

대칭적으로 경사진 되메움된 공간에서의 수평토압에 대한 수정연구

A Modification Study on Horizontal Earth Pressure in the Symmetrically Sloped Backfilled Space

문창열*

Moon, Chang-Yeul

Abstract

Marston (1913) and Spangler's (1982) theory was widely used in the analysis of the earth pressure of the narrow and long excavated ditch type backfield ground. Their theory was more clearly explained by expressing the minor principle stress arch connecting the minor principle stress link induced by interaction between the excavated wall surface and the backfilled earth. which was done by R.L. Handy(1985). Later C.G. Kellogg(1993) extended the study from vertical symmetric to incline symmetric in the backfill space type research. In the C.G. Kellogg's study, it is assumed that the resistance of wall friction on the sloping wall could be replaced by the internal friction angle in the sloping section bottom. In the study, the resistance of wall friction in the sloping section bottom, which was applied by C.G. Kellogg, would be different in magnitude with the resistance of wall friction in sloping section. The magnitude is expected to affect in the earth pressure calculation and verified by the soil test box, the C.G. Kellogg's theory, the numerical analysis and the modified C.G. Kellogg's theory considering the friction resistance to influence the incline wall.

Keywords : minor principle stress arch, wall friction, internal friction angle, soil test box,

요 지

좁고 길게 굴착된 고랑형태의 되메움 지반의 토압에 관한 해석에 널리 사용되어져 오던 Marston(1913), Spangler(1982) 이론은 R.L. Handy(1985)가 굴착벽면과 되메움 흙과의 상호작용에 의한 최소주응력의 고리를 연결한 최소주응력 아치로서 표현함으로써 보다 명확한 설명이 가능하게 되었다. 이후 C.G. Kellogg(1993)는 지금까지 주로 수직하게 대칭된 공간만을 대상으로 논의 되오던 되메움 공간형태를 경사지게 대칭된 공간형태에 대하여 연구를 확장하였다. 발표된 C.G. Kellogg(1993) 이론식은 이론식의 도출 과정에 있어 경사 벽면의 마찰저항이 아닌 경사단면 저부에서 연직한 되메움 흙 자체의 내부 마찰의 크기로서 가정하였다. 본 연구는 C.G. Kellogg가 적용한 경사단면 저부에서 연직된 면의 마찰저항은 경사진 단면에서의 마찰저항과는 다른 크기를 갖을 것이며 이 크기는 토압 산출에 영향을 미칠것으로 판단되어 이를 실내모형 토조실험, C.G. Kellogg(1993) 이론식, 수치해석, 실제 경사벽면에 미치는 마찰저항을 고려한 수정된 C.G. Kellogg 이론식으로 규명하고자 하였다.

주요어 : 최소주응력 아치, 벽마찰, 내부마찰각, 실내모형토조

* 정회원 · 삼척대학교 토목공학과 교수

1. 서론

상·하수도, Gas 관, 통신구, 전력구 등의 시공은 일반적으로 지반을 좁고, 길게 굴착한 다음 시설물을 설치하고 되메움을 하게 된다. 지금까지 되메움 토압에 관한 해석은 주로 수직인 굴착 단면에 대하여 국한 되었으나, C.G. Kellogg(1993)는 이러한 시공이 현장의 상황에 따라 경사구배를 취하는 점에 착안하여 이론식을 제안하였다. C.G. Kellogg는 기존의 R.L. Handy(1985)의 최소주응력의 고리를 연결한 최소주응력 아치 이론을 적용하여 수평토압비 K 와 일계 선형미분방정식으로 산출식을 제안하였다.

제안된 C.G. Kellogg(1993) 이론식은 이론식의 도출 과정에 있어 경사 벽면의 마찰저항이 아닌 경사단면 저부에서 연직인 되메움 흙 자체의 내부 마찰의 크기로서 가정하였다. 그러나 C.G. Kellogg가 적용한 경사단면 저부에서 연직인 면의 마찰저항은 경사진 단면에서의 마찰저항과는 그 크기가 다를 것이며 그 크기는 토압 산출에 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 이를 실내모형 토조실험, C.G. Kellogg(1993) 이론식, 수치해석, 실제 경사벽면에 미치는 마찰저항을 고려한 수정된 C.G. Kellogg 이론식으로 규명하고자 하였다.

2. Kellogg 이론의 고찰

2.1 되메움 공간 형태를 고려한 일반식의 고찰

Kellogg(1993)는 되메움 공간의 형태가 기존의 좁고 수

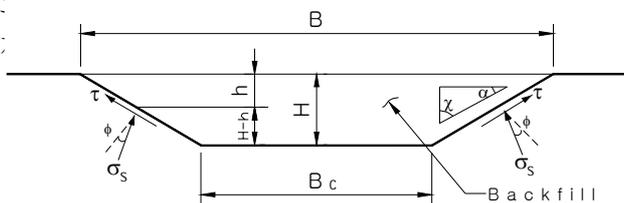


그림 1. 대칭경사 되메움 지반모형

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

여기서 $K_1 = \frac{-K \cdot \mu}{\tan \psi}$, $K_2 = \frac{-\gamma}{2 \tan \psi}$,
 $K_3 = B_c + 2H \tan \psi$

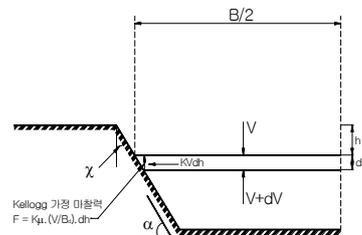
K = 힘응력비,

μ = 되메움 흙과 원지반면의 마찰계수($\tan \phi$),

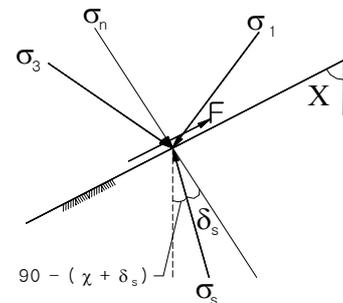
γ = 흙의 단위중량,

B = 임의 높이에 대한 되메움 층간의 폭,

B_c = 굴착 저면 바닥폭



(a) Kellogg가 가정한 단면의 힘의 평형



(b) 굴착면에서의 응력

그림 2. 경사면에서의 힘의 평형

Kellogg는 굴착면 바닥 저부 경사면 단부에서 연직인 부분에서의 흙은 마찰에 의한 마찰의 크기 $F = \sigma_{av} \cdot \tan \phi$ 로서 가정하였다. 여기서 σ_{av} 는 임의 높이에 대한 흙자중의 연직응력으로서 벽면에서의 크기와 단면 중앙부에서의 크기가 다르므로 단면폭 B 에 대하여 평균한 평균연직응력을 의미한다. 그림 1에서와 같은 되메움 공간은 굴착면(또

는 구조물)의 변위라든가 바다면의 침하등을 배제한다면 그림 2와 같이 되메움흙에 의한 연직력은 벽면에 수직한 힘과 벽면에서의 마찰저항(전단저항)으로서 벽면과 수직면에 대하여 벽면마찰각 σ_s 를 가지는 힘으로 표현할 수 있다. 따라서 벽면에서 연직 및 수평하게 작용하는 각각의 응력을 다음으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_v = \sigma_s \cdot \sin(\delta_s + \psi) \quad (2)$$

$$\sigma_h = \sigma_s \cdot \cos(\delta_s + \psi) \quad (3)$$

여기서 $K = \frac{\sigma_h}{\sigma_v}$ 를 수평응력비라 놓고 그림 2(a)와 같은 단면에서의 힘의 평형을 고려하면 다음과 같다.

$$V + dV - V + 2\sigma_v \cdot dh - \gamma Bdh = 0 \quad (4)$$

$$dV + 2K \frac{\sigma_v \cdot \sin(\delta_s + \psi)}{\cos(\delta_s + \psi)} dh = \gamma Bdh \quad (5)$$

$$\frac{dV}{dh} + 2K \cdot \mu' \left(\frac{V}{B} \right) = \gamma Bdh \quad (6)$$

여기서

$$\mu' = \tan(\delta_s + \psi)$$

$$B = B_c + 2(H - h) \cdot \tan \psi$$

$$dB = -2 \tan \psi \cdot dh$$

$$K_1 = -\frac{K \cdot \mu'}{\tan \psi}$$

$$K_2 = \frac{-\gamma}{2 \tan \psi}$$

$$\frac{dV}{dB} + K_1 \frac{V}{B} = K_2 B \quad (7)$$

(7)식의 해를 구하면

$$V = \frac{K_2}{2 + K_1} [B^2 - K_3^2 \left(\frac{K_3}{B} \right)^{K_1}] \quad (8)$$

$$K_3 = B_c + 2H \tan \psi$$

이상에서 살펴본듯 기존 Kellogg가 발표한 식과 동일하나 벽면마찰항으로 표현되는 $\mu = \tan \delta_s$ 가 경사기울기 요

소를 감안한 $\mu' = \tan(\delta_s + \psi)$ 로 바뀐 것에 불과하다. 그러나 이 차이는 실제 토압의 평가에 있어서 상당한 차이를 가져온다. 따라서 본 연구에서는 모형토조실험, FLAC 2D를 이용한 수치해석 및 기존 Kellogg(1993)식, 수정된 Kellogg식을 사용 비교 검토하고자 한다.

2.2 수평응력비 K

Handy(1985) 및 Kellogg(1993)에 의하여 되메움 공간이 수직 또는 경사지게 형성된 공간에 대하여 각각 제안된 수평응력비 K는 Handy(1985)의 최소주응력을 연결하는 현수선 이론을 Kellogg(1993) 또한 충실히 따른 것으로 조사 되었으며 그 결과는 정확히 일치함을 보였고, 단지 그 결과를 도출함에 있어 되메움 공간의 형태만이 달리 고려 되었음이 확인 되었다. 본 연구에서의 수평응력비의 사용은 Kellogg(1993)가 제안한 다음의 식 (9)를 사용하기로 한다.

$$K = C_{av} \cdot (\cos^2 \theta + K_a \cdot \sin^2 \theta) \cdot \quad (9)$$

여기서

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

$$K_a = \text{Rankine 주동토압계수}$$

$$\theta = 45 + \frac{\Phi}{2} + \psi, \quad \Phi = \text{되메움 지반의 전단저항각}$$

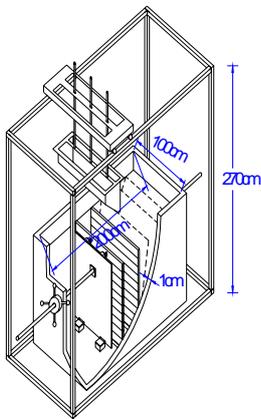
$$\Psi = \text{연직면과 굴착면의 경사각}$$

3. 실험

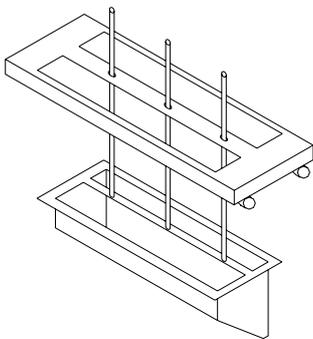
3.1 실험장치

실험에 사용된 장치는 2m×1m×1m×10mm(가로×세로×높이×두께)의 강판을 사용하여 제작한 실내 모형토조로서 그 형태는 그림 3과 같다. 토조의 측면 내부는 2mm의 얇은 아크릴판을 사용하였으며 실험시 발생할 수 있는 측면 마찰이 최소화되도록 제작하였다. 모형벽체 및 되메움 모형지반조성장치는 그림 3의 (c)와 같이 비교적 가공이 용이한 베이크 플레이트를 100cm×10cm×3cm(가로×세로×두께)의 크기 및 경사도를 감안하여 각 경사도에 맞도

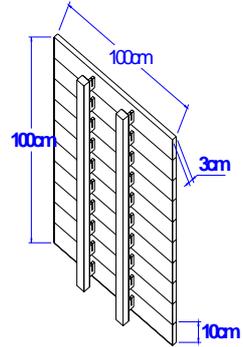
록 22개를 제작하였다. 깊이에 따른 수평토압을 측정하기 위하여 저부에서 5단까지는 용량 100kg, 상부 5단 이상에서는 50kg의 하중계를 각각 부착하여 측정하였다. 벽마찰에 의한 영향을 구현하기 위하여 벽면 및 경사면의 모형판에는 직접전단시험에 의하여 되메움 지반 조성시 사용된 강사용 모래의 내부마찰각과 동일한 거친 거칠기의 샌드페이퍼를 직접전단시험을 통하여 선정 부착 후 실험하였다. 연직력의 측정은 되메움 저부쪽의 크기만큼 베이크 플레이트를 저부쪽에 따라 각각 제작하여 100kg의 하중계를 부착하여 측정하였다. 사용된 하중계는 $\pm 10\text{gr}$ 의 정밀도를 지닌 국내산 (봉신 Load cell co)을 이용하였다. 자료의 출력은 Validyne(U.S.A)회사 제품의 UPC-601과 NEC(일산) 제품의 Remote Scanner DE1200을 설치한 후 컴퓨터와 연결하여 자동으로 출력된 후 저장되도록 하였다. 또한, 깊이별 측정을 위한 분리된 모형 벽체간의 상호간섭이나 모래의 침입을 방지하기 위하여 벤토나이트를 묽게 반죽하여 처리하였다. 되메움 지반 조성장치는 지반이 조밀한 경우에는 강사높이가 단계별로 일정하게 유지되어 되메움 지반이 목적에 맞게 일정하도록 시행하였다.



(a) 모형토조의 개략도



(b) 강사기



(c) 베이크 플레이트

그림 3. 실험장치

3.2 모형지반의 물성

본 연구 모형지반에 사용된 모래는 강원도 삼척시 근덕면 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 전단 저항각 ϕ 를 측정 하였다.

표 1. 모형지반의 기본물성치

단위중량 γ (t/m ³)	내부마찰각 ϕ (°)	점착력 C (t/m ²)
1.61	38°	0

3.3 실험 방법

본 실험에 적용된 실험의 종류는 표 2와 같으며 실험은 목적인 굴착공간의 크기에 따라 베이크 플레이트로 제작된 모형 벽체를 설치한 후 수평토압 측정기기 및 연직토압 측정기의 초기화를 시행하고 지반의 밀도가 목적인 값에 이르도록 강사높이를 미리 시행착오에 의한 방법으로 얻은 다음 시행하였다. 또한 목적인 지반의 밀도를 확인하기 위하여 각 층당 함수비 측정용 용기를 바닥면, 30cm, 60cm 높이에 각각 매설한 다음 실험이 끝난후 회수하여 이를 확인하는 방법을 사용하였다.

표 2. 실험 종류

단위중량 γ (t/m ³)	내부마찰각 ϕ (°)	퇴메움 지반 저부폭 (cm)	연직면에 대한 굴착 경사각 Ψ (°)
1.61	38°	10 cm	0°
			10°
			20°
			30°
		20 cm	0°
			10°
			20°
			30°

4. 수치 해석

본 연구의 수치해석은 다양한 지반공학 문제를 유한차분법으로 모델링하는 이차원 수치해석 프로그램인 FLAC을 사용하였다. 해석 방법은 토조모형 실험과 같은 형상으로 모델링하고 퇴메움의 하부폭에 따른 굴착면의 각을 변화시키면서 실험과 동일한 퇴메움 과정을 거친 후 연직도압 및 수평도압이 출력되도록 하였다. 퇴메움 지반은 Mohr-Coulomb의 파괴기준과 탄소성-응력변형율의 구성관계를 갖는 2차원 평면요소를 사용하였으며, 퇴메움 지반의 기본 물성치는 모형실험에 사용된 지반의 물성치를 사용하였다. 퇴메움 지반의 변형계수 및 프와송비는 삼축 압축 시험기를 이용하여 얻어진 결과를 사용하였고 원지반의 변형계수 및 프와송비는 일반적인 지반을 가정하여 대표값을 적용하였으며 본 모델의 입력물성치는 표 3과 같다.

표 3. 수치 해석에 입력된 물성치

	단위중량 γ (t/m ³)	내부 마찰각 ϕ (°)	점착력 c (t/m ²)	탄성계수 E (MPa)	프와송비 ν
원지반	1.8	40	0	105	0.25
퇴메움 지반	1.61	38	0	80	0.3

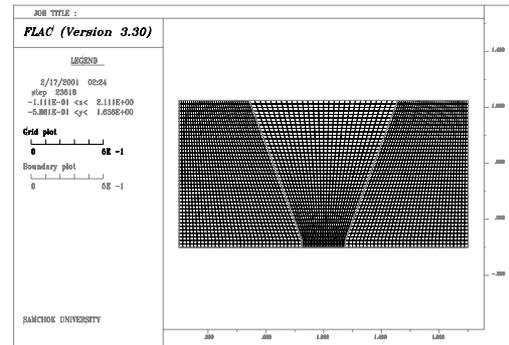


그림 4. FLAC 해석단면 Mesh

5. 실험결과 및 분석

5.1 퇴메움 공간이 연직인 경우에 대한 비교 분석

그림 5, 그림 6는 퇴메움 폭 20cm, 굴착면이 수직인 경우에 대하여 기존 Marston(1913), Handy(1985), 수정 Kellogg, 수치해석 결과를 나타낸 것으로서 그동안 널리 사용되던 이론들과 수정된 Kellogg식이 모형토조실험에서 얼마 만큼 검증 되겠는지의 여부를 확인한 결과이다. 그림 5, 그림 6에서의 모든 결과치의 영향은 유사하나 토압의 크기에 있어 Handy(1985) 및 수정 Kellogg식의 결과치는 정확히 일치하며 실험결과보다 약간 크게 나타났다. 그러나 Marston(1913)식의 결과는 퇴메움 높이에 따라 실험결과보다 약간 크거나 작은 모양을 보이며 수치해석 결과보다 작은 크기를 나타냈다. 이러한 이유는 Marston(1913)의 식 중 수평도압비의 적용에 있어 Rankine의 주동도압계수가 사용된 점이다. Rankine의 주동도압계수가 $K_a = \sigma_3 / \sigma_1$ 인 점에 비추어 보면 실제 벽면에 작용되어지는 응력은 최대 및 최소주응력의 크기를 갖지 않으며 또한 최대 및 최소주응력은 전단력이 "0"인 면에 작용하여야 하므로 이론 및 실제 거동 상태에도 부합되지 않는 까닭으로 보인다. 수치해석에 의한 결과는 Handy(1985) 및 수정 Kellogg식과 실험결과의 중간 값을 나타냈으며 굴착벽면이 퇴메움 단계에서 응력전이에 의한 아칭현상을 나타내는 분포형태를 보였다. 실제현장에서 퇴메움 상태의 응력은 이와 같을 것으로 판단된다. 이상에서 살펴보듯이 수정 Kellogg 이론식은 굴착면이 수직인 경우에도 적용할수 있음이 확인됐으며 수치해석 결과로는 퇴메움 토압에 의하여 벽체의 응력전이에 의한 아칭효과도 퇴메움 토압에 영향을

미치는 것으로 확인되었다.

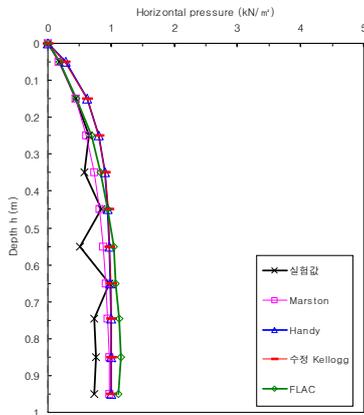


그림 5. $B_c=10\text{cm}$, $\psi=0^\circ$

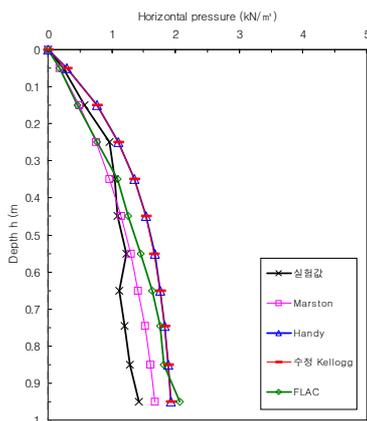


그림 6. $B_c=20\text{cm}$, $\psi=0^\circ$

5.2 경사진 대칭굴착면에 대한 비교분석

5.2.1 경사도에 따른 비교분석

그림 7, 그림 8, 그림 9는 되메움 저부폭 10cm, 연직면에 대한 경사도 $\psi = 10^\circ$, $\psi = 20^\circ$, $\psi = 30^\circ$ 에 대한 결과를 나타내었다. 결과에 따르면 경사도의 증가에 따라 즉 되메움 공간의 크기가 커질수록 당연히 토압의 크기는 증가되었으나 그 분포형태에 있어 수정된 Kellogg 이론식은 점차 정수압적인 삼각형분포를 보이고 있으며 실험결과와 수치 해석은 매우 근사한 분포 경향을 나타내었다. 이러한 결과는 벽면마찰과 깊이가 증가함에 따라 줄어지는 되메움 공간의 형태, 벽체의 응력 재분포에 따른 아칭 영향이 복합적

으로 작용되는 점등을 반영할수 있으나, 수정된 Kellogg식에서는 원 지반의 물성을 반영시키는 요소는 없지만 그 크기나 분포는 매우 유사하였으며 보다 안전측의 값을 갖는 것으로 판단된다. 그러나 Kellogg식은 그 크기나 경향이 상이한 형태를 보이고 있는데 이는 본 연구 서론에서 예상한 대로 결과를 보이고 있다.

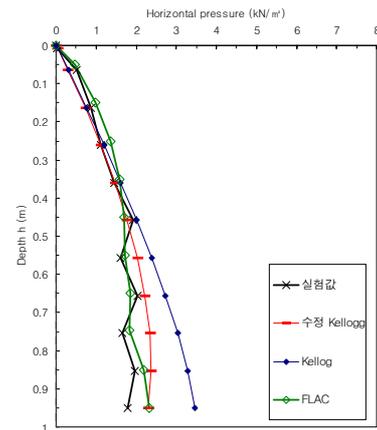


그림 7. $B_c=10\text{cm}$, $\psi=10^\circ$

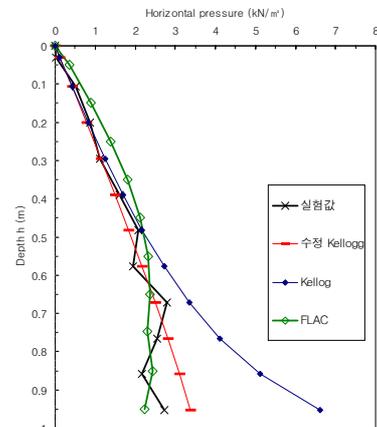


그림 8. $B_c=10\text{cm}$, $\psi=20^\circ$

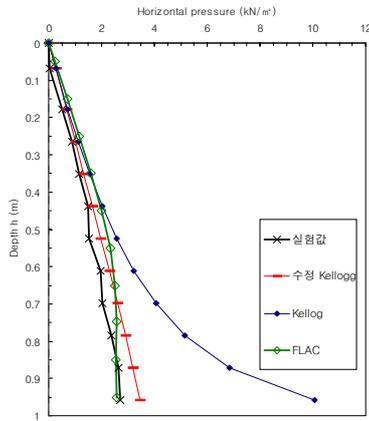


그림 9. $B_c=10\text{cm}$, $\psi=30^\circ$

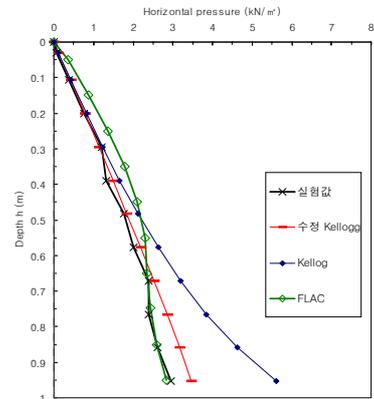


그림 11. $B_c=20\text{cm}$, $\psi=20^\circ$

5.2.2 되메움 저부폭 B_c 증가에 따른 비교

그림 10, 그림 11, 그림 12은 경사각 20° , 저부폭 10cm, 20cm, 30cm에 대한 실험 결과를 나타내었다. 수정된 Kellogg식, 실험결과 및 수치해석 결과는 그 분포 경향과 크기에 있어 매우 근사한 형태를 보이며 거리가 증가함에 따라 토압의 증가 변화는 발생하고 있으나 증가폭은 크지않다. 반면 Kellogg 이론식은 동일한 경사각을 갖는 조건임에도 불구하고 되메움 저부폭이 작은 즉 되메움 공간이 작을 수록 토압이 커지는 이상현상을 나타내고 있다. 위의 결과에서 보여지듯 수정된 Kellogg 이론식은 벽체의 아칭현상을 반영하고 있지 못한 점은 있으나 그 크기나 분포 면에서 실험 및 수치해석 결과에 매우 근사한 결과를 나타내고 있다. 따라서 Kellogg 이론식은 수정 Kellogg식으로 보완되어짐이 마땅하다고 사료된다.

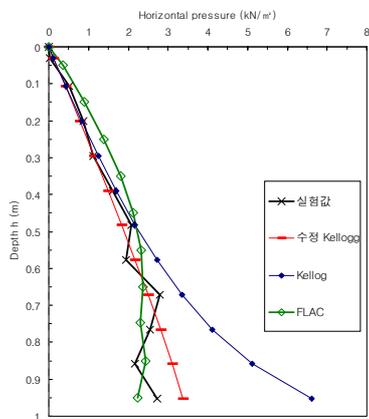


그림 10. $B_c=10\text{cm}$, $\psi=20^\circ$

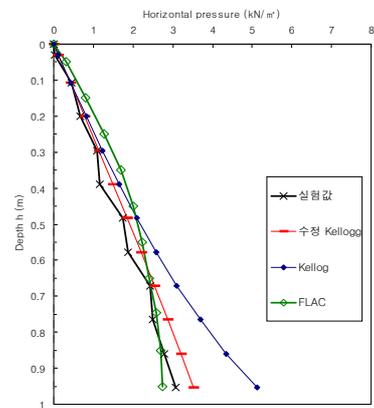


그림 12. $B_c=30\text{cm}$, $\psi=20^\circ$

6. 결 론

이상의 논의 되었던 연구에 대하여 정리하면 다음과 같다

1. 되메움에 의한 굴착벽면의 응력전이에 의한 아칭현상을 수치해석으로 확인할 수 있었으나 토압분포 및 그 크기는 수정된 제안식이 안전측임을 확인하였다.
2. 대칭 경사면을 갖는 되메움 공간에 대하여 제안된 Kellogg 이론식은 모형토조실험, 수치해석 및 수정된 Kellogg 이론식으로서 미비한 점이 확인되었다.
3. 수정된 Kellogg 이론식은 대칭의 수직인 되메움 및 경사진 되메움 공간의 토압산정에 적용시킬수 있다.

7. 감사의 글

본 논문을 2002학년도 삼척대학교 학술 연구 조성비에 의한 연구성과임을 밝히며, 이에 감사드립니다.

(접수일자 : 2003년 4월 4일)

참 고 문 헌

1. 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 collage, Ames, Iowa, No.31.
2. Spangler, M.G., and Handy, R.L., (1982), Soil Engineering, 4th Ed. Harper and Row, Inc, New York, N.Y.
3. Handy, R.L., (1985) The arch in soil Arching, J. Geotech. Engineering., ASCE, 108(11), 1405 ~ 1422.
4. Kellogg, C.G., (1993), Vertical Earth Loads on Buried Engineered Works J. Geotech. Engineering., ASCE. Vol119, No3, 487 ~ 505.