

진동대 실험을 통한 흙막이 벽체의 변위 거동 특성

Displacements Behavior of Retaining Walls by Shaking Table Test

윤원섭^{1*}, 윤부열², 양철규³, 박연준⁴

Won-Sub Yoon^{1*}, Bu-Yeol Yun², Chul-Kyu Yang³, Yeon-Jun Park⁴

〈Abstract〉

In this study, experiments were carried out after fabricating and installing a physical model considering the size of the prototype. In the model test, the number of struts placed on the wall and the applied acceleration were selected as test variables. Two different types of waves, long-period and short-period, were applied with magnitudes of 0.05g, 0.1g, 0.2g, and 0.3g. Measured are displacements at specified points. As a result of the analysis, displacement exceeding the allowable displacement of the wall occurred at an acceleration greater than 0.05g to 0.1g depending on the seismic waves applied. Therefore guidelines have to be established through further studies for aseismic design of earth retaining walls.

Keywords : Model test, Earth retaining walls, Earthquake

1* 교신저자, 정회원, 창신대학교 토목공학과 교수,
E-mail: totoma13@cs.ac.kr

2 정회원, 창신대학교 토목공학과 교수

3 비회원, NI 스틸, 상무

4 비회원, 수원대학교 토목공학과 교수

1 Dept. of Civil Engineering, Chang-Shin University

2 Dept. of Civil Engineering, Chang-Shin University

3 Managing Director, N.I STEEL Co., Ltd.

4 Dept. of Civil Engineering, The University of Suwon

1. 서론

가설 구조물인 흙막이 벽체에 발생하는 토압과 변위는 콘크리트 옹벽 등의 강성구조물에 비해 연성 거동을 하게 된다. 연성 거동을 하게 되면 흙막이 벽체에서 발생하는 변위는 지진 규모와 보강량, 보강방법, 벽체 종류, 지반 종류 등에 따라 거동 특성이 다양하게 나타나게 된다.

최근 들어 Yoon et al.(2015), Yoon et al.(2016)의 지진 발생 시 거동 특성에 대해 수치 해석과 진동대 실험을 통한 국내 연구가 진행되었으나, 연구 조건이 단편적으로 진행되었을 뿐 다양한 조건에서의 연구는 없는 실정이다. 흙막이 구조물은 가설구조물로 구조물이 시공되는 동안 지진 발생 확률이 낮다는 이유 때문에 관련 연구는 지금까지 미비할 수 밖에 없었다.^{1) 2)}

또한 흙막이 구조물에 대한 지진 시 적용할 수 있는 토압에 대한 최근 연구는 기존에 적용하던 지진 시 토압 공식은 강성구조물에 적용되는 토압론이기 때문에 흙막이 구조물에 적용할 경우 실제 토압보다 작게 평가될 수 있어 구조물 종류와 발생 변위에 따라 지진 시 토압의 산정방법을 다르게 적용하는 것이 타당한 것으로 제안한 바 있다 (Hwang et al., 2006).³⁾

하지만 기존의 연구 대부분이 흙막이 구조물의 지진 시 거동을 명확히 정의하지 못하고 있어 추가적이고, 지속적인 흙막이 구조물에 대한 연구가 진행될 필요가 있다. 또한 국내의 연구 실적이 미진하기 때문에 지진 발생 시 흙막이 구조물의 붕괴를 예측하는 것이 어렵기 때문에 국내에서 지진이 발생할 경우 흙막이 구조물의 붕괴로 인한 대규모 인명 및 재산피해 규모의 예측은 더욱 어려울 수 밖에 없다.

이러한 연성벽체인 흙막이 구조물의 붕괴를 예측하기 위해서는 붕괴의 기준이 되는 발생 변위에

대한 지진 시 거동 연구부터 지속적으로 진행될 필요가 있다. 연구과정에서 변위와 토압, 가속도의 관계와 흙막이 구조물의 종류, 다양한 지진조건 등에서의 거동 특성에 대한 많은 연구가 필요한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 기존에 발생확률이 낮아 지진에 대한 안전성을 고려하지 않았던 가설 흙막이 구조물의 지진 시 거동 특성에 대해 분석하였다. 지진 시 거동특성 분석을 위해 흙막이 벽체의 보강재 설치량 및 가진 가속도의 크기, 지진파의 종류 등의 변수를 고려하여 지진 시 변위 거동특성에 대해 분석하였다.

2. 연구방법

본 연구의 흙막이 벽체는 안정성과 경제성을 확보하기 위해 벽체에 설치하는 보강량과 가진 가속도의 크기에 대한 결과를 분석하여 지진 시 거동 특성에 대해 분석하였다. 지진 시 변위 거동 특성을 분석하기 위해 다음과 같이 모형실험을 실시하였다.

2.1 실험 재료

모형 실험기의 토조 벽체는 실험 결과에 가장 작은 영향을 미칠 수 있도록 20mm 두께의 매끄럽고 견고한 재질인 아크릴로 제작된 것으로 하였다. 모형 토조는 길이 2m, 폭 0.6m, 높이 0.7m를 사용하였고, 유압잭을 이용하여 수평진동을 가할 수 있으며, 최대 1g까지의 지진가속도를 가할 수 있다.

본 연구에서 사용된 흙막이 벽체의 높이를 10m로 가정하였기 때문에 모형 실험기의 크기와

Table 1. Acrylic material

Division	Material Property	Result	Units
Acrylic material	Specific Gravity	1.19	-
	Tension Strength	670 ~ 780	MPa
	Elongation	10 ~ 20	%
	Charpy	1.0	MPa

구조물 크기를 고려하여 상사율을 결정하였다. 또한 도심지 굴착의 경우 일반적으로 10m(지하 2층~3층) 굴착을 시행하므로 이번 실험에서 벽체의 높이를 10m로 계획하였다.

벽체의 재료는 아크릴로 제작하였으며, 아크릴 재료 특성은 Table 1과 같으며, Fig. 1(a)와 같이 토압을 H-pile로 전달해주는 벽체(판)를 95mm×500mm×3mm(가로×세로× 두께)로 제작하였다.

Fig. 1(b)와 같이 벽체(pile) 설치 시 사용된 H-pile이며, 스틸로 제작되어 흙의 폭은 벽체 두

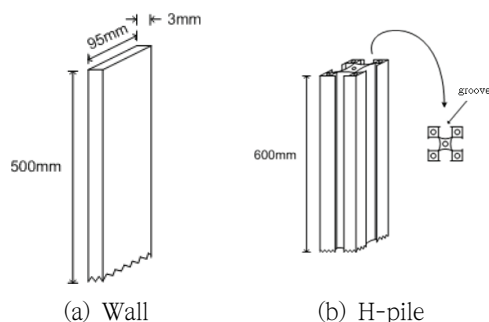


Fig. 1 Wall and H-pile material

께에 맞게 3mm로 제작하였다. 실험에 사용된 H-pile은 강성이 큰 스틸 재료를 사용하였으며, 상사율에 따라 길이는 600mm로 제작되었다. 사용 재료는 비교적 강성이 크고, 단단한 재료를 사용하였다. 흙막이 구조물 시공은 단면 폭 600mm, 단면 높이 700mm인 모형 토조 안에 흙을 채우면서 벽체를 H-pile 홈에 끼워가며 시공하였다.

모형실험에서 사용하는 재료는 물리적 특성에 따라 실험결과에 큰 영향을 미치므로 실제 시공현

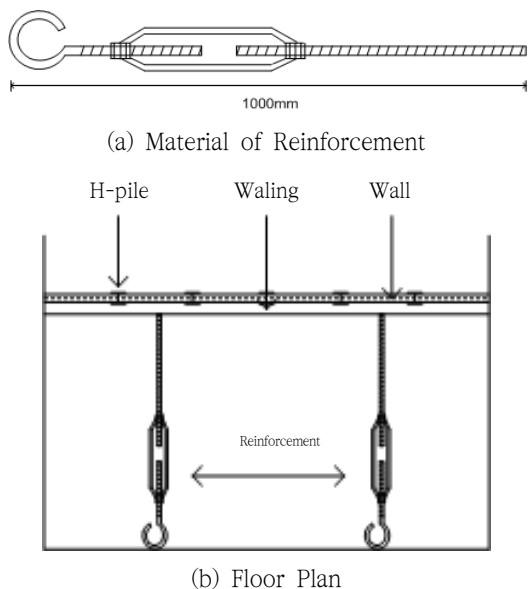


Fig. 2 Reinforcement installed cross section and used reinforcement

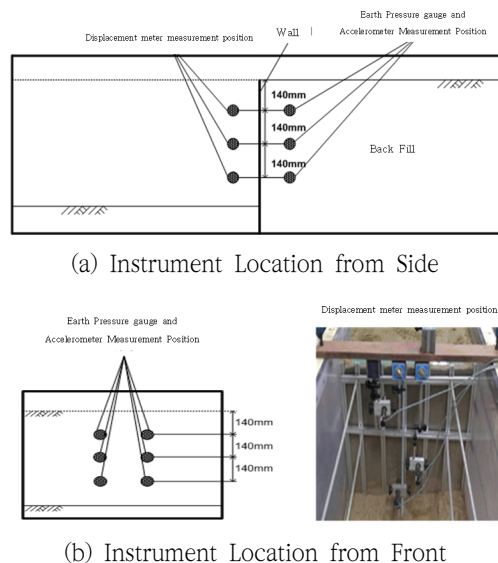


Fig. 3 Location of the instrument

Table 2. Result of sieve analysis

Division	Result	Grain-size Accumulation Curve
Maximum Particle Diameter(mm)	0.8	
#10(%)	99.3	
#40(%)	66.2	
#200(%)	1.4	
D ₁₀ (mm)	0.39	
D ₃₀ (mm)	0.305	
D ₆₀ (mm)	0.216	
Cu	1.8	
Cg	1.1	
USCS	SP	

장의 재료에 대해 상사비를 적용하여 결정하는 것이 중요하다.

사용된 재료 중 흙과 보강재가 가장 중요한 재료로 사용되었으며, 이 재료의 선정방법에 따라 실험 결과에 가장 큰 영향을 미치게 된다.

먼저 본 연구에서 뒤채움재로 사용된 흙의 밀도특성 및 물리특성을 분석하였다. 실험에 사용된 시료는 체가름시험을 통해 뒤채움재의 적합성을 판단하였고, 다짐시험과 상대밀도시험을 시행하여 시료의 특성을 파악하였다.

Table 2는 체가름시험 결과이다. 체가름시험을 통해 최대입경은 0.8mm이며, 10번체 통과량은 99.3%, 40번체 통과량은 66.2%, 200체 통과량은 1.4%로 뒤채움재에 필요한 조건에 부합하다는 결론을 도출하였다. 뒤채움재로 사용된 시료는 SP로 분류되었다. 본 연구에서 사용된 재료는 최대 입경을 제안하는 전두입도법에 의해 선정하여 최대 입경을 0.8mm로 선정하였다.

Table 3. Result of relative density

Maximum Dry Unit Weight (r_{dmax})	Minimum Dry Unit Weight (r_{dmin})	Dry Unit Weight (r_d)	Relative Density
17.56kN/m ³	12.78kN/m ³	14.62kN/m ³	46.23%

Table 3은 실험 시료의 상대밀도 특성이다. 최적함수비(w_{opt})는 12.30%, 최대건조단위중량(γ_{dmax})은 17.56kN/m³이며, 최소건조단위중량(γ_{dmin})은 12.78kN/m³의 결과를 보였다. 상대밀도 시험 결과 모형실험에서 조성된 지반의 상대밀도는 44.25%로 나타났다.

본 연구에는 strut을 이용한 버팀보 공법에 하중 재하는 스크류잭 방식을 이용하는 것으로 보강 재료를 선정하였다. Fig. 2는 모형실험에 사용된 보강재이다. 보강재는 나사식이며, 길이 조절이 편리하도록 되어있다.

2.2 계측기 설치

모형실험에서 계측기 설치 위치는 보강재 설치량 변화와 관계없이 여러 조건에서 동일하게 Fig. 3과 같이 적용하였는데, 계측기 위치는 뒤채움재

의 최상단에서부터 상부(0.28H, H:굴착깊이), 중간부(0.56H), 하부(0.84H)에 설치하였다.

을 상사율에 의해 계산한 것이다.

2.3 적용 상사비

본 연구에서는 구조물의 원형에 대한 거동을 분석하기 위해 Iai(1989)의 상사법칙을 적용하여 실험을 시행하였다.

모형실험에서는 실험기의 제원 및 제반 실험조건을 고려하여 실제 흙막이 벽체의 높이를 10m로 가정하여 1/20 크기로 모델링 하였다. 따라서 상사율을 고려한 벽체의 높이는 0.5m, 근입장은 0.1m, 보강재 길이는 1000mm이상 시공이 가능하도록 하였다. 실험 단면에 대한 계측 항목은 변위이고 Table 4는 모형실험에 사용된 각 물리량

2.4 실험단면 조성 및 적용지진파

실험준비는 지반 조성, 벽체, 보강재, 계측기 설치 등이 있다. 실험 지반을 습윤 상태로 조성하였으며, 실험 진행 시 지반의 거동변화를 확인하기 위해 지반조성을 실시하였고, 실험지반 조성 후 벽체 앞면에 변위계 3개소 설치하였다.

Fig. 4는 모형실험 과정이며, 보강재 4단 벽체의 모형실험 과정이다. 실험 시행 전에 모형 실험기 바깥면에 락 테이프를 이용해 벽체, 보강재, 계측기 위치를 표시하였다. 벽체는 H-pile 흠에 끼워 모형 실험기에 맞게 설치하였고, H-pile은 근입장을 고려하여 설치하였다.

보강재 설치는 하단부터 흠을 조성하면서 단계별로 설치하였고, 나사를 조절하며, 벽체에 단단히 밀착시켜 토압에 저항할 수 있도록 하였다.

구조물 내진설계에 사용가능한 실제 지진기록으로는 Tokachi-Oki(1968)와 Miyagi-Ken-Oki(1978) 지진 시 Hachinohe항과 Ofunato항에서 기록된 가속도시간이력이며, 국내에서 구조물 내

Table 4. Application of similarity law to model test

Division	Similarity Law	Application(1/20)
Displacement	$\lambda^{-1.5}$	89.44
Times	$\lambda^{0.75}$	9.46
Length	λ	20

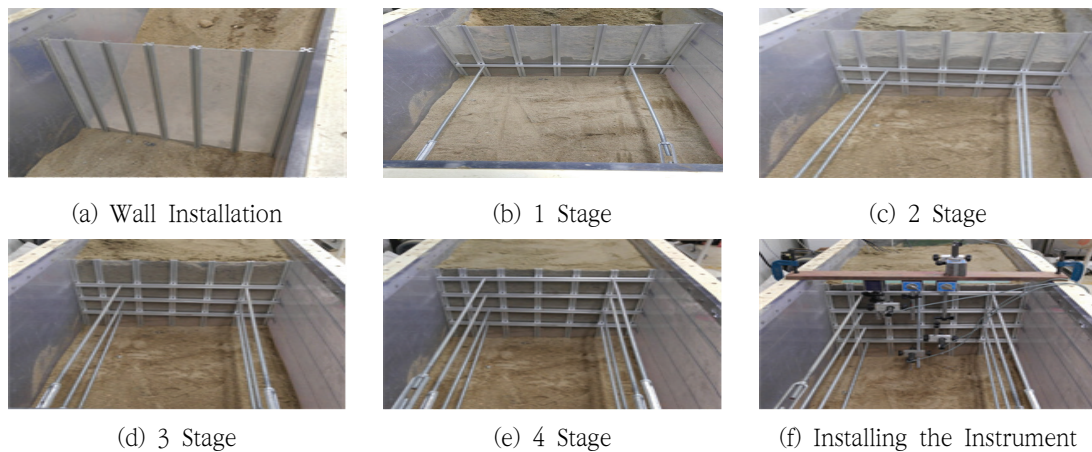


Fig. 4 Preparation of a model tests

진설계 시 주로 사용되는 자료이다.

Ofunato항의 가속도 시간이력곡선은 지표면에 노출된 기반암에서 조사되었으며, Hachinohe항의 지진기록보다 단주기의 지진이다. 내진설계 시 사용하기 위해 실 지진기록을 택할 때에는 장주기, 단주기 성분이 우세한 지진 모드를 고려토록 선택해야 한다. Fig. 5는 실험에 사용한 지진의 가속도 이력곡선이다.

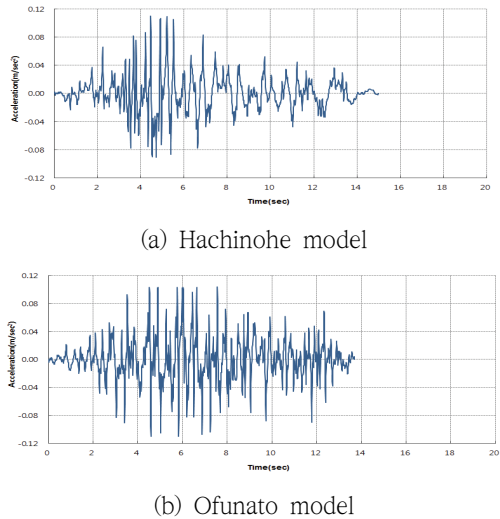


Fig. 5 Seismic waves applied to tests

3. 실험 결과 분석

본 연구에서는 H-pile + 토류판 공법과 strut 버팀보 공법으로 보강된 흙막이 구조물에 대한 가진 지진파 크기와 보강량에 따른 지진 시 흙막이 거동 특성을 진동대 실험 결과를 이용하여 분석하였다.

3.1 장주기

Table 5, Fig. 6은 장주기파 가진 시 변위 결과이다. 실험 결과 최대 변위는 0.3g 가속도가 가진 된 경우 196.77mm가 발생되었으며, 최소 변위는 0.05g 가진 시 4단 보강의 하부에서 13.10mm가 발생되었다. 보강 단수가 줄수록 0.05g 가진 시 상부에서 35%, 중간지점에서 29%, 하부에서는 33%가 감소되어 상부에서 변위 감소가 가장 크게 발생되었다. 0.1g 가진 시에는 하부에서 34%로 가장 많이 감소되었으며, 중간부에서 20%로 감소되었다.

0.2g에서 보강단수 증가에 따른 변위 감소비율은 최대 45%, 최소 12%의 변위 감소를 보였으며, 0.3g에서는 하부에서 최대 43%, 중간부에서 18%의 최소 감소율을 보였다. 낮은 가진 가속도에서는 상부에서 변위의 감소가 가장 컸으나 가진 가속도가 클수록 하부에서 변위의 감소율은 가장 크게 나타났다.

흙막이 벽체의 붕괴 기준은 일반적으로 허용 변위(H/300, H:굴착깊이)와 지반 굴착 시 발생하는 구조물 부재의 응력에 대해 판단하고 있다. 본 연구에서는 허용 변위를 기준으로 붕괴 여부에 대해 평가하였다. 실제 연구 대상 흙막이의 높이는 10m이므로 허용 변위는 33mm이 된다.

이 허용 변위 기준을 적용하여 흙막이 구조물의 안정성을 분석하면 장주기파에서 발생한 변위가 허용 변위를 초과하는 경우는 0.1g 가진 가속도에서는 2단 및 3단 보강 상부구간이상에서 허용 변위를 초과하였다. 0.2g에서는 하부구간 3단, 4단 보강, 0.3g에서는 4단 보강의 조건을 제외하고 모든 조건에서 허용 변위량을 초과하여 붕괴되는 것으로 분석되었다.

실제 현장에서 10m 지반 굴착에 따른 흙막이 공사 시 일반적으로 지반조건에 따라 3단에서 4

단의 보강이 이루어진다. 이 경우 0.1g 이상의 가진 가속도에 의한 지진이 발생할 경우 흙막이 구조물의 붕괴가 발생되어 피해가 발생하는 것으로 분석되었다.

Table 5. Result of displacement with long-period wave

Test Acceleration	Reinforced	Displacement(mm)		
		Upper Part	Middle Part	Lower Part
0.05g	2 Stage	27.68	22.68	19.68
	3 Stage	23.89	17.89	16.10
	4 Stage	17.89	16.10	13.10
0.1g	2 Stage	42.93	28.62	21.47
	3 Stage	39.36	25.68	19.10
	4 Stage	28.62	22.89	14.10
0.2g	2 Stage	75.13	48.30	42.93
	3 Stage	67.98	39.36	29.68
	4 Stage	66.19	33.99	23.68
0.3g	2 Stage	196.78	60.82	46.51
	3 Stage	177.10	57.24	40.41
	4 Stage	152.05	50.09	26.68

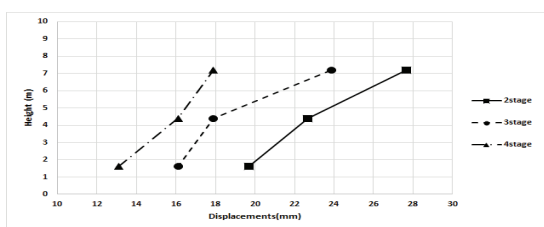
3.2 단주기

Table 6, Fig. 7은 단주기파 가진 시 변위 결과이다. 실험결과 최대 변위는 0.3g 가진 가속도가 가진된 경우 2단 보강에서 313.23mm가 발생되었으며, 최소 변위는 4단 보강에서 0.05g 가진 시 하부에서 13.89mm가 발생되었다.

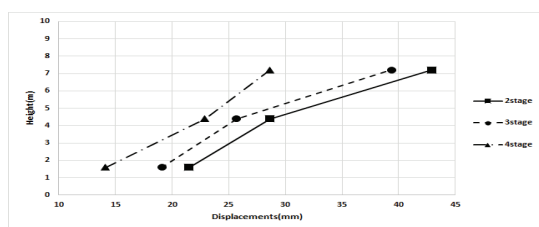
보강 단수가 줄수록 0.05g 가진 시 상부에서 38%의 변위가 감소되었으며, 중간지점에서 31%, 하부에서는 35%가 감소되어 상부에서 변위 감소가 가장 컸다.

0.1g 가진 시 하부에서 42%로 가장 많이 변위가 감소되었으며, 상부에서 31%로 가장 작았다. 0.2g에서는 하부에서 최대 41%, 상부에서 최소 35%의 감소되었으며, 0.3g에서는 중간부에서 최대 21%, 상부에서 23%의 최소 감소율을 보였다. 낮은 가진 가속도에서는 상부에서 변위의 감소가 가장 컸으나, 0.1g 이상에서는 가진 가속도가 클수록 하부에서 변위의 감소율은 가장 컸다.

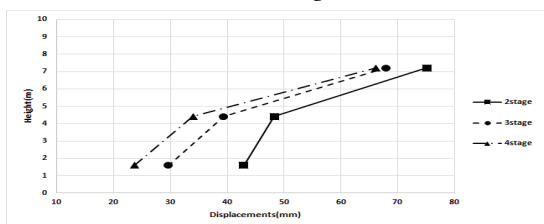
허용 변위 기준에 따른 구조물의 붕괴 발생 가



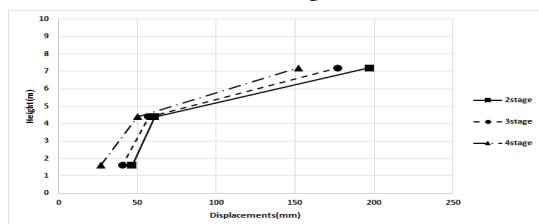
(a) 0.05g



(b) 0.1g



(c) 0.2g



(d) 0.3g

Fig. 6 Result of displacement with long-period wave

능성을 분석하면 단주기파에서 발생 변위가 허용 변위를 초과하는 경우는 0.05g 상부 2단, 3단 보강 조건에서 붕괴가 발생하는 것으로 분석되었으며, 0.1g 가진 가속도에서는 모든 보강조건에서 상부

구간에서 허용 변위를 초과 하였다. 0.2g에서는 하부구간 4단 보강 조건을 제외하고 허용 변위를 초과하여 붕괴되는 것으로 분석되었다.

0.3g에서는 모든 보강 및 위치 조건을 제외하고 모든 조건에서 허용 변위량을 초과하여 붕괴되는 것으로 분석되었다.

Table 6. Result of displacement with short-period wave

Test Acceleration	Reinforced	Displacement(mm)		
		Upper Part	Middle Part	Lower Part
0.05g	2 Stage	42.93	23.26	21.47
	3 Stage	37.57	21.47	19.89
	4 Stage	26.83	16.10	13.89
0.1g	2 Stage	98.39	32.20	26.83
	3 Stage	76.92	26.83	21.47
	4 Stage	67.98	19.68	15.68
0.2g	2 Stage	246.86	67.98	48.30
	3 Stage	162.79	48.30	37.93
	4 Stage	161.00	43.30	28.62
0.3g	2 Stage	313.23	152.05	112.70
	3 Stage	291.58	146.69	101.97
	4 Stage	273.70	120.82	95.61

실제 현장에서 10m 지반 굴착에 따른 흙막이 공사 시 단주기 성분의 지진이 발생된 경우 0.05g 이상의 가진 가속도에서도 흙막이 구조물의 붕괴가 발생되어 피해가 발생하는 것으로 분석되었다.

1978년 계측기 설치 이후 국내에서 발생된 대부분의 지진들은 고주파의 단주기 성분이 큰 특성을 보이고 있다. 연구 조건과 동일한 조건의 흙막이 굴착 현장에서는 작은 규모의 지진이 발생되더라도 붕괴에 의한 피해가 발생할 가능성이 있는 것으로 판단된다.

3.3 비교분석

실험 결과를 종합 하면 보강 단수를 늘리는 보

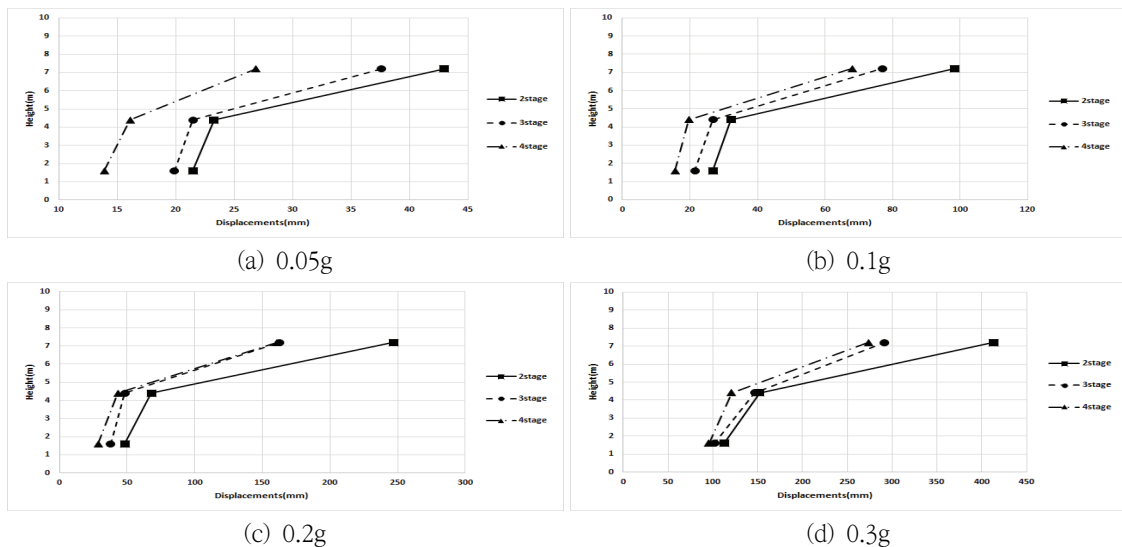


Fig. 7 Result of displacement with short-period wave

강 방안이 흙막이 구조물을 가장 안정하게 시공할 수 있는 방법으로 분석되었다.

지진파의 주기에 따른 실험 결과를 비교하면 장주기 지진파의 경우 보강재 3단 이하, 0.1g 이상의 가진 가속도, 단주기 지진파의 경우 3단 이하, 0.05g의 가진 가속도에서 흙막이 구조물의 붕괴가 발생되었다. 장주기 지진파보다 단주기 지진파에서 발생 변위가 크게 발생되고, 낮은 가진 가속도에서도 허용 변위 기준을 벗어나 붕괴가 발생되는 것으로 분석되었다.

본 연구에 사용된 조건에 의한 흙막이 구조물은 단주기에 취약한 것으로 판단되었으며, 이는 연구에 사용된 H-pile이 길이가 짧고, 강성과 좌굴 강도가 큰 이유로 분석된다.

비교적 연성 구조물로 분류되는 흙막이 구조물의 경우 장주기의 지진파 성분에서 구조적으로 불안정한 거동을 보이는 기존 동적 거동 이론과 차이를 보이는 결과로 흙막이 구조물 벽체의 강성을 고려한 추가적인 연구는 필요한 것으로 분석된다.

향후 연구 조건과 동일한 강성이 큰 구조물에 의한 흙막이 구조물의 시공이 이루어지는 경우 중간정도 조밀한 모래의 특성을 보이는 지반과 보강 조건인 경우 추가적인 대책방안이 필요하였다.

4. 결론

본 연구에서는 H-pile + 토류판 공법을 모사한 흙막이 구조물의 보강량과 가진 가속도 크기, 지진파 종류에 따른 진동대 모형실험을 실시하였으며, 실험 결과를 분석한 내용은 다음과 같다.

1. 진동대 모형실험결과 구조물의 높이가 비교적 높지 않고, 사용 재료의 강성이 커 단주기에서 발생 변위가 크게 발생하였으며, 보

강재 보강량이 늘수록 강성 구조물로 거동할 수 있어 변위는 감소되었다.

2. 장주기 3단 보강 이하의 경우 0.1g 이상의 가진가속도에서 벽체의 허용변위인 33mm를 초과하였으며, 단주기 3단 보강 이하에서는 0.05g에서도 허용변위량을 초과하여 국내 내진 설계 기준의 가진 가속도내에서 흙막이 구조물은 붕괴가 발생되었다.
3. 변위는 벽체의 상부로 갈수록 관성력의 증가로 발생량이 증가하였고, 가진 가속도가 증가할수록 벽체의 상부, 중간, 하부에 발생하는 변위량은 가진 가속도가 작은 경우보다 크게 증가하였다.

본 연구는 현장에서 시공되는 모든 흙막이 구조물에 대한 연구 결과는 아니며, 추후 근입깊이, 지반조건, 지진특성, 보강재의 재료 특성 등을 고려한 추가 연구가 필요하였다.

사 사

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2018R1D1A1B07043961).

참고문헌

- [1] Yoon, W. S. Yang, C. K. Ju, W. Y. and Park, Y. J., A Study on the Behavior Characteristics of the Earth Retaining Wall Using Seismic Analysis, 2015 Spring Geosynthetics Conference, Vol. 2015 No. 4, pp. 107-110, 2015. (in Korean with English abstract)

- [2] Yoon, W. S. Yang, C. K. Park, Y. J. and Chae, Y. S., A Study on the Characteristics of Seismic Earth Retaining Structures Using Model Test, 2016 Spring Geosynthetics Conference, Vol. 2016, No. 4, pp. 71-72, 2016. (in Korean with English abstract)
- [3] Hwang, B. K. Lee, S. J. and Kim, Y. H., A Study of Dynamic Earth Pressure Effects on Underground Wall, KSCE Conference, Vol. 2006, No. 10., pp. 2775-2778, 2006. (in Korean with English abstract)

(접수: 2018.10.05. 수정: 2018.11.23. 게재확정: 2018.12.04.)