

비대칭 좁은 공간에서의 되메움 토압에 관한 연구

A Study on Earth Pressure in Unsymmetrical Narrow Backfill Space

문 창 열*

Moon, Chang-Youl

Abstract

The horizontal and vertical earth pressures in backfill space which is narrowly excavated like ditch are affected by the shape of ditch backfill space and the wall friction between excavated surface and backfill soil.

In this paper, for the excavated surface the Handy's equation of a symmetric vertical case and the Kellogg's equation of a symmetric sloped one are modified to show the minor principal stress arch for the unsymmetrical excavated backfill space. Compared with the soil test box result, a similarity in magnitude and distribution of backfill earth pressure shows that the earth pressure has been observed. The backfill earth pressure in unsymmetrically sloped space has been shown twice as much as the one in vertically excavated space and also remarkable decline of arching for the former case.

It is verified that the earth pressure equation should account the shape and size of backfill space to calculate the earth pressure for similar structure to the one handled in this study.

요 지

고랑형태로 좁게 굴착된 되메움 공간에 대한 수평 및 연직 토압은 굴착면과 되메움 흙과의 벽면마찰 및 고랑식 되메움공간의 형상에 따라 그 영향을 받는다.

본 연구에서는 대칭수직 굴착면에 대한 Handy의 제안식 및 대칭경사굴착면에 대한 Kellogg의 식을 수정하여 비대칭 굴착형상의 되메움 공간에 대한 수정식과 최소주응력아치 형태를 나타내어 보였다. 수정된 식은 모형토조 실험결과와 비교하였을 때 되메움 토압의 크기, 분포 등 그 경향이 매우 유사하였으며 비대칭으로 경사진 공간에서의 되메움 토압이 대칭적으로 수직하게 굴착된 공간에서의 토압보다 2배 이상의 큰 크기와 현저한 아칭현상의 저하를 보였다.

본 연구와 유사한 현장의 구조물에 미치는 토압을 산정할 때 되메움 공간의 형상 및 크기 등을 고려한 토압산정식이 적용되어야 할 것으로 확인되었다.

Keywords : Unsymmetrical backfill space, Earth pressure, Minor principal stress arch

* 정회원, 삼척대학교 토목공학과 부교수

1. 서 론

고랑형태의 좁게 굴착된 공간에 대한 되메움 토압은 기존의 Rankine 및 Coulomb 등의 고전적 토압을 적용하기에는 그 경계조건이 달라 사용하기에 적합하지 않다.

일반적으로 좁게 굴착된 조건에서의 되메움 토압은 되메움 흙의 자중보다 그 크기가 작으며 그 분포형태는 정수압적인 선형분포가 아니라 비선형적 분포를 보이는 것으로 알려졌다. 이러한 이유로서는 굴착된 벽면과 되메움 흙사이의 벽면마찰 및 굴착공간의 크기가 그 영향을 미치는 것으로 설명되고 있다.

고랑형태의 좁게 굴착된 공간에서의 되메움 토압에 대한 연구는 Janssen(1895)의 사일로 이론을 확장해석한 Marston(1913), Spangler(1938), Spangler와 Handy(1982)등의 연구가 널리 알려져 있다.

Handy(1985)는 이러한 조건에서의 되메움 토압을 되메움 흙이 함몰되어 보이는 평면아치 형태에 주목하여 최소주응력의 궤적을 연결하는 최소주응력 아치로서 밝힌 바 있으며 기존의 Marston(1913), Spangler등(1938)이 채택한 Rankine의 토압계수 K_a 의 이론적 오류를 지적하고 수정을 가하여 새롭게 제안하였다.

고랑형태의 좁은 공간에서의 토압은 주로 굴착벽면이 수직인 경우에 대하여 논의 되어 왔다. 그러나 Kellogg(1993)는 굴착면이 대칭적으로 경사진 경우에 굴착 벽면에서 작용하는 주응력 방향의 변화에 따른 수평응력비를 Handy(1985)의 최소주응력 아치를 이용하여 새롭게 제안하였으며 또한 되메움 토압은 되메움 공간의 기하학적 형상에 의존 되어진다고 주장하였다.

최근 국내에서의 이러한 연구는 이 등의(1997) 연구와 정 등의(1996) 연구가 활발히 진행되어 왔으나 수평 토압비 및 아치의 형태 등에 관한

연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 고랑형태의 좁은 굴착공간이 대칭이 아닌 비대칭의 경우에 대칭으로 경사진 굴착 공간에 대하여 제안된 Kellogg(1993)의 이론식을 수정하고 아칭형태를 규명한 수평토압비를 적용하여 비대칭 굴착공간에서 굴착경사도 및 되메움폭의 증가가 되메움 토압에 미치는 영향을 모형토조 실험을 통하여 확인하고자 하였다.

2. 비대칭 되메움 공간에 대한 수정 이론식의 제안

2.1 되메움 공간 형태에 대한 Kellogg 제안식의 수정

그림 1은 연직벽면의 높이 H , 연직면과 경사 굴착면이 한방향으로 ψ 의 기울기를 가지며 굴착저면 또는 사면에 인접한 구조물의 저면 폭을 B_c 로 나타낸 그림이다.

그림 1은 미소평면의 수직벽체 및 경사굴착면에서 연직력에 대한 힘의 평형을 고려하면 식 (1) 및 식 (3)으로 표시된다.

$$V + dV - V + dP_w \sin \delta_w + dP_s \sin(\delta_s + \psi) = r \cdot Bdh \quad (1)$$

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

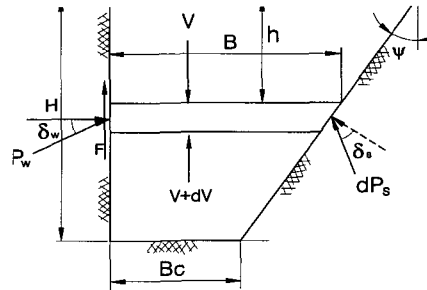


그림 1. 비대칭 되메움 공간에서의 미소 평면에 대한 힘의 평형

B_c = 되메움 저부내의 수평 공간폭

$$dP_w \cos \delta_w = dP_s \cos(\delta_s + \Psi) \quad (3)$$

식 (3)을 식 (1)에 대입하여 정리하면 식 (4)와 같다.

$$dV + dP_w \sin \delta_w + dP_w \cdot \cos \delta_w \cdot \tan(\delta_s + \Psi) = \gamma B dh \quad (4)$$

연직한 벽면의 미소단면에 대한 힘의 평형에서 다음을 고려한다.

$$dP_w = d \frac{\sigma_{hw}}{\cos \delta_w} \cdot dh \quad (5)$$

$$K_{av} = \frac{\sigma_{hw}}{\sigma_{av}} \quad (6)$$

여기서

K_{av} = 평균 수평도압비

σ_{hw} = 연직벽면에 작용하는 수평응력(t/m^2)

σ_{av} = 임의의 높이 h에 발생하는 연직응력을 되메움 폭B로서 평균된 연직응력 (V/B) (t/m^2)

δ_w = 수직벽면의 마찰각 ($^\circ$)

δ_s = 경사벽면에서의 마찰각 ($^\circ$)

γ = 흙의 단위중량 (t/m^3)

식 (5)과 식 (6)을 식 (4)에 대입하면 식 (7)로 표현된다.

$$dV + K_{av} \left(\frac{V}{B}\right) \mu dh + K_{av} \left(\frac{V}{B}\right) \mu' \cdot dh = \gamma B dh \quad (7)$$

$$dB = - \tan \Psi dh \quad (8)$$

$$\frac{dV}{dB} + K_1 \left(\frac{V}{B}\right) = K_2 B \quad (9)$$

$$K_1 = - \frac{K_{av}(\mu + \mu')}{\tan \Psi}, K_2 = - \frac{\gamma}{\tan \Psi}$$

여기서

V = 연직력(t/m)

B = 되메움 공간 임의의 폭(m)

μ = 마찰계수 ($\tan \delta_w$)

μ' = 경사면에 작용하는 마찰계수
[= $\tan(\delta_s + \Psi)$]

Ψ = 연직면에 대한 굴착면 경사 기울기 ($^\circ$)

식 (9)는 선형미분 방정식이므로 임의의 되메움 깊이에 대한 연직력은 다음 식 (10)으로 얻어진다.

$$V = \frac{K_2}{2 + K_1} [B^2 - (K_3)^{K_1+2} (B)^{-K_1}] \quad (10)$$

$$K_3 = B_c + H \tan \Psi$$

또한 수직한 벽면에 미치는 수평응력은 다음의 식 (11)로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{hw} = \left(\frac{V}{B}\right) K_{av}$$

$$\sigma_{hw} = \frac{K_2 \cdot K_{av}}{(2 + K_1)} [B - (K_3)^{K_1+2} (B)^{-(K_1+1)}] \quad (11)$$

2.2 수평응력비에 대한 고찰 및 제안

되메움 공간이 비대칭 경사면으로 형성된 경우에 대한 수평응력비는 연직한 굴착면을 대상으로 하였을 때의 Handy(1985)가 제안한 수평응력비 K_w 와 대칭굴착 경사면을 취하였을 때의 Kellogg(1993)가 제안한 수평응력비 K 는 달라질 것이다.

좁게 굴착된 고랑식 되메움 굴착의 토압산정에 지금까지 널리 사용되고 있는 Marston과 Anderson(1913)의 제안식에 적용된 수평응력비 $K_a = \sigma_3/\sigma_1$ 는 주응력을 적용하고 있는데에 그 이론적 오류가 지적되어 왔다.

좁은 굴착면과 되메움 흙과의 벽면 마찰에 의하여 Krynine(1945)은 고랑형태의 되메움 벽면

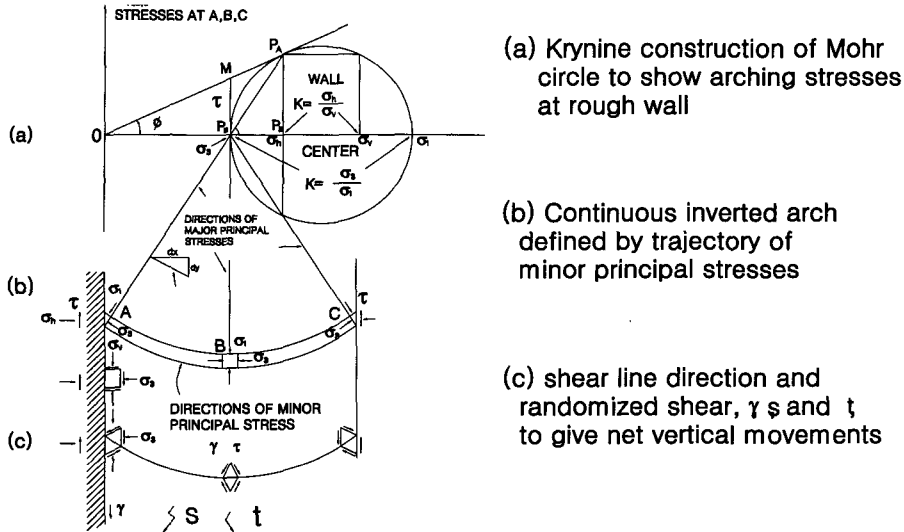


그림 2. 거친 벽에서의 아칭응력에 대한 Mohr원(Krynine, 1945)

과 되메움 흙간의 벽면 마찰로 인한 힘의 평형을 고려하여 Mohr의 응력원으로서 굴착벽면에 작용하는 연직응력은 최대주응력보다 작고 수평응력은 최소주응력보다 크다는 사실을 밝혀 다음의 식 (12)로 나타내었다.

$$K = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \frac{1 - \sin^2 \phi}{1 + \sin^2 \phi} \quad (12)$$

그러나 Krynine(1945)의 제안식은 연직력은 작게 수평력은 크게 평가 되어진다.

Handy(1985)는 그림 2에서 보이는 바와 같이 Krynine의 평면아치를 이용하여 벽면에서 발생하는 힘의 평형을 고려하고 전단력이 "0"이 되는 주응력면에 작용되는 최소주응력을 연결하는 방법으로서 그 형태가 구조물 아치의 역방향인 현이 하향으로 처지는 아치임을 주장하였다.

좁은 공간의 벽면마찰에 의한 연직응력은 임의의 깊이에서 임의의 연직력을 고려할 때 대칭벽면에서는 그 크기가 동일할 수 있으나, 중앙단면에서의 크기는 다르게 된다. 즉 동일한 깊이에서 벽마찰에 의한 연직력과 중앙단면으로 향할수록 그 크기가 다르게 됨으로서 이를 되메움 쪽으로

서 평균한 값을 사용 $\sigma_{av} = V/B$ 로 사용하였다.

아울러 최대주응력과 평균연직응력의 비, 즉 σ_{av} / σ_1 를 현수선(catenary) 방정식을 사용하여 되메움 흙의 전단저항각 $\phi = 10^\circ \sim 40^\circ$, $C = 0$ 의 범위에서 0.94~0.95의 값을 나타냄을 밝혀 다음 식 (13)으로서 수평토압비를 제안하였다.

$$K_w = \frac{\sigma_h}{\sigma_{av}} = 1.06(\cos^2 \theta + K_a \sin^2 \theta) \quad (13)$$

지금까지의 논의는 주로 대칭의 연직굴착면에 대한 것으로서 Kellogg(1992)는 현장에서 흔히 벽면 경사를 갖고 굴착하는 점을 감안 기존 대칭의 연직굴착 공간에서의 수평응력비를 적용할 수 없음을 지적하였다.

Kellogg(1992)는 그림 3과 같이 대칭의 경사굴착면에서 수평응력비는 경사굴착면의 기울기가 달라지므로서 주응력의 방향변화에 따라 Handy(1985)의 식 (13)을 다음의 식 (14)로 수정제안 하였다.

$$K = C_{av}(\cos^2 \theta + K_a \cdot \sin^2 \theta) \quad (14)$$

여기서

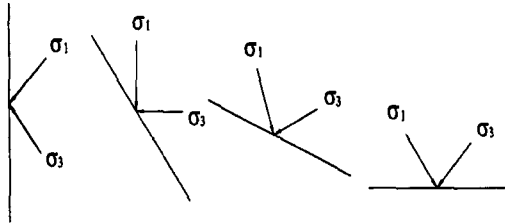


그림 3. 굴착면의 경사에 따른 주응력 방향의 변화 ($\phi = 30^\circ$)

C_{av} = 최대주응력과평균연직응력비 ($= \sigma_1 / \sigma_{av}$)

$$\theta = 45^\circ + \frac{\phi}{2} + \psi$$

K_a = Rankine 주동토압계수

본 연구에서는 비대칭으로 경사진 경우에는 이미 살펴본 대칭공간에 대한 Handy(1985)의 수평토압비 K_w 및 Kellogg(1993)의 K 또한 적용하기에 적합하지 않아 Handy(1985)의 최소주응력 현수선 아치를 이론적으로 검증한 Kingsley(1989)의 논의를 참조하여 비대칭 공간에서의 최소주응력 아치를 표현하여 보았다.

그림 4에서와 같이 연직한 벽의 대향에 경사 굴착면을 갖는 고랑형태의 좁은 비대칭 공간에의 주응력의 변화는 경사굴착면의 경사에 따른 토체의 도심 이동으로 인하여 그 영향이 미칠 것으로 판단된다.

따라서 주응력의 변화에 따른 토체의 변위가 그림 4의 (b)와 같이 예상될 수 있어 이에 대한 힘의 평형을 고려하여 정리하면 다음식으로 나타낼 수 있다.

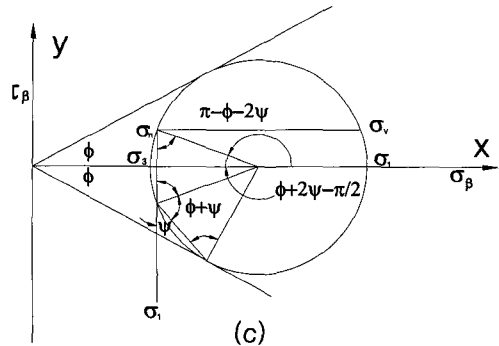
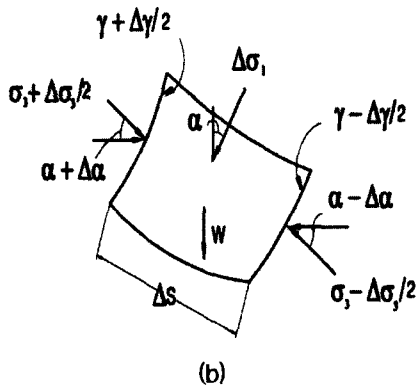
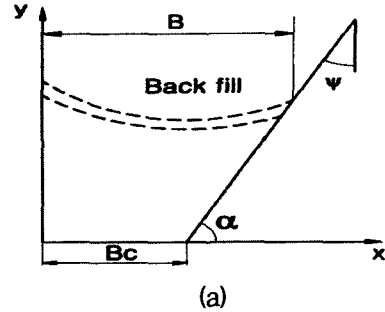
$$\sum V = 0$$

$$(F_-) \sin\left(\alpha - \frac{\Delta\alpha}{2}\right) - (F_+) \sin\left(\alpha + \frac{\Delta\alpha}{2}\right)$$

$$- \Delta\sigma_1 \Delta s \cdot \cos \alpha = W \quad (15)$$

$$\sum H = 0$$

$$(F_+) \cos\left(\alpha + \frac{\Delta\alpha}{2}\right) - (F_-) \cos\left(\alpha - \frac{\Delta\alpha}{2}\right)$$



$$\begin{aligned} 2\beta + \pi + 2\psi - \pi/2 &= \pi \\ \beta &= 3\pi/4 - \phi/2 - \psi \\ \theta &= \pi - \beta = \pi/4 + \phi/2 + \psi \end{aligned} \quad (d)$$

그림 4. 굴착면 경사를 고려한 미소요소의 변형 영향과 Mohr원의 해석

$$- \Delta\sigma_1 \Delta s \cdot \sin \alpha = 0 \quad (16)$$

여기서 $(F_+) = \left(\sigma_3 + \frac{\Delta\sigma_3}{2}\right) \left(\gamma + \frac{\Delta\gamma}{2}\right)$

$$(F_-) = \left(\sigma_3 - \frac{\Delta\sigma_3}{2}\right) \left(\gamma - \frac{\Delta\gamma}{2}\right)$$

식 (15), 식 (16)을 정리하여 곡선에 대하여 식 (17), 식 (18)로서 적분을 취할 수 있다.

$$\sigma_3 r \sin \alpha - \Delta \sigma_1 \int \cos \alpha dS - \gamma \int r dS = 0 \quad (17)$$

$$\sigma_3 r \alpha - \Delta \sigma_1 \int \sin \alpha dS = 0 \quad (18)$$

여기서 흙의 단위중량 γ 는 미소요소의 길이 S 에 일정하여 $\Delta \sigma_1$ 은 무시할 수 있다면 다음식 (19)를 얻을 수 있다.

$$\tan \alpha = \frac{\int \cos \alpha dS + \gamma \int r dS}{\int \sin \alpha dS} = f(S) \quad (19)$$

즉, $\tan \alpha$ 는 미소요소 길이 S 의 함수로서 $f(S)$ 로 표현할 수 있다.

$$\tan \alpha = \frac{d_y}{d_x}, \quad d_y^2 = dS^2 - d_x^2$$

$$\frac{d_y}{d_x} = \left[\left(\frac{dS}{d_x} \right)^2 - 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (20)$$

식 (19)와 식 (20)은 식 (21)로 표현할 수 있다.

$$x = \int \frac{dS}{[1 + f^2(S)]^{\frac{1}{2}}} \quad (21)$$

$f(S) = AS + C_1$ 으로 놓으면 Taylor급수 근사차 첫째항으로 $C_1 = 0$ 이며, 식 (21)의 해는 식 (22)로 정리된다.

$$x = \left(\frac{1}{A} \right) \sinh^{-1}(AS) + C_2 \quad (22)$$

식 (22)에 대하여 경계조건 $x=0, S=0$ 에서 $C_2=0$.

그러므로 곡선의 경사는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

식 (22)로부터

$$x = \left(\frac{1}{A} \right) \sinh^{-1}(AS), \quad AS = \sin \cdot Ax$$

따라서,

$$\tan \alpha = \frac{d_y}{d_x} = f(S) = AS = \sin(Ax) \quad (23)$$

또, $dy = \sinh(Ax) dx$ 이므로

$$y = \int \sinh(Ax) dx = \frac{1}{A} \cosh(Ax) + C \quad (24)$$

식 (24)는 현수선 아치의 방정식으로 경계조건 $x=0, y=0$ 를 적용하면 다음의 식 (25)를 얻게 된다.

$$y = \frac{[\cosh(Ax) - 1]}{A} \quad (25)$$

식 (25)에서

$$x=B \text{이면 } \alpha = (45^\circ - \frac{\phi}{2} - \psi), \quad \frac{1}{A} = aB$$

여기서, $B = B_c + (H-h) \tan \psi$,

$$a = \frac{1}{\sinh^{-1}[\tan(45^\circ - \frac{\phi}{2} - \psi)]}$$

비대칭 되메움 공간에서의 현수선 아치는 도심을 중심축으로 하여 그림 5, 그림 6, 그림 7에 나타냈으며 굴착경사각이 완만하여짐에 따라 아칭현상은 둔화됨을 알 수 있다. 이는 굴착경사면의 기울기가 완만할수록 벽면마찰의 영향이 감소되며 되메움 공간의 크기가 확대됨으로 좁은 공간에서의 되메움 토압에 발생하는 아칭영향에 의한 토압은 크게 기대할 수 없을 것으로 사료된다. 이러한 현상은 수평면에 대한 경사기울기가 $\alpha = 45^\circ + \phi/2$ 이하에서 그 경향이 뚜렷한 것으로 나타났으며, $\alpha = 45^\circ + \phi/2$ 를 넘는 경우 주응력방향의 회전에 따라 최소주응력의 아치는 발생되지 않기 때문이다. 또한 되메움 지반의 조성에 따른 영향은 지반이 조밀할수록 입자간의 역물림 효과(interlocking)에 의하여 아치의 처짐은 보다 완만함을 보이는 경향을 나타내는 것으로 보인다.

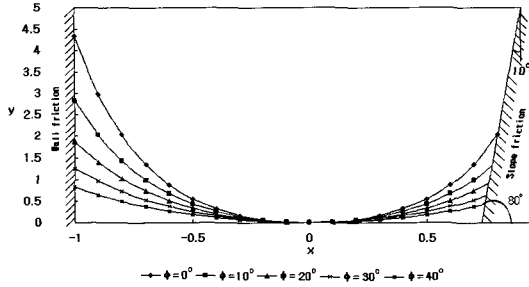


그림 5. 비대칭 경사를 고려한 되메움 지반에서의 흙의 내부마찰각에 따른 최소주응력 아칭 ($\alpha=80^\circ$)

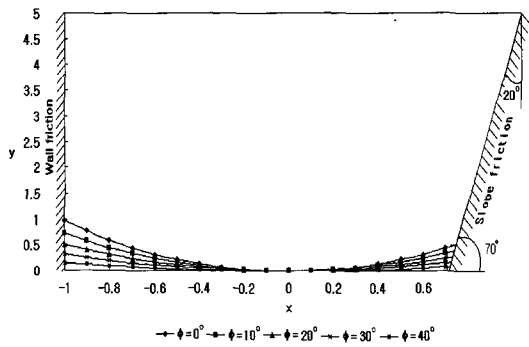


그림 6. 비대칭 경사를 고려한 되메움 지반에서의 흙의 내부마찰각에 따른 최소주응력 아칭 ($\alpha=70^\circ$)

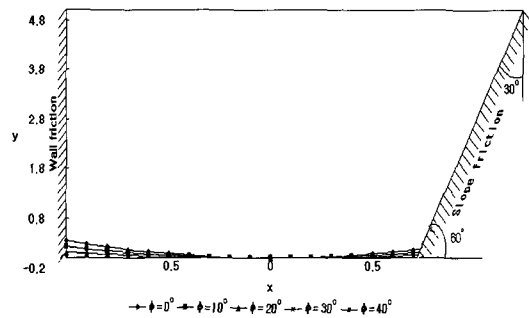


그림 7. 비대칭 경사를 고려한 되메움 지반에서의 흙의 내부마찰각에 따른 최소주응력 아칭 ($\alpha=60^\circ$)

한편 굴착면 경사각의 기울기에 따른 되메움 흙의 수평응력비는 되메움 공간의 도심에 따라 역시 영향을 받을 것으로 사료된다. 따라서 본 연구에 적용될 수평응력비 K는 그림 8에 보인

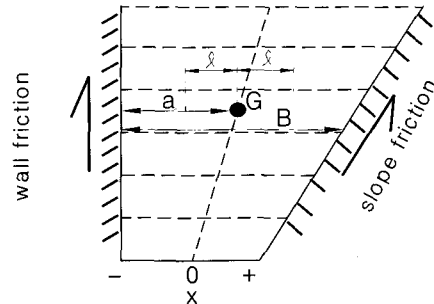


그림 8. 비대칭 굴착공간의 수평응력비 K를 고려하기 위한 도심의 위치

바와 같이 되메움 공간 도심을 중심으로 수직인 벽면에는 Handy의 K_w , 경사벽면에는 Kellogg의 수평응력비 K를 적용하여 식 (26)과 같이 평균한 K_{av} 를 사용하기로 한다.

$$K_{av} = K_w \cdot a + K(B-a)/B \quad (26)$$

여기서,

B: 임의 깊이에서의 되메움 폭

a: 수직인 벽면에서 도심까지 거리

3. 실험

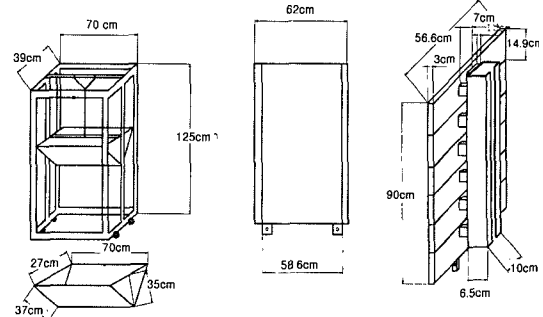
본 연구에서는 좁게 고랑식으로 굴착된 비대칭 되메움 공간에 대한 수정 Kellogg이론식의 적합성과 그 적용성을 모형실험을 통하여 확인하고자 다음과 같이 벽면의 거칠기, 지반의 상대밀도, 되메움 저부폭의 크기, 굴착면의 경사각을 각각 달리하여 수행하였다.

3.1 실험 종류 및 부호규약

실험은 다음 표 1과 같이 도합 80회의 실험을 하였으며 벽면의 거칠기를 표현하기 위하여 전단시험을 행하여 사용모래의 내부마찰각과 동일한 사포를 선정 부착하였다.

표 1. 시험종류 및 사용기호 규약

실험 기호	변수 상대밀도	벽마찰		되메움폭 (cm)				
		P ϕ	Po	10	20	30	40	50
P ϕ DBA	조밀 (Dense, 72%)	δ_w 42		연직면에 대한 경사각 (ψ°)				
P ϕ LBA	느슨 (Loose, 6.5%)	31		0	0	0	0	0
PoDBA	조밀 (Dense, 72%)		29	10	10	10	10	10
PoLBA	느슨 (Loose, 6.5%)		22°	20	20	20	20	20
				30	30	30	30	30



(a) 강사장치 (b) 경사 조절판 (c) 모형벽체
그림 10. 모형벽체 및 되메움 모형지반 조성 장치

실내 모형토조로서 형태는 그림 9와 같으며 부속 장치는 그림 10과 같다.

토조의 측면내부는 10 mm 유리를 토조벽 양쪽에 각각 부착 측면마찰이 최소화 되도록 하였다.

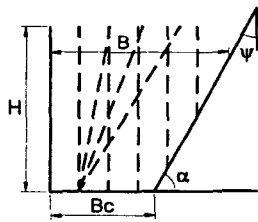
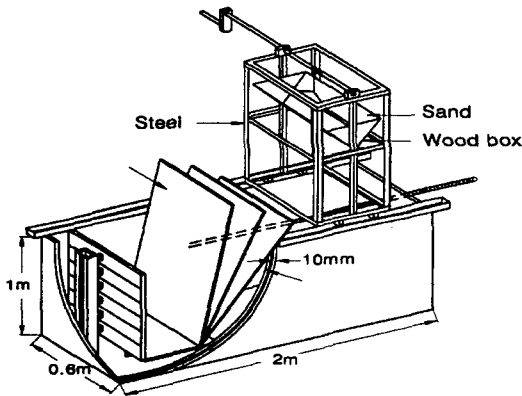


그림 9. 모형토조

3.2 실험장치

3.2.1 토 조

실험에 사용된 토조는 높이 1m, 가로 2m, 세로 0.6m, 두께 10 mm의 강판을 사용하여 제작한

3.2.2 모형벽체 및 토압측정장치

모형벽체 및 되메움 모형지반조성장치는 그림 10의 (c)와 같이 비교적 가공이 용이한 베이크 플레이트를 56.6 cm × 14.9 cm × 3 cm(가로×세로×두께)의 크기로 6개를 제작하여 되메움 높이 H=0.9m가 되도록 하였다. 깊이에 따른 수평 토압을 측정하기 위하여 저부에서 3단까지는 용량 50 kg, 상부 3단에는 30 kg의 하중계를 각각 부착하여 측정하였다. 또한, 벽마찰에 의한 영향을 파악하기 위하여 벽면 및 경사면의 모형판에는 직접전단시험에 의하여 되메움지반 조성시 사용된 강사용모래의 내부마찰각과 동일한 거친 거칠기의 샌드페이퍼를 직접전단시험을 통하여 선정 부착후 실험하였다. 연직력의 측정은 되메움저부쪽의 크기만큼 베이크 플레이트를 저부쪽에 따라 각각 제작하여 100 kg의 하중계를 부착하여 측정하였다. 사용된 하중계는 ±10gr의 정밀도를 지닌 국내산(봉신 load cell co)을 이용하였다.

자료의 출력은 Validyne(U.S.A)회사 제품의 UPC-601 2set를 설치한 후 컴퓨터와 연결하여 자동으로 출력된 후 저장되도록 하였다. 또한, 깊이별 측정을 위한 분리된 모형 벽체간의 상호간섭이나 모래의 침입을 방지하기 위하여 벤토나이트를 물게 반죽하여 처리하였다.

퇴메움 지반의 조성은 지반이 조밀한 경우에는 강사높이를 단계별로 일정하게 유지시켜 퇴메움 지반이 균일한 조밀성이 유지 되도록 시행하였으며 지반의 상대밀도를 확인하기 위하여 깊이별로 함수비 측정용 용기를 매설하여 퇴메움지반 조성이 완료된후 회수하여 확인하는 방법을 채택하였다. 상대밀도가 낮은 지반의 조성은 가급적 느슨한 지반이 조성되도록 모래를 플라스틱 용기를 사용하여 진동 등에 따른 상대밀도의 증가가 발생하지 않도록 조성하였다. 굴착면의 경사도를 표현하기 위한 경사면판은 10 mm 두께의 강판을 가공하여 사용하였으며 후면 경사용 강판에 지름 3 cm의 강봉에 나사홈을 형성시킨 강봉을 사용하여 경사가 조절될 수 있도록 하였다.

3.3 모형지반

본 연구 모형지반에 사용된 모래는 강원도 삼척시 근덕면 소재 해사로서 염분에 의한 흡착을 배제하고자 담수로서 세척후 공기건조시킨 것으로 사용하였으며 사용된 모래의 입도분석 및 기본 물성치는 그림 11과 표 2로 조사되었다. 사용된 모래는 조립을 2.08의 비교적 가는 모래로써 입형은 비교적 둥근 입자와 모난 입자가 적당히 섞인 모래로서 통일분류법(Unified Classification System)에 의한 분류결과 SP로 분류되었다.

모형 퇴메움 지반 조성은 샌드커튼(sand curtain) 방법을 이용한 강사법(raining method) 으로 퇴메움 지반을 조성하였으며, 퇴메움 높이별로 강사

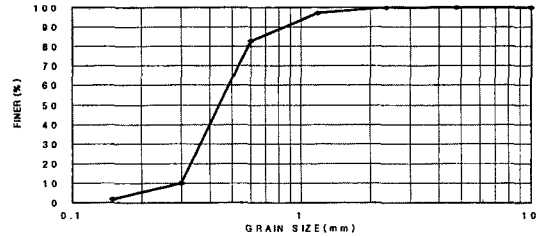


그림 11. 모형 퇴메움 지반 사용모래의 입도 분포 곡선

표 2. 모형 퇴메움 지반 사용 모래의 특성

구 분	특성치	
비 중	2.65	
F.M	2.08	
균등계수	1.67	
곡률계수	0.91	
최대건조밀도 (kg/cm ³)	1.79	
최소건조밀도 (kg/cm ³)	1.40	
통일분류	SP	
내부 마찰각	조밀한 경우	42°
	느슨한 경우	31°

전에 함수비 측정용 캔($\varphi \times h = 3 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$)을 2층(총6층)당 3개씩 매설하여 상대밀도의 균일성을 확인하는 방법을 사용하였다.

강사후 모형 퇴메움 지반의 상대밀도를 계산식에 의하여 상대밀도가 조밀한 경우 $D_r = 72\%$, 느슨한 경우 $D_r = 6.5\%$ 로 각각 조성되어졌다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 굴착벽면이 수직인 경우에 대한 기준 이론식과 제안식 및 실험결과와의 비교

4.1.1 수평토압

그림 12와 그림 13은 지반을 조밀하게 조성하고 벽면에 지반조성 모래의 내부마찰각과 같은 크기로 측정된 사포를 부착한 실험결과와 기준 이론식 및 제안식을 비교하여 나타내었다.

그림 14와 그림 15는 지반을 느슨하게, 벽면을

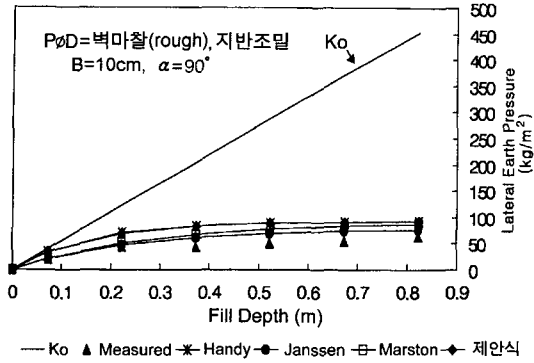


그림 12. 되메움 저부폭 증가에 따른 실험결과와 이론추정 수평토압 결과의 비교 [Dr=72%, $\phi=42^\circ$, $\delta_w=42^\circ$, $\alpha=90^\circ$]

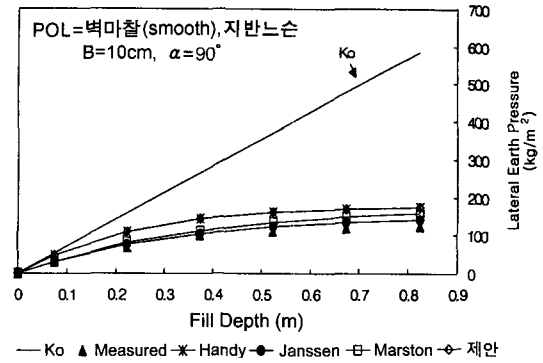


그림 14. 되메움 저부폭 증가에 따른 실험결과와 이론추정 수평토압 결과의 비교 [Dr=6.5%, $\phi=31^\circ$, $\delta_w=22^\circ$, $\alpha=90^\circ$]

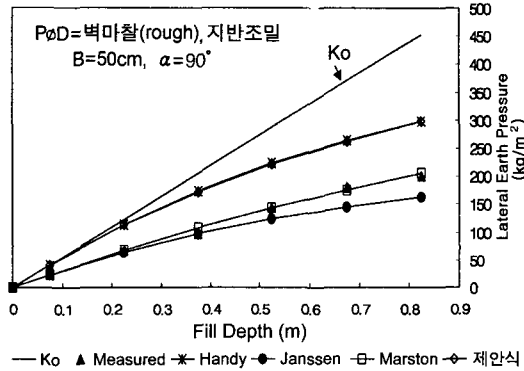


그림 13. 되메움 저부폭 증가에 따른 실험결과와 이론추정 수평토압 결과의 비교 [Dr=72%, $\phi=42^\circ$, $\delta_w=42^\circ$, $\alpha=90^\circ$]

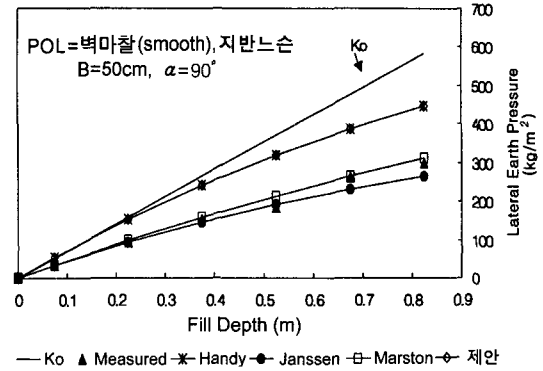


그림 15. 되메움 저부폭 증가에 따른 실험결과와 이론추정 수평토압 결과의 비교 [Dr=6.5%, $\phi=31^\circ$, $\delta_w=22^\circ$, $\alpha=90^\circ$]

매끄럽게 하였을 때의 실험 결과와 기존 이론식 및 제안식을 비교하여 나타내었다.

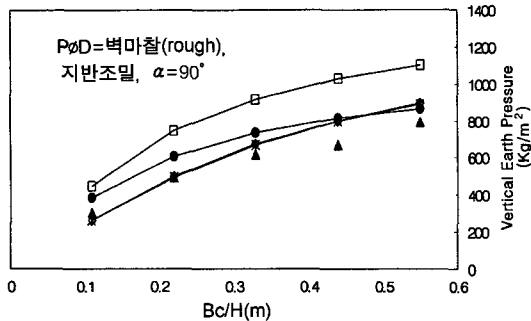
지반이 조밀하고 벽면이 충분히 거친 그림 12, 그림 13 경우가 느슨한 조건인 그림 14, 그림 15 조건보다 토압의 크기가 작게 나타남을 보여준다. 또한 되메움의 폭이 좁은 그림 12, 그림 14는 되메움 폭이 넓은 그림 13, 그림 15보다 토압의 크기가 현저히 작아지는 아칭현상을 보였다. 이러한 결과는 되메움 폭의 크기 및 벽면 마찰에 따라 토압에 미치는 영향이 큰 것으로 판단된다. 이론치와 실험치는 그 분포와 형태가 매우 유사하며 그 크기는 Janssen, Marston, Handy 및 제안식 순으로 크기를 보였다. 실험결과에 Jan-

ssen의 이론식이 가장 근접하나 되메움 폭이 증가할수록 실험치보다 작은 결과를 나타나게 됨은 silo 이론식중 silo의 동수반경을 적용하는 점이 그 원인으로 확인되었다.

한편 Handy의 이론식과 비대칭 경사면을 고려한 Kellogg의 수정식은 경사가 없는 수직인 경우에는 동일결과를 보였으며, Jaky의 정지 토압 보다는 그 크기가 작으나 되메움 공간 폭이 클수록 점차 접근 하기는 하지만 그 크기는 역시 작았다.

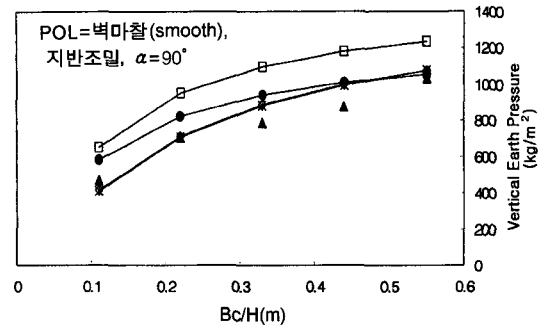
4.12 연직토압

그림 16은 모형지반을 조밀, 벽마찰을 거친 조



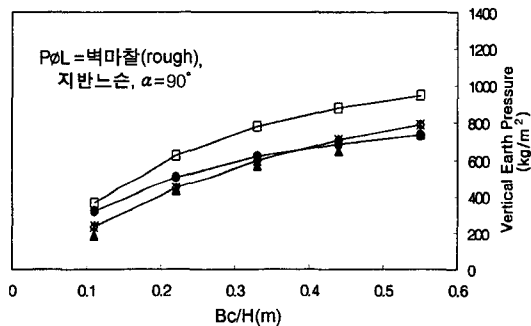
▲ Measured * Handy ● Janssen □ Marston ◇ 제안

그림 16. 되메움 폭에 따른 되메움 저부 연직 토압의 실험결과와 이론추정 결과의 비교. [Dr=72%, $\phi=42^\circ$, $\delta_w=42^\circ$, $\alpha=90^\circ$]



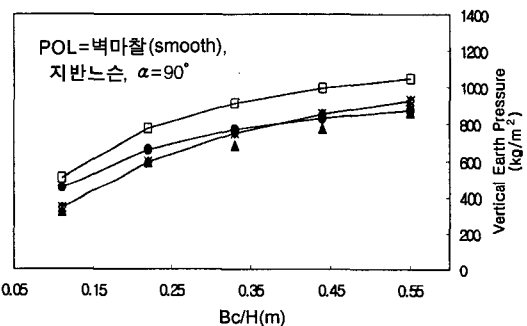
▲ Measured * Handy ● Janssen □ Marston ◇ 제안

그림 18. 되메움 폭에 따른 되메움 저부 연직 토압의 실험결과와 이론추정 결과의 비교 [Dr=72%, $\phi=42^\circ$, $\delta_w=29^\circ$, $\alpha=90^\circ$]



▲ Measured * Handy ● Janssen □ Marston ◇ 제안식

그림 17. 되메움 폭에 따른 되메움 저부 연직 토압의 실험결과와 이론추정 결과의 비교 [Dr=6.5%, $\phi=31^\circ$, $\delta_w=31^\circ$, $\alpha=90^\circ$]



▲ Measured * Handy ● Janssen □ Marston ◇ 제안식

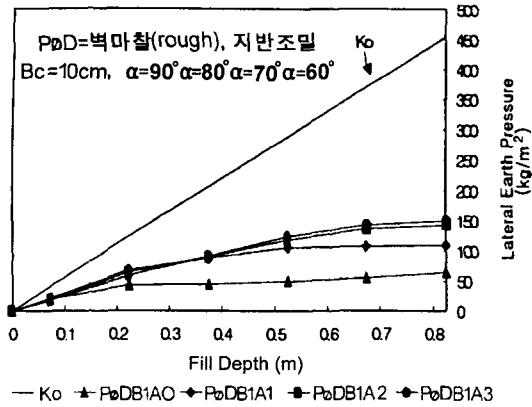
그림 19. 되메움 폭에 따른 되메움 저부 연직 토압의 실험결과와 이론추정 결과의 비교 [Dr=6.5%, $\phi=31^\circ$, $\delta_w=22^\circ$, $\alpha=90^\circ$]

건으로하여 되메움 저면에서 측정된 연직토압을 이론식에 의하여 추정된 결과를 비교한 것으로서 대체적으로 실험결과에 Handy(1985), 제안식, Janssen(1895) 및 Marston(1913) 순으로 추정되었다. 이는 Handy(1985) 및 제안식에 사용된 수평응력비 Kw의 값이 기존의 Marston(1913)이나 Janssen(1895)이 가정한 Rankine의 토압계수 Ka 값보다 크게 산출된 결과이다. Kellogg(1993)에 의하면 Marston(1913)이론에 의하여 산출된 연직토압은 실제 측정결과 보다 높은 것으로 보고되어 있다. 그러나 그 분포의 형태 및 경향은 매우 유사하였다. 그림 17은 모형지반을 느슨, 벽

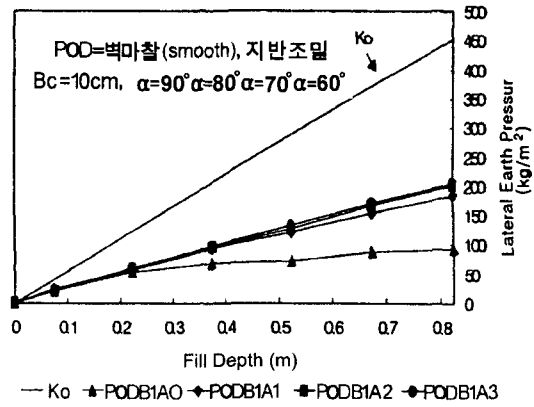
마찰을 거칠게 조성한 것으로 측정연직토압에 Handy(1985), 제안식, Janssen(1895) 및 Marston(1913) 순으로서 Handy(1985) 및 제안식 추정치가 가장 좋은 접근성을 보였다.

그림 18은 모형지반의 상대밀도 조밀, 벽마찰은 매끄럽게 조성한 것으로서 그 경향은 그림 16 및 17과 동일한 결과를 보이나 큰 연직력을 나타내어 벽마찰의 영향을 잘 나타내었다.

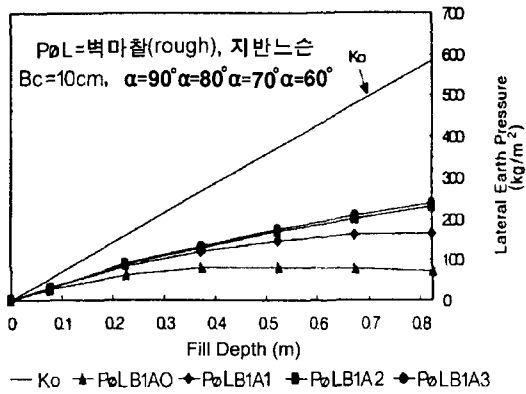
그림 19는 모형지반 상대밀도를 느슨, 벽마찰을 매끄럽게 조성하였을 경우로서 그림 16 및 그림 17에서 나타낸 토압크기에 비하여 상당히 증가된 큰 값을 보여주며 되메움 폭이 클수록 그



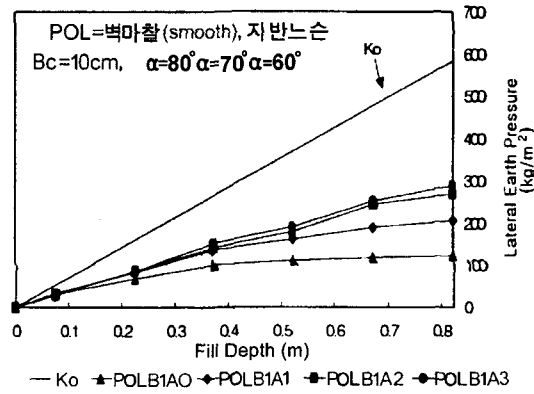
(a)



(a)



(b)



(b)

그림 20. 동일한 벽마찰 및 되메움 저부폭 Bc 조건하에서 모형지반 상대밀도 및 경사도 변화에 따른 되메움 깊이별 수평토압

그림 21. 동일한 벽마찰 및 되메움 저부폭 Bc 조건하에서 모형지반 상대밀도 및 경사도 변화에 따른 되메움 깊이별 수평토압

차이는 점차 작아지는 것으로 나타나 역시 벽마찰과 되메움 공간 크기에 대한 이칭 영향이 작아지는 것을 나타내었다. 이론치들의 연직 토압의 증가와 실험치와의 증가경향은 유사하였다.

른 수평토압의 변화는 그림 20, 그림 21에 나타내었다.

4.2 연직하 모형벽체와 굴착면이 경사진 비대칭 단면에서의 되메움 토압

4.2.1 수평토압

동일한 벽마찰 및 되메움 공간폭에 대하여 모형지반의 상대밀도 및 굴착면경사각 변화에 따

그림 20(a), (b)는 모형벽체의 벽마찰은 거칠며, 상대밀도 조밀 및 느슨, 그림 21(a), (b)는 모형벽체의 벽마찰은 매끄러운 상태로서 상대밀도 조밀 및 느슨하게 각각 조밀 또는 느슨하게 조성하여 실험한 결과로서 동일한 되메움 공간폭에서 굴착면 경사각에 따른 수평토압분포를 되메움 깊이에 따라 각각 표시하였다.

그림 20 및 그림 21의 결과에 의하면 상대밀도가 높은 경우 상대밀도가 낮은 경우에 비하여

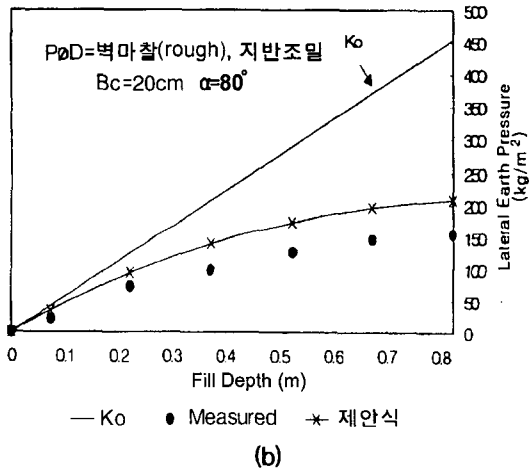
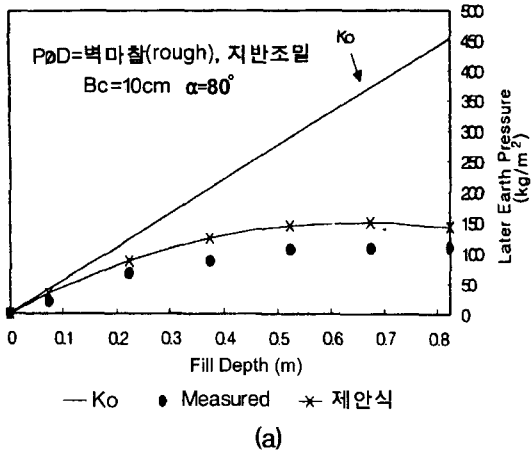


그림 22. 경사진 되메움 지반의 실험결과 및 제안식 추정결과 수평토압의 비교 [Dr=72%, $\phi=42^\circ$, $\delta_w=42^\circ$, $\alpha=80^\circ$]

수평토압의 크기는 작게 측정되었으며 수평면에 대한 굴착면경사각 α 가 증가함에 따라 역시 수평토압의 증가를 가져왔다.

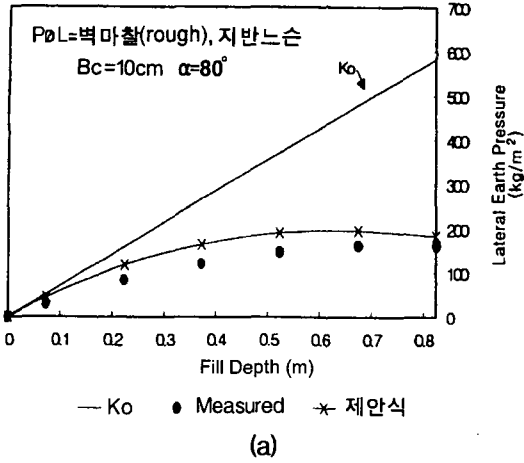
그림 20 및 21의 공통된 결과는 경사각 $\alpha=70^\circ$ 이하의 기울기에서 수평토압의 증가는 미소하여 그 크기는 $\alpha=70^\circ$ 에서나 $\alpha=60^\circ$ 가 동일하거나 $\alpha=60^\circ$ 에서 약간 소폭의 증가를 하였다. 이러한 점은 벽마찰 또는 상대밀도에 상관없이 일정한 양상을 보였다. 따라서 수평면에 대한 기울기 α 가 70° 이하의 기울기에 따르는 수평토압은 수직인 벽체에 미치는 영향이 크지 않음을 알

수 있었다. 한편, 모형굴착지반의 굴착면 경사각이 수평면에 대하여 $45^\circ + \phi/2$ 이상의 기울기에서는 주응력의 방향이 수평 및 연직토압을 벽체 및 바닥면에 증가시키는 형태로 나타나는 결과를 보였다. 이러한 이유로는 $\alpha=60^\circ$ 이하의 굴착면 경사각에서는 최소 주응력 아치는 형성되지 않는 조건, 즉 아칭영향이 발생하지 않는 조건으로서 수직인 벽체에 대한 경사기울기의 영향이 미미하였다. 따라서 이러한 경우는 고전적 토압이론을 적용할수도 있는 경계조건이라고 사료된다. 수정식과 실험결과에 대한 대비는 그림 22(a), (b)~26(a), (b)로 나타내었다.

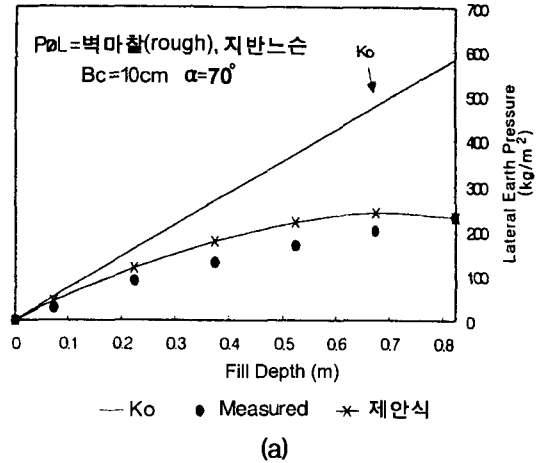
그림 22의 (a), (b)는 되메움 저부폭을 10cm 및 20cm로 한 경우 굴착면 경사각 $\alpha=80^\circ$ 에 대한 수평토압의 비교로서 제안식은 실험결과와 유사한 분포를 보였다.

실험결과와 제안식으로 추정된 수평토압 크기는 제안식에 의한 토압의 크기가 약 +25%의 큰 값을 보였다. 되메움 폭 10 cm 및 20 cm의 굴착면 경사각이 각각 $\alpha=80^\circ$ 로서 벽마찰이 크며 모형지반의 상대밀도가 낮은 조건인 그림 23(a)는 그 경향이 그림 21과 유사한 형태를 보였으며 실험결과와의 근접성은 되메움 저부공간폭 10cm, 굴착면 경사각 $\alpha=80^\circ$ 에서는 제안식 19%로서 근접하는 최대수평토압 크기를 보였다. 또한, 되메움 공간 폭 20cm, 굴착면 경사각 $\alpha=80^\circ$ 에서는 실험 결과에 대하여 제안식 +11% 정도의 접근하는 결과를 보였다.

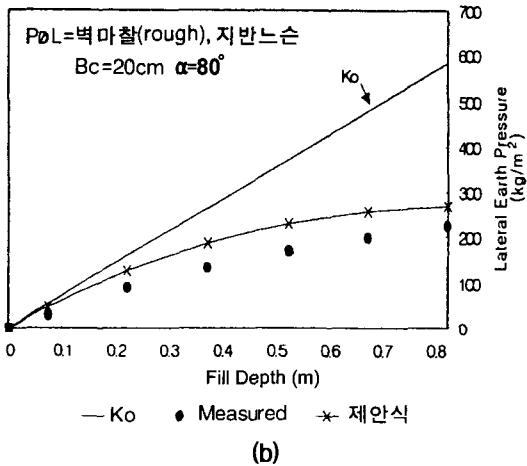
그림 24(a), (b)는 되메움 공간폭 10 cm, 20 cm 굴착면 경사각 $\alpha=70^\circ$ 의 결과로서 되메움 공간 폭 10 cm에서의 최대수평토압은 실험결과대비 제안식으로 추정된 결과가 +11%의 접근성을 보였다. 그림 25(a), (b)는 모형지반 상대밀도가 높고 벽면 마찰이 낮은조건으로서 제안식 추정결과와 실험결과는 벽마찰이 큰 경우의 그림 22의 조건보다 큰 수평 토압과 벽면마찰의 영향에 의



(a)



(a)



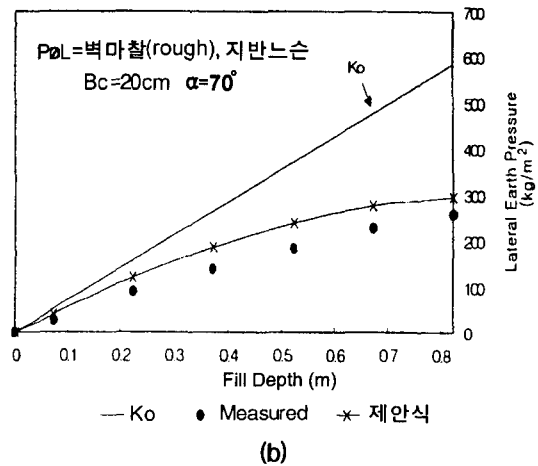
(b)

그림 23. 경사진 되메움 지반의 실험결과 및 제안식 추정결과 수평토압의 비교
 $[D_r=6.5\%, \phi=31^\circ, \delta_w=31^\circ, \alpha=80^\circ]$

하여 아칭효과가 저하되는 토압분포를 보였다.

그림 26(a), (b)는 벽면마찰 및 모형지반의 상대밀도가 모두 작은 조건으로서 그림 24와 같이 굴착면 경사각이 보다 완만한 $\alpha=70^\circ$ 에서 동일한 낮은 밀도로 지반을 조성한 경우로서 벽면마찰 및 지반의 밀도에 따라 아칭현상이 현저히 둔화되어 비교적 직선형태의 토압 분포를 보였다. 이는 벽마찰 및 되메움 공간의 크기와 형태에 따라 토압은 큰 차이를 보이는 결과로 판단된다.

이상의 시험결과와 제안식으로 추정된 결과를 대비하였을 때 실험결과치에 대하여 제안식으로



(b)

그림 24. 경사진 되메움 지반의 실험결과 및 제안식 추정결과 수평토압의 비교
 $[D_r=6.5\%, \phi=31^\circ, \delta_w=31^\circ, \alpha=70^\circ]$

산출된 최대수평토압은 +9%~+35% 사이의 결과를 나타내었다. 이러한 결과는 모형토조의 측면마찰의 발생등에 대한 오차를 감안한다면 그 적용성은 적합한 것으로 사료된다.

4.2.2 연직토압

모형되메움 지반의 저부폭 10 cm, 20 cm의 조건에서 굴착면 경사각 $\alpha=80^\circ, 70^\circ$ 에 대한 연직토압에 대한 그림 27, 그림 28로 나타내었다.

실험결과에 대한 근접성은 대체적으로 제안식 결과가 실험치보다 +5%~+15%의 증가된 크기

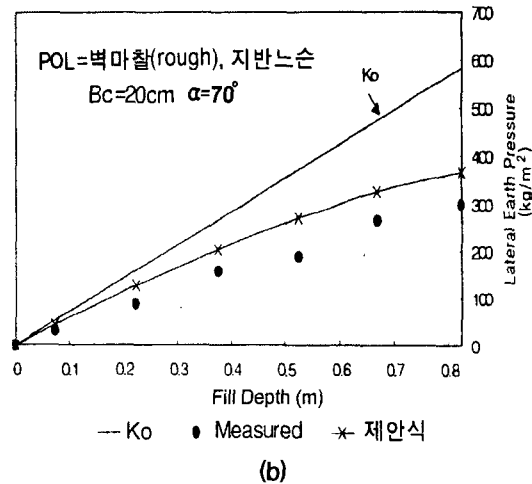
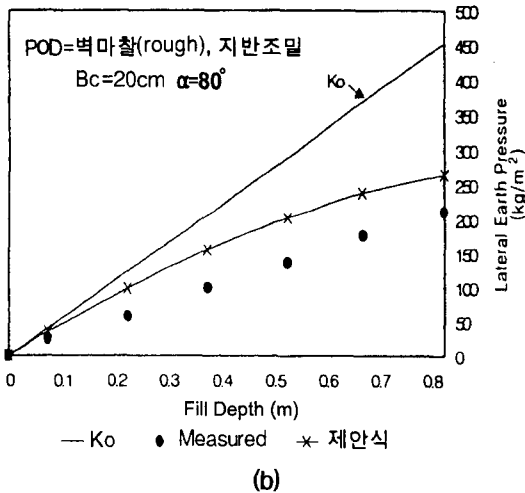
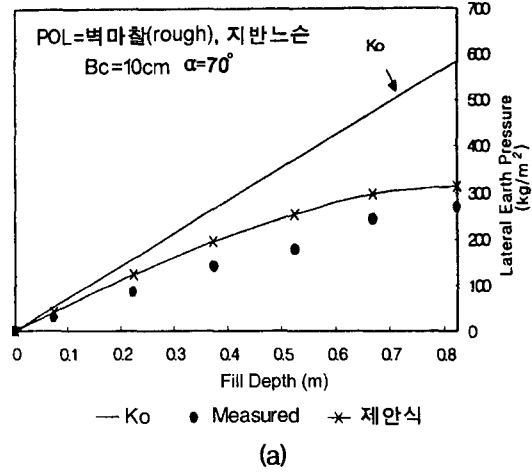
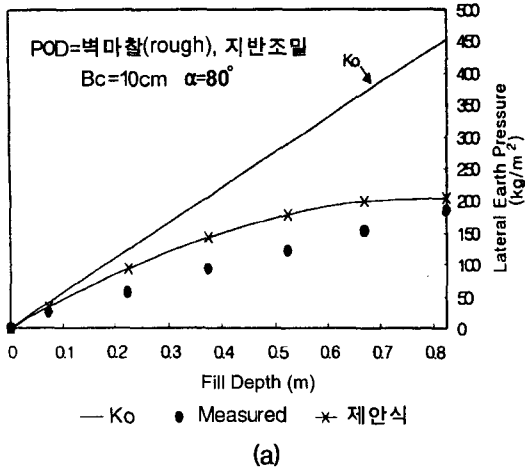


그림 25. 경사진 되메움 지반의 실험결과 및 제안식 추정결과 수평토압비교 [$D_r=72\%$, $\phi=42^\circ$, $\delta_w=29^\circ$]

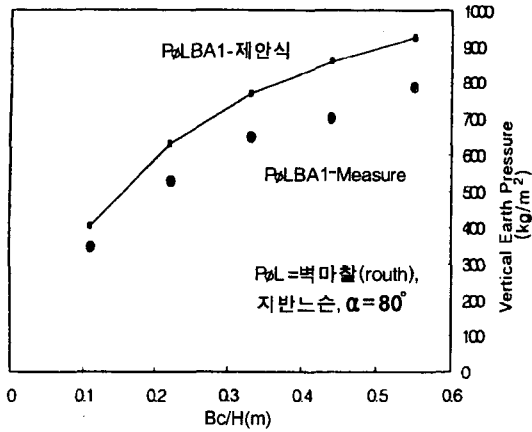
그림 26. 경사진 되메움 지반의 실험결과 및 제안식 추정결과 수평토압비교 [$D_r=6.5\%$, $\phi=31^\circ$, $\delta_w=22^\circ$]

로 나타났으며, 그 증가 경향은 매우 유사하였다.

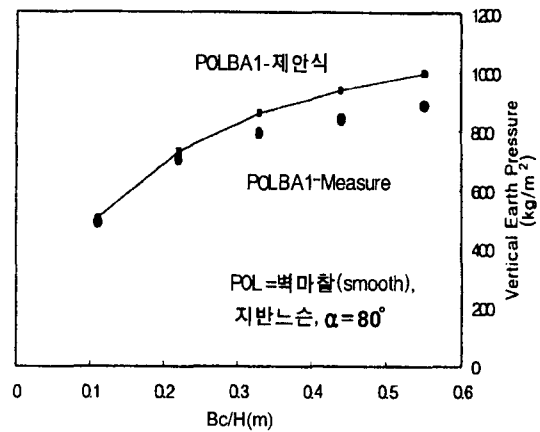
5. 결 론

현장에서 다양하게 형성될 수 있는 고랑식의 좁은 굴착 공간 및 좁은 옹벽배면의 공간 등을 감안한 비대칭 경사 굴착 공간에 대하여 Kellogg의 대칭 경사를 갖는 이론식을 수정한 제안식과 실험결과를 비교, 검토한 결과를 요약하면 다음과 같다.

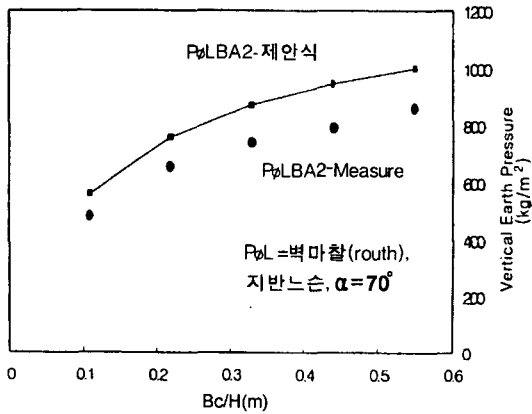
- 1) 되메움 벽면을 수직하게 굴착한 경우에 대한 기존 이론식 및 제안식으로 추정하여 본 수평토압 실험결과에 대한 결과는 실험치, Janssen, Marston 및 Handy의 순으로 그 크기와 형태가 증가되는 모양을 보였으며, Handy의 이론식과 제안된 이론식은 동일한 결과가 산출되었다. 그러나 Janssen의 이론식으로 산출된 결과는 본 실험의 경우 굴착 저부폭이 30 cm 이상인 경우에는 실험결과보다 작게 산출되는 결과를 보였는데 이는 이론식에서



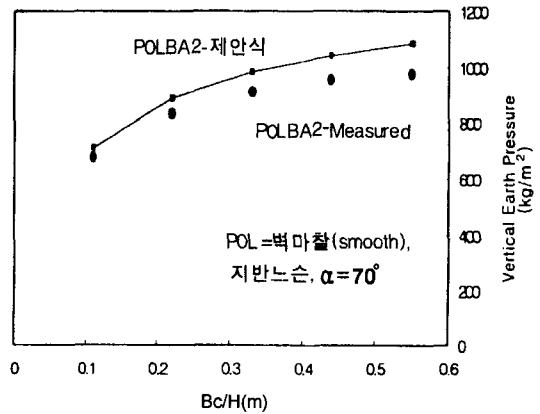
(a)



(a)



(b)



(b)

그림 27. 굴착면 경사각에 따른 실험결과 및 제안식 연직토압 [Dr=6.5%, $\phi=31^\circ$, $\delta_w=31^\circ$]

그림 28. 굴착면 경사각에 따른 실험결과 및 제안식 연직토압 [Dr=6.5%, $\phi=31^\circ$, $\delta_w=22^\circ$]

동수 반경을 고려한 점이 큰 마찰력으로 반영된 결과에 의한 것으로 확인되었다.

- 2) 되메움 벽면을 연직하게 굴착한 경우에 대한 기존 이론식 및 제안식으로 추정하여 본 연직토압은 실험치, Handy, 제안식, Janssen 및 Marston 순으로 그 크기를 나타내어 Marston 이론에 의한 연직토압은 상당히 안전측일 것으로 사료된다.
- 3) 비대칭 경사 굴착 공간에 있어 한계 경사각 이내에서의 수평 및 연직토압의 크기는 굴착 공간의 형태가 동일할 경우 벽면이 수직인 경

우에 비하여 실험 및 제안 이론식으로 나타난 결과가 모두 약 2배이상 증가되는 결과를 보였다. 이는 현장에서 비대칭 경사 굴착면으로 갖는 구조물들에 대한 토압산정시 되메움 공간의 크기 및 형태를 고려한 선택적인 산정식이 적용되어야 할 것으로 판단된다.

- 4) 비대칭 경사 굴착 공간에서의 수직인 벽면이 부담하는 수평토압은 수정 제안식 및 실험 결과가 그 크기 및 경향에 있어 매우 유사하여 그 적용성을 확인할 수 있었다.
- 5) 비대칭 경사면이 수평면과 $45^\circ + \phi/2$ 이하의

- 경사를 취할 경우 수직하 벽체에 미치는 수평 토압은 아칭효과를 기대할 수 없으며, 고전적 토압이론을 적용하여야 할 것으로 판단된다.
- 6) 되메움 폭이 좁을 경우 벽마찰 등에 의한 아칭영향은 더욱 증대되며, 본 연구의 실험 결과에서는 되메움 폭에 대한 굴착면 저부 폭의 비가 0.11이었다.

감사의 글

본 연구는 삼척대학교 학술연구지원에 의한 것이며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 이상덕, 문창열, 김은섭, 이종규 (1997), “되메움 지반에 의한 수평토압에 관한연구”, 대한토목학회는 문집, 대한토목학회, 제17권 제III-3호, pp. 285 ~ 292.
2. 문창열 (1997), “좁은 공간에서의 되메움 토압에 관한 연구” 박사학위 청구논문, 단국대학교.
3. 정성교, 조기영, 윤치관, 이대명 (1996), “뒤채움(굴착)의 형상에 따라 매설박스에 유발되는 토압”, 한국지반공학회지, 제12권, 제5호, pp. 75 ~ 85.
4. Handy, R. L., (1985), “The Arch in Soil Arching”, JGE. ASEC., Vol. 111. No. 3, Mar., pp. 302 ~ 318.
5. Kellogg, C. G., (1993), “Vertical Earth Loads on Buried Engineered Works”, JGE. ASCE, Vol. 119, No. 3, pp. 487 ~ 506.
6. Kingsley. H. W., (1989), Technical Note of “Arch in Soil Arching”, JGE, ASCE, Vol. 115 No. 3 pp. 415 ~ 419
7. Krynine, D. P., (1945), Discussion of “Stability and Stiffness of Cellular Cofferdams”, by Karl Terzaghi, Transactions, ASCE, Vol. 110, pp. 1175 ~ 1178.
8. Krynine, D. P., (1947), Soil Mechanics 2th ed. MCGRAW-HILL BOOK Co. INC.
9. Lambe, T. W. & Whitman, T. V., (1979), “Soil Mechanics”, SI Version, John Wiley and Sons.
10. Marston, A. & 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, p. 181.
12. Spangler, M. G., (1948), “Underground Conduits-An Appraisal of Modern Reserarch”, “Transactions ASCE. Vol. 113, pp. 316-345
13. Spangler, M. G., (1962). “Culvert and Conduits”, Foundation Engineering, G. A. Lonands, ed. Megraw-hill Book Co. Inc. NewYork.
14. Spangler, M. G., & Handy, R. L., (1982), “Soil Engineering”, Harper & Row, Publishers, New York.
15. Terzaghi, K., (1943), “Theoretical Soil Mechanics”, and John Wiley and Sons.

(접수일자 1999. 6. 10)