

연약지반 굴착에 따른 지반파괴 억지대책 실내모형 실험

김재홍*

Kim, Jae-Hong*

Model Test of Stabilizing Measures for Ground Failure Due to Soft Ground Excavation

ABSTRACT

When conducting excavations after burying the soft ground, even if the retaining walls are installed, failure often occurs within backfill. In order to minimize the occurrences of failures, model test was performed after the installation of stabilizing piles to investigate the stabilizing effects. The model chamber is set up with clay foundation reinforced with and without stabilizing piles. During the excavation of clay foundation, the subsidence, pore water pressure, and soil pressure along the excavation were measured. As a result of the model test, the increase of excavation levels and the reduction of subsidence of back ground were observed with the stabilizing piles, compared to those without the stabilizing piles. The installation of stabilizing piles does not influence the pore water pressure change, but induces less subsidence rate. In addition, the depth of excavation has a significant effect on the back ground and it was evaluated that the maximum subsidence occurs as it is closer to the excavation point.

Key words : Soft ground, Excavation, Earth retaining wall, Model test, Bearing pile

초 록

연약지반을 매립후 굴착을 시행할 경우 흙막이벽체를 설치하더라도 배면지반에 지반파괴가 발생한다. 이를 최소화하기 위해 억지말뚝을 적용 후 실내모형 실험을 시행하여 억지효과를 규명하였다. 모형토조내 점토를 충전하고 계측시스템을 이용하여, 무보강일 경우와 억지말뚝으로 보강한 경우를 설정하여 굴착에 따른 배면지반의 침하, 간극수압, 토압을 측정하였다. 모형실험 결과 억지말뚝으로 보강할 경우 무보강시와 비교할 때 굴착 단계의 증가와 배면지반의 침하가 감소된 것으로 평가되었다. 간극수압은 보강여부와는 크게 상관없었고, 침하율은 적게 나타났다. 또한, 굴착깊이가 배면지반에 매우 큰 영향을 미치고, 굴착지점과 가까울수록 최대 침하가 발생하는 것으로 평가되었다.

검색어 : 연약지반, 굴착, 흙막이벽체, 모형실험, 억지말뚝

1. 서론

국토 내륙의 개발이 거의 완료되어 해안 연약지반을 매립하여 대단위 부지를 조성하고 있다. 이렇게 조성된 부지는 대부분 산업단지나 주거단지로 개발되고 있다. 매립이 완료된 부지에 각종 건축공사 시 지하주차장이나 기타 지하공간의 활용을 위해 지하터파기(굴착)를 시행한다. 연약지반에 굴착을 시행할 경우 흙막이벽체를 설치하더라도 굴착으로 인하여 굴착면 측으로 흙막이벽체가 이동(수평변위)하여 굴착배면에는 지반파괴(침하)가 발생하고 굴착면 하부에는 굴착배면지반 토압의 이동으로 융기현상이 발생한다(Fig. 1).

종래의 흙막이구조물은 버팀 보나 에스앵커로 지지된 억지말뚝과 토류판을 사용하는 연성벽체가 주로 이용되어 왔다. 그러나 이러한

* 정회원 · 교신저자 · K-water연구원 책임연구원 (Corresponding Author · K-Water Institute (KWI) · kjhpmk@kwater.or.kr)

Received February 28, 2014/ revised April 9, 2014/ accepted May 8, 2014

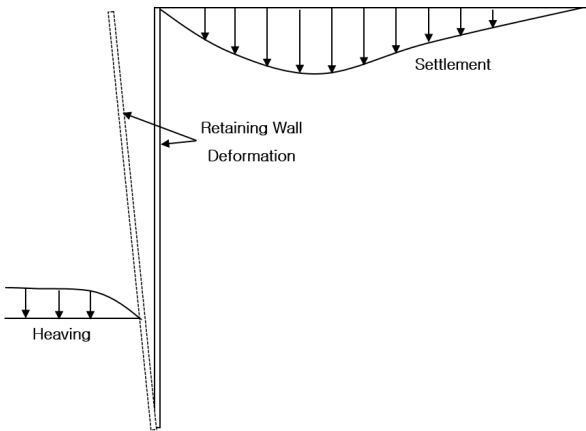


Fig. 1. Ground Deformation by Excavation



Fig. 2. Road Failure by Excavation

흙막이구조물은 강성이 작아 벽체의 변형이 크게 발생하게 되고 차수성이 좋지 않아 굴착이 진행되는 동안 지하수위가 저하되어 굴착배면지반의 침하를 크게 유발시킨다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 최근에는 지중연속벽(diaphragm wall)과 같이 강성이 크고 차수성이 뛰어난 강성벽체를 많이 사용하여 트렌치 굴착으로 인한 지반변형 및 상재하중의 영향에 관한 연구(Hong et al., 2006; 2007)가 시행되었지만, 현재까지 굴착공사 시에는 여전히 어스앵커나 버팀보로 보강한 흙막이 벽체를 많이 적용하고 있다.

흙막이벽체 설치후 굴착시 굴착 배면지반의 강도 저하로 인해 배면지반(도로)의 파괴와 인접 구조물의 안전에도 영향을 미친다. Fig. 2는 연약지반 터파기로 인한 배후도로의 침하광경을 나타내고 있다. 이때, 도로의 변형뿐만 아니라 지하에 매설된 상하수도, 전기, 통신 및 가스관 같은 각종 도시기반시설물(Life Line)의 변형으로 국민생활에 불편도 야기 시키며, 흙막이 벽체의 붕괴 시에는 작업 종사자의 안전사고로도 이어질 수 있다.

흙막이 벽체에 작용하는 측방토압은 흙막이벽체의 변형, 흙막이 벽체와 지반사이의 상호작용에 의해 결정되므로 지반조건, 굴착 깊이, 벽체의 강성, 구속조건, 시공방법 등에 관해서 영향을 받는다. 지금까지 흙막이 벽체에 작용하는 토압에 대해서는 Tergahi and Peck (1948; 1967) 및 Tschebotarioff (1973)에 의하여 제안경험 공식이 굴착현장에서 많이 사용되어 왔다. 그 후 현장계측(Juran and Elias (1991)이나 수치해석을 통해(Chandasekaran and King, 1974; Finno and Harahop, 1991)에 의해 연구가 진행되었다. 근래에는 Sidney (2010), Lei et al. (2012)이 원심모형 실험기를 이용하여 굴착시 배면지반의 거동에 대한 연구가 수행되었다.

상기와 같이 굴착에 의한 흙막이 벽체의 거동과 이에 따른 배면지반의 거동 분석에 대해서는 많은 연구가 진행되어 왔다. 한편, 지반의 활동방지를 위해 활동영역까지 말뚝을 설치하여 상재하중에 대한 억지역할을 하는 억지말뚝에 대해서는 대부분 정적 설계 방법에 대해서만 이루어졌고(Ito et al., 1981; 1982; Jeong et al., 2003; Lee 2005), 최근에는 1g 진동대를 이용한 억지말뚝의 내진보강 효과 실험 등이 연구되었다(Han et al., 2011). 지금까지 억지말뚝에 대해서는 사면의 활동방지 연구가 대부분이고 연약지반에 성토시 억지말뚝을 이용하여 측방유동 방지에 대한 연구실적도 있다(Kim, 2011).

본 연구에서는 연약지반 굴착시 흙막이 벽체의 변형으로 인한 굴착 배면지반의 파괴를 최소화 하고자 역지대책으로 억지말뚝을 적용하기로 하였다. 무보강시와 억지말뚝으로 보강할 경우를 구분하여 실내에서 모형 토조를 이용한 일련의 실험을 시행하여 억지효과를 검증하였다.

2. 모형실험 장치

2.1 모형 토조

균번 실내 모형실험을 수행하기 위한 모형 토조는 100cm × 80cm × 40cm의 규격에 외벽은 아크릴 15mm로 제작하였다. 실험 중 모형 토조의 변형을 방지하고자 강제프레임을 설치하였고 누수방지를 위하여 이음부는 실리콘으로 처리하였다.

Fig. 3은 모형 토조 개념도이다. 토조 측면에는 지하수위 유지 물탱크를 설치하였다. 모형 토조와 물탱크에 밸브를 설치하여 지반 안정화 과정에서 발생하는 간극수 배출이 가능하도록 하였고, 점토 충전 후 인공지반 안정화를 목적으로 사용할 하중 재하판(80cm × 40cm)과 이를 제어 가능한 Control Panel이 장착되어 있다.

2.2 사용 시료

모형 토조내 인공지반을 조성하고자 사용된 시료는 경기도 안산 지역의 연약점토를 채취하여 사용하였다. 현장에서 시료를 채취한



(a) Chamber

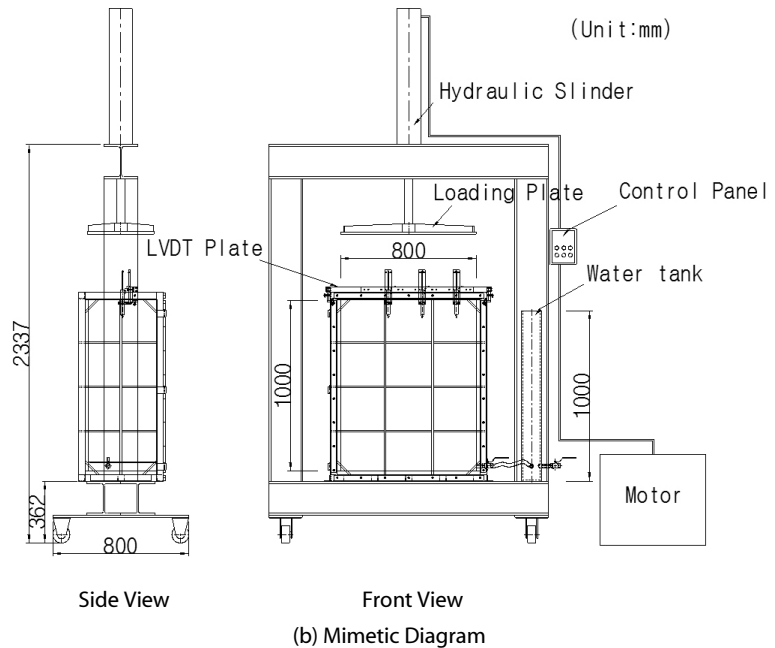


Fig. 3. Chamber Concept

Table 1. Result of Laboratory Soil Tests

Depth (m)	Wn (%)	Gs	Atterberg Limits		Grain Size Distribution %, Finer than				Unconfind Comp. Strength			UU	Consolidation Test		U.S.C.S
			LL (%)	PL (%)	#4	#10	#40	#200	qu (kPa)	qr (kPa)	St	Cuu (kPa)	Pc (kPa)	Cc	
3.0~3.8	34.6	2.70	35.5	16.2	100.0	100.0	91.2	77.8	62.0	-	-	32.1	97.0	0.234	CL
4.5~5.3	31.1	2.71	45.1	27.5	100.0	100.0	99.6	96.3	87.7	-	-	45.9	170.0	0.183	CL

후 실험실에서 물성과 역학실험을 수행하였고 그 결과는 Table 1과 같다.

2.3 흙막이벽체 및 억지말뚝

굴착모형 실험에 사용할 흙막이벽체는 stainless 재질(t=0.5mm)로 60cm × 40cm의 규격으로 제작하여 토조 벽체에서 20cm 이격하여 설치하였다. 단, 어스앵커나 버팀보는 실내모형 실험의 한계상 재현하지 않았다.

또한, 억지대책 효과를 재현할 억지말뚝은 흙막이 벽체와 동일한 재질로 직경 1인치(2.54cm), 두께 0.5mm, 길이 60cm의 중공단면으로 제작하였다.

2.4 계측장치

Fig. 4는 금번 실내실험을 위한 모형토조내 계측기 설치 현황이다. 굴착에 따른 모형지반의 거동을 분석하기 위하여 미소변위계(LVDT)를 흙막이벽체에서 8cm, 28cm, 48cm 이격한 위치에 총

3개소를 설치하였다. 측정범위는 0~100mm이며, 분해능은 0.01mm이다. 모형토조 상단에 거치대를 이용하여 설치하였으며, 10분 간격으로 데이터를 측정하였다.

굴착에 따른 토압의 변화를 확인하고자 흙막이벽체 후면(굴착배면)에 흙막이벽체 최상단으로 부터 10cm, 25cm, 40cm, 50cm 위치에 4개소, 흙막이벽체 전면(굴착면)에는 흙막이벽체 최상단으로 부터 40cm, 50cm의 위치에 토압계 2개소를 흙막이벽체에 접촉하여 설치하였다. 토압계를 부착할 위치에는 사포를 이용하여 표면을 정리 후 전용 접착제를 이용하여 부착하였다. 모형지반 내 수분의 영향으로 데이터에 노이즈가 포함될 수 있으므로 방수테이프를 붙여 1차로 실링하였고 최종적으로 청테이프를 붙였다. 측정범위는 0~200kPa이며, 케이블의 길이는 5.0m로 하였다. 데이터로거(CR1000)에 연결하여 10분 간격으로 데이터를 측정하였다. 토압계는 별도의 보호과정을 거치지 않고 흙막이 벽체에 붙여 모형지반에 설치하였다.

간극수압의 영향을 확인하고자 간극수압계를 설치하였다. 토압

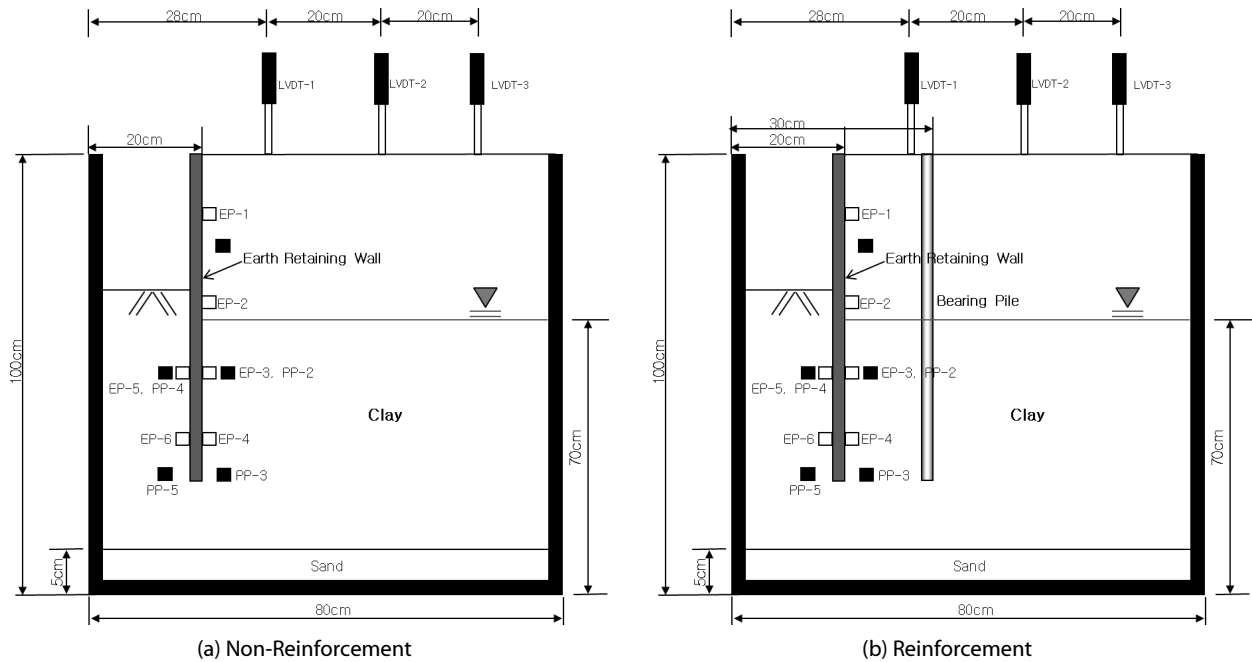


Fig. 4. Measuring Instrument (Scale : None)

계와 달리 흙막이 벽체에 부착하지 않고 흙막이 벽체를 기준으로 전후면에 10cm 이격하여 굴착배면측은 모형지반 상단에서 20cm, 40cm, 60cm 위치에 3개소, 굴착측은 모형지반상단으로부터 50cm, 60cm의 위치에 2개소를 설치하였다. 측정범위는 0~200kPa이며, 데이터로거(CR1000)에 연결하여 10분 간격으로 데이터를 측정하였다. 간극수압계는 모형지반에 직접 설치하면 측정이 잘 되지 않고 반복실험을 수행하면 망실될 수 있다. 이러한 문제를 해결하고자 섬유망과 주문진 표준사를 이용하여 센서를 보호하였다. 모형지반에 설치하기 전에 기포를 제거하기 위해 24시간 수침시켜 사용하였다. 굴착시 계측기의 단선 우려와 원활한 굴착을 위해 굴착면측은 굴착계획선(토조상단에서 40cm) 하부에만 설치하였다.



Fig. 5. Clay Filling

3. 실험방법 및 계획

3.1 실험방법

모형실험은 다음과 같은 순서로 시행하였다.

- 1) 토조 하부에 간극수압 배출을 위한 주문진 표준사를 5cm 포설하고 상단에 부직포를 설치한다.
- 2) 토조 벽면의 마찰을 최소화하기 위하여 토조 내부벽면에 오일을 도포하고 비닐 랩을 부착한다.
- 3) 현장에서 채취한 점토시료를 토조내에 충전한다. 이 때, 점토 충전과 다짐으로 토조 벽체에 변형이 발생하지 않도록 최소한의 두께로 충전하고 다짐을 시행한다.

- 4) 모형 토조내 인공지반을 조성하면서 흙막이 벽체를 병행하여 설치한다.
- 5) 흙막이 벽체는 상기와 같이 굴착에 따른 거동분석을 위한 토압계가 부착되어 있기 때문에 모형지반을 조성후 압입하기가 불가능하여 모형 토조내 점토를 충전하면서 설치한다. 흙막이 벽체를 고정하기 위하여 Fig. 5와 같이 합판과 각목을 사용하였다. 이때, 간극수압계도 같이 설치한다.
- 6) 고정용 합판과 각목은 소정의 위치까지 점토를 충전한 후 제거한다.

- 7) 모형 토조 상단까지 인공지반을 조성한 뒤 상단면의 계측선을 정리한 후 상재 하중판(80cm×40cm)을 이용하여 100Kpa 압력을 10분 단위로 하중재하와 제하를 반복하여 50시간을 다짐한다.
- 8) 가압판을 이용한 다짐을 완료 후 상부표면을 정리하고 미소변위계(LVDT)를 설치하고 토압계, 간극수압계 계측선을 데이터로거에 연결한다.
- 9) 지반안정화를 위하여 다시 50시간의 예비압밀을 실시한다.
- 10) 예비압밀과정에서는 모형 토조와 탱크에 연결된 밸브를 열어 간극수를 배출한다.
- 11) 굴착과정에서는 물통의 밸브를 잠그고 수위를 흙막이 벽체의 중앙부분까지 채워 지하수위를 유지한다. 억지대책 실험 시에는 이때 억지말뚝을 설치한다.
- 12) 굴착을 시행하면서 굴착에 따른 굴착배면 지반의 침하, 토압, 간극수압의 변화를 관찰한다.

3.2 실험 계획

실험 방법은 무보강 실험이나 억지대책보강 실험 모두 동일하게 1단계를 10cm 씩 굴착하는 것으로 가정하여 총 4단계 굴착을 하는 것으로 계획하였다. 굴착은 흙막이벽체의 영향이 최소화되도록 시행하였고, 1단계 굴착시간은 20여분으로, 단계별 굴착 유지시간은 24시간으로 계획하였다.

무보강 실험에서는 흙막이벽체만 설치하였지만 억지대책실험에서는 흙막이벽체와 억지말뚝을 설치하는 것으로 계획하여 흙막이벽체에서 배면지반 측으로 10cm 이격하여 총 3개의 억지말뚝을 흙막이 벽체와 동일한 방향으로 배치하였다.

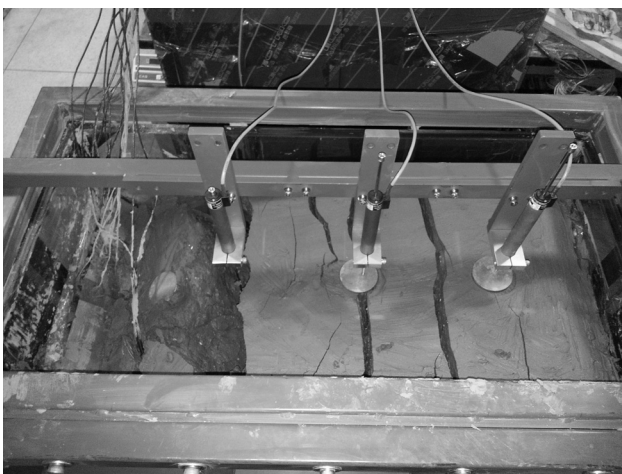
4. 실험 결과

4.1 배면지반 침하

굴착에 따른 흙막이벽체의 거동과 배면지반의 광경은 Fig. 6과 같다. Fig. 6(a)의 무보강실험과 Fig. 6(b)의 억지말뚝 보강실험 모두 3단 굴착후 24시간 경과된 광경을 나타내며, 무보강에서는 흙막이벽체가 전도된 상태이며, 억지말뚝 보강에서는 변형은 있으나 전도되지 않은 상태이다. 또한, 무보강에 비해서 배면지반의 균열 폭이 적게 발생된 광경을 나타낸다.

무보강 실험의 굴착에 따른 배면지반의 침하 계측결과는 Fig. 7(a) and Table 2와 같다. 굴착후 급속하게 침하가 발생한 후 점진적으로 수렴하는 경향을 보이다 다음 단계 굴착직후 다시 급속히 침하하는 경향을 보이고 있다. 침하량은 굴착지점과 거리에 비례하여 발생하였다. 무보강에서는 3단 굴착후 약 240여분후에 흙막이벽체가 전도되어 흙막이 벽체와 가장 가까운 1번 LVDT는 계측이 불가하고 2번, 3번 LVDT만 계측이 가능하였으며 점진적으로 수렴하는 경향을 나타내고 있다. 흙막이 벽체와 가까운 1번 LVDT는 1단 굴착시 최대 침하량이 0.13mm, 2단 굴착시 최대 침하량은 21.13mm, 3단 굴착시 최대 침하량이 89.35mm로 흙막이 벽체의 전도로 인해 침하량이 급격하게 발생하였다. 흙막이 벽체와 28cm 이격된 2번 LVDT의 최대 침하량은 24.98mm, 3번 LVDT는 최종 침하량이 약 15.0mm로 나타났다. 이때, 1번 LVDT는 계측 허용 한계를 넘어서 계측이 불가하였다.

Fig. 7(b)는 억지말뚝으로 보강한 배면지반의 침하량 변화를 나타낸 결과이다. 1번 LVDT의 경우 1단 굴착시 최대 침하량이 4.88mm, 2단 굴착 시 15.25mm, 3단 굴착 시 28.33mm, 4단 굴착 시 59.28mm로 나타났다. 4단 굴착후 290분후에는 계측이



(a) Non-Reinforcement



(b) Reinforcement

Fig. 6. Scene of Excavation (3th. Ex)

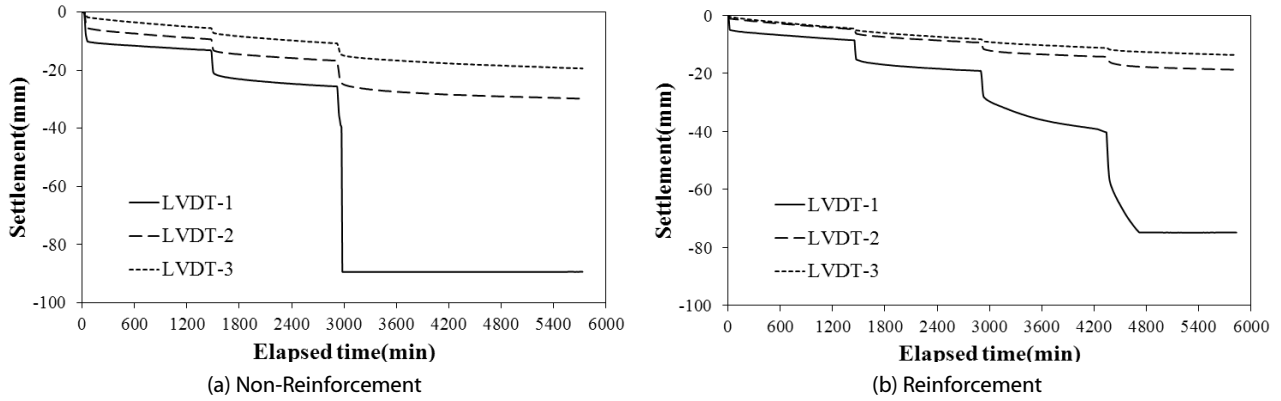


Fig. 7. Result of Settlement

Table 2. Result of Settlement (Unit : mm)

Classification	Sensor	1st. EX (10cm)		2nd. EX (20cm)		3rd. EX (30cm)		4th. EX (40cm)	
		Initial	Final	Initial	Initial	Initial	Final	Initial	Final
Normal	LVDT-1	-	0.13	17.5	21.13	89.33	89.35		
	LVDT-2	-	0.1	11.43	13.28	24.68	24.98		
	LVDT-3	-	0.07	6.37	7.25	14.80	15.00		
Reinforcement	LVDT-1	-	4.88	12.63	15.25	25.73	28.33	57.33	59.28
	LVDT-2	-	1.02	5.67	6.35	10.87	11.67	16.05	16.37
	LVDT-3	-	0.07	4.82	4.82	8.62	8.95	11.75	11.82

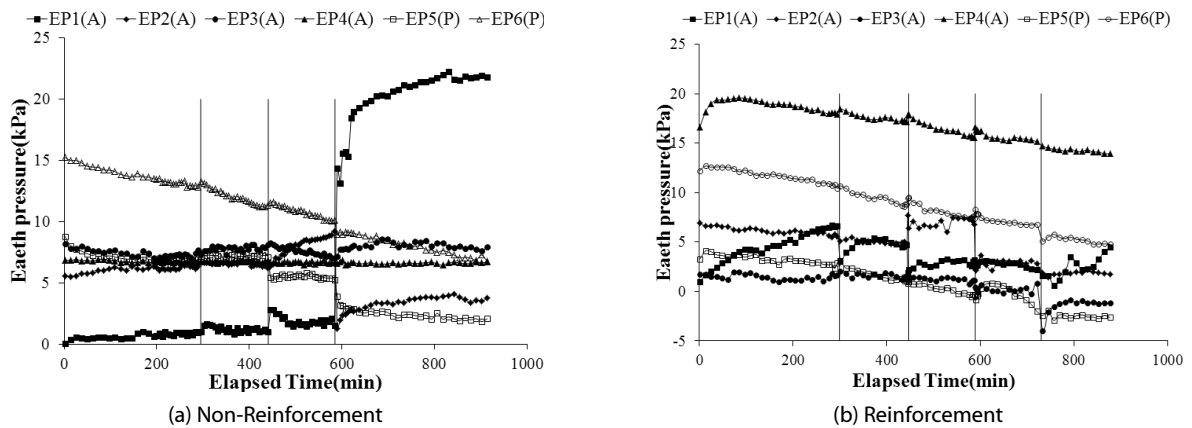


Fig. 8. Result of Soil Pressure

되지 않았는데, 이 역시 흙막이벽체가 전도된게 아니라 LVDT 측정 범위를 벗어났기 때문이다. 2번 LVDT의 최대 침하량은 16.37mm, 3번 LVDT의 최대 침하량은 11.82mm로 나타났다. 또한, 1번과 2번 LVDT 침하량의 차이가 무보강 실험시와 비교하면 감소한 모습이다.

침하량을 비교하면 무보강에서는 3단 굴착 시 최대 침하량이 89.35mm로 나타났고, 보강실험에서는 4단 굴착 시 최대 침하량이

59.28mm로 발생하여 약 30.0mm 차이를 보였으며 보강효과가 약 1.5배 차이가 났다. 두 실험에서 동일한 3단 굴착을 기준으로 비교하면 보강실험이 28.33mm의 침하량이 발생하여 침하량에서는 보강에 따라 약 3배 정도 차이가 발생한 것으로 확인되었다.

4.2 토압

Fig. 8은 토압계측 결과를 나타내고 있다. Fig. 8(a)는 무보강시의

토압계측 결과로써 굴착 배면측의 토압계를 확인하면 상단의 1번 토압계는 굴착에 따라 토압이 큰 변화가 없다가 3단 굴착 후 약 7kpa대의 토압이 약 20kpa대로 급격하게 상승하는 것으로 확인되었다. 이는 침하 경향과 유사한 것으로 흙막이벽체의 거동으로 인해 상단의 1번 토압계가 상대적으로 가장 영향을 받아 토압이 많이 작용한 것으로 판단된다. 그 외 배면지반의 토압은 큰 변화가 없었다.

굴착 측 토압계 중 굴착면 직하단인 5번 토압계는 1차 굴착에서는 큰 변화가 없다가 2차와 3차 굴착 시 굴착에 따라 토압이 감소하는 것으로 나타났고, 6번 토압계 역시 토압이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 굴착배면측은 굴착에 따라 토압이 약간 상승하였고 굴착면측은 감소하는 것으로 나타났다. 이는 서론(Fig. 1)에서 전술한 바와 같이 굴착으로 인하여 굴착배면측 토압이 굴착면측으로 이동하는데 굴착배면은 압축되고 굴착면측은 팽창되어 융기현상이 발생되어 응력이 이완되었기 때문이다.

Fig. 8(b)는 억지말뚝 보강 시 굴착에 따른 토압계측 결과이다. 대부분 토압이 감소하는 경향이나 굴착배면측의 가장 낮은 4번 토압계의 토압이 무보강에서는 약 5Kpa 대의 일정한 토압과는 달리 최대 20Kpa에서 15Kpa로 서서히 감소하여 토압이 크게 작용하는 것으로 나타났다. 이는 굴착배면 지반이 굴착으로 인해 압축되는 과정에서 억지말뚝설치로 굴착배면 측 하단부인 4번 토압계가 크게 영향을 받은 것으로 억지말뚝 설치로 인해 하부지반의 억지효과에 기인한 것으로 판단된다.

4.3 간극수압

Fig. 9는 굴착에 따른 간극수압 계측 결과이다. 간극수압은 무보강시와 억지말뚝 보강시 모두 굴착으로 인한 시간경과에 따라 간극수압이 감소하는 유사한 거동을 나타낸다. Fig. 9(a)는 무보강시 간극수압 결과이다. Fig. 4와 같이 토조 상단에서 30cm 하단부위에

지하수위를 재현하고 있어 지하수위보다 높은 위치의 1번 간극수압이 3~4kpa에서 -2~3kpa로 적게 나타났고, 지하수위 직하단의 2번 간극수압은 12kpa에서 8kpa로 나타났다. 나머지 간극수압계 설치 높이에 따라 간극수압은 크게 발생하였지만 실험도중 대부분 5kpa 정도로 감소하는 경향을 나타내고 있다. Fig. 9(b)는 보강시 간극수압 결과로 설치 위치별로 간극수압의 작용이나 시간경과에 따라 간극수압이 약 5Kpa대의 감소를 보이며 보강시와 유사하게 나타났다. 이로써 간극수압의 소산은 보강여부와는 큰 관계가 없는 것으로 판단된다.

4.4 흙막이벽체의 거동과 배면지반의 균열 현황

굴착이 완료된 후 굴착에 따른 흙막이 벽체의 거동과 배면지반 상단의 균열 현황을 조사하였다. 사진으로 정성적인 확인보다 정량적인 확인이 필요하여 디지털카메라를 이용하여 사진촬영을 하여 이를 카드 도면으로 전환하였다.

Fig. 10(a)는 무보강시 흙막이 벽체의 거동 현황을 나타낸 것이다. 3단 굴착 후 흙막이 벽체는 완전히 전도된 상태이다. 1단 굴착시에는 당초 위치에서 굴착 전면으로 33.3mm 변형하였고, 2단 굴착시 103.63mm, 3단 굴착시 완전히 전도되어 변위가 200mm 이상 발생하여 측정이 불가하였다. Fig. 10(b)는 억지말뚝 보강시 굴착에 따른 흙막이 벽체의 변형을 나타낸 것이다. 1단 굴착 시 10.32mm, 2단 굴착 시 35.74mm, 3단 굴착 시 64.56mm, 4단 굴착에서는 원위치에서 131.64mm까지 변형하여 무보강시와 보강시의 흙막이 변형이 약 3배 정도 차이가 나는 것으로 나타났다.

Fig. 11은 무보강시 굴착에 따른 배면 지반의 형상으로 굴착 후 다음 단계 굴착직전의 형상을 나타낸 것이다. 당초 흙막이 벽체는 0mm 지점에 위치하였으나 1단 굴착 후 24시간이 경과하여 2단 굴착이 시작되는 시점에는 흙막이 벽체가 굴착면측으로 변형되었고, 배면지반 약 10cm까지 균열이 발생한 모습이다. 2단 굴착에서는

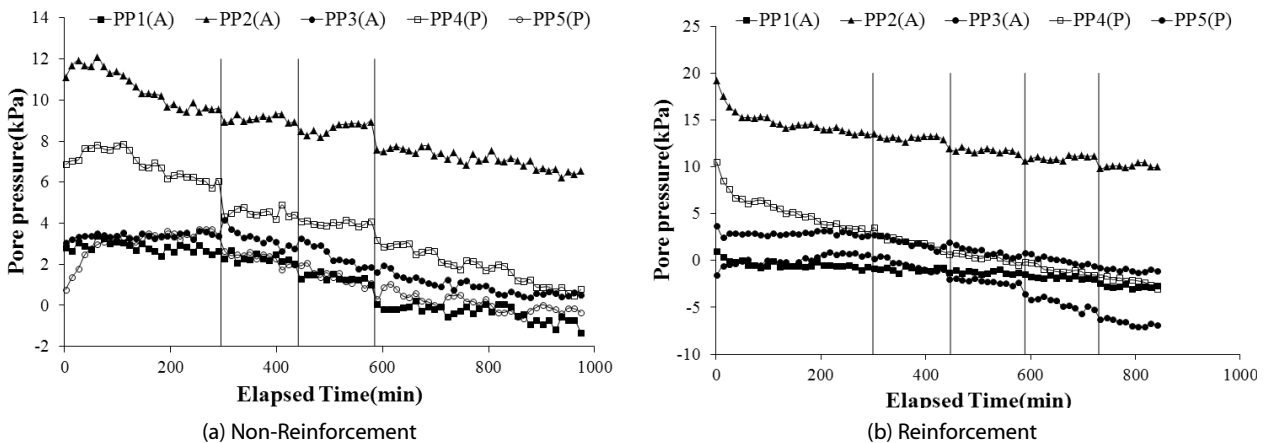


Fig. 9. Result of Pore Pressure

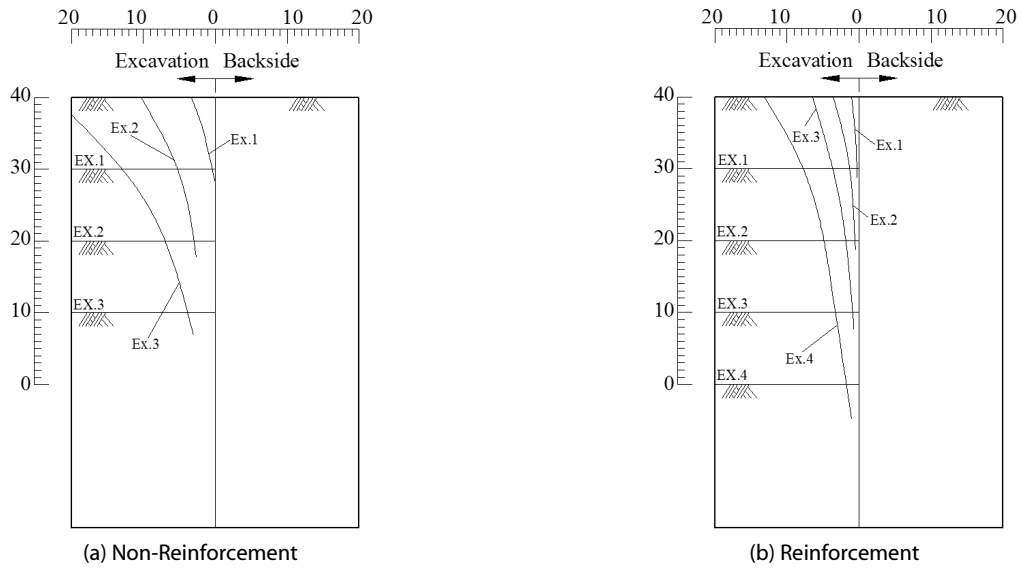


Fig. 10. Displacement of Wall (Unit : mm)

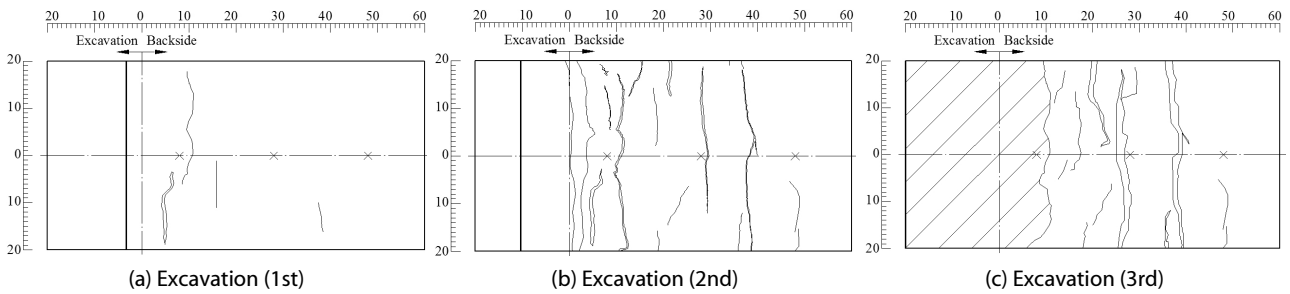


Fig. 11. Crack Scene (Non-Reinforcement)

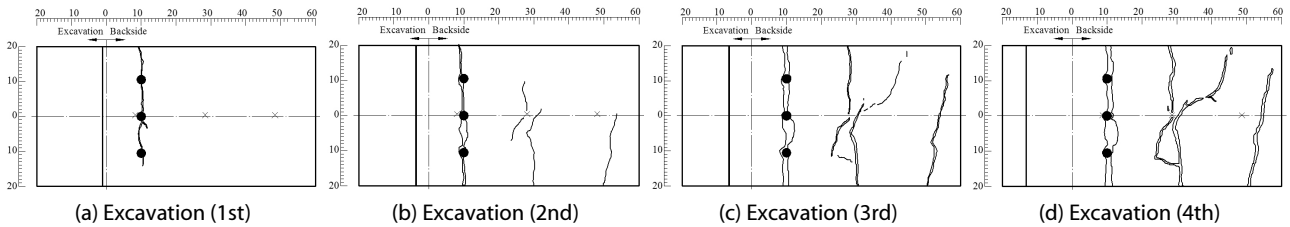


Fig. 12. Crack Scene (Reinforcement)

배후지반 전체를 횡단하는 균열이 6~7개 정도 발생하였고, 흙막이 벽체도 원위치에서 보다 많이 변형된 상태이다. 3단 굴착에서는 흙막이 벽체가 전도되었으며 배면지반의 균열의 폭이 커진 상태를 알 수 있다. Fig. 12는 역지말뚝 보강시 굴착에 따른 배면지반의 균열 양상을 나타낸 것이다. 흙막이벽체에서 배면지반으로 10cm 이격된 검정색 원은 역지말뚝이다. 무보강시와 달리, 횡방향 균열의 개수 및 간격이 크지 않은 양상이다.

5. 고찰

5.1 배면 침하량

Fig. 13은 흙막이벽체에서 거리별 배면 침하량을 도시한 것이다. 1단 굴착 및 2단 굴착 시에는 침하가 크게 발생하지 않았으나 3단 굴착 시 침하가 크게 발생한 것으로 나타났다. 흙막이벽체에서 약 30cm 이격한 거리에서 침하가 급격하게 감소하였고, 흙막이벽체에서 멀어짐에 따라 침하가 수렴하는 경향이다.

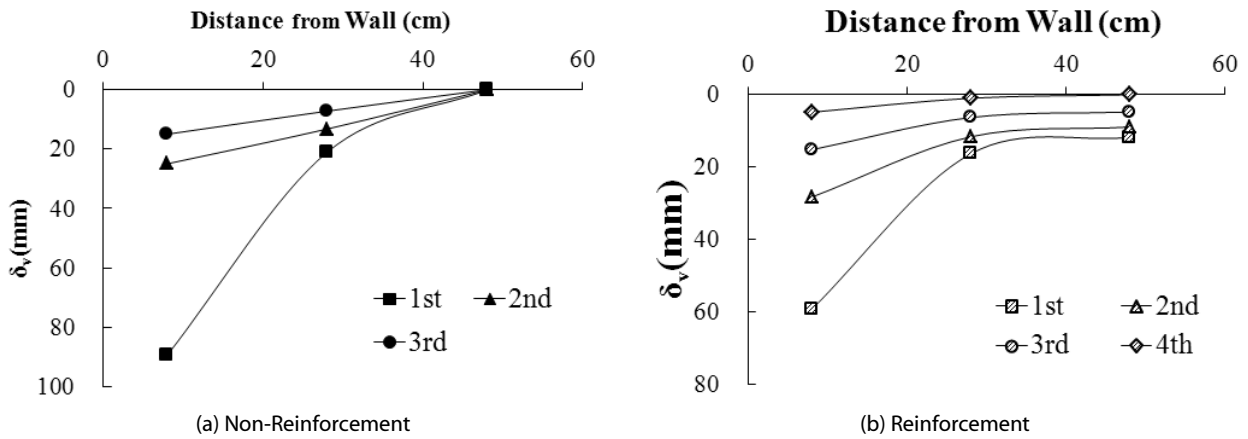


Fig. 13. Settlement for Distance from Wall

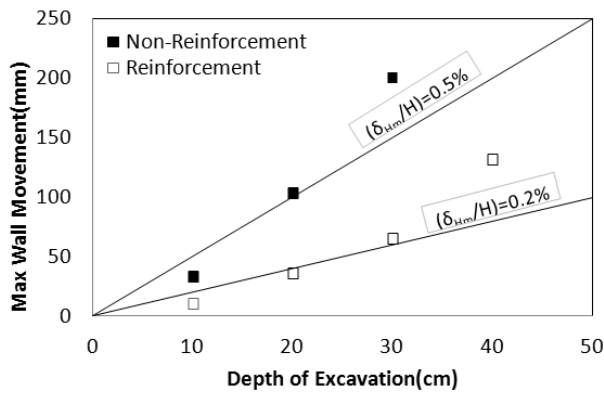


Fig. 14. Wall Displacement by Excavation Depth

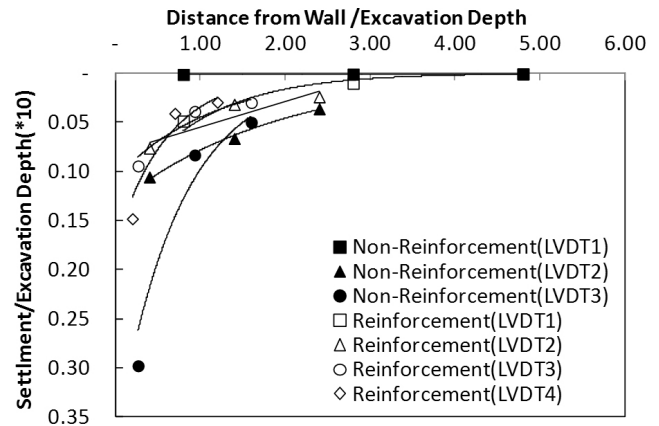


Fig. 15. Settlement Ratio

5.2 흙막이벽체의 변형

흙막이벽체의 변형을 예측하는 것은 흙막이벽체의 변형이 복잡한 지반조건, 시공조건, 굴착순서, 시공관리 등에 영향을 받기 때문에 매우 어렵다. 흙막이벽체의 변형량 예측 방법으로는 측정치를 참고하는 방법이나 수치해석법 등이 있다. Goldberg et al. (1976)은 흙막이벽체의 최대수평변위는 굴착깊이의 0.5%보다 작다고 하였으며 흙막이벽체의 수평변위는 평균적으로 굴착 깊이의 0.2%보다 작다고 하였다. 이것은 굴착깊이와 흙막이벽체의 최대수평변위에 대한 Clough등의 연구에서도 비슷한 경향을 보이고 있다. Clough and O'Rourke (1990)은 흙막이벽체의 최대수평 변위량은 벽체의 종류에 관계없이 대부분 굴착깊이의 0.5% 이내라고 하였으며 평균적으로 굴착 깊이의 0.2%가 된다고 제안하였다. Fig. 14는 본 연구의 굴착 깊이에 따른 흙막이 벽체의 변위량이다. 무보강 실험에서는 약 0.5% 정도이며, 역지보강 시험에서는 약 0.2%의 변위가 발생한 것으로 나타났다.

5.3 굴착시 지반침하율

Peck (1969)은 H-말뚝 흙막이 벽이나 널말뚝 흙막이 벽이 설치된 지반의 굴착으로 인하여 발생된 지반침하량에 대하여, 많은 실측결과를 토대로 굴착배면지반의 침하량과 침하영향범위는 지반특성과 흙막이 벽의 강성에 크게 영향을 받고 있으며, 특히 침하가 크게 발생하는 현장조건하에서는 침하의 영향범위가 굴착 깊이의 4-5배의 거리까지 미치는 것과 최대 침하가 발생하는 위치는 흙막이벽 배면으로부터 굴착 깊이의 1/2거리에 있다고 제시하였다.

Fig. 15는 흙막이벽체에서 이격된 위치에 따른 굴착배면지반의 침하량을 무차원화 시켜 지반침하율로 나타낸 것으로, 굴착면으로부터 이격거리와 침하량을 각각 굴착 깊이로 나누어 도시하였다. 무보강시와 비교하면 역지말뚝 보강시 침하율이 적게 나타났다. 흙막이벽체에서 침하의 영향범위를 살펴보면 굴착 깊이의 4-5배의 거리까지 미치지만 대부분 2배 정도이며, 최대 침하가 발생하는 위치는 무보강 LVDT3 지점으로 흙막이벽체 배면으로부터 굴착 깊이의 1/2에 해당하는 것을 알 수 있다.

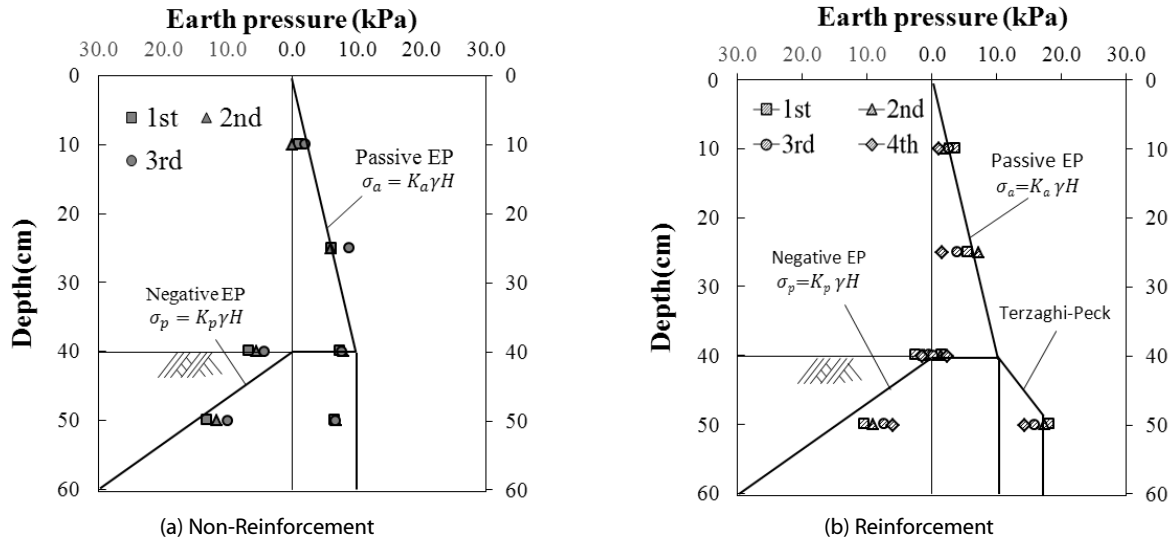


Fig. 16. Soil Pressure Compression

5.4 토압 분포

Fig. 16은 모형 지반내 토압 분포를 비교한 것이다. 굴착범위내의 토압 분포를 살펴보면, 무보강의 경우 굴착 깊이 중간이나 저면의 토압이 유사한 크기로 작용하고 있으나, 역지말뚝 보강에서는 배면 지반 층의 굴착하부는 Rankine의 주동토압을 넘어서 Terzaghi-Peck이 제안한 범위에 해당하는 것으로 나타났다. 이는 역지말뚝의 역지효과에 기인한 것으로 판단된다. 따라서, 토압실험 결과를 바탕으로 역지말뚝 보강실험의 경우 굴착저면 상부 주동토압은 $P_a = 1/2 K_a \gamma H_1^2$ (여기서, K_a : 주동토압, r : 단위중량, H : 높이)로 나타났고, 굴착저면 하부의 경우 상부를 상재하중으로 처리하여 $P_o = K_a \gamma H_1 H_2 + 1/2 K_a \gamma H_2^2$ 로 제한할 수 있다.

6. 결론

현재까지 굴착에 따른 연구는 수없이 진행되어 왔다. 본 연구는 굴착으로 발생하는 배면지반의 파괴에 대한 역지대책으로 역지말뚝을 적용 후 효과를 규명하기 위하여 무보강시와 역지말뚝 보강으로 구분하여 실내실험을 시행하였고 역지말뚝 보강효과에 대한 결과를 다음과 같이 도출하였다.

(1) 굴착으로 인한 배면지반 파괴의 경향은 무보강과 역지말뚝보강 모두 굴착초기에 침하가 크게 발생하나 점점 수렴하는 형상으로 확인되었고, 역지말뚝 보강일 경우 무보강시와 비교하면 굴착단계의 증가와 최대 침하량에서 약 1.5배 정도가 동일 굴착단계(3단계 굴착)시를 비교하면 침하량이 약 3배 정도 차이가 발생함을 알 수 있다.

- (2) 간극수압의 소산 경향은 간극수압계의 설치 위치에 따라 높은 위치의 간극수압계가 크게 발생하였으며, 대부분 5kpa 크기로 감소하는 것으로 나타났다. 지하수위 보다 높은 위치의 간극수압계는 간극수압이 가장 적게 나타났고, 무보강 시와 보강시가 유사한 결과를 보여 보강여부와 관계가 적은 것으로 판단된다.
- (3) 침하의 영향범위는 굴착 깊이의 2배 정도이며, 최대 침하가 발생하는 위치는 흙막이벽체 배면으로부터 굴착 깊이의 1/2에 해당하는 것을 알 수 있다. 또한, 굴착에 따른 흙막이 벽체의 변위량은 무보강과 역지말뚝 보강시가 Clough and O'Rourke (1990)의 제안식의 범위내로 발생하는 것으로 확인되었다.
- (4) 침하량과 토압의 분포, 흙막이 벽체 변형을 종합하면 굴착시 배면지반의 파괴에 대하여 역지말뚝 적용이 효과가 있는 것으로 판단된다. 향후 지속적인 연구로 역지말뚝의 간격이나 배치 등의 굴착시 역지말뚝 적용에 따른 설계법에 대한 연구와 제안식이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 K-water 연구원 해안연약지반 압밀침하관리 및 굴착에 의한 기반시설 보호대책 연구비 지원에 의해 시행되었으며 이에 감사드립니다.

References

Chandrasekaran, V. S. and King, G. J. W. (1974). "Simulation of excavation using finite element." *Jour. OF. S.M.F., ASCE*, Vol.

- 110, No. GT910, pp. 1604-1089.
- Clough, G. W. and O'Rourke, T. D. (1990). "Construction induced movements of insitu walls. Design and performance of earth retaining structures." *Geotechnical Special Publication*, No. 25, ASCE, pp. 439-470.
- Finno, P. J. and Harahop, I. S. (1991). "Finite element analysis of HDR-4 excavation." *Geotechnical Engineering*, Vol. 117, No. 10, pp. 1590-1609.
- Goldberg, D. T., Jaworski, W. E. and Gordon, M. D. (1976). *Lateral support systems and underpinning*, Report FHWA-RD-75-128, Vol. 1, Federal Highway Administration Washington, D.C.
- Han, J. T., Cho, J. S., Yoo, M. T. and Lee, S. H. (2009). "A study on seismic retrofit design of the stabilized piles by 1g shaking table tests and pseudo-static analysis." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 11, No. 2, pp. 93-101 (in Korean).
- Hong, W. P., Lee, M. K. and Lee, J. H. (2006). "Model tests on ground deformation during trench excavation for diaphragm walls." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Korean Geotechnical Society, Vol. 22, No. 12, pp. 77-88 (in Korean).
- Hong, W. P., Lee, M. K., Yun, J. M. and Lee, J. H. (2007). "The effects of ground deformation caused by surcharge loads during trench excavation." *Journal of the Korean Civilengineering Society*, KSCE, Vol. 27, No. 3, pp. 185-193 (in Korean).
- Ito, T., Matsui, T. and Hong, W. P. (1981). "Design method for stabilizing piles against landslide-one row of piles." *Soils and Foundations*, Vol. 21, No. 1, pp. 21-37.
- Ito, T., Matsui, T. and Hong, W. P. (1982). "Extended design method for multi-row stabilizing piles against landslide." *Soils and Foundations*, Vol. 22, No. 1, pp. 1-13.
- Jeong, S. S., You, K. H. and Lee, S. K. (2003). "Coupled effect of Pile/Slope systems." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Korean Geotechnical Society, Vol. 19, No. 5, pp. 163-173 (in Korean).
- Juran, I. and Elias, V. (1991). *Ground anchors and soil nails in retaining structure*, 2nd, Ed, Fang, H. Y, pp. 892-896.
- Kim, J. H. (2011). "Numerical analysis about pile reinforcement effect for restraint of lateral displacement occurring in the embankment on soft ground." *J. Korean Geosynthetics Society*, Korean Geosynthetics Society, Vol. 10, No. 4, December, 2011, pp. 1-10 (in Korean).
- Lee, S. H. (2005). "A study on slope safety factor variation by pile construction depth and space." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Korean Geotechnical Society, Vol. 21, No. 1, pp. 115-121 (in Korean).
- Lei W., Nadarajah Ravichandran, C. and Hsein, J. (2012). "Bayesian updating of KJHH model for prediction of maximum ground settlement in braced excavations using centrifuge data." *Computers and Geotechnics*, 44, pp. 1-8.
- Peck, R. B. (1969). "Deep excavations and tunnelling in soft ground." *7th ICSMFE. State-of-Art*, Vol. 108, pp. 1008-1058.
- Sidney, S. Y. L. (2010). *Ground movements due to excavation in clay : Physical and Analytical Models*, Ph. D Dissertation. University of Cambridge Churchill College, Cambridge.
- Terzaghi, K. and Peck, R. B. (1948). *Soil mechanics in engineering practice*, 1st Ed., John Wiley and Sons, New York, pp. 345-352.
- Terzaghi, K. and Peck, R. B. (1967). *Soil mechanics in engineering practice*, 2nd Ed., John Wiley and Sons, New York, pp. 394-413.
- Tschebotarioff, G. P. (1973). *Foundations, retaining and earth structure*, McGraw-Hill, New York, pp. 415-457.