보안 과제( ), 일반 과제(○) / 공개(○), 비공개( ), 발간등록번호(11-B552989-000359-01)

국토교통과학기술촉진연구사업 제 2차 연도 최종 보고서

R&D / 20CTAP-C151892
-02

강재 스트립과 프리캐스트 콘크리트 블록 활용 모듈러 지중아치 구조 개발 최종보고서

2021. 01. 11.

주관연구기관 / 경남과학기술대학교
공동연구기관 / 전남대학교
위탁연구기관 / (주) 택한

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통과학기술원장 귀하

'강재 스트립과 프리캐스트 콘크리트 블록 활용 모듈러 지중아치 구조 개발'(연구개발 기간 : 2019. 04. ~ 2020. 12.) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2021. 01. 11.

주관연구기관명 : 국립 경남과학기술대학교 산학협력단 이상원 (인)

공동연구기관명 : 국립 전남대학교 산학협력단 김재국 (인)

위탁연구기관명 : (주) 택한 문종훈 (인)

주관연구기관책임자: 안 진 희
공동연구기관책임자: 허 정 원
위탁연구기관책임자: 조 광 일

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

제 출 문

국토교통과학기술원장 귀하

'강재 스트립과 프리캐스트 콘크리트 블록 활용 모듈러 지중아치 구조 개발'(연구개발 기간 : 2019. 04. ~ 2020. 12.) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2021. 01. 11.

주관연구기관명 : 국립 경남과학기술대학교 산학협력단 이상원 (인)

공동연구기관명 : 국립 전남대학교 산학협력단 김재국 (인)

위탁연구기관명 : (주) 택한 문종훈 (인)

주관연구기관책임자: 안 진 희
공동연구기관책임자: 허 정 원
위탁연구기관책임자: 조 광 일

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

제 출 문

국토교통과학기술원장 귀하

'강재 스트립과 프리캐스트 콘크리트 블록 활용 모듈러 지중아치 구조 개발'(연구개발 기간 : 2019. 04. ~ 2020. 12.) 과제의 최종보고서 10부를 제출합니다.

2021. 01. 11.

주관연구기관명 : 국립 경남과학기술대학교 산학협력단 이상원 (인)

공동연구기관명 : 국립 전남대학교 산학협력단 김재국 (인)

위탁연구기관명 : (주) 택한 문종훈 (인)

주관연구기관책임자: 안 진 희
공동연구기관책임자: 허 정 원
위탁연구기관책임자: 조 광 일

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에 동의합니다.

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제 고유 번호</td><td>20CTAP-C151892-02</td><td>해당 단계 연구 기간</td><td>2020. 01. ~ 2020. 12.</td><td>단계구분</td><td>2차년도 / 2차년도</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구사업명</td><td>중사업명</td><td colspan="4">국토교통기술촉진연구사업</td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="4">-</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구과제명</td><td>대과제명</td><td colspan="4">-</td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="4">강재 스트립과 프리캐스트 콘크리트 블록 활용 모듈러 지중아치 구조 개발</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연구책임자</td><td rowspan="2">안진희</td><td>해당단계 참여연구원 수</td><td>총: 20 명
내부: 20 명
외부: 0 명</td><td>해당단계 연구비</td><td>정부: 206,000 천원
민간: 천원
정부외: 천원
상대국: 천원
계: 206,000 천원</td></tr>
<tr><td>총 연구기간 참여연구원 수</td><td>총: 22 명
내부: 22 명
외부: 0 명</td><td>총 연구비</td><td>정부: 370,000 천원
민간: 천원
정부외: 천원
상대국: 천원
계: 370,000 천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및 소속 부서명</td><td colspan="3">경남과학기술대학교
토목공학과</td><td colspan="2">참여기업명: 해당없음</td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="3">상대국명: 해당없음</td><td colspan="2">상대국 연구기관명: 해당없음</td></tr>
<tr><td>위탁연구</td><td colspan="3">연구기관명: (주) 택한</td><td colspan="2">연구책임자: 조광일</td></tr>
</table>

※ 국내・외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 갈음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반과제 본 사업은, 과제에 참여하는 연구인력 외에 국토교통 분야의 다양한 전문가, 연구자들이 본 연구과제에 관심과 참여를 유도하여 수요자의 입장에서 필요한 분야를 도출할 수 있도록 해야 하므로 일반과제로 보안등급을 설정함

9대 성과 등록・기탁번호

구분	논문	특허	보고서 원문	연구시설・장비	기술요약 정보	소프트웨어	화합물	생명자원		신품종	
								생명정보	생물자원	정보	실물
등록・기탁 번호	4(5)	2	-	-	-	1	-	-	-	-	-

국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설・장비 현황

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

기존 지중아치 구조와 비교하여 시공성 및 이동성을 개선하고 가설구조물을 배제한 강재 스트립과 프리캐스트 콘크리트 블록 활용 모듈러 지중아치 구조 기술 개발을 위하여 프리캐스트 콘크리트 블록 연결부의 요소기술 성능 평가와 지진 신뢰성 분석을 통한 내진성능 확보, 구조 단면의 최적화 설계 프로그램 개발, 현장 적용성 실험 및 하중 재하 실험을 통한 구조적 유효성과 거동 특성을 평가하였음	보고서 면수 총 95 페이지

〈 요약문 〉

연구의 목적 및 내용	**강재 스트립과 프리캐스트 콘크리트 블록 활용 모듈러 지중아치 구조 개발** ○ 프리캐스트 콘크리트 블록 연결부 요소기술 성능 평가 ○ 프리캐스트 모듈 지중아치의 지진신뢰성 해석 ○ 모듈러 지중아치 구조 단면 최적화 및 안전성 검토
연구개발성과	○ 강재 스트립과 프리캐스트 콘크리트 블록 활용 모듈러 지중아치 구조 개발 ○ 지중아치 구조의 지진신뢰성 분석을 통한 내진성능 확보 ○ 지중아치 구조 단면의 최적화를 통한 공사비 절감 ○ 구조 단면의 최적화에 따른 구조 안전성 평가
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 폭원 30m 이하 개착식 지중암거, 지하차도 및 생태터널 시장에 활용 ○ 아치교량, 대공간 건축구조, 우수저류조 등 확대 적용 및 유지관리 불필요 ○ 해외 선진수준의 지중아치 구조 관련 기술 보유 ○ 터널라이닝 및 건축구조 등으로 기술 확대 ○ 개착식 터널 및 생태교량, 지하차도 등 현장에 교통흐름 방해 없이 시공 ○ 지중 매립을 통해 자연친화적 경관기능을 향상 ○ 지중아치 적용시장에서 공사비 30% 감소: 약 225억원/년의 건설비용 절감 가능 (1,500억원/년 규모 시장에서 본 기술로 50% 대체할 경우)

핵심어 (5개 이내)	지중 아치 시스템	모듈러 아치	프리캐스트 패널	구조 부재의 최적화	지진 거동

〈 SUMMARY 〉

<table>
<tr><td>Purpose & Contents</td><td colspan="5">Development of modular underground arch system using steel strip and precast concrete blocks
○ Evaluation of structural performance of connection element for precast concrete block
○ Seismic reliability analysis of precast concrete modular underground arch
○ Examination of structural optimization and safety for structural member and section of underground arch system</td></tr>
<tr><td>Results</td><td colspan="5">○ Development of modular underground arch system using steel strip and precast concrete blocks
○ Securement of seismic performance for underground arch system from seismic reliability analysis
○ Construction cost reduction from the sectional optimization of underground arch system
○ Evaluation of structural safety from the sectional optimization of underground arch system</td></tr>
<tr><td>Expected Contribution</td><td colspan="5">○ Applications for cut-and-cover underground culverts, underground road ways and eco-corridors for 30m or less width
○ Applications for arch bridges, large span spatial structures and rainwater tanks etc. and maintenance - free for various applications
○ Advanced technology of underground arch system in the world
○ Application for tunnel lining and architectural structures
○ Construction without traffic flow interference
○ Providing eco-friendly view from underground construction
○ Construction cost reduction by 30% (22.5 billion won/year approximately)
- market size: 150 billion won/year / market share: 50%</td></tr>
<tr><td>Keywords</td><td>Underground arch system</td><td>Modular arch</td><td>Precast panel</td><td>Optimization of structural member</td><td>Seismic behaviors</td></tr>
</table>

〈 Contents 〉

1. Introduction ····· 1

2. Current Status for Related Researches ····· 2

3. Research Contents ····· 5

4. Research Results and Contributions ····· 88

5. Future Plans ····· 90

6. Collected Technology Information during Research ····· 91

7. Security Level ····· 91

8. Registered Research Facility and Equipments ····· 91

9. Laboratory Safety ····· 91

10. Representative Research Results ····· 91

11. Et cetera ····· 93

12. References ····· 93

〈 목 차 〉

1. 연구개발과제의 개요 ····· 1

2. 국내외 기술 개발 현황 ····· 2

3. 연구수행내용 및 성과 ····· 5

4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 ····· 88

5. 연구개발성과의 활용 계획 ····· 90

6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 ····· 91

7. 연구개발성과의 보안등급 ····· 91

8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설 · 장비 현황 ····· 91

9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적 ····· 91

10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적 ····· 91

11. 기타 사항 ····· 93

12. 참고 문헌 ····· 93

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

○ (최종연구목표) 강재 스트립 및 프리캐스트 블록 활용 지중아치 구조시스템을 위한 연결상세 해석기법 및 내진안전성 평가 기술개발

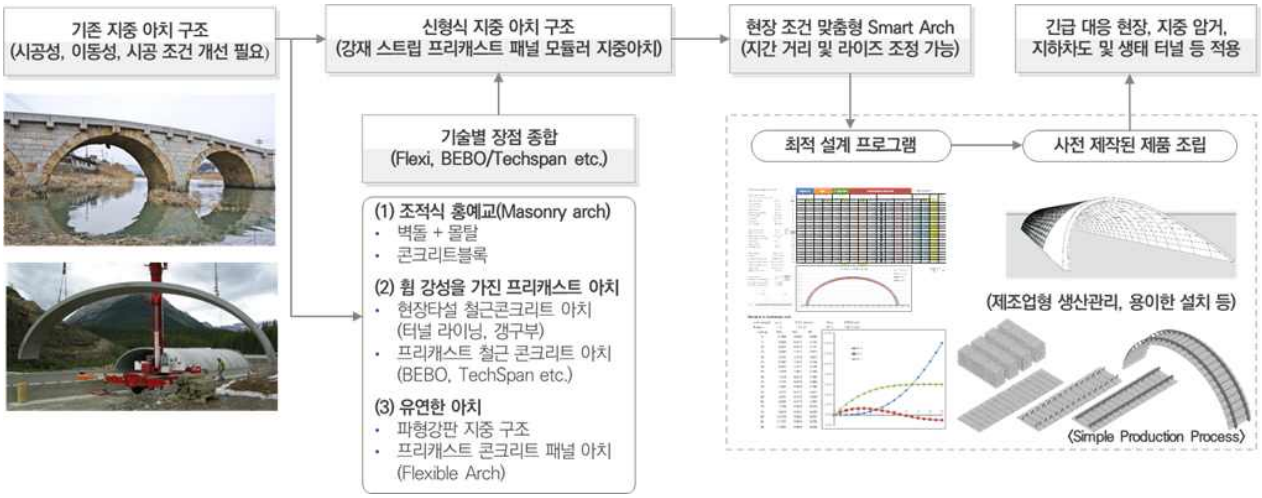
○ (최종성과물) 단순일괄시공 가능 “강재 스트립 및 프리캐스트 블록 활용 지중아치 구조체 요소기술”

2. 연구개발의 필요성

○ (개발 필요성) 현재 국내 폭원 30m 이하(2~6차선)의 지중암거, 지하차도 및 생태터널의 국내시장 규모는 연간 1,500억원 수준이며, 통 · 물류체계의 정비 사업으로 도로 및 철도노선이 확장됨에 따라 기존 노선을 횡단하거나 신규노선 확보를 위해 생태단절 구간이 늘어날 전망임. 일반적인 교량구조는 받침, 신축이음 등의 주기적인 유지관리가 필요하나 본 연구에서 개발하고자 하는 지중아치 시스템은 별도의 바닥판 및 받침/신축이음이 필요 없으므로 공사비가 저렴할 뿐만 아니라 유지관리도 용이하여 지간 30m이하 소교량에 쉽게 적용할 수 있으며, 특히 생태통로와 같이 시공성이 떨어지고 교량 부재의 이동이 어려운 지역에서 현장시공 및 일괄가설이 가능한 프리캐스트 블록형 구조시스템의 개발이 필요함.

3. 연구개발 범위

○ (핵심연구내용) 기존 지중아치 구조와 비교하여 시공성 및 이동성을 개선하고 시공현장 조건의 불확실성을 개선할 수 있는 프리캐스트 콘크리트 블록연결 지중아치 구조 시스템을 개발하기 위하여 강재 스트립 및 프리캐스트 콘크리트 블록을 활용하고 가설구조물을 배제한 지중아치 연결구조 및 시스템을 개발하고자 함.



< 연구개발 지중아치 개발 내용 >

제2장. 국내외 기술 개발 현황

1. 국내 기술현황

○ (국내 기술현황) 현재 국내의 지중아치구조는 주로 파형강판이나 프리캐스트 콘크리트를 이용하여 제작, 시공, 공용 중에 있음. 대표적인 기존 지중아치구조인 파형강판 구조는 현장에 파형강판들을 운반하여 현장에서 다수의 연결부를 볼트체결/조립하여 현장 조립 공사기간이 5일 이상 소요되며, 프리캐스트 콘크리트 아치구조는 운반제약에 의해 2개 또는 3개의 대블록을 현장으로 반입한 후 가설구조물을 설치하거나 중장비가 인양한 상태로 가지점을 설치하여 현장 연결하여야 하므로 아치구조 설치를 위해 최소 6일 이상 소요됨. (폭 15m, 길이 20m 기준)

○ 아치구조물은 시공 중 자중에 의한 축력은 작은 반면, 불균등하게 작용하는 시공하중에 의한 모멘트가 발생하며 이에 대한 기존 기술의 대처 방안은 다음과 같음.

- 파형강판 구조는 시공 중 휨모멘트 및 공용 중 압축력에 저항하기 위해 강재량이 과다 사용되는 단점이 있음.
- 아치구조물 전체 또는 절반을 일체형의 프리캐스트 콘크리트 부재로 제작하는 방법은 시공 중 발생하는 휨에 대해 부재가 저항하도록 철근콘크리트로 구성되며 일정 두께 이상의 콘크리트가 필요하고 철근 사용이 과다하며, 부재의 크기 및 형태상의 제약으로 제작 및 운반비용이 상승하는 문제점이 발생할 수 있음.

○ 기존 지중 구조물의 경우 구조물과 주변부 토질, 지반을 따로 평가하는 것이 일반적인 방법이나, 본 연구에서는 지반-구조물 상호작용(SSI) 분석을 통하여 지진 등의 외력에 의하여 지반으로부터 구조체로 전달되는 하중에 의한 구조체의 거동뿐만 아니라 구조체의 거동으로부터 유발되는 지반과 상호작용을 함께 고려할 수 있음.

○ (국내 국가연구개발사업 유사연구 검토) 현재 국내에서 수행되거나 진행된 지중아치관련 유사연구과제를 정리하였음. 지중아치와 관련된 연구들이 진행된 사례는 있으나 본 연구와 구조시스템이나 제안 내용이 다른 과제로 판단됨.

표 2.1 국토교통과학기술진흥원(www.kaia.re.kr) 검색결과

부처명	사업명(사업기간)	과제명(연구내용)	예산	비 고
국토교통부	건설기술연구사업 (2006-12-01 ~2008-10-01)	리브 보강형 프리캐스트 아치를 이용한 개착터널의 설계 및 시공법 개발(프리캐스트 콘크리트 아치의 중앙부 블럭에 리브를 보강한 공법 개발)	8.5억	진성토건
국토교통부	국토교통기술 사업화지원 (2008-07-25~ 2008-10-24)	고속국도 상부를 생태공간으로 활용하기 위한 장대폭원의 개착식 복개 아치 구조물 개발(아치형상의 강재 거더 상부에 프리캐스트 콘크리트를 합성한 아치구조 공법 기술가치 평가)	0.6억	청석 엔지니어링
국토교통부	국토교통기술 사업화지원 (2008-12-29~ 2009-06-28)	급속시공 및 장대폭원이 가능한 강합성 아치형 생태통로 구조물의 개발(아치형상의 강재거더를 설치하고 상부에 프리캐스트 콘크리트를 합성한 아치구조 공법 개발)	1.8억	청석 엔지니어링
국토교통부	국토교통기술촉진 연구사업 (2017-06-30~ 2018-12-31)	토피가 큰 지중아치 구조물의 최적화 시스템 구축을 위한 신개념 Embedded Trench Installation (ETI) 적용 기술 개발(지중구조물에 재하되는 토압을 구조물 전체를 둘러싸는 고압축성 물질(Embedded Trench)을 이용하여 최대 80%까지 경감시키기 위한 해석적 연구)	1.78억	상명 대학교



지중아치구조(생태통로)



파형강판 구조



프리캐스트 콘크리트 아치구조

< 기존 지중아치 구조물 >

○ (국내외 기술특허 동향) 특허 동향을 분석하기 위해 특허정보검색시스템(www.kipris.or.kr)를 참고하였음. 국내 특허의 경우 검색키워드는 “지중아치”, “프리캐스트”, “구조”를 조합하여 관련 특허를 검색하였고 해외 특허의 경우 “buried”, “arch”, “precast”, “structure”를 조합하여 특허검색을 실시하였음.

○ 국내 특허 중 본 개발기술 분야인 개착식 아치구조 관련 기술은 전체 출원 83건 중 29건(35%)을 차지하고 있었으며 등록 55건 중 18건(33%)을 차지하고 있음. 해외의 경우 파형강판 및 프리캐스트 콘크리트 아치가 활발히 적용되고 있는 미국에서 91건(55%)으로 가장 많은 건 수를 나타내었음.

○ 국내외 특허동향 분석결과, 지중아치와 관련된 기술특허 등이 다수 출원 되었으나, 본 연구와 관련된 특허는 본 연구에 참여기관이 소유한 특허 “프리캐스트 콘크리트 블록, 상기 블록을 이용한 아치구조물 및 상기 아치구조물의 시공방법 (등록번호: 10-1735039)”와 유사한 특허가 있으며 다른 특허는 본 연구과제 내용과 상이한 내용으로 판단됨.

< 검색 국내특허 분석 >

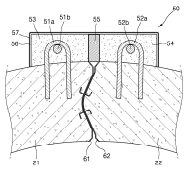
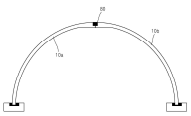
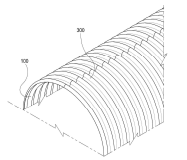
분야	개착식 아치구조	비개착식 터널	지하구조
출원건수	29건	17건	52건
등록건수	18건	9건	18건

< 검색 국외특허 분석 >

분야	미국	PCT	유럽	일본
출원/등록 건수	91건	57건	17건	2건

○ 국내외 적용되고 있는 특허와 관련하여 본 연구개발 내용과의 차별성을 다음과 같이 나타내었음.

< 연구내용과 기존 특허와의 차별성 >

특 허	특허 현황	
	특허명	아치형 세그멘트를 가지는 터널구조체 및 이의 시공방법
	특허번호	제10-0555046(2006.02.17.)
	최종권리자	후레씨네코리아(제품명: Techspan)
	차별성	프리캐스트 콘크리트 아치구조로 각 블록 간의 연결상세 관련 특허임
	특허명	2분절 프리캐스트 콘크리트 아치 시스템 및 그 시공 방법
	특허번호	제10-1491952(2015.02.03.)
	최종권리자	인터컨스텍(제품명: Seg Arch)
	차별성	프리캐스트 콘크리트 아치구조로 각 블록을 연결 시공하는 방법 특허임
	특허명	파형강판을 이용한 아치 구조물 및 그 시공방법
	특허번호	제10-1620513(2016.05.04.)
	최종권리자	평산에스아이, 청암건업(제품명: 파형강판)
	차별성	파형강판 아치구조로 파형강판 겹이음 및 곡률형성, 방수 등의 시공방법 특허임

○ (국내외 시장분석) 국내 2017년 SOC예산에서 도로분야는 74,134억원, 철도분야는 68,041억원, 물류, 지역 및 도시 분야는 39,418억원으로 편성되었으며 이 중 지중암거 및 생태통로 시장규모는 전체 예산의 1% 미만으로 1,500억원 정도로 추정(업체별 매출현황 종합결과 프리캐스트 콘크리트 아치 250억, 파형강판 500억, 철근콘크리트 암거 750억)됨.

< 국내 · 외 시장규모 (단위 : 억원) >

구 분	현재의 시장규모(2017년)	예상 시장규모(2020년)
세계 시장규모	30,000	40,000
국내 시장규모	1,500	2,000
산출 근거	국내외 경쟁업체 매출규모 합산	

○ 본 연구에서 개발하고자 하는 프리캐스트 블록 및 스트립을 이용한 지중아치 시스템은 국내에서 적용되고 있는 지중아치 공법대비 공사비 및 공사기간을 30% 이상 절감할 수 있기 때문에 전체 시장의 20%를 점유하여 500억원/년 이상의 매출을 기대함. 해외의 프리캐스트 지중아치 관련업체는 북미의 컨텍(미), 암텍(미), AIL(캐) 등이 있고, 유럽에서는 BEBO(스), 마티에르(프) 등이 있음. 상기 해외업체들도 주로 프리캐스트 콘크리트 아치나 파형강판을 활용하여 지중아치구조를 제작/시공하고 있으며 그 시장규모는 국내의 20배 정도로 추정(업체별 매출현황 종합결과)됨.



< 국외 지중아치 관련기업 >

제3장. 연구수행내용 및 성과

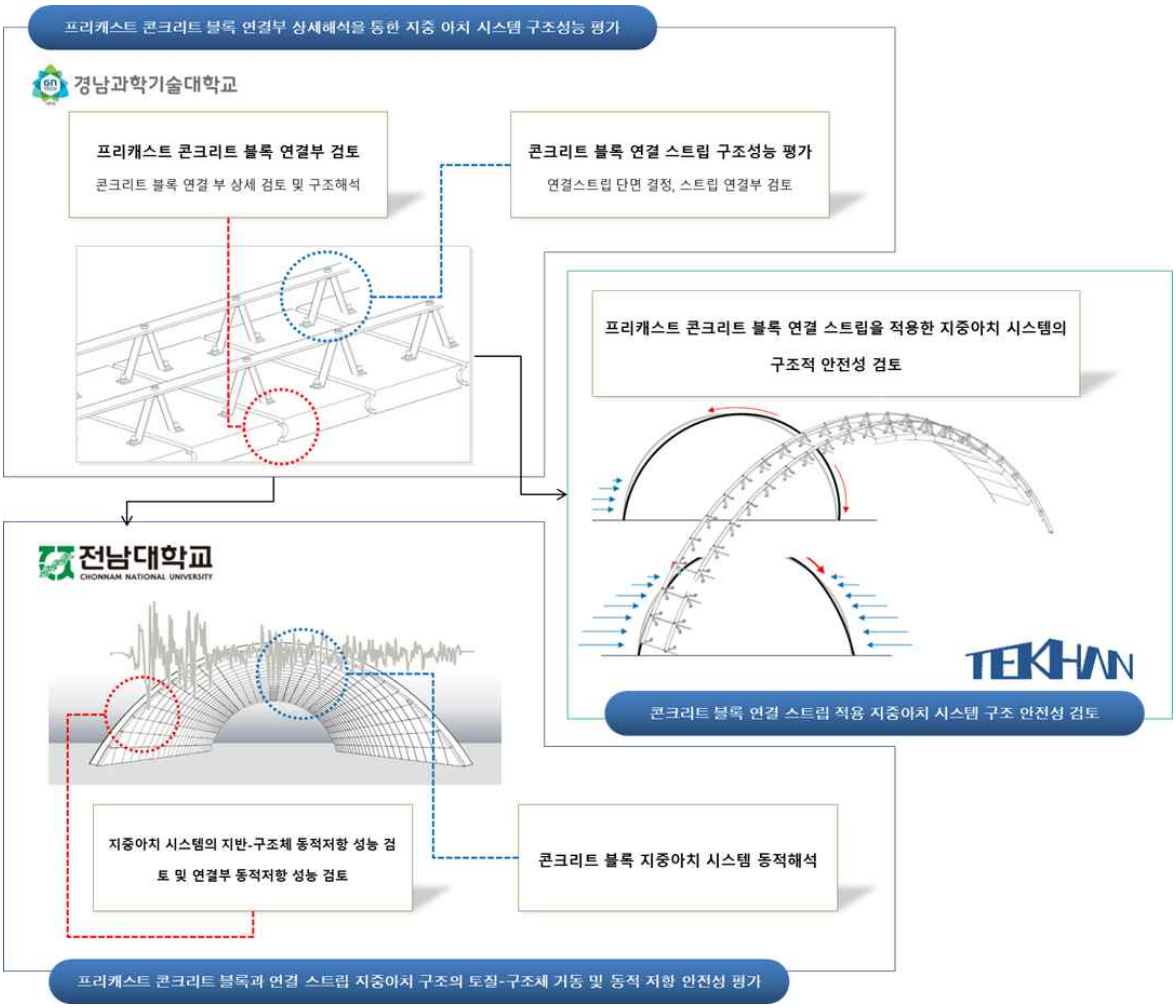
1. 연구내용

○ (핵심연구내용) 강재 스트립과 프리캐스트 콘크리트 블록 활용 모듈러 지중아치 구조 개발

- (핵심1) 강재 스트립과 프리캐스트 콘크리트 블록 활용 모듈러 지중아치 구조 개발
- (핵심2) 지중아치 구조 지반-구조물 거동 및 동적저항 안전성 평가
- (핵심3) 지중아치 구조 단면 최적화 및 안전성 검토

○ (1차년도 연구개발내용)

- (단위성과 A-1) 프리캐스트 콘크리트 블록 연결부 상세해석을 통한 지중아치 시스템의 구조성능 평가
- (단위성과 B-1) 프리캐스트 콘크리트 블록과 지반의 엄밀 상호작용해석 수치모델 작성/검토
- (단위성과 B-2) 간편 지진응답해석 수치모델의 적용성 검토 및 결과 비교분석
- (단위성과 C-1) 지중아치 시스템 요소기술의 구조적 안전성 검토



< 1차년도 연구개발 목표 및 내용 (연구개발계획서) >

○ (2차년도 연구개발내용)

- (단위성과 A-2) 프리캐스트 콘크리트 블록 연결부 요소기술의 성능평가 및 거동분석
- (단위성과 B-3) 프리캐스트 콘크리트 블록과 연결스트립 지중아치구조의 내진안전성 평가
- (단위성과 C-2) 단면 최적화 적용방안 마련

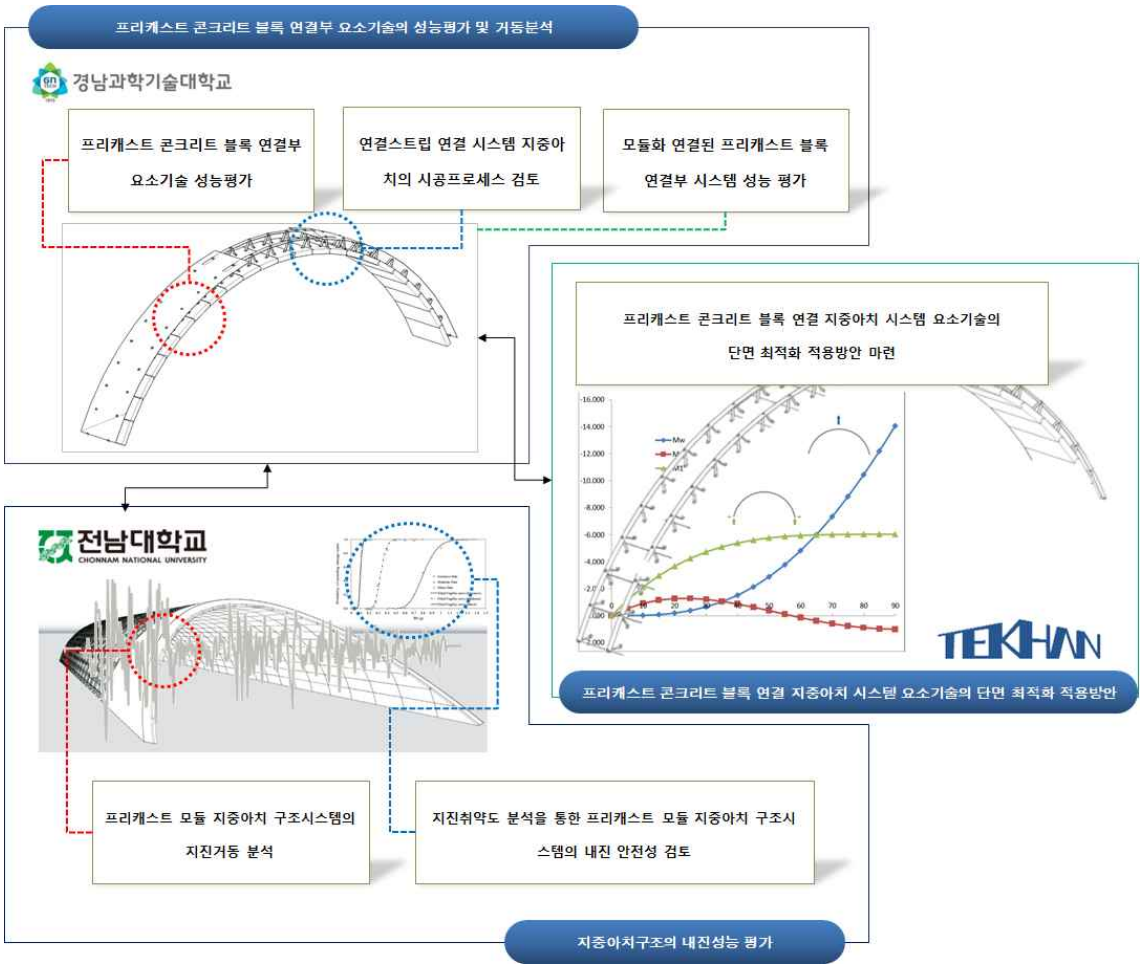
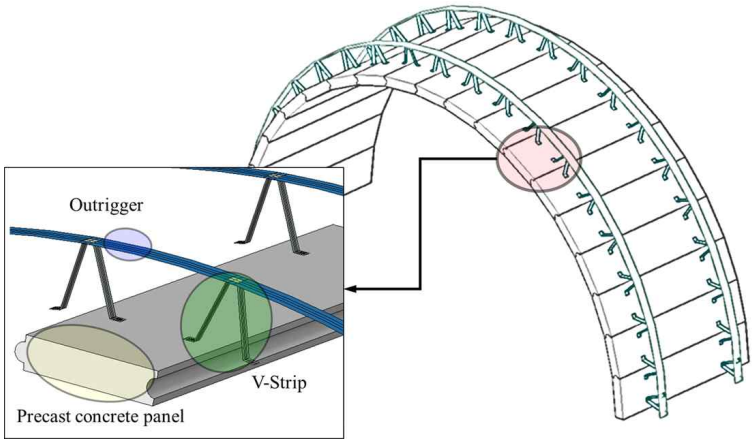


그림 3.2 2차년도 연구개발 목표 및 내용 (연구개발계획서)

1.1 강재 스트립과 프리캐스트 콘크리트 블록 활용 모듈러 지중아치 구조 개발 (핵심1)

○ (개요) 강재 스트립과 프리캐스트 콘크리트 블록 활용 모듈러 지중아치 구조는 분절된 프리캐스트 패널이 연결부 V-strip을 통하여 외측에 설치되는 아웃리거 리브와 연결되는 구조로 설계되었음. 제안 지중아치 시스템의 구조적 특성과 거동 특성을 해석적으로 확인하였으며, 구조 부재 요소의 단면 결정 및 단위 부재 강도 평가 실험 등을 실시함. 이후 실스케일의 지중아치 시스템 실험체 제작 후 인상 및 설치 과정을 확인하여 시공 프로세스를 구축하였으며, 현장 적용성 실험과 하중 재하 실험을 통하여 실제 구조물의 거동 특성을 확인하였음.

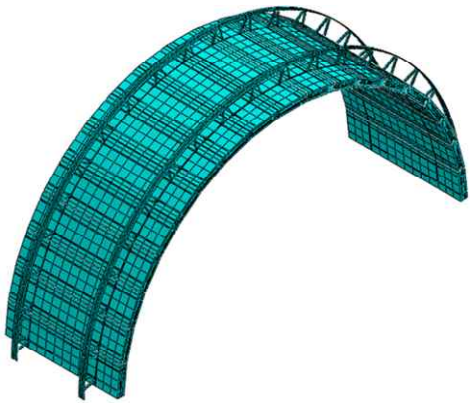


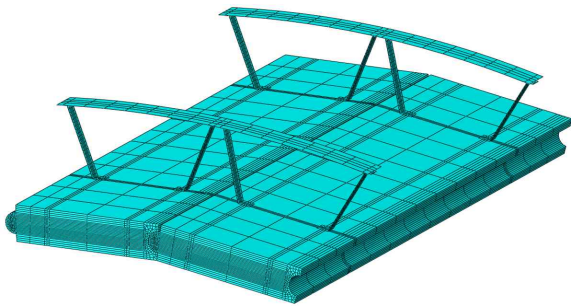
< 강재 스트립과 프리캐스트 콘크리트 블록 활용 모듈러 지중아치 구조 >

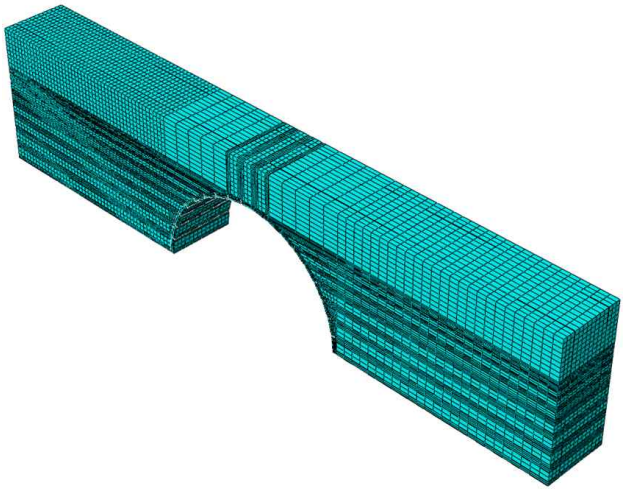
○ **(단위성과 A-1) 프리캐스트 콘크리트 블록 연결부 상세해석을 통한 지중아치 시스템의 구조성능 평가**

- 제안 아치 시스템의 구조적 특성과 거동 특성을 확인하기 위하여 전체 시스템에 대한 구조해석을 실시하였음. 또한, 제안 지중아치 구조 시스템의 인상 및 설치 과정에서 필요한 아웃리거 및 연결 스트립의 두께 등이 지중아치 구조 시스템 거동에 영향을 미칠 수 있으므로 부재 단면 구성 및 형상에 따른 거동 분석을 실시하였음. 부재 형상에 따른 거동 분석을 통하여 제안 지중아치 구조 부재 요소의 (프리캐스트 패널, V-strip) 단면을 결정하였으며, 각각의 구조 부재를 시제작하여 프리캐스트 패널 선설치 앵커 인발 실험, 프리캐스트 패널 압축 실험, V-strip구조성능 및 인발 연계 평가를 실시하였음. 이후 실스케일의 지중아치 시스템 실험체를 제작하여 인상 및 설치 과정을 확인하였음.

  - (제안 지중아치 시스템 구조적 특성 및 거동 특성 확인) 제안 지중아치 시스템의 구조적 특성과 거동특성을 평가하기 위하여 3D 비선형 구조해석을 이용하여 제안 아치 구조 거동을 확인하였음. 구조해석은 범용 해석 프로그램 ABAQUS를 이용하였으며, 지중 아치 구조의 지간(Arch span 6, 7, 8m)에 따라 제안 아치 구조 거치 후 토공 시 토공 단계별 아치 구조의 응력 분포, 변위 등의 거동을 확인하였음.

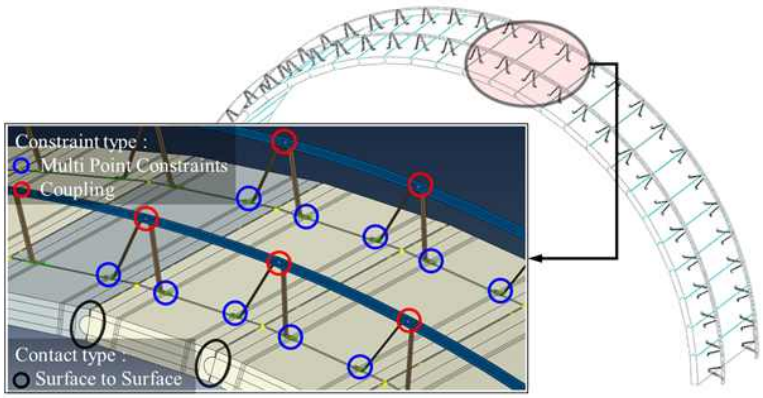




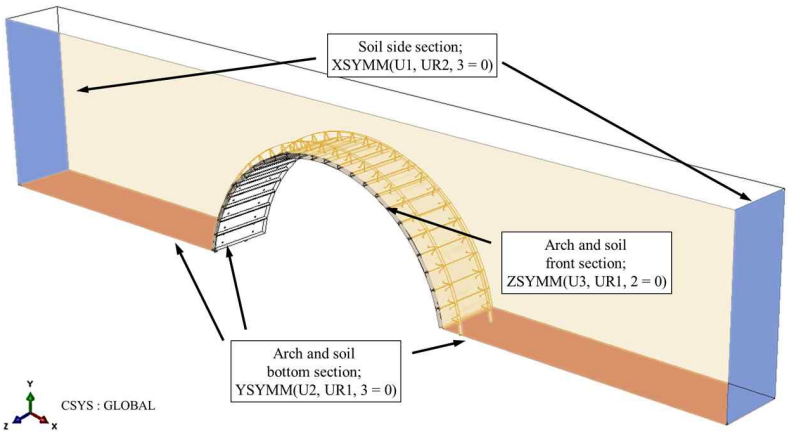


< 제안 아치 구조 3D 비선형 구조해석 모델 >

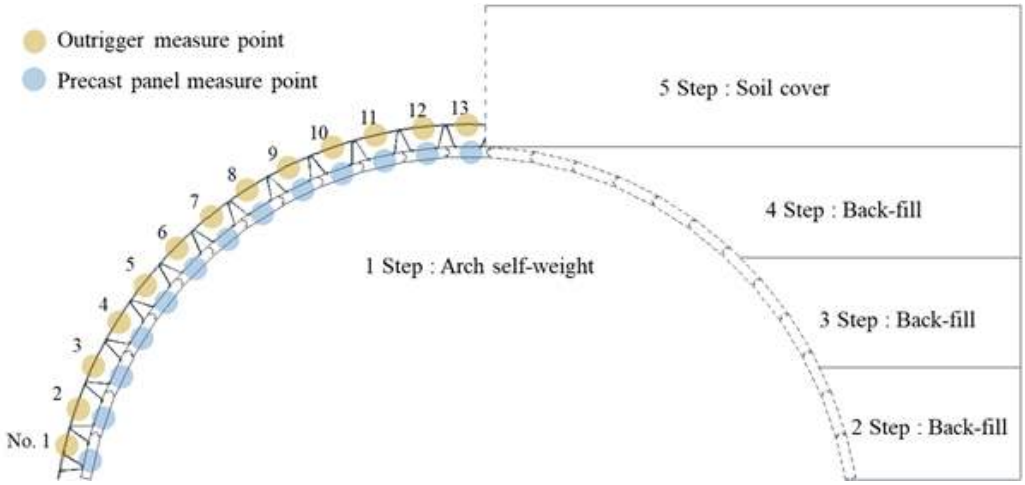
- 부재간의 상호작용을 고려하기 위하여 접촉 및 경계 조건을 각각의 부재의 특성에 맞게 적용하였음. 접촉조건의 경우 프리캐스트 패널과 패널, 토체와 패널은 Surface to surface 기능을 이용하여 표면 접촉 조건과 마찰계수를 적용하였으며, 프리캐스트 패널과 V-strip은 Multipoint constraint 기능을 이용하였고 V-strip과 아웃리거는 Coupling 기능을 이용하여 부재간의 접촉 조건을 고려하였음. 제안 지중아치 시스템 구조해석에 적용된 토체의 경계조건은 x, y, z 축방향에 대하여 각각 고정조건을 적용하였음. 아치 시스템의 경우 지점부에 y 축에 대하여 고정하였으며, 아치 측면을 z 축에 대하여 고정하였음. 하중조건으로는 각각의 부재 단위중량에 해당하는 자중만을 고려하여 시공 단계에서 발생하는 토압이 고려될 수 있도록 하였음.



< 제안 아치 구조 모델의 부재간 접촉 조건 >



< 제안 아치 구조 모델의 경계 조건 >

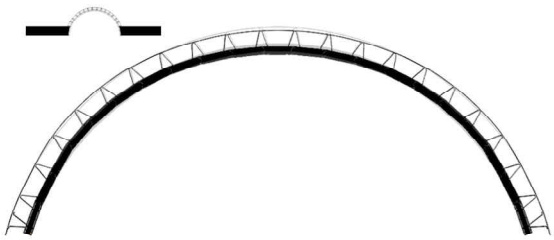


< 제안 아치 구조 모델의 하중 조건 >

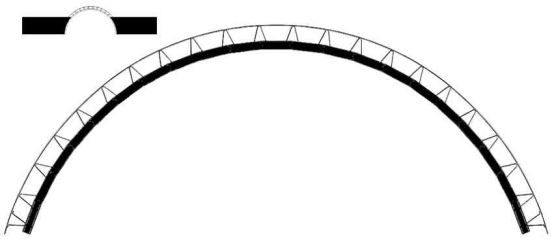
- (구조해석 결과) 제안 지중아치 구조의 지간에 따라 응력 및 변위 거동이 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 시공 단계의 진행에 따라 프리캐스트 패널 및 아웃리거 부재에서 인장 및 압축 응력이 감소하여 구조적으로 안정된 응력 분포를 가지는 것을 확인하였음. 수평 및 수직 변위 또한 시공 단계의 진행에 따라 최종 시공 단계에서 수직 변위 약 0.1㎜, 수평 변위 1㎜로 변형 및 부재력이 매우 작게 나타나 안정된 구조 거동을 가질 것으로 판단됨.



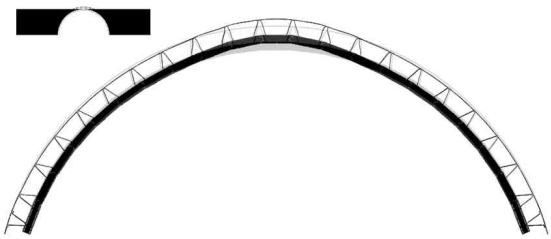
(a) 아치 자중 상태



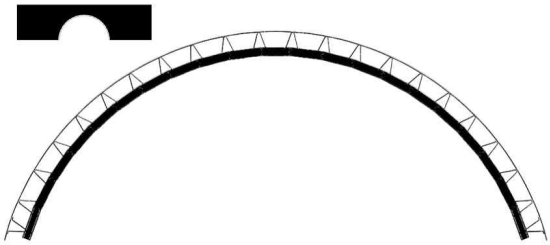
(b) 토공 1단계



(c) 토공 2단계

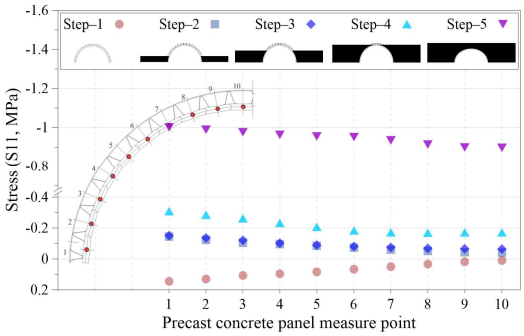


(d) 토공 3단계

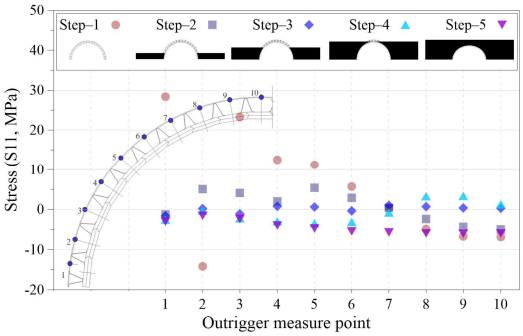


(e) 최종 완성 단계

< 제안 아치 구조의 토공 단계별 변형 형상(Scale factor: 50) >

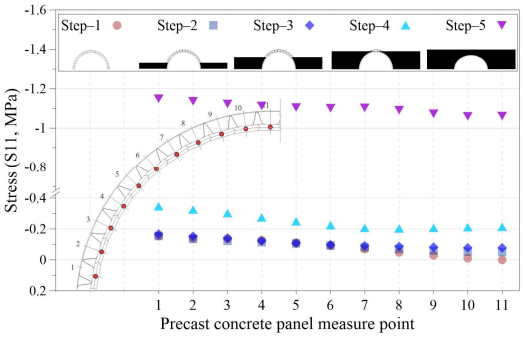


(a) 프리캐스트 패널

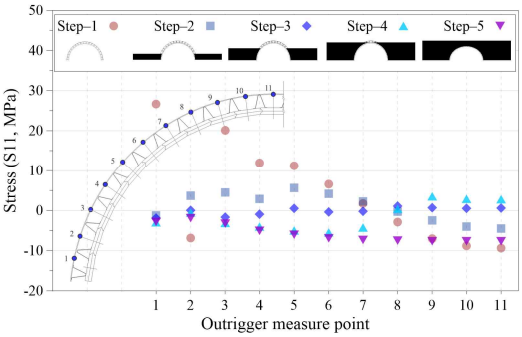


(b) 아웃리거

< 지간 6m 아치 구조의 부재별 응력 거동 >

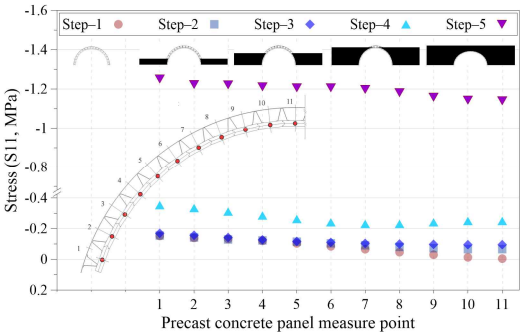


(a) 프리캐스트 패널

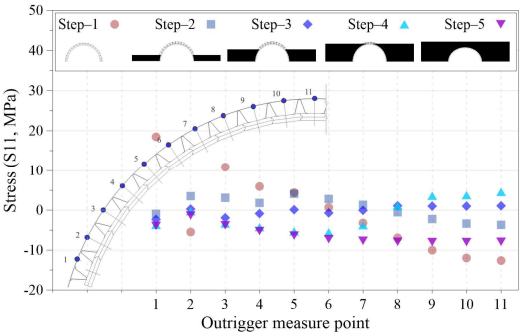


(b) 아웃리거

< 지간 7m 아치 구조의 부재별 응력 거동 >

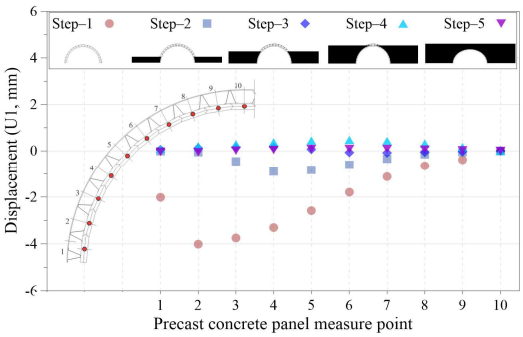


(a) 프리캐스트 패널

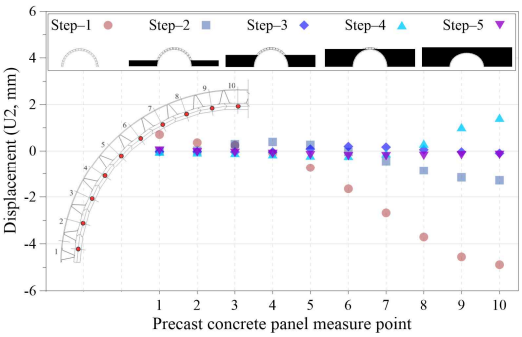


(b) 아웃리거

< 지간 8m 아치 구조의 부재별 응력 거동 >

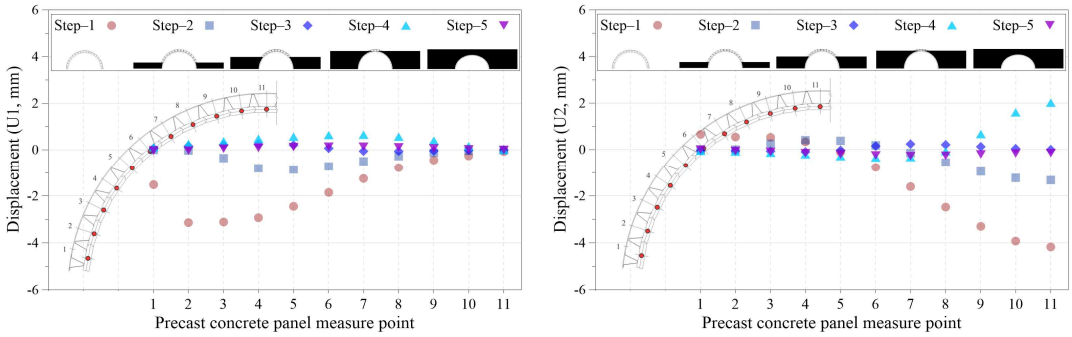


(a) 수평 변위



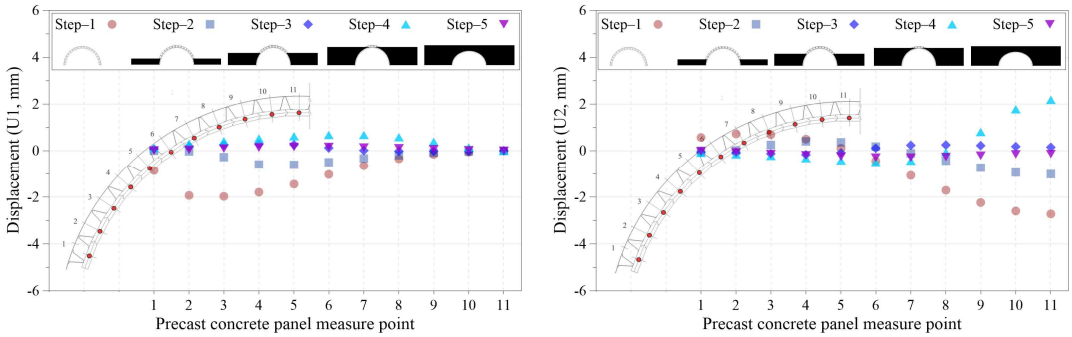
(b) 수직 변위

< 지간 6m 아치 구조의 프리캐스트 패널 변위 거동 >



(a) 수평 변위 (b) 수직 변위

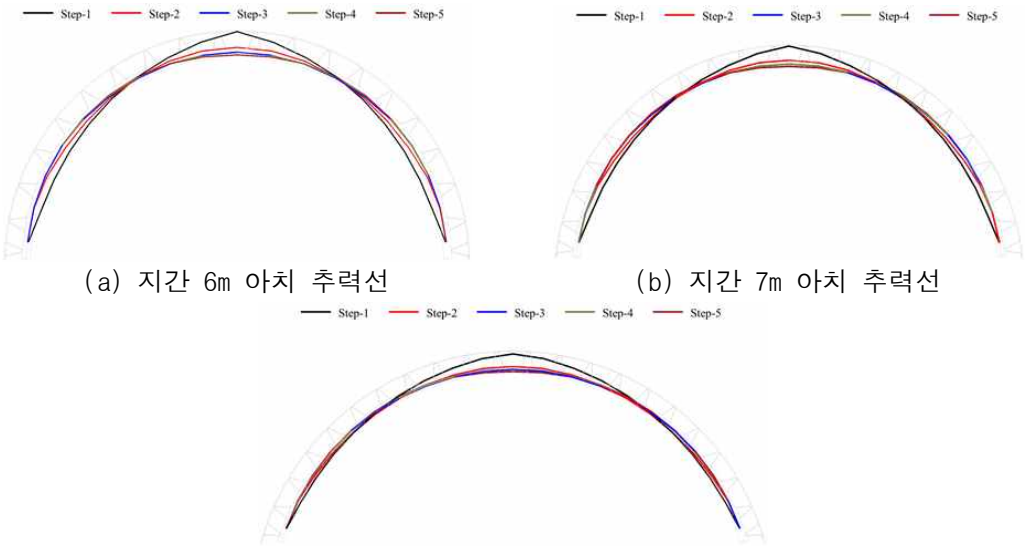
< 지간 7m 아치 구조의 프리캐스트 패널 변위 거동 >



(a) 수평 변위 (b) 수직 변위

< 지간 8m 아치 구조의 프리캐스트 패널 변위 거동 >

- (구조해석 결과를 이용한 제안 아치 구조의 추력선 거동 분석) 지중 아치 구조의 응력 및 변위 등의 결과를 이용하여 추력선을 계산하였음. 최종 완성 단계에서 프리캐스트 콘크리트 블록 내부에 추력선이 위치하므로 구조적으로 안정적인 거동을 하는 것으로 판단됨.

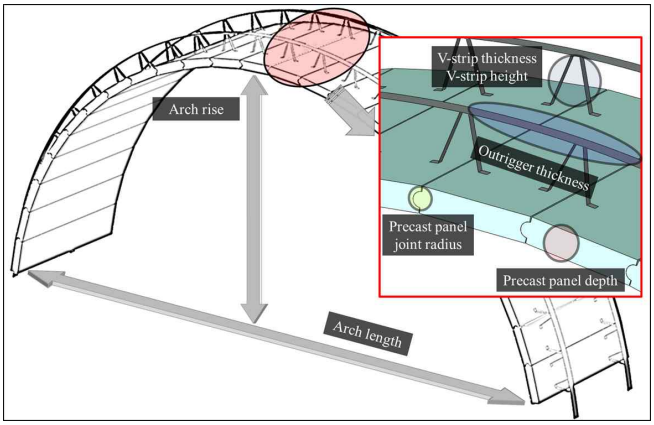


(a) 지간 6m 아치 추력선 (b) 지간 7m 아치 추력선

(c) 지간 8m 아치 추력선

< 제안 아치 구조의 지간 길이별 추력선 결과 >

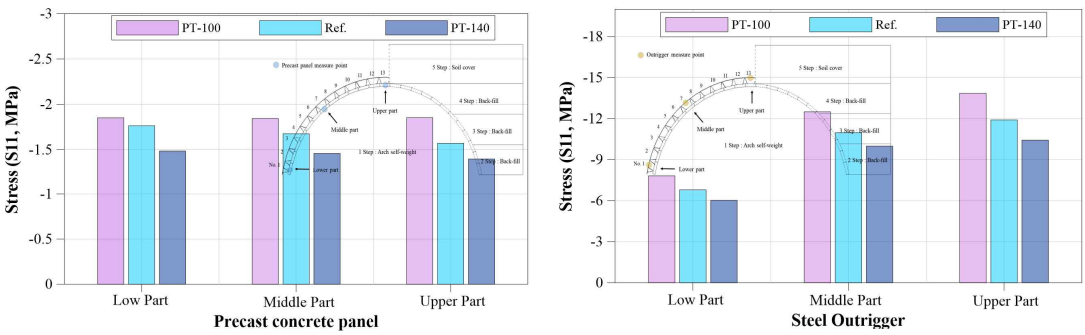
- (소요 부재의 단면 결정을 위한 단면 형상 변화에 따른 거동 평가) 제안 지중아치 구조시스템의 인양 및 설치 과정에서 필요한 아웃리거 및 연결 스트립의 두께 등이 지중아치 구조시스템 거동에 영향을 미칠 수 있으므로 소요 부재의 단면 결정을 위하여 구조해석을 통한 부재 단면 구성 및 형상에 따른 거동 분석을 실시함.



	프리캐스트 패널 두께	연결 스트립 높이	아웃리거 두께
1	120	250	12
2	100	250	12
3	140	250	12
4	120	200	12
5	120	300	12
6	120	200	10
7	120	200	14
8	120	300	10
9	120	300	14

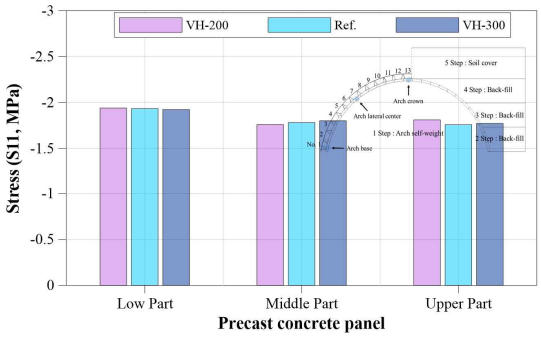
< 제안 아치 구조의 단면 구성 및 아치 구조형상에 따른 변수 >

- 소요 부재의 단면형상 변화에 따른 거동 평가 결과 프리캐스트 패널 두께가 증가할수록 프리캐스트 패널과 아웃리거의 응력이 감소하는 것을 확인하였으며, 연결부 스트립 높이가 증가할수록 프리캐스트 패널에 발생하는 응력은 감소하지만, 아웃리거의 응력은 국부적으로 증가하는 것을 확인하였음. 아웃리거의 두께 변화에 따라 아웃리거에 발생하는 응력의 수준이 다르게 나타나고 있지만, 아웃리거의 두께 변화보다 연결부 스트립의 높이가 변화될 때의 응력 거동이 더 크게 변화하는 것을 확인할 수 있음.
- 아웃리거의 거동은 연결부 스트립의 높이와 아웃리거의 두께에 영향을 받고 프리캐스트 패널은 상재 토체의 하중 크기와 프리캐스트 패널 두께에 따라 거동이 다르게 나타나는 것을 확인하였으며, 제안 지중아치 구조의 인양과정에서 아웃리거 및 연결부 스트립 두께 등이 거동에 영향을 미칠 수 있으므로 아웃리거의 편심 거리 및 두께 등의 검토가 필요할 것으로 판단됨.

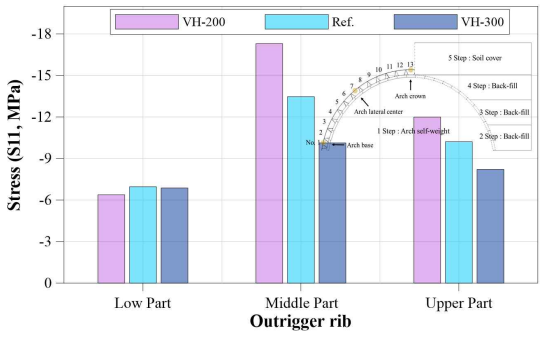


(a) 프리캐스트 패널 위치별 응력 (b) 아웃리거 위치별 응력

< 프리캐스트 패널 두께 감소에 따른 응력 결과 >

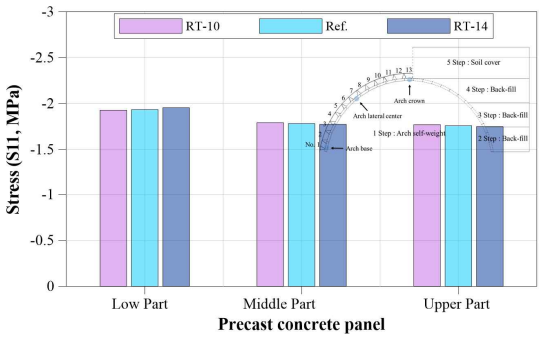


(a) 프리캐스트 패널 위치별 응력

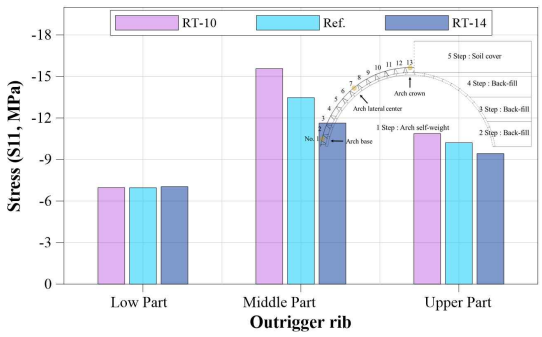


(b) 아웃리거 위치별 응력

< 연결 스트립의 높이 변화에 따른 응력 결과 >

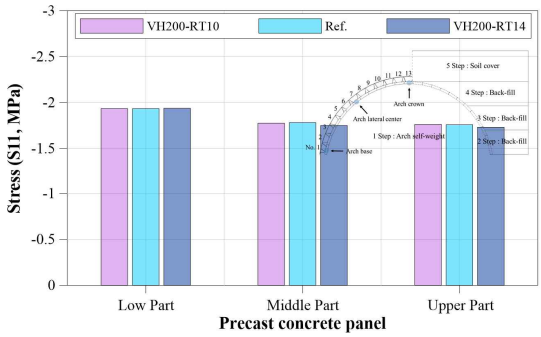


(a) 프리캐스트 패널 위치별 응력

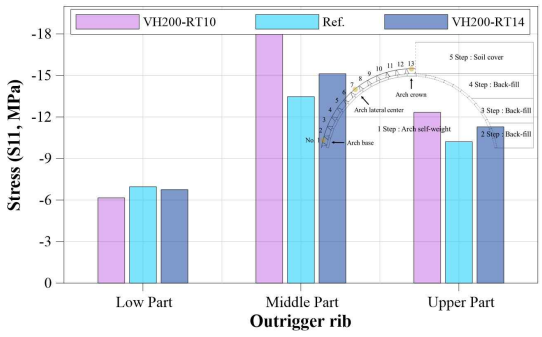


(b) 아웃리거 위치별 응력

< 아웃리거 두께 변화에 따른 응력 결과 >

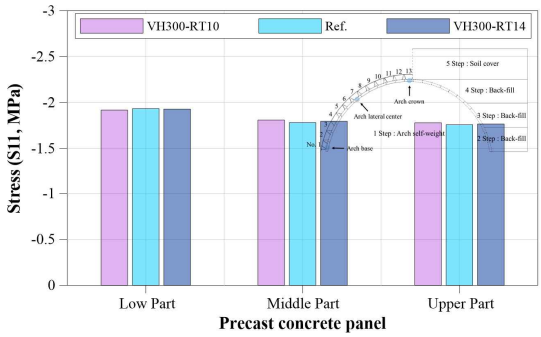


(a) 프리캐스트 패널 위치별 응력

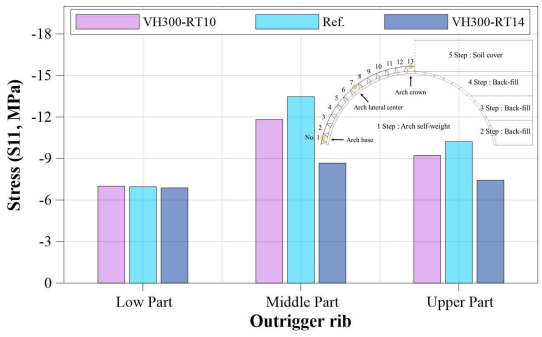


(b) 아웃리거 위치별 응력

< 아웃리거 두께 및 연결 스트립 높이 변화에 따른 응력 결과: 연결 스트립 높이 200㎜ >



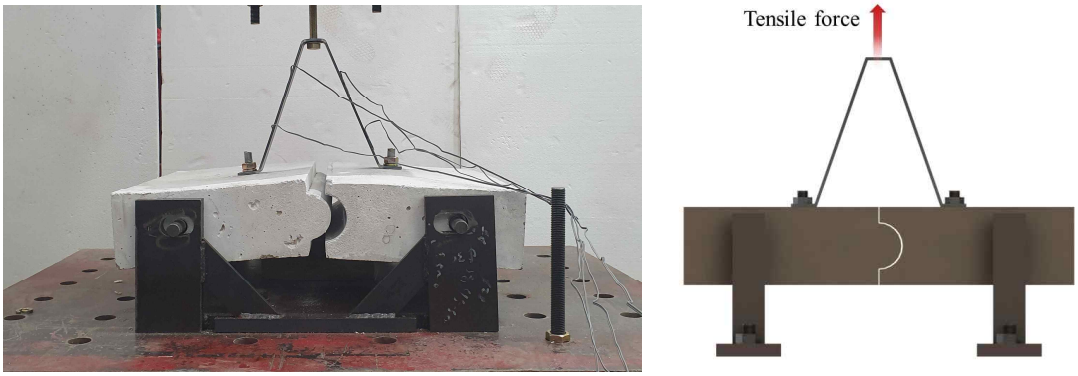
(a) 프리캐스트 패널 위치별 응력



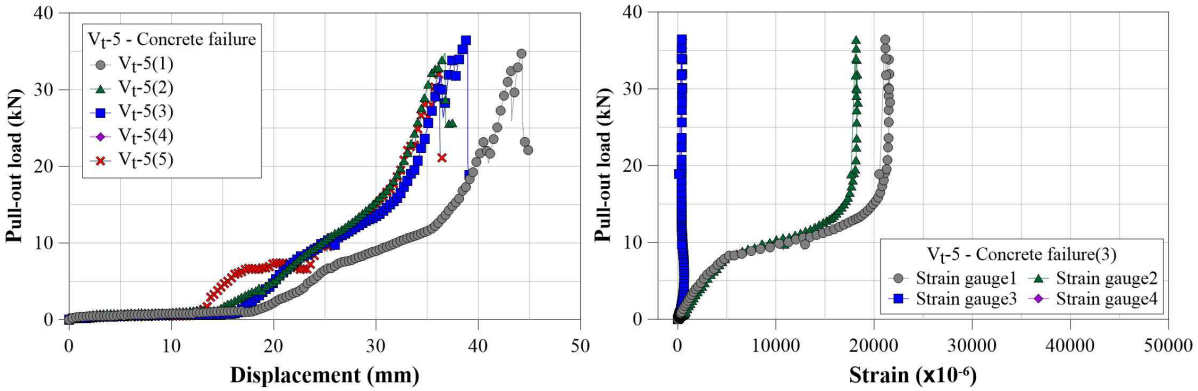
(b) 아웃리거 위치별 응력

< 아웃리거 두께 및 연결 스트립 높이 변화에 따른 응력 결과: 연결 스트립 높이 300㎜ >

- (프리캐스트 콘크리트 블록 연결 스트립 구조성능 및 인발 연계 평가) 제안 지중아치 구조의 인양 및 설치 시 지중아치의 자중에 대한 연결 스트립의 성능을 평가하기 위하여 연결 스트립 인장실험을 실시하였음. 연결 스트립의 형상에 따른 파괴 모드 및 최대 인장 하중을 확인하기 위하여 연결 스트립의 형상을 변화하여 인장 저항성능을 평가하였음. 연결 스트립의 두께가 두꺼울수록 인장 저항성능이 향상되며 콘크리트 인장 파괴 수준 이상의 강도를 확인하였음.



< 연결 스트립의 인장 저항성능평가 시험체 및 실험 방법 >



< 연결 스트립 인장 저항성능평가 결과 >

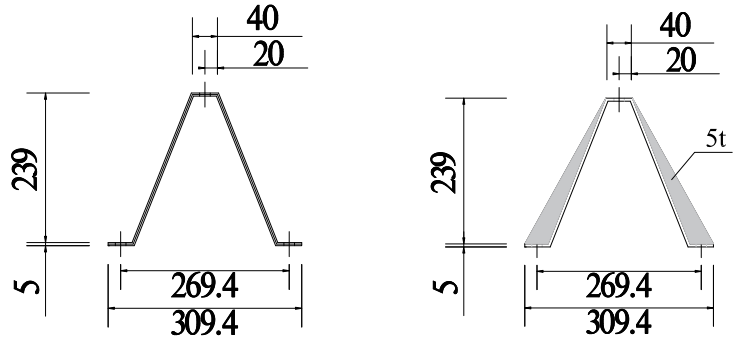
- (프리캐스트 패널 연결 스트립 아치 구조성능 평가) 지간 6m 기준 지중아치 시스템을 제작하여 시공·설치 성능을 평가하였음. 연결 스트립의 좌굴 거동에 따라 지중아치 시스템의 인양 위치와 인양 시스템 재설계가 필요할 것으로 판단됨. 또한, 연결 스트립의 횡방향 강성 부재를 적용하는 것으로 형상 개선이 필요할 것으로 판단됨. 연결 스트립 횡방향 강성 부재는 연결 스트립과 동일한 두께로 제작하며, 연결 스트립의 단부를 보강재와 함께 용접하여 제작하였음.



< 아치 실험체 인상 모습 >



< 아치 실험체 연결 스트립의 좌굴 거동 발생 >



< 연결 스트립 형상 개선 >



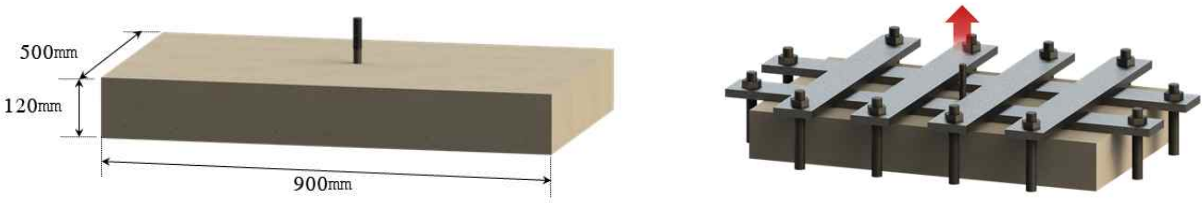


<연결 스트립 형상 개선 아치 실험체 제작>

○ (단위성과 A-2) 프리캐스트 콘크리트 블록 연결부 요소기술의 성능평가 및 거동분석

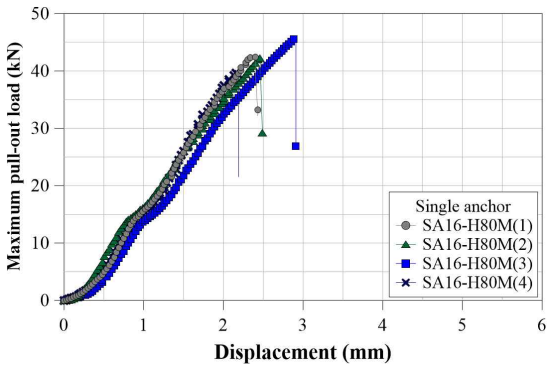
- 제안 지중아치 시스템 연결부 요소기술의 성능평가 및 거동분석을 위하여 부재 성능 평가를 실시하고 발생 가능한 파괴 메커니즘 분석과 현장 적용성 실험 및 하중 재하 실험 등을 실시하였음. 부재 성능 평가에서는 프리캐스트 패널의 선설치 앵커 인발 성능과 프리캐스트 패널 휨 실험을 실시하였으며, 발생 가능한 파괴 메커니즘 분석에서는 프리캐스트 패널의 하부에 균열이 발생한 경우와 V-strip의 연결이 상실된 경우에 대한 거동을 확인하였음.

- (프리캐스트 콘크리트 블록 연결부 검토) 프리캐스트 콘크리트 블록 연결부 검토를 위하여 프리캐스트 패널을 제작하여 선설치 앵커에 대한 인발저항성능과 지압 강도를 평가하였으며, 알루미늄 보강재의 적용 효과를 확인하였음. 또한, 프리캐스트 패널 연결부 상세 구조해석을 통하여 성능 수준을 비교하였음.

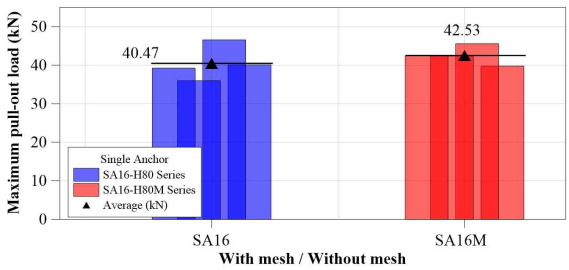


<프리캐스트 패널 선설치 앵커 인발 성능 평가 실험>

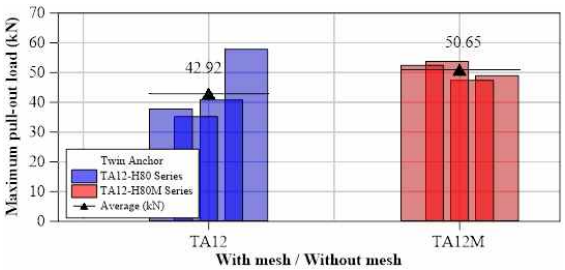
- 제안 지중아치 구조 연결부 요소중 스트립과 연결하기 위하여 프리캐스트 패널에 선설치 앵커를 적용하였으며, 선설치 앵커 인발시험을 통하여 인양 및 설치시 발생하는 하중에 대한 인발저항성능을 평가하였음 (D12, 16, 20; Mesh; Buried depth etc.). 선설치 앵커 인발저항성능 평가 결과 와이어 메쉬의 영향은 메쉬 매입 여부에 따라 영향이 크지 않지만 앵커 지름 및 매입깊이는 적용 지간이나 인양 방법 등에 따라 앵커의 지름은 12-16㎜를 적용하고 앵커의 최소 매입깊이는 60㎜ 이상 확보할 필요가 있을 것으로 판단됨.



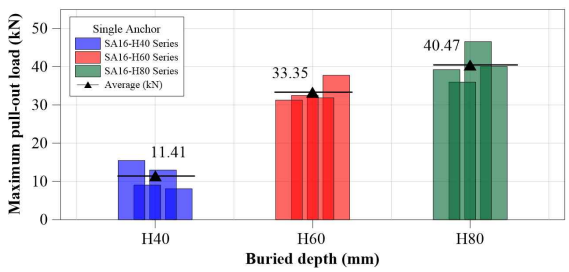
(a) 하중-변위 관계



(b) 메쉬 적용 여부에 따른 비교



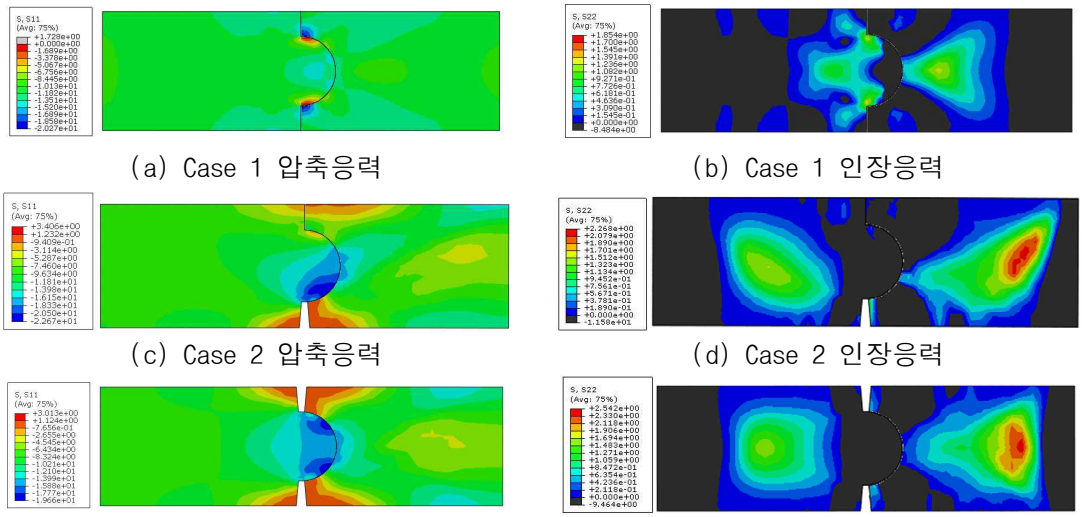
(c) 단일앵커 및 2열 앵커 설치에 따른 비교



(d) 매입 깊이 변화에 따른 비교

< 프리캐스트 패널 선설치 앵커 인발 성능 평가 실험 결과 및 비교 >

- (제안 지중아치 구조 연결부 상세 구조해석) 3D 비선형 구조해석을 통하여 프리캐스트 콘크리트 블록 연결부 형상에 따른 지압 거동을 확인하였음. 대상 아치 구조의 형상과 프리캐스트 패널간 지압 영역 변화에 따른 거동 변화를 비교하기 위한 것으로 패널 연결부 형상에 따라 프리캐스트 패널의 발생 응력 분포가 변화되며, 실제 아치 구조와 유사한 프리캐스트 패널 블록의 지압 거동인 Case 3의 경우 원형 지압부의 압축 응력이 상대적으로 균일하게 작용하게 되며, 발생 인장 응력도 압축 응력과 유사하게 나타나고 있음을 확인할 수 있음. 실제 지중아치 구조의 제작을 위하여 프리캐스트 블록의 지압부 단면이 변화하더라도 동일한 하중 저항성능을 확보할 수 있을 것으로 평가됨.

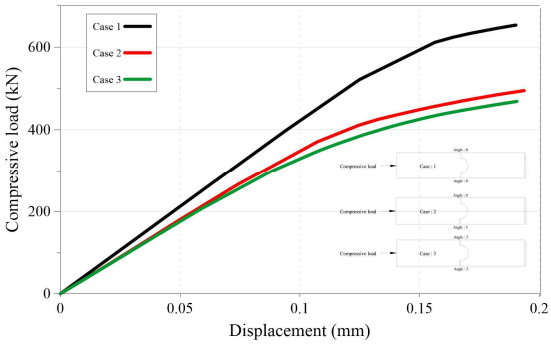


(a) Case 1 압축응력 (b) Case 1 인장응력

(c) Case 2 압축응력 (d) Case 2 인장응력

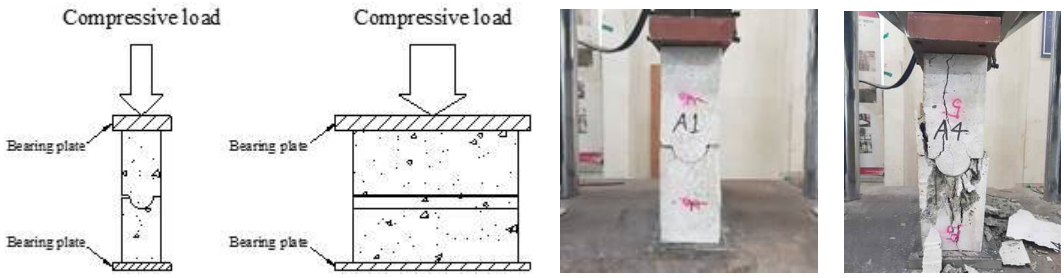
(e) Case 3 압축응력 (f) Case 3 인장응력

< 지중아치 연결부 형상에 따른 상세 구조해석 결과 >



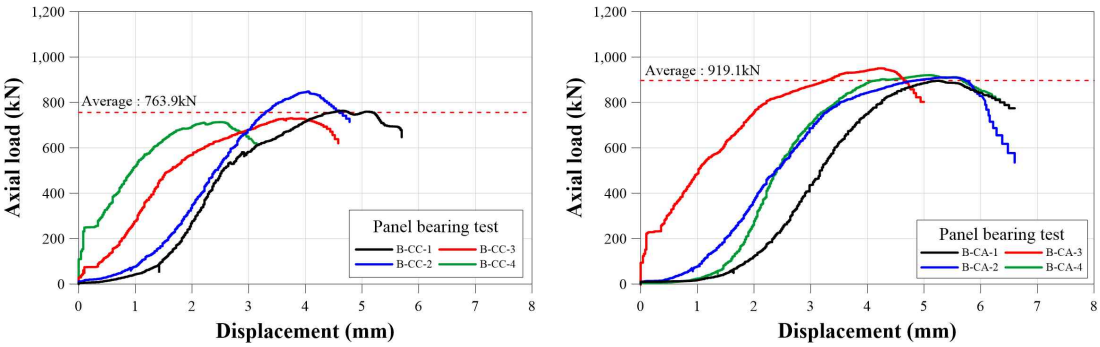
<지중아치 연결부 형상에 따른 하중-변위 곡선 비교>

- (프리캐스트 패널 지압 강도 및 연결부 보강재 적용 효과 검토) 지압 실험을 통한 프리캐스트 패널의 지압 강도 평가 및 알루미늄 보강재 적용 효과를 확인하였음. 프리캐스트 패널에 적용되는 알루미늄 보강재의 경우 타설시 거푸집으로 사용할 수 있으며, 아치 인상 및 설치 과정에서 프리캐스트 패널 접촉 시 연결부의 국부적인 파손 방지 및 마찰 감소에 기여할 수 있으므로 알루미늄 보강재의 적용 여부도 고려하였음.



< 알루미늄 보강재 적용 여부에 따른 지압 강도 평가 실험 >

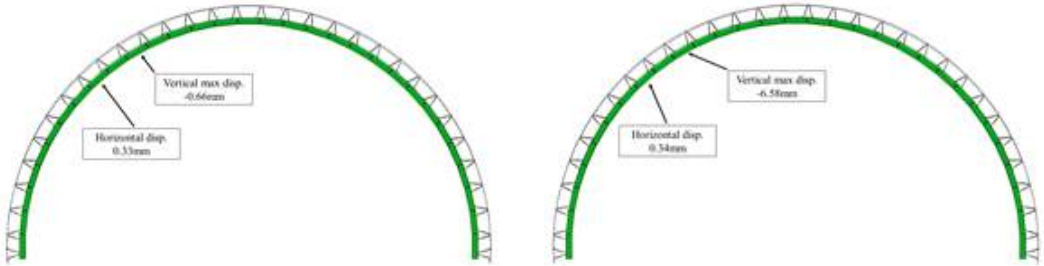
- (지압 강도 실험 결과) 프리캐스트 패널 연결부의 지압 강도는 4회 평균 763.9kN으로 나타났으며, 알루미늄 보강재 적용시 지압강도는 4회 평균 919.1kN으로 나타났음. 알루미늄 보강재 적용시 프리캐스트 패널 지압 강도가 약 20% 상승하는 것을 확인하여 알루미늄 보강재가 지압 강도에도 기여하는 것을 확인하였음.



(a) 알루미늄 보강재 미적용 시험체 (b) 알루미늄 보강재 적용 시험체

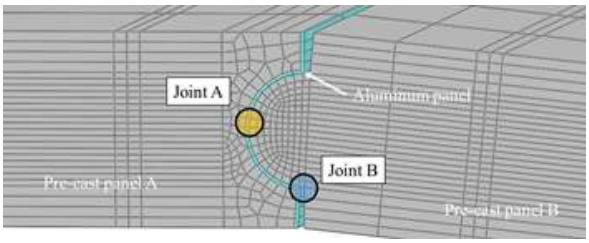
< 알루미늄 보강재 적용 여부에 따른 지압 강도 평가 실험 결과 >

- (제안 지중아치 구조의 알루미늄 보강재 적용 여부에 따른 구조해석) 보강재 적용에 따라 제안 지중아치 구조의 거동 확인 결과 알루미늄 보강재 적용으로 구조적 거동 차이가 나타나지 않았음. 하지만, 외부 충격에 의한 연결부 손상 및 지중아치 패널간 회전 거동을 개선할 수 있으므로 시공성 개선 및 구조 거동 개선에 기여할 수 있을 것으로 판단됨.

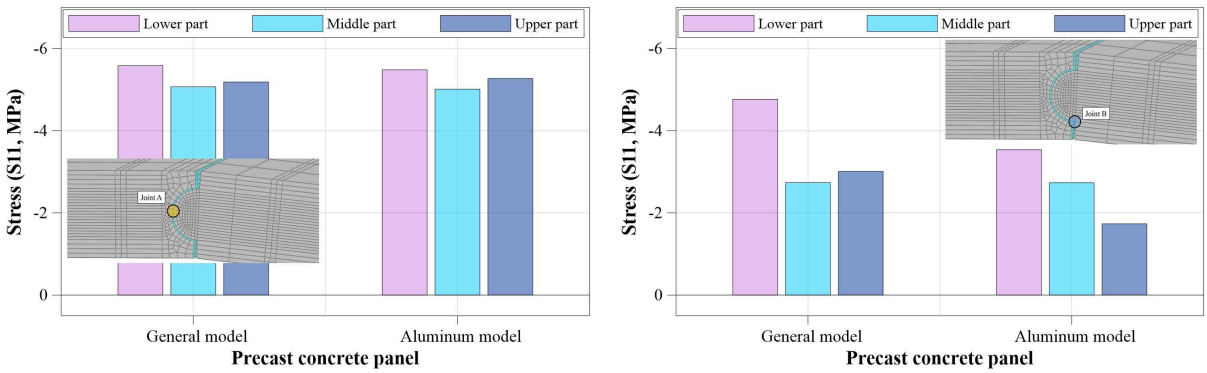


(a) 알루미늄 보강재 미적용 아치의 처짐 (b) 알루미늄 보강재 적용 아치의 처짐

< 알루미늄 보강재 적용 여부에 따른 제안 지중아치 구조의 거동 >



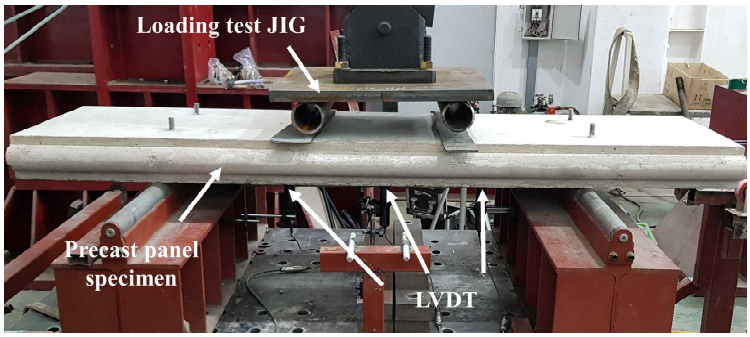
<알루미늄 보강재 적용 여부에 따른 구조해석 결과 비교 위치 A, B>



(a) Joint A (b) Joint B

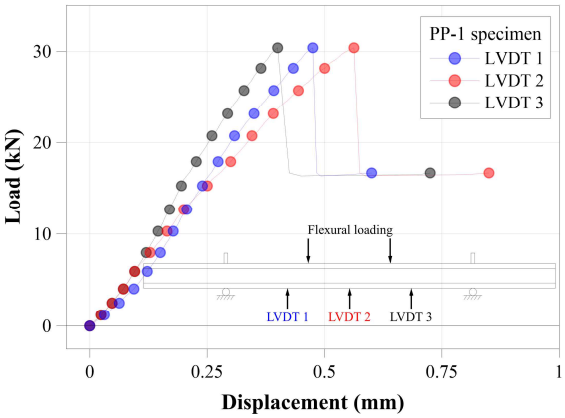
< 알루미늄 보강재 적용 여부에 따른 제안 지중아치 연결부 거동 확인 결과 >

- (프리캐스트 패널 휨 실험) 제안된 지중아치 시스템의 주요 부재인 프리캐스트 패널은 얇고 긴 형상으로 설계되어 최소한의 인장 저항을 위한 와이어 메쉬만 고려되었음. 프리캐스트 패널의 경우 아치 특성에 따라 설치 이후의 압축에 대한 하중에 저항하게 되어 휨이 발생하지 않는 부재지만 인상 과정 및 운반 과정에서 프리캐스트 패널 자중에 의한 휨이 발생하게 됨. 따라서, 프리캐스트 패널의 휨 저항성능을 확인하기 위하여 휨 실험을 실시하였음.

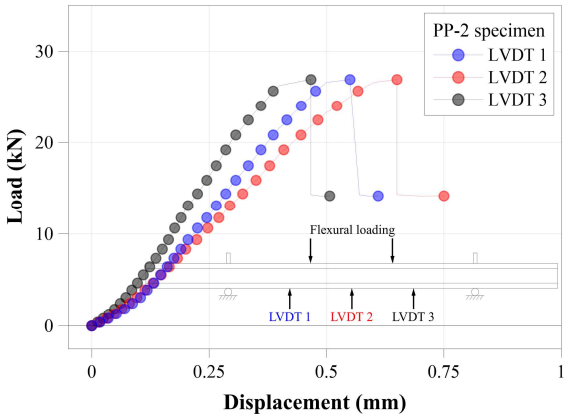


< 휨 실험 모습 >

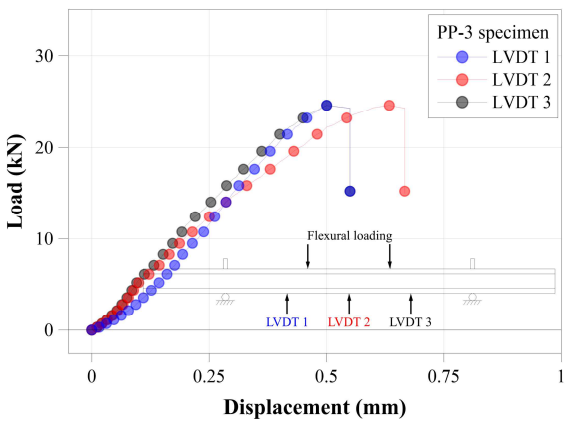
- (휨 실험 결과) 프리캐스트 패널의 휨 실험 결과, 최소 균열 하중 10.3kN에서 균열이 발생하였으며, 이때 발생하는 응력은 약 3.5MPa로 나타나 인장 균열이 발생하였음을 확인할 수 있음. 프리캐스트 패널 1개의 중량은 약 290kg이므로 최소 균열 하중과 비교하여 약 28% 수준으로 나타나 인상 및 운반 과정에서 발생하는 프리캐스트 패널 자중에 대하여 충분한 휨 저항 성능을 확보하고 있음을 확인함.



< PP-1 specimen >



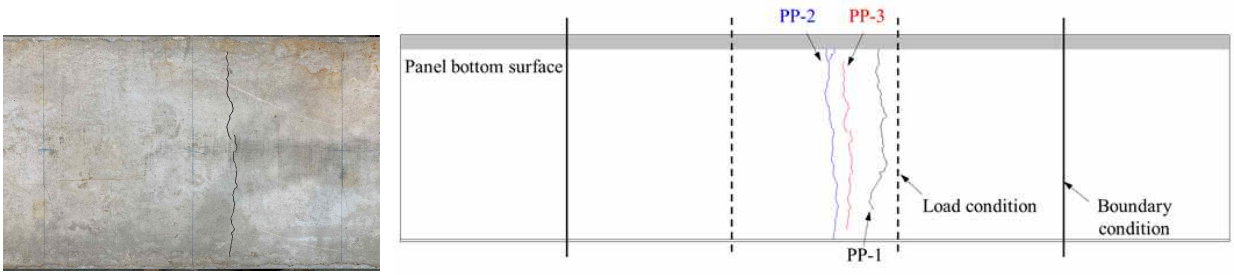
< PP-2 specimen >



< PP-3 specimen >

< 프리캐스트 패널 휨 실험 결과 >

	Crack load (kN)	Disp. at crack load (mm)	Crack stress by crack load (MPa)	Ultimate flexural load (kN)	Disp. at ultimate flexural load (mm)
PP-1	10.29	0.19	3.45	30.39	0.60
PP-2	11.76	0.27	3.95	26.94	0.65
PP-3	11.43	0.23	3.84	24.63	0.63
Avg.	11.16	0.23	3.75	27.32	0.63



< 균열 분포 형상 (프리캐스트 패널 하면) >

- (프리캐스트 모듈러 아치간 연결 장치 개발) 본 연결 장치는 도로폭에 따라 제안 지중아치 시스템을 연속적인 배치 이후 아치간 연결을 하기 위하여 고안하였음. 일반적으로 프리캐스트 아치 구조의 경우 아치 크라운 부를 연속적으로 연결하는 방법을 사용하기 위하여 홈을 내어 콘크리트로 타설하거나 U형 강재 연결재를 활용하여 엮은 형태로 연결하는 방법, 강선을 활용한 프리스트레싱 도입 방법 등을 사용하고 있음. 제안 아치 시스템의 경우 프리캐스트 패널의 선설치 앵커를 활용하여 종방향 연결장치를 개발하였음. 개발한 종방향 연결 장치는 1:1 결합 방식의 Type A와 2:2 결합 방식의 Type B로 두 가지 연결방법을 제안하였음.

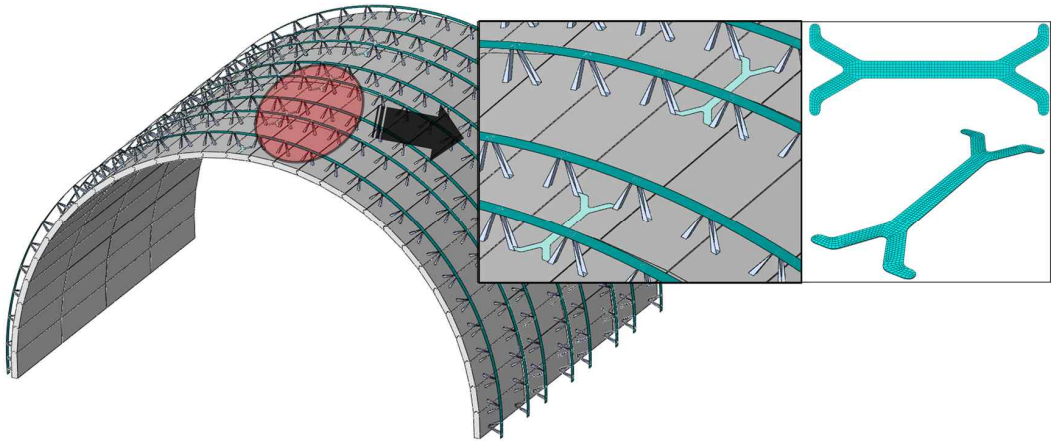


<연결부 Type A>

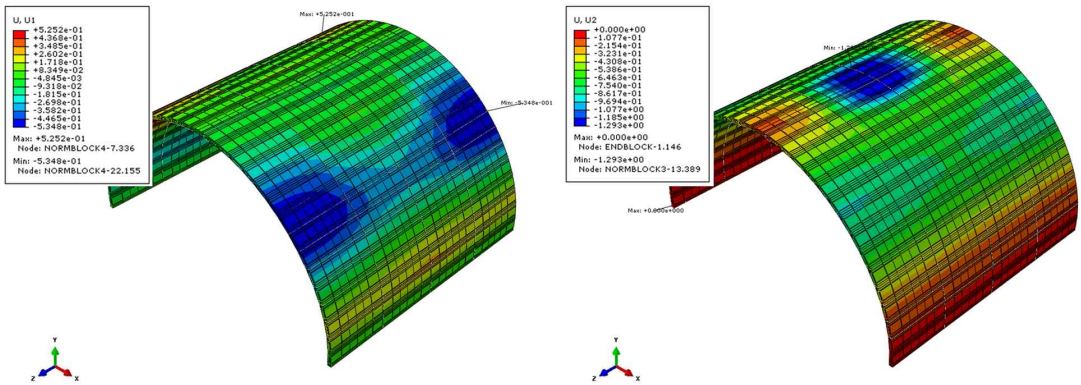


< 연결부 Type B >

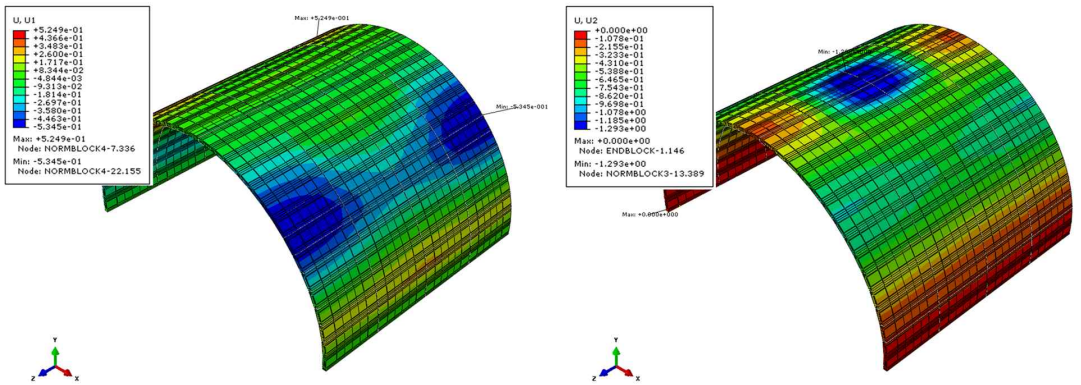
- (연결 장치 구조해석) 해당 연결 장치의 적용에 따라 제안 아치 시스템의 변형 등을 확인하기 위하여 외부 하중 효과를 적용하여 구조해석을 실시하였음. 구조해석에 적용한 모델은 총 4개의 아치로 구성되었으며, 토체를 고려하여 모델링하였음. 구조해석 결과, 부재와 부재간의 축력이 상대적으로 크게 발생하기 때문에 상재 하중 재하에도 수직 및 수평 반력의 차이가 발생하지 않음을 확인하였음. 또한, 해당 연결 장치가 구조 부재로 적용되는 것이 아니므로 상대적으로 연결성이 좋은 Type B를 적용하는 것이 합리적일 것으로 판단됨.



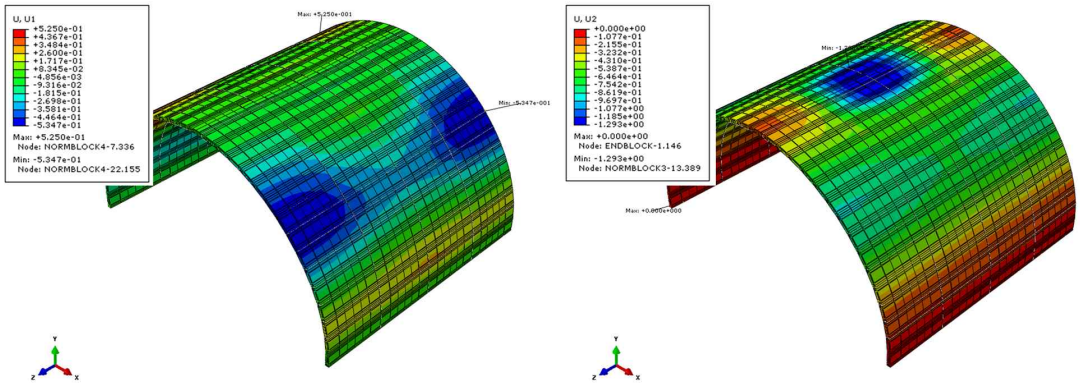
< 연결부 해석 모델 >



(a) Reference 모델

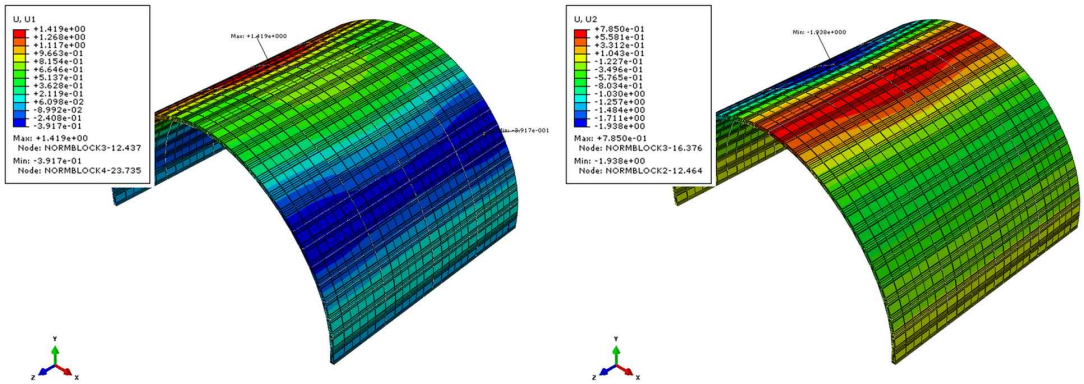


(b) 상부 연결판 적용 모델

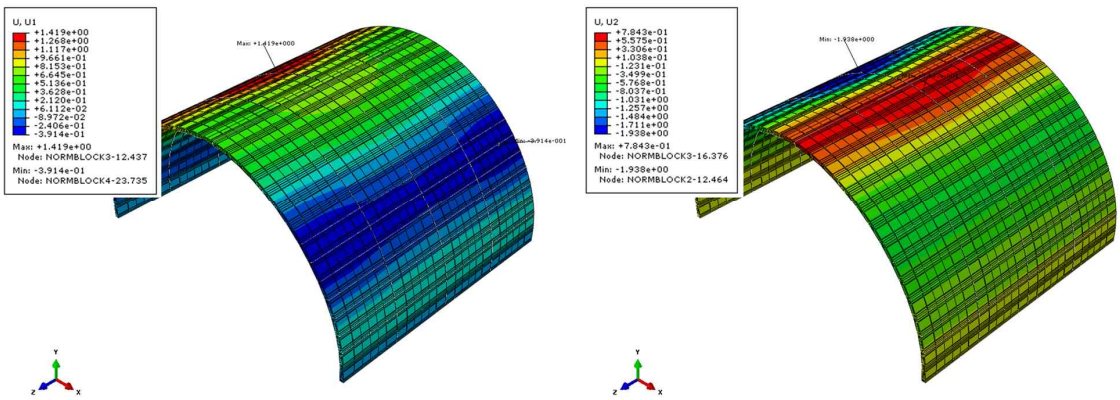


(c) 상부 및 측면 연결판 적용 모델

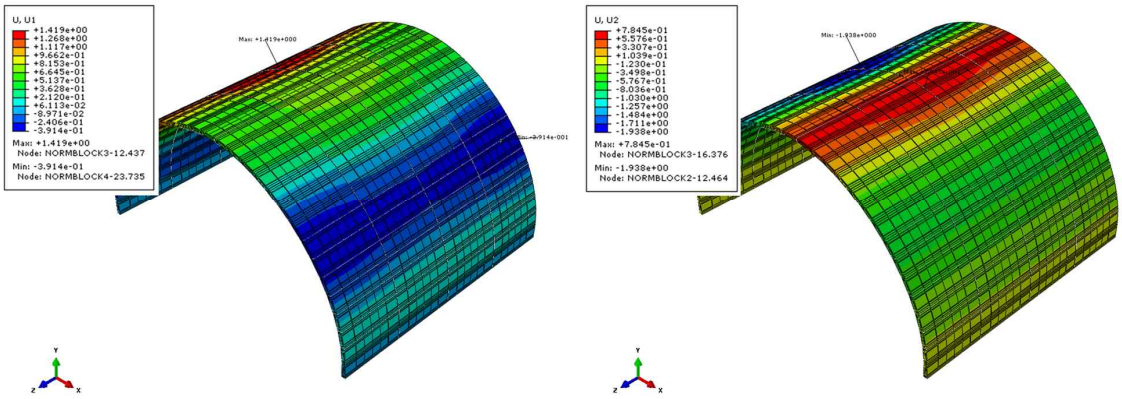
< 아치 중심부 하중 재하에 따른 수평 및 수직 변위 >



(a) Reference 모델

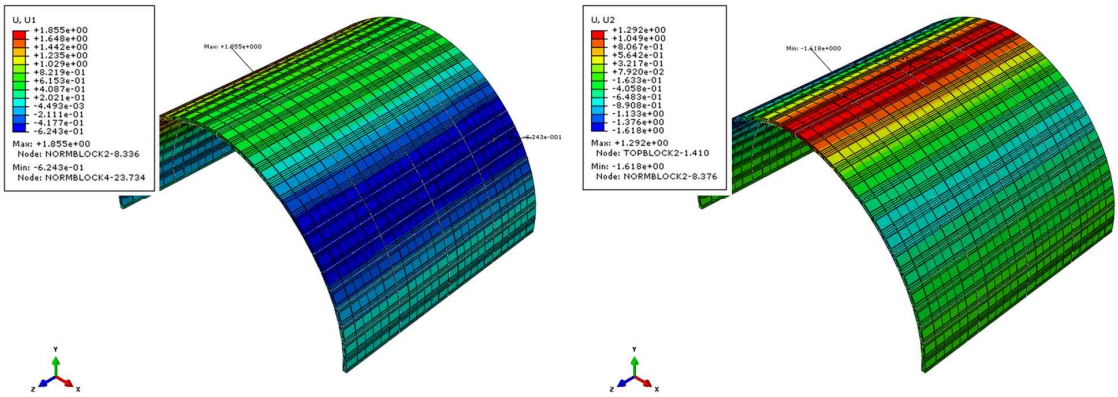


(b) 상부 연결판 적용 모델

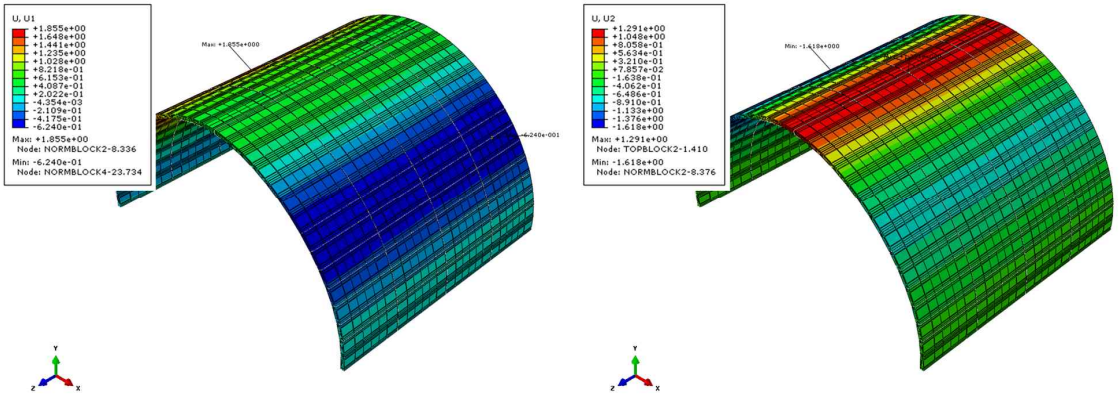


(c) 상부 및 측면 연결판 적용 모델

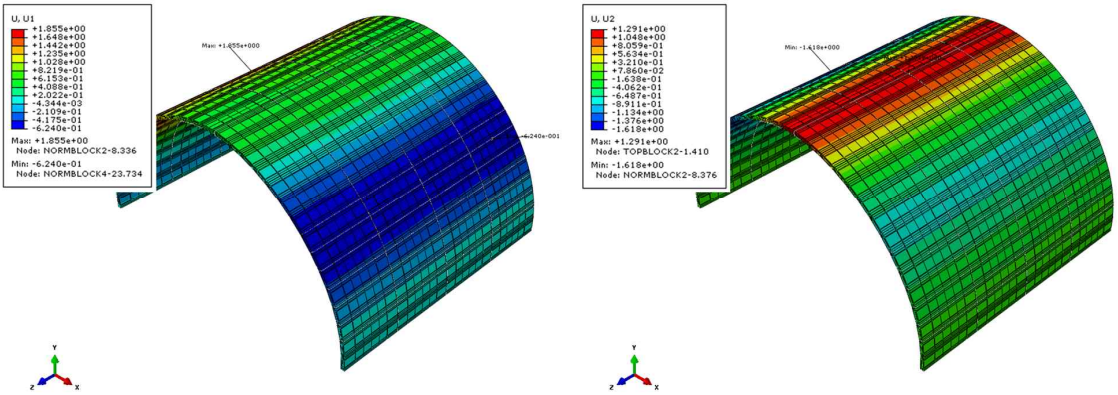
< 아치 측면부 하중 재하에 따른 수평 및 수직 변위 >



(a) Reference 모델



(b) 상부 연결판 적용 모델



(c) 상부 및 측면 연결판 적용 모델

< 아치 지점부 하중 재하에 따른 수평 및 수직 변위 >

- (프리캐스트 패널 이음부 연결성 평가 및 내구성 확보방안 검토) 제안 지중아치 시스템은 아치 인상 및 설치 이후 프리캐스트 패널 연결부가 떨어져 있는 상태로 아치가 형성됨. 이러한 상태에서 토공시 이음부 틈으로 흙 입자가 침투할 수 있으며, 흙 입자의 침투로 누수 등의 원인이 될 수 있음. 프리캐스트 패널 이음부 연결성 평가와 흙 입자의 침투를 방지하기 위한 이음부 처리 방안 등에 대하여 검토하기 위하여 프리캐스트 패널 이음부 연결성 평가 실험체를 제작하였음. 실험에 사용된 프리캐스트 패널 이음부 연결성 평가 실험체는 높이 120㎜, 길이 500㎜의 암, 수 프리캐스트 패널을 1조로 제작하였으며, 아치 설치 이후 형상과 같이 약 3도씩 회전하였음. 이후 V-strip을 연결하고 이음부를 처리한 후 흙과 물을 넣을 수 있도록 아크릴을 이용하여 수조 형태로 제작하였음. 이음부 처리 방안으로는 Type A~D로 가정하였으며, Type A의 경우 수용성 도막식 방수재(전면), Type B의 경우 시트 방수(전면), Type C의 경우 우레탄 실리콘(이음부), Type D 수용성 도막식 방수재(전면) + 우레탄 실리콘(전면)으로 구분하여 처리 방안을 마련하였음.






< Type A > < Type B > < Type C > < Type D >

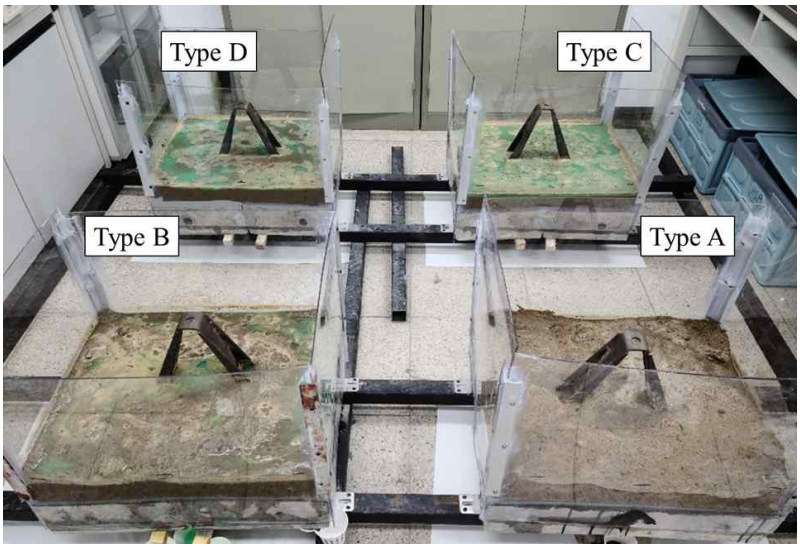
< 이음부 처리 방안 >

- (이음부 연결성 평가 및 내구성 확보방안 검토 결과) 이음부 처리 방안의 적용 이후 각각의 Type에 따라 이음부 흙의 침투 및 누수 방지를 확인하였음. Type A 수용성 도막식 방수재의 경우 이음부 위치에 피복 두께가 충분히 적용되기 어려우므로 흙 입자가 이음부에 침투하였으며, 이음부의 미소한 공극으로 인하여 누수가 발생하였음. Type B 방수 시트의 경우 이음부 위치에 흙 입자의 침투는 방지하였으나, 제안 지중아치 시스템의 특성상 V-strip 볼트 연결부 형상으로 인하여 작업성이 떨어지고 볼트 연결부 위치에서 수분의 침투로 누수가 발생하는 것을 확인하였음. 현장 적용성 실험에서 적용한 Type C 우레탄 실리콘 (이음부)의 경우 이음부에 코킹되어 우레탄 실리콘이 충분히 충전되어 흙 입자의 침투를 방지하였으며, 누수에도 영향이 없음을 확인하였음. Type D 수용성 도막식 방수재와 우레탄 실리콘을 동시 적용한 경우, Type C와 동일하게 이음부에 우레탄 실리콘이 충분히 충전되어 흙 입자의 침투와 누수가 발생하지 않았음. 제안 지중아치 시스템의 경우 지중 구조물로 유지관리가 어려운 점을 고려하여 Type D를 적용하여 프리캐스트 패널 표면 처리와 이음부 코킹을 적용하는 것이 합리적일 것으로 판단됨.



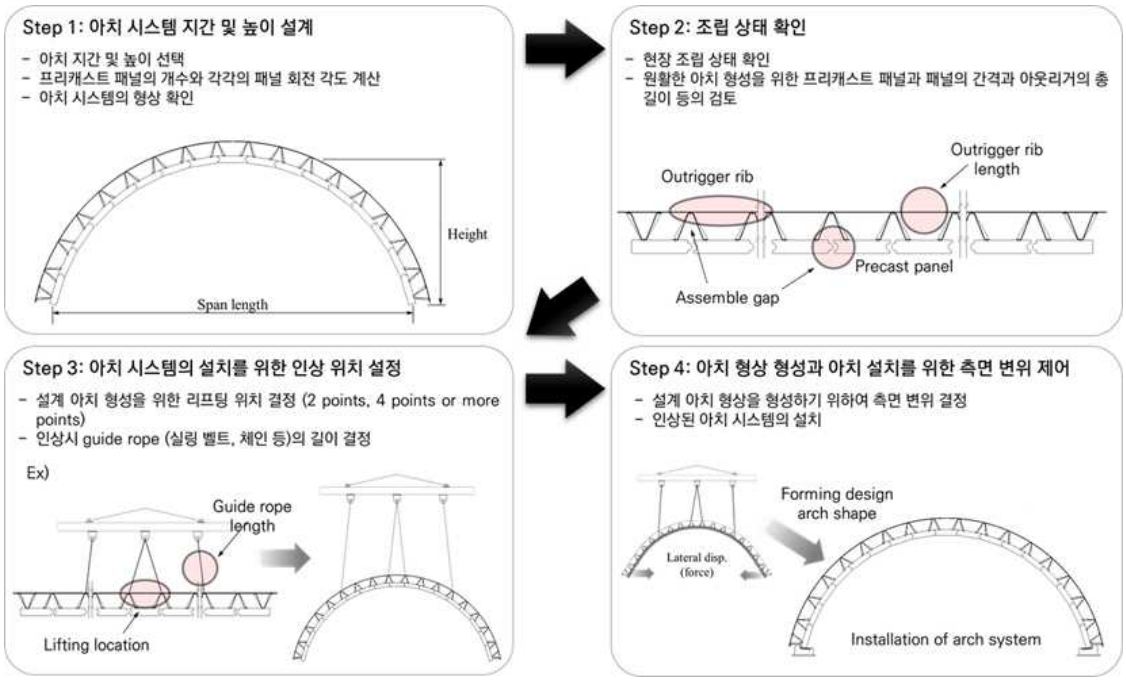


< 실험 과정 모습 (Type C) >



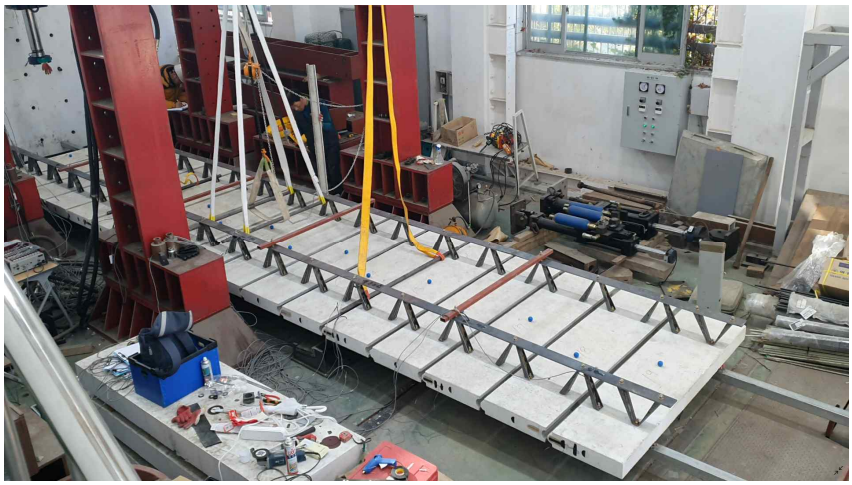
< 실험 완료 모습 >

- (아치 시스템의 구조적 유효성 및 프리캐스트 콘크리트 블록 연결부 요소기술 성능 평가) 제안 지중아치 시스템의 시스템 성능 및 시공 프로세스 관련하여 연계 요소기술의 성능 개선을 위하여 실물 크기의 아치 실험체를 제작하였음. 제작된 실험체는 실험실에서 인상 및 설치 과정에서 발생하는 부재 거동을 평가하고 프리캐스트 콘크리트 블록 연결부에서 나타나는 응력 거동을 확인하여 아치 시스템의 구조적 유효성과 연결부 요소기술의 성능을 확인하였음.



< 인상 및 설치 과정 평가 방법 >

- (실험 결과) 인상 및 설치 실험 과정에서 인상 높이에 따라 프리캐스트 패널 연결부가 원활하게 연결되는 것을 확인하였음. 아치 형성 과정에서 각각의 부재에서 나타나는 거동 평가를 위하여 프리캐스트 패널, 아웃리거, V-strip의 변형률을 측정하였음. 최종 설치 이후 초기 설계 모델과 비교하여 수평 및 수직 변위는 각각 6㎜, 7㎜의 최대 변위가 발생하였으며, 각각의 부재에 발생하는 응력 수준은 프리캐스트 패널의 경우 3MPa 이내, 아웃리거의 경우 60MPa 이내, V-strip의 경우 20MPa 이내로 나타나 부재 각각의 재료 강도와 비교하여 매우 작은 수준으로 나타나는 것을 확인하였음.



< 초기 조립 모습 >



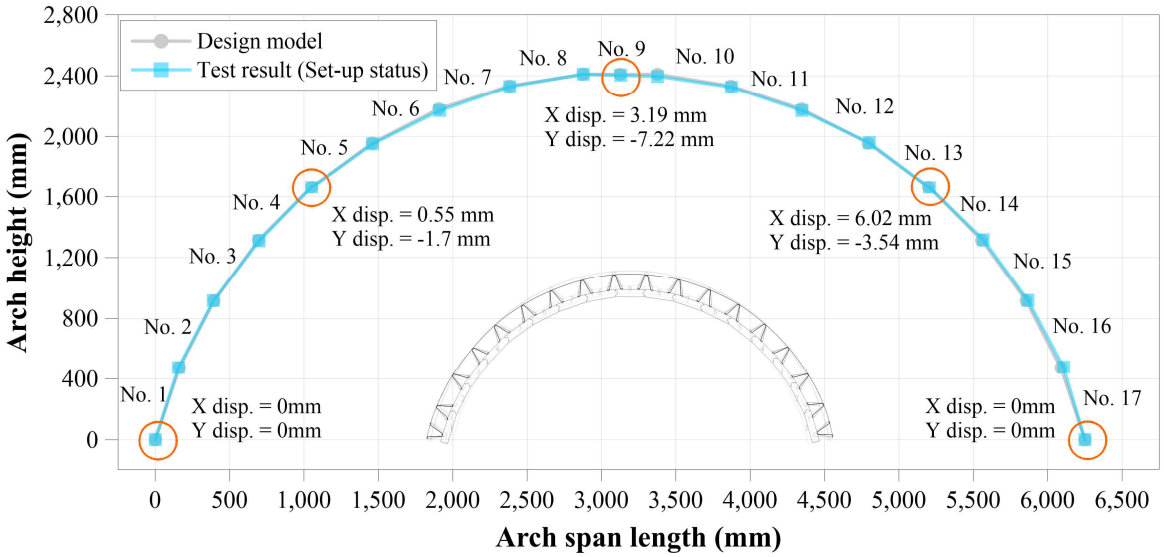
< 인상 높이 1,150㎜ >



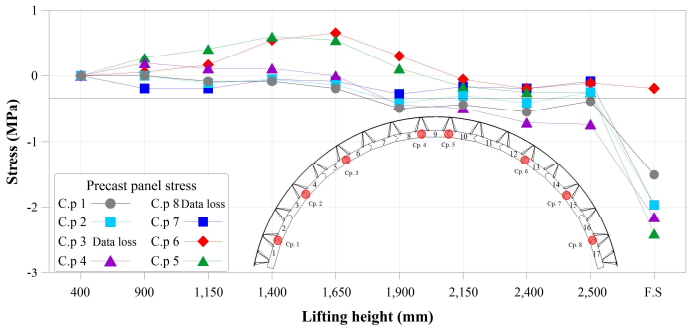
< 인상 높이 2,500㎜ >



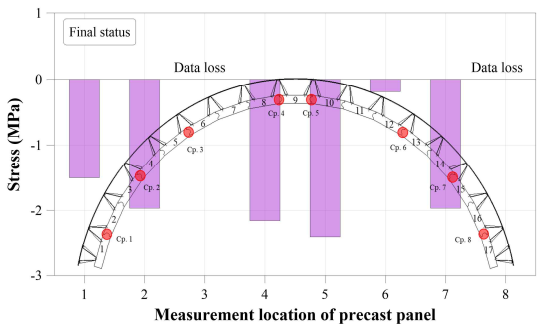
< 최종 설치 모습 >



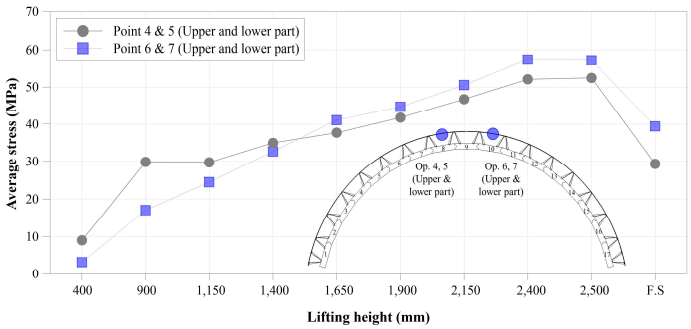
< 아치 시스템 수직 및 수평 변위 >



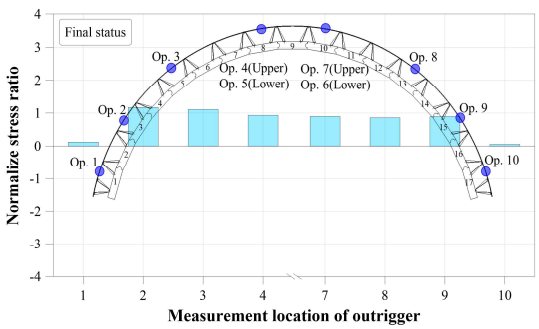
< 프리캐스트 패널 응력 거동 >



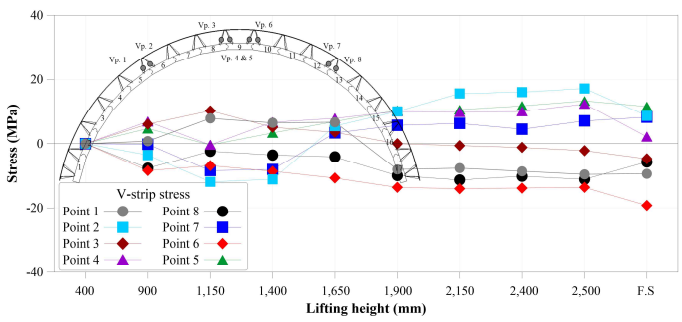
< 최종 프리캐스트 패널 응력 >



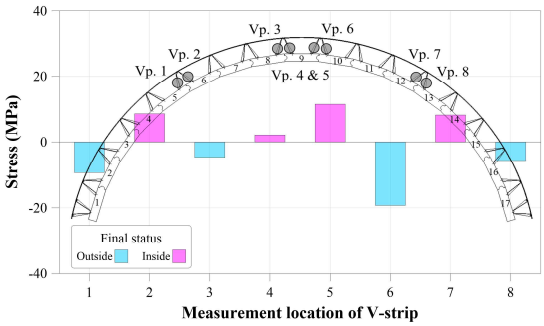
< 아웃리거 공칭 응력 거동 >



< 최종 아웃리거 공칭 응력 >

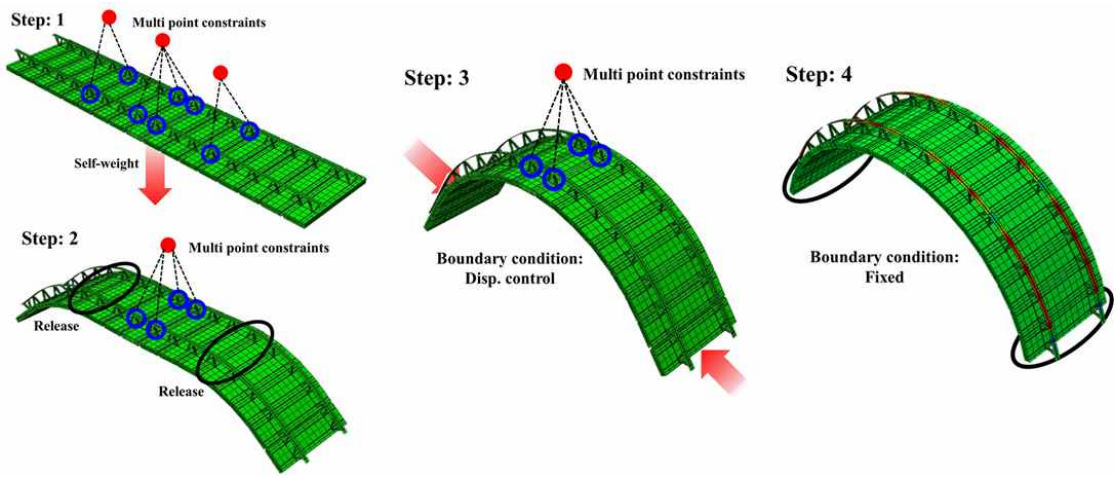


< V-strip 응력 거동 >

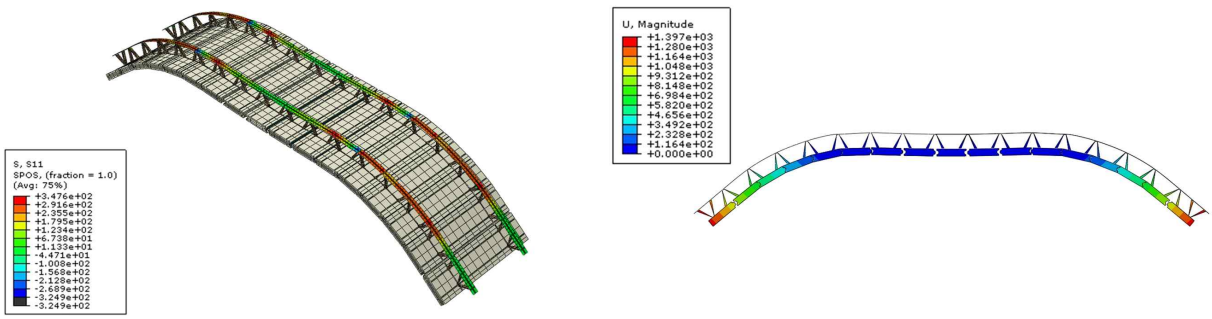


< 최종 V-strip 응력 >

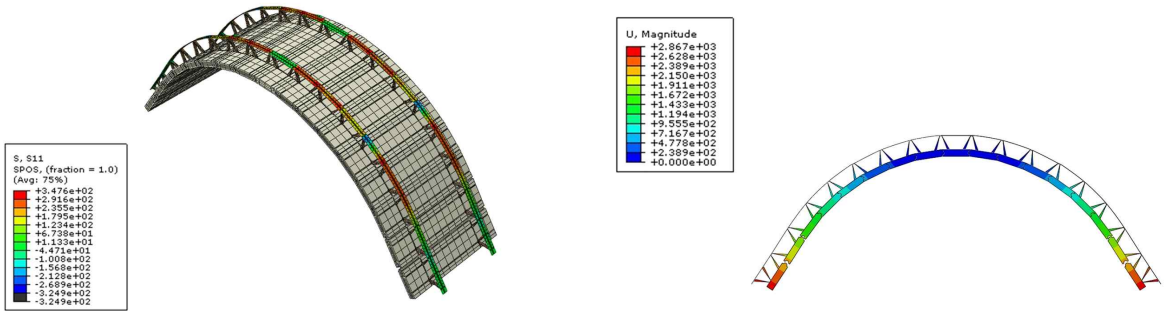
- (인상 및 설치과정 유한요소 해석) 제안 지중아치 실험체의 인상 및 설치 과정 실험과 동일한 과정을 모사하여 유한요소해석을 실시하였음. 인상 과정에서 나타나는 응력 및 변형 형상은 다를 수 있으나, 최종 설치 이후 응력 및 변형 형상은 유사할 수 있으므로 응력 분포도와 변형 형상을 나타내었음. 유한요소 해석 결과, 응력 및 변형 형상이 실험 결과와 유사한 수준으로 나타나는 것을 확인하였음. 유한요소 해석을 통하여 평가된 변형 형상과 인상 및 설치 실험 결과에서 나타난 변형 형상의 차이가 아치 시스템 지간 및 높이와 비교하여 1 % 미만의 변형을 나타내는 것을 확인하였음. 이를 통하여 실제 부재의 거동과 측정 결과의 유효성을 유한요소 해석을 통하여 검증하였음.



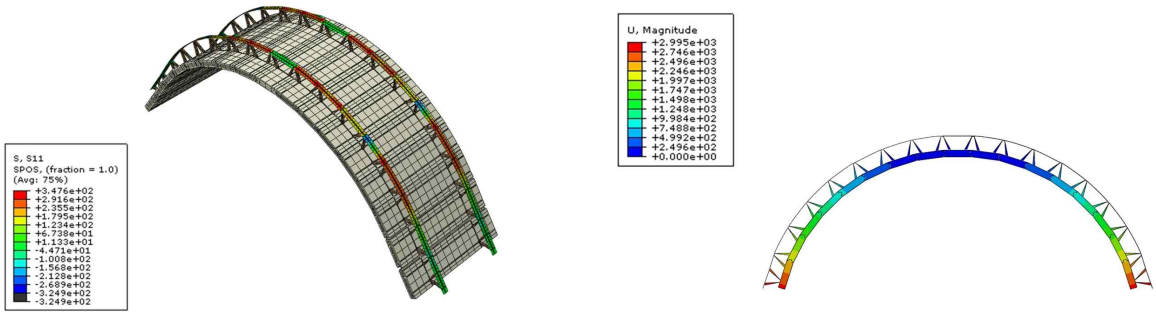
<인상 및 설치 과정 유한요소 해석 방법>



< Step: 1, 아치 시스템 자중 효과 부여 (8점 인상) >

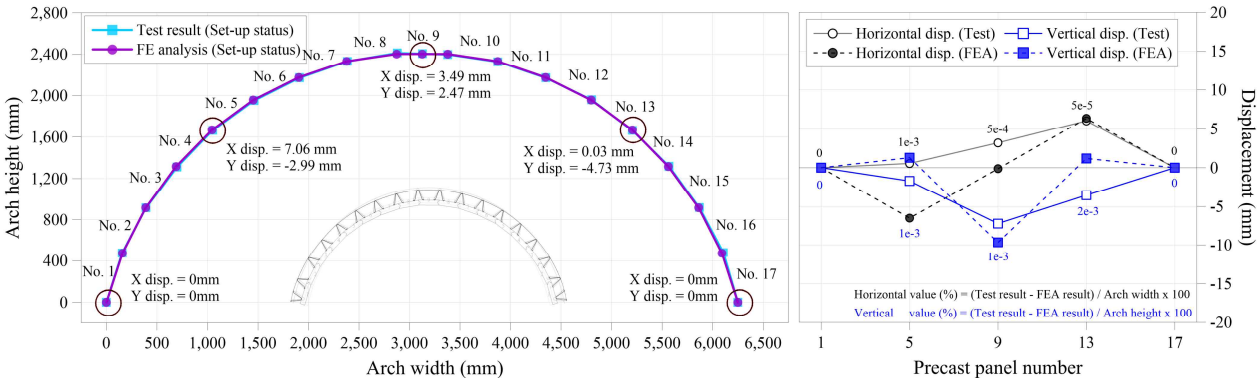


< Step: 2, 외측 인상 조건 해제 (4점 인상) >



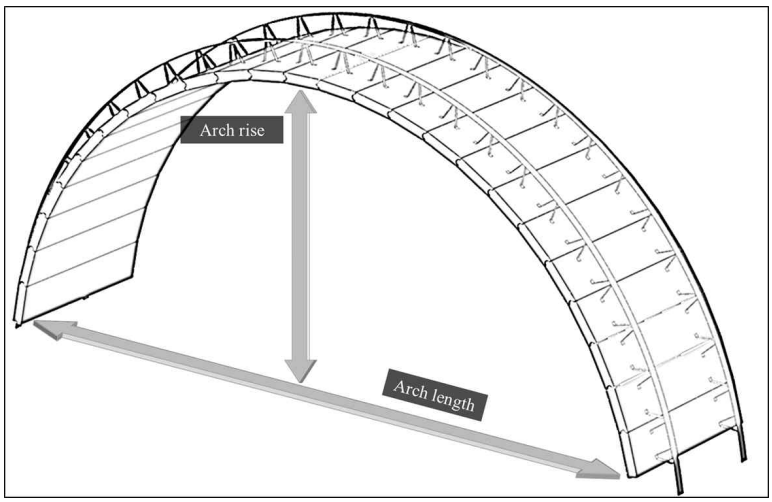
< Step: 4, 최종 설치 >

< 인상 과정별 응력 및 변위 분포도 >

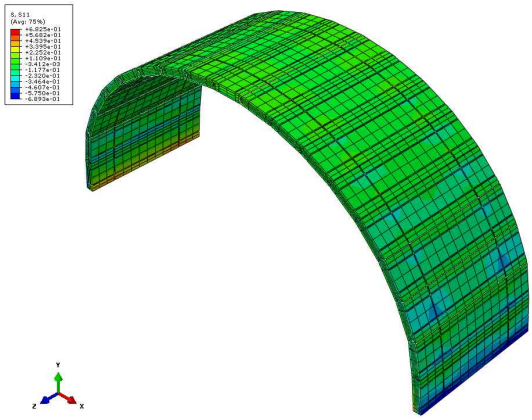


< 인상 및 설치실험 결과와 유한요소 해석결과 비교 >

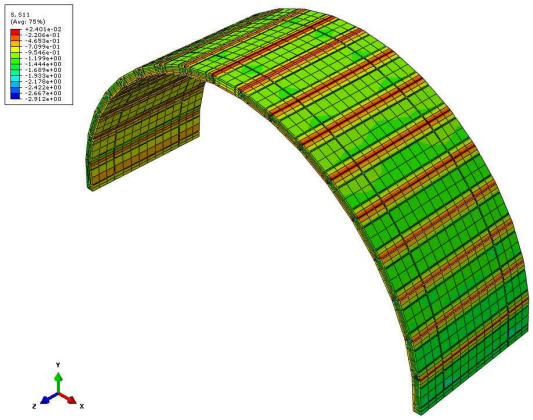
- (유한요소해석을 통한 강재 스트립 및 프리캐스트 블록 활용 지중아치 거동 세부 분석) 제안 지중아치 시스템의 세부 거동 분석을 위하여 지반 모델을 포함한 지중아치의 지간장의 변화에 따른 거동을 확인하였음. 지간장을 6, 8, 10m로 변화하였으며, 라이즈 비는 0.5를 적용하고 접촉 및 경계 조건을 동일하게 적용하여 지간장의 변화에 따른 지중아치 시스템의 전체적인 아치 거동과 응력 상태를 확인하였음.



< 지중아치 구조의 지간장 변화에 따른 거동 평가 >

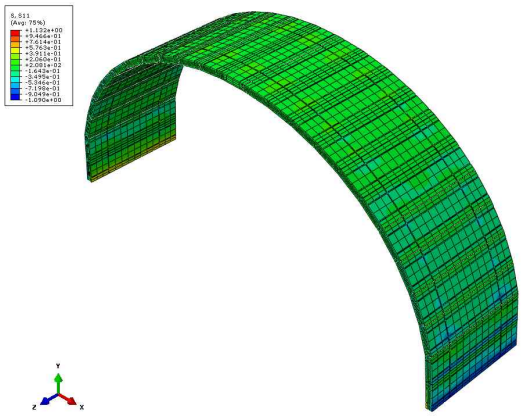


(a) Arch self-weight

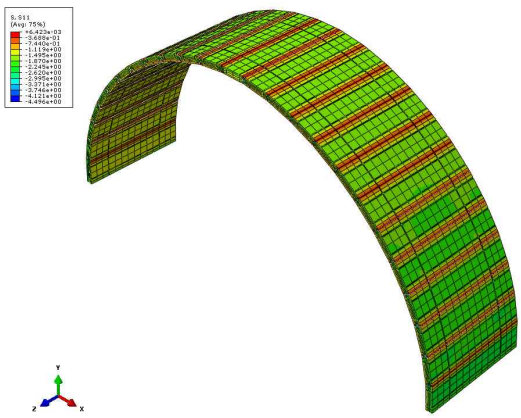


(b) Final construction

< 지간장 6m 아치 시스템의 응력 및 변형 형상 (scale factor:50) >

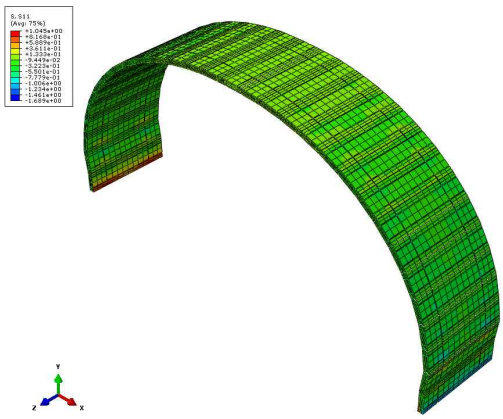


(a) Arch self-weight

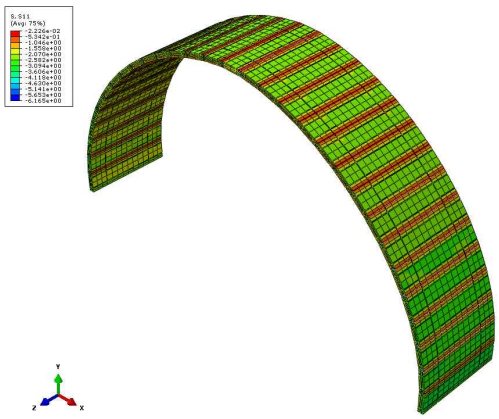


(b) Final construction

< 지간장 8m 아치 시스템의 응력 및 변형 형상 (scale factor:50) >



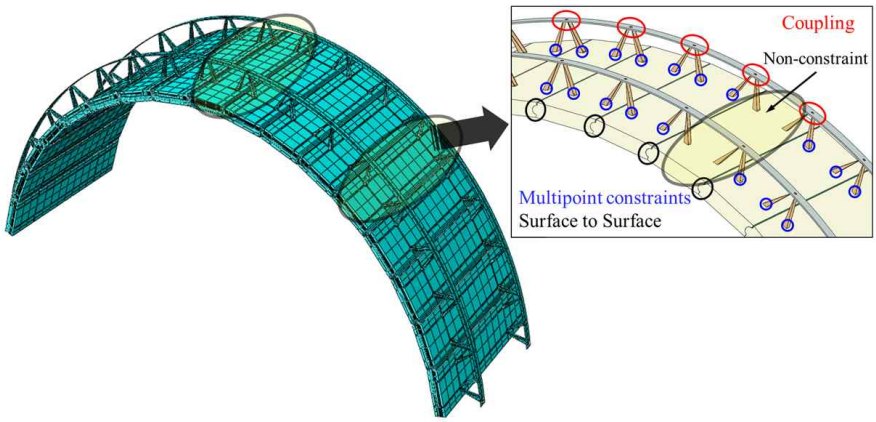
(a) Arch self-weight



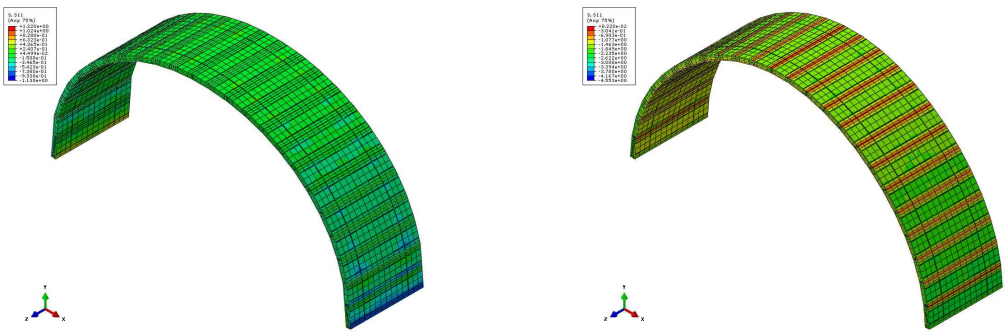
(b) Final construction

< 지간장 10m 아치 시스템의 응력 및 변형 형상 (scale factor:50) >

- (프리캐스트 콘크리트 블록 결함을 고려한 거동 분석) 대상 지중아치 시스템에 발생 가능한 파괴 메커니즘을 고려하기 위하여 프리캐스트 패널에 결함이 발생하였을 때 지중아치 시스템의 거동을 확인하였음. 프리캐스트 패널의 결함은 프리캐스트 패널 하부에 인위적인 균열을 부여하는 것과 V-strip과 연결이 상실되었을 때의 아치 거동과 응력 상태를 확인하였음.

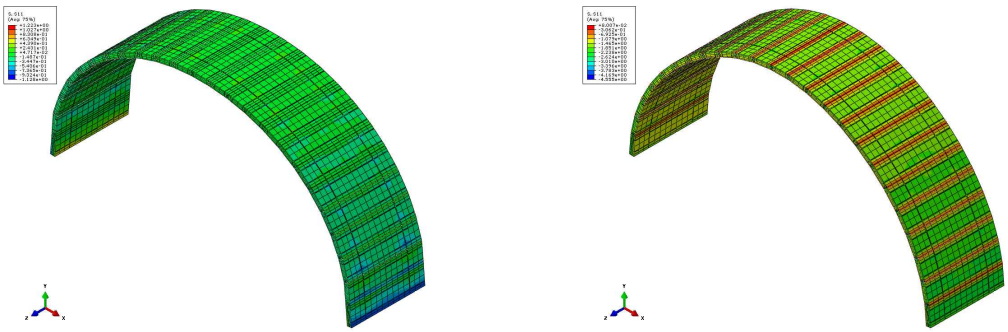


<프리캐스트 콘크리트 블록 결함 적용 모델>



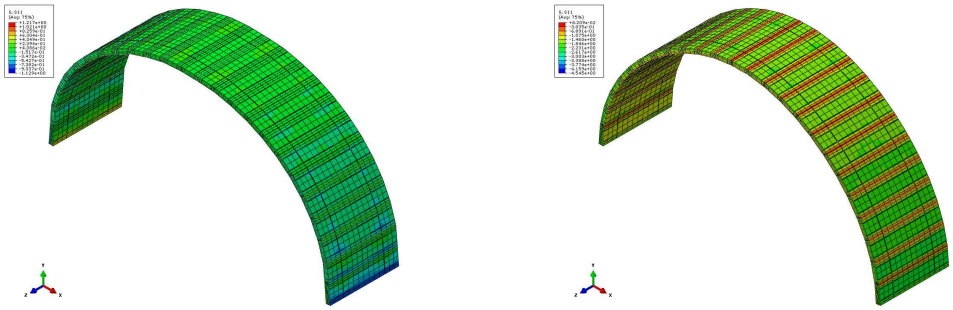
(a) Arch self-weight (b) Final construction

< 아치 크라운 패널 균열 발생시 응력 및 변형 형상 (scale factor:50) >



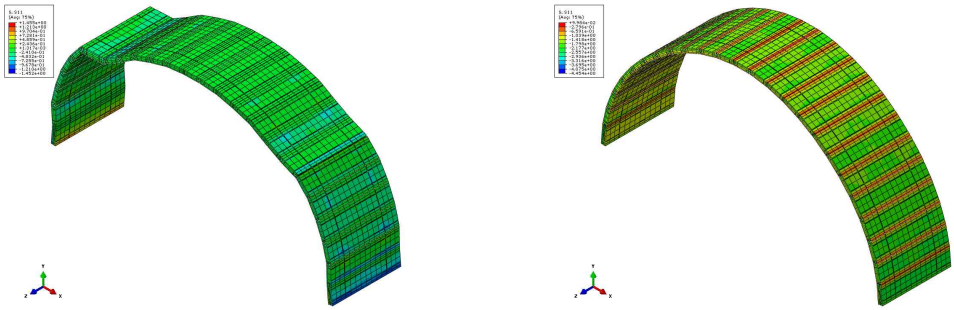
(a) Arch self-weight (b) Final construction

< 전체 패널 균열 발생시 응력 및 변형 형상 (scale factor:50) >



(a) Arch self-weight (b) Final construction

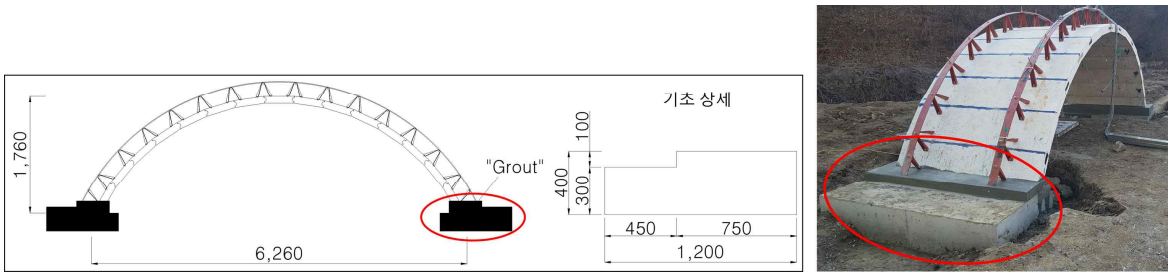
< 아치 크라운부 연결 상실시 응력 및 변형 형상 (scale factor:50) >



(a) Arch self-weight (b) Final construction

< 양쪽 중앙부 연결 상실시 응력 및 변형 형상 (scale factor:50) >

- (지중아치 시험시공 중 구조물 변형 측정 및 분석) 지중아치 시험시공 중 구조물의 변형 측정 및 분석을 위하여 제안 지중아치 시스템을 실물 제작하여 현장 적용성 실험과 하중 재하 실험을 실시하였음. 현장 적용성 및 하중 재하 실험에 사용되는 아치 시스템은 지간 6m, 높이 2m로 제작되었으며, 아치 상부에 토체를 시공하기 위하여 윙벽을 양쪽으로 시공하였음.
- (현장 적용 실험) 제안 지중아치 시스템의 시공 프로세스 검토와 아치 거동 특성을 확인하기 위하여 현장 실험을 하였으며, 인상 및 설치 과정과 토공 과정에서 발생하는 토압에 따른 부재의 거동을 확인하였음. 현장 적용 실험체는 현장에서 프리캐스트 패널을 조립하였으며, 크레인을 활용하여 인상 및 설치 하였음. 아치 기초는 해석에 의한 지점부 반력을 고려하여 검토하였으며, 아치 자중에 의한 지반의 처짐 등을 방지하기 위하여 사전에 아치 기초 지반에 버림타설을 실시하였음. 또한, 아치 인상 및 설치시 아치 형성 과정에서 프리캐스트 패널의 연결부 접촉 상태 및 회전 각도 등의 문제로 인하여 설계 지간장과 일부 다를 수 있으므로 기초 폭을 설계 지간장보다 크게 제작하고 아치 설치 이후 단부 프리캐스트 패널을 그라우트 타설하여 고정하였음. 아치 설치 이후 윙벽과 흙을 총 3단계에 걸쳐 시공하였으며, 토공 과정에서는 좌, 우측의 편심 효과가 발생하지 않도록 단계별로 토공 높이를 나누어 시공하였음. 인상 및 설치 과정부터 윙벽 및 토공 과정까지 각 시공 단계별로 LVDT 및 스트레인 게이지를 통하여 변위 및 변형률을 측정하여 부재 거동 특성을 확인하였음.



< 지중아치 기초 설계 및 시공 >



(a) 프리캐스트 패널 조립 모습



(b) 아치 실험체 인상 과정

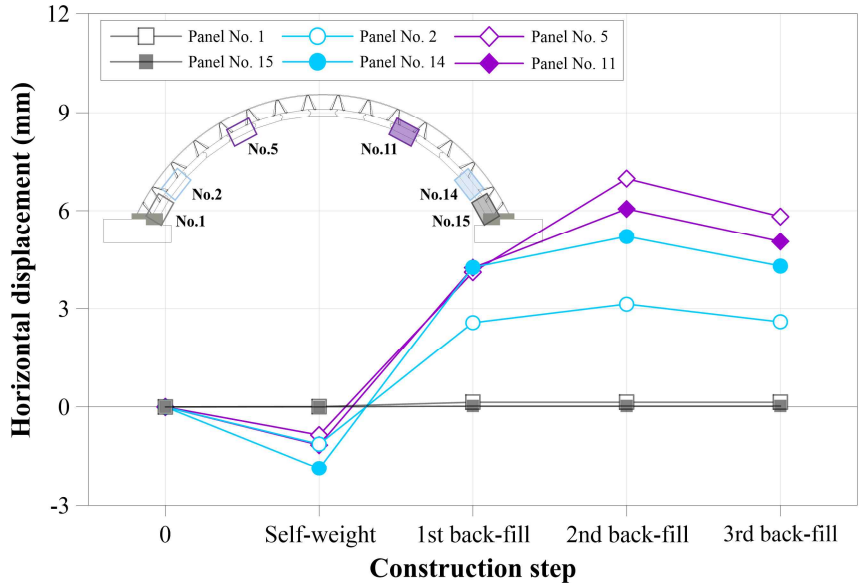


(c) 아치 실험체 설치 모습

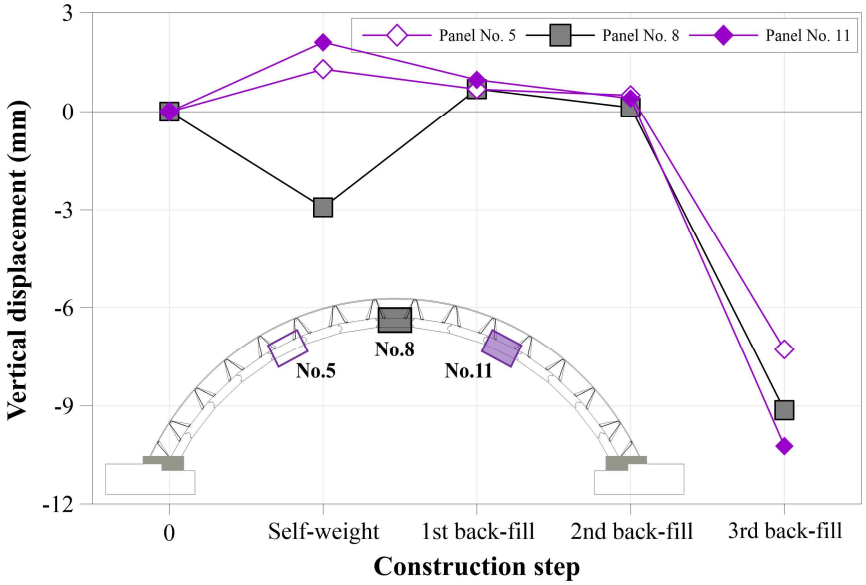


(d) 시공 완료 모습

< 지중아치 시스템 시공 과정 >

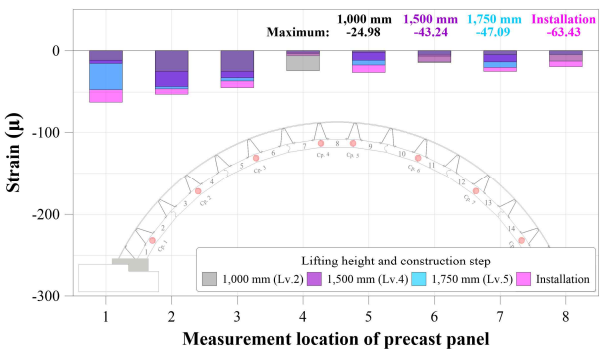


(a) 수평 변위

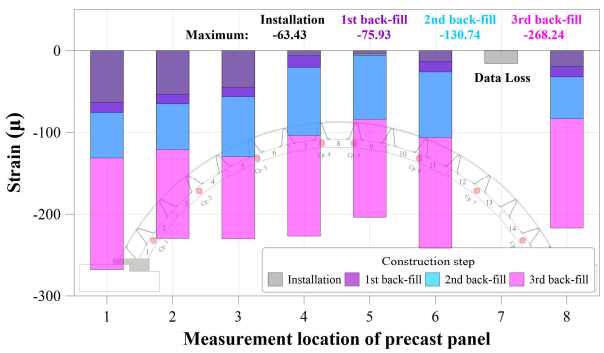


(b) 수직 변위

< 지중아치 시스템 수평 및 수직 변위 >

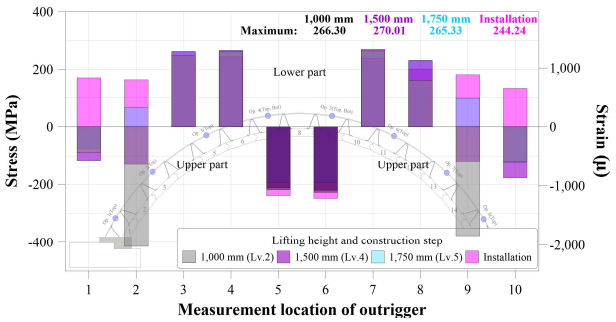


(a) 인상 및 설치 과정

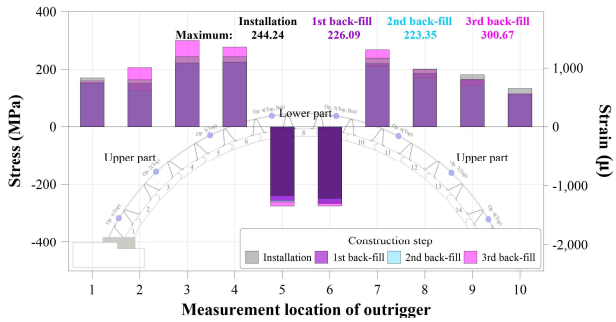


(b) 토체 시공 과정

< 프리캐스트 패널 응력 >

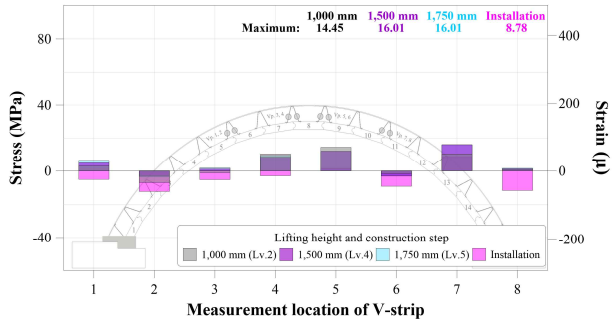


(a) 인상 및 설치 과정

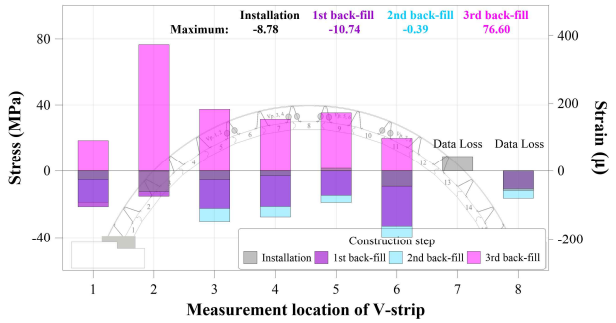


(b) 토체 시공 과정

< 아웃리거 응력 >



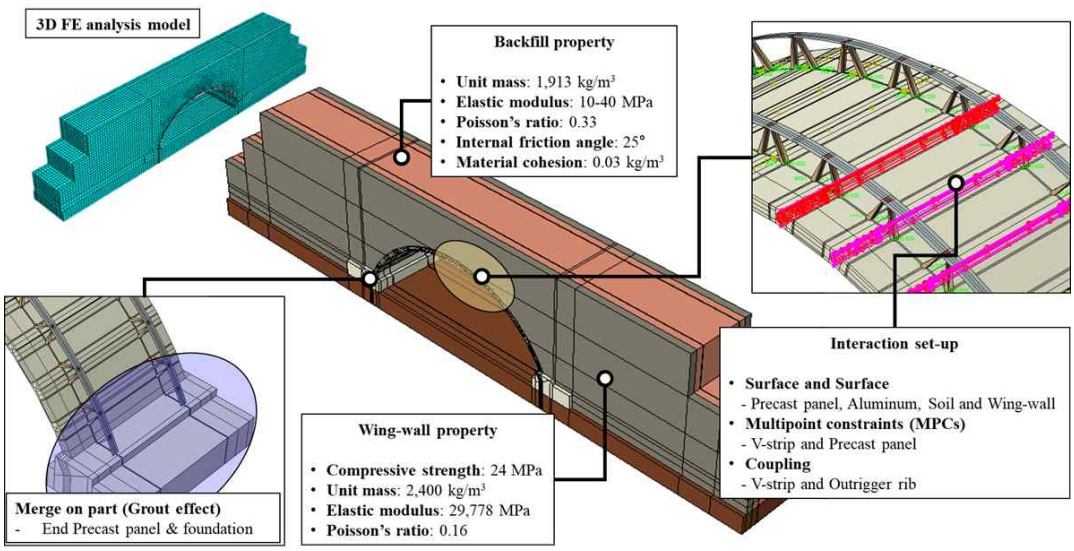
(a) 인상 및 설치 과정



(b) 토체 시공 과정

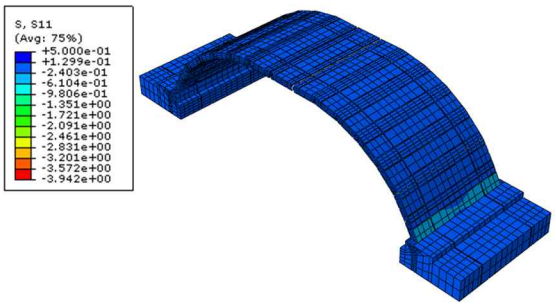
< V-strip 응력 >

- (현장 적용성 실험체 구조해석) 제안 지중아치 시스템의 현장 적용성 평가를 위한 현장 적용성 실험체를 구조해석하여 실험 결과의 타당성과 안전성을 확인하였음. 구조해석에서는 현장 적용성 실험과 동일한 시공 과정 효과를 적용하기 위하여 Model change 기능을 적용하였음. 접촉 조건 및 경계 조건은 제안 지중아치 시스템의 부재별 거동 특성을 반영하여 Surface to surface, Multi-point constraint, Coupling 등의 기능을 적용하였음. 하중 조건의 경우 각각의 재료 단위 중량에 따른 자중을 고려하였음. 흙의 재료 특성의 경우 비선형성을 적용하더라도 외부 하중이 존재하지 않으므로 항복 수준 이하의 응력이 나타나 흙의 비선형성이 고려되지 않았음.

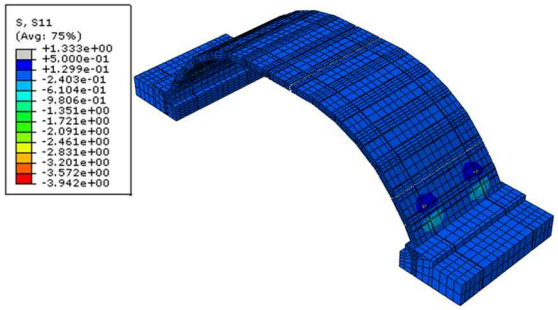


< 현장 실험체 유한요소 해석 모델 >

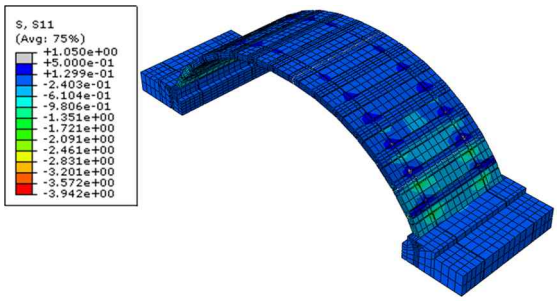
- (구조해석 결과) 프리캐스트 패널의 응력은 아치 효과에 의하여 지점부에서 3.9MPa 이하의 압축 응력 수준을 나타내었으며, 전체 시공 과정에서 나타나는 응력 수준이 크지 않음을 확인하였음. 변형 상태의 경우 실험과 매우 유사한 수준으로 변형 거동을 나타내었으며, 특히 최종 시공 완료 상태에서는 거의 동일한 수준으로 변형이 발생하는 것을 확인할 수 있음. 이를 통하여 실험 결과의 타당성을 확인할 수 있으며, 제안 지중아치 시스템의 안전성을 확인할 수 있었음.



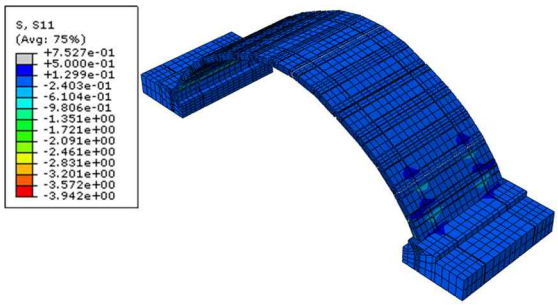
< 아치 자중 상태 응력 거동 >



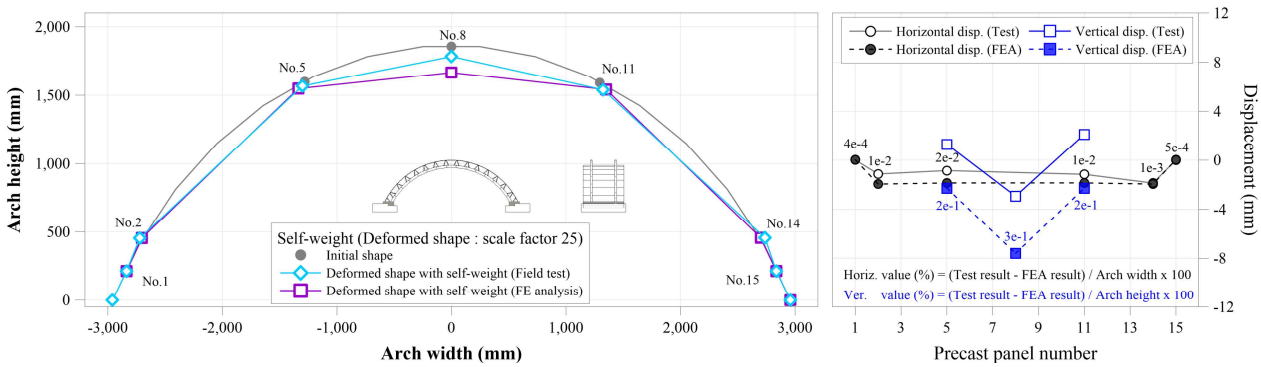
< 1단계 backfill 적용시 응력 거동 >



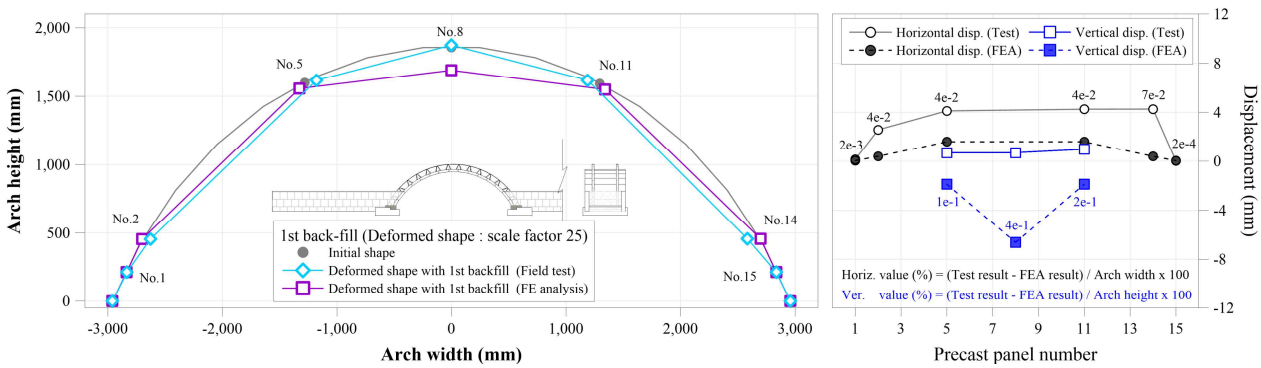
< 2단계 backfill 적용시 응력 거동 >



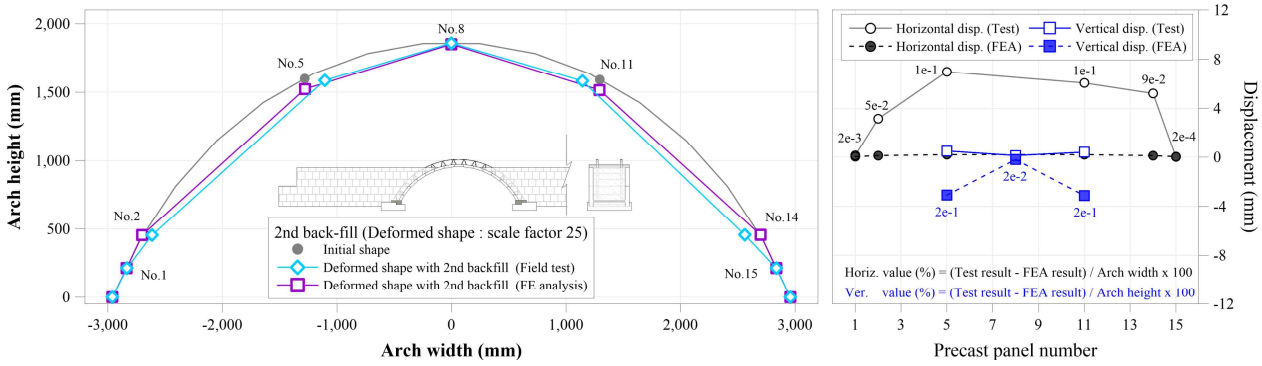
< 3단계 backfill 적용시 응력 거동 >



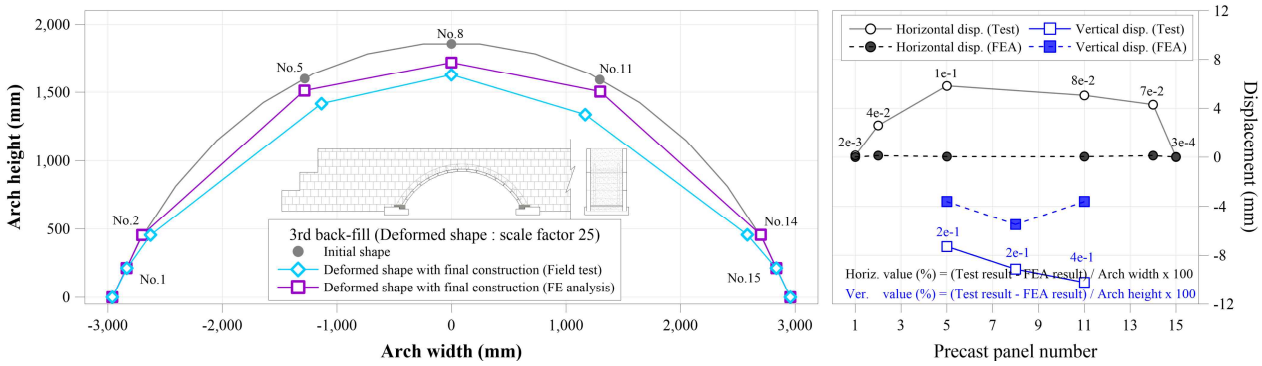
< 아치 자중 상태 - 변위 비교 >



< 1단계 backfill 적용 - 변위 비교 >

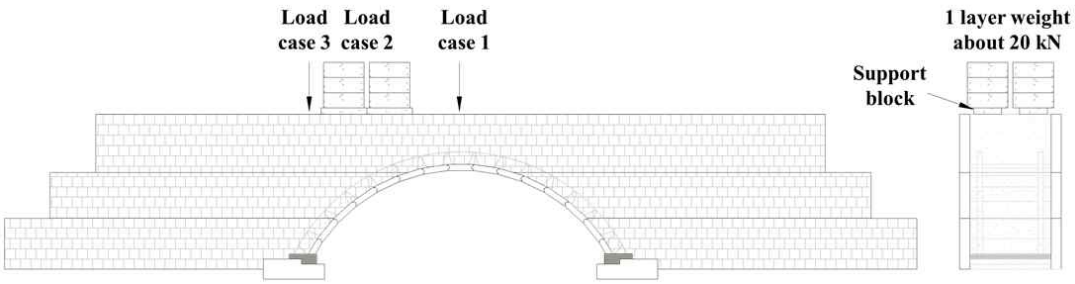


< 2단계 backfill 적용 - 변위 비교 >



< 3단계 backfill 적용 - 변위 비교 >

- (하중 재하 실험) 제안 지중아치 시스템의 상재 하중 효과에 따른 아치 거동 특성을 확인하기 위하여 하중 재하 실험을 실시하였음. 하중 효과는 아치 중앙부, 측면 중앙부, 지점부로 3 종류를 고려하였음. 각각의 하중위치에 계량된 콘크리트 블록을 활용하여 하중을 재하함으로써 하중재하 실험을 실시하였음. 아치 실험체에 적용된 하중 수준은 약 120kN이며, 하중 재하 과정에서 LVDT 및 스트레인 게이지를 통하여 변위 및 변형률을 측정하였음.

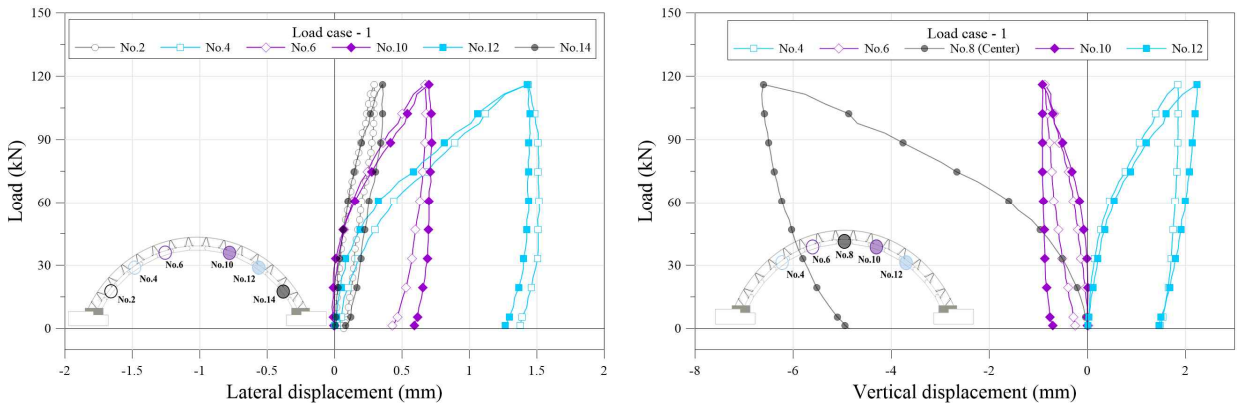


< 하중 재하 실험 방법 >

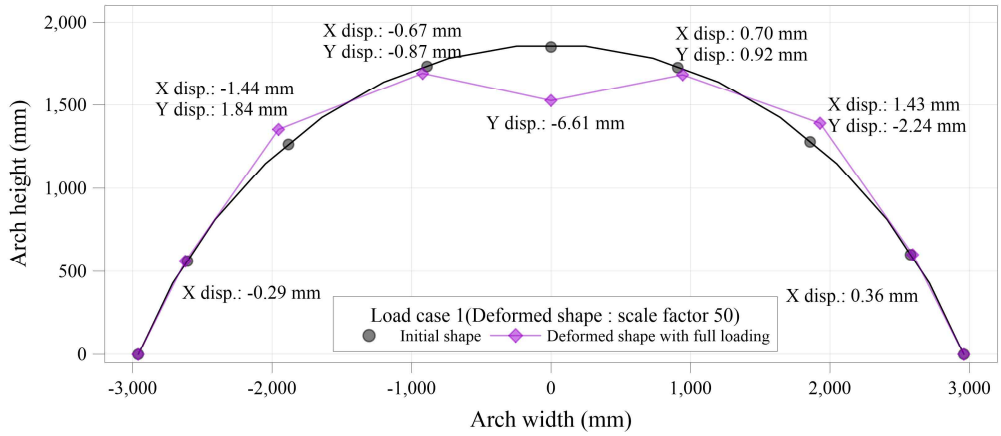




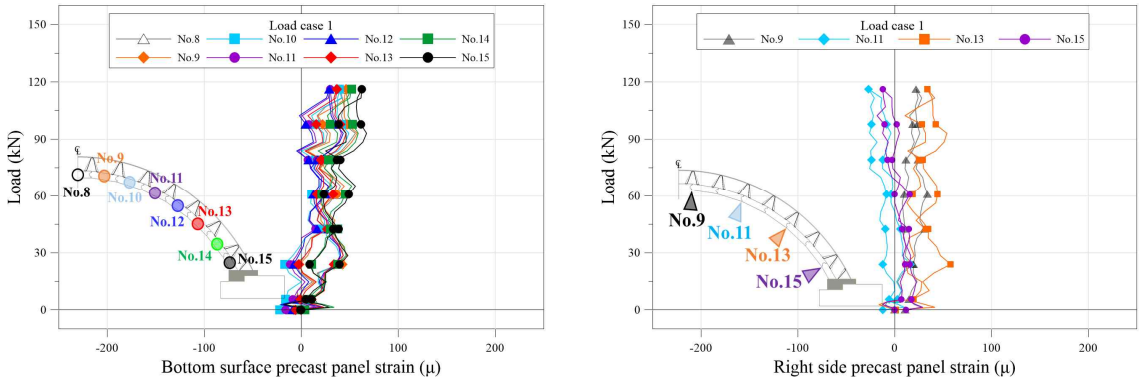
< 하중 재하 실험 모습 >



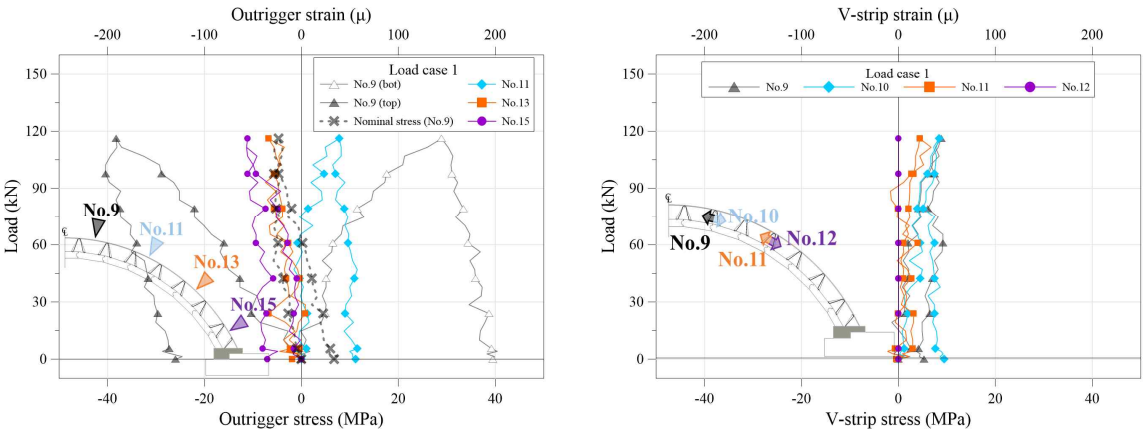
< Load case 1 - 수평 및 수직 변위 >



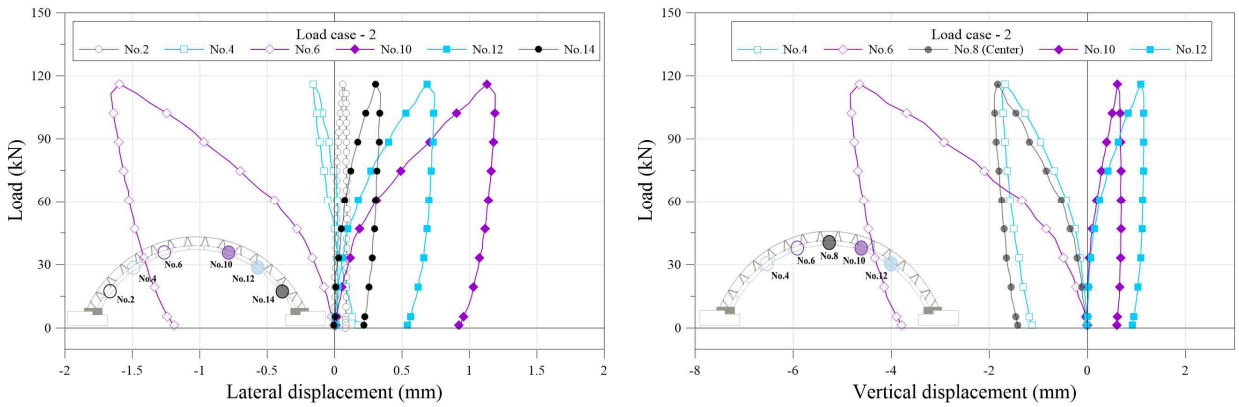
< Load case 1 - 변형 형상 (scale factor: 50) >



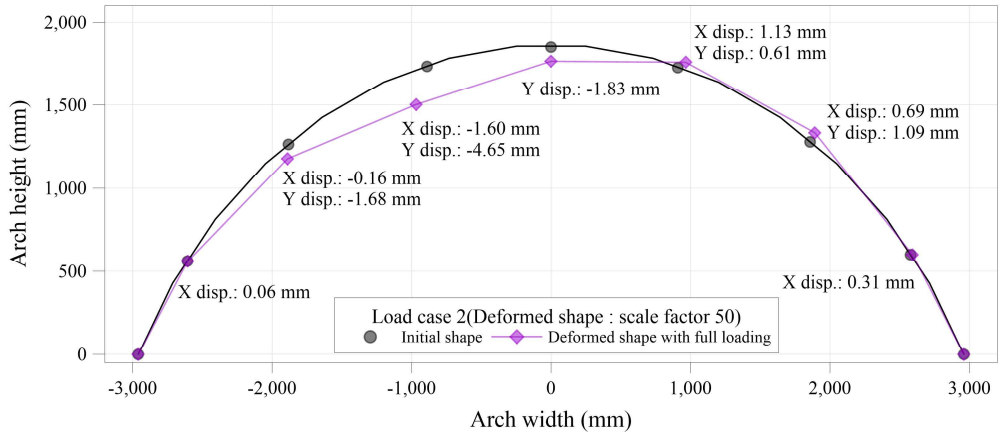
< Load case 1 - 프리캐스트 패널 변형률 >



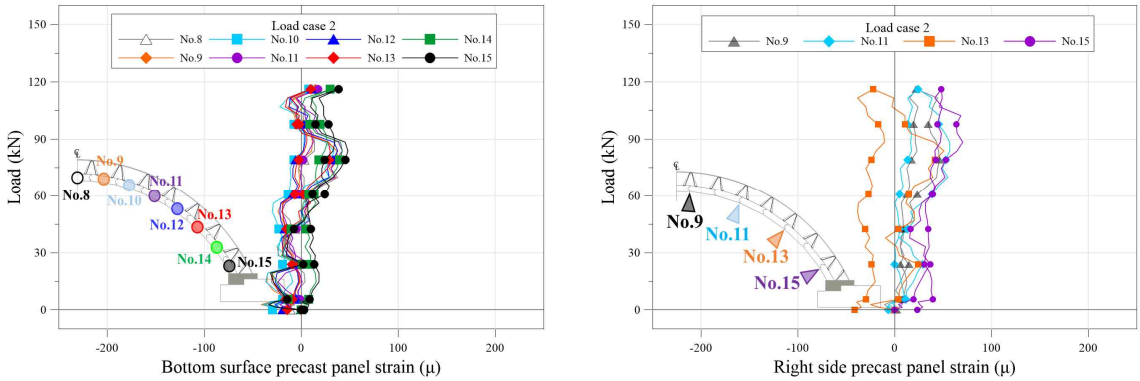
< Load case 1 - 아웃리거 및 V-strip 응력 >



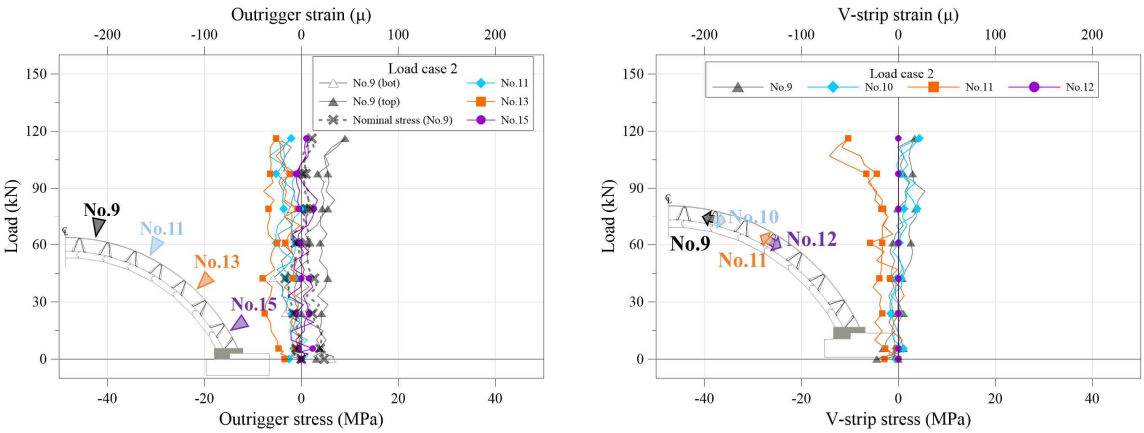
< Load case 2 - 수평 및 수직 변위 >



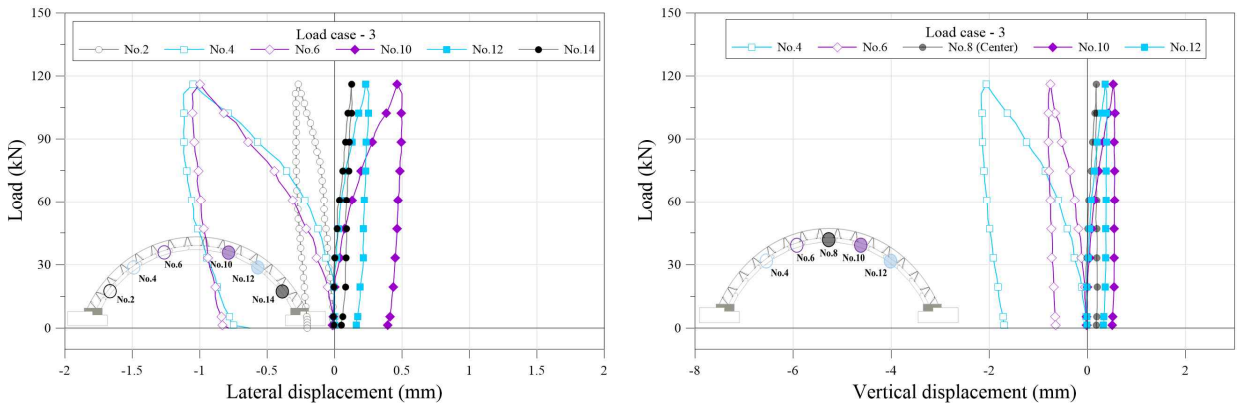
< Load case 2 - 변형 형상 (scale factor: 50) >



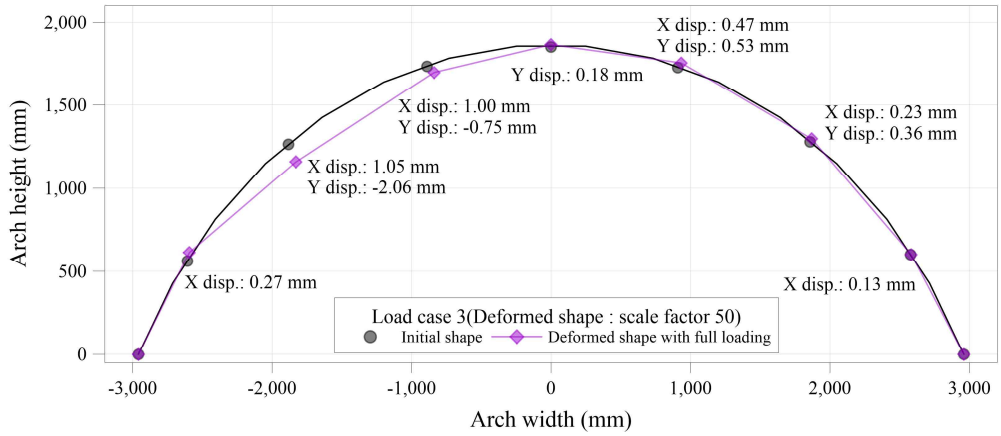
< Load case 2 - 프리캐스트 패널 변형률 >



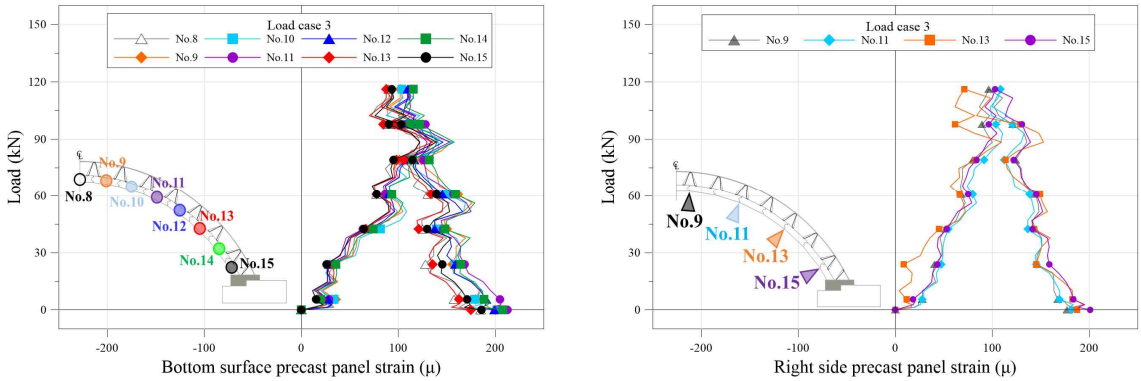
< Load case 2 - 아웃리거 및 V-strip 응력 >



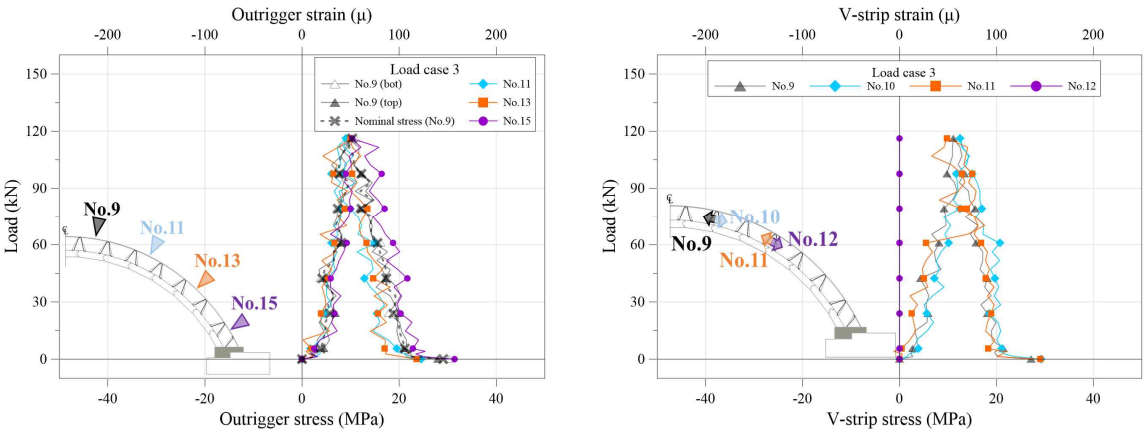
< Load case 3 - 수평 및 수직 변위 >



< Load case 3 - 변형 형상 (scale factor: 50) >

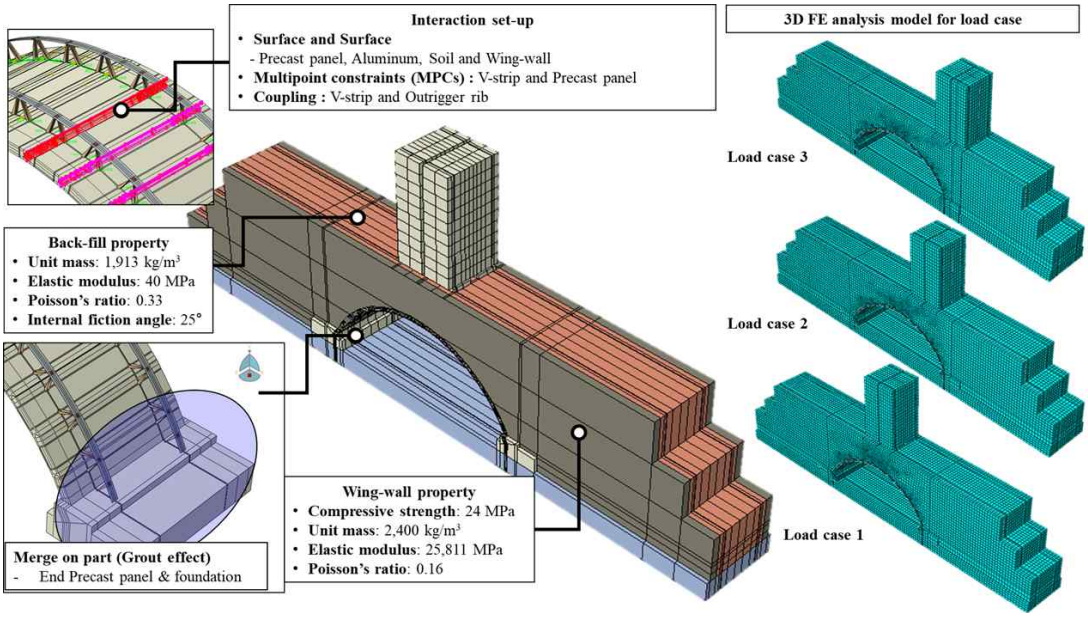


< Load case 3 - 프리캐스트 패널 변형률 >



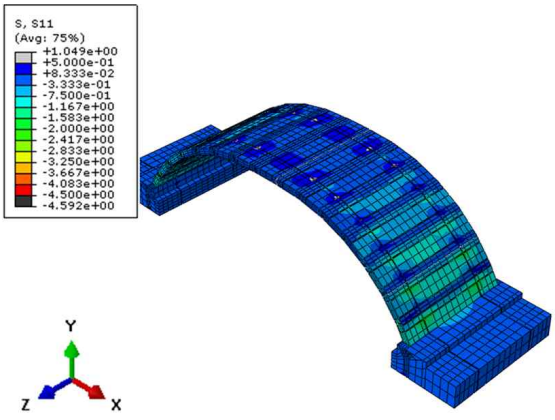
< Load case 3 - 아웃리거 및 V-strip 응력 >

- (하중 재하 실험체 구조해석) 제안 지중아치 시스템의 상재 하중 효과에 따른 아치 거동 특성 확인을 위하여 실시한 하중 재하 실험 결과를 검증하기 위하여 구조해석을 실시하였음. 하중 재하 실험체 구조해석에서는 현장 적용성 실험체 구조해석 모델과 재료 특성 및 접촉 및 경계 조건 등을 동일하게 적용하였음. 하중 조건의 경우 콘크리트 블록을 솔리드 요소로 모형화하여 자중을 적용하였음.

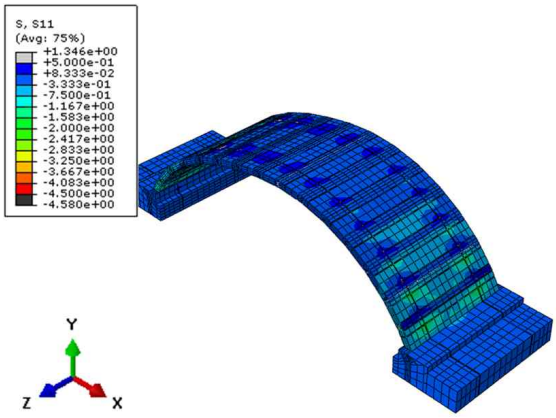


< 하중재하실험 유한요소 해석 모델 >

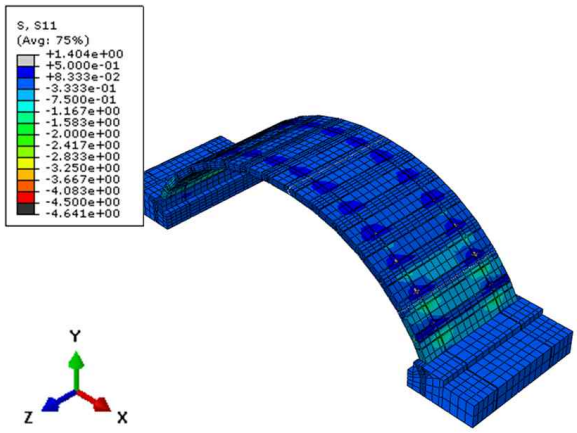
- (구조해석 결과) 프리캐스트 패널의 응력은 각각의 하중 재하 위치와 관계없이 5MPa 이내의 압축 응력이 발생하였음. 변형 형상 및 수평, 수직 변위 거동의 경우 실험 결과와 매우 유사한 수준의 거동을 나타내었음. 구조해석 결과의 경우 실험 결과와 비교하여 상대적으로 작은 수준으로 나타났으나, 하중 재하 단계에 따른 구조적인 거동이 매우 유사하게 나타나고 있는 것을 확인하여 실제 하중 재하 실험 결과의 유효성을 검증하였음.



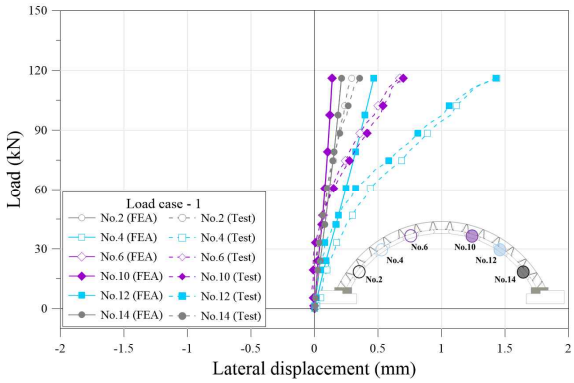
< Load case 1 - 응력 거동 >



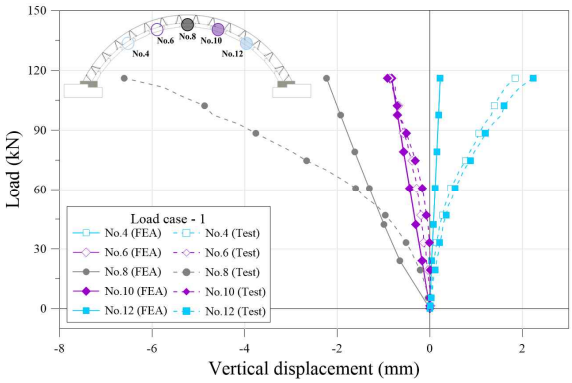
< Load case 2 - 응력 거동 >



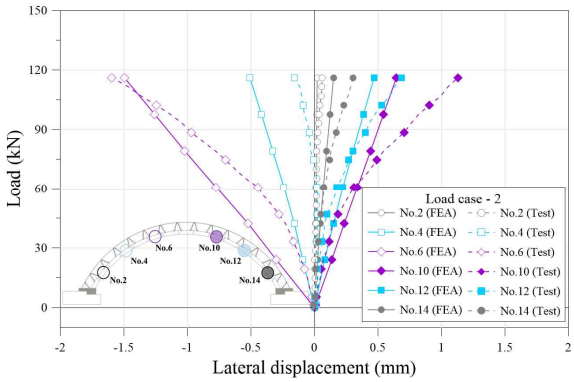
< Load case 3 - 응력 거동 >



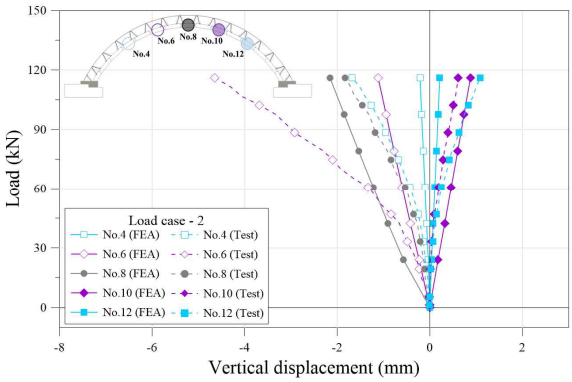
< Load case 1 - 수평 변위 >



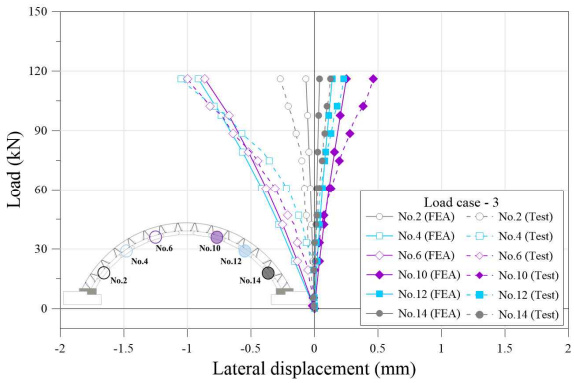
< Load case 1 - 수직 변위 >



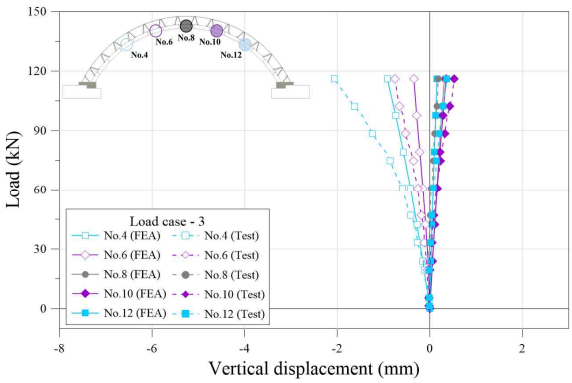
< Load case 2 - 수평 변위 >



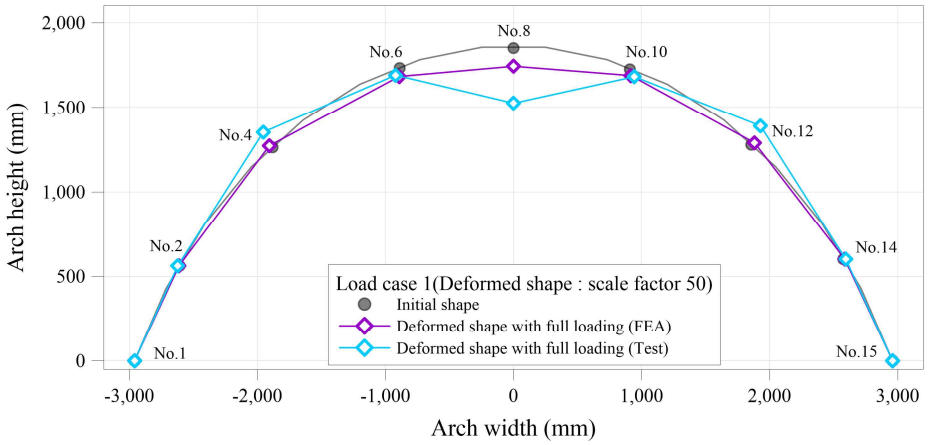
< Load case 2 - 수직 변위 >



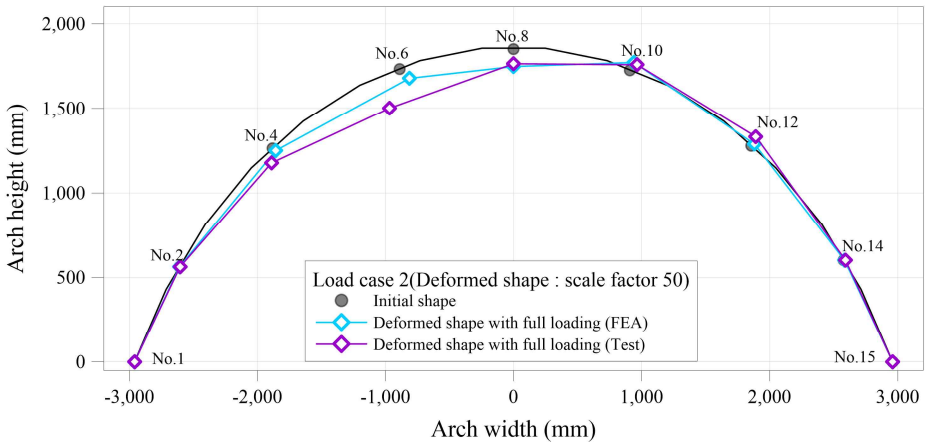
< Load case 3 - 수평 변위 >



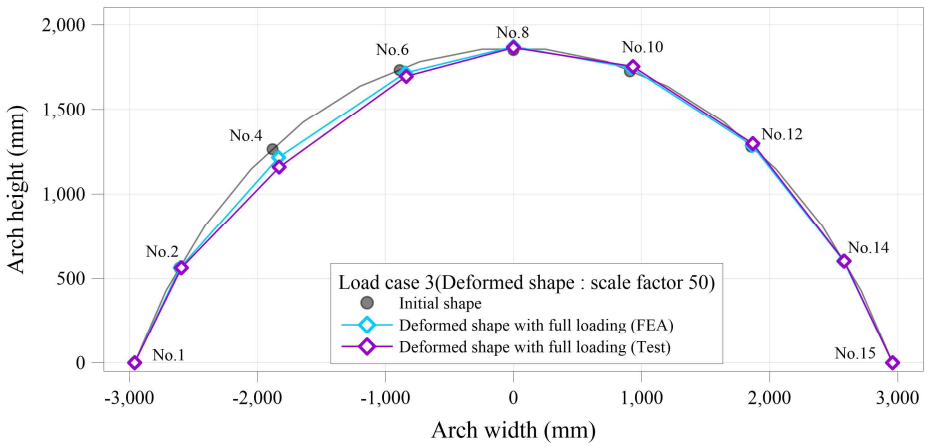
< Load case 3 - 수직 변위 >



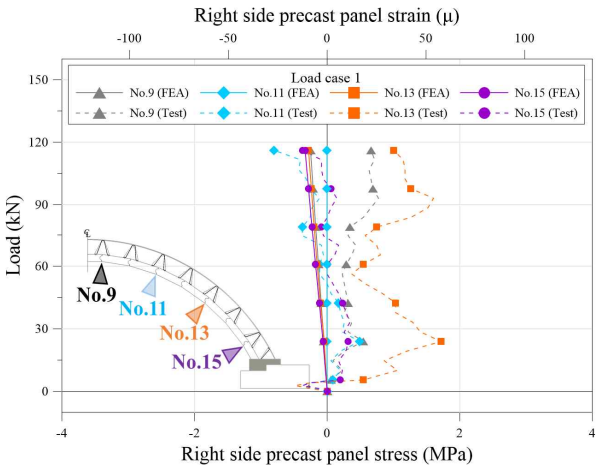
< Load case 1 - 변형 형상 및 변위 비교 >



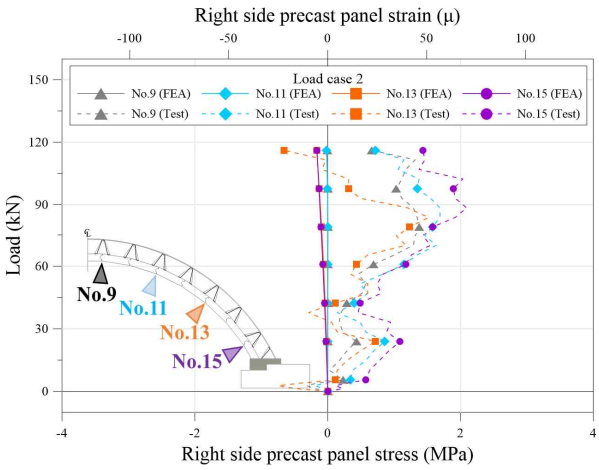
< Load case 2 - 변형 형상 및 변위 비교 >



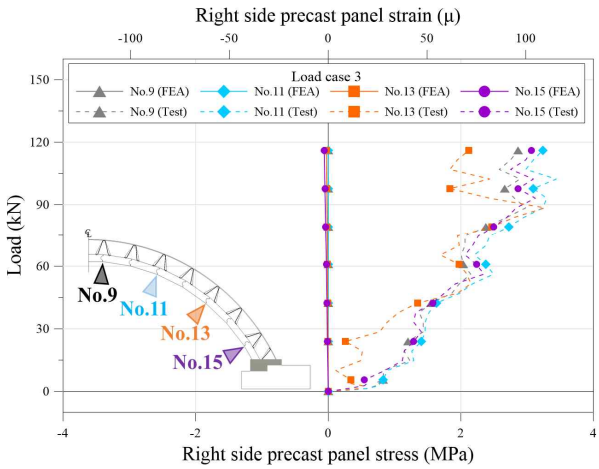
< Load case 3 - 변형 형상 및 변위 비교 >



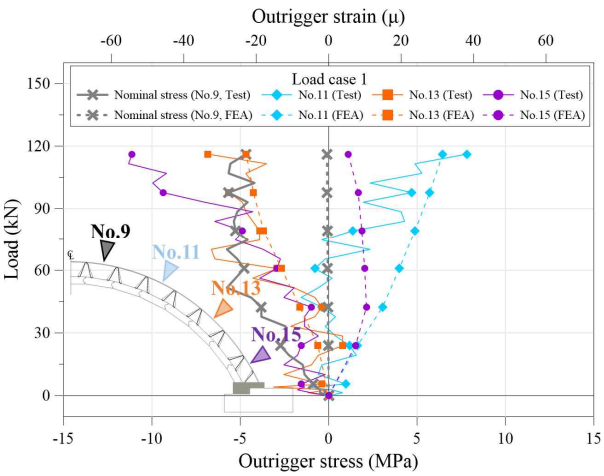
< Load case 1 - 패널 응력 비교 >



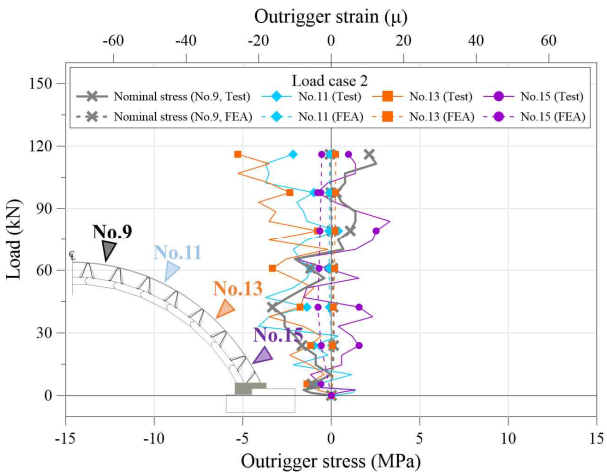
< Load case 2 - 패널 응력 비교 >



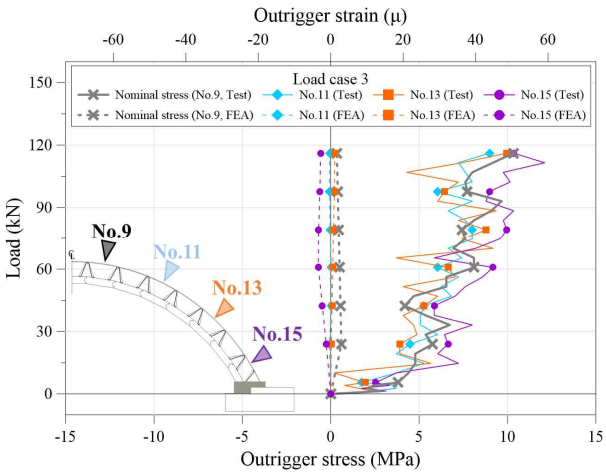
< Load case 3 - 패널 응력 비교 >



< Load case 1 - 아웃리거 응력 비교 >

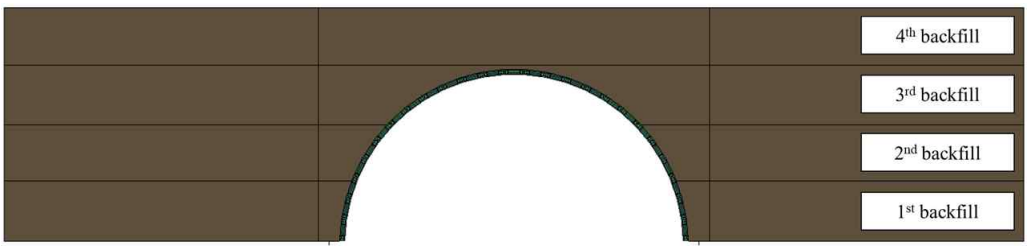


< Load case 2 - 아웃리거 응력 비교 >

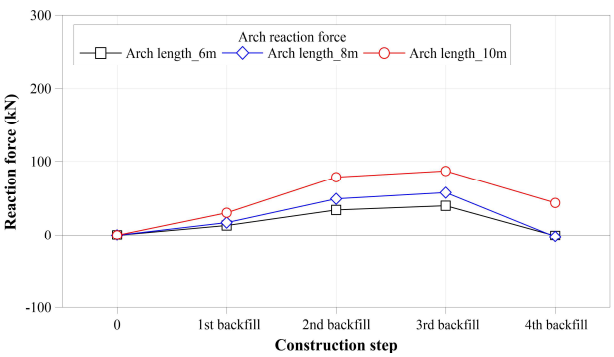


< Load case 3 - 아웃리거 응력 비교 >

- (타 형식 지중아치 구조물 작용토압 설계 관련자료를 통한 토압 발생 메커니즘 분석) 타 형식 지중아치 구조 설계 관련 자료 분석 결과, 작용 토압을 구조물 형상과 관계없이 해당 단면이 직사각형으로 채워져 있다고 가정하여 Rankin 토압 이론을 적용하였음. 하지만 아치 형상이 반영된 경우 Rankin 토압 이론과 작용 토압이 다르기 때문에 비교하는 것이 어려움. 개발 지중아치 구조에 작용하는 토압 발생 메커니즘을 확인하기 위하여 토압에 의해 발생하는 아치 시스템의 반력과 토체 단부에 발생하는 반력을 확인하여 토압 수준을 확인하였음. 토체 단부 반력의 경우 토체 높이의 증가에 따라 반력 수준이 증가하는 거동을 나타내었며, 아치 지점 반력의 경우 1, 2단계에서는 토체 단부 반력과 유사한 수준을 나타내고 있으나 3, 4단계에서는 연직 방향으로 작용하는 토체 자중에 따라 반력이 감소하는 거동을 나타내었음.



< 토압발생 메커니즘 분석을 위한 해석 모델 >

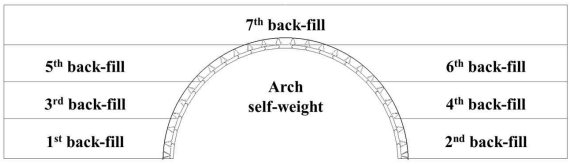


< 아치 지점 반력 >

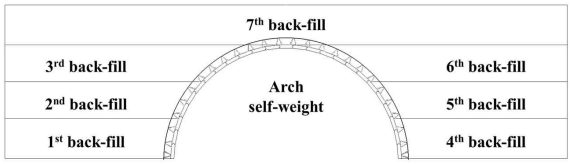


< 토체 단부 반력 >

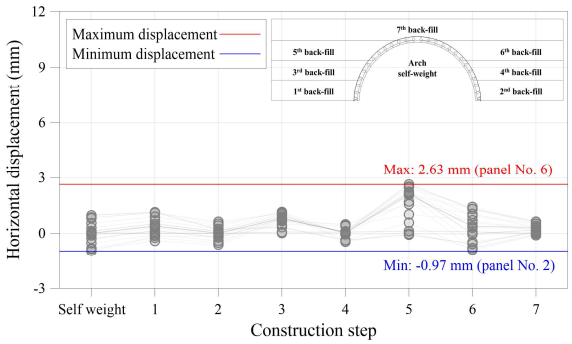
- (편토압 작용시의 구조적 안정 검토) 대상 아치 시스템에 편토압이 작용하였을 때 나타나는 거동 특성을 확인하기 위하여 시공순서를 2가지로 구분하여 각각의 시공순서에 따른 변형 상태를 확인하였음. 시공순서는 아치 좌, 우측에 번갈아 시공하는 시공순서 A와 아치 좌측에 우선 시공 이후 우측을 시공하는 시공순서 B로 구분하여 유한요소 해석을 실시하였음. 유한요소 해석에서는 흙의 불확실한 재료 특성에 따라 흙의 탄성계수를 변화시켜 각각의 변위 결과를 확인하고 최대 변위가 발생한 조건에 대하여 구조적 안정을 검토하였음. 유한요소 해석에 적용된 흙의 탄성계수는 10, 20, 40MPa로 변화하였으며, 흙의 탄성계수가 작아짐에 따라 아치 거동의 변형이 상대적으로 크게 나타나는 것을 확인하였음. 모든 조건에서 최대 수평 및 수직 변위가 각각 9.6mm, 4.6mm로 상대적으로 작은 수준의 변위가 발생하는 것을 확인하였음. 하지만 편토압이 크게 작용하는 시공순서 B의 경우 실제 시공에서는 성토 이후 다짐으로 인하여 변위가 더 크게 발생할 수 있으며, 다짐 이후 우측 성토 시 이미 발생한 변형이 회복되지 않을 수 있음. 따라서, 편토압이 작용하더라도 발생하는 변위가 크지 않으므로 구조적으로 안정성을 확보하고 있음을 확인하였음. 하지만, 실제 시공에서는 흙의 다짐 효과 등으로 인하여 편토압에 의한 변형이 크게 발생할 수 있으므로 편토압이 최소한으로 발생할 수 있도록 양측의 균형을 맞추어 시공하는 방법을 적용하는 것이 구조적으로 안정적일 것으로 판단됨.



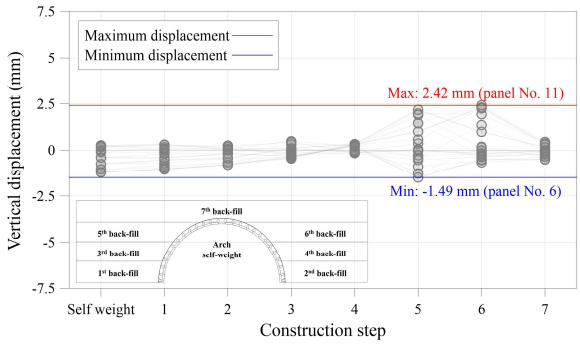
< 시공순서 A >



< 시공순서 B >

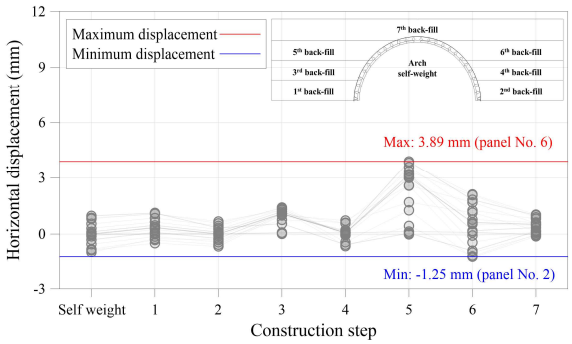


(a) 수평 변위

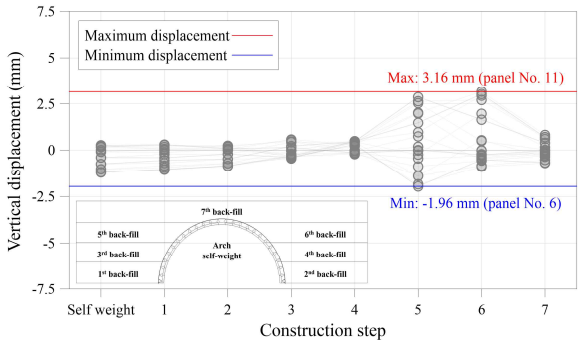


(b) 수직 변위

< 시공순서 A (흙의 탄성계수 40MPa) >

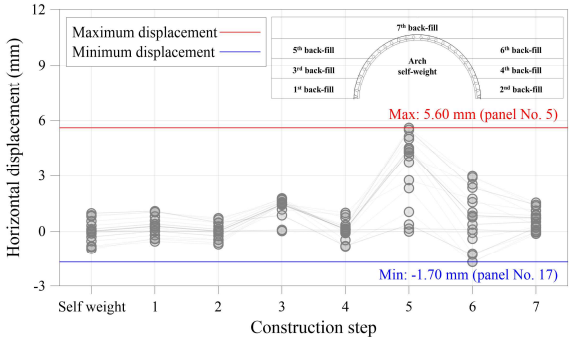


(a) 수평 변위

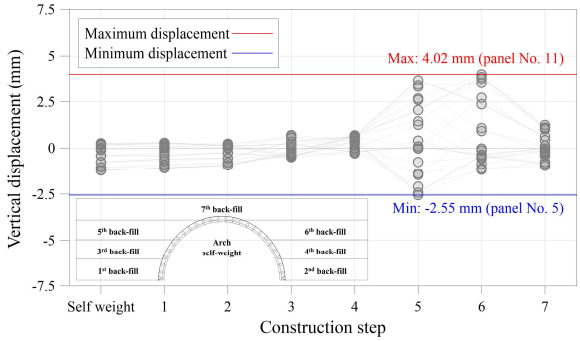


(b) 수직 변위

< 시공순서 A (흙의 탄성계수 20MPa) >

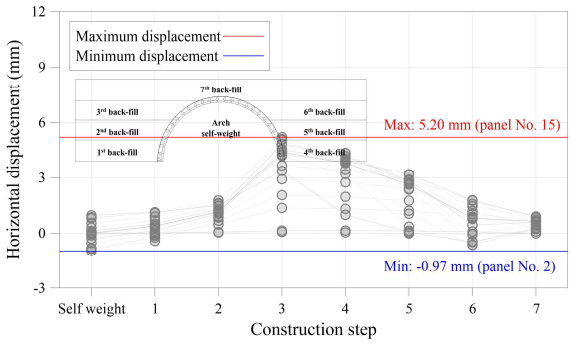


(a) 수평 변위

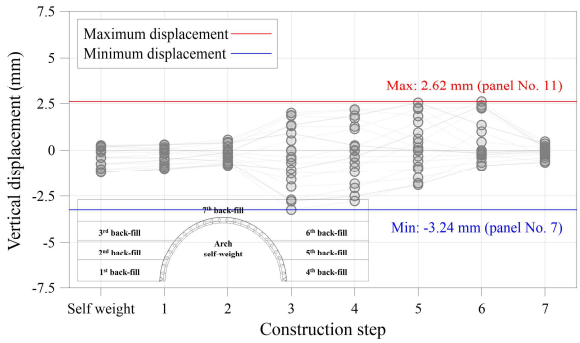


(b) 수직 변위

< 시공순서 A (흙의 탄성계수 10MPa) >

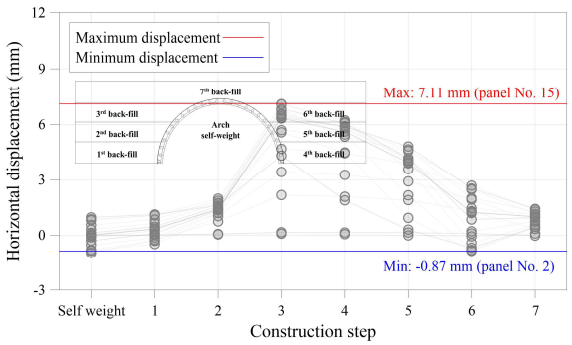


(a) 수평 변위

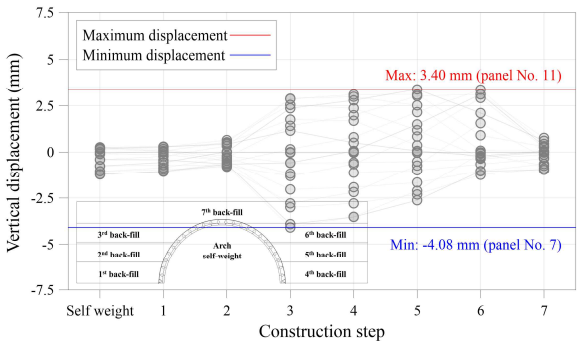


(b) 수직 변위

< 시공순서 B (흙의 탄성계수 40MPa) >

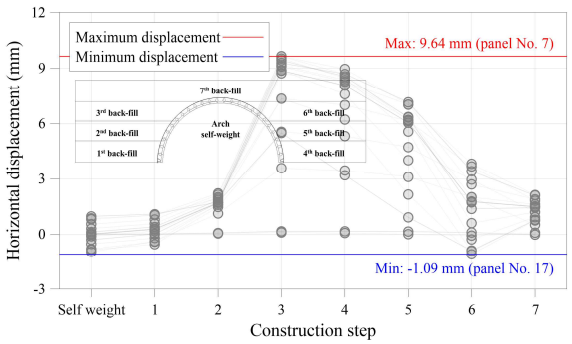


(a) 수평 변위

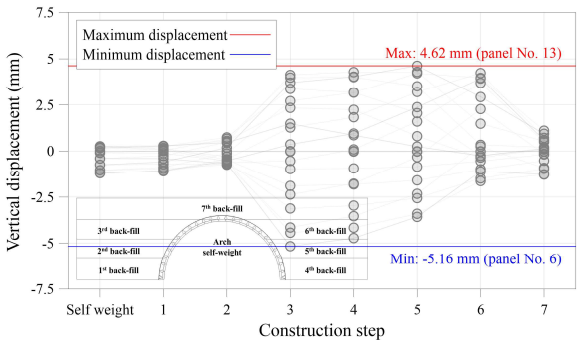


(b) 수직 변위

< 시공순서 B (흙의 탄성계수 20MPa) >



(a) 수평 변위

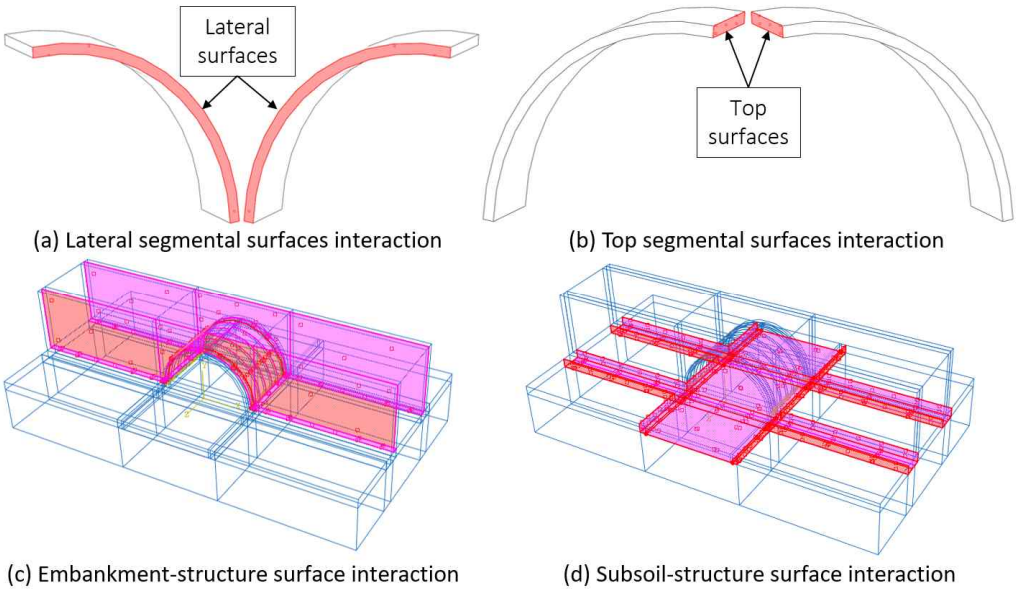


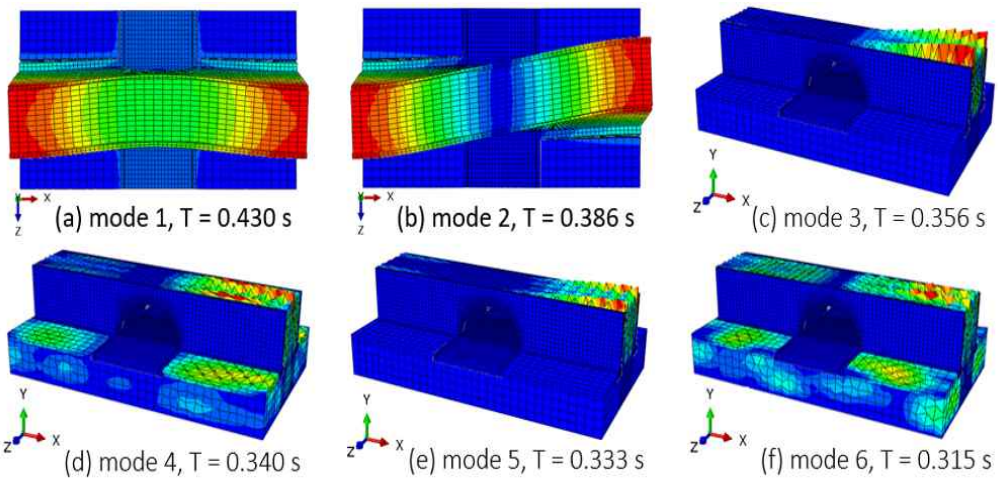
(b) 수직 변위

< 시공순서 B (흙의 탄성계수 10MPa) >

1.2 지중아치 구조 지반-구조물 거동 및 동적저항 안전성 평가 (핵심2)

○ (개요) 제안된 지중아치 구조물은 강재 스트립과 프리캐스트 콘크리트 블록을 활용하며 성토지반과의 연계작용을 통하여 효과적이고 우수한 구조성능이 확보되는 구조물이나, 동적응답에 대한 연구가 많이 이루어지지 않은 새롭고 혁신적인 구조임. 이 연구에서는 지반-구조물 상호작용(SSI)효과를 고려한 동적거동 분석을 통하여 지반으로부터 구조체로 전달되는 하중에 의한 구조체의 거동뿐만 아니라 구조체의 거동으로부터 유발되는 지반의 상호작용을 함께 고려한 지진안전성에 대한 평가를 수행하였음.

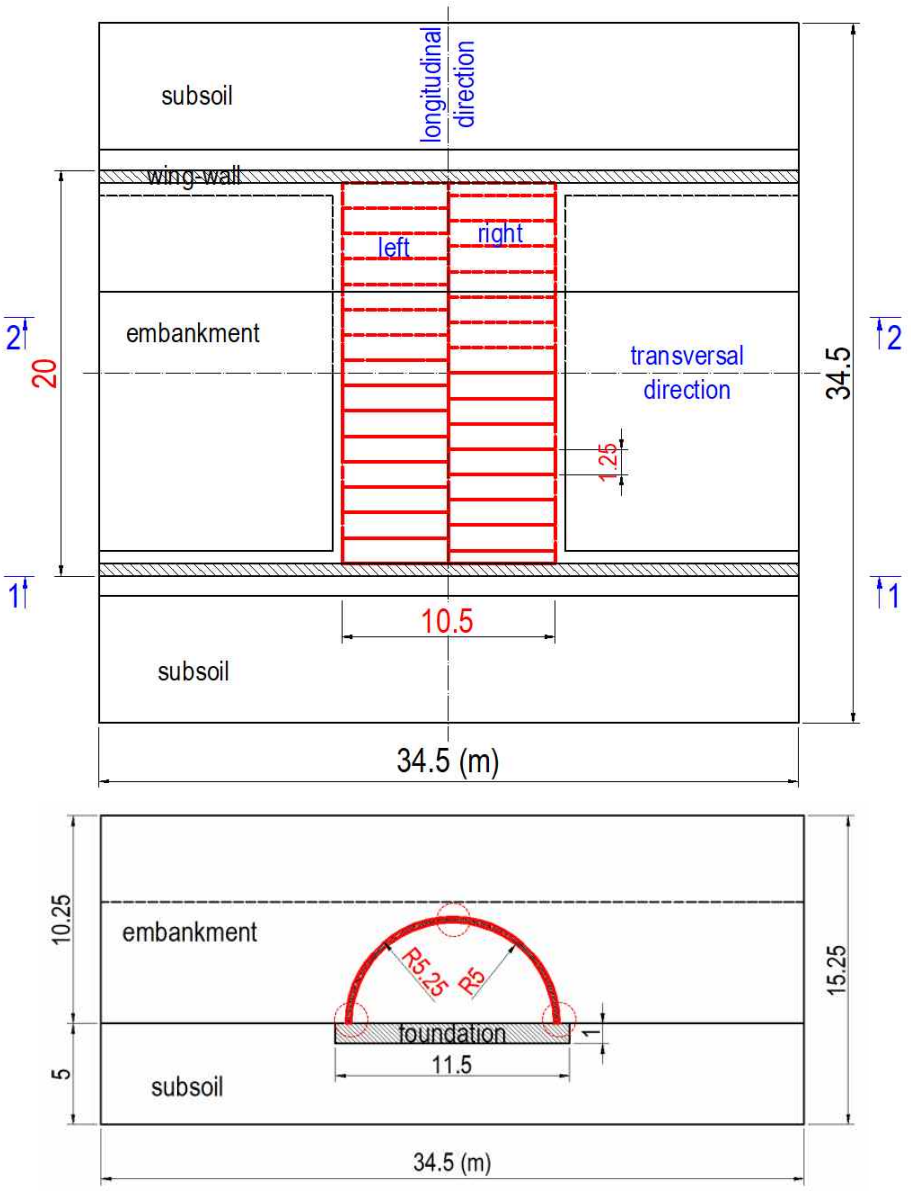




○ (단위성과 B-1) 프리캐스트 콘크리트 블록과 지반의 엄밀 상호작용해석 수치모델 작성/검토

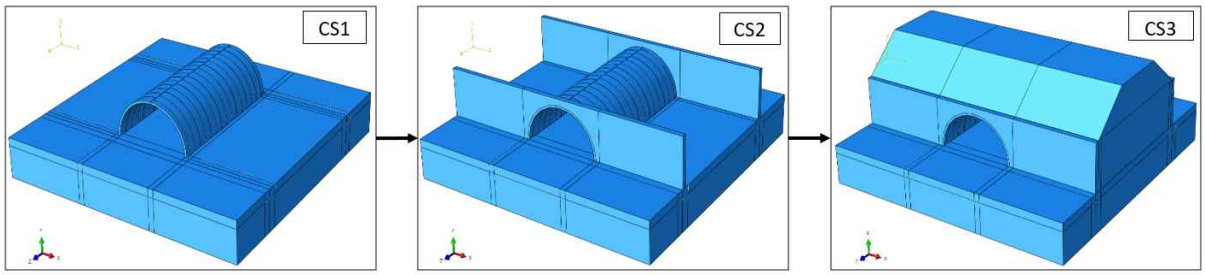
1) 모듈형 지중아치 구조 동적해석 방법 및 동적해석 모델 검토

- 모듈형 라이닝 지중아치 구조물에서 발생하는 균열 현상의 수치해석적 검증을 위한 유한요소 모델 정립
  - 제안된 아치 구조물의 수치해석 적용에 앞서, 지반-구조물 상호해석(soil-structure interaction analysis)의 검증을 위한 모델 정립
  - 기존 연구에서 검증된 모델을 대상으로 수치해석 모델 작성(ABAQUS 이용)
  - 기존 연구 결과 대비 내용 분석



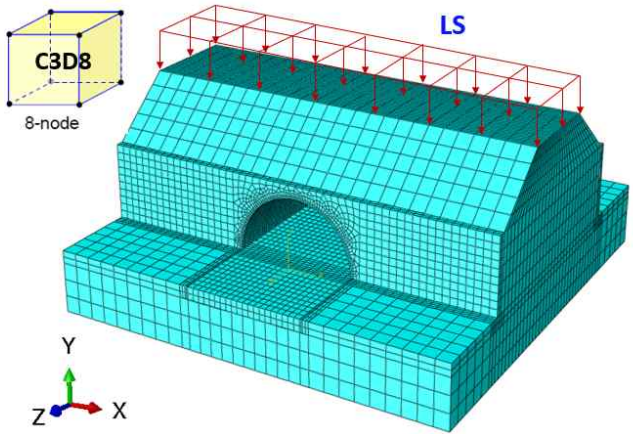
<지반-구조물 상호해석의 검증을 위한 모델 설정>

● 모듈형 라이닝 지중아치 구조물의 시공 단계별 모델 작성
- 제안된 아치 구조물과 유사하도록 ① 라이닝 구조물 설치, ② 격벽 설치, ③ 상재토 매립의 단계로 설정하여 구조해석 수행
- 각 재료 특성 및 기본 제원을 기존 연구와의 비교 검증을 위하여 동일하거나 유사하도록 설정(기존 연구에서 제공되지 않는 값에 대해서는 참고문헌에 기초하여 합리적인 입력값을 적용)



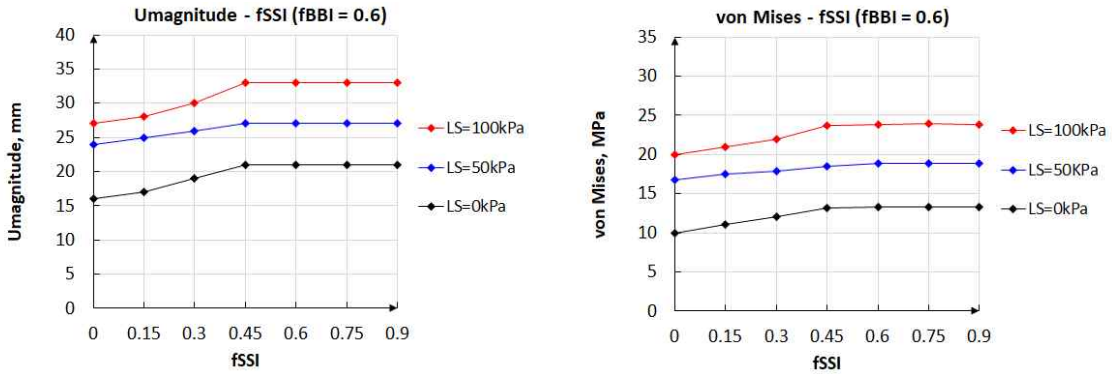
<시공 단계별 해석 모델 작성 ① 라이닝 구조물 설치, ② 격벽 설치, ③ 상재토 성토>

● 정적하중 하에서의 모듈 라이닝의 충격 영향 평가 : 변형 및 응력
- 하중 범위 0~100kPa에서 자중과 상재토 중량 및 이동하중에 따른 X방향, Z방향의 변위 검토
- 세그먼트 간에 발생하는 상호작용(Block-Block interaction, BBI)과 상재토와 모듈형 라이닝 구조물과의 접촉(Soil-Structure interaction, SSI)으로 구분



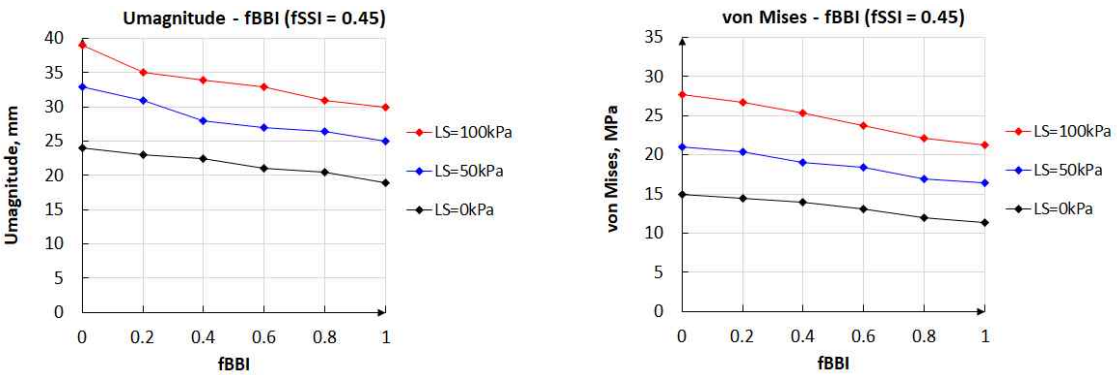
<충격 영향 평가를 위한 수치해석 모델 및 상재압>

● 지반-구조물 간의 마찰계수에 따른 영향 분석
- 지반-구조물 상호작용 마찰계수(fSSI) : 마찰계수 0~0.45구간에서 하중 크기(LS)와 관계없이 전체변위가 증가하는 양상을 보이나 0.45부터는 일정한 값을 나타내는 것으로 확인됨
- 응력 변화도 변위와 동일한 양상으로, fSSI 0.45 이상에서 변화가 없는 것으로 확인



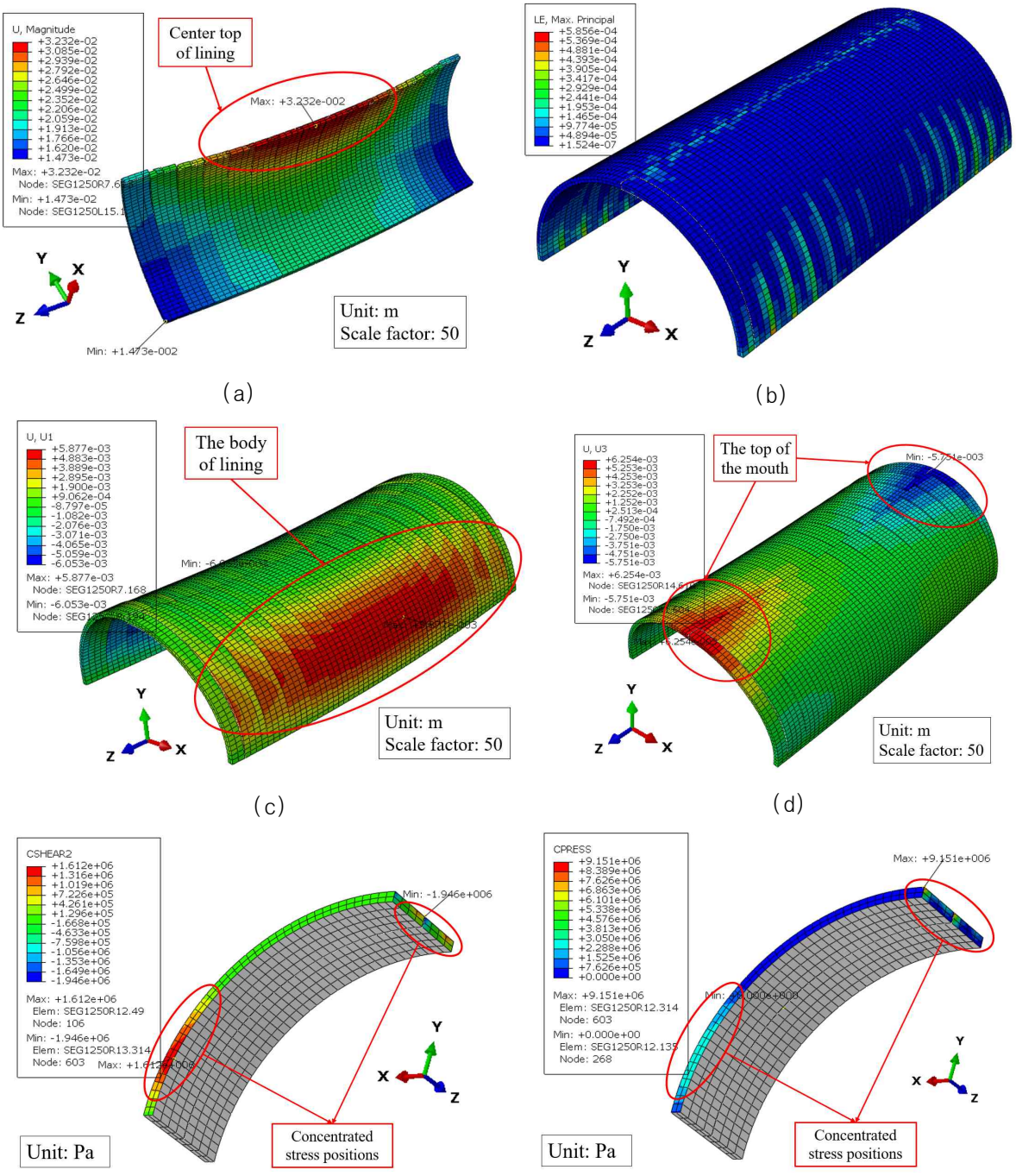
(a) (b)
<지반-구조물 상호작용 마찰계수(fSSI)에 따른: (a)변위, (b) 응력>

● 블록-블록 간의 마찰계수에 따른 영향 분석
- 블록-블록 상호작용 마찰계수(fBBI) : 하중크기(LS)에 관계없이 마찰계수가 커질수록 변위 및 응력이 감소하는 것을 확인



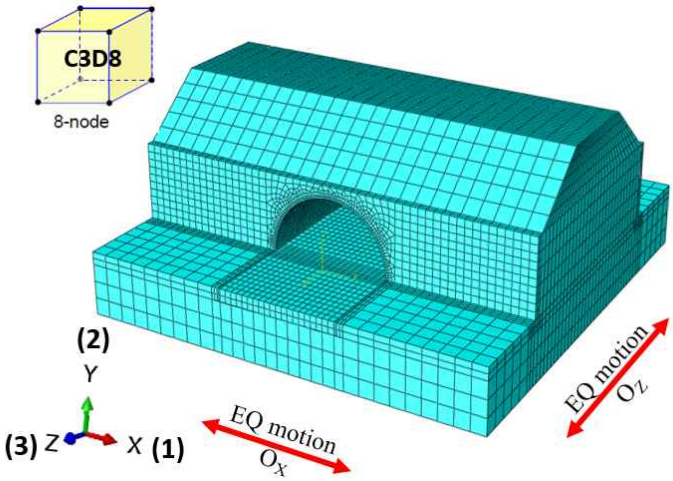
(a) (b)
<블록-블록 상호작용 마찰계수(fBBI)에 따른: (a)변위, (b) 응력>

● 모듈형 지중아치 구조물의 변위 형상
- 일반적으로 라이닝은 중앙 상단에서 가장 큰 변위가 관찰됨
- X방향 변형은 라이닝 구조물의 중심에서 크게 발생하고, Z방향 변형은 라이닝 구조물의 입구 상단에서 최대값을 나타냄
- 전반적으로 가장 큰 변위는 각 블록 세그먼트 사이의 접촉면에 집중되며 최대 응력은 라이닝 하단 영역에서 확인됨
- 세그먼트의 측면과 상단표면에서 발생하는 마찰전단응력의 증가는 세그먼트 가장자리에서 균열을 발생시킬 수 있을 수준으로 확인



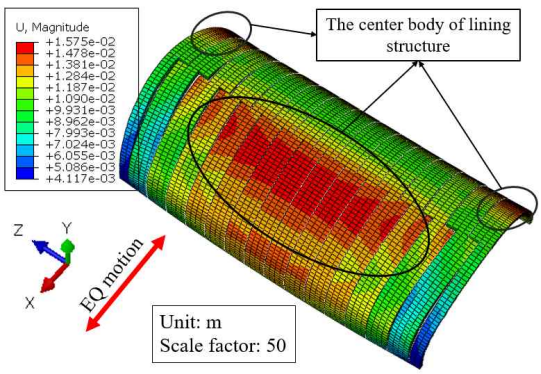
<모듈형 지중아치 구조물의 전체 변위 양상:(a) X방향 변위, (b) 변형율, (c) X방향 변위, (d) Z방향 변위, (e) 마찰전단응력, (f) 접촉압력 (fSSI=0.45, fBBI=0.6)>

● 지진하중 적용시 모듈형 지중아치 구조물의 거동
- 지진하중 적용 모델은 기존 모델과 동일하되 측면의 변위를 제한하였음
- 적용하중은 자중 및 PGA 0.4g인 지진하중(경주지진)을 적용함
- Z방향 가진 Case 1과 X방향 가진 Case 2로 구분하여 적용하였음
- fSSI 및 fBBI는 각각 0.6, 0.45를 적용하였음

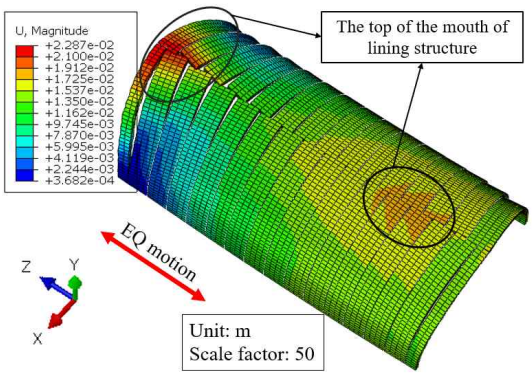


<지진하중시 거동 평가를 위한 수치해석 모델 및 가진방향>

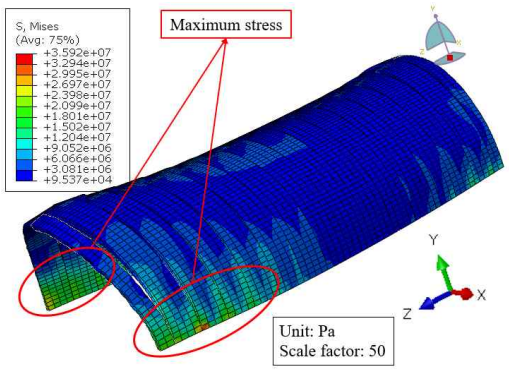
● 모듈식 지중아치 구조물의 수치해석을 통한 지진시 거동 분석
- 최대 변위는 Z방향 가진시의 아치 입구 상단에서 발생하는 것으로 확인
- X(구조물 횡단)방향 가진시에도 라이닝 중간 구조물 주변에서 가장 큰 변위가 확인되었으나 유의미할 정도로 크지는 않음
- 최대응력은 블록의 가장자리 영역에서 확인되었으며, 전반적으로 Z방향 가진시의 응력이 X방향 가진시 대비 큰 응력발생을 확인하였음



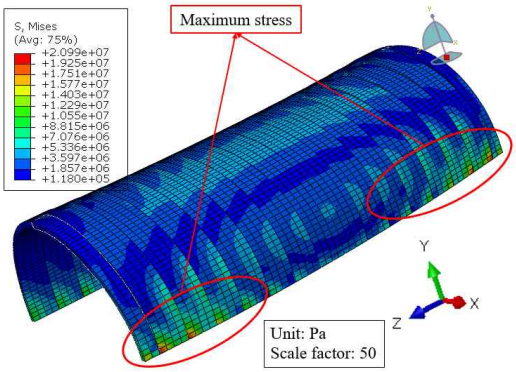
(a)



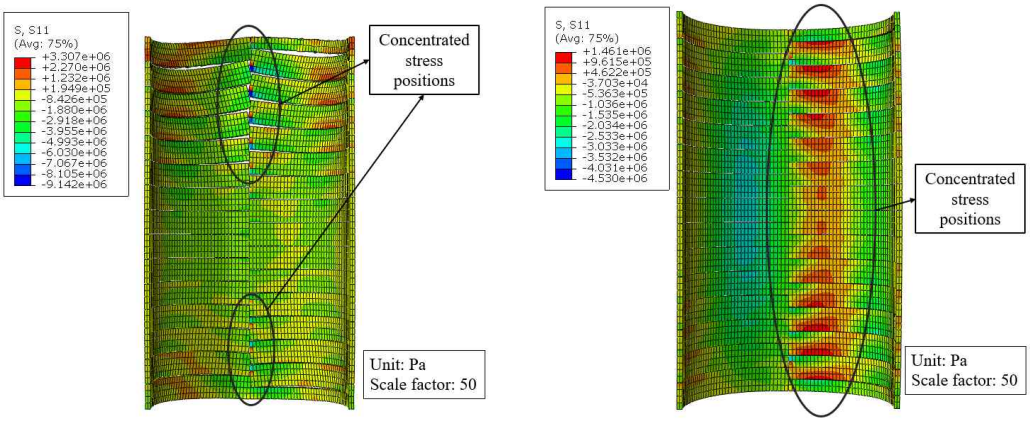
(b)



(c)



(d)



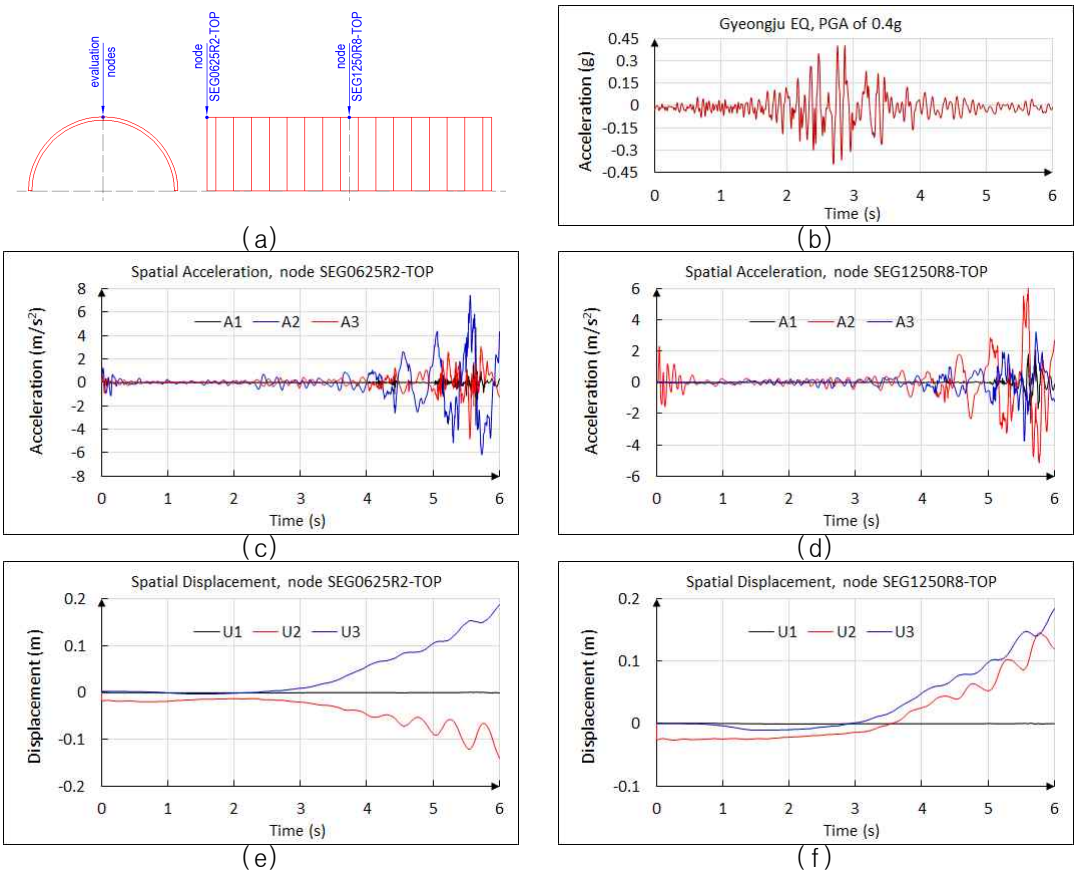
(e) (f)

<모듈형 지중아치 구조물의 지진시 거동 :(a) 변위-Case1, (b) 변위-Case2, (c) 응력-Case1, (d) 응력-Case2, (e) x방향응력-Case1, (f) x방향응력-Case2 (fSSI=0.45, fBBI=0.6)>

2) 모듈형 지중아치 구조물의 동적저항 성능

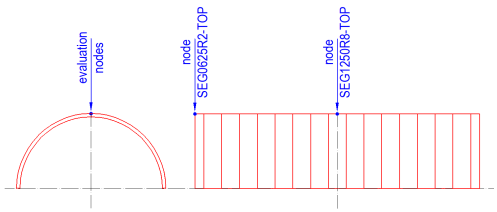
● 모듈식 지중아치 구조물의 시간이력해석(Time-history analysis) 결과

- Z(구조물 종방향)방향 가진시의 시간이력 해석 결과는 아래와 같음
- 입력가진의 위상과 변위응답의 위상사이에 차이가 있음을 확인하였으며, 입력 PGA 대비 응답가속도 값이 더 크게 나오는 것을 확인함
- X방향 가진시에도 전반적으로 비슷한 양상이 나타나는 것으로 확인함. 단, X방향 가진시에는 입력 PGA대비 응답가속도가 작은 값을 나타냄

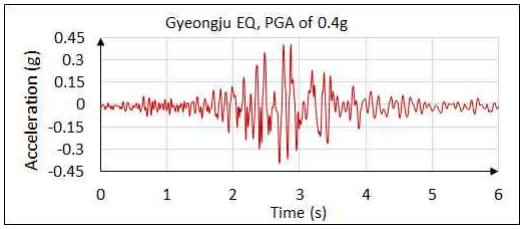


(a) (b) (c) (d) (e) (f)

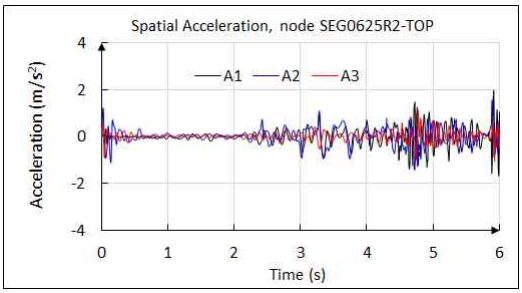
<시간이력해석 결과 : (a)비교지점, (b)입력가속도, (c)입구부 위상차, (d)중앙부 위상차, (e)입구부 잔류변위 (f)중앙부 잔류변위>



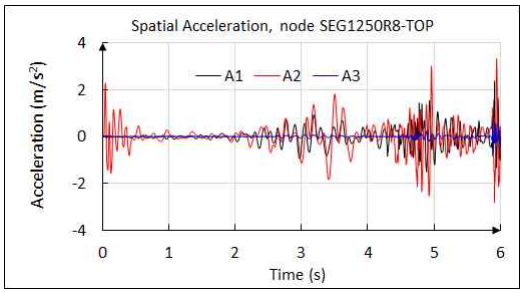
(a)



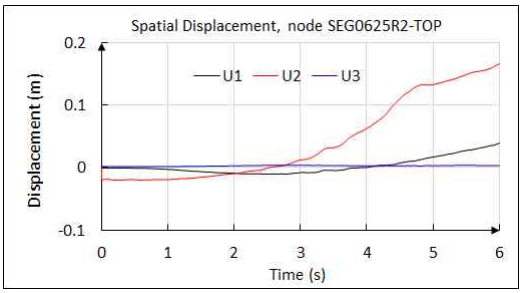
(b)



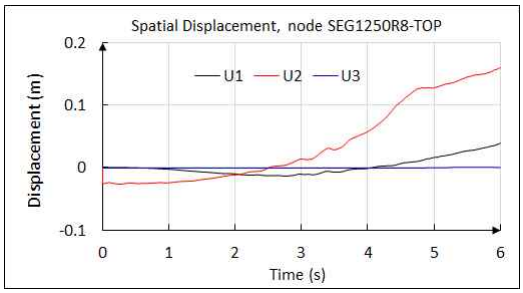
(c)



(d)



(e)



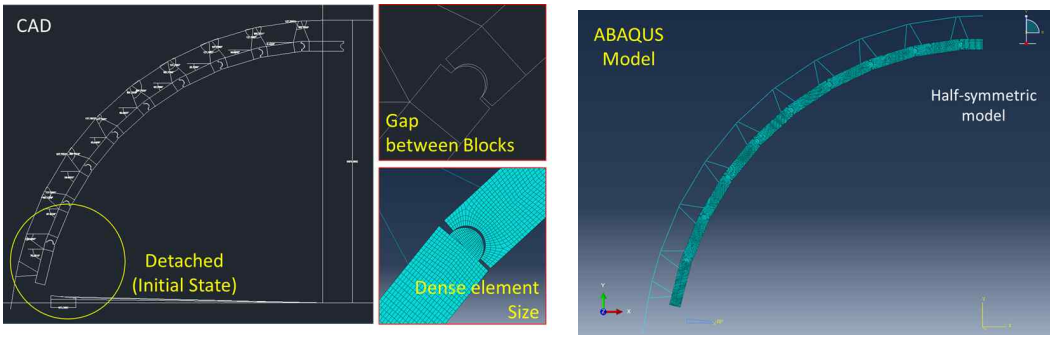
(f)

<시간이력해석 결과 : (a)비교지점, (b)입력가속도, (c)입구부 위상차, (d)중앙부 위상차, (e)입구부 잔류변위 (f)중앙부 잔류변위>

○ (단위성과 B-2) 지진응답해석 수치모델의 적용성 검토 및 결과 비교분석

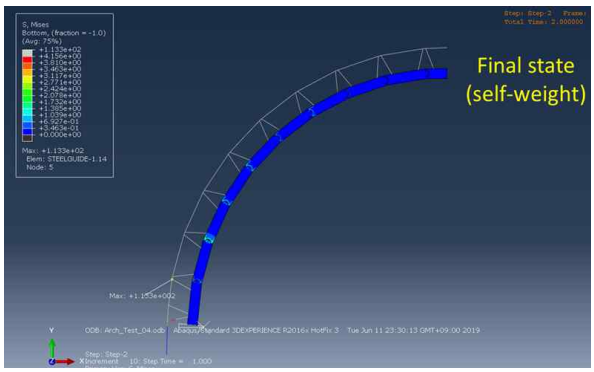
● 모듈식 지중아치 구조물의 해석모델 개발
- 상당한 양(수천 회 이상)의 수치해석이 필요할 수 있는 취약도(또는 신뢰성)해석 적용을 위해 간략화된 모델로의 변환이 요구됨 - 계산상의 효율성 확보
- 3차원 상세 모델과의 비교분석을 통하여 유사한 거동을 하도록 설정할 필요가 있음
- 모듈식 지중아치 구조물의 설치과정 및 상재토압 작용시의 거동에 대한 모델의 검증

● 모듈식 지중아치 구조물의 거치시 발생하는 블록간 압력 및 마찰계수 설정 모델 작성
- 모듈식 지중아치 구조물의 거치시 각 블록사이의 볼록면과 오목면의 거동 분석
- 거치 직전 접합면 사이 틈(Gap)을 적용하고 거치단계에서 압력 확인

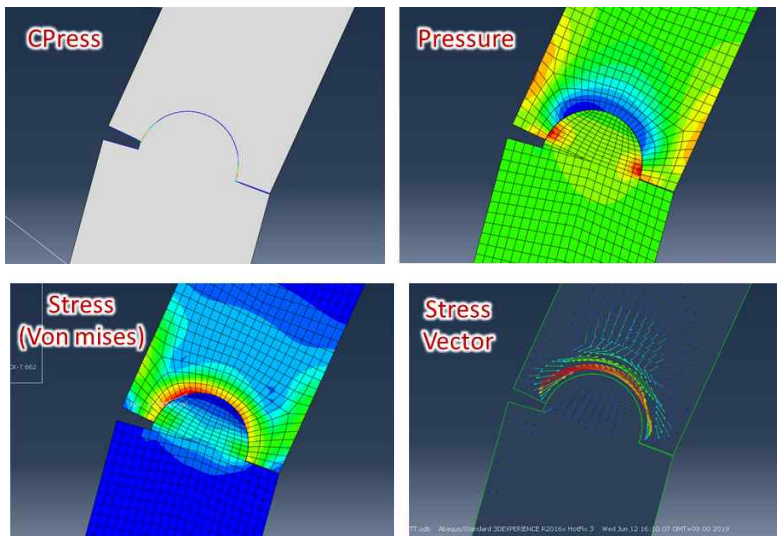


<모듈식 지중아치 구조물의 거치 직전상황 및 각 블록간의 틈 모델>

● 거치 및 자중 적용시 발생하는 거동 분석 결과
- 볼록면과 오목면 사이에서 일정 압력이 발생하는 것을 확인하였으며 일부 응력이 콘크리트의 인장강도를 벗어나는 것을 확인함 → 설계상 고려가 요구됨

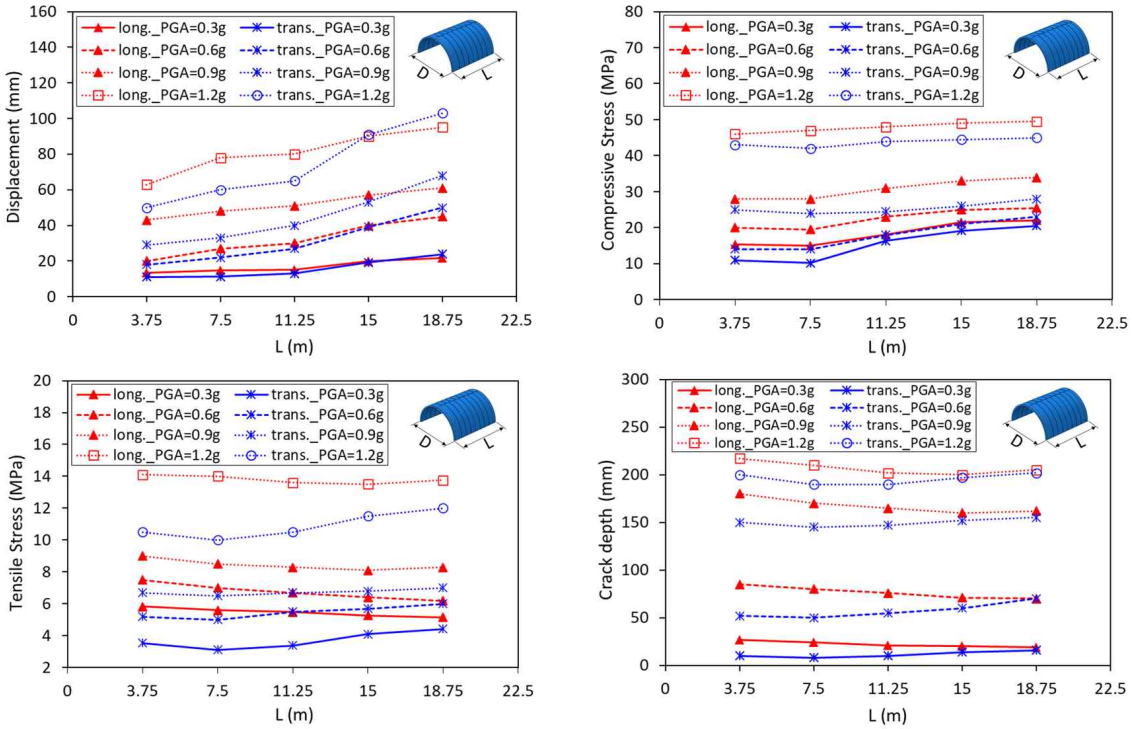


<거치 완료시 응력 상태(Von-Mises)>

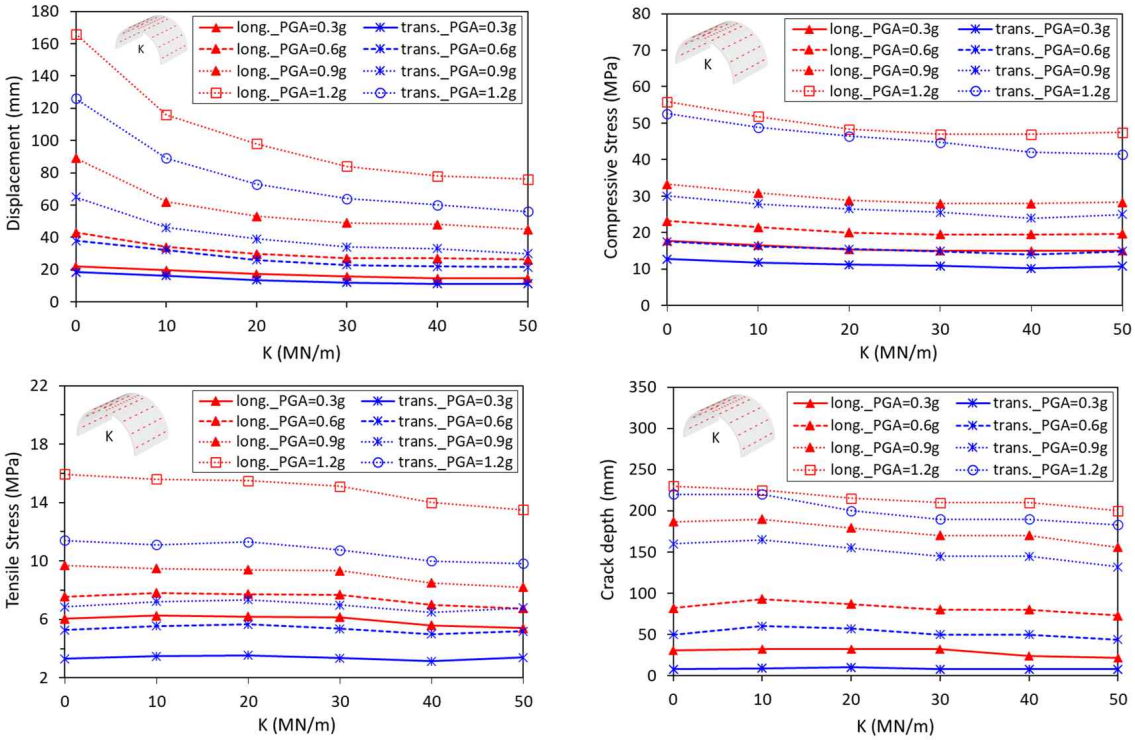


<볼록부 오목부 사이에 발생하는 압력 및 응력>

● 모듈식 지중아치구조의 지진응답에 대한 매개변수(아치길이 및 철근강성)연구
- 매개변수 연구 결과 지중아치구조의 지진거동은 PGA와 지반운동 방향에 따라 의존함
- 아래와 같이 프리스트레스트 철근의 아치 길이와 강성의 분산에도 민감하게 반응함
- 종방향 아치의 내진 저항은 가로방향 아치의 내진저항보다 큼
- 프리스트레스트 철근의 강성이 세그먼트 구성요소에 미치는 영향은 지반운동 방향과 PGA에 크게 의존

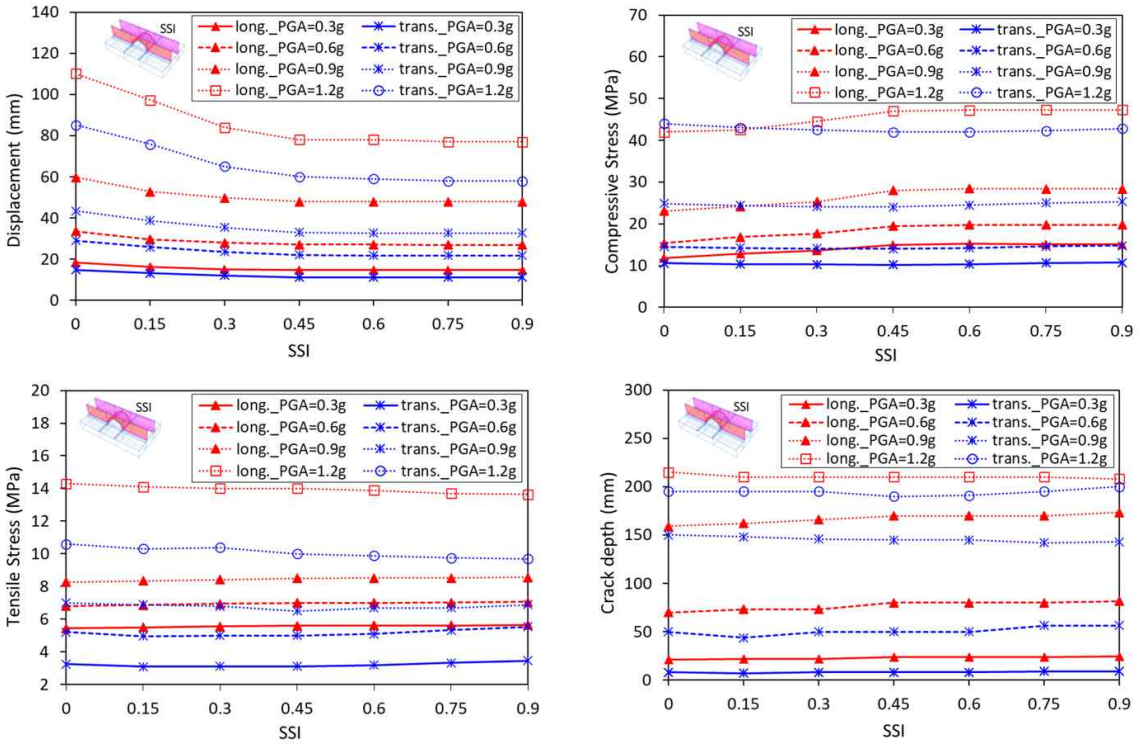


< 아치 길이에 따른 최대 지진응답의 변화(변위, 압축/인장응력, 균열깊이 >

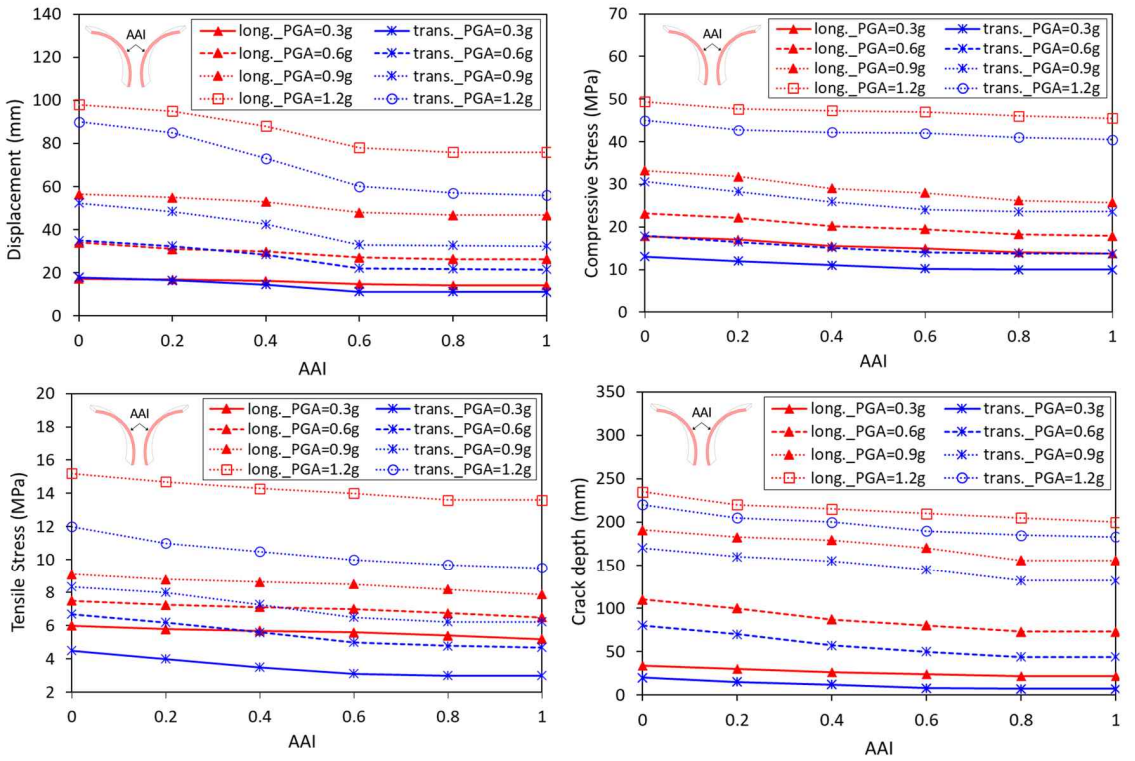


< 프리스트레스 철근의 강성변화에 따른 최대 지진응답의 변화(변위, 압축/인장응력, 균열깊이 >

● 모듈식 지중아치구조의 지진응답에 대한 매개변수(SSI 및 AAI)연구
- SSI는 MUAB의 지진응답에 특히 압축·장력응력과 균열깊이에 미치는 영향은 미미하나, AAI (아치-아치 상호작용)는 중간 정도의 영향을 가짐
- SSI가 0에서 0.45로 증가함에 따라 특히 양쪽 지반운동에서 변위가 약 20% 감소
- SSI 증가에 따른 효율적인 지반아칭효과로 인해 더 큰 SSI로 더 압축되고 안정화됨
- AAI의 증가는 구조의 내진성능을 증가시킬 수 있고, 특히 PGA의 횡방향 상승에 따른 내진성능이 증가하기 때문에 구성요소의 최대 변위, 인장 및 압축응력, 균열깊이의 감소를 초래



< 지반-구조물 상호작용(SSI) 변화에 따른 최대 지진응답의 변화(변위, 압축/인장응력, 균열깊이 >



< 아치-아치 상호작용(AAI) 변화에 따른 최대 지진응답의 변화(변위, 압축/인장응력, 균열깊이 >

○ (단위성과 B-3) 프리캐스트 콘크리트 블록과 연결스트립 지중아치구조의 내진안전성 평가

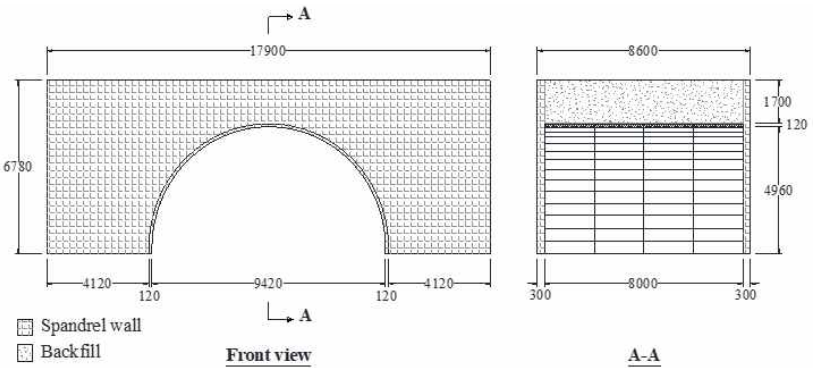
1) 지진주파수 특성을 고려한 지진응답 분석

● 지진응답분석(ABAQUS 프로그램)을 위한 유한요소모델링

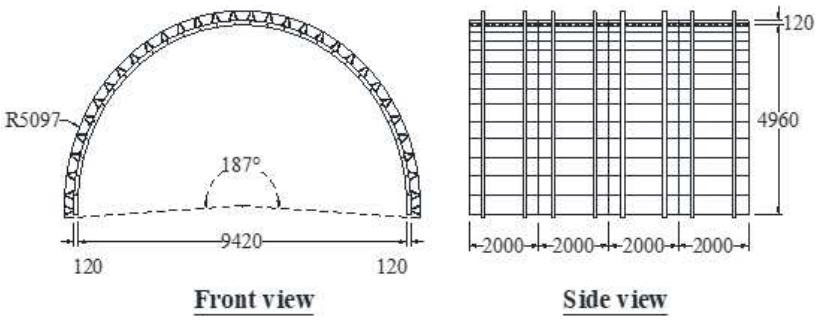
- 제안된 아치시스템의 구성요소는 프리캐스트 패널 세그먼트, 외부의 강재 아웃리거 및 강재 V-strip을 포함하며, 각 링은 64개의 V-strip을 통해 2개의 아웃리거에 연결된 31개의 프리캐스트 패널로 구성
- 아치시스템의 길이는 9.42m이고 높이는 4.96m
- 아치 정점부에서 채움의 피복덮개는 아래의 Canadian Highway Bridge Design Code에 따라 산정함

$$H_c \geq \frac{S}{6}\left(\frac{D_h}{D_v}\right)^{1/2} \Rightarrow H_c \geq 0.4\left(\frac{D_h}{D_v}\right)^{1/2}$$

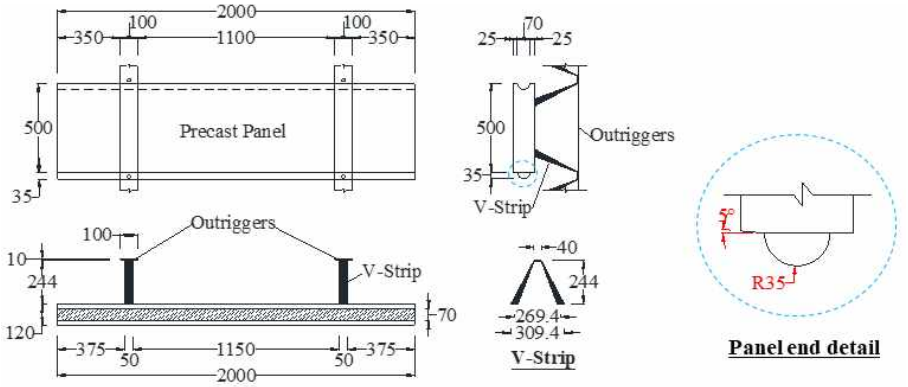
여기서 S는 아치의 스팬길이, D_v는 수직방향의 직경, D_h는 수평방향의 직경을 의미함



(a) 지중아치 시스템



(b) 지중아치 구성요소의 규격

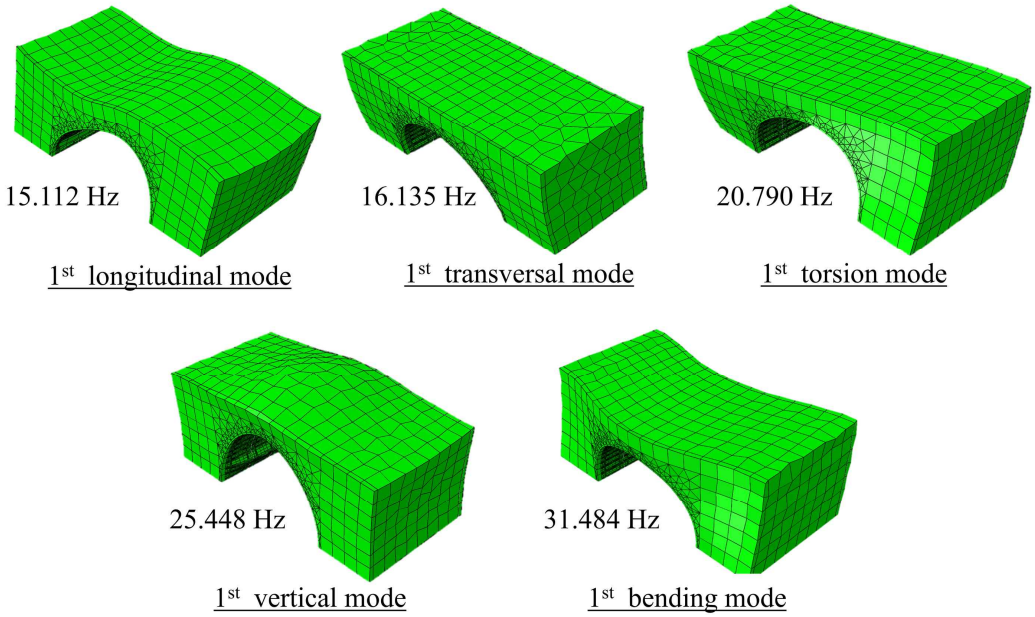


(c) 아치 구성요소(아웃리거 및 V-스트립 등)의 치수

< 지중아치 시스템의 구성요소 및 규격 >

- 프리캐스트 패널, 강철 아웃리거 및 V-strip의 재료특성은 정적 해석과 동일
- 되메우기 흙의 밀도는 $\rho = 1900\,kg/m^3$, 탄성계수 $E = 1000\,MPa$, 푸아송비 $\nu = 0.25$
- Mohr-Coulomb 소성거동을 적용하여 마찰각 $\phi = 35^\circ$, 팽창각 $\psi = 15^\circ$ 및 점착력 $c = 0.05\,MPa$을 각각 사용
- 스팬드럴벽의 특성은 $\rho = 2450\,kg/m^3$, $E = 3300\,MPa$ 및 $\nu = 0.20$

● 모드분석(Modal Analysis) 결과
- 지중아치시스템의 고유진동수를 정의하기 위한 모드분석 수행
- 아래에 구조물의 고유모드 형상을 나타내었으며, 1차 모드는 $f = 15.11\,Hz$인 세로방향



< 지중아치시스템의 고유모드 형상 >

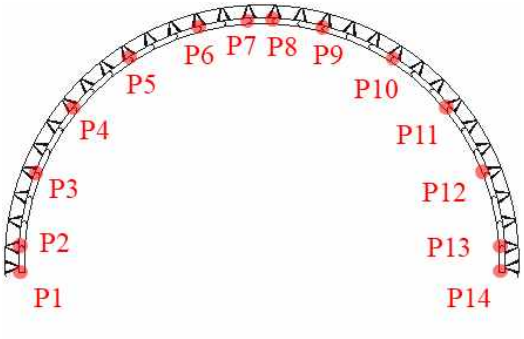
● 지중아치구조의 지진주파수 특성에 대한 영향을 고려한 지진응답분석(ABAQUS 프로그램)
- 아래 표와 같이 PGA/PGV 비를 통한 지진 주파수특성을 분류

PGA/PGV [g/(m/s)]	**Earthquake frequency content classification**
PGA/PGV <0.8	Low
0.8 < PGA/PGV < 1.2	Intermediate
1.2 < PGA/PGV	High

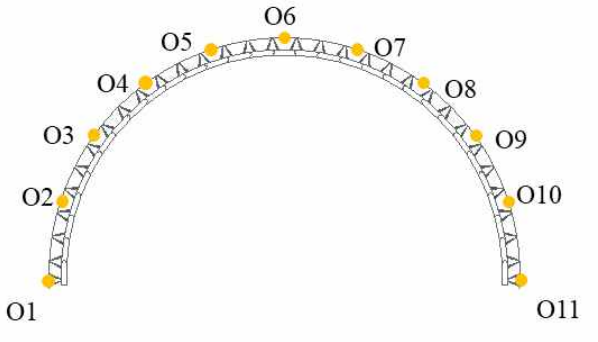
- 9개의 지진시간이력을 선정하여 아래와 같이 3가지 지진주파수특성 세트로 분류

No.	**Earthquake**	**PGA [g]**	**PGV [m/s]**	**PGA/PGV**	**Frequency content classification**
1	1968 Hachinohe	0.154	0.731	0.21	Low
2	1983 Taiwan Smart1	0.013	0.018	0.72	Low
3	1979 Imperial Valley	0.327	0.428	0.76	Low
4	1983 Coalinga	0.076	0.076	1.00	Intermediate
5	New Madrid, MO	0.536	0.533	1.01	Intermediate
6	1978 Ofunato	0.154	0.142	1.09	Intermediate
7	1980 Anza	0.065	0.033	1.97	High
8	1980 Livermore	0.028	0.014	1.98	High
9	1976 Friuli	0.030	0.012	2.38	High

- 지진거동의 결과는 아래 그림과 같이 패널 접합점인 프리캐스트 패널에서의 14곳, 그리고 아웃리거에서는 그림 6에 표시된 11곳의 위치에서 표시

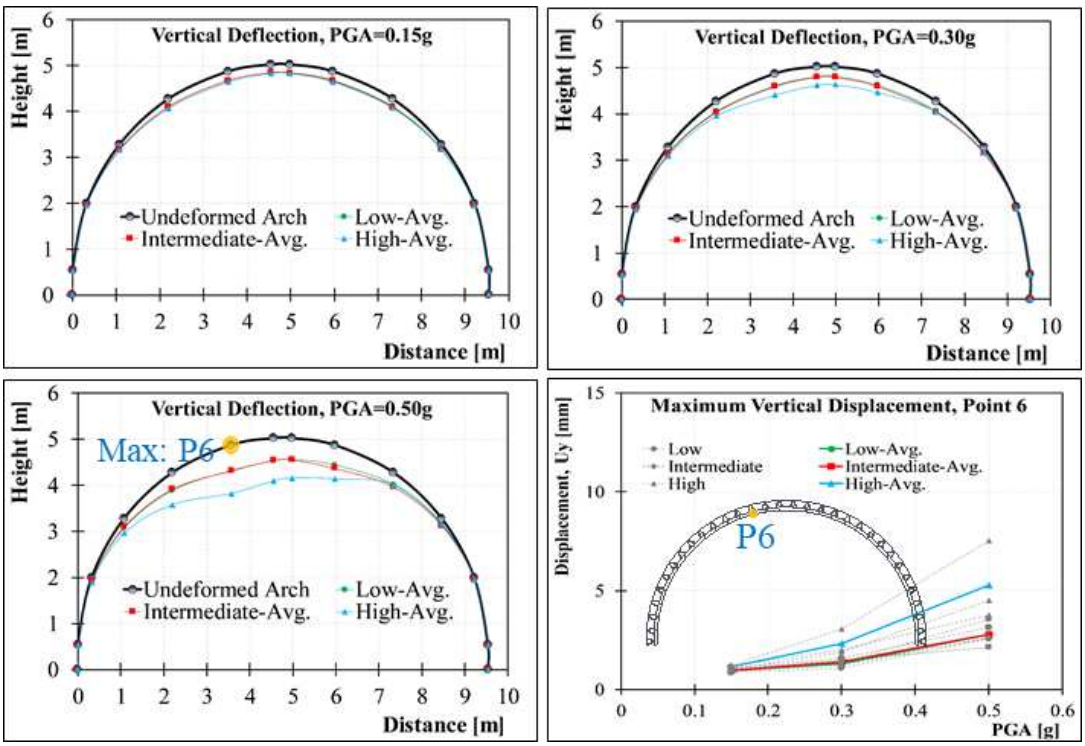


< 프리캐스트 패널의 결과 산출위치 >



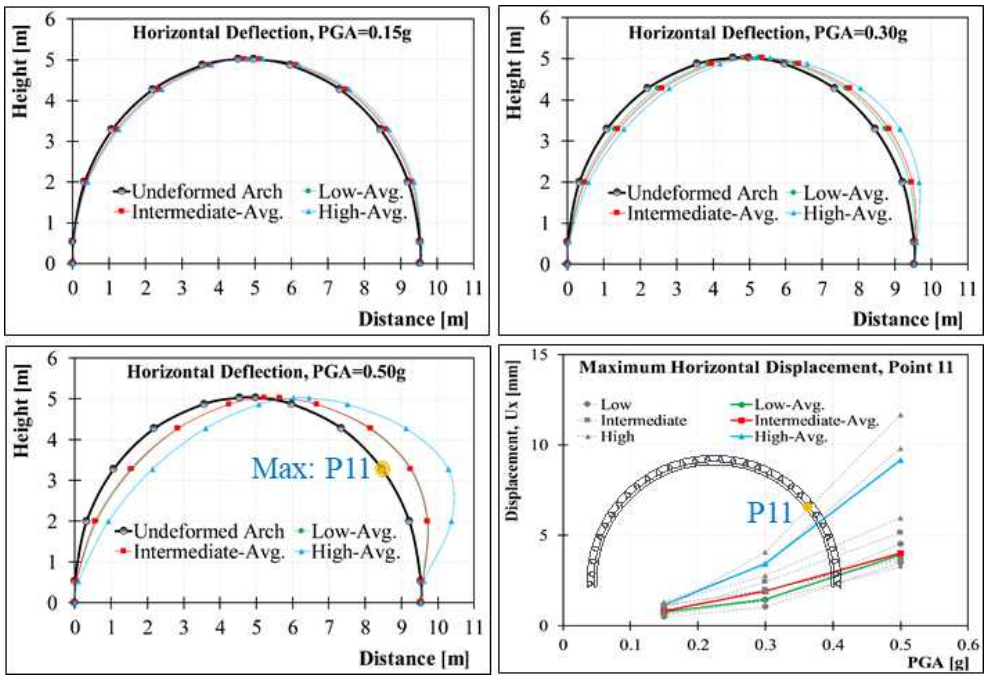
< 아웃리거의 결과 산출위치 >

● 지중아치구조의 PGA와 지진주파수 특성에 따른 수직변위 결과
- 전반적으로 PGA의 증가에 따라 지진응답도 증가
- 그림 7에서 볼 수 있듯이 수직변위가 유사하게 나타나며, 0.15g의 낮은 PGA에서 주파수특성은 구조물의 지진응답에 미치는 영향이 크지 않은 것으로 보임
- PGA가 0.30~0.50g까지 증가하면 고(高) 지진주파수특성의 영향은 중(中)저(低) 지진주파수특성 보다 훨씬 명확하게 나타남
- 최대 수직변위를 갖는 아치 정점부에 가까운 P6 지점에서 발생한 최대 수직변위는 저(低)주파 및 중간 주파수특성의 경우 약 2.8㎜이고 고(高)주파수특성의 값은 약 5.3㎜로 확인됨



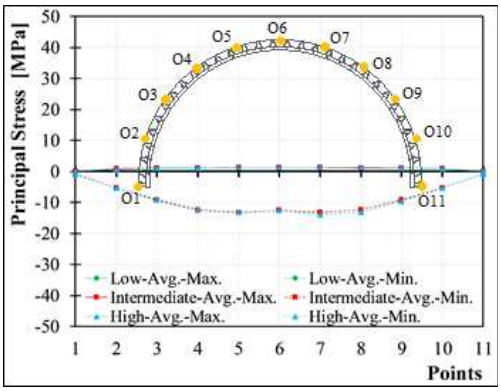
< PGA와 지진주파수특성에 따른 지중아치 구조의 수직변위 >

● 지중아치구조의 PGA와 지진주파수 특성에 따른 수평변위 결과
- 지중아치구조의 수평변위에 대한 지진거동도 유사함
- 0.30g 이상의 PGA를 갖는 지진을 고려할 때 지진주파수특성이 더 중요한 역할을 하며, 아치의 중간 높이인 P11에서 가장 큰 변형이 발생하므로 수평변위 측면에서 가장 중요한 지점으로 확인됨
- PGA = 0.50g에서 고주파특성에 대한 P11 지점에서의 최대 변형량은 약 9.0㎜이며, 저주파수 및 중간 주파수특성에 대한 값인 약 4.0㎜의 두 배임

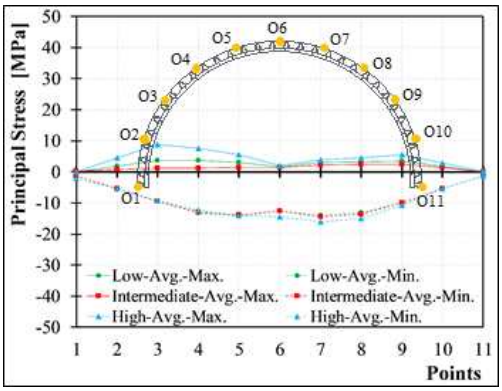


< PGA와 지진주파수특성에 따른 지중아치 시스템의 수직변위 >

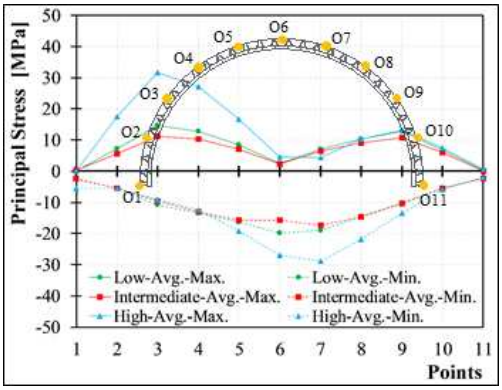
● 지중아치 구조의 PGA와 지진주파수 특성에 따른 주응력 결과
- 주응력과 관련하여 일반적으로 가장 중요한 위치는 아치베이스와 첫 번째 패널 및 두 번째 패널의 접합점임
- 아래 그림은 아치베이스에서 높은 주응력을 나타내는 일반적인 경우를 나타냄
- PGA가 0.15g에서 0.50g까지 변하는 최대 주응력의 경우에 지진주파수특성의 차이가 명확함
- 그러나 최소 주응력에 있어서는 모든 주파수특성의 값은 0.15g의 PGA에서 모두 유사하며, 그 영향은 PGA가 0.30g까지 증가하고 저 주파수특성 및 중간 주파수특성에 비해 고 주파수특성에서 큰 값이 발생함



(a) PGA=0.15g



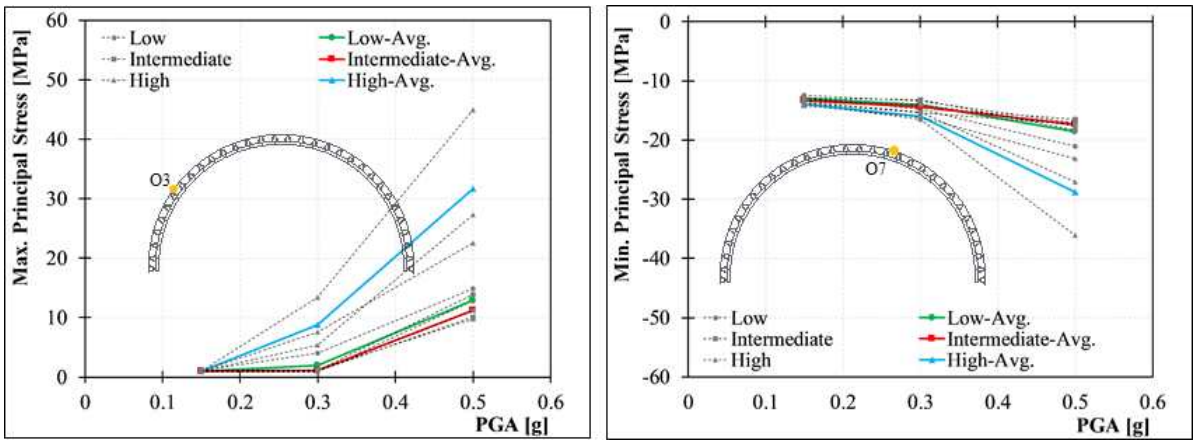
(b) PGA=0.30g



(c) PGA=0.50g

< PGA와 지진주파수특성에 따른 아웃리거의 최대 및 최소 주응력 >

- 아치시스템의 중요한 구성 요소인 외부 강재 아웃리거의 내진성능을 아래 그림에 표시
- 일관되게 0.15g의 낮은 PGA에서 지진응답은 모든 경우와 유사하나, PGA가 0.30~0.50g으로 증가할 때 지진주파수특성의 영향이 분명한 차이를 보이며 더욱 중요해짐
- 아웃리거의 가장 중요한 위치는 각각 최대 주응력 및 최소 주응력에 대한 지점 O3 및 O7임
- 이 지점들은 프리캐스트 패널의 최대변위 위치와 유사함

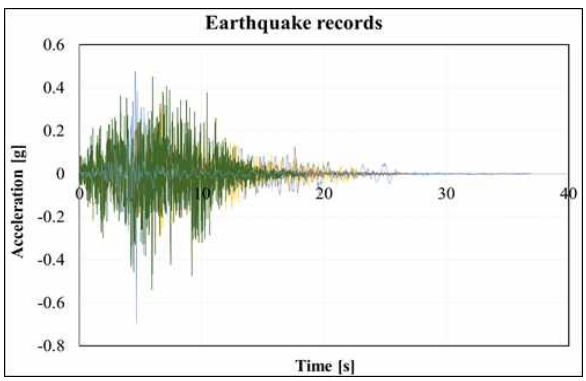


< 아웃리거의 임계위치에서의 최대 및 최소 주응력 >

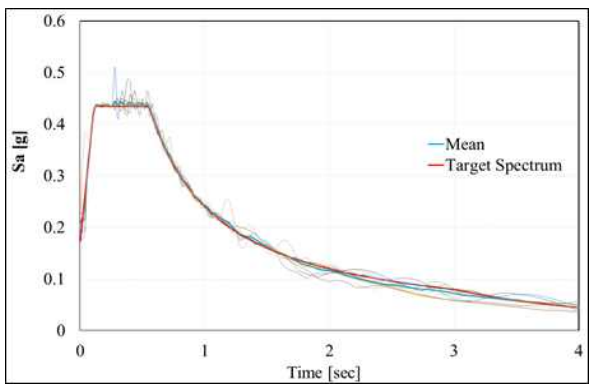
● 지중아치구조의 지진거동 분석에 대한 결론
- 프리캐스트 패널의 응력의 최대값 발생 위치는 대부분 아치베이스와 패널 접합부
- 최대 수직변위는 아치크라운이나 아치크라운(P6~P9)에 가까운 위치에서 발생하고, 최대 수평변위는 아치의 중간 높이(P11 또는 P4)에서 발생
- 아웃리거의 극한위치는 주응력 값이 가장 큰 O3과 O7의 위치
- 낮은 PGA에서 지진주파수특성은 구조물의 지진응답에 미소한 영향을 미치는 것으로 보임
- 높은 PGA(0.30g부터)에서는 지진주파수특성이 중요한 역할
- 고 주파수특성이 중간 및 저 주파수특성에 비해 큰 영향

2) 지중아치구조의 지진취약도분석에 의한 내진안전성 평가

● 지진 취약도분석을 위한 지진가속도 시간이력
- 지진취약도분석에는 가장 정확하고 합리적인 방법인 비선형 동(動)해석을 적용
- 이 연구에서는 12개의 지진가속도 시간이력을 사용함(최소 7세트 지진시간이력 사용 권장)
- 지진가속도시간이력은 우선 Zone I에서의 지반유형 S4에 대한 감쇠비 5%의 한국설계스펙트럼에 매칭
- 매칭된 지진가속도 시간이력을 PGA가 0.2g, 0.4g, 0.5g, 0.6g, 0.7g, 0.8g, 0.9g, 1.0g, 1.2g 및 1.4g가 되도록 스케일링하여 작성
- IDA 개발과 취약도곡선 정립에 총 120개 지진가속도 시간이력이 적용



< 12개의 실지진기록 >

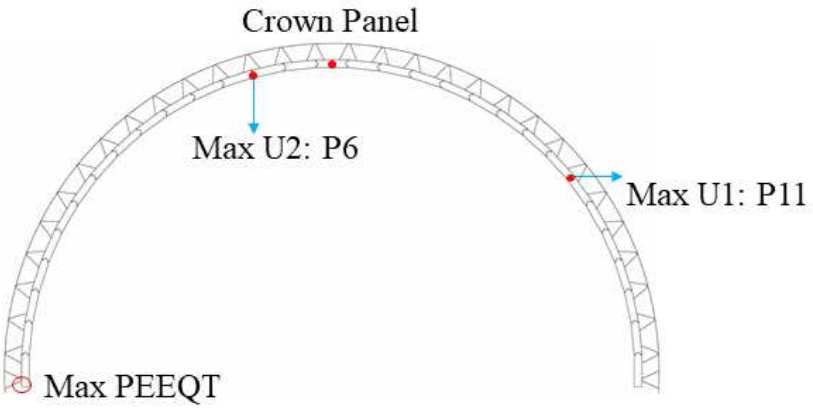


< 설계응답스펙트럼에 대한 매칭 >

● 지진 취약도분석을 위한 손상측정치(DM)와 강도측정치(IM)

- 손상측정치(DM): 임계 위치에서 수직변위 및 수평변위, 즉 지점 P11에서 U1-Max 및 지점 P6에서 U2-Max; 아치크라운에서의 수직 및 수평변위, U1-Crown 및 U2-Crown; 등가인장 소성변형률, 아치베이스에서의 PEEQT

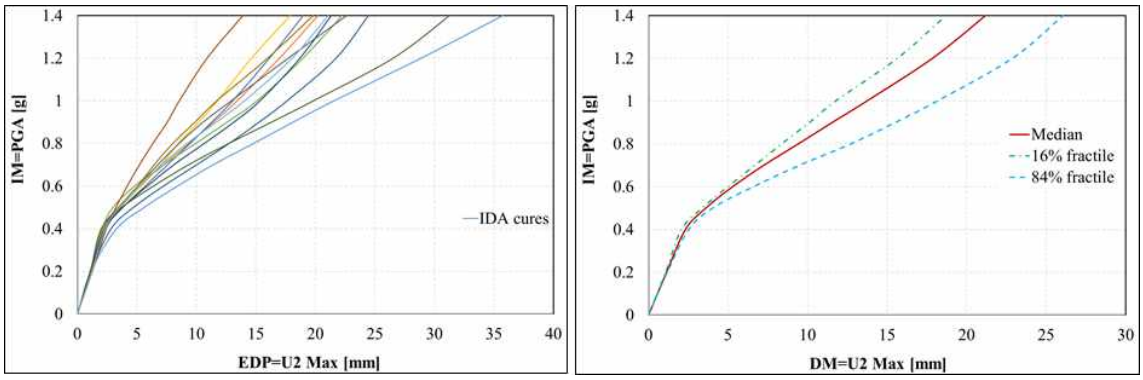
_ 강도측정치(IM): PGA 또는 감쇠비 5%의 기본주기에 대한 가속도스펙트럴 Sa(T1, 5%), 이 연구에서는 PGA를 사용



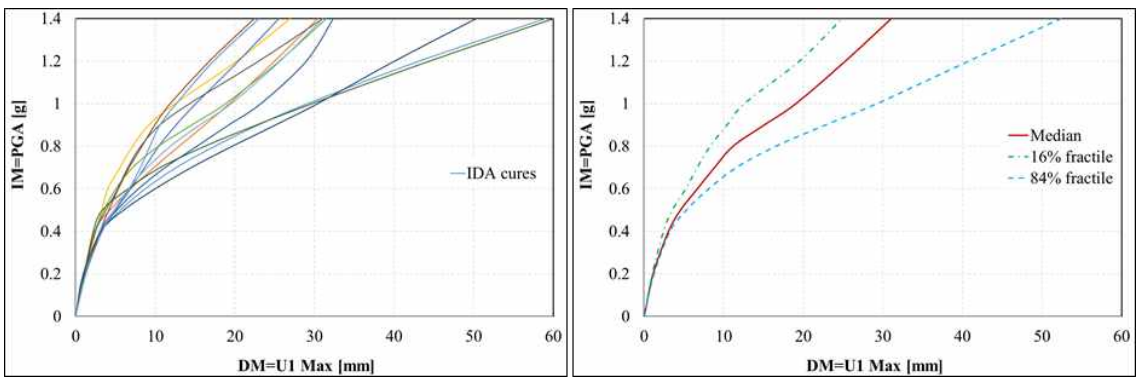
< 아웃리거의 임계위치에서의 최대 및 최소 주응력 >

● 지진 취약도분석을 위한 증분동적해석(IDA, Incremental Dynamic Approach)

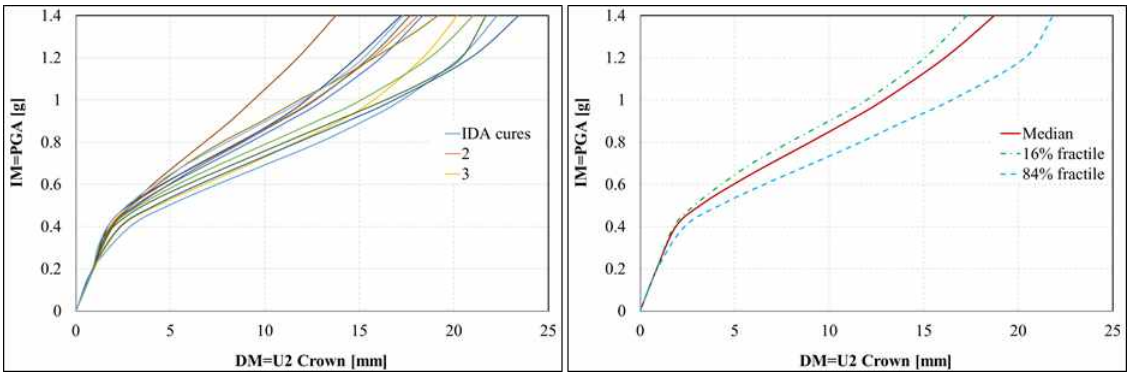
- IDA(Incremental Dynamic Approach)곡선은 IM과 DM 사이의 관계를 나타냄
- 12개의 지진가속도 시간이력으로 12세트의 IDA 곡선을 작성을 통한 중앙값, 16% 분위수와 84% 분위수 곡선을 산정
- 중앙값 곡선은 매칭된 지진의 50%가 주어진 IM에서 규정된 DM을 유발함을 의미하며, 16% 분위수 및 84% 분위수 곡선은 매칭된 지진의 각각 84%와 16%가 주어진 IM에서 규정된 DM을 유발함을 의미함



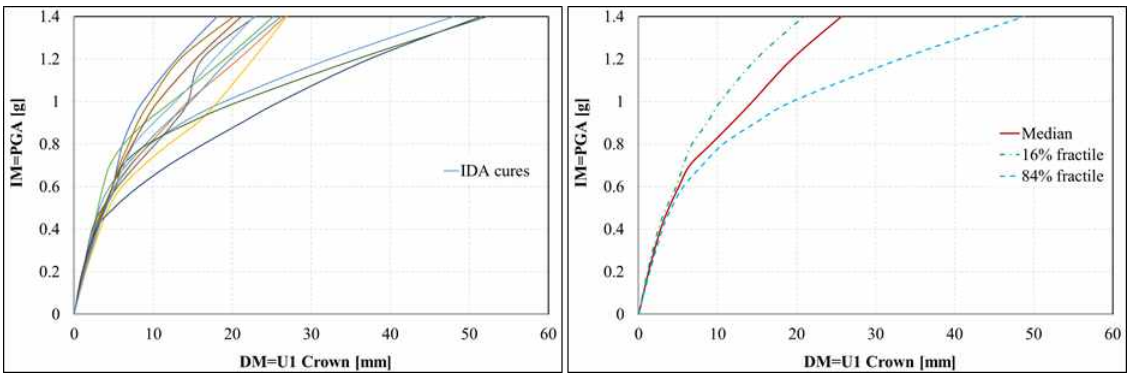
(a) DM=U2-Max에 대한 IDA 곡선



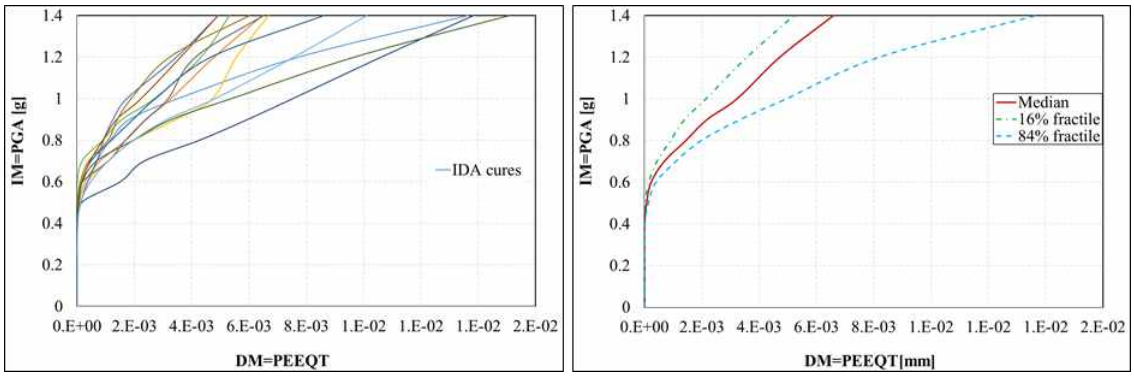
(b) DM=U1-Max에 대한 IDA 곡선



(c) DM=U2-Crown에 대한 IDA 곡선



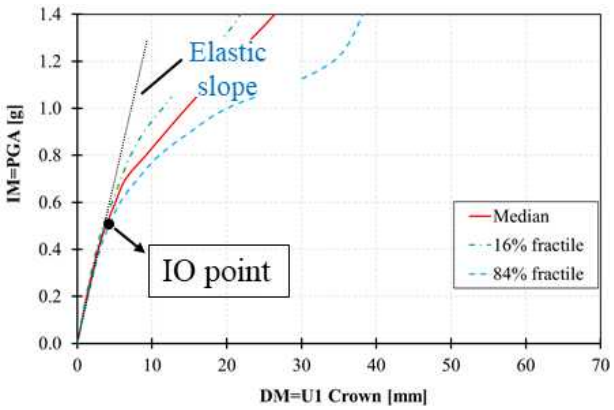
(d) DM=U1-Crown에 대한 IDA 곡선



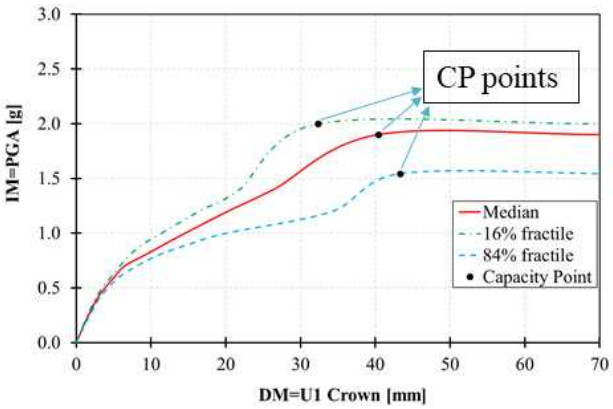
(e) DM=PEEQT에 대한 IDA 곡선

< 5개 손상측정치(DM)에 대해 작성된 IDA 곡선 >

- IO(즉시복구) 지수는 다음 그림과 같이 IDA 곡선에서 탄성기울기가 80%의 값으로 변하는 위치의 좌표(DM=변위, IM=PGA)로 정의
- 모든 DM에 대해 동일한 절차를 수행하여 아래 표와 같이 IO수준을 정의함



< IO(즉시복구) 점에 대한 정의 >



< CP(붕괴방지) 점에 대한 정의 >

< IO수준에 대한 5가지 손상측정치(DM)의 중앙값, 16%와 84% 분위수 값 >

		U2-Max		U1-Max		U2-Crown		U1-Crown		PEEQT	
		IM	DM	IM	DM	IM	DM	IM	DM	IM	DM
IO	Median	0.5g	3.60 mm	0.5g	4.56 mm	0.5g	3.18 mm	0.5g	3.82 mm	0.5g	7.06e-5
	16%	0.5g	3.37 mm	0.5g	3.53 mm	0.5g	2.87 mm	0.5g	3.50 mm	0.5g	2.20e-5
	84%	0.5g	4.03 mm	0.5g	5.29 mm	0.5g	4.21 mm	0.5g	4.15 mm	0.5g	1.34e-4

< CP수준에 대한 5가지 손상측정치(DM)의 중앙값, 16%와 84% 분위수 값 >

		U2-Max		U1-Max		U2-Crown		U1-Crown		PEEQT	
		IM	DM	IM	DM	IM	DM	IM	DM	IM	DM
CP	Median	1.90g	21.85 mm	1.90g	41.62 mm	1.90g	17.32 mm	1.90g	40.44 mm	1.90g	9.3e-3
	16%	2.00g	18.78 mm	2.00g	36.87 mm	2.00g	15.88 mm	2.00g	32.31 mm	2.00g	1.5e-2
	84%	1.54g	27.45 mm	1.54g	46.40 mm	1.54g	20.73 mm	1.54g	43.30 mm	1.54g	7.8e-3

- 지진취약도곡선의 정의
  - 취약도곡선의 작성에는 아래의 대수정규누적분포함수(CDF)가 적용

$$P(C|IM=x)=\Phi\left(\frac{\ln(x/\theta)}{\beta}\right)$$

  - 여기서: P(C|IM=x)는 파괴의 확률, IM은 강도측정치, Φ( )는 표준정규분포, θ는 취약도함수의 중앙값 또는 50% 파괴확률의 강도측정치의 수준, β는 ln(IM)의 표준편차

  - 모벤트법(Method of Moment; MOM):

$$\ln\hat{\theta}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\ln IM_i$$

$$\hat{\beta}=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}\left(\ln\left(IM_i/\hat{\theta}\right)\right)^2}$$

  - 여기서: $\hat{\theta}$과 $\hat{\beta}$는 θ와 β의 추정값
  - 전체 자료에 대한 Likelihood는 아래와 같음

$$Likelihood=\prod_{j=1}^{m}\binom{n_j}{z_j}p_j^{zj}(1-p_j)^{n_j-z_j}$$

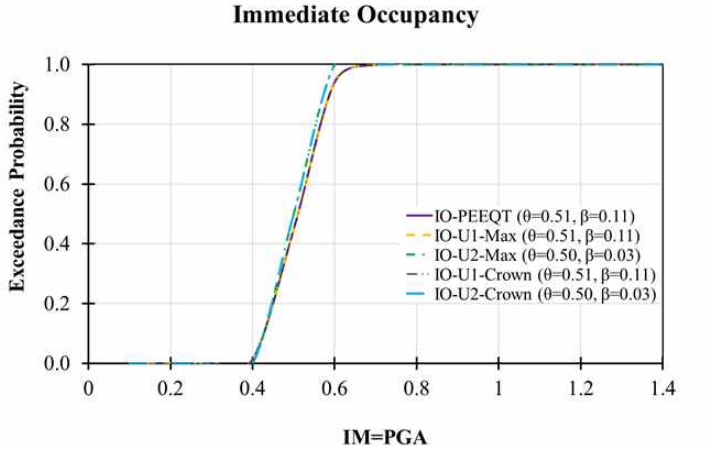
  - 여기서 z_j는 n_j번째 지진운동에서의 파괴, p_j는 $IM=x_j$에서 파괴확률, 그리고 m은 강도측정치(IM) 수준의 총 수
  - $P(C|IM=x)=\Phi\left(\frac{\ln(x/\theta)}{\beta}\right)$를 p_j에 대입하여 정리하면, 우도함수(Likelihood function)는 다음과 같이 표시됨

$$Likelihood=\prod_{j=1}^{m}\binom{n_j}{z_j}\Phi\left(\frac{\ln(x_j/\theta)}{\beta}\right)^{z_j}\left(1-\Phi\left(\frac{\ln(x_j/\theta)}{\beta}\right)\right)^{n_j-z_j}$$

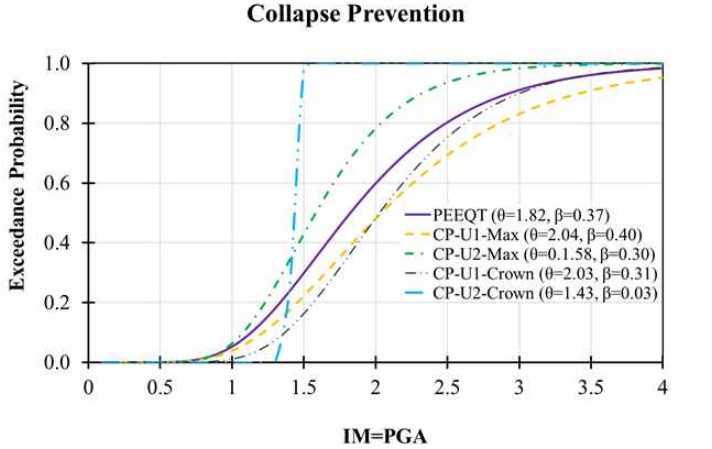
  - 최종적으로 취약도함수의 중앙값과 대수표준편차에 대한 매개변수 추정치는 상기 우도함수를 최대화함으로써 다음과 같이 산정

$$\{\hat{\theta},\hat{\beta}\}=\arg max\sum_{j=1}^{m}\left\{\ln\binom{n_j}{z_j}+z_j\ln\Phi\left(\frac{\ln(x_j/\theta)}{\beta}\right)+(n_j-z_j)\ln\left(1-\Phi\left(\frac{\ln(x_j/\theta)}{\beta}\right)\right)\right\}$$

- 지중아치구조의 지진취약도곡선의 작성
  - 상기 절차를 통하여 구한 이 지중아치구조의 IM수준에 대한 취약도곡선은 다음과 같음
  - 5가지 다른 손상측정치(DM)에 대해서, 취약도곡선의 결과는 0.03g ~ 0.11g의 분산범위에서 IO 수준을 유발하는 중앙값 PGA가 0.50g ~ 0.51g로 유사하게 나타났음
  - CP 수준을 유발하는 중앙값 PGA는 1.43g에서 2.04g로 확인되었으며, 구조물에 대한 취약도곡선을 정립하는 데 수평변위가 다른 DM보다 더 적절한 것으로 확인됨

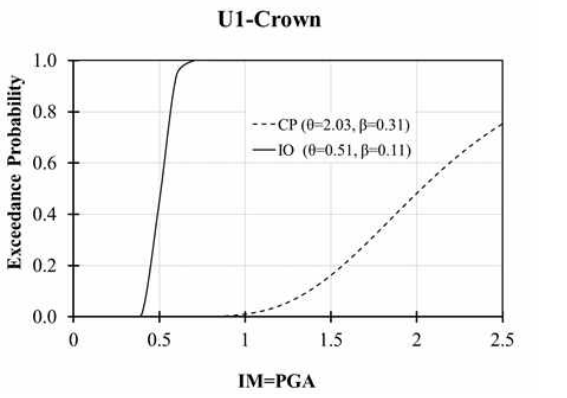


< 지중아치구조의 IO 수준에 대한 취약도곡선 >

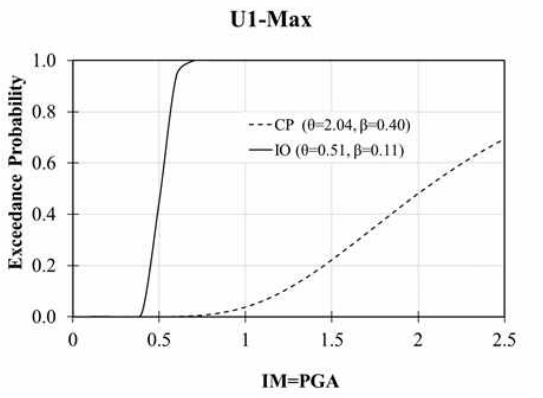


< 지중아치구조의 CP 수준에 대한 취약도곡선 >

- 아치정점부에서 최대 수평변위와 수평변위를 사용하여 IO 및 CP 레벨에 대한 취약도곡선을 아래 그림에 도시하였음



< DM=U1-Crown의 IO와 CP에 대한 취약도곡선 >



< DM=U1-Max의 IO와 CP에 대한 취약도곡선 >

● 지중아치구조의 지진취약도분석에 의한 내진안전성평가 결과
- 많은 연구자들에 의해 적용된 IDA 방법이 지중아치구조물에 대한 내진평가의 분석에 적합한 것으로 확인됨
- Zone I, 지반분류 S4, 500년의 재현주기의 국내설계스펙트럼가속도에 해당하는 지진에서 이 아치구조물은 PGA = 0.50g ~ 0.51g에서 IO 수준에 도달할 것으로 추정되며, PGA = 2.03g ~ 2.04g에서 CP 수준에 도달할 것으로 추정
- IDA곡선 작성을 위해서 앞서 정의한 P6, P11 및 정점부와 같은 임계위치에서의 최대변위를 적용할 수 있음
- 아치베이스(첫 붕괴위치)의 PEEQT 또한 IDA 곡선과 취약도곡선의 작성에 적합함

1.3 지중아치 구조 단면 최적화 및 안전성 검토 (핵심3)

○ (개요) 강재 스트립과 프리캐스트 콘크리트 블록 활용 모듈러 지중아치 관련 기준을 분석하고 지간장 별 설계예제를 작성하여 본 지중아치 시스템의 설계 타당성을 확인하였음. 또한 다양한 현장에 최적으로 적용할 수 있는 지중아치 설계를 위해 설계용 자동화 프로그램을 개발하였으며 시공단계 및 공사비 분석을 통해 경제성을 확인하였음

○ (단위성과 C-1) 지중아치 시스템의 구조적 안전성 검토

- (지중아치 구조 관련 설계기준 정합성 검토) 설계기준에 부합하는 합리적인 지중아치 설계를 위하여 지중아치 시스템 설계를 위한 건설기준 코드 및 국가표준 목록을 확인하였음
- 각 코드의 지중아치 시스템 관련 항목 중 지중아치 시스템을 구성하는 주부재 (프리캐스트 콘크리트 블록, 강재 스트립) 단면 검토를 위한 기준 확인
  >> 지중아치 시스템 지간장별 예비 설계에 적용

<지중아치 시스템 관련 주요 설계기준 (건설기준코드 - 국가건설기준센터)>

구 분	설계기준	
	코드번호	코드명
공통	KDS 10 00 00	공통설계기준
	KDS 10 10 00	설계기준 총칙
	KDS 14 00 00	구조설계기준
	KDS 24 00 00	교량설계기준
	KDS 24 10 11	교량설계 일반사항(한계상태설계법)
	KDS 24 12 11	교량 설계하중조합(한계상태설계법)
	KDS 24 12 21	교량 설계하중(한계상태설계법)
	KDS 24 14 21	콘크리트교 설계기준(한계상태설계법)
	KDS 24 14 31	강교 설계기준(한계상태설계법)
프리캐스트 콘크리트 블록	KDS 14 20 01	콘크리트구조 설계(강도설계법) 일반사항
	KDS 14 20 10	콘크리트구조 해석과 설계 원칙
	KDS 14 20 20	콘크리트구조 휨 및 압축 설계기준
	KDS 14 20 22	콘크리트구조 전단 및 비틀림 설계기준
	KDS 14 20 30	콘크리트구조 사용성 설계기준
	KDS 14 20 40	콘크리트구조 내구성 설계기준
	KDS 14 20 54	콘크리트용 앵커 설계기준
	KDS 14 20 62	프리캐스트 콘크리트구조 설계기준
	KDS 14 20 64	구조용 무근콘크리트 설계기준
	KDS 14 20 74	기타 콘크리트구조 설계기준
	KDS 14 20 80	콘크리트 내진설계기준
강재 스트립	KDS 14 31 05	강구조설계 일반사항(하중저항계수설계법)
	KDS 14 31 10	강구조 부재 설계기준(하중저항계수설계법)
	KDS 14 31 25	강구조 연결 설계기준(하중저항계수설계법)

- (지중아치 시스템 주부재 예비 설계를 위한 기본 제원 설정) 강재 스트립과 프리캐스트 콘크리트 블록 활용 모듈러 지중아치 구조의 안전성 검토를 위해 기본 제원을 설정함

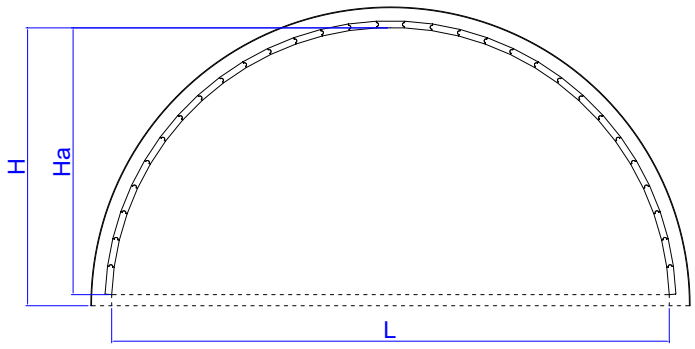
(1) 지간장: 기본 지간장을 15m로 설정하고 ±5m를 고려하여 10m, 20m 지간장 설정

(2) 높이: 계획 형상비(높이/지간장) 0.5가 되도록 높이(H)를 설정하고 해당 형상에 블록의 하면이 일치하도록 배치하여 지중아치 구조만의 높이(Ha) 산정

(3) 단위 폭: 프리캐스트 콘크리트 블록의 폭을 고려하여 2m로 검토

(4) 토피고: 모든 지간장에 대해 1m로 통일 (토피고가 높아질수록 지중아치 시스템에 유리하

므로, 보수적으로 예비 설계 진행)



<지중아치 기본 제원>

<지중아치 시스템 예비 설계용 구조 주요 제원>

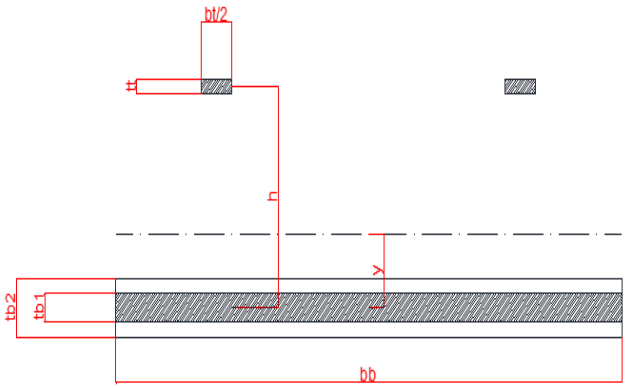
지간장 (L, m)	높이 (H, m)	계획 형상비	아치구조 높이 (H_a,m)	아치구조 형상비
10	5	0.5	4.80	0.48
15	7.5	0.5	7.37	0.49
20	9	0.5	9.95	0.50

- (지중아치 단면 설계) 각 재료의 물성을 결정하고 설계를 실시하여 응력을 검토함으로써 안전성을 확인함

(1) 재료: 콘크리트 - 압축강도 35MPa / 강재 - SS450 (항복강도 450MPa)

(2) 검토단면 형상변수

- 프리캐스트 콘크리트 블록: 폭(bb), 지압부 두께(tb1), 전체 두께(tb2)
- 강재 스트립: 폭(bt/2, 1열의 폭), 두께(tt), 블록과의 거리(h)



<지중아치 단면>

(3) 예비 설계 방법

- 지간장 15m 대상으로 단면설계 후 응력수준이 유사하도록 지간장 10m, 20m 설계
- 콘크리트 블록은 대량 일괄생산을 목표로 하므로 가능한 동일한 단면 사용
- 제작성을 고려하여 블록의 최소 두께는 120mm로 설정

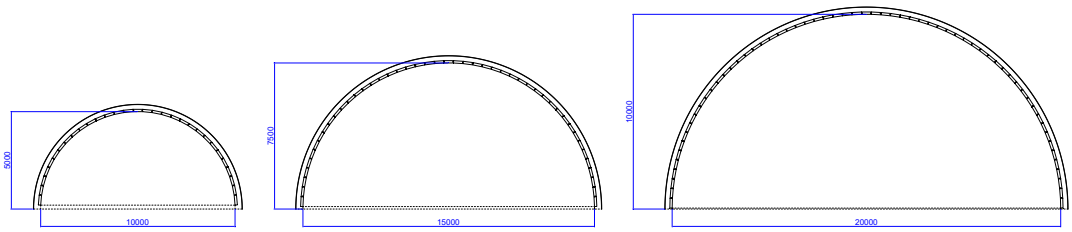
a. 지중아치 시스템은 생태교량에 사용되는 것으로 가정 (토압하중만 적용)

b. 토압 하중계수: 성토 중 - 1.0, 완성계 - 1.35

c. 콘크리트 설계지압강도: $\phi_c\left(0.85 f_{ck}\sqrt{A_2/A_1}\right)A_1$

(콘크리트 재료계수: $\phi_c = 0.65$)

d. 강재 스트립 설계인장강도: $\phi_t P_t$ (강도저항계수, $\phi_t = 0.90$)



(a) L=10m (b) L=15m (c) L=20m

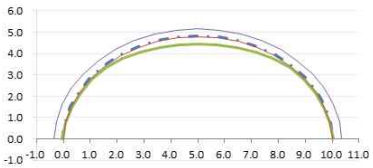
<그림 1.x3 지중아치 시스템 예비 설계 형상>

<지중아치 시스템 예비 설계용 검토 단면>

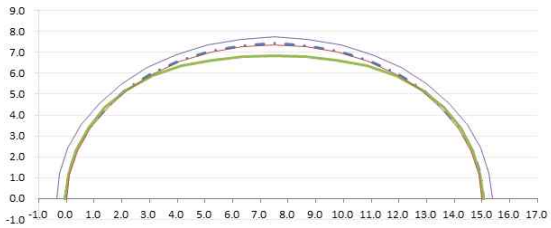
지간장 (m)	프리캐스트 콘크리트 블록			강재 스트립		
	폭 (bb, mm)	두께 (mm)		폭 (bt/2, mm)	두께 (tt, mm)	거리 (h, mm)
		tb1	tb2			
10	2,000	70	120	120	8	310
15	2,000	70	120	200	12	310
20	2,000	110	170	260	18	335

(4) 설계 결과

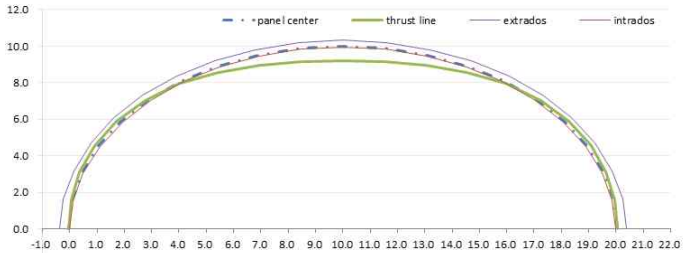
- 지중아치 시스템 지간장별(10, 15, 20m) 프리캐스트 콘크리트 블록 및 강재 스트립 단면 도출
- 지중아치 시스템 지간장별 추력선도 검토: 프리캐스트 콘크리트 블록에 인장력이 발생하지 않도록 설계 검토



(a) 지간장 10m에 대한 추력선



(b) 지간장 15m에 대한 추력선



(c) 지간장 20m에 대한 추력선

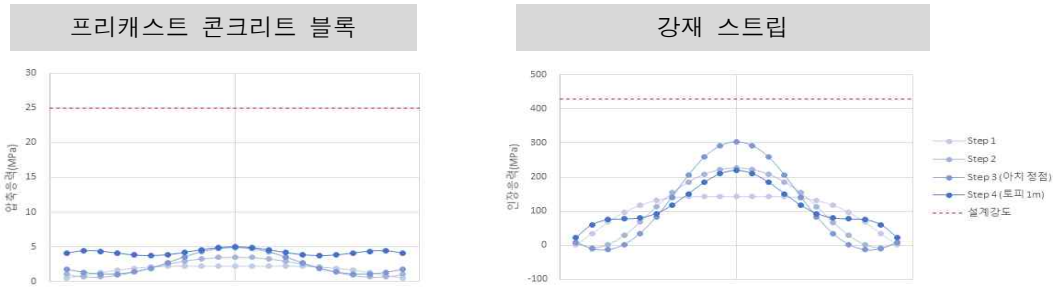
< 지중아치 시스템 지간장별 추력선 >

- 지중아치 시스템 지간장별 주부재 발생응력 검토

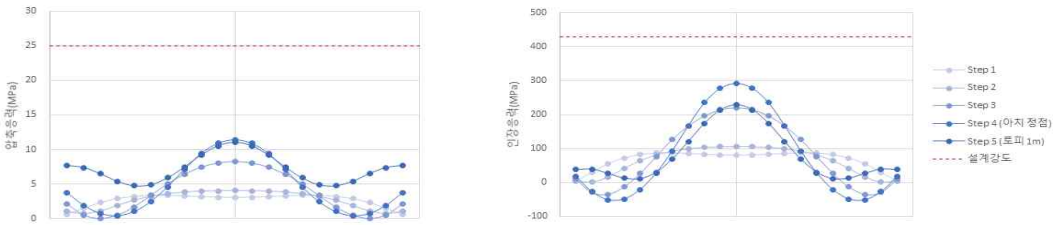
→ 아치 정점까지 성토 시 최대 응력 발생

→ 프리캐스트 콘크리트 블록: 지간장 증가에 따라 발생응력 증가
(지간장 15m의 경우 설계강도 대비 50% 수준의 응력 발생)

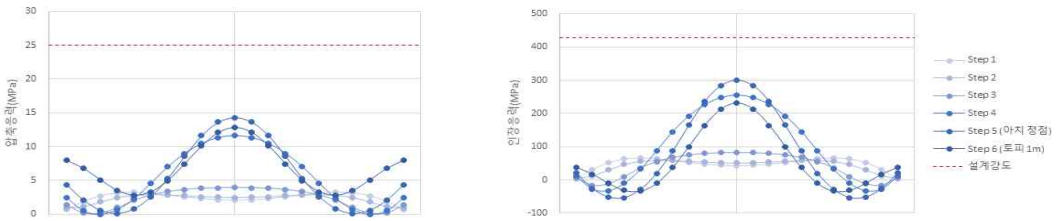
→ 강재 스트립: 설계강도 대비 약 75% 수준



(a) 지간장 10m



(b) 지간장 15m



(c) 지간장 20m

<지중아치 시스템 지간장별 응력>

(5) 설계 소결론

- 지간장별 설계결과
  a. 지간장 15m 이하: 동일한 단면의 프리캐스트 콘크리트 블록 사용
  b. 지간장 20m : 높은 두께의 콘크리트 블록 소요 → 경제성/시공성 저하 우려
- 적정 지간장
  a. 지간장 15m 이하를 본 지중아치 시스템의 주요 대상으로 설정하여 동일한 두께의 프리캐스트 콘크리트 블록 일괄 사용
  b. 지간장 15m 초과 적용 시 보강 앵커를 활용하여 15m 이하용 단면 유지

○ (단위성과 C-2) 단면 최적화 적용방안 마련

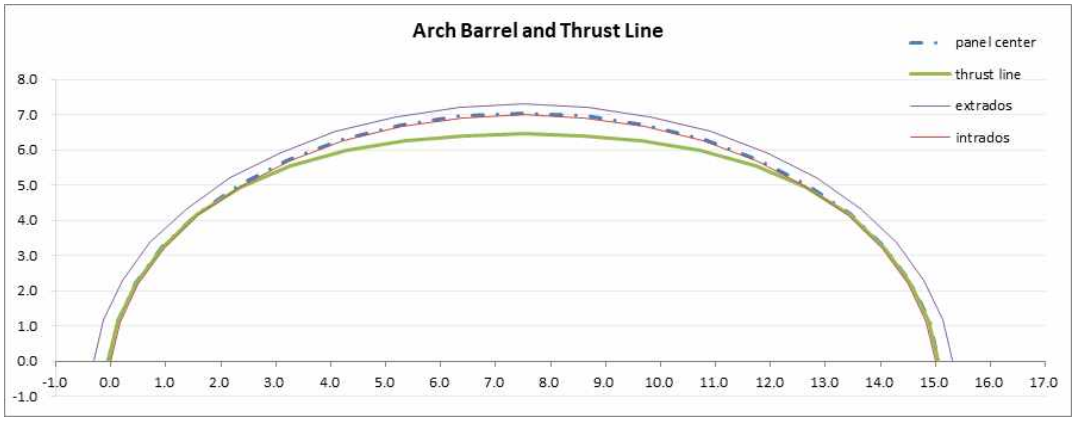
- (지중아치 최적 설계용 프로그램 개발) 본 연구개발의 강재 스트립과 프리캐스트 콘크리트 블록 활용 모듈러 지중아치 구조는 종래의 콘크리트 아치 및 파형강판 아치 구조와 다르게 콘크리트 블록과 강재 스트립이 복합적으로 구성되어 있으므로 이를 위한 별도의 설계 도구 구축이 필요하여 프리캐스트 콘크리트 블록 및 강재 스트립의 단면을 검토할 수 있는 설계용 프로그램을 개발함

(1) 특징

- 목적: 본 프로그램은 프리캐스트 블록 및 강재 스트립을 적용한 지중아치 구조물을 설계하기 위한 프로그램임
- 본 프로그램에서는 사용자가 가정한 프리캐스트 블록 및 강재 스트립의 제원, 상부 토체의 물성치를 활용하여 지중아치 구조물의 추력선도를 자동으로 도출할 수 있으며, 프리캐스트 블록 및 강재 스트립에 발생하는 응력이 각 위치에서 산출됨
- 이를 통해 사용자는 지중아치 형상, 프리캐스트 블록 및 강재 스트립의 제원을 조정함으로써 최적의 지중아치 설계가 가능함

(2) 주요 기능 (프로그램 실행 결과물)

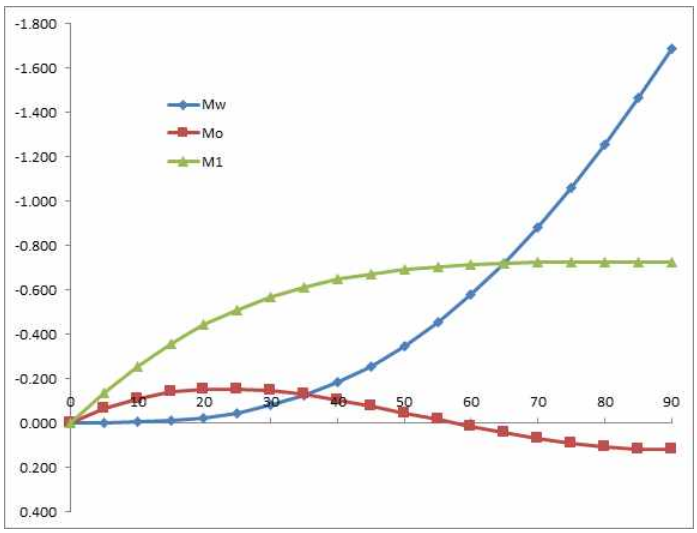
- 지중아치 구조의 추력선의 좌표 및 그래프
- 프리캐스트 블록의 각 위치에 발생하는 응력
- 강재 스트립의 위치에 발생하는 응력
- 지점부 반력
- 1점 인상 시 모멘트



(a) 추력선도

stress (MPa)	
Conc. Panel	Outrigger
6.749	-32.457
6.726	-40.426
6.084	-35.089
5.316	-28.270
4.986	-31.796
5.396	-51.601
6.545	-86.937
8.186	-131.824
9.897	-176.524
11.191	-209.671
11.673	-221.927
11.191	-209.671
9.897	-176.524
8.186	-131.824
6.545	-86.937
5.396	-51.601
4.986	-31.796
5.316	-28.270
6.084	-35.089
6.726	-40.426
6.749	-32.457

(b) 부재 응력도

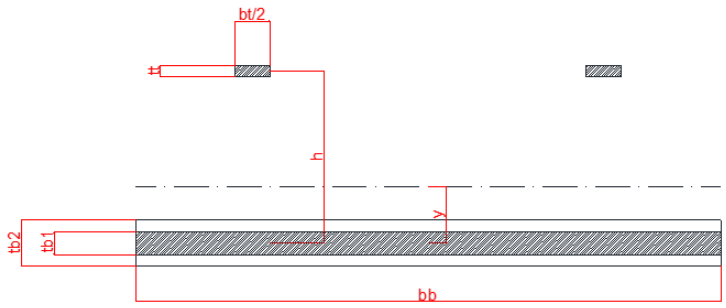


(c) 인상 시 모멘트

<지중아치 설계 프로그램 실행 후 주요 결과물>

(3) 최적설계 시 고려 가능 항목

- 지중아치 형상 및 단면 제원
- 토체 물성치
- 토체 높이
- 토체면 경사
- 지중아치 형상 (복합 곡률 및 비정형 가능)
- 수동토압 비율



Dimension

Stiffener 폭(합산)	bt	200	mm	
Stiffener 두께	tt	12	mm	
재료 강성비	n	7.193		
Conc 패널 폭	bb	1000	mm	
Conc panel 지압면 두께	tb1	70	mm	
Conc panel 전체 두께	tb2	120	mm	
Stiffener-Conc panel 중심간 거리	h	310	mm	

Section Properties

Stiffener 단면적	At	2400	mm2	steel
Stiffener 환산단면적	Ate	17263	mm2	conc
Conc panel 지압면 단면적	Ab	70000	mm2	conc
단면적합계(지압면 고려)	A	87263	mm2	conc
Conc panel 전체단면적	Ab2	120000	mm2	conc
단면적합계(전단면 고려)	A2	137263	mm2	conc
중심선 높이(지압면)	yb	61	mm	from CL of Conc Panel
중심선 높이(전단면)	yb2	39	mm	
단면2차모멘트(지압면 고려)	I	1.331E+09	mm4	conc
단면2차모멘트(전단면 고려)	I2	1.450E+09	mm4	conc
단면계수(stiffener)	Zt	744000	mm3	steel
단면계수(conc panel)	Zb	21700000	mm3	conc

Weight

강재 단위중량	ps	78.5	kN/m3
Conc 단위중량	pc	25	kN/m3
connector-stiffener 물량비		30%	
충진콘크리트 단위길이당 중량		6.25	kN/m ☐ 포함여부
단위길이당 중량	w	3.245	kN/m

Strength

콘크리트 강도		35	MPa
강판항복강도		450	MPa (SS590) --> SS450 (KS D 4503)

Young's Modulus

콘크리트 탄성계수		27806	MPa
강판 탄성계수		200000	MPa

Resistance Factor

콘크리트 지압 재료계수	Φc	0.65	
강재 인장항복 저항계수	Φty	0.90	
강재 인장파단 저항계수	Φtu	0.80	

Design Strength

강판 설계인장강도	Pt	972	kN	405 MPa
콘크리트 설계지압강도	Pb	1772	kN	25 MPa (지압면)
소성 모멘트강도	Mr	301	kN.m	30.132 t.m

Sample

인양시 설계모멘트	M	150	kN.m	
Tmax		484	kN	
Stiffener 응력	ft	201.6	MPa	steel
Conc panel 응력	fb	6.9	MPa	conc

<부재 제원 및 물성치 입력 화면>

Properties and Design Criteria

filling			
friction angle of fill (phi)	35	deg	
lateral earth pressure coefficient	coef.		index
at rest (Ko)	0.43		r
active (Ka)	0.27		a
passive (Kp)	1.85	50%	p
mobilization factor (m)	0.33		
unit weight of fill	2.7	t/m^3	1.35
concrete voussior			
unit weight of concrete	2.4	t/m^3	
strength	28	MPa	
material partial factor (thrust zone)	0.65		
material partial factor (average)	0.3		
design strength (thrust zone)	15.47	MPa	
design strength (average)	7.14	MPa	

<설계 변수 입력 화면>

(4) 프로그램 사용방법

- 변수 입력

a. 강재 스트립 제원: 폭, 두께

b. 프리캐스트 블록 제원: 폭, 지압면 두께, 전체 두께

c. 프리캐스트 블록 및 강재 스트립 간 거리

d. 재료 강도 및 탄성계수

e. 재료 저항계수

f. 재료 단위중량

g. 토체 마찰각

h. 토피고

i. 토체면 경사

j. 가설 시 타이 장력

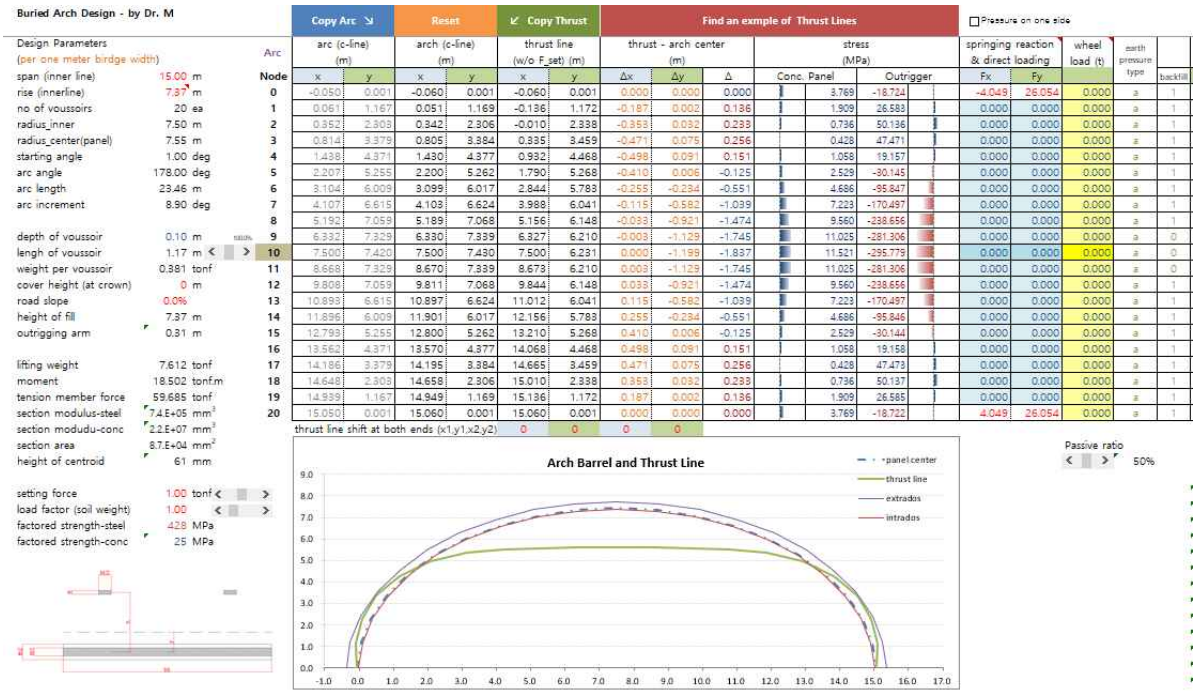
k. 하중계수

l. 토체 단위중량

m. 주동토압 또는 수동토압

n. 수동토압 비율

o. 상재하중



<지중아치 설계 프로그램 메인 실행 화면>

- 실행 및 활용

a. 각종 변수 입력

b. 기본 아치 형상 확인 및 복사: 'Copy Arc' 버튼 클릭

c. 1차 추력선 확인: 'Find an example of Thrust Lines' 버튼 클릭

d. 프리캐스트 블록 및 강재 스트립 응력 확인

e. 반력 확인

f. 필요 시 아치 형상 조정 - 추력선과 동일한 최적 형상으로 조정: 'Copy thrust' 버튼 클릭 (반복 실행으로 최적 형상 조정 가능)

g. 인상 시 모멘트 확인 (1점 인상 시에만 참조)

h. 각 변수 조정 후 반복 실행하여 최적 설계안 도출

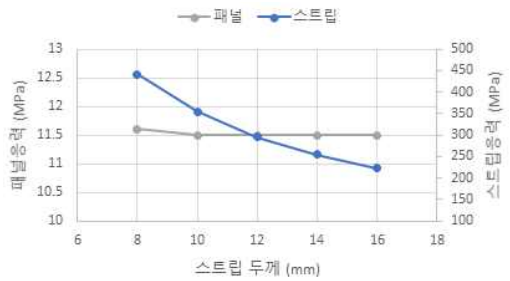
* 토피고 조절을 통해 토공 중 응력 검토 필요

(5) 단면 최적화 과정

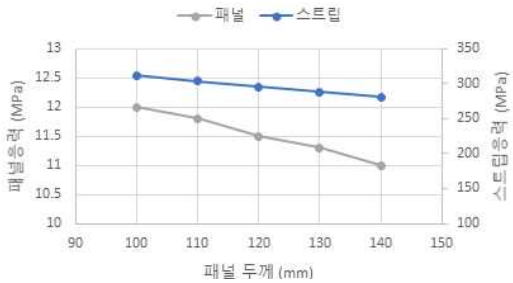
- 고정변수: 기본 설계 조건
  - 아치 형상(지간장, 라이즈), 패널 폭, 스트립 폭
    : 지간장 15m / 라이즈 7.4m / 패널 폭 1000mm / 스트립 폭 100mm
- 설계변수 : 아치 단면 (콘크리트 패널 및 강재 스트립 단면)
  - 패널 두께, 스트립 두께, 패널-스트립 간 거리
    (각 부재 두께 및 거리 감소 시 단면의 감소가 가능하지만 부재 응력 증가)
- 제한조건 설정
  - 강재 스트립 응력: 300MPa
  - 콘크리트 패널 응력: 12MPa

<지중아치 시스템 최적 설계 변수>

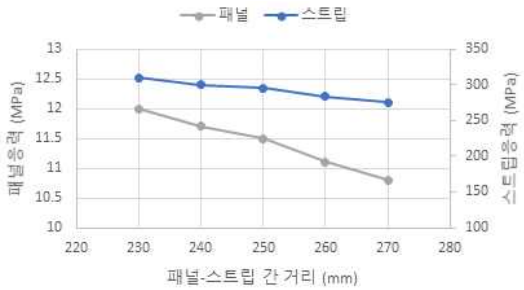
스트립 두께		패널 두께		패널-스트립 간 거리	
범위	간격	범위	간격	범위	간격
8~16mm	2mm	100~140mm	10mm	230~270mm	10mm



(a) 스트립 두께 조정



(b) 패널 두께 조정



(c) 패널-스트립 간 거리 조정

<지중아치 시스템 최적 설계>

- 설계변수 조정 및 분석

a. 강재 스트립 두께
  - 콘크리트 패널 응력 변화 미소
  - 강재 스트립 12mm 미만 시 스트립 응력 제한조건 초과
  → 강재 스트립 두께: 12mm 이상

b. 패널 두께
  - 강재 스트립 응력 변화 낮음
  - 패널 두께 110mm 이하 시 패널 및 스트립 응력 제한조건 초과
  → 콘크리트 패널 두께: 120mm 이상 (제작 및 시공 시 핸들링 용이)

c. 패널-스트립 간 거리
  - 거리 240mm 이하 시 패널 및 스트립 응력 제한조건 초과
  → 패널-스트립 간 거리: 250mm 이상

d. 검토
  - 조건: 스트립 두께 12mm / 패널 두께 120mm / 패널-스트립 간 거리 250mm
  - 결과: 강재 스트립 응력 제한조건 모두 만족
  → 최종안: 스트립 두께 12mm / 패널 두께 120mm
  / 패널-스트립 간 거리 250mm

- (강재 스트립과 프리캐스트 콘크리트 블록 활용 모듈러 지중아치 경제성 분석) 본 연구개발의 강재 스트립과 프리캐스트 콘크리트 블록 활용 모듈러 지중아치 시스템의 및 시공단계를 정립하고 각 단계에 소요되는 비용을 산정하여 경제성을 분석하였음.

(1) 시공단계 및 소요일수

- 강재 스트립과 프리캐스트 콘크리트 블록 활용 모듈러 지중아치 시스템의 시험시공을 통해 시공단계를 정립하고 경간장 15m(아치길이 22m) 길이 20m의 지중아치구조를 대상으로 하여 각 단계에 소요되는 일수를 산정하였음
  : 동일 규모의 타 형식 아치는 대략 14~16일이 소요되는 것에 비해 본 지중아치는 약 10일의 공사기간이 소요될 것으로 예상

<지중아치 시스템 시공단계 및 소요일수>

구분	공종	소요일수
기초	줄기초 배근	2
	타설 및 양생	3
	레빌링 패드	1
설치	트럭 운반	1
	크레인 일괄 설치	1
연결	아치배럴 간 강재연결	1
방수	방수시트 시공	1
합계		10

(2) 단계별 공사비 산정

- 전체 공사비 산정을 위해 본 지중아치의 패널당 단가 및 파형강판 단가를 우선 산정함

<본 연구개발 과제의 지중아치 및 파형강판 지중아치 공사비 산정 근거>

(a) 본 과제의 지중아치 패널

구성	산출근거		패널당 단가 (원)	비고
콘크리트 패널	규격 (mm)	120 x 500 x 2000	43,200	35MPa 와이어메쉬포함
	체적(m^3)	0.12		
	체적당단가(원/m^3)	360,000		
알루미늄 거푸집	규격 (mm)	184 x 1.0t (R30)	3,463	오목단부 설치
	체적(mm^3)	184000		
	중량 (kg)	0.495		
	중량당 단가 (원/kg)	7,000		
매입물(볼트)	규격 (mm)	Φ20	4,000	매입물고정프레임 비용무시
	수량 (ea)	4		
	개당 단가 (원/ea)	1,000		
역V형 연결재	규격 (mm)	500 x 80 x 5t	7,850	규격 생산
	수량 (ea)	2		
	중량 (kg/ea)	1.570		
	단가 (원/kg)	2,500		
인장재	규격 (mm)	500 x 200 x 12t	25,120	주문생산
	수량 (ea)	2		
	중량 (kg/ea)	6.280		
	단가 (원/kg)	2,000		
조립	카고크레인 임대 (원/일)	400,000	10,000	최소조립수량가정 20m x 2barrel
	2인 노무비 (원/일)	400,000		
	일 조립수량	80		
합계			93,633	

(b) 파형강판 (규격: SS590, t=5.45, 중량=34.5kg/m2)

가격 정보	단가 (원/m^2)	15% 겹침 보정 (원/m^2)
물가정보 공시가격 (2020년 9월)	167,000	192,050
판매가(공시가격의 75% 협상가)	125,250	144,038

(c) 기타 단가

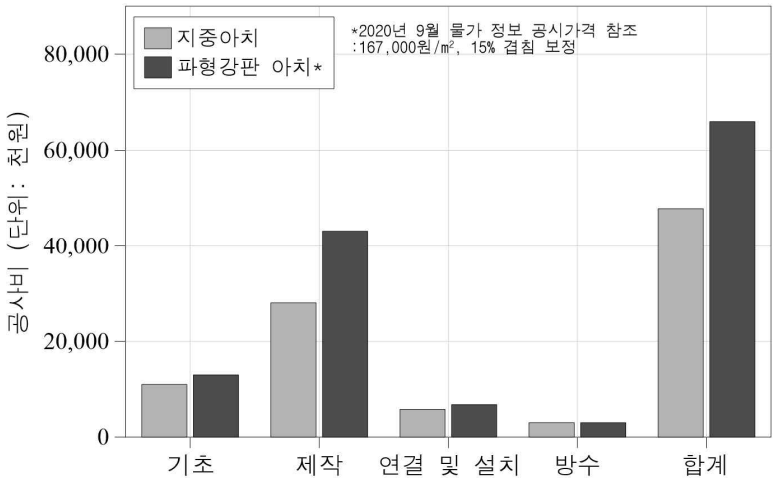
구분	공종	단가
기초	철근콘크리트	250천원/m^3
	레벨링 패드 설치 (양측	50천원/m^2
설치	트럭 운반	400천원/회
	크레인(50톤)	3,200천원/일
	카고/비계/인력	1,200천원/일
연결	아치배럴 간 강재연결	100천원/회
방수	방수시트 설치	10천원/m^2
	실란트 충전	10천원/m^2

- 경간장 10m(아치 폅침 길이 22m), 길이 20m 규모의 지중아치와 생태교량으로 많이 사용되는 경간장 15m(아치 폅침 길이 22m), 길이 20m인 규모의 지중아치를 대상으로 하여 본 지중아치와 파형강판 아치의 공사비를 비교하였으며, 본 지중아치는 위의 패널당 단가를 활용하였고 파형강판 아치는 물가정보 공시가격을 활용하였음(토공 및 면벽공사 제외).
  : 경쟁 공법인 파형강판 아치 대비 약 30% 공사비 절감 가능 (경간장 10m: 27.4%, 경간장 15m: 28.6%)

< 지중아치 공사비 비교 (경간장 10m, 아치 폅침 길이 15m, 길이 20m 기준) >

(단위: 천원)

공법	본 지중아치		파형강판 아치*	
구분	공종	공사비	공종	공사비
기초	철근콘크리트(40m^3)	10,000	철근콘크리트(40m^3)	10,000
	레벨링 패드 설치(20m)	1,000	기초 연결부 철물 시공(20m)	3,000
제작	강재스트립(20열) 및V형연결재(800개)	9,891	대골형 파형강판 (5.45t) 440m^2x15% 겹침할증	43,200
	PC 패널 0.5m x 2m (300장)	13,999		
	기타 매입물	1,200		
	패널 조립	3,000		
설치	트럭 운반(4회)	1,600	트럭 운반(2회)	800
	크레인(50톤) 일괄설치(1일)	3,200	카고/비계/인력 (5일)	6,000
연결	아치배럴 간 강재연결(10회)	1,000	-	-
방수	방수시트 설치(10회)	3,000	실란트 충전(440m^2)	3,000
합계	합계	47,890	합계	66,000

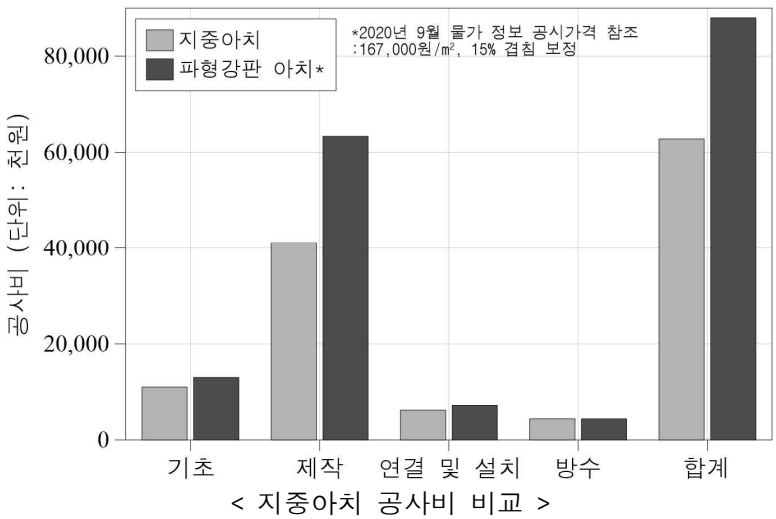


< 지중아치 공사비 비교 >

< 지중아치 공사비 비교 (경간장 15m, 아치 폴침 길이 22m, 길이 20m 기준) >

(단위: 천원)

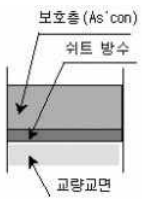
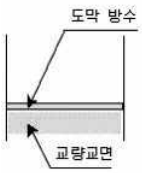
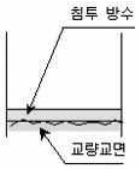
공법	본 지중아치		파형강판 아치*	
구분	공종	공사비	공종	공사비
기초	철근콘크리트(40㎥)	10,000	철근콘크리트(40㎥)	10,000
	레벨링 패드 설치	1,000	기초 연결부 철물 시공	3,000
제작	강재스트립(20열) 및V형연결재(1200개)	14,507	대골형 파형강판 (5.45t) 440㎡x15% 겹침할증	63,360
	PC 패널 0.5m x 2m (440장)	20,532		
	기타 매입물	1,760		
	패널 조립	4,400		
설치	트럭 운반 (5회)	2,000	트럭 운반 (3회)	1,200
	크레인(50톤) 일괄 설치	3,200	카고 + 비계 + 인력	6,000
연결	아치배럴 간 강재연결	1,000	-	-
방수	방수시트 설치	4,400	실란트 충전	4,400
합계	합계	62,799	합계	87,960



< 지중아치 공사비 비교 >

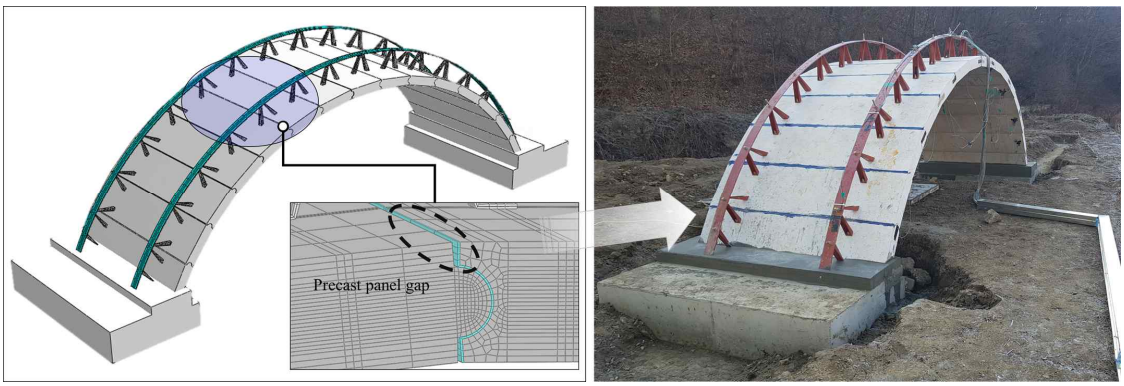
- (지중아치 방수방안 제안 및 적용성 검토) 지중구조물과 콘크리트 방수와 관련된 기준 및 방수재의 성능 기준 등에 대하여 문헌 검토를 실시하였음. 한국전력공사에서는 수용성 에폭시 모르타르 외벽 방수를 원칙으로 하지만 외벽 방수가 곤란한 교통혼잡지역, 작업공간이 협소한 장소 등은 내벽 방수를 시행하고 있음. 현장 타설시 구조물의 치밀성이 떨어짐 등의 이유로 완벽한 방수가 어려우므로 가능한 외벽 방수를 원칙으로 시행하고 있음. 토목구조물의 방수 지식(오상근)에서는 토목 방수에 대하여 다음과 같은 성능을 만족하여야 한다고 제시하였음.
    - 불투수성으로 내수성을 가질 것
    - 강판 상판의 변형이나 콘크리트의 균열발생에 대해 대응할 수 있는 추종성이 있을 것
    - 차량 교통의 발진, 정지에 따른 전단력, 충격하중 등에 대해서도 충분한 저항성이 있을 것
    - 상판 및 포장층과의 접착성이 우수할 것
    - 열 영향에 의해 재질이 변하지 않을 것
    - 취급이 용이하고 시공성이 우수할 것
    - 화학작용에 대해서 안정할 것
- 에폭시수지계 방수, 방식 도료의 종류는 무용제계, 수계, 용제계로 구분하였으며 시공현장에서는 대부분 용제계를 사용하는 사례가 많았으며, "에폭시 방수"라는 표현으로 설계서에 제시되어왔음. 도료의 품질과 관련하여 "KS F 4921"의 5. 품질에 규정하는 성능에 적합하여야 하며, 콘크리트 바탕에 도포한 방수, 방식층의 품질은 시험방법에 따라 검사를 실시하고 일반적인 교면방수시스템 두께 기준 등의 성능을 확보한 재료를 사용하여야 함.

<차량용 도로교의 방수공법 분류 (오상근, 2012)>

구분	시트식	도막식		침투식
		고무계 및 역청계	수지계	
공법				
	총두께 44.0㎜	총두께 42.5㎜	총두께 2.5㎜	침투깊이 4.0㎜
	시트 4㎜ + 보호층 40㎜	도막 2.5㎜ + 보호층 40㎜	도막 2.5㎜	

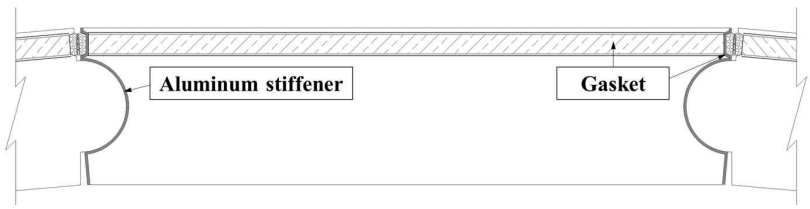
- 국토교통부 (터널표준시방서)에서는 방수에 대하여 다음과 같이 설명하고 있음
    - 비배수형 방수형식 터널의 경우에는 내부로 지하수가 유입되지 않도록 콘크리트 라이닝 전 주면에 방수막을 설치하여야 함
    - 방수막은 상호 접착이 좋은 재질이어야 하며, 한국산업표준(KS)을 만족하는 제품을 사용하여야 함
    - 세그먼트 라이닝 방수에는 실링, 코킹, 볼트체결 등의 형식이 있으며, 사용목적과 현장여건에 적합하도록 한 가지 또는 여러 가지의 방법을 조합하여 사용할 수 있음
    - 실링 재료에는 합성 고무계, 복합 고무계, 수팽창 고무계 등이 있으며, 수밀성, 내구성, 압착성, 복원성, 시공성 등이 우수한 것을 선택하여야 함
    - 코킹 재료에는 에폭시계, 치오콜계, 요소수지계 등의 재료가 있으며, 현장조건을 고려하여 적합한 재료를 선정하여야 함
    - 콘크리트 세그먼트에서 주입구나 볼트 체결부 주변에서 미세한 균열에 의해 누수가 많은 경우는 에폭시 등으로 방수하여야 함

- 제안 지중아치 시스템의 경우 아치 형성 과정에서 프리캐스트 패널 연결부에 틈이 발생하게 되어 방수 대책이 요구되므로 현장 적용 실험 진행 과정에서 아치 설치 이후 프리캐스트 패널 연결부에 코킹 방수법을 적용하였음. 현장 실험에 적용한 방수재는 주관연구기관에서 이음부 처리 방안에서 설명한 것과 같이 다양한 처리 방법이 있으나 이음부에만 우레탄 실리콘을 코킹하였으며, 시공 이후 지속적으로 관찰하였으나 프리캐스트 패널 하부에 누수 흔적이 나타나지 않았으므로 방수 기능을 하고 있음을 확인하였음. 프리캐스트 패널 이음부에만 방수 처리를 하더라도 방수 성능을 충분히 확보할 수 있으나, 지중 구조물의 특성상 유지관리가 불가하므로 프리캐스트 패널의 노후화로 인하여 미세한 공극을 통하여 누수가 발생할 수 있으므로 이음부 뿐만 아니라 전면에 수용성 도막식 방수재를 도포하고 우레탄 실리콘을 코킹하는 방법을 적용하는 것이 적절할 것으로 판단됨.

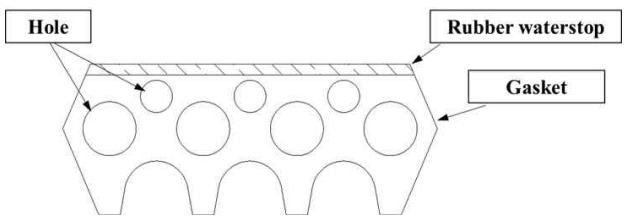


<제안 지중아치 시스템의 방수 대책 적용 모습>

- (지중아치 방수방안 개선안) 터널 구조물의 경우 세그먼트 라이닝에 수팽창 지수재와 가스캣(Gasket)을 활용하여 방수 대책을 마련하고 있음. 제안 지중아치 시스템의 경우에도 세그먼트 형식으로 구성되어 있으므로 터널 세그먼트 라이닝에 적용되는 수팽창 지수재와 가스캣을 활용하여 방수방안을 마련하고자 함. 수팽창 지수재가 적용된 가스캣은 프리캐스트 패널과 패널, 아치와 아치 사이에 발생하는 틈을 통하여 흙 입자 또는 수분의 침투를 방지할 수 있도록 하였음. 이에 기존 프리캐스트 패널의 원형 연결부 윗부분에 가스캣을 적용하기 위하여 단면 형상을 개선하였음. 가스캣 적용을 위하여 기존 프리캐스트 패널 단부에 적용된 알루미늄 보강재의 형상도 다음과 같이 변경되었음.
- 제안 지중아치 시스템 연결부의 방수대책으로 본 연구에서 제안한 수팽창지수제와 가스캣을 활용한 방수시스템을 적용할 수 있을 것으로 판단됨. 추가적인 방수방안으로는 아치 상부 전체를 콘크리트로 타설하는 방법, 아치 상부에 성토를 하면서 별도의 차수 시스템을 설치하는 방안 등을 적용하여 방수 대책을 마련할 수 있을 것으로 판단됨.



< 가스캣이 적용된 프리캐스트 패널 단면 >



< 적용 가스캣 형상 >

2. 연구개발 추진전략 및 방법

○ (추진전략) 강재 스트립과 프리캐스트 콘크리트 블록 활용 모듈러 지중아치 구조 개발 기술은 특허출원 이후 기본 개념에 대한 구조적 검토 등을 통하여 기술적 실현 여부만이 검토되었음. 본 연구를 통하여 개념적, 해석적으로 검토된 내용을 구체화된 해석과 요소기술에 대한 평가를 통하여 실현 가능성을 검토하고자 하였음.

- (이론적 확립) 본 연구에서 개발한 기술은 강재 스트립과 프리캐스트 콘크리트 블록 활용 모듈러 지중아치 구조로 기존 콘크리트 아치 및 파형강판 아치 구조와 다르게 프리캐스트 콘크리트 블록과 강재 스트립이 복합적으로 구성되어 있으므로 해당 기술의 구조 상세검토를 통하여 해당 개발 지중아치의 유효성과 타당성을 확보하고 이론적으로 입증하기 위하여 노력하였으며, 다양한 학회 참가를 통하여 전문가의 의견을 반영하였음.

< 지중아치 시스템 관련 학회발표 현황 >

구분	학회명	발표 논문명
1	한국구조물진단유지관리공학회 2019년도 가을 학술발표회	강재 리브 연결 분절 프리캐스트 아치 교량 패널 연결부 거동 평가
2	한국구조물진단유지관리공학회 2019년도 가을 학술발표회	프리캐스트 패널 아치 연결부 상세 해석
3	한국구조물진단유지관리공학회 2019년도 가을 학술발표회	Abaqus/CAE를 이용한 모듈러지중아치교량의 지진해석
4	2019 대한토목학회학술대회	강재 스트립 연결 분절형 프리캐스트 패널 아치교량의 거동
5	2019 대한토목학회학술대회	Effect of the Friction Coefficient between Segments on Strain and Stress of Lining Structure of 3-hinge Arch Culvert Under Static Loading
6	한국구조물진단유지관리공학회 2020년도 여름 학술발표회	아웃리거 설치 분절 프리캐스트 콘크리트 아치 시스템의 아치형성 실험
7	한국구조물진단유지관리공학회 2020년도 여름 학술발표회	아웃리거가 구비된 분절 프리캐스트 콘크리트 아치 시스템의 시공과정 평가
8	2020년 한국해양공학회 춘계학술대회	Seismic Behavior of Modular Underground Arch Bridge: A case study
9	2020년 한국해양공학회 춘계학술대회	Seismic Response Of Precast Panel-Segmented Arch Bridge With Outriggers
10	2020 대한토목학회학술대회	강재 아웃리거 설치 프리캐스트 아치 시스템의 인상 해석
11	2020 대한토목학회학술대회	아웃리거 설치 프리캐스트 패널 아치 시스템의 하중 저항 성능
12	2020 대한토목학회학술대회	Seismic response of Precast Panel-Segmented Arch Bridge with Outriggers Considering the Arch Size Effect
13	2020년 추계 소음진동학술대회	중소지간 적용 아치시스템의 지진 거동 평가
14	한국구조물진단유지관리공학회 2020년도 가을 학술발표회	아웃리거가 구비된 프리캐스트 패널 아치 시스템의 패널 연결부 해석

- (지적재산권) 1차년도에는 '앵커 부재가 구비된 지중 아치 구조 및 이의 시공 방법' 으로 개발 지중아치 구조와 시공 방법에 대한 특허를 출원하였으며, 2차년도에는 '강재 일체형 아치구조 거푸집' 으로 강재 거푸집을 활용한 지중아치 시공 방법에 대한 특허를 출원하고 '프리캐스트 블록 및 강재 스트립 활용 지중아치 구조 설계 프로그램' 을 개발하여 프리캐스트 콘크리트 블록 및 강재 스트립의 단면을 검토할 수 있도록 하였음.

구분	지적재산권의 종류	명칭
1	특허(출원)	앵커 부재가 구비된 지중 아치 구조 및 이의 시공 방법 (등록번호 10-2019-0142787)
2	특허(출원)	강재 일체형 아치구조 거푸집 (등록번호 10-2020-0180761)
3	소프트웨어	프리캐스트 블록 및 강재 스트립 활용 지중아치 구조 설계 프로그램 (등록번호 C-220-036967)

○ (추진체계) 주관연구기관에서는 제안 지중 아치 구조시스템 연결부의 실험 · 해석적 분석으로 요소기술 단위의 안정성 평가로 제안 지중아치 구조시스템의 요소 단위 기술 평가에 따른 구조적 거동 및 안정성 평가를 담당하고 공동연구기관에서는 제안 지중아치 시스템의 지반-구조물 상호작용 및 구조물-구조물 간의 연계(접촉)거동을 지진해석과 관련 설계변수의 불확실성을 고려한 신뢰성 해석을 수행하여 정량적 안전성 평가가 가능한 해석기법 개발을 담당함. (주) 택한을 위탁연구기관으로 편성하여 지중아치 시스템 관련 설계 변수 입력 시 토압하중, 주부재 응력, 추력선도 등이 자동적으로 생성되어 신속한 최적 설계 가능하게 하여 실무적인 차원에서 전문성을 보강하였음.



○ 연구추진경과

1차년도													
일련번호	연구내용	추진 일정											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	프리캐스트 콘크리트 블록 연결부 검토												
2	콘크리트 블록 연결 스트립 구조성능 및 평가												
3	프리캐스트 콘크리트 블록과 지반의 상호작용해석 수치모델 작성/검토												
4	간편 지진응답해석 수치모델의 적용성 검토 및 결과 비교분석												
5	지중아치 시스템의 구조적 안전성 검토												

2차년도													
1	프리캐스트 콘크리트 블록 연결부 요소기술 성능 평가												
2	모듈화 연결된 프리캐스트 블록 연결부 시스템 성능 평가												
3	연결스트립 연결 시스템 지중아치의 시공프로세스 검토												
4	SSI를 고려한 프리캐스트 모듈 지중아치 구조시스템의 지진시 거동 분석												
5	프리캐스트 모듈 지중아치의 지진신뢰성 해석												
6	단면 최적화 적용방안 마련												

3. 연구개발성과

○ 핵심연구성과 (연구개발계획서 기준)

연번	핵심성과 (CTE)	핵심성과 설명	성과 유형	연구기관	해당 연차	TRL
1	프리캐스트 모듈 지중아치 요소기술 개발	프리캐스트 콘크리트 블록 연결부 평가 및 해석 기술	공법 · 기법	경남과기대	2	4
2	프리캐스트 모듈 지중아치의 지진신뢰성 해석	프리캐스트 모듈 지중아치의 동적해석기반 신뢰성 평가 및 기법	공법 · 기법	전남대	2	4
3	지중아치 최적 설계 자동화 프로그램	지중아치 최적 설계용 프로그램 개발	소프트웨어	(주)택한	2	4

○ (핵심성과 1) 프리캐스트 모듈 지중아치 요소기술 개발

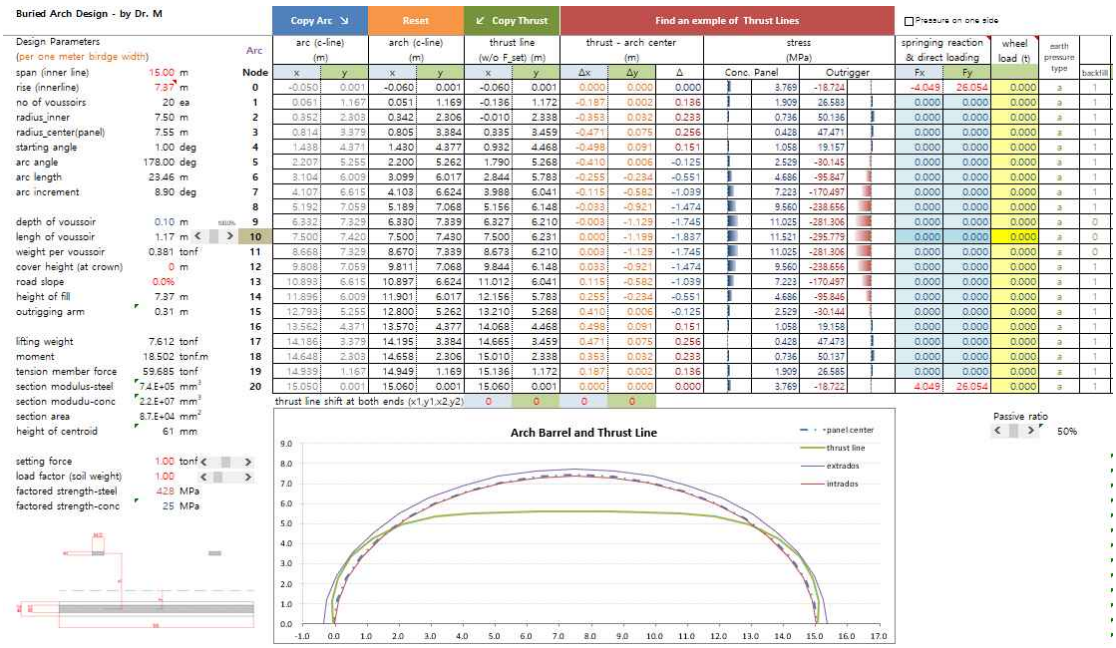
핵심성과 1		
정의	프리캐스트 콘크리트 블록 연결부 및 강재 스트립, 아웃리거 등 지중아치 구성 부재 상세 요소 해석으로 정밀 거동 분석과 지중아치 구조시스템의 구조해석 및 실험 수행으로 지중아치 시스템의 구조 거동 특성 및 부재 요소 성능 평가를 통한 요소기술 개발	
목적	- 프리캐스트 콘크리트 연결부 상세 해석 및 실험으로 단면 형상과 구조 성능 확인 - 지중아치 구조시스템의 구조해석 및 현장 실험을 통한 부재 요소의 적절성 검토 - 부재 단위실험 및 현장 실험을 통한 부재 성능 및 유효성, 적절성이 검토된 요소기술의 개발	
성능목표	(기존기술 수준) 지중 아치 구조시스템 연결부 요소를 기존 지중아치 구조의 거동특성을 고려하여 평가 및 해석을 적용하기 어려움 (개발기술 수준) 제안 지중 아치 구조시스템 연결부의 실험 · 해석적 분석으로 요소기술 단위의 안정성 평가로 제안 지중아치 구조시스템의 부재 단위 및 전체 시스템에 대한 실험 · 해석적 분석을 통한 성능 및 구조적 거동, 안전성이 고려된 제안 지중아치 구조시스템 요소 기술 개발	
성과달성 책임자 (소속기관)	안진희(경남과학기술대학교)	
소요기간	’19.04 ~’ 20.12(1년 8개월)	
성과달성 확인방법	SCI급 논문 게재 여부	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	0건
	논문	국내 : 1편 SCI(E) : 3(3)편 (21.02.25 기준 3편 게재, 1편 개정중, 2편 심사중)
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

○ (핵심성과 2) 프리캐스트 모듈 지중아치의 지진신뢰성 해석

핵심성과 2		
정의	프리캐스트 모듈형 지중아치의 지반-구조물 상호작용 및 구조물-구조물 간의 연계(접촉)거동을 고려한 지진해석과 관련 설계변수의 불확실성을 고려한 신뢰성해석을 수행하여 정량적 안전성 평가가 가능한 진일보된 해석기법	
목적	- 지반-구조물-구조물 간의 상호작용 및 설계변수의 불확실성 고려 등을 통한 특수 구조물의 지진해석기술에 대한 진보 - 한계상태설계법 등의 최근 설계법에서 목표로 하는 안전성수준에 대해 정량적/수치적 확인이 가능하여 설계목표 달성여부의 확인을 통한 안전성 확보 - 제안된 구조물의 특성(모듈간의 접촉거동 등)을 고려한 엄밀 지진해석이 가능하여 지진시 기존의 방법에 비해 상대적으로 정확한 거동예측이 가능하여 안전성 확보를 전제로 한 경제적 설계의 구현	
성능목표	(기존기술 수준)일체형 지중아치의 확정적 지진해석으로 제안 구조물의 특성을 고려하기 용이하지 않으며 설계변수의 불확실성을 고려하기 어려움 (개발기술 수준)프리캐스트 모듈형 지중아치의 지반-구조물 상호작용 및 구조물-구조물 간의 연계(접촉)거동을 고려한 지진해석과 관련 설계변수의 불확실성을 고려한 신뢰성해석을 수행하여 정량적 안전성 평가가 가능한 진일보된 해석기법	
성과달성 책임자 (소속기관)	허정원(전남대학교)	
소요기간	’19.04 ~’ 20.12(1년 8개월)	
성과달성 확인방법	SCI급 논문 게재 여부	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	0건
	논문	SCI(E) : 0(2)편 (21.02.25 기준 1편 개정중, 1편 심사중)
	저작	0건
	S/W	0건
	신기술	0건
	기타	0건

○ (핵심성과 3) 지중아치 최적 설계 자동화 프로그램

핵심성과 3		
정의	대상 현장 관련 설계 변수(지중아치 시스템 형상변수, 고정하중 및 활하중, 하중계수 및 저항계수 등)을 입력하면 지중아치 시스템 주부재의 응력 및 추력선도가 자동적으로 생성되고, 해당 결과를 참고하여 입력변수의 반복적 조정을 통해 최적 설계안을 도출할 수 있는 프로그램	
목적	- 지중아치 시스템 주부재 단면의 최적 설계 - 지중아치 시스템 상세 구조계산을 설계를 위한 기본 데이터 생성	
성능목표	(기존기술 수준) 반복적 수동 계산을 통한 설계 (개발기술 수준) 지중아치 시스템 관련 설계 변수 입력 시 토압하중, 주부재 응력, 추력선도 등이 자동적으로 생성되어 신속한 최적 설계 가능	
성과달성 책임자 (소속기관)	조광일 ((주) 택한)	
소요기간	’19.04 ~’20.12(1년 8개월)	
성과달성 확인방법	상기 성과물의 소프트웨어 등록 여부 확인	
성과달성에 따른 정량적 성과	특허 출원/등록	2건
	논문	0건
	저작	0건
	S/W	1건
	신기술	0건
	기타	0건



< 지중아치 설계용 자동화 프로그램 실행화면 >

○ 각 항목별 정량적 연구성과

구분	성과종류	성과명
1_1	[특허출원]	앵커 부재가 구비된 지중 아치 구조 및 이의 시공 방법
1_2	[특허출원]	강재 일체형 아치구조 거푸집
2_1	[국내논문]	프리캐스트 콘크리트 패널 분절 아치 시공을 위한 선설치 앵커의 인발 강도 평가
3_1	[국외논문]	The Performance Assessment of a Precast, Panel-Segmented Arch Bridge with Outriggers
3_2	[국외논문]	Structural Performance of a Segmental Precast Arch System with Outrigger by Sectional Geometry of Structural Member
3_3	[국외논문]	Segment precast arch bridge with outriggers reinforced with aluminum stiffeners at panel ends
3_4	[국외논문]	Lifting Test and Analysis of a Segmented Arch System with Outrigger Ribs and Flexural Loading Tests of Precast Panels
3_5	[국외논문]	Construction Stage Analysis of a Precast Concrete Buried Arch Bridge with Steel Outriggers from Full-scale Field Test
3_6	[국외논문]	Full-scale Field Testing of a Precast Concrete Buried Arch Bridge with Steel Outriggers: Field Loading Test
3_7	[국외논문]	Finite Element Analysis-Aided Seismic Behavior Examination of Modular Underground Arch Bridge
3_8	[국외논문]	Seismic Performance of Newly Developed Buried Arch System Considering the Effects of Earthquake Frequency Content
4_1	[소프트웨어]	프리캐스트 블록 및 강재 스트립 활용 지중아치 구조 설계 프로그램
5_1	[학술발표]	강재 리브 연결 분절 프리캐스트 아치 교량 패널 연결부 거동 평가
5_2	[학술발표]	프리캐스트 패널 아치 연결부 상세 해석
5_3	[학술발표]	Abaqus/CAE를 이용한 모듈러지중아치교량의 지진해석
5_4	[학술발표]	강재 스트립 연결 분절형 프리캐스트 패널 아치교량의 거동
5_5	[학술발표]	Effect of the Friction Coefficient between Segments on Strain and Stress of Lining Structure of 3-hinge Arch Culvert Under Static Loading
5_6	[학술발표]	아웃리거 설치 분절 프리캐스트 콘크리트 아치 시스템의 아치형성 실험
5_7	[학술발표]	아웃리거가 구비된 분절 프리캐스트 콘크리트 아치 시스템의 시공과정 평가
5_8	[학술발표]	Seismic Behavior of Modular Underground Arch Bridge: A case study
5_9	[학술발표]	Seismic Response Of Precast Panel-Segmented Arch Bridge With Outriggers
5_10	[학술발표]	강재 아웃리거 설치 프리캐스트 아치 시스템의 인상 해석
5_11	[학술발표]	아웃리거 설치 프리캐스트 패널 아치 시스템의 하중 저항 성능
5_12	[학술발표]	Seismic response of Precast Panel-Segmented Arch Bridge with Outriggers Considering the Arch Size Effect
5_13	[학술발표]	중소지간 적용 아치시스템의 지진 거동 평가
5_14	[학술발표]	아웃리거가 구비된 프리캐스트 패널 아치 시스템의 패널 연결부 해석

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

○ (기술적 성과) 기계적 이음을 배제한 프리캐스트 콘크리트 블록 지중아치 구조시스템의 요소기술에 대한 해석 및 구조적 성능평가와 구조적 안전성 및 일괄 가설, 시공성 검토를 통하여 제안 지중아치 시스템의 적용성을 검토하였음. 본 연구에서 프리캐스트 블록간 기계적 이음이 없는 구조시스템 개발을 통하여 기존 지중아치 구조와 비교하여 시공성 및 이동성이 개선되어 보다 신속하고 간편한 지중아치구조 시스템 기술을 개발함.

○ (사회, 경제적 성과) 개발 지중아치 구조 시스템은 개착식 터널이나 생태교량, 지하차도 등 다양한 현장에 적용 가능하며 시공성이 우수하여 급속시공이 가능할 뿐만 아니라 기존 사회적 요구가 주변 환경과 관련하여 여유와 관심이 고조되어 가는 추세에 따라 지중 매립을 통해 자연친화적인 경관기능을 향상시킬 수 있음. 앞서 분석된 결과에서 지중아치 적용시장은 연간 1,500억원 수준으로 본 기술의 도입으로 기존 대비 공사비를 30% 이상 감소시켜 전체시장의 50%를 대치할 경우 약 225억원/년의 건설비용 절감 가능함.

< 연구개발 계획서 상 제시된 성과점검 기준 >

구분	핵심 성과물 (CTE)		단위 성과물		성과점검기준							양적성과 현황
					질적 성과지표		목표치	달성치	측정 방법	검증 방법	가중치	달성치
주관	A	강재 스트립과 프리캐스트 콘크리트 블록 활용 모듈러 지중아치 구조 개발	A-1	프리캐스트 콘크리트 블록 연결부 상세해석을 통한 지중아치 시스템의 구조성능 평가	①	콘크리트 블록 연결부 상세	1건	1건	검토 여부	보고서	5	특허 : 출원 0 건 등록 0 건 논문(SCI) : 3(3)건 논문(비SCI) : 1 건 시제품 : 0 건 S/W : 0 건
					②	콘크리트 블록 연결부 구조해석	설계대비 강도 100% 이상	설계대비 강도 100% 이상, SCI 논문 1건	해석 여부	논문 및 보고서	15	
			A-2	프리캐스트 콘크리트 블록 연결부 요소기술의 성능평가 및 거동분석	①	요소기술 성능 평가	설계대비 강도 100% 이상	설계대비 강도 100% 이상	평가 여부	보고서	15	
					②	요소기술 시스템 성능 평가	설계대비 강도 100% 이상	설계대비 강도 100% 이상, SCI 논문 1건	평가 여부	논문 및 보고서	15	
					③	시공프로세스 검토	1식	-	검토 여부	보고서	5	
공동	B	강재 스트립과 프리캐스트 콘크리트 블록 활용 모듈러 지중아치 구조 지반-구조물의 거동 및 동적저항 안전성 평가	B-1	프리캐스트 콘크리트 블록과 지반의 엄밀 상호작용해석 수치모델 작성/검토	①	SSI 고려 수치해석 모델 작성 및 검토	SCI논문 1건	SCI 논문 1건 (개정중)	작성 여부	논문 및 보고서	5	특허 : 출원 0 건 등록 0 건 논문(SCI) : (2) 건 논문(비SCI) : 0 건 시제품 : 0 건 S/W : 0 건
			B-2	간편 지진응답해석 수치모델의 적용성 검토 및 결과 비교분석	①	간편해석법과 비교분석	1건	1건	분석 여부	보고서	5	
			B-3	SSI를 고려한 프리캐스트 모듈 지중아치 구조시스템의 지진시 거동 분석	①	지진거동 분석	SCI논문 1건	SCI 논문 1건 (심사중)	분석 여부	논문 및 보고서	5	
					②	내진 안전성 검토	보고서 1건	보고서 1건	검토 여부	보고서	10	
	C	강재 스트립과 프리캐스트 콘크리트 블록 활용 모듈러 지중아치 구조 단면 최적화 및 안전성 검토	C-1	지중아치 시스템의 구조적 안전성 검토	①	설계예제 작성	3건	3건	지간장별 설계 예제 건수	보고서	10	특허 : 출원 2 건 등록 0 건 논문(SCI) : 0 건 논문(비SCI) : 0 건 시제품 : 0 건 S/W : 1 건
			C-2	단면 최적화 적용방안 마련	①	지중아치 최적 설계용 프로그램 개발	1식	1식	프로그램 자동화 여부	보고서 및 엑셀 프로그램	10	

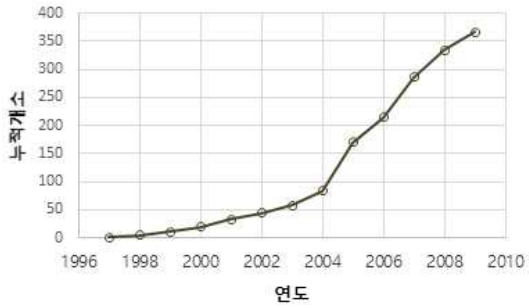
2. 관련 분야 기여도

○ (시공 기술 개선) 기존 지중 구조물에서는 사전제작이 불가하고 아치 형상의 특성으로 인한 운반에 제약이 있으나 개발 지중아치 시스템의 경우 프리캐스트 콘크리트 블록들이 강재 스트립으로 연결되어 일괄 운반 및 가설이 가능하며, 강재 스트립 연결홀 간격 조정에 따라 다양한 곡률 조절이 용이하므로 설계/주문 전 대량 생산/적치가 가능하여 기존 방식보다 혁신적인 시공 기술에 기여 가능함.

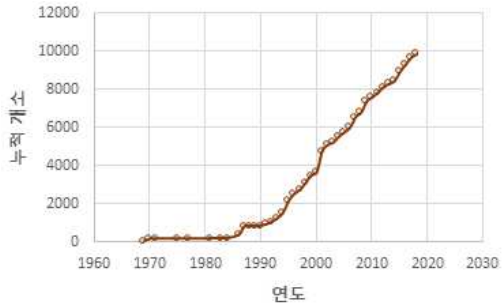
○ (경제성 개선) 강재와 콘크리트 사이의 높이 및 강재 두께 조정에 의해 시공중 휨 수준을 조정할 수 있고, 프리캐스트 콘크리트 블럭을 공용중 압축력 저항에 필요한 최소 단면적을 기준으로 최소화할 수 있으므로 부재의 경량화를 통한 공사비 절감이 가능함.

제5장. 연구개발성과의 활용계획

○ 대상 아치 실용화를 위한 프리캐스트 아치 패널 기초부에 대한 상세 및 윙벽의 적용방안 제시
○ 아치 부재 설계 지침 및 시공지침과 아치 시스템 조립과 설치에 대한 지침 제시
○ 폭원 30m 이하 개착식 지중 암거, 지하차도 및 생태통로, 터널 시장에 활용
○ 아치교량, 대공간 건축구조, 우수저류조 등 확대 적용 및 유지관리 불필요
○ 해외 선진수준 이상의 지중아치 구조 관련 기술 보유
: 동남아 및 중동의 여러 나라에 본 기술의 적용 통한 해외 수주 가능
○ 터널라이닝 및 건축구조 등으로 기술 확대
○ 국제특허로 출원 통한 해외시장 진출의 발판 마련 및 고부가가치 창출
○ 개착식 터널 및 생태교량, 지하차도 등 현장에 교통 흐름 방해 없이 시공
○ 지중 매립을 통해 자연친화적 경관 기능 향상
○ 지중아치 적용시장에서 공사비 30% 감소: 약 225억원/년의 건설비용 절감 가능
(1,500억원/년 규모 추정, 시장에서 본 기술로 50% 대체할 경우)
○ 지중아치 시스템 적용이 가능한 생태통로, 지중암거 등의 공사에 적극 반영 추진
- 생태통로 시장규모: 20~30개소/년 신설 추정 / 국내 총 500개소 이상 운영 중
* 참고자료: 생태통로 네트워크(2020, 국립생태원), 전국 야생동물 생태통로 설치 현황 (2010, 환경부)
- 지중암거 시장규모: 약 280개소/년 신설 추정(2010년 이후 평균) / 국내 약 1만개소 운영 중
* 참고자료: 한국도로공사 암거 현황 (2020, 공공데이터포털)



<생태통로 증가 추세(환경부)>



<지중암거 증가 추세(공공데이터포털)>

○ 본 과제를 통해 개발된 지중아치 시스템의 장점을 타 형식과 대비하여 관련 기관(발주처, 설계사, 시공사 등) 홍보

구분	**본 지중아치 시스템**	BEBO ARCH	TechSpan	파형강판
형 태				
관련 업체	(주)택한 (참여기업)	인터컨스텍 (SegArch)	후레씨네코리아	평산,픽슨,넥스틸
주요압축부재	프리캐스트 콘크리트	프리캐스트 콘크리트		강판
주부재 두께	120mm	300mm	400mm	고강도 강판(SS590)
설계지배인자 (단계별뒤채움)	인장띠의 모멘트 강도	모멘트에 의한 내/외측면 균열		모멘트-축력 합성응력 및 좌굴
설계지배인자 (공용중)	지압강도	축력+모멘트 강도		볼트연결부 압축강도
제작/생산성	동일한 패널 반복생산 사전제작가능	프로젝트별 거푸집 제작		프로젝트별 파형강판 패턴 조합
운반/설치 용이성	경량구조로 운반 용이 일괄가설 가능	프리캐스트아치 반쪽당 트레일러1대 필요 설치시 부재90도 회전		트럭운반 및 카고크레인 이용 현장 인력작업 비중 높음
경제성	62,799,000원	129,720,000원		87,960,000원
	* 경간장 15m(아치길이 22m), 길이 20m 생태교량 (토공 및 면벽공사 제외)			

제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

○ 본 연구에서 개발한 기술은 국내에서 처음 제안, 연구된 것으로서 수집된 관련 해외 과학기술 정보는 없음

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급 분류	보안	일반
		○
결정 사유	본 사업은, 과제에 참여하는 연구인력 외에 국토교통 분야의 다양한 전문가, 연구자들이 본 연구과제에 관심과 참여를 유도하여 수요자의 입장에서 필요한 분야를 도출할 수 있도록 해야 함	

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설 · 장비 현황 (해당없음)

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

○ 경남과학기술대학교에는 실험 및 연구활동을 수행할 때 발생할 수 있는 안전사고의 예방과 교내 환경오염방지를 위하여 “경남과학기술대학교 실험·실습실 안전관리규정(2013)”을 제정하여 이를 준수할 것을 의무화 하고 있음. 그리고 경남과학기술대학교 자체적으로 연구활동종사자 집합교육, 연구활동종사자 사이버교육, 연구실 안전점검, 연구실 시설개선, 연구활동종사자 안전보험 가입, 연구활동종사자 건강검진 등의 다양한 프로그램이 운영되고 있어, 모든 참여 연구원들이 적극 참여하여 연구실 안전 및 연구원의 안전 조치를 이행하였음.

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/ 특허/ 기타)	논문명/특허명/ 기타	소속 기관명	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	특허	앵커 부재가 구비된 지중 아치 구조 및 이의 시공 방법	경남 과기대, (주) 택한	주관, 위탁 책임	대한민국	-	2019.11.08	단독 사사	-
2	특허	강재 일체형 아치구조 거푸집	경남 과기대, (주) 택한	주관, 위탁 책임	대한민국	-	2020.12.22	단독 사사	-

3	논문	The Performance Assessment of a Precast, Panel-Segmented Arch Bridge with Outriggers	경남과기대	주관책임	Applied Sciences	2.474	2019.11.01	단독 사사	SCIE
4	논문	프리캐스트 콘크리트 패널 분절 아치 시공을 위한 선설치 앵커의 인발 강도 평가	경남과기대	주관책임	한국구조물진단유지관리공학회 논문집	-	2020.04.30	단독 사사	-
5	논문	Structural Performance of a Segmental Precast Arch Bridge with Outrigger by Sectional Geometry of Structural Member	경남과기대	주관책임	KSCE Journal of Civil Engineering	1.515	2020.11.	단독 사사	SCIE
6	논문	Segment precast arch bridge with outriggers reinforced with aluminum stiffeners at panel ends	경남과기대	주관책임	Structural Engineering and Mechanics	2.984	under review	단독 사사	SCIE
7	논문	Lifting Test and Analysis of a Segmented Arch System with Outrigger Ribs and Flexural Loading Tests of Precast Panels	경남과기대	주관책임	KSCE Journal of Civil Engineering	1.515	under review	단독 사사	SCIE
8	논문	Construction Stage Analysis of a Precast Concrete Buried Arch Bridge with Steel Outriggers from Full-scale Field Test	경남과기대	주관책임	Structures	1.839	2021.02.	단독 사사	SCIE

9	논문	Full-scale Field Testing of a Precast Concrete Buried Arch Bridge with Steel Outriggers: Field Loading Test	경남과기대	주관책임	Engineering Structures	3.548	revision	단독 사사	SCIE
10	논문	Finite Element Analysis-Aided Seismic Behavior Examination of Modular Underground Arch Bridge	전남대학교	공동책임	Tunnelling and Underground Space Technology	4.450	revision	단독 사사	SCIE
11	논문	Seismic Performance of Newly Developed Buried Arch System Considering the Effects of Earthquake Frequency Content	전남대학교	공동책임	Structure and Infrastructure Engineering	2.620	under review	단독 사사	SCIE
12	기타	프리캐스트 블록 및 강재 스트립 활용 지중아치 구조 설계 프로그램	(주)택한	위탁책임	대한민국	-	2020.10.22	단독 사사	소프트웨어

제11장. 기타 사항

○ 해당 없음

제12장. 참고 문헌

[1] Wakeman A. The NUCON arch – plain precast concrete arch systems. Arch Bridges, Proceedings of the first international conference on arch bridges held at Bolton, UK 3-6 September, 1995; 645-652.

[2] Bernini J, Fitzsimons N, Heierli W. Overfilled Precast Concrete Arch Bridge Structures. Proceedings of 16th Congress of International Association for Bridge and Structural Engineering (IABSE), Lucerne, 2000; 380-387.

[3] Bialy M, Skrzypiec S. Analysis of Interaction of Prefabricated Reinforced Concrete Tunnel with Subsoil. Technical Transactions, The Silesian University of Technology, Poland, 2015; 22-27.

[4] Segrestin P, Brockbank WJ. Precast Arches as Innovative Alternative to Short-Span Bridges. Proceedings of the 4th International Bridge Engineering Conference, San Francisco, CA., 1995; 219-226.

[5] Hutchinson D. Application and Design of Segmental Precast Arches. ASCE Proceedings of Geotechnical Engineering for Transportation Projects (GeoTrans), Los Angeles, CA., 2004; 452-459.

[6] Long A, McPolin D, Kirkpatrick J, Gupta A, Courtenay D. FlexiArch: from concept to practical applications. The Structural Engineer, The Institution of Structural Engineers, 2014; 10-15.

[7] Taylor SE, Robinson D, Grattan S, Long AE, Gupta A, Hogg I. Monitoring of Monkstown Bridge A Novel Flexi-Arch Bridge System. Proceedings of 12th Structural Faults and Repairs International Conference, Edinburgh, UK. 2008.

[8] Hertz KD. Super-Light Concrete with Pearl-Chains. Magazine of Concrete Research 2009; 61(8):655-663.

[9] Halding PS, Hertz KD, Viebaek NE, Kennedy A. Assembly and Lifting of Pearl-Chain Arches. Proceedings of fib Symposium, Copenhagen, Denmark, 2015; 71.

[10] Halding PS, Hertz KD, Schmidt JW. Precast Pearl-Chain Concrete Arch Bridges. Engineering Structures 2015; 103:214-227.

[12] Ong CY, Choong KK, Tan GE, Ong TB. Trends and Development of Precast Concrete Closed Spandrel Arch Bridge Systems. Applied Mechanics and Materials 2015; 802:295-300.

[13] Jeon SH, Cho K-I, Huh JW, Ahn J-H. The Performance Assessment of a Precast, Panel-Segmented Arch Bridge with Outriggers. Applied Science 2019; 9(21):4646.

[14] Jeon SH, Lee HJ, Moon JH, Huh JW, Ahn J-H. Structural Performance of a Segmental Precast Arch System with Outrigger by Sectional Geometry of Structural Member. KSCE Journal of Civil Engineering 2020; 24(11):3356-3375, DOI: 10.1007/s12205-020-2030-x.

[15] Jeon SH, Cho K-I, Lee WH, Huh JW, Ahn J-H. Lifting and Precast Panel-Loading Tests using a Segmented Arch System with Outrigger Ribs. KSCE Journal of Civil Engineering 2020; under review.

[16] Jeon SH, Moon HD, Sim CW, Ahn J-H. Full-scale Field Testing of Precast Concrete Buried Arch Bridge with Steel Outriggers: Construction Stage Analysis. 2020; under review.

[18] Wang J, Melbourne C. Finite element analyses of soil-structure interaction in masonry arch bridges. ARCH'07 – 5th International Conference on Arch Bridges 2007.

[19] Luo C, Yang X, Zhan C, Jin X, Ding Z. Nonlinear 3D finite element analysis of soil–pile–structure interaction system subjected to horizontal earthquake excitation. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 2016; 84:145-156.

[20] Noorzaei J, Viladkar MN, Godbole PN. Influence of strain hardening on soil-structure interaction of framed structures. Computers & Structures 1995; 55:789-795.

[21] Duncan JM, Byrne P, Wong KS, Mabry P. Strength, Stress-Strain and Bulk Modulus Parameters for Finite Element Analyses of Stresses and Movements in Soil Masses. Research Report No. UCB/GT/80-01, College of Engineering, Office of Research Services, University of California, Berkeley, CA., 1980; 79.

[22] Oswald CS, Furlong RW. Observed Behavior of Concrete Arch Culvert. Research Report No. 932-1F, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, 1993; 172.

[24] Wood JH, Jenkins DA. Seismic Analysis of Buried Arch Structures. Proceedings of 12th WCEE: 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, 2000; 0768.

[25] Hognestad E. A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete

Members. University of Illinois Bulletin, The University of Illinois, Urbana-Champaign, IL. 1951; 399:128.

[26] Drucker DC, Prager W. Soil Mechanics and Plastic Analysis or Limit Design. Quarterly of Applied Mathematics 1952; 10:157-165

[27] Kay JN, Rigon C. Instrumentation of a BEBO Arch constructed at Byron Bay, New South Wales. Report No. R77, Department of Civil Engineering, University of Adelaide 1986; 67.

[28] Oswald CS, Furlong RW. Observed Behavior of Concrete Arch Culvert. Research Report No. 932-1F, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, 1993; 172.

[29] Webb MC. Improved Design and Construction of Large-Span Culverts. Ph.D. Dissertation, University of Massachusetts, Amherst, 1999; 469.

[30] McGrath TJ, Moore ID, Selig ET, Webb MC, Taleb B. Recommended Specifications for Large-Span Culverts. NCHRP Report 473, National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council, 2002; 39.

[31] Tan GE, Ong TB, Choong KK, Ong CY. A New Form of Precast Closed Spandrel Arch Bridge System. Proceedings of the 7th International Conference on Arch Bridges, Trogir-Split, Croatia, 2013; 195-202.

[32] Block P. Equilibrium Systems: Studies in Masonry Structure. Master's Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, 2005.

[33] Block P, Ciblac T, Ochsendorf J. Real-time limit analysis of vaulted masonry buildings. Comput. Struct. 2006, 84, 1841–1852.

[34] Collings D. Steel-Concrete Composite Bridges ICE: Washington, DC, USA, 2005, 110–128.

[35] Heyman J. The Masonry Arch Ellis Horwood Ltd.: Chichester, UK, 1982.

[36] Brencich A, Morbiducci R. Masonry Arches: Historical Rules and Modern Mechanics. Int. J. Archit. Herit. 2007, 1, 165–189.

[37] Loo YC, Yang Y. Cracking and failure analysis of masonry arch bridges. J. Struct. Eng. ASCE 1991, 117, 1641–1659.

[38] Lacidogna G, Accornero F. Elastic, plastic, fracture analysis of masonry arches: A multi-span bridge case study. Curved Layer Struct. 2018, 5, 1–9.

[39] Tan GE, Ong TB, Ong CY, Choong KK. Development and Standardisation of New Precast Concrete Open Spandrel Arch Bridge System. Proceedings of the 37th IABSE Symposium in Madrid, Madrid, Spain, 3–5 September 2014, 799–806.

[40] Canadian Standards Association. CAN/CSA-S6-14: Canadian Highway Bridge Design Code, Rexdale, Ontario; Canadian Standards Association: Toronto, ON, Canada, 2014.

[41] BSI British Standards. BS 5975: Code of Practice for Temporary Works Procedures and the Permissible Stress Design of Falsework; BSI British Standards: London, UK, 2008.

[42] 김남희, 고현무, 홍성걸. 전통석조 아치교량의 구조적 거동에 대한 연구. 한국전산구조공학회 2008 년도 정기학술대회 논문집, 2008, 78–83.

[43] 김남희, 고현무, 홍성걸. 석조 홍예아치교의 구조적 안정성 평가시스템 개발. 한국전산구조공학회 논문집, 2009, 22, 15–23.

[44] 조용상. 조립식 복합소재 데크를 이용한 아치가교 개발. 석사학위논문, 국민대학교, 2008.

[45] 이상민, 신중섭, 전세진, 한만엽. 아치교 라이즈비의 최적 설계. 한국콘크리트학회 학술대회 논문집, 2012, 24, 541-542.

[46] ABAQUS. Abaqus analysis user's manual version 6.14, Dassault Systems Simulia Corp, 2014.

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.