

## 다층지반에서의 토압분포

\* 이종규

\*\* 전성근

---

\* 단국대학교 토목공학과 교수.

\*\* 단국대학교 토목공학과 박사과정.

# 다층지반에서의 토압분포

## (Distribution of Earth Pressures in Multi-layered Ground)

\* 이종규

\*\* 전성곤

### 1. 서론

대부분의 토류구조물에 있어서 굴착으로 인하여 발생하는 문제는 지반조건 및 지하수위에 큰 영향을 받는다. 또한 굴착 규모와 깊이, 벽체의 강성, 선행긴장력 도입방식 및 시공기술 수준등에도 크게 좌우되며 이러한 요소가 복합적으로 영향을 끼치므로 토류벽체의 거동을 이론적으로 예측하기는 매우 어렵다.

일반적으로 옹벽과 같은 강성벽체에서의 토압 추정은 소성평형상태에서의 Rankine - Resal 토압과 흙 췌기론에 근거한 Coulomb 토압등에 의하고, 비교적 강성이 작은 토류벽체를 버팀구조로 지지하며 굴착하는 경우 굴착진행에 따른 벽체의 거동은 옹벽과 같은 강성벽체의 거동과는 다르다. 근본적으로 토압분포는 지반조건뿐만 아니라 벽체의 거동에 영향을 받는 흙-구조물 상호작용(Soil- Structure Interaction)에 따라 달라지게 되므로 버팀구조의 형식과 선행긴장력에 관계되어 강성벽체에 대한 토압분포와는 일치되지 않는다.

연성벽체로서의 토류벽에 작용하는 토압분포는 굴착후 버팀구조 설치를 전제로한 경험토압을 적용하는 것이 일반적이다.

Terzaghi 와 Peck(1948), Peck(1969) 및 Tschebotarioff (1973)등은 굴착이 끝나고 버팀구조가 설치된 후의 토압분포를 버팀구조에 작용하는 하중을 계속하여 제안하였다.

이들 경험토압분포는 지반은 단일토층이고, 버팀구조는 스트러트이며, 토류벽체는 개수식이고, 지하수위는 최종굴착면아래에 있으며, 모래지반은 간극수가 없고, 점토지

---

\* 단국대학교 토목공학과 교수.

\*\* 단국대학교 대학원 토목공학과 박사과정.

반은 간극수압을 무시한 상태를 전제로한 분포이다.

한편, 버팀구조 설치후의 토압분포는 토류벽의 안정에 필수적인 것이지만 보다 불리한 경우는 다음 단계 버팀구조를 설치하기 위하여 굴착을 진행중인 과정이 될 것이다. 이 경우의 토압분포는 경험토압상태와 다를 것이고 더우기 벽체의 변위에 지배될 것이므로 해석방법에 따라 달라지게 된다.

이상에서 언급한바와 같이 토류벽의 거동에 대한 해석은 크게 두가지 면을 고려하여야 한다. 그 하나는 토류벽에 작용하는 토압분포이고 다른 하나는 토류벽에 관한 해석방법인데 이 2개의 요소는 상호 밀접한 관련이 있다.

현재까지의 연구결과를 요약하면 토류벽에 작용하는 토압분포를 포함하는 벽체거동에 관한 이론적 연구는 아직까지 명확한 것은 아니며, 지반조건에 따른 토질정수의 추정, 버팀구조의 설치 및 선행긴장력과 관련하여 이론적으로 그 거동을 예측하고 현장 계측을 정밀하게 실시하여 이들 결과로 부터 비교, 검토하는 방법이 바람직한 것으로 사려된다. 더우기 현재까지의 연구 결과를 볼때 주로 단일균질지층에 대한 연구 결과가 대부분이다.

우리나라와 같이 지층 구성이 사질토층, 풍화암, 연암, 경암층 순으로 구성되어 있고, 특히 암반을 포함하는 다층지반에 대한 토압분포 및 벽체거동이 단일사질토지반에 대한 연구결과와 일치하는 지는 명확하지가 않다.

본 연구에서는 위와 같은 사실에 기초하여 암반을 포함한 다층지반으로 구성된 서울지역 9개 굴착 공사현장에서의 10개 단면에 대하여 버팀구조에 부착된 하중계 및 변형계의 계측치로 부터 환산한 토압분포와 지반조사 결과로 추정한 토질정수를 사용하여 구한 경험토압분포를 비교 검토하고, 버팀구조의 계측치로 부터 환산한 토압분포를 각 지층별로 구분하여 평균토압계수와 토압분포계수를 제안하였다.

한편, 굴착 단계별 흙-구조물 상호작용을 고려한 탄소성지반상 연속보 해석 이론을 기초로 탄소성 해석 프로그램을 개발하고 추정 토질정수를 사용하여, 토압의 변화와 그 분포를 예측하였다.

또한, 최종 굴착단계에서 실측된 벽체변위를 개발한 탄소성 해석 프로그램을 이용하여 역해석(Feed Back Analysis)을 수행한 후 그 결과를 추정 토질정수를 사용한 결과의 재분포 토압 및 버팀구조반력 실측치로 부터 구한 토압분포와 비교, 검토하므로써 제안된 토압분포와 토압계수를 검증하였다.

## 2. 지반조건

본 연구 대상 현장은 주변에 아파트, 빌딩, 지하철등 근접시공의 위험요소를 내포하고 있는 서울지역에 위치한 지하 GL. -17.0M ~ -35.6M의 도심도 굴착현장들이며, 각 현장의 지층구성은 대부분 사질토층, 풍화암, 연암, 경암등의 순으로 다층지반을 형성하고 있으며 각 현장의 토질 주상도는 그림2.1과 같다.

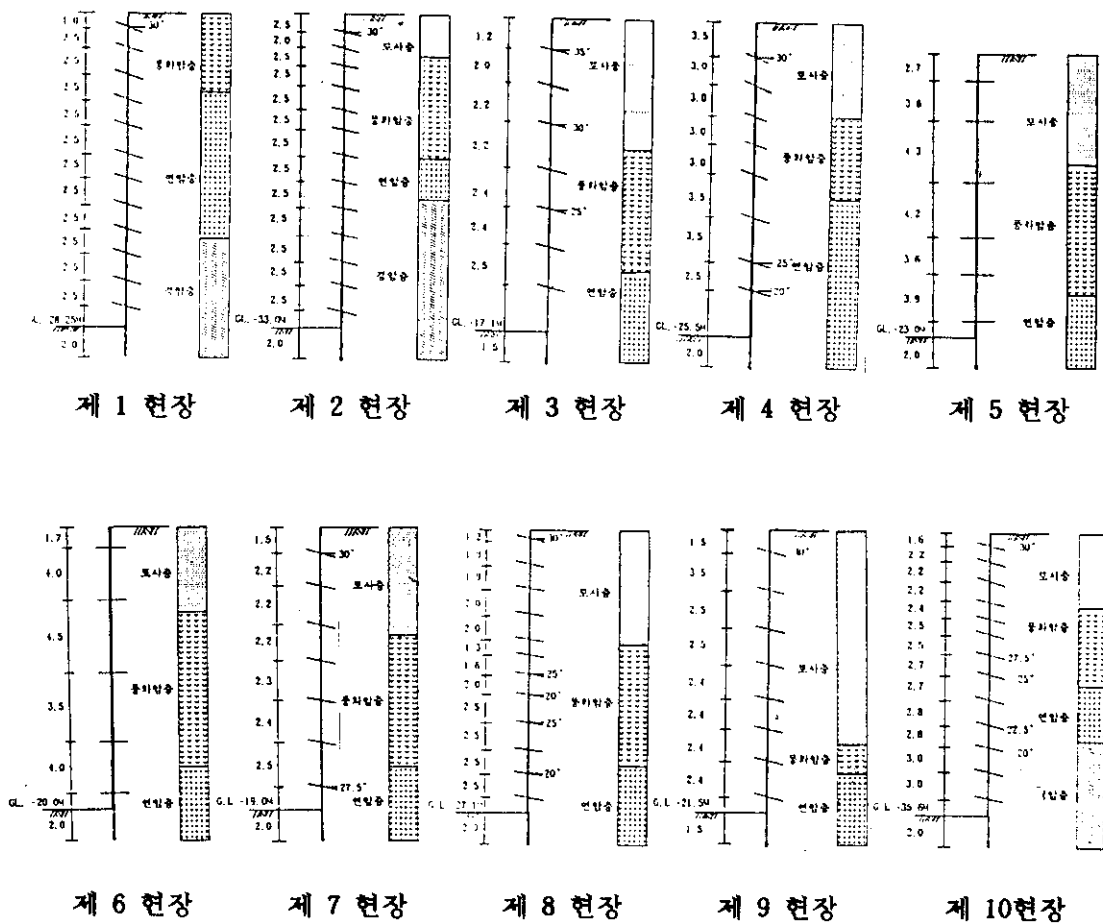


그림2.1 각 현장의 토질주상도

각 현장의 토류벽체의 종류, 벽체제원, 지지형식 및 총굴착 깊이는 표 2-1과 같다. 7개현장은 C.I.P(Cast in place) 와 C.I.P + H-Pile + 토류판으로 된 연성벽체이고, 3개 현장은 비교적 강성이 큰 Diaphragm Wall로 시공되었으며, 벽체지지형식은 스트리트나 앵커로 지지되었다.

표 2-1 각 현장의 벽체종류와 지지형식

현 장	벽체종류	벽 체 제 원	지지형식	총 굴착깊이
제 1-T 현장	C. I. P+H-PILE	H-300X300X15X15	앵 커	GL. - 28.25M
제 1-D 현장	C. I. P+H-PILE	H-300X300X15X15	앵 커	GL. - 33.0M
제 3 현장	H - PILE	H-300X300X15X15	앵 커	GL. - 17.1M
제 4 현장	D - WALL	T = 800 mm	앵 커	GL. - 25.5M
제 5 현장	D - WALL	T = 800 mm	스트리트	GL. - 23.0M
제 6 현장	D - WALL	T = 800 mm	스트리트	GL. - 20.0M
제 7 현장	H - PILE	H-300X200X9X14	앵 커	GL. - 19.0M
제 8 현장	H - PILE	H-300X300X15X15	앵 커	GL. - 27.1M
제 9 현장	C. I. P+H-PILE	H-300X200X9X14	앵 커	GL. - 21.5M
제 10현장	H - PILE	H-300X200X9X14	앵 커	GL. - 35.6M

\* 주 : H 는 H형강  
T 는 벽체 두께

### 3. 계측 결과 분석

#### 3.1 토압분포

본 연구에서는 버팀구조에 설치한 하중계나 변형계를 이용하여 단계별 굴착시 각 버팀구조가 분담하는 하중을 중점분할법으로 계산하여 토압으로 환산하였다.

환산된 토압분포는 그림3.1과 같으며, 실측 토압분포중 실선은 굴착깊이 증가에 따라 측정된 버팀구조 반력의 최대값으로 분포시킨 토압이고 점선은 평균값을 사용하여 구한 것이다.

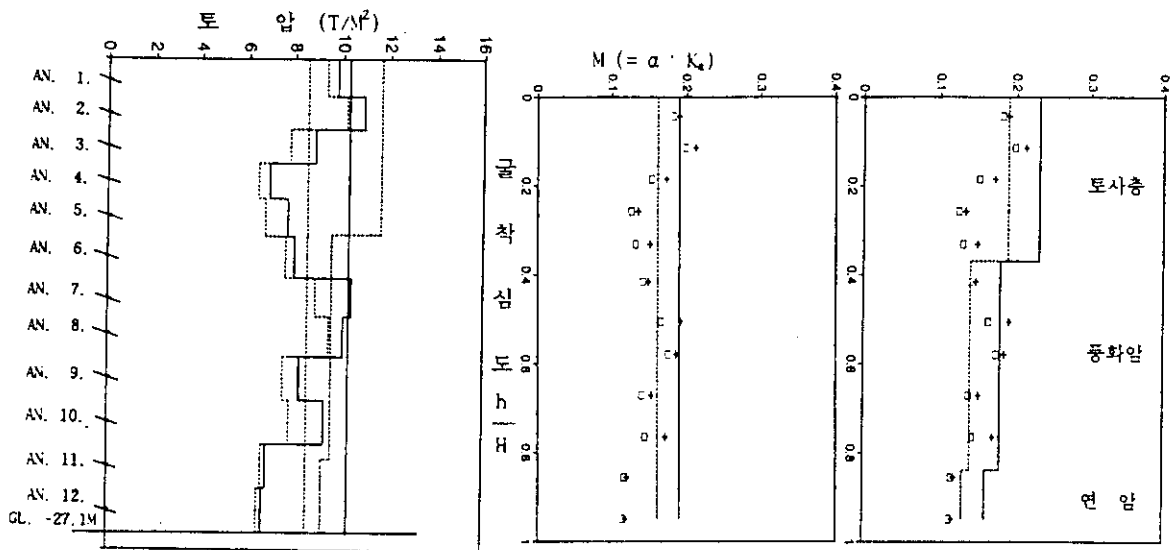
그리고 1점쇄선과 2점쇄선은 각각 Peck의 경험토압을 지반조건에 따라 추정된 토질정수를 사용하여 다층지반의 단위중량과 내부마찰각을 각 지층의 깊이를 고려하여

평균한 값으로 단일지층으로 계산한 결과와 각 지층별 단위중량과 내부마찰각을 사용하여 계산한 결과를 나타낸 것이다.

한편, 각 지층별 추정 토질정수로 구한 Peck의 경험토압과 계측반력으로 구한 토압은 각각의 현장에 따라 다르지만, 10개 단면에 대한 평균치는 사질토층 51 ~ 59%, 풍화암층 62 ~ 68%, 연암층 60 ~ 64%, 경암층 53 ~ 56%로서 전체적인 경향으로 볼 때 Peck의 경험토압에 약 56 ~ 62% 정도로 계측토압이 작게 나타났다.

또, 다층지반을 단일지층으로 토질정수를 환산하여 적용한 Peck의 경험토압의 약 57 ~ 63% 정도로 나타났다. 이 결과는 최대 토압을 암반층에 균일 분포시킨 경우의 70 ~ 80%에 비해 10 ~ 20%정도 작게 나타났다.

계측반력으로 구한 토압이 Peck의 경험토압보다 작은 이유는 계측토압에는 암반층의 점착력이 고려된 것에 비하여 Peck의 경험토압에서는 이 값이 무시되었기 때문으로 보인다.



(a) 단일층

(b) 지층별

그림 3.1 굴착 단계별 계측토압과 경험토압의 비교 (제 8 현장)

그림 3.2 굴착단계별 계측토압에 의한 토압분포계수 M (제 8 현장)

또한 그림 3.1에서 Peck의 경험토압에 각 지층별 점착력을 지층별 깊이를 고려한 평균 점착력(=2·Cave √Ka)으로 환산하여 고려한 경우를 계측토압과 비교한 결과로서

10개 단면에 대한 평균치는 사질토층 68 ~ 78%, 풍화암층 89 ~ 98%, 연암층 89 ~ 96%, 경암층 97 ~ 103% 였고, 전체적인 경향은 점착력을 고려한 Peck의 경험토압에 비하여 계측토압이 약 86 ~ 94%로 나타났다. 또한 다층지반을 단일지층으로 환산하여 점착력을 고려한 Peck의 경험토압에 비하여 계측반력으로 구한 토압이 81 ~ 90%로 나타났다.

그림 3.1에서 버팀구조 계측치로 환산한 토압분포는 점착력을 고려하지 않은 Peck의 경험토압분포보다 지층별 및 단일층으로 간주한 어느 경우라도 작은 값을 나타내며, 점착력을 고려하면 Peck의 경험토압보다 크거나 근사한 것으로 나타났다.

이에 대한 분석은 많은 논의가 요구되는데 본 연구 대상 단면에서의 지반조건과 지지방법등을 고려할 수가 있다. 왜냐하면 Peck등의 경험토압분포는 전제조건이 균일한 지층이고, 개수식으로서 배면수압이 존재하지 않으며 점착력이 고려되지 않은 경우이고, 스트러트로 지지된 경우에 한하여 그 실측하중을 재분포 시킨 경우인데 비하여 본 연구에서 적용된 현장은 H- Pile에 긴장력을 작용시킨 앵커지지 방식과 강성이 비교적 큰 Diaphragm Wall에 앵커와 스트러트 지지방식에 대한 경우이며, 지반조건 또한 균일층이 아니며 더구나 사질토층으로 구성된 지반이 아니고 사질토층, 풍화암, 연암 및 경암등으로 구성된 다층지반의 경우이기 때문이다.

더우기 Peck의 경험토압에 적용한 토질정수의 값이 사질토층 및 풍화암층에서는 표준관입시험의 결과, 암반층에서는 Design Manual이나 R.M.R(Rock Mass Rating) 또는 Q-System으로 분류하여 추정한 값이기 때문에 적용 토질정수의 오차등을 들 수 있으므로 암반층을 포함한 다층토인 경우 사질토에 대한 Peck의 경험토압을 하중으로 분포시킬때 이들에 대하여 보다 많은 연구, 검토가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

Peck의 경험토압분포에서는 상재하중의 영향이 고려되지 않았으나, 실제 계측된 버팀구조의 반력은 상재하중을 포함하고 있다. 그러나 토압환산시 상재하중의 영향이 아주 미소하였기 때문에 Peck의 경험토압분포에 상재하중을 무시하여도 큰 문제가 없는 것으로 판단되었다.

본 연구 대상 현장의 경우 양수에 의하여 지하수위가 연암층이하에서 안정되어 있으므로 수압의 영향은 무시하였다.

### 3.2 토압분포계수

사질토 지반에 대한 Peck의 경험토압분포중  $0.65 \cdot K_a = m$ 으로 놓고 이를 토압분포계수라 하고 굴착단계별 앵커 및 스트리트에 부착한 하중계 및 변형계로 측정한 평균 및 최대값으로 구한 토압분포중  $m$ 에 해당하는 값을  $M = \alpha \cdot K_a$  라 하여 역시 토압분포계수라 한다.

여기서, 토압계수 대신 토압분포계수  $M$ 으로 비교 검토하는 이유는 Peck의 경험토압의  $m$ 값중  $0.65$ 가 다층지반인 경우 사질토층 이외에도 적용할 수 있는지는 의문이며, 토압계수  $K_a$ 도 굴착진행에 따라 변하므로 실측토압분포에서는 이 값을  $M = \alpha \cdot K_a$ 로 나타내었다.  $M_1$ 은 지층별로 구한 값이고  $M_2$ 는 다층지반을 각 지층별 깊이를 고려한 단일층으로 본 경우의 값이다. 또, Peck의 경험토압 분포계수중  $m_1$ 은 지층별 토압계수  $K_a$ 를 적용한 토압분포계수이고  $m_2$ 는 다층지반을 각 지층별 깊이를 고려한 단일층으로 토질정수를 환산하여 구한 값( $K_{ave}$ )를 사용한 값이다.

이들 결과를 현장별로 나타내면 그림 3.2와 같고 이를 단일층으로 환산했을 때와 지층별 토압분포계수의 변화경향이 같았으며, 전 현장에 대하여 계측치의 토압분포계수를 각 지층별로 평균한 결과 사질토층  $M=0.116 \sim 0.135$ , 풍화암층  $M=0.120 \sim 0.132$ , 연암층  $M=0.102 \sim 0.109$ , 경암층  $M=0.078 \sim 0.084$ 로 나타났으며, 단일층으로 환산한 경우 토압분포계수는  $M=0.111 \sim 0.124$ 로 나타났다. 이를 점착력을 고려하지 않은 Peck의 경험토압분포계수와 비교했을 때 평균적으로 사질토층 51 ~ 59%, 풍화암층 62 ~ 68%, 연암층 59 ~ 63%, 경암층 52 ~ 55%이고 단일층으로 환산한 경우 57 ~ 64%로 작게 나타난 반면, 각 지층별 점착력을 지층별 깊이를 고려하여 계산한 평균점착력을 Peck의 경험토압에서 적용한 경우의 경험토압분포계수와 비교했을 때 평균적으로 사질토층 68 ~ 78%, 풍화암층 90 ~ 98%, 연암층 90 ~ 96%, 경암층 96 ~ 103%로 나타났고 단일층으로 환산한 경우 78 ~ 87%로 근접하는 것으로 나타났다.

그림 3.3, 3.4, 3.5, 3.6은 굴착깊이에 따른 토압분포계수  $M$ 값의 변화 추이를 나타낸 것으로 사질토층에서 경암층으로 갈수록 변화율이 감소하는 것을 알 수 있다.

이상의 결과를 분석할때 Peck의 토압분포중 평균 내부마찰각의 추정오차를 고려한다면 버팀구조 설치후의 토압분포는 다층지반인 경우에도 Peck의 토압분포와 비교할 때 점착력의 적용여부에 따라 큰 편차를 보이고 있으므로 본 연구대상 지반에서와 같이 암반을 포함하는 다층지반에 대한 토압분포 추정시 지반조건에 따른 내부마찰각의 추정에 세심한 배려가 필요하다는 것이다.

또한 사질토 지반에 대한 Peck의 경험토압분포계수  $m = 0.65 \cdot K_a$  에서  $0.65$ 를  $\alpha$ 로



하였을 때 굴착단계별 계수  $\alpha$ 를 토압분포계수  $m$ 의 최대치와 평균치에 추정토압계수  $K_a$ 를 사용하여 Peck의 경험토압계수 0.65와 비교하였다. 이 결과를 지층별로 분석하면 사질토층  $\alpha = 0.333 \sim 0.385$ , 풍화암층  $\alpha = 0.405 \sim 0.444$ , 연암층  $\alpha = 0.390 \sim 0.417$ , 경암층  $\alpha = 0.341 \sim 0.365$ 로 각각 나타났으며, 이를 Peck의 값과 비교하면 점착력을 고려하지 않은 경우와 고려한 경우에 있어 사질토층 51 ~ 59%, 66 ~ 77%, 풍화암층 62 ~ 68%, 88 ~ 97%, 연암층 60 ~ 64%, 85 ~ 92%, 경암층 53 ~ 56%, 97 ~ 104%로 각각 나타났다.

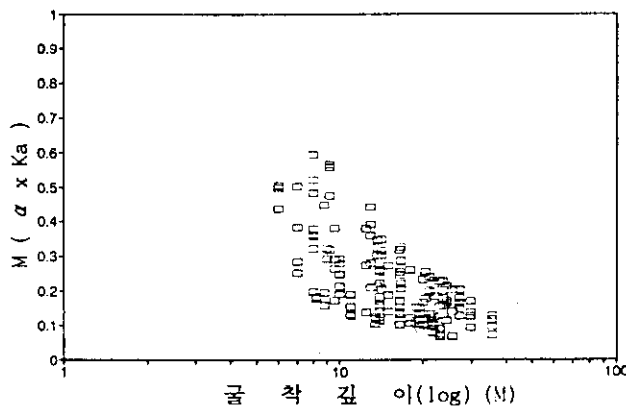


그림 3.3 굴착깊이별 사질토층의 M 값의 변화

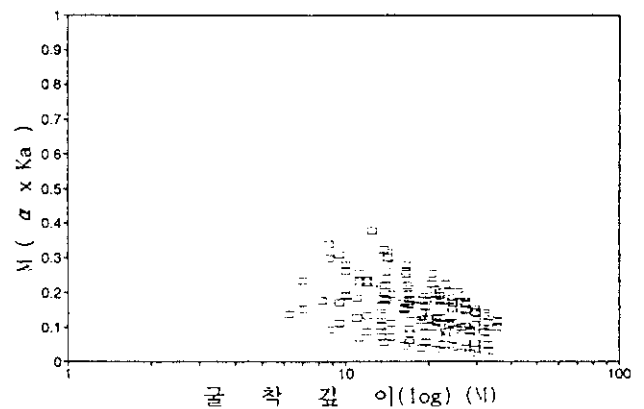


그림 3.4 굴착깊이별 풍화암층 M 값의 변화

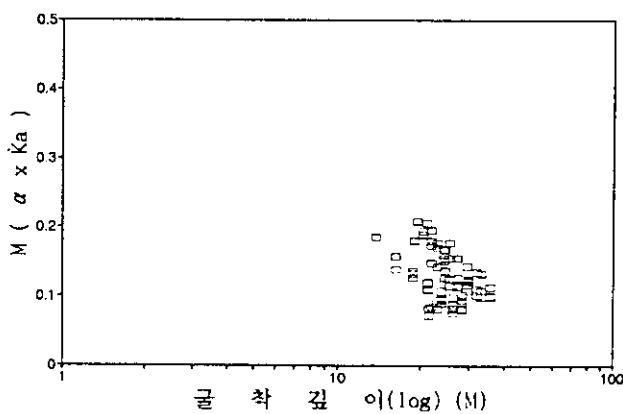


그림 3.5 굴착깊이별 연암층의 M 값의 변화

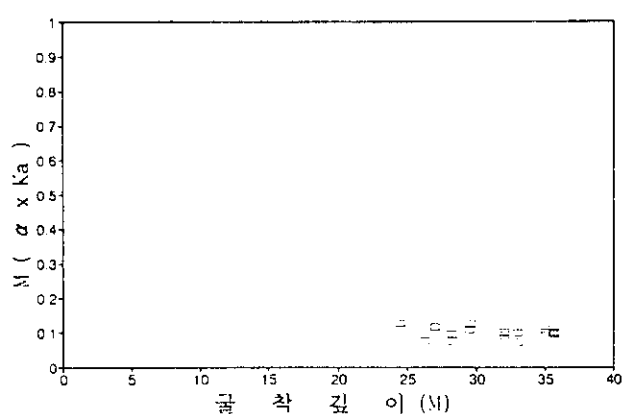


그림 3.6 굴착깊이별 경암층의 M 값의 변화

또한 각 지층별 깊이를 고려한 평균토압계수  $K_{ave}$ 를 사용하여 다층지반을 단일층으로 환산하여 계산하였을 때  $\alpha = 0.406 \sim 0.452$ 으로서, 점착력을 고려하지 않은 경우 Peck의 계수 0.65에 63 ~ 70%로 작게 나타났으며, 점착력을 고려한 경우에는 79 ~ 88%로 근접하는 것으로 나타났다.

### 3.3 지층별 토압계수

Peck의 경험토압공식중 일반적으로 사질토에 적용되는  $0.65 \cdot K_a \cdot \gamma \cdot H$ 를 전제조건으로 앞철의 토압분포계수(M)에서 계수  $\alpha$ 를 0.65로 보고 굴착깊이 변화에 따른 토압계수 분포를 사질토층, 풍화암층, 연암층, 경암층으로 나누어 각각 그림3.7, 그림3.8,

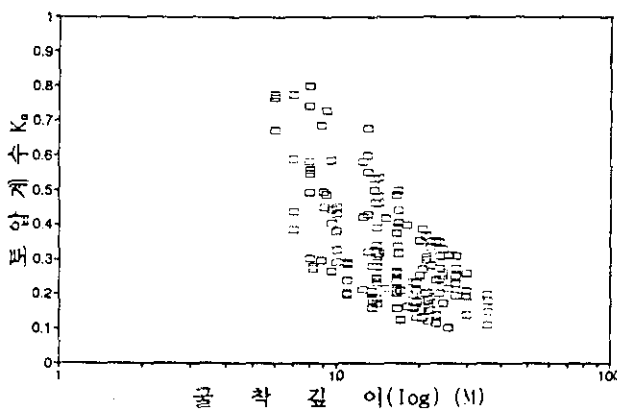


그림 3.7 굴착깊이별 사질토층의 토압계수의 변화

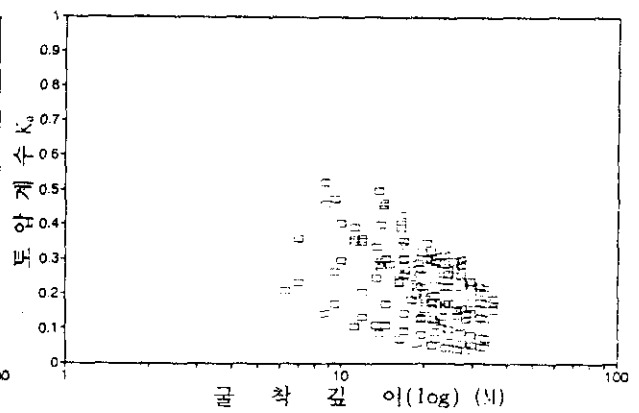


그림 3.8 굴착깊이별 풍화암층의 토압계수의 변화

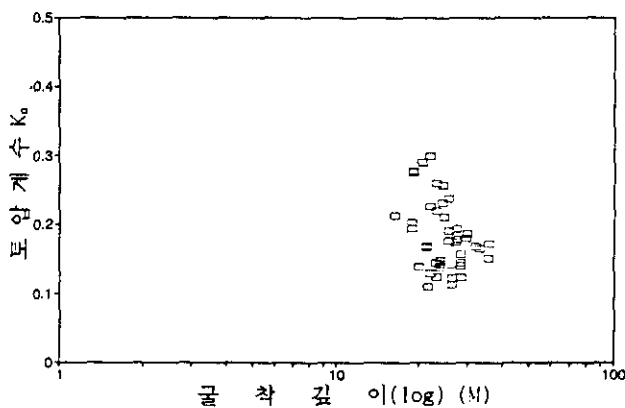


그림 3.9 굴착깊이별 연암층의 토압계수의 변화

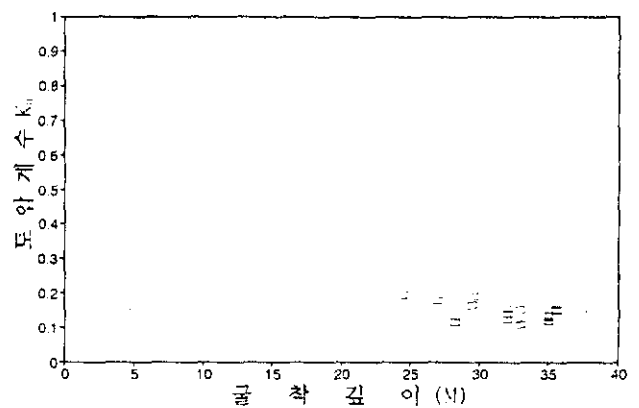


그림 3.10 굴착깊이별 경암층의 토압계수의 변화

그림3.9, 그림3.10에 나타내었으며, 이들은 토압분포계수 M의 경향과 같다.

그림 3.7의 사질토층의 경우 굴착깊이가 깊어 갈수록 일정한 범위를 유지하면서 감소하는 경향을 알 수 있으며, 굴착단계별과 굴착이 완료될때까지의 사질토층의 토압계수의 변화는  $K_a = 0.86 - 0.271 \log \cdot D$ 로 나타났다. 여기서 D는 굴착깊이(m)이다.

그림 3.8은 풍화암층을 Peck의 경험토압분포중 사질토층으로 간주한 경우 굴착진행에 따른 토압계수의 변화를 나타낸 것이며, 토압계수의 변화는  $K_a = 0.62 - 0.171 \log \cdot D$ 로 나타났다.

그림 3.9는 연암층을 풍화암층과 같이 사질토층으로 간주한 경우이며, 그림 3.9에서 심도 0M ~ 15M 까지의 값들이 나타나지 않은 것은 연암층의 깊이가 대략 15M 이하이므로 상단의 사질토층과 풍화암층 값들을 제외하였기 때문이고, 연암층의 토압계수 값의 변화는  $K_a = 0.32 - 0.0731 \log \cdot D$ 로 나타났다.

그림 3.10은 연암층과 같이 경암층에 대한 토압계수 값의 변화로서  $K_a = 1/(2.15 + 0.15D)$ 로 나타났다.

#### 4. 탄소성해석 결과 및 분석

본 연구에서 개발한 토류벽체 해석용 탄소성 프로그램으로 토질정수를 변화시켜 각 현장 계측 벽체변위에 가장 근접한 결과를 얻을 때까지 역해석 (Feed Back Analysis)을 수행하였다. 이때 초기의 토질정수들은 표준관입시험 결과와 R.M.R등으로 추정된 값을 사용하였다.

최종굴착시 현장 계측변위와 토질정수를 변화시켜 역해석한 결과 변위는 그림 4.1과 같다.

현장 버팀구조의 반력에는 암반층에 대한 점착력, 내부마찰각 및 상재하중이 포함된 결과이므로 이를 Peck 경험토압 분포의 점착력과 상재하중이 무시된 사질토에 대한 경험토압분포와 비교한다는 것을 모순이 될 수 있다.

따라서, 현장 계측변위에 맞도록 점착력, 내부마찰각 및 상재하중을 고려한 역해석한 결과의 토압을 재분포시켜, 표준관입시험이나 R.M.R등으로 추정된 토질정수와 상재하중을 고려한 탄소성해석 결과의 토압과 버팀구조 반력을 환산한 계측토압을 지층별로 재분포시켜서 비교한 결과 그림 4.2와 같이 나타났다.

그림 4.2의 제4현장과 기타 현장의 토압들을 정리한 결과 다층지반에 대한 토질정

수중 암반층의 점착력을 고려하여 탄소성 역해석한 결과를 재분포시킨 경우의 토압분포는 지층별로 계측 반력토압과 비교했을 때 각각 사질토층 145% 풍화암층 87%, 연암층 83%, 경암층 66%로 사질토층에서는 계측 반력토압이 45% 크게 나타났고 다른 지층에서는 역해석 결과 토압이 크게 나타났다.

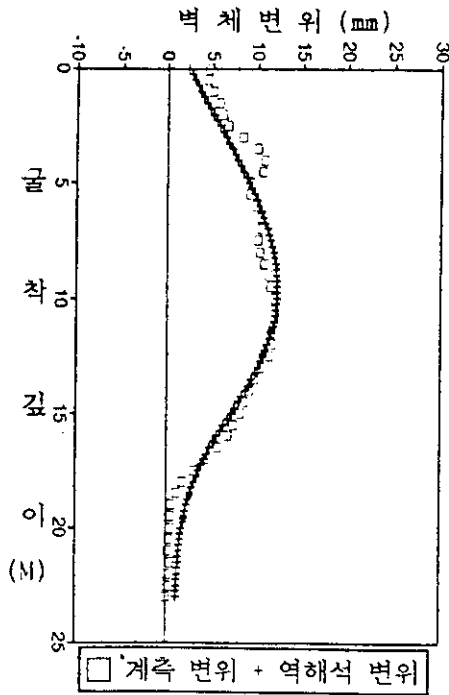


그림4.1 최종굴착시 토류벽체 현장  
계측변위와 역해석 결과 변위  
(제 9 현장)

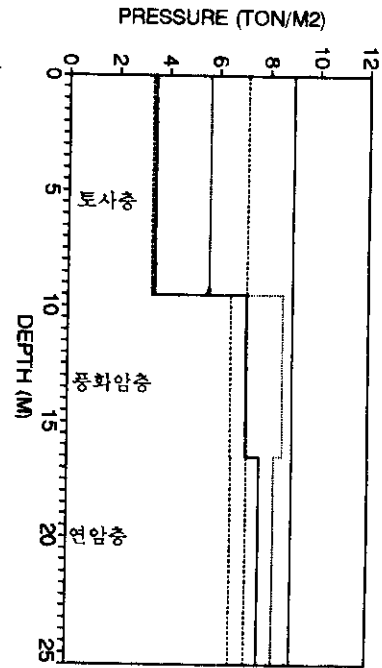


그림4.2 재분포 토압의 비교  
(제 4 현장)

또한 역해석 재분포 토압은 점착력을 고려한 Peck의 경험토압에 비하여 사질토층에서는 53%로 작게 나타났지만 풍화암층은 110%, 연암층 112%, 경암층 157%로 크게 나타났다.

토류벽체에 작용하는 전토압에 대한 비교결과는 그림 4.3과 같으며 실측변위에 일치하도록 역해석한 토압에 대하여 추정토압은 20% ~ 50%이하로 작게 나타난 반면 계측 반력 토압은  $\pm 17\%$ 의 범위에서 역해석 결과의 토압이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

또, 점착력을 고려한 Peck의 경험토압에 대하여 계측변위에 의한 역해석 토압 및 계측반력 토압은 각각 96%, 90%로 나타났다.

추정 토질정수를 사용하여 탄소성 해석으로 구한 삼각형 및 사다리꼴 토압분포를

Peck의 경험토압과 같이 직사각형으로 재분포시켰을 때의 토압의 크기를 같은 토질정수를 사용한 Peck의 경험토압과 비교하였을 때 Peck의 경험토압에 암반층의 점착력을 고려한 경우에는 Peck의 경험토압분포가 1.4배 크고, 점착력을 고려하지 않은 경우에는 2.7배가 되어 Hunt(1986)가 단일토층에서 제안한 1.2배보다 매우 큰 값을 나타낸다. 이 결과를 분석하면 암반을 포함한 다층지반의 토압분포는 사질토층인 경우보다 매우 작게 나타나는데 점착력을 고려한 Peck의 경험토압이 1.4배로서 Hunt(1986)의 1.2배와 근접되고 고려하지 않은 경우 2.7배나 되므로 암반층을 포함한 다층지반을 사질토층으로 하여 Peck의 경험토압을 적용할 때 암반층의 점착력을 고려하는 것이 타당하다고 판단된다.

한편, 계측반력토압을 탄소성 해석으로 구한 토압분포와 비교하면 계측반력으로 구한 재분포 토압이 1.6배로 크므로 Hunt의 1.2배에 비해 큰 값으로 나타났다.

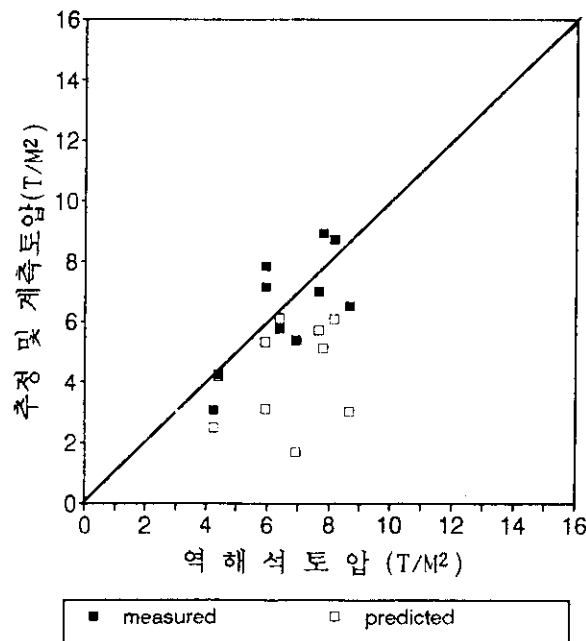


그림4.3 토류벽체에 작용하는 전토압의 재분포 결과 비교

위의 결과를 종합하면 암반층을 포함하는 다층지반에서 지반조건으로 추정된 토질정수를 사용하여 Peck의 경험토압을 추정하는 경우 점착력을 무시하면 계측반력토압은 이보다 작고, 점착력을 고려하면 이와 근사하거나 크고 굴착단계별로 점착력을 고려한 탄소성 해석으로 구한 토압분포는 계측반력 토압 및 역해석 토압보다 작게 나타나므로

다층지반에 대하여 토압분포를 추정하는 경우 경험토압분포 및 단계별 토압 검토가 필수적인 것으로 보이고 암반층의 토질정수 적용시 Peck의 경험토압분포에 암반층의 점착력을 반드시 고려하여야 할 것으로 판단되며, 특히 암반층 토질정수 추정에 보다 많은 연구가 필요한 것으로 사려된다.

## 5. 결 론

암반을 포함한 다층지반으로 구성된 서울지역 9개 굴착공사 현장의 10개 단면에 대하여 버팀구조에 부착된 계측기기로 부터 토압분포를 역추정하고, 굴착 단계별 흙-구조물의 상호작용을 고려한 탄소성지반상 연속보 이론을 기초로 한 프로그램을 개발하여 계측변위량을 역해석하여 이를 추정 토압분포와 비교, 검토한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 다층지반에서 계측반력으로 구한 토압분포는 Peck의 경험토압과 비교할 때 암반층의 점착력을 고려하지 않은 경우 약 57 ~ 63%로 작게 나타난 반면, 암반층의 점착력을 고려한 경우 약 81 ~ 90%로 나타났다.
2. 계측반력으로 구한 지층별 토압분포계수( $M=\alpha \cdot Ka$ )는 사질토층에서  $M=0.116 \sim 0.135$ , 풍화암층  $M=0.120 \sim 0.132$ , 연암층  $M=0.102 \sim 0.109$ , 경암층  $M=0.078 \sim 0.084$ 로 나타났으며, 단일층으로 환산한 경우 토압분포계수는  $M=0.111 \sim 0.124$ 로 나타났다. 이를 Peck의 경험토압의 토압분포계수( $m=0.65 \cdot Ka$ )와 비교할 때 어느 경우를 막론하고 점착력을 무시하면 매우 과소하고, 고려하면 근접하는 것으로 나타났다.
3. Peck의 경험토압분포계수중 정수  $\alpha=0.65$ 를 계측반력으로 구한 토압분포계수중의 정수( $\alpha$ )와 비교하였을 때 암반층의 점착력을 Peck의 경험토압분포에 적용시킨 경우 근접하는 반면 고려하지 않은 경우 작은 값으로 나타났으며, 다층지반을 단일층으로 환산한 경우  $\alpha=0.406 \sim 0.452$ 로 나타났다.
4. 암반을 포함한 다층지반에서 굴착단계별과 굴착이 완료될 때까지의 토압계수값의

변화는 버팀구조의 계측반력 값을 근거로 할때 굴착깊이(D)에 따라 사질토층은  $K_a = 0.86 - 0.27 \log \cdot D$ , 풍화암층은  $K_a = 0.62 - 0.17 \log \cdot D$ , 연암층은  $K_a = 0.32 - 0.073 \log \cdot D$ , 경암층은  $K_a = 1 / (2.15 + 0.15D)$  로 나타났다.

5. 본 연구에서 개발한 탄소성 해석 프로그램을 이용하여 실측 벽체 변위로 역해석하여 구한 재분포 토압은 계측반력 토압분포와  $\pm 17\%$ 의 범위로 일치되며, 또 점착력을 고려한 Peck의 경험토압에 대하여 계측변위에 의한 역해석 토압 및 계측반력 토압은 각각 96%, 90%로 나타났다.
6. 사질토층 및 암반층으로 구성된 다층지반에 대하여 지반조건으로 부터 Peck의 경험 토압분포를 추정하는 경우 암반층의 점착력은 반드시 고려되어야 하나 그 추정방법에는 많은 검토가 요구된다.
7. 다층지반에 있어 버팀구조 설치가 완료된 후의 재분포토압의 크기는 탄소성해석으로 구한 토압보다 1.4 ~ 1.6배 증가되는 것으로 나타났다.

위의 결과를 종합하면 암반층을 포함하는 다층지반에서 지반조건으로 추정한 토질정수를 사용하여 Peck의 경험토압을 추정하는 경우 점착력을 무시하면 계측반력토압은 이보다 작고, 점착력을 고려하면 이보다 크므로, 굴착단계별로 점착력을 고려한 탄소성 해석으로 구한 토압분포는 계측반력 토압 및 역해석 토압보다 작게 나타나므로 다층지반에 대하여 토압분포를 추정하는 경우 경험토압 분포 및 단계별 토압검토가 필수적인 것으로 보이며 특히, 암반층의 토질정수 추정에 보다많은 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. Bowles, J.E., Foundation Analysis and Design, 4th ed., MGH, 1988.
2. Clough, G.W., "Deep Excavations and Retaining Structures," In Hsai-Yang Fung (Ed.), Analysis and Design of Building Foundation, ENVO., Publishing Co., Lehigh Valley, PA, pp.417-465, 1976.

3. Clough, G.W., and J.M. Duncan, "Finite Element Analysis of Retaining Wall Behavior," ASCE 97(SM12), pp.1657-1673, 1971
4. Hunt, R.E., Geotechnical Engineering Analysis and Evaluation, MGH, 1986
5. Lambe, T.W., and Whitman R.V., Soil Mechanics, John Wiley & Sons, 1979
6. O'Rourke, T.D., and Cording, E.J., "The Observed Performance of Deep Subway Excavation," University of Illinois at Urbana-Champaign, September 12, 1974
7. Peck, R.B., "Earth Pressure Measurements in Open Cuts," Chicago Subway, ASCE, Trans., 1943
8. Peck, R.B., "Deep Excavation and Tunneling in Soft Ground," State-of-The-Art Volume 4, Proc., 7th ICSMFE, Mexico, 1969
9. Terzaghi, K., Theoretical Soil Mechanics, John Wiley and Sons, Inc., New York, NY., 1948
10. Terzaghi, K., and R.B. Peck, Soil Mechanics in Engineering Practice, Second Edition, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1967
11. Tschebotarioff, G.P., Foundations, Retaining and Earth Structures, 2nd., ed., MGH, 1973
12. Xanthakos, P.P., Slurry Walls, McGraw-Hill, 1979
13. 이종규, 전성곤, "다층지반 굴착시 토류벽에 작용하는 토압분포," 한국지반 공학회지 9권 1호, pp.59-68, 1993
14. 이종규, 흙막이 공법과 근접시공, 삼성 ENG., 기술연구소, pp.2-14, 1992
15. 김학문, "The Theoretical and Site Behavior of a Braced Diaphragm Wall - A Comparison," Proceeding of First Korea-Japan Joint Geotechnical Seminar On Excavation & Tunneling In Urban Areas, pp.111-127, 1990
16. 홍원표, 김학문, "흙막이 구조물( I )," 한국지반공학회지 7권 3호, pp.73-92, 1991