KGS FALL '96 National Conference / 25~26, October, 1996 / Seoul / Korea

지반반력계수 산정방법에 따른 토류벽의 굴착 단계별 거동 비교

Comparison of the Sequential Behavior of Earth Retaining Walls Based on the Estimation Methods of Subgrade Reaction Coefficient

김황[1] Hwang Kim, 장범수[2] Buhm-Soo Chang, 김수일[3] Soo-Il Kim, 정상섬[4] Sang-seom Jeong

1) 연세대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept of Civil Engineering, Yonsei Univ.
2) 연세대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept of Civil Engineering, Yonsei Univ.
3) 연세대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ.
4) 연세대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ.

SYNOPSIS : In this study, a computer program to predict the sequential behavior of earth retaining structure using p-y curves was developed and verified through the comparison between prediction and in-situ measurement. The emphasis was given to the wall deflections based on the estimation methods of subgrade reaction coefficient proposed by Terzaghi and present approach using p-y curves. It is shown that the analysis by present approach is sensitive to the plastic limit required to reach the maximum passive and minimum active earth pressures and thus tend to underestimate the wall deflections. However predicted wall deflections using Terzaghi's subgrade reaction constant show overestimated results compared with measured deflections. Based on the results obtained, it is found that present approach using p-y curve can be effectively used to perform back calculation analysis in the anchored wall structures, whereas method proposed by Terzaghi can be applicable to the preliminary design of retaining wall with suitable safety factor.

Key Words : sequential behavior, earth retaining wall, subgrade reaction coefficient, plastic limit, back calculation, preliminary design

1. 서 론

대도시 지역에서와 같이 좁은 대지를 최대한 효과적으로 이용할 필요성이 있는 지역에서 건물의 고층화에 따른 굴착깊이의 증가는 지하굴착시 시공관리의 필요성을 증대시켰으며 단순한 벽체의 변형뿐만 아니라 주변지반의 침하와 인접건물의 영향 등에 대한 종합적인 관리를 요구하고 있다. 이러한 도심지 고층건물과 지하시설물의 안전하고 효율적인 시공, 관리를 위하여 지반의 변형과 토류구조물의 상호작용, 그리고 그에 따른 주변지반의 침하를 보다 효과적으로 예측, 관리할 필요성이 증대되고 있다.

이와 같은 배경에서 본 연구에서는 한계소성변위를 이용한 다단계 굴착에 따른 벽체 변위해석 프로그램을 개발하고 개발된 프로그램을 이용하여 얻은 해석변위, 기존에 제안된 지반반력계수 산정방법을 이용하여 얻은 해석변위, 그리고 계측된 변위를 비교, 분석하여 각 방법의 장단점과 적용성을 살펴보고자 한다.

2. 토류벽의 해석이론

2.1 탄성보법을 이용한 벽체의 모델링

본 연구에서는 토류벽체의 모델링을 위하여 그림 1과 같이 토류벽은 보요소로, 지반과 보강재는 탄소성스프링으로 모델화한 beam-column이론을 적용하였다. 이러한 탄소성지반상의 보이론은 기초지반을 스프링으로 간주한 고전적인 Winkler해법의 기본이론을 따르되 실제 기초지반의 거동을 비교적으로 적절히 반영할 수 있도록 하였다. 벽체의 변위해석을 위해 적용한 기본구성방정식은 굴착단계나 보강재의 설치 및 인장에 따라 식(1), 식(2) 및 식(3)과 같다.

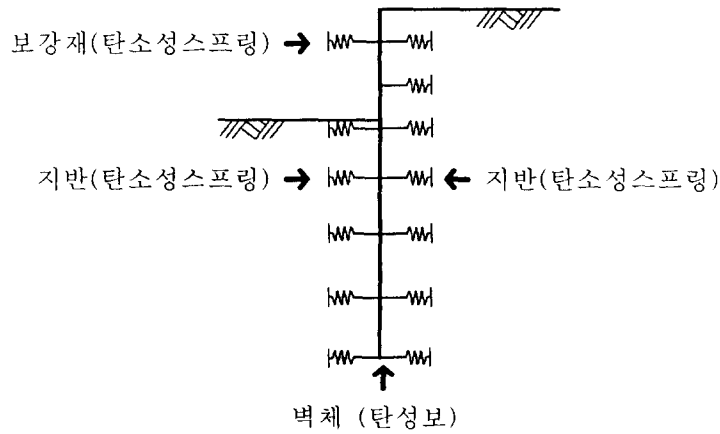


그림 1. 탄성보법을 이용한 벽체의 모델링

① 지반의 굴착

$$EI\frac{\partial^4 y(x)}{\partial x^4} = q - K_h y(x) \tag{1}$$

여기서, EI는 벽체의 휨강성, $y(x)$는 벽체의 변위, K_h는 지반반력계수이다.

② 보강재의 인장

$$EI\frac{\partial^4 y(x)}{\partial x^4} = q - [K_h y(x) + R] \tag{2}$$

여기서, R : 보강재의 프리스트레스이다.

③ 지반의 재굴착

$$EI\frac{\partial^4 y(x)}{\partial x^4} = q - [K_h y(x) + R + \frac{AE}{LS} y^{*(x)}] \tag{3}$$

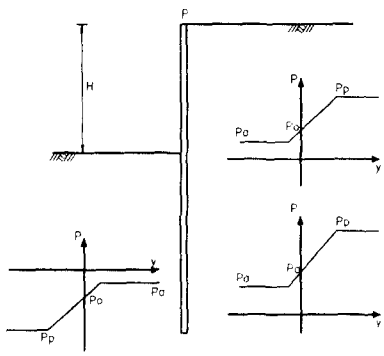
여기서, S는 앵커 설치 간격, L은 자유장, AE는 앵커의 축방향강성, $y^*(x)$는 앵커설치시 발생한 변위로부터 산정된 변위이다.

3 프로그램의 개발

3.1 굴착단계별 모델링

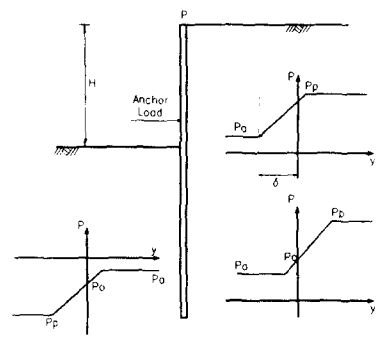
벽체와 지반의 거동은 굴착단계에 따라 많은 영향을 받는다. 따라서 벽체의 거동을 효과적으로 예측하기 위하여 굴착, 보강재의 설치, 재굴착 등의 굴착단계에 따라 각 굴착단계의 특성을 고려한 모델링이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 굴착단계에 따른 벽체의 거동특성을 고려하기 위하여 그림 2와 같이 굴착단계를 단순화하여 모델링하였다. 그림의 A면은 주동상태이고 B면은 수동상태이다. 굴착면 이하의 p-y 특성곡선은 주동부와 수동부의 p-y 특성곡선을 합성하여 사용하였다.

지반의 비선형 거동과 이력 특성에 따른 제하 및 재하시 토체의 하중,변위특성의 변화는 p-y 특성곡선의 이동을 통해서 반영하였다. 새로운 p-y 특성곡선은 그림 2(c)에서와 같이 전단계의 p-y 특성곡선을 소성변위의 양만큼 이동시켜 구할 수 있다. 이러한 소성변형은 굴착면 이상에서만 고려되고 있으며 굴착면 이하의 경우 p-y 특성곡선을 이동시키지 않고 변위를 산정하였다. 이를 토대로 본 연구에서는 해석프로그램을 개발하였다.



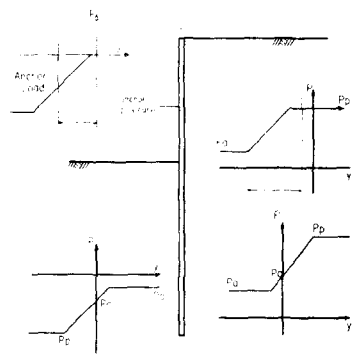
B면 A면

(a) 지반의 굴착



B면 A면

(b) 보강재의 프리스트레싱



B면 A면

(c) 보강재 보강후의 굴착

그림 2 굴착단계별 모델링

3.2 프로그램의 검증

본 연구에서 개발된 프로그램의 신뢰성과 타당성을 검토하기 위해 미국국립과학재단(N.S.F)에서 지정한 Texas의 공인된 지반에 순수 연구용으로 시험 시공, 계측한 벽체의 변위 및 모멘트와 본 프로그램 해석결과 얻어진 변위 및 모멘트를 비교하였다. 그림 3은 시험시공된 벽체 단면도이며, 표 1은 토류벽의 제원 및 현장물성이다. 실험 벽체가 시공된 현장은 균질의 중간밀도 모래로 가정하였다. 주동토압계수 k_0는 역해석을 통해 산정한 값인 0.15를 사용하였다. 본 사례 지반의 주동 및 수동 한계소성변위는 벽체의 엄지 말뚝에 부착된 변형률 게이지 측정값을 이용하여 한계주동소성변위는 0.05 in, 한계수동소성변위는 0.5 in로 제안되어 있다. 프로그램의 한계소성변위에 따른 해석변위의 변화를 보기위해 한계소성변위를 물성시험을 통해 제안된 0.05~0.5 in를 중심으로 0.03~0.3 in, 0.04~0.4 in, 0.05~0.5 in, 0.06~0.6 in, 그리고 0.07~0.7 in의 5개의 구간으로 나누어 변위를 해석하고 실측치와 비교하였다. 그림 4(a), (b), (c)는 각 굴착단계별 해석변위들과 실측변위를 도시한 결과이며 엄지말뚝에 설치된 변형률 측정기에서 얻은 결과로부터 계산된 휨모멘트와 해석을 통해 얻은 변위를 미분하여 구한 휨모멘트는 그림 5(a), (b), (c)에 나타내었다. 거동의 개형은 실측치와 해석치가 유사한 경향을 보이고 있다.

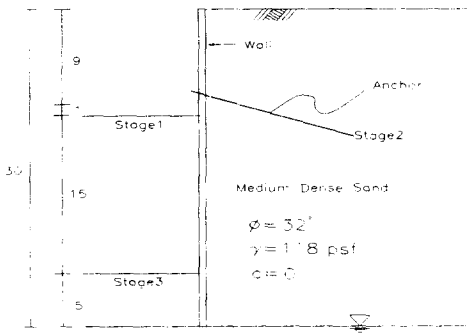
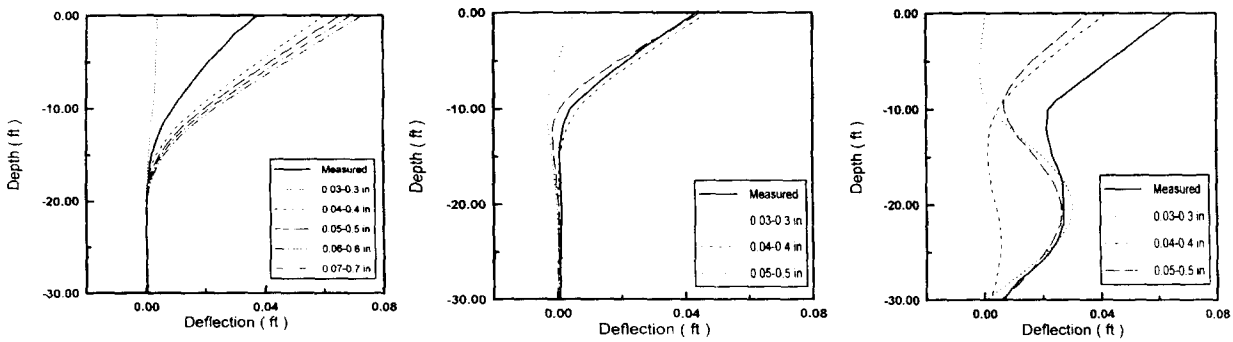


그림 3. 벽체의 단면도 (Texas 사례)

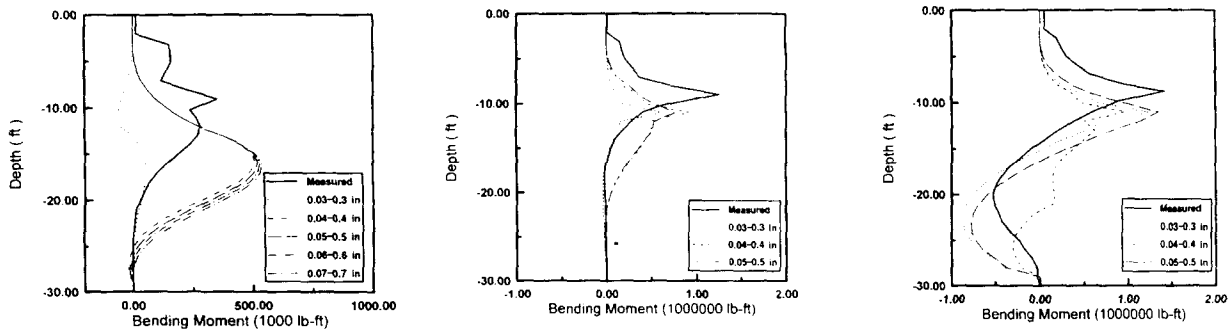
표 1. 입력값 (Texas 사례)

지반물성	단위중량	115 pcf
	마찰각	32°
	점착력	0
벽체제원	굴착깊이	25 ft
	근입장	5 ft
	횡방향강성	1.25×10^{10} lb-in^2
	엄지말뚝지름	10.2 in
	앵커설치간격	8 ft
앵커제원	자유장	15 ft
	프리스트레스	68.6 kips
	앵커강성	1.157×10^5 lb/in
	설치경사각	30°



(a) 1단굴착 (b) 보강재설치 (c) 2단굴착

그림 4. 벽체의 변위 (Texas Case)



(a) 1단굴착 (b) 보강재의 설치 (c) 2단굴착

그림 5. 벽체의 휨모멘트 (Texas Case)

4. 해석방법에 따른 벽체의 거동 비교 분석

벽체 변위 산정방법에 따른 해석결과를 국내에서 시공되고 계측된 실측치를 대상으로 분석하였다. 이를 위해 본 연구에서 적용한 해석 방법은 다음과 같다.

① 지반반력상수를 이용한 방법.

방법 1 : Terzaghi가 제안한 초기 지반반력상수를 Terzaghi의 제안식에 따라 변형하여 이용한 방법

방법 2 : 지반조사를 통해 얻은 지반반력계수를 Terzaghi의 제안식에 따라 변형하여 이용한 방법

② 한계소성변위를 이용한 방법

방법 3 : 강성벽체에 관하여 제안된 한계소성변위를 이용한 방법

방법 4 : 조사된 물성치를 이용하여 한계소성변위를 산정하는 방법

지반반력상수를 이용한 벽체 변위 해석은 토류벽의 굴착단계별 거동해석을 위해 개발된 프로그램인 Wallap을 이용하였고 한계소성변위를 이용한 벽체의 변위 해석은 본 연구에서 개발, 검증된 프로그램을 이용하였다.

4.1 벽체변위 해석방법

4.1.1 지반반력상수를 이용한 방법

이 방법은 적용되는 지반반력상수의 값에 따라 다음 두가지 방법으로 나눌 수 있다.

첫 번째 방법은 Terzaghi가 제안한 초기 지반반력상수를 이용한 방법이다. Terzaghi는 초기 지반반력상수의 값을 사질토의 경우 상대밀도에 따라, 점성토의 경우 수직지반반력계수를 이용한 연경도에 따라 제안하였다. 따라서 본 연구에서는 Terzaghi가 제안한 초기 지반반력상수를 적용하여 벽체의 변위를 산정하였다.

두 번째 방법은 지반조사를 통해 얻은 지반반력계수를 이용한 방법이다. 현장에서 실시되는 시추주상도와 표준관입시험치를 이용하여 산정된 지반반력계수를 초기 지반반력상수로 적용하여 Terzaghi가 제안한 방법으로 보정하여 변위를 산정하였다.

4.1.2 한계소성변위를 이용한 방법

이 방법은 한계소성변위를 산정하는 방법에 따라 다음 두가지 방법으로 나누어 진다.

첫 번째 방법은 강성벽체에 관하여 제안된 한계소성변위를 이용한 방법이다. 이 방법은 FEM해석에 의해 제안된 강성벽체의 토질별 한계소성변위를 이용하여 벽체의 변위를 산정하는 방법이다.

두 번째 방법은 조사된 물성치를 이용하여 한계소성변위를 산정하는 방법이다. 주동 및 수동의 한계소성변위 산정을 위해 표준관입치로부터 Fukuoka식을 이용하여 구한 지반반력계수를 이용한다. 기초구조물의 설계와 해석을 위한 지반조사는 일반적으로 보오링에 의한 토질주상도의 작성 및 표준관입시험을 통해 얻은 각 토층별 평균 N치를 이용하여 토체의 물성치와 지반반력계수를 산정한다. 산정된 토체의 물성치와 Rankine의 토압공식을 이용하여 주동 및 수동 토압을 산정한다.

그림 6은 N치를 이용한 한계소성변위의 산정방법을 도시한 것이다. Fang(1991)은 옹벽의 한계변위에 관한 연구 결과, 한계수동변위는 한계주동변위의 약 10배이며 한계소성변위는 토체의 종류와 상태에 따라 달라지는 특징을 가지고 있다. 토압과 변위곡선상의 기울기가 지반반력계수이므로 각 토층의 중간 깊이에서 산정된 주동 및 수동토압을 한계수동변위와 한계주동변위의 비가 1:10이며 기울기가 지반조사를 통해 산정된 지반반력계수의 값이 되도록 연결한다. 이 때, 주동토압과 만나는 점의 변위가 그 층에서의 한계주동변위가 되며, 수동토압과 만나는 점의 변위가 그 층에서의 한계수동변위가 된다. 이 변위가 각 토층안에서 일정하다고 보고 깊이에 따라 p-y 특성곡선을 산정한다. 벽체의 변위량에 해당하는 지점의 토압과 지반반력계수를 구하여 벽체의 변위를 산정하였다.

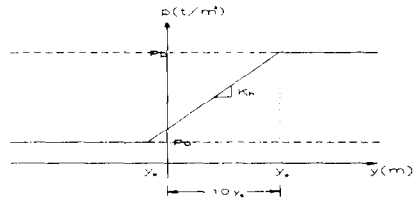


그림 6 한계소성변위의 산정

4.2 벽체해석

4.2.1 지반굴착 계측사례 1

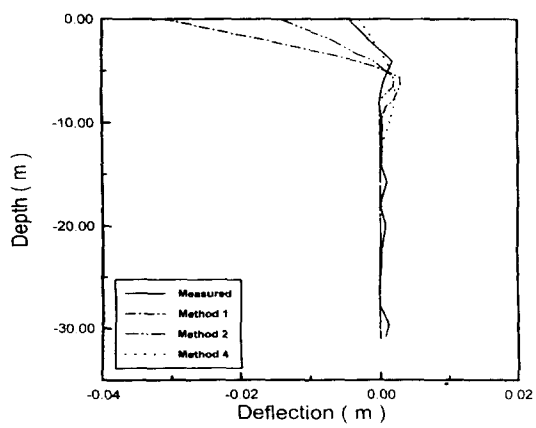
본 사례는 서울시 강남구 삼성동에 위치한 삼성생명 빌딩 신축공사 현장으로 엄지말뚝과 토류판으로 이루어진 토류구조물을 앵커를 이용하여 지지하며 28.5 m 깊이까지 굴착이 이루어 졌다. 지반보강과 차수를 위하여 S.C.W와 차수 그라우팅을 실시하였다. 엄지말뚝으로는 300×300×15×15의 H-Pile이 이용되었고, 앵커는 초기 인장력의 손실을 고려하여 ϕ 12.5 mm×5의 강연선을 30 ton으로 인장하여 정착한 것으로 해석하였다. 토층의 구성은 표 2와 같다. 각 방법에 따른 입력치는 표 3과 같다. 그림 7은 굴착이 6.1m와 8.4m 까지 이루어 졌을 때의 실측된 변위와 해석된 변위를 도시한 것이다.

표 2. 토질물성치 (지반굴착 계측사례 1)

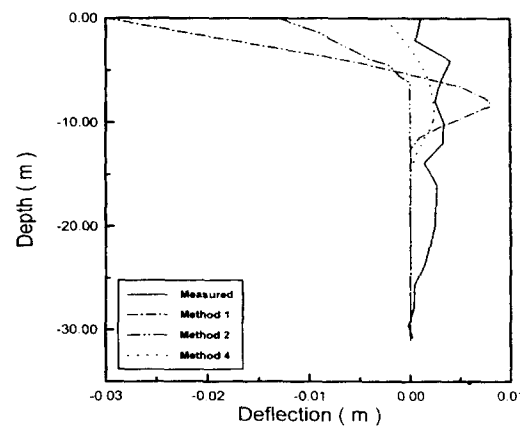
	깊이 (m)	γ_w (t/m^3)	γ_{sat} (t/m^3)	내부마찰각 (°)	c (t/m^2)
Fill	4.5	1.8	1.9	28.0	0.0
Clay	6.5	1.8	1.9	26.0	5.0
Residual Soil	12.5	1.9	2.0	32.0	0.0
Weak Rock	14.0	2.0	2.1	36.0	3.0
Hard Rock	35.0	2.1	2.2	38.0	5.0

표 3. 각 방법에 따른 입력물성치 (지반굴착 계측사례 1)

	지반반력계수를 이용(t/m^3)		한계변위를 이용(m)			
	방법 1	방법 2	방법 3		방법4	
			y_a	y_p	y_a	y_p
Fill	250	500	0.024	0.24	0.0013	0.013
Clay	1750	2000	0.12	0.24	0.0025	0.025
Residual Soil	360	2750	0.012	0.12	0.0021	0.021
Weak Rock	1200	4480	-	-	-	-
Hard Rock	2500	5280	-	-	-	-



(a) 6.1 m 굴착



(b) 8.4 m 굴착

그림 7. 지반굴착 계측사례 1

4.2.3 지반굴착 계측사례 2

본 사례는 서울시 신촌동에 위치한 연세대학교 부설 공학연구센터 신축에 따른 지하굴착 및 흙막이 설치공사 현장의 2번 계측구 구간이다. 굴착공법은 엄지말뚝 및 토류판으로 구성된 토류구조물을 어스앵커로 지지하면서 굴착이 이루어졌다.

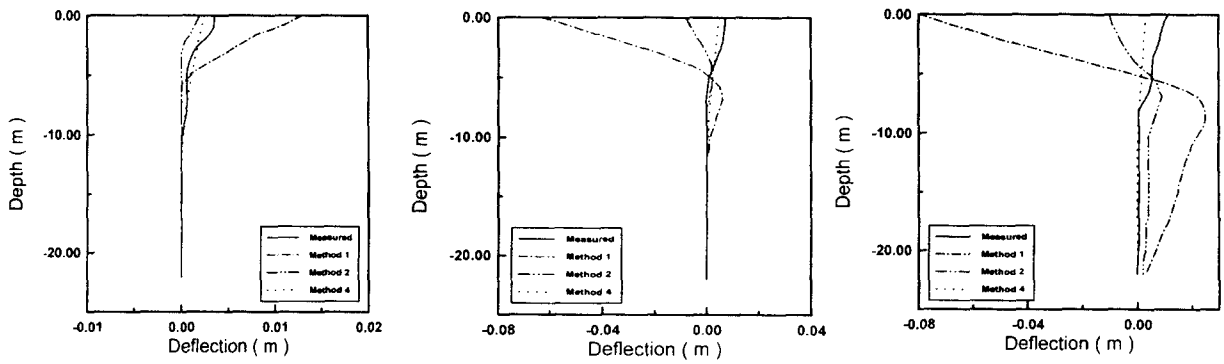
엄지말뚝은 300×200×9×14의 H-Pile이 사용되었고 지반보강을 위하여 지름이 12.7 mm인 강연선을 사용하여 45 ton의 프리스트레스로 인장하여 정착하였으나 앵커의 초기손실을 고려하여 35 ton으로 가정하여 해석하였다. 지반의 물성치는 표 4와 같다. 각 방법별 입력 물성치는 표 5와 같다. 그림 8은 2.1m, 4.9m, 7.9m 까지 지반굴착이 이루어 졌을 때의 실측 변위와 해석 변위를 도시한 것이다.

표 4. 토질물성치 (지반굴착 계측사례 3)

	깊이 (m)	γ_w (t/m^3)	γ_{sat} (t/m^3)	내부마찰각 (°)	c (t/m^2)
Residual Soil	8.2	1.8	1.9	22.8	0.65
Weathered R.	18.5	1.9	2.0	33.0	2.0
Weak Rock	19.8	2.0	2.1	36.0	4.0
Hard Rock	25.0	2.1	2.2	40.0	6.0

표 5. 각 방법에 따른 입력물성치 (지반굴착 계측사례 3)

	지반반력계수를 이용 (t/m^3)		한계변위를 이용(m)			
	방법 1	방법 2	방법 3		방법4	
			y_a	y_p	y_a	y_p
Residual Soil	400	2000	0.0164	0.0164	0.001	0.01
Weathered R	800	3000	-	-	-	-
Weak Rock	1800	5000	-	-	-	-
Hard Rock	3000	7000	-	-	-	-



(a) 2.1 m 굴착 (b) 4.9 m 굴착 (c) 7.9 m굴착

그림 8. 지반굴착 계측사례 2

4.3 해석결과의 비교분석

지반굴착 계측사례의 실측치와 해석치의 비교에서 보이듯, 지반반력계수를 이용한 방법의 경우, 변위는 지반반력의 산정에 따라 한계소성변위를 이용한 방법보다 해석치의 변위에 큰 차이는 없으나 실측치의 변위보다 안전측으로 산정된다. 또한 앵커등 보강재에 대한 변위의 영향이 매우 크다. 따라서 주변지반의 변형이 인접시설물의 안정에 큰 영향을 주는 대도시 지반굴착에서 안전측으로 설계할 수 있다. 그러나 변위량이나 변위형태에 대한 정확한 해석에는 한계를 지니고 있다. 한계소성변위량을 이용한 해석의 경우, 한계소성변위량의 산정에 따라 변위량과 변위의 형태에 큰 영향을 준다. 그러나 현장의 지반상태를 고려하여 토체의 한계소성변형량을 정확히 산정한 경우, 변체의 변위량이나 벽체의 변위형태를 보다 정확히 산정할 수 있다. 따라서 일정 시공단계에서 벽체의 변위형태나 변위량을 통해 한계소성변위를 산정하고 앞으로의 변위의 양상이나 변위의 형태를 예측하는 역해석의 경우 한계소성변위를 이용한 방법이 지반반력계수를 이용한 방법보다 유용한 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 지반반력계수의 산정방법에 따른 벽체의 거동을 비교 분석하기 위하여 한계소성변위를 이용하여 지반반력계수를 산정하고 굴착단계에 따른 벽체의 굴착단계별 변위를 해석하는 프로그램을 개발하였다. 해석에서는 벽체에 작용하는 토체의 횡토압과 변위와의 관계를 주동토압과 수동토압, 그리고 한계소성변위를 이용하여 탄소성모델로 모델링하는 탄소성보법이 사용되었다. 본 연구에서 개발된 프로그램을 이용한 벽체 변위해석방법과 기존의 벽체해석방법을 수치해석을 통하여 실측변위와 비교하여 각 벽체 변위해석방법의 특징과 적용성을 살펴 보았다. 본 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 벽체 변위의 해석결과 벽체의 변형량은 개발된 프로그램이 사용하고 있는 p-y 특성곡선을 적용한 해석의 경우, p-y 특성곡선 산정을 위한 토체의 한계소성변위선정에 따라 큰 영향을 받으며, 한계소성변위를 토체의 상태와 종류를 고려하여 정확히 산정한다면 벽체의 변위 형태와 벽체의 변위량을 현장 변위와 유사하게 산정할 수 있다.
2. 강성벽체인 옹벽과 연성벽체인 토류벽은 변형형식에 많은 차이를 가지고 있으며 이러한 차이는 토체의 한계소성변위 산정에도 영향을 미치는 것으로 판단된다.
3. 지반조사결과를 이용하여 한계소성변위량을 산정한 경우 변위의 형태와 변위량이 실측치와 유사하지만 변위량이 계측치보다 과소하게 산정되는 경향이 있다.
4. Terzaghi가 제안한 지반반력계수를 이용한 벽체 변위 산정방법의 경우는 지반반력계수의 변화에 따른 벽체의 변위차이가 적고 벽체의 변위가 안전측으로 산정되는 경향이 있다.
5. 이상의 결과를 종합하면 안전을 고려한 예비설계를 위해서는 지반반력계수를 이용한 해석이 유용하며 역해석시에는 소성한계를 적용한 벽체의 해석이 유용하다는 것을 알 수 있다.

참고 문헌

1. 한국지반공학회(1995), **지반굴착시 주변지반의 해석기법과 시공관리를 위한 계측 및 품질관리 방법에 관한 연구**, 제1권, 제2권, 한국지반공학회.
2. Terzaghi, K., "Evaluation of Coefficients of Subgrade Reaction", *Geotechnique Vol. 5*, 1954, pp. 297-325.
3. Hanna, T. H. and Kurdi, I. I.(1974), "Studies on Anchored Flexible Retaining Walls in Sand", *J. of Geotech Eng. Div., ASCE,* Vol.100, No GT10, pp1091-1106.
4. 김수일, 장범수, 정상섬(1994), "P-Y특성곡선의 Coupling을 고려한 토류벽의 거동 해석", **대한토목학회논문집**, 제14권, 제3호.
5. 주재건(1993), **지반굴착에 따른 토류구조물의 응력해석 및 설계 프로그램 EXCAD 2.20 해설**, 다산컨설턴트.
6. 천일지오컨설턴트(1995), **단계별 지하굴착에 대한 탄소성해석 프로그램Sunex 사용법 설명서,** 천일지오컨설턴트.
7. 한국지반공학회(1992), "굴착 및 흙막이 공법", **한국지반공학회**, pp. 358-365.
8. Kim N. K.(1993), *A Beam-Column Method for Tieback Walls,* Ph.D Dissertation, Texas A & M University.
9. Fang, H. Y.(1991), *Foundation Engineering Handbook*, Van Nostrand Reinhoid, pp. 232- 235.
10. 지반굴착위원회(1995), **지반굴착해석 컴퓨터 프로그램 세미나**, 한국지반공학회.
11. 새길엔지니어링(1992), **삼성동 삼성생명사옥 신축에 따른 지하굴착 및 흙막이공사 계측관리 보고서**, 새길엔지니어링.