

비대칭 공간의 수평응력비 산정에 따른 수평응력에 관한 연구

Horizontal Stress Based on the Calculation of Lateral Stress Ratio in Unsymmetrical Space

문 창 열¹ Moon, Chang-Yeul
이 수 기² Lee, Soo-Ki
권 승 준³ Kwon, Seung-Joon

Abstract

The backfilled space can have various shapes such as vertical or lateral symmetric, unsymmetric slope depending on field conditions. Kellogg (1993) suggested the different equations for the backfill earth pressure and the lateral stress ratio considering that the stresses are different between the symmetrically sloped backfilled space and the vertical one. Kellogg (1993) assumed the stress generated on sloped wall surface as the simple internal friction angle of backfilled soil. However, Moon (1997) suggested modified Kellogg equation assuming that stress behavior in the sloped wall will be varied according to the rotation angle of principal stress and the friction of sloped wall surface. This study has compared and investigated the horizontal stresses of unsymmetrical backfilled space numerically and experimentally obtained when Kellogg lateral stress ratio is applied to and when average lateral stress ratio considering unsymmetric backfill slope of left and right are applied to the modified Kellogg equation. It is shown that the horizontal stress on the sloped wall has good match numerically and experimentally in the modified Kellogg equation when Kellogg's lateral stress ratio in symmetric condition is applied to the unsymmetric condition. But the horizontal stress on the vertical wall shows disagreement numerically and experimentally. The horizontal stress results in good agreement numerically and experimentally when the average lateral stress ratio of left and right at unsymmetric slope as applied to the modified Kellogg equation. Therefore, it is estimated that the application of the average lateral stress ratio to the left and right wall should be considered when backfilled space formed unsymmetric conditions.

요 지

되메움되는 공간의 형상은 현장의 여건에 따라 수직 및 대칭 경사 또는 비대칭 경사를 포함하는 다양한 형태를 취할 수 있다. Kellogg(1993)는 대칭적으로 경사진 되메움 공간에서의 응력은 수직 조건에서의 응력과는 다른 경계 조건이므로 이를 고려한 되메움 토압 이론식과 수평응력비를 제안하였다. Kellogg(1993)는 경사진 벽면에서 발생하는 응력을 되메움 흙의 단순한 내부마찰각으로 가정하였다. 이에 문(1997)은 경사진 벽면에서의 응력의 상태는 벽면마찰과 주응력의 회전방향에 따라 달라질 것을 예상하여 되메움 공간이 비대칭으로 형성되는 경우, 기존의 Kellogg(1993) 이론식에 대한 수정 Kellogg 이론식을 제안한 바 있다. 본 연구에서는 비대칭한 되메움 공간의 수평응력을 문(1997)의 수정 Kellogg 이론식에 기존 Kellogg(1993)의 수평응력비를 적용한 경우와 비대칭인 좌, 우측의 되메움 경사를 고려한 평균 수평응력비를 적용한 경우에 대하여 실내모형 토조실험과 수치해석으로 비교, 검토하였다. 결과에 의하면 수

1 정회원, 삼척대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Samcheok Univ., moonyeul@samcheok.ac.kr)

2 정회원, 삼척대학교 산업대학원 토목공학과 석사과정 (Member, Graduate student, Dept. of Civil Engrg. Samcheok Univ.)

3 삼척대학교 토목공학과 교수 (Prof., Dept. of Civil Engrg., Samcheok Univ.)

정된 Kellogg 이론식에 Kellogg(1993)의 대칭한 조건에서의 수평응력비를 비대칭한 조건에 적용시킬 경우 경사진 벽면에서의 수평응력은 실험, 수치해석 결과에 매우 유사한 양상을 보이고 있으나 보다 수직인 벽면에서의 수평응력은 그 크기가 실험, 수치해석의 결과와는 상이한 결과를 보였다. 한편 비대칭 경사면 좌, 우측의 평균수평응력비를 수정 Kellogg 이론식에 적용하였을 경우에는 보다 수직인 면에서의 수평응력은 실험 및 수치해석 결과와 매우 유사한 결과를 나타냈다. 이러한 결과는 되메움 공간이 비대칭 조건을 형성하는 경우에는 좌, 우측 벽면 경사에 대한 평균 수평응력비의 적용이 고려되어야 할 것으로 판단된다.

Keywords : Average lateral stress ratio, Horizontal stress, Soil box test

1. 서 론

좁게 되메움 되는 공간에서의 응력은 크게 되메움 공간의 형태와 되메움 벽면과 되메움 재료와의 벽면 마찰에 의하여 그 크기 및 분포가 달라진다. 일반적으로 좁은 공간에서의 되메움 응력은 되메움 되는 흙 자중보다 작은 크기로 작용되어지는데 이러한 이유는 폭이 좁은 공간에서 흙의 자중이 되메움 벽면과의 마찰 저항에 의하여 중력 방향으로의 자중 전이가 저지되며 되메움 흙의 전단저항각에 따른 평면 아칭으로서 설명 되어진다. 되메움 벽면에서 발휘되는 연직응력에 대한 수평응력의 비 즉 수평응력비의 적용은 되메움 응력의 크기와 분포에 매우 큰 영향을 미치게 되며 실제 구조물의 안정을 평가하는 중요한 요소이다.

이러한 연구로는 Marston & Anderson(1913) Iowa 이론, Handy(1985), Kellogg(1993) 및 문(1997)에 의한 수정 Kellogg 이론 등이 있다. 되메움 공간이 수직인 경우의 Handy(1985)의 수평응력비에 관한 이론식에 대하여 Kellogg(1993)는 타당함을 긍정하고 되메움 공간이 대칭으로 경사지는 경우에 Handy(1985)의 이론에 근거한 수평응력비와 되메움 응력을 산정하는 이론식을 제안 하였다. 문(1997, 1999)은 Kellogg(1993)가 제안한 이론식에 있어 되메움 벽면에서의 응력 상태를 벽마찰로 가정 한 점은 벽면 경사에 따른 벽마찰과 주응력의 회전방향에 의하여 달라질 것으로 예상하여 비대칭 되메움 공간에서의 응력 산출 이론식을 기존의 Kellogg(1993) 이론식을 수정하여 제안한 바 있다.

본 연구에서는 좁은 되메움 공간이 대칭이 아닌 비대칭의 경우에 관하여 Kellogg(1993)의 대칭 이론과 수평응력비를 각각 수정, 적용하여 비대칭 되메움 공간에서 되메움 경사 및 되메움 폭의 증가와 지반 조성상태의 변화가 되메움 응력에 미치는 영향을 실내모형 토조실

험을 통하여 확인하고자 한다.

2. 수평응력비 K에 대한 고찰

2.1 Handy(1985)의 수평응력비 Kw

Krynine(1945)은 그림 1과 같은 수직벽면에서 되메움 흙과 벽면의 마찰이 충분히 발휘될 경우 평면아칭에 대한 기존 Janssen(1985)이나 Marston & Anderson(1913) Iowa이론에서 사용된 주응력비 $K_a = \frac{\sigma_3}{\sigma_1}$ 사용에 있어 최대 및 최소주응력은 전단력이 0이 되는 면에 작용되어야 함에도 불구하고 적용된 K_a 의 부당함을 지적하여 그림 1의 벽면에서 형성되는 삼각형 요소에 대한 힘의 평형을 고려하여 그림 2로 다음의 수평응력비 K 를 제안하였다.

그림 2에서의 힘의 평형을 고려하면,

$$\sigma_h = \sigma_1 \cos^2 \theta + \sigma_3 \sin^2 \theta \quad (1)$$

$$\sigma_v = \sigma_1 \sin^2 \theta + \sigma_3 \cos^2 \theta \quad (2)$$

$$\tau = (\sigma_1 - \sigma_3) \sin \theta \cdot \cos \theta \quad (3)$$

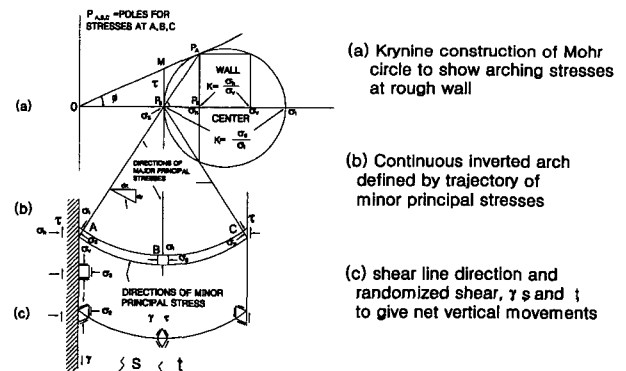


그림 1. 거친 벽에서의 아칭응력에 대한 Mohr 원(Krynine 1945)

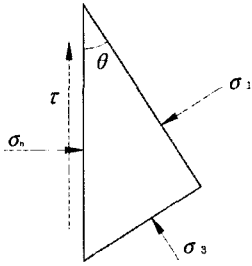


그림 2. 수직벽면에서 되메움 흙과의 마찰저항에 의한 힘의 평형

σ_1 으로 식 (1)을 나누면

$$\frac{\sigma_h}{\sigma_1} = \cos^2\theta + K_a \cdot \sin^2\theta \quad (4)$$

그림 1(a)의 Mohr 원의 그림에서

$$\sigma_h - \sigma_3 = \sigma_1 - \sigma_v \quad (5)$$

이를 정리하면

$$\frac{\sigma_v}{\sigma_1} = \sin^2\theta + K_a \cdot \cos^2\theta \quad (6)$$

따라서 힘의 평형을 고려하는 구성식은 다음과 같다.

$$K = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \frac{\cos^2\theta + K_a \cdot \sin^2\theta}{\sin^2\theta + K_a \cdot \cos^2\theta} \quad (7)$$

Handy(1985)는 이러한 Krynine(1945)의 평면아치를 이용하여 전단력이 0이 되는 주응력에 작용하는 최소주응력을 연결고리 형태로서 구조물 아치의 역방향인 하향의 아치임을 밝혔다.

Handy(1985)가 제안한 현수선의 방정식은 식 (8)과

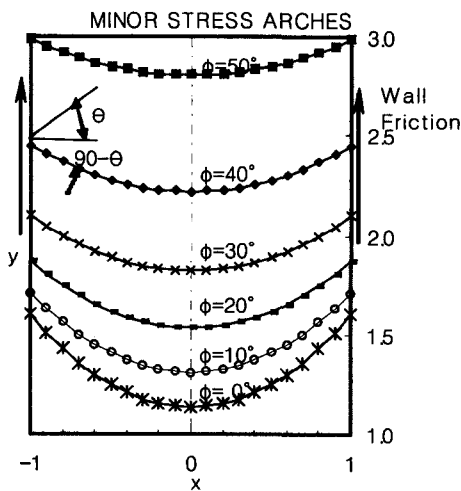


그림 3. $\delta = \phi$ 인 거친 벽에서의 최소 주응력 현수선 아치

같이 표현된다.

$$y = \frac{a}{2} \left[\exp\left(\frac{x}{a}\right) + \exp\left(-\frac{x}{a}\right) \right] \quad (8)$$

$$\text{여기서, } a = \frac{1}{\sinh^{-1} \tan\left(45^\circ - \frac{\phi}{2}\right)},$$

x : 굴착단면 중앙에서의 상대거리(± 1)

식 (8)을 사용하여 되메움 지반의 내부마찰각 ϕ 에 따른 최소주응력 아치를 그림 3에 나타내었다. 즉, 지반이 조밀할수록 평면 아치는 편평해짐을 나타내는 것으로 흙 입자 상호간의 강한 구속력이 발휘됨을 뜻한다.

또한, Handy(1985)는 좁은 공간의 벽면마찰 효과에 의한 연직응력이 벽면과 벽면 사이 이격거리에 따라 다르므로 평균연직응력을 사용할 것을 주장하여 평균연직응력 $\sigma_{av} = \frac{V}{B}$ 로 사용할 것과 그림 4와 같이 평균연직응력 대 최대주응력비 즉 σ_{av}/σ_1 는 되메움 재료 $\phi = 10 \sim 40^\circ, c=0$ 의 범위에서 0.94~0.95의 값을 나타내는 것으로 밝혔다.

따라서 좁은 공간에서 응력의 산출에 사용되는 평면 아칭효과에 의한 수평응력 대 평균 연직응력에 대한 수평응력비를 $K_w = \frac{\sigma_h}{\sigma_{av}}$ 로서 사용할 것을 제안하였다.

$$K_w = \frac{\sigma_h}{\sigma_{av}} = 1.06(\cos^2\theta + K_a \cdot \sin^2\theta) \quad (9)$$

2.2 Kellogg(1993)의 수평응력비 K

Kellogg(1993)는 되메움 공간이 경사지게 형성되는

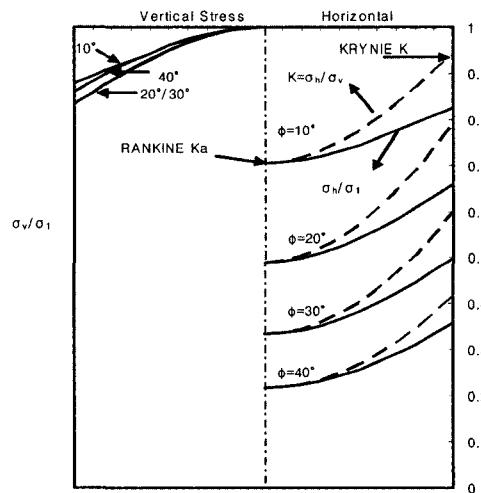


그림 4. 최대주응력에 대한 수직 및 수평응력비

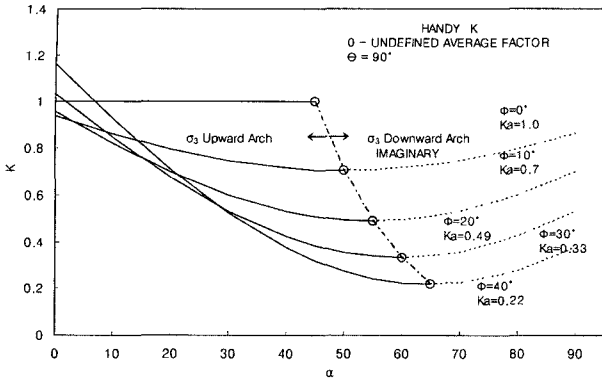


그림 5. 되메움 경사에 따른 K

경우에 대하여 Handy(1985)의 최소주응력을 연결하는 현수선 아치 이론으로서 식 (10)에 의한 그림 5로서 되메움 벽면이 경사지는 경우에 대한 차별화된 수평응력비를 사용할 것을 주장하였다. 그림 5는 Kellogg(1993)에 의해 제안된 경사의 변화에 따른 수평응력비를 나타낸 그림으로서 Handy(1985)의 수평응력비 K_w 를 확장 해석하여 나타낸 것이다. 이에 따르면 되메움 벽면이 수직인 경우에 비하여 되메움 경사면이 완만해질수록 또한 되메움 전단저항각이 클수록 수평응력비 K 는 점차 작은 크기를 갖는 것으로 나타난다. 즉, 이는 되메움 벽면에 작용되는 응력은 수평응력보다 연직응력이 우세하여지는 점을 잘 표현한 것으로 판단된다.

$$K = C_{av} \cdot (\cos^2 \theta + K_a \cdot \sin^2 \theta) \quad (10)$$

여기서, $\frac{1}{C_{av}} = \frac{1}{2} (1 + K_a) + \frac{1}{4} \frac{(\sin 2\theta)(1 - K_a)}{\frac{\pi}{2} - \theta}$

$$K_a = \text{Rankine 주동토압계수}, \theta = 45 + \frac{\phi}{2} + \psi$$

2.3 수평응력비 K_s 에 대한 고찰

본 연구에서는 Handy(1985)의 수평응력비 K_w 를 대칭적인 공간에 적용하여 $\delta = \phi$ 인 거친 벽면에서의 수평응력비 K 에 대한 상수인 C_{av} 값을 그림 6에 표현하였다. 대칭 경사진 경우에 대한 그림 6(a), (b), (c)를 살펴보면 되메움 경사의 증가에 따라 최대주응력 σ_1 과 임의의 수평응력 σ_h 의 비는 점점 그 크기가 작아짐을 나타내고 있다. 이러한 점은 되메움 공간의 크기가 증가함에 따라 응력구속 효과가 저하되는 즉 연직응력의 증가에 따른 수평응력의 증가 역시 발생되기는 하나 그 증가 폭이 미약하여 지는 것으로 판단된다. 이러한 현상은 경사진 되메움 벽면에서의 수평응력이 수직인 면에서보다 작은 크기로 작용되어 질 것이다. 즉, 경사진 면에서의 주응력의 방향이 그림 7과 같은 형태로 점차 회전될 것이며 비대칭의 경우에는 경사진 면에서 최소주응력 σ_3 의 궤적이 보다 편평하여질 것이고 점차 수직면으로 상향의 아치를 그리며 연결될 것으로 사료된다. 이러한 점은 되메움 벽면 좌, 우측 경사정도에 따라 그 모양은 달라질 것이며 되메움 공간의 크기에 따라 상호 간섭에 의한 영향을 보일 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 대칭 경사진 경우에서의 수평응력비를 K_s 로 비대칭 경사진 상태에 적용하였을 경우와, 상호 간섭에 의한 영향을 고려하여 되메움 벽면 좌, 우측의 수평응력비를 평균한 수평응력비 K_{av} 를 기존의 Kellogg(1993) 이론식을 수정한 이론식에 적용하여 실험 및 수치해석

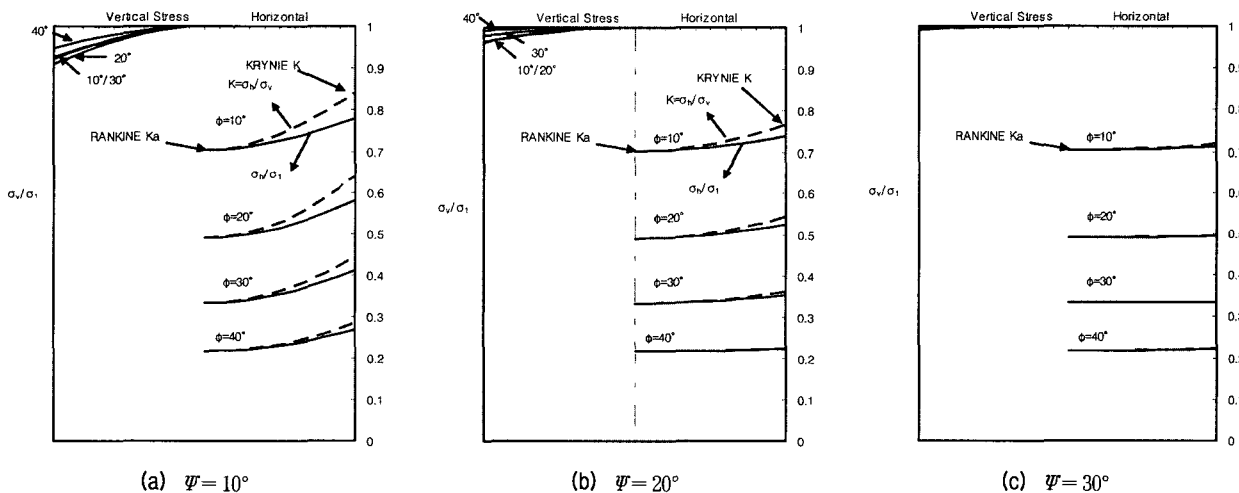


그림 6. 최대주응력에 대한 연직 및 수평응력비

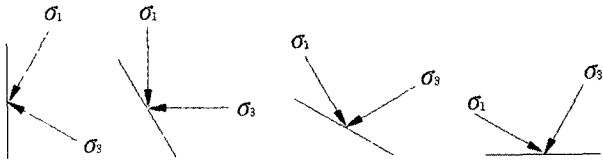


그림 7. 퇴매움 벽면의 경사에 따른 주응력 방향의 변화(φ = 30°)

에 의한 그 적합성을 비교 검토하고자 한다.

2.4 퇴매움 공간 형태를 고려한 Kellogg(1993) 이론식의 수정

기존의 Kellogg(1993) 이론식은 폭이 좁은 트랜치 등이 다양한 대칭 경사를 취할 때 발생하는 응력에 대하여 제안하였다. 그러나 Kellogg(1993) 이론은 경사면의 마찰저항이 아닌 경사 저부의 연직 투영된 경계면에서의 내부마찰각을 사용하고 있고, 퇴매움 벽면 경사가 대칭일 경우로 제한되었다. 그림 8과 같은 비대칭 경사 단면에 작용하는 주응력 방향에 의한 힘의 평형을 취하여 해를 얻으면 Kellogg(1993)에 의하여 제안된 이론식과는 다른 식 (19)를 얻을 수 있다.

$$V + dV - V + d_{PSL} \cdot \sin(\Psi_L + \delta) + d_{PSR} \cdot \sin(\Psi_R + \delta) = \gamma B dh + \frac{\gamma dh^2 \tan \Psi_L}{2} + \frac{\gamma dh^2 \tan \Psi_R}{2} \quad (11)$$

미소항이므로 무시하여 정리하면 식 (12)로 나타낼 수 있다.

$$dV + d_{PSL} \cdot \sin(\Psi_L + \delta) + d_{PSR} \cdot \sin(\Psi_R + \delta) = \gamma B dh \quad (12)$$

$$d_{PSL} = \frac{\sigma_{hL}}{\cos(\Psi_L + \delta)} dh, \quad d_{PSR} = \frac{\sigma_{hR}}{\cos(\Psi_R + \delta)} dh$$

이므로 식 (12)는 식 (13)과 같이 정리된다.

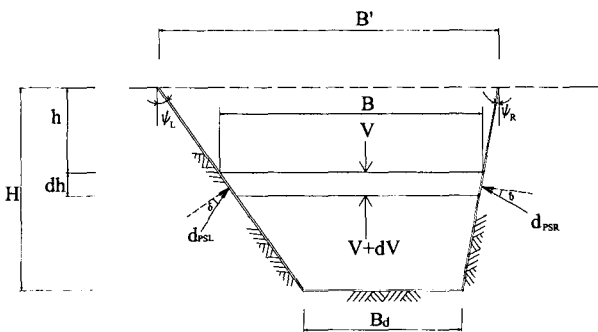


그림 8. 비대칭경사 퇴매움 지반모형

$$dV + \sigma_{hL} \tan(\Psi_L + \delta) dh + \sigma_{hR} \tan(\Psi_R + \delta) dh = \gamma B dh \quad (13)$$

σ_{vL} 및 σ_{vR} 은 임의의 크기 B에 대한 평균 연직응력 $\sigma_{av} = \left(\frac{V}{B}\right)$ 를 식 (13)에 적용하면 식 (14)로 정리된다.

$$dV + K_L \left(\frac{V}{B}\right) \tan(\Psi_L + \delta) dh + K_R \left(\frac{V}{B}\right) \tan(\Psi_R + \delta) dh = \gamma B dh \quad (14)$$

$$dV + \frac{V}{B} dh (K_L \mu_L + K_R \mu_R) = \gamma B dh \quad (15)$$

여기서, $K_1 = K_L \mu_L + K_R \mu_R$, $\mu_L = \tan(\Psi_L + \delta)$,

$$\mu_R = \tan(\Psi_R + \delta)$$

식 (15)를 정리하면,

$$\frac{dV}{dh} + K_1 \frac{V}{B} = \gamma B \quad (16)$$

$$\therefore dh = - \frac{dB}{(\tan \Psi_L + \tan \Psi_R)} \quad \text{이므로 다음의 식 (18)을 얻을 수 있다.}$$

$$\frac{dV}{dB} + K_1 \frac{V}{B} \left(\frac{-1}{\tan \Psi_L + \tan \Psi_R} \right) = \gamma B \left(\frac{-1}{\tan \Psi_L + \tan \Psi_R} \right) \quad (17)$$

여기서, $K_2 = - \frac{K_1}{\tan \Psi_L + \tan \Psi_R}$, $K_3 = - \frac{\gamma}{\tan \Psi_L + \tan \Psi_R}$

$$\therefore \frac{dV}{dB} + K_2 \frac{V}{B} = K_3 B \quad (18)$$

식 (18)은 일계 선형 미분방정식으로, 초기조건 $h=0$, $V=0$ 이면

$$\therefore V = \frac{K_3}{K_2 + 2} \left[B^2 - K_4^2 \left(\frac{K_4}{B} \right)^{K_2} \right] \quad (19)$$

여기서, $B = B_d + (H - h)(\tan \Psi_L + \tan \Psi_R)$,

$$K_4 = B_d + H(\tan \Psi_L + \tan \Psi_R)$$

좌측 퇴매움 경사면과 우측 퇴매움 경사면에 작용하는 수평응력은

$$\sigma_{hL} = K_L \frac{V}{B} = K_L \sigma_{av} \quad (20)$$

$$\sigma_{hR} = K_R \frac{V}{B} = K_R \sigma_{av} \quad (21)$$

여기서, $\sigma_{av} = \frac{V}{B}$

Ψ_L, Ψ_R : 되메움 벽면 경사

B_d : 되메움 저부폭, $\mu_L : \tan(\Psi_L + \delta)$,

$\mu_R : \tan(\Psi_R + \delta)$

3. 실험

3.1 실험장치

실험에 사용된 장치는 그 크기가 2m×1m×1.1m×10mm(가로×세로×높이×두께)로서 강판을 사용하여 제작한 실내모형 토조로서 그림 9(a)와 같다. 토조의 측면 내부는 2mm의 얇은 아크릴판을 사용하였으며 실험 시 발생할 수 있는 측면 마찰이 최소화되도록 제작하였다. 모형 벽면은 그림 9의 (b)와 같이 비교적 가공이 용이한 베이크플레이트를 100cm×10cm×3cm(가로×세로×두께)의 크기 및 경사를 감안하여 각 경사에 맞도록 22개를 제작하였다. 깊이에 따른 수평응력을 측정하기 위하여 저부에서 5단까지는 용량 100kg, 상부 5단 이상에서는 50kg의 하중계를 각각 부착하여 측정하였다. 지반의 조성은 초기 시험에 의하여 측정된 상대밀도에 달하도록 시험방법을 정한 후 강사높이와 강사방법을 결정하였다. 되메움 지반의 조성은 지반이 조밀한 경우에는 강사높이를 단계별로 일정하게 유지되도록 Sand Curtain 방법을 이용한 강사방법에 의하여 지반을 조성하였으며 느슨한 지반인 경우에는 강사높이를 주지 않는 최대한의 느슨한 지반이 되도록 조성하였다. 또한 상대

밀도를 확인하기 위하여 함수비 측정용 캔을 매설하여 실험 후 확인하였다.

3.2 모형지반의 물성

본 연구 모형지반에 사용된 모래는 강원도 동해안 소재 해사로서 염분에 의한 흡착을 배제하고자 담수로서 세척 후 공기 건조시킨 것으로 사용하였으며 사용된 모래의 입도분석 및 기본 물성치는 표 1과 같다. 본 실험에 사용된 해사의 강도정수는 점착력이 없는 사질토이므로 직접전단 시험기를 이용한 전단시험을 시행하여 사용된 해사의 전단저항각 ϕ 를 측정 하였다.

4. 수치해석

본 연구의 수치해석은 유한차분법을 이용한 프로그램인 FLAC 2D를 사용하였다. FLAC 2D 프로그램은 지반 해석용 범용 프로그램으로 다양한 지반공학 문제를

표 1. 모형지반의 기본물성치

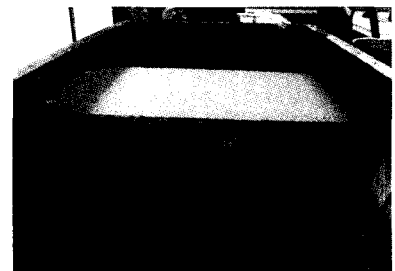
구	분	물 성 치
비	중	2.65
F	M	1.97
균	등 계 수	1.53
곡	률 계 수	1.18
통	일 분 류	SP
내 부 마 찰 각	Dr=72%	42°
	Dr=6.5%	31°



(a) 모형토조



(b) setting 장면



(c) 강사 후 모습

그림 9. 실험장치

표 2. 수치 해석에 입력된 물성치

지 반 상 태		단위중량 r (kN/m ³)	내부마찰각 ϕ (°)	점 착 력 c (Pa)	변형계수 E (MPa)	프와송비
원 지 반		17.66	40	0	105	0.25
되메움 지 반	Dr=72%	15.99	42	0	28	0.25
	Dr=6.5%	13.73	31	0	24	0.30

모델링 할 수 있는 수치해석 프로그램으로 2차원적인 해석을 실시하였다. 수치해석에 사용된 퇴매움 지반은 Mohr-Coulomb의 파괴기준과 탄소성 응력-변형률의 구성관계를 갖는 2차원 평면변형요소를 사용하였고 퇴매움 지반의 기본 물성치는 실내모형 토조실험에 사용된 지반의 물성치를 사용하였으며 퇴매움 지반과 퇴매움 벽면의 경계요소를 두어 이들 상호간에 발생하는 마찰 효과를 고려하였다. 해석 방법은 원지반을 굴착한 후 퇴매움할 때 퇴매움 벽면에 작용하는 응력의 크기 및 형상을 규명하기 위하여 실내모형 토조실험과 같이 퇴매움 벽면의 경사, 벽면마찰, 저부폭의 변화 및 지반 조성상

태를 변화시켜 수치해석을 수행하였다. 본 모델의 입력 물성치는 표 2와 같이 나타내었다.

5. 실험결과 및 분석

5.1 대칭 경사면의 수평응력비 K_s 를 사용한 수평응력 고찰

5.1.1 퇴매움 벽면 경사에 따른 분석

그림 10, 그림 11, 그림 12는 지반을 느슨하게 조성하고 저부폭이 20cm로 동일한 경우 퇴매움 벽면 경사에

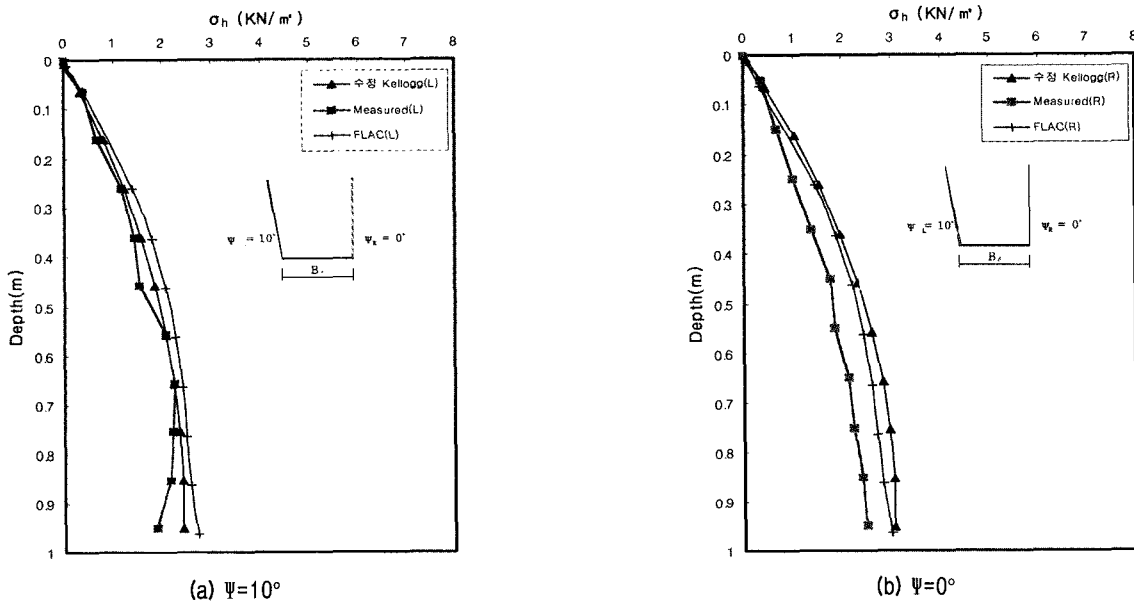


그림 10. 지반 느슨, 저부폭 20cm, 퇴매움 경사 좌10° 우0°

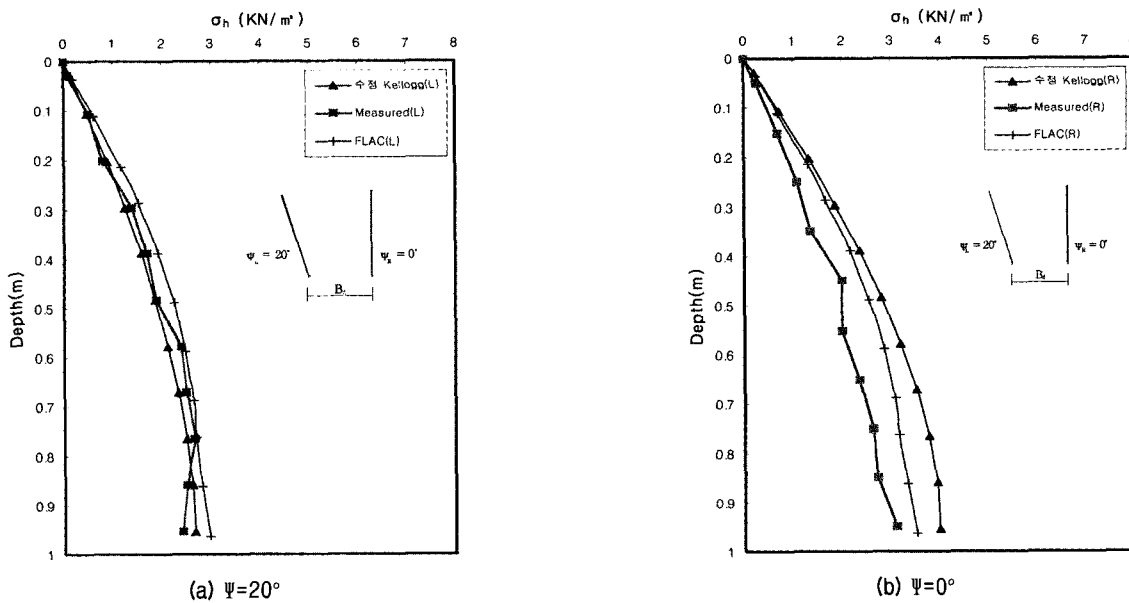


그림 11. 지반 느슨, 저부폭 20cm, 퇴매움 경사 좌20° 우0°

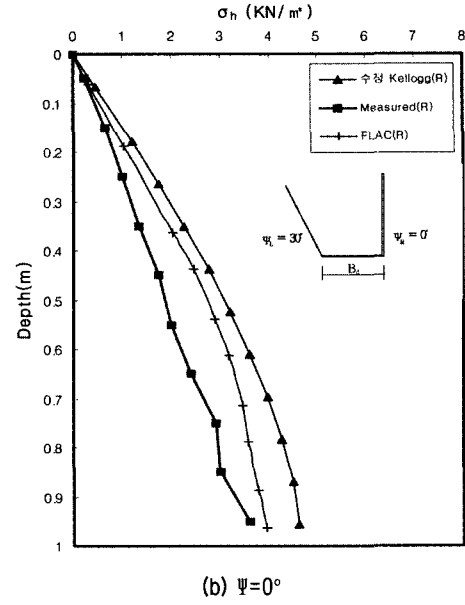
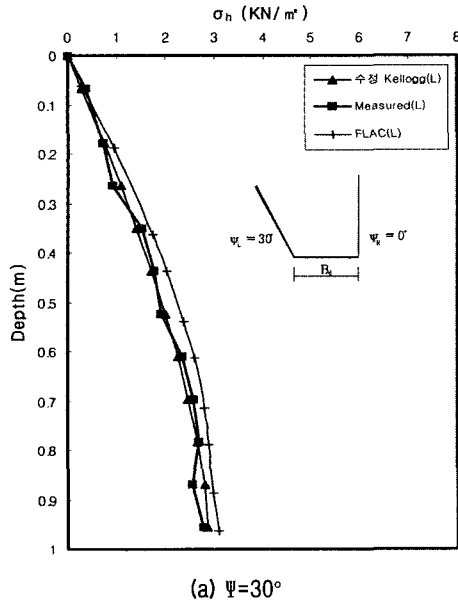


그림 12. 지반 느슨, 저부폭 20cm, 되메움 경사 좌30° 우0°

따른 비교 분석이다. 실험결과는 경사진 벽면에서보다 수직인 벽면에서의 수평응력 크기가 더 큰 것으로 나타났다. 이러한 경향은 수치해석, 수정 Kellogg 이론식 모두에게서 동일한 경향을 보였다. 그러나 그 크기에 있어서는 경사진 벽면에서는 실험결과, 수치해석, 대칭 경사면에 대한 수평응력비 K_s 를 사용한 수정 Kellogg 이론식이 비교적 유사한 크기를 갖는 반면 수직인 벽면에서는 다소 그 크기에 차이를 보였다. 이러한 점은 경사가 증가할수록 수정 Kellogg 이론식에 대칭 경사면에 대

한 수평응력비 K_s 를 사용한 수평응력의 산정이 실험결과 및 수치해석 결과에 비하여 더욱 상이하여지는 결과를 그림 10(b), 그림 11(b), 그림 12(b)에서 보이고 있다.

5.1.2 되메움 저부폭 증가에 따른 분석

그림 13, 그림 14, 그림 15는 되메움 벽면 경사를 10°, 지반을 조밀하게 조성했을 때 되메움 저부폭의 증가에 따른 수평응력을 비교한 것이다. 되메움 저부폭을 증가시키는 경우 수정 Kellogg 이론식에 대칭경사의 수평응

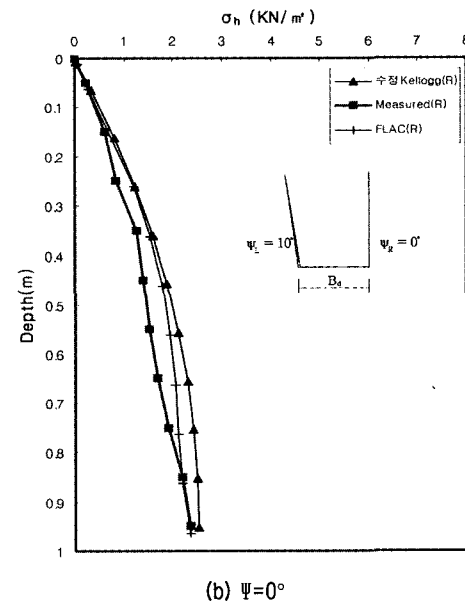
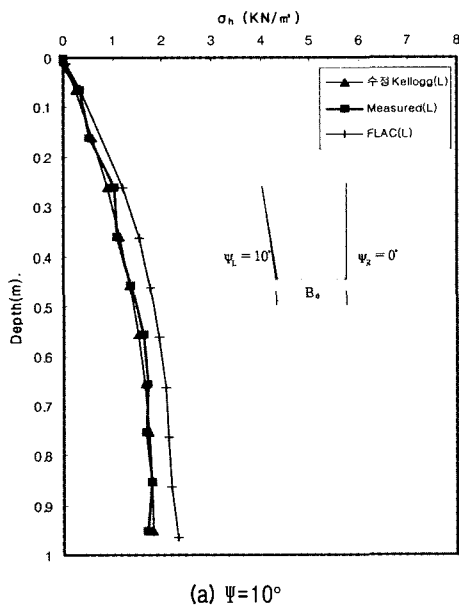
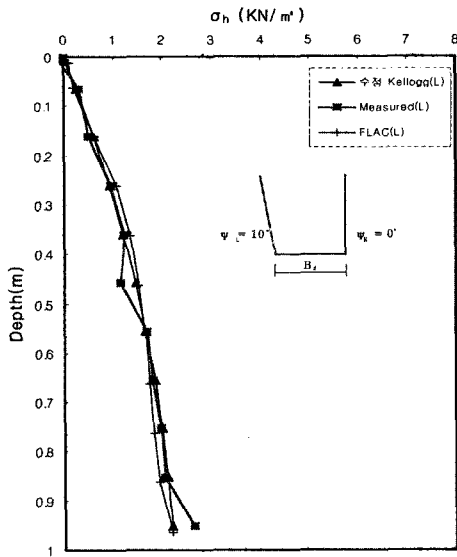
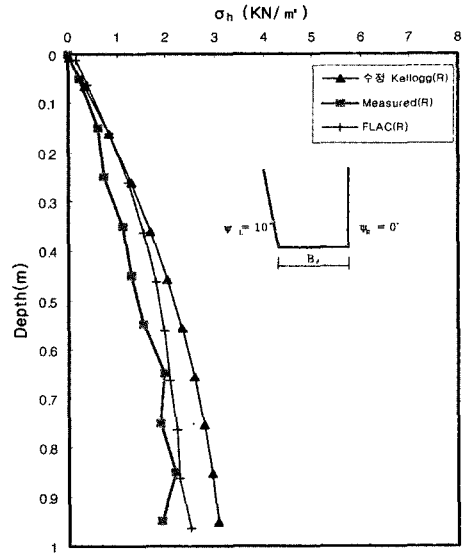


그림 13. 지반 조밀, 저부폭 20cm, 되메움 경사 좌10° 우0°

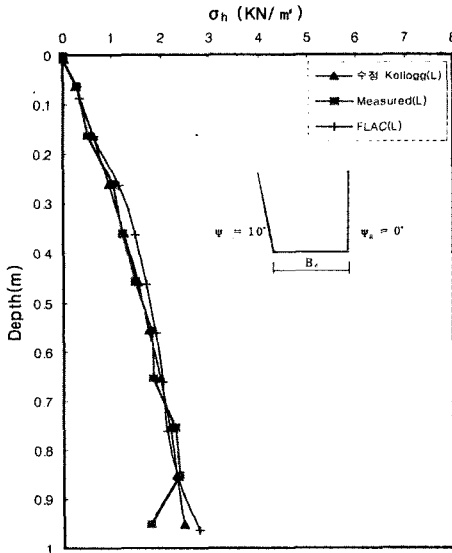


(a) $\Psi=10^\circ$

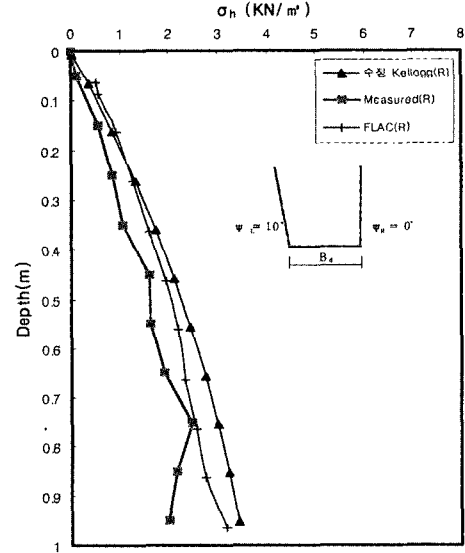


(b) $\Psi=0^\circ$

그림 14. 지반 조밀, 저부폭 30cm, 되메움 경사 좌 10° 우 0°



(a) $\Psi=10^\circ$



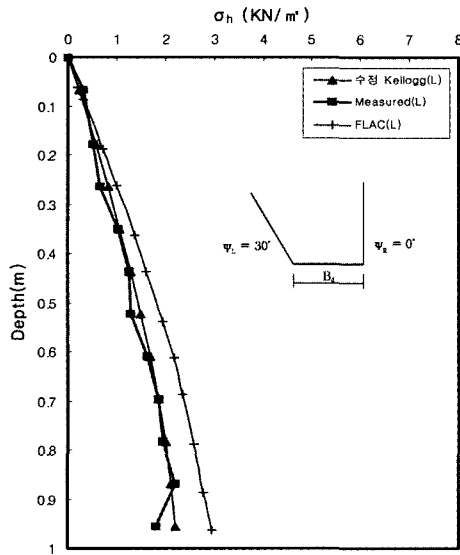
(b) $\Psi=0^\circ$

그림 15. 지반 조밀, 저부폭 40cm, 되메움 경사 좌 10° 우 0°

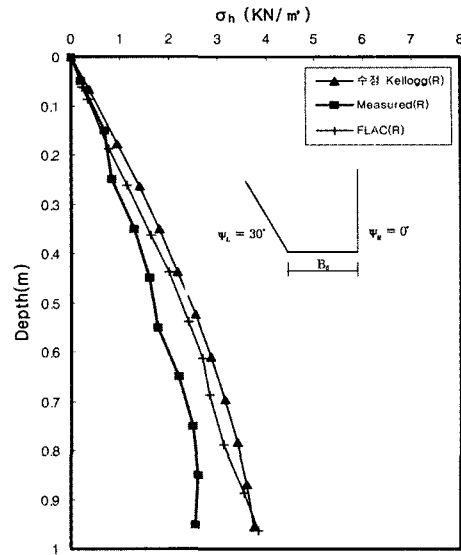
력비 K_s 를 적용하여 산출된 수평응력은 실험결과, 수치 해석 결과에 매우 유사한 크기와 분포 경향을 보였다. 그러나 수직인 벽면에서의 수평응력은 되메움 폭을 증가시킬수록 실험결과 및 수치해석의 결과에 상이한 경향을 나타내고 있다. 이러한 점은 비대칭 상태에서 경사 및 되메움 폭이 증가하는 경우에서 대칭의 경우를 고려한 수평응력비 K_s 는 수직인 벽면에 대한 경계조건 상이함이 나타나는 것으로 판단된다. 따라서 비대칭한 경우에는 대칭을 경계조건으로 한 수평응력비의 적용은 불합리 한 것으로 판단된다.

5.1.3 지반 조성상태에 따른 비교

되메움 저부폭이 30cm이며 좌측 되메움 경사가 30° , 우측은 수직으로 구현하고 지반을 각각 느슨하고 조밀하게 조성하였을 때의 결과를 그림 16, 그림 17에 나타내었다. 지반이 느슨하게 조성되었을 때의 되메움 수평응력이 조밀하게 조성되었을 때의 되메움 수평응력보다 크게 나타났다. 이는 지반조성 상태에 따른 벽면 마찰이 응력에 미치는 영향을 잘 표현하는 것으로 판단된다. 이러한 결과는 실험, 수치해석, K_s 를 사용한 수정된 Kellogg 이론식 모두에게서 같은 경향을 보이고 있다.

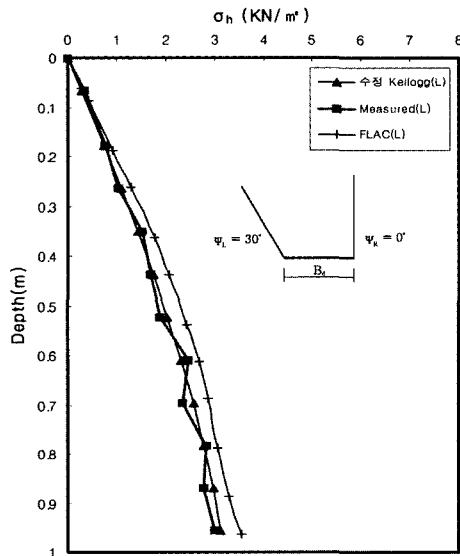


(a) $\Psi=30^\circ$

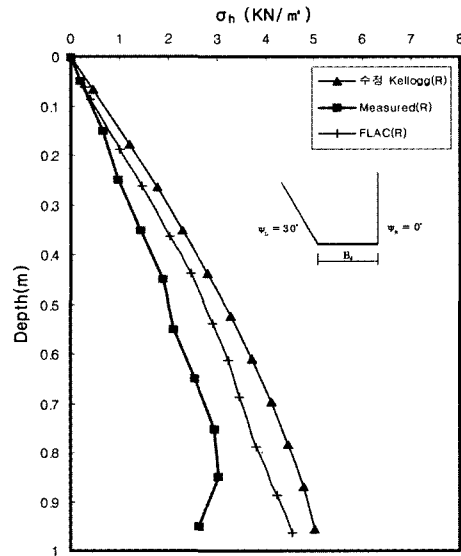


(b) $\Psi=0^\circ$

그림 16. 지반 조밀, 저부폭 30cm, 되메움 경사 좌30° 우0°



(a) $\Psi=30^\circ$



(b) $\Psi=0^\circ$

그림 17. 지반 느슨, 저부폭 30cm, 되메움 경사 좌30° 우0°

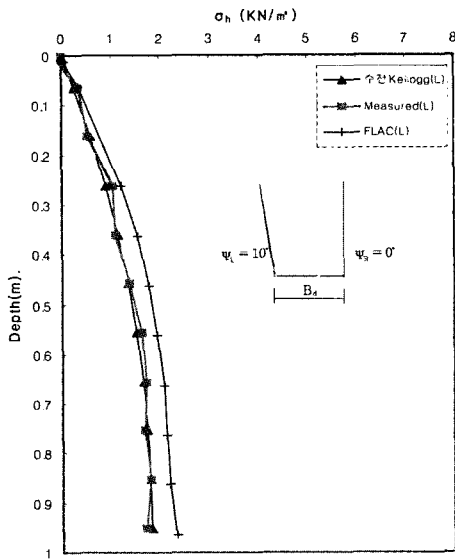
그러나 수직인 벽면에서의 실험결과와 수치해석 결과는 K_s 를 사용한 수정 Kellogg 이론식으로 산출된 결과와는 역시 상이한 크기의 분포를 보였다.

5.2 실험결과 및 수정 Kellogg 이론식에 대한 평균 수평응력비 K_{av} 적용에 대한 비교

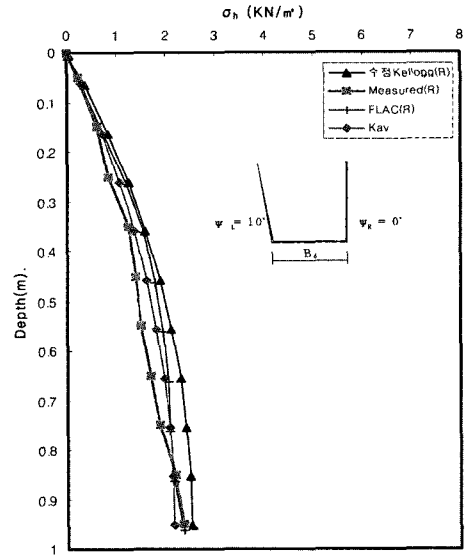
지반을 조밀하게 조성하고 되메움 벽면의 경사를 좌측 10°, 우측을 수직으로 구현한 후 실험한 결과와 수정 Kellogg 이론식을 비교한 것을 그림 18과 그림 19에 나

타내었고 그림 20, 그림 21은 지반을 느슨하게 조성하고 되메움 벽면의 경사를 30°, 우측을 수직으로 구현한 후 실험 결과이다. 되메움 벽면 경사가 10° 및 30°로 경사진 경우에는 수정 Kellogg 이론식과 매우 흡사하지만 수직인 벽면과는 다소 차이가 있다.

그러나, 수정 Kellogg 이론식에서 수평응력비 K_s 를 좌, 우측 벽면의 경사에 따른 평균값을 취하여 수평응력을 산출한 결과는 실내모형 토조실험과 수치해석에서의 수직인 벽면에서 나타나는 수평응력의 크기와 유사하여지는 것으로 나타났다. 따라서 보다 수직인 벽면에

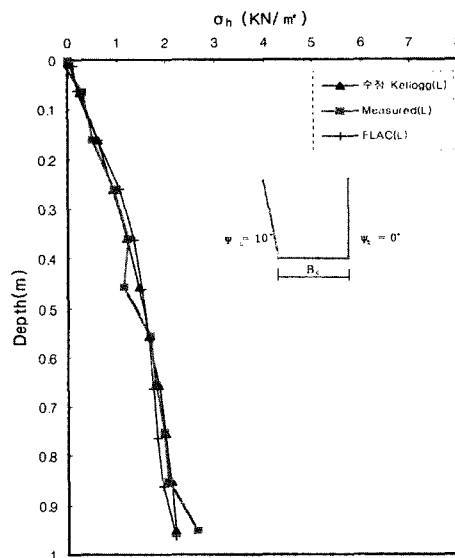


(a) $\Psi=10^\circ$

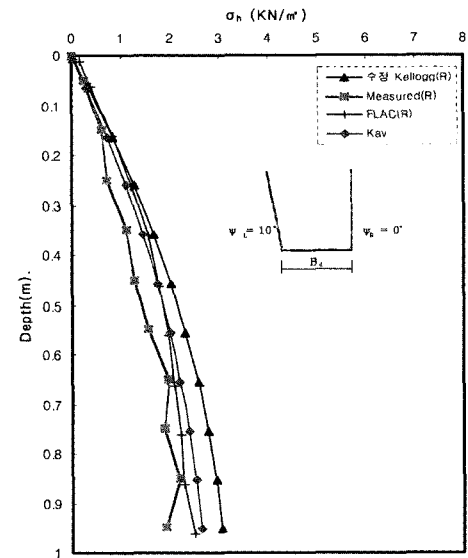


(b) $\Psi=0^\circ$

그림 18. 지반조밀, 저부폭 20cm, 되메움 경사 좌10° 우0°



(a) $\Psi=10^\circ$



(b) $\Psi=0^\circ$

그림 19. 지반 조밀, 저부폭 30cm, 되메움 경사 좌10° 우0°

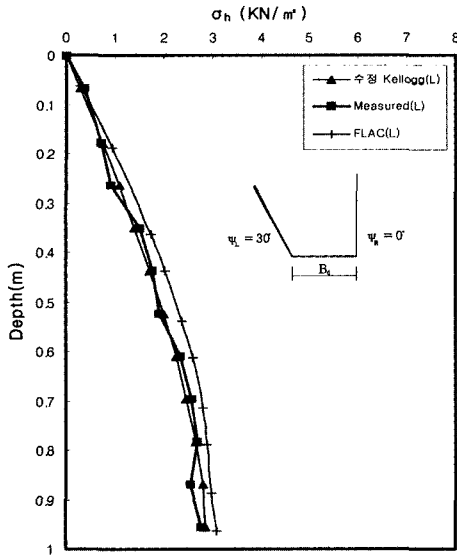
작용되는 수평응력비는 대칭한 경우에 대한 좌, 우측 벽면의 수평응력비 K_s 를 평균하여 적용하는 것이 보다 실제에 가까울 것으로 판단된다.

6. 결론

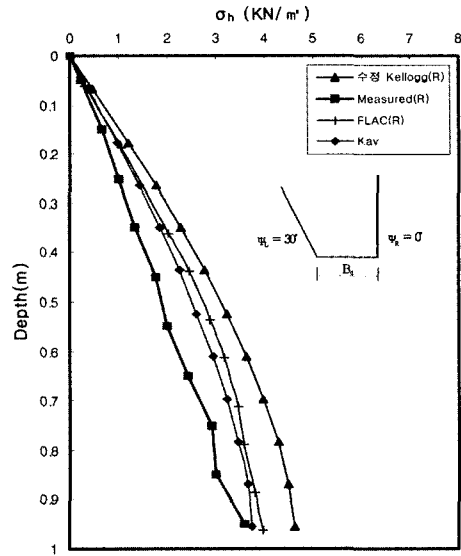
비대칭적으로 형성되는 되메움 공간에서의 응력산출을 위한 수평응력비의 적용에 있어 기존의 Kellogg(1993)가 제안한 수평응력비 K_s 와 비대칭 되메움 공간을 고려하는 평균 수평응력비 K_{av} 를 수정 Kellogg 이론식에

적용하여 실험한 결과와 수치해석 결과에 비교 검토한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 지반의 조성상태가 동일한 경우, 되메움 벽면 경사가 비대칭으로 경사진 경우의 실험 측정값은 경사진 벽면에서는 수정 Kellogg 이론식과 매우 유사한 크기 및 분포를 보이지만 수직인 벽면일 경우에는 다소 차이를 보였다. 이러한 이유는 경사진 벽면으로 되메움 흙의 자중이 이동되는 벽마찰에 의한 구속 효과가 둔화된 결과가 반영된 것으로 사료된다.

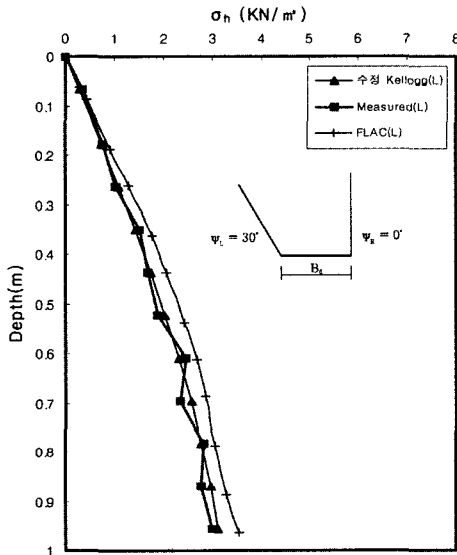


(a) $\Psi=30^\circ$

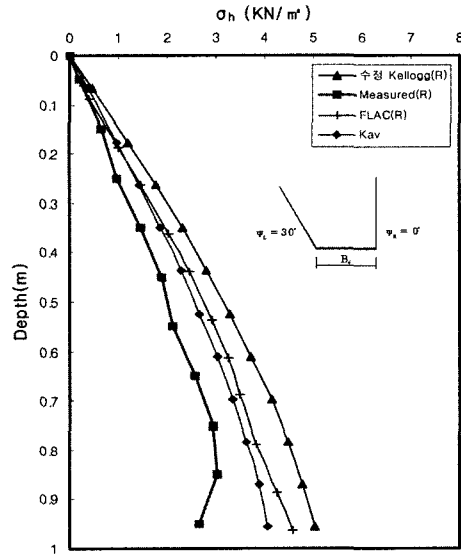


(b) $\Psi=0^\circ$

그림 20. 지반느슨, 저부폭 20cm, 되메움 경사 좌30° 우0°



(a) $\Psi=30^\circ$



(b) $\Psi=0^\circ$

그림 21. 지반 느슨, 저부폭 30cm, 되메움 경사 좌30° 우0°

이러한 점은 비대칭 상태에서 경사 및 되메움 폭이 증가하는 경우에서 대칭 경사진 벽면의 경우를 고려한 수평응력비 K_s 는 수직인 벽면에 대한 적용은 불합리한 것으로 판단된다.

- (2) 대칭 경사진 되메움 벽면에 적용하는 수평응력비를 비대칭 벽면에 적용시킬 경우에 이를 평균한 K_{av} 를 사용한 결과, 수직인 벽면에 작용하는 수평응력의 크기 및 분포가 수정 Kellogg 이론식과 유사하게 나타났으며 수치해석의 결과에 그 크기 및 분포가 유사하였다. 따라서 되메움 벽면이 비대칭한 경우

보다 수직인 벽면에서의 수평응력비의 적용은 대칭 상태에서의 수평응력비를 산술 평균 적용함이 보다 실험결과 및 수치해석 결과에 근접하여지는 것으로 나타났다.

- (3) 지반 조성상태에 따라 되메움 수평응력은 조밀하게 조성되었을 때보다 느슨하게 조성되었을 때의 수평응력이 크게 나타났으며 이는 벽면 마찰의 효과가 아칭 영향에 미치는 점이 표현되는 것으로 판단되며 실험결과, 수치해석 및 수정 Kellogg 이론식에서 동일하게 나타났다.

참 고 문 헌

1. 문창열 (1997), 좁은 공간에서의 퇴매움 토압에 관한 연구, 박사 학위 청구논문, 단국대학교.
2. 문창열 (1999), "비대칭 좁은 공간에서의 퇴매움 토압에 관한 연구", 한국지반공학회논문집, 한국지반공학회, 제15권, 제4호, pp. 261-277.
3. FLAC (1996), Fast Lagrangian Analysis of Continua, Ver.3.3, ITASCA CONSULTING GROUP, INC.
4. Handy, R.L. (1985), "The arch in soil Arching", JGE. ASCE, Vol.111, No.3, Mar., pp.302-318.
5. Janssen, H.A. (1985), "Versuche uber Getreidedruck in Silozeuen", Z. Ver. deut Ingr. Vol.39, pp.1045.
6. Kellogg, C.G. (1993), "Vertical Earth Loads on Buried Engineered Works", JGE., ASCE. Vol.119, No3, pp.487-506.
7. Krynine, D.P. (1945), Discussion of "Stability and Stiffness of cellular cofferdams" by Karl Terzaghi, Transactions, ASCE, Vol.110, pp.1175-1178.
8. Marston, A. and Anderson, A.O. (1913), "The Theory of Loads On pipes in Ditches and Tests of cement and clay drain Tile and Sewer pipe", Iowa Engineering Experiment station Bulletin, Iowa state college, Ames, Iowa, No.31.

(접수일자 2004. 10. 21, 심사완료일 2004. 11. 24)