

## 대칭경사진 벽체의 되메움 수평토압에 관한 연구

### Lateral Earth Pressures on Symmetrical Backslope Walls

이 종 규\*<sup>1</sup> Lee, Chong-Kyu

허 경 한\*<sup>2</sup> Huh, Kyung-Han

#### Abstract

Studies on lateral earth pressures in narrow space using the arching concept have been considerably developed at the beginning of the 20th century. Most theories, however, have been proposed for the vertical or one side backslope conditions rather than symmetrical backslope walls. The investigations described in this paper are designed to identify the behavior of lateral earth pressures in the symmetrical backslope walls varying backslope angles, wide ditch bottom, wall frictions and relative density of backfill materials. For these purpose, 24 model tests were carried out under those conditions. A comparative analysis is performed to identify lateral earth pressures between the test and calculated results based on Kellogg(1993), Modified Kellogg and a wall friction theory.

#### 요 지

좁은 되메움 공간의 벽체가 연직 또는 한쪽 벽체만이 경사진 경우 수평토압에 관한 연구는 국내외에서 상당히 진전되어 왔으나, 대칭으로 경사진 경우의 연구는 미흡한 실정이다. 본 연구는 되메움 공간의 벽체가 대칭으로 경사지고 벽체간 하부폭이 다를 때 발생하는 수평토압에 관한 거동을 구명하기 위하여 시도되었다. 이를 위하여 모형토조를 사용하여 되메움 공간의 벽체가 대칭으로 경사진 경우 벽체의 경사각, 하부폭, 벽마찰각, 상대밀도를 변화시켜 총 24종류의 모형실험을 수행하였고, 이 결과를 Kellogg(1993)제안식, 벽면경사를 고려한 수정 제안식 및 벽면마찰반력으로부터 구한 수평토압과 비교, 분석하였다. 연구 결과 벽면마찰반력을 고려한 경우 평균연직토압을 적용하였음에도 Arching 효과가 발휘된 실험결과와 가장 근소한 차이를 나타내었다.

**Keywords :** Arching effect, Backfill, Backslope, Geostatic pressure, Lateral earth pressures, Wall friction

#### 1. 서 론

인접대형건물간의 지하층 굴착과 도심지내 통신구 및 전력구, 박스칼버트와 같은 구조물 등을 개착식으로 굴착 건설한 후, 협소한 잔여공간 즉, 구조물의 외벽과 굴착면 사이를 되메우기할 때 발생하는 수평토압의 추정은 용이하지가 않다. 이때 발생하는 토압은 기존의 벽체변위를 전제로 한 Rankine-Resal(1857)이나 Coulomb(1776)의 토압과는 일치하지 않을 것이기 때문이다. 현

재까지 관용적으로 추정하는 방법은 벽체변위에 근거한 토압 이론을 적용하는 것이었으나 실제의 토압은 벽체사이의 거리(폭), 벽체의 경사정도에 따라 달라지게 되며 오히려 Silo이론으로 모사된(simulated) 토압과 유사할 수도 있을 것이다.

좁은 공간 되메움 토압에 관한 연구는 평면아치개념을 도입한 Janssen(1895)의 이론식이 발표된 이후 Silo이론을 확장 해석한 Marston(1913), Anderson(1913), Spangler(1938), Handy(1985) 등에 의해 수행되어왔다.

\*1 정희원, 단국대학교 공과대학 토목환경공학과 교수

\*2 정희원, 단국대학교 대학원 토목공학과 박사수료

여기서 Handy(1985)의 이론은 최소 주응력 아치의 궤적을 현수선의 형태로 가정하였고, 옹벽 배면 되메움된 지반에 발생된 수평토압은 아칭이론을 적용하여 추정하였으나, 이러한 제안식들은 되메움 공간의 벽체가 연직인 상태라고 가정한 경우이다.

Kellogg(1993)는 폭이 좁은 도랑 등이 다양한 대칭경사각을 가질 때 발생하는 수평토압에 대하여 경사 굴착면에서의 주응력 변화를 고려한 Handy(1985)의 수평응력비를 확장, 해석하여 제안하였다. 최근 국내에서도 좁은 되메움 공간의 벽체가 연직 또는 한쪽 벽체만이 경사진 경우의 수평토압에 대한 연구가 문창렬(1997), 정성교 등(1999)에 의하여 상당히 진전되어 왔으나, 되메움 공간 양측벽체가 대칭으로 경사진 수평토압에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구는 되메움 공간의 양측벽체가 대칭으로 경사지고 벽체간 폭이 다를 때 발생하는 수평토압에 관한 거동을 구명하기 위하여 수행되었다. 이를 위하여 모형토조를 사용하여 대칭으로 경사진 면의 경사각, 하부폭, 벽마찰각, 상대밀도 등을 변화시켜 총 24종류의 모형실험을 수행하였으며, 이 결과를 Kellogg(1993)제안식, 벽면경사 영향을 고려한 수정 제안식 및 벽면마찰반력으로 구한 수평토압과 비교, 분석하여 그 거동을 구명하였다.

## 2. 이론 고찰

### 2.1 Kellogg(1993) 제안식

지반을 굴착할 때 Kellogg(1993)는 폭이 좁은 도랑 등이 대칭으로 경사진 경우 발생하는 연직토압이나 수평토압에 대하여 경사진 굴착면에서의 주 응력 변화를 고려한 Handy(1985)의 토압계수(K)를 확장 해석하여 제안하였다. 이때 Kellogg(1993)는 벽면경사의 영향을 미소평면요소의 폭에 반영되는 것으로 보고 양단에서의

마찰력은 그림 1.(b)와 같이 연직인 경우와 동일하게 본 Handy(1995)의 이론을 적용하여 식 (1)~식 (3)과 같이 제안하였다.

$$V = \frac{K_2}{2 + K_1} \left[ B^2 - K_3^2 \cdot \left( \frac{K_3}{B} \right)^{K_1} \right] \quad (1)$$

$$\sigma_{av} = \frac{V}{B}, \quad \sigma_h = \sigma_{av} K \quad (2)$$

$$\text{토압계수 } K = \frac{\frac{\sigma_h}{\sigma_1}}{\frac{\sigma_{av}}{\sigma_1}} = C_{av} (\cos^2 \theta + Ka \cdot \sin^2 \theta) \text{이다.} \quad (3)$$

여기서,  $K_1 = -\frac{K\mu}{\tan \psi}$ ,  $K_2 = \frac{-r}{2 \tan \psi}$ ,  $K_3 = Bc + 2H \tan \psi$   
 $V$ : 단위길이 당 작용하는 연직력,  $\mu$ : 마찰계수( $\tan \delta$ ),  
 $\psi$ : 벽체경사각,  $r$ : 되메움 흙의 단위중량,  $Bc$ : 하부폭,  
 $B_0$ : 상부폭,  $\sigma_{av}$ : 평균연직토압,  $\sigma_h$ : 수평토압

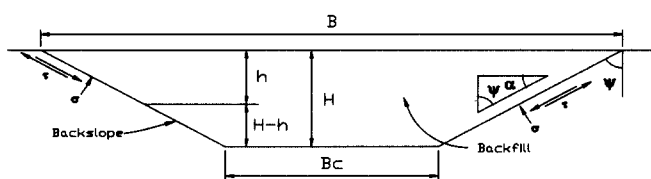
### 2.2 벽면경사 영향을 고려한 수정 제안식

Kellogg(1993)는 벽면경사의 영향을 미소요소의 폭에만 반영되는 것으로 보고 벽면마찰은 연직인 경우와 동일하다고 보고 적용하였으나 Handy(1985)의 토압계수 K 값이 Rankine이론에 근거하였으므로 토압  $P=K(V/B)dh$ 는 그림 2.(b)의 지표면경사와 같이 수평으로 작용하게 되므로 경사벽면에 작용하는 마찰력의 크기는 식 (4)와 같이 된다. 따라서 미소평면요소에 작용하는 힘들에 대하여 연직방향 평형방정식을 적용하면 식 (4)~식 (11)과 같이 된다.

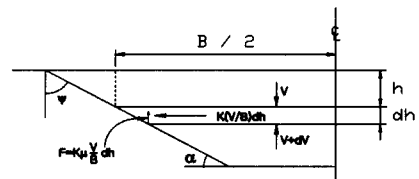
$$F = K\mu \frac{V}{B} \cos^2 \psi \quad (4)$$

$$V + dV - V - rBdh + 2K \frac{V}{B} \mu dh \cos^2 \psi = 0 \quad (5)$$

$$\text{그러므로 } \frac{dV}{dh} + \frac{2K_1 V}{B} = rB \text{ 이며} \quad (6)$$

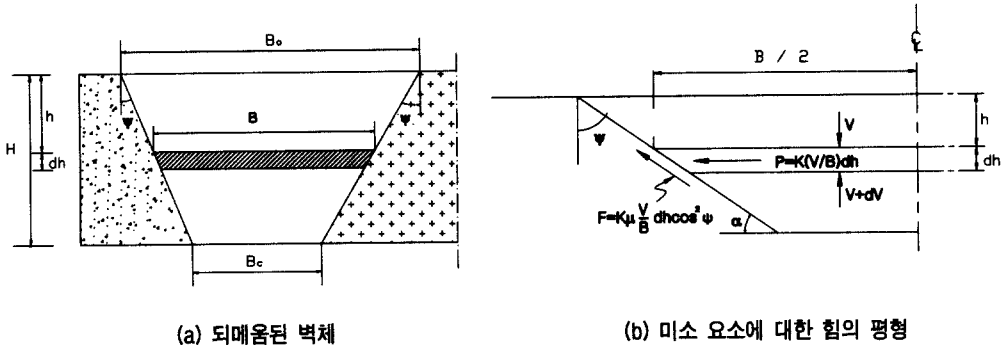


(a) 대표적인 굴착된 도랑



(b) 미소 요소에 대한 힘의 평형

그림 1. 되메움공간의 양측벽체가 대칭으로 경사진 경우(Kellogg1993)



(a) 되메움된 벽체 (b) 미소 요소에 대한 힘의 평형

그림 2. 대칭으로 경사진 벽체의 미소요소에 대한 힘의 평형

여기서  $B = B_c + 2(H-h)\tan\psi$ 이므로  $dB = -2\tan\psi dh$ 가 되고 이 결과를 식 (6)에 대입하여 그 해를 구하면 식 (7)과 같이 된다.

$$\frac{dV}{dB} + \frac{K_2 V}{B} = K_3 B \quad (7)$$

또, 식 (7)을 적분하여 그 해를 구하면

$$V = \frac{K_3}{K_2 + 2} \cdot B^2 + C \cdot B^{-K_2} \quad (8)$$

가 되고 여기서 상재하중이 없으면 초기조건은  $V(K_4) = 0$ 이고,  $B_0 = K_4 = B_c + 2H\tan\psi$ 가 되므로 이를 식 (8)에 대입하면 식 (9)~식 (11)과 같다.

$$V = \frac{K_3}{K_2 + 2} \left[ B^2 - K_4^2 \left( \frac{K_4}{B} \right)^{K_2} \right] \quad (9)$$

$$\sigma_{av} = \frac{V}{B} = \frac{V}{B_c + 2(H-h)\tan\psi} \quad (10)$$

$$\sigma_h = K \cdot \frac{V}{B} \quad (11)$$

여기서,  $K_1 = K\mu \cos^2\psi$ ,  $K_2 = -K_1 \left( \frac{1}{\tan\psi} \right)$ ,  $K_3 = -\gamma \cdot$

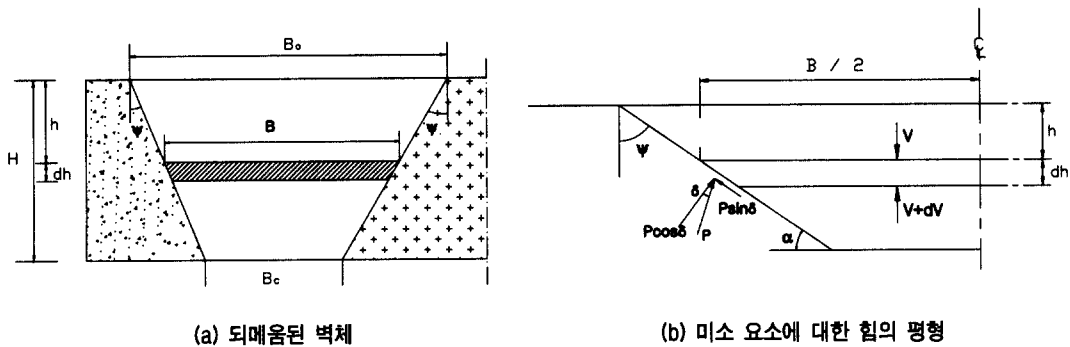
$\left( \frac{1}{2\tan\psi} \right)$  기타 기호는 식 (1), (2), (3) 및 그림 2에 나타낸바와 같다.

### 2.3 벽면마찰반력으로 추정된 수평토압

그림 3과 같은 미소요소를 생각할 때 경사면에 작용하는 마찰반력 P는 벽면과  $\delta$  만큼 경사 되어 작용한다. 이와 같이 벽면마찰반력을 고려한 경우의 토압은 소성평형이론에 근거한 Rankine(1857)의 토압계수를 적용한 Handy(1985)의 토압보다는 반대측 벽면영향을 무시한다면 벽면마찰력을 고려한 Coulomb(1776)의 토압과 유사하다고 생각할 수 있다. 그 이유는 Kellogg(1993)가 적용한 Handy(1985)의 토압계수는 하향아치(minor arch)를 고려한 주응력 방향을 설정하여 결정된 것이므로 벽면마찰반력을 고려하는 경우에는 적용하기가 어렵기 때문이다. 그림 3을 참조하여 미소요소에 대한 연직방향 평형조건식을 적용하면 다음 식 (12)~식 (18)과 같다.

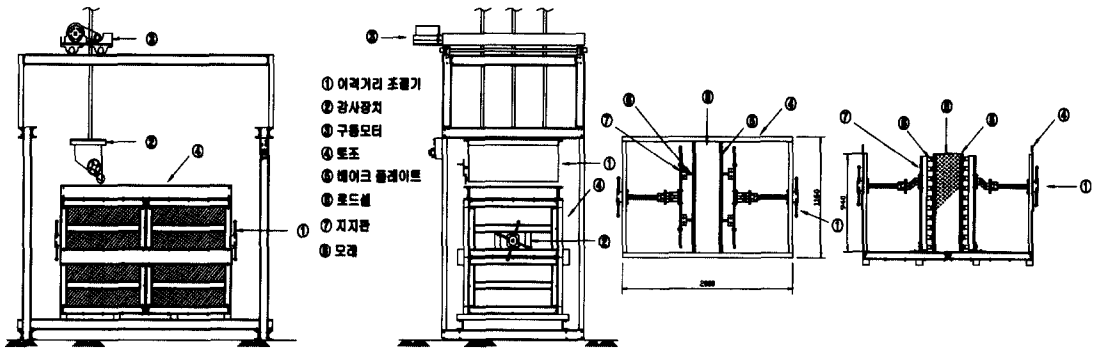
$$V + dV - V - rBdh + 2 \left[ K \left( \frac{V}{B} \right) dh \sin(\delta + \psi) \right] = 0 \quad (12)$$

$$\text{그러므로 } \frac{dV}{dh} + \frac{2V \cdot K_1}{B} = rB. \quad (13)$$



(a) 되메움된 벽체 (b) 미소 요소에 대한 힘의 평형

그림 3. 대칭으로 경사진 벽체의 미소요소에 대한 힘의 평형



(a) 정면도 (b) 측면도 (c) 평면도 (d) 단면도

그림 4. 모형토조

여기서  $B = B_c + 2(H-h)\tan\psi$  이므로  $dB = -2\tan\psi dh$  가 되고 이 식 (13)에 대입하여 그 해를 구하면 식 (14)와 같다.

$$\frac{dV}{dB} + \frac{K_2 V}{B} = K_3 B \quad (14)$$

또, 식 (14)를 적분하여 그 해를 구하면 식 (15)와 같이 된다.

$$V = \frac{K_3}{K_2 + 2} \cdot B^2 + C \cdot B^{-K_2} \quad (15)$$

여기서 상재하중이 없으면 초기조건은  $V(K_4) = 0$ 이고,  $B_0 = K_4 = B_c + 2H\tan\psi$ 가 되므로 이를 식(15)에 대입하면 식(16)~식(18)과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$V = \frac{K_3}{K_2 + 2} \left[ B^2 - K_4^2 \left( \frac{K_4}{B} \right)^{K_2} \right] \quad (16)$$

$$\sigma_{av} = \frac{V}{B} = \frac{V}{B_c + 2(H-h)\tan\psi} \quad (17)$$

$$\sigma_h = K \cdot \frac{V}{B} \quad (18)$$

$$\text{토압계수 } K = K_a = \frac{\cos^2(\phi - \psi)}{\cos^2\psi \cdot \cos(\delta + \psi) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta + \phi) \cdot \sin\phi}{\cos(\delta + \psi) \cdot \cos\psi}} \right]^2} \quad (19)$$

여기서,  $K_1 = K \sin(\delta + \psi)$ ,  $K_2 = -K_1 \left( \frac{1}{\tan\psi} \right)$ ,  $K_3 = -r \cdot \left( \frac{1}{2\tan\psi} \right)$  기타 기호는 식 (1), (2) 및 그림 3에 나타낸바와 같다.

### 3. 실험

#### 3.1 실험의 종류

좁은 되메움 공간의 양측벽면이 대칭으로 경사진 경

우 실내모형토조의 벽체 좌측경사각 ( $\psi_L$ )과 우측경사각 ( $\psi_R$ ), 하부폭( $B_c$ ), 되메움시료의 상대밀도( $D_r$ ), 벽마찰각( $\delta$ )을 변화시켜 총 24종류의 모형실험을 수행하였다.

#### 3.2 실험장치

##### 3.2.1 토조

실내모형실험에 사용된 모형토조는 1050mm×2000mm×1100mm(가로×세로×높이)에 두께 10mm의 강판을 사용하였는데 그 기구도는 그림 4와 같다. 또한, 모형토조의 측벽마찰을 최소화하기 위하여 토조내부측벽에 3mm 두께의 아크릴 판을 부착하였다.

##### 3.2.2 모형벽체 및 측정장치

본 실험에 사용된 모형벽체는 그림 5와 같이 가공이 용이한 베이크 플레이트를 1000mm×99.8mm×30mm(가로×세로×두께)의 크기로 10개 제작하여 높이(H)가 1,000mm 되도록 하였으며, 대칭벽체의 경사각을 80°, 70°, 60°( $\psi = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ$ )로 변화시킬 때 각 기울기 조건에 맞는 크기로 베이크 플레이트를 제작하여 되메움

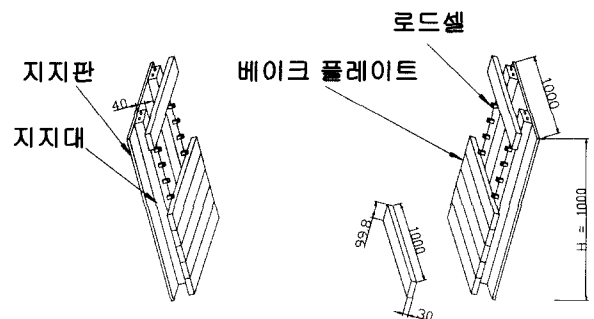


그림 5. 모형벽체

높이를 조절할 수 있도록 하였다. 또한, 모형벽체와 모래사이의 벽마찰 영향을 고려하기 위하여, 모형벽체(베이크 플레이트)를 1cm 두께로 성형하여 직접전단시험기의 하부상자에 설치하고 상부상자에는 상대밀도를 달리하여 모래시료를 조성한 후 직접전단시험을 통하여 구한 마찰각  $\delta$  를 적용하였다.

한편, 분리된 모형벽체를 구성하고 있는 베이크플레이트간의 상호간섭이나 모래의 침입을 방지하기 위하여 물계 반죽된 벤토나이트로 분리된 틈이 메워 지도록 처리하였다. 또한, 벽체에 작용하는 토압을 측정하기 위하여 모형벽체의 저판에서 5단까지는 100kg의 하중계(load cell) 20개를 설치하고 6단~10단까지는 50kg의 하중계(load cell)를 20개 설치하여 측정하였다. 이때, 사용된 하중계는  $\pm 10gr$ 의 정밀도를 지닌 국내산(봉신 load cell co.)을 사용하였으며 측정은 일본NEC사의 제품을 사용하여 토압을 측정하였다.

### 3.2.3 실험방법

좁은 되메움 공간에 지반을 조밀하게 조성할 경우 강사장치를 사용하여 강사높이를 단계별로 일정하게 유지시켰으며, 느슨한 지반을 조성하기 위하여는 플라스틱 용기를 사용하여 모래를 조심스럽게 낙하시키는 방법을 이용하였다. 이때 모형실험과정은 초기상태를 설정한 후 되메움시 측정된 데이터는 자동으로 컴퓨터에 내장되고 출력될 수 있도록 하였다.

## 3.3 모형지반

### 3.3.1 모형지반의 기본 물성

모형토조 지반에 사용된 모래는 강원도 삼척시 근덕면 소재 해사로서 염분에 의한 흡착 수막을 제거하고자 담수로서 세척 후 공기 건조시켜 사용하였으며 사용된

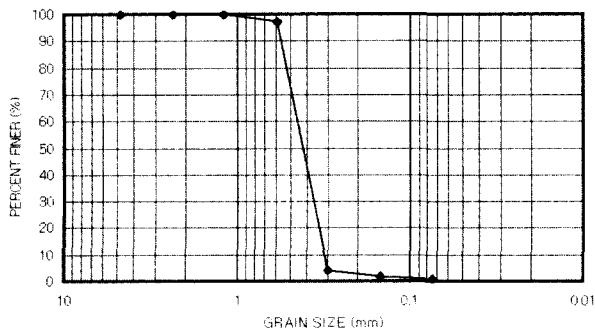


그림 6. 되메움 지반에 사용된 모래의 입도 분포곡선

표 1. 되메움 지반에 사용된 모래의 특성값

구분	특성값	
비중	2.64	
유효입경	0.31	
곡률계수	1.00	
균등계수	1.42	
최대건조밀도(kg/cm <sup>3</sup> )	1.69	
최소건조밀도(kg/cm <sup>3</sup> )	1.36	
통일분류	SP	
내부마찰각	조밀한 경우	38.7°
	느슨한 경우	28°

모래의 입도 분석 결과는 그림 6과 같으며 통일 분류법(unified soil classification system)으로는 SP로 분류되었고 기타 물성값은 표 1에 정리하였다.

## 4. 실험결과 및 비교분석

### 4.1 하부폭의 크기와 상대밀도가 수평토압에 미치는 영향

하부폭의 크기가 수평토압에 미치는 영향을 구명하기 위하여 되메움 깊이와 대칭벽체의 수평과 이루는 경사각은  $80^\circ(\psi=10^\circ)$ 로 일정하게 하고 하부폭만 0.1m, 0.2m 및 0.3m로 변화시켰을 때 시료의 상대밀도를 느슨 및 조밀한 경우 두 가지로 조성하여 실험한 결과는 그림 7, 8 및 9이다.

그림 7.(a)는 하부폭을 0.1m, 대칭벽체의 수평과 이루는 경사각을  $80^\circ(\psi=10^\circ)$ 로 느슨하게 조성된 경우인데 되메움 깊이가 표면에서 0.2m일 때까지의 실측수평토압은 Kellogg제안식, 벽면경사 영향을 고려한 수정제안식 및 벽면마찰반력으로 추정된 결과와 거의 일치하였으나, 되메움 깊이가 증가된 0.95m지점까지의 실측전체수평토압은 이론전체수평토압보다 각각 33.3%, 35.4%, 19% 작게 나타났다. 또한, Kellogg제안식 및 벽면경사 영향을 고려한 수정제안식에 의한 거동은 거의 선형적 삼각형분포로 나타났으나, 실측수평토압은 시계방향으로 오펜한 비 선형분포를 나타냈는데 이런 이유는 되메움 연직토압이 지중연직토압보다 작기 때문인 것으로 판단된다. 지중연직토압이란 그림 1(b)의 어느 Level에서 단위길이당 수직력(geostatic vertical force) V를 각 깊이에서 폭을 적용하여  $\sigma_{av} = V/B$ 를 구한 값이다. 이때 증가된 되메움 깊이가 0.65m이후로 실측수평토압은 지중수평토압보다 작게 나타났으며, 지중수평토압은 실측수평토압과 벽면마찰반력을 고려한 수평토압 사이에 나타났다.

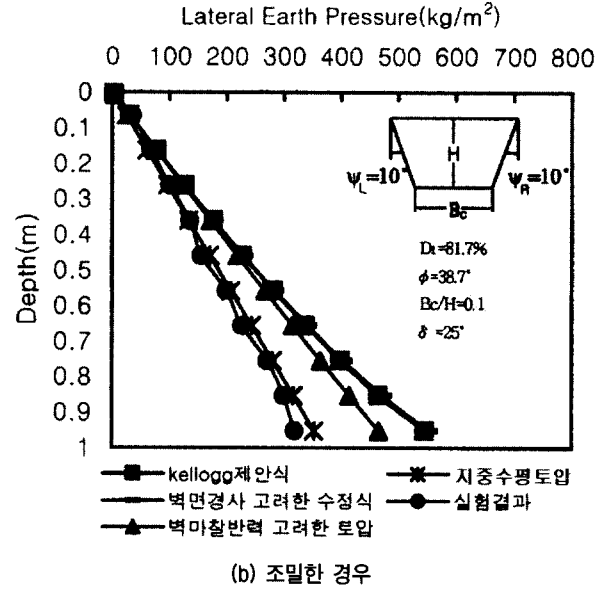
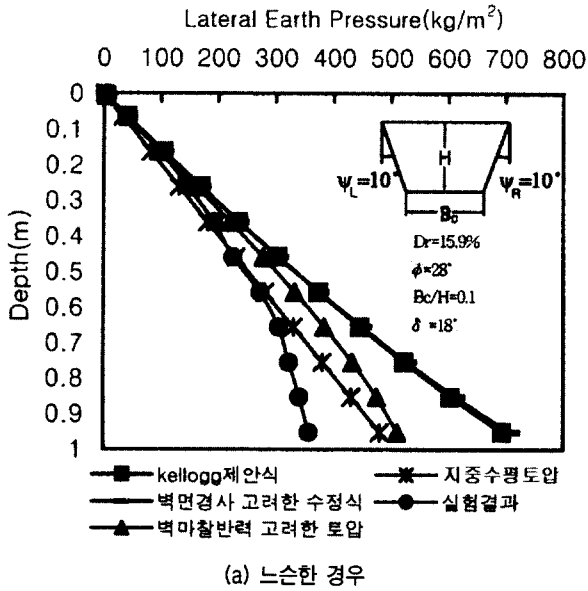


그림 7. 하부폭이 0.1m인 경우

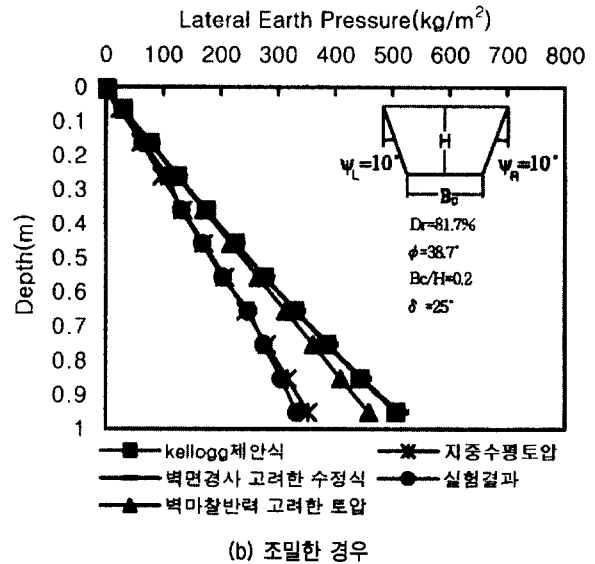
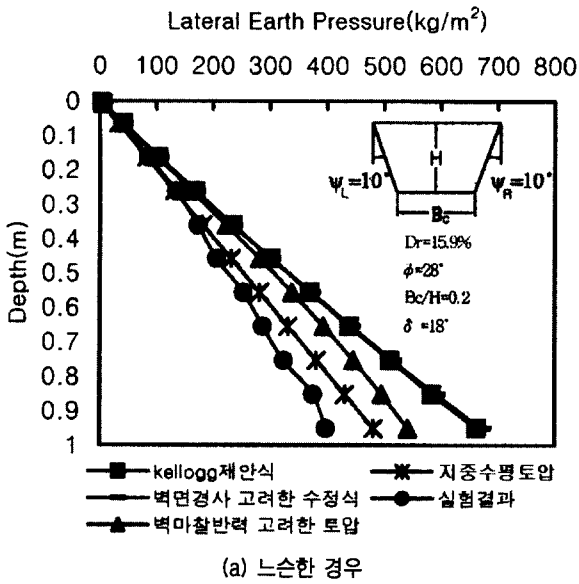
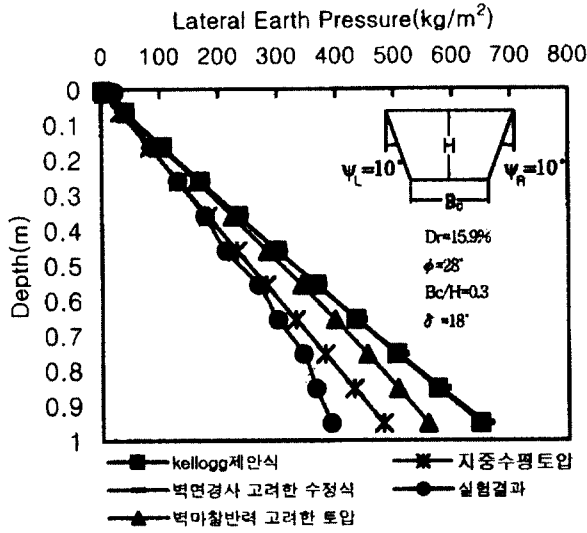


그림 8. 하부폭이 0.2m인 경우

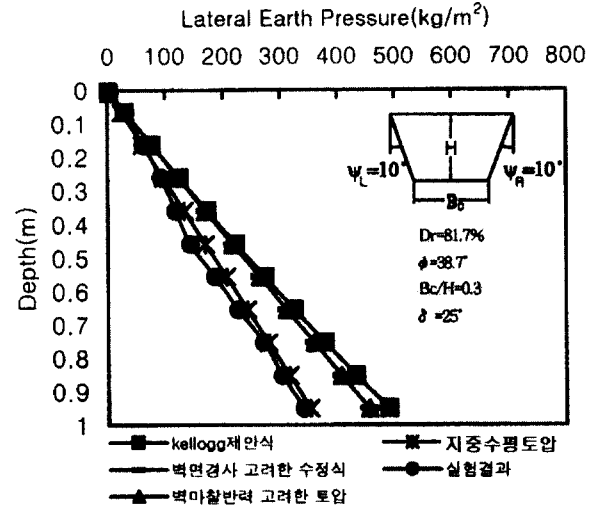
그림 7.(b)는 그림 7.(a)에서 하부폭과 벽면경사각은 동일하고 상대밀도만 그림 7.(a)의 15.9% 보다 조밀한 81.7% 경우인데 이때 내부마찰각은 28°에서 38.7°로, 벽면마찰각 역시 18°에서 25°로 증가되었을 때 이론전체 수평토압보다는 각각 31.5%, 34.1% 및 27% 정도 작게 나타났다. 한편, 그림 7.(a)의 느슨한 경우와 비교하면 각각 13.5%와 14.5%, 2% 및 12.1%로 작게 나타났는데 이는 조밀한 경우 벽면마찰 및 내부마찰각의 효과가 증가하였기 때문으로 판단된다. 또한 증가된 되메움 깊이가 0.65이후로 실측수평토압은 비 선형분포로 나타났으

나, 이론수평토압은 정수압적 선형분포를 나타내었다. 또한, 실측 및 지중수평토압은 정량적으로 매우 잘 일치하였다.

하부폭을 0.2m로 증가시키고 기타조건은 그림 7.(a)와 같은 경우 비교, 검토한 결과는 그림 8.(a)와 같은데 실측전체수평토압은 이론전체토압보다는 각각 33.6%, 34.8% 및 22.1% 작게 나타났다. 한편, 그림 8.(b)의 모든 조건은 그림 7.(b)와 동일하고 하부폭만 0.2m로 증가시켰을 때인데 실측전체수평토압은 이론전체수평토압보다는 각각 33%와 35.6% 및 26.3% 작게 나타났다. 이



(a) 느슨한 경우



(b) 조밀한 경우

그림 9. 하부폭이 0.3m인 경우

경우 실측수평토압 및 세 가지 이론수평토압거동은 매우 유사하였으며, 거의 선형적 삼각형분포를 보였다.

그림 9.(a)는 모든 조건이 그림 8.(a)와 동일하고 하부폭만 0.3m로 증가시켰을 때의 실측전체수평토압은 이론전체수평토압보다는 각각 32.3%와 34.1% 및 22.4% 작게 나타났다. 그림 9.(b) 또한 모든 조건은 그림 8.(b)와 같고 하부폭만 0.3m로 증가될 때 결과인데 각 경우의 이론전체토압보다는 44.3%와 44.6% 및 34.7% 작게 나타났다. 한편, 그림 9의 실측수평토압 및 세 가지 이론수평토압 거동 역시 그림 7, 8의 결과와 유사하였다.

위의 결과를 종합하면 Kellogg의 제안식 및 벽면경사만을 고려한 수정식으로는 아칭효과를 반영한 수평토압을 추정하기는 충분하지 못한 것으로 판단된다. 또한, 시료의 상대밀도에 따른 영향은 토압의 정량적인 값에만 관련되고 정성적으로는 동일하다고 판단된다.

한편, 위의 결과를 식 (1), (5) 및 (12)를 참조하여 고찰하면 식 (1) 및 (5)에서는 연직토압( $V/B$ )을 산정하는데 하향아치(minor arch)이론에 근거하였음에도 연직토압을 평균값( $\sigma_{av} = V/B$ )을 적용하였고 식 (12)는 흙 췌기이론에 근거하였음에도 연직토압을 산정할 수 없어 마찬가지로 평균연직토압을 적용한 모순이 내재해 있다. 다만, 벽면마찰력을 고려한 경우에는 Handy의 토압계수가 하향아치를 고려한 주 응력의 방향변화를 전제하고 있으므로 Handy의 토압계수를 적용할 수 없음은 명백하다. 위와 같은 조건 하에 모형토조 실험결과와 비교·검토기로 한다.

그림 7, 그림 8 및 그림 9의 결과를 보면 하부폭이

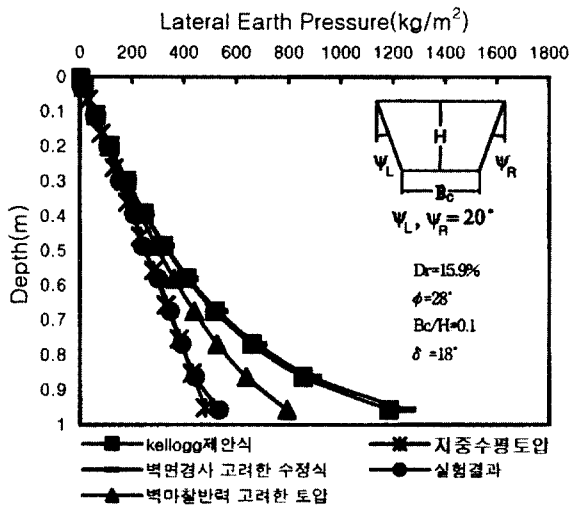
증가되면 상대밀도 및 벽면마찰각에 관계없이 실측수평토압은 세 가지 경우의 이론수평토압보다 작게 나타났는데 이는 되메움 깊이는 일정하므로 하부폭이 클수록 아칭효과가 감소하기 때문이며 따라서 하부폭이 증가될수록 토압의 증가량이 감소되는 것으로 나타났다. 또한 벽면마찰반력으로 부터 구한 경우 평균연직토압을 적용하였음에도 아칭효과가 발휘된 실측수평토압과 가장 근소한 차이를 나타내는 것으로 판단된다.

따라서 모형토조실험을 수행하여 얻은 실측수평토압에 가장 근접한 이론수평토압은 벽면마찰반력을 고려한 토압, Kellogg제안식 및 벽면경사영향을 고려한 순으로 비슷하게 나타났다.

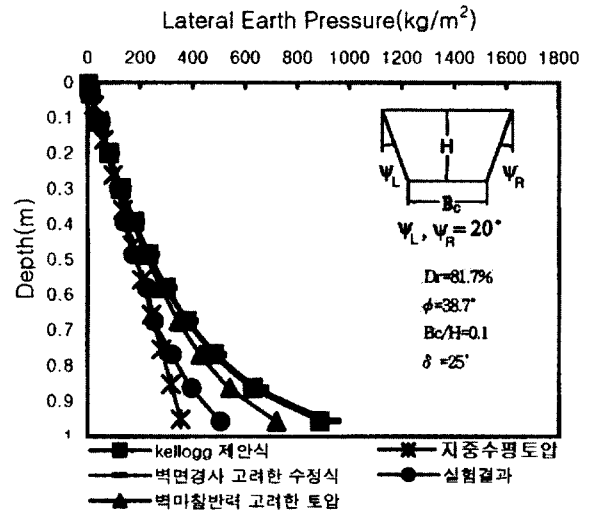
#### 4.2 경사각과 상대밀도의 변화가 수평토압에 미치는 영향

각 경사각의 크기에 따른 영향을 고찰하기 위하여 대칭벽체의 수평과 이루는 경사각을  $70^\circ$ ,  $60^\circ$  ( $\psi = 20^\circ, 30^\circ$ )로 변화시키고 되메움 깊이와 하부폭은 0.1m로 일정하게 하였을 때 시료의 상대밀도가 서로 다른 경우 두 가지로 조성하여 구한 실측수평토압과 세 가지 이론식으로 구한 수평토압과 비교한 결과는 그림 10, 11과 같다.

그림 10.(a),(b)는 대칭벽체의 수평과 이루는 경사각을  $70^\circ$  ( $\psi = 20^\circ$ ), 되메움 깊이와 하부폭을 0.1m로 일정하게 유지하였을 때 시료의 상대밀도를 느슨 및 조밀하게 조성한 경우인데 그림 10.(a)에서 느슨한 경우 실측전체수평토압은 이론전체수평토압보다 각각 44.5%, 46.2% 및 25.5% 작게 나타났으며 그림 10.(b)의 조밀한 경우 실측

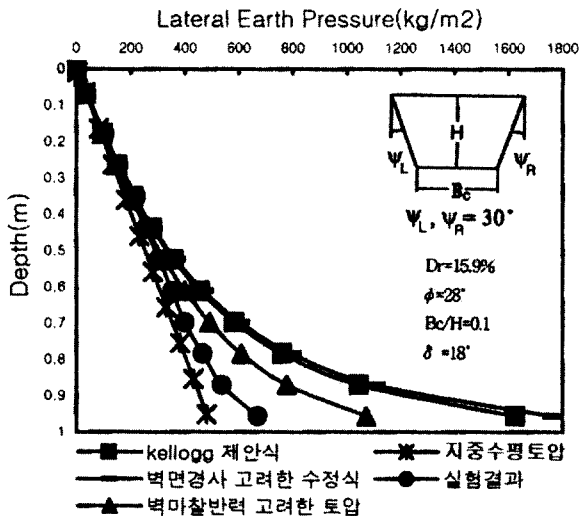


(a) 느슨한 경우

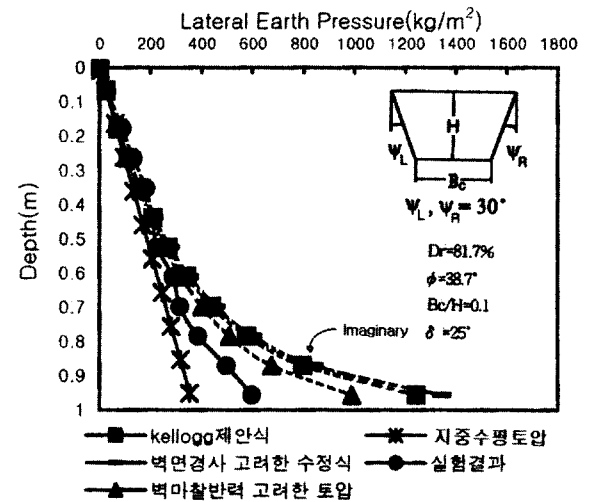


(b) 조밀한 경우

그림 10. 벽체경사각이 70° ( $\psi=20^\circ$ )이고 대칭인 경우



(a) 느슨한 경우



(b) 조밀한 경우

그림 11. 벽체경사각이 60° ( $\psi=30^\circ$ )이고 대칭인 경우

전체토압은 세 이론의 전체 수평토압보다 각각 35.3%, 38.9% 및 28.3% 작게 나타났다. 또한, 그림 10.(a)의 각각의 결과값보다는 26.2%, 27%, 4% 및 6% 정도 작게 나타났으며, 이때 벽체경사각이 70°( $\psi=20^\circ$ )보다 작으면 되메움 연직토압이 지중연직토압보다 커서 실측수평토압은 반 시계 방향으로 오목한 비 선형분포를 나타내는데, 이는 Kellogg (1993)의 주장과 일치한다.

또한, 되메움깊이가 표면에서 0.3m일 때까지의 실측 및 세 이론수평토압은 지중수평토압과 일치하다가 증가된 되메움 깊이가 0.3m이후로는 실측 및 세 이론수평토압은 지중수평토압보다 정량적으로 크게 나타났으며,

정성적으로는 다른 양상을 보였다.

그림 11.(a)는 모든 조건이 그림 10.(a)와 동일하고 대칭벽체의 수평과 이루는 경사각만 60°( $\psi=30^\circ$ )로 증가시켰을 때의 실측전체수평토압인데 각각의 경우 이론전체수평토압보다는 42.7%와 44.2% 및 30.7% 작게 나타났으며 그림 11.(b) 또한 모든 조건은 그림 10.(b)와 같고 벽체의 경사각만 60°( $\psi=30^\circ$ )로 증가시켰을 때의 실측수평토압인데 세 가지 경우의 이론전체수평토압보다는 29.1%와 32.8% 및 17.3% 정도 작게 나타났다. 한편, 그림 11의 토압 거동은 그림 10의 거동과 유사하였다.

그림 11.(b)의 점선은 배면경사각이 수평면을 기준으



로  $45+\phi/2$  보다 작을 경우 파괴면을 벗어나므로 최소주 응력의 아치궤적이 배면경사각으로 회전되어 아칭효과는 소멸되는 것으로 생각할 수 있다. 한편, 벽면마찰력만을 고려한 경우에도 흙 썩기 파괴면을 벗어나므로 이때의 실측수평토압은 어느 경우거나 소성평형상태의 토압이라고 생각할 수 있다. 이 경우 실측전체수평토압은 각 경우의 가상이론전체수평토압보다 29.1%, 32.8%, 및 17.3%정도 작게 나타났는데, 실측수평토압은 소성변형의 잔류상태인 모형실험 토압이 존재하는 것으로 판단된다.

## 5. 결론

좁은 되메움 공간의 대칭경사진 벽체에 작용하는 토압 거동을 구명하기 위하여, 대칭벽체의 경사각, 하부폭 및 상대밀도를 변화시켜 수행한 실내모형실험결과를 Kellogg 제안식, 벽면경사영향을 고려한 수정 제안식 및 벽면마찰반력으로 추정된 수평토압과 비교, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 되메움 깊이가 일정하고 하부폭, 상대밀도 및 경사각을 변화시킨 경우 벽면에 작용하는 실측수평토압은 벽면마찰반력으로 추정된 수평토압, Kellogg 제안식 및 벽면경사영향을 고려한 수정 제안식의 순으로 비슷하게 나타났는데, 이는 벽면마찰반력을 고려하는 경우 Arching 효과가 발휘된 실측수평토압에 가장 근소한 차이를 보여주는 것으로 판단된다.
- (2) 되메움 깊이와 대칭벽체의 경사각은 일정하고 하부폭만이 다른 조건 하의 실측수평토압은 이론수평토압보다 작게 나타났는데, 그 이유는 상대밀도 및 벽면마찰각의 크기에 관계없이 하부폭이 증가될수록 아칭효과가 감소하기 때문이며, 따라서 하부폭이 증가될수록 토압의 증가량이 감소되는 것으로 판단된다.
- (3) 배면경사각이 파괴면  $45+\phi/2$ 보다 작은 경우 모형 실험에 의한 실측수평토압은 가상이론수평토압의 최대값보다 약 2배정도로 작게 나타났는데, 이는 최소주응력의 아치궤적이 배면경사각으로 회전되어 아칭효과는 소멸되는 것으로 생각되며 이 경우 실측수평토압은 소성평형상태에 있는 것으로 판단된다.
- (4) 대칭벽체의 수평과 이루는 경사각이  $80^\circ(\psi=10^\circ)$ 이고 하부폭이 0.1m~0.3m인 경우 실측수평토압은 시계방향으로 오목한 비선형분포를 나타냈는데 그 이유는 되메움 연직토압이 지중연직토압보다 작기 때

문이며 이때, 지중수평토압은 실측수평토압보다 크게 나타났다. 벽체경사각이  $70^\circ(\psi=20^\circ)$ 보다 작아지면 되메움 연직토압이 지중연직토압보다 커서 실측수평토압은 반 시계 방향으로 오목한 비 선형분포를 나타냈는데 이 결과는 Kellogg(1993)의 주장과 일치한다. 이때 지중수평토압은 실측 및 세 이론수평토압보다 작게 나타났다.

- (5) 대칭벽체의 수평과 이루는 경사각이  $80^\circ(\psi=10^\circ)$ 인 경우 이론수평토압은 지중수평토압과 유사한 선형적 삼각형분포를 나타내고 경사각이  $70^\circ(\psi=20^\circ)$ 보다 작으면 실측수평토압과 같이 반 시계방향으로 오목한 비 선형분포를 나타내므로 벽체경사각이  $80^\circ(\psi=10^\circ)$ 보다 작은 경우에만 아칭효과가 발휘된 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 이종규·문창렬(1997), “좁은 공간 되메움 지반에서의 상재하중 영향에 의한 토압”, 한국지반공학회, 제13권 제6호, pp.165~177.
2. 이종규·문창렬·김은섭·이상덕(1997), “되메움 지반에 의한 수평토압에 관한 연구”, 대한토목학회논문집, 제17권, pp.285~292.
3. 문창렬(1997), 좁은 공간에서의 되메움 토압에 관한 연구, 공학박사학위논문, 단국대학교.
4. 문창렬(1999), “비대칭 좁은 공간에서의 되메움 토압에 관한 연구”, 한국지반공학회, 제15권, 제6호, pp.261~277.
5. 정성교·김문규·정진교·이만렬·남선우(1999), “되메움 과정이 고려된 모형벽체에 작용하는 수평토압 : I.고정벽체”, 대한토목학회논문집, 제19권, pp.795~806.
6. Bowels, J.E.(1996), Foundation Analysis and Design, 5th Edition, McGraw Hill Book co, pp.1175.
7. Handy, R.L.(1985), “The Arch in Soil Arching”, JGE. ASCE., No.3, Mar., pp.302~318.
8. Janssen, H.A.(1895), “Versuche uber Getreidedruck in Silozeuen” Z. Ver. deut. Ingr. Vol.39. pp.1045( Partial English Translation in Proceedings of the Institute of Civil Engineers, London, England, 1896., pp.553.
9. Kellogg, C.G.(1993), “Vertical Earth Loads on Buried Engineered Works”, JGE, ASCE, Vol.115, No.3, pp.487~506.
10. Kingsley, O. and Williams, H.(1989). “Geostatic Wall Pressures”, JGE. ASCE Vol. pp.1321~1325.
11. Lambe, T.W. and Whitman, T.V.(1979)., Soil Mechanics SI Version, John Wiley and Sons.
12. Marston, A. and Anderson, A.O.(1913). “Theory of Loads on Pipes in Ditches and Test of Cement and Clay Drain Tile and Sewer Pipe”, Bul., Iowa Engrg., Experiment Station, Ames, Iowa.
13. Parkin, A.K. by Discussion.(1977). “Lateral Earth Pressure at Soft Clay”, JGE. ASCE Vol. pp.1030~1031.
14. Sherif, M.M. and Mackey, R.D.(1987). “Pressures on Retaining Wall with Repeated Loading”, JGE. ASCE Vol. pp.1341~1345.

(접수일자 2001. 7. 13)