

최종보고서(일반과제용)										보안등급	
										일반[✓], 보안[]	
중앙행정기관명	국토교통부				사업명	사업명		국토교통기술촉진연구사업			
전문기관명	국토교통과학기술진흥원					내역사업명		국토교통기술혁신연구 (기반연구 유형)			
공고번호	공고-제05호				연구개발과제번호		20CTAP-C157021-01				
국가과학기술 표준분류	EI0410		60%	EI0306		20%	EI0406		20%		
연구주제	(대분류) 고부가가치 건설기술 창출				(중분류) 고부가가치 인프라		(소분류) 환경 대응형 구조물				
연구개발과제명	국문	지반의 변형이 예측되는 극한 · 극서 지역에서의 안정성 확보를 위한 환경 대응형 말뚝 기초 개발									
	영문	Development of environment-responsive pile foundations to secure stability in the cold and hot regions against soil deformation									
주관연구개발기관	기관명	인천대학교 산학협력단				사업자등록번호	121-82-10382				
	주소	(우) 인천광역시 연수구 아카데미로 119				법인등록번호	120171-0003404				
연구책임자	성명		우상인		직위		조교수				
	연락처	직장전화	032-835-8461		휴대전화		010-7375-4060				
		전자우편	siwoo@inu.ac.kr		국가연구자번호		10832248				
연구개발기간	전체	2020. 04. 13 - 2021. 12. 31 (1년 9개월)									
	1년차	2020. 04. 13 - 2020. 12. 31 (0년 9개월)									
	2년차	2021. 01. 01 - 2021. 12. 31 (1년 0개월)									
연구개발비 (단위 : 천원)	정부지원 연구개발비	기관부담 연구개발비		그 외 기관 등의 지원금 자립자단체 기타()				합계		연구개발비 외 지원금	
	현금	현금	현물	현금	현물	현금	현물	현금	현물		합계
총계	370,000			-	-	-	-	370,000		370,000	-
1년차	160,000			-	-	-	-	160,000		160,000	-
2년차	210,000			-	-	-	-	210,000		210,000	-
공동연구개발기관 등	기관명	책임자	직위	휴대전화		전자우편		비고			
								역할		기관유형	
공동연구개발기관											
위탁연구개발기관											
연구개발기관 외 기관											
연구개발담당자 실무담당자	성명		신세희		직위		연구원(석박사통합)				
	연락처	직장전화	032-835-4751		휴대전화		010-2786-9263				
		전자우편	shin.s.h.9398@gmail.com		국가연구자번호		1179-2848				

이 최종보고서에 기재된 내용이 사실임을 확인하며, 만약 사실이 아닌 경우 관련 법령 및 규정에 따라 제재 처분 등의 불이익도 감수하겠습니다.

2022 년 03 월 18 일

연구책임자 : 우 상 인



주관연구개발기관의 장 : 인천대학교 산학협력단 김 규 원



국토교통과학기술진흥원장 귀하

< 요약 문 >

사업명		국토교통기술촉진연구사업		연구개발과제번호		20CTAP-C157021-01	
내역사업명		국토교통기술혁신연구					
국가과학기술표준분류		EI0410	60%	EI0306	20%	EI0406	20%
연구주제		(대분류) 고부가가치 건설기술 창출		(중분류) 고부가가치 인프라		(소분류) 환경 대응형 구조물	
연구개발과제명		지반의 변형이 예측되는 극한·극서 지역에서의 안정성 확보를 위한 환경 대응형 말뚝 기초 개발					
전체 연구개발기간		2020. 04. 13 - 2021. 12. 31 (1년 9개월)					
총 연구개발비		총 370,000 천원 (정부지원연구개발비 : 370,000 천원)					
연구개발단계		기초[☒] 응용[] 개발[] 기타(위 3가지에 해당되지 않는 경우)[]		기술성숙도		착수시점 기준(TRL 1) 종료시점 목표(TRL 4)	
연구개발과제 유형		지정공모 [] 자유공모 [☒]					
연구개발과제 특성		기반연구					
연구 개발 목표 및 내용	최종 목표	○ 환경적 요인으로 인해 지반의 변형이 예측되는 극한지 및 극서지에서 안정적으로 상부 구조물을 지지할 수 있는 지반 변형 대응형 말뚝 기초 양식 개발 ○ 지반 변형 대응 부재의 형식과 결합 방식 고안 및 최적 위치 분석 ○ 변형이 발생하는 모형 지반에 설치된 말뚝의 하중 전달 기전을 분석하여, 제안된 지반 변형 대응형 말뚝 기초의 효용성을 모형실험을 통해 분석 ○ 지반 변형 대응형 말뚝 기초의 최적 형상 및 변형량 제시 ○ 기존 말뚝 대비 시공비 10% 절감					
	전체 내용	○ 극한지 및 극서지 지반 변형 문헌 및 사례 조사 - 극한지 및 극서지 지층 구성 및 변형 사례에 대한 통합적인 지반 분석 자료 제시 ○ 지반 변형 대응 부재 양식의 고안 및 선정 - 능동형 및 수동형 지반 변형 대응 부재 설계 및 개발 ○ 말뚝 기초와 지반 변형 대응 부재의 결합 방법 도출 및 선정 - 지반 변형 대응 부재와 말뚝의 최적 결합 방법 개발 ○ 지반 변형 대응 부재의 최적 위치 결정 - 수치해석을 통한 지반 변형 대응 부재 최적 위치 분석 ○ 지반 변형 모사 토조 및 말뚝 제작 - 지반 변형 모사 토조 및 지반 변형 구현 장비 설계 및 제작 - 적용성 평가를 위한 지반 변형 대응형 말뚝 기초 모형 제작 ○ 지반 변형 대응형 말뚝 기초 평가 - 지반 변형 대응형 말뚝 기초의 지반 변형 대응 효과 분석 및 실효성 검증 - 지반 변형 대응형 말뚝 기초의 최적 형상 및 변형량 결정 - 기존 말뚝 대비 시공비 10% 절감 효과 검증					

	1년차	목표	○ 극한지 및 극서지 지반 변형 문헌 및 사례 조사 ○ 지반 변형 대응 부재 양식의 고안 및 선정 ○ 말뚝 기초와 지반 변형 대응 부재의 결합 방법 도출 및 선정 ○ 지반 변형 대응 부재의 최적 위치 결정 ○ 지반 변형 모사 토조 및 말뚝 제작
		내용	○ 극한지 및 극서지 지반 변형 문헌 및 사례 조사 - 극한지 및 극서지 지층 구성 및 변형 사례에 대한 통합적인 지반 분석 자료 제시 ○ 지반 변형 대응 부재 양식의 고안 및 선정 - 재료 자체의 특성을 활용한 자체 재료형 및 실린더형 부재 세부 설계 ○ 말뚝 기초와 지반 변형 대응 부재의 결합 방법 도출 및 선정 - 말뚝과 지반 변형 대응 부재의 결합 방법으로 볼트식, 나사식 결합 고안 - 공인인증시험을 통한 결합 방식에 따른 강도 분석 ○ 지반 변형 대응 부재의 최적 위치 결정 - 변형 발생 지반 및 지반 변형 대응형 말뚝 기초의 수치해석 모델링 및 거동 분석 - 수치해석을 통한 지반 변형 대응 부재 최적 위치 분석 ○ 지반 변형 모사 토조 및 말뚝 제작 - 지반 변형 대응형 말뚝 기초의 적용성 평가를 위한 지반 변형 모사 토조 개발 - 지반 융기 및 침하 구현 방안 고안 및 지반 변형 구현 장비 개발 - 일반 강관 말뚝 대상 예비 실험을 통한 장비의 가동성 평가
	2년차	목표	○ 지반 변형 대응 부재의 최적 위치 결정 ○ 지반 변형 모사 토조 및 말뚝 제작 ○ 지반 변형 대응형 말뚝 기초 평가
		내용	○ 지반 변형 대응 부재의 최적 위치 결정 - 능동형 및 수동형 지반 변형 대응 부재가 적용된 지반 변형 대응형 말뚝 기초의 수치해석 모델링 및 실효성 검증 - 수치해석 결과를 기반으로 한 지반 변형 대응 부재의 최적 위치 결정 ○ 지반 변형 모사 토조 및 말뚝 제작 - 능동형 및 수동형 지반 변형 대응 부재 설계 및 개발 - 지반 변형 대응 부재와 말뚝의 최적 결합 방법 개발 및 모형 말뚝 제작 - 지반 변형 대응형 말뚝 기초의 적용성 평가를 위한 지반 변형 모사 토조 개발 - 지반 융기 및 침하 구현 방안 고안 및 지반 변형 구현 장비 개발 - 개발 말뚝 대상 모형실험을 통한 장비의 가동성 평가 - 지반 변형 대응형 말뚝 기초 실효성 검증을 위한 모형실험 개념 정립 ○ 지반 변형 대응형 말뚝 기초 평가 - 지반 변형 대응형 말뚝 기초의 지반 변형 대응 효과 및 실효성 검증 - 극한지 및 극서지 지반 조건에 따른 지반 변형 대응형 말뚝 기초 최적 형상 및 변형량 결정 - 기존 말뚝 대비 시공비 10% 절감 효과 분석

연구개발성과	○ 극한지 및 극서지 지반 변형 문헌 및 사례 조사 - 극한지/극서지의 지반 변형의 주요 기전 및 침하/응기 여부 파악 - 극한지/극서지에서의 사회기반시설 건설 수요 파악 ○ 지반 변형 대응 부재 - 지반 변형 대응 부재로서 변위 제어식 능동형과 하중 제어식 수동형 부재 개발 - 슬리브 배치를 활용한 말뚝과 부재의 결합 방식 개발 및 좌굴 안정성 확보 - 지반 변형에 따른 각 부재의 거동 및 지반 변형 대응 효과 분석 - 말뚝 내 지반 변형 대응 부재 최적 위치 제시 ○ 적용성 평가를 위한 실내모형실험 - 지반 변형 모사 토조 및 지반 변형 구현 장비 설계 및 개발 - 능동형 부재의 지반 침하 및 응기 대응 효과 검증 - 수동형 부재의 지반 침하 및 응기 대응 효과 분석 및 검증 - 스프링-대시팟 수동형 부재의 거동 분석 및 부주면 마찰력 30% 감소 효과 검증 - 말뚝 직경 대비 1배 이상의 지반 변형 대응 가능성 검증 - 각 부재 형식에 따른 개발 말뚝의 기존 말뚝에 대한 시공비 10% 절감 효과 검증											
연구개발성과 활용방안 및 기대효과	○ 지속연구 활용 가능성 - 사업화를 위한 TRL 7 이상의 추가적인 후속연구 수행 필요에 따른 기초 연구 자료로서 활용 가능 - 개발 기술과 IoT, ICT 기술 등의 융합을 통한 지능형 사회기반시설 관련 연구에 활용이 가능 ○ 타 연구에서의 응용 - 지반에 변형에 적극적으로 대응하는 다양한 지반 구조물의 연구에 응용 - 본 연구에서 적용한 방법론 활용을 통한 옹벽, 흙막이 벽체, 얇은 기초 등과 같은 관련 기술의 고도화 ○ 기업화 추진 방안 / 기술 이전 - 연구 수행에 따라 발생한 지적 재산권에 대한 기술이전 등을 통한 사업화 가능											
연구개발성과의 비공개여부 및 사유	해당없음											
연구개발성과의 등록· 기탁 건수	논문	특허	보고서 원문	연구 시설· 장비	기술 요약 정보	소프트 웨어	표준	생명자원		화합물	신품종	
								생명 정보	생물 자원		정보	실물
	6	6										
연구시설·장비 종합정보시스템 등록 현황	구입기관	연구시설· 장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장 소)	ZEUS 등록번호			
국문핵심어 (5개 이내)	말뚝		지반 침하		지반 응기		주면 마찰력		적응형 토목 구조물			
영문핵심어 (5개 이내)	Pile		Ground Settlement		Ground Heaving		Skin Friction		Adaptive Civil Structure			

< 목 차 >

1. 연구개발과제의 개요	01
2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행내용	02
3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도	81
4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)	91
5. 연구개발성과 및 관련 분야에 대한 기여 정도	95
6. 연구개발성과의 관리 및 활용 계획	96
7. 참고 문헌	97

별첨자료(성과 증빙자료 등)

1. 연구개발과제의 개요

1) 연구개발과제의 최종 목표

- 본 연구개발사업에서는 환경적 요인으로 인해 지반의 변형이 예측되는 극한 및 극서지에서 안정적으로 상부 구조물을 지지할 수 있는 지반 변형 대응형 말뚝 기초¹ 양식을 개발하고자, 지반 변형 대응 부재²의 형식과 결합 방식을 고안하고, 변형이 발생하는 모형 지반에 설치된 말뚝의 하중 전달 기전을 분석하여, 제안된 지반 변형 대응형 말뚝 기초의 현장 적용성을 평가하고자 한다.

¹ 연구 범위를 명확히 하기 위해 개발 말뚝의 명칭을 “환경 대응형 말뚝 기초”에서 “지반 변형 대응형 말뚝 기초”로 2차년도에 변경함

² 연구 목적을 명확하게 나타내기 위해 지리 및 환경적 요인으로 인한 지반 변형에 대응하는 말뚝 부재의 명칭을 “말뚝 기초 보강 물질”에서 “지반 변형 대응 부재”로 2차년도에 변경함

2) 연구개발과제의 연차별 목표

○ 1차년도

- 극한지 및 극서지 지반 변형에 관한 문헌 및 사례 조사
- 지반 변형 대응 부재 양식의 고안 및 선정
- 말뚝 기초와 지반 변형 대응 부재의 결합 방법의 도출 및 선정
- 수치해석을 통한 지반 조건별 지반 변형 대응 부재의 최적 위치 결정
- 모형 토조 및 지반 변형 모사 시스템 개발
- 모형 실험에 적합한 지반 변형 시나리오 고안

○ 2차년도

- 수치해석을 통한 지반 조건별 지반 변형 대응 부재의 최적 위치 결정
- 모형 토조 및 지반 변형 모사 시스템 개발
- 모형 실험에 적합한 지반 변형 시나리오 고안
- 모형 실험을 통한 지반 변형 대응형 말뚝의 적용성 평가

구분	연구개발목표	핵심 연구개발성과 (연구개발성과물)	현재 국내·외 기술수준	연구개발 목표치	목표치 설정 근거	가중치 (%)
1년차 (2020)	극한지 및 극서지 지반 변형도 문헌 조사	극한지 및 극서지 지반 변형 실태 파악 (지반 변형 분석 보고서)	-	문헌 및 사례조사 15건	극한지 및 극서지 분류에 따른 지반 조사 결과 분석	5.5
	말뚝 기초 보강 물질	말뚝 보강 물질, 결합 방법 및 최적 위치 결정 (분석 보고서, 수치해석 및 실험 보고서)	-	보강재 종류별 2건	말뚝 보강재 종류(자체재료형, 실린더형)에 따른 적합성 분석	27.5
	적용성 평가를 위한 실내모형실험	테스트용 말뚝, 지반 변형 모사 토조 개발 및 제작 (실험 보고서)	-	지반 변형 종류별 2건	지반 변형 종류(침하, 용기)에 적합한 말뚝 및 토조 제작	12.5
2년차 (2021)	지반 변형 대응 부재 ³	말뚝 보강재 최적 위치 결정 (수치해석 보고서)	-	대응 부재 종류별 2건	대응 부재 종류(능동형, 수동형)에 따른 적합성 분석	7.5
	적용성 평가를 위한 실내모형실험	환경 대응형 말뚝 기초 평가 (실험 보고서)	-	말뚝 직경 대비 지반 변형 대응 1배 이상 및 시공 및 유지관리 비용 10% 절감	환경 대응형 말뚝 기초 개발에 따른 지반 변형 대응 효과 분석	42.5

³ 연구 목적을 명확하게 나타내기 위해 지리 및 환경적 요인으로 인한 지반 변형에 대응하는 말뚝 부재의 명칭을 “말뚝 기초 보강 물질”에서 “지반 변형 대응 부재”로 2차년도에 변경함

2. 연구개발과제의 수행 과정 및 수행 내용

○ 연구 수행 과정 중 주요 변경 사항

- 1차년도 연구책임자인 인천대학교 김동욱의 2021년 1월 6일 사망 면직으로 인해 연구책임자가 인천대학교 우상인으로 2차년도 진행 중 2021년 4월 2일자로 변경(협약일: 2021년 04월 02일)

○ [CTE A] - 극한지 및 극서지 지반 변형도 문헌 조사

- [A-1] 극한지 환경 조사

본 연구에서는 그림 1과 같이 총 8개 지역의 극한지(알래스카, 캐나다, 러시아, 남극, 중국, 이탈리아, 그린란드) 지반에 대해서 문헌 및 사례를 조사하였다.



그림 1. 극한지 지반 조사 지역 분포

극한지 지반은 영구 동토층과 계절적 동토층으로 구분된다. 영구 동토층은 주로 한대 기후 지역 지반의 영구 동결 심도 아래에 존재하며, 계절적 동토층은 한대 기후 및 냉대 기후의 지표 부근에 존재한다.

그림 2는 한대 기후 지반의 일반적인 구성 및 기후 변화의 지반에 대한 영향을 함께 보여준다. 지반의 표면에는 계절별로 동결과 융해가 반복되는 계절적 동토층(혹은 활성층)이 존재하며, 그 아래에는 영구 동토층이 존재한다. 그림 2와 같이 영구 동토층에는 얼음층(혹은 아이스렌즈) 및 물과 얼음이 섞인 구간이 산재하여 존재한다. 산업화 등으로 인한 기후 온난화가 발생하여 한대 기후 지역의 온도가 상승할 경우, 지표면에 인접한 영구 동토층 내부의 간극빙 및 아이스렌즈 등이 융해되어 배수되고, 이는 싱크홀 및 지반 침하를 발생시킬 수 있다.

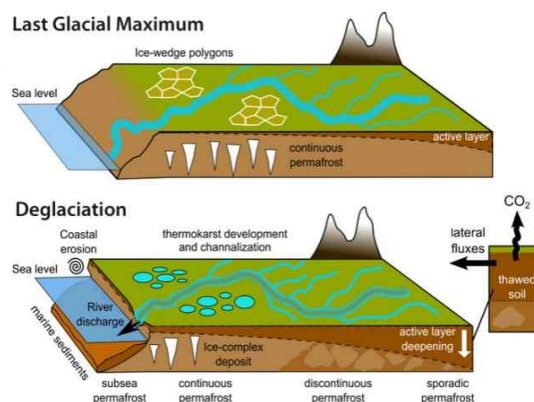


그림 2. 한대 기후 지역 지반의 구성 및 관련 지형(Tesi et al., 2016)

한대 기후에서 그림 2와 같이 계절적 동토 아래에는 영구 동토층이 존재하나, 냉대 기후에는 그림 3과 같이 계절적 동토 아래에는 일반 지반이 존재한다. 기온이 영상으로 유지되는 기간의 계절적 동토층에서는 겨울동안 동결되어있던 지반의 간극수가 융해 후 배수되어 지반의 부피가 감소하여 지반 침하가 발생한다. 반대로 기온이 영하로 유지되는 겨울에는, 간극수가 결정화되면서 동결되어 지반의 부피가 증가하여 지반의 융기가 발생한다. 이러한 현상을 동상 융기(Frost Heaving)이라 한다.

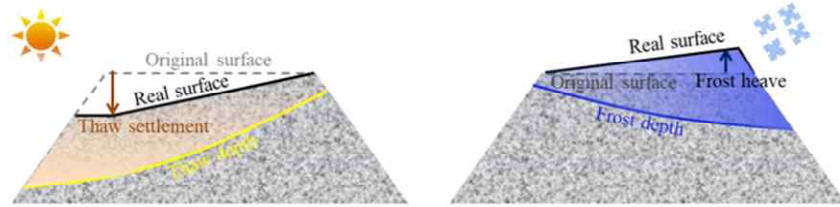


그림 3. 냉대 기후 지역 계절적 동토의 융기 및 침하(Tai et al., 2021)

(1) 미국, 알래스카(Livengood에서 북서쪽으로 20 km, Fairbanks의 북쪽으로 100 km 지점)

해당 지반은 다양한 형태의 동토층으로 구성된다. 대표적인 지층 구성은 지표로부터 ① 포화도가 높은 계절적 동토층, ② 포화도가 낮은 동결/융해가 반복된 퇴적층, ③ 포화도가 높은 영구 동토층, ④ 포화도가 낮은 영구 동토층이다. 이 지역에서는 최근 기후 온난화로 인해 포화도가 높은 ① 및 ③ 지층에서 간극수의 융해로 인한 지반 변형률이 20~60%에 달하는 융해 침하가 발생하였다(Kanevskiy, 2012).

(2) 미국, 알래스카(Anchorage)

Anchorage 지역은 바다의 영향으로 고위도 지역이나 연평균 기온 2.2°C 내외의 비교적 온화한 기온을 가지나, 전체 지역의 2~5%에 해당하는 면적에 영구 동토층이 존재한다. 영구 동토층이 존재하는 지역에서 수행한 시추 조사 결과, 영구 동토층은 4.5~10 m의 깊이에 주로 분포하며, 영구 동토층 내부에는 최대 40 cm 두께의 포화도가 낮은 토사층과 최대 70 cm 두께에 달하는 아이스 렌즈가 불규칙적으로 번갈아 가며 위치한다. 최근 기후의 온난화로 인해 Anchorage 지역 지반의 온도가 상승하고 있으며, 이로 인해 영구 동토층 내부 간극수가 서서히 융해되어, 지반 침하가 발생할 가능성이 있다(Kanevskiy, 2013).

(3) 남극

Campbell (2018)이 남극 대륙 내에서 수행한 지반조사 결과에 따르면, 지표로부터 0.5 m 내외 구간에는 일별 또는 계절별 온도 변화를 겪으면서 동결 및 융해가 반복적으로 발생하는 활성층이 존재한다. 또한, 활성층 아래에는 64~150%의 매우 높은 함수비를 가지는 동토층 및 두꺼운 얼음층이 존재한다.

(4) 캐나다, 퀘벡

Buteau et al. (2005)이 지반조사를 수행한 캐나다 퀘벡주에 위치한 지역의 경우, Tyrrell Sea로부터 유입된 해양 퇴적물로 구성된 영구 동토층이 지표로부터 약 22.5 m 심도까지 존재한다. 해당 영구 동토층에는 최대 4 cm 두께의 아이스 렌즈가 산재되어 있으며, 이는 조사 지반에 존재하는 총 얼음의 60%에 해당한다.

(5) 러시아

Volkov et al. (2017)은 북극 지역에 위치한 Yamal Polar Agricultural College 부근 지역의 지반을 대상으로 콘관입시험을 수행하였다. 지반은 ① 심도 약 1 m 이내에는 사질 점토로 구성된 활성층, ② 심도 1~3.5 m에는 실트질 점토로 구성된 활성층, ③ 심도 3.5~6 m에는 아이스 렌즈가 소량 포함된 실트질 점토층, ④ 심도 6 m 이상에서는 얼음 함량이 높은 점토질 영구 동토층으로 구성된다.

(6) 중국

Chen et al. (2016)이 조사한 칭하이-티베트 고원 지역은 세계에서 가장 큰 중저위도 영구 동토 지역으로 중국에 존재하는 모든 영구 동토 지역 면적의 약 70%를 차지하고 있다. 지표로부터 최대 약 5.7 m 까지는 계절적 동토층이 존재하며, 이후 많은 아이스 렌즈를 포함한 영구 동토층이 최대 60 m 까지 존재한다.

(7) 이탈리아(알프스 산맥)

Guglielmin et al. (2004)는 알프스 산맥에 위치한 Foscagno Valley 부근 동토층에 대해 조사를 수행하였다. 해당 지반은 심도 0.75 m까지는 붕적토, 0.75~2.50 m에는 동결 빙적토, 2.50~7.65 m에는 거대한 얼음층, 7.65~17.50 m에는 얼음층과 포화도가 높은 동토층이 산재 되어 있으며, 17.5~23.5 m에는 비동토층으로 구성된다. 해당 지반과 같이 경사도가 심한 고산지대의 경우, 영구 동토층 및 거대한 얼음층을 포함한 매우 복잡한 지층 구성을 가지고 있는 것으로 파악된다.

(8) 그린란드(2차년도 추가)

Jørgensen and Andreasen (2007)는 그린란드 Kangerlussuaq 공항 지반의 영구 동토층에 대해 조사를 수행하였다. 해당 지반에는 심도 1.5~2.0 m 이내에 활성층이 존재하며, 이후 100~150 m까지 영구 동토층이 존재한다. 최근 기후 온난화로 인해 아스팔트 포장층 하부의 활성층이 융해되며, 지반 침하가 발생하였다.

- [A-2] 극서지 환경 조사

본 과업에서는 총 12곳(브라질, 인도, 말레이시아, 멕시코, 싱가포르, 태국, 베트남, 나이지리아, 사우디아라비아(2건), 수단, 요르단)의 극서지 지반에 대한 문헌 및 사례에 대해 조사를 수행하였다. 극서지는 기후에 따라 열대 기후 지역과 사막 기후 지역으로 구분되며, 기후 조건에 따라 지반 조건이 다르다.

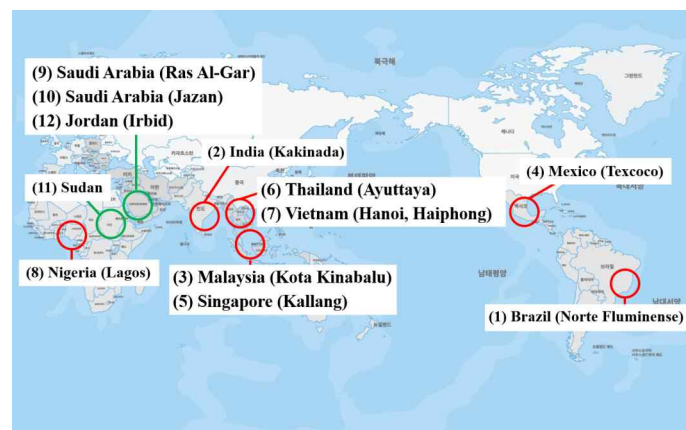


그림 4. 극서지 지반 조사 지역 분포

열대 기후 지역에서는 높은 강수량, 온도 및 습도의 영향으로 물리적/화학적 풍화, 침식 및 퇴적 현상이 활발하게 발생한다. 이에 따라 중남미, 인도, 동남아시아의 열대 기후 지역의 해안가에는 연약한 점성토 지반이 매우 넓고 깊게 분포한다. 이러한 지반에 상부에 구조물 등으로 인한 하중이 가해질 경우, 그림 5와 같이 과잉간극수압이 발현되고, 그 후 간극수가 천천히 배수되면서 지반이 가라앉는 압밀 현상이 발생한다.

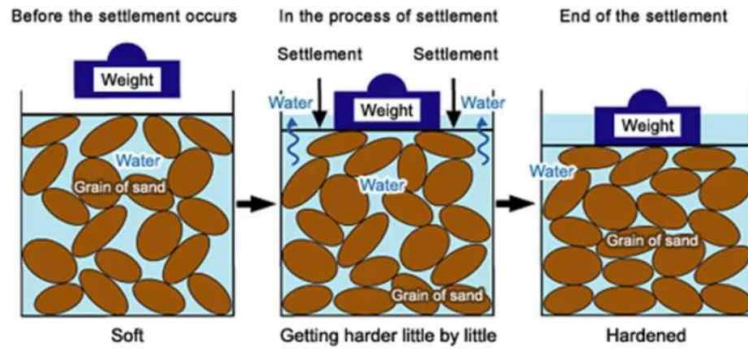


그림 5. 연약 점토 지반에서 압밀 현상의 기전

사막 기후 지역 해안가 인접 지반에서는 강우 및 해수 범람 등으로 인해 지반 내로 수분이 유입된 후, 매우 건조한 기후 특성상 간극수가 빠르게 증발하여, 간극수 내에 용해되어 있던 염분이 결정화되면서 지반이 융기되거나 지표에 균열이 발생한다. 이러한 지반을 Sabkha라 하며, 그림 6은 Sabkha의 형성과정을 도식화하여 보여준다. Sabkha 지반에서 다시 강우 등으로 인해 수분이 유입될 경우, 결정화된 염분의 용해로 인해 융기된 지반이 빠르게 침하할 수 있다.

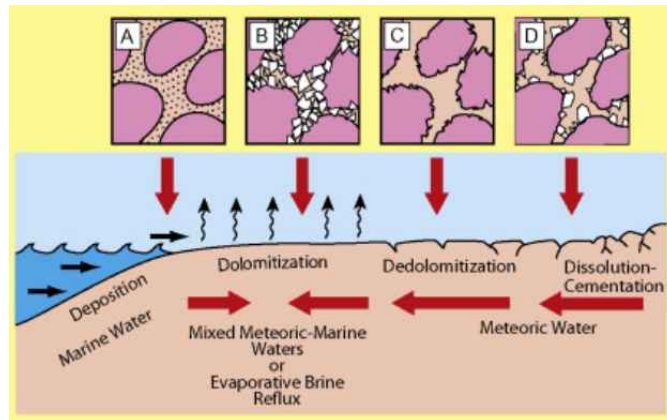


그림 6. Sabkha 지반의 형성 (Purser, 1985)

또한, 본 연구의 2차년도에는 팽창성 지반에 대해서 추가로 조사하였다. 팽창성 지반은 범람성 하천이 존재하는 사막 기후 지역에 주로 분포한다. 우기에 하천의 범람으로 인해 지반에 퇴적된 점토 입자가, 건조한 사막 기후의 특성상, 급격히 건조되면서 수축한다. 그 후, 국지성 호우, 하천의 재범람, 상하수도의 유출 등으로 인해 점토층에 물이 유입될 경우, 점토층이 급격하게 팽창하면서 그림 7과 같이 상부 구조물에 손상을 가할 수 있다.

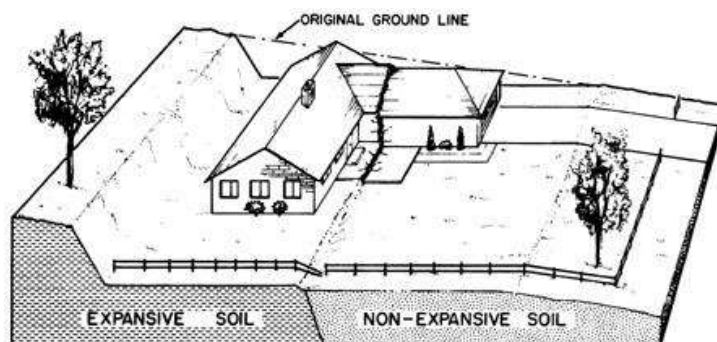


그림 7. 팽창성 지반으로 인한 상부 구조물의 손상(Mathewson, 1988)

(1) 브라질(Norte Fluminense)

Povoa et al. (2018)은 브라질 Norte Fluminense 지역에서 지반조사를 수행하였다. 지반조사 결과, 해당 지반은 주로 퇴적층으로 구성되며, 지하 수위는 지표로부터 약 0.5 m 심도에 위치한다. 시추 조사 결과, 0~2 m 구간에는 연약한 이탄질 점토층(Soft Peat Clay)이 존재하며, 이후 최대 13 m 심도까지 연약한 점토층이 존재한다.

(2) 인도(Kakinada)

Kumar et al. (2015)에 따르면, 인도 Kakinada 지역 지반에는 연약한 해성 점토 퇴적층이 두껍게 존재하며, 지하 수위는 심도 0.5 m에 위치한다. 시추 조사 결과, 심도 1.5 m까지는 SPT N이 19 정도인 중간 밀도의 모래층, 심도 1.5~3 m에는 SPT N이 1인 매우 느슨한 점토층, 심도 3~14 m에는 약 84%의 함수비를 가지는 SPT N이 1~2인 매우 연약한 점토층, 심도 14 m 아래에는 SPT N이 50 이상인 단단한 점토층이 해당 지반을 구성한다.

(3) 말레이시아(Kota Kinabalu)

Mohamad et al. (2016)에 따르면, 상당한 비율의 말레이시아 국토에 연약 지반이 존재한다. 이 연약지반은 주로 총적 퇴적물, 유기물, 이탄으로 구성된다. Kota Kinabalu 지역에서 수행한 지반조사 결과, 최상부에 존재하는 약 7.2 m 두께의 퇴적층 아래에는 약간의 유기물을 포함한 매우 연약한 이탄층이 10.6 m의 두께로 존재한다. 지반조사 수행 지역에서 지반 개량 후 시공된 산업 단지의 침하량을 분석한 결과, 시공 완료 이후 2년간 13 cm의 침하가 추가로 발생하였으며, 5년 뒤에는 24.3 cm의 침하가 발생할 것으로 예측하였다.

(4) 멕시코(Texcoco)

Vega-Meyer et al. (2006)에 따르면, 멕시코시티 인근 Texcoco 지역에는 유기질 함량이 높은 매우 연약한 점토층이 최대 36.5 m까지 분포한다.

(5) 싱가포르

Lee et al.(2009)는 싱가포르 Kallang 지역의 연약 지반에 대해 조사를 수행하였다. 지반조사 결과, 0~9.5 m에는 매립층, 9.5~25.5 m에는 매우 연약한 해성 점토층, 25.5~31.5 m에는 견고한 중간 점토층, 31.5~38.5 m에는 연약한 해성 점토층, 38.5~47.5 m에는 견고한 중간 점토층, 47.5 m 이하에는 입경이 큰 총적층이 존재하였다. 총 연약층의 두께가 38.5 m에 달하는 해당 지반에서는 사회기반시설 건설 이후, 압밀침하가 2009년 현재 지속적으로 발생하고 있다.

(6) 태국(Ayuttaya)

Voottipruex et al. (2019)가 태국 Ayuttaya 지역의 지반을 조사한 결과, 0~2 m에 위치한 풍화 점성토층이 존재하고, 2~8 m 구간에는 비배수 전단강도가 10 kPa 내외인 매우 연약한 점토층이 존재한다. 단단한 점토층은 심도 8 m 아래에 존재한다.

(7) 베트남

Yoon et al. (2010)에 따르면, 베트남 해안지역에는 두께 20~50 m의 연약한 점토층이 다수 분포하고 있다. 하노이와 하이퐁 지역 지반의 층상은 일반적으로 심도 0~20 m에 위치하는 초연약 점성토층, CH, CL, MH 등으로 분류되는 세립토로 구성된 두께 10~30 m의 중간층, SPT N값이 10 이상인 중간 굳기 이상의 점토로 구성되는 하단층으로 구분된다.

(8) 나이지리아(Lagos)

Oyedele et al. (2011)은 나이지리아 Lagos 지역에서 지반조사를 수행하였다. 지반조사 결과, 일반적으로 매우 연약한 이탄 및 점토층이 심도 3 m까지 존재하며, 조밀한 모래층은 최소 10 m 이상의 심도에 존재한다.

(9) 사우디아라비아(Ras Al-Gar)

사우디아라비아 동부에 위치한 Ras Al-Gar 지역의 지반조사 결과, 심도 0~5 m에는 Sabkha 층, 5~10 m에는 매우 느슨한 실트질 모래가 존재하며, 그 아래에는 중간 또는 매우 단단한 실트질 모래층이 분포한다(Alnuaim and El Naggar, 2014).

(10) 사우디아라비아(Town of Jazan)

Dhowian et al. (1987)에 따르면, 사우디아라비아의 수도 리야드에서 남서쪽 방향에 위치한

Jazan 마을 전역에는 Sabkha 지반이 존재한다. 지반조사 결과, 해당 지반은 ① 심도 2 m까지는 미세한 실트질 모래로 구성된 균열이 발생한 Sabkha 지층, ② 심도 2~10 m에는 작은 입경의 모래, 유기질 점토와 Sabkha가 섞여있는 압축성이 매우 큰 복합지층, ③ 심도 10 m 이상에는 중간 또는 높은 밀도의 모래로 구성된 단단한 지층으로 구성된다.

(11) 수단(2차년도 추가)

Charlie et al. (1984)는 아프리카 수단의 팽창성 지반에 대해 조사를 수행하였다. 조사 결과, 팽창성 지반은 통일분류법상 대부분 CH 혹은 MH로 분류되며, 수분 유입 시 상부 하중이 없을 때 16~380%, 상부 하중이 존재할 때 1~15% 팽창하였다. 팽창성 지반의 두께는 나일강 부근에서 가장 크며, 그 값은 10 m 이상으로 측정되었다. 수단에서는 팽창성 지반의 영향으로 많은 구조물이 기울어지거나, 구조물 내력벽에 균열이 발생하였다.

(12) 요르단(2차년도 추가)

Abdullah and Al-Abadi (2010)는 요르단 북부 Irbid 지역의 팽창성 지반에 대해 조사를 수행하였다. 조사 결과, 11~16 m 두께의 팽창성 지반이 존재한다. 해당 팽창성 지반은 통일분류법상 CH로 분류되며, 14%의 팽창성을 가진다.

- [A-1 & A-2] CTE A 결론

본 과업에서는 극한지(한대 및 냉대 기후 지역)에 존재하는 동토층과 극서지(열대 및 사막 기후 지역)에 존재하는 특이 지반에 대한 문헌 및 사례를 조사하였다.

영구 동토층이 존재하는 지역(극한지)에서는 지구 온난화에 따른 기온 증가로 인해 영구 동토층이 포함하고 있는 풍부한 양의 얼음이 융해되고, 융해된 간극수가 배수되어 침하가 점진적으로 발생하고 있는 문제가 있다. 이에 따라 기존에 영구 동토층에 설치된 구조물 등의 안정성이 저해되고 있다. 이러한 기온 변화는 갑작스럽게 일어나지 않으며, 점진적으로 일어난다. 따라서, 영구 동토층에 새로 구조물을 건설할 경우, 이러한 침하 현상을 고려해서 구조물을 지지할 기초를 설계할 필요가 있다.

지구 온난화로 인해 영구 동토층이 계절적 동토층(혹은 활성층)으로 변화하고 있다. 계절적 동토층에서는 계절의 변화에 따라 간극수가 동결/융해되며, 이에 따라 간극수의 동결 시에는 지반이 융기하고 융해 시에는 지반이 침하된다. 즉, 계절적 동토층에서는 지반의 융기/침하가 반복적으로 일어나며, 이러한 거동을 고려한 기초 구조물이 필요하다.

열대(극서지) 지역에는 활발한 풍화작용으로 인해 강과 바다가 만나는 지역에 매우 두꺼운 연약한 점성토 지반이 분포하고 있다. 이러한 지역에 교량, 항만, 공항, 고속도로와 같은 대형 사회기반시설을 설치할 경우, 큰 양의 압밀침하가 예상되며, 이를 고려하여 안전하게 무거운 상부 구조물을 지지할 기초가 필요하다.

Sabhka 지반이 존재하는 사막(극서지) 해안가 지방에는 해수의 범람 및 급속 건조에 따른 염분의 결정화로 인해 지반의 융기와 해수의 재범람 및 국지성 호우로 인한 염분의 용해가 유발하는 급격한 침하가 반복적으로 발생할 수 있다. 즉, Sabhka 지반에 설치되는 구조물의 대해서는 이러한 염분의 결정화/용해로 인한 지반의 반복적인 융기/침하에 대항할 수 있는 기초양식이 필요하다.

또한, 범람 하천 주위 사막(극서지) 지역에서는 하천의 범람으로 인해 퇴적된 점성토가 사막기후의 영향으로 급속히 건조되어 쌓인다. 이후, 하천의 재범람, 상하수도의 유출, 국지성 호우 등으로 인해 수분이 유입될 경우 급속히 팽창하고, 그 후 재건조 과정 동안 급속히 수축하는 팽창성 지반이 존재한다. 횡 방향 하중을 주로 받은 풍력 발전소의 기초의 경우, 모멘트로 인한 인발에 저항을 해야 하며, 따라서, 이러한 팽창성 지반이 많이 분포하는 극서지에 구조물을 시공할 경우, 수분 유입으로 인한 지반의 융기/침하를 고려한 기초 양식이 필요하다.

결론적으로 극한 및 극서지에는 지반공학 그리고 토질역학 측면에서 어려운 지반이 많이 존재한다. 구조물의 안정성 측면에서는 이러한 어려운 지반을 피하는 것이 합리적일 수 있다. 본 과업에서 조사한 문헌에서 다른 지역의 국가, 기후분류, 지반 조건, 및 지반조사 사유를 정리하면 표 1과 같다. 표 1에서 보이듯, 본 과업에서 조사한 극한지 및 극서지 지반조사에 대한 문헌에서 지반조사를 수행한 이유는 사회기반시설의 계획, 건설, 유지관리와 관련이 있다. 이는 사회기반시설의 입지는 지반공학적 이유보다는 지리, 사회, 정치, 경제적 이유로 주로 결정되기 때문이다.

역설적으로 이런 어려운 지반이 존재하는 지역이 지리 및 사회적으로 요지일 경우가 많이 있다. 사막 기후 지역에서는 당연히 기후가 선선한 해안 지역(Sabhka 지반 존재 가능 지역)에 인구가 밀집되어 있으며, 또한 물을 쉽게 구할 수 있는 하천 주위(팽창성 지반 존재 가능 지역)에 많은 사람이 살고 있다. 열대 기후에는 식수를 쉽게 구할 수 있으며, 물류 이동이 편한 강과 바다가 만나는 지역(두꺼운 퇴적 연약층이 존재하는 지역)에 많은 도시가 있다. 또한, 경제 및 정치적인 이유로 어려운 지반에서의 사회기반시설에 대한 수요가 꾸준히 증가하고 있다. 극한의 추위가 있지만, 현재까지 채취되지 않은 많은 자원이 매설된 극한지에도 많은 사회기반시설의 구축이 예정되어 있으며, UN 원조사업의 일환으로 팽창성 지반이 많은 수단에서는 최근 풍력 발전소의 건설이 많이 계획 중(Arab State, 2021)에 있다. 종합해 보면, 전 세계적으로 동토 지반, 연약 지반, Sabhka 지반, 팽창성 지반에서의 사회기반시설의 건설은 피할 수가 없다. 따라서, 이러한 어려운 지반에서 안전하게 상부 하중을 지지할 수 있는 새로운 말뚝 양식의 제시가 필요하다.

표 1. 극한지 및 극서지 지반조사 문헌 상세

분류	국가	분류	참고문헌	지반 조건	지반 조사 사유
극한지	미국	극지	Kanevskiy (2012)	동토층	고속도로 건설 및 철로 직선화
	미국	극지	Kanevskiy (2013)	동토층	고속도로 건설 및 철로 직선화
	남극	극지	Campbell (2018)	동토층	매장 자원 개발을 위한 플랜트
	캐나다	극지	Buteau et al. (2005)	동토층	대규모 인프라 구축 프로젝트
	러시아	극지	Volkov et al. (2017)	동토층	구조물 침하 발생 원인 파악
	중국	고원	Chen et al. (2016)	동토층	인프라 구축 계획 수립
	이탈리아	고원	Guglielmin et al. (2004)	동토층	동토 지층의 특성 파악
	그린란드	극지	Jørgensen and Andreasen (2007)	동토층	동토 융해 및 지반 침하 발생 원인 파악
극서지	브라질	열대	Povoa et al. (2018)	연약 점토층	석유 및 가스 산업 시설 구축
	인도	열대	Kumar et al. (2015)	연약 점토층	산업 신설 및 항만 개발
	말레이시아	열대	Mohamad et al. (2016)	연약 점토층	구조물 지반 침하 원인 파악
	멕시코	열대	Vega-Meyer et al. (2006)	연약 점토층	신규 도로 건설
	싱가포르	열대	Lee et al.(2009)	연약 점토층	흙막이 지지 공법 설계 검토
	태국	열대	Voottipruex et al. (2019)	연약 점토층	고속도로 건설
	베트남	열대	Yoon et al. (2010)	연약 점토층	고속도로 건설
	나이지리아	열대	Oyedele et al. (2011)	연약 점토층	얕은 기초 시공 가능성 검토
	사우디 아라비아	사막	Alnuaim and El Naggar (2014) Dhowian et al. (1987)	Sabhka 지반	주거 인프라 재개발 / 석유 생산 플랜트
	수단	사막	Charlie et al. (1984)	팽창성 지반	사회기반 시설 건설을 위한 팽창성 지반 문제점 파악
	요르단	사막	Abdullah and Al-Abadi (2010)	팽창성 지반	팽창성 지반 특성 분석 및 개량 공법 평가

○ CTE B - 지반 변형 대응 부재 (1, 2차년도)

- [B-1 & 2] 지반 변형 대응 부재 선정 / 말뚝과 부재의 결합 방법 선정

• 지반 변형 대응 구조물의 필요성

지반의 침하 및 융기가 예상되는 지반에 대해서는 지반 개량 공법이 우선적으로 고려되고 있다. 영구 동토 지반 침하의 경우, 지구 온난화에 따른 점진적인 침하이므로 이를 지반 개량을 통해 막을 수는 없다. 계절적 동토 지반을 개량하기 위해서 많은 시도가 있었지만, 아직 그 적용성이 부족하여 계절적 동토층이 많은 러시아에서는 그림 10과 같은 라스푸티차 현상이 매년 발생하고 있다. 또한, 사막 기후 지역에 많이 분포하는 Sabhka 지반, 팽창성 지반에 대해서는 효용성이 있는 지반 개량 공법이 제시되지 않았다. 현재 명확한 작용 기전과 효용성이 밝혀진 지반 개량 공법은 연약한 점성토층에 적용되는 연직 배수재 공법이 있다. 하지만, 연직 배수재가 설치된 연약 점성토 지반에서도 1차 압밀 종료 후에도 2차 압축 침하가 무시하지 못할 정도로 발생하며, 2차 압축 침하를 억제할 방안은 아직 명확히 제시되어 있지 않다. 따라서, 다양한 기전으로 발생하는 모든 종류의 지반 변형을 억제할 방안은 존재하지 않으며, 이에 대한 대응으로 지반의 변형에 대응하는 구조물 양식을 제시할 필요성이 있다.



그림 8. 라스푸티차 현상

• 지반 침하/융기에 따른 말뚝의 하중 전달 기전

압밀 침하 등의 이유로 인해, 말뚝보다 지반이 더 침하하는 경우, 그림 9와 같이 말뚝 주위 지반에는 전단 변형이 발생하게 된다. 이에 따라 말뚝 주변에는 하향 전단 응력이 발생하며, 이를 부주면 마찰력(Negative Skin Friction)이라고 한다. 부주면 마찰력은 말뚝 단면에 작용하는 축력 및 지지층에 전달되는 하중을 증가시키며, 이는 말뚝의 과도한 침하 혹은 지지력 파괴를 유발할 수 있다. 따라서 지반 침하 시, 부주면 마찰력의 발현으로 인해 상부 구조물의 안정성이 감소한다.

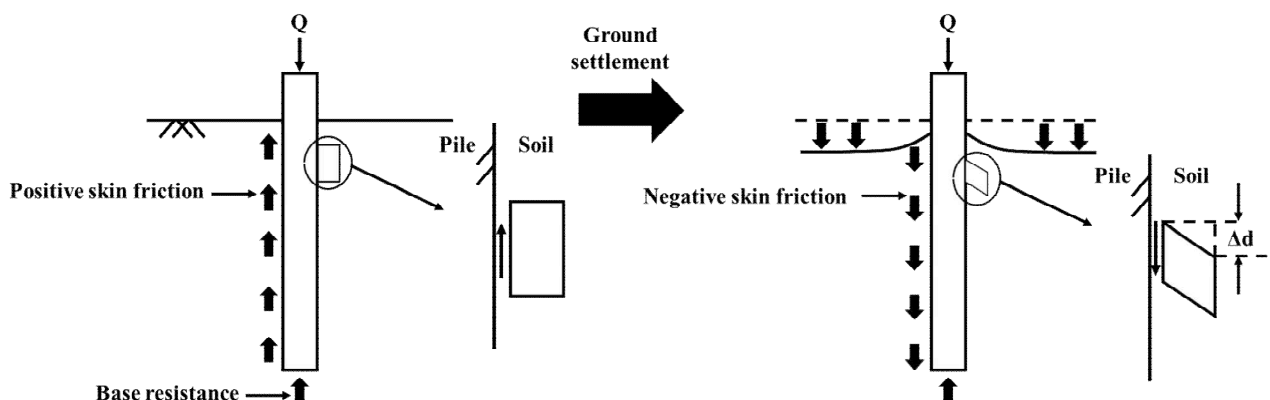


그림 9. 지반 침하에 따른 말뚝의 하중 전달 기전 변화

동상 융기 및 팽창성 지반에 수분 유입 등의 이유로 **지반이 융기하는 경우**, 그림 10와 같이 말뚝 주위 지반에는 반시계 방향으로 전단변형이 발생하게 된다. 이에 따라 말뚝 주면에는 상향 마찰력이 발생하고, 이는 말뚝을 인발시키려 한다. 이러한 현상 발생 시에는 **말뚝의 인발 저항력이 감소하는 문제가 발생**하며, 이는 특히 횡 방향 하중을 주로 지지하는 구조물을 지지하는 무리말뚝 중 하중이 작용하는 방향에 설치된 말뚝의 안정성에 영향을 줄 수 있다.

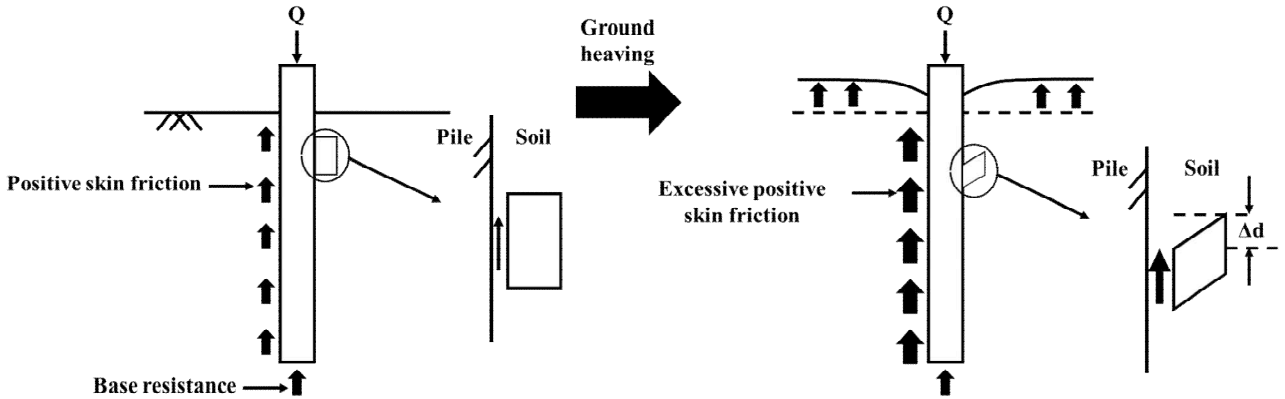


그림 10. 지반 융기에 따른 말뚝의 하중 전달 기전 변화

• 지반 변형 대응 방식 제시

현재 지반 변형 시 발생하는 말뚝에 불리하게 작용하는 주면 마찰력(예: 부주면 마찰력)을 감소시키기 말뚝 표면에 역청재 등을 이용하여 **Slip Layer Coating를 적용하는 공법**이 사용되고 있다. 이 공법의 경우, **부주면 마찰력을 20% 정도 감소시키는 것으로 알려져 있으나, 그 효용성이 한시적이고, 또한 환경오염 문제를 일으킬 수 있다.** 다른 공법으로는 **말뚝 직경보다 약간 큰 케이싱을 박아 말뚝 자체가 부주면 마찰력을 받지 않도록 하는 방안**이 있으나, **말뚝과 케이싱이 모두 시공되어야 하므로 연약층 두께가 클 경우 비경제적이며, 마찰말뚝으로 시공할 수 없다는 단점**이 있다.

따라서 기존 공법과는 다른 기전으로 극한지 및 극서지 지역에서 발생할 수 있는 지반 변형에 대해 장기적으로 대응할 수 있는 새로운 말뚝 기초 양식의 제시가 필요하다. 이에 따라 본 과업에서는 그림 11과 같이 일반 강관 말뚝의 중간에 지반 변형에 대응할 수 있는 **“지반 변형 대응 부재”가 삽입된 형태의 말뚝 양식을 제시하고자 하며, 그 명칭을 “지반 변형 대응형 말뚝”이라 설정하였다.** 지반 변형 대응 부재는 지반의 변형에 따라 지반 침하 시에는 소폭 압축되고, 지반 융기 시에는 소폭 팽창하여 **지반과 말뚝 사이의 상대변위를 줄여서 말뚝에 불리하게 작용하는 주면 마찰력을 감소시키는 역할**을 한다.

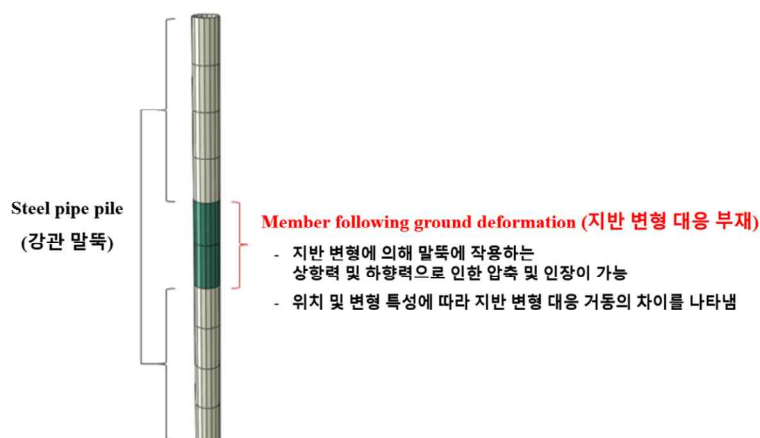


그림 11. 지반 변형 대응형 말뚝의 도식도

그림 12는 지반 변형 대응형 말뚝이 지반 침하에 대응하는 방식을 보여준다. 그림 12과 같이 본 과업에서 제시하는 말뚝은 강관 말뚝 사이에 지반 변형 대응형 부재가 위치하고 있다. 만일 그림 12의 중앙 그림과 같이 지반의 침하가 발생한다면, 강성이 매우 큰 말뚝은 지반에 비해 소량 침하하며, 부주면 마찰력이 말뚝의 주면을 따라 작용한다. 이 부주면 마찰력은 말뚝의 축력을 증가시키며, 마찰말뚝의 경우에는 지반에 작용하는 선단 하중을 증가시켜, 말뚝의 안정성을 저해시킬 수 있다. 하지만, 본 연구에서 제안하는 지반 변형 대응형 부재를 적용한다면 그림 12의 우측 그림과 같이, 지반 변형 대응형 부재의 압축으로 인해 부재 상부에 위치하는 말뚝에 작용하는 부주면 마찰력이 감소하게 되며, 말뚝의 하중 전달 기전을 개선하여 말뚝에 작용하는 축력을 감소시키는 원리로 말뚝의 안정성을 확보할 수 있다.

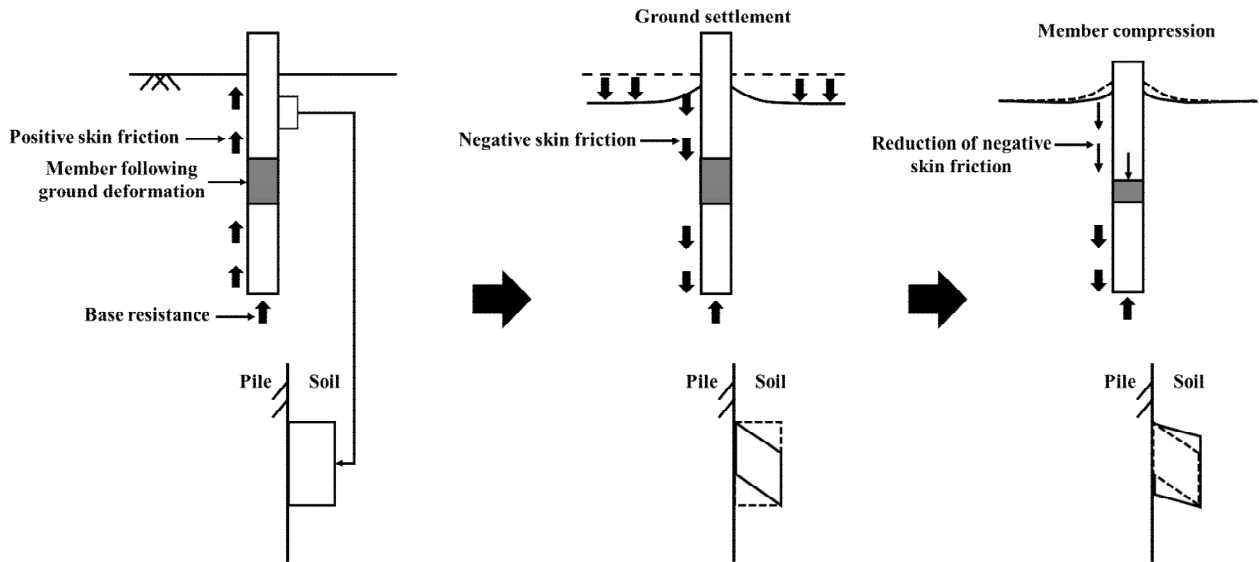


그림 12. 지반 변형 대응형 말뚝 기초의 지반 침하 대응 메커니즘

그림 13는 지반 변형 대응형 말뚝이 지반 융기에 대응하는 방식을 보여준다. 만일 지반의 융기가 발생한다면, 상향으로 추가 주면 마찰력이 작용한다. 인발에 저항하는 말뚝의 경우, 이 경우 인발 저항력을 일부 상실하게 되어 그 안정성이 감소한다. 지반 변형 대응형 부재를 적용한다면 그림 13의 우측 그림과 같이, 지반 변형 대응형 부재의 팽창으로 인해 말뚝을 인발시키려는 주면 마찰력이 감소하게 되며, 말뚝의 하중 전달 기전을 개선시킬 수 있다.

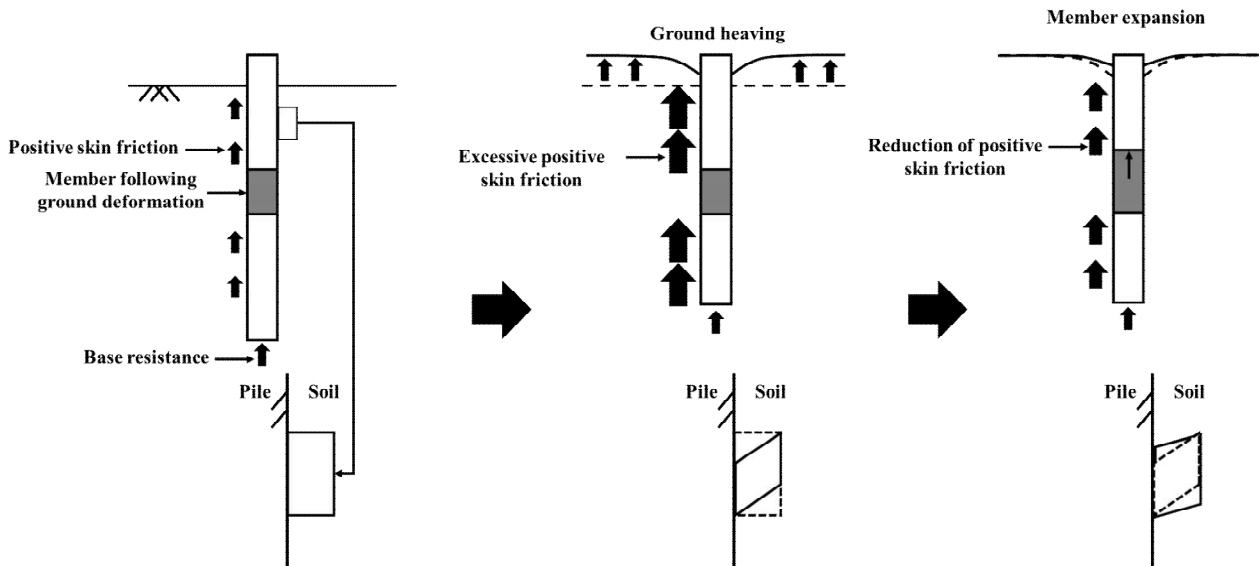


그림 13. 지반 변형 대응형 말뚝 기초의 지반 융기 대응 메커니즘

위에 언급한 바와 같이 거동하는 지반 변형 대응형 말뚝은 기존 말뚝 양식을 합리적으로 제시하기 위해서는 다음 사항에 대한 면밀한 검토 및 확인이 필요하다.

① 지반 변형 대응 부재의 말뚝 내 위치 결정

실제 지반에는 잠재적 변형 가능성이 있는 지층과 안정적인 지층이 혼재되어 있다. 따라서, 지층 구조에 따라 지반 변형 대응 부재의 말뚝 내 위치를 최적화할 필요가 있으며, 본 과업에서는 수치 해석을 통해 이를 제시하고자 한다.

② 지반 변형 대응 부재의 양식 및 말뚝과의 결합 방식 결정

지반 변형 대응 부재는 지반의 침하 시에는 압축 거동을, 지반의 융기 시에는 팽창 거동을 할 수 있어야 한다. 따라서 이러한 복잡한 거동을 수행할 수 있는 부재의 양식을 고안해야 한다. 또한, 지반 변형 대응 부재와 말뚝 사이를 안전하게 연결할 수 있는 방안 또한 고려해야 한다.

③ 지반의 침하/융기에 대응하기 위해 지반 변형 대응 부재의 변형량 파악

지반의 변형은 큰 폭으로 발생할 수 있으나, 지반 변형 대응 부재의 변형량은 한정되어 있다. 따라서 효과적으로 지반의 변형에 대응할 수 있는 지반 변형 대응 부재의 변형량을 결정해야 한다. 본 과업에서는 이를 모형실험을 통해 결정하고자 한다.

본 보고서에서는 각 연차별로 상기 사항에 대한 접근법과 그 결과, 그리고 보완책을 수치해석, 모형실험, 그리고 해석적 방법을 통해 제시하고자 한다.

• 지반 변형 대응 부재 및 결합 방식 - 1차년도 연구내용

본 과업의 1차년도에는 지반 변형 대응 부재로 재료 자체의 특성을 활용한 자체 재료형 및 내부 유체의 이동에 의해 변위가 발생하는 실린더형을 고려하였다.

① 자체 재료형 지반 변형 대응 부재

자체 재료형 지반 변형 대응 부재 및 상하부 말뚝과의 연결 도식도는 그림 14와 같다. 지반 변형 대응 부재 중앙부 외경은 말뚝의 외경과 같으며, 지반 변형 대응 부재 상하부 외경은 말뚝의 내경과 같아 그림 14와 같이 용이하게 상하부 말뚝과 체결이 가능하도록 하였다. 지반 변형 대응 부재와 말뚝은 볼트, 나사선, 혹은 용접으로 결합하도록 한다.

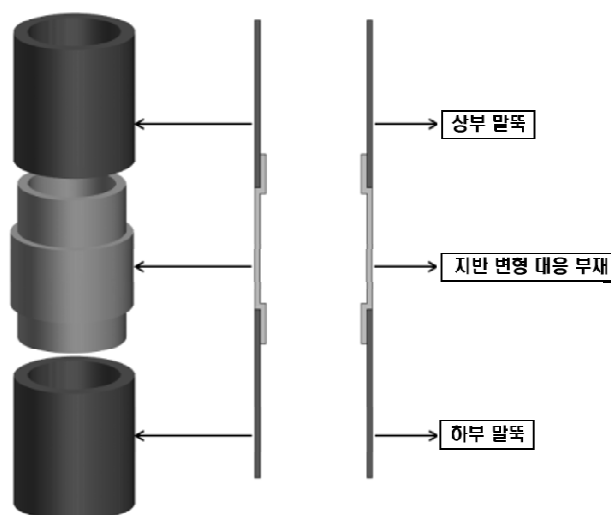


그림 14. 자체 재료형 지반 변형 대응 부재 도식도

그림 14와 같은 지반 변형 대응 부재가 가져야 하는 재료적 특성은 다음과 같다. 먼저 말뚝의 구조적 안정성을 확보하기 위해 상하부에 연결된 강관 말뚝과 항복 및 인장 강도는 유사해야 하며, 지반

변형에 따라 압축/인장이 가능하도록 축 방향 강성이 작아야 한다. 또한, 마지막으로 상하부 말뚝과 용접 혹은 볼트를 이용한 결합이 가능해야 한다. 본 과업의 1차년도에서는 콘크리트, 폴리머, 금속 등의 다양한 건설 재료 중, 상기 조건을 만족하기 위해서는 금속이 가장 적합하다는 판단하에, 다양한 합금에 대해 조사를 하였다. 조사한 합금의 탄성계수를 포함한 물성값은 표 2와 같다.

Titanium 및 Zirconium의 경우, 강관 말뚝의 재료로 주로 쓰이는 Stainless Steel에 비해 강성은 작고, 항복 강도는 비슷하여 적합하나, 인장 강도가 작고 매우 고가인 관계로 배제하였다. Cobalt Chrome은 Stainless Steel에 비해 강한 강도를 가지나 강성이 유사하여 배제하였다. 최종적으로 본 연구의 1차년도에서는 알루미늄 합금(Aluminium6061)을 자체 재료형 지반 변형 대응 부재의 재료로 선정하였다.

표 2. 자체 재료형 지반 변형 대응 부재의 재료 후보군

금속 종류	탄성 계수 (GPa)	항복강도 (MPa)	극한 인장 강도 (MPa)
Stainless steel	190-200	205	515
Aluminum 6061	69-79	275	310
Titanium, Grade 1	103	170	240
Zirconium 702	96	205	380
Titanium, Ti6A4V	100-120	940	1100
Cobalt Chrome	230	450	621

② 실린더형 지반 변형 대응 부재

1차년도에 제안한 실린더형 지반 변형 대응 부재의 작동 기전은 다음과 같다. 지반 변형에 의해 상부 말뚝에 축력이 작용할 경우, 상부 말뚝이 지반 변형 대응 부재를 변형시키고, 이 변형이 특정값에 도달하면 실린더에 있던 유체가 이동하면서, 상부 말뚝이 지반 변형과 함께 움직여 말뚝-지반 사이의 상대변위를 감소시킨다. 본 과업의 1차년도에는 실린더형 부재로서 유체 배출식과 유체 주머니식을 제안하였다.

그림 15는 유체 배출식 실린더를 적용한 지반 변형 대응 부재(이하, 유체 배출식 실린더 부재)를 도시화 하여 보여준다. 유체 배출식 실린더 부재는 지반의 침하에만 대응이 가능하도록 설계하였으며, 자체 재료식과 동일하게 유체 배출식 실린더 부재 중앙부 외경은 말뚝의 외경과 같으며, 상하부 외경은 말뚝의 내경과 같아 상하부 말뚝과 체결이 가능하도록 하였다.

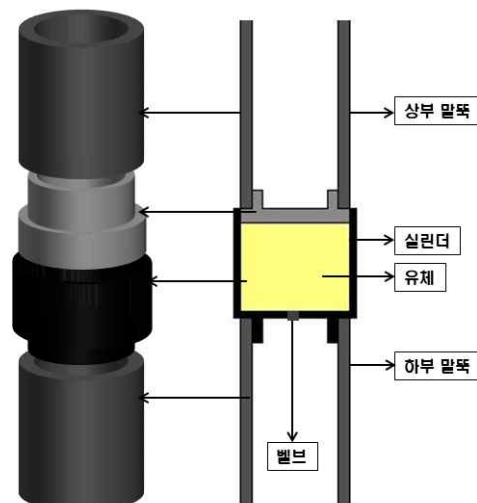


그림 15. 유체 배출식 실린더형 지반 변형 대응 부재 도식도

그림 15와 같이 유체 배출식 실린더 부재는 실린더와 밸브로 구성된다. 그림 16은 지반 침하 발생 시, 유체 배출식 실린더 부재의 대응 방식을 보여준다. 만일 지반이 말뚝에 비해 더 침하 한다면, 부주면 마찰력이 작용하게 되고 부주면 마찰력은 상부 말뚝을 아래로 끌어내리려고 하며, 이 하중은 실린더 내부의 유체에 전달된다. 이 경우, 그림 16과 같이 밸브 하단에 위치하는 스프링이 압축된다. 지반 변형에 의해 더 큰 힘이 실린더에 전달되면, 스프링이 계속 압축되어 실린더의 배출구와 밸브의 배출구가 일치할 경우, 실린더 안의 유체가 배출된다. 이에 따라, 실린더가 압축되고, 상부 말뚝 또한 하향으로 이동한다. 유체 배출식 실린더 부재는 이러한 기전으로 말뚝에서 지반과 말뚝의 상대변위를 억제하여 부주면 마찰력을 상쇄시킨다.

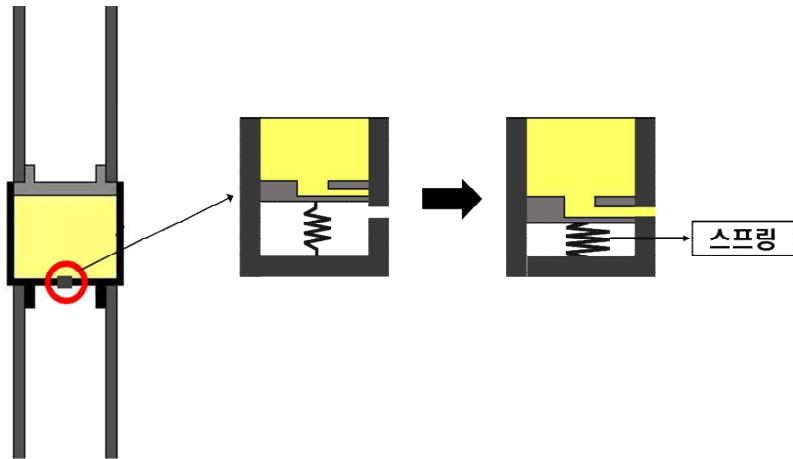


그림 16. 지반 침하 시 유체 배출식 실린더형 지반 변형 대응 부재의 거동

그림 17은 유체 주머니식 실린더를 적용한 지반 변형 대응 부재(이하, 유체 주머니식 실린더 부재)를 도식화하여 보여준다. 유체 주머니식 실린더 부재는 지반의 침하/용기 모두에 대응이 가능하도록 설계되었으며, 다른 부재와 마찬가지로 부재 중앙부 외경은 말뚝의 외경과 같으며, 상하부 외경은 말뚝의 내경과 같아 상하부 말뚝과 체결이 가능하도록 하였다.

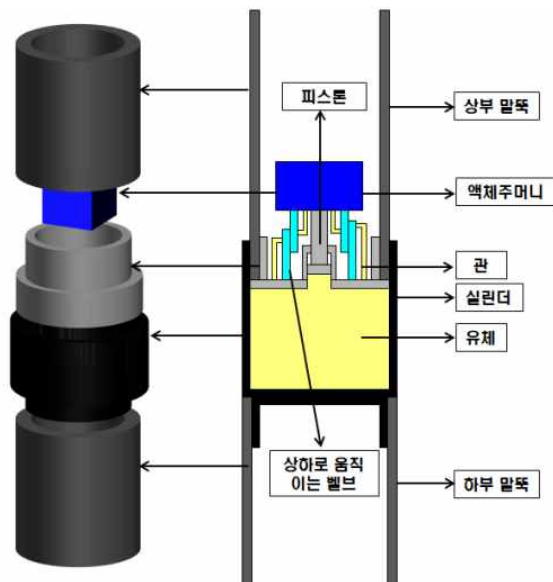


그림 17. 유체 주머니식 지반 변형 대응 부재 도식도

그림 17과 같이 유체 주머니식 부재는 유체 주머니, 피스톤, 실린더, 그리고 이동식 밸브로 구성된다. 그림 18은 지반 침하 시 유체 주머니식 부재가 어떻게 대응하는지를 도식화하여 보여준다. 지반이 침하하는 경우, 부주면 마찰력의 발현으로 인해 상부 말뚝에서 추가 축력이 작용하여 실린더 내부

의 압력이 증가하게 된다. 이에 따라 피스톤이 상향으로 이동하게 되며, 그림 18(a)와 같이 실린더와 유체 주머니 사이의 연결관(그림 18의 피스톤 우측 연결관)이 체결된다. 연결관이 체결되면 유체가 실린더와 유체 주머니 사이를 자유롭게 이동하게 된다. 지반이 침하하는 경우, 실린더 내부에 정압이 작용하므로, 실린더에서 유체 주머니로 유체가 이동하며, 실린더가 수축하려 한다. 실린더의 수축으로 인해, 상부 말뚝을 더욱 하향으로 이동하여 지반과 상대변위가 줄어들게 되고, 이에 따라 부주면 마찰력이 감소한다.

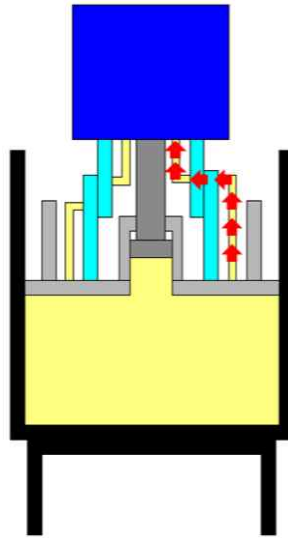


그림 18. 지반 침하 시 유체 주머니식 실린더 부재의 대응

그림 19은 지반 융기 시 유체 주머니식 부재가 어떻게 대응하는지를 도식화하여 보여준다. 지반이 융기하는 경우, 상부 주면 마찰력이 추가로 발현됨에 따라 상부 말뚝에서 인발력이 작용하여 실린더 내부에는 부압이 작용하게 된다. 이에 따라 피스톤이 하향으로 이동하게 되며, 그림 19와 같이 실린더와 유체 주머니 사이의 연결관(그림 19의 피스톤 좌측 연결관)이 체결된다. 연결관이 체결되면 유체가 실린더와 유체 주머니 사이를 자유롭게 이동하게 된다. 지반이 융기하는 경우, 실린더 내부에 부압이 작용하므로, 유체 주머니에서 실린더로 유체가 이동하며, 실린더가 팽창하려 한다. 실린더의 팽창으로 인해, 상부 말뚝을 더욱 상향으로 이동하여 지반과 상대변위가 줄어들게 되고, 이에 따라 말뚝을 인발 시키려는 마찰력이 감소한다.

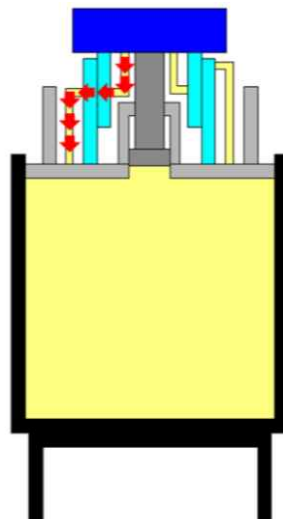


그림 19. 지반 융기 시 유체 주머니식 실린더 부재의 대응

③ 지반 변형 대응 부재와 말뚝과의 결합 방식

지반 변형 대응형 말뚝 기초는 지반 변형 대응 부재의 상하부에 강관 말뚝이 결합된 형태를 가진다. 따라서, 전체 말뚝의 강성 및 강도는 결합 방식의 영향을 받는다. 현재 주로 쓰이는 말뚝의 결합 방식은 용접식, 볼트식, 나사선식 결합이 있다. 자체 재료형 부재의 재료로 선정된 알루미늄 합금 부재는 열에 취약하다. 따라서 본 연구에서는 말뚝의 결합 방식으로 볼트식과 나사선식 결합을 고려하였다. 본 과업의 1차년도에서는 자체 재료형 부재의 재료로 선정된 알루미늄 합금 부재와 스테인리스 강관 말뚝을 그림 20과 같이 볼트 그리고 나사선을 이용하여 결합한 모형체를 제작하였으며, 결합 방식에 따른 모형체의 휨 및 압축 강도를 측정을 공인인증시험 기관에 의뢰하였다.



(a)



(b)

그림 20. 지반 변형 대응 부재와 강관 말뚝의 결합 방식: (a) 볼트식, (b) 나사선식

공인인증시험 성적서의 예시는 그림 21과 같으며, 표 3은 전체 시험 결과를 정리하여 보여준다. 공인인증시험 결과, 결합부가 존재하지 않는 일반 강관 말뚝의 경우, 압축 강도가 408.8 kN, 휨 강도가 99.9 kN으로 측정되었다.

지반 변형 대응 부재의 높이가 100 mm일 경우, 볼트식 결합을 적용할 때 압축 강도는 355.7 kN으로 측정되었으며, 이는 일반 강관의 압축 강도의 87%에 해당한다. 볼트식 결합 말뚝의 휨 강도는 18.95 kN으로 일반 강관 말뚝의 휨 강도의 19%에 해당한다. 나사선식으로 결합된 말뚝의 압축 강도는 290.5 kN으로 측정되었으며, 이는 일반 강관의 압축 강도의 71%에 해당한다. 나사선식 결합 말뚝의 휨 강도는 32 kN으로 일반 강관 말뚝 휨 강도의 32%에 해당한다.

지반 변형 대응 부재의 높이가 50 mm일 경우, 볼트식 결합을 적용할 때 압축 강도는 361.8 kN으로 측정되었으며, 이는 일반 강관의 압축 강도의 88.5%에 해당한다. 볼트식 결합 말뚝의 휨 강도는 31.3 kN으로 일반 강관 말뚝의 휨 강도의 31.3%에 해당한다. 나사선식으로 결합된 말뚝의 압축 강도는 225.8 kN으로 측정되었으며, 이는 일반 강관의 압축 강도의 55.2%에 해당한다. 나사선식 결합 말뚝의 휨 강도는 39.55 kN으로 일반 강관 말뚝 휨 강도의 39.6%에 해당한다.

종합해 보면, 볼트식 및 나사선식 결합을 적용한 말뚝 모두 일반 강관 말뚝에 비해 압축 및 휨 강도가 낮았다. 각 강도에 대해서 일반적인 분석을 하면, 압축 강도는 볼트식에서 나사선식보다 더 크게 측정이 되었으며, 휨 강도는 나사선식에서 볼트식보다 더 크게 측정이 되었다. 또한, 부재의 높이와 압축 및 휨 강도와는 상관성이 떨어졌다. 마지막으로, 나사선식을 적용할 때, 나사선의 길이를 증가시킬수록 압축 및 휨 강도가 증가할 것으로 판단된다.

표 3. 강관 말뚝 및 (결합 방식이 다른) 지반 변형 대응 말뚝의 압축 및 휨 강도

일반 강관 말뚝							
압축 강도 (kN)				408.8			
휨 강도 (kN)				99.9			
부재 높이: 100 mm							
볼트식				나사식			
부재 위치	중단	중상단	상단	부재 위치	중단	중상단	상단
압축 강도 (kN)	355.7	286.2	340.5	압축 강도 (kN)	290.5	280.5	241.4
휨 강도 (kN)	18.95	18.1	54.25	휨 강도 (kN)	32	23.35	45.1
부재 높이: 50 mm							
볼트식				나사식			
부재 위치	중단	중상단	상단	부재 위치	중단	중상단	상단
압축 강도 (kN)	361.8	300.9	272.9	압축 강도 (kN)	225.8	206.2	200
휨 강도 (kN)	31.3	19	55.4	휨 강도 (kN)	39.55	28.7	53.6



시험 성적서

시료명(생산국) : 축소형 말뚝(대한민국)

검 수 번 호 : KCM020-04193

시료 채취 장소 : 인천대학교 지반공학연구소

의 외 인 : 인천대학교 공과대학 C동 236호

이 학 된

검 수 일 자 : 2020년 10월 26일

시 료 채 취 일 : -

성과 이용 목적 : 연구과제 제출

생 산 자 : -

결 과

연번	시험검사종목	시험검사방법	시험검사결과		책임기술자			시험검사자	
			S ₁	S ₂	자격종목및번호	성 명	서 명	성 명	서 명
1	휨 하중 (N)	KS F 8002:2012 준용	32 000	18 950	토목품질시험기술사 10190010300S	정수하		황태현	
2	압축 하중 (kN)	KS F 8002:2012 준용	290.5	355.7					

- 시험 속도 : 1mm/min
- S₁ : 나사형, S₂ : 볼트 체결

[일반분야]

한국건설자재시험연구원

원 장 임 동

2020년 11월 04일



발급문서진위확인

TEL : 031) 419-3002 / FAX : 484-9977

주 소 : 경기도 안산시 상록구 사사안골3길 9(사사동)

유 의 사 항

1. 위 시험 · 검사 결과는 당초 의뢰 시 제출된 시료에 대한 결과이므로 다른 목적으로의 이용을 금합니다.
2. 책임기술자 및 시험검사자의 성명과 서명이 없는 경우에는 결과에 대한 보증을 할 수 없습니다.

KCM-Q-12-F05(00) (1/4)

한국건설자재시험연구원

A4(210 × 297)

KCMIC 한국건설자재시험연구원

그림 21. 결합 방식에 따른 지반 변형 대응 말뚝 기초의 휨 및 압축 강도의 시험 성적서 예시

- **지반 변형 대응 부재 및 결합 방식 - 2차년도 연구내용**

해당 항목에 대한 1차년도 지적사항과 그에 대한 분석 및 보완 방향은 다음과 같다.

1차년도 지적사항: 말뚝의 좌굴 현상에 대한 검토가 필요

1차년도에 제시된 방식으로 지반 변형 대응 부재를 적용한다면, 해당 부재의 부족한 강성으로 인해 연약지반에 시공된 세장비가 큰 말뚝의 경우, 좌굴 현상이 발생할 수 있으니, 그에 대한 검토 및 대책이 필요함

지적사항 분석 및 보완 방향

말뚝의 탄성계수를 E , 단면적을 A , 그리고 단면 이차 모멘트를 I 라 할 때, 좌굴 현상은 말뚝의 축강성(EA)이 아니라 휨강성(EI)의 함수이다. 지반 변형 대응형 말뚝의 경우, 1차년도에는 제시된 말뚝의 양식을 따른다면, 축강성(EA)과 휨강성(EI)이 동시에 감소되게 되어, 매우 연약한 지반에 설치된 세장비가 큰 장대말뚝의 경우, 좌굴 현상에 취약할 수 있다. 이에 따라, 2차년도에는 축강성은 조절 가능하고, 휨강성은 유지할 수 있는 지반 변형 대응 부재를 고안하였다.

2차년도에는 먼저 1차년도에 제안된 지반 변형 대응형 부재의 양식 및 결합 방식에 대해서 면밀히 검토를 하였으며, 이를 바탕으로 새로운 결합 방식 및 지반 변형 대응 부재를 제시하였다.

① 1차년도 제안 부재 및 결합 방식의 검토 및 분석

1차년도에 제안된 자체 재료형 부재의 경우, 알루미늄의 탄성계수는 스테인리스 스틸의 40% 정도이다. 즉, 동일한 하중이 작용할 때, 동일한 길이의 알루미늄 말뚝의 변형률은 스테인리스 스틸 말뚝의 변형률 2.5배 정도이다. 말뚝은 지반에 비해 강성이 매우 큰 구조물이며, 말뚝의 침하/용기에서 말뚝 부재 자체의 압축/팽창량이 차지하는 비율은 매우 작다. 따라서 자체 재료형 부재의 압축률이 강관 말뚝의 압축률의 2.5배라 할지라도, 강관 말뚝의 압축률이 매우 작으므로, 자체 재료형 부재의 압축량도 매우 작아, 자체 재료형 부재의 지반 변형 대응 능력은 미미할 것으로 판단하였다.

실린더형(유체 배출식 및 유체 주머니식) 부재 중 하나인 유체 배출식 부재의 경우, Sabhka 지반, 계절적 동토, 팽창성 지반과 같이 용기/침하가 반복하여 발생하는 지반에는 적용이 불가하다. 따라서 2차년도에는 이를 배제하였다. 유체 주머니식 부재의 경우, 그림 18, 19에 보이듯 그 구조가 매우 복잡하다. 이에 따라 2차년도에는 실린더형 부재의 제작 가능성을 먼저 검토하였다. 기계 설비 제작 전문가와 협의 결과, 실린더형 부재의 경우, 피스톤이 특정 범위만큼 이동하여 연결관이 체결될 때 유체가 이동해야 하나, 연결관 체결 전에 아주 작은 틈새로 유체의 유출이 발생할 가능성이 매우 크며, 이를 막기 어렵다는 결론을 내렸다.

1차년도에 제안된 부재 중, 자체 재료형 부재는 상하부에 연결된 강관 말뚝과 동일한 단면을 가지고 있다. 또한, 자체 재료형 부재로 재료로 선정된 알루미늄은 강관 말뚝의 재료인 스테인리스 스틸보다 약 40% 작은 탄성계수를 가지고 있다. 따라서 자체 재료형 부재의 휨 강성은 강관 말뚝의 40%에 해당하며, 1차년도 지적사항과 같이 자체 재료형 부재를 적용한 말뚝은 좌굴에 취약한 구조를 가지게 된다. 실린더형 부재의 경우, 여러 부품이 복잡하게 조합되어 있어, 적절한 보강 없이는 휨에 저항할 수 없으며 좌굴에 취약한 구조이다.

상기 사항을 종합해 볼 때, 1차년도에 제안된 지반 변형 대응 부재 양식 및 말뚝과의 결합 방식은 효율성 측면에서 충분한 변위를 유발시켜 지반-말뚝간의 상대변위를 발생시키기 힘들고 안정성 측면에서 좌굴에 취약한 구조를 가지며, 제작 가능성 측면에서 비경제적이거나 혹은 그 구조가 복잡하여 제작이 힘든 것으로 판단되었다. 이에 따라 2차년도에서는 지반 변형 대응 부재 양식 및 그 결합 방식을 효율성, 안정성, 그리고 제작 가능성을 확보할 수 있도록 전면 수정하고 설계하였다.

② 지반 변형 대응 말뚝 기초의 결합 방식

2차년도에 개발한 지반 변형 대응 부재의 기본 성능 조건은 축 방향 강성(혹은 변형) 조절 가능 및 휨 강성 유지로 설정하였다. 이를 위해 지반 변형 대응 말뚝 기초의 결합 방식을 그림 22와 같이 제시하였다. 개선된 지반 변형 대응 말뚝은 상부 강관 말뚝(그림 22의 옅은 회색), 하부 강관 말뚝(그림 22의 짙은 회색), 지반 변형 대응 부재(그림 22의 파란색), 그리고 이를 감싸는 슬리브(그림 22의 흰색)로 구성된다.

슬리브의 재질은 상하부 말뚝과 동일하게 스테인리스 스틸을 적용하며, 슬리브와 상부 강관 말뚝은 휨 강성 확보를 위해 충분한 길이의 나사선을 이용해서 결합한다. 그림 22에서 슬리브는 지반 변형 대응 부재의 압축 및 팽창시 토사의 유입의 차단하고 및 추가 휨 강성의 제공을 통한 좌굴에 대한 안정성 확보하도록 한다. 그림 22와 같은 양식을 구성할 경우, 부재의 축 강성은 지반 변형 대응 부재가 결정하고, 부재의 휨 강성은 슬리브의 휨 강성으로 결정되어 좌굴에 대한 안정성을 확보할 수 있다.

지반 변형 대응 부재는 상하부 말뚝에 단단히 결합하여 부재의 압축/팽창 시 말뚝이 함께 이동할 수 있도록 한다. 특히 인장에 저항하는 말뚝의 경우, 부재와 말뚝의 결합부를 충분히 보강하여 부재의 탈락을 방지한다. 또한, 상하부 말뚝 사이에 단면이 충분한 길이의 겹치는 구간을 두어 지반 변형 대응 부재의 팽창 시에도 상하부 말뚝의 중심이 일치하도록 한다.

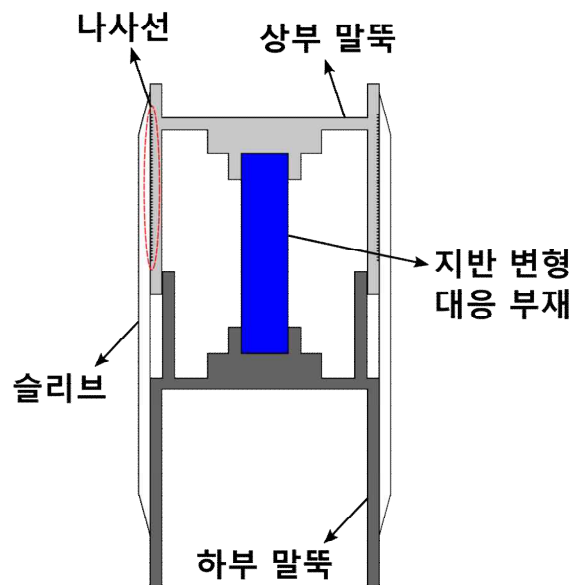


그림 22. 2차년도 제안 지반 변형 대응 부재와 강관 말뚝 양식

지반의 강도는 일반적으로 심도가 깊을수록 크며, 말뚝의 최하단에는 선단 지지력이 작용한다. 따라서 그림 22에서 하부 말뚝보다는 상부 말뚝이 지반 변형 대응 부재의 압축 및 팽창에 의해 좀 더 많은 변위를 가지게 된다. 따라서 지반 변형 대응 부재의 변형 발생 시, 상부 말뚝이 주로 움직이며, 상부 말뚝에 결합된 슬리브 또한 움직이게 된다.

상기 분석을 바탕으로 하여, 지반 침하 시 지반 변형 대응 말뚝의 거동을 분석해 보면 그림 23과 같다. 일반적으로 말뚝의 강성이 지반의 강성보다 매우 크므로, 압밀 현상, 영구 동토 내 간극수의 응해, 팽창성 지반의 재건조 등의 이유로 지반의 침하가 발생한다면, 그림 23a와 같이 지반이 말뚝에 비해 상대적으로 하향 이동하게 되고, 이에 따라 부주면 마찰력이 작용하게 된다. 이때, 지반 변형 대응 부재를 압축시키면(그림 23b), 말뚝-지반과의 상대변위가 줄어들게 되어 부주면 마찰력이 감소한다. 만일 지반 변형 대응 부재를 더 압축시킨다면, 그림 23c와 같이 부주면 마찰력이 아닌 정주면 마찰력이 발현되어 상부 구조물로부터 전이되는 하중에 저항하게 된다.

그림 24는 지반 융기 시 지반 변형 대응 말뚝의 거동을 도식화하여 보여준다. 계절적 동토 내 간극수의 동결, 건조한 팽창성 지반에 수분 유입, Sabhka 지반의 염분 결정화 등의 이유로 지반의 융기가 발생한다면, 그림 24a와 같이 지반이 말뚝에 비해 상대적으로 상향 이동하게 되고, 이에 따라 말뚝

에 과도한 인발력이 작용하게 된다. 이때, 지반 변형 대응 부재를 팽창시키면(그림 24b), 말뚝-지반과의 상대변위가 줄어들게 되어, 인발력이 마찰력이 감소한다. 만일 지반 변형 대응 부재를 더 팽창시킨다면(그림 24c), 말뚝에 충분한 인발 저항력이 확보된다.

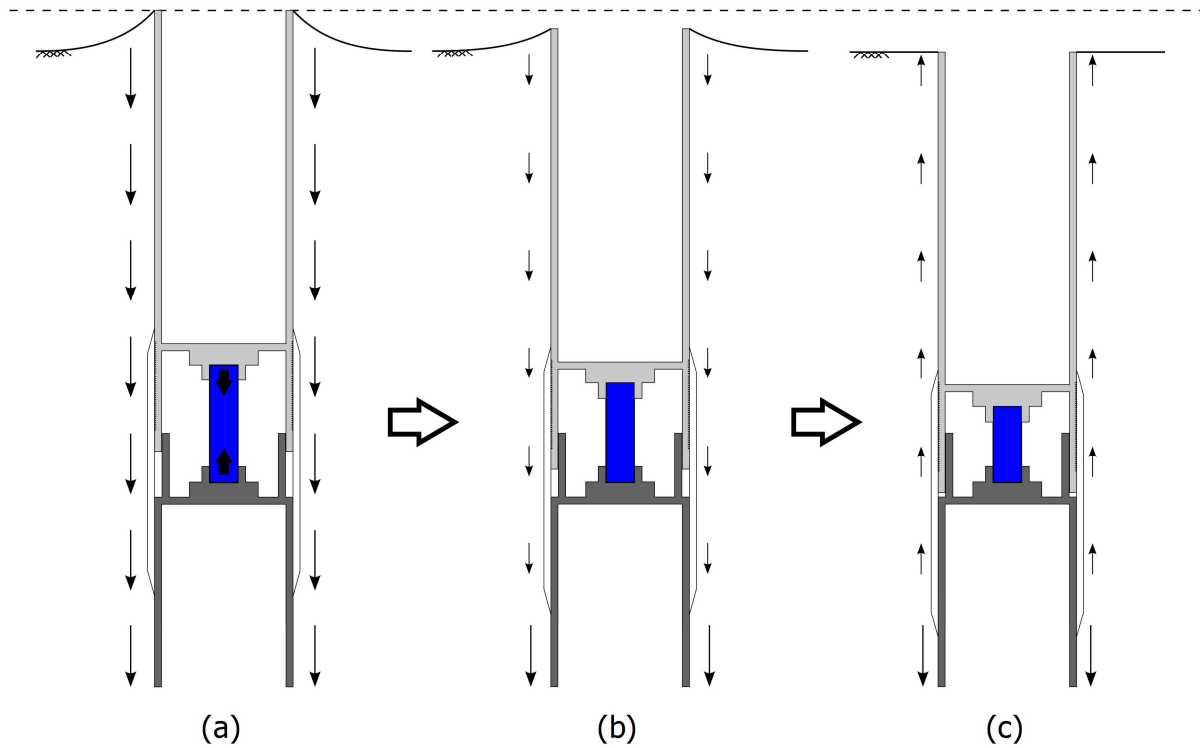


그림 23. 지반 침하 시 지반 변형 대응 말뚝의 거동(변형은 과장되었음)

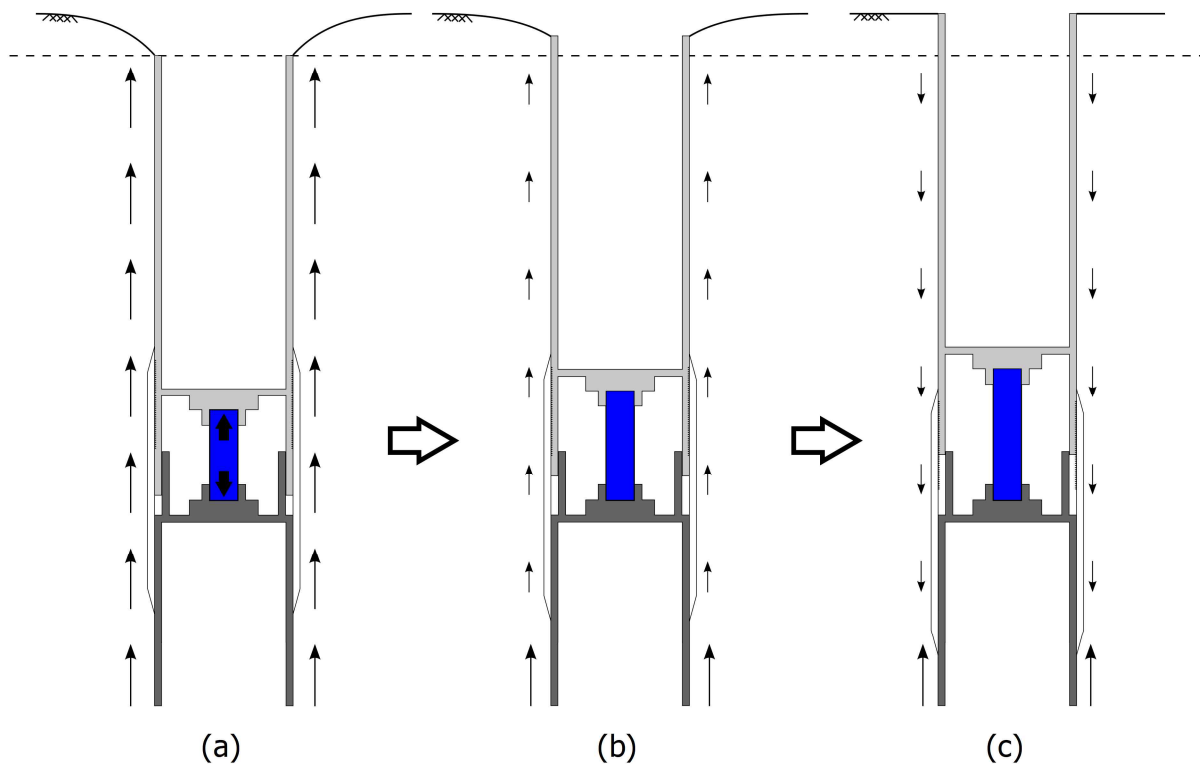


그림 24. 지반 융기 시 지반 변형 대응 말뚝의 거동(변형은 과장되었음)

③ 수동형 지반 변형 대응 부재

연구 성과를 명확히 나타내기 위해 본 과업의 2차년도에는 “자체 재료형” 지반 변형 대응 부재를 “수동형” 지반 변형 대응 부재로 그 명칭을 변경하였다. 2차년도에 새롭게 제안된 부재-말뚝 결합형식이 추가 슬리브의 결합으로 인해 (좌굴에 대비하여) 충분한 휨 강성을 확보하므로, 수동형 지반 변형 대응 부재(이하 수동형 부재)의 주요 기능은 강관 말뚝보다 작은 축 강성을 가져서 지반 변형에 따라 말뚝을 소폭 이동시켜 말뚝-지반 간 상대변위를 상쇄하여 말뚝에 불리하게 작용하는 마찰 저항을 저감시키는 것이다.

그림 25는 본 과업에서 고안한 수동형 부재를 도식화하여 보여준다. 1차년도 연구를 분석한 결과, 지반 변형 대응 부재가 효용성을 가지기 위해서는 강관 말뚝보다 매우 작은 축 강성을 가져야 한다. 이 조건에 부합하는 재료로 본 과업에서는 그림 25a와 같은 금형 강재 스프링을 제안하고자 한다. 금형 강재 스프링의 경우, 코일의 두께 및 간격을 조절하여 지반 변형 대응에 필요한 변형을 가지도록 축 강성을 조절할 수 있다.

또한, 2차년도에는 그림 25b와 같은 스프링과 대시팟을 병렬로 연결한 부재(이하, 스프링-대시팟 부재) 또한 수동형 부재로 고려하였다. 대시팟이 존재할 경우, 지반 변형에 의한 하중이 작용할 때, 대시팟이 먼저 그 하중에 저항한다. 그 후, 하중이 대시팟에서 스프링으로 전이되게 된다. 즉, 대시팟을 적용할 경우, 지반의 변형 시 스프링으로의 하중 전달이 지연되며, 본 연구에서는 이를 확인하고자 하였다.

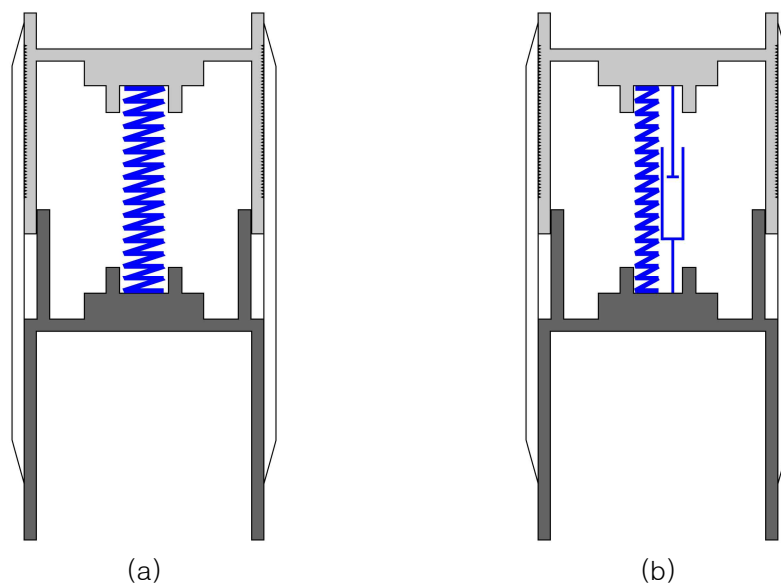


그림 25 수동형 지반 변형 대응 부재의 도식도: (a) 스프링형, (b) 스프링-대시팟형

④ 능동형 지반 변형 대응 부재

1차년도에 제안된 자체 재료형 부재 및 2차년도에 제안된 수동형 부재의 변형은 지반 변형에 의한 말뚝에 가해지는 추가 하중의 크기에 비례하여 결정된다. 1차년도에 제안된 실린더형 부재의 경우, 지반 변형으로 인해 특정 크기의 하중이 부재로 전이될 때 유체 이송관이 체결되어 변형이 유발된다. 따라서 이러한 부재는 지반 변형으로 인해 부재로 전이되는 하중에 의해 활성화되는 수동적 부재라 할 수 있으며 부재 제어 방식은 하중 제어 방식이라 할 수 있다. 수동형 부재의 제어 방식이 하중 제어 방식이므로, 이를 적용한 말뚝을 설계할 때는 수동형 부재를 활성화시키는 하중이 필요하다. 즉, 수동형 부재가 포함된 말뚝을 설계할 때에는 지반의 예측 변형량 및 그로 인하여 말뚝에 가해지는 추가 축력을 예측해야 한다. 이는 흙의 역학적 거동, 흙과 말뚝 사이 접촉면에서의 마찰 및 부착 거동, 흙과 말뚝의 상호작용 등을 고려해야 하는 매우 어려운 문제이다. 본 과업의 2차년도에는 수동형 부재의 이러한 단점을 극복하기 위해 변위 제어 방식인 능동형 지반 변형 대응 부재(이하 능동형 부재)를 제안하고자 한다.

수동형 부재 설계 시 필요한 지반 내부 하중의 예측은 매우 어려우나, 지반의 침하/응기량은 침하핀 등을 이용하여 지표에서 쉽게 측정할 수 있다. 본 과업에서는 능동형 부재 양식으로 그림 26과 같은 복동식 유압 실린더를 제안하며, 능동형 부재는 측정된 지반 침하 및 응기량을 기반으로 그 압축 및 팽창량을 조절하여 말뚝에 불리하게 작용하는 마찰 저항을 저감시키도록 한다. 능동형 부재는 말뚝 외부로 연결된 유체 이송관과 전기선을 필요로 하며, 유체 이송관을 통해 유압 실린더내 유체를 주입 및 배출시키고, 전기선을 통해 필요한 전력을 공급한다.

능동형 부재를 적용할 경우, 유압 실린더에 작용하는 압력과 변형량으로부터 말뚝의 현재 하중 전달 기전을 파악할 수 있다. 따라서 지반 변형 및 부재 현재 상황에 대한 모니터링 시스템을 구축할 경우, 말뚝의 하중 전달 기전을 최적화하여 유지할 수 있는 지능형 말뚝의 구축이 가능하다.

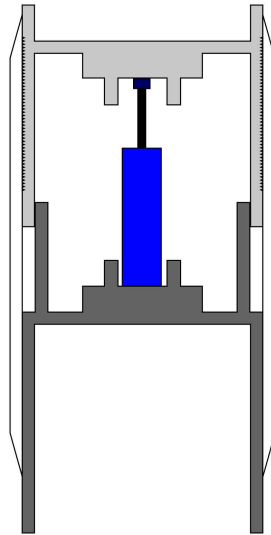


그림 26 능동형 지반 변형 대응 부재 도식도

- [B-3] 말뚝 내 지반 변형 대응 부재 최적 위치

• 지반 변형 대응 부재 최적 위치 결정 - 1차년도

① 자체 재료형 지반 변형 대응 부재

본 과업의 1차년도에는 수치해석을 통해 자체 재료형 부재의 말뚝 내 최적 위치를 파악하였다. 부재의 위치를 변수로 하여 특정 지층(지반의 중단)에서 침하 및 융기가 발생하였을 때 지반 변형 대응형 말뚝 기초와 일반 강관 말뚝의 주변 마찰력과 축 응력을 분석하였다. 3차원 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS/CAE(SIMULIA, 2014)을 사용하여 지반 변형에 따른 각 말뚝의 거동을 분석하였으며, 해석 단면은 그림 27과 같다. 해석 지반의 직경은 20 m, 높이는 25 m이며, 지반 상부 20 m는 연약 점토층으로, 하부 5 m는 지지층(조밀한 모래층)으로 구성하였다. 말뚝은 스테인리스 강관으로 가정하였으며, 길이 22 m, 직경 0.5 m, 두께 0.01 m로 모델링하였다. 말뚝의 선단은 말뚝 직경의 2배인 1 m만큼 지지층으로 근입 되도록 하였다. 표 4는 수치해석에 사용된 지반과 말뚝의 물성을 나열하고 있다.

지반 경계 조건의 경우, 측면은 지반 침하에 따른 연직 변위 발생이 가능하도록 수평 이동은 고정하고 수직 이동은 가능하도록 설정하였으며, 하부는 움직임이 없어야 하므로 모든 방향을 고정하였다. 말뚝 주변과 지반의 접촉면은 지반 변형의 조건에서 마찰력이 충분히 발현될 수 있도록 마찰계수를 0.6으로 설정하였다.

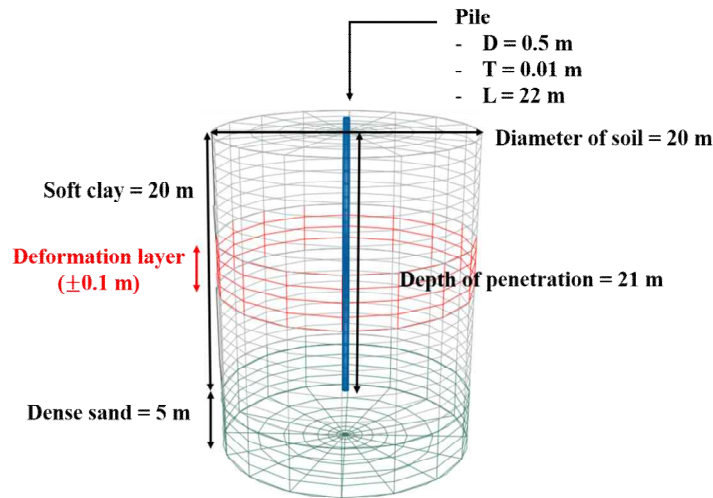


그림 27. 수치 해석 단면

표 4. 수치해석에 사용된 말뚝과 지반의 물성

구분	강관 말뚝	연약 점토층	조밀한 모래층
구성 모델	Elastic	Mohr-Coulomb	
단위중량, γ (kN/m ³)	76.82	18	20
탄성계수, E (MPa)	200,600	5	50
포아송비, ν	0.3	0.3	0.3
마찰각, ϕ (°)	—	20	35
팽창각, ψ (°)	—	0.1	10
점착력, c (kPa)	—	3	0.1

본 연구에서는 연약 지반층 중단 5 m 구간에 열팽창(Thermal Expansion)을 적용하여 지반의 침하 및 융기를 수치적으로 모사하였다. 열팽창 모델에서 재료의 체적 변화율은 열팽창 계수(Thermal Expansion Coefficient)를 통해 온도에 비례하며, 따라서 기준 온도로부터의 온도 감소 및 증가에 따라

지반의 침하 및 융기가 발생한다. 그림 28은 변형 발생 지층의 열팽창 계수를 0.01로 기준 온도를 25℃로 설정한 뒤, 초기 온도 25℃에서 온도를 감소/증가시킬 때, 지반 변형량을 보여준다. 다수의 수치 해석을 통해 그림 29와 같은 온도 변화에 따른 지반 변형량을 구축한 후, 목표 변형량(± 0.1 m)에 해당하는 최종 온도가 결정되었으며, 그 값은 지반 침하 시 23.63℃, 지반 융기 시 26.17℃로 산정되었다.

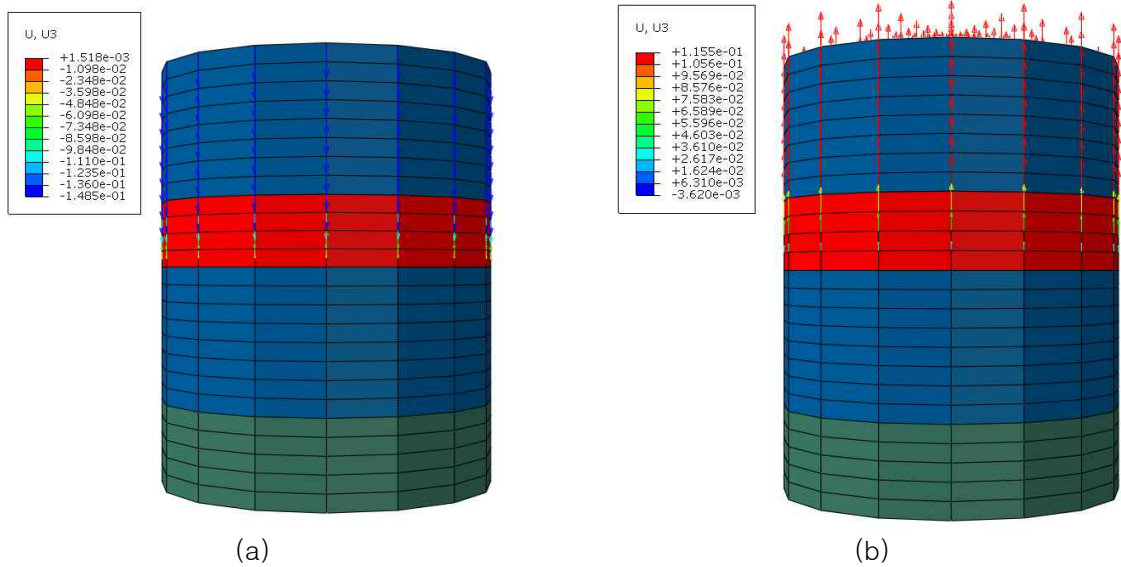


그림 28. 지반의 열팽창 해석 시 연직 변위의 분포: (a) 지반 침하, (b) 지반 융기

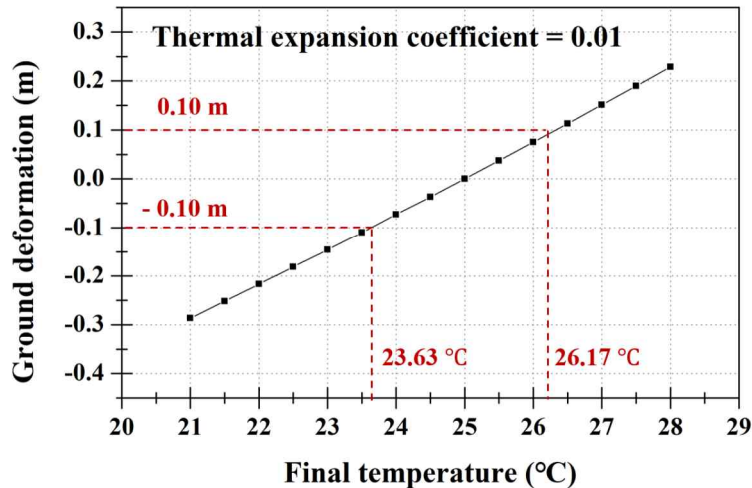


그림 29. 온도 변화에 따른 지반 변형량

본 연구에서는 지반 변형의 조건에서 일반 강관 말뚝과 지반 변형 대응형 말뚝 기초의 주변 마찰력 및 축 응력을 비교하고 부재 위치에 따른 지반 변형 대응 효과의 차이를 분석하기 위해 표 5와 같이 해석 조건을 설정하였다. 그림 30은 수치해석에서 자체 재료형 지반 변형 대응 부재의 말뚝 내부 세 부분 위치를 보여준다. 부재 위치 효과를 분석하기 위하여 부재는 지표면, 변형이 발생하는 지층의 중앙, 연약 지반층의 최하단에 2 m의 길이로 각각 배치하였다. 또한, 부재 위치 효과를 명확하게 파악하기 위하여 지반 변형 대응 부재의 탄성계수는 강관 말뚝에 비해 매우 작은 1 GPa로 설정하였다.

표 5. 수치해석 케이스

지반 변형 유형	말뚝 종류	수동형 지반 변형 대응 부재 위치
침하	강관 말뚝	-
	지반 변형 대응형 말뚝	상단
		중단
		하단
융기	강관 말뚝	-
	지반 변형 대응형 말뚝	상단
		중단
		하단

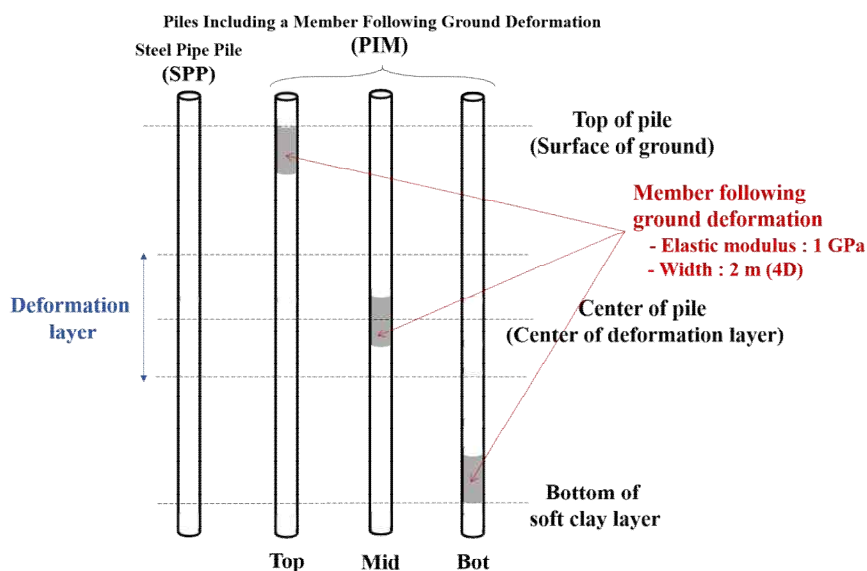


그림 30. 수치해석 모델링 및 해석 케이스

그림 31은 지반 침하에 따른 말뚝 기초의 주면 마찰력 및 축 응력을 심도에 따라 보여준다. 또한, 음의 값을 가지는 주면 마찰력을 적분하여 총 부주면 마찰력의 값을 산정한 결과는 표 6과 같다. 그림 31의 축 응력 그래프에서 음수는 압축 응력을 의미하여, 양수는 인장 응력을 의미한다. 그림 31에서 침하 발생 시 모든 말뚝에서 부주면 마찰력이 발생하나, 지반 변형 대응형 말뚝 기초의 경우, 부주면 마찰력이 강관말뚝(SPP) 보다 약 14~19%정도 작게 산정되며, 최대 압축 응력 또한 작게 산정되었다. 이 감소 효과는 지반 변형 부재가 말뚝의 하단에 위치하였을 때 가장 크게 나타났다. 따라서 **지반 변형 대응 부재가 변형층 아래에 위치하는 것이 부주면 마찰력 및 압축 응력의 감소에 효과적**이라고 판단된다.

그림 32은 지반 융기에 따른 말뚝 기초의 주면 마찰력 및 축 응력의 깊이별 분포를 보여준다. 표 7은 말뚝에 작용하는 총 상향 마찰력을 나열한다. 지반이 융기될 때, 말뚝을 인발시키려 한다. 하지만, 말뚝이 인발 및 인장되는 정도보다 지반 융기량이 더 크므로, 말뚝 주변부 지반에는 상향 마찰력이 발생하며, 이에 따라 말뚝에 작용하는 인장 응력이 증가하였다. 지반 변형 대응형 말뚝 기초의 경우, 말뚝에 작용하는 상향력에 의해 자체 재료형 부재가 인장되어 지반과의 상대변위를 줄여주며 말뚝에 작용하는 상향력과 인장 응력을 일정량 감소시켰다. **이 감소 효과는 부재가 변형층에 위치하였을 때 가장 크게 나타났다.**

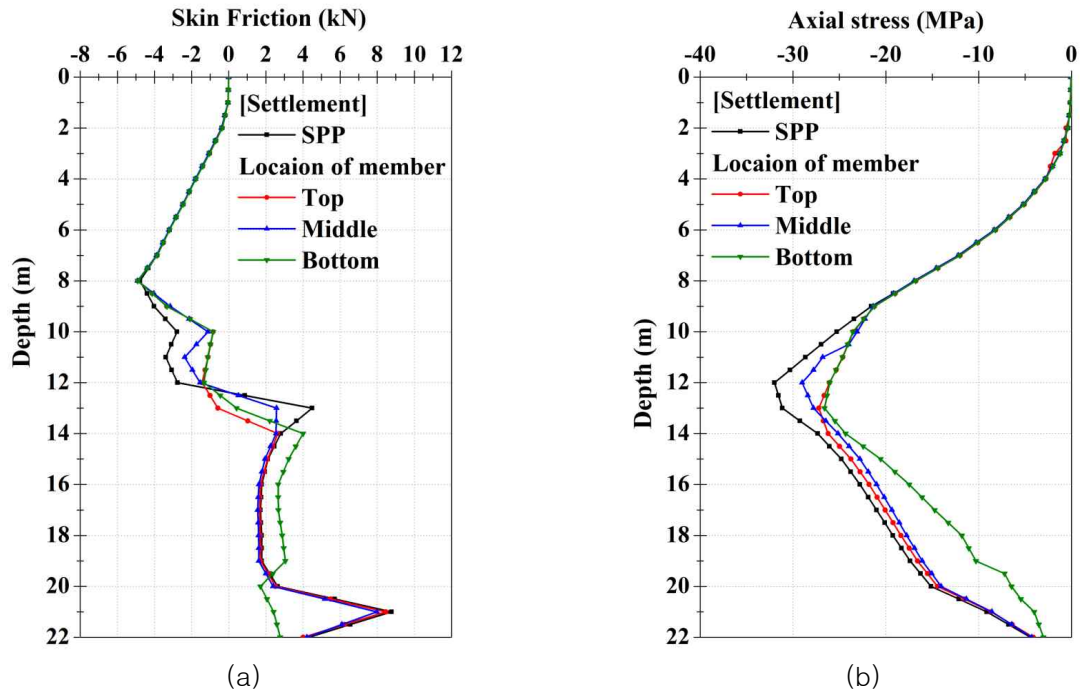


그림 31. 지반 침하 발생에 따른 각 말뚝의 거동 분석: (a) 주면 마찰력, (b) 축 응력

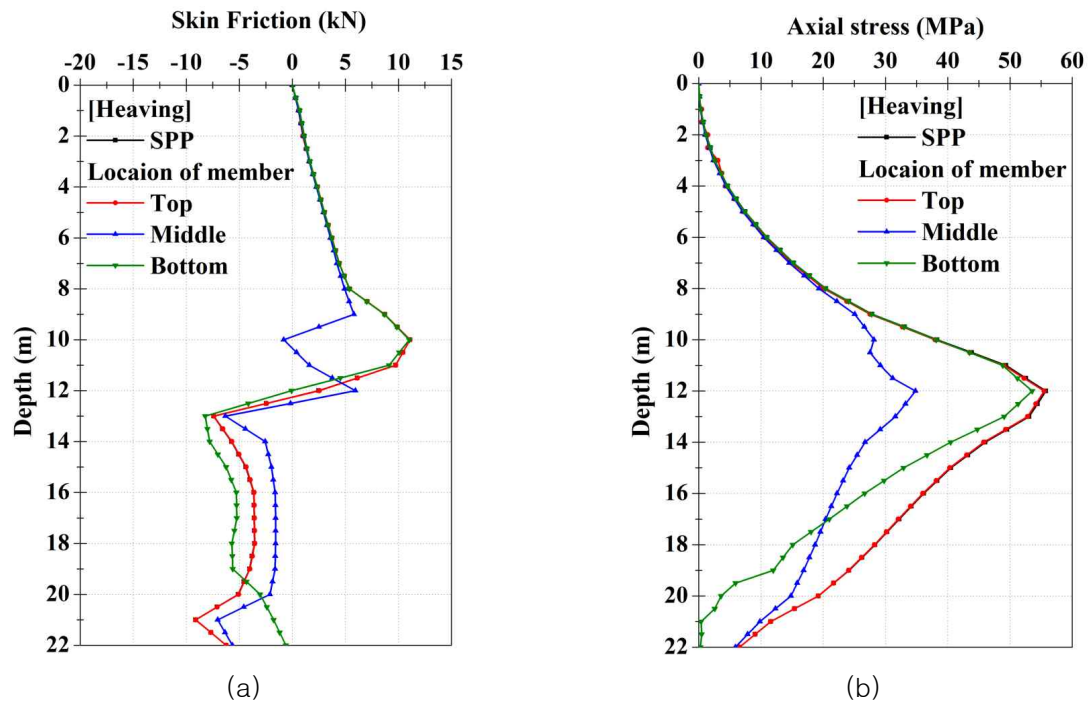


그림 32. 지반 융기 발생에 따른 각 말뚝의 거동 분석: (a) 주면 마찰력, (b) 축 응력

표 6. 그래프 면적으로 산정된 각 말뚝의 주면 마찰력

말뚝 종류	지반 변형 대응 부재 위치	부주면 마찰력 (kN)	부주면 마찰력 감소 정도 (%)
강관 말뚝	-	29.67	-
지반 변형 대응 말뚝	상단	24.65	16.92
	중단	25.48	14.12
	하단	24.08	18.84

표 7. 그래프 면적으로 산정된 각 말뚝의 주변 마찰력

말뚝 종류	지반 변형 대응 부재 위치	상향 마찰력 (kN)	상향 마찰력 감소 정도 (%)
강관 말뚝	-	53.47	-
지반 변형 대응형 말뚝	상단	53.26	0.39
	중단	32.34	39.52
	하단	51.09	4.45

② 실린더형 지반 변형 대응 부재

강관 말뚝 내부에 실린더형 부재가 삽입된 지반 변형 대응형 말뚝의 거동을 수치해석을 통해 분석하였다. 지반 변형 대응 부재의 위치를 변수로 하여 침하가 발생하였을 때 지반 변형 대응형 말뚝 기초와 일반 강관 말뚝의 주변 마찰력과 축 응력을 분석하여 부재의 최적 위치를 결정하였다.

그림 33(a)은 수치해석 단면을 보여주고 있다. 본 과업에서는 실린더형 부재가 설치된 강관 말뚝과 일반 강관 말뚝을 고려하였다. 강관말뚝은 직경 609.6 mm, 두께 14 mm, 길이 25 m로 모델링하였다. 강관 말뚝의 물성은 탄성계수 117,680 MPa, 포아송비 0.3, 밀도 7.86 t/m³로 설정하였으며, 실린더형 부재의 경우 강관 말뚝과 동일한 물성을 가지나, 온도의 변화에 따라 팽창 및 수축이 가능도록 하였다. 그림 33(a)와 같이 실린더형 부재는 말뚝 상단, 중단, 하단에 2 m 두께로 배치하였다,

그림 33(b)는 실린더형 부재의 변형량과 열팽창 계수 사이의 관계를 보여준다. 본 과업에서 열팽창 변형률은 재료 자체의 물성인 탄성계수, 밀도 등과는 상관이 없으며, 임의로 부여한 온도 변화(기준 온도와 초기 온도의 차이) 및 열팽창 계수와 관련이 있다. 실린더형 부재의 온도 변화를 0℃(기준 온도)에서 10℃로 고정하였다. 그림 33(b)에서 $\Delta V/V$ 는 부피 변화비로 V 는 초기 실린더형 부재의 부피이며, ΔV 는 온도 변화에 의한 실린더형 부재의 부피변화를 의미한다. 수치 해석 결과, 그림 33(b)와 같이 양(+)의 열팽창 계수를 입력하였을 경우, 부재는 팽창하였으며, 음(-)의 열팽창 계수를 입력하였을 경우 부재가 수축하는 것을 확인하였다.

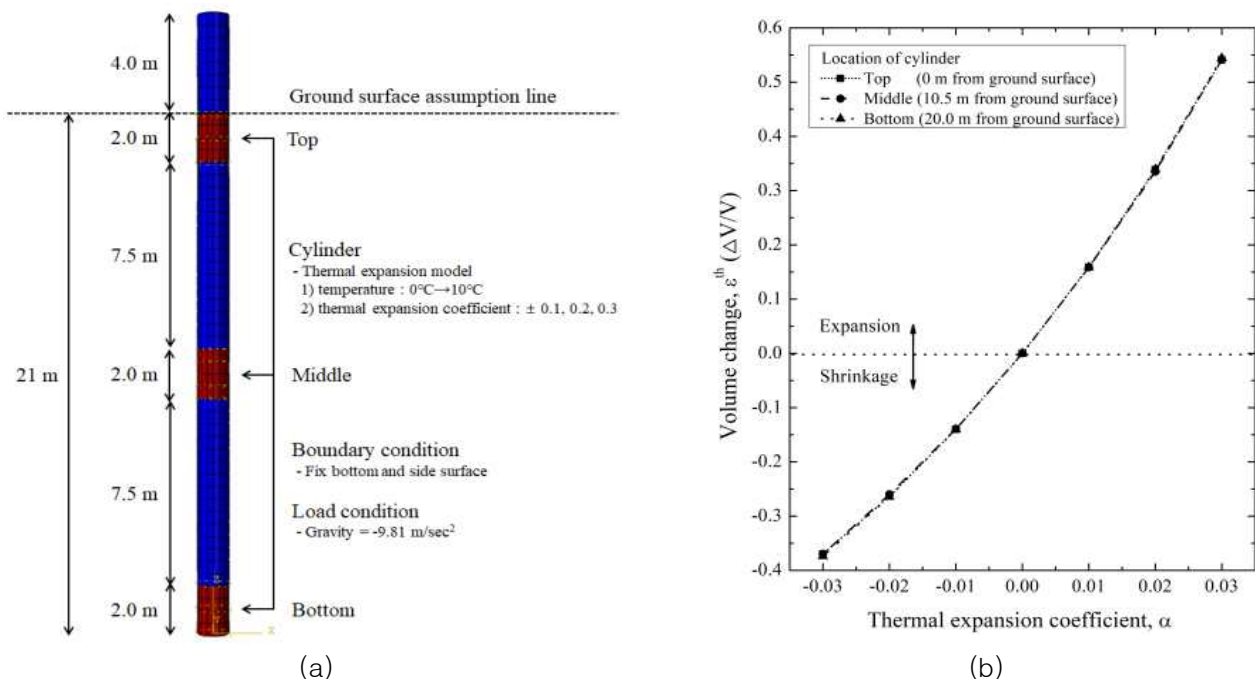


그림 33. 열팽창 모델을 통한 실린더형 부재의 모사: (a) 말뚝 모델링, (b) 실린더의 부피 변화비

그림 34는 본 수치해석에서 모델링한 지반을 보여준다. 지반은 원기둥 형태로 지름 25 m, 높이 26 m(연약 점토층 = 21 m, 암반층 = 5 m)로 구성하였다. 지반 변형 대응형 말뚝 기초는 암반층 바

로 위에 위치한다. 표 8은 사용된 지반의 물성을 보여준다. 지반의 경계 조건은 지반 하단면을 연직 방향으로 고정하였으며, 지반 측면은 연직변위는 허용하고 수평변위는 허용하지 않았다. 수치해석에서 8절점 육면체 요소를 사용하여 격자를 구성하였다. 말뚝의 경우, 정확한 주면 마찰력 측정을 위해 지반보다 상대적으로 조밀하게 격자를 구성하였다.

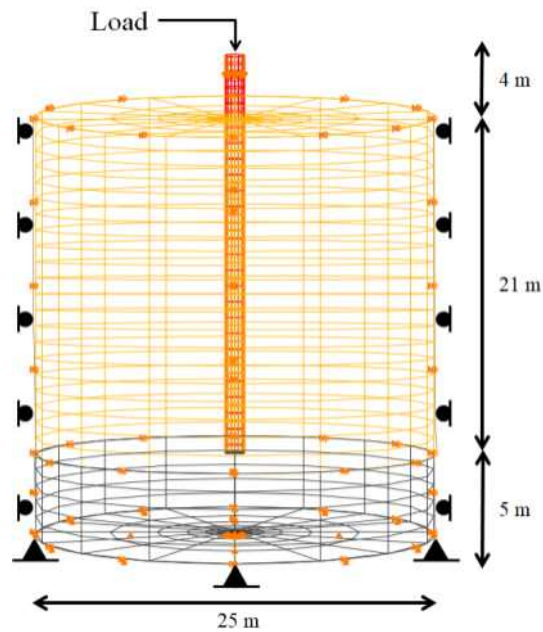


그림 34. 지반과 말뚝의 통합 모델링

표 8. 수치해석에 사용된 지반의 물성

구분	연약 점토층	암반층
구성 모델	Mohr-Coulomb	
단위중량, γ (kN/m ³)	19	21.5
탄성계수, E (MPa)	20	185.18
포아송비, ν	0.3	0.3
마찰각, ϕ (°)	28	32
점착력, c (kPa)	5	35

해석 과정은 그림 35와 같다. 먼저 말뚝 두부에 재하되는 하중을 결정하기 위한 수치 해석을 수행하였다. 말뚝 설치의 목적이 상부 구조물 하중에 따른 지지력 발현이기 때문에 하중 재하는 필수적이다. 하지만 충분한 하중이 재하되지 않을 경우, 말뚝의 거동을 정확히 분석할 수 없으며, 과도한 하중은 말뚝 자체의 손상을 유발하기 때문에 적절한 하중 선택이 중요하다. 이에 따라 재하 하중을 재료의 파괴가 발생하기 직전의 하중인 극한하중으로 결정하였으며, 극한하중 작도법 중 강관 말뚝에 적합한 Terzaghi(1942) 이론에 근거한 산정법을 사용하였다. Terzaghi(1942) 이론은 말뚝의 극한하중을 침하량이 말뚝 직경에 10%에 도달할 때의 하중이라고 정의하며, 강관 말뚝 직경이 609.6mm 이므로 침하량 60.96mm에서의 반력을 극한하중으로 산정하였다.

극한하중 선정이 완료되면 말뚝 두부에 대하여 변위 제어가 아닌 하중 제어를 수행한다. 하중 제어를 수행하는 이유는 변위 제어 시 지반 변형에 대해 말뚝 두부가 고정되는 현상이 발생하며, 이는 지반 응기/침하에 따른 말뚝 변위를 정확하게 측정하기 어렵기 때문이다. 따라서 하중 제어 이후 지반의 침하를 강제적으로 발생시켜 지반 변형을 유도하며, 실린더 위치 및 변형량(0.1 m 및 0.3 m)을 변수로 지반 대응형 말뚝 기초의 실효성을 검증하였다.

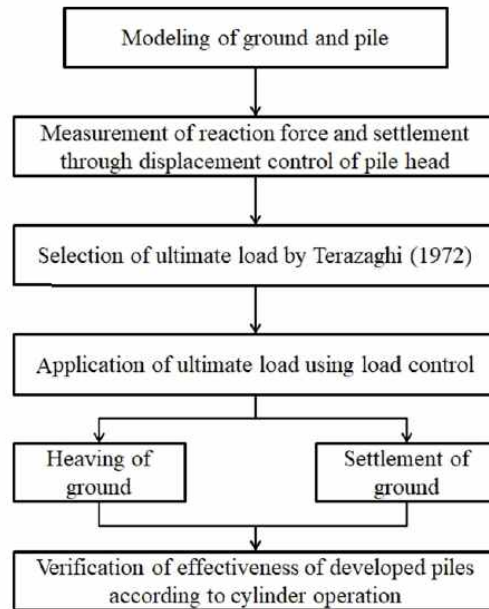


그림 35. 수치해석 과정

실린더형 부재의 물성은 강관 말뚝의 물성과 동일하게 설정하였으며, 지반 변형 대응형 말뚝의 극한하중은 일반적인 강관 말뚝의 극한하중과 같다. 그림 36은 안정된 지반에서 말뚝 두부 변위 제어에 따른 하중-침하 곡선을 나타내며, Terzaghi(1942)의 극한하중 선정법에 따라 해석에 사용된 말뚝의 극한하중은 8.48 MN으로 산정되었다. 이후 해석에서는 극한하중을 압력 단위로 변경하여 적용되며, 강관 말뚝의 단면적을 고려할 때, 말뚝 두부에 재하되는 압력 값은 323.67 MPa이다.

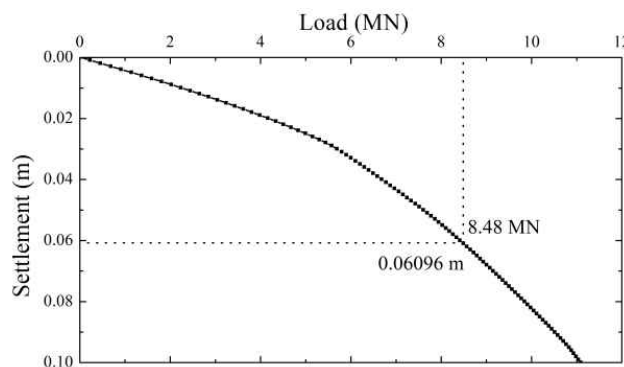


그림 36. 안정된 지반에서 말뚝의 하중-침하 곡선

그림 37은 일반 강관 말뚝에 대해 지반 침하에 따른 말뚝의 깊이에 따른 주면 마찰력 및 축 응력의 분포를 보여준다. 침하가 발생하지 않을 경우에는 마찰력 분포에서 정주면 마찰력만 발현되나, 지반 침하량이 커질수록 부주면 마찰력이 증가하고, 최대 부주면 마찰력 발생 지점이 지표면에서부터 더 깊게 위치하였다. 또한, 마찰력이 0이 되는 중립점의 위치도 침하량이 클수록 깊게 위치하는 것을 확인하였다. 중립점의 위치는 침하에 따른 말뚝의 축 응력 변화에서도 확인할 수 있다. 침하를 받지 않는 말뚝의 경우 상부 하중에 의해 압축력이 작용하나 깊이가 깊어질수록 하중 전달률이 떨어져 압축력이 감소한다. 하지만 침하 발생 시 말뚝에 작용하는 압축 응력이 증가하였고, 최대 압축 응력 발생 지점은 마찰력이 0이 되는 중립점의 위치와 같다. 해석 결과를 토대로 **침하에 따른 부주면 마찰력은 말뚝에 작용시키는 압축 응력을 증가시키며, 마찰력이 0이 되는 중립점에서 최대 압축 응력이 발현됨을** 알 수 있다.

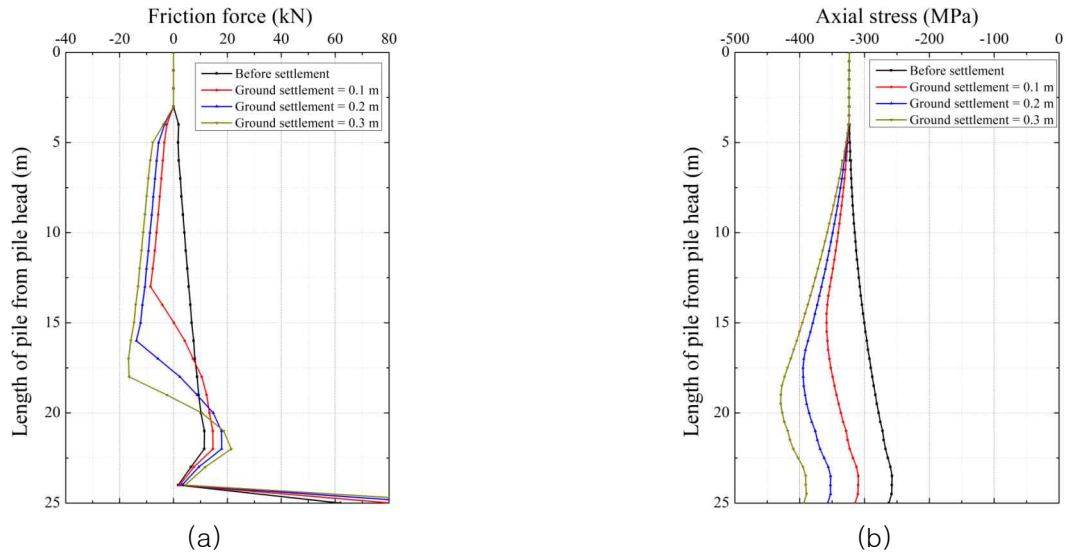


그림 37. 지반 침하 발생에 따른 일반 강관 말뚝의 거동: (a) 주면 마찰력, (b) 축 응력

말뚝 두부에 극한하중이 작용하며 지반 침하량이 0.3 m일 때, 실린더를 각 위치(상단, 중단, 하단)에서 수축/팽창시킨 결과는 그림 38 및 표 9와 같다. 실린더가 최하단에 위치하고 수축량이 클 때 부주면 마찰력은 발현되지 않았으며, 최하단 위치 및 팽창량이 클 때 부주면 마찰력만이 발생하였다. 실린더가 상단 및 중단에 위치할 경우 실린더의 동작(수축/팽창) 및 부피 변화량에 따라 상이한 경향을 보였는데 이는 중립점 위치에 따른 영향으로 판단된다. 즉, 중립점 상부의 깊이에서 실린더가 작용하더라도 하부 깊이는 말뚝과 지반 사이의 상대적인 변위 차이가 발생하고, 실린더의 작용은 새로운 변수로 지반 내 마찰력 분포에 작용하기 때문에 정확한 경향 파악이 어렵다. 반면 실린더를 중립점 이하의 깊이에 설치할 경우 상부 지반과 말뚝의 상대변위를 감소시켜 준다. 따라서 침하가 발생할 경우, 지반 대응형 말뚝의 실린더는 중립점 이하의 깊이에 설치하여야 하며, 팽창은 부주면 마찰력을 증가시키므로 수축을 하는 것이 적합하다.

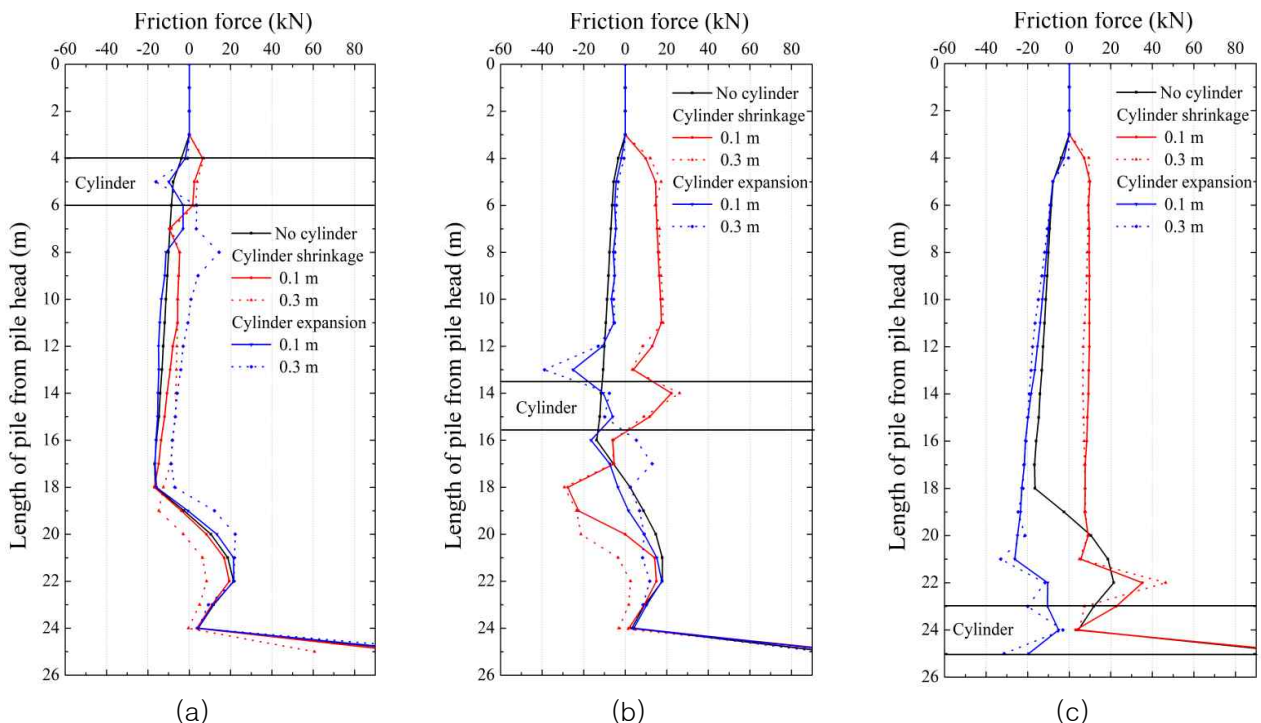


그림 38. 지반 침하시 실린더형 부재의 위치에 따른 말뚝의 주면 마찰력: (a) 상단, (b) 중단, (c) 하단

표 9. 실린더의 위치 및 변형 특성에 따른 말뚝의 주면 마찰력

실린더 위치	수축		팽창	
	10 cm	30 cm	10 cm	30 cm
없음	-947.68 kN			
상단	10.88 kN	640.04 kN	-73.33 kN	1,941.68 kN
중단	3,227.78 kN	1,033.03 kN	-96.21 kN	260.37 kN
하단	4,455.46 kN	4,120.61 kN	-5,201.49 kN	-5,660.24 kN

• **지반 변형 대응 부재 최적 위치 결정 - 2차년도**

1차년도 수치해석 결과, 지반 변형 대응 부재의 최적 위치는 변형층 부근의 심도로 판단된다. 2차년도에는 이로부터 시작하여, 변형층 부근 다양한 위치에 지반 변형 대응 부재를 위치시킨 후 지반 침하/응기 시 말뚝의 하중 전달 기전을 분석하여 최적의 위치를 결정하였다.

2차년도에는 수치적 효율성을 확보하기 위해 삼차원이 아닌 축대칭(Axisymmetric) 조건에서 수치해석을 수행하였으며, 해석 단면은 그림 39와 같다. 지반은 직경 20 m, 높이 25 m(연약 점토층 = 20 m, 암반 지지층 = 5 m)로 구성하였다. 본 수치해석은 지반 변형 대응 부재의 종류 및 위치에 따른 영향을 분석하기 위해 수행되므로 강말뚝으로 가정하여 직경 0.5 m, 길이 21 m으로 모델링 하였으며, 말뚝의 선단이 암반층에 의해 지지되도록 하였다. 지반과 말뚝의 요소 유형은 4절점 사각형 요소를 사용하였다. 또한 2차년도에는 수치적 수렴성(Convergence)을 확보하기 위해 1차년도 보다 공간을 조밀하게 이산화시켰다. 이에 따라 2차원 평면에서 총 1,706개(지반 = 1,580개, 말뚝 = 126개)의 요소로 격자를 구성하였다. 수치해석에 사용된 물성의 경우, 지반은 Hejazi et al.(2008), 말뚝은 Kim et al.(2020)의 문헌을 참고하였으며, 이는 표 10과 같다.

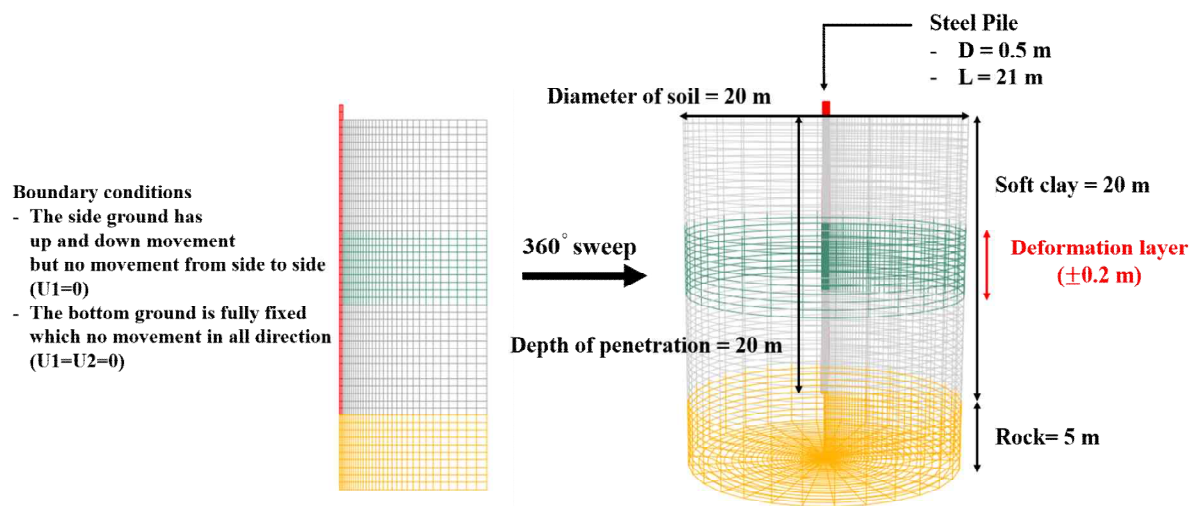


그림 39. 수치해석 단면

표 10. 수치해석에 사용된 말뚝과 지반의 물성

구분	강말뚝	연약 점토층	암반층
구성 모델	Elastic	Mohr-Coulomb	
밀도, ρ (kg/m ³)	7653	1989	2193
탄성계수, E (MPa)	200,000	31	185,18
포아송비, ν	0.2	0.28	0.3
마찰각, ϕ (°)	—	20.5	32
팽창각, ψ (°)	—	4.81	10
점착력, c (kPa)	—	7	35
K_0	1	0.65	0.43

지반 경계 조건의 경우, 바닥면은 완전 고정하고, 측면은 수평 변위 고정 및 연직 변위 허용으로 설정하였다. 지반과 말뚝 주면의 마찰계수는 0.6으로 설정하였다. 특정 지층의 수축 및 팽창으로 인해 발생하는 침하 및 융기를 구현하기 위하여 20 m의 연약 지반층 중앙에 5 m 구간에는 열팽창(Thermal Expansion) 모델을 적용하였다. 열팽창 모델은 열팽창 계수(Thermal Expansion Coefficient)를 기울기로 기준 온도로부터의 온도 변화에 따른 체적 변화가 비례한다. 먼저, 열팽창 계수를 0.01으로 설정한 후, 목표하는 지반 변형량(± 0.2 m)에 대응하는 온도 변화를 산정하기 위해 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과 기준 및 초기 온도(25°C)에서 온도 변화에 따른 지반 변형량은 그림 40과 같다. 이에 따라 지반 융기를 모사하기 위해서는 수치해석 상 온도를 25°C 에서 29°C 로 상승시켰으며, 지반 침하를 모사하기 위해서는 수치해석 상 온도를 25°C 에서 20.9°C 로 감소시켰다.

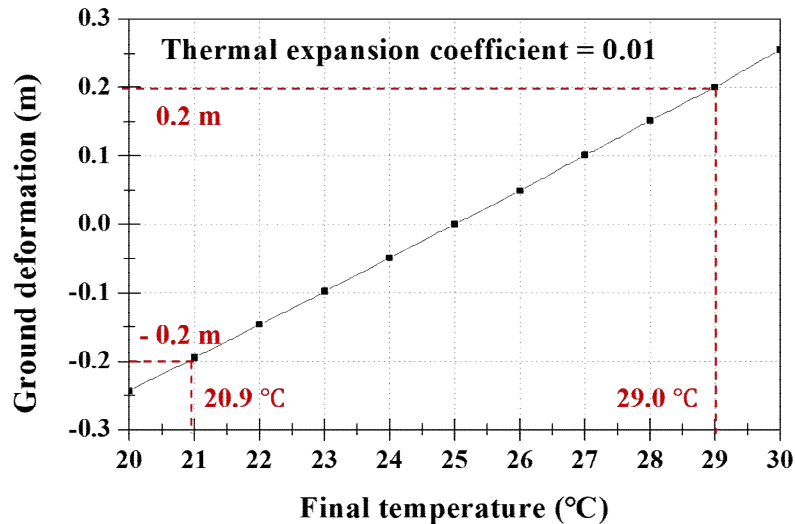


그림 40. 최종 온도 변화에 따른 지반 변형량

본 과업에서는 부재의 종류, 위치, 변형량에 따라 지반 변형 대응형 말뚝에 작용하는 주면 마찰력 및 축 응력을 파악하기 위하여 표 11과 그림 41과 같이 해석 조건을 설정하였다. 또한, 지반 침하 및 융기에 대해 각 조건을 반복하여 수치해석을 수행하였다. 2차년도 연구에서 지반 변형 대응 부재는 능동형 부재와 수동형 부재로 구분된다.

각각의 거동을 고려하여 수동형 부재(스프링)에는 말뚝에 비해 낮은 탄성계수를 적용하여 지반 변형에 의해 말뚝에 작용하는 상·하향력에 의해 자체적으로 부재가 인장 및 압축되도록 하였으며, 능동형 부재는 열팽창 모델을 적용하여, 실린더형 부재와 동일한 거동을 할 수 있도록 하였다. 또한, 변형이 발생하는 지층의 상단, 중단, 하단에 부재를 배치하여, 각 부재의 위치에 따른 거동의 차이를 상세히 분석하였다. 수치해석은 지반 변형 대응형 부재의 변형량에 따라 D1과 D2로 구분된다. D1의 경우, 지반 변형량의 10%(± 0.02 m)에 해당하는 변형을 능동형 및 수동형 부재에 발생시켰다. D2는 변형량의 차이에 따른 거동을 분석하기 위하여 부재의 종류에 따라 구분되었다. 능동형 부재는 변형량을 줄여 지반 변형량의 5%(± 0.01 m)만큼, 스프링은 변형량을 늘려 ± 0.14 m만큼 변형되도록 하였다.

해석 과정의 진행순서는 다음과 같다. 먼저, 말뚝과 지반의 접촉 조건 및 지반의 경계 조건을 설정하고, 전체 모델에 중력을 적용하여 안정화 시킨다. 그 후, 변형 발생 지층의 온도를 변화시켜 침하와 융기를 모사하고 말뚝에 작용하는 주면 마찰력과 축 응력을 산정한다. 수동형 부재의 경우, 해당 단계에서 변형이 즉각적으로 발생하므로 지반 변형 대응 효과가 동시에 발현된다. 능동형 부재의 경우, 그 후, 부재의 온도를 변화시켜, 인위적인 부재 변형을 발생시켜 지반 변형 대응 거동을 분석한다.

표 11. 수치해석 케이스

말뚝 종류	부재 위치			부재 변형량		구분
	Top	Mid	Bot	D1	D2	
강말뚝 (Steel Pile)						SP
실린더(능동형 부재) 설치 말뚝 (Steel Pile with Cylinder)	○			○		SPC-T-D1
		○		○		SPC-M-D1
			○	○		SPC-B-D1
	○				○	SPC-T-D2
		○			○	SPC-M-D2
			○		○	SPC-B-D2
스프링(수동형 부재) 설치 말뚝 (Steel Pile with Spring)	○			○		SPS-T-D1
		○		○		SPS-M-D1
			○	○		SPS-B-D1
	○				○	SPS-T-D2
		○			○	SPS-M-D2
			○		○	SPS-B-D2

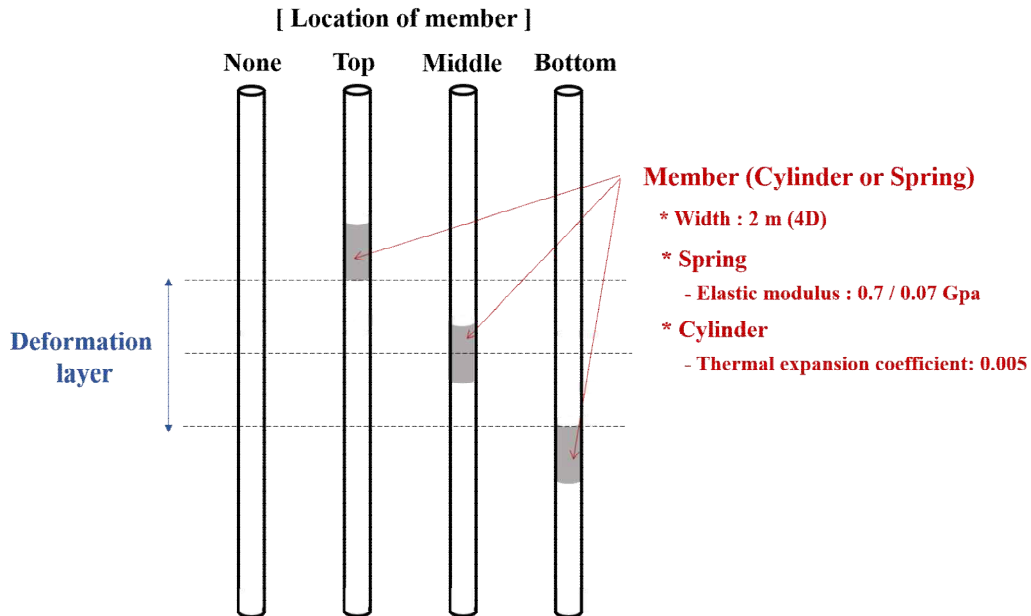


그림 41. 지반 변형 대응 부재 위치

지반 침하가 발생하였을 때, 강말뚝과 D1의 변형량에 해당하는 실린더 및 스프링 부재가 적용된 말뚝의 거동은 그림 42, 그림 43과 같으며, 부재의 위치 및 변형량에 따른 말뚝의 거동은 그림 44~49와 같다. 주면 마찰력 그래프의 음수 구간을 적분하여 산정된 총 부주면 마찰력은 표 12와 같다. 축응력 그래프에서 (-)값은 압축 응력을 의미하며, (+)값은 인장 응력을 의미한다.

강관 말뚝의 경우, 모든 수치해석에서 지반 침하에 따라 부주면 마찰력이 발현되었으며, 이에 따라 말뚝에 작용하는 압축력이 크게 발생하였다. 또한, 주면 마찰력의 값이 0이 되는 중립점은 침하 발생 지층의 하부에 위치하는 것을 확인하였다.

수치해석 결과, 지반 변형 대응 부재의 압축은 지반과 말뚝 사이의 상대변위를 감소시켜, 지반 침하에 대응하는 것을 확인하였다. 능동형 부재의 경우, 거동 특성상 말뚝에 작용하는 하향력에 의한 압축이 아닌 강제적인 압축이 발생하므로 말뚝 주변 지반의 재배열이 명확하게 발생하며, 하향(부주면) 마찰력이 상향(정주면) 마찰력으로 전환되었다. 그러나 수동형 부재의 경우에는 지반 침하량 대비 10%에 해당하는 부재의 압축(D1)이 발생하여도, 하향 마찰력 및 축 응력 감소 효과가 거의 발생하지 않았으며, 탄성계수를 낮춰 압축량을 크게 증가(D2)시킬 경우, 하향력이 감소하였다.

이러한 효과는 마찰거동의 비선형성으로부터 비롯된다. 지반 침하 시 말뚝 주면에는 부주면 마찰력이 점진적으로 증가한다. 그 후, 능동형 부재의 압축이 발생하면, 주면에 하중의 제하(Unloading)이 발생하여, 부주면 마찰력이 크게 감소하게 된다. 하지만, 수동형 부재의 경우, 지반 침하와 동시에 압축이 되며 별도의 하중 제하(Unloading) 단계가 존재하지 않는다. 따라서 수동형 부재를 통해 지반 침하에 대응하기 위해서는 상대변위가 거의 발생하지 않도록 부재의 축 강성이 말뚝에 비해 매우 작아야 한다.

부재 위치의 영향을 분석한 결과, 변형 발생층 하단에 부재를 위치시키는 것이 부주면 마찰력을 가장 크게 감소시키는 것을 확인하였다. 이를 통하여 지반 변형 대응 부재는 변형 발생 지층의 하단 즉, 중립점 부근에 위치하는 것이 가장 효과적이라고 판단된다.

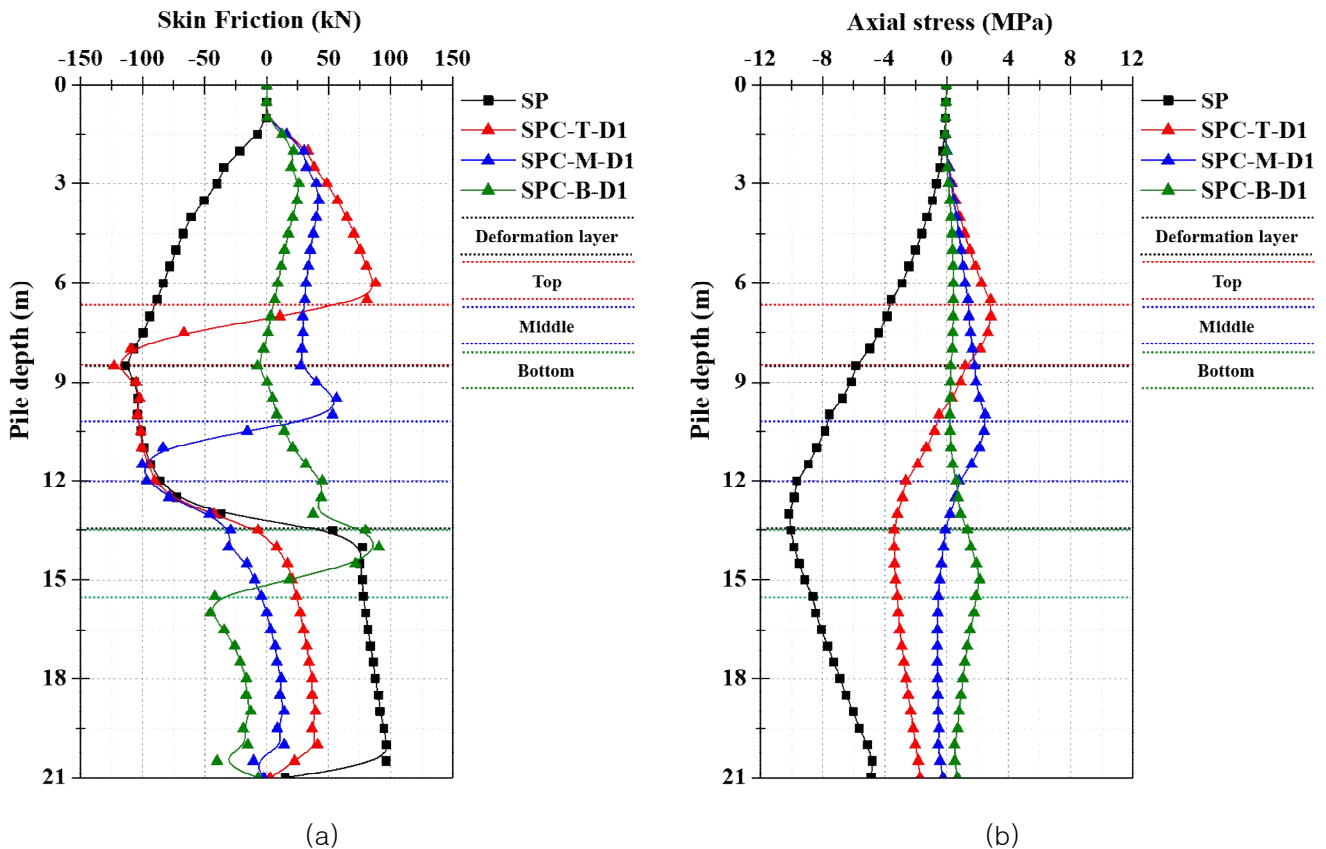
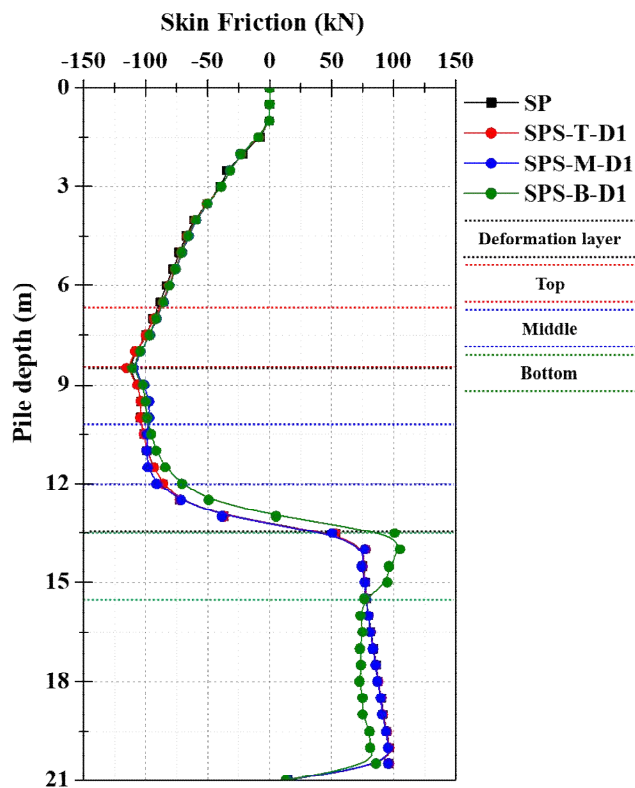
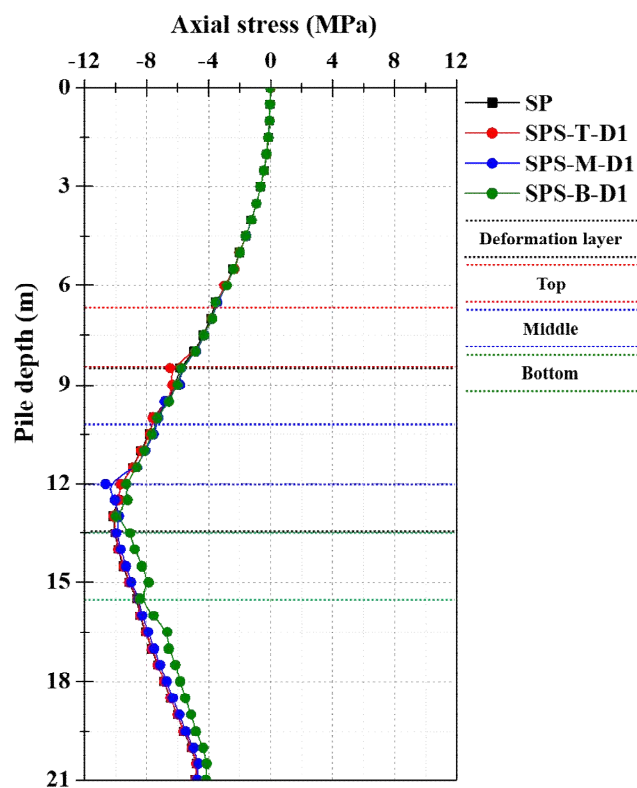


그림 42. 지반 침하 발생에 따른 능동형 부재 말뚝의 거동(D1): (a) 주면 마찰력, (b) 축 응력

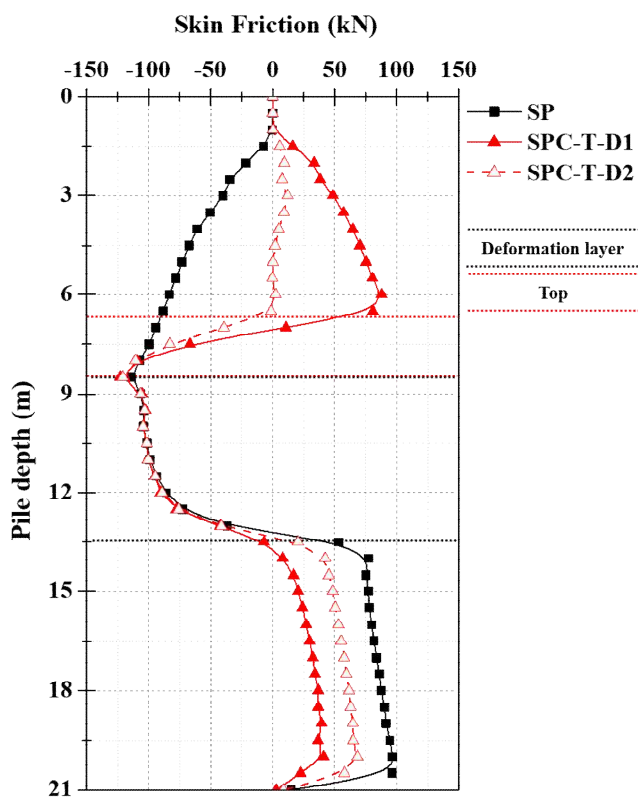


(a)

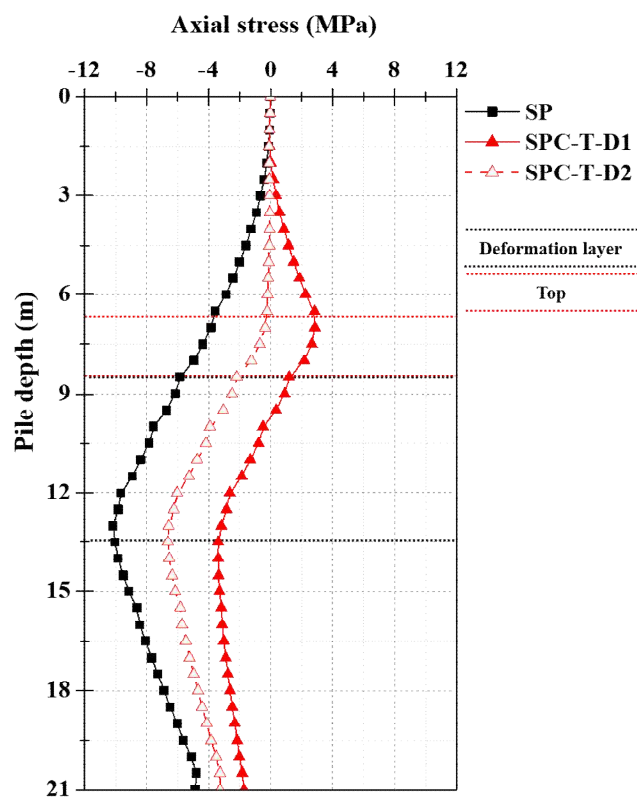


(b)

그림 43. 지반 침하 발생에 따른 수동형 부재 말뚝의 거동(D1): (a) 주면 마찰력, (b) 축 응력



(a)



(b)

그림 44. 지반 침하 발생에 따른 능동형 부재 말뚝의 거동(상단 위치): (a) 주면 마찰력, (b) 축 응력

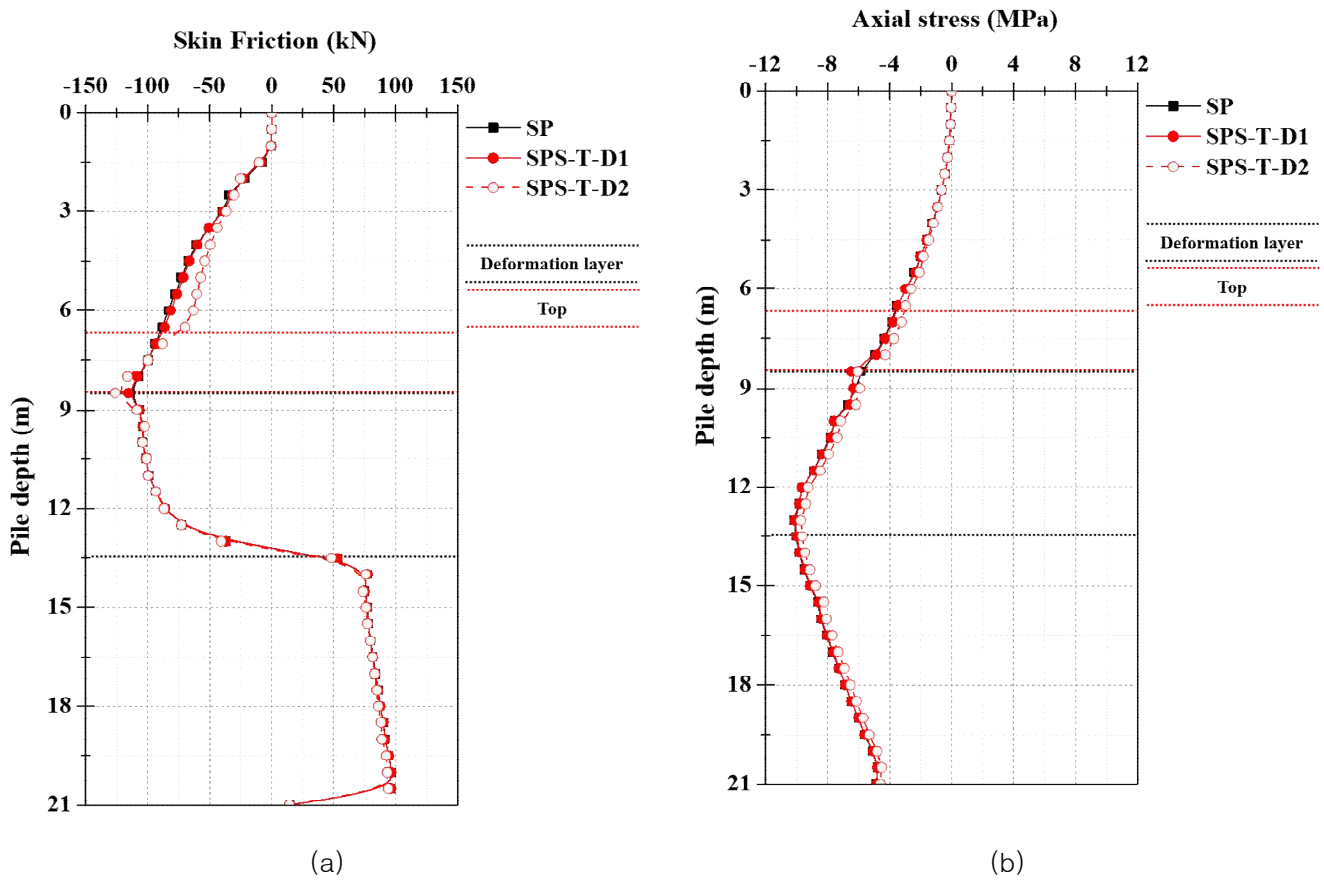


그림 45. 지반 침하 발생에 따른 수동형 부재 말뚝의 거동(상단 위치): (a) 주면 마찰력, (b) 축 응력

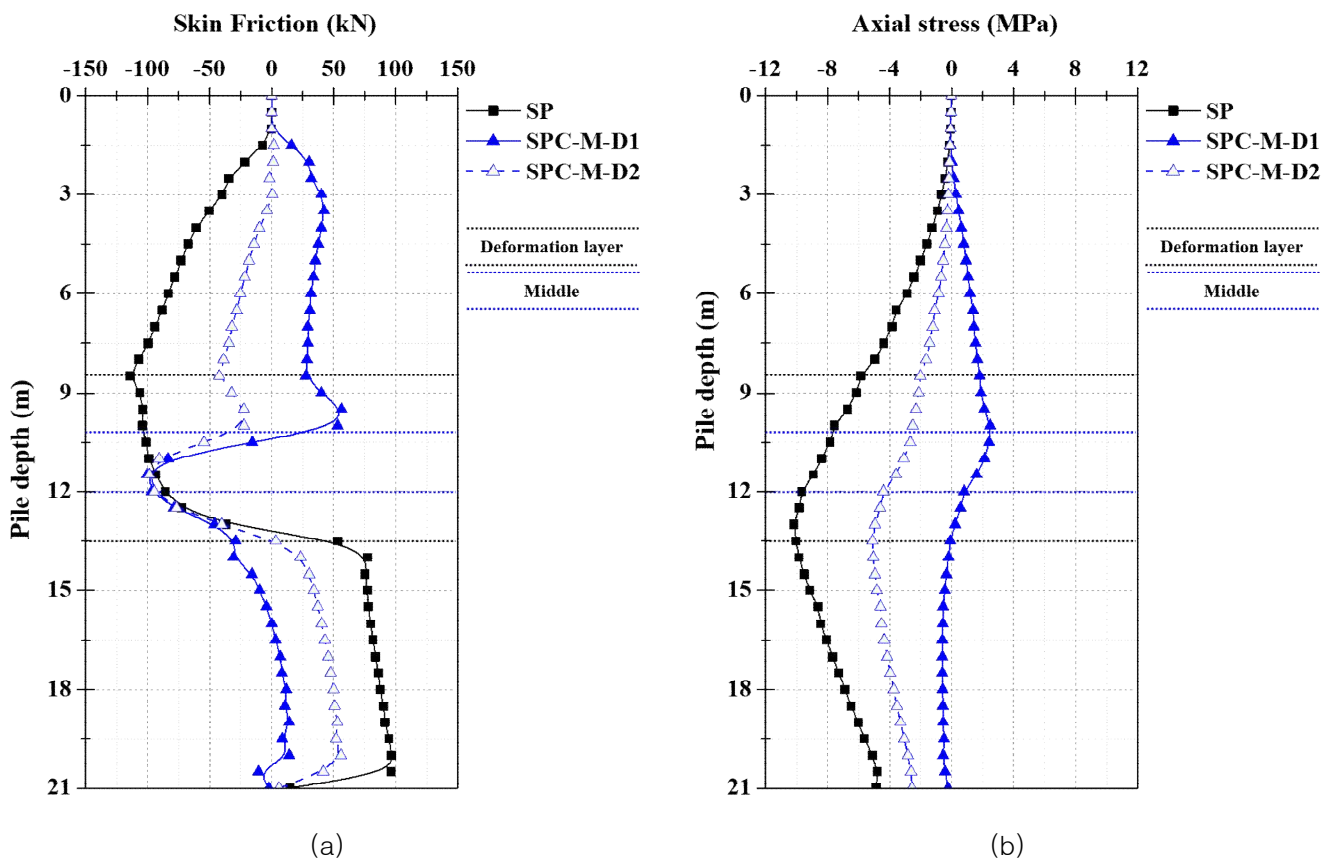
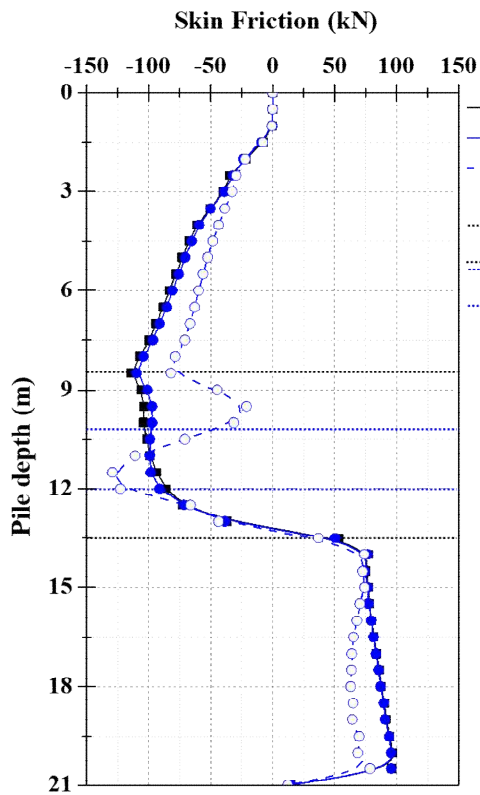
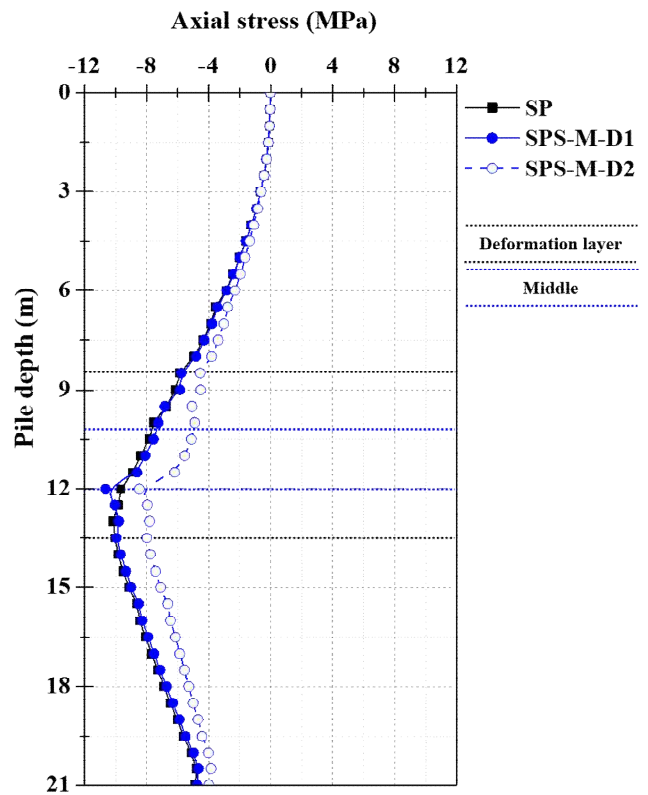


그림 46. 지반 침하 발생에 따른 능동형 부재 말뚝의 거동(중단 위치): (a) 주면 마찰력, (b) 축 응력

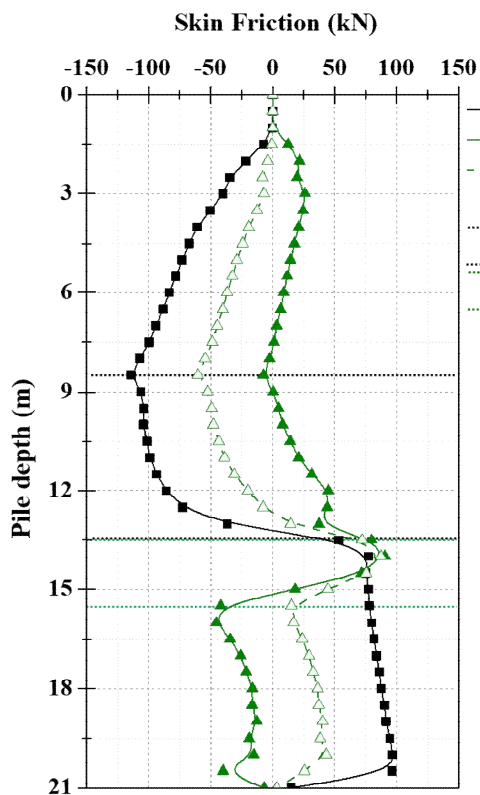


(a)

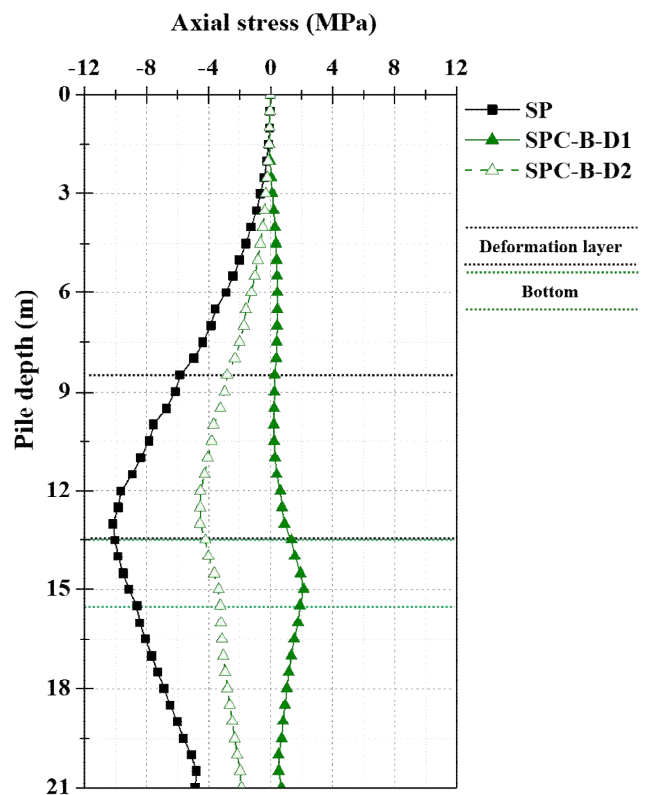


(b)

그림 47. 지반 침하 발생에 따른 수동형 부재 말뚝의 거동(중단 위치): (a) 주면 마찰력, (b) 축 응력



(a)



(b)

그림 48. 지반 침하 발생에 따른 능동형 부재 말뚝의 거동(하단 위치): (a) 주면 마찰력, (b) 축 응력

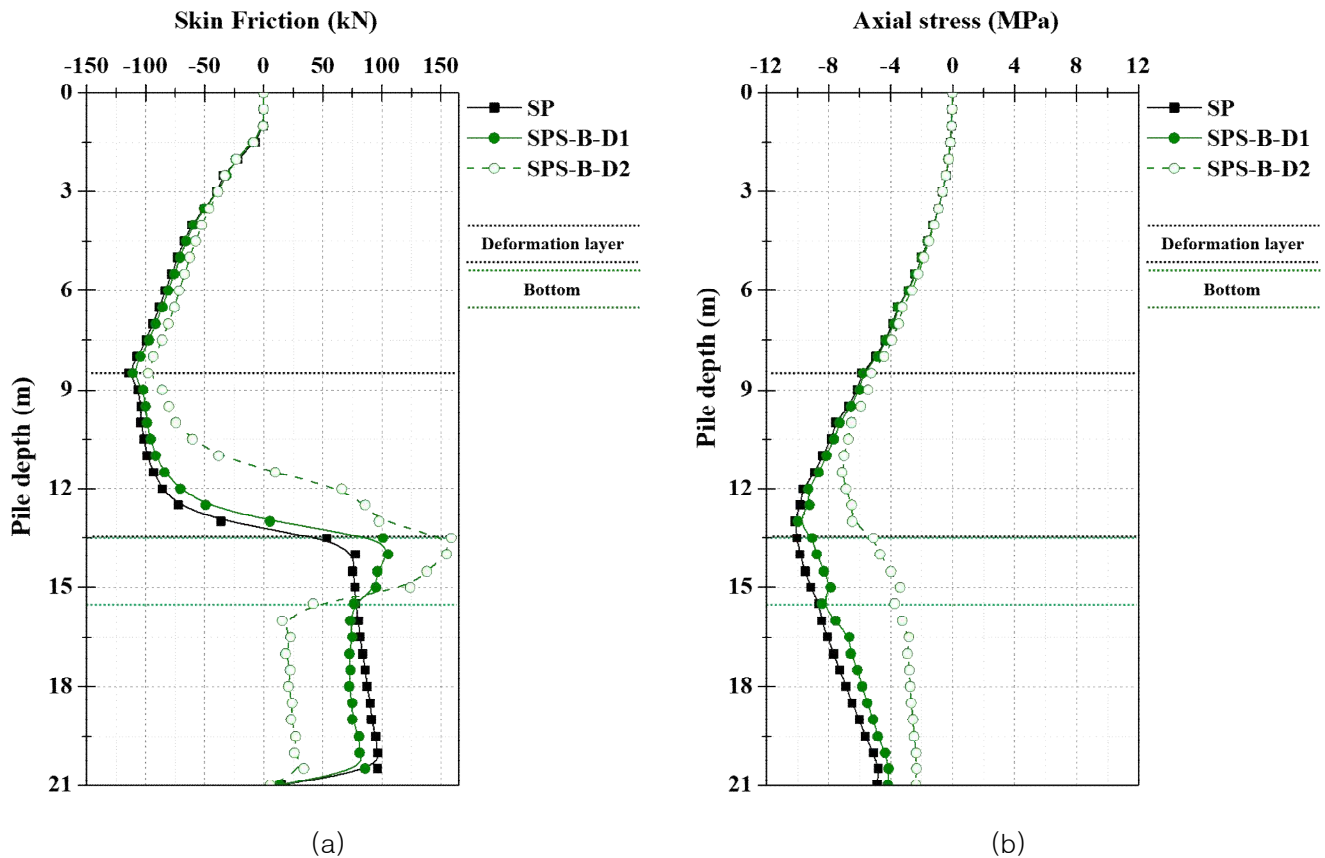


그림 49. 지반 침하 발생에 따른 수동형 부재 말뚝의 거동(하단 위치): (a) 주면 마찰력, (b) 축 응력

표 12. 그래프 면적으로 산정된 각 말뚝의 총 부주면 마찰력

말뚝 구분	하향 마찰력 (kN)	하향 마찰력 감소 정도 (%)
SP	905.7	—
SPC-T-D1	559.7	38.2
SPC-M-D1	256.2	71.71
SPC-B-D1	147.0	83.77
SPC-T-D2	582.6	35.67
SPC-M-D2	399.8	55.85
SPC-B-D2	354.6	60.84
SPS-T-D1	902.1	0.40
SPS-M-D1	886.7	2.10
SPS-B-D1	842.8	6.94
SPS-T-D2	846.9	4.50
SPS-M-D2	691.2	23.68
SPS-B-D2	616.2	31.96

지반 융기가 발생하였을 때, 강말뚝과 D1의 변형량에 해당하는 능동형 및 수동형 부재가 적용된 말뚝의 거동은 그림 50, 51과 같으며, 부재의 위치 및 변형량에 따른 말뚝의 거동은 그림 52~ 57과 같다. 주면 마찰력 그래프의 양수 구간을 적분하여 산정된 상향 마찰력의 값은 표 13과 같다.

해석 결과, 융기층 위 말뚝 주면에는 상향 마찰력이 작용하고 이로 인해 말뚝에는 인장 응력이

발현되었다. 이는 말뚝의 인발 저항력을 감소시킨다. 지반 변형 대응형 말뚝 기초의 경우, 지반 변형 대응 부재의 인장은 지반과 말뚝 사이의 상대변위를 감소시켜 지반 융기에 효과적으로 대응하는 것을 확인하였다.

능동형 부재에서는 최소 31.41%, 최대 85.23%의 상향력 감소 효과가 크게 나타났다. 하지만, 수동형 부재에서는 능동형 부재보다 크게 작은 최소 0.56%, 최대 31.51%의 상향력 감소 효과가 발생하였다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 마찰 거동의 비선형성으로 비롯된 현상으로 판단된다. 또한, 지반 침하의 경우와 마찬가지로 융기에서도 주면 마찰력이 0이 되는 지점인 중립점에 부재가 위치하는 것이 지반 변형 대응에 가장 효과적이라고 판단된다.

종합해 보면 지반 침하 및 융기 경우 모두, 지반 변형 대응 부재를 중립점 부근에 위치하는 것이 말뚝에 불리하게 작용하는 주면 마찰력을 가장 크게 감소시키는 것을 확인하였다.

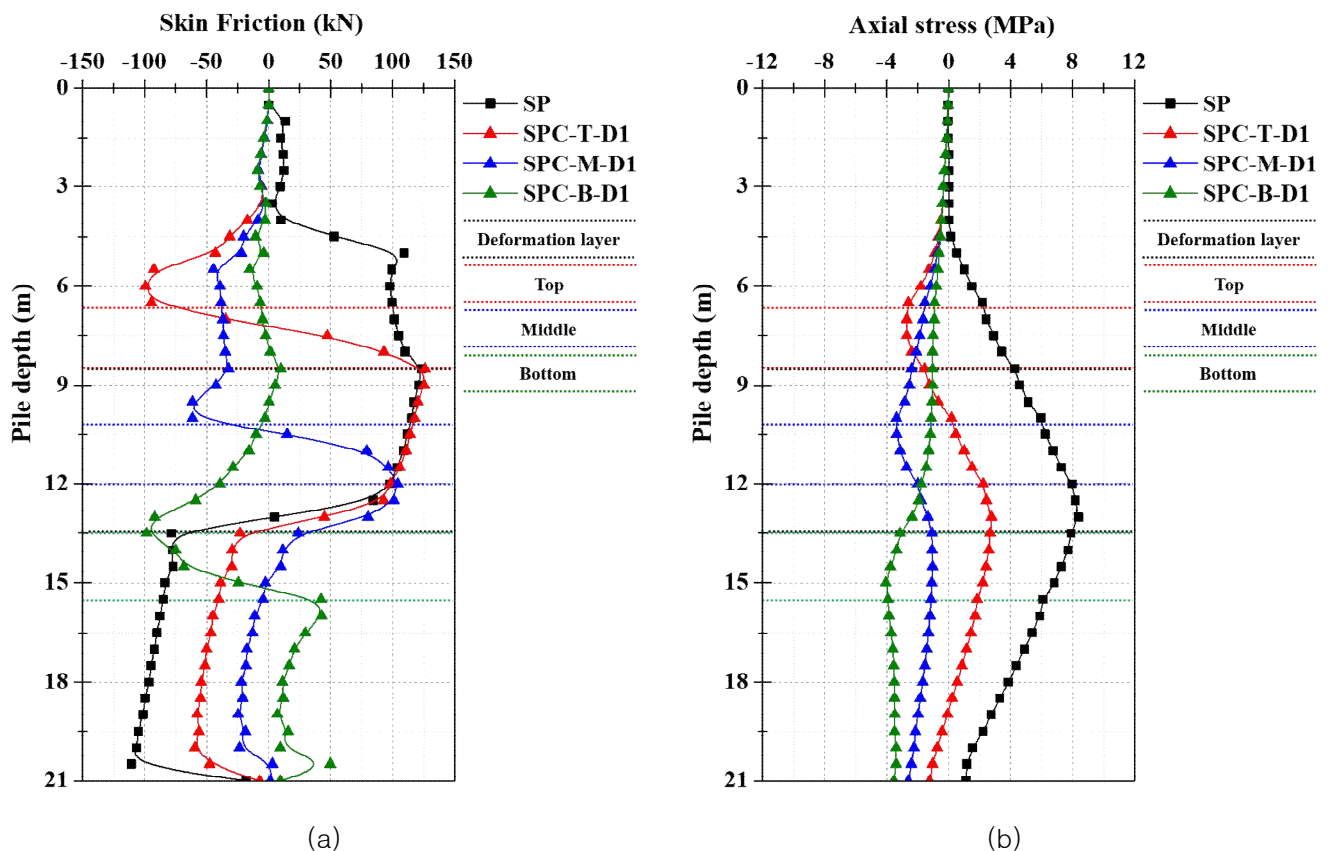
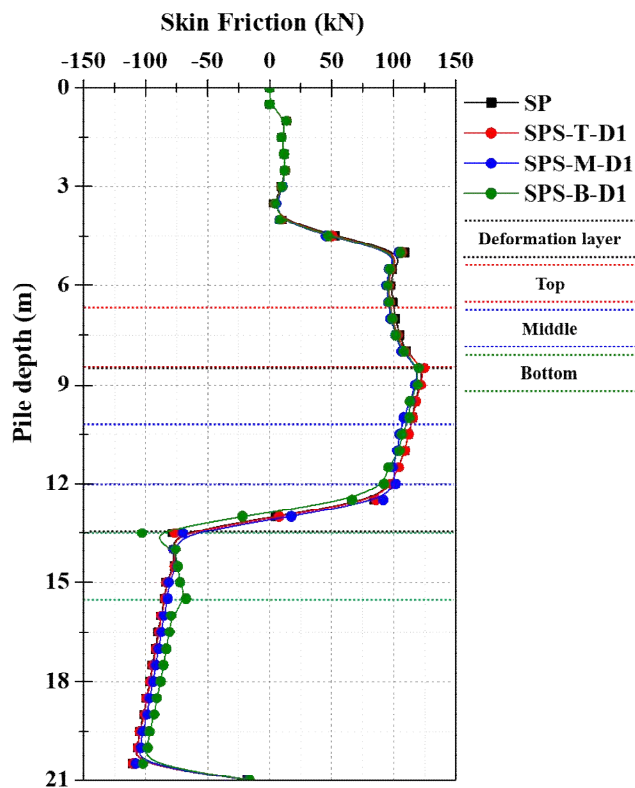
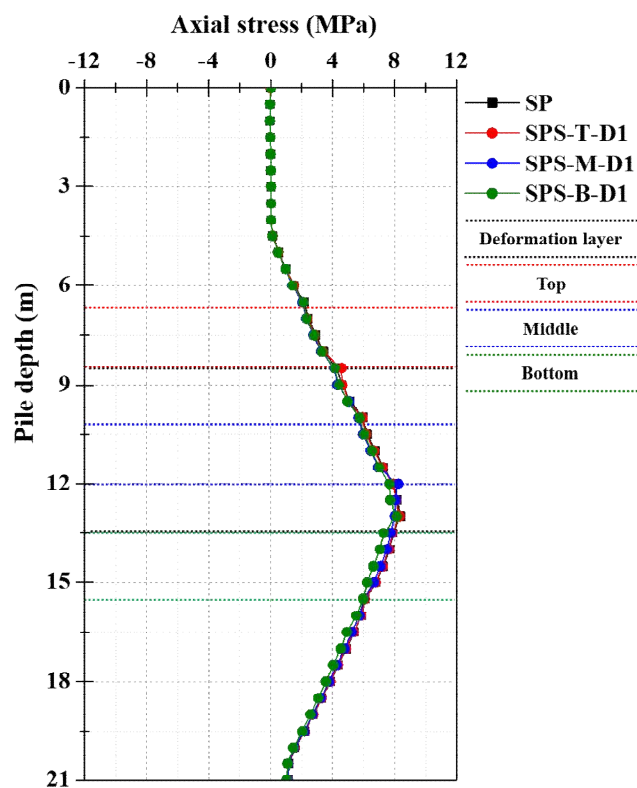


그림 50. 지반 융기 발생에 따른 실린더 부재 말뚝의 거동(D1): (a) 주면 마찰력, (b) 축 응력

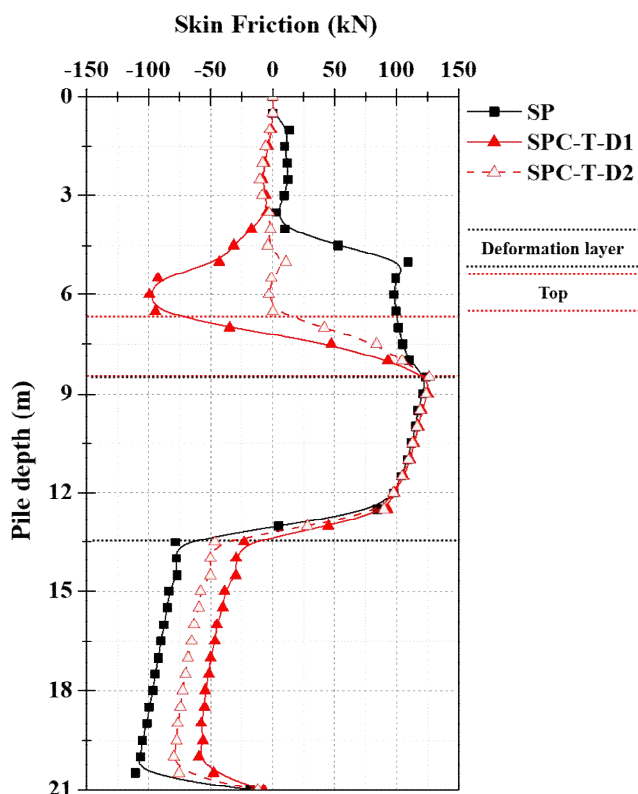


(a)

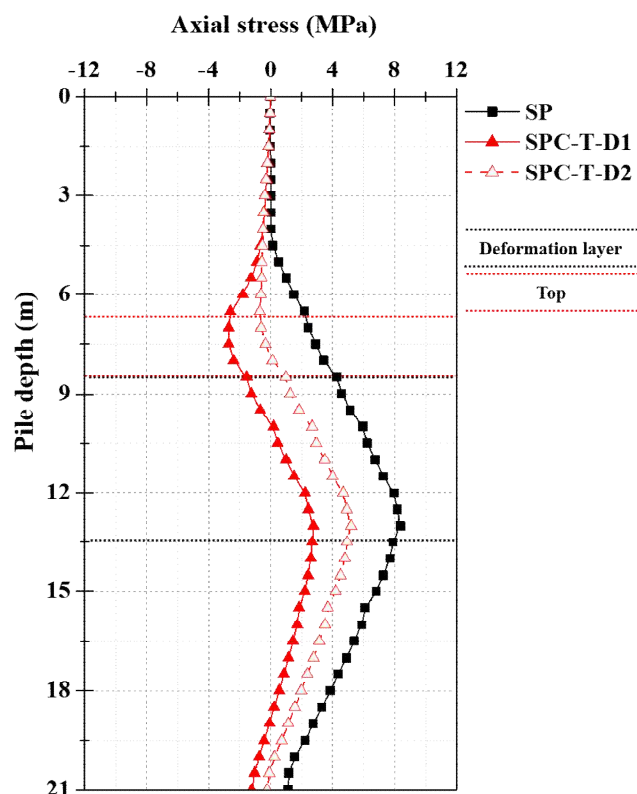


(b)

그림 51. 지반 융기 발생에 따른 스프링 부재 말뚝의 거동(D1): (a) 주면 마찰력, (b) 축 응력

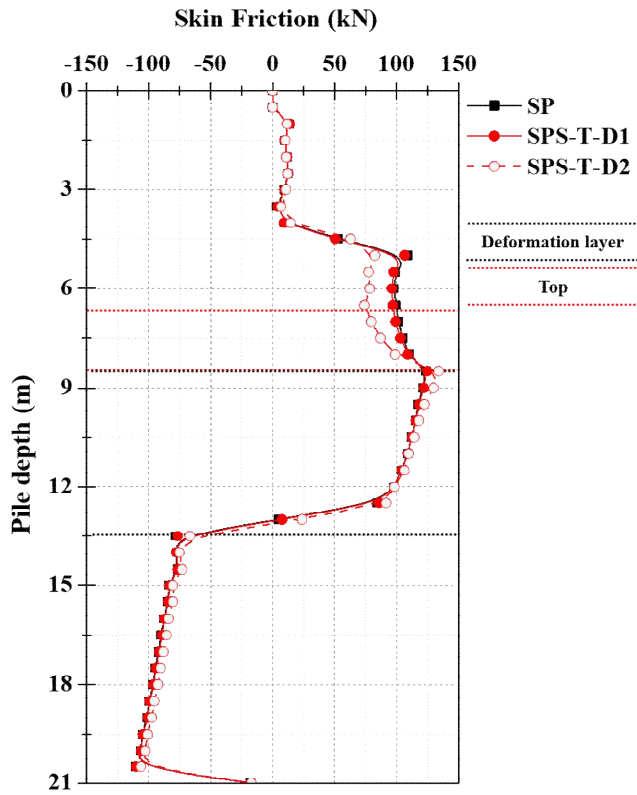


(a)

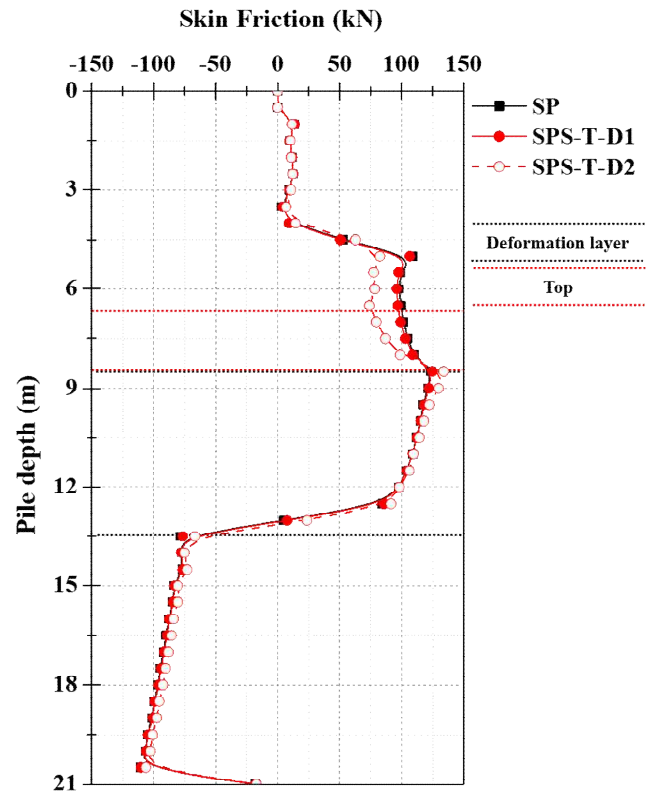


(b)

그림 52. 지반 융기 발생에 따른 실린더 부재 말뚝의 거동(상단 위치): (a) 주면 마찰력, (b) 축 응력

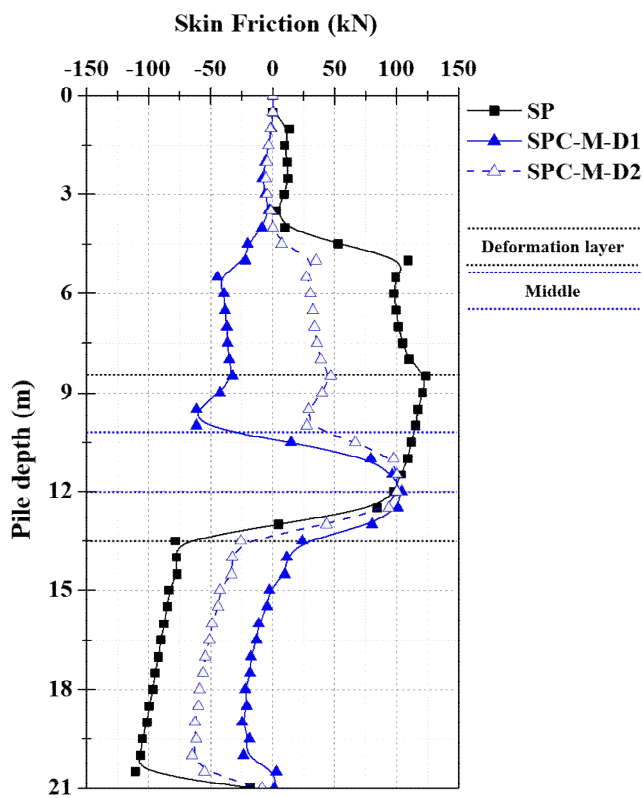


(a)

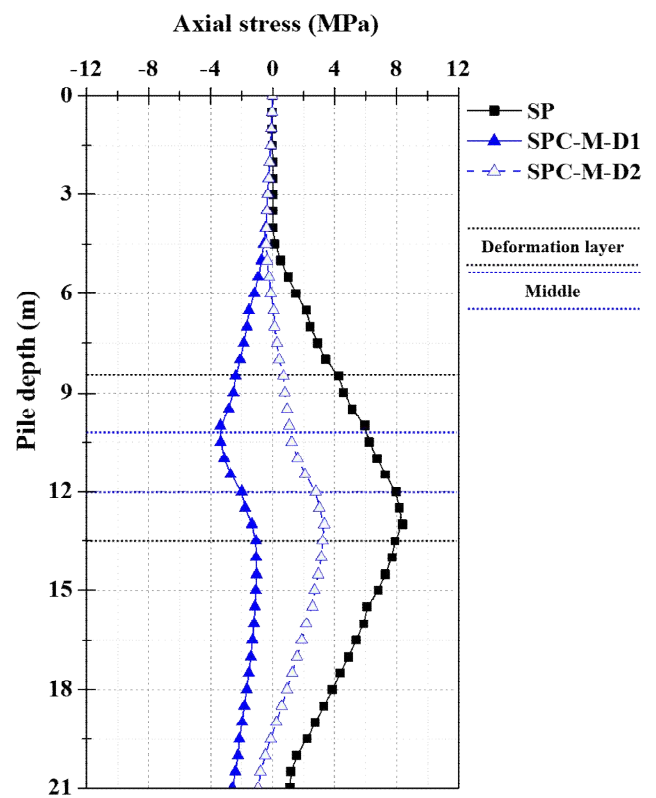


(b)

그림 53. 지반 융기 발생에 따른 스프링 부재 말뚝의 거동(상단 위치): (a) 주면 마찰력, (b) 축 응력

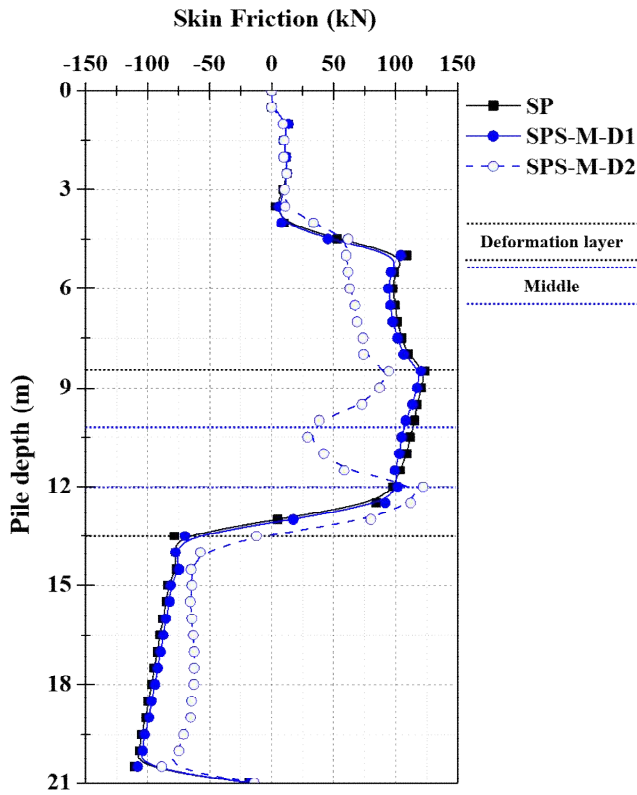


(a)

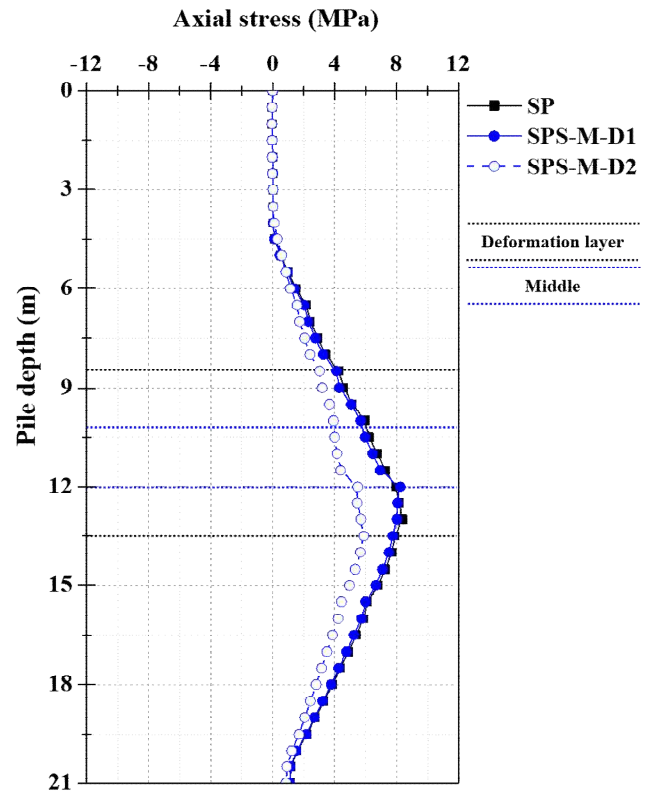


(b)

그림 54. 지반 융기 발생에 따른 실린더 부재 말뚝의 거동(중단 위치): (a) 주면 마찰력, (b) 축 응력

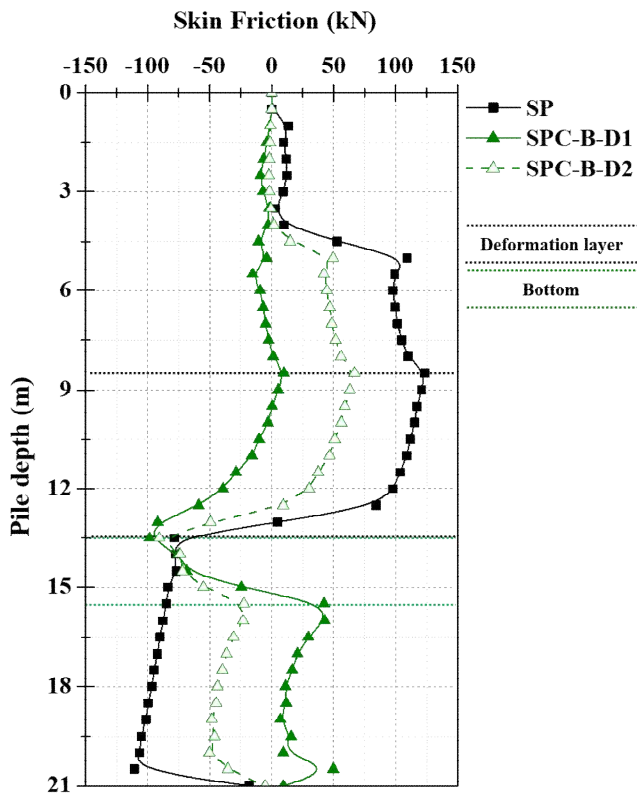


(a)

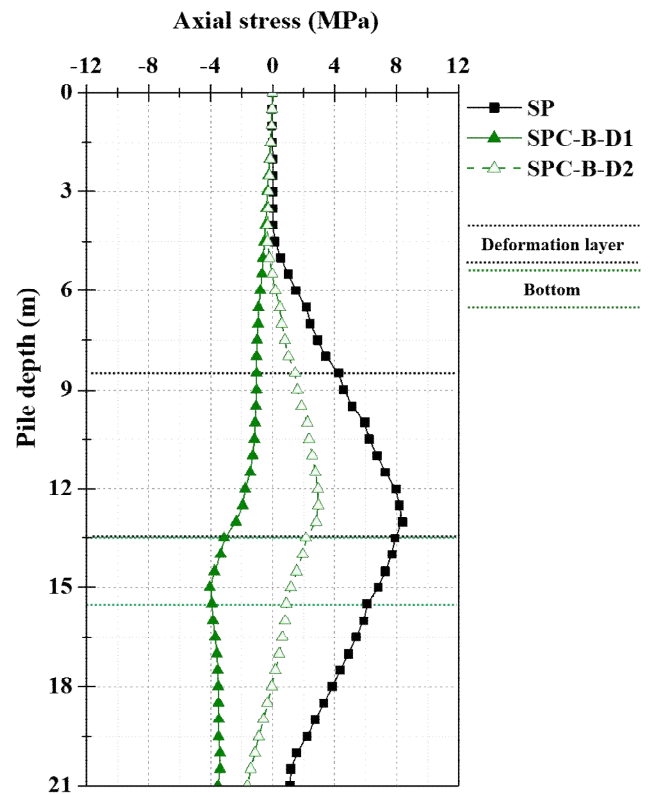


(b)

그림 55. 지반 융기 발생에 따른 스프링 부재 말뚝의 거동(중단 위치): (a) 주면 마찰력, (b) 축 응력



(a)



(b)

그림 56. 지반 융기 발생에 따른 실린더 부재 말뚝의 거동(하단 위치): (a) 주면 마찰력, (b) 축 응력

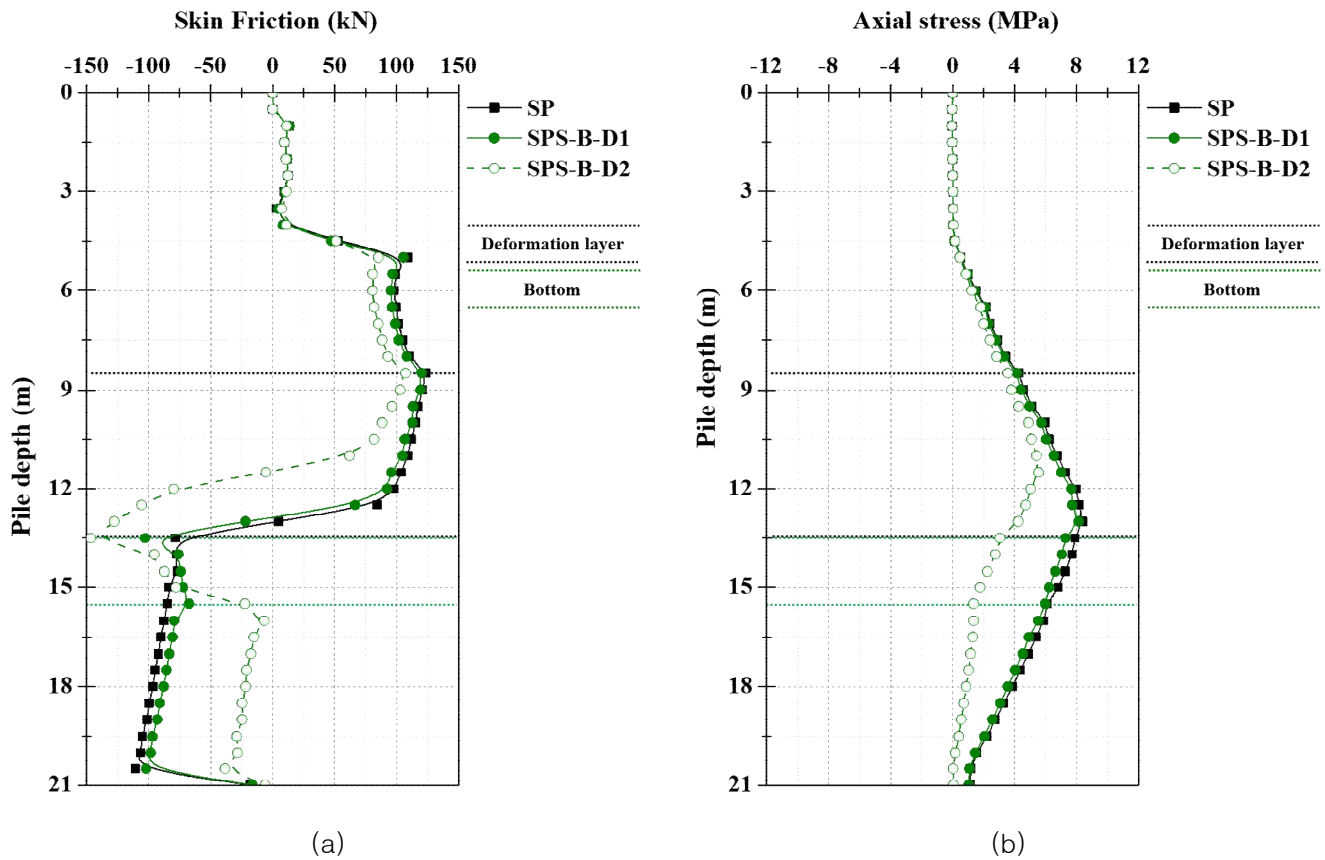


그림 57. 지반 융기 발생에 따른 스프링 부재 말뚝의 거동(하단 위치): (a) 주면 마찰력, (b) 축 응력

표 13. 그래프 면적으로 산정된 각 말뚝의 상향 마찰력

말뚝 구분	상향 마찰력 (kN)	상향 마찰력 감소 정도 (%)
SP	916.3	—
SPC-T-D1	589.7	35.64
SPC-M-D1	257.0	71.75
SPC-B-D1	135.3	85.23
SPC-T-D2	628.5	31.41
SPC-M-D2	438.9	52.10
SPC-B-D2	385.7	57.91
SPS-T-D1	911.2	0.56
SPS-M-D1	891.5	2.71
SPS-B-D1	871.3	4.91
SPS-T-D2	877.9	4.19
SPS-M-D2	678.9	25.91
SPS-B-D2	627.6	31.51

○ CTE C - 적용성 평가를 위한 실내모형실험

- [C-1] 지반 변형 모사 토조

• 지반 변형 모사 토조 제작 - 1차년도

본 과업의 1차년도에서는 지반 변형을 모사할 수 있는 모형 토조를 그림 58과 59와 같이 설계하고 제작하였다. 모형 토조는 모형 지반이 조성될 토조(그림 59a), 모형 지반을 안전하게 지지하는 토조 받침(그림 59b), 상부 하중 재하를 위한 반력보로 구성된다. 실험의 편의성을 확보하기 위해 그림 59c와 같이 토조와 토조 받침은 합체 및 분리가 가능하도록 제작하였다. 토조 받침 중심에는 원형으로 공간을 두어 말뚝의 삽입 및 고정이 가능하도록 하였다. 토조 위에는 반력보를 설치하여 말뚝에 하중을 재하할 수 있도록 하였다.

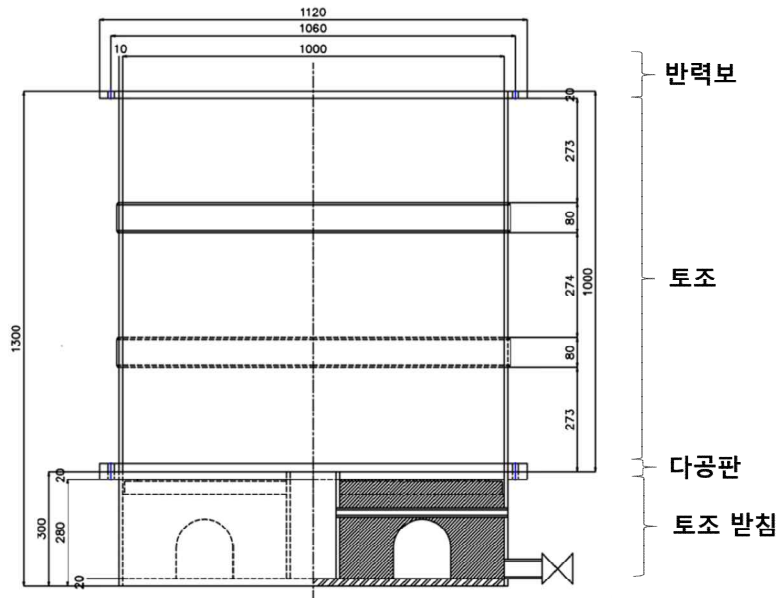


그림 58. 1차년도 모형 토조 단면 설계도

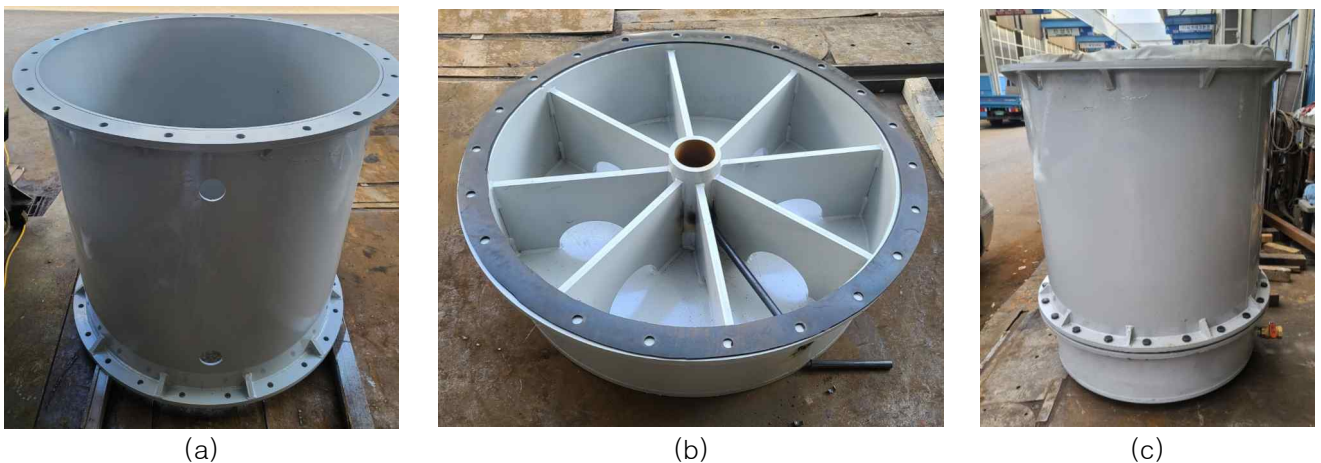


그림 59. 1차년도 제작 지반 변형 모사 토조: (a) 토조, (b) 토조 받침, (c) 토조 조립 전경

1차년도에서는 지반 상부에 압력을 주어 지반의 침하를 구현하고자 하였다. 그림 60은 (a) 지반 침하 모사용 지반 가압 설비와 (b) 가압 설비와 토조를 조립한 전경을 보여준다. 말뚝 하중 재하를 위한 반력보와 가압판은 일체화하여 제작하였다. 가압판 상부에 연결된 복동식 유압 실린더에 의해 가압판이 상하로 이동하며, 이를 활용하여 지표에 압력을 가해 지반을 침하시킬 수 있도록 제작하였다. 그림 61은 가압판의 효용성을 확인하기 위해 실행한 예비 실험의 결과로, 가압판 가동 전후, 지반의 침하 정도를 보여준다.



(a)



(b)

그림 60. 지반 침하 모사용 상부 가압판: (a) 제작 사진, (b) 토조와 조립 전경



(a)



(b)

그림 61. 가압판 가동 전후의 지반 침하: (a) 가압판 가동 전, (b) 가압판 가동 후

본 과업의 1차년도에서는 지반 용기를 모사하기 위해서, 토조의 내부를 감싸는 원통형 튜브에 공기를 주입하여, 조성된 지반에 횡 방향 토압을 증가시켜, 횡 방향으로 압축시키고, 연직 방향으로 팽창하여 지반 용기가 구현되도록 하였다. 그림 62는 원통형 튜브에 공기를 주입하기 전과 후의 모형 지반을 보여준다. 그림 62와 같이 원통형 튜브에 공기를 주입하면, 모형 지반이 횡 방향으로 압축되고, 이에 따라 구속압이 없는 지표로 지반이 용기하는 것을 볼 수 있다. 그림 63은 원통형 공기 튜브의 효용성을 확인하기 위해 실행한 예비 실험의 결과로, 가압판 가동 전후, 지반의 용기 정도를 보여준다.



(a)



(b)

그림 62. 공기 주입을 통한 지반의 융기 모사: (a) 공기 주입 전, (b) 공기 주입 후



(a)



(b)

그림 63. 공기 주입 전후의 지반 융기: (a) 공기 주입 전, (b) 공기 주입 후

- **지반 변형 모사 토조 - 2차년도**

1차년도에 제작한 지반 변형 모사 토조에 대한 지적사항은 다음과 같다.

1차년도 지적사항: 지반 용기 모사 시 공기 튜브 팽창 방법의 적절성에 대한 검토가 필요

1차년도에는 지반의 침하를 모사하기 위해서 지반 상부에서 하중을 재하하였으며, 지반 용기를 모사하기 위해서 횡 방향으로 지반을 압축시켜 연직 방향으로 지반이 용기되도록 하였으나, 이 같은 지반 침하/용기 모사 방법이 실제 지반의 거동을 잘 반영하는지에 대한 검토가 필요

지적사항 분석 및 보완 방향

문헌조사 결과, 굉장히 넓은 범위의 지반에서 지반의 침하 및 용기가 발생함. 따라서, 반무한 평면 조건에서 지반이 횡 방향 변위 없이 침하 및 용기함. 따라서 2차년도에 지반 용기를 모사하기 위해 공기 튜브를 이용한 방법은 합리적이지 않음. 추가로, 1차년도에 적용된 방식대로 지반의 침하를 모사하면 지반 내부의 구속압을 상승시키며, 이는 실제 지반 침하 현상과 부합하지 않음

2차년도에는 먼저 지적사항에 따라 1차년도에 제작된 지반 변형 모사 토조에 대해서 면밀히 검토를 하였으며, 이를 바탕으로 **지반 변형 모사 토조를 재설계하고 개선**하였다.

① 1차년도 제작 지반 변형 모사 토조 검토 및 개선 방향 설정

지반의 변형이 모사 가능한 토조를 합리적으로 설계 및 제작하기 위해서는 실제 지반의 침하 및 용기가 일어나는 상황, 말뚝의 하중 전달 기전, 그리고 일반적인 말뚝의 설치 심도를 먼저 파악할 필요가 있다.

말뚝은 세장비가 굉장히 큰 구조물이다. 따라서, 일반 중력 조건(1g)에서 모형실험을 통해 말뚝에 작용하는 선단 지지력과 주면 마찰력을 모두 합리적으로 고려하는 것은 불가능하다. 일반적으로 **말뚝의 선단은 깊은 심도에 위치하며, 심도가 깊을수록 지반은 외부 환경 변화의 영향을 크게 받지 않으며, 따라서 이로 인한 지반의 변형 또한 제한적이다.** 따라서 **말뚝 선단부는 지반의 변형에 대한 영향을 말뚝 주면에 비해 크게 받지 않는 것으로 판단**하였다. 이에 따라, 본 과업의 2차년도에서는 **지반의 변형에 따라 발생하는 주면 마찰력의 변화에 초점**을 맞추었다.

지반이 침하하는 조건을 살펴보면, 연약한 점성토층의 압밀 침하하는 상부 하중의 재하로 인해 발생하나, Sabhka 지반에서는 습윤 유입으로 인한 침하가 발생하고, 팽창성 지반에서는 간극수의 건조로 인해 침하가 발생하고, 영구 동토층에서는 동토 내 간극빙의 용해로 인해 침하가 발생한다. 따라서 **꼭 상부 압력의 증가와 같은 역학적인 요인만이 지반 침하의 원인이 아니며, 환경적 요인이 지반 침하의 원인일 경우가 많다.** 또한, 1차년도에는 단순히 유압 실린더를 이용하여 지반에 압력을 가하여 침하를 모사하였다. 기계적으로 유압 실린더는 하중 제어가 아니라 변형 제어기이다. 만일 **재하판을 이용하여 지반을 침하시키면, 지반 내부의 연직 및 횡 토압이 변하게 된다.** 하지만, **실제 지반 조건을 생각해 보면, 지반의 연직압의 주요 원인은 상부 지반의 자중이므로, 지반의 침하시 연직압이 증가하지는 않는다.** 상기 이유로 검토 결과, **재하판을 이용한 지반의 침하 모사는 합리적이지 않은 것으로 판단**하였다.

그림 64는 실제 지반 용기 발생시 지반의 거동을 도식화하여 보여주며, 그림 65는 본 과업에서 (a) 1차년도 및 (b) 2차년도에 적용한 지반 용기 모사 방법을 도식화하여 보여준다. 본 과업에서 수행한 문헌조사 결과, 지반 용기는 계절적 동토 내 간극수의 빙결, 팽창성 지반에서의 습윤의 유입에 의해 발생한다. 이 경우 모두 지반 용기는 그림 65a와 같이 횡 방향 하중 증가로 인해 발생하지 않는다. **실제 용기 현상은 그림 64와 같은 반무한 평면에서, 환경적 요인으로 인해, 굉장히 넓은 범위의 지반에서 발생하며, 이때 횡 방향 변위는 거의 발생하지 않으므로 횡 방향 압축으로 인한 연직 방향 용기의 모사는 실제 조건에 부합하지 않는다.** 또한, 횡 방향 하중이 증가하게 되면, 지반의 응력이 변화하게 되어, 응력 교란이 발생하여 실험 결과에 영향을 미치게 된다. 따라서 본 과업의 2차년도에서는 그

림 65b와 같이, 그림 64의 점선 사각형을 모형화하여 지반을 밑면으로부터 상승시켜 지반의 응기를 모사하도록 하였다. 본 과업의 2차년도에서는 상기와 같은 검토사항을 고려하여, 지반 변형 모사 토조를 재설계하고, 수정하고, 제작하였다.

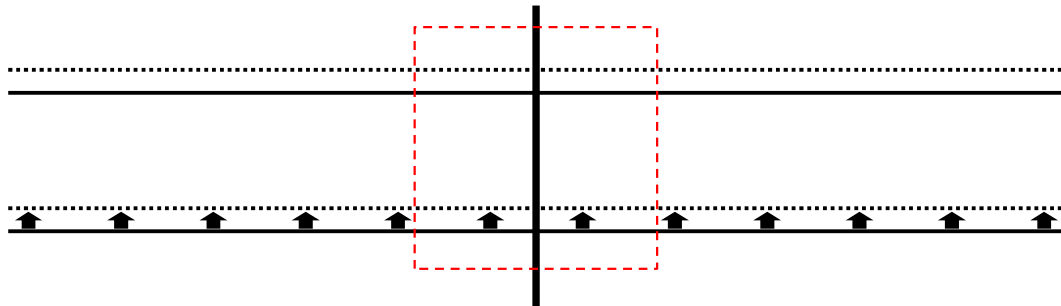


그림 64. 실제 지반 응기 발생 도식도

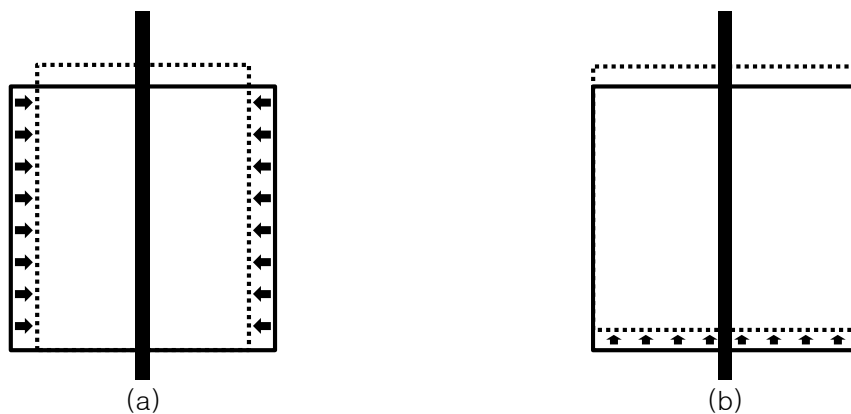


그림 65. 지반 응기 모사 방법: (a) 1차년도, (b) 2차년도

② 지반 변형 모사 토조 수정, 설계 및 제작

그림 66은 본 연구의 2차년도에 설계 및 제작한 지반 변형 모사 토조를 도식화하여 보여준다. 토조는 이중관 형식으로 설계하였으며, 모형 지반은 내부 챔버에 조성된다. 모형 말뚝은 내부 챔버 가운데를 관통하며, 말뚝의 선단은 로드셀에 연결되어 선단에 전달되는 하중을 측정한다. 내부 챔버 아래에는 공압 튜브를 설치하여 공기의 유입/유출에 따라 모형 지반을 연직 방향으로 움직일 수 있도록 한다. 이중관 형식의 토조이므로, 모형 지반이 상하로 움직일 때, 토조의 경계면에서는 추가 마찰력이 발현되지 않는다. 모형 토조의 변위는 내부 챔버에 연결된 변위계(LVDT)를 이용하여 측정하고, 지반에 작용하는 연직압은 단면이 내부 챔버와 동일한 강재 디스크를 이용하여 조절한다.

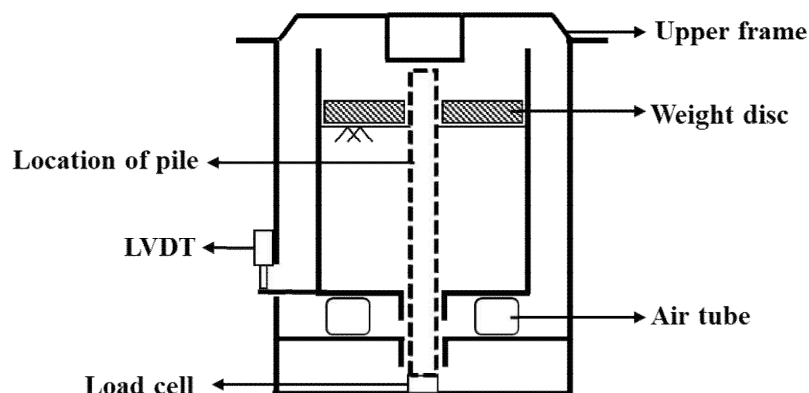


그림 66. 2차년도 제작 지반 변형 모사 토조 도식도

그림 67은 2차년도에 제작한 지반 변형 모사 토조를 이용하여 지반의 침하 및 융기를 어떻게 모사할 수 있는지 도식화하여 보여준다. 지반의 융기를 모사하기 위해서는, 내부 챔버 하부 공압 튜브의 공기를 모두 제거하여 그 위치를 가장 아래에 위치시킨 후, 내부 챔버에 모형 말뚝을 설치하고 모형 지반을 조성한다. 그 이후 공압 튜브에 공기를 주입시켜 모형 지반을 천천히 융기시키며, 이때 발생하는 추가 주면 마찰력으로 인해 변화하는 선단 하중을 측정한다. 지반의 침하를 모사하기 위해서는, 내부 챔버 하부 공압 튜브의 공기를 꽉 채워 가장 위에 위치시킨 후, 내부 챔버에 모형 말뚝을 설치하고 모형 지반을 조성한다. 그 이후 공압 튜브에 공기를 천천히 제거하여 모형 지반을 천천히 침하시키며, 이때 발생하는 추가 주면 마찰력으로 인해 변화하는 선단 하중을 측정한다.

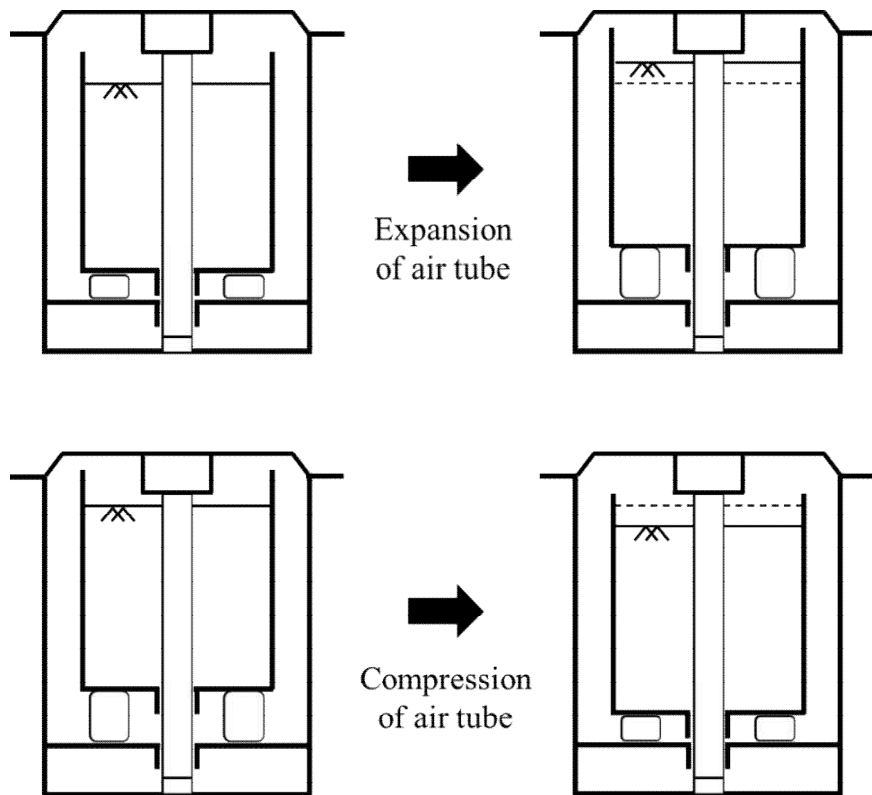


그림 67. 2차년도 제작 지반 변형 모사 토조를 이용한 지반의 융기 및 침하 모사 방법

그림 68은 제작한 지반 변형 모사 토조의 구성품 및 그 조립 전경을 보여준다. 그림 68a는 이중 관 형식으로 제작된 토조를 보여주고 있으며, 토조 한가운데 위치하는 모형 강관 말뚝 또한 보여준다. 말뚝 선단에는 로드셀이 설치되어 있어, 말뚝으로부터 전이되는 선단 하중을 측정하도록 하였다. 그림 68b는 모형 지반 상부에 설치하여 지반에 연직압을 가하기 위해 제작한 하중 디스크이다. 그림 68c는 내부 챔버 아래에 설치되어 모형 지반을 연직 방향으로 이동시키는 공압 튜브이다. 총 3개의 공압 튜브를 설치하였으며, 공압 튜브는 컴프레셔와 체결된 공압 조절 패널과 연결되어 있다. 추가적으로 공압 튜브와 패널의 연결부에는 공기 이동 속도 제어기를 설치하여 공기의 주입 및 배출속도를 용이하게 조절할 수 있도록 하였다. 그림 68d는 말뚝에 상부 하중을 모사하기 위한 무게추 설치 전경을 보여준다. 말뚝에 가해지는 상부 하중을 세밀하게 조절하기 위해 다량의 원형 디스크 형태의 무게추를 제작하였으며, 실험 중 안전을 위해 무게추의 전도를 방지하고, 무게추의 하중이 연직 방향으로 말뚝에 온전히 전이되도록 상부 프레임을 제작하였다.



(a)



(b)



(c)



(d)

그림 68. 2차년도 제작 지반 변형 모사 토조 전경: (a) 이중관 형태의 토조, (b) 지반 가압을 위한 하중 Disc, (c) 지반을 연직 방향으로 이동시키는 공압 실린더, (d) 지반 조성 전 전체 조립 전경

- [C-2] 말뚝 제작 및 실내모형실험

• 지반 변형 대응 말뚝 기초 제작

2차년도에는 1차년도 지적사항 및 자체 분석 및 검토 내용을 바탕으로 말뚝과 지반 변형 대응 부재의 체결 형식을 그림 69a와 같이 변경하였으며, 이에 따라 그림 69b와 같이 말뚝 모형체를 제작하였다. 그림 69과 같이 상하부 말뚝은 분리되어 있으며, 그 사이에는 지반 변형 대응 부재가 설치된다. 지반 변형 대응 부재가 설치되는 지점에서는 다양한 부재의 교체가 가능하도록 기계적 이음이 가능하도록 하였다. 또한, 그림 69a와 같이 상하부 말뚝과 동일한 재질의 슬리브가 지반 변형 대응 부재 바깥을 감싸는 형태로 제작하였다. 슬리브는 상부 말뚝과 나사선을 이용하여 단단히 결합하도록 한다. 그림 69c, d, e는 그림 69a, b에 모형 말뚝의 일체화 결합 과정을 보여준다. 먼저, 지반 변형 대응 부재를 하부 말뚝에 삽입(그림 69c) 한 후, 상부 말뚝을 부재에 결합(그림 69d)한다. 그 후 슬리브를 상하부 말뚝 및 지반 변형 대응 부재를 모두 감싸도록 나사선으로 단단히 결합(그림 69e)한다.

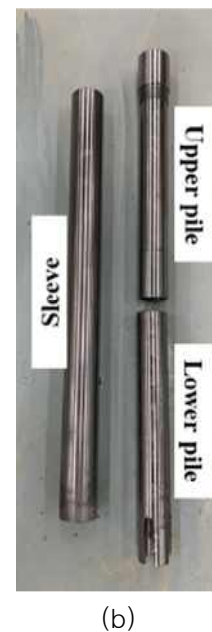
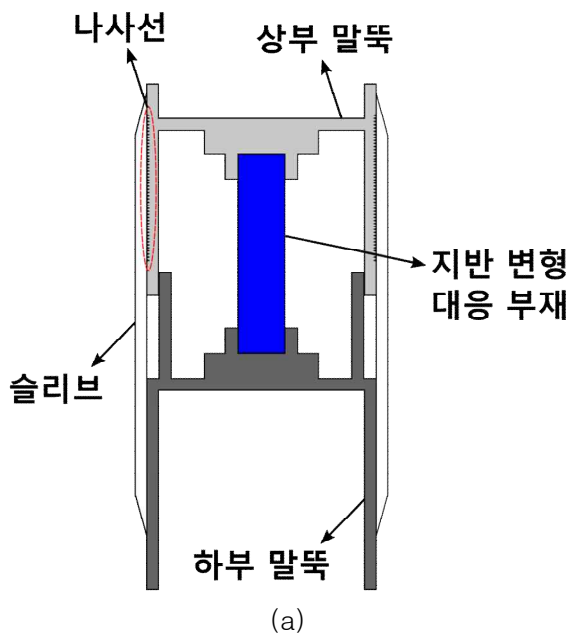
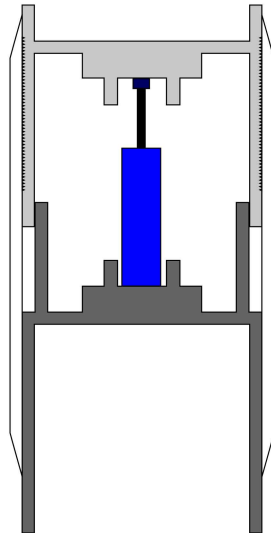


그림 69. (a) 결합 방식 도식도, (b) 제작 말뚝, (c~e) 말뚝 결합 과정: (c) 하부 말뚝에 지반 변형 대응 부재 삽입, (d) 상부 말뚝 결합, (e) 슬리브 결합

그림 70은 본 과업의 2차년도에 제안한 능동형 지반 변형 대응 부재의 개념도 및 제작품을 보여 준다. 능동형 부재로는 전동 유압 실린더를 제작하였다. 전동 유압 실린더에는 유체 이송관 및 전력선이 연결되며, 이는 다시 유압 조작 패널과 체결된다. 실험 중에는 유압 조작 패널을 제어하여 전동 유압 실린더를 연직 방향으로 압축 혹은 팽창시킨다.



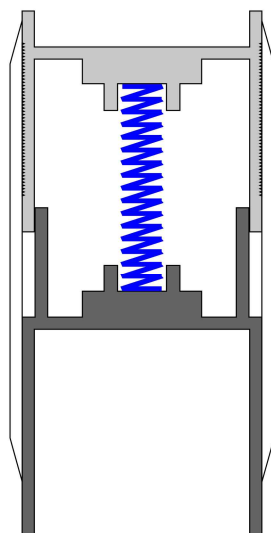
(a)



(b)

그림 70. 능동형 지반 변형 대응 부재 도식도 및 제작 부재

그림 71은 본 과업의 2차년도에 제안한 수동형 지반 변형 대응 부재 중 스프링을 적용한 부재의 개념도 및 제작품을 보여준다. 스프링 부재로는 스프링 계수가 21.33 kg/mm인 금형 스프링을 적용하였다.



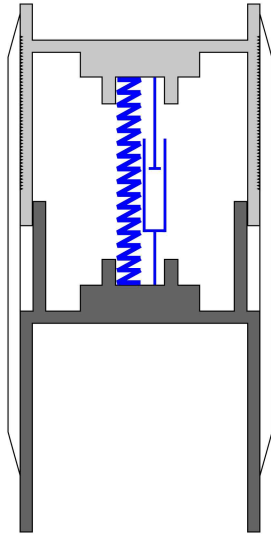
(a)



(b)

그림 71. 수동형(스프링) 지반 변형 대응 부재 도식도 및 제작 부재

그림 72는 본 과업의 2차년도에 제안한 수동형 지반 변형 대응 부재 중 스프링-대시팟을 적용한 부재의 개념도 및 제작품을 보여준다. 스프링은 스프링 부재와 동일한 제품을 적용하였으며, 대시팟은 그림 72와 같이 스프링과 병렬로 설치하였다.



(a)



(b)

그림 72. 수동형(스프링-대시팟) 지반 변형 대응 부재 도식도 및 제작 부재

- **지반 변형 대응형 말뚝의 효용성 확인을 위한 모형 실험**

모형 지반은 입자가 모난 파쇄 모래를 이용하여 조성하였다. 실험 모래에 대해 체분석 시험을 수행한 결과, $D_{60} = 0.564 \text{ mm}$, $D_{30} = 0.389 \text{ mm}$, $D_{10} = 0.244 \text{ mm}$ 이고, 균등계수 $C_u = 2.31$, 곡률계수 $C_g = 1.10$ 으로 파악되어, 실험 모래는 통일분류법상 입도가 나쁜 모래(SP)로 분류되었다. 비중 실험 결과, 실험 모래의 비중은 2.642로 측정이 되었으며, 이는 모래의 주요 광물인 석영의 비중인 2.65와 유사하다. 종합해 보면 **실험 모래는 입도가 균질한 입자가 모난 석영질 모래**이다.

모형 지반 조성 시, 입자의 조밀도를 조절하기 위해, 최대 간극비 실험(혹은 최소 밀도 실험)을 실시하였다. 실험 결과 최소 건조 단위 중량은 1.328 g/cm^3 으로 측정이 되었으며, 이에 해당하는 간극비는 0.988이다. 최소 간극비(혹은 최대 밀도)를 측정하기 위해서는 강사 실험을 실시하였다. Hariprasad (2016)와 Dastpak (2021)에 따르면, 입도가 균질한 모래를 낙하고가 50 cm 이상에서 낙하시키면, 상대밀도 97~99%의 매우 조밀한 상태를 만들 수 있다. 이에 따라 본 과업에서는 낙하 높이를 70 cm로 하여 실험 모래를 다짐 몰드에 강사시킨 후, 그 밀도를 측정하였다. 실험 결과 간극비는 0.629로 측정되었으며, 이를 본 과업에서는 최소 간극비로 가정하였다.

모형 지반은 강사 시스템을 이용하여 조성하였다. 그림 73은 본 실험에서 적용한 강사 시스템의 도식도와 이를 사용하여 조성한 모형 지반을 보여준다. 지반은 총 4층으로 조성하였으며, 한 층의 두께는 10 cm로 하였다. 강사 높이는 70 cm로 하여, 한 층 조성이 끝나면 강사기를 10 cm 상향 이동시킨 후, 다음 층을 조성하였다.

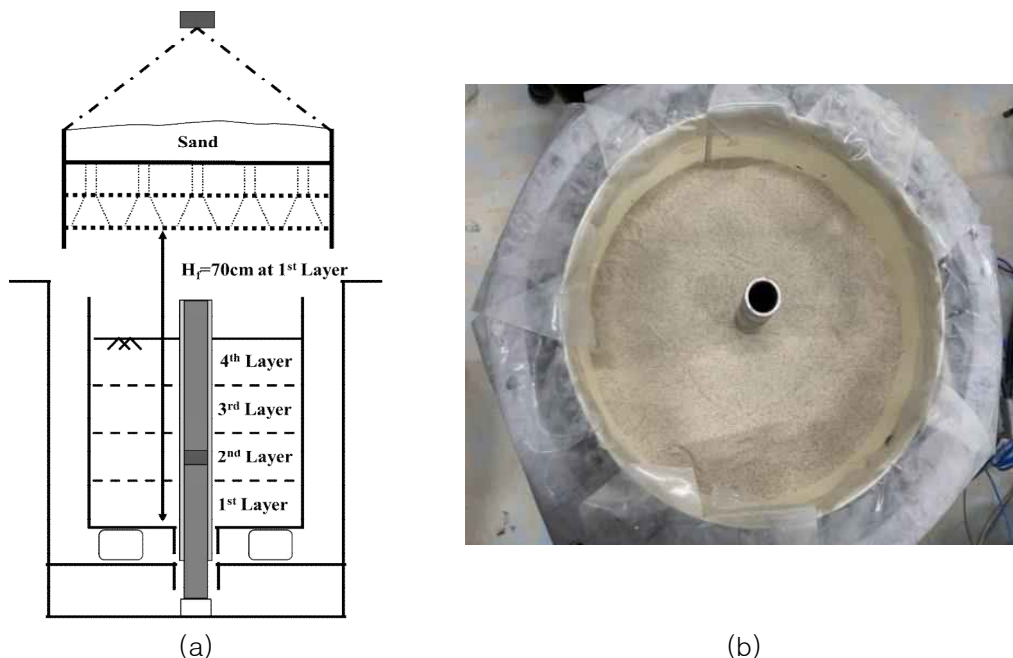


그림 73. (a) 강사 시스템 도식도 및 (b) 이를 적용하여 조성한 모형 지반

2차년도에서는 일부 실험에서 압전 센서를 이용한 지반 변형 시 말뚝에 작용하는 횡 토압의 변화의 측정을 시도하였다. 일반적으로 토압계는 고가이고, 평면이며, 강성이 큰 재료로 제작된다. 말뚝과 같이 곡률이 있는 부재에 토압계를 설치하는 것은 쉽지가 않다. 최근에 많은 발전을 이룬 압전 센서의 경우, 그 재질이 유연하여 곡률이 있는 표면에 부착하기가 쉬우며, 전통적인 토압계에 비해 경제적이다. 본 과업에서는 그림 74와 같이 압전 센서를 말뚝 표면에 부착하였다. 이때, 전단력에 의해 센서의 탈락을 방지하고자 에폭시를 이용하여 압전 센서를 말뚝에 단단히 접착하였다. **압전 센서로부터 토압을 읽고 측정하기 위해서는 마이크로컨트롤러의 일종인 아두이노를 사용**하였으며, 그 연결 전경은 그림 75와 같다.



그림 74. 모형 말뚝에 부착된 압전 센서

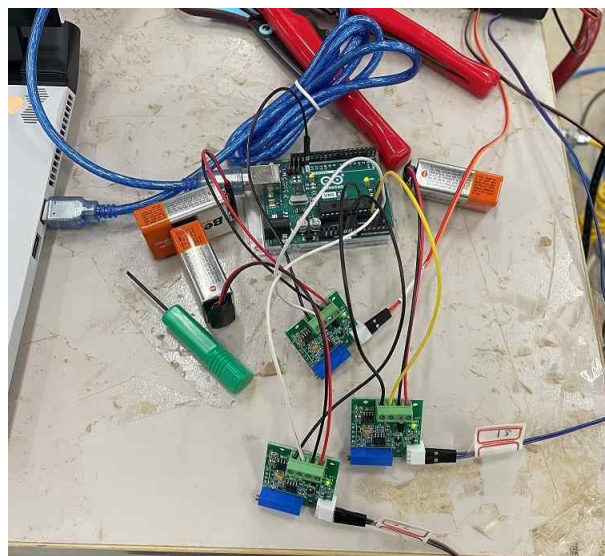


그림 75. 아두이노 및 압전 센서를 활용한 토압 측정



그림 76. 실험 준비를 마친 실험기 전경

그림 76은 모형 말뚝 설치, 모형 지반 조성, 지반 연직압 적용, 말뚝 하중 적용 등의 실험 준비를 모두 마친 실험기 전경을 보여준다. 말뚝 두부에는 총 150 kg의 하중을 무게추를 이용하여 재하하였다. 말뚝의 자중은 25 kg로 측정이 되어, 주변 마찰력이 작용하지 않을 경우, 선단에는 175 kg이

작용하도록 하였다. 말뚝 하중 재하추 상부에는 변위계를 설치하여 말뚝의 변위를 측정하였으며, 지반의 변위는 토조 측면에 설치된 변위계를 이용하여 측정하였다.

그림 77/78은 능동형 부재가 삽입된 모형 말뚝을 적용하여 지반 침하/용기 실험을 수행하는 과정을 도식화하여 보여준다. 먼저, 지반 조성 완료 이후 말뚝 두부에는 무게추를, 모형 지반에는 하중 재하 Disc를 설치한다. 그 후, 공압 튜브의 공기를 배출/주입하여 지반을 침하/용기시키며, 이때 선단 로드셀에서 하중의 변화를 측정한다. 지반 침하/용기 이후에는 말뚝에 능동형 부재가 압축/팽창되며, 이때 압축/팽창량에 따른 선단 하중의 변화를 읽고, 이로부터 총 주면 마찰 저항의 변화를 측정한다. 이로부터 하중 전달 기전의 변화를 분석할 수 있다.

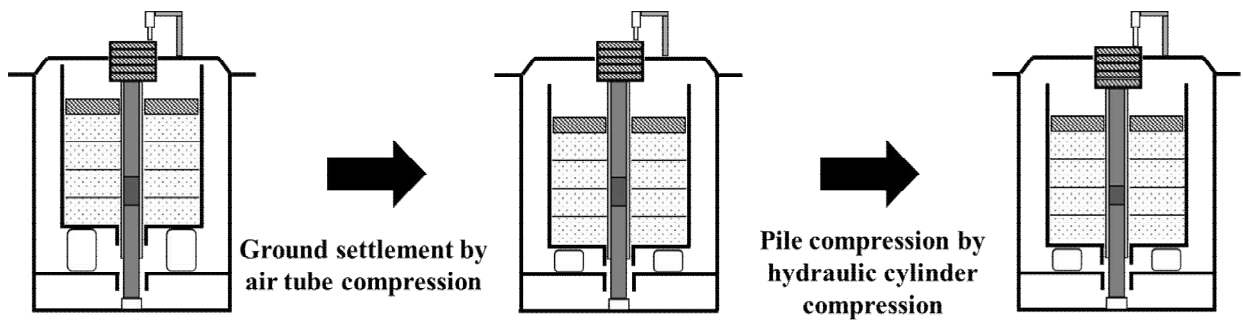


그림 77. 지반 침하 시 능동형 지반 변형 대응 말뚝 기초가 적용된 모형 실험

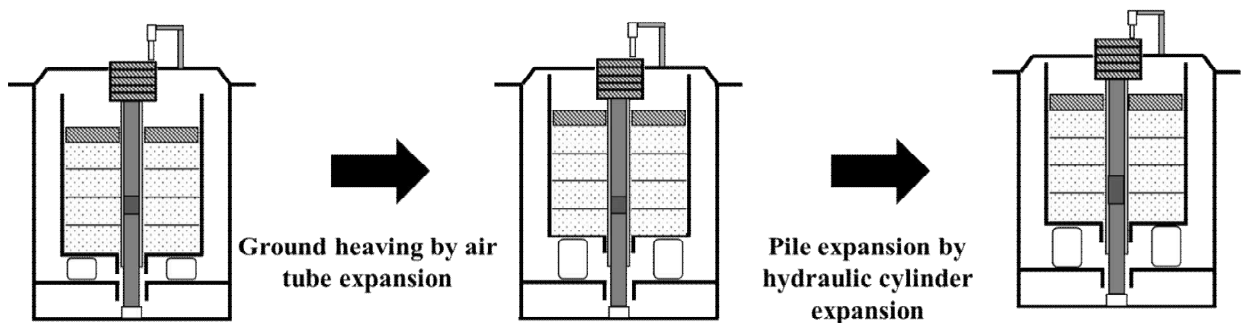


그림 78. 지반 용기 시 능동형 지반 변형 대응 말뚝 기초가 적용된 모형 실험

본 과업에서는 지반의 조밀도, 연직응력, 지반 변형 방향, 지반 변형 대응 부재를 변수로 하여 실험 계획을 수립하였다. 지반의 조밀도는 상대밀도로 조절하였으며, 상대밀도 50%(느슨한 지반)와 97%(조밀한 지반) 두 조건을 고려하였다. 지반의 작용하는 연직응력은 하중 재하 Disc의 수로 조절하였다. 하중 재하 Disc 하나는 지반에 약 3.5 kPa의 연직압을 증가시키며, 본 과업에서는 Disc 수 1, 2개를 고려하였다. 지반 변형 방향은 침하/용기를 고려하였다. 지반 변형 대응 부재의 효과를 파악하기 위해, 일반 강관 말뚝(대조군), 능동형 부재 적용 말뚝, 수동형 스프링 부재 적용 말뚝, 수동형 스프링-대시팟 부재 적용 말뚝에 대해서 실험을 계획하였다.

본 실험은 한 번 수행에 많은 인력과 시간이 필요한 실험이며, 실험 변수가 많다. 또한, 정형화된 실험기를 이용하지 않고 제작한 실험기를 사용하므로, 실험기의 지속적인 개보수 및 조정이 필요하였다. 마지막으로 실험의 재현성을 확인하기 위해 일부 실험은 2회 이상 반복할 필요가 있었다. 위와 같은 이유로 실험 횟수를 최적화할 필요가 있었다. 표 14는 본 과업의 2차년도에서 계획한 22개의 모형 실험의 목록이다. 실험기 초기 오류 수정, 예비 실험, 재현성 확인 실험 및 본 실험을 포함하여, 약 40회 이상의 모형 실험을 2차년도에 수행하였다.

표 14. 수행 모형 실험 목록

말뚝 종류	상대밀도 $D_R(\%)$		하중 재하 Disc 수		지반변형	형토압 측정 여부	일련번호
	50%	97%	1개	2개			
일반강관	○		○		침하		STL-LD-D1-S
	○			○	침하		STL-LD-D2-S
		○		○	침하		STL-HD-D2-S
		○		○	침하	○	STL-HD-D2-S-K
	○		○		융기		STL-LD-D1-H
	○			○	융기		STL-LD-D2-H
		○		○	융기		STL-HD-D2-H
능동형 부재 적용 (유압 실린더)	○		○	-	침하		CP-LD-D1-S
	○			○	침하		CP-LD-D2-S
		○		○	침하		CP-HD-D2-S
		○		○	침하	○	CP-HD-D2-S-K
	○		○	-	융기		CP-LD-D1-H
	○			○	융기		CP-LD-D2-H
		○		○	융기		CP-HD-D2-H
수동형 부재 적용 (스프링)	○		○		침하		SP-LD-D1-S
	○			○	침하		SP-LD-D2-S
		○		○	침하		SP-HD-D2-S
		○		○	침하	○	SP-HD-D2-S-K
	○		○		융기		SP-LD-D1-H
	○			○	융기		SP-LD-D2-H
		○		○	융기		SP-HD-D2-H
수동형 부재 적용 (스프링 대시팻)		○		○	침하	○	SDP-HD-D2-S-K

- [C-3] 지반 변형 대응 말뚝 기초 평가

• 지반 침하 시 지반 변형 대응 말뚝의 효용성 평가

① 일반 강관 말뚝(대조군)

그림 79는 일반 강관 말뚝에 대해서 지반 침하 모형 시험을 하여 측정된 지반 침하량 대비 선단 하중의 변화를 보여준다. 그림 79에서 STL-LD-D1-S(지표 연직압 3.5 kPa)와 STL-LD-D2-S(지표 연직압 7.0 kPa)을 비교해 보면, 연직압이 클수록, 지반이 침하할 때, 더 큰 선단 하중이 측정되었다. 그림 79에서 STL-LD-D2-S(상대밀도 50%)와 STL-HD-D2-S(상대밀도 97%)을 비교해 보면, 지반의 밀도가 클수록 더 큰 선단 하중이 측정되었다.

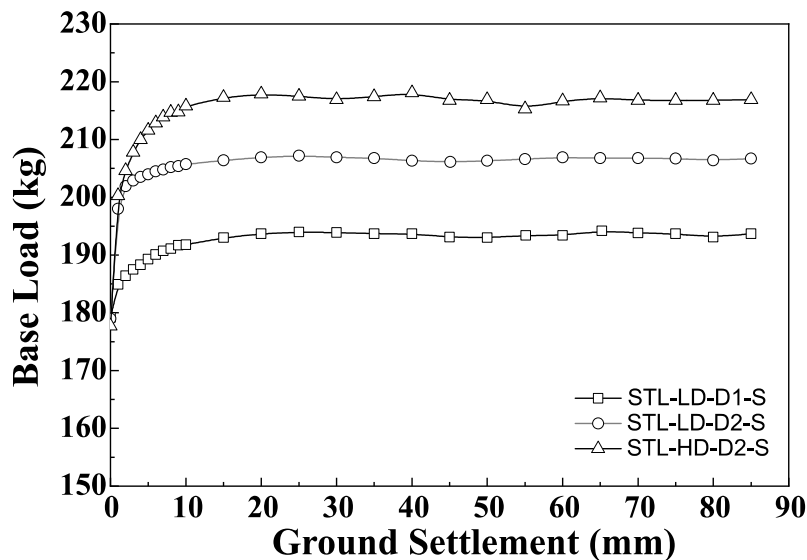


그림 79. 지반 침하 시 일반 강관 말뚝에 작용하는 선단 하중의 변화

이러한 현상을 분석하기 위해서 말뚝 주변에 작용하는 총 주변 마찰력을 지반 침하에 대해 도시 하면 그림 80과 같다. 이때, 총 주변 마찰력은 말뚝 두부에 가해지는 하중 및 말뚝의 자중의 합에서 그림 80에서 측정된 선단 하중을 빼서 산정할 수 있다. 그림 80에서 모든 경우, 주변 마찰력은 음수를 가지며, 이는 부주면 마찰력이 발현이 되었음을 의미한다.

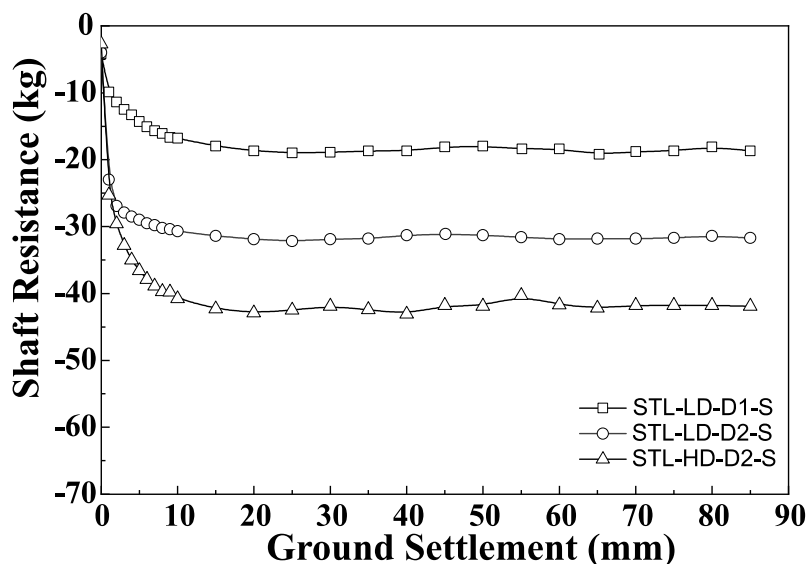


그림 80. 지반 침하 시 일반 강관 말뚝에 작용하는 총 주변 마찰력의 변화

그림 80에서 STL-LD-D1-S(지표 연직압 3.5 kPa)와 STL-LD-D2-S(지표 연직압 7.0 kPa)을 비교해 보면, 연직압이 클수록, 지반이 침하할 때, 부주면 마찰력의 크기가 더 크다. 변형이 국한되어 있는 상태에서 상부 하중이 크면, 횡 토압도 커진다. 본 실험에서 횡 토압은 말뚝에 수직하여 작용하므로, 횡 토압이 클수록 부주면 마찰력이 커지는 것을 알 수 있으며, 이로부터 말뚝-지반의 접촉면 거동은 Coulomb의 마찰법칙을 따른다는 것을 알 수 있다.

STL-LD-D2-S(상대밀도 50%)와 STL-HD-D2-S(상대밀도 97%)을 비교해 보면, 지반의 밀도가 클수록 부주면 마찰력의 크기가 더 크다. 흙은 개별 입자로 구성된 입상 재료이다. 느슨하게 조성된 입상 재료에 전단 변형이 발생하면, 입자와 입자 사이의 빈 공간에 다른 입자가 끼어들며, 전체 부피는 줄어들게 된다. 반면, 조밀하게 조합된 입상 재료에 전단 변형이 발생하면, 입자가 다른 입자를 타고 올라가서, 전체 부피가 늘어나게 된다. 이러한 현상을 Dilatancy 현상이라 한다. 본 실험에서 조밀한 모래로 실험할 경우, 지반의 침하로 인해 말뚝-지반 경계부에서는 전단 변형이 발생하게 된다. 이 경우, 조밀한 지반의 경우(STL-HD-D2-S), 지반이 팽창하려 하나, 횡 방향 구속으로 인해 팽창이 억제되어 횡 방향 토압이 증가하게 되고, 이에 따라 부주면 마찰력이 크게 발현되었다.

② 능동형 부재

그림 81은 지반 침하 후, 능동형 부재를 압축시킴에 따라 모형 말뚝 선단에 작용하는 하중을 도시한다. 그림 81a에서 보이듯, 부재 압축과 동시에 선단 하중이 큰 폭으로 감소한다. 이를 좀 더 자세히 나타내기 위해 그림 81b에서는 부재 압축량에 대수 좌표계를 적용하였다. 부재 압축량이 대략 10 mm 정도 되면, 그 값이 수렴하는 경향을 가진다. 상부 하중의 영향을 살펴보면, 상부 하중이 큰 경우(CP-LD-D2-S)에 작은 경우(CP-LD-D1-S)보다 선단 하중의 감소폭이 더 큼을 알 수 있다. 또한, CP-LD-D2-S와 CP-HD-D2-S를 비교하면, 지반의 밀도가 클수록 선단 하중이 더 크게 감소하는 것을 알 수 있다.

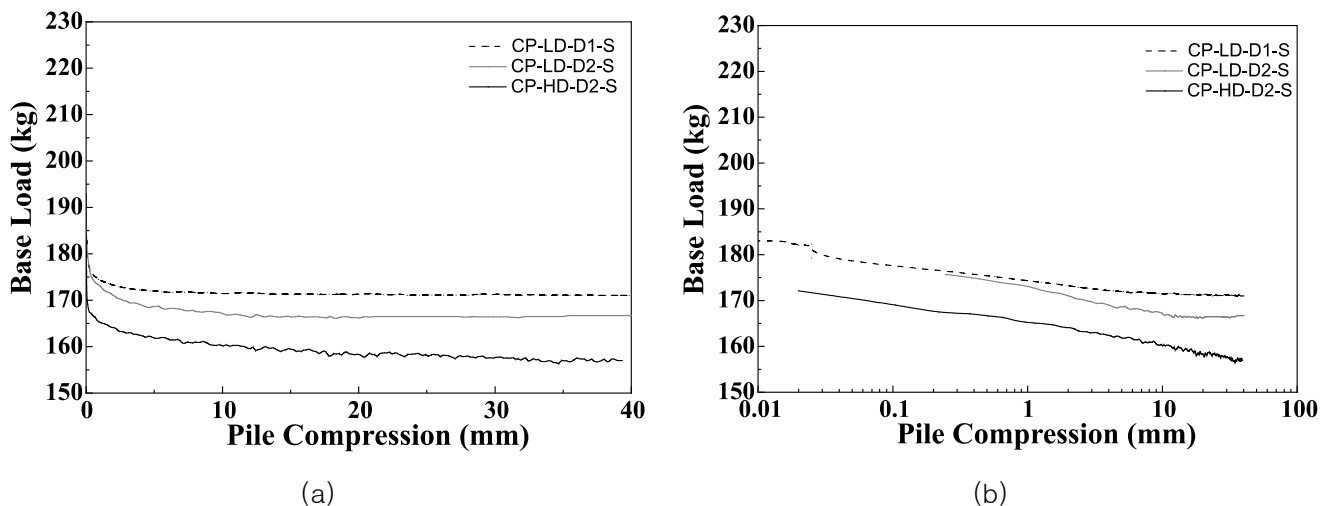


그림 81. 지반 침하 후 능동형 부재 압축에 따른 선단 하중의 변화: (a) 일반 좌표계, (b) 대수 좌표계

지반 변형 대응 말뚝의 거동을 분석하기 위해 선단 하중(그림 81)으로부터, 총 주면 마찰력을 추출한 결과는 그림 82와 같다. 그림 82a에서 지반 변형 대응 부재의 매우 작은 압축에도 총 주면 마찰력이 크게 변하는 것을 알 수 있다. 이를 좀 더 자세히 나타내기 위해 그림 82b에서는 부재 압축량에 대수 좌표계를 적용하였다. 모든 경우에, 지반 변형 대응 부재가 압축됨에 따라 부주면 마찰력이 정주면 마찰력으로 전환되었다. 상부 하중이 클수록 그리고 지반의 조밀도가 클수록, 부재 압축 시 최종적으로 도달하는 정주면 마찰력이 크게 산정되었다. 이는 말뚝-지반의 접촉면의 거동은 마찰 거동을 따르며, 지반이 조밀할수록 전단 시 팽창하려는 성질을 가지기 때문이다. 그림 82b를 보면, CP-LD-D1-S의 경우, 부재 압축량 0.7 mm에서 부주면 마찰력이 정주면 마찰력으로 전환되고, CP-LD-D2-S의 경우, 부재 압축량 0.4 mm에서 부주면 마찰력이 정주면 마찰력으로 전환되었다. 조

밀한 지반에 높은 상재압을 가한 CP-HD-D2-S의 경우, 부재 압축과 동시에 부주면 마찰력이 정주면 마찰력으로 전환되었다. 측정 및 실험 오차를 고려할 때, 부재 압축량 1~2 mm에서 부주면 마찰력에서 정주면 마찰력으로 전환된다고 할 수 있다. 즉, 매우 작은 지반 변형 대응 부재의 압축량으로도 충분히 부주면 마찰력을 완전히 상쇄시킬 수 있다.

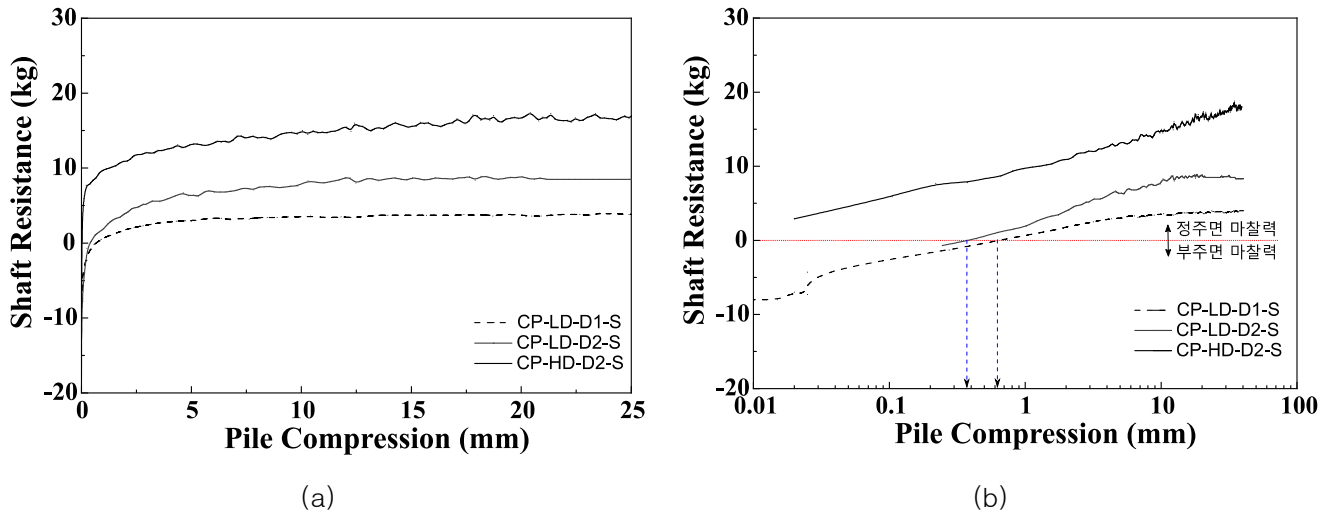


그림 82. 지반 침하 후 능동형 부재 압축에 따른 총 주면 마찰력의 변화: (a) 일반 좌표계, (b) 대수 좌표계

③ 수동형(스프링) 부재

그림 83은 지반 침하 시 수동형(스프링) 부재가 장착된 지반 변형 대응 말뚝(SP) 선단에서 측정된 하중을 지반 침하량에 대해 보여준다. 비교를 위해 지반 침하 시 강관 말뚝(STL) 선단에서 측정된 하중을 그림 83에서 함께 도시하였다. 실험 결과, 상부 하중이 작고 지반의 밀도가 작을 경우 (SP-LD-D1-S), 스프링 부재 말뚝과 강관 말뚝에서 측정된 선단 하중은 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만 상부 하중이 클수록(SP-LD-D2-S), 그리고 지반의 조밀도가 클수록(SP-HD-D2-S), 대응하는 강관 말뚝(STL)에 비해 수렴값에 도달하는 지반 침하량이 더 컸다. 즉 스프링 부재가 적용된 말뚝의 경우, 최대 선단 하중에 도달하는 지반 변위량을 증가시키는 효과가 있는 것으로 판단된다. 계속된 침하 발생 시, 일반 강관 말뚝의 경우 선단 하중이 수렴하였으나, 스프링 부재 적용 말뚝의 선단 하중은 소폭 감소하였다.

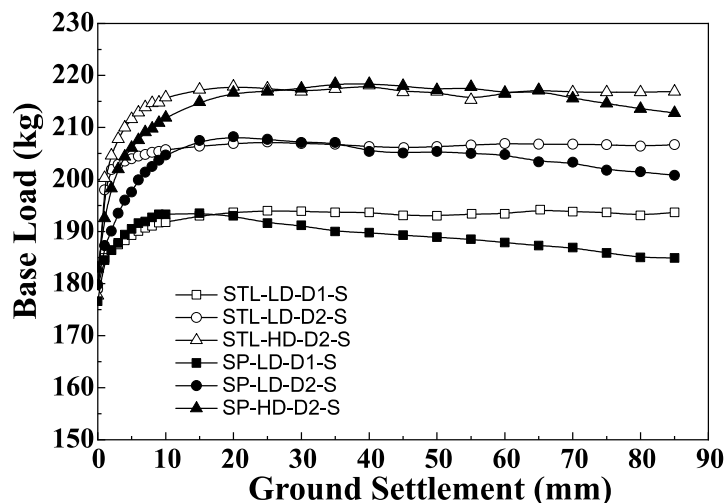


그림 83. 지반 침하 시 스프링 부재가 설치된 지반 변형 대응 말뚝(SP)과 일반 강관 말뚝(STL)에 작용하는 선단 하중의 변화

말뚝의 하중 전달 기전 변화를 명확히 파악하기 위해 그림 83에서 측정된 선단 하중을 이용하여, 총 주면 마찰력을 산정하고 이를 지반 침하량에 대해 도시하면 그림 84와 같다. 또한, 그림 85는 지반 침하량 대비 스프링 부재 말뚝(SP)의 압축량을 보여준다. 상부 하중이 작고 지반의 조밀도가 작을 경우(SP-LD-D1-S), 수동형 말뚝과 강관 말뚝의 큰 차이가 보이지 않았다. 이는 말뚝에 작용하는 주면 마찰력이 작아, 이로 인해 유발되는 스프링 변형량이 작고(그림 85), 따라서 수동형 말뚝과 강관 말뚝의 거동에 큰 차이가 없어 발생한 현상으로 판단된다.

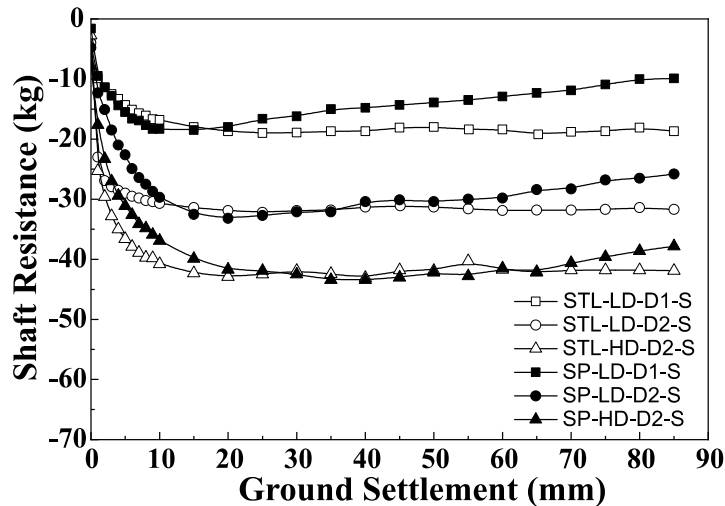


그림 84. 지반 침하 시 스프링 부재가 설치된 지반 변형 대응 말뚝(SP)과 일반 강관 말뚝(STL)에 작용하는 총 주면 마찰 저항의 변화

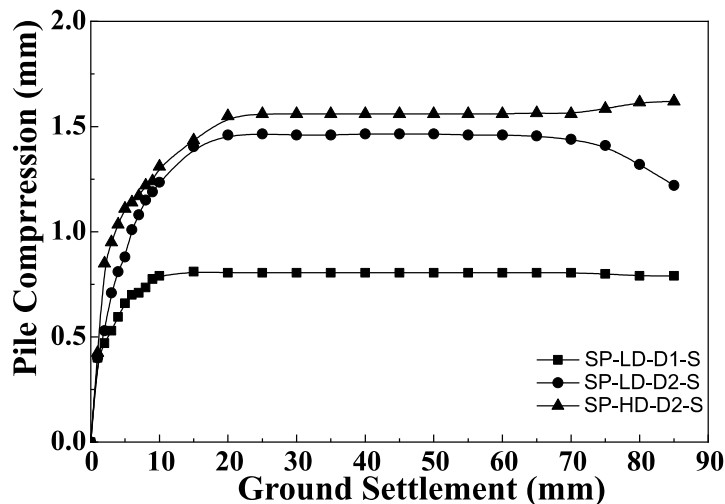


그림 85. 지반 침하량 대비 스프링 부재 설치 지반 변형 대응 말뚝(SP)의 압축량

그림 84에서 상부 하중이 크고(SP-LD-D2-S, STL-LD-D2-S), 지반의 조밀도가 클 경우(SP-HD-D2-S, STL-HD-D2-S), 측정된 최대 부주면 마찰력은 강관 말뚝이나 스프링 부재 말뚝이나 유사하였다. 단, 최대 부주면 마찰력에 도달하는 지반 침하량이 스프링 부재 말뚝에서 더 컸다. 이는 그림 85로부터 설명할 수 있다. 그림 85에서 SP-LD-D2-S와 SP-HD-D2-S의 경우, 초기에 지반의 침하함에 따라 스프링 부재의 압축량은 증가하며, 따라서 지반과 말뚝 사이의 상대변위가 일반 강관 말뚝에 비해 억제되며, 이에 따라 마찰력의 발현이 지연된다. 침하가 계속될수록 스프링 부재의 압축률은 감소하다 SP-LD-D2-S는 지반 침하량 20 mm, SP-HD-D2-S는 지반 침하량 25 mm에서 스프링 부재가 더 이상 압축되지 않았다. 이 지점은 그림 84에서 스프링 부재 말뚝의 부주면 마찰력이 일반 강관 말뚝의 부주면 마찰력과 만나는 지점과 대략적으로 일치한다.

즉, 스프링 부재의 경우, 지반 침하량이 작을 경우에는 부주면 마찰력을 감소시키는 효과가 있다. 만일 더 작은 강성의 스프링을 적용한다면, 동일한 지반 침하에 대해 부주면 마찰력을 더욱 감소시킬 수 있을 것이다. 하지만, 능동형 부재 적용 말뚝과는 다르게, 스프링 부재를 이용하여 부주면 마찰력을 완전히 상쇄시키는 것은 불가능하며, 침하량이 매우 클 경우에는 스프링 부재 말뚝은 일반 강관 말뚝과 유사하게 거동하리라 생각된다.

④ 수동형(스프링-대시팻) 부재 / 횡 토압 측정 결과

본 과업에서 스프링-대시팻 부재는 2차년도 11월에 고안하였으며, 적절한 대시팻 선별과 부수 기자재 제작으로 인해 2차년도 12월에 실험을 수행하였다. 2차년도 12월까지 많은 실험을 이미 수행하여 모형 말뚝의 슬리브가 모래와의 마찰로 인해 많이 닳아, 말뚝 표면의 마찰 물성이 변했을 가능성이 있었다. 또한, 공압 시스템과 같은 설비에 대한 기온 하강의 영향 또한 발생할 가능성이 있었다. 따라서 스프링-대시팻 부재의 적절성을 확인하기 위해서 일반 강관 말뚝, 능동형 부재, 스프링 부재 실험을 동일한 조건(하중 Disc 2개, 상대밀도 97%)에서 한번 더 반복하였으며, 이때 말뚝에 압전 센서를 부착하여 지반 변형 시 발생하는 횡 방향 토압을 측정하였다.

그림 86은 지반 침하 시 스프링-대시팻 부재 말뚝(SDP-HD-D2-S-K), 스프링 부재 말뚝(SP-HD-D2-S-K), 일반 강관 말뚝(STL-HD-D2-S-K)의 선단에서 측정된 하중을 지반 침하량에 대해서 보여준다. 그림 86에서 스프링 부재 말뚝의 선단 하중은 계속되는 지반 침하 시 강관 말뚝의 선단 하중에 결국 수렴하였으며, 이 같은 경향은 이전 실험과 동일하다. 하지만 스프링-대시팻 부재가 적용된 말뚝의 경우, 선단 하중이 침하 초기에는 스프링 부재 말뚝보다 빨리 증가하지만, 이후 감소하여 최종적으로 강관 말뚝 및 스프링 말뚝보다 작은 선단 하중이 측정되었다.

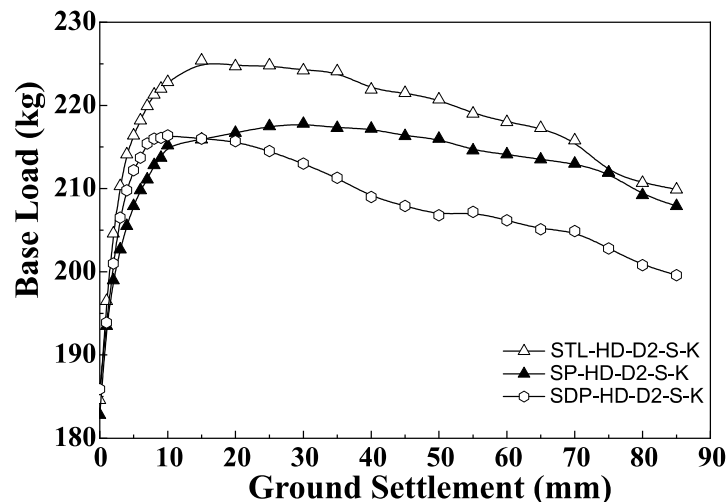


그림 86. 지반 침하 시 스프링-대시팻 부재 말뚝(SDP), 스프링 부재 말뚝(SP), 일반 강관 말뚝(STL)에 작용하는 선단 하중의 변화

말뚝의 하중 전달 기전을 분석하기 위해서 그림 86의 결과를 이용하여 각 말뚝에 작용하는 총 주면 마찰력을 산정하여 지반 침하량에 대해 도시하면 그림 87과 같다. 그림 87에서 계속적인 침하로 인해 최종적으로 작용하는 부주면 마찰력은 스프링-대시팻 부재 말뚝의 경우 -27 kg으로 이는 강관 말뚝의 최종 부주면 마찰력인 -40 kg의 67.5%이다. 최대 부주면 마찰력은 스프링-대시팻 부재 말뚝은 -40 kg, 강관 말뚝은 -52 kg로, 스프링-대시팻 부재를 적용할 경우, 부주면 마찰력이 약 24% 감소하는 것으로 측정되었다. 참고로, 일반적인 Slip Layer Coating의 효과는 부주면 마찰력을 15~20% 정도 감소시키는 것으로 알려져 있다. 스프링-대시팻 부재의 경우, Slip Layer Coating과 동시에 적용이 가능하므로, 이를 활용할 경우, 부주면 마찰력을 더욱 줄일 수 있으리라 생각된다. 하지만, 스프링-대시팻 부재 말뚝의 경우도 능동형 부재 말뚝과는 달리 부주면 마찰력을 상쇄시킬 수는 없으며, 그 크기를 줄일 수만 있다.

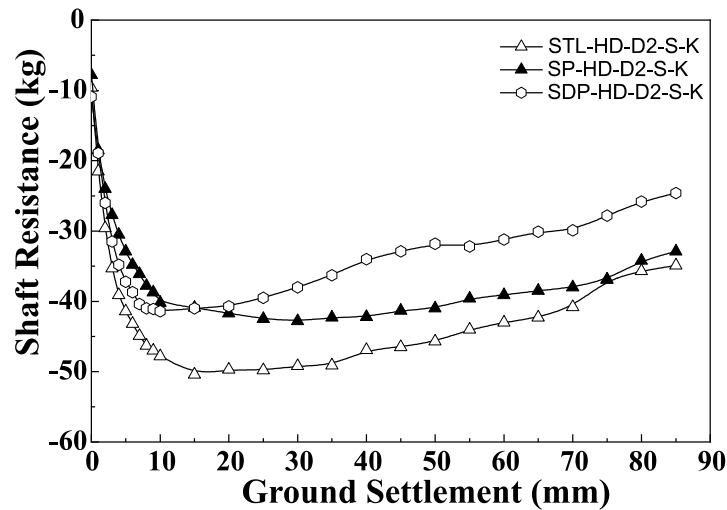


그림 87. 지반 침하 시 스프링-대시팟 부재 말뚝(SDP), 스프링 부재 말뚝(SP), 일반 강관 말뚝(STL)에 작용하는 총 주면 마찰력의 변화

말뚝의 중앙부에 부착한 압전 센서를 이용하여 횡 방향 토압을 측정하고, 이로부터 산정한 횡 방향 토압계수의 지반 침하에 대한 변화를 도시하면 그림 88과 같다. 강관 말뚝(STL-HD-D2-S-K)의 경우, 지반 침하 초기에 토압계수가 (정지토압에 가까운) 0.5에서 2.5로 급격하게 증가하였다. 지반 침하 발생 초기에는, 말뚝-지반 사이에 부주면 마찰력이 발현된다. 이 마찰력으로 인해 지반-말뚝 사이에 미끄러짐이 발생하지 못할 경우, 지반 내부에 전단 변형이 발생한다. 이때, 지반이 조밀하다면, 팽창하려는 경향성을 가지지만 변형이 구속되어 팽창하지 못하여 횡 방향 토압이 크게 증가한다.

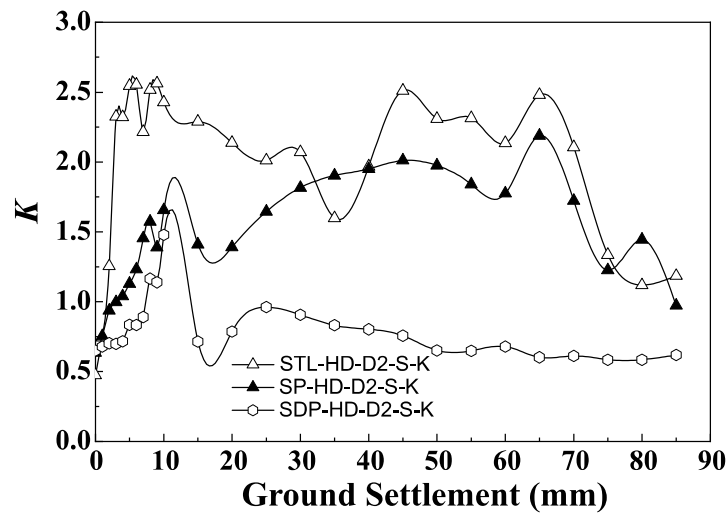


그림 88. 지반 침하 시 스프링-대시팟 부재 말뚝(SDP), 스프링 부재 말뚝(SP), 일반 강관 말뚝(STL)의 횡 방향 토압계수의 변화

스프링 말뚝의 경우, 지반 침하 초기에 토압계수가 0.5에서 1.5로 증가하였다. 이는 강관 말뚝에서 측정된 토압계수의 약 60%이다. 스프링의 압축량으로 인한 말뚝-지반 간 상대변위가 억제되고, 이로 인해 말뚝과 지반 사이의 마찰로 인한 지반 내부의 전단 변형이 스프링 말뚝 매설 지반에서 강관 말뚝 매설 지반보다 작게 발생하여 횡 방향 토압 증가량 또한 작아진다. 하지만 계속적으로 지반이 침하 한다면, 결국에는 지반 내부의 전단 변형량이 누적되어 횡 방향 토압계수는 강관 말뚝과 비슷한 수준까지 도달한다.

스프링-대시팻 말뚝의 경우, 지반 변형 시 토압계수가 0.5에서 1.25로 증가하였다. 이는 강관 말뚝에서 측정된 토압계수의 약 50%이다. 이는 지반 침하 시 말뚝 부근 지반의 전단 변형량이 강관 말뚝 및 스프링 말뚝에 비해 더 작음을 의미한다. 그 후, 스프링-대시팻 말뚝에서의 토압계수는 0.6~0.8 정도로 수렴하는 경향성을 보였다. 따라서 스프링-대시팻 말뚝에서 작용하는 횡 방향 토압이 작으므로, 이로 인해 부주면 마찰력도 작게 발현되는 것으로 파악된다. 이는 지반 침하시, 스프링-대시팻 말뚝이 관입된 지반 내부의 전단 변형량이 스프링 말뚝 및 일반 강관 말뚝에 비해 작아서 발생한 현상으로 판단된다.

- 지반 융기 시 지반 변형 대응 말뚝의 효용성 평가

- ① 일반 강관 말뚝의 거동(대조군 실험)

그림 89는 일반 강관 말뚝에 대해서 지반 융기 모형 시험을 하여 측정된 지반 융기량 대비 선단 하중의 변화를 보여준다. 그림 89에서 STL-LD-D1-H(지표 연직압 3.5 kPa)와 STL-LD-D2-H(지표 연직압 7.0 kPa)을 비교해 보면, 연직압이 클수록, 지반이 융기할 때, 더 작은 선단 하중이 측정되었다. 그림 66에서 STL-LD-D2-H(상대밀도 50%)와 STL-HD-D2-H(상대밀도 97%)을 비교해 보면, 지반의 밀도가 클수록 더 작은 선단 하중이 측정되었다.

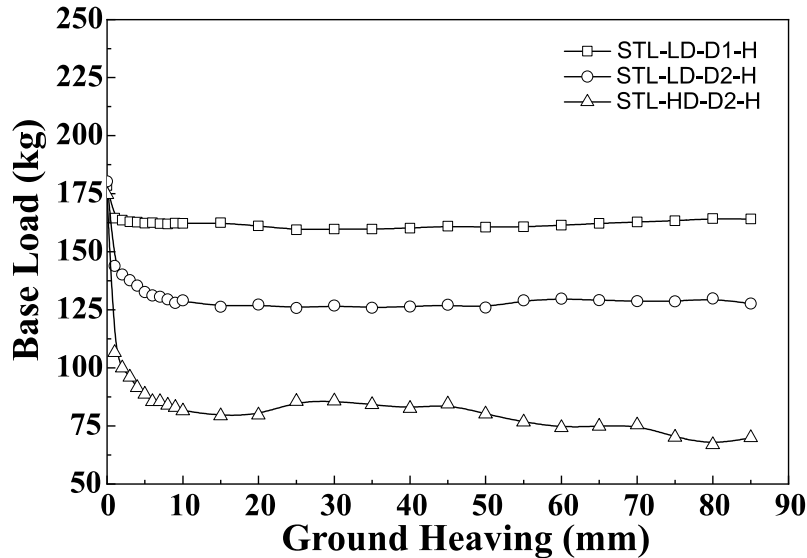


그림 89. 지반 융기 시 일반 강관 말뚝에 작용하는 선단 하중의 변화

이러한 현상을 분석하기 위해서 말뚝 주면에 작용하는 총 주면 마찰력을 지반 융기에 대해 도시하면 그림 90과 같다. 이때, 총 주면 마찰력은 말뚝 두부에 가해지는 하중 및 말뚝의 자중의 합에서 그림 89에서 측정된 선단 하중을 빼서 산정할 수 있다. 그림 90에서 모든 경우, 주면 마찰력은 양의 값을 가지며, 이는 말뚝을 인발하려 하는 힘이다. 그림 90에서 STL-LD-D1-H(지표 연직압 3.5 kPa)와 STL-LD-D2-H(지표 연직압 7.0 kPa)을 비교해 보면, 연직압이 클수록 지반이 융기할 때, 말뚝을 인발 시키려는 마찰력의 크기가 더 크다. 또한, STL-LD-D2-H(상대밀도 50%)와 STL-HD-D2-H(상대밀도 97%)을 비교해 보면, 지반의 밀도가 클수록 말뚝을 인발 시키려는 마찰력의 크기가 더 크다. 이는 말뚝-지반의 접촉면 거동은 Coulomb의 마찰법칙을 따르며, 조밀한 흙은 전단 시 팽창하려는 거동을 보이기 때문이다.

한가지 짚고 넘어가야 할 것은 지반 융기(그림 90)로 인한 인발 마찰력의 절대값과 지반 침하(그림 80)로 인한 부주면 마찰력의 절대값을 비교하면, 상부 상재압이 클수록 그리고 지반의 조밀도가 클수록 지반 융기로 인한 인발 마찰력이 동일한 조건에서 지반 침하로 인한 부주면 마찰력에 비해 상당히 큰 것을 알 수 있다. 예를 들어 그림 80에서 STL-HD-D2-S의 경우, 최종적으로 수렴하는 부주면 마찰력이 대략 -42 kg인데 반해, 그림 90에서 STL-HD-D2-H의 경우, 최종적으로 수렴하는 인발 마찰력이 100 kg에 육박한다.

이를 설명하기 위해서는 지반의 변형, 지반과 말뚝의 상대 변형, 그로 인한 지반 내 하중의 전이를 이해할 필요가 있다. 말뚝이 근입되어 있는 지반에 변형이 발생하면, 말뚝 주면 부근에서 가장 큰 변형이 발생한다. 또한, 말뚝과 지반 사이에 마찰 저항으로 인해 지반 내부에 변형이 발생한다. 지반 내부의 어느 정도 범위에서 변형이 발생하는지를 살펴보기 위해서는 그림 91과 (a) 지반의 융기 및 (b) 침하 시 가능한 등변형률선(붉은색 점선)과 하중 전이 방향(파란색 실선)을 도시할 필요가 있다. 상대적인 관점에서 지반의 융기 시 지반 내부 변형은 말뚝의 근입 시와 동일하며, 지반의 침하 시 지반 내부 변형은 말뚝 인발 시와 동일하다. 만일 지반이 융기된다면, 말뚝 주면으로부터 하중은 그림

91a처럼 단단한 하부 지반으로 전이될 수 있다. 즉 주위 지반이 반력을 제공하는 것이다. 하지만 지반의 침하 발생 시에는 정지상태의 지반에서 지표에 반력을 제공할 물질이 없으므로 그림 68b처럼 하중이 전이되기가 힘들다. 이같은 분석을 토대로, 지반이 융기될 때, 하부 지반이 반력체 역할을 하여, 지반 내 더 넓은 영역으로 하중이 전이되며, 더 큰 인발 마찰력이 발현되는 것이라 판단하였다.

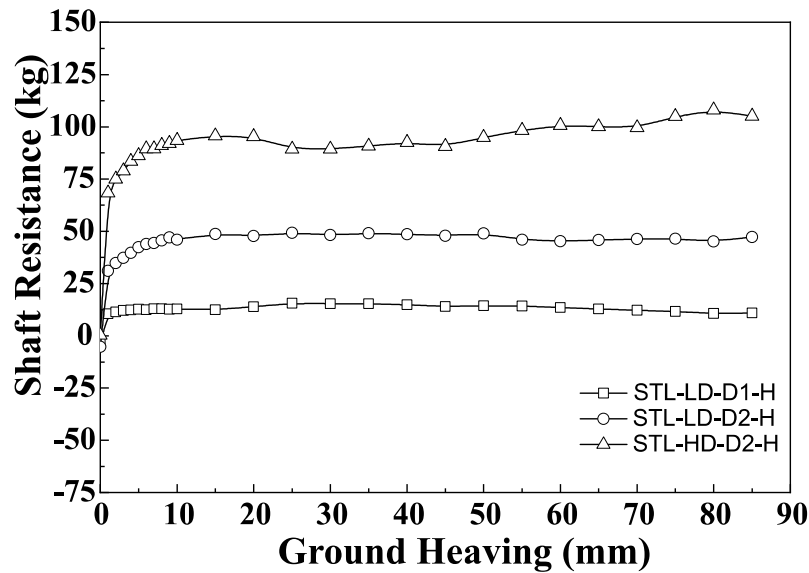


그림 90. 지반 융기 시 일반 강관 말뚝에 작용하는 정주면 마찰력의 변화

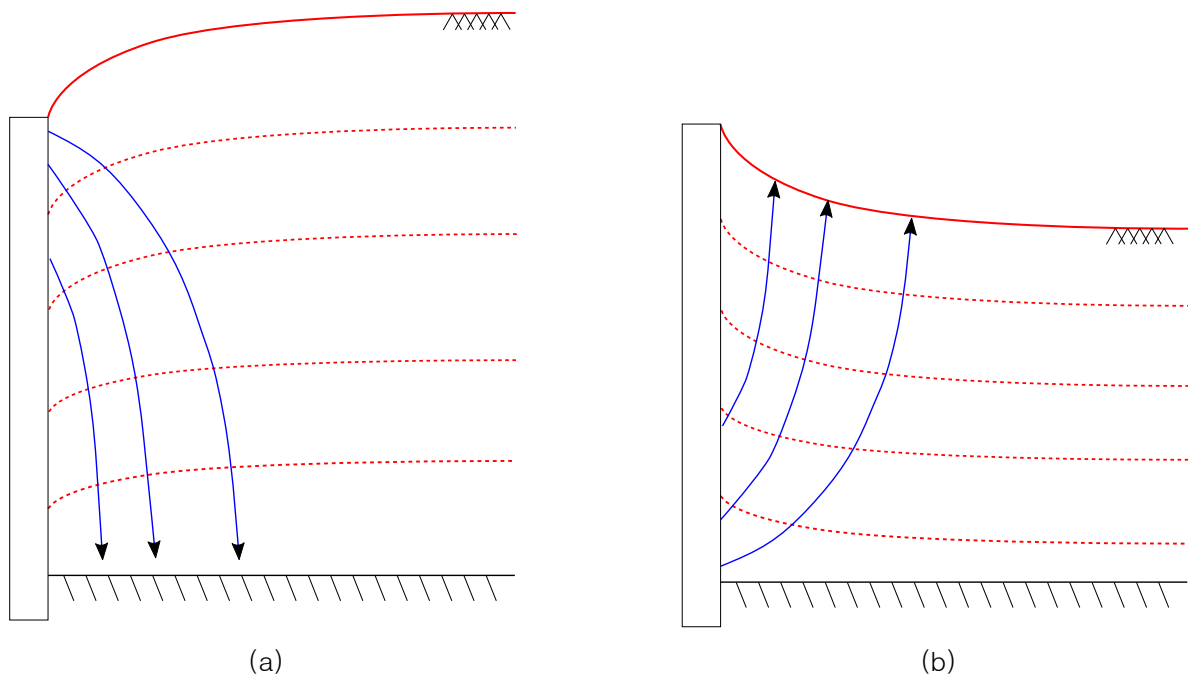


그림 91. 지반 융기 및 침하 시 지반 내부 하중 변이 양상:

(a) 지반 융기 시 발생 가능한 하중 전이, (b) 지반 침하 시 발생이 쉽지 않은 하중 전이

② 능동형 부재

그림 92는 지반 융기 후, 능동형 부재를 팽창시킴에 따라 모형 말뚝 선단에 작용하는 하중을 도시한다. 그림 92a에서 보이듯, 부재 팽창과 동시에 선단 하중이 큰 폭으로 증가한다. 이를 좀 더 자세히 나타내기 위해 그림 92b에서는 부재 팽창량에 대수 좌표계를 적용하였다. 부재 팽창량이 대략 10 mm 정도 되면, 그 값이 수렴하는 경향을 보인다. 상부 하중의 영향을 살펴보면, 상부 하중이 큰 경우

(CP-LD-D2-H)에 작은 경우(CP-LD-D1-H)보다 선단 하중의 증가폭이 더 큼을 알 수 있다. 또한, CP-LD-D2-H와 CP-HD-D2-H를 비교하면, 지반의 밀도가 클수록 선단 하중이 더 크게 증가하는 것을 알 수 있다.

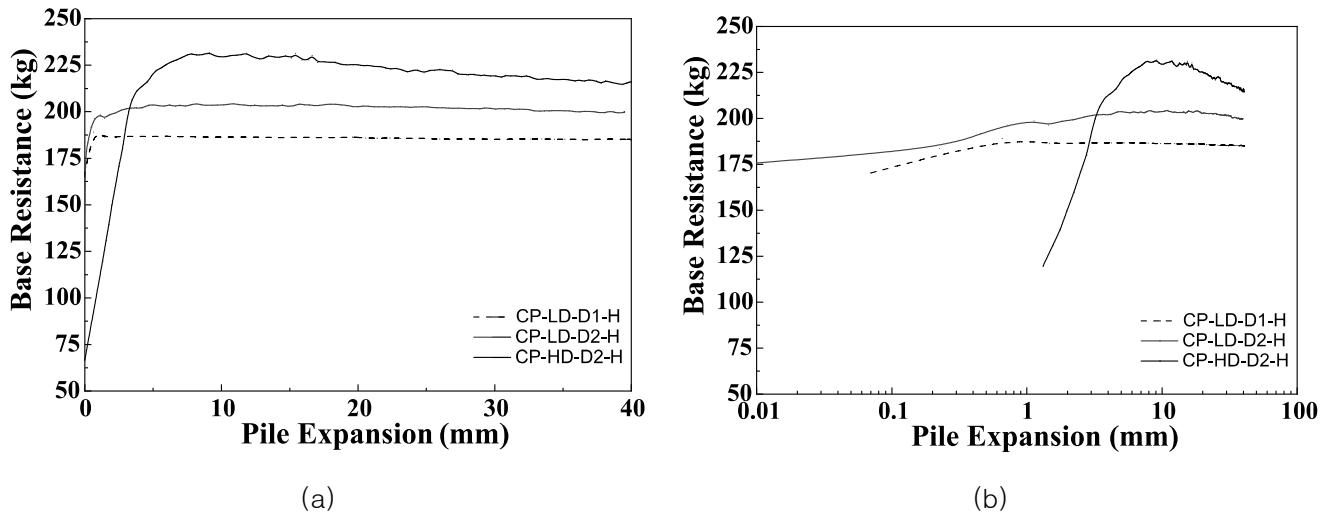


그림 92. 지반 용기 후 능동형 부재 팽창에 따른 선단 하중의 변화: (a) 일반 좌표계, (b) 대수 좌표계

지반 변형 대응 말뚝의 거동을 분석하기 위해 선단 하중(그림 92)으로부터, 총 주면 마찰력을 추출한 결과는 그림 93과 같다. 그림 93a에서 지반 변형 대응 부재의 매우 작은 팽창에도 총 주면 마찰력이 크게 변하는 것을 알 수 있다. 이를 좀 더 자세히 나타내기 위해 그림 93b에서는 부재 팽창량에 대수 좌표계를 적용하였다. 모든 경우에, 지반 변형 대응 부재가 팽창됨에 따라 말뚝을 인발 시키려는 마찰력이 오히려 부주면 마찰력으로 전환되었다. 상부 하중이 클수록 그리고 지반의 조밀도가 클수록, 부재 팽창 시 최종적으로 도달하는 부주면 마찰력의 크기가 커졌다. 이는 말뚝-지반의 접촉면의 거동은 마찰 거동을 따르며, 지반이 조밀할수록 전단 시 팽창하려는 성질을 가지기 때문이다. 그림 93b를 보면, CP-LD-D1-H의 경우, 부재 팽창량 0.15 mm에서 인발 마찰력이 부주면 마찰력으로 전환되고, CP-LD-D2-H의 경우, 부재 팽창과 동시에 인발 마찰력이 부주면 마찰력으로 전환되었다. 조밀한 지반에 높은 상재압을 가한 CP-HD-D2-H의 경우, 부재 팽창량 2.5 mm에서 인발 마찰력이 부주면 마찰력으로 전환되었다. 측정 및 실험 오차를 고려할 때, 부재 팽창량 2~3 mm에서 인발 마찰력이 부주면 마찰력으로 전환된다고 할 수 있다. 즉, 매우 작은 지반 변형 대응 부재의 팽창량으로도 충분히 말뚝을 인발 시키려는 마찰력을 완전히 상쇄시킬 수 있다.

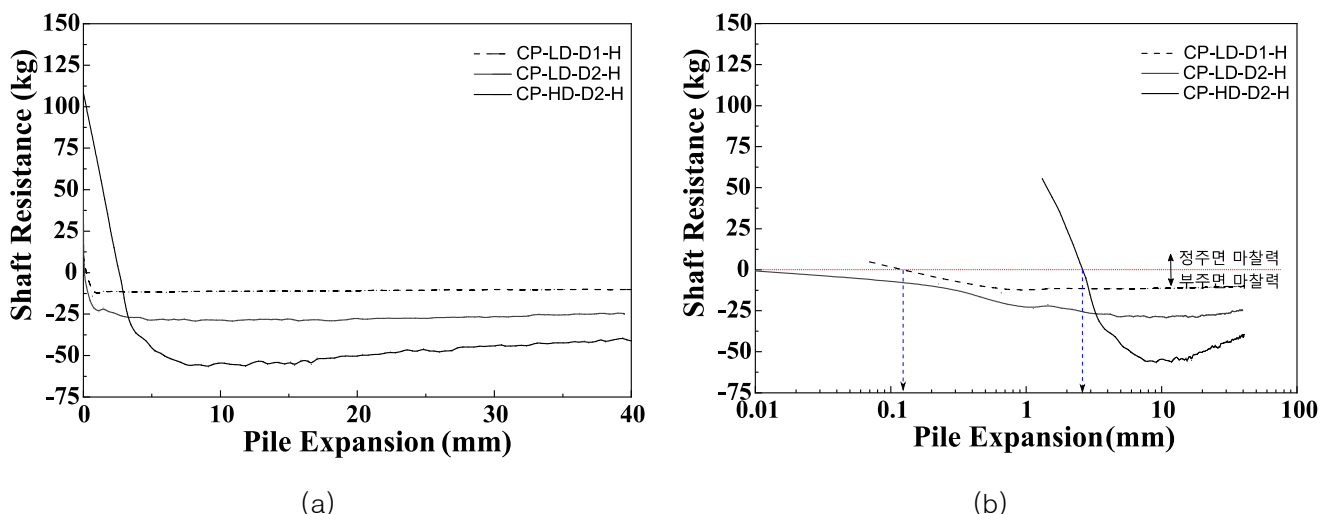


그림 93. 지반 용기 후 능동형 부재 팽창에 따른 총 주면 마찰력의 변화: (a) 일반 좌표계, (b) 대수 좌표계

③ 수동형(스프링) 부재

그림 94는 지반 융기 시 수동형(스프링) 부재가 장착된 지반 변형 대응 말뚝(SP) 선단에서 측정된 하중을 지반 융기량에 대해 보여준다. 비교를 위해 지반 융기 시 강관 말뚝(STL) 선단에서 측정된 하중을 그림 94에서 함께 도시하였다. 실험 결과, 상부 하중이 작고 지반의 밀도가 작을 경우(SP-LD-D1-H), 스프링 부재 말뚝과 강관 말뚝에서 측정된 선단 하중은 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만 상부 하중이 클수록(SP-LD-D2-H), 그리고 지반의 조밀도가 클수록(SP-HD-D2-H), 대응하는 강관 말뚝(STL)에 비해 더 큰 선단 하중이 측정되었다. 즉 스프링 부재가 적용된 말뚝 경우, 주어진 지반 융기량 내에서는 지반 융기로 인한 선단 하중의 감소를 억제하는 것으로 나타났다. 이는 침하(그림 83)와는 다른 경향성이다. 지반이 침하하는 경우에는, 침하량이 증가할수록, 스프링 부재 말뚝의 선단 하중은 강관 말뚝에 수렴하였다.

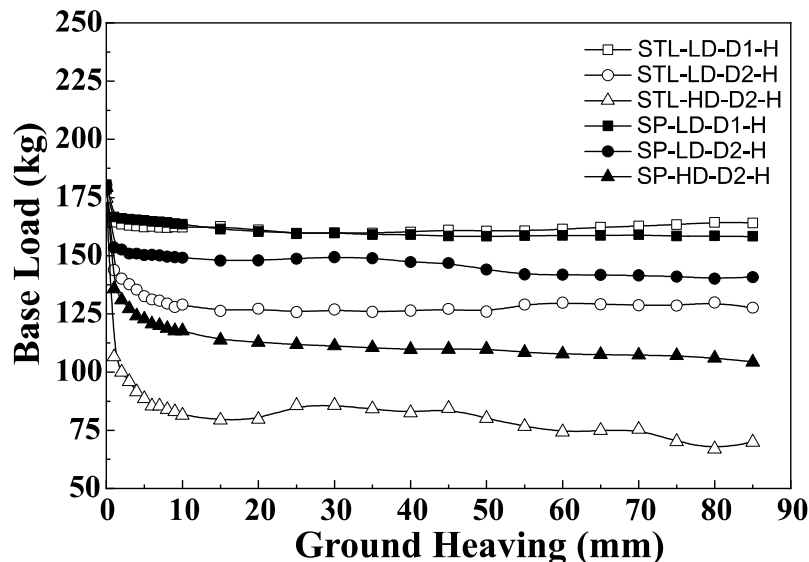


그림 94. 지반 융기 시 스프링 부재가 설치된 지반 변형 대응 말뚝(SP)과 일반 강관 말뚝(STL)에 작용하는 선단 하중의 변화

이러한 차이점을 분석하여 말뚝의 하중 전달 기전 변화를 명확히 파악하기 위해 그림 94에서 측정된 선단 하중을 이용하여, 총 주면 마찰력을 산정하고 이를 지반 융기량에 대해 도시하면 그림 95와 같다. 또한, 그림 96는 지반 융기량 대비 스프링 부재 말뚝(SP)의 팽창량을 보여준다. **상부 하중이 작고 지반의 조밀도가 작을 경우(SP-LD-D1-H), 스프링 부재 말뚝과 강관 말뚝의 큰 차이가 보이지 않았다.** 이는 말뚝에 작용하는 주면 마찰력이 작아, 이로 인해 유발되는 스프링 변형량이 작고(그림 96), 따라서 수동형 말뚝과 강관 말뚝의 거동에 큰 차이가 없어 발생한 현상으로 판단된다.

반면, 그림 95에서 상부 하중이 크고(SP-LD-D2-H, STL-LD-D2-H), 지반의 조밀도가 클 경우(SP-HD-D2-H, STL-HD-D2-H), **스프링 부재 말뚝의 측정된 최대 인발 마찰력은 강관 말뚝보다 작게 산정**되었다. 앞서 설명했듯이 지반의 융기는 침하에 비해 많은 지반 내부 변형을 유발시킨다. 이에 따라 같은 크기의 침하 시 발생하는 부주면 마찰력보다 큰 인발 마찰력이 지반 융기 시 발생한다. 따라서 더 많은 축력이 말뚝에 전이되며, 스프링 부재의 팽창량은 침하 시 부재의 압축량보다 크다. 그림 96은 이를 잘 보여준다. 동일한 조건에서 침하 시 스프링 압축량은 1.5 mm(그림 62의 SP-HD-D2-S)인데 반해, 융기 시 스프링 팽창량은 그 두배인 3.0 mm(그림 96의 SP-HD-D2-H)로 측정되었다. **이로부터, 하중 제어 방식인 수동형 부재의 경우, 지반 변형으로 인한 추가 하중이 클수록(상대적인 관점에서 부재의 축강성이 작을수록) 그 성능이 향상됨을 알 수 있다.** 침하 실험 결과인 그림 85와는 달리 그림 96에서 스프링의 팽창량은 지반 융기량에 따라 느린 속도지만 상승함을 알 수 있다. 본 실험에서는 지반 융기량을 100 mm로 제한 하였지만, 만일 지반 융기량이 더 크다면, 스프링 부재의 팽창량은 결국 수렴할 것이고, 결국 스프링 부재 말뚝의 거동은 일반 강관 말뚝의 거동과 유사

해질 것이라 판단된다.

즉, 스프링 부재의 경우, 본 실험에서 적용한 지반 융기량에서는 인발 마찰력을 감소시키는 효과가 있다. 만일 더 작은 강성의 스프링을 적용한다면, 동일한 지반 융기에 대해 인발 마찰력을 더욱 감소시킬 수 있을 것이다. 하지만, 지반 융기 시에도 침하 시와 동일하게 스프링 부재를 이용하여 인발 마찰력을 완전히 상쇄시키는 것은 불가능할 것이며, 융기량이 매우 클 경우에는 스프링 부재 말뚝은 일반 강관 말뚝과 유사하게 거동하리라 생각된다. 다만, 일반 강관 말뚝과 유사한 거동을 보이는 융기량의 크기는 동일한 조건에서 침하량보다 클 것이라 판단된다.

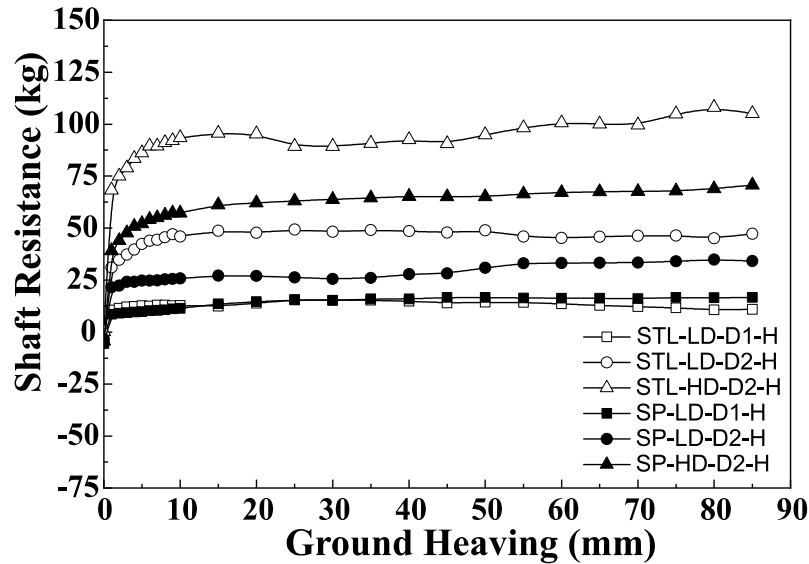


그림 95. 지반 침하 시 스프링 부재가 설치된 지반 변형 대응 말뚝(SP)과 일반 강관 말뚝(STL)에 작용하는 총 주면 마찰 저항의 변화

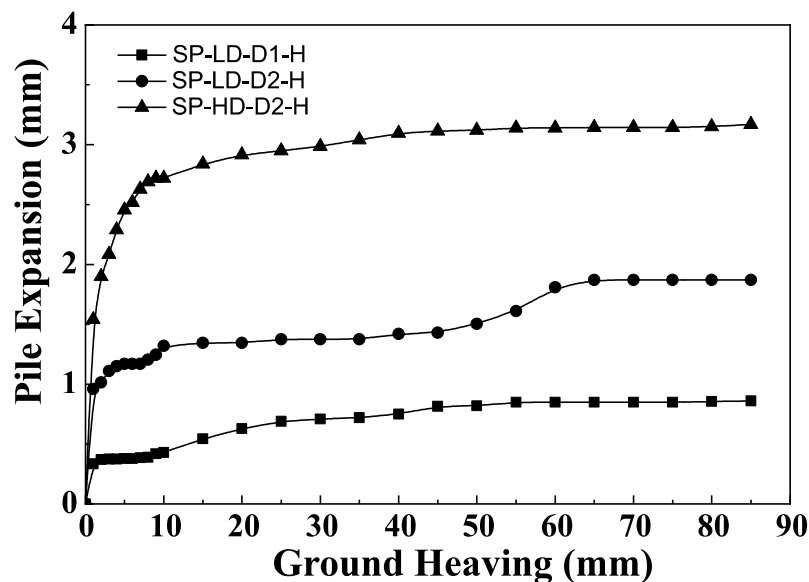


그림 96. 지반 침하량 대비 스프링 부재 설치 지반 변형 대응 말뚝(SP)의 압축량

- **모형 실험 결론 / 지반 변형 대응 말뚝의 양식 제시**

최종적으로 모형 실험에 대한 결론을 내리고, 지반의 변형에 적합한 지반 변형 대응 말뚝의 양식을 제시하고자 한다. 이에 대한 1차년도 지적사항 및 그에 대한 대응은 다음과 같다.

1차년도 지적사항: 지반 변형 대응 부재의 설치에 따른 상부 구조물 이동에 대한 대응책

본 연구에서는 지반에 변형이 발생할 경우, 말뚝 중간에 설치되어 말뚝의 길이를 변화시켜 말뚝의 하중 전달 기전을 개선하는 부재를 제안함. 하지만 말뚝 길이를 변화시킬 경우, 상부 구조물이 이동하게 되며, 이에 대한 대응책이 필요함.

지적사항 분석 및 보완 방향

본 연구에서 수행한 모형실험의 결과, 말뚝의 하중 전달 기전을 개선하기 위해서는 5 mm 이내의 매우 작은 변위가 필요함. 비록 이 변위가 작으나, 말뚝 허용 침하량과의 비교 검토가 필요하고, 또한, 상부 구조물의 과도한 침하/응기를 방지하기 위한 방안 또한 필요함.

지반 침하 시에는 말뚝에 부주면 마찰력이 작용한다. 반면 지반 응기 시에는 말뚝을 인발 시키려는 마찰력이 작용한다. 본 과업에서는 모형실험을 통해 말뚝에 불리하게 작용하는 이러한 주면 마찰력을 상쇄 혹은 감소시키는 **지반 변형 대응 부재의 실효성을 검증**하였다.

능동형 부재 말뚝의 경우, **지반 침하 시 부재를 소량 압축시켜 말뚝에 해로운 부주면 마찰력을 완전히 상쇄**시킬 수 있다. 모형 실험 결과, 부주면 마찰력의 완전한 상쇄에 필요한 부재의 압축량은 1 mm 이내로 측정되었다. 또한, 응기하는 지반에 설치된 능동형 부재 말뚝의 경우, **부재를 소량 팽창시키면 말뚝을 인발하려는 마찰력을 완전히 상쇄**시킬 수 있다. 이때 필요한 팽창량은 실험 결과 3 mm 이내로 측정되었다. 실험 및 측정 오차를 고려할 때, **부재 변위량 5 mm 정도면 충분히 말뚝의 하중 전달 기전을 개선할 수 있으리라** 생각된다.

스프링 부재 말뚝의 경우, 지반 침하량이 아주 작을 때는 부주면 마찰력을 소폭 감소시켜 줄 수 있다. 하지만 침하량이 20 mm를 넘어갈 경우, 일반 강관 말뚝과 유사한 거동을 보인다. 반면 지반이 응기하는 경우에는 본 실험에서 적용한 응기량 100 mm이내에서는 말뚝을 인발시키려는 마찰력을 최대 40%까지 감소시켰다. 하지만 이 이상의 응기가 발생할 경우에는 결국 일반 강관 말뚝과 유사한 거동을 보이리라 생각된다.

추가로 본 과업에서는 침하하는 지반에서의 스프링-대시팟 부재 말뚝의 효용성을 모형실험을 통해 검증하였다. 실험 결과 **스프링-대시팟 부재 말뚝은 최종(혹은 극한) 부주면 마찰력을 33%, 최대 부주면 마찰력을 24% 감소**시켰다.

각 부재의 거동을 말뚝 주면에서의 상대변위와 주면 마찰력으로 설명하면 다음과 같다. 그림 97은 수동형 부재 말뚝과 일반 강관 말뚝에서의 말뚝 주면-지반 간 상대변위 d_s 와 주면 마찰력 f_s 의 관계를 도시하고 있다. 만일 상대변위가 작을 경우(그림 97a), 스프링 부재 말뚝(SP)의 상대변위는 일반 강관 말뚝(STL)의 상대변위보다 스프링 변형량 C 만큼 작을 것이다. 이에 따라서, 그림 84의 지반 침하 초기와 같이 주면 마찰력 f_s 의 차이가 발생하게 된다. 하지만 상대변위량이 커지게 되면(그림 97b), 주면 마찰력이 수렴하게 되고, 스프링 변형량 C 가 존재하더라도, 스프링 부재 말뚝과 강관 말뚝의 주면 마찰력 f_s 의 차이가 작아지게 된다. 따라서 그림 84에서 지반 침하량이 커지면, 스프링 부재 말뚝의 거동과 강관 말뚝의 거동이 유사하게 된다. 수동형 부재의 경우, 그림 97에서 변형량 C 는 주면 마찰력의 총합과 스프링의 강성으로부터 결정된다. 따라서, 지반 조건을 정확히 파악하고 이에 적합한 스프링의 강성을 결정하는 것이 매우 중요하다.

스프링-대시팟을 이용할 경우, 다른 거동이 예상된다. 지반 침하 초기에는 스프링보다 대시팟이 하중을 받게 된다. 따라서 초기엔 상대변위가 스프링에 비해 크다. 하지만, 그 후 대시팟에서 스프링으로 하중이 전이되면서 상대변위가 줄어들게 된다. 즉, 스프링-대시팟 부재 말뚝의 주면 마찰력은 제하(Unloading) 경로에 위치하게 된다. 이에 따라 그림 87과 같이 스프링-대시팟 부재의 부주면 마찰력은 그 크기가 스프링 부재 말뚝 그리고 일반 강관 말뚝보다 작아지게 된다.

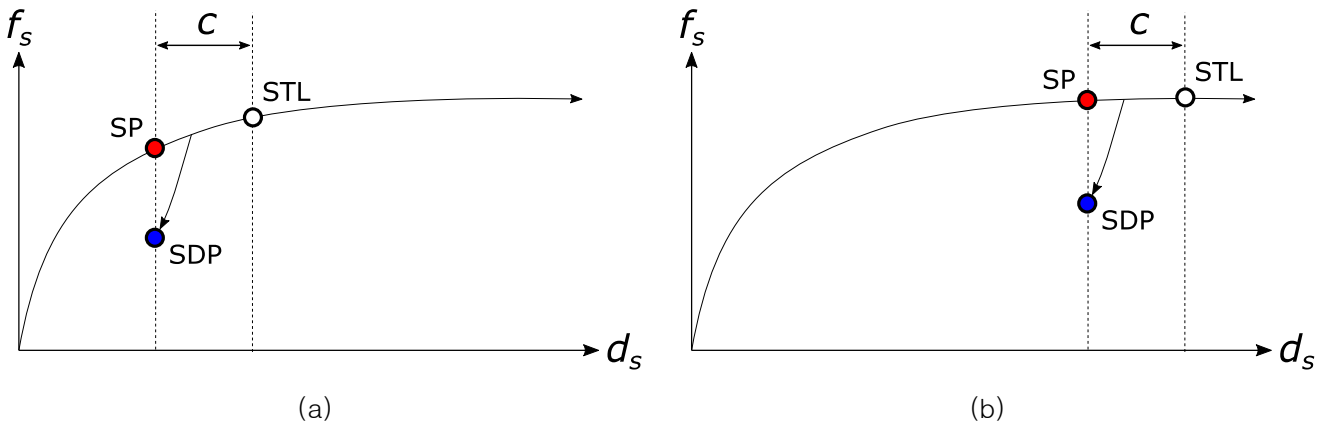


그림 97. 스프링(SP), 스프링-대시팟(SDP) 부재 적용 말뚝과 일반 강관 말뚝(STL)에서의 상대변위 d_s 와 주면 마찰력 f_s 의 관계: (a) 소변위 조건, (b) 대변위 조건

그림 98는 능동형 부재 말뚝과 일반 강관 말뚝에서의 말뚝 주면-지반간 상대변위 d_s 와 주면 마찰력 f_s 의 관계를 도시하고 있다. 능동형 부재 말뚝의 경우, 변위 제어 체계를 갖추고 있다. 따라서 부재 변형량 C 를 조절하여 말뚝에 작용하는 주면 마찰력을 그림 98와 같이 언로딩 경로에 위치하게 할 수 있다. 일반적으로 언로딩 경로의 기울기는 매우 급하므로, 매우 작은 변형량($< 5 \text{ mm}$)을 이용하여서 말뚝에 불리하게 작용하는 주면 마찰력을 완전히 상쇄할 수 있다.

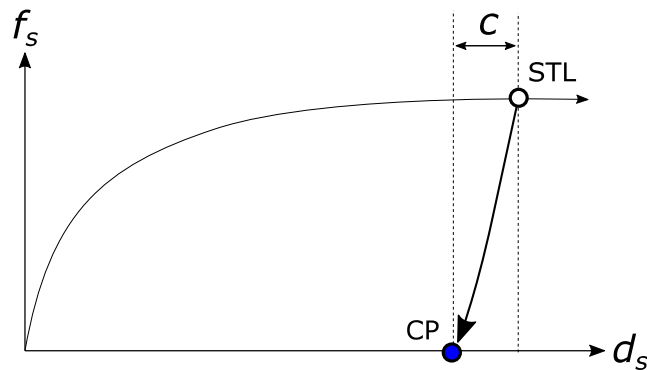


그림 98. 능동형(CP) 부재 적용 말뚝과 일반 강관 말뚝(STL)에서의 상대변위 d_s 와 주면 마찰력 f_s 의 관계

도로교 설계기준(2015)에 따르면, 직경 2 m의 말뚝 기초의 허용 연직 변위는 38 mm이다. 따라서 본 과업에서 설정한 부재 변위량 5 mm는 말뚝의 허용 연직 변위 38 mm에 비해 매우 작다. 하지만, 말뚝의 변위는 선단 및 주면부 지반의 침하 및 말뚝 자체의 압축으로부터 유발되므로, 상부 구조물의 과도한 침하를 방지하기 위해서는 추가적인 장치가 필요하다. 이에 본 과업에서는 그림 99와 같이 지반 변형 대응 말뚝 상부에 레벨링 장비를 부착한 양식을 제안하고자 한다.

능동형 부재를 적용한다면, 지반 변형 시 예측된 지반 변형량을 기반으로 능동형 부재를 변형 시켜 말뚝의 하중 전달 기전을 개선하고, 그 변형량을 말뚝 상부에 장착된 레벨링 장치로 보상하여 상부 구조물의 변형을 방지하도록 한다. 수동형 부재를 적용한다면, 지반 변형 시 말뚝에 작용하는 추가 축력 만큼 부재가 변형되게 된다. 이때, 부재의 변형량을 예측하고, 그만큼 말뚝 상부에 장착된 레벨링 장치로 보상하여 상부 구조물의 변형을 방지하도록 한다.

마지막으로, 본 과업에서 수행한 문헌 조사에서 제시된 지반에 대하여, 적용이 가능한 지반 변형 대응 말뚝 양식을 제시하면 다음과 같다. 수동형 부재 적용 말뚝은 소규모 침하/용기가 반복하여 발생하는 지반에 적용하는 것이 적합하다. 이와 같은 지반은 동결 심도가 얇은 계절적 동토 지반, 층 두께가 작은 팽창성 및 Sabhka 지반 등이 있다. 능동형 부재의 경우, 모든 지반에 적용이 가능하다. 특히

대규모 침하/용기가 문제가 되는 지반에는 능동형 부재만이 적용이 가능하다. 이러한 지반으로는 두꺼운 연약 점성토 지반 그리고 기후 변화로 인해 간극비가 용해되고 있는 영구 동토층이 있다.

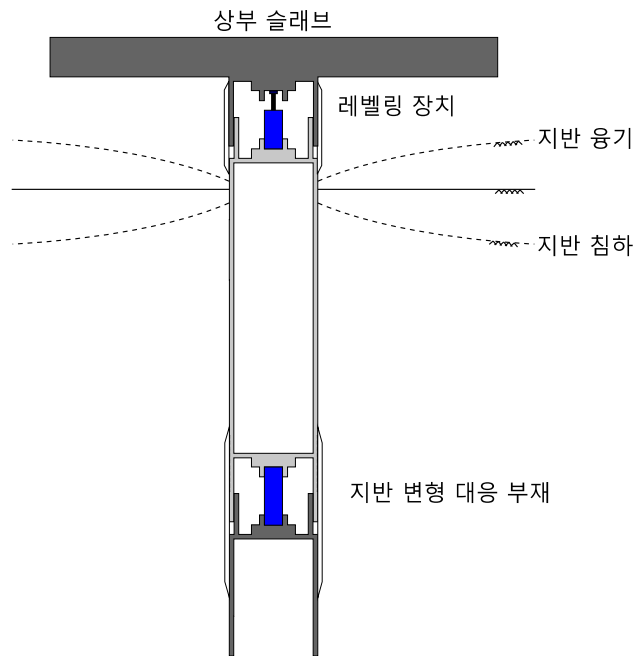


그림 99. 상부 구조물 변형 보정을 위한 레벨링 장치를 부착한 지반 변형 대응 말뚝

- 경제성 평가

개발 말뚝의 경제성을 평가를 위하여, 본 과업에서는 그림 100과 같은 단일 연약지반에 설치된 말뚝을 고려하였다. 말뚝의 직경과 길이는 각각 D 와 H 이며, 점성토 층에 근입되어 있는 마찰말뚝이다. 연약층의 두께는 말뚝의 길이와 동일한 H 로 설정하였다.

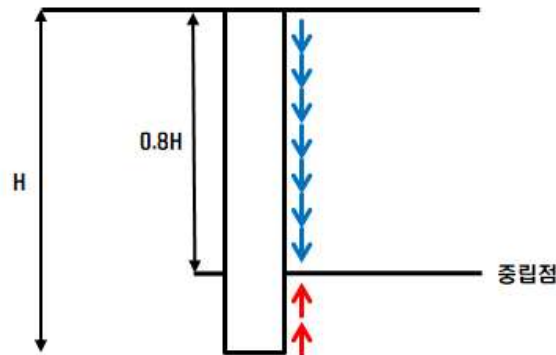


그림 100. 단일 연약지반에서 부주면 마찰력을 받는 말뚝 예시

구조물 기초설계기준 해설(한국지반공학회, 2003)에 따르면 부주면 마찰력이 정주면 마찰력으로 전환되는 중립축은 식 (1)과 같이 산정할 수 있다. 여기서 L 은 부주면 마찰력이 작용하는 압밀층에 걸쳐있는 말뚝의 길이, n 은 말뚝 지지 형태에 따른 계수(마찰말뚝이나 불완전지지 말뚝($N \leq 20$)이면, $n = 0.8$, 보통의 모래, 자갈층에 지지할 경우, $n = 0.9$, 암반이나 굳은 지층에 완전 지지할 경우, $n = 1.0$), H 는 연약층의 두께이다.

$$L = n \times H \quad (1)$$

식 (1)에 따라 중립축의 위치를 지표면에서부터 $0.8H$ 로 설정하였으며, 중립축 상부에서는 부주면 마찰력이, 중립축 하부에서는 정주면 마찰력이 작용한다. 중립축 상부에 작용하는 부주면 마찰력은 식 (2)를 이용하여 산정한다. 이때, f_n 은 단위 부주면 마찰력, A_s 는 마찰력이 작용하는 말뚝 주면의 면적이다.

$$Q_{ns} = f_n \times A_s \quad (2)$$

단위 부주면마찰력 f_n 는 계수 β (점토: 0.20~0.25, 실트: 0.25~0.35, 모래: 0.35~0.50)와 연직 유효응력 σ'_v 의 곱으로 식 (3)과 같다.

$$f_n = \beta \times \sigma'_v \quad (3)$$

연약지반을 점토로 가정하면, β 는 0.25이고, 식 (3)을 식 (2)에 대입하면 다음과 같다.

$$Q_{ns} = (0.25) \times (\gamma_{day} \times \frac{0.8H}{2}) \times (2\pi r \times 0.8H) \quad (4)$$

최종적으로 식 (4)로부터, 점토 지반에서의 부주면 마찰력은 다음과 같다.

$$Q_{ns} = 0.16\pi r \gamma_{day} H^2 \quad (5)$$

전체 주면 마찰력 계산을 위해 정주면 마찰력을 계산하여야 하며, 이는 식 (6)과 같다.

$$Q_{ps} = f_s \times A_s \quad (6)$$

여기서 f_s 는 Reese and O'Neill (1999)에 따라 식 (7)로 구할 수 있으며, β 는 식 (8)을 이용하여 산정한다.

$$f_s = \beta \times \sigma_v' \quad (7)$$

$$\beta = 1.5 - 0.135 \sqrt{Z} \quad (8)$$

부주면 마찰력과 동일하게, 식 (6)-(8)을 이용하면, 최종적으로 식 (9)와 같은 정주면 마찰력 산정 공식을 얻을 수 있다.

$$Q_{ps} = 0.36\pi r\gamma_{\text{clay}} H^2(1.5 - 0.135 \sqrt{0.9H}) \quad (9)$$

식 (5)와 식 (9)를 이용하면 말뚝에 작용하는 전체 마찰력을 구할 수 있으며, 식 (10)과 같다.

$$Q_s = Q_{ps} - Q_{ns} = \pi r\gamma_{\text{clay}} H^2(0.38 - 0.0486 \sqrt{0.9H}) \quad (10)$$

식 (5), (9), (10)에서 $\pi r\gamma_{\text{clay}}$ 은 말뚝 반지름, 지반의 단위중량이다. 따라서 전체 주면 마찰력은 말뚝 길이 H 에 대한 함수이다. 따라서 $\pi r\gamma_{\text{clay}}$ 를 1로 치환하였으며, 말뚝 길이에 따른 부주면 마찰력, 정주면 마찰력, 전체 마찰력을 나타내면 표 15와 같다.

표 15. 말뚝 길이에 따른 부주면, 정주면, 전체 마찰력

말뚝길이, H	부주면 마찰력 (①)	정주면 마찰력 (②)	전체 마찰력 (②-①)
6	5.76	15.37	9.61
7	7.84	20.48	12.64
8	10.24	26.21	15.97
9	12.96	32.54	19.58
10	16.00	39.42	23.42
11	19.36	46.84	27.48
12	23.04	54.76	31.72
13	27.04	63.17	36.13
14	31.36	72.03	40.67
15	36.00	81.32	45.32
16	40.96	91.03	50.07
17	46.24	101.12	54.88
18	51.84	111.58	59.74
19	57.76	122.39	64.63
20	64.00	133.52	69.52
21	70.56	144.96	74.40
22	77.44	156.69	79.25
23	84.64	168.69	84.05
24	92.16	180.94	88.78
25	100.00	193.42	93.42

본 분석에서는 지반 침하에 따른 부주면 마찰력 저감을 위해 능동형(실린더), 수동형(대시팻+스프링)을 적용하였으며, 능동형의 경우 부주면 마찰력을 완전히 상쇄시키며, 수동형은 부주면 마찰력을 30% 감소시킬 수 있다. 따라서 표 15의 부주면 마찰력을 능동형과 수동형 지반 변형 대응 말뚝을 적용하였을 경우에 대해 각각 재계산하였으며, 결과는 표 16과 같다. 일반 말뚝, 능동형 부재 적용 말뚝, 수동형 부재 적용 말뚝의 말뚝 길이에 대한 전체 마찰력을 도시하면 그림 101과 같다.

표 16. 말뚝 길이에 따른 능동형, 수동형 지반 변형 대응 말뚝에 작용하는 전체 마찰력

말뚝길이 H	능동형 말뚝			수동형 말뚝		
	부주면 마찰력 (①)	정주면 마찰력 (②)	전체 마찰력 (②-①)	부주면 마찰력 (③)	정주면 마찰력 (④)	전체 마찰력 (④-③)
6	0.00	15.37	15.37	4.03	15.37	11.34
7	0.00	20.48	20.48	5.49	20.48	14.99
8	0.00	26.21	26.21	7.17	26.21	19.05
9	0.00	32.54	32.54	9.07	32.54	23.46
10	0.00	39.42	39.42	11.20	39.42	28.22
11	0.00	46.84	46.84	13.55	46.84	33.29
12	0.00	54.76	54.76	16.13	54.76	38.63
13	0.00	63.17	63.17	18.93	63.17	44.24
14	0.00	72.03	72.03	21.95	72.03	50.08
15	0.00	81.32	81.32	25.20	81.32	56.12
16	0.00	91.03	91.03	28.67	91.03	62.36
17	0.00	101.12	101.12	32.37	101.12	68.75
18	0.00	111.58	111.58	36.29	111.58	75.29
19	0.00	122.39	122.39	40.43	122.39	81.96
20	0.00	133.52	133.52	44.80	133.52	88.72
21	0.00	144.96	144.96	49.39	144.96	95.57
22	0.00	156.69	156.69	54.21	156.69	102.48
23	0.00	168.69	168.69	59.25	168.69	109.44
24	0.00	180.94	180.94	64.51	180.94	116.43
25	0.00	193.42	193.42	70.00	193.42	123.42

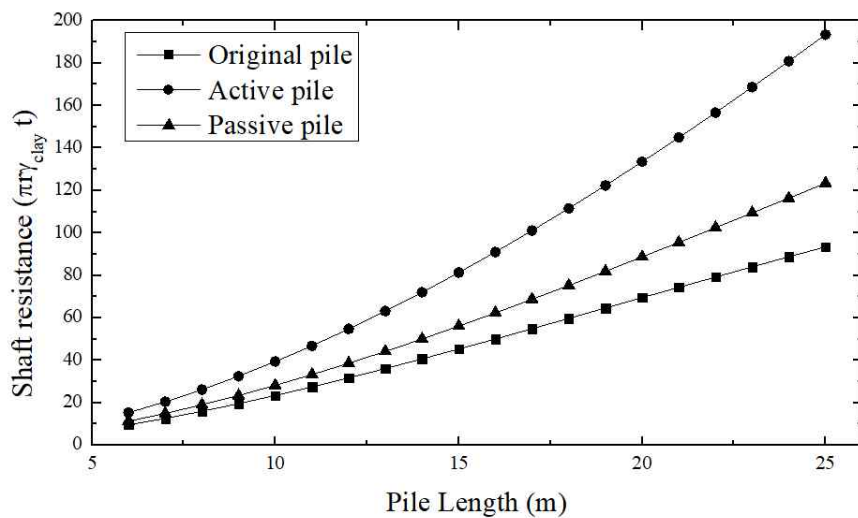


그림 101. 말뚝 길이 대비 일반 말뚝(Original Pile), 능동형 부재 적용 말뚝(Active Pile), 수동형 부재 적용 말뚝(Passive Pile)의 전체 마찰력

표 15-16, 그림 101을 이용하여 동일한 마찰력을 얻기 위한 말뚝의 길이를 일반 말뚝, 능동형 및 수동형 부재 적용 말뚝에 대해 산정하면 표 17과 같다. 표 17과 같이, 일반 말뚝보다 능동형, 수동형 말뚝을 이용할 때, 말뚝의 길이를 현저하게 줄일 수 있으며, 말뚝 길이가 길어짐에 따라 해당 감소비는 커짐을 확인하였다. 개발 말뚝에 사용된 실린더 또는 대시팻, 스프링의 단가가 크지 않다는 점에서 재료비 측면에서 동일 길이 대비 단가는 같다고 가정하였다. 따라서 길이의 감소는 재료비 절감과

말뚝 타설 및 매입에 필요한 천공 단가를 감소시키는 역할을 하며, 길이 감소비가 그대로 시공 단가로 직결된다. 상기 분석을 통해, 본 연구의 최종 목표인 시공비 10% 절감 부분에서 능동형 말뚝은 말뚝 길이와 상관없이 이를 달성할 수 있으며, 수동형 말뚝은 말뚝 길이 9 m 이상에서 이를 만족함을 알 수 있다.

표 17. 동일한 마찰력을 가지는 일반, 능동형, 수동형 말뚝의 길이

일반 말뚝길이 (①)	능동형 말뚝		수동형 말뚝	
	길이 (②)	일반말뚝 대비 감소비 [(①-②)/①*100%]	길이 (③)	일반말뚝 대비 감소비 [(①-③)/①*100%]
6	5.15	14.12	5.86	2.34
7	5.71	18.39	6.56	6.31
8	6.30	21.22	7.30	8.70
9	6.92	23.16	8.09	10.14
10	7.54	24.59	8.90	11.04
11	8.18	25.67	9.73	11.59
12	8.81	26.56	10.57	11.95
13	9.45	27.30	11.41	12.20
14	10.08	27.97	12.26	12.42
15	10.71	28.59	13.11	12.63
16	11.33	29.19	13.95	12.84
17	11.94	29.78	14.77	13.09
18	12.53	30.37	15.59	13.39
19	13.11	30.98	16.39	13.73
20	13.68	31.60	17.17	14.13
21	14.23	32.23	17.94	14.58
22	14.77	32.88	18.68	15.08
23	15.28	33.56	19.40	15.64
24	15.78	34.25	20.10	16.25
25	16.26	34.97	20.77	16.91

○ 한계점 및 후속 연구

- [CTE-A] - 극한지 및 극서지 지반 변형도 문헌 조사

본 연구에서는 온도의 변화(동토층), 염분의 용해 및 결정화(사브카), 압밀(연약 점토층), 수분의 유입으로 인한 점토층의 팽창(팽창성 지반)에 의해서 발생하는 지반 변형에 관한 문헌에 초점을 맞추었다. 이 외에도 점토 입자의 물리화학적 기전에 의해서 발생하는 이차압축, 탄산질 모래(Carbonated Sand) 입자의 파쇄에 의한 지반 침하, 식생의 성장에 의한 지반 변형과 같이 다양한 이유로 지반이 침하 혹은 융기될 수 있다. 따라서, 후속 연구에서는 본 연구에서 조사한 지반 변형 기전 이외에 다른 기전으로 발생하는 지반 변형에 대한 문헌 조사를 수행할 필요가 있다.

- [CTE-B] - 지반 변형 대응 부재

본 연구에서 제안한 지반 변형 대응형 말뚝은 지반 변형 대응 부재와 상하부 말뚝으로 구성된다. 따라서 새로운 양식의 말뚝에 적합한 새로운 시공법을 후속 연구를 통해 개발할 필요성이 있다. 또한, 본 말뚝은 여러 부재로 구성되며, 말뚝의 길이 방향으로 말뚝의 단면이 변하게 되며, 이에 따라 응력이 집중되는 구간이 존재하게 된다. 후속 연구에서는 이러한 한계점을 극복하고자 응력 집중을 최소화할 수 있는 부재 및 결합부 설계 방안을 개발할 필요가 있다. 또한, 말뚝의 생애주기는 매우 길며 지반 변형은 매우 장기간에 걸쳐서 발생할 수 있으므로, 지반 변형 대응 부재의 성능이 장기간 유지되는지 모니터링을 통해 확인할 필요가 있다.

- [CTE-C] - 적용성 평가를 위한 실내 모형 실험

본 연구에서는 건조한 모래를 이용하여 모형 지반을 조성하고 모형 실험을 실시하였다. 따라서, 실제 지반 조건(지층 구성, 온습도, 강우, 구속압 등)을 고려한 성능 검증 시험을 후속 연구에서 수행할 필요가 있다. 또한, 본 연구에서는 1g 조건에서 축소 모형 실험을 수행하였으며, 이에 따라 말뚝의 주변 마찰력의 변화에 초점을 맞추었다. 후속 연구에서는 이를 확장하여 원심모형시험 혹은 실사이즈 모형 실험을 실시하여 주변 마찰력 뿐 아니라 선단 지지력까지 고려하여, 지반 변형 시, 그리고 지반 변형 대응 부재 작동 시, 말뚝의 유기적인 거동을 파악할 필요가 있다. 상기와 같은 심도 있는 연구를 수행할 경우, 자재비, 가공비, 인건비 등과 같은 상세한 비용의 정량화가 가능하며, 이를 바탕으로 더욱 신뢰성 있는 경제성 분석 또한 수행할 수 있다.

3. 연구개발과제의 수행 결과 및 목표 달성 정도

1) 연구수행 결과

(1) 정성적 연구개발성과

○ [CTE A] 극한지 및 극서지 지반 변형 관련 문헌 조사(TRL1)

- 세부항목: [A-1] 극한지 환경 조사 / [A-2] 극서지 환경 조사
- 2차년도에는 1차년도 문헌조사 내용을 재검토하고 정리하였음
- 극한지 8건, 극서지 12건(1차년도 17건, 2차년도 3건 추가)에 대해서 문헌조사를 실시함
- 영구 동토(한대기후)에서는 기후 온난화로 인한 간극빙의 용해로 인한 점진적인 침하 발생
- 계절적 동토(한대 및 냉대기후)에서는 동결/용해의 반복으로 인한 지반의 반복적인 융기/침하 발생
- 열대기후 지역에서는 활발한 풍화작용으로 압밀 침하량이 큰 두꺼운 연약지반(열대기후) 다수 존재
- 사막기후에서는 해안가에는 염분의 결정화/용해로 인한 Sabhka 지반의 반복된 융기/침하 발생
- 사막기후 범람성 하천 인근에는 팽창성 지반이 존재하며, 수분의 유입/건조로 인한 융기/침하 발생
- 극한지/극서지의 지반 변형의 주요 기전 및 침하/융기 여부 파악
- 극한지/극서지에서의 사회기반시설의 건설 수요 파악

○ [CTE B] 지반 변형 대응 부재(TRL4)

- 세부항목: [B-1] 지반 변형 대응 부재 선정, [B-2] 말뚝과 부재의 결합 방법 선정,
[B-3] 말뚝 내 지반 변형 대응 부재 최적 위치
- 1차년도에 제안된 지반 변형 대응 부재 및 결합 방법에 대한 전면적인 재검토를 실시함
- 지반 변형 대응 부재로는 변위 제어식인 능동형과 하중 제어식인 수동형 부재를 각각 제안함
- 능동형 부재 양식으로는 전동 유압 실린더 부재를 제안함
- 수동형 부재는 스프링 부재와 스프링-대시팟 부재를 각각 제안함
- 1차년도 지적 사항에 따라, 대응 부재 바깥에 슬리브를 배치하여 좌굴 안정성을 확보함
- 지반 침하/융기 시 각 부재의 거동과 그로 인한 대응 효과를 도식화하여 분석함
- 수치해석을 통해 말뚝 내 지반 변형 대응 부재 최적 위치를 중립축 부근으로 결정함

○ [CTE 3] 적용성 평가를 위한 실내모형실험(TRL4)

- 세부항목: [C-1] 지반 변형 모사 토조, [C-2] 말뚝 제작 및 실내모형실험,
[C-3] 지반 변형 대응 말뚝 기초 평가
 - 1차년도 지적사항 및 자체 검토 결과를 바탕으로 지반 변형 모사 토조를 전면 개선함
 - 실제 발생하는 지반의 변형을 실험실에서 유사하게 모사할 수 있는 방안을 제시함
 - 설계한 양식을 바탕으로 능동형, 수동형(스프링), 수동형(스프링-대시팟) 부재를 제작함
 - 굽어진 말뚝 표면에 유연한 압전센서를 이용하여 말뚝에 작용하는 횡 토압을 측정함
 - 능동형 부재는 지반 침하/융기에 의해 발생하는 말뚝에 불리한 주면 마찰력을 상쇄시킬 수 있음
 - 스프링(수동형) 부재는 침하가 크게 발생하는 지반에서는 그 효용성은 떨어짐
 - 스프링(수동형) 부재는 융기 지반에서는 그 효용성이 확인됨
 - 스프링-대시팟(수동형) 부재는 부주면 마찰력을 약 30% 정도 저감시킴
 - 수동형 부재는 지반 침하 시 부주면 마찰력을 감소시키나 부주면 마찰력을 상쇄시킬 수는 없음
 - 각 부재의 작동 기전을 말뚝의 하중 전달, 지반 내부의 하중 전이, 그리고 마찰이론을 이용하여 분석함
 - 연약지반에 설치된 마찰 말뚝에 대해 제안 말뚝의 경제성 분석을 수행하였음
 - 능동형 부재는 말뚝 길이와 상관없이 시공비를 10% 이상 절감이 가능함
 - 수동형 부재는 말뚝 길이가 9 m 이상일 경우, 시공비를 10% 이상 절감이 가능함
-

(2) 정량적 연구개발성과

○ 지적재산권 / 특허

- 1차년도: 출원 4건(목표 2건), 등록 0건(목표 0건) - 달성률 200%
- 2차년도: 출원 0건(목표 0건), 등록 6건(목표 2건) - 달성률 300%
- 합계: 출원 4건(목표 2건), 등록 6건(목표 2건) - 달성률 250%

○ 논문(SCI)

- 1차년도: 출판 0건(목표 0건)
- 2차년도: 출판 2건(목표 2건) - 달성률 50%
- 연구과제 종료 후: 출판 1건 (2022년 2월)
- 합계: 출판 2건(목표 2건) - 달성률 100%

○ 논문(비SCI)

- 1차년도: 출판 2건(목표 2건) - 달성률 100%
- 2차년도: 출판 1건(목표 3건) - 달성률 33%
- 연구과제 종료 후: 출판 1건 (2022년 3월)
- 합계: 출판 4건(목표 5건) - 달성률 80%

○ 성과홍보

- 1차년도: 학술발표회 4건(목표 2건) - 달성률 200%
- 2차년도: 학술발표회 5건(목표 4건) - 달성률 125%
- 연구과제 종료 후: 학술발표회 1건 (2022년 3월)
- 합계: 학술발표회 10건(목표 6건) - 달성률 166%

○ 인력양성

- 2차년도: 박사 1인, 석사 3인, 학사 1인 총 5건(목표 3건) - 달성률 166%
 - 합계: 박사 1인, 석사 3인, 학사 1인 총 5건(목표 3건) - 달성률 166%
-

(3) 세부 정량적 연구개발성과

[과학적 성과]

□ 논문(국내외 전문 학술지) 게재

번호	논문명	학술지명	주저자명	호	국명	발행기관	SCIE 여부 (SCIE/비SCIE)	게재일	등록번호 (ISSN)	기여율
1	침하가 예측되는 지반에서 강관말뚝 주면 마찰 저항에 따른 말뚝의 거동 분석	한국지반공 학회논문집	이기철	36(11)	대한민국	한국지반공학 회	비SCIE	2020.11	1229-2427	100%
2	지반 변형 대응형 말뚝 기초의 거동 분석	한국지반 신소재학회 논문집	이준원	19(4)	대한민국	한국지반신소 재학회	비SCIE	2020.12	2508-2876	100%
3	수치해석을 통한 말뚝 배치에 따른 군말뚝 효율 분석	대한토목 학회논문집	이기철	41(5)	대한민국	대한토목학회	비SCIE	2021.10	1015-6348	100%
4	지반 변형 대응 부재를 적용한 말뚝의 부마찰력 저감 성능의 실험적 검증	한국지반공 학회논문집	신세희	38(3)	대한민국	한국지반공학 회	비SCI	2022.03	1229-2427	100%
5	Numerical Analysis of the Contact Behavior of a Polymer-BasedW aterproof Membrane for Tunnel Lining	Polymers	이기철	12(11)	스위스	MDPI	SCIE	2020.11	2073-4360	50%
6	Analysis of Vertical Earth Pressure Acting on Box Culverts through Centrifuge Model Test	Applied Sciences	이기철 (교신)	12(1)	스위스	MDPI	SCIE	2021.12	2076-3417	50%
7	Analysis of Horizontal Earth Pressure Acting on Box Culverts through Centrifuge Model Test	Applied Sciences	이기철, 우상인 (교신)	12(4)	스위스	MDPI	SCIE	2022.02	2076-3417	100%

□ 국내 및 국제 학술회의 발표

번호	회의 명칭	발표 내용	발표자	발표 일시	장소	국명
1	KSCE 2020 CONVENTION	수치해석을 통한 말뚝 배치에 따른 군말뚝 효율 분석	이기철	2020.10.23	제주	대한민국
2	KSCE 2020 CONVENTION	지반 침하 발생에 따른 말뚝 거동의 수치해석적 분석	신세희	2020.10.23	제주	대한민국
3	ICCAEE 2020	Numerical Analysis of Behavior of Environmental-Responsive Pile Foundations and Ground Deformation in Extreme Regions	신세희	2020.11.14	온라인개최	뉴질랜드
4	2020 Fall Geosynthetics Conference	극한지 및 극서지에서 지반 변형 대응형 말뚝 기초 개발 연구	이기철	2020.11.06	서울	대한민국
5	2021 Spring Geosynthetics Conference	지반 변형 양상에 따른 말뚝 기초 거동의 수치해석적 분석	신세희	2021.03.25	서울	대한민국
6	2021 Spring Geosynthetics Conference	지반 침하 발생 위치에 따른 말뚝 거동의 수치 해석적 연구	이학린	2021.03.25	서울	대한민국
7	2021년 한국지반공학회 가을학술발표회	지반 변동성에 따른 단독 및 무리말뚝의 거동 분석	이기철	2021.10.01	서울	대한민국
8	2021년 한국지반공학회 가을학술발표회	실내모형실험을 통한 지반 변형 대응형 말뚝 기초의 거동 분석	이학린	2021.10.01	서울	대한민국
9	2021 Fall Geosynthetics Conference	모형 실험을 통한 지반 변형 대응용 말뚝 부재의 실효성 검증 연구	신세희	2021.11.18	서울	대한민국
10	2022 Spring Geosynthetics Conference	지반 변형 대응 부재의 부마찰력 저감 효과의 모형 실험을 통한 검증	신세희	2022.03.31	경기도	대한민국

□ 기술 요약 정보

번호	연도	기술명	요약 내용	기술 완성도	등록 번호	활용 여부	미활용사유	연구개발기관 외 활용 여부	허용방식

□ 보고서 원문

번호	연도	보고서 명	발간일	등록 번호

□ 생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물

번호	생명자원(생물자원, 생명정보)/화합물 명	등록/기탁 번호	등록/기탁 기관	발생 연도

[기술적 성과]

□ 지식재산권(특허, 실용신안, 의장, 디자인, 상표, 규격, 신품종, 프로그램)

번호	구분	지식재산권 등 명칭 (건별 각각 기재)	국명	출원			등록			기여율	활용 여부
				출원인	출원일	출원번호	등록인	등록일	등록번호		
1	특허	현장타설형 부마찰력 저감 말뚝 및 부마찰력 저감 말뚝 시공 방법	대한민국	인천대학교 산학협력단	2020.10. 07	10- 2020- 0129116	인천대학교 산학협력단	2021.01. 22	10- 2208823	100	-
2	특허	압밀식 부마찰력 저감장치가 구비된 부마찰력 저감 말뚝 및 부마찰력 저감 방법	대한민국	인천대학교 산학협력단	2020.09. 24	10- 2020- 0123901	인천대학교 산학협력단	2021.04. 14	10- 2242358	100	-
3	특허	액체 배출식 부마찰력 저감장치가 구비된 부마찰력 저감 말뚝 및 부마찰력 저감 방법	대한민국	인천대학교 산학협력단	2020.09. 24	10- 2020- 0123890	인천대학교 산학협력단	2021.04. 14	10- 2242353	100	-
4	특허	동결응해에 의한 피해 저감 말뚝	대한민국	인천대학교 산학협력단	2020.11. 23	10- 2020- 0157381	인천대학교 산학협력단	2021.04. 27	10- 2247609	100	-
5	특허	매입형 부마찰력 저감 말뚝 및 부마찰력 저감 방법	대한민국	인천대학교 산학협력단	2020.10. 07	10- 2020- 0129110	인천대학교 산학협력단	2021.04. 27	10- 2247605	100	-
6	특허	지반변형 모사가 가능한 말뚝시험장치 및 말뚝시험방법	대한민국	인천대학교 산학협력단	2020.11. 23	10- 2020- 0157387	인천대학교 산학협력단	2021.04. 27	10- 2247624	100	-

○ 지식재산권 활용 유형

번호	제품화	방어	전용실시	통상실시	무상실시	매매/양도	상호실시	담보대출	투자	활용 예정	기타
1										√	
2										√	
3										√	
4										√	
5										√	
6										√	

☐ 저작권(소프트웨어, 서적 등)

번호	저작권명	창작일	저작자명	등록일	등록번호	저작권자명	기여율

☐ 신기술 지정

번호	명칭	고시일	보호기간	지정번호

☐ 기술 및 제품 인증

번호	인증 분야	인증기관	인증 내용		인증 획득일	국가명
			인증명	인증번호		

☐ 표준화

○ 국내표준

번호	인증구분	인증여부	표준명	표준인증기구명	제안주체	표준종류	제안/인증일자

○ 국제표준

번호	표준화단계 구분	표준명	표준기구명	표준분과명	의장단 활동여부	표준특허 추진여부	표준개발 방식	제안자	표준화 번호	제안일자

[경제적 성과]

☐ 시제품 제작

번호	시제품명	출시/제작일	제작업체명	설치장소	이용분야	사업화 소요 기간	인증기관 (해당 시)	인증일 (해당 시)

☐ 현장적용

번호	적용기술명	적용일	발주기관명	적용 연구개발기관명	적용현장명(장소)

☐ 기술 실시(이전)

번호	기술 이전 유형	기술 실시 계약명	기술 실시 대상 기관	기술 실시 발생일	기술료	
					발생 연도	발생액(천원)

☐ 사업화 투자실적

번호	연도	투자 자금 성격*	추가 연구개발 투자(천원)	설비 투자(천원)	기타 투자(천원)	합계(천원)

□ 사업화 현황

번호	사업화 방식	사업화 형태	지역	사업화명	내용	업체명	매출액		매출 발생 연도	기술 수명
							국내 (천원)	국외 (달러)		

□ 매출 실적(누적)

번호	사업화명	발생 연도	매출액		합계	산정 방법
			국내(천원)	국외(달러)		
합계						

□ 사업화 계획 및 무역 수지 개선 효과

성과					
사업화 계획	사업화 소요기간(년)				
	소요예산(천원)				
	예상 매출규모(천원)		현재까지	3년 후	5년 후
	시장 점유율	단위(%)	현재까지	3년 후	5년 후
		국내			
		국외			
향후 관련기술, 제품을 응용한 타 모델, 제품 개발계획					
무역 수지 개선 효과(천원)	수입대체(내수)		현재	3년 후	5년 후
	수 출				

□ 고용 창출

번호	사업화명	사업화 업체명	고용창출 인원(명)		합계(명)
			yyyy년	yyyy년	
합계					

□ 고용 효과

구분			고용 효과(명)
고용 효과	개발 전	연구인력	
		생산인력	
	개발 후	연구인력	
		생산인력	

☐ 비용 절감(누적)

번호	사업화명	발생 연도	산정방법	비용 절감액(천원)
합계				

☐ 경제적 파급 효과

(단위 : 천원/년)

구분	사업화명	수입 대체	수출 증대	매출 증대	생산성 향상	고용 창출 (인력 양성 수, 명)	기타
해당 연도							
기대 목표							

☐ 산업 지원(기술지도)

번호	내용	기간	참석 대상	장소	인원(명)

☐ 기술 무역

(단위 : 천원)

번호	계약 연월	계약 기술명	계약 업체명	계약업체 국가	총 계약액	기 징수액	해당 연도	징수액	향후 예정액	수출/수입

[사회적 성과]

☐ 법령 반영

번호	구분 (법률/시행령)	활용 구분 (제정/개정)	명 칭	해당 조항	시행일	관리 부처	제정/개정 내용

☐ 정책활용 내용

번호	구분 (제안/채택)	정책명	관련 기관 (담당 부서)	활용 연도	채택 내용

☐ 설계 기준/설명서(시방서)/지침/안내서에 반영

번호	구분 (설계 기준/설명서/지침/안내서)	활용 구분 (신규/개선)	설계 기준/설명서/ 지침/안내서 명칭	반영일	반영 내용

☐ 신진연구자 채용

번호	채용 연구개발기관명	채용일	근로기간	채용인원(명)	채용인원 중 청년인력(명)

□ 전문 연구 인력 양성

번호	분류	연도	현황(명)										
			학위별				성별		지역별				
			박사	석사	학사	기타	남	여	수도권	충청권	영남권	호남권	기타
1	졸업	2021	1				1		1				
2	졸업	2021		1			1		1				
3	졸업	2021		1			1		1				
4	졸업	2022		1			1		1				
5	졸업	2022			1		1		1				

□ 산업 기술 인력 양성

번호	연도	프로그램명	프로그램 내용	교육 기관	교육 개최 횟수	총 교육 시간	총 교육 인원

□ 다른 국가연구개발사업에의 활용

번호	연도	중앙행정기관명	사업명	연구개발과제명	연구책임자	연구개발비(천원)

□ 국제화 협력성과

번호	구분 (유치/파견)	기간	국가	학위	전공	내용

□ 홍보 실적

번호	홍보 유형	매체명	제목	홍보일

□ 포상 및 수상 실적

번호	종류	포상명	포상 내용	포상 대상	포상일	포상 기관

[인프라 성과]

□ 연구시설·장비

번호	구축 기관	연구시설/ 연구장비명	규격 (모델명)	개발여부 (○/×)	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록여부	연구시설·장비 종합정보시스템* 등록번호	구축일자 (YY.MM.DD)	구축비용 (천원)	비고 (설치 장소)
1	인천 대학 교	지반 변형 모사 토조	-	○	×	-	2021.07.10	20,350	인천대학교 토질실습실

2) 목표 달성 수준

연구 개발 목표	달 성 내 용	달성도(%)
○ [CTE A] 극한지 및 극서지 지반 변형도 문헌 조사	○ 극한지 및 극서지 지반조사 결과 - 극한지 8건, 극서지 12건에 대해 문헌조사 실시 - 극한지 해당 지반: 영구 동토, 계절적 동토 - 극서지 해당 지반: 연약지반, Sabhka, 팽창성 지반 - 각 지반의 주요 문제점, 지반 변형 기전 파악 - 각 위치별로 사회기반시설의 현황 및 건설계획 파악 - 문헌조사를 기반으로 세부 연구 방향 수립	100
○ [CTE B] 지반 변형 대응 부재	○ 지반 변형 대응 부재 및 결합 방법 - 1차년도 설계안의 전면 재검토 - 2차년도에는 능동형 부재와 수동형 부재를 선정함 - 능동형/수동형 부재는 각각 변위/하중 제어 방식 - 능동형 부재의 부품으로는 전동 유압 실린더 선정 - 수동형 부재의 경우, 스프링과 스프링-대시팟 선정 - 부재와 말뚝의 안전한 결합 방식 설계 - 좌굴에 대한 안정성 확보를 위한 슬리브를 이용 ○ 지반 조건별 지반 변형 대응 부재의 최적 위치 결정 - 지반 변형 방향, 지반 변형 대응 부재 위치를 달리하며, 다수의 수치해석 수행하고 분석 - 최적 위치는 주변 마찰력의 양상이 바뀌는 중립점(혹은 중립축)으로 파악됨	100
○ [CTE C] 적용성 평가를 위한 실내모형실험	○ 지반 변형 모사 토조 메커니즘 및 토조 제작 - 실제 지반의 침하/용기 시 거동 특성 분석 - 이를 반영하여 지반 변형 모사 토조 개선 ○ 축소 모형 말뚝에 적합한 지반 변형 시나리오 적용 - 실험변수: 대응 부재, 지반 변형 방향, 상재압, 조밀도 - 실험변수를 달리하면서 다양한 시나리오 적용 ○ 극한지/극서지 지반 변형에 따른 제작 말뚝의 적용성 - 능동형 부재: 말뚝 직경 1배 이상의 변형 대응 가능 - 경제성 분석 결과, 시공비용 10% 절감 가능	100

4. 목표 미달 시 원인분석(해당 시 작성)

1) 목표 미달 원인(사유) 자체분석 내용

- 2022년 3월 현재 본 연구의 질적 성과는 달성하였으나, 양적 성과는 소폭 미달성
 - 미달성 양적 성과: 비 SCI 논문 1편 출판
- 2차년도 1분기(21.01.06~21.04.02) 동안 연구책임자 부재
 - 기존 연구 책임자인 인천대학교 산학협력단 김동욱의 21.01.06 사망 면직으로 인해 연구책임자 공석
 - 현 연구 책임자인 인천대학교 산학협력단 우상인은 21.04.02부터 해당 연구에 참여
 - 1차년도 지적사항에 대한 검토, 지반 변형 대응 부재의 재설계, 모형 토조의 재검토 및 개선 지체
- COVID19
 - COVID19 사태로 인해, 실험실 및 연구실 출입 통제가 다수 있었음
 - 본 연구는 많은 인력과 시간이 필요한 다수의 모형실험을 포함하고 있어 이로 인한 어려움이 있었음
 - 연구에 영향을 준 세부 사례는 아래 표와 같음

일자	세부 내용	조치 사항	연구 영향
2021.02.10	교내 확진자 발생(학생식당) 연구원의 동선 겹침	교내 동선 일시적 폐쇄	연구원 전원 연구 중단
2021.07.21	교내 확진자 발생(학생식당) 연구원의 동선 겹침	교내 동선 일시적 폐쇄	연구원 전원 연구 중단
2021.09.01	교내 확진자 발생(8호관)	8호관 일시적 폐쇄	연구실 출입 불가
2021.09.17	연구 책임자 및 연구원 백신접종(1차)	재택근무	실험 인원 결손
2021.09.23	연구원 백신접종(1차)	재택근무	실험 인원 결손
2021.09.25	연구원 백신접종(1차)	재택근무	실험 인원 결손
2021.09.27	연구원 백신접종(1차)	재택근무	실험 인원 결손
2021.10.14	연구원 백신접종(2차)	재택근무	실험 인원 결손
2021.10.22	연구 책임자 및 연구원 백신접종(2차)	재택근무	실험 인원 결손
2021.10.23	연구원 백신접종(2차)	재택근무	실험 인원 결손
2021.10.28	연구원 백신접종(2차)	재택근무	실험 인원 결손
2021.10.30	연구원 백신접종(2차)	재택근무	실험 인원 결손
2021.11.12	연구 책임자 확진자 접촉	연구 책임자 수동감시	연구 책임자 교내 출입 불가
2021.11.13	교내 확진자 발생(9호관)	9호관 일시적 폐쇄	실험실 출입 불가
2021.11.30	교내 확진자 발생(8호관)	8호관 일시적 폐쇄	연구실 출입 불가
2021.12.11	교내 확진자 발생(8호관)	8호관 일시적 폐쇄	연구실 출입 불가
2021.12.23	교내 확진자 발생(8호관)	8호관 일시적 폐쇄	연구실 출입 불가

2) 자체 보완활동

- 2022년 3월 현재 미달성 양적 성과는 비 SCI 논문 1건
 - 미달성한 양적 성과를 조속히 보완하기 위해 다음과 같은 보완 활동을 진행 중
 - 비SCI 논문 현황
 - 2022년 3월 현재 1편의 비 SCI 논문을 작성 중이며, 3월 중 투고 예정임
 - 2022년 상반기 중 비SCI 논문 미달성 양적 성과 달성이 예상됨
-

3) 연구개발 과정의 성실성

○ 연구 진행 전략

- 연구 책임자 주도하에 매주 연구 계획 수립 및 점검을 진행하였음
- 1차년도 기수행 연구에 대한 전면적인 재검토를 수행하고, 이를 보완하였음
- 많은 인력과 시간이 필요한 모형실험을 다수 수행해야 하므로, 체계적인 실험 계획을 수립하였음
- 매 실험 종료 후, 결과 분석 및 개선점에 대한 토의를 즉각적으로 진행하고 이를 반영하였음

○ 실험 장비 제작

- 1차년도 지적사항 및 자체 검토 결과, 1차년도에 제작한 토조의 전면적인 개선이 필요하였음
- 2차년도에 검토한 결과, 1차년도 제시 지반 변형 대응 부재는 그 효용성이 작거나 제작이 불가하였음
- 이에 따라 전면적으로 토조를 개선하고, 부재, 말뚝을 재설계하고 제작하였음
- 세부 실험 장비 제작 일지는 다음과 같음

일자	내용	장소	참여자
2021.04.15	지적사항 및 자체 검토 결과 종합 및 개선점 도출 토조, 부재, 말뚝 제작 업체 선정 시작	인천대학교	연구책임자 1인, 연구원 2인
2021.04.27	최초 지반 변형 모사 토조 및 능동형 부재 말뚝 설계 회의 진행	인천대학교	연구책임자 1인, 연구원 2인
2021.05.04	지반 변형 모사 토조 및 모형 말뚝 개념 설계 완료에 따른 제작 가능 업체 조사	인천대학교	연구책임자 1인, 연구원 2인
2021.05.17	토조, 지반 변형 구현 장비, 모형 말뚝 제작 업체 최종 선정 회의 진행	인천대학교	연구책임자 1인, 연구원 2인
2021.05.27	모형 말뚝 설계 검토 및 보완 회의 진행	인천대학교	연구책임자 1인, 연구원 1인
2021.06.02	지반 변형 구현 장비 설계 보완 회의 진행 및 제작 업체 최종 선정	인천대학교	연구책임자 1인, 연구원 2인
2021.06.28	토조, 지반 변형 구현 장비, 모형 말뚝 제작 진행 상황 검토	인천대학교	연구책임자 1인, 연구원 2인
2021.07.19	장비 가동성 확인 및 토조 및 지반 변형 구현 장비 수령	인천대학교	연구책임자 1인, 연구원 2인

○ 모형 실험 수행

- 세부 모형 실험 수행 일지는 다음과 같음

일자	세부 내용	실험 수행 및 결과 분석 인원	결과 분석 및 보완 계획
2021.07.21. ~ 2021.08.05	능동형 부재 / 침하	연구원 3인, 연구책임자 1인	■ 토조 내 토사 유실 발생 ■ 장비 수리 및 재점검
2021.08.06. ~ 2021.08.07	능동형 부재 / 침하	연구원 3인, 연구책임자 1인	■ 유압 실린더의 누유 발생 ■ 유압 호스 내 공기 유입 ■ 누유 방지용 밸브 추가 설치 ■ 호스 내 공기 제거 작업 수행
2021.08.08. ~ 2021.08.17	능동형 부재 / 침하	연구원 3인, 연구책임자 1인	■ 말뚝-지반 경계에서 토사 유실 ■ 경계부 처리 방안 검토 ■ 능동형 부재 실험 수행
2021.08.18. ~ 2021.09.07	능동형 부재 / 침하 / 웅기	연구원 4인, 연구책임자 1인	■ 말뚝 인발 현상 발생 ■ 말뚝 재하용 무게추 추가 제작 ■ 슬래브 하단과 지반 하판 사이에

			흙 끼임 현상 발생 -> 슬리브 재가공 ■ 능동형 부재 실험 재수행
2021.09.08. ~ 2021.9.27	기 수행된 실험 내용 및 결과 검토 및 실험 장비의 보완 및 개량 수행	연구원 2인, 연구책임자 1인	■ 지반 변형 시 편심 현상 발생 ■ 공압 속도 제어기 추가 ■ 슬래브 하단과 지반 하판 사이에 흙 끼임으 로 인한 오류 -> 슬래브 연장 ■ 상재압 모사 웨이트 디스크 추가 제작 ■ 지반 조성 방법을 다짐법에서 강사기 활용 법으로 변경
2021.09.28. ~ 2021.10.01	강사 실험	연구원 3인, 연구책임자 1인	■ 강사기의 낙하고에 따른 실험 모래의 상대 밀도 측정
2021.10.05. ~ 2021.11.02	능동형 부재 / 침하 / 웅기	연구원 4인, 연구책임자 1인	■ 말뚝 근입부와 슬래브의 간섭 ■ 슬래브 길이 축소 작업 수행 ■ 능동형 부재 실험 수행 완료
2021.11.03. ~ 2021.11.08	수동형 부재 / 실험 준비	연구원 4인, 연구책임자 1인	■ 금형 스프링 부재 장착을 위한 위치 고정용 플레이트 제작
2021.11.09. ~ 2021.11.26	수동형 부재 / 침하 / 웅기	연구원 4인, 연구책임자 1인	■ 강성이 작은 스프링 적용 시, 지반 변형 대 응 효과 미미함 -> 스프링 교체 ■ 수동형 부재 실험 수행 완료
2021.12.01. ~ 2021.12.16	수동형 부재 (스프링-대시팻) / 침하	연구원 4인, 연구책임자 1인	■ 수동형 부재(스프링-대시팻) 실험 수행 완료

5. 연구개발성과의 관련 분야에 대한 기여 정도

- 지반 침하/융기로 인해 기초의 설계 및 시공이 어려운 지반에 적용이 가능한 말뚝 기초 양식 제시
 - 능동형 부재의 적용 시, 지반 변형에 의해 말뚝에 불리한 주면 마찰력을 상쇄시킬 수 있음
 - 제안된 기초 양식의 작동 기전은 말뚝 하중 전달 기전, 지반 내부 하중 전이 기전, 마찰이론 등을 바탕으로 면밀하게 분석되었으며, 실내모형실험을 통해 그 효용성이 검증되었음
 - 부주면 마찰력 상쇄를 위해 일반적으로 적용되는 Slip Layer Coating 공법보다 환경적 영향이 적음
 - 경제성 분석 결과, 연약지반에 설치되는 마찰말뚝의 경우에도 그 경제성이 확보됨
 - 지반의 변형을 예측하는 것은 매우 어려우며, 지반을 개량하는 것 또한 그 한계가 명확함
 - 부산 웅동의 경우, 연직배수재 등을 활용하여 지반을 개량하였으나, 지반 침하로 피해가 발생함
 - 부산 신항의 경우, 침하 수렴 판정 이후에도, 추가로 1 m 이상의 침하가 발생함
 - 기존 사회기반시설은 일반적으로 예측하기 어려운 지반의 변형에 적합한 설계 및 시공법을 제시하는 경우가 많아, 완공 후에도 지반의 변형으로 인해 많은 피해가 발생하였음
 - 본 연구에서는 초점을 바꾸어 지반의 변형에 적극적으로 대응하는 구조물 양식을 제안하였음
 - 새로운 사회기반시설의 설계 및 시공에 대한 접근법을 제시함
 - 제안된 능동식 부재의 경우, IoT, ICT, 센서 기술과 조합하여, 외부 하중 및 지반 변형에 반응하여 상부 구조물을 안전하게 지지하는 스마트 말뚝 양식의 제안이 가능함
 - 타 분야와의 협력이 가능한 사회기반시설의 설계, 시공, 유지관리 기법의 제시가 가능
-

6. 연구개발성과 관리 및 활용 계획

○ 추가연구의 필요성

- 본 연구는 TRL 4를 목표로 하므로, 사업화를 위해서는 TRL 7이상의 추가 연구가 필요함
- 개발 기술은 IoT, ICT 기술 등과 융합이 용이하여 지능형 사회기반시설 관련 연구에 활용이 가능함

○ 타 연구에의 응용

- 지반에 변형에 적극적으로 대응하는 다양한 지반 구조물의 연구에 응용될 가능성이 매우 큼
- 옹벽, 흙막이 벽체, 얇은 기초 등에 대해서도 본 연구에서 적용한 방법론의 활용 가능

○ 기업화 추진 방안 / 기술 이전

- 본 연구의 수행과정 중 달성한 지적 재산권에 대해서는 기술이전 등을 통한 사업화가 가능
-

7. 참고 문헌

- Abdullah, W. S., and Al-Abadi, A. M. (2010). "Cationic-electrokinetic improvement of an expansive soil.", *Applied Clay Science*, Vol. 47, No. 3-4, pp. 343-350.
- Alnuaim, A. M., and El Naggar, M. H. (2014). "Performance of foundations in sabkha soil: numerical investigation". *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol. 32, No. 3, pp. 637-656.
- Arab State, (2021). "Sudan's first wind turbine arrives", June 15.
- Buteau, S., Fortier, R., and Allard, M. (2005). "Rate-controlled cone penetration tests in permafrost.", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 42, No. 1, pp. 184-197.
- Campbell, S., Affleck, R. T., and Sinclair, S. (2018). "Ground-penetrating radar studies of permafrost, periglacial, and near-surface geology at McMurdo Station, Antarctica.", *Cold Regions Science and Technology*, No. 148, pp. 38-49.
- Charlie, W. A., Osman, M. A., and Ali, E. M. (1984). "Construction on expansive soils in Sudan". *Journal of Construction Engineering and Management*, Vol. 110, No. 3, pp. 359-374.
- Chen, J., Zhao, L., Sheng, Y., Li, J., Wu, X. D., Du, E. J., Liu, G. Y. and Pang, Q. Q. (2016). "Some characteristics of permafrost and its distribution in the Gaize area on the Qinghai-Tibet Plateau", *China. Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, Vol. 48, No. 2, pp. 395-409.
- Dastpak, P., Abrishami, S., Anbarani, M. R., and Dastpak, A. (2021), "Effect of Perforated Plates on the Relative Density of Uniformly Graded Reconstituted Sands Using Air Pluviation Method", *Transportation Infrastructure Geotechnology*, Vol. 8, pp. 569-589
- Dhowian, A. W., Erol, A. O., and tan, S. (1987). "Settlement predictions in complex sabkha soil profiles", *Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur*, Vol. 36, No. 1, pp. 11-21.
- Guglielmin, M., Camusso, M., Polesello, S., and Valsecchi, S. (2004). "An old relict glacier body preserved in permafrost environment: the Foscagno rock glacier ice core (Upper Valtellina, Italian Central Alps)", *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, Vol. 36, No. 1, pp. 108-116.
- Hariprasad, C., Rajashekhar, M., and Umashankar, B. (2016), "Preparation of uniform sand specimens using stationary pluviation and vibratory methods", *Geotechnical and Geological engineering*, Vol. 34, No. 6, pp. 1909-1922.
- Hejazi, Y., Dias, D., and Kastner, R. (2008), "Impact of Constitutive Models on the Numerical Analysis of Underground Constructions", *Acta Geotechnica*, Vol.3, No.4, pp.251-258.
- Kanevskiy, M., Shur, Y., and Connor B. (2012). "Study of the ice-rich syngenetic permafrost for road design (Interior Alaska)", *Proceedings of the Tenth International Conference on Permafrost, Salekhard, Russia: The Northern Publisher*, Vol. 1, pp. 25-29.
- Kanevskiy, M., Shur, Y., Krzewinski, T., and Dillon, M. (2013). "Structure and properties of ice-rich permafrost near Anchorage", *Alaska. Cold regions science and technology*, No. 93, pp. 1-11.
- Kumar, S. G., Sridhar, G., Radhakrishnan, R., Robinson, R. G., and Rajagopal, K. (2015). "A case study of vacuum consolidation of soft clay deposit", *Indian Geotechnical Journal*, Vol. 45, No. 1, pp. 51-61.
- Kim, D., Jeong, S., and Park, J. (2020), "Analysis on Shaft Resistance of the Steel Pipe Prebored and Precast Piles based on Field Load-transfer Curves and Finite Element Method", *Soils and Foundations*, Vol.60, No.2, pp.478-495.
- Lee, S. R., Park, H. K., Shim, J. B., Lim, S. S., and Shin. K. H. (2009). "Estimation of Pile Tension Loads Induced by Excavation in Singapore Soft Clay Applying a Pile-Plugged Jet Grouted slab", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 25, No. 1, pp. 77-92.
- Mathewson, C. C. (1988). "Expansive soils, engineering geology". In: General Geology. Encyclopedia of Earth Science. Springer, Boston, MA., pp. 114-119.
- Mohamad, N. O., Razali, C. E., Hadi, A. A. A., Som, P. P., Eng, B. C., Rusli, M. B., and Mohamad, F.

-
- R. (2016). “Challenges in construction over soft soil-case studies in Malaysia”, In *IOP conference series: materials science and engineering*, Vol. 136, No. 1, pp. 1-8.
- Oyedele, K. F., Oladele, S., and Adedoyin, O. (2011). “Application of geophysical and geotechnical methods to site characterization for construction purposes at Ikoyi, Lagos, Nigeria.”, *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, Vol. 1, No. 1, pp. 87-100.
- Povia, L. M. M., Nascimento, P. N. C., and Maia, P. C. A. (2018). “Laboratory Parameters of a Soft Soil Deposit in Macaé, Brazil”, *SOILS AND ROCKS*, Vol. 41, No. 1, pp. 3-16.
- Purser, B. H. (1985). “Dedolomite porosity and reservoir properties of Middle Jurassic carbonates in the Paris Basin, France”, *Carbonate Petroleum Reservoirs*. Springer, New York, NY, pp. 341-355.
- SIMULIA (2014), 6.14 *Documentation Collection*, ABAQUS/CAE User’ Manual.
- Tai, B., Wu, Q., Yue, Z., and Xu, H. (2021). “Ground temperature and deformation characteristics of anti-freeze-thaw embankments in permafrost and seasonal frozen ground regions of China”. *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 189.
- Tesi, T., Muschitiello, F., Smittenberg, R. H., Jakobsson, M., Vonk, J. E., Hill, P., Andersson, A., Kirchner, N., Noormets, R., Dudarev, O., Semiletov, I., and Gustafsson, Ö. (2016). “Massive remobilization of permafrost carbon during post-glacial warming”. *Nature Communications*, Vol. 7, No. 1, pp. 1-10.
- Terzaghi, K. (1942), “Discussion of the Progress Report of the Committee on the Bearing Value of Pile Foundations”, In *Proceedings ASCE*, Vol.68, pp.311-323.
- Vootipruex, P., Jamsawang, P., Sukontasukkul, P., Jongpradist, P., Horpibulsuk, S., and Chindaprasirt, P. (2019). “Performances of SDCM and DCM walls under deep excavation in soft clay: Field tests and 3D simulations”. *Soils and Foundations*, Vol. 59, No. 6, pp. 1728-1739.
- Vega-Meyer, R., Garrido, R. S., Piedrabuena, A. R., Larios, I. N., and Lapuente, R. P. (2006). “Geogrid-reinforced roadway embankment on soft soils: A case study”, In *Soft Soil Engineering: Proceedings of the Fourth International Conference on Soft Soil Engineering, Vancouver, Canada, 4-6 October 2006*, CRC Press.
- Volkov, N., Sokolov, I., and Jewell, R. (2017). “Investigation by Cone Penetration Tests of Piled Foundations in Frozen Soil Maintained by Thermosyphons”, *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS)*, Vol. 31, No. 1, pp. 40-58.
- Yoon, D. D., Cho, S. H., and Seo, W. S. (2010). “A Case Study on Soft Soil Treatment Design and Construction in Vietnam”, In *Proceedings of the Korean Geotechnical Society Conference*, Korean Geotechnical Society, pp. 336-345.
-

< 별첨 >

별첨 자료

1. 총 연구개발기간 성과점검기준표 및 증빙자료
 2. 세부 정량적 연구개발성과 증빙자료(총 연구개발기간 성과점검기준표 실적 증빙자료에 기 포함되어 있는 증빙자료 제외)
-

주 의

1. 이 보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업 ‘국토교통기술촉진연구사업’ 연구개발과제 최종보고서이다.
2. 이 연구개발내용을 대외적으로 발표할 때에는 반드시 국토교통부(국토교통과학기술진흥원)에서 시행한 국토교통과학기술 연구개발사업의 결과임을 밝혀야 한다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 된다.