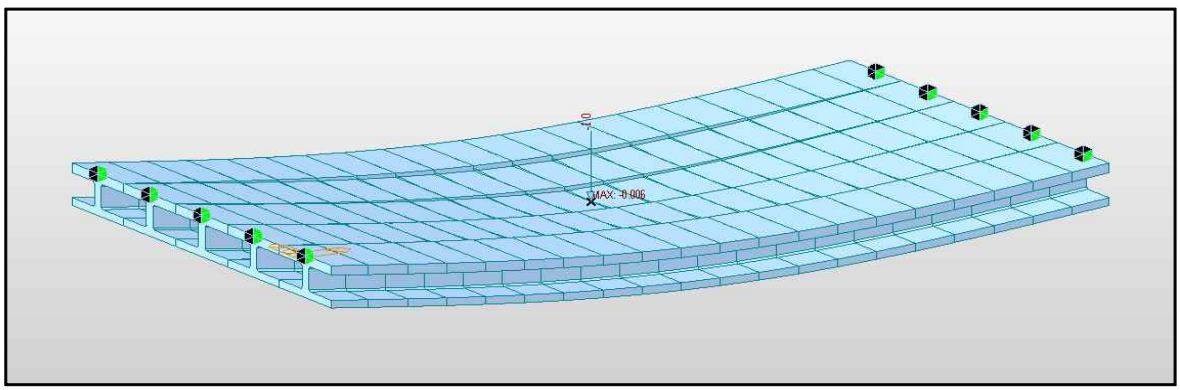
구 분	제 원	단면적(mm²)	긴장력(MPa)	배치간격(m)
상부슬래브 텐던	Φ0.6 “-5	693.50	1440.0	2.0
하부슬래브 텐던	Φ0.6 “-5	693.50	1440.0	4.0

② 횡방향 텐던 배치도

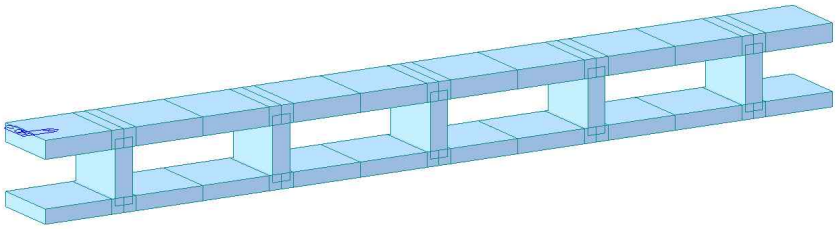


③ 경계조건

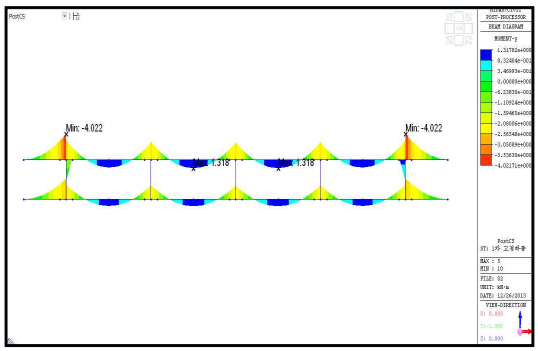
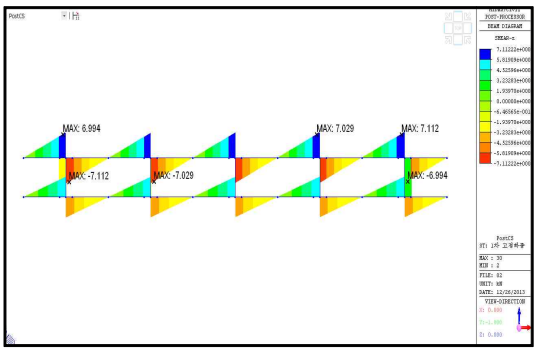
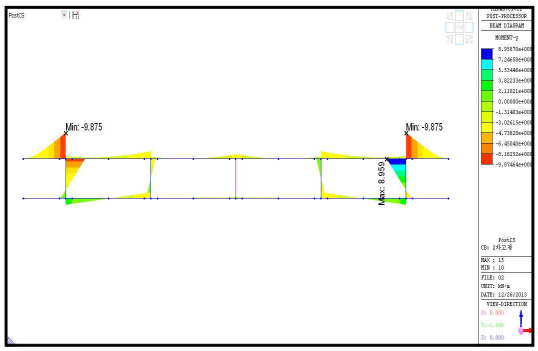
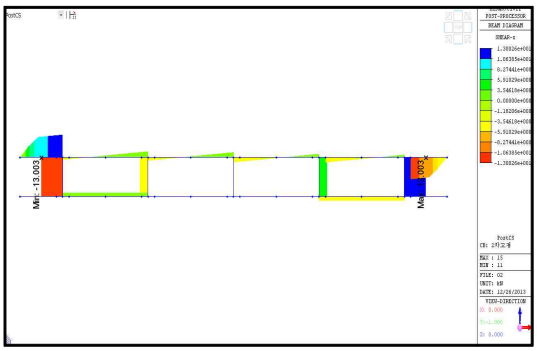
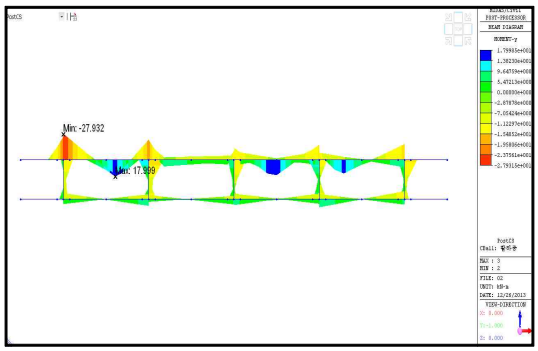
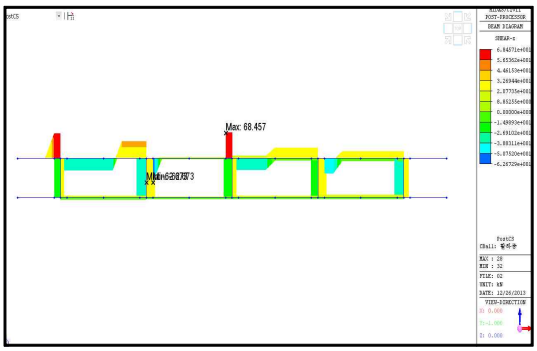
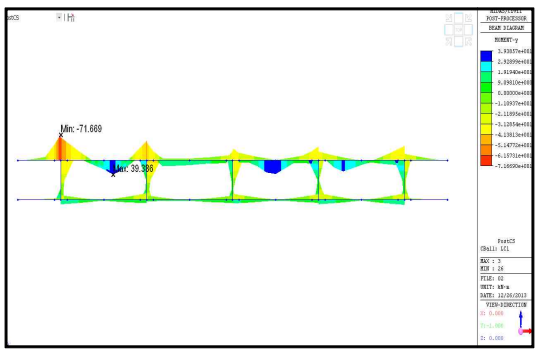
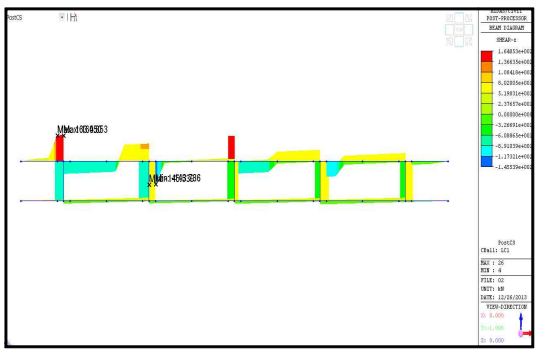
횡단면의 지점 강성을 계산하기 위하여 전체 구조물의 중앙부에 단위하중(P)을 재하 하고, 이에 따른 δ 값을 구하였다. P=Kδ 식을 이용하여 빔 중앙부의 연직 강성을 구한 후 지점 스프링으로 변환하여 경계조건을 설정하였다.



④ Modeling

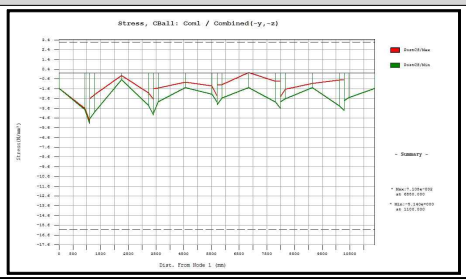


⑤ 단면력도

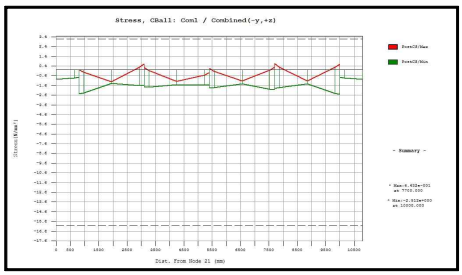
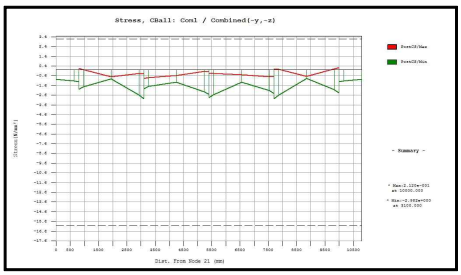
구 분	모멘트도	전단력도
1차 고정 하중		
2차 고정 하중		
차량 활하중		
극한 하중 조합		

⑥ 응력검토

□ 상부슬래브

상연응력(MPa)	하연응력(MPa)	비 고
		· 허용 휨압축응력 : 18.000MPa · 허용 휨인장응력 : 3.162MPa (단, 빔 연결부의 허용 휨인장응력은 0.000MPa임.)

□ 하부슬래브

상연응력(MPa)	하연응력(MPa)	비 고
		· 허용 휨압축응력 : 18.000MPa · 허용 휨인장응력 : 3.162MPa (단, 빔 연결부의 허용 휨인장응력은 0.000MPa임.)

⑦ 부재력 집계

구 분		극한하중시		사용하중시
		모멘트(KN.m)	전단력(kN)	모멘트(KN.m)
상부슬래브	지점부	71.669	164.853	38.828
	중앙부	39.385	68.740	20.337
복 부	외측 복부	41.734	67.042	24.525
	내측 복부	46.459	78.109	23.393
하부슬래브	지점부	18.437	21.432	10.370
	중앙부	14.783	20.321	9.803

⑧ 강도검토

구 분		계수모멘트(KN.m)	공칭휨강도(KN.m)	판단
상부슬래브	지점부(헌치부)	71.669	89.827	OK
	지점부(일반부)	60.467	61.878	OK
	중앙부	39.385	61.878	OK
하부슬래브	지점부	14.783	27.542	OK
벽체	외측	41.734	68.930	OK
	내측	46.459	68.930	OK

마. 경제성 검토

교량형식의 경제성은 제품의 구성요소 및 시공방법에 의해 차이가 많이 나는데, 최근의 교량 건설공사에 주로 적용되고 있는 개량형 PSC-I빔 계열의 경우 강합성 계열의 교량과 비교할 때 공사비는 현격히 감소하나, 아래 그림과 같이 형하고에 제약이 있는 경우에는 높은 형고로 인해 적용성에 있어 불리한 단점이 있어 형하고 제약시 고가의 강합성 계열 형식이 적용되고 있으나, 강합성 교량의 경우 복잡한 시공 공종과 이에 따른 공기지연 및 강재 사용에 따른 공사비 증대가 불가피한 실정이다.

이와 같은 국내 교량 건설공사의 실정을 감안할 때 개량형 PSC-I빔 계열의 높은 형고를 탈피하고, 강합성 교량에 적용되는 강재 사용의 배제 등으로 인한 공사비 절감 효과를 기대할 수 있는 저 형고, 저 예산의 신개념 교량 상부형식 필요한 실정이며, 이에 따라 본 연구를 통해 PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브교가 합리적이고 혁신적인 대체할 수 있을 것으로 기대할 수 있다.

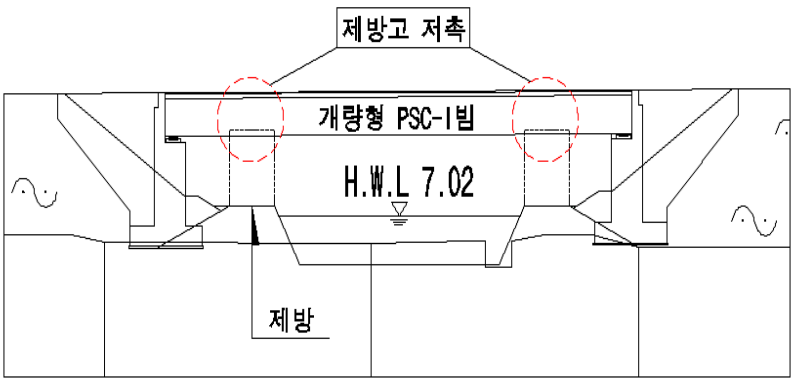


그림 2-35 형하고가 제약되는 거더교 사례

기존의 개량형 PSC-I빔의 형고를 탈피하여 저형고 교량건설이 가능하면서도, 강재 사용 배제를 통해 공사비를 강합성 교량 계열의 공사비 이하로 절감할 수 있는 공법이 PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브교이다.

다음의 표는 개량형 PSC-I빔 계열의 공법과 강합성 교량에 대해 최근 고속도로 건설공사에 적용된 공사비를 기준으로 산정된 요약표이다. 형식별 교량에 대해서는 폭원 11.5m를 기준으로 5주형을 적용하였을 경우를 기준으로 작성하였다.

제 원 : L=20M, H=1.1m (단위 : 본당)

공 종		규 격	단위	수량	재 료 비		노 무 비		경 비		합 계		비고
					단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액	단가	금 액	
NO. 1	BEAM 제작대	B = 2.3M	10M	2	268,702	537,404	393,935	787,870	-	-		1,325,274	
NO. 2	철근가공조립	복잡	TON	3.920	12,080	47,347	511,521	2,004,906	10,230	40,096		2,092,349	
NO. 3	PC, STRAND 구입 및 운반(종방향)	φ 15.2MM	TON	0.755	1,742,750	1,315,776	-	-	38,182	28,827		1,344,603	
	PC, STRAND 구입 및 운반(횡방향)	φ15.2MM	TON	0.379	1,742,750	660,056			38,182	14,461		674,517	
NO. 4	쉬이스관 조립(종방향)	φ85MM	M	39.865	4,771	190,195	7,743	308,674	-	-		498,869	
	쉬이스관 조립(횡방향)	φ60MM	M	40.000	1,901	76,023	7,744	309,758				385,781	
NO. 5	PC, STRAND 정착공(종방향)	15가닥용	개소	4	229,528	918,112	32,422	129,688	-	-		1,047,800	
	PC, STRAND 정착공(횡방향)	5가닥용	개소	32	32,008	1,024,242	27,735	887,504				1,911,746	
NO. 6	강재 거푸집	T = 4MM	M^2	109.157	2,060	224,863	36,587	3,993,727	23	2,510		4,221,100	
NO. 7	콘크리트 타설	19-45-15	M^3	30.970	-	-	29,549	915,132	413	12,790		927,922	
NO. 8	인장작업(종방향)		개소	4	10,734	42,936	49,728	198,912	13,620	54,480		296,328	
	인장작업(횡방향)		개소	32	10,734	343,500	49,729	1,591,322	12,552	401,671		2,336,493	
NO. 9	GROUTING		본	1	72,613	72,613	94,229	94,229	7,962	7,962		174,804	
NO.10	몰탈	1 : 3	M^3	0.600	91,775	55,065	81,443	48,865	-	-		103,930	
NO.11	SOLE PLATE 제작 및 설치	650 × 800	개소	2	128,369	256,738	355,283	710,566	1,130	2,260		969,564	
NO.12	에폭시 접착제		kg	53.730	30,000	1,611,900	4,887	262,555				1,874,455	
	BEAM 제작 계					7,376,769		12,243,708		565,058		20,185,535	
NO.13	BEAM 가설 및 전도방지공		본	1	299,050	299,050	328,725	328,725	725,603	725,603		1,353,378	
NO.14	철 근	SD30	TON	3.920	680,000	2,665,260						2,665,260	
NO.15	레미콘	45MPa	M^3	30.970	89,350	2,767,170						2,767,170	
	재료비 계					5,432,430						5,432,430	
	계					13,108,249		12,572,433		1,290,661		26,971,342	

제 원 : L=25M, H=1.1m (단위 : 본당)

공 종		규 격	단위	수량	재 료 비		노 무 비		경 비		합 계		비고
					단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액	단가	금 액	
NO. 1	BEAM 제작대	B = 2.3M	10M	3	268,702	671,755	393,935	984,837	-	-		1,656,592	
NO. 2	철근가공조립	복잡	TON	4.973	12,080	60,067	511,521	2,543,538	10,230	50,868		2,654,473	
NO. 3	PC, STRAND 구입 및 운반(종방향)	φ 15.2MM	TON	1.365	1,742,750	2,378,853	-	-	38,182	52,118		2,430,971	
	PC, STRAND 구입 및 운반(횡방향)	φ15.2MM	TON	0.450	1,742,750	783,817			38,182	17,173		800,989	
NO. 4	쉬이스관 조립(종방향)	φ85MM	M	74.797	4,771	356,856	7,743	579,153	-	-		936,009	
	쉬이스관 조립(횡방향)	φ60MM	M	47.500	1,901	90,277	7,744	367,838				458,115	
NO. 5	PC, STRAND 정착공(종방향)	15가닥용	개소	6	229,528	1,377,168	32,422	194,532	-	-		1,571,700	
	PC, STRAND 정착공(횡방향)	5가닥용	개소	38	32,008	1,216,287	27,735	1,053,911				2,270,198	
NO. 6	강재 거푸집	T = 4MM	M^2	139.177	2,012	280,024	36,499	5,079,821	22	3,061		5,362,906	
NO. 7	콘크리트 타설	19-45-15	M^3	36.975	-	-	29,549	1,092,574	413	15,270		1,107,844	
NO. 8	인장작업(종방향)		개소	6	10,734	64,404	49,728	298,368	13,620	81,720		444,492	
	인장작업(횡방향)		개소	38	10,734	407,906	49,729	1,889,694	12,552	476,985		2,774,585	
NO. 9	GROUTING		본	1	136,231	136,231	176,798	176,798	7,962	7,962		320,991	
NO.10	몰탈	1 : 3	M^3	0.600	91,775	55,065	81,443	48,865	-	-		103,930	
NO.11	SOLE PLATE 제작 및 설치	650 × 800	개소	2	128,369	256,738	355,283	710,566	1,130	2,260		969,564	
NO.12	에폭시 접착제		kg	67.230	30,000	2,016,900	4,887	328,524				2,345,424	
	BEAM 제작 계					10,152,348		15,349,019		707,417		26,208,783	
NO.13	BEAM 가설 및 전도방지공		본	1	312,200	312,200	364,360	364,360	776,227	776,227		1,452,787	
NO.14	철 근	SD30	TON	4.973	680,000	3,381,300						3,381,300	
NO.15	레미콘	45MPa	M^3	36.975	89,350	3,303,716						3,303,716	
	재료비 계					6,685,016						6,685,016	
	계					17,149,564		15,713,379		1,483,644		34,346,586	

제 원 : L=30M, H=1.2m (단위 : 본당)

공 종		규 격	단위	수량	재 료 비		노 무 비		경 비		합 계		비고
					단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액	단가	금 액	
NO. 1	BEAM 제작대	B = 2.3M	10M	3	268,702	806,106	393,935	1,181,805	-	-		1,987,911	
NO. 2	철근가공조립	복잡	TON	5.850	12,080	70,668	511,521	2,992,397	10,230	59,845		3,122,910	
NO. 3	PC. STRAND 구입 및 운반(종방향)	φ 15.2MM	TON	2.000	1,742,750	3,485,500	-	-	38,182	76,364		3,561,864	
	PC. STRAND 구입 및 운반(횡방향)	φ15.2MM	TON	0.544	1,742,750	948,831			38,182	20,788		969,619	
NO. 4	쉬이스관 조립(종방향)	φ80MM	M	119.728	4,771	571,222	7,743	927,053	-	-		1,498,275	
	쉬이스관 조립(횡방향)	φ60MM	M	57.500	1,901	109,283	7,744	445,277				554,560	
NO. 5	PC. STRAND 정착공(종방향)	14가닥용	개소	8	229,528	1,836,224	32,422	259,376	-	-		2,095,600	
	PC. STRAND 정착공(횡방향)	5가닥용	개소	46	32,008	1,472,347	27,735	1,275,787				2,748,134	
NO. 6	강재 거푸집	T = 4MM	M^2	175.691	1,996	350,679	36,451	6,404,112	22	3,865		6,758,656	
NO. 7	콘크리트 타설	19-45-15	M^3	44.712	-	-	29,549	1,321,194	413	18,466		1,339,660	
NO. 8	인장작업(종방향)		개소	8	10,734	85,872	49,728	397,824	13,620	108,960		592,656	
	인장작업(횡방향)		개소	46	10,734	493,781	49,729	2,287,525	12,552	577,403		3,358,708	
NO. 9	GROUTING		본	1	193,422	193,422	283,002	283,002	7,962	7,962		484,386	
NO.10	몰탈	1 : 3	M^3	0.645	91,775	59,194	81,443	52,530	-	-		111,724	
NO.11	SOLE PLATE 제작 및 설치	650 × 800	개소	2	128,369	256,738	355,283	710,566	1,130	2,260		969,564	
NO.12	에폭시 접착제		kg	80.730	30,000	2,421,900	4,887	394,493				2,816,393	
	BEAM 제작 계					13,161,767		18,932,941		875,913		32,970,620	
NO.13	BEAM 가설 및 전도방지공		본	1	350,053	350,053	407,914	407,914	1,010,349	1,010,349		1,768,316	
NO.14	철 근	SD30	TON	5.850	680,000	3,978,000						3,978,000	
NO.15	레미콘	45MPa	M^3	44.712	89,350	3,995,017						3,995,017	
	재료비 계					7,973,017						7,973,017	
	계					21,484,837		19,340,855		1,886,262		42,711,954	

[함양-울산간 고속도로, 한국도로공사, 2013년]

형 식	경간장별 상부공 ㎡당 직접공사비(원) (2013년 단가 기준)				비 고
	L=20M	L=25M	L=30M	평 균	
일반 PSC-I빔	-	490,000	502,000	496,000	
개량형 PSC-I빔	535,000	550,000	564,000	549,700	
PSC-I 중공슬래브	586,000	597,000	619,000	601,000	
강합성 계열	601,000	696,000	743,000	680,000	

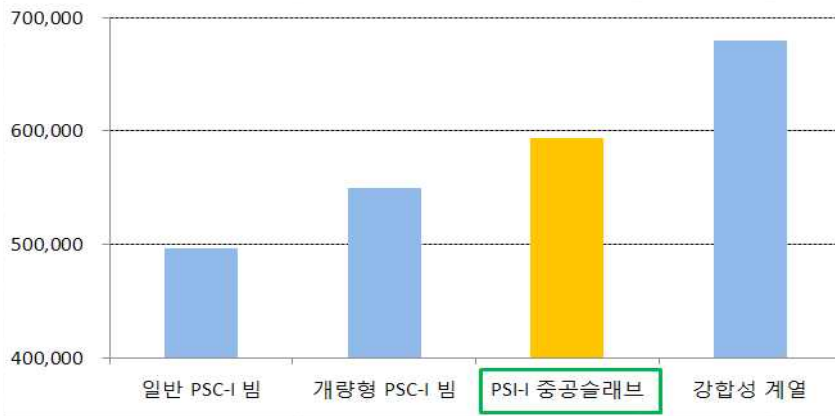


그림 2-36 형식별 공사비 비교

바. 적용성 확대를 위한 일체식 교량화

(1) 일체식 교대 교량 개요

교량산업의 비약적인 발전과 더불어 사회 간접시설물의 운용과 관련된 유지관리가 건설산업에 중요한 결정변수가 됨에 따라 구조물의 생이주기비용을 감안한 설계 및 시공은 사업계획수립과 시행시 중요한 고려항목이 되었다. 국내 기술자들에 의한 교량구조물의 건설이 시작된지 약 50여년이 경과되는 현시점에서 볼 때 기존 시설물의 유지관리 비용은 기하급수적으로 늘어나고 있으며 각종 사회간접 시설물의 공용수명을 감안할 경우 미래의 시점에서 폭발적으로 증가한 유지관리와 관련 시설물의 개축 및 보수에 소요되는 비용은 막대한 예산과 전문인력을 필요로 하게 될 것은 자명한 사실이다.

이에 각 발주처들은 설계 시부터 유지관리 비용의 절감을 필수적으로 검토하고 있다. 특히 기간 시설물중 교량 구조물은 다음과 같은 잉듀로 도로의 기능을 유지함에 결정적 역할을 수행하게 된다.

첫째, 교량구조물은 이를 포함한 교통시스템 체계의 능력을 좌우한다.

둘째, 단위 길이당 건설비용이 고가이다.

셋째, 교량구조물의 붕과나 손상은 전체 도로 교통망의 붕괴를 의미한다.

따라서, 도로 이용자의 안전과 연결도로망의 사용성 확보를 목적으로 한 경우 특수교량을 포함한 장대교량과 마찬가지로 교량 연장 100m 이하의 교량 또한 그 역학은 동일하다고 판단된다.

본 연구에서 개발되는 PCB-SLAB 거더 또한 유지관리를 고려한 교대와의 일체화 공법을 검토, 개발하여 향후 새롭게 형성되거나 변화할 시장에 진입할 수 있도록 그 공법을 개발하였다. 본 절에서는 일체식 교량의 적용성을 검토하고 개발된 공법을 제시 하였다.

(가) 일체식 교대 교량의 적용성 검토

국내 건설교량의 약 90% 이상을 점유하고 있는 100m이하의 교량건설시 유지관리가 용이한 교량 형식의 적극적인 활용은 매우 중요하다. 교량구조물에서 유지관리시 중요한 부분을 차지하고 있는 이동부재(Movable Member) 즉, 신축이음장치(Expansion Joint)와 베어링(Bearing)은 유지관리자에게는 매우 부담스런 존재이나, 일반적인 교량의 경우 구조체의 원활한 구조거동을 위해 필수 요소이다. 교량건설 및 이에 대한 유지관리의 경험이 상대적으로 매우 발달한 선진국가인 미국에서는 이같이 유지관리시 큰 문제를 유발하는 위의 두 가지 구조요소를 배제한 교량 형식이 매우 활발히 사용되고 있으며 이를 광의의 의미로서 무조인트 교량(Jointless Bridge)라 부른다. 그러나, 진정한 의미의 무조인트 교량(예로들면 아치교나 라멘교 등)은 그 적용범위에 한계를 가지게 되므로 이의 적용성을 개선한 일체식 교대교량(Integral Abutment Bridge)이 활발히 사용되고 있다. 국내에서도 일체식 교대 교량이 2000년 12월 준공되어 공용중에 있다. 평촌2교는 국내 최초의 무조인트 교량으로 30m PSC BEAM을 사용한 3경간 교량으로 구조 특성을 보면, 교대 형식으로 난쟁이 교대(Stub Type)를 일렬의 H말뚝으로 지지하는 형식을 사용하고 있다. 또한 상부구조는 교대, 말뚝 그리고 접속슬래브가 일체구조(Monolitic Structure)를 형성하고 있다.



그림 2-37 국내 최초로 건설된 3경간 연속 무조인트 교량(평촌2교)

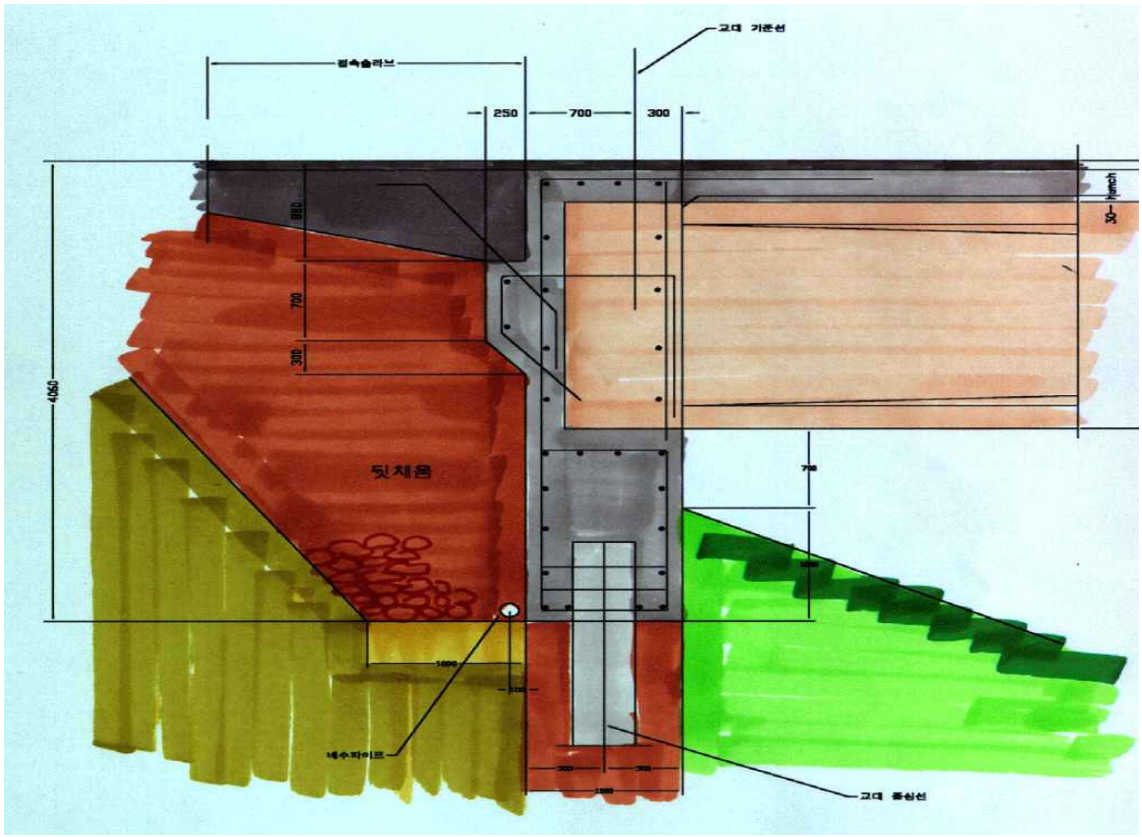


그림 2-38 평촌2교 교대 연결부 설계 개념도



그림 2-38 평촌2교 상부구조와 교대 접합부

위와 같은 교량은 교대에 사용되는 베어링과 신축이음장치를 제거하게 되므로 초기공사비 감소효과 및 향후 공용중 유지관리가 최소화되므로 미국 각 주 도로국(DOT)의 경우 모든 중소형 교량 건설시 그 적용범위에 해당하는 경우 우선 혹은 기본교량으로 사용되고 있다. 40여년간의 시공실적과 유지관리에 대한 성능을 이론과 경험으로 체득한 결과를 통해 적용되고 있지만, 이 형식의 우수성은 매우 폭넓게 인정하여 영국, 호주에서 사용되고 있다. 특히, 영국의 경우 활용방안에 대한 방침을 위해 특별위원회를 구성하여 미국에서의 본 형식 교량의 활용현화에 대한 조사를 다년간에 걸쳐 시행한바 있다. 일본의 경우는 지간길이 28.3m의 형고 1.3m 8개의 Steel Plate Girder를 사용하고 5개의 강관말뚝 기초를 적용한 일체식 교대 교량이 이미 1999년 시공한 예가 있다.

구조거동에 가장 큰 영향을 미치고 있는 변수가 주위 환경조건에 대한 교량의 신축변위량이므로 교량공법 적용 국가의 온도 및 기후조건을 고려하여 국가 특성에 맞게 설계조건을 경정하는 일이 우선적으로 실시되어야 한다. 이에 대한 연구가 국내에서도 다수 실행되었다. 일체식 교대 교량의 경우 콘크리트와 강교량 형식에 구애됨이 없이 적용이 가능하고 실질적으로 강교량의 적용성이 매우 용이하며 미국의 경우에도 강교량 형식이 다수 차지하고 있다.

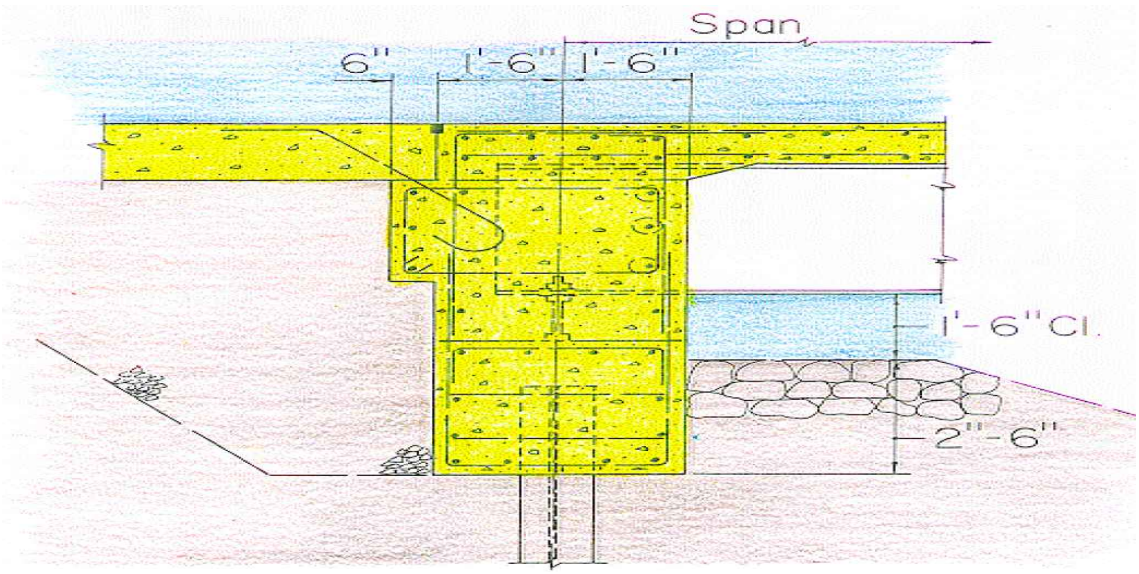


그림 2-39 미 오하이주의 Integral Abutment Bridge 교대 구성도

강판형교의 적용은 기존의 조인트 교량 공법과 다른 몇 부분의 가설 방법을 제외하고는 설계가 용이하고 시공성이 매우 좋다. 특히, 공장제작제품의 현장조립이라는 관점에서 공기와 품질을 고려할 때, 일체화 공법적용으로 얻을수 있는 잇점은 매우 다양하다.

일체식 교대 교량의 경우 그 적용범위에 제약이 존재하여 기존 교량과의 비교시 적용조건을 충족하는 경우에만 사용이 가능하다. 그 적용 제한조건으로 대표적인 사항은

첫째, 일체식 교대 교량은 온도와 같은 외기환경조건에 대한 상부구조의 신축변위가 교대와 파일에 직접 전달되므로 총발생 변위량에 대한 제약이 필요하다. 즉, 교량 총 연장길이에 대한 제한조건이 존재한다. 미국의 경우 각 주마다 규정은 다르지만 콘크리트 교량의 경우에 약 120m, 강교량의 경우는 60m까지 건설을 허용한다.

둘째, 교대는 파일지지조건인 경우에만 공법적용이 가능하며 파일의 최소길이는 4~6m 정도로 규정한다.

셋째, 교량의 사각에 대한 제한조건이 존재하며 약 30도 정도를 그 적용 한계값으로 제시한다.



그림 2-40 Steel Plate Girder 일체식교대 교량

위와 같은 적용제한 조건 외에 국내 실정을 감안할 경우 형하 공간의 활용이 필수적이므로, 적용되는 난쟁이 교대의 특성을 감안할 경우 도로의 계획고가 매우 높은 성토공정을 필요로하여 형하공간의 활용에 제약을 받을 수 있다. 동시에 아직은 보고된바 없으나 교대부에 중요한 손상 혹은 결함이 발생하는 경우 일반교량의 보수공정 작없을 적용할 수 없는 단점을 갖고 있다. 구조적으로 하중분배의 유리함과 내진성능의 우수성은 타교량과 비교시 우수한 장점을 가지고 있으나, 사용되는 말뚝에 발생 가능성 있는 고응력과 정형화된 구조계산법이 존재하지 않아 구조 이론적으로 실 거동을 정확히 산정하기 매우 어려운 여러 가지 문제도 갖고 있다.

최근 10여년간 이런 구조상의 문제점은 여러 연구결과에 따라 구조계산 방법이 제시되었고 국내에서도 연구가 진행되어 왔다. 또한 실교량의 계측을 통한 성능검증이 시행되고 있다. 지금 까지의 연구를 바탕으로한 일체식 교대 교량의 구조해석 방법으로 각부재를 이상화한 뼈대 구조물의 해석결과를 적용하여 설계하는 방법으로 충분한 구조안정성을 보장할 수 있는 것으로 증명되었다. 한편, 구조해석 모델에 작용하는 온도변화로 교대 배면에 작용하는 토압하중의 크기 및 분포에 대한 합리적 적용과 국내 각 지역에 대한 실제적인 외기온도 변화폭에 대한 연구가 필수적으로 이루어 져야 한다.

(나) 반일체식 교대 교량의 적용성 검토

일체식 교대 교량의 장점을 이용하고 단점을 보완하기 위하여 적용되는 교량형식으로 구조개념은 일부분 유사하지만 실제 완전히 다른 교량형식이라 할 수 있다. 우선적으로 교량에 사용되는 이동조인트(Movable Joint)의 경우 그 숫자가 오히려 증가하고 있다. 일체식 교대 교량의 경우 교대와 상부구조 연결부에 설치되는 신축이음장치를 배제하고 이를 접속슬래브와 도로연결부 사이에 설치하고 있으나 반일체식 교대 교량읙 uddn ryeo 교좌부에 일종의 신축이음장치를 도입하고 있다. 그러나, 이와 같은 구조적 형상을 취하므로서 일반교량에서 요구되는 유지관리의 필요성을 매우 감소시키고 있다.

구조적으로는 교대와 이를 지지하는 말뚝에 대해 상부구조의 온도신축 변위로 발생하는 수평과 회전변위를 허용하는 구조를 일체식 교대교량 이라고 한다면 반일체식 교대 교량의 경우는 수평변위만을 허용한다고 간략하게 그 특성을 구분할 수 있다.

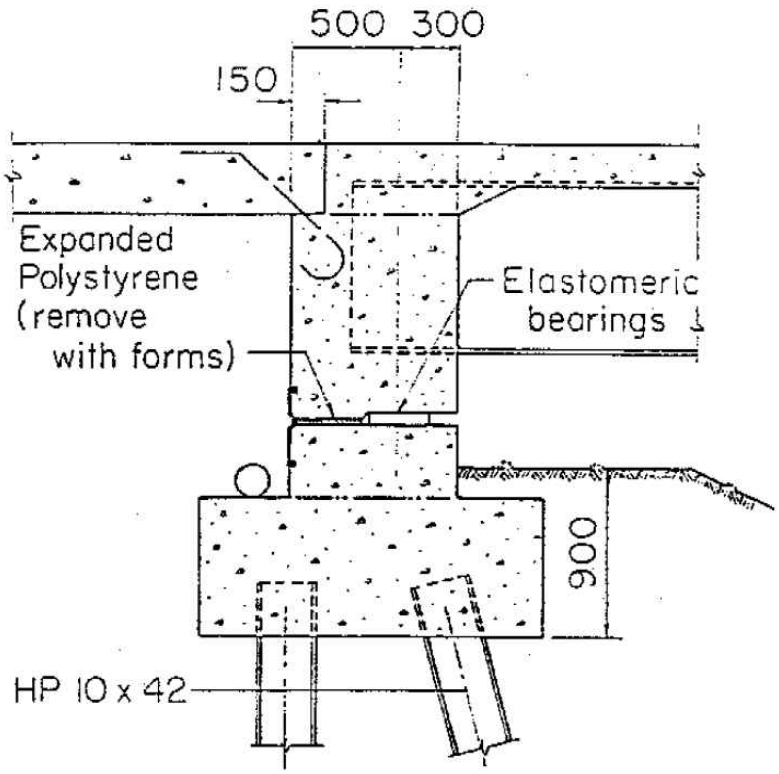


그림 2-41 Semi-Integral Bridge 교대 구성도

상부구조에 작용하는 교대 변위에 따른 토압과의 상호작용과 교좌부에 위치하는 조인트 접합부에 대한 차수목적 시스템의 추가 적용 및 특수목적을 가진 각 구성요소들은 일반교량과는 다른 목적을 가지므로 매우 세심한 설계개념을 요구한다. 또한, 구조적으로 필히 검토되어야 할 각 방향의 변위에 대한 상세검토가 추가적으로 요구된다. 이것은 교축방향에 대한 종방향, 횡방향 그리고 회전에 대한 제어조건을 말한다. 이런 변위와 구조물의 상관관계에 대해 충분한 경험과 합리적 예측이 불가능한 경우 반일체식 교대 교량의 적용은 많은 문제점을 유발할 수 있다.

먼저, 상부구조에 발생하는 종방향 변위는 탄성고무받침으로 교대 구조물과 분리되어 있으므로 일체식 교대 교량에서 필수적인 난쟁이 교대 형식의 적용 제한조건에서 벗어나 확대기초를 포함한 다양한 형식의 교대 형식과 혼용이 가능하게 되나, 기본적으로 일체식 교대 교량과 마찬가지로 종방향 변위에 대해 뒷채움재의 토압, 접속슬래브와 보조기층과의 마찰력, 날개벽과 뒷채움재의 마찰저항이 주된 제어조건이 된다. 추가적으로 탄성고무받침의 전단변형이 제어조건으로 요구된다. 종방향 변위에 대한 구속정도는 합리적 구조계산에 의해 결정될 수 있지만 날개벽 형상의 변화, 다경간 교량을 계획할 경우 적절한 강성을 가진 교각과의 연결을 통해 적정한 변위 분산이 가능하다.

두 번째로, 반일체식 교대 교량의 경우 상부구조와 연결된 가로벽체의 이동을 허용하게 되므로 교대의 교좌부에는 교대높이 방향으로의 이동 조인트가 필요하다.

따라서, 종방향 변위를 유도할 수 있는 수직방향의 제어 베어링(Guide Bearing)이 필요하게된다.

마지막으로, 상부구조의 신축변위로 발생하는 토압은 항상 작용면에 수직으로 작용하게 되므로 교량이 사각을 가지게 되는 경우 수직분력에 의한 상부구조 전체를 회전시키는 우력이 발생하게 된다. 그러므로 교량의 사각이 증대 되는 경우에 대한 검토와 대비가 필요하다. 이상의 주요변위 외에도 각 교량의 부속구조물 즉, 연석이나 중앙분리대, 난간등도 변위에 대하여 합리적 거동을 할 수 있는 상세설계에 대해 많은 검토가 필요하다.

이것은 반일체식 교대 교량의 구조 역학적 거동에 대한 주의사항들이며, 이러한 검토가 완료된 후에는 상세설계가 필요하게 된다.

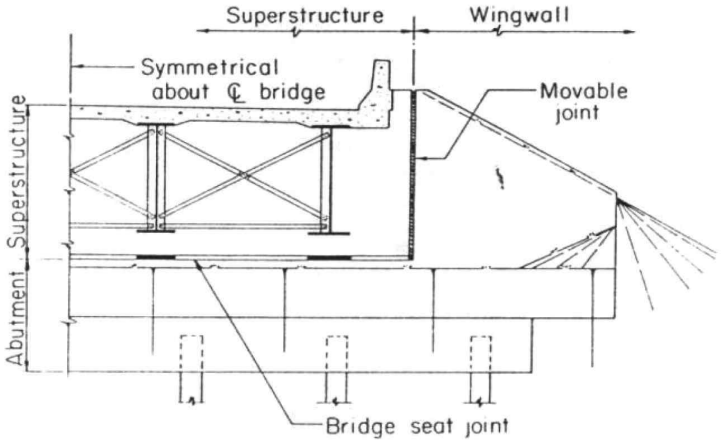


그림 2-42 교대 높이방향의 이동조인트

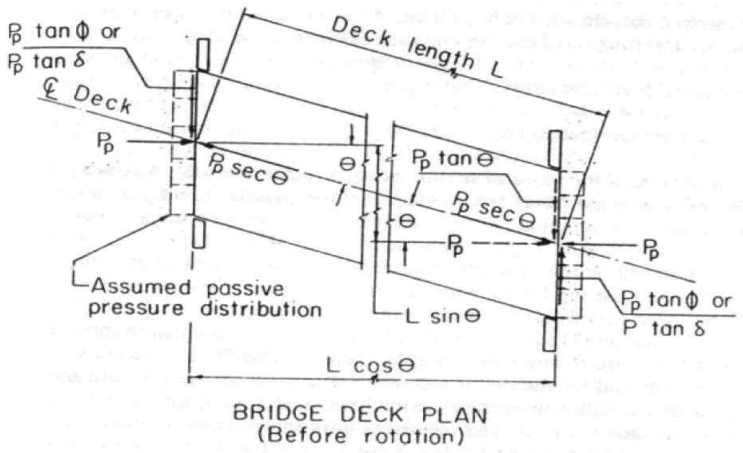


그림 2-43 (반)일체식 교량의 사각에 대한 영향

상세설계의 핵심은 3가지 정도로 분류가 가능하다. 두가지는 이동조인트(Movable Joint)와 관련한 사항으로 교좌 연결조인트(Bridge Seat Joint), Cyclic Control Joint로 구분이 가능하고 나머지는 교대 뒷채움 관련 상세설계를 의미한다. 교좌 연결조인트로는 부식에 대해 매우 강한 내구성을 가진 탄성고무받침이 주로 적용되고 있으며, 구조적으로 상부구조의 발생변위를 교대 기초와 분리시키는 역할을 수행한다. 또한, 탄성고무 재질의 내구성이 매우 뛰어난 Seal재를 필요로 하게 된다. 뒷채움재의 침투를 막기 위한 수단과 방수의 역할을 수행하며 구조적으로 바람직하다.

교대기초와 상부구조에 발생 가능한 부등변위를 함께 수용할 수 있는 방안의 채택이 필요하며 이는 유지보수를 최소화하는 가장 손쉬운 방법이다. 다양한 방법이 현재 적용되어 성능시험 중이며 사용재료와 접합 방법과 관련한 기술들이 포함되어 있다. 일체식 교대 교량과 동일하게 종방향 변위는 접속슬래브 끝단에 설치되는 일종의 조인트를 필요로 하게 된다. 현재 미국의 경우에는 일체식 혹은 반일체식 교대 교량에 대하여 접속슬래브 사용을 권장하고 있으며 Cyclic Control Joint의 경우 매우 다양한 형식이 존재하고 있다.



그림 2-44 반일체식 교대 교량의 시공사례

뒷채움재의 경우 반일체식 교대 교량의 경우 구조물을 형성하는 합성구조재로 취급하여 거동을 파악하는 것이 바람직하므로, 뒷채움재의 성능 유지를 위해 접속슬래브의 사용은 필수적이고, 뒷채움재의 성능을 일관되게 유지하기 위한 인접 도로부의 배수시설과 뒷채움재 상면에 존재하는 도로연석을 포함한 배수장치에 각별한 주의가 요구된다. 또한, 뒷채움재의 배수를 보장하기 위한 다양한 장치 적용과 뒷채움재의 형상과 사용재료의 결정에도 주의 하여야 한다.

(2) 기술개발 동기 및 구성요소

(가) 기술개발 동기

일반교량(Joint Bridge)은 온도 및 습도 등 외부환경 변화에 의한 상부구조 신축을 처리하기 위해 신축이음장치와 교량받침의 기계적 구조요소를 필수적으로 사용하게 된다. 이와 같은 기계적 요소는 공용 중 활하중 또는 2차 하중의 영향으로 파손되어 교량 내구성 저하 및 유지관리 측면에서 심각한 문제로 지적되고 있다. 이를 개선하고자 1930년대 이후 미국, 캐나다 등을 중심으로 신축이음장치와 교량받침을 설치하지 않는 교량형식을 꾸준하게 적용하고 있다. 일체식을 포함하는 무조인트 교량형식은 장기 외부환경 변화에 대응한 유지관리 비용을 최소화하기 위한 목적으로 교량 상부구조 건설시 이동장치를 설치하지 않는 교량을 총칭한다.

일체식교대 교량(Integral Abutment Bridge)은 무조인트 교량의 한 형식으로 신축이음장치를 설치하지 않는 부분에서 무조인트 교량과 유사한 개념을 갖지만 아래 그림과 같이 상부구조와 낮은 높이의 교대(소교대 또는 상부구조와 벽체교대)를 일체 시공하여 상부구조의 온도신축으로 발생하는 수평 또는 회전변위를 손쉽게 수용하는 구조 개념을 도입한 형식을 의미한다.

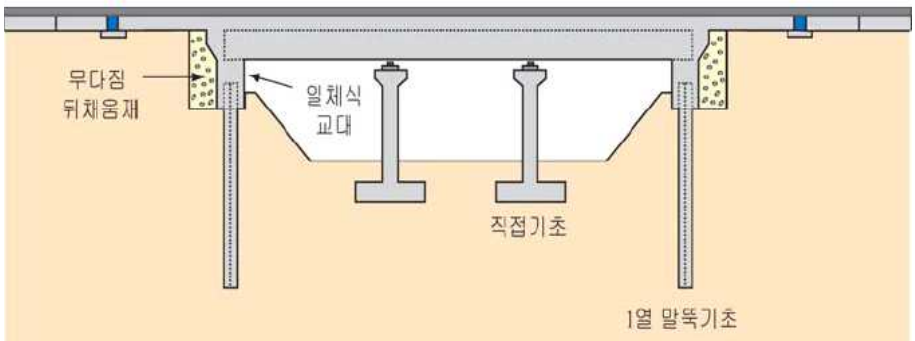


그림 2-45 일체식 교대 교량의 개념도

본 연구의 최종 결과물이 되는 PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브교의 경우 일체식 교대 개념을 도입하는 경우 공사비 절감 및 추가의 형하고 확보가 가능하여 그 적용성이 증대될 것으로 기대된다.

(나) 일체식 교량의 구성요소

아래 그림은 일체식 교량의 구성요소를 보여주는 개념도로써 상부구조와 일렬의 말뚝으로 지지되는 교대가 일체로 시공된 단경간 또는 다경간 교량을 보여준다.

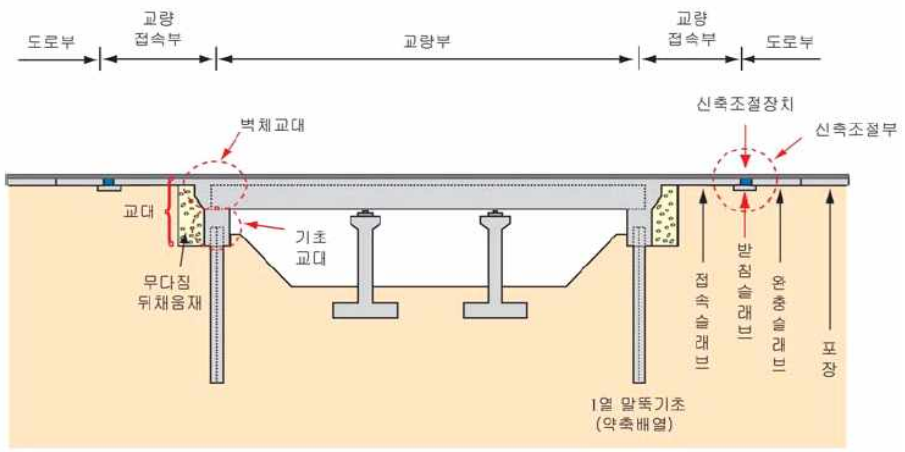


그림 2-45 일체식 교대 교량 주요 명칭

기본 개념상 교대부는 시공단계에 따라 기초교대와 벽체교대로 구분한다. 일반적으로 교량은 외기 온도변화에 따른 신축변위와 거더 단부 회전에 대해 유연성을 보유할 수 있도록 일렬 말뚝으로 지지되며, 일체식 교량의 주요 구성요소는 아래그림과 같다.

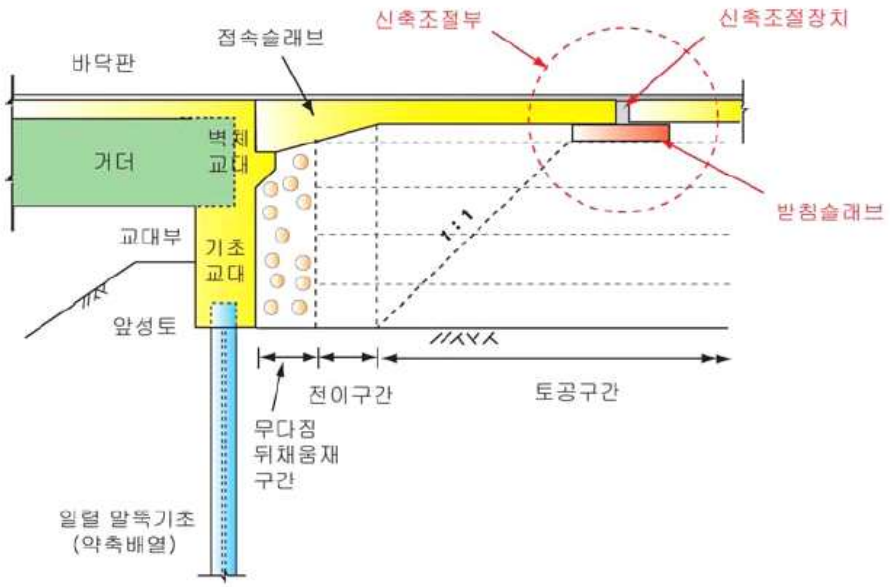


그림 2-46 일체식 교대 교량의 주요 구성요소

(다) 일체식 교량의 특성

일체식 교량의 경우 국외 시공사례 분석 및 국내 실용화연구의 일환으로 한국도로공사에서 “대전~통영간 고속도로 건설공사”에 2001년 국내 최초로 기술을 도입하여 3경간 90m PSC beam 교량을 건설하였다. 이 후 완공 교량의 공용 중 계측과 결과 분석을 통해 설계 및 시공에 대한 지속적인 설계 및 시공기준을 수립하고 이에 대한 검증 및 확인 작업이 진행되고 있다. 최근 생애주기비용(LCC)을 포함한 건설이 강조되면서 본 형식의 교량에 대한 기술개발과 적용이 활발히 진행 중이다.

일체식 교량의 가장 중요한 특성은 교량의 상부구조가 교대와 일체로 시공되는 점으로써 종래 계절적인 온도 변화로 발생하는 상부구조의 신축변위를 처리하기 위하여 사용되는 받침을 제거하고 신축조절장치가 일반교량과 다르게 교량 구조물의 교대 상부에 위치하지 않고 도로부의 접속슬래브 끝단에서 간단한 형식으로 존재하게된다. 일체식 교량으로 시공됨에 따라 얻어지는 가장 큰 장점은 공용 중 교량의 유지관리의 최대 문제점인 상부구조의 신축이음장치와 교량받침을 배제함으로 이로 유발되는 손상을 사전에 배제하여 구조물의 공용수명을 최대한 보장할 수 있다.

(3) PCB-SLAB 교량의 일체식 교량화

(가) 개요 및 필요성

상기와 같은 장점을 보유한 일체식 교량 개념을 본 연구의 최종목표인 PSC-I 거더를 이용한 중공 슬래브교량 형식에 접목을 시킬 경우, 다양한 측면에서 향후 공법 적용성이 증대 될 것으로 판단된다. 거더를 상부구조로 사용하는 일반교량 의 경우 아래 그림과 같이 필수적으로 받침과 신축이음장치의 적용은 필수적이다.

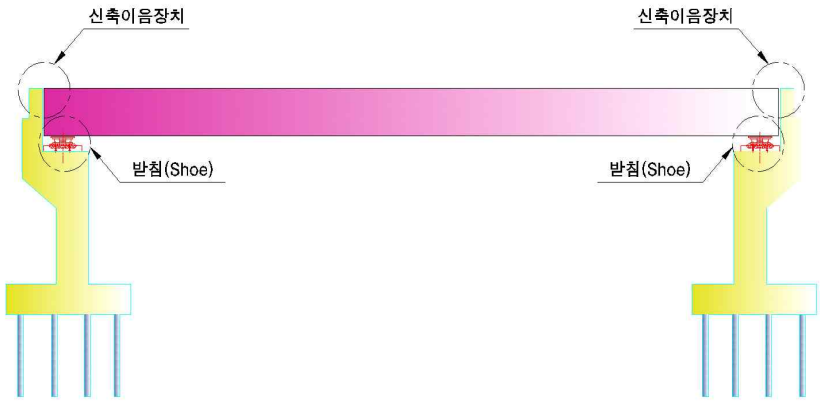


그림 2-47 받침 및 신축이음 장치가 적용되는 일반교량

본 연구 결과물인 PSC-I 거더를 이용한 중공 슬래브교에 일체식 교량을 적용할 경우 위와 같은 일반 교량에서 필수요소인 신축이음장치 및 받침이 불필요하게 되어 직접공사비의 절감효과 및 형고 저감효과(추가 형하고 확보)를 기대할 수 있게 된다.



그림 2-48 신축이음 및 받침이 배제된 일체화 교대 교량

또한, 유지관리시 교량의 사용수명을 단축시키는 상부구조의 신축이음장치와 교좌장치를 제거함으로써 일반교량과 비교시 공용수명을 연장할 수 있어 기존 중공슬래브교의 장점을 더욱 향상시킨 PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브교는 유지관리의 편리성에서도 그 우위를 점할 수 있을 것이다.

(나) 일체화 방법

① 단지점부 확폭을 통한 교대부 형성 공법

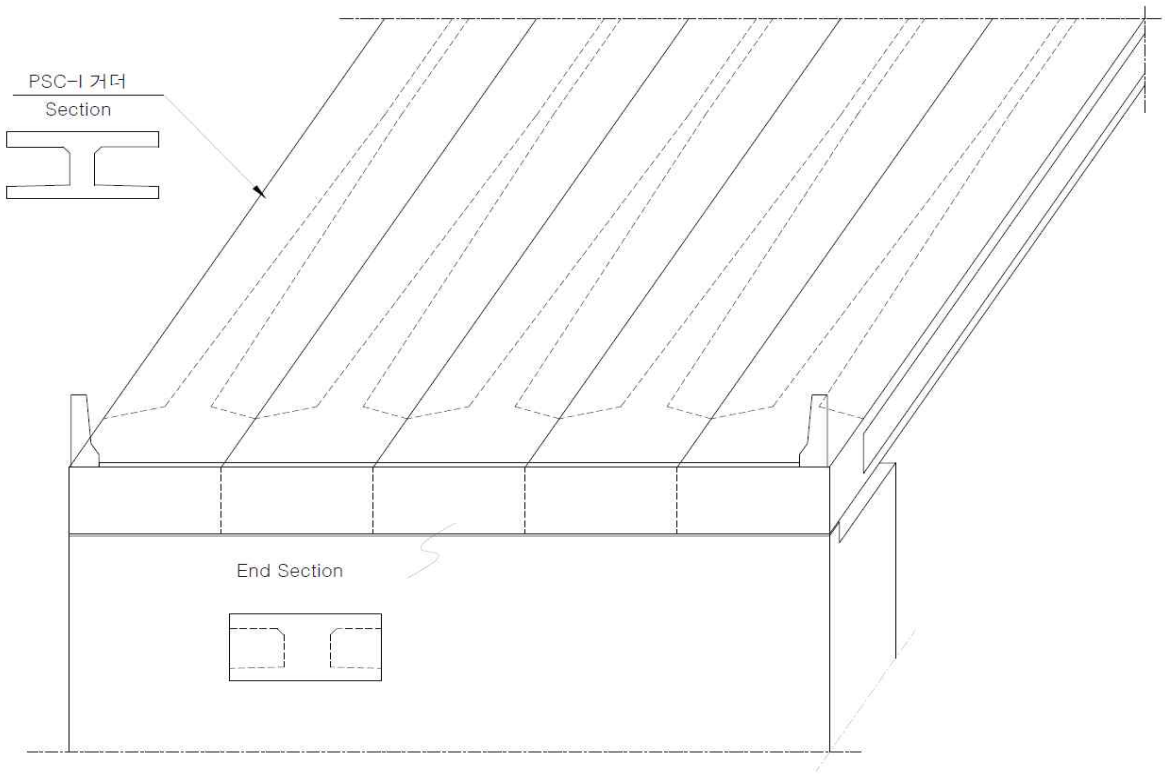


그림 2-49 반일체식 교량 교대부 형성 개념도

PCB-SLAB 공법은 블록으로 프리캐스트 제작된 거더를 거치하여 횡방향 연결을 통해 중공슬래브교를 형성하는 공법이다. 거더단면은 일반부의 경우 PSC-I거더에서 상하부의 플랜지를 확장하여 다른 블록의 거더와 연결되어 바닥판슬래브가 불필요하다. 확폭된 플랜지 부분은 또한 단지점부에는 정방형의 블록을 형성하게 된다.

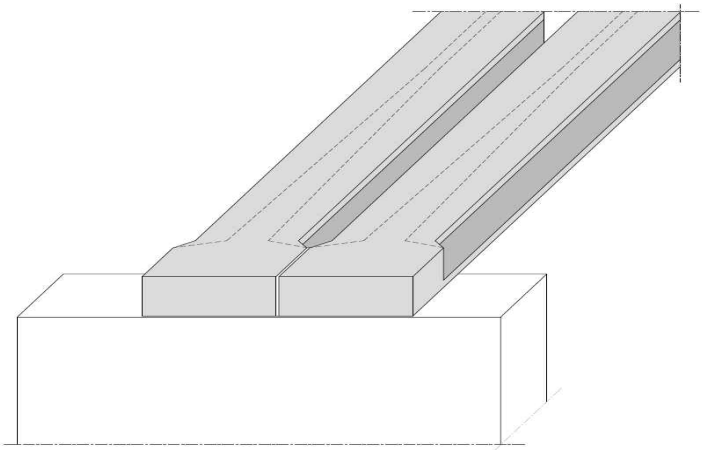


그림 2-50 거더간 연결 상세

거더간 연결을 위한 현장타설부분의 공간을 일반부에 두게 되지만 단지점부는 횡방향 텐던을 통해 일체화 시키게 되므로 일반부보다 폭이 넓게 제작할 필요가 있다. 따라서, 거더단부 자체가 반일체식 교대 교량의 흉벽역할을 하게되어 뒷채움재를 막기 위한 별도의 구조재가 필요 없다.

반일체식 교대 교량에서 교좌장치가 설치되는 공간인 거더와 교좌면 사이의 높이 약 400mm는 뒷채움재의 유실방지와 차수를 목적으로 차수패널이나 방수쉬트(Neoprene Sheet)를 부착하거나 거더부를 하단으로 확장시키는 방법들이 일반적으로 이용된다.

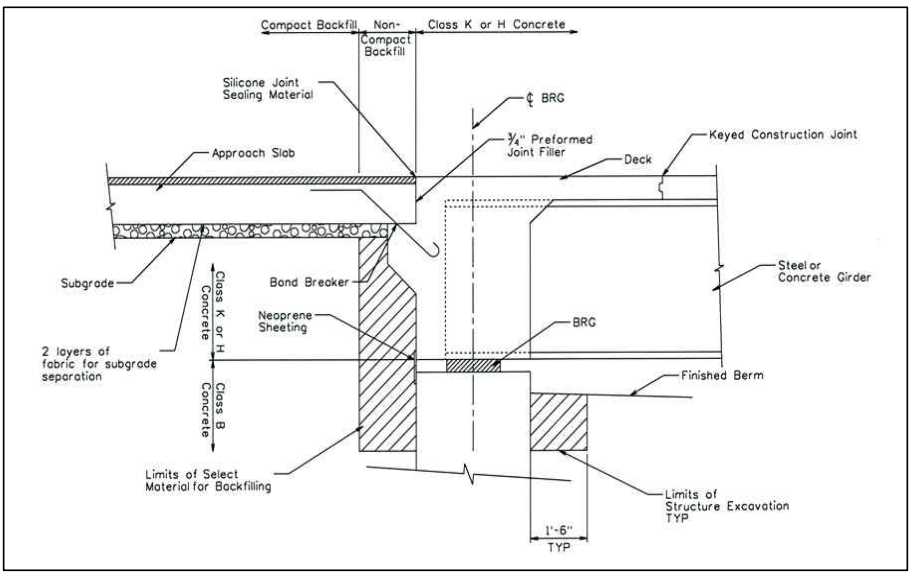


그림 2-51 방수쉬트를 이용한 방법(Virginia Division of Highways)

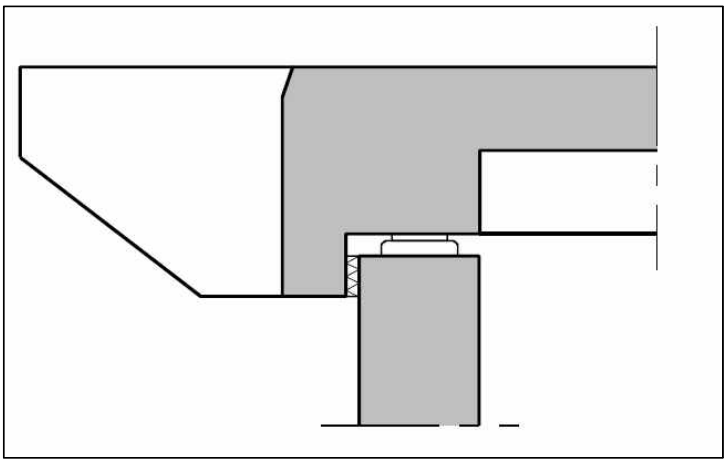
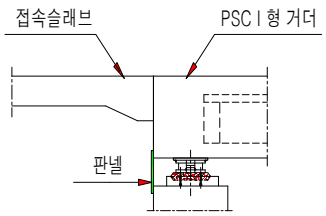
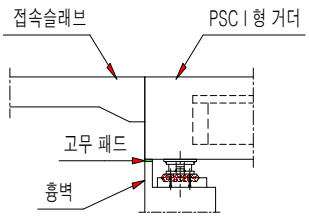
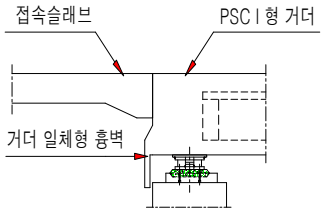


그림 2-52 거더 단부를 확장한 법(Norwegian Method)

본 공법의 경우 적용할 수 있는 뒷채움 재료의 유실방지 방법을 검토해보면 표와 같이 3가지로 요약할 수 있고, 제작이나 시공편의를 고려하여 어떤 방법이든 선택할 수 있다.

표 2-22 뒷채움재 유실방지 장치 비교

구분	개요도	특징
판넬식		- 교대 시공후 거더를 거치하고 거더와 교대 단차 부분을 판넬을 이용하여 마감하는 방식으로 시공성 우수 - 판넬이 상부거더의 변위를 허용하며 토압에 저항 할 수 있는 재료 선택 필요
교대 일체형 흉벽		- 교대에 상부와의 단차를 막아주는 흉벽을 설치하고 거더와의 연결부에 고무패드를 설치하여 상부거더의 변위를 허용하고 토사를 막아주는 방식 - 거더와 흉벽 연결부의 고무패드가 상부거더의 지속적인 신축에 의하여 손상발생 우려
거더 일체형 흉벽		- 거더 일체형 흉벽을 설치하여 토사를 막아줌과 동시에 흉벽은 교대와 상부의 허용변위 이상 이격이 되어 상부거더의 원활한 신축 허용

② L형 흉벽을 이용한 반일체식 교대 교량화 공법

PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량은 거더의 단지점부(교대부) 단부가로보가 없어 횡방향 텐던에 의한 단순연결로 반일체식 교량이 형성된다. 그러나, 조립식 프리캐스트 거더의 경우 교축방향의 규모를 고려할때 매치캐스팅이 사실상 어렵고, 제작오차로 인해 현장시공이 어렵다. 또한 에폭시를 이용한 단순 접합은 일체화된 구조거동을 보장하기 어렵다. 따라서, 거더 상부 플랜지 부분에 일정부분 현장타설하여 거더간 횡방향 일체화를 시키는 방법이 불가피하다. 이때, 단지점부는 거더와 거더사이를 일반적으로 가로보 연결하나, 반일체식 교대 형성을 위해 프리캐스트 L형 흉벽을 사전에 거치한 후 PCB-SLAB를 거치하고 현장타설하여 연결하는 방법을 본 연구에서 제안하였다.

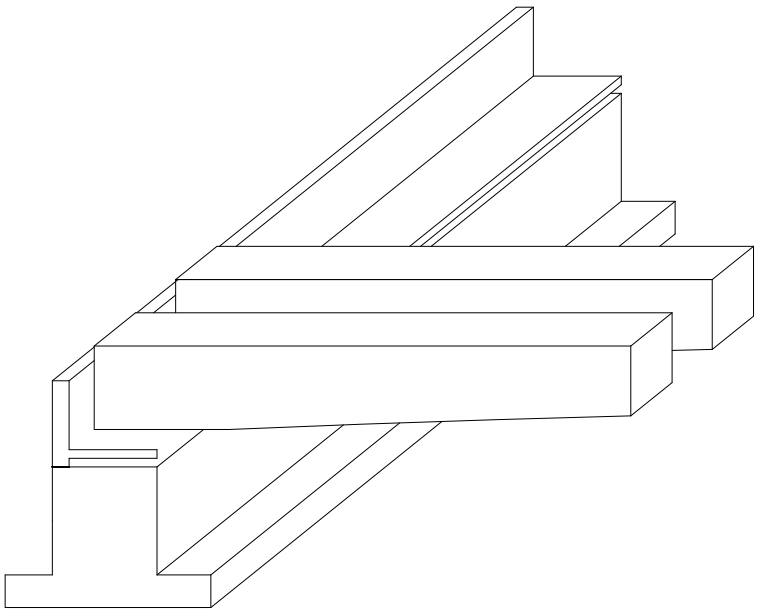


그림 2-53 L형 프리캐스트 흉벽 적용 개념도

프리캐스트 L형 흉벽을 이용한 반일체식 교량화 공법은 본 연구에서 개발된 PCB-SLAB 교량 뿐만 아니라, 기존에 시공되고 있는 PSC 거더나, 합성형 거더를 포함하여 범용으로 적용할 수 있도록 고안되었으며, 특허출원(출원번호 10-2014-0060480) 하였다.

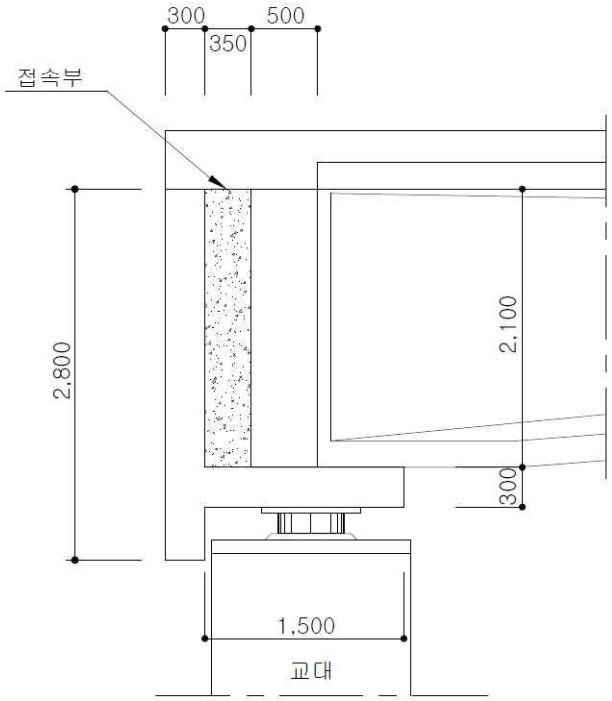


그림 2-54 PSC 거더에 적용한 프리캐스트 L형 흉벽 예시도

거더와 흉벽의 연결안은 당초 비부착이나 에폭시를 이용하는 방법을 검토하였다. 그 외의 공간은 일체화 교대 형성을 위해 전단연결재를 배치하고 현장 타설 안으로 고려하였다.



그림 2-55 연결부 비부착 또는 에폭시 접합 개념도

이 개념을 바탕으로 접속슬래브 연결부를 포함한 상세 부분에 대한 검토를 수행하였다. 1안의 경우 L형 흉벽의 높이를 접속슬래브 하단까지 설치하고 거더와 접속슬래브 바로 연결하는 방법으로, 중공슬래브 특징상 L형프리캐스트 흉벽과 접합면이 발생하지 않아 두 구조체의 일체화로 보기 어렵다. 또한, L형 흉벽의 필요성 문제가 제기된다. 교좌높이 400mm를 막는 구조체로 L형 흉벽을 설치하기에는 과도한 계획이며, 하천교량 적용시 저판 두께만큼 불리하게 된다.

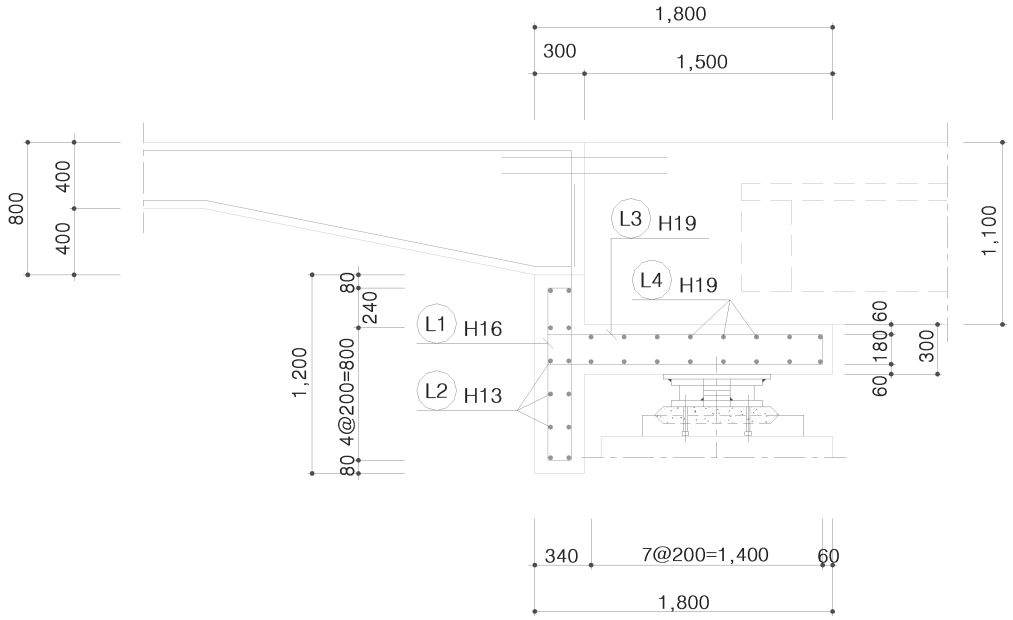


그림 2-56 접속슬래브 및 L형 흉벽 연결상세 1안

2안의 경우에는, L형 흉벽의 높이를 거더 높이까지 설치하고 흉벽과 거더의 이격 부분을 이용하여 흉벽, 거더 및 접속슬래브 연결하는 방법으로, L형 흉벽과 이격을 시켜 일체화 시키며, 저판을 제외한 흉벽만 연결되어 일체화로 보기 어려운 점이 있다. 교좌높이 400mm를 막는 구조체로 L형 흉벽을 설치하기에는 과한 측면이 있고 하천교량 적용시 저판 두께만큼 불리하게 된다.

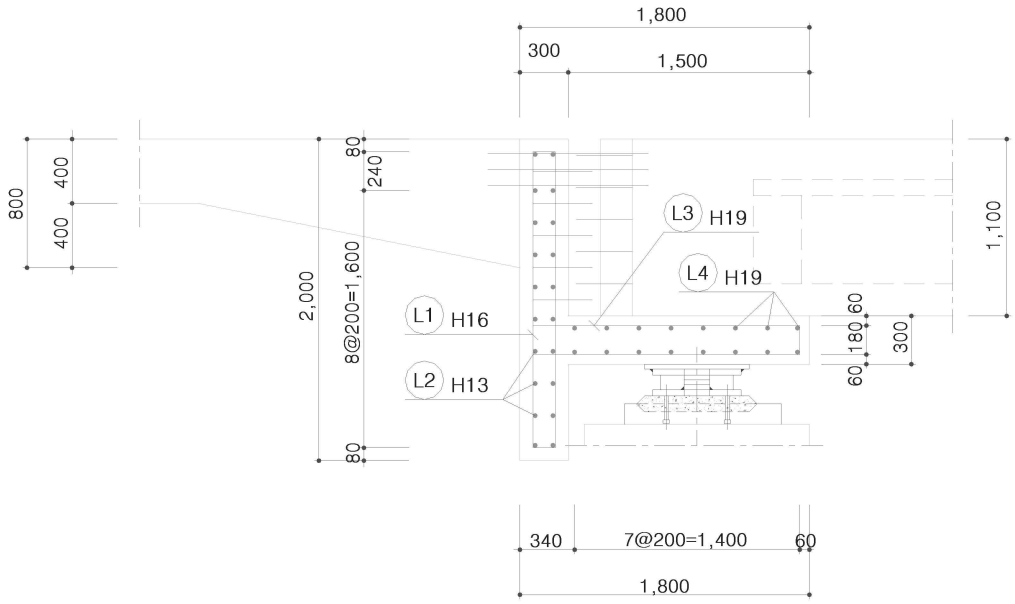


그림 2-57 접속슬래브 및 L형 흉벽 연결상세 2안

3안의 경우에는, L형 흉벽의 높이를 거더 높이까지 설치하고 흉벽과 거더를 이격시킨 후 그 부분을 이용하여 흉벽, 거더 및 접속슬래브를 연결하는 방법으로, L형 흉벽과 이격시켜 일체화 시킨다. 저판과 거더를 연결하는 강봉을 도입해 두 구조체를 일체화 시켰다.

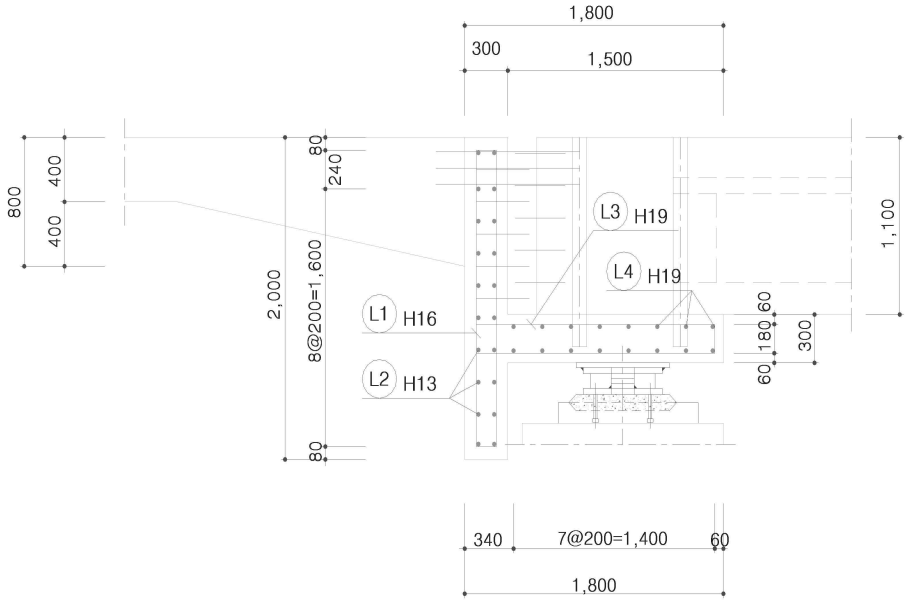


그림 2-58 접속슬래브 및 L형 흉벽 연결상세 3안

그러나, 콘크리트가 맞닿은 면은 차량활하중에 의해 미소한 균열이 교량의 전체 거동에 영향을 미칠정도로 확대될 수 있고, 침투수로 인한 내구성에 문제를 유발할 수 있다. 강봉을 이용하여 두 구조체를 접합시키더라도 여전히 이 문제는 상존하므로, 일체식 교대 교량에 일반적으로 사용되는 Rubber Joint Filler를 이용하되 직접적인 전단에도 저항할 수 있도록 전단연결 철근을 배치하였다.

L형 흉벽에서 거더와 연결되는 부분의 전단연결 철근배치를 위해 거더 제작시 흉벽 슬래브 하단에 10cm x 10cm의 홈을 두어 연결하는 방안과 거더에 홈을 두어 흉벽 슬래브로부터 사전 매입된 전단연결재와 일체화 시키는 방법, 그리고 거더와 흉벽 슬래브 모두에 홈을두고 2단으로 전단연결재를 배치하는 방법을 검토하였다. 세가지 안을 검토한 결과 거더 제작 및 L형 흉벽 제작시의 문제점과 시공단계중 거더 거치시에 정확도를 확보하는 방법을 고려하여 거더에 홈을 두는 방법이 합리적인 것으로 평가 되었다.

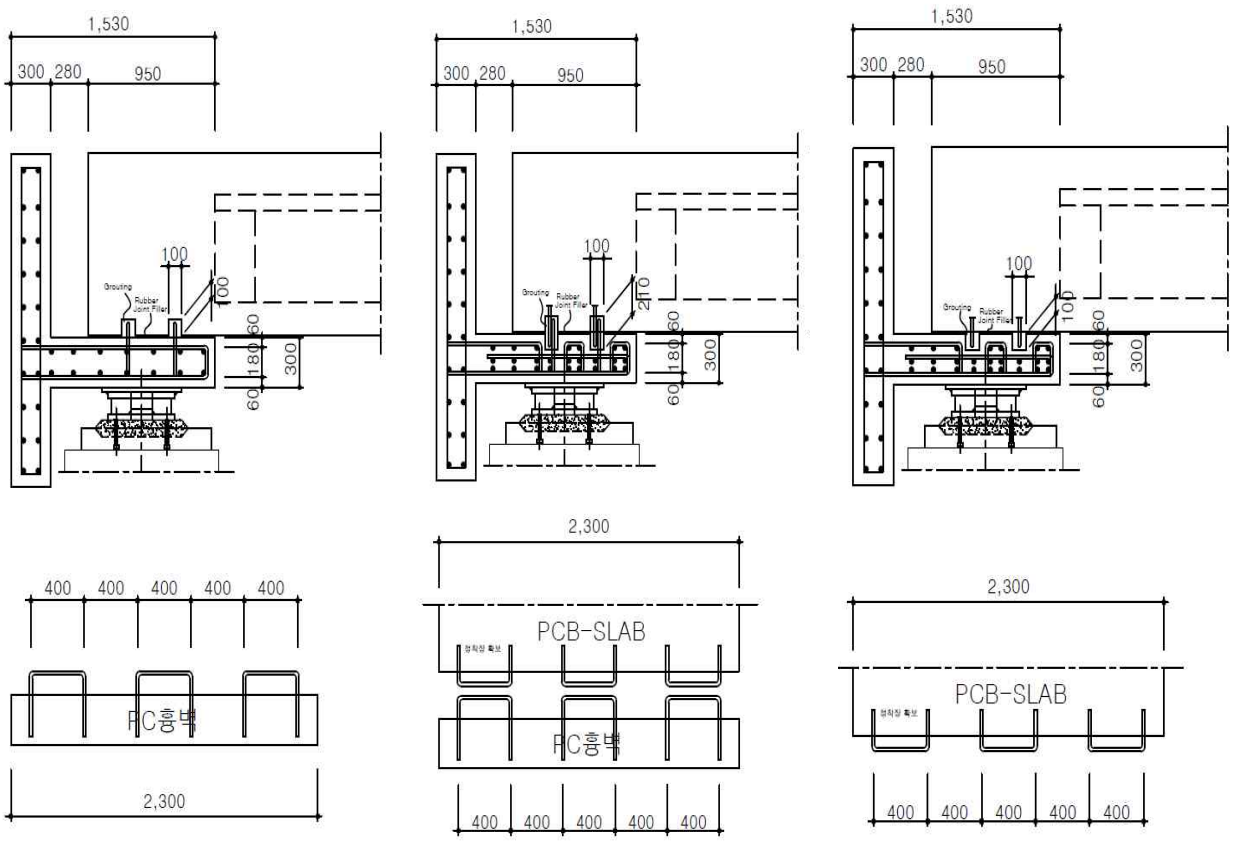


그림 2-59 L형 흉벽 슬래브 연결 상세 검토안

(나) 일체화관련 실험 항목 선정 검토

기술개발 추진 중인 PSC I 거더를 이용한 중공슬래브 교량은 주로 그 적용대상이 연장 30m이내 (실제적으로 25m이내) 단경간 교량으로 한정되므로 일체식으로 인한 아래와 같은 이점이 존재한다.

- 받침높이를 배제하는 형하공간 확보의 이점
- 시공 편의성 제공
- 슬래브 교량 형식이므로 강성부족으로 교량 사용성(진동, 처짐) 부족 해결
- 내진 성능 증대
- 하천교량의 경우 제방 훼손 최소화 및 최소규모 교대 구현 가능

그러므로 향후 기술보급과 적용성을 증대하기 위하여 일체식 교량으로의 확대 적용을 위한 기술개발 필요하며 실험연구는 일체식 교량의 범용적 기술부분과 연구진 개발 교량에 적용이 필요한 필요기술개발로 나누어 필요한 실험을 대 분류 할 수 있다.

① 일체식 교량의 범용기술 부분

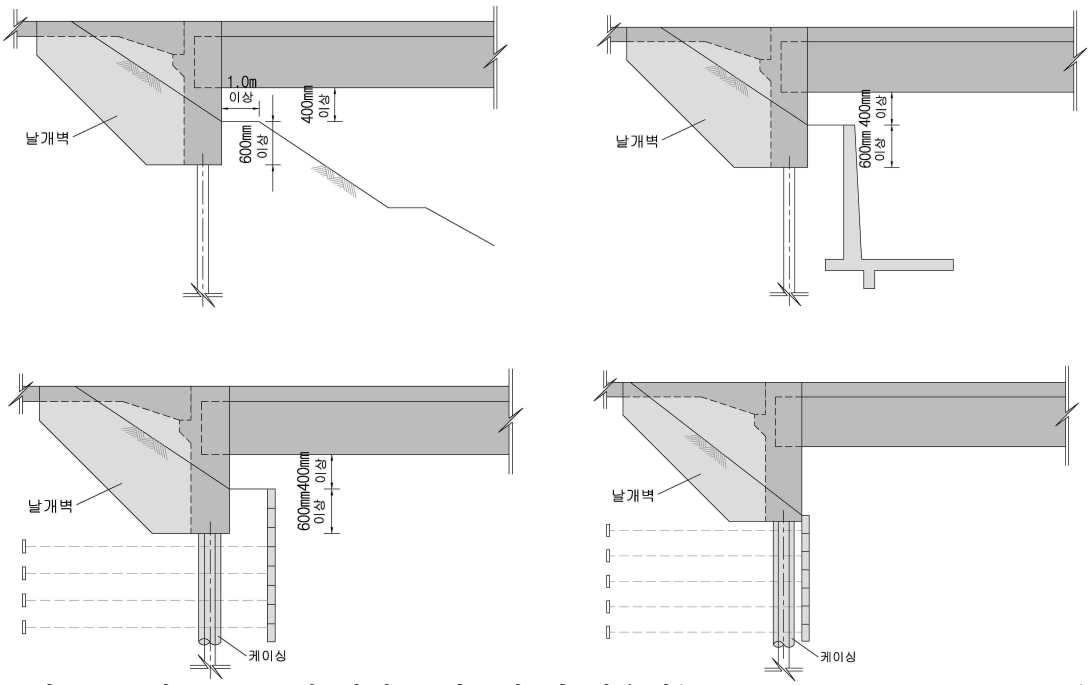


그림 2-60 한국도로공사 앞성토 기준안 및 허용예(Full Integral Abutment Bridge)

□ 개선점

국내의 경우, 특히 미국과 다르게 앞성토로 인한 교량하부 여유공간 확보가 어려운 경우가 다수 존재하고, 형하 공간 활용이 절대적으로 필요한 경우가 있음. 위의 그림과 같이 한국도로공사의 경우, 합리적인 구조 검토 후 적절한 보완을 실시하는 경우 앞성토에 대한 특별한 제한을 두고 있지는 않으나 기술적으로 이에 대한 최소 검증이 필요함. 또한 견고한 지반이 교대기초 저면 근접하여 존재하는 경우, H 말뚝의 최소 근입(5-6m)을 위한 인위적 방안에 대한 기술기준 필요.

□ 접근방안

아래 그림과 같이 다양한 H파일의 설치와 인접지반을 인공적으로 구성하는 경우에 대한 합리적인 설계 및 시공방안 수립을 위한 기술검증 수행(안).

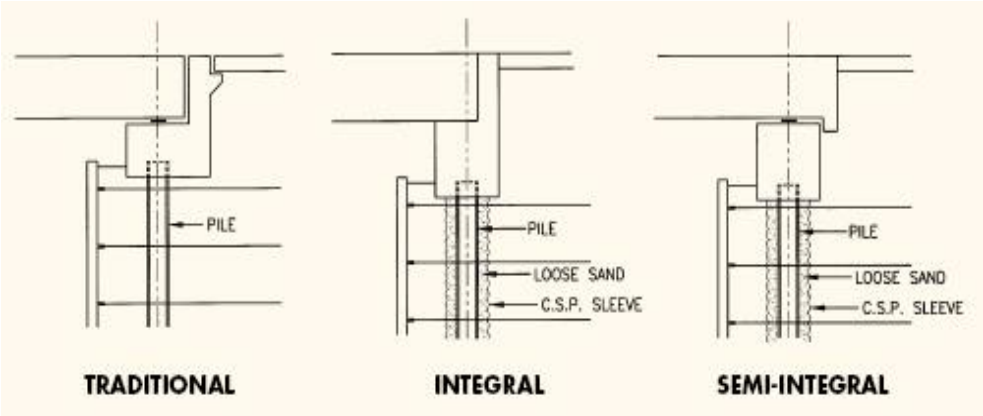




그림 2-61 False Abutment in Full & Semi-Integral(가칭 ‘헛교대’)

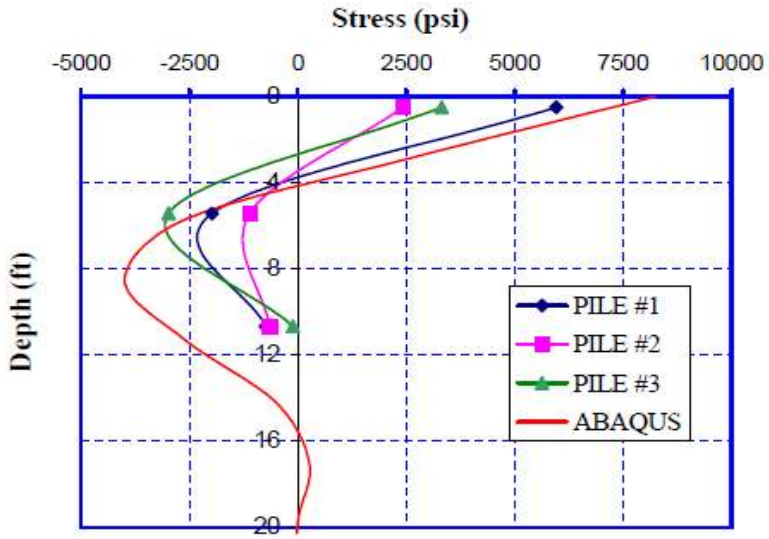


그림 2-62 CSP (Corrugated Steel Pipe or Steel Casing) with H-pile & 수치해석예

□ 실험수행 방안 검토

- 1안 : 상부구조 온도신축 변위에 따른 말뚝 휨거동시 교대 하단 말뚝과 인접지반과의 상호 영향 파악

- 2안 : CSP 혹은 Casing 적용시 사용 H-pile과 1안에서의 영향을 고려한 적정 크기의 CSP의 선정 방안

- 3안 : CSP 혹은 Casing 내부의 채움재의 종류 및 채움 깊이 (시공, 재료 고려)

② 직접 연관 기술 개발 부분

□ 개선점

본 연구진이 개발 중인 “PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브” 의 경우 결정된 거더 형상을 이용하게 되는 경우, 상부구조 단부가 격벽을 이루면서 폐합된 형상을 가지게 됨. 전술한 바와 같이 최근 기술추세 및 적용성 확대를 위하여 일체식 교량 형식에 대한 검토가 필요함.

□ 접근방안

상부 구조 단부가 폐합되므로 일반 거더의 일체식화시 적용되는 단부격벽 현장타설이 없으므로 현 상태에서는 Full integral 형식보다는 Semi에 대한 기술개발이 유리하다고 판단됨. 즉, 아래 그림과 같이 일반 거더 형식의 경우 기초교대 상부에 거더를 거치한 후 바닥판과 벽체교대 콘크리트를 동시 타설하여 일체화 확보가 가능한 반면 본 연구로 개발된 기술은 PSC I Girder 거더 거치시 이미 벽체교대가 형성되는 기술임.

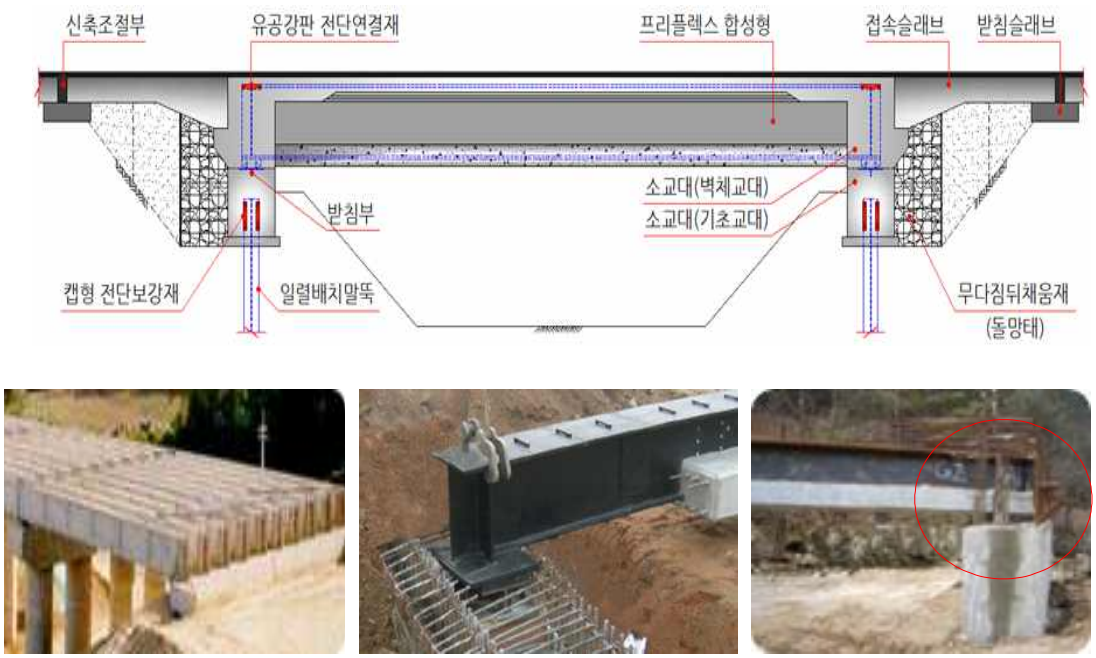


그림 2-63 거더 형식의 일체식 교량 시공예

□ 실험 수행 방안 검토

- 1안 : 기초교대와 벽체교대의 연결 방안

- 2안 : **접속슬래브 시공을 위한 Block-Out 및 힌지철근의 유효성 검증 실험**

(아래 그림과 같이 접속슬래브 연결 철근이 다양한 형태로 미국 각주의 표준도에 사용되고 있으나 시공 편리성이 부족하고 실제 효과에 대한 검증이 부족하여 시공성 개선 방안 및 이에 필요한 실험)

- 3안 : 반일체 적용시 받침 보호방안 (뒷채움 토사 유입 및 배수관련)

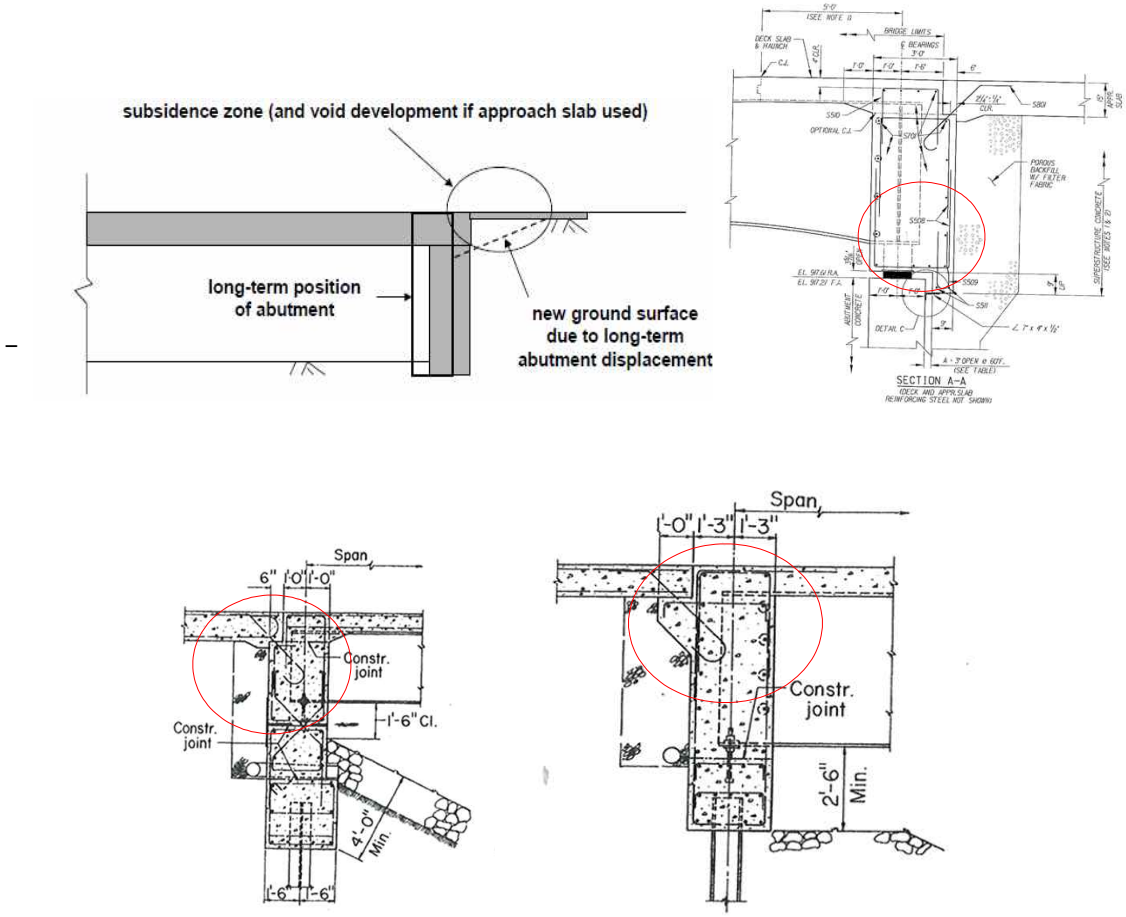


그림 2-64 접속슬래브 연결방안 및 하부 받침 보호방안

③ 연구과제 추진 실험 방안 결정

상기와 같이 연구 목적에 부합되는 효과적 실험 항목을 고려한바 본 연구에서 개발한 중공슬래브는 다수의 거더가 연결되어 교량 상부 구조가 단부가 폐합되는 특성을 가지게 되므로 자연스럽게 단부 격벽이 형성이 되는 특징을 가지게 된다. 그러므로 일체식 교량으로의 적용보다는 반일체(Semi-integral)교량으로의 적용이 보다 손쉽고 합리적인 측면을 보유하게 된다. 이 같은 측면을 연구 수행의 관점과 대비하면 말뚝, 교대부 연결에 관련된 사항보다는 상기 제시 2안이 보다 실제적이며 합리적으로 판단되어 접속슬래브의 연결방안에 대한 실험 수행을 결정하였다.

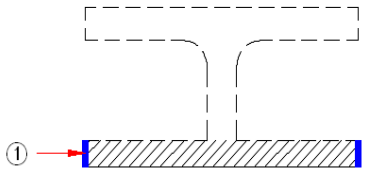
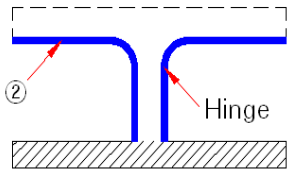
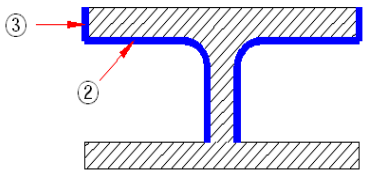
사. PCB-SLAB 거더 제작 및 시공법 개발

(1) 제작 거푸집 검토

본 교량은 플랜지 폭원이 2.3m로 일반적인 PSC 거더와 같이 1회 타설시 하부플랜지에 불완전한 충진이 예상되어 아래 표와 같이 2차 분할타설 하도록 계획하였다.

거푸집은 1차 타설시 하부플랜지 측면과 2차로 타설되는 복부와 상부슬래브 하면으로 나누어지며, 구조물 양생이후 거푸집 탈형 등을 고려하여 하부플랜지 거푸집과 복부, 상부플랜지 거푸집은 연결하여 고정될 수 있도록 고려하였다.

표 2-23 강재 거푸집을 이용한 콘크리트 타설 순서

	- 하부플랜지 거푸집 시공 콘크리트 타설
	- 하부플랜지 거푸집 탈형 - 콘크리트 강도 확인 후 복부 및 상부 플랜지 거푸집 시공
	- 복부, 상부플랜지 콘크리트 타설 - 콘크리트 강도 확보 후 거푸집 힌지를 이용하여 양생 이후 원활한 탈형작업을 할 수 있도록 제작

콘크리트 타설 순서에 따른 거푸집 제작시 고려 사항 요약하면 아래와 같다.

(가) 상하부 슬래브 변폭이 가능하도록 제작하여 설계에 유연하게 대처할 필요 있음.

(나) 횡방향 강연선은 좌우 동일하게 블록아웃 되도록 설치되어야 한다.

(다) 25m이상 경간장 적용시 강연선 개수 3개를 고려한 복부 확폭부 변화가 가능하도록 제작하여 형고 변화시 재활용 가능하도록 제작.

(라) 상부 플랜지 복부 연결부 헌치 100mm x 100mm 도입

(마) 상하부 플랜지 하면에 30mm x 30mm 헌치를 도입하여 탈형시 탈락방지 필요

(바) 복부 거푸집 지지 및 정밀도 확보를 위한 타이 설치로 매립볼트 필요.

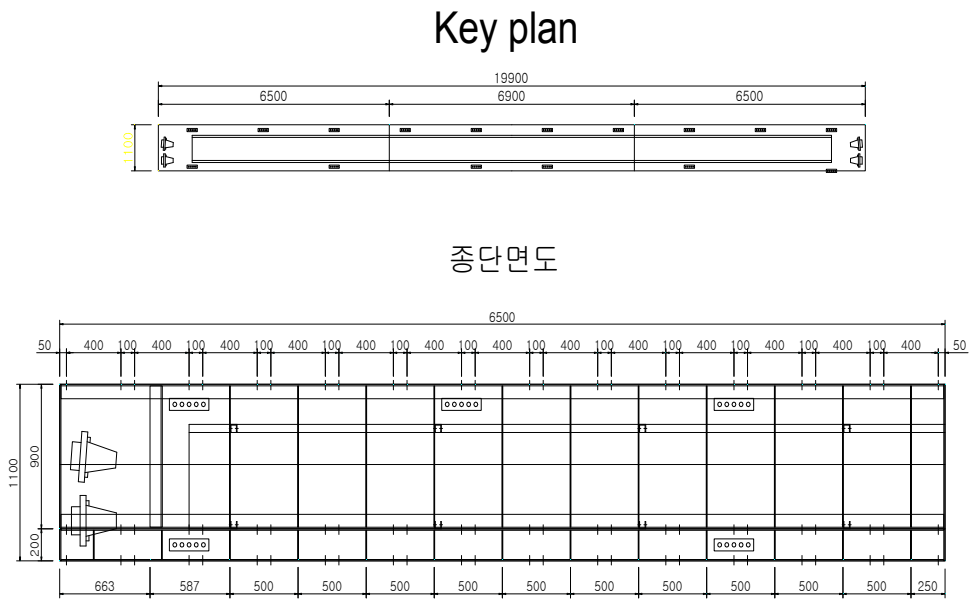


그림 2-65 거푸집 제작도면(1)

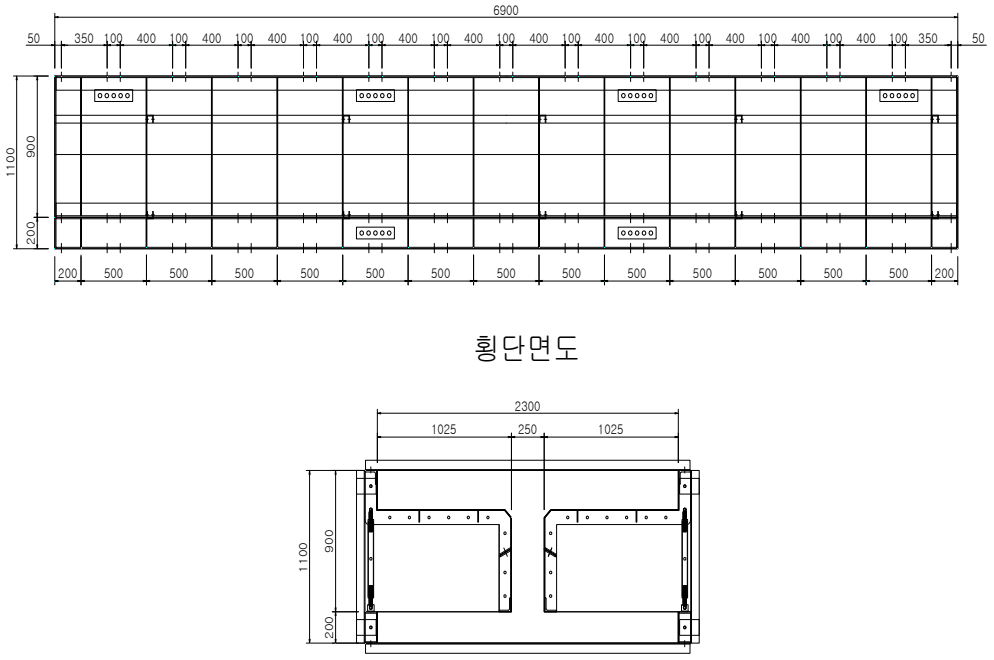


그림 2-66 그림 179 거푸집 제작도면(2)

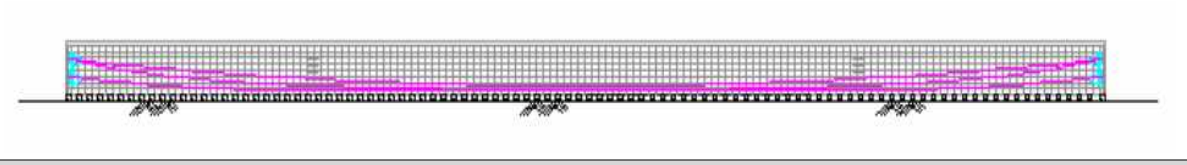
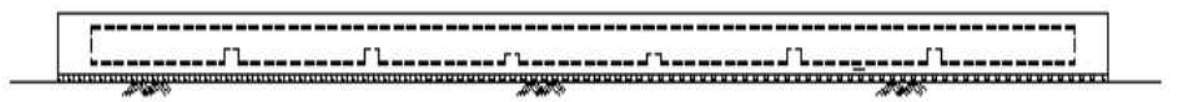
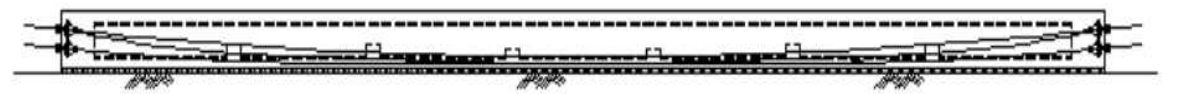
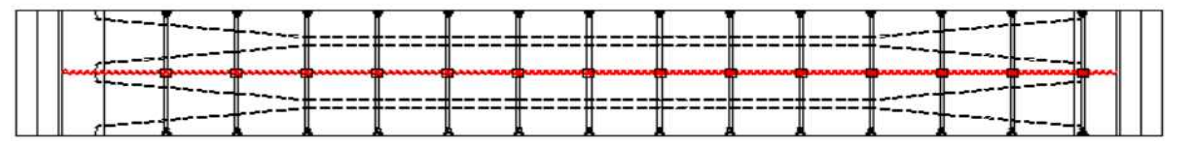
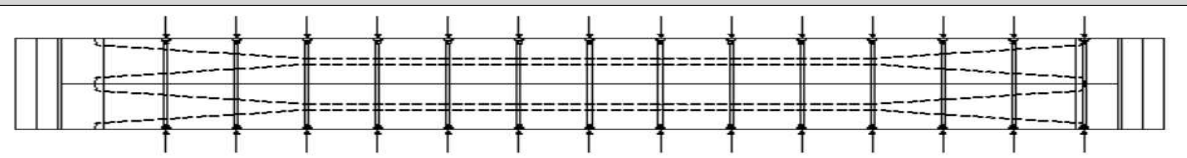
(2) 거더 제작 순서 검토

(가) 거더 제작 순서도

실물 거더의 정동적 거동평가를 위해 실시할 L=20m의 PSC-I 거더를 제작하기 위한 시공 순서도는 아래와 같다.

표 2-24 거더 제작 순서도

1. 제작대 설치

2. 철근 및 쉬스관 조립

3. 강재거푸집 설치 및 콘크리트 타설

4. 종방향 강선 긴장작업

5. 접합부 에폭시 도포 및 블록아웃 몰탈 채움

6. 횡방향 강선 긴장작업


(나) 제작 단계별 과정



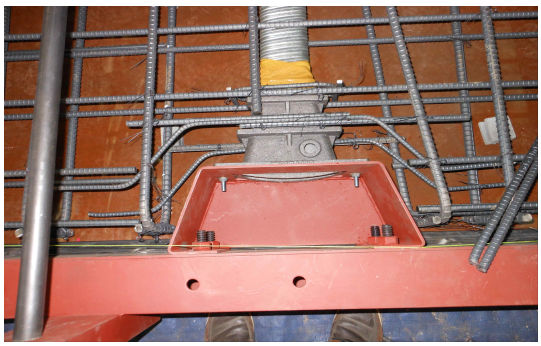
(a) 바닥판 설치



(b) 철근 및 쉬스관 조립



(c) 1단계 거푸집 조립



(d) 횡방향 쉬스관 조립



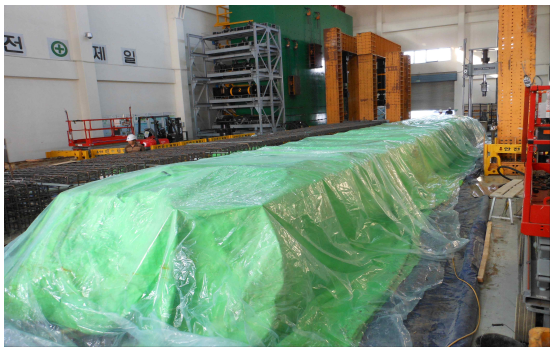
(e) 1단계 타설 및 양생완료



(f) 2단계 거푸집 조립



(g) 2단계 콘크리트 타설



(h) 양생

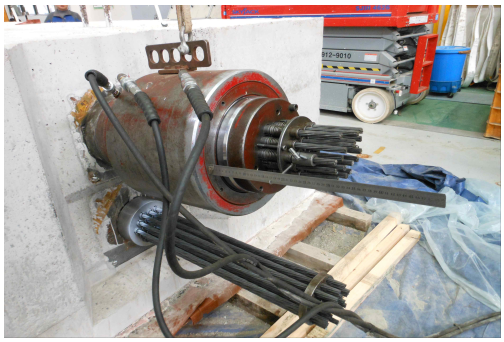
그림 2-67 거더 제작 과정(1)



(a) 탈형



(b) 공시체 압축강도시험



(c) 종방향 텐던 인장



(d) Grouter 배합 및 교반



(e) Grouting



(f) 단부마감 및 거치

그림 2-68 거더 제작 과정(2)

(3) 거더간 병렬 시공 검토

현장여건을 고려하여 실제 거더 시공시 발생할 수 있을 문제점에 대해 사전 검토할 것을 목표로 실험체 거더를 대상으로 두 개의 거더를 각각 거치하는 단계와 횡방향으로 연결하는 작업을 수행하여 검토하였다. 연결부 접합방법으로는 에폭시를 이용한 면접합 후 횡방향 텐던을 이용하여 긴장력을 도입하였다. 횡방향 텐던의 긴장순서는 강선 긴장시 플랜지부에서 발생할 수 있는 2차응력과 오차를 최소화 하기 위해 거더 중앙부에서 단부쪽으로 순차적으로 긴장작업을 수행하였다.



(a) 교좌면에 거더 거치



(b) 횡방향 거더 거치(2본)



(c) 강연선 삽입



(d) 접합면 에폭시 도포



(e) 거더 밀착 거치



(f) 텐던 정착판 설치



(g) 강연선 긴장



(h) 정착쇄기 및 마감

그림 2-69 거더간 횡방향 연결 과정

(4) 작업대차 검토

중공슬래브교 가설 후 횡방향 긴장재 인장작업을 위해 작업대차를 최외측 거더 상면에 위치시켜 거더 종방향으로 작업대차를 이동시키며 각 지점에서 인장작업을 실시하는 방법으로 작업대차를 이용하여 플랜지부를 작업인부가 이동하면서 인장작업을 실시하는 방법이다.

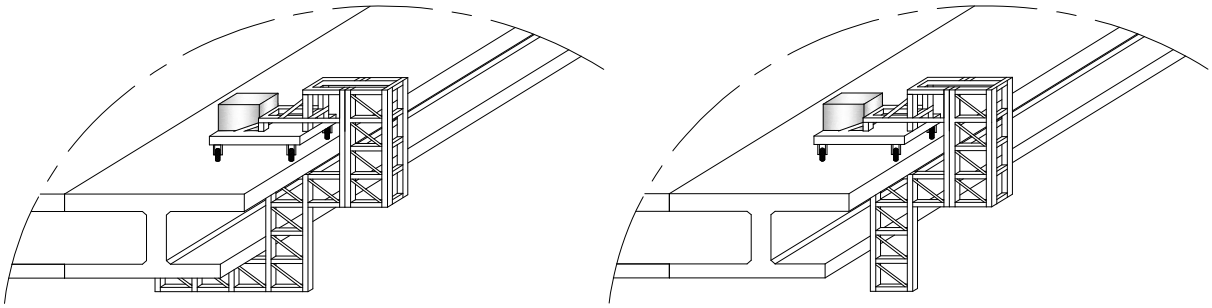


그림 2-70 상하부 플랜지 횡방향 긴장작업을 위한 작업대차



그림 2-71 작업대차 적용 사례

그림과 같은 기존 사례를 바탕으로 연구결과물인 중공슬래브교의 실제 적용시 교량제원에 맞는 차량(카고 크레인)이나 장비들을 구축할 수 있는 부분까지 시공방법에 대한 검토를 수행한 결과, 통상의 작업대차나 유지관리용 대차를 변형하여 긴장작업에 최적화된 심플한 작업대차 제작이 필요할 것으로 판단된다. 고교각의 계획으로 고소작업이 불가피한 경우에도 기존의 PSC교량에 일반적으로 적용되고 있는 작업대차를 이용하면 충분하며 안전문제도 없을 것으로 판단된다. 교대 또는 교각부가 높지 않은 교량에서 횡방향 텐던의 긴장작업은 비계와 같은 가설지지대를 이용하여 충분히 작업이 가능하다.

(5) 문제점 및 개선사항

실험체 제작을 통해 프리캐스트 제작된 거더의 거치 및 횡방향 연결 시공을 수행하여 제작상의 문제나 시공시 고려할 사항들을 검토하여 개선사항을 제시하였다. 그 내용을 요약하면 아래와 같다.

(가) 상하부 플랜지의 종방향 철근이 거더 끝단까지 연결되도록 연장 필요.

(나) 복부와 하부슬래브 연결부에 헌치를 두어 강성 증대.

헌치 설치시 거푸집 해체 및 콘크리트 타설등 시공성을 고려한 방안 필요.

(다) 횡방향 정착구 설치시 거더 철근과의 간섭 발생으로 배근도 수정 필요.

(라) 현장타설 없이 횡방향 긴장과 에폭시 접합을 통한 연결방법은 시공성이나 구조안전성 측면에서 불리.

① 횡방향 강연선 삽입시 시공어려움

② 거더 해체 결과 에폭시 접합면적이 전단면의 20% 이내로 접합효과 미미함

③ 우수시 거더 접합부를 통한 누수 문제 발생우려.

④ 가설시 교좌면 정위치 시공이 어려움.

⑤ 종방향 장지간의 플랜지 접합면은 프리캐스트 제작시 접합면 정밀제작 불가.

(마) 최외측 거더의 하부플랜지 단면형상 개선 필요.

(바) 거더의 횡방향 연결은 하부플랜지의 경우 5cm정도의 유격을 두어 무수축콘크리트를 이용하여 현장타설 후 횡방향 거더의 긴장으로 접합시키고, 상부플랜지의 경우 약 50cm 정도의 간격을 두어 별도의 철근 연결상세에 따라 현장타설 하도록 개선.

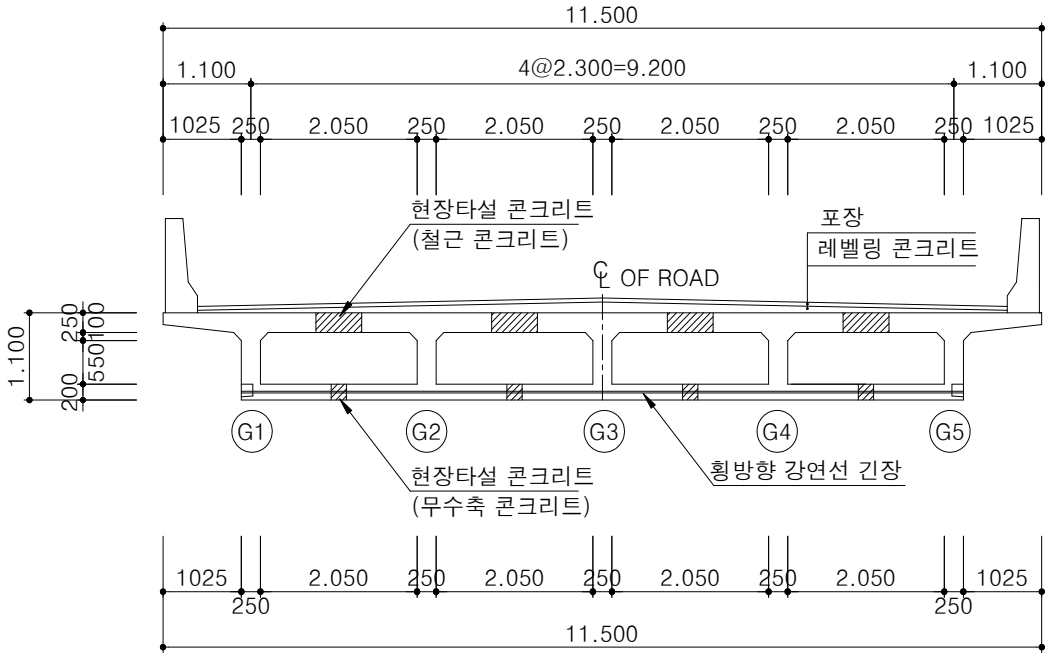


그림 2-72 거더 횡단면 및 연결부 상세 개선안

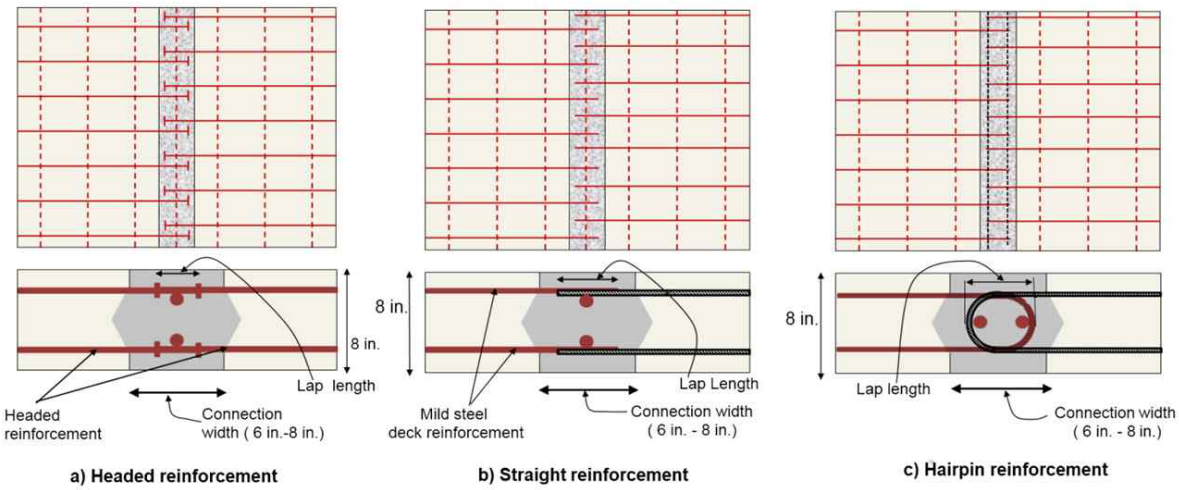


그림 2-78 횜인장 연결상세 비교

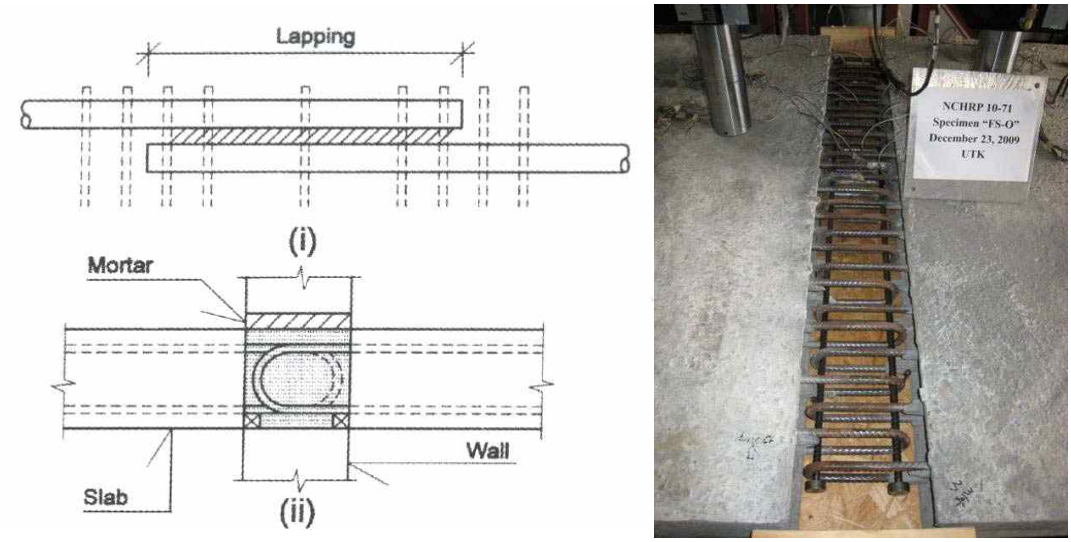
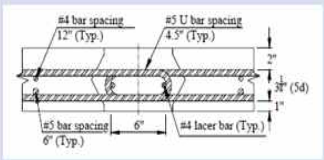
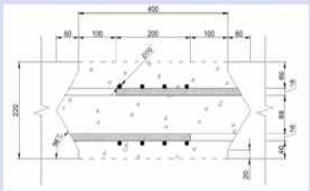
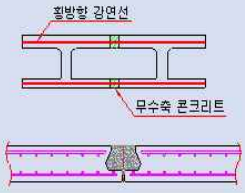


그림 2-79 헤어핀 형식의 횜인장 연결상세 예

ALT1 현타+루프철근 이음	ALT2 현타+단순철근 겹침이음	ALT3 무수축콘크리트 +횡텐던
		
가장 많이 적용되는 형식 참조 : NCHRP Report 10-71 (National Cooperative Highway Research Program)	일반적인 형식으로 시공성 양호. 모듈러 교량 연구프로젝트 적용	하부 거푸집 불필요 강선 긴장을 통한 일체화 방법

→ 현장여건 및 경제성을 고려하여 선택적 적용 가능

3. 연구결과 및 검증

가. PCB-SLAB 실물모형 재하실험

(1) 실험목적 및 내용

본 실험은, ㈜에이스이엔씨와 ㈜이산이 제안하여 개발하고 있는 PSC I-거더를 이용한 조립식 중공 슬래브 교량(이하, 조립식 중공 슬래브 교량)에 대한 설계의 타당성 및 개선 사항을 검토하기 위한 것으로, 조립식 중공 슬래브 교량에 대한 실물모형 실험체(이하, 실험체)를 제작하고 정·동적 재하실험을 실시하여 실험체의 거동을 검토하는 것을 목적으로 한다.

제안된 조립식 중공 슬래브 교량은 상·하부 플랜지가 확폭된 복수의 PSC I-거더가 횡방향으로 연결(일체화)되는 구조를 갖는다. 즉, 조립식 중공 슬래브에 대한 거동 검토는 개별 PSC I-거더의 거동은 물론 일체화된 구조로서의 거동에 대한 검토를 포함하여 이루어져야 한다. 따라서 실험체는 두 개의 PSC I-거더를 연결하는 구조로 계획하고 개별 PSC I-거더의 거동과 일체화된 구조에 대한 거동을 검토하였다.

실험체의 거동 검토는 PSC I-거더의 주요 시공단계인 종방향 프리스트레싱 단계와 하중재하 단계에 대하여 이루어졌으며, 동적해석의 기초자료를 마련하기 위한 고유진동수 검토를 포함하였다. 실험체의 일체화 거동 특성을 검토하기 위해, 두 개의 거더에 균등한 하중을 재하하는 방법 외에 일측 거더에만 하중을 재하하는 방법으로 실험을 수행하였다.

이상의 내용을 바탕으로, 본 실험의 주요 검토 내용을 정리하면 다음과 같다.

(가) 조립식 중공슬래브 교량 실물모형의 시공단계 거동 검토

① 종방향 긴장단계 거동 검토

② 횡방향 긴장단계 거동 검토

(나) 조립식 중공슬래브 교량 실물모형을 이용한 정적재하실험 및 거동 검토

① 편측 재하하중에 의한 거동 검토

② 균등 재하하중에 의한 거동 검토

(다) 조립식 중공슬래브 교량 실물모형의 고유진동수 검토

(2) 실험개요

실물모형실험은 제안된 조립식 중공슬래브의 시공 단계에서의 거동과 재하하중에 의한 휨거동을 검토하기 위해 수행되었다. 조립식 중공슬래브가 복수의 PSC I-거더가 횡방향 긴장을 통해 일체화되는 구조적 특성고려하기 위해 두 개의 PSC I-거더로 구성되는 실물모형실험체를 제작하였다. 본 실험에서 검토한 시공 단계는 PSC I-거더에 종방향으로 긴장력이 도입되는 단계와 두 개의 PSC I-거더를 일체화하기 위해 횡방향으로 긴장력이 도입되는 단계이다. 재하하중에 의한 휨성능은 조립식 중공슬래브의 일체화 거동을 검토하기 위해 하나의 거더에만 하중이 재하되는 조건(편측 재하)과 조립식 중공슬래브의 휨거동을 검토하기 위해 두 개의 거더에 균등한 하중이 재하되는 조건(균등 재하)에 대하여 검토하였다. 균등 재하 조건에 대한 실험은 설계하중에 대한 검토와 실험체의 휨강도를 검토하기 위해 수행되었다. 아래의 표는 본 실험에서 고려한 주요 거동 검토 단계 및 검토 항목을 정리한 것이다.

표 2-25 단계별 검토 목적 및 검토 항목

단계	검토 목적	검토 항목
종방향 긴장력 도입	단면 거동 검토	- 변위(솟음량) vs. 설계단계 모델의 변위 - 교축방향 변형률 vs. 설계단계 모델의 변형률
횡방향 긴장력 도입	긴장력 도입 수준 검토	- 횡방향 압축 변형량 - 단면 상·하부 교축직각방향 변형률
편측 재하 (설계하중)	일체거동 검토	- 변위, 단차 - 단면 상·하부 교축직각방향 변형률
균등 재하	휨강성 균열 하중 휨변형 횡방향 분포 휨강도	- 하중-변위 vs. 설계단계 모델의 변위 - 하중-교축방향 변형률 vs. 설계단계 모델의 변형률 - 중립축 위치 vs. 설계단계 모델의 변형률 - 상·하부 플랜지 교축방향 변형률의 횡방향 분포 vs. 설계단계 모델의 변형률

(3) 실험 대상교량의 설계

실험 대상 교량은 조립식 중공슬래브 교량으로 설계된 도로교로서 교량 연장은 20 m, 교량 폭은 11.5 m이다. 대상 교량에는 폭 2.3 m, 거더 높이 1.1 m를 갖는 PSC I-거더 5 개가 횡방향으로 연결된 구조를 갖는다. 그림 2-80은 대상 교량과 PSC I-거더의 제원을 나타낸 것이다.

실물모형실험체는 대상 교량에 적용된 것과 동일한 PSC I-거더 2 개로 구성된 교량모형으로 교량 연장은 20 m, 교량 폭은 4.6 m이다.

PSC I-거더에는 종방향으로 배치되는 2 개의 덕트에 각각 15.2 mm 직경의 PS 강연선 18 가닥이 배치되며, 덕트 당 34544.5 kN(=1383.7 MPa)의 긴장력(jacking force)이 도입된다. 복수의 PSC I-거더를 일체화하기 위한 교축직각방향 긴장재로 15.2 mm 직경의 PS 강연선 5 가닥이 배치되는 플랫 덕트(flat duct)가 적용하였으며, 경간 중앙부에 배치된 플랫 덕트의 간격은 2.0m이다. 상부플랜지 및 하부플랜지에 배치된 횡방향 긴장용 강연선 1 가닥에 도

입된 긴장력(Jacking force)은 각각 200kN과 150kN이다. 자중과 종방향 긴장력 도입 단계에서 3.96m의 솟음이 발생할 것으로 계산되었다.

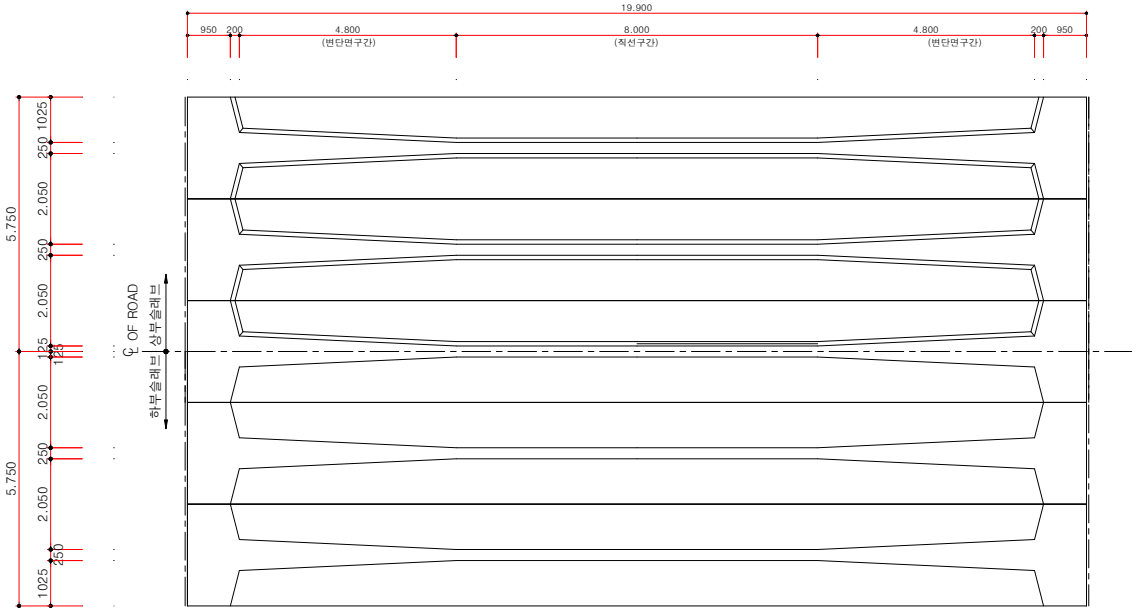
표 2-25의 검토 항목에 대한 실험체의 거동과 설계 결과를 비교하기 위해 경간 중앙부 단면의 응력 및 변형률에 대한 설계 결과를 표 2-26와 표 2-27에 정리하였다. 표 2-26와 표 2-27에서 자중 및 긴장력에 의한 변형률은 응력을 긴장력 도입 시점의 콘크리트 탄성계수인 29069.6 MPa($0.8f_{ck}$=32 MPa)으로 나누어 계산하였으며, 2차 고정하중 및 활하중에 의한 변형률은 콘크리트 설계압축강도(f_{ck}=40 MPa)에 대한 탄성계수인 30891.1 MPa로 나누어 계산한 것이다.

표 2-26 하중별 휨모멘트 및 응력 - 내측 거더

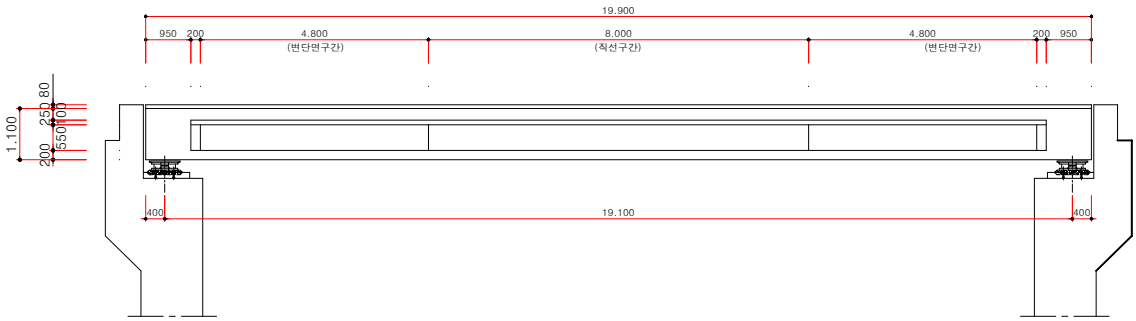
하중	휨모멘트 (kN-m)	응력 (MPa)		변형률 (10^{-6})	
		상연	하연	상연	하연
자중	1545.0	-3.885	4.242	-133.6	145.9
긴장력	-	-0.150	-10.667	-5.2	-366.9
2차 고정하중	364.7	-0.909	0.995	-29.4	32.2
활하중	1130.8	-2.844	3.111	-92.1	100.7

표 2-27 하중별 휨모멘트 및 응력 - 외측 거더

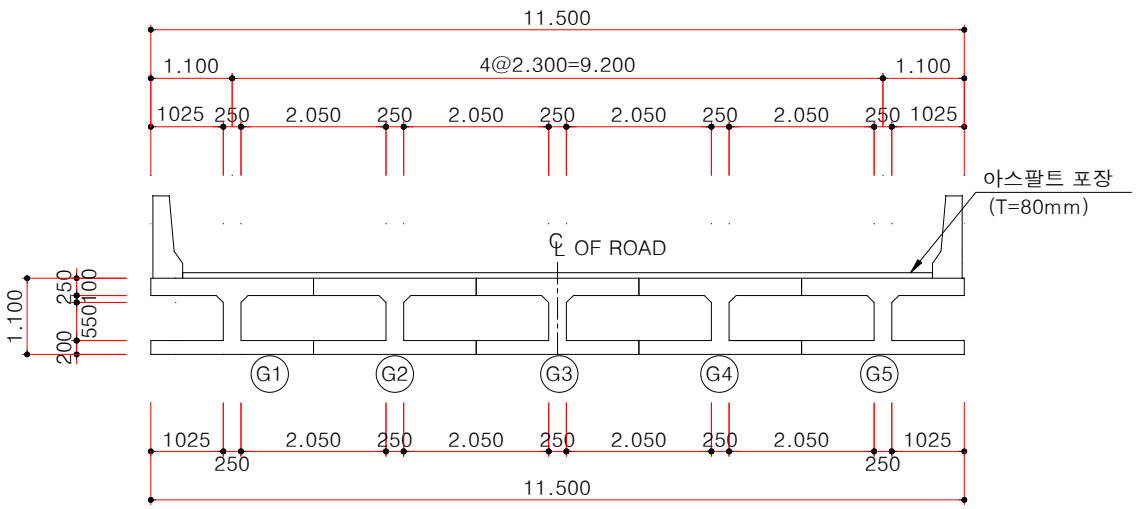
하중	휨모멘트 (kN-m)	응력 (MPa)		변형률 (10^{-6})	
		상연	하연	상연	하연
자중	1545.0	-3.885	4.242	-133.6	145.9
긴장력	-	-0.150	-10.667	-5.2	-366.9
2차 고정하중	428.6	-1.078	1.179	-34.9	38.2
활하중	1183.8	-2.977	3.256	-96.4	105.4



(a) 평면도



(b) 종단면도



(c) 횡단면도

그림 2-80 실험대상교량의 제원

(4) 실험체 제작

실험체 제작은 한국건설기술연구원 구조실험동 내에서 이루어졌으며, 2 개의 PSC I-거더를 제작하고 지점 위에 거치시킨 뒤 일체화 하는 순서로 제작이 이루어졌다. 표 2.27는 실험체 제작 순서를 나타낸 것이다.

표 2-27 실험체 제작 순서

철근/쉬스 조립 및 거푸집 설치	하부플랜지 콘크리트 타설
	
Girder 1 콘크리트 타설/양생	Girder 1 콘크리트 타설/양생
	
종방향 긴장력 도입	이동/거치
	
횡방향 긴장	실험체용 도장
	

콘크리트는 세 단계로 나누어 타설하였다. 먼저, 두 개의 PSC I-거더 하부플랜지에 콘크리트를 타설하였으며, 4일 후에 첫 번째 거더(이하, Girder 1)의 남은 부분의 콘크리트를 타설하고 증기양생을 실시하였다. 마지막으로, Girder 1 콘크리트의 증기양생이 완료된 이후에 두 번째 거더(이하, Girder 2)의 남은 부분의 콘크리트를 타설하고 증기양생을 실시하였다. 증기양생은 짧은 시기에 강도가 발현되도록 할 목적으로 실시하였으며, 콘크리트의 품질을 확보하기 위해 그림 2-81과 같이 콘크리트의 초결 기간을 충분히 확보할 수 있도록 거푸집 내 온도를 관리하였다. 실험체에 적용된 콘크리트의 설계압축강도는 40 MPa이며, 종방향 긴장력 도입 시점에서 발현된 콘크리트의 압축강도와 최종적인 콘크리트의 압축강도는 표 2-82와 같다. 공시체의 양생조건은 실험체에 타설된 콘크리트의 양생조건과 동일하게 적용하였으며, 두 번째 공시체 강도 측정 시점(2014-04-03) 이후에는 강도발현이 크게 이루어지지 않아 최종 공시체 강도 측정 시점(2014-04-09)에서는 실험체에 타설된 모든 콘크리트가 최대 압축강도에 도달한 것으로 판단하였다.

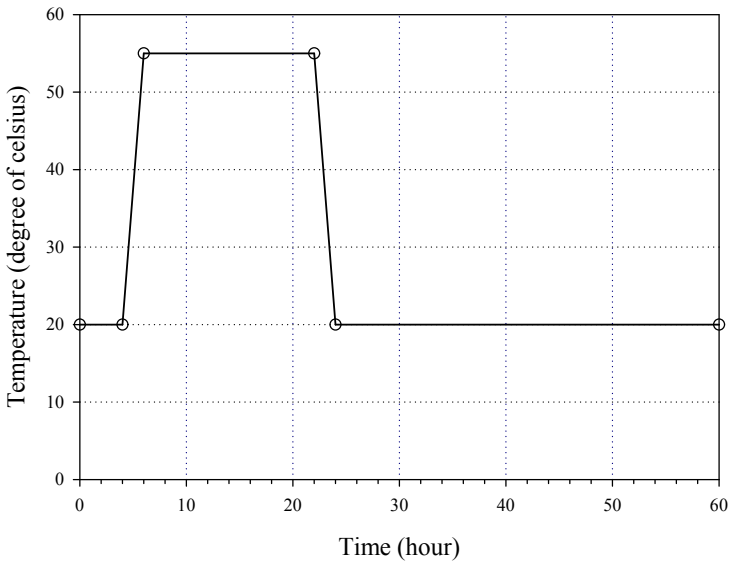


그림 2-81 증기양생 관리 계획

표 2-28 콘크리트 공시체의 압축강도

타설 위치	타설 시기	공시체 압축강도 (Mpa)		
		2014-03-26[1)]	2014-04-03	2014-04-09
하부플랜지	2014-03-14	34.3 (12)[2)]	37.9 (20)	39.3 (26)
Girder 1: 웹, 상부플랜지	2014-03-18	29.9 (8)	33.0 (16)	33.3 (22)
Girder 2: 웹, 상부플랜지	2014-03-21	31.0 (5)	35.5 (13)	35.9 (19)

1) 종방향 긴장력 도입 시점
2) ( ): 콘크리트의 재령

(5) 계측기 및 센서 배치

(가) 변위계

변위계의 위치는 계측 단계별 목적에 따라 결정하였다. 종방향 긴장력 도입 단계에서는 그림 2-82와 같이 PSC I-거더의 솟음량을 계측하기 위해 경간 중앙부 하부 플랜지 상단에 두 개의 변위계를 설치하였다. 횡방향 긴장력 도입 단계에서는 그림 2-83와 같이 경간 중앙부 상부 플랜지 양단에 변위계를 설치하여 횡방향으로 발생하는 축방향 변형을 계측하였다.

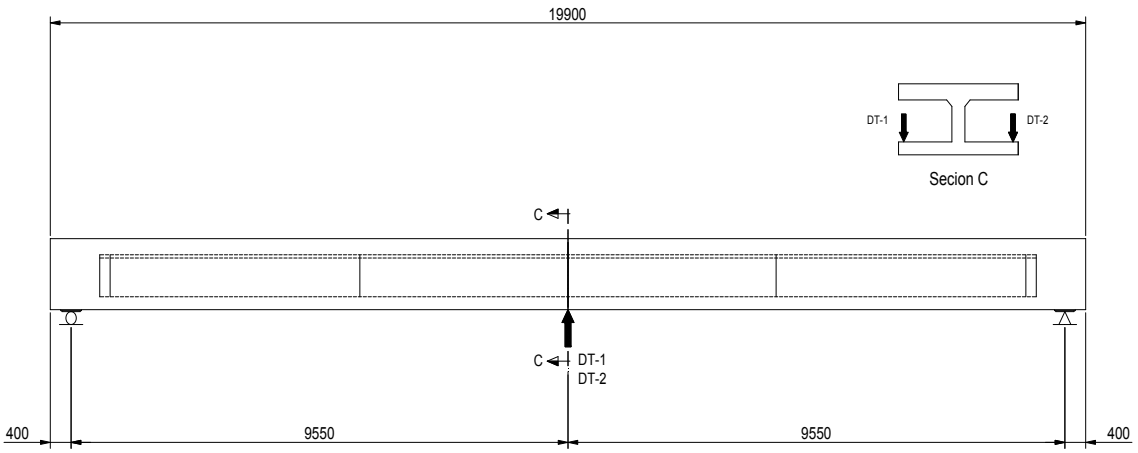


그림 2-82 변위계 위치 - 종방향 긴장력 도입 단계

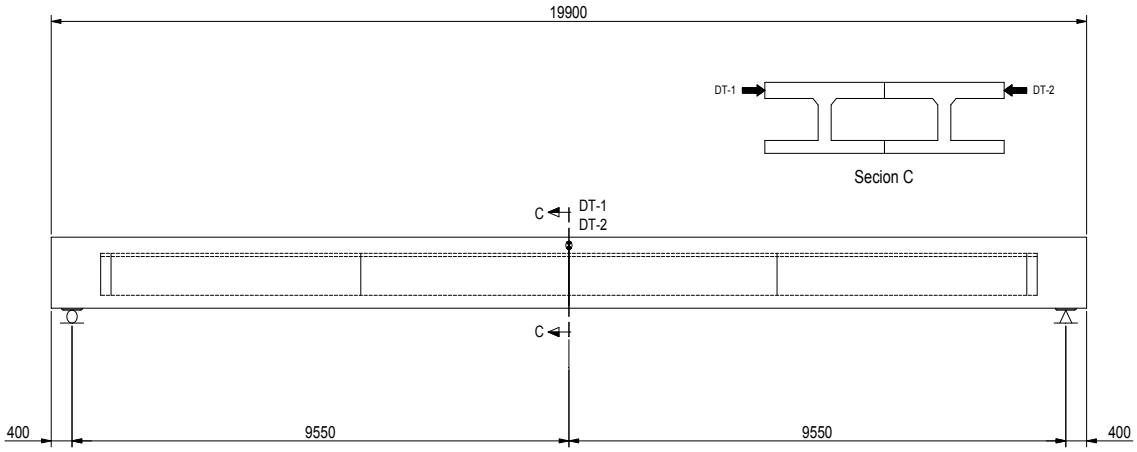


그림 2-83 변위계 위치 - 횡방향 긴장력 도입 단계

하중 재하 단계에서는 그림 2-84과 같이 경간 중앙부(Section C)와 경간 중앙부에서 5.0 m 이격된 지점(Section A)에 변위계를 설치하였다. PSC I-거더의 변위를 계측하기 위한 변위계는 Secion A와 Section B에 모두 설치 되었으며, 각 PSC I-거더의 횡방향 중심 즉, 웹의 폭방향 중심에 위치하도록 결정하였다. 두 PSC I-거더 간의 단차를 계측하기 위한 변위계는 Secion C에서 하부 플랜지 종방향 연결부를 중심으로 양측으로 100 mm 이격된 위치에 설치되었다.

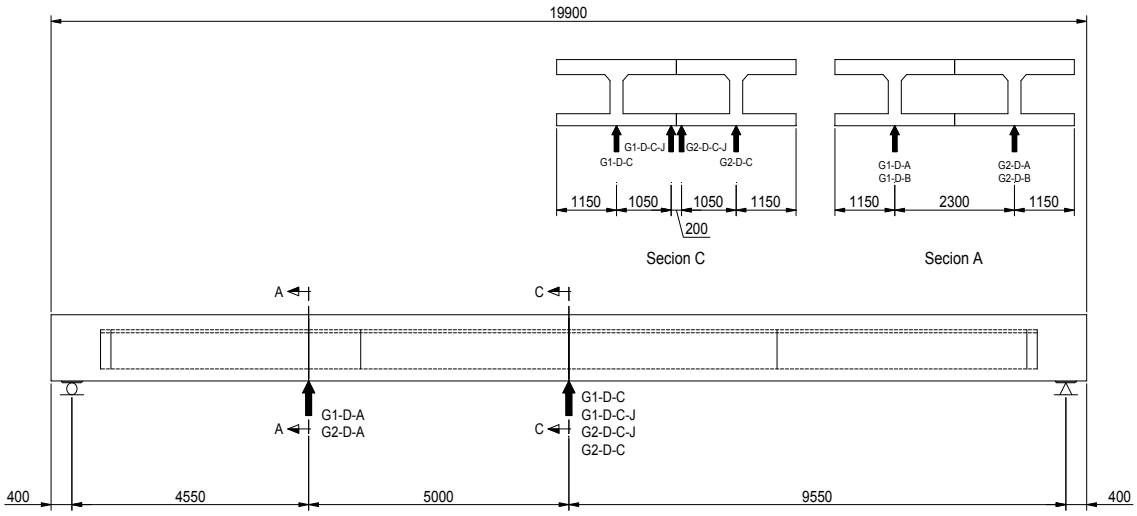


그림 2-84 변위계 위치 - 하중 재하 단계



(a) 종방향 긴장력 도입 단계



(b) 횡방향 긴장력 도입 단계



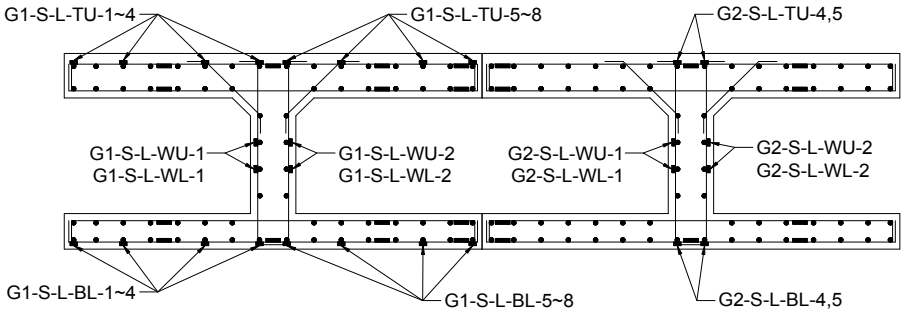
(c) 하중 재하 단계

그림 2-85 변위계 설치 전경

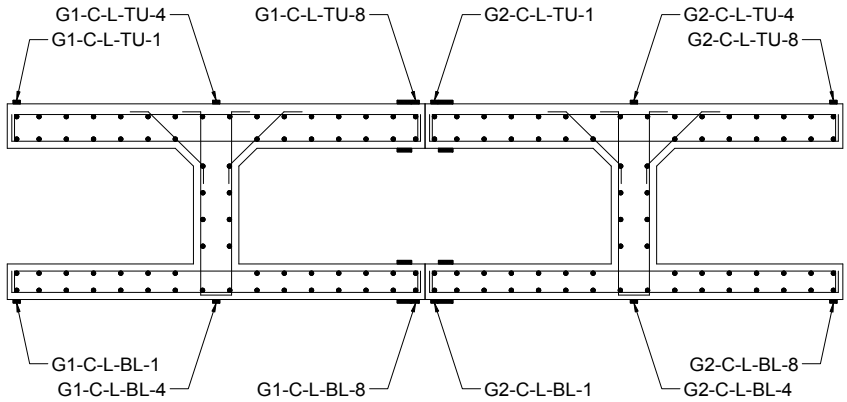
(나) 변형률 게이지

변형률 게이지는 시공 단계 및 하중 재하 단계에서 실첨체에 발생하는 교축방향(이하, 종방향) 및 교축직각방향(이하, 횡방향)의 변형률을 계측하기 위해 설치되었다.

그림 2-86은 실험체의 경간 중앙부 단면에 설치된 종방향 변형률 게이지의 위치를 나타낸 것이다. 종방향 변형률 게이지에서 계측된 변형률로로부터 종방향 긴장력 도입 단계 및 하중 재하 단계에서 실험체의 경간 중앙부 단면에 발생하는 종방향 변형률로부터 단면의 휨 거동, 압축 거동과 상·하부 플랜지에 발생하는 종방향 응력의 폭방향(횡방향) 분포를 검토하고자 하였다.



(a) 철근 변형률 게이지



(b) 콘크리트 변형률 게이지

그림 2-86 종방향 변형률 게이지 설치 위치

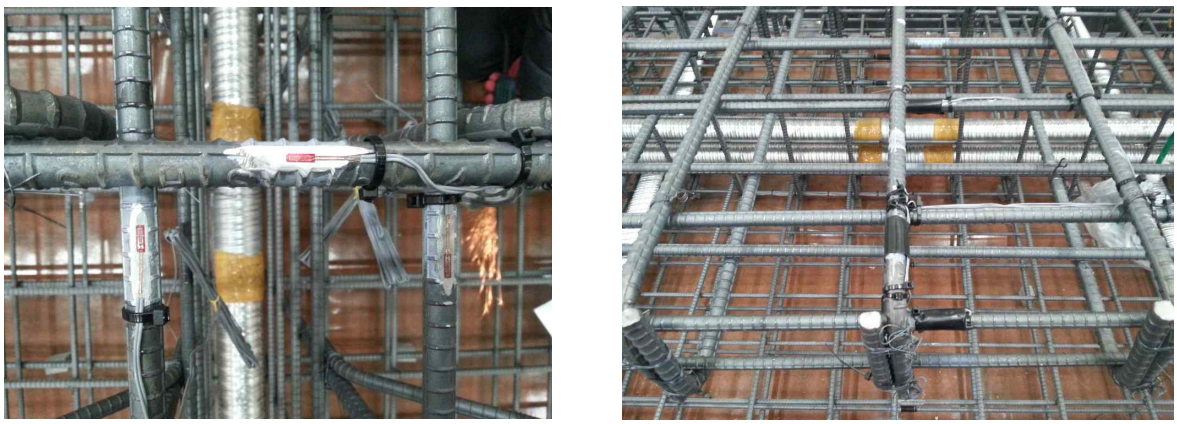
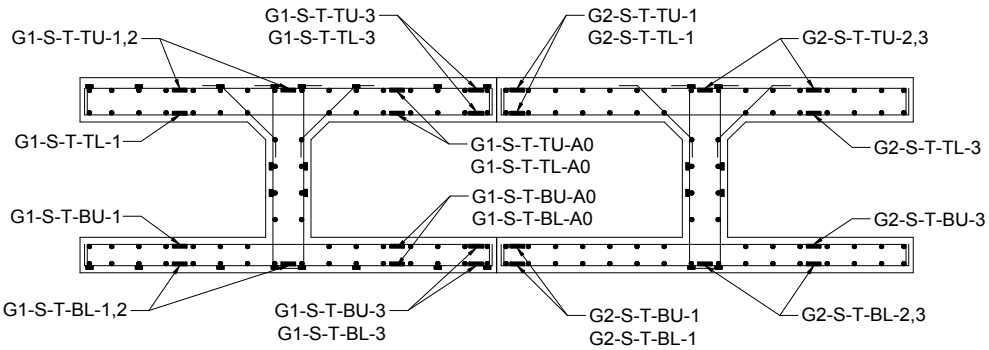
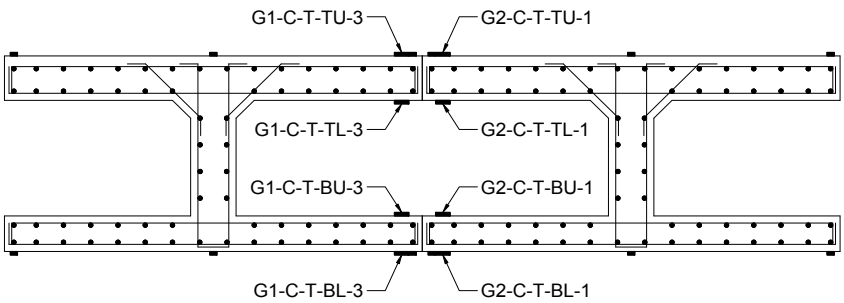


그림 2-87 철근 변형률 게이지 설치 과정

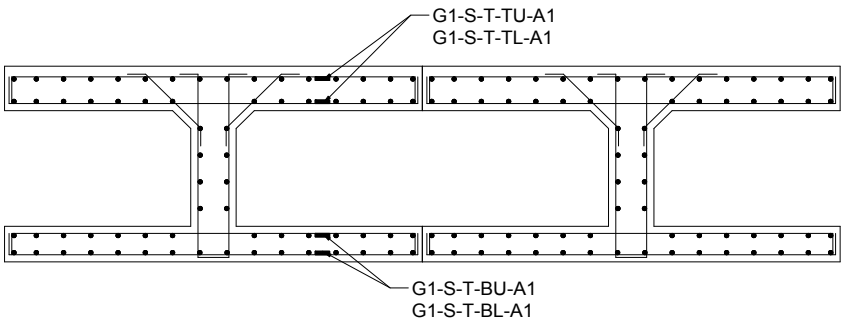
그림 2-88은 실험체의 경간 중앙부 단면에 설치된 횡방향 변형률 게이지의 위치를 나타낸 것이다. 횡방향 변형률 게이지는 횡방향 긴장력 도입 단계 및 하중 재하 단계에서 실험체의 경간 중앙부 단면에서 횡방향으로 발생하는 변형률을 계측하기 위해 설치되었다. 횡방향 변형률 게이지에서 계측된 변형률로부터 횡방향 긴장 단계에서 플랜지 단면에 도입되는 압축 변형을 검토하고, 하중 재하 단계에서 두 PSC I-거더의 계면에 발생하는 변형률을 검토하고자 하였다.



(a) 철근 변형률 게이지 (지간 중앙부)



(b) 콘크리트 변형률 게이지 (지간 중앙부)



(c) 철근 변형률 게이지 (지간 중앙부 1 m 이격 지점)

그림 2-88 횡방향 변형률 게이지 설치 위치

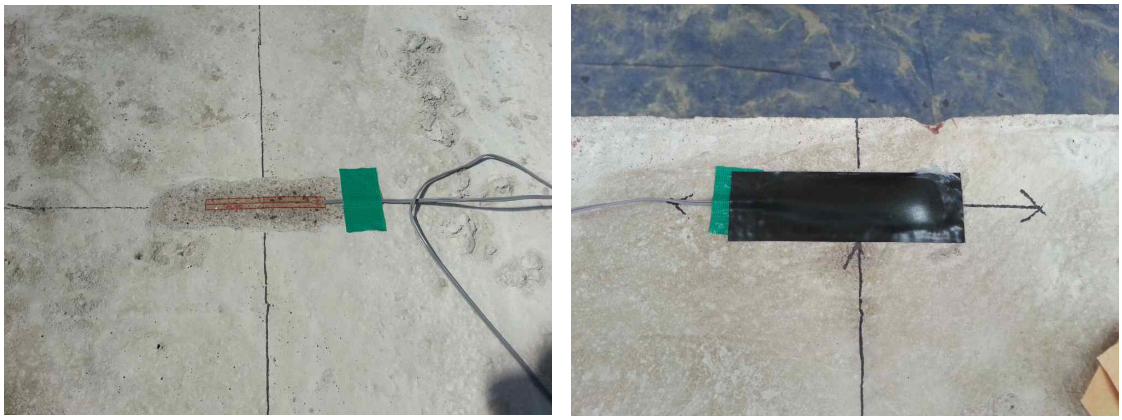


그림 2-89 콘크리트 변형률 게이지 설치 과정

(6) 하중 재하

하중은 그림 2-90와 같이 경간 중앙부에 작용시켰으며, 두 개의 PSC I-거더 간의 일체화 거동을 검토하기 위해 하나의 거더에 하중을 작용사키는 단계(Step 1)과 두 개의 거더에 동일한 하중을 작용시키는 단계(Step 2)로 구분하여 하중을 적용하였다.

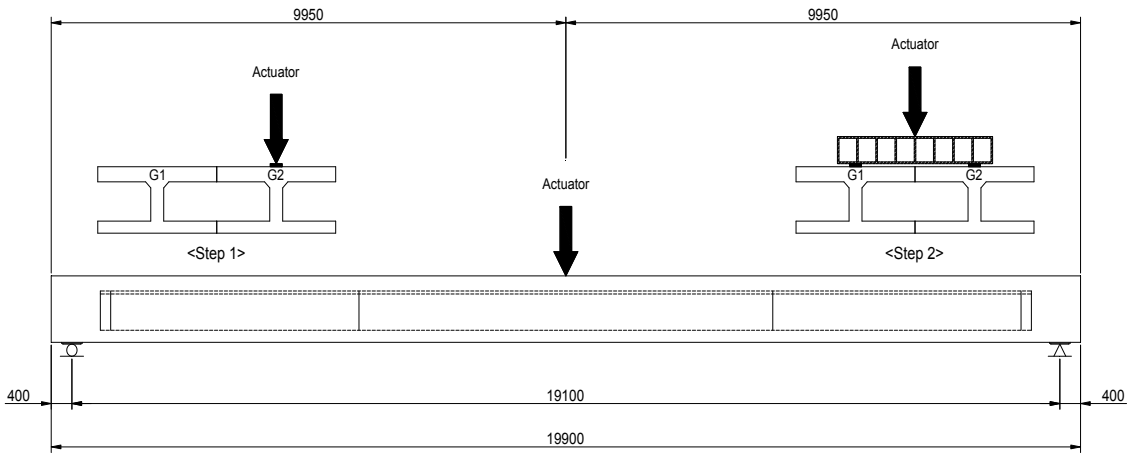


그림 2-90 하중 위치

하중의 크기는 대상 교량에 작용하는 설계하중에 의한 모멘트를 기준으로 결정하였다. 표 2-29은 대상 교량에 작용하는 휨모멘트와 휨모멘트에 대응하는 재하 하중을 정리한 것이다. 사용하중(2차 고정하중 + 활하중)에 대한 등가의 재하하중은 약 338 kN이며, 계수하중(1.3×2차 고정하중 + 2.15×활하중)에 대한 등가의 재하하중은 약 650 kN이다.

설계 단계의 계산에 의한 PSC I-거더 하나에 대한 공칭휨강도(M_n)는 7085.0 kN-m이며, 공칭휨강도에서 자중의 효과를 제거한 값($M_n - M_{d1}$)은 5540,0 kN-m이다. 공칭휨강도에 도달할 것으로 예상되는 재하 하중은 약 1160 kN 이며, 두 개의 PSC I-거더로 구성된 실험체로 환산하면 최대 하중은 약 2320 kN에 이를 것으로 예상된다.

표 2-29 하중별 휨모멘트 및 응력 - 내측 거더

하중	조합	휨모멘트 (kN-m)			재하 하중[1] (kN)
		외측	내측	Max.	
자중	M_{d1}	1545.0	1545.0	1545.0	323.6
2차 고정하중	M_{d2}	428.6	364.7	428.6	89.8
활하중	M_{live}	1183.8	1130.8	1183.8	247.9
사용하중	$M_{d2}+M_{live}$	1612.3	1495.5	1612.3	337.7
계수하중	$1.3M_{d2}+2.15M_{live}$	3102.2	2905.3	3102.2	649.7

[1] 재하 하중은 지간 19.1 m를 갖는 단순지지로 가정된 보로 가정하여 Max. 휨모멘트로부터 계산된 것이며, 거더 하나에 대한 값임.

정적재하실험을 실시하기 전, 실험체의 고유진동수를 검토하기 위한 진동실험을 수행하였다. 실험체의 동적 응답을 계측하기 위해 그림 2-91와 같은 위치에 가속도계를 설치하고 인위적인 진동(충격)을 발생시킨 뒤 계측을 수행하였다.

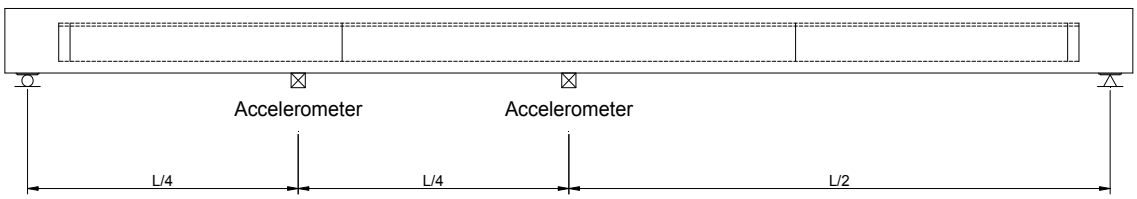


그림 2-91 하중 위치



그림 2-92 가속도계 설치 광경

나. PCB-SLAB 재하실험 결과 및 분석

(1) 시공 단계별 거동

(가) 종방향 긴장에 의한 거동

① Grider 1

그림 2-93은 종방향 긴장력 도입 단계에서 Girder 1의 경간 중앙부에서 계측된 변위와 설계단계에서 예측된 변위를 나타낸 것이다. Girder 1의 경간 중앙부에 발생한 변위는 평균 약 1.10 mm 이었으며, 설계 단계에서 예측된 값(3.96 mm)에 비해 작은 솟음이 발생하였다.

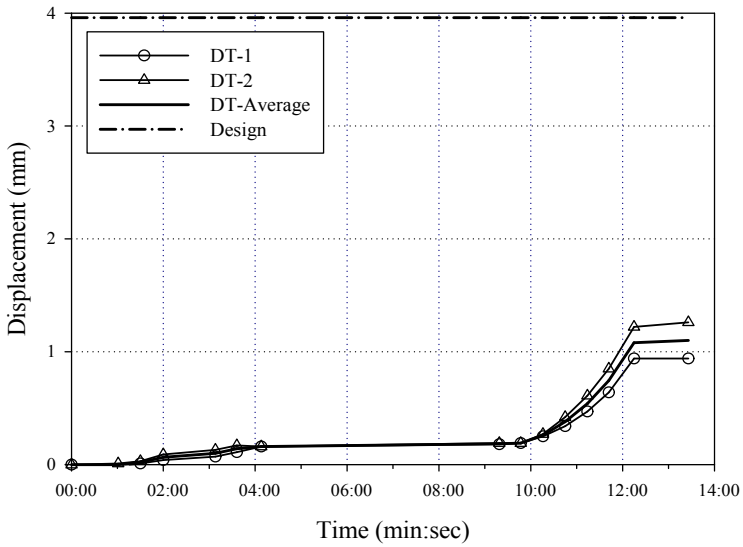


그림 2-93 종방향 긴장에 의한 변위 - Girder 1.

그림 2-94, 그림 2-95 종방향 긴장력 도입 단계에서 Girder 1의 경간 중앙부 단면에서 계측된 교축방향 변형률을 설계 단계에서 예측된 변형률과 비교하여 나타낸 것이다. 그림 2-94와 그림 2-95에 나타낸 변형률 값은 단면 내에서 같은 높이에 설치된 변형률 게이지의 평균 계측 값이며, 그림 2-94는 Girder 1 단면의 횡방향 중심(core)에 설치된 변형률 게이지로부터 계측된 평균 계측 값을 나타낸 것이고 그림 2-95은 Girder 1 단면 내에서 같은 높이에 설치된 모든 변형률 게이지로 계측된 평균 계측 값을 나타낸 것이다.

그림 2-94와 그림 2-95의 결과로부터, 종방향 긴장력 도입 단계에서 단면의 변형률이 모두 압축 측에 있는 것을 알 수 있다.

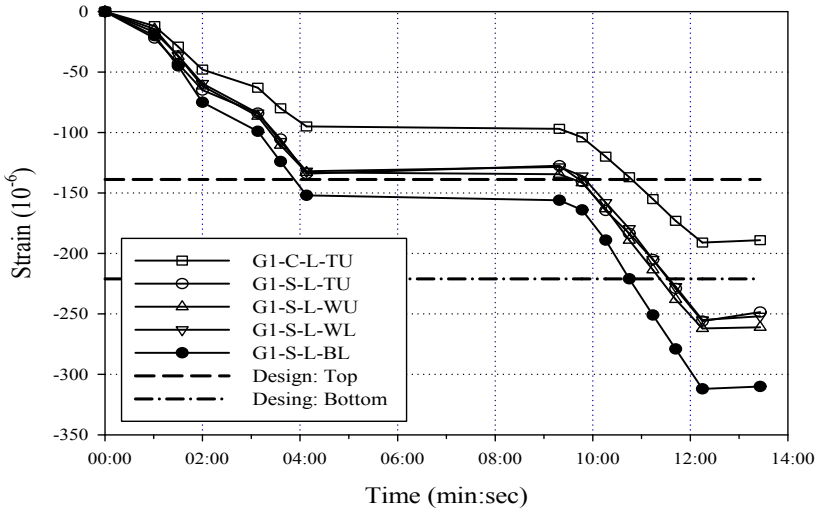


그림 2-94. 종방향 긴장에 의한 단면 변형률 - Girder 1, Core.

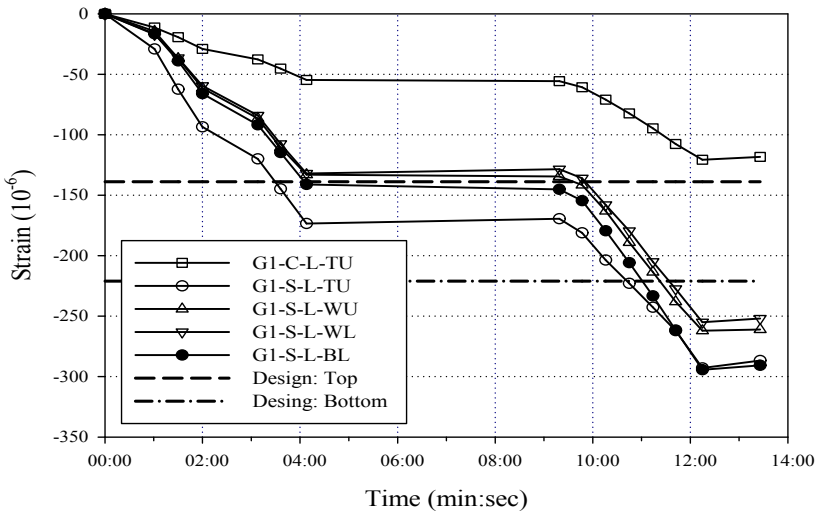


그림 2-95. 종방향 긴장에 의한 단면 변형률 - Girder 1, Average.

횡방향 중심에 설치된 철근 변형률 게이지를 기준으로 상·하단의 변형률은 각각 약 -249μ과 -310μ이며, 같은 높이에 위치한 게이지의 평균값을 기준으로 상·하단의 변형률은 각각 약 -287μ, -291μ이다. 설계 단계에서 예측된 단면 상·하단의 변형률은 각각 -138.8μ, -221μ이므로, Girder 1 실험체에 보다 큰 압축 변형률이 발생한 것을 알 수 있다.

그림 2-96은 종방향 긴장력 도입 단계에서 Girder 1 단면의 높이 방향에 대한 변형률 분포와 설계 단계에서 예측된 변형률 분포와 비교하여 나타낸 것이다. 그림 2-96에서 단면의 상단(height = 1,100 mm)의 변형률은 콘크리트 변형률 게이지에서 계측된 것으로 단면에 분포된 변형률의 경향에 비해 큰 변형률이 발생한 것을 알 수 있다. 그림 2-93에서 Girder 1의 솟음이 설계 단계에서 예측된 값에 비해 작게 발생한 사실로부터 단면에 발생한 휨변형(그림 3.6의 변형률 분포의 기울기)은 설계 단계에서 예측된 것에 비해 작게 발생했을 것으로 예상할 수 있다.

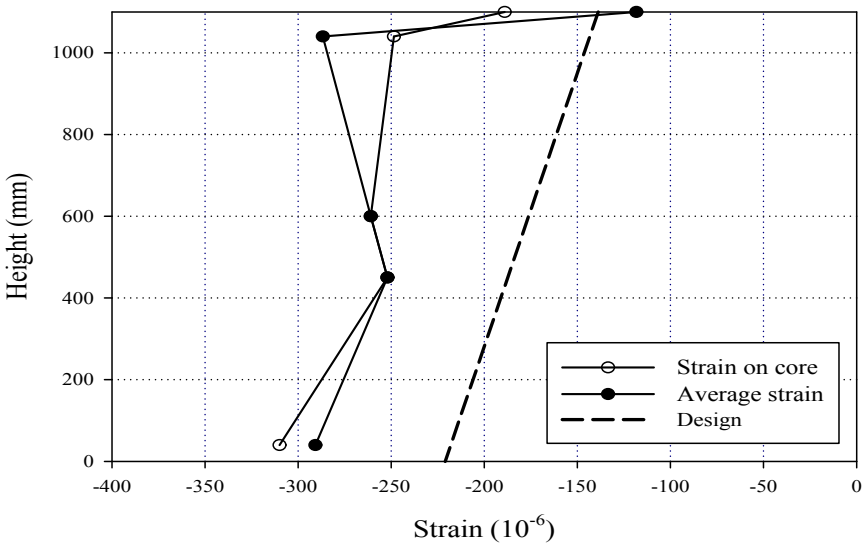


그림 2-96 종방향 긴장에 의한 단면 변형률의 연직방향 분포 - Girder 1.

그림 2-97에서 콘크리트 게이지(상단)를 제외한 변형률 분포의 기울기는 설계 단계에서 예상한 것과 일치하지만 콘크리트 게이지는 이러한 경향에서 크게 벗어난 결과를 보인다. 따라서 단면 상단에 설치된 콘크리트 게이지의 계측 값은 실험 결과 분석의 대상에서 제외하기로 한다.

콘크리트 변형률 게이지를 제외한 단면의 변형률 분포로부터, 종방향 긴장력 도입 단계에서 Girder 1의 경간 중앙부 단면에 설계 단계에서 예측된 것에 비해 보다 큰 압축 변형

률이 도입되었다는 것을 알 수 있다. 또한, 휨변형은 설계 단계에서 예측된 것에 비해 작게 발생하였다.

그림 2-98은 종방향 긴장력 도입 단계에서 Girder 1 상부플랜지의 폭에 걸쳐 나타나는 종방향 변형률의 분포와 하부플랜지의 폭에 걸쳐 나타나는 종방향 변형률의 분포를 나타낸 것이다. 상부플랜지 및 하부플랜지의 종방향 변형률은 웹에서 멀어질수록 점차 감소하는 경향을 보였으며, 상부플랜지의 일측 단에서 종방향 변형률이 급격하게 증가하는 경향을 보였다.

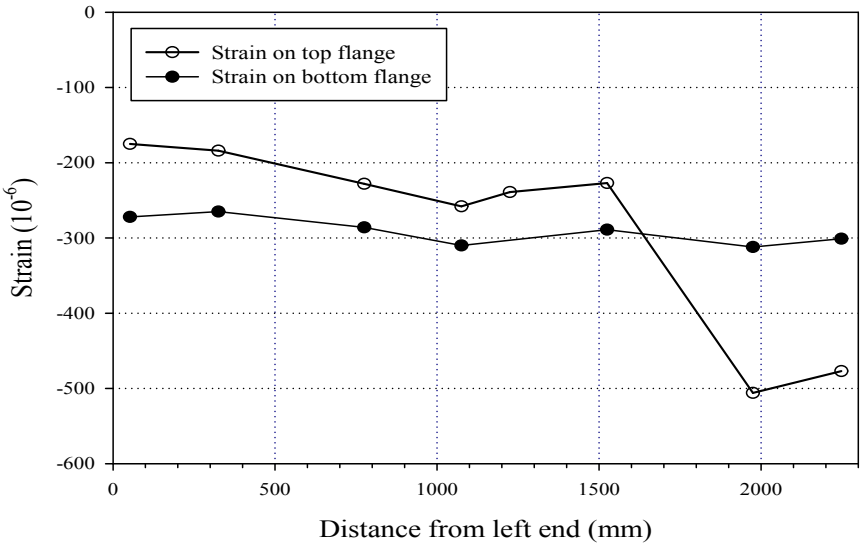


그림 2-97 종방향 긴장에 의한 플랜지 단면 상·하단 변형률의 횡방향 분포
- Girder 1, 철근 변형률 기준.

상부플랜지의 일측 단에서 종방향 변형률이 급격하게 증가하는 원인과 단면 거동을 검토하기 위해 Girder 1 경간 중앙부 단면에 대한 종방향 변형률의 단면 내 분포를 검토하였다. 그림 2-98은 Girder 1 경간 중앙부 단면에 대한 종방향 변형률의 단면 내 분포를 나타낸 것이다. 그림 2-98의 결과에서 종방향 긴장력에 의해 발생한 것으로 예상되는 단면의 수직축 및 수평축에 대한 휨거동 효과를 제거한 결과를 그림 2-99에 나타내었다. 그림 2-99의 종방향 변형률 분포로부터 종방향 긴장력 도입 단계에서 Girder 1 경간 중앙부 단

면에 뒤틀림이 발생한 것으로 나타났다. 뒤틀림의 효과는 하부플랜지 보다 상부플랜지에서 크게 발생한 것으로 나타났으며, Girder 1의 긴장력에 의한 솟음이 작게 발생하여 하부플랜지의 상당한 구간이 지면과 닿아있었기 때문에 하부플랜지에서는 뒤틀림에 의한 변형이 크게 발생하지 않았던 것으로 판단된다.

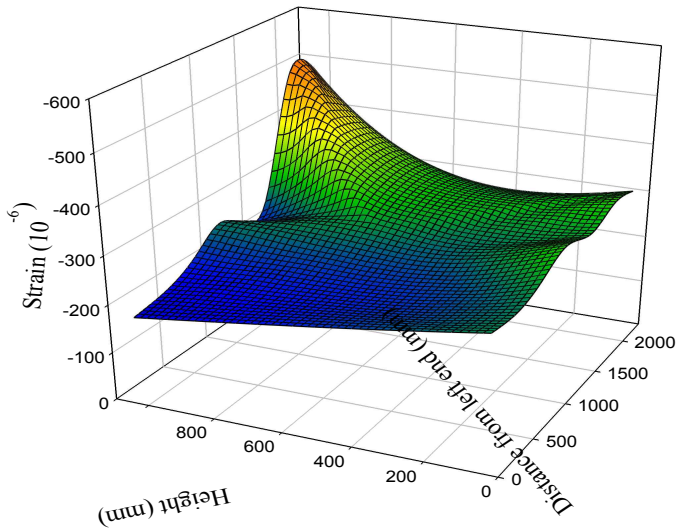


그림 2-98 종방향 긴장에 의한 종방향 변형률의 단면 내 분포 - Girder 1, 철근 변형률 기준, 휨변형 포함.

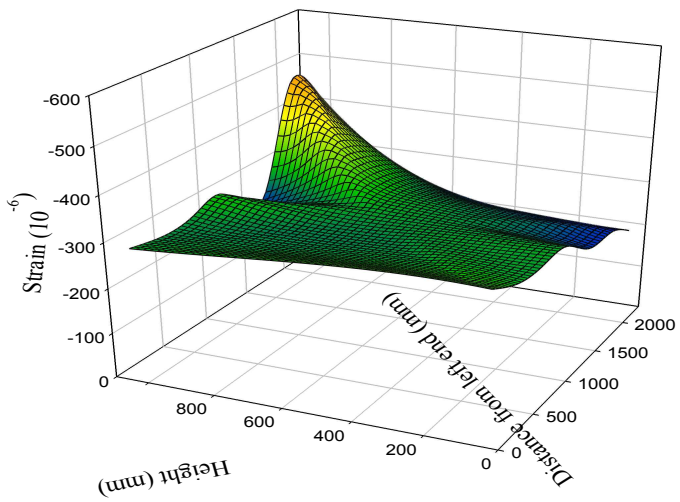


그림 2-99 종방향 긴장에 의한 종방향 변형률의 단면 내 분포 - Girder 1, 철근 변형률 기준, 휨변형 제외.

② Grider 2

그림 2-100은 종방향 긴장력 도입 단계에서 Girder 2의 경간 중앙부에서 계측된 변위와 설계단계에서 예측된 변위를 나타낸 것이다. Girder 2의 경간 중앙부에 발생한 변위는 평균 약 0.72 mm 이었으며, 설계 단계에서 예측된 값(3.96 mm)과 Girder 1의 변위에 비해 작은 솟음이 발생하였다.

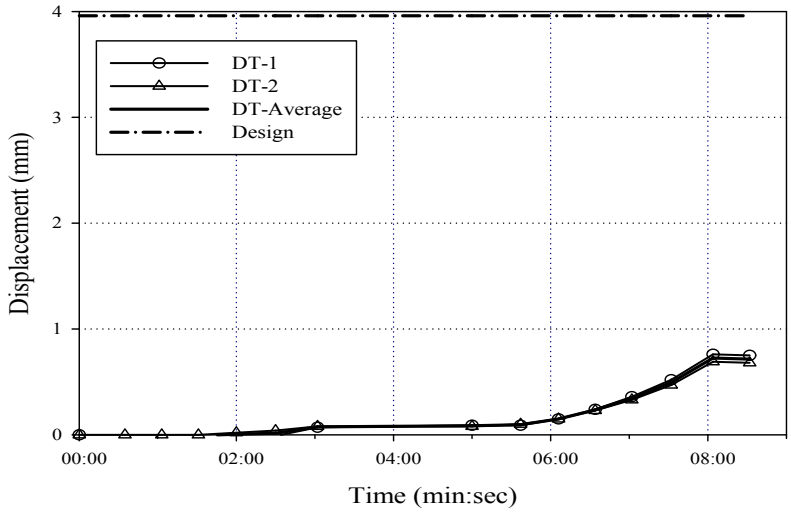


그림 2-100 종방향 긴장에 의한 변위 - Girder 2.

그림 2-101와 그림 2-102은 종방향 긴장력 도입 단계에서 Girder 2의 경간 중앙부 단면에서 계측된 교축방향 변형률을 설계 단계에서 예측된 변형률과 비교하여 나타낸 것이다. Girder 2의 경간 중앙부 단면에 설치된 교축방향 철근 변형률 게이지는 모두 단면의 횡방향 중심(core)에 위치하기 때문에 그림 2-101와 그림 2-102에 나타낸 변형률은 콘크리트의 변형률(G2-C-L-TU)를 제외하고 모두 동일한 결과를 나타낸다.

그림 2-101과 그림 2-102의 결과로부터, 종방향 긴장력 도입 단계에서 단면의 변형률이 모두 압축 측에 있는 것을 알 수 있다. 횡방향 중심에 설치된 철근 변형률 게이지를 기준으로 상·하단의 변형률은 각각 약 -217μ, -266μ이다. 설계 단계에서 예측된 단면 상·하단의 변형률은 각각 -138.8μ, -221μ이므로, Girder 2 실험체에 보다 큰 압축 변형률이 발생한 것을 알 수 있다.

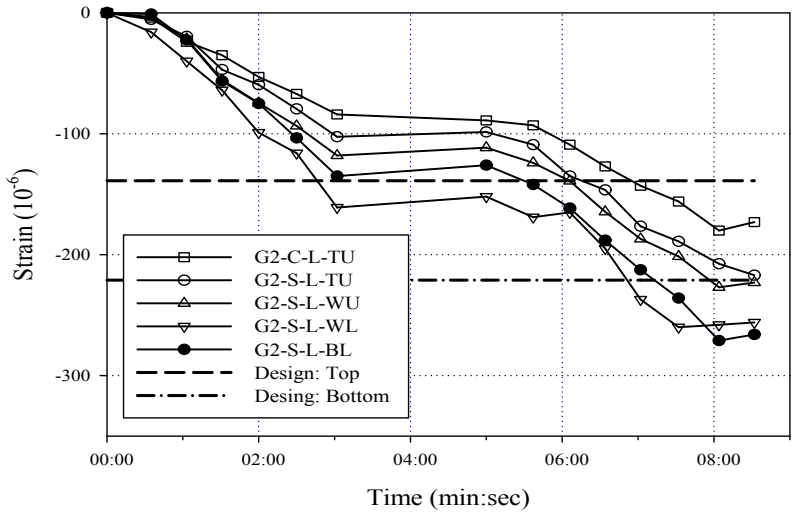


그림 2-101 종방향 긴장에 의한 단면 변형률 - Girder 2, Core.

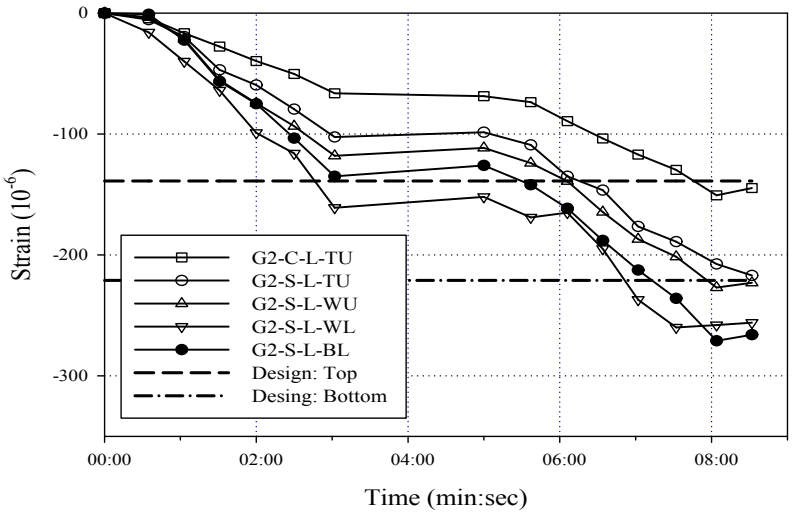


그림 2-102 종방향 긴장에 의한 단면 변형률 - Girder 2, Average.

그림 2-103은 종방향 긴장력 도입 단계에서 철근의 변형률을 기준으로 Girder 2 단면의 높이 방향에 대한 변형률 분포와 설계 단계에서 예측된 변형률 분포와 비교하여 나타낸 것이다. 그림 2-103의 변형률 분포로부터, 종방향 긴장력 도입 단계에서 Girder 2의 경간 중앙부 단면에 설계 단계에서 예측된 것에 비해 보다 큰 압축 변형률이 도입되었다는 것을 알 수 있으며, 휨변형은 설계 단계에서 예측된 것에 비해 작게 발생한 것을 알 수 있다.

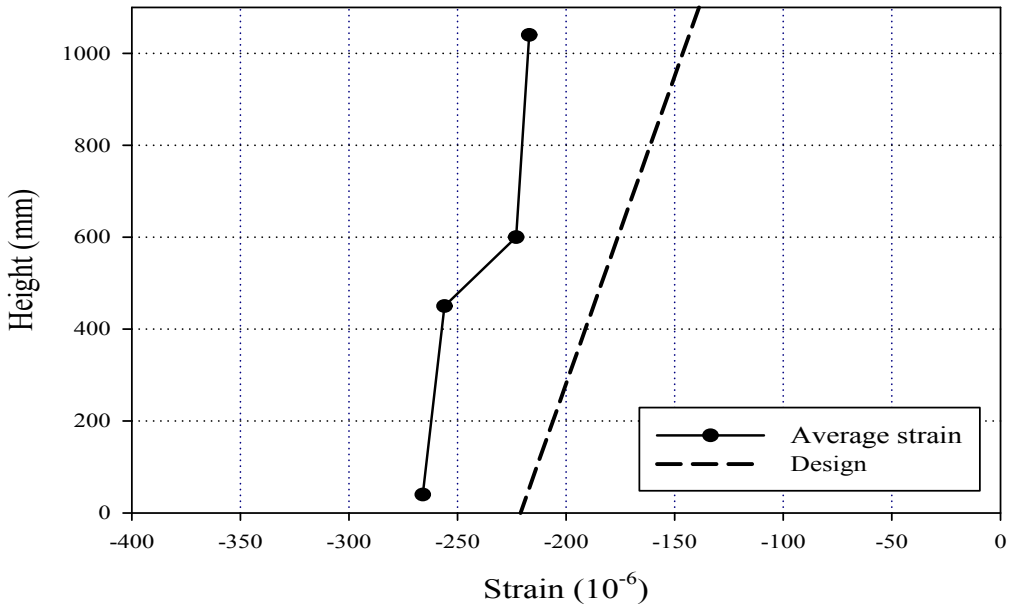


그림 2-103 종방향 긴장에 의한 단면 변형률의 연직방향 분포 - Girder 2, Average.

(나) 횡방향 긴장에 의한 거동

그림 2-104와 그림 2-105은 횡방향 긴장력 도입 단계에서 상·하부플랜지에 발생한 교축직각방향 변형률의 분포를 설계단계에서 예측된 변형률과 비교하여 나타낸 것이다. '실험개요'에서 설명한 것과 같이, 상·하부플랜지에 설치된 횡방향 긴장용 덕트의 간격은 경간 중앙부에서 2.0 m이다. 즉, 경간 중앙부에서 상·하부플랜지에 도입된 횡방향 긴장력(각각 1000 kN과 750 kN)이 폭 2.0 m에 걸쳐 단면에 균등하게 분포한다고 가정하면 상·하부플랜지에 도입될 것으로 예상되는 압축변형률은 각각 -62μ, -58μ이다.

그림 2-104와 그림 2-105의 횡방향 변형률의 분포로부터, 횡방향 긴장력에 의한 변형률은 상·하부플랜지의 단면 내에 균등하게 분포하지 않은 것으로 나타났으며, 상부플랜지의 상단과 하부플랜지의 하단에서는 인장 측의 변형률이 나타났다. 철근의 변형률 게이지(그림 2-104의 'Upper/Lower rebar in top flange'와 그림 2-105의 'Upper/Lower rebar in bottom flange')의 평균값을 설계단계의 예측 값(그림 2-104 및 그림 2-105의 'Design')

과 비교하면 상·하부플랜지의 중립축에 도입되는 축변형량은 예상된 값과 유사한 결과를 보이는 것으로 나타났다.

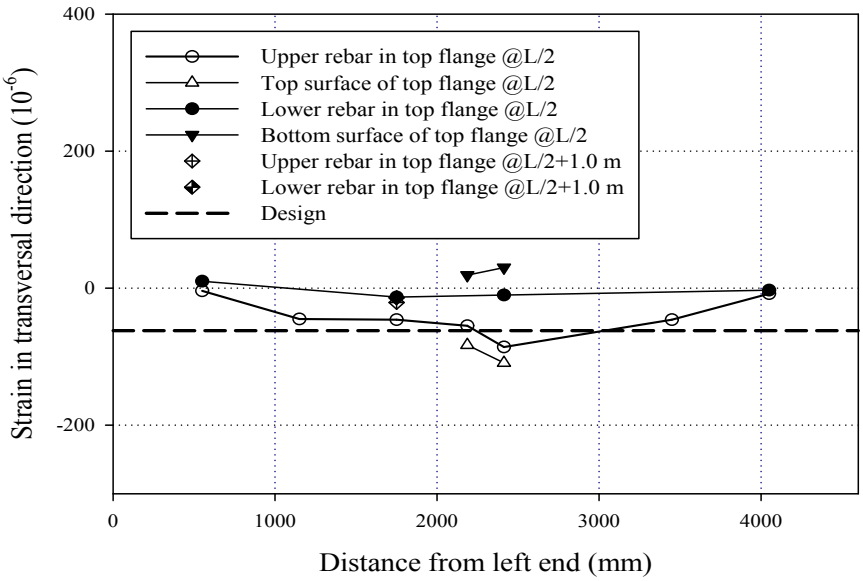


그림 2-104 횡방향 긴장에 의한 상부플랜지 교축직각방향 변형률의 횡방향 분포 - Girder 1.

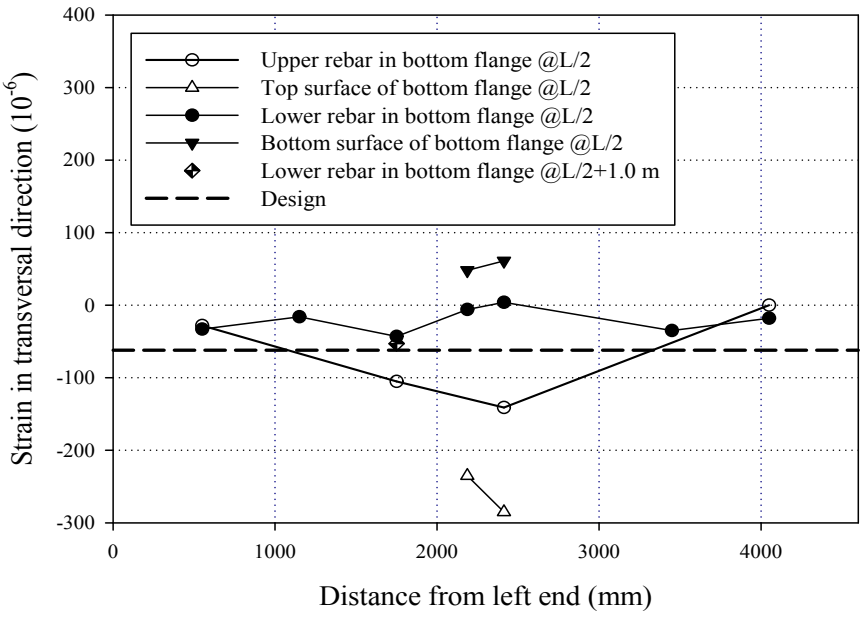


그림 2-105 횡방향 긴장에 의한 하부플랜지 교축직각방향 변형률의 횡방향 분포 - Girder 1.

(2) 편측 재하하중에 의한 거동(Step 1)

본 절에서는 두 개의 PSC I-거더가 횡방향으로 연결된 이후 두 거더의 합성거동을 검토하기 위하여 하나의 거더(Girder 2)에만 하중을 재하한 단계(Step 1)에서 실험체에 나타난 거동을 검토하였다. 재하된 하중 최댓값은 사용하중에 대한 거더 하나에 해당하는 등가의 재하하중(338 kN) 보다 다소 상회하는 347 kN이었다.

그림 2-106는 재하하중에 의해 경간 중앙부에서 발생한 실험체의 변위를 나타낸 것이다. 그림 2-106에 나타낸 실험체의 변위는 그림 2-84의 'Section C-C'에 나타낸 것과 같이 두 거더의 횡방향 중심에서 계측된 것으로, 하중이 재하(이하, Loading)되는 단계와 하중이 제거(이하, Unloading)되는 단계를 모두 나타낸 것이다. 그림 2-107는 Loading 단계의 거동을 보다 명확히 확인하기 위하여 그림 2-106의 결과에서 Unloading 단계의 거동을 제거한 결과를 나타낸 것이다. 사용하중을 편측으로 반복 재하한 결과, 실험체에는 잔류변형이 발생하지 않았으며 실험체는 선형탄성적인 거동을 보였다.

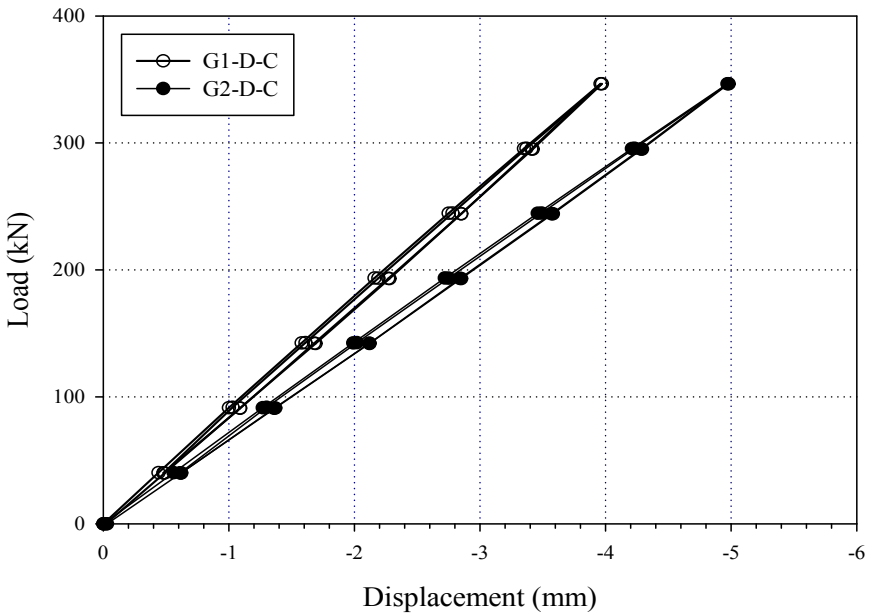


그림 2-106 편측 재하하중에 의한 변위 - Cyclic.

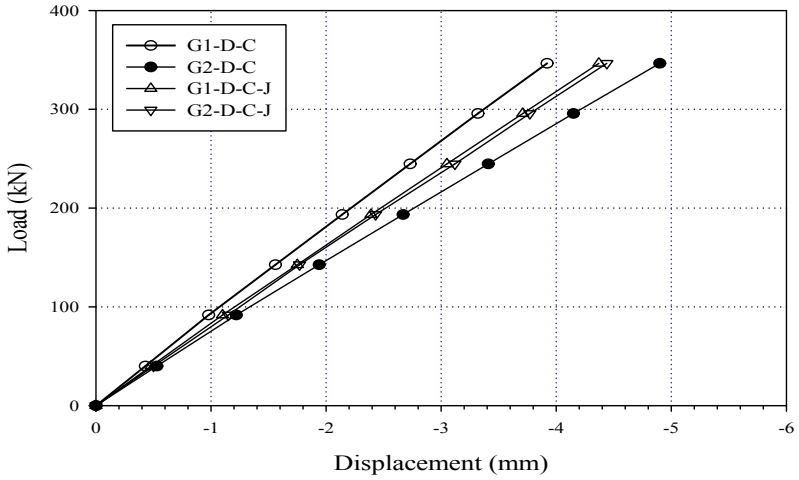


그림 2-107 편측 재하하중에 의한 변위 - Monotonic.

그림 2-108은 하중 단계별로 편측 재하하중에 의한 경간 중앙부 단면의 하단에서 계측된 변위의 교축직각방향 분포를 나타낸 것이다. 두 거더의 연결부 인근에 설치된 변위계(G1-D-C-J와 G2-D-C-J)는 연결부에서 각각 100 mm 이격된 위치에 설치된 것이며, 좌측 표식부터 G1-D-C, G1-D-C-J, G2-D-C-J, 그리고 G2-D-C의 순서로 변위계의 위치와 변위의 크기를 나타낸 것이다. 그림 2-108에 나타낸 변위의 분포로부터 하중 단계별로 네 지점에서 계측된 변위는 모두 연속선상에 있는 것을 알 수 있으며, 이러한 결과로부터 두 거더는 일체화된 거동을 보이는 것을 확인할 수 있다.

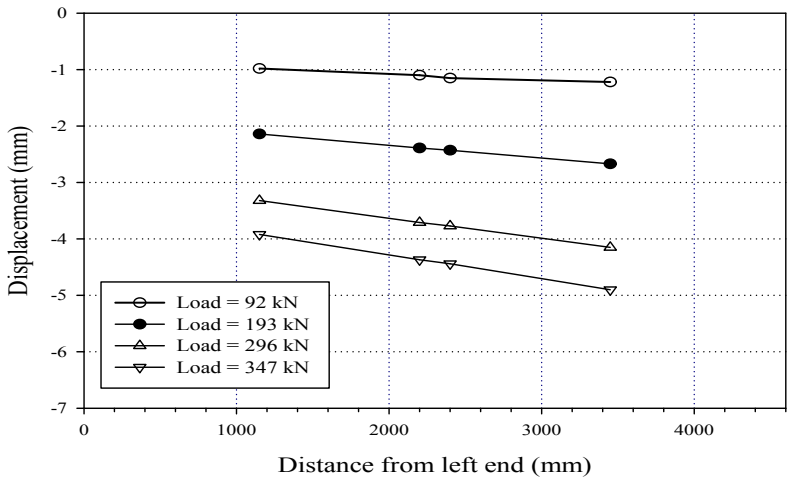


그림 2-108 편측 재하하중 단계별 지간 중앙부 변위의 분포

그림 2-109은 편측 재하하중에 의해 상부플랜지의 상부 철근과 하부플랜지의 하부철근에서 계측된 횡방향 변형률의 횡방향 분포를 나타낸 것이다. 편측 재하하중에 의해 상부플랜지에는 인장 측의 변형률이 발생하였고 하부플랜지에는 압축 측의 변형률이 발생하였다. 하지만, 편측 재하하중에 의해서 횡방향 긴장력에 의해 도입되는 압축 변형률(약 60)을 넘어서는 횡방향 인장 변형률은 발생하지 않았다.

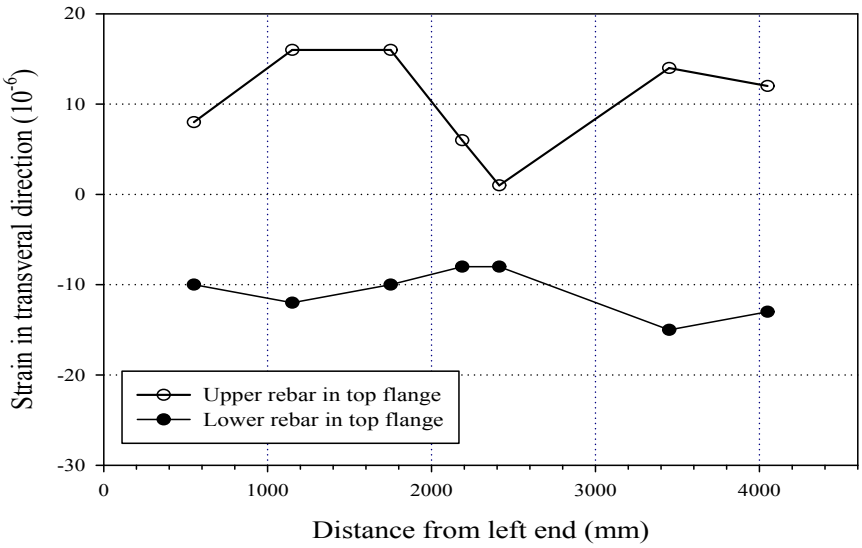


그림 2-109 편측 재하하중에 의한 단면 상·하단 교축직각방향 변형률의 횡방향 분포

(3) 균등 재하하중에 의한 거동(Step 2)

(가) 설계하중

본 절에서는 두 개의 PSC I-거더가 횡방향으로 연결된 이후 두 거더가 합성된 실험체의 휨거동을 평가하기 위해 두 거더에 동일한 하중을 재하한 단계(Step 2)에서 실험체에 나타난 거동을 검토하였다. 재하된 하중 최댓값은 자중을 제외한 계수하중(표 2-29 참조)에 대한 두 개의 거더에 해당하는 등가의 재하하중(1299.4 kN) 보다 다소 상회하는 1376.3 kN이었다.

① 하중-변위 거동

그림 2-110은 재하하중에 의해 경간 중앙부에서 발생한 실험체의 변위를 나타낸 것이다. 그림 2-110에 나타낸 실험체의 변위는 그림 2-84의 'Section C-C'에 나타낸 것과 같이 두 거더의 횡방향 중심에서 계측된 것으로, Loading 단계와 Unloading 단계를 모두 나타낸 것이다. 그림 2-111는 Loading 단계의 거동을 보다 명확히 확인하기 위하여 그림 2-110의 결과에서 Unloading 단계의 거동을 제거한 결과를 나타낸 것이다. 계수하중에 대한 등가의 재하하중을 반복 재하한 결과, 실험체의 경간 중앙부에서는 약 2.0 mm의 잔류변형이 발생하였다. 사용하중에 대한 등가의 재하하중(675.4 kN; 표 2-29 참조) 내에서 실험체의 휨강성은 설계단계의 해석 모델에 비해 작게 나타났으나 선형적인 하중-처짐 거동을 보였으며 그 이상으로 하중이 증가하면서 점차 실험체의 휨강성이 감소하는 경향을 보였다.

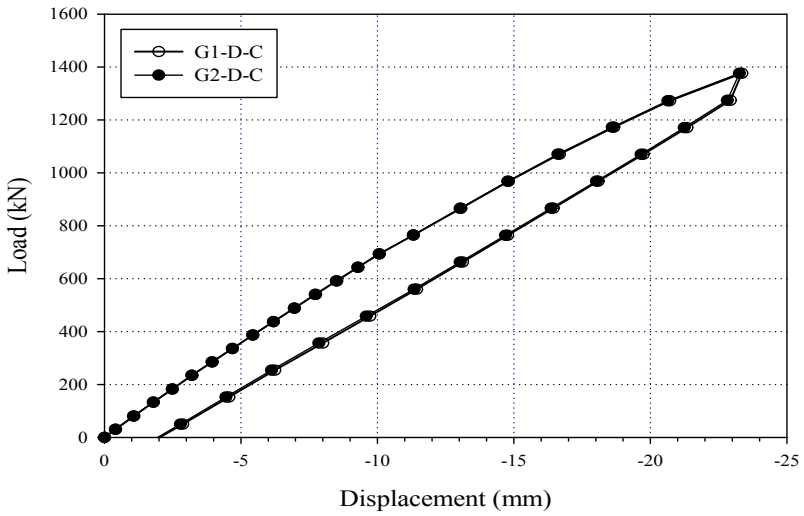


그림 2-110 균등 재하하중에 의한 변위 - Cyclic, 계수하중.

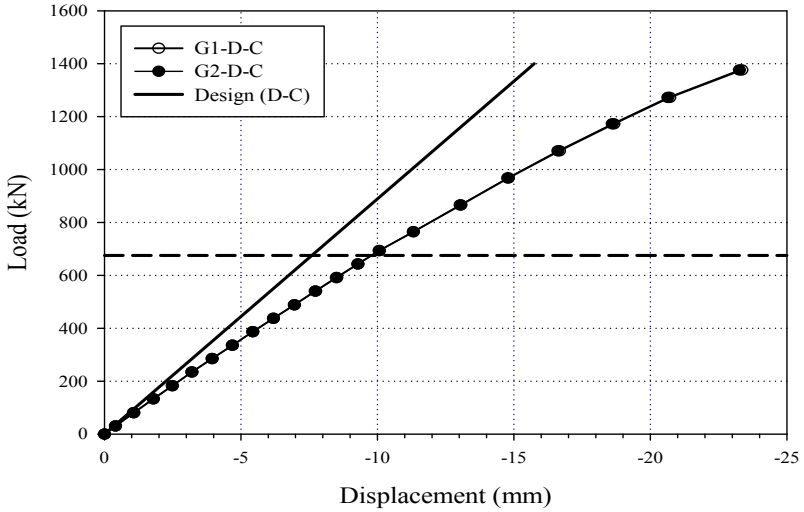


그림 2-111 균등 재하하중에 의한 변위 - Monotonic, 계수하중.

② 하중-변형률 거동

그림 2-112~그림 2-114은 계수하중에 대한 등가의 재하하중에 의해 실험체의 경간 중앙부 단면에서 계측된 교축방향 변형률을 설계 단계에서 예측된 변형률과 비교하여 나타낸 것이다. 그림 2-112과 그림 2-113은 단면의 횡방향 중심(core)에 설치된 변형률 게이지로부터 계측된 평균 계측 값을 나타낸 것이고, 그림 2-113 단면 내에서 같은 높이에 설치된 변형률 게이지의 평균 계측 값을 나타낸 것이다.

재하하중에 의해 실험체의 경간 중앙부 단면에서 발생한 변형률은 설계 단계에서 예측된 변형률과 비교하여 압축 측과 인장 측 모두에서 큰 것으로 나타났다. 즉, 실험체의 휨강성은 설계 단계에서 예측된 휨강성에 비해 낮은 것으로 나타났다. 재하하중의 증가에 따른 변형률의 변화는 동일한 높이에 위치한 모든 게이지의 평균 계측 값을 나타낸 그림 2-114에서 보다 명확히 나타났다. 그림 2-114에 나타난 '하중-인장 측 변형률'의 경향으로부터 인장 측 변형률은 약 700 kN 이상에서 급격하게 변화하는 것으로 확인할 수 있다.

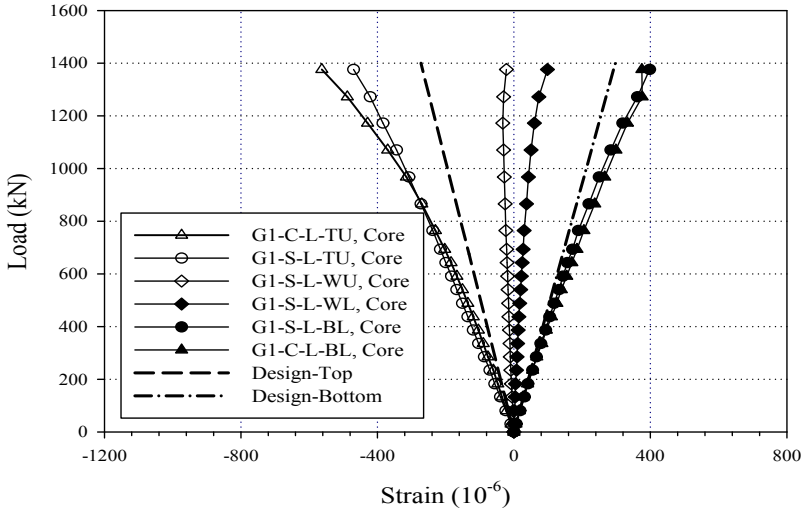


그림 2-112 균등 재하하중에 의한 변형률 - Girder 1, Core.

일반적으로 콘크리트 휨실험체에서 확인되는 인장 측 변형률의 급격한 변화의 원인은 인장 측 단면에 발생하는 휨균열이라고 할 수 있다. 즉, 실험체의 인장 측에 휨균열이 발생하는 하중은 사용하중에 대한 등가의 재하하중(675.4 kN)을 넘는 약 700 kN 이상인 것을 확인할 수 있다.재하하중에 의해 경간 중앙부에서 발생한 실험체의 변위를 나타낸 것이다.

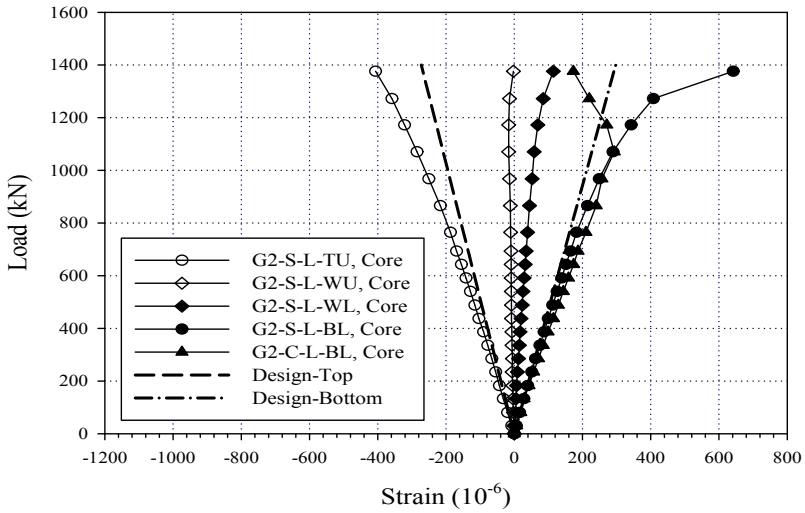


그림 2-113 균등 재하하중에 의한 변형률 - Girder 2, Core

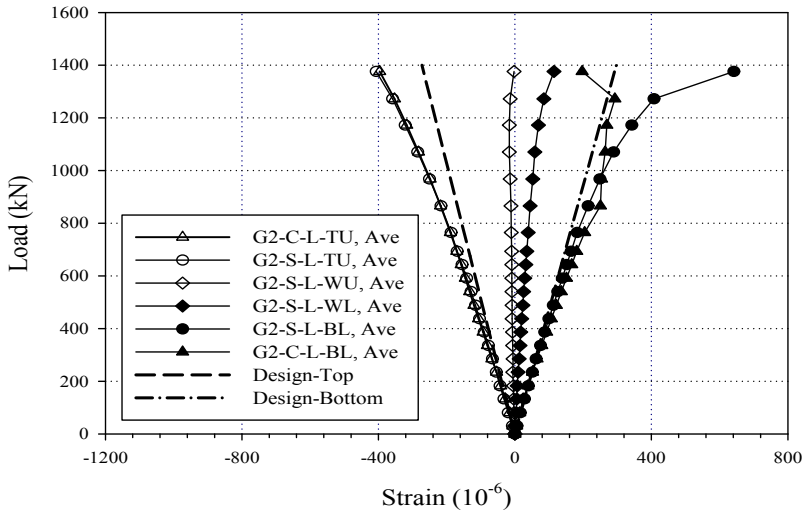


그림 2-114 균등 재하하중에 의한 변형률 - Girder 2, Average.

그림 2-115와 그림 2-116은 각각 재하하중에 의한 Girder 1과 Girder 2의 중립축 변화를 설계 단계에서 비균열 단면에 대하여 예측된 중립축과 비교하여 나타낸 것이다. 중립축은 횡방향 중심(core)에 위치한 상·하단 철근의 변형률(그림 2-115의 'G1-S-L-TU,BL of core'; 그림 2-116의 'G2-S-L-TU,BL'), 상단과 하단 각각 동일 높이에 설치된 모든 철근 변형률 게이지의 평균(그림 2-115의 'G1-S-L-TU,BL in average'), 그리고 웹의 중립축 인근에 위치한 변형률 게이지의 평균(그림 2-115의 'G1-S-L-WU,WL'; 그림 2-116의 'G2-S-L-WU,WL')을 기준으로 한 세 가지 방법으로 추정하였다. Girder 2의 경간 중앙부 단면에 설치된 교축방향 철근 변형률 게이지는 모두 단면의 횡방향 중심(core)에 위치하기 때문에 그림 2-116의 상·하단 철근 변형률 게이지를 기준으로 한 중립축('G2-S-L-TU,BL')은 'core'에 대한 결과와 'average'에 대한 결과를 구분하지 않고 나타내었다.

Girder 1의 경우(그림 2-115) 웹의 중립축 인근에 설치된 변형률 게이지와 상·하단 철근 변형률 게이지의 평균으로부터 추정된 중립축 높이가 유사한 결과를 보이는 것으로 나타

났으며, 설계 단계에서 예측된 중립축 높이와 비교하여 낮은 높이에서 중립축이 형성되는 것으로 나타났다. 하중 재하 초기 단계에서는 단면에 발생하는 변형률의 크기가 작아서 오차에 의해 영향이 크기 때문에 하중이 일정 수준(약 400 kN)으로 증가해야 중립축 높이에 대한 안정적인 결과를 얻을 수 있다. 중립축 높이가 안정적으로 추정되는 하중 이상의 재하하중에서 단면 하단의 휨균열에 의해 중립축의 높이가 올라가기 시작하는 하중은 약 800 kN 수준인 것으로 나타났다.

Girder 2의 경우(그림 2-116), 상·하단 철근 변형률 게이지의 평균 계측 값으로부터 추정된 중립축 높이에 비해, 웹의 중립축 인근에 설치된 변형률 게이지의 평균 계측 값으로부터 추정된 중립축 높이가 사용하중에 대한 등가 재하하중(675.4 kN) 수준에서 설계 단계에서 예측된 중립축 높이에 보다 가까운 결과를 보이는 것으로 나타났다. 그림 2-116에 나타낸 중립축 높이의 경향으로부터 Girder 2에서 단면 하단의 휨균열에 의해 중립축의 높이가 올라가기 시작하는 하중은 약 800 kN 수준인 것으로 나타났다.

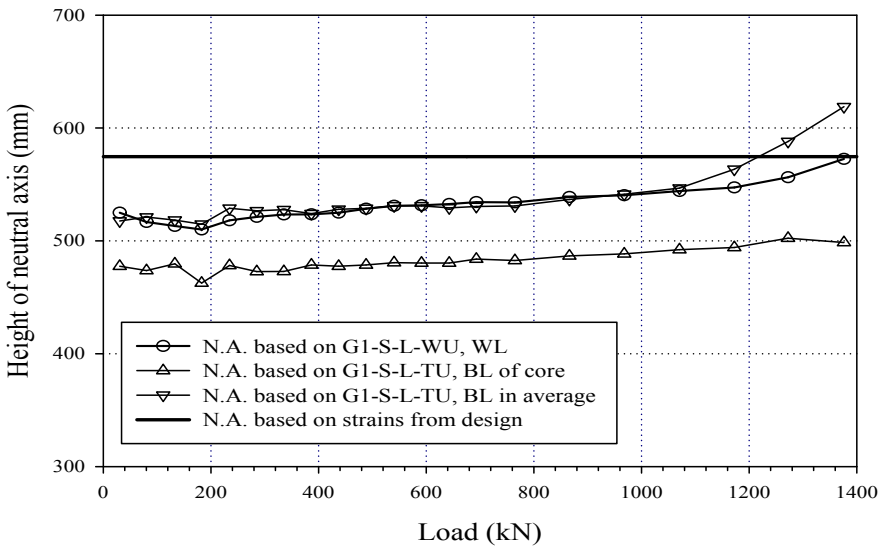


그림 2-115 균등 재하하중에 의한 중립축 변화 - Girder 1, 계수하중.

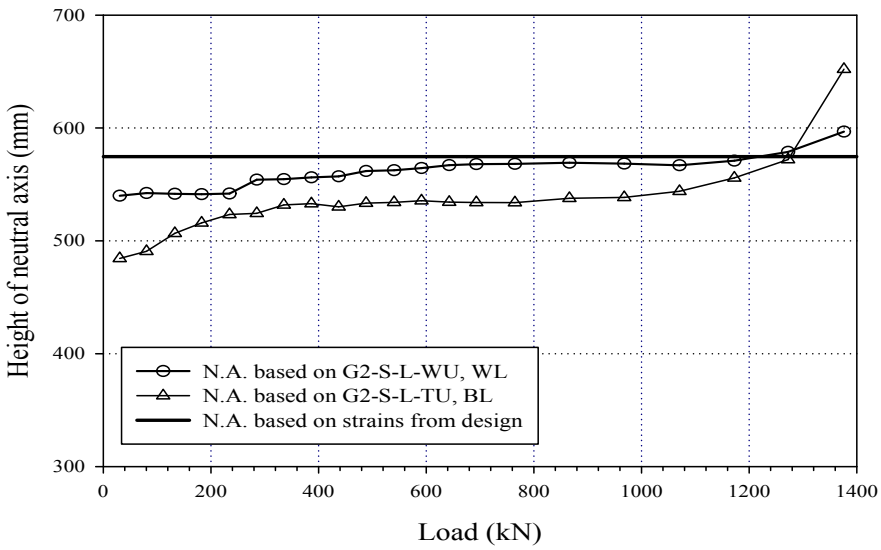


그림 2-116 균등 재하하중에 의한 중립축 변화 - Girder 2, 계수하중.

③ 변형률 분포

그림 2-117은 사용하중에 대한 등가의 재하하중과 유사한 수준의 재하하중(약 693 kN)에 의해 Girder 1에서 상·하부플랜지의 폭에 걸쳐 나타나는 종방향 변형률의 분포를 나타낸 것이고, 그림 2-118은 동일한 재하하중에 의해 Girder 2에서 상·하부플랜지의 폭에 걸쳐 나타나는 종방향 변형률의 분포를 나타낸 것이다. Girder 1에서 상부플랜지의 종방향 변형률은 전단지연현상(shear lag effect; Sedlacek and Bild, 1993; Ahn et al, 2004)에 의해 웹에서 멀어질수록 점차 감소하는 경향을 보였으며, 하부플랜지에서는 뚜렷한 경향이 나타나지 않았다. Girder 2의 경우에는 상·하부플랜지에서 모두 뚜렷한 경향 없이 대체로 유사한 종방향 변형률이 분포하는 것으로 나타났다. Girder 1의 상부플랜지의 종방향 변형률 분포에서 플랜지 끝단의 변형률(-137)은 횡방향 중심의 종방향 변형률(-219)의 약 63% 수준이었다.

그림 2-119과 그림 2-120는 Girder 1 및 Girder 2의 경간 중앙부 단면에 대한 종방향 변형률의 단면 내 분포를 나타낸 것이다. 그림 2-119과 그림 2-120의 결과에서 재하하중(약 693 kN)에 의해 발생한 것으로 예상되는 단면의 수직축 및 수평축에 대한 휨거동 효과를

제거한 결과를 그림 2-121과 그림 2-122에 나타내었다. 그림 2-121 및 그림 2-122의 결과로부터 하중재하 단계에서는 종방향 긴장 단계와 같은 뒤틀림이 발생하지 않은 것을 알 수 있다.

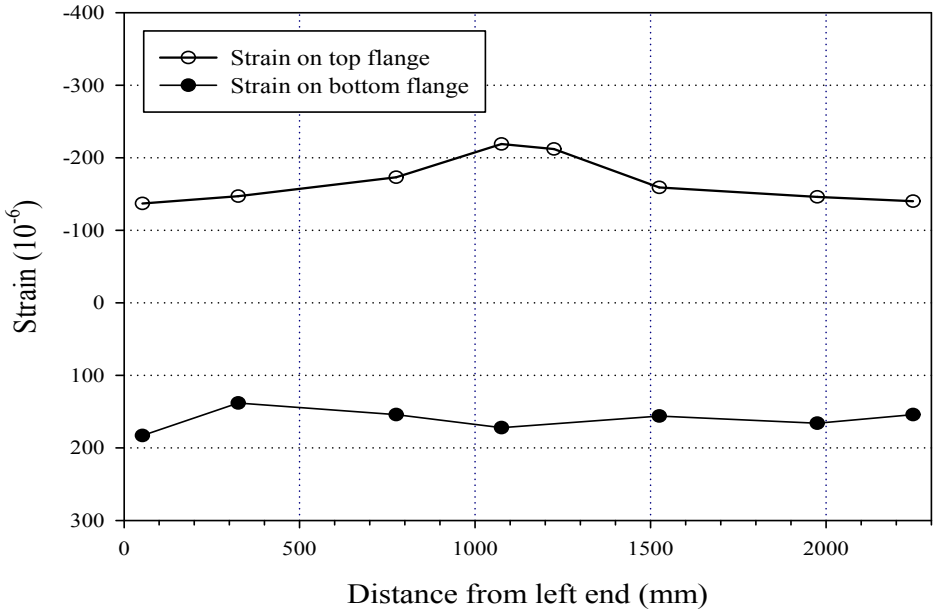


그림 2-117 균등 재하하중에 의한 종방향 변형률의 횡방향 분포 - Girder 1, 693 kN.

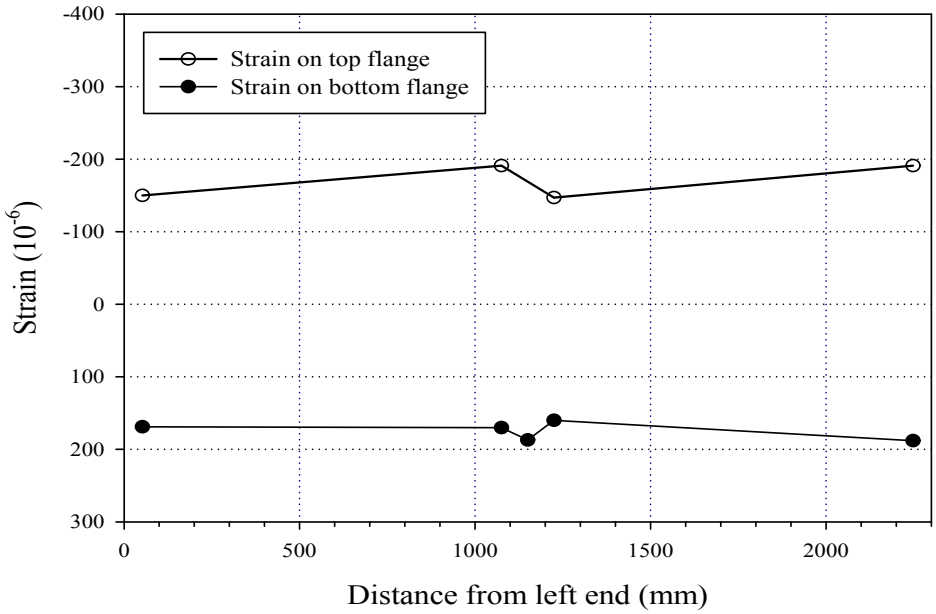


그림 2-118 균등 재하하중에 의한 종방향 변형률의 횡방향 분포 - Girder 2, 693 kN.

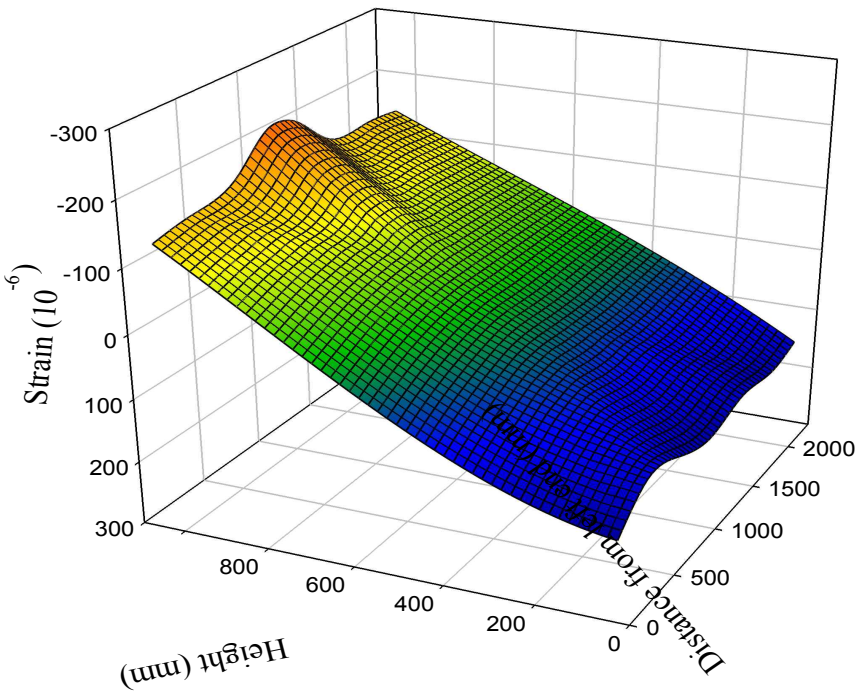


그림 2-119 균등 재하하중에 의한 변형률의 단면 분포 - Girder 1, 휨변형 포함.

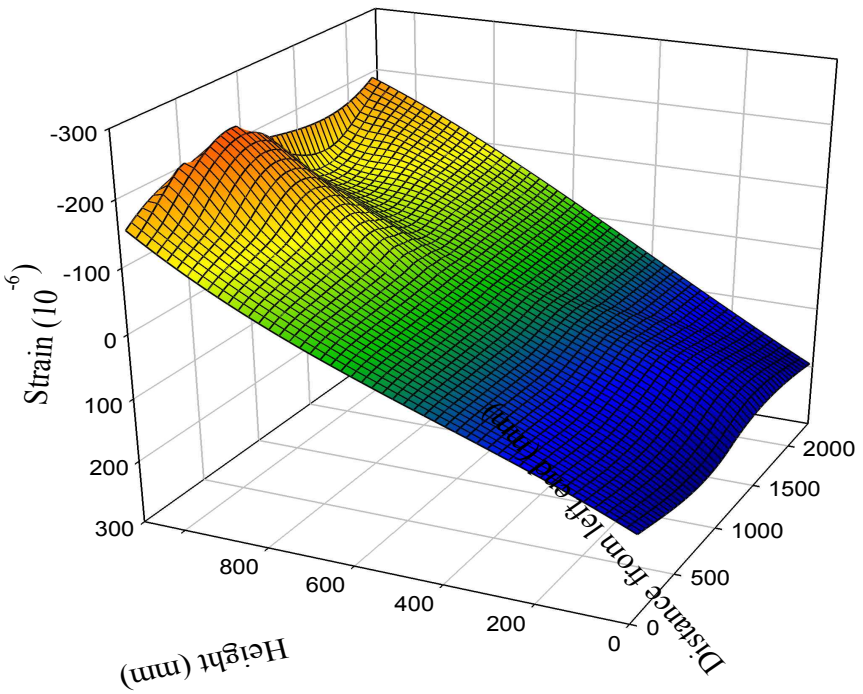


그림 2-120 균등 재하하중에 의한 변형률의 단면 분포 - Girder 2, 휨변형 포함.

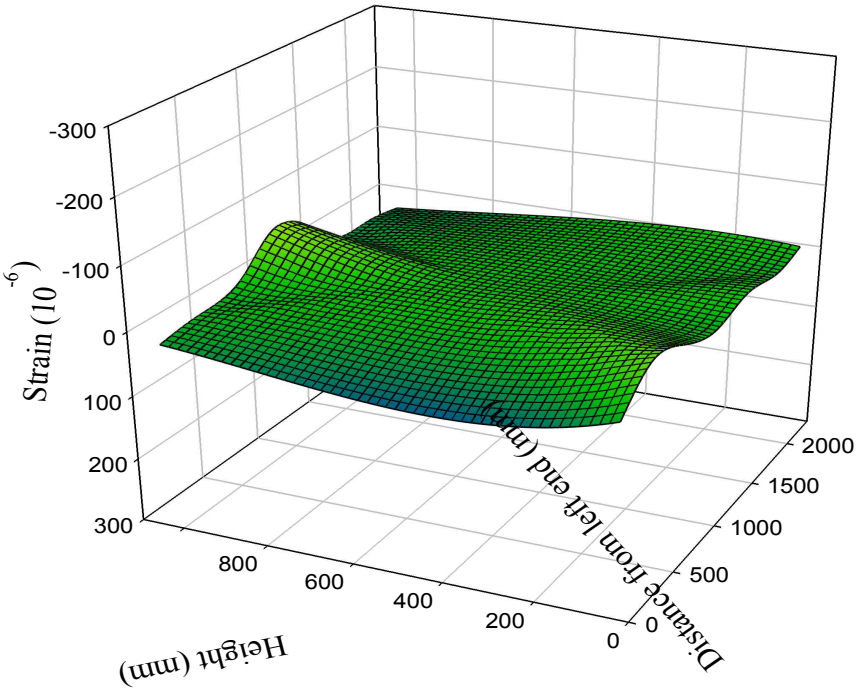


그림 2-121 균등 재하하중에 의한 변형률의 단면 분포 - Girder 1, 휨변형 제외.

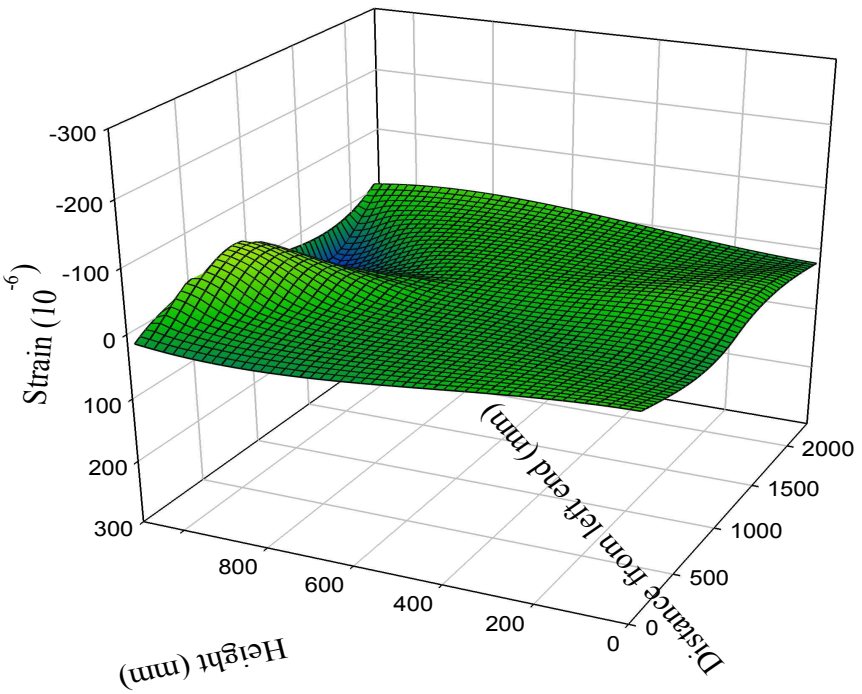


그림 2-122 균등 재하하중에 의한 변형률의 단면 분포 - Girder 2, 휨변형 제외.

(나) 극한하중

본 절에서는 실험체의 휨강도 및 극한하중에 대한 거동을 검토하기 위해 실험체에 작용시킬 수 있는 최대하중까지 하중을 재하하면서 실험체에서 나타난 거동에 대하여 기술하였다. 하중은 실험체의 상부플랜지에서 압축파괴가 일어나는 것을 방지할 수 있는 수준까지만 재하하였다. 재하된 최대하중은 약 2,800 kN이었다.

그림 2-123은 실험체에 재하된 최대하중까지의 재하하중에 의해 발생실험체의 변위와 설계 단계에서 예측된 단면의 휨강도에 대한 등가의 재하하중과 비교하여 나타낸 것이다. 그림 2-123에 나타낸 실험체의 변위는 그림 2-84의 'Section C-C'에 나타낸 것과 같이 두 거더의 횡방향 중심에서 계측된 것으로, Loading 단계와 Unloading 단계를 모두 나타낸 것이다. 최대하중까지 하중을 반복 재하한 결과, 실험체의 경간 중앙부에서는 약 15 mm의 잔류변위가 발생하였다. 그림 2-123에 나타낸 실험체의 휨강도에 대한 등가의 재하하중은, 자중에 의한 효과가 포함되어 있지 않은 재하하중과 비교하기 위해, 계산된 실험체의 휨강도(M_n)에서 자중에 의한 휨모멘트(M_d)를 제외한 값을 기준으로 계산된 것이다. 그림 2-123의 결과로부터 실험체에 재하된 하중의 최댓값(약 2,800 kN)은 설계 단계에서 예측된 휨강도에 대한 등가의 재하하중(약 2,320 kN)을 넘어서는 것을 알 수 있다.

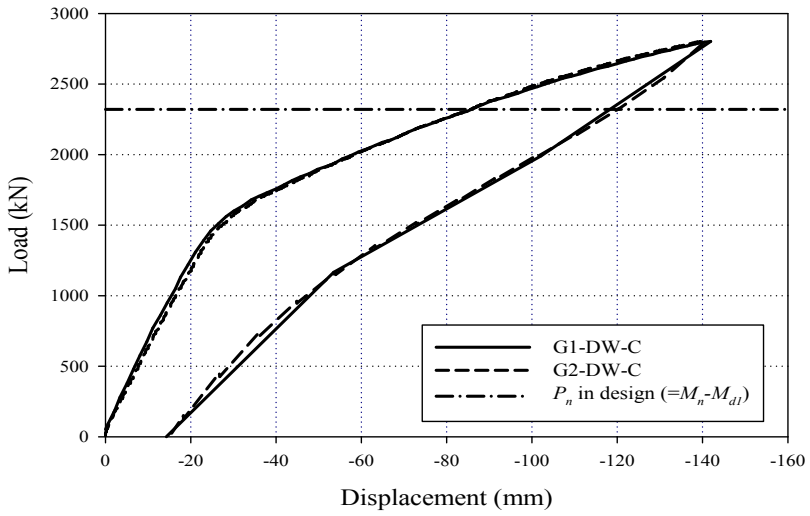


그림 2-123 균등 재하하중에 의한 변위 - Cyclic, 최대하중.

그림 2-124은 재하하중에 의해 실험체의 경간 중앙부 단면의 상·하단에서 계측된 교축방향 변형률을 나타낸 것이다. 그림 2-124에 나타낸 변형률은 단면 내에서 같은 높이에 위치한 모든 변형률 게이지의 평균 계측 값이다. 그림 3.33의 결과로부터 최대하중에서 하단 철근의 변형률('G1,2-S-L-BL')은 철근의 항복응력(400 MPa)에 대응하는 변형률(2,000 μ)을 넘어서는 것을 알 수 있다. 하지만, 상단 철근의 변형률('G1,2-S-L-TU')은 항복에 도달하지 않은 상태이고 콘크리트 단면 상단의 변형률은 압축 파고에 이르는 변형률(3,000 μ)에 이르지 않았기 때문에 실험체가 견딜 수 있는 하중과 변위는 본 실험체에서 재하된 최대하중과 변위 이상일 것으로 판단된다.

그림 2-125는 그림 2-124의 결과를 바탕으로 재하하중의 증가에 의한 두 거더의 중립축 높이의 변화를 나타낸 것이다. 중립축은 상부로 이동하다가 1,800 kN의 하중 이후부터 일정한 수준을 유지하는 것을 알 수 있다. 즉, 재하하중이 증가하면서 단면 하부에서 발생한 휨균열이 단면 상부로 진전하다가 약 1,800 kN 이상으로 하중이 증가하면서 균열은 더 이상 진전하지 않고 상부의 압축변형이 증가하는 한 것으로 판단된다.

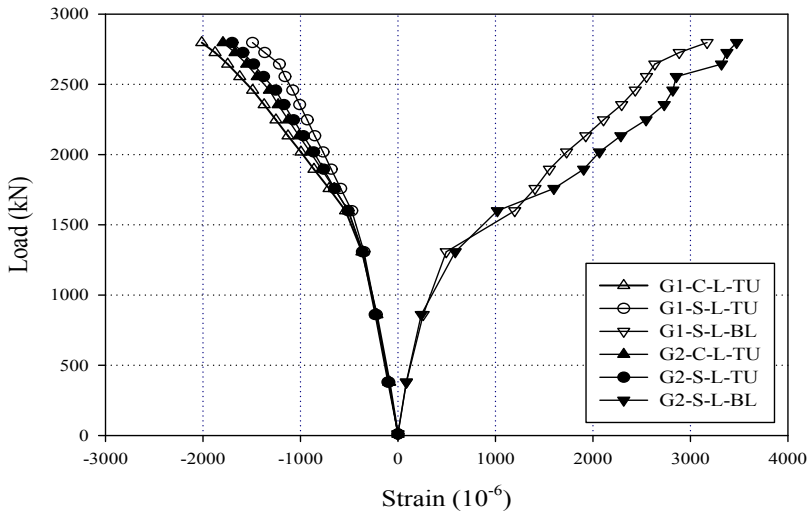


그림 2-124 균등 재하하중에 의한 변위 - Monotonic, 최대하중.

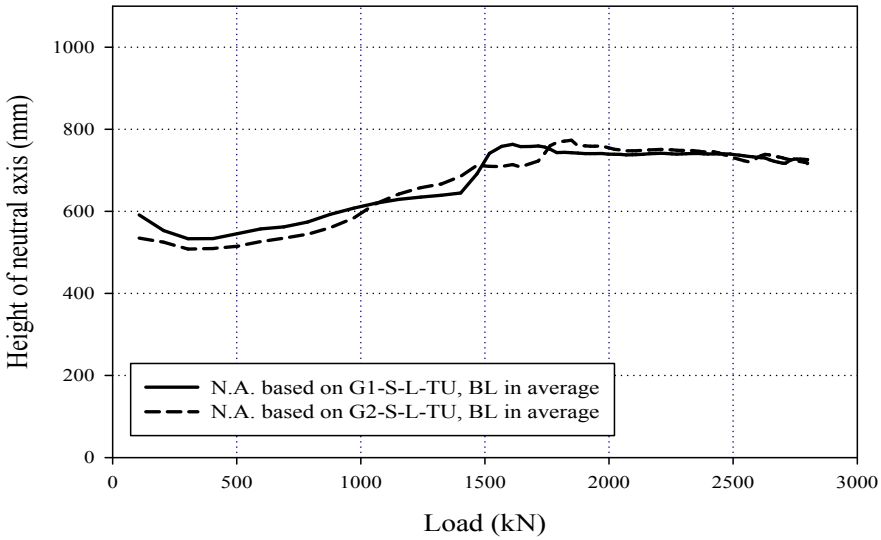


그림 2-125 균등 재하하중에 의한 중립축 변화 - 최대하중.

(4) 고유진동수 (동적 재하실험)

그림 2-126와 그림 2-127은 각각 진동실험을 통해 경간 중앙부(L/2 위치, 그림 2-91 참고)에 설치된 가속도계와 경간의 1/4 지점(L/4 위치, 그림 2-91 참고)에 설치된 가속도계에서 계측된 시간 영역의 가속도 데이터를 주파수 영역에 대하여 표현한 것이다. 그림 2-126와 그림 2-127의 진동실험 결과로부터 실험체의 1차 고유진동수는 약 5.71 Hz인 것을 알 수 있다.

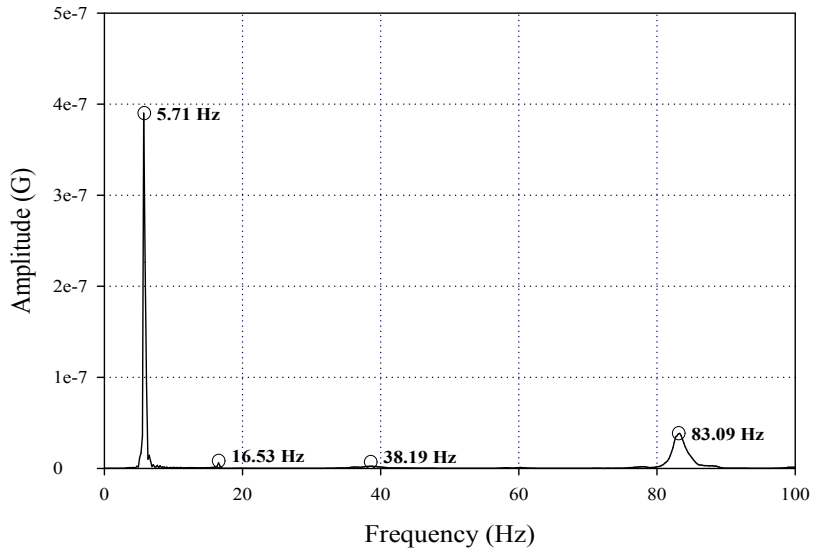


그림 2-126 주파수 영역의 가속도 응답 - L/2 위치.

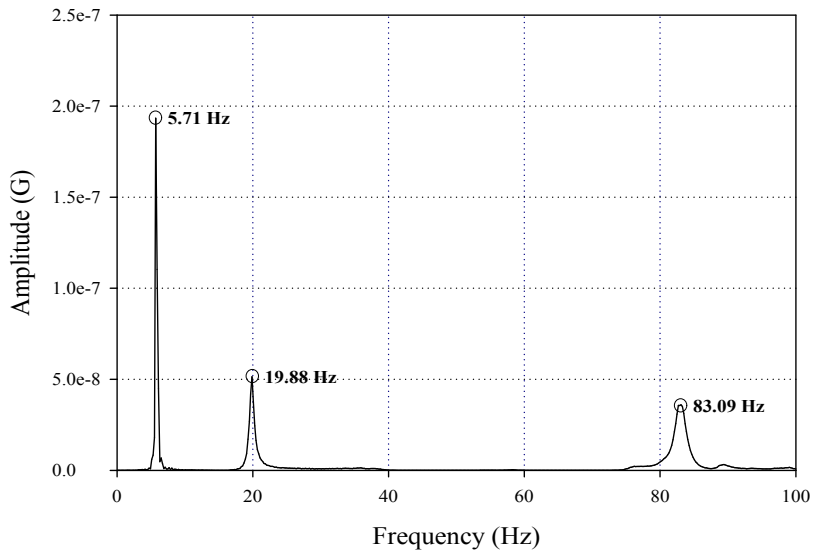


그림 2-127 주파수 영역의 가속도 응답 - L/4 위치.

(5) 결론

PSC I-거더를 이용한 조립식 중공 슬래브 교량의 거동을 검토하기 위해 실물모형실험체를 이용한 정·동적 재하실험을 실시한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(가) 종방향 긴장력 도입 단계에서 PSC I-거더의 솟음은 설계 단계에서 예측된 값에 비해 작게 나타났으며, 단면에 발생한 압축 변형률은 설계단계에서 예측한 것에 비해 큰 것으로 확인되었다.

(나) 종방향 긴장력을 도입하는 과정에서 PSC I-거더의 중앙부 단면에서 뒤틀림이 발생하여 플랜지 단면의 일부에 변형률이 크게 증가하는 거동이 발생하였다.

(다) 두 개의 PSC I-거더가 합성된 이후 하나의 거더에만 하중을 가력하여 거동을 검토한 결과, 두 개의 PSC I-거더는 일체화되어 거동하는 것을 확인 할 수 있었다.

(라) 두 개의 PSC I-거더에 균등한 하중을 가력하면서 실험체의 거동을 검토한 결과, 실험체의 휨강성은 설계 단계에서 예측한 것에 비해 작은 것으로 나타났으며, 사용하중에 대한 등가의 재하하중 이내에서 실험체는 선형탄성적인 거동을 보였다.

(마) 설계하중에 의해 상·하부플랜지에 발생한 종방향 변형률의 분포를 검토한 결과, 상부플랜지에서 전단지연효과에 의해 웹에서 멀어질수록 종방향 응력이 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

(바) 실험체의 휨강도는 설계 단계에서 예측한 휨강도에 비해 큰 것으로 나타났으며, 정적재하실험을 실시하기 전에 실시한 진동실험 결과를 검토한 결과 실험체의 1차 고유진동수는 약 5.71 Hz이었다.

다. 구조상세(일체식 교량화) 성능 실험

(1) 실험목적 및 내용

국토교통부 기술사업화 연구 지원과제로 선정되어 수행 중인 “PSC I 거더를 이용한 중공슬래브 교량 기술개발” 의 연구 결과물의 주적용 대상 교량의 연장길이 (약 25m)와 고안된 거더 형상이 Semi-Integral (반일체식)교량으로의 적용이 가능한 바, 개발교량의 보급 및 적용성 확대를 위하여 일체식 교량의 필수 구조 요소인 접속슬래브 연결부에 대한 실험 연구 수행하였다.

본 실험은 일반 접속슬래브의 거동 파악 목적이 아니라 고안 개발된 PCB_Slab (Prestressed Concrete Slab Bridge; 가칭)의 반일체식 교량 적용 시 합리적인 접속슬래브 연결철근의 고안과 이에 따른 설계, 시공 기술개발을 위한 실험이므로 실험 분석은 접속슬래브의 연결부 거동 파악으로 한정하여 수행하기로 결정하였으며 아래와 같이 필요한 구조 거동을 분석 할 수 있는 실험 계획을 수립하였다.

(가) 교대와 접속슬래브 연결철근 형상에 따른 상부구조 수축시 연결부 인장 거동 파악

① 3가지 제안 연결부 형상에 대한 파괴하중 실험

② 인장하중 작용시 주요사항

- 연결철근의 하중-변위 파악(P-δ curve)

- 파괴순서 고찰(콘크리트, 철근)

- 3가지 연결방안에 대한 구조거동 특성 파악

③ 연결철근 설계시 고려사항 (설계 고려사항 제시)

(나) 접속슬래브 침하 발생시 교대연결부의 휨 거동

① 하중재하에 따른 연결부 거동 특성(힌지거동, 일체거동)

② 부모멘트 인장 철근 계측(철근 하중 변위)

③ 합리적 연결방법 및 고려사항 제시

(2) 접속슬래브 설치기준 검토

(가) 접속슬래브 설치 목적

아래 그림은 아스팔트 포장 도로 상에 위치하는 교량의 접속슬래브 구성을 보여주며 기본적으로 접속슬래브는 상대적으로 다짐도가 떨어지는 교량 뒷채움부에서 공용 중 발생 가능한 자연 다짐 침하로부터 진입출부에 발생가능한 단차를 예방하여 차량의 충격하중으로부터 교량 구조물을 보호하여 유지관리의 효율성을 증대하고 사용자에게 쾌적한 주행환경을 제공하기 위하여 설치된다.

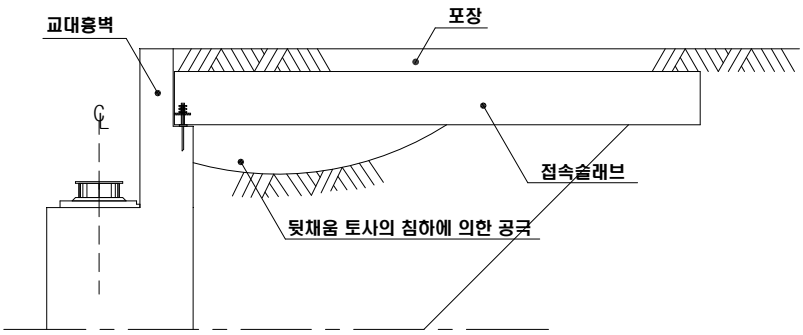


그림 2-128 접속슬래브 설치 개요도 (아스팔트 포장)

콘크리트 포장이 사용되는 교량의 경우는 아래 그림과 같이 받침 및 완충슬래브를 배치하여 콘크리트 포장부에서 발생하는 온도신축 변위도 함께 처리 할 수 있는 형상을 반영하고 있다.

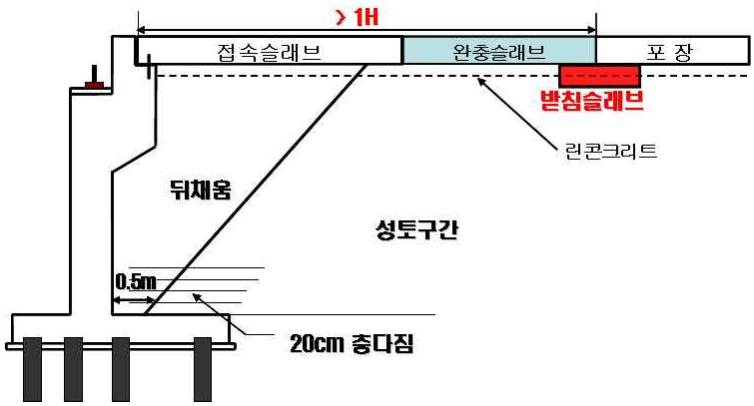
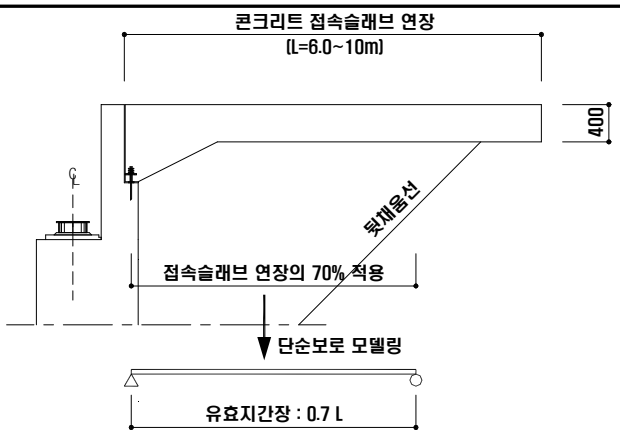


그림 2-129 접속슬래브 설치 개요도 (콘크리트 포장)

국내의 경우 접속슬래브는 일측 단부가 교대 흉벽에 도웰(Dowel)바의 설치로 연결하게 되므로 기본적으로는 하단부 토사부에 의하여 지지되는 일반슬래브 구조 개념으로 거동하나 설계시는 직하면의 공극 발생을 대비하여 단순보 개념을 적용하고 설치 길이는 최대 10m를 초과하지 않도록 규정하고 있다.

접속슬래브 구조 설계시의 일반적 적용 기준은 아래 표와 같다.

표 98. 접속슬래브 구조설계 적용기준

교대 뒷채움부의 지반침하로 인한 공동구 발생을 고려해 콘크리트 슬래브 연장의 70%를 가진 단순보로 가정 <도로설계요령 제3권 p440>	

(3) 실험 계획

기 개발된 PCB-Slab 교량 거더의 형상특성을 감안하고 향후 적용성 확대를 위하여 개발기술의 반일체식 교량으로의 기술 접목시 필요한 접속슬래브 연결 철근방안에 대한 구조성능 평가를 위하여 3개의 연결철근 형상에 대한 실험을 제안하였다. 각 연결방안에 대하여 재하 하중의 목적에 따라 직접인장과 휨 실험을 각각 실시키로 계획하였다. 접속슬래브와 교대 연결부는 힌지와 일체 연결을 구현하는 연결방법을 반영하고 각 구조거동을 확인할 수 있는 재하실험 계획을 수립하였다.

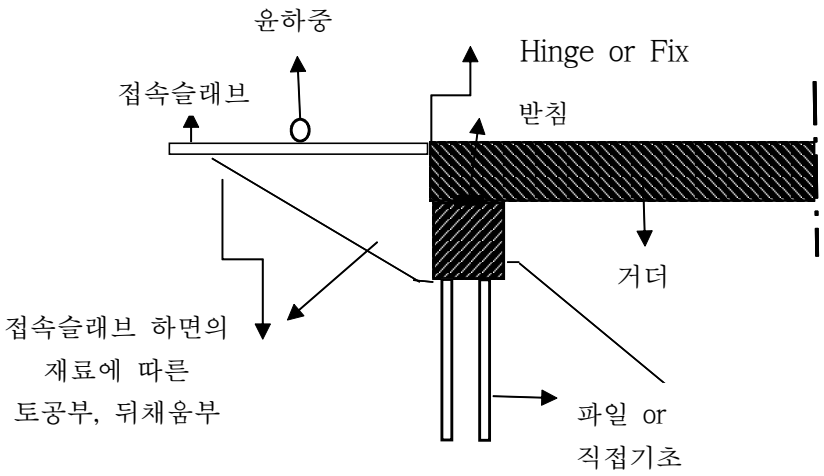


그림 2-130 일체식 교대 교량의 구성도

상기 그림에서와 같이 일체식 교량에서는 외기 온도변화로 발생하는 상부거더 구조의 신축은 접속슬래브와 같이 거동이 필요하므로 접속슬래브와 교대 연결 결합부는 구조 및 기능 측면에서 중요하다. 접속슬래브와 교대 연결부는 거더의 온도신축 변위에 따라서 접속슬래브와 함께 변위 발생이 가능한 상세 구조가 필요하다. 일체식 교량의 적용이 빈번한 국외지역의 설계 및 시공 문헌자료를 조사 분석한 결과, 크게 두 가지 구조 개념을 구현하는 연결방안을 실시하고 있으며 연결부 상부 부모멘트 연결철근의 존재 유무에 따라서

□ Hinge 거동

□ 일체(Fix) 거동

을 선택 적용하고 있으나 설계자들은 힌지거동의 반영을 선호하는 것으로 조사된다. 이를 감안하여 연구 개발된 PCB-Slab에 적용 가능한 연결철근을 단순성과 시공성을 고려하여 3가지 철근 연결형상을 고안 하였으며 결과를 설계기준에 맞추어 실험체를 설계 제작하였다.

(가) 인장, 휨 실험체의 설계 및 제작

접속슬래브의 실험체 설계는 콘크리트 포장에 적용되는 한국도로공사 설계 기준을 적용하였으며 제작과 해석의 편의를 위하여 단위 폭으로 설계 및 제작하였다. 사용재료는 철근

H 19 / SD 400을 사용하였으며, 사용 콘크리트 설계기준강도는 PCB-Slab 거더와 접속슬래브에 각각 40 MPa, 27 MPa를 적용하였다. 실험체 형상은 실험 하중의 가력을 위하여 인장 실험체의 경우, 양단부에 PS 강봉으로 고정, 설치 할 수 있도록 실험 기관과 사전 협의하여 내용을 반영하였다.

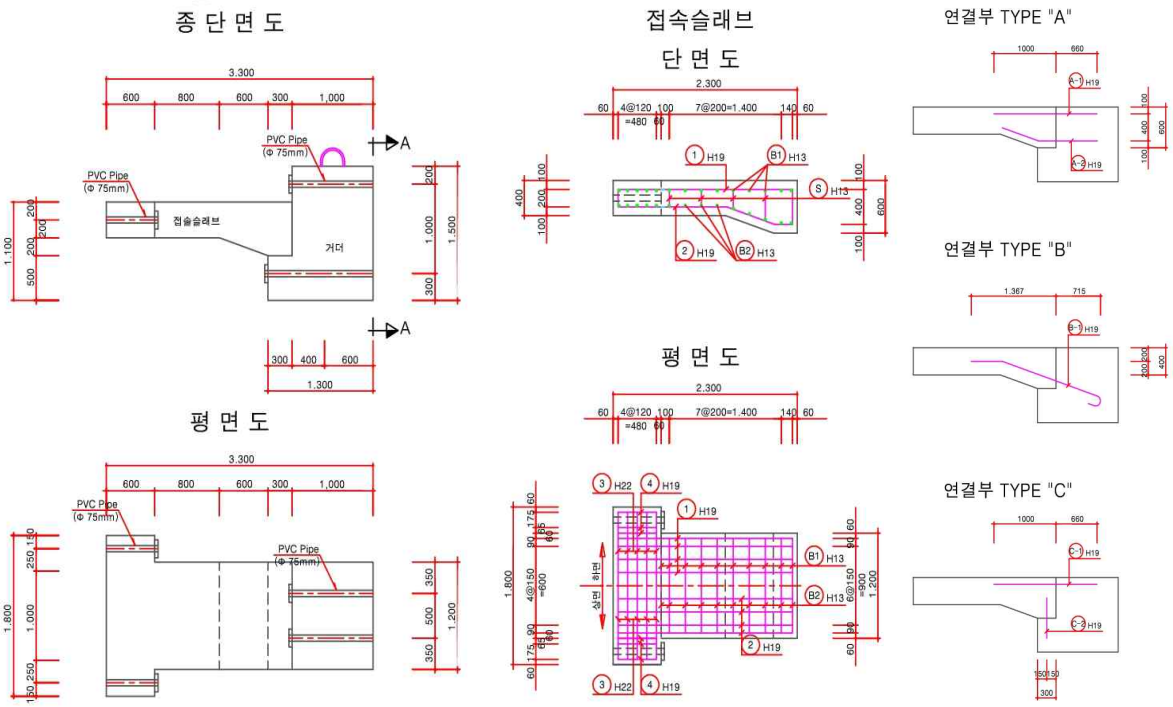


그림 2-131 인장 실험체 설계단면

3가지 연결철근의 형상은 기본적으로 부모멘트 연결철근을 도입한 일체(Fix)형 A와 C Type과 힌지거동을 유도한 B Type으로 구분하여 결정하였다. A Type의 경우는 일체거동으로 발생 가능한 연결부 부모멘트를 처리하기 위한 상부 연결철근과 하부의 경사 철근을 배근하였으며, 일체 거동의 C Type 경우는 상부는 A Type과 동일하고 하부는 시공성을 고려하여 지점부에 다수의 수직 철근을 가지는 배치를 반영하였다. 전형적 힌지 철근이 사용되는 B Type의 경우는 접속슬래브에서는 가능한 중립축에 위치하고 이후 경사부는 가능한 실험체 하면에 위치토록 배근을 하여 힌지거동을 구현하기 손쉽게 철근을 배치하였다.

A와 C 실험체의 상부 부모멘트 연결철근의 경우 접속슬래브 방향으로 겹이음 길이를 반영하여 1000mm 매입과 PCB-Slab 거더로 D-19철근의 정착길이에 해당하는 660mm매입을 설계시 반영하였다. 실험체의 길이는 약 2.3m를 적용하여 인장 가력지점으로부터 충분한 거리를 확보하여 가력하중이 가능한 단위 폭에 균일한 평균하중으로 연결부에 작용 할 수 있도록 계획하였다.

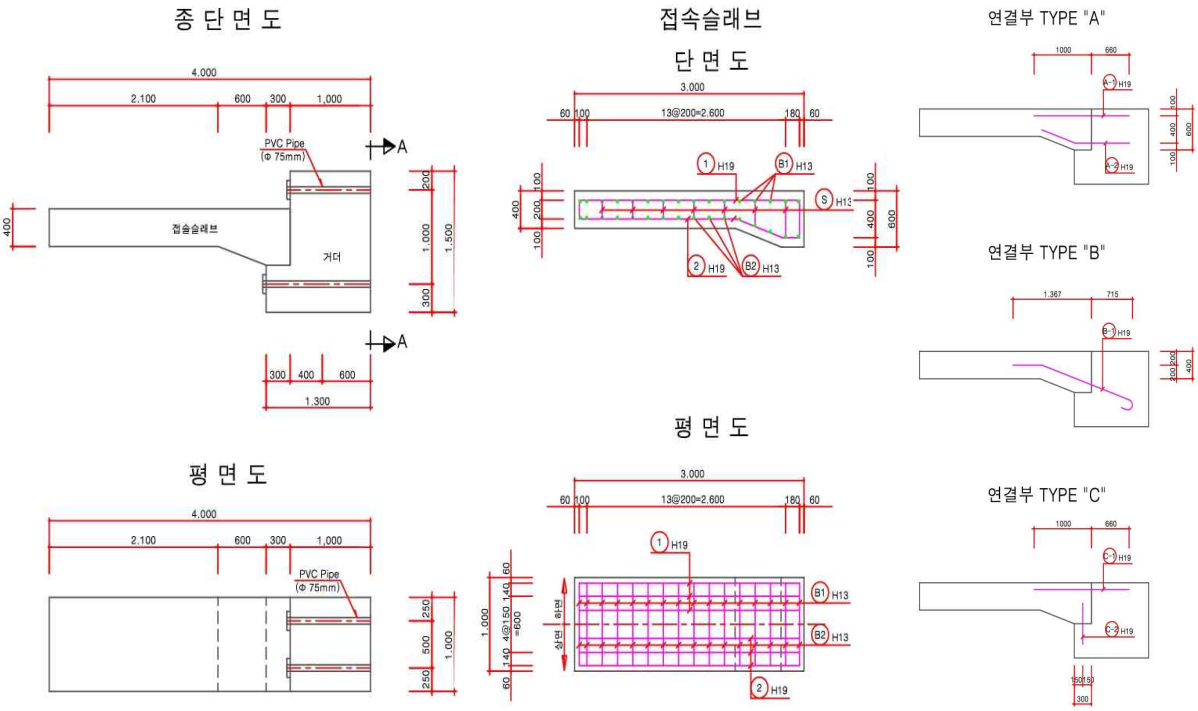


그림 2-132 휨 실험체 설계단면

위 그림은 휨 실험체의 설계도면을 보여주며 적용된 연결철근의 형상은 인장 실험체와 동일하다. 접속슬래브의 휨 거동을 위하여 인장실험체의 2.3m의 길이를 3m로 연장하였으며 연결철근의 배근형상은 동일하나 배근 수량의 경우 인장 실험체의 상부철근 9가닥 하부 5가닥 철근배근을 상부 7가닥, 하부 4가닥으로 감소하여 배근을 계획하였다. 배근수량 조정 사유는 휨 거동시 각 연결철근의 구조적 역할을 보다 명확하게 관찰하기 위한 목적이다.

6개 인장, 휨실험체는 경기도 여주시 소재의 콘크리트 구조실험체 전문제작업체인 토탈피씨산업(주)에 의뢰하여 아래 사진과 같이 공장제작을 하였으며, 사용 콘크리트의 공시체

를 제작하여 28일 압축강도 시험을 실시한 결과, 적용 설계기준 강도인 28 MPa, 40 MPa를 상회하는 결과를 확인하였다.



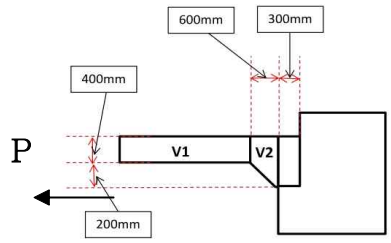
그림 2-133 실험체 제작 사진

(나) 하중재하

① 접속슬래브 인장실험

접속슬래브의 인장 실험은 직접인장 가력을 위한 실험체 Setting을 위한 강봉 설치를 고려한 작업 외는 특별한 고려사항은 필요 없었으며 가력하중의 범위에 따른 인장거동 특성을 주의 깊게 고찰하기 위한 하중범위를 사전 검토는 다음과 같다. 인장하중은 아래 표와 같이 실험체의 자중이 중요 결정요소가 되기 때문에 실험체의 길이가 증대됨에 따른 자중을 고려시 약 100 KN의 가력하중 범위가 실제적 작용하중으로 판단되었고 철근의 매입 부착강도 등을 감안시 약 800 KN 수준의 가력상태에서 파괴가 예측되었다.

접속슬래브 연결부 인장 실험 가력(안)



1. 접속슬래브 중량만큼의 인장 필요 (마찰계수무시)
2. 설계규정상 접속슬래브 최대 길이 8m
3. 9 ton까지 가능한 정밀가력 (신구접합부crack 발생시점 체크)
4. Type별 인발최대하중(구조계산)까지 가력
(신구접합부 이격(crack) 발생시점 체크 및 이격량 관찰)
5. Type별 인발파괴시까지 가력 (가능한 경우)
(신구접합부 이격(crack) 발생시점 체크 및 이격량 관찰)

슬래브 연장(m) 브라켓상부제외	V_1 (m^3)	V_2 (m^3)	V_t(m^3) [V_1+V_2]	접속슬래브 중량 (ton)	가력 (ton)
2	0.56	0.3	0.86	2.15	2
3	0.96	0.3	1.26	3.15	3
4	1.36	0.3	1.66	4.15	4
5	1.76	0.3	2.06	5.15	5
6	2.16	0.3	2.46	6.15	6
7	2.56	0.3	2.86	7.15	7
8	2.96	0.3	3.26	8.15	8
9	3.36	0.3	3.66	9.15	9
10	3.76	0.3	4.06	10.15	10
⋮					11
인발파괴하중 (약식계산)	A Type				39.36
	B Type				60.19
	C Type				83.11

그림 2-134 접속슬래브 연결부 인장 실험 가력(안)

② 접속슬래브 휨실험

인장실험의 경우는 접속슬래브와 교대연결부의 구조 거동 및 성능을 확인하기 위한 직접 인장 실험이므로 실험 장비를 고려한 부분을 제외하고 특별한 계획이 필요 없으나 휨 실험의 경우는 연결부 형태에 따른 힌지거동의 확인과 일체(Fix)거동에서의 부모멘트 철근의 역할 고찰이 필요하므로 이를 감안하여 아래와 같이 가력하중 범위를 검토하였다. 실제 접속슬래브의 거동의 이상화는 아래 그림의 세 번째와 같다고 판단되나 실험실에서 접속슬래브의 지반지지 조건을 구현 할 수 없고 본 실험의 목적은 일체 거동의 연결부에서 부모멘트 철근의 구조 거동이므로 연결부에 최대 부보멘트를 유발하는 하중재하에 해당하는 1안의 지점 선하중 가력방안을 휨 실험 방법으로 결정하였다. 그 외 외팔보 및 외팔보의 지점 도입방안의 재하방법도 고려는 하였으나 이는 활하중 재하에 따른 접속 슬래브의 실거동의 휨 변위와는 구조 개념이 상이하게 되어 가력방안에서 배제하였다.

휨 실험 방안에서 가력하중의 위치, 크기 및 이에 따른 실험체의 응력분포의 경향을 실험 수행 전에 파악하기 위하여 구조해석을 아래와 같이 Solid modeling하여 3차원 탄성 수치해석을 수행하였으며 가력방안을 접속슬래브 부모멘트 연결부에 휨 인장응력을 크게 발생시킴을 확인하였다.

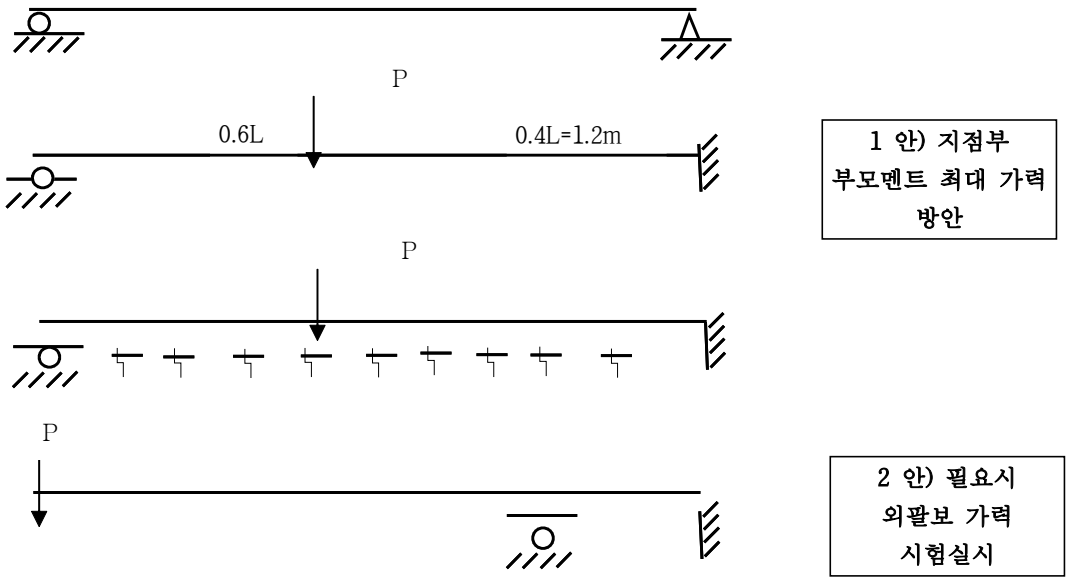


그림 2-135 휨실험 하중 재하 검토

기본적으로 가력하중으로 발생하는 모멘트에 의한 응력 값이 2.7 MPa (균열발생 응력 = 개략 접속슬래브 콘크리트 강도의 fck = 27 Mpa의 1/10 수준)에 해당하는 가력하중의 크기를 수치해석으로 조사한 바 최대 가력하중은 1000 KN 수준으로 판단되어 결과를 실험에 참조하였다.

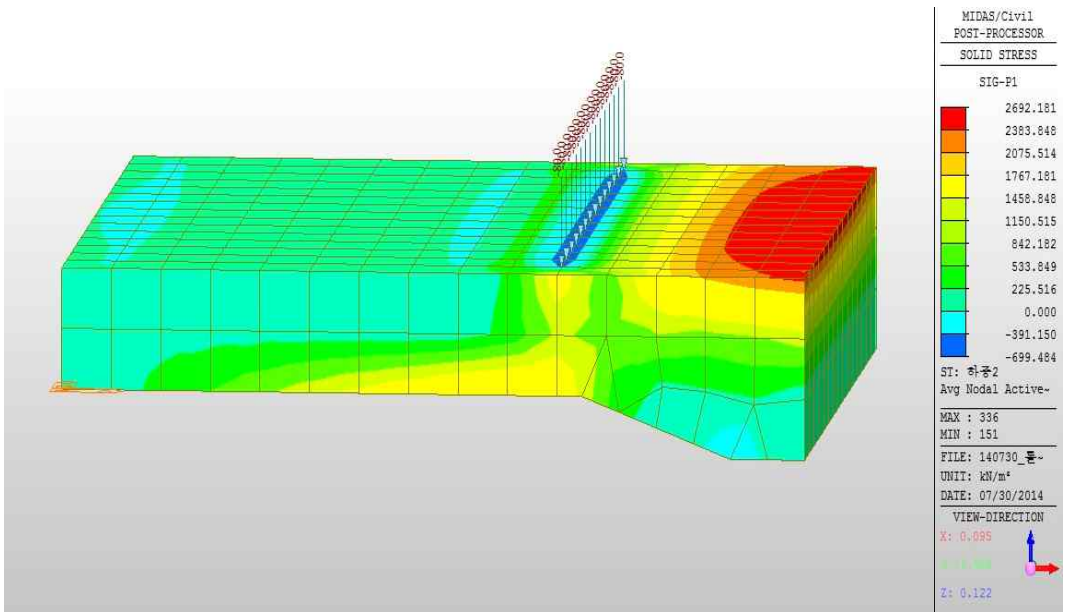


그림 272. 휨실험체 구조해석

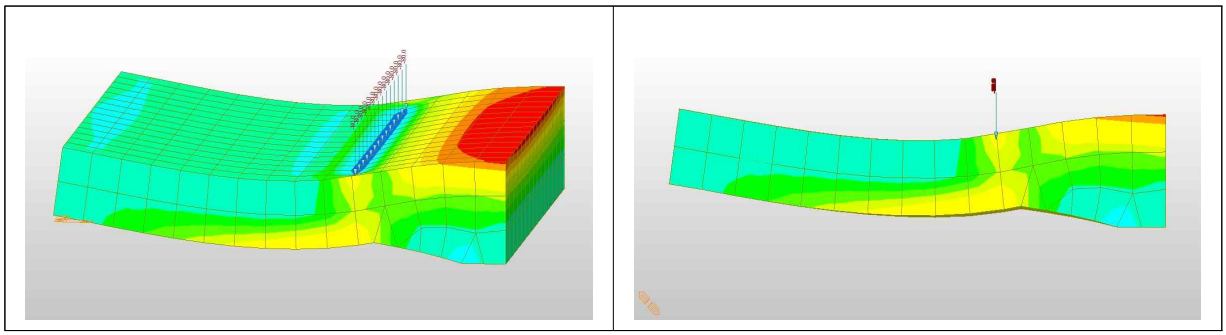


그림 2-136 휨실험체 구조해석 결과

표 2-30 하중 재하에 따른 발생응력

구 분	발생응력 (MPa)		
재하응력P(kN) [총하중(절점당)]	1050(75)	1120(80)	1190(85)
발생응력 (정모멘트부)	1.849	1.972	2.095
발생응력 (부모멘트부)	2.524	2.692	2.860

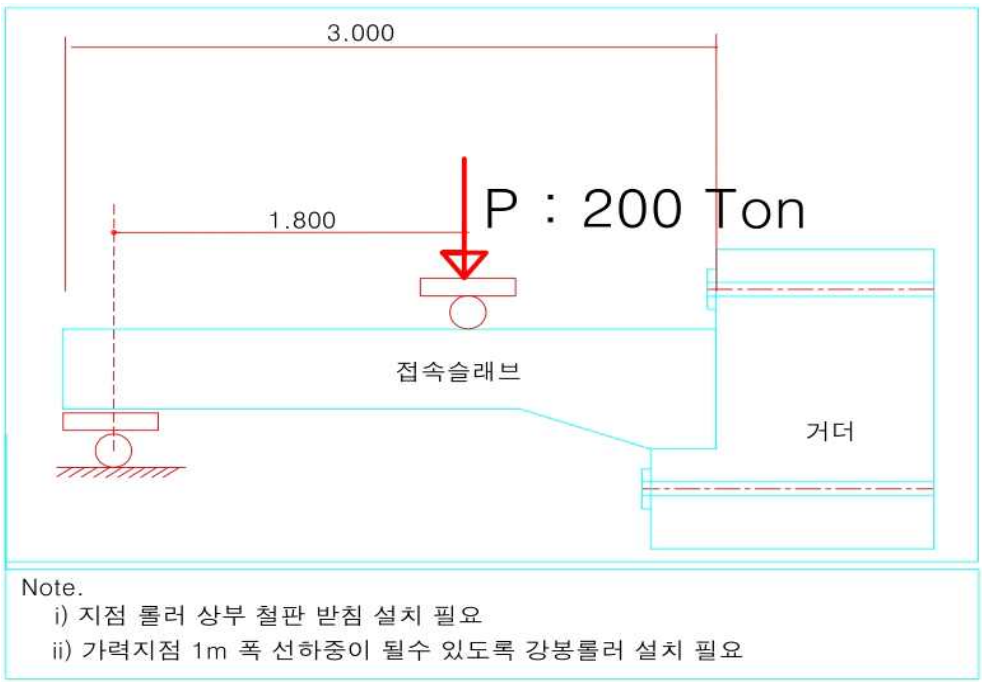


그림 2-137 휨 실험 가력도

(4) 계측기 및 센서 배치

실험체에 사용된 게이지는 철근변형률 센서와 LVDT 2종류이며, 철근변형율 게이지의 경우는 실험체 제작, 운반, 실험 과정 중 게이지의 망실을 대비하여 단위 폭 실험체의 중앙부 연결 철근에 동일 위치에 철근 2열에 설치하였다.

게이지 및 LVDT 설치 수량, 위치 및 명칭은 그림과 같다.

표 2-31 계측기 및 센서 설치 위치와 명칭

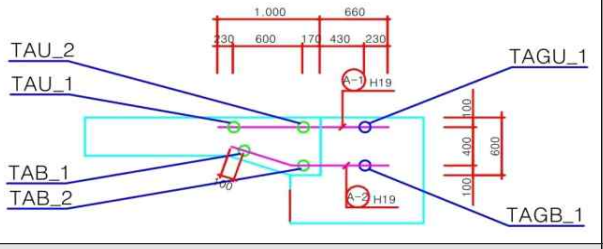
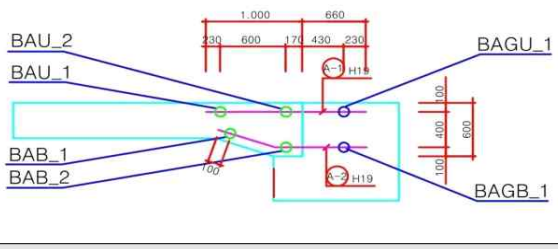
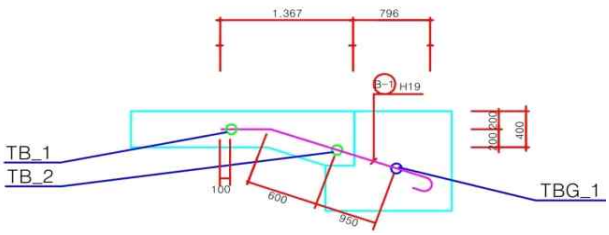
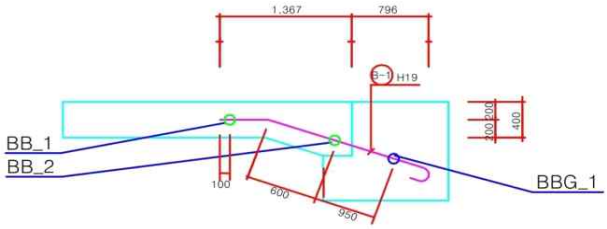
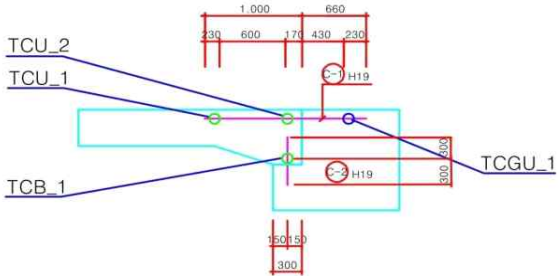
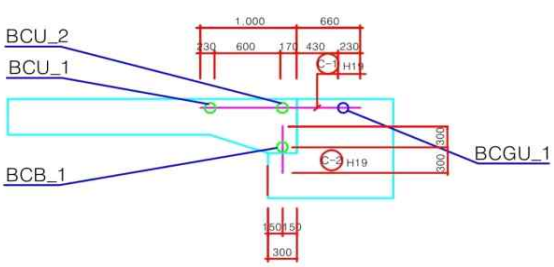
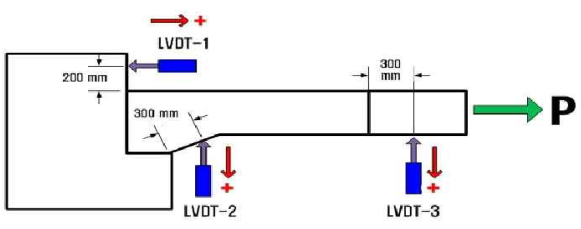
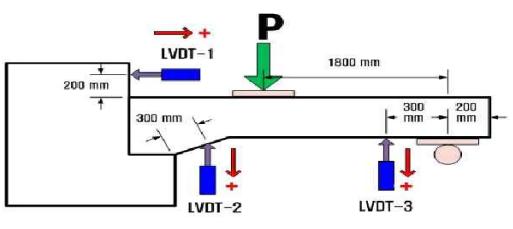
<table>
<tr><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>철근게이지 [Tension A TYPE]</td><td>철근게이지 [Bending A TYPE]</td></tr>
<tr><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>철근게이지 [Tension B TYPE]</td><td>철근게이지 [Bending B TYPE]</td></tr>
<tr><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>철근게이지 [Tension C TYPE]</td><td>철근게이지 [Bending C TYPE]</td></tr>
<tr><td> 
</td><td> 
</td></tr>
<tr><td>LVDT [Tension]</td><td>LVDT [Bending]</td></tr>
</table>



그림 2-138 철근 변형률 게이지 설치과정



그림 2-139 LVDT 설치과정

라. 구조상세 실험결과 및 분석

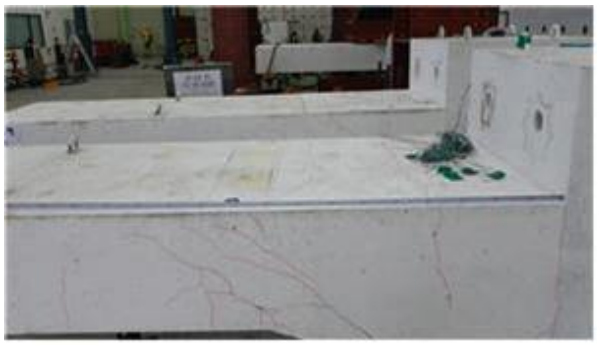
(1) 실험 수행 내용

실험체에 대한 인장 및 휨 가력 실험은 2014년 7월21일 실험체 운반을 수행하였으며 이후 8월5일까지 각 6개 실험체에 대한 인장 및 휨 실험을 명지대학교 하이브리드 구조실험센타에서 실시하였다. 각 실험체에 대한 실험 과정은 아래 그림과 같다.



그림 2-140 인장실험 수행 장면





Bending A TYPE





Bending B TYPE





Bending C TYPE

그림 2-141 휨실험 수행 장면

(2) 인장실험 결과 분석

3개 실험체 모두 최대 가력하중(약 850 KN) 범위 내에서 연결철근의 항복을 관찰하지 못하고 실험 종료하였다. 이는 인장 실험체에 배근된 연결철근의 수량 (9가닥)의 많기 때문에 충분한 하중을 가력하지 못한 사유로 판단된다. 단 실제적으로 접속슬래브의 최대 길이(10m)에 해당하는 자중에 의한 정지마찰력이 실제 작용 가능한 최대하중이기 때문에 마찰계수를 최대 1이라 가정 시, 10m 접속슬래브의 자중에 해당하는 하중이 약 100 KN이므로 실험체 최대 가력하중 850 KN은 파괴거동을 고찰하지는 못하였으나 인장거동 특성을 고찰하기 위한 충분한 하중으로 판단된다.

각 연결형식에 대한 하중 변위곡선을 Actuator과 상단 LVDT의 변위 기준으로 그래프를 작성하면 아래 그림과 같다. 구조거동이 다르게 설계 고안된 B Type (Hinge)의 경우 A, C와는 확연한 거동 차이을 보이고 있으며 개략 하중 250 KN 근처에서 접속슬래브와 교대 연결부의 신구 접합이 분리되며 이후 힌지거동을 보여주고 있다.

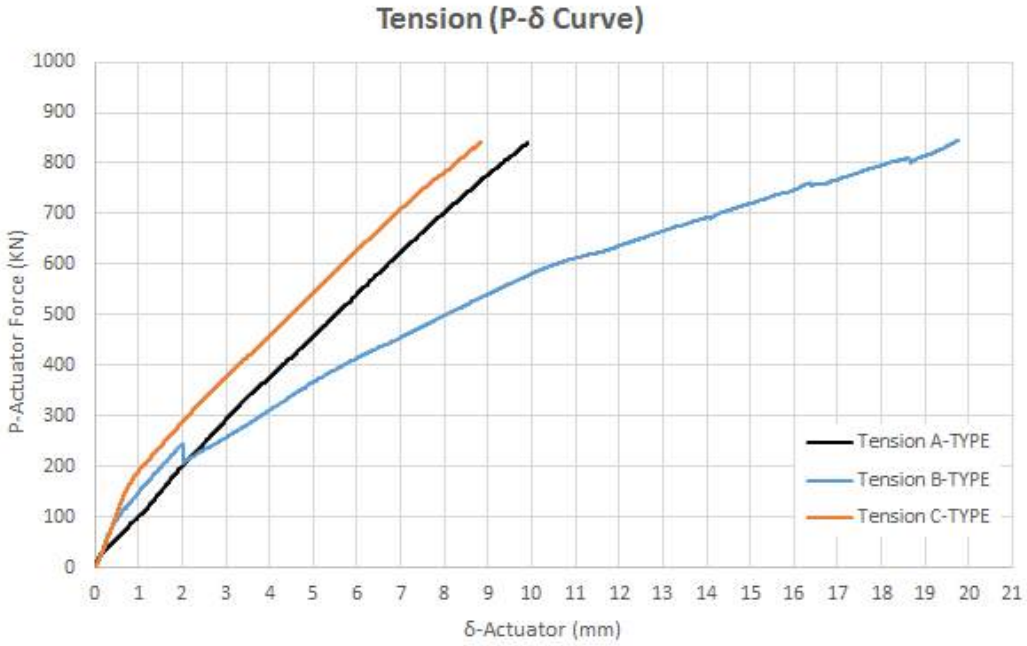


그림 2-142 인장실험 p-δ 곡선

이 같은 힌지거동은 우선적으로는 인장가력 실험체가 헌치부가 존재하여 가력하중에 의한 편심 모멘트가 발생하는 원인과 접합부의 상부 보강철근 없는 힌지철근의 영향으로 판단된다. 일체 연결을 구현한 A, C Type의 경우 초기 하중부 (약 200KN)까지는 A Type의 강결 거동이 상대적으로 약한 것을 보이나 이후 하중부터 최종 가력하중까지는 동일한 거동을 하는 결과를 보여준다.

설계 시 착안한 구조거동이 다름은 상단부의 LVDT 값에 대한 아래 그래프로써 확연하게 확인 가능하다. 즉 B Type은 명확한 힌지거동을 보여주며 일체 연결부는 힌지거동과 비교 시 완벽한 일체 거동을 보여주고 있다.

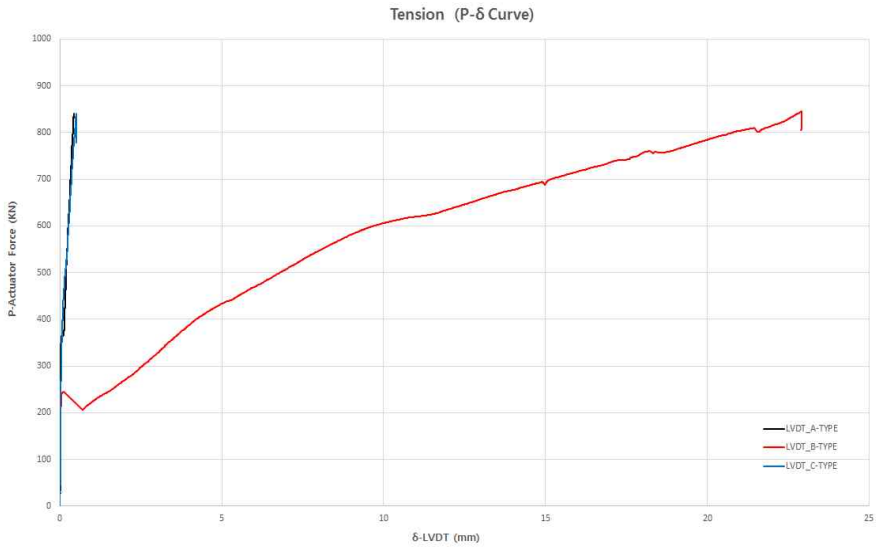


그림 2-143 인장실험 p-δ 곡선(LVDT)

일체 연결을 위한 배근을 실시한 A와 C의 경우 각 연결철근의 하중에 의한 변형율(응력)은 아래 두 그래프와 같다. 기본적으로는 상부 부모멘트 철근이 많은 하중을 분담함을 보이나 A Type의 경우 하단부의 경사 철근은 상대적으로 효율적 저항을 하지 않음을 아래 그림과 같이 보여주고 있다. 이 같은 점이 A Type의 하중재하 초기 성능이 상대적으로 C Type보다 저하됨의 원인으로 사료된다.

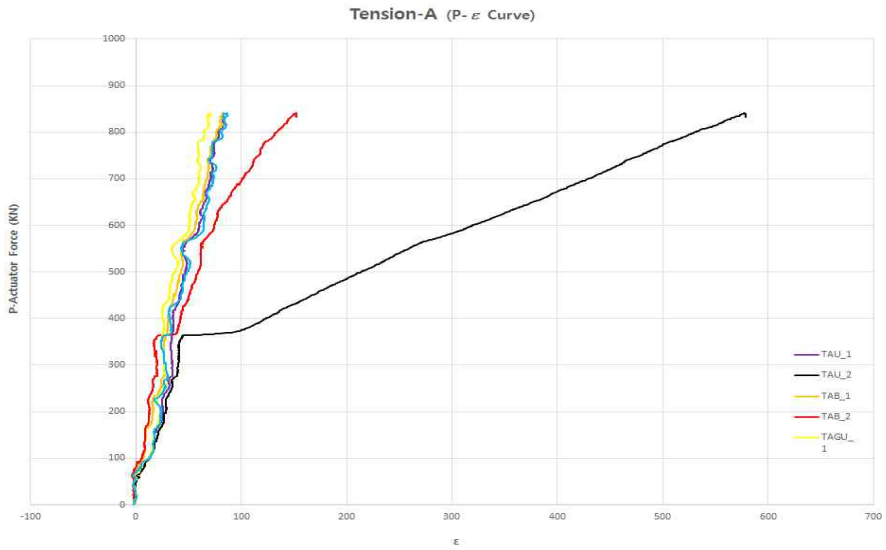


그림 2-144 인장실험체 A-Type의 변형율 그래프

A와 C 실험체 공히 약 400 KN의 작용하중에서 신구 콘크리트 부착부에서의 분리가 발생하고 이후 철근 연결부에서 하중을 분담하는 경향을 동일하게 보여준다.

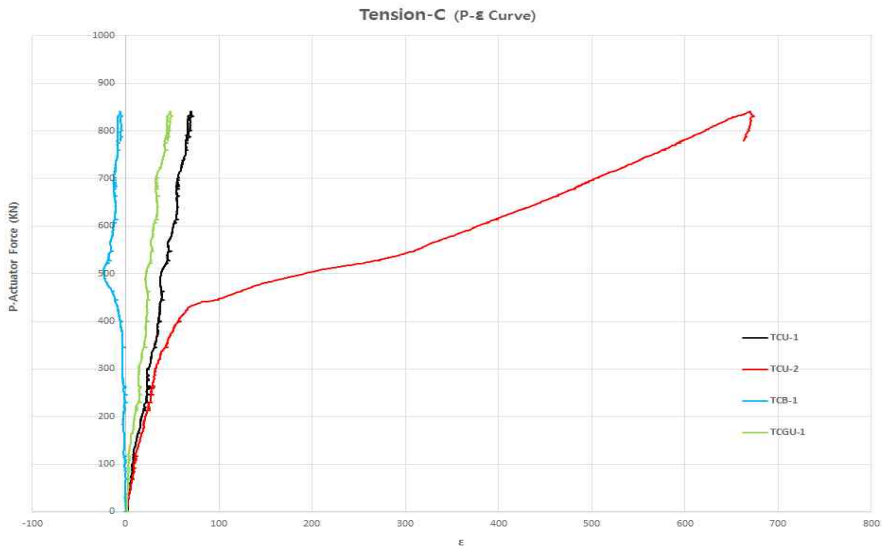


그림 2-145인장실험체 C-Type의 변형율 그래프

힌지철근이 배근된 B Type의 경우 예측된 힌지 구조거동을 충실하게 수행하는 것을 보여주며 약 250 KN 근처에서 분리거동을 시작하고 균열이 하단부로 내려가면서 발전하여

힌지철근이 서서히 하중을 분담함을 보이며 균열부가 힌지철근에 도달하는 시점(약 600 KN)에서 철근의 변형율이 급격하게 상승하는 전형적 힌지 거동을 보여주고 있다. 이때 힌지철근의 갈고리 형상부에도 상당 수준의 변형율이 발생하여 중요성이 인식된다.

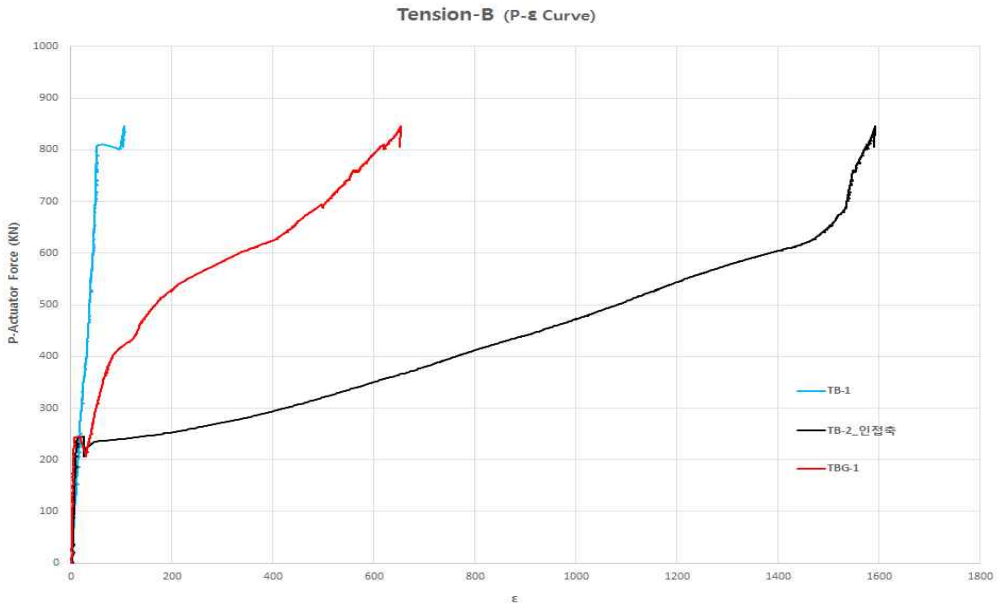


그림 2-146 인장실험체 B-Type의 변형율 그래프

결국 A, C Type은 강결, C Type은 힌지거동을 보임을 확인하였으며 3가지 형상의 연결부는 설계 시 예측한대로 사용 하중 하에서 충분한 구조성능을 보유하고 있다. 특히 안전율을 감안한 약 200 KN의 하중까지는 접속슬래브와 상부구조의 일체거동을 안정적으로 수행한다고 판단된다. 추가로 신구 콘크리트의 접합부가 상당한 부착 저항력을 보유함을 보이고 있어서 현장에서 신구접합부 처리 또한 상당한 품질관리가 필요한 것으로 생각된다. 특히 힌지 철근을 사용하는 경우는 균열발생을 자연히 유도하게 되므로 힌지철근은 가능한 에폭시 코팅이 된 것을 사용함이 간단하게 연결부의 수명을 보장 하는 좋은 방법으로 사료된다. 결과적으로 인장하중의 작용하는 일체 연결의 경우 시공성을 감안시 C Type의 구조거동이 보다 효과적인 연결방법으로 보여진다. 단 이는 휨 하중과 동시에 고려가 필요한 사항이므로 휨 거동 특성을 동시에 반영한 해석이 필요하다.

(3) 휨실험 결과 분석

휨 실험체의 가력을 실시한 결과, B Type(힌지)은 구조 거동 특성상 지속적인 회전변위로 가력하중에 의한 극한거동을 관찰 할 수 없었다. A와 C Type (Fix 연결)의 경우 하중에 의한 극한 거동파괴가 실험 계획 시 예측과 다르게 아래 그림과 같이 헌치부의 사인장 균열 파괴가 발생하여 이에 대한 원인 파악이 필요하므로 구조해석을 실시하였다.

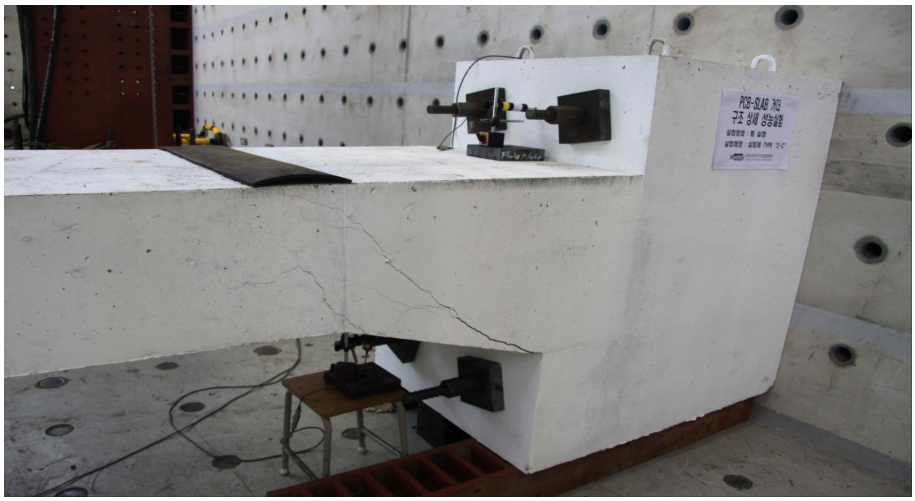


그림 2-147 휨 실험 수행 장면

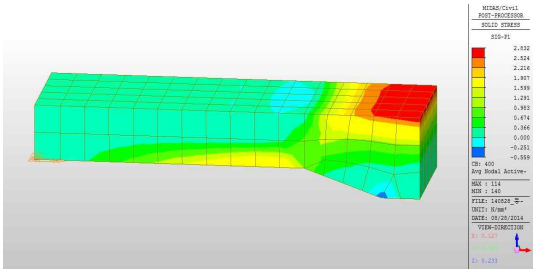
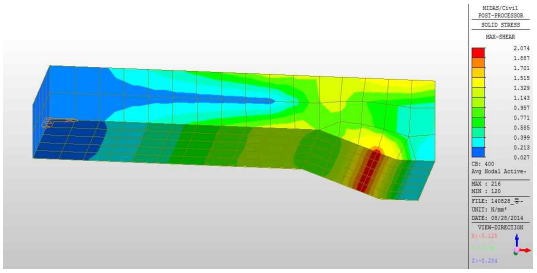
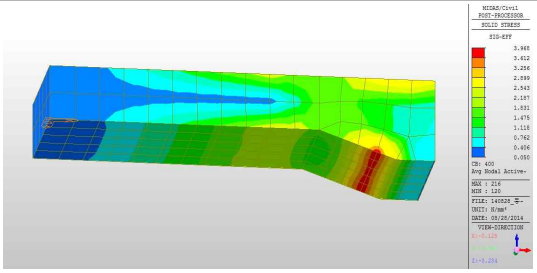
휨 실험체의 균열 전개 순서는 아래 그림과 같이 접속슬래브 교대 연결부에서 접합 분리가 우선 발생하였으며 가력부 하단 및 부모멘트부의 균열이 발생 진행되고 헌치부 경사균열 발생 후 급속한 사인장 균열의 순서로 실험체 균열이 전개되었다.



그림 2-148 휨 실험 결과 발생한 균열

아래 표는 실험체와 동일한 수치모델링에서 가력하중 400 KN 상태의 탄성해석에 의한 응력분포이며 이때 파괴 주인장응력이 헌치 하단부에 발생함이 확인된다. 콘크리트 인장강도는 fr = 0.63 = 3.273 Mpa 이며 탄성해석 결과를 감안하여 비례에 의하여 균열 발생 하중을 추정 시 약 330 KN 수준에서 균열 발생이 가능한 것으로 판단되었다.

표 2-32 구조 해석을 통한 응력검토

구 분	응력분포	발생응력(MPa)
Sig-P1(MPa) 주축1방향의 주응력		2.832
Max-Shear(MPa) 최대전단응력		2.074
Sig-eff(MPa) 유효응력 (Von-Mises Stress)		3.968

재하실험 전 과정의 동영상 및 육안 관찰 결과는 슬래브의 상단과 하단의 균열 발생 후 급속한 사인장 균열이 발생 했으므로 사인장 균열 발생 전 가력하중 하에서는 실험체가 당초 예상한 휨 거동을 한 것으로 판단된다.

각 실험체의 하중 변위곡선을 Actuator와 상단 LVDT의 변위 기준으로 그래프로 표현한 결과는 아래 그림과 같다. 3종류의 실험체는 연결철근의 형상에 따라서 분명한 일체 거동

(A, C)과 힌지거동(B)을 보이고 있으며 일체 연결 실험체의 경우 두 실험체가 동일한 거동을 하였음을 보여주고 있다.

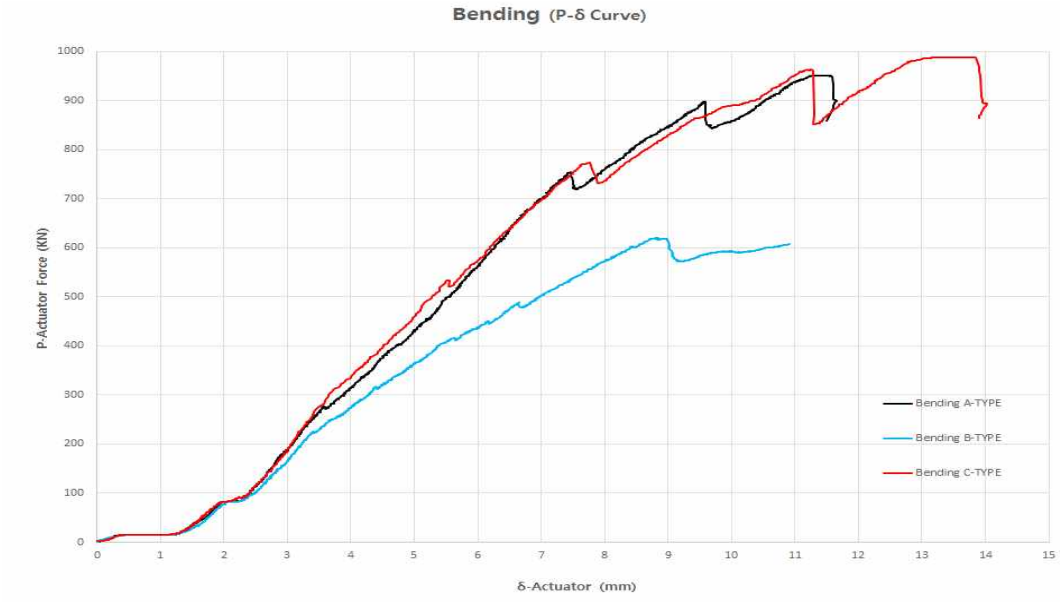


그림 2-149 휨 실험 p-δ 곡선

연결부 상단의 LVDT 계측 값에 의한 하중 변위곡선도 인장실험 결과와는 다르게 Actuator 변위거동과 유사한 결과를 보이고 있다.

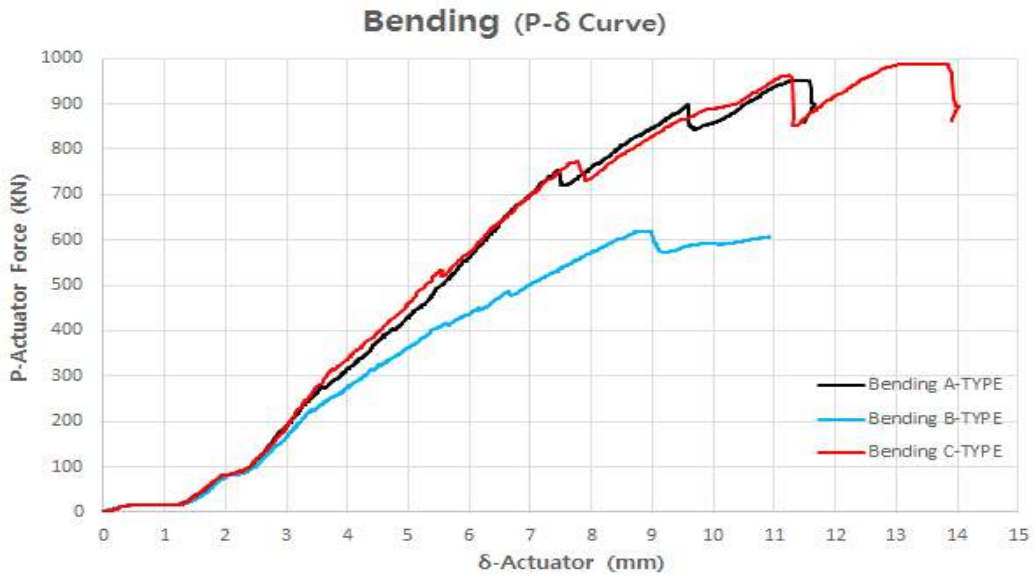


그림 2-150 휨 실험 p-δ 곡선(LVDT)

일체연결 실험체의 상부 연결철근의 하중 변형율 곡선도 같은 거동을 보이며 변형율의 값이 2000을 상회함으로써 상부 철근은 항복하중에 도달함을 확인 할 수 있다. 힌지철근의 중앙부의 변형율 값은 하중증대에 따라 슬래브와 교대 접합부의 분리에 의한 지속적인 회전 변위 발생으로 점진적인 하중을 분담하나 가력하중 범위 내에서는 항복거동이 발생하지 않았다. 이는 힌지철근의 배근위치가 슬래브와 교대 접합부의 상부에 있지 않고 하부에 위치하므로 일체 연결 실험체의 상부철근과 비교시 변형이 작게 발현되기 때문이다.

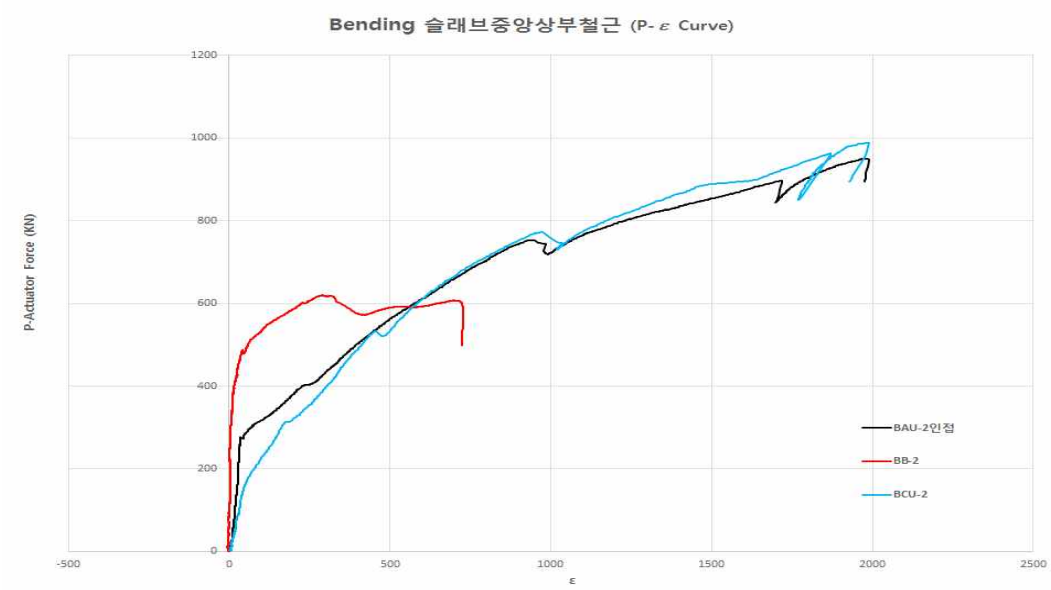


그림 2-151 슬래브 중앙 상부철근 변형률

휨 실험체 A의 경우는 가력하중의 크기 약 280 KN에서 접속슬래브와 교대 연결부에서 분리가 발생하고 이때부터 상부와 하부철근으로 하중이 전달되는 양상을 보이며 약 400 KN 에서 상부와 하부의 인장 균열이 발생되어 철근의 저항이 유지되었으며 경사 하부철근 지속적인 압축 저항을 함을 계측으로 확인 하였다. 하중 증가에 따라 730 KN 근처에서 헌치 지점부에 사인장 균열이 발생하여 실험체는 비선형 구조 거동을 나타내었다.

휨 실험체 B의 경우는 약 230 KN에서 접속슬래브와 교대 연결부의 분리가 시작되었으

며 약 310 KN 하중에서 균열이 발생하여 힌지철근이 하중 분담을 시작하였다, 가력 하중 값 490 KN 이상에서는 힌지철근으로 점진적 하중 분담을 보이며 연결부의 회전변위 발생으로 최종 가력하중까지도 힌지 철근은 탄성범위 내 거동을 보이고 있다.

휨 실험체 C의 경우는 약 300 KN 하중에서 접합부의 분리가 발생하였으며 약 500 KN 근처에서 휨 균열이 발생하여 철근이 저항하면서 약 750 KN 하중에서 헌치 지점부에서 사인장 균열로 파괴 형상을 보였다. 전반적인으로 C Type은 A Type과 동일한 구조거동을 보여주고 있다.

상부철근의 거더 매입부의 철근 변형율은 아래 그래프와 같다.

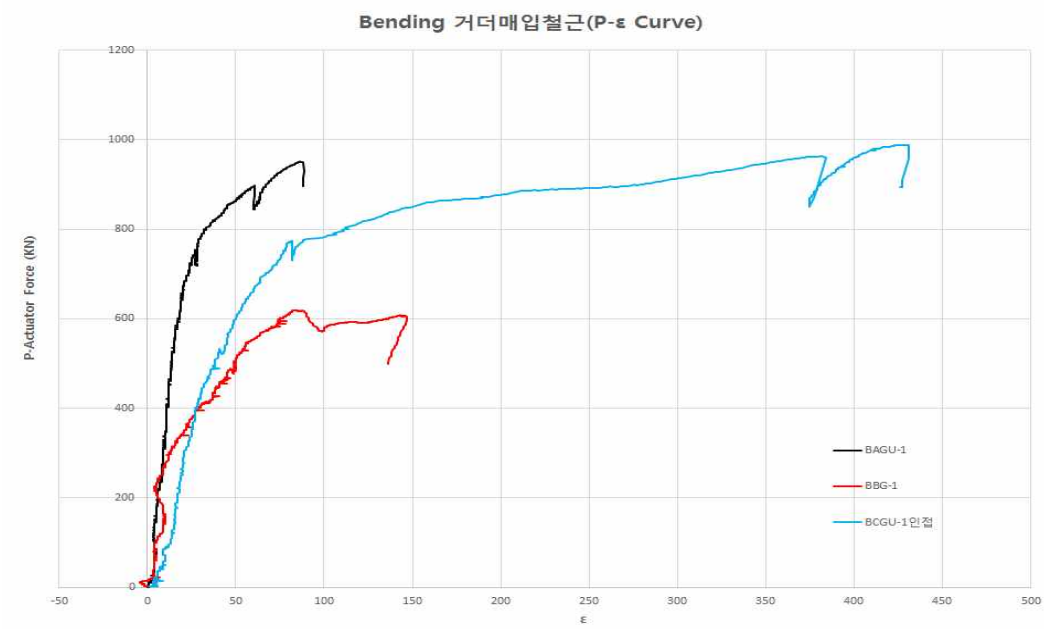


그림 2-152 거더 매입부 철근 변형률

교대 매입부 상부철근은 C Type의 경우 가력하중에 대하여 전형적인 인장 저항을 보이고 있으나 A Type의 경우는 하단 경사 철근의 하중을 분담하여 상부 철근의 역할이 한정적 구조거동을 나타나고 있다. 이는 헌치의 지점부가 받침부와 같은 역할을 하면서 가력하중에 대하여 저항을 하게되어 경사철근이 인장 저항을 하기 때문으로 판단된다.

휨 실험 결과 인장 실험체와 동일하게 일체연결과 힌지연결은 확연한 거동 차이를보여주고 있으며 같은 일체 거동의 경우 C Type 거동이 시공성과 구조거동의 간단성을 감안시 A Type과 상대 비교시 우수한 것으로 판단된다. 아래와 같이 가력하중 범위 중 실제 접속슬래브의 작용하는 설계 활하중에 해당하는 차량 윤하중을 산정하였다. (DB - 24 후륜하중 : 64 kN ~ 72.4 kN, 74.9 kN ~ 83.2 kN)

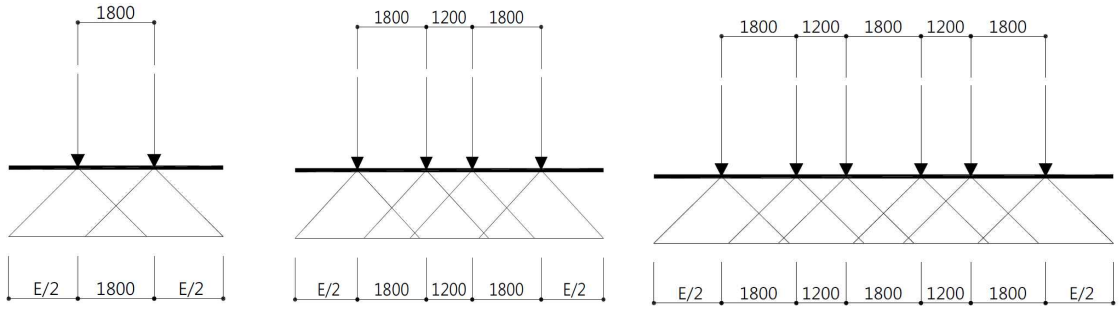
□ 충격계수

I = 15 / (40+L) ≤ 0.3 최대값 0.3 적용

□ 유효폭

E=1.2+0.06L ≤ 2.1 ∴ 2.1m(1.2m) 적용

□ 전차선 재하시의 하중산정



- 1차선 재하

Ea = 1.8×1+2.1 = 3.9m (3.0m)

Pr = 2 × 96 × (1+0.3) / 3.9 = 64.0 kN (83.2kN)

- 2차선 재하

Ea = 1.8×2+1.2+2.1 = 6.9m (6.0m)

Pr = 4 × 96 × (1+0.3) / 6.9 = 72.35 kN (83.2kN)

- 3차선 재하

Ea = 1.8×3+1.2×1+2.1 = 9.9m (9.0m)

Pr = (6 × 96 × (1+0.3) / 9.9) × 0.9 = 68.07 kN (74.9kN)

이상과 같이 차량 하중은 단위 폭에 100 KN 이하로 작용함을 감안시 가력하중 범위에서 실험에 적용된 하중의 결과는 모든 연결 형태가 접속슬래브의 실 작용하중에 대하여 구조적 안정성을 확보하고 있음을 확인 할 수 있다.

(4) 결론

국토교통부 기술사업화 지원 연구과제 “PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량개발”의 3차년도 최종 연구내용으로 연구수행으로 2차년도 개발된 PCB-Slab교량 형식의 적용성과 보급성을 증대하기 위한 일환으로 Semi-integral(반일체식) 교량으로의 적용을 위하여 접속슬래브의 연결방법에 대한 성능실험을 실시하였다. 개발교량은 단면형상 구성이 반일체 교량 적용이 상대적으로 용이하여 다수의 실험사항에 대한 검토를 거쳐 접속슬래브에 대한 실물거동 실험 계획을 수립하여 6개 실험체에 대하여 인장과 휨 거동 실험을 수행하였다.

13.3.4 Approach Slabs

Although usually not considered as part of the superstructure, approach slabs have been found to be one of the most critical components of an integral bridge. The approach slabs serve two primary purposes:

1. Approach slabs reduce the compaction of the backfill material behind the backwall due to traffic. Control of excessive passive soil resistance to thermal expansion is also achieved.

2. The thermal movements of the system are transferred from the end of the bridge to the point where the approach slab joins the roadway pavement. A flexible pavement joint is provided at this point. Details of the flexible pavement joint vary from agency to agency. In addition, some agencies use plastic sheets or expanded polystyrene boards below the approach slab to provide a positive separation from the subgrade to enhance movement.

An important lesson learned is that the approach slab must be tied to the abutment backwall with mild steel reinforcing. Failure to provide this reinforcing in some early integral bridges resulted in a gradually increasing opening of the joint between the backwall and approach slab. The cause of this problem is the inability of the approach slab to move with the abutment on the contraction portion of the thermal cycle. Accumulation of debris in the joint leads to a successively wider opening of the joint with each expansion portion of the cycle. Many bridge engineers prefer to have hinge style reinforcing bar details across this joint instead of straight horizontal bars in order to accommodate rotation of the abutment or the approach slab.

Approach slabs are generally about 20-25 ft long and are standardized in most states. The flexible pavement joint should match that of the particular joint material used to accommodate the movement rating desired. Theoretically, the reinforcement needed for connection to the abutment should exceed the weight of the slab multiplied by the coefficient of friction between poured concrete and sub-base material used. No. 6 bars at 12 in. centers have reportedly worked well in some states.

Another method, which has been used in Ontario, is to design the approach slab bottom reinforcement based on a span equal to 50% of the slab length, usually 20-30 ft. Assuming that the approach slab is dragged on the approach fill, the reinforcement to tie the slab to the abutment backwall is nominal. The width of the joint at the free end of the approach slab should be kept small. A ¾ in. wide sealed saw cut in the pavement at the end of the approach slab has reportedly worked well for bridge lengths up to 300 ft.

그림 2-153 PCI 설계기준

다음의 내용은 미국 PCI 설계기준에서 발췌한 내용으로 일체식 교량에서 접속슬래브 주요 기술사항에 대하여 일반적 내용을 기술하고 있다. 설계 기술자들은 접속슬래브와 교대 연결방안으로 공용 중 발생 가능한 회전변위를 수용하도록 hinge 형식을 선호하고 있음을 기재하고 있다.

그러나 힌지 형식의 사용은 회전변위 발생시 아래와 같이 접속슬래브의 연결부에 균열을 허용하게 되므로 일체식교량 온도신축 거동시 발생 균열에 각종 잡물이 유입되어 지속적인 균열 폭의 확대가 발생 할 수 있으므로 완벽한 처리방안으로 간주 할 수 없다.

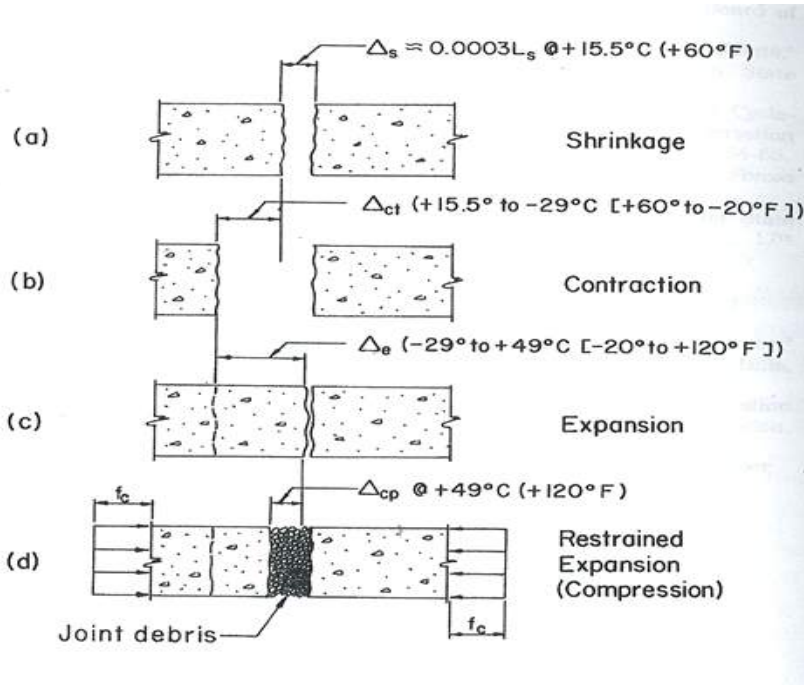


그림 2-154 온도에 의해 연결부에 발생하는 신축응력 개념

연결부 설계개념은 두 가지 방법의 가능하며 장단점을 기술하면 다음과 같다

① 힌지(Hinge) 연결

- 단순보 설계 개념 적용
- 뒷채움부의 공극으로 단차발생시 구조적 문제점을 교대 구조물과 격리
- 연결부 상부 균열 발생
- 균열부의 오염물질 유입으로 지속적으로 간격 확대 유지관리 문제 발생

② 일체(Fix) 연결

- 연속개념의 설계 필요
- 연결부 상부 균열방지 가능
- 연결부 손상 발생시 교대의 구조적 영향 발생

위와 같은 구조적 개념을 실제적으로 확인하고 기 개발 완료한 PCB-Slab에 직접 적용 가능한 3가지 연결 철근 형상에 대한 구조실험을 실시하였으며 획득한 실험 결과를 분석한 결과 다음과 같이 접속슬래브 연결에 필요한 기술적 사항을 확인하였다.

(가) 실험체의 연결철근의 배근방법과 수량에 대하여 각 연결방법은 충분한 구조 안정성을 보유한 결과를 보였다. 추후 실험 결과에 따른 적절 배근 수량산정이 필요하다.

(나) 각 연결방법이 구조성능 측면에서 안정성을 보이기 때문에 연결부의 힌지거동과 일체 거동의 선택은 설계자의 선호에 따라서 결정이 가능하다. 단 일체거동의 경우 부모멘트 철근의 배치가 어렵지 않고 시공성도 용이하고 명확한 구조거동을 보장하기 때문에 그 C-Type의 연결철근 형상의 사용을 추천한다.

(다) 연결철근은 그 수량이 많지 않고 장기간에 걸쳐 하중이 반복적으로 작용함과 장기적으로는 당연히 연결부가 균열에 노출되는 환경에 위치함에 향후 유지관리의 편의성을 감안하여 에폭시코팅 철근의 사용이 권장된다. 이때 적절한 철근 매입깊이에 대한 변경사항의 설계반영이 필요하다.

(라) 힌지철근의 사용시 경사부 철근은 가능한 접속슬래브와 교대연결부의 하단에 배치를 하여 힌지거동 발생이후에도 지속적인 탄성거동을 할 수 있도록 한다. 또한 교대 매입부의 갈고리 형상은 설계기준을 준수하고 충분한 매입을 보장하도록 한다.

(마) 접속슬래브와 교대연결부의 신구 콘크리트 타설시 가능한 시방 규정을 준수하여 확실한 청소와 접합면 처리는 필수적이며 실제적으로 부착강도도 상당한 구조적 역할을 수행하는 것으로 판단된다.

마. 일체식 교량화 공법 연결부 실험

(1) 실험 목적 및 내용

본 실험은 일체식 교량화 공법의 방법으로 제안한 프리캐스트 L형 교대 흉벽을 이용한 반일체식 교량 형성에 관한 것으로 L형 흉벽과 중공슬래브의 교대부 연결부위의 상세 성능실험을 위해 실시 되었다.

반일체식 교량에 있어서 교대 흉벽을 보다 간단하게 시공할 수 있으면서도 접속슬래브와 교대 흉벽을 일체로 연결될 수 있도록 하여, 본 연구 과제에서 개발된 중공슬래브교를 비롯하여 기존에 적용되는 PSC 거더 모두에 적용할 수 있도록 범용으로 고안된 공법에 대해 실험을 통해 결과를 검증하는 것이 목적이다.

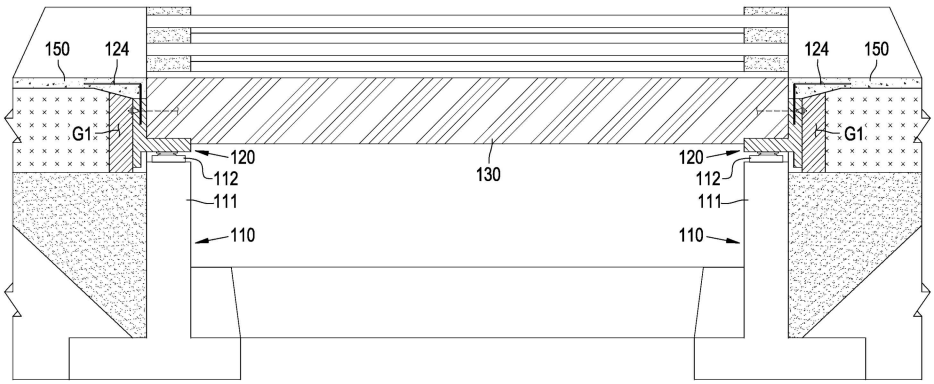


그림 2-155 프리캐스트 교대 흉벽을 이용한 반일체식 교량
(특허출원 10-2014-0060480)

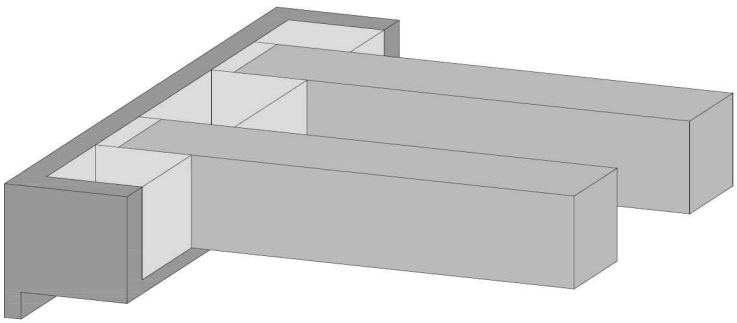


그림 2-156 L형 프리캐스트 흉벽 형성 개념도

반일체식 교대 교량은 거더의 종방향 신축량에 대해 무다짐 뒷채움 토사 및 교좌장치가 변위를 수용하게 되므로 프리캐스트 흉벽과 거더는 일체로 거동한다고 볼 수 있다. 따라서, 프리캐스트 흉벽은 시공단계 중 제작이나 거치시에 작용하는 자중, 거더 거치 시 시공오차로 인해 발생하는 하중에 대해 저항할 정도로만 단면이 설계 되면 된다. 현장타설을 통해 거더와 연결된 후에는 거더와 일체로 거동하는 것으로 볼 수 있다. 그러나, 거더간 서로 다른 신축량으로 인한 교량의 횡방향 응력발생이나, 뒷채움 흑이나 교좌장치의 노후와 불량을 비롯하여 같은 예기치 못한 거동으로 인해 프리캐스트 흉벽과 거더의 연결부에 부가적인 응력이 발생할 수 있다. 따라서, 다양한 연결 방법에 대한 검토를 수행하였으며, 최종 확정된 연결부 상세를 적용하여 프리캐스트 L형 흉벽과 중공슬래브 거더간의 연결부에 대해 성능실험을 실시하였다.

성능실험 방안으로 당초에 계획된 사항으로 첫째는 L형 흉벽 횡방향 단면 적정성 검토를 위해 교좌를 지점으로 하고 거더 위치에 가력하여 휨성능 실험을 수행하는 것으로 계획 하였으나, L형 흉벽의 슬래브 단면이 커지는 것을 대체하기 위해 Tendon 도입도 필요하게 되며, 전체 공사비를 감안할 때 교좌장치의 비중이 작으므로 실효성의 문제로 제외하였다.

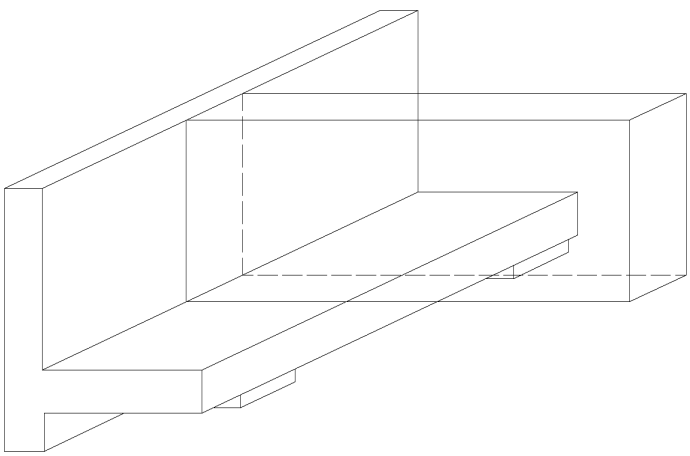


그림 2-157 L형 흉벽 하단 슬래브 휨성능실험 계획안

둘째는, 뒷채움재와 접하는 PC흉벽 성능실험을 위해 SB-3를 이용하여 뒷채움하고 실제 형상과 동일한 여건의 실험체를 제작하여 거더의 종방향 변위 수용의 결과와 L형흉벽 및 연결부위 거동을 평가하는 계획을 수립하였으나, 기존의 뒷채움재 성능실험과 유사하고 가력시 발생하는 수동토압에 대해 휨과 전단 성능의 평가는 이미 충분히 예측되므로 실험에서 제외하였다.

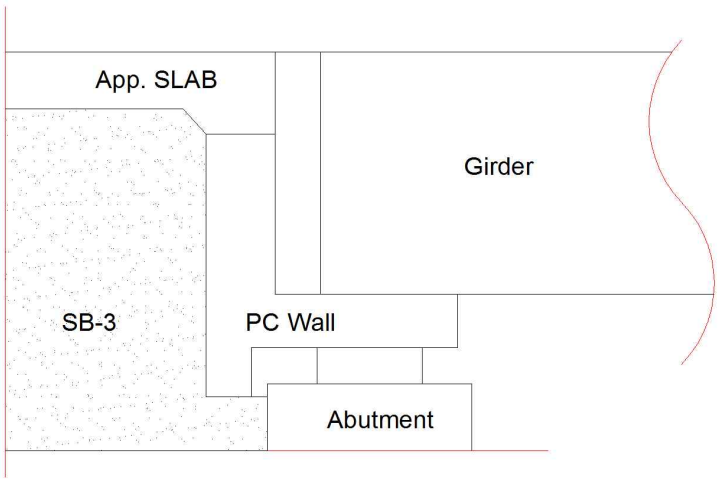


그림 2-158 뒷채움재와 접하는 PC흉벽의 성능실험 계획안

(2) 실험계획

(가) 실험체 설계

프리캐스트 L형 흉벽과 중공슬래브 거더의 연결부 인장 실험을 위해서는 반력벽에 고정시킬수 있는 장치가 필요하며, 인장에 약한 철근콘크리트 실험 대상체에 영향을 미치지 않도록 계획 되어야 한다. 따라서, 거더의 교축방향 신축을 고려할 때 L형 흉벽을 반력벽에 고정시키도록 계획하고, 거더는 연결부의 영향이 미치는 범위 정도만 고려하여 길이를 정하는 것이 합리적이다. 바닥판이 없는 실제 교량에서의 종방향력이 거더를 통해 전달되므로 교축 직각방향을 고려할 때 PCB-SLAB 1개의 거더와 그 폭에 따른 L형 흉벽을 고려 하였다.

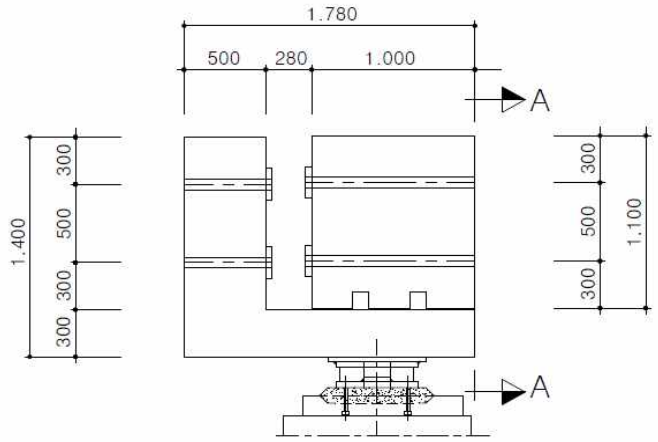


그림 2-159 실험체 종단면도

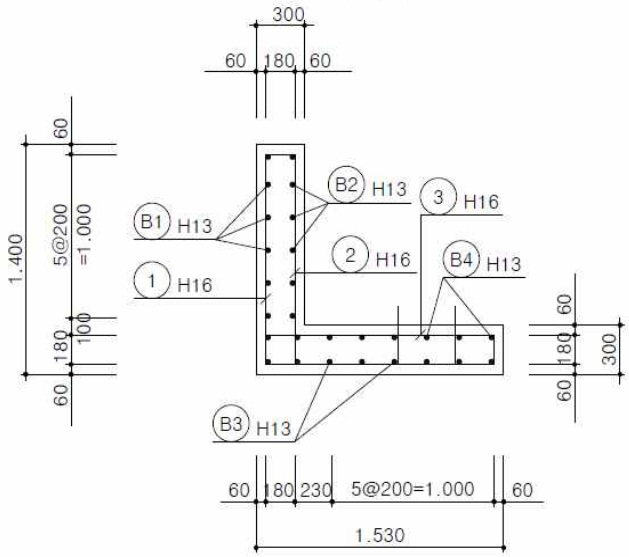


그림 2-160 L형 흉벽 단면도

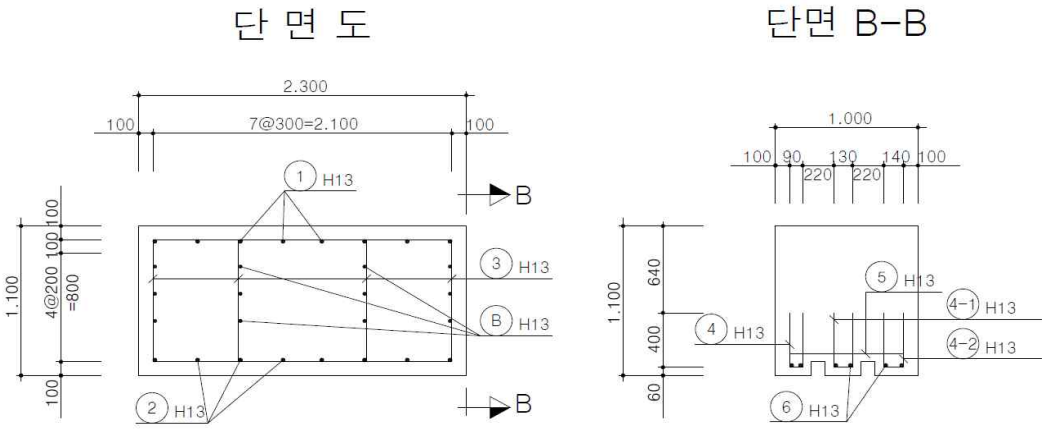


그림 2-161 실험체 거더 단면도

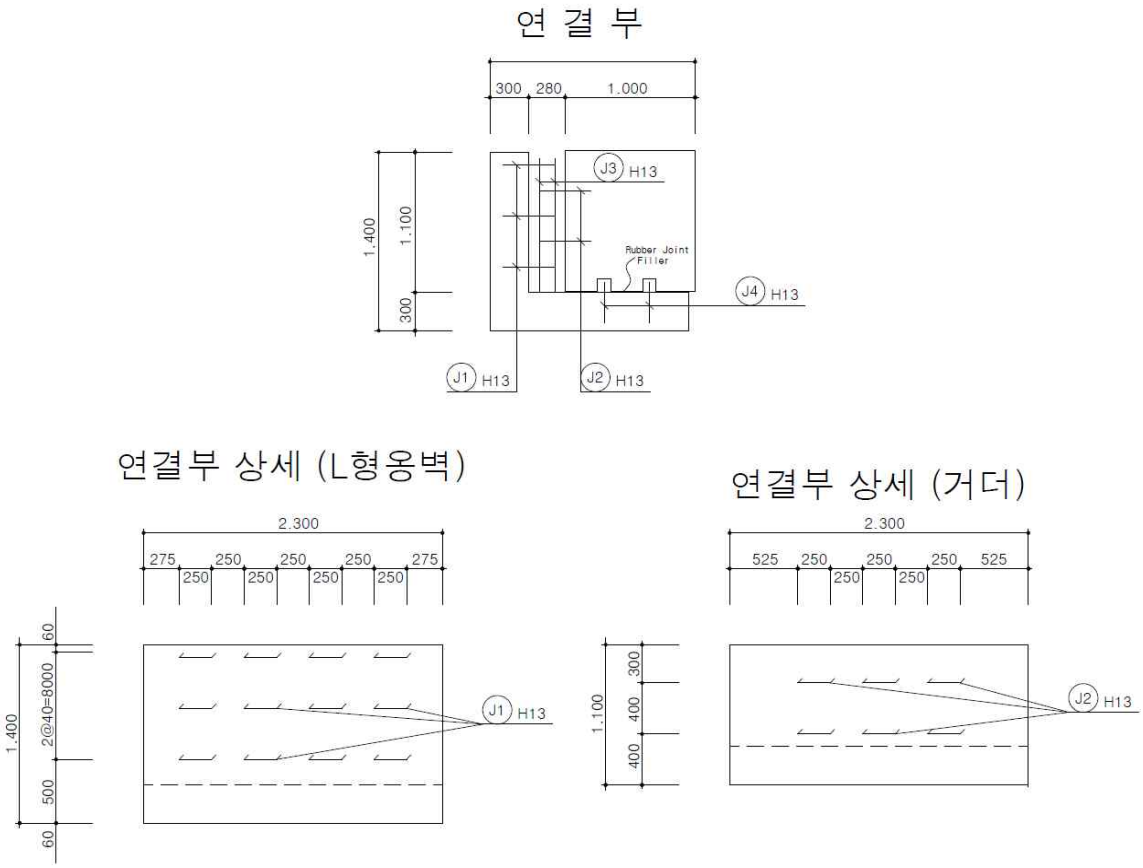


그림 2-162 연결부 철근 상세

기본적인 실험체 단면에 인장실험을 위한 정착 앵커를 고려하여 확폭하거나 연결부에 배치된 철근보다 실험체 고정정착 부분이 먼저 항복하지 않도록 배려되어야 한다. 연결부에 매입된 D13철근 36EA 부착길이에 따른 부착력 및 전단철근의 전단강도를 계산한 결과 총 107ton의 인장력에는 실험체가 저항할 수 있는 것으로 예측되어, 실험체를 고정시키는 강봉의 총 인장강도를 확보하기 위해서 정착장치를 고려하여 충분한 개수가 고려되도록 매입형과 관통형 강봉 설치 홀을 실험체 제작에 반영하였다.

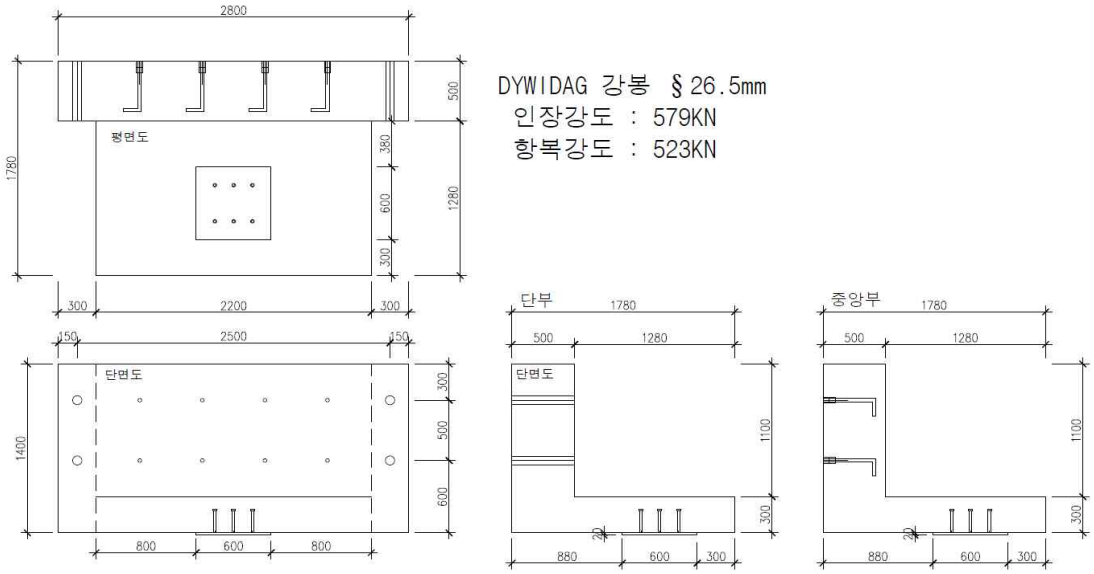


그림 2-163 실험체 정착부 배치도(L형 흉벽부)

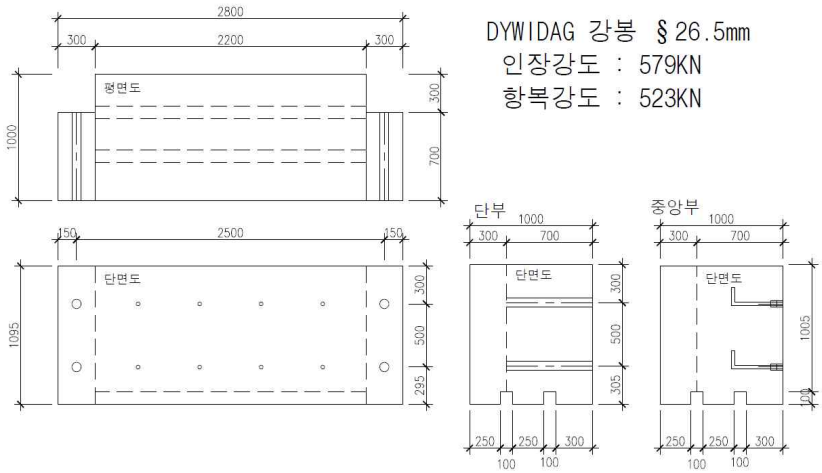


그림 2-164 실험체 정착부 배치도(거더부)

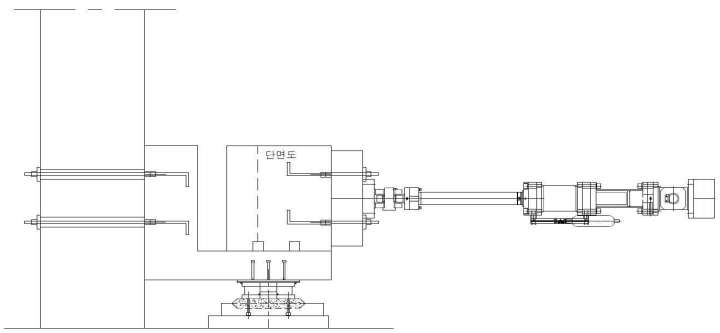


그림 2-165 실험체 고정 개념도

(나) 실험체 제작

본 실험은 L형 흉벽과 거더와 현장타설되는 연결부에 대한 실험이므로 사전에 프리캐스트로 제작되는 흉벽과 거더는 조립을 위한 거치시 하중에 대해서 강도가 확보되도록 양생기간이 확보되어야 하고 두 구조체를 조립하여 현장타설하는 부분과 하단부 그라우팅 부분도 실험실시전 충분한 양생기간(하절기 15일 이상)을 두어 콘크리트가 설계강도를 발휘할 수 있도록 하였다.



(a) 거푸집 조립



(b) 철근 조립

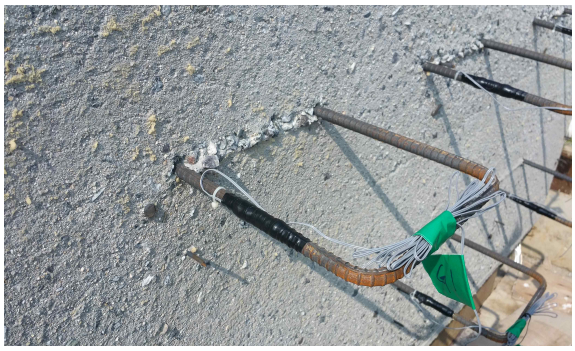


(c) 콘크리트 타설



(d) 양생후 탈형

그림 2-166 1단계 실험체 제작과정



(a) 철근 변형률 게이지 부착



(b) 이동 및 조립



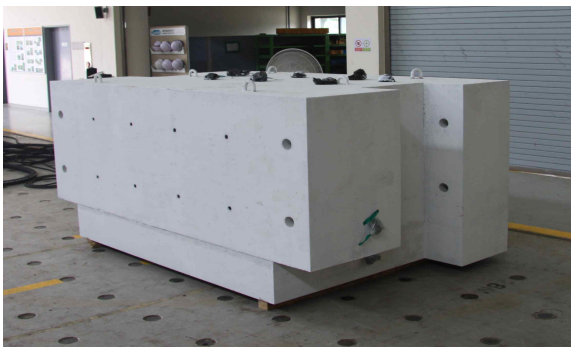
(c) 연결부 철근 배치



(d) 하단 연결홈 그라우팅



(e) 연결부 현장타설



(d) 제작완료

그림 2-167 2단계 실험체 제작과정



그림 2-168 인장실험을 위한 실험체 배면 고정정착 홀

(다) 계측기 및 센서 배치



그림 2-169 철근 변형률 게이지 배치도

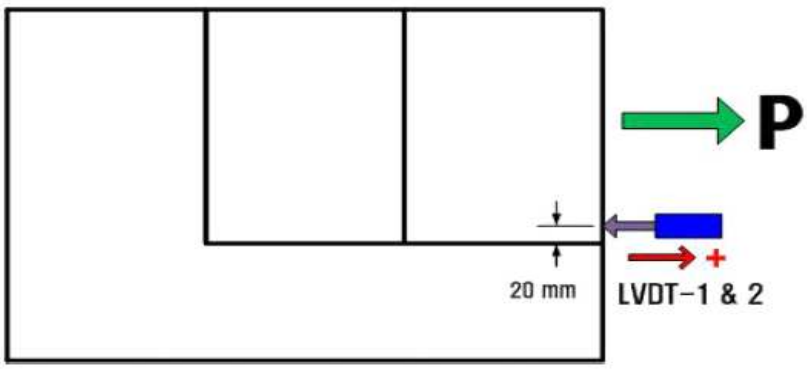


그림 2-170 변위계(LVDT) 배치도

(라) 하중재하

인장실험을 위해 5,000kN Static Actuator 설치하고, 하중제어방식으로 50kN/min의 실험속도로 인장력을 재하 함. 하중이 약 1,000kN에 도달한 후 변위제어방식으로 전환하여 0.3mm/min의 실험속도로 실험체 항복이후 일정변위에 도달할 때까지 지속적으로 수행함.

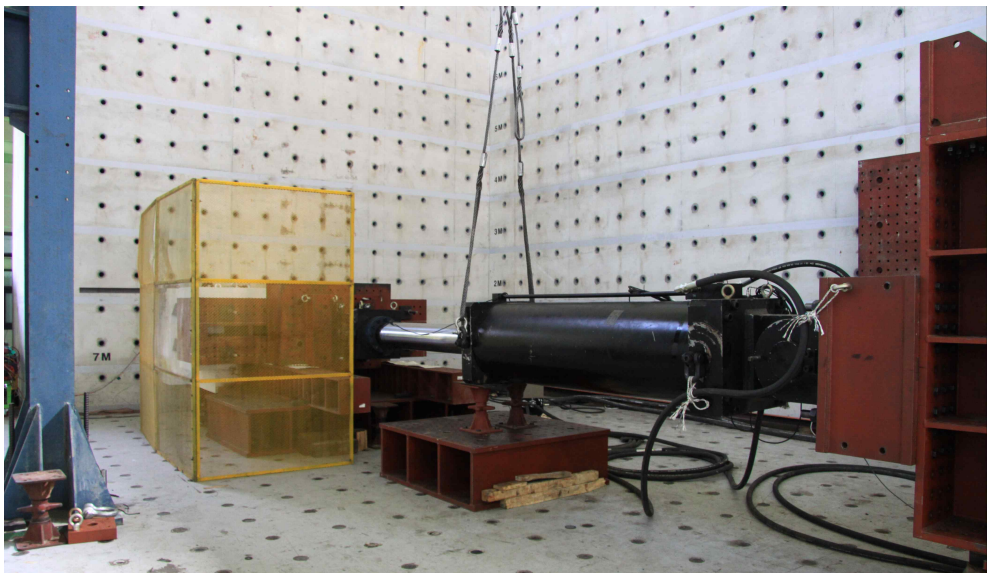


그림 2-171 5,000kN Static Actuator 설치

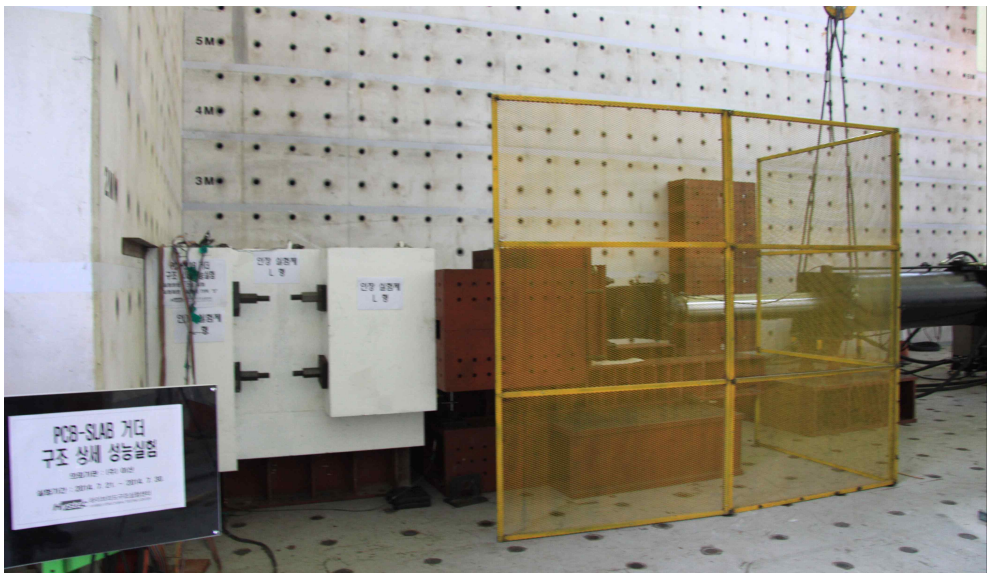


그림 2-172 L형 흉벽 인장실험체 설치 전경

(3) 실험결과 및 분석

(가) 실험수행 내용

① 실험준비



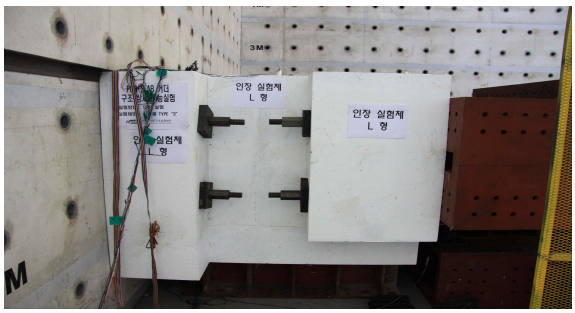
(a) 실험체 반입



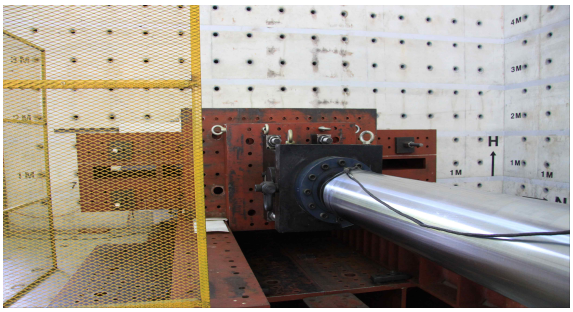
(b) 5MN 유압 가력기 설치



(c) 강봉을 이용한 실험체 고정



(d) 반력벽에 실험체 고정



(e) 강재블록에 가력기 연결



(f) 실험체 하부 좌측에 LVDT-1 설치



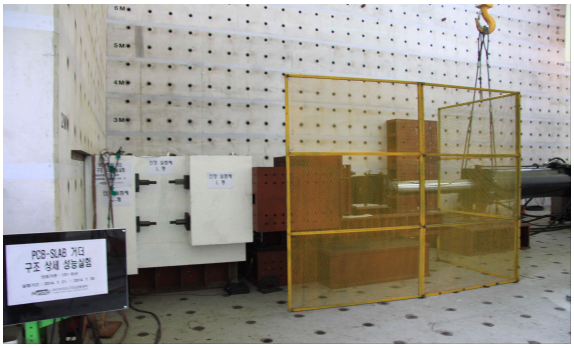
(g) 실험체 하부 우측에 LVDT-2 설치



(h) 변형률게이지 및 변위계의 계측장비 연결

그림 2-173 실험준비 과정

② 인장실험



(a) 인장실험 전경 1



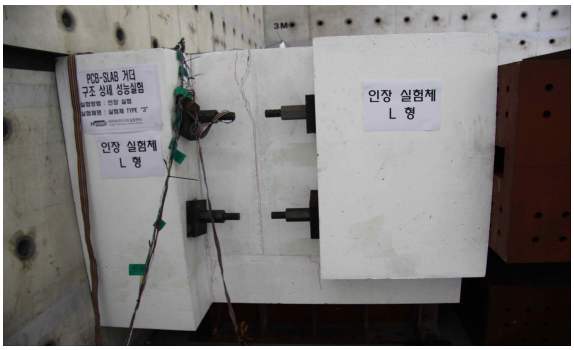
(b) 인장실험 전경 2



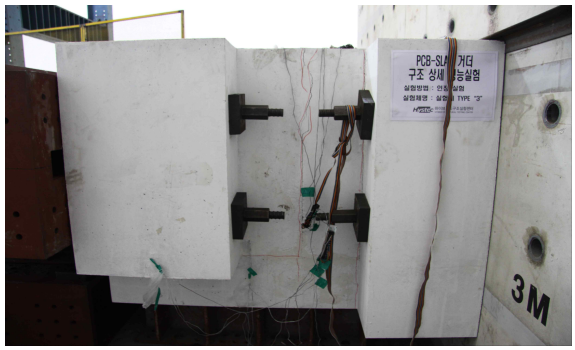
(c) 실험후 인장실험체 1



(d) 실험후 인장실험체 2



(e) 인장실험체 연결부 균열(좌)



(f) 인장실험체 연결부 균열(우)

그림 2-174 인장실험 전경 및 균열

(나) 실험결과 분석

Static Actuator의 변위재하 방식으로 1697kN까지 인장력을 가력한후 실험이 종료되어 실험장비에서 얻은 하중-변위그래프를 아래 그림에 나타내었다. 다만, 본 실험이 인장실험이며 부재전체의 균등가력을 위해 부가적으로 설치된 강재블럭과 정착장치등으로 인한 변위의 손실을 감안 해야 하므로 구조물의 정확한 변위를 파악할 필요가 있다.

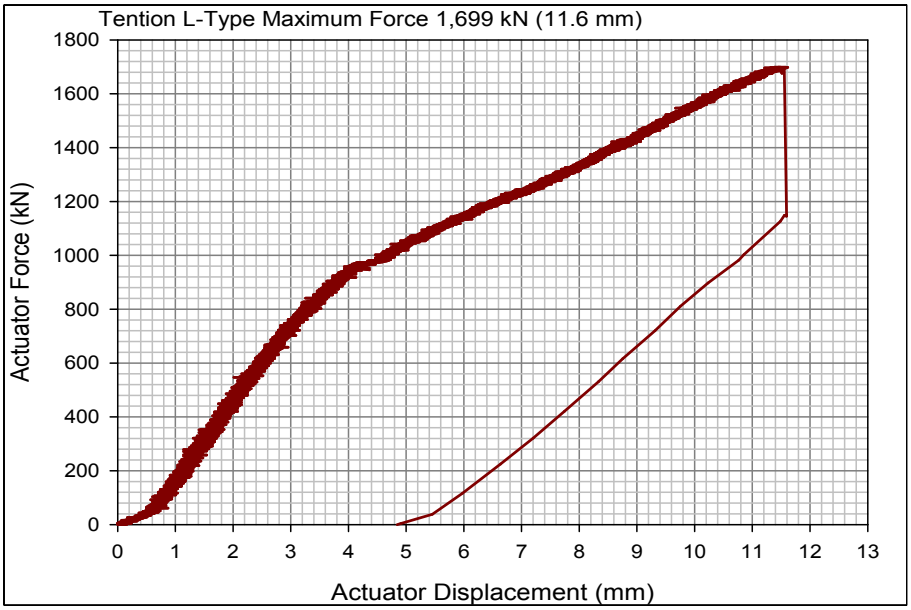


그림 2-175 인장실험 하중-변위 그래프

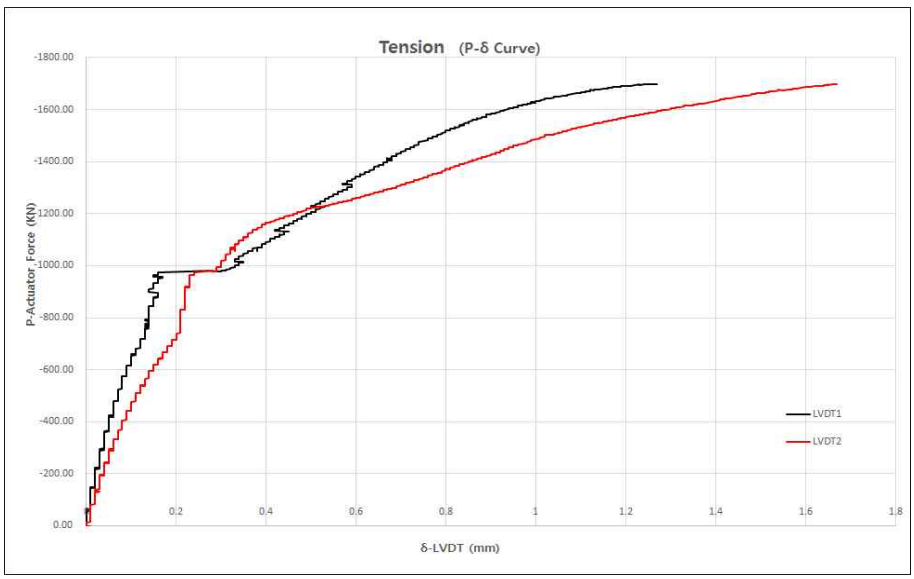


그림 2-176 하중-변위계(LVDT) 그래프

실험체의 변위는 거더 끝단 좌우측에 설치된 LVDT에 의해 계측되었으며 그림과 같다. 실험초기 1000kN까지 하중재하 방식으로 가력하는 동안 972.45kN에서 순간 변위가 늘어났으나 이후 완만한 곡선을 보이며 변위가 증가하였고 실험장비와 실험체의 변위발생 경향은 일치하였다.

L형 흉벽 벽체와 바닥판에 배치된 연결철근과 거더부에 배치된 연결부 철근의 변형률 그래프는 각각 아래 그림과 같은 결과를 보였다.

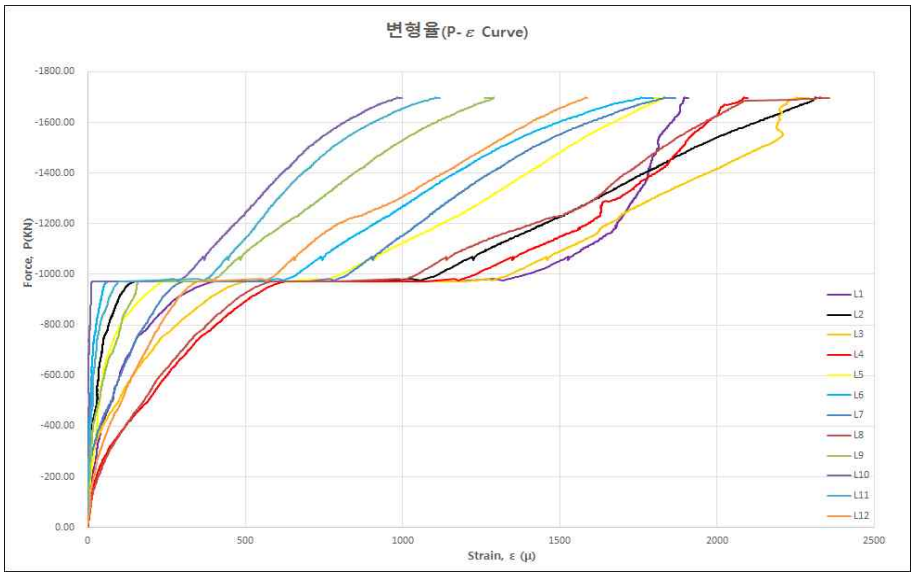


그림 2-177 하중-변형율 그래프(L형흉벽부 철근)

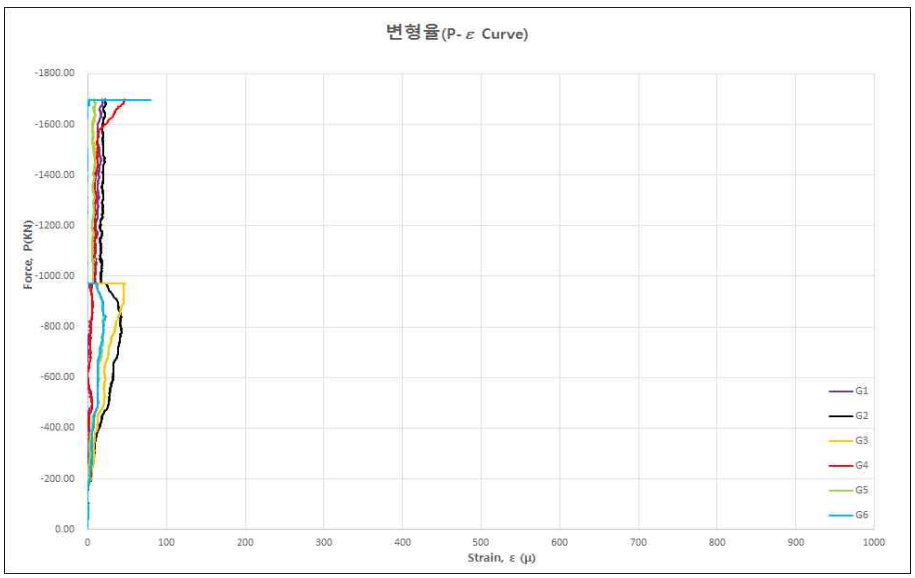


그림 2-178 하중-변형율 그래프(거더부 철근)

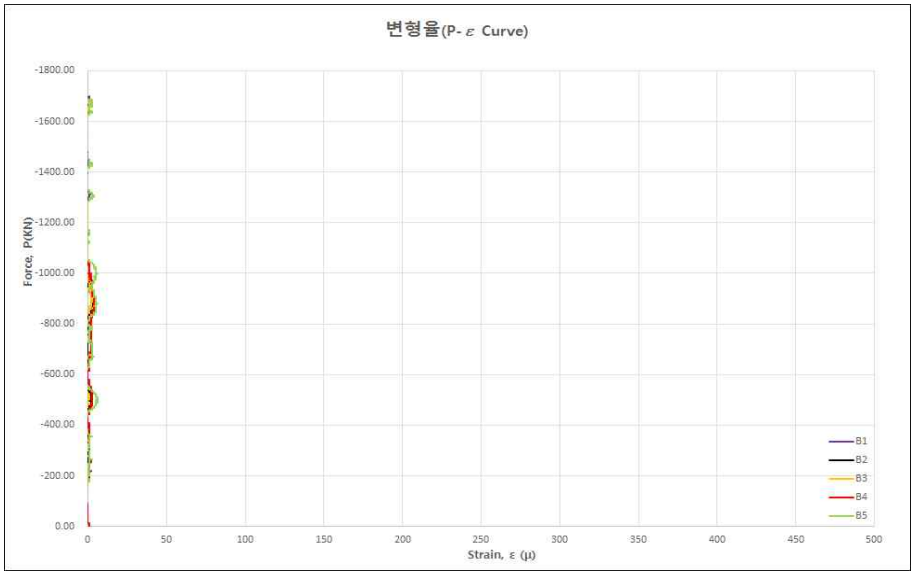


그림 2-179 하중-변형율 그래프(바닥부 철근)

철근의 변형율은 L형 흉벽 벽체부에 설치된 철근의 변형율에 비해 거더부 연결철근과 바닥부 철근의 변형율은 상대적으로 미소한 것으로 나타났다. 거더부 연결철근의 경우는 인장응력의 작용점을 거더부에 설치된 원인으로 벽체부 연결철근이 먼저 하중전달 받는 것으로 평가되며, 바닥부 연결철근의 경우는 rubber mat 설치로 실질적인 하중이 작용하지 않는 것으로 볼 수 있다. 따라서, 실제 구조물의 경우에도 바닥부의 철근은 거더와의 부착을 위한 용도로만 최소한의 철근이 배치되어도 무방할 것으로 판단된다.

또한, 가력하는 동안 미소한 변형율을 나타내다가 972.45kN에서 급격히 변형률이 증가한 것은 현장타설 연결부의 신구콘크리트가 분리되어 철근이 하중분담을 시작하는 시점으로 볼 수 있다. 현장타설 되는 단면의 콘크리트 치핑이 치밀하게 이루어진 결과로도 보인다. 콘크리트 인장강도 상실이후 철근의 항복변형율(2,000 μ)까지 도달하는 동안 변형율은 지속적으로 증가되었다.

L형 흉벽 벽체에 배치된 3단의 연결철근은 전체적으로 인장하중을 분담하는 결과를 보였으나 특히, 최상단 철근의 하중 분담이 가장 큰 것으로 평가 되었다. 실제 교량에서는 상단이 폐합되어 실험체 보다는 고른 분담을 보일 것으로 예상되나 형상이 L형이므로 실험결과와 같이 최상단 연결철근이 가장 많은 하중분담을 할 것으로 보이므로 설계시 중요하게 고려될 필요가 있다.

(4) 결론

실제 교량에서는 실험체와 달리 L형 흉벽 하단에 교좌장치가 위치하여 거더의 교축방향과 일체로 거동하며, 주하중은 온도하중으로 예상된다. 따라서, 본 실험은 현장타설 연결부의 인장실험을 통해 철근의 항복변형율 도달시의 최대 내하력을 평가 하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(가) 인장력 972.45kN 작용시 철근의 변형률이 최대 1,200μ로 급격히 증가하였다. 이것은 현장타설부의 신구 콘크리트가 분리되면서 콘크리트의 인장강도를 상실한 시점에서 철근이 대부분의 하중을 분담한 결과로 보인다. 현장타설시 접합면의 세밀한 치핑을 통해 콘크리트의 인장강도를 최대화 할 수 있을 것으로 판단된다.

(나) L형 흉벽부 벽체에 배치된 연결철근부가 대부분의 인장력을 분담하는 양상을 보였으며, 상대적으로 바닥부의 연결철근은 미소한 철근변형율을 나타내 하중분담을 거의 하지 않으므로 설계시 특별히 강도에 대한 검토 없이 최소한의 철근 배치가 가능하다.

(다) 철근의 항복변형률 (fy=4,00MPa, 2,000μ) 도달시의 작용하중은 1418.3kN의 결과를 보여, 일체화된 실제 교량의 교축방향 거동은 온도하중으로 예상되는 하중에 비해 예기치 못하게 미소한 변위가 발생하므로, 충분히 저항할 수 있을 것으로 판단된다.

(라) 전체적으로 연결철근의 강도는 본 구조물인 거더와 비교해도 일체로 거동할 수 있는 충분한 강성을 확보한 것으로 평가할 수 있으며, 일부과다 배치된 연결상세 철근은 제거하고 효과적인 배치를 통해 최적의 성능 발현이 가능하다.

제 3 장 최종 연구성과 및 적용실적

1. 연구성과

가. PSC-I 거더를 이용한 PCB-SLAB 교량의 해석 및 설계

기존의 중공슬래브 교의 단점을 극복하고 바닥판 슬래브가 없는 프리캐스트 조립식 거더를 개발하여 중공슬래브를 형성하여 저형고 거더를 개발하기 위한 연구목표에 맞추어 새로운 형식에 대한 구조해석 방법에 대한 연구와 설계 수행 후 설계지침(안)을 제시하였다.

(1) 기초문헌조사

개발할 중공슬래브량의 해석과 설계에 적용할 설계기준을 설정하기 위해 도로교 설계기준, 콘크리트 구조설계기준 및 도로설계편람 등 국내의 건설관련 시방서 및 논문, 해외문헌 자료등의 조사 수행.

(2) 기존공법 사례연구

기존의 중공슬래브교 및 슬래브교, 라멘교 등의 연구개발 내용 검토와 유사공법에 대한 계산서, 도면 등의 설계자료에 대한 검토 및 비교안 작성.

(가) 중공 슬래브교의 문제점 및 사례 연구

(나) 기존 강합성 라멘교의 원리 및 경제성 분석

(3) PSC-I 거더의 최적 단면 산정

현재 주로 적용되는 도로교의 횡단폭원 및 횡방향 접합방법을 고려하여 단면에 대한 연구를 수행하였으며, 설계기준 검토에 따른 최적단면 설정.

(가) PSC-I빔의 단면변화를 통한 최적 단면 도출

(나) Bulb-T 형태의 단면 특성 연구

(다) 거더의 적정간격 및 경간장별 형고 산출

(라) 정착구 위치 및 쉬스관 배치에 관한 연구

(마) 긴장력 도입 방안 연구

(바) 중공라멘교 적용단면 검토

(4) 거더간 합리적 연결방안

거더의 횡방향 접합을 위해 플랜지 폭원을 검토하고 전단키와 횡방향 긴장재, 에폭시 접착제를 통한 연결방안 검토.

(가) 콘크리트 재령에 따른 솟음량 관리 기준 검토

(나) 거더간 합리적 횡방향 연결방안 비교 검토

(다) 거더간 일체화를 위해 횡방향 긴장재를 이용한 연결방법 검토

(5) 상세해석을 통한 구조안전성 검토

설정된 단면에 대해 단면계수산정, 상부하중 적용 및 강선에 대한 영향을 고려하여 구조계산을 수행하고 범용구조해석 프로그램인 Midas Civil을 이용한 모델링과 해석을 통해 단면에 발생하는 응력과 단면적정성을 검토함.

(가) 교직방향 하중 횡분배를 고려한 모델링 방법에 대한 검토

(나) 강연선 인장에 따른 압축력 도입을 고려한 해석 방안 검토

(다) 상세해석을 통한 응력검토.

(6) 설계지침(안) 개발

국내외 시방서 및 본 연구에 적용된 설계기준을 종합하여 PCB-SLAB 교량의 설계지침(안) 개발.

(가) 교량관련 설계기준에 대한 적합성 여부검토

(나) PCB-SLAB 교량의 설계지침(안)

(7) 설계편람 및 표준도작성

관련규정과 시방서을 근거로 설계도서를 작성하고 최적화 연구를 수행함. 설정된 단면에 대한 일반도, 배근도, 시공상세도 등의 설계도면 작성.

(가) 설계도서 작성을 위한 표준화 방법 검토

(나) 표준지간 설정을 통한 구조계산서, 거더도면, 상세도면의 작성

나. PSC-I 거더를 이용한 PCB-SLAB 교량의 제작 및 시공기술

단면 최적화를 통해 기존의 바닥판 슬래브가 없는 프리캐스트 조립식 거더를 개발하기 위한 연구목표에 맞추어 새로운 형식에 대한 구조해석과 설계 수행하여 실제시공이 가능한 설계성과품이 작성되었다. 따라서, 거더 제작과 시공의 단계별 문제점 검토와 시공여건을 고려한 경제적인 시공방법 검토가 수행되었고, 최종적으로 개선방향을 제시하였다.

또한, 개발된 PCB-SLAB 거더의 실물 재하실험을 통해 검증하였고, 신축이음이 없어 주행성이나 유지관리에 유리한 반일체식 교량으로의 적용성 확대를 위해 개발된 중공슬래브 교량의 구조상세를 제시하였고, 실험을 통해 검증한 후 추천(안)을 제시하였다.

(1) 거더간 합리적 연결방안 추가검토

횡방향 강선 도입에 따른 합리적인 시공방안 연구 및 Key Segment를 이용한 방안 검토를 수행하고 실험을 위한 실제 제작과 거치 및 시공을 통해 적정성 여부 검토와 개선방향에 대해 종합적으로 검토하였다. 제시된 여러 방법들 중 상부플랜지 부분은 불가피하게 현장타설 할 수 있도록 상세를 변경하였고, 횡방향 텐던의 도입도 하부플랜지부로 한정하였다. 이를 반영하여 최종 성과품을 작성하였다.

(2) 거더 제작 방안 검토

개발된 거더의 제작을 위해 제작순서를 검토하고 거푸집을 단계별로 설계하였으며, 거더간 병렬 시공방법과 작업대차에 대한 검토를 수행하였고, 최종적으로 발생할 수 있는 문제점들에 대해 개선사항을 제시하였다.

(가) 제작 거푸집 설계 및 검토

(나) 거더 제작순서 및 시공순서 검토

(다) 거더간 병렬시공 및 작업대차 검토

(라) 문제점 및 개선사항을 반영한 최종안 설정

(3) 시공지침(안) 개발

기존 25m~35m 교량의 선택 폭을 넓히게 된 본 연구개발은 실질적인 사업화를 추진하기 위해 필요한 요소기술을 개발하는 것이므로 설계나 해석을 통한 구조적 안정성을 확보함과 동시에 기존의 거더교와 다른 단면형상과 시공방안에 따른 유의사항이나 지침이 제시되어야 하므로 거더의 제작과 시공법을 실험체를 통해 검증하고 문제점을 개선하여 시공지침(안)을 개발 하였다.

(가) 제작을 위한 일반사항 제시

(나) 콘크리트 타설 및 인장에 관한 사항 제시

(다) 거더 현장 거치 및 현장시공을 위한 사항 제시

(4) 실험체 설계 및 실험방향 설정

개발된 거더에 대해 수행한 실험체 설계는 20m의 2주형 PCB-SLAB 거더와 적용성 확대를 위한 일체식 교량화를 위한 구조상세부 설계로 반일체식 교량의 접속슬래브 연결상세와 프리캐스트 L형 흉벽을 이용한 연결부 설계를 수행하였다.

(가) 실물거더 실험을 위한 거더 설계

① 구조계산서 및 도면작성

② 수량산출 및 내역서 작성

③ 정동적 거동해석을 위한 실험 방법 설정

(나) 반일체식 교대 교량화를 위한 구조상세 설계

① 반일체식 교대 교량의 접속슬래브 연결철근 상세 검토

② 프리캐스트 L형 흉벽의 단면설계 및 제작 순서 검토

③ 연결부 인장실험을 고려한 블록아웃부 설정 및 제작도 작성

④ 휨 및 인장실험 및 계측방법 검토

다. 주요 연구성과

(1) 논문게재 성과

게재일	논 문 명	저 자	학 회 명
2014년 12월 (예정)	일체식 교량의 접속슬래브 연결철근 형상에 따른 연결부 구조거동에 대한 실험적 연구	유성근, 김나연, 김호섭, 김영호	한국복합신소재구조학회

(2) 학술대회 발표 성과

발표일	발표명	저자	학술대회명	국내외 구분
2014년 10월	PSC-I 거더를 이용한 조립식 중공슬래브의 휨거동	이상윤 김정호 김철호	2014 한국콘크리트학회 가을 학술대회	국내

(3) 기술기사 게재 성과

게재일	기 술 기 사 명	저 자	학 회 명
2013년 12월	구조재료의 효율적 이용과 제작 결함의 사전배제를 위한 중공슬래브 실용 기술개발	어기택 정의용 김나연 김철호 장석윤	한국복합신소재구조학회

(4) 특허성과

출원 및 등록현황				
출원연도	특허명	출원인	출원국	출원 및 등록번호
2013	전단키를 구비한 무바닥판 프리캐스트 거더교 및 그 시공방법	(주)에이스이엔씨	대한민국	10-2013-0161029
2014	프리캐스트 교대흉벽을 이용한 반일체식 교량 및 그 시공방법	(주)에이스이엔씨	대한민국	10-1452178 (2014. 10. 13)

(5) 시제품 제작

제작연도	시제품명	세부내용	용도
2013	PCB-SLAB 단경간 교량 모형 시제품	1/50 크기의 실물축소모형	시공순서 검토 및 홍보활용

(6) 실험

수행일	실험명	수행기관
2014. 4	PSC-I 거더를 이용한 조립식 중공슬래브 교량 실물모형 재하실험	한국건설기술연구원
2014. 8	PCB-SLAB 거더 구조상세 성능실험	명지대학교 하이브리드 구조실험센터

(7) 연구개발 홍보

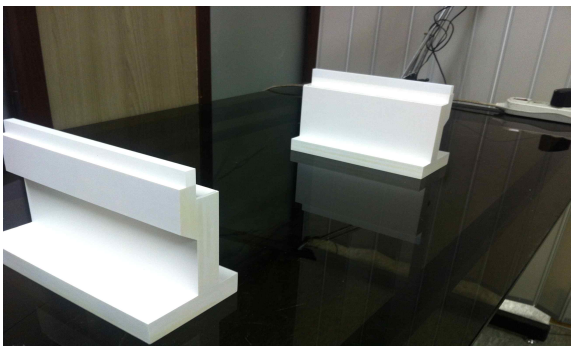
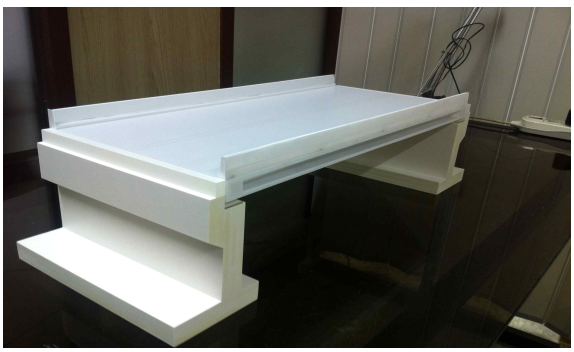
수행일	홍보내용	홍보처
2014년 4월	공개재하실험(초대장 작성 및 배포)	관련업체
2014년 8월	PCB-SLAB 홍보 브로슈어 제작 및 배포	건설교통 신기술대전

2. 시작품 제작 및 실물실험

가. 시작품 제작

본 연구를 통해 개발된 PCB-SLAB 교량에 대해 모형을 1/50로 제작하여 시공단계별 문제점과 간섭여부를 체크하고 추후 홍보에 활용하기 위해 모형을 제작하였다.

표 3-1 제작 모형 및 시공과정

	- 하부(교대) 시공 - 제작장에서 거더 제작
	- 거더 가설 - 횡방향 강연선 긴장
	- 포장 및 부대시설 시공 후 공용

나. 거더 실물모형 재하실험

본 실험은 (주)에이스이엔씨와 (주)이산이 개발한 PSC-I 거더를 이용한 조립식 중공슬래브(PCB-SLAB) 교량에 대한 설계 타당성 및 개선사항 검토를 위한 것으로 실물모형 실험체를 제작하고 정동적 재하실험을 실시하여 거동을 평가하기 위해 한국건설기술연구원에서 수행하였다. 이 실험은 실용화 기반의 연구목적에 맞추어 공개재하실험을 실시하여 여러 전문가들의 의견을 청취하고 본 교량에 대해 홍보하였다.

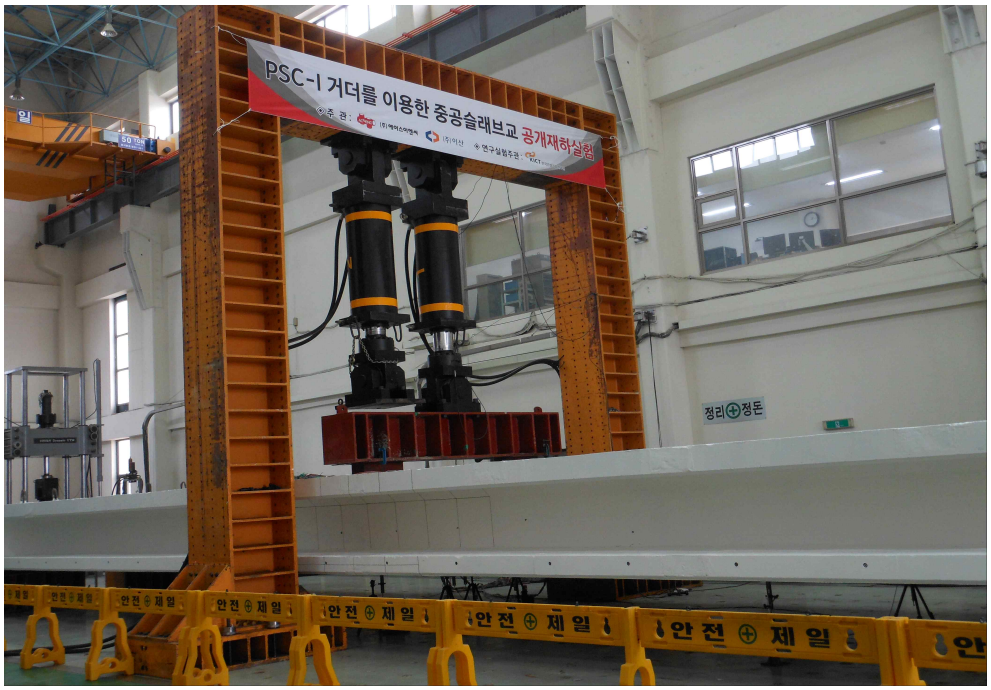


그림 3-1 공개재하실험 실시 전경

(가) 실험보고서 수득

(나) 실험결과 분석 및 개선사항 반영

(다) 공개재하 실험 실시로 연구된 교량 홍보 실시

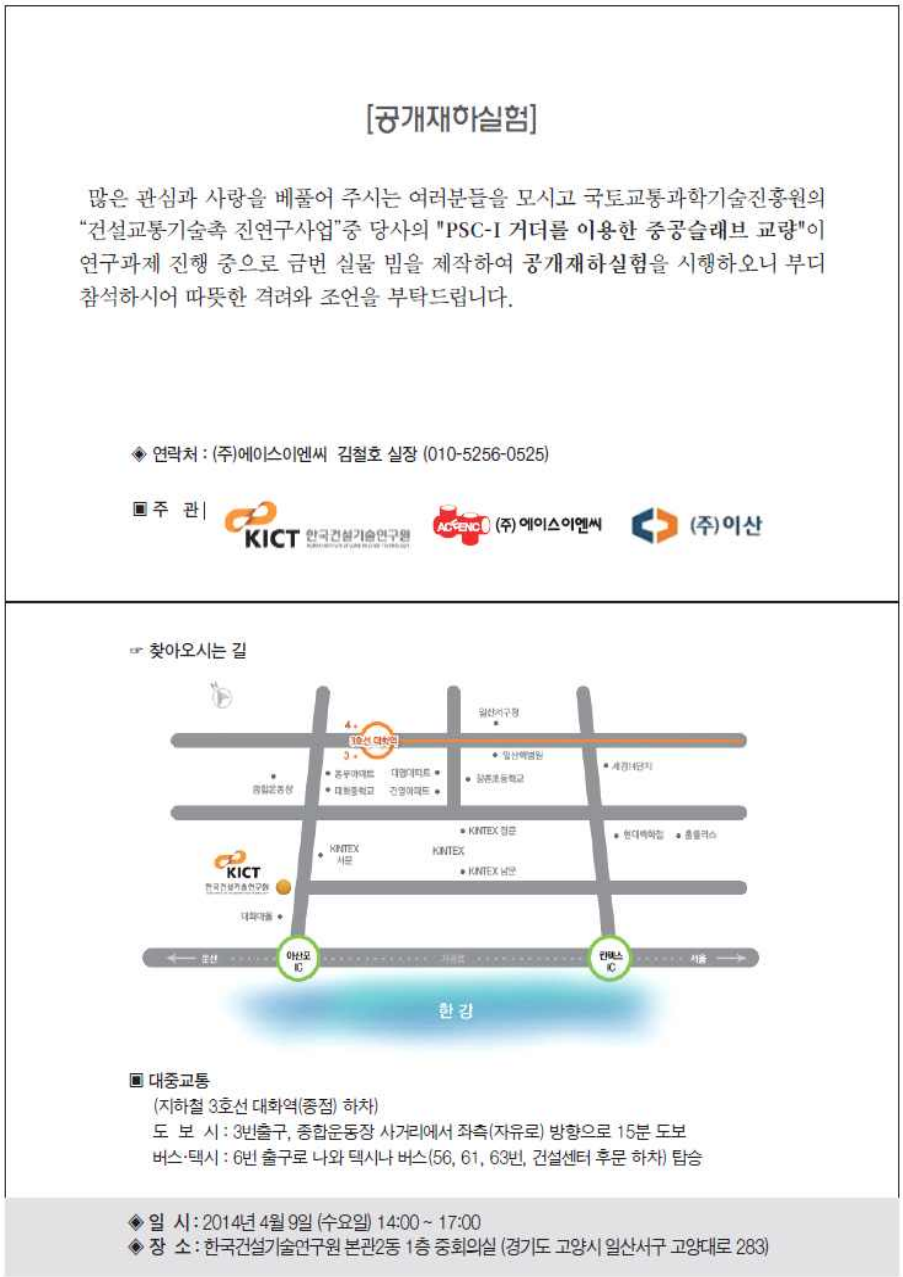


그림 3-2 공개재하실험 초청장

다. 구조상세 성능실험

개발된 중공슬래브 교량의 연장 약 25m와 고안된 거더 형상이 단지점부 단면확대 또는 프리캐스트 흉벽을 이용하여 Semi-Integral (반일체식)교량으로의 적용이 가능한 바, 개발교량의 보급 및 적용성 확대를 위하여 프리캐스트 흉벽으로 현장타설하여 연결되는 부분의

구조성능에 대한 성능평가와 일체식 교량의 필수 구조 요소인 접속슬래브 연결부에 대한 실험 연구 수행하였다.

본 실험은 반일체식 교량의 흉벽부와 접속슬래브의 거동 파악 목적이 아니라 고안 개발된 PCB_SLAB (Prestressed Concrete Slab Bridge)교의 반일체식 교량 적용시 거더와 일체로 거동하게 될 프리캐스트 L형 흉벽의 연결부 성능에 대한 평가와 합리적인 접속슬래브 연결철근의 고안과 이에 따른 설계, 시공 기술개발을 위해 명지대학교 하이브리드 구조실험센터에서 실시되었다.

(가) 인장 및 휨 실험수행

(가) 실험보고서 수득 및 결과분석

(나) 국내 학술지 논문 제출

(1) 일체식 교대 교량의 접속슬래브 성능실험



그림 3-3 인장실험 전경

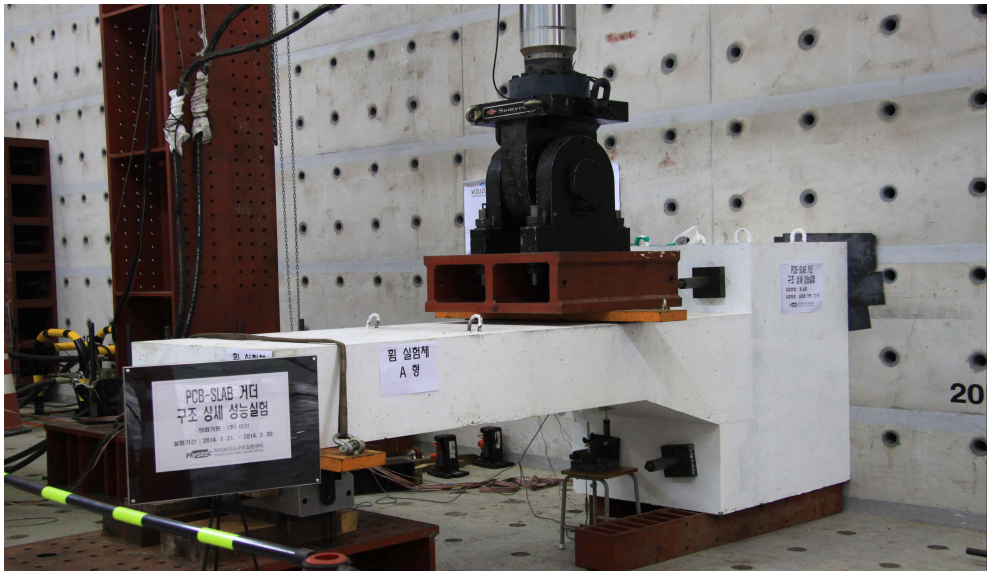


그림 3-4 휨실험 전경

(2) 일체식 교량화 공법 연결부 성능실험

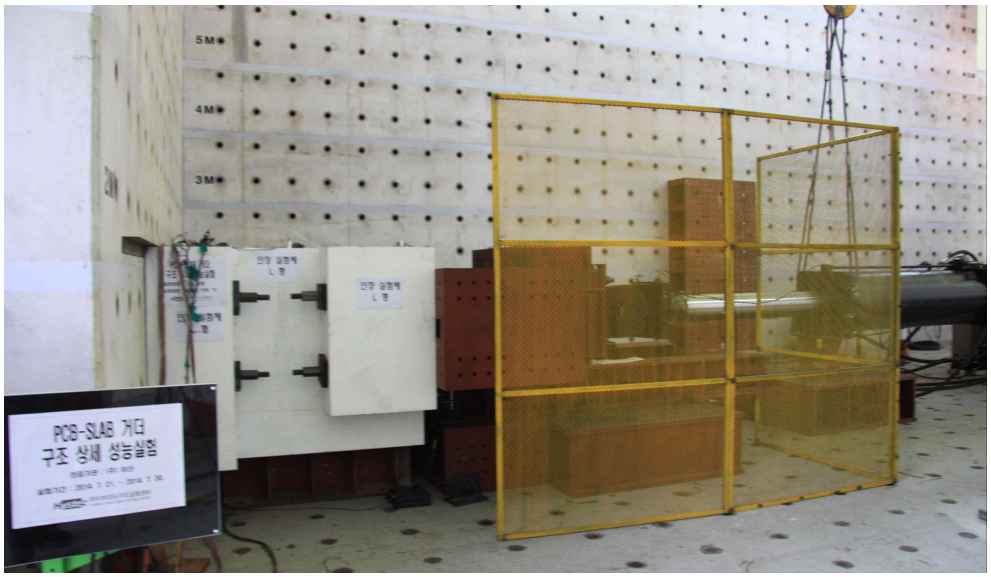


그림 3-5 L형 흉벽-거더 연결부 인장실험 전경

3. 기술개발 성과의 국내외 시장 전망

가. 국내외 시장규모

국토해양부는 매년 고속도로, 일반국도, 지방도 등 전국 도로상의 교량 및 터널에 대한 기초현황과 통계자료를 분석한 “도로교량 및 터널 현황조서”를 발표하고 있는데, 현황조서에는 국내의 모든 교량과 터널에 대한 연장, 폭, 준공년도, 구조물 형식 등에 대한 일반적인 내용이 포함되어 있다.

현황조서는 민간업체에서 현재 교량 및 터널의 건설현황을 파악하여 교량 및 터널의 설계 및 시공에 참고자료로 이용할 수 있으며, 공공분야에서 구조물의 설계 및 유지관리 등 장래계획을 수립하는데 중요한 국가 기본 자료로 활용하기 위하여 작성된 것이다.

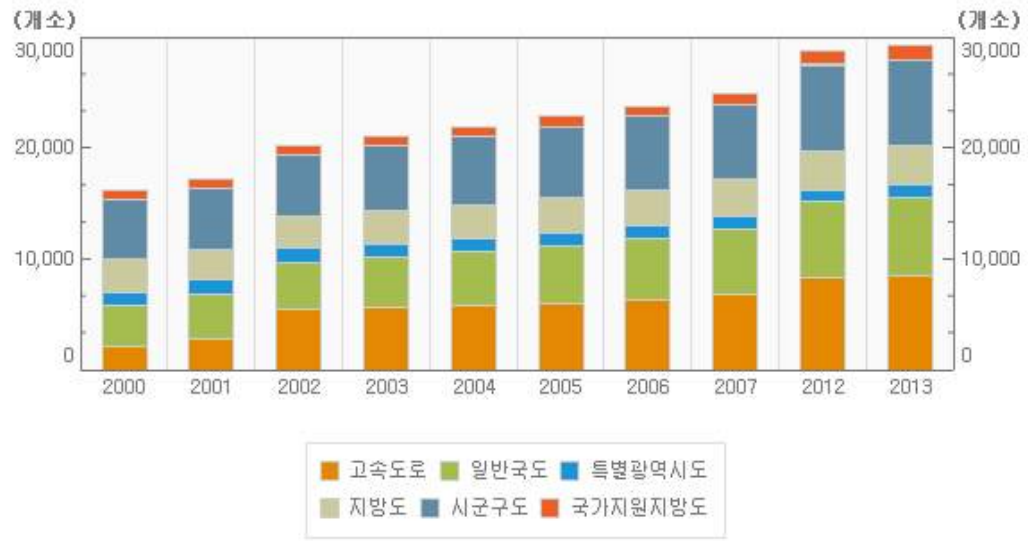


표 3-2 연도별 교량개소 및 연장 현황

[단위 : 개소, km]

구 분	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
교량개소	21,117	21,906	22,871	23,805	24,923	25,792	26,920	27,381	28,152	28,713	29,190
교량연장	1,764	1,882	1,987	2,139	2,289	2,389	2,567	2,618	2,721	2,792	2,851

상기 표와 같이 2013년 말 기준 총 교량개소가 29,190개소, 연장이 2,851km로 조사 되어 2010년 대비 1,809개소, 연장 233km가 증가한 것으로 나타났으며, 10년 전 인 2003년 대비 해서는 8,073개소(38%), 연장 1,087km(62%)가 증가하여 연평균 교량 수는 3.8%, 연장은 6.2% 꾸준히 증가한 것을 알 수 있다.

표 3-3 도로 교량의 증감 추이

구 분	2003년말 (A)	2013년말 (B)	증감(2003말 기준)	
			B - A	(B - A) / A
교량 개소	21,117 개소	29,190 개소	8,073 개소	38 %
교량 연장	1,764 Km	2,851 Km	1,087 Km	62 %

도로교량증가의 주요 원인은 고속국도와 일반국도 등 간선도로 확충 시 도로의 기능 및 환경친화적인 도로건설 등에 기인하고 있다. 최근 들어 교통정체구간 해소 등을 위해서는 지속적으로 도로투자가 이루어져야 하나, 도로부문 투자비중이 축소됨에 따라 향후 교량 및 터널 증가 추세는 약간 둔화될 것으로 예상된다. 하지만, 교통정체구간해소, 국토균형개발 촉진, 국가경쟁력 제고 등은 물론 도로이용자들의 교통안전을 위해서는 도로부문 투자비용 확대가 불가피 할 것으로 판단된다.

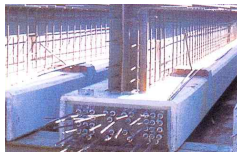
주 산업의 특성상 매년 시장규모가 편차가 있으나, 국내 거더시장은 대략 1조 4천억원 내외의 안정적인 물량으로 시장이 형성되어 있다. 지난 수년간 건설시장의 시장성 성장과 대규모의 SOC, 정부 국토환경 디자인 혁신사업과 광역 경제권 30대 선도 프로젝트 등 국내 교량 건설 시장은 안정적이다.

또한, 최근 4대강 정비사업의 후속으로 각 하천 지류의 정비화 사업이 활발히 발주되고 있는 상황이다. 한국수자원공사의 경우 수변사업에 있어서 단지조성이나 하천 횡단교량 이나 한국농어촌공사에서 주관하는 새만금 간척지 개발사업에도 소규모 교량도 많이 필요로 하고 있는 실정이다.

표 3-4 기존기술과 보유 기술의 차별성(1)

구분	기존기술명 (지적재산권 명)	개발자 (또는 지적 재산권자) (개발년도)	기술내용	공법의 원리, 특징 및 기능	보유기술의 차별성
1	IPC거더교 (신기술221호) 	(주)인터컨스텍 (2003)	단계적 긴장력 도입에 의한 PSC I형 거더의 제작기술	단순보 형태의 빔을 거치한 후 시공단계별 하중증가를 고려하여, 단계적으로 긴장력을 도입시켜 가설하는 교량형식	기존기술은 PSC Beam 계열인데 반해, 보유기술은 구조 합리화 측면에서 강재와 콘크리트의 장점을 활용하는 하이브리드구조 형식의 트러스웨브 거더교로서, 구조가 단순하여 시공성 및 품질확보가 용이하고 경관성이 탁월
2	PSC e-Beam교 (신기술517호) 	우경건설 (2003)	PSC I형 거더의 상연에 강판을 매설하고,부모멘트구간에 강판 및 강선을 연결한 교량의 연속화공법	단면의 압축구역을 강재 및 확장된 콘크리트 플랜지로 보강하여 단면성능을 향상시킨 교량형식	기존기술은 PSC Beam계열인데 반해, 보유기술은 구조합리화측면에서 강재와 콘크리트의 장점을 활용하는 하이브리드구조형식의 트러스웨브거더교로서, 구조가 단순하여 시공성 및 품질확보가 용이하고 경관성이 탁월
3	PSC U-D Beam교 (신기술270호) 	만세코리아 (2000)	신설 연속 합성형교량에서 거더의 상승·하강에 의한 프리스트레싱 도입시공법	이동지점의 하강, 상승 과정을 통해 고정지점쪽 부모멘트 구간 바닥판과 정모멘트 구간 하부플랜지에 압축응력을 도입시켜 가설하는 교량형식	기존기술은 PSC Beam계열인데 반해, 보유기술은 구조합리화측면에서 강재와 콘크리트의 장점을 활용하는 하이브리드구조형식의 트러스웨브 거더교로서, 구조가 단순하여 시공성 및 품질확보가 용이하고 경관성이 탁월

표 3-5 기존기술과 보유 기술의 차별성(2)

구분	기존기술명 (지적재산권 명)	개발자 (또는 지적 재산권자) (개발년도)	기술내용	공법의 원리, 특징 및 기능	보유기술의 차별성
4	Preflex 빔 (특허0089541호) 	삼표이엔씨 (2004)	강재 I-Girder에 프리플렉션 하중을 재하시킨 후 릴리즈하여 강재의 복원력으로 하부케이싱 콘크리트에 압축응력을 도입하고 비부착 강선으로 추가 압축스트레스를 도입하는 프리플렉스 공법	1차 프리플렉션(설계하중의 70 ~ 80%) 하중을 재하하고 잔여하중은 비부착 강선에 의해 2차 프리스트레스를 토입	솟음 처리된 프리플렉스 거더용 강형을 강형을 재하대 상, 하로 거치한 후 프리플렉션 하중을 재하하여 소요의 프리플렉스 응력이 도입되도록 하는 기술로서, 강재사용에 따른 고가의 공사비와 복잡한 시공 과정이 본 기술과의 차별적
5	RPF 거더교 (신기술77호) 	동양 RPF산업 (1997)	프리스트레스트 프리플렉스 합성보의 설계 및 제작방법	프리플렉션 하중에 의해 하부플랜지 콘크리트에 압축 프리스트레스를 도입하고, PS강연선에 의해 콘크리트 부위에 추가 압축프리스트레스를 도입하는 교량형식	기존기술은 PF Beam계열인데 반해, 보유기술은 구조합리화측면에서 강재와 콘크리트의 장점을 활용하는 하이브리드구조 형식의 트러스웨브 거더교로서, 구조가 단순하여 시공성 및 품질확보가 용이하고 경관성이 탁월
6	변단면 PSCI-I BEAM교 (신기술648호) 	에이스이엔씨 (2012)	거더 상부 플랜지 보강용 철근 도입과 거더 하연을 곡선화하여 아치형상 PSC-I 거더를 제작하는 기술	단부는 높고 중앙부는 낮도록 빔 하연을 곡선형으로 한 변단면으로 PSC-I 빔을 제작하여 미관을 향상시킨 개량형 PSC-I빔으로 전단면 압축의 구조개념과 고강도 콘크리트 및 강성보강용 철근 매입으로 구조적 안정성과 사용 및 미관을 향상시킨 교량형식	종래의 보편적이고 획일적인 PSC빔의 형상을 탈피하여 종방향으로 아치형상을 구현하여 미관을 향상시키고, 빔 상부플랜지 내에 강성증대용 철근을 매입시켜 강성 및 편심효과 증대로 효과적인 긴장력 도입이 가능하며, 다단계 긴장 생략으로 시공성 및 경제성이 우수

기존기술과의 차별성

구 분	PSC-I거더를 이용한 중공슬래브교 (PCB – SLAB 교)	일반 PSC-I 거더교	강합성 라멘교
개 요	PSC-I 거더를 이용하여 중공부를 형성하는 교량형식	빔 제작시 긴장력을 도입하여 최종 상태의 응력이 허용응력 범위를 만족	RC 라멘교의 경간장 확대를 위하여 상부와 우각부에 강합성 구조를 도입
적용경간장	20m < L < 30m	25m < L < 45m	25m < L <45m
형 고	H = 1.1 m	H = 1.2~2.0m	H = 1.0~1.8m
특 징	- 가설 동바리 필요없어 시공성 우수 - 현장타설 배제로 공기단축 효과	- 구조 안전성, 시공성, 경제성 우수 - 형고가 높아 형하고 확보에 불리	- 형하고 제약있는 경우 주로 사용 - 강합성 거더사용으로 저형고 적용
총 공사비 (만원/m2)	20m: 170 25m: 175 30m: 180	20m: 160 25m: 165 30m: 170	20m: 220 25m: 230 30m: 250
검토결과	저형고의 경제성이 우수한 공법	공사비는 저렴하나 형고가 높은 단점	강합성 구조 사용으로 공사비 고가

- 일반 PSC-I 빔 보다는 **형하고 확보**에 유리한 공법
- 강합성 라멘교 보다는 **경제적**인 공법

→ **PCB-SLAB 교**

나. 기술수요 및 현장 적용 가능성

국가경제 발전과 더불어 국내 건설시장의 규모 또한 점차 증대되고 있으며, 단순히 양적으로의 증대뿐 아니라 장지간 저형고 및 공사비 절감 등 신규 기술의 증대 또한 필요한 실정이다. 또한, 주변 경관과의 조화를 위해 교량 건설 시 공법의 미관성 역시 그 중요성이 부각되고 있다.

교토의정서 등 국제사회의 지구 온난화 방지노력에 따라 국내에서도 정부의 저탄소 녹색성장의 정책이 발표되어 건설산업에서도 이산화탄소 배출량 저감을 위한 친환경 기술개발 등의 노력이 현실화 되었다. 이러한 노력의 일환으로 계획, 검토, 시행단계에서 공사비 절감을 위한 최적설계 및 물량점검의 노력이 포함되는 것은 하나의 추세로 굳어지고 있는 바 이러한 사회적 요구에 합당하도록 본 기술은 공장에서 제작후 운반하여 별도의 동바리 설치 없이 현장에서 조립되는 단순 공정을 통한 시공성확보와 빔 플랜지가 상부슬래브 역할을 수행함으로써 종래 적용되던 슬래브와 거더의 합성형식으로 인한 각각의 추가 공정과 기타 여러 자재들의 사용에 따른 공사비 절감효과로 인해 경제성이 우수한 기술이다.

또한, 친환경 건설공사에 대한 요구에 맞게 콘크리트 및 PS강선에 의한 단순 공정으로 현장 혹은 공장에서 PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 수직분할 블록화 부재들의 연결 및 조립에 의한 작업 완성으로 현장 콘크리트 타설 작업이 최소화되고, 강재의 사용을 배제함으로써 강재 사용 시 필수적으로 수반되는 용접과 같은 공정을 생략함으로써 이산화탄소의 발생을 억제하여 친환경적인 기술로 평가받을 수 있을 것이다.

이와 같은 시공성 및 환경친화성, 경제성을 갖추면서도 구조적으로 안전성이 확보한 바 본 기술은 사하중 및 활하중에 의하여 발생하는 슬래브 부재들 사이에 발생하는 전단력은 중공 슬래브 부재의 연결부에 설치된 전단키 및 횡방향 프리스트레스가 감당하게 되고, 이러한 전단키와 중공 슬래브 부재에 설치 된 긴장재들의 긴장력의 작용에 의해서 교량전체가 일체적으로 거동하게 된다.

결국 본 기술의 중공 슬래브 부재의 상부 플랜지는 바닥판으로 작용을 하게 되고, 종방향으로는 슬래브 부재의 플랜지 내에 설치된 긴장재를 긴장하여 주형에 작용하는 전체 응력을 조절하고 강성을 증대시킴으로써 구조적 안전성을 확보하였다.

설계자의 의도에 따라서 재하되는 하중의 발생 단계별로 긴장력을 도입할 수 있는데, 이는 1차 고정하중에 대해 긴장력을 도입한 후 운반 및 가설이 완료 된 후 2차 긴장재 도입과 그 후 2차의 추가고정하중 및 활하중에 대해서 긴장하는 방식과 같이 단계별로 긴장력을 도입할 수 있어 중공 슬래브의 중공부와 외부에 복수개의 외부 긴장재가 추가적으로 제공 되어지는 것을 특징으로 하여 추후 유지관리 적용에도 편리하게 적용될 수 있을 것이다.

또한, 이러한 구조적 안전성 확보와 함께 주형의 형고를 실질적으로 낮추고, 기존 중공 슬래브교가 갖고 있던 폐쇄형의 획일적인 단면을 탈피하여 중공부 단면의 높이와 폭이 각기 서로 반대방향으로 테이퍼 형태로 변하는 단면 형상을 갖도록 하여 경관설계에 적합하도록 하였으며, 현장에서의 작업을 최소화하여 경제적이고 내구성 있는 조립식 교량을 건설할 수 있다.

다. 경쟁기술 대비 가격경쟁력

PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량의 경우 공장에서 수직 분할하여 블록을 제작한 후 현장 이동 후 조립 및 가설되어 완료되어지는 단순 공정으로 타 공법 형식에 비해 제작 공정이 간단하다. 현재 주로 적용되는 교량 건설 공법들의 경우 현장에서 거푸집 및 동바리 등의 부속자재에 의해 제작되고 현장 콘크리트 타설로 양생하는 상당한 시간이 소요되어 교량의 공사 기간이 장기화 되고 있는 실정이다. 그러나, PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량의 경우 현장에서 제품화 된 수직분할 블록의 조립 및 가설로 공사가 완료되는 공정으로 별도의 동바리 및 거푸집이 필요하지 않아 공정이 대폭 축소되어 공기 단축 및 사용 자재의 감소로 공사비가 저렴하다.

표 3-6 단계별 시공과정 비교(소요 일수)

구 분	PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량	소요일수	PSC - I형 거더교	소요일수
단계 1	공장 혹은 현장에서 수직분할 블록 PSC-I 거더 제작	40	현장에서 수직분할 블록 PSC-I 거더 제작	40
단계 2	종방향 인장작업	7	종방향 인장작업	7
단계 3	제품화 된 블럭 PSC-I거더 운반 및 가설	2	PSC-I 거더 운반 및 가설	2
단계 4	횡방향 인장작업(철근 연결)	7	슬래브 거푸집 및 동바리 설치	7
단계 5			슬래브 콘크리트 타설	40
계		56		96
비 고		**- 40**		-

표 3-7 기존 기술과의 경제성 비교

(단위 : 원, 4본 기준)

PCB-SLAB교 (B=10.0m, L=30m)			강합성 라멘교 (B=10.0m, L=30m)		
공 종	상 부 공	비 고	공 종	상 부 공	비 고
거더 제작	131,882,480	현장 제작	거더 제작	216,568,312	현장 제작
거더 가설	7,073,264	크레인 가설	거더 가설	3,272,320	크레인 가설
상부 슬래브	15,000,000		상부 슬래브	51,000,000	
소 계	153,955,744		소 계	270,840,532	
자 재 비	31,892,068	철근 및 레미콘	자 재 비	13,921,588	철근 및 레미콘 강재(SM520)
총 계	185,847,712		총 계	284,762,120	
비 교	**65.3%**			100 %	

제 4 장 연구목표 달성 및 효과

1. 목표달성도

가. 연도별 연구목표

1차년도는 PSC-I 거더를 이용한 PCB-SLAB 교량의 해석 및 설계에 관한 연구를 수행하여, 국내·외 사례조사 및 기존공법에 대한 비교검토를 실시하였고, 거더 단면의 최적화와 거더간 합리적 연결방안을 제시하였다. 상세해석을 통한 구조안전성을 검토하고 설계지침과 구조계산서, 도면 등의 성과품을 작성하였다.

2차년도는 PSC-I 거더를 이용한 PCB-SLAB 교량의 해석 및 설계에 관한 연구를 수행하여, 개발되고 설계된 최종안에 대하여 특허출원과 거더 제작 방안을 검토하였고 시작품을 제작하였으며, 강재거푸집을 설계 및 제작하였다.

3차년도는 개발된 PCB-SLAB 교량의 실물 거더 제작과 재하실험을 수행하여 정·동적 거동에 대해 평가 및 검증하였고, 실제 현업에 적용성을 확대하기 위한 추가연구로 일체식 교대 교량화 공법을 개발하였다. 또한, 일체식 교대 교량의 접속슬래브 연결상세에 관한 연구를 수행하였으며, 개발된 PCB-SLAB 교량과 연계하여 프리캐스트 흉벽을 이용한 반일체식 교대교량 형성 연결부와 접속슬래브 연결 상세에 관한 실험적 연구를 실시하였다.

표 4-1 연차별 연구목표 및 내용

연 차	연구목표	주요 연구내용
1차년도	■ 기초문헌 조사	• 본 연구와 관련된 제반 참고자료를 조사
	■ 기존 공법에 대한 사례 연구	• 중공 슬래브교의 문제점 및 사례 연구 • 기존 강합성 라멘교의 원리 및 경제성 분석
	■ 단면의 최적화 산정	• PSC-I빔의 단면변화를 통한 최적화 단면도출 • Bulb-Tee 형태의 단면특성 연구 • 적절한 거더간격 및 경간장별 형고 산출 • 정착구 위치 및 쉬스관 배치에 대한 연구 • 긴장력 도입 방안 연구 • 중공라멘교 적용단면 개발
	■ 거더간 합리적 연결방안	• 재령에 따른 솟음량 관리 기준안 도출 • 거더간 합리적인 횡방향 연결방법 도출 • 횡방향 긴장재를 이용한 연결방안 연구
	■ 상세해석을 통한 구조안전성 검증	• 도출된 단면에 대한 구조물 상세 해석
	■ 설계기준(안) 개발	• 교량관련 설계기준에 대한 적합성 여부 • 개발 거더의 설계기준(안) 개발
	■ 설계편람 및 설계도면 작성	• 설계 성과품 작성을 위한 표준화 작업 • 구조계산서, 거더도면, 상세도면 작성
2차년도	■ 홍보물 제작	• 카다로그 제작 및 배부 통한 홍보
	■ 학회지 논문 게재	• 학회지 논문 게재를 위한 이론적 연구
	■ 특허출원	• 관련 기술의 특허 출원
	■ 시작품 제작	• 개발 거더의 축소모형 제작
	■ 강재거푸집 제작	• 실물 빔 제작을 위한 강재거푸집 제작
3차년도	■ 실물 빔 제작	• 정적거동 평가를 위한 실물모형 제작 및 시험 • 동적거동 평가를 위한 실물모형 제작 및 시험
	■ 실물 재하시험	• 정적, 동적거동 평가 • 실험결과를 통한 보고서 작성
	■ 적용성 확대를 위한 실험적 연구	• 일체식교량(Integral Bridge)화 연구

나. 성과목표 및 성과지표

본 과제는 3차년에 걸쳐 세부과제로 나누어 진행한 새로운 형식의 중공슬래브 교량의 단면설정 및 이론적 연구를 비롯하여 실물 거더 제작과 시공 기술을 개발하고 실험을 통해 검증하였다. 또한, 개발된 교량의 적용성 확대를 위한 일체식 교량 공법을 개발하고 구조상세 성능실험을 통해 검증하였다. 따라서, 연구개발을 통한 성과물이 사업화 될 수 있도록 최적화 하는데 목표를 두고 수립한 성과지표이다.

표 4-2 최종 성과목표 및 지표

연차	핵심 성과물 (level1)	단위 성과물 (level2)		최종 성과목표				해당 기관	예산 (백만)	정량목표
				질적목표(측정방법)		목표치	검증방법			
1	PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량의 설계 및 시공 기술 개발	1-1	학술지게재 논문	①	게재 논문수	1건	논문집			논문 : 1 건
		1-2	연구개발 관련 홍보	①	정기간행물 발간 건수	1건	간행물			간행물 : 1 건
		1-3	특허출원건수	①	특허출원 건수	1건	출원서류			특허 : 출원 1 건
		1-4	연구원당 특허출원건수	①	특허출원 건수	0.111건/인	출원서류			특허 : 출원 1 건
		1-5	연구비당 특허출원건수	①	특허출원 건수	0.167건/6억	출원서류			특허 : 출원 1 건
		1-6	기술수준 향상도	①	수준 향상정도	100%	구조 계산서			계산서 : 1 건
2	PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량의 설계 및 시공 기술 개발	2-1	연구개발 홍보 건수	①	홍보물 제작건	1건	카다로그			홍보물 : 1 건
		2-2	학회지 게재 논문	①	게재 논문수	1건	논문집			논문 : 1 건
		2-3	특허출원건수	①	특허출원서류	1건	출원서류			특허 : 출원 1 건
		2-4	시작품 제작	①	시작품 (축소모형 및 관련제품)	1건	시작품			시제품 : 제작 1 건
		2-5	강재거푸집 제작	①	강재거푸집 등록현황	1건	실물 및 사진대장			거푸집 : 제작 1 건
3	PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량의 설계 및 시공 기술 개발	3-1	실물 빔 제작	①	재하시험용 실물 빔	1건	실물 및 사진대장			실물빔 : 제작 1 건
		3-2	실물재하시험	①	시험결과 보고서	1건	보고서			보고서 : 작성 1 건
		3-3	적용성 확대를 위한 시험연구	①	시험결과 보고서	1건	보고서			보고서 : 작성 1 건
계										특허 : 출원 1 건 논문 : 1 건 시제품 : 1 건 간행물 : 1 건 계산서 : 1 건 홍보물 : 1 건 거푸집 : 1 건 실물빔 : 1 건 보고서 : 2 건

다. 연구목표 달성도

본 과제 수행 결과 당초 목표했던 정량적 성과지표는 모두 달성되었으며, 특허 1건과 학술회의 1건 등 성과 목표치를 추가 달성 하였다.

표 4-3 성과지표 달성도

연차	핵심 성과물 (level1)	단위 성과물 (level2)		최종 성과목표				해당 기관	예산 (백만)	정량목표
					질적목표(측정방법)	목표치	검증방법			
1	PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량의 설계 및 시공 기술 개발	1-1	학술기사 게재	①	게재논문수	1건	논문집			학술기사 : 1 건
		1-2	연구개발 관련 홍보	①	정기간행물 발간 건수	1건	간행물			간행물 : 1 건
		1-3	기술수준 향상도	①	수준 향상정도	100%	구조 계산서			계산서 : 1 건
2	PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량의 설계 및 시공 기술 개발	2-1	연구개발 홍보 건수	①	홍보물 제작건	1건	카다로그			홍보물 : 1 건
		2-2	학회지 게재 논문	①	게재 논문수	1건	논문집			논문 : 1 건
		2-3	특허출원	①	특허출원서류	1건	출원서류			특허 : 출원 1 건
		2-4	시작품 제작	①	시작품 (축소모형 및 관련제품)	1건	시작품			시제품 : 제작 1 건
		2-5	강재거푸집 제작	①	강재거푸집 등록현황	1건	실물 및 사진대장			거푸집 : 제작 1 건
3	PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량의 설계 및 시공 기술 개발	3-1	실물 빔 제작	①	재하시험용 실물 빔	1건	실물 및 사진대장			실물빔 : 제작 1 건
		3-2	실물재하시험	①	시험결과 보고서	1건	보고서			보고서 : 작성 1 건
		3-3	적용성 확대를 위한 시험연구	①	시험결과 보고서	1건	보고서			보고서 : 작성 1 건
		3-4	특허출원	①	특허출원서류	1건	출원서류			특허 : 출원 1 건
		3-5	학술회의	①	발표논문	0건	논문집			논문 : 1 건
계										특허 : 출원 2 건 학술기사 : 1 건 학술회의 : 1 건 논문 : 1 건 시제품 : 1 건 간행물 : 1 건 계산서 : 1 건 홍보물 : 1 건 거푸집 : 1 건 실물빔 : 1 건 보고서 : 2 건

2. 연구개발 성과의 파급 효과

가. 기술적 효과

본 기술은 교량 상부구조 가운데 해외에서는 보편적으로 널리 사용되고 있으나, 국내의 경우 취약한 기술력으로 그 보급이 보편화되지 않고 있는 중공슬래브교에 대한 것으로 국내에서의 기술적인 단점을 극복하고 중공 슬래브교의 장점은 더욱 부각시켜 그 활용도를 높일 수 있는 기술이다. 이는 강합성 라멘이나 PF-빔의 경간장 및 형하고 제약을 극복함과 동시에 구조적 장점을 근본적으로 개선시키고, 시공성 및 경제성을 향상시킨 기술로 향후 부가가치가 매우 높은 기술이 될 것으로 예상된다.

교량을 건설함에 있어서 상부 구조형식의 선정은 시공여건과 함께 경제성, 경관 등을 종합적으로 비교 검토 후 결정되는데, 본 기술인 조립식 중공형 거더교는 시공의 단순화와 강재 및 동바리 미 설치에 따른 경제성 확보 그리고 종래의 획일적인 단면을 탈피하여 단면의 변화를 통한 미관의 향상으로 경관설계의 극대화를 추구할 수 있어 교량 완공 후 주위 경관과의 조화로 미적인 우수성 등이 개선된 신기술의 공법으로 그 파급효과가 매우 클 것으로 기대된다.

본 기술인 PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량의 경우 시공 시 기존 슬래브 교량 형식에서 슬래브 타설을 위한 동바리 및 거푸집의 설치 및 해체가 필요 없어 공기가 단축되고 시공이 간단한 장점이 있다. 또한, 상부 구조체의 중량을 감소시키고 단면의 두께를 얇게 할 수 있는 중공형 슬래브가 가지는 장점을 충분히 활용하면서도, 기 활용중인 조립식 중공 슬래브교의 단점으로 지적되던 후프 텐션에 의해 발생되는 균열을 근본적으로 해결할 수 있다. 종래의 획일적인 단면 형상을 탈피하여 지간 중앙부로부터 지간의 단부로 테이퍼되는 변단면 형태로 단면을 구성하여, 구조 역학적으로 유리한 단면 효과를 나타내도록 슬래브 및 단면의 최적화 구성으로 저 형고의 장 지간 교량 시공이 가능할 것이다.

한편, 형고가 높아 형하고 확보에 문제가 되고 있는 PSC빔 교량 및 강교의 단점을 극복하고자 대체 공법으로 적용되고 있는 라멘 형식 교량의 경우 지간의 증대를 위해 콘크리트와 강재를 합성시킨 강합성 라멘교량이 적용되고 있는 추세이나 이는 강재 사용에 따른 공사비 증대와 이산화탄소 발생과 같은 환경적인 문제점을 발생시키고 있으나, 본 기술은 PSC빔 교량 및 강교의 단점을 개선하고, 강합성 라멘교에서 사용되는 강재의 사용을 배제하여 저 형고·장 지간의 교량기술을 확보함과 동시에 친환경적인 기술로서 그 기대효과가 클 것으로 예상된다.



나. 경제·산업적 효과

본 기술은 교량 건설시장의 발전에 국한된 것이 아니라 관련 산업의 발전을 함께 기대할 수 있는 시장을 가지고 있다. 즉, 본 기술을 구성하는 재료 중 하나인 콘크리트는 국내에 상당한 시장규모를 가지는 산업으로써 본 기술의 폭 넓은 현장 적용에 따라서 관련 산업의 발전에 상당부분 기여할 수 있는 사회적, 경제적 파급효과를 가지고 있다.

최근 건설시장은 원자재 가격의 상승, 특히 강재 가격의 상승으로 경제성 제고를 통한 건설 예산의 절감이 주된 관심사이다. 이에 교량 건설에 있어서 강박스 교량이나 강합성 라멘교 보다는 콘크리트교가 선호되는 추세이며 기 설계된 교량의 경우에도 실시설계 단계에서 콘크리트 교량으로 교체되고 있는 실정이다.

본 기술의 제작방법은 중공부의 중앙부분을 수직분할 블록화하여 현장에서 조립하여 설치하는 간단한 공정으로 별도의 슬래브 공사를 위한 거푸집 및 동바리의 설치가 필요치 않아 공기가 단축되어 경제적 우위성이 예상된다.

장경간화를 위해 강재를 사용한 타 공법들이 국내 건설 시장에 상당수 적용되고 있는 실정에서 본 기술의 경우 강재 사용을 배제하여 공사비 절감 효과가 클 것이며, 강재 사용 시 필수적으로 수반되는 용접 공정이 없어 용접 시 발생되는 이산화탄소의 억제를 통한 친환경적인 교량 건설공법으로 경제적, 사회적 파급 효과가 클 것이다.



다. 정책적 효과

본 연구개발의 결과로 개발된 PCB-SLAB 교량은 시공기간의 단축을 위한 세계적인 트렌드인 모듈화 공법 개발과 발맞추어 프리캐스트 제작된 거더를 조립하여 시공함으로서 공기단축과 품질향상, 시공성 향상등을 가져올 것이다. 한국도로공사 등에서 추진하고 있는 중·소규모의 교량에 대한 무조인트 교량공법의 적용이 확대될 것으로 예상되어 본 연구에서 개발한 적용성 확대공법 즉, 반일체식 교량화 공법과 접속슬래브 연결부 상세 제안은 개발된 교량의 실용화 추진에 많은 역할을 할 것이다. 바닥판 슬래브 타설이 별로도 진행되지 않는 것도 공기단축과 모듈화 공법의 특징을 실현하는 큰 장점이 될 것이다.

그동안 교량의 계획에서 저형고의 실현을 위해 시공기간이 길고 기술적 한계로 채택되지 못하던 중공슬래브 교량을 대체하여 기술자들의 선택의 폭을 넓히는 동시에 발주처의 예산절감 기조도 확보할 수 있는 명분이 될 것이다.

또한, 국내의 경우만 보더라도 아주 다양한 형식(형상, 재료 등)의 거더교가 개발되고 시공 되지만 대부분 경쟁이 치열하고 시장의 한계에 부딪혀 새로운 공법을 제시하거나 연구개발하고 있는 경우는 드물다. 물론 교량 자체 형식보다 시공방법이나 연결부 등 기능위주의 기술개발은 계속되고 있다. 따라서 본 연구개발의 성과로 인해 교량의 신공법 개발이 가속화 되는 계기가 될 것이며, 정부의 연구개발 사업 기조도 새로운 교량개발에 투자할 수 있기를 기대해 본다.

제 5 장 연구성과의 활용 및 추가연구 필요성

1. 연구성과의 활용방안

본 연구개발은 교량의 상부 구조형식 가운데 PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량의 제작기술과 관련 되는 것으로서, 실 시공을 통한 실용화에 그 목적이 있다.

주요 연구내용 및 범위는 중공 슬래브교를 구성하는 핵심기술인 중공부의 중앙부분을 수직분할 블록화하여 현장으로 이동 후 조립 및 설치하는 방법에 관한 것으로 간편한 시공성 및 경제성과 함께 최적의 단면 구성으로 저형고 장지간 교량 건설에 있어 국내 건설시장에 미칠 파급 효과가 클 것이다.

또한, 종래 폐쇄적이고 획일적인 단면 형상을 탈피하여 중공부 단면의 높이와 폭이 각기 서로 반대방향으로 테이퍼 형태로 변하는 단면으로 구성하여 최근 그 요구가 증대되는 경제성 확보 및 경관설계의 취지에 적합한 공법으로 추후 건설시장 활용에 긍정적일 것으로 기대된다.

가. 사업화 추진방안

(1) 연구결과의 기업 활용방안

주관기관인 (주)에이스이엔씨는 교량 관련 구조설계 및 시공 업무를 수행하며, 이미 국내의 대표적 교량 건설공법으로 자리 잡고 있다. 벤처기업 등록 후 기업부설연구소 설립 및 INNO-BIZ 기업으로 등록되어 있으며, 최근 본 기업의 공법인 변단면 PSC-I BEAM은 건설신기술 제648호로 등록이 되었다. 교량 관련 각종 특허를 소유하고 있으며, 한국건설기술연구원에서 시행된 실물 재하시험을 비롯하여 한국철도기술 연구원으로부터 철도교 동적 성능시험 등 활발한 연구활동이 진행되었다. 또한, 건설 교통 R&D 정책인프라사업의 주관기업으로 참여하여 과제를 성공적으로 수행 하였다.

공동 참여기관인 (주)이산은 종합엔지니어링 사업 주체로 건설 분야 뿐 아니라 환경, 기계, 전기 및 통신 등 광범위한 분야에서 설계 및 감리 업무를 수행중인 기업으로 국내외 건설 산업 발전에 이바지 하고 있다. 다수의 건설관련 특허 및 실용신안을 취득하고 있으며, 우수한 기술자들의 역량으로 설계 및 감리 분야에서 확고한 입지를 확보하고 있다.

이와 같이, 주관기관인 (주)에이스이엔씨와 공동 참여기관인 (주)이산은 우수한 기술력과 인재를 바탕으로 부가가치가 높은 기술집약적인 분야의 업무를 주 업무로 수행하고 있으며, 건설기술에 관한 활발한 연구활동으로 혁신역량이 우수하다.

따라서, 주관연구기관은 PSC-I형 거더의 설계와 시공을 전문으로 하는 건설회사로서 본 과제 결과물인 PCB-SLAB교량과 보유기술력으로 실제 적용이 가능하도록 자체 영업망을 구축하고 수주활동을 진행하여 사업활 할 수 있는 최선의 조건을 갖추고 있다. 공동 연구기관인 (주)이산 또한 토목분야 종합설계업체로 수자원 및 하천분야에 있어 국내업체를 대표하고 있어 설계에 반영할 수 있도록 발주처에 홍보하고 설계를 수행할 수 있는 역량을 갖고 있어 사업화에 최선의 조건을 갖고 있다.





(2) 관련 연구개발 전망

PSC-I 거더를 이용한 중공슬래브 교량의 실용화를 위해 계산서, 수량산출서, 설계도 및 공사시방서의 표준화 작업을 통해 설계 성과물 및 시공기술의 품질 개선을 추구할 수 있으며, 본 기술을 바탕으로 더욱 향상된 중공 거더교의 기술개발과 제작기술의 발전으로 그동안 국내 건설 시장에서 활성화 되지 못한 중공형 거더교의 활발한 적용이 가능할 것으로 판단된다.

나. 타 산업에 미치는 효과

본 기술은 교량 건설시장의 발전에 국한된 것이 아니라 관련 산업의 발전을 함께 기대할 수 있는 시장을 가지고 있다. 본 기술의 주 사용 재료인 콘크리트 및 철근은 국내에 상당

한 시장규모를 가지는 산업으로서 본 기술의 폭넓은 현장 적용에 따라서 관련 산업의 발전에 상당부분 기여할 수 있으며, 공장 제작 후 현장까지의 운반을 위한 운송, 제작 및 가설을 위한 건설인부, 운송수단 및 가설크레인 시장에 이르기 까지 국내 산업 발전에 미치는 긍정적인 영향이 클 것으로 기대된다.

다. 정부정책과 연계방안

최근 교량 건설 사업에 다양한 형식의 공법들이 적용되고 있는바, 이에 따른 혼선을 방지하고 투명성을 확보하기 위해 정부 정책의 방침으로 “조달청 물품등록”과 같은 방침이 시행되고 있으므로 본 기술의 경우에도 교량 건설 시장에 실용화 된 이후 이와 같은 정부의 방침에 따라 정부 정책과 연계될 수 있을 것으로 기대된다.

라. 기술실시 계획

(1) 기술료 납부기준

(가) 「국토교통부소관 연구개발사업 운영규정」제44조에 따라 주관연구기관이 중소기업에 해당하여 정부출연금의 10% 납부 예정

(나) 연구개발 후 주관연구기관이 연구개발결과에 따른 결과물 기술실시 예정

(2) 기술료 납부계획 수립

주관연구기관의 기술실시계획에 따라 연구과제 종료시점부터 영업 및 홍보를 통해 개발된 교량의 매출이 발생할 것으로 예상되며, 2016년부터 기술료 납부계획을 수립하고 기관과 협약을 통해 기술료를 납부할 계획임.

2. 추가연구 필요성

본 연구과제는 기술사업화 과제로 조립식 거더를 이용한 중공슬래브 교량의 개념 아이디어를 실제 적용이 가능한 PSC-I거더를 이용한 중공슬래브 교량의 단면설정, 구조해석 및 계산을 통해 설계하고, 시공이 가능하도록 시작품을 제작하여 문제점을 해결하는 부분과 시공성을 고려하여 설계단계부터 고려해야 할 사항을 모두 포함하여 설계와 시공시 발생할 수 있는 부분을 해결하였다. 또한, 실물거더 모형을 제작하여 공인된 연구기관으로부터 실험을 수행하여 안전성을 평가하고 적용성 확대를 위해 일체식 교량화를 위한 공법개발과 상세부 구조성능실험을 수행하여 실적용에 문제가 없도록 평가하였다. 실험결과는 이후 영업에 홍보자료로도 활용될 수 있을 것이다.

본 연구를 통해서 개발된 PCB-SLAB 교량의 장점과 설계와 시공문제의 해결 그리고 충분한 실험을 통한 검증을 통해 향후 저형고 거더나 라멘교의 시장진출이 가능하다. 그러나, 본 연구과제를 수행하는 동안에 연구기간과 예산의 문제로 추가적으로 수행해야할 몇가지 아이템이 도출되었으며 이는 사업화 또는 실용화와 관련한 핵심적인 문제들 보다는 이후 보다 경제적이고 체계적으로 발전시키고 시장성을 추가적으로 확보하기 위해 추가연구가 필요한 부분이다.

가. 3차원 해석방법을 통한 단면 최적화 연구

PCB-SLAB교량은 기본적으로 PSC-I거더의 형상을 변형하여 상하부 플랜지 확폭으로 중공슬래브를 형성하므로 기존의 PSC-I거더의 해석이나 설계법과 크게 차이가 없다. 본 연구과제의 수행에도 이미 검증된 기존의 거더 해석과 설계법을 따라 수행되었다. 그러나, 교량의 완성계 측면에서 보면 상하부 플랜지가 폐합되어 거더 중앙부에 중공을 형성하게 되고 교폭전체에 걸쳐 하나의 면으로 최종 단면이 형성되어 Frame을 이용한 기존의 해석방법은 박스형태의 단면이 가지는 뒤틀림에 대한 강성과 하중횡분배를 고려할 때 조금 보수

적으로 구조계산이 이루어 질수 있다. 일반적으로 plate 또는 shell을 이용한 판해석의 결과보다 frame 해석결과가 크게 산출되므로 합리적인 3차원해석을 수행한다면 보다 최적의 단면를 산출할 수 있을 것으로 기대된다. 한편, 강연선을 이용하여 프리스트레스를 토입해야 하는 측면에서 본다면, 임계단면보다 강선의 인장력에 저항해야하는 콘크리트 압축부 단면이 최소한의 치수로 유지되어야 할 수 있으므로 여러 변수들에 대한 시행착오를 통해 평가한후 설정되어야 한다. 마찬가지로 프리캐스트 조립식 거더로 제작되어야 하므로 제작이 가능한 수준의 텐던 배치나 시공시 거치 하중(거더자중)에 변형이 발생할 수 있도록 저항해야 하므로 최적산면 산정시 면밀히 검토 되어야 한다.

따라서, 3차원 해석에 의해 단면력이 산출되고 최소화된 형고를 고정변수로 설정한후 긴장력 도입량을 결정하는 순서로 구조계산이 이루어 질 것이며, 판해석에 견주어 구조해석의 편의를 위해 프레임해석 방법에 대해서도 합리적인 모델링 방법 등이 추가 연구를 통해 비교검토 될 수 있을 것이다.

나. 실차량 재하 실험 연구

실험을 통해 검증된 PCB-SLAB교량의 실물거더 모형에 대한 안전성 평가는 활하중을 정적하중으로 재하하여 내하력을 평가한 부분과 공진회피를 위한 고유진동수 측정으로 이루어졌다. 구조해석과 실험을 통해 실적용을 위한 대부분의 위험요소를 제거하고 검증된 것으로 볼수 있으나, 실제로 교량이 현장의 상황에 맞게 교폭과 교장을 고려하여 시공이 된후, 차량하중이 작용하였을 때, 교량 전체 거동을 추가로 검증할 필요가 있으며, 이는 예기치 못한 상세부의 문제를 파악하거나 활하중에 의한 동적 특성을 평가할 수 있을 것이라 사료된다.

교량의 수요처인 발주처에 보다 신뢰성 있는 데이터를 제시하여 홍보하고 영업을 위한 활동을 차제 하고서라도 실험실 단위의 평가 이후는 Test Bed를 통해 Track Recorder를

확보하는 것은 개발된 교량에 대한 신뢰성 확보 차원을 넘어 반드시 필요한 절차로 볼 수 있다. 실차량 재하 실험 연구는 현장에서 안전진단시 적용되는 모든 센서나 계측기를 통해 이루어 질 것이며, 교량의 활하중 평가를 위한 기본 테이터를 제공하게 될 것이다. 그리고 가능하다면 장기적이 거동 평가가 지속될 수 있도록 모니터링 시스템을 구축할 필요성도 제기된다.

다. 저형고 PCB-SLAB 라멘공법 개발

본 연구를 수행하는 중 기존 교량시장에 적용되고 있는 기본적인 라멘교 공법에 대해 조사가 이루어졌고 라멘교는 일반적으로 교량하단에 부채도로나 하천을 횡단하여 가설되므로 저형고를 실현하기 위한 방법에서 출발한 공법들로 강재를 이용한 것들이 대부분 이었다. PCB-SLAB교량 또한 저형고가 기본적인 강점을 가진 교량이며 오히려 조립식 프리캐스트로 시공성이나 공기단축이 가능하며 특히 단지점부의 횡방향 확장만으로 라멘교량의 벽체와 연결부 일부가 형성되는 공법이므로 본 연구결과 개발된 기술들을 활용한다면 보다 경쟁력있는 라멘교량 공법 개발이 가능할 것으로 판단된다.

라멘교는 우각부의 강성을 이용하여 중앙부 단면감소를 꽤하는 교량으로 형하고 제약이 있을대 통상 계획된다. 국내 라멘교 공법은 10개업체, 15개 이상의 형식이 현재 개발되어 적용되고 있으며, 연간 시장규모가 최소 2,000억원 이상에 이를 것으로 파악되며 대부분 합성형을 이용하고 있다.

핵심개발 내용으로는 라멘의 벽체와 개발된 거더와의 연결방법이라 볼 수 있으며, 전단키를 필수적으로 설치하고 철근연결과 현장타설하는방법, 강봉이나 PC긴장재를 도입하는 방법, 매입 H빔을 연결하는 방법 등을 검토할 수 있다. 추가적으로 횡방향 연결철근 및 현장타설 상세, 상세부 구조해석을 통한 단면 및 철근상세 최적화, 연결부 또는 우각부에 대한 실험적 연구 등을 연구주제로 설정할 수 있다.

연구개발의 진행은 기존공법 분석, 상세부 비교안 검토 및 확정, 구조계산 및 도면작성, 공사비 산정, 경쟁공법과의 경제성 분석, 지간별 표준화 작업, 사업화를 위한 홍보자료 작성 등으로 계획 할 수 있다.

제 6 장 참 고 문 헌

1. 도로교 설계기준 (한국도로교통협회, 2010)

2. 도로교 설계기준 해설편 (대한토목학회, 2008)

3. 콘크리트 구조설계기준 (한국콘크리트 학회, 2012)

4. 도로설계요령 (한국도로공사) 등

5. 도로설계실무편람 (한국도로공사) 등

6. 신현묵, 프리스트레스트 콘크리트(동명사, 2005)

7. 김수만, 철근콘크리트 구조공학(2005, 청문각)

8. E. C. Hambly, “Bridge Deck Behaviour”

9. Arthur H. Nilson, “Design of concrete structures“

10. R. I. Gilbert, “Design of Prestressed Concrete“.

11. Edward G. Nawy, “Prestressed Concrete“

12. Bridge design Practice manual, state of cal. dep. of transportation.

13. Conrad P. Heins, “Design of Modern Concrete Highway Bridge“

14. Ceistian Menn, “Prestressed Concretre Bridge“

15. AASHTO, “LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS“

16. Michael P Collins and Denis Mitchell, “Prestressed Concrete Structures “