

사질토 지반에서 흙막이벽체-지하공간 연속 굴착에 따른 지반거동에 대한 실험적 연구

박종덕¹ · 유정선² · 김도엽³ · 이석원^{4*}

¹비회원, 건국대학교, 사회환경시스템공학과 석사

²비회원, 건국대학교, 사회환경시스템공학과 석사과정

³비회원, 건국대학교, 사회환경시스템공학과 학사

⁴정회원, 건국대학교, 사회환경시스템공학과 교수

Experimental study on the ground movement due to consecutive construction of retaining wall and underground space in cohesionless soil

Jong-Deok Park¹, Jeong-Seon Yu², Do-Youp Kim³, Seok-Won Lee^{4*}

¹Konkuk University, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Master

²Konkuk University, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Master

³Konkuk University, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Bachelor

⁴Konkuk University, Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Professor

ABSTRACT: The ground movement and changes in earth pressure due to the consecutive construction of retaining wall and underground space were studied experimentally. A soil tank having 160 cm in length and 120 cm in height, was manufactured to simulate the vertical excavation like retaining wall by using 10 separated right side walls and underground space excavation like tunnel by using 5 separated bottom walls. The variation of earth pressure and surface settlement were measured according to the excavation stages. The results showed that the decrease of earth pressure due to the wall movement can cause the increase of earth pressure of the neighboring walls proving the arching effect. Experiments simulating continuous construction sequence also identified arching effect, however only 50% of earth pressure was restored on the 10th right side wall due to the movement of 1st bottom side wall unusually.

Keywords: Ground movement, Underground space, Retaining wall, Model tank

초 록: 본 연구에서는 흙막이벽과 같은 수직굴착과 터널과 같은 지하공간의 연속적인 굴착에 따른 지반 거동과 토압 변화를 실험적으로 연구하였다. 굴착 단계별로 벽체 거동, 토압 변화, 그리고 지표 침하의 측정이 가능한 길이 160cm, 높이 120cm의 모형 토조를 제작하였다. 실험은 균일하게 조성된 사질토 지반에서 벽체에 임의의 변위를 가하고, 토압 변화와 지표 침하를 확인하는 방식으로 수행하였다. 모형실험은 흙막이벽과 지하공간의 연속적인 시공을 모사하기 위하여 흙막이벽 굴착을 모사하는 우측벽체 10개 및 지하공간 굴착을 모사하는 하부벽체 5개를 순서대로 거동시켜 모사하였다. 실험 결과, 벽체의 주동변위로 감소된 토압이 주변 벽체로 분담되는 아칭현상이 모든 벽체에서 발생함을 확인하였다. 연속되는 시공을 모사한 실험에서 phase마다 아칭현상을 확인할 수 있으나, 하부1단 벽체의 거동 시, 우측10단 벽체는 다른 경우와 달리 토압이 50%정도만 회복됨을 보였다.

주요어: 지반거동, 지하공간, 흙막이벽, 모형토조

*Corresponding author: Seok-Won Lee

E-mail: swlee@konkuk.ac.kr

Received April 10, 2015; Revised April 24, 2015;

Accepted April 28, 2015

1. 서 론

최근 국내 도심지의 경우, 지상공간의 포화에 따른 지하공간 활용이 활성화되면서 각종 복잡한 형태의 연속적인 개착 및 굴착이 이루어지고 있다. 개착구조물과 지하공간이 연결되는 시설은 이미 기존에 시공되고 있으나, 개착구조물을 시공하고 동시에 주변으로 지하공간이 건설되는 경우는 그렇게 흔하지 않은 경우라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 지하정거장과 같은 개착식 흙막이벽체를 시공하고 이어서 근접하여 지하공간이 건설되는 경우에 대하여 지반거동 및 역학적 변화에 대하여 연구를 수행하였다.

기존의 연구사례를 보면 흙막이 벽체에 관한 연구(Jeon et al., 2013; Tang and Kung, 2010)는 상당히 수행되었고, 또한 지하공간 굴착에 대한 연구(Son, 2013; Son and Yun, 2010)도 상당히 수행되었다. 그러나 이 두 경우를 연속하여 수행하는 것을 모사한 연구는 많지 않은 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 흙막이 벽체의 건설에 따른 벽체의 변위 및 토압을 측정하고 이어서 지하공간의 건설에 따른 추가적인 변위 및 토압의 변화를 측정하였다. 이를 위하여 대형 모형토조를 제작하였고, 실험재료로서 모래를 사용하였다. 즉, 굴착 단계별로 벽체 거동, 토압 변화, 지표 침하의 변화를 파악할 수 있는 길이 160 cm, 높이 120 cm의 모형 토조를 제작했다. 실험은 균일하게 조성된 사질토 지반에서 벽체에 변위를 가하고 토압 변화와 지표 침하를 확인하는 방식으로 수행하였다. 모형실험은 흙막이벽과 지하공간의 연속적인 시공을 모사하기 위하여 흙막이벽을 모사하는 우측벽체 10개 및 지하공간을 모사하는 하부벽체 5개를 순서대로 거동시켜 모사했다. 이를 통하여 각각의 시공이 상호 거동에 미치는 영향을 알아보았다.

2. 실내모형실험

2.1 모형실험장비

실험을 위해 모형 토조를 Fig. 1과 같이 지반조성구역, 우측벽체변위부, 침하측정부로 나누어 설계했다. 토조의 총 크기는 길이 160 cm, 높이 120 cm의 정방형 구조이며, 폭은 40 cm이다. 지반조성구역 내 강사를 통해 실제로 지반이 조성되며, 구역의 크기는 길이 80 cm, 높이 80 cm, 폭 40 cm 이다. 2차원 거동을 모사하기 위해서 토조를 구성하는 재료는 수평, 수직을 제외한 방향으로 변형이 발생하지 않도록 두께 45 mm의 강으로 제작되었다. 침하량과 벽체 변형을 파악하고자 150 mm 두께의 투명아크릴을 배치했고, 아크릴의 힘을 방지하기 위해 동일한 두께의 강을 격자형으로 배치했다. 모형지반은 주문진 규사를 사용하여 조성했고, 일정한 간격을 두고 다짐봉을 낙하시키는 방식으로 모형지반을 완성했다. 지반 조성이 완료된 토조는 Fig. 2와 같다.

모형벽체는 단계별 흙막이벽 굴착과 지하공간 굴착을 모사하기 위해, 우측벽체 10개, 하부벽체 5개로

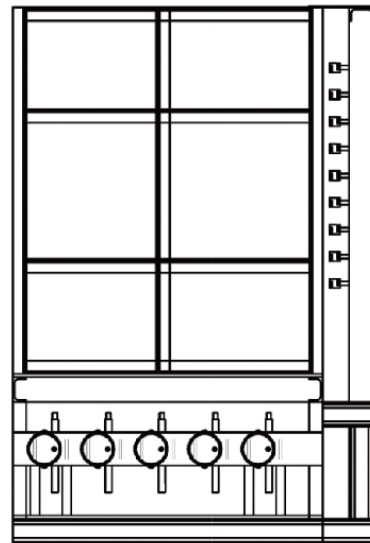


Fig. 1. Model tank

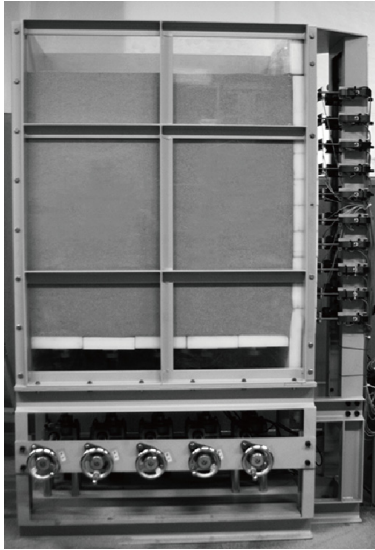


Fig. 2. Tank with sand

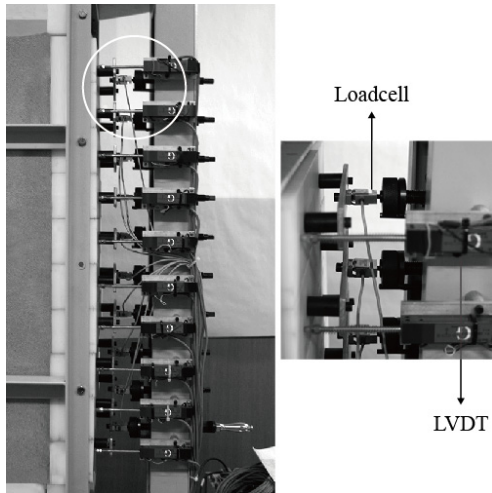


Fig. 3. LVDT installed

분리하여 제작했다. 벽체의 크기는 우측벽체가 가로 8 cm, 세로 8 cm, 폭 40 cm이며, 하부벽체는 가로 16 cm, 세로 5 cm, 폭 40 cm이다. 우측벽체의 두께는 8 cm, 하부벽체의 두께는 5 cm로 구성된 지반으로 변형이 발생하지 않을 정도의 충분한 두께로 매끄럽게 제작했다. 이는 휨, 강성, 마찰각의 영향을 최소화함으로써, 해당 영향으로 인해 실험 결과가 달라지지 않도록 계획한 것이다. 각 벽체에 screw를 벽체 후면에

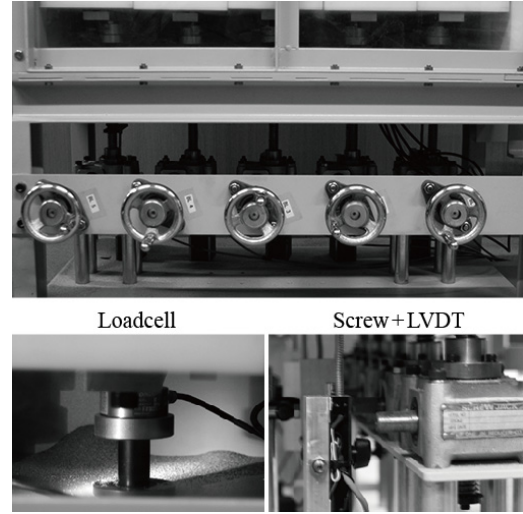


Fig. 4. Load cell installed

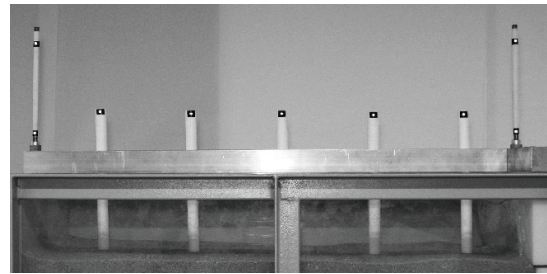


Fig. 5. Measurement system for ground movement

배치했고, 이는 screw를 회전시켜 동력이 벽체에 전달되어, 좌우 혹은 상하 거동을 가능토록 하기 위함이다. 변위와 토압의 변화가 측정 가능해야 하므로 Fig. 3 및 Fig. 4와 같이 screw가 배치된 공간에 하중계(load cell)와 변위센서(Linear Variable Differential Transformer, LVDT)를 각 벽체마다 배치했다.

벽체의 인위적 거동으로 지반의 침하는 필연적으로 발생하며, 본 실험에서 지표 침하를 측정하기 위해 Fig. 5와 같이 지표침하 측정부를 구성했다. 침하량을 측정하기 위한 봉은 자체 무게로 인해 침하되지 않기 위해 스티로폼 재질을 사용했으며, 직경은 2 cm, 길이는 20 cm로 제작했다. 스티로폼 봉을 구속하기 위해 T형 바를 설계했고, 봉과 동일한 직경으로 구멍을 뚫어 상하 거동이 용이하도록 했고, 일정한 간격으로

구멍을 배치했다. 사진측량을 통해 지표 침하량을 산출하기 위해 DSLR (Canon)과 상용 소프트웨어 Photomodeler 5 pro를 사용했다.

2.2 실험조건 및 과정

2.2.1 실험 시료

지반 조성을 위해 건조된 주문진 규사를 사용했다. 사용한 규사의 물리적 특성은 Table 1과 같다. 지반을 조성할 때마다 일정한 단위중량을 유지하고 그 값을 확인하기 위해 단위중량 측정용 캔을 깊이 20 cm, 40 cm, 60 cm에 매설했고 실험 종료 이후에 캔 내부의

단위중량을 측정했다. 조성된 지반의 단위중량은 평균 12.4 kN/m³을 나타냈다.

2.2.2 실험 조건

본 실험의 목적은 균일하게 조성된 사질토 지반에서 흠막이 벽체의 주동변위 발생(phase1~phase10)에 따른 토압 변화와 지표침하를 확인하고 연속해서 인접 하부에서 지하공간이 굴착(phase11~phase15)될 때 유도되는 지반변위를 측정하는 것이다. 따라서 실험 조건은 우측벽체(wall)와 하부벽체(base)에 단계별로 변위를 부여하여(phase1~phase15) 흠막이벽-지하공간의 연속적인 시공을 Fig. 6과 같이 모사하였다.

우측벽체의 변형을 측정하기 위해 적절한 벽체 변위의 산정은 필수적이다. 본 실험에서는 Milligan (1974)의 단순화된 벽체 변형 모델을 적용했고, Clough (1990)의 벽체 최대변위 0.005H를 고려한 벽체 변위를 설정했다. Fig. 7은 우측벽체가 거동할 때 캔틸레버 형상을 가지도록 변위가 진행되는 그래프이며, 실험에 적용한 상세한 벽체 변위는 Table 2와 같다. Fig. 8은 우측벽체가 거동할 때 벌징 형상을 가지도록 변위가 진행되는 그래프이며, 상세한 벽체 변위는 Table 3과 같다.

Table 1. Physical properties of soil

Cu ¹⁾	Cc ²⁾	Gs	USCS
1.53	0.87	2.63	SP

¹⁾Uniformity coefficient

²⁾Coefficient of gradation

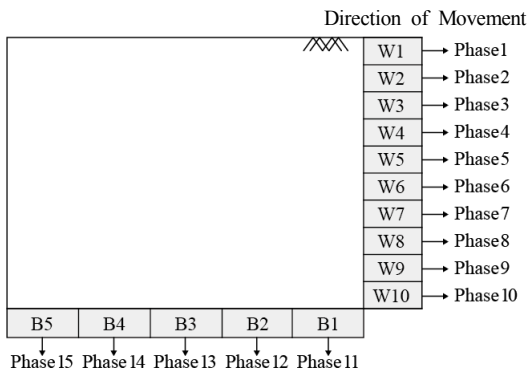


Fig. 6. Experimental test condition

2.2.3 실험 과정

우선 벽체 간 수평을 맞추고 총 80 cm의 모형지반 조성을 위해 10번에 나누어 8 cm씩 강사했다. 1.0 kg의 다짐봉을 사용해서 일정간격으로 25회 다짐했다. 지반 조성이 완료된 후 T형 바를 설치하고 일정

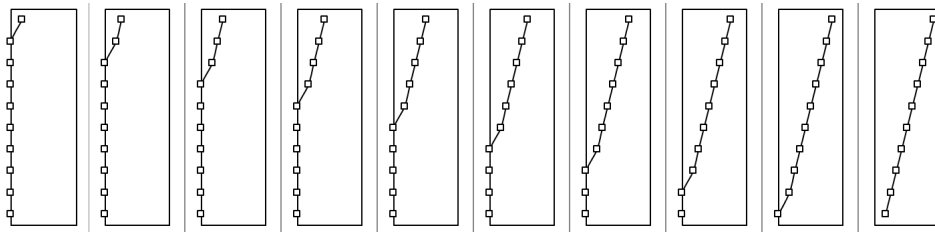


Fig. 7. Cantilever shape

Table 2. Displacement of wall for cantilever shape (mm)

Phase	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Sum	
Right Wall	W1	1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5							5.5
	W2		1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5							5.0
	W3			1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5							4.5
	W4				1.0	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5							4.0
	W5					1.0	0.5	0.5	0.5	0.5							3.5
	W6						1.0	0.5	0.5	0.5							3.0
	W7							1.0	0.5	0.5							2.5
	W8								1.0	0.5							2.0
	W9									1.0	0.5						1.5
	W10										1.0						1.0
Bottom	B1										3.0						3.0
	B2											3.0					3.0
	B3												3.0				3.0
	B4													3.0			3.0
	B5														3.0		3.0

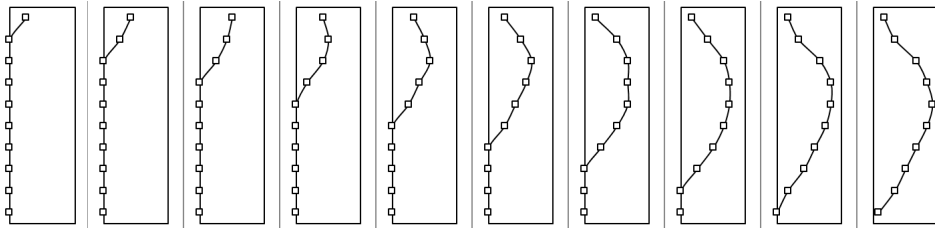


Fig. 8. Bulging shape

Table 3. Displacement of wall for bulging shape (mm)

Phase	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Sum	
Right Wall	W1	1.5	1.0	0.5	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5	0.0	0.0	0.0						1.0
	W2		1.5	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0	-0.5	-0.5	0.0						2.0
	W3			1.5	1.0	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0						4.0
	W4				1.0	1.5	1.0	0.5	0.5	0.5	0.0						5.0
	W5					1.5	1.0	1.5	0.5	0.5	0.5						5.5
	W6						1.5	1.5	1.0	0.5	0.5						5.0
	W7							1.5	1.5	0.5	0.5						4.0
	W8								1.5	1.0	0.5						3.0
	W9									1.0	1.0						2.0
	W10										0.5						0.5
Bottom	B1										3.0						3.0
	B2											3.0					3.0
	B3												3.0				3.0
	B4													3.0			3.0
	B5														3.0		3.0

간격으로 측점을 붙인 스티로폼 봉 5개를 배치했다. 실험을 위해 적용한 벽체의 변위는 Table 2 및 Table 3과 같다. 변위 속도는 0.02 mm/sec로 적용하였다. 실험의 모든 과정은 PC와 데이터로거를 이용해 하중계와 변위센서의 변화되는 값을 스프레드시트에 기록하였다.

3. 모형실험 결과

실험은 우측벽체 phase1 (W1 in Fig. 6)으로부터 하부벽체 phase15 (B5 in Fig. 6)로 이어지는 흠막이벽 시공과 지하공간 시공을 연속적으로 모사했다. 우측 벽체 변위의 형상에 따라 실험방식을 캔틸레버+지하공간 굴착 방식 및 별장+지하공간 굴착 방식으로 나눴다. 토압 변화는 이러한 2가지 방식을 각각 나누어 서술했으나, 지표침하량은 실험 방식간 비교를 위해 종합해서 결과를 서술했다.

3.1 토압 변화

3.1.1 캔틸레버+지하공간 굴착 방식

우측벽체 상부의 최대 변위가 5.5 mm를 가지도록 거동시키고, 우측벽체의 거동이 완료된 이후에는 하부1단 벽체부터 차례대로 일정한 침하(3 mm)를 부여해 토압의 변화와 지표침하를 산출했다. 토압의 변화 양상을 4단계로 분류했다. 즉, 우측벽체, 하부1단 벽체, 하부3단 벽체, 그리고 하부5단 벽체로 나누어 토압의 변화를 파악했다.

Fig. 9는 우측벽체에 작용하는 깊이별 토압을 phase0(초기토압), phase1, phase2마다 도시한 그래프이다. Phase0과 phase1간의 토압 변화를 비교하면, 우측1단 벽체의 거동으로, 그 주변의 토압은 감소함을 보였다. Phase1과 phase2간의 토압 변화를 비교하면, 우측2단 벽체의 거동으로, 그 주변의 토압은 감소함을 보였다. 그러나 우측1, 3단 벽체 주변의 토압은 오히려 증가함을 보였는데, 증가된 최종토압은 초기에 벽체가 지녔던 토압보다 큰 값이다. 우측2단 벽체의 거동이

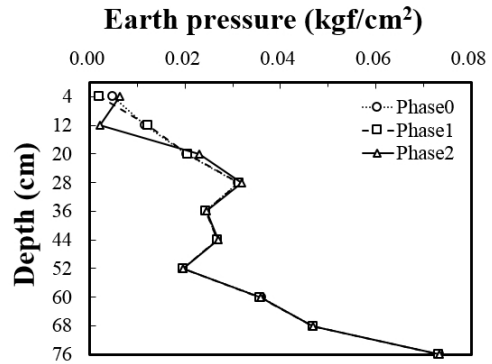


Fig. 9. Pressure for cantilever, phase0-2

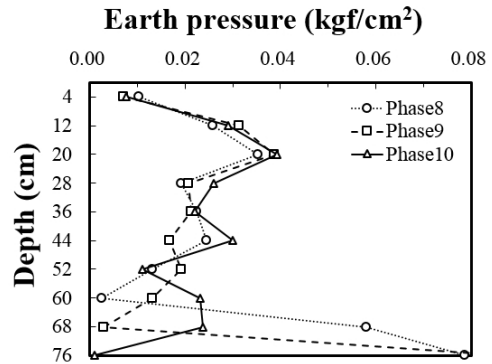


Fig. 10. Pressure for cantilever, phase8-10

주변 지반을 이완시키며, 이완된 영역의 토압이 상·하부 지반으로 분배되는 아칭현상을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 우측벽체에 작용하는 깊이별 토압을 phase8, phase9, phase10마다 도시한 그래프이다. Phase8과 phase9간의 토압 변화를 비교하면 우측9단 벽체의 거동으로, 우측9단 주변의 토압은 감소함을 보였다. 그러나 우측8, 10단 벽체 주변으로 응력이 재분배되어 우측8, 10단 주변의 토압은 증가함을 보였다. Phase9과 phase10간의 토압 변화도 우측 10단 벽체의 토압이 감소했고, 그 응력은 우측9단 벽체로 분배되는 아칭현상으로 설명가능하다. Phase1부터 phase10까지 공통적으로 아칭현상이 발생했다. 각 벽체의 거동이 이루어지면, 결론적으로 해당 벽체에 작용하는 토압이 정지토압에서 주동토압으로 감소하고, 거동이 이루어지는 벽체와 맞닿는 상부 및 하부 벽체

의 토압이 증가하며, 거동하는 벽체와 거리가 멀어질수록 증가되는 토압의 폭이 감소하는 결과를 나타냈다.

Fig. 11은 우측벽체에 작용하는 깊이별 토압을 phase10(우측10단), phase11(하부1단)마다 도시한 그래프이다. Phase10과 phase11간의 토압 변화를 비교하면, 하부1단 벽체의 거동으로 우측10단 벽체의 토압은 증가함을 보였다. 우측벽체에서 토압이 증가되는 범위는 우측4단부터 우측10단 벽체까지이며, 제일 큰 상승폭은 0.0193 kgf/cm^2 이다. Fig. 12는 phase11 과정에서, 하부1단 벽체에 작용하는 토압 변화를 도시한 그래프이다. 하부1단 벽체 하강이 원인이 되어, 하부1단 벽체의 토압은 0.083 kgf/cm^2 감소되어 0.013 kgf/cm^2 로 수렴함을 보였다. Fig. 13은 phase11 과정에서, 하부2, 3단 벽체에 작용하는 토압 변화를 도시한

그래프이다. 하부1단 벽체 하강이 원인이 되어, 하부2단 벽체의 토압은 0.030 kgf/cm^2 증가되어 0.138 kgf/cm^2 로 수렴함을 보였고, 하부3단 벽체의 토압은 증감 폭이 없음을 보였다. 하부1단 벽체의 거동은 하부3단 벽체에 작용하는 토압에는 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

Fig. 14는 우측벽체에 작용하는 깊이별 토압을 phase12(하부2단), phase13(하부3단)마다 도시한 그래프이다. Phase12와 phase13간의 토압 변화를 비교하면, 하부3단 벽체의 거동으로 우측벽체는 지속적으로 토압의 변화를 가짐을 보였다. 우측벽체에서 토압이 증가되는 범위는 우측8단부터 우측10단 벽체까지이며, 제일 큰 상승폭은 0.0193 kgf/cm^2 이다. 우측벽체의 하부는 토압이 증가함을 보이지만, 상부는 토압이

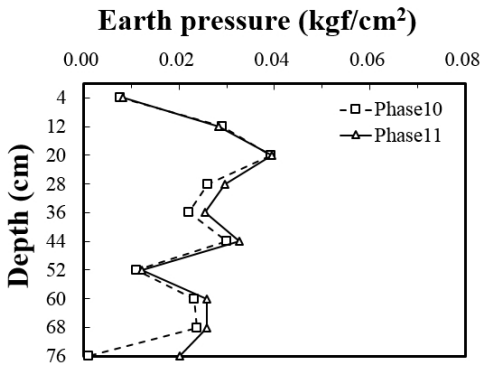


Fig. 11. Pressure for cantilever, phase10-11

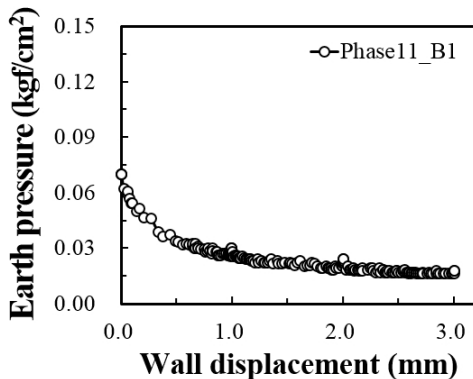


Fig. 12. Pressure on B1

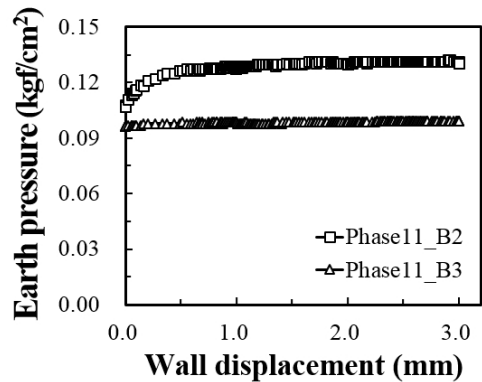


Fig. 13. Pressure on B2 and B3

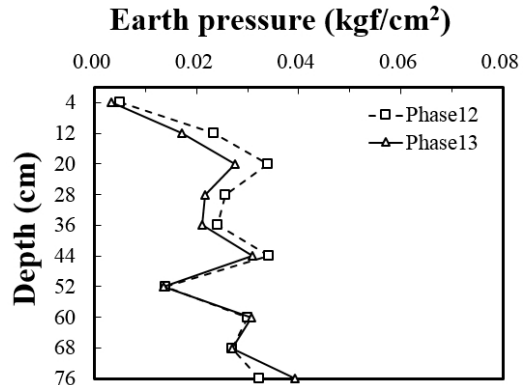


Fig. 14. Pressure for Cantilever phase12-13

감소함을 보였다. 이 현상은 하부지반의 토압 증가에 반하여 발생하는 아칭현상으로 판단된다.

Fig. 15는 phase13 과정에서, 하부3단 벽체에 작용하는 토압 변화를 도시한 그래프이다. 하부3단 벽체 하강이 원인이 되어, 하부3단 벽체의 토압은 0.0977 kgf/cm² 감소되어 0.0289 kgf/cm²로 수렴함을 보였다. Fig. 16은 phase13 과정에서, 하부2, 4단 벽체에 작용하는 토압 변화를 도시한 그래프이다. 하부3단 벽체 하강이 원인이 되어, 하부2단 벽체의 토압은 0.0625 kgf/cm² 증가되어 0.0930 kgf/cm²로 수렴함을 보였고, 하부4단 벽체의 토압은 0.0156 kgf/cm² 증가되어 0.1164 kgf/cm²로 수렴함을 보였다. 하부2단 벽체의 토압증가량이 더 큰 이유는 phase12에서 하부2단 벽체의 거동으로 지반이 이완되어 토압이 상당량 감소되었기 때문이며, 하부2단 벽체 쪽으로 응력이 더

분배된 것은 아닌 것이다.

Fig. 17은 우측벽체에 작용하는 깊이별 토압을 phase14(하부4단), phase15(하부5단)마다 도시한 그래프이다. Phase14과 phase15간의 토압 변화를 비교 하면, 하부5단 벽체의 거동으로 우측벽체는 토압의 변화가 비교적 적음을 보였다. 우측3~6단 벽체가 소량 감소함을 확인할 수 있고, 그 폭은 0.0017 kgf/cm²이다.

Fig. 18은 phase15 과정에서, 하부5단 벽체에 작용하는 토압 변화를 도시한 그래프이다. 하부5단 벽체 하강이 원인이 되어, 하부5단 벽체의 토압은 0.0727 kgf/cm² 감소되어 0.0328 kgf/cm²로 수렴함을 보였다. Fig. 19는 phase15 과정에서, 하부3, 4단 벽체에 작용하는 토압 변화를 도시한 그래프이다. 하부5단 벽체 하강이 원인이 되어, 하부3단 벽체의 토압은 0.0188

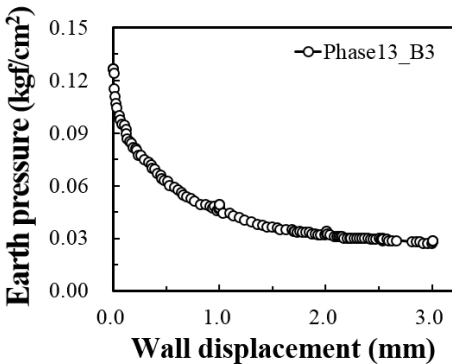


Fig. 15. Pressure on B3

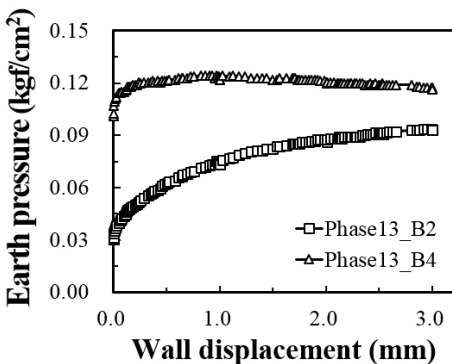


Fig. 16. Pressure on B2 and B4

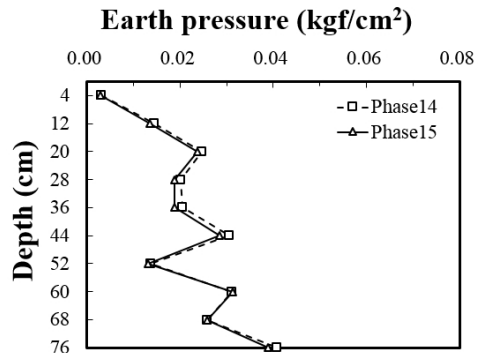


Fig. 17. Pressure for cantilever, phase14-15

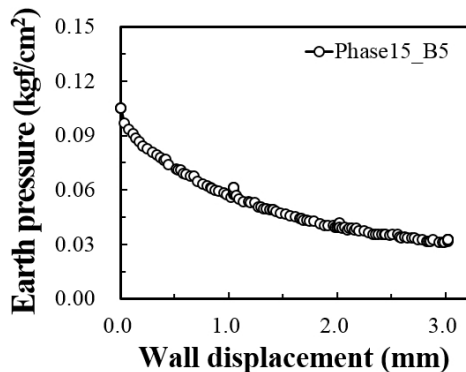


Fig. 18. Pressure on B5

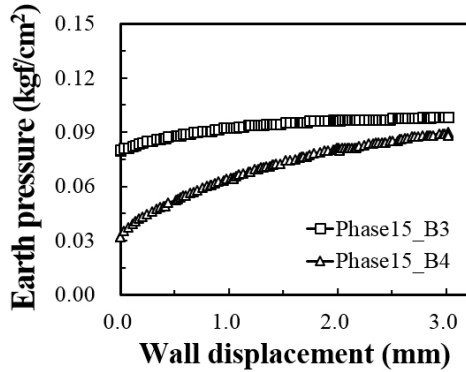


Fig. 19. Pressure on B3 and B4

kgf/cm² 증가되어 0.0985 kgf/cm²로 수렴함을 보였고, 하부4단 벽체의 토압은 0.0563 kgf/cm² 증가되어 0.0833 kgf/cm²로 수렴함을 보였다.

3.1.2 벌징+지하공간 굴착 방식

우측벽체 중앙부가 최대 변위(5.5 mm)를 가지도록 거동시키고, 우측벽체의 거동이 완료된 이후에는 하부1단 벽체부터 차례대로 일정한 침하(3 mm)를 부여해 토압의 변화와 지표침하를 산출했다. 토압의 변화 양상은 캔틸레버+지하공간 굴착 방식과 동일하게 4 단계로 분류하였다.

Fig. 20은 우측벽체에 작용하는 깊이별 토압을 phase0(초기토압), phase1, phase2마다 도시한 그래프이다. Phase0과 phase1간의 토압 변화를 비교하면 우측1단 벽체의 거동으로, 그 주변의 토압은 감소함을 보였다. Phase1과 phase2간의 토압 변화를 비교하면 우측2단 벽체의 거동으로, 그 주변의 토압은 감소함을 보였다. 그러나 우측1, 3단 벽체 주변의 토압은 증가함을 보였는데, 증가된 최종토압은 초기에 벽체가 지녔던 토압보다 큰 값이다. 우측2단 벽체의 거동이 주변 지반을 이완시키며, 이완된 영역의 토압이 상·하부 지반으로 분배되는 아칭현상을 확인할 수 있다.

Fig. 21은 우측벽체에 작용하는 깊이별 토압을 phase8, phase9, phase10마다 도시한 그래프이다. Phase8과 phase9간의 토압 변화를 비교하면 우측9단

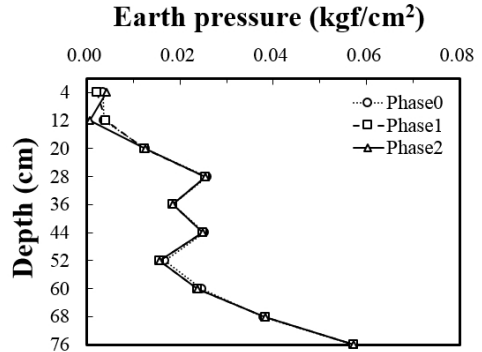


Fig. 20. Pressure for bulging, phase0-2

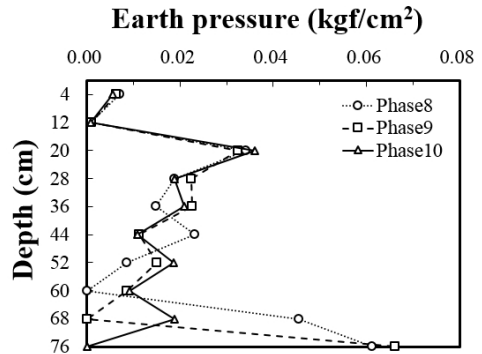


Fig. 21. Pressure for bulging, phase8-10

벽체의 거동으로, 우측9단 주변의 토압은 감소함을 보였다. 그러나 우측8, 10단 벽체 주변으로 응력이 재분배되어 우측 8, 10단 주변의 토압은 오히려 증가함을 보였다. Phase9과 phase10간의 토압 변화도 우측 10단 벽체의 토압이 감소했고, 그 응력은 우측9단 벽체로 분배되는 아칭현상으로 설명가능하다. 캔틸레버+지하공간 굴착 방식과 동일하게 Phase1부터 phase10까지 공통적으로 아칭현상이 발생했다. 벌징 굴착 방식에서는 캔틸레버 굴착 방식과 달리 수동방향의 변위도 가해지는데, 이 경우에도 아칭현상은 동일하게 발생했다.

Fig. 22는 우측벽체에 작용하는 깊이별 토압을 phase10(우측10단), phase11(하부1단)마다 도시한 그래프이다. Phase10과 phase11간의 토압 변화를 비교하면, 하부1단 벽체의 거동으로 우측10단 벽체의 토압

은 증가함을 보였다. 우측벽체에서 토압이 증가되는 범위는 우측3단부터 우측10단 벽체까지이며, 제일 큰 상승폭은 0.0069 kgf/cm^2 이다. 캔틸레버 방식과 동일하게 하부1단 벽체에 작용하는 토압 변화를 살펴보면, 하부1단 벽체 하강이 원인이 되어, 하부1단 벽체의 토압은 0.0484 kgf/cm^2 감소되어 0.0164 kgf/cm^2 로 수렴함을 보였다. 또한 하부1단 벽체 하강이 원인이 되어, 하부2단 벽체의 토압은 0.0211 kgf/cm^2 증가되어 0.1243 kgf/cm^2 로 수렴함을 보였고, 하부3단 벽체의 토압은 증감 폭이 없음을 보였다. 하부1단 벽체의 거동은 하부3단 벽체에 작용하는 토압에는 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

Fig. 23은 우측벽체에 작용하는 깊이별 토압을 phase12(하부2단), phase13(하부3단)마다 도시한 그래프이다. Phase12와 phase13간의 토압 변화를 비교

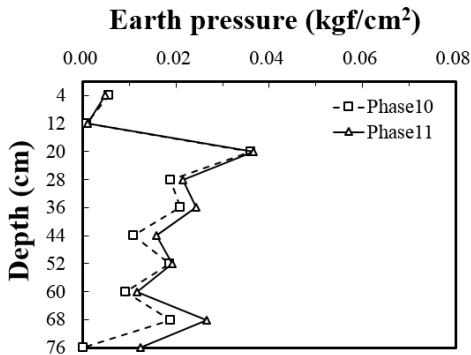


Fig. 22. Pressure for bulging, phase10-11

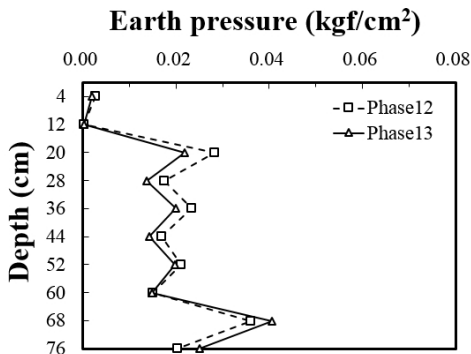


Fig. 23. Pressure for bulging, phase12-13

하면, 하부3단 벽체의 거동으로 우측벽체는 지속적으로 토압의 변화를 가짐을 보였다. 우측벽체에서 토압이 증가되는 범위는 우측9단부터 우측10단 벽체까지이며, 제일 큰 상승폭은 0.004 kgf/cm^2 이다. 우측벽체의 하부는 토압이 증가함을 보이지만, 상부는 토압이 감소함을 보였고, 제일 큰 하강폭은 0.0066 kgf/cm^2 이다. 이 현상은 하부지반의 토압 증가에 반하여 발생하는 아칭현상으로 판단된다. 캔틸레버 방식과 동일하게 phase13 과정에서 하부3단 벽체에 작용하는 토압 변화를 살펴보면, 하부3단 벽체 하강이 원인이 되어, 하부3단 벽체의 토압은 0.0993 kgf/cm^2 감소되어 0.0188 kgf/cm^2 로 수렴함을 보였다. 또한 하부3단 벽체 하강이 원인이 되어, 하부2단 벽체의 토압은 0.060 kgf/cm^2 증가되어 0.0883 kgf/cm^2 로 수렴함을 보였고, 하부4단 벽체의 토압은 0.0227 kgf/cm^2 증가되어 0.1242 kgf/cm^2 로 수렴함을 보였다. 하부2단 벽체의 토압증가량이 더 큰 이유는 phase12에서 하부2단 벽체의 거동으로 지반이 이완되어 토압이 상당량 감소되었기 때문이며, 하부2단 벽체 쪽으로 응력이 더 분배된 것은 아닌 것으로 판단된다.

Fig. 24는 우측벽체에 작용하는 깊이별 토압을 phase14(하부4단), phase15(하부5단)마다 도시한 그래프이다. Phase14와 phase15간의 토압 변화를 비교하면, 하부5단 벽체의 거동으로 우측벽체는 토압의 변화가 비교적 적음을 보였다. 우측3~7단 벽체가 소량 감소함을 확인할 수 있고, 그 폭은 0.0022 kgf/cm^2

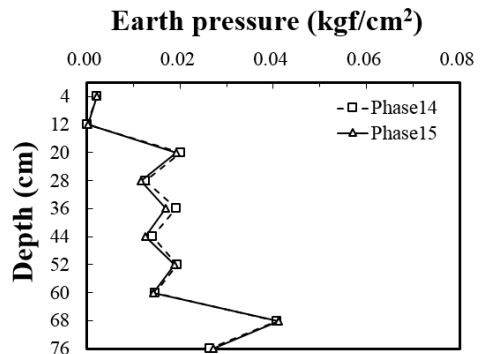


Fig. 24. Pressure for bulging, phase14-15

이다. Phase15 과정에서 하부5단 벽체에 작용하는 토압 변화를 살펴보면, 하부5단 벽체 하강이 원인이 되어 하부5단 벽체의 토압은 0.0711 kgf/cm^2 감소되어 0.0297 kgf/cm^2 로 수렴함을 보였다. 또한 하부5단 벽체 하강이 원인이 되어, 하부3단 벽체의 토압은 0.0149 kgf/cm^2 증가되어 0.0907 kgf/cm^2 로 수렴함을 보였고, 하부4단 벽체의 토압은 0.0649 kgf/cm^2 증가되어 0.0969 kgf/cm^2 로 수렴함을 보였다.

3.2 지표 침하

Fig. 25 및 Fig. 26은 캔틸레버 굴착 형상 및 벌징 굴착 형상을 적용한 실험에서, phase10까지의 침하를 각각 도시한 그래프이다. X축은 우측벽체의 총 높이 80 cm로 나누었고, Y축은 최대 침하량으로 나누어 정규화했다. 우측벽체 근접부에서 최대 침하량을 나타냈으며, 캔틸레버 굴착 형상에서는 1.35 cm, 벌징 굴착 형상에서는 1.12 cm로 나타났다. 우측벽체에 벌징 굴착 형상을 적용했을 때, 최대 침하량 및 침하기울기가 작음을 보였다. 캔틸레버 굴착 형상은 지속적인 주동 변위로 인해 침하가 일어날 수 있는 공간도 지속적으로 제공되는 반면, 벌징 굴착 형상은 phase4부터 상부에 수동변위를 적용함으로써 지표의 침하를 억제한 것이라 판단된다.

Fig. 27 및 Fig. 28은 캔틸레버 굴착 형상 및 벌징 굴착 형상을 적용한 실험에서, phase11~15까지의

침하를 각각 도시한 그래프이다. 우측벽체 근접부에서 최대 침하량을 나타냈으며, 캔틸레버 굴착 형상에서는 1.91 cm, 벌징 굴착 형상에서는 1.68 cm로 나타났다. 하부벽체의 순차적 거동으로, 모형 토조 내의 모든 범위가 영향범위임을 보였다. 2가지 굴착 실험은

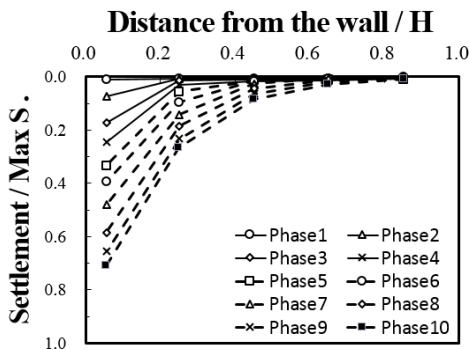


Fig. 25. Settlement for cantilever

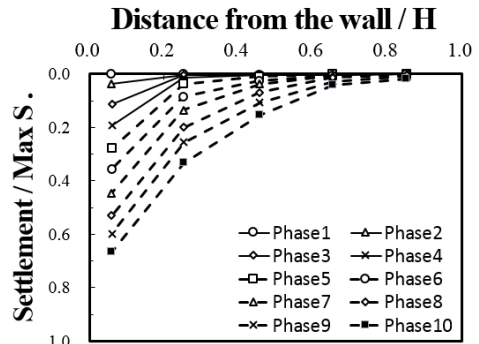


Fig. 26. Settlement for bulging

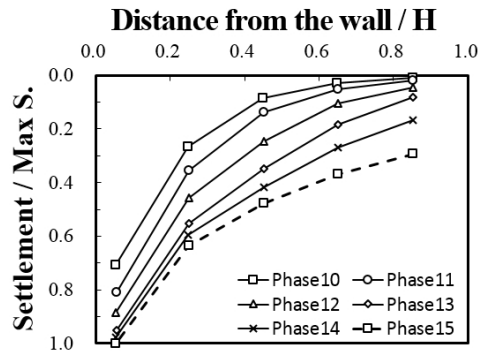


Fig. 27. Settlement for cantilever

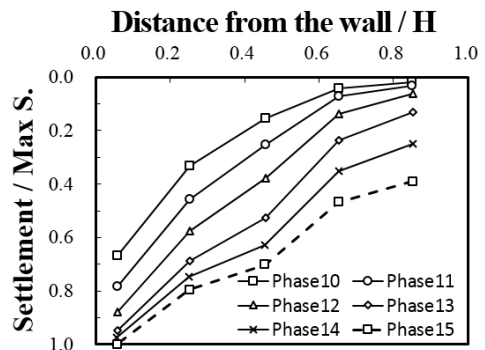


Fig. 28. Settlement for bulging

phase가 진행될수록 공통적으로 침하량은 모든 범위에서 증가하며, 침하 기울기는 줄어들을 확인할 수 있다.

4. 모형실험 결과 분석

4.1 기존 이론과의 비교

Terzaghi and Peck (1967)과 Tschebotarioff (1973)가 제시한 경험토압 분포도와 실험결과를 비교함으로써, 수행한 실험이 선행연구와 부합하는지 여부를 확인하였다. Fig. 29는 캔틸레버 굴착 형상 적용 시 phase10, Fig. 30은 벌징 굴착 형상 적용 시 phase10에서의 토압 분포를 이론식과 함께 도시한 것이다. 각 그림에서 검정 실선은 실험 결과이며, 회색 점선은 Terzaghi and Peck (1967)과 Tschebotarioff (1973)가 제시한 경험토압을 나타내고 있다. 비교 결과, phase10이 완료된 이후 토압은 캔틸레버 굴착과 벌징 굴착 실험의 결과가 서로 유사함을 확인할 수 있다. 두 실험 모두 상부(우측3단 부근)의 토압은 약 0.02 kgf/cm² 만큼 과다한 값을 나타냈으나, 전반적인 경향은 Terzaghi and Peck (1967) 및 Tschebotarioff (1973)가 제시한 경험토압과 유사함을 보였다.

Fig. 31은 캔틸레버 굴착형상 적용 시 phase10, Fig. 32는 벌징 굴착형상 적용 시 phase10에서의 지표 침하량 분포를 기존 이론식과 함께 도시한 것이다. Phase10

굴착이 완료된 이후 침하량은 캔틸레버 굴착과 벌징 굴착 실험 결과가 서로 유사함을 확인할 수 있다. 두 실험 결과 모두 전반적인 경향은 Caspe (1966)가 제시한 침하량 곡선과 유사함을 보였다.

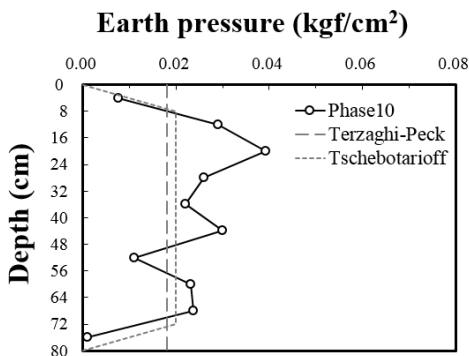


Fig. 29. Pressure for cantilever, phase 10

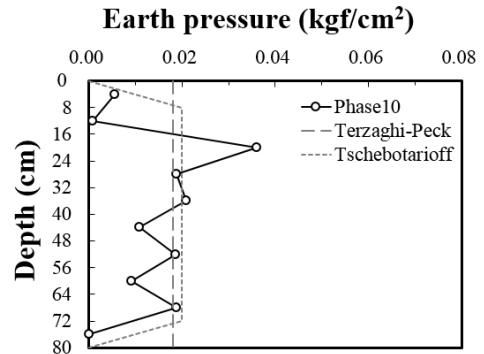


Fig. 30. Pressure for bulging, phase 10

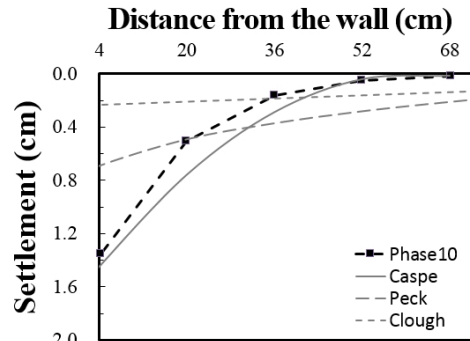


Fig. 31. Settlement for cantilever, phase 10

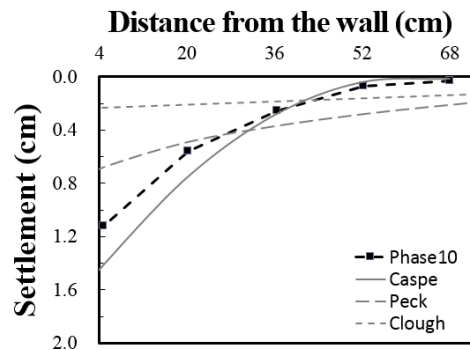


Fig. 32. Settlement for bulging, phase 10

4.2 벽체토압 비교

Fig. 33 및 Fig. 34는 연속시공 전체 실험단계 (phase1~phase15)에서 벽체간의 영향을 파악하기 위해, 우측4, 5, 6단 벽체의 토압을 각 phase 굴착단계마다 도시한 것이다. Fig. 33은 캔틸레버 굴착 형상, Fig. 34는 벌징 굴착 형상일 때이며, 두 실험 모두 토압의 변화가 유사한 경향을 보였다. 벽체를 거동하면 벽체 주변 토압은 감소하고, 거동하는 벽체의 상·하부 토압이 증가하는 아칭현상을 보였다. Phase10까지 각 벽체가 거동한 이후, 공통적으로 토압이 회복됨을 확인할 수 있다. Phase10부터 phase12까지는 토조 하부의 토압 감소가 원인이 되어, 우측벽체 중앙부는 토압이 다소 증가함을 확인할 수 있으며, phase13부터 증가했던 토압이 다시 감소함을 보였다.

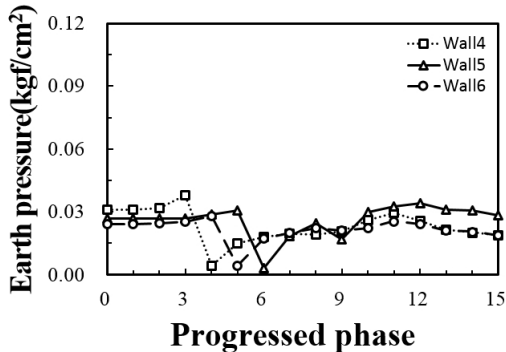


Fig. 33. Pressure for cantilever, wall 4,5,6

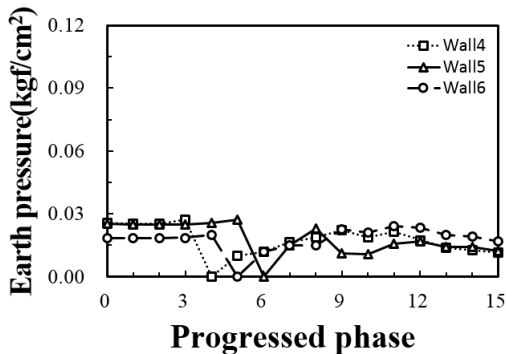


Fig. 34. Pressure for bulging, wall 4,5,6

Fig. 35 및 Fig. 36은 연속시공 전체 실험단계 (phase1~phase15)에서 벽체간의 영향을 파악하기 위해, 우측9, 10, 하부1단 벽체의 토압을 각 phase 굴착 단계마다 도시한 것이다. Fig. 35는 캔틸레버 굴착 형상, Fig. 36은 벌징 굴착 형상일 때이며, 두 실험 모두 토압의 변화가 유사한 경향을 보였다. 벽체를 거동하면 벽체 주변 토압은 감소하고, 거동하는 벽체의 상·하부 토압이 증가하는 아칭현상을 보였다. 우측9단과 우측10단 벽체의 거동 이후, 각 벽체는 토압을 초기토압만큼 회복하지 못하는 현상을 확인할 수 있다. 그리고 하부1단 벽체는, phase9부터 벽체에 작용하는 토압이 감소했으며, phase12이후 초기토압보다 더 큰 값이 작용함을 확인하였다. 우측벽체의 거동(phase9, 10)으로 지반이 일정한 영역을 가지고 이완되면서, 영역 내에 속하는 하부1단 벽체도 토압이

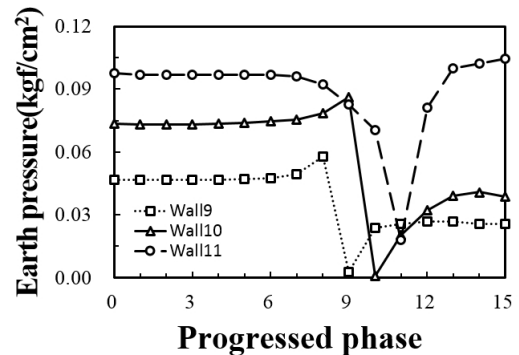


Fig. 35. Pressure for cantilever, W9,10 & B1

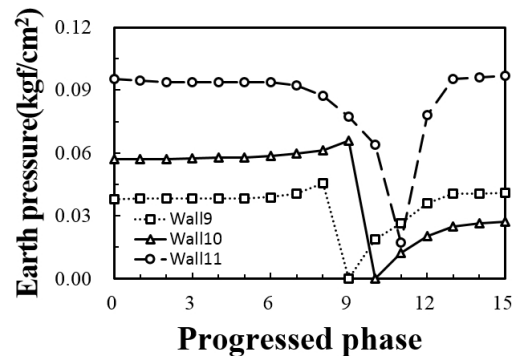


Fig. 36. Pressure for bulging, W9,10 & B1

감소됨을 확인하였다. 다음 phase가 이어지면서 토압이 분배되어 회복될 때, 우측벽체보다 하부1단 벽체로 토압이 분배되는 현상도 파악할 수 있다.

5. 결론

본 연구는 흙막이벽과 지하공간의 복합적인 거동 양상을 파악하기 위해 실내 모형실험을 수행하였다. 두 가지 종류의 벽체 변위를 선정하고, 주동 및 수동 변위를 벽체에 적용했다. 15개 벽체의 개별적 거동으로 변화하는 토압 및 지표침하를 계측하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 벽체가 주동방향으로 거동하면, 주변의 지반이 이완되면서 토압이 감소하는 현상을 보였다. 그에 반해 거동하는 벽체의 상·하부 벽체는 토압이 증가함을 보였다. 벽체의 주동변위로 감소된 토압이 주변 벽체로 전이되는 아칭현상임을 알 수 있고, 이 현상이 모든 벽체에서 발생함을 확인하였다.
2. 벽체 변위에 따른 토압 변화 연구를 통하여 초기에 발생하는 변형, 즉 거동시작 직후부터 약 2 mm 거동 시 토압의 변화가 대부분 이루어짐을 확인하였다.
3. 캔틸레버 굴착 혹은 벌징 굴착 형상을 벽체 변위로 적용시켜 phase10까지 실험한 연속굴착 모사 결과, Terzaghi and Peck (1967), Tschebotarioff (1973)가 흙막이벽의 토압으로 제시한 토압 분포와 유사한 경향을 나타냈다.
4. 하부1단 벽체의 거동이 우측10단 벽체의 토압 상승을 유도하였으며, 그 증가량은 초기 토압대비 50% 정도로 나타났다. 이는 타 구간에서 응력이 재분배될 경우에는 초기 토압을 상회하는 토압이 회복된다는 결과와 비교하여보면, 흙막이벽-지하공간 접촉부의 특이성이며 토체가 이완되고 이는 일체거동으로 이어지는 것으로 판단된다.
5. Phase11 이후 하부 변형이 이어지면서 우측벽체의 중·하부(깊이 20-80 cm) 토압이 증가함을 확인하

였고, 우측벽체와 이격거리가 0.5H (phase13)를 초과하면서 우측벽체의 토압변화가 미미함을 확인할 수 있었다.

6. Phase10에서의 지표 침하량을 이론식과 비교했을 때, Caspe (1966)의 침하곡선 경향과 유사함을 확인하였다. 캔틸레버 굴착과 벌징 굴착을 비교해 봤을 때, 캔틸레버 굴착의 최대 침하량과 침하 기울기가 더 큰 값을 보였다. 이는 캔틸레버 굴착 형상이 지속적인 주동변위적용이 원인이 되어 나타나는 현상으로 판단되며, 벌징 굴착 형상과 같이 상부에 수동변위를 적용하는 것이 최대 침하와 침하 기울기를 다소 억제할 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발, 13건설연구T01)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

1. Caspe, M. (1966), "Surface settlement adjacent to braced open cuts", *Journal of Soil Mechanics and Foundations Div.*, 92(ASCE #4867 Proceeding).
2. Clough, G.W., O'rourke, T.D. (1990), "Construction induced movements of insitu walls", *Geotechnical Special Publication (GSP) No. 25, ASCE*, pp. 439-470.
3. Jeon, J.-H., Park, J.-D., Lim, Y.-D., Lee, S.-W. (2013), "Damage assessment of structures according to the excavation methods", *J. of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 15, No. 2, pp. 161-173.
4. Milligan, G.W.E. (1974), "The behaviour of rigid and flexible retaining walls in sand", *Dissertation; University of Cambridge*.
5. Son, M. (2003), "The response of buildings to excavation-induced ground movement", *Ph.D*

- dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign.
6. Son, M.-R., Yun, J.-C. (2010), "Comparison of ground movements in a single ground layer and multiple ground layers due to nearby tunnel excavation", *J. of KSCE*, Vol. 30, No. 3C, pp. 167-174.
 7. Tang, Y.G., Kung, G.T.C. (2010), "Investigating the effect of soil models on deformations caused by braced excavations through an inverse- analysis technique", *Computers and Geotechnics*, Vol. 37, pp. 769-780.
 8. Tschebotarioff, G.P. (1973), "Foundations, retaining and earth structure", McGraw-Hill, pp. 415-432.
 9. Terzaghi, K., Peck, R.B. (1967), "Soil mechanics in engineering practice".