18CTAP-C129912-02

보안 과제( ), 일반 과제(✓) / 공개( ), 비공개( )발간등록번호( )

국토교통기술촉진연구사업 제2차 연도 최종 보고서

R&D / 18CTAP-C129912-02

변위제어를 이용하여 생애주기비용(LCC)을 30%이상 절감한 유지관리생력화 완전일체형 연속교의 설계시공 기술개발 최종보고서

연속교의 설계시공 기술개발 최종보고서
30% 이상 절감한 유지관리생력화 완전일체형
변위제어를 이용하여 생애주기비용(LCC)을

2019. 01. 18.

주관연구기관 / 한밭대학교 산학협력단
협동연구기관 / (주)선구엔지니어링
참여기관 / 한국교통대학교 산학협력단

2019

국토교통과학기술진흥원

국토교통부

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술진흥원장 귀하

'변위제어를 이용하여 생애주기비용(LCC)을 30%이상 절감한 유지관리생력화 완전일체형 연속교의 설계시공 기술개발'(연구개발 기간 : 2017. 04. 01 ~ 2018. 12. 31) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2019 . 01 . 18 .

주관연구기관명 : 한밭대학교 산학협력단 (대표자) 차 동 진 (인)
협동연구기관명 : (주)선구엔지니어링 (대표자) 강 윤 식 (인)
참여기관명 : 한국교통대학교 산학협력단 (대표자) 전 문 수 (인)

주관연구기관책임자: 최 병 호
협동연구기관책임자: 임 철 수
참여기관책임자: 최 상 현

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

과제 고유 번호	18CTAP-C129912-02	해당 단계 연구 기간	2018. 01 01 - 2018. 12. 31(12월)	단계구분	(해당단계) 2 / (총단계) 2
연구사업명	중사업명				
	세부사업명				
연구과제명	대과제명	변위제어를 이용하여 생애주기비용(LCC)을 30%이상 절감한 유지관리생력화 완전일체형 연속교의 설계시공 기술 개발			
	세부과제명				
연구책임자	최 병 호	해당단계 참여연구원 수	총: 13명 내부: 5명 외부: 8명	해당단계 연구비	정부: 220,000천원 민간: 77,000천원 계: 297,000천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 16명 내부: 7명 외부: 9명	총 연구비	정부: 370,000천원 민간: 129,500천원 계: 499,500천원
연구기관명 및 소속 부서명	한밭대학교 산학협력단			연구책임자: 최 병 호	
협동연구	연구기관명: 선구엔지니어링			연구책임자: 임 철 수	
참여연구	연구기관명: 한국교통대학교 산합협력단			연구책임자: 최 상 현	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 갈음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	

9대 성과 등록·기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설·장비	기술요약 정보	소프트웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명 정보	생물 자원	정보	실물
등록·기탁 번호											

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설·장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

요약

○ 상부구조 변위제어 위한 교대최적화 설계 기법
○ 철도교의 교대 강성과 궤도-교량 상호작용의 평가기법
○ 건조수축 및 크리프 저감 설계 및 시공 기술 개발
○ 콘크리트 상판 및 기초와 강재 교각 간 강결 구조 개발
○ 완전일체형 연속교와 기존 교량의 공사비 및 LCC 비교 분석

보고서 면수

109

〈 국문요약문 〉

연구의 목적 및 내용	• 연구 목적 -도로교, 철도교 및 수로교 등 모든 형태의 교량에 적용 가능하고 유지관리비용을 최소화할 수 있는 저비용·고성능 교량을 개발하는 것으로서, 교량의 모든 구조 요소를 강결시켜 지진하중 등의 수평하중을 강성이 큰 교대가 직접 부담하게 함으로써 교대 외의 모든 부재를 슬림하게 만들어 경관성과 경제성, 내진성 등을 획기적으로 향상시킨 완전일체형 연속교의 설계 및 시공 기술 개발 -이를 위해 교대에 강결된 상부구조의 건조수축과 크리프를 효과적으로 제어하고 온도 하강 시 발생하는 인장응력을 적절히 제어할 수 있는 설계 및 시공 기술 개발 • 연구 내용 -건조수축 및 크리프의 배제(또는 최소화)와 온도하중에 의한 인장응력의 효과적 제어를 위한 기술 개발 및 수치해석을 통한 검증 -온도하중에 의해 상부구조에 발생하는 인장응력 최소화 및 철도교에서 교량과 궤도의 상호작용을 종합적으로 고려한 교대 강성 설계 및 지반 상호작용 해석 기법 개발 -도로교 및 철도교에 대한 경간장별 최적디자인 제안(콘크리트, 강재, 콘크리트 및 강재 합성)을 위한 각종 상세 해석 시행, 주요 부재 또는 요소에 대한 3D Solid 해석 -건조추축 및 크리프 제어 효과에 대한 수치해석과 Bench Scale 규모의 실험 수행을 통한 검증
연구개발성과	-건조수축 및 크리프 제어 방안에 대한 설계 및 시공 기법 개발과 수치 해석, Bench Scale 규모의 실험을 통한 검증 결과 -교대 강성과 상부구조의 온도(하강 시)에 의해 발생하는 인장응력과의 관계 규명 및 지반과 일체로 모델링한 교대의 강성 최적화 설계 기법 -철도교에서 교대 강성과 궤도-교량 상호작용(Track-Structure Interaction)과의 상호작용 규명 및 지반과 일체로 모델링한 교대의 강성 최적화 설계 기법 -PSC 콘크리트 상판과 강재 교각, 강재 교각과 RC 기초와의 일체화 상세 및 수치해석을 통한 일체화 효과 검증 결과 -경간별 기존 교량과의 초기 공사비 및 LCC 비교 분석 결과
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	-완전일체형 연속교는 특수한 상황을 제외한 일반적인 환경에서의 표준 교량으로서 도로교(보도교), 철도교 및 수로교 등 그 적용 범위가 거의 무제한적이며 이를 통해 해당 사업의 예산 절감을 통한 사업성 향상으로 인프라 건설 사업의 활성화에 크게 기여할 전망임 -완전일체형 연속교는 받침 등 교량에 부착된 부대시설이 없고 그 자체로 매우 슬림해서 주변 경관에 미치는 영향이 최소화되는 교량이므로 교량 건설로 인한 민원 예상 지역 등에 적극 활용 가능함 -교량 기술의 최종 단계인 완전일체형 연속교 기술 확보로 세계 도로 및 철도 시장에서 국내 기업의 가격 및 기술 경쟁력 제고

핵심어 (5개 이내)	일체형 교량	무조인트 교량	유지관리비	철도교 적합성	생애주기비용

〈 SUMMARY 〉

Purpose & Contents	• Purpose –The objective of this research is to develop design and construction technologies for a low-cost, high-performance, and maintenance-free integral bridge applicable to all types of bridges for railroads as well as highways. By integrating all the major structural members of the bridge including the sub-structures (i.e., abutments, foundations, and piers) as well as the super-structures (e.g., girders and decks), the end-restrained full integral bridge system realizes much slimmer major structural members except abutments which are far stiffer to withstand most of horizontal loads such as earthquake. With slimmed major members, the developed end-restrained integral bridge can improve landscape, economic and seismic performances. –For the purpose of this study, design and construction technologies for controling shrinkage and creep of the super-structure as well as tensile stress arise with dropped temperature are developed. • Contents –Developing design and construction technologies for controlling shrinkage and creep of the super-structure as well as tensile stress at lower temperature with numerical verification. –Developing design and construction technologies for abutments to minimize tensile stress in the super-structure at low temperature considering track-bridge interaction and an analysis method considering soil interaction. –Performing detailed analyses for presenting optimum design for each span length of highway and railway bridges, and for main members and elements with 3D solids. –Performing numerical analyses for verifying shrinkage and creep control effects and bench-scale verification experiments.
Results	–Developing design and construction technologies for controlling shrinkage and creep of the super-structure as well as tensile stress at lower temperature with numerical verification. –Developing design and construction technologies for abutments to minimize tensile stress in the super-structure at low temperature considering track-bridge interaction and an analysis method considering soil interaction. –Performing detailed analyses for presenting optimum design for each span length of highway and railway bridges, and for main members and elements with 3D solids. –Performing numerical analyses for verifying shrinkage and creep control effects and bench-scale verification experiments.
Expected Contribution	–The fully integrated continuous bridge, as a standard bridge except for special conditions, can be applied to highway, railway, pedestrian, and aqueduct bridges, and can vitalize infrastructure construction market via enhancing business value with the same budget. –The fully integrated continuous bridge without supplementary facilities, such as bearings and expansion joints, can realize much slimmer members, and minimize influence to surrounding landscape and civil complaints. –The fully integrated continuous bridge technology, one of the premier bridge technology to date, can enhance cost and technology competitiveness in the world highway and railway bridge market.

Keywords	Integral bridge	Jointless bridge	Maintenance cost	Adequacy of railway bridge	Life cycle cost

〈 CONTENTS 〉

1. Outline of Research and Development Project ·····1
2. Domestic and overseas technology development status ·····7
3. Research contents and results ·····8
4. Achievement of goals and contribution to related fields ·····100
5. Plan to utilize R&D achievements ·····103
6. Overseas Science and Technology Information ·····104
7. Security level of R&D achievement ·····105
8. Research facilities and equipment registered in the National Science and Technology Comprehensive Information System ·····105
9. Implementation of safety measures in laboratories based on R&D tasks 105
10. Representative Research Results of R&D Project ·····106
11. Others ·····107
12. References ·····107

〈 목 차 〉

제1장. 연구개발과제의 개요 ····· 1
1. 연구개발 목적 ····· 1
2. 연구개발의 필요성 ····· 1
3. 연구개발 범위 ····· 2
제2장. 국내외 기술 개발 현황 ····· 7
제3장. 연구수행내용 및 성과 ····· 8
1. 1차년도 연구수행내용 ····· 8
2. 2차년도 연구수행내용 ····· 22
제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 100
1. 목표 달성도 ····· 100
2. 관련 분야 기여도 ····· 102
제5장. 연구개발성과의 활용 계획 ····· 103
제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 ····· 104
제7장. 연구개발성과의 보안등급 ····· 105
제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설 · 장비 현황 ····· 105
제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적 ····· 105
제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적 ····· 106
제11장. 기타 사항 ····· 107
제12장. 참고 문헌 ····· 107

〈 표 목 차 〉

표 3-1-1. 구조물의 단면특성 ····9
표 3-1-2. 콘크리트의 물성치 ····9
표 3-1-3. 변위제어 교대의 단면제원 ····10
표 3-1-4. 실험계획에 따른 모델 선정 ····10
표 3-1-5. 단일모드스펙트럼 해석 위한 등가지진하중 ····11
표 3-1-6. Analysis results (longitudinal behavior) ····13
표 3-1-7. 다중모드 스펙트럼 해석법 간의 결과 비교 ····13
표 3-1-8. Lateral analysis results ····14
표 3-2-1. 부재 단면특성 ····16
표 3-2-2. 재료적 특성 ····16
표 3-2-3. 스프링 요소의 강성 ····16
표 3-3-1. 완전일체형 교량 시스템 시공단계 리스트 ····18
표 3-3-2. 시공단계별 상부거더 응력 검토(MPa) ····19
표 3-3-3. 실험체별 실험 조건 ····22
표 3-4-1. 구조물의 단면특성 ····23
표 3-4-2. 콘크리트의 재료물성 ····23
표 3-4-3. 강재의 재료물성 ····23
표 3-4-4. 변위제어 교대의 단면제원 ····24
표 3-4-5. 콘크리트의 재료물성 ····26
표 3-4-6. 강재의 재료물성 ····26
표 3-4-7. 다중모드스펙트럼 해석 위한 등가지진하중 ····28
표 3-4-8. 교량 내진성능의 소요역량 (전체 일체식 교량) ····28
표 3-4-9. 모멘트-곡률 해석 결과 ····30
표 3-4-10. 작용하중(F_H)에 따른 해석모델의 수평변위 ····32
표 3-4-11. 작용하중(F_H)에 따른 해석 모델의 중간교각 위치에서의 모멘트(M_y) ····33
표 3-4-12. 등가지진하중일 때의 상부공(거더)과 교각의 단면모멘트 ····33
표 3-4-13. 교량의 내진성능 ····35
표 3-4-14. 표준설계안의 내진성능 ····35
표 3-4-15. 파괴모드에 따른 내진성능 평가 ····36
표 3-4-16. 파괴모드별 평가지표 ····37
표 3-4-17. 파괴 모드에 따른 공급역량 ····37
표 3-4-18. 교대 단면제원 및 물성치 ····38
표 3-4-19. 공급변위 연성도에 따른 콘크리트에 의한 전단강도(V_c) ····39
표 3-4-20. 공급변위 연성도에 따른 교대 전단강도 ····39
표 3-4-21. 심부 콘크리트 단면 제원 ····42
표 3-4-22. 횡구속철근 배치에 따른 구속 콘크리트의 재료물성 ····43
표 3-4-23. 횡구속 철근 배치방안에 따른 변수해석 결과 ····44
표 3-5-1. 부재의 단면특성 ····45
표 3-5-2. 재료적 특성 ····45
표 3-6-1. 해석 Case ····95

〈 그 림 목 차 〉

그림 1-3-1. 연구개발 대상 교량시스템 ····2
그림 1-3-2. 수평지진하중에 의한 영향평가 위한 변수해석모델링 방안 ····4
그림 1-3-3. 수평지진하중에 의한 영향평가 위한 변수해석모델링 ····4
그림 1-3-4. 경량전철 고가교 적용 개념 ····5
그림 1-3-5. 연차별 연구내용 및 수행체계 ····6
그림 2-1-1. 연도별 교량 개소 및 연장 증가 추이 ····7
그림 3-1-1. 일체형 교량 국외 사례 ····8
그림 3-1-2. 완전 일체형 콘크리트 연속교량 시스템 ····9
그림 3-1-3. 교대 해석모델 단면 ····10
그림 3-1-4. Sectional stiffness (abutment) ····11
그림 3-1-5. Fully integral bridge longitudinal displacement ····11
그림 3-1-6. Longitudinal displacement variation of pier and abutment ····11
그림 3-1-7. Percentage difference and trend analysis ····12
그림 3-1-8. Lateral displacement of fully integral bridge model ····14
그림 3-1-9. Lateral displacement variation of pier and abutment ····14
그림 3-1-10. Lateral analysis percentage difference and trend analysis ····14
그림 3-2-1. 궤도-교량 상호작용 모델의 구성 ····15
그림 3-2-2. 궤도-교량 상호작용 모델의 구성 ····15
그림 3-2-3. 해석대상 교량 ····16
그림 3-2-4. 해석대상 교량에 대한 단면도 ····16
그림 3-2-5. 하중 재하 위치별 해석 모델 ····17
그림 3-2-6. 점배치 방식에 따른 하중조합에 의해 발생하는 레일부가응력 ····17
그림 3-2-7. 지점방식에 따른 레일-교량 상대변위 ····17
그림 3-3-1. 완전일체형 교량 시스템 시공단계 및 제작순서 개요도 ····18
그림 3-3-2. 공단계별 상부거더 응력 분포 Diagram ····19
그림 3-3-3. 건조수축에 의한 하부구조 단면력 변화 ····19
그림 3-3-4. 크리프에 의한 하부구조 단면력 변화 ····19
그림 3-3-5. SEMI_일체형과 FULLY_일체형 교량 시스템 하부구조 단면력(kN·m) 비교 ····20
그림 3-3-6. SEMI_일체형과 FULLY_일체형 교량 시스템 상부 거더 Stress(MPa) 비교 ····20
그림 3-3-7. 수평변위 조정공 도입 개요도 ····21
그림 3-3-8. 수평변위 조정공 적용에 따른 하부구조 단면력(kN·m) 비교 ····21
그림 3-3-9. 수평변위 조정공 적용에 따른 상부 거더 Stress(MPa) 비교 ····21
그림 3-3-10. 실험체 제작 일반도 ····21
그림 3-4-1. 완전 일체형 콘크리트 연속교량 시스템 ····23
그림 3-4-2. 교대단면도 ····24
그림 3-4-3. 수치해석 모델 구성 및 하중조건, 경계조건 ····24
그림 3-4-4. 파이버 요소를 이용한 비선형 재료특성에 따른 단면분할 ····25

그림 3-4-5. 재료 응력-변형률 곡선 ····26
그림 3-4-6. 지반-스프링 모형 ····27
그림 3-4-7. 최적설계안의 종방향 Pushover 응답 ····29
그림 3-4-8. 모멘트-곡률 곡선 ····29
그림 3-4-9. 전도모멘트-변위 곡선 ····30
그림 3-4-10. 하부구조물의 종방향 변위 해석 결과 ····31
그림 3-4-11. 교대강성에 따른 하부구조물(교각3)의 단면모멘트(M_y) 변화 ····32
그림 3-4-12. 교각의 변형 및 곡률분포 ····34
그림 3-4-13. 모멘트-변위 곡선 ····34
그림 3-4-14. 일반적인 교각의 파괴모드 ····36
그림 3-4-15. 적용 대상 일체형 교량 교대 단면 ····37
그림 3-4-16. 교대 휨성능곡선 ····38
그림 3-4-17. 교대 전단성능곡선 ····40
그림 3-4-18. 교대의 파괴모드 결정 ····40
그림 3-4-19. 철근상세에 따른 구속효과 ····41
그림 3-4-20. 압축콘크리트의 응력-변형률 관계 ····41
그림 3-4-21. 횡구속철근 배치방안에 따른 모델링 ····42
그림 3-4-22. 횡구속철근 보강 효과 ····42
그림 3-4-23. 직사각형 단면에 대한 측 방향 구속 응력으로부터 구속력 측정 ····43
그림 3-4-24. 횡구속철근 배치방안에 따른 해석 결과 ····44
그림 3-5-1. 해석대상 교량 ····45
그림 3-5-2. 해석대상 교량에 대한 단면도 ····45
그림 3-5-3. 온도하중에 의한 레일의 부가축응력 변화 ····45
그림 3-5-4. 온도 상승시 부가응력 및 상대변위 ····46
그림 3-5-5. 궤도 종저항력과 수평지지반력계수 변화에 따른
부가응력 및 상대변위 최대값 비교 ····46
그림 3-5-6. 교대부 강성 변화에 따른 레일 부가축응력 ····47
그림 3-5-7. 교각 강성 변화에 따른 레일 부가축응력 ····47
그림 3-5-8. 궤도 종저항력 변화에 따른 레일 부가축응력 ····47
그림 3-5-9. 교량 연장 변화에 따른 레일 부가축응력 ····47
그림 3-5-10. 교대 강성 변화에 따른 레일-교량 상대변위 ····48
그림 3-6-1. 종평면도 ····48
그림 3-6-2. 횡단면도 ····49
그림 3-6-3. 텐던 배치도 ····50
그림 3-6-4. 시공 단계별 모델링도 ····51
그림 3-6-5. 종평면도 ····54
그림 3-6-6. 횡단면도 ····54
그림 3-6-7. 텐던 배치도 ····55
그림 3-6-8. 시공 단계별 모델링도 ····56
그림 3-6-9. 종평면도 ····61
그림 3-6-10. 횡단면도 ····61

그림 3-6-11. 텐던 배치 개요도 ····62
그림 3-6-12. 시공 단계별 모델링도 ····64
그림 3-6-13. 모멘트 변화 ····80
그림 3-6-14. 측 경간장별 응력 변화 ····81
그림 3-6-15. 측 경간장별 응력 변화 ····82
그림 3-6-16. 측 경간장별 응력 변화 ····83
그림 3-6-17. 측 경간장별 응력 변화 ····84
그림 3-6-18. 측 경간장별 응력 변화 ····84
그림 3-6-19. 교대 강성별 응력 변화 ····84
그림 3-6-20. 교대 및 교각 접합부 상세 ····85
그림 3-6-21. 수평변위 조정공 도입 개요도 ····91
그림 3-6-22. 수평변위 조정공 적용에 따른 하부구조 단면력(kN·m) 비교 ····91
그림 3-6-23. 수평변위 조정공 적용에 따른 상부 거더 Stress(MPa) 비교 ····91
그림 3-6-24. 실험체 제작 일반도 ····92
그림 3-6-25. 실험체 제작 사진대지 ····92
그림 3-6-26. 계측기 설치 위치도 ····93
그림 3-6-27. 철근 변형률도 ····93
그림 3-6-28. 콘크리트 변형률도 ····94
그림 3-6-29. 2018. 04. 18 ~ 07. 17 변위도 ····94
그림 3-6-30. FEM modeling ····95
그림 3-6-31. 경계조건 & 하중조건 ····95
그림 3-6-32. P-Δ curve ····96
그림 3-6-33. 0.76mm 변형 시 응력 및 반력 ····96
그림 3-6-34. 1.14mm 변형 시 응력 및 반력 ····96
그림 3-6-35. Case A 결과 그래프 ····97
그림 3-6-36. Case A 결과 그래프(확대) ····97
그림 3-6-37. Case B 결과 그래프 ····97
그림 3-6-38. Case C & D 결과 그래프 ····98
그림 3-6-39. 종합 결과 그래프 ····98
그림 3-6-40. 수평 및 회전 변위제어 교대를 이용한 완전 일체형 연속교의
장대화 및 최적화 모델 예시 ····99

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

구분	내용
최종 목표	- 교량의 모든 구조 요소를 강결, 지진하중(철도교에서는 장대레일종하중, 시·제동하중) 등 주요 수평하중을 강성이 큰 변위제어 교대가 부담하게 함으로써 교대 외의 모든 부재를 슬림하게 만들어 경관성과 경제성, 내진성능 등을 획기적으로 향상시킨 일체형교량의 설계 및 시공 위한 기반기술의 개발 - 교좌장치, 진동완충받침, 낙교방지 및 전단저항장치, 신축이음장치, 레일 신축이음 등 고가의 부대시설/부속품 필요 없는 저비용·고성능 Maintenance-Free 교량시스템의 개발: **교량 부속장치 기존 사용량 대비 70% 저감 및 생애주기비용 30% 저감**
세부 목표	- 교대에 강결된 상부구조의 건조수축과 크리프를 효과적으로 제어 위한 수평변위 조정공법의 개발 - 신축이음장치 교좌장치 등 부대시설을 제거한 교량시스템의 bench scale 규모 실험검증 - 교대 강성과 상부구조의 온도(하강 시)에 의해 발생하는 인장응력과의 관계 규명 및 지반과 일체로 모델링한 교대의 강성 최적설계 기법 개발 - 철도교에서 교대 강성과 궤도-교량 상호작용(Rail-Structure Interaction)규명 및 지반과 일체로 모델링한 교대의 강성 최적화 설계 기법 개발 - PSC 콘크리트 상판과 하부구조 연결 상세 개발 및 수치해석을 통한 일체화 효과 검증 - 기존 교량과의 초기 공사비 및 LCC 비교 분석

2. 연구개발의 필요성

○ 기술적 중요성

- 일체형교량은 건조수축과 크리프가 극단적으로 작거나, 인장에 강한 소재가 개발되면 그 효과가 극대화될 수 있어 재료, 소재 기술의 발달에 따라 급격히 진화하는 미래지향적 기술이며, 교량 기술의 발전 단계에서 종국 단계의 기술로서 세계 시장에서 국내 기업의 경쟁력을 비약적으로 높여줄 수 있다. 특히 선진국의 현재 기술 상황 및 발전 전망을 고려할 때 시급히 확보해야 할 기술이다.

○ 경제·산업적 중요성

- 일체형교량은 기존 교량 대비 최소 30% 이상 LCC 절감이 가능하므로 경제적 타당성(B/C)이 부족한 사업의 사업성을 높여 신규 사업을 창출할 수 있으며, 사업성을 확보한 사업에서도 상당 규모의 예산 절감이 가능하므로 이를 신규 사업에 투자, 건설 투자 활성화의 선순환 구조를 만드는데 크게 기여할 수 있다.

○ 창의성·혁신성

- 본 제안의 변위제어 교대를 적용한 완전일체형 연속교는 기존 교량 대비 최소 30% 이상 LCC 차원에서 비용 절감이 가능하므로 경제적 타당성(B/C)이 부족한 사업의 사업성을 높여 신규 사업 창출 →국가 예산의 절감 및 건설 투자 활성화의 선순환 구조를 만드는데 크게 기여할 전망
- 본 연구는 종래의 교대일체형 교량의 세계적 기술 수준을 한 단계 뛰어넘는 새로운 개념으로써, 상부구조와 교각만이 아닌 양측 교대와 그 사이의 부재를 모두 일체화하여, 지진하중 등 큰 수평하중을 강성이 큰 교대가 부담하도록 하여 교량 부재 전체를 슬림하게 할 수 있다. 이에 따라, 연속교 교량의 경제성과 내진 성능, 미관 등을 종합적이면서도 획기적으로 개선하는 연구임
- 열차-궤도 및 궤도-구조물을 별도 해석하여 중첩하는 기존 해석기법과 달리 유한요소해석 및 강체해석기법을 조합한 동시 해석을 통하여 궤도부에 발생하는 응력, 변위 등에 대하여 보다 정확하고 신뢰도 높은 결과를 얻을 수 있음

- 기존 교량에 사용되는 신축이음장치, 기능성 받침 외에 내진대책 위한 진동완충받침, 낙교방지 및 전단저항장치, 면진교좌장치 등 고가의 부속품을 일절 필요치 않은 유지관리 차원에서도 경제성이 높은 시스템

3. 연구개발 범위

가. 1차 연도

① 개발 목표

○ 주관연구기관(한밭대학교):

· 상부구조물과 하부구조물(교대/교각)의 완전일체형 교량시스템의 거동특성 분석

· 완전일체형 교량시스템 주요 구성요소(ITEM)의 요구 성능 도출

○ 협동연구기관(선구엔지니어링):

· 상부구조물과 하부구조물(교대/교각)의 완전일체형 교량시스템의 실용화 방안 수립

· 완전일체형 교량시스템 주요 구성요소(ITEM)의 기본설계안 도출

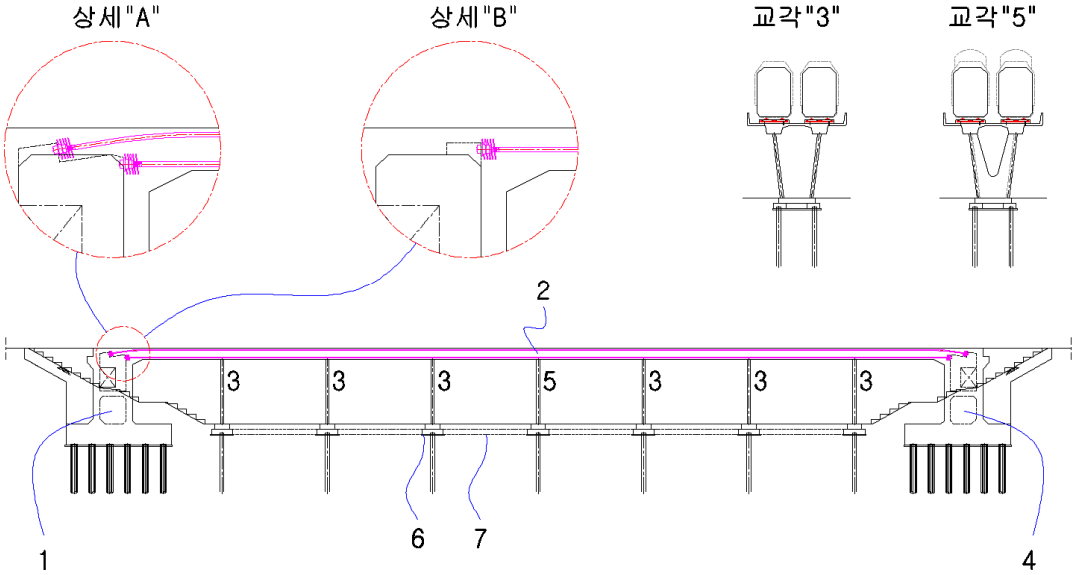


그림 1-3-1. 연구개발 대상 교량시스템: 받침과 레일 신축이음 등 **부대시설/부속품 없는** ***Maintenance-Free*** 저비용 슬림한 **완전일체형 연속교**

② 개발 내용 및 범위

○ 주관연구기관(한밭대학교):

· 상부구조물과 하부구조물(교대/교각)의 완전일체형 교량시스템의 기본구성 정립

- 주요 핵심구성(위 교량시스템 구성도 참조): 변위제어교대, 슬림형교각, 상부/하부구조 강결 접합부, 수평변위 조정공, 상판-교대 완전일체구조(상세A, 상세B)
- 주요 핵심구성별 목표 구조성능의 도출: 기존 문헌 및 연구보고서의 준용 가능한 세부사항 분석. 주요 영향인자 및 설계파라미터의 이론적 정립.

· 수평하중에 대한 변위제어 교대의 거동특성 분석

- 변위제어 교대와 상부구조 및 슬림 중간교각 간 상호작용의 시뮬레이션
- 구조시스템의 수치해석모델링 및 유한요소기법 엄밀해석
- 변위제어 교대 강성에 따른 파라메트릭 변수해석

· 유기적인 일체형 교량시스템 형성 위한 목표성능의 정량적 도출

- 수평하중 및 횡방향 변위 적정제한 및 수직하중만 담당 저항하는 슬림형 교각 형성 위한 단부 변위제어 교대의 소요강성

- 콘크리트상판-교각-기초 강결접합부의 소요 구조성능

· 철도-교대 상호작용 영향 연구

- 문헌 및 사례 조사: (세미)일체형교량의 궤도-교량 상호작용에 관한 기존 해석결과 분석
- 교대 강성-궤도 레일 상호작용의 수치해석: 상부구조의 경간장별 변수해석에 의한 레일 부가 응력 평가 → 교대 강성과 장대레일에 발생하는 부가응력간의 관계 규명

○ 협동연구기관(선구엔지니어링):

· 상부구조물과 하부구조물(교대/교각)의 완전일체형 교량시스템의 기본설계 수행

- 완전일체형 교량시스템의 시공단계 및 제작순서의 정립
- 현행 설계기준 및 공사시방서의 준용 구조계산서 및 표준도면 작성 → 각 단계별 설계기준 및 지침의 기초적인 응용: 제한/미비사항 및 보완/개선 필요사항의 도출

· 건조수축/크리프를 포함한 수평변위의 효과적 제어/저감 공법의 개발

- 완전일체형 교량에서 발생되는 건조수축 및 크리프 등 수평변위거동의 수치해석적 평가
- 저감대책(수평변위조정공법)의 기본방안 및 세부기술 정립
- 수평변위 조정공(KEY SEG) 구조사양의 상세 설계

· 상부구조물과 하부구조물의 일체화 시공 위한 접합상세 개발

- 교량 상판과 하부구조 일체화 시공에 대한 독일, 일본 등의 해외사례 및 국내 개발 기술 조사 분석
- 콘크리트 상판 및 기초와 강재 교각의 강결 접합부 기본설계안 도출
- 수치해석에 의한 기본 구조성능 평가 → 최적 강결 접합 구조사양의 확정

나. 2차 연도

① 개발 목표

○ 주관연구기관(한밭대학교):

· 완전일체형 교량시스템 주요 구성요소(ITEM)의 구조성능 평가 및 검증

· 완전일체형 교량시스템의 설계시공 기법 및 지침 정립

○ 협동연구기관(선구엔지니어링):

· 완전일체형 교량시스템 주요 구성요소(ITEM)의 최적설계안 도출

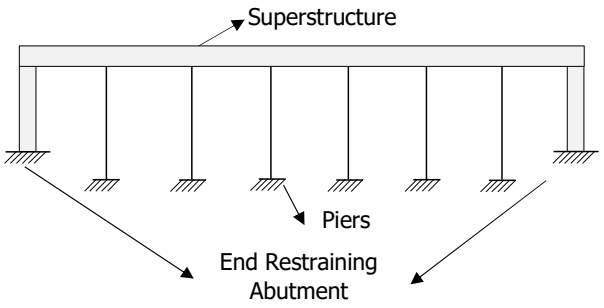
· 완전일체형 교량시스템의 경제성 분석 및 사업화 추진전략 수립

② 개발 내용 및 범위

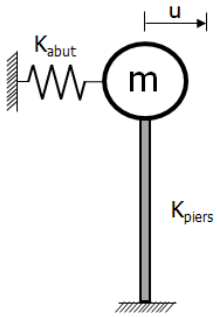
○ 주관연구기관(한밭대학교):

· 변위제어 교대 및 일체형교량시스템의 구조성능 평가

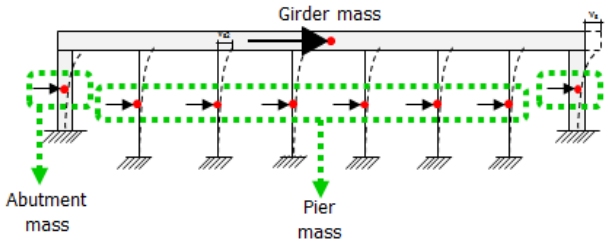
- 수치해석에 의한 주요 구성요소의 성능 평가
  1) 단일모드/다중모드스펙트럼법, 푸쉬오버해석법 등에 의한 공급역량 및 내하성능 평가
  2) 변위제어교대-슬림 교각 간 상호작용 거동 특성의 영향인자 및 관계 규명
  3) 변위제어 교대, 슬림 교각, 콘크리트상판-교각-기초 접합부(기초파일 두부 포함)의 수평력 등 하중분배 특성의 상세 평가 → 소요 구조성능의 분석: 다자유도 모델 비선형해석법과 단자유도 모드해석법의 비교
- 변위제어 교대-지반 상호작용의 영향 평가: 고정지지 및 탄성지반 조건(일반적인 암반조건: S_1과 S_2), 관입깊이 등에 따른 영향 → 교각기초 및 교대기초 각각의 적정제원 및 소요성능



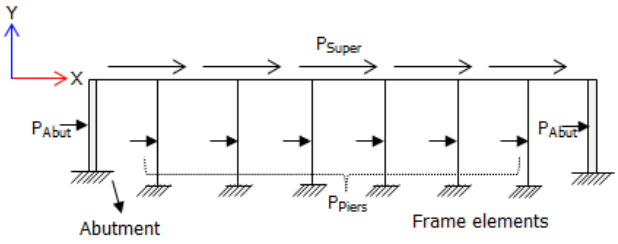
(a) Fully Integral Continuous Bridge System



(b) SDOF Spectrum Analysis

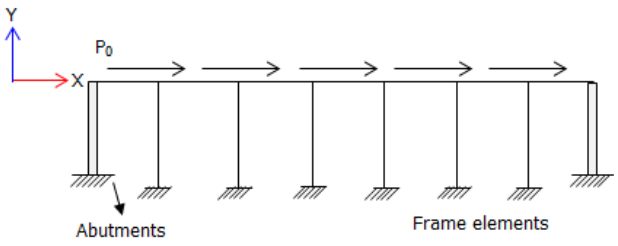


(c) MDOF relative behavior of fully integral bridges

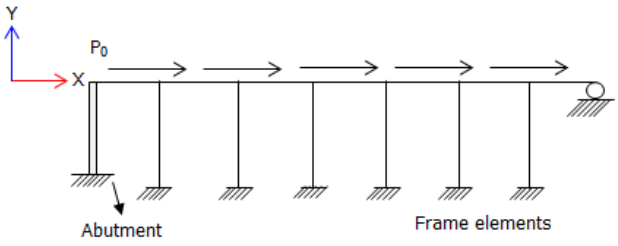


(d) MDOF Analysis (Distributed Mass)

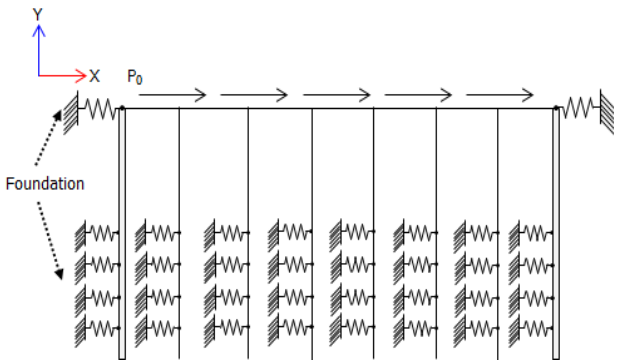
그림 1- 3- 2. 수평지진하중에 의한 영향평가 위한 변수해석모델링 방안



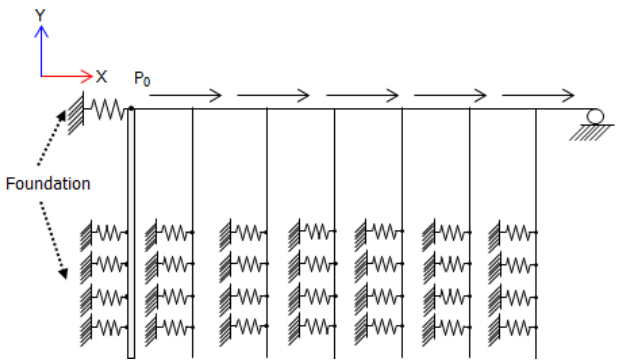
(a) Both- end abutments, Fixed foundation



(b) One- end abutments, Fixed foundation



(c) Both- end abutments, Flexible foundation



(d) One- end abutments, Flexible foundation

그림 1- 3- 3. 수평지진하중에 의한 영향평가 위한 변수해석모델링: 지반- 구조물 상호작용

· 완전일체형 교량시스템의 설계기준/지침 정립

– 변위제어 교대 일체형 교량의 해석방안 및 관련 지침 수립→ 변위제어 교대 및 지반 상호작용의 영향을 고려한 적정 수치해석기법 및 합리적 설계기법의 정립

- 수치해석/실험결과의 분석 → 현행 설계기준 및 공사 시방서 내용의 준용방안 및 보완 세부 내용의 수립

· 철도-교대 상호작용의 영향 적용기법 및 기준 정립

- 철도-교대 상호작용 데이터베이스 분석: 장대레일에 발생하는 부가응력의 허용범위를 만족하는 교대 한계변위량의 통계 분석
- 궤도-교대 상호작용 영향을 고려한 교대의 허용 한계변위 및 공칭강도 검토 지침 개발

○ 협동연구기관(선구엔지니어링):

· 완전일체형 교량시스템의 최적설계안 개발

- 현재 철도 라멘교의 제한적인 적용성(4x20.0m=80.0m)을 극복한 최대 경간 35.0m, 7경간 연속교(L=227.0m)에 대한 구조적 안전성 정립 및 최소 다리밑 공간 5.0m 확보가 가능한 교각 높이별 변수 해석으로 완전일체형 교량 시스템의 적용범위 정립
- 완전일체형 교량시스템 건조수축/크리프를 포함한 수평변위의 효과적 제어/저감 공법의 보완 및 교정: 최적화 공법 도출을 위한 Bench scale 규모 시험체 모형 설계/제작 및 실험적 평가 → 수치해석 결과를 보정한 수평변위조정공법의 확립
- 상부구조물과 하부구조물의 일체화 시공 위한 접합상세에 대해 요소(접합부) 실험
  → 실험 결과와 수치해석 결과 비교 분석을 통한 실험 적정성 검증
  → 실험 결과 분석을 통한 완전일체형 교량 시스템의 상부구조와 교대 접속부에 대한 최적 경계조건 확립 및 접속 상세 도출
- 완전일체형 교량 설계기준 지침을 적용한 최적화 프로토타입 설계안의 개발
  : 시공단계별 수치해석에 기반한 기본설계안의 작성 (구조계산서 및 표준도)

· 완전일체형 연속교의 경제성(VE/LCC)분석

- 기존 교량의 내진대책 위한 진동완충받침, 낙교방지 및 전단저항장치, 면진교좌장치, 신축이음장치, 기능성 받침 등 고가의 부속품 배제한 구조시스템의 검토
- 교량 부대장치/부속품 없는 비용절감 효과의 정량적 평가
- Maintenance-Free 저비용 슬림한 생애주기비용 저감 교량시스템의 물량산출서 작성 및 경제성 분석 → 실용적 활용 전략 수립

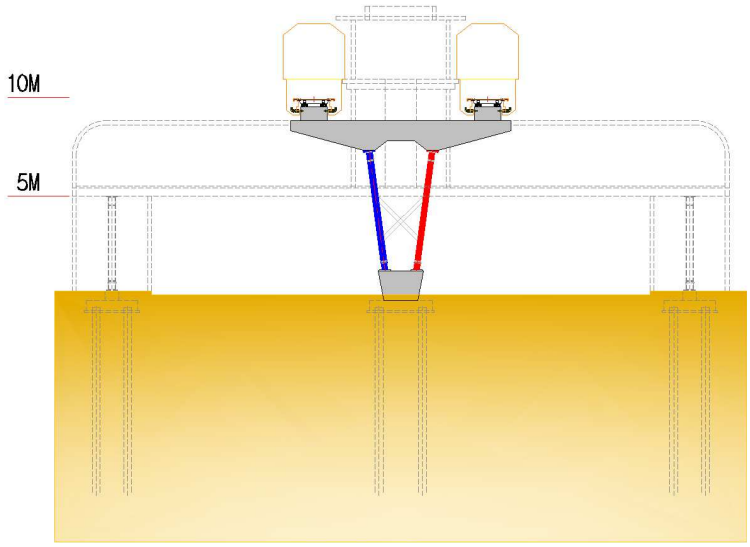


그림 1-3-4. 경량전철 고가교 적용 개념

※ 참여기관별 연구수행 내용의 유기적 연결 및 상호협조 추진방안

□ 1차년도 연구는 건조추축 및 크리프 수평변위 효과적 제어, 교대 강성과 상부구조의 응력 관계 규명, 철도 궤도의 상호작용 및 변위제어 등에 대한 **기본이론 및 설계기법**의 정립, **수치해석**적 검토 및 **실험규명 방안의 수립** 등을 진행하고, 2차년도 연구에서는 **Bench scale 규모의 실험 수행 및 해석적 비교분석**을 통해 1차년도 연구내용을 교정 및 보완 → 레일신축이음 장치 등 고가부속품이 소요치 않는 완전일체형 연속교 설계기법 및 지침 개발 완료

□ 주관연구기관인 국립한밭대학교에서 참여기관인 한국교통대학교와 함께 철도교량과 궤도의 상호작용 및 지반 상호작용을 합리적으로 반영한 **변위제어 교대 적용 완전일체형 연속교의 설계기법 및 지침을 정립**하고, 협동연구기관인 선구엔지니어링(주)에서 주관연구기관에서 정립한 설계기법 및 지침을 반영하고 상부구조물과 하부구조물의 일체화 시공 위한 실용적 접합상세 개발을 통해 **완전일체형 연속교 프로토타입 기본설계 수행 및 LCC비용 최적화 방안** 수립



그림 1-3-5. 연차별 연구내용 및 수행체계

제2장. 국내외 기술 개발 현황

○ 국내 현황

- 국토교통부 전국 교량현황조사에 따르면 2016년 총 교량 수는 30,983개소, 연장이 3,077km로 조사되고 있으며, 2014년과 비교하여 교량수 1,087개, 연장 127km가 증가한 것으로 나타났다. 이는 10년 전인 2005년과 대비하여 교량수 8,112개소, 연장 1,091km가 증가하여 연평균 교량수는 3.09% 연장은 4.49%의 비율로 꾸준히 증가한 것을 알 수 있다.

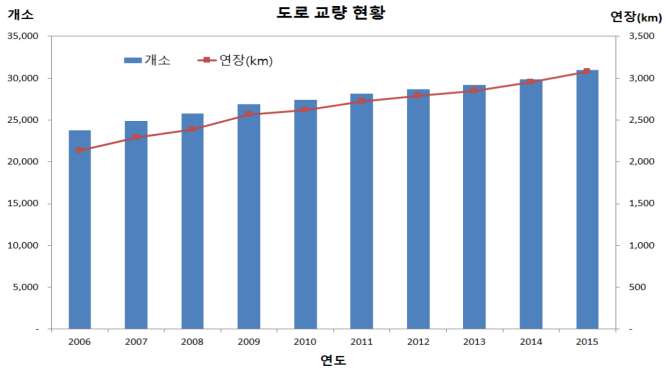


그림 2-1-1. 연도별 교량 개소 및 연장 증가 추이

기준년도	개소		연장(m)	비고
2005년 12월말	22,871		1,986,708	
2014년 12월말	29,896		2,950,056	
2015년 12월말	30,983		3,077,432	
비 율 (2015년 12월말 기준)	2005년 대비	증가수	8,112개소	
		연간비율	3.09%(연평균)	
	2014년 대비	증가수	1,087개소	
		비율	3.64%	

- 우리나라 주요 고속도로인 경부고속도로가 정식 개통된 지 40년이 넘었으며, 교량의 기대수명을 60년~70년 정도로 예상할 경우 우리나라의 교량도 이제 청년기를 지나 장년기에 본격 진입됨을 알 수 있다. 이러한 점을 고려하여 구조물의 성능저하 및 노후화에 대한 구조적 건전성 평가 및 유지관리 방안에 대한 검토 필요성이 부각되고 있다. 특히 2000년 이후의 고속도로 유지관리 실적을 보면 교면포장 교체 이외 교량 유지관리 비용의 약 33% 이상이 신축이음장치 및 교량받침의 보수, 보강에 사용되었으며, 이에 따라 교량 상의 신축이음장치 및 교량받침을 제거한 완전일체형 교량의 수요가 앞으로 꾸준히 증가할 것으로 예상된다.

○ 국외 현황

- 국내 건설시장이 단기적으로 다소 위축될 것으로 예상되는 반면 해외건설시장은 중장기적으로 활발할 것으로 예상된다. 또한 국내 건설경기 둔화 우려에 따라 신규로 해외에 진출하려는 중소 및 중견 건설업체들도 급증할 것으로 예상된다.
- 세계 건설시장은 성장세가 지속될 것으로 전망되며, 성장지역이 중동에서 아시아 및 중남미 지역으로 이동할 것으로 예상된다.
- 특히, MENA(중동)은 석유 또는 정유 플랜트에서 발전 및 교통 등 인프라 중심으로 발주패턴의 변화가 이루어지고 있으며, 이는 '아랍의 봄' 영향으로 정권 유지를 위해 정부예산의 인프라 투자비중 확대에 따른 것으로 판단된다.
- 아시아 지역, 특히 동남아시아의 지역은 열악한 인프라로 인한 비효율 개선을 위해 전력, 교통 등 인프라 부분에 대한 투자를 확대하고 있다.
- 따라서 유럽을 제외한 전 세계 건설 시장이 성장할 것으로 판단되며, 특히 아시아, 중동, 중남미에 있어서 사회간접자본 분야에서의 성장이 예상된다

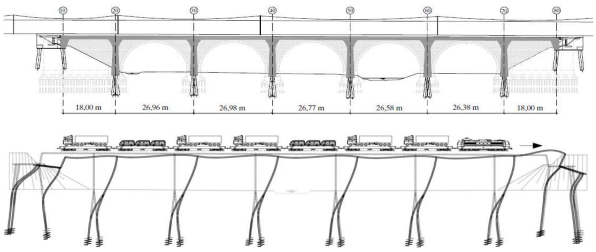
제3장. 연구수행내용 및 성과

1. 1차년도 연구수행내용

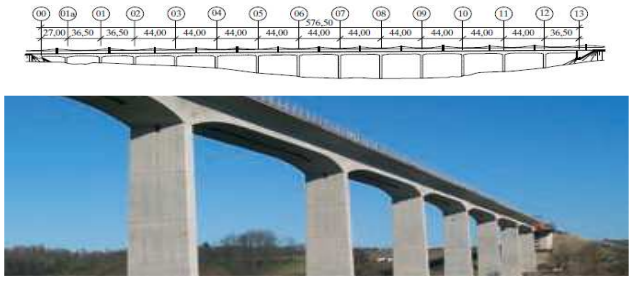
가. 상부구조물과 하부구조물(교대/교각)의 완전일체형 교량 시스템의 기본 구성 정립

○ 일체형 교량시스템의 해외사례조사

- 독일에서는 철도 노선의 일체형 교량이 더 높은 타당성을 가지며, 일체형 교량시스템의 최근 개발 동향을 소개하고 현재 철도 신선에 건설된 대형 교량에 대한 전망을 제공하고자 함
- 저비용의 견고한 건설 유형과 심플한 유지관리와 관련하여 일체형 교량시스템으로 건설된 철도 노선에도 적용되고 있음
- 높은 강성, 수평 하중의 양호한 전달 및 베어링이 없는 단순한 구조와 같은 프레임 교량의 장점은 광범위하게 논의되고 있음



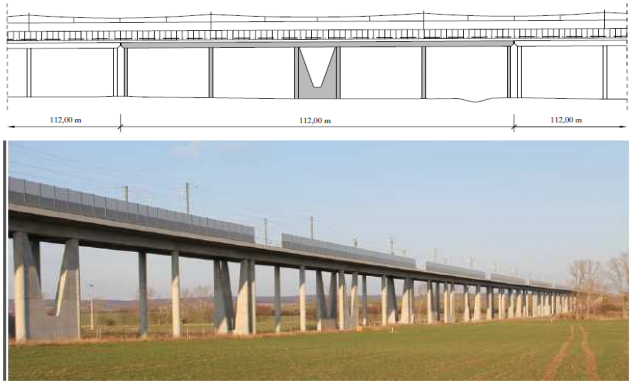
(a) Rednitztal 고가교, 총 연장 170m



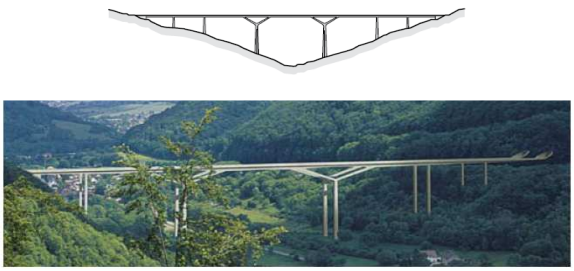
(b) Scherkondetal 고가교, 총 연장 576.5m



(c) Unstruttal 고가교, 총 연장 2,668m



(d) Gänsebachtal 고가교, 일체형 구간 112m



(e) Filstalbrücke [LAP] 고가교



(f) Stöbnitztalbrücke [LAP] 고가교

그림 3-1-1. 일체형 교량 국외 사례

- 교량의 중앙부에 강성이 큰 아치 형태의 스트럿을 설치하여 수평하중에 저항하는 세미 일체형 교량(그림 3-1-1(c) 또는 그림 3-1-1(d))은 아치형 스트럿이 수평하중에 충분히 저항하기 때문

에 상부구조에 강결된 나머지 수직 교각들은 거의 수직하중만을 부담하므로 매우 얇은 형태가 가능

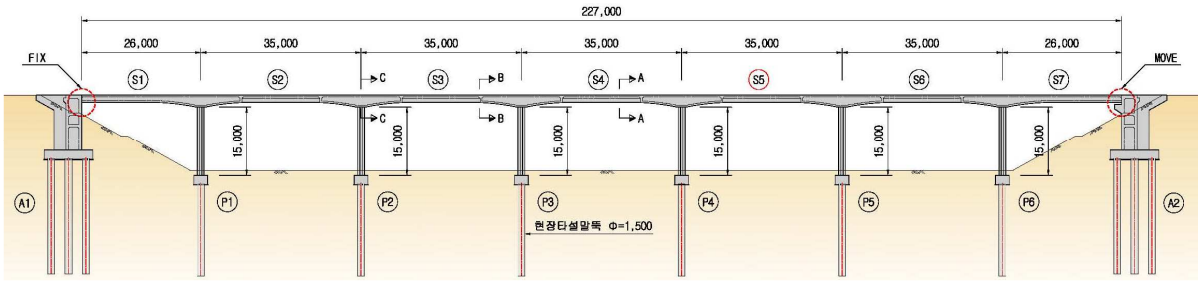
- 강성이 큰 편측 교대에 상부구조를 강결시켜 수평하중에 저항하는 방안은 수평하중에 저항하는 별도의 스트럿 구조가 불필요하므로 효율적이나, 건조수축 및 온도에 의한 변형의 중심이 상부구조와 강결된 편측 교대이므로 적용 가능한 교량 연장은 상대적으로 짧음. 그러나, 좌우 교대에의 고정점을 변화시켜 일방향 변형-리턴 변형을 유발하는 특별한 시공법에 의해 그림 3-1-1(c)이나 그림 3-1-1(d)의 교량보다 연장 확대 가능 → 본 과제에서는 이 방법을 채택함

○ 완전일체형 연속교의 기본구성

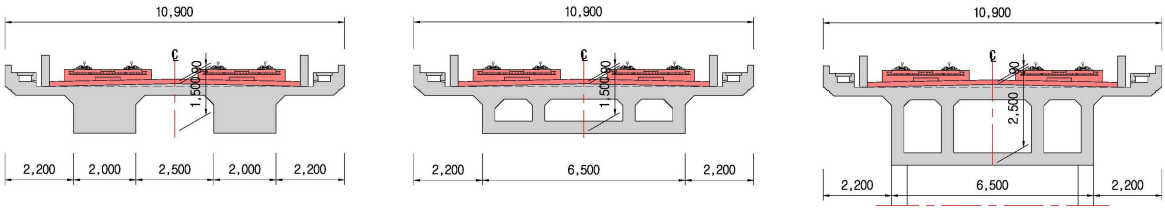
· 주요 핵심 구성(그림 3-1-2참조) : 변위제어교대, 슬림형교각, 상부/하부구조 강결 접합부, 수평변위 조정공, 상판-교대 완전일체구조

- 교량구성 : 각 지간은 26~35m로 총 연장 227m, 7경간으로 구성, 교폭 10.9m인 철도교
- 상부구조 : 각 구간의 소요 강성과 형고에 따라 총 3가지 프리스트레스 콘크리트 거더로 구현, 각기 박스형 단면과 충실 단면을 가짐 (그림 3-1-2(b),(c),(d))
- 하부구조 : 양단에 대칭으로 설치된 변위제어 교대와 6개의 중간교각으로 형성
- 교각기초 : 교각 강성이 감소할수록 하중분담이 감소하는 것을 감안하여 현장타설말뚝 Φ1,500 3개를 교축직각방향으로 1열배치 → 종방향 수평력 분담 최소화
- 교대기초 : 다주가구의 말뚝배치로 종방향 수평력에 대해 저항

· 구조물의 단면특성과 구성요소별 콘크리트의 물성치는 표 3-1-1, 표 3-1-2와 같음



(a) 정면도



(b) 단면 A (c) 단면 B (d) 단면 C

그림 3-1-2. 완전 일체형 콘크리트 연속교량 시스템

표 3-1-1. 구조물의 단면특성

Member		A (m^2)	I_y (m^4)	I_z (m^4)	J (m^4)	H (m)
거더	A	8.38	56.16	1.695	2.783	1.5
	B	7.73	48.34	2.076	5.747	1.5
	C	9.33	57.49	7.830	18.05	2.5
교대		15.72	199.60	27.09	76.19	12
교각		9.25	29.57	1.651	4.77	15

표 3-1-2. 콘크리트의 물성치

Type	f_{ck} (Mpa)	E (Mpa)	G (MPa)	w (kN/m^3)
상부 구조	40	30008	12857	24.5
하부 구조	30	27537	11798	24.5

○ 변위제어 교대 강성에 관한 변수연구

· 변수연구 개요

- 목적 : 교대 구조 및 강성에 따른 하부구조와 상부구조의 상호작용과 수평하중 분배특성 및 변위제어 효과를 정량적으로 평가 → 변위제어 교대의 소요 강성과 규모, 수평변위의 적정 제한 수준 결정
- 재하 하중 : 수평 하중의 가장 지배적인 인자로 예상되는 지진 하중 산정
- 단일모드스펙트럼해석과 다중모드스펙트럼해석법을 적용

· 변수해석 모델

- 지진하중에 의한 교축방향 및 횡방향(교축직각) 거동 등 2가지 자유도에 대해 수행
- 범용구조해석 프로그램 ABAQUS를 이용하여 진행
- 교대의 단면제원과 구조 형상은 그림 3-1-3 및 표 3-1-3과 같이 총 6가지 모델로 구성
- 각 Case별 교대의 단면강성(z축)은 최소 2배에서 18배로 증가
- Case1~6은 한쪽 교대 일체형 교량, Case 1-2~4-2는 양쪽 교대 일체형 교량 형식
- 완전요인 설계법에 의거하여, 교대제어방식과 수평휨강성(I_z)를 고려한 4가지 케이스를 도출, 이에 더하여 각각의 요인의 효과를 증감한 케이스를 추가하여 관계를 분석함(표 3-1-4)
- 실험계획법에 의거하여, 주요지배인자인 양단 및 일단 변위제어 교대와 수평휨강성(I_z)의 범위를 고려하여 케이스 선정

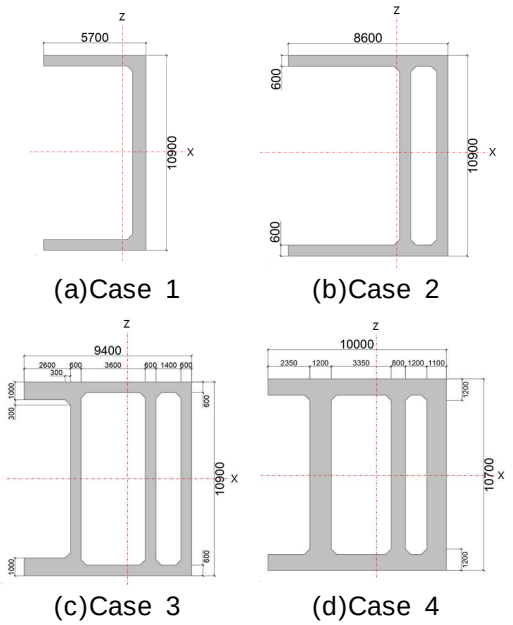


그림 3-1-3. 교대 해석모델 단면

표 3-1-3. 변위제어 교대의 단면제원

Case	A (m^2)	I_x (m^4)	I_z (m^4)	J (m^4)
1	14.21	240.69	40.50	2.6
2	22.23	371.38	125.25	47.28
3	31.27	491.17	260.79	332.40
4	46.04	624.07	400.13	580.85
5	66.79	792.92	521.58	1015.02
6	99.82	1007.47	782.37	1773.71

표 3-1-4. 실험계획에 따른 모델 선정

표준 순서	런 순서	중앙점	블럭	A	B	교대제어 방식	수평 휨강성 (I_z ,m^4)
4	1	1	1	1	1	양단	200
3	2	1	1	- 1	1	일단	200
2	3	1	1	1	- 1	양단	100
1	4	1	1	- 1	- 1	일단	100

· 단일모드 스펙트럼해석 (Single Spectrum Analysis, SSA)

- 하나의 진동모드만을 사용하는 스펙트럼 해석법으로써, 교량의 교축방향과 교축직각방향에 대해 고유주기를 계산하여 탄성력과 탄성변위를 구한 후 교량에 적용할 등가적정 지진하중을 산정하는 방법
- 교량시스템의 하부구조는 서로 상이한 강성을 갖는 변위제어 교대와 교각이 일체화된 것이어서 교량 각 위치의 종방향 변위($v_s(x)$)는 유한요소 정적해석을 통해 우선 구함
- 표 3-1-5와 같은 공식을 통해 산정된 등가정적지진하중을 유한요소모형에 교축방향 및 교축직각방향으로 적용하여 수평 변위, 밑면전단력 및 전도모멘트 등 지진응답을 분석

표 3-1-5. 단일모드스펙트럼 해석 위한 등가지진하중

구 분	기준 공식	
탄성응답지진계수(C_s)	$C_s = \frac{1.2AS}{T^{2/3}} \le 2.5A$	A : 가속도계수 (재현주기 1000년 0.154) S : 지반특성계수 (지반종류 II : 1.2)
교량의 주기(T)	$T = 2\pi\sqrt{\frac{\gamma}{p_o g \alpha}}$	p_o : 단위 등분포 하중 α : 설계 상수 $\left(\alpha = \int v_s(x)dx\right)$
등가적정지진하중(p_e)	$p_e = \frac{\beta C_s}{\gamma} w(x) v_s(x)$	$v_s(x)$: 단위등분포하중 재하 시 변위량 $w(x)$: 단위길이당 고정하중 β : 설계 상수 $\left(\beta = \int w(x)v_s(x)dx\right)$ γ : 설계 상수 $\left(\gamma = \int w(x)v_s(x)^2dx\right)$

· 다중모드 스펙트럼해석 (Multi-Spectrum Analysis, MSA)

- 여러 개의 진동모드를 사용하는 스펙트럼 구조 해석법으로써, 일체형 교량의 교대와 교각이 균일하지 않기 때문에 강성차이의 영향을 살펴보기 위해 비교 해석
- 교량 모델링은 각 연결부와 절점이 6개의 자유도를 가진 3차원 공간뼈대 구조물로써 모형화하였으며, 각 부재별로 명시된 질량을 고려하여 관성효과를 포함
- 응답해석 시 고려되는 모드 수는 총 30개이며, 부재의 단면력과 변위는 개별모드로부터 각각의 응답에 90% 이상의 질량 참여율을 확보

○ 변위제어 교대 종방향(교축) 거동특성분석

· 종방향 거동 및 변위 응답

- 교대의 강성이 증가함에 따라 교대 및 교각에서의 수평 변위가 감소 (그림 3-1-6)

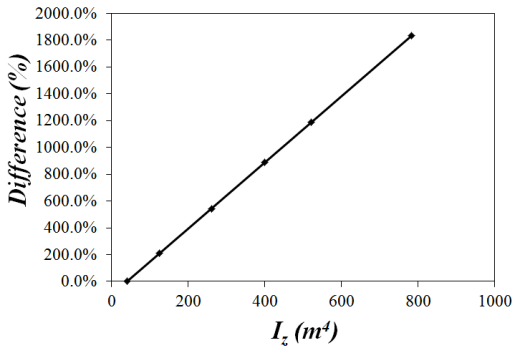
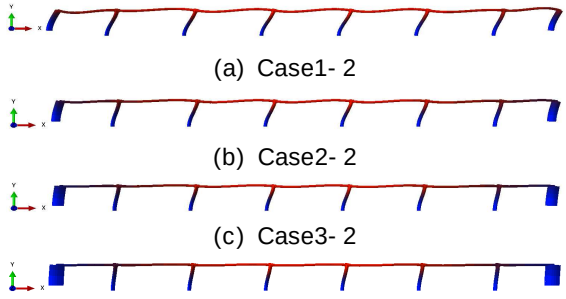


그림 3-1-4. Sectional stiffness (abutment)



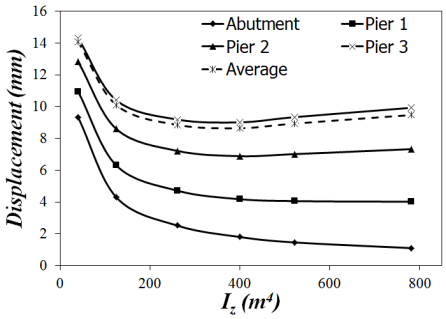
(a) Case1-2

(b) Case2-2

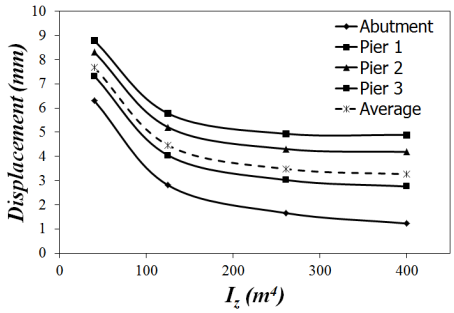
(c) Case3-2

(d) Case4-2

그림 3-1-5. Fully integral bridge longitudinal displacement



(a) one side abutment



(b) both side abutment

그림 3-1-6. Longitudinal displacement variation of pier and abutment

· 일측교대 일체형 교량의 밑면전단력과 전도모멘트

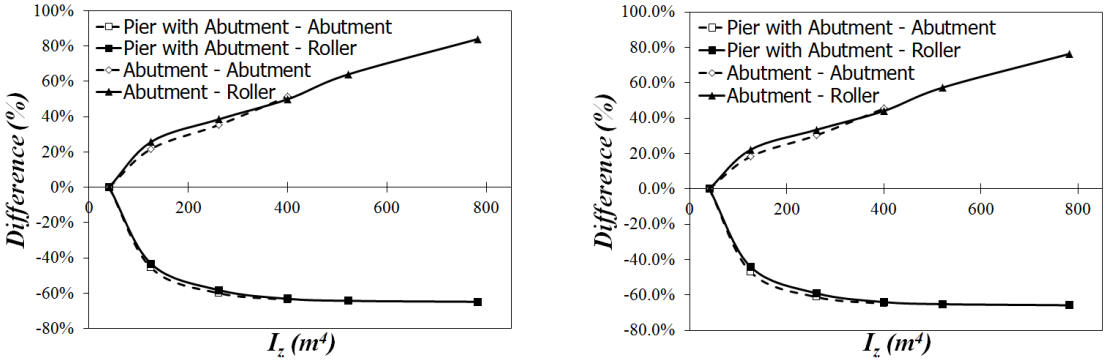
- 교대에 발생하는 최대 전단력과 모멘트는 교각에 비해 10배에서 최대 24배의 규모로 크게 작용 (그림 3-1-7)
- 교각의 단면에 작용하는 전도모멘트는 교대 강성 증가에 따라 급격히 줄어드는 경향을 보이다가 점차 수렴하여 최대 65% 저감 (그림 3-1-7(a))
- 교각의 밑면전단력도 유사한 감소 경향을 보임 (그림 3-1-7(b)). Case 4에서 수렴하여 최대 66% 감소. 따라서, 교대의 강성(I_z)을 그 이상 늘리는 것은 무의미하며 오히려 지진하중효과만 증가되는 부작용
- 변위제어 교대의 z축 휨강성(I_z)이 교량 전체의 수평 거동에 대해 민감한 영향을 갖는 설계인자임을 알 수 있으며, 200m^4 수준(Case 3)에 도달하면 교각에 발생하는 밑면전단력 및 전도모멘트가 각각 60% 가까이 감소하면서 수렴구간을 형성
- 이를 채택하면 수평변위를 효과적으로 제어하여 교각의 단면과 상부구조의 형상을 상응하는 범위 이내로 슬림하게 줄일 것으로 기대

· 양쪽 교대 일체형 교량의 밑면전단력과 전도모멘트

- Case1-2을 기준으로 단면2차모멘트를 최소 2배에서 10배까지 증가시킴
- 교각의 단면에 작용하는 전도모멘트는 그림 3-1-12(a)에 보이듯이 최대 64%까지 감소, 밑면전단력은 그림 3-1-7(b)에 보이듯이 최대 65%까지 감소

· 양측교대와 일측교대 해석결과 비교

- 교각에 작용하는 전도모멘트는 그림 3-1-7(a)와 같이 두 해석결과 그래프가 거의 유사하게 감소
- 교각의 밑면전단력도 그림 3-1-7(b)에서 보이듯이 유사하게 감소하는 경향을 보임
- 교각의 변위는 양측교대 모델에서 일측교대의 경우에 비해 1.5~2배 낮게 평가됨



(a) Reaction moment(M_z) (b) Reaction force(F_x)

그림 3-1-7. Percentage difference and trend analysis

- 교대의 수평휨강성(I_z)과 교각의 모멘트 감소율(Diff., %)은 명확한 역비례 상관관계 특성을 가지며 이의 관계는 식 3-1-1과 같음

$$diff.(\%) = -8\times10^{-7}I_z^3 + 0.0012I_z^2 - 0.57I_z + 17.62 \qquad \text{(식 3-1-1)}$$

- 이는 교대의 수평휨강성(I_z) 증가에 따라 지진하중에 의해 발생되는 교각의 모멘트나 전단력이 통계적으로 명확히 제어되는 것을 의미하며, 해석적으로 분석된 거동특성의 회귀분석 결과 통계적 유의미성 확인
- 회귀 분석 :

  회귀방정식

  감소율 = -0.00 + 1.00 Trend Formula

예측 변수	계수	SE계수	T	P
상수	- 0.000	4.823	- 0.00	1.000
Trend Formula	1.00000	0.08926	11.20	0.000

모형요약

S = 4.97541 R- 제곱 = 96.9% R- 제곱(수정) = 96.1%

분산 분석

출처	DF	SS	MS	F	P
회귀	1	3106.9	3106.9	125.51	0.000
잔차 오차	4	99.0	24.8		
총계	5	3205.9			

표 3- 1- 6. Analysis results (longitudinal behavior)

Case	Displacement (mm)				밑면전단력(F_x) (kN)				전도모멘트(M_z) (kN·m)			
	Abut.	Pier1	Pier2	Pier3	Abut.	Pier1	Pier2	Pier3	Abut.	Pier1	Pier2	Pier3
1	9.3	11.0	12.8	14.3	16,877	1,479	1,475	1,682	193,416	11,740	12,481	14,107
2	4.3	6.3	8.6	10.4	20,608	828	993	1,221	243,218	6,644	8,390	10,245
3	2.5	4.7	7.2	9.2	22,509	606	837	1,078	267,735	4,905	7,057	9,046
4	1.8	4.2	6.9	9.0	24,311	532	799	1,056	289,933	4,322	6,733	8,868
5	1.5	4.1	7.0	9.3	26,546	515	814	1,095	316,958	4,187	6,861	9,186
6	1.1	4.0	7.3	9.9	29,753	506	851	1,163	355,700	4,123	7,170	9,769
1- 2	6.3	7.3	8.3	8.8	11,384	998	953	1,031	130,469	7,849	8,069	8,651
2- 2	2.8	4.0	5.2	5.8	13,459	530	599	676	158,845	4,257	5,069	5,679
3- 2	1.7	3.0	4.3	4.9	14,829	388	497	577	176,390	3,141	4,198	4,848
4- 2	1.2	2.8	4.9	4.9	16,555	350	483	571	197,445	2,843	4,082	4,799

· 종방향 거동 해석결과 비교 (표 3-1-7)

- 수평 변위는 MSA에 비해 SSA방법이 10%내외 오차범위로 과다 평가
- 교대의 최대모멘트와 밑면전단력은 SSA 방법이 다소 과다하게 보수적으로 평가하고 있으나, 교각에서는 다소 과소평가 하는 경향을 보임
- 슬림한 교각의 설계는 다중모드스펙트럼법의 결과를 따르는 것이 바람직할 것으로 보임

표 3- 1- 7. 다중모드 스펙트럼 해석법 간의 결과 비교

Member	Displacement (mm)			Force (kN)			Moment (kN- m)		
	SSA	MSA	%	SSA	MSA	%	SSA	MSA	%
Abutment1	1.7	1.4	17.5%	14,829	12,828.8	15.6%	176,390	150,766.0	17.0%
Pier 1	3.0	2.6	16.4%	388	609.8	- 36.4%	3,141	3,785.6	- 17.0%
Pier 2	4.3	3.9	11.3%	497	970.8	- 48.8%	4,198	5,891.4	- 28.7%
Pier 3	4.9	4.5	8.6%	577	1,174.7	- 50.9%	4,848	7,073.2	- 31.5%
Pier 4	4.9	4.5	8.6%	577	1,174.7	- 50.9%	4,84	7,073.2	- 31.5%
Pier 5	4.3	3.9	11.3%	497	970.8	- 48.8%	4,198	5,891.4	- 28.7%
Pier 6	3.0	2.6	16.4%	388	609.8	- 36.4%	3,141	3,785.6	- 17.0%
Abutment2	1.7	1.4	17.5%	14,829	12,828.8	15.6%	176,390	150,766	17.0%

○ 변위제어 교대 횡방향(교축직각) 거동특성분석

· 교량의 횡방향으로 유효지진하중을 재하하여 변위제어 교대의 구조 및 강성에 따른 전체 교량의 거동특성, 밑면전단력, 전도모멘트 등 수평하중 효과의 분배 경향을 확인(그림 3-1-8,9,10과 표 3-1-8)

- 교대 강성에 따른 교각과 교대에서의 교축직각방향 변위의 차이는 크지 않으며, 오히려 질량 증가로 인해 다소 커지는 경향도 보임(그림 3-1-8)

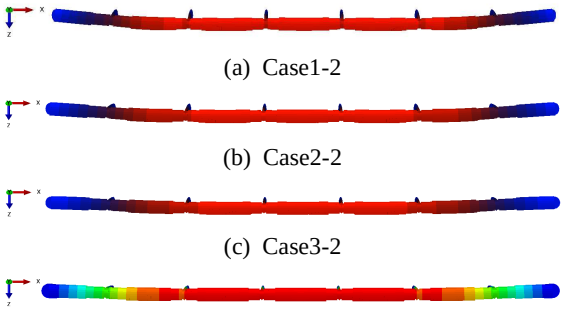


그림 3-1-8. Lateral displacement of fully integral bridge model

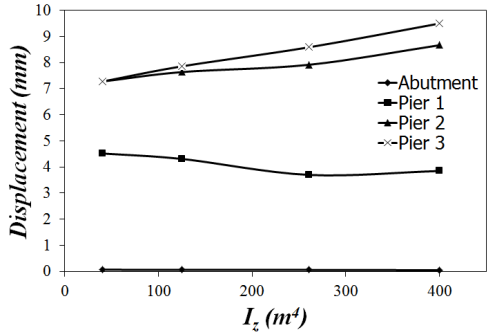
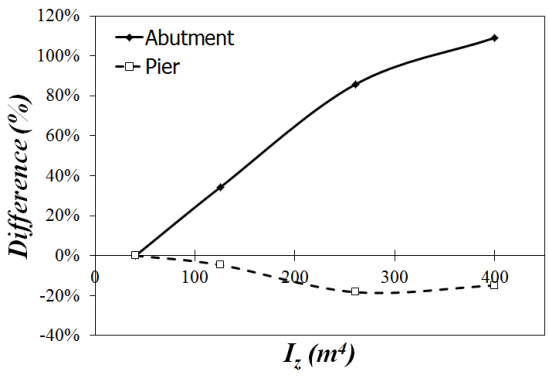


그림 3-1-9. Lateral displacement variation of pier and abutment

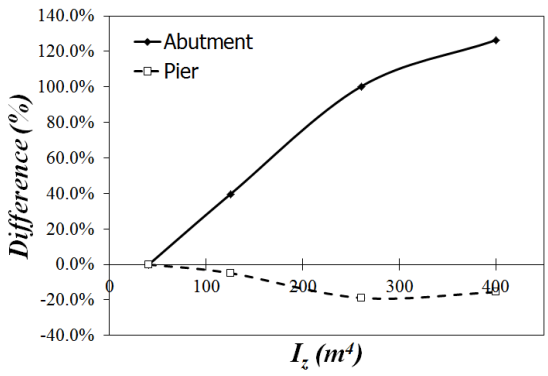
- 전도모멘트는 교대에서 종방향 거동과 유사하게 최대 109%까지 증가, 교각에서의 변동은 상대적으로 그 차이가 크지 않음: Case1-2를 기준, 15% 내외 수준 (그림 3-1-11(a))
- 밑면전단력은 Case1-2에 비교하여 교대에서는 최대 125% 정도 늘어나지만, 교각에서는 15% 내외 정도에 불과함(그림 3-1-11(b)). 교대로부터 멀리 떨어진 교각일수록 변위와 단면력의 저감 효과가 낮아짐
- 이에 따라 횡방향 거동에 대한 교대 강성은 크게 늘릴 필요가 없고 교각의 소요강성은 교대에서 멀수록 증가되나, 비일체형 기존 교량의 교각에 비해서는 다소 줄어들 것으로 기대됨

표 3-1-8. Lateral analysis results

Case	Displacement (mm)				밑면전단력(F_z) (kN)				전도모멘트(M_x) (kN·m)			
	Abut.	Pier1	Pier2	Pier3	Abut.	Pier1	Pier2	Pier3	Abut.	Pier1	Pier2	Pier3
1-2	0.07	4.52	7.28	7.28	408.3	3005.8	4824.9	4790.9	5586.2	44739.7	72037.2	71861.7
2-2	0.06	4.31	7.64	7.86	570.2	2859.1	5064.1	5175.8	7498.1	42636.2	75582.5	77609.1
3-2	0.06	3.70	7.92	8.59	818.1	2439.3	5256.2	5660.5	10380.6	36540.2	78408.7	84828.6
4-2	0.05	3.85	8.67	9.50	924.1	2537.8	5750.4	6266.6	11679	38062.4	85770.1	93899.5



(a) Reaction moment(M_z)



(b) Reaction force(F_x)

그림 3-1-10. Lateral analysis percentage difference and trend analysis

○ (세미)일체형교량의 궤도-교량 상호작용에 관한 기존 해석결과 분석

- 궤도/교량 상호작용 응답에 양향을 미치는 요소는 하중 조합(온도 하중, 시/제동 하중, 열차 수직 하중), 교량의 종방향 길이, 교량부의 지점 배치 방식, 하부 구조의 강성 등이 있으며, 도상의 비선형적 거동 및 저항 특성이 응답 결과에 가장 지대한 영향을 미치는 매개변수임
- 도상 저항력이 양호한 경우 과다한 레일 축력이 발생하지 않으며, 이에 따른 좌굴 및 파단 위험이 적음
- 일반적인 경우, 토공노반에 비하여 교량부에서는 구조물의 신축 및 수직 휨변위로 인하여 도상 이완현상이 쉽게 발생하므로 도상 저항력이 저하됨
- 레일과 교량의 온도 변화량에 따라서 레일에 발생하는 축력의 경향은 변화하며, 교량의 신축 방향에 따라 궤도에 압축 또는 인장으로 부가축력이 발생함
- 온도하중 고려 시 전 구간 장대화된 경우는 레일온도가 변하더라도 종방향 변위가 발생하지 않으며 따라서 궤도/교량상호작용이 발생하지 않으므로 구조물의 온도변화만 고려함
- 교량 경간의 길이가 증가함에 따라서 레일에 발생하는 축력은 증가함
- 열차 주행 특성을 고려하여 재하 되는 열차 시/제동 하중은 교량상 종방향 위치에 따라서 응답에 영향을 주며, 안전성 검토는 가장 축력이 크게 발생하는 위치를 기준으로 함

○ 일체형구조 레일-교량 상호작용 해석

· 모델링 파라메타

- 교좌장치배열, 상판 및 교각의 제원 및 물성치, 상판의 휨강성 및 높이, 상판의, 중립축위치, 기초의 수평 및 휨강성 등의 구조물 파라메타를 고려해야 함

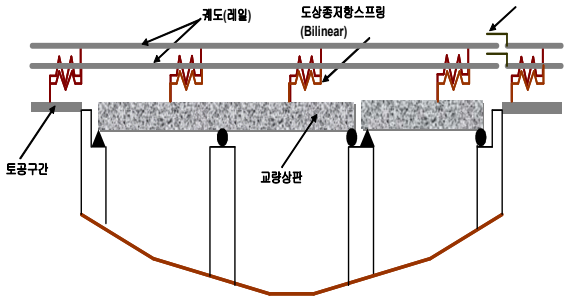


그림 3- 2- 1. 궤도- 교량 상호작용 모델의 구성

- 궤도, 상판 및 교좌장치의 실제 높이에 대한 영향을 고려할 수 있도록 레일과 상판, 상판과 교좌장치의 연결은 높이를 고려한 강체요소(Rigid link)로 모델링 하고, 이때 단순화를 위하여 레일의 높이는 상판 상부면과 일치하는 것으로 간주할 수 있음

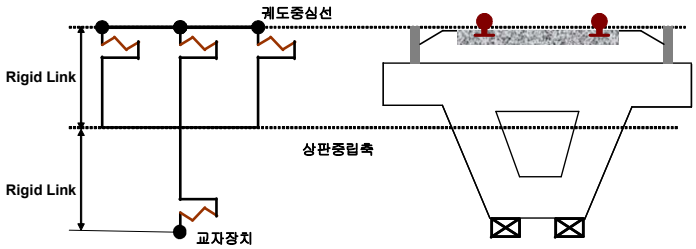


그림 3- 2- 2. 궤도- 교량 상호작용 모델의 구성

- 해석의 정확성을 높이기 위하여 레일과 교량상판을 모델링하는 요소의 최대길이는 2m 이내로 하고, 인접토공구간을 최소 100m이상까지 모형화하여 임의의 경계 설정에 따른 오차를 최소화해야 함
- 레일응력을 평가하고자하는 경우, 교좌장치하부의 강성이 없는 것으로 가정하여 고정경계로 처리 가능

· 수치해석 모델

- 해석대상 교량은 연장 227m, 교폭 10.9m의 복선교로 중앙 5지간은 35m, 양단 2지간은 26.0m로 구성하였으며, 완전일체형으로 가정하였음.

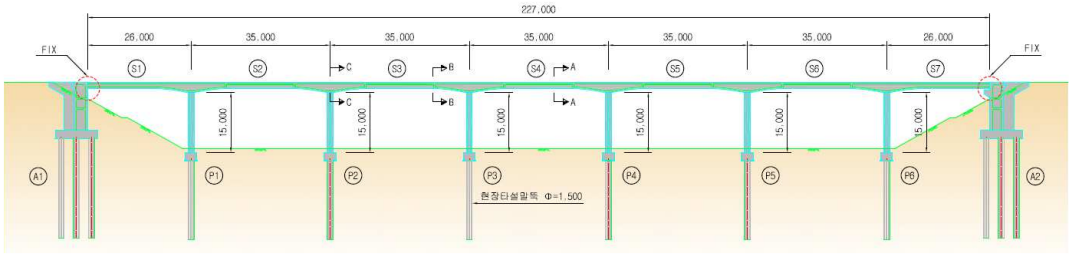
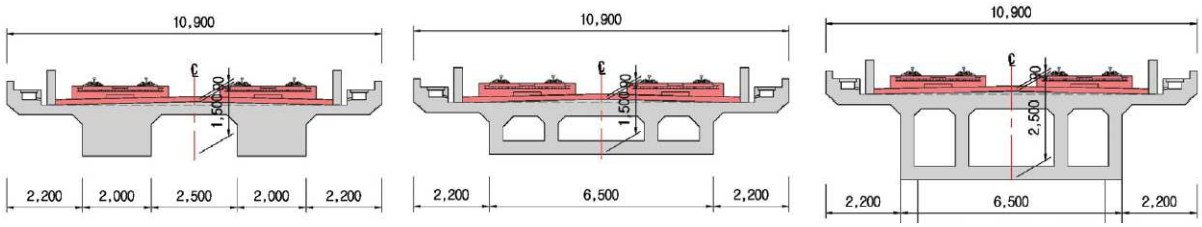


그림 3-2-3. 해석대상 교량

- 하부구조는 양단에 대칭으로 설치된 변위제어 교대와, 그 사이 설치된 6본의 중간 교각으로 구성되며, 철도설계기준에 따라 설계하였음. 상부구조는 총 3가지의 PSC 거더로 구성되어 있으며, 단면제원 및 재료특성은 다음 표들과 같음. 교각의 기초는 ϕ1,500의 현장타설말뚝 3본을 교축직각방향으로 1열 배치하였으며, 변위제어 교대는 다주 가구식으로 말뚝을 배치하여 종방향력에 저항하도록 하였음.



(a) 단면 A-A (b) 단면 B-B (c) 단면 C-C

그림 3-2-4. 해석대상 교량에 대한 단면도

표 3-2-1. 부재 단면특성

부재		A (m^2)	I_y (m^4)	I_z (m^4)	J (m^4)	H (m)
거더	A	8.38	56.16	1.695	2.783	1.5
	B	7.73	48.34	2.076	5.747	1.5
	C	9.33	57.49	7.830	18.05	2.5
교대		15.72	199.60	27.09	76.19	12
교각		9.25	29.57	1.651	4.77	15

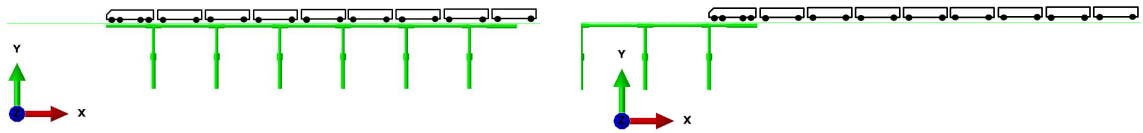
표 3-2-2. 재료적 특성

형식	설계강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)	전단탄성계수 (MPa)	단위중량 (kN/m^3)
상부	40	30,008	12,857	24.5
하부	30	27,537	11,798	24.5

표 3-2-3. 스프링 요소의 강성

Type		K_x (N/m)	K_y (N/m)	한계변위 (mm)	종저항력(궤도당) (kN/m)
궤 도	하중비재하 시	-	61.10E6	0.50	40
	하중재하 시	-	61.10E6	0.50	60
얕은 기초		3.63E+9	3.75E+7	-	-
깊은 기초		4.53E+7	3.31E+8	-	-

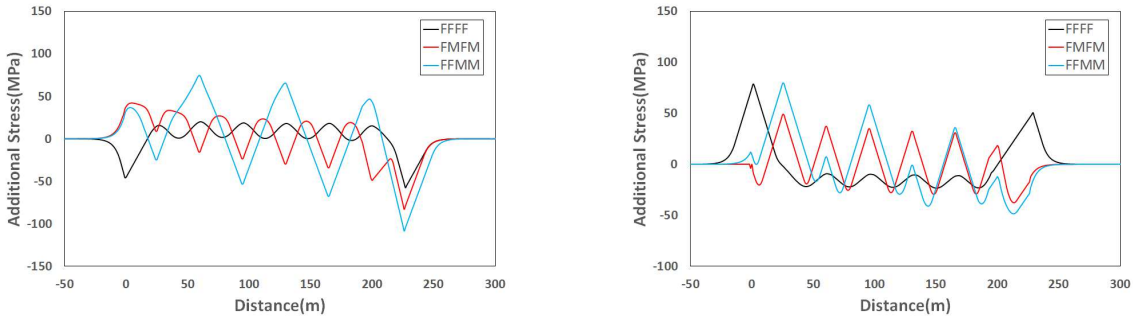
- 레일에서 발생하는 축력의 안전성 검토를 위해 그림 3-2-5과 같이 조합된 하중을 두 개소에 대해 재하하고, 응답을 검토함
- 완전 일체형인 경우(FFFF)와 지점방식이 FMFM, FFMM인 경우 온도하중, 시제동하중 및 열차하중 재하 시 레일부가축응력 및 레일-교량 상대변위를 비교함



(a) 열차수직하중+제동하중 (b) 열차시동하중

그림 3-2-5. 하중 재하 위치별 해석 모델

- 온도 상승 시, 완전일체형(FFFF)인 경우 레일부가압축응력은 최대 58MPa, FMFM방식은 83MPa, FFMM방식은 108MPa이 발생하였으며 지점방식에 따라 30%~46%의 부가응력감소율을 보임
- 온도 하강 시, 완전일체형(FFFF)인 경우 레일부가인장응력은 최대 79MPa, FMFM방식은 49MPa, FFMM방식은 79MPa이 발생하여 부가응력은 감소하지 않았으며, 이는 온도상승 시와 달리 배면토의 기여도가 없어 교대부 강성이 감소하여 발생한 것으로 판단됨. 이러한 점을 감안할 때 온도 하강 시에도 충분한 교대부 강성이 확보되도록 설계가 이뤄져야 함.



(a) 온도 상승(40℃) 시 레일부가압축응력 (b) 온도 하강(-50℃) 시 레일부가인장응력

그림 3-2-6. 지점배치 방식에 따른 하중조합에 의해 발생하는 레일부가응력

- 시제동하중에 의해 발생한 레일-교량 상대변위는 완전일체형(FFFF)인 경우 최대 0.3mm, FMFM방식은 1.5mm, FFMM방식은 2.7mm가 발생하였으며 모두 5mm미만으로 나타남

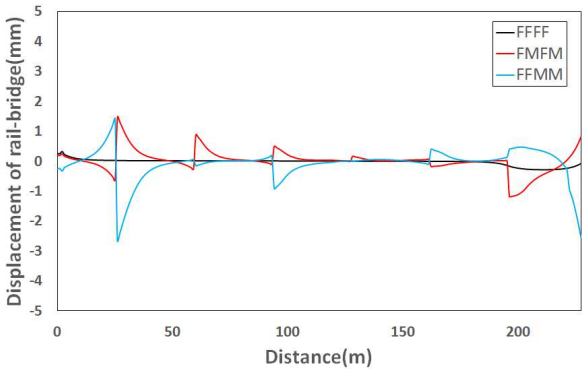


그림 3-2-7. 지점방식에 따른 레일-교량 상대변위

○ 완전일체형 교량시스템의 기본설계

· 완전일체형 교량 시스템 시공단계 및 제작순서 정립

- 완성계 모델에서는 자유단(Roller)인 교대 A2를 시공 단계시 가고정점(Hinge)으로 적용하여 상부 거더 완료시까지 크리프 및 건조수축에 의한 변위를 교대 A2방향으로 유도
- 최종 단계에서는 교대A1을 강결(Fix)시키고 교대 A2를 다시 자유단(Roller)으로 변경하여 공용중 크리프 및 건조수축에 의한 변위를 교대 A1방향으로 유도
- 크리프 및 건조수축에 의한 구조물의 부재력 및 응력을 최소화

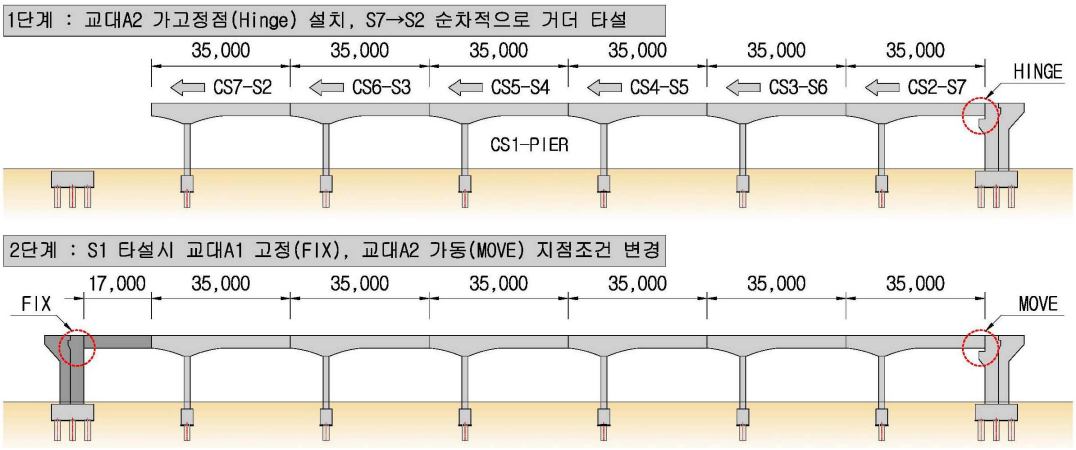


그림 3-3-1. 완전일체형 교량 시스템 시공단계 및 제작순서 개요도

표 3-3-1. 완전일체형 교량 시스템 시공단계 리스트

Steps	Day	First step	Last step	Remarks
CS 1- PIER	100	0	100	기초 및 교각 시공
CS 2- S1~CS 7- S6	120	100	220	교대 A2 가고정점 설치,S7→S2 순차적 타설
CS 8- S1	60	220	280	교대 A1 과 S1 시공, 교대 A2 MOVE로 변경, 최종 긴장 및 2차 고정하중 재하
FINAL	9720	280	10000	사용하중 재하

· 완전일체형 교량 시스템 거동 분석 및 안전성 검토

- 완전일체형 연속교의 기본 설계안은 콘크리트 부재에 작용하는 인장응력을 최소화하고 시공성의 향상을 고려하여 제작단계에 따른 시공단계별 3차원 해석을 수행
- 해석 모델링은 기초의 강성을 적절히 고려하기 위해 현장타설말뚝을 모델링에 반영하였으며, 타설 순서와 양생 시간 등이 반영될 수 있도록 시공단계별 하중 조건을 구성
- 단계별로 거더 타설 및 긴장력 도입에 따른 프리스트레스 도입 시 압축강도 30MPa의 허용압축응력16.5MPa, 허용인장응력 2.739MPa의 만족 여부를 확인하고, 사용하중(열차하중 및 온도하중) 재하시 상부 거더의 무인장화(허용인장응력 0MPa)가 가능하도록 검증

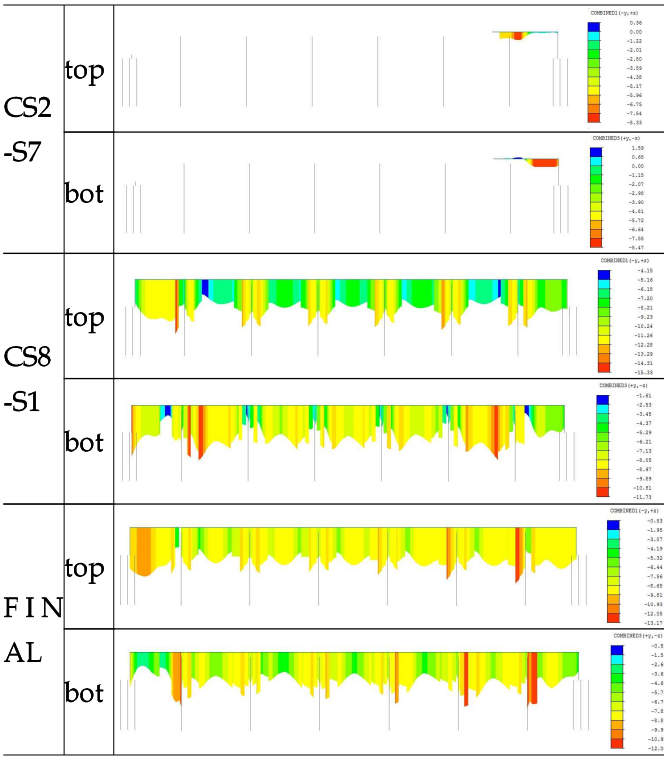


그림 3-3-2. 시공단계별 상부거더 응력 분포 Diagram

표 3-3-2. 시공단계별 상부거더 응력 검토(MPa)

Classifi-cation	top		bottom		검토
	comp.	tensile	comp.	tensile	
CS2- S7	- 8.07	+0.36	- 8.22	+1.48	O.k
CS3- S6	- 10.93	+0.36	- 8.50	+1.24	O.k
CS4- S5	- 10.95	+0.36	- 8.39	+1.28	O.k
CS5- S4	- 10.87	+0.36	- 8.38	+1.30	O.k
CS6- S3	- 10.81	+0.36	- 8.36	+1.31	O.k
CS7- S2	- 10.76	+0.36	- 8.35	+1.32	O.k
CS8- S1	- 15.33	-	- 11.73	-	O.k
FINAL	- 13.17	-	- 12.00	-	O.k

- 상부 거더와 하부 구조가 강결된 라멘 구조는 시간 종속적 응력인 크리프 및 건조 수축에 의해 하부 구조의 수평력 및 전도 모멘트가 크게 발생
- 그림 3-3-3, 그림 3-3-4에서와 같이 크리프 및 건조수축에 의한 시공단계별 하부구조에 나타난 단면력은 CS2-S7~CS7-S2 시공단계와 CS8-S1 시공단계의 단면력 방향이 서로 상반되는 것으로 검토됨
- 이는 지점조건 변경에 의한 영향을 적절히 반영된 것으로써 시공단계별 지점조건의 변경에 의해 하부구조에 발생하는 단면력을 줄일 수 있으므로 이와 같은 효과를 적절히 활용하면 하부구조 소요 단면의 저감이 가능할 것으로 기대됨

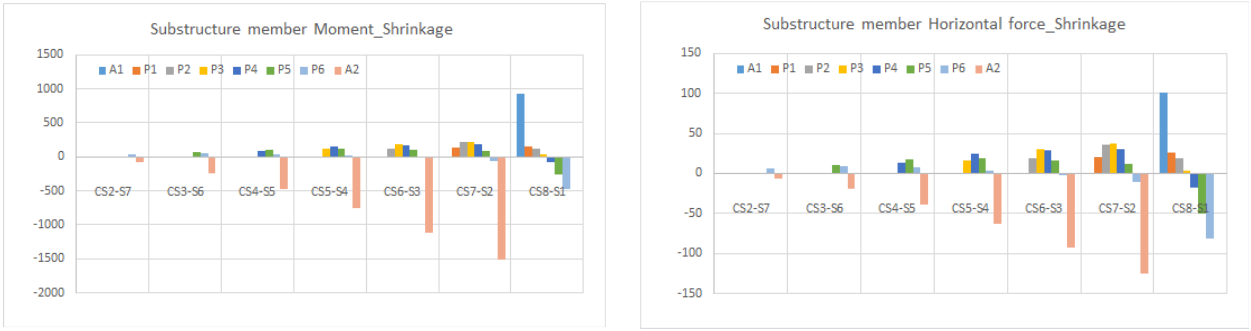


그림 3-3-3. 건조수축에 의한 하부구조 단면력 변화

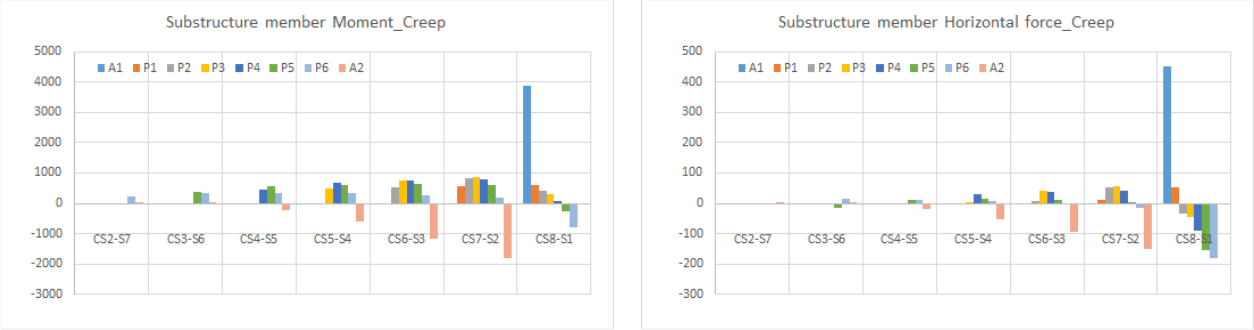


그림 3-3-4.크리프에 의한 하부구조 단면력 변화

○ 지점 조건에 따른 완전 일체형 교량시스템 거동 분석

· 일체형 교량시스템의 기본설계를 바탕으로 교대 1개소에 대해 강결(FIX) 적용(이하 SEMI_일체형 교량시스템)한 교량의 적정 규모, 시공단계 및 제작 단계 정립을 통해 크리프 및 건조축에 의한 구조물 단면력을 최소화, 교량 시스템의 안전성 확보가 가능한 것으로 검토 검증
· 교대 2개소에 대하여 강결(FIX) 적용(이하 FULLY_일체형 교량 시스템)한 교량시스템 구축을 위해 교량 시스템간 거동 차이를 분석
· 연구 대상 FULLY_일체형 교량시스템은 SEMI_일체형 교량시스템의 규모, 제원 등을 동일하게 적용하였으며, 지점 조건의 경우 가고정점을 적용한 교대 A2를 시공 및 사용 중 강결 조건으로 적용하여 검토수행
· 교량 시스템간 거동 분석 결과 그림 3-3-5에서 같이 교대부 변위를 FULLY_완전일체형 교량시스템은 교대부에 SEMI_일체형 교량시스템보다 큰 단면력을 보이는 반면에 교각 단면력은 교량의 중심을 기준으로 단면력 재분배가 효과적으로 일어나 교각의 단면력을 감소하는 효과를 확인



그림 3-3-5. SEMI_일체형과 FULLY_일체형 교량 시스템 하부구조 단면력(kN·m) 비교

· 상부거더의 경우 변위가 제어된 교대의 강성에 의해 시간종속적 응력 및 온도하중에 의해 인장응력이 발생하여 SEMI_일체형 교량 시스템에 비하여 압축응력의 감소 및 일부구간 인장응력이 발생하는 것으로 검토된바, FULLY_일체형 교량 시스템에 대하여 인장응력 저감 기술 및 적정한 단면 개선이 요구됨.

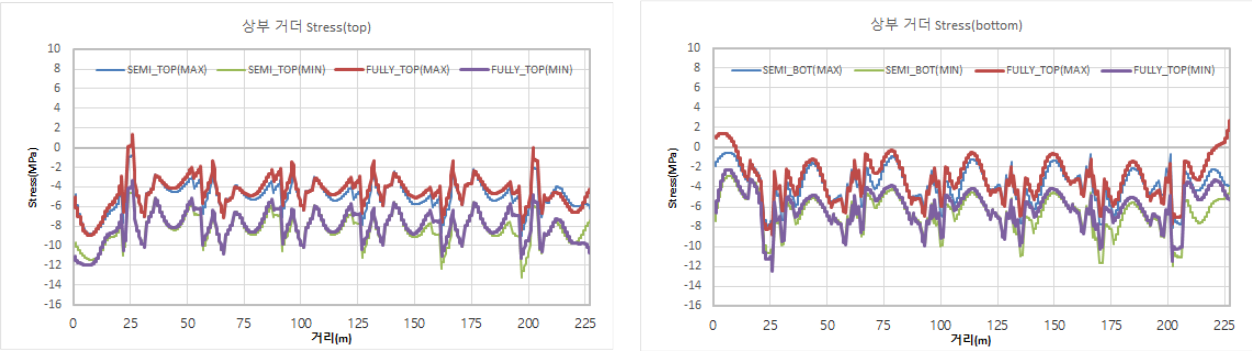
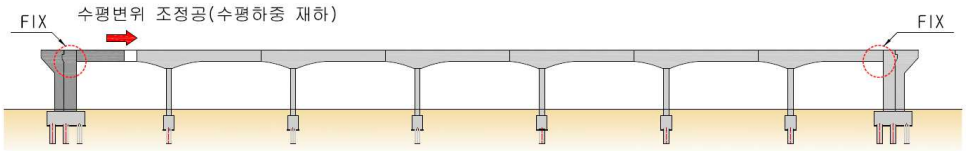


그림 3-3-6. SEMI_일체형과 FULLY_일체형 교량 시스템 상부 거더 Stress(MPa) 비교

○ 수평변위 조정공 효과 분석

· 교량시스템간 거동 분석을 통해 FULLY_일체형 교량시스템의 문제점으로 제기된 교대부 단면력 증가및 상부거더 인장응력 증가에 대한 저감 방안으로 수평변위 조정공을 도입하여 FULLY_일체형 교량 시스템의 거동에 따른 효과를 분석
· 수평변위 조정공은 그림 3-3-7와 같이 교대A1과 상부거더 S1이 강체 연결 전 교대 A2방향으로 수평하중을 재하하여 시간종속적 변위가 유발되는 크리프 및 건조수축에 대하여 선행 변위를 유발함으로써 교량시스템의 단면력 및 인장응력 저감 효과가 기대



구 분	수평하중
INTE_H0	-
INTE_H1000	1,000kN
INTE_H5000	5,000kN
INTE_H10000	10,000kN

그림 3-3-7. 수평변위 조정공 도입 개요도

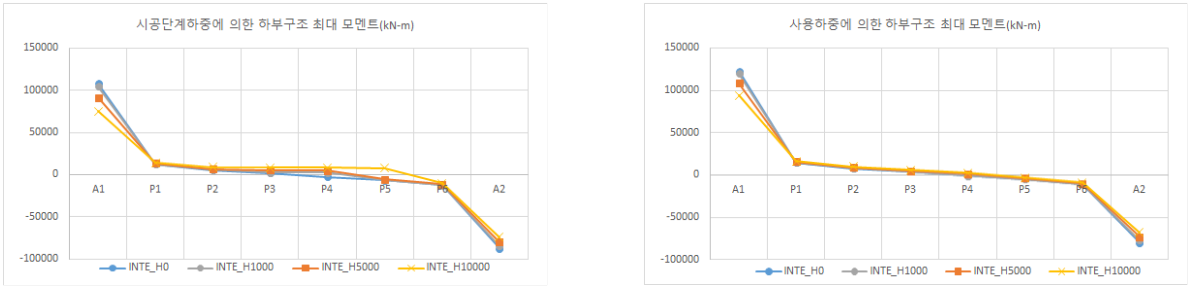


그림 3-3-8. 수평변위 조정공 적용에 따른 하부구조 단면력(kN·m) 비교

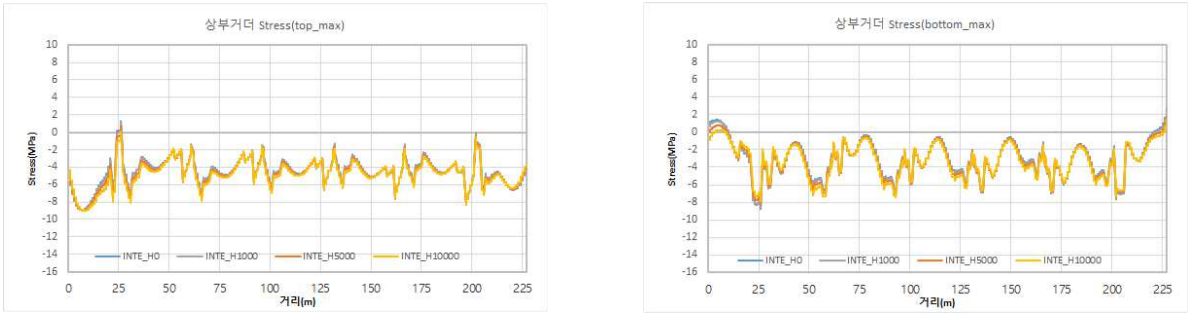


그림 3-3-9. 수평변위 조정공 적용에 따른 상부 거더 Stress(MPa) 비교

○ 크리프 및 건조수축 영향 저감 및 상부구조물과 하부구조물의 일체화 시공방안 검증 실험체 제작

· 수치해석을 통해 도출한 수평변위 조정공 및 지점부 연결 조건에 따른 구조물 거동 영향등을 분석하기 위해 실험 계획을 수립하였으며, 1차년도 내에 시험체 제작 완료 후 2년차도까지 시간 종속적 변위 및 응력 영향을 분석하고자 함.

· 실험체 제작 개요 :

- 검토대상 실험 조건은 수평변위 조정공의 효과 및 상부구조물과 하부구조물 일체화 시공방안을 검증하기 위해 그림 32와 같이 실험체 제작
- 종점측을 고정시킨 500x500 콘크리트 빔 구조 4개소에 대하여 양생 2개월 건조수축 변위 발생 후 2개소 시험체에 대하여 시점부 수평변위 조정공(Jack force)를 도입하여 선행 변위를 유발시킴으로써 이에 따른 시간 종속적 변위 및 응력 영향을 분석
- 수평조정공 도입으로 인한 선행변위 유발 후 시점측 지점조건을 강결 유무(철근콘크리트, 무근콘크리트 타설)에 따른 구조물 거동 분석

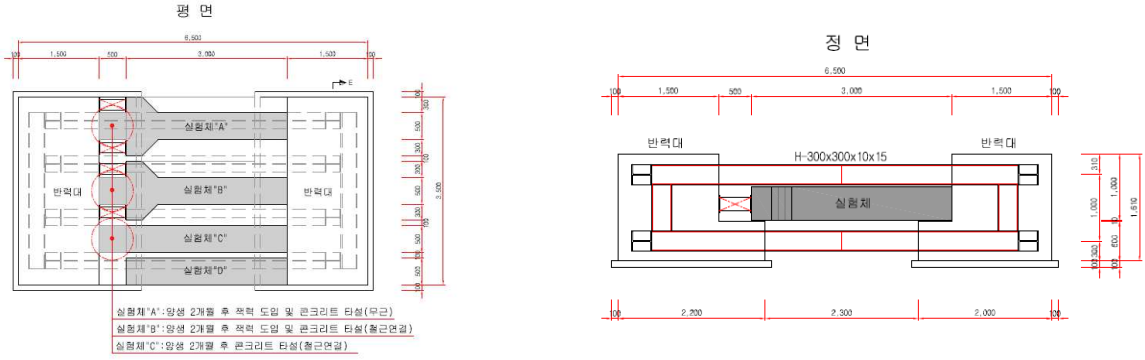


그림 3-3-10. 실험체 제작 일반도

· 실험체별 실험 조건

- 총 4개소의 실험체를 제작하여 각 실험체별 수평변위 조정공(Jack force) 도입 여부 및 연결부 상세에 따른 실험체 변위 및 응력 분석

표 3-3-3. 실험체별 실험 조건

구분	수평변위 조정공 도입 여부	연결부 상세	비고
실험체 "A"	Jack force	무근 콘크리트 연결	양생 2개월 후 Jack force 도입 및 연결부 무근 콘크리트 타설
실험체 "B"	Jack force	철근 콘크리트 연결	양생 2개월 후 Jack force 도입 및 연결부 철근 콘크리트 타설
실험체 "C"	-	철근 콘크리트 연결	양생 2개월 후 연결부 철근 콘크리트 타설
실험체 "D"	-	FREE	실험 완료까지 자유 변위

2. 2차년도 연구수행내용

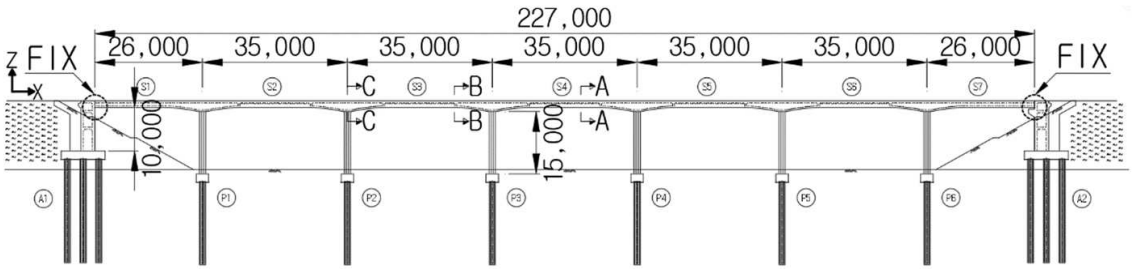
가. 변위제어 교대 및 일체형교량시스템의 구조성능 평가

○ 완전일체형 연속교의 최적설계 구성(안)

· 주요 핵심 구성(그림 3-4-1참조) : 변위제어교대, 슬림형교각, 상부/하부구조 강결 접합부, 수평변위 조정공, 상판-교대 완전일체구조

- 교량 형식 : 7경간 완전일체형 PSC BOX(FSM) 거더교
- 교량지간구성 : L = 26.0 + 5@35.0 + 26.0 = 227.0m, 7경간으로 구성
- 교량 폭원 : B = 10.9m
- 상부구조 : 각 구간의 소요 강성과 형고에 따라 총 4가지 프리스트레스 콘크리트 거더로 구현, 각기 박스형 단면과 충실 단면을 가짐 (그림 3-4-1(b),(c),(d),(e)), SWPC 강연선 배치
- 하부구조 : 양단에 대칭으로 설치된 변위제어 교대와 6개의 중간교각으로 형성 (그림 3-4-1(f), (g))
- 교대단면 : 중공단면으로 설계 → 최적교대 설계안 확립 (그림 3-4-1(g))

· 구조물의 단면특성은 표 3-4-1과 같고, 구성요소별 콘크리트, 강재 재료의 물성치는 표 3-4-2, 표 3-4-3과 같음



(a) 정면도

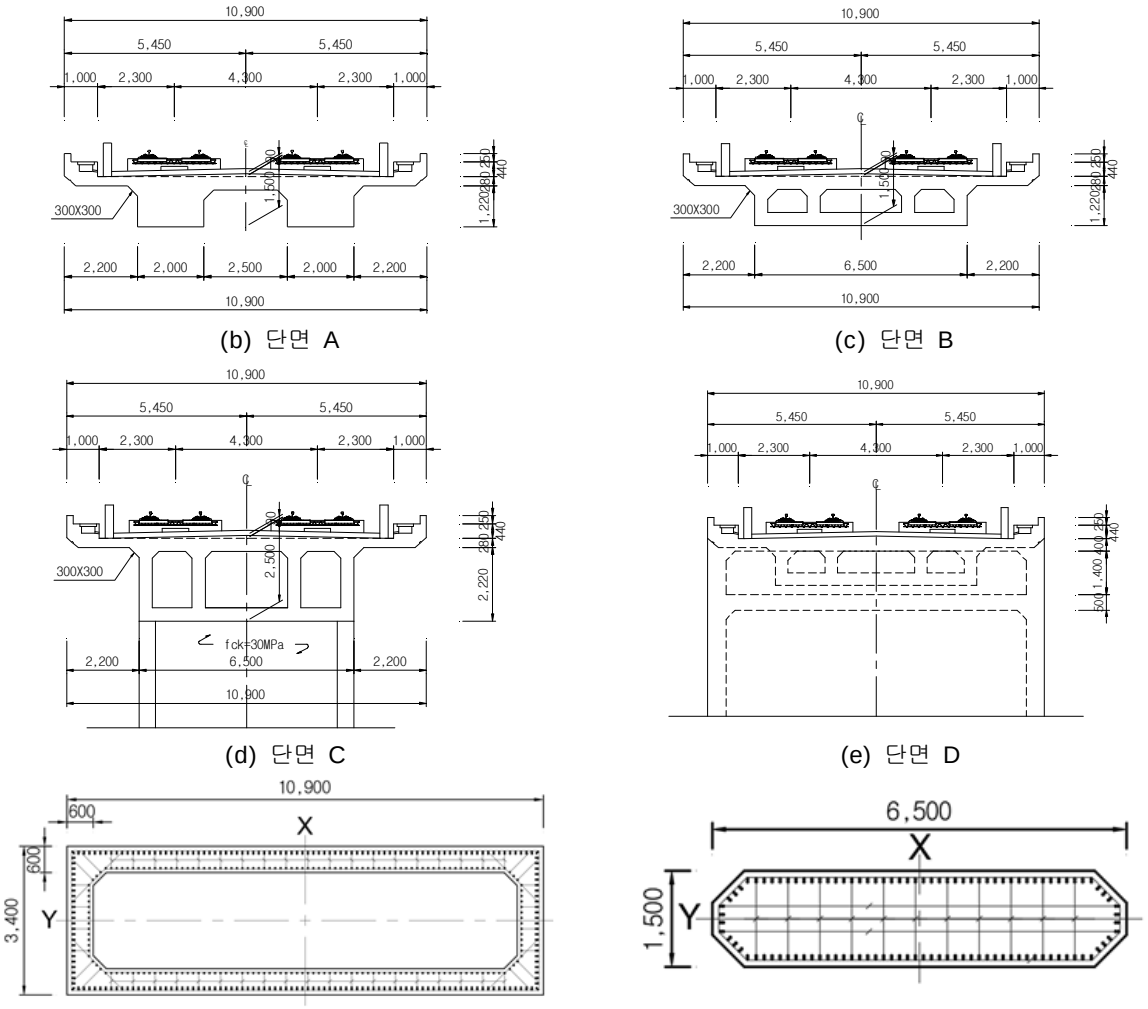


그림 3- 4- 1. 완전 일체형 콘크리트 연속교량 시스템

표 3- 4- 1. 구조물의 단면특성

Member		A (m^2)	I_y (m^4)	I_z (m^4)	J (m^4)	H (m)
거더	A	8.38	56.16	1.695	2.783	1.5
	B	7.73	48.34	2.076	5.747	1.5
	C	9.33	57.49	7.830	18.05	2.5
교대		20.97	31.1	27.09	76.19	12
교각		9.25	29.57	1.651	4.77	15

표 3- 4- 2. 콘크리트의 재료물성

Type	f_{ck} (Mpa)	ε_{co}	E (Mpa)	G (Mpa)	w (kN/m^3)
상부 구조	40	0.002	30008	12857	24.5
하부 구조	30	0.002	27537	11798	24.5

표 3- 4- 3. 강재의 재료물성

	f_y (Mpa)	E_s (Gpa)
철근	400	200
강연선	1600	200

○ 변위제어 교대 일체식 교량의 수평거동 수치해석 모델링 방안

· 변수연구 개요

– 목적 : 지진공학 전용 해석 프로그램인 OpenSees를 활용하여 비선형 정적 Pushover 해석을 수행하여 공급변위, 변위연성도와 같은 내진 성능을 평가하기 위한 수치해석법을 정립 → 지진하중에 의한 교량의 변위를 효율적으로 제어하기 위한 적절한 강성 제안

· 변수해석 모델

- 지진하중에 의한 교축방향에 대해 수행.
- 전문 해석프로그램: 지진공학 전문수치해석 범용프로그램 OpenSees 이용
- 교대의 최적설계안은 Case 4로 그림 3-4-2와 같음
- 교대 강성에 따른 단면제원은 표 3-4-4와 같이 구성
- Case 1~7 : 교대의 콘크리트 단면적을 변수로 수평휨강성(I_y) 증가
- Case 8~12 : 교대의 종방향 철근비를 변수로 수평휨강성(I_y) 증가
- 전체 교량 모델의 구성과 하중조건, 경계조건은 그림 3-4-3과 같음

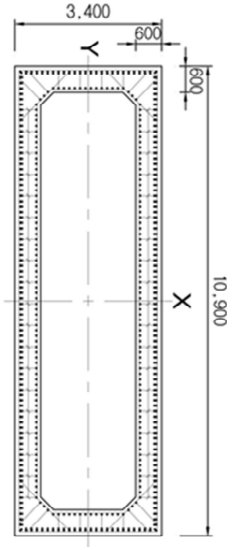


그림 3-4-2. 교대단면도

표 3-4-4. 변위제어 교대의 단면제원

Case	H (m)	A_c (m^2)	A_s (m^2)	ρ	I_y (m^4)
1	1.50	9.25	0.143	0.0152	1.7
2	1.90	14.1	0.292	0.0203	6.8
3	2.40	14.7	0.304	0.0203	12.8
4(Base)	3.40	15.9	0.328	0.0202	31.1
5	3.90	16.5	0.341	0.0202	43.5
6	4.40	17.1	0.353	0.0202	58.3
7	4.90	17.7	0.365	0.0202	75.6
8	3.40	15.9	0.046	0.0029	27.8
9	3.40	15.9	0.186	0.0115	29.3
10	3.40	15.9	0.251	0.0155	31.0
11	3.40	15.9	0.620	0.0375	34.3
12	3.40	15.9	0.868	0.0518	37.3

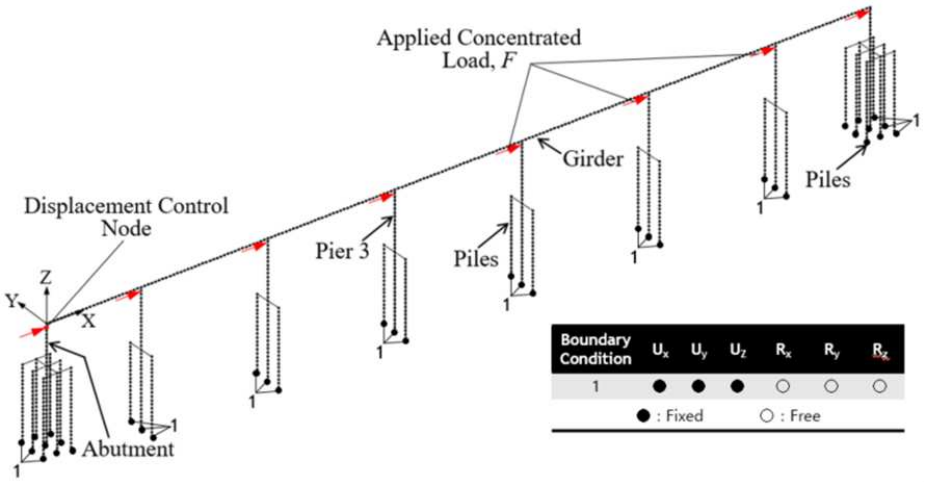


그림 3-4-3. 수치해석 모델 구성 및 하중조건, 경계조건

· 파이버요소 모델링 (Fiber modeling) 수행

- 파이버요소모델링(fiber modeling): 단면내 원재료별 특성과 철근보강에 따른 재료특성의 영향을 각 해당 위치별로 적절히 분할하여 효과적 구현하는 기법
- 거더(단면 B, C)와 변위제어교대, 중간 교각의 소성힌지 발생 예상 구간에 대한 비선형 단계의 거동 모사: 파이버 요소 단면을 적용한 분산소성 모델(Distributed Plasticity Model)을 통해 비선형프레임요소(dispBeamColumn element)를 이용한 모델링 구현 → 실제 보-기둥의 소성 휨거동을 적합하게 모사하여 부재 길이에 따른 비선형 거동의 영향을 정교하게 반영

- 파이버 모델링을 통해 단면을 구성하는 비선형 재료모델을 할당하며, 이와 같은 구현과정에 필요로 하는 거더, 교대, 교각 각각의 파이버 요소 단면 형상은 그림 3-4-4에 나타낸 바와 같음
- 거더-교대 연결부와 거더-교각 연결부 Rigid link로 모델링 → 연결부 소요성능 파악

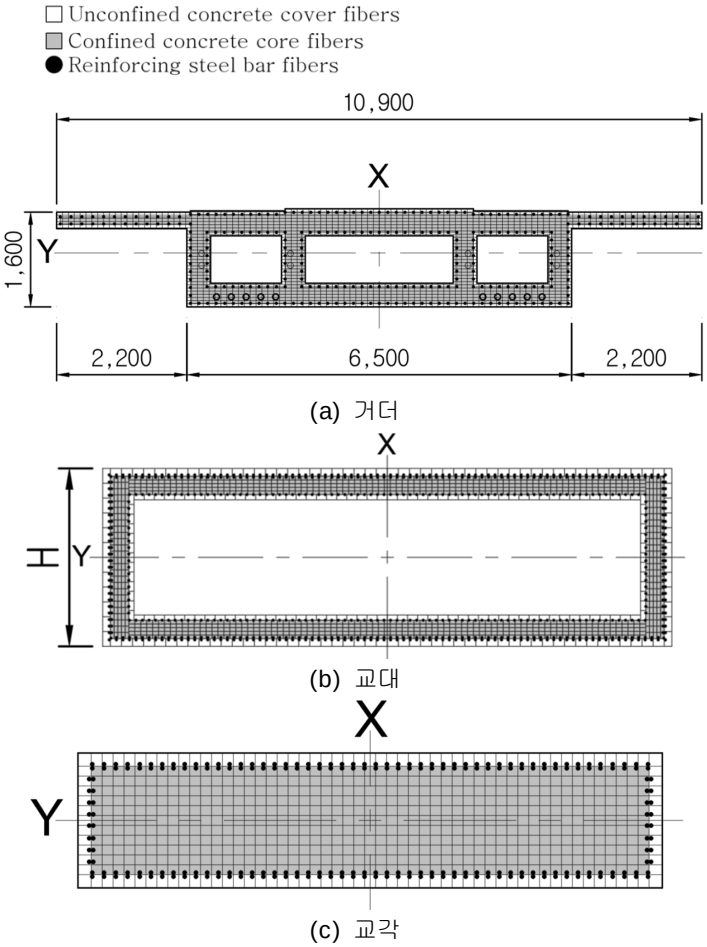


그림 3-4-4. 파이버 요소를 이용한 비선형 재료특성에 따른 단면분할

· 재료특성 모형 정립

1) 콘크리트 모델

- 교대, 교각, 거더 등 주요 철근콘크리트 단면 부재에 적용된 띠철근 및 나선철근과 같은 횡구속철근의 구속 효과를 통해 콘크리트 모델의 압축강도와 연성능력 증가효과 고려
- 비구속 콘크리트 강도, 심부콘크리트를 구속하는 띠철근 간격, 띠철근 강도와 면적, 띠철근을 지지하는 종방향 철근 간격 등에 의해 구속 콘크리트 강도와 연성도 결정
- 파이버 요소를 이용, 횡구속철근의 효과에 따른 단면을 분할하고 합리적으로 반영: 구속 콘크리트 및 비구속 콘크리트로 기본적인 분류
- OpenSees에서 제공하는 Kent-Park의 이론에 의해 구성된 Concrete02 모델 채택 → 교대, 교각, 거더에 적용
- 해석모델에 사용된 콘크리트 재료 물성치는 표 3-4-5와 같음
- 콘크리트 모델의 응력-변형률 관계는 그림 3-4-5(a)와 같음

2) 강재 모델

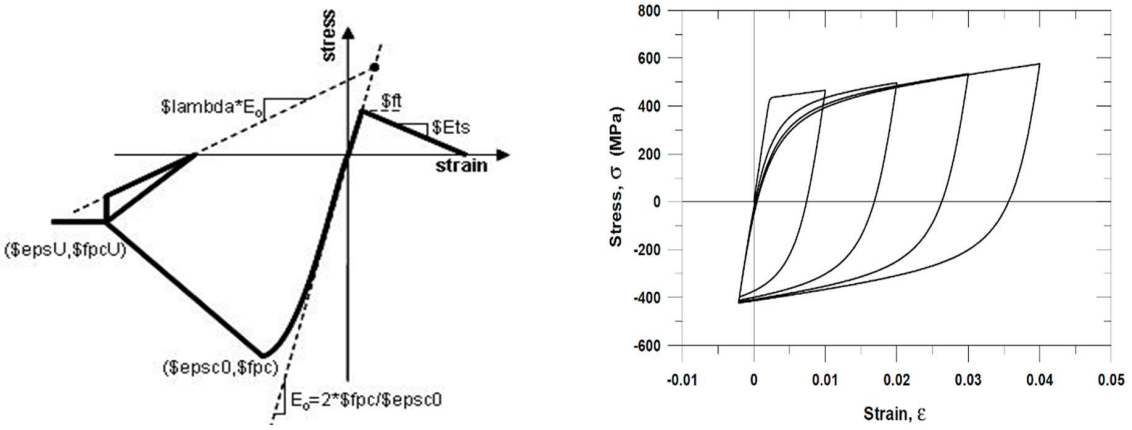
- KDS 14 31 10 강구조설계기준(하중저항계수설계법)에서 제시하는 항복강도 사용
- 완전탄소성 비선형 재료모델 적용: OpenSees에서 제공하는 Steel02 모델 채택
- 해석모델에 사용된 강재 재료 물성치는 표 3-4-6과 같음
- 강재 모델의 응력-변형률 관계는 그림 3-4-5(b)에 제시된 바와 같음

표 3-4-5. 콘크리트의 재료물성

Type	f_{ck} (Mpa)	ε_{co}	f_{pcu} (Mpa)	ε_u	f_t (Mpa)	E_{ts} (GPa)	Remarks
상부 구조	40.0	0.002	8.0	0.005	3.27	1.22	Unconfined
	51.5	0.004	25.0	0.024	3.27	0.55	Confined
하부 구조	30.0	0.002	6.0	0.005	3.27	1.22	Unconfined
	36.0	0.004	23.1	0.024	3.27	0.55	Confined

표 3-4-6. 강재의 재료물성

	F_y (Mpa)	E_s (GPa)	b	R_0	C_{R1}	C_{R2}
철근	400	200	0.01	18	0.925	0.15



(a) 콘크리트 (b) 강재

그림 3-4-5. 재료 응력-변형률 곡선

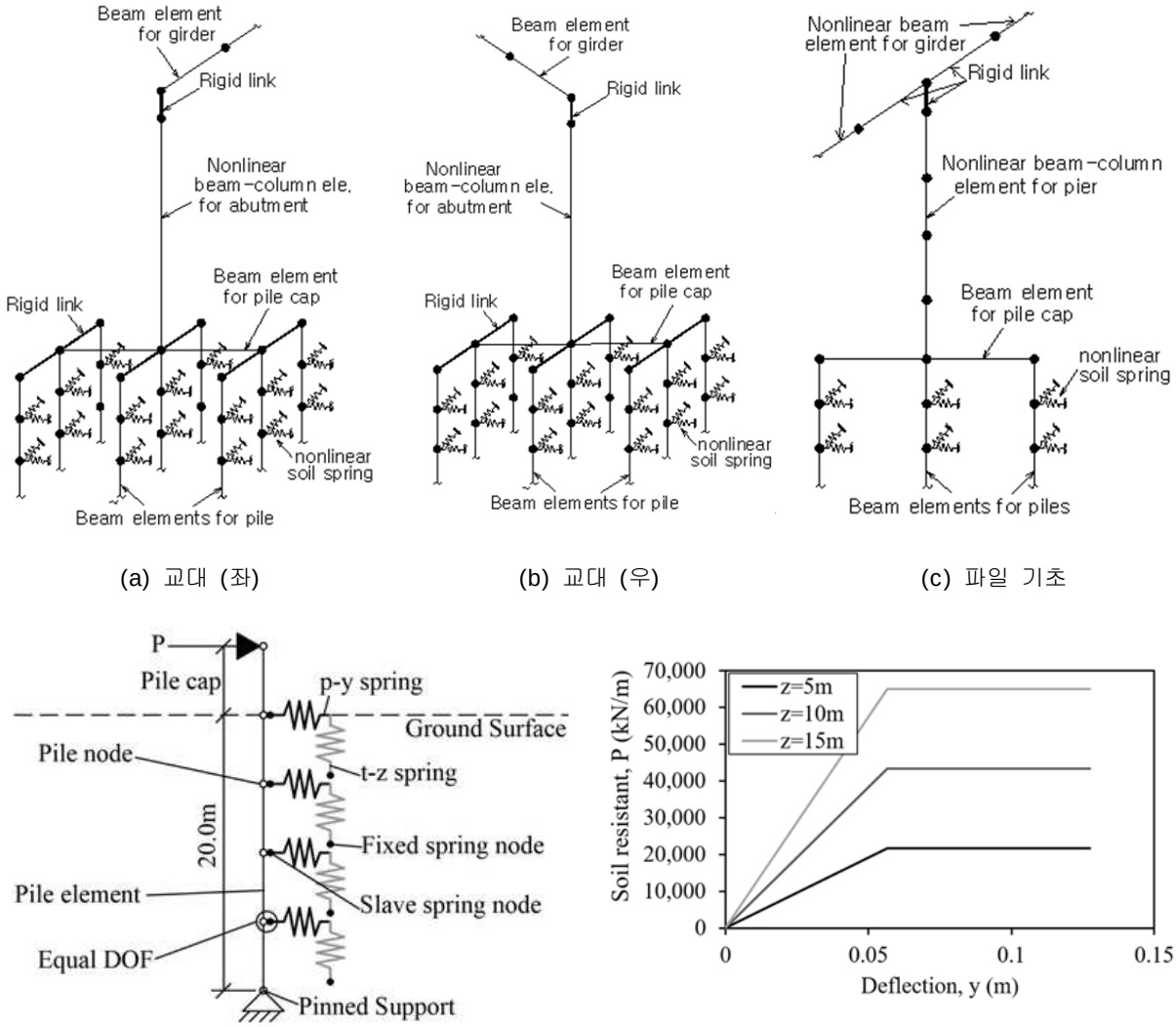
· 지반-구조물 상호작용 모델링

- 지진해석에서 지반-구조물 상호작용은 교량 시스템의 응답에 큰 영향을 미침
- 말뚝은 파일캡 아래 20m 연장으로 구성. 선형 탄성 요소로 모델링 하였으며 경계조건은 힌지로 설정.
- 지반-구조물 모델 구성은 그림 3-4-6(a),(b),(c)와 같음
- 그림 3-4-6(d)는 기초 지반의 p-y와 t-z 비선형 스프링 요소를 나타냄.
- Opensees의 p-y 지반 스프링 모델은 기초 지반의 횡 방향 저항을 나타내고, t-z 지반 스프링 모델은 수직으로 움직일 때 말뚝에 작용하는 마찰을 나타냄 → 지반에 요구되는 극한 성능은 Reese et al.(1974)의 제안식을 통해 결정됨.
- 지반 기초상단에 요구되는 전단력은 API에서 제안된 방정식을 통해 산정.
- 변위제어 교대는 교대 뒷채움재의 지지효과 없이 횡방향 하중을 지지한다고 보수적으로 가정

○ 변위제어 교대 일체식 교량 해석방법

· 푸쉬오버 비선형 해석법(Pushover Nonlinear Analysis)

- 전체 교량의 내진성능은 교량의 소성힌지가 발생하였을 때의 변위 및 변위 연성도에 의해 평가 → 하중-변위 곡선을 통해 산정.
- Pushover 해석은 비선형 정적 해석법으로 구조물이 항복한 이후의 동적 거동과 하중의 재분배를 고려한 시스템의 안정한계상태를 효과적으로 파악할 수 있는 실용적인 해석방법.



(a) 교대 (좌) (b) 교대 (우) (c) 파일 기초

(d) 지반- 말뚝 상호작용 (e) p- y 곡선

그림 3- 4- 6. 지반- 스프링 모형

- 구조물이 극한상태에 이를 때까지 구조물 최상단에 횡방향 하중을 재하하여 교각의 휨성능 평가
- Pushover 해석은 일정한 방향에서 단조증가(Monotonic) 형태의 하중을 이용 → 구조물의 응답 상태를 제어방식에 따라 하중제어와 변위제어 방식으로 구분.
- 하중제어는 구조물에서 발생하는 내력한계를 미리 가정하고 하중증분법을 이용하여 하중과 변위 관계를 파악.
- 변위제어는 구조물에서 예상되는 목표변위를 가정하고 설정된 목표변위를 달성할 수 있도록 단계별 변위를 제어함으로서 하중과 변위 관계에 대한 거동을 파악.
- Pushover 해석 분석단계
  ① 변위제어 교대의 모멘트-곡률(M-Φ)해석을 수행하여 각 단면의 비선형거동 특성을 산정.
  ② Pushover 해석은 변위제어(displacement control) 방식을 채택 → 교각상부의 수평변위를 점진적으로 늘려가며 수행함 : 교량이 붕괴될 때까지 해석이 진행됨을 의미.
  ③ 해석결과를 통해 변위제어 교대의 하중-변위곡선이 산정됨 → 교량에 작용하는 하중은 밑면전단력과 전체 교량 시스템의 상부에서 발생하는 최대변위를 통해 얻을 수 있음.
  ④ 교량의 연성능력과 공급변위는 공급변위 연성도 산정식(식 3-4-3)를 적용하여 하중-변위곡선을 통해 산정 → 극한 전단강도와 극한 휨강도는 해석 결과로부터 소성힌지 형성 이후 교량에서의 붕괴와 극한 상태를 통해 결정되는 공급변위, Δ_c에 상응하는 값

· 다중모드 스펙트럼해석 (Multi-Spectrum Analysis, MSA)

- 정밀한 해석이 요구되는 경우 다중모드 스펙트럼 해석법 실행 → 여러 개의 진동모드를 사용하는 스펙트럼 구조해석법으로 내진설계를 위한 기본적인 해석법
- 교량의 모델링은 구조물의 강성과 관성효과를 설계에 근접하게 하기 위해 3차원 공간뼈대구조물로 모델링하여 선형 동적해석 수행 → 각 모드의 복합연계효과 및 최종응답의 기여도를 결정하기 위함.
- 교량 모델링은 각 연결부와 절점이 6개의 자유도를 가진 3차원 공간뼈대 구조물로써 모형화하였으며, 각 부재별로 명시된 질량을 고려하여 관성효과를 포함.
- 응답해석 시 고려되는 모드 수는 총 30개이며, 부재의 단면력과 변위는 개별모드로부터 각각의 응답에 90% 이상의 질량 참여율을 확보.
- 현행 내진설계기준(KDS 2016)과 Caltrans(2013), AASHTO (2010)에서 규정된 기준에 근거하여 다중모드스펙트럼 해석을 통해 프로토타입 설계안에 요구되는 설계 지진 하중을 산정.
- 지진응답 분석 시 유한요소모형에 정적지진하중을 교축방향으로 적용

표 3- 4- 7. 다중모드스펙트럼 해석 위한 등가지진하중

구 분	기준 공식	
탄성응답지진계수(C_{sm})	$C_{sm} = S_{D1}/T_m$	A : 가속도계수 (재현주기 1000년 0.154) S_{D1} : 지반특성계수 (지반종류Ⅱ : 1.2)
교량의 주기(T)	$T=2\pi\sqrt{\frac{\gamma}{p_o g\alpha}}$	p_o : 단위 등분포 하중 α : 설계 상수 $\left(\alpha=\int v_s(x)dx\right)$
등가적정지진하중(p_e)	$p_e=\frac{\beta C_s}{\gamma}w(x)v_s(x)$	$v_s(x)$: 단위등분포하중 재하 시 변위량 $w(x)$: 단위길이당 고정하중 β : 설계 상수$\left(\beta=\int w(x)v_s(x)dx\right)$ γ : 설계 상수 $\left(\gamma=\int w(x)v_s(x)^2dx\right)$

○ 설계 요구조건

- 다중모드 스펙트럼 해석을 통해 작용 하중(F_H)의 범위 결정: 설계 지진하중에 해당하는 작용하중 적용 → 국내 설계기준 공식을 통해 계산된 등가 정적 지진하중(p_e)에 추가적으로 바닥판과 교량부속장치인 방호벽, 교량난간 등과 같은 사하중을 더한 값
- 본 연구에서는 변위를 효율적으로 제어하기 위한 변위제어 교대 수평 휨강성의 적정 요구수준을 산정하기 위해 설계 지진하중인 보다 작은 20,000kN부터 최대 125,000kN의 종방향 하중을 적용
- 표 3-4-8은 다중모드 스펙트럼 해석을 통해 결정된 최적설계안의 수평변위, 밑면전단력 및 전도모멘트 등 소요역량을 나타냄

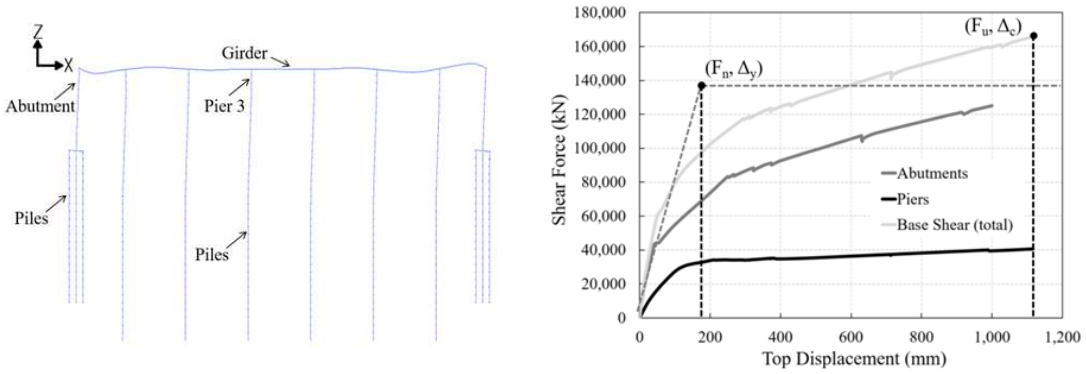
표 3- 4- 8. 교량 내진성능의 소요역량 (전체 일체식 교량)

수평변위 (mm)	밑면전단력 (kN)	전도모멘트 (kN- m)
10.1	39,487	364,083

○ 최적설계안의 Pushover 해석 결과

- Pushover 해석을 수행한 결과, 최종 하중 단계에서의 종방향 거동 형상은 그림 3-4-7(a), Pushover 응답은 그림 3-4-7(b)와 같음.
- 변위제어 교대와 교각으로 구성된 전체 프레임이 지진하중에 저항하며, 변위제어 교대와 교각의 종방향 거동은 서로 유사한 경향을 보임

- 중간교각이 항복점을 초과한 후에도 전체 기울기가 증가하는 경향을 보임.
- 전체 공급변위가 변위제어 교대의 강성에 의해 지배적으로 영향을 받고, 전체 밑면 전단력의 대부분이 적절한 강성을 가진 변위제어 교대에 의해 지지됨



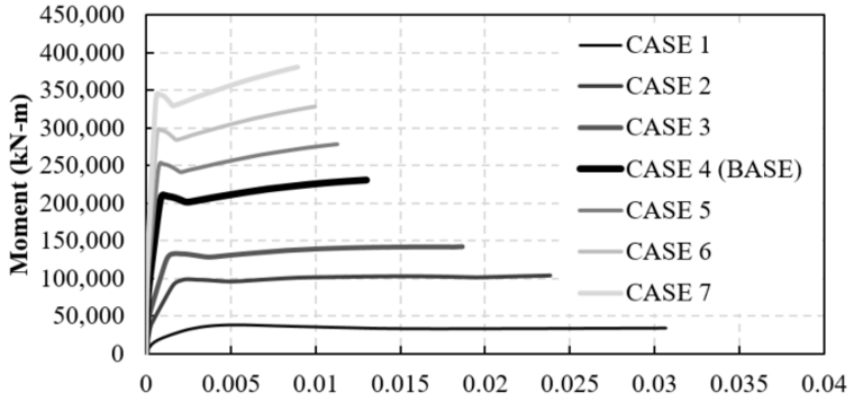
(a) 교량의 거동 형상 (b) 하중- 변위 곡선

그림 3- 4- 7. 최적설계안의 종방향 Pushover 응답

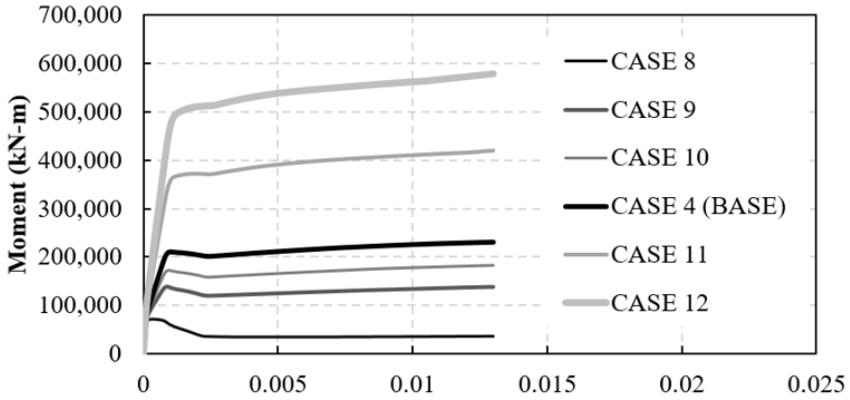
○ 변수해석 결과

· 모멘트–곡률 해석 결과

- 변위제어 교대의 강성에 따른 변수해석 결과, 모멘트 곡률 관계는 그림 3–4–8과 표 3–4–9와 같음.



(a) 교대 단면적에 따른 해석 결과



(b) 보강철근비에 따른 해석 결과

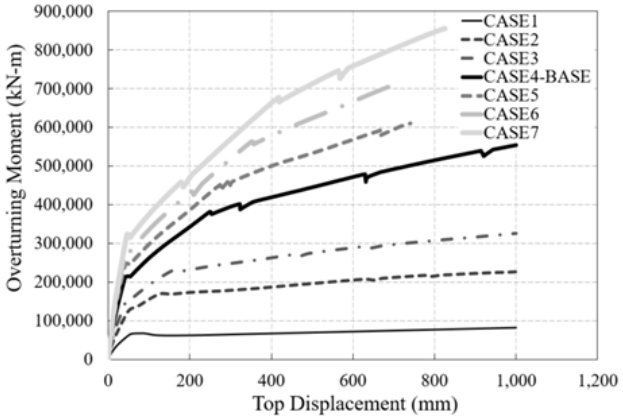
그림 3- 4- 8. 모멘트- 곡률 곡선

표 3-4-9. 모멘트-곡률 해석 결과

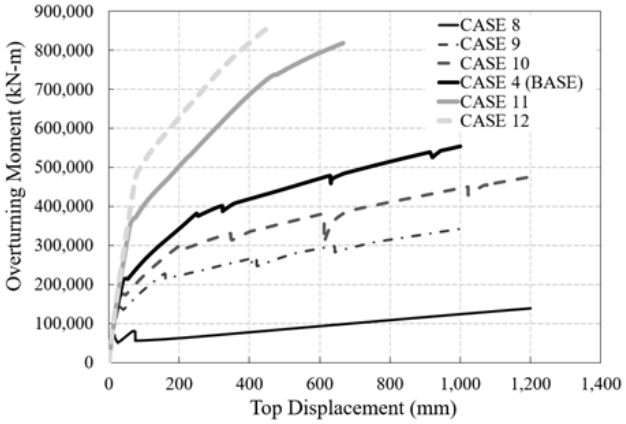
Case	항복 곡률 (Φ_y, mm)	항복 휨모멘트 (M_y, kN-m)	극한 곡률 (Φ_u, mm)	극한 휨모멘트 (M_u, kN-m)
1	0.0053	38,117	0.0307	33,842
2	0.0025	98,796	0.0238	103,788
3	0.0018	132,950	0.0187	142,224
4	0.0010	210,809	0.0130	230,765
5	0.0009	253,614	0.0113	278,440
6	0.0008	298,657	0.0100	328,488
7	0.0007	345,884	0.0089	381,020
8	0.0004	71,513	0.0130	36,364
9	0.0004	103,981	0.0130	138,356
10	0.0004	117,901	0.0130	182,824
11	0.0004	188,418	0.0130	420,042
12	0.0004	231,349	0.0130	578,686

· Pushover 해석 결과

- 전체 변수 범위 내에서 비선형 연성 거동을 하며 교대 강성이 증가할수록 전체 교량의 대표적인 내진성능인 전도모멘트가 이에 비례하여 증가하는 경향을 보임 (그림 3-4-9) → 교대 강성이 증가할수록 극한상태 전도모멘트 증가
- 교대 강성이 가장 작은 Case 1과 최적설계안(Case 4)의 비교 결과 교량의 극한상태 전도모멘트는 약 6.7배 증가함.



(a) 교대 단면적에 따른 해석 결과



(b) 보강철근비에 따른 해석 결과

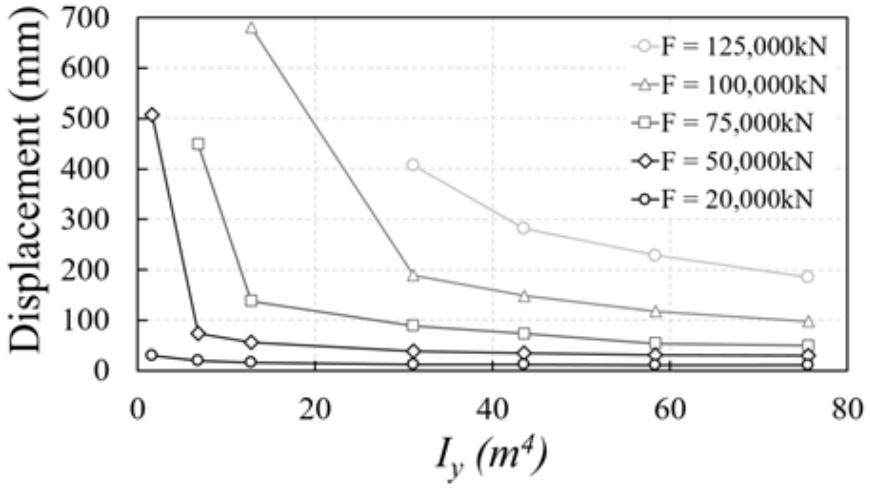
그림 3-4-9. 전도모멘트-변위 곡선

- 그림 3-4-10과 표 3-4-10은 수평 작용하중(F_H)와 교각 상부 변위의 관계를 나타냄.
- 종방향 변위가 교대 강성에 따라 급격히 감소하는 경향을 보이며 일정 강성에서 수렴하는 경향을 보임
- 일례로써, 지진하중 작용 시, 교대 강성에 따라 교량의 상대 변위가 급격하게 감소하는 경향을 보이다가 교대 수평 휨강성이 $30m^4$ 에서 수렴구간을 형성
- 지진하중이 작용할 때, 수렴전/후 교량의 교축변위(수평변위) 비율은 다음과 같음

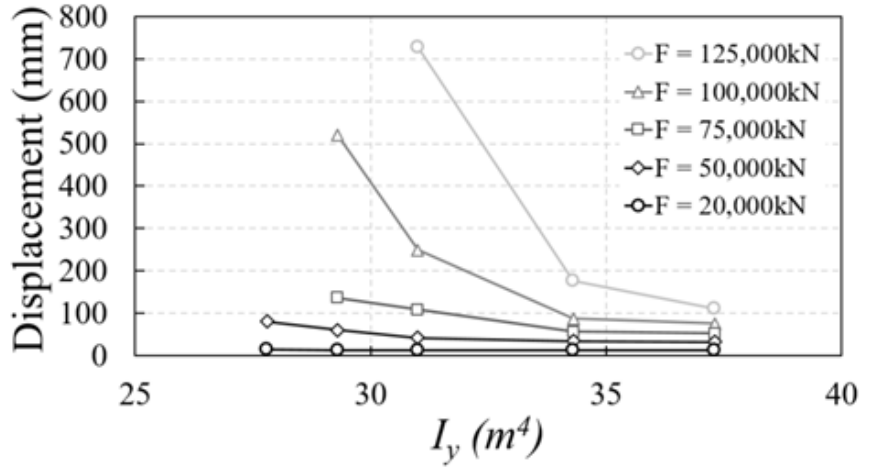
$$\frac{\Delta_2}{\Delta_1} = \frac{189}{680.4} = 0.3 < 1$$

여기서, Δ_1: 수렴 전 교축방향 변위
Δ_2 : 수렴 후 교축방향 변위

- 교대가 충분한 강성을 유지한다면 교량 전체의 종방향 변위가 효과적으로 제어될 수 있음을 의미 → 변위를 효율적으로 제어하는 교대의 요구 휨강성 추정.
- 변위제어 교대의 수평휨강성(I_y)이 증가함에 따라, 중각 교각에서 발생하는 단면모멘트는 감소하는 경향을 보임(그림 3-4-11, 표 3-4-11) → 적절한 교대 강성 선정 시 중간교각의 슬림한 설계 가능



(a) 교대 단면적에 따른 해석 결과



(b) 보강철근비에 따른 해석 결과

그림 3-4-10. 하부구조물의 종방향 변위 해석 결과

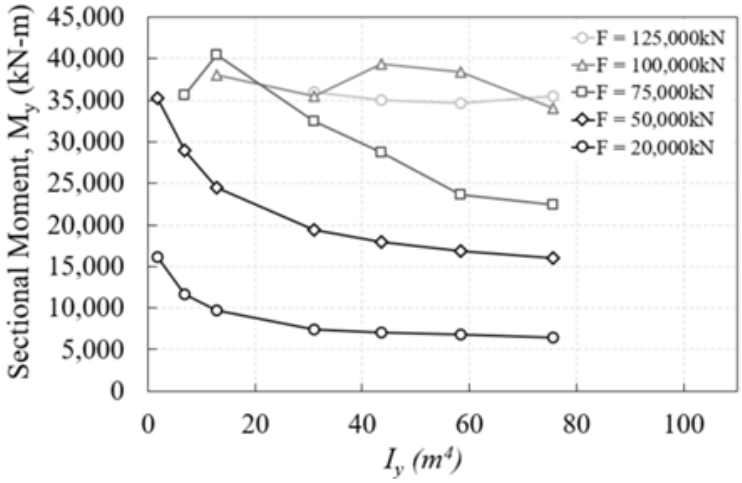


그림 3-4-11. 교대강성에 따른 하부구조물(교각3)의 단면모멘트(M_y) 변화

- 교대의 수평휨강성(I_y)과 교각의 수평변위(Displacement) 관계는 다음 식 3-4-1과 같음

$$Displacement = 451 I_y^{-0.69} \quad \text{(식 3-4-1)}$$

- 교대의 수평휨강성(I_y) 증가에 따라 지진하중에 의해 발생되는 교각의 수평변위가 통계적으로 명확히 제어되고 있음을 의미하며, 해석적으로 분석된 거동특성 결과 회귀분석 결과 통계적 유의미성 확인
- 회귀 분석 :

회귀방정식

Displacement = −37.4 + 1.61 Trend Formula

예측 변수	계수	SE계수	T	P
상수	- 37.45	23.76	- 1.58	0.176
Trend Formula	1.6079	0.1768	9.09	0.000

모형요약

S = 45.9224 R-제곱 = 94.3% R-제곱(수정) = 93.2%

분산 분석

출처	DF	SS	MS	F	P
회귀	1	174439	174439	82.72	0.000
잔차 오차	5	10544	2109		
총계	6	184983			

표 3-4-10. 작용하중(F_H)에 따른 해석모델의 수평변위

Case	20,000kN	50,000kN	75,000kN	100,000kN	125,000kN
1	30.1	506.7	-	-	-
2	20.0	73.6	448.8	-	-
3	16.4	55.9	138.0	680.4	-
4	12.2	39.0	89.2	189.0	407.1
5	11.7	34.7	73.3	148.6	281.3
6	11.1	31.5	53.7	118.0	228.3
7	10.6	29.4	49.4	97.6	185.5
8	13.9	80.9	-	-	-
9	12.7	60.8	136.9	520.4	-
10	12.4	41.8	108.5	249.3	726.8
11	12.1	34.3	56.1	87.4	175.9
12	11.9	32.4	52.7	75.7	110.3

표 3- 4- 11. 작용하중(F_H)에 따른 해석 모델의 중간교각 위치에서의 모멘트(M_y)

Case	20,000kN	50,000kN	75,000kN	100,000kN	125,000kN
1	16,107.5	35,280.5	-	-	-
2	11,664.3	28,927.0	35,576.0	-	-
3	9,739.3	24,457.6	40,430.8	38,024.7	-
4	7,369.4	19,450.3	32,508.6	35,514.7	35,948.5
5	7,086.3	17,976.6	28,691.6	39,306.4	35,009.9
6	6,776.7	16,805.1	23,612.0	38,356.4	34,680.3
7	6,446.5	15,977.6	22,404.1	34,002.2	35,459.0
8	8,337.4	30,352.5	-	-	-
9	7,676.8	25,649.4	40,571.3	36,534.5	-
10	7,482.4	20,339.2	36,795.0	34,695.5	38,801.1
11	7,320.6	17,828.2	24,321.4	31,781.8	35,910.7
12	7,194.8	17,171.7	23,369.4	29,049.3	36,647.3

- 지진 등 수평하중에 의한 상부구조에 발생하는 응력 제어 특성을 살펴봄.
- 거더의 수평휨강성(I_y)이 증가함에 따라 거더와 교각에 발생하는 단면모멘트는 감소하는 경향을 보임(표 3-4-12).
- 일례로, 최적설계안(Case 4)와 Case 5의 상부구조에서 발생하는 휨응력비(σ_1, σ_2)를 구하면 다음과 같음.

$$\frac{\sigma_2}{\sigma_1}=\frac{M_2}{M_1}=\frac{14,481.5}{14,890.4}=0.97<1$$

여기서, M_2 : 최적설계안(Case 4)에서의 휨모멘트

M_1 : Case 5에서의 휨모멘트

표 3- 4- 12. 등가지진하중일 때의 상부공(거더)과 교각의 단면모멘트

Case	Iy	Moment(kN- m)	
		Pier	Girder
3	12.8	38,024.7	14,009.3
4	31.1	35,514.7	14,890.4
5	43.5	39,306.4	14,481.5
6	58.3	38,356.4	11,638.1
7	75.6	34,002.2	9,137.9

나. 완전일체형 교량시스템의 설계기준/지침 정립

(1) 일체식 교량의 내진성능 평가

○ 전체 교량 시스템의 내진성능 평가 기준

- 내진성능은 전체 구조시스템의 내진성능은 전체 변위 기준 및 변위 연성도 요구조건을 충족해야하며, 교량의 설계지진하중으로 인한 전체 변위기준(식 3-4-2)을 만족 해야함(Caltrans 2013).

$$\Delta_D < \Delta_C \qquad \text{(식 3-4-2)}$$

여기서, Δ_D : 지진하중에 의해 산정된 소요변위

Δ_C : 교량의 소성힌지에 의해 극한공급역량에 도달했을 때의 전체 프레임의 공급변위

- 교량의 모든 연성 부재는 변위연성도 요구조건을 만족 시켜야함 → 전체프레임은 상부와 하부구조물이 강결된 일체식 교량의 특징에 의해 하나의 연성부재에 해당하므로 식 3-4-3에 정의된 공급 변위 변성도(μ_c)를 만족시켜야함

$$\mu_c = \frac{\Delta_C}{\Delta_y} \qquad \text{(식 3-4-3)}$$

여기서, Δ_y : 소성힌지가 형성될 때 발생하는 전체교량시스템의 항복변위

- 극한 전단강도(F_y)와 극한 휨강도(M_u)는 교량의 극한상태의 재료의 강도를 기반으로 함.
- 교각의 항복 및 극한상태에서의 변위는 비선형해석 또는 단면해석을 통하여 계산하는 것을 원칙으로 함 → 일체식 교량의 소성 모멘트는 완전 탄소성 응답으로 모멘트-곡률 곡선을 통해 추정, 공급변위($\triangle_C$)는 극한 전단강도(F_u)와 극한 휨강도(M_u)에 상응하는 값으로 정의함(그림 3-4-13)

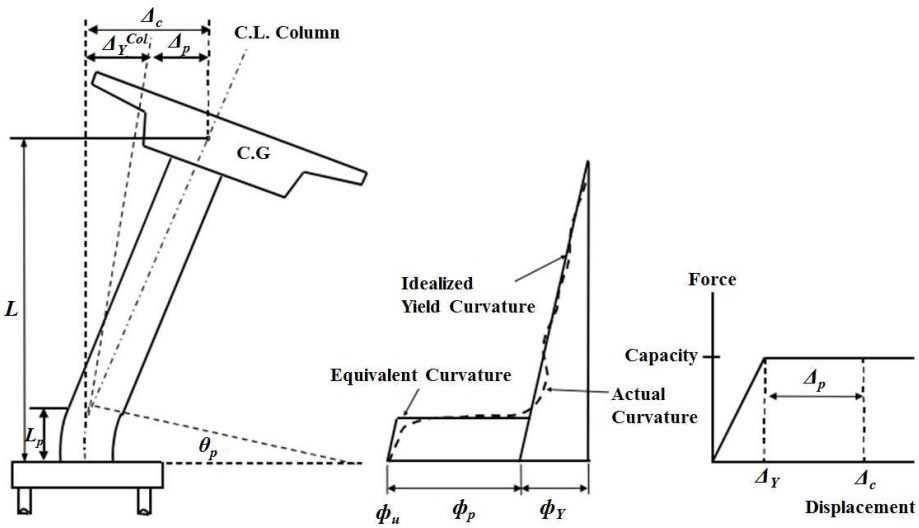


그림 3-4-12. 교각의 변형 및 곡률분포

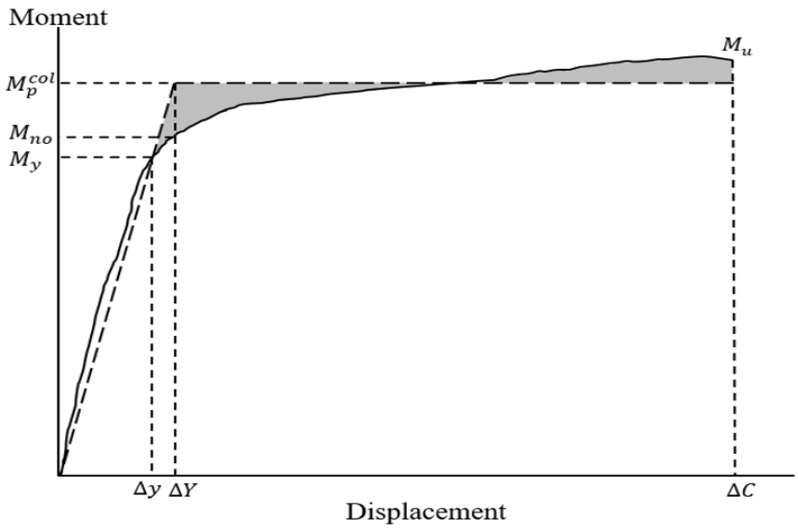


그림 3-4-13. 모멘트-변위 곡선

- 전체 교량 프레임을 포함한 각 부재는 부재의 소요변위와 관계없이 식 3-4-4에서 정의된 최소 공급변위 연성도를 만족 시켜야함 → 소성힌지영역에서 최소 회전 공급역량을 확보하기 위함

$$\mu_c \leq 3.0 \qquad \text{(식 3-4-4)}$$

○ 완전일체형 교량 시스템의 내진성능평가

- 교대 수평 휨강성(I_y)에 따른 변수 해석적 검토 → 지진에 의한 수평 변위제어를 위한 최소 요구 강성 및 최적 설계 방안 제시
- 극한 전단강도와 휨강도는 교대 강성에 따라 증가하는 경향을 보임 → 교대 수평휨강성에 따라 교량의 내진성능 향상(표 3-4-13)
- 교량 시스템의 파괴강도 저항성능 증가에 따른 연성도는 저감 없이 유사한 수준을 유지 → 최소 공급변위연성도인 3.0 만족(표 3-4-13)

표 3-4-13. 교량의 내진성능

Case	공급변위 (Δ_c, mm)	공급변위 연성도 (μ_c)	극한 전단강도 (F_u, kN)	극한 휨강도 (M_u, kN-m)
1	1,000.0	5.73	8,193	81,930
2	1,000.0	5.80	22,653	226,528
3	1,000.0	5.88	32,589	325,894
4 (base)	1,000.0	6.36	55,404	554,038
5	741.0	5.02	61,021	610,207
6	696.5	5.08	70,749	707,486
7	825.5	7.05	85,497	854,972
8	1,200.0	6.97	13,884	138,840
9	1,000.0	5.92	34,260	342,604
10	1,200.0	7.30	47,588	475,885
11	666.3	6.36	55,404	818,519
12	448.2	5.88	81,852	855,041

- 표준설계안의 공급역량과 소요역량의 극한 전단강도(F_u)와 극한 휨강도(M_u)를 비교하면 다음 표 3-4-14와 같음.
- 적절한 수평휨강성(I_y)을 가진 교량 표준설계안에서의 극한 전단강도와 극한 휨강도의 공급역량과 소요역량 비는 1보다 큰 값을 가짐(표 3-4-14) → 내진성능을 만족, 지진에 대한 안전성을 확보함.

표 3-4-14. 표준설계안의 내진성능

	공급역량 (Capacity)	소요역량 (Demand)	비율
변위 (mm)	1000	10.1	99
극한 전단강도 (kN)	55,404	39,487	1.4
극한 휨강도 (kN-m)	554,038	364,083	1.52

○ 변위제어 교대의 내진성능평가

· 구성요소의 내진성능 평가방법

- 교각과 교대의 파괴모드(그림 3-4-14)에 따라 산정되는 공급역량과 소요역량의 비교를 통해 내진성능을 평가하는 방식

$$\frac{F_{P,C}}{F_{P,D}} \geq 1.0 \quad \text{만족} \qquad \text{(식 3-4-5)}$$

여기서, $F_{P.C}$: 교각의 공급역량으로 휨파괴, 휨-전단파괴 모드의 경우에는 공급변위와 항복변위의 비로 산정되며, 전단파괴 모드의 경우에는 단면강도로 산정

$F_{P.D}$: 교각의 소요역량

공급역량(Capacity) : 교량의 구성요소가 보유하고 있는 외부하중에 저항할 수 있는 능력

소요역량(Demand) : 내진성능 평가기준지진의 지진세기에서 교량이 붕괴되지 않기 위하여 교량에 요구되는 단면강도 및 변형성능의 크기로서 내진성능 평가기준지진의 응답스펙트럼에 의하여 결정

- 파괴모드는 휨성능곡선과 전단성능곡선 간의 관계에 따라 결정
- 휨성능 곡선 : 교각기둥이 휨에 견딜 수 있는 성능을 하중-변위 관계를 이용하여 나타낸 곡선
- 전단성능 곡선 : 교각기둥이 전단하중에 견딜 수 있는 성능을 하중-변위 관계를 이용하여 나타낸 곡선

표 3-4-15. 파괴모드에 따른 내진성능 평가

지표 / 파괴모드	공급역량($F_{P,C}$)	소요역량($F_{P,D}$)	내진성능평가
휨 파괴 휨- 전단파괴	$\mu_{\Delta_c} = \frac{\Delta_c}{\Delta_y}$	$\mu_{\Delta_d} = \lambda_{DR} \cdot R_s$	$\frac{F_{P,C}}{F_{P,D}} = \frac{\Delta_c / \Delta_y}{\lambda_{DR} \cdot R_s}$
전단파괴	V_n	$[V_E]_{COMB}$	$\frac{F_{P.C}}{F_{P.D}} = \frac{V_n}{[V_E]_{COMB}}$

- 공급변위 연성도(μ_{Δ_c}) : 공급변위를 항복변위로 나눈 값
- 공급변위(Δ_c) : 교각의 파괴모드에 의해 결정되는 교각이 견딜 수 있는 최대변위
- 항복변위(Δ_y) : 일반단면 교각의 하중-변위곡선에서 원점과 초기항복(점)을 잇는 직선이 교각의 항복강도와 교차하는 점에서의 변위 크기
- 단면강도(F_n) : 교각의 파괴모드를 고려한 최대지진강도로서 전단파괴모드의 경우에는 전단강도이고, 휨파괴모드의 경우에는 극한강도이며, 휨-전단파괴모드의 경우에는 항복강도와 극한강도 사이의 값

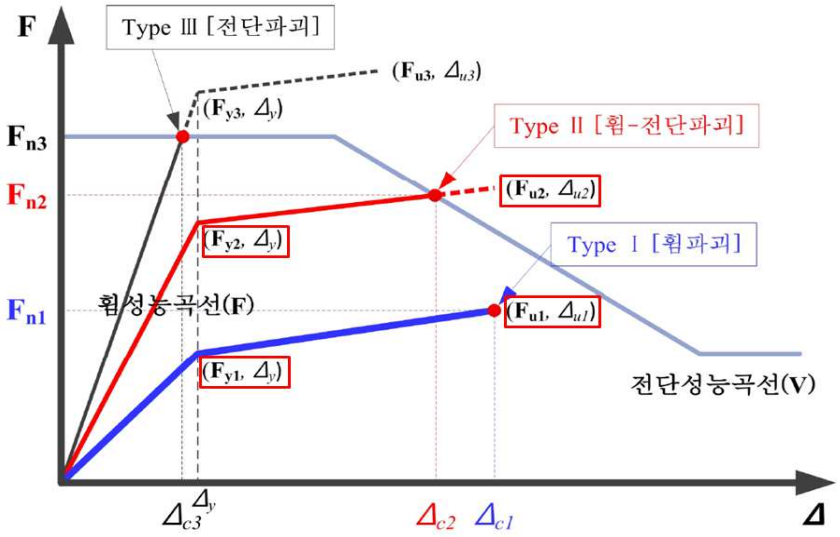


그림 3-4-14. 일반적인 교각의 파괴모드

- 파괴모드별 평가지표는 다음 표 3-4-16과 같으며 완전일체형 교량에서는 휨파괴 또는 휨-전단파괴로 예상됨

표 3-4-16. 파괴모드별 평가지표

파괴모드	평가지표	
	항복휨강도, 항복변위	극한휨강도, 극한변위
Type Ⅰ 휨파괴	$(F_{y1}, \triangle_y)$	$(F_{u1}, \triangle_u)$
Type Ⅱ 휨-전단파괴	$(F_{y2}, \triangle_y)$	$(F_{u2}, \triangle_u)$

- 극한변위(Δ_u) : 휨에 의해 교각의 콘크리트 최연단 압축변형률이 극한변형률에 도달할 때의 수평변위
- 극한강도(F) : 휨에 의해 교각의 콘크리트 최연단 압축변형률이 극한변형률에 도달할 때의 수평강도
- 파괴모드 정의

① 휨파괴 모드 : 교각이 휨파괴에 이를 때까지 전단파괴가 발생하지 않는 파괴모드

② 휨-전단파괴모드 : 교각의 축방향철근 항복 후 휨파괴에 이르기 전에 전단파괴가 발생하는 파괴모드

③ 전단파괴 모드 : 교각의 축방향철근이 항복 이전에 전단파괴가 발생하는 파괴모드

표 3-4-17. 파괴 모드에 따른 공급역량

파괴모드	공급역량	
휨파괴	공급변위연성도	$\mu_{\Delta_c} = \Delta_c/\Delta_y = \Delta_{u1}/\Delta_y$
휨-전단파괴	공급변위연성도	$\mu_{\Delta_c} = \Delta_c/\Delta_y$
전단파괴	전단강도	$F_n = V_n$

- 파괴 모드에 따른 공급변위(Δ_c)

① 휨 파괴모드: 극한변위(Δ_{u1})로 산정

② 휨-전단 파괴모드: 전단성능곡선과 휨성능곡선의 교차점의 변위로 산정

· 교대의 내진성능 평가 결과

- 적용 대상

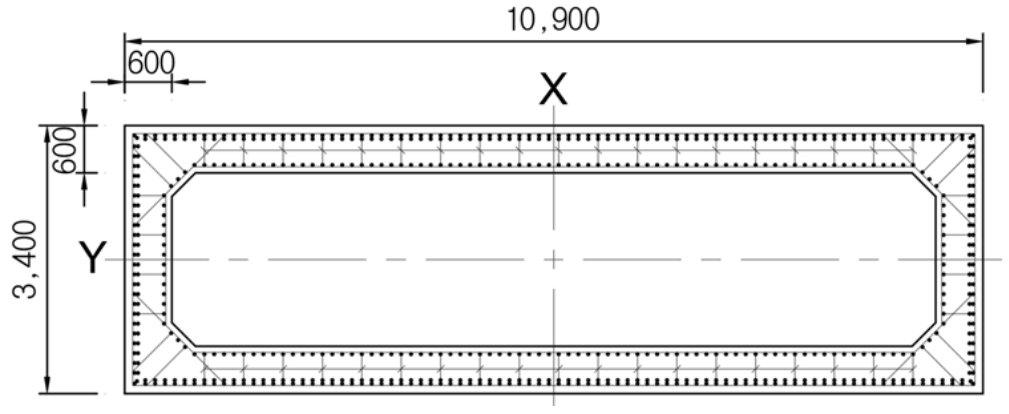


그림 3-4-15. 적용 대상 일체형 교량 교대 단면

표 3-4-18. 교대 단면제원 및 물성치

단면제원		f_{ck} (Mpa)	f_{yh} (Mpa)	횡방향철근상제	종방할철근상세	비고
형상	크기(m) B×H					
직사각형	10.9×3.4	30	400	H16	H25	

- Pushover 해석을 통한 휨성능 곡선 작성

① 항복강도 및 항복변위 산정 : 철근이 항복할 때의 강도와 변위

$$(\triangle_y, F_y) = (38.8mm, 18,406.43kN)$$

② 극한강도 및 극한변위 산정 : p-△ 곡선에서 최대변위와 최대강도

$$(\triangle_u, F_u) = (1,000mm, 56,012kN)$$

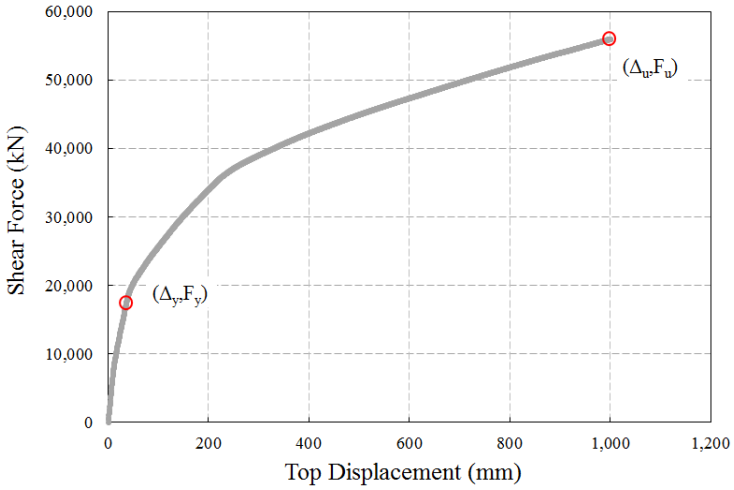


그림 3-4-16. 교대 휨성능곡선

- 전단성능 곡선 작성

① 종 횡비 산정

$$\frac{B}{H} = \frac{10,900}{3,400} = 3.21$$

∴ 천이 교각 : 일반교각의 전단강도 산정공식 사용

② 교대의 전단강도 산정

ㅣ) 콘크리트에 의한 전단강도(V_c)

$$V_c = k\sqrt{f_{ck}}A_e$$

$$= k\sqrt{30} \times 12.72 = 69.67k$$

여기서, f_{ck} = 30MPa

A_g = 15.9m^2

$A_e = 0.8A_g$ = 12.72m^2

$$k = 0.3 - 0.1(\mu_\triangle - 2) \leq 0.3$$

표 3- 4- 19. 공급변위 연성도에 따른 콘크리트에 의한 전단강도(V_c)

공급변위 연성도($\mu_\triangle$)	전단강도 감소계수(k)	전단강도(V_c) (kN)
0	0.3	20901.09279
2	0.3	20901.09279
5	0	0
8	0	0

II) 콘크리트에 의한 전단강도(V_s)

$$V_s = \frac{A_v f_{yh} D'}{s}$$
$$= \frac{794.4 \times 400 \times 3,236.3}{400} \times 10^{-3}$$
$$= 2570.9kN$$

여기서, A_v = 4*A_{sp} = 4*198.6 = 794.4mm^2

A_{sp} = 198.6 (H16)

f_{yh} = 400 MPa (설계기준 항복강도 500MPa 이하)

D' = H_s-2(d_c-d_{bt}/2-d_{bl}/2) = 3,236.3

s = 400mm

III) 축하중 작용에 의한 전단강도(V_p)

$$V_p = 0.15\frac{P_\top t_s}{L_s} \rightarrow 0\text{으로 가정}$$

IV) 교대의 전단강도(V_n)

$$V_n = V_c + V_s + V_p$$

표 3- 4- 20. 공급변위 연성도에 따른 교대 전단강도

공급변위 연성도($\mu_\triangle$)	교대전단강도(V_c) (kN)
0	23472.00951
2	23472.00951
5	2570.91672
8	2570.91672

③ 전단성능 곡선 산정

$$\triangle = \triangle_y \times \mu_\triangle$$

여기서, 항복변위($\triangle_y$) : 38.8mm

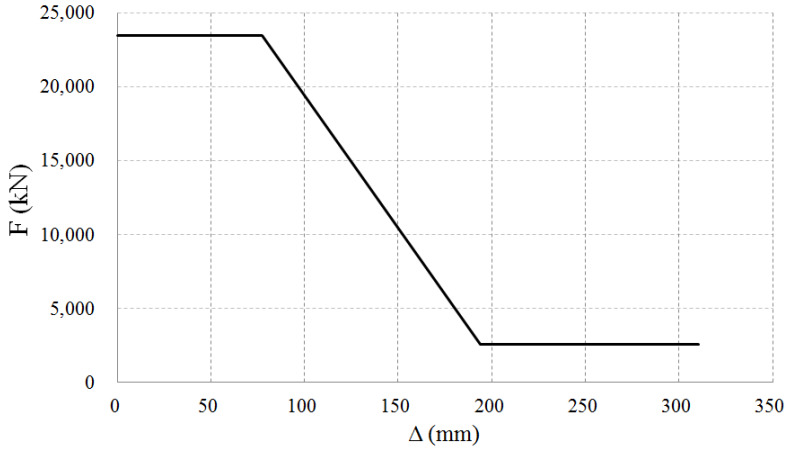


그림 3-4-17. 교대 전단성능곡선

- 교각의 파괴모드 결정

① 휨성능곡선과 전단성능 곡선 배치

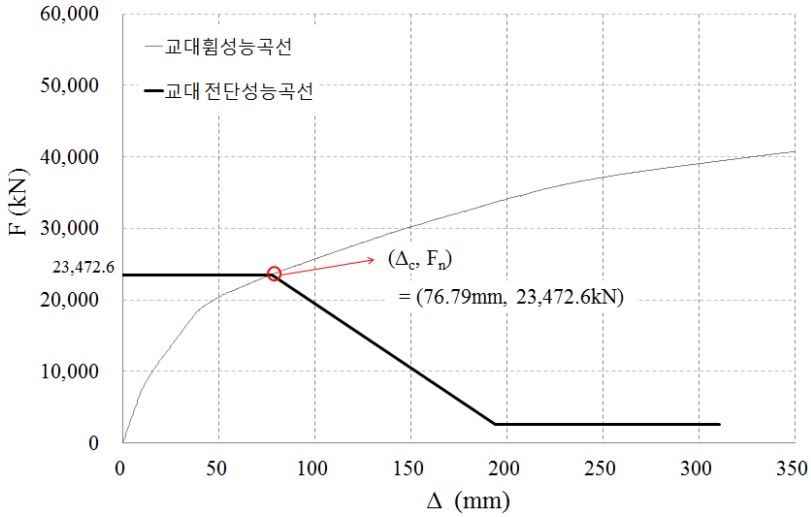


그림 3-4-18. 교대의 파괴모드 결정

② 성능곡선 분석 : 교각의 축방향 철근이 항복한 이후 휨파괴에 이르기 전에 전단파괴가 발생하므로 **휨 전단파괴모드**로 결정

③ 공급역량 산정

Ⅰ) 단면강도(F_n)

$$F_n = V_n = 23{,}472.6kN$$

$$(F_y = 18{,}406.43kN \leq F_n = 23{,}472.6kN < F_u = 56{,}012kN)$$

Ⅱ) 공급변위($\triangle_c$)

$$\triangle_c = 76.79mm$$

$$(\triangle_y = 38.8mm \leq \triangle_c = 76.79mm < \triangle_u = 1000mm)$$

Ⅲ) 공급역량($F_{P,C}$)

$$F_{P,C} = \mu_{\triangle_c} = \frac{\triangle_c}{\triangle_y} = \frac{76.79mm}{38.8mm} = 2.0$$

(2) 변위제어 교대의 강도/연성도 향상방안

○ 횡보강근(횡구속철근)의 구속효과를 이용한 재료특성 향상 방법

· 기본 구현 방안

- 교각은 지진시 휨과 압축을 동시에 받는 부재 → 부재의 횡구속 철근은 압축콘크리트를 구속하고 축방향 철근의 좌굴을 방지함(횡방향 철근이 없을 경우 부재는 비교적 작은 변형에도 콘크리트 피복이 탈락되어 쉽게 파괴됨)
- 모멘트 재분배가 발생 할 수 있도록 철근 콘크리트 프레임 부재의 적절한 연성 필요 → 철근 콘크리트 기둥의 소성 힌지 영역에서 연성능력 향상을 위해 띠 또는 나선철근을 통해 충분한 횡방향 보강을 제공해야함
- 교각단면의 압축콘크리트 응력-변형률 모델은 교각의 실제 거동을 예측하기 위해 횡방향 철근의 구속효과를 고려하여 적절한 모델 적용(그림 3-4-19)
- 횡구속된 콘크리트의 응력-변형률 모델은 Kent&Park 모델(1982)등과 같이 여러 가지 모델이 있으나, 이들 대부분은 원형단면 등과 같이 제한된 조건에서만 적용이 가능 → 모든 단면 형상과 횡구속 철근량에 대해서 적용할 수 있는 **Mander 등(1988)의 제안식**을 사용(그림 3-4-20)

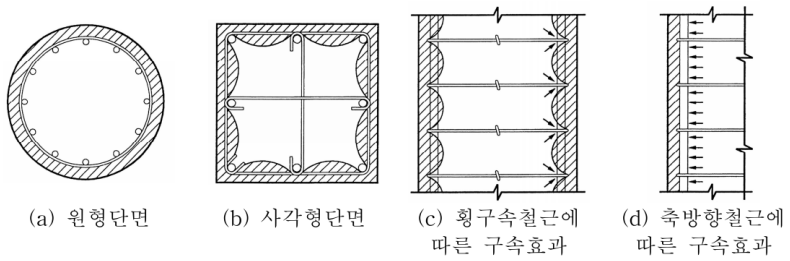


그림 3-4-19. 철근상세에 따른 구속효과(▨: 비구속 영역, Priestley 등, 1996)

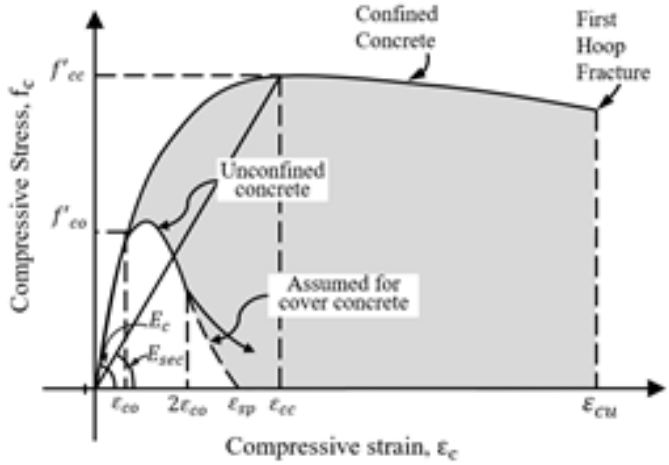


그림 3-4-20. 압축콘크리트의 응력-변형률 관계(Mander 등, 1988)

○ 중공단면 교대 벽체의 휨연성 및 소성거동능력 향상방안

· 횡보강근(띠철근) 배치에 따른 심부구속 영향검토

- 내부 띠철근(hoop)의 형상 및 배치방안(그림 3-4-21)에 따른 변수해석적 연구
- 단일 벽체 내에 배치된 내부 띠철근 단위개수(n_{th})에 따른 변수모형 설계: 1~15개의 횡구속철근 효과 정량적 비교 분석

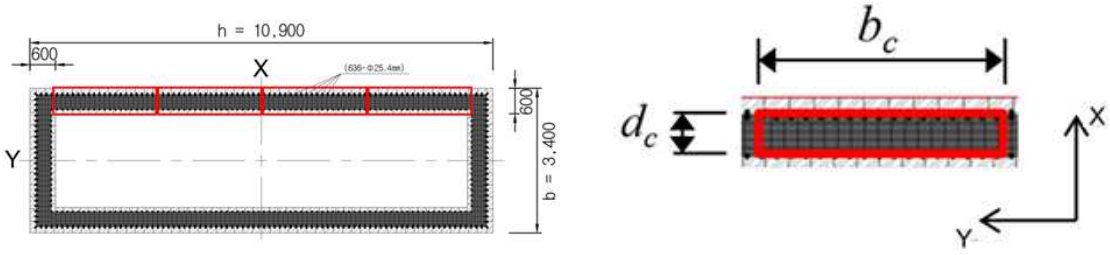


그림 3-4-21. 횡구속철근 배치방안에 따른 모델링

표 3-4-21. 심부 콘크리트 단면 제원

d_c (mm)	b_c (mm)	R_c (mm)	d_b (mm)	n	n_{th}
379.10	425.77	0	25.4	15	15

- 그림 3-4-22과 같이 횡구속 철근에 의해 유효하게 구속되는 콘크리트의 최소면적은 아래 식 3-4-6과 같음.

$$A_e = b_c d_c = \sum_{i=1}^{n} \frac{(wl)^2}{6})(1 - \frac{s'}{2b_c'})(1 - \frac{s'}{2d_c}) \qquad \text{(식 3-4-6)}$$

여기서, b_c : 띠철근으로 둘러싸인 단면 폭(작은 변)

d_c : 띠철근으로 둘러싸인 단면 길이(큰 변) $(b_c \geq d_c)$

w'_i : 순방향철근 순간격

s' : 횡방향철근 순간격

- 유효구속계수는 다음 식 3-4-7과 같음.

$$\kappa_e = \frac{A_e}{A_{cc}} \qquad \text{(식 3-4-7)}$$

여기서, A_e : 횡구속 철근에 의해 유효하게 구속되는 콘크리트의 최소면적

A_{cc} : 횡구속 철근의 중심선으로 에워싸인 공칭 횡구속 콘크리트 면적

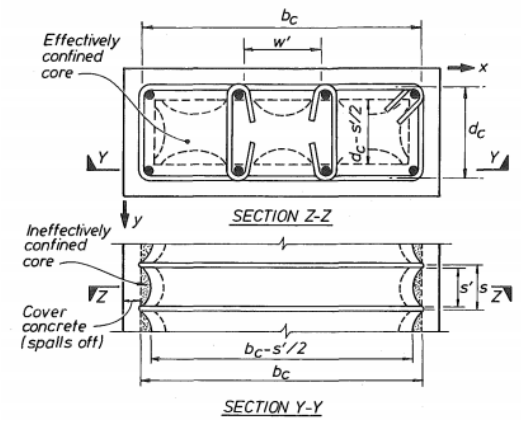


그림 3-4-22. 횡구속철근 보강 효과

- 사각형 단면의 x, y방향에 따른 횡구속 철근비는 식 3-4-8과 같음

$$\rho_x = \frac{A_{sx}}{sd_c}, \quad \rho_y = \frac{A_{sy}}{sb_c} \qquad \text{(식 3-4-8)}$$

여기서, A_{sx} : 그림 3-4-23에서 x방향 횡구속 철근 면적

A_{sy} : 그림 3-4-23에서 y방향 횡구속 철근 면적

- x, y방향의 유효 횡구속 응력은 식 3-4-9와 같음

$$f_{lx}^{'} = k_e \rho_x f_{yh}, \; f_{ly}^{'} = k_e \rho_y f_{yh} \qquad \text{(식 3-4-9)}$$

여기서, f_{yh} : 횡구속 철근의 항복강도(MPa)

s : 횡방향 철근간격

k_e : 유효구속계수

- Mander의 구속 콘크리트 압축 강도식은 식 3-4-10과 같음

$$f_{cc}^{'} = f_{co}^{'}(-1.254 + 2.254\sqrt{1 + \frac{7.94 f_l^{'}}{f_{co}^{'}}} - 2\frac{f_l^{'}}{f_{co}^{'}}) \qquad \text{(식 3-4-10)}$$

여기서, $f_{co}^{'}$: 비구속 콘크리트의 압축강도

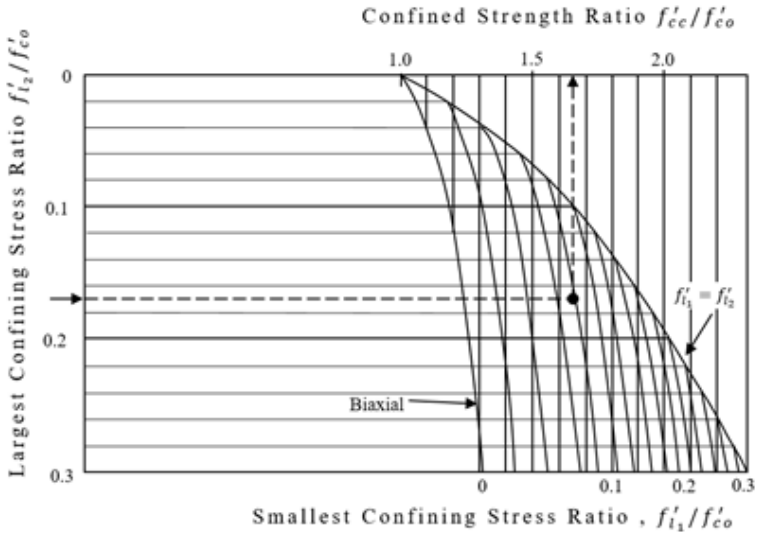


그림 3-4-23. 직사각형 단면에 대한 측 방향 구속 응력으로부터 구속력 측정

- 횡구속 철근 배치에 따라 심부구속 효과가 반영된 콘크리트의 재료물성치 산정 (표 3-4-22)
  : 내부 띠철근의 형상비와 배근간격에 따라 최적설계안에 비해 구속 콘크리트 압축강도 31%, 콘크리트 압축강도에서의 변형률 92.5%증가 → 종-횡비율이 유사해질수록 유리해지는 특성

표 3-4-22. 횡구속철근 배치에 따른 구속 콘크리트의 재료물성

Case	n_{th}	f_{pc} (MPa)	ε_{psc}	f_{pcu} (MPa)	ε_{psu}	f_t (MPa)	E_{ts}
4 (base)	1	36	0.004	23.1	0.024	3.27	0.55
13	3	42	0.006	26.9	0.036	3.77	0.022
14	9	44.7	0.0069	28.7	0.041	3.98	0.017
15	15	47.1	0.0077	30.2	0.046	4.14	0.006

○ 횡구속 철근 배치방안에 따른 내진성능 해석 검토 결과

- 단일 후프에 비해 15개의 후프 적용 시 극한상태 휨강도 최대 10% 증가
- 기본적인 파괴강도 및 에너지 소산능력 향상 확인: 교대 벽체 내의 횡보강근 적용방식에 따른 교대 단면설계의 최적화 및 효율성 제고 방안의 제시
- 나선철근의 배치방안, 형상비와 횡방향철근 간격에 따른 벽체 구속효과로 인한 중공교대 전체 구조 성능 향상효과 확인

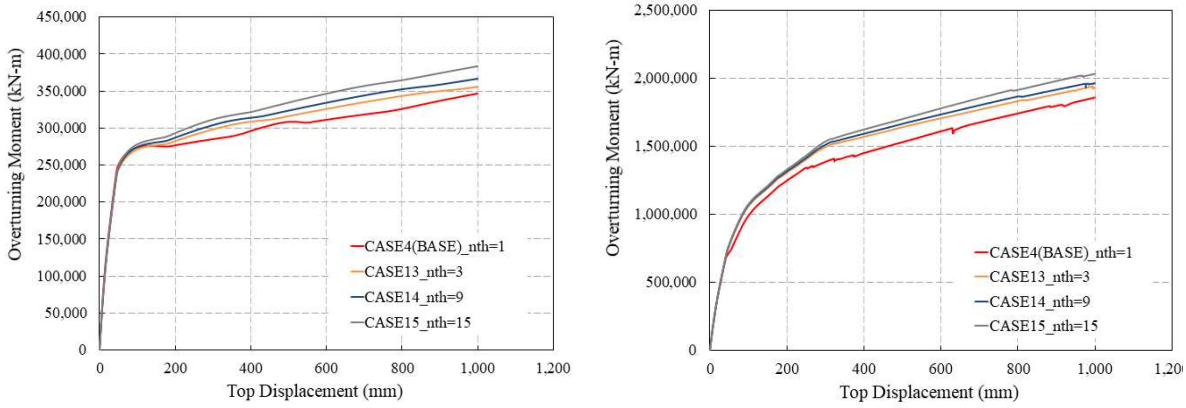
표 3- 4- 23. 횡구속 철근 배치방안에 따른 변수해석 결과

(a) 교대부

Case	Δ_C (mm)	μ_c	F_u (kN)	M_u (kN- m)
4 (base)	1000.0	15.9	34,656	346,559
13	1000.0	13.7	35,569	355,687
14	1000.0	12.4	36,663	366,635
15	1000.0	11.5	38,354	383,546

(b) 전체교량시스템

Case	Δ_C (mm)	μ_c	F_u (kN)	M_u (kN- m)
4 (base)	1000.0	5.71	165,662	1,859,436
13	1000.0	4.57	173,199	1,932,726
14	1000.0	4.02	176,372	1,964,481
15	1000.0	3.50	183,282	2,033,897



(a) 교대부 (b) 전체교량 시스템

그림 3- 4- 24. 횡구속철근 배치방안에 따른 해석 결과

- 심부보강 및 이중벽 구속효과의 시너지 효과에 대한 추후 검토 필요: 내부 지지구조 및 내부벽체 보강에 의한 고성능 신형식 교대 구조의 개발 → 구조적 효율성 및 적정 내구성의 확보 위해, 적정 두께의 강판이나 아라미드(ARF)계열 또는 초분자량 섬유보강(UKF)을 이용 합성구조 내부벽체를 형성한 고내구성 이중격벽 교대시스템의 착안 → 추후 연구로 최적구조 변위제어 교대 개발과업의 추진 예정

다. 철도-교대 상호작용 적용기법 및 기준정립

○ 철도-교대 상호작용 데이터베이스 분석

- 교량 상에 부설되는 장대레일은 궤도-교량 상호작용(Track Bridge Interaction, TBI)에 의하여 부가적인 축방향 응력이 발생하며, 이러한 레일의 부가축응력에 영향을 미치는 인자로는 하중조합(온도, 시제동, 열차), 교량의 종방향 신축길이, 지점배치 방식 및 하부구조 강성이 있음.
- 일체형 교량의 경우 일반적인 교량과 달리 상하부구조가 일체화되므로 교대 및 교각을 포함한 하부구조 강성이 중요한 영향인자임. 관련하여 하부구조의 한계변위량에 대한 검토를 수행함.
- 해석대상 교량은 연장 227m, 교폭 10.9m의 복선교로 중앙 5지간은 35m, 양단 2지간은 26.0m로 구성하였으며, 완전일체형으로 가정하였음.

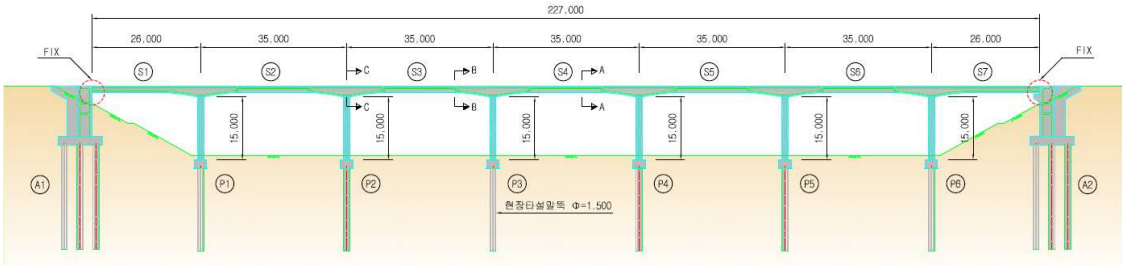
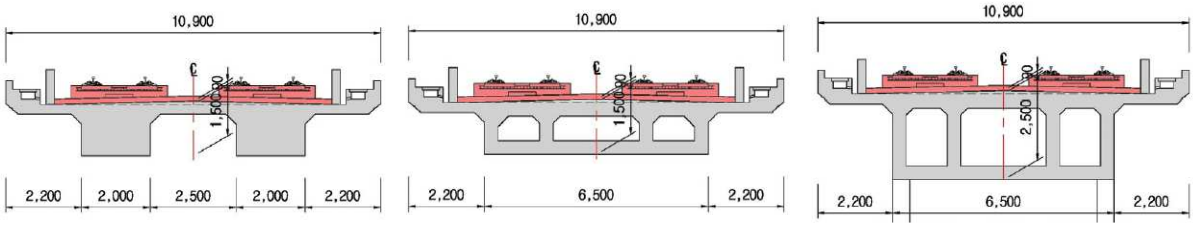


그림 3-5-1. 해석대상 교량

- 하부구조는 양단에 대칭으로 설치된 변위제어 교대와, 그 사이 설치된 6본의 중간 교각으로 구성되며, 철도설계기준에 따라 설계하였음. 상부구조는 총 3가지의 PSC 거더로 구성되어 있으며, 단면제원 및 재료특성은 다음 표들과 같음. 교각의 기초는 ϕ1,500의 현장타설말뚝 3본을 교축직각방향으로 1열 배치하였으며, 변위제어 교대는 다주 가구식으로 말뚝을 배치하여 종방향력에 저항하도록 하였음.



(a) 단면 A-A (b) 단면 B-B (c) 단면 C-C

그림 3-5-2. 해석대상 교량에 대한 단면도

표 3-5-1. 부재의 단면특성

부재		A (m^2)	I_y (m^4)	I_z (m^4)	J (m^4)	H (m)
거더	A	8.38	56.16	1.695	2.783	1.5
	B	7.73	48.34	2.076	5.747	1.5
	C	9.33	57.49	7.830	18.05	2.5
교대		15.72	199.60	27.09	76.19	12
교각		9.25	29.57	1.651	4.77	15

표 3-5-2. 재료적 특성

형식	설계강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)	전단탄성계수 (MPa)	단위중량 (kN/m^3)
상부	40	30,008	12,857	24.5
하부	30	27,537	11,798	24.5

- 교량은 상용프로그램인 ABAQUS를 이용하여 Beam요소로 모델링하였으며, 궤도 종방향 저항력은 KR-C 08080에 제시된 콘크리트궤도에 대한 비선형 스프링요소를 적용하여 궤도특성을 반영하였음.
- 해석에 고려한 하중은 KR C-08080에 따라 온도하중, 시제동하중 및 열차하중(KRL-2012)이며, 레일과 교량의 온도 변화는 재설정온도 20℃를 기준으로 +40℃~-50℃와 ±25℃로 각각 고려하였음.
- 온도 상승 시 레일의 부가축응력은 양단부에서 최대값이 나타나는 것을 알 수 있음. 양단부의 부가축응력은 온도 하강 시 인장, 온도 상승 시 압축값이 나타나게 되며, 각각 교대의 휨강성과 배면토의 압축강성의 영향을 받음.

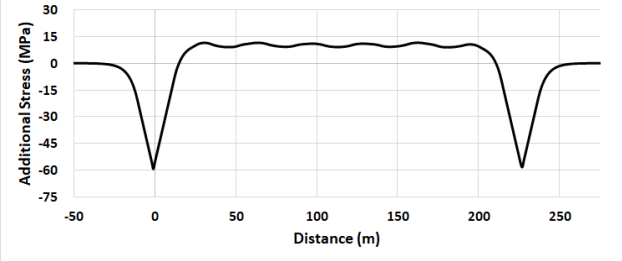
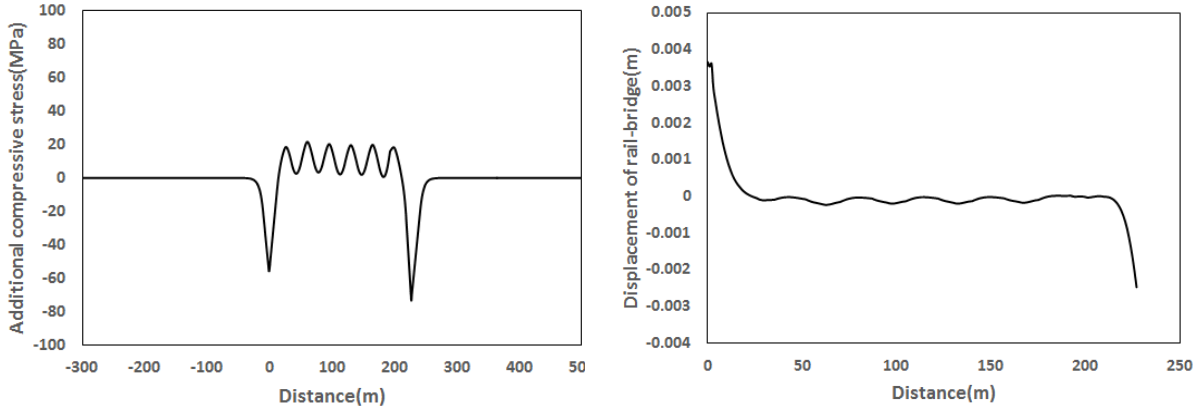


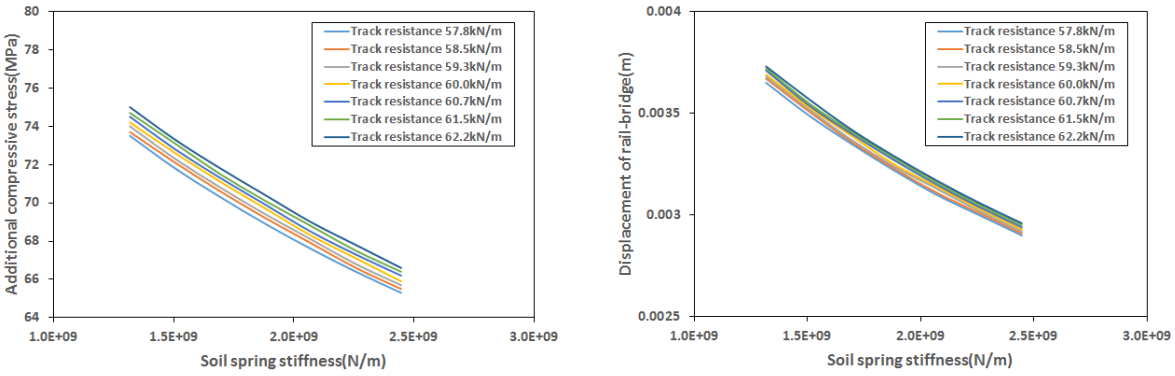
그림 3-5-3. 온도하중에 의한 레일의 부가축응력 변화

- 교대부 수평지지반력계수(배면토)와 궤도 종저항력의 변화에 따른 레일부가축응력과 레일-교량의 상대변위의 회귀분석을 수행
- 궤도 종저항력의 산정은 윤경민 등(2015), 교대부 수평지지반력계수는 O.N. Taskari 등(2015) 참고
- 교대부 수평지지반력계수가 증가할수록, 궤도 종저항력이 감소할수록 부가압축응력과 레일-교량 상대변위가 작아지는 것으로 나타남
- 궤도 종저항력과 교대부 수평지지반력계수의 변화에 따른 레일부가축응력과 레일-교량 상대변위 회귀분석 결과, 레일 부가축응력 수렴도 목표치인 0.95를 만족하는 것을 나타남.



(a) 부가압축응력 (b) 레일- 교량 상대변위

그림 3- 5- 4. 온도 상승시 부가응력 및 상대변위(궤도종저항력 57.8kN/m, 수평지지반력계수 1317.6MPa)

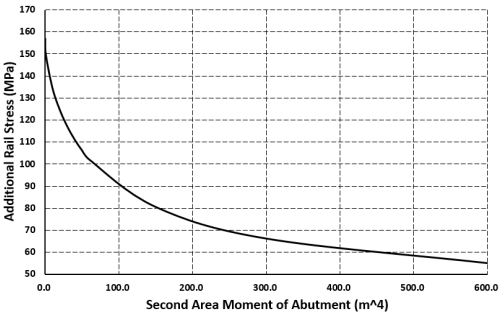


(a) 부가압축응력 (b) 레일- 교량 상대변위

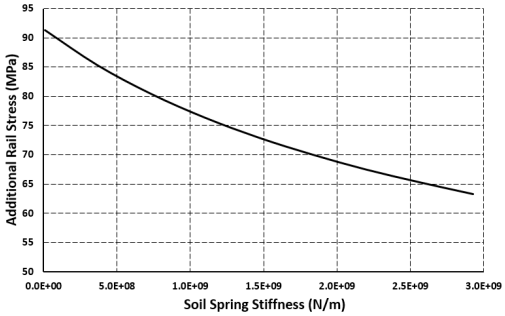
그림 3- 5- 5. 궤도 종저항력과 수평지지반력계수 변화에 따른 부가응력 및 상대변위 최대값 비교

○ 궤도-교량 상호작용을 고려한 교대의 허용 한계변위 및 공칭강도 검토

- 온도, 시제동 및 열차하중을 고려하여 교대부 강성, 교각부 휨강성, 궤도 종저항력 및 교량연장 변화에 따른 레일의 부가축응력 검토 수행
- 온도하중에 대하여 검토한 결과 교대부 강성 증가에 따라 레일 부가축응력이 감소하는 것으로 나타남



(a) 온도 하강 시



(b) 온도 상승 시

그림 3- 5- 6. 교대부 강성 변화에 따른 레일 부가축응력

– 교각의 휨강성 증가에 따라 레일의 부가축응력이 감소함

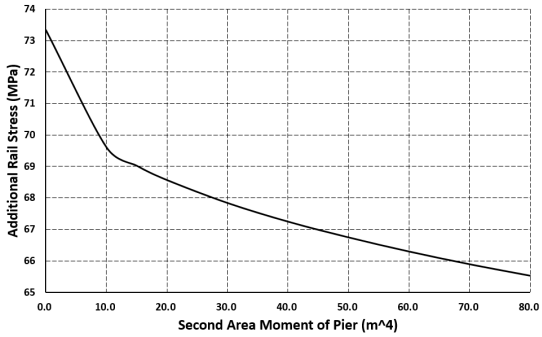
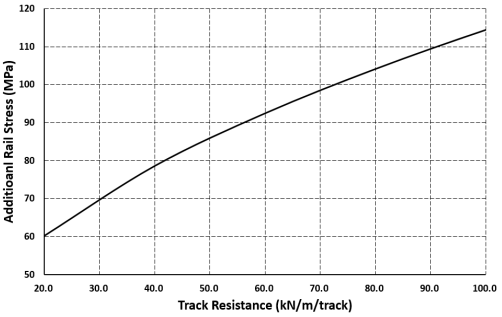
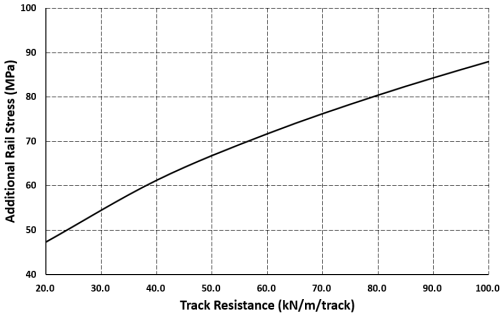


그림3- 5- 7. 교각 강성 변화에 따른 레일 부가축응력

– 궤도 종저항력 증가에 따라 레일의 부가축응력도 증가



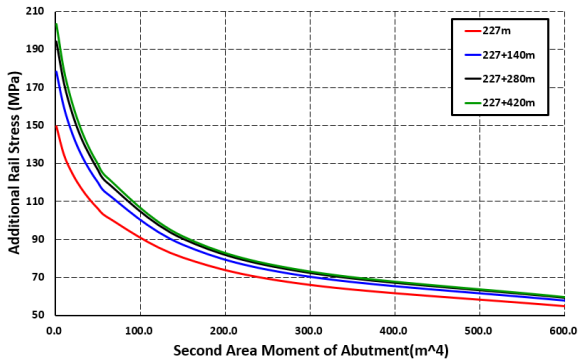
(a) 온도 하강 시



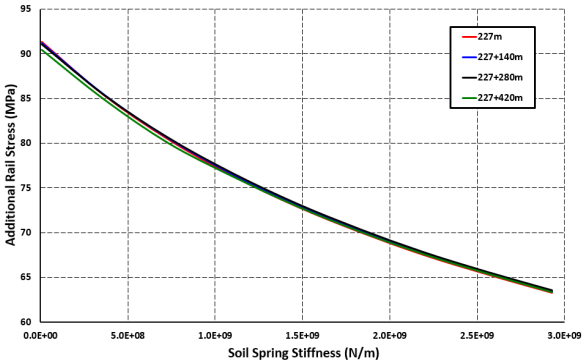
(b) 온도 상승 시

그림 3- 5- 8. 궤도 종저항력 변화에 따른 레일 부가축응력

– 교량 연장 증가에 따른 교대부 강성의 영향은 온도 하강 시 일부 발생하나 온도 증가 시는 영향이 거의 없음



(a) 온도 하강 시



(b) 온도 상승 시

그림 3- 5- 9. 교량 연장 변화에 따른 레일 부가축응력

- 교대 휨강성 증가에 따라 휨강성 150m^{4}까지는 레일 교량 상대변위는 감소하였으며 150m^{4}을 넘어가게되면 상대변위 감소폭이 매우미소함

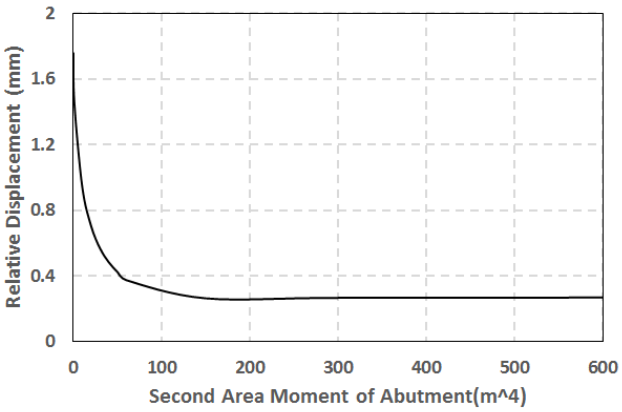


그림 3- 5- 10. 교대 강성 변화에 따른 레일- 교량 상대변위

· 해석 결과를 종합하여 다음과 같이 교대의 허용 한계변위 및 교대부 강성에 대한 검토 지침 도출

- 교대의 허용 한계변위는 궤도-교량 상호작용 해석을 통하여 산정한 레일의 부가축응력을 고려하여 결정되어야 하며 교각의 강성 및 궤도 종저항력 특성이 적절히 반영되어야 함.
- 교량 연장 변화에 따른 교대부 강성은 온도 하강 시에 대한 고려만으로 충분함.

라. 완전일체형 교량시스템의 최적설계안 개발

○ 기본설계안의 개선 및 검토(프로토타입)

· 교량 개요

- 교량 형식 : 7경간 완전일체형 PSC BOX(FSM) 거더교
- 지간 구성 : L = 26.0 + 5@35.0 + 26.0 = 227.0m
- 교량 폭원 : B = 10.9m (복선)

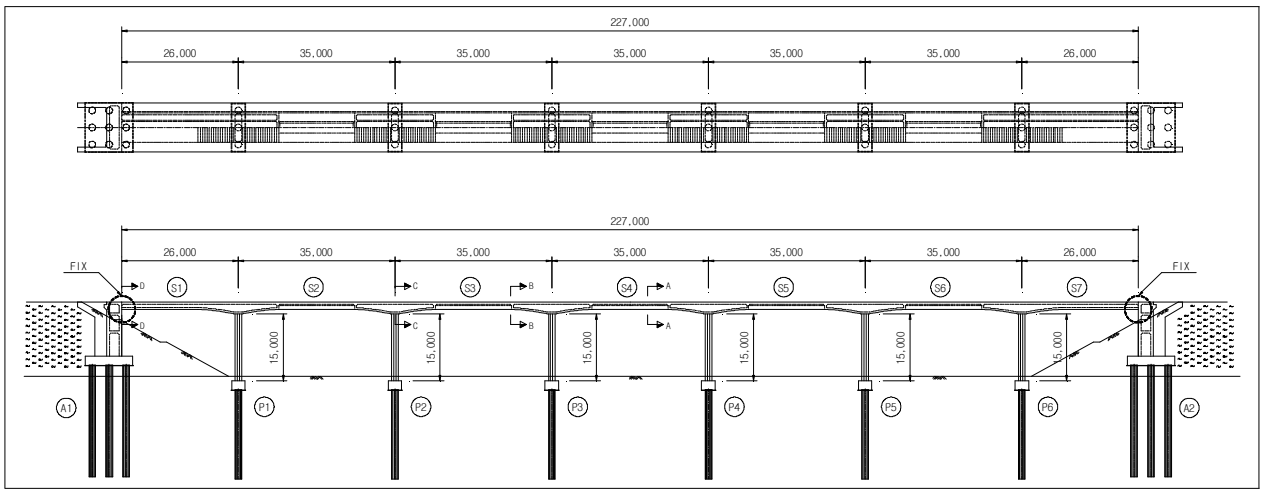


그림 3- 6- 1. 종평면도

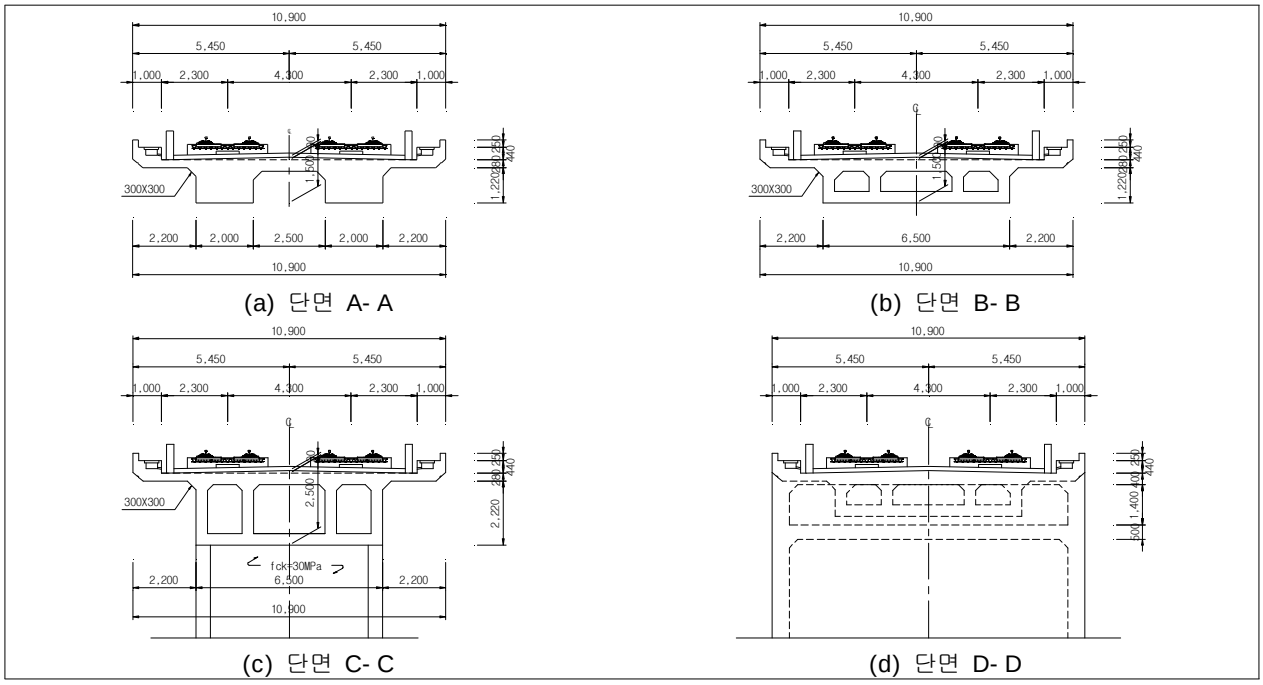


그림 3- 6- 2. 횡단면도

· 사용재료 및 허용응력

- 콘크리트 특성(압축강도) : f_{ck} = 40.0MPa (상부 구조물), 30.0MPa (교대, 교각)
- 허용응력

적용범위	허용응력 (MPa)	
	응력구분	설계기준
프리스트레스 도입 직후[주1)] (크리프와 건조수축에 의한 손실이 일어나기 전)	압축응력	$0.55f_{ci}'$ = 17.600
	인장응력[주2)]	$0.5\sqrt{f_{ci}'}$ = 2.828
사용하중 작용 시 (모든 손실이 일어난 후)	압축응력	$0.4f_{ck}$ = 16.0
	인장응력	0
균열하중 작용 시	균열응력	$0.63\sqrt{f_{ck}}$ = 3.984

주1) 프리스트레스 도입 직후 콘크리트 허용응력은 단면의 콘크리트 재령에 따라 설계기준강도(f_{ck})를 적용할 수 있음.

⇨ 기존 프리스트레스 도입 시 압축강도($f_{ci'}$)는 30.0MPa을 적용하였으나, 본 검토에서는 $f_{ci'} = 0.8 \times f_{ck}$ = 32.0 MPa 적용

주2) 미리 압축력을 가한 인장구역에서의 허용인장응력

- PS 강재

✓ PS 강재(KSD 7002, SWPC 7B)의 재료 특성

구 분	단 위	물성치	구 분		단 위	물성치
탄성계수	MPa	2.0×10^5	곡률마찰 계수	일반	μ/rad	0.2
단위중량	kN/㎥	78.5		직선	μ/rad	0.15
항복강도	MPa	1,600	파상마찰 계수	일반	κ/m	0.00405
인장강도	MPa	1,900		직선	κ/m	0.00150

⇨ 기존 곡률마찰계수는 0.3 μ/rad, 파상마찰계수는 0.0066 κ/m를 적용하였으나, 본 검토에서는 도로교설계기준의 마찰계수를 적용 (일반구간은 평균값, 직선구간은 최소값)

✓ 사용 텐던 단위

Internal Tendon(Bonded) : 6-19(ϕ15.2㎜-19), 6-22(ϕ15.2㎜-22)

· 적용하중

적용하중	적용 하중	비 고
Construction Stage (CS)	1차 고정하중(D1), 2차 고정하중(D2), Prestressing(PS), Creep/Shrinkage(CR/SH)	
Static Load Case (ST)	장대레일 종하중(LR), 토압(H), 활하중(L), 온도하중(GT) 차량 횡하중(LF), 원심하중(CF), 풍하중(W), 시제동하중(SB)	

· 하중조합

- 극한강도 검토 : Envelope(Case1~4)

  Case1 : 1.35D + 1.35CR/SH + 1.0PS + 1.85L + 1.60H + 1.35CF + 1.35LF

  Case2 : 1.60D + 1.60CR/SH + 1.0PS + 1.60L + 1.60H + 1.60CF + 1.60LF

  Case3 : 1.35D + 1.35CR/SH + 1.0PS + 1.40L + 1.60H + 1.35CF + 1.35LF + 1.35GT

  Case4 : 1.35D + 1.35CR/SH + 1.0PS + 1.40L + 1.60H + 1.35CF + 1.35LF + 1.35GT + 1.40LR + 1.40SB + 1.35W

- 응력 검토 : CS + L + H + LR + GT

· 텐던 배치도



그림 3- 6- 3. 텐던 배치도

· 텐던 도입 긴장력 : 1440MPa (0.9fpy)

· 3D 모델링

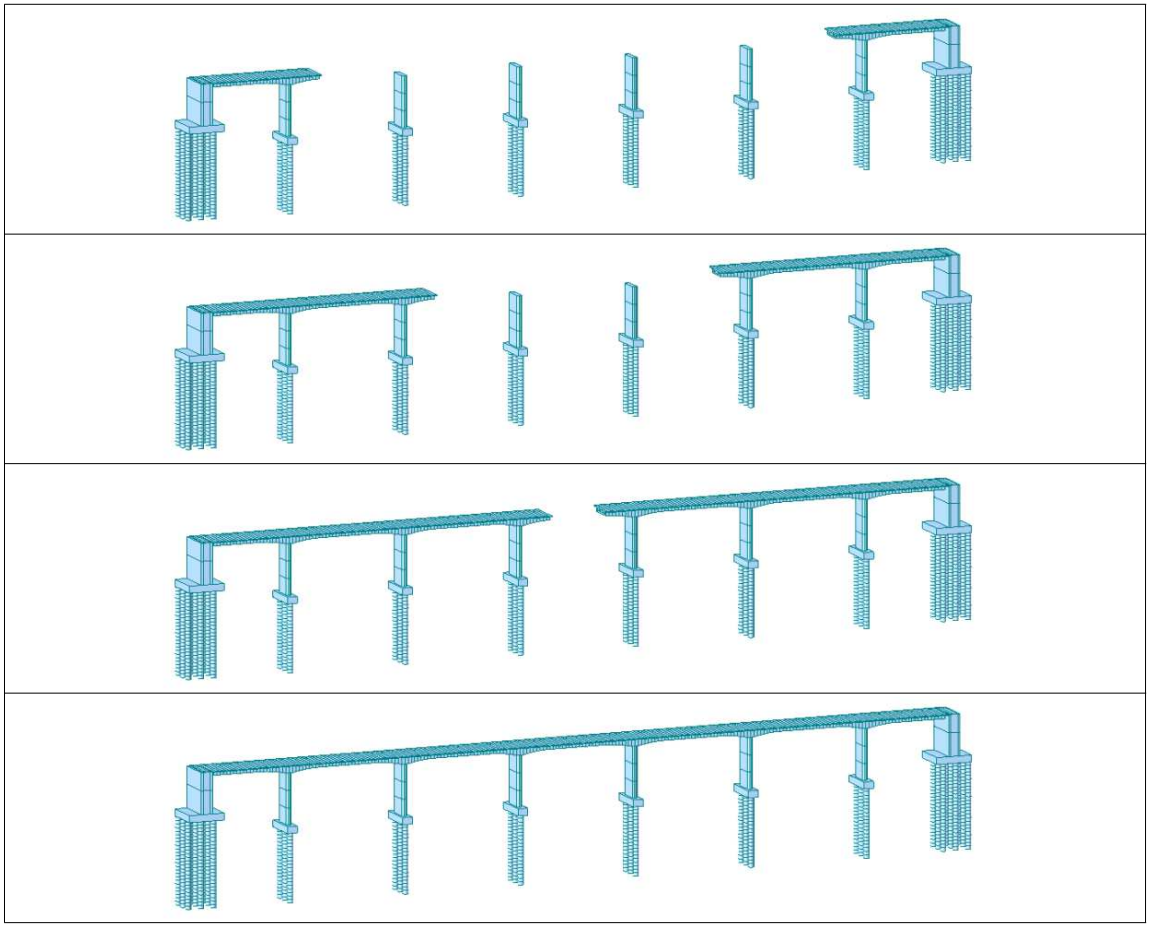
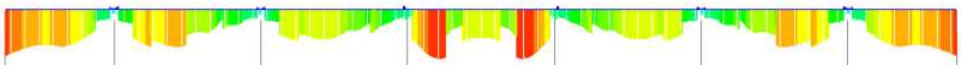
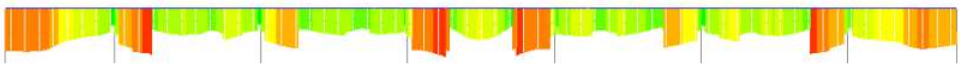
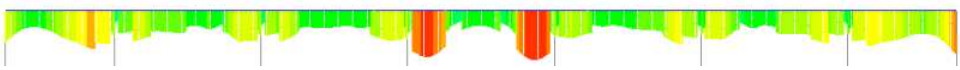


그림 3- 6- 4. 시공 단계별 모델링도

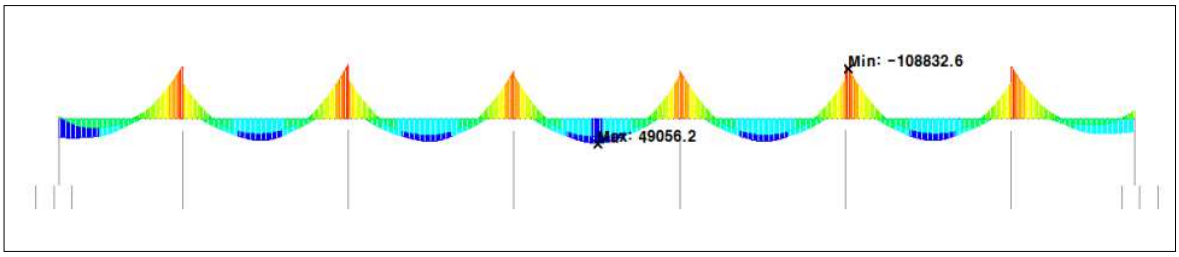
· 응력 검토

구 분		Diagram
CS1	TOP	
	BOT	
• 발생 압축응력 : 13.3MPa < 허용 휨압축응력 : $0.55f_{ci}'$ = 17.6MPa … O.K • 발생 인장응력 : 1.7MPa < 허용 휨인장응력 : $0.5\sqrt{f_{ci}'}$ = 2.8MPa … O.K		
CS2	TOP	
	BOT	
• 발생 압축응력 : 16.3MPa < 허용 휨압축응력 : $0.55f_{ci}'$ = 17.6MPa … O.K • 발생 인장응력 : 1.4MPa < 허용 휨인장응력 : $0.5\sqrt{f_{ci}'}$ = 2.8MPa … O.K		

CS3	TOP	
	BOT	
• 발생 압축응력 : 15.7MPa < 허용 휨압축응력 : $0.55f_{ci}'$ = 17.6MPa … O.K • 발생 인장응력 : 1.1MPa < 허용 휨인장응력 : $0.5\sqrt{f_{ci}'}$ = 2.8MPa … O.K		
CS4	TOP	
	BOT	
• 발생 압축응력 : 17.1MPa < 허용 휨압축응력 : $0.55f_{ci}'$ = 17.6MPa … O.K • 발생 인장응력 : 0.9MPa < 허용 휨인장응력 : $0.5\sqrt{f_{ci}'}$ = 2.8MPa … O.K		
사용 상태	TOP	
	BOT	
• 발생 압축응력 : 16.5MPa < 허용 휨압축응력 : $0.4f_{ck}$ x 1.15 = 18.4MPa … O.K • 발생 인장응력 : 0.01MPa > 허용 휨인장응력 : 0MPa (인장응력이 S4구간에 미미하게 발생)		

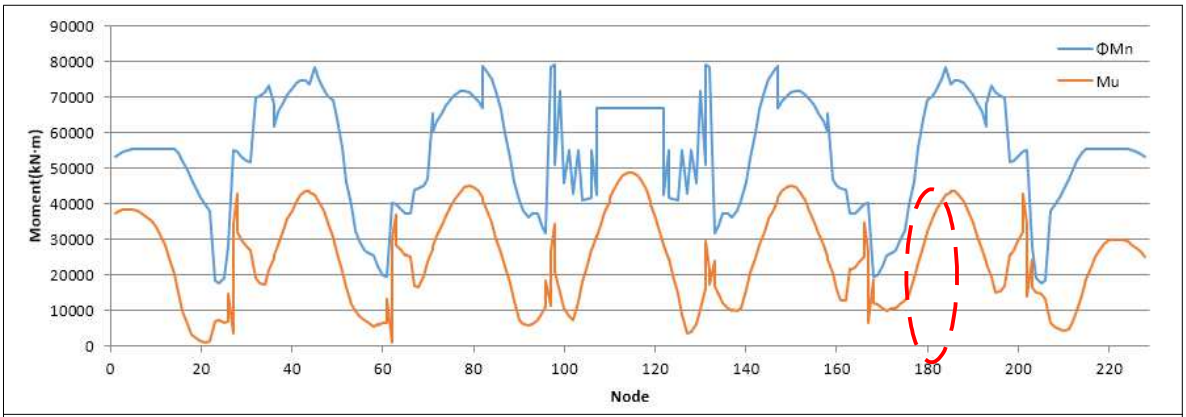
· 휨강도 검토

– 모멘트도(M_u)



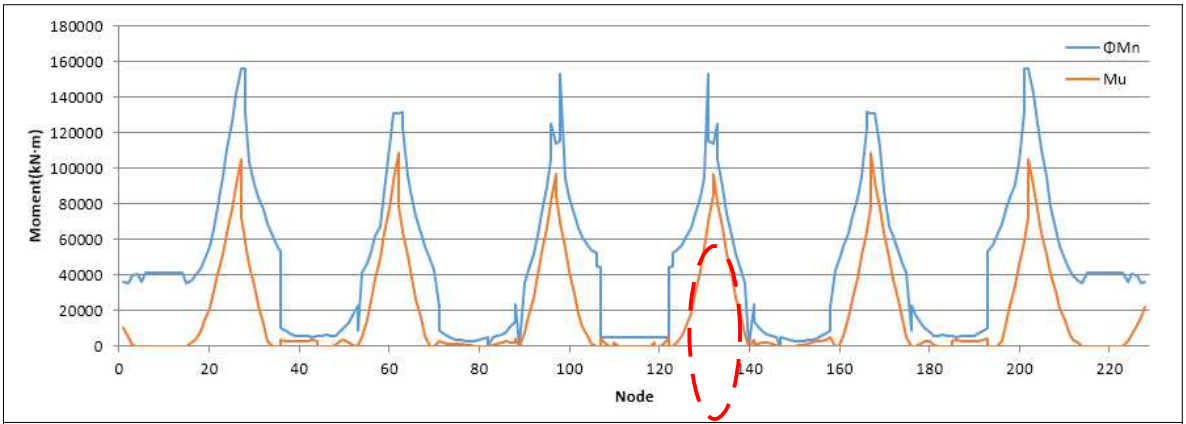
– 강도 검토(ϕM_n–M_u 그래프)

✓ 정모멘트



• Element 167-j : M_u = 18930 kN.m < ϕM_n = 19639 kN.m (1.04)

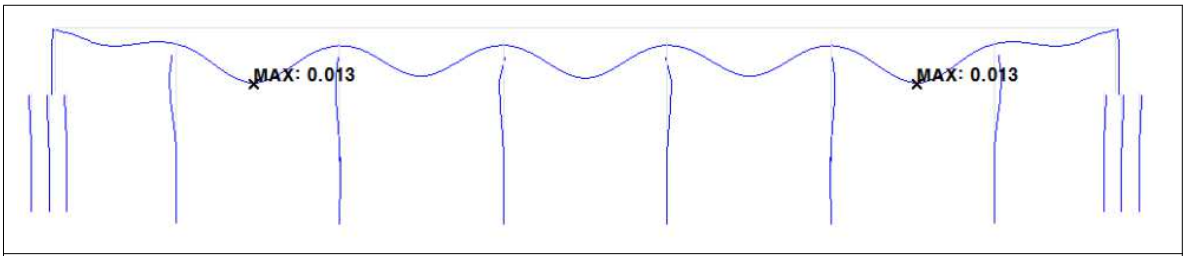
✓ 부모멘트



- Element 121-j : M_u = 4984 kN.m < $\emptyset M_n$ = 5101 kN.m (1.02)

· 처짐 검토

– 주행안전성에 대한 연직처짐 검토는 표준열차하중+충격계수의 하중조합에 의한 처짐값으로 검토



- δ (= 0.013m) < δ_a (= L / 600 = 0.058m) … O.K

· 텐던 공사비 내역서(직접공사비 791,360,450원, 347만원/m)

공 종 명	규 격	수량	단위	재 료 비		노 무 비		경 비		합 계		비 고
				단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액	
1. PSC 공		1	식		485,357,779		274,128,577		31,874,094		791,360,450	
.1.1. 강연선 조립 및 설치	Φ15.2mm	111.512	ton	1,931,250	215,357,550	183,618	20,475,610	12,853	1,433,263	2,127,721	237,266,423	
.1.2. 쉬스관 조립 및 설치												
... 쉬즈관 설치	Φ100mm	4011	m	7,938	31,839,318	14,669	58,837,359	293	1,175,223	22,900	91,851,900	
... 쉬즈관 설치	Φ110mm	816	m	9,072	7,402,752	16,549	13,503,984	330	269,280	25,951	21,176,016	
.1.3. 쉬즈관 그라우팅		39.262	m3	171,360	6,727,936	800,560	31,431,586	218,303	8,571,012	1,190,223	46,730,534	
.1.4. 정착구 설치												
... 긴장용 정착구 설치	22Φ15.2mm	24	개	482,000	11,568,000	176,532	4,236,768	7,061	169,464	665,593	15,974,232	
... 고정용 정착구 설치	22Φ15.2mm	24	개	482,000	11,568,000	176,532	4,236,768	7,061	169,464	665,593	15,974,232	
... 긴장용 정착구 설치	19Φ15.2mm	102	개	456,000	46,512,000	138,511	14,128,122	5,540	565,080	600,051	61,205,202	
... 고정용 정착구 설치	19Φ15.2mm	70	개	456,000	31,920,000	138,511	9,695,770	5,540	387,800	600,051	42,003,570	
... 연결용 정착구 설치	19Φ15.2mm	24	개	1,286,000	30,864,000	207,767	4,986,408	8,310	199,440	1,502,077	36,049,848	
.1.5. 강연선 긴장												
... 강연선 인장(일단)	19Φ15.2mm,모노	76	개소			55,462	4,215,112	3,935	299,060	59,397	4,514,172	
... 강연선 인장(일단)	22Φ15.2mm,모노	88	개소			55,462	4,880,656	3,935	346,280	59,397	5,226,936	
... 강연선 인장(일단)	19Φ15.2mm,멀티	90	개소			277,317	24,958,530	19,680	1,771,200	296,997	26,729,730	
... 강연선 인장(일단)	22Φ15.2mm,멀티	20	개소			296,197	5,923,940	21,007	420,140	317,204	6,344,080	
... 강연선 인장(양단)	19Φ15.2mm,모노	608	개소			102,704	62,444,032	26,113	15,876,704	128,817	78,320,736	
.1.6. 쉬즈관 보호호스 설치,해체		4827	m	393	1,897,011	1,281	6,183,387			1,674	8,080,398	
.1.7. 그라우팅주입구	D25mm, L=800mm	816	EA	932	760,512	372	303,552			1,304	1,064,064	
.1.8. AIR VENT		67	EA	4,200	281,400	1,680	112,560			5,880	393,960	
.1.9. 무수축 몰탈 타설		6.042	m3	3,000,000	18,126,000	191,760	1,158,613	36,525	220,684	3,228,285	19,505,297	
.1.10. 먹트거블러												
... 먹트거블러	D=100	669	개	2,500	1,672,500					2,500	1,672,500	
... 먹트거블러	D=110	136	개	2,800	380,800					2,800	380,800	
.1.11. 정착구 보호캡 설치												
... 정착구 보호캡 설치	19Φ15.2mm	48	개소	280,000	13,440,000	10,981	527,088			290,981	13,967,088	
... 정착구 보호캡 설치	22Φ15.2mm	172	개소	320,000	55,040,000	10,981	1,888,732			330,981	56,928,732	

○ 기본설계안의 개선 및 검토(프리캐스트 타입)

· 교량 개요 : 교각 및 주두부는 현장타설, 중앙 경간 프리캐스트 제작 및 크레인 거치

- 교량 형식 : 8경간 완전일체형 PSC BOX 거더교
- 지간 구성 : L = 24.0 + 6@30.0 + 24.0 = 228.0m
- 교량 폭원 : B = 10.9m (복선)

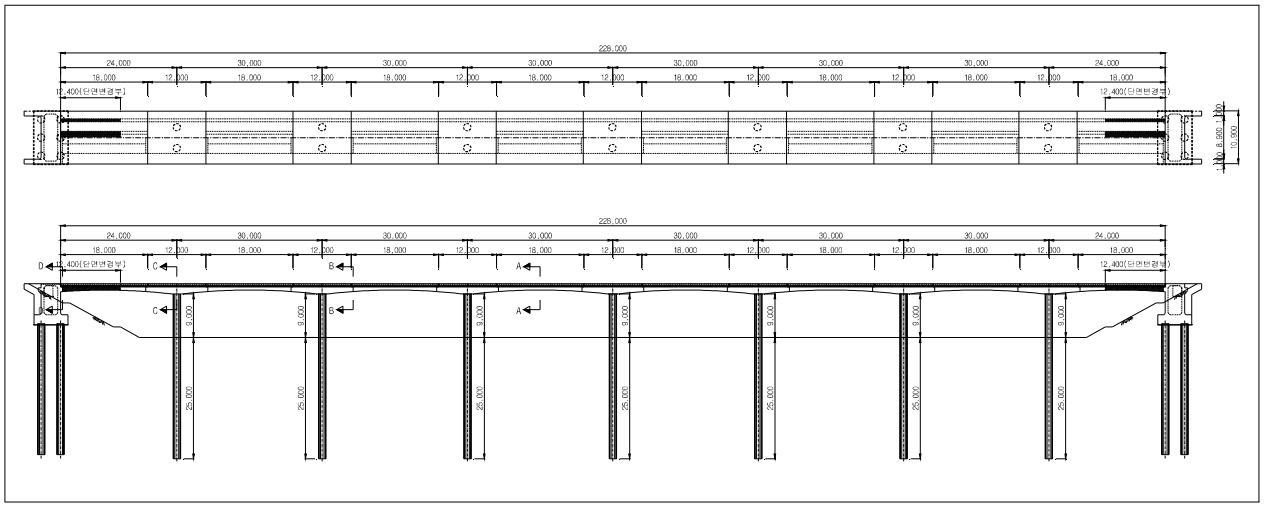


그림 3- 6- 5. 종평면도

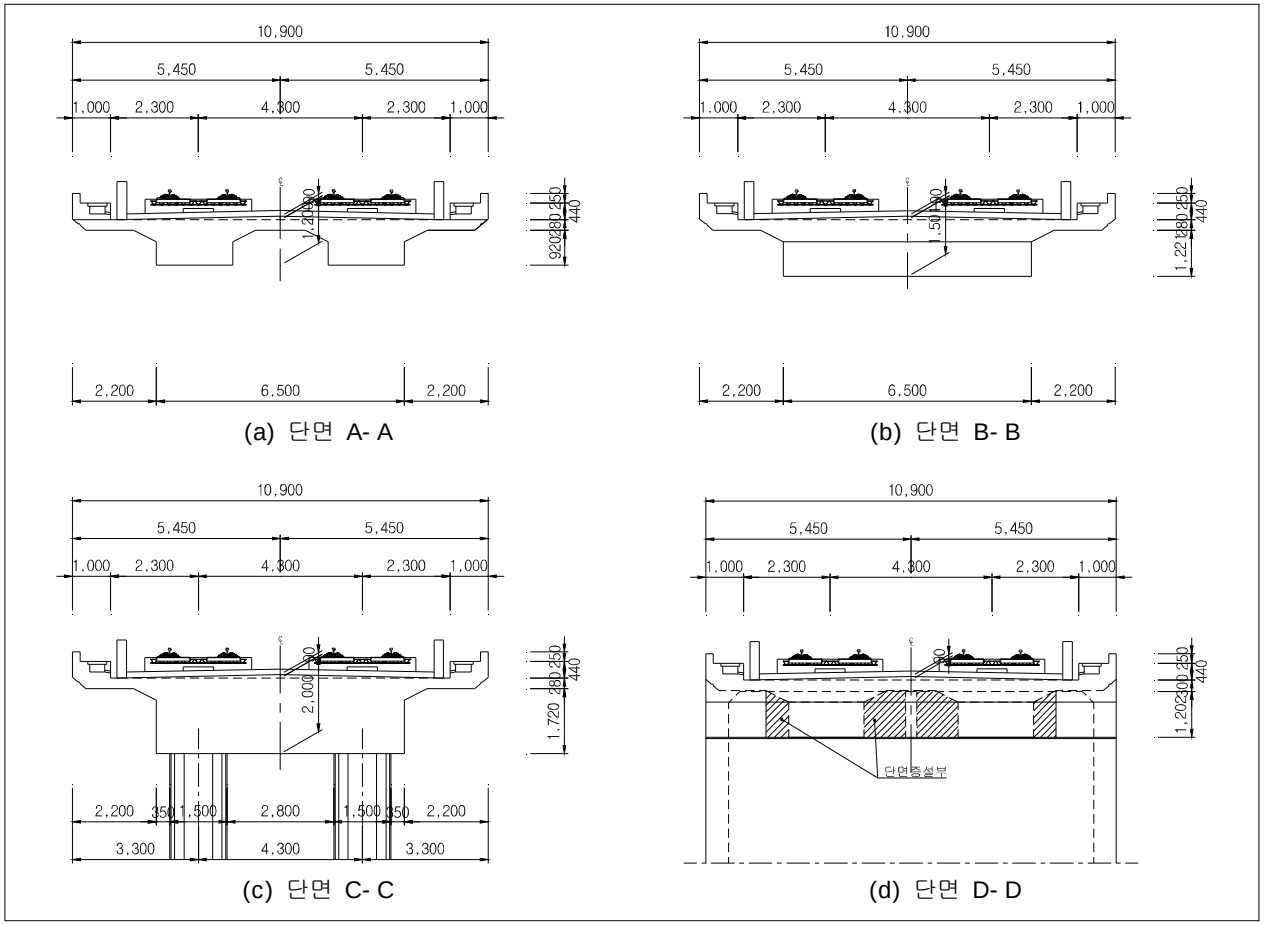


그림 3- 6- 6. 횡단면도

· 텐던 배치도

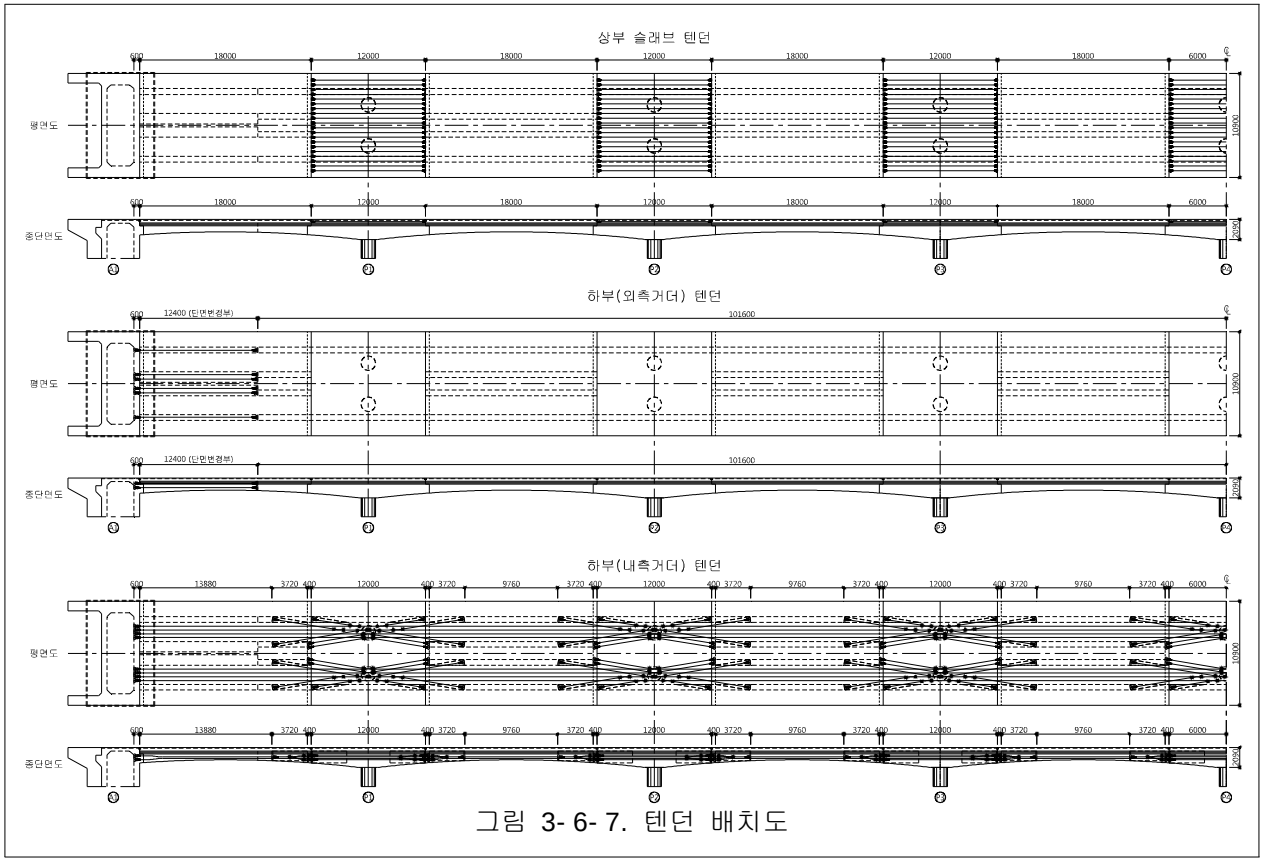
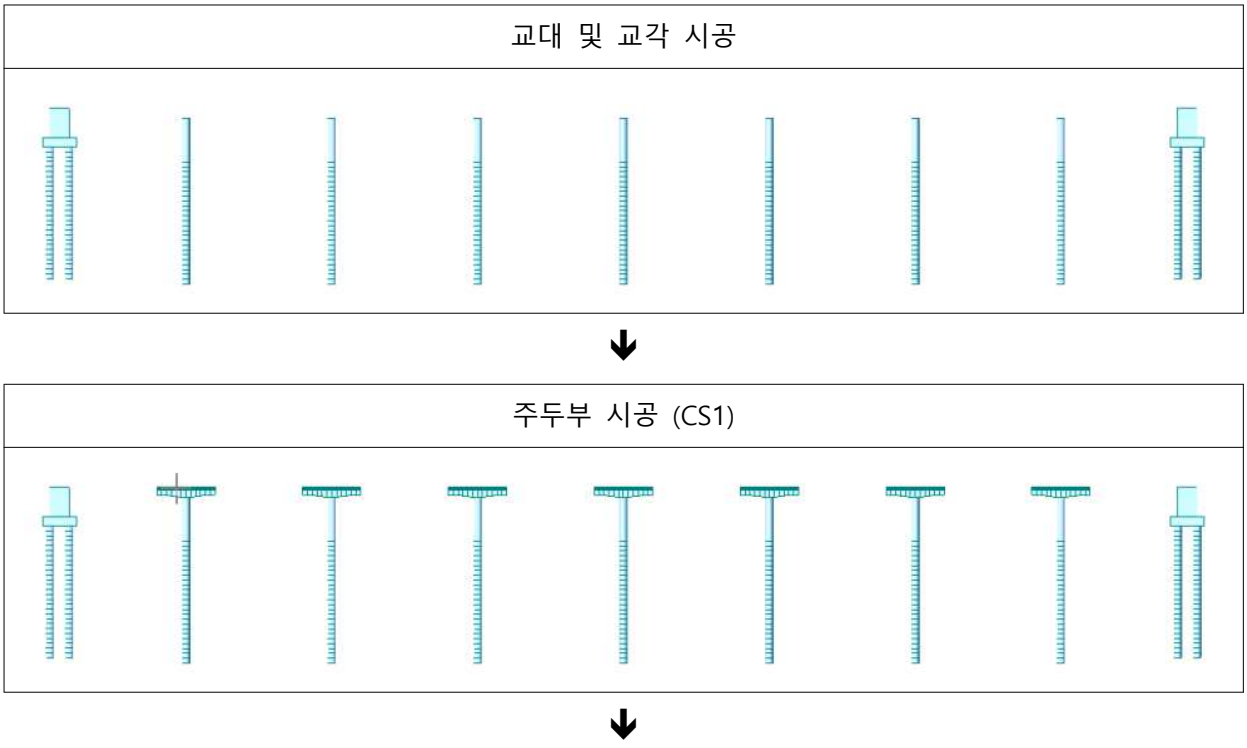


그림 3- 6- 7. 텐던 배치도

· 텐던 도입 긴장력 : 1440MPa (0.9fpy)

· 3D 모델링



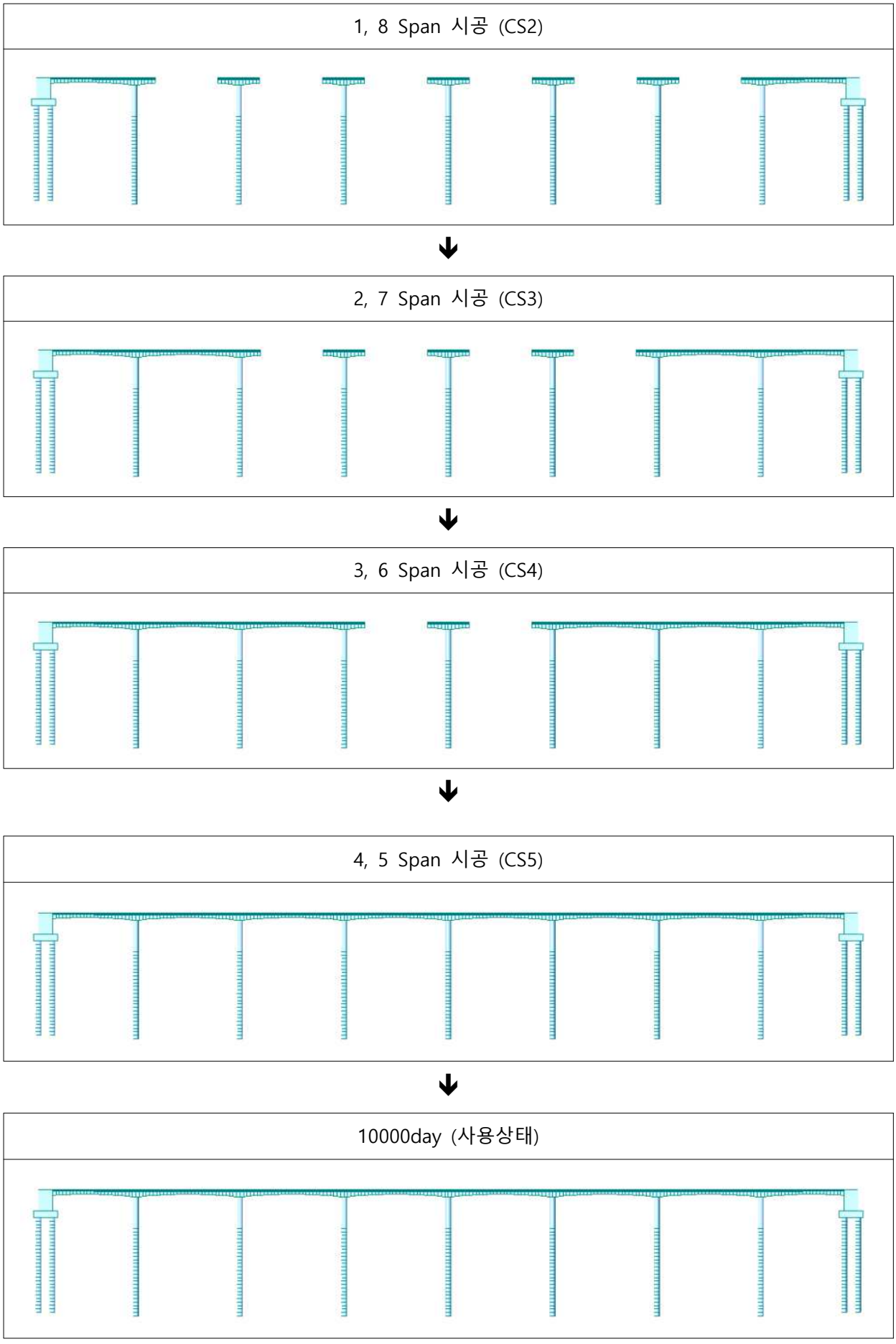
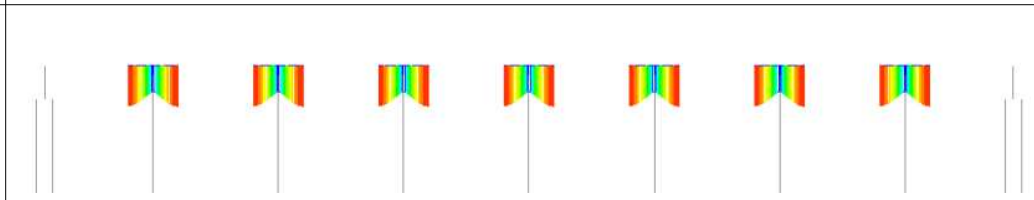
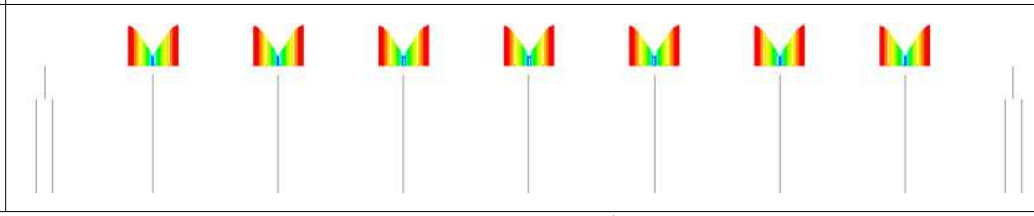
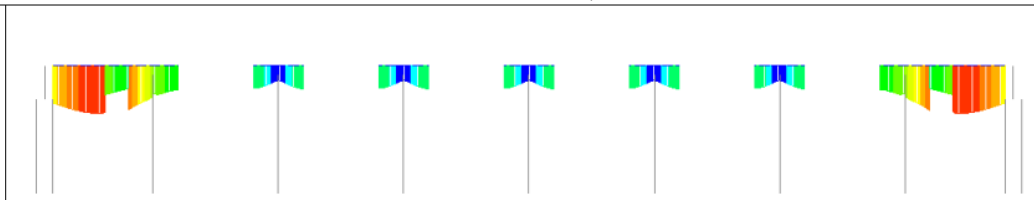
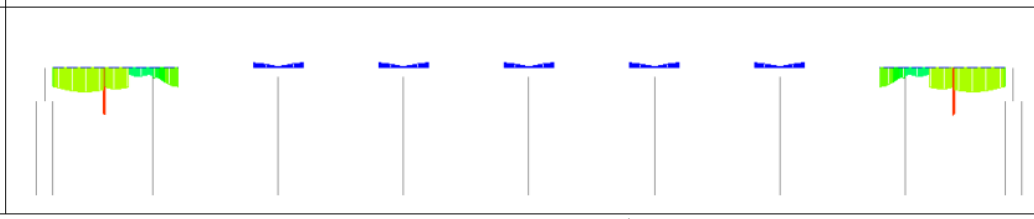
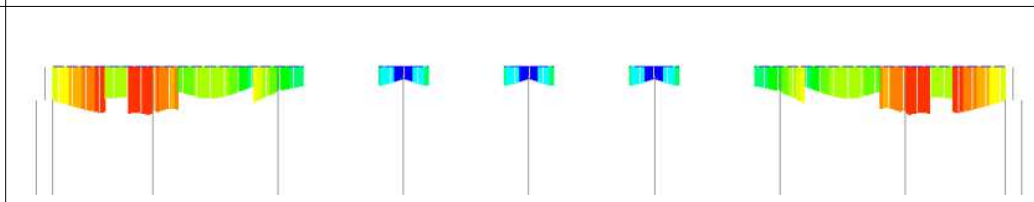
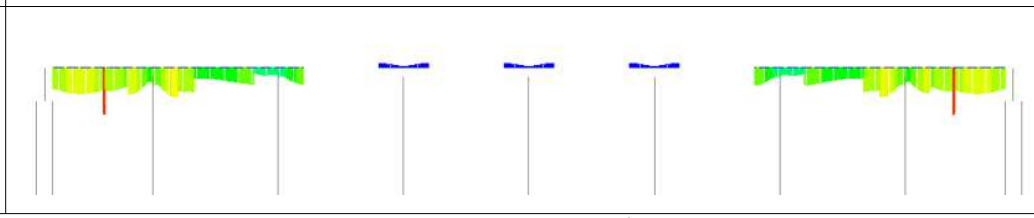
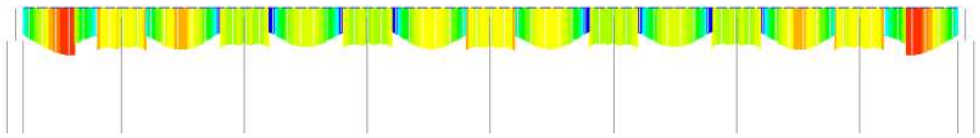
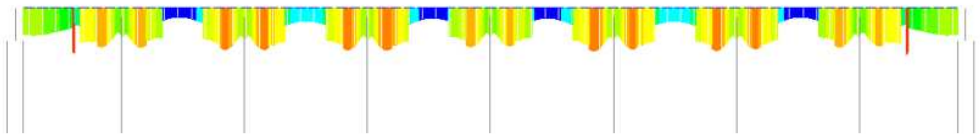
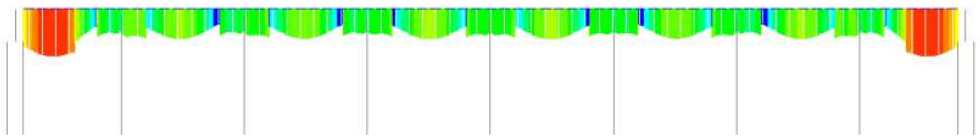
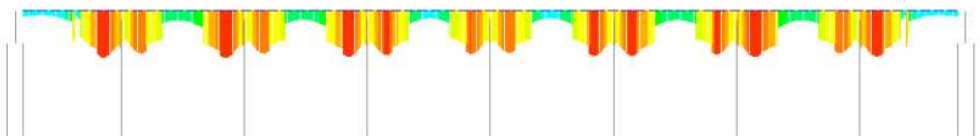


그림 3- 6- 8. 시공 단계별 모델링도

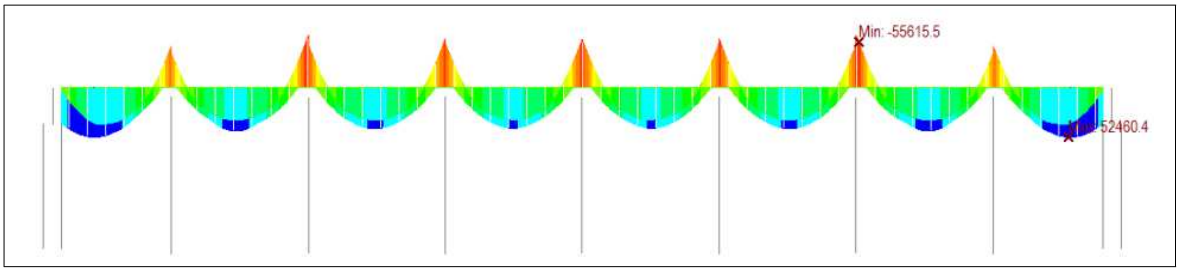
· 응력 검토

구 분		Diagram
CS1	TOP	
	BOT	
• 발생 압축응력 : 3.8MPa < 허용 휨압축응력 : $0.55f_{ci}'$ = 17.6MPa ... O.K • 발생 인장응력 : 1.5MPa < 허용 휨인장응력 : $0.5\sqrt{f_{ci}'}$ = 2.8MPa ... O.K		
CS2	TOP	
	BOT	
• 발생 압축응력 : 15.0MPa < 허용 휨압축응력 : $0.55f_{ci}'$ = 17.6MPa ... O.K • 발생 인장응력 : 1.5MPa < 허용 휨인장응력 : $0.5\sqrt{f_{ci}'}$ = 2.8MPa ... O.K		
구 분		Diagram
CS3	TOP	
	BOT	
• 발생 압축응력 : 16.5MPa < 허용 휨압축응력 : $0.55f_{ci}'$ = 17.6MPa ... O.K • 발생 인장응력 : 1.5MPa < 허용 휨인장응력 : $0.5\sqrt{f_{ci}'}$ = 2.8MPa ... O.K		

CS4	TOP	
	BOT	
• 발생 압축응력 : 15.2MPa < 허용 휨압축응력 : $0.55f_{ci}'$ = 17.6MPa ... O.K • 발생 인장응력 : 1.5MPa < 허용 휨인장응력 : $0.5\sqrt{f_{ci}'}$ = 2.8MPa ... O.K		
CS5	TOP	
	BOT	
• 발생 압축응력 : 13.3MPa < 허용 휨압축응력 : $0.55f_{ci}'$ = 17.6MPa ... O.K • 발생 인장응력 : 0.0MPa < 허용 휨인장응력 : $0.5\sqrt{f_{ci}'}$ = 2.8MPa ... O.K		
사용 상태	TOP	
	BOT	
• 발생 압축응력 : 12.9MPa < 허용 휨압축응력 : $0.4f_{ck}$ x 1.15 = 20.7MPa ... O.K • 발생 인장응력 : 0.04MPa > 허용 휨인장응력 : 0MPa (인장응력이 1span구간에 미미하게 발생)		

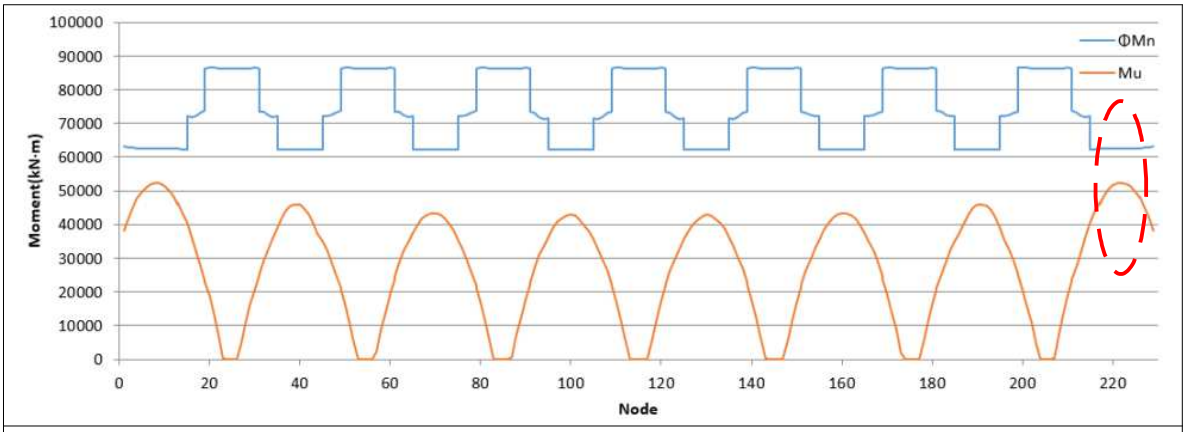
· 휨강도 검토

– 모멘트도(M_u)



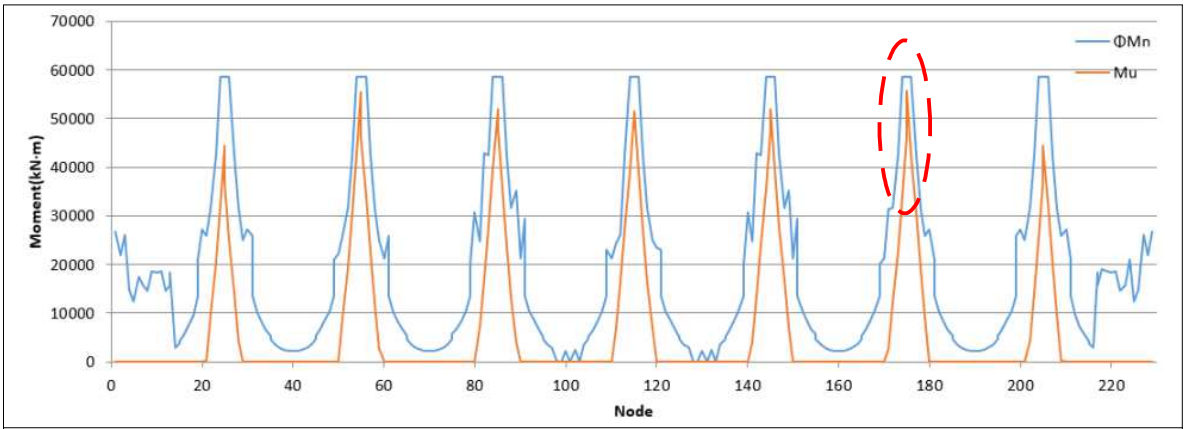
- 강도 검토(ϕM_n-M_u 그래프)

✓ 정모멘트



- Element 221-j : M_u = 52460.42 kN.m < ϕM_n = 62656.11 kN.m (1.19)

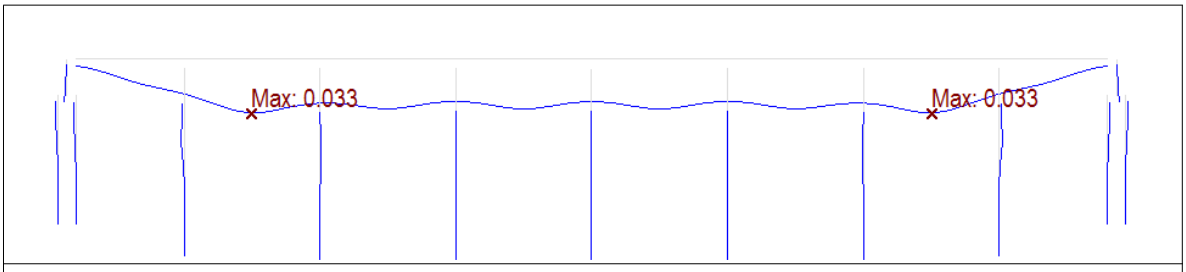
✓ 부모멘트



- Element 175-i : M_u = 55615.5 kN.m < ϕM_n = 58528.19 kN.m (1.06)

· 처짐 검토

- 주행안전성에 대한 연직처짐 검토는 표준열차하중+충격계수의 하중조합에 의한 처짐값으로 검토



- δ (= 0.033m) < δ_a (= L / 600 = 0.050m) ... O.K

· 텐던 공사비 내역서(직접공사비 957,873,286원, 422만원/m)

내역서

공 종 명	규 격	수량	단위	재 료 비		노 무 비		경 비		합 계		비 고
				단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액	단 가	금 액	
☑ 완전일체형 철도교(2안)		1	식		698,008,261		337,197,205		22,667,820		957,873,286	
1. 완전일체형 철도교		1	식		698,008,261		337,197,205		22,667,820		957,873,286	
.1.1. 강연선 조립 및 설치	Φ15.2mm	138.567	ton	1,931,250	267,951,268	183,618	24,525,305	12,853	1,716,736	2,127,721	284,193,309	
.1.2. 쉬스관 조립 및 설치					55,223,532		101,769,602		2,082,069		159,025,203	
... 쉬즈관 설치	= 90x20mm	1618	m	7,371	11,926,278	13,541	21,909,338	270	436,860	21,182	34,272,476	
... 쉬즈관 설치	Φ100mm	5214	m	7,938	41,388,732	14,669	76,484,166	293	1,527,702	22,900	119,400,600	
... 쉬즈관 설치	Φ120mm	187	m	10,206	1,908,522	18,054	3,376,098	361	67,507	28,621	5,352,127	
.1.3. 쉬즈관 그라우팅		45.98	m3	171,360	7,879,132	800,660	36,809,748	218,303	10,037,571	1,190,223	54,726,451	
.1.4. 정착구 설치					168,568,000		79,890,920		3,195,392		251,654,312	
... 긴장용정착구 설치	27Φ15.2mm	16	개	526,000	8,416,000	176,532	2,824,512	7,061	112,976	709,593	11,353,488	
... 고정용정착구 설치	27Φ15.2mm	16	개	526,000	8,416,000	176,532	2,824,512	7,061	112,976	709,593	11,353,488	
... 긴장용정착구 설치	19Φ15.2mm	128	개	456,000	58,368,000	138,511	17,729,408	5,540	709,120	600,051	76,806,528	
... 고정용정착구 설치	19Φ15.2mm	128	개	456,000	58,368,000	138,511	17,729,408	5,540	709,120	600,051	76,806,528	
... 긴장용정착구 설치	5Φ15.2mm	140	개	125,000	17,500,000	138,511	19,391,540	5,540	775,600	269,051	37,667,140	
... 고정용정착구 설치	5Φ15.2mm	140	개	125,000	17,500,000	138,511	19,391,540	5,540	775,600	269,051	37,667,140	
.1.5. 강연선 긴장							80,136,216		5,686,052		85,822,268	
... 강연선 긴장(일단)	19Φ15.2mm,모노	700	개소			55,462	38,823,400	3,935	2,754,500	59,397	41,577,900	
... 강연선 긴장(일단)	27Φ15.2mm,멀티	16	개소			363,515	5,816,240	25,782	412,512	389,297	6,228,752	
... 강연선 긴장(일단)	19Φ15.2mm,멀티	128	개소			277,317	35,496,576	19,680	2,519,040	296,997	38,015,616	
.1.6. 쉬즈관 보호호스 설치,해체					2,345,941		8,939,782				11,285,723	
... 쉬즈관 보호호스	= 90x20mm	1618	m	114	184,452	1,237	2,001,466			1,351	2,185,918	
... 쉬즈관 보호호스	100mm	5214	m	393	2,049,102	1,281	6,679,184			1,674	8,728,286	
... 쉬즈관 보호호스	120mm	187	m	601	112,387	1,386	259,182			1,987	371,569	
.1.7. 그라우팅주입구	D25mm, L=800mm	284	EA	932	264,688	372	105,648			1,304	370,336	
.1.8. AIR VENT		284	EA	3,000	852,000	1,200	340,800			4,200	1,192,800	
.1.9. 무수축 몰탈 타설		6.241	m3	3,000,000	18,723,000	243,015	1,516,656			3,243,015	20,239,656	
.1.10. 먹트거플러					3,000,700						3,000,700	
... 먹트거플러	= 90x20mm	270	개	2,700	729,000					2,700	729,000	
... 먹트거플러	D=100	869	개	2,500	2,172,500					2,500	2,172,500	
... 먹트거플러	D=120	31	개	3,200	99,200					3,200	99,200	
.1.11. 정착구 보호캡 설치					83,200,000		3,162,528				86,362,528	
... 정착구 보호캡 설치	27Φ15.2mm	32	개소	360,000	11,520,000	10,981	351,392			370,981	11,871,392	
... 정착구 보호캡 설치	19Φ15.2mm	256	개소	280,000	71,680,000	10,981	2,811,136			290,981	74,491,136	

○ 최종 개선안(VE/LCC 대상)

· 선행 연구 내용 검토에 따른 개선 개요

- 종단이 낮은 철도교의 특성을 고려 FSM 공법 적용(비교 대상 교량과 도일 종단)
- 경간 분할 최적화(24.0+6@30.0+24.0➜18.0+6@32.0+18.0)
- 교대 강성 증대(폭 3.4m➜4.0m, 높이 10.0m➜4.9m) 및 교각 강성 축소
- 교대부 복합말뚝, 교각부 PSC말뚝 적용(철도교에서 가장 경제적인 말뚝 형식 조합)

· 교량 개요

- 교량 형식 : 8경간 완전일체형 PSC BOX(FSM) 거더교
- 지간 구성 : L = 18.0 + 6@32.0 + 18.0 = 228.0m
- 교량 폭원 : B = 10.9m (복선)

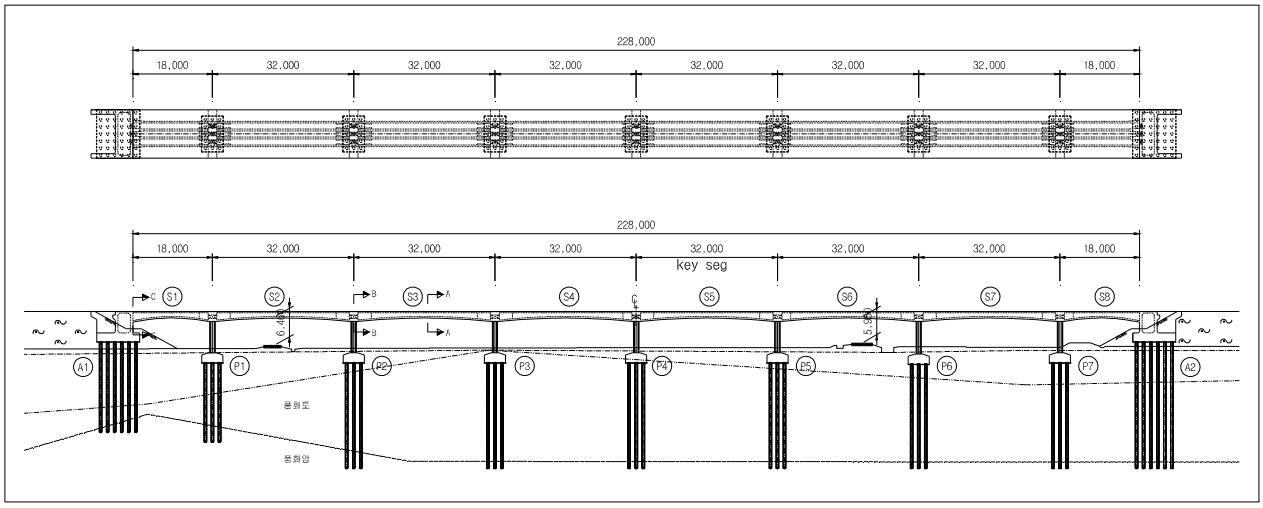
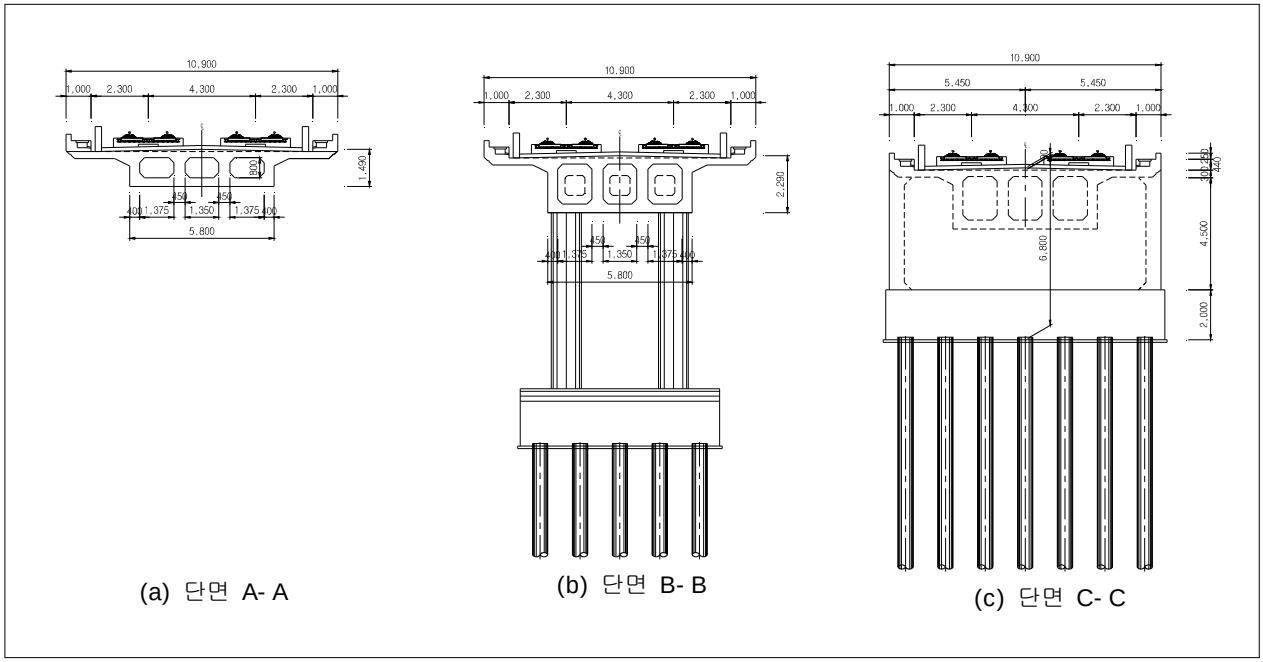


그림 3- 6- 9. 종평면도



(a) 단면 A- A

(b) 단면 B- B

(c) 단면 C- C

그림 3- 6- 10. 횡단면도

· 사용재료 및 허용응력

- 콘크리트 특성(압축강도) : f_{ck} = 50.0MPa (상부 측경간), 45.0MPa (상부 내측경간), 30.0MPa (교대, 교각)
- 허용응력

적용범위	허용응력 (MPa)				허용응력 증가계수
	응력구분	설계기준	45MPa	50MPa	
프리스트레스 도입 직후[주1] (크리프와 건조수축에 의한 손실이 일어나기 전)	압축응력	$0.55f_{ci}'$	19.8	22.0	시공중 1.25
	인장응력	$0.5\sqrt{f_{ci}'}$	3.00	3.16	
사용하중 작용 시 (모든 손실이 일어난 후)	압축응력	$0.4f_{ck}$	18.0	20.0	공용중 1.15
	인장응력	0	0	0	
균열하중 작용 시	균열응력	$0.63\sqrt{f_{ck}}$	4.23	4.45	

주1) 프리스트레스 도입 직후 콘크리트 허용응력은 단면의 콘크리트 재령에 따라 설계기준강도(f_{ck})를 적용할 수 있음.

⇨ 프리스트레스 도입시의 콘크리트 압축강도($f_{ci'}$) : f_{ck} = 45MPa, $f_{ci'}$ = 0.8 × f_{ck} = 36.0 MPa

f_{ck} = 50MPa, $f_{ci'}$ = 0.8 × f_{ck} = 40.0 MPa

- PS 강재

✓ PS 강재(KSD 7002, SWPC 7B)의 재료 특성

구 분	단 위	물성치	구 분	단 위	물성치
탄성계수	MPa	2.0×10^5	곡률마찰계수	μ/rad	0.15
단위중량	kN/m³	78.5			
항복강도	MPa	1,600	파상마찰계수	κ/m	0.0015
인장강도	MPa	1,900			

⇨ 곡률마찰계수 및 파상마찰계수는 도로교설계기준의 마찰계수 최소값 적용

✓ 사용 텐던 단위

Internal Tendon(Bonded) : 6-5(ϕ15.2㎜-5), 6-19(ϕ15.2㎜-19),
6-27(ϕ15.2㎜-27)

· 적용하중

적용하중	적용 하중	비 고
Construction Stage (CS)	1차 고정하중(D1), 2차 고정하중(D2), Prestressing(PS), Creep/Shrinkage(CR/SH)	
Static Load Case (ST)	장대레일 종하중(LR), 토압(H), 활하중(L), 온도하중(GT) 차량 횡하중(LF), 원심하중(CF), 풍하중(W), 시제동하중(SB)	

· 하중조합

- 극한강도 검토 : Envelope(Case1~4)

Case1 : 1.35D + 1.35CR/SH + 1.0PS + 1.85L + 1.60H + 1.35CF + 1.35LF

Case2 : 1.60D + 1.60CR/SH + 1.0PS + 1.60L + 1.60H + 1.60CF + 1.60LF

Case3 : 1.35D + 1.35CR/SH + 1.0PS + 1.40L + 1.60H + 1.35CF + 1.35LF + 1.35GT

Case4 : 1.35D + 1.35CR/SH + 1.0PS + 1.40L + 1.60H + 1.35CF + 1.35LF + 1.35GT
+ 1.40LR + 1.40SB + 1.35W

- 응력 검토 : CS+L+H+ LR +GT

· 텐던 배치 개요도

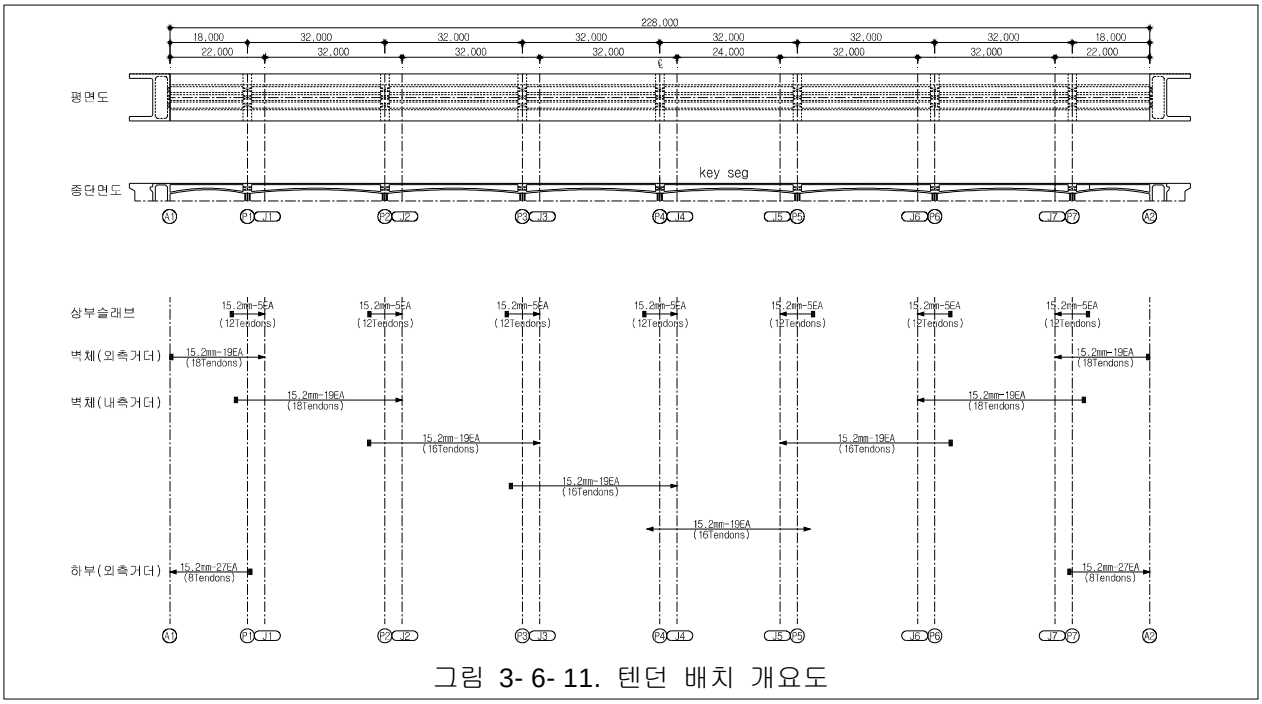
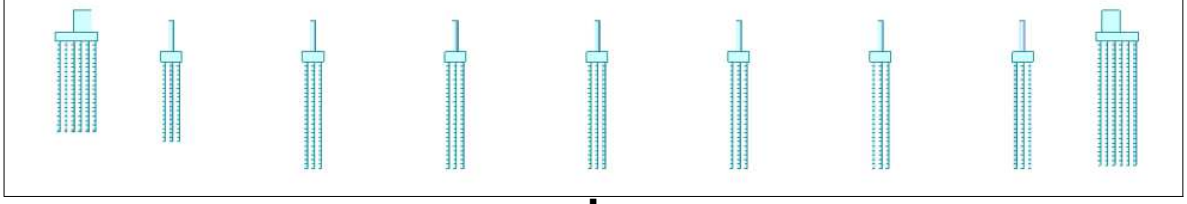


그림 3-6-11. 텐던 배치 개요도

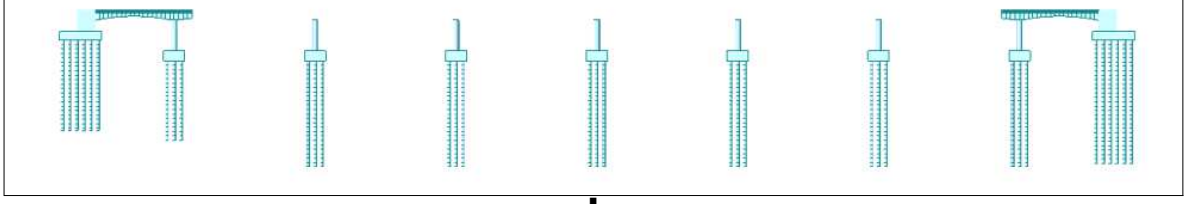
· 텐던 도입 긴장력 : 1440MPa ($0.9f_{py}$)

· 3D 모델링

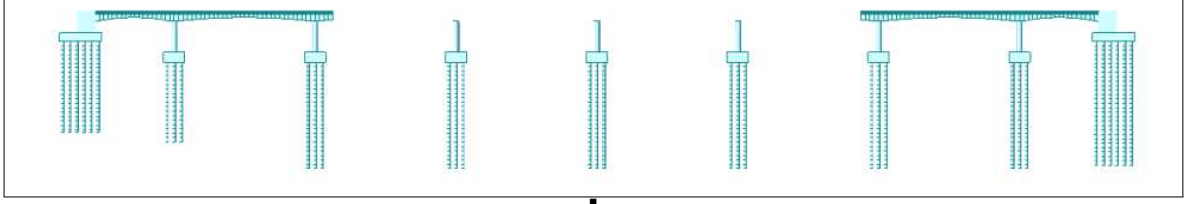
교대 및 교각 시공



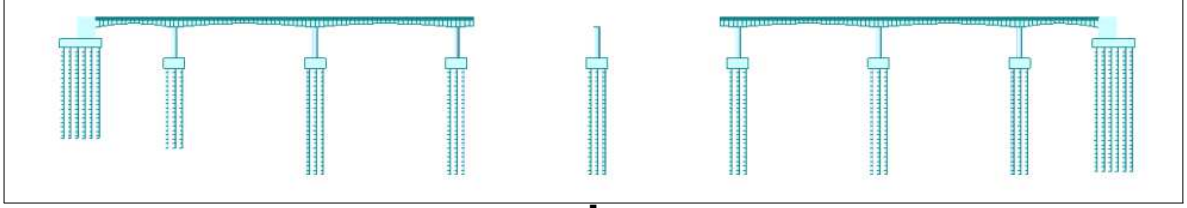
1, 8 Span 시공 (CS1)



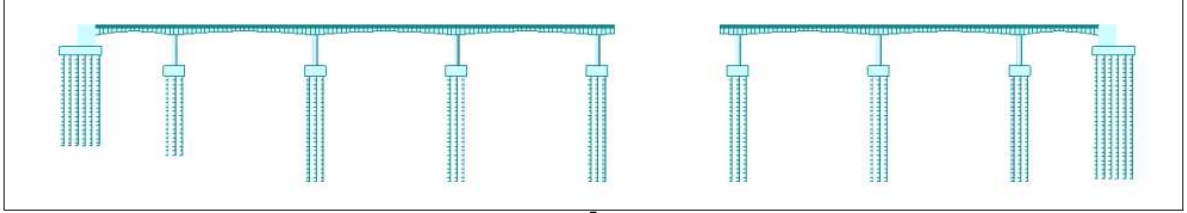
2, 7 Span 시공 (CS2)



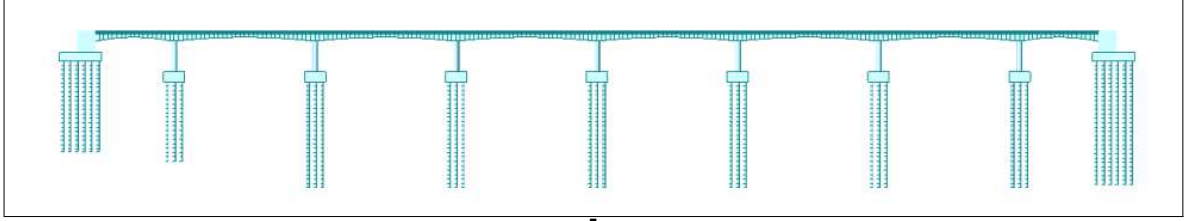
3, 6 Span 시공 (CS3)



4 Span 시공 (CS4)



5 Span 시공 (CS5)



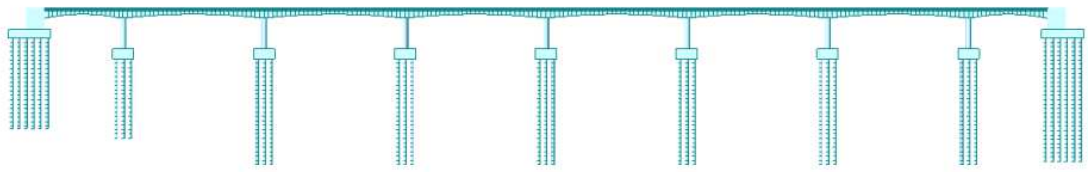
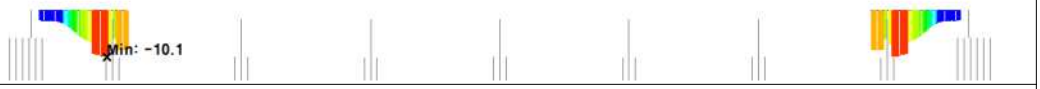
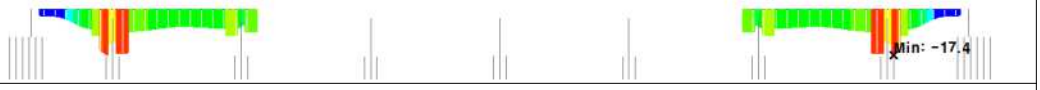
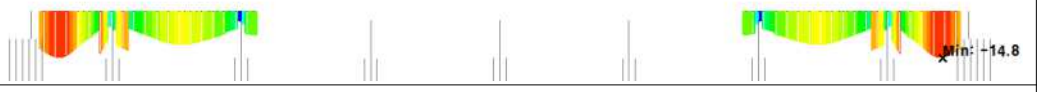
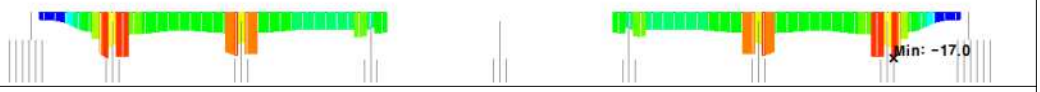
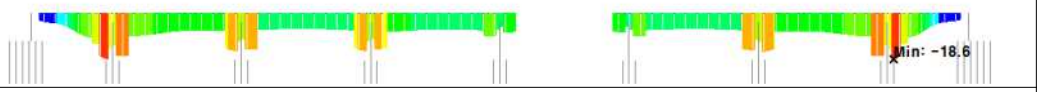
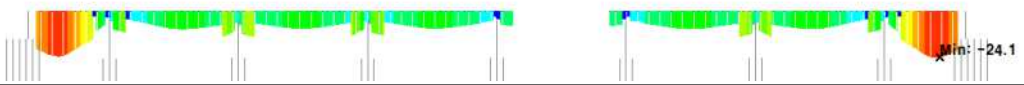
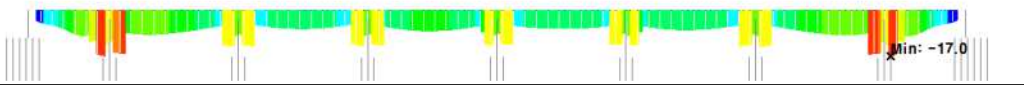
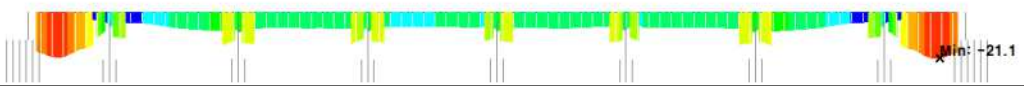
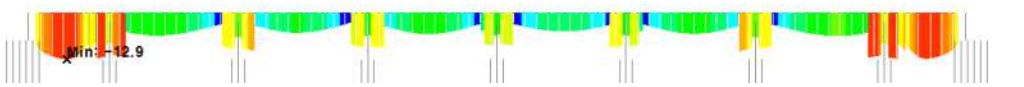
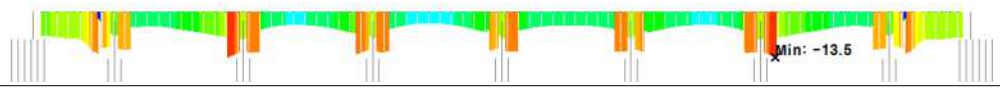
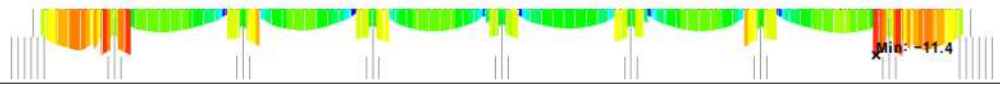
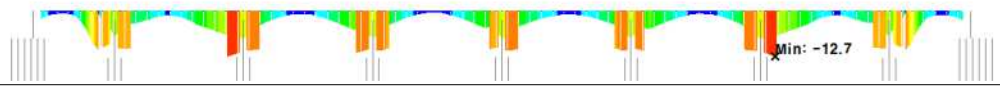
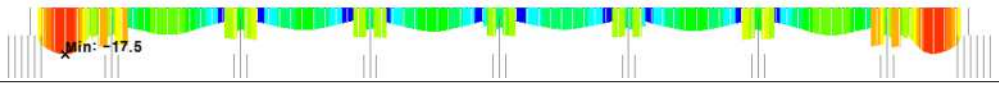
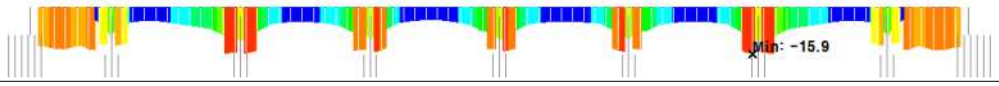
10000day


그림 3- 6- 12. 시공 단계별 모델링도

· 응력 검토

구 분		Diagram
CS1	TOP	
	BOT	
• 발생 압축응력 : 15.8MPa < 허용 휨압축응력 : 0.55f_{ci}' × 1.25 = 27.5MPa ... O.K		
CS2	TOP	
	BOT	
• 발생 압축응력 : 17.4MPa < 허용 휨압축응력 : 0.55f_{ci}' × 1.25 = 27.5MPa ... O.K		
CS3	TOP	
	BOT	
• 발생 압축응력 : 17.0MPa < 허용 휨압축응력 : 0.55f_{ci}' × 1.25 = 27.5MPa ... O.K		
CS4	TOP	
	BOT	
• 발생 압축응력 : 24.1MPa < 허용 휨압축응력 : 0.55f_{ci}' × 1.25 = 27.5MPa ... O.K		
CS5	TOP	
	BOT	
• 발생 압축응력 : 21.1MPa < 허용 휨압축응력 : 0.55f_{ci}' × 1.25 = 27.5MPa ... O.K		
10000 day	TOP	

	BOT	
• 발생 압축응력 : 13.5㎫ < 허용 휨압축응력 : $0.4f_{ck}$ x 1.15 = 20.7㎫ ... O.K		
사용 상태 (Max)	TOP	
	BOT	
• 발생 압축응력 : 12.7㎫ < 허용 휨압축응력 : $0.4f_{ck}$ x 1.15 = 20.7㎫ ... O.K		

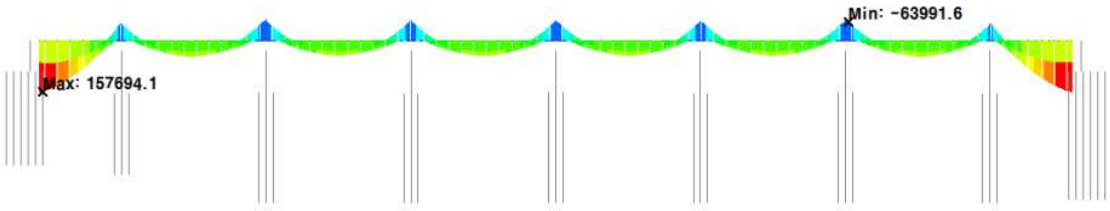
구 분		Diagram
사용 상태 (Min)	TOP	
	BOT	
• 발생 압축응력 : 17.5㎫ < 허용 휨압축응력 : $0.4f_{ck}$ x 1.15 = 23.0㎫ ... O.K		

※ 허용응력 증가계수 : 가설시 1.25, 공용시 1.15

※ 측경간(1, 8Span) : 50MPa / 내측경간(2~7Span) : 45MPa

· 휨강도 검토

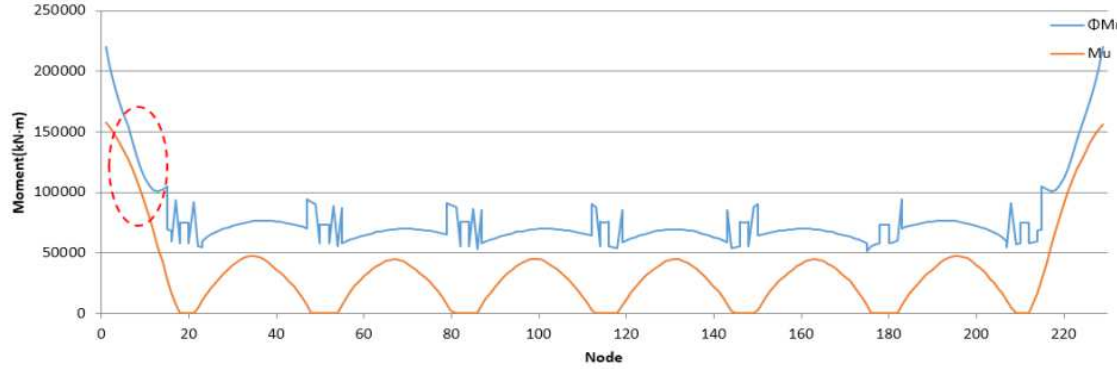
– 모멘트도(M_u)



(단위 : kN. m)

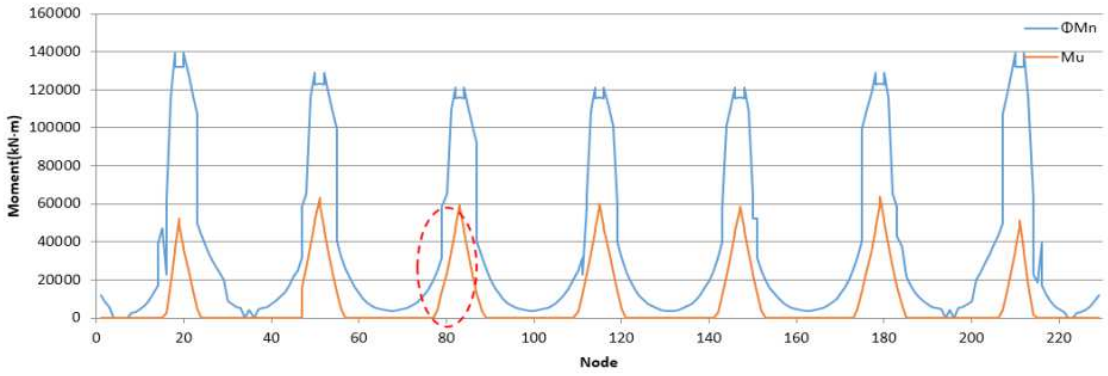
– 강도 검토($ØM_n$–M_u 그래프)

✓ 정모멘트



• Element 7-i : M_u = 119,712 kN.m < $ØM_n$ = 142,022 kN.m (1.19)

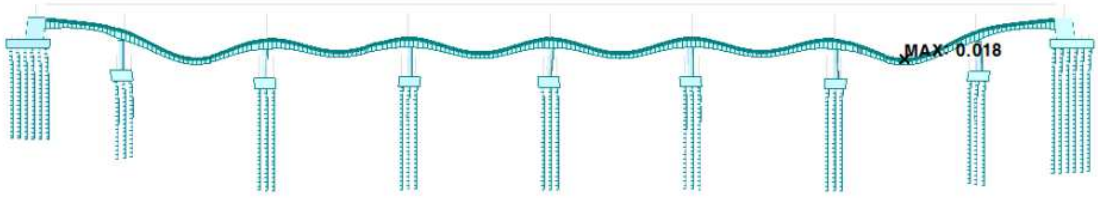
✓ 부모멘트



- Element 82-j : M_u = 59,538 kN.m < $\emptyset M_n$ = 113,642 kN.m (1.90)

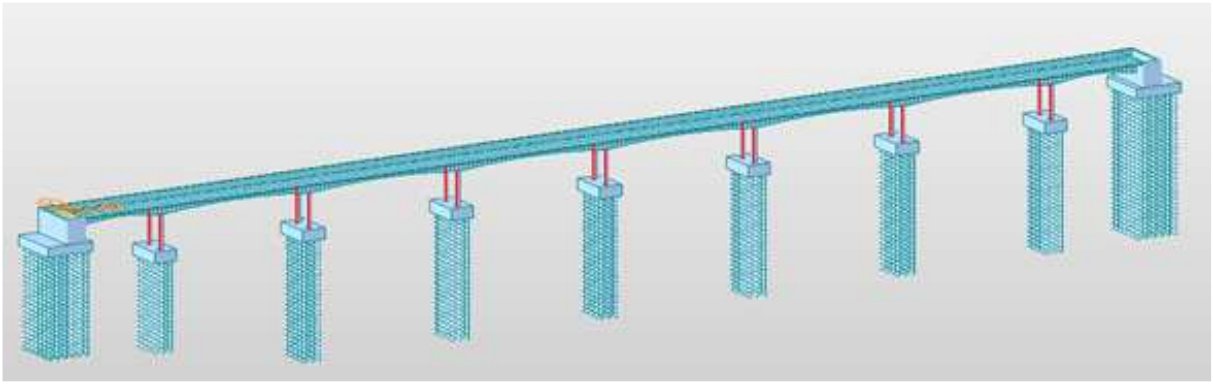
· 처짐 검토

– 주행안전성에 대한 연직처짐 검토는 표준열차하중+충격계수의 하중조합에 의한 처짐값으로 검토



- δ (= 0.018m) < δ_a (= L / 600 = 0.053m) ... O.K

· 교각 검토



(1) 교각기둥 제원

직경 (mm)	Ec (MPa)	γg (kN/m3)	길이 (m)	Es (MPa)	fy (MPa)
1200	27.52	24.52	7.052	2.0e+05	400

(2) Analysis Force

구 분	P (kN)	Mx (kN.m)	My (kN.m)	Vx (kN)	Vy (kN)
Pmax	14716.5	280.1	-123.0	-37.1	-31.6
Pmin	6119.2	-1666.6	983.6	-213.3	588.1
Mx,max	12188.6	-4539.7	98.3	-98.0	82.6
My,max	11180.7	-292.4	-1086.2	-309.0	-84.4
Vx,max	11180.7	-292.4	-1086.2	-309.0	-84.4
Vy,max	9143.2	1162.9	-163.4	-45.3	751.8

(3) Rebar

1) Main Rebar

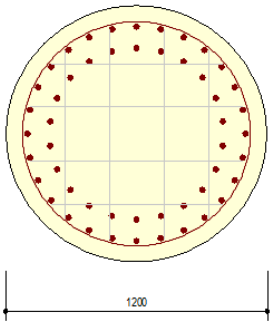
- Layer-1 : 28 - D32 (Cc = 100mm, As = 22,238mm²)
- Layer-2 : 22 - D32 (Cc = 200mm, As = 17,472mm²)

2) Hoop Rebar

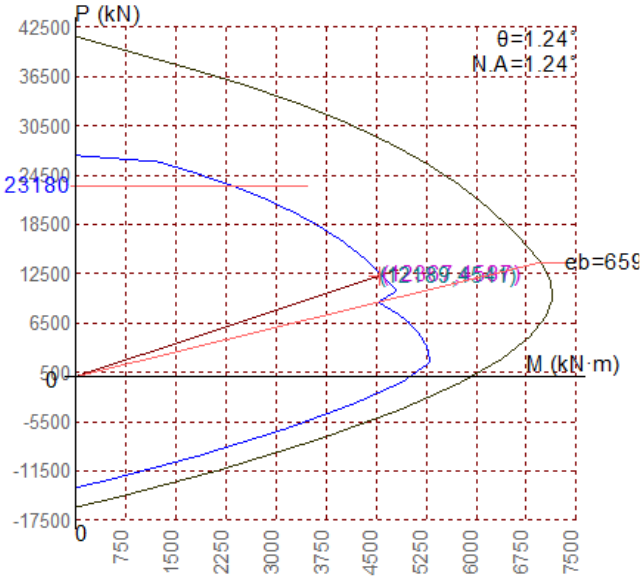
- End : D13@150
- Middle : D13@150

3) Tie Bar

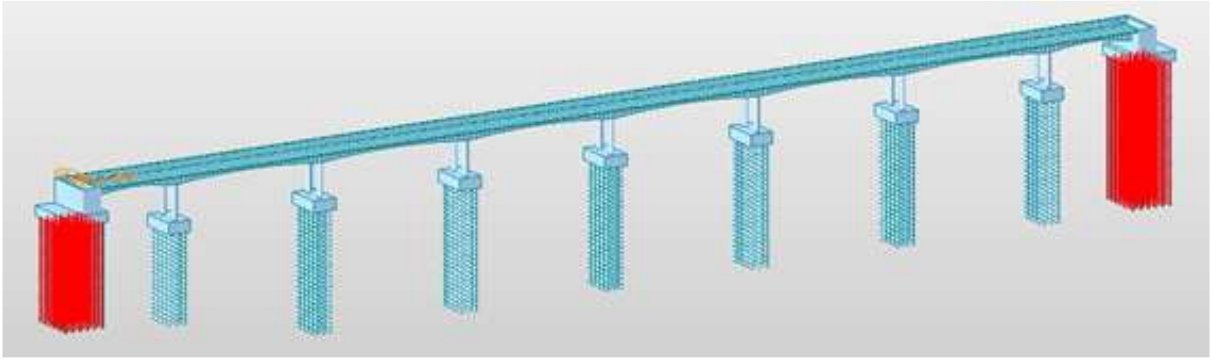
- D16 (Fy = 240MPa)



(4) Check P-M Capacity



· 교대 복합말뚝 검토



(1) 강관말뚝 제원 (0~4.7m)

말뚝의 종류 및 시공법	직경 (mm)	두께 (mm)	부식두께 (mm)
프리보링 강관말뚝	609.6	12	2

(2) PHC말뚝 제원 (4.7m~20.5m, 4.7m~28m)

Diameter (mm)	Thikness (mm)	Effective Prestressing(MPa)			Allowable Stress(MPa)	
		A	B	C	A	B, C
600	90	4.2	7.8	10	20	21.3

A(m²)	Ixx(m⁴)	Iyy(m⁴)	x(m)	y(m)
0.2764	0.00483	0.00483	0.3	0.3

(3) 복합말뚝 응력검토 하중 조합

Load Case	Factor	Type
LR(CB) 장대레일 종하중	: 1.0	Add
H(ST) 토압	: 1.0	Add
Summation(CS) 고정하중, PS, CR/SH	: 1.0	Add
L(CB) 활하중	: 1.0	Add
GT_15(CB) 온도하중	: 1.0	Add
GT_5(CB) 온도하중	: 1.0	Add

(4) 강관말뚝 Analysis Force (0m)

구 분	P(kN)	Hx(kN)	Hy(kN)	H(kN)	Mx(kN.m)	My(kN.m)	M(kN.m)
Hy,max	118.0	3.1	376.5	376.5	-237.9	10.0	238.1
Mx,max	148.6	-1.3	190.2	190.2	-339.1	-7.0	339.1

(5) 강관말뚝 응력 검토

- Allowable Stress

fsa = 190.0 MPa

τsa = 110.0 MPa

- Section Property

D : diameter of pile	:	609.6	mm
t : thickness of pile		12	mm
t0 : corrosion tickness		2	mm
Ap : cross-section area of pile	:	18,711	mm^2
I : moment of inertia	:	829,939,361	mm^4

- Bending stress check

f = P / A ± M (D/2) / I

구 분	P(kN)	M(kN.m)	P/A (MPa)	M(D/2)/I (MPa)	f (MPa)	fsa (MPa)	Check
Mx,max	148.6	339.1	7.9	124.5	132.5	190.0	O.K

- Shear stress check

τ = 2H / A

구 분	H(kN)	τ (MPa)	τsa (MPa)	Check
Hy,max	376.5	40.24	110.0	O.K

(6) PHC말뚝 Analysis Force (4.7m)

구 분	P(kN)	Hx(kN)	Hy(kN)	H(kN)	Mx(kN.m)	My(kN.m)	M(kN.m)
Hy,max	-155.6	-1.3	-55.6	55.6	88.1	-2.2	88.2
Mx,max	-42.4	1.1	-15.8	15.8	220.4	2.4	220.4

(7) PHC말뚝 응력 검토

- Bending stress check

f = P / A ± M (D/2) / I

말뚝응력 = f + 유효프리스트레스응력

구 분	P(kN)	M(kN.m)	P/A (MPa)	M(D/2)/I (MPa)	말뚝응력 (MPa)	허용응력 (MPa)	Check
Hy,max	-155.6	88.2	0.56	5.47	9.5	20.0	O.K
Mx,max	-42.4	220.4	0.15	13.68	17.7	20.0	O.K

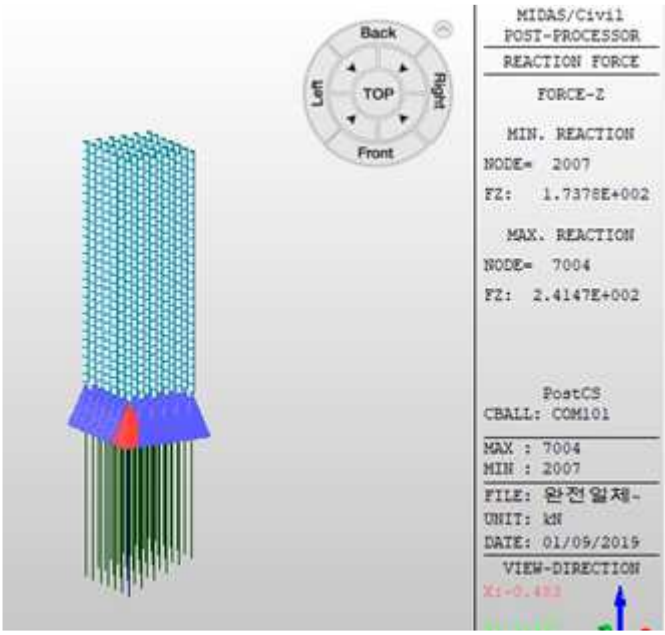
- Shear stress check

τ = 1.96H / A

구 분	H(kN)	τ (MPa)	τsa (MPa)	Check
Pmax	55.6	0.39	1.08	O.K
Pmin	15.8	0.11	1.08	O.K

(8) 말뚝 지지력 검토

- 말뚝의 허용 지지력 : 선단지지 + 마찰지지 말뚝 = 1442.1kN



Max Reaction Force
= 241.5 kN O.K

(9) 말뚝의 수평변위량 검토 (교대)

- 최대 수평변위량 (1행 1열)

Dx (mm)	Dy (mm)	Ry (rad)
−7.075	0.163	−0.000809

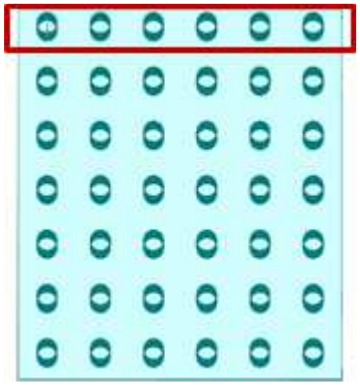
- 작용하중

Axial (kN)	Shear-y (kN)	Shear-z (kN)	Torsion (kN·m)	Moment-y (kN·m)	Moment-z (kN·m)
−85.58	1.87	−32.36	0.01	−80.20	4.76

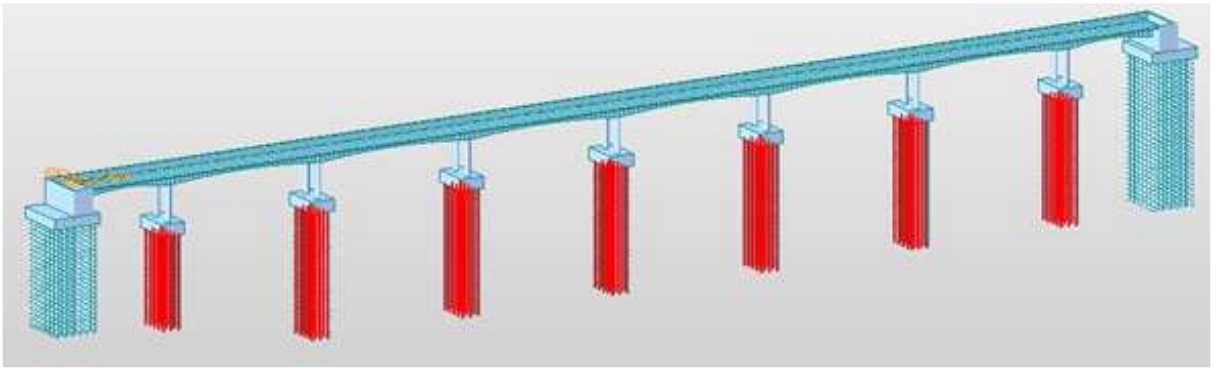
- 말뚝머리 최대 수평변위량 검토

“허용변위량은 말뚝지름의 1%로 하며, 지름 1,500mm 이하인 말뚝의 허용변위량은 15mm로 한다.”

δ = 7.075 mm ≤ δa = 15 mm ∴ O.K



· 교각 PHC말뚝 검토



(1) PHC말뚝 제원

Diameter (mm)	Thikness (mm)	Effective Prestressing(MPa)			Allowable Stress(MPa)	
		A	B	C	A	B, C
600	90	4.0	7.8	10	20	21.3

A(m²)	Ixx(m⁴)	Iyy(m⁴)	x(m)	y(m)
0.2764	0.00483	0.00483	0.3	0.3

(2) PHC 말뚝 응력검토 하중 조합

Load Case	Factor	Type
LR(CB)	: 1.0	Add
H(ST)	: 1.0	Add
Summation(CS)	: 1.0	Add
L(CB)	: 1.0	Add
GT_15(CB)	: 1.0	Add
GT_5(CB)	: 1.0	Add

(3) Analysis Force

구 분	P(kN)	Hx(kN)	Hy(kN)	H(kN)	Mx(kN.m)	My(kN.m)	M(kN.m)
Pmax	1625.4	0.0	-0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
Pmin	699.0	1.1	-1.2	1.6	-39.8	7.3	40.5
Hx,max	1196.8	-5.0	-6.7	8.3	-15.8	-10.7	19.1
Hy,max	827.8	2.4	27.1	27.2	-13.8	-1.1	13.8
Mx,max	1301.0	-1.8	6.9	7.1	-114.3	-11.4	114.9
My,max	1301.0	-1.8	6.9	7.1	-114.3	-11.4	114.9

(4) 응력 검토

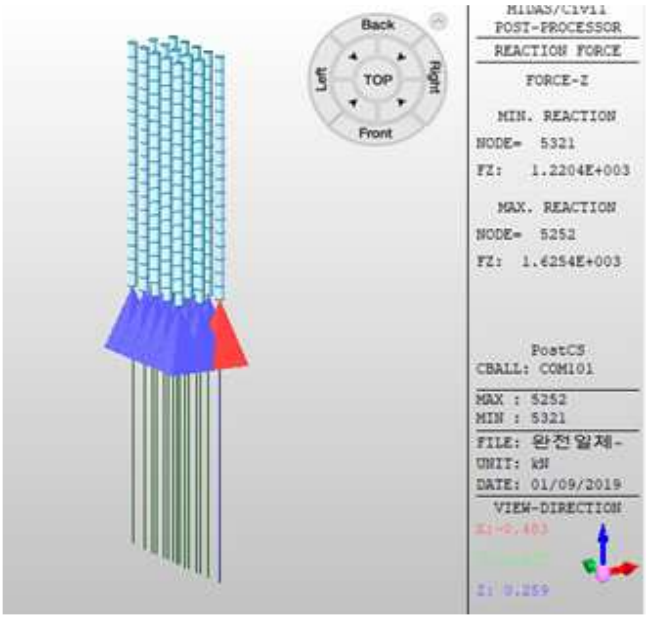
- Bending stress check

f = P / A ± M (D/2) / I　　말뚝응력 = f + 유효프리스트레스응력

구 분	P(kN)	M(kN.m)	P/A (MPa)	M(D/2)/I (MPa)	말뚝응력 (MPa)	허용응력 (MPa)	Check
Pmax	1625.4	0.0	5.88	0.00	9.9	20.0	O.K
Pmin	699.0	40.5	2.53	2.51	9.0	20.0	O.K
Hx,max	1196.8	19.1	4.33	1.18	9.5	20.0	O.K
Hy,max	827.8	13.8	3.00	0.86	7.9	20.0	O.K
Mx,max	1301.0	114.9	4.71	7.13	15.8	20.0	O.K
My,max	1301.0	114.9	4.71	7.13	15.8	20.0	O.K

(5) PHC 말뚝 지지력 검토

- 허용 지지력 : 1609.2 kN (지반조사보고서 참조)



Max Reaction Force
= 1625.4 kN
Say O.K (Error rate : about 1%)
(향후 말뚝 본수 조정)

(6) 말뚝의 수평변위량 검토

- 최대 수평변위량

Dx (mm)	Dy (mm)	Ry (rad)
3.767	0.099	0.001968

- 작용하중

Axial (kN)	Shear-y (kN)	Shear-z (kN)	Torsion (kN·m)	Moment-y (kN·m)	Moment-z (kN·m)
-1246.94	0.02	-0.52	0.01	0.95	-0.04

- 말뚝머리 최대 수평변위량 검토

"허용변위량은 말뚝지름의 1%로 하며, 지름 1,500mm 이하인 말뚝의 허용변위량은 15mm로 한다."

δ = 3.767 mm ≤ δa = 15 mm ∴ O.K

· 공사비 및 주요 물량 비교

구분			기존 철도교 225m	일체형(FSM) 228m	증감	비고
상부공			1,307,546,366	1,552,806,771	245,260,405	주경간장 확대 : 25m → 32m
교대공			69,356,255	77,038,717	7,682,462	
교각공			295,944,335	80,436,999	(215,507,336)	
토공 및 기초공			628,513,117	422,102,622	(206,410,495)	
주요, 지급 자재비			2,100,979,912	1,130,579,730	(970,400,182)	
순공사비			4,402,339,985	3,262,964,839	(1,139,375,146)	
총공사비			5,634,995,181	4,176,594,994	(1,458,400,187)	
M당(만원)			2,504	1,832	73.1%	※말뚝기초 시
레미콘	25-40-15	㎥	1,283	1,736	453	상부구조
	25-27-15	㎥	1,023	65	(958)	
	25-24-15	㎥	3,275	1,480	(1,795)	하부구조
	계	㎥	5,581	3,281	(2,300)	58.8%
철근	SD30	ton	212.274	256.943	44.669	PSC
	SD40	ton	677.991	210.110	(467.881)	RC
	계	ton	890.265	467.053	(423.212)	52.5%
PHC말뚝	D=600	m	7,598	2,403	(5,195)	31.6%
복합말뚝	D=600	m	1,258	2,058	800	163.6%
교량받침		개	90	-	(90)	

· 완전 일체형 연속교 내역서(PSC BOX 18.0+6@32.0+18.0=228.0m)

공 종 명	규 격	수량	단위	합 계		비 고
				단 가	금 액	
총공사비	순공사비×1.282	228.0	m	18,318,399	4,176,594,994	
순공사비	교량공+주요자재비+지급자재비				3,262,964,839	
직접공사비	교량공+주요자재비				2,796,684,081	
1. 교 량 공		1	식		2,132,385,109	
1-1. 토공 및 기초공		0			422,102,622	
1) 토 공		0			92,832,186	
토사터파기	육상,H=4m 미만,기계	3624	㎥	1,036	3,754,464	2.토공
되메우기및다짐	토사	3019	㎥	4,533	13,685,127	2.토공
구조물뒷채움	잡 석,로울러다짐	823	㎥	32,138	26,449,574	2.토공
구조물뒷채움	잡 석,램머다짐	353	㎥	36,556	12,904,268	2.토공
물푸기	양수기,φ150mm	511	hr	4,403	2,249,933	10.기계
앞성토	토 사	3123	㎥	6,470	20,205,810	
법면보호블럭	400×400×100mm	319	㎡	37,539	11,974,941	
보호블럭기초	하천용	33	m	19,589	646,437	
비탈면보호공	씨앗뿜어붙이기+ 거적덮기	212	㎡	4,536	961,632	16.조경
2) 기초말뚝박기		0			329,270,436	
PHC 말뚝박기	φ600mm×90T,외부케이싱내부굴착	2403	m	42,968	103,252,104	6.비계
복합말뚝박기	φ600mm×12T,외부케이싱내부굴착	2058	m	47,264	97,269,312	6.비계
말뚝두부보강	PHC 말뚝,φ600mm	105	본	128,226	13,463,730	
말뚝두부보강	복합말뚝,φ600mm	84	본	293,158	24,625,272	
PHC 말뚝이음	φ600mm	378	본	194,881	73,665,018	
말뚝재하시험비	동재하시험	9	회	500,000	4,500,000	
말뚝재하시험비	정재하시험	2	회	3,000,000	6,000,000	
말뚝재하시험비	수평재하시험	1	회	2,695,000	2,695,000	
말뚝비파괴검사	복합말뚝	8	개소	200,000	1,600,000	

공 종 명	규 격	수량	단위	합 계		비 고
				단 가	금 액	
말뚝비파괴검사	기성말뚝	11	개소	200,000	2,200,000	
1-2. 교 대 공		**0**			**77,038,717**	
1) 콘크리트타설		0			8,037,764	
바닥콘크리트	무근,fck=18MPa	23	㎥	12,508	287,684	9.철근
구체콘크리트	철근,fck=24MPa	720	㎥	10,764	7,750,080	9.철근
2) 거푸집		0			22,525,967	
합판거푸집	6 회,H=0～7m 이하	9	㎡	14,317	128,853	9.철근
합판거푸집	4 회,H=0～7m 이하	167	㎡	17,523	2,926,341	9.철근
합판거푸집	3 회,0～7.0m 이하	554	㎡	20,095	11,132,630	9.철근
문양거푸집	합성수지,H = 0～7m 이하	187	㎡	44,589	8,338,143	
3) 강관비계매기	3 개월,H=30m 이하	562	㎡	9,730	5,468,260	6.비계
4) 동바리		0			6,069,730	
강관동바리	교량용,H=0～7m 이하	275	공/㎡	20,581	5,659,775	9.철근
동바리수평연결재	강관	119	㎡	3,445	409,955	9.철근
5) 방수공		0			1,593,014	
아스팔트방수	벽체,2 회	160	㎡	7,616	1,218,560	3.미장
아스팔트방수	바닥,2 회	71	㎡	5,274	374,454	3.미장
6) 교명주및교명판설치		0			4,475,112	
교명주 설 치	화강암,600×800×1200mm	2	개	2,104,851	4,209,702	17.조경시설
교명판	450x350x10	2	개소	70,812	141,624	17.조경시설
설명판	350x250x10	2	개소	34,464	68,928	17.조경시설
측량기준점설치	황동주물	2	개소	27,429	54,858	
7) 스페이서설치		0			262,084	
스페이서설치	벽체	908	㎡	273	247,884	
스페이서설치	슬래브및기초	142	㎡	100	14,200	
8) 철근가공조립		0			17,829,922	/%
철근가공조립	복잡	46	Ton	387,607	17,829,922	9.철근
9) 배면배수시설		0			734,827	
부직포 설 치	200g/㎡	29	㎡	135	3,915	
유공관 설 치	THP 유공관,φ200 ㎜	46	m	8,606	395,876	
무공관 설 치	THP 무공관,φ200 ㎜	52	m	6,443	335,036	
10) 배수공 설 치	PVC Pipe,D50×160mm	26	개소	203	5,278	
11) 관로뚜껑제작설치	490×300×80 ㎜	88	개	5,810	511,280	
12) 물끊기홈설치	알루미늄,ㄷ-30×20mm	26	m	746	19,396	
13) 교대번호표지판	900×900×1.0mm	2	개	78,920	157,840	
14) 교대점검용계단		2	개소	3,599,548	7,199,096	
15) 교량난간설치	스텐레스,H=1.00m	13	m	165,319	2,149,147	7.금속
16) 자갈막이	H=0.23m		m	16,677		
1-3. 교 각 공		**0**			**80,436,999**	
1) 콘크리트타설		0			8,209,688	
바닥콘크리트	무근,fck=18MPa	29	㎥	12,508	362,732	9.철근
구체콘크리트	철근,fck=24MPa	729	㎥	10,764	7,846,956	9.철근
2) 거푸집		0			16,997,643	
합판거푸집	6 회,H=0～7m 이하	18	㎡	14,317	257,706	9.철근
합판거푸집	4 회,H=0～7m 이하	412	㎡	17,523	7,219,476	9.철근
강재거푸집	원형,H=0～7m 이하	317	㎡	30,033	9,520,461	9.철근
3) 강관비계매기	3 개월,H=30m 이하	400	㎡	9,730	3,892,000	6.비계
4) 강관동바리		0				
5) 교각번호표지판	900×900×1.0mm	7	개	78,920	552,440	
6) 스페이서설치		0			240,386	
스페이서설치	벽체	782	㎡	273	213,486	
스페이서설치	슬래브및기초	269	㎡	100	26,900	
7) 커플러설치		0			42,095,940	
나사식이음	직경 25mm	168	개소	5,306	891,408	
8) 철근가공조립	매우복잡	93	Ton	409,151	38,051,043	9.철근
강판전기용접	X-형용접,T = 16mm,횡향	29	m	108,741	3,153,489	
9) 교각접지선부설	H=13m	14	개소	603,493	8,448,902	

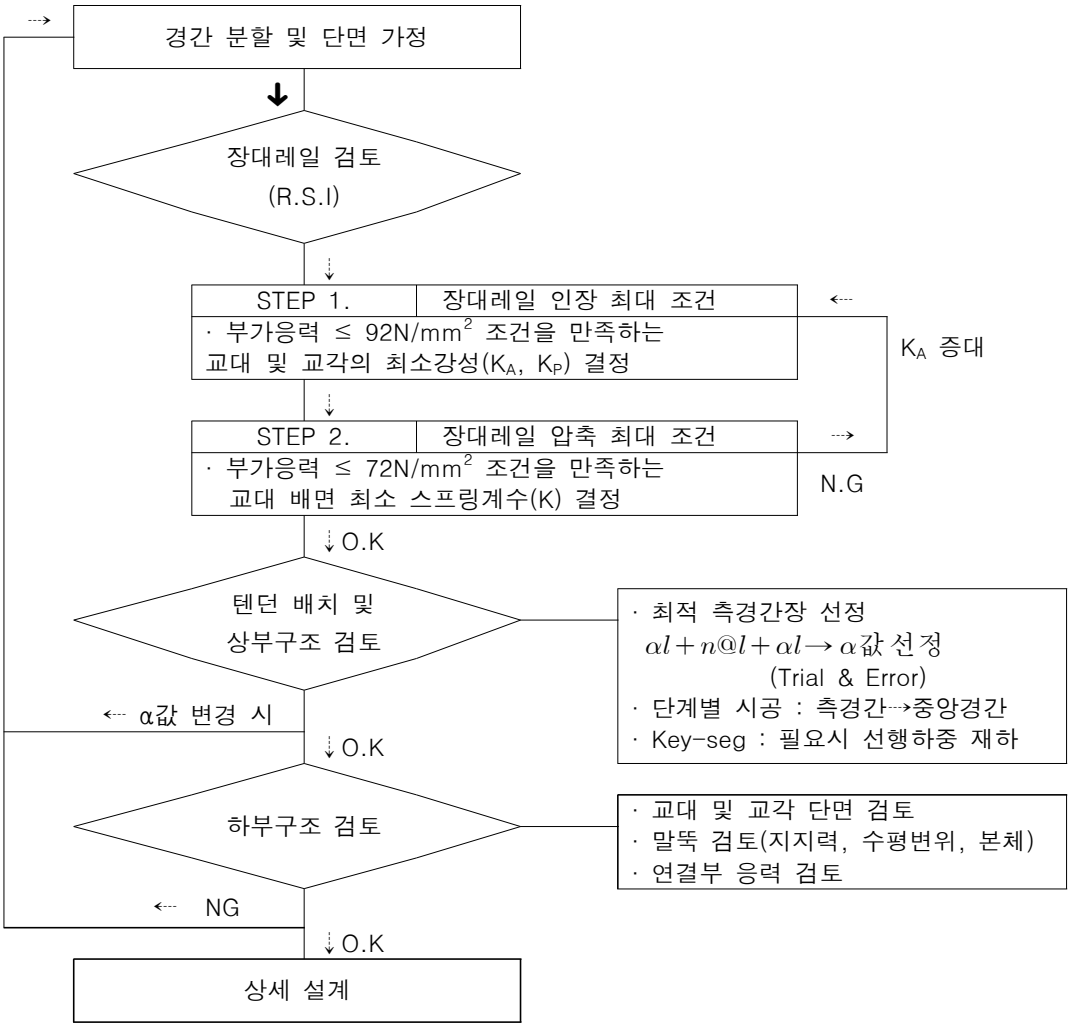
공 종 명	규 격	수량	단위	합 계		비 고
				단 가	금 액	
1-4. 상 부 공		**0**			**1,552,806,771**	
1) 콘크리트타설		0			19,375,200	
구체콘크리트	철근,fck=27MPa	1800	㎥	10,764	19,375,200	9.철근
2) 거푸집		0			144,687,117	
합판거푸집	3 회,0～7.0m 이하	6783	㎡	20,095	136,304,385	9.철근
문양거푸집	합성수지,H = 0～7m 이하	188	㎡	44,589	8,382,732	
3) 동바리		0			144,892,564	
동바리	교량용(단가 수정)	8109	공/㎥	13,066	105,952,194	
슬래브 거푸집 받침대		1505	공/㎡	25,874	38,940,370	
4) 슬라브면고르기	데크피니셔	1984	㎡	437	867,008	
5) 교량신축이음		0				
6) 교 면 방 수	침투식액체	1984	㎡	19,694	39,072,896	3.미장
7) 물끊기홈설치	알루미늄,ㄷ-30×20mm	494	m	746	368,524	
8) 배수시설		0			97,784,183	
배수공 설 치	PVC Pipe,D50×260mm	228	개소	330	75,240	
관로뚜껑제작설치	490×300×80 ㎜	1498	개	5,810	8,703,380	
교량배수시설	금암교	1	식	89,005,563	89,005,563	
9) 교량유지관리표지판	난간용,300×210×0.5mm	8	개	47,674	381,392	
10) 방음벽설치		0			87,189,600	
방음벽제작및설치(교량용)	반사형,H2.0m×W4.0m	240	m	363,290	87,189,600	7.금속
11) 교좌장치설치		0				/%
12) 교좌장치점검통로		0				
13) 스페이셔	슬라브 및 기초	5452	㎡	100	545,200	
14) 철근가공조립	복잡	280	Ton	387,607	108,529,960	
15) 초기우수처리시설	탑천교		식	14,000,000		
16) 슬라브양생	피막양생	1984	㎡	409	811,456	
17) 교량난간설치	스텐레스,H=1.00m	200	m	165,319	33,063,800	7.금속
19) 비산자갈방진망설치		32	m	225,459	7,214,688	
20) 전철주받침설치		18	개소	1,720,331	30,965,958	
21) 미관줄눈설치	목재,50×30mm		m	2,295		
22) 와이어메쉬 설치	#8-100*100		㎡	2,160		
23) 방음벽기초		60	개소	40,265	2,415,900	
24) 횡빔철근연결용접		0				
25) PSC 공		1	식		834,641,325	
26) IPC 거더제작및설치		0				
1-5. 가도 및 축도		**0**				
비탈면보호공	씨앗뿜어붙이기+ 거적덮기	477	㎡	4,536	2,163,672	16.조경
하부노반다짐	토사	1417	㎡	1,125	1,594,125	
표토제거	답구간,T=20cm	2098	㎡	273	572,754	
표토제거	답외구간,T=15cm	52	㎡	165	8,580	
잡 석 깔 기	T = 20cm	306	㎡	32,070	9,813,420	
토 사 깎 기	굴삭기,1.0 ㎥	1724	㎥	1,172	2,020,528	
구조물기초다짐	잡 석	13	㎥	36,634	476,242	
가배수관철거	흄관,D600mm	32	m	13,019	416,608	
가배수관철거	흄관,D1,000mm	25	m	28,953	723,825	
1-6. 공사용우회도로		**0**				
하부노반다짐	토사	185	㎡	1,125	208,125	
흙돋기 철 거	토사,굴삭기 1.0 ㎥	148	㎥	3,071	454,508	
잡 석 깔 기	T = 20cm	53	㎡	32,070	1,699,710	
1-7. 공사용우회수로		**0**				
토 사 터파기	육상,4m 이하,기계	495	㎥	1,036	512,820	2.토공
하부노반다짐	토사	104	㎡	1,125	117,000	
되메우기및다짐	토사	495	㎥	4,533	2,243,835	2.토공
흙돋기 철 거	토사,현장유용,굴삭기 1.0 ㎥	104	㎥	3,071	319,384	
1-8. 유지보수용도로		**0**				
표토제거	답구간,T=20cm	1765	㎡	273	481,845	
표토제거	답외구간,T=15cm	101	㎡	165	16,665	

공 종 명	규 격	수량	단위	합 계		비 고
				단 가	금 액	
측구뚝쌓기		47	㎥	5,422	254,834	
측구터파기	토사,인력 10%+기계 90%	131	㎥	2,089	273,659	
토 사 깎 기	대규모	8	㎥	655	5,240	
하부노반다짐	토사	775	㎡	1,125	871,875	
비탈면보호공	씨앗뿜어붙이기+ 거적덮기	331	㎡	4,536	1,501,416	16.조경
토 사 터파기	육상,4m 이하,기계	338	㎥	1,036	350,168	2.토공
되메우기및다짐	토사	236	㎥	4,533	1,069,788	2.토공
구조물기초다짐	잡 석	11	㎥	36,634	402,974	
콘크리트포장	인력포설,T = 0.20m	140	㎡	5,177	724,780	14.포장
합판거푸집	4 회,0-7m 이하	62	㎡	17,523	1,086,426	9.철근
와이어메쉬 설치	#8-150*150	699	㎡	1,798	1,256,802	
비 닐 양 생	P.E 필름,T=0.1 ㎜	699	㎡	540	377,460	
비닐쉬트깔기	P.E 필름,T = 0.1mm	699	㎡	869	607,431	
신축이음설치	합판,T = 12mm	8	㎡	8,668	69,344	3.미장
충진제채움	아스팔트,12×12mm	38	m	1,089	41,382	3.미장
수 축 줄눈공	콘크리트포장,1 차로	95	m	3,968	376,960	3.미장
보조기층포설	본선포장	194	㎡	29,433	5,710,002	14.포장
주름관 부 설	THP Pipe,φ600mm	7	m	38,022	266,154	
기초콘크리트타설	무근,fck=18MPa	39	㎥	14,638	570,882	9.철근
합판거푸집	4 회,0-7m 이하	127	㎡	17,523	2,225,421	9.철근
흄관접합및부설	수밀벨트식,D600mm	82	m	42,526	3,487,132	
날개벽콘크리트타설	무근.fck=21MPa	1	㎥	13,819	13,819	9.철근
합판거푸집	3 회,0-7m 이하	9	㎡	20,095	180,855	9.철근
1-9. 유지보수용도로 집수정		**0**				
소형콘크리트타설	무근,fck=18MPa	1	㎥	37,636	37,636	9.철근
소형콘크리트타설	철근,fck=24MPa	9	㎥	34,142	307,278	9.철근
합판거푸집	6 회,0-7m 이하	3	㎡	14,317	42,951	9.철근
합판거푸집	4 회,0-7m 이하	70	㎡	17,523	1,226,610	9.철근
스페이셔	벽체용	36	㎡	273	9,828	
스페이셔	슬라브 및 기초	11	㎡	100	1,100	
철근가공조립	간단	0.5	Ton	300,587	150,294	9.철근
스틸그레이팅설치	1000×1000×75	3	개	202,650	607,950	
1-10. 농업용진입로		**0**				
하부노반다짐	토사	12	㎥	1,125	13,500	
콘크리트포장	인력포설,T = 0.20m	6	㎡	5,177	31,062	14.포장
합판거푸집	4 회,0-7m 이하	3	㎡	17,523	52,569	9.철근
와이어메쉬 설치	#8-150*150	28	㎡	1,798	50,344	
비닐쉬트깔기	P.E 필름,T = 0.1mm	28	㎡	869	24,332	
비 닐 양 생	P.E 필름,T=0.1 ㎜	28	㎡	540	15,120	
보조기층포설	본선포장	6	㎥	29,433	176,598	14.포장
주름관 부 설	THP Pipe,φ600mm	7	m	38,022	266,154	
2. 주 요 자 재 비			**식**		**664,298,972**	
2-1. 철 근					**372,902,972**	**9.철근**
철 근	SD300,D13 ㎜	145.703	Ton	796,300	116,023,299	
철 근	SD300,D16~D32 ㎜	111.24	Ton	791,409	88,036,337	
철 근	HD400,D13 ㎜	198.885	Ton	801,200	159,346,662	
철 근	HD400,D16~D32 ㎜	11.926	Ton	796,300	9,496,674	
2-2. 말 뚝					**291,396,000**	**6.비계**
복 합 말 뚝	φ600 ㎜×12T,L=25m	84	본	3,469,000	291,396,000	
3. 지 급 자 재 비	**익산~대야**		**식**		**466,280,758**	
3-1. 레 미 콘					**238,277,281**	**9.철근**
레 미 콘	25-40-15	1736	㎥	75,509	131,083,624	
레 미 콘	25-27-15	65	㎥	63,200	4,108,000	
레 미 콘	25-24-15	1480	㎥	60,581	89,659,880	
레 미 콘	25-21-15	143	㎥	57,827	8,269,261	
레 미 콘	40-18-12	41	㎥	56,000	2,296,000	
레 미 콘	40-18- 8	53	㎥	53,972	2,860,516	

공 종 명	규 격	수량	단위	합 계		비 고
				단 가	금 액	
3-2. 말 뚝					**161,573,580**	**6.비계**
P H C 말 뚝	B 종,φ600 ㎜×90T	2617	m	61,740	161,573,580	
3-3. 아 스 콘						**14.포장**
3-4. 흄 관						
원심력철근콘크리트관	직관,φ60 ㎝	82	m	27,490	2,254,180	
3-5. 토목섬유						
부 직 포	200g/㎡	29	㎡	1,080	31,320	
3-6. 방 음 판						**7.금속**
일반흡음방음판	3960×500		매	138,181		
소 계					**66,429,897**	
3-7. 부가가치세	**직접구매비의 10%**		**식**			
3-8. 조달수수료			**식**			

○ 완전 일체형 연속교의 최적안 도출을 위한 성능 평가 및 시공 메뉴얼

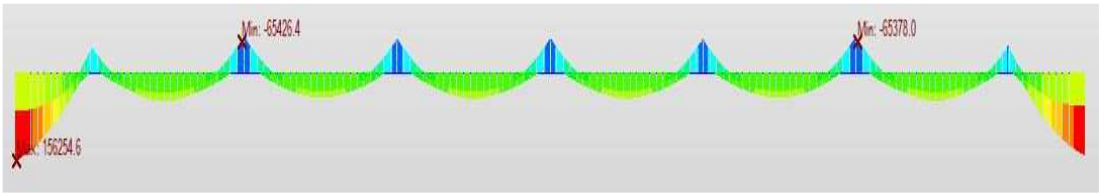
· 완전 일체형 연속교 설계 및 시공 메뉴얼



- 기존 연구 결과의 경험에 의해 작성된 일반도와 단면에 대해 1차적으로 장대레일 안정성 검토를 수행(Rail Structure Interaction analysis). 이때 상부구조의 변위가 적절히 제어되는(인장 부가응력 ≤ 92N/mm^2 조건을 만족하는) 변위제한 교대와 기타 교각 강성(EI/L)의 최소값을 선정.
- 압축 조건에서는 허용부가응력이 72N/mm^{2}로 보다 엄격한 변위 제어가 필요하며 이것은 교대 배면의 강성을 활용. 통상 수준에서의 배면 설계에 의한 스프링계수로 압축 부가응력 ≤ 92N/mm^2 조건을 만족할 경우 다음 단계로 이동하며, 불만족할 경우 부족한 만큼 교대 강성을 높여 인장 부가응력부터 다시 검토.

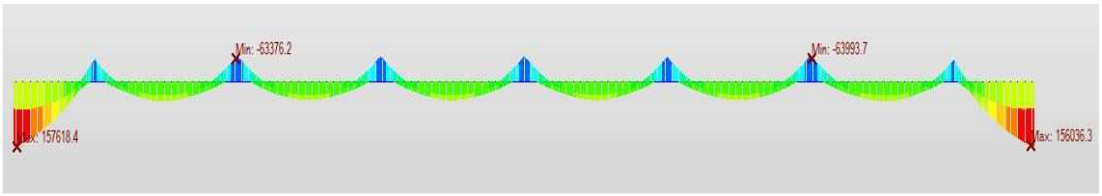
- 장대레일 조건을 만족하는 각 요소의 강성을 결정한 후에는 상부구조 해석을 통해 최적 경간장으로 계획되었는지를 검토. 기 연구된 측 경간장의 비(α×주경간장)을 중심으로 측 경간장을 변화해가며 최적 측 경간장을 선정하며, 가정된 측 경간장이 변경될 경우 첫 단계로 피드백.
- 최적 경간장 선정 후 하부구조 검토를 거쳐 상세 설계 시행.

· 측 경간장 변화에 따른 모멘트 검토



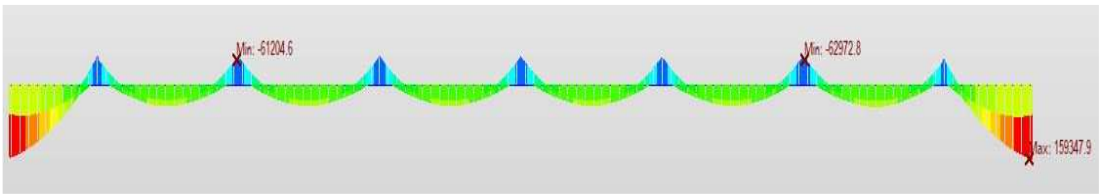
156,254.4 −65,426.4 −65,378.0 146,224.7

16+6@32+16



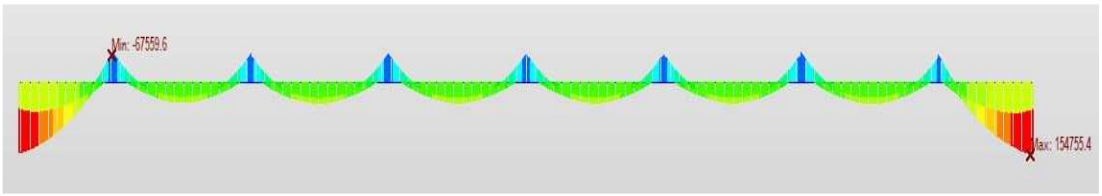
157,618.4 −63,376.2 −63,993.7 156,036.3

18+6@32+18(최종 개선안)



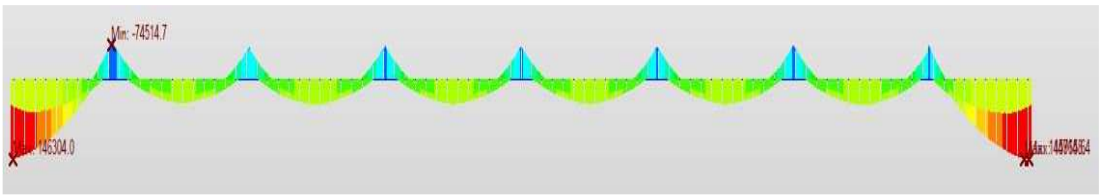
155,957.0 −61,204.6 −62,972.8 159,347.9

20+6@32+20



151,878.4 −67,559.6 −62,215.2 154,755.4

22+6@32+22



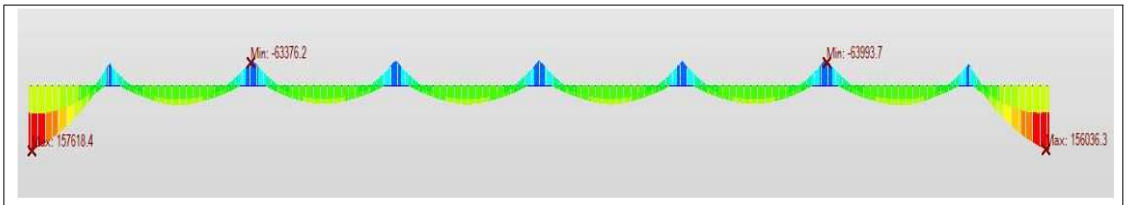
146,304.0 −74,514.7 −61,524.5 147,158.4

24+6@32+24

- 변위제한 교대에 의한 구속 효과로 측 경간 교대 측 단부에 통상적인 라멘구조에서 발생하는 부모멘트 대신 매우 큰 값의 정모멘트가 발생하며 이것이 완전일체형 연속교의 가장 큰 특징임.

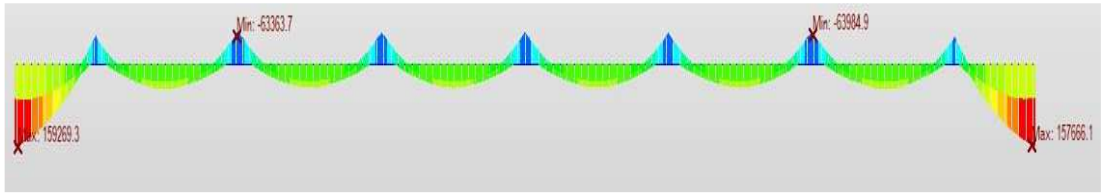
- 측 경간 외의 모든 중앙 경간에는 통상적인 라멘구조의 모멘트 발생
- 측 경간장 16.0m를 기준으로 경간장이 늘어날수록 정모멘트 및 부모멘트 감소 경향. 다만 특이하게 측 경간장 16.0m 대비 18.0m는 정모멘트 다소 증가.
- 측 경간장이 길어지면(22.0m에서부터) 부모멘트의 최대값이 제2 교각에서 제1 교각 쪽으로 이동하고 그 값도 감소에서 증가 추세로 변화

· 교대 강성 변화에 따른 모멘트 검토(경간 분할 18.0+6@32.0+18.0을 기준으로)



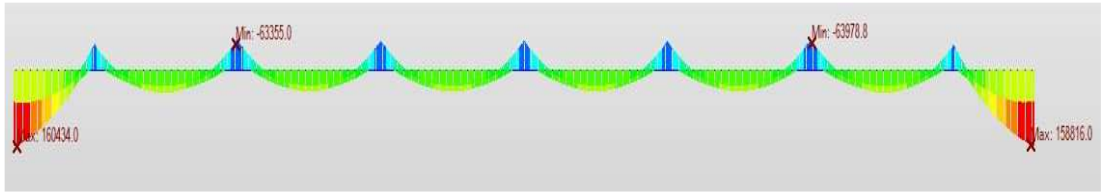
157,618.4 −63,376.2 −63,993.7 156,036.3

최종 개선안 : 교대 두께 4.0



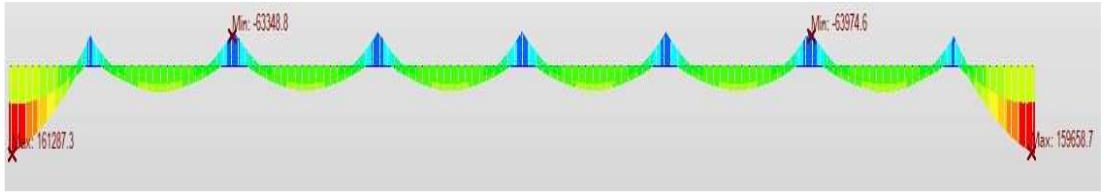
159,269.3 −63,363.7 −63,984.9 157,666.1

교대 두께 4.5



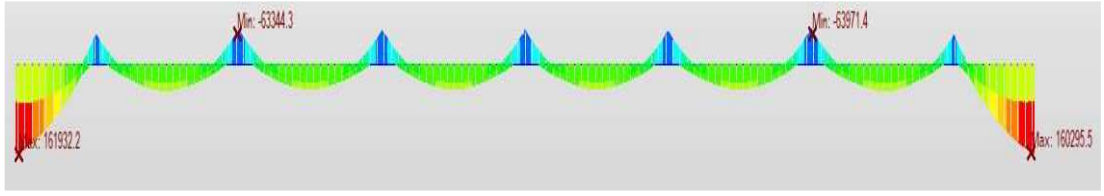
160,434.0 −63,355.0 −63,978.8 158,816.0

교대 두께 5.0



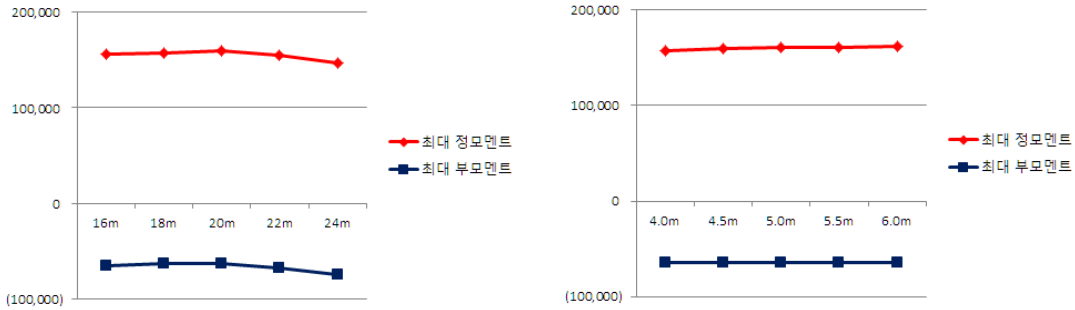
161,287.3 −63,348.8 −63,974.6 159,658.7

교대 두께 5.5



161,932.2 −63,344.3 −63,971.4 160,295.5

교대 두께 6.0

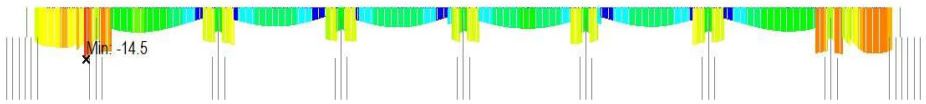
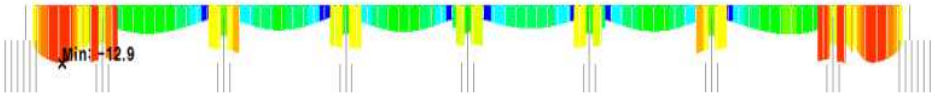
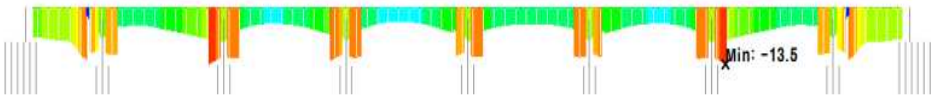
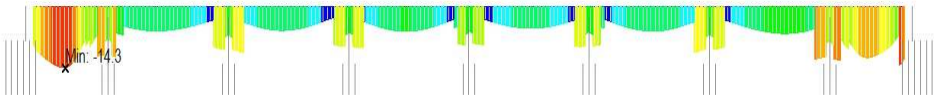
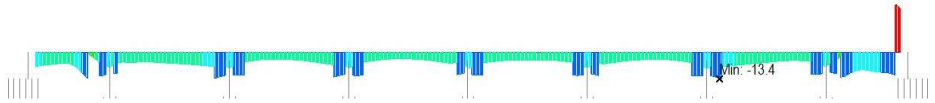
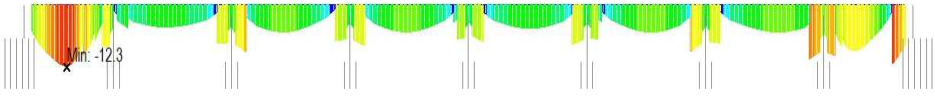
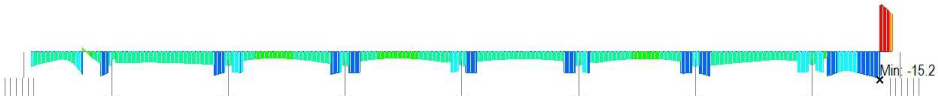


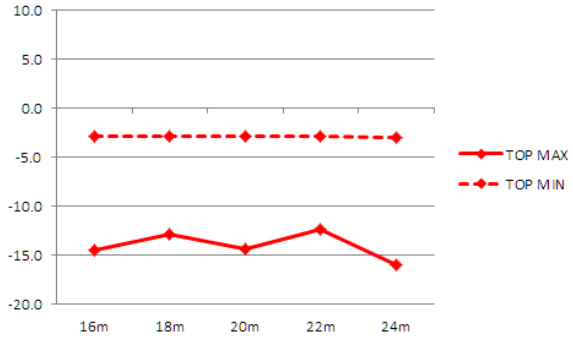
(a) 경간장별 모멘트 변화 (b) 교대 강성별 모멘트 변화

그림 3-6-13 모멘트 변화

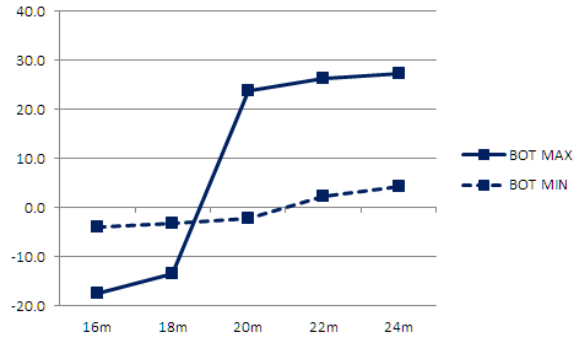
- 변위제어 교대의 강성이 커짐에 따라 비례해서 측 경간의 정모멘트도 증가하나 중앙 경간장의 모멘트 변화는 미미함
- 변위제어 교대의 두께가 50% 증가하는 동안 측 경간 정모멘트 증가는 2.7%에 불과함

· 측 경간장 변화에 따른 응력 검토 : 사하중+건조수축 및 크리프(10,000day)_단계별 텐던 긴장

구 분		Diagram
16+6@32+16	TOP	
	BOT	
발생 압축응력 : 17.5MPa < 허용 휨압축응력 : $0.4f_{ck}$ x 1.15 = 20.7MPa ... O.K		
18+6@32+18	TOP	
	BOT	
발생 압축응력 : 13.5MPa < 허용 휨압축응력 : $0.4f_{ck}$ x 1.15 = 20.7MPa ... O.K		
20+6@32+20	TOP	
	BOT	
하면 측 경간에서 인장 발생(NG)		
22+6@32+22	TOP	
	BOT	
하면 측 경간에서 인장 발생(NG)		



(a) 측 경간장별 응력 변화(TOP)

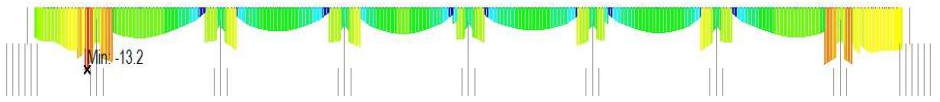
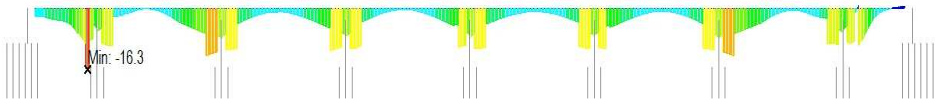
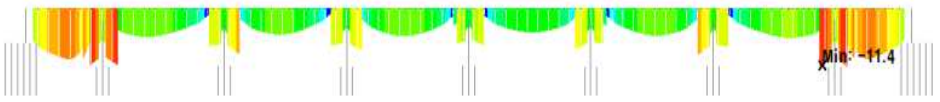
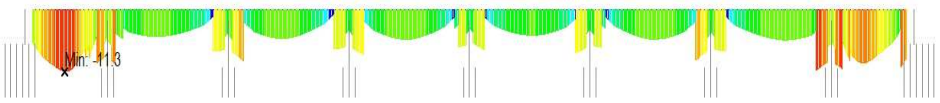
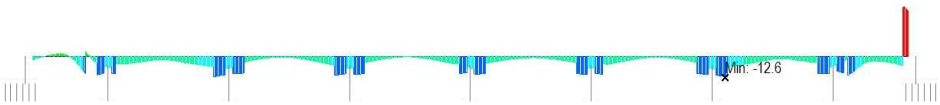
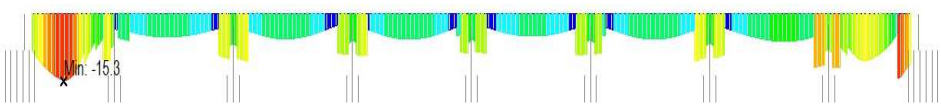
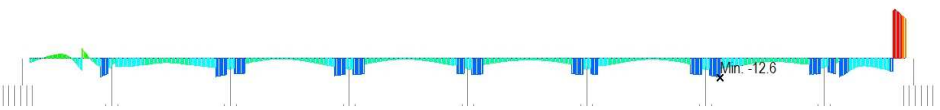


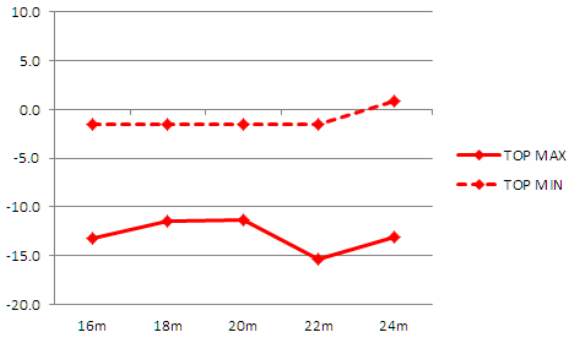
(b) 측 경간장별 응력 변화(BOT)

그림 3-6-14. 측 경간장별 응력 변화

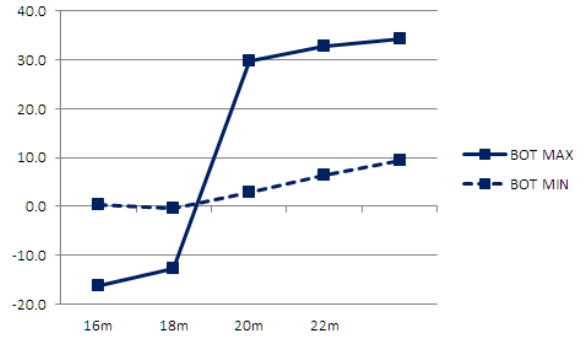
- 측 경간장 20.0m 이상에서 텐던에 의한 인장 제어 불가

· 측 경간장 변화에 따른 응력 검토 : 사용하중

구 분		Diagram
16+6@32+16	TOP	
	BOT	
발생 압축응력 : 16.3MPa < 허용 휨압축응력 : $0.4f_{ck}$ x 1.15 = 20.7MPa ... O.K		
18+6@32+18	TOP	
	BOT	
발생 압축응력 : 12.7MPa < 허용 휨압축응력 : $0.4f_{ck}$ x 1.15 = 20.7MPa ... O.K		
20+6@32+20	TOP	
	BOT	
하면 측 경간에서 인장 발생(NG)		
22+6@32+22	TOP	
	BOT	
하면 측 경간에서 인장 발생(NG)		



(a) 측 경간장별 응력 변화(TOP)

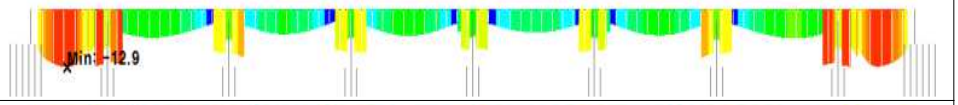
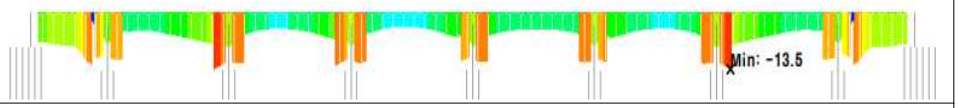
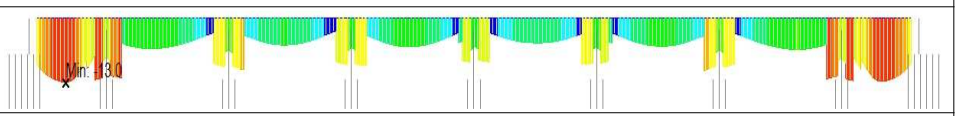
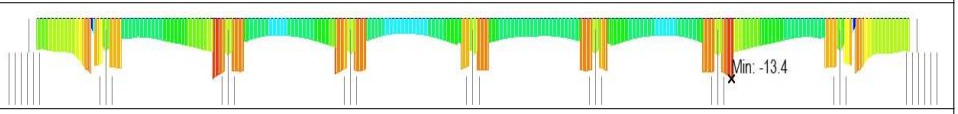
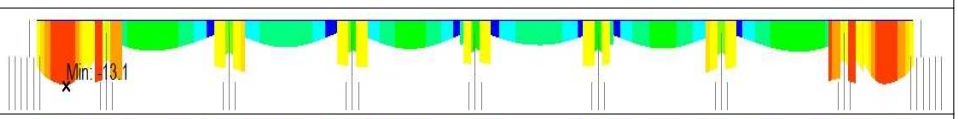
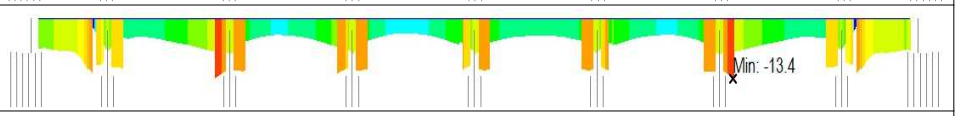
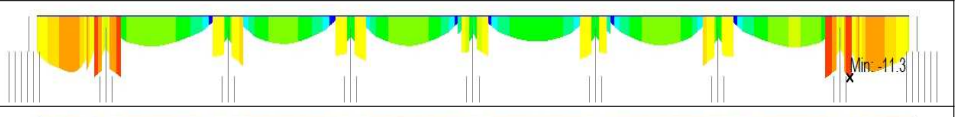
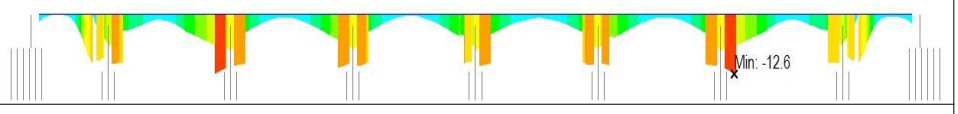
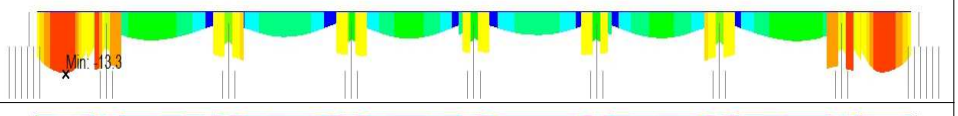
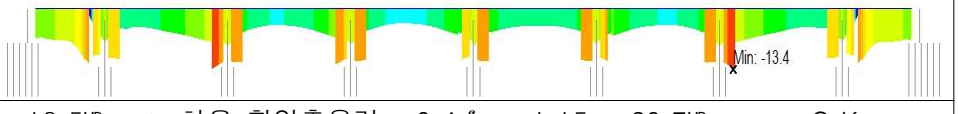


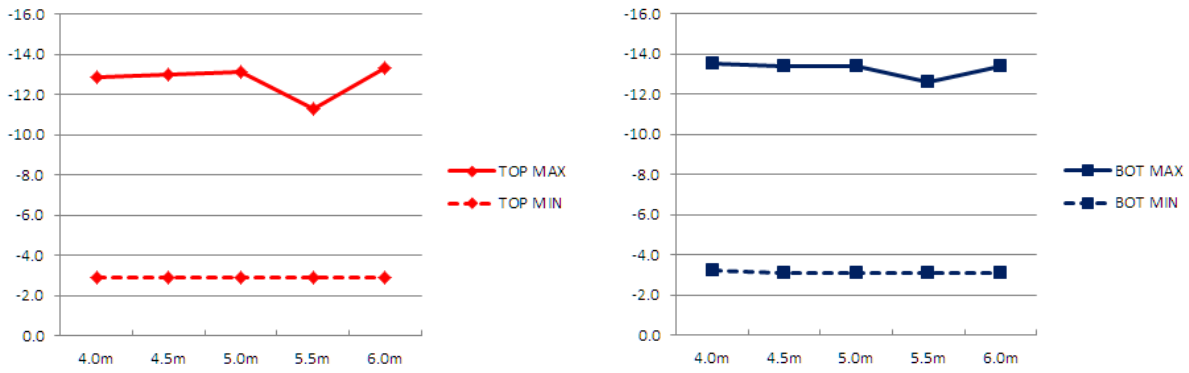
(b) 측 경간장별 응력 변화(BOT)

그림 3-6-15. 측 경간장별 응력 변화

- 측 경간장 20.0m 이상에서 텐던에 의한 인장 제어 불가

· 교대 강성별 응력 검토 : 사하중+건조수축 및 크리프(10,000day)_단계별 텐던 긴장

구 분		Diagram
18+6@32+18 교대 두께 4.0	TOP	
	BOT	
발생 압축응력 : 13.5MPa < 허용 휨압축응력 : $0.4f_{ck}$ x 1.15 = 20.7MPa ... O.K		
18+6@32+18 교대 두께 4.5	TOP	
	BOT	
발생 압축응력 : 13.4MPa < 허용 휨압축응력 : $0.4f_{ck}$ x 1.15 = 20.7MPa ... O.K		
18+6@32+18 교대 두께 5.0	TOP	
	BOT	
발생 압축응력 : 12.6MPa < 허용 휨압축응력 : $0.4f_{ck}$ x 1.15 = 20.7MPa ... O.K		
18+6@32+18 교대 두께 5.5	TOP	
	BOT	
발생 압축응력 : 13.4MPa < 허용 휨압축응력 : $0.4f_{ck}$ x 1.15 = 20.7MPa ... O.K		
18+6@32+18 교대 두께 6.0	TOP	
	BOT	
발생 압축응력 : 13.5MPa < 허용 휨압축응력 : $0.4f_{ck}$ x 1.15 = 20.7MPa ... O.K		

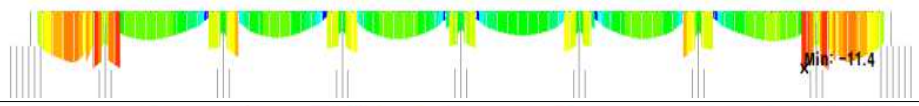
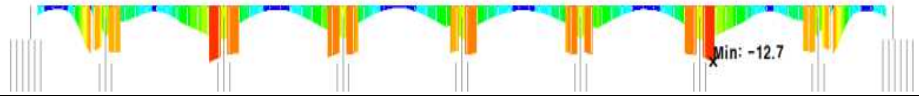
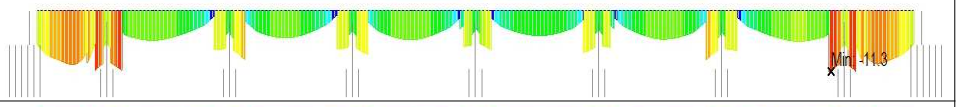
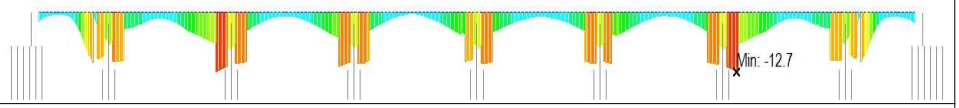
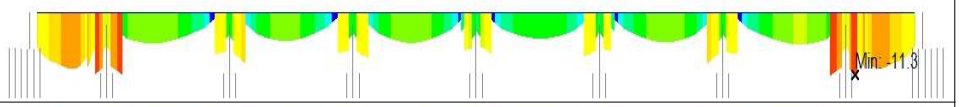
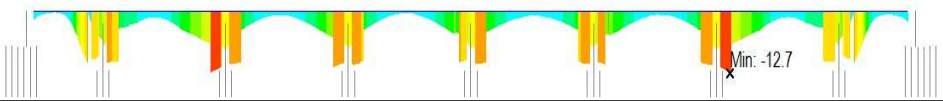
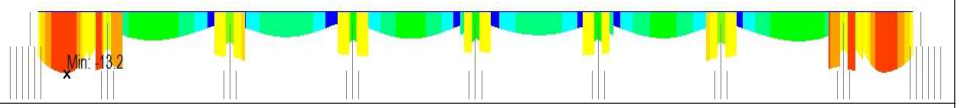
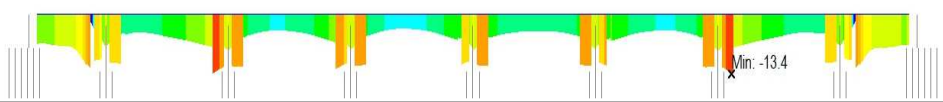
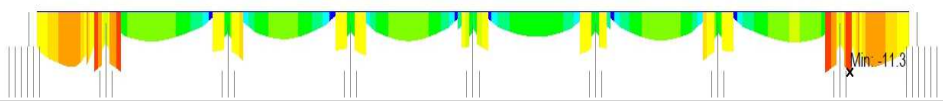
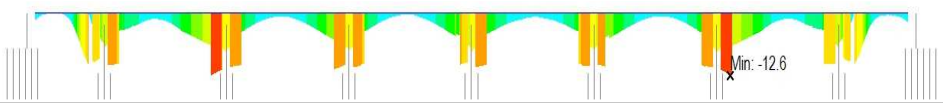


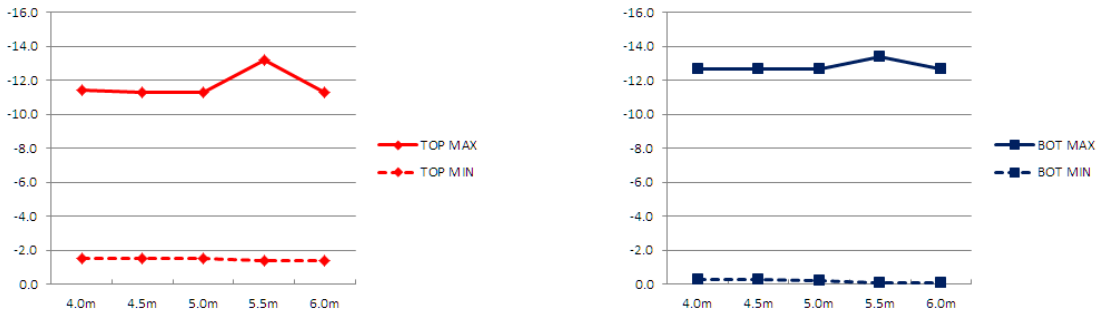
(a) 측 경간장별 응력 변화(TOP)　　(b) 측 경간장별 응력 변화(BOT)

그림 3-6-16. 측 경간장별 응력 변화

– 교대 강성의 변화가 상부구조의 응력에 대한 안전성에 미치는 영향은 미미함.

· 교대 강성별 응력 검토 : 사용하중

구 분		Diagram
18+6@32+18 교대 두께 4.0	TOP	
	BOT	
발생 압축응력 : 12.7MPa < 허용 휨압축응력 : $0.4f_{ck}$ x 1.15 = 20.7MPa ... O.K		
18+6@32+18 교대 두께 4.5	TOP	
	BOT	
발생 압축응력 : 12.7MPa < 허용 휨압축응력 : $0.4f_{ck}$ x 1.15 = 20.7MPa ... O.K		
18+6@32+18 교대 두께 5.0	TOP	
	BOT	
발생 압축응력 : 12.7MPa < 허용 휨압축응력 : $0.4f_{ck}$ x 1.15 = 20.7MPa ... O.K		
18+6@32+18 교대 두께 5.5	TOP	
	BOT	
발생 압축응력 : 13.4MPa < 허용 휨압축응력 : $0.4f_{ck}$ x 1.15 = 20.7MPa ... O.K		
18+6@32+18 교대 두께 6.0	TOP	
	BOT	
발생 압축응력 : 12.7MPa < 허용 휨압축응력 : $0.4f_{ck}$ x 1.15 = 20.7MPa ... O.K		



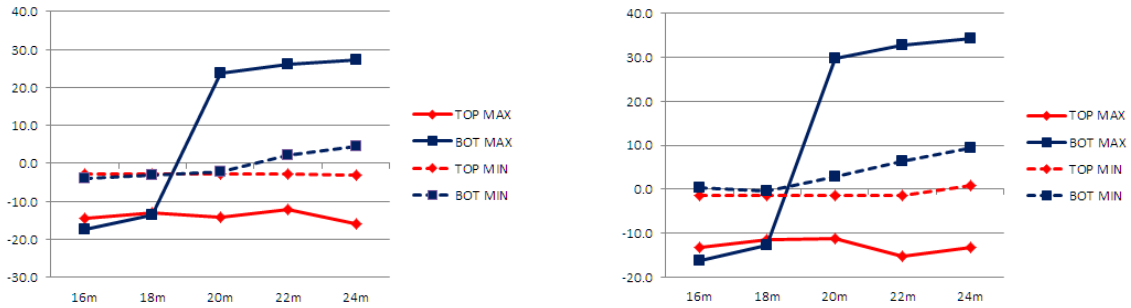
(a) 측 경간장별 응력 변화(TOP) (b) 측 경간장별 응력 변화(BOT)

그림 3-6-17. 측 경간장별 응력 변화

- 교대 강성의 변화가 상부구조의 응력에 대한 안전성에 미치는 영향은 미미함.

· 종합 검토 결과(건조수축 및 크리프 저감 설계 및 시공 기술)

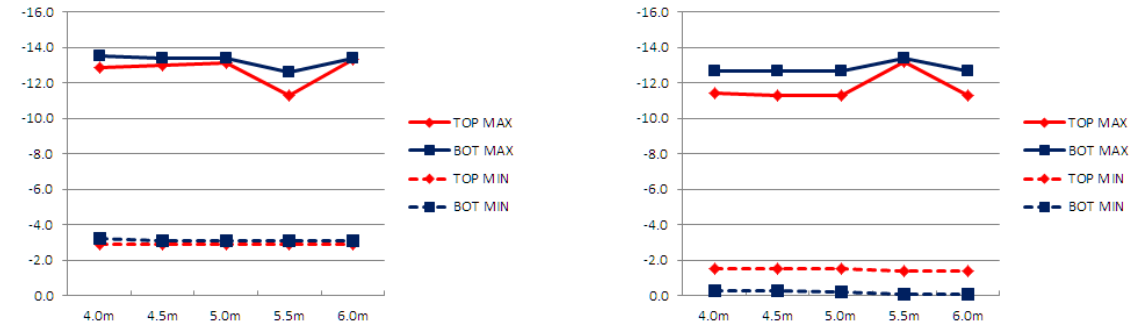
- 완전 일체형 연속교에 발생하는 모멘트는 교대에 인접한 **양 측경간 교대 측 단부에**서 통상적인 라멘 구조에서 부모멘트가 발생하는 것과는 달리 **정모멘트가 발생하고(수축하중이 원인) 또, 최대 값**임.
- 축력(인장력)과 모멘트의 조합에 의해 발생하는 상부구조의 응력도 측 경간에서 최대로 강선 긴장에 의한 인장응력 제거의 주 대상 경간임
- 측 경간의 인장응력 제어를 위한 **가장 효과적인 방안은 측 경간장의 축소**로 본 연구 대상 교량에서 최적 측 경간장은 0.5625×주경간장 (0.5625×32.0=18.0m).
- 교대 강성이 증가할수록 모멘트도 증가하나 상부구조의 응력에 대한 안전성에 미치는 영향은 미미하므로 장대레일 안전성을 확보하기 위한 교대 강성 결정의 자유도는 매우 높음.
- 즉, 장대레일 안전성 확보 측면에서는 교대 강성이 클수록 유리한 바, 본 검토 결과는 **장대레일 안정성 확보를 위한 교대 강성을 증대하더라도 상부구조의 안전성 확보에는 큰 문제가 없음**을 의미함.



(a) 사용하중 재하 전 (b) 사용하중 재하 시

그림 3-6-18. 측 경간장별 응력 변화

- 측 경간장에 의해 결정되며 중앙 경간장 32.0m 시 최적 측 경간장은 18.0m(중앙 경간장의 56.25%)



(a) 사용하중 재하 전 (b) 사용하중 재하 시

그림 3-6-19. 교대 강성별 응력 변화

- 교대 강성 변화의 영향 미미

· 최적 접합부 상세(안)

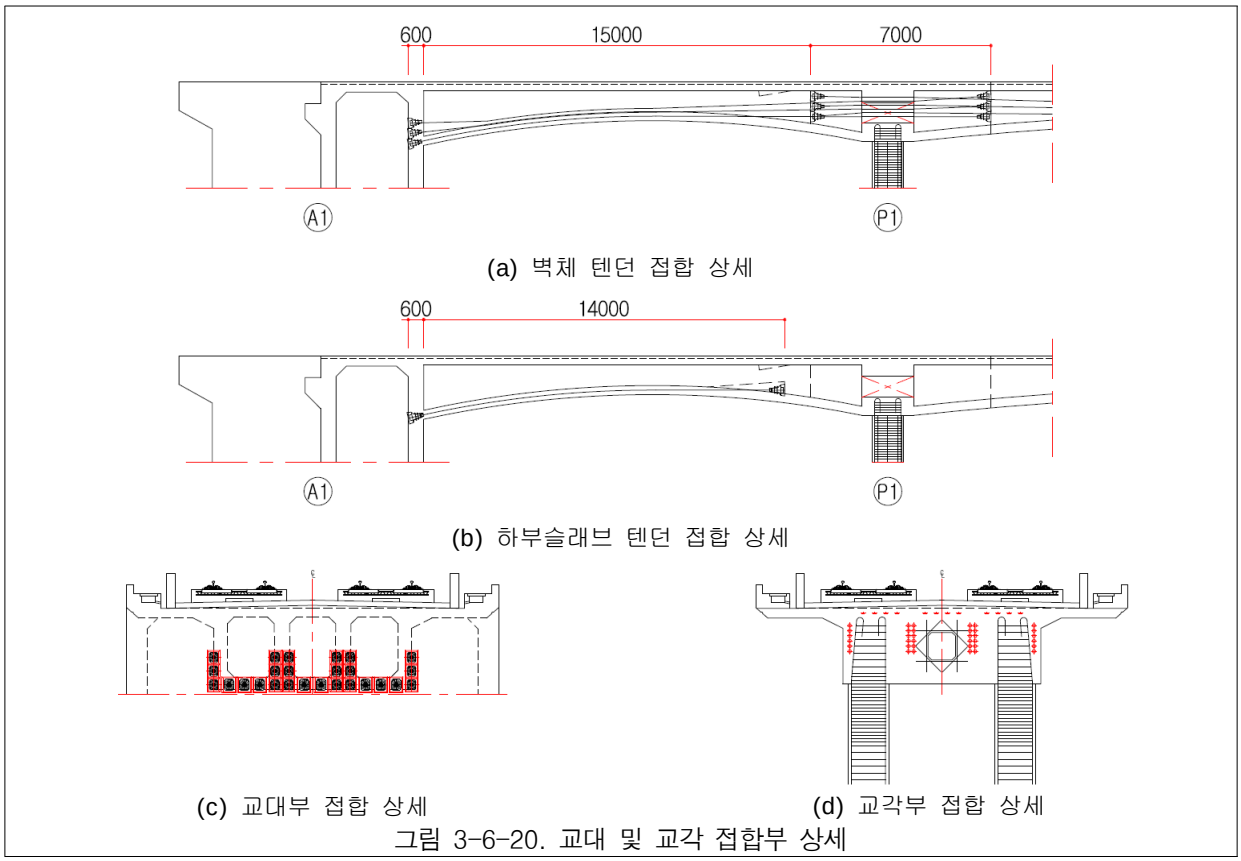
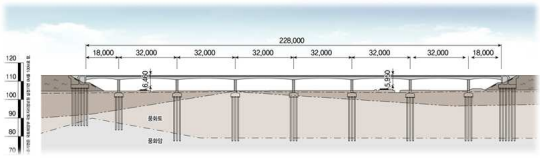
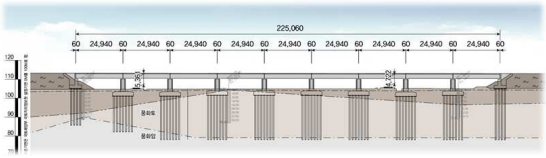


그림 3-6-20. 교대 및 교각 접합부 상세

마. 완전일체형 연속교의 경제성(VE/LCC)분석

○ VE 분석

· 대상 교량 선정

구 분	완전 일체형 연속교	비교교량
교량형식	·상부구조의 변위 제한을 이용한 완전 일체형 철도 연속교	·기존 철도교 표준교
개 요 도		
장 단 점	·고차 부정정 구조로 내진성, 주행안전성 등 구조 효율 매우 우수 ·신축이음, 받침 등 완전 배제로 유지관리생력화 구조 ·미관이 날렵하여 매우 우수 ·기존 철도교 대비 경제적	·단경간교로 구조 효율 불량 ·신축이음, 받침 등 고가의 부대시설 교체 비용 큼 ·높은 형고와 부대시설로 미관 불량 ·비경제적

· 분석 결과

- 개발대상 교량의 성능향상 및 비용절감이 가능한 최적의 대안도출 → 세부평가 가중치는 개발교량의 특징을 평가할 수 있는 지표를 설정하여 전문가에 의한 AHP분석 기법을 활용하여 가중치 결정

- 평가 항목의 선정 및 고려 사항

· 개발교량의 특성을 나타낸 평가지표 활용(구조안정성, 유지관리성, 계획성, 시공성, 환경성, 이용자편의성)

구 분	고 려 사 항
구 조 안 정 성	·내진성, 주행안정성과 같은 구조적 효율성 검토
유 지 관 리 성	·교량의 유지관리 용이성 및 부대시설의 보수 용이성 등 검토
계 획 성	·교량의 경제성, 현장 적합성 및 미관성 등 검토
시 공 성	·시공실적 검토, 장비반입 및 반출의 용이성 검토
환 경 성	·시공중 발생되는 소음 및 진동, 환경에 미치는 영향성 검토
이 용 자 편 의 성	·철도교량 사용성에 대한 검토

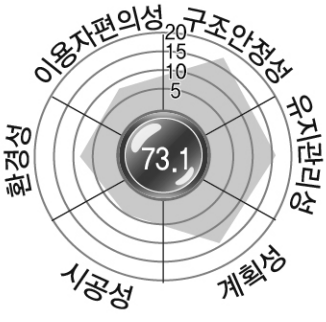
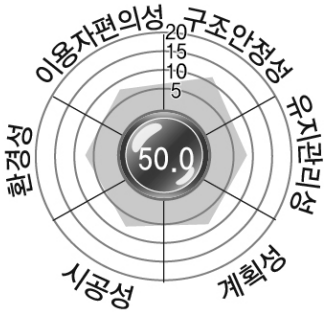
- 계측 분석(AHP)를 통한 가중치 산출

· 쌍대비교를 통하여 상위요소에 기여하는 정도를 아래 쌍대 비교 척도에 맞추어 중요도 부여

평 가 항 목		A	B	C	D	E	F		확정가중치
A.	구조안정성	1.00	2.29	1.26	2.62	1.26	0.87	⇨	23.3%
B.	유지관리성	0.44	1.00	2.29	1.65	1.00	0.91	⇨	17.5%
C.	계 획 성	0.79	0.44	1.00	0.79	3.00	1.00	⇨	15.9%
D.	시 공 성	0.38	0.61	1.26	1.00	1.26	1.59	⇨	15.0%
E.	환 경 성	0.79	1.00	0.33	0.79	1.00	2.62	⇨	14.8%
F.	이용자편의성	1.14	1.10	1.00	0.63	0.38	1.00	⇨	13.5%
합 계		4.55	6.43	7.14	7.49	7.90	7.99		100.0%

- 성능 분석

·5인 이상의 VE팀 내 전문가 및 외부전문가로 구성된 평가팀에 의한 설문조사 실시
·Caltrans의 성능등급 기준에 따른 등급평가 기준으로 설문분석 수행

평가항목	가중치	개발교량		비교교량	
		등급	점수	등급	점수
구조안정성	23.3%	8.0	18.6	5.0	11.7
유지관리성	17.5%	9.0	15.8	5.0	8.8
계 획 성	15.9%	9.0	14.3	5.0	8.0
시 공 성	15.0%	4.0	6.0	5.0	7.5
환 경 성	14.8%	6.0	8.9	5.0	7.4
이용자편의성	13.5%	7.0	9.5	5.0	6.8
성 능 점 수		73.1		50.0	
성 능 그 래 프					

○ LCC(생애주기비용) 분석

· 유지관리비용 산출 근거

1) 점검진단비

- [시설물의 안전관리에 관한 특별법 시행령-대통령령 제28586호(2018.1.18.)]에 따라 1종, 2종 시설물 구분
- [시설물의 안전점검 및 정밀안전진단 실시 등에 관한 지침 국토교통부고시 (제2018-45호) (2018.1.8.)]을 근거로 비용 산정

2) 보수 및 보강비

- 철도교량의 설계단계 생애주기비용(LCC)분석 시스템개발(한국철도도시공단, 2008.11)을 적용하여 비용 분석 수행
- 철도교량의 LCC비용 분석을 위한 국내에서 개발한 비용산정 모형을 적용 (한국도로공사 유지보수 모델의 경우 철도교 중심의 개발교량 적용에 부적합)

3) 해체 폐기 비용

- 분석기간을 50년 적용함으로 인해 실질적인 해체 폐기는 발생하지 않는 것으로 판단하여 미적용

· 분석 방법

- 확정적 LCC 분석방법 후 민감도 분석 수행을 통하여 분석결과의 신뢰성 검토

· 분석 기준

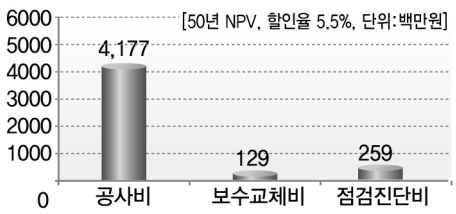
1) 분석기간

- 분석기간은 미래지불비용을 평가하는 시간한계이므로 LCC 분석 시 충분한 범위로 설정 → 교량구조물의 공용수명을 기준으로 설정하여 구조물의 생애주기비용(LCC)을 산정 (민감도 분석으로 공용수명 이상의 기간에 대한 비용검증 수행)
- LCC 분석의 대상이 되는 기간을 의미하며, 내구성, 경제성 및 사회적 영향과 관련제도 등을 토대로 결정
  ① 적용분석기간 : 구조물의 공용 수명 및 실제평균 사용수명, 관련 연구 자료를 검토하여 분석기간 50년 적용
  ② 민감도 분석 : 분석기간 50년을 기준으로 10년 간격으로 30년부터 70년까지 민감도 분석 수행하여 신뢰성 확보

2) 할인율

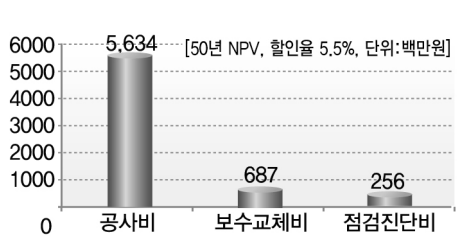
- 본 과업의 할인율은 시중은행금리와 물가상승율을 반영한 실질할인율인 1%내외를 적용할 수 있겠으나, 경제성 판단을 위한 할인율의 경우 실질적인 기대비용을 반영할 필요가 있어, 공공공사에서 최신에 적용하고 있는 할인율인 5.5%를 적용함
- 민감도 분석: 할인율 5.5%를 기준으로 3.5~7.5%까지 1%간격으로 민감도 분석 수행하여 신뢰성 확보

· 개발 교량 LCC 분석

구 분		개발교량	그 래 프
공 사 비		4,177	
유지보수비	보수교체비	129	
	점검진단비	259	
LCC 합 계		4,565	

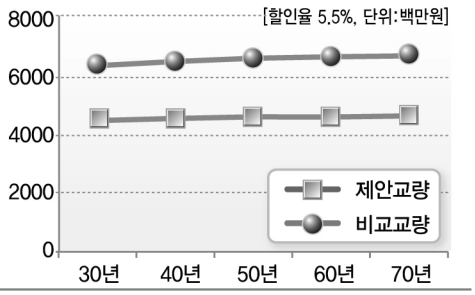
(단위 : 백만원/현가)

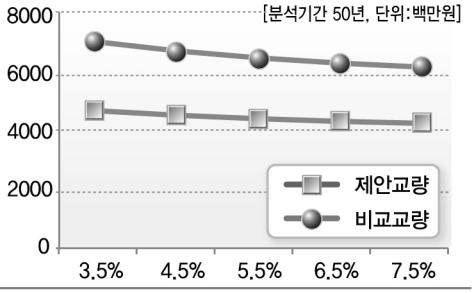
· 비교 교량 LCC 분석

구 분		비교교량	그 래 프
공 사 비		5,634	
유지보수비	보 수 교 체 비	687	
	점 검 진 단 비	256	
L C C 합 계		6,577	

(단위 : 백만원/현가)

· 민감도 분석

기 간	개발교량	비교교량	민감도 분석(기간)
30년	4,471	6,396	
40년	4,524	6,469	
50년	4,565	6,577	
60년	4,583	6,626	
70년	4,593	6,642	

할 인 율	개발교량	비교교량	민감도 분석(할인율)
3.5%	4,770	7,114	
4.5%	4,653	6,806	
5.5%	4,565	6,577	
6.5%	4,500	6,403	
7.5%	4,449	6,270	

• 민감도 분석 결과 기간의 변화와 할인율의 변화에도 비용의 순위변화가 발생하지 않는 바 LCC분석을 위해 적용한 확정적 분석법의 신뢰성 확보

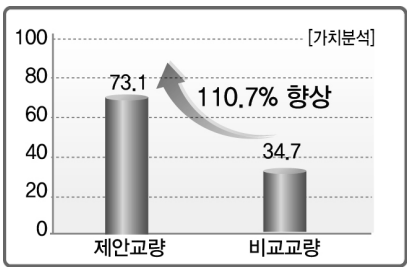
(단위 : 백만원/현재가)

· 생애주기비용(LCC) 분석 결과

구 분	개발교량	비교교량	증 감
공 사 비	4,177	5,634	▼ 1,457
유 지 보 수 비	388	943	▼ 555
L C C	4,565	6,577	▼ 2,012
L C C 지 수	1.00	1.44	-

· 가치 분석

구 분	개발교량	비교교량	증 감
성 능 (P)	73.1	50.0	▲ 46.2%
비 용 (C)	1.00	1.44	▼ 30.6%
가 치 (V)	73.1	34.7	▲ 10.7%
가치향상유형	가치혁신형		



• **개발교량은 비교교량 대비 성능 46.2%증가(P↑), 비용30.6% 감소(C↓)로 가치(V)는 110.7% 향상**
➜ 가치 혁신형

바. 완전일체형 연속교의 경관성(CG)

○ 프리캐스트 Type







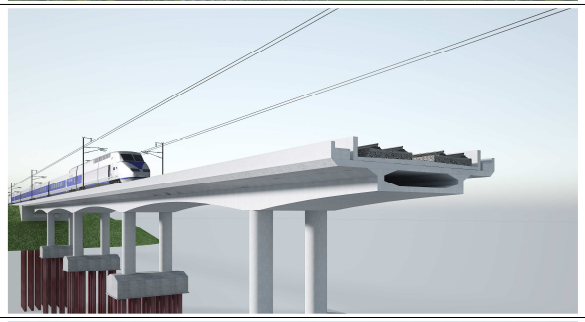
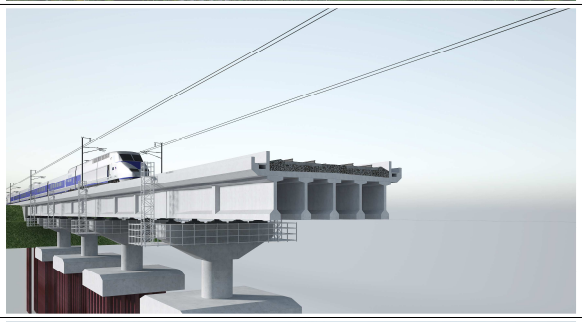
Π형 원형 교각

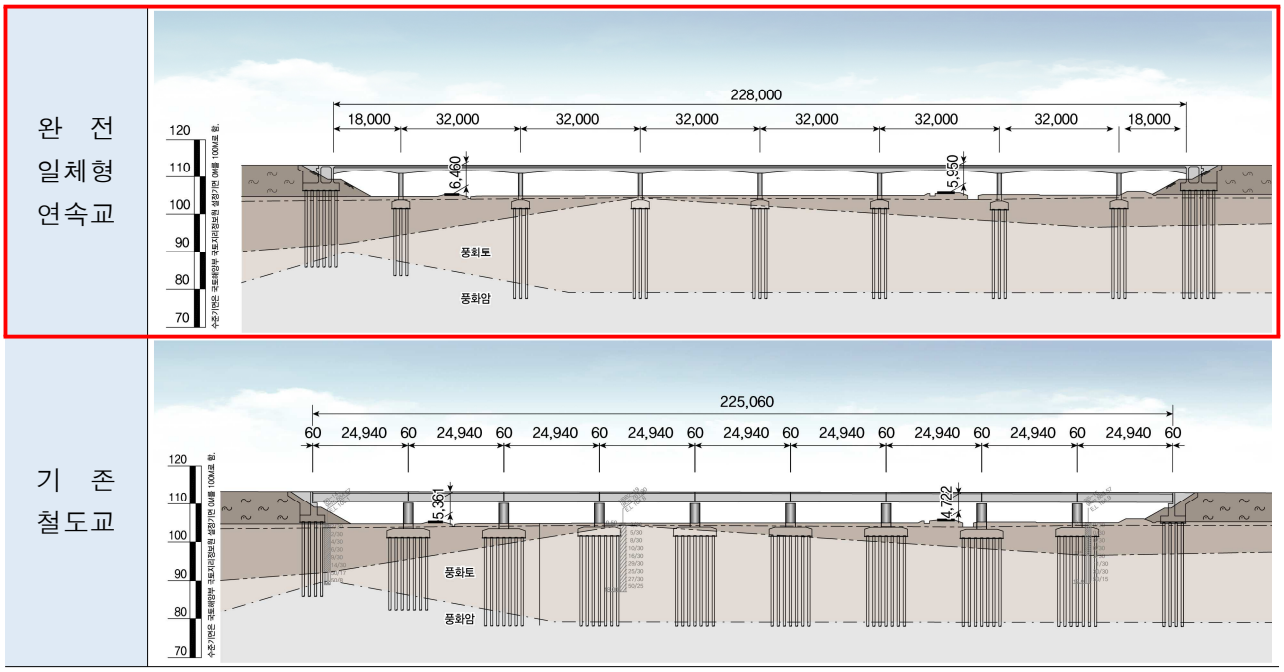

벽식 교각



시공순서도

○ 최종 개선안 – 기존 교량과의 비교

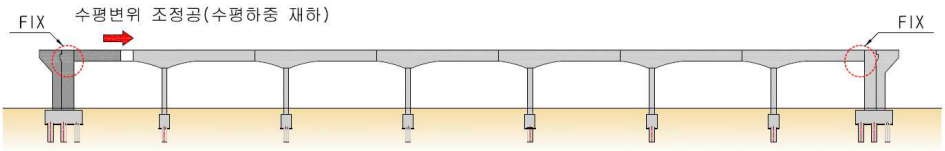
완전 일체형 연속교	기존 철도교
	
	
	



※ 완전 일체형 연속교가 기존 PSC Beam 단경간 연속교에 비해 경간장이 25.9m에서 32.0m로 28% 확대됐음에도 형하고가 5.36m에서 6.46m로 20% 높아지는 등 미관과 개방감에서 월등히 우수.

○ 수평 변위 조정공 개요

- 교량시스템 간 거동 분석을 통해 FULLY_일체형 교량시스템의 문제점으로 제기된 교대부 단면력 증가 및 상부거더 인장응력 증가에 대한 저감 방안으로 수평변위 조정공을 도입하여 FULLY_일체형 교량 시스템의 거동에 따른 효과를 분석
- 수평변위 조정공은 그림 3-6-21과 같이 교대A1과 상부거더 S1이 강체 연결 전 교대 A2방향으로 수평하중을 재하하여 시간종속적 변위가 유발되는 크리프 및 건조수축에 대하여 선행 변위를 유발함으로써 교량시스템의 단면력 및 인장응력 저감 효과가 기대



구 분	수평하중
INTE_H0	-
INTE_H1000	1,000kN
INTE_H5000	5,000kN
INTE_H10000	10,000kN

그림 3-6-21. 수평변위 조정공 도입 개요도

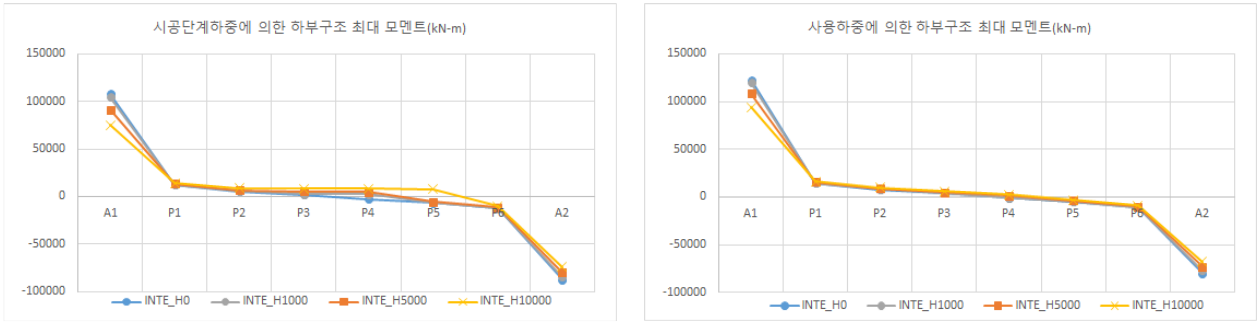


그림 3-6-22. 수평변위 조정공 적용에 따른 하부구조 단면력(kN·m) 비교

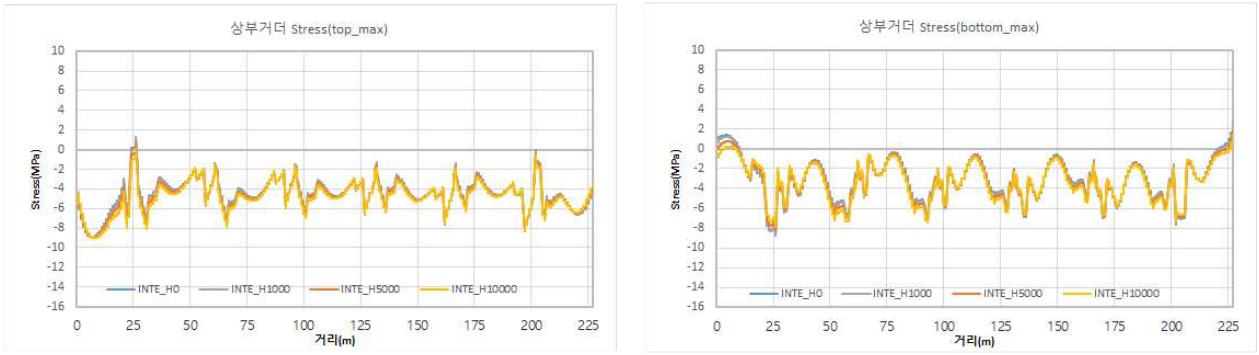


그림 3-6-23. 수평변위 조정공 적용에 따른 상부 거더 Stress(MPa) 비교

○ 크리프 및 건조수축 영향 저감 및 상부구조물과 하부구조물의 일체화 시공방안 검증 실험체 제작

- 검토 대상 실험 조건은 수평변위 조정공의 효과 및 상부구조물과 하부구조물 일체화 시공방안을 검증하기 위해 그림 3-6-24과 같이 실험체 제작
- 종점측을 고정시킨 500x500 콘크리트 빔 구조 4개소에 대하여 양생 2개월 건조수축 변위 발생 후 2개소 시험체에 대하여 시점부 수평변위 조정공(Jack force)를 도입하여 선행 변위를 유발 시킴으로써 이에 따른 시간 종속적 변위 및 응력 영향을 분석
- 수평조정공 도입으로 인한 선행변위 유발 후 시점측 지점조건을 강결 유무(철근콘크리트, 무근콘크리트 타설)에 따른 구조물 거동 분석

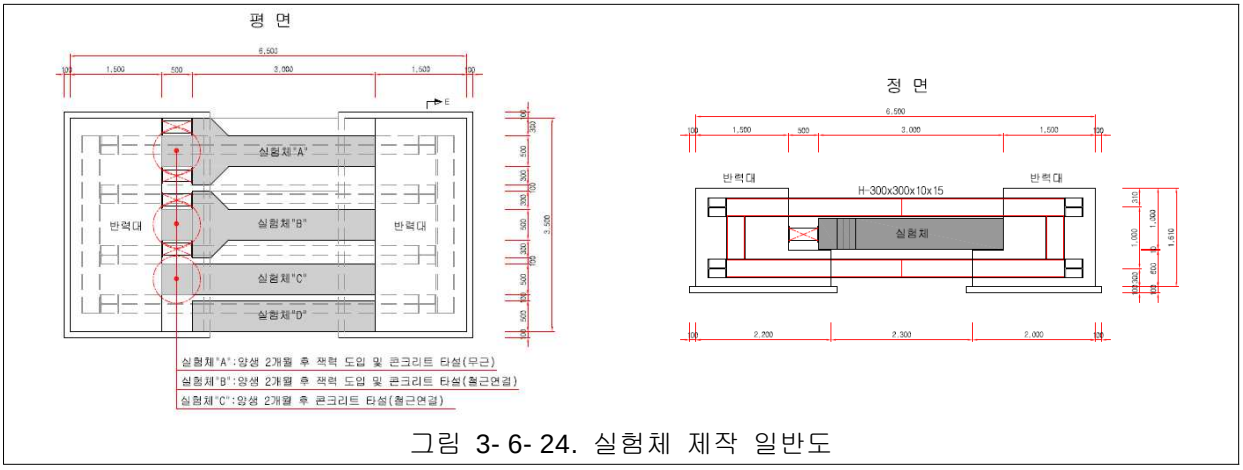


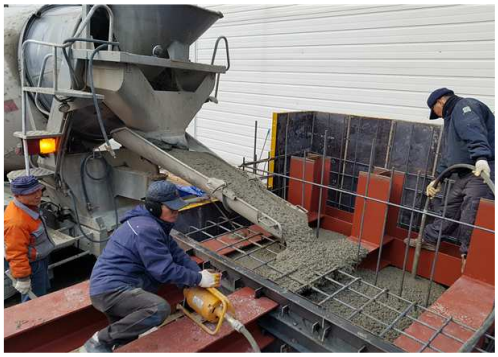
그림 3-6-24. 실험체 제작 일반도

○ 실험체 제작 및 실험 결과 분석

· 실험체 제작



(a) H-Beam 제작



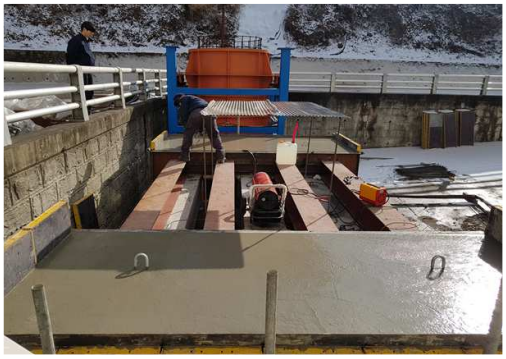
(b) 철근 조립 및 1차 콘크리트 타설



(c) 1차 타설분 양생



(d) 2차 타설분 거푸집 설치 및 철근 조립



(e) 콘크리트 2차 타설 및 양생



(f) 시험 완료 후 철거

그림 3-6-25 실험체 제작 사진대지

· 계측기 설치 위치도

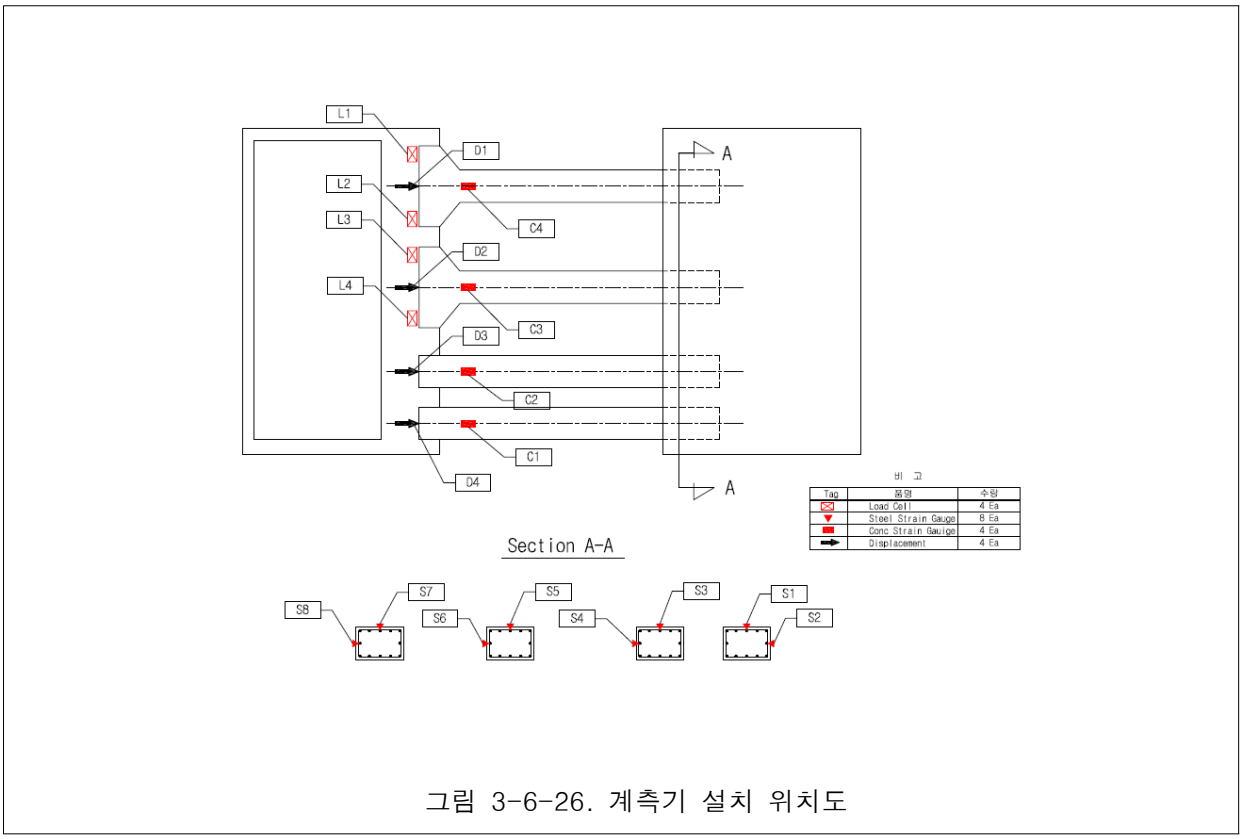


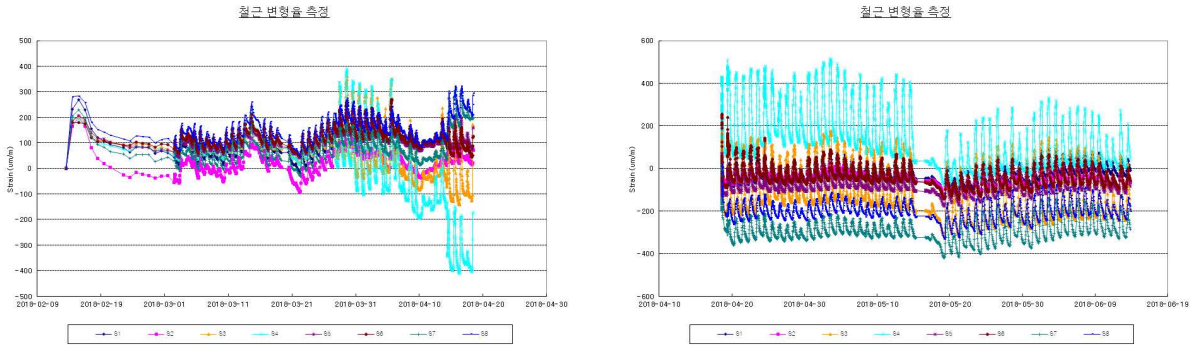
그림 3-6-26. 계측기 설치 위치도

- 실험체 A : 200KN 압축력 도입 후 무근 채움
- 실험체 B : 100KN 압축력 도입 후 철근 연결
- 실험체 C : 철근 연결로 수축 구속
- 실험체 D : 자유 신축
- 하중계 : 7개소
- 철근 변형률계 : 8개소
- 콘크리트 변형률계 : 4개소
- 변위계 : 4개소

· 실험 개요

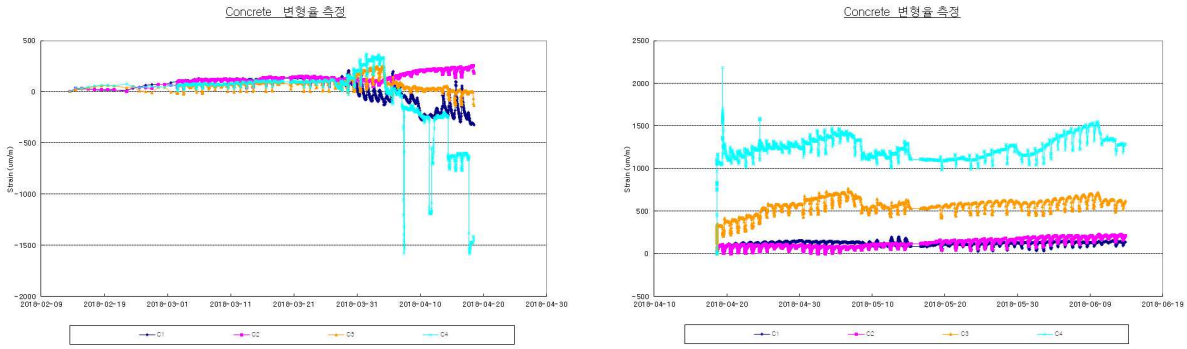
- 콘크리트 타설 및 2개월 양생 후 2개소 실험체에 압축력 도입 및 2개소 실험체에는 압축력 도입 없이 시간 경과에 따른 하중, 변형률 및 변위 측정

· 실험 결과 및 분석



(a) 2018. 02. 12 ~ 04. 18 (b) 2018. 04. 18 ~ 07. 17

그림 3-6-27. 철근 변형률도



(a) 2018. 02. 12 ~ 04. 18 (b) 2018. 04. 18 ~ 07. 17

그림 3-6-28. 콘크리트 변형률도

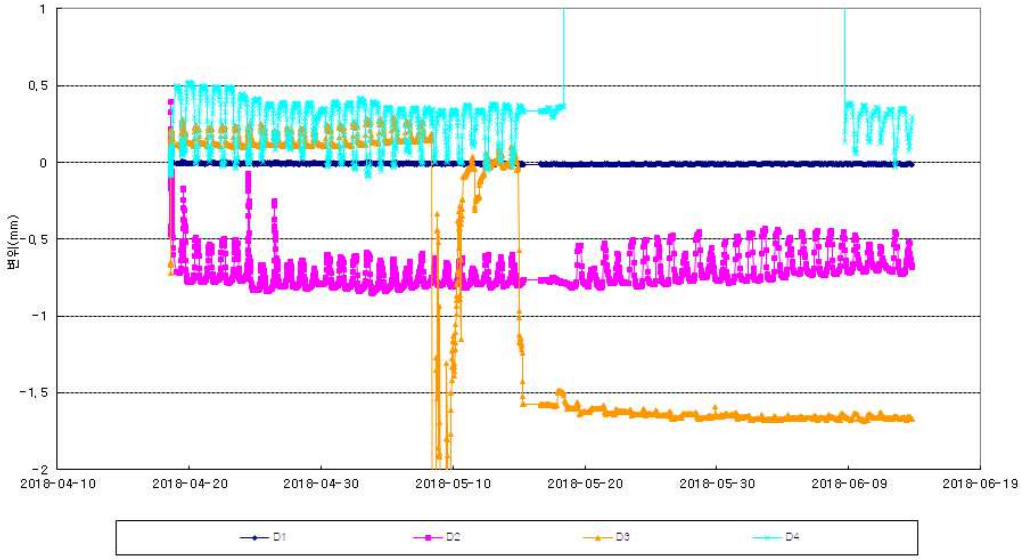


그림 3-6-29. 2018. 04. 18 ~ 07. 17 변위도

- 옥외 실험의 한계로 일정 구간에서 계측의 교란이 발생하였으나 각 실험체 별 차별화 된 추이가 발생
- 선행하중 재하 후 철근 연결로 강결시켜 변위의 방향성을 제거한 실험체 D2에서 리턴변위가 발생하고 선행하중 재하 후 무근을 채워 건조수축의 방향성을 유지한 D1의 변위가 제어됨이 확인됨.

○ 실험체 FEM 해석

· 해석 개요

- FEM 프로그램을 활용하여 철근콘크리트 모델의 경계조건, 하중조건 등에 따른 시간 의존적 변형(크리프 & 건조수축)의 영향을 평가. FEM 프로그램은 ABAQUS 6.13을 활용하고, 시간 의존적 변형은 콘크리트구조기준(2012)의 예측 식을 참고.

· 해석 절차

- 재료 및 기하비선형을 고려한 FEM modeling
- 경계조건 및 하중조건에 따른 P-Δ curve 계산
- 콘크리트구조기준(2012)에 따른 시간 의존적 변형 계산
- 시간 의존적 변형을 고려한 FEM 모델의 하중 및 변위 계산

· 해석 모델링

(1) 모델 및 해석 case

- 해석 모델은 앞선 실험체 제작 일반도와 같이 4case로, 모델 규격은 500x500x3000(mm)로 모두 동

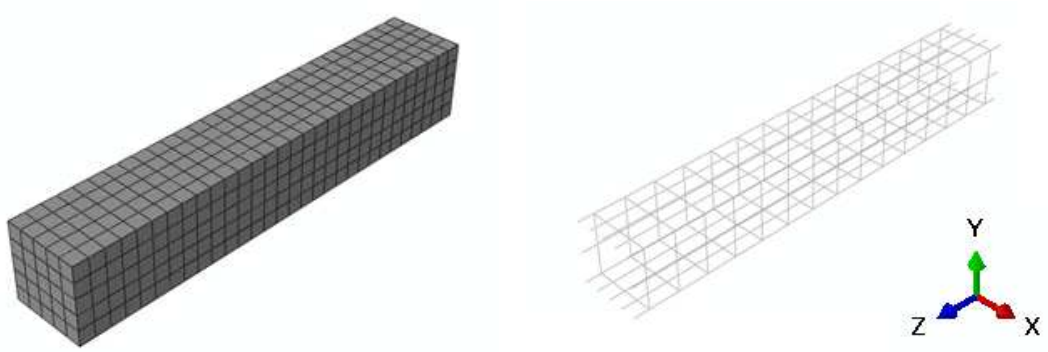
일하며, 해석 모델 각각의 case는 아래 표 3-6-1와 같다.

표 3-6-1. 해석 Case

	잭력 도입 (압축력)	경계 조건	시간 의존적 변형
Case A	2,000 KN	잭력 도입 후 무근 채움	크리프 & 건조수축
Case B	1,000 KN	잭력 도입 후 철근 연결	크리프 & 건조수축
Case C	-	철근 연결	건조수축
Case D	-	자유 경계	건조수축

(2) 해석조건

- ABAQUS 6.13
- 철근 : Truss / 콘크리트 : Solid element
- 철근 f_y = 400MPa, E_s = 200GPa
- 콘크리트 f_{ck} = 27MPa, E_c = 23,045MPa, ε_{co} = 0.002, 2차원 포물선 S-S curve 가정
- 재료 및 기하비선형 고려
- 모델의 축방향 거동 분석



(a) 콘크리트 모델링 (b) 철근 모델링

그림 3-6-30. FEM modeling

(3) 경계조건 & 하중조건

- Z방향을 구속하고 변위하중을 작용시켜 변위량 증가에 따른 하중 변화를 검토

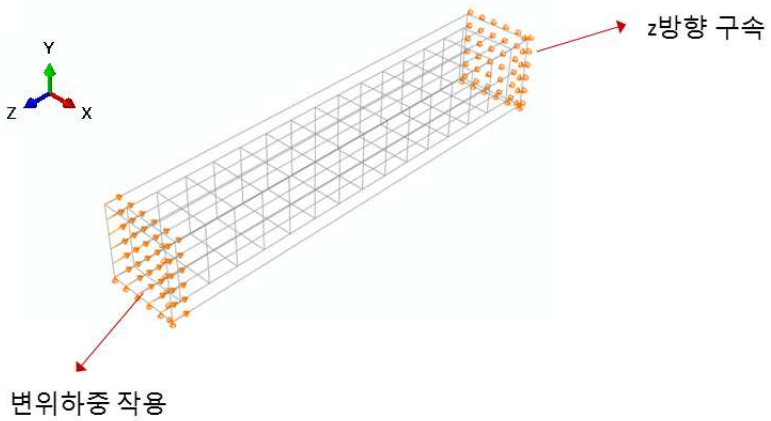
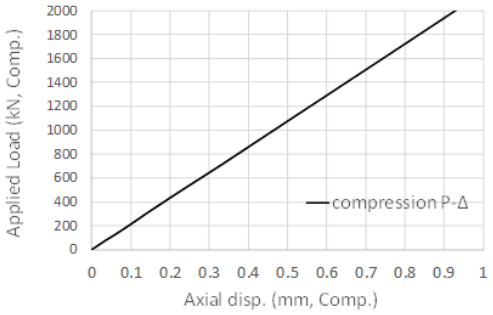


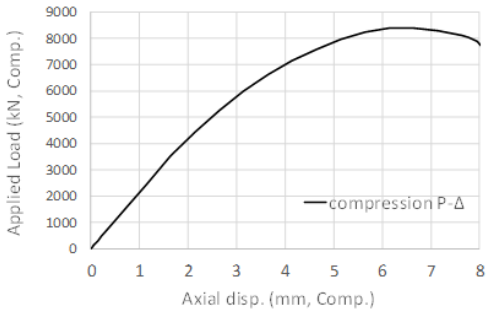
그림 3-6-31. 경계조건 & 하중조건

· 해석 결과

- 해석 결과, 모델의 최대 하중은 약 8,400KN으로 나타남
- 변위량 약 0.93mm일 때, 탄성거동을 보이며 2,000KN의 하중이 계산됨
- 변위량 약 0.465mm일 때, 탄성거동을 보이며 1,000KN의 하중이 계산됨



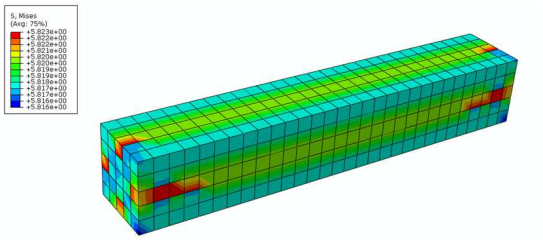
(a) P-Δ curve (탄성구간)



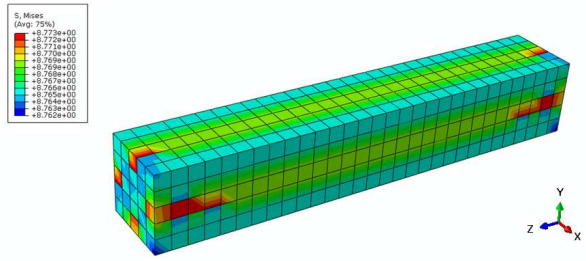
(b) P-Δ curve (전구간)

그림 3-6-32. P-Δ curve

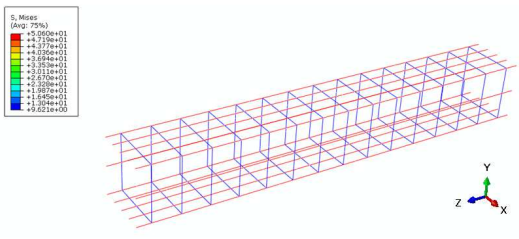
- <그림 3-6-33>와 <그림 3-6-34>는 각각 0.76mm 변형과 1.14mm 변형일 때의 응력 및 반력을 나타낸 것으로 콘크리트와 철근의 응력을 각각 나누어서 그때 발생하는 반력을 표시



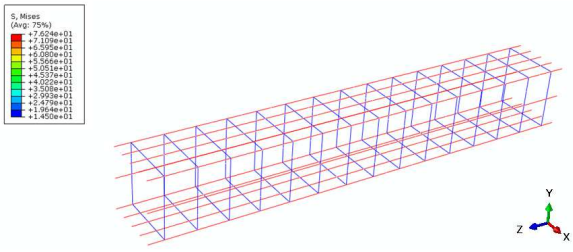
(a) 콘크리트 응력 (약 5.8MPa)



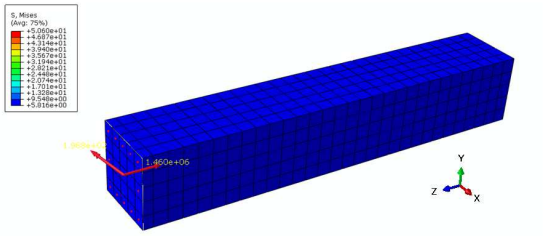
(a) 콘크리트 응력 (약 8.8MPa)



(b) 철근 응력 (약 50.6MPa)

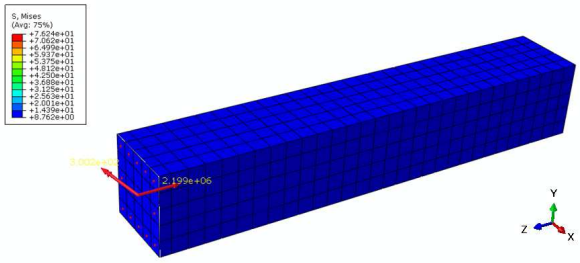


(b) 철근 응력 (약 76.2MPa)



© 반력 (약 1,460KN)

그림 3-6-33. 0.76mm 변형 시 응력 및 반력

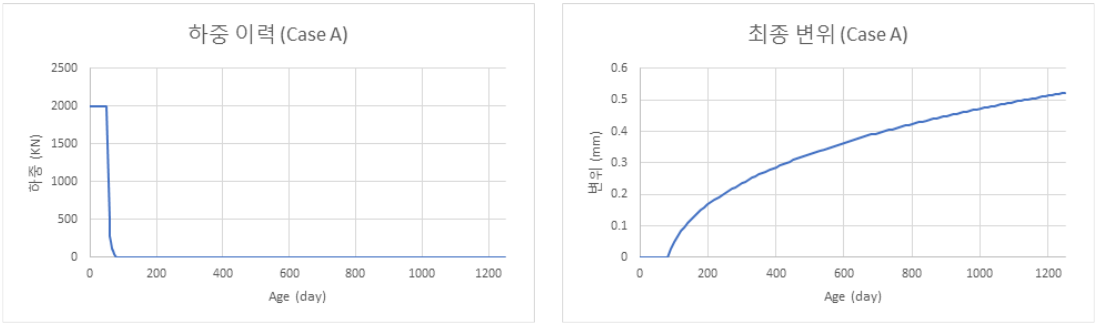


© 반력 (약 2,199KN)

그림 3-6-34. 1.14mm 변형 시 응력 및 반력

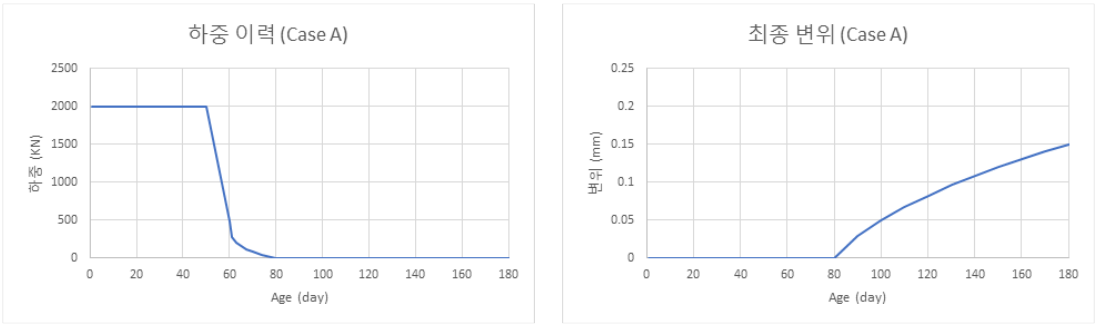
· 시간 의존적 변형

- 콘크리트구조기준(2012) 참고 (2.2.2 절)
- 크리프 & 건조수축 예측식 계산
- 가정 사항 (양생 온도 20°C / 1종 시멘트 습윤 양생 / 상대 습도 70%)
- 양생 60일 이후 하중 재하
- 1,250일 까지 계산
- <그림 3-6-35>은 Case A에 대한 결과 그래프이다. 잭력(2,000KN)으로 인한 0.93mm의 초기 변형이 소산된 이후 추가적인 시간 의존적 변형이 발생. 하중이 소산된 A_{ge}는, <그림 3-6-36>과 같이 하중재하 약 20일 후로 계산되었으며, 1,250일 기준 최종 변위는 약 0.523mm가 발생.



(a) 하중 이력 (b) 최종 변위

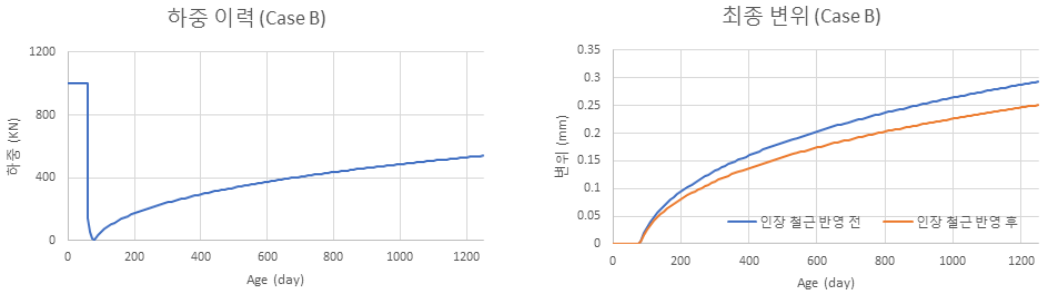
그림 3-6-35. Case A 결과 그래프



(a) 하중 이력 (b) 최종 변위

그림 3-6-36. Case A 결과 그래프(확대)

- <그림 3-6-37>은 Case B에 대한 결과 그래프로서 잭력(1,000KN)으로 인한 0.465mm의 초기 변형이 소산된 이후 추가적인 시간 의존적 변형이 발생. 1,250일 기준 최종 변위는 약 0.293mm가 발생하게 되나, 인장 철근의 영향으로 약 0.251mm의 최종 변위가 발생. 이때 모델에 발생하는 내력은 약 540KN임



(a) 하중 이력 (b) 최종 변위

그림 3-6-37. Case B 결과 그래프

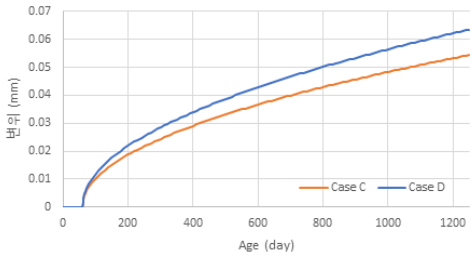


그림 3- 6- 38. Case C & D 결과 그래프

- <그림 3-6-38>는 Case C와 D에 대한 결과 그래프로 초기 응력이 없기 때문에 시간 의존적 변형 중 건조수축만 발생. Case D의 경우, 자유 경계 조건에 있기 때문에 1,250일 기준 최종 변위는 약 0.0636mm가 발생함. Case C의 경우, 인장 철근의 영향으로 건조수축을 제한하여 약 0.0544mm의 최종 변위가 발생.

· 검토 결론

- FEM 프로그램을 활용하여, 경계조건과 변위하중 변경에 따른 모델에 작용하는 하중을 검토하고 시간 의존적 변형(크리프 & 건조수축)의 영향을 평가하여 FEM 해석 결과에 적용.
- 그 결과, 해석 모델의 최대 최대하중은 8,400KN으로 나타났으며, 2,000KN 하중에서 탄성거동을 보이며 약 0.93mm 변형이 발생하고, 1,000KN 하중에서 역시 탄성거동을 보이며 약 0.465mm의 변형이 발생.
- Case A의 경우, 잭력(2,000KN)에 의한 변형(0.93mm)이 잭력 도입 약 20일 후에 소산되고, 1,250일 기준 0.523mm의 변형이 발생하는 것으로 나타남.
- Case B의 경우, 잭력(1,000KN)에 의한 변형(0.465mm)이 소산되고, 인장철근의 제한으로 1,250일 기준 약 0.846mm의 변형을 나타냄.
- Case C와 Case D의 경우, 건조수축만 발생하며, Case C는 인장철근의 제한으로 1,250일 기준 0.0544mm, Case D는 0.0636mm의 변형이 발생하는 것으로 나타남.
- 해석 결과, <그림 3-6-39>과 같이 초기 잭력을 도입하여 시간 의존적 변형으로 인한 변위를 제어할 수 있는 것으로 나타남. 또한 인장철근의 삽입으로 시간 의존적 변형을 일부 제어할 수 있는 것으로 나타남.
- 시간 의존적 변형을 예측하여 이에 상응하는 초기 잭력을 도입 or 인장철근을 배근하여, 모델에 발생하는 내력을 줄일 수 있을 것으로 판단됨.
- 건조수축에 의한 변위에 비해 크리프에 의한 변위가 월등히 큼.
- 결론적으로 완전 일체형 연속교 중심에서 교대 쪽으로 향하는 선행하중(압축력)을 재하하여 초기 변형을 발생시킨 후 무수축몰탈로 채워 선행하중을 유지시킴으로써 카운트(역방향) 크리프 변형을 유도하여 교량 완공 후 교량 중심 방향을 향해 발생하는 건조수축 및 크리프를 상쇄할 수 있음이 확인됨.

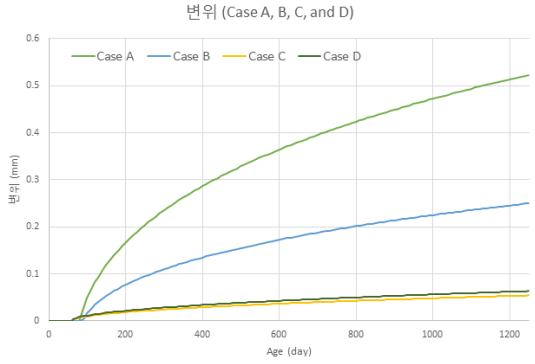


그림 3- 6- 39. 종합 결과 그래프

아. 연구 종합 결론 및 향후 추진 과제

○ 연구 종합 결론

- 완전 일체형 연속교의 최적화 설계를 위해 건조수축과 크리프의 영향에 의해 수평 변위와 회전 변위가 집중적으로 발생하는 변위제어 교대 및 교대에 연한 측 경간의 최적화가 중요.
- 변위제어 교대 및 측 경간의 최적화를 통해 장대레일 안전성과 상부구조의 안전성이 확보되는 경우, 측 경간에 비해 상대적으로 건조수축 및 크리프의 영향이 작은 중앙 경간을 연속적으로 늘여 500m, 1,000m가 넘는 장대 완전일체형 연속교의 개발 가능성 확보.
- 크리프의 영향이 과도할 경우 양측 교대 방향으로의 선행하중 재하를 통해 카운트 크리프(압축)를 유도함으로써 상부구조의 수축에 따른 인장 크리프를 상쇄함으로써 상부구조를 보다 슬림화하고 강선량도 최소화할 수 있는 이론적 및 실험적 근거 확보
- 최적화 설계를 위한 “완전 일체형 연속교의 설계 Procedure” 정립
- 현 연구 수준에서 기존 철도교 대비 초기 공사비 25%, LCC 비용 30% 절감 목표 달성

○ 향후 추진 과제

- 변위제어 교대의 수평 변위 제어에 더불어 회전 변위 제어 기능 부여로 완전 일체형 연속교의 성능 향상 및 장대화 연구
- 연구 대상 교량 레벨에서 수축에 의한 크리프력을 상쇄할 수 있는 양측 교대 방향으로의 선행하중 재하 효과 연구를 통해 상부구조의 슬림화 및 강선량 최소화 추구
- 수평 및 회전 변위제어 교대 상세 개발 및 장대레일 안전성, 내진 성능 및 상부구조 텐던 최적화를 위한 통합 모델링 및 시행
- 한계상태설계법을 적용하고 있는 도로교로의 연구 영역 심화 및 확대
- 현재 설계 진행 중인 호남고속철도 등에 사업화 대상 교량 선정 및 집중 연구로 기술 사업화 실현

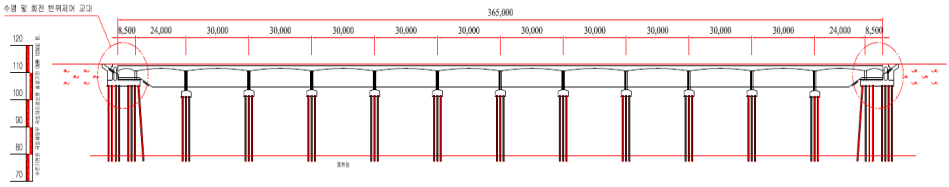


그림 3- 6- 40. 수평 및 회전 변위제어 교대를 이용한 완전 일체형 연속교의 장대화 및 최적화 모델 예시

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

○ 성과점검기준표

[1차년도]

구분	핵심성과(CTE)		단위성과		성과점검기준							양적 성과 건수
					질적 성과지표		목표치	달성치	측정방법	검증방법	가중치	
주관	1	상부구조 변위제어 위한 교대최적화 설계 기법	1-1	변위제어 교대의 거동특성 평가	①	신뢰도(R^2)	>0.95	>0.95	회귀분석	보고서	2.5	
					②	실험계획법(DOE)	<0.05	<0.05	분산분석	보고서	2.5	
	2	철도교의 교대 강성과 궤도-교량 상호작용의 평가기법	2-1	구조성능 평가	①	허용 부가 레일 응력	20%	20%	수치해석	설계기준	10	
					②	레일-교량 상대 변위	<5mm	<5mm	수치해석	설계기준	5	
공동	3	건조수축 및 크리프 저감 설계 및 시공 기술 개발	3-1	수평변위조정공 도입효과 분석	①	건조수축 영향 감소	50%	10%	수치해석	보고서	2.5	특허 : 출원 1 건
					②	크리프 영향 감소	20%	5%	수치해석	보고서	2.5	
			3-2	최적 설계 및 시공방안 수립	①	안전성	>1.0	>1.0	수치해석	구조계산서	5	
					②	경제성 분석	기존교량대비 70%	95%	물량 산출서	보고서	2.5	
	4	콘크리트 상판 및 하부구조간 연결 구조 개발	4-1	연결부 소요 성능기준 정립	①	소요강성 수렴도(R^2)	>0.95	0.96	회귀분석	보고서	10	
					②	접합부 내하력 개선율	115%	105%	수치해석	보고서	2.5	
			4-2	최적 연결 접합부 상세 도출	①	성능평가	>1.0	>1.0	수치해석	구조계산서	2.5	
					②	표준도 작성	100%	60%	설계도면	설계도면	2.5	
계											100	특허 : 출원 1 건 등록 0 건 논문 : 0 건 시제품 : 0 건 S/W : 0 건

[2차년도]

구분	핵심성과(CTE)		단위성과		성과점검기준						양적 성과 건수
					질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	가중치	
주관	1	상부구조 변위제어 위한 교대최적화 설계 기법	1-2	교대 소요 강성 기준의 정립	① 수렴성(R^2)	>0.95	-	회귀분석	보고서	5	논문 : 2 건
					② 안전성	1.0	-	비선형해석	보고서	2.5	
			1-3	변위제어 교대 설계 및 구조성능 검증	① 공칭강도	>1.0	-	수치해석	구조계산서	7.5	
					② 상부공의 인장응력비	<1.0	-	수치해석	구조계산서	2.5	
					③ 교축변위 비율	<1.0	-	수치해석	구조계산서	2.5	
	2	철도교의 교대 강성과 궤도-교량 상호작용의 평가기법	2-2	최적구조시스템의 개발	① 레일 부가응력 수렴도(R^2)	>0.95	-	회귀분석	통계 보고서	5	논문 : 2 건
					② 성능평가	1.0	-	수치해석	설계기준	5	

공동	3	건조수축 및 크리프 저감 설계 및 시공 기술 개발	3-3	구조성능 검증 (Bench scale)	①	성능평가	100%	-	성능 검증 실험	시험 성적서 실험 평가서	5	논문 : 1 건
					②	시공메뉴얼 작성	100%	-	보고서	보고서	2.5	
	4	콘크리트 상판 및 하부구조간 연결 구조 개발	4-3	구조성능 검증 (요소 실험)	①	성능평가	100%	-	성능 검증 실험	시험 성적서 실험 평가서	10	특허 : 출원 1 건
					②	시공메뉴얼 작성	100%	-	보고서	보고서	2.5	
계											50	특허 : 출원 1 건 등록 0 건 논문 : 5 건 시제품 : 0 건 S/W : 0 건

[최종]

구분	핵심성과 (CTE)		단위성과		성과점검기준							양적 성과 현황	
						질적 성과지표	목표치	달성치	측정방법	검증방법	가중치	목표건수 (계획)	달성건수 (실적)
주관	1	상부구조 변위제어 위한 교대최적화 설계 기법	1-1	변위제어 교대의 거동특성 평가	①	신뢰도(R^2)	>0.95	>0.95	회귀분석	보고서	2.5	특허출원 2건 논문게재 5건	특허출원 2건 특허등록 1건 논문게재 2건 (4건 게재예정) 논문발표 1건
					②	실험계획법(DOE)	<0.05	<0.05	분 산 분석	보고서	2.5		
			1-2	교대 소요 강성 기준의 정립	①	수렴성(R^2)	>0.95	-	회 귀 분석	보고서	5		
					②	안전성	1.0	-	비 선 형 해석	보고서	2.5		
			1-3	변위제어 교대 설계 및 구조성능 검증	①	공칭강도	>1.0	-	수 치 해석	구조계산서	7.5		
					②	상부공의 인장응력비	<1.0	-	수 치 해석	구조계산서	2.5		
					③	교축변위 비율	<1.0	-	수 치 해석	구조계산서	2.5		
	2	철도교의 교대 강성과 궤도-교량 상호작용의 평가기법	2-1	구조성능 평가	①	허용 부가 레일 응력	20%	20%	수치해석	설계기준	10		
					②	레일-교량 상대 변위	<5mm	<5mm	수치해석	설계기준	5		
			2-2	최적구조시스템의 개발	①	소요강성 수렴도(R^2)	>0.95	-	회귀분석	통계 보고서	5		
					②	성능평가	1.0	-	수치해석	설계기준	5		
공동	3	건조수축 및 크리프 저감 설계 및 시공 기술 개발	3-1	수평변위조정공 도입효과 분석	①	건조수축 영향 감소	50%	10%	수치해석	보고서	2.5		
					②	크리프 영향 감소	20%	5%	수치해석	보고서	2.5		
			3-2	최적 설계 및 시공방안 수립	①	안전성	>1.0	>1.0	수치해석	구조계산서	5		
					②	경제성 분석	기존 교량 대비 70%	95%	물량 산출서	보고서	2.5		
			3-3	구조성능 검증 (Bench scale)	①	성능평가	100%	-	성능검증 실험	시험 성적서 실험 평가서	10		
					②	시공메뉴얼 작성	100%	-	보고서	보고서	2.5		
	4	콘크리트 상판 및 하부구조간 연결 구조	4-1	연결부 소요 성능기준 정립	①	소요강성 수렴도(R^2)	>0.95	0.96	회귀분석	보고서	2.5		
					②	접합부 내하력	115%	105%	수치해석	보고서	2.5		

		개발				개선율							
			4-2	최적 연결 접합부 상세 도출	①	성능평가	>1.0	>1.0	수치해석	구조계산서	5		
					②	표준도 작성	100%	60%	설계도면	설계도면	2.5		
			4-3	구조성능 검증 (요소 실험)	①	성능평가	100%	-	성능검증 실험	시험 성적서 실험 평가서	10		
					②	시공메뉴얼 작성	100%	-	보고서	보고서	2.5		

2. 관련 분야 기여도

○ 변위제어 교대는 내진대책을 위한 고가의 교량부속품 기존사용량 대비 70% 저감 가능, 부속품의 잦은 파손에 의한 수리 및 교체로 인해 유발되는 유지관리 생애주기 비용(LCC) 31% 저감 가능, 기존 철도교의 공사비 대비 26% 절감 가능, 유지보수비 대비 59% 절감 → 사회적 비용 부담이 감소됨.

○ 교대와 교각을 일체식으로 시공함으로 교량 부속품 사용이 저감 → 기존 교량에 비해 유지보수가 편리하여 일상적인 교량점검이 어렵거나 유지보수의 주기가 긴 지역에 유리하게 적용 가능.

○ 일체식 교대 교량은 슬림한 구조형상으로 미관향상의 효과를 가짐 → 기존 교량의 도심미관을 해치는 둔탁하고 육중한 형상으로 인한 민원 및 기피 현상 같은 부정적인 영향을 해소 가능

○ 변위제어 교대 일체형 교량의 Pushover 해석을 통한 휨강도, 공급변위연성도와 같은 내진성능 평가 → 변위제어 교대 일체형 교량의 적정 수치해석 기법 및 관련 지침을 수립, 철도교의 궤도-교량 상호작용 영향 적용 기법 및 기준 정립

○ 변위제어 교대 강성에 따른 구조해석적 변수해석을 통해 상부구조, 변위제어 교대 및 중간교각 간 상호작용에 따른 수평하중의 분배특성을 분석 → 효과적으로 수평변위를 제어하는데 필요한 교대 강성간의 상관관계를 정립, Pushover 해석을 수행하여 내진성능 평가를 통한 변위제어 교대를 적용한 철도연속교의 내진성능 향상 기반기술을 확보.

○ 기존 일반 조인트 교량은 노후화와 지진등의 이유로 신축이음의 기능 상실이 발생하여 구조적으로 많은 문제가 발생함, 따라서 주기적인 교체 작업 및 보수 보강으로 인한 유지관리 비용이 투입되고 있음 → 변위제어 교대 일체식 교량은 상부구조와 하부구로를 일체로 강결시킨 구조형식의 교량, 큰 강성을 가진 변위제어 교대가 지진하중이나 제동하중 등의 수평하중에 효과적으로 저항하여 교량의 신축이음 장치와 교좌장치 등 고가의 교량부속품을 생략이 가능함 → 내진성능과 경제성을 획기적으로 향상시킴.

○ 건조수축 및 크리프의 배제(또는 최소화)와 온도하중에 의한 인장응력의 효과적 제어를 위한 기술개발 및 수치해석을 통해 검증함

○ 완전일체형 연속교는 특수한 상황을 제외한 일반적인 환경에서의 표준교량으로서 도로교, 철도교 및 수로교 등 그 적용 범위가 거의 무제한적이며 이를 통해 해당 사업의 예산 절감을 통한 사업성 향상으로 인프라 건설 사업의 활성화에 크게 기여할 것으로 사료됨.

○ 교량기술의 최종단계인 완전일체형 연속교 기술 확보 → 세계 도로 및 철도 시장에서 국내 기업의 가격 및 기술 경쟁력이 제고될 수 있는 기술적 토대 마련.

제5장. 연구개발성과의 활용계획

1. 연구개발성과의 활용방안

□ 완전일체형 교량은 교량의 진화 단계로 구분하면 그 최종 단계로서 재료 기술의 발달(인장에 강하고 온도에 의한 신축이 작은 재료)과 함께 그 활용 방안이 무궁무진한 미래형 교량임[단경간교→연속교→라멘형 연속교→세미-일체형교량(현 단계)→일체형교량]

□ 일체형교량은 특수한 환경을 제외한 일반적인 환경에서의 표준 교량으로서 도로교(보도교), 철도교 및 수로교 등 그 적용 범위가 거의 무제한적이며 이를 통해 해당 사업의 예산 절감을 통한 사업성 향상으로 인프라 건설 사업의 활성화에 크게 기여할 전망임

□ 일체형교량은 받침 점검시설 등 교량에 부착된 여러 부대시설이 없고 그 자체로 매우 슬랜더해서 주변 경관에 미치는 영향이 최소화되는 교량이므로 교량 건설로 인한 민원 예상 지역 등에 적극 활용 가능함

□ 소규모 교각을 활용한 일체형교량은 극단적으로 날렵한 경관이 우수하므로 도심지 경전철 교량에 최적의 형식임

□ 특히 철도교에서는 레일신축이음 없는 연속교가 가능해지고, 상시 철도교 특유의 종방향 하중(장대레일 종하중, 시·제동하중)을 모두 교대가 부담하므로, 기존 철도교에 비해 획기적으로 날렵한 형태의 교량 건설이 가능해지며, 그만큼 공사비 및 유지관리비용도 획기적으로 저감 가능

2. 기대효과

○ 기술적 측면

□ 세미-일체형교량 상용화로 일체형교량 기술에 가장 근접해 있는 독일에 앞서 세계 최초로 완전일체형 연속교 기술 확보

- 콘크리트 교량에서 건조수축 및 크리프 영향 최소화 기술 확보
- 레일신축이음 없는 장대 연속 철도교 기술 확보(기존 철도교의 연속교 기술은 교량 양측 교대성토부에 레일신축이음을 설치할 경우 최대 약 900m)

□ 건조수축 및 크리프 영향 최소화 기술은 구조물 설계에 다양하게 응용 가능

- 건조수축 및 크리프 영향 최소화 시 다양한 부정정 구조물의 경제적 설계 가능

○ 경제적·산업적 측면

□ 향후 인프라 시장은 노후 시설의 교체 비용 증가, 기존 시설의 유지관리 비용 증가, 의료 서비스 확대 등 복지비용의 확대, 신 성장 동력확보를 위한 지출 증가 등으로 지속적으로 악화될 전망

□ 완전일체형 교량은 기존 교량 대비 최소 30% 이상 공사비 절감 효과를 기대할 수 있으므로 각종 도로 및 철도 사업의 사업성을 높여 인프라 건설사업의 활성화에 기여

- 우리나라 주요 고속도로인 경부고속도로가 정식 개통된 지 40년이 넘었음. 우리나라의 교량도 기대수명을 60년~70년 정도로 산정한 경우 보았을 때 이제 청년기를 지나 장년기에 본격 진입됨에 따라 구조물의 성능저하 및 노후화에 대한 구조적 건전성 평가 및 유지관리 방안에 대한 검토 필요성이 부각되고 있다. 특히 2000년 이후의 고속도로 유지관리 실적을 보면 교면포장 교체 이외 교량 유지관리 비용의 약 33% 이상이 신축이음장치 및 교량받침의 보수, 보강에 사용되었으며, 이에 따라 교량 상의 신축이음장치 및 교량받침을 제거한 완전일체형 교량의 수요가 앞으로 꾸준히 증가할 것으로 예상됨

○ 사회적 측면

□ 일체형교량은 교량 상판에 불연속부가 없으므로 주행 차량의 승차감이 향상될 뿐만 아니라 신축이음 자체가 없으므로 이의 교체나 보수로 인한 차량 정체 등 사회적 부편 익도 예방 가능

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

1. 해외기준

설계관련자료	발행기관	발행연도
AASHTO Load and resistance factor design (LRFD) specifications.	American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)	2010
Caltrans seismic design criteria, version 1.6	California Department of Transportation	2013

2. 국외 주요 문헌

문헌제목	저자	학회지명
Seismic design and retrofit of bridges.	Priestly, M. J. N., Seible, F., and Calvi, G. M.	New York, Wiley
Integral abutment bridges: comparison of current practice between European countries and the united states of America.	White, H.	New York State Department of Transportation.
Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design 21st Edition.	American Petroleum Institute (API).	Washington,D.C.
Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand.	Reese, L. C., Cox, W. R. and Koop, F.D.	Offshore Technology Conference

3. 국외 주요 논문

논문제목	저자	학회지명
Cyclic Behavior Modeling of Rectangular RC Bridge Pies using OpenSees.	Attarchian, N., Kalantari, A., and Moghaddam, A. S.	Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering
Flexural members with confined concrete	Kent D. C. and Park R.	ASCE J. Struct.
Seismic vulnerability assessment of a continuous steel box girder bridge considering influence of LRB properties.	Lee T. H., and Nguyen D. D.	Sadhana.
Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete.	Mander J. B., Priestley M. J. N., and Park R.	Journal of Structural Engineering
Method of analysis for cyclically loaded reinforced concrete plane frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal force and bending.	Menegotto, M. and Pinto, P. E.	IABSE Symposium of Resistance and Ultimate Deformability of structures Acted on by Well-Defined Repeated Loads
Nonlinear Analysis of Integral Abutment Bridges.	Greimann, L. F., Yang, P. and Wolde-Tinsae, A. M.	Journal of Structural Engineering
OpenSees command language manual.	Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M. H. and Fenves, G. L.	Pacific Earthquake Engineering Research Center

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		O
결정 사유		

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설 · 장비 현황

구입 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

○ 기술적 위험 요소 분석, 안전 관리 대책

① 연구실의 안전을 확보하고 환경위해 요소를 제거하기 위하여 주기적으로 안전점검을 실시해야 한다.

② 안전점검의 종류와 실시 시기는 다음 각 호의 구분과 같다.

1. 일상점검: 연구개발 활동에 사용되는 기계·기구·전기·약품·병원체 등의 보관 상태와 보호 장비의 관리 실태 등을 육안으로 실시하는 점검으로서 연구개발 관련 실험실습을 시작하기 전에 매일 1회 실시
2. 정기점검: 연구개발, 실험실습 활동에 사용되는 기계·기구·전기·약품·병원체 등의 보관 상태와 보호 장비의 관리 실태 등을 안전점검기기를 이용하여 실시하는 세부적인 점검으로서 매년 1회 이상 실시
3. 특별안전점검: 폭발사고와 화재사고 등 연구활동종사자의 안전에 치명적인 위험 가능성이 있을 것으로 예상되는 경우에 실시하는 점검으로서 총장이 필요하다고 인정하는 경우에 실시

③ 제2항의 안전점검을 실시할 수 있는 부서와 자격은 다음과 같다.

1. 일상점검: 각 연구실의 안전관리자 및 연구활동종사자
2. 정기점검과 특별안전점검: 안전관리부서(관계 법령의 해당 자격을 갖춘 사람)

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관 명	역할	논문 게재지/ 특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일 /특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	완전일체형 철도 연속교의 교대 강성에 따른 수평하중 분배 특성 및 시공단계별 거동해석	한밭대	저자	한국방재학회논문집	-	2018.02.28	단독	비SCI
2	논문	Buckling Strength Increment of Curved Panels Due to Rotational Stiffness of Closed-Section Ribs Under Uniaxial Compression	한밭대	저자	International Journal of Steel Structures	-	2018.06.30	단독	SCI
3	논문	Seismic Performance Evaluation of a Fully Integral Concrete Bridge with End-Restraining Abutments	한밭대	저자	Advances in Civil Engineering	-	-	단독	게재예정
4	논문	Seismic Performance Evaluation of a Fully Integral Steel Bidge with Strut-Braced Piers	한밭대	저자	International Journal of Steel Structures	-	-	단독	게재예정
5	국제 학술 발표	Parametric Pushover Analyses of a Fully Integral Railroad Bridge with End-Restraining Abutment	한밭대	발표자	ART2018	-	2018.11.14	단독	
6	특허	건조수축 및 크리이프의 영향을 최소화한 세미 일체형 연속교 제조공법	(주) 선구		대한민국	-		단독	
7	특허	슬라이딩 시스템을 도입하여 건조수축 및 크리이프의 영향을 최소화한 완전 일체형 연속교 제조공법	(주) 선구		대한민국			단독	
5	논문	다경간 완전일체형 연속철도교량 장대레일의 축력 변화 해석	교통대	저자	도시철도학회	-		단독	게재예정
6	논문	변위제어를 이용한 무도상 교량의 레일장대화 공법의 적용성 분석	교통대	저자	한국철도학회	-		단독	게재예정

제11장. 기타 사항

제12장. 참고 문헌

1. 국가건설기준센터 (KDS 24 17 11), “교량내진설계기준(한계상태설계법)”, 2016.
2. 최병호, 곽재영, 김태곤, 임철수, “완전일체형 철도 연속교의 교대 강성에 따른 수평하중 분배 특성 및 시공단계별 거동해석”, 방재학회 논문집, 18(2), p.p 261-270, 2018.
3. 한국건설기술연구원, “기계식 신축이음장치가 불필요한 무조인트보수공법 기술 검증 및 해외 현지화”, 2016.
4. 한국도로공사 도로교통연구원, “연장 200m급 무조인트 교량시스템 개발”, 2016.
5. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), “AASHTO Load and resistance factor design (LRFD) specifications.”, Washington, D. C., USA, 2010.
6. Attarchian, N., Kalantari, A., and Moghaddam, A. S., “Cyclic Behavior Modeling of Rectangular RC Bridge Pies using OpenSees.” 4th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, pp. 2286-2295, 2014.
7. Caltrans. Caltrans seismic design criteria, version 1.6. California Department of Transportation., 2013.
8. Choi, B. H., Moreno, L. B., Lim, C. S., Nguyen, D. D. and Lee, T. H., “Seismic Performance Evaluation of a Fully Integral Concrete Bridge with End-Restraining Abutments.”, Journal of the Constructional Steel Research, Submitted, 2019.
9. Erhan, S. and Dicleli, M., “Comparative assessment of the seismic performance of integral and conventional bridges with respect to the differences at the abutments.”, Bulletin of Earthquake Engineering, 13(2), pp. 653-677, 2014.
10. Far, N. E., Maleki, S., and Barghian, M., “Design of integral abutment bridges for combined thermal and seismic loads.”, Earthquake and Structures, 9(2), pp. 415-430, 2015.
11. Kent D. C. and Park R., 1971, Flexural members with confined concrete., ASCE J. Struct. Div. 97(7): 1969-1990.
12. Kozak, D. L., LaFave, J. M., and Fahnestock L. A., “Seismic modeling of integral abutment bridges in Illinois.”, Engineering Structures. 165(15), pp. 170-183, 2014.
13. Kwak J. Y., Moreno, L. B., Lee, T. H., Choi, B. H., “ Seismic Performance Evaluation of a Fully Integral Steel Bridge with Strut-Braced Piers”, International Journal of Steel Structures, submitted, 2019.
14. Lee T. H., and Nguyen D. D., “Seismic vulnerability assessment of a continuous steel box girder bridge considering influence of LRB properties.”, Sadhana. 43(1), 14, 2018.
15. Mander J. B., Priestley M. J. N., and Park R., “Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete.”, Journal of Structural Engineering. ASCE, 114(8), pp. 1804-1826, 1988.
16. Menegotto, M. and Pinto, P. E., “Method of analysis for cyclically loaded reinforced

concrete plane frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal force and bending.”, IABSE Symposium of Resistance and Ultimate Deformability of structures Acted on by Well-Defined Repeated Loads, Lisbon, Portugal, 13: 15-22, 1973.
17. Priestly, M. J. N., Seible, F., and Calvi, G. M., “Seismic design and retrofit of bridges.”, New York, Wiley, pp. 265-456, 1996.
18. White, H., “Integral abutment bridges: comparison of current practice between European countries and the united states of America.”, New York State Department of Transportation. New York, NY, USA, 2007.
19. American Petroleum Institute (API)., 2002. “Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design 21st Edition.”, Washington, D.C., USA.
20. Faraji, S., Ting. J. M., Crovo, D. S. and Ernst, H., 2001. “Nonlinear Analysis of Integral Bridges: Finite-Element Model.”, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 127(5), pp. 454-461.
21. Greimann, L. F., Yang, P. and Wolde-Tinsae, A. M., 1986. “Nonlinear Analysis of Integral Abutment Bridges.”, Journal of Structural Engineering, ASCE, 112(10), pp. 2263-2280.
22. Kong, B., Cai, C. S. and Zhang, Y., 2016. “Parameteric study of an integral abutment bridge supported by prestressed precast concrete piles.”, Engineering Structures, 120, pp. 37-48.
23. Korean National Railroad Agency (KNR)., 2016. Korean railway bridge specification.
24. Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M. H. and Fenves, G. L., 2007. OpenSees command language manual. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, USA.
25. Reese, L. C., Cox, W. R. and Koop, F. D., 1974. “Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand.”, Offshore Technology Conference, Houston, Texas.
26. Zordan, T., Briseghella, B. and Lan, C., 2011. “Parametric and pushover analyses on integral abutment bridge.”, Engineering Structures, 33(2), pp. 502-515.

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.

2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.