

# 도심지 깊은굴착에 따른 지반거동과 작용토압

## *Ground Movements and Apparent Earth Pressures during Deep Excavation in Urban Area*

유 충 식, 성균관대학교 토목공학과 조교수  
김 연 정, 성균관대학교 토목공학과 박사수료

### 1. 서 론

도심지 굴착공사에 있어 흙막이벽체의 효율적인 설계와 시공을 위해서는 정보화시공 측면에서 벽체에 작용하는 토압 뿐만 아니라 벽체 및 지반의 거동을 가능한 사전에 정확히 예측하는 것이 필수적이다. 특히, 도시의 과밀화로 굴착에 따른 지반거동은 주변의 시설물들에 영향을 미칠 수 있으므로 흙막이벽체는 주변지반의 거동을 억제하는 측면에서 설계되고 시공되어야 한다.

그러나 국내에서 수행되고 있는 설계는 아직까지 외국의 학자들에 의해 제시된 토압이나 지반거동 예측기법들이 적용되고 있는데 이러한 예측기법은 주로 점토 또는 모래지반에서 얻어진 경험식 또는 반경험식이므로 주로 암반을 포함한 국내 굴착현장에 그대로 적용하기가 곤란하다. 특히 흙막이벽체의 강성, 지지구조와 설치간격, 과굴착(過掘鑿), 선행하중 등 여러가지 시공변수는 흙막이벽체에 작용하는 토압 뿐만아니라 지반거동에 상당히 큰 영향을 미친다. 그러므로 국내 현장의 일반적인 지반조건과 적용되는 시공방법 및 기술수준을 감안한 연구를 수행하여 그 결과를 설계와 시공에 반영되어야 할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 국내 도심지 굴착공사의 적절한 설계기법 개발을 목적으로 현장의 계측자료를 분석하여 몇가지 시공변수에 따른 토압 및 지반거동 특성을 알아보았으며, 그 결과를 토대로 토압과 지반거동 예측기법을 제안하였다. 또한 유한요소해석을 수행하여 지반거동을 경감시킬 수 있는 효과적인 시공방법에 대하여 알아보았다.

### 2. 깊은굴착에 관한 기존의 연구

버팀굴착에 있어서 지반굴착에 따른 응력해방은 흙막이벽체에 수평토압을 발생시키며, 토압의 증가는 흙막이벽체와 지반의 거동을 유발시킨다.

흙막이벽체에 작용하는 토압분포는 벽체의 강성과 움직임에 따라 달라지며, 버팀굴착의 경우 벽체에 작용하는 수평토압에 대하여 Terzaghi(1943)는 대수나선의 활동면을 경계로 하는 흩쇄기의 움직임과 아칭으로 토압을 설명하였다. 더욱이 버팀굴착은 여러 단계로 시공되며 굴착이 진행되면서 토압이 변화하므로 설계시에는 이론적인 토압 보다는 버팀보나 앵커의 축력으로부터 얻어진

겉보기토압이 적용되고 있다. 버팀굴착의 설계시 고려되는 겉보기토압은 Terzaghi & Peck (1948, 1967), Tschebotarioff(1973) 등에 의해 처음 제시되었으며, 그 후 Clough(1976), Goldberg et al(1976)은 선행재하된 앵커지지 벽체에 작용하는 겉보기토압이 버팀지지 벽체에서 보다 크고 균등하다는 것을 보여 주었다.

지반굴착에 따른 주변지반의 침하계측 결과를 이용하여 Peck(1969)은 지반조건에 따른 최대 침하량과 영향범위를 제시한 침하예상곡선을 제시하였으며, Caspe(1966)은 흙막이벽체의 수평변위 체적을 이용하여 지반침하를 추정하는 방법을 제시하였다. 한편 1970년대에 들어 지반굴착에 대한 현장계측과 수치해석이 적용되면서 Clough & Tsui(1974), O'Rourke(1975), Goldberg et al(1976), Mana & Clough(1981) 등 많은 연구자들에 의해서 지반거동에 대한 연구가 본격화되었으며, 최근 Clough & O'Rourke(1990)의 연구결과는 흙막이벽체의 변위와 지반침하에 대한 많은 정보를 제공하고 있다.

그러나 이상의 연구결과는 점토와 모래로 구성된 퇴적지반에서 얻어진 경험적·반경험적인 관계이므로 암반을 포함하는 굴착현장에 기존 이론을 적용하여 토압과 지반거동을 예측하는 것은 다소의 문제가 있다. 암반을 포함하는 지반굴착에 있어 흙막이벽체에 작용하는 겉보기토압은 모래 지반에 대한 Terzaghi & Peck(1967) 토압에 비해 작으며[이종규와 전성곤(1993), 채영수와 문일(1994), 홍원표와 윤중만(1995)], 벽체와 지반거동 역시 기존 이론보다 작은 것으로 알려져 있다. [이종규와 전성곤(1993), 양구승(1996)]

### 3. 계측자료분석과 유한요소해석

#### 3.1 현장계측자료

##### 가. 계측자료의 구분

국내 도심지에서 수행되는 지반굴착 공사에 있어 흙막이벽체에 작용하는 겉보기토압 분포와 수평변위를 알아보기 위하여 국내 57개 현장에서 수집된 경사계 측정자료와 지지구조에 설치된 하중계 및 변형계 측정자료를 분석하였다. 본 연구에서는 217단면의 경사계 측정자료와 56단면의 겉보기토압 측정자료를 이용하였고, 표 1은 분석된 계측결과를 벽체의 종류와 지지방법으로 구분하여 나타내었다.

표 1. 연구에 이용된 계측자료의 구분

경사계 자료 (217단면)		겉보기토압 자료 (56단면)
벽체종류에 따른 구분	지지방법에 따른 구분	
H-pile+토류판 ; 145단면	앵커지지 ; 114단면 버팀지지 ; 103단면	앵커지지 (load cell) ; 32단면
S.C.W. ; 21단면		
C.I.P. ; 30단면		버팀지지 (strain gage) ; 24단면
Diaphragm Wall ; 21단면		

#### 나. 지반조건

국내 도심지 굴착공사현장의 지반은 대부분 퇴적층과 잔류토층 뿐만아니라 기반암의 굴착을 포함하는데 본 연구는 풍화잔류토와 기반암을 포함하는 현장의 계층자료를 이용하였다. 연구에 이용된 현장의 최종 굴착깊이는 8.0~35.0m이며, 겔보기토압 자료를 포함하는 현장의 평균 굴착깊이는 21.7m 이다.

한편 매립층, 퇴적층 및 풍화잔류토층을 토사층이라 하면 전체 굴착깊이에 대한 토사층 두께는 평균적으로 48% 이며, 풍화암이 20%, 연.경암이 32% 정도로 토사층과 암반이 약 50% 정도 분포하는 것으로 나타났다.

### 3.2 유한요소해석

국내에서는 흙막이공법으로 “H-pile+토류판”이 주로 적용되며 보강방법과 시공기술 역시 유사하게 적용되고 있어 여러가지 시공변수가 토압과 지반거동에 미치는 영향을 파악하기 곤란하기 때문에 이를 보완하기 위하여 평균적인 현장조건을 상정하여 유한요소해석을 수행하였다.

#### 가) 사용 프로그램

유한요소해석은 성균관대학교 지반공학연구실에서 개발한 프로그램인 GEOFE2D를 이용하여 해석을 수행하였다. 프로그램 GEOFE2D는 기초문제, 지하굴착, 터널해석 등 다양한 지반공학적 문제에 대한 해석이 가능한 유한요소해석 프로그램으로 여러가지 재료의 구성모델을 적용할 수 있는 주 프로그램과 유한요소망 생성과 해석결과를 가시화 할 수 있는 전.후처리 프로그램으로 구성되어 있다.

#### 나) 해석조건과 모델링

유한요소해석에 있어 평균적인 지반조건으로 고려하기 위하여 GL-10m을 기준으로 상부는 보통 조밀한 모래, 하부는 매우 조밀한 풍화토나 풍화암, 최종굴착면인 GL-21m 하부는 연암으로 고려하였다. 또한 굴착은 깊이와 폭을 각각 21m 및 15m로 고려하고 그림 1에 나타낸 것과 같이 1단계 굴착(GL-2m) → 1단 strut + 2단계 굴착(GL-5m) → 2단 strut + 3단계 굴착(GL-8m) → . . . 의 과정으로 8단계 굴착(GL-21m)을 고려하였으며, 각 지층에 대한 공학적특성은 그림에 함께 나타내었다. 흙막이벽체와 strut은 H형강 250×250×9×14 및 H형강 300×300×10×15를 2.0m 간격으로 설치하는 것을 감안하였다.

그러나 굴착시공에 따른 여러가지 변수가 흙막이벽체의 거동과 겔보기토압에 미치는 영향을 알아보기 위하여 표 2에 나타낸 바와 같이 전체 굴착깊이에 대한 토사층 깊이( $H_s/H$ ), 벽체강성 ( $EI$ ), 지지구조 간격( $h_s$ ), 과굴착 깊이( $h_{oe}$ ), 상부 토층의 특성을 변화시키면서 해석을 수행하였다.

한편 해석모델에 있어 지반은 Drucker-Plager 항복규준을 따르는 탄소성 재료로 가정하고, 흙막이벽체와 strut은 각각 beam 및 spring요소를 적용하였다. 또한 흙막이벽체와 지반의 상호거동을 모사하기 위하여 벽체와 지반 사이는 상호면요소(interface element)를 적용하였다.

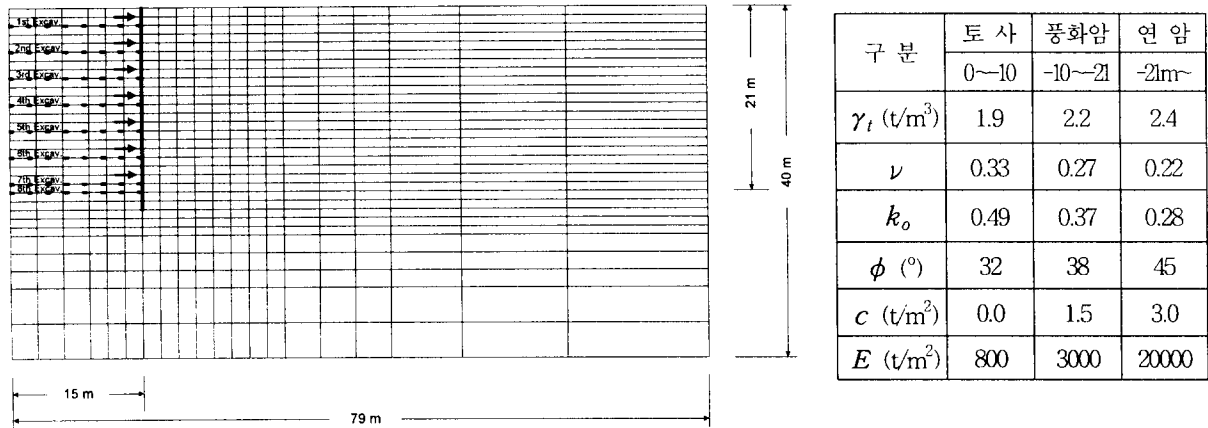


그림 1. 유한요소해석 조건

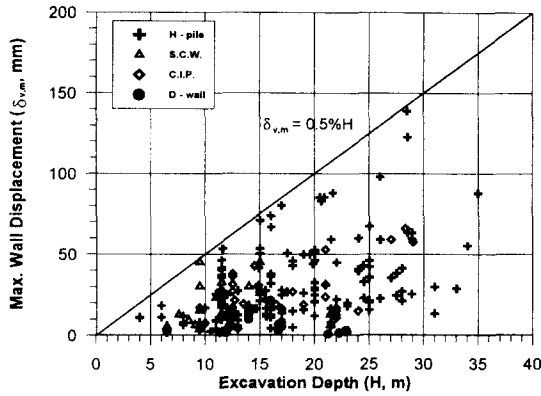
표 2. 유한요소해석 내용

구분	$H_s/H$	$EI$ , t-m <sup>2</sup>	$h_s$ , m	$h_{oe}$ , m	$EI/\gamma_w h_s^4$
기본조건	0.5	1134	3	1	14
지층구성 변화	1.0, 0.0	1134	3	1	14
벽체강성 변화	0.5	1134×(0.5~20)배	3	1	7, 70, 140, 210, 280
지지간격 변화	0.5	1134×(0.25~4)배	2	1	18, 36, 71, 142, 213, 283
과굴착깊이 변화	0.5	1134	3	2 or 3	14
상부토층의 토성	0.5	1134	3	1	14

## 4. 흙막이벽체의 거동분석

### 4.1 벽체의 종류별 최대변위 발생 경향

그림 2는 217단면의 경사계 자료에서 얻어진 굴착깊이( $H$ )와 최대수평변위( $\delta_{h,m}$ )의 관계를 보여주는데 그림에 나타내었듯이 암반을 포함하는 굴착공사에서 벽체의 수평변위는 Goldberg et al(1976), Clough & O'Rourke(1990) 등이 제안한 위험기준인  $0.5\%H$  이내에 분포한다. 또 흙막이 벽체 종류별 최대 수평변위는 C.I.P.나 Diaphragm wall과 같이 벽체강성이 클수록 수평변위가 작게 나타나며, 구속효과에 대한 신뢰도가 높은 경향을 관찰할 수 있다. 한편 유사한 강성의 경우라도 S.C.W.나 C.I.P.의 경우가 H-pile+토류판에 비하여 다소 작은 수평변위를 보였는데 이는 초기변위의 구속과 토류판 배면의 여굴 방지에 있어 연속적인 벽체가 효과적이기 때문으로 판단된다.



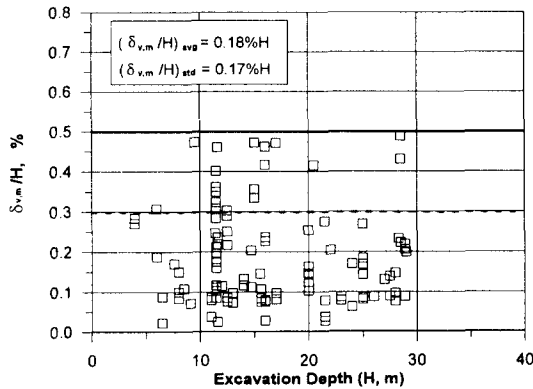
구 분	평 균	표준편차	계측자료
H - pile	0.18%H	0.11%H	145단면
S.C.W.	0.16%H	0.11%H	21단면
C.I.P.	0.15%H	0.08%H	30단면
Diaphragm Wall	0.04%H	0.04%H	21단면
전 체	0.16%H	0.11%H	217단면

그림 2. 최대 굴착깊이(H)와 최대수평변위( $\delta_{h,m}$ )의 관계

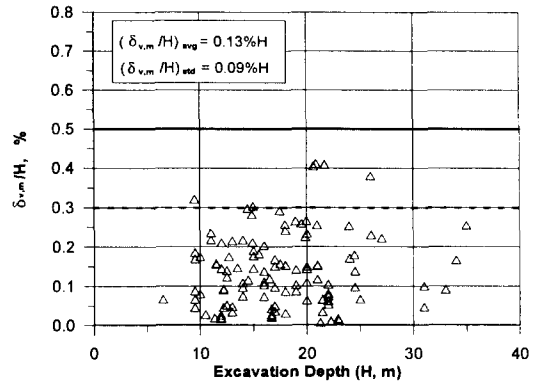
#### 4.2 지지방법에 따른 최대 수평변위

지반굴착에 진행됨에 따라 흙막이벽체의 변위는 증가하므로 초기변위를 회복시키거나 또는 추가변위를 억제하기 위하여 지지구조에 선행하중을 가하게 된다. 이때 앵커는 버팀보에 비하여 선행하중을 가하기가 용이하며, 일반적으로 시공시 과다굴착의 여지가 적어서 변위구속에 효율적이다.

그림 3은 흙막이벽체의 최대 수평변위를 지지구조의 형식에 따라 구분하여 나타낸 것인데 보이는 것과 같이 버팀보지지에서는 103단면 중 18단면의 최대수평변위가 0.3%H 이상인 반면 앵커지지 벽체에서는 114단면 중 5단면에 불과하다. 또한 그림에 나타나 있듯이 버팀보지지 벽체의 최대 수평변위는 평균 0.18%H이며, 앵커지지의 경우는 0.13%H로 앵커가 변위의 구속효과가 크고 신뢰도가 높은 것을 알 수 있다.



(a) 버팀보지지 흙막이벽



(b) 앵커지지 흙막이벽

그림 3. 지지방법에 따른  $\delta_{h,m}/H - H$ 의 관계

### 4.3 시스템 강성에 따른 최대 수평변위

흙막이벽체의 휨강성 ( $EI$ )과 지지구조 간격 ( $h_s$ ), 물의 단위중량 ( $\gamma_w$ )으로 무차원인 흙막이벽체의 시스템강성 ( $EI/\gamma_w h_s^4$ )으로 나타낼 수 있는데 그림 4는 시스템강성에 따른 최대수평변위의 변화 경향을 나타내고 있다. 그림에 보이는 바와 같이 벽체의 최대수평변위는 시스템강성이 증가함에 따라 쌍곡선의 형태로 감소하는 경향을 보이고 있으며, 그림에 보이는 상한치에 대한 곡선은 아래의 식(1)로 표현된다.

$$\frac{\delta_{h, \max}}{H}, (\%) = -\frac{k_s - 12}{1.9 k_s + 120} + 0.5 \quad (1)$$

상기 식에서  $k_s$ 는 흙막이벽체의 시스템강성 ( $=EI/\gamma_w h_s^4$ )을 나타내는데 이 관계로부터 동일한 휨강성을 지닌 벽체의 경우에도 앵커나 버팀보와 같은 지지구조의 간격을 좁히므로써 흙막이벽체의 수평변위를 경감시킬 수 있다는 것을 보여주는 결과라 할 수 있다.

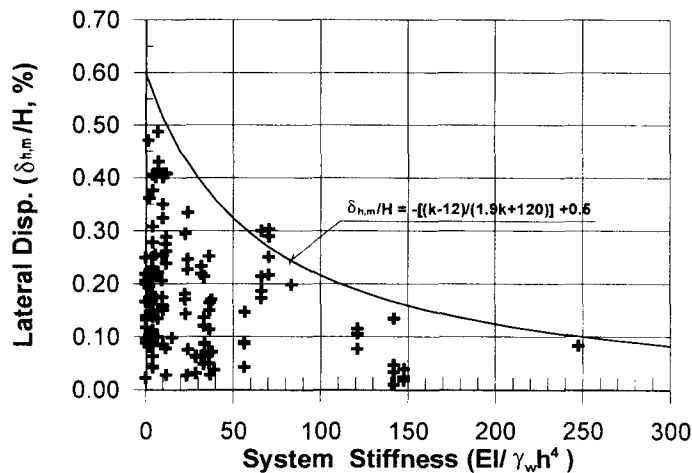


그림 4. 흙막이벽체의 시스템 강성 ( $EI/\gamma_w h_s^4$ )과 ( $\delta_{h,m}/H$ )의 관계

### 4.4 유한요소해석 결과

여러가지 시공변수가 흙막이벽체의 변위에 미치는 영향을 알아보기 위하여 벽체강성, 지지구조간격, 파굴착깊이 지반조건 등이 변화되는 경우에 대한 유한요소해석을 수행하였으며, 해석결과에서 얻어진 수평변위를 각각의 매개변수에 대해 나타내면 그림 5~8과 같다.

그림 5는 지지구조의 간격( $h_s$ )이 3.0m 또는 2.0m인 경우에 대하여 각각 흙막이벽체의 강성 ( $EI$ )이 증가하는 경우에 대한 해석결과를 나타낸 것인데 벽체의 강성이 증가하거나 지지구조의 간격을 좁하면 수평변위가 감소하는 전형적인 결과를 보여주고 있다. 그러나 시스템강성 측면에서  $EI$ 의 증가는  $h_s$ 를 감소시키는데 비하여 변위억제에 효과적이기는하나 대동소이한데 이러한 결과로 볼 때 경제성 측면에서는  $h_s$ 를 좁히는 것도 변위억제에 효과적인 방법이라고 할 수 있다.

그림 6은 평균적인 현장조건에서 시스템강성 ( $k_s = EI / \gamma_w h_s^4$ )이 기본조건인 14인 경우와 70인 경우에 대하여 굴착깊이( $h_{oe}$ )를 변화시킨 경우에 대한 해석결과를 보여주는데 그림에서 과굴착깊이는 시스템강성에 비하여 벽체의 변위에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. 또한 그림 7은 지반조건에 따른 흙막이벽체의 최대변위를 보여주고 있는데 이 관계에서 하부에 암반을 포함하는 경우와 암반을 포함하지 않은 경우에 있어 벽체의 수평변위는 큰 차이가 있으며, 특히 토사층의 토성은 벽체변위에 큰 영향을 미친다. 따라서 암반을 포함한 굴착에 있어 지반거동 예측기법은 기존의 이론을 그대로 적용해서는 곤란하다.

한편 이상의 모든 해석결과를 최대 수평변위와 시스템 강성의 관계로 정리하며 나타내면 그림 8와 같은데 그림에 나타나 있는것과 지반이 연약한 점성토로 구성된 경우를 제외하고는 모든 경우에 있어 최대 수평변위는 계측자료분석에서 얻어진 경험식의 범위에 있다. 이와 같은 결과를 감안할 때 평균적인 수평변위 이상의 변위가 발생하는 경우는 이상적인 시공조건에서 과굴착, 토류관 뒷체움 불량 등의 시공에 따른 영향과 지하수의 영향 때문일 것으로 사료되며, 특히 암반을 포함하는 굴착현장의 경우 과도한 벽체의 변위는 주로 시공 불량에서 그 원인을 찾을 수 있다.

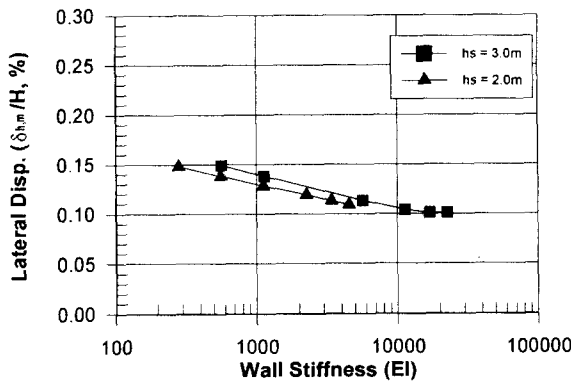


그림 5. 벽체강성과 지지간격의 영향

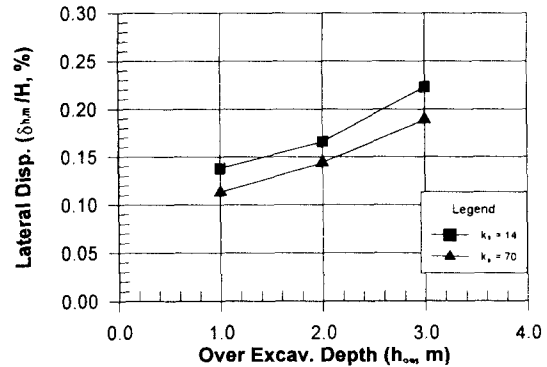


그림 6. 과굴착의 영향

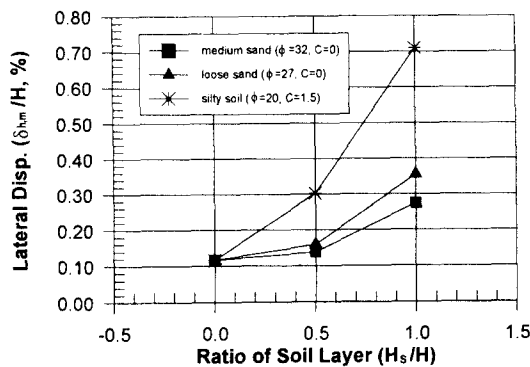


그림 7. 토층비와 토사층의 영향

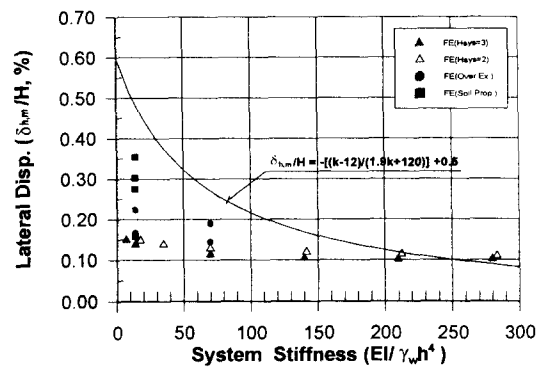


그림 8.  $EI / \gamma_w h_s^4$ 와  $\delta_{h,m} / H$ 의 관계

## 5. 흙막이벽체에 작용하는 겉보기토압

### 5.1 겉보기토압 분포경향

흙막이벽체에 작용하는 겉보기토압 ( $\sigma_h$ )은 그림 9에 나타난 것과 같이 앵커 또는 버팀보에 작용하는 축력 ( $Q_i$ )을 분담면적 ( $A$ )으로 나누어서 계산할 수 있다. 본 연구에서 분석한 57단면에 대한 하중계 및 변형계 측정결과 지지구조에 작용하는 하중은 불규칙하게 나타났기 때문에 본 연구에서는 각 단면의 계측결과중 최대 축력을 기준으로 최대겉보기토압 ( $\sigma_{h,m}$ )을 산정하였다.

그림 10은 각 현장에서 측정된 최대겉보기토압과 Rankine토압 ( $K_a\gamma H$ )의 관계를 보여주는데 최대겉보기토압과 Rankine토압의 비 ( $\sigma_{h,m}/K_a\gamma H$ )는 24~87%의 범위이며, 평균 49% 정도이다. 이와같이 암반굴착을 포함하는 현장에서의 최대겉보기토압은 평균적으로 Terzaghi & Peck(1967)의 토압보다 작으며, 국내 학자[이종규와 전성곤(1993), 채영수와 문일(1994), 홍원표와 윤중만(1995)]들의 연구결과와 유사하게 나타난다.

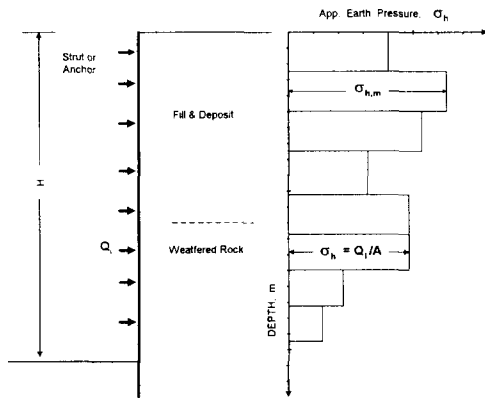


그림 9. 겉보기토압 분포

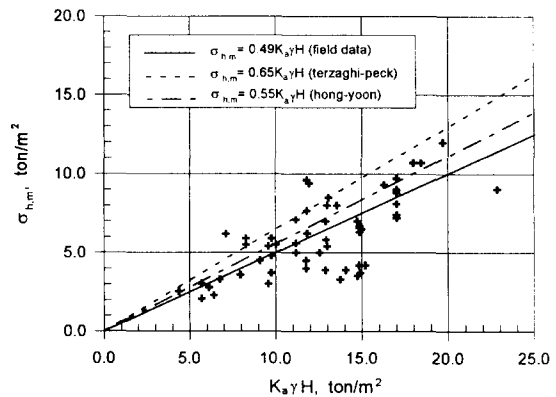


그림 10. 최대겉보기토압과 Rankine토압의 관계

### 5.2 지지구조에 따른 겉보기토압

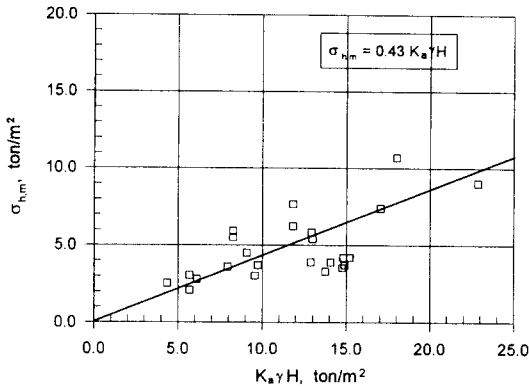
일반적으로 국내에서 행해지는 설계에서는 지지구조에 관계없이 Terzaghi-Peck(1967)의 토압이 적용되고 있다. 본 연구에서는 지지구조에 따른 토압 분포경향을 알아보기 위하여 최대겉보기토압을 지지구조에 따라 구분하여 나타내었는데 그림 11에 보이는 바와 같이 ( $\sigma_{h,m}/K_a\gamma H$ )는 버팀지에서는 0.71~0.24(평균 0.43), 앵커지지는 0.87~0.34(평균 0.55)이다. 즉,

$$\sigma_{h,m} = 0.55K_a\gamma H \quad (\text{앵커지지}) \quad (2a)$$

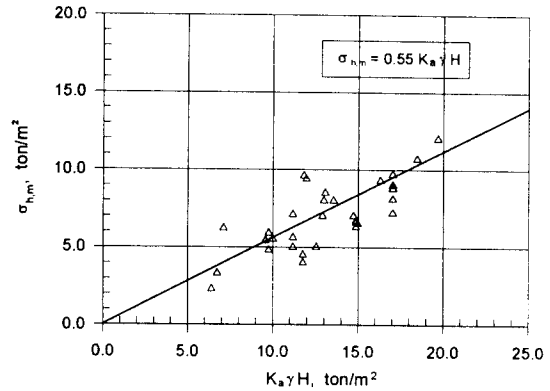
$$\sigma_{h,m} = 0.43K_a\gamma H \quad (\text{버팀지지}) \quad (2b)$$

이와 같이 앵커에 의해 지지되는 벽체는 버팀지지의 경우보다 더 큰 토압이 작용하는 것으로 나타나는데 이는 선행긴장에 따른 변위 구속효과 때문인 것으로 판단된다.





(a) 버팀보에 의해 지지되는 경우



(b) 앵커에 의해 지지되는 경우

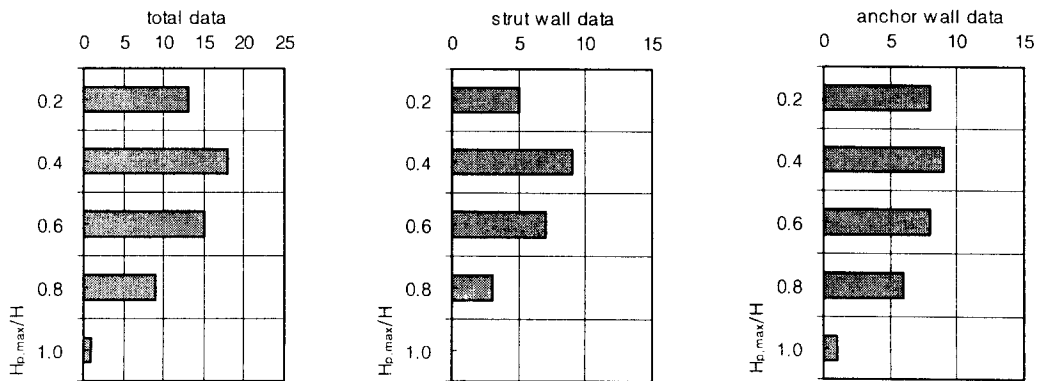
그림 11. 흙막이벽체의 지지구조에 따른 토압계수비

### 5.3 결보기토압 분포

흙막이벽에 작용하는 수평토압은 시공조건이나 선행하중에 따라 달라지므로 최대토압의 작용점은 비교적 불규칙하게 나타난다. 그러나 대부분의 경우에 있어 지지구조에 작용하는 축력은 하부로 갈수록 작아지는 일반적인 경향이 있는데 이는 하부로 갈수록 지반의 상대밀도가 조밀하게 변화하거나 또는 암반을 포함하기 때문인 것으로 판단된다.

그림 12(a)는 측정된 57단면에 대하여 최대결보기토압의 작용 위치를 도수분포로 나타낸 것인데 굴착깊이의 80% 깊이(0.8H) 까지 고르게 분포하는 경향을 보이고 있다. 한편 지지방법으로 구분하면 버팀 지지의 경우[그림 12(b)] 최대토압은 전반적으로 상부에서 부터 0.6H 상부에 집중한다. 그러나 앵커의 경우[그림 12(c)]는 지표에서 0.8H 깊이까지 전체적으로 고른 분포를 보이고 있는데 이는 앵커지지의 경우 선행하중 때문인 것으로 판단된다.

이상에서 나타낸 것과 같은 최대 결보기토압의 크기나 작용위치로부터 지지방법에 따른 결보기토압의 분포는 다음의 그림 13과 같이 나타낼 수 있다.

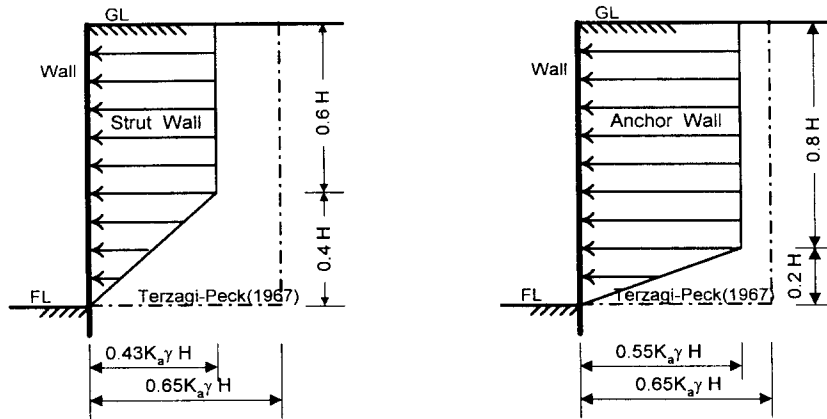


(a) 전체 측정자료

(b) 버팀지지의 경우

(c) 앵커지지의 경우

그림 12. 최대 결보기토압의 분포



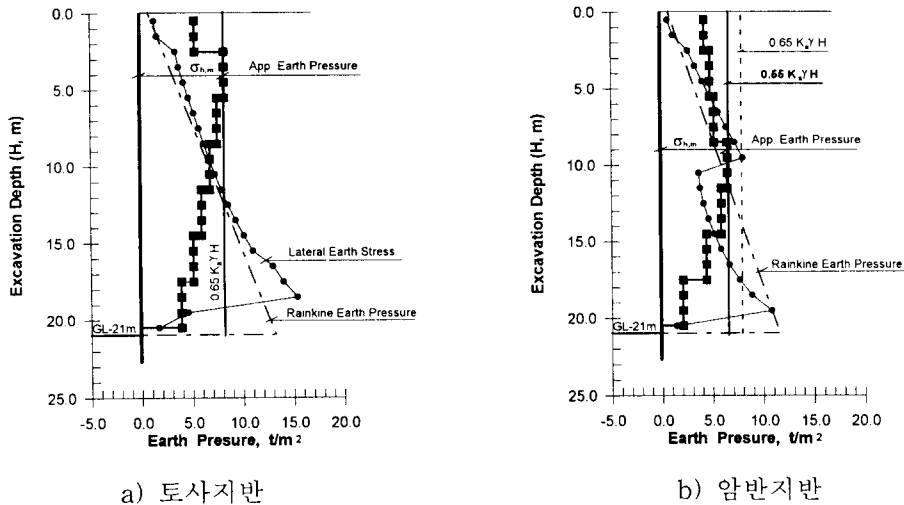
(a) 버팀지지의 되는 경우

(b) 앵커지지의 경우

그림 13. 흙막이벽체에 작용하는 겉보기토압 분포

#### 5.4 유한요소해석 결과

그림 14는 모래지반을 굴착하는 경우(a)와 암반을 포함하는 지반을 굴착의 경우(b)에 대한 유한요소해석 결과로부터 벽체에 작용하는 수평토압과 지지구조의 축력으로계산된 겉보기토압 및 Rankine 토압 분포를 나타낸 것이다. 그림에 나타내었는 것과 같이 최대겉보기토압과 Rankine 토압의 비 ( $\sigma_{h,m}/K_a\gamma H$ )는 모래지반을 굴착하는 경우 0.65인 반면 암반을 포함한 굴착의 경우는 약 0.55 정도를 나타내고 있는데 이와 같은 결과는 계측자료 분석에서 얻어진 경험적인 이론과 일치한다고 할 수 있다.



a) 토사지반

b) 암반지반

그림 14. 겉보기토압과 배면토압 및 Rankine 토압의 관계 (유한요소해석 결과)

이와 같은 관계를 보다 명확히 알아보기 위하여 여러가지 조건에 대한 유한요소해석 결과에서 최대겉보기토압 ( $\sigma_{h,m}$ )과 겉보기토압분포 ( $\sigma_{h,m} \cdot H$ ), 지지구조에 작용하는 전축력 ( $\sum Q_s$ ) 및

벽체배면의 수평응력 ( $\Sigma \sigma_x$ )을 계산하여 표 3에 나타내었다. 표에 제시된 관계에서 흙막이벽체의 설계시 적용되는 겉보기토압 분포와 실제 지지구조에 작용하는 축력 및 배면에 작용하는 수평토압의 관계는 다음과 같다.

$$\frac{\sigma_{h,m} H}{\Sigma Q_s} = 1.54 \quad (3)$$

$$\frac{\sigma_{h,m} H}{\Sigma \sigma_x} = 1.18 \quad (4)$$

즉, 흙막이벽체의 설계에 겉보기토압을 적용하는 지지구조에 작용하는 전 축력과 배면에 작용하는 수평토압에 비하여 각각 54% 및 18% 정도 큰 토압을 이용하는 것으로 나타난다. 한편 표 3에서 암반을 포함한 지반굴착에 있어 흙막이벽체에 작용하는 최대 겉보기토압과 Rankine 토압의 관계 ( $\sigma_{h,m}/K_a\gamma H$ )는 0.48~0.64의 범위이나 평균적으로 0.55 정도이다.

표 3. 여러 가지 조건에 대한 유한요소해석 결과로부터 계산된 토압분포

해석조건				$\sigma_{h,m}$	$\sigma_{h,m} H$	$\Sigma Q_s$	$\Sigma \sigma_x$	$K_a \gamma H$
$H_s/H$	$EI/\gamma_w h_s^4$	$h_{oe}$	$h_s$					
0.5	14	1	3	6.46	135.59	90.89	105.22	12.0
1.0	14	1	3	8.19	141.69	115.15	143.62	13.0
0.0	14	1	3	5.71	119.84	91.18	107.42	11.2
0.5	14	2	3	6.03	126.63	81.85	97.36	12.0
0.5	14	3	3	6.16	129.29	72.42	89.18	12.0
0.5	70	1	3	6.44	135.24	87.80	119.76	12.0
0.5	210	1	3	5.78	121.31	84.07	128.41	12.0
0.5	420	1	3	7.75	162.75	81.68	134.79	12.0

## 6. 결 론

도심지 굴착에 따른 흙막이벽체의 거동 및 토압 예측기법 개발의 일환으로 수행된 현장의 계측자료 분석과 유한요소해석 결과로부터 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 굴착깊이에 대한 벽체의 최대수평변위는 Goldberg et al(1976)과 Clough & O'Rourke(1990)가 제안한 위험기준인 0.5%H 이내에 분포하며, 평균은 0.16%H 정도이다.
- 벽체의 수평변위는 벽체의 강성에 반비례하는 것으로 나타났으며, 앵커지지 벽체의 경우가 버팀지지에 비하여 다소 큰 변위구속 효과를 보인다.
- 흙막이벽체의 시스템강성으로 벽체의 최대수평변위를 예측할 수 있으며, 강성이 작은 벽체의 경우에도 과굴착과 토류판 뒷채움 등의 시공관리를 통하여 벽체의 변위를 경감시킬 수 있다.
- 암반을 포함한 지반굴착에 있어 최대 겉보기토압은 평균적으로 Rankine 토압의 49% 정도로 국내에서 적용되는 Terzaghi-Peck(1967)의 토압 보다 작은 것으로 나타났다.

- 앵커지지 벽체의 경우 평균 최대결보기토압은 Rankine 토압의 55%, 버팀지지 벽체는 43% 정도인데 이와 같은 결과는 국내 다른 연구자들의 연구결과와 유사하다.
- 흙막이벽체의 설계에 결보기토압을 적용하는 것은 상당히 보수적인 설계를 가능케 하지만 지반거동을 억제하는 측면에서는 설계토압보다 굴착시공의 영향이 크기 때문에 철저한 시공관리가 요구된다.
- 앞으로 보다 다양한 조건의 계측자료를 체계적으로 수집하고 분석하여 여러 가지 시공변수들이 흙막이벽체의 거동에 미치는 영향을 알아보아야 할 것이다.

## ■ 참고 문헌

- 1) 양구승(1996), “도심지 깊은굴착시 인접지반 거동에 대한 분석”, 공학박사학위논문, 서울대학교
- 2) 이종규,전성곤(1993), “다층지반의 굴착시 토류벽에 작용하는 토압 분포”, 한국지반공학회지, Vol. 9, No. 1, pp59~68
- 3) 홍원표, 윤중만(1995), “지하굴착시 앵커지지 흙막이벽체에 작용하는 측방토압”, 한국지반공학회지, Vol. 11, No. 1, pp63~77
- 4) 채영수, 문일 (1994), “국내 지반조건을 고려한 흙막이 벽체에 작용하는 토압”, 한국지반공학회 '94 가을 학술발표회 논문집, pp129~138
- 5) Capse, M. S. (1966), “Surface Settlement Adjacent to Braced Open Cuts”, JSMFD, ASCE, Vol. 92, SM 4, July, pp51~59
- 6) Clough, G. W. and Tsui, Y. (1974), “Performance of Tie Back Walls in Clay”, J. of Geotechnical Eng. Div., ASCE, Vol. 100, No. GT12, pp.1259~1274.
- 7) Clough, G. W. and O'Rourke, T. D. (1990), “Construction Induced Movements of Insitu Walls”, Design and Performance of Earth Retaining Struc., GSP, No. 25, ASCE, pp439~470.
- 8) Goldberg, D. T., Jaworski, W. E. and Gordon, M. D. (1976), “Lateral Support Systems and Underpinning”, Reports No. FHWA-RD-75-128, 129 and 130, FHWA, Washington D.C.
- 9) Mana, A. I. and Clough, G. W. (1981), “Prediction of Movements for Braced Cuts in Clay”, J. of Geotechnical Eng. Div., ASCE, Vol. 107, No. GT6, June, pp.759~777.
- 10) O'Rourke, T. D. (1975), “A Study of Two Braced Excavations in Sand and Interdedded Stiff Clay”, Ph. thesis, Univ.of Illinois at Urbana-Champaign.
- 11) Peck, R. B. (1969), “Deep Excavation and Tunnelling in Soft Ground”, Proceedings of 7th ICSMFE, Mexico, Vol. 4, pp259~290
- 12) Terzaghi, K.(1943), “Theoretical Soil Mechanics - 8th Printing”, Chapman & Hall, pp182~189
- 13) Terzaghi, K. and Peck, R. B. (1967), “Soil Mechanics in Engineering Practice 2nd edition”, John Wiley and Sons, Inc., New York, pp394~413
- 14) Tschebotarioff, G. P. (1973), “Foundation Retaining and Earth Structure”, 2nd Ed., McGraw-Hill Book Company, pp642