

건축물 내진성능 확보를 위한 삼축내진말뚝 개선 연구(2/2)

A study on the improvement of triaxial seismic piles
to secure the seismic performance of buildings(2/2)

2023.12.

건축물 내진성능 확보를 위한 삼축내진말뚝 개선 연구(2/2)

A study on the improvement of triaxial seismic piles
to secure the seismic performance of buildings(2/2)

2023.12.

한국건설기술연구원
연구책임자 / 한진태 연구위원
연구수행자 / 김종관 수석연구원, 김석중 수석연구원,
전준서 수석연구원, 박가현 수석연구원,
유병수 박사후연구원, 루이스 디에고 에레라
학생연구원,
메론 알레바쥬 메코넨 학생연구원

제 출 문

한국건설기술연구원장 귀하

본 보고서를 “건축물 내진성능 확보를 위한 삼축내진말뚝 개선 연구(2/2)” 과제의 최종보고서로 제출합니다.

2023년 12월 31일

주관연구기관명 : 한국건설기술연구원

총괄연구책임자 : 연구위원 한진태

참여연구원 : 수석연구원 김종관, 김석중, 전준서, 박가현

박사후연구원 유병수

학생연구원 루이스 디에고 에레라, 메론 알레바췌 메코넨

요 약 문

I. 연구 제목

건축물 내진성능 확보를 위한 삼축내진말뚝 개선 연구(2/2)

II. 연구개발의 필요성 및 목적

최근 건축물의 기초가 구조부재에 포함되도록 건축구조기준이 개정되어 향후 말뚝기초 또한 건축물 기둥과 같이 구조부재로 간주하여 내진성능을 필요로 한다. 건축물의 구조기준 등에 관한 규칙'에 따라 향후 건축물의 기초도 기둥, 보 등과 같이 구조부재로 간주되며 지진 시 안정성을 확보하도록 설계하여야 한다. 이러한 내진성능 확보에 관한 규정은 이미 법적으로도 강제되어 있으나, 현재 건축물 기초의 내진설계는 적확하게 수행되지 않고 있는 실정이다. ㈜에스와이텍에서 개발한 삼축내진말뚝은 소규모 건축물 기초 내진설계에 적용하기에 적합한 공법으로, 2020년 KICT 공모과제(코로나19대응 건설(연)중소 중견기업 지원프로그램)에서 S등급을 받아 시제품 제작 완료했으나, 다음과 같은 애로사항 해결 및 성능 개선 연구 필요하다. 본 연구에서는 지원기업의 보유기술인 삼축내진말뚝에 대하여 지진하중에 대한 삼축내진말뚝 안정성 검증, 지지 메커니즘 분석을 통한 삼축내진말뚝 설계 프로세스 정립, 삼축내진말뚝 설계지침 제도화에 대한 연구를 수행하였다.

III. 연구개발의 내용 및 범위

본 사업에서는 향상된 내진성능 확보를 위한 건축물 내진설계 확보를 위한 삼축내진말뚝 공법 개선을 위하여 다음과 같은 연구를 수행하였다.

- (1) 실험 및 해석기반 내진성능 산정방법 도출
 - 삼축내진말뚝 내진성능 평가를 위한 영향인자 산정
 - 변수연구를 위한 추가 동적원심모형실험 및 동적수치해석 수행
 - 변수연구를 통한 삼축내진말뚝의 부재력 및 동적거동 평가

- (2) 동적하중을 고려한 삼축내진말뚝 설계안 제시
 - 실험 및 해석 결과 분석을 통한 간이 설계식 제안
 - 다양한 경험식 조합을 이용한 시간이력 정밀동해석 수행
 - 삼축내진말뚝 설계안 제시

IV. 연구개발 결과

본 사업은 지원기업에 개발한 삼축내진 말뚝파일의 내진성능을 검증하고 건축물의 내진보강 분야의 시장진출을 지원하고자 수행되었으며, 원심모형실험을 통하여 삼축내진말뚝의 지지 메커니즘을 검증하였고, 2차원 3차원 수치해석을 통해 모델링 및 내진성능 검증을 통하여 설계 정량화를 위한 변수연구를 수행을 바탕으로 특허를 출원하였다. 또한, 동적원심모형실험 및 수치해석 변수연구 보완을 통하여 삼축내진 말뚝의 설계안을 마련하고자 한다. 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 동적 원심모형실험을 통한 삼축내진말뚝 메커니즘 검증
 - 기초 관련 동적원심모형실험 국내외 문헌 분석
 - 삼축내진말뚝의 동적원심모형실험을 통한 내진성능 검증
 - 삼축내진말뚝의 내진성능 발현 메커니즘에 관한 국내 KCI논문 게재
 - 메커니즘 분석을 통한 향상된 삼축내진말뚝 공법 도출 및 특허출원

- (2) 수치해석을 통한 삼축내진말뚝 내진성능 검증
 - 3차원 수치해석프로그램(FALC3D)를 활용한 단일말뚝 및 군말뚝 모델링
 - 지반 구조체 복합거동 확인을 위해 4층 높이 건물 고려
 - 삼축내진말뚝 적용에 따른 구조물 거동분석(지반증폭, 구조체 응답 확인)
 - 일반 마이크로파일과 삼축내진말뚝의 내진성능 비교·분석을 통해 삼축내진말뚝의 우수성 확인

- (3) 실험 및 해석기반 내진성능 산정방법 도출
 - 지진파 종류, 설치각도, 상부구조물 유무에 따른 가속도, 수평변위, 침하량 정량평가
 - 삼축내진말뚝 내진성능에 관한 변수연구를 바탕으로 국내 KCI 논문 게재
 - 수치모델의 검증 및 변수연구를 통한 말뚝의 부재력 및 동적거동 정량평가

- (4) 동적하중을 고려한 삼축내진말뚝 설계안 제시
 - 등가정적해석을 이용한 간이 내진성능 평가법 제안
 - 시간이력동적해석을 위한 최적 말뚝-지반 경계물성 산정법 검증
 - 삼축내진말뚝 내진 설계지침(안) 제시

목 차

제1장 서 론	1
1. 연구의 필요성	1
2. 국내외 동향	3
2.1 정책현황	3
2.2 연구개발 현황	3
2.3 시장·산업동향	5
2.4 동적원심모형실험 문헌조사	8
2.4 말뚝관련 문헌조사	8
3. 사업목표	10
3.1 사업목표 및 내용	10
3.2 추진전략	11
3.3 추진체계	11
제2장 1차년도 주요 연구성과	13
1. 동적 원심모형실험을 통한 삼축내진말뚝 메커니즘 검증	13
1.1 경사말뚝	13
1.2 삼축내진말뚝	13
2. 수치해석을 통한 삼축내진말뚝 내진성능 검증	15
2.1 삼축내진말뚝 모델링 및 입력 물성값 산정	15
2.2 수치해석을 통한 내진성능 검증	16
제3장 실험 및 해석기반 내진성능 산정방법 도출	17
1. 동적원심모형실험 기반 삼축내진말뚝 변수연구	17
1.1 삼축내진말뚝 모형 제작	17
1.2 지반조성 및 실험 단면	19
1.3 동적 원심모형실험 결과	22
1.4 그룹 삼축내진말뚝의 내진성능 평가 및 매개변수 도출	28
2. 유한차분(FDM) 해석 기반 삼축내진말뚝 변수연구	29
3. 삼축내진말뚝 내진성능 산정방법 도출	33
3.1 삼축내진말뚝 내진성능 평가	33

3.2	내진성능 간이산정방법 제안	38
제4장	동적하중을 고려한 삼축내진말뚝 설계안 제시	39
1.	수치해석 기반 삼축내진말뚝 설계 정량화	39
1.1	말뚝-지반 경계물성 고려	39
2.	삼축내진말뚝 설계안 마련	41
2.1	삼축내진말뚝 내진 안정성 간이평가	41
2.2	삼축내진말뚝 내진 안정성 정밀평가	47
제4장	결론	52
참고문헌	56

표 목 차

표 1.1	건축물의 구조기준 등에 관한 규칙	2
표 1.2	개발된 내진말뚝 및 개발중인 내진말뚝 현황	5
표 3.1	삼축내진말뚝 모형 마이크로파일의 제원	17
표 3.2	Silica sand의 물성	19
표 3.3	Case 1: 최대입력지진가속도에 따른 말뚝 상부에서의 최대 가속도	22
표 3.4	Case 2: 최대입력지진가속도에 따른 말뚝 상부에서의 최대 가속도	25
표 3.5	지반과 ESB 토조의 입력 물성	29
표 3.6	파일캡, 연결부, 상부구조물의 입력 물성	29
표 3.7	말뚝 및 지반-말뚝 인터페이스의 입력 물성	30
표 3.8	내진성능 평가에 활용된 지진파와 최대가속도	33
표 3.9	지진하중의 최대가속도에 따른 최대수평변위 결과 (mm)	34
표 3.10	지진하중의 최대가속도에 따른 최대휨모멘트 결과 (kN·m)	35
표 3.11	최대가속도에 따른 기존마이크로파일 대비 삼축내진말뚝의 말뚝두부 최대수평변위 비율	36
표 3.12	최대가속도에 따른 기존마이크로파일 대비 삼축내진말뚝의 최대휨모멘트 비율	37
표 4.1	Interface friction angle considered in the previous study	39
표 4.2	말뚝 두부에 작용되는 적용하중 산정방법	42

그림 목차

그림 1.1	포항지진 발생위치	1
그림 1.2	포항지진 피해 사례	2
그림 1.3	지진시 말뚝피해와 포항지진에서의 필로티 피해	3
그림 1.4	건축물의 말뚝 일체 모델링(일본건축학회, 2017)	6
그림 1.5	말뚝 구조부재에 대한 하중 산정 모델도(일본건축학회,2017)	6
그림 1.6	일본의 지진시 내진보강 말뚝(예)(일본건축학회,2017)	7
그림 1.7	일본의 말뚝 내진보강 예	7
그림 1.8	마찰 말뚝 구성(mm, 모델 축척) 및 수직(v) 및 경사(i) 말뚝 그룹의 응답 비교: 15번째 하중 사이클에 대한 벤딩 모멘트	9
그림 1.9	파일 두부에서 벤딩 모멘트와 관성력의 관계 실험	9
그림 1.10	연구 추진 체계	12
그림 2.1	입력가속도에 따른 지반 및 구조물 응답 비교	13
그림 2.2	실험단면 및 센서배치	14
그림 2.3	격자 자동화 코드를 통한 삼축내진말뚝 모델링	15
그림 2.4	삼축내진말뚝 동적수치해석 입력 물성치	15
그림 2.5	삼축내진말뚝 적용/미적용 시 지반-말뚝-구조체 복합 거동	16
그림 3.1	(좌) 설치각도가 15°인 그룹 삼축내진말뚝 (Group 15) (우) 설치각도가 0°인 그룹 삼축내진말뚝 (Group 00)	18
그림 3.2	단자유도 상부 구조물	18
그림 3.3	상부 구조물을 부착한 삼축내진말뚝 (좌 15°, 우 0°)	19
그림 3.4	그룹 삼축내진말뚝 설치 및 낙사 모습	19
그림 3.5	Case 1, Case 2 실험단면 및 센서배치	20
그림 3.6	Case 1 실험단면 및 센서배치	20
그림 3.7	Case 2 실험단면 및 센서배치	21
그림 3.8	입력지진파의 정규화된 가속도-시간 이력	21
그림 3.9	최대입력지진가속도에 따른 말뚝 상부에서의 최대 가속도	22
그림 3.10	그룹 삼축내진말뚝 및 지반의 침하량	23
그림 3.11	최대 가속도가 발현된 시점에서의 모멘트 및 축력 (입력지진파: Capetown 0.084 g)	24

그림 3.12 지표에서 최대 가속도가 발현된 시점에서의 모멘트 및 축력 (입력지진파: Sine 2 Hz 0.222 g)	24
그림 3.13 최대입력지진가속도에 따른 말뚝 상부에서의 최대 가속도	25
그림 3.14 구조물을 부착한 그룹 삼축내진말뚝 및 지반의 침하량	26
그림 3.15 그룹 삼축내진말뚝 상부 구조물의 수평변위	27
그림 3.16 지표에서 최대 가속도가 발현된 시점에서의 모멘트 및 축력 (입력지진파: Capetown 0.230 g)	27
그림 3.17 지표에서 최대 가속도가 발현된 시점에서의 모멘트 및 축력 (입력지진파: Sine 2 Hz 0.211g)	28
그림 3.18 원심모형실험과 수치모델 해석 결과 비교	31
그림 3.19 경사각도별 최대 휨 모멘트 비교	31
그림 3.20 경사각도별 최대 축력 비교	32
그림 3.21 경사각도별 최대 침하 비교	32
그림 3.22 지진하중의 최대가속도에 따른 말뚝두부의 최대수평변위 결과	34
그림 3.23 지진하중의 최대가속도에 따른 말뚝의 최대휨모멘트 결과	35
그림 3.24 지진하중에 대한 삼축내진말뚝의 말뚝두부 최대수평변위 감소효과	36
그림 3.25 지진하중에 대한 삼축내진말뚝의 최대휨모멘트 감소효과	37
그림 4.1 Moment diagram under various shear and normal friction angle (more than 100 cases)	40
그림 4.2 Moment diagram when shear and normal friction angle was 20.6°, 28°	40
그림 4.3 Comparison between maximum moment from test and simulation results ($\phi_s = \phi_{\max} - 5^\circ$)	41
그림 4.4 soft clay의 정규화 비선형스프링 (API, 2011)	43
그림 4.5 sand의 극한지지력 산정을 위한 도표 (API, 2011)	43
그림 4.6 sand의 초기지반반력계수 (API, 2011)	44
그림 4.7 등가정적해석을 위한 말뚝 제원 결정	44
그림 4.8 등가정적해석을 위한 말뚝-지반 비선형스프링 선정	45
그림 4.9 등가정적해석을 위한 말뚝두부 하중	45
그림 4.10 등가정적해석 결과	46
그림 4.11 Modulus reduction curve and damping curve	47
그림 4.12 Procedure of baseline correction	48
그림 4.13 Behavior of pile element along with shear-direction	

(Itasca Consulting Group, 2023)	49
그림 4.14 Behavior of pile element along with normal-direction	
(Itasca Consulting Group, 2023)	49
그림 4.15 Super structure modeling	50

제1장

서론

1. 연구의 필요성

2017년 발생한 규모 5.4 포항지진으로 전체 공공시설 644개소 중 학교 건물 피해가 235개소로 가장 많았으며, 주택피해 28,811개소 중 375개소가 전파, 1,055개소가 반파 등 건축물 피해가 매우 심각하였다. 국내 내진율은 약 10%(약600만동)으로 전체 건축물중 90%가 지진에 취약한 상태이다.

최근 건축물의 기초가 구조부재에 포함되도록 건축구조기준이 개정되어 향후 말뚝기초 또한 건축물 기둥과 같이 구조부재로 간주하여 내진성능을 확보하도록 하여야 한다. '건축물의 구조기준 등 0 관한 규칙'에 따르면 향후 건축물의 기초도 기둥, 보 등과 같이 구조부재로 간주되며 지진 시 안정성을 확보하도록 설계하여야 한다. 이러한 내진성능 확보에 관한 규정은 이미 법적으로도 강제되어 있으나 현재 건축물 기초의 내진설계는 적확하게 수행되지 않고 있는 것이 현실이다. 건축물 기초구조 설계 기준(KDS 41 19 00)에는 말뚝기초에서도 내진해석을 수행하도록 하고 있으나 비용증가와 시공여부에 대한 육안확인 불가 등의 이유로 적극적 시행이 이루어지지 않고 있다.



그림 1.1 포항지진 발생위치



그림 1.2 포항지진 피해 사례

표 1.1 건축물의 구조기준 등에 관한 규칙

<p>건축물의 구조기준 등에 관한 규칙 (약칭: 건축물구조기준규칙)</p> <p>제1장 총칙 제2조(정의) 이 규칙에서 사용하는 용어의 정의는 다음과 같다. <개정 2009. 12. 31., 2018. 11. 9.></p> <p>1. “구조부재(構造部材)”란 건축물의 기초·벽·기둥·바닥판·지붕틀·토대(土臺)·사재(斜材 : 가새·버팀대·귀잡이 그 밖에 이와 유사한 것을 말한다)·가로재(보·도리 그 밖에 이와 유사한 것을 말한다) 등으로 건축물에 작용하는 제9조에 따른 설계하중에 대하여 그 건축물을 안전하게 지지하는 기능을 가지는 건축물의 구조내력상 주요한 부분을 말한다.</p>

해외 연구사례에 따르면 지진 시 말뚝기초의 전도, 기울어짐 등의 피해가 보고되고 있으나 국내에서는 말뚝기초 내진설계가 적확하게 수행되지 않는 관행으로 MMI 5이상의 지진 발생시 사회적 혼란이 야기될 수 있으며, 대피시설로 지정되어 있는 공공건물, 호텔 등 대부분 건물의 말뚝기초에 내진설계가 적용되어 있지 않아 큰 피해가 예상된다. 지진 시 말뚝의 파괴형상은 필로티 파괴모습과 거의 동일한 파괴유형을 가지며, 내진설계가 반영되지 않는 말뚝기초의 경우 육안으로 확인되지 않는 상태에서 파괴형상을 유추해볼 수 있다.

따라서, 지진시 발생할 수 있는 피해를 예방하기 위한 공법개발이 필요하다. 본 연구에서 지원하고자 하는 기업은 이를 해결하기 위해 삼축내진말뚝이라는 새로운 형상의 말뚝을 개발하였다. 하지만, 정적수치해석 및 수평하중재하실험만 수행하여 D114, t=9mm 강관을 기준으로 수직력 1,000kN, 수평력 100kN까지 설계에 적용할 수 있음을 확인하였다. 하지만 실제 지진하중하에서 개발한 말뚝이 어떠한 거동을 하며, 기존 말뚝에 비해 내진성능을 확보할 수 있는지에 대해서는 여전히 불분명한 상

태이다. 따라서, 지진하중 하에서의 삼축내진말뚝의 내진성능 발현 메커니즘을 학술적으로 검증하고 변수연구를 통해 동적하중을 고려한 삼축내진말뚝의 설계안을 제시할 수 있는 연구가 필요하다.

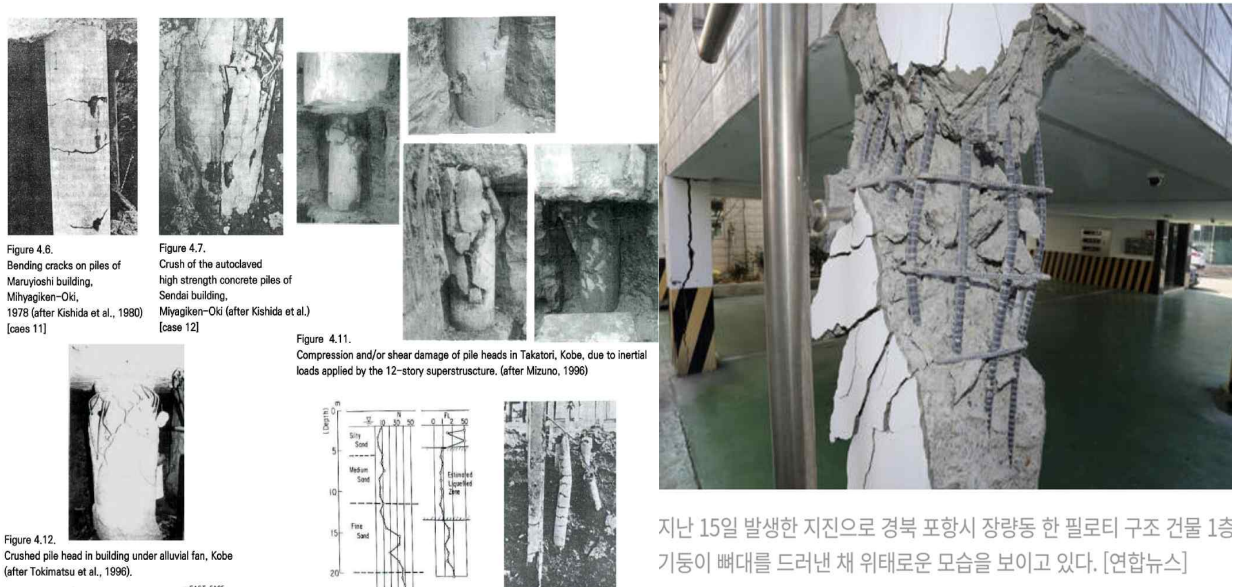


그림 1.3 지진시 말뚝피해와 포항지진에서의 필로티 피해

2. 국내외 동향

2.1 정책현황

국내에서는 기초의 내진설계가 법으로 의무화되어 있으나 건축물에서는 말뚝기초의 내진설계를 수행하고 있지 않다. 국내에서 최근 건축과 토목의 콘크리트 구조기준과 강구조 기준이 공통으로 통합되어 있음에도 불구하고, 토목 구조물에서는 말뚝의 기초 내진설계가 수행되는 반면, 건축에서는 비용증가를 이유로 육안확인이 불가한 지하구조에 내진설계를 하고 있지 않다.

이에 반해 일본에서는 일본 건축학회(2017)에서 내진말뚝에 대한 설계지침을 제시하여 설계가 용이하도록 하였으며, 이미 많은 상품이 반영되고 있다. 일본 건축학회에서는 건축물의 내진설계 시 말뚝의 내진설계가 되도록 제시하고 있다. 구조계산 방법도 구체적으로 다음과 같이 하도록 제시하여 교량과는 다르게 간단한 설계법을 제시하고 있다.

2.2 연구개발 현황

1950년대 처음 개발된 이후 마이크로파일에 대한 연구는 모형시험, 수치해석 그리고 현장시험 등 다양한 연구방법을 통해 몇몇 연구자 또는 관련기관(Lizzi, 1982; FHWA, 2005; Tsukada et

al., 2006)에 의해 수행되어 왔다. 기존 연구들을 보면 연구초기에는 단일 마이크로파일(Single micropile)에 대한 수직지지특성에 국한되어 연구가 진행되었다. 그러나 최근 연구된 기존 연구를 보면, 파일간격과 관계된 파일간의 간섭효과, 파일제원과 길이와 관계된 파일길이비(Pile length ratio, L/D)를 달리한 관련 연구가 활발히 진행되어왔고, 현재까지도 연구가 진행되고 있다.

삼축 마이크로파일은 수평하중에 저항하고자 설치각도를 달리하도록 설치가 가능하다. 그리고 파일구조상 파일체의 수평하중에 대한 저항성은 설치각도를 달리 적용한 소구경 채움 콘크리트 파일의 지지특성에 관계된다.

수평하중에 저항하도록 설치된 삼축 마이크로파일은 수평하중이 작용할 경우 파일의 설치조건에 따라 파일체 내에 하중이 달리 부담하는 구조이다. 즉, 수평하중에 저항하는 각축에 설치된 마이크로파일의 설치조건과 수평하중의 방향에 따라 설치된 파일체에 전이된 하중은 수직과 수평력이 전이되고 이를 각축의 마이크로파일체가 부담하게 된다. 따라서 마이크로파일의 거동 및 지지특성에 대한 문헌 조사가 요구되며, 이에 본 절에서는 최근 수행되었던 설치조건에 따른 마이크로파일의 지지특성에 관한 연구에 대해 살펴보고 본 연구방향을 제시하고자 한다.

마이크로파일의 활용이 증가함에 따라 다양한 방법을 통해 마이크로파일의 지지특성에 대한 연구가 진행되었고, 이 연구들을 통해 마이크로파일도 파일의 설치조건에 따라 큰 수평지지력의 증가 효과를 기대할 수 있음을 확인하였다. 최근 마이크로파일의 관련 연구들은 주로 효과적인 파일의 수평저항성 증가를 위한 연구와 파일의 내진성능향상을 위한 연구가 주로 진행되고 있다.

다양한 연구중 마이크로파일의 수평지지력에 관련된 연구는 주로 2000년 이후에 이루어지고 있으며 관련 연구는 다음과 같다. Petrasovits and Award(1968)은 일반 짧은 파일에 대하여 설치각도별 지지력을 평가한 결과 파일설치각도 -30° 인 경우(인장파일)의 파일의 수평지지력이 가장 크게 발휘되는 것으로 제시하였다.

FHWA(2005)는 수평하중에 저항하는 마이크로파일의 휨 모멘트와 수평변위 분포를 연구하였다. Oh(2015) 등은 모형시험과 수치해석(2D)를 통해 단일 마이크로파일에 대한 각도별 수평지지력을 평가하여 최적의 파일조건(길이 및 각도)을 제시하였다.

Abdollahi and Mortezaei(2015)은 원형 무리 마이크로파일로 설치된 파일의 지진하중에 대한 저항성 평가하기 위해 3차원 수치해석을 수행하여 지진하중에 대한 거동을 분석하고 지반상태에 따른 원형 무리 마이크로파일의 최적설치 각도를 제안하였으며, Hussain(2019)은 사각배치의 형태의 마이크로파일에 대하여 모형시험을 수행하여 상대밀도, 파일길이비, 간격에 따른 마이크로파일의 수평저항성을 평가하였다.

Hwang(2020)등은 수평하중을 받는 복열 마이크로파일에 대하여 모형시험과 수치해석(2D)를 통해 최적의 수평지지력을 나타내는 마이크로파일의 설치조건을 제안한 바 있다.

국내에서는 20여년 전부터 말뚝의 내진설계에 관한 연구가 수행되어 왔으나 토목분야에서 상부하중이 작은 교량에 적합한 복합형 말뚝과 합성형 말뚝이 일부 개발되어 적용되고 있을 뿐, 건축분야에

서는 적용되지 않는 실정이다. 최근, 건축분야 내진설계 기준 강화로 일부 건물에서 내진말뚝 설계와 시공이 수행되기 시작하였으며, 대표적인 예로 인하대학교 송도 연구동(강관말뚝), 안양 오피스텔(삼축), 용인오피스텔(래티스내진말뚝)이 있다. 본 연구에서 지원하는 에스와이텍에서는 다양한 형태로 적용가능한 내진말뚝 공법을 개발하고 있으며, 국내에서는 가장 많은 내진말뚝 기술을 보유하고 있다.

표 1.2 개발된 내진말뚝 및 개발중인 내진말뚝 현황

<p style="text-align: center;">삼축 내진 말뚝 특허 (제 10-2014125호)</p> 	<p style="text-align: center;">기존 건물 증축용 다축말뚝 특허 (제 10-2294532호)</p> 	<p style="text-align: center;">래티스 말뚝 특허 (제10-2288036호)</p> 
<p style="text-align: center;">고성능 PHC보강 내진말뚝</p>	<p style="text-align: center;">래티스 보강 말뚝</p>	<p style="text-align: center;">하이브리드 내진말뚝</p>
		

2.3 시장·산업동향

국내 말뚝 시장에서 PHC말뚝이 소요되는 금액은 1조원/년이며 내진말뚝을 설계에 적용하는 경우 2.5~5배 정도 증가할 것으로 판단된다. 따라서 전체 시장규모는 약 5조원으로 예상되며 이중 삼축복합 말뚝 비중을 5%정도로 추정하면 2500억/년까지 성장할 것으로 판단된다. 국내 말뚝 전체 시장을 현재 PHC 말뚝 1조/년, 기타 0.5조/년 소비하고 있으며, 내진말뚝으로 적용되는 경우 2~5배 정도의 기초 보강공사비가 증가될 것으로 판단되며, 연간 말뚝 시장은 3~5조의 시장으로 예상된다. 건축분야에서는 현재 내진말뚝이 전혀 적용되고 있지 않기 때문에 이 시장을 신규시장으로 간주한다면, 향후 3년 내 삼축내진말뚝 적용규모를 최소 2500억원/년까지 확장할 수 있을 것으로 판단할 수 있다.

일본에서는 대부분 건축물에 내진말뚝 시공이 우선 이루어진 후 설계지침이 제정된 반면, 국내에서는 이미 법령이 제정·발효되어 있음에도 실제 시공이 이루어지지 않고 있다.

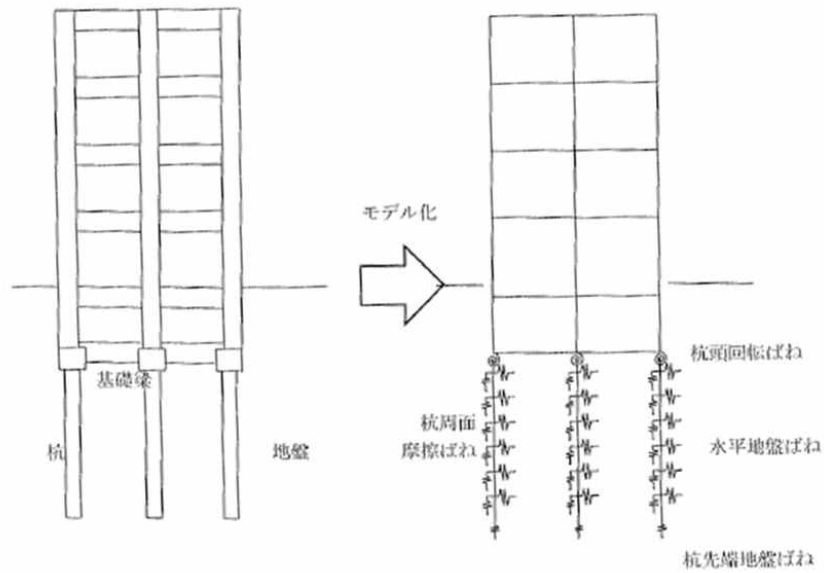


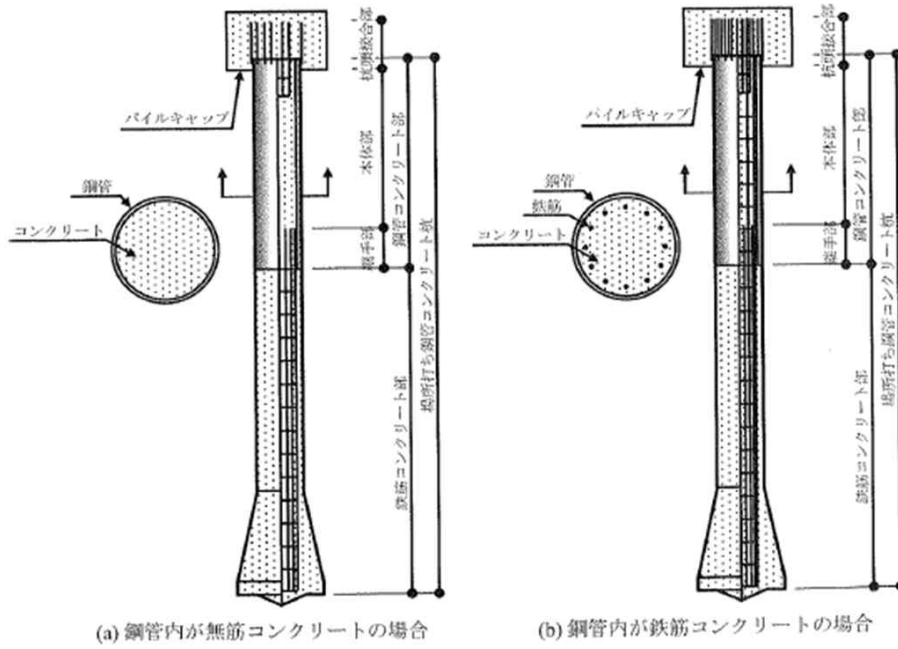
그림 1.4 건축물의 말뚝 일체 모델링(일본건축학회, 2017)

모델명 상	일체형 (건물까지 모델)	분리형1 (건물이 큰 하중만 모델)	분리형2 (1개 모델)	분리형3 (단일지층)
	복수 말뚝, 바닥슬라브 강성고려, 다층지반	복수 말뚝, 바닥슬라브 강성고려, 다층지반	단 말뚝, 두부고정, 다층지반	단 말뚝, 두부고정, 단일지반 (Chang공식 등)
모델개요도		• 말뚝 별도 모델 		
상단구조모델 및 기초구조				

그림 1.5 말뚝 구조부재에 대한 하중 산정 모델도(일본건축학회, 2017)

일본에서는 강관에 철근을 넣는 방식과 PHC말뚝에 강관을 외부에 함께하는 공법이 적용되고 있으며, 이미 시장에서 판매하고 있다. 그림 1.6는 일본에서 내진말뚝으로 적용되고 있는 말뚝의 그림을 나타낸다. 그림 1.7는 PHC말뚝 외부에 강관을 넣는 방법과 내부에 철근을 넣는 방식으로 직경 1m이상 되는 말뚝에도 적용이 가능하나 시공장비가 커지는 문제를 가지고 있다. 일본에서는 대부분 건축물에 내진말뚝 시공이 우선 이루어진 후 설계지침이 제정

된 반면, 국내에서는 이미 법령이 제정·발효되어 있음에도 실제 시공이 이루어지지 않고 있다.



解説図 5.4.18 場所打ち鋼管コンクリート杭の構造

그림 1.6 일본의 지진시 내진보강 말뚝(예)(일본건축학회,2017)

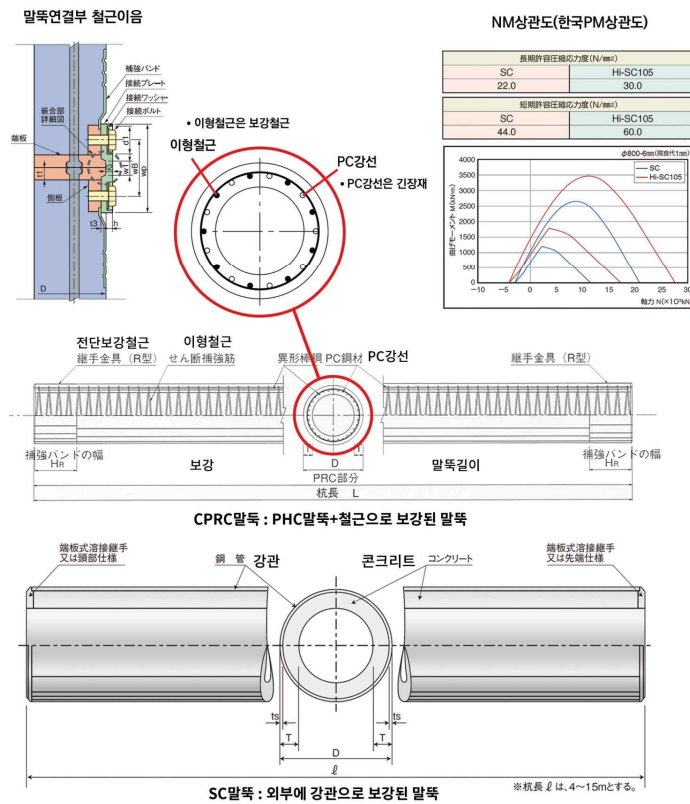


그림 1.7 일본의 말뚝 내진보강 예

2.4 동적원심모형실험 문헌조사

원심모형실험은 축소모형을 고속으로 회전시켜 발생하는 원심가속도를 모형지반에 가하여 원형지반의 응력 상태를 구현하는 실험 방법이다. 원심모형실험은 구속압에 의존하는 지반 거동을 신뢰성 있게 모사할 수 있으며, 지반과 구조물을 축소 모형으로 제작하여 모사하기 때문에 경제적이다. 특히 동적 원심모형실험은 지반과 구조물의 동적 거동 메커니즘을 효과적으로 평가할 수 있다. 또한, 실험실에서 구현하기 어려운 지진 시 지반의 파괴 및 대변형 특성까지도 모사할 수 있다.

본 연구에서는 KAIST에 있는 KOCED(Korea Construction Engineering and Transport Development Collaboratory Management Institute) 지오센트리퓨지 실험센터의 원심모형실험기를 사용하였다. 장비의 회전반경은 5 m이고 최대 용량은 240 g-ton으로 최대 1300 kg의 적재하중(Payload)에 대해 130 g-level의 원심가속도를 재현할 수 있다. 여기에 전기제어-유압방식(electro hydraulic servo type)의 2차원 진동대를 이용하여 지진 하중을 축소모형에 가할 수 있다. 진동대는 정현파 및 실지진파를 모사할 수 있으며, 최대 적재하중 700 kg에 대하여 최대 20 g-level의 가속도를 재현할 수 있다. 이때 축소모형에 최대지반가속도 0.5 g 수준의 지진 하중을 가할 수 있다.

2.5 말뚝관련 문헌조사

(1) 마이크로파일 및 그룹 마이크로파일 원심모형실험

동적 원심모형실험을 통한 마이크로파일 및 그룹 마이크로파일의 동적 거동은 국내외에서 활발하게 연구되었다. 마이크로파일의 동적 거동은 입력지진파의 주파수 성분에 따라 크게 달라지는데, 일반적으로 저주파 성분이 많은 입력지진파는 더 큰 변위를 유발할 수 있는 것으로 알려져 있다. 고주파 성분은 마이크로파일 위 질량체와 공진을 이룰 수 있기 때문에 이를 유의해야하며 지반과 입력지진파의 주파수가 공진을 이룰 경우 마이크로파일에 큰 휨 모멘트를 가하기도 한다(Hussein et al., 2016). 이 외에도 동적 원심모형실험을 활용한 마이크로파일의 동적거동 연구로는 Yoo 등이 동적 원심모형 실험을 통해 마이크로 파일의 p-y 곡선을 산정하고 이를 기존 p-y 곡선들과 비교하여 적용성을 검증한 바 있으며(Yoo et al., 2013), 웨도지지말뚝의 동적 거동을 평가하고 웨도지지말뚝의 일반 단면에 대해 연약지반 대비 성토체 높이 비율 기준을 제시하였다(Yoo et al. 2019).

(2) 경사말뚝의 내진성능

본 연구에서 제안된 삼축 내진말뚝말뚝에 대한 성능을 원심모형실험을 통해 검증한 연구는 아직 없으나 형태가 유사한 경사말뚝의 내진성능은 원심모형실험, 1 g 진동대 실험, 수치해석등을 통해 다방면에서 평가되었다. Escoffier et al.(2008)은 그림 1.8과 같이 원심모형실험에서 수평하중 재하를 통해 준정적하중에서 수직말뚝군과 경사말뚝군의 응답을 비교했고 경사말뚝군이 더 큰 횡방향 저항과

3. 사업목표

3.1 사업목표 및 내용

본 연구에서는 국내의 경주/포항 지진에 따른 대규모 지진피해 현실화 가능성이 증대됨에 따라, 건축물 기초의 내진보강에 대한 인식이 증가할 것으로 판단하였기에, 국내 건축물 기초에 대하여 삼축 내진말뚝 설치에 따른 건축물 보강 및 내진보강시장 수요를 선점하고자 사업을 진행하고자 하였다. 이를 위하여, 1) 동적 원심모형실험을 통한 삼축내진말뚝 메커니즘 검증, 2) 수치해석을 통한 삼축 내진말뚝 내진성능 검증, 3) 실험 및 해석기반 내진성능 산정방법 도출, 4) 동적하중을 고려한 삼축 내진말뚝 설계안 마련을 통하여 본 연구를 통해 개발된 기술의 사업화를 추진하고자 하였다. 자세한 사업 목표 및 내용은 다음과 같다.

- (1) 동적 원심모형실험을 통한 삼축내진말뚝 메커니즘 검증
 - 말뚝기초를 대상으로 한 동적원심모형실험 국내외 문헌 분석을 통해 원심모형실험을 수행하기 위한 사전자료 수집 및 말뚝의 내진성능평가 관련 항목 도출
 - 원심모형실험(Centrifuge model test)를 통해 삼축내진말뚝의 지진하중에 대한 응답특성평가
 - 원심모형실험결과를 바탕으로 지진하중에 대한 삼축내진말뚝의 내진성능 향상 메커니즘을 검증함으로써 추가적 개선사항 도출
 - 문헌분석 및 모형실험 결과를 바탕으로 향상된 삼축내진말뚝 공법 도출 및 특허출원
- (2) 수치해석을 통한 삼축내진말뚝 내진성능 검증
 - 모형실험결과를 바탕으로 내진성능을 평가하기 위해 가장 적절한 삼축내진말뚝 및 지반을 모델링 하고 입력 물성치 산정
 - 모형실험을 모사한 수치해석모델링을 바탕으로 수치해석 재현성 검토
 - 삼축내진말뚝 단일체를 대상으로 지진하중에 대한 내진성능을 상세히 검토함으로써 모형실험으로 확인하기 어려운 주변지반과의 상호작용 등 상세검토
 - 삼축내진말뚝의 구성각도, 길이, 지진하중의 작용방향, 지반강도 등 변수연구를 통해 삼축내진말뚝의 설계정량화 기초자료 도출
- (3) 실험 및 해석기반 내진성능 산정방법 도출
 - 실험 및 수치해석 변수연구를 통한 설계변수 보완
 - 삼축내진말뚝 내진성능 산정방법 도출
- (4) 동적하중을 고려한 삼축내진말뚝 설계안 제시
 - 해석 및 실험기반 삼축내진말뚝 설계 정량화
 - 삼축내진말뚝 설계안 마련

3.2. 추진 전략

지반안전연구본부 기초 및 내진분야 전문가 연구진으로 참여하고 있으며, 지반연구본부에서 수행중인 지진 및 지반진동, 기초분야 전문가로 구성된 연구에 참여하여, 기초 및 내진 보강용 파일/말뚝 공법 개발 연구를 수행하였다. 또한, 연구책임자는 수직증축 리모델링 시 기초 보강 등 기초분야 뿐만 아니라 액상화 및 내진 관련 과제에 다수 참여한 전문가이다.

이와 더불어, 국내 전문가와 활용을 통해 내진말뚝 원천기술 수준을 극대화 하기 위하여, 내진 관련 전문가 집단 자문을 통한 연구개발 고도화 및 신뢰성을 확보하고자 하였다. 또한, 원심모형실험 전문가 활용을 통한 삼축내진 말뚝의 발현 메커니즘 검토를 수행하고자 한다.

3.3. 추진 체계

본 사업은 중소·중견기업 수요기반 기술사업화 지원사업이라는 과제 특성상 연구원(KICT 지반연구본부), 지원기업((주)에스아이텍) 그리고 내진관련 전문가 그룹으로 사업 추진체계를 갖추고 있다. 삼축내진말뚝 연구과제의 추진전략 및 방법을 정리하면 다음과 같다.

- (1) (2단계 연구추진 전략 수립) 1차년도 내진삼축 말뚝 메커니즘 분석 + 2차년도 변수연구를 통한 삼축내진말뚝 설계안 마련
 - (1단계) 내진삼축말뚝 메커니즘 분석 및 성능 검증
 - 내진기초 관련 국내외 문헌조사 및 문제점 분석
 - 동적원심모형실험을 통한 내진삼축 메커니즘 분석
 - 수치해석을 통한 내진삼축말뚝 메커니즘 성능 검증
 - 내진성능이 향상된 삼축내진말뚝 공법 개선안 도출
 - 동적원심모형실험을 통한 향상된 삼축내진말뚝의 내진성능 검증
 - (2단계) 동적하중을 고려한 내진삼축말뚝 설계안
 - 동적원심모형실험 및 수치해석 변수 보완을 통한 삼축내진말뚝 성능 검증 및 산정방법 도출
 - 설계 및 시공 정량화를 위한 내진삼축말뚝 설계안 마련
- (2) 개발 기술 상용화 가능성과 성과 확산을 위한 단계별 기술 개발 연구전략 수립
 - 동적원심모형실험 및 수치해석 및 삼축내진말뚝 설계안 마련을 통한 내진삼축말뚝의 성능 검증
 - 내진삼축말뚝의 설계 및 시공 정량화를 통한 기술 실용화 기반 마련
 - 설계에 적용가능한 삼축내진말뚝 설계안 마련을 통한 내진성능 확보된 구조물 성능 향상
- (3) 사업화 추진 전략.
 - 포항 경주 지진으로부터 국내 시장의 내진말뚝 법적 적용으로 지진 시 발생하는 사회적 혼란

을 방지하여 사회적 안정을 도모

- 노후 공동주택의 리모델링 시장, 도심지 근접시공을 통한 기초 보강, 학교 시설물 및 공공기관 등 건축물의 내진보강 시장 등 다양한 분야의 내진기초보강 시장에 개발 공법을 적용할 수 있을 것으로 기대
- 연구원 및 지원 기업과 기술을 개발하고, 내진보강 공법을 다양한 내진보강말뚝 시장에 적용할 수 있도록 네트워크 구축
- 설계 적용을 위한 내진성능 정량화를 위한 연구수행을 통한 삼축내진말뚝 설계 정량화 및 설계안 적용.의 성능 검증

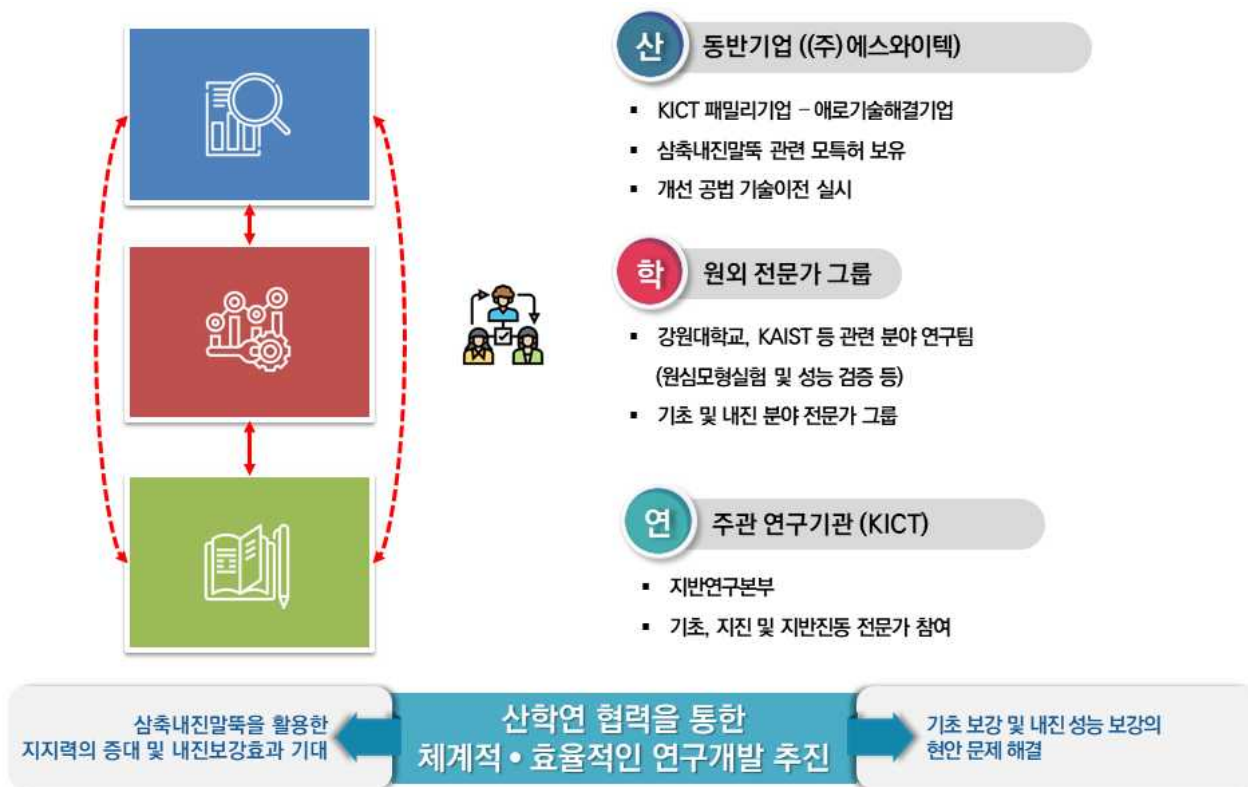


그림 1.10. 연구 추진 체계

제2장

1차년도 주요 연구 성과

1. 동적 원심모형실험을 통한 삼축내진말뚝 메커니즘 검증

1.1 경사말뚝

경사말뚝이 적용된 구조물의 응답을 분석하기 위해 경사말뚝이 설치되지 않은 경사지반 모델인 IA62 모델 및 경사말뚝이 설치된 경사지반 모델인 IAI58모델의 응답을 비교하였다.

경사말뚝을 적용한 경우 상부 구조물의 가속도, 변위가 모두 감소하였으며, 말뚝 모멘트 또한 크게 감소하였다. 이는 경사말뚝이 구조물의 거동을 억제하여 말뚝에 발생할 수 있는 휨 응력을 감소시키는 것으로 판단되며, 추가적으로 상부 플레이트의 가속도 및 변위 또한 감소시키는 것으로 판단된다. 결과적으로, 경사말뚝의 원심모형 실험 결과를 통하여, 삼축내진말뚝의 적용 가능성을 확인하였다.

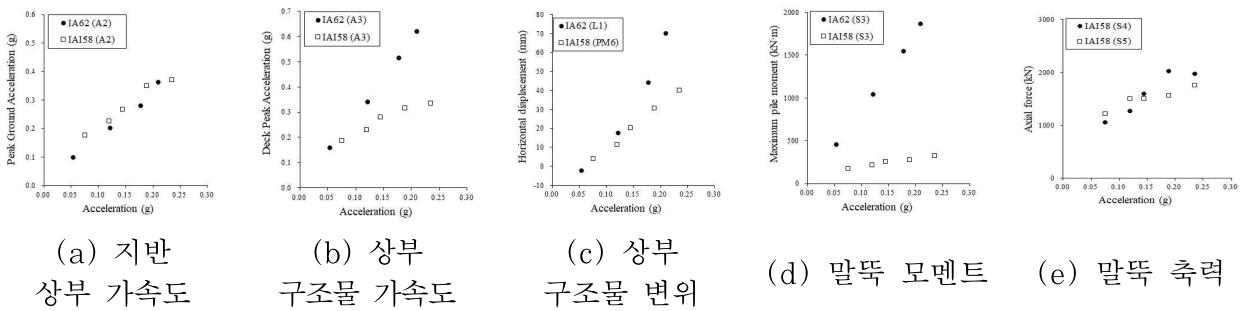


그림 2.1 입력가속도에 따른 지반 및 구조물 응답 비교

1.2 삼축내진말뚝

삼축내진말뚝의 동적거동 평가를 위해 설치각도에 따라 마이크로파일의 설치각도를 0°, 15°, 30° 세 가지로 설정하였다. 실험 지반은 silica sand를 사용하여 낙사를 통해 상대밀도 80%로 조성하였다. 실험 토조는 동적 원심모형실험에서 토조와 지반 사이 발생하는 경계효과를 최소화 하는 것으로 알려진 등가전단보 토조를 사용하였다(Lee et al., 2013).

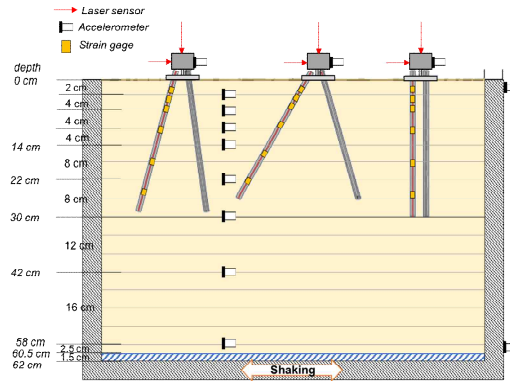


그림 2.2 실험단면 및 센서배치

삼축내진말뚝 및 지반의 응답을 측정하기 위해 스트레인 게이지, 가속도계, 레이저 센서, 벤더 엘리먼트 등을 설치하였다. 실험에 사용된 지진파는 sweep, re-sweep, Capetown, San Fernando, ramped sine 2 Hz로 각 지진파는 stage test를 통해 지진파의 세기를 증가시켜가며 가진되었다. sweep 및 re-sweep 모션은 지반의 고유주기 산정을 위해 사용하였으며 최대입력지진가속도 0.05 g 이하의 낮은 세기로 가진하였다. Capetown, San Fernando, ramped sine 2 Hz의 최대입력지진가속도는 각각 0.2 g, 0.18 g, 0.22 g이다.

Capetown 0.2 g의 경우 설치각도에 따른 가속도 응답 차이가 두드러지지 않았다. 그러나 San Fernando와 ramped sine 2 Hz의 경우 연직말뚝(0°)에서 가장 큰 가속도 응답을 보였으며 경사말뚝(15°, 30°)간의 가속도 응답 차이는 크지 않았다.

삼축내진말뚝의 수직 및 수평 변위는 말뚝 상부 질량체의 움직임을 레이저 센서로 측정하여 획득하였다. 수평변위의 경우 설치각도가 클수록 수평변위가 작게 발견되었다. 가속도 증폭특성과 마찬가지로 연직말뚝(0°)에서 가장 큰 수평변위를 보였으며 경사말뚝(15°, 30°)간의 수평변위 차이는 크지 않았다. 수직변위 (침하량)의 경우 15°의 삼축내진말뚝에서 가장 작게 나타났다.

변형률 또한 설치각도가 클수록 작게 발견되었으며 연직말뚝이 경사말뚝보다 변형률이 훨씬 크게 발견되었다. 이는 연직말뚝의 말뚝 상부와 하부의 수평변위 차이가 경사말뚝보다 크기 때문일 것으로 추정된다.

전반적으로 설치각도가 증가할수록 삼축내진말뚝의 내진성능이 우수하게 발견되었다. 연직말뚝과 경사말뚝의 동적 응답 차이는 크게 나타났으나 경사말뚝(15°, 30°)간의 동적 응답 차이는 크지 않았다. 따라서 시공성 등을 함께 고려하였을 때 설치각도가 15°인 삼축내진말뚝의 활용도가 가장 높을 것으로 기대된다.

2. 수치해석을 통한 삼축내진말뚝 내진성능 검증

2.1 삼축내진말뚝 모델링 및 입력 물성값 산정

기존 지반내진연구에서 검증된 유한차분 상용프로그램(FLAC 3D)를 이용하여 단일말뚝 및 군말뚝을 모델링하였다. 삼축 내진말뚝은 말뚝(Pile)요소를 이용하여 모델링 되었다. 말뚝요소는 축력과 모멘트에 저항이 가능한 구조요소로, 인접지반의 절점과 상호작용이 가능한 요소이다. 삼축내진말뚝을 구성하는 3개의 말뚝요소는 최상단에서 절점을 공유하며, 프로토타입의 거동을 묘사하기 위하여 상부 0.3m 위치에 스티프너 역할을 할 수 있도록 쉘요소를 이용하여 강결하였다. 이를 통하여 실제 커플러(Coupler)의 거동을 묘사할 수 있도록 수치모델이 구성되었다. 지반-구조체 복합거동(Soil-Structure Interaction)확인을 위해 4층 높이 건물 고려하고, 변수연구를 위한 격자 자동화 코드를 작성하였다.

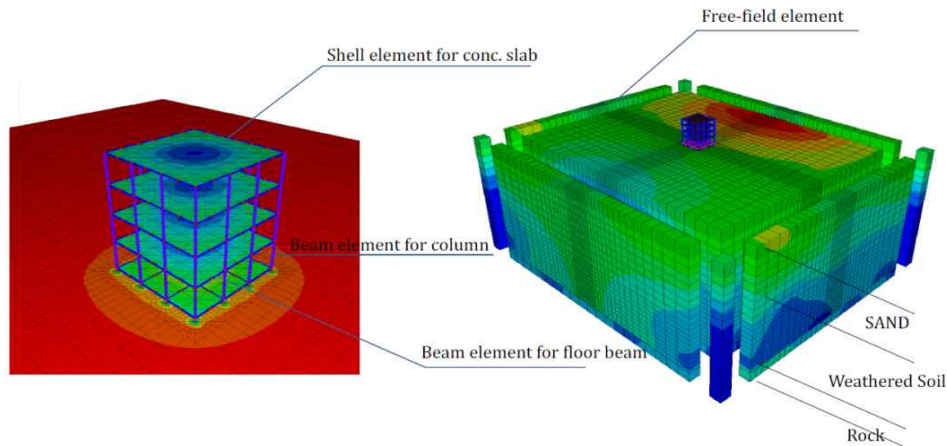


그림 2.3 격자 자동화 코드를 통한 삼축내진말뚝 모델링

관련 문헌 조사 및 현장조사 데이터를 이용하여 입력 물성치를 산정하고 삼축내진말뚝의 복합재료 특성을 고려한 축강성 및 휨강성을 산정하였다.

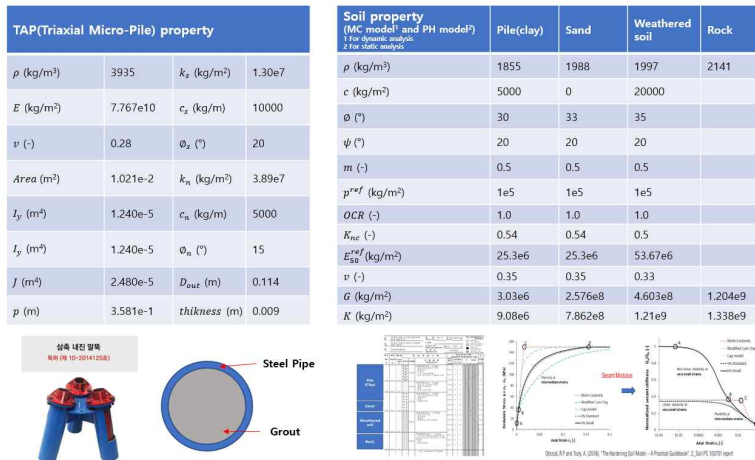


그림 2.4 삼축내진말뚝 동적수치해석 입력 물성치

2.2 수치해석을 통한 내진성능 검증

삼축내진말뚝 적용에 따른 구조물 동적 거동(지표 증폭, 구조체 응답 확인)을 분석하였다. 분석 결과를 바탕으로 일반 마이크로파일 내진성능과 삼축내진말뚝의 내진성능을 비교 분석하였다.

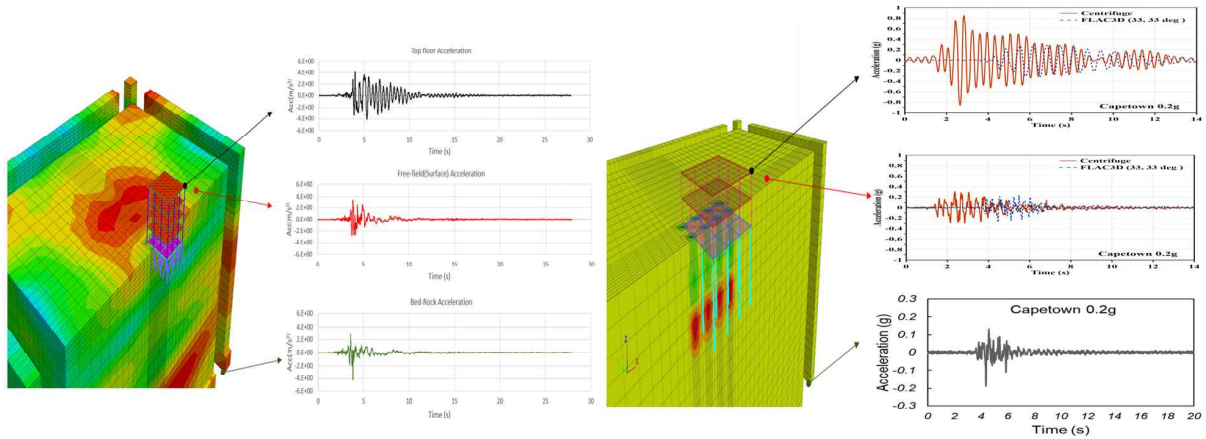


그림 2.5 삼축내진말뚝 적용/미적용 시 지반-말뚝-구조체 복합 거동

삼축내진말뚝 적용여부에 따른 지지력을 분석하기 위해 수평 재하시험, 수직 재하시험, 인발시험을 일반 마이크로파일과 삼축내진말뚝(설치각도 20도 기준)을 대상으로 모사하였다. 그 결과, 일반 마이크로파일의 지지력은 수평 재하시험 시 19.4kN, 수직 재하시험 시 192kN, 인발시험 시 194kN 인 반면, 삼축내진말뚝의 지지력은 69.9kN, 273kN, 243kN을 보였다. 지지력 증가율은 수평 재하시험, 수직 재하시험, 인발 시험에 대해 각각 360%, 140%, 125%을 보여, 수평력에 대한 저항이 더욱 큰 것을 확인하였다.

삼축내진말뚝의 설치각도에 따라 지지력 변화를 확인하기 위해 10도, 20도를 고려하여 해석을 수행하였다. 그 결과, 설치각도 10도의 경우 수평 재하시험 시 37.9kN, 수직 재하시험 시 259kN, 인발시험 시 247kN인 반면, 20도의 경우 69.9kN, 273kN, 243kN을 보였다. 설치각도가 10도에서 20도로 변화하면서 지지력 증가율은 수평 재하시험, 수직 재하시험, 인발 시험에 대해 각각 184%, 105%, 98%을 보였다. 삼축내진말뚝 적용여부 결과와 유사하게 설치각도가 증가함에 따라 수직력 및 인발력에 대한 저항보다 수평력에 대한 저항이 더 큰 것을 알수 있다.

말뚝길이 변화를 확인하기 위해 3m, 4.5m, 6.0m를 고려하여 비교하였다. 말뚝길이 변화(3m, 4.5m, 6.0m)에 따라 수평 재하시험 시 37.9kN, 52.7kN, 69.9kN, 수직 재하시험 시 133kN, 199kN, 273kN, 인발시험 시 104kN, 171kN, 243kN을 보였다. 모든 실험 결과에서 말뚝길이가 증가하면서 선형적인 지지력 증가가 확인되었다. 말뚝길이 3m를 기준으로 4.5m, 6.0m일 때 지지력 증가율은 수평 재하시험 시 139%, 184%, 수직 재하시험 시 151%, 207%, 인발시험 시 164%, 234%로 나타났다. 앞 선 2개 변수와 달리, 말뚝길이가 증가할수록 수직력에 대한 저항이 수평력에 대한 저항보다 더 큰 것으로 확인되었다. 설치각도 변화는 수평 지지력에, 말뚝길이 변화는 수직 지지력에 지배적인 인자로 확인된다.

제3장

실험 및 해석기반 내진성능 산정방법 도출

1. 동적원심모형실험 기반 삼축내진말뚝 변수연구

1.1 삼축내진말뚝 모형 제작

삼축내진말뚝 모형은 동일한 길이의 마이크로파일을 파일 두부에서 결합시켜 제작하였다. 실제 삼축내진말뚝은 철로 이루어져 있으나 높은 g-level에서 동일한 재료로 길이를 축소하여 모형을 제작할 경우 파일의 직경이 매우 작아져 센서 부착에 어려움이 따를 수 있다. 따라서 마이크로파일을 철보다 강성이 낮은 알루미늄으로 제작하고 다음 식을 통해 원형과 모형 삼축내진말뚝의 휨강성을 동일하게 하여 삼축내진말뚝 모형의 직경을 결정하였다.

$$E_p I_p = E_m I_m \times N^4$$

이 때, N은 원심모형실험에서의 g-level로 본 연구에서는 20 g-level에서 실험을 수행하였다. g-level과 휨강성을 고려한 삼축내진말뚝 마이크로파일의 원형 및 모델 제원은 표 3.1에 기재된 바와 같다.

표 3.1 삼축내진말뚝 모형 마이크로파일의 제원

	Model scale	Prototype scale scale
Glevel	1g	20g
외직경	12 mm	240 mm
내직경	10 mm	200 mm
길이	0.3 m	6 m

설치각도에 따른 동적거동을 평가하기 위해 마이크로파일의 설치각도를 0°와 15°로 달리하여 삼축내진말뚝을 제작하였다. 설치각도가 15°인 삼축내진말뚝 네 개를 그림 1의 좌측과 같이 말뚝 상부의 중심 간의 간격이 200 mm가 되도록 배치하여 그룹 삼축내진말뚝 모델을 제작하였다(Group 15). 설치각도가 0°인 그룹 삼축내진말뚝(Group 00)은 Group 15에서 사용된 마이크로파일 개수와 동일

한 12개의 마이크로파일을 가로 세로 길이가 200 mm인 격자 프레임에 그림 3.1의 우측과 같이 배치하여 제작하였다.

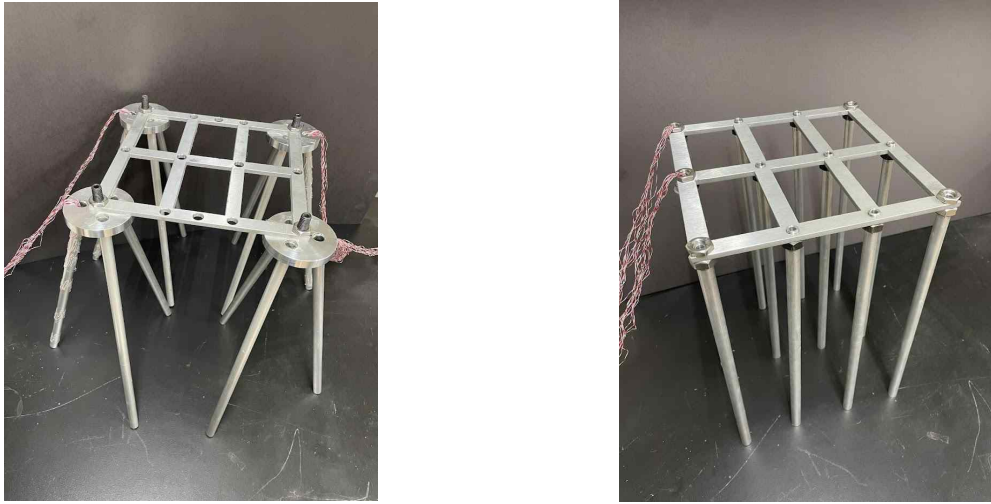


그림 3.1 (좌) 설치각도가 15°인 그룹 삼축내진말뚝 (Group 15) (우) 설치각도가 0°인 그룹 삼축내진말뚝 (Group 00)

말뚝 상부 구조물이 부재한 상황에서 동적 원심모형실험을 수행하면 말뚝이 지반과 동일한 거동을 보이며 뚜렷한 동적거동 차이를 보이지 않을 가능성이 크다. 따라서 일정 수준의 관성력 및 공진을 유발하기 위한 단자유도 시스템 상부 구조물을 제작하여 말뚝 상부에 부착하였다. 단자유도 상부 구조물은 철로 제작하였으며 제원은 그림 3.2에 도시하였다. 단자유도 구조물의 무게는 2.08 kg이고 20 g-level에서 공진 주기는 0.32 초가 되도록 제작하였다. 상부 구조물과 그룹 삼축내진말뚝은 그림 3.3과 같이 볼트 체결로 부착하였다.

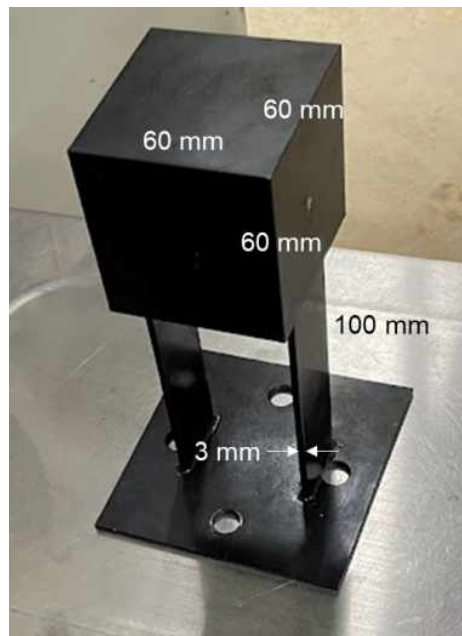


그림 3.2 단자유도 상부 구조물

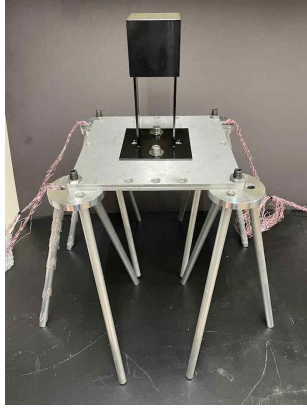


그림 3.3 상부 구조물을 부착한 삼축내진말뚝 (좌 15°, 우 0°)

1.2 지반조성 및 실험 단면

지반조성에 사용된 시료는 silica sand이며 물성을 표 3.2에 정리하였다. 80%의 상대밀도를 획득하기 위해 낙사를 통해 지반을 조성하였다. 조성에 사용한 토조는 동적 원심모형실험에서 토조와 지반 사이 발생하는 경계효과를 최소화 하는 것으로 알려진 등가전단보 토조를 사용하였다(Lee et al., 2013). 토조의 크기는 840 mm (L) × 630 mm (W) × 620 mm (D)이다. 삼축내진말뚝의 설치 깊이에 도달한 뒤 말뚝의 설치 위치를 고정하기 위해 가는 지지대에 그룹 말뚝을 일렬로 고정하여 낙사를 수행하였다(그림 3.4).

표 3.2 Silica sand의 물성

Property	Silica sand
USPS	SP (Poorly graded silica sand)
d50 (mm)	0.235
emax	1.06
emin	0.64
density (kg/m ³)	1490.753



그림 3.4 그룹 삼축내진말뚝 설치 및 낙사 모습

삼축내진말뚝 및 지반의 응답을 측정하기 위해 스트레인 게이지, 가속도계, 레이저 센서, 벤더 엘리먼트 등을 설치하였다. 그림 3.5에서와 같이 스트레인 게이지가 부착된 마이크로파일을 S1부터 S5로 표시하였다. Group 15에서는 가진 방향과 나란하게 S1, S2, S3에 스트레인 게이지를 부착하였으며 Group 00에는 지진 응답이 가장 클 것으로 예상되는 S4와 S5 위치에 스트레인 게이지를 부착하였다. 지반에 깊이별로 가속도계를 설치하였으며, 세 삼축내진말뚝 상부 및 단자유도 구조물에도 가속도계를 부착하였다. 또한 레이저 센서를 사용하여 삼축내진말뚝 상부에서의 수평 및 수직변위를 측정하였고 LVDT로 지반 침하량을 측정하였다. 상부 단자유도 구조물이 없는 Case 1과 상부 단자유도 구조물이 설치된 Case 2의 깊이별 가속도와 레이저 센서 배치를 그림 3.6과 그림 3.7에 각각 도시하였다.

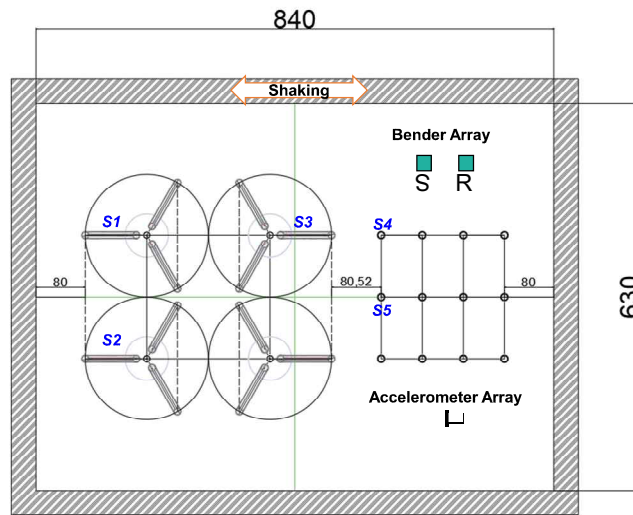


그림 3.5 Case 1, Case 2 실험단면 및 센서배치

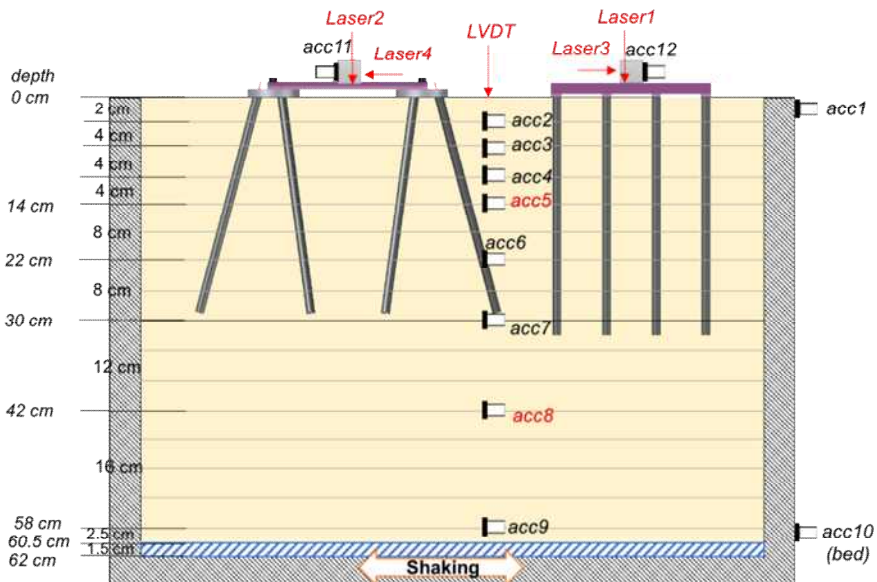


그림 3.6 Case 1 실험단면 및 센서배치

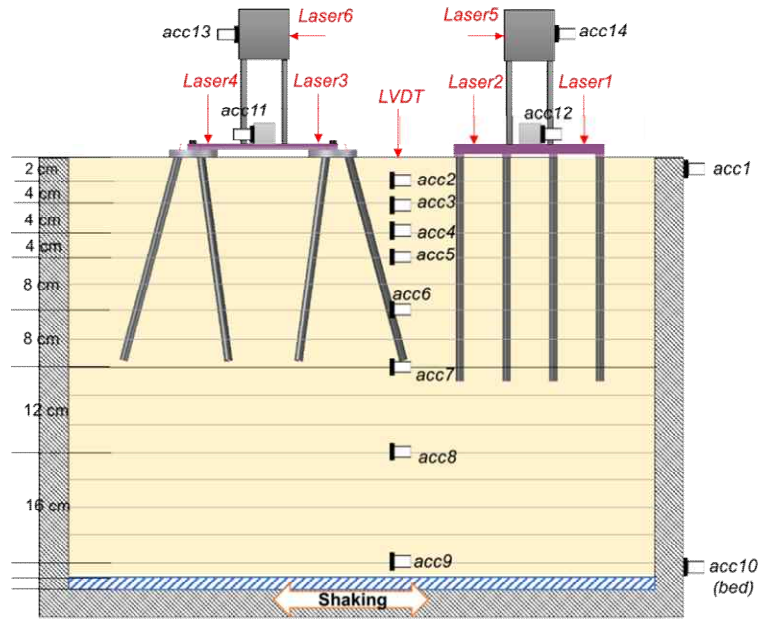


그림 3.7 Case 2 실험단면 및 센서배치

실험에 사용된 지진파는 sweep, re-sweep, Capetown, San Fernando, ramped Sine 2 Hz 로 각 지진파는 stage test를 통해 지진파의 세기를 증가시켜가며 가진되었다. sweep 및 re-sweep 모션은 지반의 고유주기 산정을 위해 사용하였으며 최대입력지진가속도 0.05 g 이하의 낮은 세기로 가진하였다. 입력지진파의 정규화된 가속도-시간이력을 그림 3.8에 나타내었다.

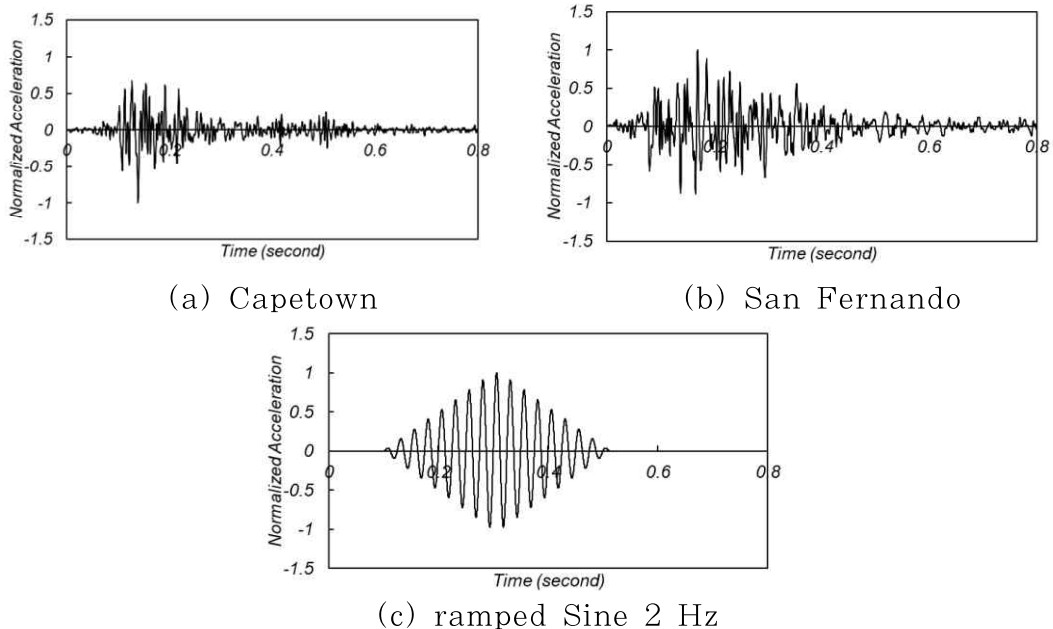


그림 3.8 입력지진파의 정규화된 가속도-시간 이력

1.3 동적 원심모형실험 결과

(1) Case 1: 상부 구조물이 없는 그룹 삼축내진말뚝

최대입력지진가속도에 따른 말뚝 상부에서의 최대 가속도를 표 3.4 및 그림 3.9에 도시하였다. 대부분의 경우에서 Group 00이 Group 15보다 큰 응답을 보였으나 Sine 2 Hz 강진(Sine 2Hz 0.158g, Sine 2 Hz 0.189g, Sine 2Hz 0.222g)이 가해졌을 때는 Group 15의 응답이 더 크게 나타났다.

표 3.3 Case 1: 최대입력지진가속도에 따른 말뚝 상부에서의 최대 가속도

	Peak Acceleration (g)		
	bed PGA	acc11(15)	acc12(00)
Capetown	0.021	0.026	0.051
	0.021	0.026	0.062
	0.027	0.045	0.061
	0.040	0.086	0.123
	0.084	0.160	0.183
	0.185	0.265	0.320
	0.258	0.328	0.402
San Fernando	0.028	0.037	0.049
	0.035	0.054	0.076
	0.077	0.189	0.196
	0.104	0.308	0.335
	0.209	0.364	0.460
	0.246	0.450	0.498
Sine 2 Hz	0.028	0.035	0.044
	0.039	0.059	0.064
	0.091	0.155	0.186
	0.115	0.216	0.236
	0.158	0.396	0.373
	0.189	0.714	0.535
	0.222	0.687	0.622

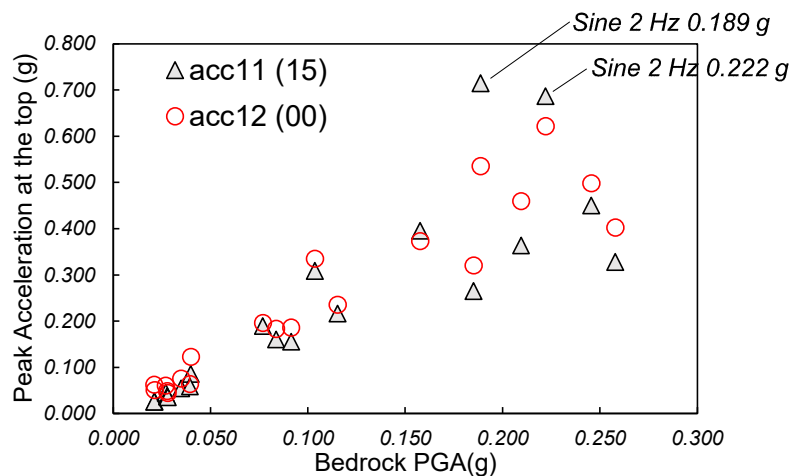
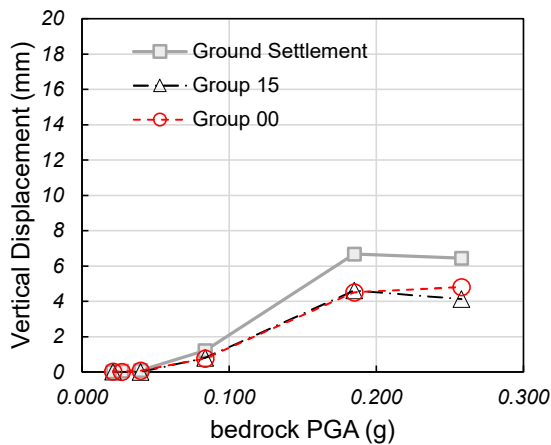


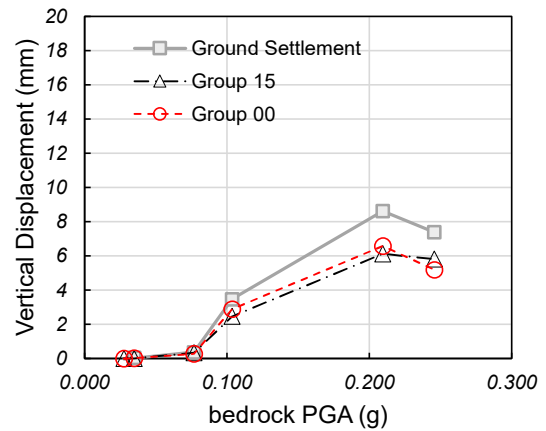
그림 3.9 최대입력지진가속도에 따른 말뚝 상부에서의 최대 가속도

그림 3.10은 세 종류의 지진파에 대하여 최대입력지진가속도에 따른 수직 잔류 침하량 결과를 나타낸다. 전반적으로 말뚝의 침하가 지반의 침하보다 크게 발생하였으며, Group 15와 Group 00의 침하량 차이는 거의 없었다. Capetown과 San Fernando 지진파를 가했을 때는 최대입력지진가속도가 0.2 g 이상에서도 10 mm 이하의 침하량이 발생했으나 Sine 2 Hz 지진파를 가했을 때는 최대입력지진가속도가 0.2 g 이하에서도 약 15 mm 가량의 비교적 큰 침하량이 발생했다.

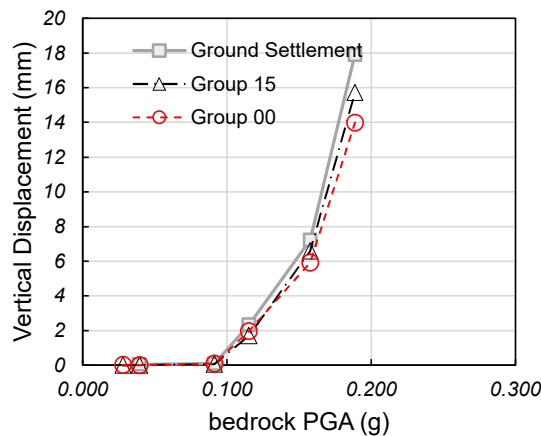
그림 3.11과 그림 3.12는 각각 입력지진파가 Capetown 0.084 g, Sine 2 Hz 0.222 g일때 지표에서 최대 가속도가 발현된 시점에서의 휨모멘트 및 축력 프로파일이다. 휨모멘트의 경우 말뚝 상부로 갈수록 크기가 증가하는 경향을 보였다. 두 케이스 모두 Group 15에 부착된 S1, S2, S3의 모멘트 및 축력이 Group 00에 부착된 S4, S5보다 크게 나타났다.



(a) Capetown

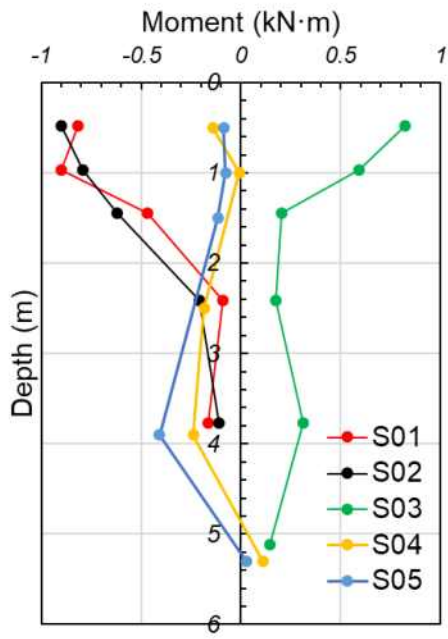


(b) San Fernando

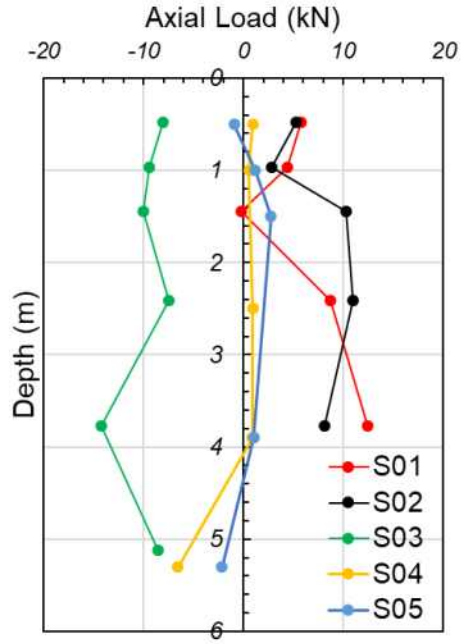


(c) ramped Sine 2 Hz

그림 3.10 그룹 삼축내진말뚝 및 지반의 침하량

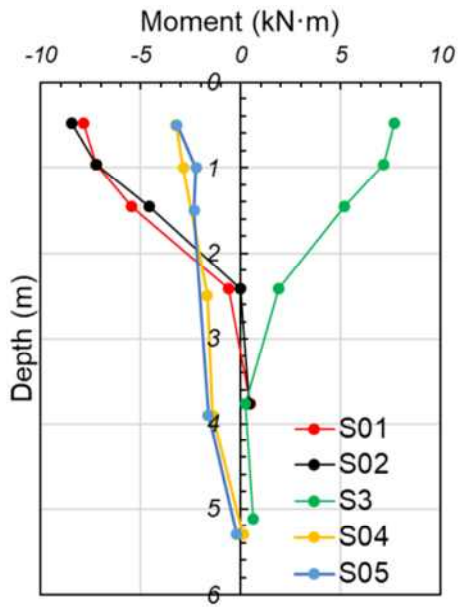


(a) 휨 모멘트

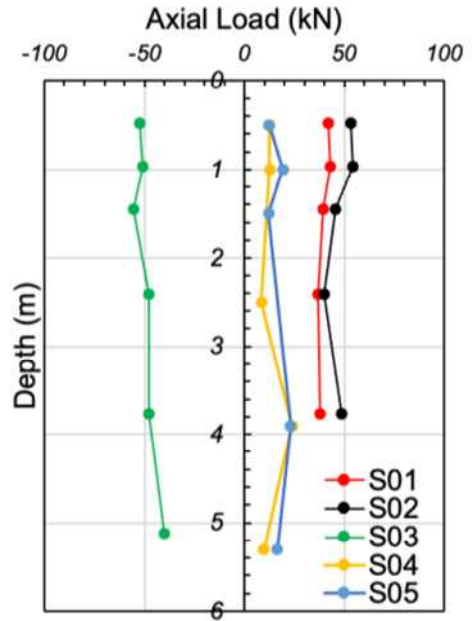


(b) 축력

그림 3.11 최대 가속도가 발현된 시점에서의 모멘트 및 축력 (입력지진파: Capetown 0.084 g)



(a) 휨 모멘트



(b) 축력

그림 3.12 지표에서 최대 가속도가 발현된 시점에서의 모멘트 및 축력 (입력지진파: Sine 2 Hz 0.222 g)

(1) Case 2: 상부 구조물이 있는 그룹 삼축내진말뚝

최대입력지진가속도에 따른 구조물 상부에서의 최대 가속도를 표 3.4 및 그림 3.13에 도시하였다. Capetown과 San Fernando 약진, Sine 2 Hz에서는 Group 15이 Group 00보다 큰 응답을 보였으나 Capetown과 San Fernando 강진이 가해졌을 때는 Group 00의 응답이 더 크게 나타났다.

표 3.4 Case 2: 최대입력지진가속도에 따른 말뚝 상부에서의 최대 가속도

	Peak Acceleration (g)		
	bed PGA	acc13(15)	Acc14(00)
Capetown	0.026963	0.21382	0.161588
	0.043205	0.43368	0.350057
	0.105905	0.656188	0.82216
	0.198555	0.856571	1.61824
	0.229988	0.862055	1.34319
San Fernando	0.030702	0.32445	0.19217
	0.036675	0.43492	0.341647
	0.06746	0.682859	1.18125
	0.118975	0.770949	1.52242
	0.201662	0.876443	1.47924
	0.232569	0.880454	1.5007
Sine 2 Hz	0.039932	0.0907	0.062917
	0.048682	0.15814	0.127302
	0.093006	0.44689	0.431028
	0.117188	0.48935	0.500917
	0.086812	0.40017	0.43289
	0.123071	1.14754	0.7402
	0.166815	2.18107	1.181586
	0.211066	2.94681	1.851044

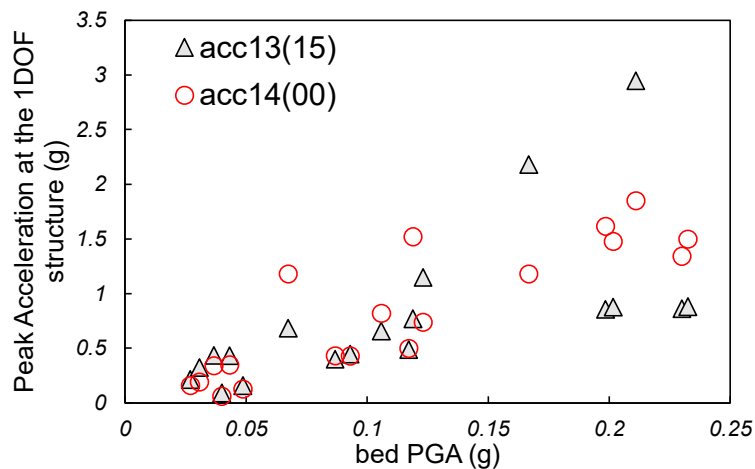
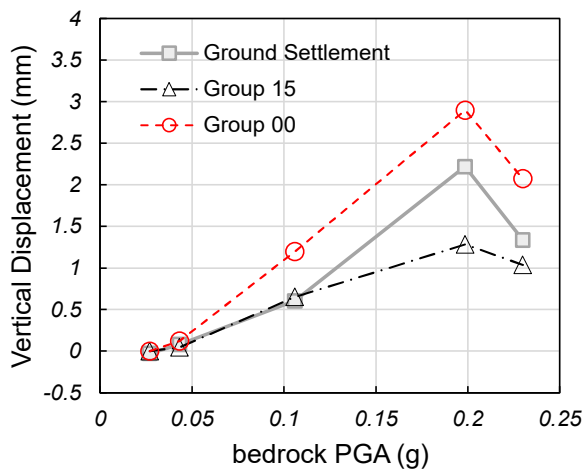


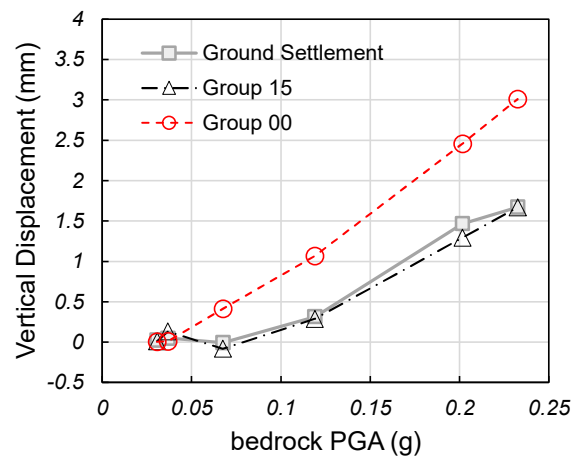
그림 3.13 최대입력지진가속도에 따른 말뚝 상부에서의 최대 가속도

그림 3.14는 세 종류의 지진파에 대하여 최대입력지진가속도에 따른 수직 잔류 침하량 결과를 나타낸다. Capetown과 San Fernando 지진파를 가했을 때는 Group 00의 침하량이 Group 15 및 지반의 침하량 보다 크게 발생했다. 하지만 Sine 2 Hz 최대입력지진가속도가 0.2 g 이상에서는 Group 15의 침하량이 지반 및 Group 00의 침하량보다 크게 발생했다.

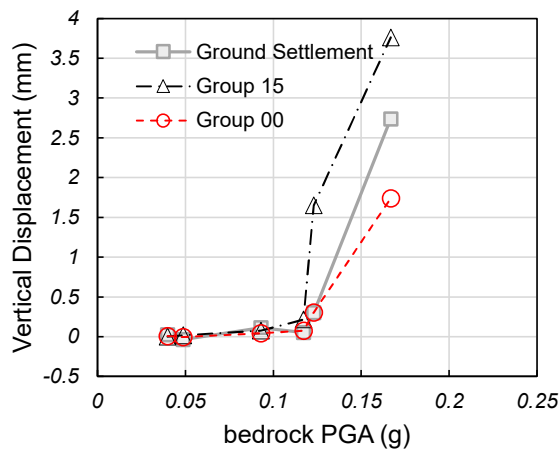
그림 3.15는 Capetown 0.230 g, San Fernando 0.233 g, Sine 2 Hz 0.222 g일때 그룹 삼축내진말뚝의 상부 구조물의 수평 변위 결과이다. Capetown 0.230 g와 San Fernando 0.233 g에서는 Group 00의 수평변위가 Group 15보다 현저하게 크게 발생했다. 반면 Sine 2 Hz 0.211 g에서는 두 Group 15의 수평변위가 더 크게 나타났다. 이는 Sine 2 Hz에서 구조물 및 기초 시스템의 공진이 일어나 응답이 크게 발생한 것이 원인일 것으로 추정된다.



(a) Capetown

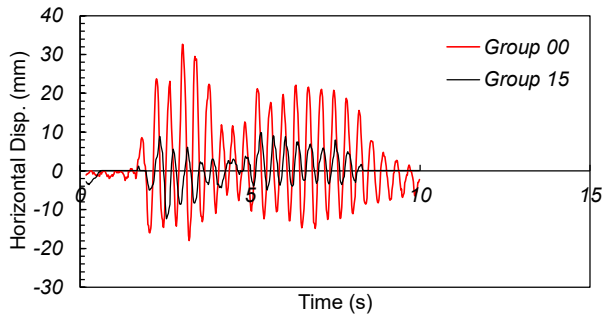


(b) San Fernando

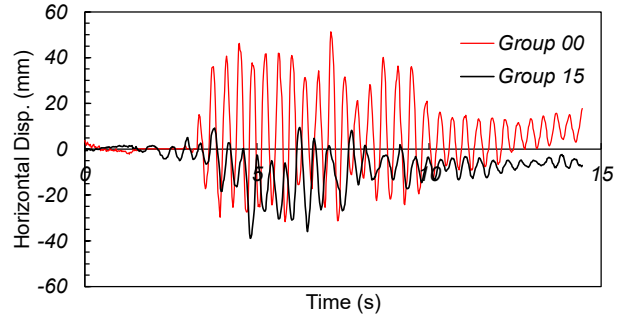


(c) ramped Sine 2 Hz

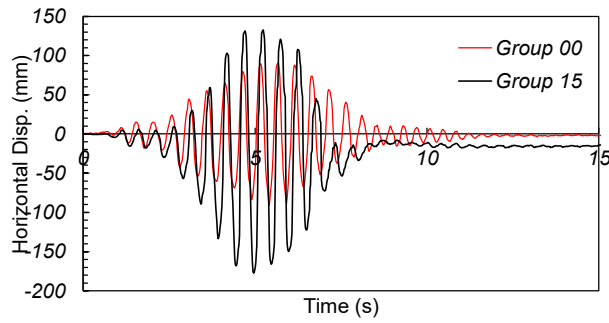
그림 3.14 구조물을 부착한 그룹 삼축내진말뚝 및 지반의 침하량



(a) Capetown 0.230 g



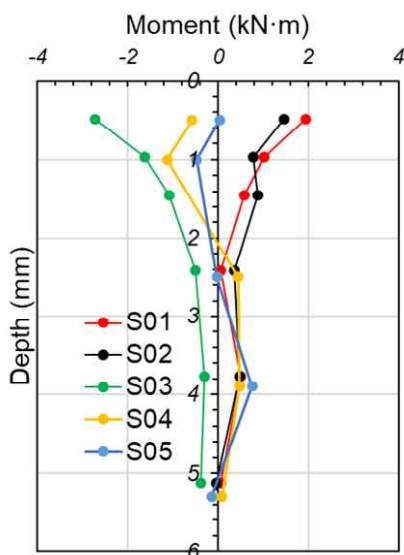
(b) San Fernando 0.233 g



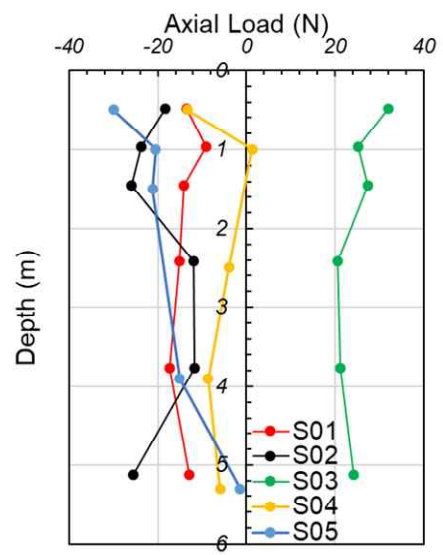
(c) ramped Sine 2 Hz 0.211 g

그림 3.15 그룹 삼축내진말뚝 상부 구조물의 수평변위

그림 3.16과 그림 3.17은 각각 입력지진파가 Capetown 0.230 g, Sine 2 Hz 0.211 g일때 지표에서 최대 가속도가 발현된 시점에서의 휨모멘트 및 축력 프로파일이다. 휨모멘트의 경우 구조물을 부착하지 않은 Case 1과 마찬가지로 말뚝 상부로 갈수록 크기가 증가하는 경향을 보였다. 두 케이스 모두 Group 15에 부착된 S1, S2, S3의 휨 모멘트 Group 00에 부착된 S4, S5보다 크게 나타났다.

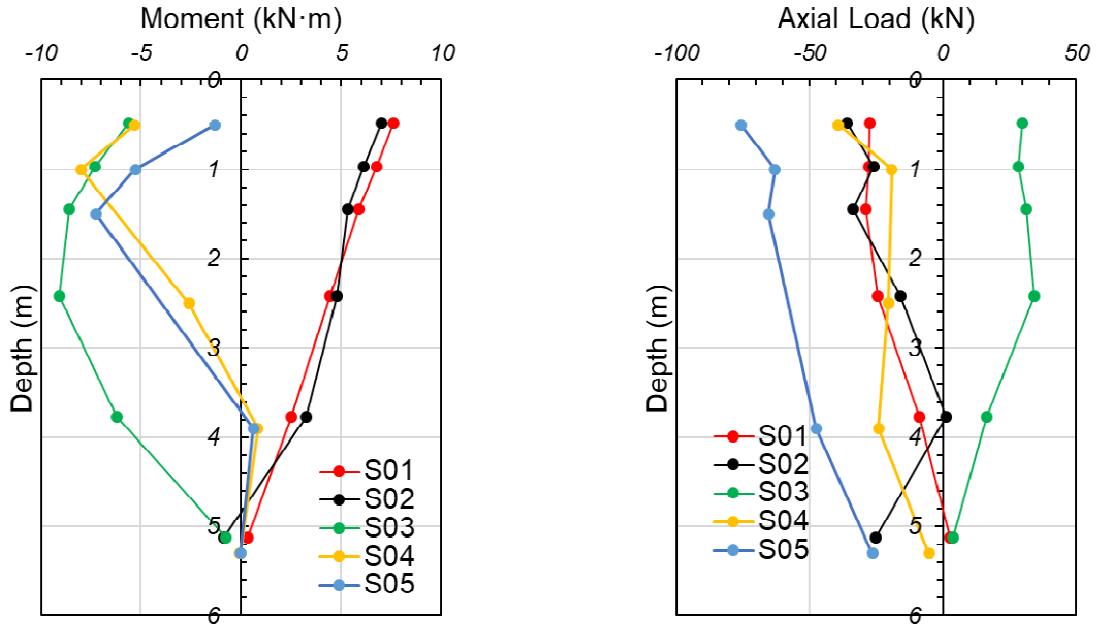


(a) 휨 모멘트



(b) 축력

그림 3.16 지표에서 최대 가속도가 발현된 시점에서의 모멘트 및 축력 (입력지진파: Capetown 0.230 g)



(a) 휨 모멘트

(b) 축력

그림 3.17 지표에서 최대 가속도가 발현된 시점에서의 모멘트 및 축력 (입력지진파: Sine 2 Hz 0.211g)

1.4 그룹 삼축내진말뚝의 내진성능 평가 및 매개변수 도출

Capetown과 San Fernando와 같은 실지진파를 가진했을 때는 전반적으로 설치각도가 큰 Group 15 삼축내진말뚝의 내진성능이 연직말뚝인 Group 00보다 우수하게 발현되었다. 반면 상대적으로 장주기 모션인 Sine 2 Hz 강진 조건에서는 Group 15의 지진응답이 Group 00보다 크게 나타났다. 국내 지진 발생 경향을 고려하였을 때 Sine 2 Hz 만큼 장주기를 가진 강진이 발생할 확률이 희박하기 때문에 Group 15와 같은 삼축내진말뚝을 사용하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

2. 유한차분(FDM) 해석 기반 삼축내진말뚝 변수연구

수치해석 모델은 3차원 유한차분법을 이용하는 FLAC3D 프로그램을 이용하였다. 원심모형실험조건에 원심가속도를 고려하여 원형 크기로 모델링하였다. 지반의 크기는 가로 16.4m, 세로 12.6m, 깊이 12.1m이고, 하단은 ESB박스를 모사(두께 1.0m)하였다. 삼축내진말뚝은 pile structure element를 이용하여 모사하였으며, 삼축내진말뚝을 결합하는 파일캡(pile cap)은 shell structure element, 상부중량은 지반과 동일하게 zone element, 상부중량과 파일캡의 연결부는 beam structure element를 이용하여 구성하였다. 경계면에서의 입력 지진파 소산을 고려하기 위해 자유장 경계조건(free-field condition)를 이용하였으며, 입력 지진파는 ESB 토조 하단(깊이 13.1m)을 반무한 탄성압반(compliant base)로 정의하여 y축 방향으로 입력하였다.

표 3.5 지반과 ESB 토조의 입력 물성

Physical properties			
Soil		ESB	
Constitutive model	Mohr-Coulomb	Constitutive model	Elastic
Density (kg/m ³)	1495	Density (kg/m ³)	2700
Friction angle (°)	38	Young's modulus (GPa)	73.0
Cohesion (kPa)	0	Poisson's ratio (-)	0.34
Poisson's ratio (-)	0.3	Bulk modulus (GPa)	76.0
Relative density (%)	70	Shear modulus (GPa)	27.2

표 3.6 파일캡, 연결부, 상부구조물의 입력 물성

Physical properties			
Pile cap		Connector/Super structure	
Constitutive model	Elastic	Constitutive model	Elastic
Density (kg/m ³)	2710	Density (kg/m ³)	8605
Young's modulus (GPa)	7.e10	Young's modulus (GPa)	2.05e11
Poisson's ratio (-)	0.35	Poisson's ratio (-)	0.35

지반의 경우, 구속압에 따라 전단파속도, 전단계수, 탄성계수, 포아송비가 달라지므로 FISH 함수 코딩을 통해 깊이별로 입력하였다. 지반 구성 모델은 Mohr-Coulomb 탄소성 모델을 이용하였으며, 이력 감쇠 모델을 적용하여 지반의 비선형 거동을 모사하였다. 이력 감쇠 모델은 FLAC3D에서 제공되는 hysteretic damping 모델 중 sigmodal-3 model를 이용하였으며, 입력변수는 Chanh et al.(2018)가 이용한 값을 사용하였다. 해당 입력값은 Lee et al.(2015)이 수행한 공진주시험 결과 값을 회귀하여 얻은 값이다. 고주파로 발생하는 노이즈를 제거하기 위해 지반 내 0.2% Rayleigh damping, 구조물에 대해 3%의 감쇠를 추가로 적용하였다. 지반을 제외한 나머지 영역은 상대적으

로 큰 강성으로 변형이 크게 발생하지 않을 것으로 예상되어 모두 탄성 모델로 모델링하였다.

Capetown 지진파의 유의미한 주파수 대역은 최대 20Hz이며, 지반의 최소 전단파속도는 약 110m/s이므로, 본 연구에서는 0.5m의 크기로 Grid를 구성하였다. 본 모델링에서 지반-말뚝의 상호작용은 해석결과에 가장 중요한 요소로 Pile element에서는 전단방향(shear), 법선 방향(normal) 모두 스프링-미끄러짐 시스템으로 구성된다. 지반-말뚝 접촉면에서 발생하는 전단력이 전단강도보다 커질 경우, 미끄러짐이 발생한다. 전단방향(shear)으로 대변형을 고려할 수 있는 미끄러짐(slide), 법선 방향(normal)으로는 변형으로 발생하는 말뚝-지반 사이 틈(gap)도 고려가능하다.

표 3.7 말뚝 및 지반-말뚝 인터페이스의 입력 물성

Physical properties		Soil-Pile interface characteristics	
Density (kg/m ³)	2710	Shear coupling spring stiffness per unit length, k_s	1e10
Young's modulus (GPa)	70	Shear coupling spring cohesion per unit length, c_s	0
Poisson's ratio (-)	0.35	Shear coupling spring friction angle, ϕ_s (°)	33
Area (m ²)	1.382e-2	Normal coupling spring stiffness per unit length, k_n	1e10
Polar moment of inertia, I_p	1.686e-4	Normal coupling spring cohesion per unit length, c_n	1e10
Moment of inertia, I_x, I_y	8.432e-5	Normal coupling spring friction angle, ϕ_n (°)	33
Perimeter (m)	7.540e-1	Gap	Not considered

검증에 이용된 원심모형실험 결과는 0.157g의 Capetown 지진파를 입력했을 때의 결과를 이용하였다. 그림 3.18은 원심모형실험과 수치해석에서 얻어진 가속도 시간이력 및 5% 감쇠비 응답스펙트럼을 비교한 결과를 보여준다. 지진파가 입력된 ESB박스에서 지표면으로 가까워질수록 원심모형실험과 수치해석으로 얻어진 가속도와 주파수대역에서 차이가 발생하였으나, 수치해석 모델은 지반에 의한 에너지 증폭/감쇠 효과가 모사하는 것으로 판단된다. 수치해석 결과는 정확히 원심모형실험 결과와 일치하지 않으나 전반적으로 유사한 경향을 보여 삼축내진말뚝의 거동을 잘 모사하는 것으로 판단된다. 정량적인 차이는 지반물성의 불확실성, 지반-말뚝 접촉면 물성의 불확실성, 초기 응력/변형률 상태의 차이로 기인하는 것으로 판단된다.

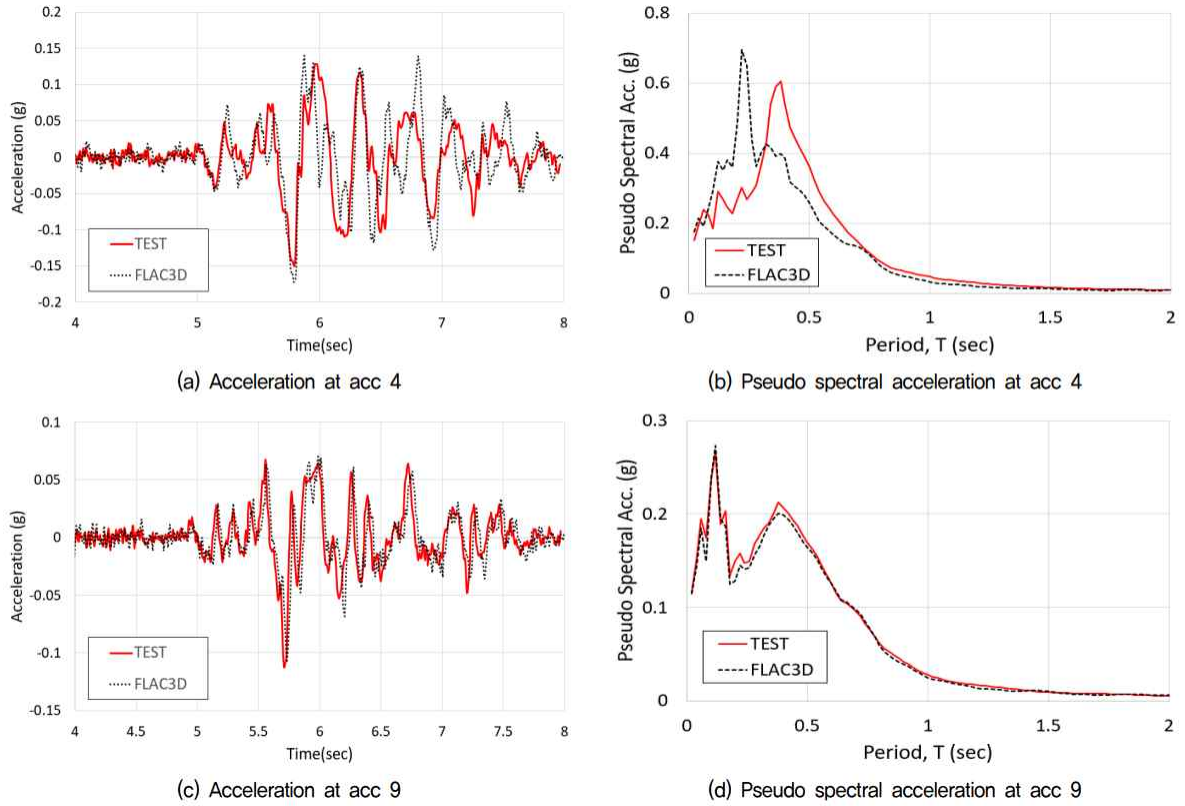


그림 3.18 원심모형실험과 수치모델 해석 결과 비교

실지진기록을 이용한 수치모델의 해석 결과, 최대 휨모멘트는 경사각도가 15도 일 때 가장 작았으며, 경사각도 0도에 비해 약 30% 작게 나타났다. 반면 Sine 2Hz 입력파에서는 경사각도가 증가할수록 최대 휨모멘트가 커지는 것으로 확인되었다.

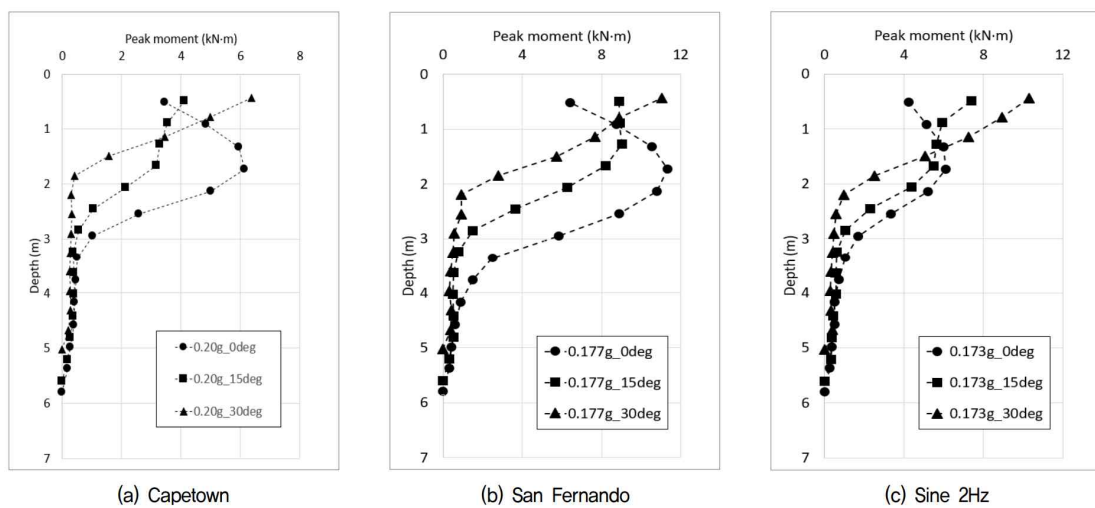


그림 3.19 경사각도별 최대 휨 모멘트 비교

경사각도별 최대 축력의 경우에는 모든 지진파에서 경사각도가 증가함에 따라 말뚝에 작용되는 축

력이 낮아지는 것을 확인하였다. Capetown 지진파, San Fernando 지진파, Sine 2Hz 입력과 조건에서 경사각도 0도일 때 축력 대비 경사각도 15도의 압축력은 각각 18%, 17%, 0%, 경사각도 30도의 압축력은 30%, 36%, 0% 낮은 값을 보였으며, 인장력은 경사각도 15도일 때 19%, 21%, 19%, 경사각도 30도일 때는 38%, 34%, 44% 낮은 값을 보였다. 이는 경사각도에 따라 연직 말뚝의 축력보다 크거나 작게 나올 수 있다는 Kim et al.(2001)의 연구결과와 유사하다.

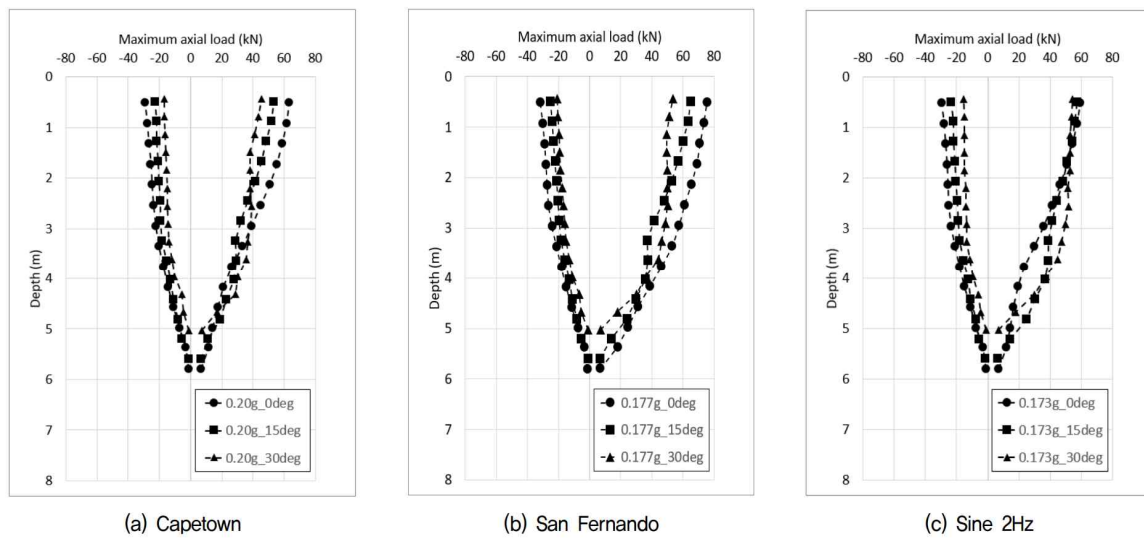


그림 3.20 경사각도별 최대 축력 비교

입력 지진파 및 경사각도에 따라 침하양상은 각기 달라짐을 확인하였다. Capetown 지진파와 San Fernando 지진파에서는 경사각도가 15도일 때 침하량이 가장 작은 값을 가졌으나, Sine 2Hz 입력파에서는 0도일 때 가장 작은 침하량을 보였다.

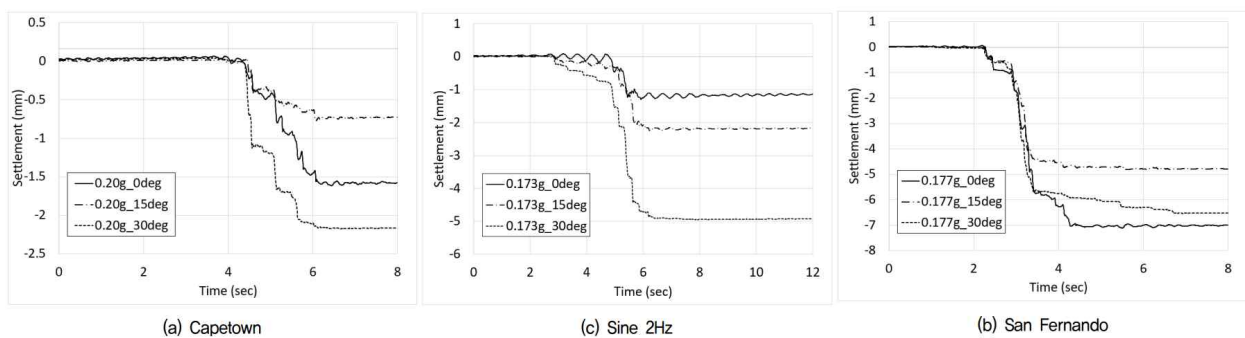


그림 3.21 경사각도별 최대 침하 비교

3. 삼축내진말뚝 내진성능 산정방법 도출

3.1 삼축내진말뚝 내진성능 평가

삼축내진말뚝의 내진성능 평가를 위해 지진하중의 최대가속도에 따른 말뚝두부의 최대수평변위와 말뚝의 최대휨모멘트를 분석하였다. 분석에 활용된 지진파 목록은 표 3.8에 기재된 바와 같다.

표 3.8 내진성능 평가에 활용된 지진파와 최대가속도

Case	PGA (g)
CT014	0.03255
CT015	0.10973
CT016	0.19941
S2023	0.03836
S2025	0.10565
S2026	0.09601
S2027	0.10066
S2028	0.14588
S2029	0.17089
S2030	0.21825
SF017	0.03091
SF019	0.05349
SF020	0.09929
SF021	0.17708

말뚝두부의 최대수평변위는 지진하중의 최대가속도가 클수록 증가하는 경향을 나타내었으나, 기존 마이크로파일 에 비해 삼축내진말뚝에서 증가 속도가 현저히 감소되는 경향을 나타내었다. 그림 3.22은 지진하중의 최대가속도에 따른 말뚝두부의 최대수평변위 결과를 나타낸 것이다.

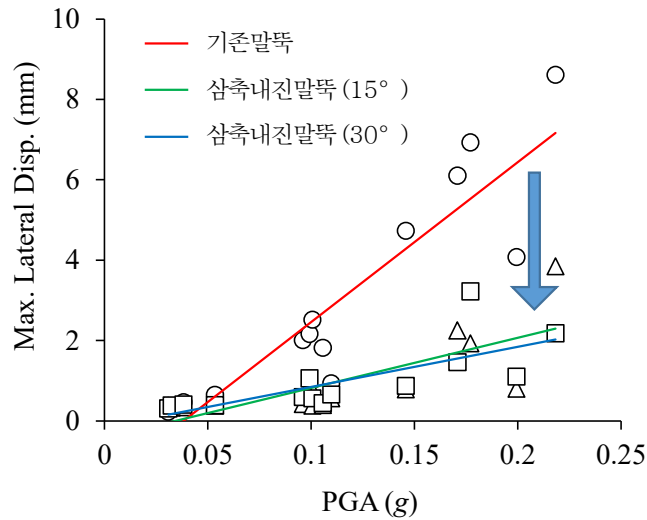


그림 3.22 지진하중의 최대가속도에 따른 말뚝두부의 최대수평변위 결과

SF017, CT014 케이스에서는 기존마이크로파일의 최대수평변위가 삼축내진말뚝의 최대수평변위보다 작게 나타났으나, 세부 분석 결과 계측 한계 이하의 응답이 계측된 것으로 지진하중의 최대가속도가 0.05g 이하인 SF017, CT014, S2023 케이스를 분석 대상에서 제외하였다. 표 3.9는 지진하중의 최대가속도에 따른 최대수평변위 결과를 정리한 것이다.

표 3.9 지진하중의 최대가속도에 따른 최대수평변위 결과 (mm)

PGA (g)	기존말뚝	삼축말뚝(15도)	삼축말뚝(30도)
0.03091	0.234519	0.375294	0.311
0.03255	0.325586	0.331504	0.382184
0.03836	0.466776	0.338401	0.407007
0.05349	0.6484	0.378059	0.392042
0.09601	2.005623	0.421029	0.592966
0.09929	2.167625	0.917608	1.062571
0.10066	2.520122	0.374385	0.566658
0.10565	1.818149	0.401347	0.439978
0.10973	0.937996	0.561871	0.655619
0.14588	4.730641	0.788102	0.87599
0.17089	6.104527	2.254786	1.462964
0.17708	6.93062	1.929063	3.222261
0.19941	4.075309	0.800604	1.106547
0.21825	8.613514	3.849303	2.178954

말뚝의 최대휨모멘트는 지진하중의 최대가속도가 클수록 증가하는 경향을 나타내었으나, 기존마이크로파일에 비해 삼축내진말뚝에서 증가 속도가 현저히 감소되는 경향을 나타내었다. 그림 3.23은 지진하중의 최대가속도에 따른 말뚝의 최대휨모멘트 결과를 나타낸 것이다.

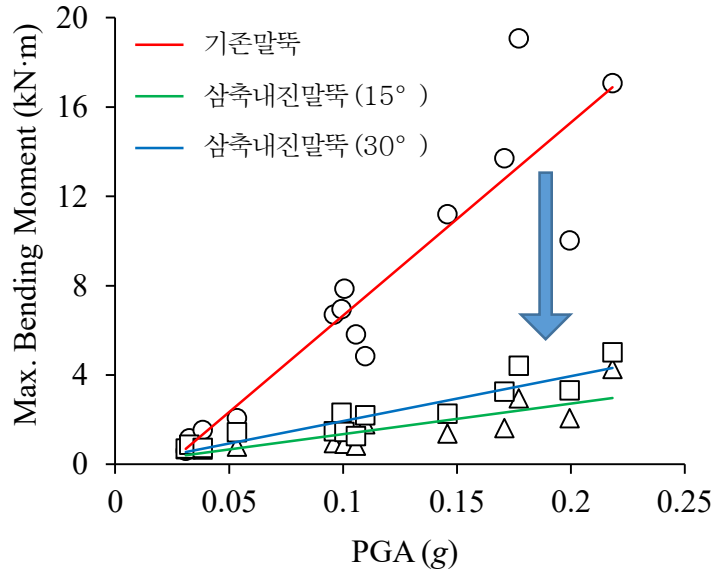


그림 3.23 지진하중의 최대가속도에 따른 말뚝의 최대휨모멘트 결과

SF017 케이스에서는 기존마이크로파일의 최대휨모멘트가 삼축내진말뚝의 최대휨모멘트보다 작게 나타났으나, 세부 분석 결과 계층 한계 이하의 응답이 계층된 것으로 지진하중의 최대가속도가 0.05g 이하인 SF017, CT014, S2023 케이스를 분석 대상에서 제외하였다. 표 3.10은 지진하중의 최대가속도에 따른 최대휨모멘트 결과를 정리한 것이다.

표 3.10 지진하중의 최대가속도에 따른 최대휨모멘트 결과 (kN·m)

PGA (g)	기존말뚝	삼축말뚝(15도)	삼축말뚝(30도)
0.03091	0.61009	0.682928	0.713106
0.03255	1.171249	0.811098	0.885031
0.03836	1.539916	0.65943	0.737018
0.05349	2.062138	0.80061	1.444553
0.09601	6.705047	0.953088	1.474158
0.09929	6.947204	1.622174	2.317877
0.10066	7.860406	0.928158	1.445538
0.10565	5.813023	0.830234	1.26909
0.10973	4.85256	1.798505	2.201322
0.14588	11.20529	1.387687	2.264297
0.17089	13.7103	1.620822	3.254888
0.17708	19.0813	2.955498	4.419276
0.19941	10.03218	2.062949	3.310828
0.21825	17.07156	4.278783	5.023685

분석 결과, 삼축내진말뚝은 기존마이크로파일에 비해 지진하중에 의한 말뚝두부의 최대수평변위를 평균 65.4%의 감소시키는 것으로 나타났다. 그러나, 보수적인 실험결과를 기준으로 삼축내진말뚝의 말뚝두부 최대수평변위는 기존마이크로파일 대비 30% 감소시킬 수 있다. 그림 3.24는 삼축내진말뚝의 말뚝두부 최대수평변위 감소효과를 보여준다.

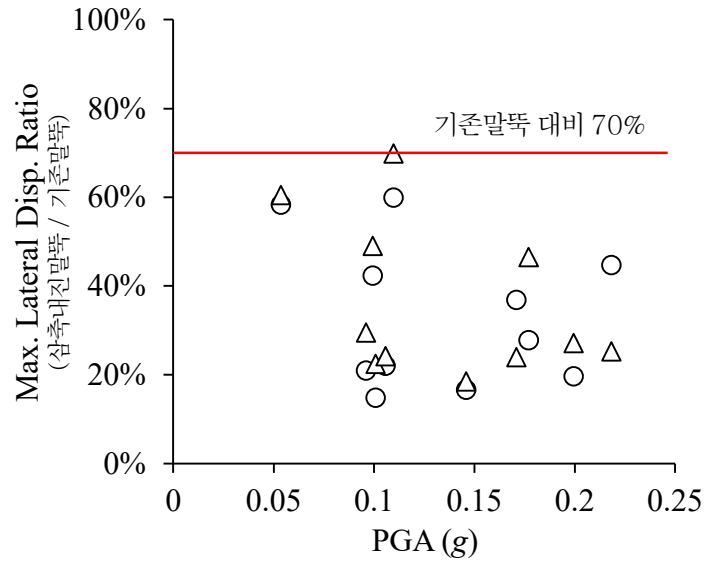


그림 3.24 지진하중에 대한 삼축내진말뚝의 말뚝두부 최대수평변위 감소효과

표 3.11은 지진하중의 최대가속도에 따른 기존마이크로파일 대비 삼축내진말뚝의 말뚝두부 최대수평변위 비율을 케이스별로 정리한 것이다.

표 3.11 최대가속도에 따른 기존마이크로파일 대비 삼축내진말뚝의 말뚝두부 최대수평변위 비율

PGA (g)	삼축말뚝(15도)/기존말뚝	삼축말뚝(30도)/기존말뚝
0.03091	160.0%	132.6%
0.03255	101.8%	117.4%
0.03836	72.5%	87.2%
0.05349	58.3%	60.5%
0.09601	21.0%	29.6%
0.09929	42.3%	49.0%
0.10066	14.9%	22.5%
0.10565	22.1%	24.2%
0.10973	59.9%	69.9%
0.14588	16.7%	18.5%
0.17089	36.9%	24.0%

분석 결과, 삼축내진말뚝은 기존마이크로파일에 비해 지진하중에 의한 말뚝 최대휨모멘트를 평균 74.3%의 감소시키는 것으로 나타났다. 그러나, 보수적인 실험결과를 기준으로 삼축내진말뚝의 최대휨모멘트는 기존마이크로파일 대비 30% 감소시킬 수 있다. 그림 3.25는 삼축내진말뚝의 최대휨모멘트 감소효과를 보여준다.

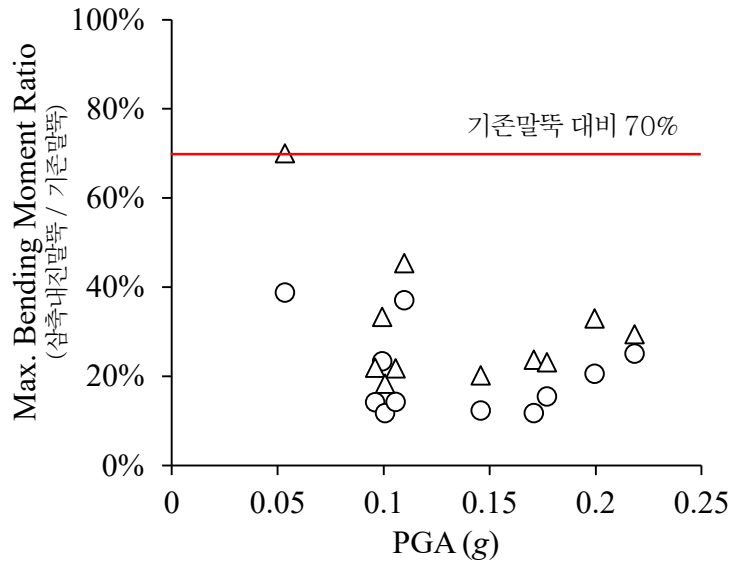


그림 3.25 지진하중에 대한 삼축내진말뚝의 최대휨모멘트 감소효과

표 3.12는 지진하중의 최대가속도에 따른 기존마이크로파일 대비 삼축내진말뚝의 최대휨모멘트 비율을 케이스별로 정리한 것이다.

표 3.12 최대가속도에 따른 기존마이크로파일 대비 삼축내진말뚝의 최대휨모멘트 비율

PGA (g)	삼축말뚝(15도)/기존말뚝	삼축말뚝(30도)/기존말뚝
0.05349	38.8%	70.1%
0.09601	14.2%	22.0%
0.09929	23.4%	33.4%
0.10066	11.8%	18.4%
0.10565	14.3%	21.8%
0.10973	37.1%	45.4%
0.14588	12.4%	20.2%
0.17089	11.8%	23.7%
0.17708	15.5%	23.2%
0.19941	20.6%	33.0%
0.21825	25.1%	29.4%

3.2 내진성능 간이산정방법 제안

수행된 원심모형실험 내용을 분석한 결과, 삼축내진말뚝은 같은 조건의 기존마이크로파일에 비해 현저히 높은 내진성능을 보이는 것으로 나타났다. 실험 결과에 따르면 삼축내진말뚝은 말뚝두부의 최대수평변위에 대해서는 평균 65.4%의 감소효과를, 최대휨모멘트에 대해서는 평균 74.3%의 감소효과를 나타내었다.

그러나, 해당 실험 결과는 여러 가지 환경적 요소들을 완벽히 통제할 수 있는 실내 실험실 조건에서 특정 지진하중에 대해 얻은 결과이기 때문에 일반적인 상황에 그대로 적용하기에는 어려움이 있다. 따라서, 본 실험에서 얻은 보수적인 실험결과를 바탕으로 다음과 같이 등가정적해석을 통해 얻은 기존마이크로파일의 내진성능에 대해 감소계수를 적용하는 간이산정방법을 적용할 수 있다.

$$y_{\max}^{TSP} = 0.7 \times y_{\max}^{CMP}$$

$$M_{\max}^{TSP} = 0.7 \times M_{\max}^{CMP}$$

여기서, y_{\max} : 말뚝두부 최대수평변위, M_{\max} : 말뚝 최대휨모멘트, TSP : Triaxial Seismic Pile (삼축내진말뚝), CMP : Conventional Micro Pile (기성마이크로파일)

제4장

동적하중을 고려한 삼축내진말뚝 설계안 제시

1. 수치해석 기반 삼축내진말뚝 설계 정량화

1.1 말뚝-지반 경계물성 고려

삼축내진말뚝의 설계 정량화에 있어 가장 중요하나 결정하기 힘든 물성이 말뚝-지반 경계물성으로 판단된다. 해당물성은 직접 실험을 통해 산정하는 방법 이외에는 기존 문헌값을 사용해야 한다. 표 4.1과 같이 많은 연구자들에 의해 말뚝-지반 경계물성 중 마찰각에 대한 경험식을 제안하거나 사용하였다.

표 4.1 Interface friction angle considered in the previous study

Researcher	Friction angle	
	Shear	Normal
Beringen et al. (1979) Randolph et al. (1994) Kwon and Yoo (2019, 2020) Kim et al. (2020) Song et al. (2022)	$\phi_s = \phi_{\max} - 5^\circ$	$\phi_n = \phi_{\max} - 5^\circ$
Chatterjee et al. (2022)	$\phi_s = \frac{2}{3} \phi_{\max}$	$\phi_n = \frac{2}{3} \phi_{\max}$
Chanh et al. (2018)	$\phi_s = \frac{2}{3} \phi_{\max}$	$\phi_n = \phi_{\max}$
Tran et al. (2022)	$\phi_s = \frac{2}{3} \phi_{\max}$	70°
Tran et al. (2021)	$\phi_s = \frac{2}{3} \phi_{\max}$	$\tan\phi_n = \lambda + \kappa \times \left(\frac{d}{D}\right)$ for $0 < d/D \leq 1$ $\tan\phi_n = 1.8$ for $d/D > 1$
Chatterjee et al. (2019)	$\phi_s = \phi_{\max}$	$\phi_n = \phi_{\max}$

삼축내진말뚝의 동적거동 분석에 맞는 마찰각 산정식을 확인하기 위해 제안된 값을 포함한 총 100가지 이상의 조합(전단, 법선방향 마찰각)을 이용하여 수치해석을 수행 후 원심모형실험과 비교를 수행하였다(그림 4.1).

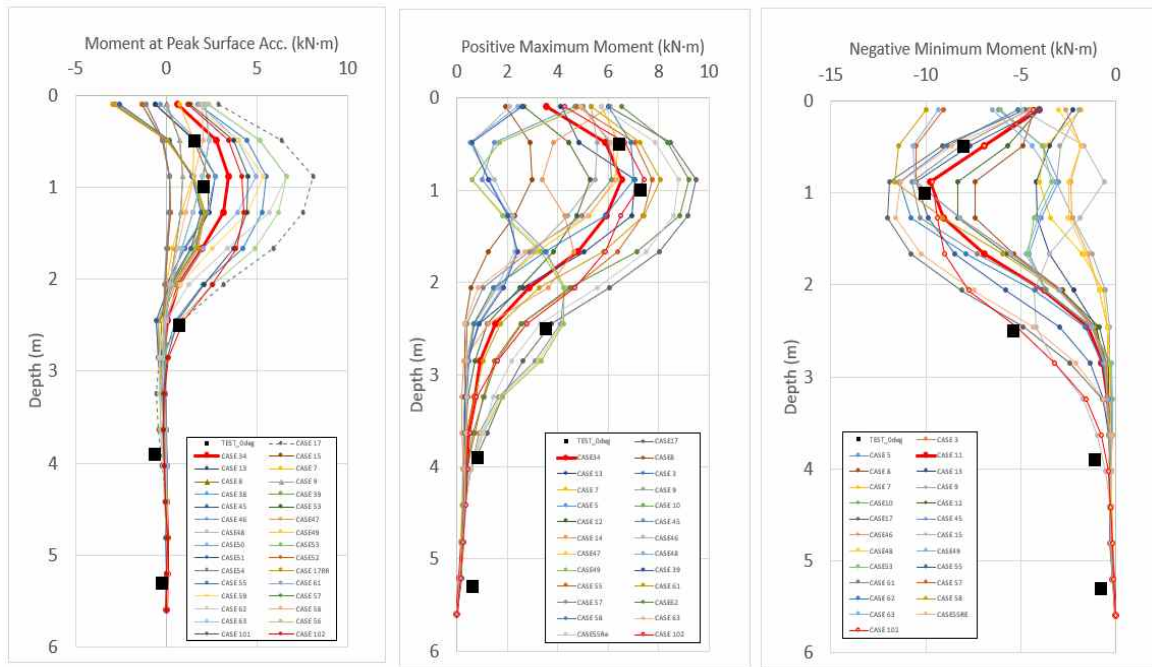
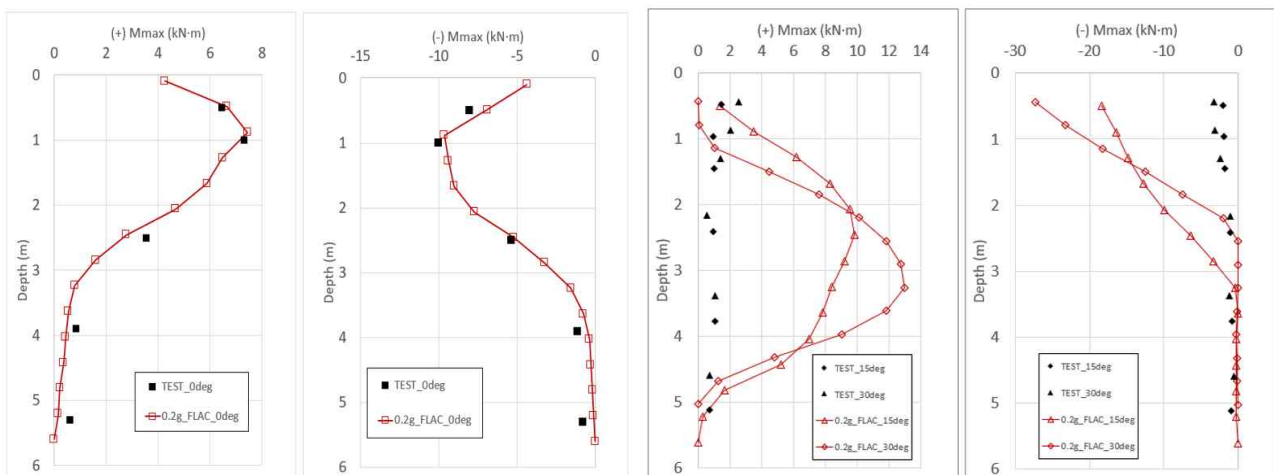


그림 4.1 Moment diagram under various shear and normal friction angle (more than 100 cases)

그림 4.2는 삼축내진말뚝의 설치각도가 0일 경우, 원심모형실험과 가장 유사한 모멘트를 보여주는 것으로 이때 전단, 법선방향의 마찰각은 20.6도, 28도였다. 하지만 설치각도 15, 30도의 거동을 예측한 결과, 원심모형실험과는 큰 차이를 보였다. 그림 4.3과 같이 모든 설치각도를 고려한 결과, 원심모형실험 결과를 잘 모사하는 말뚝-지반 경계물성 산정식은 지반의 최대 내부마찰각에 5도를 뺀 식이었다.

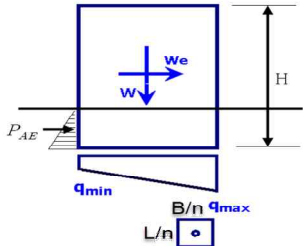
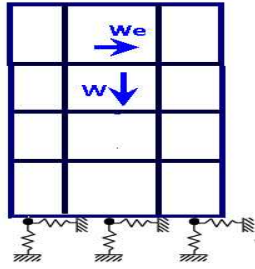


(a) 0 degree

(b) 15, 30 degree

그림 4.2 Moment diagram when shear and normal friction angle was 20.6°, 28°

표 4.2 말뚝 두부에 작용되는 적용하중 산정방법

약식계산법	건축구조 계산시 스프링 적용
	
<ul style="list-style-type: none"> • $V = q_{\max} BL$, $H = W_c / N$ - B, L : 말뚝 간격, - N : 말뚝 적용개수 	<ul style="list-style-type: none"> • $V = R_Y$, $H = R_X$ - R_X, R_Y : 수평, 수직방향 스프링 반력

1) 약식계산법: 별도의 건축구조계산서가 없는 경우에 약식으로 계산한 접지압의 q_{\min} , q_{\max} 의 값을 산정하여 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$V = qB_p L_p, \quad H = W_c / N$$

여기서, B_p, L_p : 말뚝의 설치 간격, H : 수평하중, N : 말뚝 적용개수

2) 건축 구조계산서 활용: 건축구조계산서가 있는 경우는 구조계산 시 말뚝머리 위치에 스프링을 모델 하여 구조계산서에서 산정된 반력값을 이용하여 말뚝 두부 하중으로 적용한다.

$$V = R_V, \quad H_{p\max} = R_H$$

여기서, R_V : 말뚝 두부 스프링 수직 반력, R_H : 말뚝 두부 스프링 수평 반력

(3) 말뚝-지반 비선형스프링 선정

지반은 BNWF(Beam on Nonlinear Winkler Foundation) 모델에 따라 지반의 종류, 강도 및 변형특성을 고려한 비선형스프링으로 치환한다.

- soft clay의 비선형스프링

$$1) \text{극한지지력: } p_u D = 3s_u D + \gamma' z D + J s_u z \leq 9s_u D$$

여기서, s_u : 비배수강도, D : 말뚝직경, γ' : 유효단위중량, J : 경험계수(0.25-0.5), z : 깊이

2) 정규화 비선형스프링

p / p_u	y / y_c
0.00	0.0
0.23	0.1
0.33	0.3
0.50	1.0
0.72	3.0
1.00	8.0
1.00	∞

Key
 p_u is the ultimate lateral capacity, unit of pressure;
 p is the mobilized lateral resistance, unit of pressure;
 y is the local pile lateral displacement;
 y_c equals $2.5 \times \epsilon_c \times D$;
 D is the pile diameter;
 ϵ_c is the strain at one-half the maximum deviator stress in laboratory undrained compression tests of undisturbed soil samples.

그림 4.4 soft clay의 정규화 비선형스프링 (API, 2011)

- sand의 비선형스프링

1) 극한지지력

$$p_{us} = (C_1 z + C_2 D) \gamma' z$$

$$C_1 = \frac{(\tan \beta)^2 \tan \alpha}{\tan(\beta - \phi')} + K_o \left[\frac{\tan \phi \times \sin \beta}{\cos \alpha \times \tan(\beta - \phi')} + \tan \beta (\tan \phi' \sin \beta - \tan \alpha) \right]$$

$$C_2 = \frac{\tan \beta}{\tan(\beta - \phi')} - K_a$$

여기서, $\alpha = \phi' / 2$, $\beta = 45 + \alpha$, $K_o = 0.4$, $K_a = \frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'}$

또는,

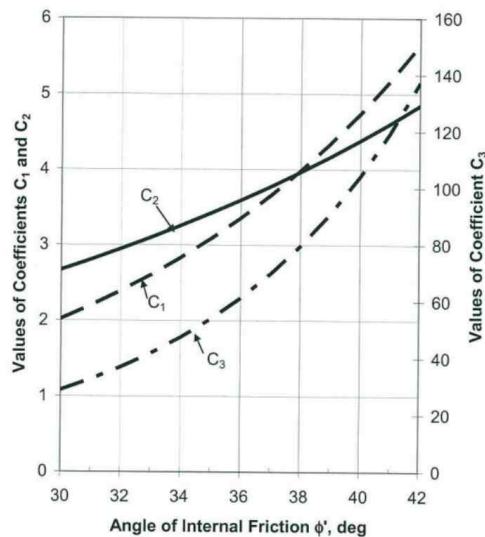


그림 4.5 sand의 극한지지력 산정을 위한 도표 (API, 2011)

2) 정규화 비선형스프링

$$p = A \times p_u \tanh\left[\frac{k \times z}{A \times p_u} y\right]$$

$$A = \left(3.0 - 0.8 \frac{z}{D}\right) \geq 0.9$$

여기서, k : 초기지반반력계수 (그림 4.6 참조)

ϕ'	k	
	MN/m ³	(lb/in ³)
25°	5.4	(20)
30°	11	(40)
35°	22	(80)
40°	45	(165)

그림 4.6 sand의 초기지반반력계수 (API, 2011)

(4) 연직말뚝 조건에 대한 등가정적해석

말뚝의 등가정적해석을 수행하기 위해서는 말뚝의 제원, 말뚝두부에 가해질 등가정적하중, 말뚝-지반 비선형스프링을 결정해야한다. 예제 말뚝은 길이 6m, 외경 240mm, 내경 200mm의 steel pipe pile 이며, 유효단위중량 8 kN/m³, 마찰각은 30°, 말뚝 한 본당 80 kN의 등가정적하중을 가정하였다.

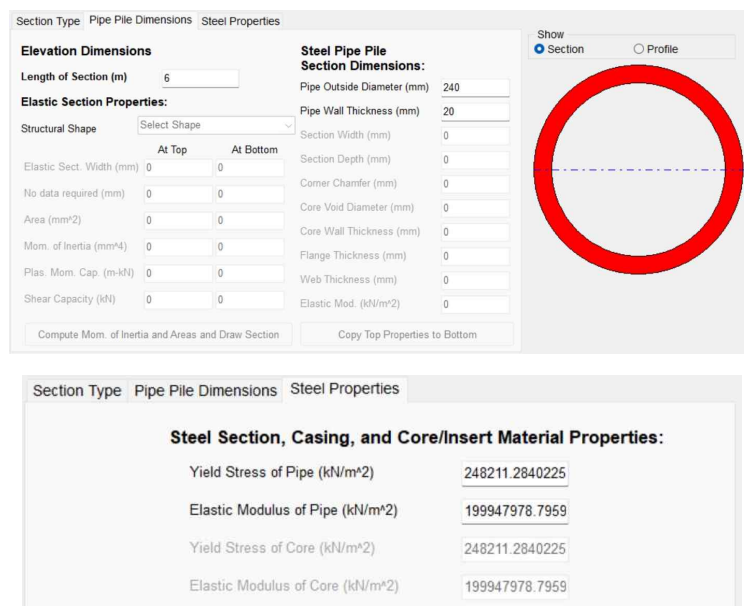


그림 4.7 등가정적해석을 위한 말뚝 제원 결정

Soil Layers

Select p-y Curve Type	Vertical Depth Below Pile Head of Top of Soil Layer (m)	Vertical Depth Below Pile Head of Bottom of Soil Layer (m)	Press Button to Enter Soil Properties
1 API Sand (D'Neill)	0	10	1: API Sand

Add Row Insert Row Delete Row

All positive depth coordinates are defined as vertical distances below the pile-head.
If the pile-head is embedded below the ground surface, the top layer must extend from the ground surface (defined by a negative vertical depth) to some point below the pile head.
Select the p-y soil type using the drop-down list in the left table column.

API Sand 1

Effective Unit	Friction Angle, (DEG)	Non-default k, (kN/m ³)
1 Weight, (kN/m ³)	30	11000
2 9	30	11000

LPILE linearly interpolates over vertical depth to compute values between the top and bottom of the layer.

LPILE will substitute a default value for k if the input value equals zero.

Distance below pile head = 3.63 m

Print Side View
Omit Hatches
Information
Close

그림 4.8 등가정적해석을 위한 말뚝-지반 비선형스프링 선정

Pile-Head Loadings and Options

Load Case	Pile-Head Loading Condition	Condition (1) for Loading Type	Condition (2) for Loading Type	Axial Load (p-delta) (kN)	Compute Top y vs. L?	Run Analysis?
1	(1) Shear [lb or kN] and (2) Moment [in-lb or kN-m]	80	0	0	No	Yes

Add Row Insert Row Delete Row

Select a pile-head loading condition from the drop-down list. Up to 100 loading cases may be specified.

Load 1 for Load Type is the first loading condition in the description of the loading condition.
Load 2 for Load Type is the second loading condition in the description of the loading condition.
The Axial Load (p-delta) is the axial thrust force used in p-delta computations.
The Compute Top Y vs. L option is used to compute top deflection for reduced pile lengths.

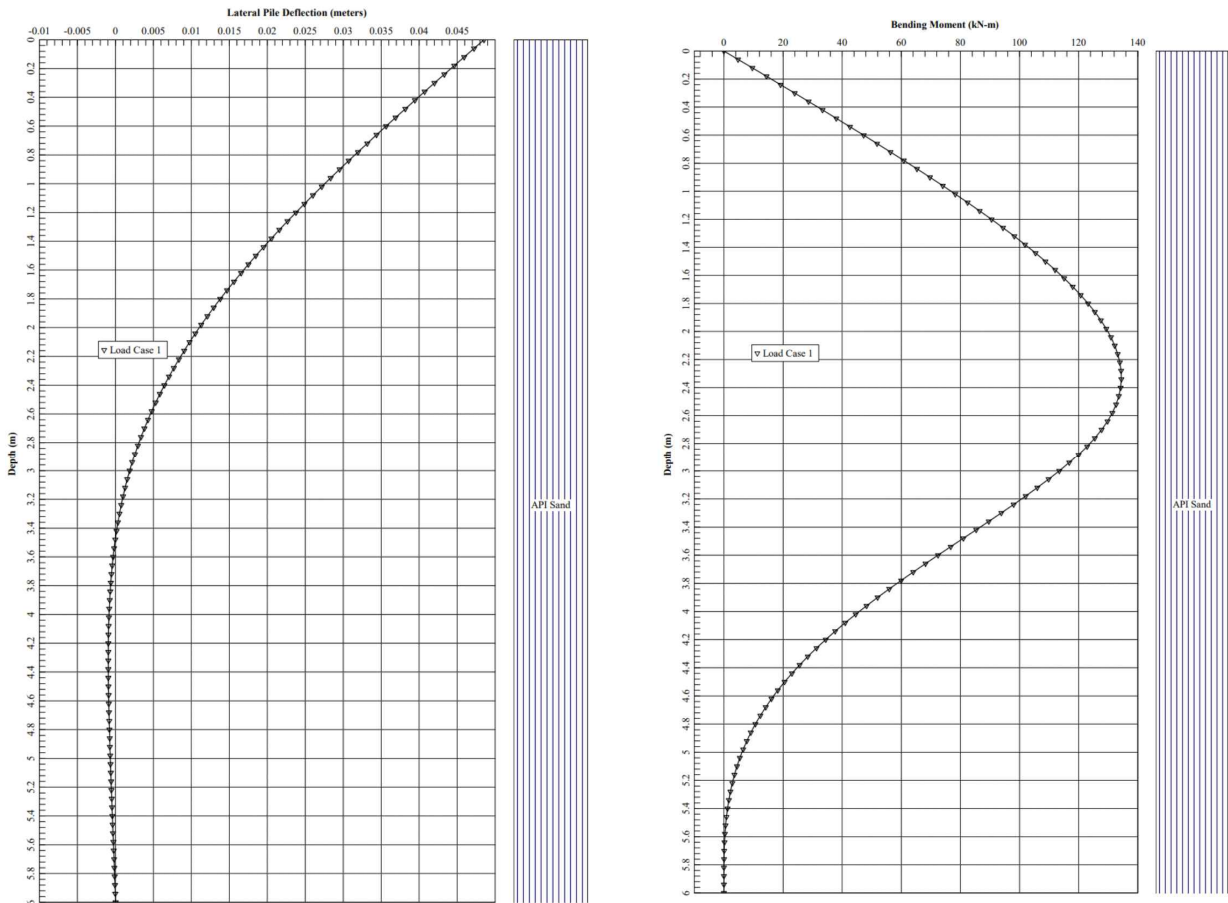
To specify a fixed-head loading condition, select a Shear and Slope condition and set the slope value equal to zero.
To specify a pinned-head loading condition, select a Shear and Moment condition and set the moment value equal to zero.

The sign convention for positive loadings is shown in the drawing below.

Conventional Loading

그림 4.9 등가정적해석을 위한 말뚝두부 하중

그림 4.10은 등가정적하중에 대한 연직말뚝의 수평변형과 휨모멘트 선도를 보여준다. 해석 결과 연직말뚝은 100kN의 등가정적하중에 의해 48.5mm의 말뚝두부 수평변위, 134.5 kN·m의 최대 휨모멘트가 발생하였다.



(a) 말뚝 수평변형 선도

(b) 말뚝 휨모멘트 선도

그림 4.10 등가정적해석 결과

(5) 삼축내진말뚝 감소계수 적용

연직말뚝에 대한 해석 결과 얻어진 말뚝두부의 수평변위와 최대휨모멘트에 감소계수를 적용하여 삼축 내진말뚝의 내진 안정성을 평가할 수 있다. 말뚝두부의 허용변위량은 구조물의 기능과 형태, 예상 사용 수명, 변위발생 시 건축물에 미치는 영향 등을 고려하여 결정하며, 38mm를 초과해서는 안된다 (KDS 11 50 20). 말뚝의 최대휨모멘트는 허용 휨모멘트를 넘지않도록 하여 말뚝의 내적 안정성을 확보한다.

간이평가법에 따라 감소계수 0.7을 적용하면, 예제 삼축내진말뚝은 등가정적하중에 의해 말뚝두부 최대수평변위 33.95mm, 최대휨모멘트 94.15 kN·m가 발생할 것으로 판단된다. 그러므로, 예제 삼축내진말뚝은 설계하중에 대해 내진 안정성을 확보하였다고 판단된다

2.2 삼축내진말뚝 내진 안정성 정밀평가

(1) 시간이력동적해석을 위한 고려사항

- 요소크기 선정

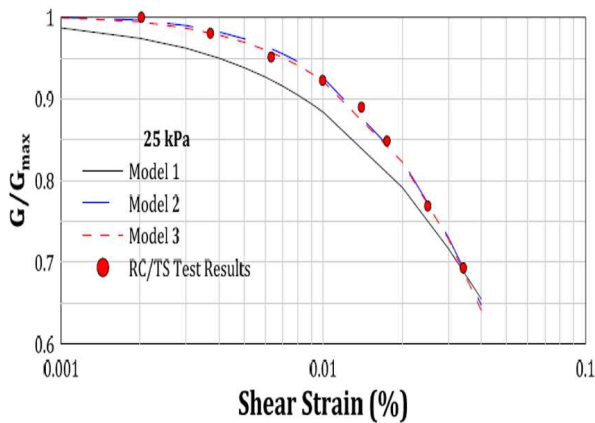
파동전파에 대한 수치적 왜곡은 모델링 조건의 함수로 발생할 수 있다. 입력 파동의 주파수 내용과 시스템의 파동 속도 특성은 파동 전파의 수치 정확성에 영향을 미친다. Kuhelmeyer and Lysmer (1973)는 요소크기 선정 시 입력 지진파의 가장 큰 주파수에 해당하는 파장(wavelength)보다 1/8~1/10배 작은 요소를 사용해야 정확한 파동전달이 가능함을 제안하였다.

$$\Delta l \leq \frac{\lambda}{8 \sim 10}, \lambda = \frac{V_s}{f}$$

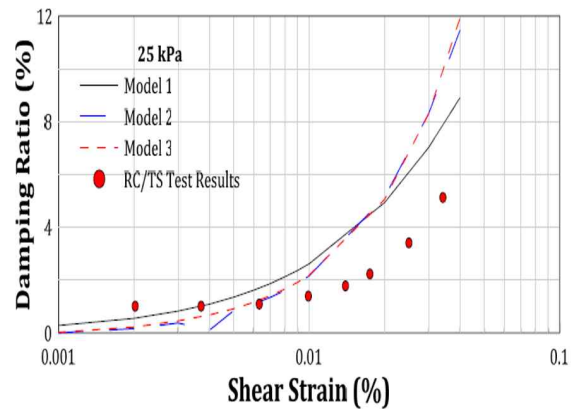
여기서, λ : 지진파의 파장, f : 지진파의 주파수, V_s : 지반의 최소 전단파속도

- 감쇠모델 선정

지반은 일정 수준 이상의 반복하중 조건에서 전단응력-전단변형률 곡선이 비선형으로 변하는 비선형성을 띤다. 이 과정에서 전단강성은 감소하고, 감쇠(damping)은 증가한다. 이러한 지반의 비선형성을 반영하기 위해 상용 수치해석 프로그램에 따라 상이한 방법을 이용하며, FLAC에서는 내장된 함수(4종)를 통해 반영할 수 있다. 지반의 구성방정식과 함께 동적거동에 중요한 인자이다.



(a) G/Gmax



(b) Damping ratio

그림 4.11 Modulus reduction curve and damping curve

- 입력 지진과 보정

보정없이 계측된 지진자료(가속도 이력, 속도이력)를 사용할 경우, 수치해석 프로그램에서는 수치적분을 통해 변위를 산정하므로 지진이 끝난 후에도 시스템의 전체 변위가 0이 아니게 된다. 이를 수치적으로 해결하기 위해 원자료(raw data)에 저주기파(low frequency wave)를 추가하며 최종적으로 변위를 0으로 만들 수 있다. 이러한 과정을 Baseline Correction이라고 하며, 저주기파는 다항식이나 주기함수로 표현할 수 있다.

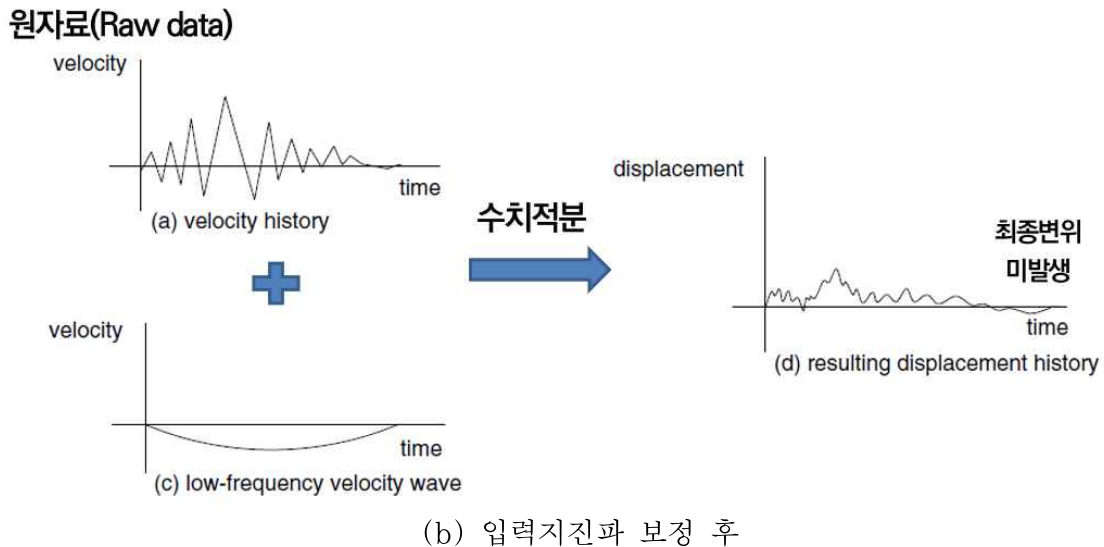
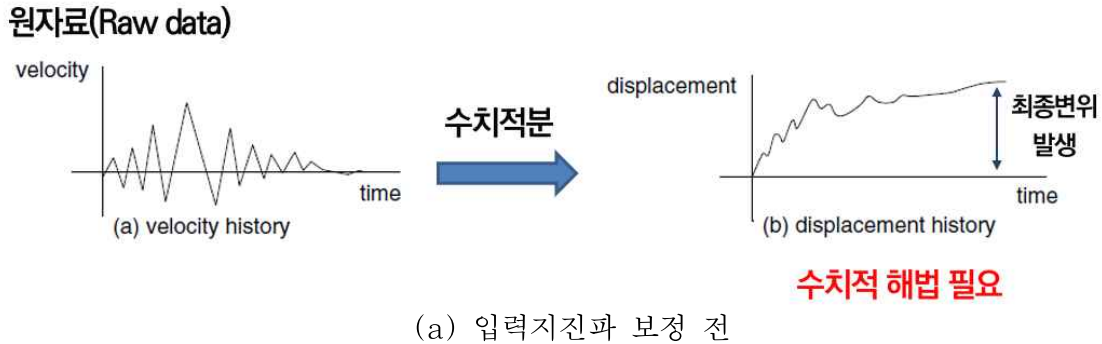


그림 4.12 Procedure of baseline correction

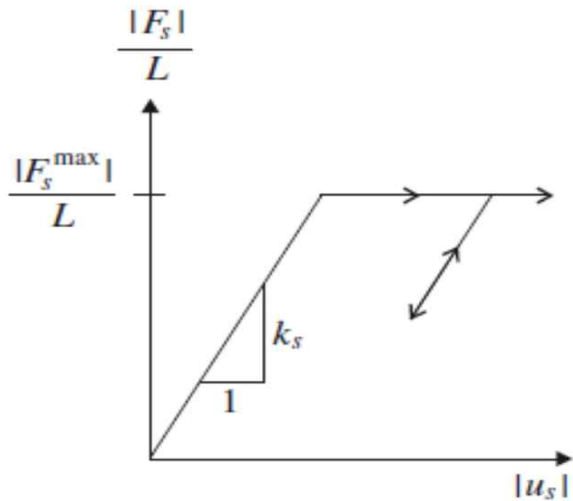
- 말뚝-지반 경계물성 산정

상용 수치해석 프로그램에 따라 이질재료간의 거동을 모사하는 방법은 상이하나, 경계물성에 대한 입력이 필수적이다. 모사방법의 차이로 요구되는 물성이 다를수 있으나, 경계물성 산정은 실내 실험을 통해 확인하는 것이 가장 바람직하다. 유한차분법을 따르는 FLAC에서는 말뚝-지반 거동은 쿨롱마찰(Coulomb friction)을 따르며, 전단방향, 법선방향의 결함강도(k_s, k_n), 점착력(c_s, c_n), 마찰각(ϕ_s, ϕ_n)로 표현가능하다. 다만 결함강도는 수치해석 계산을 위한 국부강성행렬(local stiffness matrix)를 구성하기 위한 가상의 값으로 무한의 크기를 가지는 것이 좋다. 하지만 이렇

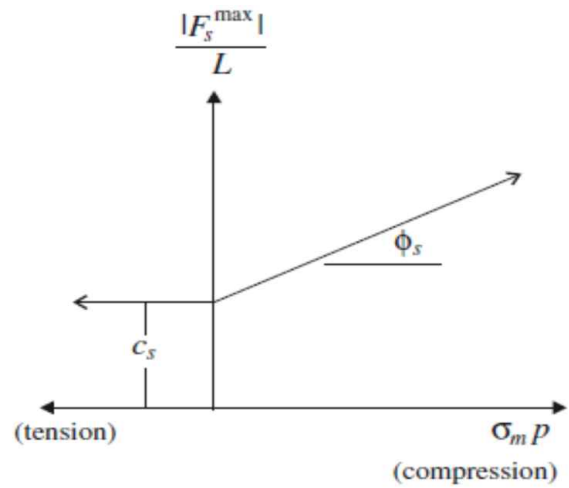
경우 해석간격이 극단적으로 감소함으로 해석시간에 영향이 주지 않는 선에서 큰 값을 적용한다. 점착력, 마찰각은 다양한 연구자들에 의해 제안되었으나, 총 100 가지 이상의 경우에 대한 원심모형실험 기반 검증을 통해 다음 경험식을 선정하였다.

$$\phi_s = \phi_n = \phi_{\max} - 5^\circ$$

여기서, ϕ_{\max} : 지반의 최대 내부마찰각

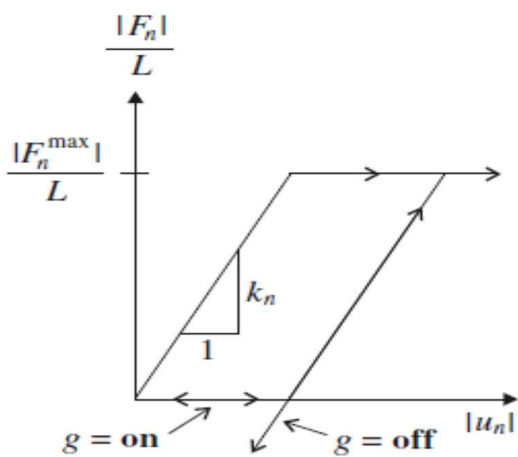


(a) Shear force/length vs relative shear displacement

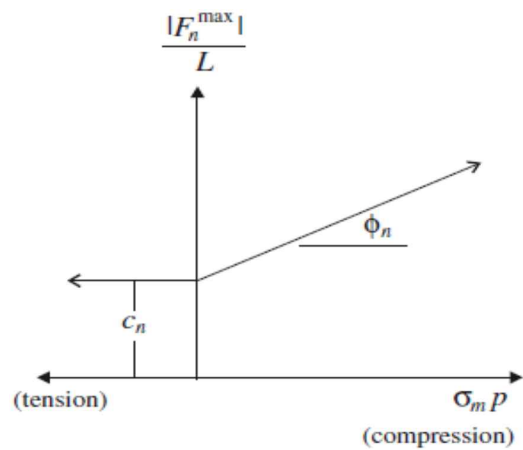


(b) Shear-strength criterion

그림 4.13 Behavior of pile element along with shear-direction (Itasca Consulting Group, 2023)



(a) Shear force/length vs relative shear displacement

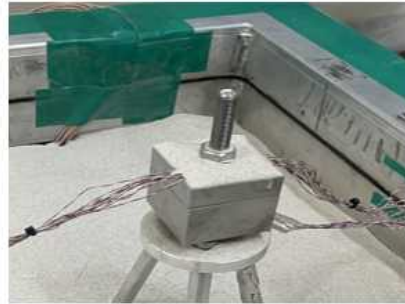


(b) Shear-strength criterion

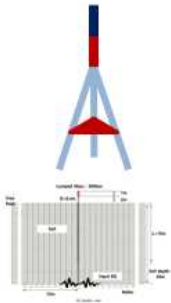
그림 4.14 Behavior of pile element along with normal-direction (Itasca Consulting Group, 2023)

- 상부 구조물 모델링

수치해석을 통한 상부 구조물 모델링 시 실제 구조물과 동일한 크기 및 요소로 모델링하는 것이 바람직하다. 구조물을 단순화하여 모델링(dumped mass)할 경우, 무게중심의 차이로 인해 실제 말뚝에 가해지는 힘이 달라질 수 있다. 다만 Shell 요소를 사용할 경우 동해석시 Locking 또는 spurious mode등의 문제로 인해 신중히 사용해야 한다.

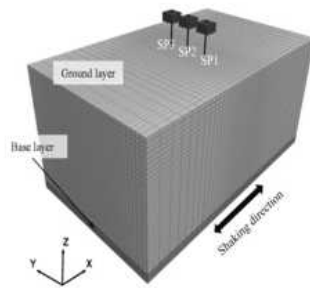


Case 1
1mX1mX1m의 Beam으로 모델링
(동일한 중량 8,064kg)



Case 2 **RECOMMEND**

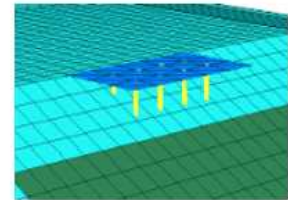
실제 Prototype과 동일한
형태 모양으로 모델링



Ref. FLAC3D Example

Wharf Subjected to Earthquake Load

Problem Statement



2D 모델에서 구조물을 Beam으로 구현(두께 0.3m)

3D 모델에서 구조물을 Shell로 구현(두께 0.3m)

그림 4.15 Super structure modeling

(2) 시간이력동적해석을 위한 고려사항 설계안 반영

삼축내진말뚝에 대한 시간이력 동적해석 수행시 다음과 같은 항을 고려해야 한다.

1. 삼축내진말뚝의 내진 안정성 정밀평가는 시간이력동해석을 통해 수행할 수 있다.
2. 정밀평가에서 말뚝의 내진 안정성은 시간이력동해석에 의한 최대말뚝두부변위와 최대휨모멘트를 바탕으로 평가한다.
3. 지진하중은 내진설계일반 (KDS 17 10 00)에 따라 기반암에 대해 작성된 설계지반운동을 사용한다.
4. 수치해석 시 지반 요소크기를 파동전달이 가능한 크기로 하여야 하며, 해의 정확도 향상을 위해 요소의 수를 조절할 수 있다. 예를 들어, 유한차분 프로그램인 FLAC3D를 이용할 경우, 요소의 크기는 아래와 같이 산정할 수 있다.

$$\Delta l \leq \frac{\lambda}{8 \sim 10}, \quad \lambda = \frac{V_s}{f}$$

여기서, λ : 지진파의 파장, f : 지진파의 주파수, V_s : 지반의 최소 전단파속도

5. 지반 감쇠모델과 함께 구조물에 대해 추가적인 감쇠를 적용하여 수치해석적 노이즈를 제거할 수 있다.
6. 입력 지진파의 특성에 따른 경계조건 설정이 필요하며, 입력 지진파는 적절한 보정 후 사용할 수 있다.
7. 말뚝-지반 경계물성은 실내 실험을 통해 산출하는 것이 가장 바람직하나 경험식을 사용하여 대신할 수 있다.

$$\phi_s = \phi_n = \phi_{\max} - 5^\circ$$

여기서, ϕ_{\max} : 지반의 최대 내부마찰각

8. 상부 구조물 모델링 시 실제 구조물과 동일한 요소로 사용하는 것을 추천한다.

제4장

결론

1. 결론

2022년 한국건설기술연구원은 주요사업의 일환으로 중소·중견기업의 수요를 기반으로 원내 연구자와 기업 간의 기술사업화 지원사업을 추진하였다. 국내 기업이 보유하고 있는 기술 중에 지자체가 당면하고 있는 문제를 해결하는 데에 활용될 수 있는 기술의 기술개량/개선, 성능평가, 특허출원, 기술이전 실시를 통한 개발 기술의 사업화라는 목표를 달성하기 위하여 추진된 사업이다.

이에 본 사업은 지원기업에 개발한 삼축내진 말뚝파일의 내진성능을 검증하고 건축물의 내진보강 분야의 시장진출을 지원하고자 수행되었으며, 원심모형실험을 통하여 삼축내진말뚝의 지지 메커니즘을 검증하였고, 2차원 3차원 수치해석을 통해 모델링 및 내진성능 검증을 통하여 설계 정량화를 위한 변수연구를 수행을 바탕으로 특허를 출원하였다. 또한, 동적원심모형실험 및 수치해석 변수연구 보완을 통하여 삼축내진 말뚝의 설계안을 마련하고자 한다. 연구결과를 정리하면 다음과 같다

2. 동적원심모형실험을 통한 삼축내진말뚝 내진성능 검토

본 연구에서는 원심모형실험을 통하여 삼축내진말뚝의 지진하중에 대한 응답특성평가 및 내진성능 향상 메커니즘을 검증함으로써 개선사항 도출을 목적으로 실험을 하였다. 이를 통해 삼축내진말뚝의 원심모형실험에 따른 가속도 증폭 특성, 수평 및 수직변위와 변형률 결과 분석을 통하여 삼축내진말뚝의 내진성능에 대한 평가를 수행하였다. 동적원심모형 실험 결과는 다음과 같다.

최대입력 지진가속도가 약 0.2g인 Capetown, San Fernando, ramped sine 2 Hz를 가했을 때 San Fernando와 ramped sine 2 Hz의 경우 연직말뚝(0°)에서 가장 큰 가속도 응답을 보였지만, 다른 입력 지진가속도와 San Fernando와 ramped sine의 경사말뚝 (15°, 30°)간의 가속도에서의 영향은 거의 없었다. 레이저 센서로 측정하여 얻은 삼축내진 말뚝 상부 질량체의 움직임을 통하여 확인한 삼축내진말뚝의 수직 및 수평변위는 설치각도가 클수록

수평변위가 작게 확인이 되었으며, 각도 0°에서의 가장 큰 수평변위를 확인하였다. 또한 수직 변인 침하량의 경우 15°에서 가장 작은 변위값을 확인하였다. 삼축내진 말뚝의 변형률은 상단 부에서 가장 큰 변형이 나타났으며, 설치각도가 작을수록 변형율이 작게 확인되었다. 연직말뚝이 경사말뚝보다 변형률이 크게 발현되었으며, 이와 같은 결과는 말뚝 상부와 하부의 변위 차이가 경사말뚝보다 큰 것으로 판단된다. 동적원심모형실험을 통하여 삼축내진말뚝의 설치각도가 증가할수록 내진성능이 향상되는 것을 확인하였으며, 시공성과 내진성능을 고려 시 설치각도가 15°에서의 삼축내진말뚝의 내진성능이 우수한 것으로 확인되었다.

3. 수치해석을 통한 삼축내진말뚝 내진성능 검토

본 연구에서는 삼축내진말뚝의 내진성능 검증을 위하여 모델링 및 입력물성치 산정을 통한 내진성능을 검증하였으며, 이를 통하여 변수연구를 통한 설계정량화를 목표로 하였다. 수치해석 결과는 다음과 같다.

삼축내진말뚝의 수치해석을 위하여 FLAC3D 프로그램을 사용하였으며, 3개의 말뚝요소는 최상단에서 절점을 공유하며, 프로토타입의 거동을 묘사하기 위하여 상부 0.3m 위치에 스티프너 역할을 할 수 있도록 셀요소를 이용하여 강결하였다. 이를 통하여 실제 커플러(Coupler)의 거동을 묘사할 수 있도록 수치모델이 구성되었다. 하부지반은 가로 116m, 세로 96m의 크기로 상부 건축물의 거동에 영향이 미치지 않는 범위까지 모델링 되었으며, 지표면 30m 두께의 퇴적모래층, 20m 두께의 풍화암층으로 구성하였으며, 암반은 50m 깊이에 위치하고 있다. 수치해석 모델링에 지하수위는 고려하지 않았으며, 지반의 최소감쇠비를 표현하기 위하여 레일레이 감쇠비 1%를 적용하였다. 반복하중에 대한 지반의 비선형 거동특성은 PH-Small 모델 이용하여 적용하였다. 상부 구조물은 보-기둥-슬래브로 구성되는 철근콘크리트 구조물로 모델링 되었으며, 삼축내진말뚝은 기초면을 구성하는 보에 강결되어 말뚝머리 고정거동을 나타내도록 하였다. 보의 단면제원은 40 × 75 cm 인 철근콘크리트 직사각형 단면이며, 기둥은 50 × 50 cm 인 철근콘크리트 기둥이다. 1층 기초바닥 슬래브는 4m x 4 m 간격의 격자로 구성된 보 사이로 철근콘크리트 슬래브가 위치하고 있으며, 철근콘크리트 슬래브는 두께 20 cm인 셀요소로 각층의 보요소에 연결되도록 모델링 하였다.

정적수치해석의 말뚝재하시험에서의 수평 재하실험 결과는 삼축내진말뚝 최상단 연결부재 최상단에 수평하중을 재하하는 경우 연결부재의 변형이 말뚝의 변위에 포함되어 삼축내진말뚝 연결부 하중재하의 경우에 비하여 큰 변위를 확인하였다. 또한, 반복하중 재하에 대해서 구성된 수치해석 모델은 반복하중에 대한 지반의 에너지 감쇠 이력곡선을 잘 표현할 수 있음을 확인 하였다. 연직 재하실험 결과 초기 수평하중 40 kN 이내의 범위에서도 지반모델에 따른 거동의 차이가 발생하며 수평변위의 크기는 $E_{50} > E_0 > PH Model$ 을 적용한 순으로 나타났다.

특히, 말뚝의 지지력 이전 구간에서도 말뚝-지반간 경계요소 정의를 위해 필요한 전단강성 k_s 에 따른 거동변화 구간이 발생함을 알 수 있다. 인발시험에서는 지반모델의 큰 차이가 발생하지 않았다. 일반 마이크로파일의 지지력은 수평 재하시험 시 19.4kN, 수직 재하시험 시 192kN, 인발시험 시 194kN인 반면, 삼축내진말뚝의 지지력은 69.9kN, 273kN, 243kN을 보였다. 지지력 증가율은 수평 재하시험, 수직 재하시험, 인발 시험에 대해 각각 360%, 140%, 125%을 보여, 수평력에 대한 저항이 더욱 큰 것을 확인하였다. 삼축내진말뚝 적용여부 결과와 유사하게 설치각도가 증가함에 따라 수직력 및 인발력에 대한 저항보다 수평력에 대한 저항이 더 큰 것을 확인하였다. 말뚝길이가 증가할수록 수직력에 대한 저항이 수평력에 대한 저항보다 더 큰 것으로 확인되었다. 설치각도 변화는 수평 지지력에, 말뚝길이 변화는 수직 지지력에 지배적인 인자로 판단된다.

동적수치해석의 지진응답 해석결과 지반으로 전달되는 지진에너지의 무한 수평지반으로 소산되는 것을 모델링하기 위하여 자유장 요소를 적용하였다. 입력지진기록대비 지표면 자유장에서 가속도 신호기록의 증폭이 발생함을 확인하였으며, 건축물의 경우 건축물의 고유주기로 인하여 지진하중 재하 후 일정기간동안의 응답이 유지됨을 확인하였다.

4. 실험 및 해석기반 내진성능 산정방법 도출

본 연구에서는 삼축내진말뚝의 내진성능 산정법을 도출하기 위해 추가적인 동적원심모형 및 유한차분 해석 수행하였다. 이를 바탕으로 변수연구를 수행하여 설계 변수를 보완하고 삼축내진말뚝의 내진성능 간이 평가법을 제안하였다. 도출된 내진성능 간이평가법은 다음과 같다.

수행된 원심모형실험 내용을 분석한 결과, 삼축내진말뚝은 같은 조건의 기존마이크로파일에 비해 현저히 높은 내진성능을 보이는 것으로 나타났다. 실험 결과에 따르면 삼축내진말뚝은 말뚝두부의 최대수평변위에 대해서는 평균 65.4%의 감소효과를, 최대휨모멘트에 대해서는 평균 74.3%의 감소효과를 나타내었다. 그러나, 해당 실험 결과는 여러 가지 환경적 요소들을 완벽히 통제할 수 있는 실내 실험실 조건에서 특정 지진하중에 대해 얻은 결과이기 때문에 일반적인 상황에 그대로 적용하기에는 어려움이 있다. 따라서, 본 실험에서 얻은 보수적인 실험결과를 바탕으로 다음과 같이 등가정적해석을 통해 얻은 기존마이크로파일의 내진성능에 대해 감소계수를 적용하는 간이산정방법을 적용할 수 있다.

$$y_{\max}^{TSP} = 0.7 \times y_{\max}^{CMP}$$

$$M_{\max}^{TSP} = 0.7 \times M_{\max}^{CMP}$$

여기서, y_{\max} : 말뚝두부 최대수평변위, M_{\max} : 말뚝 최대휨모멘트, TSP : Triaxial Seismic Pile (삼축내진말뚝), CMP : Conventional Micro Pile (기성마이크로파일)

5. 동적하중을 고려한 삼축내진말뚝 설계안 제시

본 연구에서는 동적하중을 고려한 삼축내진말뚝의 설계안을 제시하기 위해 다양한 경험식 및 총 100가지 조합을 이용한 시간이력동적해석을 수행하였다. 이를 바탕으로 삼축내진말뚝에 적합한 말뚝-지반 경계물성 경험식을 선정하고, 시간이력동해석에 관련된 고려사항을 다음과 같이 제시하였다.

1. 삼축내진말뚝의 내진 안정성 정밀평가는 시간이력동해석을 통해 수행할 수 있다.
2. 정밀평가에서 말뚝의 내진 안정성은 시간이력동해석에 의한 최대말뚝두부변위와 최대휨모멘트를 바탕으로 평가한다.
3. 지진하중은 내진설계일반 (KDS 17 10 00)에 따라 기반암에 대해 작성된 설계지반운동을 사용한다.
4. 수치해석 시 지반 요소크기를 파동전달이 가능한 크기로 하여야 하며, 해의 정확도 향상을 위해 요소의 수를 조절할 수 있다. 예를 들어, 유한차분 프로그램인 FLAC3D를 이용할 경우, 요소의 크기는 아래와 같이 산정할 수 있다.

$$\Delta l \leq \frac{\lambda}{8 \sim 10}, \quad \lambda = \frac{V_s}{f}$$

여기서, λ : 지진파의 파장, f : 지진파의 주파수, V_s : 지반의 최소 전단파속도

5. 지반 감쇠모델과 함께 구조물에 대해 추가적인 감쇠를 적용하여 수치해석적 노이즈를 제거할 수 있다.
6. 입력 지진파의 특성에 따른 경계조건 설정이 필요하며, 입력 지진파는 적절한 보정 후 사용할 수 있다.
7. 말뚝-지반 경계물성은 실내 실험을 통해 산출하는 것이 가장 바람직하나 경험식을 사용하여 대신할 수 있다.

$$\phi_s = \phi_n = \phi_{\max} - 5^\circ$$

여기서, ϕ_{\max} : 지반의 최대 내부마찰각

8. 상부 구조물 모델링 시 실제 구조물과 동일한 요소로 사용하는 것을 추천한다.

참고문헌

1. American Petroleum Institute (2014). Geotechnical and foundation design considerations. API RP 2GEO. Washington, DC: API.
2. Benz, T. (2007). "Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences", Phd, UniversitatStuttgart
3. Chanh, P. V., Tran, N. X., & Kim, S. R. (2018). 2D Numerical Simulation of a Dynamic Centrifuge Test for a Pile-Supported Structure. Journal of the Korean Geotechnical Society, 34(8), 15-26.
4. Escoffier, S., Chazelas, J. L., & Garnier, J. (2008). Centrifuge modelling of raked piles. Bulletin of earthquake engineering, 6(4), 689-704.
5. FHWA(2005), "Micropile Design and Construction", United States Department of Transportation, No.FHWA NHI-05-039, December, pp.6-30~6-57.
6. Hussain, Z., Sharma, B., & Rahman, T. (2019). Micropile group behaviour subjected to lateral loading. Innovative Infrastructure Solutions, 4, 1-9.
7. Hussien, M. N., Tobita, T., Iai, S., & Karray, M. (2016). Soil-pile-structure kinematic and inertial interaction observed in geotechnical centrifuge experiments. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 89, 75-84.
8. Itasca Consulting Group (2023), Itasca's FLAC3D 7.0 Documentation, Minnesota, USA.
9. K. Abdollahi, A. Mortezae(2015), "A new expression for determining the bending stiffness of circular micropile groups" Soil Dynamics and Earthquake Engineering, pp.58-70.
10. Kim, J.H., Hwang, J.I., Han, J.T., and Kim, M.M. (2001), Dynamic Analysis of Inclined Piles and Countermeasures against their Vulnerability, Proceedings of EESK Conference-Fall 2001, Korea, pp.107-115
11. Kuhlemeyer, R.L. and Lysmer, J. (1973), Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems, J. Soil Mech. & Foundations, Div. ASCE, 99(SM45), pp.421-427
12. Lee, J. S., Chae, H. G., Kim, D. S., Jo, S. B., & Park, H. J. (2015). Numerical analysis of inverted T-type wall under seismic loading. Computers and geotechnics, 66, 85-95.
13. Lee, S. H., Choo, Y. W., & Kim, D. S. (2013). Performance of an equivalent shear

- beam (ESB) model container for dynamic geotechnical centrifuge tests. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 44, 102-114.
14. Lizzi, F.(1982), "Static of Monuments", Sagep Publisher, Genoa, Italy
 15. Petrasovits, G. and Award, A. (1968), "Consideraion on the Bearing Capacity of Vertical and Batter Piles subjected to Forces acting in Different Directions", *Proceedings 3rd Budapest Conf. Soil. Mech. Found. Engg.*, Akademiak Kiado, Budapest, pp.. 483-497.
 16. Tsukada, Y., Miura, K., Tsubokawa, Y., Otani, Y. and You, G.(2006), "Mechanism of Bearing Capacity of Spread Footings Reinforcing with Micro-piles", *Journal of Soil and Foundation*, Vol.46, No.3, pp.367~376.
 17. Yoo, M. T., Choi, J. I., Han, J. T., & Kim, M. M. (2013). Dynamic py curves for dry sand from centrifuge tests. *Journal of earthquake engineering*, 17(7), 1082-1102.
 18. Zhang, F., Okawa, K., & Kimura, M. (2008). Centrifuge model test on dynamic behavior of group-pile foundation with inclined piles and its numerical simulation. *Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China*, 2(3), 233-241.
 19. 국토교통부 (2016), "깊은기초 설계기준(한계상태설계법) KDS 11 50 20".
 20. 국토교통부 (2018), "내진설계 일반 KDS 17 10 00".
 21. 국토교통부 (2022), "건축물 기초구조 설계기준 KDS 41 19 00".
 22. 오정배, 황태현, 허인구, 신종호, 권오엽(2015), "파일길이비와 파일설치각도에 따른 마이크로파일 수평지지특성", *한국지반공학회 논문집*, 제31권, 제6호, pp.5~13.
 23. 유민택, 이명재, 백민철, 추연욱, & 이일화. (2019). 원심모형 실험을 통한 궤도지지말뚝구조의 동적 거동 평가. *한국지반공학회논문집*, 35(2), 5-17.
 24. 황태현, 김무연, 이영생(2020), "모형시험을 통한 복열 마이크로파일의 설치조건에 따른 수평지지력 변화", *한국지반공학회 논문집*, 제36권, 제11호, pp.35~49.

서지자료

1. 출판물 고유번호 KICT 2023-115	2. 사업분류 주요사업	3. 발행일 2023.12.31	
4. 제목/부제 건축물 내진성능 확보를 위한 삼축내진말뚝 개선 연구(2/2)		5. 연구수행기간 2023.01.01.-2023.12.31	
6. 연구수행기관 한국건설기술연구원		7. 연구 수행자 한진태, 김종관, 김석중, 전준서, 박가현, 유병수, 루이스 디에고 에레라, 메론 알레마추 메코넨	
8. 수행기관 주소 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283		9. 연구의뢰기관 및 주소 -	
10. 공동 수행기관 -		11. 계약 또는 인가번호 -	
12. 초 록 최근 건축물의 기초가 구조부재에 포함되도록 건축구조기준이 개정되어 향후 말뚝기초 또한 건축물 기둥과 같이 구조부재로 간주하여 내진성능을 필요로 한다. 건축물의 구조기준 등에 관한 규칙에 따라 향후 건축물의 기초도 기둥, 보 등과 같이 구조부재로 간주되며 지진 시 안정성을 확보하도록 설계하여야 한다. 이러한 내진성능 확보에 관한 규정은 이미 법적으로도 강제되어 있으나, 현재 건축물 기초의 내진설계는 적확하게 수행되지 않고 있는 실정이다. (주)에스아이텍에서 개발한 삼축내진말뚝은 소규모 건축물 기초 내진설계에 적용하기에 적합한 공법으로, 2020년 KICT 공모과제(코로나19대응 건설(연)중소중견기업 지원프로그램)에서 S등급을 받아 시작품 제작 완료했으나, 다음과 같은 애로사항 해결 및 성능 개선 연구 필요하다. 본 연구에서는 지원기업의 보유기술인 삼축내진말뚝에 대하여 지진하중에 대한 삼축내진말뚝 안정성 검증, 지지 메커니즘 분석을 통한 삼축내진말뚝 설계 프로세스 정립, 삼축내진말뚝 설계지침 제도화에 대한 연구를 수행하였다.			
13. 키워드 말뚝, 지진, 내진설계, 기초, 복합기초			
14. 기타사항			
15. 비밀구분	16. 총면수 57	17. 발행부수	18. 가격

Bibliographic Data

1. Report ID KICT 2023-115	2. Project Classification Internal Research Project	3. Report Date December 31, 2023	
4. Title A study on the improvement of triaxial seismic piles to secure the seismic performance of buildings(2/2)		5. Research Period January. 1, 2023 ~ December. 31, 2023	
6. Performing Organization KICT		7. Authors J.T. Han, J.K. Kim, S.J. Kim, J.S. Jeon, K.H. Park, B.S. Yoo, L.D. Herrera, M.A. Mekonene	
8. Performing Organization Address 283, Goyangdae-Ro, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea		9. Sponsoring Agency None	
10. Joint Research Organization None		11. Contract or Grant No. None	
12. Abstract <p>Recently, the building structure standard has been revised to include the foundation of a building as a structural materials, and in the future, pile foundations are also regarded as structural materials like building columns and require earthquake resistance. In accordance with the ‘Rules on the Structural Standards of Buildings’, foundations of future buildings are regarded as structural materials such as columns and beams, and must be designed to ensure stability in the event of an earthquake. Although the relevant regulations for securing such seismic performance are already legally enforced, the current situation is that the seismic design of building foundations is not being carried out accurately. The triaxial seismic pile developed by SY Tech Co., Ltd. is a construction method suitable for application to the earthquake-resistant design of small-scale building foundations. In 2020, the KICT contest task (Corona 19 Response Construction (Small and Medium-sized Enterprise Support Program)) received the S grade and completed the production of the prototype. However, it is necessary to solve the following difficulties and study performance improvement. In this study, studies were conducted on triaxial seismic pile stability verification against seismic load, establishment of triaxial seismic pile design process through support mechanism analysis, and institutionalization of triaxial seismic pile design guidelines for the triaxial seismic pile, which is a technology possessed by the supporting company.</p>			
13. Keywords Pile foundation, earthquake, seismic design, foundation, piled raft foundation			
14. Supplementary Notes			
15. Security Class	16. No. of Pages 57	17. Circulation	18. Price

주의사항

1. 이 보고서는 한국건설기술연구원에서 수행한 중소·중견기업 수요기반 기술사업화 지원사업의 연구보고서입니다.
2. 이 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 한국건설기술연구원의 중소·중견기업 수요기반 기술사업화 지원사업 연구결과임을 밝혀야 합니다.

KICT 2023-115

건축물 내진성능 확보를 위한

삼축내진말뚝 개선 연구(2/2)

- 발행일 / 2023. 12. 31
- 발행인 / 김 병 석
- 발행처 / 한국건설기술연구원
경기도 고양시 일산서구 고양대로 283번지
TEL : (031) 9100-114
www.kict.re.kr
- 인쇄처 / 카피코