

## 지중에 매설된 박스구조물에 작용하는 토압 산정

### Estimation of Earth Pressures Acting on Box Structures Buried in Ground

홍원표<sup>1</sup>, 윤중만<sup>2</sup>, 송영석<sup>3\*</sup>

Won-Pyo Hong<sup>1</sup>, Jung-Mann Yun<sup>2</sup>, Young-Suk Song<sup>3\*</sup>

<sup>1</sup>Member, Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Chung-Ang University, 84 Heukseok-ro, Dongjak-ku, Seoul, Republic of Korea

<sup>2</sup>Member, Professor, Department of Construction Information System, ShinAnsan University, 135 Shinansandeahak-ro Danwon-gu, Ansan, Republic of Korea

<sup>3</sup>Member, Principal Researcher, Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, 124 Gwahank-ro, Yuseong-gu, Daejeon, Republic of Korea

#### ABSTRACT

The earth pressure acting on underground structure was measured by application of the instrumentation system in the subway construction site constructed by the method of cut-and-cover tunnel. The measured earth pressure was compared with the earth pressure obtained from the existed theoretical equation, and the actual earth pressure diagram acting on the underground structure was investigated. As a result of investigation, the vertical earth pressure is mainly affected by the embankment height, and the lateral earth pressure is significantly affected by whether the existence of earth retaining structures or not. The measured vertical earth pressure is very similar to the theoretical earth pressure proposed by Bierbaumer. The measured lateral earth pressure is closed to the active earth pressure proposed by Rankine rather than the earth pressure at rest. The coefficient of earth pressure in soil deposit layer is about 0.35, and the coefficient in soft rock deposit layer is about 0.21. For design and construction the underground structures, therefore, it is reasonable estimation that the lateral earth pressure acting on structures installed in soil deposit layers is an average value between active earth pressure and earth pressure at rest. In rock deposit layers, the lateral earth pressure acting on structure is an active earth pressure only.

#### 요 지

지중에 매설된 박스구조물에 작용하는 토압을 지하철 건설 현장의 지하철역 건설을 위하여 지하 박스구조물을 시공하는 현장에 적용하여 측정하였다. 측정된 토압을 기존의 이론적 방정식에서 얻은 토압과 비교하여, 지하 박스구조물에 작용하는 실제 토압 분포를 조사하였다. 조사 결과, 수직 토압은 주로 흙막이 높이에 영향을 받으며, 수평 토압은 흙막이 구조물의 존재 여부에 크게 영향을 받는다. 측정된 수직 토압은 Bierbaumer가 제안한 이론적 토압과 매우 유사하며, 측정된 수평 토압은 Rankine가 제안한 활성 토압에 가깝고, 흙막이 구조물이 없는 경우에는 수평 토압이 휴식 토압에 가깝다. 흙질 지층에서의 토압 계수는 약 0.35, 연암 지층에서의 토압 계수는 약 0.21이다. 따라서, 지하 박스구조물의 설계와 시공을 위하여, 흙질 지층에서 작용하는 수평 토압은 활성 토압과 휴식 토압의 평균값을, 암질 지층에서 작용하는 수평 토압은 활성 토압만을 고려하는 것이 타당하다.

**Keywords** : Underground box structure, Instrumentation, Vertical earth pressure, Lateral earth pressure, Coefficient of earth pressure

Received 6 May. 2015, Revised 9 Jun. 2015, Accepted 11 Jun. 2015

\*Corresponding author

Tel: +82-42-868-3035; Fax: +82-42-868-3414

E-mail address: yssong@kigam.re.kr (Y.S.Song)

#### 1. 서 론

일반적으로 지하 박스구조물은 개착식 터널공법 및 암거공법으로 시공되어 진다. 개착식 터널공법은 지표면에

서 직접시공이 곤란하여 가설흙막이벽을 이용하여 지반을 굴착하고 굴착지반속 소정의 위치에 구조물을 설치한 후 성토를 실시하는 것이다. 도심지에서의 지하철 공사시 주로 적용되는 개착식 터널공법은 굴착단면을 최대한 이용하기 위하여 주로 구형 라멘단면을 이용하고 있다. 한편, 암거공법은 지표면에서 직접시공이 가능하며 구조물이 완성된 후 그 일부를 노출시키거나 매설하는 것이다. 암거공법은 도로, 철도 등을 횡단하기 위하여 지반에 매설된 통로(칼버트), 전화, 가스, 상하수도 등의 관로 및 공동구를 총칭하며, 주로 원형 또는 구형 단면이 이용되고 있다.

굴착지반속에 설치된 지하구조물에 작용하는 토압은 성토재와 구조물과의 상호작용에 의해 영향을 받게 된다. 즉, 연직토압 및 측압(측방토압 및 수압)은 구조물과 주변 지반의 상대변위, 구조물과 주변지반 사이에 작용하는 마찰력(상향 또는 하향), 구조물의 강성, 구속조건, 성토재의 종류 등에 의해 크게 좌우된다. 일반적으로 지하구조물을 설계할 때 구조물 상부에 작용하는 연직토압은 주로 성토재의 단위중량에 성토고를 곱한 연직상재압을 적용하고, 구조물 측면에 작용하는 측방토압은 연직상재압에 토압계수를 곱하여 산정하고 있다. 일반적으로 측방토압은 지하구조물의 측면의 변형이 거의 발생하지 않는 것으로 가정하여 정지토압으로 간주한다.

지하구조물에 작용하는 토압에 관한 연구는 Marston and Anderson(1913)에 의해 시작되었다. Marston and Anderson(1913)은 원지반에 트렌치를 굴착하고 매설관을 설치할 경우 트렌치내 매립토의 침하로 인한 트렌치 벽면과의 마찰저항을 고려하여 매설관에 작용하는 연직토압을 산정하였다. 이를 토대로 Spangler(1948)는 매설관 상부 매립토에서의 지반아칭을 고려하여 Marston and Anderson(1913)의 이론을 확장하였다. 그리고, Christensen(1967)은 기존 매설관 부근을 굴착하여 다른 매설관을 설치할 경우 기존 매설관에 작용하는 토압에 대하여 Marston and Anderson(1913)의 이론을 수정하여 제안하였다. Dasgupta and Sengupta(1991)는 지중에 매설된 박스구조물에 작용하는 토압을 측정하기 위하여 대형모형실험을 수행한 바 있다. 한편, 정성교 외 3인(1996)은 굴착단면의 형상에 따른 매설박스구조물에 작용하는 토압에 대하여 이론적 및 수치해석적 연구를 수행하였으며, 이상덕 외 3인(1997)은 모형실험을 통하여 지하구조물에 작용하는 측방토압에 대한 연구를 수행하였다. 그러나, 이들은 모두 이론적, 수치해석적 및 모형실험적 연구이며, 실제 현장에서 측정된 자

료를 토대로 수행된 연구는 미흡한 편이다.

따라서, 본 연구에서는 개착식 터널공법으로 시공된 지하철 건설현장을 대상으로 각종 계측시스템을 적용하여 지하 박스구조물에 작용하는 토압을 측정하였다. 이를 토대로 기존 이론식으로 산정된 토압과 현장에서 계측된 실측토압을 비교 검토하고, 실제 지하 박스구조물에 작용하는 토압분포를 조사하고자 한다. 특히 지하 박스구조물이 완성된 이후, 성토에 의한 상재하중제거시, 최상단 버팀보 제거시, 흙막이벽 제거시 등 시공단계별로 토압의 변화를 고찰하고자 한다.

## 2. 대상현장

### 2.1 현장개요

본 연구에 활용된 굴착현장은 서울지하철 제 8호선 잠실구간의 개착식터널 공사구간이다. 현장계측은 본선구간 2개소와 정차장구간 2개소에 축조된 지하 박스구조물에 토압계 및 간극수압계를 각각 설치하여 실시하였다.

Fig. 1은 본선구간 및 정차장구간의 계측지점 및 주변상황을 개략적으로 나타낸 것이다. 제1계측지점은 남쪽의 백제고분로(폭 35m)에서 북쪽으로 50m정도 떨어진 석촌호수의 서호부근에 굴착깊이 17.2m, 굴착폭 12.5m로 이루어진 지하공간에 축조된 지하 박스구조물의 좌측벽이다. 제2계측지점은 북쪽의 잠실길(폭 25m)에서 송파대로(폭 40m) 남쪽방향으로 45m 떨어진 지점에 축조된 지하 박스구조물의 우측벽이다. 제1계측지점과 제2계측지점은

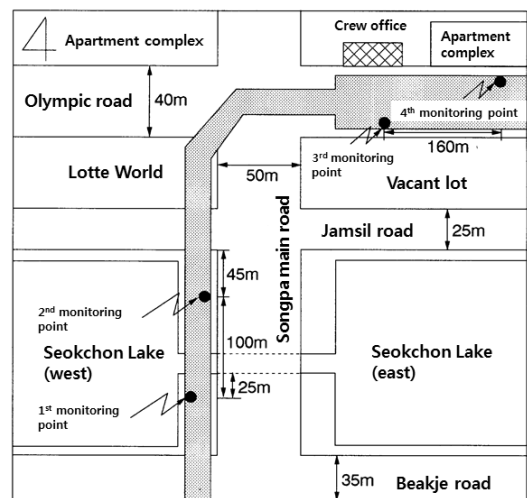


Fig. 1. Schematic view of study area and monitoring positions

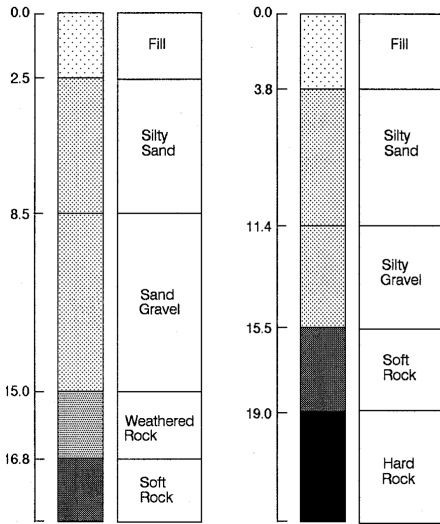


Fig. 2. Soil profiles of this site

약 100m정도 떨어져 있으며 이들 계측지점 사이에는 석촌호수 동호와 서호의 관통수로가 위치하고 있다. 한편, 제3계측지점은 올림픽로(폭 40m)를 따라 동서방향으로 위치한 잠실정차장구간 부근에 굴착깊이 23.3m, 굴착폭 33.2m로 이루어진 지하공간에 축조된 지하 박스구조물의 남측벽이며, 북쪽으로 10m 떨어진 지점에 승무원 사무소 신축공사가 진행되고 있다.

## 2.2 지반 특성

대상현장의 지층구성은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 지표면으로부터 매립토층, 충적토층, 풍화암층, 연암 및 경암층으로 구성되어 있다. 매립토층은 주로 실트 및 자갈섞인 모래, 모래섞인 자갈로 이루어져 있으며, 층의 두께는 1.0~

3.8m의 범위로 나타나고 있다. 이 지층은 단지조성 및 도로포장공사에 의하여 인위적으로 형성된 것이다. 충적토층은 매립토층 하부에 위치하고 있으며 한강 및 탄천의 범람이나 하상퇴적 등에 의해 형성된 것이다. 층의 두께는 11.7~12.5m 정도로 매우 두텁게 분포되어 있다. 충적토층의 상부는 모래층으로서 주로 실트섞인 모래로 구성되어 있으며 부분적으로 실트 혹은 자갈이 함유되어 있다. 충적토층의 하부는 자갈층으로서 모래 및 실트섞인 자갈로 구성되어 있으며 구간에 따라 약간의 호박돌이 함유되어 있다. 풍화암층은 충적토층의 하부에 위치하며 기반암이 풍화작용을 받아 형성된 것이다. 그리고, 풍화암층의 하부에는 연암 및 경암층이 위치하고 있으며, 이는 대상현장의 기반암층으로 구분된다. 즉, 지표면으로부터 15m깊이 정도까지는 매립토층 및 충적토층으로 형성된 토사층이며, 그 하부는 절리 및 균열이 발달된 암반층으로 구분할 수 있다. 한편, 대상지반의 지하수위는 지표면으로부터 7.1~8.0m아래에 위치하고 있다.

## 2.3 흙막이구조물

지하공간을 마련하기 위하여 설치된 가설흙막이구조물은 매립토층 및 충적토층으로 이루어진 토사층까지 강널말뚝(Sheet-Pile)을 관입시켰으며, 그 하부인 풍화암층 및 연암층에서는 슛크리트를 타설하거나 엄지말뚝(H-Pile)을 설치하고 그 사이에 콘크리트판을 타설하기도 하였다. 그리고 흙막이벽 지지구조는 버팀보지지방식으로 시공하였다.

본선구간에 설치된 흙막이벽은 Fig. 3(a)에 나타난 바와 같이 G.L(-)15.5m까지는 강널말뚝을 관입하고, 그 하부

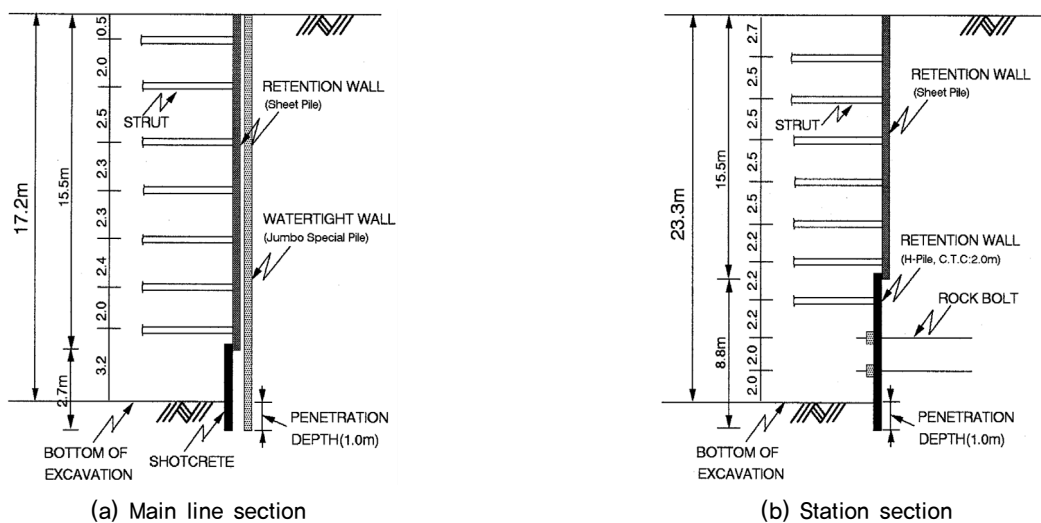


Fig. 3. Cross section of earth retention wall

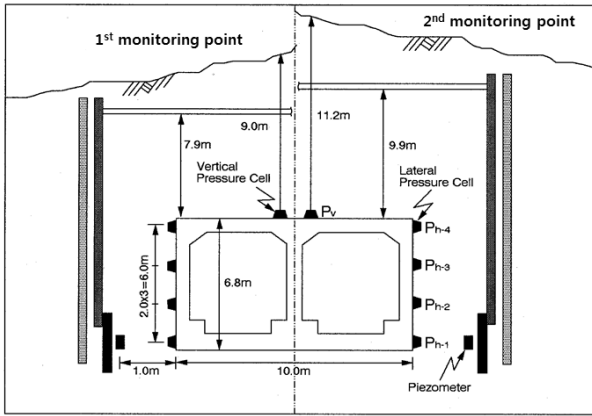


Fig. 4. Cross section of monitoring system in the main line section

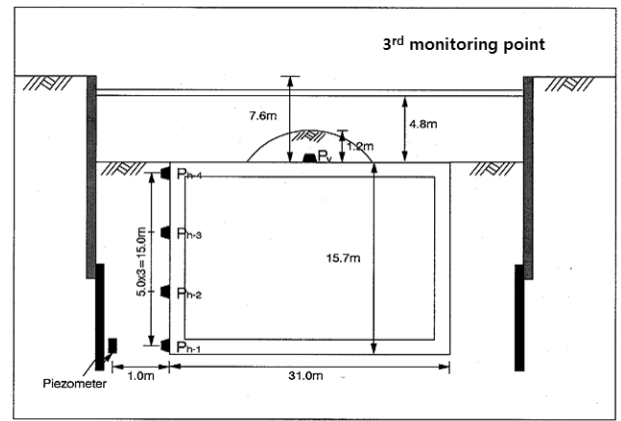


Fig. 5. Cross section of monitoring system in the station section

연암층의 2.7m 깊이까지는 슛크리트로 타설하였다. 본 굴착구간의 서측에는 석촌호수가 위치하고 있으므로 흙막이벽 배면지반에 차수벽을 설치하여 굴착현장내로 지하수의 유입을 방지하였다. 차수벽은 고압분사주입공법(JSP)을 적용하였으며 직경 80cm의 현장콘크리트말뚝을 G.L(-)17.0m 까지 중첩시공하였다.

정차장구간에 설치된 흙막이벽은 Fig. 3(b)에 나타난 바와 같이 G.L(-)15.5m까지 강널말뚝을 관입하고, 그 하부 암반층에는 엄지말뚝(H-Pile)을 2m간격으로 G.L(-)24.3m 까지 관입하였다. 그리고 엄지말뚝이 설치된 암반층에는 록볼트를 설치하여 흙막이벽을 지지하도록 하였다. 본 구간에서는 흙막이벽 배면지반에 별도의 차수벽을 설치하지는 않았으나 엄지말뚝이 설치된 구간에서는 흙막이판을 설치하지 않고 두께 15cm의 철근콘크리트를 타설하여 지하수가 굴착현장내로 유입되는 것을 방지하였다.

### 3. 현장계측

Fig. 4는 본선구간의 제1 및 제2계측지점에 설치된 토압계 및 간극수압계의 설치단면도를 개략적으로 나타낸 것이다. 그림에서 이점쇄선을 기준으로 우측이 제1계측지점이고 좌측이 제2계측지점이다. 연직토압계는 구조물 상단 중앙부에 1개씩 설치하였으며, 제1계측지점의 경우 측방토압계를 구조물 좌측벽에, 제2계측지점은 구조물의 우측벽에 각각 4개씩 설치하였다. 측방토압계는 연직으로 2m간격으로 설치되었으며 최하단 측방토압계는 구조물 측벽 하단부에서 0.7m 상부지점에 설치하였다.

Fig. 5는 정차장구간의 제3계측지점에 설치된 토압계

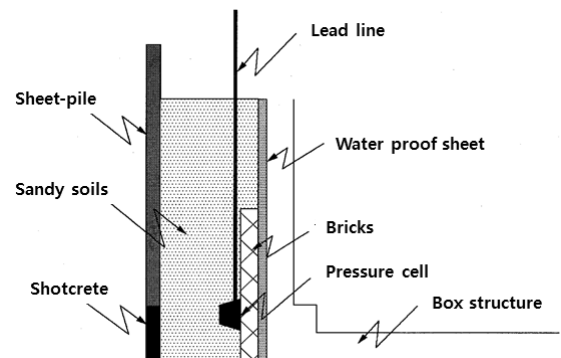


Fig. 6. Detail drawing for installing pressure cell

및 간극수압계의 설치단면도를 개략적으로 나타낸 것이다. 연직토압계는 구조물 상단 중앙부에 1개를 설치하였으며, 측방토압계는 구조물 남측벽에 4개를 설치하였다. 측방토압계는 연직으로 5m간격으로 설치되었으며 최하단 측방토압계는 구조물측벽 하단부에서 0.7m 상부지점에 설치하였다.

간극수압계는 Fig. 4와 5에 나타난 바와 같이 각 계측지점 모두 최하단 측방토압계로부터 약 1.0m정도 떨어진 지점에 설치하였다.

한편, Fig. 6은 측방토압계의 설치방법을 나타낸 것이다. 구조물의 측벽에 방수 처리후 누름벽돌을 쌓고 표면을 평탄하게 고르거나 고령점토로 고른 후 그위에 토압계를 고정·부착시켰다. Lead선은 PVC Pipe에 삽입시켜 지상의 측정장치에 연결시켰다. 토압계가 설치된 주변은 모래질 흙으로 천천히 다지면서 뒷채움을 실시하였으며 그 이외의 지점은 굴착된 원지반 흙을 사용하여 뒷채움을 하였으며 다짐은 실시하지 않았다.

## 4. 계측결과

### 4.1 연직토압

Fig. 7은 지하 박스구조물의 상단 중앙부에 설치된 토압 계로부터 측정된 연직토압의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 횡축을 측정일자, 종축을 연직토압( $t/m^2$ )으로 표시하였다.

제1계측지점에서 측정된 연직토압은 성토초기단계에서  $0.14t/m^2$ 정도로 매우 작게 나타났으나 성토가 진행되면서 토압은 급격히 증가하여 최상단 버팀보를 제거하고 성토 계획고까지 성토가 완료되었을때  $13.36-13.75t/m^2$ 정도로 나타났다. 흠막이벽(Sheet-pile)이 제거되자 토압은 약간 증가하여  $14.41-14.42t/m^2$ 정도로 나타났으며 시공이 완료된 후 장기간(2년)동안 토압의 변화는 거의 없이 일정하게 유지되고 있는 것으로 나타났다. 한편, 제2계측지점에서 측정된 연직토압의 변화는 제 1계측지점과 유사한 경향을

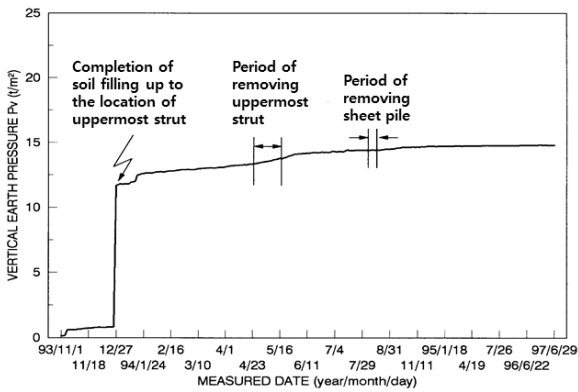
보이고 있다.

제3계측지점의 연직토압은 토압계 상부를 흠으로  $1.2m$  정도 덮어둔 상태에서 성토작업이 이루어지지 않아  $2.0t/m^2$ 으로 일정하게 유지되고 있다.

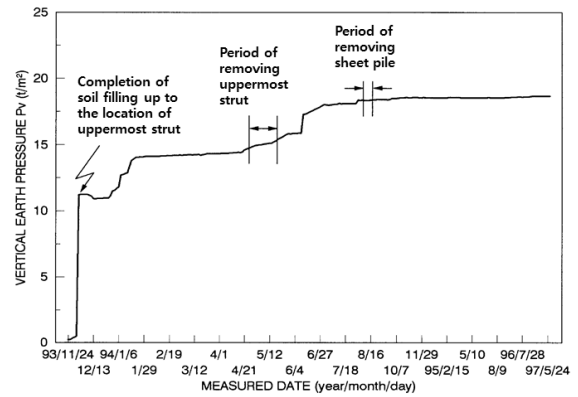
### 4.2 측압

Fig. 8과 9는 각각 본선구간 및 정차장구간에 축조된 지하 박스구조물의 측벽부에 설치된 토압계로부터 측정된 측압(측방토압 및 수압)의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 횡축을 측정일자, 종축을 측압( $t/m^2$ )으로 표시하였으며 좌측의 표시와 숫자는 구조물 측벽에 설치된 토압계의 위치를 표시하였다.

제1계측지점에 설치된 4개의 토압계로부터 측정된 측압은 흠막이벽과 구조물 사이에 뒷채움이 실시되는 성토 초기에는  $0.04-0.84t/m^2$  정도로 나타났으나 성토가 진행되면서 측압은 증가하기 시작하여 최상단 버팀보를 제거하

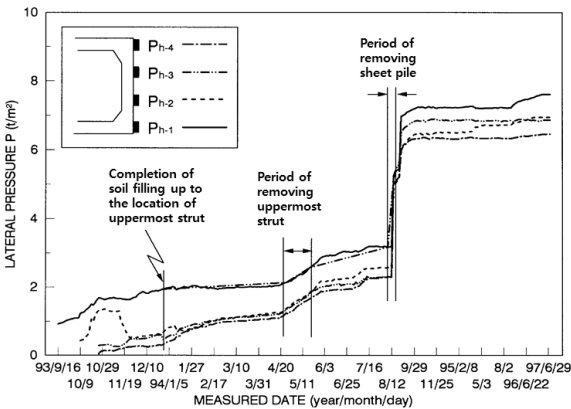


(a) 1st monitoring position

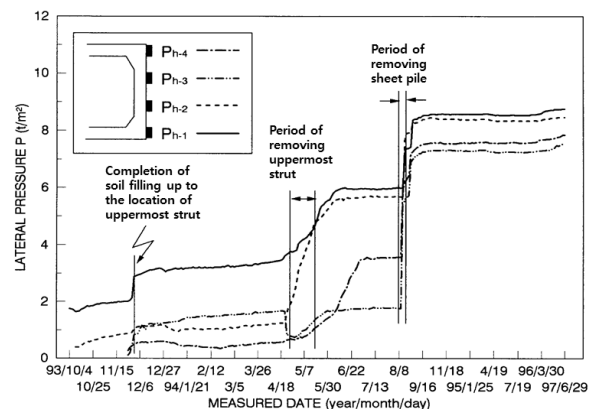


(b) 2nd monitoring position

Fig. 7. Variation of vertical earth pressure in the main line section



(a) 1st monitoring position



(b) 2nd monitoring position

Fig. 8. Variation of lateral pressure in the main line section

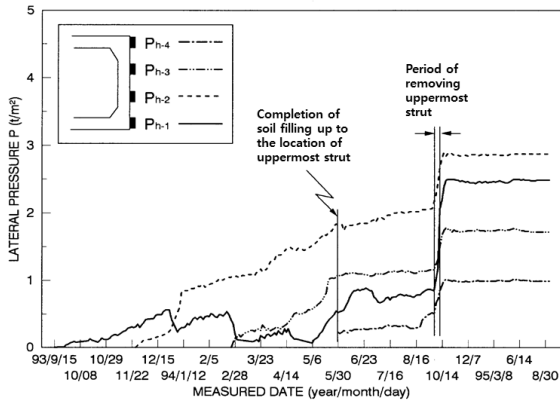


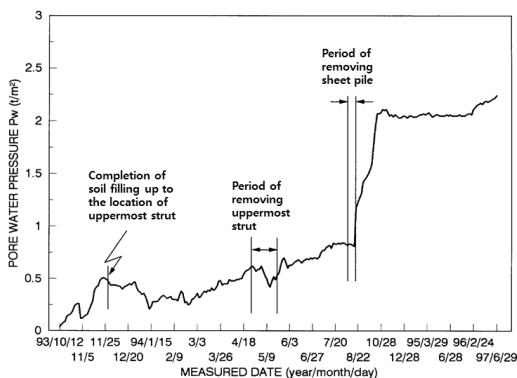
Fig. 9. Variation of lateral pressure in the station section (3rd monitoring position)

고 성토계획고까지 성토가 완료되었을때는 1.3-2.7t/m<sup>2</sup> 정도로 나타났다. 흠막이벽이 제거된 단계에서는 토압이 급격히 증가하여 6.34-7.57t/m<sup>2</sup> 정도로 나타났으며 시공이 완료된 후 장기간(2년)동안 토압의 변화는 거의 없이 일정하게 유지되고 있는 것으로 나타났다. 한편, 제2계측지점에서 측정된 측압의 변화는 제1계측지점과 유사한 경향을 보이고 있다.

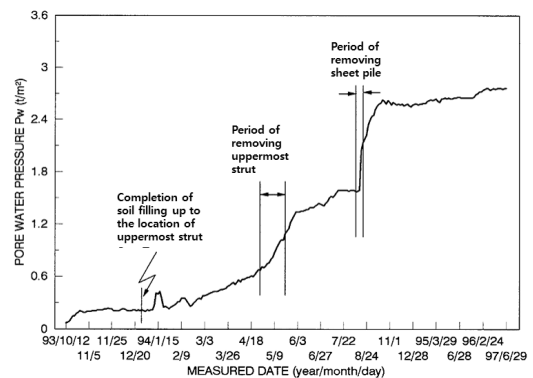
제3계측지점의 측압의 변화도 제1 및 제2계측지점과 유사하게 나타나고 있다. 그러나,  $P_{h-1}$  토압계의 경우는 Lead 선이 여러번 단선되어 초기에 계측된 측압은 매우 불규칙한 경향을 보이고 있으나 뒷채움이 완료된 후부터는 나머지 3개의 토압계와 동일한 경향을 보이고 있다. 최상단 버팀보를 제거하자 토압은 증가한 후 일정하게 유지되고 있다.

### 4.3 간극수압

Fig. 10은 본선구간에 축조된 지하 박스구조물 측벽의



(a) 1st monitoring position



(b) 2nd monitoring position

Fig. 10. Variation of pore water pressure in the main line section

최하단 토압계에서 1.0m 떨어진 지점에 설치된 간극수압 계로부터 측정된 간극수압의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 횡축을 측정일자, 종축을 간극수압(t/m<sup>2</sup>)으로 표시하였다.

제1계측지점에서 측정된 간극수압은 지하굴착과 동시에 양수작업을 실시하여 뒷채움이 실시되는 성토초기에는 0.05t/m<sup>2</sup> 정도로 거의 작용하지 않는 것으로 나타났다. 그러나 성토가 진행되면서 지하수가 유입되어 간극수압은 증가하여, 최상단 버팀보를 제거하고 성토계획고까지 성토가 완료된 단계에서는 1.6t/m<sup>2</sup> 정도로 나타났다. 흠막이벽이 제거된 단계에서는 흠막이벽 배면에 있던 지하수가 구조물측벽으로 더욱 유입되면서 간극수압이 크게 증가하여 2.66t/m<sup>2</sup> 정도로 나타났다. 그러나 시공이 완료된 후 장기간(2년)동안 간극수압은 흠막이벽 제거시와 큰 변화가 없는 것으로 나타나고 있다. 이것은 흠막이벽 배면에 설치된 차수벽(J.S.P)에 의해 지하수가 매우 작게 유입되었기 때문이라고 판단된다. 제2계측지점에서 측정된 간극수압의 변화도 제1계측지점과 유사한 경향을 보이고 있다.

한편, 시공이 완료된 후 간극수압의 측정결과를 토대로 하면 지하수의 위치는 G.L (-)12.82m-15.52m로 굴착전의 지하수위(G.L(-)7.1-8.0m)보다 훨씬 낮은 것으로 나타났다.

## 5. 시공단계별 토압변화

굴착저면에 축조된 지하 박스구조물에 토압계를 설치한 이후 굴착공간내에 성토를 실시하는 단계에서부터 흠막이벽을 제거한 후 시공이 완료된 단계까지의 토압변화를 검토하기 위하여 다음과 같이 시공단계를 4단계로 구분하였다.

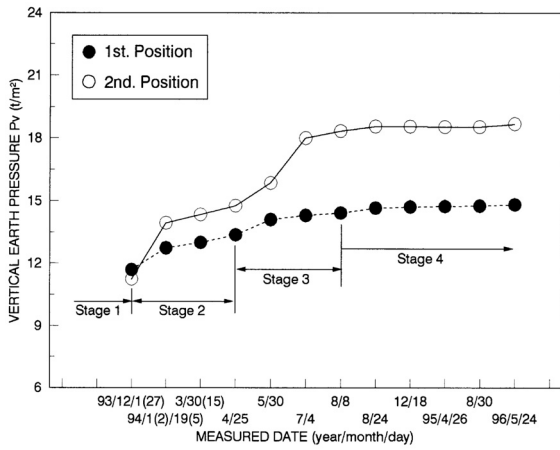


Fig. 11. Vertical earth pressure according to construction stages

제1단계는 최상단 버팀보위치까지 성토완료시 토압을 나타낸 것으로 제1계측지점의 경우 성토고가 7.9m, 제2계측지점의 경우 성토고가 9.9m이다. 제2단계는 최상단버팀보 제거전 토압을 나타낸 것이다. 제3단계는 성토계획고(지표면)까지 성토완료시 토압을 나타낸 것으로 제1계측지점의 경우 성토고가 9.0m, 제2계측지점의 경우 성토고가 11.2m이다. 마지막으로 제4단계는 흠막이벽 제거후 토압을 나타낸 것이다.

### 5.1 시공단계별 연직토압

Fig. 11은 시공단계별 연직토압의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 최상단 버팀보위치까지 성토가 완료된 제1단계 구간에서의 연직토압은 상재하중의 증가로 인하여

제1계측지점에서는 11.69t/m<sup>2</sup>, 제2계측지점에서는 11.24t/m<sup>2</sup> 정도가 작용하고 있다. 최상단 버팀보가 제거되기전 상재하중이 증가되지 않은 제2단계 구간에서도 연직토압은 각각 1.67t/m<sup>2</sup> 및 3.52t/m<sup>2</sup>정도 증가하여 13.36t/m<sup>2</sup> 및 14.67t/m<sup>2</sup> 정도가 작용하고 있다. 이것은 성토과정에서 흠막이벽을 지지하고 있던 2단-6단의 버팀보가 제거됨에 따라 흠막이벽의 하부에서 변형이 굴착면쪽으로 발생되면서 성토된 흙이 압축을 받아 흙의 상대밀도가 증가한 것으로 판단된다.

최상단 버팀보를 제거하고 성토계획고까지 성토가 완료된 제3단계 구간에서는 제1계측지점에서는 1.1m, 제2계측지점에서는 1.3m 성토가 추가로 실시되어 연직토압은 각각 1.05t/m<sup>2</sup> 및 3.58t/m<sup>2</sup> 증가하여 14.41t/m<sup>2</sup> 및 18.34t/m<sup>2</sup> 정도가 작용하고 있다. 흠막이벽이 제거된 제4단계 구간에서의 연직토압은 2년동안 장기간 토압의 변화를 계측한 결과 14.81t/m<sup>2</sup> 및 18.68t/m<sup>2</sup>로 토압의 변화는 거의 없는 것으로 나타나고 있다. 따라서 지하 박스구조물에 작용하는 연직토압은 버팀보제거에 따른 흠막이벽의 변형에도 영향을 받지만 성토고에 큰 영향을 받고 있으며 흠막이벽의 존치여부에는 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다.

### 5.2 시공단계별 측방토압

Fig. 12는 시공단계별 측방토압(측압에서 간극수압을 제외한)의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 최상단 버팀보위치까지 성토가 완료된 제1단계 구간에서의 측방토압은 제1계측지점에서는 최대 1.72t/m<sup>2</sup> 및 2.44t/m<sup>2</sup> 정도가 작용하

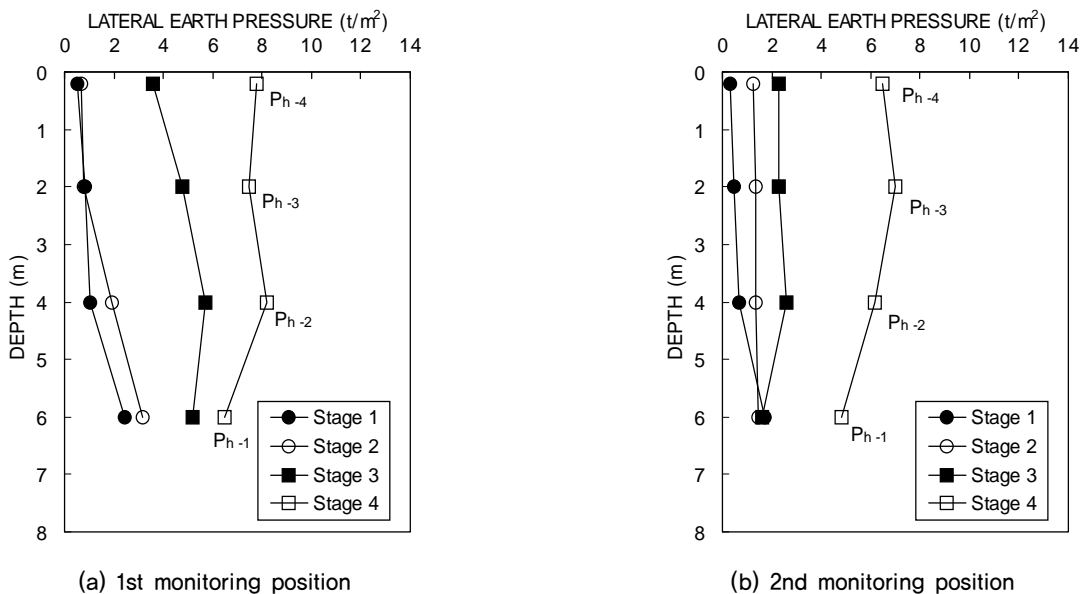


Fig. 12. Lateral earth pressure according to construction stages

고 있다. 최상단 버팀보위치까지 성토가 완료된 후부터 최상단 버팀보가 제거되기전 상재하중이 증가되지 않은 제2단계 구간에서의 측방토압은 약간 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 하단의 버팀보가 제거되면서 구조물의 측벽으로 흙막이벽의 변형이 발생하여 흙막이벽과 구조물 사이의 뒷채움된 흙에 수평방향으로 압축력이 증가한 것으로 판단된다.

최상단 버팀보를 제거하고 성토계획고까지 성토가 완료된 제 3단계 구간에서의 측방토압은 각 계측지점에서 최대 2.57t/m<sup>2</sup> 및 5.7t/m<sup>2</sup>이 작용하고 있다. 이와 같이 토압이 크게 증가한 것은 두가지 요인으로 판단된다. 즉, 성토고의 증가와 흙막이벽을 지지하고 있던 버팀보가 모두 제거되어 흙막이벽이 부담하던 측방토압의 일부가 구조물측벽에 작용하고 있는 것으로 판단된다. 그리고 흙막이벽 제거된 제4단계 구간에서의 연직토압은 흙막이벽이 제거된 후 약 4개월동안 매우 큰 폭으로 증가하여 제1계측지점에서는 최대 6.98t/m<sup>2</sup>, 제2계측지점에서는 7.47t/m<sup>2</sup>정도가 작용하고 있으며, 그 후 약 1년 6개월동안 토압은 매우 미세하게 증가하고 있다. 이와 같이 상재하중은 증가되지 않았는데도 구조물에 작용하는 측방토압이 크게 증가한 것은 흙막이벽에 작용하던 배면지반의 측방토압이 흙막이벽 제거로 인하여 지하 박스구조물에 전부 작용하였기 때문이라고 판단된다.

따라서 측방토압은 성토고 및 흙막이벽의 변형에도 영향을 받지만 흙막이벽의 존치여부에 큰 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 흙막이벽을 제거하지 않고 지중에 그대로 방치시키는 경우에는 지하 박스구조물에 작용하는 측방토압을 30~70%정도, 평균 50%를 경감시킬 수 있는 효과가 있음을 알 수 있다. 한편, 흙막이벽 배면지반에 고압분사 주입공법에 의하여 시공된 차수벽(J.S.P)이 구조물에 작용하는 측방토압을 일부 부담하여 흙막이벽 제거후 측정된 측방토압이 실제보다는 작게 작용한 것으로 생각되나, 약 2년동안의 장기간 계측결과 측방토압의 변화는 미소하게 나타나고 있으므로 차수벽에 의한 구조물에 작용하는 측방토압의 경감효과는 낮은 것으로 판단된다.

## 6. 분석 및 고찰

### 6.1 토압계수

Fig. 13은 제1 및 제2계측지점에서 측정된 연직토압 및

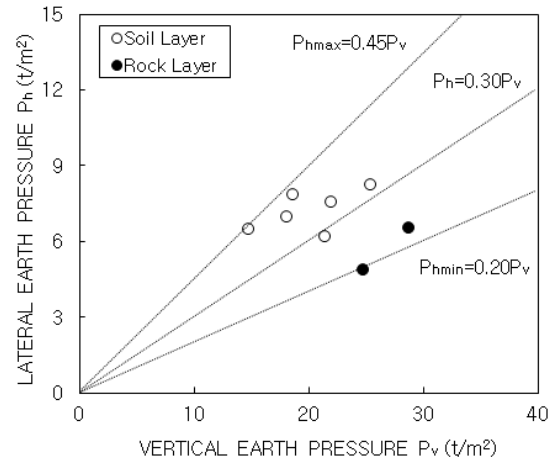


Fig. 13. Coefficient of earth pressure

측방토압을 이용하여 토압계수를 산정한 결과를 나타낸 것이다. 여기서 연직토압 및 측방토압은 흙막이벽 제거후에 측정된 최대토압을 이용하였으므로 자연상태의 지반과 동일하다고 판단된다.

지하 박스구조물 상부에서 측정된 연직토압이 구조물 측벽의 최상단에 부착된 토압계( $P_{h-4}$ )의 설치지점에서 작용하는 연직토압과 같다고 가정하고,  $P_{h-3}$ ,  $P_{h-2}$ ,  $P_{h-1}$  계측지점의 연직토압은 현장에서 측정된 연직토압에 각 토압계의 설치위치에 단위중량( $\sigma = \gamma Z$ )을 곱하여 가산하였다. 여기서, 흙의 단위중량( $\gamma$ )은 각 측정점에서 측정된 연직토압으로부터 산정한 결과 제1계측지점은 1.65t/m<sup>3</sup> 제2계측지점은 1.67t/m<sup>3</sup>으로 나타났다.

Fig. 13에서 토압계수는 토사층의 경우 0.29~0.44사이에 분포하고 있으며 평균 0.35정도로 나타났으며 연암층의 경우 0.20~0.23사이에 분포하고 있으며 평균 0.21정도로 나타났다. 따라서 지하 박스구조물의 측벽에 작용하는 토압계수는 원지반이 견고할수록 작게 나타나고 있어 뒷채움재의 종류 뿐만아니라 원지반의 종류(강도)에도 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 한편, 토사층의 경우에는 현재 통상적으로 지하 박스구조물의 뒷채움재(내부마찰각  $\phi = 30^\circ$ )에 적용하고 있는 정지토압계수  $K_0 = 0.5$ 보다 작게 나타나고 있으나 주동토압계수와는 매우 유사하게 나타났다.

### 6.2 이론토압과 연직토압의 비교

Fig. 14는 지하 박스구조물 상부에 작용하는 연직토압에 대하여 실측토압과 Marston & Anderson(1913)의 이론



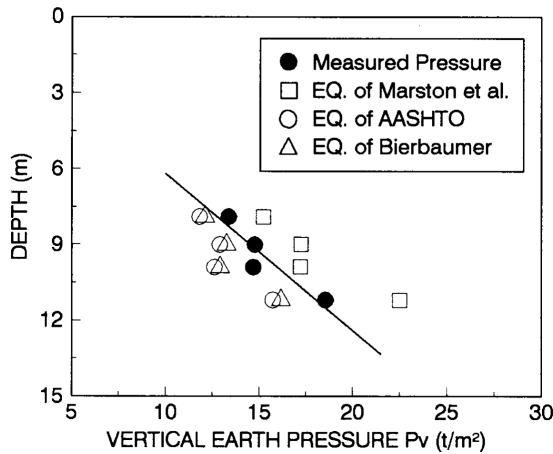


Fig. 14. Comparison of theoretical earth pressure and vertical earth pressure

식, AASHTO(1994)의 이론식, Bierbaumer(1913)의 이론식에 의한 이론토압과 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 연직토압은 성토고가 다른 두가지 경우에 대해서 비교한 것으로 최상단 버팀보까지 성토가 완료되었을때의 연직토압과 흙막이벽이 제거된 후 최대연직토압을 대상으로 하여 이론식과 비교하였다.

Fig. 14에서 AASHTO(1994)의 이론식과 Bierbaumer(1913)의 이론식에 의하여 산정된 연직토압은 현장에서 측정된 실측토압보다는 약간 작게 나타나고 있으나 Marston & Anderson(1913) 이론식에 의하여 산정된 연직토압은 실측토압보다 약간 크게 나타나고 있다. 실측토압은 이들 이론식에 의하여 산정된 연직토압 가운데 Bierbaumer(1913)의 이론토압에 가장 근사하게 나타나고 있다.

### 6.3 이론토압과 측방토압의 비교

#### 6.3.1 뒷채움 완료시 토압

흙막이벽과 지하 박스구조물 사이의 폭 1.0m를 뒷채움이 완료된 상태에서 구조물에 작용하는 측방토압은 폭이 좁은 사일로 내에 작용하는 측방토압과 유사할 것이다. 이러한 경우, 뒷채움한 흙은 구조물(지하 박스구조물과 흙막이벽)과 뒷채움된 흙의 마찰력에 의해 지지되므로 구조물과 뒷채움흙 사이의 마찰각은 정확한 측방토압을 산정하는데 매우 중요한 파라메타이다.

구조물과 뒷채움흙 사이의 마찰각( $\delta$ )은 주로 내부마찰각( $\phi$ )의 함수로 주어진다. 일반적으로 느슨한 모래의 경우에는  $\delta = \phi$ 이고, 조밀한 모래의 경우에  $\delta < \phi$ 를 적용하고 있다. 한편, Muller-Breslau(1906)는  $\delta = (1/2 \sim 3/4)\phi$ 의 범

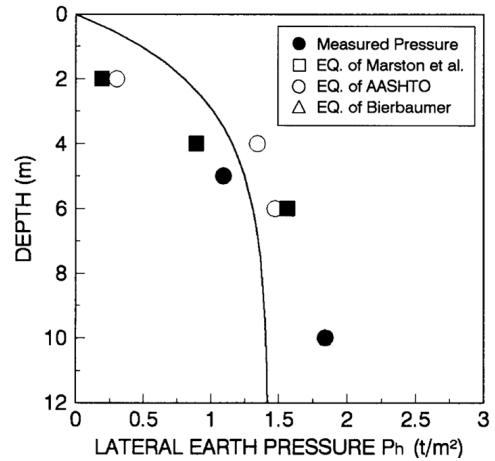


Fig. 15. Lateral earth pressure distribution after finishing backfill

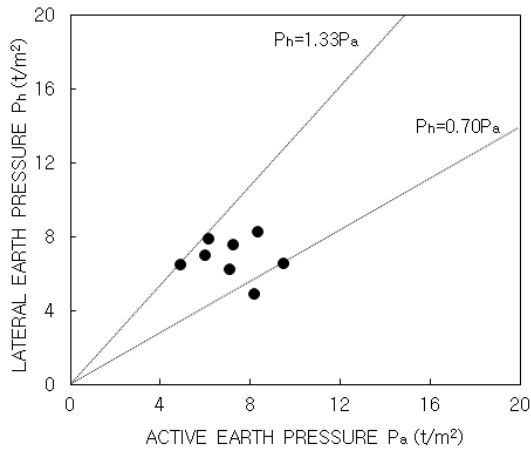
위라고 하였으며, Terzaghi(1943)는  $\delta = \phi$ , Houska(1960)는  $\delta = (2/3)\phi$ 라고 하였다.

Fig. 15는 현장에서 구조물 상단까지 뒷채움이 완료된 단계에서 측정된 측방토압과 사일로(Silo)내의 토압산정식을 이용하여 구한 측방토압을 비교하여 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 실측토압의 분포는 사일로내의 토압가운데  $\delta = (3/4)\phi$ 인 경우와 대체적으로 잘 일치하는 것으로 나타나고 있으며  $\delta = (2/3)\phi$ 인 경우보다는 약간 작게 나타나고 있다. 그러나 구조물 상부에서 측정된 토압은 사일로내에 작용하는 토압보다 작게 나타나고 있다. 이것은 뒷채움이 완료된 후 바로 측정된 토압을 이용하였기 때문에 상부의 뒷채움재의 다짐이 충분히 이루어지지 않은 상태이므로 자연상태의 지반보다는 느슨하여 실제토압보다 작게 측정된 것으로 판단된다.

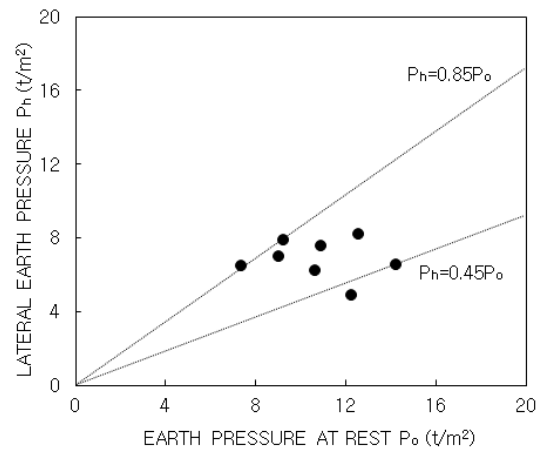
#### 6.3.2 측방토압과 주동 및 정지토압의 비교

Fig. 16(a)는 지하 박스구조물에 작용하는 실측최대측방토압과 Rankine(1857)의 주동토압  $P_a (= K_a \gamma_{avg} H)$ 과 비교한 결과이며 Fig. 16(b)는 실측최대토압과 정지토압  $P_o (= K_o \gamma_{avg} H)$ 과 비교한 결과이다. 여기서 단위중량( $\gamma$ )은 구조물 상부에 설치된 토압계로부터 측정된 연직토압을 이용하여 산정하였으며, 흙의 내부마찰각( $\phi$ )은 설계시 통상적으로 성토재에 적용하고 있는  $30^\circ$ 를 적용하였다.

Fig. 16(a)에서 실측최대측방토압은 지반조건에 관계없이 Rankine(1857)의 주동토압보다 작게 나타나고 있다. 토사지반에 작용하는 실측최대측방토압은 주동토압의 0.70~1.33배 사이에 분포하고 있으며 평균적으로 0.90배



(a) Active earth pressure versus lateral earth pressure



(b) Earth pressure at rest versus lateral earth pressure

Fig. 16. Relationship between active earth pressure or earth pressure at rest and lateral earth pressure

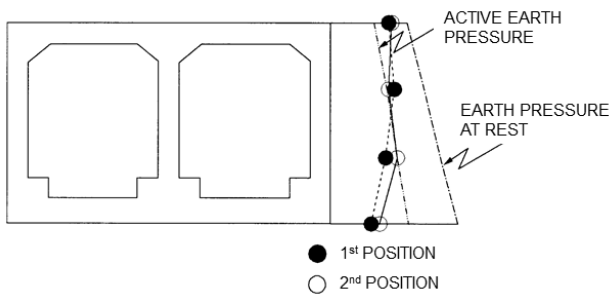


Fig. 17. Lateral earth pressure diagram

로 나타났다. 한편, Fig. 16(b)에 나타난 바와 같이 실측 최대측방토압은 정지토압의 0.45~0.85배 범위에 분포하고 있으며 평균 0.60배 정도로 나타났다.

#### 6.4 겉보기측방토압 분포

Fig. 17은 제1 및 제2계측지점에서 측정된 최대측방토압분포를 측정 깊이별로 주동토압 및 정지토압분포와 비교분석하여 나타낸 것이다. 그림에서 실측측방토압분포는 구조물 상부에서는 주동토압과 정지토압 사이에 분포하고 있지만 하단에서는 주동토압보다 작게 작용하고 있다. 이와 같이 하단부의 측방토압이 주동토압보다 작게 작용하고 있는 것은 이 지점의 원지반이 연암층으로 되어 있어 토사층보다 토압계수가 작기 때문이다.

따라서 토사층구간에 설치된 지하 박스구조물에 작용하는 측방토압은 정지토압보다는 주동토압과 정지토압의 평균치  $(P = \frac{(K_a + K_o)}{2} \gamma H)$ 를, 그리고, 암반층 구간에 설치되는 경우에는  $(P = K_a \gamma H)$ 를 사용하는 것이 보다 합리

적이라고 판단된다.

### 7. 결론

개착식 터널공법으로 시공된 지하철 건설현장을 대상으로 각종 계측시스템을 적용하여 지하 박스구조물에 작용하는 토압을 측정하였다. 이를 토대로 기존 이론식으로 산정된 측방토압과 현장에서 계측된 실측토압을 비교 검토하고, 실제 지하 박스구조물에 작용하는 토압분포를 조사하였다. 이들 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 지하 박스구조물에 작용하는 연직토압은 주로 성토고에 큰 영향을 받고 있으며 흙막이구조물의 존치여부에는 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 그러나 측방토압은 성토고도 영향을 받지만 흙막이벽구조물(버팀보, 흙막이벽)의 존치여부에 큰 영향을 받고 있다. 특히, 흙막이벽이 지중에 그대로 설치되어 있는 경우에는 지하 박스구조물에 작용하는 측방토압을 30~70% 정도 작게 작용하고 있다.
- (2) 토압계수는 토사층의 경우 평균 0.35정도로 나타났으며 연암층의 경우 평균 0.21정도로 토사층에서 크게 나타나고 있다. 따라서 토압계수는 원지반이 견고할수록 작게 나타나고 있어 뒷채움재의 종류 뿐만 아니라 원지반의 종류(강도)에도 영향을 받고 있음을 알 수 있다.
- (3) 현장에서 측정된 지하 박스구조물 상단에 작용하는 연직토압은 Bierbaumer(1913)의 이론토압에 가장 근

사하게 나타나고 있으며, AASHTO(1994)의 이론식 보다는 작으며 Marston & Anderson(1913) 이론식보다 크게 나타나고 있다. 그리고 측방토압은 정지토압보다 주동토압에 가깝게 작용하고 있다.

- (4) 지하 박스구조물 측벽에 뒷채움이 완료된 후 구조물에 작용하는 측방토압은 Marston & Anderson(1913)의 사일로 내의 토압산정식을 적용하여 추정하는 것이 가능하며, 구조물과 뒷채움흙 사이의 마찰각이  $\delta = (3/4)\phi$ 인 경우와 일치하고 있다.
- (5) 지하 박스구조물이 토사층에 설치되는 경우, 지하 박스구조물에 작용하는 측방토압은 정지토압보다는 주동토압과 정지토압의 평균치를, 암반층에 설치되는 경우에는 주동토압을 사용하는 것이 보다 합리적이라고 판단된다.

### Acknowledgement

This research was supported by the Basic Research Project (Grant No. 15-3413) of Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (KIGAM) funded by the Ministry of Science, ICT and Future Planning of Korea.

### References

1. AASHTO (1994) *LRFD Bridge Design Specifications*, 1st Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.

2. Bierbaumer, A. (1913) *Die dimensuonierung des tunnel-mauerwerkes*, Leipzig, W. Engelmann.

3. Christensen J.T. (1967) "The application of generalized stress-strain relations", *Proc. Symp. on Limit Equilibrium, Plasticity, and Generalized Stress-Strain Applications in Geotech. Engg.*, ASCE, Annual Convention and Exposition, Hollywood, Florida, pp.182-204.

4. Chung, S.G., Cho, K.Y., Yoon, C.K., Lee, D.M. (1996) "Earth pressures on box culvert induced by excavation geometry", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.12, No.5, pp.27-40. (In Korean with English Abstract)

5. Dasgupta, A. and Sengupta, B. (1991) "Large scale model test on square box culvert backfilled with sand", *Jour. Geotechnical Engineering*, Vol.117, No.1, pp.156-161.

6. Houska, J. (1960) "Beitrag zur theorie der erddrucke auf das tunnelmauerwerk", *Schweizerische Bauzeitung*, Vol.78, pp.607-609.

7. Lee, S.D., Moon, C.Y., Kim, E.S., Lee, C.K. (1997) "A study on the lateral earth pressure by the narrowly backfilled soil", *Jouranal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol.17, No.III-3, pp.285-292. (In Korean with English Abstract)

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", *Bulletins of the Engineering Experiment Station*, Iowa State College, No.31, pp.30-64.

9. Müller-Breslau H. (1906) *Erddruck auf Stutzmauern*, Alfred Kroner, Stuttgart.

10. Rankine, W. (1857) "On the stability of loose earth", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol.147, pp.9-27.

11. Spangler, M.G. (1948) "Underground conduits-An appraisal of modern research", *Transactions of ASCE*, Vol.113, pp. 316-345.

12. Terzaghi, K. (1943), *Theoretical soil mechanics*, John Wiley and Sons, pp.66-76.