

지하 박스구조물에 작용하는 토압에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Earth Pressure on the Underground Box Structure

김 은 섭^{*1}

Kim, Eun - Sup

이 상 덕^{*2}

Lee, Sang - Duk

Abstract

Some of the underground structures such as subway tunnels are constructed by open cut method, in which the ground is excavated, a structure installed, and after that the excavated space is backfilled. In this case, because of their narrow and constrained boundary conditions, the earth pressure induced by self-weight of the backfilled soil acting on the underground structures is different from that of the classical theory.

The vertical and horizontal earth pressures acting on upper slab and side wall of the underground structures constructed by open cut method are affected by the backfill geometry. The laboratory model tests were performed in the conditions of a variety of the shapes of backfill geometry and wall friction. And their results were compared with those from theories. As a result, it was observed that the distribution of the earth pressure acting on the underground structure is affected by the shapes of backfill geometry, the width of backfill, the angle of excavation and the wall friction.

요 지

지하철 터널 등의 지하구조물을 개착식으로 시공할 때에는 먼저 지반을 굴착하고 구조물을 설치한 후에 굴착공간을 되메운다. 이때 굴착면과 구조물사이의 되메움 공간이 협소하여 되메움지반의 자중에 의하여 지하구조물에 작용하는 토압은 고전적인 방법으로 구한 토압과 상이하다. 개착식으로 시공한 구조물의 상부슬래브와 측벽에 작용하는 연직 및 수평토압은 되메움공간의 형상에 따라 영향을 받을 수 있으며 이를 규명하기 위하여 되메움공간의 형상과 벽마찰각을 변화시키면서 실내모형시험을 실시하여 그 결과를

*1 정희원, 대덕공영주식회사 기술연구소 연구원

*2 정희원, 이주대학교 공과대학 토목공학과 부교수

기존의 토압이론과 비교분석하였다. 그 결과 되메움공간의 형상 즉 되메움폭과 원지반 굴착면 경사 및 구조물의 벽마찰각에 의한 영향이 관찰되었다.

Keywords : Underground structure, Earth pressure, Open cut method, Backfill, Wall friction

1. 서 론

개착식공법으로 시공하는 지하철 터널이나 지하차도 및 보도, 상·하수도, 통신구 및 전력구 등의 지하 박스구조물의 설계시에 고려하는 하중에는 여러 가지가 있으며, 특히 되메움 지반의 자중에 의한 토압은 구조물의 역학적 거동에 크게 영향을 미친다. 박스구조물 상부슬래브에 작용하는 연직토압 산출을 위한 계산식으로는 구조물과 되메움 지반의 상대변위를 고려한 Marston-Spangler(1982) 이론 및 그의 수정식들이 있으며, 구조물의 측면에 작용하는 수평토압으로 정지토압이 주로 적용되고 있다(기술경영사, 1996. 탐구문화사, 1997). 그러나 공사비와 건설공간의 부족으로 인하여 굴착공간을 최소로 함에 따라 굴착면과 구조물사이의 공간이 협소하여 구조물 시공후 되메움 시공시 다짐이 어려우며, 되메움 지반과 구조물 및 굴착면 사이의 상대마찰에 의한 영향으로 고전적인 토압산정식을 적용하기에는 문제점이 있다. 이러한 경우에 대해 Terzaghi(1943)는 흙 속에서의 아칭효과(arching effect)를 이용한 연직토압 계산식을 제시하였으나, 실제 실험을 통하여 검증된 것은 아니다. 이러한 좁은 공간을 되메우기할 때에 발생하는 수평토압에 관한 연구는 Janssen(1895)이 평면아치개념을 도입하여 토압이론식을 유도한 이래로 Marston(1913), Spangler(1982), Handy(1985), Kellogg(1993) 등에 의해 발전되었다. Handy(1985)는 최소 주응력 아치(곡선 아치)를 이용하여 트랜치(trench)와 옹벽에 작용하는 토압을 산출하였다. 안정된 사

면에 인접하여 옹벽을 시공할 때에 되메움 지반에 의하여 구조물에 작용하는 수평토압은 이등(1993), 정(1994) 등이 아칭효과를 고려하여 연구하였으며, 되메움 지반의 내부에 발생하는 아칭효과를 고려하여 지하에 매설된 구조물에 작용하는 연직토압에 대해 Kellogg(1993)가 연구하였다. 최근 유(1997)는 아치형 복개터널의 되메움 시 발생하는 역학적 거동을 실험 및 수치해석적으로 연구하였다. 지하박스구조물에 작용하는 토압에 대해서는 제한된 경계조건에 대한 Dasgupta와 Sengupta(1991)의 실험적 연구와 평면아치개념을 적용한 정(1994), 조(1994) 등의 연구에 국한된 실정이다. 그러나 지하에 박스구조물을 설치한 후 되메움 지반에 의하여 발생하는 토압의 크기 및 분포형상에 대한 이론 및 수치해석적 연구는 다소 이루어지고 있으나 다양한 경계조건을 고려한 실험적 연구는 국내외적으로 미비한 편이다.

따라서 본 연구에서는 굴착면과 구조물사이의 되메움 공간의 형상과 크기 및 벽마찰에 따라 박스구조물에 작용하는 되메움 지반의 자중에 의한 연직토압 및 수평토압의 크기와 분포형상을 실내모형실험을 통하여 연구하였으며, 또한 기존의 토압이론과 비교 분석하였다.

2. 기존의 토압이론 고찰

지중매설관이나 지하 박스구조물 등을 설계할 때 고려하는 하중으로는 구조물의 사하중, 활하중, 토압, 수압, 충격, 종횡하중, 양압력, 원심하

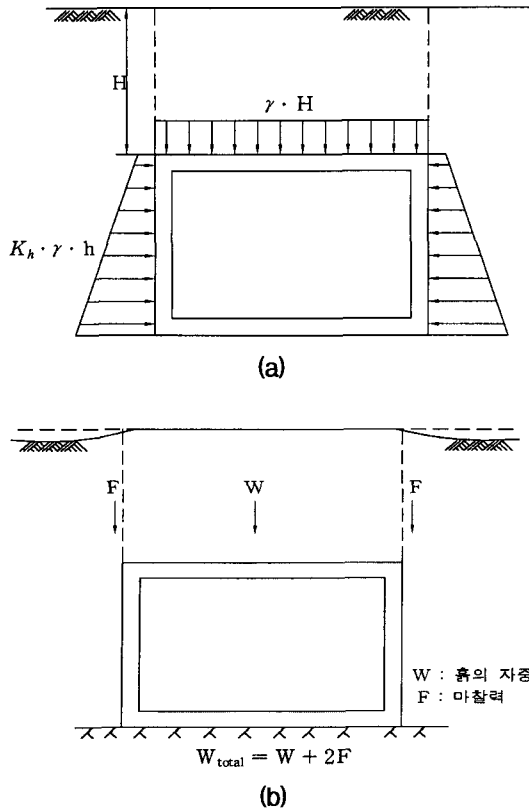


그림 1. 박스구조물에 작용하는 토압

중 등이 있는데 이들 중에서 특히 되메움한 흙의 자중에 의해 박스구조물 상부에 작용하는 연직 토압과 측면에 작용하는 수평토압이 비중이 크다.

2.1 연직토압

박스구조물의 상부슬래브에 작용하는 연직 토압은 박스구조물의 강성에 따라 다르다. 즉, 강성 박스구조물과 연성 박스구조물에서 다르다.

2.1.1 강성 박스구조물

강성 박스구조물이란 구조물의 상부슬래브에 처짐이 발생되지 않는 경우를 말한다. 이러한 강성 박스구조물의 상부슬래브에 작용하는 연직 토압은 박스구조물 외부의 측면 되메움과 슬래브

상부성토 지반의 압축성에 따라 다르게 작용한다. 즉, 측면 되메움지반과 상부 성토지반이 동시에 침하하면 구조물과 지반간의 상대 변위가 발생하지 않아서 상호거동이 발생하는 경우와 토압분포가 다르다.

1) 성토지반의 침하와 동시에 침하하는 경우 박스구조물 양 측면에 있는 되메움지반과 박스구조물 윗면에 있는 성토지반의 침하가 동일하게 발생하는 경우(그림 1 (a))에는 박스구조물 윗면에 작용하는 연직토압은 성토지반의 자중에 의한 중량 ($\gamma \cdot H$)이 된다.

$$P_v = \gamma \cdot H \quad (1)$$

여기서, P_v : 박스구조물 상부에 작용하는 연직 토압

γ : 박스구조물 위의 흙의 단위중량

H : 박스구조물 위의 성토 두께

2) 성토지반의 침하와 상대변위가 발생하는 경우

일반적으로 박스구조물 양측과 상부는 같은 지반으로 되메움하지만 침하가 발생하는 압축성 지층의 높이가 서로 다르므로, 그 침하량은 박스구조물 상부는 적고 양측은 크게 발생한다. 따라서 양자간에 상대변위가 발생하게 되어, 그림 1(b)와 같이 박스구조물 상부지반에 하향마찰력이 작용하여 성토지반의 무게보다 큰 연직토압이 작용하게 된다. 이와 같은 경우에는 Marston-Spangler의 연직토압식(식 (2))이 적용된다.

$$P_v = K_b \cdot \gamma \cdot B_o \quad (2)$$

여기서, $H_o \geq H$: $K_b = \frac{e^{2K\mu(H/B_o)} - 1}{2K\mu}$

$H_o < H$: $K_b = \frac{e^{2K\mu(H/B_o)} - 1}{2K\mu} + \frac{H - H_o}{B_o} e^{2K\mu(H_o/B_o)}$

P_v : 박스구조물 상부에 작용하는 연직토압

γ : 박스구조물 위의 흙의 단위중량
 H : 박스구조물 위의 성토 두께
 H_0 : 가상침하면에서 박스구조물 상부까지의 깊이
 B_0 : 박스구조물의 폭
 K : Rankine의 주동토압계수($K_a = (1 - \sin \phi) / (1 + \sin \phi)$)
 μ : 박스구조물 위의 흙과 양측 흙사이의 마찰계수($\mu = \tan \phi$)이다.

2.12 연성 박스구조물

연성 박스구조물의 상부슬래브에 처짐이 발생하여 박스구조물 상부지반의 침하량이 양측의 침하량보다 커지는 경우에는 앞의 2)의 경우와 반대로 마찰력이 작용하게 된다. 따라서 박스구조물에 작용하는 연직토압은 성토지반의 자중보다 작아진다. 이 경우에 Marston-Spangler는 연직토압을 아래 식 (3)과 같이 제시하고 있다.

$$P_v = K_d \cdot \gamma \cdot B_0 \quad (3)$$

여기서, $H_0 \geq H$ 이면 $K_d = \frac{1 - e^{-2K\mu(H/B_0)}}{2K\mu}$ 이고,
 $H_0 < H$ 이면 $K_d = \frac{1 - e^{-2K\mu(H_0/B_0)}}{2K\mu} + \frac{(H - H_0)}{B_0} \cdot e^{-2K\mu(H_0/B_0)}$ 이다.

2.13 도로 토공, 옹벽·박스·가설구조물 지침(일본도로협회)

2.1.1절의 경우를 근거로 하여 일본도로협회의 「도로 토공, 옹벽·박스·가설구조물 지침」에서는 식 (2)의 계수 K_b 대신에 연직토압계수 α 를 사용하여 연직토압계산식(식 (4))을 규정하고 있다. 여기서 α 는 성토높이 H 와 박스구조물의 폭 B_0 와의 비에 대한 것으로 표 1과 같다.

$$P_v = \alpha \cdot \gamma \cdot H \quad (4)$$

여기서, P_v : 박스구조물 상부의 연직토압
 α : 연직토압계수
 γ : 박스구조물 상부 흙의 단위중량
 H : 박스구조물 위의 성토두께이다.

표 1. 연직토압계수 (α)

H/B ₀	H/B ₀ <1	1 ≤ H/B ₀ <2	2 ≤ H/B ₀ <3	3 ≤ H/B ₀ <4	4 ≤ H/B ₀
α	1.0	1.2	1.35	1.5	1.6

2.2 수평토압

박스구조물, 부벽식옹벽, 지하외벽과 같이 강성이 충분히 큰 구조물은 변형이 작아서 주동토압보다는 정지토압에 가까워지므로, 보통 정지토압을 사용한다. 수평토압 계산식은 식 (5)와 같으며 일반적으로 주동토압보다 크게 산정한다.

$$P_h = K_h \cdot \gamma \cdot h \quad (5)$$

여기서, P_h : 수평토압
 K_h : 수평토압계수
 γ : 박스구조물측면 흙의 단위중량
 h : 지표로부터의 깊이

수평토압계수 K_h 는 성토지반의 다짐방법에 따라 다르며, 실제의 현장지반이 불균질한 사질토와 점토의 혼합토이므로 토압계수 $K_h = 0.5$ 를 사용하는 경우가 많다.

2.3 사일로 토압이론

2.3.1 사일로 토압

지반을 굴착하여 구조물을 설치한 후에 되메운 지반은 대체로 원지반에 비하여 느슨하므로 되메운 흙이 자중에 의해 압축되어 안정해질 때에 원지반 벽면과 되메움지반 사이에 침하량 차이로 인한 상대변위가 발생하여 마찰력이

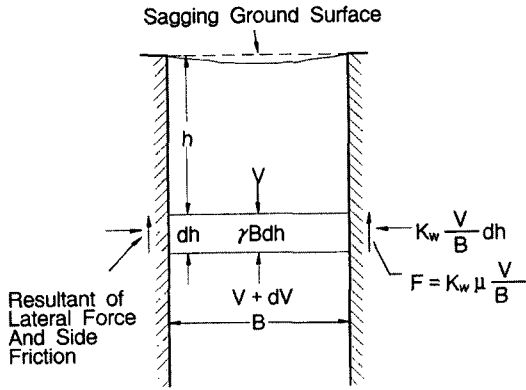


그림 2. 사일로 내에 작용하는 토압

작용하므로 구조물에 작용하는 토압은 자중에 의한 토압보다 작아지는 경향을 보인다. 그림 2에서와 같이 연직한 두 벽면 사이를 되메움할 때 벽면 마찰력이 흙의 자중을 부분적으로 지지하면, 축압 F로 인하여 깊이의 증가와 더불어 점진적으로 총 합력 V를 감소시켜 토압분포는 비선형형상이 된다. 지표면 아래로 깊이 h에 위치하는 두께 dh의 미소 요소를 가정하고, 이 요소에 작용하는 힘들의 연직 평형방정식을 취하면 수직력의 합은 식 (6)과 같이 된다. 단, 이 요소에 작용하는 연직응력은 폭 B에 걸쳐 균등하게 분포한다고 가정한다.

$$dV + 2 K_w \mu \frac{V}{B} dh = \gamma Bdh \quad (6)$$

여기서, 수직벽의 폭 B는 일정하다.

식 (6)을 적분하면 일반적으로 사용되는 트렌치에서의 하중 계산식인 식 (7)이 된다.

$$V = \gamma B^2 \frac{1 - \exp(-2 K_w \mu \frac{h}{B})}{2 K_w \mu} \quad (7)$$

여기서, V = 깊이가 h일때 연직하중의 증가량의 합

γ = 흙의 단위중량

B = 트렌치의 폭

$$K_w = \frac{\sigma_h}{\sigma_{av}}$$

$$\mu = \tan \delta$$

식 (7)로부터 $\frac{V}{B} = \sigma_{av}$, $K_w \sigma_{av} = \sigma_h$ 이므로 폭 B인 구조물의 벽면에 작용하는 수평토압은 다음과 같이 된다.

$$\sigma_h = \frac{\gamma B}{2 \mu} [1 - \exp(-2 K_w \mu \frac{h}{B})] \quad (8)$$

2.3.2 토압계수 K

사일로와 같은 좁은공간에서 토압계산에 사용되는 토압계수 K는 Janssen이 실험을 통해 처음으로 소개하였으며, Marston과 Anderson은 Rankine의 주동토압계수 $K_a = \sigma_3 / \sigma_1$ 를 사용했다.

Krynine(1945)은 Rankine의 주동토압계수가 평면아치와 벽사이에 발생하는 벽마찰을 고려하지 못한다는 점을 수정하여 Mohr의 응력원으로부터 벽체의 마찰을 고려해서 수평토압과 연직토압의 비를 사용하여 식 (9)를 유도하였다.

$$K = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \frac{1 - \sin^2 \phi}{1 + \sin^2 \phi} \quad (9)$$

Handy(1985)는 최소주응력 아치개념을 도입해서 다음과 같은 K값을 제안하였다.

$$K = \frac{\sigma_h}{\sigma_{av}} = 1.06(\cos^2 \theta + K_a \sin^2 \theta) \quad (10)$$

여기서, K_a 는 주동 토압계수이고, $\theta = 45^\circ + \frac{\phi}{2}$ 이다.

3. 실내모형실험

3.1 주문진 자연사의 기본물성

본 연구의 되메움 지반조성에 사용된 주문진 자연사에 대해서 KS F2302에 의한 입도분포시험 및 기본물성시험을 실시한 결과 입도분포 곡

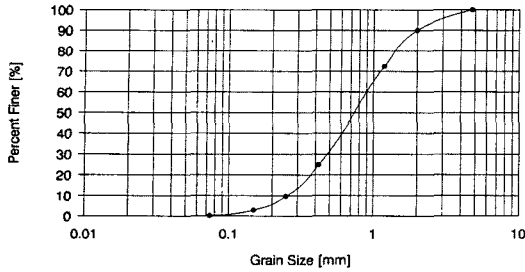


그림 3. 주문진 자연사의 입도분포 곡선

표 2. 주문진 자연사의 기본물성

입도분포	$D_{10} = 0.27$ $C_u = 4.07$ $C_c = 0.98$
최대 건조 단위 중량	$\gamma_{dmax} = 1.82$
최소 건조 단위 중량	$\gamma_{dmin} = 1.52$
최대 간극비	$e_{max} = 0.74$
최소 간극비	$e_{min} = 0.45$
비 중	$G_s = 2.64$

선은 그림 3과 같으며, 통일분류법(unified soil classification system)에 의해 미세입자가 적고 입도분포가 불량한 모래인 SP이었다.

최대 및 최소 건조단위중량은 내경이 $D = 100$ mm, 높이 $H = 125$ mm이고 해체가능한 몰드를 사용하여 다짐봉 다짐시험과 깔때기 채우기에 의한 방법으로 결정한 결과 $\gamma_{dmax} = 1.82$, $\gamma_{dmin} = 1.52$ 로 조사되었다. KS F2308에 의한 비중(G_s)은 2.64로 나타났다.

조성된 퇴매움 지반의 단위중량은 모형토조에 모래를 강사하기 전에 캔을 설치하고 시험이 완료된 후 캔을 꺼내어서 무게를 측정하여 확인하였다. 퇴매움지반의 평균단위중량은 $1.75[t/m^3]$, 상대밀도는 $D_r = 80\%$ 로 나타났다.

3.2 주문진 자연사의 전단강도

본 실험에서 사용한 주문진 자연사의 전단강도특성은 시료를 전단상자에 넣고 다짐봉으로 다져서 상대밀도 80%로 조성해서 변형률제어

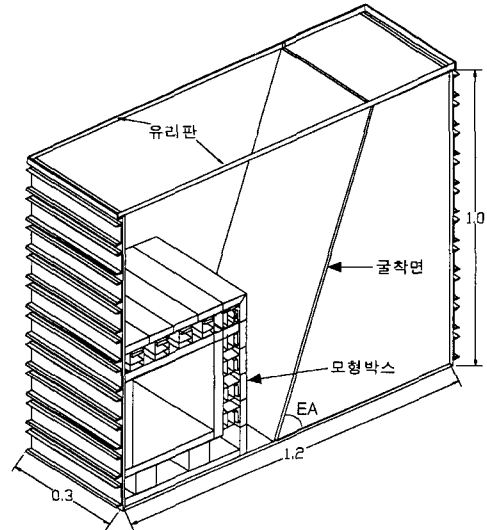


그림 4. 실내모형토조 개요도

(strain-control) 방식으로 1.03 [mm/min]의 속도로 직접전단시험을 실시하여 조사하였다. 연직응력은 0.3, 0.6, 0.9 kg/cm^2 로 변화시켰으며 시험한 결과 점착력은 없고($c=0$) 내부마찰각이 $\phi=41^\circ$ 로 나타났다.

3.3 실험장치 및 측정장치

박스구조물은 강성이 크고 성형이 쉬운 베이클라이트 판을 선반으로 가공하여 길이 30 cm, 높이 9 cm, 두께 2.5 cm의 크기로 제작하였으며 10개(상부5개, 측벽5개)의 부재로 구성하고 각 부재마다 하중계(load cell)를 부착하여 각 벽체에 작용하는 하중의 크기를 측정하였다(그림 5). 각 벽체는 내부에 설치된 강성 frame에 연결하여 고정하였다. 박스구조물의 외벽에는 지반의 내부마찰각에 해당하는 벽마찰 조건을 모사하기 위해 샌드페이퍼를 부착하였고, 벽마찰이 없는 조건을 모사하기 위해 그리스를 바른 아스테이지를 부착하였다. 또한 조립된 각 벽체의 상호간섭을 없애기 위하여 그리스를 바른 비닐을 벽체사이에 부착하였다. 박스구조물은 횡방향의 단면크

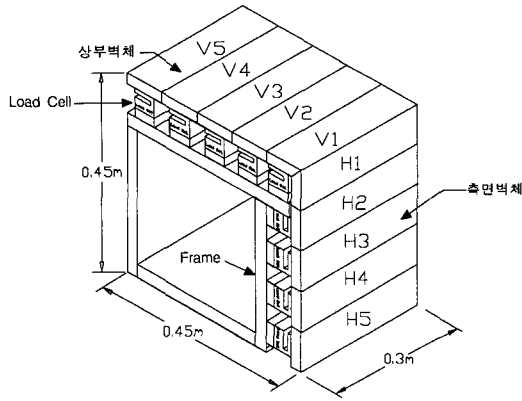


그림 5. 모형박스구조물

기에 비해 종방향의 길이가 상대적으로 매우 길어 평면변형률(plane strain)조건으로 설계 및 해석을 수행한다. 따라서 본 실험에서는 축방향의 변형을 구속하고 박스구조물의 전후 경계벽면에서 전단응력이 발생하지 않도록 토조의 측면내벽에 강성 유리판(1200×1000×8)을 부착하였다. 원지반 굴착면은 안정된 강성지반을 모사하기 위해 강철판에 지반의 내부마찰각에 해당하는 샌드페이퍼를 부착하였고, 굴착면 경사를 조절하기 위해 하부에 힌지를 설치하였다.

박스구조물에 작용하는 연직토압과 수평토압은 허용오차가 0.03%이고, 용량은 100 kgf인 15개의 (주)봉신사의 스트레인 게이지(strain gauge)식 하중계(load cell)를 사용하여 측정하였다. 모형실험에서 측정된 데이터는 미국 Validyne Engineering Corp.사 제품인 UPC-601-U Card와 컴퓨터 프로그램인 Easy Sense Software를 사용하며, 일정한 시간간격으로 자동측정하여 모니터에 출력하고 동시에 컴퓨터에 저장되도록 하였다.

3.4 실험방법

박스구조물 배면의 좁은공간을 되메움 할 때 되메움공간의 형상 및 크기와 벽마찰조건에 따른 박스구조물에 작용하는 연직 및 수평토압의

표 3. 수행한 실험의 종류 및 변수

실험명	벽마찰 WF (δ_w)	되메움 하부폭 B [cm]	굴착면 경사 EA [°]
WF3B1EA9	φ	9	90
WF3B1EA8			80
WF3B1EA7			70
WF3B1EA6			60
WF3B2EA9			18
WF3B3EA9		27	
WF3B4EA9		36	
WF3B5EA9		45	
WF3B6EA9		72	
WF0B2EA9		0	18
WF0B4EA9	36		90
WF0B6EA9	72		90

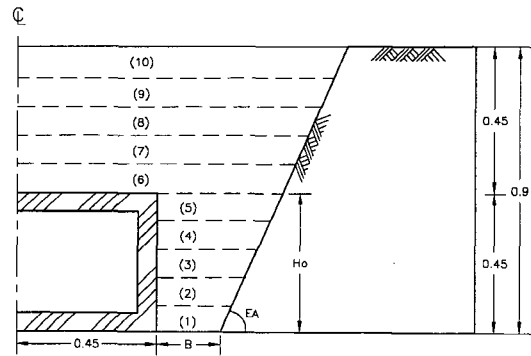


그림 6. 모형실험의 변수 및 되메움단계

크기 및 분포형상을 규명하기 위하여 모형실험을 수행하였다. 되메움지반은 강사장치를 사용하여 샌드커튼(sand curtain)방법으로 균질하게 조성하였고, 그림 6과 같이 되메움 단계별로 박스구조물에 작용하는 토압을 측정하였다. 조성된 되메움 지반의 상대밀도는 강사전에 단위중량 측정용 캔을 실험에 영향이 없는 위치에 설치하고 실험이 완료된 후 캔을 채취해서 무게와 부피를 측정하여 조사하였다. 수행한 실험의 종류는 표 3과 같다.

3.5 실험결과

지하 박스구조물 상부 슬래브에 작용하는 연

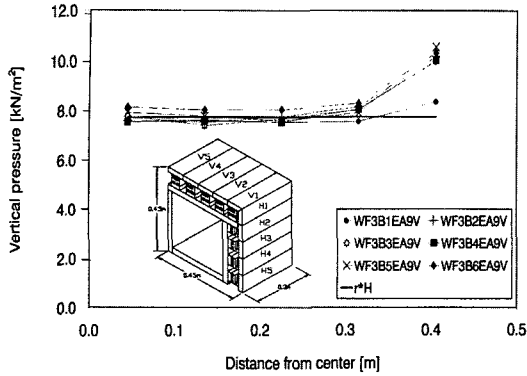


그림 7. 되메움 하부폭(B)에 따른 연직토압 (WF=φ, B=9, 18, 27, 36, 45, 72 cm, EA=90°)

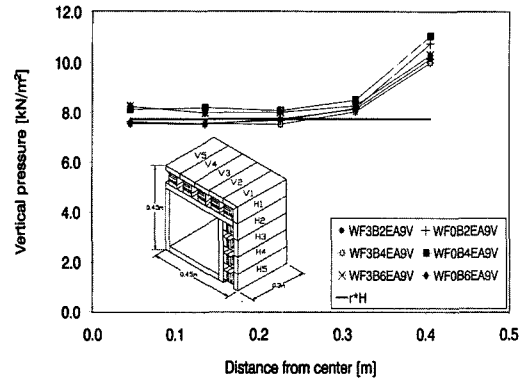


그림 9. 박스구조물 벽마찰각(WF)에 따른 연직토압 (WF=φ, 0, B=18, 36, 72 cm, EA=90°)

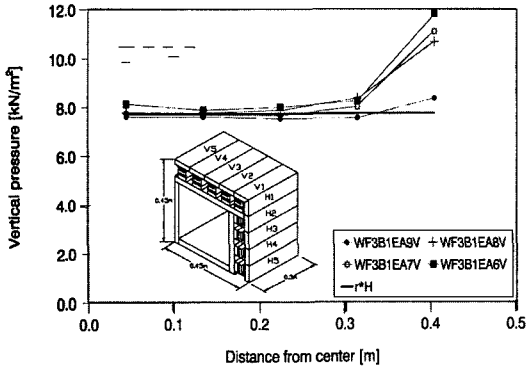


그림 8. 굴착면 경사(EA)에 따른 연직토압 (WF=φ, B=9 cm, EA=90, 80, 70, 60°)

직토압 및 측벽에 작용하는 수평토압의 분포형상과 크기를 고찰하기 위하여 되메움 공간의 형상과 구조물의 벽마찰각을 변화시켜 실내모형실험을 수행한 결과 다음과 같은 분포양상을 보였다.

3.5.1 박스구조물 상부에 작용하는 연직토압

박스구조물 하부지반이 강성지반일 경우에는 강성 박스구조물 상부의 되메움한 지반과 측면 지반사이의 상대변위로 인하여 박스구조물 상부 슬래브에 성토지반의 무게 즉, $\gamma \cdot H$ 보다 큰 연직토압이 그림 7, 8, 9와 같이 작용하였다. 여기

서, 그림 7은 벽마찰각(WF)이 지반의 내부마찰각과 같고, 굴착면 경사(EA)가 90°일 때 되메움 하부폭(B)이 9, 18, 27, 36, 45, 72 cm로 변화하는 경우에 구조물 상부 슬래브에 작용하는 연직토압의 분포형상을 나타내며 되메움 하부폭이 작은 경우는 $\gamma \cdot H$ 보다 다소 작은 크기를 보이나 하부폭이 증가하면 중앙부에서 측면으로 갈수록 $\gamma \cdot H$ 보다 상당히 큰 토압의 분포를 보인다. 그림 8은 벽마찰각(WF)이 지반의 내부마찰각과 같고, 되메움 하부폭(B)이 9 cm일 때 굴착면 경사(EA)가 90, 80, 70, 60°로 변화하는 경우에 상부 슬래브에 작용하는 토압분포를 나타내며 그림 6과 유사한 경향을 보인다. 그림 9는 굴착면 경사(EA)가 90°이고 되메움 하부폭(B)이 18, 36, 72 cm일 때 박스구조물의 벽마찰각(WF)이 지반의 내부마찰각과 같은 경우와 벽마찰이 없는 경우를 나타내며, 벽마찰이 없는 경우가 다소 큰 값을 보이나 전반적으로 유사한 크기를 나타내고 있다.

3.5.2 박스구조물 측벽에 작용하는 수평토압

지하구조물의 측벽에 작용하는 수평토압은 구조물의 변형특성에 따라 다르게 적용하지만 박

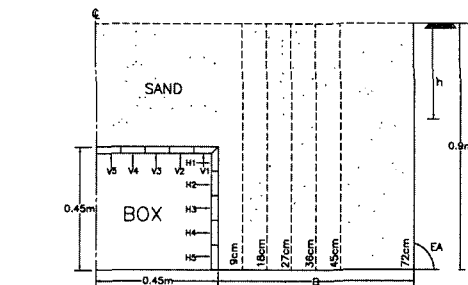
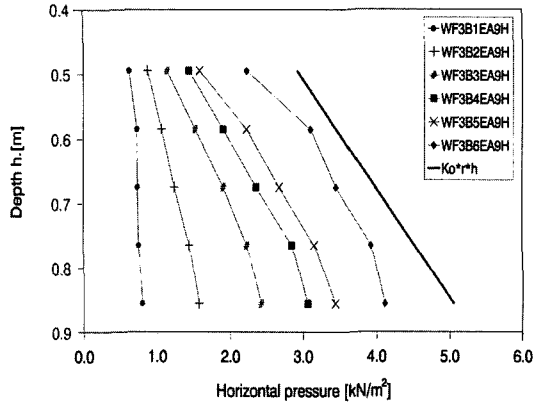


그림 10. 되메움 하부폭(B)에 따른 수평토압 (WF=φ, B=9, 18, 27, 36, 45, 72 cm, EA=90°)

스구조물과 같이 강성이 큰 구조물에서는 일반적으로 정지토압을 적용한다. 그러나 좁은공간을 되메움하는 경우 되메움 지반과 구조물 및 굴착면사이의 마찰에 의해 수평토압의 분포형상은 정지토압과는 상이하다.

그림 10은 벽마찰각(WF)이 지반의 내부마찰각과 같고, 굴착면 경사(EA)가 90°일 때 되메움 지반에 의해 박스구조물 벽체에 작용하는 수평 토압의 분포형상을 나타낸 것이다. 여기에서 되메움 하부폭이 작은 경우에는 토압의 분포는 깊어질수록 완만한 기울기의 직선적인 분포를 보이지만, 하부폭이 증가할수록 정지토압에 근접하며 급격한 기울기의 증가를 보인다. 그러나 되메움 하부폭이 작은 경우 Jaky의 정지토압 $K_0 = 1 - \sin \phi$ 와는 상당한 차이를 보이고 있다.

그림 11은 벽마찰각(WF)이 지반의 내부마찰각과 같고, 되메움 하부폭(B)이 9 cm 일때 굴착

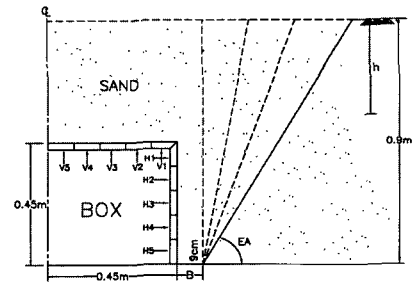
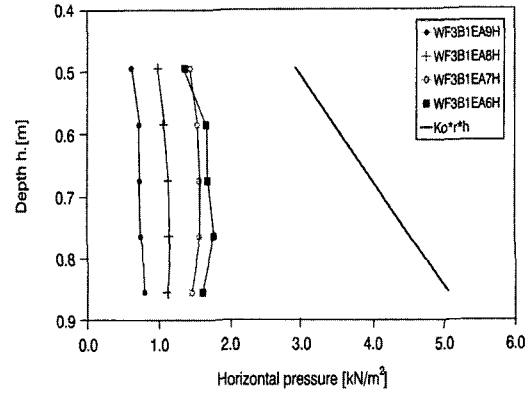


그림 11. 굴착면 경사(EA)에 따른 수평토압 (WF=φ, B=9 cm, EA=90, 80, 70, 60°)

면 경사(EA)가 90, 80, 70, 60°로 변화하는 경우를 나타내며 굴착면 경사가 완만해질수록 수평 토압은 증가하였지만 되메움 깊이에 따른 토압 분포형상은 비선형적인 형태를 보였다. 특히 굴착면 경사가 60°일 때에는 상부에서 초기에는 증가하다가 하부로 내려갈수록 감소하는 경향을 보였다.

그림 12는 굴착면 경사(EA)가 90°이고 되메움 하부폭(B)이 18, 36, 72 cm일 때 박스구조물의 벽마찰각(WF)이 지반의 내부마찰각과 같은 경우와 마찰이 없는 경우를 나타낸다. 되메움 하부폭이 작은 경우에는 벽마찰에 의한 영향이 미소하게 나타나지만 되메움 하부폭이 증가하면 벽마찰에 의한 영향 때문에 마찰이 없는 경우가 다소 크게 나타나고 있다. 이러한 현상은 되메움 깊이가 깊어질수록 더 두드러짐을 보이고 있다.

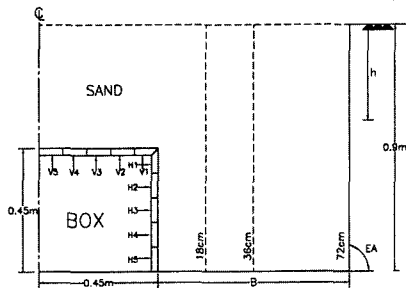
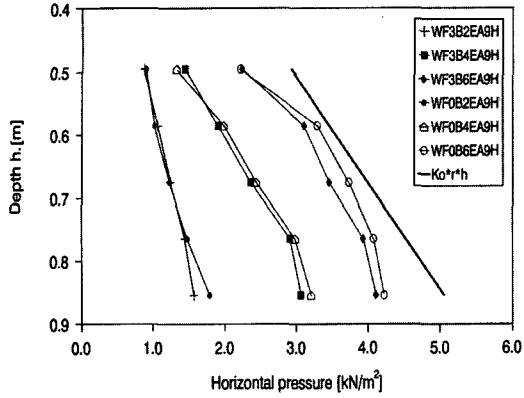


그림 12. 박스구조물의 벽마찰(WF)에 따른 수평토압(WF= ϕ , 0, B=18, 36, 72 cm, EA=90°)

4. 실험결과 비교 분석

뒤메옴한 흙의 자중에 의하여 박스구조물 상부에 작용하는 연직토압에 대한 모형실험을 실시하여 그 결과를 지반의 자중 $\gamma \cdot H$ 와 Marston-Spangler의 이론식 및 일본도로협회의 규정과 비교하였으며, 측벽에 작용하는 수평토압은 모형실험결과를 고전토압이론 및 사일로토압과 비교 분석하였다.

그림 13, 14는 벽마찰(WF)이 지반의 내부마찰각과 같고, 굴착면 경사(EA)가 90°일 때 박스구조물과 원지반 굴착면의 간격(B)을 9 cm, 36 cm, 72 cm로 변화시킬 때에 연직 및 수평토압에 대해서 모형실험과 토압이론의 결과를 비교한 것이다.

박스구조물 상부슬래브에 작용하는 연직토압

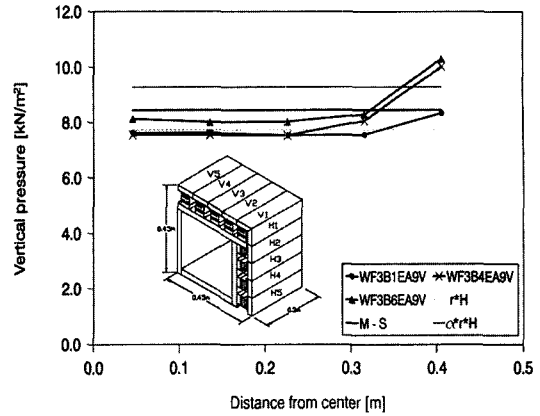


그림 13. 뒤메옴 하부쪽(B)에 따른 연직토압 비교(WF= ϕ , B=9, 36, 72 cm, EA=90°)

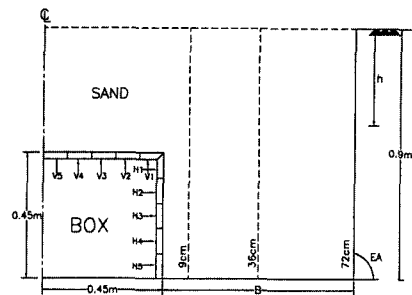
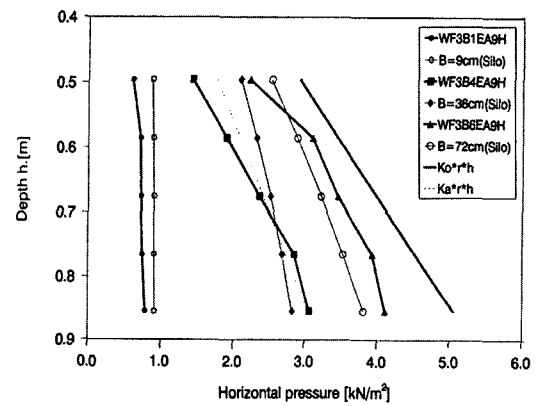


그림 14. 뒤메옴 하부쪽(B)에 따른 수평토압 비교(WF= ϕ , B=9, 36, 72 cm, EA=90°)

은 그림 13과 같이 굴착면과의 거리가 짧은 경우에는 뒤메옴 지반과 굴착면사이의 벽마찰에 의한 아칭현상으로 인하여 $\gamma \cdot H$ 보다 작은 크기를 보이고, 뒤메옴 하부쪽이 증가하면 벽마찰에 의

한 영향이 감소하고 Marston-Spangler의 연직토압계산식에 근접한 값의 크기를 보인다. 또한 박스구조물의 중앙보다는 측면으로 갈수록 연직토압은 급격한 기울기로 증가하는 경향을 보이는데, 이러한 현상은 박스구조물의 상부와 측면지반의 침하량차이에 의한 상대변위가 발생하여 중앙부에서 측면으로 갈수록 지반의 아칭현상에 의한 응력전이 현상으로 발생한다고 사료된다. 일본도로협회(1996)의 계산식은 실험결과 및 Marston-Spangler의 연직토압보다 다소 크게 나타났다.

그림 14는 수평토압의 분포형상으로 실험결과와 고전토압이론(정지토압, 주동토압) 및 사일로(silo)토압이론을 비교한 것이다. 되메움 하부폭이 작은 경우에는 실험결과 및 사일로토압이론이 유사한 분포형상을 보이지만, 상부에서 사일로토압이론이 다소 큰 값을 보이고 있다. 또한, 깊이에 따른 수평토압의 분포형상은 벽마찰에 의한 아칭효과가 커짐에 따라 완만한 기울기로 증가됨을 보이고 있다. 되메움 하부폭(B)이 36 cm 및 72 cm인 경우에는 아칭효과가 감소하여 수평토압은 삼각형 형태의 토압분포를 보이지만 상부에서 하부로 갈수록 비선형적으로 증가하였다. 되메움 지반과 구조물 측벽사이의 마찰에 의한 아칭현상은 구조물의 높이(H_0)대 되메움 하부폭(B)의 비(H_0/B)가 클수록 잘 나타남을 알 수 있었다.

박스구조물의 설계시 수평토압산정을 위하여 적용하는 정지토압은 되메움 하부폭에 따른 모형실험 및 사일로토압과는 상당한 차이를 보이고 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 원지반을 개착식으로 굴착하여 박스구조물을 설치한 후 되메움할 때 되메움 공간의 형상과 박스구조물의 벽마찰에 따른 토압

의 분포형상을 규명하기 위하여 실내모형실험을 수행하였으며, 실험결과를 기존의 설계토압이론 및 사일로토압이론과 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 모형실험결과 박스구조물 상부슬래브에 작용하는 연직토압은 되메움 하부폭(B)이 작은 경우에 $\gamma \cdot H$ 보다 작은 크기를 보이고, 되메움 하부폭이 증가함에 따라 중앙부분에서 다소 작게 증가하고, 측면부에서 상당히 크게 증가하여 Marston-Spangler의 연직토압식에 상응하는 값을 보였다. 원지반 굴착면 경사(EA)에 따른 영향도 유사하게 나타났다.
- 2) 박스구조물의 측면에 작용하는 수평토압의 분포형상은 되메움 하부폭이 작은 경우에는 완만한 기울기의 선형적인 증가를 보이고 하부폭이 증가함에 따라 삼각형 형태의 비선형적인 분포를 보였다. 또한 원지반 굴착면 경사가 완만해짐에 따라서 수평토압은 상부에서는 깊이에 따라 증가하다가 하부로 깊어질수록 감소하는 분포형상을 보였다.
- 3) 박스구조물의 벽마찰은 상부슬래브에 작용하는 연직토압보다는 측벽에 작용하는 수평토압에 많은 영향을 미치며, 벽마찰이 감소함에 따라 수평토압이 증가하는 경향을 보였다. 또한, 되메움 하부폭이 증가할수록 벽마찰에 의한 영향이 증가하였다.
- 4) 사일로토압이론에 의해 산출된 수평토압은 모형실험에 비하여 상부에서는 다소 과대평가하고 있으나, 깊이에 따른 분포형상은 유사하게 나타났다. 그러나 일반적으로 박스구조물의 설계에 적용되는 정지토압과는 상당한 차이를 보였다.

참 고 문 헌

1. 기술경영사 (1996), 최신 흙과 기초의 설계계산연

- 습, pp. 53-87.
2. 이상덕, 문창열, 김은섭, 이종규 (1997), "퇴매울 지반에 의한 수평토압에 관한 연구", 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제17권, 제III-3호, pp. 285-292.
 3. 이승래, 백규호, 박현일 (1993), "아칭효과를 고려한 강성체 옹벽의 주동토압 산정", 대한토목학회 학술발표회집, 대한토목학회, pp. 457-460.
 4. 유건선 (1997), "실험 및 수치해석에 의한 복개터널 주위의 지압 및 터널 복공의 역학적 거동에 관한 연구", 공학박사 학위논문, 서울대학교.
 5. 탐구문화사 (1997), 알기쉬운 옹벽·칼버트의 설계, pp. 85-118.
 6. 정진교 (1994), "기존사면에 인접한 중력식 옹벽에 작용하는 주동토압", 공학박사 학위논문, 동아대학교.
 7. 정성교, 조기영, 윤치관, 이대명 (1996), "퇴매울(굴착)의 형상에 따라 매설박스에 유발되는 토압", 한국지반공학회지, 제12권, 제5호, pp. 75-85.
 8. 조기영 (1994), "박스구조물에 작용하는 토압", 공학석사 학위논문, 동아대학교, 1994.
 9. Abhijit Dasgupta & Brastish Sengupta. (1991), *Large-Scale Model Test on Square Box Culvert Backfilled with Sand*, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 117, No. 1, pp. 156-161.
 10. Janssen, H. A (1896), "Versuche uber Getreidedruck in Silozellen", Z. Ver. deutIngr., Vol. 39, p.1045
 11. Krynine, D. P (1945), discussion of "Stability and Stiffness of Cellular Cofferdams", by Karl Terzaghi, ASCE. Vol. 110, pp.1175-1178.
 12. Kellogg, C. G. (1993), *Vertical earth loads on buried engineered works*, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 119, No. 3, pp. 487-506.
 13. Richard L. Handy (1985), *The Arching in Soil Arching*, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 111, No. GT3, pp. 302-318.
 14. Spangler, M. G. & Handy, R. L. (1982), *Soil Engineering*, fourth edition, Harper & Row, Publishers, pp. 727~790.
 15. Terzaghi, K. (1943), *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 66-76.

(접수일자 1999. 5. 18)