

역 T 형 옹벽에 작용하는 연직토압분포

유 남 재* · 이 명 옥**

Vertical Earth Pressure Distribution on Cantilever Retaining Wall

Nam-Jae Yoo* · Myeung-Woog Lee**

ABSTRACT

Centrifuge model tests of cantilever retaining wall were performed to investigate the vertical stress distribution due to selfweight of backfill material. Model tests were carried out to find the effect of arching action on vertical stress distribution by changing the roughness of rigid boundary slope and the distance between retaining wall and boundary slope.

A reduced scale model of cantilever retaining wall was made with concrete and Jumunjin Standard Sand with 80 % of relative density was used as foundation and backfill material. Centrifuge tests were performed by increasing g-level up to 40 g with measuring vertical stress induced by selfweight of backfill material.

Test results on vertical stress distribution were analyzed and compared with results of Silo theory.

* 강원대학교 토목공학과 부교수

** 강원대학교 토목공학과 대학원 박사과정

1. 서론

전 국토의 70%가 산지로 이루어진 우리나라는 지형윤희상 만장년기의 지형에 속하기 때문에 급경사면이 많이 분포되어 있으며 이러한 급경사면에 주거지나 도로 등을 조성함에 있어서 급경사면의 굴착은 피할 수 없는 사업이라 할 수 있다.

이러한 주거지, 도로 등을 조성하기 위하여 산지의 급경사면을 굴착한 후 발생된 굴착면 또는 기존의 암반 및 풍화대의 급사면에 인접하여 옹벽, 지하암거, 교대, 터널 등과 같은 다양한 토목구조물이 설치되곤 한다. 이러한 급경사면에 설치되는 토목구조물중 옹벽이 차지하는 비중이 대부분이라고 하여도 과언이 아니다.

이와같이 인위적 및 자연적인 안정사면에 인접하여 설치되는 옹벽에서는 사면에 작용하는 마찰력에 의한 아칭효과에 의하여 연직토압의 재분배가 발생하여 고전의 토압이론인 Rankine 및 Coulomb 이론에 의한 옹벽의 안정성 평가시 안전측의 설계가 되고 있을 것으로 알려져 있다. 따라서, 그의 효과에 의한 연직토압분포를 정확히 산정함으로써 옹벽의 안정성 평가시 수행될 필요성이 있다.

따라서 본 연구에서는 기존사면에 인접하여 설치되는 역 T형 옹벽에 대하여 굴착사면의 조도, 옹벽배면과의 간격, 굴착사면의 경사를 매개변수로 하여 자중의 원심모형모형실험을 실시하고 옹벽의 배면에 작용하는 토압을 측정하였고 실험결과를 Silo²⁾ 이론에 의한 연직토압분포를 산정하여 실험결과와 비교분석을 수행하였다.

2. 기존 이론의 고찰

기존의 안정사면에 인접하게 설치되는 토류구조물에 작용하는 토압을 구하는 이론중 연직안정사면에 즉, 뒤채움흙의 내

외측 두면이 서로평행한 경우에 적용이 가능한 이론인 기존의 Silo¹⁾ 이론이 있다.

Silo 이론은 벽체와 기존사면이 모두 연직인 경우에 대해 유도된 것으로 시멘트 사일로(또는 석탄창고) 압력에 대한 차분식을 Set up 시킨 Janssen(1895)에 의해 최초로 평면아칭(Flat Element)를 이용하여 벽체에 작용하는 토압이론식을 유도하였다.

Marston and Anderson (1913)은 Fig. 1에 보인바와 같이 사일로, 암거등과 같이 연직인 두 벽면사이에서 흙을 뒤채움 할 때 점증적인 압력의 영향을 고려하여 벽체에 작용하는 토압이론식을 유도하였다.

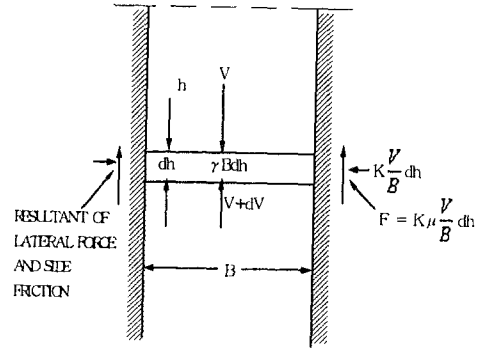


Fig. 1 Differential element in classical representation of soil arching.

Fig. 1에서 지표면 아래로 깊이 z 에 위치한 두께 dz 의 미소의 수평요소의 수직응력의 합은 아래의 식 1과 같으며

$$V - (V - dV) - 2K\mu \frac{h}{B} dh + \gamma B dh = 0 \quad (1)$$

식 1을 정리하면 식 2와 같다.

$$dV + 2K\mu \frac{V}{B} dh = \gamma B dh \quad (2)$$

여기서, 폭 B 는 상수이며 식 2를 dh에 의해 나누고 적분하면 도관위에 하중에 대한 보통 사용되는 Marston의 식은 아래와 식 5 와 같이 유도 할 수 있다.

식 2 은 식 3 으로 다시 쓸 수 있으며

$$\frac{dV}{dh} + P(z) = Q(z) \quad (3)$$

여기서, $P(z) = 2K\mu \frac{V}{B}$, $Q(z) = \gamma * B$

이 식의 일반해는 아래의 식 4 와 같으며

$$V = (\exp[-\int P(z) dz]) \int Q(z) * \exp[\int P(z) dz] dz + c \quad (4)$$

여기서, c 적분상수

$$V = \gamma B^2 \frac{1 - \exp(-2K\mu \frac{h}{B})}{2K\mu} \quad (5)$$

여기서, V : 전체 수직하중, v : 단위중량
B : Trench의 넓이, K : σ_h/σ_{av}
 $\mu : \tan \phi$

여기서, $V/B = \sigma_{av}$, $K \sigma_{av} = \sigma_h$

따라서 수평토압 σ_h 는 아래의 식 6과 같이 유도 할 수 있다.

$$\sigma_h = \frac{\gamma B}{2\mu} [1 - \exp(-2K\mu \frac{H}{B})] \quad (6)$$

한편, 토압계수 K 값은 초기에 Janssen 이 Grain에 대한 실험을 통해 구하였으나 후에 Marston and Anderson 은 주응력비와, $K_a = \sigma_1/\sigma_3$ 가 같다고 가정하여 아래의 식 7 을 사용하였다.

$$K_a = \frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \frac{(1 - \sin \phi)}{(1 + \sin \phi)} \quad (7)$$

3. 실험

3.1 시료의 기본물성실험

본 연구에서 용벽하부지반 및 뒷채움재로 사용된 시료는 주문진 표준사로서 시료의 기본적인 물성은 Table 1 에 나타난 바와 같으며 통일분류법상 SP에 해당하는 균등한 중립질의 모래이다. 한편, 강성경계사면의 조도를 변화시키기 위하여 주문진 표준사, 아연도강판, No. 80 사포를 사용하였으며 각 재료의 주문진 표준사와의 마찰각은 삼축압축시험, 직접전단에 의한 마찰시험을 통하여 각각 43.09 °(주문진 표준사, FF), 11.48 °(아연도강판, FS), 44.91 °(No. 80 사포, FT)를 얻었으며 콘크리트와 주문진 표준사의 마찰각 28.72 °를 얻었다.

한편, 본 연구에서 사용된 상대밀도 80%의 모형지반조성시 균질한 초기상대밀도를 갖는 지반을 형성하기 위하여 Raining 장치를 제작 강사법을 이용하여 초기에 균질한 지반을 형성하였다.

Table 1 Basic Properties of Jumunjin Standard Soil

Grain Size Distribution	D ₁₀ = 0.21 mm C _u = 1.19 C _c = 1.01
γ_{dmax}	1.682 kg/cm ³
γ_{dmin}	1.384 kg/cm ³
e _{max}	0.879
e _{min}	0.546
Specific Gravity	2.6

3.2 실험장치

본 연구에서는 실내에서 기존의 축소된

실내모형실험에서는 제한된 응력수준 때문에 정확히 현장응력상태를 재현할 수 없으므로 인위적으로 모형을 가속시킴에 따라 토립자 자중을 증가시켜 현장응력 수준에서 경제적으로 실험을 수행할 수 있는 원심모형실험 기법을 사용하여 실내모형실험을 수행하였다.

본 연구에서 사용된 자중의 원심모형 실험 토조는 Fig. 2 와 같으며 토조전면은 Plexiglass로 제작하여 실험 중 모형거동을 관찰 할수 있도록 제작하였다.

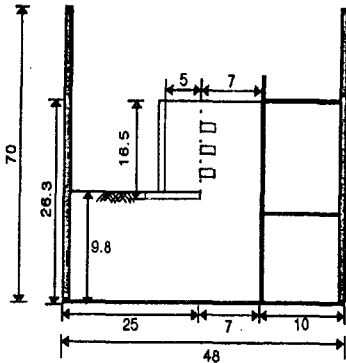


Fig. 2 Selfweight Test Model Container

한편, 본 연구에서는 원심모형 실험중 지반과 모형토조와의 벽면에 마찰력을 최소화 하기 위하여 Grease를 묻힌 비닐을 모형토조 벽면에 부착하여 벽면의 마찰력을 최소화 하였으며 강성경계사면은 나무 Block으로 제작하여 표면에 아연도강판, 모래, 사포를 부착시켜 조도를 변화 시켰다.

한편, 굴착사면과 옹벽배면 사이의 간격과 굴착사면의 조도에 따른 모형옹벽의 배면에 작용하는 토압의 분포를 알아보기 위하여 Fig. 2 에 보인 바와같이 모형옹벽의 배면에 옹벽의 상부로부터 각각 2.9, 6.9, 10.9 cm 깊이에 토압계를 설치하여 원심모형시험중 발생하는 연직토압을 측정하였으며 원심모형실험중 계측된 모든 자료는 A/D 변환기를 통하여 PC에 자동저장 하였다.

3.3 실험방법

본 연구에서 실시한 자중의 원심모형실험은 상대밀도 80 % 갖는 균질한지반을 형성하기 위하여 강사장치를 통해 일정한 깊이까지 지반을 조성한 뒤 역 T 형 옹벽을 모형지반위에 설치하고 옹벽의 배면에 일정한 깊이마다 연직토압측정을 위한 토압계를 설치한 뒤 모형토조를 원심모형기의 Basket에 설치하여 소정의 중력수준까지 원심력을 가하여 실험을 실시하였다.

본 연구에 사용된 역 T형 옹벽은 6.6m 옹벽 단면의 1/40 크기로 높이 16.5 cm, 저판길이 9 cm, 두께 2 cm의 크기의 역 T형 옹벽으로 Concrete을 이용하여 제작 사용하였다. 굴착사면은 나무 Block으로 제작하였으며 굴착사면의 간격을 옹벽배면으로 부터 2.0 cm, 3.5 cm, 7.5 cm 세가지로 그리고 굴착사면의 경사를 80°, 90° 두가지로, 굴착면의 조도를 나무 Block의 표면에 아연도 강판, 주문진표준사, No. 80 사포 등을 부착 벽면의 조도를 변화시키면서 실험을 실시하였다. 한편, Table 2 는 본 실험에서 고려한 변수를 나타내고 있다.

Table 2. Selfweight centrifuge model test parameters

자 중 실험						
옹벽 형태	굴착 사면 조도	상대 밀도 (%)	굴착 경사	간격 (cm)	중력 수준 (g)	덧채 움의 경사
역 T 형 옹 벽	11.48 °	80	90 °	2	40	0
	43.09 °					
	44.91 °					
	11.48 °			3.5		
	43.09 °					
	44.91 °					
	11.48 °			7		
	43.09 °					
	44.91 °					
	11.48 °	80	80 °			
	43.09 °					
	44.91 °					

4. 실험 결과분석

경계사면의 조도를 마찰각 11.48°(아연도강판 : FS), 43.09°(모래 : FF), 44.91°(사포 : FT)로 변화시키고, 옹벽의 배면으로부터 사면까지의 거리는 2cm, 3.5 cm, 7.5 cm, 그리고 굴착면의 경사를 80°, 90°로 변화시킨 경우에 대하여 측정된 토압을 옹벽배면의 토압을 삼각형으로 가정한 이론값($\gamma * z$)과 비교하였다.

Fig. 3 - Fig. 5 는 옹벽의 배면과 굴착사면의 간격이 2.0 cm, 3.5 cm, 7.5 cm 이고 굴착면의 조도가 FS(11.48°), FF(43.09°), FT(44.91°)이며 굴착면의 각도가 90° 일때 원심모형실험을 실시하여 측정된 토압과 옹벽배면의 토압을 삼각형으로 가정한 이론값($\gamma * z$)과 비교한 결과이다.

해석결과 Fig. 3 - Fig. 5 에 보인바와 같이 굴착면의 조도가 클수록 (FT=44.91°) 옹벽배면에 작용하는 연직토압이 작음을 볼수 있으며 이는 굴착면의 조도가 거칠어 질수록 벽면마찰력에 의한 아칭효과에 의하여 연직토압의 재분배가 발생하여 토압의 감소효과가 커짐을 나타내고 있으며 이러한 경향은 옹벽의 상부에서 보다 하부로 내려갈수록 조도의 효과가 더 커짐을 보여주고 있다.

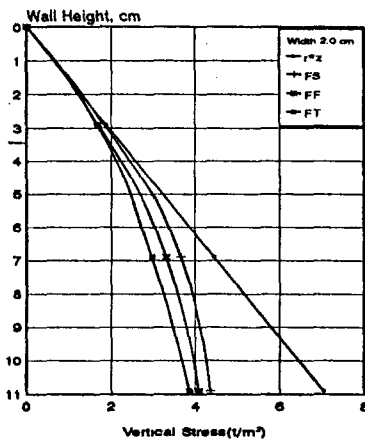


Fig. 3 Earth Pressure Distribution With Depth (Space 2 cm)

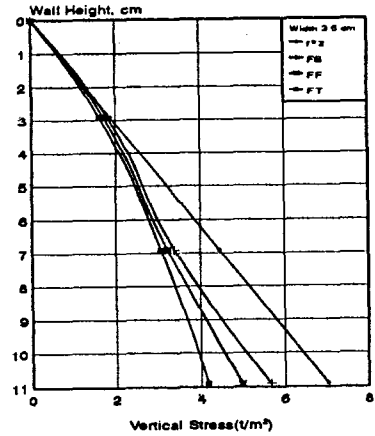


Fig. 4 Earth Pressure Distribution With Depth (Space 3.5 cm)

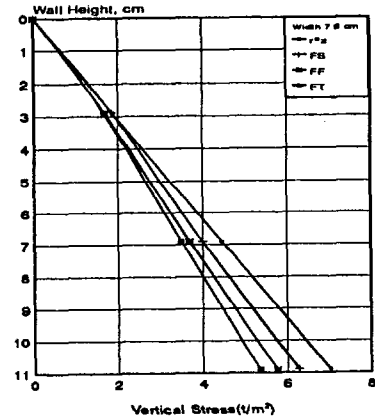


Fig. 5 Earth Pressure Distribution With Depth (Space 7.5 cm)

한편, Fig. 6 은 굴착사면의 경사각도가 80°로 경사졌을때의 실험결과와 토압분포를 삼각형으로 가정한 이론값($\gamma * z$)으로 계산된 토압을 비교한 그림이다. 본 해석에서도 알 수 있듯이 굴착사면의 조도가 거칠어짐에 따라 벽면 마찰력에 의한 아칭효과에 의해 토압의 크기가 감소하는 경향을 보여주고 있다.

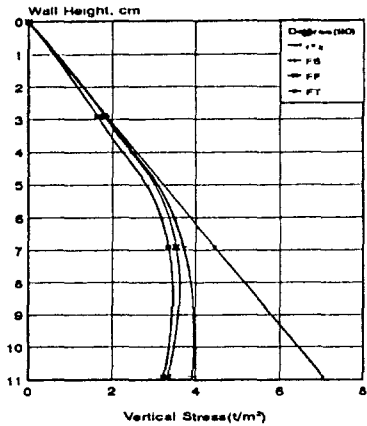


Fig. 6 Earth Pressure Distribution With Depth (Degree 80 °)

한편, Fig. 7 - Fig. 18 은 자중의 원심 모형을 통해 측정된 연직 토압을 Silo 이론의 사용하여 산정한 토압분포와 비교한 결과를 나타내고 있다.

Fig. 7 - Fig. 9는 용벽의 배면과 굴착사면의 간격이 2.0 cm 일 때 굴착사면의 조도에 따른 연직토압의 분포를 나타내고 있으며 실험을 통해 측정된 토압이 용벽배면의 토압을 삼각형으로 가정한 이론값($\gamma * z$)으로 예측된 토압에 비해 작은 토압을 나타내고 있으며 Silo 이론에 의한 토압분포는 보다 약간크게 산정됨을 보이고 있다.

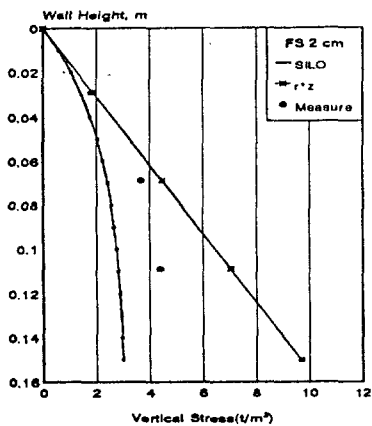


Fig. 7 Earth Pressure Distribution With Depth (Space 2 cm ; FS)

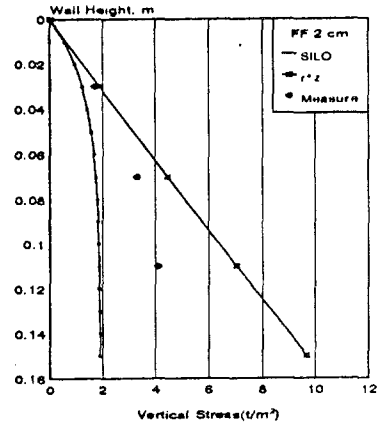


Fig. 8 Earth Pressure Distribution With Depth (Space 2 cm ; FF)

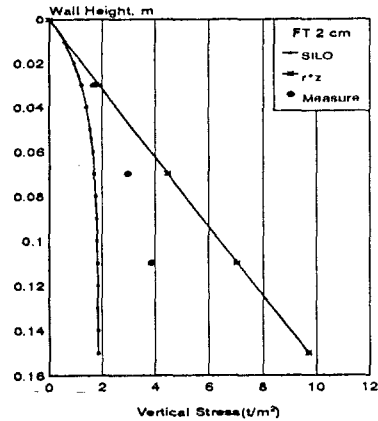


Fig. 9 Earth Pressure Distribution With Depth (Space 2 cm ; FT)

Fig. 10 - Fig. 12 는 용벽의 배면과 굴착사면의 간격이 3.5 cm 일때의 토압분포를 나타내고 있으며 비교적 Silo 이론으로 예측된 토압에 측정치와 일치함을 보이고 있으며, 용벽의 배면과 굴착사면의 간격이 7.5 cm 일때의 해석결과인 Fig. 13 - Fig. 15 결과 역시 Silo 이론으로 해석한 토압이 측정결과와 비교적 일치함을 보이고 있다.

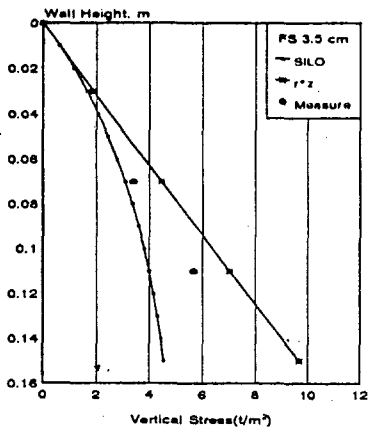


Fig. 10 Earth Pressure Distribution With Depth (Space 3.5 cm ; FS)

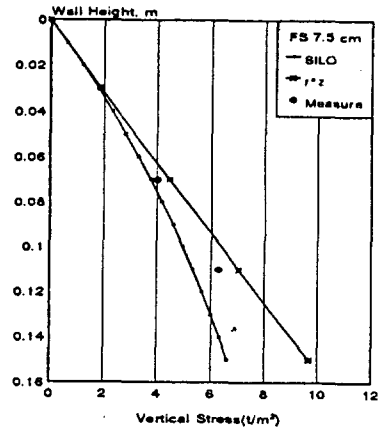


Fig. 13 Earth Pressure Distribution With Depth (Space 7.5 cm ; FS)

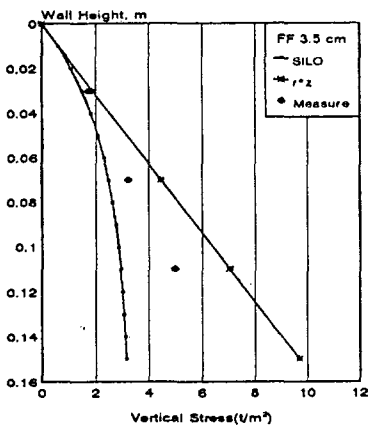


Fig. 11 Earth Pressure Distribution With Depth (Space 3.5 cm ; FF)

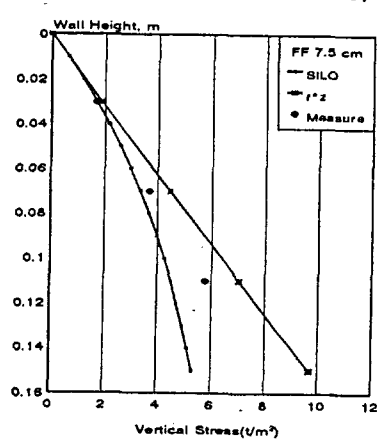


Fig. 14 Earth Pressure Distribution With Depth (Space 7.5 cm ; FF)

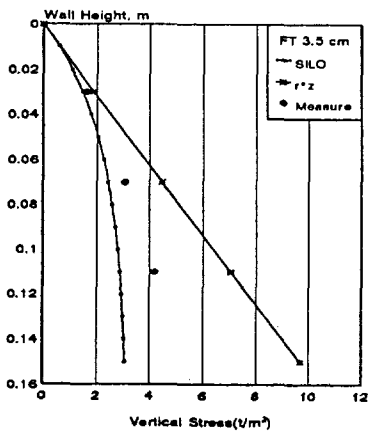


Fig. 12 Earth Pressure Distribution With Depth (Space 3.5 cm ; FT)

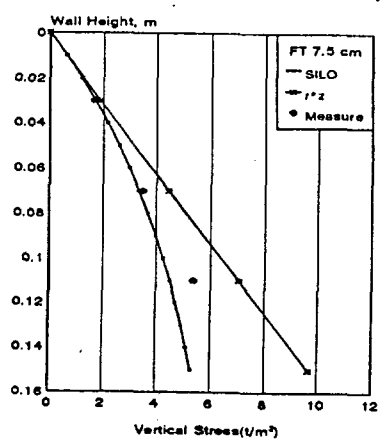


Fig. 15 Earth Pressure Distribution With Depth (Space 7.5 cm ; FT)

한편, Fig. 16 - Fig. 18 은 굴착사면의 경사가 80 ° 일때의 토압분포로 이 결과 역시 앞서결과와 마찬가지로 Silo 이론으로 예측된 토압이 실험결과와 매우 일치함을 보이고 있다.

역 T 형 옹벽을 사용하여 실시한 옹벽의 원심모형 실험을 통해 측정된 토압은 굴착면의 조도 및 옹벽의 배면의 간격에 따라 영향을 받으며 Silo 이론으로 예측된 토압이 실험을 통해 측정된 실험값에 비교적 일치함을 보이며 이는 Silo이론이 굴착사면의 벽마찰을 고려하여 토압을 산정하기 때 문이라 판단된다.

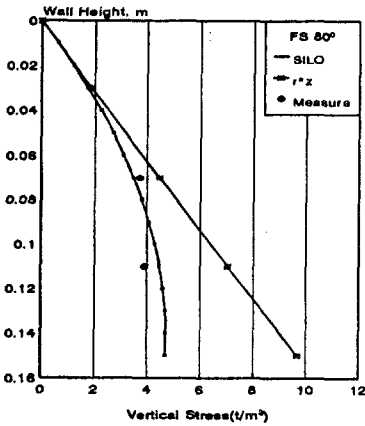


Fig. 16 Earth Pressure Distribution With Depth (Degree 80 ° ; FS)

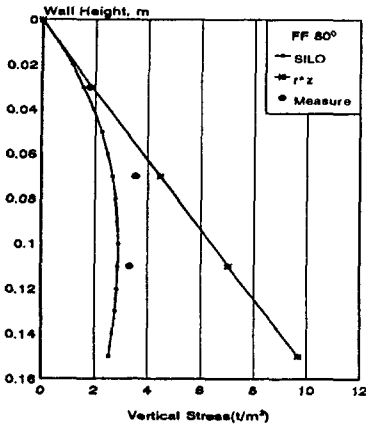


Fig. 17 Earth Pressure Distribution With Depth (Degree 80 ° ; FF)

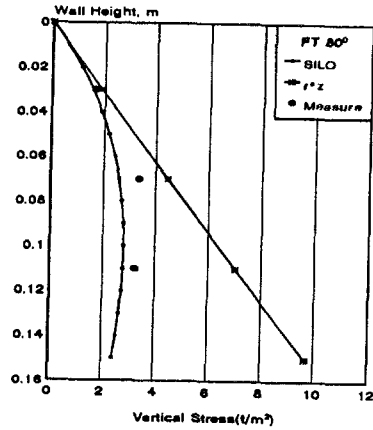


Fig. 18 Earth Pressure Distribution With Depth (Degree 80 ° ; FT)

5. 결론

기존사면에 인접하여 설치되는 역 T형 옹벽에 대하여 굴착사면의 조도, 옹벽배면과의 간격, 굴착사면의 경사를 매개변수로 하여 자중의 원심모형모형실험을 실시하고 옹벽의 배면에 작용하는 토압을 측정하는 한편, 실험결과와 기존의 Silo 이론에 의한 토압이론식과 비교분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 자중의 원심모형실험을 통해 측정된 연직토압의 분포는 옹벽과 경계사면의 간격이 좁아질수록 사면의 조도가 거칠어 질수록 토압이 감소함이 관찰 되었다.
2. 인접사면의 조도와 옹벽배면간의 거리 효과를 고려한 Silo 이론에 의한 연직토압 분포에 관한 해석결과를 실험에 의한 측정결과와 근접함을 알 수 있었다.
3. 본 연구에서 사용한 원심모형실험기법은 옹벽의 배면토에 작용하는 토압분포를 측정할 수 있는 효율적이며 경제적인 실험 방법을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] 정 성 교, 백 승 훈., “비점성토로 뒷채움한 강성옹벽에 작용하는 정적토압”, *한국지반공학회지*, 제 9권, 제 1호, pp. 69-75, 1993.
- [2] 정성교, 이만렬, 윤계한, 백승훈., “경사진 증력식 옹벽의 주동토압”, *대한토목학회 학술발표회집*, 대한토목학회, pp. 577-580, 1991.
- [3] Frydman, S., and Keissar, I., " Earth Pressure on Retaining Walls Near Rock Faces ", *JGE. Geotech. Engrg. Div., ASCE*, Vol. 113, No.6, pp. 586-599, 1987.
- [4] Handy, R. L., " The Arch in Soil Arching", *JGE. Geotech. Engrg. Div., ASCE*, Vol. 111, No.3, Mar., pp. 302-318, 1985.
- [5] Janssen, H. A., "Versuche uber Getreideruck in Silozellen", *Partial English Translation in Proceeding of Institute of Civil Engineers*, London, England, Vol. 39, pp. 1045 - 1049, 1895.
- [6] Kingsley, H. W., "Arch in Soil Arching", *JGE. Geotech. Engrg. Div., ASCE*, Vol. 115, No.3, pp. 415-419, 1989.
- [7] Kingsley, H. W., " Geostatic Wall Pressure", *JGE. Geotech. Engrg. Div., ASCE*, Vol. 115, No.9, pp. 1321-1325, 1989.
- [8] Krynine, D. P., "Stability and Stiffness of Cellular Cofferdams", *Karl Terzaghi, Transactions, ASCE*, Vol. 110, pp. 1175-1178. 1975.
- [9] Lee, I. K. and Herington, J. R., "Effective of Wall Movement on Active and Passive Pressure", *JGE. Geotech. Engrg. Div., ASCE*, Vol.98 SM6, pp. 625-640, 1972.
- [10] Marston, A., and Anderson, A. O., "Theory of Loads on and Sewer Pipe", *Bul. 31, Iowa Engineering Experiment Station*, Ames, Iowa, 1913.