論文 12-3-19

원심모형실험에 의한 굴착 흙막이벽의 안정 및 토압분포

Stability and Earth Pressure Distribution of Excavated Earth Retaining Wall by Centrifugal Model Tests

김영철*·이처근**·김홍종***·안광국****·이명원*****·허 열******
Y. C. Kim · C. K. Lee · H. J. Kim · K. K. Ahn · M. W. Lee · Y. Heo
(1997년 6월 5일 접수, 1997년 9월 5일 채택)

ABSTRACT

In this study, centrifugal model tests were performed to investigate the behavior of excavated earth retaining wall with the depth of excavation and different types of wall(aluminum, steel panel). Jumunjin standard sand was used for foundation soil. The raining method was adopted to form the required relative density of the model ground. The lateral earth pressure measured from tests were compared with estimated active earth pressure by Rankine's theory. The test results have shown that the earth pressure acting on the retaining wall and the rotation displacement of the wall are influenced by the depth of excavation and the type of wall. It was found from the test results that the deformation of the wall increases with the depth of excavation.

1. 서 론

흙막이 구조물은 지반 굴착에 있어서 주변 지반 또는 물이 굴착단면 내에 침입하지 않도록 하기 위한 구조물로서 최근 산업의 발전에 따라 도심지의 대형 건축물이나 지하철공사 등 대규모 지하굴착 작업이 수반되는 공사가 급격히 증가하고 있다. 지반을 깊이 굴착할 경우 주변의 지반은 상당한 위험 요소를 내포하게 되어 시공중 붕괴사고를 일으킬 수 있다. 이와 같은 붕괴사고는 도심지에서 주

* 전문건설공제조합 직업훈련원 토목과
** 충북대학교 대학원 토목공학과
*** 한국도로공사 도로연구소
**** Illinois Institute of Technology 토목공학과
***** 명성건설(주)
****** 충북대학교 공과대학 토목공학과

위 건물의 전도나 인접한 구조물(상하수도, 가스관, 공동구 등)의 파괴로 인하여 대형사고를 일으킬 수 있다. 흙막이 벽체의 특성 및 지반 특성에 따른 토압의 분포형태, 크기 변화는 여러 조건에 따라 상당한 차이를 나타내므로 설계시에는 안정성을 충분히 검토해야 한다.

흙막이 구조물에 작용하는 토압은 지반조건과 설계방법에 따라 벽마찰각을 무시하고 수평응력으로 토압을 고려하는 Rankine 이론과 벽체의 마찰을 고려하여 벽체와 활동면에 쐐기와 같은 토압이 작용한다고 보는 Coulomb 이론이 일반적으로 적용되고 있다[1]. Fang[2]은 모형실험을 통하여 주동토압이 포물선 형태로 분포한다고 발표하였으며, Rowe[3], Wang[4], Dubrova[5,7] 등도 일반적으로 토압분포가 포물선으로 나타난다는 실험결과를 발표하였다. 그러나, 흙막이 구조물 설계시 계산의 편리성 때문에 Rankine, Tschebotarioff, Terzaghi-Peck 등의 이론이 적용되고 있는 실정이다[6].

본 연구에서는 원심모형시험기를 이용하여 지반굴착에 따른 벽체의 안정성과 변형 및 토압분포를 규명하기 위하여 굴착깊이와 벽체를 변화시켜가면서 모형실험을 수행하였다. 또한 실험결과는 Rankine의 토압론을 이용한 이론적 결과와 비교·검토하였다.

2. 흙막이 구조물에 작용하는 토압

지표면이 하나의 평면으로 주어진 반무한 지반이 횡방향으로 인장 또는 압축을 받으면 지반은 전단변형을 일으켜 파괴되며, 인장에 의한 지반의 파괴를 주동파괴, 압축에 의한 파괴를 수동파괴라고 한다. Rankine은 흙이 비점착성이고 지표면이 수평인 경우 벽체에 작용하는 주동 및 수동토압은 다음 식과 같다고 제안하였다[1].

$$P_a = \gamma z K_a = \gamma z \frac{1-\sin\phi}{1+\sin\phi} \quad \cdots\cdots (1)$$

$$P_p = \gamma z K_p = \gamma z \frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi} \quad \cdots\cdots (2)$$

여기서, γ : 흙의 단위중량,
z : 깊이,
K_a : 주동토압계수,
K_p : 주동토압계수,
ϕ : 흙의 내부마찰각

3. 모형실험

3.1 표준사와 벽체의 기본물성

본 연구에서 모형지반 형성재료로 주문진 표준사를 사용하였으며, 시료의 물리적 성질은 Table 1과 같다. 또한 강성벽체와 연성벽체를 모델화하기 위해 크기가 20cm×20cm이고, 두께가 1mm인 강철판과 알루미늄판을 사용하였으며, 철판과 알루미늄에 대한 기본 특성은 Table 2와 같다.

Table 1 Physical properties of standard sand

Specific gravity	2.62
Maximum dry density(g/cm^3)	1.685
Minimum dry density(g/cm^3)	1.384
Uniformity coefficient(C_u)	1.30
Coefficient of curvature(C_c)	1.02
Internal friction angle ϕ(°, D_r=90%)	42
Cohesion c(kg/cm^2)	0

Table 2 Physical properties of steel and aluminum panel

Properties	Steel	Aluminum
Specific weight γ(g/cm^3)	2.71	7.85
Elasticity modulus E(t/cm^2)	713.8	1937~2141
Shear elasticity modulus G(t/cm^2)	265.1	765~816
Poisson's ratio ν	0.33	0.27~0.30
Yield stress σ_y(kg/cm^2)	204	3467~7138
Ultimate stress σ_u(kg/cm^2)	714	5608~8770

3.2 실험장치

3.2.1 원심모형시험기

본 연구에서 이용한 원심모형시험기는 최대가속도 200g-level, 최대회전속도 500rpm, 회전반경 1.28m, 용량 20g-ton이며, 그 개요도는 Fig. 1과 같다. 본체는 시험기의 구성장치를 설치하기 위한 기본 구조물로 회전 팔과 회전대가 주축을 이루고 있다. 회전바스켓은 양쪽 팔의 끝에 힌지로 연결되어 있으며, 바스켓중의 하나는 모델 박스를 설치하기 위하여 설계되었고, 다른 하나는 시험기의 가동시 모델박스로 인한 무게중심을 맞추기 위한 것으로 평형추로 이용된다. 슬립링은 모델박스에 설치한 계측장치로부터 시험기 외부에 위치한 데이타 수집 체계로 기계적 신호를 보내는데 이용한

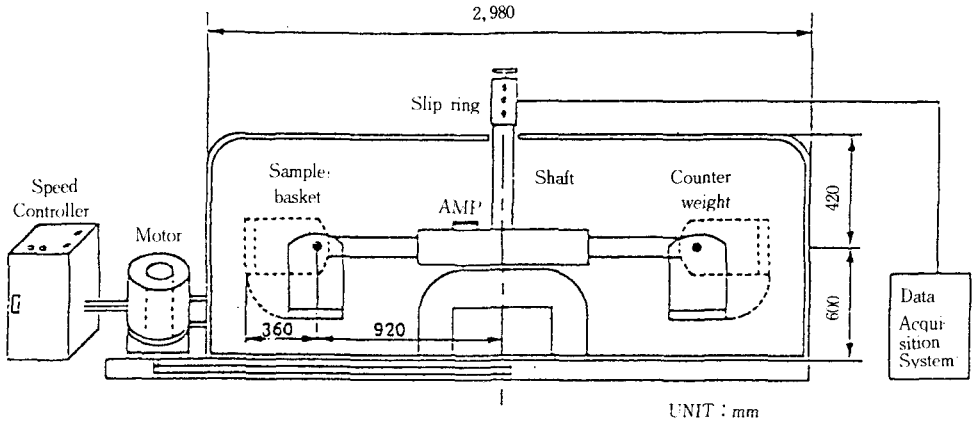

Fig. 1 A schematic diagram of the centrifuge

다. 삼상 모터는 시험기를 가동시키는 장치로 속도통제장치의 조작으로 일정한 회전속도를 유지시키는 기능을 갖고 있다.

3.2.2 모델박스

모델박스는 3면과 밑면은 2mm 두께의 스테인레스로 되어 있고, 전면은 두께 2cm의 투명한 아크릴판으로 이루어졌으며, 내부 크기가 가로 48cm, 세로 20cm, 높이 30cm인 직사각형 박스를 사용하였으며, 그 개요도는 Fig. 2와 같다.

계측장치로는 토압계(감도 1.1~1.4g/cm^2, 용량 1kg/cm^2), LVDT(감도 0.01mm, 용량 50mm)를 사용하였으며, 토압계와 LVDT로부터의 자료를 측정하기 위해 Data logger(모델명 TDS-601)를 사용하였다. 계측기는 굴착깊이 9.0cm인 경우 상부로부터 1.57, 4.31, 7.05cm 떨어진 지점, 굴착깊이가 11.5cm인 경우 2.0, 5.5, 9.0cm 지점, 굴착깊이가 14.0cm인 경우 2.44, 6.70, 10.96cm 지점에 설치하였다.

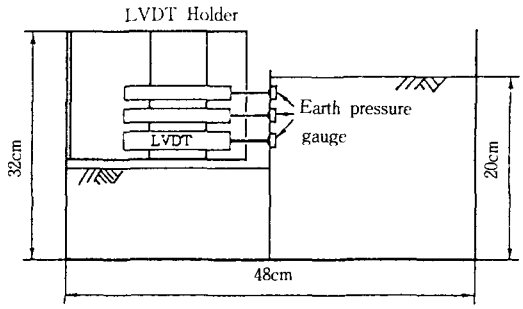

Fig. 2 A schematic diagram of the model box

3.2.3 강사기

본 실험에서는 균일한 밀도를 갖는 모형지반을 형성하기 위하여 강사기(raining device)를 제작하여 강사법으로 모형지반을 형성하였으며, 강사기를 사용하여 모형지반 형성시 지반의 밀도에 가장 큰 영향을 미치는 요소로는 slit의 크기와 낙하높이를 들 수 있다. 본 연구에서는 slit의 간격을 2.0mm로 일정하게 하고, 낙하높이를 변화시켜 가면서 지반의 밀도를 측정하여 본 실험에서 사용할 상대밀도 90%에 상당하는 낙하높이를 구하였으며, 그 결과 낙하높이 90cm에서 원하는 상대밀도가 얻어졌다. 따라서, slit의 간격 2.0mm, 낙하높이 90cm에서 모델지반을 형성하였다.

Table 3 Details of model tests

Test case	Excavation depth(cm)	Wall panel	Relative density(%)
1	9.0	Steel	90
2	11.5	Steel	90
3	14.0	Steel	90
4	9.0	Aluminum	90
5	11.5	Aluminum	90
6	14.0	Aluminum	90

3.3 실험방법

본 연구에서 모형실험은 Table 3과 같이 모두 6가지 경우에 대하여 다음과 같은 과정으로 수행하였다.

첫번째로, 미리 토압계를 부착시킨 벽체를 모델박스중앙에 설치하고 강사기를 사용하여 모형지반

을 형성하였다. 모형지반이 형성 후 실험조건에 따라 굴착을 실시한 후 벽체 전면에 LVDT를 설치하였다.

두번째로, 모델박스를 원심모형시험기 회전 바스켓에 설치한 후 토압계 및 LVDT의 전선을 연결하였다. 그 후 모델박스로 인한 모멘트평형을 맞추기 위하여 반대편의 바스켓에 하중추를 설치하였다.

마지막으로, 원심모형시험기에 전원을 공급하고 각속도를 증가시키면서 g-level에 따른 토압과 변위를 측정하였으며, 측정되는 값은 약간의 진폭을 가지므로 각 단계마다 20회 이상 측정하여 정리하였다. 실험하는 동안 바람직하지 않은 접선가속도를 억제하기 위하여 각속도를 천천히 증가시켰다.

4. 결과분석

본 연구에서는 벽체(steel, aluminum)와 굴착깊이(9.0, 11.5, 14.0cm) 변화에 따라 모두 6종류에 대해 원심모형시험기에서 g-level을 증가시켜가면서 벽체에 작용하는 토압과 변위를 측정하였다. Fig. 3~Fig. 5는 g-level에 따라 강철벽체에 작용하는 토압을 굴착깊이별로 나타낸 것이고, Fig. 6은 상부에서 측정된 강철벽체의 변위를 굴착깊이에 따라 나타낸 것이다.

굴착깊이가 9cm인 경우(Fig. 3) 깊이에 따른 토압은 15g-level까지 거의 선형적으로 증가하였으며, 15g-level 이후부터는 벽체하부에 작용하는 토압이 상부와 중부의 토압이 선형적으로 작용한다고 가정했을 때에 비해 5~10g/cm^2 정도 더 크게 나타났다. 즉, 상부와 중부사이의 직선의 기울기(1.0~7.2)와 중부와 하부사이의 직선의 기울기(1.5~10)의 차이가 15g-level까지는 0.5~1 정도이며, 15g-level 이후부터는 1.7~3.7정도를 나타내고 있다. 이는 벽체상부에서 변위가 전면으로 발생하면서 벽체하부가 벽체 전면의 수동토압에 의해 후면으로 회전하기 때문인 것으로 생각된다. 하부에서 토압의 증가현상은 g-level이 증가함에 따라 더 현저하게 발생하였으며, 이는 g-level이 증가함에 따라 벽체 상부의 변위가 크게 발생하기 때문인 것으로 생각된다. 한편, 굴착깊이가 9cm인 경우 벽체의 변위는 g-level 증가에 따라 거의 선

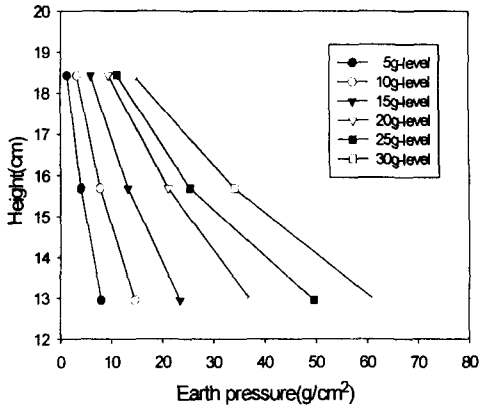

Fig. 3 Measured earth pressure for steel wall(excavation depth=9.0cm)

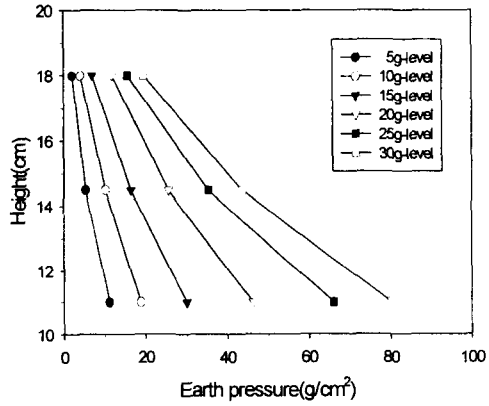

Fig. 4 Measured earth pressure for steel wall(excavation depth=11.5cm)

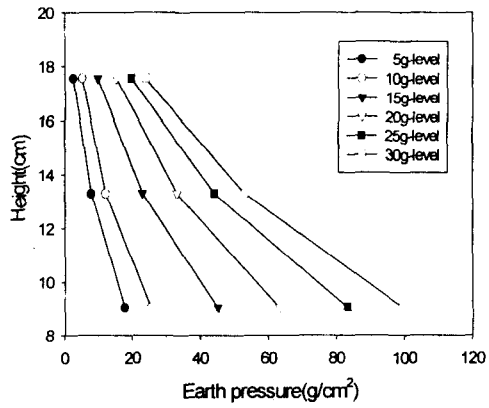

Fig. 5 Measured earth pressure for steel wall(excavation depth=14.0cm)

형적으로 증가하였으며, 최대변위는 약 1.7mm 정도가 발생하였으며, 이 경우에서는 지반의 파괴는 발생하지 않았다.

굴착깊이가 11.5cm인 경우(Fig. 4) 깊이에 따른 토압은 15g-level까지 거의 선형적으로 증가하였으며, 15g-level 이후부터는 벽체하부에 작용하는 토압이 상부와 중부의 토압이 선형적으로 작용한다고 가정했을 때에 비해 7~13g/cm^2 정도 더 크게 나타났다. 즉, 15g-level 이후부터는 중부와 하부사이의 직선의 기울기가 상부와 중부사이의 직선의 기울기에 비해 2.0~3.6 정도 크게 나타났다. 벽체의 변위는 g-level에 따라 선형적인 증가를 하였으며, 최대변위는 약 3.7mm 정도로 나타났으며, 이 경우에서도 지반의 파괴는 발생하지 않고 안정한 상태를 유지하였다.

굴착깊이가 14.0cm인 경우(Fig. 5) 깊이에 따른 토압은 10g-level까지 거의 선형적인 증가를 하였으며, 10g-level 이후부터는 벽체하부에 작용하는 토압이 상부와 중부의 토압이 선형적으로 작용한다고 가정했을 때에 비해 9~17g/cm^2 정도 더 크게 나타났다. 즉, 10g-level 이후부터는 중부와 하부사이의 직선의 기울기가 상부와 중부사이의 직선의 기울기에 비해 2.1~4.0 정도 크게 나타났다. 벽체변위도 15g-level까지는 약 1.1mm 이하의 차이를 나타냈으나, 그 이후부터는 변위의 차이가 증가하여 25g-level과 30g-level사이에서의 변위의 차이가 약 2.6mm로 나타나 거의 지반이 파괴상태에 도달하기 직전이었음을 알 수 있으며, 최대변위는 약 8.7mm가 발생하였다. 또한, Fig. 6으로부터 굴착깊이가 14cm인 경우 굴착깊이 9.0, 11.5cm와 비교하여 변위가 크게 발생하고 있음을 알 수 있다.

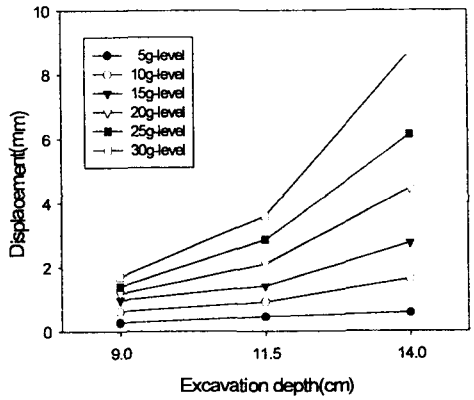

Fig. 6 Displacement vs excavation depth(steel)

Fig. 7~Fig. 9는 g-level에 따라 알루미늄벽체에 작용하는 토압을 굴착깊이별로 나타낸 것이고, Fig. 10은 상부에서 측정된 알루미늄벽체의 변위를 굴착깊이에 따라 나타낸 것이다.

알루미늄벽체를 사용한 지반에서 굴착깊이가 9cm인 경우(Fig. 7) 10g-level까지 깊이에 따른 토압은 1cm마다 1.1~1.6g/cm^{2}의 기울기로 거의 선형적으로 증가하였으며, 10g-level 이후부터는 하부벽체에 작용하는 토압이 상부와 중부의 토압이 선형적으로 작용한다고 가정했을 때에 비해 4.5~9g/cm^2 정도 더 크게 즉, 중부와 하부사이의 직선의 기울기가 상부와 중부사이의 직선의 기울기에

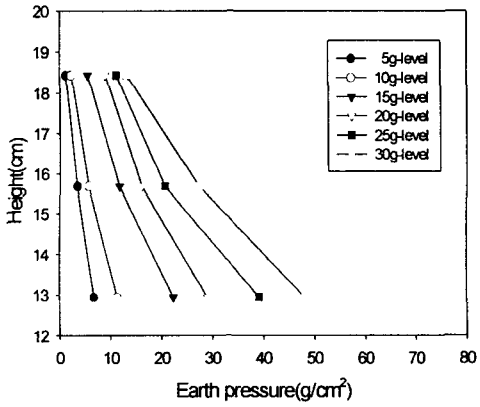

Fig. 7 Measured earth pressure for aluminum wall(excavation depth=9.0cm)

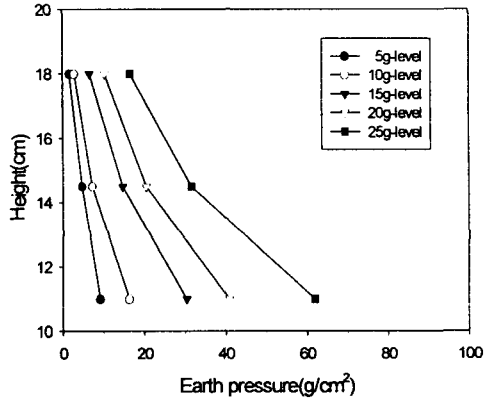

Fig. 8 Measured earth pressure for aluminum wall(excavation depth=11.5cm)

비해 1.7~3.3 정도 크게 나타났다. 또한, g-level에 따른 벽체의 변위는 거의 선형적으로 증가하였으며, 최대변위는 약 2.7mm 정도로 나타났으며, 이 경우에 지반의 파괴는 발생하지 않았다.

굴착깊이가 11.5cm인 경우(Fig. 8) 10g-level까지 깊이에 따른 토압은 거의 선형적으로 증가하였으며, 10g-level 이후부터는 하부벽체에 작용하는 토압이 상부와 중부의 토압이 선형적으로 작용한다고 가정했을 때에 비해 7.5~15g/cm^2 정도 더 크게 즉, 중부와 하부사이의 직선의 기울기가 상부와 중부사이의 직선의 기울기에 비해 2.2~4.4 정도 크게 나타났다. 또한, 벽체의 변위는 20g-level까지는 거의 선형적인 변화를 하였으며, 20g-level 이후에 변위가 현저하게 증가하여 25g-level에서 9.6mm의 변위가 발생하여 지반이 파괴상태에 도달하였다.

굴착깊이가 14cm인 경우(Fig. 9) 10g-level까지 깊이에 따른 토압은 거의 선형적으로 증가하였으며, 15g-level에서 하부벽체에 작용하는 토압이 상부와 중부의 토압이 선형적으로 작용한다고 가정했을 때에 비해 12g/cm^2 정도 더 크게 나타났다. 또한, 15g-level에서 벽체의 변위는 굴착깊이 11.5cm인 경우에 비해 약 3.5배 정도 큰 11.2mm가 발생하여 지반이 파괴상태에 도달하였다.

Fig. 6과 Fig. 10에서 알 수 있는 바와 같이 굴착깊이가 증가함에 따라 벽체의 변위는 증가하였으며, 또한, g-level이 증가함에 따라 벽체의 변위는 크게 증가하는 것으로 나타났으며, 강철벽체를 사용한 경우에 비해 알루미늄벽체를 사용한 지반에서 그 현상은 더 현저하게 나타났다.

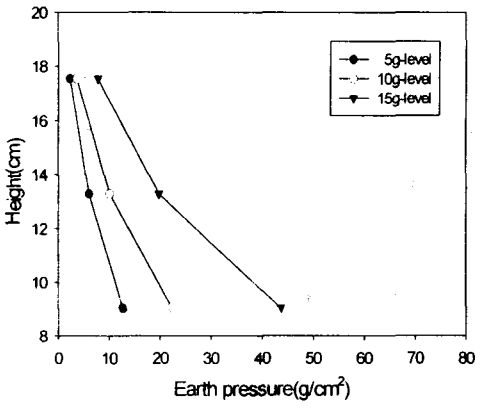

Fig. 9 Measured earth pressure for aluminum wall(excavation depth=14.0cm)

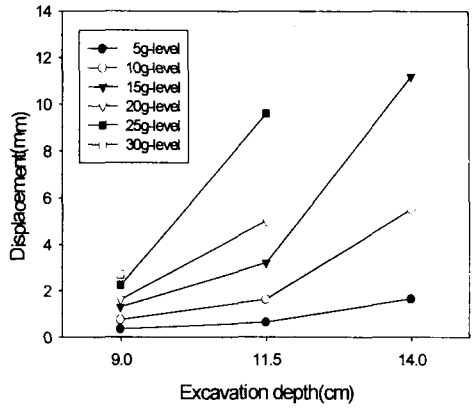

Fig. 10 Displacement vs excavation depth(aluminum)

알루미늄벽체에 작용하는 토압이 강철벽체에 작용하는 토압에 비하여 평균 약 15%정도 작게 나타났으며, 이는 알루미늄벽체의 변위가 강철벽체에 비하여 상대적으로 크게 발생하기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 11과 Fig. 12는 각각 강철벽체와 알루미늄벽체를 사용한 경우에 대한 실험결과와 Rankine의 이론적인 결과를 나타낸 것으로 강철벽체인 경우 30g-level에서의 토압을, 알루미늄벽체인 경우 25g-level에서의 토압을 나타내었다. 강철벽체를 사용한 경우(Fig. 11) 실험결과는 이론치와 비교적 잘 일치하고 있는 것으로 즉, 토압합력으로 비교하면 약 10% 정도 실험결과가 작은 것으로 나타났다. 한편, 알루미늄벽체를 사용한 경우(Fig.

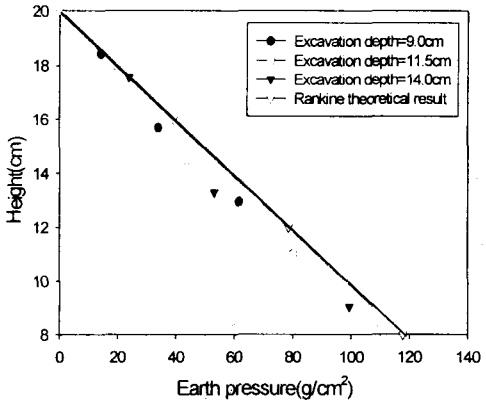

Fig. 11 Comparison of earth pressure(30g, steel)

12) 실험결과가 이론치의 토압합력에 비해 약 26% 정도 작은 것으로 나타났는데 이는 Rankine 이론이 강성벽체에 작용하는 토압산정을 위해 제안된 방법이기 때문인 것으로 생각된다. 또한, 강철벽체를 사용한 경우 굴착깊이에 따른 토압의 측정결과는 최소자승법에 의한 최적직선에 거의 근접하는 것으로(상관계수 R^2=0.99) 나타났다.

Fig. 13은 굴착깊이비(굴착깊이/지반높이)에 따른 벽체의 회전변위(벽체변위/굴착깊이)를 나타낸 것으로 굴착깊이비가 증가함에 따라 회전변위가 증가하며, 알루미늄벽체를 사용한 경우가 강철벽체를 사용한 경우에 비하여 회전변위가 굴착깊이비 0.45, 0.575, 0.70에 대하여 각각 45%, 210%, 150% 정도 큰 것으로 나타났다. 또한, 강철벽체를 사용한 경우 지반의 파괴에 근접하는 회전변위는 굴착깊이비 0.70에서 약 0.0022 정도이며, 알루미늄벽체를 사용한 경우 회전변위는 굴착깊이비가 0.575인 경우 0.0033, 굴착깊이비가 0.7인 경우 회전변위는 약 0.0054에서 지반파괴가 발생하였다.

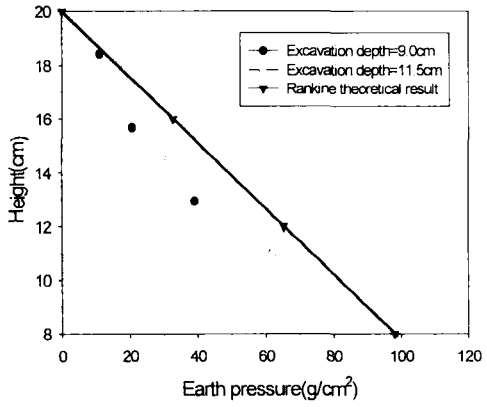

Fig. 12 Comparison of earth presure(25g, aluminum)

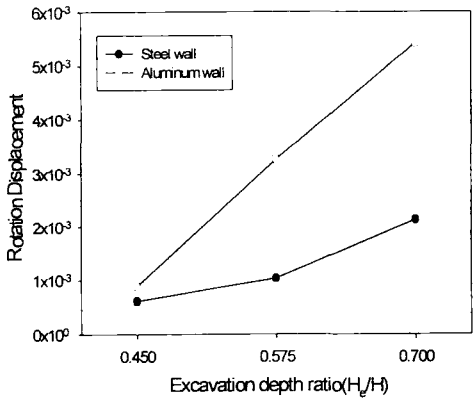

Fig. 13 Rotation displacement vs excavation depth ratio

5. 결 론

본 연구에서는 원심모형시험기를 이용하여 굴착깊이와 벽체변화에 따른 흙막이벽체의 거동과 안정성을 규명하였으며, 또한 실험결과는 Rankine의 토압론을 이용한 이론적 결과와 비교한 바 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 강철벽체를 사용하여 30g-level까지 실험한 결과 굴착깊이비 0.70인 경우 약 0.0022의 회전변위에서 지반이 거의 파괴상태에 도달하였으며, 그 이하의 굴착깊이에서 지반은 안정한 것으로 나타났다. 알루미늄벽체를 사용한 경우에는 굴착깊이비 0.45인 경우 30g-level까지 안정하였으며, 굴착깊이비가 0.575인 경우 25g-level에서(회전변위 0.0033), 굴착깊이비가 0.70인 경우 15g-level에서 (회전변위 0.0054) 지반의 파괴가 발생하였다.
2) 모든 경우에서 깊이에 따른 토압은 g-level이 낮은 경우에 거의 삼각형 형상으로 분포하였으며, 10~15g-level 이후부터는 벽체하부에 작용하는 토압이 상부와 중부의 토압이 선형적으로 작용한다고 가정했을 때에 비해 5~17g/cm^{2}정도 크게 나타났으며, 이는 벽체 상부에서 변위가 전면으로 발생하면서 벽체하부가 후면으로 회전하기 때문인 것으로 생각된다. 또한, 알루미늄벽체에 작용하는 토압이 강철벽체에 작용하는 토압에 비하여 평균 약 15%정도 작게 나타났다.
3) 실험에서 측정한 토압과 Rankine의 이론치와 비교한 결과 강철벽체인 경우 상부에서는 잘 일치하였으며, 중부, 하부에서는 약 10%정도의 차이가 발생하였고, 알루미늄벽체인 경우에도 상부에서는 잘 일치하였으나 중부와 하부에서는 25%정도 이론치가 과다하게 나타났다. 또한 강철벽체인 경우 굴착깊이에 따른 토압의 측정결과는 최적직선에 거의 근접하였다.

참 고 문 헌

1) Das, B. M., "Principles of Geotechnical Engineering", PWS Publishing Company, pp. 380~460, 1994.
2) Fang, H. Y., "Foundation Engineering Handbook", Van Nostrand Reinhold, pp. 447~476, 1991.
3) Row, P. W., & Peaker, K., "Passive Earth Pressure Measurements", Geotechnique, Vol. 15, No. 1, pp. 57~78, 1965.
4) Wang, C. K., "Stability of Rigid Frames with Non-Uniform Members", Journal of Geotechnical Engineering Division., ASCE, Vol. 93, No. ST1, pp. 275~294, 1967.
5) Dubrova, G. A., "Interaction of Soil and Structures", Rechnoy Transport, Moscow, 1963.
6) 최정범, "지반공학시리즈 3-굴착 및 흙막이 공법", 한국지반공학회, pp. 147~150, 1992.
7) Harr, M. E., "Mechanics of Particulate Media", McGraw-Hill, pp. 347~355, 1977.
8) Craig, W. H., and Schofield, A. N., "Centrifuges in Soil Mechanics", Balkema, pp. 11~17, 1988.