한국지반공학회논문집 제31권 9호 2015년 9월 pp. 69 ~ 78
JOURNAL OF THE KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY
Vol.31, No.9, September 2015 pp. 69 ~ 78

ISSN 1229-2427 (Print)
ISSN 2288-646X (Online)
http://dx.doi.org/10.7843/kgs.2015.31.9.69

직사각형 벽체의 크기에 따른 3차원 주동토압

The 3-Dimensional Active Earth Pressure Depending on the Size of Rectangular Wall

박 병 석[1] Park, Byung-Suk
이 상 덕[2] Lee, Sang-Duk

Abstract

If an active displacement occurs on a wall with finite size, the ground behind the wall forms shapes of 3-dimensional wedges and 3-dimensional active earth pressure are applied on the wall. In the previous studies, shapes of 3-dimensional wedges were measured and the resultant of 3-dimensional active earth pressure has been calculated. In this study, the magnitude and the distribution of 3-dimensional active earth pressure depending on the size of a rectangular wall, which was defined by the aspect ratio (h/w), that is, the ratio between the height and the width of wall, were measured and compared with previous 3-dimensional models. The result shows that, the horizontal displacement (S) of the wall is approx 0.12% of the height of wall (h). The resultant 3-dimensional active earth pressure is similar to that of Karstedt (1982). The distributions of earth pressures on the wall are parabolic shape. The peak earth pressure was measured at the 0.5～0.55 depth from the ground surface. The reduction factor of 3-dimensional active earth pressure against the 2-dimensional earth pressure (α) depending the aspect ratio (h/w) is presented by the diagram.

요 지

유한한 크기의 벽체에 주동변위가 발생하면 배면지반은 3차원 형태의 쐐기가 형성되고 벽체는 3차원 주동토압이 작용하게 된다. 기존 연구에서는 3차원 쐐기형상을 측정하거나 단일파괴체로 가정하여 3차원 주동토압의 합력을 산정하였다. 또한 이들 연구에서는 파괴형상과 3차원 주동토압의 크기 및 산정방법에 따라 서로 다른 결과가 도출되었다. 본 연구에서는 모형실험을 통해 벽체의 크기를 폭(w)과 높이(h) 비인 종횡비(h/w)로 나타내고, 이에 따른 3차원 주동토압의 크기와 분포를 측정하고 기존 3차원 토압연구 결과와 비교하였다. 연구결과 한계상태 벽체변위(s)는 벽체높이(h)의 약 0.12% 크기일 때 발생하였고, 합력의 크기는 Karstedt(1982)와 유사하였다. 벽체의 주동토압분포는 종횡비(h/w)가 1.2이상일 때에는 상부와 하부는 상대적으로 작고, 지표 하부 0.50～0.55h지점에서 가장 큰 포물선 형태로 나타났다. 종횡비(h/w) 0.2～2.7 범위에서 3차원 주동토압의 크기를, 고전토압이론을 이용하여 계산한 2차원 주동토압과 비교하여 종횡비(h/w)에 따른 2차원 토압 대비 3차원 주동토압 감소계수(α)를 구할 수 있는 도표로 제안하였다.

Keywords : Model test, Aspect ratio(h/w), Magnitude and distribution of 3-dimensional active earth pressure, Reduction factor

1 정회원, 아주대학교 건설교통공학과 박사과정 (Member, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil and Transportation Eng., Ajou Univ.)
2 정회원, 아주대학교 건설교통공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Transportation Eng., Ajou Univ., Tel: +82-31-219-2503, Fax: +82-31-219-2501, lsangduk@ajou.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2016년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2015 by the Korean Geotechnical Society
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

현재 사용하고 있는 고전토압이론은 파괴상태(즉, 소성상태)에 이른 흙쐐기에 작용하는 힘의 평형조건으로부터 유도한 Coulomb이론과 미소요소에 작용하는 힘의 평형조건으로부터 유도한 Rankine이론을 적용하고 있다. 많은 연구자들이 다양한 토압이론을 제시하였으나 대부분의 연구가 2차원 평면변형조건으로 가정하여 연직방향 토압만을 고려하였다. 이는 설계상 안전측이긴 하지만 과다설계의 우려가 있으므로 합리적인 설계를 위해 3차원 토압을 산정하는 것이 필요하다. 폭이 유한한 벽체에 주동변위가 발생하면 배면지반은 폭과 높이를 가지는 3차원 형태의 쐐기가 형성되면서 벽체에 2차원 주동토압보다 작은 3차원 주동토압이 작용하게 된다. 기존 3차원 토압에 대한 연구는 한정된 길이로 굴착한 슬러리 트랜치 안정성이나 강성구조물(우물통, 수직구)에 초점을 맞춰 진행하였다. 벽체의 주동변위에 의해 배면지반에 발생하는 3차원 쐐기를 단일파괴체로 검토하였으며, 각 연구에서 가정한 하중전이 방법을 고려하여 2차원 토압보다 3차원 토압이 더 작다는 것을 주장하였다. 파괴형상은 모두 단일파괴체로 가정하여 합력만을 산정하고 벽체에 작용되는 토압분포에 대한 제시는 이뤄지지 않았다.

본 연구에서는 모형실험을 통하여 종횡비(h/w)에 따른 3차원 주동토압의 크기와 주동벽체에서의 토압분포를 측정하고, 기존 3차원 토압 모델들과 비교하였다. 또한 고전토압이론을 이용하여 계산한 2차원 주동토압과 3차원 주동토압의 비를 감소계수(α)로 정의하고, 종횡비(h/w)에 따른 3차원토압계수 도표로 제안하여 실무에서 실제에 가까운 3차원 토압을 적용할 수 있도록 하였다.

2. 연구동향

기존의 3차원 주동토압은 슬러리월에서 지반 굴착시의 외적안정을 검토할 목적으로 연구되었으며, 3차원 파괴체에 대해 정역학적 평형식을 적용하거나, 모형실험을 통해 실제 파괴형상을 구하고 극한해석법을 활용하여 3차원 토압을 구하였다. Huder(1972)는 평판형 지반요소에 대해 정역학적 평형식을 적용하여 3차원 토압을 제안하였으나 실제의 파괴형상을 고려할 수 없는 단점이 있다. Prater(1973), Guβmann and Lutz(1981) 등은 2차원 흙쐐기이론을 확장하여 3차원 흙쐐기 양측면의 전단저항을 고려하여 3차원 주동토압을 제안하였다. Piaskowski and Kowalewski(1965)는 3차원 파괴형상을 가정하여 3차원 토압을 계산하였고, Karstedt(1982)는 모형실험에서 구한 실제 파괴형상을 기초로 한계 평형식을 적용하여 3차원 토압을 제안하였다.

2.1 정역학적 모델

슬러리월에 평행하고 단위 두께를 갖는 흙판의 안정을 고려하여 슬러리월의 안전율을 구하는 방법이다. 평판형 지반요소에 대해 정역학적 평형식을 적용하여 3차원 토압을 구하였다. Silo이론을 적용하여 단위길이 1m 판에 전단저항력을 감안하여 일정깊이 이하에서는 토압을 작게 적용하였으며, 실제의 파괴형상을 고려할 수 없다. Terzaghi의 silo이론에서 유도한 저감계수를 사용하는 Huder(1972)의 모델이 대표적이다. Fig. 1은 Huder의 3차원 주동토압의 개념도이며, Eq. (1)은 토압계산식이다.

$$e_{ah}^{3D} = K_{ah}\,\sigma_z\,A_{Huder} \tag{1}$$

$$A_{Huder} = \frac{b}{z}\,\frac{1-\exp(-2K_y\tan\phi\, z/b)}{2K_y\tan\phi}$$

$$K_{ah} = \tan^2(45-\frac{\phi}{2}),\ K_y = 1-\sin\phi$$

γ = unit weight (kN/m^3)

ϕ = internal friction angle (°)

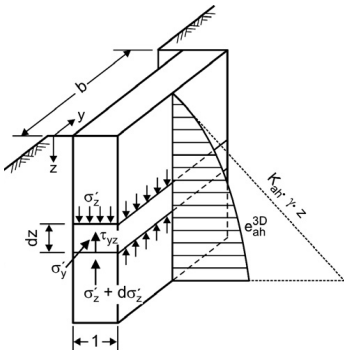


Fig. 1. Huder (1972) model

2.2 쐐기형 모델

쐐기형 모델은 Coulomb의 고전적인 토압이론을 쐐

기형의 파괴체로 확장하여 3차원 토압을 구하며, 계산이 간편하고 이론적인 접근이 간단하여 널리 적용된다. 기존 2차원 이론에 따라 쐐기형의 단일파괴체로 가정하고, 대수나선 및 직선으로 검토하였기 때문에 다른 모델에 비하여 토압이 크게 나타나는 경향을 보인다. Fig. 2와 같이 쐐기의 측면에 전단력이 작용한다고 가정하여 3차원 효과를 나타냈으며 극한평형상태를 적용하는 식에 따라 여러 가지 방법으로 나눌 수 있다.

Prater(1973)는 2차원 흙쐐기의 양측면에 활동에 대한 전단저항이 작용한다고 가정하고, 2차원토압에 비하여 양측면 전단저항만큼 감소된 3차원 주동토압을 구하였으며, Guβmann and Lutz(1981)는 측면저항력을 연직성분만큼 줄여서 적용하여 더욱 발전된 3차원 흙쐐기 모델을 제안하였다.

Fig. 2의 Prater(1973)의 쐐기형 모델에서 3차원 흙쐐기의 측면에 작용하는 전단저항력(T)은 측면에 작용하는 수직력(N) 수평토압의 합력에 의해 결정되며, 3차원 흙쐐기 측면에 작용하는 수직응력이 깊이에 따라 직선분포하면, 그 합력(N)과 전단저항력(T), 흙쐐기 자중(G)은 Eq. (2)와 같다.

$$N=\int \sigma_y dA=\int K_y\sigma_z dA=K_y\gamma\int z dA$$
$$=\frac{1}{6}K_y\gamma T_s^3\frac{1}{\tan\theta} \tag{2}$$
$$T=N\tan\phi,\quad G=\frac{1}{2}\gamma T_s^2 L\frac{1}{\tan\theta},\quad K_a\leqq K_y\leqq K_0$$

Eq. (2)에서 K_y는 토압계수이며, 쐐기의 측면에 대해 수직방향(쐐기의 길이방향)으로는 변위가 일어나지 않으므로 정지토압계수 K_0를 적용하는 경우가 많다. 길이 L이고 깊이 T_s인 흙쐐기에 작용하는 3차원 수평토압($E_{ah\,3D}$)은 Q의 수직방향 힘의 평형식을 적용하면 구할 수 있다(Eq. (3)).

$$E_{ah\,3D}=G\frac{x-a}{1+ax}-2T\frac{1+x^2}{(1+ax)\sqrt{1+x^2}},$$
$$(x=\tan\theta,\ a=\tan\phi) \tag{3}$$

Guβmann and Lutz(1981)는 3차원 흙쐐기 무게 G와 흙쐐기 양측면에 작용하는 전단저항력($2T$)의 연직성분($2T\cos\theta$)만큼 감소시켜 작용하는 3차원 주동토압을 구하였으며, Eq. (4)와 같다.

$$E_{ah\,3D}=\frac{\gamma T_s^2 L}{2}\left\{\frac{x-a}{x+ax^2}-\frac{2KaT_s(1+x^2)}{3Lx(1+ax)\left(\sqrt{1+x^2}+\frac{2}{3}Ka\frac{T}{L}x\right)}\right\},$$
$$(x=\tan\theta,\ a=\tan\phi) \tag{4}$$

2.3 조개형 모델

조개형 모델은 가정한 파괴형상이나 모형실험에서 구한 실제 파괴형상을 기초로 한계평형식을 적용하여 구할 수 있다. Piaskowski and Kowalewski(1965)는 Fig. 3과 같이 타원형단면을 갖는 기둥이 수평에 대해 각도 θ인 활동면을 따라 활동하며 기둥의 측면에는 아무런 힘도 작용하지 않는 파괴체 모델을 제안하였다. 3차원 토압은 내부마찰각(φ)별로 벽체의 길이(L)와 깊이(T_s)의 비에 따라 2차원토압에 대한 감소계수(α)를 그래프로 나타내었다(Fig. 3). T_s/L이 증가할수록 3차원 토압의 크기가 2차원 주동토압에 비해 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 하지만 파괴형상을 가정한 것이기 때문에 실제 파괴형상과 다소 차이를 보이고, 지반 조건에 따라 일반화시키기 어렵다. 또한 바닥 활동면에서만 활동 저

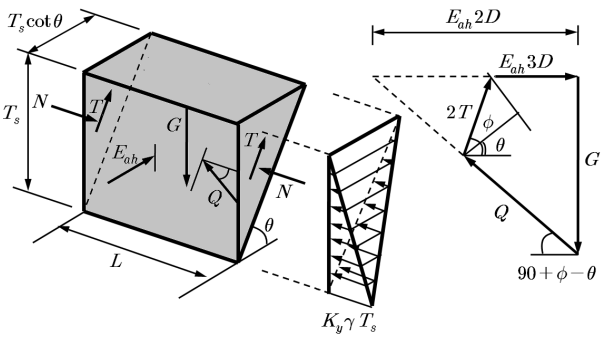


Fig. 2. Prater (1973), Guβmann and Lutz (1981) model

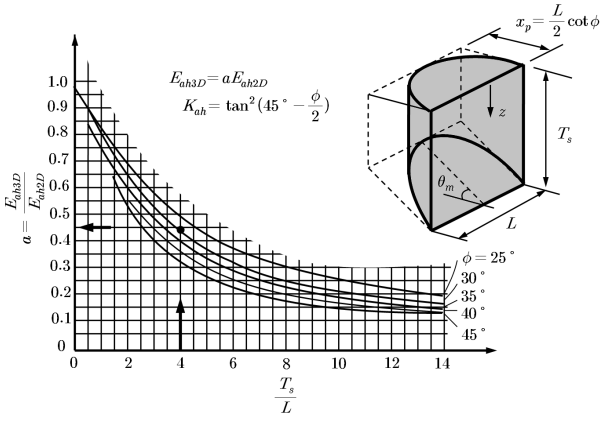


Fig. 3. Piaskowski and Kowalewski (1965) model

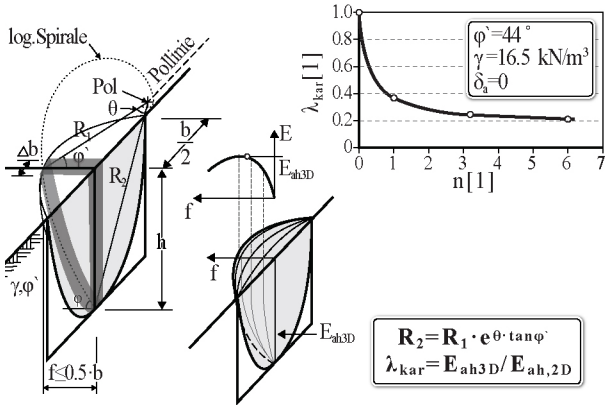


Fig. 4. Karstedt (1982) model

항력을 고려하여 조개형 모델 중 상대적으로 3차원 토압 크기가 큰 경향을 보인다.

Karstedt(1982)는 사질토지반의 슬러리월 모형실험에서 폭 0.165m, 0.33m에 대하여 수위차에 의한 수평변위를 주어 주동토압을 측정하고 고화제를 사용하여 파괴체의 형상을 파악하였다. 모형실험에서 구한 파괴형상에 근거로 가로와 세로 방향 모두 대수나선형인 조개껍질 모양의 3차원 파괴체 모델을 제안하고 한계평형식을 적용하여 3차원 토압을 산정하였다. 계산방법이 다소 복잡하나 지금까지 제안된 모델 중에서 실제의 파괴모양과 가장 잘 부합하는 것으로 평가된다. 하지만 수위차에 의한 수평변위를 주어 주동토압을 측정하고, 파괴체의 형상을 파악하기 때문에 상대적으로 큰 변형이 발생하였으며, 폭(w)과 높이(h)의 비에 대한 3차원 주동토압을 제시하였으나, 폭(w)과 높이(h)의 빈도가 적은 것으로 나타났다.

3. 모형실험

3.1 모형실험기

실내모형토조는 (Width)1.00m×(Height)1.00m×(Length) 1.20m의 규격으로, 토압이 측정되는 전면판은 중량이 가볍고 강성이 큰 베이크라이트($E = 14{,}700{,}000\ kN/m^2$, $EI = 1.59\ kN \cdot m^2$)를 사용하여 제작하였다(Fig. 5). 전면판은 횡으로 7개(좌로부터 폭(Width) = 0.15, 0.125, 0.075, 0.3, 0.075, 0.125, 0.15m), 종으로 6개(위로부터 높이(Height) = 0.06, 0.12, 0.18, 0.18, 0.27, 0.19m)로 제작하였다(Fig. 6). 총 42개(횡 7개 × 종 6개)의 전면판에는 Load Cell(용량 0.5kN)을 설치하여 수평방향 토압을 측정할 수 있도록 하였다. 로드셀의 배면은 벽체 역할의 베이크라이트 판(토압판)을 부착하고, 전면은 반력벽 역할의 투명 아크릴판과 벽체의 변위를 제어할 수 있는 강봉(Φ10mm× (L)100mm)을 부착하였다(Fig. 7).

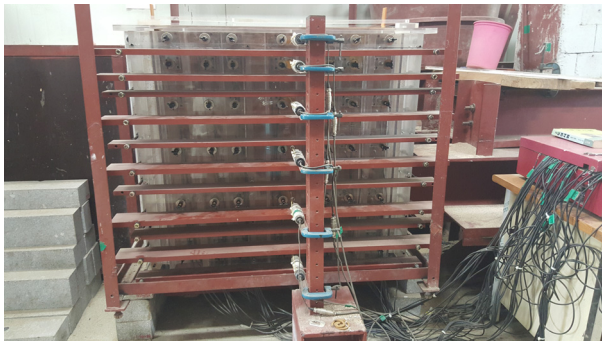


Fig. 5. Model test box

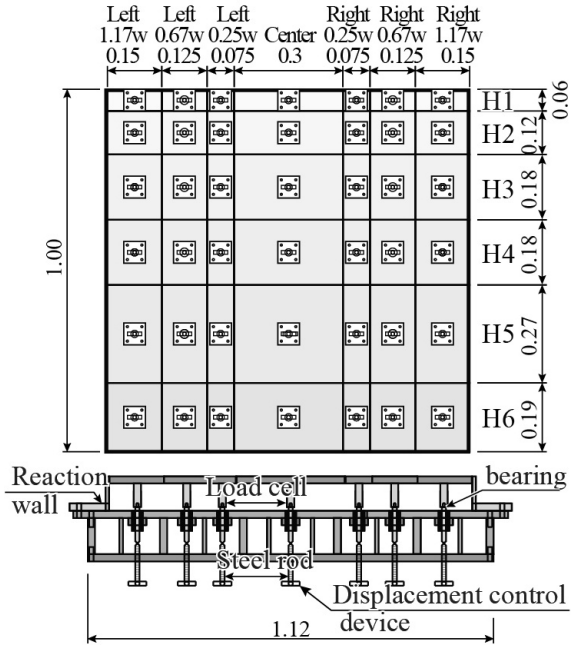


Fig. 6. Diagram of test equipment

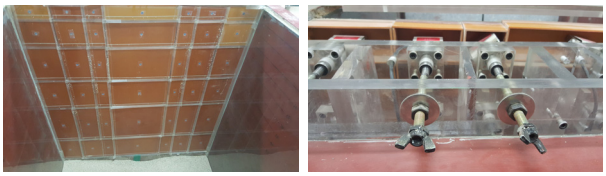


Fig. 7. Earth pressure plate and displacement control device

3.2 모형지반

모형지반은 주문진 자연사를 사용하였다. 모형지반의 물리적 특성을 알기 위하여 입도분포시험(KS F 2301,

KS F 2302, KS F 2324), 최대·최소 건조단위중량시험(DIN 18126), 비중시험(KS F 2308) 등의 기본물성 시험을 수행하고, 직접전단시험(KS F 2343)을 실시하여 역학적 특성을 파악하였다. Fig. 8은 입도분포시험 결과이며, Fig. 9는 직접전단시험 결과이다. 시험에서 확인된 모형지반의 물리적, 역학적 특성은 Table 1과 같다.

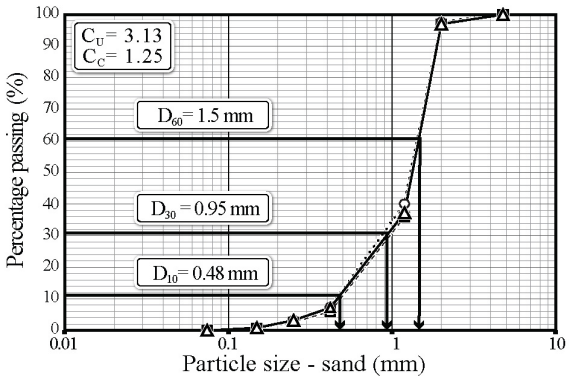


Fig. 8. Grain size accumulation curve

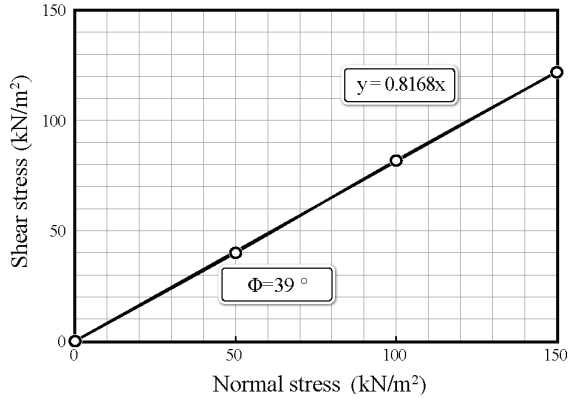


Fig. 9. Result of direct shear test

3.3 계측

모형지반의 초기응력(정지토압), 종횡비(h/w)와 벽체변위에 따라 변하는 토압은 총 42개로 분리된 토압판에 각각 설치한 로드셀(Load Cell)로 측정하였다. 각 토압판은 상호 간섭을 받지 않고 토압의 분포를 측정할 수 있다. 이동 벽체의 수평변위를 측정하는 변위계는 0.01mm까지 계측 가능한 LVDT를 사용하였다. LVDT는 Center 전면판에 6개(Center H1～H6), 벽체변위 확인용으로 1개(Left 0.25w H3)를 배치하였다. 실험 중 측정된 Data는 정적 데이터 로거(Data Logger)인 TDS-303을 통하여 측정, 저장된다. 모형실험에 사용한 계측기의 제원과 수량은 Table 2와 같다.

3.4 실험방법 및 변수

벽체 종횡비(h/w)에 따른 3차원 주동토압의 크기와 분포를 파악하기 위하여 5가지 종횡비(h/w)에 대한 실험을 수행하였다. 샌드커튼(Sand Curtain) 방식으로 시료의 낙하높이를 0.7m로 일정하게 유지하여 균질한 지반을 조성하고, 초기 정지토압을 확인하였다. 정지토압

Table 1. Result of laboratory soil tests

Particle-size distribution	Maximum dry unit weight (γ_{dmax})	Minimum dry unit weight (γ_{dmin})	Unit weight (γ_t)	Relative density (D_r)	Specific gravity (G_s)	Internal friction angle (ϕ)	Cohesion (c)
C_u=3.13 C_c=1.25 SP	17.8 kN/m^3	15.4 kN/m^3	17.4 kN/m^3	85.3 %	2.65	39°	0 kPa

Table 2. Instrument type and capacity

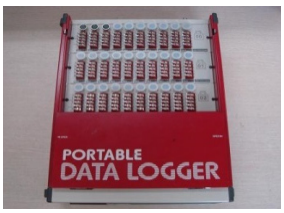
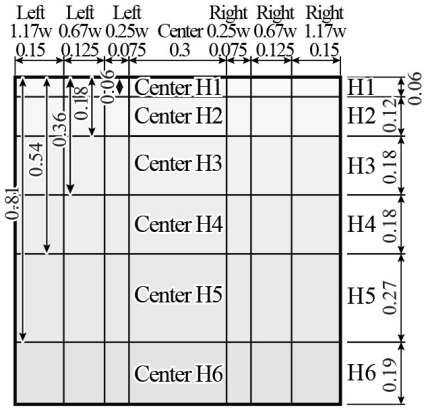
Category	Load Cell	LVDT	Data Logger
Instruments			
Location	42 Front panels	Center H1~H6, Left 0.25w H3	–
Object	Earth Pressure Measurement	Wall displacement measurement	Data measurement
Capacity	0.5 kN, (Precision 0.1 N)	50mm, (Precision 0.01 mm)	Measurable data 49
Quantity	42	7	1

Table 3. Variables of the earth pressure experiment

Category	Experiment variable	Activity displacement plate	Outline
CASE 1	Aspect ratios 0.2 (h=0.06m/w=0.30m)	Center H1	
CASE 2	Aspect ratios 0.6 (h=0.18m/w=0.30m)	Center H1~H2	
CASE 3	Aspect ratios 1.2 (h=0.36m/w=0.30m)	Center H1~H3	
CASE 4	Aspect ratios 1.8 (h=0.54m/w=0.30m)	Center H1~H4	
CASE 5	Aspect ratios 2.7 (h=0.81m/w=0.30m)	Center H1~H5	

확인 후 주동변위를 발생시켰으며 수평변위는 급격한 파괴가 일어나지 않도록 0.01mm씩 단계별로 일정하게 제어하면서 각 전면판의 토압을 측정하였다. 수평변위는 전면판에 설치된 LVDT로 관리하였다. 실험변수는 Table 3과 같다.

4. 결과 분석

초기응력(정지토압)상태에서 종횡비(h/w)에 따라 Center 전면판에 주동변위를 발생시키면서 전면판과 주변 지반의 토압을 측정하였다. 실험에서 측정한 3차원 주동토압은 2차원 주동토압 및 기존 3차원 주동토압 모델과 비교하였다. 수평방향은 Center 전면판의 폭 w를 기준으로 좌측(Left), 우측(Right)에 0.25w, 0.67w, 1.17w로, 수직방향은 토압판 위치에 따라 H1~H6으로 표현하였다.

4.1 초기응력(정지토압)

수평변위 발생에 따른 주동토압의 변화를 측정하기 위해서는 정확한 초기응력상태(정지토압)를 구현하는 것이 매우 중요하다. 지반조성에 의해 벽체에 변위가 발생하지 않도록 유의하면서 균질한 실험지반을 조성하였다. 지반조성 후 전체 전면판의 수평하중을 측정하여 정지토압계수를 산정한 결과, 정지토압계수(K_0)는 0.37로 나타났다.

사질토에서의 이론식(Jacky(1944), Saglamer(1975), Bolton (1986), Robert Szepeshai(1994))으로 구한 내부마찰각에 의한 정지토압계수(K_0)는 약 0.36~0.38(평균 0.37)로 나타났다(Fig. 10). 검토한 이론식 중 사질토 지반에서 해석 및 실험적 결과를 통해 가장 적합한 식으로 평가받고 있는 Jacky(1944)의 정지토압계수(K_0)와 가장 근사한 것으로 나타났다.

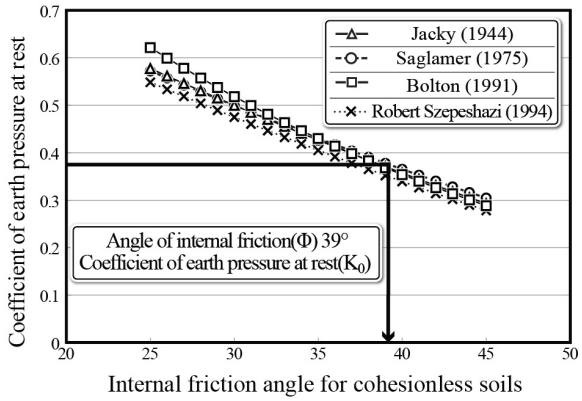


Fig. 10. The coefficient of earth pressure at rests of sand (Theory)

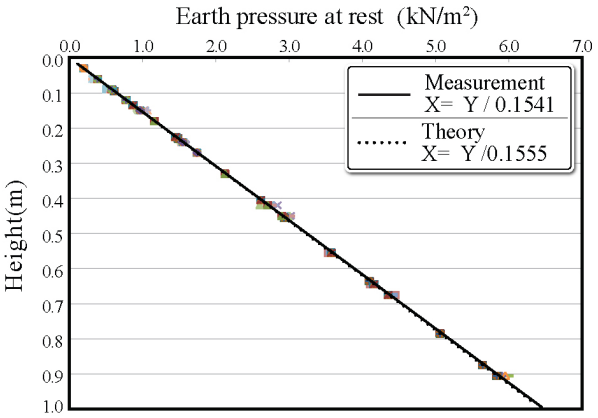


Fig. 11. Comparison of the initial stress for the experiment

Jacky(1944)의 정지토압계수(K_0)를 이용하여 모형실험지반 초기응력(정지토압)상태를 비교하였다. Fig. 11

은 모형실험지반 초기응력(정지토압)상태에 대하여 측정한 초기응력(정지토압)과 이론식(Jacky(1944))을 비교한 그림이다. 모형실험지반의 정지토압계수(K_0)는 0.37로 각 실험마다 동일한 지반상태를 유지하였다.

4.2 종횡비(h/w)에 따른 3차원 주동토압

4.2.1 한계상태 주동변위

정지토압은 주동변위 발생 초기부터 큰 폭으로 감소하였으며, 벽체높이(h)의 약 0.12% 변위에서 변화 없이 수렴하여 주동파괴가 최종 발생한 것으로 판정하였다(Fig. 12). 이때의 변위를 한계상태 주동변위(한계변위 s)로 정하였다(Fig. 12). 각 실험에서 한계변위와 벽체높이, 한계변위율은 Table 4와 같다.

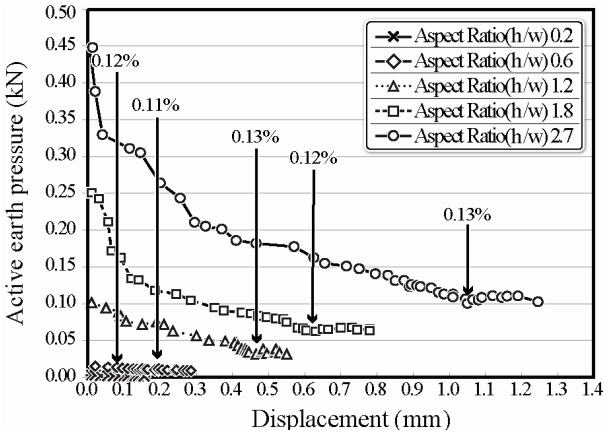


Fig. 12. Trend of displace following aspect ratio (h/w)

Table 4. Wall displacement and wall height in Limit state

Division	Displacement Limit s (mm)	Wall height h (mm)	s/h (%)
Aspect ratio (h/w)0.2	0.070	60	Approx. 0.12%
Aspect ratio (h/w)0.6	0.195	180	Approx. 0.11%
Aspect ratio (h/w)1.2	0.465	360	Approx. 0.13%
Aspect ratio (h/w)1.8	0.630	540	Approx. 0.12%
Aspect ratio (h/w)2.7	1.050	810	Approx. 0.13%

4.2.2 3차원 주동토압 및 분포

실험에서 측정한 3차원 주동토압(E_{ah3D})을 정지토압(E_{0h}), 고전토압이론을 이용하여 계산한 주동토압(E_{ah2D})과 비교하였다(Table 5). 3차원 파괴체의 크기가 2차원 파괴체보다 축소되어 3차원 토압(E_{ah3D})이 2차원 토압(E_{ah2D})보다 감소되는 것을 확인하였다.

Fig. 13은 종횡비(h/w)에 따른 3차원 주동토압(E_{ah3D})을 Center 전면판 높이에 따라 정규화하여 비교하였다. 종횡비(h/w) 0.6이하에서는 토압을 2개이하의 전면판으로만 측정하여 직선분포를 보이며, 종횡비(h/w) 1.2이상에서부터 포물선 분포를 보였다. 종횡비(h/w)가 증가함에 따라 주동토압 최대 지점이 약 0.35~0.55h으로 나타났다. 하지만 종횡비(h/w) 1.2의 경우 0.33~0.75h 위치의 토압을 1개의 판으로만 측정하여 0.35h 이후의 주동토압 최대지점에 대하여 정확하게 판단하기 어렵기 때문에 종횡비(h/w) 1.8~2.7에서 측정한 주동토압을 이용하여 최대 지점을 0.50~0.55h로 판단하였다. 종횡비(h/w) 1.2 이상에서 주동벽체 상부와 하부는 상대적으로 작고,

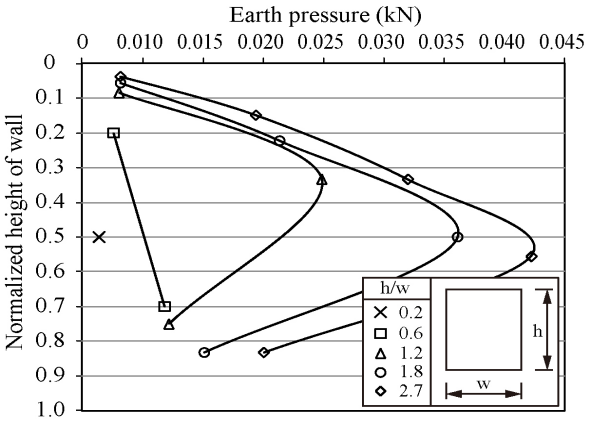


Fig. 13. Earth pressure of normalized height

Table 5. Comparison among earth pressure at rest, 2-dimensional and 3-dimensional active earth pressure

Division	Earth pressure at rest E_{0h} (kN)	2-dimensional active earth pressure E_{ah2D} (kN)	3-dimensional active earth pressure E_{ah3D} (kN)	(E_{ah3D}) / (E_{ah2D})
Aspect ratio (h/w)0.2	0.0035	0.0021	0.0014	0.66
Aspect ratio (h/w)0.6	0.0313	0.0190	0.0095	0.50
Aspect ratio (h/w)1.2	0.1252	0.0761	0.0312	0.41
Aspect ratio (h/w)1.8	0.2816	0.1713	0.0623	0.36
Aspect ratio (h/w)2.7	0.6336	0.3854	0.1003	0.26

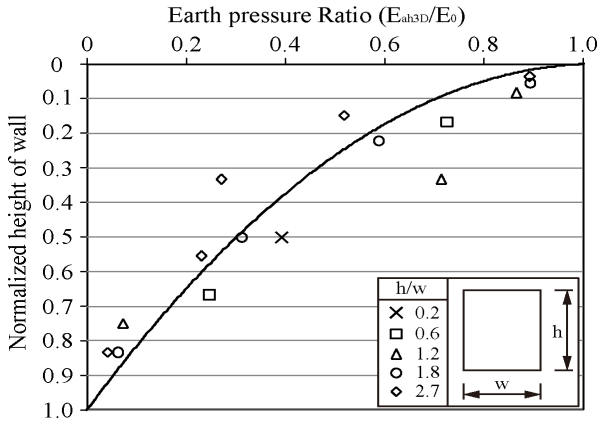


Fig. 14. Distribution of normalized height and E_{ha3D}/E_0

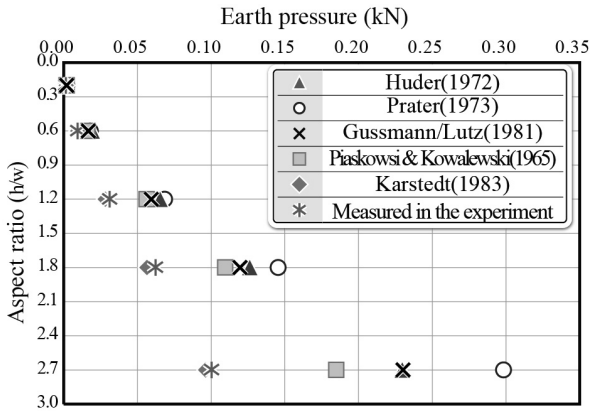


Fig. 15. Comparison of 3-dimensional active earth pressures following aspect ratio (h/w)

높이 0.50～0.55h 지점에서 토압이 가장 크게 발생하는 포물선 형태의 3차원 토압 분포를 보였으며, 3차원 쐐기의 전단저항력 및 수평·수직방향으로의 하중전이로 인하여 발생하는 것으로 판단된다. Fig. 14는 종횡비(h/w)에 변화에 따른 x축(정지토압 대비 주동토압)과 y축(주동변위 전면판 높이)을 정규화하여 변화된 3차원 주동토압의 분포를 파악하였다. 주동토압 대비 정지토압의 비는 정규화된 높이 0.0～0.4h의 경우 0.5이상, 0.4～0.6h의 경우 0.2～0.4, 0.6～0.9h의 경우 0.2～0.1이하로 나타났다. 정규화된 높이 0.7～0.9h의 경우 주동토압 대비 주동토압의 비가 0.1이하로 토압이 가장 크게 감소하는 구간으로 나타났다. 상부에서는 토압의 변화가 작고, 약 0.5h를 지점을 기준으로 3차원 주동토압이 급격히 작아지는 분포를 보였다. 종횡비(h/w)에 따른 변화된 3차원 주동토압의 분포를 종합하여 그림 Fig. 14와 같이 곡선모양의 추세선으로 경향을 나타내었다.

4.2.3 3차원 주동토압 모델 비교 및 제안

3차원 주동토압 모델인 정역학적 모델(Huder(1972)), 쐐기형 모델(Prater(1973), Guβmann and Lutz(1981)), 조개형 모델(Piaskowsi and Kowalewski(1965), Karstedt(1982))의 계산결과와 실험에서 구한 3차원 주동토압을 비교하였다(Table 6, Fig. 15). 벽마찰각이 없는 실험조건을 고려하여 이론식은 벽마찰각 “0”으로 계산하였다. 주동토압(E_{ah3D})의 크기는 Karstedt(1982) ≤ 실험결과 (E_{ah3D}) < Piaskowsi and Kowalewski(1965) < Guβmann and Lutz (1981) ≤ Huder(1972) ≤ Prater(1973)순으로 나타났다. 정역학적 모델과 쐐기형 모델의 경우 종횡비(h/w) 0.6까지는 정역학적 모델이 크게 나타났으나, 종횡비(h/w) 1.2 이상에서는 쐐기형 모델이 크게 나타났다. 정역학적 모델의 경우 silo이론에서 유도한 저감계수 즉, 마찰력의 크기가 깊이에 따라 증가하기 때문에 종횡비(h/w) 1.2 이상에서 주동토압이 상대적으로 작아지며, 쐐기형 모델의 경우 2차원 흙쐐기 이론을 확장하였기 때문에 하부에서 주동토압이 커진 것으로 판단된다. 실제의 파괴모형을 고려한 Karstedt(1982) 조개형 모델의 3차원 주동토압이 가장 작게 나타났다.

기존 연구에서 제안한 토압산정식을 검토한 결과 정역학적 모델(Huder(1972))의 경우 단위길이 1m판의 전단저항력 즉, silo이론을 적용하여 종횡비(h/w) 1.2 미만에서는 쐐기형 Prater(1973)모델과 비슷하나 종횡비(h/w)

Table 6. Comparison 3-dimensional active earth pressure models

Division	Static	Wedge type		Shell shape		Test
	Huder (kN)	Prater (kN)	Guβmann /Lutz (kN)	Piaskowski /Kowalewski (kN)	Karstedt (kN)	E_{ah3D} (kN)
Aspect ratio (h/w)0.2	0.0024	0.0021	0.0020	0.0021	0.0017	0.0014
Aspect ratio (h/w)0.6	0.0194	0.0183	0.0169	0.0164	0.0096	0.0095
Aspect ratio (h/w)1.2	0.0659	0.0694	0.0601	0.0569	0.0285	0.0312
Aspect ratio (h/w)1.8	0.1271	0.1476	0.1210	0.1108	0.0571	0.0623
Aspect ratio (h/w)2.7	0.2315	0.3035	0.2328	0.1870	0.0974	0.1003

1.2 이상에서는 상대적으로 토압이 감소하여, 쐐기형 모델(Guβmann and Lutz(1981))과 비슷한 토압 크기를 보였다.

쐐기형 모델의 경우 2차원 역쐐기의 측면 전단력을 고려하여, 대수나선 및 직선으로 밖에 풀 수 없기 때문에 모형실험에서 측정한 토압보다 약 1.5～3.0배 토압이 크게 나타나는 문제를 보이며, 실제 파괴모델과 부합하지 않는 것으로 나타났다.

조개형 모델 Piaskowsi and Kowalewski(1965)의 경우 타원형의 단면을 갖는 기둥 모양의 파괴모형을 선정하여 구한 것이기 때문에 지반조건에 따라 일반화시키기 어려운 점이 있으며, 바닥 활동면에서만 활동 저항력을 고려하였기 때문에 종횡비(h/w)가 작은 경우 쐐기형 모델과 유사한 토압을 보였다. 모형실험에 측정한 토압보다 약 1.5～1.9배 토압이 크게 나타났다.

Karstedt(1982)의 경우 토압이 모형실험으로 측정한 토압과 유사하지만, 수위차에 의한 수평변위를 주어 주동토압을 측정하고, 파괴체의 형상을 파악하기 위하여 본 실험과 비교하여 상대적으로 큰 변형을 발생시킨 것으로 판단된다. 또한 폭(w)과 높이(h)의 비에 대한 3차원 주동토압을 제시하였으나, 폭(w)과 높이(h)의 빈도가 적은 것으로 나타났다.

모형실험에서 측정한 주동토압을 근거로 종횡비(h/w)에 따른 2차원 주동토압(E_{ah2D}) 대비 3차원 주동토압에 대한 비율을 Fig. 16와 같이 제안하였다. Fig. 16는 Table 5의 종횡비(h/w)와 2차원 주동토압과 3차원 주동토압의 비(E_{ah3D}/E_{ah2D})를 이용하여 작성되었으며 종횡비(h/w) 0.2～2.7범위에서 종횡비에 부합하는 3차원 주동토압 감소계수(α)를 찾아 활용할 수 있도록 제안하였다.

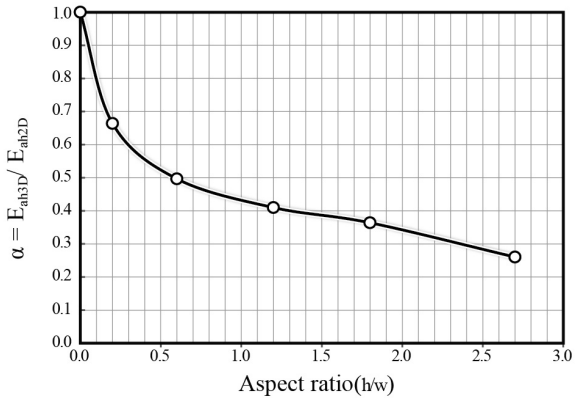


Fig. 16. $\alpha(E_{ah3D}/E_{ah2D})$ following aspect ratio (h/w)

$$E_{ah3D} = \alpha E_{ah2D} \quad (5)$$

E_{ah2D} = 2-dimensional active earth pressure

E_{ah3D} = 3-dimensional active earth pressure (Measurement)

$\alpha = E_{ah3D}/E_{ah2D}$

5. 결 론

본 연구에서는 모형실험을 통해 직사각형 벽체의 크기를 벽체 종횡비(h/w)의 변화에 따른 3차원 주동토압의 크기와 분포를 측정하고, 기존 3차원 모델과 비교하였으며 2차원 주동토압과 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 모형지반의 초기응력(정지토압)상태의 토압계수는 (K_0) 0.37로, Jacky(1944)의 정지토압계수(K_0)와 가장 근사한 것으로 나타났다.
(2) 종횡비(h/w)에 거의 무관하게 한계상태의 주동변위(s)는 벽체높이의 약 0.12%로 나타났다.
(3) 주동벽체 토압분포는 종횡비(h/w) 1.2이상에서 상부와 하부는 상대적으로 작고, 지표 하부 0.50～0.55h 지점에서 토압이 가장 크게 발생하는 포물선 형태로 나타났다.
(4) 단일파괴체로 검토한 주동벽체의 3차원 주동토압 합력 크기는 Karstedt(1982)와 유사한 것으로 나타났다. Karstedt(1982)의 조개형 모델을 제외한 정역학적, 쐐기형, 조개형 모델의 합력의 크기(토압)는 모형실험에서 측정한 토압보다 약 1.5～3.0배 크게 나타났다.
(5) 모형실험에서 측정한 주동토압을 근거로 종횡비(h/w) 0.2～2.7에 따른 2차원 주동토압(E_{ah2D})대비 3차원 주동토압의 비, 3차원 주동토압 감소계수(α)를 활용할 수 있도록 하였다.

참고문헌 (References)

1. Huder, J. (1972), "Stability of Bentonite Slurry Trenches with Some Experiences in Swiss Practice", *Proceedings 5th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Madrid, pp.517-522.
2. Prater, E. G. (1973), "Die Gewölbewirkung der Schlitzwände", *Der Bauingenieur,* Nr. 48, Heft 4, pp.125-131.
3. Gußmann, P. and Lutz, W. (1981), "Schlitzstabilität bei Anstehendem

Grundwasser", *Geotechnik*, (4), pp.70-81.
4. Piaskowski, A. and Kowalewski, Z. (1965), "Application of Thixotropic Clay Suspensions for Stability of Vertical Sides of Deep Trenches without Strutting", *Proceedings 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Montreal, Vol.2, pp. 526-529.
5. Karstedt, J. P. (1982), "*Untersuchungen Zum Aktiven Räumlichen Erddruck im Rolligem Boden bei Hydrostatischer Stützung der Erdwand*", Veröffentlichungen des Grundbauinstituts der Technischen Universität Berlin, Heft 10.
6. Jacky, J. (1944), "The Coefficient of Earth Pressure at Rest", *journal for Society of Hungarian Architects and Engineers* October, pp. 355-358.
7. Saglamer, A. (1975), "Soil Parameters Affecting Coefficient of Earth Pressure at Rest of Cohesionless Soils", *Proc. Istanbul Conf. on Soil Mech. and Found. Engrg*., Turkiya Bilimsel ve Teknik Arasfirma Kurumu, Ankara, Torkey, Vol.1, pp.9-16.
8. M. D. Bolton (1986), "The Strength and Dilatancy of Sands", *Géotechnique*, Vol.36, No.1, pp.65-78.
9. Robert Szepeshazi (1994), "On the K_0 factor", Periodica polytechnica ser. Civil. Eng. Vol.38, No.1, pp.127-195.
10. Lee, Sang Duk (2014), *Soil Mechanics*, CIR, pp.401-406

Received : September 2nd, 2015
Revised : September 17th, 2015
Accepted : September 17th, 2015