

# 토피가 큰 지중아치 구조물의 최적화 시스템 구축을 위한 신개념 Embedded Trench Installation(ETI) 적용 기술개발 최종보고서

2019. 03. 29.

주관연구기관 / 상명대학교  
공동연구기관 / 서울대학교

국 토 교 통 부  
국토교통과학기술진흥원

## 제 출 문

국토과학기술진흥원 귀하

‘토피가 큰 지중아치 구조물의 최적화 시스템 구축을 위한 신개념 Embedded Trench Installation (ETI) 적용 기술개발’ (연구개발 기간 : 2017.06.30 ~ 2018.12.31) 과제의 최종보고서를 제출합니다.

2019.03.29

주관연구기관명 : 상명대학교 천안산학협력단 박 상 순 (인)

공동연구기관명 : 서울대학교 산학협력단 윤 의 준 (인)

주관연구기관책임자: 박 종 섭

공동연구기관책임자: 강 준 석

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에  
동의합니다.

## 보고서 요약서

|                   |                              |                                                                                  |                             |             |                                                                       |
|-------------------|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------|-----------------------------------------------------------------------|
| 과제 고유 번호          | 17CTAP-C132628-01            | 해당 단계<br>연구 기간                                                                   | 2018.01.01<br>- 2018.12.31  | 단계구분        | 2/2                                                                   |
| 연구사업명             | 중사업명                         | 건설교통기술촉진연구사업                                                                     |                             |             |                                                                       |
|                   | 세부사업명                        |                                                                                  |                             |             |                                                                       |
| 연구과제명             | 대과제명                         | 토피가 큰 지중아치 구조물의 최적화 시스템 구축을 위한 신개념<br>Embedded Trench Installation (ETI) 적용 기술개발 |                             |             |                                                                       |
|                   | 세부과제명                        |                                                                                  |                             |             |                                                                       |
| 연구책임자             | 박 종 섭                        | 해당단계<br>참여연구원 수                                                                  | 총: 10명<br>내부: 10명<br>외부: 0명 | 해당단계<br>연구비 | 정부: 192,000 천원<br>민간: - 천원<br>정부외: - 천원<br>상대국: - 천원<br>계: 192,000 천원 |
|                   |                              | 총 연구기간<br>참여연구원 수                                                                | 총: 12명<br>내부: 12명<br>외부: 0명 | 총 연구비       | 정부: 370,000 천원<br>민간: - 천원<br>정부외: - 천원<br>상대국: - 천원<br>계: 370,000 천원 |
| 연구기관명 및<br>소속 부서명 | 상명대학교 천안산학협력단<br>서울대학교 산학협력단 |                                                                                  |                             | 참여기업명       |                                                                       |
| 국제공동연구            | 상대국명:                        |                                                                                  |                             | 상대국 연구기관명:  |                                                                       |
| 위탁연구              | 연구기관명:                       |                                                                                  |                             | 연구책임자:      |                                                                       |

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

|                         |         |                                               |    |
|-------------------------|---------|-----------------------------------------------|----|
| 연구개발성과의<br>보안등급 및<br>사유 | 보안등급 분류 | 보안                                            | 일반 |
|                         | 결정 사유   | 연구내용이 대부분 일반적인 내용을 포함하여 특별히<br>보안등급으로 분류되지 않음 |    |

### 9대 성과 등록·기탁번호

| 구분           | 논문  | 특허 | 보고서<br>원문 | 연구시설<br>· 장비 | 기술요약<br>정보 | 소프트<br>웨어 | 화합물 | 생명자원     |          | 신품종 |    |
|--------------|-----|----|-----------|--------------|------------|-----------|-----|----------|----------|-----|----|
|              |     |    |           |              |            |           |     | 생명<br>정보 | 생물<br>자원 | 정보  | 실물 |
| 등록·기<br>탁 번호 | 11건 | 3건 |           |              |            |           |     |          |          |     |    |

### 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황

| 구입기관 | 연구시설<br>· 장비명 | 규격<br>(모델명) | 수량 | 구입연월일 | 구입가격<br>(천원) | 구입처<br>(전화) | 비고<br>(설치장소) | NTIS<br>등록번호 |
|------|---------------|-------------|----|-------|--------------|-------------|--------------|--------------|
| 해당없음 |               |             |    |       |              |             |              |              |
|      |               |             |    |       |              |             |              |              |

#### 요약

- 구조물 전체를 둘러싸는 고압축성 경량물질(EPS Geofom)을 이용하여 지중 깊이 매설된 지중구조물에 작용하는 큰 토압을 최대 80%까지 경감 가능한 새로운 형태의 ETI(Embedded Trench Installation) 기술 개발
- 연구 및 개발 기술에 대한 학계의 객관적 검증  
: 국내논문 4건, SCI(E) 논문 7건, 출간을 위한 진행 중 논문 5건
- 개발 기술의 지식재산권 획득 : 특허 출원 3건
- 개발 기술의 현장시험을 통한 성능 검증
- 개발 기술의 기술실시계약 체결
- 개발 기술 최적화 가이드라인 제시

보고서 면수 137

## 〈 요약문 〉

|                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |       |      |        |      |
|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|------|--------|------|
| 연구의<br>목적 및 내용            | <p>본 연구는 도시 내 심층 지하공간의 재창출을 위한 대규모 지중아치구조물을 경제적으로 개발이 가능하도록 하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 지반구조 상호작용을 고려한 구조해석으로 아치구조물의 정확한 거동특성을 파악하고, 과거 매설 구조물에 부과되는 하중을 고압축성물질을 활용하여 경감시키는 방법인 Imperfect Trench Installation (ITI)의 효과를 극대화할 수 있는 신개념 Embedded Trench Installation (ETI)를 적용하여 아치구조물을 지중깊이 매설할 경우에 최대 80%까지 응력경감 효과가 있기에 지중아치구조물의 경량화 및 안정성에 크게 기여할 것이다.</p> <p>본 연구는 “1차년도 : 비선형토질모델 및 지반구조상호작용을 고려한 ETI적용 장폭아치구조물의 해석기법 개발”, “2차년도 : 새로운 ETI의 장폭아치구조물 적용 타당성 검증을 위한 실증실험 및 ETI 설계 가이드라인 개발”로 구분되며 연구목표에 대한 주요 연구내용은 다음과 같다.</p> <p>■ [1차년도] 비선형토질모델 및 지반구조상호작용을 고려한 ETI적용 장폭아치구조물의 해석기법 개발</p> <p>① 비선형토질모델과 기하 및 재료비선형을 고려한 장폭 아치구조물의 해석모델 개발</p> <p>② 새로운 ETI적용 장폭아치구조물의 3D 해석모델 개발 및 실증실험</p> <p>■ [2차년도] 새로운 ETI의 장폭아치구조물 적용 타당성 검증을 위한 실증실험 및 ETI 설계 가이드라인 개발</p> <p>① ETI를 적용한 지중 장폭아치구조물의 해석모델 검증을 위한 실증실험분석</p> <p>② 검증모델을 이용한 최적의 소프트존 (Soft Material Zone)제안 및 설계가이드라인 개발</p> |       |      |        |      |
| 연구개발성과                    | <p>도심 심층 지하 공간 재창출을 위한 아치형구조물 개발을 위해</p> <p>[1] 지반구조 상호작용을 고려한 ETI 장폭아치구조물의 해석기법 개발</p> <p>[2] 새롭게 제안된 ETI의 실증실험을 통한 검증 및 ETI 설계 가이드라인 마련</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |       |      |        |      |
| 연구개발성과의<br>활용계획<br>(기대효과) | <p>■ 활용방안</p> <ul style="list-style-type: none"><li>■ ETI 적용으로 장폭아치구조물의 심층 매설시 특수설계 없는 경량화, 최적화 시공 및 안정성증대가 가능하며 향후 지하대공간의 시장수요가 증대될 것으로 예상되기에 활용의 폭이 클 것이다.</li><li>■ EPS Geofoam의 우수한 에너지 흡수능력으로 지중구조물의 내진성능 향상에 크게 기여할 것이다. 최근 한반도에 잦은 지진에 노출됨에 따라 지중구조물의 내진설계에 대한 획기적인 아이디어와 가이드라인을 제공하는 데 이 연구는 크게 활용될 수 있다.</li><li>■ EPS Geofoam으로 극한환경하에서 단일효과로 동결융해 시에 구조물의 손상을 최소화 할 수 있다. 또한 지중구조물과 상재토와의 Soft Material Zone 설치를 통하여 소음, 진동 등의 사용성 증진에도 크게 기여할 것이다.</li></ul> <p>■ 기대성과</p> <p>본 연구를 통해 지중깊이 매설되는 아치형 지중구조물 해석 및 설계가이드라인은 국제적 수준 이상의 기술력을 확보하고 국가 도시생태공원 및 지하공간 확보시장의 경제적 파급효과를 견인할 것으로 기대된다.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                       |       |      |        |      |
| 핵심어<br>(5개 이내)            | 지하공간                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 지중구조물 | 생태통로 | 지반-구조물 | 아치교량 |

## < SUMMARY >

|                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                  |             |                |             |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-------------|----------------|-------------|
| Purpose & Contents    | <p>The purpose of this study is to develop large-scale buried arch structures associated with an innovative load-reducing method, <b>ETI (Embedded Trench Installation)</b>. ETI is the revised and upgraded version of ITI (Imperfect Trench Installation), which could reduce the earth pressures on buried structures by 80% using embedded soft material zone. Nonlinear soil models and advanced soil-structure interaction analyses would be adapted to evaluate complex structural behaviors of soil-structure-soft zone interactions. The developed design guidelines for ETI arch structures would make huge contributions on the safe and economic construction of the large-scale underground spaces.</p> <p>This research is classified into “1st year : Development of 3D finite element models on ETI arch structures associated with nonlinear soil models and soil-structure interactions” , “2nd year : Development of design guidelines for ETI arch structures through full-scale field tests and developed 3D finite element (FE) models” and main research contents are as follow</p> <p>■ [1st year] Development of 3D FE models on ETI long-span arch structures associated with nonlinear soil models and soil-structure interactions</p> <p>① Development of 3D FE models for long-span arch structures</p> <p>② Development of 3D FE models and field tests for ETI long-span arch structures</p> <p>■ [2nd year] Development of design guidelines for ETI long span arch structures through full-scale field tests and developed 3D FE models</p> <p>① Evaluation of Full-scale field tests for ETI long span arch structures for the validation of the developed 3D FE models</p> <p>② Development of optimum design guidelines for ETI long span arch structures using the calibrated and validated 3D FE models</p> |                  |             |                |             |
| Results               | <p>The final results are as follows:</p> <p>[1] Development of <b>3D FE models on ETI long-span arch structures</b></p> <p>[2] Development of <b>design guidelines for ETI long span arch structures</b></p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                  |             |                |             |
| Expected Contribution | <p>■ <b>Application plan</b></p> <p>■ Development of lightweight and economic arch structures under deep burials would meet increased needs for underground spaces for the next generation.</p> <p>■ EPS Geofoam surrounding arch structures could reduce seismic forces imposed on buried structures.</p> <p>■ EPS Geofoam insulation would reduce the environmental damage on buried structures due to freezing and thawing cycles.</p> <p>■ <b>Expected outcome</b></p> <p>Large-scale underground space and eco-friendly park businesses would be boosted by the developed <b>design guidelines and analytical methodologies for ETI long span arch structures</b>.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                  |             |                |             |
| Keywords              | Underground Space                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Buried Structure | Eco-Pathway | Soil-Structure | Arch Bridge |

## < Contents >

|                                                                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 1. Introduction of Research .....                                                                                                   | 1   |
| 1-1. Significance of Research .....                                                                                                 | 1   |
| A. Background .....                                                                                                                 | 1   |
| B. Importance of Research .....                                                                                                     | 3   |
| C. Technical Description of Research .....                                                                                          | 4   |
| 1-2. Scope of Research .....                                                                                                        | 6   |
| A. Research Scope and Method .....                                                                                                  | 6   |
| 2. Status of Domestic and International technology development .....                                                                | 7   |
| 2-1. Domestic Status of Research Targets .....                                                                                      | 7   |
| 2-2. International Status of Research Targets .....                                                                                 | 7   |
| 2-3. Stages of research development .....                                                                                           | 7   |
| 3. Research Progress and Results .....                                                                                              | 9   |
| 3-1. Objectives and Contents of Research .....                                                                                      | 9   |
| A. Final Objectives .....                                                                                                           | 9   |
| B. Strategic Methodology .....                                                                                                      | 10  |
| C. Annual Research Goals and Results .....                                                                                          | 11  |
| 3-2. Major Contents and Results of Research .....                                                                                   | 12  |
| A. Development of non-linear analytical model for buried arch<br>structure considering the geometry and material nonlinearity ..... | 12  |
| B. Three dimensional analysis model of new ETI applied to arch<br>structure .....                                                   | 24  |
| C. Experimental Test for Verification of Analytical Model of Underground<br>Arch Structures Using ETI .....                         | 33  |
| D. Proposed design and guidelines for optimal soft zone .....                                                                       | 74  |
| 4. Achievement of goals and contribution to related field .....                                                                     | 111 |
| 4-1. Level of Objective Achievements .....                                                                                          | 111 |
| A. Performance checklist .....                                                                                                      | 111 |
| B. Quantitative Research Achievements .....                                                                                         | 112 |
| 4-2. Contributions to related field .....                                                                                           | 112 |

|                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------|-----|
| 5. Plan to utilize Research achievements .....                 | 113 |
| 5-1. Utilization of Research Performance .....                 | 113 |
| 5-2. Expected effect of Research achievements .....            | 114 |
| 6. Review of related international researches .....            | 115 |
| 6-1. Article collection information .....                      | 115 |
| 7. Security rating of R & D Achievement .....                  | 117 |
| 8. Current Status of Research Equipments on NTIS .....         | 117 |
| 9. Implementation of safety measures in the laboratories ..... | 118 |
| 10. Representative research achievements .....                 | 119 |
| 11. Others .....                                               | 124 |
| 12. References .....                                           | 125 |

## < 목 차 >

|                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------|-----|
| 제1장. 연구개발과제의 개요 .....                                               | 1   |
| 1. 연구개발의 필요성 .....                                                  | 1   |
| 가. 연구개발의 개요 .....                                                   | 1   |
| 나. 연구개발의 중요성 .....                                                  | 3   |
| 다. 연구개발의 기술설명 .....                                                 | 4   |
| 2. 연구개발의 범위 .....                                                   | 6   |
| 가. 연구 범위 및 연구 수행 방법 .....                                           | 6   |
| 제2장. 국내외 기술 개발 현황 .....                                             | 7   |
| 1. 연구개발대상의 국내현황 .....                                               | 7   |
| 2. 연구개발대상의 국외현황 .....                                               | 7   |
| 3. 기술개발성숙도 .....                                                    | 7   |
| 제3장. 연구수행내용 및 성과 .....                                              | 9   |
| 1. 연구개발의 목표 및 내용 .....                                              | 9   |
| 가. 연구개발의 최종 목표 .....                                                | 9   |
| 나. 연구개발 추진 전략 및 방법 .....                                            | 10  |
| 다. 연차별 연구 목표 및 결과 .....                                             | 11  |
| 2. 연구개발의 주요 내용 및 결과 .....                                           | 12  |
| 가. 비선형토질모델과 기하 및 재료비선형을 고려한 장폭 아치구조물의 해석<br>모델 개발 .....             | 12  |
| 나. 새로운 ETI적용 장폭아치구조물의 3D 해석모델 개발 .....                              | 24  |
| 다. ETI를 적용한 지중 장폭아치구조물의 해석모델 검증을 위한 실증실험 .....                      | 33  |
| 라. 검증모델을 이용한 최적의 소프트존(Soft Material Zone) 제안 및 설계<br>가이드라인 개발 ..... | 74  |
| 제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도 .....                                       | 111 |
| 1. 목표 달성도 .....                                                     | 111 |
| 가. 성과점검기준표 .....                                                    | 111 |
| 나. 정량적 연구성과 목표 및 달성도 .....                                          | 112 |
| 2. 관련 분야 기여도 .....                                                  | 112 |

|                                             |     |
|---------------------------------------------|-----|
| 제5장. 연구개발성과의 활용 계획 .....                    | 113 |
| 1. 연구개발성과의 활용방안 .....                       | 113 |
| 2. 연구개발성과의 기대효과 .....                       | 114 |
| 제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보 .....           | 115 |
| 1. 논문 수집정보 .....                            | 115 |
| 제7장. 연구개발성과의 보안등급 .....                     | 117 |
| 제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황 .....    | 117 |
| 제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적 ..... | 118 |
| 제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적 .....               | 119 |
| 제11장. 기타 사항 .....                           | 124 |
| 제12장. 참고 문헌 .....                           | 125 |

# 제1장. 연구개발과제의 개요

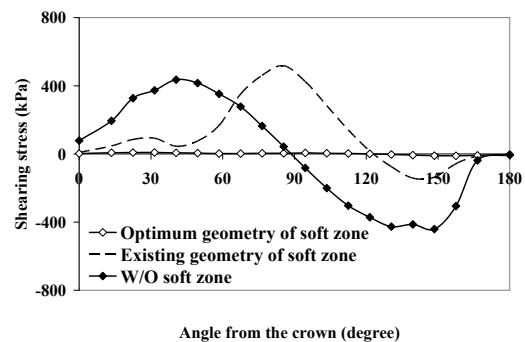
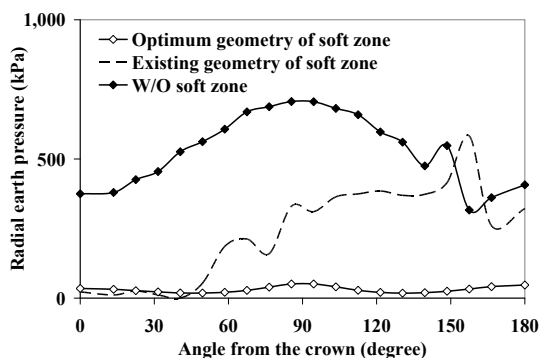
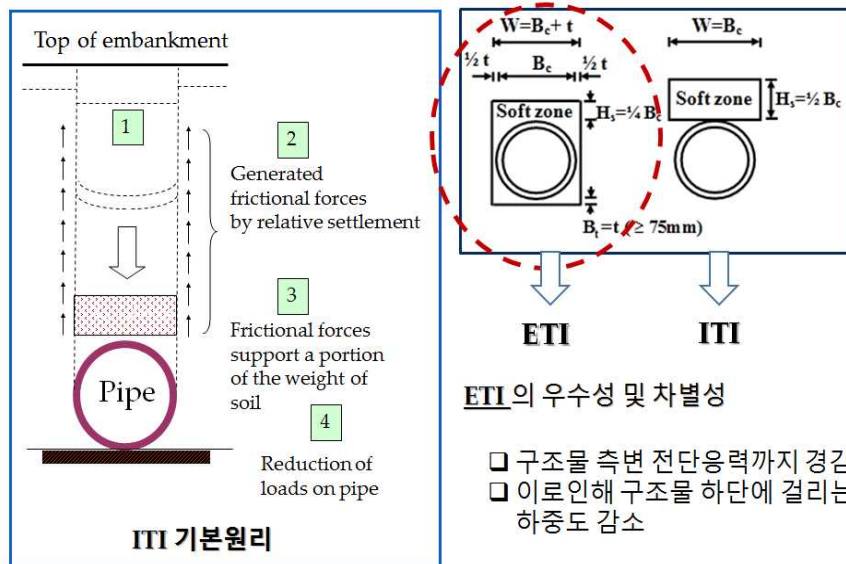
## 1. 연구개발의 필요성

### 가. 연구개발의 개요

본 연구 과제를 통한 성과인 “비선형토질모델 및 지반구조상호작용을 고려한 ETI적용 장폭아치구조물의 해석기법 개발” 및 ITI (Imperfect Trench Installation)효과를 극대화한 “ETI (Embedded Trench Installation)의 장폭아치구조물 적용 타당성 검증을 위한 실증시험 및 ETI 설계 가이드라인 개발”은

- 도시재생, 친환경생태공원, 지하공간에 대한 지하급수적 수요증가에 대한 근본적인 문제점을 해결하는 기초 원천기술이며
- 지중 깊이 매설된 지중구조물에 작용하는 큰 토압을 구조물 전체를 둘러싸는 고압축성 물질 (가칭 Embedded Trench)을 이용하여 최대 80%까지 경감시킬 수 있는 획기적인 기술로서 실증시험을 통한 검증이 완료되면 지하대공간 건설에 획기적인 비용절감과 안정성 증대를 가져올 것으로 기대된다.

### Imperfect Trench Installation (ITI) & Embedded Trench Installation (ETI)

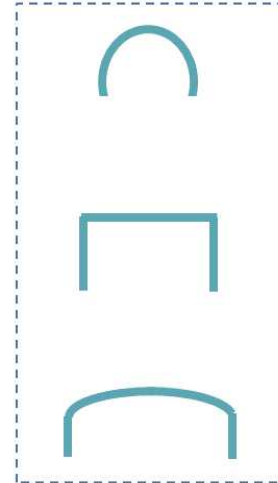
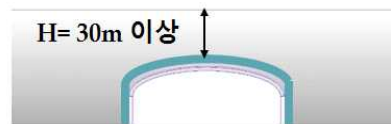
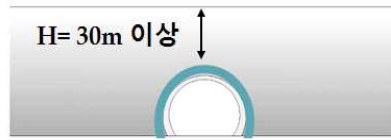


ETI (Optimum geometry of soft zone)사용시 관의 외부에 걸리는 토압과 전단력이 외벽전체에 걸쳐 크게 감소됨을 위 그림에서 확인할 수 있음.

그림 1-1. ITI와 ETI의 기본개념

ETI & ITI 기본원리:  
 EPS Geofoam 등의 고압축성물질로 지중 구조물을 감싸면  
 상대처짐에 의해  
 Positive Soil Arching (Load Transfer 에 의한 하중 경감효과)

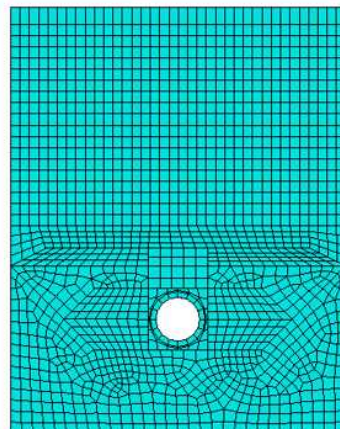
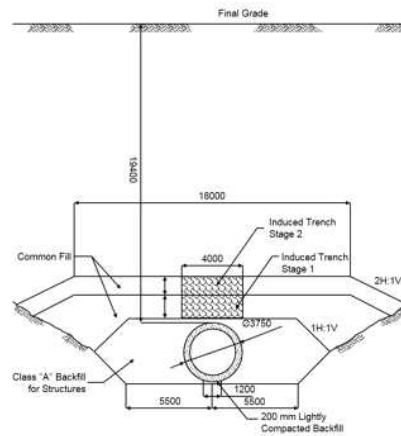
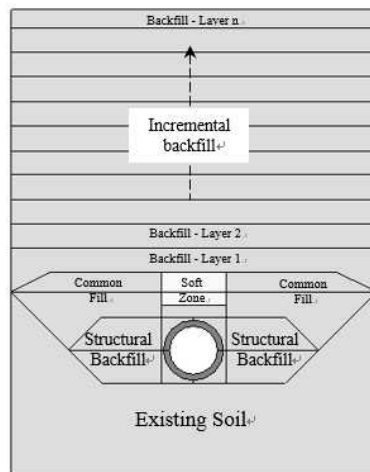
\*Note: not to scale



Why ETI?  
 하중감소  
 내진성능 강화  
 Insulation으로 동결융해에 의한 저항력 증대

- 다양한 Shape이 가능
- 상단면을 곡면, 또는 평면으로 시공  
(2차년도 최적화 설계로 결정)

그림 1-1. ITI와 ETI의 기본개념(계속)



|              |              |
|--------------|--------------|
| Front & Back | Z dir. fixed |
| Sides        | X dir. fixed |
| Bottom       | Y dir. fixed |

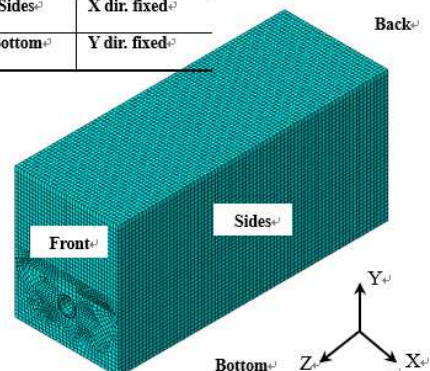


그림 1-2. Soft zone을 포함한 지중매설구조물의 FE 모델링 예

## 나. 연구개발의 중요성

### (1) 연구개발의 배경

- 도심을 통과하는 고속도로, 순환도로 등은 경제 발전의 기반적 역할 및 도심지 교통 흐름에 중요한 역할을 수행하고 있다.
- 그러나 평면상 지반 높이가 주변지역과 유사하거나 낮은 단면의 도로의 경우 주변 지역 주민들에게 소음, 분진, 열섬 등의 고통을 제공하는 공간이 되고 있다.
- 따라서 신설되는 도심지 도로 및 철로는 지하화하는 것이 합리적이며 또한 기존 도로의 경우 지중화하여 상부를 생태공원으로 조성하므로서 도로건설로 인해 단절된 생활문화권을 회복하고 대규모 용지구입비용없이 대규모 휴식공원을 조성하여 시민의 삶의 질을 향상시키고, 지역의 상징으로 활용될 수 있다.

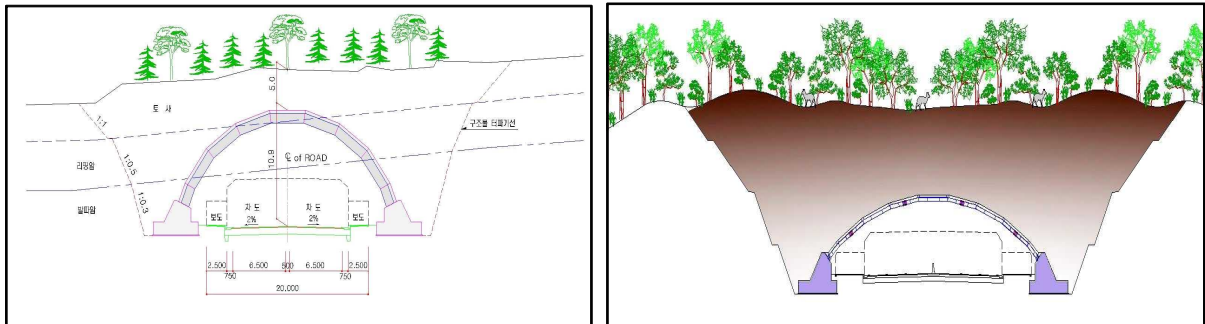


그림 1-3. 생태교량 지중아치구조물

- 지중에 매설되는 관거나 지중 구조물은 토압 및 상재하중을 충분히 받을 수 있도록 대부분 철근콘크리트 구조형식이며, 15m 이상의 지간 확보가 쉽지 않다.
- 환경이나 재해방지 차원에서 중요한 생태통로나 산사태 방지용 구조물은 대부분 지중 개착식 구조로 적용된다. 따라서 4차로 이상의 폭을 갖는 도로, 하천 및 지장물이 인접한 철도에서 장지간의 대단면 생태통로나 산사태 방지용 구조물의 건설이 현재의 기술로는 어려움이 있다.
- 한편, 장지간을 갖는 개착식 지중 구조물의 기술 개발은 미래의 지하공간 기술개발의 기초가 될 것이다.

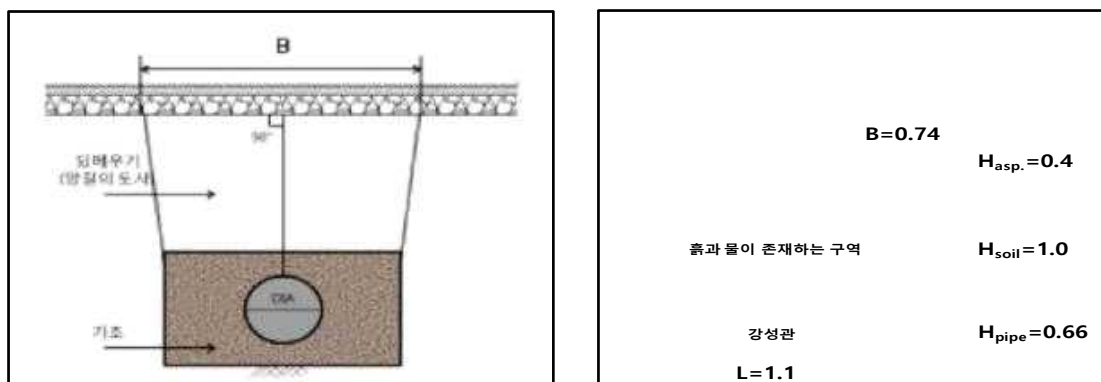


그림 1-4. 지중 관거의 토압 및 상재하중 구성

## (2) 연구개발의 성격

- 지중 구조물의 장시간 대형화를 위해서는 토압과 상재하중의 경량화와 경제적이고 안전성 확보를 위한 설계 및 시공기술을 보유하여야 한다.
- 이에 미국과 캐나다에서는 EPS Geofoam을 적용한 ITI(Imperfect Trench Installation)효과를 통해 지중 구조물 상부에 작용하는 하중을 경량화시키는 연구를 진행하고 있다.
- 이에 본 연구에서는 지중 구조물 주변 전체에 Soft Zone을 형성하여 하중의 영향을 80%이상 대폭 감소시켜 최적화된 구조물 설계 및 시공이 가능하도록 함으로서 지하공간 기술개발에 크게 기여하고자 한다.

|                                       |                                                                                                                                            |
|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 국가 시설물<br>유지관리 기본<br>전략 및 정책과의<br>부합성 | 이 연구과제는 국토교통 R&D 중장기전략중 시공자동화/효율화 특수구조물 구축기술 내에 지하대공간 실용화 기술 및 실증부분에 부합되며 도시재생 및 지하공간 활용의 전략적 핵심원천기술임.                                     |
| 기초연구 및<br>원천기술 개발의<br>시의성             | “국토교통기술촉진연구사업” 내 기초원천기술구축 과제로 지하대공간의 안정성확보를 위한 지중구조물 및 시스템 개발 목표를 실천하기 위해 시급히 요구되는 필수불가결한 기술로서 시의성이 매우 높으며 과제 완료 시점인 2019년말까지 기술개발검증이 가능함. |
| 기초연구 및<br>원천기술 개발의<br>중요성             | 국토교통기술 연구개발추진과 실현을 위한 지식기반의 실용적 원천기술로서 지중구조물의 경량화, 최적화와 안정성증대를 이를 획기적인 기초원천기술임.                                                            |

## 다. 연구개발 기술 설명

### (1) 기술의 우수성

- 기존 대심도 지중구조물 설계 및 시공에 있어서 큰 토압과 상부하중으로 인하여 매우 거대한 강합성 또는 철근콘크리트 구조물이 고려되었다. 이에 본 연구과제에서는 대심도 지중구조물 전체에 작용하는 하중을 최대 80%까지 저감할 수 있는 이론 연구를 토대로 대심도 및 저심도 지중구조물에 대한 검증을 실시하고 적용성을 확대하고자 하는 세계 최초의 원천 기술 개발연구이다. 향후 지하 대공간 개발을 위한 비용과 노력을 대폭 절감시킬 수 있는 창의적이고 혁신적인 연구이다.

### (2) 기술의 도전성

- 지중관거나 지반구조에 Soft Material Zone 설치로 인한 관거와 구조물에 미치는 영향에 대해 국내에서는 이론적으로나 실증적으로 연구가 진행된바가 없으며 미국과 캐나다에서 일부학자들에 의해 연구되고 있다. 이에 본 연구과제에서는 Soft Material Zone 설치로 인한 하중저감효과에 대한 연구결과를 토대로 새롭게 ETI 개발 적용함으로써 세계적으로 기술을 선도하고자하는 도전적인 연구이다.

(3) 기술의 차별성

| 선행연구 과제                                                        | 차별화 방안                                                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                          |
|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 과제명                                                            | 요소 기술                                                                                                                                                                  | 활용 및 차별화 방안                                                                                                                                                                                              |
| 급속시공 및 장대폭원이 가능한 강합성 아치형 생태통로 구조물의 개발에 관한 연구 (2010년)           | <ul style="list-style-type: none"> <li>30-50m이상의 횡단폭원이 가능한 개착식 지중 구조물의 개발</li> </ul>                                                                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>기존연구에 더하여 심층매설시에도 적용 가능한 구조물의 해석 및 설계기법 개발</li> <li>이를 위해 새로운 ETI공법을 지중아치 구조물에 적용하여 지중구조물의 경량화 및 특수설계 없이 심층 (30m이상)에 매설이 가능한 지중구조물 개발</li> </ul>                  |
| Performance of Induced Trench Culverts in New Brunswick (2007) | <ul style="list-style-type: none"> <li>지중에 80m에 매설된 박스형 암거에 ITI를 적용하여 획기적인 하중경감 효과를 실험을 통해 검증</li> </ul>                                                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>ITI의 세계적 권위자인 Valsangkar의 연구로 새롭게 제안된 ITI를 논문에 언급만 하고 실증실험은 전통적인 ITI기법을 사용</li> <li>이 연구는 세계최초로 새롭게 제안된 ETI의 실증실험으로서 실증완료 후 세계에서 독보적인 원천기술을 확보하게 될 것임.</li> </ul> |
| 토압경감과 투수성 증대를 통해 폭우기와 해빙기에 붕괴사고를 원천 차단하는 옹벽 실험 연구(2017)        | <ul style="list-style-type: none"> <li>흙막이 구조물에 작용하는 수평토압을 50%줄이고, 투수계수를 5배 이상 향상시키며, 동결융해 반복시 발생하는 전단저항의 감소를 30% 줄여 강우기 및 해빙기에 흙막이 구조물의 붕괴사고를 방지하는 뒷채움재 개발</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>무게를 경감하는 공법개발에 대한 시공법 개발 및 재활용품의 사용 극대화로 경제성 확보방안을 연구에 활용할 수 있음.</li> <li>ETI공법을 적용한 지중아치구조물의 경량화, 최적화는 차별화되는 기술로 다양한 지중구조물 형식에 적용이 가능할 것임.</li> </ul>            |
| 환경친화적 준설토 확보, 매립 및 운송거리 30 km 이상급 이송기술 개발                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>준설토활용 경량혼합토의 연약지반개량공법 수치해석</li> </ul>                                                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>토압을 경감하기 위해 경량혼합토를 준설토를 활용하여 개발함.</li> <li>EPS Geofoam을 적용하는 공법은 아니나 수치해석적기법을 활용한 토압저감 효과 분석은 참고자료로 활용 가능함.</li> </ul>                                            |

## 2. 연구개발의 범위

### 가. 연구 범위 및 연구 수행 방법

| 연구 범위              | 연구 수행 방법<br>(이론적·실험적 접근방법)                                                                  | 구체적인 내용                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 해석모델개발을 위한 주요변수 파악 | <ul style="list-style-type: none"> <li>장폭아치구조물 해석모델개발을 위한 비선형토질 모델 및 주요변수 파악</li> </ul>     | <ul style="list-style-type: none"> <li>흙을 상재하중으로만 고려하는 아치구조물의 해석모델 적용 사례조사 및 거동분석</li> <li>흙과 아치구조물의 상호거동을 고려한 범용해석프로그램 조사 분석</li> <li>비선형토질 모델 적용을 위한 해석기법 조사 및 분석</li> <li>비선형토질 모델을 활용한 지중아치구조물 해석 주요변수파악</li> </ul>                                                     |
|                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>ETI 적용 장폭아치구조물 해석모델 개발을 위한 주요변수 연구</li> </ul>        | <ul style="list-style-type: none"> <li>대심도 및 저심도 지중구조물에 ITI (Imperfect Trench Installation) 적용을 통한 지중아치구조물 하중경감 효과 분석</li> <li>대심도 및 저심도 지중구조물에 새로운 ETI (Embedded Trench Installation) 적용을 통한 지중아치구조물 거동특성 분석</li> <li>ETI 적용 지중 장폭아치구조물 해석을 위한 모델링 확립 및 주요변수 연구</li> </ul> |
| 장폭아치구조물의 해석모델 개발   | <ul style="list-style-type: none"> <li>비선형토질모델과 기하 및 재료비선형을 고려한 장폭아치구조물의 해석모델 개발</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>선형토질모델과 선형아치구조물 해석 사례조사 및 거동분석</li> <li>선형토질모델과 비선형아치구조물 해석연구 및 결과 분석</li> <li>비선형토질모델과 기하 및 재료비선형을 고려한 해석연구</li> <li>Soil-Structural Interaction Analysis를 통한 지중구조물 강성, 연성거동 분석연구</li> </ul>                                        |
|                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>ETI 적용 장폭아치구조물의 3D 해석모델 개발</li> </ul>                | <ul style="list-style-type: none"> <li>ETI적용 장폭아치구조물 2D, 3D 해석모델 개발</li> <li>범용해석프로그램을 활용한 해석기법과 3D해석결과 상호비교 분석연구</li> <li>최적화된 지중아치구조물 모델 및 해석기법 정립</li> <li>2차년도 실증실험을 위한 예비 3D해석 실시</li> </ul>                                                                           |
| 테스트 베드 구축 및 모니터링   | <ul style="list-style-type: none"> <li>실증실험을 위한 사전조사 및 예비 실험 실시</li> </ul>                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>낮은 깊이에 매설되는 지중 아치구조물의 거동특성 조사 및 분석</li> <li>지중 아치구조물의 거동특성 실험 실시</li> <li>1-2차년도 현장실험을 위한 사전조사 및 적용방법 분석</li> </ul>                                                                                                                  |

## 제2장. 국내외 기술 개발 현황

---

### 1. 연구개발 대상의 국내 현황

- 현재 국내에 개착식 지중아치 구조물과 관련된 기술을 가지고 있는 회사는 (주)동명기술공단, 진성토건(주), 평산에스아이, (주)픽슨 등이 있으며 현재 기술 수준에서 국내기술은 2차로 도로횡단 및 이보다 폭이 작은 곳에 주로 이용되고 있다.
- 개착식 복개 구조물 설계 및 개발 분야에서 기술능력은 지중에서 횡단폭원의 극대화로 판가름 날 수 있다. 진성토건(주)의 P.A.B System은 15m 폭원이 최대이며 평산에스아이의 파형강판은 20m 폭원이 최대치이다. 상기 회사들은 그 공법의 특성상 더 이상의 폭원 확대는 어려울 것으로 판단된다. (주)동명기술공단은 현재 30m 전후 폭원까지 가능한 기술을 개발하였으며, 더 큰 폭원이 가능하도록 지속적인 연구를 수행하고 있다.
- 장폭아치구조물의 심층매설에 대한 연구사례는 거의 없으며 ITI(Imperfect Trench Installation)의 적용사례도 전무하다.

### 2. 연구개발 대상의 국외 현황

- 현재 국외에 개착식 지중아치 구조물에 관련된 기술을 가지고 있는 회사는 Humes, The Reinforced Earth Company 및 BEBO 등이 있으며 현재 기술 수준에서 각 회사별로 15~20m가 최대 폭원이다. 그러나 20~30m 범위의 폭원으로 기술을 확장 적용시 구조물의 상재하중 및 토피의 증가에 따라 공법 적용이 불가능 할 수도 있다.
- 30~50m 횡단폭원을 갖는 개착식 지중 아치 구조물 공법은 청석엔지니어링이 2010년 국내외에서 최초로 시도한 공법으로써 신시장이 창출되는 개념이었으나 매설깊이가 크지 않은 경우에 대한 연구였고 지반구조 상호작용의 영향을 고려하지 않았다.
- ITI는 캐나다 등에서 널리 쓰이는 공법이며 미국에서는 AASHTO시방서에서 간단히 소개하는 단계이다. 그러나 기존 ITI는 모두 구조물 상단에만 Soft Zone을 설치하는 개념으로 구조물 전체를 둘러싸는 신개념의 본연구 방법과 근본적으로 차이가 있다.

### 3. 기술개발 성숙도

- 제시된 TRL에 비추어 본 연구과제의 각 단계 수준을 제시하면 아래 그림과 같다.
- 1차년도 연구목표인 ‘비선형토질모델과 기하 및 재료비선형을 고려한 ETI 장폭 아치 구조물의 해석모델 개발’은 기존 기술 ITI 와 ETI의 기술적 개념정립단계로 연구 착수 시점에는 TRL 2이며 1차년도 연구종료 시에는 TRL 3으로 분류된다,
- 2차년도 연구목표인 ‘ETI를 적용한 지중 장폭아치구조물의 해석모델 검증에 위한 실증실험 및 설계가이드라인 개발’은 모형실험을 통한 실험적 증명 단계를 진행하며 연구 착수 시점에는 TRL 3으로 최종 성능평가를 거쳐 연구종료 시에는 TRL 4으로 분류된다,

표 2-1. 연구단계

| 구분      |       | 연구 착수                               | 연구 종료                               | 단계별 설명 |                  |
|---------|-------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------|------------------|
| 기초연구 단계 | TRL 1 | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | TRL 1  | 이론적 연구단계         |
|         | TRL 2 | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | TRL 2  | 기술적 개념정립 단계      |
| 실험 단계   | TRL 3 | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | TRL 3  | 실험적 증명 단계        |
|         | TRL 4 | <input type="checkbox"/>            | <input checked="" type="checkbox"/> | TRL 4  | 실험실 성능평가 단계      |
| 시작품 단계  | TRL 5 | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | TRL 5  | 유사환경 시험 단계       |
|         | TRL 6 | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | TRL 6  | 유사환경 기술시범 단계     |
| 실용화 단계  | TRL 7 | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | TRL 7  | 실제환경 시작품 데모 단계   |
|         | TRL 8 | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | TRL 8  | 시제품 설치 및 성능시험 단계 |
| 사업화 단계  | TRL 9 | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/>            | TRL 9  | 현장적용/사업화 단계      |

## 제3장. 연구 수행 내용 및 성과

### 1. 연구개발의 목표 및 내용

#### 가. 최종 목표

| 구분       | 내용                                                                                                                                                        |                                                                                                             |                                                                                                                                                                      |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 최종 목표    | 본 연구는 비선형토질모델 및 지반구조상호작용을 고려한 ETI적용 장폭아치구조물의 해석 기법 개발” 및 “새로운 ETI (Embedded Trench Installation)의 장폭아치구조물 적용 타당성 검증을 위한 실증실험 및 ETI 설계 가이드라인 개발을 최종 목표로 함. |                                                                                                             |                                                                                                                                                                      |
| 세부 목표    | 1세부 (상명대)                                                                                                                                                 | 장폭아치구조물의 해석기법 개발 및 ETI의 타당성 검증을 위한 실증실험                                                                     |                                                                                                                                                                      |
|          | 2세부 (서울대)                                                                                                                                                 | ETI적용 장폭아치구조물의 해석기법 및 설계가이드라인 개발                                                                            |                                                                                                                                                                      |
| 연구 개발 범위 | 지중매설 아치구조물                                                                                                                                                | 본 연구개발 과제는 지중깊이 매설되는 장폭 아치형구조물에 걸리는 하중을 최대 80%까지 줄일수 있는 획기적인 ETI공법의 적용가능성 실증실험과 설계가이드라인 개발로서 융·복합 기초원천 기술임. |                                                                                                                                                                      |
| 주요 연구 내용 | 상명대                                                                                                                                                       | 1차년도                                                                                                        | 비선형토질모델과 기하 및 재료비선형을 고려한 장폭 아치구조물의 해석모델 개발<br>① 장폭아치구조물 해석모델개발을 위한 비선형토질 모델 및 주요변수 파악<br>② 비선형토질모델과 기하 및 재료비선형을 고려한 장폭 아치구조물의 해석모델 개발<br>③ 실증실험을 위한 사전조사 및 시편 제작과 설치 |
|          |                                                                                                                                                           | 2차년도                                                                                                        | ETI를 적용한 지중 장폭아치구조물의 해석모델 검증을 위한 실증실험<br>① ETI 실증실험을 통한 지중아치구조물 거동특성 비교 분석<br>② ETI 실증실험 데이터 분석을 통한 해석모델 검증                                                          |
|          |                                                                                                                                                           | 1차년도                                                                                                        | 새로운 ETI적용 장폭아치구조물의 3D 해석모델 개발<br>① ETI적용 장폭아치구조물 해석모델 개발을 위한 주요변수 연구<br>② ETI적용 장폭아치구조물의 3D 해석모델 개발                                                                  |
|          | 서울대                                                                                                                                                       | 2차년도                                                                                                        | 검증모델을 이용한 최적의 소프트존 (Soft Material Zone)제안 및 설계가이드라인 개발<br>① ETI실증실험 결과를 이용한 ETI 3D해석모델의 검증<br>② 검증된 ETI 해석모델을 이용한 최적화된 설계 가이드라인 마련                                   |
|          |                                                                                                                                                           |                                                                                                             |                                                                                                                                                                      |
|          |                                                                                                                                                           |                                                                                                             |                                                                                                                                                                      |
| 최종 성과물   | [1] 지반구조상호작용을 고려한 ETI 장폭아치구조물의 해석기법 개발                                                                                                                    |                                                                                                             |                                                                                                                                                                      |
|          | [2] ETI의 장폭아치구조물의 내진 및 극한환경에 저항력 증대 검증을 위한 해석모델 개발                                                                                                        |                                                                                                             |                                                                                                                                                                      |
|          | [3] 새롭게 제안된 ETI의 실증실험을 통한 검증 및 실험가이드라인 마련                                                                                                                 |                                                                                                             |                                                                                                                                                                      |
|          | [4] ETI 최적화 설계 가이드라인 마련                                                                                                                                   |                                                                                                             |                                                                                                                                                                      |

ETI : Embedded Trench Installation, ITI: Imperfect Trench Installation

## 나. 연구개발 추진 전략 및 방법

- 본 연구과제의 성공적인 개발을 위해 주관기관(상명대)와 공동기관(서울대)의 지속적인 연구 인력 교류와 해석기법 및 데이터 수집 및 ETI 3D모델 구축 및 실증실험을 위해 협동하여 연구를 수행하였음.
- 또한 기존에 시도되지 않았던 ETI를 지중구조물에 적용하는 혁신적인 연구개발내용을 효과적으로 수행하기 위하여 본 연구의 추진전략을 다음의 4 단계로 구분하여 추진함.
  - ① 문헌조사 및 전문가 활용을 통한 정보 수집
  - ② 사전조사 및 파일럿스터디를 통한 해석변수파악
  - ③ 해석모델개발 및 검증을 위한 실험/해석
  - ④ 해석결과와 실증실험 결과를 이용한 ETI 설계기법의 최적화

| 연구목표                                                             |                                                                       | 주요 연구내용                                                    | 추진전략  |       |       |     |
|------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-----|
|                                                                  |                                                                       |                                                            | 정보 수집 | 변수 파악 | 실증/해석 | 최적화 |
| [1차년도]<br><br>비선형 토질모델과 기하 및 재료 비선형을 고려한 ETI 장폭아치 구조물의 해석모델 개발   | 1세부(상명대)<br>[비선형토질모델과 기하 및 재료비선형을 고려한 장폭 아치구조물의 해석모델 개발]              | 장폭아치구조물 해석모델개발을 위한 비선형토질 모델 및 주요변수 파악                      | ●     | ○     | ○     | △   |
|                                                                  |                                                                       | 비선형토질모델과 기하 및 재료비선형을 고려한 장폭 아치구조물의 해석모델 개발과 실증실험 시편제작 및 설치 | ●     | ○     | ●     | △   |
|                                                                  | 2세부(서울대)<br>[새로운 ETI적용 장폭아치구조물의 3D 해석모델 개발]                           | ETI적용 장폭아치구조물 해석모델 개발을 위한 주요변수 연구                          | ●     | ○     | ○     | △   |
|                                                                  |                                                                       | ETI적용 장폭아치구조물의 3D 해석모델 개발                                  | △     | ○     | ●     | ○   |
| [2차년도]<br><br>ETI를 적용한 지중장폭 아치구조물의 해석모델 검증을 위한 실증실험 및 설계가이드라인 개발 | 1세부(상명대)<br>[ETI를 적용한 지중장폭 아치구조물의 해석모델 검증을 위한 실증실험]                   | ETI 실증실험을 통한 지중아치구조물 거동특성 비교 분석                            | ○     | ○     | ●     | △   |
|                                                                  |                                                                       | ETI 실증실험 데이터 분석을 통한 해석모델 검증                                | ○     | ○     | ●     | △   |
|                                                                  | 2세부(서울대)<br>[검증모델을 이용한 최적의 소프트존 (Soft Material Zone) 제안 및 설계가이드라인 개발] | ETI실증실험 결과를 이용한 ETI Soft Zone Geometry 최적화                 | △     | ○     | ●     | ●   |
|                                                                  |                                                                       | 검증된 ETI 해석모델을 이용한 최적화된 설계 가이드라인 마련                         | △     | ○     | ●     | ●   |

● : 매우강함(매우많음), ○ : 강함(많음), △ : 보통, × : 없음

## 다. 연차별 연구 목표 및 결과

| 구분<br>(연차)                      | 세부 연구 목표                                                                                             | 연구개발 수행 내용                                                                                                                                                                        | 연구 결과                                                                                                                                                                                                                    |
|---------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1차년도<br>2017.06<br>~<br>2017.12 | <ul style="list-style-type: none"> <li>비선형 토질 모델과 기하 및 재료비선형을 고려한 장폭아치구조물의 해석 모델 개발 (상명대)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>장폭아치구조물 해석 모델개발을 위한 비선형 토질 모델 및 주요변수 파악</li> <li>비선형토질모델과 기하 및 재료비선형을 고려한 장폭 아치구조물의 해석모델 개발</li> <li>실증실험을 위한 사전 조사 및 시편 제작과 설치</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>AASHTO LRFD와 CANDE Manual을 참고하여 비선형토질 모델의 재료 특성 조사.</li> <li>장폭아치구조물의 해석 모델 및 실증 실험을 위해 2D 모델 유한 요소 해석 진행.</li> <li>실증실험에 필요한 시편제작, 장비, 소모품 구입 및 시공 계획 수립.</li> </ul>             |
|                                 | 새로운 ETI적용 장폭아치구조물의 3D 해석모델 개발 (서울대)                                                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>ETI적용 장폭아치구조물 해석모델 개발을 위한 주요변수 연구</li> <li>ETI적용 장폭아치구조물의 3D 해석모델 개발</li> </ul>                                                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>ETI 기술 중 매설토 대신 치환되는 Soft Material Zone(EPS Geofoam)의 재료 특성 확보.</li> <li>장폭아치구조물의 3D 해석 모델을 통해 기존 ITI 기술과 신개념 ETI 기술 효과 비교.</li> </ul>                                            |
| 2차년도<br>2018.01<br>~<br>2018.12 | ETI를 적용한 지중 장폭아치 구조물의 해석모델 검증에 위한 실증실험 (상명대)                                                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>ETI 실증실험을 위한 실증실험 결과 분석</li> <li>ETI 실증실험 데이터 분석을 통한 해석모델 검증</li> </ul>                                                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>실증실험 구조계산 및 시공, 실험 환경 구축.</li> <li>모형 지중아치구조물 실험을 통한 토압 변화 결과 분석.</li> <li>3D 및 2D 유한요소해석 결과와 실증실험 데이터 비교 분석 진행.</li> <li>초기 예측결과와 장기예측결과와의 비교를 통한 ETI 기술의 유지관리 효과 분석.</li> </ul> |
|                                 | 검증모델을 이용한 최적의 소프트존(Soft Material Zone) 제안 및 설계가이드라인 개발 (서울대)                                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>ETI실증실험 결과를 이용한 ETI Soft Zone Geometry 최적화</li> <li>검증된 ETI 해석모델을 이용한 최적화된 설계 가이드라인 마련</li> </ul>                                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>ETI 기술의 실험 검증 결과를 토대로 최적의 Soft Zone에 대한 유한요소해석 진행.</li> <li>ETI를 적용한 파형강판 아치에 대한 ETI 기술 적용 분석.</li> <li>검증된 ETI 해석 모델을 활용한 변수해석 실시.</li> <li>ETI 적용을 위한 설계 가이드라인 작성</li> </ul>    |

---

## 2. 연구개발의 주요내용 및 결과

### 가. 비선형토질모델과 기하 및 재료비선형을 고려한 장폭 아치구조물의 해석 모델 개발

#### (1) 장폭아치구조물 해석모델개발을 위한 비선형토질 모델 및 주요변수 파악

##### (가) 지중아치구조물의 비선형 모델 주요 변수

- 지상, 지중구조물의 경우 필연적으로 토양의 재료적 특성을 고려해야하며 대부분 토양의 재료적 특성은 선형탄성체로서 취급되고 있으나 연약한 지반 혹은 지반이 큰 동하중을 받는 경우에 토양의 비선형적 거동이 두드러짐.
- 선형은 몇 개의 단순한 구성요소로 분석하여 특징을 파악한 후 전체 행동을 추측 가능한 정량적 방법이지만 비선형은 본질적으로 몇 개의 간단한 구성요소로는 분석이 불가능하며 선형을 근사시키는 선형화방법을 이용한 근사적 비선형해석으로 행동을 예측함.
- 비선형성은 크게 재료의 항복응력을 초과할 때 나타나는 재료비선형과 구조물과 지반 혹은 기초의 부분적 분리나 미끄러짐 등의 접촉면 상실에 의한 기하적 비선형성으로 나뉘어짐.
- 토양문제를 해결하는데 있어 선형거동과 비선형거동에 관한 비교적인 연구가 요구되며 비선형거동의 정도에 대해 판단이 필요함.

##### (나) 토양-구조물의 해석기법 사례조사 (재료 비선형)

- 탄·소성모델은 이미 지반 구조물의 거동해석에 적용하고 있으며 Kondner(1963)가 개발한 탄성 쌍곡선 구성모델은 개념과 구성식이 비교적 단순 하면서도 흙의 비선형거동을 잘 나타낼 수 있기 때문에 흙 구조물의 거동해석에 많이 사용됨.
- 탄성 쌍곡선 구성모델은 Duncan과 Chang(1970)에 의해 수정되어 널리 사용되었지만 모든 탄성모델과 같이 전단응력 아래서 체적변화가 일어나는 것을 설명하지 못하는 한계가 있음. 이 단점을 극복하기 위하여 Lade와 Duncan(1973)은 입방체형시험기를 이용한 모래의 시험결과를 기본으로 새로운 모델을 제안함.
- 이 새로운 모델은 항복기준, 비관련 유동칙 그리고 전 소성일을 응력수준의 쌍곡선 함수로 표현하는 일 경화법칙을 수용하고 있으며 두 개의 항복면과 비관련 유동칙이 적용되므로 해석상의 어려움이 있어 Kim과 Lade(1988 a, b, c)는 항복면이 하나인 새로운 구성모델을 제안함. 이 단일항복면 구성모델은 현재 제안된 여러 구성모델 중 비선형의 응력-변형 거동을 광범위하게 해석할 수 있고 일 경화 및 연화까지도 설명이 가능하며 어떠한 응력경로에서도 일정한 토질매개변수를 얻을 수 있어 일반삼축압축시험 결과만으로도 광범위한 응력경로 상태의 지반에 대한 거동을 예측할 수 있고 배수조건이 상이한 경우도 동일한 토질매개변수를 얻을 수 있는 장점이 있음.

---

## (다) 아치구조물의 해석 사례조사 (기하 비선형)

### ① 해외 연구 내용

- Timoshenko와 Gere(1961)와 Austin(1971)은 탄성 면내좌굴이 고려된 아치에 대하여 연구를 진행. 고전 좌굴 이론으로써 좌굴 전 아치의 거동이 선형(Linear)이며, 좌굴 전 변형을 고려하지 못하였음.
- Austin과 Ross(1976)는 유사 기하 비선형 해석을 이용하여 원형 탄성 아치와 포물선 탄성 아치에 대하여 아치 리브를 따라 작용하는 수직 등분포 하중과 아치 크라운에 작용하는 집중하중에 관하여 연구를 수행하여 좌굴 전 변위가 고려된 좌굴계수를 제안함.
- Harrison(1982)은 유한요소해석을 통해 포물선 탄성 아치에 관하여 기하 비선형 해석을 수행하였으며 부분 등분포 하중을 받는 라이즈비가 0.25인 포물선 탄성 아치의 경우 아치의 전 구간에 걸쳐 등분포하중이 작용하는 경우보다 임계 등분포하중의 크기가 작다는 사실을 발표함.
- Pi와 Trahair(1996)는 비선형 유한요소해석을 이용하여 I 단면 원형아치의 비탄성 면내 좌굴강도에 관하여 연구를 수행하였으며, 다양한 하중에 대하여 아치의 잔류응력(Residual Stress)과 아치 리브의 초기결함(Initial Imperfection)의 영향에 관하여 연구를 수행함.
- Bradford 등(2002)은 아치 중앙에 집중하중을 받는 대칭단면 원형 탄성 아치의 간략식을 유도하였으며, 그 결과를 비선형 유한요소해석을 통하여 검증함.
- Wei 등(2009)는 아치의 초기변형이 고려된 비선형 유한요소해석을 이용하여 대칭하중 형태를 고려한 고정지점 포물선 아치의 면내 좌굴강도를 보-기둥이론(Beam-Column Method)을 이용하여 등분포하중과 집중하중에 대하여 간략식을 제안함.

### ② 국내 연구 내용

- 김연태 등(1992)은 동하중 재하시 낮은 아치의 동적 비선형해석을 수행하고 좌굴 하중을 구함.
- 박용명 등(2004)은 구조실험과 매개변수해석을 수행하여 원형 강관을 수직 브레이스로 연결한 아치 리브의 면내좌굴강도 및 극한 강도에 관하여 연구를 수행함.
- 문지호 등(2005)은 기하비선형해석을 통하여 대칭하중을 받는 포물선아치에 대하여 탄성 면내 좌굴강도에 관한 연구를 수행하고 기하비선형이 고려된 좌굴계수를 제안.
- 김용희 등(2009)는 대칭하중이 적용된 신형식단면이 원형아치에 대하여 기하비선형성이 고려된 탄성면내좌굴강도의 간략식을 제안함.

(라) 기존 연구기법에 대한 적용성 검토

① 모델 선정

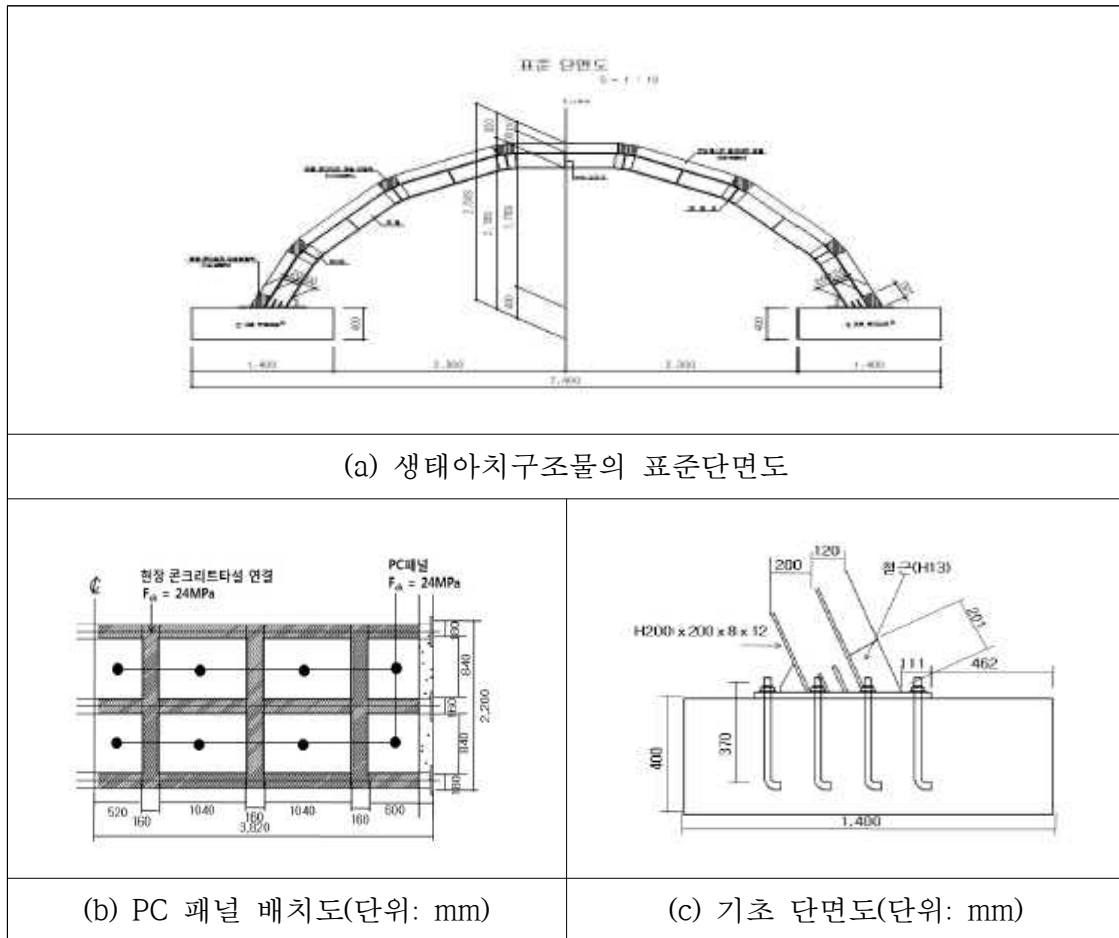


그림 3-1 생태아치구조물 상세 제원

■ 해석모델의 일반사항

- 경간장(L) 5732mm, 높이(f) 1869mm, 거더 간의 간격100mm
- 사각 162°
- 주형과 가로보의 단면제원 H 200×200×8×12(SM400B)

■ 프리캐스트 콘크리트 : 1000×120( $f_{ck}$  = 35MPa,  $E_c$  =29.9MPa)

■ 기존 연구해석기법에 대한 적용성을 검토하기 위하여 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS(2013)을 사용한 모델링 기법의 적절성을 평가하고, 이론식 비교를 통한 모델의 정확도 검증을 실시함.

■ 비교 이론식은 Roark's Formulas for Stress and Strain(6th. Edition)에서 제안하고 있는 양단고정지지에 관한 Curved Beams의 집중하중과 등분포하중의 이론식을 각각 ABAQUS(2013) Beam Element, Shell(S4R)을 적용하여 해석하였음.

■ 집중하중은 해석모델의 아치크라운에 1N을 재하하였으며 등분포하중은 아치리브를 따라 89N을 재하하였음.

■ 집중하중 또는 등분포하중을 받는 경우의 수평력, 수직력, 모멘트 발생 결과를 나타내었으며, 이론식 결과와 해석결과를 나타내었음.

② 기존의 연구기법을 활용한 유한요소해석

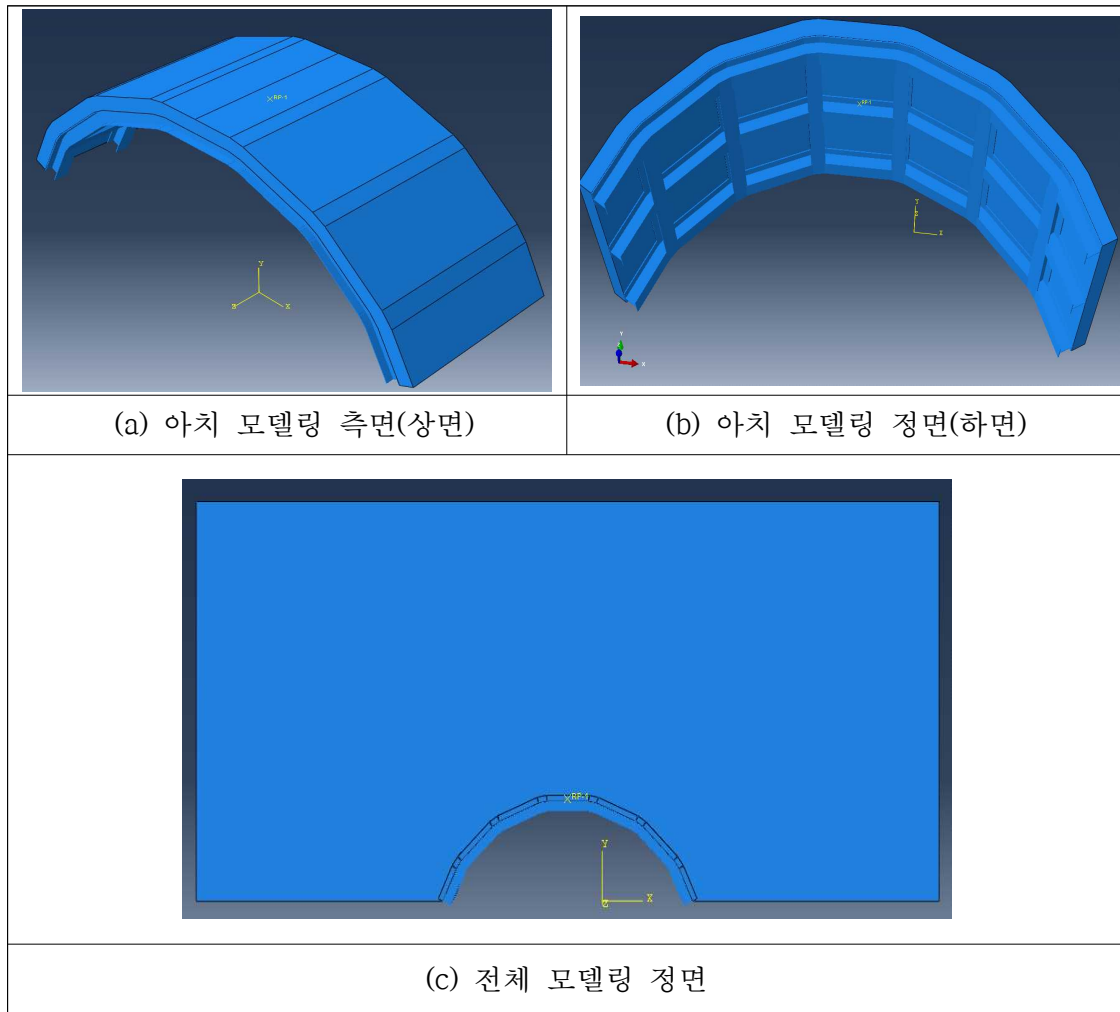


그림 3-2 생태아치구조물 해석 모델링

표 3-1. 해석 재료의 물성치

|          | 밀도<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 탄성계수<br>(MPa) | 포아송비  |
|----------|----------------------------|---------------|-------|
| Backfill | 1,922.09                   | 55.4          | 0.21  |
| Steel    | 7820                       | 210,000       | 0.3   |
| Concrete | 2,402.89                   | 29,900        | 0.167 |

표 3-2. 집중하중 작용시 발생 반력, 모멘트

|                   | 수평력(N) | 수직력(N) | 모멘트(N · mm) |
|-------------------|--------|--------|-------------|
| Roark' s Formules | 0.72   | 0.5    | 241         |
| ABAQUS 해석결과       | 0.67   | 0.5    | 221         |
| 비교 결과             | 6.94%  | 0.00%  | 8.3%        |

표 3-3. 등분포하중 작용 시 발생 반력, 모멘트

|                   | 수평력(N) | 수직력(N) | 모멘트(N · mm) |
|-------------------|--------|--------|-------------|
| Roark' s Formules | 31.2   | 44.5   | 3,963       |
| ABAQUS 해석결과       | 29.4   | 44.5   | 3,710       |
| 비교 결과             | 5.7%   | 0.00%  | 6.3%        |

(마) 아치구조물 비선형 해석연구결과 비교 분석

① 토양을 상재하중으로 고려한 비선형 탄성아치해석

- 탄성아치의 해석기법 검증을 위하여 다음과 같은 구조물을 해석하고 기존 연구 결과와 비교함.
- 검증해석에 사용된 아치의제원은 다음과 같음.
  - 지간(L)=1,232mm, 높이(f)=76.2mm, 라이즈비(f/L)= 0.062
  - 해석단면= 50.8mm×25.4mm
  - 탄성계수(E)= $6.895 \times 10^4$  MPa
  - 양단 고정 경계조건, 보 요소 100개 적용.
- Schreyer와 Masur (1966), Stolarski와 Belytschko(1982), 그리고 Pi와 Trahair(1996)의 연구결과를 비교함. 그림 4를 살펴보면 해석결과와 기존연구자들의 제안값과 유사함을 알 수 있고, 특히 Pi와 Trahair(1996)의 연구결과와 매우 유사함을 알 수 있음.

그림 13

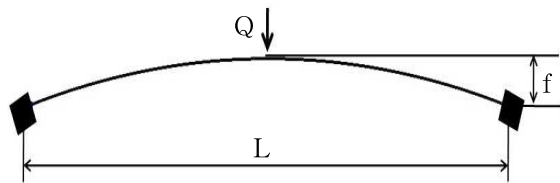


그림 3-3 해석기법 검증모델

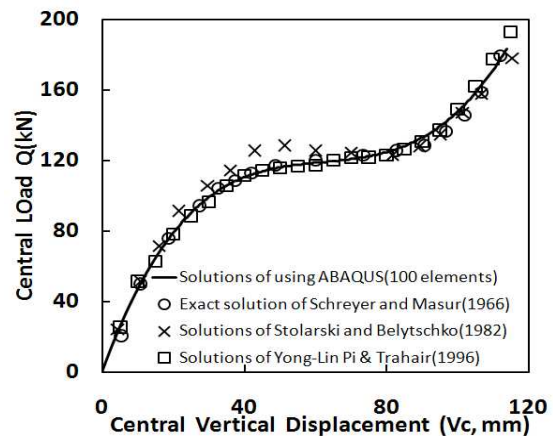


그림 3-4 비선형 탄성아치 하중-변위 곡선

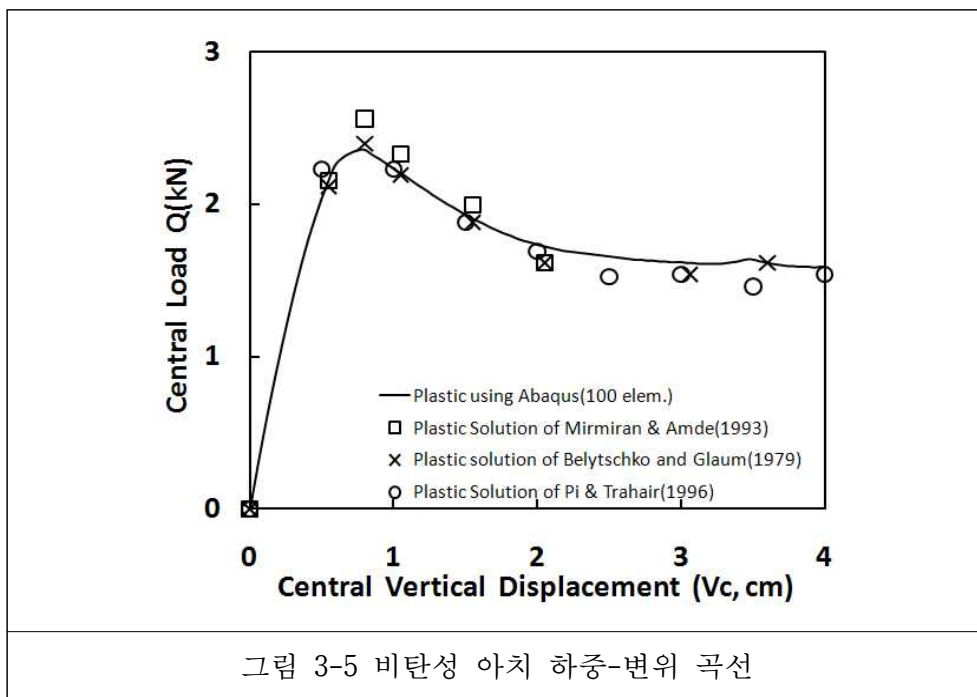
② 토양을 상재하중으로 고려한 비선형 비탄성아치해석

- 비선형 비탄성아치의 해석기법 검증에 사용된 아치의 제원은 다음과 같으며, 양단고정 경계조건, 탄소성재료특성이 고려되었으며 초기변형과 잔류응력은 고려되지 않음.

표 3-4. 검증모델의 제원

| 아치경간(L,mm) | 아치높이(f,mm)    | 라이즈비(f/L)           | 경계조건      |
|------------|---------------|---------------------|-----------|
| 864        | 61.84         | 0.072               | 양단고정      |
| 적용요소(S4R)  | 해석단면          | 탄성계수(MPa)           | 항복응력(MPa) |
| 100        | 25.4mm × 15mm | $6.895 \times 10^4$ | 138       |

- 비교결과를 살펴보면 탄성거동시 해석결과는 타 연구자들의 결과와 유사한 거동을 보이나 비선형 비탄성구간(수직처짐 1~2구간)의 경우 Belytschko와 Glaum(1979), Mirmiran와 Amde(1993)는 일부차이를 보이고 Pi와 Trahair(1996)의 결과와는 일치하는 것을 확인함.
- 유한요소해석 프로그램을 이용하여 해석 결과 비교로부터 범용구조해석 프로그램 ABAQUS(2013)을 활용한 탄성, 비탄성 유한요소해석모델링이 기존연구자들의 제안 식들과 유사한 거동을 보임을 확인할 수 있음.



---

(바) 결론

- 토양-구조물의 상호작용에 대해 비선형의 종류를 구분하여 재료비선형과 기하비선형에서 고려해야하는 변수들을 기존연구자들의 연구내용을 비교 및 분석하여 정리함.
- 유한요소프로그램인 ABAQUS(2013)을 사용한 아치구조물 모델링의 적절성을 평가하기 위해 Roark의 이론식을 비교하여 정확도 검증을 실시하였으며 그 결과 수직력의 경우 정확히 일치하였으며 수평력과 모멘트의 경우 5~8% 이내의 오차가 발생하였음. 따라서, 유한요소프로그램 ABAQUS(2013)을 이용한 모델링 기법이 적절함을 판단함.
- 비선형 탄성아치 해석 및 비탄성 아치해석을 위한 해석모델을 이용하여 기존의 연구자들의 연구 결과와 비교분석하였으며, Belytschko와 Glaum(1979), Mirmiran와 Amde(1993)는 일부차이를 보이고 Pi와 Trahair(1996)의 결과와는 일치하는 것을 확인함.
- 범용구조해석 프로그램 ABAQUS(2013)을 활용한 탄성, 비탄성 유한요소해석모델이 기존연구자들의 제안 식들과 유사한 거동을 보임을 확인함. 위의 비교분석을 통하여 ABAQUS를 해석프로그램을 적용한 상세해석이 적절함을 확인함.

## (2) 비선형토질모델과 기하 및 재료비선형을 고려한 장폭 아치구조물의 해석모델 개발

### (가) 아치구조물 해석 모델 선정

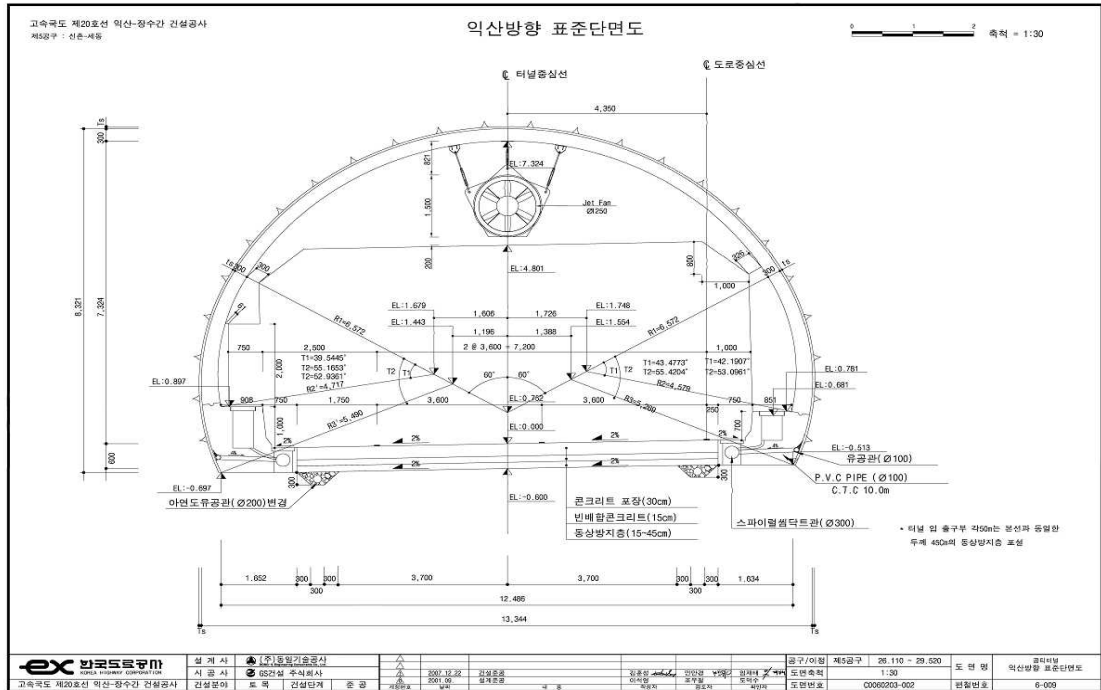


그림 3-6. 콤퍼터널 익산방향 표준단면도 (참조:한국도로공사)

표 3-4. 재료비선형을 고려한 재료 특성

|                    | 밀도<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | 탄성계수<br>(Pa)   | 포아송비 | 응력-변형률 곡선 |          |
|--------------------|----------------------------|----------------|------|-----------|----------|
|                    |                            |                |      | 응력(Pa)    | 변형률      |
| Backfill           | 1,922.09                   | 55,489,364     | 0.21 | 60,350    | 0        |
|                    |                            |                |      | 184,498   | 0.000946 |
|                    |                            |                |      | 301,748   | 0.001634 |
|                    |                            |                |      | 888,692   | 0.003950 |
| Concrete           | 2,402.89                   | 28,209,167,426 | 0.15 | -         |          |
| Geofoam<br>(EPS12) | 11.2                       | 1,500,000      | 0.12 | 15,000    | 0        |
|                    |                            |                |      | 15,000    | 0.01     |
|                    |                            |                |      | 35,000    | 0.05     |
|                    |                            |                |      | 40,000    | 0.1      |
| Geofoam<br>(EPS15) | 14.4                       | 2,500,000      | 0.12 | 25,000    | 0        |
|                    |                            |                |      | 25,000    | 0.01     |
|                    |                            |                |      | 55,000    | 0.05     |
|                    |                            |                |      | 70,000    | 0.1      |
| Geofoam<br>(EPS19) | 18.4                       | 4,000,000      | 0.12 | 40,000    | 0        |
|                    |                            |                |      | 40,000    | 0.01     |
|                    |                            |                |      | 90,000    | 0.05     |
|                    |                            |                |      | 110,000   | 0.1      |

(나) 아치구조물의 모델링 방법

- 이번 연구의 해석 방법은 ABAQUS에서 2D 해석 중 Plane Strain요소를 사용하였다. 지중구조물 특성상 길이 방향으로의 거동특성이 변화가 거의 없고 아래의 그림과 같이 ABAQUS 3D 해석 결과도 길이방향에 따라 Contact Pressure가 일정하다는 것을 알 수 있다. 따라서 3D 해석보다 용이하고 빠른 해석을 진행할 수 있는 2D 해석으로 해석을 진행하였다. 아치는 2D Beam Section, 매립토 및 Soft Material Zone은 2D Solid Section으로 해석을 하였다.
- 아치 파트와 매립토 및 Soft Material Zone 파트는 함께 거동해야한다. 따라서 ABAQUS의 Interactions 옵션을 사용하여 파트 간 부착을 하였음. 여기서 Interactions의 세부 사항은 마찰계수를 무한하게 설정해주어 파트 간 슬라이딩이 생기지 않게 해주면서 완전부착으로 인하여 서로 떨어지지 않게 설정함.
- 아치 파트와 매립토 및 Soft Material Zone 파트는 함께 거동해야한다. 따라서 ABAQUS의 Interactions 옵션을 사용하여 파트 간 부착을 하였음. 여기서 Interactions의 세부 사항은 마찰계수를 무한하게 설정해주어 파트 간 슬라이딩이 생기지 않게 해주면서 완전부착으로 인하여 서로 떨어지지 않게 설정함.
- 아치 Mesh type은 B21(2-node linear Beam in a plane)이며, 매립토 및 Soft Material Zone Mesh type은 CPE4R(4-node bilinear plan strain quadrilateral, reduced integration, hourglass control)을 적용하였음.
- 또한, 하중은 중력 방향으로 재하하였으며 일반적인 정적해석으로 진행되었음.

표 3-5. Soft Material Zone 두께 변수

| Model     | Span<br>방향<br>증가비율 | Rise<br>(높이)방향<br>증가 비율 | Model | Span<br>방향<br>증가비율 | Rise<br>(높이)방향<br>증가 비율 | Model | Span<br>방향<br>증가비율 | Rise<br>(높이)방향<br>증가 비율 |
|-----------|--------------------|-------------------------|-------|--------------------|-------------------------|-------|--------------------|-------------------------|
| Only Soil | 0%                 | 0%                      | -     | -                  | -                       | -     | -                  | -                       |
| S1R1      | 10%                | 10%                     | S2R1  | 20%                | 10%                     | S3R1  | 30%                | 10%                     |
| S1R2      | 10%                | 20%                     | S2R2  | 20%                | 20%                     | S3R2  | 30%                | 20%                     |
| S1R3      | 10%                | 30%                     | S2R3  | 20%                | 30%                     | S3R3  | 30%                | 30%                     |
| S1R4      | 10%                | 40%                     | S2R4  | 20%                | 40%                     | S3R4  | 30%                | 40%                     |
| S1R5      | 10%                | 50%                     | S2R5  | 20%                | 50%                     | S3R5  | 30%                | 50%                     |
| S1R6      | 10%                | 60%                     | S2R6  | 20%                | 60%                     | S3R6  | 30%                | 60%                     |
| S1R7      | 10%                | 70%                     | S2R7  | 20%                | 70%                     | S3R7  | 30%                | 70%                     |
| S1R8      | 10%                | 80%                     | S2R8  | 20%                | 80%                     | S3R8  | 30%                | 80%                     |
| S1R9      | 10%                | 90%                     | S2R9  | 20%                | 90%                     | S3R9  | 30%                | 90%                     |
| S1R10     | 10%                | 100%                    | S2R10 | 20%                | 100%                    | S3R10 | 30%                | 100%                    |

(다) 아치구조물의 경계조건

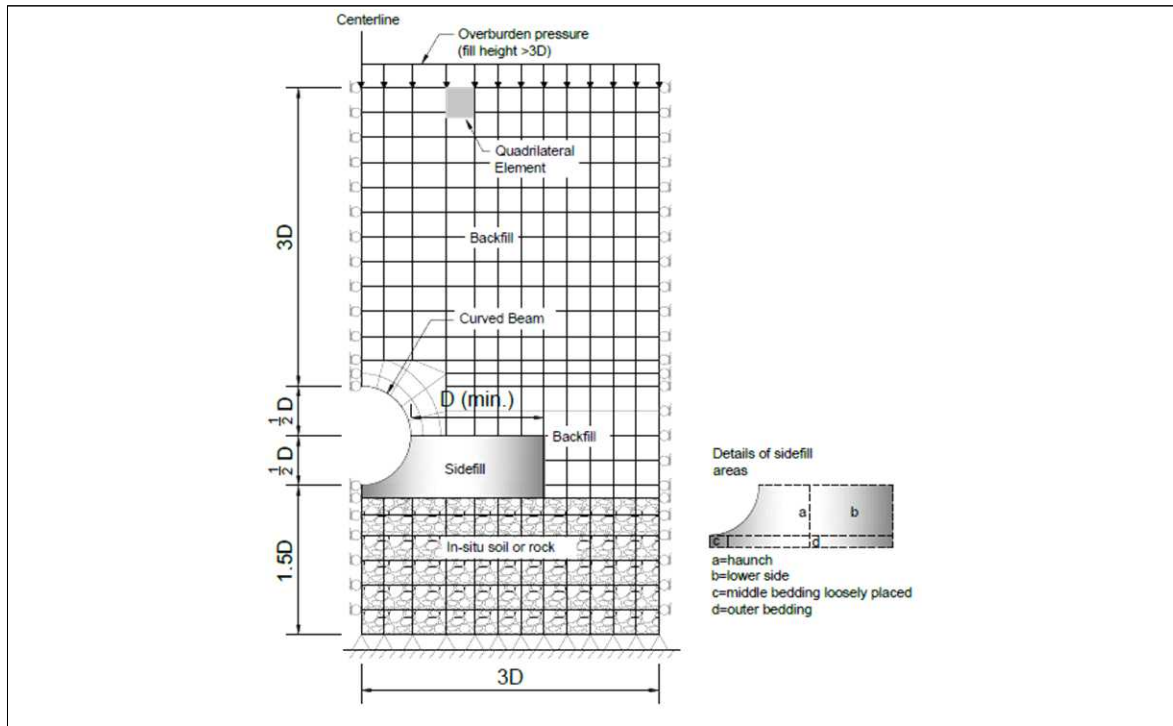


그림 3-7 유한요소모델 도식화 (D=Diameter)



그림 3-8 유한요소모델 경계조건

- 그림 8은 토양과 관거(파이프)시스템을 나타내고 있음. 토양 모델링은 대칭을 이용하여 시스템의 절반만 모델링 되었으며 토양-구조물의 시스템에서 토양 모델링은 Kang 등 (2007)에 의해 수행된 유한요소해석 결과에 기초하여, 관거의 수평, 수직으로 관경의 3

배 길이까지 확장될 때 가장 효과적임을 확인하였음. 관경의 3배 이상의 매설토는 추가 과부하 압력으로 모델링된 토양의 상단부분에 중력방향으로 재하함.

- 토양-아치구조물에서는 매설깊이의 상호적 관계를 살펴보면, 지중 아치구조물의 구조 거동에 미치는 영향을 고려하여 토양의 연속체 성질에 따라 아치 높이의 3배만큼 토양을 모델링함. 이때 지반의 전체 크기가 경계조건의 영향과 서로 간섭하지 않는다고 가정함.

(라) 해석결과

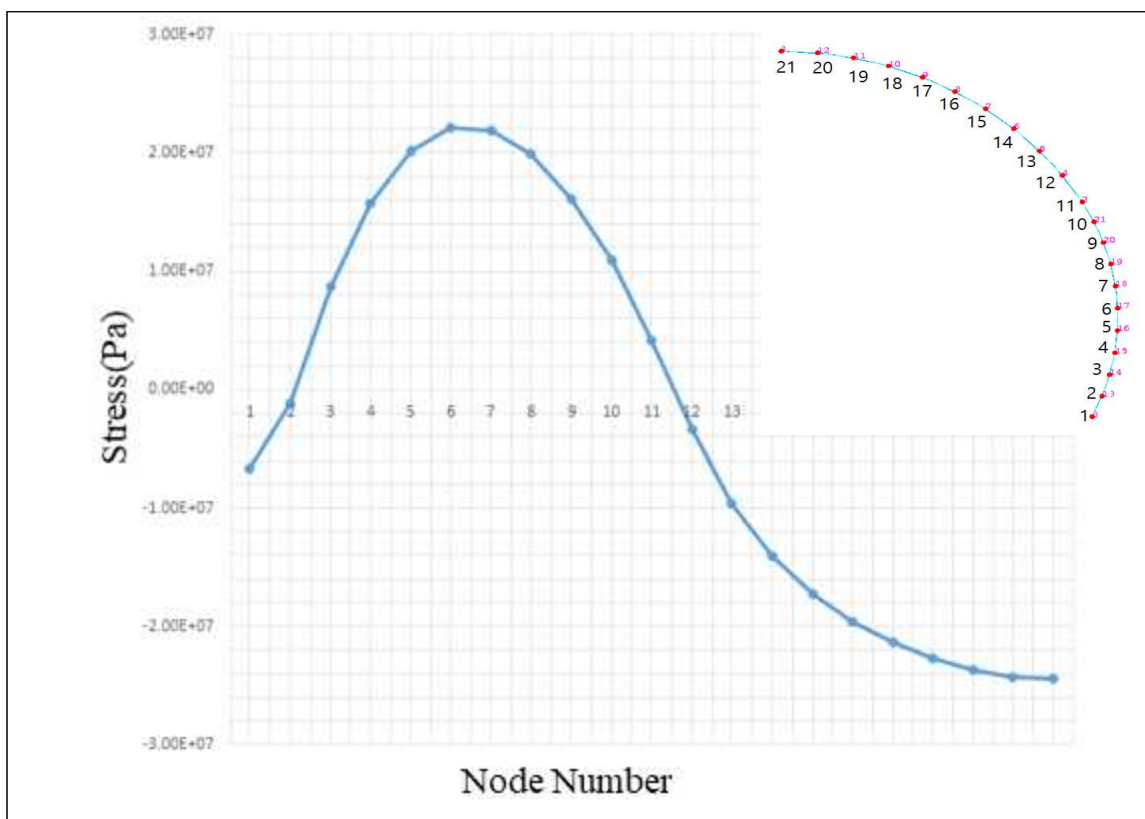


그림 3-9 Geofoam을 사용하지 않은 해석모델(Only Soil) 절점(Node)에 대한 축응력

- ITI, ETI를 적용하지 않고(Geofoam을 사용하지 않는 경우) 기존 흙을 상재하중으로 고려한 경우 절점 6에서 최대 인장응력이 발생하며, 절점 21번에는 최대 압축응력이 발생함.
- 수평으로 표시한 얇은 점선은 Geofoam을 사용하지 않은 경우(Only Soil) 절점 6과 21번의 인장응력과 압축응력 값을 나타내며, 두꺼운 수평 점선은 수평 얇은 점선의 50% 감소 했을 때 인장응력과 압축응력 값을 나타냄.
- 그림 9를 살펴보면, 아치 높이(Rise)의 20% 이하로 상부에 Geofoam을 설치하는 경우 설치효과를 볼 수 없으며, 최소 30%이상의 Geofoam를 설치하여야 응력저감 효과를 볼 수 있음.
- Geofoam을 설치하여 아치구조물에 발생하는 응력의 저감효과가 50% 이상이 되기 위해서는 아치 높이(Rise)의 70% 이상의 두께로 상부에 Geofoam을 설치하고 Span 방향으로 Span길이에 10% 증가(1.1L)시켜 Geofoam을 설치하면 효과를 볼 수 있음.

- 아치 높이(Rise)의 70% 이상의 두께로 상부에 Geofoam을 설치하는 경우 응력저감효과는 크게 변화되지 않음을 알 수 있음.

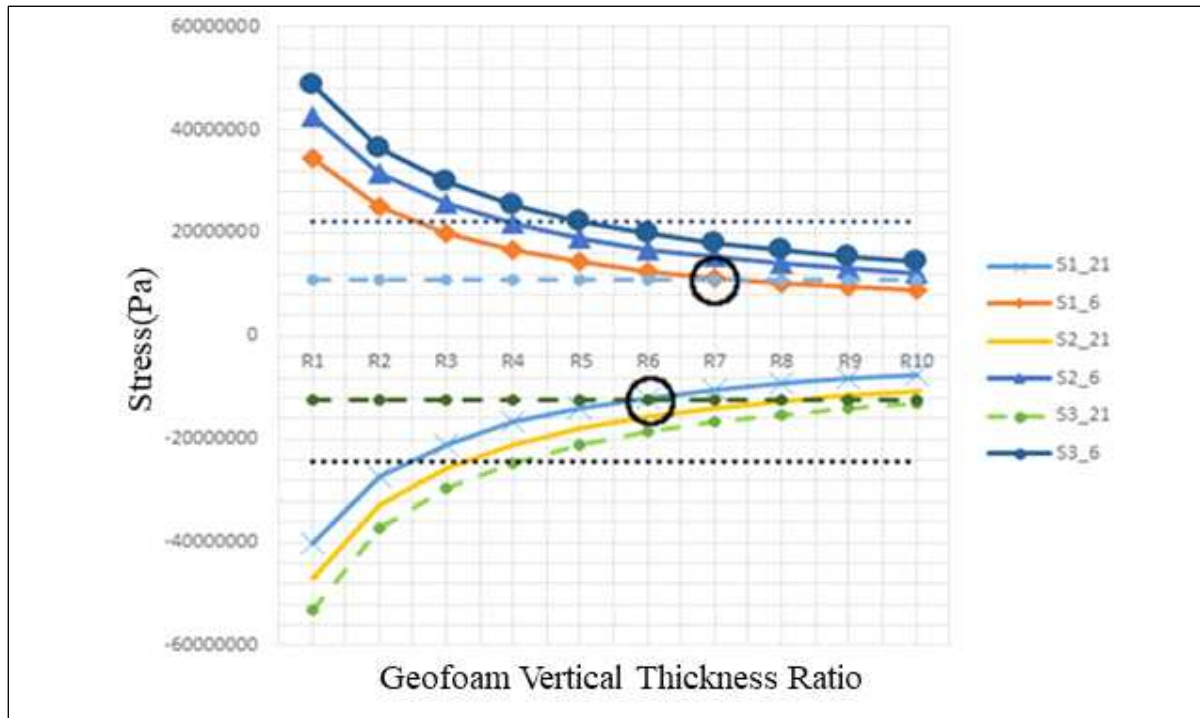


그림 3-10 Soft Material Zone 두께 변화에 대한 절점 6과 21의 축응력 비교

## 나. 새로운 ETI적용 장폭아치구조물의 3D 해석모델 개발

### (1) ETI 적용 장폭아치구조물의 해석모델 개발을 위한 주요변수 연구

#### (가) 실증실험 해석 모델 선정

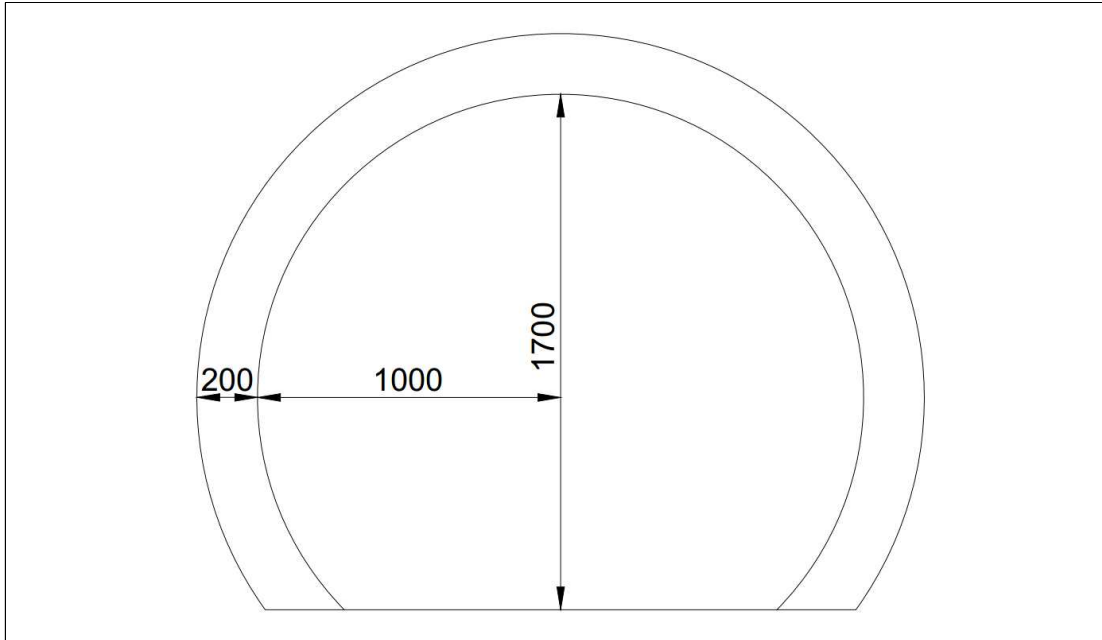


그림 3-11. 실증실험 아치 재원(단위 mm)

- 실험체 재원은 다음과 같음.
  - 관경(D) 2,000mm, 하부에서 300mm 절단하여 아치(Arch)형상을 구현
  - Span(길이) = 2,000mm, Rise(높이) = 1,700mm, 두께 = 200mm, Rise Ratio = 0.85
- Soft Zone의 두께는 Span의 10% ~ 50%, Rise의 10% ~ 100% 의 변수로 적용.
- 재료의 특성과 경계조건은 해석조건과 부합되게 조치.

#### (나) Soft Zone의 설치 위치

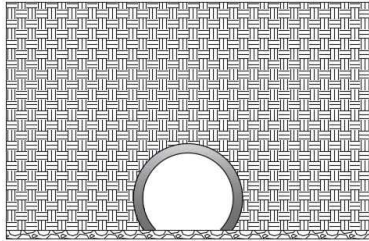
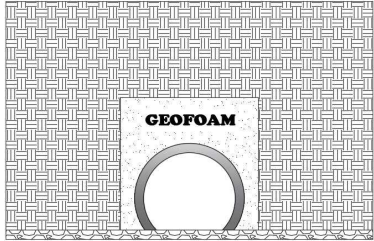
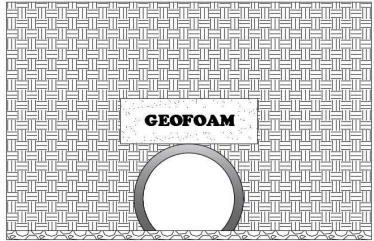
|                                                                                     |                                                                                     |                                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |
| (a) Soft Zone 미설치                                                                   | (b) Soft Zone 상부<br>및 측면 설치<br>(ETI 기법)                                             | (c) Soft Zone<br>상부 설치<br>(ITI 기법)                                                    |

그림 3-12 실증실험의 Soft Material Zone 설치 위치

(다) 실증실험 해석모델 해석 결과

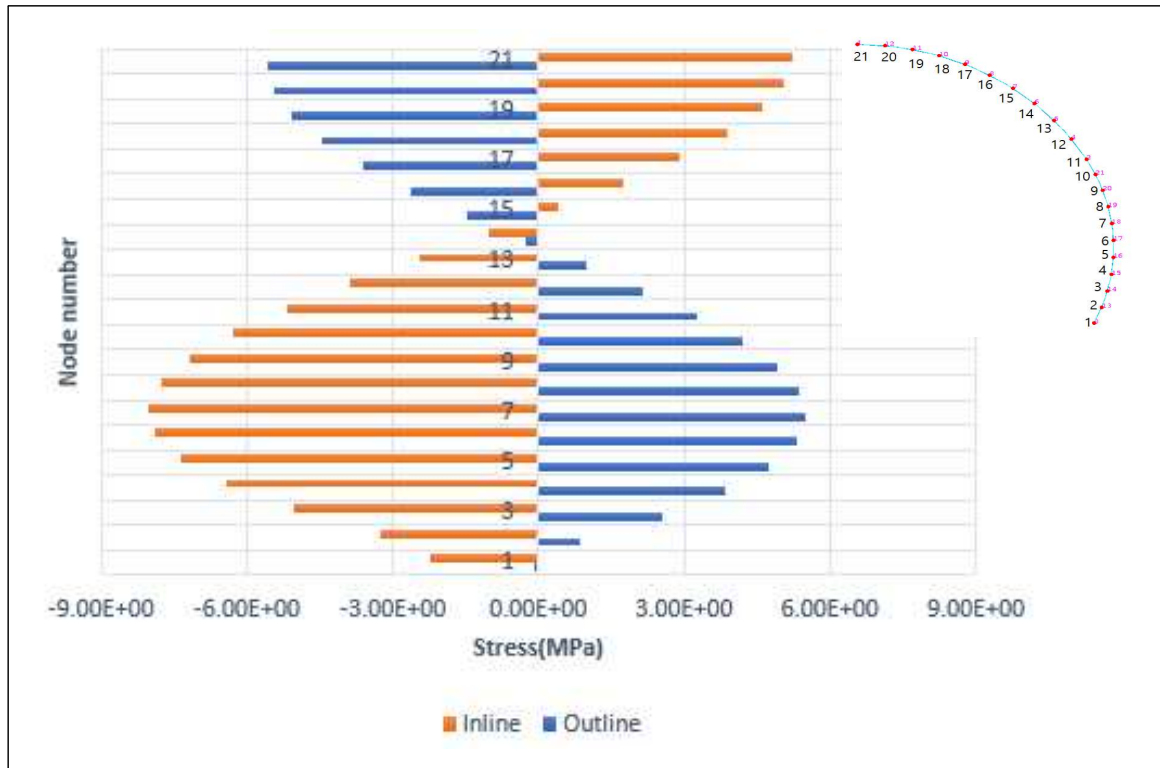


그림 3-13 Soft Material Zone 미설치 경우 각 노드에 대한 축응력

- 고풀터널 해석 모델 결과와 동일하게 Crown Point(Node Number 21)와 Spring Line(Node Number 6,7)에서 최대 인장 또는 압축응력이 발생함. 실증실험 시 Crown Point의 지점과 Spring Line 지점에 Strain Gage를 설치하여 응력을 비교하고자 함.

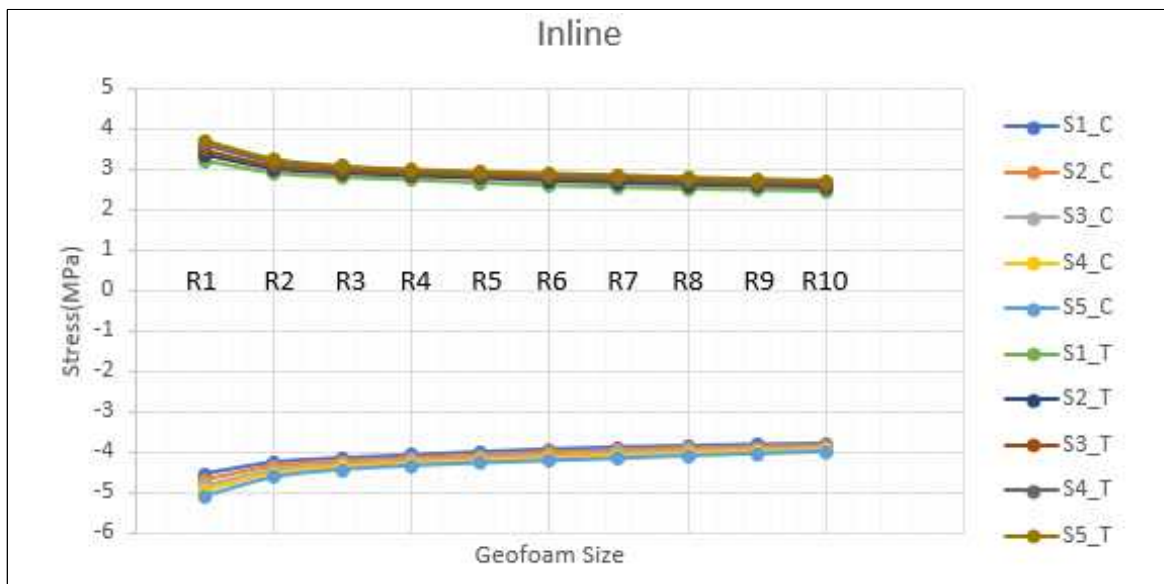


그림 3-14 Soft Material Zone 두께 변화에 따른 최대 인장 및 압축응력 (ETI기법)

- ETI모델은 Soft Material Zone 수평길이 및 수직두께가 Span대비 비율 10%(1.1L), Rise 대비 두께 30%(0.3R)일 때 최대 인장 응력과 압축 응력이 50%이상 감소율을 보임.

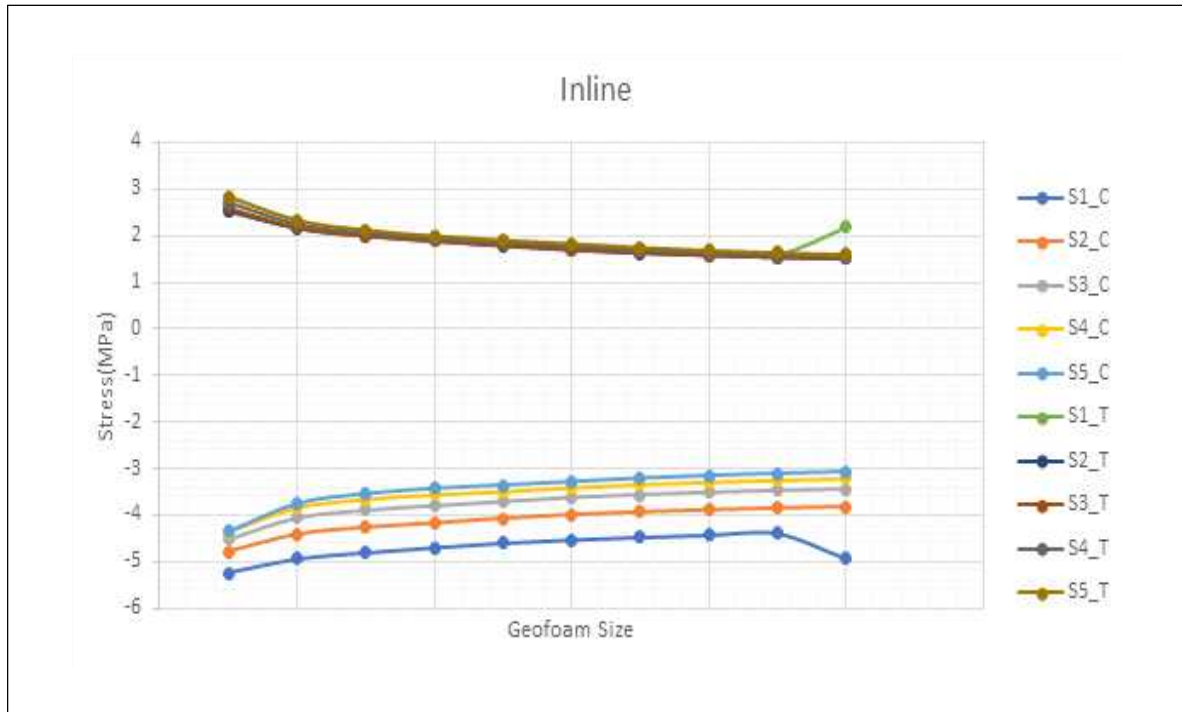


그림 3-15 Soft Material Zone 두께 변화에 따른 최대 인장 및 압축응력 (ITI기법)

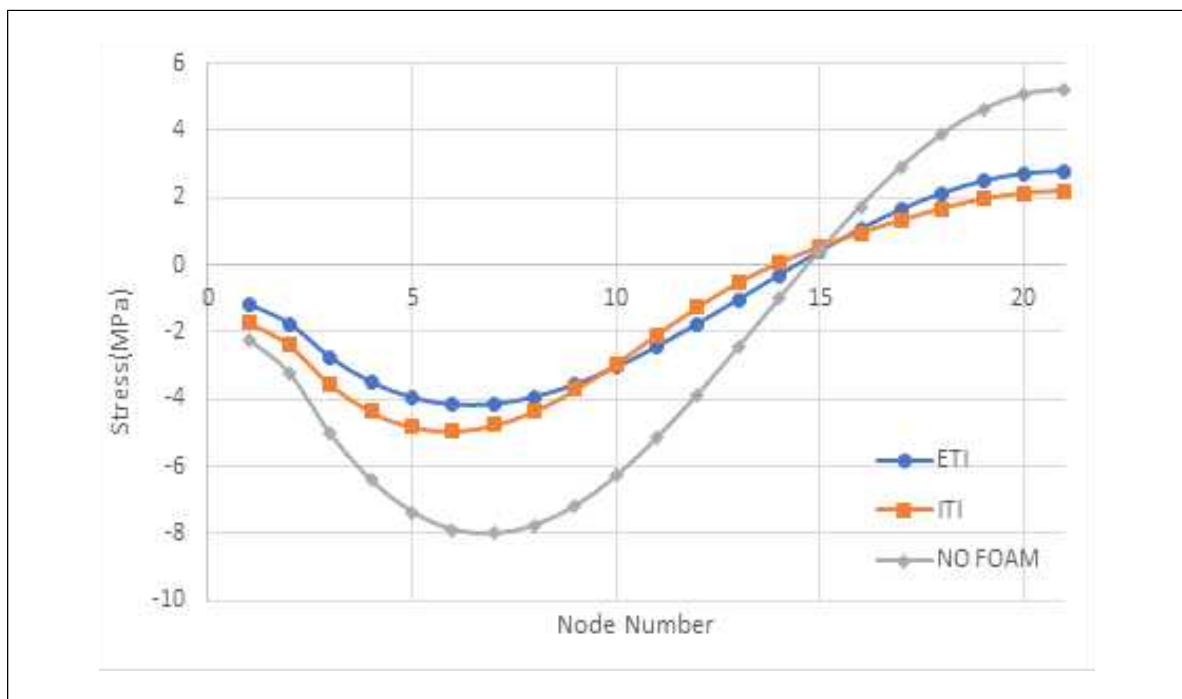


그림 3-16 ETI, ITI의 Inline에 발생하는 응력 비교

- Soft Material Zone의 사이즈 증가 시 응력감소량이 일정해지는 SIR3에 대한 비교 그래프로 Soft Material Zone의 높이(R)을 30%, 폭(S)를 10% 증가 시켰을 경우에 해당함.
- Inline의 경우, ETI가 ITI보다 1~9번 노드에서 응력이 더욱 감소되며 이는 ITI의 하부에 대한 응력집중을 ETI가 보다 효과적으로 제어할 수 있음을 나타냄.

(라) 해석결과를 토대로 한 기존 연구내용들과의 비교

① 연약지반에 사용된 기존 EPS 성토와의 차별성

- 기존 연약한 토지의 도로공사에 적용되던 EPS Geofoam의 목적 및 역할은 연약지반과 인근에 무거운 채움재를 대신하여 지반토양과 인접구조의 무리한 하중을 방지하면서도 상부하중을 지탱하는 역할이며, 특수 장비가 없이 취급이 용이하기에 공사시간이 단축되고 궁극에 공사비 단축 등의 효과를 가져오는것임. 본 연구에서 제안하는 ETI는 EPS Geofoam의 저밀도를 활용하여 하중을 줄이는 것이 목적이 아니라 EPS Geofoam의 고압축성성질을 활용하여 구조물상부 흙의 상대침하를 유도하여 상부토압을 인근으로 분산시키는 (Positive Soil Arching) 지반-특수재료-구조 상호작용의 원리를 이용하는 것으로서 비교적 적은 양의 EPS Geofoam로 지중구조물을 감싸서 구조물에 걸리는 토압을 최대 80%까지 줄이는 효과가 있음. 아래의 표들은 ABAQUS의 해석 결과 이며, 위에 이론에 대한 신뢰를 증명해줌.

표 3-6. Span 비율 10% 일 때, Rise 비율에 따른 Contact Pressure 감소율

| Node Number | Only Soil | ETI_ S1R1 | ETI_ S1R2 | ETI_ S1R3 | ETI_ S1R4 | ETI_ S1R5 | ETI_ S1R6 | ETI_ S1R7 | ETI_ S1R8 | ETI_ S1R9 | ETI_ S1R10 |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 1           | 0%        | 93%       | 93%       | 93%       | 93%       | 93%       | 93%       | 93%       | 93%       | 93%       | 93%        |
| 2           | 0%        | 92%       | 92%       | 92%       | 92%       | 92%       | 92%       | 92%       | 92%       | 92%       | 92%        |
| 3           | 0%        | 90%       | 90%       | 90%       | 89%       | 89%       | 89%       | 89%       | 89%       | 89%       | 89%        |
| 4           | 0%        | 89%       | 89%       | 89%       | 89%       | 89%       | 89%       | 89%       | 89%       | 89%       | 89%        |
| 5           | 0%        | 89%       | 89%       | 88%       | 88%       | 88%       | 88%       | 88%       | 88%       | 88%       | 88%        |
| 6           | 0%        | 89%       | 89%       | 88%       | 88%       | 88%       | 88%       | 88%       | 88%       | 88%       | 88%        |
| 7           | 0%        | 89%       | 88%       | 88%       | 88%       | 88%       | 88%       | 88%       | 88%       | 88%       | 88%        |
| 8           | 0%        | 89%       | 89%       | 89%       | 89%       | 89%       | 89%       | 89%       | 89%       | 89%       | 89%        |
| 9           | 0%        | 89%       | 89%       | 89%       | 89%       | 89%       | 90%       | 90%       | 90%       | 90%       | 90%        |
| 10          | 0%        | 89%       | 90%       | 90%       | 90%       | 90%       | 90%       | 90%       | 90%       | 91%       | 91%        |
| 11          | 0%        | 88%       | 89%       | 90%       | 90%       | 91%       | 91%       | 91%       | 91%       | 91%       | 91%        |
| 12          | 0%        | 88%       | 89%       | 90%       | 90%       | 91%       | 91%       | 91%       | 92%       | 92%       | 92%        |
| 13          | 0%        | 87%       | 88%       | 89%       | 90%       | 91%       | 91%       | 92%       | 92%       | 92%       | 92%        |
| 14          | 0%        | 85%       | 87%       | 88%       | 89%       | 90%       | 91%       | 92%       | 92%       | 92%       | 93%        |
| 15          | 0%        | 84%       | 86%       | 87%       | 89%       | 90%       | 91%       | 92%       | 92%       | 92%       | 93%        |
| 16          | 0%        | 81%       | 84%       | 85%       | 87%       | 89%       | 90%       | 91%       | 92%       | 92%       | 93%        |
| 17          | 0%        | 79%       | 83%       | 85%       | 87%       | 89%       | 90%       | 91%       | 92%       | 92%       | 93%        |
| 18          | 0%        | 76%       | 82%       | 84%       | 86%       | 88%       | 89%       | 91%       | 91%       | 92%       | 93%        |
| 19          | 0%        | 72%       | 81%       | 83%       | 85%       | 87%       | 89%       | 90%       | 91%       | 92%       | 92%        |
| 20          | 0%        | 69%       | 80%       | 83%       | 84%       | 87%       | 89%       | 90%       | 91%       | 92%       | 92%        |
| 21          | 0%        | 68%       | 80%       | 83%       | 85%       | 87%       | 89%       | 90%       | 91%       | 92%       | 92%        |

② 기존 ITI (지중구조물 상부에만 EPS Geofoam을 설치하는 공법)와의 차별성

- 기존 ITI가 Positive Soil Arching을 유도한다는 원리에서는 본 연구에서 제안하는 ETI와 같으나, 기존 ITI는 구조물 상단에 걸리는 토압을 40%정도까지 현격히 줄일 수 있었으나 줄어든 토압이 구조물측면으로 이동하여 구조물을 밑으로 끌어당기는 전단력으로 작용하여 구조물 하단에 하중이 증가하여 전체구조물에 걸리는 최대토압의 감소율은 그리 크지 않았었고 구조물이 줄어든 상부토압과 비교적 큰 하부토압사이의 불균형으로 인해 위로 Uplift되는 위험성에 노출됨. 본 연구에서 제안하는 ETI는 구조물전체에 걸리는 토압을 균등하게 80%이상 줄임으로써 하방향과 상방향의 토압의 불균등이 해소되어 구조물에 걸리는 하중의 감소와 안정성이 크게 증대되는 효과가 있음.

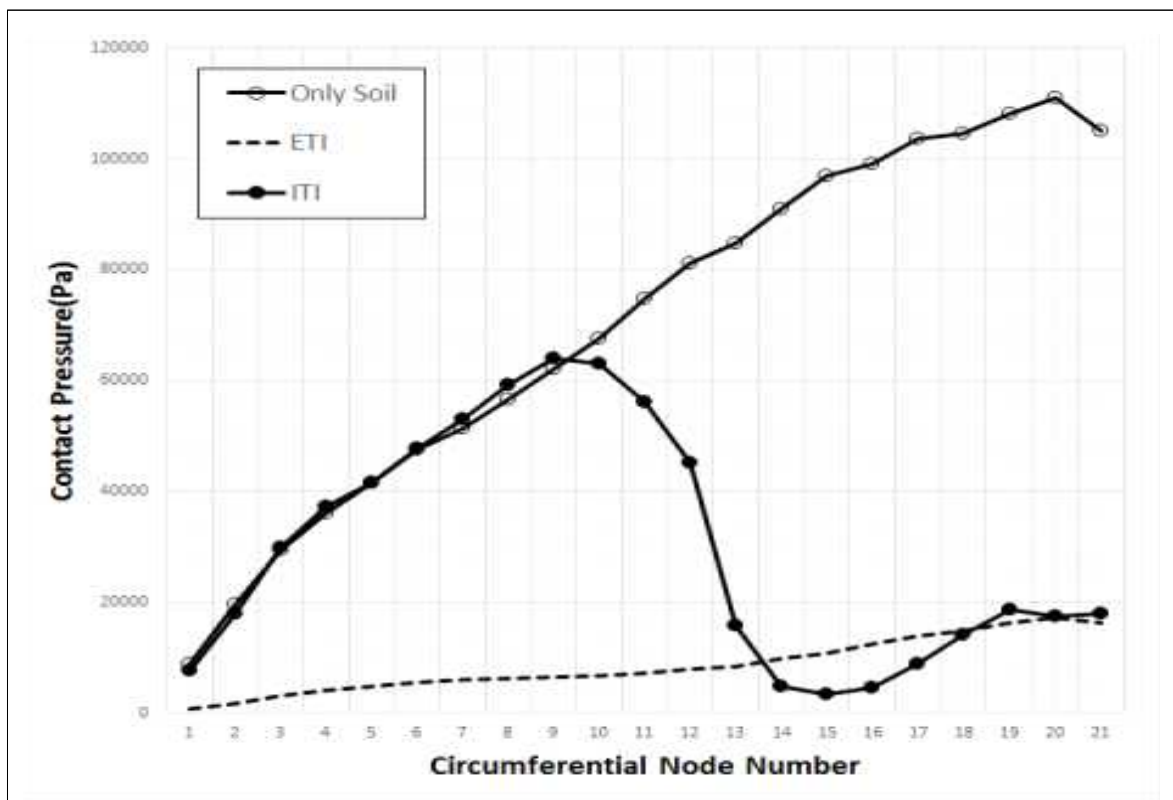


그림 3-17 Soft Material Zone 형태에 따른 Contact Pressure 비교

- 그림 18은 ABAQUS의 해석 결과를 보면 기존 ITI 기법은 아치 상부 토압은 확연하게 경감시켜주지만 측면과 하부의 토압에 경감효과는 보이지 않음. 하지만 ETI 기법은 상부는 ITI의 기법보다는 경감효과는 크지는 않지만 상부, 측면 및 하부 전체적인 부분에서 토압 경감 효과가 두드러지는 것으로 보임. 따라서 기존 ITI 기법보다는 ETI 기법이 지중아치구조물에 작용하는 토압에 대해 경감효과가 뛰어난 것으로 판단됨.
- 구조물의 Contact Pressure는 기존 토압과 변형에 의한 압력의 합이다. Only Soil 경우와 ETI 기법 경우 측면에서 인장 변형이 발생하고 ITI 기법인 경우 측면에서 압축 변형이 발생함. 따라서 Only Soil 경우와 ETI 기법 경우 변형의 의한 압력이 Contact Pressure의 증가를 초래하고 ITI 기법인 경우 변형의 의한 압력이 Contact Pressure의 감소를 초래함. 하지만 Only Soil인 경우와 ITI인 경우 측면에 발생하는 Contact Pressure는 매우 유사한 값을 가짐. 즉, ITI에서 상부에서 저감되었던 토압이 측면의 토

압으로 변형되어 측면에 더 많은 토압이 발생하며 ETI 경우 또한 ITI 경우처럼 측면 토압이 증가하지만 Soft Material Zone에 의하여 구조물에 직접적인 Contact Pressure가 발생하지 않는 것으로 판단됨. 그림 21은 ABAQUS의 해석결과(Contact Pressure, Displacement)를 기준으로 토압을 이동을 유추한 것임.

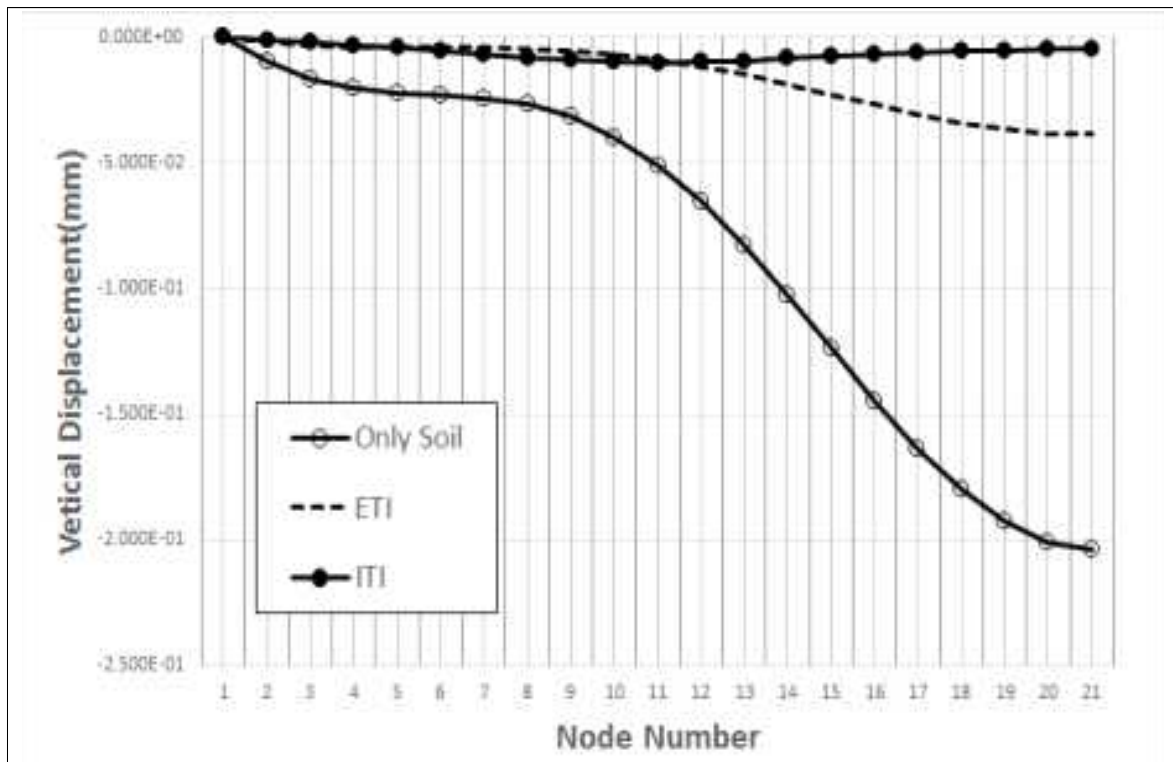


그림 3-18 Soft Material Zone 형태에 따른 Vertical Displacement 비교

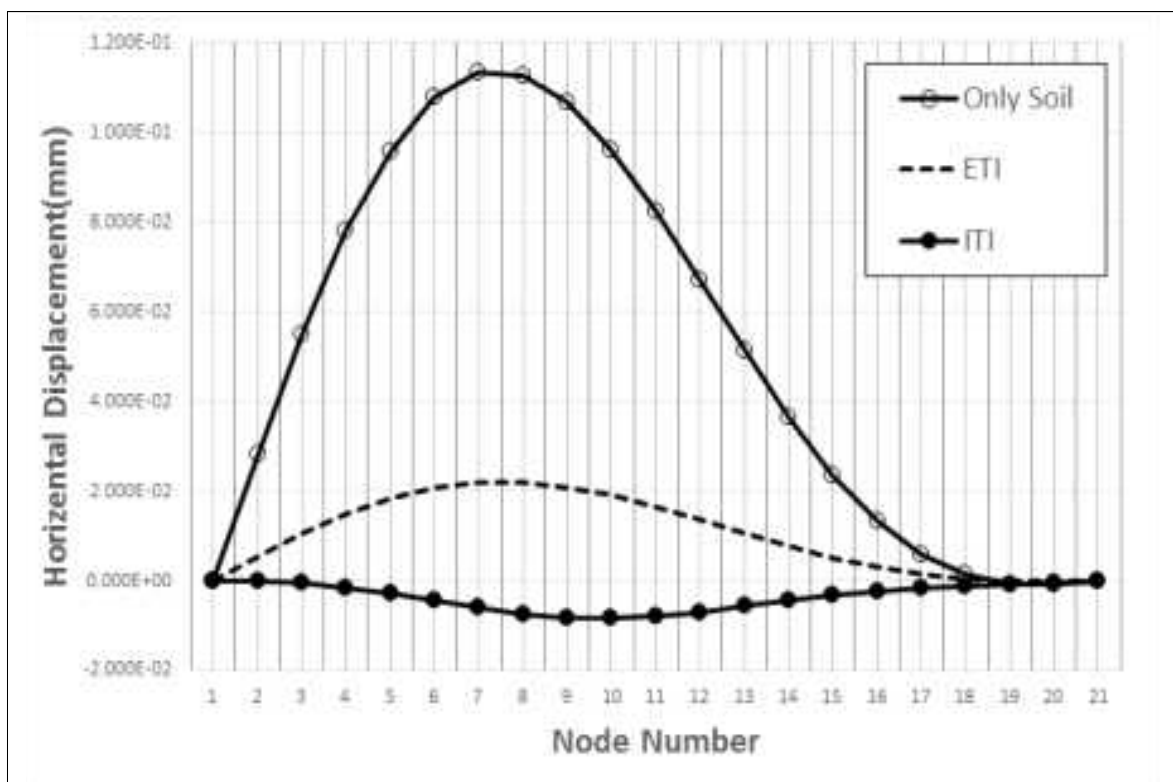


그림 3-19 Soft Material Zone 형태에 따른 Horizontal Displacement 비교

## (2) ETI 적용 장폭아치구조물의 3D 해석모델 개발

### (가) 초기 실증실험 3D 해석모델 선정

#### ① 초기 실증실험 모델 제원

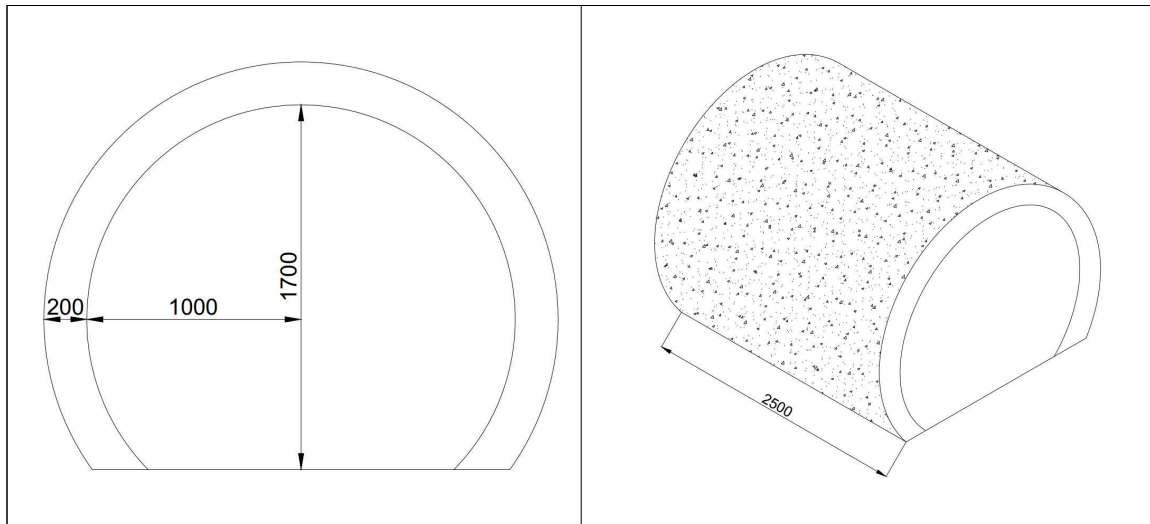


그림 3-20 실증실험 3D 아치 제원

- 실험체의 관경(D) 2,000mm이며, 하부에서 300mm 절단하여 아치(Arch)형상을 구현함.
- Span(길이) = 2,000mm, Rise(높이) = 1,700mm, 두께 = 200mm, Rise Ratio = 0.85
- Soft Material Zone의 두께는 Span의 10% ~ 50%, Rise의 10% ~100% 의 변수 적용함.
- 재료의 특성과 경계조건은 해석조건과 부합되게 조치함.

#### ② 실증실험 3D 해석 모델링

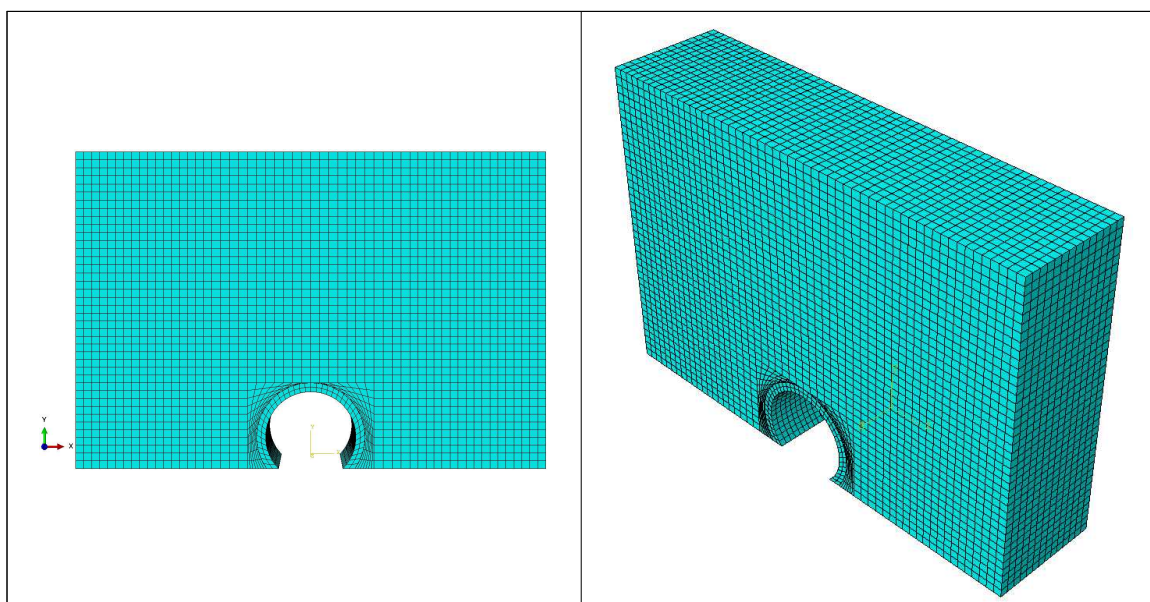


그림 3-21 실증실험 3D 아치 해석모델 (흙과 아치 형상)

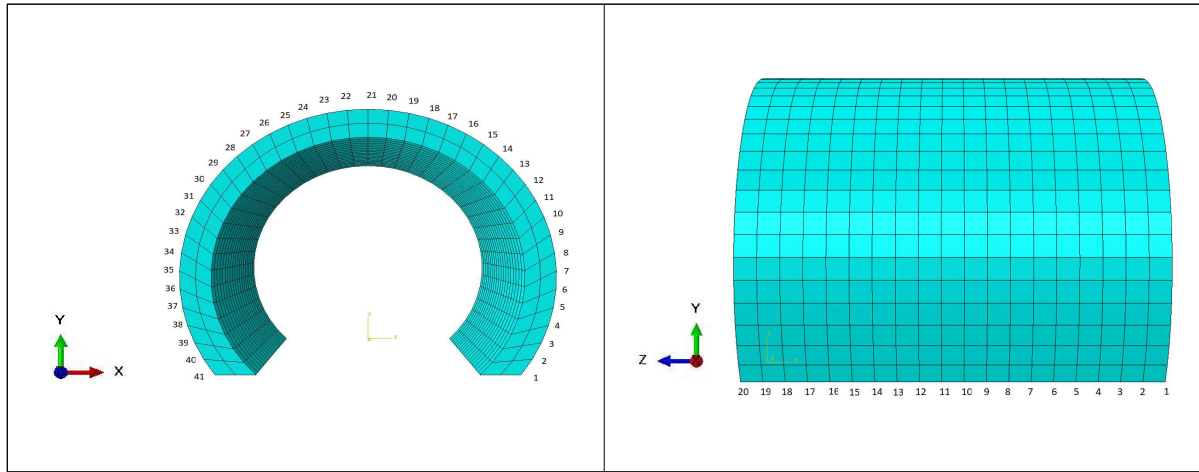


그림 3-22 실증실험 3D 아치 해석모델 (모델의 원주와 길이방향에 따른 Node Number)

표 3-7. 실증실험 3D 해석모델 경계조건

|              | U1         | U2         | U3         | UR1        | UR2        | UR3        |
|--------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Front & Back | Free       | Free       | Resistance | Resistance | Resistance | Free       |
| Side         | Resistance | Free       | Free       | Free       | Resistance | Resistance |
| Bottom       | Free       | Resistance | Free       | Resistance | Free       | Resistance |

### ③ 초기 실증실험 3D 해석모델 해석 결과

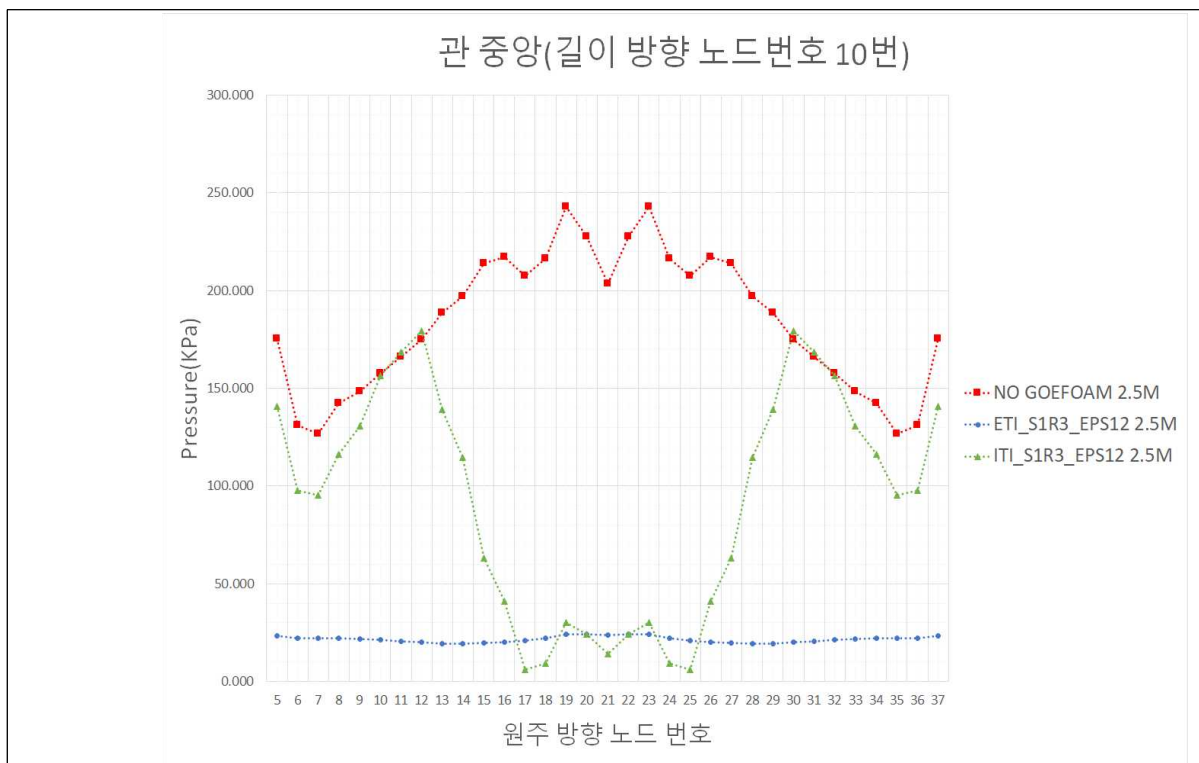


그림 3-23 관 중앙에서 원주 방향에 따른 토압

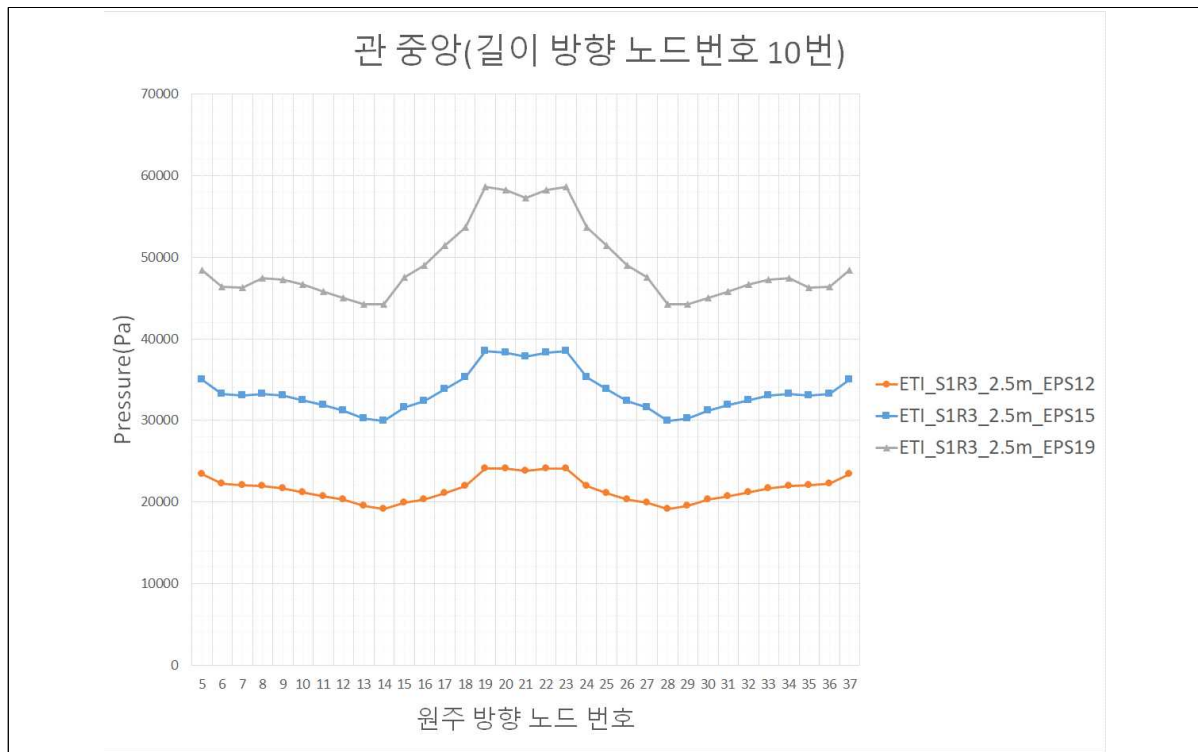


그림 3-24 Goefoam의 재료 특성 변화에 따른 토압

- Soft Material Zone에서 사용되는 Soft Material은 탄성계수가 작을수록 아치구조물에 작용되는 토압 경감효과가 좋아짐(토양-구조물 상호작용 및 토양의 아칭효과 극대화).
- ITI기법은 ETI기법보다 Crown 주위로 토압 경감효과가 뛰어나지만 Crown에서 벗어날수록 Soft Material의 토압 경감효과를 보지 못하거나 미비함.
- ETI기법은 최대 토압 경감률 92%를 보이며, ITI기법은 최소 토압 경감률 26%, 최대 토압 경감률 98%를 보임.

#### ④ 실증실험 토압계 설치 위치 선정

- 실증실험체 3D 해석모델 결과를 토대로 토압계의 위치는 절점 11번과 21번에 설치함.

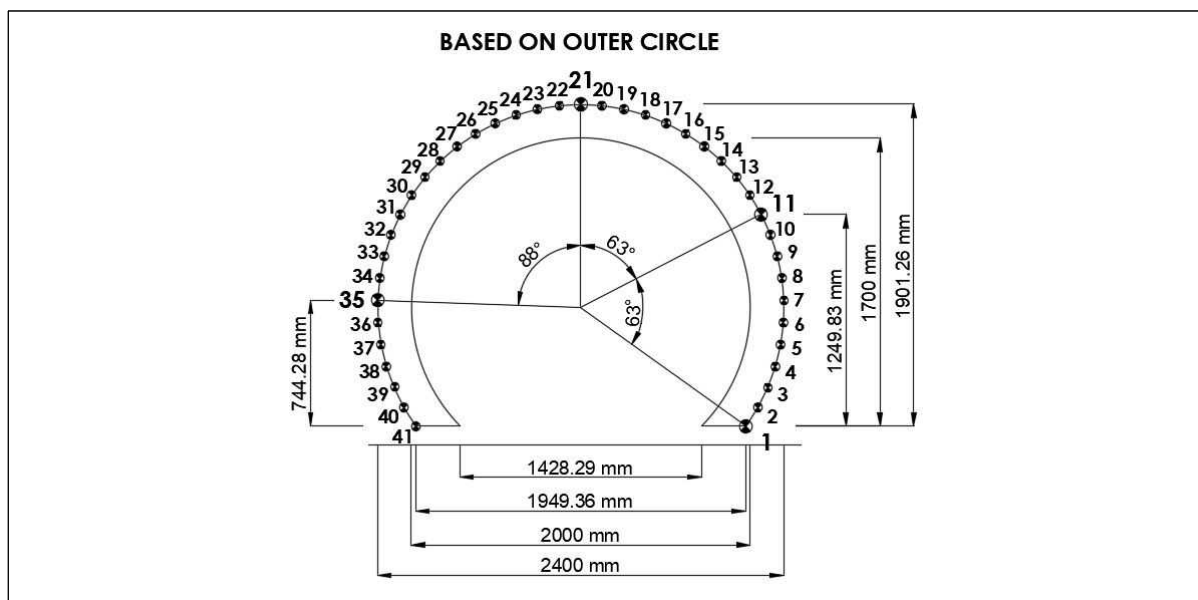


그림 3-25 실증실험 시공에 대한 아치구조물 재원 및 토압계 위치

## 다. ETI를 적용한 지중 장폭아치구조물의 해석모델 검증에 위한 실증실험

### (1) ETI 실증실험을 통한 지중아치구조물의 거동특성 비교 분석

#### (가) 실증실험 사전조사 및 계획

##### ① 현장실험 대상지 답사 및 선정

- 실험체의 제작 및 실험구역은 다수의 실험체 제작경험이 있는 제작업체의 협조를 통하여 지중아치 구조물의 모형실험체 제작 및 실험을 진행하였다.
- 실험체의 설치의 경우 지하수위, 굴착 깊이, 공사시간과 시기, 민원 발생가능성, 장비의 진출입 가능성 등 여러 가지를 고려하여 실증실험을 위한 사전조사를 진행하였고 산청군 모고리로 선정되었다.

표 3-8. 답사지 비교 내용

|   | 답사지                | 위 치                             | 비 교                                                                                 |
|---|--------------------|---------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | 오산시<br>양산          | 경기도 오산시<br>양산동<br>328-2번지       | 암반지층으로 인해 암반 불연속면(절리)의 방향성과 강도가 전체 안정성 검토에 중요한 요소로 작용하며 토압분포 산정의 어려움으로 터파기의 적절성 낮음. |
| 2 | 아산시<br>인주          | 충청남도<br>아산시<br>인주면 공세리<br>일원    | 근접시공으로 주변 지하수위 변화에 의한 지반 손실 및 지하수위 감소에 따른 침수 발생 가능성이 높음.                            |
| 3 | 아산시<br>탕정          | 충청남도<br>아산시<br>탕정면 매곡리<br>일원    | 근접시공으로 주변 지하수위 변화에 의한 지반 손실 및 지하수위 감소에 따른 침수 발생 가능성이 높음.                            |
| 4 | 세종시<br>도담          | 세종특별자치시<br>도담동 일원               | 공사 시기 및 인허가 협의가 어려움                                                                 |
| 5 | 산청군<br>모고리<br>(선정) | 경상남도<br>산청군<br>모고리 산<br>67번지 일대 | 지하수위, 굴착 깊이, 공사기간과 공사시기, 민원 발생 가능성, 장비의 진출입 가능성, 시공성 등을 검토한 결과 적합도가 높으며 인허가 협의가 수월함 |

② 선정 지역 위치

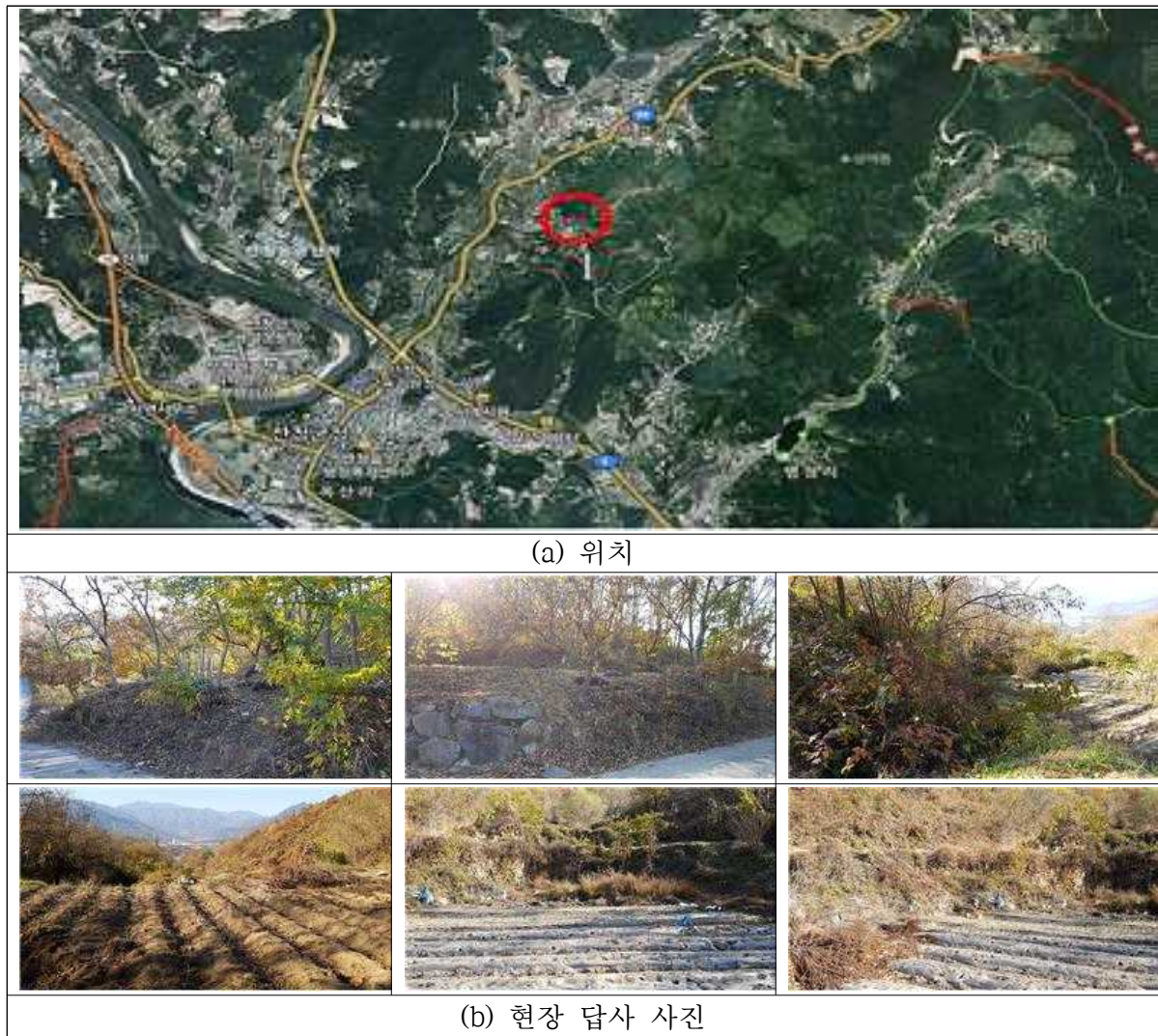


그림 3-26 실증실험 위치 및 현장 답사 사진 (선정 지역)

③ 실험 공정표

- 현장조사 : 2017년 9월 중
- 측량 및 설계 : 2017년 10월 ~ 11월
- 시공 : 2017년 12월 ~ 2월
- 실증실험 테스트베드 구축 및 시공 모니터링 계측 공정표

| 주요 연구내용                              | 용역 기간 |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|--------------------------------------|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
|                                      | 12    | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 1. 실험체 설치를 위한 토공공사 실시                |       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| 2. 아치구조물(실험체) 제작 및 설치                |       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| 3. 실험체 설치 후 모니터링 시설 설계 및 설치          |       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| 4. 시공 후 준공 보고서 (시공계획, 시공과정, 시공결과) 작성 |       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| 5. 아치구조물과 고압축성 물질 간 안정성 및 시공 모니터링 계측 |       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
| 6. 계측 현황 결과 및 최종보고서                  |       |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |

## (나) 실험체 제작

### ① 실험 계획

- 실증실험의 목적은 매립깊이에 따른 구조물과 토양의 상호작용 및 Geofoam을 활용한 기법 적용 시의 거동특성 분석이므로 경제적인 측면을 고려하여 실제 지중구조물의 1/6에 해당하는 제원을 사용하여 실험을 실시하였다.
- 따라서 본 실험은 유한요소해석을 통한 구조물 분석 후, Span길이는 2000mm, Rise 높이는 1500mm 지간은 8000mm 설정하여 실험체를 제작하였으며 토양의 매립깊이는 구조물 높이의 3배로 총 6m의 토양이 되메우기과정에 사용되었다. 다음 그림은 실험체에 사용된 단면의 상세 제원이다.

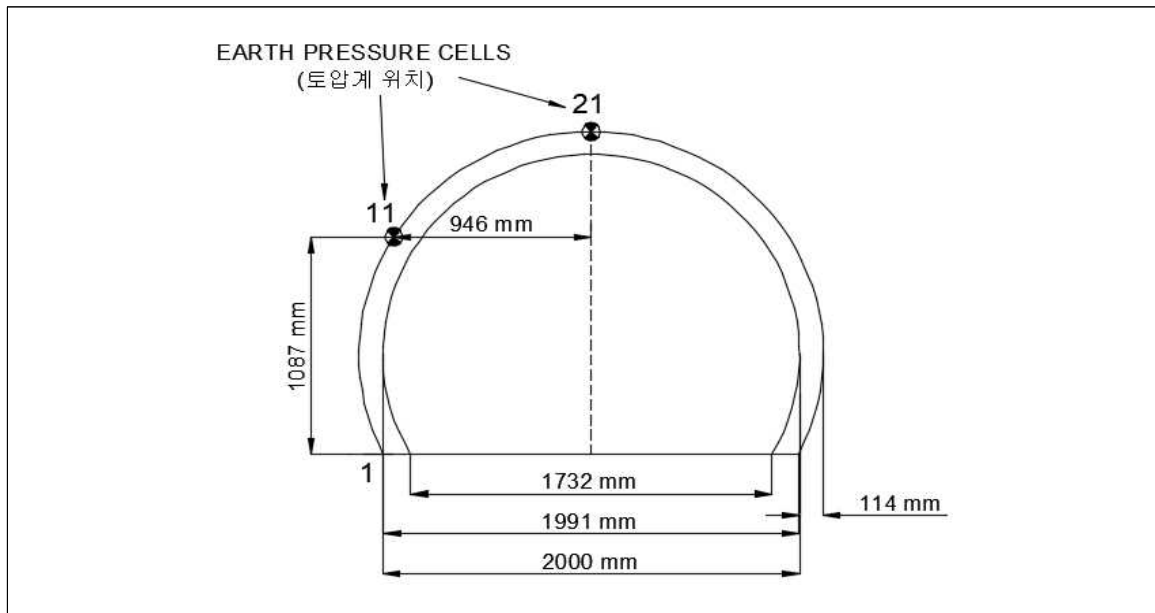
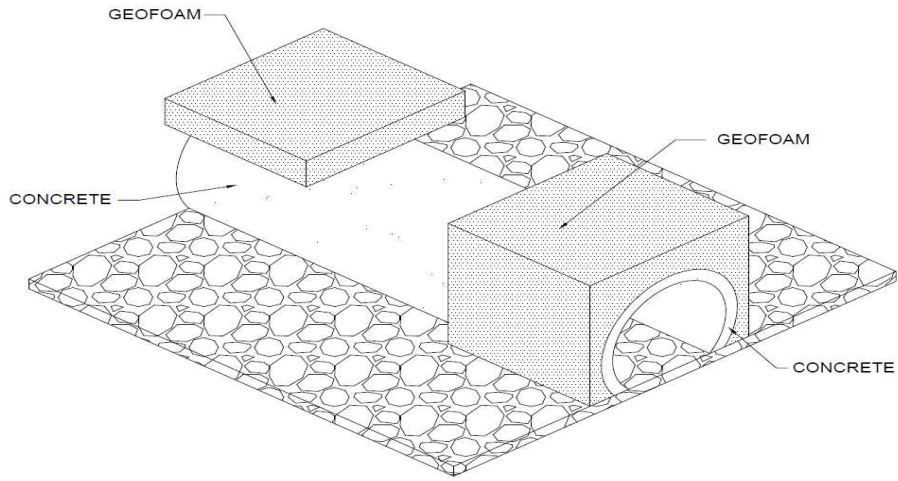
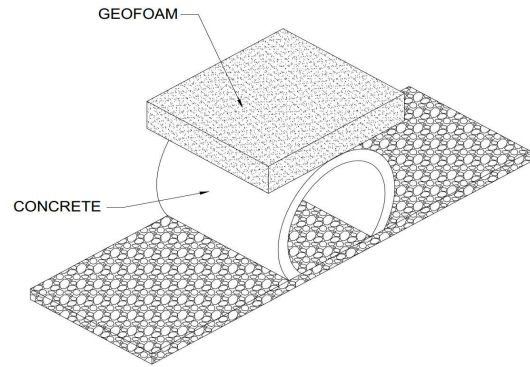
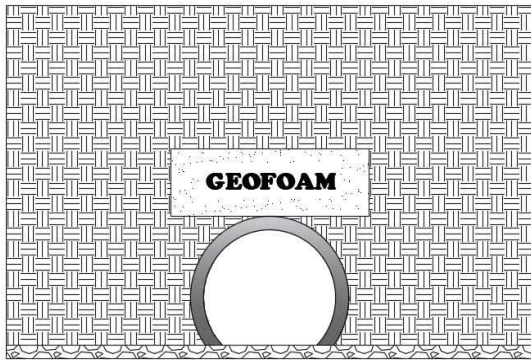


그림 3-27 지중아치구조물의 단면 제원

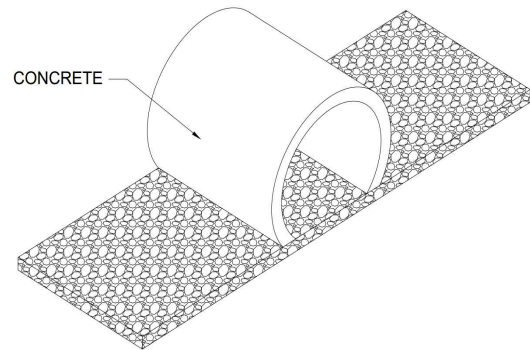
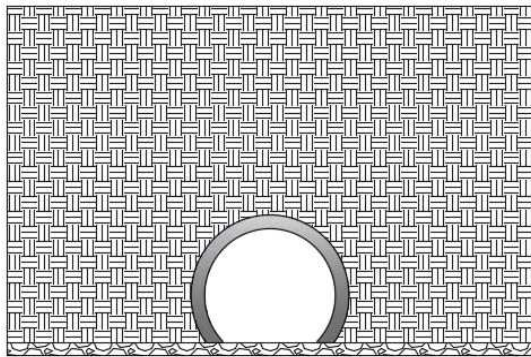
- 실험체는 총 8m의 길이를 가지며 Geofoam의 유무 및 적용방법에 따라 총 3구간으로 구분되어 각 구간당 2m로 설정하여 실험을 실시하였다. 그림 3-28은 실증실험 구간별 Geofoam 적용방법을 나타낸 것으로 1구간은 EPS Geofoam을 아치 상부에 설치한 ITI(Imperfect Trench Installation), 2구간은 EPS Geofoam을 사용하지 않는 OS 구간, 3구간은 EPS Geofoam을 전체적으로 둘러싸는 ETI(Embedded Trench Installation)의 설치 Type을 나타낸다.
- 실험체 설치 및 실험 준비 과정은 모형 아치구조물의 설치완료 후 토압계, 스트레인 게이지 부착, 마지막으로 Geofoam의 설치가 완료된 이후 굴삭기를 이용하여 토피고별 되메우기 순으로 진행하였다.



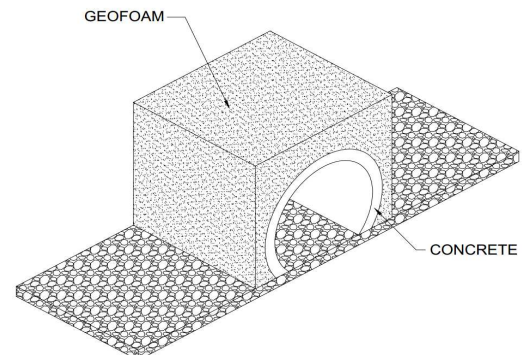
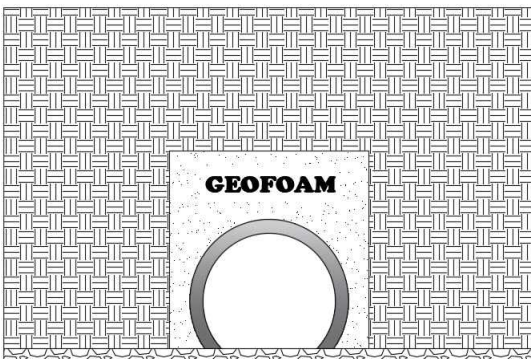
(a) 실증실험 아치 모형도



(b) 1구간 - Soft Material Zone 상부 설치



(c) 2구간 - Soft Material Zone 설치 하지 않음



(d) 3구간 - Soft Material Zone 측면 및 상부 설치

그림 3-28 실증실험 구간별 아치모형도 및 제원

## ② 실험체 설계 단면

- 본 실험에 적용된 지중아치구조물에 사용된 재료는 콘크리트( $f_{ck} = 24MPa$ )와 철근( $f_y = 400MPa$ )이며, 강도설계법을 사용하였다.
- 그림3-29 는 실험체의 설계단면으로서 측면도와 정면도를 나타내며 그림3-30은 실험체 구간별 단면도이다. 단면도 C-C' 와 E-E' 의 경우 하나의 실험체에 ITI와 Soil 그리고 ETI를 적용한 구간들이 연결된 구간에 끼치는 영향을 최소화하기 위해 설치한 경계 합판이다. 하지만 실제 시공 과정 시 합판설치로 인한 다짐 정도가 매립깊이별 토압측정에 영향을 끼칠 우려가 있어서 제외되었다.
- 실험체의 경우 4m의 총길이를 갖는 2개의 아치구조물을 연결하여 시공하였기 때문에 이음부를 고려하여 2구간(OS)과 3구간(ETI)을 바꿔서 실험을 실시하였다. 그림 3-31은 최종적으로 설계된 형상으로 2구간(OS)과 3구간(ETI)만 변경된 것이며, 실험체 설치 완료 후 콘크리트 입구를 시공하여 내부 환경변화 확인과 실험 완료 이후 유지관리 공간으로 활용 할 수 있도록 설계되었다.

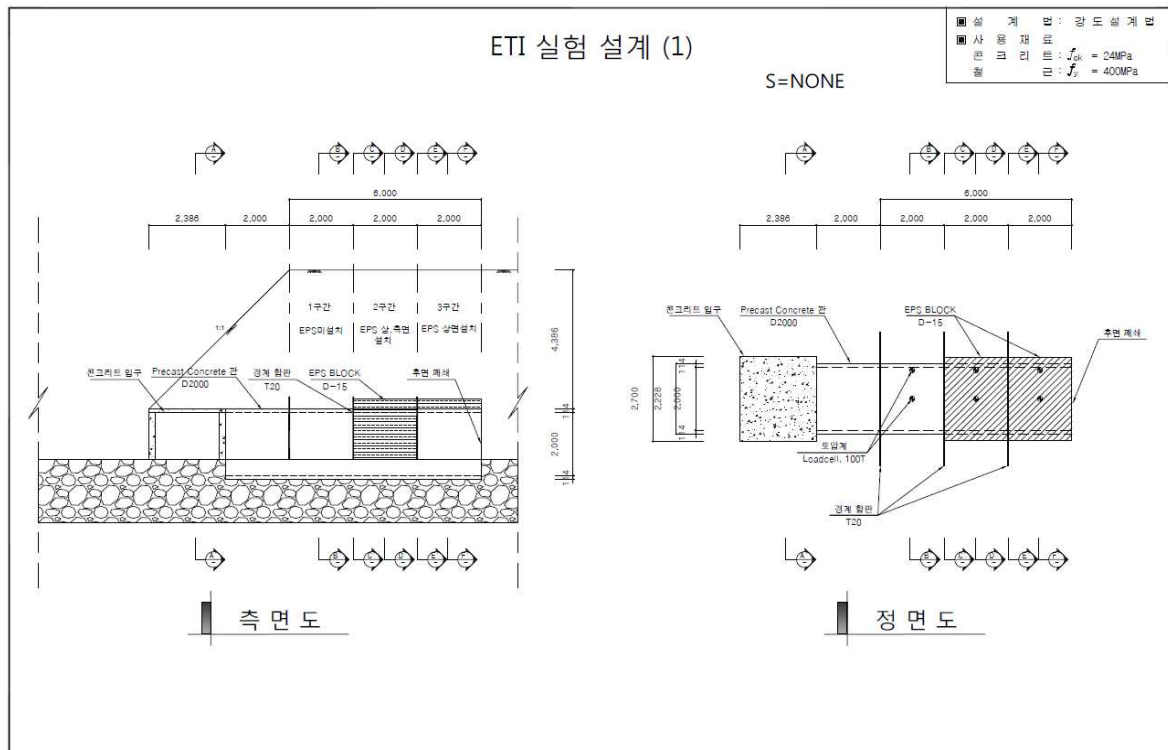


그림 3-29 측면도와 정면도 설계도

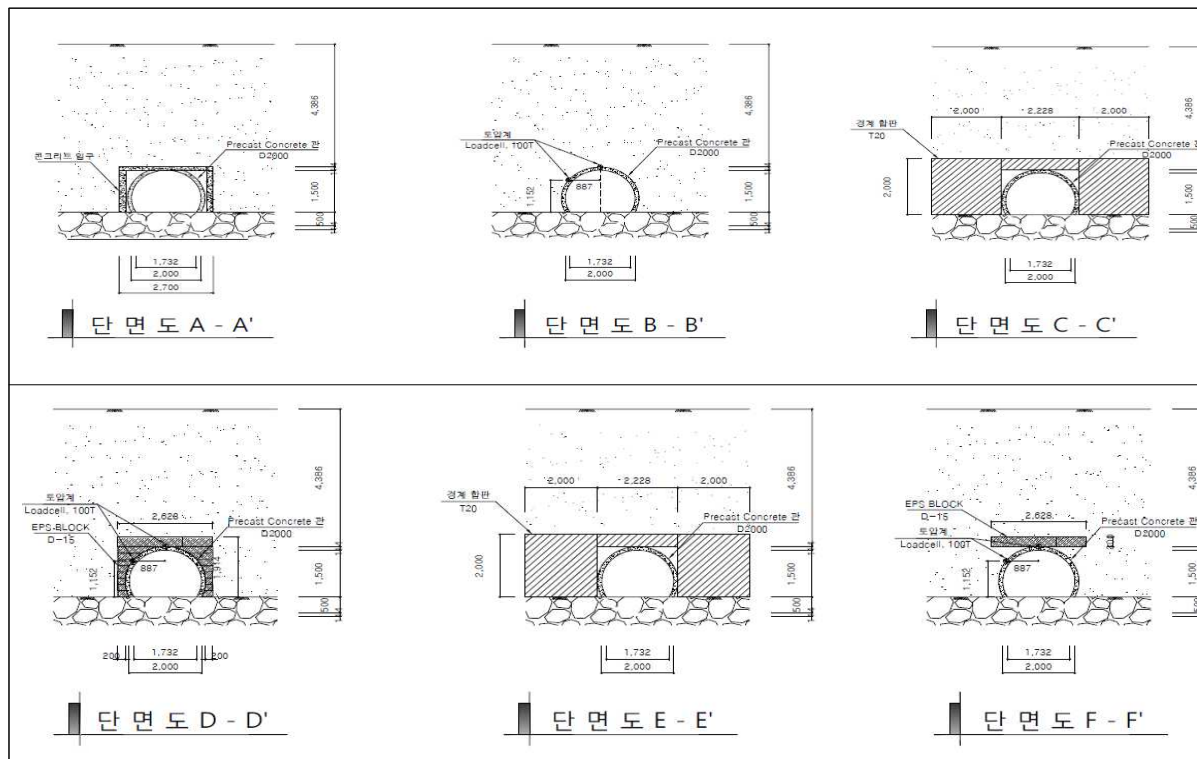


그림 3-30 단면 설계도

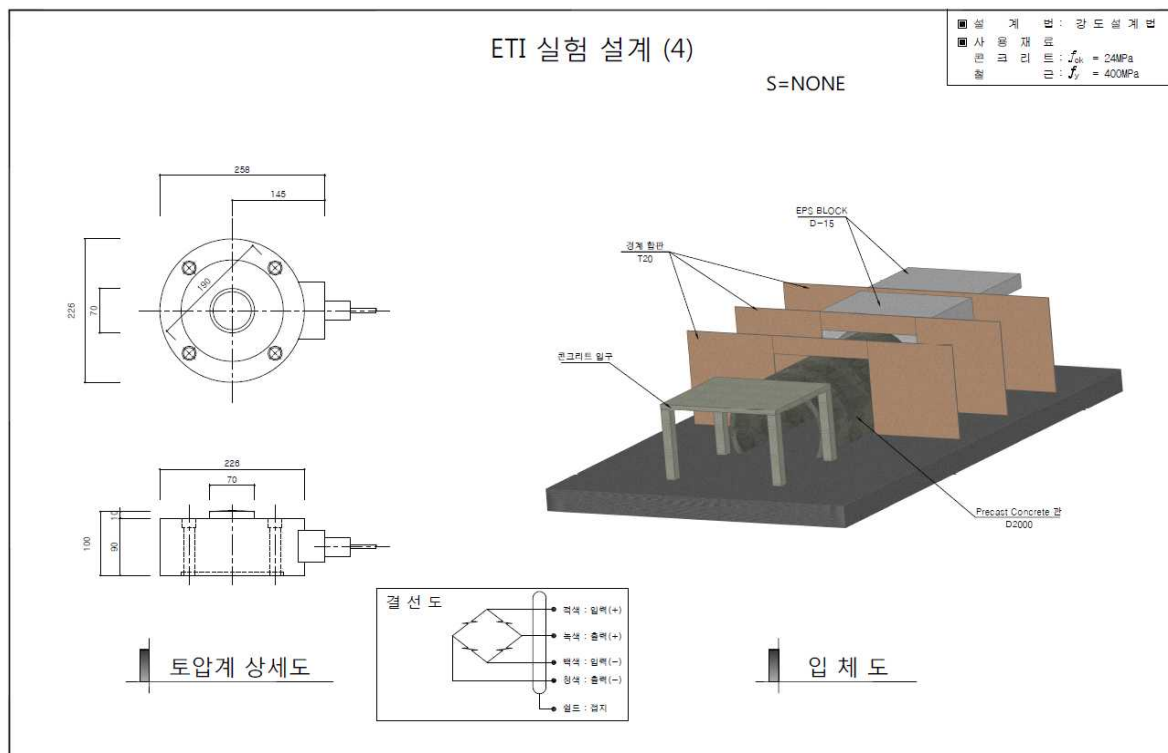


그림 3-31 최종 설계 모습

(다) 실험준비

① 토압계 및 Strain Gauges

- 실증실험에서는 매립깊이별 토압과 아치구조물의 거동을 분석하기 위하여 토압계(GS-5k)와 Strain Gauges(PL-60-11-5L)를 사용하였다.

|                                                                                   |      |                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------|-----------------------------------------------------|
|  | 직경   | 100mm                                               |
|                                                                                   | 측정범위 | 0~500kPa                                            |
|                                                                                   | 온도범위 | -20~60℃                                             |
|                                                                                   | 선정이유 | 유한요소해석을 통하여 최대 발생하는 토압을 기준으로 지하수위, 상부하중 등 여러 변수를 고려 |

그림 3-32 토압계 (참조:NG사 GS-5k)

- 사전 유한요소해석 결과를 토대로 토압계의 경우 1구간, 2구간, 3구간 각 4개를 아치 크라운 경간의 1/4과 1/2지점에 그리고 Spring Line의 1/4과 1/2지점에 설치하였으며, Strain Gauges의 경우 총 24개가 토압계와 동일한 위치로 아치구조물의 종방향과 횡방향으로 부착하였다.
- 다음 그림 3-32는 유한요소해석 결과를 토대로 선정된 토압계 및 Strain Gauge의 부착 위치이다.

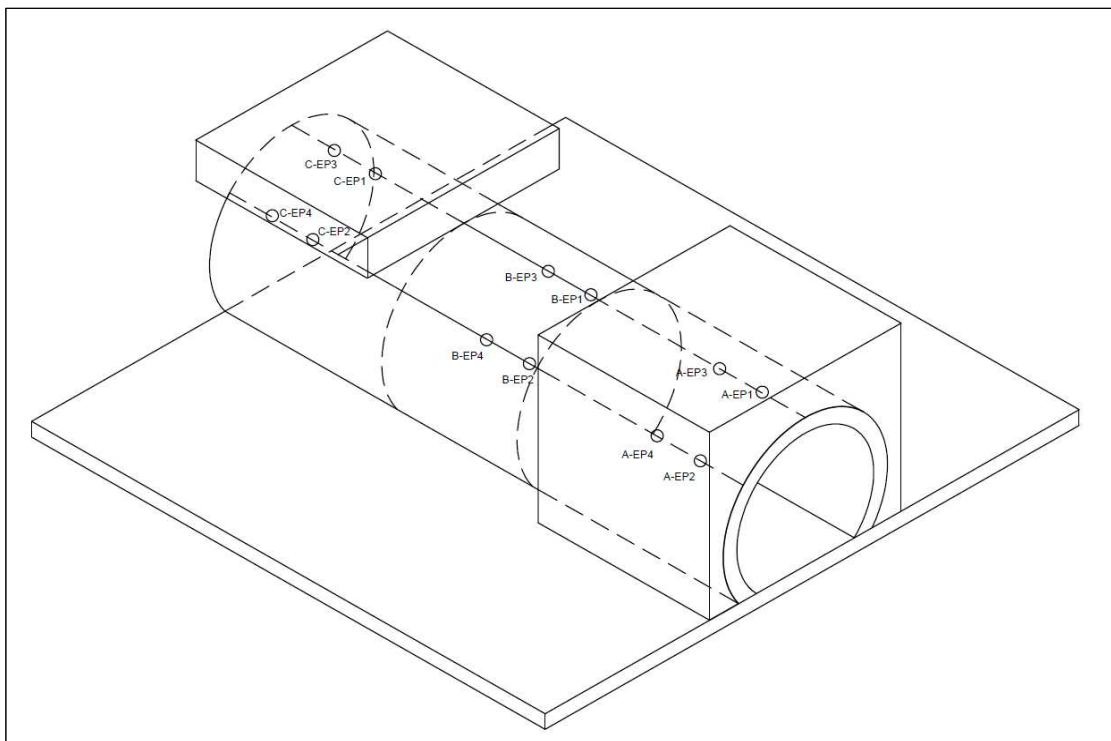


그림 3-33 토압계와 Strain Guages 부착위치

## ② Data Logger

- 실험을 진행하기 전 토압계 및 Strain Gauges 및 계측기의 이상 유무를 검증하기 위해 Data Logger 사전 점검을 수행하였다. Data Logger는 SDL-610R모델과 TDS-530모델 총 2대가 사용되었으며 구조물에 발생하는 토압 및 변형을 계측 방법은 다음과 같다.
- 토압계의 경우 제작 시 발생하는 R.O(mv/v)값에 대한 오차범위를 고려하기 위해 계측이 진행되기 전에 결선도의 연결에 따라 데이터 값의 부호가 결정되므로 유의하여 진행하였다. Strain Gauge의 경우 토압계에 비하여 외부에 센서가 노출되어 있어 환경적 요인 등 민감하며, 파손될 우려가 있어 계측 시 유의하였다. 아래 그림 3-34는 Data Logger 설치모습과 토압계 결선도를 나타내었다.



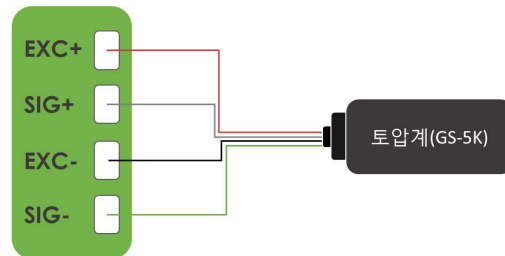
(a) SDL610R



(b) TDS\_530



(a) 토압계



(b) Strain Gauges

그림 3-34 Data Logger 및 토압계 결선도

---

(다) 실험 내용

① 실험체 설치

- 실험체 설치의 경우 먼저 터파기를 통해 실험체를 설치 장소를 확보한 뒤 기초를 세우고 그 위에 사전에 제작된 콘크리트 아치구조물을 설치 후 다시 한 번 기초 작업을 통하여 실험체를 움직이지 않도록 고정하였다.



(a) 실험체 설치 (장소: 경남 산청군)



(b) 실험체 설치 모습(외부)



(c) 실험체 설치 모습(내부)

그림 3-35 실험체 설치 과정

## ② 계측기 부착

- 토압계의 경우 아치의 곡률을 고려하기 위해 반력판 대신 에폭시를 이용하여 구조물에 부착하였으며 Strain Gauge의 경우 아치의 표면을 글라인더를 이용하여 매끄럽게 만든 후 전용 접착제와 코팅제를 이용하여 설치하였다.



(a) Strian Gauges 부착



(b) 토압계 설치

그림 3-36 계측기 부착 모습

## ③ Geofoam 재단

- Geofoam의 경우 전기적 장치 등 여러 방법으로 재단이 가능하고, 토양의 1%의 경량 재료로서 다른 충전제에 비해 가볍고 재단이 용이 하다. 따라서 현장에서 필요시 원하는 만큼 잘라 사용할 수 있기 때문에 시공성이 뛰어나다는 장점을 갖는다. 모형실험체의 상부에 설치하는 ITI와 전체를 둘러싸는 ETI의 경우 열선을 이용하여 재단하였다.
- 계측기 및 실험체의 전체적인 설치가 완료된 이후 Geofoam을 설치하여 최종적인 실험체 형상을 나타내었다. 그림 3-38의 (a)의 경우 ETI 적용형상 (b)는 ITI 적용형상을 나타낸다.



그림 3-37 Geofoam 재단 방법



(a) ETI 적용



(b) ITI 적용

그림 3-38 Geofoam 재단 및 적용 형상

#### ④ 통풍구 설치

- 계측기 설치가 끝난 이후에는 되메우기를 진행하였을 때 실험체의 입구에 흙이 들어가는걸 방지하기 위하여 입구를 콘크리트 덮개를 이용하여 막았으며, 그림 3-39는 실험체의 통풍구를 설치하여, 환기가 잘 통하도록 해주었으며, 추후 실증실험이 완료되면 참고로서 사용가능하도록 할 예정이다.



(a) 아치 입구 폐쇄



(b) 통풍구 설치

그림 3-39 아치구조물 최종형상

⑤ 되메우기

- 최종적인 형태의 실험체가 완료된 이후 굴삭기를 이용하여 되메우기를 진행하였다. 되메우기 시 토양의 다짐을 고려하기 위해 50cm씩 흙을 되메우고 다짐하였다. 그림 3-40는 4m, 5m 그리고 최종적으로 6m의 토양이 매립된 모습으로 각 매립깊이별 토압 및 변형률을 계측하였다.



(a) 4m



(b) 5m



(b) 6m

그림 3-40 토피고별 되메우기 과정

## (2) ETI 실증실험 데이터 분석을 통한 해석모델 검증

### (가) 실험체 추가 해석모델 검증

#### ① 지중아치구조물 해석기법

- 고압축성 물질 EPS Geofom을 이용하여 지중아치구조물의 토압 및 응력감소에 대한 수치해석을 진행하였다. 해석 Case의 경우 Rise비와 Geofiam Size를 변화시켰을 때 생기는 경향을 파악하였으며, 구조물에 발생하는 토압 및 응력 감소 효과를 평가하기 위해 범용구조해석프로그램인 ABAQUS(2016)을 사용하였다.
- 3D 해석의 경우 2D 해석결과를 토대로 실험에 적용할 아치구조물의 제원과 Geofom Size를 선정하여 해석을 진행하였다.
- 사전연구내용을 살펴보면 Kang et al..(2008a)은 범용해석프로그램인 ABAQUS의 해석모델의 적절성을 판단하기 위하여 CANDE-89, MSC/NASTRAN의 프로그램을 이용하여 Pipe와 Soil의 상호작용에 대한 해석 모델의 검증을 진행하였다.
- 해석결과 ABAQUS와 MSC / NASTRAN 및 CANDE-89의 프로그램을 통해 구조물에 발생하는 Redual Earth Pressure는 7%미만의 차이를 보이고 있어 ABAQUS를 사용한 Soil-Structure 모델링에 대한 적절성을 평가하였다.
- Kang et al.(2008a)dl 제안한 해석모델링과 실제 사용된 해석모델링으로 본 해석에 적용된 모델링은 지중아치구조물의 좌·우는 해석제원 굴착 폭의 2배 이상, 아치구조물의 상부로부터 3배에 해당하도록 모델링하였다. 추가적으로 실험결과와 해석결과와의 분석을 통해 적절성을 확인하고자 한다.

#### ① 실험체 유한요소해석모델링

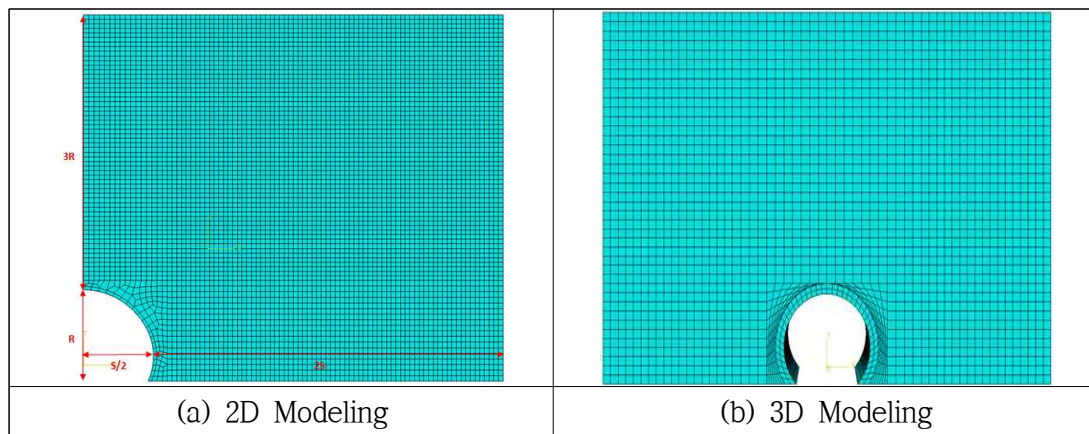


그림 3-41 유한요소해석 모델링

- 해석 프로그램은 ABAQUS(2016)을 사용하여 2차원 해석을 진행하고 그 결과를 토대로 3차원 해석을 수행하였다. 2차원 해석의 경우 모델링 된 아치 구조물과 토양의 상호작용을 고려하기 위해 Wire의 Beam요소를 사용하였으며, Soil과 Geofom은 Shell요소를 적용하였다.
- 구조물과 Soil과의 맞닿는 부분은 Interaction Option을 사용하였으며, Shell-Plane Strain요소를 적용하여 무한한 길이를 가지도록 설정하였다. 3차원 해석의 경우 Soil요

소를 적용한 것을 제외하고 2차원해석과 거의 동일한 방법으로 진행하였다. 그림 2.3은 유한요소해석모델링 모습이다.

- Backfill의 경우 CANDE 2017 MANUAL을 참고하여 사용하였으며, Geofoam의 경우 ASTM D6817 강성 셀룰러 폴리스티렌 Geofoam 표준규격을 참고하여 사용하였다. 또한 EPS Geofoam의 경우 밀도가 낮은 경우 동일한 하중 아래에서 보다 압축성이 우수한 경향을 보이나, 밀도가  $10\text{kg}/\text{m}^3$ 이하인 경우 발포 비드간 결합력이 약하여 쉽게 파괴되는 성질이 있어 지반공학적으로 이용할 경우  $10\text{kg}/\text{m}^3$ 이상의 제품을 이용하여야 한다. 따라서 EPS Geofoam의 특성을 고려하여 EPS15의 물성치를 사용하여 해석을 진행하였다. 그림 3-42은 해석에 사용된 Backfill과 Geofoam의 Strain-Stress Curve이다.

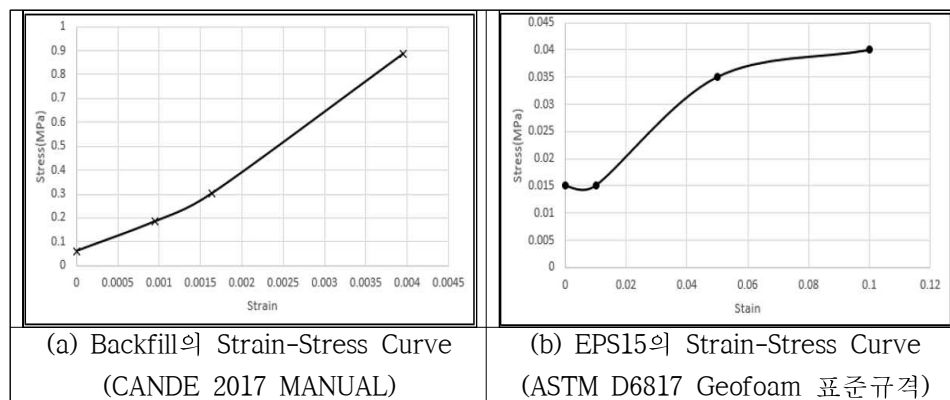


그림 3-42 Backfill과 Geofoam의 Strain-Stress Curve

## ② 매개 변수 및 경계조건

- 해석 변수의 경우 아치구조물의 Span-Rise비와 Geofoam Size를 고려하여 해석을 진행하였으며, Geofoam규격과 Span-Rise비를 변화시켜 실험체의 Rise비와 최적의 Geofoam 규격을 선정하였다.
- 표 3-9는 2D해석에 사용된 아치구조물의 Span-Rise비를 나타낸 것으로 시공성과 2D해석결과를 바탕으로 실험체의 경우 Rise 0.75를 선정하여 3D해석을 진행하였다. 그림 3-43은 Geofoam Size를 나타낸 것으로 (a) ETI의 경우 Span방향으로 10~30%씩 Rise 높이로는 10~100%까지 증가시켰으며, (b) ITI의 경우 구조물 상부에 설치된 Geofoam Size로 Span길이의 10~30%, Rise 높이로 10~100% ETI와 동일한 조건으로 Geofoam Size변화시켜 해석을 실시하였다.

표 3-9 Span-Rise비에 따른 해석제원

| Span(mm) | Rise높이(mm) | Span-Rise비 |
|----------|------------|------------|
| 2000     | 1700       | 0.85       |
| 2000     | 1500       | 0.75       |
| 2000     | 1300       | 0.65       |
| 2000     | 1000       | 0.5        |

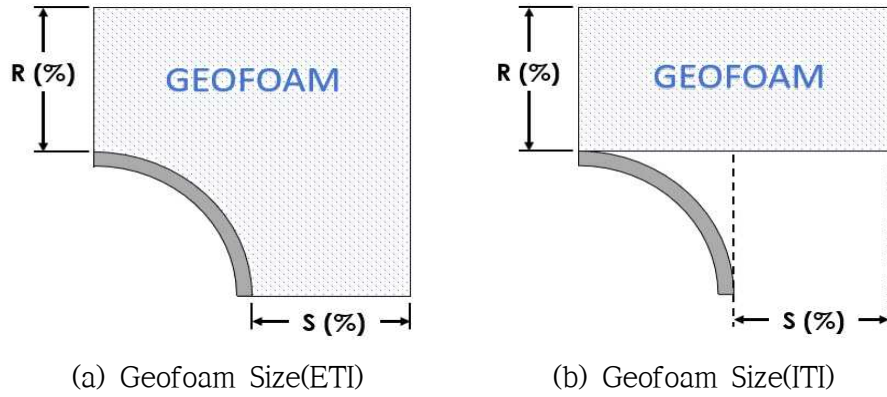


그림 3-43 Geofoam Size

- 표 3-10 및 3-11은 해석에 사용된 경계조건을 보여준다. 지중아치구조물의 경우 바닥면은 양단고정과 양단힌지로 주로 사용되지만 본 해석의 경우 실증실험과의 연관성을 고려하여 밑면은 모든 변위와 회전에 대해 구속해 주었고 모델링된 토양 옆면의 경우 흙의 거동을 고려하여 롤러조건을 사용하였으며, 앞면의 경우 Shell-Plane Strain요소를 적용하여 무한한 길이를 가지도록 설정하여 따로 경계조건을 적용하지 않았다. 3D해석의 경우 아치의 지간을 실험체와 동일하게 적용하고 해석단면의 앞면과 뒷면의 경우 롤러 조건을 적용하였다. 하중조건은 흙의 자중만 고려하여 진행하였다.

표 3-10 경계조건 (2D)

|             | U1 | U2 | UR3 |
|-------------|----|----|-----|
| Arch-Bottom | R  | R  | R   |
| Arch-Middle | R  | F  | R   |
| Soil-Bottom | R  | R  | F   |
| Soil-Side   | R  | F  | F   |

<R: Resistance F: Free>

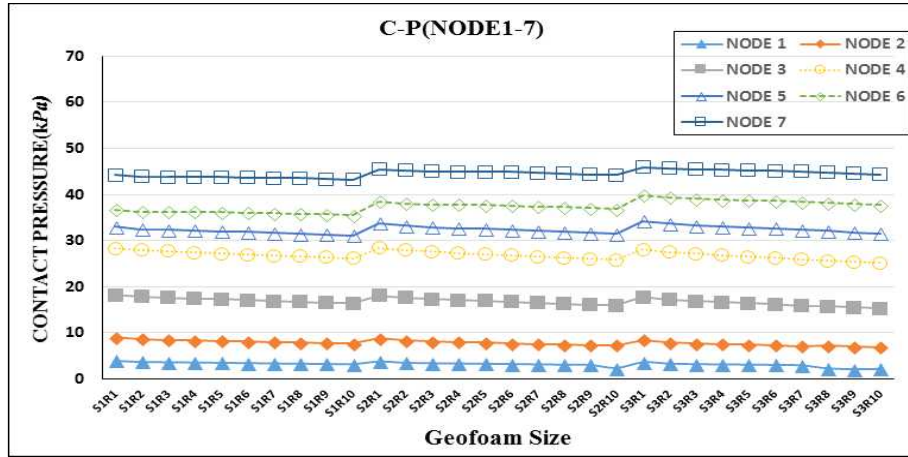
표 3-11 경계조건 (3D)

|              | U1 | U2 | U3 | UR1 | UR2 | UR3 |
|--------------|----|----|----|-----|-----|-----|
| Arch-Bottom  | R  | R  | R  | R   | R   | R   |
| Soil-Bottom  | F  | R  | F  | R   | F   | R   |
| Side         | R  | F  | F  | F   | R   | R   |
| Front & Back | F  | F  | R  | R   | R   | F   |

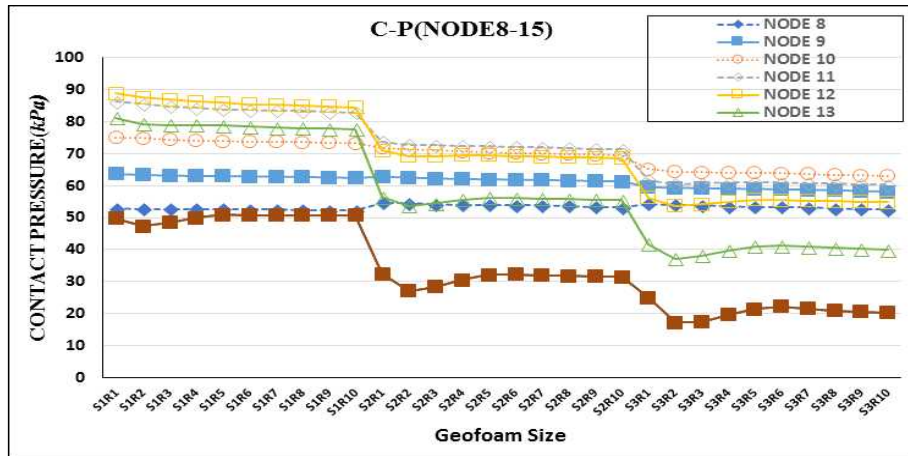
<R: Resistance F: Free>

③ 2D해석을 통한 거동 특성 분석 결과

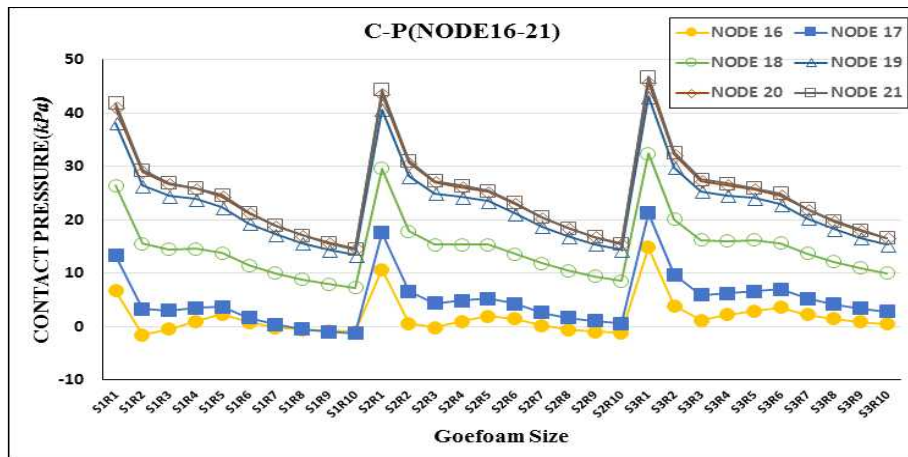
- 해석상에서 아치구조물은 총 21개의 Node로 구분하였으며, Rise비에 따른 수치 해석 결과의 경우 아치의 각 Node에 발생하는 토압, 응력, 반력을 비교 · 분석 하였다.



(a) Geofoam Size별 토압(Node 1-7)

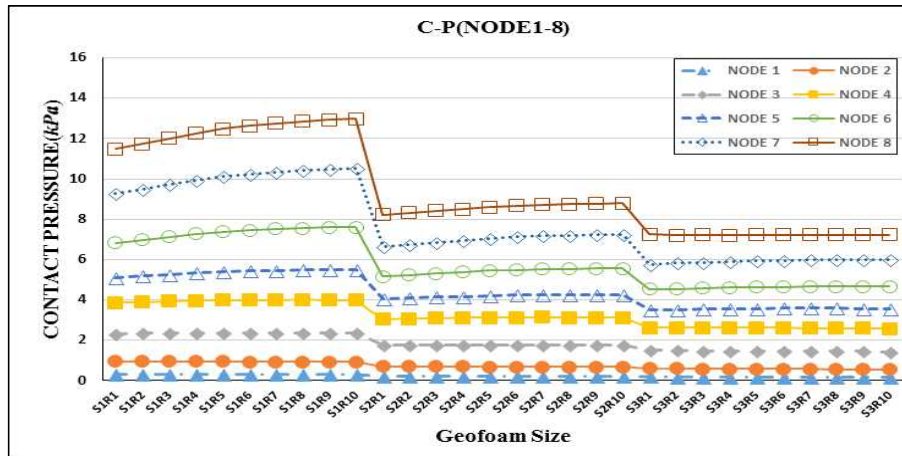


(b) Geofoam Size별 토압(Node 8-15)

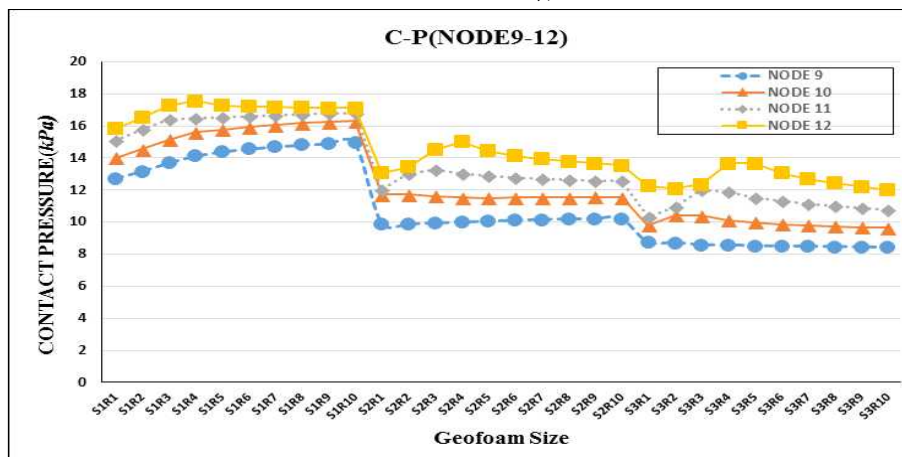


(c) Geofoam Size별 토압(Node 16-21)

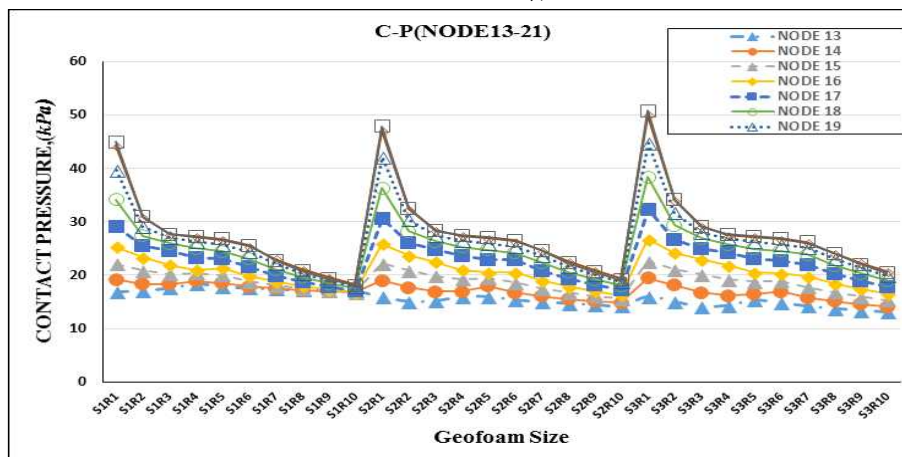
그림 3-44 Geofoam Size별 토압(ITI)



(a) Geofoam Size별 토압(Node 1-8)



(b) Geofoam Size별 토압(Node 9-12)



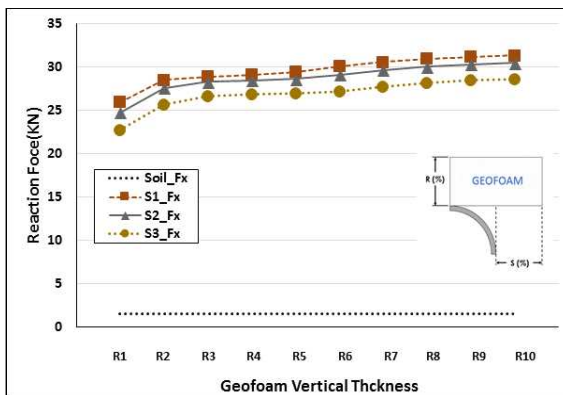
(c) Geofoam Size별 토압(Node 13-21)

그림 3-45 Geofoam Size별 토압(ETI)

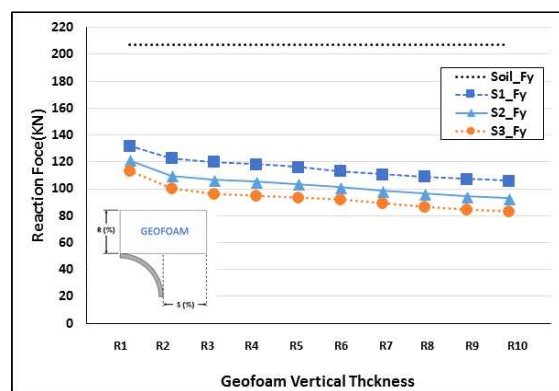
- 그림 3-44는 ITI기법의 Rise 0.85일 때, Geofoam Size 변화에 따른 각 Node에 발생하는 토압을 보여준다. (a)의 경우 아치 하단을 기준으로 1-7 Node의 발생하는 토압으로 Rise 높이의 Geofoam 두께를 증가시키더라도 토압감소에 영향이 미치지 않으며, Span길이의 두께를 증가시킬 경우 오히려 아치의 하단에서 토압이 증가하는 것을 확인할 수 있다. (b)는 아치 Side Line의 8-15 Node에 발생하는 토압으로 Rise 높이의 두께를 증가시켰을 때 토압이 감소되지만 Span길이의 두께를 증가시킬 경우 토압이 감소하였으

며, (C)의 경우 아치의 16-21 Node에 발생하는 토압으로 Geofoam의 두께를 변화시켰을 때 토압경감효과가 뛰어난 것을 확인할 수 있었다.

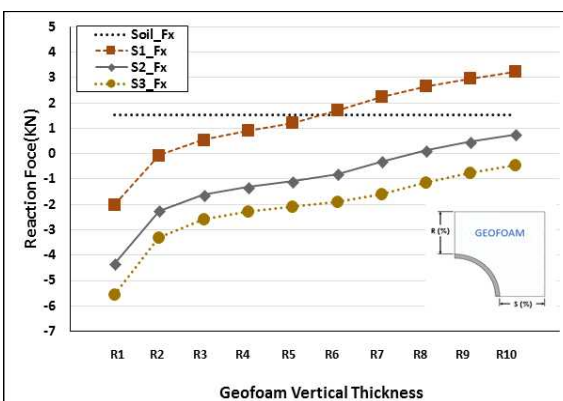
- 그림 3-45는 ETI기법의 Rise 0.85일 때 발생하는 토압을 보여준다. 아치의 하단부근인 (a)의 경우 1-8 Node에 발생하는 토압으로 Rise높이의 두께를 변화시켰을 때 상부에서의 토압경감효과로 인해 하단에 토압이 집중되면서 점차 토압이 증가되지만 Span길이 방향으로 두께를 증가시킬 경우 토압 감소 효과가 뛰어난 것을 볼 수 있다. (b)와(C)의 경우 Side Line과 Arch Crown의 토압분포로 상부에 Geofoam을 설치한 ITI와 비슷한 경향을 갖는 것을 볼 수 있지만 Side Line의 토압의 경우 ETI의 토압이 5배 이상 작은 것을 확인할 수 있다.
- ITI와 ETI의 아치하단의 토압분포를 비교할 경우 ITI는 아치 하단에서 Geofoam의 영향을 받지 않아 토압이 크게 발생되며, Geofoam 두께를 증가하여도 오히려 아치의 하단에 토압이 증가하는 것을 볼 수 있으며, ETI의 경우 모든 면에서 Geofoam의 영향으로 토압이 경감되는 것을 볼 수 있으며, Span방향으로 Geofoam 두께를 증가할 경우 토압 경감효과가 증가한다.



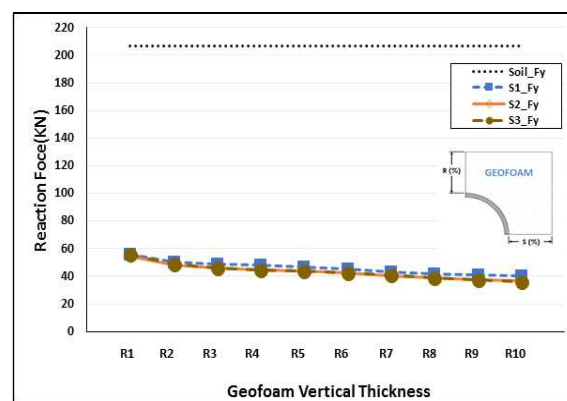
(a) ITI 수평 반력



(b) ITI 수직 반력



(c) ETI 수평 반력



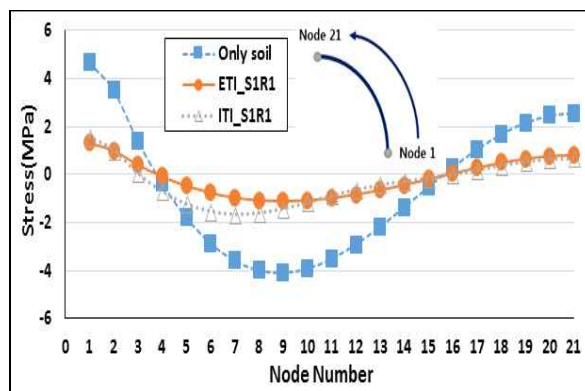
(d) ETI 수직 반력

그림 3-46 반력 비교

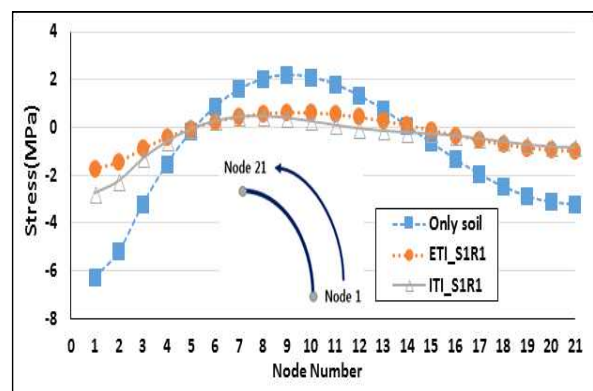
- 그림 3-46의 (a)와 (b)는 OS(Only Soil)의 반력을 기준으로 ITI기법을 적용한 아치의 반력을 비교한 그래프이다. 앞서 설명한 ITI의 토압의 경우 상부에서의 토압 경감효과는 뛰어나지만 경감된 토압이 아치의 하단에 집중되는 문제가 발생하는 것을 확인하였으

며, 반력 또한 아치 하단의 집중된 토압으로 인하여 수평 반력에 문제가 되는 것을 볼 수 있다. (a)의 경우 ITI를 적용한 아치의 수평 반력으로 OS와 비교하였을 때 10배이상의 큰 반력이 생기는 것을 확인 할 수 있으며, Goeofoam의 두께를 Rise높이 비율만큼 두께를 증가시킬수록 상부의 경감된 토압이 클수록 아치의 하단에 토압이 집중되는 것이 큰 것을 알 수 있으며, 반력이 증가하는 것을 볼 수 있다. (b)는 ITI기법을 적용한 아치의 수직 반력을 나타내며, 수직반력의 경우 상부의 경감된 토압으로 인하여 반력 또한 경감되는 것을 확인할 수 있다.

- (c)와 (d)는 ETI기법을 적용한 아치의 반력을 비교한 그래프이다. (c)는 ETI를 적용한 아치의 수평 반력으로 S1(Span길이의 10%를 보강)의 경우에는 R5(Rise높이의 50%까지 보강)까지 OS보다 반력이 작게 나타났으며, 두께가 R6이상부터 반력이 크게 나타나는 것을 볼 수 있었으며, S2이상 보강한 경우에는 R10까지 사용하여도 OS의 경우보다 반력이 작게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이 경우를 보면 R의 두께를 증가시킬수록 상부의 경감된 토압이 흘러내려 아치의 하단에 집중된다는 것을 반력을 통해서도 확인할 수 있었다. (d)의 경우 ETI를 적용한 아치의 수직 반력으로 상부의 토압뿐만 아니라 아치 Side Line의 토압까지 모두 경감되기 때문에 ITI기법 보다 수직반력 또한 감소하는 것을 확인할 수 있다.



(a) OutLine Stress



(b) Inline Stress

그림 3-47 Geofoam 적용 형식별 축 응력 비교

- 그림 3-47은 2D 해석결과 ITI와 ETI기법 적용 시 발생하는 x축 방향의 최대 축 응력으로 Outline은 아치의 바깥면, Inline은 아치의 안쪽면의 축응력을 나타낸다.
- 최대 발생 축응력 Node의 경우 OS와 ETI의 경우 같았으며, ITI의 경 토압집중으로 인하여 8Node에서 발생하는 것을 볼 수 있었으며, Span방향의 20%이상 사용하였을 경우에는 ETI보다 ITI의 최대 축 응력이 더 감소되는 경향을 확인할 수 있는데, 2D해석 결과의 경우 x축에 대한 축 응력 확인할 수 있으며, 보다 확실한 응력 비교를 하기 위해서는 3D해석이 필요로 한다.

---

(나) 실험체 적용 Geofoam 사이즈 선정

- 표 3-12, 3-13, 3-14 그리고 3-15는 Rise비에 따른 최적 Geofoam을 선정하고 토압 경감률에 대하여 나타내었다.
- ETI의 경우 Geofoam을 Span길이의 10%만 사용하더라도 아치 하단에서의 토압이 약 80%이상의 경감되는 것을 볼 때 S2와 S3를 사용하는 것보다 경제적인 측면을 고려하여 S1을 선정하였으며, Rise높이의 Geofoam 두께는 Arch Crown부근과 Side Line의 토압 경감률을 확인하여 선정하였다.
- Rise비가 0.85의 경우 전체적으로 80%이상의 토압 경감률을 보이고 있는 S1R3를 사용하는 것이 가장 합리적일 것으로 판단되며, Rise비가 0.75의 경우 전체적으로 70%이상의 토압 경감률을 보이는 S1R2, Rise비가 0.65와 0.5의 경우 마찬가지로 전체적인 토압 경감률이 70%이상 되는 S1R2와 S1R4를 각각 사용하는 것이 경제적인 것으로 판단된다.
- 또한 앞서 아치에 발생하는 반력에서 설명하였듯이 Rise높이의 Geofoam의 두께를 많이 사용하여 상부의 토압을 경감시킬 경우에는 수평 반력이 과도하게 발생되어 Span길이 방향으로 Geofoam을 보강해주어야 하는 문제가 발생한다.
- 따라서 Geofoam을 많이 사용하는 것이 좋은 것은 아니며 구조물과 토양조건에 맞는 최적의 Geofoam을 선정하여 사용하는 것이 토압, 응력 그리고 반력 등 문제를 해결할 수 있으며, Geofoam의 경우 S1R1 ~ S1R4 사이의 최적 두께를 찾아 사용하는 것이 합리적일 것으로 판단된다.

표 3-12. Rise 0.85일 때, 최적 Geofoam

&lt;단위: kPa&gt;

| Node Number | Rise 0.85 |          |     |           |          |     |
|-------------|-----------|----------|-----|-----------|----------|-----|
|             | Only Soil | ETI_S1R3 | 경감률 | Only Soil | ITI_S1R3 | 경감률 |
| 1           | 4.70      | 0.32     | 93% | 4.70      | 3.65     | 22% |
| 2           | 11.83     | 0.94     | 92% | 11.83     | 8.51     | 28% |
| 3           | 19.64     | 2.35     | 88% | 19.64     | 17.66    | 10% |
| 4           | 28.92     | 3.93     | 86% | 28.92     | 27.70    | 4%  |
| 5           | 35.90     | 5.26     | 85% | 35.90     | 32.32    | 10% |
| 6           | 41.92     | 7.13     | 83% | 41.92     | 36.24    | 14% |
| 7           | 47.75     | 9.72     | 80% | 47.75     | 43.77    | 8%  |
| 8           | 54.30     | 12.01    | 78% | 54.30     | 52.64    | 3%  |
| 9           | 61.17     | 13.69    | 78% | 61.17     | 63.16    | -3% |
| 10          | 69.91     | 15.16    | 78% | 69.91     | 74.40    | -6% |
| 11          | 79.55     | 16.42    | 79% | 79.55     | 84.75    | -7% |
| 12          | 90.83     | 17.27    | 81% | 90.83     | 86.84    | 4%  |
| 13          | 101.08    | 17.59    | 83% | 101.08    | 79.00    | 22% |
| 14          | 110.13    | 18.32    | 83% | 110.13    | 48.48    | 56% |
| 15          | 120.62    | 20.23    | 83% | 120.62    | 16.97    | 86% |
| 16          | 128.16    | 21.94    | 83% | 128.16    | 14.55    | 88% |
| 17          | 135.79    | 24.53    | 82% | 135.79    | 11.2     | 91% |
| 18          | 142.62    | 25.96    | 82% | 142.62    | 14.44    | 90% |
| 19          | 146.00    | 27.02    | 81% | 146.00    | 24.43    | 83% |
| 20          | 149.75    | 27.65    | 82% | 149.75    | 26.67    | 82% |
| 21          | 148.19    | 27.72    | 81% | 148.19    | 26.92    | 82% |

표 3-13. Rise 0.75일 때, 최적 Geofoam

<단위: kPa>

| Node Number | Rise 0.75 |          |     |           |          |      |
|-------------|-----------|----------|-----|-----------|----------|------|
|             | Only Soil | ETI_S1R2 | 경감률 | Only Soil | ITI_S1R2 | 경감률  |
| 1           | 4.88      | 0.74     | 84% | 4.88      | 5.37     | -10% |
| 2           | 12.34     | 1.92     | 84% | 12.34     | 13.85    | -12% |
| 3           | 21.12     | 3.98     | 81% | 21.12     | 24.82    | -17% |
| 4           | 29.43     | 5.90     | 79% | 29.43     | 33.94    | -15% |
| 5           | 35.40     | 7.53     | 78% | 35.40     | 37.89    | -7%  |
| 6           | 41.78     | 9.40     | 77% | 41.78     | 43.82    | -4%  |
| 7           | 46.96     | 10.80    | 76% | 46.96     | 49.98    | -6%  |
| 8           | 53.91     | 11.96    | 77% | 53.91     | 58.93    | -9%  |
| 9           | 61.93     | 12.85    | 79% | 61.93     | 68.21    | -10% |
| 10          | 69.28     | 13.41    | 80% | 69.28     | 75.17    | -8%  |
| 11          | 77.31     | 14.13    | 81% | 77.31     | 77.62    | -1%  |
| 12          | 86.10     | 15.45    | 82% | 86.10     | 70.68    | 17%  |
| 13          | 94.20     | 17.49    | 81% | 94.20     | 54.15    | 42%  |
| 14          | 102.39    | 19.63    | 80% | 102.39    | 31.09    | 69%  |
| 15          | 109.32    | 21.81    | 80% | 109.32    | 15.47    | 85%  |
| 16          | 114.96    | 25.35    | 77% | 114.96    | 11.10    | 90%  |
| 17          | 120.62    | 28.81    | 76% | 120.62    | 19.07    | 84%  |
| 18          | 124.25    | 31.67    | 74% | 124.25    | 25.62    | 79%  |
| 19          | 126.87    | 33.96    | 73% | 126.87    | 32.73    | 74%  |
| 20          | 131.25    | 36.30    | 72% | 131.25    | 34.84    | 73%  |
| 21          | 127.59    | 35.93    | 72% | 127.59    | 34.72    | 72%  |

표 3-14. Rise 0.65일 때, 최적 Geofoam

<단위: kPa>

| Node<br>Number | Rise 0.65 |          |     |           |          |      |
|----------------|-----------|----------|-----|-----------|----------|------|
|                | Only Soil | ETI_S1R2 | 경감률 | Only Soil | ITI_S1R2 | 경감률  |
| 1              | 5.76      | 0.99     | 82% | 5.76      | 7.29     | -26% |
| 2              | 13.61     | 2.30     | 83% | 13.61     | 17.07    | -25% |
| 3              | 22.09     | 3.93     | 82% | 22.09     | 27.49    | -24% |
| 4              | 28.77     | 5.18     | 81% | 28.77     | 33.81    | -17% |
| 5              | 34.35     | 6.28     | 81% | 34.35     | 38.12    | -11% |
| 6              | 39.38     | 7.29     | 81% | 39.38     | 43.43    | -10% |
| 7              | 45.06     | 8.23     | 81% | 45.06     | 50.50    | -12% |
| 8              | 51.06     | 9.04     | 82% | 51.06     | 56.32    | -10% |
| 9              | 57.75     | 9.97     | 82% | 57.75     | 61.92    | -7%  |
| 10             | 64.72     | 11.03    | 82% | 64.72     | 62.05    | 4%   |
| 11             | 71.71     | 12.65    | 82% | 71.71     | 57.38    | 19%  |
| 12             | 79.28     | 15.04    | 81% | 79.28     | 44.52    | 43%  |
| 13             | 85.48     | 16.11    | 81% | 85.48     | 29.25    | 65%  |
| 14             | 91.09     | 17.91    | 80% | 91.09     | 9.67     | 89%  |
| 15             | 96.97     | 20.60    | 78% | 96.97     | 7.33     | 92%  |
| 16             | 102.07    | 22.90    | 77% | 102.07    | 8.49     | 91%  |
| 17             | 105.51    | 25.10    | 76% | 105.51    | 15.68    | 85%  |
| 18             | 108.83    | 26.47    | 75% | 108.83    | 22.80    | 79%  |
| 19             | 110.88    | 27.58    | 75% | 110.88    | 27.15    | 75%  |
| 20             | 113.69    | 28.55    | 74% | 113.69    | 27.49    | 75%  |
| 21             | 111.29    | 28.46    | 74% | 111.29    | 27.59    | 75%  |

표 3-15. Rise 0.5일 때, 최적 Geofoam

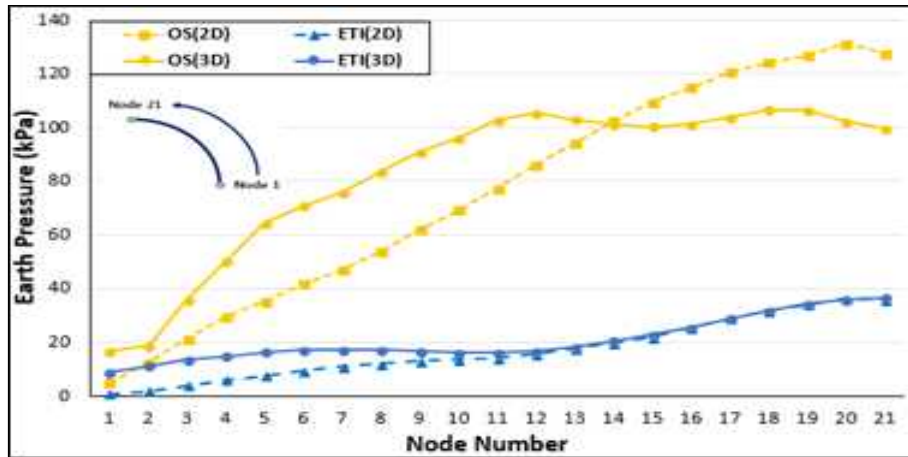
&lt;단위: kPa&gt;

| Node Number | Rise 0.5  |          |        |           |          |        |
|-------------|-----------|----------|--------|-----------|----------|--------|
|             | Only Soil | ETI_S1R4 | 경감률(%) | Only Soil | ITI_S1R4 | 경감률(%) |
| 1           | 2.34      | 0.52     | 78%    | 2.34      | 3.60     | -54%   |
| 2           | 9.04      | 1.85     | 80%    | 9.04      | 13.34    | -48%   |
| 3           | 18.03     | 3.00     | 83%    | 18.03     | 23.87    | -32%   |
| 4           | 26.74     | 3.83     | 86%    | 26.74     | 32.95    | -23%   |
| 5           | 32.34     | 4.40     | 86%    | 32.34     | 37.78    | -17%   |
| 6           | 33.26     | 4.79     | 86%    | 33.26     | 37.54    | -13%   |
| 7           | 42.88     | 5.63     | 87%    | 42.88     | 44.51    | -4%    |
| 8           | 43.95     | 6.05     | 86%    | 43.95     | 40.87    | 7%     |
| 9           | 49.36     | 6.87     | 86%    | 49.36     | 36.68    | 26%    |
| 10          | 52.97     | 7.78     | 85%    | 52.97     | 28.76    | 46%    |
| 11          | 52.71     | 8.72     | 83%    | 52.71     | 13.64    | 74%    |
| 12          | 62.16     | 10.43    | 83%    | 62.16     | 13.35    | 79%    |
| 13          | 66.72     | 12.09    | 82%    | 66.72     | 9.87     | 85%    |
| 14          | 69.43     | 13.95    | 80%    | 69.43     | 8.50     | 88%    |
| 15          | 75.70     | 16.20    | 79%    | 75.70     | 12.97    | 83%    |
| 16          | 74.85     | 17.86    | 76%    | 74.85     | 11.52    | 85%    |
| 17          | 79.50     | 19.94    | 75%    | 79.50     | 17.56    | 78%    |
| 18          | 81.67     | 21.70    | 73%    | 81.67     | 20.50    | 75%    |
| 19          | 81.60     | 22.94    | 72%    | 81.60     | 20.54    | 75%    |
| 20          | 84.93     | 24.03    | 72%    | 84.93     | 21.71    | 74%    |
| 21          | 82.35     | 24.08    | 71%    | 82.35     | 21.05    | 74%    |

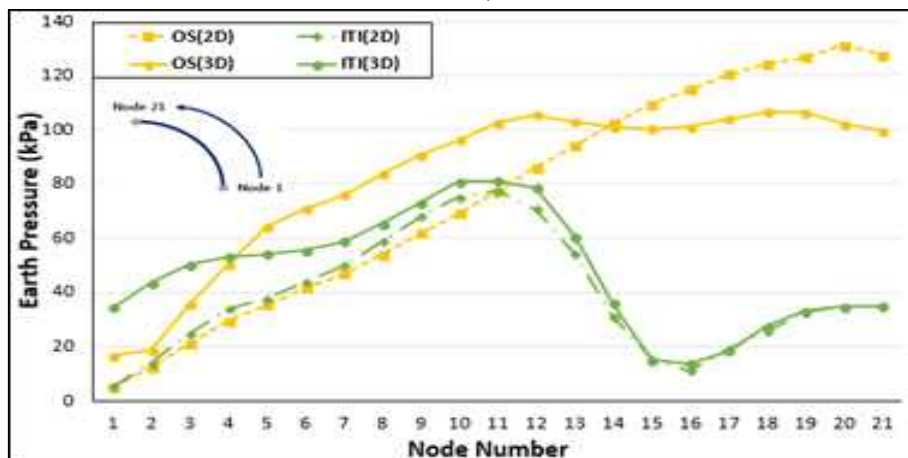
(다) 3D 모델을 이용한 실험체 해석 결과

① 2D해석을 통한 거동 특성 분석 결과

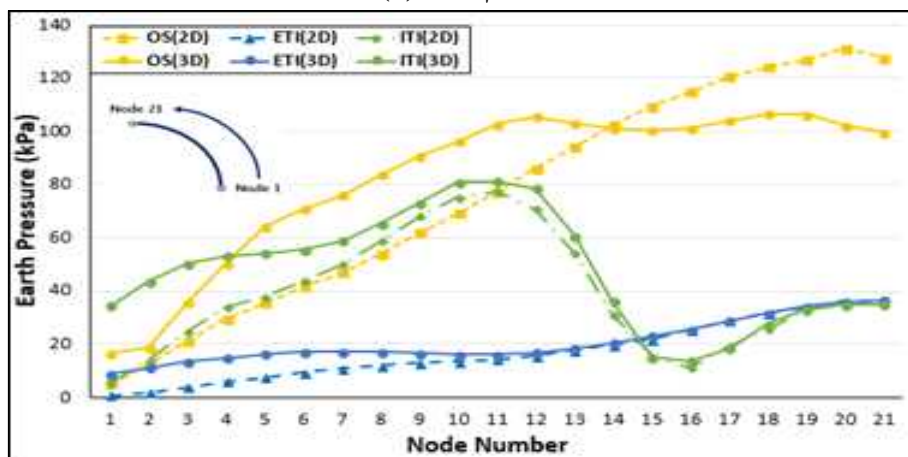
- 그림 3-48에 실험체와 동일한 제원으로 Rise비 0.75(Span 2000mm, Rise높이 1500mm) 일 때, 2D해석과 3D해석 시 구조물에 발생하는 토압에 비교하였다.



(a) OS 와 ETI



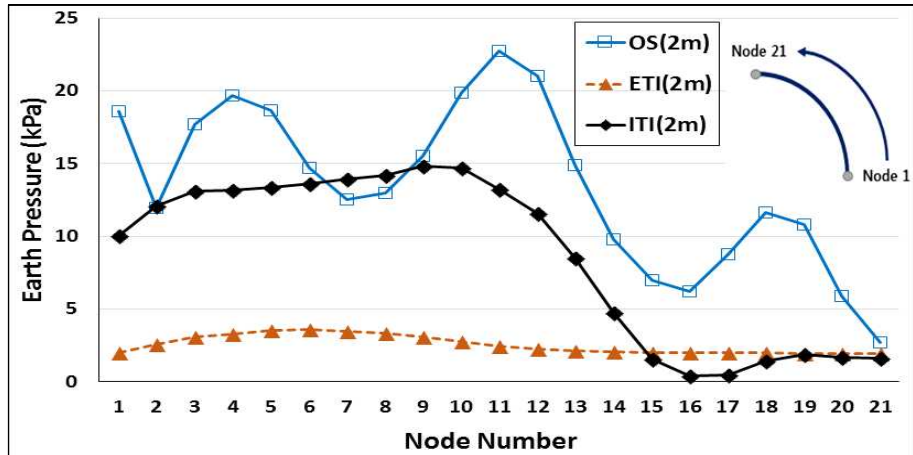
(b) OS와 ITI



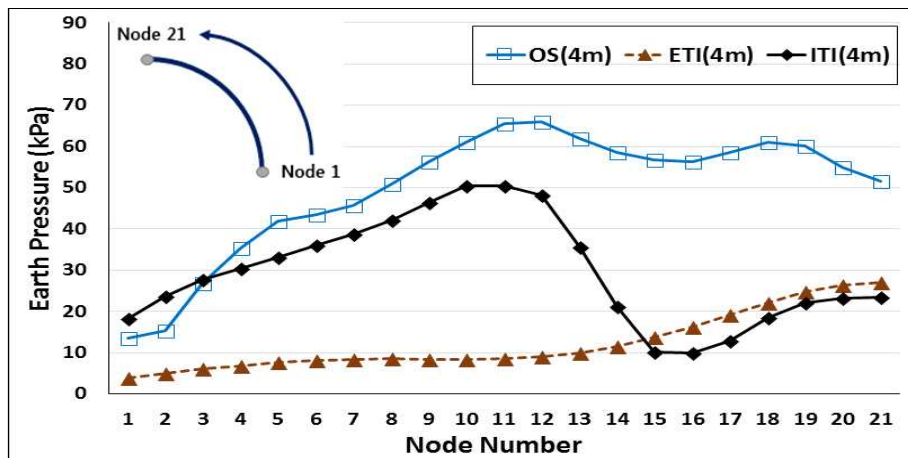
(c) OS, ITI 와 ETI

그림 3-48 2D해석과 3D해석 결과비교

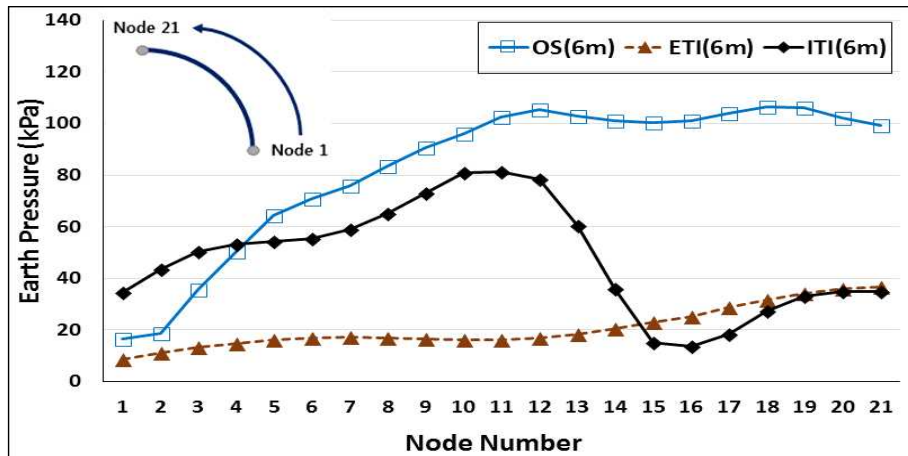
- 그림 3-49는 3D해석결과를 나타낸 그래프 매립깊이에 따른 구간별 토압을 비교한 결과이다.



(a) 토피고 2m인 경우



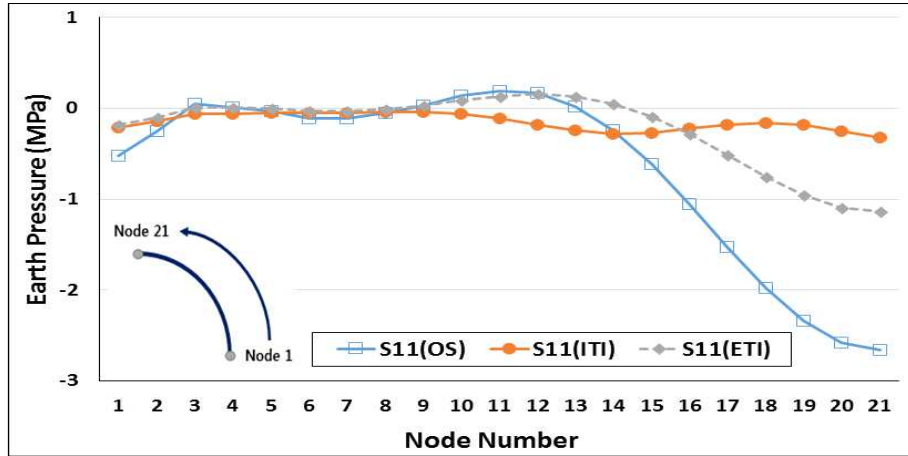
(b) 토피고 4m인 경우



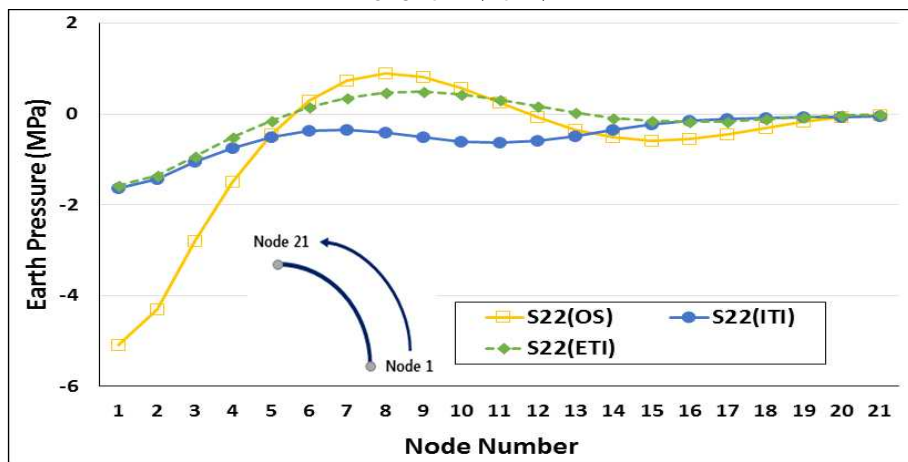
(c) 토피고 6m인 경우

그림 3-49 Geofoam 적용 형식별 토압비교

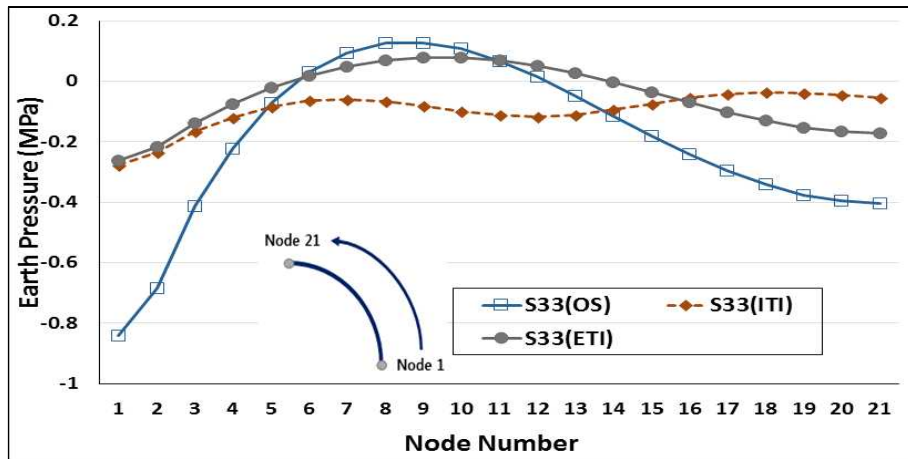
■ 그림 3-50은 아치구조물의 OutLine에 대한 축 응력을 나타낸 결과이다.



(a) 횡방향 축응력(S11)



(b) 종방향 축응력(S22)



(c) 수직방향 축응력(S33)

그림 3-50 Arch OutLine 축 응력

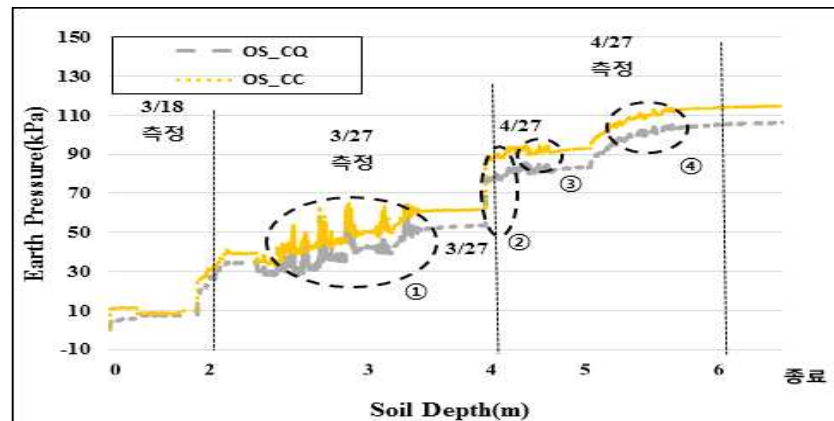
### (3) 계측 결과와 유한요소해석 결과 비교를 통한 ETI 검증 및 최적화

(가) 토압 초기 계측결과

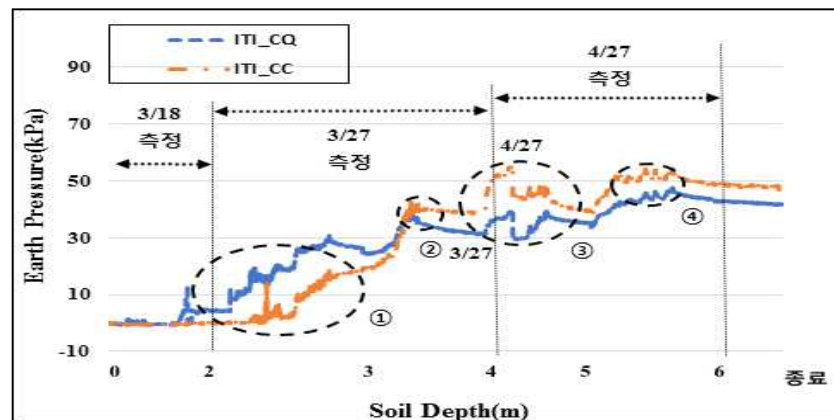
① 아치구조물의 상부 토압

■ 그림 3-51의 약자는 다음을 의미한다.

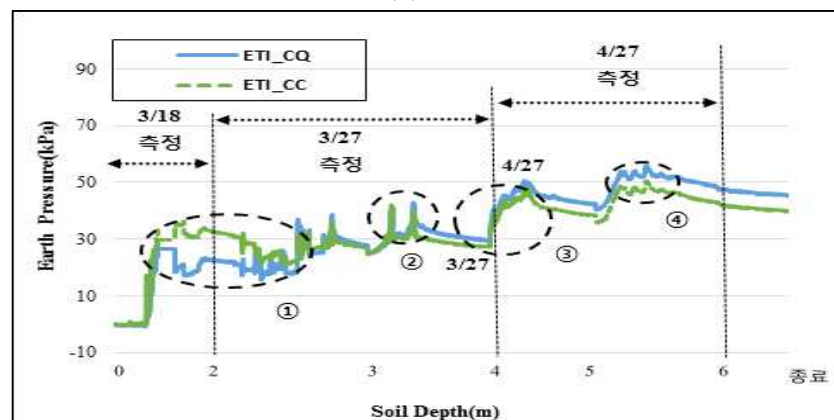
- CQ(Arch Crown Quater)= 아치 경간 1/4지점의 토압계 부착위치
- CC(Arch Crown Center)= 아치 경간 1/2지점의 토압계 부착위치
- OS(Only Soil)= Geofoam을 사용하지 않은 구간



(a) OS



(b) ITI



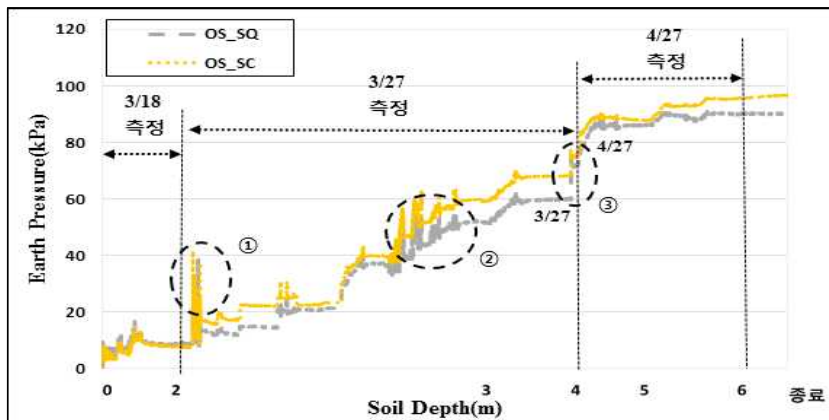
(c) ETI

그림 3-51 아치 상부의 토압계측 결과

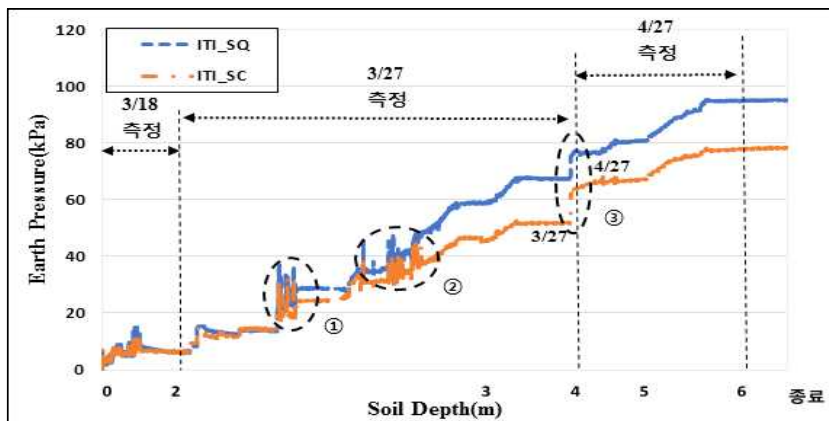
- 그림 3-51의 ①,③,④로 표시된 부분은 굴삭기를 이용하여 되메우기가 진행되는 과정과 다짐과정에서의 토압의 변화이며, 환경적인 요인으로 인해 실험체 주위에 자연적 다짐 변화가 발생함을 알 수 있다.
- Geofoam을 사용한 (b)의 ITI와 (C)의 ETI구간에서 매립초반의 경우 토압이 증가하나 매립깊이가 깊어질수록 Geofoam이 압축되면서 토압계측 결과가 안정화되는 것을 확인할 수 있다.

## ② 아치구조물의 측면 토압

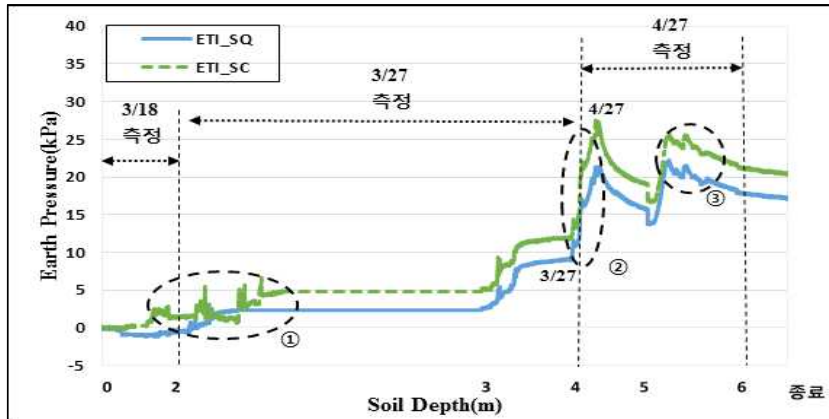
- 그림 3-52는 아치의 하단을 기준으로  $63^\circ$  부근의 측면에 설치한 토압계 결과이며 약자는 다음을 의미한다.
  - SQ(Arch Side Line Quater)= 아치 경간 1/4지점의 토압계 부착위치
  - SC(Arch Side Line Center)= 아치 경간 1/2지점의 토압계 부착위치



(a) OS



(b) ITI



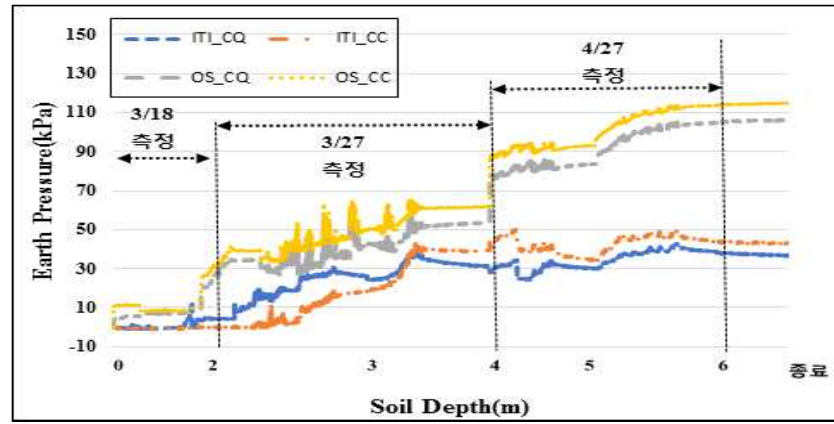
(c) ETI

그림 3-52 아치 측면 토압계측 결과

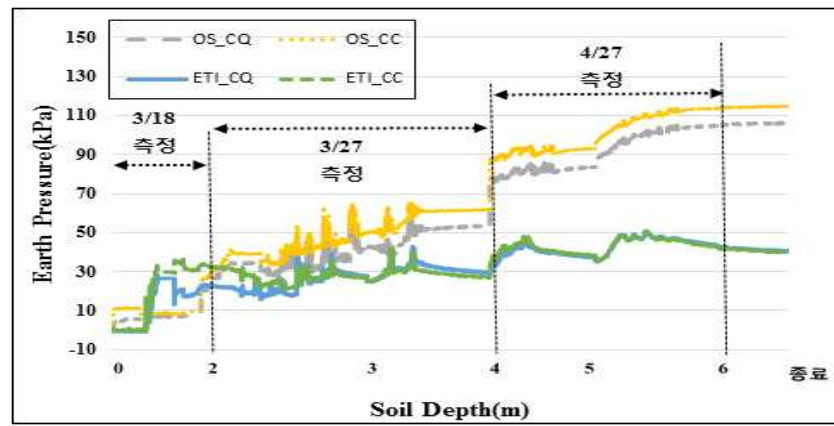
- (a) OS, (b) ITI 및 (C) ETI의 측면토압계측 결과 상부토압과 마찬가지로 되메우기가 진행되면서 점차 토압이 증가하는 것을 볼 수 있으며, (b) ITI의 경우 Geofoam이 측면에 적용되지 않았기 때문에 앞서 본 ITI구간 상부의 토압 감소 결과와 확연히 차이가 나며 이는 OS구간과 비슷한 토압분포를 보인다.
- (C) ETI의 경우 상부뿐만 아니라 측면에서도 토압경감 효과가 두드러지는 것을 볼 수 있으며, 기존 토압보다 70%이상 토압이 경감되었다.
- ①,②,③에서 되메우기 시 굴삭기의 이동과정에서 발생하는 토압 증가 및 감소 현상이 발생하였다.

### ③ 상부 토압 비교

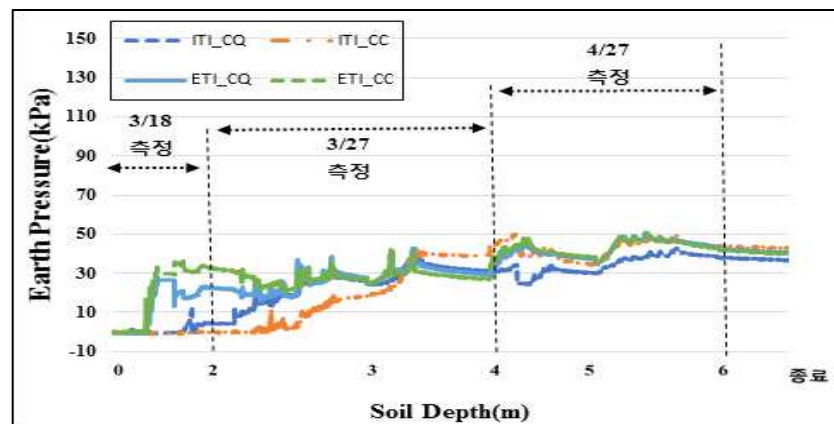
- 그림 3-53은 OS, ITI, ETI에 따른 아치구조물 상부 발생 토압을 비교한 내용이다.
- (a)의 경우 OS와 ITI를 비교한 것으로 계측 초반에 비교적 큰 차이를 보이지 않고 매립깊이가 깊어질 경우 토압에 차이를 보인다.
- (b)의 경우에는 되메우기 초반 일정부근에서 ETI구간이 OS구간보다 토압이 크게 나타나는 것으로 보인다. 이는 ETI구간의 토압계와 Geofoam이 완전히 밀착되기 위해 압축되는 과정에서 Geofoam에 받는 전체적인 토압이 토압계로 전해진 것으로 판단되며, Geofoam 위치 수정 후 매립깊이가 깊어질수록 ITI와 마찬가지로 토압에 큰 차이를 보였다.
- (C)의 경우 ITI와 ETI를 비교한 것으로 상부에 같은 두께의 Geofoam을 사용하였기 때문에 측정된 4개의 토압 모두 비슷한 값이 계측되었다.
- 실험을 진행하면서 최종 6m의 되메우기를 완료하고 측정한 결과 OS구간의 경우 더 이상 토양을 매립하지 않아도 토압이 점차 증가하는 것을 확인하였으며, ITI와 ETI는 토압이 감소하였다. 이는 시간이 지나면서 토양의 다짐에 따라 토압이 증가하는 것으로 보여진다. ITI와 ETI의 경우 Geofoam이 충분히 압축되면서 그 효과가 발휘되어 상대적으로 토압에 영향을 받지 않고 오히려 감소하는 것으로 판단된다.



(a) OS와 ITI



(b) OS와 ETI

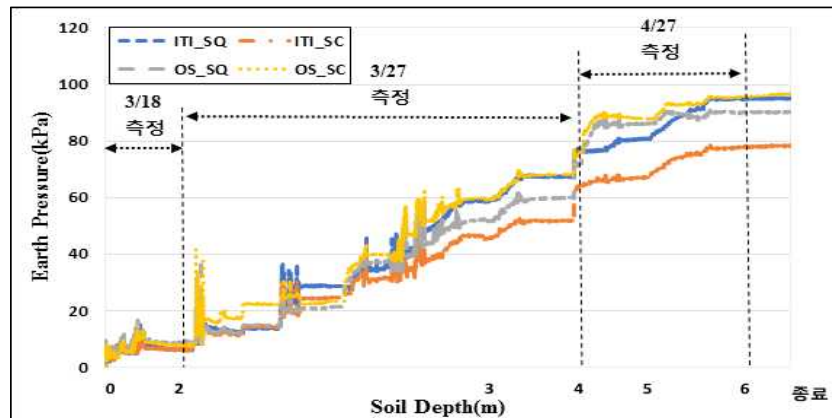


(c) ETI와 ITI

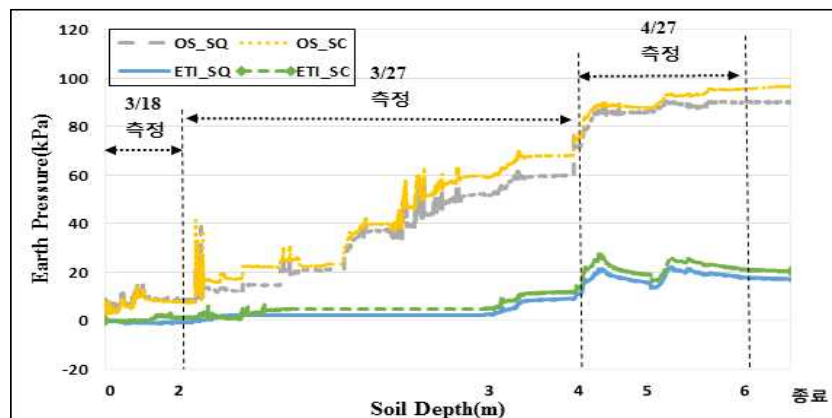
그림 3-53 아치 상부의 구간별 토압 비교

#### ④ 측면 토압 비교

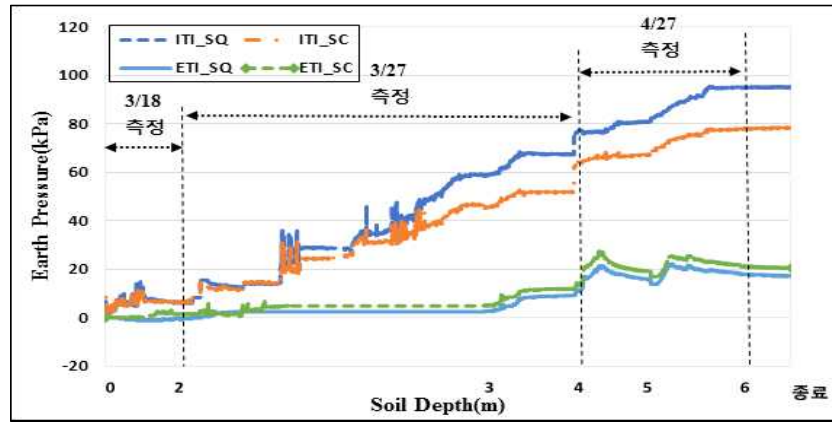
- 그림 3-54는 OS, ITI, ETI에 따른 아치구조물 측면 발생 토압을 비교한 내용으로 OS를 기준으로 분석되었다.
- (a)는 OS구간과 ITI구간을 비교한 결과로 ITI기법의 경우 구조물 상부는 Geofoam을 사용하여 보강하지만 측면은 보강하지 않는 기법으로 상부의 토압은 감소하지만 측면의 토압에서 경감된 상부 토압의 일부가 아치의 하단으로 집중됨을 확인하였다.
- (b)의 경우 OS구간과 ETI구간을 비교한 그래프로 ETI의 경우 상부의 토압이 ITI와 마찬가지로 경감되지만 ITI와 달리 측면까지 보강하였기 때문에 상부에서의 경감된 토압이 흘러내려 아치의 하단에 집중되더라도 Geofoam을 이용하여 보강됨으로써 토압집중 현상이 발생하지 않았다. 이를 통해 Geofoam을 사용하는 것은 단순히 구조물에 걸리는 토압을 경감하는 역할을 할뿐만 아니라 구조물에 경감된 토압을 다른 곳으로 흘러보내는 역할을 하는 것을 확인할 수 있다.
- (C)의 경우 ITI구간과 ETI구간을 비교한 결과로 앞서 본 상부의 토압과는 다르게 똑같이 Geofoam을 사용하더라도 보강형태에 따라 측면까지 토압경감효과가 뛰어난 것을 확인할 수 있다.



(a) OS과 ITI 발생 토압



(b) OS과 ETI 발생 토압



(c) ETI와 ITI 발생 토압

그림 3-54 Side Line의 구간별 토압 비교

(나) 수치해석과 초기 계측결과와의 비교

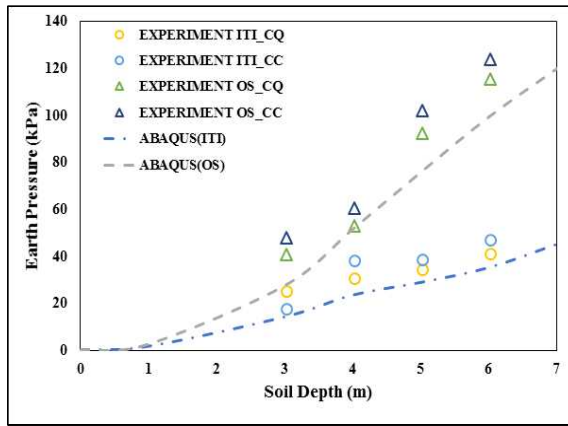
① 아치 상부 토압의 수치해석과 초기계측결과 비교

- 표 3-16과 그림 3-55는 매립깊이별 아치 상부에서 발생된 구간별 초기계측결과와 유한요소해석 결과를 비교한 것이다.
- 되메우기 3m 완료 시점에 계측된 결과는 자연다짐기간으로 상대적으로 실험 값과 해석 값에서 약 30%의 오차율이 발생하였으나 되메우기 6m 완료 시점에서는 OS는 6%와 13%, ITI는 5%와 18%, ETI는 10%와 8%의 차이를 보인다.

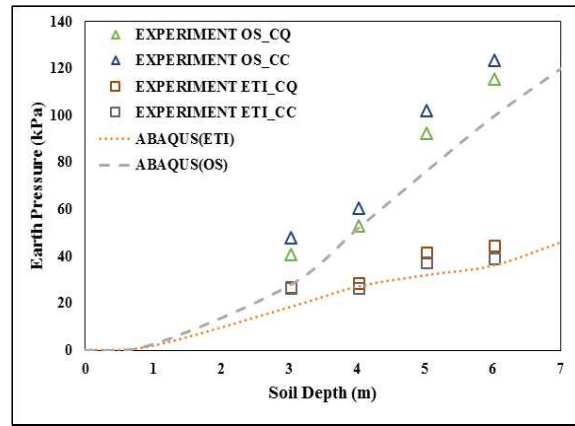
표 3-16 아치 상부에 발생되는 토압 비교

<단위: kPa>

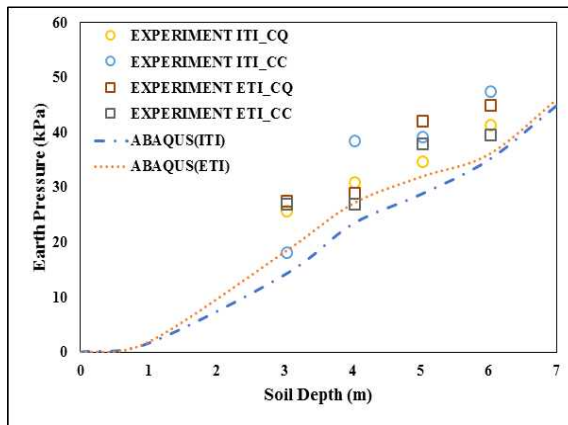
| Geofoam Shape |            | Only Soil |        | ITI    |        | ETI    |        |
|---------------|------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|
|               |            | OS_CQ     | OS_CC  | ITI_CQ | ITI_CC | ETI_CQ | ETI_CC |
| 3m            | EXPERIMENT | 41.65     | 48.71  | 26.17  | 18.52  | 27.93  | 27.34  |
|               | ABAQUS     | 27.60     | 27.60  | 14.07  | 14.07  | 18.26  | 18.26  |
|               | Diff.(%)   | 33.72     | 43.33  | 46.22  | 24.02  | 34.64  | 33.23  |
| 4m            | EXPERIMENT | 53.70     | 61.45  | 31.36  | 38.91  | 29.40  | 27.34  |
|               | ABAQUS     | 51.58     | 51.58  | 23.35  | 23.35  | 27.02  | 27.02  |
|               | Diff.(%)   | 3.95      | 16.05  | 25.54  | 39.98  | 8.09   | 1.17   |
| 5m            | EXPERIMENT | 83.39     | 92.90  | 30.57  | 35.28  | 38.02  | 38.81  |
|               | ABAQUS     | 75.86     | 75.86  | 28.75  | 28.75  | 31.92  | 31.92  |
|               | Diff.(%)   | 9.03      | 18.34  | 5.95   | 18.51  | 16.04  | 17.75  |
| 6m            | EXPERIMENT | 106.43    | 114.76 | 36.95  | 43.12  | 40.57  | 39.98  |
|               | ABAQUS     | 99.42     | 99.42  | 35.06  | 35.06  | 36.51  | 36.51  |
|               | Diff.(%)   | 6.59      | 13.36  | 5.12   | 18.69  | 10.01  | 8.68   |



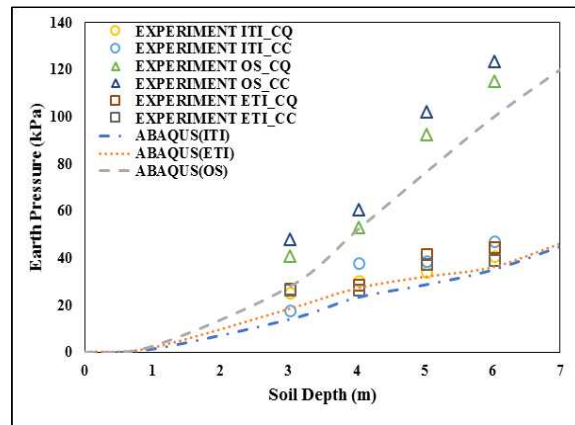
(a) OS와 ITI



(b) OS와 ETI



(c) ITI와 ETI



(d) OS, ITI 및 ETI

그림 3-55 아치 상부의 실험결과와 해석결과 비교

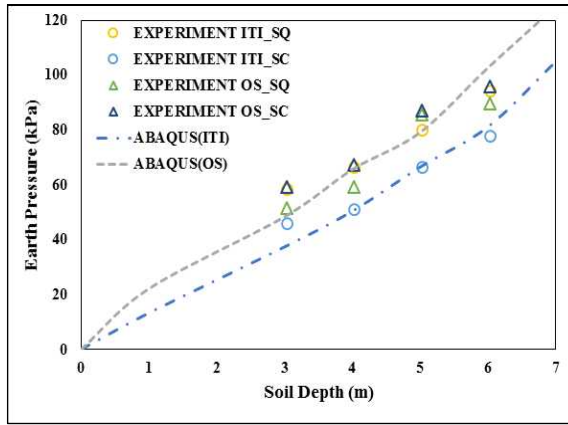
② 아치 측면 토압의 수치해석과 초기계측결과 비교

- 표 3-17과 그림 3-56은 매립깊이별 아치하단을 기준으로 63° 부근의 측면에 발생된 구간별 초기계측결과와 유한요소해석 결과를 비교한 것이다.
- 아치 측면에서 발생하는 토압 비교 결과 매립깊이에 따른 모든 구간에서 실험값과 해석값이 근접함을 확인할 수 있다.
- ETI의 5m와 6m의 되메우기 완료 시점 계측결과를 비교하면 토압이 거의 증가하지 않는 것을 볼 수 있는데, 이 경우 5m부근에서 Geofom이 충분히 압축되어 그 효과가 발휘되면서 토압의 증가가 줄어들게된다.
- 최종 매립깊이인 6m를 비교해보면 OS는 -13%와 -6%의 차이를 보였으며, ITI의 경우 -3%와 14%의 차이, ETI의 경우 -2%와 14%의 차이를 보였으며, 실험 값과 해석 값은 매우 유사하다.

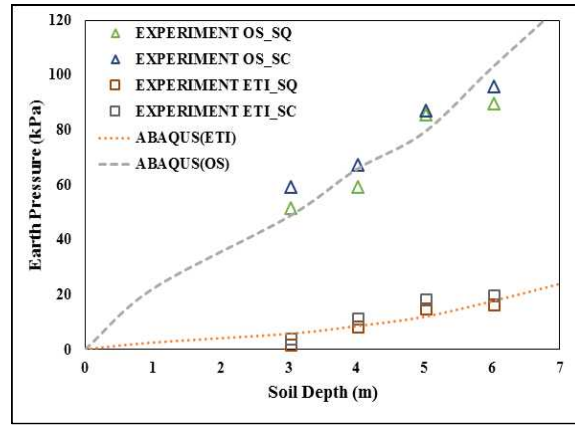
표 3-17 아치 측면에 발생하는 토압 비교

<단위: kPa>

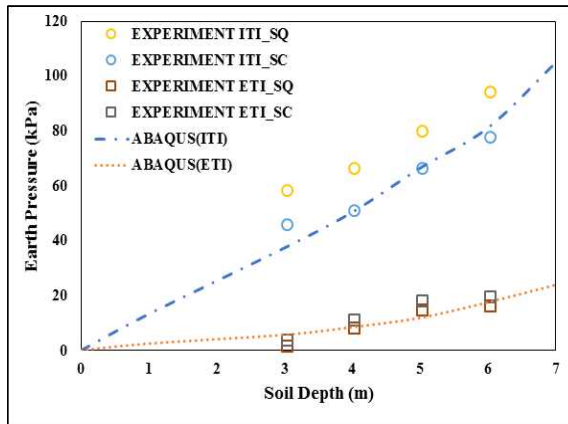
| Geofom Shape |            | Only Soil |        | ITI    |        | ETI     |        |
|--------------|------------|-----------|--------|--------|--------|---------|--------|
|              |            | OS_CQ     | OS_CC  | ITI_CQ | ITI_CC | ETI_CQ  | ETI_CC |
| 3m           | EXPERIMENT | 52.33     | 59.88  | 59.09  | 46.75  | 2.35    | 4.80   |
|              | ABAQUS     | 38.34     | 38.34  | 37.41  | 37.41  | 5.70    | 5.70   |
|              | Diff.(%)   | 26.73     | 35.97  | 36.69  | 19.97  | -142.13 | -18.60 |
| 4m           | EXPERIMENT | 60.07     | 68.21  | 67.42  | 51.84  | 9.11    | 11.96  |
|              | ABAQUS     | 65.58     | 65.58  | 50.46  | 50.46  | 6.56    | 6.56   |
|              | Diff.(%)   | -9.16     | 3.85   | 25.16  | 2.66   | 28.04   | 45.15  |
| 5m           | EXPERIMENT | 86.24     | 87.81  | 80.95  | 67.33  | 15.78   | 19.11  |
|              | ABAQUS     | 79.08     | 79.08  | 66.57  | 66.57  | 11.99   | 11.99  |
|              | Diff.(%)   | 8.30      | 9.94   | 17.76  | 1.13   | 24.00   | 37.25  |
| 6m           | EXPERIMENT | 90.26     | 96.73  | 95.26  | 78.50  | 17.25   | 20.48  |
|              | ABAQUS     | 102.64    | 102.64 | 81.21  | 81.21  | 17.62   | 17.62  |
|              | Diff.(%)   | -13.71    | -6.11  | 14.75  | -3.45  | -2.13   | 14.00  |



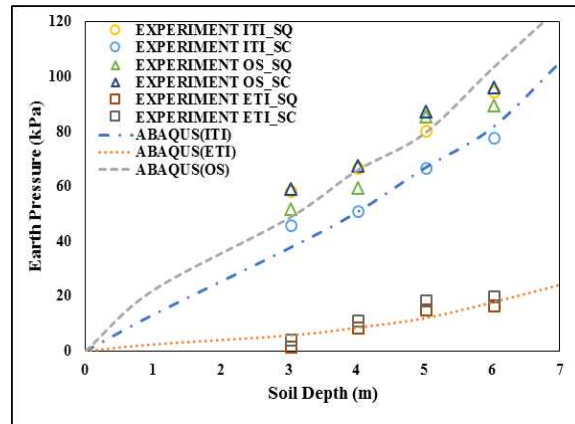
(a) OS와 ITI



(b) OS와 ETI



(c) ITI와 ETI



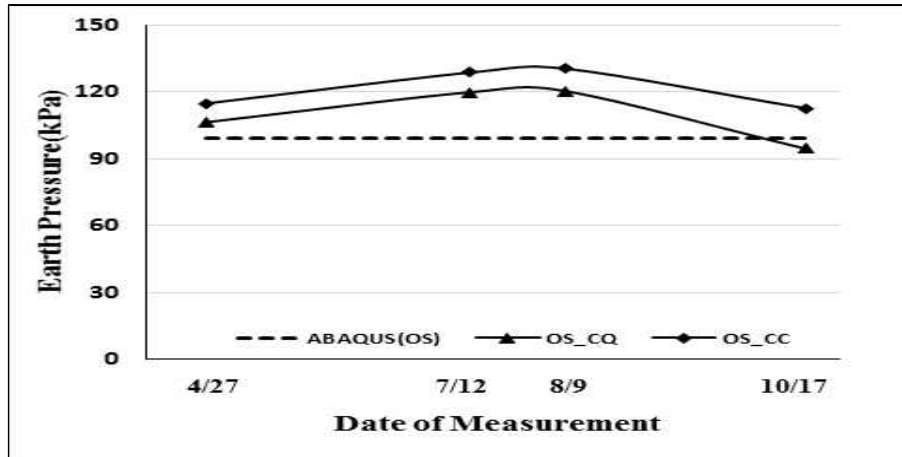
(d) OS, ITI 및 ETI

그림 3-56 아치 측면의 실험결과와 해석결과 비교

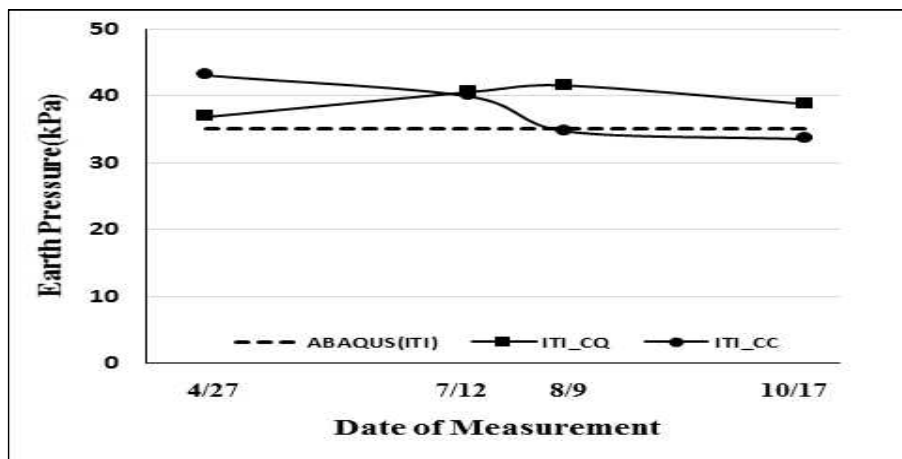
#### (다) 장기계측 안정성 평가

##### ① 아치구조물의 상부 토압

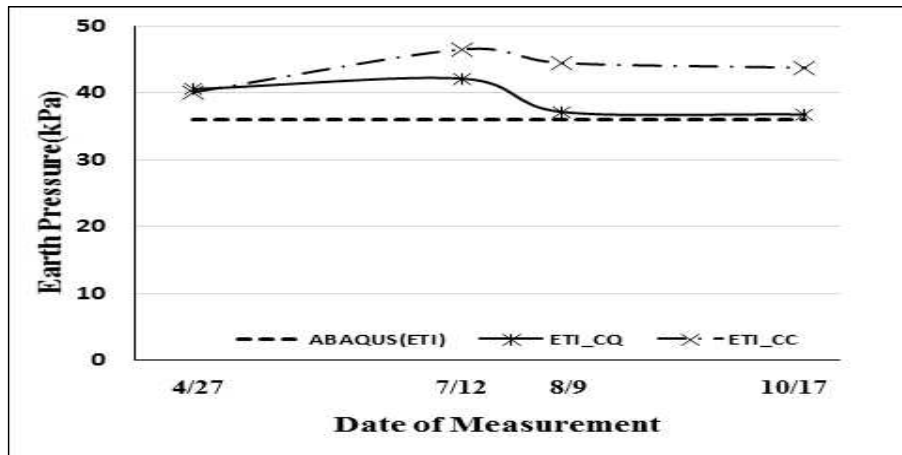
- 그림 3-57 및 3-58는 6m의 최종 되메우기 완료 후 10개월간 구조물에 발생되는 토압 계측 결과이다.
- 따라서, 장기계측은 실증실험이 완료되고 난 이후에 EPS Geofoam을 사용하여 경감되었던 토압이 꾸준히 유지되는지에 관하여 기간별로 계측을 진행하여 안정성에 대한 평가를 실시하였다.
- 장기계측의 경우에는 최종과제가 종료되어도 추가적인 계측을 통하여 안정성에 대한 평가를 진행할 예정이다.
- EPS Geofoam을 적용한 ETI의 단기변형은 사용성에 큰 문제가 발생하고 있지 않으나 장기 변형에 따른 흙 상부 도로 또는 구조물에 미치는 변형 등 사용성 문제여부는 유사 주제의 후속연구를 통하여 검증을 시도한다.



(a) OS



(b) ITI

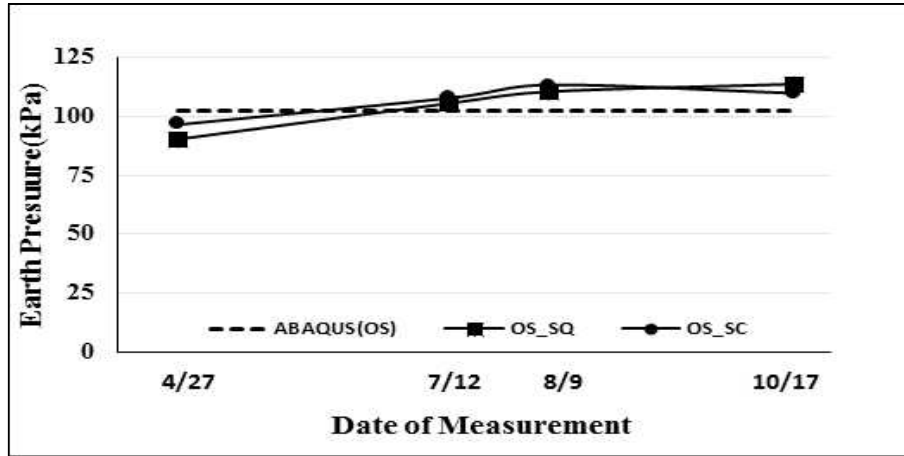


(c) ETI

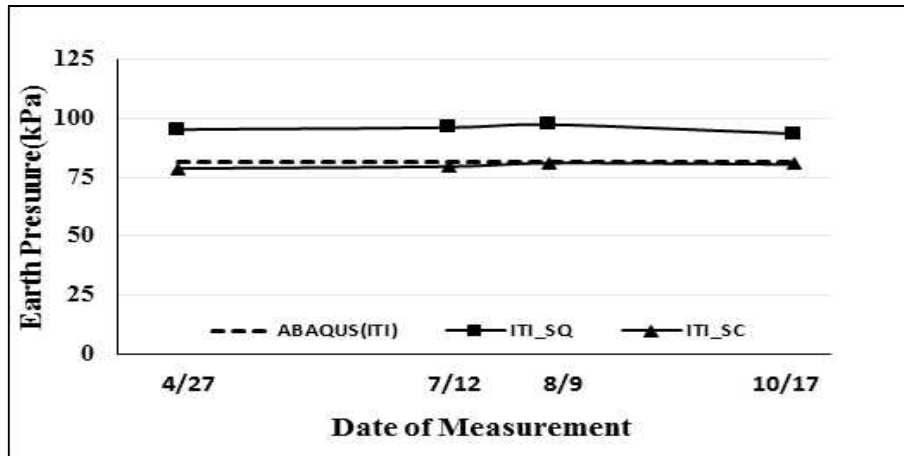
그림 3-57 아치 상부의 장기계측 결과

- 그림 3-57은 아치 상부에서의 토압계측결과를 나타낸다.
- (a)는 Geofoam을 사용하지 않은 일반적인 구조물에 발생하는 토압인 OS의 결과로 계측 기간별로 토압이 일부 변화하였지만 유한요소해석결과와 비슷한 토압이 발생하는 것을 확인 할 수 있다.
- (b)는 구조물 상부에 EPS Geofoam을 적용한 ITI의 토압계측결과를 나타낸 그래프로 초기에 경감되었던 구조물 상부의 토압이 계측기간 별로 거의 유사하거나 Geofoam이 안정화 되면서 오히려 더 감소되는 형태의 토압분포를 나타낸다.

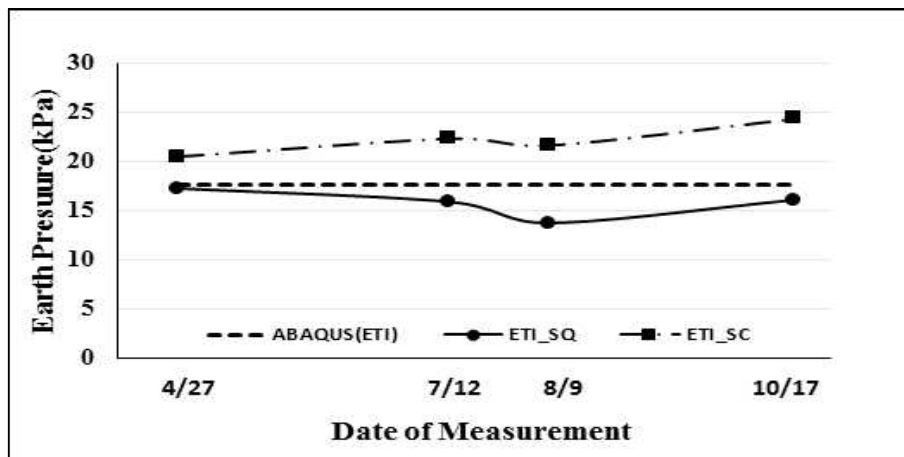
- (C)는 EPS Geofoam을 구조물 전체에 둘러싼 ETI의 토압계측 결과로 해석결과와 유사한 토압분포를 가지며 기간별로 계측한 결과 되메우기가 완료된 직후와 유사하거나 오히려 더 경감된 토압분포를 갖는다.



(a) OS



(b) ITI



(c) ETI

그림 3-58 아치 측면의 장기계측 결과

- 그림 3-48은 아치 측면에서 발생된 토압계측결과를 보여준다.
- (a)는 구조물에 EPS Geofoam을 적용하지 않은 OS의 장기계측 결과로 7월 8월의 계측한 값이 일부 증가하는 것은 장마의 영향과 잦은 소나기로 인해 계측시 토양이 일부

---

젖어있는 상태에서 계측되었으며, 일부 토압이 증가하였지만 10월 달의 경우 토압이 점차 감소된다.

- (b)는 ITI의 아치 상부에서의 토압경감효과와는 반대로 아치의 하단부에 토압이 집중되는 현상을 확인할 수 있으며, 유한요소해석결과와 유사한 토압분포를 보인다.
- (C)는 ETI의 계측결과로 OS와 ITI에 비하여 확연히 토압이 경감되는 것을 볼 수 있으며, 기간별로 계측한 결과 토압경감효과가 꾸준히 유지된다.

#### (라) 결론

- 기존의 지중 구조물은 폭원과 토피고가 제한적이라는 문제점을 가지고 있다. 생태아치 구조물의 경우 생태폭원이 협소하여 상부의 공원화에 어려움이 있으며, 지중깊이 매설되는 아치구조물의 경우 폭원과 토피고가 제한적이라는 시공적 한계를 가지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 EPS Geofoam을 사용하여 토압 및 응력을 경감시켜 문제시된 구조물의 한계를 보완하고, 구조적 문제와 시스템의 안정성을 평가하기 위하여 해석적, 실험적 연구를 진행하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.
- ① 지중아치구조물의 경우 토압경량화의 문제를 해결하고자 EPS Geofoam유무와 형태에 따라 구조물에 발생하는 토압에 대한 연구를 진행하였다. EPS Geofoam의 유무와 형태에 따라 구조물에 끼치는 토압은 큰 차이가 있으며, 기존에 연구되고 있는 ITI기법의 경우 상부의 토압 경감효과가 뛰어나지만 토압이 구조물 하단에 집중되어 과도한 토압이 생기는 문제점을 실험을 통해 확인하였다. 또한, ETI기법의 경우 구조물 전체에서 토압 경감효과가 뛰어난 것을 실험과 해석을 통해 검증하였다.
  - ② 해석결과 구조물에 발생하는 토압의 경우 아치 상부에서 ITI와 ETI에서 65%이상 감소되었으며, 아치 측면의 경우 80%이상 감소되었다. 또한, 실험결과 아치 상부에서 ITI와 ETI에서 65%이상 동일하게 감소되는 것을 확인하였으며, Side Line의 경우 ETI에서 80%이상 토압이 감소되는 것을 확인하였다. 따라서, 해석결과와 실험결과를 비교하였을 때, 10%내의 차이와 동일한 감소율을 보이는 것으로 보아 유한요소해석의 값이 신뢰성 높다고 판단된다. 또한 3D해석을 통하여 구조물에 미치는 응력에 대하여 자세하게 확인해본 결과, 아치 경간의 횡방향(X축)과 아치 경간의 종방향(Z축)에 대한 축 응력의 경우 ITI와 ETI 모두 대폭 감소되는 것을 확인할 수 있지만, 아치 경간의 수직방향(Y축)에 대한 축 응력의 경우 ETI의 경우 전체적으로 감소한 반면 ITI의 경우 아치의 상부에서 오히려 OS보다 과도한 응력이 발생하는 것으로 보아 구조물에 미치는 토압과 응력은 절대적인 영향이 있음을 확인할 수 있다.
  - ③ 본 연구에서 ETI기법의 경우 Rise높이의 Geofoam의 보강비율을 높일 경우 효과가 상부에서 극대화 되지만 더 이상 보강하지 않은 Span방향에서 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 따라서 ETI기법을 실제 시공에 적용할 경우 Geofoam의 상부와 측면의 최적의 보강두께를 설정하여야 할 것이다.
-

- 
- ④ 본 연구에서는 실험이 완료되고 구조물의 안정성을 평가하기 위해 장기계측을 실시하였다. 장기계측결과 초기 실험이 완료되고 난 직후의 토압과 시간이 지남에 따라 발생하는 토압을 기간별로 계측하여 비교한 결과 거의 유사한 토압분포를 가지는 것을 확인할 수 있었으며, 연구과제가 종료되더라도 추가적인 장기계측을 통하여 안정성에 대한 평가를 추가적으로 진행할 예정이다.
- ④ 토피고에 따른 지중아치구조물에 발생하는 변위는 해석 및 계측을 통하여 매우 작은 값을 나타냄을 확인할 수 있었다. EPS Geofom의 장기변형에 의한 토피 상부의 수직 변위는 본 실험 및 해석연구의 목표가 아니었으나, ETI 공법을 도로하부 등 장기 수직 변위가 민감한 영향을 받는 경우에 적용하기 위해서는 장기 변형에 대한 EPS Geofom의 내구성 재료특성 및 ETI 공법의 장기거동에 대한 후속연구가 필요하다.

(1) ETI 실증실험 결과를 이용한 ETI Soft Zone Geometry 유효성 분석

(가) 다양한 매개 변수를 고려한 Soft Zone Geometry

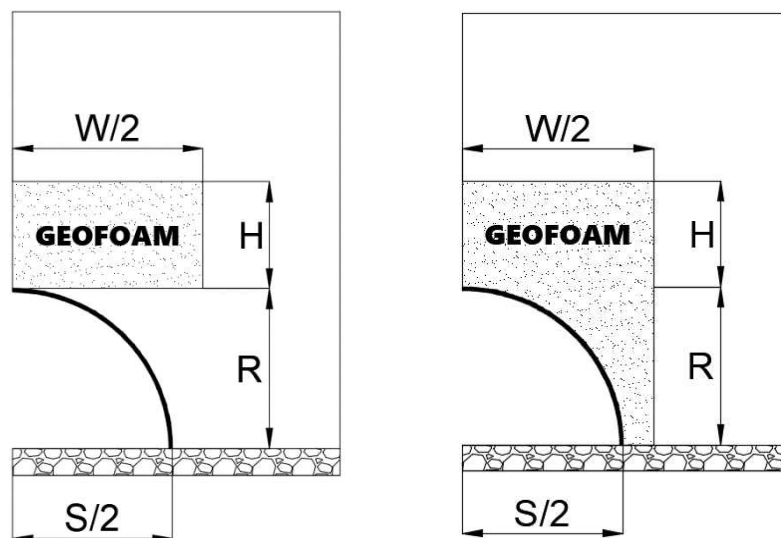
실증실험을 통해 검증된 해석 모델과 데이터를 이용하여 유효성 분석을 실시하였다. 파형강판 아치구조물에 Soft Zone을 적용하여 구조적 거동과 성능을 예측하고 최적의 EPS Geofoam 형상과 사용량 그리고 적정 매립깊이를 선정한다.

(나) 매개 변수

- 구조물은 3가지의 다른 모델 케이스를 분석하였다. 3가지 모델은 흙과 파형강판 아치만 고려한 Initial, 직사각형 형태의 Geofoam이 아치구조물 바로 위에 배치된 ITI, 마지막으로 Geofoam이 아치구조물을 감싸고 있는 ETI 이다.
- ITI와 ETI는 span-width 와 rise-height 비율에 따라 추가로 구분하였다. 지오폴의 폭(W)은 아치의 span(S)의 0%부터 30%, 지오폴의 높이(H)는 아치의 높이(R)의 10%~100%로 변화시켜 해석을 진행하였다.
- 모델은 trench installation, 지오폴 너비, 지오폴 높이 형태에 따라 “(E 또는 DS(0~3)R(1~10))” 으로 이름을 붙였다. 예를 들어, ES3R9 모델은 지오폴의 span는 아치 span의 0.8, 지오폴의 높이는 아치의 rise의 0.9가 된다. 파형강판 아치구조물의 span과 rise는 대략적으로 각각 2m , 1m 가 될 것이다.

표 3-18. 모델 구성

| Case    | EPS Geofoam | Analysis Designation |
|---------|-------------|----------------------|
| Initial | X           | SO                   |
| ITI     | O           | IS#R#                |
| ETI     | O           | ES#R#                |



(a) ITI

(b) ETI

그림 3-59 EPS Geofoam 적용 방법

(다) 유한요소해석 모델링

- Kang(2007), Stromblad(2014), Singh(2016) 에 의해 검증된 대칭시스템을 활용하여 구조물의 절반만 모델링에 사용하였다. Kang et al.(2007) 의 연구에 따르면, 측면과 상단의 경계는 중심선에서부터 아치 span의 2.5배, crown위로 아치의 rise 3배 이하를 해석 범위로 고려한다.
- 범용해석프로그램인 ABAQUS의 적절성을 판단하기 위하여 Initial 모델의 상부(crown) 토압을 또다른 범용해석프로그램인 CANDE의 결과와 비교하였다. ABAQUS와 CANDE으로 동일한 속성을 가진 토양의 깊이를 1m,3m,6m,10m 4가지로 모델링 한 결과 ABAQUS의 값은 CANDE와 최대 2.51% 차이를 보였다. 따라서 ABAQUS를 사용한 모델링에 대해 적절성을 평가하였다.

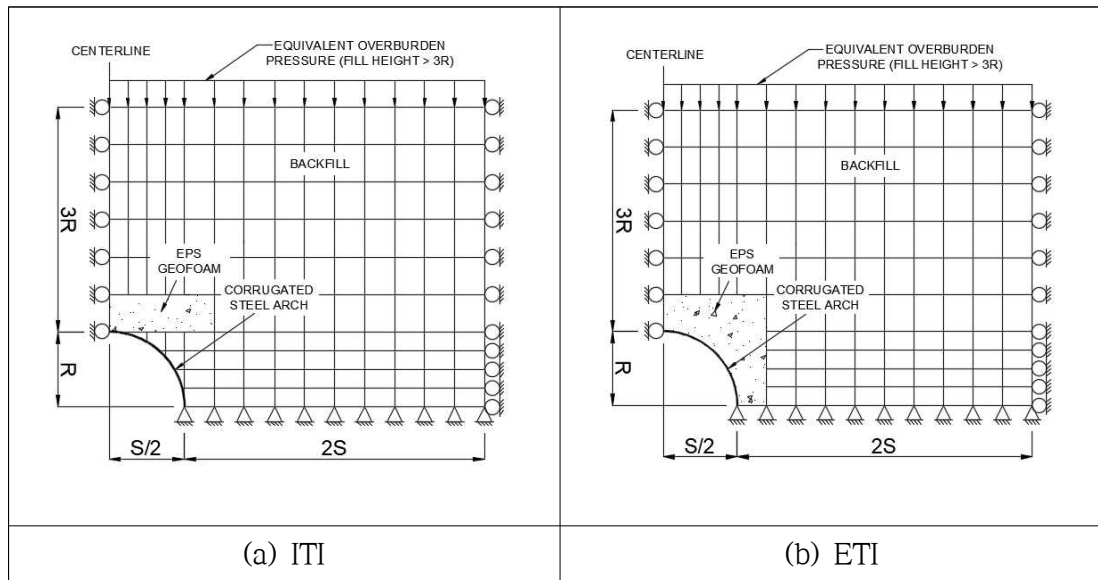


그림 3-60 유한요소해석모델 도식화

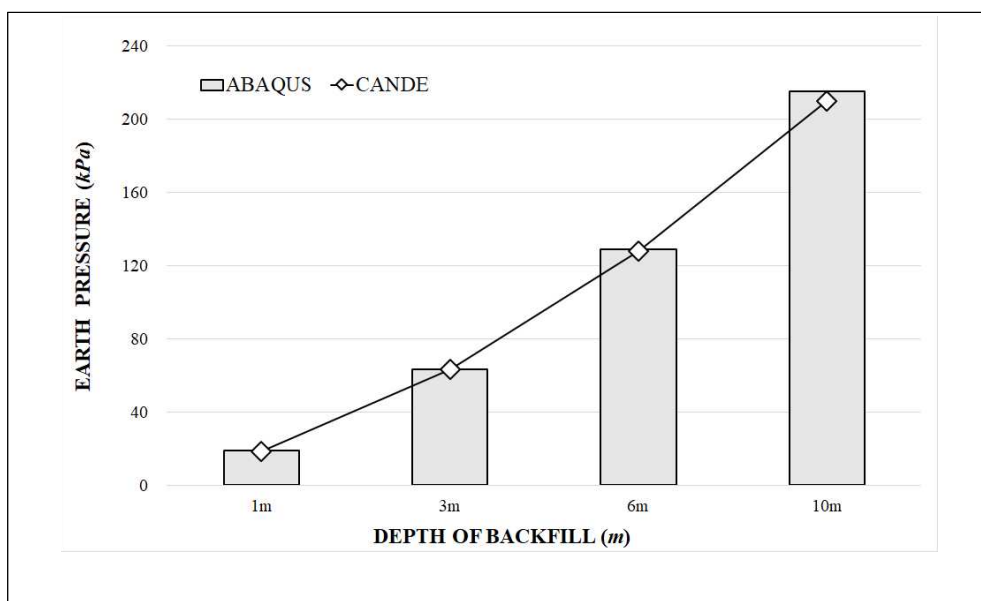


그림 3-61 CANDE 와 ABAQUS의 결과 비교

(다) Element Type

- 토양과 EPS Geofoam은 해석프로그램 ABAQUS를 사용하여 Shell의 deformable 요소를 사용하여 2차원 해석을 진행하였으며, 파형강판 아치구조물은 Wire의 deformable 요소를 사용하여 2차원 해석을 수행하였다.
- 토양과 Geofoam은 모두 4-node bilinear plane stress 요소(CPS4R)를, 파형강판 아치구조물은 2-node linear beam 요소(B21)를 적용하였다. 메쉬(Mesh) 사이즈는 0.0785m에서 1m의 범위로 설정하였다.

(라) 재료 특성

- 토양의 경우 ASTM D2487에 분류된 상대밀도 95%의 잘 다져진 모래와 자갈모래를 사용하였다. Geofoam은 EPS Industry Alliance을 참고하여 EPS 12, EPS 15, EPS 19의 3가지 타입을 본 연구에서 사용하였다.
- 본 연구에서 사용된 강재는 최소 항복강도  $275 \text{ N/mm}^2$  에 해당하는 S275로 ASTM의 A36 강재와 한국설계기준의 SS400 강재와 동등한 강도를 갖는다.
- 파형강판 아치구조물은 standard and deep corrugation 효과를 고려하여 152 x 51mm와 400 x 150의 크기를 갖는다.
- Rectangular section을 포함한 2차원 beam Corrugated plates의 모델링하기 위해, 등가 두께( $\bar{t}$ ), 등가 탄성계수( $\bar{E}$ )는 원주방향으로 계산되어야한다 (Mellat, 2012, Beben, 2012, Sutubadi and Khatibi, 2013, and Sobotka, 2014).
- El-Sawy(2003)에 의해, 원주방향의 등가 두께와 탄성계수는 다음과 같이 계산할 수 있다 :

$$\bar{t} = \sqrt{\frac{12I}{A}} \quad (1)$$

$$\bar{E} = \frac{12EI}{\bar{t}^3} \quad (2)$$

여기서,  $I$  는 corrugated plate의 단위 길이 당 관성모멘트이고,  $A$ 는 corrugated plate의 단위 길이 당 면적,  $E$ 는 강재의 탄성계수이다.

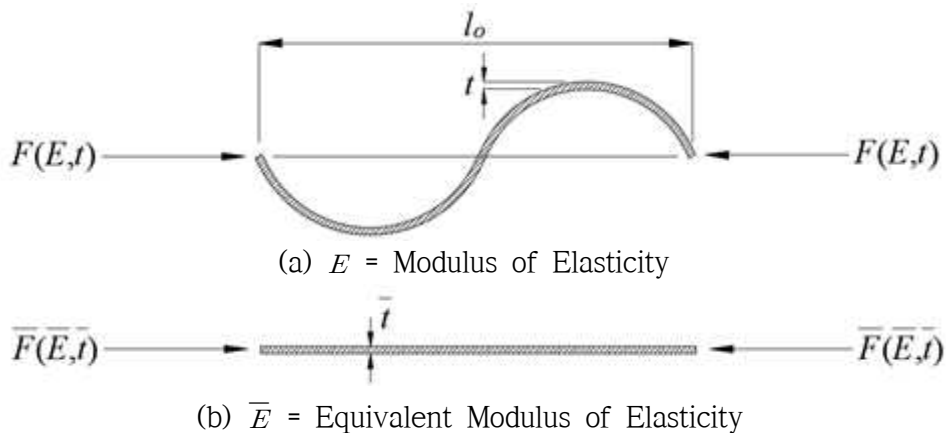


그림 3-62 파형강판과 등가강판의 단면

표 3-19. 파형강판의 등가 단면 제원

| Profile               | Thickness, t<br>(mm) | Modulus of<br>Elasticity, E<br>(MPa) | Equivalent<br>Thickness, t<br>(mm) | Equivalent<br>Modulus of<br>Elasticity, E<br>(MPa) |
|-----------------------|----------------------|--------------------------------------|------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 152<br>x<br>51<br>mm  | 3.0                  | 210,000                              | 60.0185                            | 12,323.2101                                        |
|                       | 4.0                  | 210,000                              | 60.1894                            | 16,844.8188                                        |
|                       | 5.0                  | 210,000                              | 60.3635                            | 21,391.8968                                        |
|                       | 6.0                  | 210,000                              | 60.5339                            | 25,883.1914                                        |
|                       | 7.0                  | 210,000                              | 60.7019                            | 30,139.4033                                        |
| 400<br>x<br>150<br>mm | 3.0                  | 210,000                              | 182.9002                           | 4,483.5918                                         |
|                       | 4.0                  | 210,000                              | 183.0655                           | 6,138.2938                                         |
|                       | 5.0                  | 210,000                              | 183.2511                           | 7,805.1912                                         |
|                       | 6.0                  | 210,000                              | 183.4060                           | 9,457.7042                                         |
|                       | 7.0                  | 210,000                              | 183.5711                           | 11,027.8811                                        |

표 3-20. 재료 특성

|                | Material<br>Type | Density, $\rho$<br>( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) | Modulus of<br>Elasticity, E<br>(MPa) | Poisson's<br>Ratio, $\nu$ | Stress, $\sigma$<br>(kPa) | Strain, $\epsilon$ |
|----------------|------------------|-----------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------|
| Soil           | SW90             | 1,922.09                                      | 55.4894                              | 0.21                      | 60.350                    | 0                  |
|                |                  |                                               |                                      |                           | 184.498                   | 0.000946           |
|                |                  |                                               |                                      |                           | 301.748                   | 0.001634           |
|                |                  |                                               |                                      |                           | 888.692                   | 0.00395            |
| EPS<br>Geofoam | EPS12            | 11.2                                          | 1.5                                  | 0.12                      | 15                        | 0                  |
|                |                  |                                               |                                      |                           | 15                        | 0.01               |
|                |                  |                                               |                                      |                           | 35                        | 0.05               |
|                |                  |                                               |                                      |                           | 40                        | 0.1                |
|                | EPS15            | 14.4                                          | 2.5                                  | 0.12                      | 25                        | 0                  |
|                |                  |                                               |                                      |                           | 25                        | 0.01               |
|                |                  |                                               |                                      |                           | 55                        | 0.05               |
|                |                  |                                               |                                      |                           | 70                        | 0.1                |
|                | EPS19            | 18.4                                          | 4.0                                  | 0.12                      | 40                        | 0                  |
|                |                  |                                               |                                      |                           | 40                        | 0.01               |
|                |                  |                                               |                                      |                           | 90                        | 0.05               |
|                |                  |                                               |                                      |                           | 100                       | 0.1                |
| Steel          | S275             | 7850                                          | 210,000                              | 0.3                       | 276,500                   | 0                  |
|                |                  |                                               |                                      |                           | 276,500                   | 0.004              |
|                |                  |                                               |                                      |                           | 283,900                   | 0.02               |
|                |                  |                                               |                                      |                           | 370,000                   | 0.15               |

(마) 경계 및 하중 조건

- 경계 조건은 다음과 같다; 파형강판 아치 구조물의 상단(crown)과 토양의 옆면은 핀 조건을 사용하였고, 파형강판 아치구조물의 바닥면(spring line)은 고정으로, 토양은 힌지 조건을 사용하였다.
- 하중은 토양과 파형강판 아치구조물의 자중이 적용되었다. Surface-to-Surface Contact type 옵션은 파형강판 아치구조물과 토양 그리고/또는 지오폴의 상호작용을 위해 사용되었다.

표 3-21. 유한요소해석 모델의 경계조건

| Material              | Location             | U1 | U2 | U3 |
|-----------------------|----------------------|----|----|----|
| Corrugated Steel Arch | Top (Crown)          | R  | F  | R  |
|                       | Bottom (Spring Line) | R  | R  | R  |
| Backfill              | Side                 | R  | F  | F  |
|                       | Bottom               | R  | R  | F  |

F: Free R: Restrained

(바) 유한요소해석 결과

- 이번 장은 EPS Geofoam의 타입 뿐만 아니라 형상, 크기에 따른 영향을 정리한 연구 결과를 제시한다. 분석에는 아치의 span 2m, rise 1m, 토양의 높이 3m인 94개의 모델을 포함한다. 아치구조물은 S275 등급의 152 x 51 mm, 두께 7mm를 갖는다. 토양으로는 SW90의 흙이 사용되었다. EPS12, EPS15, EPS19를 사용하였고, Geofoam의 너비는 아치 span 방향으로 0%에서 30% 증가시켰으며(S0~S3) 높이는 아치의 rise방향으로 0%에서 100% 증가시켰다(R1~R10).

① EPS Geofoam 종류에 따른 효과

- 그림 6-63 b는 ETI 모델의 경우 지오폴 유형이 EPS12, EPS15, EPS19로 변할 때 crown과 spring line에서 토압이 크게 감소했음을 보여준다. EPS12와 EPS15를 적용시킨 ETI와 ITI모델 모두에서 지오폴의 높이가 R1에서 R2로 변화할 때 압력이 크게 감소하였다. ETI는 spring line에서 토압이 크게 감소하였으나 ITI는 spring line에서 토압이 증가하였다.
- 그림 6-64는 S1R2모델의 아치부근에서의 변위를 비교한 것이다. a는 haunch(crown에서 약 31°)에서의 수평변위를 나타낸 것이고, b는 crown에서의 수직변위를 나타낸 것이다.
- 그림 6-65는 S1R2모델의 아치부근의 응력을 비교한 것을 나타낸 것이며, 최대 토압이 발생하는 부분은 spring line과 haunch(crown에서 약 31°)그리고 crown이다. Crown에서 응력이 증가한 ES1R2-G19를 제외한 모든 경우에서 spring line과 crown에서 응력이 감소하였다. 마찬가지로, 모든 ITI은 haunch에서 응력이 감소하였고 ETI모델은 반대로 관찰되었으며 특히 G15, G19에서 나타났다.

- 표 3-22 는 EPS Geofoam 유형에 따른 영향을 고려한 파형강판 아치 구조물의 거동 분석을 요약한 것이다. 그 결과 EPS15는 압력, 변위 및 응력 감소 측면에서 ITI에 가장 적합한 EPS Geofoam 유형이고 EPS12는 아치주변에서의 압력, 변위, 응력 감소 측면에서 ETI에 가장 적합한 유형으로 분석되었다.

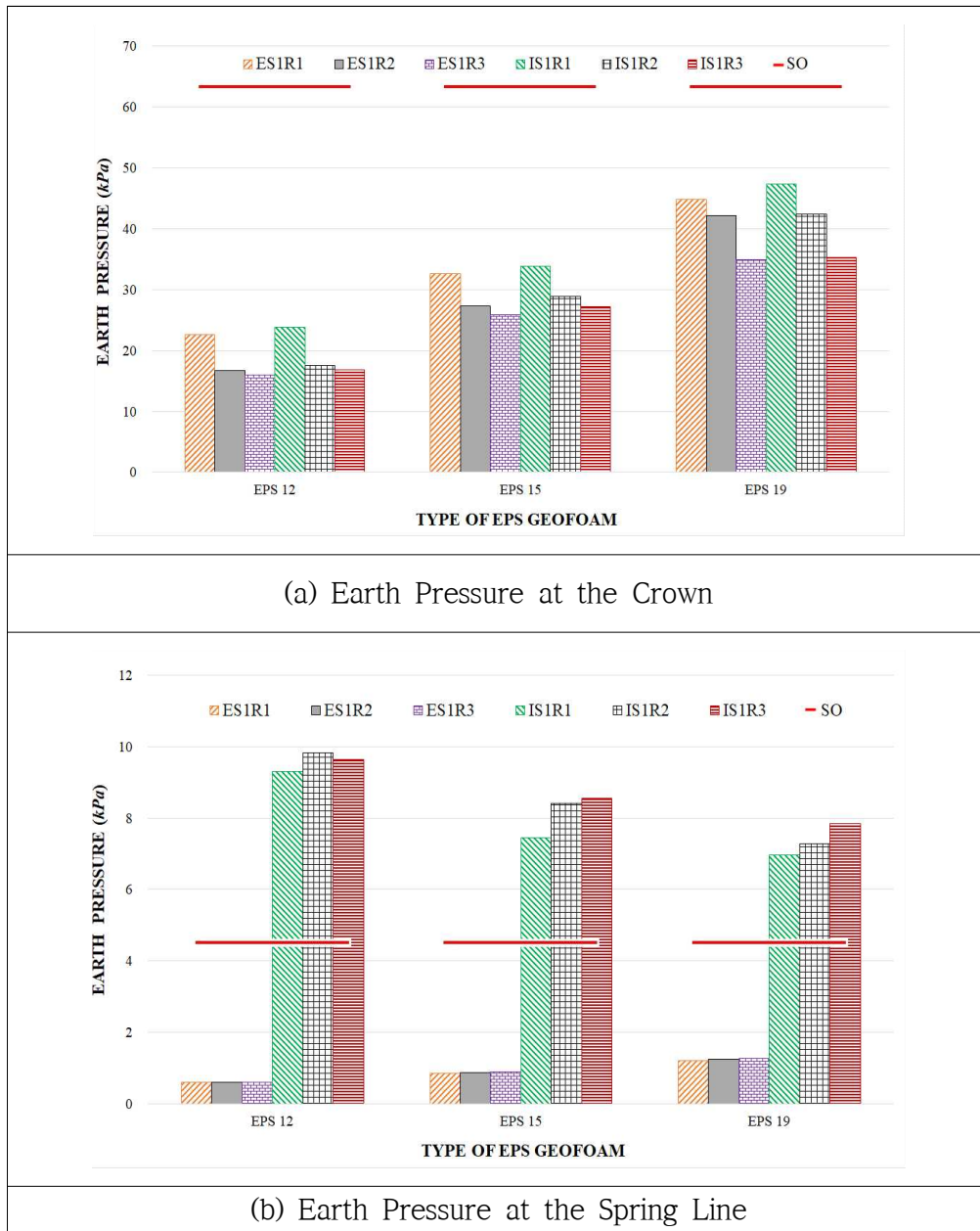
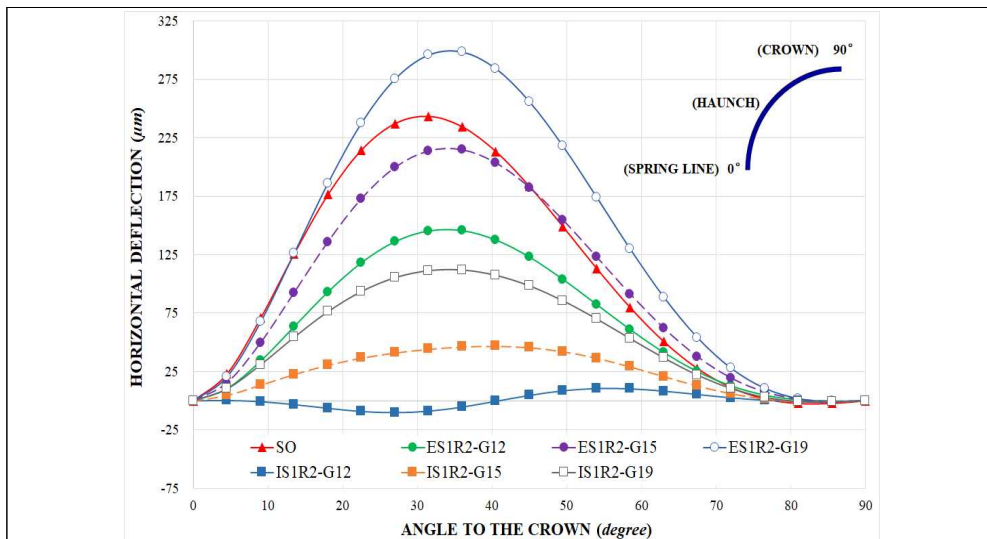


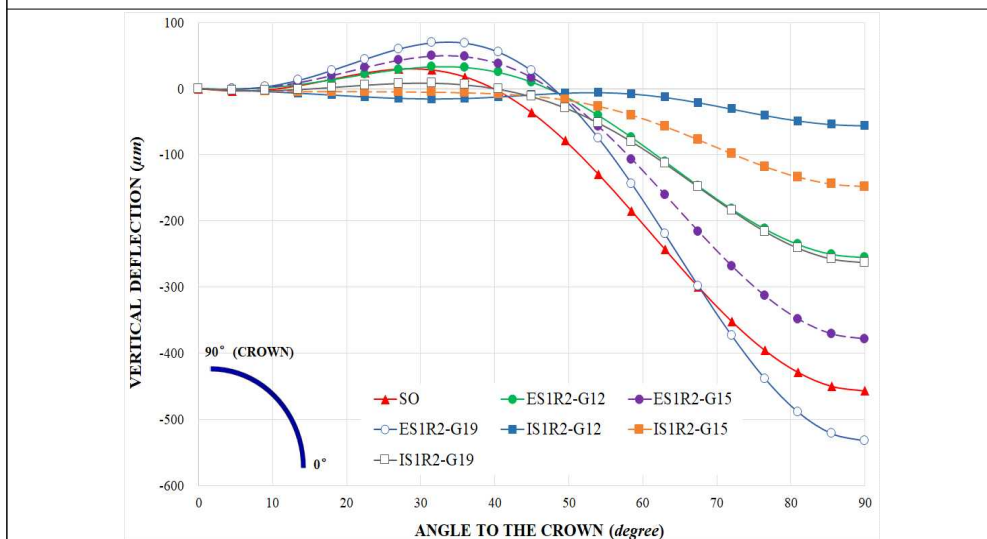
그림 3-63 EPS Geofoam의 종류에 따른 Initial, ITI 및 ETI 토압 비교

표 3-22. EPS Geofoam의 종류에 따른 파형강판 아치구조물의 구조적 거동 분석

| Geofoam Type         | Crown          |                   |                     | Spring Line    |                     | Haunch              |
|----------------------|----------------|-------------------|---------------------|----------------|---------------------|---------------------|
|                      | Earth Pressure | Stress            | $\Delta Y$          | Earth Pressure | Stress              | $\Delta X$          |
| ITI ( $\uparrow G$ ) | $\uparrow P$   | $\uparrow \sigma$ | $\uparrow \Delta Y$ | $\downarrow P$ | $\downarrow \sigma$ | $\uparrow \Delta X$ |
| ETI ( $\uparrow G$ ) | $\uparrow P$   | $\uparrow \sigma$ | $\uparrow \Delta Y$ | $\uparrow P$   | $\uparrow \sigma$   | $\uparrow \Delta X$ |



(a) Horizontal Deflection



(b) Vertical Deflection

그림 3-64 EPS Geofoam의 종류에 따른 Initial, ITI, and ETI 변위 비교

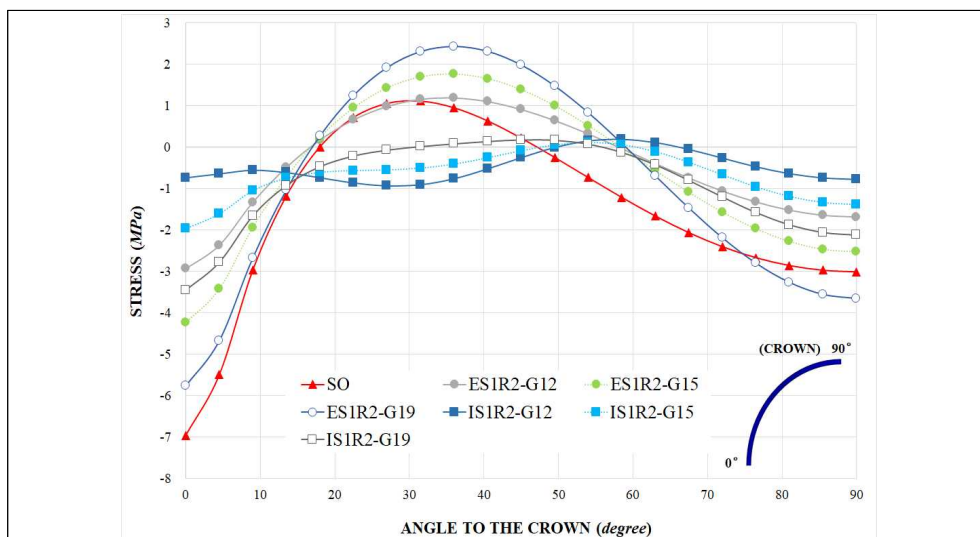


그림 3-65 EPS Geofoam의 종류에 따른 Initial, ITI 및 ETI 응력 비교

② EPS Geofoam 형상에 따른 효과

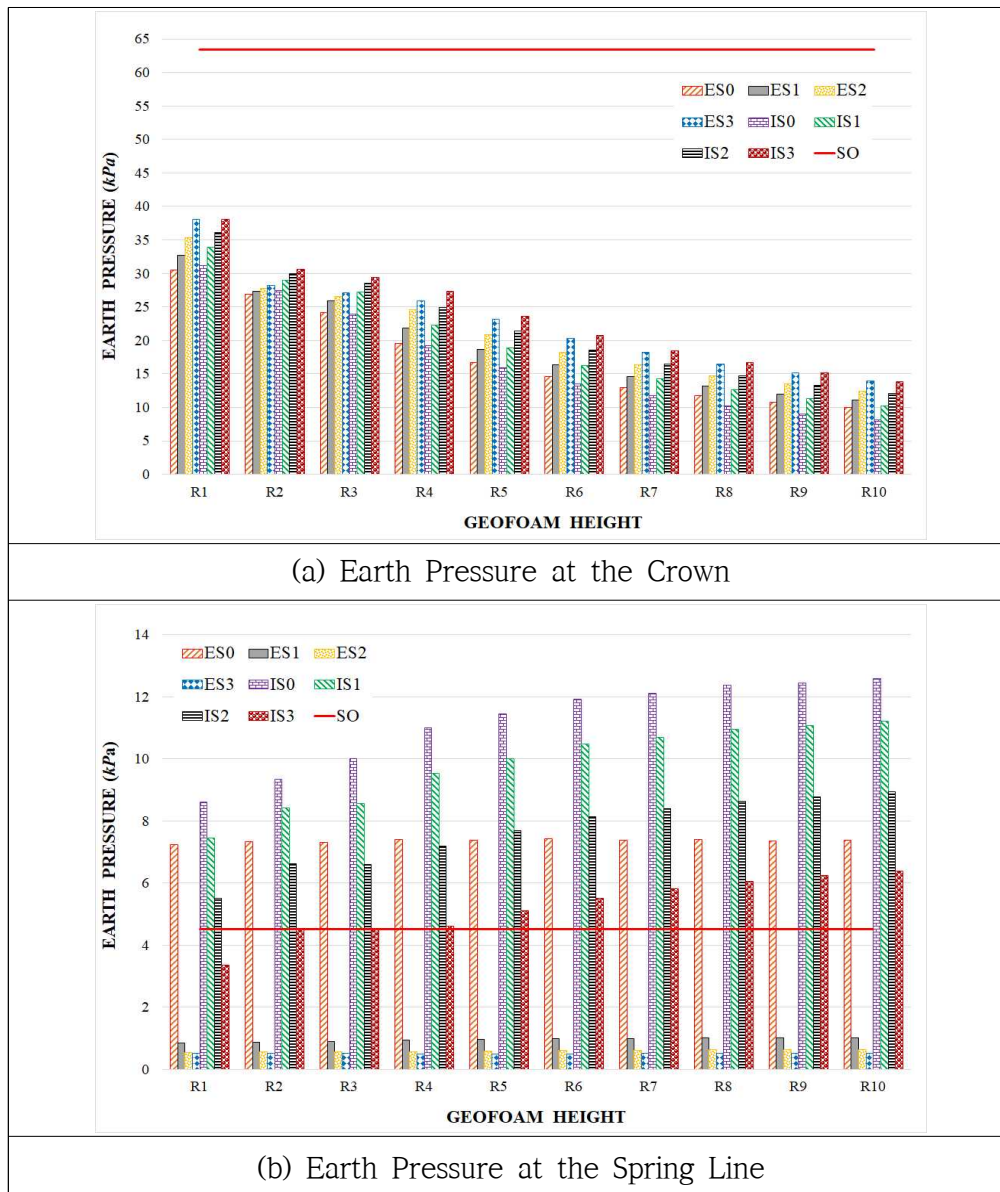


그림 3-66 EPS Geofoam의 사이즈에 따른 Initial, ITI 및 ETI 응력 비교

- 그림 3-66 a는 ETI와 ITI 모두 특히 R10모델에서 crown의 토압이 크게 감소하는 것을 보여준다. 또한, 모든 모델은 Geofoam의 폭이 증가함에 따라 압력이 증가하고 높이가 증가함에 따라 압력이 줄어드는 것을 보여준다.
- 그림 3-66 b는 Geofoam 폭이 아치의 너비와 동일한 경우(ES0)를 제외한 ETI모델은 Spring line에서 토압이 감소하는 것을 보여준다. 또한, Geofoam의 폭이 증가함에 따라 spring line에서의 압력이 감소하고 높이가 증가함에 따라 압력이 증가하는 것을 보여준다.

표 3-23. EPS Geofoam의 사이즈에 따른 파형강판 아치구조물의 발생 토압 경향 분석

| Geofoam Size |     | At the Crown   |               |       |       | At the Spring Line |               |               |               |
|--------------|-----|----------------|---------------|-------|-------|--------------------|---------------|---------------|---------------|
|              |     | Earth Pressure | Reduction (%) |       |       | Earth Pressure     | Reduction (%) |               |               |
|              |     |                | Min.          | Ave.  | SOR1  |                    | Min.          | Ave.          | SOR1          |
| ITI          | ↑ W | ↑ P            | 39.95 (S3R1)  | 67.83 | 50.92 | ↓ P                | 25.81* (S3R1) | -87.30 (Inc.) | -90.18 (Inc.) |
|              | ↑ H | ↓ P            |               |       |       | ↑ P                |               |               |               |
| ETI          | ↑ W | ↑ P            | 39.92 (S3R1)  | 68.14 | 51.93 | ↓ P                | 77.58 (S2R10) | 84.96         | -59.82 (Inc.) |
|              | ↑ H | ↓ P            |               |       |       | Minimal ↑ P        |               |               |               |

- 그림 3-67은 Geofoam 높이를 최소 및 최대로 증가시킨 R1에서 R10까지 모든 Geofoam 크기에 대한 영향을 고려하여 파형강판 아치구조물의 변위에 대한 결과를 비교한 것이다. 최대수평변위는 haunch(crown에서  $31^\circ$ )을, 수직변위는 crown부분을 고려하였다. R10의 경우 ETI 및 ITI 경우 모두 R1에 비해 변위 감소가 더 잘 나타난다.

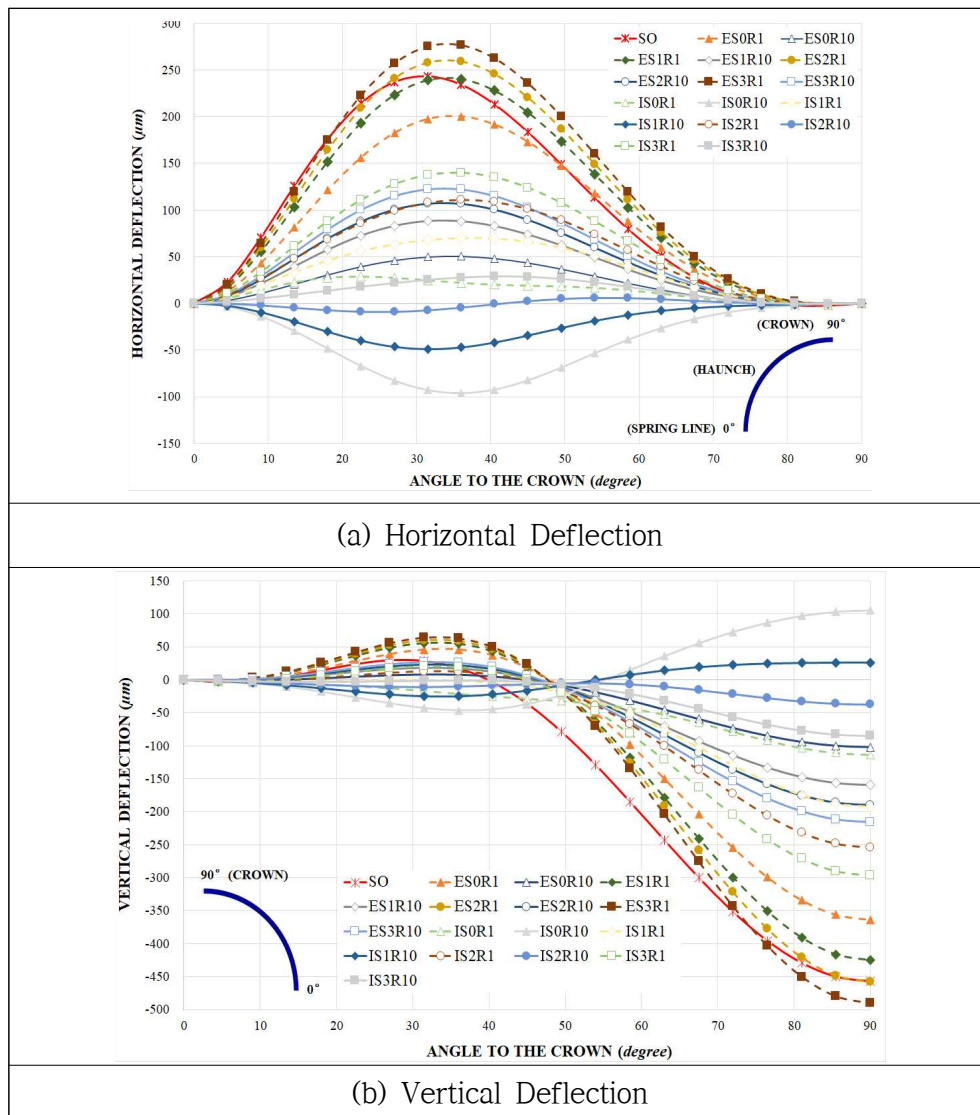


그림 3-67 EPS Geofoam 사이즈에 따른 Initial, ITI 및 ETI 변위 비교

- 표 3-24는 Geofoam의 다양한 크기의 영향을 고려한 파형강판 아치 구조물의 변위 거동 분석을 요약한 것이다. 이 표는 Geofoam의 최소량을 갖는 SOR1모델의 Crown과 Spring line에서의 최소 및 평균 변위 감소량을 보여준다. 결과에 따르면, ITI는 아치를 중심으로 변위 감소 측면에서 ETI모델에 비해 더 좋은 결과를 보여준다.

표 3-24. EPS Geofoam의 사이즈에 따른 파형강판 아치구조물의 발생 변위 경향 분석

| Geofoam Size |     | At the Crown |               |       |       | At the Haunch(31°) |               |       |       |
|--------------|-----|--------------|---------------|-------|-------|--------------------|---------------|-------|-------|
|              |     | $\Delta Y$   | Reduction (%) |       |       | $\Delta X$         | Reduction (%) |       |       |
|              |     |              | Min.          | Ave.  | SOR1  |                    | Min.          | Ave.  | SOR1  |
| ITI          | ↑ W | ↑ $\Delta Y$ | 35.12 (S3R1)  | 81.41 | 75.20 | ↑ $\Delta X$       | 43.50 (S3R1)  | 93.76 | 89.77 |
|              | ↑ H | ↓ $\Delta Y$ |               |       |       | ↓ $\Delta X$       |               |       |       |
| ETI          | ↑ W | ↑ $\Delta Y$ | 7.01* (S1R1)  | 39.99 | 20.48 | ↓ $\Delta X$       | 1.73* (S1R1)  | 37.33 | 18.85 |
|              | ↑ H | ↓ $\Delta Y$ |               |       |       | ↓ $\Delta X$       |               |       |       |

- 그림 3-68은 모든 S1R2와 S1R10 경우에 대한 강 아치구조물의 응력 결과를 비교한 것을 보여준다. 표는 ETI와 ITI모델 모두 Crown과 spring line에서 응력이 감소함을 보여준다.
- 표 3-25는 Geofoam의 크기에 대한 영향을 고려한 강 아치구조물의 거동 분석을 요약한 것이다. 표는 최소한의 Geofoam을 갖는 SOR1의 경우와 함께 crown과 spring line에서의 최소 및 평균 응력감소율을 보여준다. 결과에 따르면, ITI는 아치 주변의 응력 감소 측면에서 ETI모델에 비해 더 나은 결과를 보여준다.

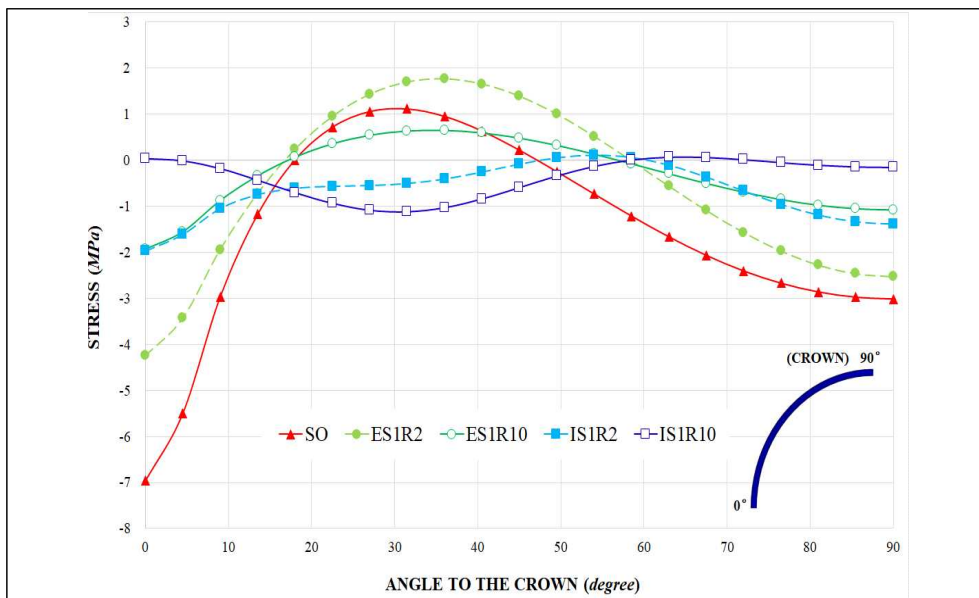


그림 3-68 EPS Geofoam 사이즈에 따른 Initial, ITI 및 ETI 응력 비교

표 3-25. EPS Geofoam의 사이즈에 따른 파형강판 아치구조물의 발생 응력 경향 분석

| Geofoam Size |     | At the Crown        |               |       |       | At the Spring Line  |               |       |       |
|--------------|-----|---------------------|---------------|-------|-------|---------------------|---------------|-------|-------|
|              |     | Stress              | Reduction (%) |       |       | Stress              | Reduction (%) |       |       |
|              |     |                     | Min.          | Ave.  | SOR1  |                     | Min.          | Ave.  | SOR1  |
| ITI          | ↑ W | ↑<br>Except for IS0 | 24.28 (S3R1)  | 70.40 | 61.73 | ↑<br>Except for IS0 | 50.41 (S3R1)  | 82.02 | 68.28 |
|              | ↑ H | ↓<br>Except for IS0 |               |       |       | ↓<br>Except for IS0 |               |       |       |
| ETI          | ↑ W | ↑                   | 4.15* (S1R1)  | 38.09 | 15.48 | ↑                   | 21.86 (S3R1)  | 55.49 | 45.07 |
|              | ↑ H | ↓                   |               |       |       | ↓                   |               |       |       |

③ Steel 두께에 따른 변화

- 그림 3-69는 강판의 두께가 변하더라도 ETI은 crown과 spring line 모두에서 토압이 크게 감소하였으며, ITI은 crown에서의 토압만이 감소됨을 보여준다. ETI와 ITI 모두 Geofoam의 높이가 증가함에 따라 crown에서의 압력은 감소한다.

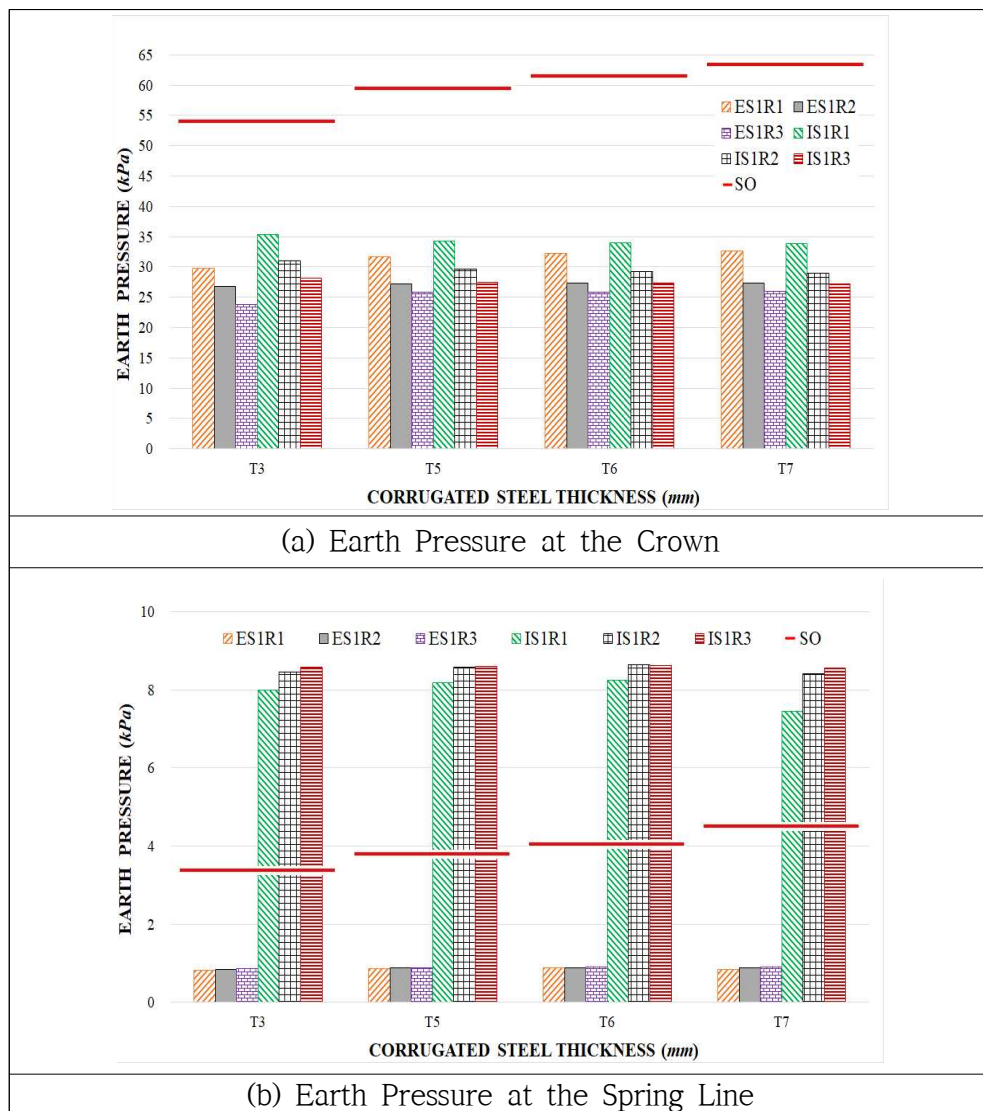


그림 3-69 파형강판의 두께에 따른 Initial, ITI 및 ETI 토압비교

- 그림 3-70은 S1R2모델의 아치주변의 변형을 비교한 것이다. 크리티컬한 부분으로 수평 변위는 haunch(crown에서  $31^\circ$ )을, 수직변위는 crown부분을 고려하였다. ETI T3와 T5의 경우를 제외한 모든 경우에서 haunch부분의 수평변위가 감소하였다. 반면에, ETI T3만이 Crown에서 수직변위가 감소하지 않았다.
- 그림 3-71은 S1R2모델의 아치주변의 응력을 비교한 것을 나타낸 것이다. 크리티컬한 부분은 spring line 과 haunch(크라운의 약  $31^\circ$ ), crown을 고려하였다. crown에서 응력이 27.45% 증가한 ES1R2-T3를 제외한 모든 경우에서 spring line과 crown에서 응력이 감소하였다. 마찬가지로, ITI모델은 IS1R2-T3를 제외하고 모든 경우에서 haunch부분의 응력이 감소하였고, 반대로 ETI모델은 haunch에서 응력이 증가하였다.
- 표 3-26은 강판의 두께 변화를 고려한 파형강판 아치 구조물의 거동분석을 요약한 것이다. 분석한 결과, 7mm의 두께의 강판은 다른 두께에 비하여 압력, 변위, 응력을 크게 감소시킨 것을 확인하였다.

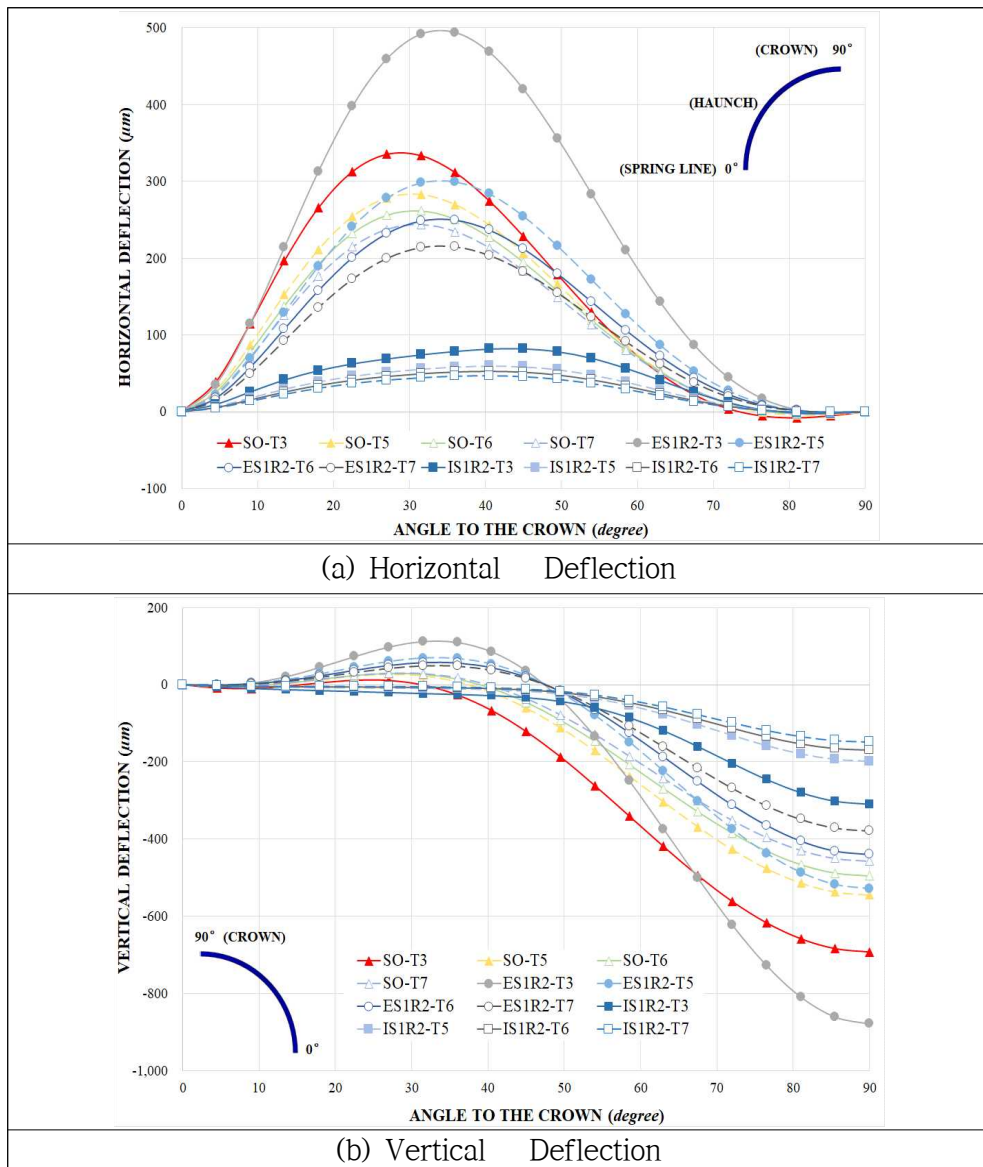


그림 3-70 파형강판의 두께에 따른 Initial, ITI 및 ETI 변위 비교

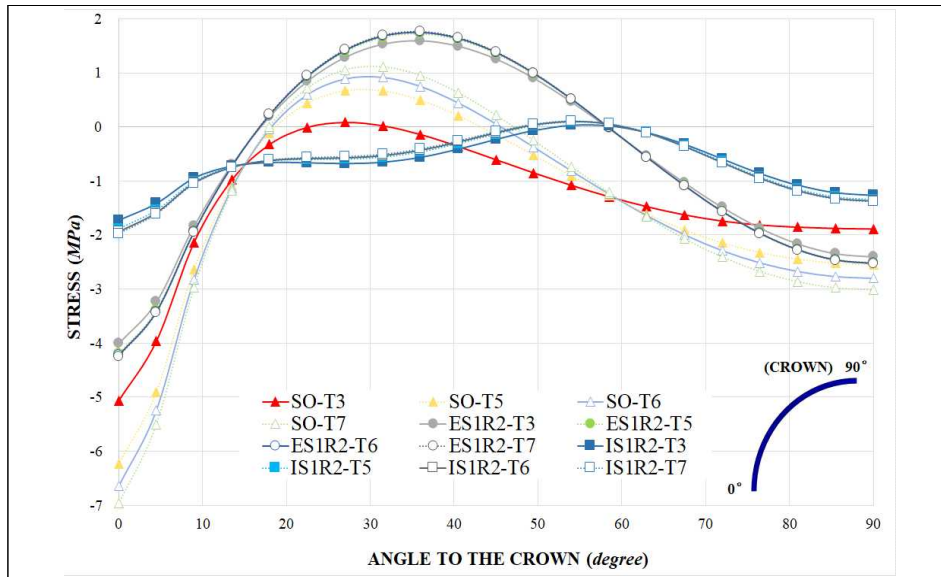


그림 3-71 파형강판의 두께에 따른 Initial, ITI 및 ETI 응력 비교

표 3-26. 파형강판의 두께에 따른 아치구조물의 발생 토압 경향 분석

| Steel Thickness |              | Crown          |                   |                       | Spring Line                  |                   | Haunch                |
|-----------------|--------------|----------------|-------------------|-----------------------|------------------------------|-------------------|-----------------------|
|                 |              | Earth Pressure | Stress            | $\Delta Y$            | Earth Pressure               | Stress            | $\Delta X$            |
| ITI             | $\uparrow T$ | $\downarrow P$ | $\sigma \uparrow$ | $\downarrow \Delta Y$ | $\uparrow P$<br>Except at T7 | $\sigma \uparrow$ | $\downarrow \Delta X$ |
| ETI             | $\uparrow T$ | $\uparrow P$   | $\sigma \uparrow$ | $\downarrow \Delta Y$ | $\uparrow P$<br>Except at T7 | $\sigma \uparrow$ | $\downarrow \Delta X$ |

#### ④ 다양한 파형강판의 형태

- 그림 3-72 a와 같이 ETI 및 ITI 모두 crown에서의 큰 압력 감소 외에도 강판의 제형이 표준 제형에서 deep 파형강판으로 바뀌면서 ETI 모델의 경우 압력이 증가하고, ITI모델의 경우 감소한다. 또한, ETI와 ITI 모두에서 Geofoam 높이가 증가함에 따라 crown에서의 압력은 감소한다. 마찬가지로, Spring line에서의 압력 감소 또한 그림 3-72 b에서 확인할 수 있다. b는 ITI모델이 deep 파형강판으로 제형이 바뀌면서 상대적으로 큰 압력 증가가 나타났으며, Geofoam의 높이가 높아짐에 따라 압력의 변화가 최소화되었다는 것을 알 수 있다.
- 그림 3-73은 S1R2모델의 아치주변의 변형을 비교 분석한 것을 나타낸 것이다. 모든 경우에서 초기 토양 모델(SO)에 비해 haunch의 수평변위와 crown에서의 수직변위가 모두 감소했다.

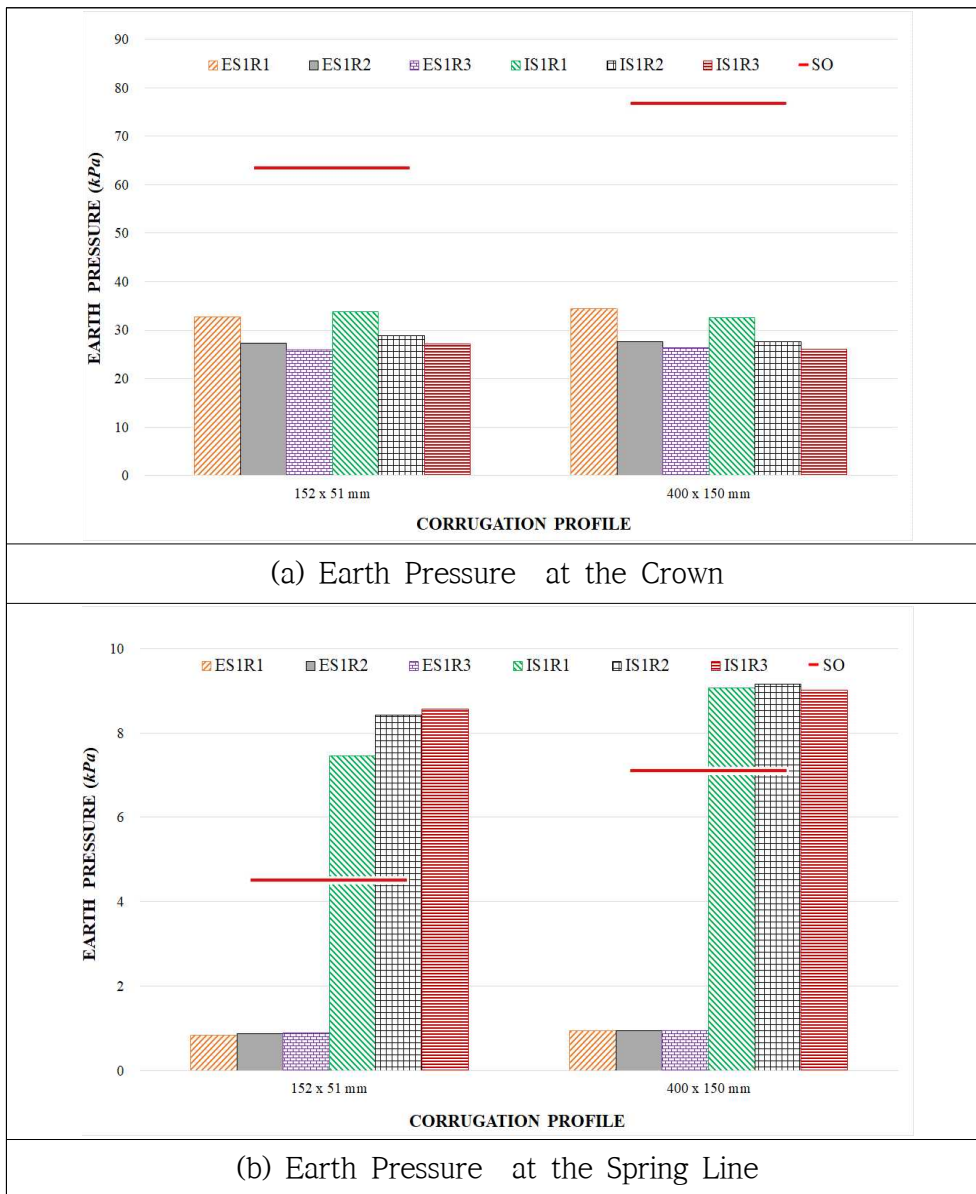
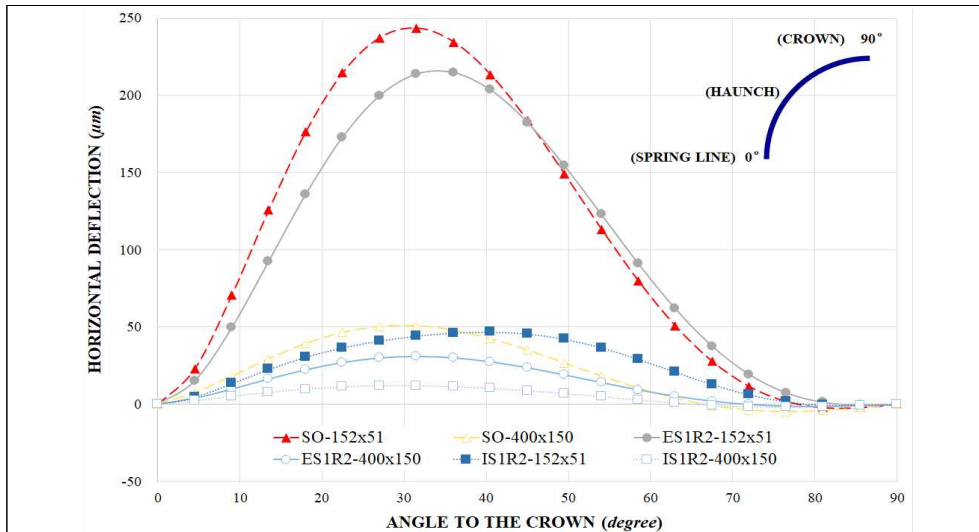
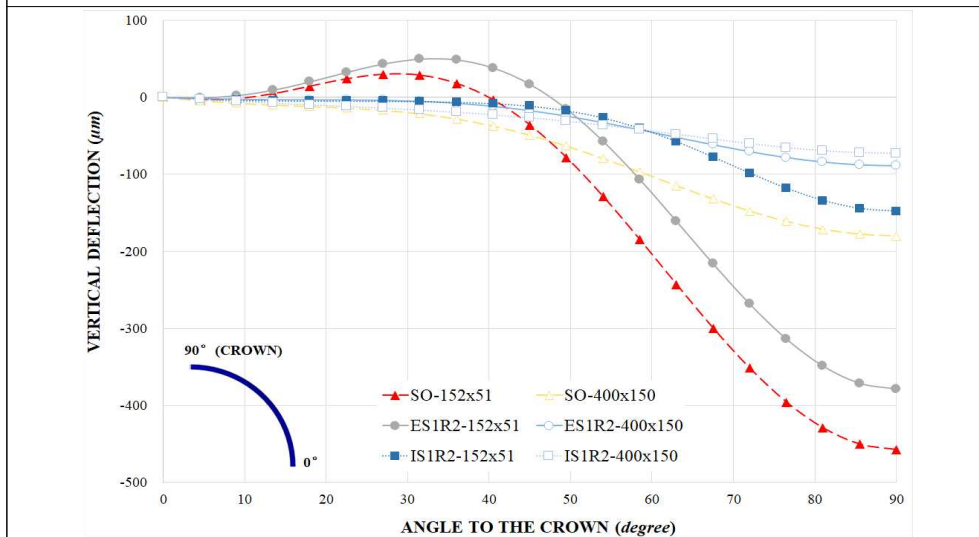


그림 3-72 파형강판의 형태에 따른 Initial, ITI 및 ETI 토압 비교

- 그림 3-74은 S1R2의 아치주변의 응력을 비교한 것이다. 이것은 강판이 표준제형에서 파형강판으로 변화함에 따라 모든 케이스가 Spring line과 crown에서 응력이 감소하는 그림 3-72와 유사한 결과를 보여준다.
- 표 3-27은 다양한 파형강판의 제형의 영향을 고려한 아치구조물의 거동 분석을 요약한 것이다. 결과에 따르면, 특히 ITI에서 압력, 변위 및 응력 감소 측면에서 파형강판아치 구조물이 더 좋은 결과를 나타냈다.



(a) Horizontal Deflection



(b) Vertical Deflection

그림 3-73 파형강판의 형태에 따른 Initial, ITI 및 ETI 변위 비교

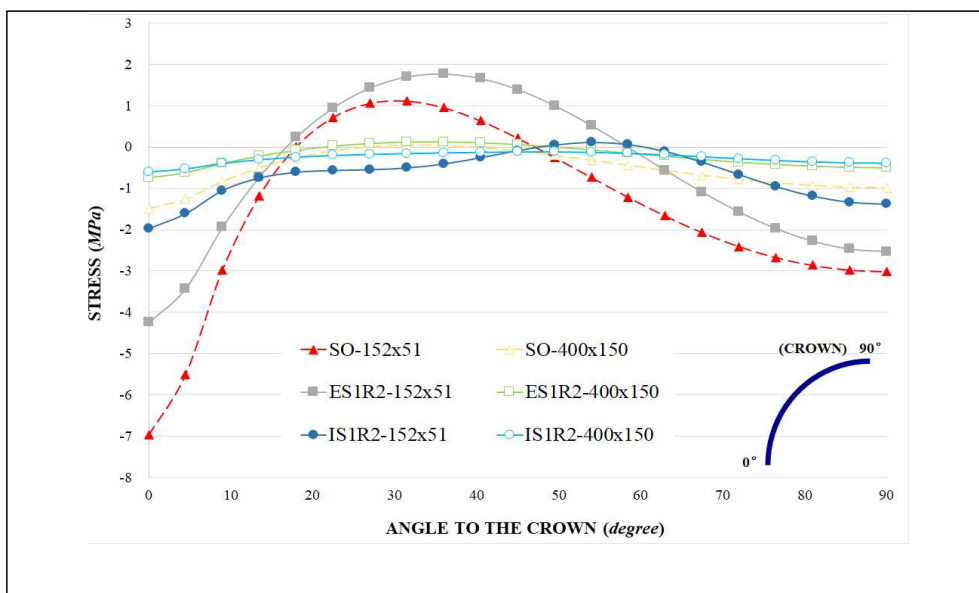


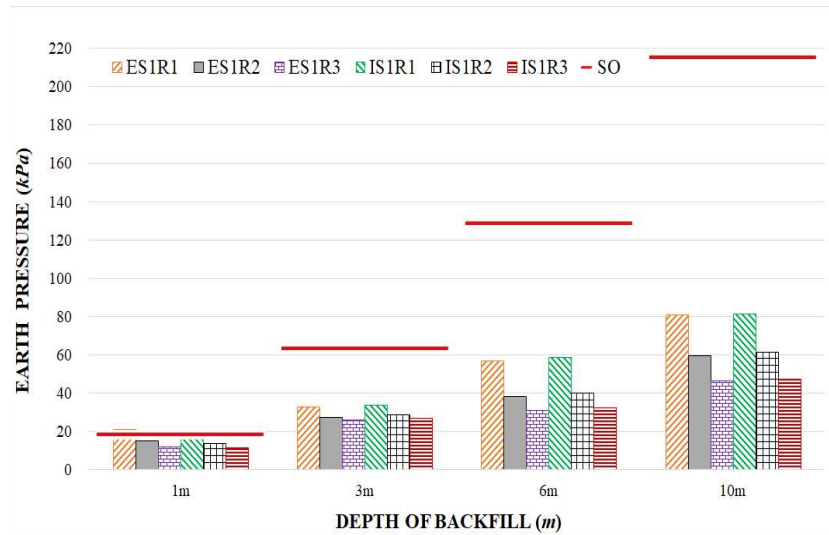
그림 3-74 파형강판의 형태에 따른 Initial, ITI 및 ETI 응력 비교

표 3-27. 파형강판의 형태에 따른 아치구조물의 발생 토압 경향 분석

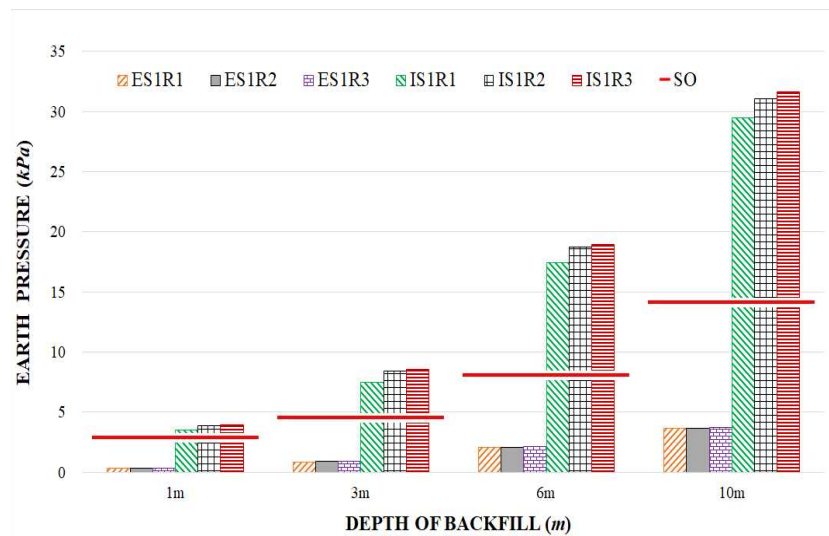
| Corrugation Profile |               | Crown          |                     |                       | Spring Line    |                     | Haunch                |
|---------------------|---------------|----------------|---------------------|-----------------------|----------------|---------------------|-----------------------|
|                     |               | Earth Pressure | Stress              | $\Delta Y$            | Earth Pressure | Stress              | $\Delta X$            |
| ITI                 | $\uparrow$ CP | $\downarrow$ P | $\sigma \downarrow$ | $\downarrow \Delta Y$ | $\uparrow$ P   | $\sigma \downarrow$ | $\downarrow \Delta X$ |
| ETI                 | $\uparrow$ CP | $\uparrow$ P   | $\sigma \downarrow$ | $\downarrow \Delta Y$ | $\uparrow$ P   | $\sigma \downarrow$ | $\downarrow \Delta X$ |

⑤ 토양(Backfill)의 영향

- 그림 3-75는 토양의 깊이에 따른 crown과 spring line에서의 토압의 결과를 비교한 것이다. 이전 장에서 ETI와 ITI 모두 특히 Crown에서 토압을 감소시켰다는 것이 증명되었다. 그러나, 토양의 깊이가 1m인 ES1R1의 경우는 a와 같이 Geofoam이 없는 모델(SO)에 비해 토압이 12.33%증가하였다. 반면에, Geofoam이 없는 모델(SO)과 Geofoam이 있는 모델(ETI, ITI)의 압력 차는 6m와 10m 모델에서 볼 수 있는 crown에서 발생하는 실제 압력보다 토양의 깊이가 깊어짐에 따라 압력이 점차적으로 증가하였다. 또한, b는 토양의 매립 깊이가 증가할수록 ETI와 ITI모델 모두 spring line에서 토압이 증가하는 것을 보여준다.
- 그림 3-76에서는 S1R2 모델의 아치 주변의 변위 비교하였다. 토양의 매립깊이가 1m인 ETI모델을 제외한 모든 경우에서 haunch에서 수평변위와 crown에서 수직변위가 감소하였다.
- 그림 3-77은 S1R2모델의 아치주변의 응력을 비교하였다. ES1R2-1m를 제외한 모든 경우에서 spring line과 crown에서 응력이 감소하였다. 또, ITI모델은 다양한 경향을 보이는 반면, ETI는 토양의 깊이가 깊어짐에 따라 아치 주변의 응력이 증가하는 것을 확인할 수 있다.
- 표 3-28은 다양한 토양의 매립깊이의 영향을 고려한 파형강판아치구조물의 거동 분석을 요약한 것이다. 결과에 따르면, ETI모델은 토양의 매립깊이가 깊어짐에 따라 압력, 변위, 응력 경감에 더 좋은 결과를 보인다. ITI모델에서도 spring line에서 비교적 큰 압력 증가를 제외하고 ETI와 비슷한 결과를 보인다.

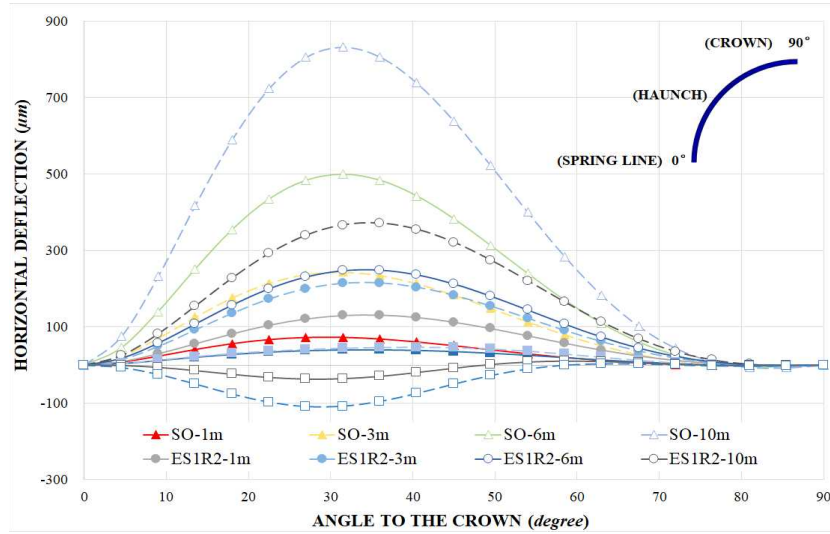


(a) Earth Pressure at the Crown

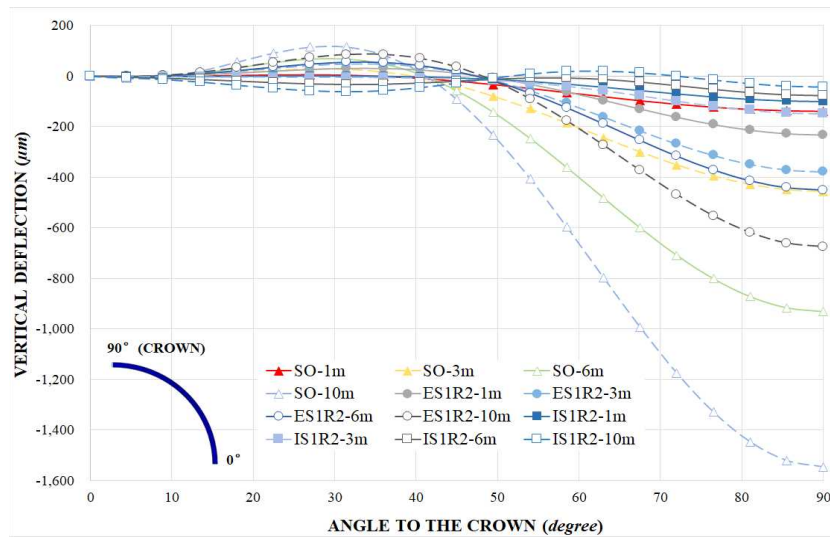


(b) Earth Pressure at the Spring Line

그림 3-75 토양의 깊이에 따른 Initial, ITI 및 ETI 토압 비교



(a) Horizontal Deflection



(b) Vertical Deflection

그림 3-76 토양의 깊이에 따른 Initial, ITI 및 ETI 변위 비교

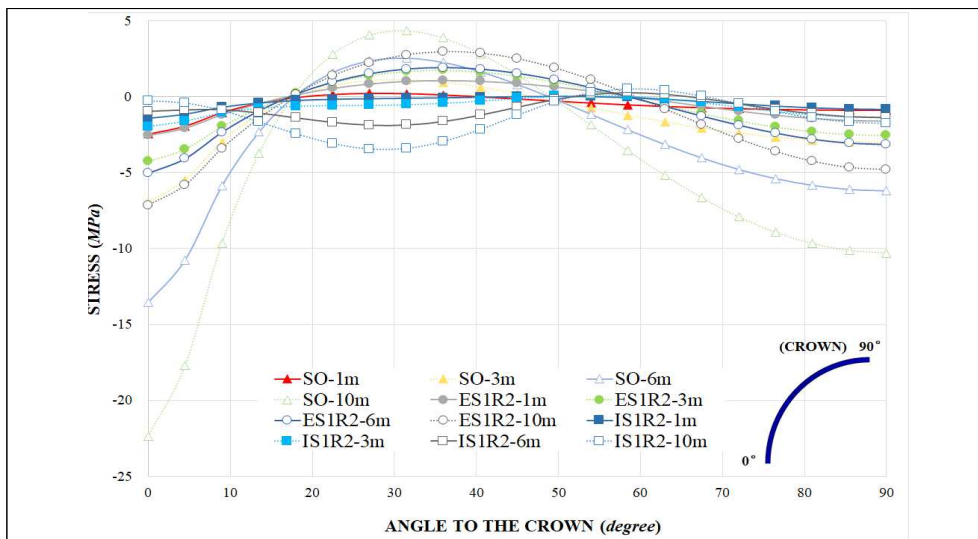


그림 3-77 토양의 깊이에 따른 Initial, ITI 및 ETI 응력 비교

표 3-28. 토양의 깊이에 따른 아치구조물의 발생 토압 경향 분석

| Backfill Depth |              | Crown          |                   |                                                                     | Spring Line    |                                                                 | Haunch                                         |
|----------------|--------------|----------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------|----------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
|                |              | Earth Pressure | Stress            | $\Delta Y$                                                          | Earth Pressure | Stress                                                          | $\Delta X$                                     |
| ITI            | $\uparrow D$ | $\uparrow P$   | Fluctuates        | $\uparrow \Delta Y$<br>(1m-3m)<br>$\downarrow \Delta Y$<br>(3m-10m) | $\uparrow P$   | $\sigma \uparrow$<br>(1m-3m)<br>$\sigma \downarrow$<br>(3m-10m) | $\uparrow \Delta X$<br>But (-) for<br>6m & 10m |
| ETI            | $\uparrow D$ | $\uparrow P$   | $\sigma \uparrow$ | $\uparrow \Delta Y$                                                 | $\uparrow P$   | $\sigma \uparrow$                                               | $\uparrow \Delta X$                            |

(사) 결론

■ 강관의 두께 및 파형강관의 제형과 더불어 EPS Geofoam의 형태와 유형 및 토양의 매립 깊이의 영향에 대한 파형강관아치구조물의 거동을 Dassault Systems에서 개발한 유한요소해석프로그램 ABAQUS CAE를 이용하여 분석 및 연구를 진행하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

- ① EPS12의 Geofoam은 ETI 및 ITI 모델의 아치 주위의 토압, 응력 및 변위의 경감을 증가시킨다. 그러나 Spring line에서 토압경감 측면에서는 EPS15의 Geofoam이 ITI모델에 더 합리적이다.
- ② Geofoam의 높이(H)는 ETI 및 ITI 모델의 아치구조물의 토압, 응력, 변위를 감소시키는데 중요한 역할을 하며, Geofoam의 폭(W)은 Spring line의 압력은 제외된다.
- ③ ETI은 ITI에 비해 spring line의 토압경감에 더 효과적이다. 그러나 ITI는 ETI에 비해 응력 및 아치의 변위 경감 측면에서 더 효과적인 결과를 제공한다.
- ④ 강관의 두께 증가는 ETI 및 ITI 모두에서 아치의 토압, 응력, 변위의 큰 감소율을 제공한다.
- ⑤ Deep 파형강관 (Deep corrugated steel) 은 표준파형강관보다 ETI 모델에서 더 큰 아치의 토압, 응력, 변위를 보인다. 그러나 표준파형강관은 ITI 모델에서 더 나은 응력 및 변위 감소율을 보인다.
- ⑥ ITI의 Spring line에서의 토압감소율을 제외하고 매립깊이가 깊은 토양은 매립깊이가 낮은 토양에 비해 아치의 토압, 응력 및 변위 감소율이 더 크게 나타난다.

## (2) 검증된 ETI 해석모델을 이용한 최적화된 설계 가이드라인 마련

(가) ETI가 적용된 콘크리트 지중아치구조물의 Soft Zone Geometry 선정

### ① Soft Zone Geometry 제안

- 모형 실증실험을 통해 검증된 ETI 기술의 Soft Zone Geometry 최적화를 위해 적용 가능성이 있는 4가지 Soft Zone에 대한 유한요소해석을 진행함.
- Soft Zone은 EPS Geofoam에 의해 형성되는 영역으로 본 내용에서 아치구조물에 적용시킨 Soft Zone의 형상은 다음 그림 3-59와 같음.
- 본 내용에 사용된 용어의 의미는 다음과 같음.
  - R= 아치의 높이(m), S= 아치구조물의 지간길이(m)
  - W= EPS Geofoam의 폭(m), H= EPS Geofoam의 높이(m)
  - H/R= EPS Geofoam 높이 대 아치구조물의 높이
  - W/S는= 구조물의 지간길이와 EPS Geofoam 폭의 비
- Ex)H/R=0.2는 EPS Geofoam 높이가 아치 높이의 20%임.
- 해석에서 EPS Geofoam의 W와 H는 각각 10-20% ,10-100% 범위로 변화됨.

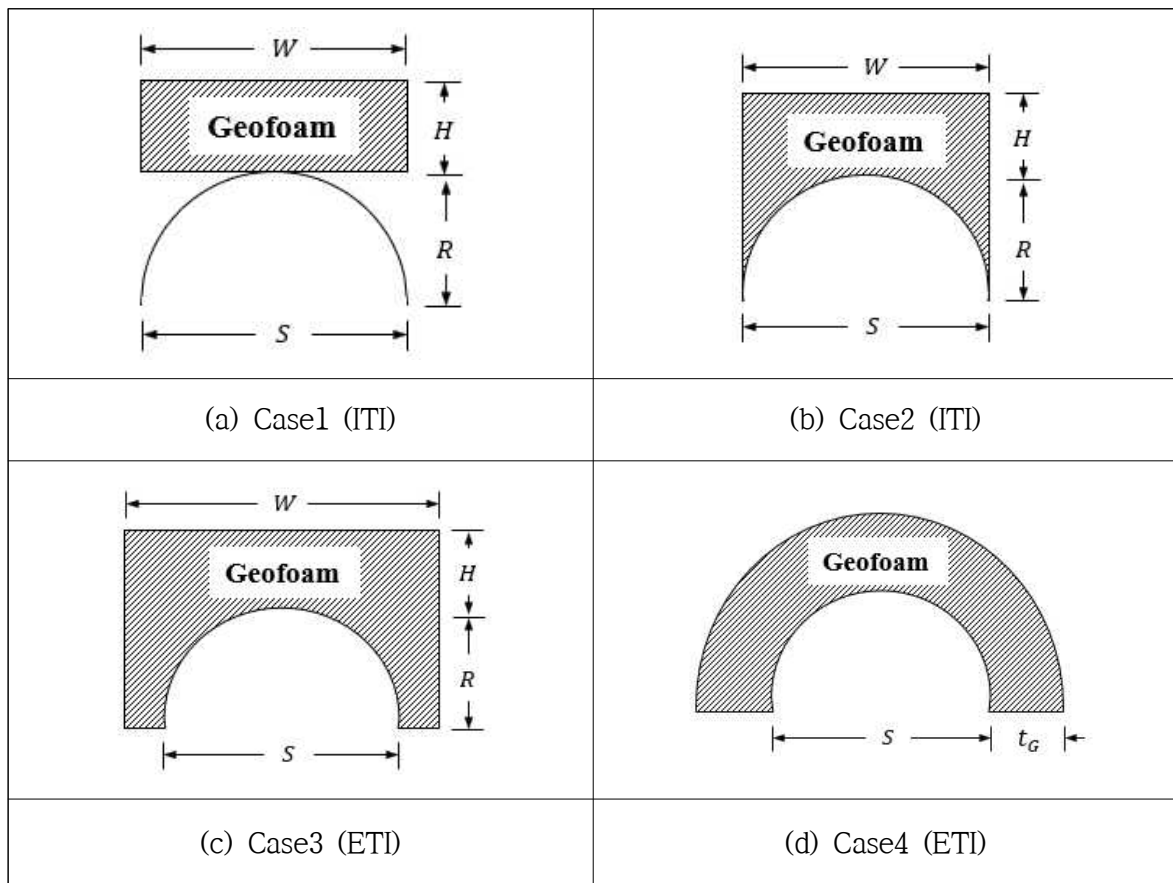


그림 3-78. Soft Zone 제안 형상

표 3-29. Geofoam 적용 형태에 따른 모델 구분

| CASE   | Upper reinforcement | Side reinforcement | Analysis designation | Reinforcement ratio                              |
|--------|---------------------|--------------------|----------------------|--------------------------------------------------|
| CASE 1 | O                   | ×                  | C1                   | $0.2 \leq \frac{H}{R} \leq 2.0$                  |
|        |                     |                    |                      | -                                                |
| CASE 2 | O                   | △                  | C2                   | $0.2 \leq \frac{H}{R} \leq 2.0$                  |
|        |                     |                    |                      | $\frac{W}{S} = 1.0$                              |
| CASE 3 | O                   | O                  | C3                   | $0.2 \leq \frac{H}{R} \leq 2.0$                  |
|        |                     |                    |                      | $1.1 \leq \frac{W}{S} \leq 2.0$                  |
| CASE 4 | O                   | O                  | C4                   | $\frac{H}{R} = \frac{W}{S} = t_G = 0.2 \sim 2.0$ |

## ② 유한요소해석 모델링 방법

- EPS Geofoam 적용 형상에 따른 지중아치구조물의 거동 특성을 분석하기 위해 범용구조해석 프로그램 ABAQUS를 사용함. 또한, 3차원 해석이 가능하나 모델링 단순화를 고려해 평면변형조건에 의한 2차원 해석을 수행함.
- 모델링 및 해석기법은 기존에 수행된 Kang et al. 방법론을 재차 검증하여 적용하였으며 모델링 내용은 그림 3-79과 같음.
  - Program= ABAQUS(2016)
  - Elements= Beam(B21), Shell(CPS4R), Shell-Plane Strain
  - Contact Option= No Sliding, No Separation
  - Loading Condition= Gravity
- Soft Zone을 적용하기 위해 실제 건설된 아치구조물을 통계하여 2차선 도로에 해당하는 지간길이 10m, 높이 5m, 두께 0.4m의 아치구조물을 해석의 대상으로 하였음.

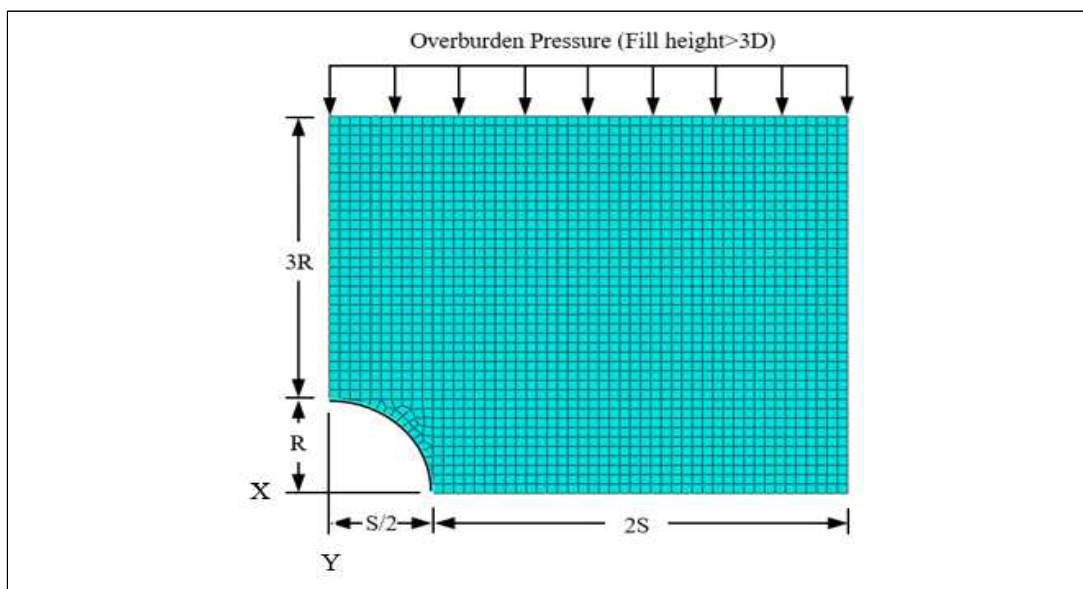


그림 3-79. 유한요소해석 모델링

- Soft Zone에 사용되는 EPS Geofoam의 규격과 재료 특성값은 ASTM International에서 제공하는 표준규격인 ASTM D6817인 Standard Specification for Rigid Cellular PolyStyrene Geofoam을 사용하였음.
- EPS Geofoam은 밀도에 따라 구분되는 탄성모델로 허용압축강도를 고려하여 표 3-30에 나타난 EPS 15의 값이 적용됨.
- 콘크리트는 탄성계수 28GPa의 보통콘크리트, 지반의 재료 특성값은 단위중량  $1922.09 \text{ kg/m}^3$ 의 상대밀도 90%인 SW90을 적용함.

표 3-30. EPS 15의 재료특성

| Density<br>( $\text{kg/m}^3$ ) | Elastic<br>Modulus<br>(E, MPa) | Poisson's<br>Ratio | Compressive<br>Resistance at 5%<br>Strain (kPa) | Compressive<br>Resistance at 10%<br>Strain (kPa) |
|--------------------------------|--------------------------------|--------------------|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 14.4                           | 2.5                            | 0.12               | 55                                              | 70                                               |

표 3-31. 모델의 경계조건

| Type |        | X-Axial<br>(Lateral) | Y-Axial<br>(Vertical) | Z-Axial<br>Rotation |
|------|--------|----------------------|-----------------------|---------------------|
| Soil | Side   | Restrain             | Free                  | Free                |
|      | Bottom | Restrain             | Restrain              | Free                |
| Arch | Upper  | Restrain             | Free                  | Restrain            |
|      | Lower  | Restrain             | Restrain              | Restrain            |

### ③ 유한요소해석 결과

- 해석 모델별 발생 토압, 축응력, 최대변위 및 반력 비교를 통해 해석 단면의 안정성을 평가하고 최적 단면 형태를 결정함.
- 그림 3-80 Soft Zone을 각 단면별로 적용시켰을 때 발생하는 토압을 Soft Zone적용 전과 비교한 결과임.
- Degree 0 은 아치 크라운, Degree 90은 아치 하단을 의미하며 Case2의 경우 아치크라운 부터 Soft Zone의 압축 변위가 충분히 일어나는 아치 중간구간까지는 토압이 감소되나 Soft Zone이 적어지는 아치하단부 85.5° 에서 Case1과 같이 토압이 Soft Zone 적용 전보다 증가하는 현상이 발생함.
- Case 3와 Case 4는 아치 전체에서 토압이 감소되며 Soft Zone이 적용되는 면적은 동일하여 전체적으로 비슷한 토압 경향을 보이나 박스형과 아치형태로 구분되어 아치의 중간부분에서 Case3이 토압감소율이 높음을 확인함.

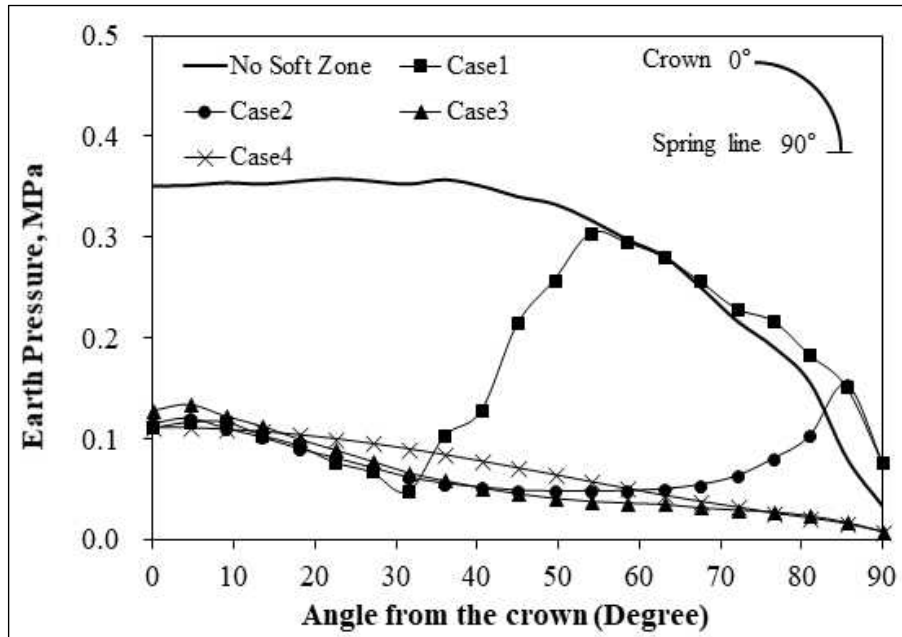


그림 3-80 Case별 발생 토압

- 그림 3-81는 구조물이 지반과 접촉하는 면에서 발생하는 응력분포를 도시화 한 것으로 Soft Zone 적용 시 Case 1 -Case 4 모두 전체적으로 응력이 감소되었으나 Case 1에서 아치 상부로부터 40-70° 에서 압축응력이 아닌 인장응력 발생 구간으로 변화됨.

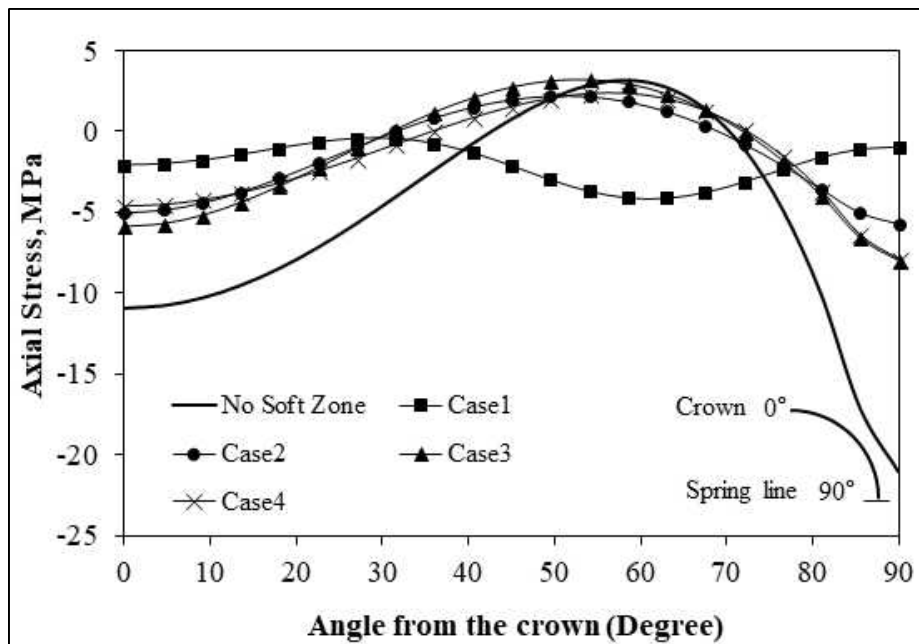


그림 3-81 Case별 축응력

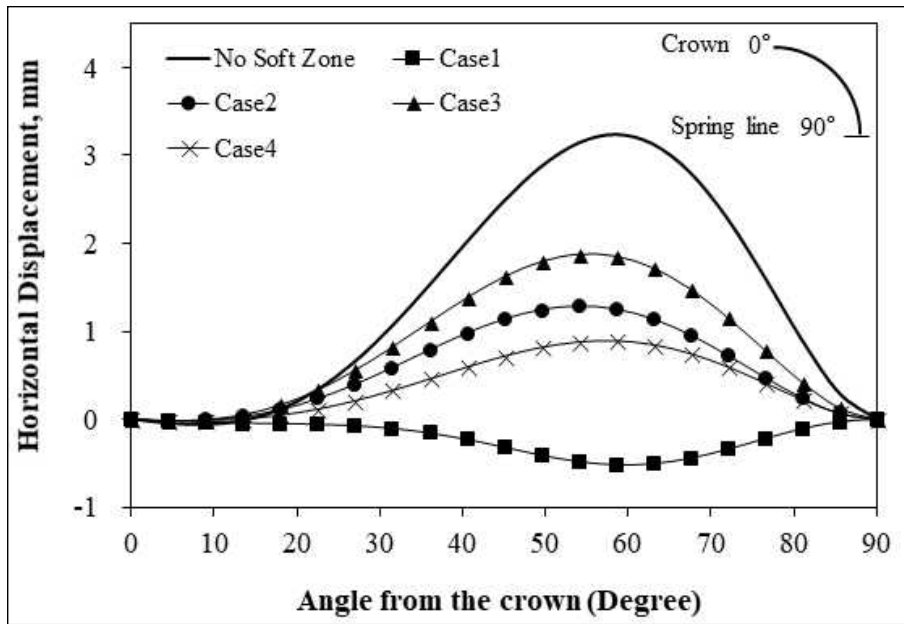


그림 3-82 Case별 횡방향 변위

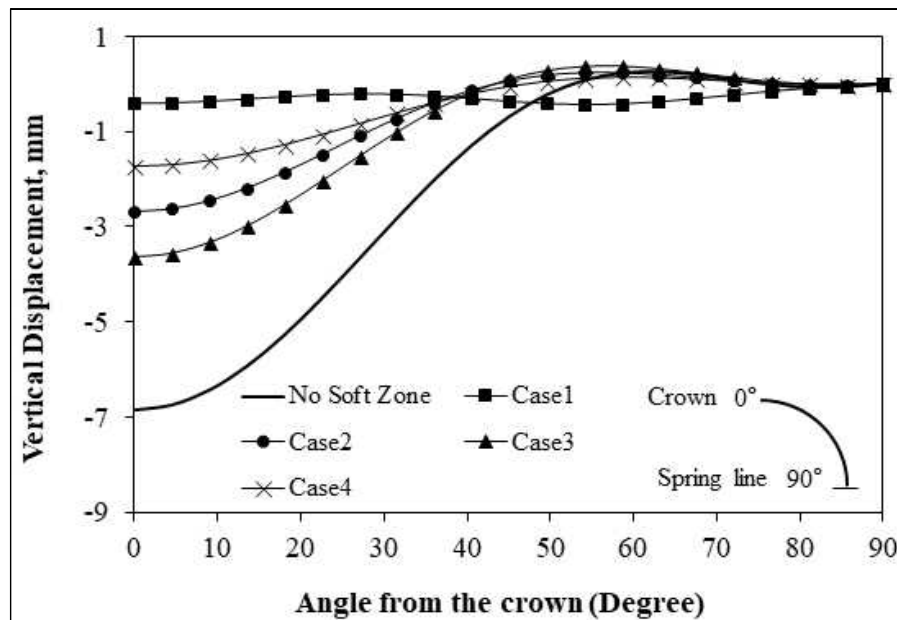


그림 3-83 Case별 종방향 변위

- 그림 3-82과 3-83의 변위 결과에서 Case1을 적용한 아치구조물 측면부가 횡토압 증가에 의해 토양을 미는 방향이 아닌 안쪽으로 변위가 발생하는 것을 확인할 수 있음.

표 3-32. Case별 반력(Degree=90)(unit: kN)

| Case      | 1       | 2      | 3      | 4      |
|-----------|---------|--------|--------|--------|
| Direction |         |        |        |        |
| X-Axial   | 509.49  | 277.25 | 119.24 | 189.28 |
| Y-Axial   | 1,241.1 | 541.09 | 541.22 | 581.27 |

- Soft Zone이 적용되지 않은 경우에 지점에서 발생하는 반력은  $F_x = 748.47kN$  ,  $F_y = 2,305.69kN$  임. 표 3-22는 각 Case 1-4에서 발생하는 반력을 나타내고 있으며, Soft Zone의 영역이 증가하는 Case3의 횡토팅 (X축방향)은  $F_x = 119.24kN$ 으로 84% 감소된 값을 보여줌.

#### ④ Soft Zone Geometry 비교 및 최종 제안

- Soft Zone을 지중아치구조물에 적용시킬 경우 구조물 측면부 Soft Zone의 유무와 박스형 또는 아치형 등의 단면형상이 구조물의 안전성 평가에 중요한 인자임을 확인함.
- 라이즈비 0.5의 아치구조물에서 ITI공법 적용시 발생하는 약 32% 하단 톅압 증가 현상을 해결하고 78%이상의 하중저감효과를 확보하기 위해서는 구조물의 측면부에 Soft Zone을 위치시키는 ETI 공법인 Case 3이 최적 Soft Zone Geometry임.

표 3-33. Soft Zone Geometry에 따른 톅압감소율

| Degree | C1    | C2    | C3  | C4  |
|--------|-------|-------|-----|-----|
| 0      | 68%   | 67%   | 63% | 68% |
| 4.5    | 67%   | 66%   | 62% | 68% |
| 9      | 67%   | 69%   | 65% | 69% |
| 13.5   | 71%   | 71%   | 68% | 69% |
| 18     | 74%   | 75%   | 72% | 70% |
| 22.5   | 79%   | 77%   | 75% | 72% |
| 27     | 81%   | 80%   | 78% | 73% |
| 31.5   | 86%   | 83%   | 81% | 74% |
| 36     | 71%   | 85%   | 84% | 76% |
| 40.5   | 63%   | 85%   | 85% | 77% |
| 45     | 37%   | 86%   | 87% | 79% |
| 49.5   | 23%   | 86%   | 88% | 80% |
| 54     | 4%    | 85%   | 88% | 82% |
| 58.5   | 1%    | 84%   | 88% | 83% |
| 63     | 0%    | 82%   | 87% | 84% |
| 67.5   | -3%   | 79%   | 87% | 85% |
| 72     | -6%   | 71%   | 86% | 85% |
| 76.5   | -14%  | 58%   | 85% | 86% |
| 81     | -18%  | 34%   | 85% | 85% |
| 85.5   | -88%  | -90%  | 78% | 84% |
| 90     | -132% | -132% | 74% | 83% |

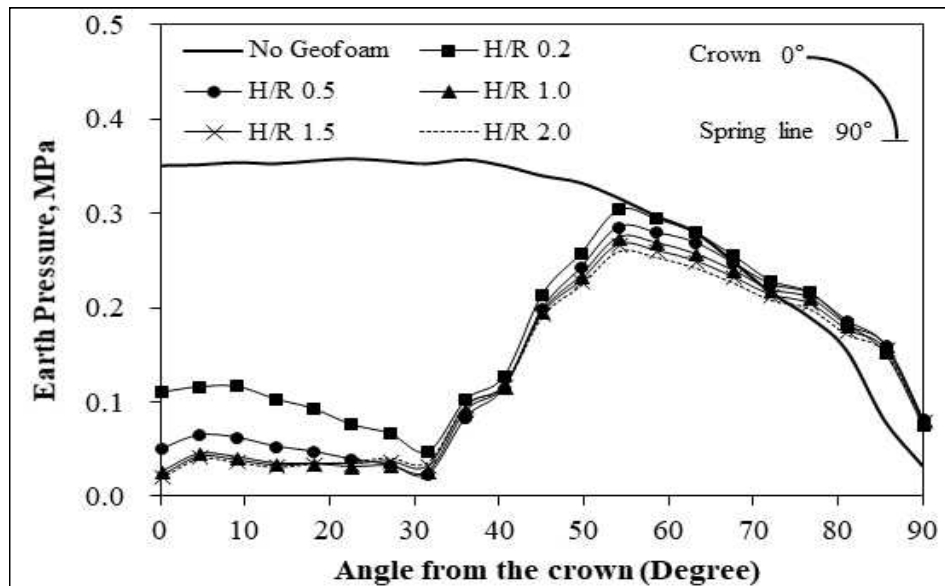
(나) Soft Zone 두께 제안

① Soft Zone 비율 선정을 위한 해석 조건

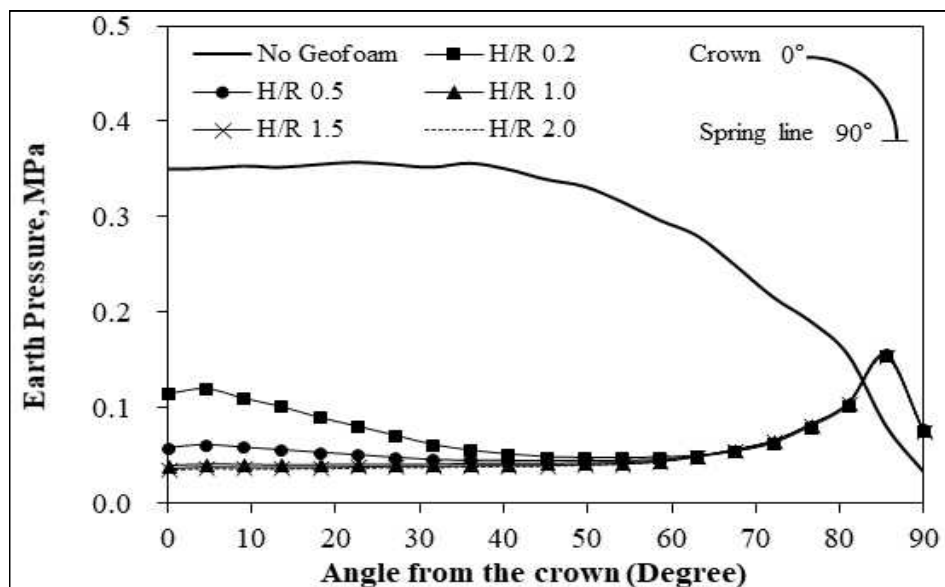
- 앞서 동일 조건에서의 Soft Zone Geometry를 선정하였으며, 최대 토압감소효과가 나타나는 Soft Zone 비율을 선정하기 위해서 4가지 Case에 EPS Geofoam 적용 비율을 증가시켜 유한요소해석을 진행하였음. 모델링 방법은 위와 동일함.
- 본 내용에 사용된 용어의 의미는 (가)의 내용과 같으며  $W/S = 1.0$ 는 아치의 지간길이와 EPS Geofoam의 폭이 같은 길이로 보강되었음을 나타내며  $W/S = 1.1$ 은 EPS Geofoam의 폭이 아치 지간길이의 110%에 해당함.
- 해석에서 EPS Geofoam의 W와 H는 각각 10-20% ,10-100% 범위로 변화됨.

② Soft Zone 높이 비율 변화에 따른 해석 결과

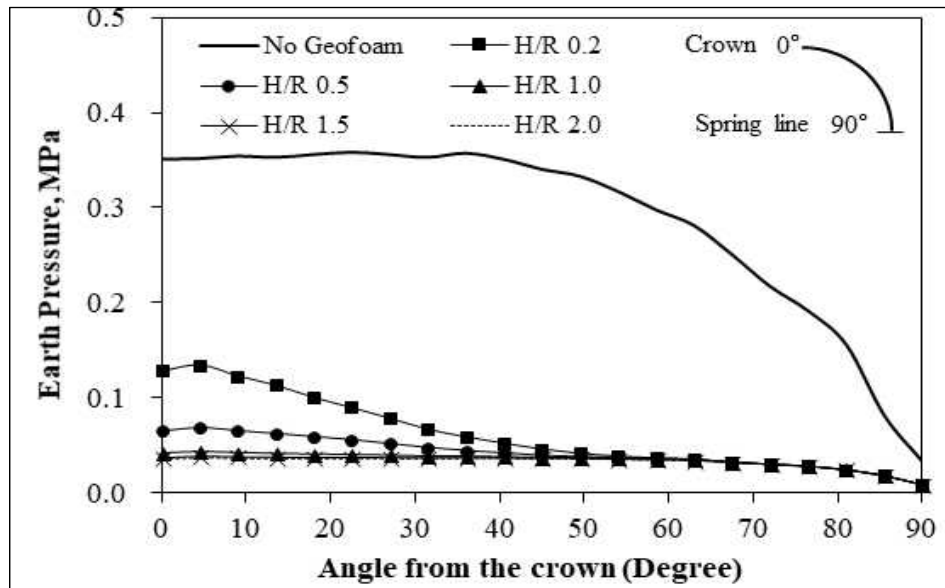
- 그림 3-84는 Case 1-4의 Soft Zone을 적용시킨 후 EPS Geofoam 높이(H)를 증가시켰을 때 아치구조물에서 발생하는 토압발생량을 나타낸 결과임.



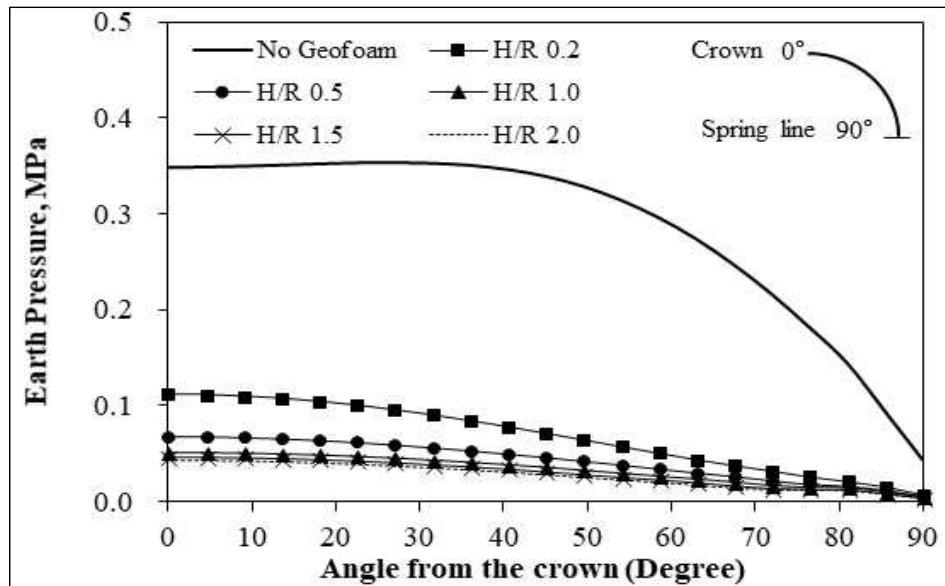
(a) Case1 ( $W/S = 1.0$ )



(b) Case2 ( $W/S = 1.0$ )



(c) Case3 ( $W/S = 1.1$ )



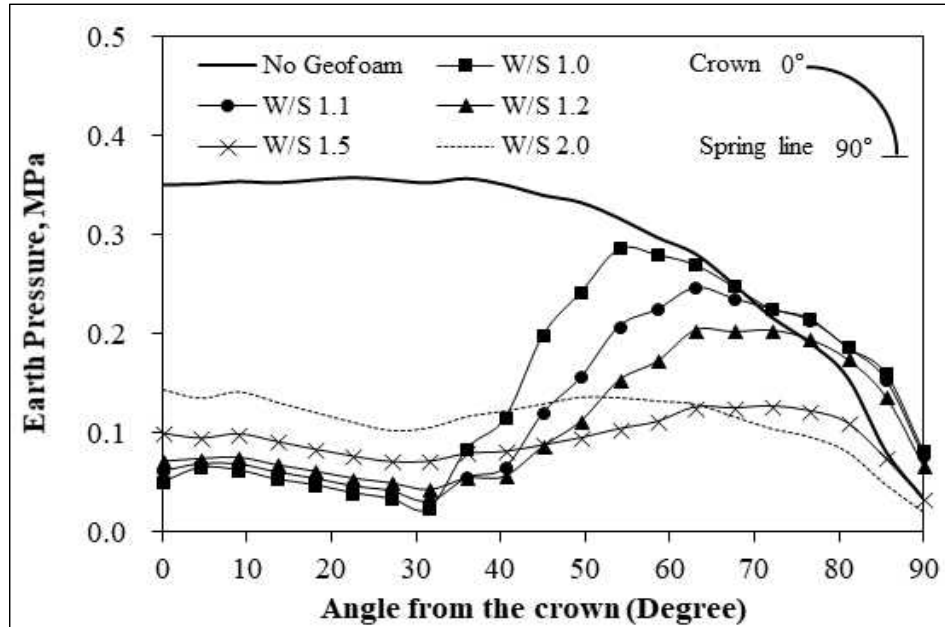
(d) Case4 ( $W/S = H/R = t_G$ )

그림 3-84 종방향 보강비율 증가시의 모델별 발생 토압

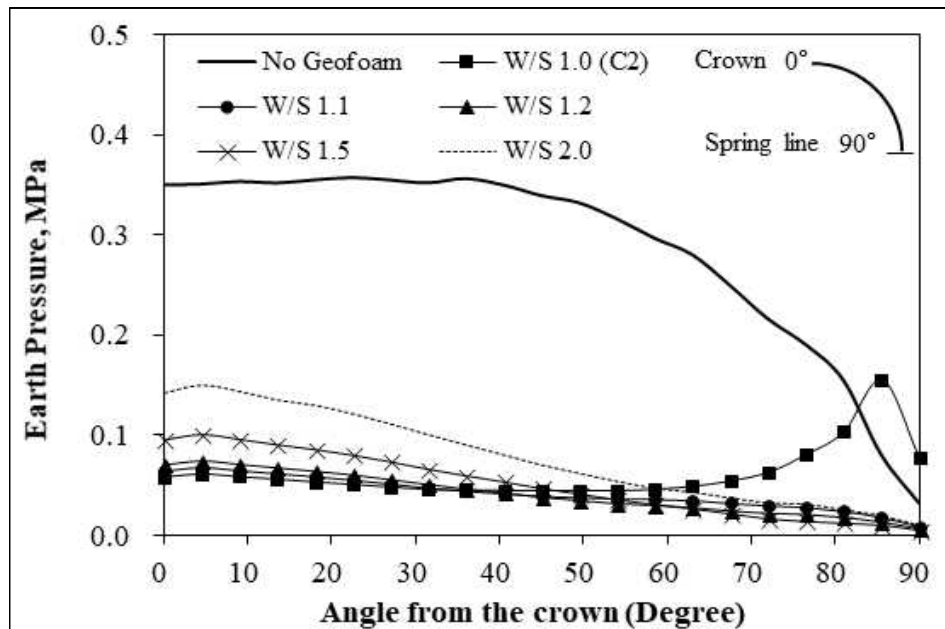
- 그림 3-84에서 결과를 살펴보면 Case1-4 모두 아치리브 상부에서 EPS Geofoam 높이가 증가할수록 토압이 더욱 감소됨.
- 아치구조물의 높이와 EPS Geofoam의 높이의 비인  $H/R$ 이 0.5일 때 까지는 그 차이가 크나 그 이후의 Geofoam 높이 증가는 토압에 큰 영향을 주지 않음.
- (b) 및 (c)에서 Case2와 Case3은 아치리브의 상부를 제외하고는 각각  $60^\circ$ ,  $50^\circ$  이후의 하단으로 갈수록 Geofoam 높이 증가에 따른 토압 감소 효과에 차이가 없음.
- Case1과 Case2에서 발생하는 하단의 토압 증가 현상은 EPS Geofoam 높이 증가에 의해 해결되지 않음.

③ Soft Zone 폭 비율변화에 따른 해석 결과

- 그림 3-85 (a)와 (b)는 Case1와 Case3의 경우에 EPS Geofoam 폭을 증가시켰을 때 발생하는 토압을 나타냄.



(a) C1 ( $H/R = 0.5$ )



(b) C2, C3 ( $H/R = 0.5$ )

그림 3-85 횡방향 보강비율 증가시의 모델별 발생 토압

- Case4의 경우 EPS Geofoam이 아치 형태로 위치하며 이 때 상부와 측면의 EPS Geofoam 비율이 동일한 두께의 개념이므로 결과를 도시하지 않음.
- (a)를 살펴보면 EPS Geofoam 폭 증가는 EPS Geofoam 높이를 증가시킬 때 보다 토압에 더 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있음.
- EPS Geofoam의 폭을 증가시키는 것은 아치상단과 아치의 어깨부분에서 토압감소효과

를 저감시키지만 아치리브 중간 41° 부터 하단까지의 토압 감소에 효과적이기 때문에 Case1에서 발생하는 아치하단부의 토압 증가 현상에 큰 영향을 줌.

- Case1의 경우  $W/S = 2.0$ 의 비율을 적용하면 상부토압의 영향 때문에 아치구조물 하단에서 보강 전 보다 토압이 커지는 현상이 해결됨.
- (b)에서 Case3는 Case1보다 적은  $W/S = 1.1$ 의 측면 EPS Geofoam 길이 증가를 통해 토압을 안정적으로 감소시킴.

④ Soft Zone 비율변화에 따른 반력 비교

- 표 3-34~3-37에 EPS Geofoam 폭과 길이를 증가시킴에 따라 발생하는 반력값임.

표 3-34. Geofoam 높이 증가에 따른  $F_x$  반력 ( $W/S = 1.0 \sim 1.1$ , Unit:  $kN$ )

| Increased H/R | C1     | C2     | C3     | C4     |
|---------------|--------|--------|--------|--------|
| 0.2           | 509.45 | 541.10 | 119.24 | 581.27 |
| 0.5           | 515.67 | 409.32 | 113.90 | 263.24 |
| 1.0           | 547.79 | 354.88 | 119.45 | 219.75 |
| 1.5           | 570.43 | 338.22 | 125.50 | 205.08 |
| 2.0           | 578.36 | 322.13 | 128.09 | 196.63 |

표 3-35. Geofoam 높이 증가에 따른  $F_y$  반력 ( $W/S = 1.0 \sim 1.1$ , Unit:  $kN$ )

| Increased H/R | C1        | C2     | C3     | C4     |
|---------------|-----------|--------|--------|--------|
| 0.2           | 1,2411.70 | 277.25 | 541.22 | 189.28 |
| 0.5           | 996.18    | 278.54 | 387.39 | 719.88 |
| 1.0           | 879.79    | 289.48 | 318.90 | 520.85 |
| 1.5           | 835.33    | 294.68 | 298.48 | 425.64 |
| 2.0           | 802.83    | 295.98 | 283.46 | 366.43 |

표 3-36. Geofoam 폭 증가에 따른  $F_x$  반력 ( $H/R = 0.5$ , Unit:  $kN$ )

| Increased W/R | C1     | C2      | C3     | C4 |
|---------------|--------|---------|--------|----|
| 1.0           | 574.43 | *277.38 | 277.38 | -  |
| 1.1           | 512.21 | -       | 113.40 | -  |
| 1.2           | 438.48 | -       | 85.46  | -  |
| 1.5           | 253.80 | -       | 75.13  | -  |
| 2.0           | 214.20 | -       | 130.03 | -  |

\*  $W/S 1.0$ 의 경우  $C2=C3$

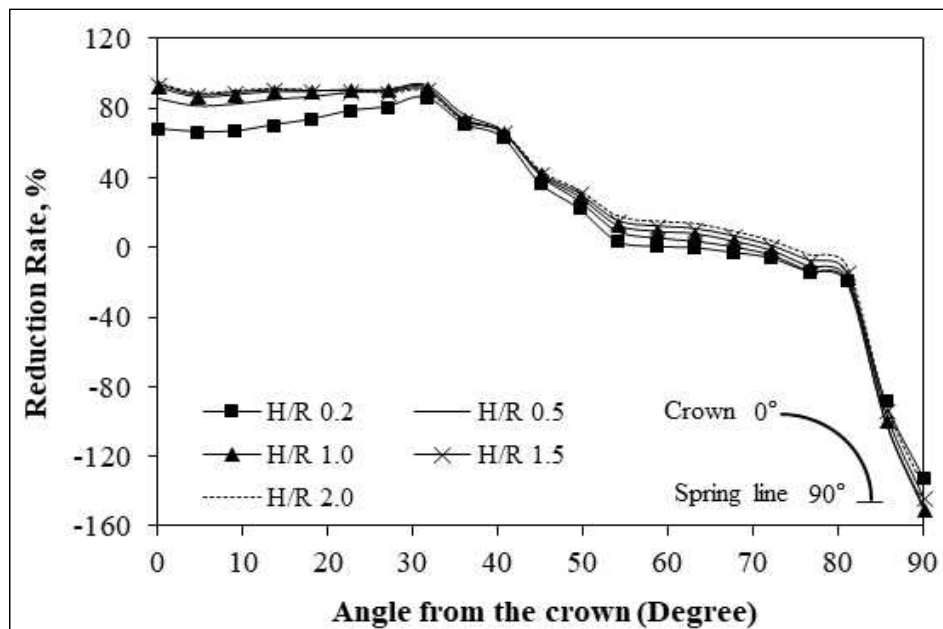
표 3-37. Geofoam 폭 증가에 따른  $F_y$  반력 ( $H/R = 0.5$ , Unit:  $kN$ )

| Increased H/R | C1       | C2      | C3     | C4 |
|---------------|----------|---------|--------|----|
| 1.0           | 1,131.18 | *335.45 | 335.45 | -  |
| 1.1           | 922.95   | -       | 313.54 | -  |
| 1.2           | 791.11   | -       | 331.68 | -  |
| 1.5           | 734.24   | -       | 426.97 | -  |
| 2.0           | 968.44   | -       | 637.76 | -  |

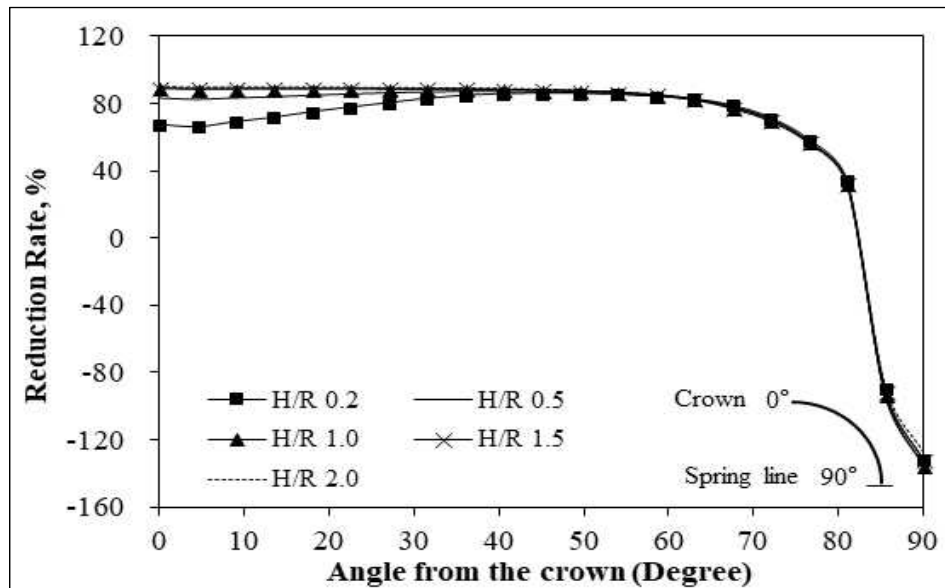
\* W/S 1.0의 경우 C2=C3

④ Soft Zone 적용 비율 비교 및 최종 제안

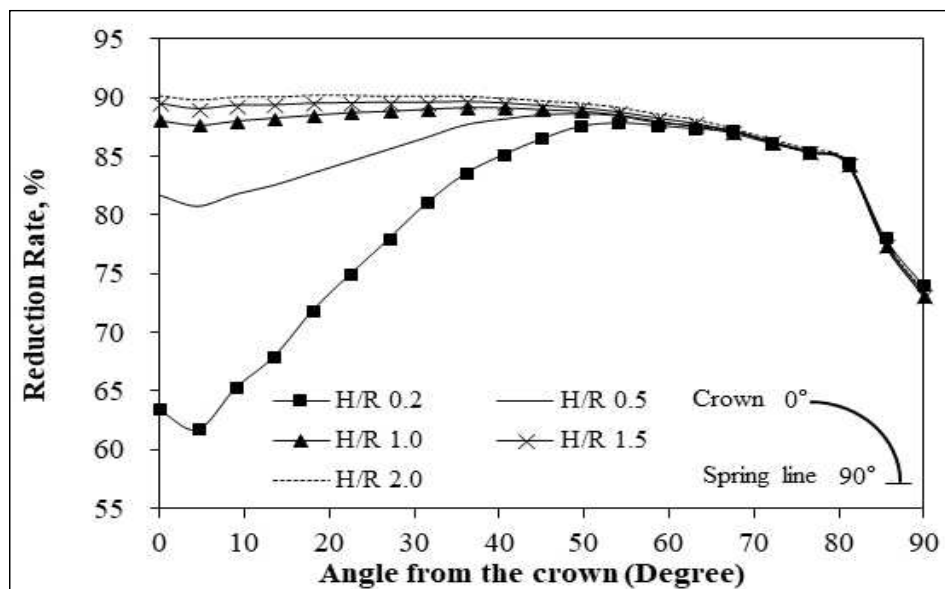
- Soft Zone 적용되는 높이 비율을 증가시킬 경우 아치구조물의 상부, 폭 비율을 증가시킬 경우 아치구조물의 측면 및 하단에 토압감소효과를 줌.
- Soft Zone을 ITI 공법인 Case 1과 Case2로 적용할 경우 Soft Zone 높이 비율 증가로는 하단 토압 증가 현상을 해결할 수 없으며 폭 비율 증가시 아치구조물의 지간길이 2배 만큼 비율을 높여야 아치 구조물 전체에서 평균 50%의 토압 감소율을 보임.
- ETI 공법인 Case3은 상부에서 최소의 Geofoam 사용시 65%이상 토압감소효과를 보이며 EPS Geofoam 높이 증가로 H/R의 비율이 1.0이 될 때까지 토압감소효과를 최대 25% 증가시킬 수 있음. Case4에서는 아치리브 전체에서 약 15%-8% 정도 증가시킬 수 있음.
- 또한 Case3은 폭 비율을 W/S 1.1~W1.2일 때 평균 80%의 횡토압 감소효과를보임.



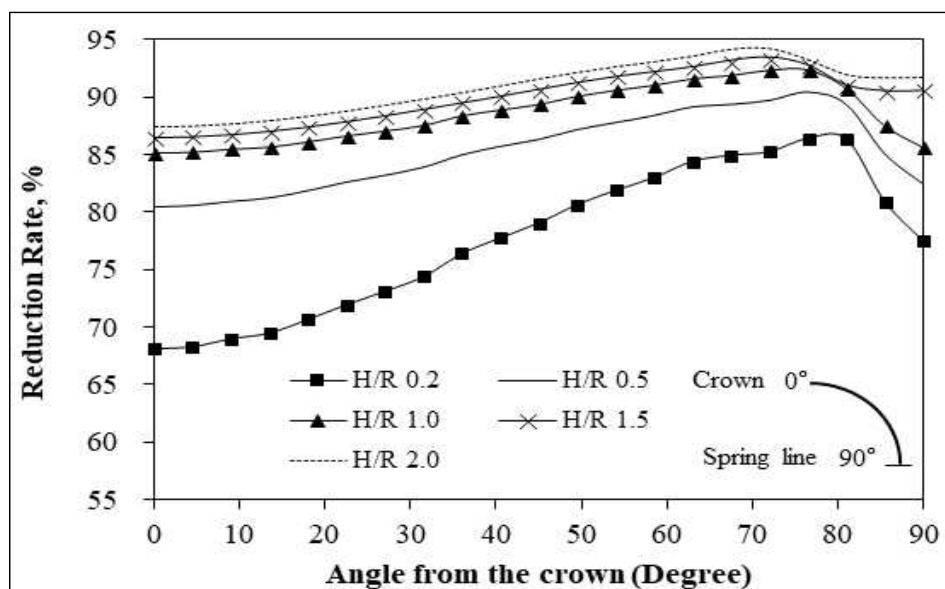
(a) Case1 ( $W/S = 1.1$ )



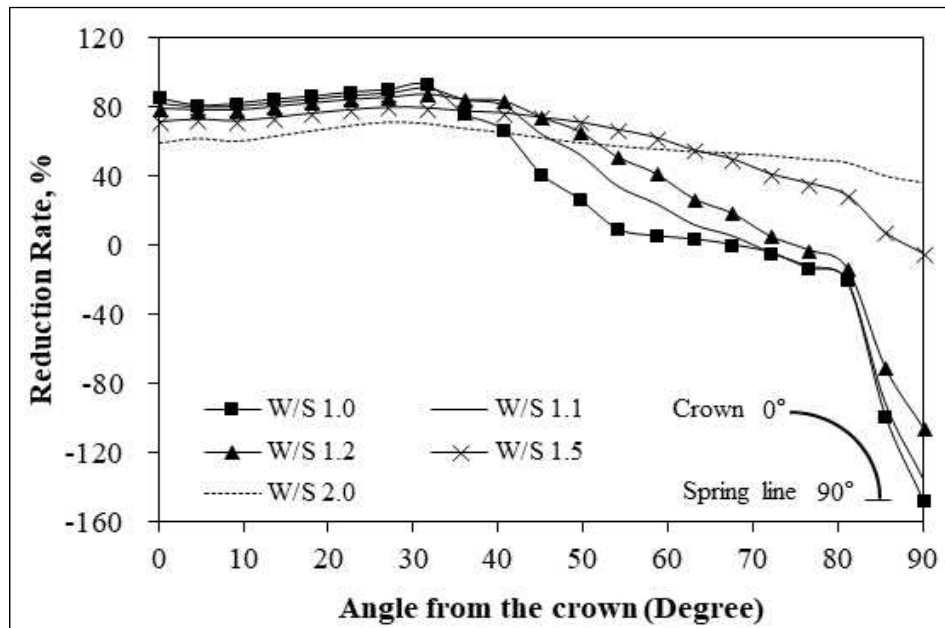
(b) Case2 ( $W/S = 1.0$ )



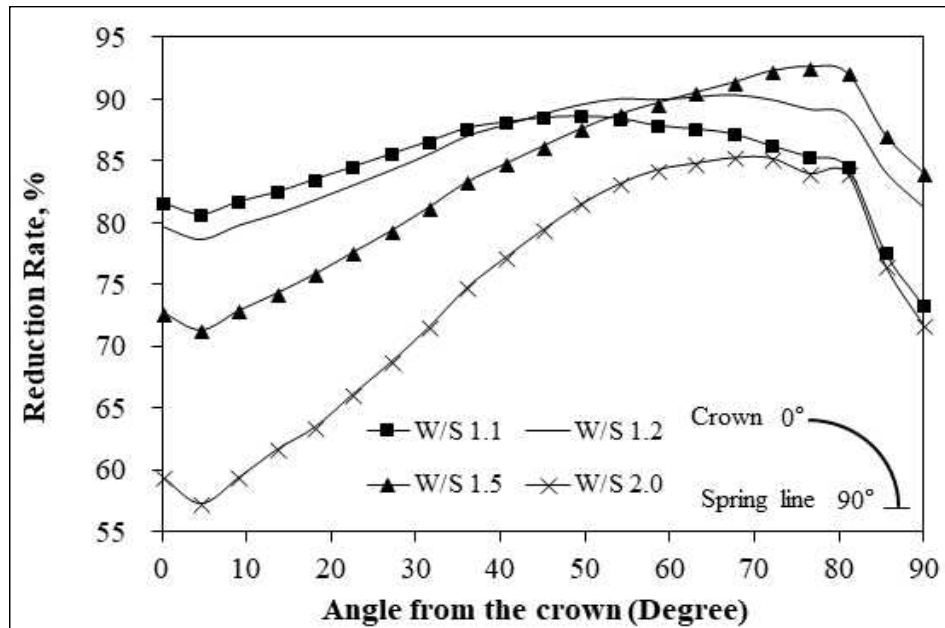
(c) Case3 ( $W/S = 1.1$ )



(d) Case4 ( $W/S = H/R = t_G$ )



(a) C1 ( $H/R = 0.5$ )



(b) C3 ( $H/R = 0.5$ )

그림 3-87 Geofoam 폭 증가시의 토압 감소율

(다) 최적 Soft Zone Geometry와 비율 적용 시 라이즈비 변화에 따른 토압감소율

① Soft Zone 비율 선정을 위한 해석 조건

- 일반적으로 아치형상을 갖는 구조물은 아치리브의 형상과 라이즈비에 따라 경제성 및 강성에 영향을 받음. 아치 교량의 경우 보통 라이즈비 0.1~0.2가 사용되며 지하철도 및 터널은 0.7~0.8로 서울 지하철의 경우 폭 3.6m, 높이 4.96m인 라이즈비 0.73이 적용됨.
- 아치구조물의 라이즈비(R/S)를 0.25, 0.5, 0.75로 변화시켜 Case 3의 Soft Zone을 적용하였을 때 발생하는 토압을 정리하였음.
- 본 해석에 사용된 토압감소율은 최적 Soft Zone Geometry와 비율은 (가),(나)의 최종결과를 적용하여 산출되었음.
- 해석에서 EPS Geofom의 W와 H는 각각 10~20% ,10~100% 범위로 변화됨.

② Soft Zone 높이 비율 변화에 따른 해석 결과

- 표 3-38~3-40은 라이즈비 0.2, 0.5, 0.75를 갖는 아치구조물에 ETI를 적용하였을 때 발생하는 토압 감소율 결과로 최적 EPS Geofom 폭 범위인 W/S 1.1 와 1.2와 Geofom 높이 비율인 H/R 0.1~1.0를 적용했을 때의 토압감소율을 나타냄.

표 3-38 R/S=0.25의 토압감소율, Unit: %

| H/R | W/S= 1.1 |       |         | W/S= 1.2 |       |         |
|-----|----------|-------|---------|----------|-------|---------|
|     | Max.     | Mini. | Average | Max.     | Mini. | Average |
| 0.1 | 86       | 7     | 60      | 86       | 1     | 58      |
| 0.2 | 86       | 37    | 68      | 86       | 31    | 66      |
| 0.3 | 86       | 51    | 72      | 86       | 46    | 70      |
| 0.4 | 86       | 59    | 75      | 86       | 56    | 74      |
| 0.5 | 86       | 65    | 77      | 86       | 62    | 76      |
| 0.6 | 86       | 69    | 79      | 86       | 66    | 78      |
| 0.7 | 86       | 72    | 80      | 86       | 70    | 79      |
| 0.8 | 86       | 75    | 81      | 87       | 72    | 80      |
| 0.9 | 87       | 76    | 82      | 87       | 74    | 81      |
| 1.0 | 87       | 78    | 83      | 87       | 76    | 82      |

표 3-39. R/S=0.5의 토압감소율, Unit: %

| H/R | W/S = 1.1 |       |         | W/S = 1.2 |       |         |
|-----|-----------|-------|---------|-----------|-------|---------|
|     | Max.      | Mini. | Average | Max.      | Mini. | Average |
| 0.1 | 88        | 36    | 75      | 91        | 29    | 74      |
| 0.2 | 88        | 59    | 80      | 91        | 55    | 80      |
| 0.3 | 89        | 70    | 83      | 91        | 66    | 83      |
| 0.4 | 89        | 76    | 85      | 91        | 73    | 85      |
| 0.5 | 89        | 79    | 86      | 91        | 77    | 87      |
| 0.6 | 89        | 82    | 87      | 91        | 80    | 87      |
| 0.7 | 89        | 83    | 87      | 91        | 82    | 88      |
| 0.8 | 89        | 85    | 88      | 91        | 83    | 89      |
| 0.9 | 89        | 86    | 88      | 91        | 84    | 89      |
| 1.0 | 89        | 87    | 88      | 92        | 86    | 89      |

표 3-40. R/S=0.75의 토압감소율, Unit: %

| H/R | W/S = 1.1 |       |         | W/S = 1.2 |       |         |
|-----|-----------|-------|---------|-----------|-------|---------|
|     | Max.      | Mini. | Average | Max.      | Mini. | Average |
| 0.1 | 88        | 44    | 78      | 90        | 41    | 79      |
| 0.2 | 89        | 66    | 83      | 91        | 63    | 84      |
| 0.3 | 89        | 74    | 85      | 91        | 72    | 86      |
| 0.4 | 89        | 79    | 86      | 91        | 77    | 87      |
| 0.5 | 90        | 82    | 87      | 91        | 80    | 88      |
| 0.6 | 90        | 84    | 88      | 91        | 83    | 89      |
| 0.7 | 90        | 85    | 88      | 91        | 84    | 89      |
| 0.8 | 90        | 86    | 88      | 92        | 85    | 90      |
| 0.9 | 90        | 86    | 89      | 92        | 86    | 90      |
| 1.0 | 90        | 86    | 89      | 92        | 87    | 90      |

- Soft Zone을 적용하였을 때 아치하단과 크라운에서 최대, 최소 토압감소율이 발생함.
- 표 3-27의 라이즈비 0.25의 경우  $W/S=1.1$  적용 시 최대 토압감소율은 86-87%로 일정한 반면 최소토압감소율은 Soft Zone의 H/R 비율 증가에 따라 7%에서 78%까지 크게 변화됨.
- 표3-39과 표3-40을 살펴보면 라이즈비 0.5와 0.7의 경우에도  $W/S=1.1$ 로 Soft Zone을 적용하면 최대 토압감소율이 88%이상 나타나며 H/R 비율 변화가 아치 크라운에서 발생하는 최소 토압감소율에 큰 영향을 주는 것을 확인함.
- 이때 라이즈비가 커질수록 동일 H/R 비율에서 최소토압감소율이 증가됨. 0.75의 라이즈비에서는 H/R 0.2에서 평균 토압 감소율이 80-83%이상 되지만 라이즈비 0.25에서는 H/R 0.7이상을 적용해야 80%이상의 평균 토압감소율이 발생함.
- 따라서 아치의 라이즈비가 작아지면 Soft Zone의 비율을 증가시켜야 높은 라이즈비에서 발생하는 토압 감소율과 유사해짐.

### ③ 구조물의 라이즈비 변화에 따른 ETI 최대 토압 감소율 제시

- ETI공법을 적용한 아치구조물의 라이즈비가 높아질수록 적은 양으로도 토압감소효과가 증가하며 낮은 라이즈비의 경우 높은 라이즈비를 갖는 아치구조물보다 Geofoam 높이 비율을 증가시키는 것이 좋음.
- 0.25-0.75의 라이즈비를 갖는 아치구조물에 ETI 기법을 적용시키면 최대 80-90%까지 토압이 경감되는 것을 확인하였음.
- 따라서, 아치형태를 적용시키는 구조물의 목적에 따라 라이즈비별 최대 토압 감소율을 이용하여 Geofoam 사용량을 결정해야 함.

(라) ETI 적용 시 아치 크기 변화에 따른 토압감소율

① 아치 크기별 해석 조건

- 아치구조물의 라이즈비는 0.5로 고정하였으며 도로의 폭을 고려하여 1~3차선에 해당하는 5m, 10m, 15m로 변화를 주어 아치구조물의 지간길이(S)를 결정하였음.
- 아치구조물의 크기변화에 맞추어 하중조건이 동일하도록 매립깊이 또한 증가시켰음.
- Soft Zone Geometry는 ETI인 Case3로 적용하였으며 EPS Geofoam의 적용 비율은 사용량에 비례하였을 때 가장 큰 토압감소효과가 나타났던 H/R 0.2와 0.5 그리고 W/S 1.1를 비교하였음.

② 아치 크기에 따른 토압감소효과

- 그림 3-88에서 같은 비율의 EPS Geofoam을 적용시켰을 때 아치지간이 증가될수록 아치 상부에서 5%~10% 적은 토압 감소율이 나타났으며 하부에서 토압 감소율이 높음.
- EPS Geofoam 비율 H/R을 0.2에서 0.5로 증가시키면 상부에서 나타난 차이가 적어지게 되며 하부에서 높은 토압 감소율을 보인 지간길이 3차선 길이의 지간길이를 갖는 15m 아치구조물이 평균적으로 가장 높은 감소율을 보임.

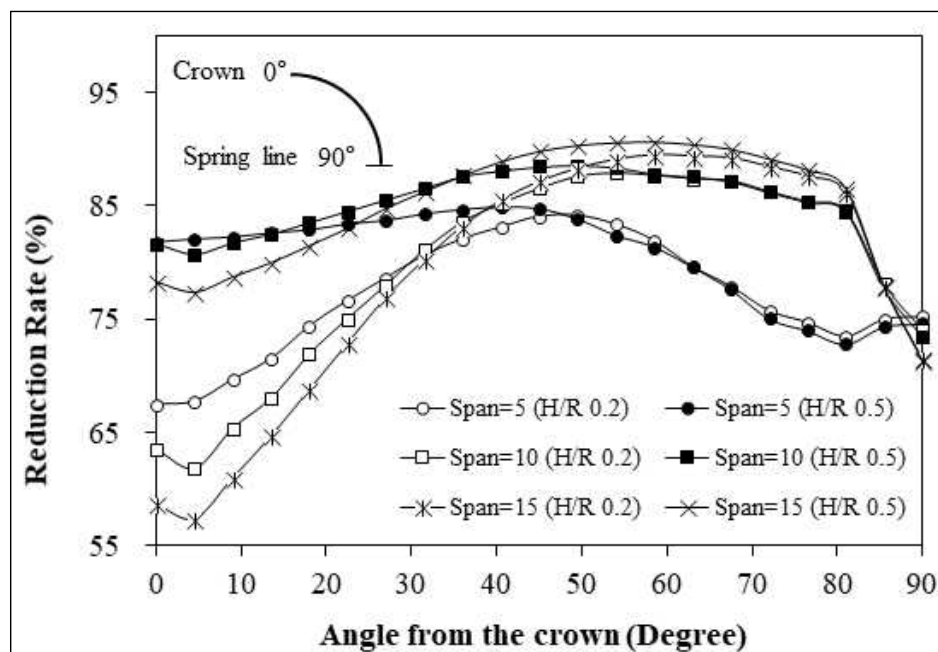


그림 3-88 아치크기에 따른 토압 감소율 (W/S=1.1)

- 그림 3-89의 평균 토압 감소율을 나타낸 그래프를 보면 아치구조물의 크기 변화에 따른 평균 토압 감소율의 차이는 EPS Geofoam 적용량을 증가시켰을 때 약 4%, 적은양의 EPS Geofoam을 적용하는 Case3의 경우 그 차이가 2%이내가 되므로 아치 크기에 따른 EPS Geofoam의 토압 감소효과는 큰 차이를 보이지 않음.

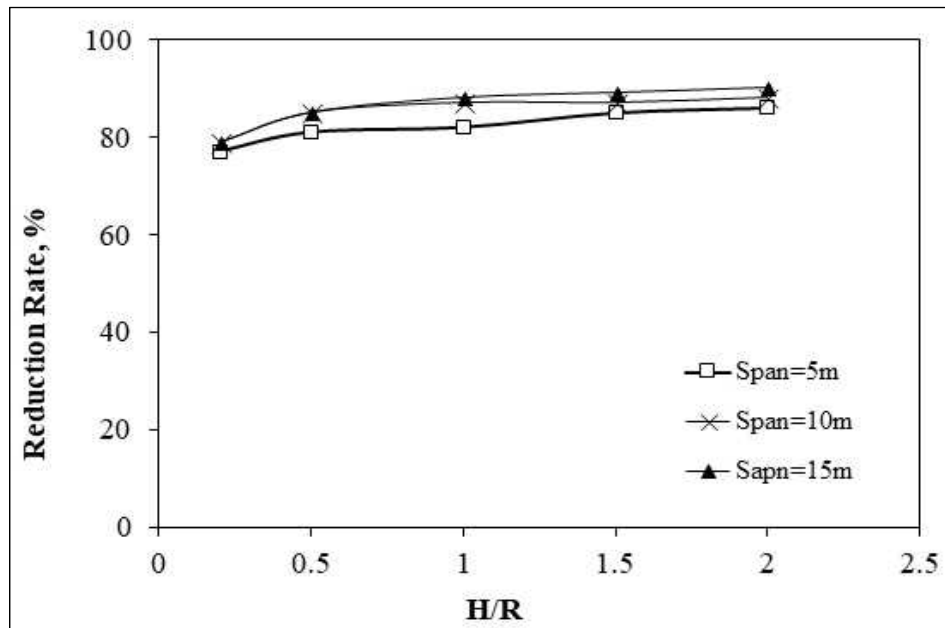


그림 3-89 아치 크기에 따른 평균 토압 감소율 ( $H/S=0.5$ )

- Soft Zone 적용 비율인  $H/R$ 과  $W/S$ 를 이용하여 EPS Geofoam 사용량을 결정할 경우 아치 크기가 증가할 때 구조물의 크기변화와 상관없이 유사한 토압감소효과를 얻을 수 있음을 확인함.

## 제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

### 1. 목표 달성도

#### 가. 성과점검기준표

| 구분 | 핵심성과<br>(CTE) |                                                        | 단위성과 |                                                    | 성과점검기준     |                   |          |      |                                         |             | 양적 성과<br>건수 |                     |
|----|---------------|--------------------------------------------------------|------|----------------------------------------------------|------------|-------------------|----------|------|-----------------------------------------|-------------|-------------|---------------------|
|    |               |                                                        |      |                                                    | 질적<br>성과지표 | 목표<br>치           | 달성<br>치  | 측정방법 | 검증방<br>법                                | 가중<br>치     |             |                     |
| 주관 | 1             | 비선형토질모델과 지하 및 재료비선형을 고려한 장폭아치구조물의 해석모델 개발              | 1-1  | 장폭아치구조물 해석모델개발을 위한 비선형토질 모델 및 주요변수 파악              | ①          | 해석모델 주요변수 파악      | 유효성 증명   | -    | 사례분석<br>(토질모델 사례의 적용성분석 및 원인별 유효성 분석)   | 사례분석 연구 보고서 | 10%         | 논문 : 2건             |
|    |               |                                                        | 1-2  | 비선형토질모델과 지하 및 재료비선형을 고려한 장폭아치구조물의 해석모델 개발과 시편제작 설치 | ①          | 해석모델 개발 및 시편제작 설치 | 해석 모델 구축 | -    | 전문가자문<br>(비선형을 고려한 지반구조해석모델에 대한 전문가 검토) | 전문가의견서      | 10%         |                     |
|    | 2             | ETI를 적용한 지중 장폭아치구조물의 해석모델 검증을 위한 실증실험                  | 2-1  | ETI 실증실험을 위한 실증실험 결과 분석                            | ①          | 실증실험              | 유효성 증명   | -    | 실험분석<br>(실적결과와 실험결과 비교분석)               | 실험분석        | 10%         | 특허출원: 1건            |
|    |               |                                                        | 2-2  | ETI 실증실험 데이터 분석을 통한 해석모델 검증                        | ①          | 해석모델 검증           | 유효성 증명   | -    | 전문가자문<br>(실험결과를 반영한 해석모델 검증에 대한 전문가 검토) | 전문가의견서      | 20%         | 논문 : 2건             |
| 공동 | 3             | 새로운 ETI적용 장폭아치구조물의 3D 해석모델 개발                          | 3-1  | ETI적용 장폭아치구조물 해석모델 개발을 위한 주요변수 연구론                 | ①          | 해석모델 주요변수 파악      | 유효성 증명   | -    | 사례분석<br>(ETI적용성분석 및 변수별 유효성 분석)         | 사례분석 연구 보고서 | 10%         | 특허출원: 1건            |
|    |               |                                                        | 3-2  | ETI적용 장폭아치구조물의 3D 해석모델 개발                          | ①          | 해석모델 개발           | 해석 모델 구축 | -    | 전문가자문<br>(ETI 모델에 대한 전문가 검토)            | 전문가의견서      | 10%         | 논문 : 1건             |
|    | 4             | 검증모델을 이용한 최적의 소프트존 (Soft Material Zone)제안 및 설계가이드라인 개발 | 4-1  | ETI실증실험 결과를 이용한 ETI Soft Zone Geometry 최적화         | ①          | 해석모델 최적화          | 유효성 증명   | -    | 사례분석<br>(Soft Zone Geometry에 따른 유효성 분석) | 최적화 연구 보고서  | 10%         | 논문 : 2건             |
|    |               |                                                        | 4-2  | 검증된 ETI 해석모델을 이용한 최적화된 설계 가이드라인 마련                 | ①          | 최적설계 가이드라인 개발     | 유효성 증명   | -    | 전문가자문<br>(설계가이드라인의 적용성에 대한 전문가 자문)      | 전문가의견서      | 20%         |                     |
| 계  |               |                                                        |      |                                                    | -          | -                 | -        | -    | -                                       | -           | 100%        | 특허출원: 2건<br>논문 : 7건 |

## 나. 정량적 연구성과 목표 및 달성도

| 성과지표               | 성과<br>목표 | 최소<br>성과<br>목표 | 1차년도<br>성과                 | 2차년도<br>성과        | 비고                   |
|--------------------|----------|----------------|----------------------------|-------------------|----------------------|
| SCI(E)급 학술지 게재(2점) | 4건       | 2건             | 1건                         | 6건                | 5건<br>추가예정<br>(총12건) |
| 일반학술지 게재(1점)       | 3건       |                | 1건                         | 3건                |                      |
| 특허출원(1점)           | 2건       | 1건             | 0건                         | 3건                |                      |
| 특허등록(2점)           |          |                |                            |                   |                      |
| 인력 양성              |          |                |                            | *추가 실적<br>달성 (3명) |                      |
| 디자인 등록(1점)         |          |                |                            |                   |                      |
| 소프트웨어(1점)          |          |                |                            |                   |                      |
| 하드웨어(1점)           |          |                |                            |                   |                      |
| 기타(1점)             |          |                |                            |                   |                      |
| 소계(점수)             | 13점      | 5점             | 1.16점                      | 13.5점             | *추가예정<br>포함 시        |
|                    |          |                | 총괄 합계 14.66 점<br>(22.66점*) |                   |                      |

## 2. 관련 분야 기여도

- 본 연구과제는 지중구조물 전체에 작용하는 하중을 대폭 감소시킬 수 있는 획기적인 방법으로서 세계 최초로 시도되는 ETI 신개념을 검증하였음.
- 지중구조물(지반구조/터널)분야에서 상대적으로 중요시 되지 않았던 Soft Material Zone 설치에 대한 효과를 정량적으로 정립하므로 이론과 실증실험의 적합성을 도출하여 미래 지하대공간 개발에 대한 새로운 해결 방안을 제안함.
- 향후 급격히 증가될 것으로 예상되는 도심도, 저심도 지중(아치)구조물의 경제적이고 효율적인 설계 및 시공의 기초적인 연구로 활용될 것임.

## 제5장. 연구개발성과의 활용계획

---

### 1. 연구개발성과의 활용방안

#### ■ 건설분야에 새로운 ETI기법적용으로 세계최초 원천기술 기반 마련

- (1) 토피가 큰 지중아치구조물의 경제적 안정성 확보를 위한 최적화 가이드라인 제공 가능
- (2) ETI 적용으로 구조물 전체에 걸리는 하중을 대폭 감소시킴으로서 장폭아치구조물의 심층 매설시 특수설계 없는 경량화, 최적화 시공 및 안정성 증대
- (3) 지중구조물의 지반-구조물 상호작용에 있어서 연성거동, 강성거동에 대한 이론적 정립을 강화하고 강성구조물의 연성 거동을 유도하여 고차원 구조물 거동 연구의 기초 연구로 활용 가능
- (4) 향후 지하대공간의 시장수요가 증대에 따른 활용도 증가

#### ■ 국가적 차원의 지진에 대한 시설물 내진 안전 진단 및 유지관리 예산 절감

- (1) EPS Geofoam의 우수한 에너지 흡수능력으로 지중구조물의 내진성능 향상
- (2) 최근 한반도에서 발생하는 잦은 지진을 대비하기 위한 지중구조물의 내진설계 아이디어 제공
- (3) 지중구조물의 전 폭에 Soft Material Zone 설치를 위한 가이드라인 제시로 한반도 지반 및 지진특성에 부합하는 지중구조물 설계 및 시공이 가능할 것이다.

#### ■ 중장기적 환경변화 대응 전략 수립

- (1) 심층매설 지중구조물의 환경변화에 대한 대응력을 효율적으로 증대시켜 중장기적 유지관리 대응 전략 수립이 가능
- (2) EPS Geofoam으로 극한환경하에서 단열효과로 동결융해 시에 구조물의 손상을 최소화
- (3) 지중구조물과 상재토와의 Soft Material Zone 설치를 통하여 소음, 진동 등에 사용성 증진
- (4) 현장 적용성 극대화를 위하여 기술이전 기업과의 지속적인 후속 연구를 통하여 현장 적용 연구변수 추가 도출 및 경제성, 안전성, 사용성 최적화

---

## 2. 연구개발성과의 기대효과

지중 시설물 설계, 시공, 성능평가 및 유지관리 등의 종합적인 중장기 계획에 있어서 지중 시설물의 경제적인 안전성을 확보하는 원천기술로 기대가 되며 본 기술을 통하여 국내 내수 시장의 활성화 및 국제 경쟁력 강화가 기대됨. 또한 지중 시설물의 경제적 건설과 유지관리를 통하여 확보된 비용 절감은 지중 상부의 조경, 생태공원 조성의 예산으로 확대되어 주변지역의 삶의 질 향상에 기여하는 바가 클 것으로 예상됨.

### ■ 기술적 측면

- (1) 세계최초로 시도되는 ETI의 심층 아치구조물의 적용으로 국제적 수준 이상의 기술력 확보
- (2) 기존 지중 시설물 성능향상 및 유지관리 최소화를 위한 적용 시스템 개발을 통하여 국가경쟁력 확보

### ■ 경제적 측면

- (1) 본 개발기술을 이용하여 지중구조물 최적화를 실현하여 효율적인 지하 대공간의 시공 및 유지관리 비용을 절감 효과 기대
- (2) 국가적 차원의 지하구조물 최적화 예산 분배 의사결정을 지원함으로써 적정비용 산출 기여
- (3) 건설분야와 최신 이론 및 IT 계측분야의 융복합 기술력을 바탕으로 지중구조물 성능평가 기술의 질적 성과 효과를 기대

### ■ 사회적 측면

- (1) 지중구조물 효율성 극대화를 통해 지속가능한 국가 이미지를 제고하기 위한 기술력을 바탕으로 대외적 홍보 가능
- (2) 설계 및 시공단계에서 최적화를 통하여 과도한 비용을 방지하고 경제적인 지중 시설물 설계 및 관리에 대한 미래지향적 건설경제 기틀마련 가능
- (3) 기존 지중구조물의 성능평가의 어려움 및 중요도를 고려하여 설계 및 시공기술의 개발로 사회적 비용 감소

## 제6장. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보

### 1. 논문 수집 정보

| 년도   | 저자                                    | 제목                                                                                                                 | 주제                                                                                                                                                              | 문헌정보                                                                                                                                       |
|------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1922 | Marston                               | Second progress report to the joint concrete culvert pipe committee                                                | Formally called the technique Induced Trench Installation (ITI)                                                                                                 | Iowa Engineering Experimental Station: Ames, I.A.                                                                                          |
| 1994 | Okabayashi, Ohtani, Akiyama, Kawamura | Centrifugal model test for reducing the earth pressure on the culvert by using the flexible material               | 65% reduction of overburden pressure at top slab and recommended optimum size and location of EPS geofoam                                                       | Proceedings of the 4th International Offshore and Polar Engineering. Osaka, Japan: International Society of Offshore and Polar Engineering |
| 1994 | Vaslestad, Johansen, Holm             | Load reduction on rigid culverts beneath high fills: Long-term behavior                                            | The vertical pressure was reduced to less than 50% of the overburden<br>The vertical pressure at the crown was reduced to less than 30% of the overburden       | Transportation Research Record No. 1415, pp. 58-68                                                                                         |
| 2002 | Borque                                | Centrifuge and numerical modeling of induced trench twin conduits                                                  | 30% reduction of overburden pressure at top slab                                                                                                                | Master's Thesis, Department of Civil Engineering, University of New Brunswick, Fredericton, N.B., Canada                                   |
| 2005 | Yoo, Parker, Kang,                    | Bedding and fill heights for concrete roadway pipe and box culverts                                                | Suggested that the compressible material be placed directly above the conduit to obtain maximum earth load reduction                                            | Final Report, ALDOT Project No. 930-592, Highway Research Center, Auburn University. Alabama, USA                                          |
| 2007 | Kang Parker, Yoo                      | Soil-Structure Interaction and Imperfect Trench Installations for Deeply Buried Concrete Pipes                     | VAF were affected by height of backfill and installation practices for bedding and side fill. The modulus of elasticity greatly affects the load reduction rate | ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 133, No.3, pp.277-285.                                                 |
| 2007 | Kang Parker, Yoo                      | Soil-Structure Interaction and Imperfect Trench Installation for Deeply Buried Corrugated Polyvinyl Chloride Pipes | Recorded 92% arching factor reduction rate related to axial force, and 18% reduction rate for bending moment                                                    | Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board No. 2028, pp.192-202.                                         |

|      |                                                        |                                                                                                                        |                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                                      |
|------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 2007 | Kang<br>Parker,<br>Yoo                                 | Effects of frictional forces acting on sidewalls of buried box culverts                                                | Studied new EPS layout (top+side) which led to additional 50% reduction at bottom slab and quantified drag down force effect up to 80% | International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 32, No. 3, pp. 289-306.                                                                                             |
| 2007 | Kang<br>Parker,<br>Yoo                                 | Soil-Structure Interaction for Deeply Buried Corrugated Steel Pipes Part I: Embankment Installation                    | Arching factors were not affected by pipe's slenderness ratio and fill height-to-diameter ratio                                        | ELSEVIER: Engineering Structures, Vol. 30, pp. 384-392.                                                                                                                                              |
| 2008 | McAfee and<br>Valsangkar                               | Field performance, centrifuge testing, and numerical modelling of an induced trench installation                       | The vertical pressure at the bottom ranged from 9% to 39% of the overburden                                                            | Canadian Geotechnical Journal, Vol. 45, pp. 85-101                                                                                                                                                   |
| 2009 | Vaslestad,<br>Yesuf,<br>Johansen,<br>Wendt,<br>Damtew, | Instrumented field test and soil structure interaction of concrete pipe with high fill                                 | The average pressure was reduced to 23% of overburden pressure and successfully prove a 17 year monitoring                             | Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: The Academia and Practice of Geotechnical Engineering (pp.1802-1805). Alexandria, Egypt: IOS Press. |
| 2010 | McGuigan<br>Valsangkar                                 | Centrifuge testing and numerical analysis of box culverts installed in induced trenches                                | The pressure at the top was 28% of overburden and 35% less pressure was obtained for ITI compared to positive projecting case          | Canadian Geotechnical Journal, Vol. 47, No. 2, pp. 147-163                                                                                                                                           |
| 2016 | Ahmed                                                  | Experimental investigations into the role of geosynthetic inclusions on the earth pressure acting on buried structures | 17% pressure reduction on the side walls and 70% pressure reduction at the upper wall was observed                                     | Doctoral Dissertation, Department of Civil Engineering and Applied Mechanics, McGill University, Canada.                                                                                             |
|      |                                                        |                                                                                                                        | 90% pressure reduction at the crown and about 25% at the invert was observed                                                           |                                                                                                                                                                                                      |

## 제7장. 연구개발성과의 보안등급

| 보안등급 분류 | 보안                                         | 일반 |
|---------|--------------------------------------------|----|
|         |                                            | ○  |
| 결정 사유   | 연구내용이 대부분 일반적인 내용을 포함하여 특별히 보안등급으로 분류되지 않음 |    |

## 제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

| 구입 기관 | 연구시설/<br>연구장비명 | 규격<br>(모델명) | 수량 | 구입<br>연월일 | 구입<br>가격<br>(천원) | 구입처<br>(전화번호) | 비고<br>(설치<br>장소) | NTIS장비<br>등록 번호 |
|-------|----------------|-------------|----|-----------|------------------|---------------|------------------|-----------------|
| 해당 없음 |                |             |    |           |                  |               |                  |                 |

## 제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

### (1) 연구실 안전점검

#### 1) 연구실 일상 점검

- 연구시작 전 각 연구실 책임자는 육안으로 장비 및 시설을 매일 점검

#### 2) 연구실 정기 점검

- 과학기술분야 연구실의 일반안전, 산업위생, 전기안전, 소방안전, 화공안전, 가스안전, 기계안전 등의 전문분야 점검
- 매월 각 연구실을 주기적으로 점검

#### 3) 연구실 정밀안전진단

- 산업안전보건법 제39조에 의거 유해인자를 취급 연구실
- 과학기술부령이 정하는 독성가스를 취급하는 연구실
- 매년 1회 이상 외부 전문기관에 의뢰하여 실시 후 중대결함이 발견될 경우, 교육과학기술부에 보고

### (2) 교육 훈련

#### 1) 개요

- 연구실 안전 확보 및 종사자의 건강보호, 실험 및 연구활동에 기여, 안전환경조성에 관한 법률 의거 연구실의 환경안전교육이 의무화 목표수립.

#### 2) 교육대상

- 교수, 대학원생, 소속연구원, 전문직원, 실험참여 학부생 등

#### 3) 교육실시

- 1학기 - 법정 교육시간인 6시간을 온라인 및 집합교육으로 실시
- 2학기 - 법정 교육시간인 6시간을 온라인 교육으로 실시

### (3) 시설 및 물품 보험 가입 현황

| 보 험 명             | 보 상 내 용            | 대 상      | 주관부서 |
|-------------------|--------------------|----------|------|
| 연구실<br>안전공제<br>보험 | 사망 : 1억원           | 연구활동 종사자 | 관리팀  |
|                   | 부상 : 최대 1,000만원    | 연구활동 종사자 | 관리팀  |
|                   | 후유장애 : 최대 1억원      | 연구활동 종사자 | 관리팀  |
| 학교시설 및 물품<br>보험가입 | 시설 : 천안캠퍼스 32개동 건물 | 학교시설     | 관리팀  |

## 제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

| 번호 | 구분<br>(논문/<br>특허/<br>기타) | 논문명/특허명/기타                                                                                                            | 소속<br>기관명   | 역할        | 논문<br>게재지/<br>특허 등록<br>국가                          | 영향력<br>지수 | 논문<br>게재일<br>/특허<br>등록일 | 사사<br>여부 | 특기<br>사항    |
|----|--------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------|----------------------------------------------------|-----------|-------------------------|----------|-------------|
| 1  | 논문                       | EPS Geofoam을<br>이용한 Soft Zone<br>적용방법에 따른<br>지중아치구조물의<br>하중저감에 관한<br>해석 연구                                            | 주관<br>(상명대) | 연구<br>책임자 | 한국산학<br>기술학회<br>논문집                                | -         | 2018.<br>09.31          | 단독       | 일반<br>(KCI) |
| 2  | 논문                       | Elastic Buckling<br>Assessment of Doubly<br>Symmetric I-Beams<br>with Singly Stepped<br>Section at Midspan            | 주관<br>(상명대) | 연구<br>책임자 | 한국방재<br>학회논문집                                      | -         | 2017.<br>12.30.         | 중복       | 일반<br>(KCI) |
| 3  | 논문                       | Inelastic Buckling<br>Strength of Stepped<br>I-Beams at Midspan<br>Subjected to Uniform<br>Bending                    | 주관<br>(상명대) | 연구<br>책임자 | 한국방재<br>학회논문집                                      | -         | 2018.<br>08.            | 중복       | 일반<br>(KCI) |
| 4  | 논문                       | Ultimate Strength of<br>10 MW Wind Turbine<br>Tower Considering<br>Opening, Stiffener,<br>and Initial<br>Imperfection | 주관<br>(상명대) | 연구<br>책임자 | International<br>Journal of<br>Steel<br>Structures | 0.734     | 2018.<br>09.19          | 중복       | SCI(E)      |
| 5  | 논문                       | 토피고가 큰 생태교량<br>(Eco-Bridge)의<br>지속가능설계를 위한<br>지오폴 (Geofoam)의<br>적용기술 개발                                               | 공동<br>(서울대) | 연구<br>책임자 | 한국 복합<br>신소재구조<br>학회 논문집                           | -         | 2018.<br>06.21          | 단독       | 일반<br>(KCI) |

|    |    |                                                                                                                             |             |           |                                                        |       |                |    |     |
|----|----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------|--------------------------------------------------------|-------|----------------|----|-----|
| 6  | 논문 | Structural Behaviors of Reinforced Concrete Piers Rehabilitated with FRP Wraps                                              | 공동<br>(서울대) | 연구<br>책임자 | International<br>Journal of<br>Polymer<br>Science      | 1.718 | 2017.<br>11.19 | 중복 | SCI |
| 7  | 논문 | Development of Improved Frequency Expressions for Composite Horizontally Curved Bridges with High-Performance Steel Girders | 공동<br>(서울대) | 연구<br>책임자 | Arabian<br>Journal for<br>Science and<br>Engineering   | 1.092 | 2018.<br>06.05 | 중복 | SCI |
| 8  | 논문 | Development of Dynamic Impact Factors Expressions for Skewed Composite Concrete-Steel Slab-on-Girder Bridges                | 공동<br>(서울대) | 연구<br>책임자 | Advances in<br>Materials<br>Science and<br>Engineering | 1.372 | 2018.<br>07.10 | 단독 | SCI |
| 9  | 논문 | Dynamic Response Evaluation of Long-Span Reinforced Arch Bridges Subjected to Near- and Far-Field Ground Motions            | 공동<br>(서울대) | 연구<br>책임자 | Applied<br>Sciences<br>-Basel                          | 1.689 | 2018.<br>07.27 | 단독 | SCI |
| 10 | 논문 | Reinforcing the Structural Stability of Old Nationally Important Trees with FRP Wraps                                       | 공동<br>(서울대) | 연구<br>책임자 | International<br>Journal of<br>Polymer<br>Science      | 1.718 | 2018.<br>08.01 | 중복 | SCI |
| 11 | 논문 | Live Load Distribution Factors for Skew Stringer Bridges with High-Performance-Steel Girders under Truck Loads              | 공동<br>(서울대) | 연구<br>책임자 | Applied<br>Sciences<br>-Basel                          | 1.689 | 2018.<br>09.21 | 단독 | SCI |

|    |    |                                                                                                                                          |             |       |                                                            |  |                      |  |        |
|----|----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------|------------------------------------------------------------|--|----------------------|--|--------|
| 12 | 논문 | Effects of embedded trench installaions using expanded polystrene geofoam applied to buried corrugated steel arch structures             | 주관<br>(상명대) | 연구책임자 | Tunneling and Underground Space Technology                 |  | 심사중                  |  | SCI    |
| 13 | 논문 | Inelastic Lateral Buckling Resistance of Stepped I-Beam with Compact Section and Continuous Bracing                                      | 주관<br>(상명대) | 연구책임자 | KSCE Journal of Civil Engineering                          |  | 2018 .03<br>게재<br>예정 |  | SCI(E) |
| 14 | 논문 | The Effect of Load Reduction on Underground Concrete Arch Structures in Embedded Trench Installaions                                     | 공동<br>(서울대) | 연구책임자 | International Journal of Concrete Structure and Materials  |  | 심사중                  |  | SCI    |
| 15 | 논문 | Finite element analyses of deeply buried concrete pipe in proposed imperfect trench installations using Expanded Polystyrene (EPS) Foams | 공동<br>(서울대) | 연구책임자 | Engineering Structures                                     |  | 심사중                  |  | SCI    |
| 16 | 논문 | Development of Live Load Distribution Factor Equation for Concrete Multicell Box-Girder Bridges under Vehicle Loading                    | 공동<br>(서울대) | 연구책임자 | International Journal of Concrete Structures and Materials |  | 심사중                  |  | SCI    |

|    |                  |                                                                                                                                         |                             |          |                                                              |  |                |    |                                       |
|----|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------|--------------------------------------------------------------|--|----------------|----|---------------------------------------|
| 17 | 특허               | 기초부 보완<br>지중구조물 상부 하중<br>저감 공법 및 그<br>공법에 의한 기초부<br>치환 지중구조물 상부<br>하중 저감 구조                                                             | 주관<br>(상명대)                 | 주<br>발명자 | 대한<br>민국                                                     |  | 2018.<br>07.17 | 단독 | 출원<br>번호<br>(10-<br>2018-<br>0083165) |
| 18 | 특허               | 다층 구조 경량부재를<br>이용한 지중구조물<br>상부 하중 저감 공법<br>및 그 공법에 의한<br>다층 구조 경량부재를<br>이용한 지중구조물<br>상부 하중 저감 구조                                        | 주관<br>(상명대)/<br>공동<br>(서울대) | 주<br>발명자 | 대한<br>민국                                                     |  | 2018.<br>07.17 | 단독 | 출원<br>번호<br>(10-<br>2018-<br>0083171) |
| 19 | 특허               | 수평압 대응<br>지중구조물 상부 하중<br>저감 공법 및 그<br>공법에 의한 수평압<br>대응 지중구조물 상부<br>하중 저감 구조                                                             | 공동<br>(서울대)                 | 주<br>발명자 | 대한<br>민국                                                     |  | 2018.<br>07.17 | 단독 | 출원<br>번호<br>(10-<br>2018-<br>0083177) |
| 20 | 기타<br>(학술<br>발표) | 토피고 및 SOFT<br>ZONE을 고려한<br>지중매설 관거의<br>거동특성에 대한 해석<br>연구                                                                                | 주관<br>(상명대)                 |          | 2017<br>대한토목<br>학회<br>학술발표<br>대회                             |  | 2017.<br>10.20 |    |                                       |
| 21 | 기타<br>(학술<br>발표) | A Study on the<br>Ultimate Strength of<br>10MW Wind Tower<br>with Opening and<br>Stiffener Considering<br>Initial Imperfection<br>Ratio | 주관<br>(상명대)                 |          | 2017<br>International<br>Symposium<br>on Steel<br>Structures |  | 2017.<br>11.03 |    |                                       |
| 22 | 기타<br>(학술<br>발표) | Embedded Trench<br>Installation 기법을<br>적용한<br>지중아치구조물의<br>Span-Rise 비에 따른<br>토압 경감 효과 연구                                                | 주관<br>(상명대)                 |          | 2018<br>한국<br>방재학회<br>학술대회                                   |  | 2018.<br>02.27 |    |                                       |

|    |                  |                                                                                                                                           |             |  |                                     |  |                |  |  |
|----|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|--|-------------------------------------|--|----------------|--|--|
| 23 | 기타<br>(학술<br>발표) | Embedded Trench<br>Installation을 적용한<br>지중아치구조물의<br>Geofoam 최적화에<br>대한 연구                                                                 | 주관<br>(상명대) |  | 2018<br>한국<br>복합신소재<br>구조학회<br>학술대회 |  | 2018.<br>04.19 |  |  |
| 24 | 기타<br>(학술<br>발표) | An Investigation of<br>Buried Corrugated<br>Steel Arch Structure<br>Using Trench<br>Installations with<br>Expanded Polystyrene<br>Geofoam | 주관<br>(상명대) |  | 2018<br>한국<br>복합신소재<br>구조학회<br>학술대회 |  | 2018.<br>04.19 |  |  |
| 25 | 기타<br>(학술<br>발표) | Embedded Trench<br>Installation을 적용한<br>지중아치구조물의<br>매설 깊이에 따른<br>토압 경감 효과에<br>대한 실험 연구                                                    | 주관<br>(상명대) |  | 2018<br>한국<br>강구조학회<br>학술대회         |  | 2018.<br>05.30 |  |  |
| 26 | 기타<br>(학술<br>발표) | Application of<br>Expanded Polystyrene<br>Geofoam for Buried<br>Concrete Arch<br>Structure Considering<br>the Construction<br>Workability | 주관<br>(상명대) |  | 2018<br>대한<br>토목학회<br>학술대회          |  | 2018.<br>10.18 |  |  |

## 제11장. 기타사항

---

해당사항 없음.

## 제12장. 참고문헌

---

1. 김연태, 허택녕, 김문겸, 황학주. (1992) “비선형 운동해석에 의한 낮은 아치의 동적 임계좌굴하중의 결정”, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, Vol.12, pp45-54
2. 김용희, 박종섭, 이선호, 오민수, 전병권, 이영호. (2009) “장대폭원의 개착시 강합성 지중아치 교량의 성능평가 실험연구”, 대한토목학회, 대한토목학회 정기 학술대회 논문집, Vol.2009, No.10, pp1225-1229
3. 문지호, 윤기용, 김성훈, 이학은. (2005) “대칭 하중을 받는 포물선 아치 리브의 탄성 면내 좌굴 강도”, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, Vol.17, No.2, pp161-171
4. 박용명, 허택영, 이필구, 노경배. (2004). “브레이스트 아치 리브의 면내 좌굴 및 극한강도 평가”, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, Vol.16, No.6, pp759-768
5. AASHTO LRFD. (2007). Bridge design specifications. 4th ed. Washington, D.C., AASHTO
6. ABAQUS. (2013). Standard User's Manual Version 6.13. Pawtucket, RI: Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc.
7. Austin, J.L., (1971). A plea for excuses. In: Lyas, C. (Ed.). Philosophy and Linguistics. The MacmillanPress Ltd., London. pp. 79-101. (Originally published in the Proceedings of the Aristotelian Society,1956-1957; reprinted in Austin, J.L. Philosophical Papers. Oxford University Press, London. pp. 175-204.)
8. Austin, W.J. and Ross, T.J., (1976) “Elastic Buckling of Arches under Symmetrical Loading”, Journal of Structural Division. ASCE, Vol. 102, pp. 10851095
9. Harrison, H., (1982) “In-Plane Stability of Parabolic Arches”, Journal of Structural Division. ASCE, Vol. 108, pp.195205
10. Belytschko, T. and Glaum, L.W. (1979) “Application of Higher Order Co-rotational stretch Theories to Nonlinear Finite Element Analysis”, Computer and Structure, Vol.10, No.1-2, pp.175-182
11. Bradford, M.A., Uy, B., and Pi, Y.L. (2002a) “In-plan Elastic Stability of arches under a Central Concentrated Load”, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.128, No.7, pp.710-719
12. Bradford, M.A., Uy, B., and Pi, Y.L. (2002b) “In-plan Elastic Stability of arches under a Central Concentrated Load”, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.128, No.7, pp.719-722
13. Duncan J.M. and Chang C.Y. (1970). “Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils”, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 96, No. SM 5, pp.1629-1653
14. Katona, M. G. (2017). CANDE: Culvert Analysis and Design User Manual and Guideline. National Cooperative Highway Research Project, Gig Harbor, WA
15. Kim, M. K. and Lade, P. V. (1988 a), “Single Hardening Constitutive Model for Frictional Materials, I. Plastic potential Function”, Computers and Geotechnics, 5(4), pp.307-324
16. Kim, M. K. and Lade, P. V. (1988 b), “Single Hardening Constitutive Model for

- 
- Frictional Materials, II Yield Criterion and Plastic Work Contours” , Computers and Geotechnics, 6(1), pp.13-29
17. Kim, M. K. and Lade, P. V. (1988 c), “Single Hardening Constitutive Model for Frictional Materials III. Comparisons with Experimental Data” , Computers and Geotechnics, 6(1), pp.30-47
  18. Kondner R.L. (1963). “Hyperbolic Stress-Strain Response: Cohesive Soils” , Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 89, No. SM1, pp. 115-143
  19. Lade, P.V. and Duncan, J.M. (1973). “Cubical Triaxial Tests on Cohesionless Soil,” Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 99(SM10), 793-812
  20. McGraw-Hill (1989), Roark’s Formulas for Stress and Strain 6th Edition
  21. Mirmiran, A. and Amde A. M. (1993) “Inelastic Buckling of Prestressed Sandwich or Homogeneous Arches” , Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.119, No.9, pp.2733-2743
  22. Pi, Y.L. and Trahair, N.S., (1996) “In-Plane Inelastic Buckling and Strengths of Steel Arches,” Journal of Structural Engineering. ASCE, Vol. 122, pp. 734-747.
  23. Schreyer, H. and Masur, E. (1966) “Buckling of Shallow Arches” , Journal of Engineering mechanics Division, ASCE, Vol.90, No.4, pp.1-19
  24. Stolarski, H., and Belytschko, T. (1989) “Membrane Locking and Reduced Integration for Curved Element” , Journal of Application Mechanics, Vol.49, No.1, pp.172-176
  25. Timoshenko, S.P., and Gere, J.M. (1961) Theory of elastic stability, 2nd Edition, McGraw-Hill Book Co.,Inc., New York
  26. Wei Y, Tsang C.K., and Zheng X.F. (2009) Mechanisms of regulation of RNA polymerase III-dependent transcription by TORC1. EMBO J28(15):2220-30
  27. Beben, D. (2012). Numerical study of performance of soil-steel bridge during soil backfilling. Structural Engineering and Mechanics, Vol. 42, No. 4, pp. 571-587.
  28. El-Sawy, K. M. (2003). Three-dimensional modeling of soil-steel culverts under the effect of truckloads. ELSEVIER: Thin-Walled Structures, Vol. 41, pp. 747-768.
  29. Kang, J. S., Parker, F. and Yoo, C. H. (2007a). Effects of frictional forces acting on sidewalls of buried box culverts. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 32, No. 3, pp. 289-306.
  30. Kang, J. S., Parker, F. and Yoo, C. H. (2007b). Soil-structure interaction for deeply buried corrugated steel pipes Part I: Embankment installation. ELSEVIER: Engineering Structures, Vol. 30, pp. 384-392.
  31. Kang, J. S., Parker, F. and Yoo, C. H. (2007c). Soil-structure interaction for deeply buried corrugated steel pipes Part II: Imperfect trench installation. ELSEVIER: Engineering Structures, Vol. 30, pp. 588-594.
  32. Kang, J. S., Parker, F. and Yoo, C. H. (2007d). Soil-structure interaction and imperfect trench installations for deeply buried corrugated PVC pipes. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board No. 2028, pp. 192-202.
-

- 
33. Kang, J. S., Parker, F. and Yoo, C. H. (2007e). Soil-structure interaction and imperfect trench installations for deeply buried concrete pipes. *ASCE: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 133, No. 3, pp. 277-285.
  34. Kang, J. S. (2007). Soil-structure interaction and imperfect trench installations as applied to deeply buried conduits. Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, Auburn University, Auburn, Alabama.
  35. Mellat, P. (2012). Dynamic analysis of soil-steel composite bridges for high speed railway traffic. Master's Thesis, Department of Civil and Architectural Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.
  36. Sigh, S. (2016). Pressure reduction on wide culverts with EPS geofoam backfil. Master's Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Syracuse University, Syracuse, New York.
  37. Sobotka, M. (2014). Numerical simulation of hysteretic live load effect in a soil-steel bridge. *Studia Geotechnica et Mechanica*, Vol. 36, No. 1, pp. 103-109.
  38. Stromblad, N. (2014). Modeling of soil and structure interaction subsea. Master's Thesis, Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden.
  39. Sutubadi, M. H. and Khatibi, B. R. (2013). Effect of soil properties on stability of soil-steel culverts. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, Vol. 37, pp. 79-90.

### 주의

1. 이 최종보고서는 국토교통과학기술진흥원에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구 보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통과학기술진흥원에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.