KGS Spring '97 National Conference / 28, March, 1997 / Seoul / Korea

다층지반에서의 굴착토류벽에 작용하는 토압분포에 관한 사례연구

A case study on Distribution Earth Pressures on Braced Cut Walls in Multi-Layered Ground

정은택[1], Eun-Taeg Jeong, 김석기[2], Seok-Ki Kim

[1] 동아엔지니어링(주) 구조지반사업부 주임, Geotechnical & Structure. Div. Dong-Ah Eng. Co. LTD
[2] 동아엔지니어링(주) 구조지반사업부 대리, Geotechnical & Structure. Div. Dong-Ah Eng. Co. LTD

SYNOPSIS : It is very difficult to predict exactly the behavior of a Braced Cut Walls in earth structures. Because the earth pressure of the flexible wall depends on "Soil-structure Interaction", in order to design something accurately, exact earth pressure designation is required. This paper describes the comparison and investigation of three kind of earth pressure. One is "Peck's earth pressure" that is pressure from subsoil exploration and is applied to the flexible wall like a subway excavation. Another is the values which is measured by the Load cell. The other is the output valve got by being run a "elasto-plastic analsys" fitted in real construction stages. As the results, each earth pressure in cohesionless layered is similar. But these valves from rock layered included in cohesion are different from each other and when cohesion is added to "Peck". This earth pressure is similiar to or lower than above two values except "Peck." At this point, it is unsuitable to apply "Peck's empirical earth pressure" which doesn't consider a cohesion or ground water levels to multi-layered ground including rock layered. Therefore "Peck's empirical earth pressure" with cohesion is suitable to estimate exact earth pressure. We think that it is necessary to much study to estimate more accurate soil parameter.

Key words : "Soil-structure Interaction", "elasto-plastic analsys", "Peck's empirical earth pressure"

1. 서 론

연성벽체에서의 토류벽에 작용하는 토압분포는 굴착후 버팀구조 설치를 전제로한 Terzaghi & Peck(1948), Peck(1969), Tschebotarioff(1973) 등이 제안한 경험토압을 적용하는 것이 일반적이지만 이것은 여러 가지 상태 - 단일토층, 개수식, 점토지반은 간극수압 무시한상태, 지하수위는 최종굴착면 아래 - 를 전제로한 분포이며 실제 국내현장에서 이들을 적용하기에는 현장조건과 일치하지 않는 것이 너무많아 그대로 적용하기에는 많은 문제점이 있을수 있다.
본 연구에서는 위와 같은 사실에 기초하여 암반을 포함한 다층지반으로 구성된 서울지역 지하철 굴착공사현장에서의 4개단면에 대하여 버팀구조에 부착된 축력계의 계측치로부터 환산된 토압분포와 경험토압분포를 비교하였고 탄소성해석을 수행후 구한 토압분포와 비교, 검토하므로서 제안된 토압분포와 토압계수를 검증하였다.

2. 흙막이 구조의 해석기법 및 방법

2.1 해석기법

본 장에서는 흙막이 구조에 작용하는 외력 중에서 토압에 대해서 기술하고 이러한 하중이 작용할 때의 흙막이 구조의 해석기법들에 대하여 언급한다. 흙막이 구조의 해석은 흙막이 벽체의 응력과 변형 및 지보공의 반력을 구하는 계산방법이며 그림2.1은 계산방법의 분류를 나타낸다.

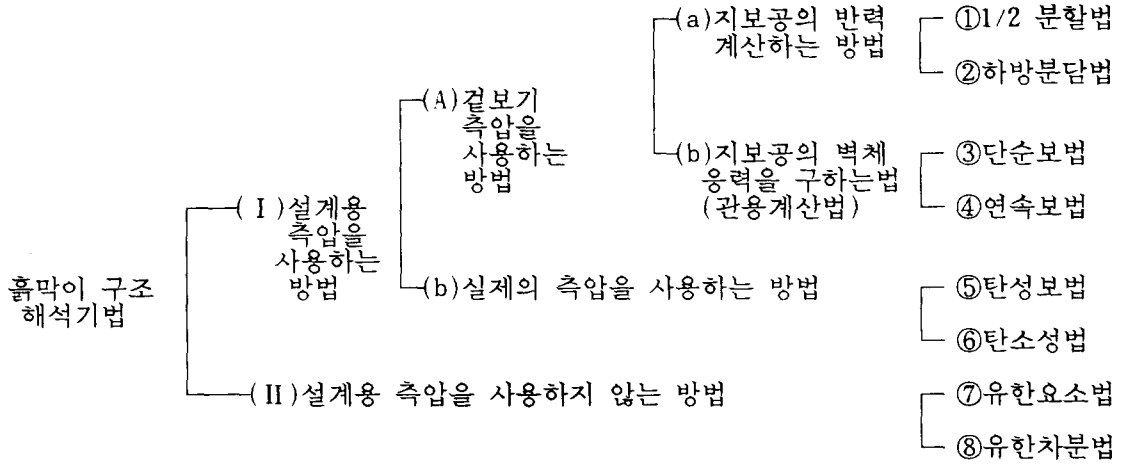


그림 2.1 해석기법의 종류(참고문헌 3, 7)

이러한 방법들 중에서 ①1/2분할법 ②하방분담법 ③단순보법 ④연속보법은 계산이 단순하며 도심지에서의 근접시공이 아니고 대체로 굴착깊이가 15m 이내인 얕은 굴착깊이의 흙막이 구조해석에 많이 사용되어 왔던 간편법이다. 탄성보법이나 탄소성보법은 겉보기토압이 아닌 Rankine-Resal Coulomb의 삼각형 토압을 사용하여 벽체변위에 따른 가변 토압을 추정하여 해석하는 방법이며 지보공의 축력과 흙막이벽의 응력 및 변위를 구할수 있는 방법이다. 유한요소법(FEM) 및 유한차분법(FDM)과 같은 수치해석기법은 토류벽의 응력 변형뿐만 아니라 주변의 지반과 구조물의 변형도 동시에 해석되므로 주변지반이나 인접구조물에의 영향이 큰 문제로 되는 대규모 대심도의 토류벽 설계 및 시공에 많이 적용된다. 유한요소법에 의한 벽체의 부재력과 지지구조의 반력은 종래의 방법에 의한 해석결과와 현장계측결과에 비해 과소평가되는 것으로 알려져 있는데 이는 흙이 탄성체도 아니고 더구나 연속체 물질도 아니기 때문이다.

2.2 해석방법

2.2.1 간편해석법

아래 그림 2.2는 간편해석법에 대한 여러방법을 나타낸 것이다.

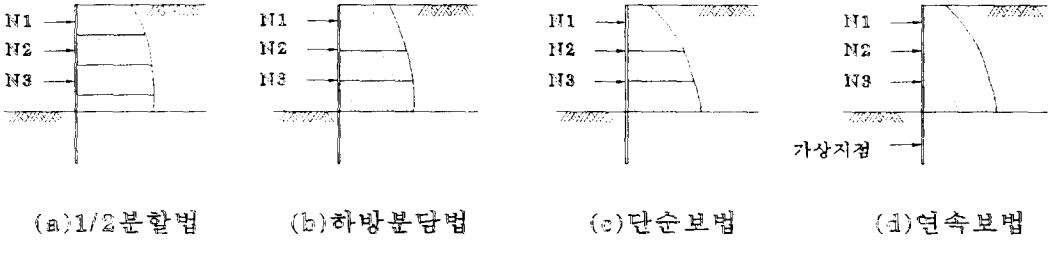


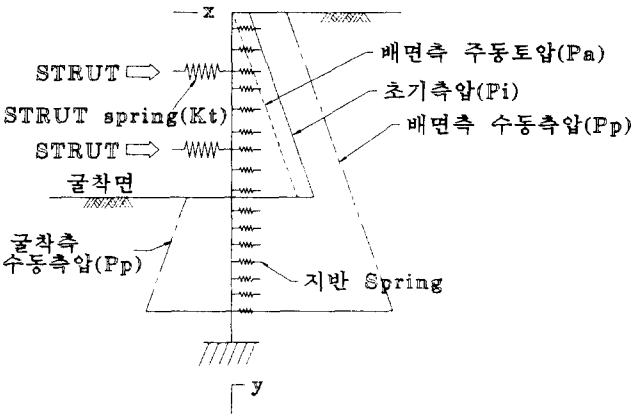
그림 2.2 간편해석법(참고문헌 3, 6, 7)

(a)는 1/2분할법으로서 지보공과 지보공간의 1/2에 해당하는 토압을 각각의 지보공이 분담하는 것으로 계산하는 방법이며 (b)는 굴착과정을 고려하여 지보공은 다음 지보공의 설치전까지의 토압을 다 받는다고 가정하여 각 지보공의 축력을 구하는 방법으로서 (a)에 비하여는 더 실제적이지만 연약지반일때는

과소평가될 수 있다. (c) 및 (d)는 지보공의 축력뿐 아니라 토류벽체의 응력도 구할수 있는 간편법으로서 (c)는 지보공과 지보공에 의하여 지지되는 단순보에 토압을 작용시켜서 지보공의 반력과 벽체의 응력을 구하는 방법이며 (d)는 각 지보공과 굴착면 이하 어떤 깊이에 가상지지점이 있다고 가정하고 이들 지점에 의하여 지지되는 연속보에 토압을 작용시켜서 지보공의 축력과 벽체의 응력을 구하는 방법이다.

2.2.2 탄소성법

탄소성법은 그림 2.3과 같이 흙막이 벽체는 탄성보, 지보공은 탄성 Spring, 또 지반은 탄소성 Spring으로 모델링하고 초기 토압을 가하여 발생하는 변위를 계산하고 그 변위에 상응하는 지반의 탄소성상태를 판단하고 토압을 보정하여 다시 변위를 계산하는 반복과정을 통하여 흙막이 벽체의 변위, 응력 및 지보공의 반력을 계산하는 해석법이다. 본 모델에서 하중과 변형에 대한 기본식은 다음과 같이 표시된다.



$$EI\frac{d^4x}{dy^4} + \frac{AE'}{L} \cdot x = Pi - Ks \cdot x$$

여기서, E : 흙막이 벽체의 탄성계수
I : 흙막이 벽체의 단면2차Moment
A : 지보공의 단면적
E′ : 지보공의 탄성계수
L : 지보공의 길이
Pi : 초기토압(주로 정지토압이 사용됨)
Ks : 지반의 수평방향 지반반력계수
x : 깊이 y지점에서의 벽체의 x방향변위

그림 2.3 탄소성보법의 기본구조 모델(참고문헌 3, 8)

우변의 Pi -Ks ·x는 초기토압(보통 정지토압 Po 사용됨)에 지반의 변위(x)로 인한 보정치를 가감한 것이며 최종적으로 작용하는 토압이 된다. 식의 우변에서 보이는 바와 같이 계산초기에 작용시킨 토압 Pi는 벽체의 변위에 1차적으로 비례하여 증감된다. 그러나 이 토압은 "변위-토압관계"에서 주동토압과 수동토압의 범위(최소 및 최대한계치)이내에 있어야 하며, 그 범위를 벗어나는 변위가 발생할때는 토압으로 되고 지반 반력계수를 0으로 한후 반복계산이 계속된다. 그전 반복계산시의 토압계산시의 토압의 차이가 미리 정해둔 오차 이내 일때 계산을 종료한다.

2.2.3 유한요소법 및 유한차분법

유한요소법 및 유한차분법은 토압을 입력하는 대신에 지반의 탄소성강도특성과 흙막이 벽체 및 지보공의 탄성강도 특성을 입력함으로써 변위와 응력을 구하는 해석법이다. 그림 2.4는 흙막이 구조의 유한요소 모델예이다. 그림에서 흙막이 벽체는 탄성보(Beam)요소, Strut는 탄성봉요소(Truss요소 또는 Spring요소라 불리기도 함)로 모델링 된다. 최근에는 좌굴문제를 포함할 수 있는 Support요소가 개발되었다. Earth anchor도 Strut와 마찬가지로 탄성봉요소로 모델링되며, 또한 정착부와 지반과의 사이에 어떤 크기의 미끄럼저항을 가지는 Cable요소가 개발되어 사용되기도 한다. 흙막이 벽체와 배면지반과의 접합부에는 연결요소(joint요소 또는 interface요소라 불리기도 함)가 도입되어 수직방향의 인장력에는 저항하며, 면을 따라 일어나는 마찰벽 저항력은 이 압축력과 일정한 관계를 가지도록 하여 실제와 더욱 가까운 결과를 얻도록 하고 있다. 지반은 탄소성거동 특성을 갖는 모델로 구성된다. 이들은 임의의 크기를 가지는 요소로서 해석에 요구되는 지반을 분할하고 여기에 흙막이 벽체를 설치한후 단계별로 굴착하고 지보공을 설치하면서 각 분할점의 X,Y방향 변위와 각 요소의 응력을 계산하는 방법이다. 또한 이 방법은 흙막이 벽의 수평변위와 지표면에서의 침하량뿐만 아니라 지반내 임의의 분할점에서의 변위를

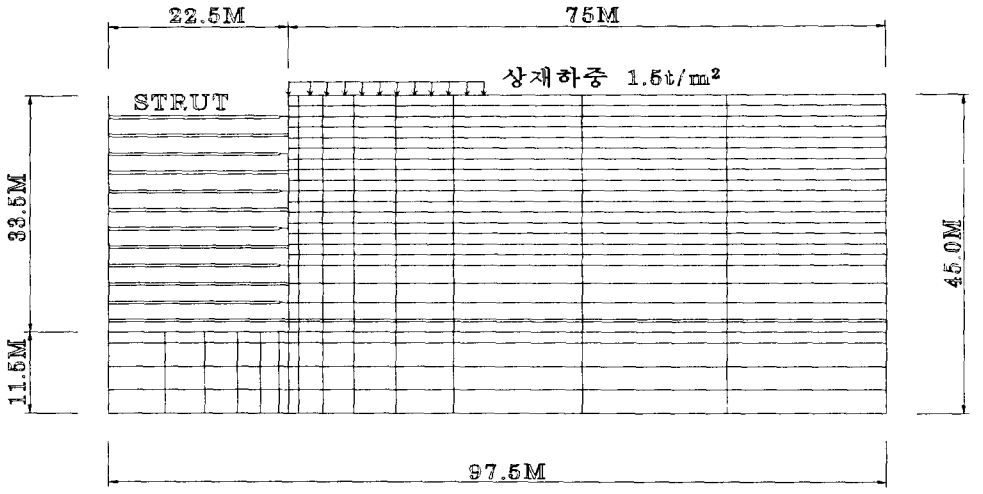


그림 2.4 유한요소법에 의한 모델예(참고문헌 3)

알 수 있는 장점이 있다. 반면에 해석결과는 입력되는 지반의 역학특성, 즉 내부 마찰각 ϕ, 점착력 c, 탄성계수 E에 큰 영향을 받는다. 또 해석방법, 즉 전응력해석인지 유효응력해석인지와, 탄성해석인지 탄소성해석인지에 따라서도 크게 영향을 받으므로 Data 입력과 해석방법의 선정에 유의하여야 한다.

3. 굴착에 따른 다층지반에서의 토압분포비교

3.1 지반조건

본 논문은 현재진행중이거나 공사가 끝난 서울지역 지하철 ○○현장을 대상으로 한것으로서 주변에는 인접 건물과 많은 교통량이 있으며, 각 현장의 지층구성은 대부분 사질토층, 풍화암, 연암, 경암 등의 순으로 다층지반을 형성하고 있으며 각 현장의 토질주상도, 벽체종류 및 지지형식은 아래 그림 3.1과 표 3.1과 같다.

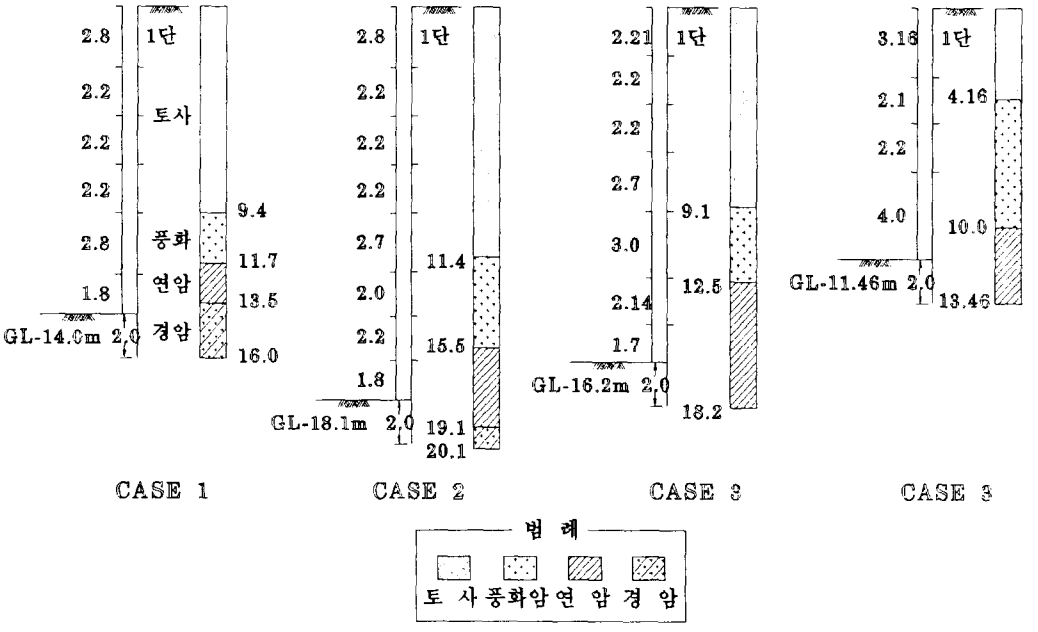


그림 3.1 각 현장의 토질 주상도

표 3.1 각 현장의 벽체종류와 지지형식

현 장	벽 체 종 류	벽 체 제 원	지지형식	총굴착깊이
case1	H-PILE	H=298×299×9×14	스트럿	G.L-14.0m
case2	H-PILE + JSP	H=298×299×9×14 T=800mm	스트럿	G.L-18.1m
case3	H-PILE + JSP	H=250×250×9×14 T=800mm	스트럿	G.L-16.2m
case4	H-PILE + SIG	H=250×250×9×14 T=1,000mm	스트럿	G.L-11.46m

H : H형강　T : 벽체두께

3.2 계측토압과 경험토압과의 비교

아래 그림 3.2와 3.3은 굴착단계별 계측토압과 경험토압을 비교한 것으로 계측토압은 버팀구조에 설치된 축력계로부터 중점분할법으로 계산하여 환산한 것이고 경험토압은 Peck 토압을 사용하였다. 그림에서 지층별 깊이를 고려한 단층 Peck토압은 지층별의 내부마찰각(φ)과 단위중량(γ)을 깊이별로 평균하여 단층으로 나타낸 것이다.

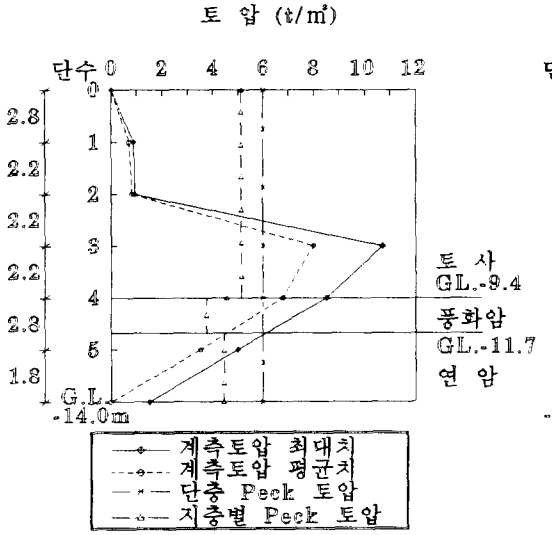


그림 3.2 굴착단계별 계측토압과 경험토압의 비교(case1)

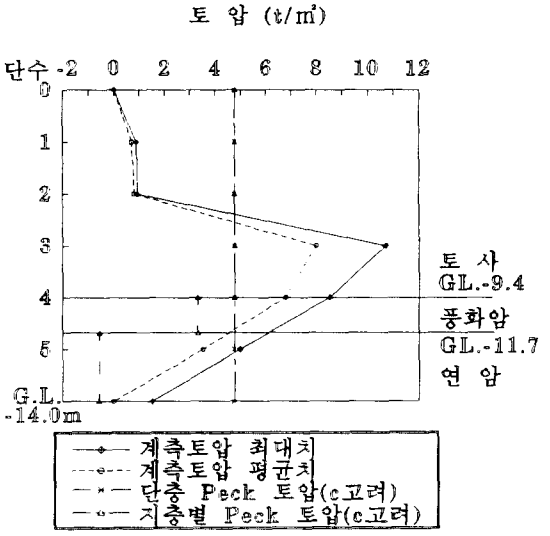


그림 3.3 계측토압과 점착력 고려된 경험토압의 비교(case1)

위의 그림과 같이 두 토압을 비교한 결과 현장에 따라서 다소 틀리지만 단일지층으로 환산했을시 약 47%정도로 계측토압이 작게 나타났는데 이는 Peck토압에 점착력이 고려되지않았기 때문인 것으로 판단되며 그림 3.3과 같이 점착력을 고려하면 암층에서 계측토압이 약 30%정도 크게 나타났다. 이와 같은 원인은 Peck토압의 전제조건이 실제현장에서의 작업조건과는 많은 차이점, 즉 점착력의 고려유무, 균일층과 다층, 배면수압의 존재유무등 복합요인에 의해서 차이가 났기때문인 것으로 판단된다.

3.3 지층별 계측토압분포계수와 경험토압분포계수 비교

본 장에서는 계측 토압분포계수 $M(=\alpha \cdot k_a)$과 경험토압분포계수 $m(=0.65 \cdot k_a)$을 비교, 그 결과를 분석하였다. M과 m을 비교한 이유는 m값중 0.65가 다층지반인 경우 사질토층 이외에도 적용할수 있는지 의문이며 토압계수 k_a도 굴착진행에 따라 변하므로 실측토압분포에서는 이 값을 $M = \alpha \cdot k_a$ 로 나타내었다. 그림 3.4는 굴착단계별 계측토압에 의한 토압분포계수 M을 나타낸 것이다. 아래 그림처럼 각 현장에 대하여 계측치의 토압분포계수를 각 지층별로 평균한 결과 사질토층 M=0.170~0.326, 풍화암층 M=0.08

~0.13, 연암층 M=0.05~0.16로 나타났으며 단일층으로 환산한 경우 M=0.07~0.16로 나타났다. 이를 점착력을 고려하지 않은 Peck의 경험토압분포계수와 비교했을 때 평균적으로 사질토층은 93~152%, 풍화암층 45~118%, 연암층 40~110%로 나타났고 단일층으로 환산한 경우 38~70%로 작게 나타났다.

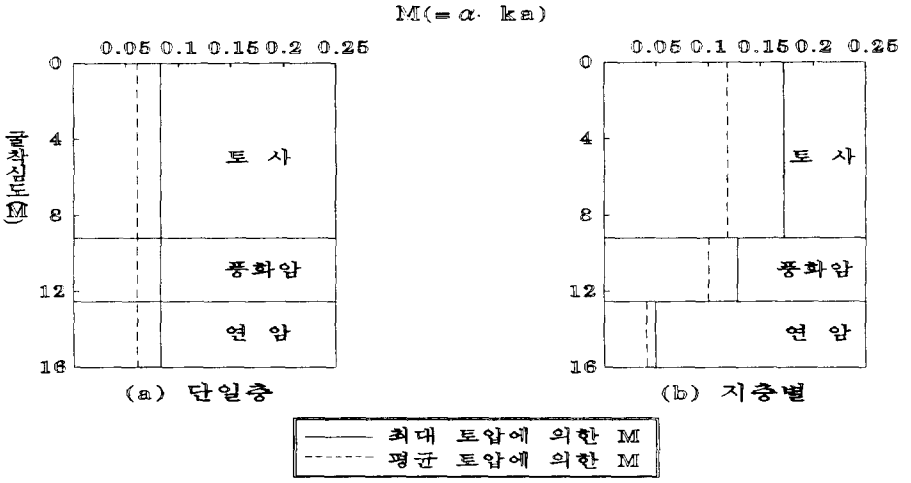


그림 3.4 굴착단계별 계측토압에 의한 토압분포계수M(case3)

이를 점착력을 고려한 Peck경험토압분포계수와 비교해보면 단층이 89~260%정도로 나타나고 층별로도 풍화암, 연암층은 매우크게 나타났다. 이것은 이 4개 현장의 점착력 c값을 매우 크게 산정했기 때문인 것으로 사료된다. 이상과 같이 토압분포계수M값의 변화추이는 사질토층에서 암층으로 갈수록 변화율이 감소가 됨을 알수 있다. 또한 사질토 지반에 대한 Peck의 경험토압분포계수 $m=0.65k_a$에서 0.65를 α로 보고 계측토압에서 추정된 k_a값을 넣어 α값을 계산해보면 사질토층은 0.43~0.58, 풍화암층은 0.2~0.65, 연암층은 0.14~0.52로 각각 나타났으며 또 다층지반을 단층으로 했을 때 α는 0.51~0.92로 나타났다. 단일층으로 했을때는 평균 0.65와 비슷하나 다층지반으로 하면 일반적으로 Peck의 0.65보다 작게 나타났다.

3.4 지층별 계측토압계수와 경험토압계수와의 비교

앞절의 계측 토압분포계수 $M(=\alpha \cdot k_a)$에서 α를 0.65로 보고 굴착깊이 변화에 따른 토압계수분포를 사질토층, 풍화암층, 연암층으로 나누어 각각 그림3.5, 3.6, 3.7에 나타내었다.

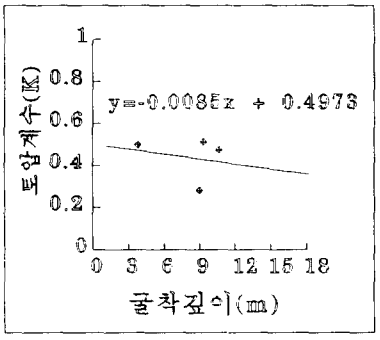


그림 3.5 굴착깊이별 사질토층의 토압계수의 변화

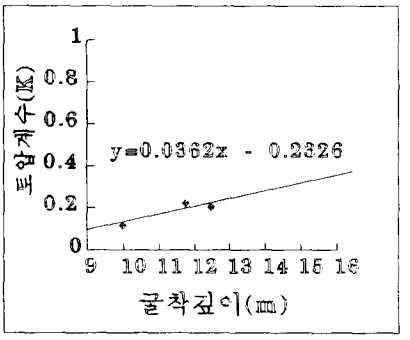


그림 3.6 굴착깊이별 풍화암층의 토압계수의 변화

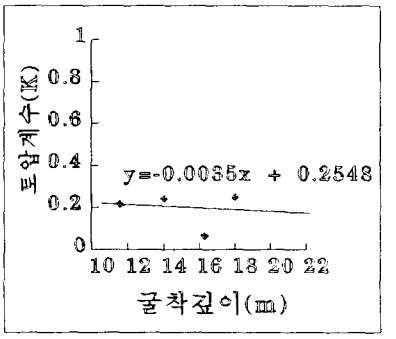


그림 3.7 굴착깊이별 연암층의 토압계수의 변화

위의 그림은 4개현장에 대해서만 비교하였기 때문에 신뢰성에는 문제가 있으나 대체적으로 깊이가 깊을수록 토압계수는 감소하는 경향을 보이고 있다.

3.5 실측치와 탄소성해석결과에 따른 토압의 비교

본 연구에서는 case4의 현장을 대상으로 실측치와 수치해석법에 의한 토압을 비교하였다. 현장상태는 주변에 하천이 흐르고 있으며 토류벽 배면지반에 차수를 위한 S.I.G Grouting시공을 하였다. 벽체는 엄지말뚝(H=250×250×9×14)을 2.5m간격으로 설치했으며 지지방식은 strut방식을 택하였다. 지층별 특성은 아래 표4.2와 같다.

표 4.2 지층별 특성

	내부마찰각 φ (°)	단위중량 γ (t/m^2)	점착력 c(t/m^2)	지반반력상수 k
매립층	30	1.8	0	1,300(t/m^3)
충적층	32	1.8	0	2,000(t/m^3)
풍화암	35	2.0	10.0	5,700(t/m^3)
연암	40	2.1	30.0	100,000(t/m^3)

본 현장의 지층상태는 상부로 부터 매립토, 실트질모래, 풍화암, 연암의 순으로 구성된 서울시의 전형적인 다층지반이고 계측기는 버팀보에 Load cell 과 strain-gage를 설치, 토압의 변화를 관찰하였다. 수치해석에 적용한 탄소성해석 Program은 Wallap(ver.3.4L)을 사용하여 다단계 굴착해석을 행하였다. 입력 data는 지반조사 보고서상의 토질정수와 실제 시공상태를 입력하였고 단계별 굴착에 대한 지하수위변화는 계측 data의 값을 입력, 해석하였다. 그림 3.8은 최종굴착이 끝나고 버팀보 거치, 완료된 상태를 나타낸것이고 그림 3.9는 탄소성해석을 수행한 후의 토압과 실제계측토압을 나타낸 것이다.

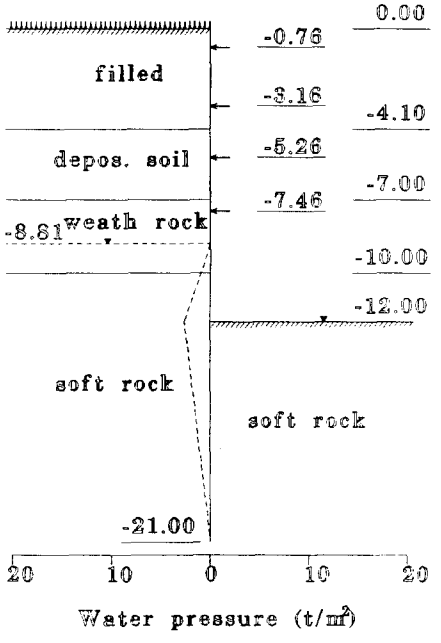


그림3.8 최종굴착이 완료된후의 현장상태

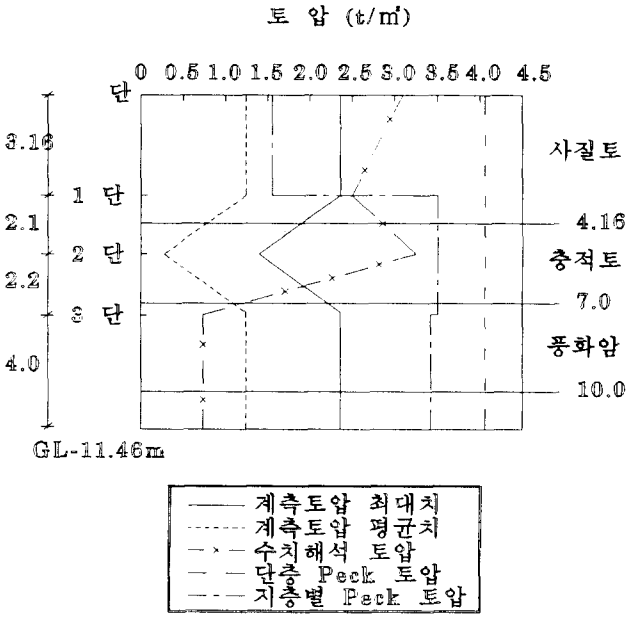


그림3.9 계측토압과 탄소성해석토압과의 비교

위 그림에서 보듯이 실제계측토압과 수치해석상의 토압을 비교해보면 매립층에서는 거의 유사하고 충적토에서는 차이가 많이 난다. 이것은 실제 S.I.G Grouting이 충적토층에 집중적으로 시공되었고 Program 해석상 정확한 벽체특성이 고려가 안되었기 때문에 실계측 토압과 탄소성해석토압과 차이가 난 것으로 생각되며, 풍화암 이후의 차이가 나는 것은 토질 정수치의 점착력이 매우 크게 작용되어 점착력을 고려한 탄소성해석 토압은 작게 나타나고 , 계측토압은 토질정수상의 점착력보다는 작은 값이 실제로 작용한 것으로 사료되며 이로 인해 계측치의 토압보다 작게 나온 것으로 생각되며 이 결과를 보더라도 정확한 토질정수 추정이 얼마나 중요한지를 알 수 있다. Peck경험토압과 비교했을시 점착력이 고려가 안된

Peck경험토압은 Program해석이나 실제 계측치보다 모두 크게 나타났다. 또한 점착력을 고려한 Peck토압은 점착력이 고려된 탄소성해석과 비슷하게 나왔으며, 계측 토압에서는 암층에서만 차이가 많이났다.

4. 결 론

우리나라와 같은 암반을 포함한 다층지반으로 구성된 서울 지하철 2개 현장의 4개 단면에 대하여 버팀구조에 부착된 계측기기로 부터 환산한 토압과 Peck의 경험토압, 탄소성해석 Program수행후의 토압분포를 비교, 검토한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 실제 계측과 Peck의 경험토압을 비교한 결과, 평균적으로 토사층은 70~86%정도, 암층은 48~55%정도로 Peck의 경험토압보다 계측토압이 작게 나타났으며 토사층에서는 어느정도 Peck의 경험토압이 신뢰성이 높은 것으로 판단된다.
2. 실계측토압과 다층지반의 층 두께를 고려한 단일지층의 Peck경험토압과 비교시는 약 47%로 계측토압이 작게 나타났으나 암반층의 점착력을 고려하면 계측토압은 매우 크게 나타났다.
3. 계측 반력으로 구한 지층별 토압계수($M=\alpha \cdot k_a$)는 사질토층에서 M=0.170~0.326, 풍화암층은 M=0.08~0.13, 연암층은 M=0.05~0.16으로 나타났으며 단일층으로 환산한 경우 M=0.07~0.16으로 나타났다. 이를 점착력을 고려안한 단일층의 Peck의 경험토압의 토압분포계수($m=0.65k_a$)와 비교할 때 38~70%로 작게 나타났으며 점착력을 고려하면 과대한 것으로 나타났다.
4. 사질토 지반에 대한 Peck의 경험토압분포계수 $m=0.65k_a$에서 0.65를 α로 보고 계측 토압에서 추정된 k_a값을 넣어 α값을 계산해보면 단일층으로 환산한 경우 $\alpha=0.51$~0.92로 평균적으로 0.65와 비슷하고 다층지반으로 하면 일반적으로 Peck의 0.65보다 작게 나타났다.
5. 계측토압분포계수 $M(=\alpha \cdot k_a)$에서 α를 0.65로 보고 굴착깊이 변화에 따른 토압계수를 살펴보면 대체적으로 깊이가 깊을수록 토압계수는 감소하는 경향을 보이고 있다.
6. 실제 시공상황을 고려, 탄소성해석을 수행후 구한 탄소성토압과 이를 Peck의 경험토압과 계측토압을 서로 비교한 결과, 점착력이 고려안된 Peck의 경험토압이 평균적으로 이들 두 토압보다 크게 나왔으며 토사층에서는 Peck의 경험토압과 탄소성해석토압, 계측토압 모두 비슷하게 나왔고 다층지반의 암층인 경우 점착력의 적용여부에 따라 큰 편차를 보이고 있으므로 점착력의 추정에 세심한 주의가 요구된다.

위의 결과를 종합하면 암반층을 포함하는 다층지반에서 지반조건으로 추정한 토질정수를 사용하여 Peck의 경험토압을 추정한 경우 실제 계측토압보다 점착력이 고려안되어 크게 나오고 점착력이 고려되면 작게 나타나며, 점착력을 고려한 탄소성해석토압은 토사층에서는 계측토압과 비슷하나 암층에서는 계측토압보다 작게 나타나므로 설계시, 보다 정확한 암반층의 토질정수가 고려되어야 하며 다층지반 토압적용시 보다 세심한 단계별 토압검토가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 정인준, 김명모, "토질공학원론", 구미서관, pp308~380
2. 정인준, 김명모, "기초공학원론", 구미서관, pp313~317
3. 개착시 지반굴착에 따른 흙막이벽의 해석기법(1995), pp33~61
4. 이종규, 전성곤, "다층지반에서의 토압분포", 한국지반공학회, 지반굴착, pp143~157
5. 이종규, 전성곤, "다층지반굴착시 토류벽에 작용하는 토압분포",한국지반공학회지 9권1호, pp59~68
6. 채영수, "벽체변위에 따른 토류벽에 작용하는 토압", 고려대학교 대학원 박사학위논문, pp3~13
7. 굴착 및 흙막이공법, 한국지반공학회, pp27~32
8. 홍원표, 윤중만, "지하굴착시 앵커지지 흙막이벽에 작용하는 측방토압", 한국지반공학회지 11권 1호
9. Performance of earth and earth-supported structures, American society of civil Engineers, pp255~258