

## 지하굴착시 앵커지지 지중연속벽에 작용하는 측방토압 및 벽체의 변형거동

### Lateral Earth Pressures Acting on Anchored Diaphragm Walls and Deformation Behavior of Walls during Excavation

홍 원 표<sup>1</sup> Hong, Won-Pyo

윤 중 만<sup>2</sup> Yun, Jung-Mann

이 문 구<sup>3</sup> Lee, Moon-Ku

이 재 호<sup>4</sup> Lee, Jae-Ho

#### Abstract

Lateral earth pressure and horizontal displacement of the diaphragm walls constructed in multi-soil layers were analyzed by the field instrumentation from six building construction sites in urban area. The distribution of the developed earth pressure of the anchored diaphragm walls during excavation shows approximately a trapezoid diagram. The maximum earth pressure of anchored diaphragm walls corresponds to  $0.45\gamma H$ , and the earth pressure acts at the upper part of the walls. The maximum earth pressure is two times larger than the empirical earth pressure of flexible walls in sands suggested by Terzaghi and Peck (1967), Tschebotarioff (1973), and Hong and Yun (1995a). The horizontal displacement of diaphragm walls is closely related with supporting systems such as struts, anchors, and so on. The horizontal displacement of anchored walls shows less than 0.1 percent of the excavated depth, and the horizontal displacement of strutted walls shows less than 0.25 percent of the excavated depth. Therefore, the restraining effect of horizontal displacement to the anchored diaphragm walls is larger than the strutted diaphragm walls. In addition, since the horizontal displacement of the diaphragm walls is lower than the criterion,  $\delta = 0.25\%H$ , used for control the anchored retention wall using soldier piles, the safety of excavation sites applied with the diaphragm walls is pretty excellent.

#### 요 지

6개의 도심지 굴착현장에서 계측된 현장계측자료를 토대로 다층지반에 설치된 앵커지지 지중연속벽에 작용하는 측방토압과 벽체의 변형을 분석하였다. 앵커지지 지중연속벽에 작용하는 측방토압의 분포는 사다리꼴 모양이며, 최대 측방토압의 크기는  $0.45\gamma H$ 임을 알 수 있다. 그리고 굴착면 상부에서도  $0.1\gamma H$ 의 토압이 작용하는 것으로 나타났다. 제안된 측방토압의 크기는 Terzaghi and Peck(1967), Tschebotarioff(1973) 및 홍원표와 윤중만(1995a)이 제안한 연성벽체의 경험토압보다 약 2배 정도 크다. 지중연속벽의 변형거동은 지지방식과 밀접한 관계가 있는 것으로 나타났다. 앵커지지 지중연속벽의 수평변위는 굴착깊이의 0.1%이내에서, 버팀보 지지방식의 경우에는 굴착깊이의 0.25% 이내에서 발생하고 있어, 벽체의 지지효과는 앵커지지방식이 버팀보 지지방식보다 양호함을 알 수 있다. 그리고 지중연속벽의 수평변위는 엄지말뚝으로 시공된 앵커지지 흠막이벽의 시공관리기준인  $\delta = 0.25\%H$  보다 작으므로 지중연속벽으로 시공된 굴착현장의 안정성은 상당히 양호함을 알 수 있다.

**Keywords** : Anchored wall, Diaphragm wall, Excavation, Horizontal displacement, Lateral earth pressure

1 정회원, 중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Chung-Ang Univ.)

2 정회원, 안산공과대학 건설계열 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Ansan College of Technology, jmyun@act.ac.kr, 교신저자)

3 정회원, 중앙대학교 대학원 토목공학과 박사과정 수료 (Member, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engrg., Chung-Ang Univ.)

4 정회원, 중앙대학교 방재연구소 전임연구원 (Member, Researcher, Disaster Prevention Institute, Chung-Ang Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

지하굴착공사에 적용되는 흙막이벽은 크게 엄지말뚝, 흙막이벽, 강널말뚝 흙막이벽등과 같은 연성벽체와 지중연속벽의 강성벽체로 구분된다. 최근, 도심지에서 실시되는 굴착공사는 대부분이 기존구조물에 근접하여 시공되고 있다. 근접시공시, 엄지말뚝 흙막이벽과 같은 연성벽체를 적용하여 지하굴착을 실시하게 되면 흙막이벽의 변형과 지하수위의 저하로 인하여 안정상태에 있는 인접구조물 및 지하매설물을 불안정한 상태로 변화시킬 우려가 많다. 이러한 문제를 최소화하기 위해 흙막이벽으로 벽체의 강성이 높고 차수성이 양호한 지하연속벽이 많이 적용되고 있다.

지하굴착에 따른 연성벽체에 작용하는 측방토압과 연성벽체의 변형거동에 대한 연구는 Terzaghi and Peck (1967), Tschebotarioff(1973), Peck(1969), Mana and Clough(1981) 등에 의해 본격적으로 진행되어 최근까지 상당히 많은 연구성과가 발표되었으며 이들 연구결과들은 현재 흙막이구조물의 설계와 시공에 설계기준이나 시공관리기준으로 많이 사용되고 있다(Hunt, 1986); Juran and Elias, 1991; Xanthakos, 1991; Clough and O'Rourke, 1990). 국내에서는 1990년 이후부터 연성벽체에 대한 연구가 활발히 진행되어 많은 연구성과가 발표되었다(이종규와 전성곤, 1993; 채영수와 문일, 1994; 양구승과 김명모, 1997). 특히, 홍원표 등은 우리나라 토질특성을 고려한 측방토압분포를 수정제안 하였으며(홍원표와 윤중만, 1995a; 홍원표 등, 2004a, 홍원표 등, 2004b), 또한 흙막이벽 및 굴착주변지반의 변형량을 토대로 흙막이벽 및 주변지반의 안정성을 판단하는 시공관리기준을 제안하였다(홍원표와 윤중만, 1995b; 홍원표 등, 2001; 홍원표 등, 2004b).

지하연속벽을 적용하여 굴착공사를 실시할 경우 흙막이벽에 작용하는 측방토압과 굴착지반의 변형거동은 연성벽체를 적용한 경우와는 상당히 다른 형태를 나타낼 것이다. 이러한 지하연속벽에 대한 거동에 대하여, 외국에서는 실내시험 및 현장사례연구와 해석적 방법을 토대로 연구가 활발히 진행되고 있다(Bolton and Powrie, 1988; Gourvenec and Powrie, 1999; Poh and Wong, 1998; Thorley and Forth, 2002). 국내에서도 지하연속벽에 대하여 현장계측(이철주, 2005), 원심모형실험(이치근 등, 2000) 및 수치해석(김동준 등, 2001)을 통한 연구가 진행되고 있으나 외국에 비해 연구성과가 저조하여

우리나라 지반특성에 맞는 지하연속벽에 작용하는 측방토압의 분포 및 크기 그리고 흙막이벽 변형에 따른 시공관리기준이 명확히 규명되지 않고 있다. 이로 인하여 지중연속벽을 적용한 흙막이 구조물 설계시 연성벽체에 작용하는 측방토압이나 강성벽체인 옹벽에 작용하는 측방토압을 설계에 적용하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 앵커지지 지중연속벽에 설치된 하중계로부터 측정된 앵커축력을 토대로 벽체에 작용하는 측방토압의 크기와 분포를 제안하고자 한다. 그리고 흙막이벽 배면지반속에 설치된 경사계로부터 측정된 벽체의 수평변위를 토대로 굴착단계별 흙막이벽의 변형거동을 파악하고, 굴착깊이와 최대수평변위와의 관계를 분석하여 흙막이벽의 안정성을 판단하고자 한다. 이를 통하여 우리나라의 다층지반에서 지하연속벽을 적용한 굴착공사에 대한 설계기준을 제안하여 지하연속벽의 설계 및 시공이 경제적이고 안전하게 이루어지도록 하고자 한다.

## 2. 굴착사례현장

### 2.1 현장개요

본 연구에 활용된 사례현장은 모두 6개 현장으로 도심지에서 시공된 대규모, 대심도 굴착공사 현장이다. 굴착현장 주변에는 대규모 아파트단지, 고층빌딩, 인접공사현장, 상가 및 주택지가 밀집되어 있다. 따라서 지하굴착에 따른 주변지반의 침하, 측방이동, 지지력 손실로 인하여 인접건물이나 지하구조물에 피해를 줄 수 있어 근접시공의 문제점이 대두될 수 있는 현장들이다. 각 현장의 굴착깊이는 대략 9.5m에서 21.5m로 깊은 굴착에 속한다.

### 2.2 지반특성

굴착현장의 지반조건은 그림 1에 나타난 바와 같이 우리나라 내륙지방의 전형적인 지층구조인 표토층, 퇴적층, 풍화대층, 기반암층으로 구성된 다층지반이다. 표토층은 대부분 실트질 모래, 모래질 실트, 자갈등이 혼재되어 이루어져 있다. 퇴적층은 매립층 하부에 분포하고 있는 층으로 점토섞인 모래나 실트섞인 모래로 형성된 하상퇴적층이다. 풍화대층은 모든 현장에 분포되어 있으며 풍화도가 매우 심한 풍화잔류토층과 모암조각

이 존재하며 비교적 단단한 풍화암층으로 구분되어 있다. 이 표토층 및 풍화대층은 사질토의 성분이 많은 관계로 단순화를 위하여 내부마찰각만 가지는 지층( $c=0$ )으로 취급하기로 한다. 표토층과 풍화대층에 대한 토질정수는 설계시 사용한 토질정수와 표준관입시험 N치를 이용한 각종 제안식의 평균값으로 적용하였다. 한편, 풍화대 하부에는 기반암인 연암 및 경암으로 구분되는 암층이 분포하고 있으며 대부분 현장의 연암층과 경암층은 균열과 절리가 발달되어 있다.

### 3. 현장계측

#### 3.1 흠막이구조물

그림 1은 굴착사례현장 가운데 제1현장 및 제2현장에

대한 흠막이구조물의 단면을 개략적으로 나타낸 것이다. 전체 굴착현장의 흠막이공의 형식을 개략적으로 나타내면 표 1과 같다.

모든 굴착현장의 흠막이벽은 그림 1에 나타난 바와 같이 지중에 철근콘크리트를 설치하는 지중연속벽으로 시공되었으며, 앵커지방식으로 되어 있다. 지중연속벽은 80cm~100cm 두께로 설치되었으며, 기반암(연암 또는 경암)층보다 약 1.5m~2.0m정도 더 관입시켜 굴착저면으로의 지하수의 누수를 방지하였다. 그리고 굴착이 진행되는 동안 지중연속벽을 지지하기 위하여 그라운드앵커를 설치하였다. 굴착현장에 설치된 그라운드앵커(ground anchor)는 가설앵커로, 긴장재는 PC 강선 12.7mm를 4~6개 사용하고 있다. 그라운드앵커는 연직으로 2.0m~3.0m 간격으로 설치하였으며, 수평으로는 1.3m~2.0m 간격으로 설치하였다. 앵커의 설치각도는

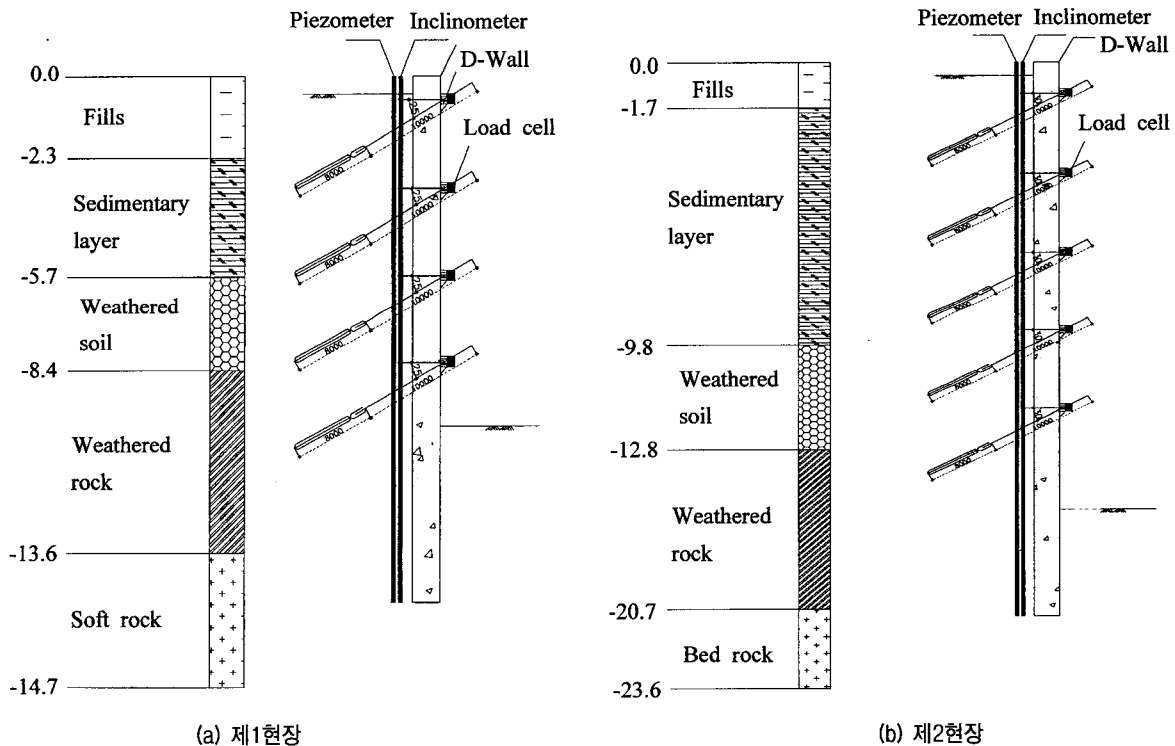


그림 1. 토질주상도 및 흠막이벽 굴착단면도

표 1. 굴착현황 및 흠막이공

현장	굴착고	벽체의 두께	Earth Anchor 시공조건
제1현장	10.0m	80cm	수평간격 : 1.5m, 연직간격 : 2.5~3.0m, 천공각도 : 25°
제2현장	21.2m	100cm	수평간격 : 1.5m, 연직간격 : 2.0~3.0m, 천공각도 : 30°
제3현장	18.0m	80cm	수평간격 : 1.8m, 연직간격 : 2.0~3.0m, 천공각도 : 25°
제4현장	12.3m	80cm	수평간격 : 1.3m, 연직간격 : 2.0~2.5m, 천공각도 : 30°
제5현장	8.2m	80cm	수평간격 : 1.8m, 연직간격 : 2.5~3.0m, 천공각도 : 30°
제6현장	21.5m	100cm	수평간격 : 2.0m, 연직간격 : 2.0~2.5m, 천공각도 : 25°

25~30°로 되어 있다.

### 3.2 현장계측

순타공법이 적용된 6개 굴착현장에 총 54개소에 계측기를 설치하여 지중연속벽 및 그라운드앵커의 변형거동을 조사하였다. 각 굴착현장에 설치된 계측기는 표 2에 나타난 바와 같이 지중경사계 13개소, 지하수위계 13개소, 하중계 38개소이다.

지중경사계는 흙막이벽에 근접한 굴착배면지반에 설치하여, 시공도중 흙막이벽 및 배면지반의 수평변위의 발생방향, 크기, 속도 등의 변화를 조사하였다. 지하수위계는 지중경사계가 설치된 인접부근에 함께 설치하여 굴착단계 및 강우에 따른 지하수위 변화를 조사하였다. 그리고 앵커 두부에 하중계를 설치하여 굴착에 따른 앵커축력의 변화를 조사하였으며 진동현식을 사용하였다.

## 4. 계측결과 및 분석

### 4.1 앵커축력

그림 2는 굴착단계별 앵커두부에 설치된 하중계로부터 앵커축력의 변화를 측정된 결과이다. 그림에서 횡축을 측정일자, 종축을 앵커축력(ton)으로 표시하였으며 우측의 표식과 숫자는 하중계가 설치된 띠장의 번호를 표시하였다.

그림 2에 나타난 바와 같이 대부분의 현장에서 측정된 앵커축력은 인장력을 가한 후 나타난 초기의 선행인장력이 굴착완료시점까지 큰 변화없이 비교적 안정된 상태를 보이고 있다. 그리고 각 굴착단계별 흙막이벽의 변형에 따른 배면지반에 작용하는 토압의 재분배 현상이 발생되어 앵커축력은 일정한 값을 유지하거나 약간 감소 혹은 증가하는 경향을 보인다. 굴착완료시 각 현장에서 측정된 앵커축력은 30~60ton 범위에 분포하고 있어 앵커의 지지기능이 충분히 발휘되고 있다. 그러나 그림 2(a)의 제 1현장에서 측정된 앵커축력은 5~25ton

정도로 다른 현장의 앵커축력보다 작게 측정되고 있으며, 다른 굴착현장과는 달리, 굴착이 진행되는 동안 앵커축력은 일정한 값으로 수렴되지 않고 굴착완료시까지 계속하여 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 다른 굴착현장에 비해 굴착진행속도나 앵커의 시공상태가 적절하게 이루어지지 않았음을 의미한다.

이상의 계측결과를 정리하면 지중연속벽을 지지하는 앵커의 축력변화는 굴착초기에 연성벽체의 앵커축력의 변화와 차이가 있는 것을 알 수 있다. 연성벽체의 경우 앵커에 인장을 가한 후 앵커를 두부에 정착시키면 앵커축력은 1차적으로 감소하고, 굴착이 진행되는 동안 흙막이벽의 변형이 증가하고, 지하수위 저하에 따른 응력의 재분배 현상이 발생하여 추가적으로 앵커축력이 감소한다(홍원표 등, 2004b). 그러나 강성벽체의 경우 앵커에 인장력을 가한 후, 앵커를 두부에 정착시켜도 연성벽체와 같이 앵커축력의 감소현상이 나타나지 않고 일정하게 유지되거나 약간 증가하는 경향을 보이고 있다. 이는 지중연속벽의 강성이 연성벽체 보다 커 배면지반의 변형이 억제되고, 차수효과도 뛰어나 지하수위가 저하되지 않아 굴착깊이가 깊어짐에 따라 수압이 작용하는 등, 굴착에 따른 배면지반의 응력 재분배 현상이 연성벽체의 경우와는 상당한 차이가 있음을 의미한다. 또한 대부분의 현장에서 상단에 설치된 앵커보다는 중·하단에 설치된 앵커축력이 더 크게 측정되어, 굴착상단부에서는 토압 뿐만 아니라 수압이 작용하고 있음을 알 수 있다.

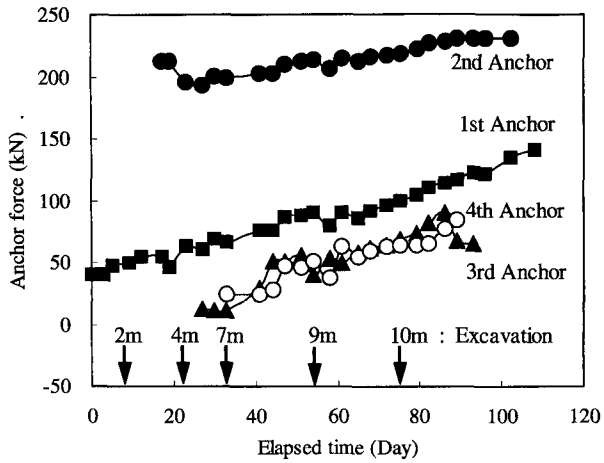
### 4.2 지중연속벽의 수평변위

그림 3은 굴착단계별 지중연속벽에 발생하는 수평변위의 변화를 측정된 결과이다. 그림에서 횡축을 벽체의 수평변위량(mm), 종축을 굴착깊이로 표시하였으며 좌측의 표식과 숫자는 각 단계별 지지구조의 위치를 표시하였다.

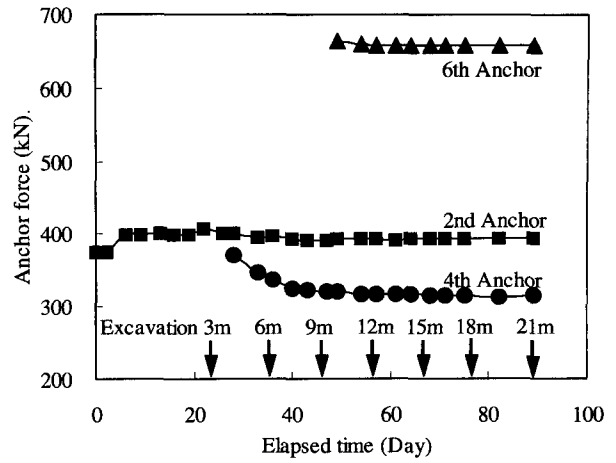
그림 3에서 보는 바와 같이 지중연속벽의 수평변위는 굴착이 진행되는 동안 굴착깊이에 비례하여 점진적으로

표 2. 계측기 설치현황

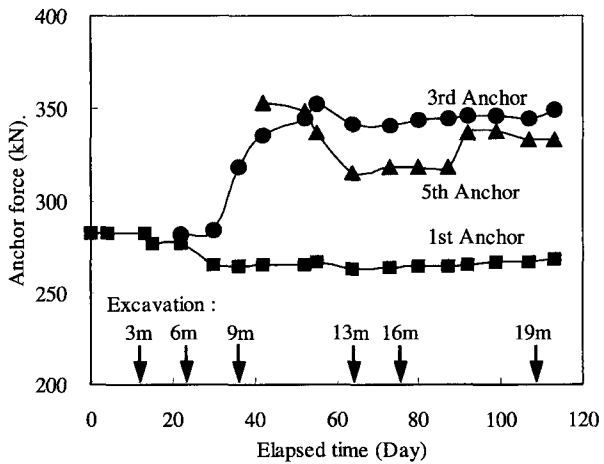
계 측 항 목	설 치 위 치	기 기 형 식	설 치 수 량
지중경사계	지중연속벽 배면지반	Servo Accelerometer	13개소
지하수위계	지중연속벽 배면지반	부저식	13 개소
하 중 계	지중연속벽 그라운드앵커	V/W Type	38 개소



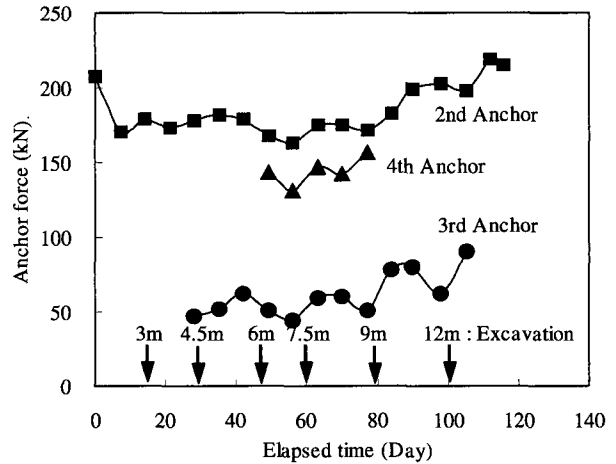
(a) 1현장



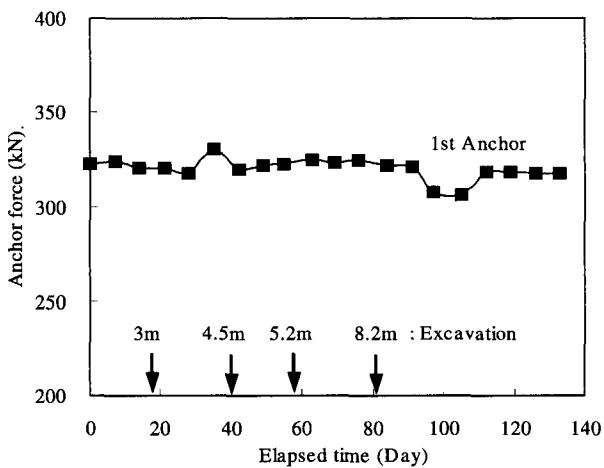
(b) 2현장



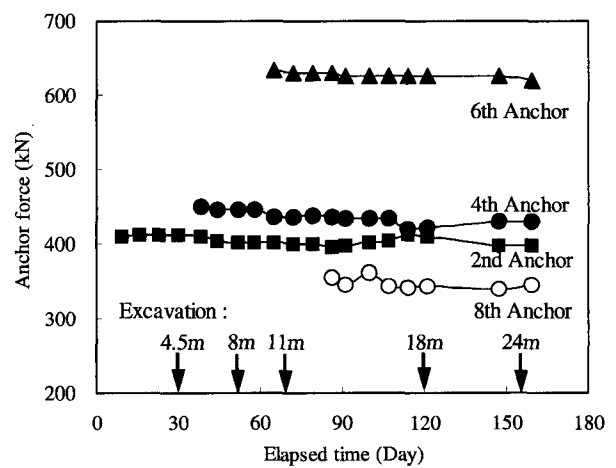
(c) 3현장



(d) 4현장



(e) 5현장



(f) 6현장

그림 2. 그라운드앵커의 축력변화도

로 증가하고 있다. 대부분의 굴착현장에서는 흙막이벽의 수평변위가 어느 굴착단계에서 급격하게 증가하는 불안정한 경향을 보이지 않고 있으며 최종 굴착단계까지 수평변위는 거의 일정한 비율로 증가하고 있다. 그러

나 제1현장의 흙막이벽의 수평변위는 굴착 후 앵커의 설치지연으로 인한 과다굴착이 이루어져 흙막이벽의 수평변위가 급격히 증가하였으나, 그 후 적절한 시공관리로 통하여 수평변위의 증가량을 감소하여 안정된 증

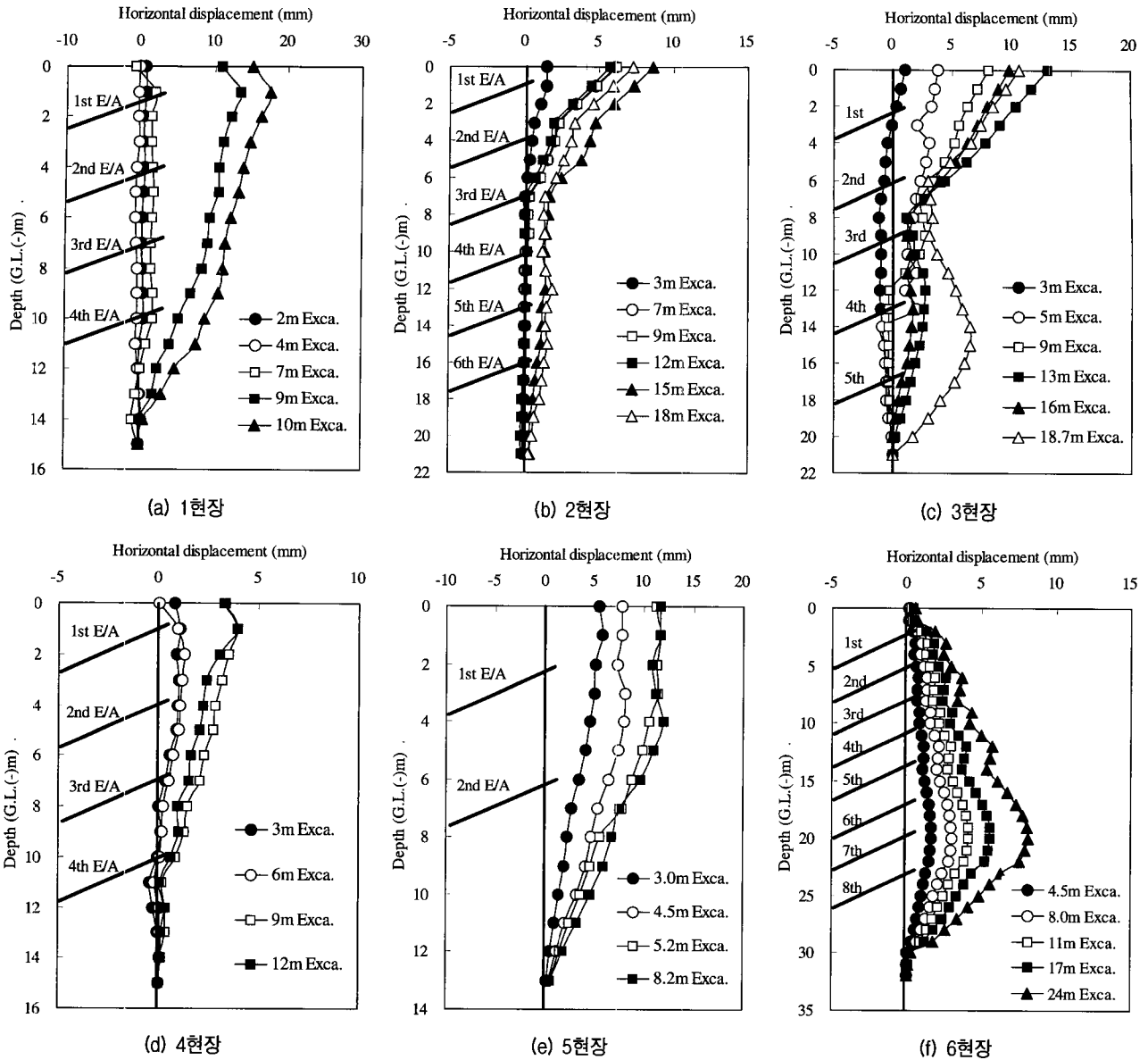


그림 3. 지중연속벽의 수평변위

가추세를 보이고 있다. 각 굴착현장에서 지중연속벽의 최대수평변위는 지표면 부근이나 굴착면 상부에서 발생하고 있으나 제6현장은 지중연속벽의 하단부에서 최대수평변위가 발생하고 있다. 그리고 앞에서 언급된 바와 같이 굴착도중 시공상 문제가 있었던 제1현장(그림 3(a))을 제외한 굴착현장에서 측정된 지중연속벽의 최대수평변위량은 10~15mm 정도로 매우 작게 발생하고 있다.

계측결과를 토대로 강성벽체인 지중연속벽 변형형상을 살펴보면 엄지말뚝 흠막이벽으로 이루어진 연성벽체의 변형형상(홍원표와 윤중만, 1995a; 홍원표 등, 2004b)과는 달리 흠막이벽 상단부에서 수평변위가 크게 발생하는 형상을 보이고 있으며, 굴착완료후 지중연속벽에

발생되는 최대수평변위량은 굴착깊이에 비해 상당히 작음을 알 수 있다.

### 4.3 지하수위

그림 4는 굴착공사 진행에 따른 지하수위의 변화를 나타낸 그림이다. 그림 중 점선은 굴착심도와 지하수위 위치가 같아지는 지점을 연결한 것이다. 여기서 점선의 좌측영역은 지하수위가 굴착심도보다 하부에 위치하여 굴착에 의한 영향과 무관한 영역이며(1현장, 5현장), 점선의 우측영역은 지하수위 심도 이하로 굴착이 이루어지는 것(2~4현장, 6현장)을 나타낸다.

연성벽체인 엄지말뚝 흠막이벽의 경우, 흠막이벽 배

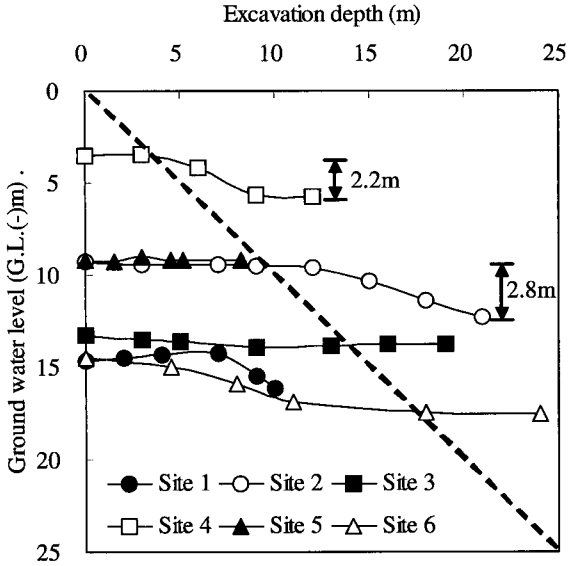


그림 4. 지중연속벽 배면지반의 지하수위변화

면에 L/W, S.C.W 등의 차수공법을 시공하여도 굴착이 진행되는 동안 지하수위도 동시에 저하되는 경향을 보인다. 그러나 그림 4에 나타난 바와 같이 지중연속벽 배면지반의 지하수위는 굴착이 진행되는 동안 거의 변화가 없이 일정하게 유지되고 있거나(3현장, 6현장), 약간 저하하는 경향(2현장, 4현장)을 보이고 있다. 지하수위가 저하된 현장의 경우, 굴착이 완료된 후에 측정된 지하수위는 굴착전 보다 최대 2.8m 가량 저하된 것으로 나타나고 있어 지하수위의 저하폭이 연성벽체인 엄지말뚝 흠막이벽(윤중만, 1997)의 경우보다 매우 작음을 알 수 있다. 따라서 지중연속벽은 차수효과가 상당히 뛰어나, 흠막이벽 뿐만 아니라 차수벽의 역할도 충분히 발휘되고 있는 것을 알 수 있다. 이로 인하여 지중연속벽으로 시공된 굴착현장은 흠막이벽 배면에 토압 뿐만 아니라 수압도 작용하는 것으로 판단된다.

## 5. 흠막이벽에 작용하는 측방토압

### 5.1 측방토압의 산정법

앵커지지 방식의 지중연속벽에 작용하는 측방토압을 산정하기 위하여 앵커두부에 하중계를 설치하고 각 중계로부터 측정된 앵커축력을 이용하여 굴착단계별 지중연속벽에 작용하는 측방토압을 산정하였다. 흠막이벽에 작용하는 측방토압 산정방법으로는 중점분할법과 하방분담법의 많이 사용되고 있다. 본 연구에서는 그림 5와 같이 중점분할법을 이용하여 앵커축력에 의한 굴착

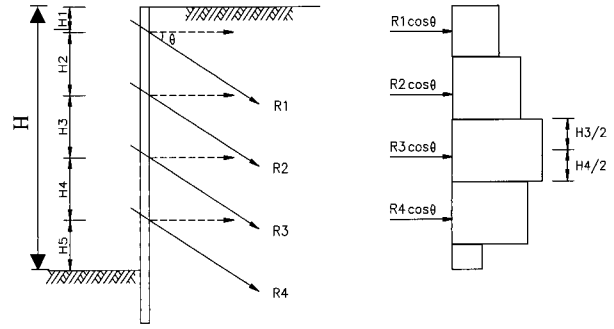


그림 5. 앵커축력의 분담토압

단계별 결보기측방토압 산정하였다. 중점분할법은 각 단계에 설치된 앵커의 축력을 하중분담원리에 근거하여 식 (1)과 같이 단위면적당 토압으로 환산하여 구하였다 (Flaate, 1966).

$$p = \frac{R \cdot \cos \theta}{D \cdot L} \quad (1)$$

여기서,  $p$  : 측방토압( $kN/m^2$ )

$R$  : 하중계에 의해 실측된 앵커축력(kN)

$\theta$  : 앵커의 설치각도(Deg)

$D$  : 앵커의 수평설치간격(m)

$L$  : 중점분할법에 의한 분담길이(m)

각 단계별 굴착에 따른 측방토압을 평가하는데 있어서 지반의 단위중량은 식 (2)를 이용하여 구한 평균단위중량( $\gamma_{avg}$ ) 적용하였다. 그리고 평균단위중량의 산정시 지하수위 조건을 고려하기 위하여 지하수위 아래지반의 경우 수중단위중량을 사용하였으며, 연암이하 암반층에서는 수압이 작용하지 않은 것으로 고려하였다.

$$\gamma_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i \cdot \gamma_i}{H} \quad (2)$$

여기서,  $H$  : 전체 굴착깊이(m)

$H_i$  : 각지층 두께(m)

$\gamma_i$  : 지층두께가  $H_i$ 인 층의 흙의 단위중량( $kN/m^3$ )

### 5.2 굴착단계별 측방토압 분포

그림 6은 지중연속벽을 설치하여 굴착을 실시한 6개 현장에서 측정된 각 단계의 앵커축력을, 식 (1)을 이용하여 굴착단계별 환산측방토압을 산정하여 나타낸 것이다. 지중연속벽에 작용하는 측방토압분포를 나타내기

위하여, 그림에서 종축에는 굴착깊이를 표시하였으며, 횡축에는 하중계의 앵커축력값으로부터 산정된 실측토압을 표시하였다. 이러한 측방토압은 각 단계별 굴착이 완료되고 지지구조인 앵커가 설치된 후에 산정된 토압이다.

그림 6(a)는 제1현장의 지중연속벽에 작용하는 측방 토압분포를 나타낸 것으로, 측방토압은 굴착면 상부에서 일정깊이까지는 굴착깊이에 비례하여 증가하다가 그 이후 깊이에서는 토압이 감소하는 것으로 나타났다. 그림 6(b)~(c)는 제2, 3, 4현장의 토압분포를 나타낸 것으로 굴착단계별 토압분포는 대부분 지표면에서 하부로 갈수록 증가하는 경향을 보이고 있으나, 그림 6(f)의

제6현장의 경우에는 굴착깊이가 증가함에 따라 토압분포도 증가하다가 하단부에서 감소하는 불규칙한 분포를 보이고 있다. 그리고 제5현장의 경우에는 제2단 피장에만 하중계가 설치되어 있어 그림 6(e)에 나타난 바와 같이 각 굴착단계별 토압분포의 변화를 도시 할 수 없었다.

그림 6에 나타난 측방토압분포를 정리하여 보면, 지중연속벽에 작용하는 측방토압분포는 일부 굴착현장에서는 굴착면 중, 하단부에서 토압이 감소하거나 또는 증가하는 불규칙한 분포형상을 보이고 있지만 대부분의 굴착현장의 측방토압분포는 굴착깊이에 비례하여 굴착면 상부에서 하부로 갈수록 측방토압이 증가하는 경향을 보이고 있다. 그리고 지중연속벽에 작용하는 최대측

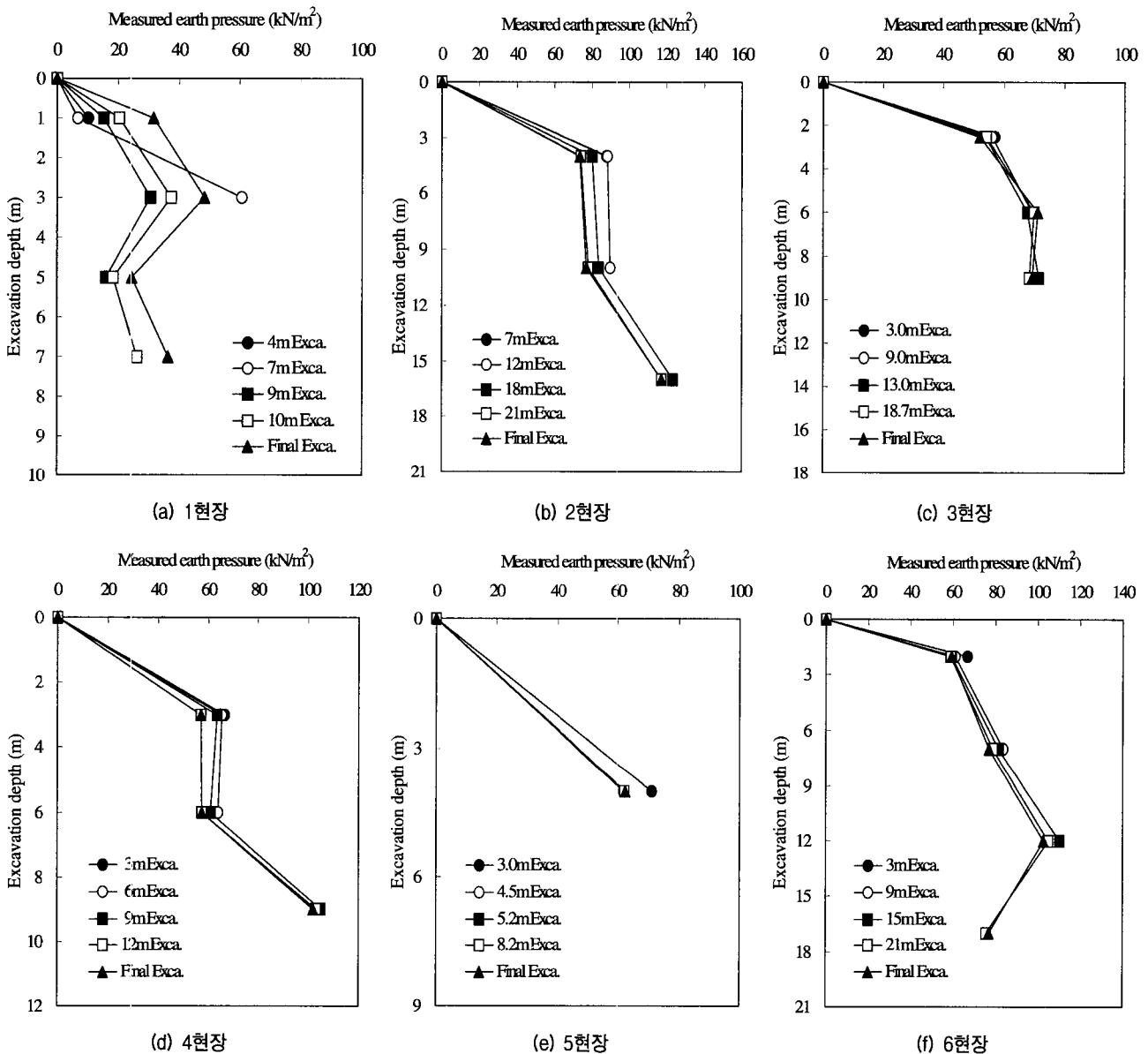


그림 6. 굴착단계별 지중연속벽의 측방토압분포도



방토압은 벽체의 중, 하단부에서 발생하고 있다.

### 5.3 측방토압분포의 제안

그림 6에 도시한 각 굴착현장의 앵커축력으로부터 산정된 굴착단계별 측방토압분포도를 이용하여 지중연속벽에 작용하는 측방토압분포를 제안하고자 한다. 그림 7은 흙막이벽에 작용하는 측방토압의 분포와 최대측방토압의 크기를 구하기 위하여 각 굴착단계에서 산정된 측방토압을 모두 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 지중연속벽에 작용하는 측방토압분포는 각 계측지점에서의 최대토압을 연결한 최대포락선으로 나타낸 것으로 사다리꼴 형태로 제안할 수 있다.

Terzaghi and Peck(1967)은 안전율을 고려하여 평균계측값 보다 30%정도 크게 토압분포를 제시하였다. 본 연구에서도 이러한 점을 고려하여 평균토압분포가 아니라 최대포락선으로 연결한 최대토압분포를 제안하고 있다. 이 최대토압분포는 그림 9(a) 나타난 바와 같이 평균토압보다 약 30%~50% 큼을 알 수 있다.

그림 7에서 제안된 측방토압분포는 지표면에서 0.3H까지는 토압이 선형적으로 증가하고 그 이후부터 0.7H 깊이까지는 일정하게 유지되다가 0.7H부터 굴착저면까지는 토압이 선형적으로 감소하는 사다리꼴 형태이며, 최대측방토압의 크기는  $0.45\gamma H$  이다. 그리고 굴착면 상부에서도  $0.1\gamma H$  크기의 토압이 작용하고 있다. 이는 그림 3에 나타난 바와 같이 지중연속벽은 벽체의 강성이 커서 연성벽체에 비해 벽체의 수평변위가 작게 발생하

고, 두부에서 변위가 어느 정도 구속되고 있기 때문이다.

그림 7에서 제안된 측방토압 분포는 도심지에서 암반층이 포함된 다층지반에 설치된 앵커지지 지중연속벽의 설계시, 수압을 고려한 설계토압으로 적용할 것을 권장한다. 그러나 실제 굴착현장에서 지하수의 위치에 따라 지중연속벽에 작용하는 측방토압분포는 본 연구에서 제안된 토압분포와는 약간 다르게 작용할 수 있으므로 실무에서 앵커지지 지중연속벽 및 지보공의 단면 설계시 이러한 요인들을 고려하여 설계하는 것이 바람직하다.

### 5.4 경험 토압과의 비교

그림 8은 본 연구에 의해 제안된 앵커지지 지중연속벽에 작용하는 측방토압분포와 사질토지반에 설치된 연성벽체를 대상으로 제안된 Terzaghi and Peck(1967), Tschebotarioff(1973), 홍원표와 윤중만(1995a)의 경험토압분포를 비교하여 나타낸 것이다.

그림에 나타난 바와 같이 제안된 측방토압분포는 Terzaghi and Peck이 제안한 직사각형 분포 보다는 Tschebotarioff, 홍원표와 윤중만(1995a)이 제안한 사다리꼴 분포와 유사하게 나타났다. 그리고 제안된 측방토압분포의 굴착면 상·하단부의 변곡점의 위치는 각각 0.3H로 Tschebotarioff의 0.10H, 0.20H보다는 다소 크게 나타났지만, 홍원표와 윤중만이 제안한 토압분포의 변곡점의 위치와는 동일함을 알 수 있다.

한편, 지중연속벽에 작용하는 최대측방토압의 크기

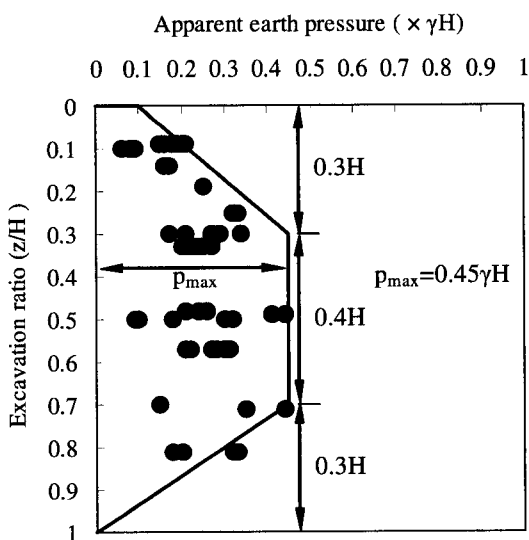


그림 7. 앵커지지 지중연속벽의 측방토압분포 제안

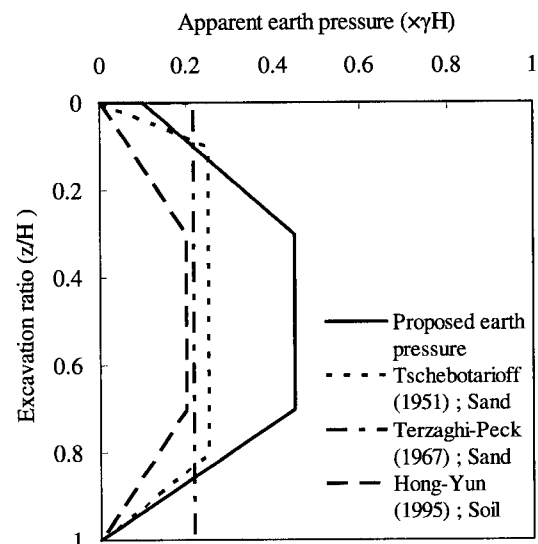


그림 8. 경험토압과의 비교

는 사질토지반을 대상으로 Terzaghi and Peck(1967), Tschebotarioff(1973), 홍원표와 윤중만(1995)이 제안한 연성벽체의 측방토압보다 약 2배정도 크게 나타났다. 이것은 엄지말뚝 흠막이벽과 같은 연성벽체는 흠막이벽의 변형이 크게 발생하여 벽체에 토압이 작게 작용하게 되지만 지중연속벽과 같은 강성벽체는 벽체의 변형이 작게 발생하여 벽체에 토압이 크게 작용하고 있음을 의미한다. 또한 굴착이 진행되는 동안 지중연속벽은 차수효과가 뛰어나 굴착배면의 지하수위가 거의 일정하게 유지되고 있어 연성벽체와 달리 벽체에 수압이 작용한 것으로 사료된다.

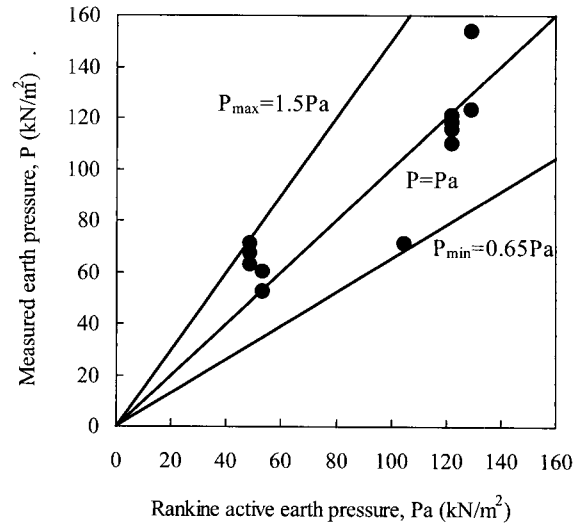
### 5.5 이론토압과의 비교

그림 9는 그림 6의 각 굴착현장의 측방토압분포도에서 구한 최대측방토압을 최종굴착깊이의 위치에서의 Rankine의 주동토압, 정지토압과 연직상재압과 비교하여 나타낸 것이다.

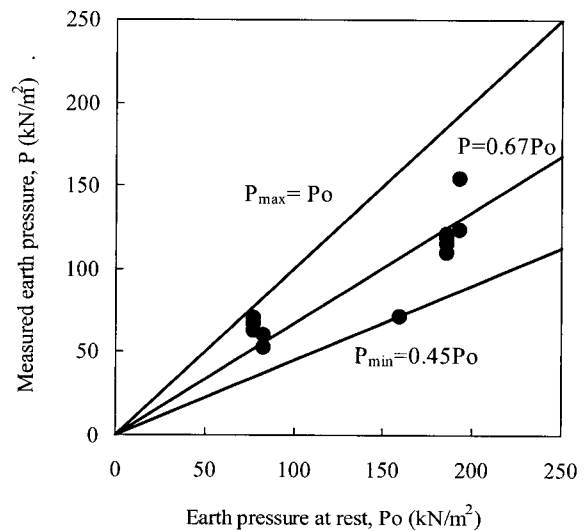
그림 9(a)에서 보는 바와 같이 제안된 최대측방토압은 Rankine의 주동토압( $P_a = K_a \gamma_{avg} H$ )의 0.65~1.5배 범위에 있으며 평균적으로 1.0배인 것으로 나타났다. 따라서, 지중연속벽에 작용하는 평균측방토압은 Rankine의 주동토압과 동일하게 작용하며, Terzaghi and Peck (1967)이 사질토지반에서 제안한 최대측방토압  $0.65K_a \gamma H$  보다 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

그림 9(b)는 제안된 최대측방토압과 최종굴착깊이에서의 Jaky(1948)의 정지토압계수를 이용한 정지토압( $P_o = K_o \gamma_{avg} H$ )과 비교한 결과이다. 그림에서 최대측방토압은 정지토압의 0.45~1.0배 범위에 분포하고 있으며 평균 2/3배 정도로 나타났다. 이는 NAVFAC(1982)이 단단한 모래지반에 설치된 앵커지지벽에 작용하는 측방토압분포를 정지토압의 0.4배로, 느슨한 모래지반에서는 0.5배로 제시한 것보다는 크게 나타나고 있다.

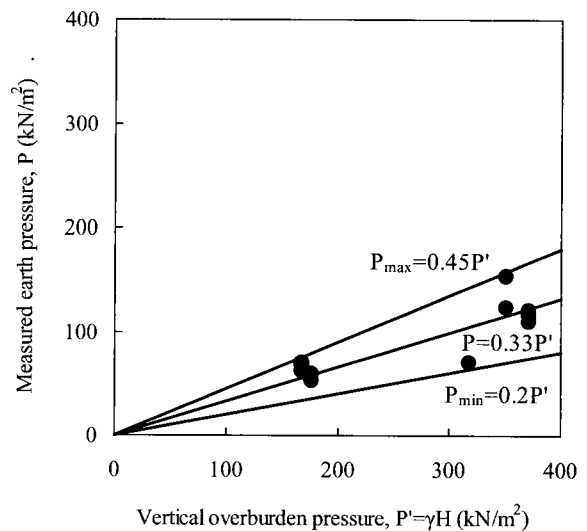
한편, 그림 9(c)는 제안된 최대측방토압과 최종굴착깊이에서의 연직상재압( $\sigma_v' = \gamma_{avg} H$ )을 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 최대측방토압은 연직상재압의 0.2~0.45배 범위에 있으며 평균적으로 연직상재압의 1/3(0.33배)에 해당하는 것으로 나타났다. Tschebotarioff (1973)는 모래지반의 흠막이벽에 작용하는 측방토압으로 연직상재압의 0.25배, 견고한 점토지반에서는 0.375배를 제시한 바 있다. 따라서 지중연속벽에 작용하는 평균최대측방토압은 Tschebotarioff가 사질토지반에서 제



(a) Rankine의 주동토압



(b) 정지토압



(c) 연직상재압

그림 9. 이론토압과 비교

시한 토압보다는 크게 나타나고 있으며, 견고한 점토지반에서 제시한 토압과는 매우 비슷함을 알 수 있다.

### 5.6 굴착에 따른 지중연속벽의 변형

흙막이벽의 수평변위는 벽체의 지지방식과 배면지반의 토질특성, 그리고 배면지반의 하중조건 등에 영향을 받지만, 일반적으로 굴착깊이가 증가함에 따라 흙막이벽의 수평변위는 증가를 하게 된다.

홍원표와 윤중만(1995b)은 국내 사질토지반에서 앵커 지지방식의 연성벽체의 경우 흙막이벽의 최대수평변위는 굴착깊이의 0.5% 이내라고 제안한 바 있으며, 흙막이벽의 수평변위가 굴착깊이의 0.25% 이상 발생하면 흙막이벽의 안정성에 문제가 있는 현장으로 분류한 바 있다. Clough and O'Rourke(1990)는 벽체의 종류에 관계없이 흙막이벽의 최대수평변위는 굴착깊이의 0.5% 이내이고 평균수평

변위는 굴착깊이의 0.2%가 된다고 제안한 바 있다.

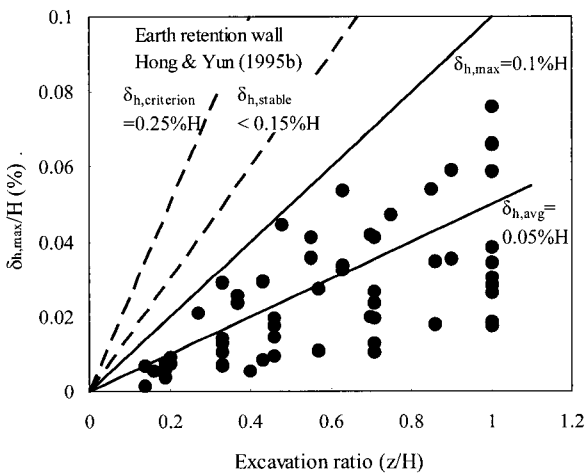
그림 10은 지중연속벽에 대한 굴착깊이와 흙막이벽의 수평변위와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 종축은 벽체의 수평변위를 굴착깊이로 무차원화시킨 것이며, 횡축은 각 단계별 굴착깊이를 최대굴착깊이로 무차원화시켜 나타내었다. 여기서, 앵커지지 방식의 굴착현장과 버팀보지지 방식의 굴착현장의 지반조건 벽체의 강성이 유사한 현장으로, 굴착공사는 암반층이 포함된 다층지반(c=0)에서 실시되었으며 벽체의 두께는 80~100cm 이다.

먼저 그림 10(a)에 나타난 앵커지지 지중연속벽의 수평변위는 굴착깊이의 증가와 함께 증가하는 경향을 나타내었으며, 벽체의 최대수평변위는 굴착깊이의 0.1%, 평균수평변위는 굴착깊이의 0.05% 정도 발생하는 것으로 나타나고 있다. 한편, 그림 10(b)는 황광현(2002)이 제시한 버팀보지지 지중연속벽의 최대수평변위를 나타낸 것으로서 최대수평변위량은 굴착깊이의 0.25%이고, 평균수평변위량은 굴착깊이의 0.1% 정도 발생함을 알 수 있다. 그림 10에 나타난 바와 같이 버팀보로 지지된 흙막이벽에서 발생된 수평변위량이 앵커로 지지된 흙막이벽의 수평변위량보다 두배 이상 크게 발생하고 있어 앵커지지방식이 버팀보지지방식 보다 흙막이벽의 지지효과가 뛰어난 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 엄지말뚝 흙막이벽으로 시공된 연성벽체에서 굴착깊이와 흙막이벽의 수평변위의 관계에 대한 연구결과와 동일함을 알 수 있다(윤중만, 1997).

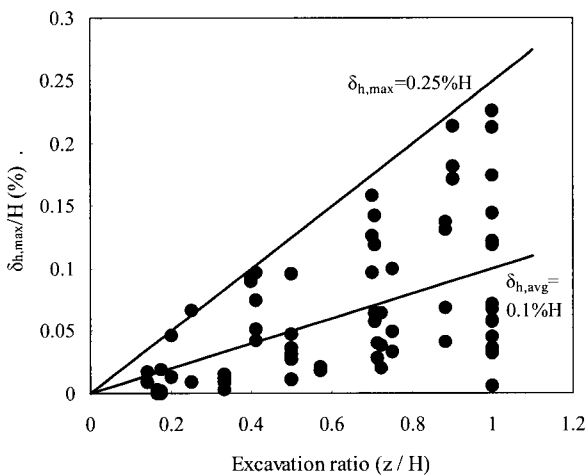
한편, 지지방식에 관계없이 지중연속벽에서 발생하는 최대수평변위량 및 평균수평변위량은 Clough and O'Rourke(1990)에 의해 제안된  $\delta_{h,max} = 0.5\%H$  및  $\delta_{avg} = 0.2\%H$  보다 작게 발생하고 있다. 그리고 지중연속벽의 최대수평변위량이 홍원표와 윤중만(1995b)이 엄지말뚝으로 시공된 앵커지지 흙막이벽에 대하여 제안한 시공관리기준인  $\delta = 0.25\%H$ 보다 작게 발생하고 있다. 따라서 지중연속벽으로 시공된 굴착현장의 안정성은 연성벽체로 시공된 굴착현장보다 상당히 양호함을 알 수 있다.

### 6. 결론

도심지에서 앵커로 지지된 지중연속벽을 이용한 굴착현장에서 측정된 현장계측자료(앵커축력, 지중연속벽의 수평변위)를 토대로 지중연속벽에 작용하는 측방토압과 굴착에 따른 벽체의 변형거동을 분석한 결과를 정리하면 다음과 같다.



(a) 앵커지지 지중연속벽



(b) 버팀보지지 지중연속벽(황광현, 2002)

그림 10. 굴착깊이별 지중연속벽의 최대수평변위

- (1) 지중연속벽 배면지반의 지하수위는 굴착이 진행되는 동안 거의 변화가 없이 일정하게 유지되고 있거나 약간 저하하고 있다. 따라서 엄지말뚝 흠막이벽과는 달리 지하굴착시 지중연속벽에는 토압 뿐만 아니라 수압도 작용한다.
- (2) 도심지에서 암반층이 포함된 다층지반에 설치된 앵커지지 지중연속벽에 작용하는 측방토압분포 및 크기를 제안하였다. 측방토압의 분포는 지표면 부근에서  $0.1\gamma H$  크기의 토압이 작용하는 사다리꼴 형태이며, 최대측방토압의 크기는  $0.45\gamma H$  이다.
- (3) 지중연속벽에 작용하는 최대측방토압의 크기는 사질토지반을 대상으로 Terzaghi and Peck(1967), Tschebotarioff(1973), 홍원표와 윤중만(1995a)이 제안한 연성벽체의 측방토압의 크기보다 약 2배 정도 크다.
- (4) 제안된 측방토압의 평균값은 Rankine 주동토압과 같으며, 정지토압의 2/3, 연직상재압의 1/3에 해당된다. 이것은 Rankine의 주동토압과는 매우 비슷하고, NAVFAC(1982)과 Tschebotarioff가 사질토지반에서 제시한 정지토압과 연직상재압 보다는 크다.
- (5) 굴착깊이에 따른 지중연속벽의 수평변위량은 지지방식에 따라 큰 차이가 있는 것으로 나타났다. 앵커로 지지된 지중연속벽의 최대수평변위( $\delta_{max}$ )는 굴착깊이의 0.1%이고, 버팀보로 지지된 지중연속벽은 굴착깊이의 0.23%로, 앵커지지방식이 버팀보지지방식 보다 작게 나타났다. 이러한 수평변위량은 엄지말뚝으로 시공된 앵커지지 흠막이벽의 시공관리기준인  $\delta = 0.25\%H$  보다 작으므로 지중연속벽으로 시공된 굴착현장의 안정성은 상당히 양호함을 알 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. 김동준, 이병철, 김동수, 양구승 (2001), “대규모 굴착공사에 따른 지중연속벽체의 변형특성(II)”, *한국지반공학회논문집*, 제17권, 4호, pp.107-115.
2. 양구승, 김명모 (1997), “도심지 깊은굴착으로 발생하는 인접지반 지표침하분석”, *한국지반공학회지*, 제13권, 제2호, pp.101-124.
3. 윤중만 (1997), *흠막이 굴착지반의 측방토압과 변형거동*, 중앙대학교 대학원 박사학위논문.
4. 이종규, 전성근 (1993), “다층지반 굴착시 토류벽에 작용하는 토압분포”, *한국지반공학회지*, 제9권, 제1호, pp.59-68.
5. 이치근, 안광국, 허열 (2000), “Diaphragm Wall에서 굴착깊이-시간-변위에 관한 원심모형실험”, *한국지반공학회논문집*, 제16권, 제5호, pp.179-191.
6. 이철주 (2005), “해성점토층에 실시된 지중연속벽 시공에 의한 지반의 변위 분석”, *한국지반공학회논문집*, 제21권, 3호, pp.43-54.
7. 채영수, 문일 (1994), “국내 지반조건을 고려한 흠막이벽체에 작용

- 하는 토압”, *한국지반공학회, 94 가을학술발표회논문집*, pp.129-138.
8. 홍원표, 윤중만 (1995a), “지하굴착시 앵커지지 흠막이벽에 작용하는 측방토압”, *한국지반공학회지*, 제11권, 제1호, pp.63-77.
9. 홍원표, 윤중만 (1995b), “지하굴착시 앵커지지 흠막이벽 안정성에 관한 연구”, *대한토목학회논문집*, 제15권, 제4호, pp.991-1002.
10. 홍원표, 윤중만, 송영석, 공준현 (2001), “깊은 굴착시 소일네일링 흠막이벽의 변형거동”, *대한토목학회논문집*, 제21권, 제2호, pp.141-150.
11. 홍원표, 송영석, 김동욱 (2004a), “연약지반에 설치된 앵커지지 강널말뚝 흠막이벽의 거동”, *한국지반공학회논문집*, 제20권, 제4호, pp.65-74.
12. 홍원표, 윤중만, 송영석 (2004b), “절개사면에 설치된 앵커지지 흠막이벽에 작용하는 측방토압 산정”, *대한토목학회논문집*, 제24권, 제4호, pp.125-133.
13. 황광현 (2002), *흠막이 지중연속벽의 변형거동과 측방토압*, 중앙대학교 건설대학원 제33회 석사학위논문, pp.80-82.
14. Bolton, M. D., and Powrie, W. (1988), “Behaviour of Diaphragm Walls in Clay Prior to Collapse”, *Geotechnique*, Vol.38, No.2, pp.167-189.
15. Clough, G. W., O'Rourke, T. D. (1990), “Construction induced Movements of insitu Walls”, *Design and Performance of Earth Retaining Structures, Geotechnical Special Publication*, No.25, ASCE, pp.439-470.
16. Flaate, K. S. (1966), “Stresses and Movements in Connection with Braced Cuts in Sand and Clay”, PhD thesis, Univ. of Illinois.
17. Gourvenec, S. M., and Powrie, W. (1999), “Three-Dimensional Finite-Element Analysis of Diaphragm Wall Installation”, *Geotechnique*, Vol.49, No.6, pp.801-823.
18. Hunt, R. E. (1986), “*Geotechnical Engineering Techniques and Practices*”, McGraw-Hill, pp.598-612.
19. Jaky, J. (1948), “Pressure in Soils”, *Proc. 2nd. ICSMFE.*, Vol.1, pp.102-107.
20. Juran, I. and Elias, V. (1991), “*Ground Anchors and Soil Nails in Retaining Structures*”, Foundation Engineering Handbook, 2nd Ed., Fang, H. Y., pp.892-896.
21. Mana, A. I. and Clough, G. W. (1981), “Prediction of Movements for Braced Cuts in Clay”, *Jour. of G.E. Div., ASCE*, Vol.107, No.GT6, pp.759-777.
22. Peck, R. B. (1969), “Deep Excavations and Tunnelling in Soft Ground”, *7th ICSMFE.*, State-of-Art Volume, pp.225-290.
23. Poh, T. Y., and Wong, I. H. (1998), “Effects of construction of diaphragm wall panels on adjacent ground: Field trial”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol.124, No.8, pp.749-756.
24. Terzaghi, K. and Peck, R. B. (1967), “*Soil Mechanics in Engineering practice*”, 2nd Ed., John Wiley and Sons, New York, pp.394-413.
25. Thorley, C. B. B., and Forth, R. A. (2002), “Settlement due to diaphragm wall construction in reclaimed land in Hong Kong”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol.128, No.6, pp.473-478.
26. Tschebotarioff, G. P. (1973), “*Foundations, Retaining and Earth Structure*”, McGraw-Hill, New York, pp.415-457.
27. Xanthakos, P. P. (1991), “*Ground Anchors and Anchored Structures*”, John Wiley and Sons. Inc., pp.552-553.

(접수일자 2006. 9. 25, 심사완료일 2007. 5. 23)