

개선된 탄소성 해석을 이용한 버팀지지 흙막이벽의 거동비교

신진환[†] · 김동신^{*}

충주대학교 토목공학과 · ^{*}충북대학교 토목공학과
(2004. 3. 29. 접수 / 2004. 6. 2. 채택)

Comparison of Displacement of the Braced Retaining Wall by Developed Elasto-Plastic Analysis

Jin-Whan Shin[†] · Dong-Shin Kim^{*}

Department of Civil Engineering, Chungju National University

^{*}Department of Civil Engineering, Chungbuk National University

(Received March 29, 2004 / Accepted June 2, 2004)

Abstract : Recently, when being constructed the large structures, the deep excavations have performed to utilize the underground space. As the ground excavation is deeper, the damage of the adjacent structure and the ground is frequently occurred. The Analysis of the retaining structures is necessary to safety of the excavation works. There are many methods such as elasto-plastic theory, FEM, and FDM to analyze the displacement of the retaining structure. In this thesis, GEBA-1 program by the Nakamura-Nakajawa elasto-plastic method was developed.

The lateral displacement of the wall was analyzed by the developed program GEBA-1, SUNEX, and EXCAD, and compared with the measured displacement by the Inclinometer. The monitored fields were three excavation work site in S-I, S-II, and S-III area. Excavation method of each site is braced retaining wall using H-pile. Excavation depth is 14m, 14m, and 8.2m.

Key Words : excavation, elasto-plastic theory, measured displacement

1. 서 론

급속한 경제성장과 인구증가로 도심지가 고밀도화 됨에 따라 지하공동이나 하부기초를 위한 지하 굴착이 증가하고 있다. 지하공간 개발은 도심지에서 대심도로 굴착되며, 기존 구조물에 인접한 굴착이 불가피하므로 이로 인한 주변 지반의 파괴가 발생하는 경우가 많다. 대심도굴착이나 인접굴착은 흙막이 구조물 자체의 안전성과 과도한 지반변위에 대한 위험성, 굴착으로 인한 지하수의 유출이나 흙막이벽의 변위로 인하여 주변지반의 침하가 발생하게 되어 인접구조물의 균열이나 부등침하 등 상당한 큰 피해를 초래하는 경우가 빈번하게 일어나고 있다. 따라서, 지반 굴착을 수행함에 있어 흙막이 구조물의 안정성에 대한 관심이 증대되고 있어, 이에

대한 많은 연구가 진행되어 왔다.

굴착공사시 흙막이 구조물을 해석하는 방법에는 간편해석법, 탄소성법, 유한요소법, 유한차분법 등이 있다. 간편해석법은 계산이 간편하다는 장점이 있으나 실제의 굴착을 잘 모델화한 것이 아니므로 도심지의 굴착에는 거의 사용되지 않고 있다. 반면, 유한요소법과 유한차분법은 실제의 굴착은 잘 묘사할 수 있으나 수식이 복잡한 특성을 지니고 있다. 탄소성 해석법은 벽체와 배면지반과의 상호작용을 고려하고 지반을 탄소성의 지반반력 스프링으로 모델링하여 해석하는 기법으로 입력자료가 다른 해석 기법보다 간단하고, 흙막이 벽체의 거동을 효과적으로 해석할 수 있는 장점이 있으므로 실제 설계의 검토 및 해석에 널리 사용되고 있다.

따라서, 현재 국내에서는 많은 탄소성 해석 프로그램이 사용되고 있다. 실제로는 굴착의 진행에 따른 토질물성치의 변화와 버팀보의 하중분배를 고려

[†]To whom correspondence should be addressed.
jshin@chungju.ac.kr

한 탄소성 해석이 요구되고 있다.

본 연구의 목적은 도심지의 버팀지지 흙막이 구조물의 굴착현장 계측자료를 이용하여 최종굴착 단계에서 벽체의 거동을 분석하고, 야마가타 확장법을 적용한 탄소성해석과 기존의 탄소성 해석방법을 비교하고자 한다. 또한, 탄소성이론에 의해 구한 굴착심도(Hex)와 수평변위의 최대발생지점(Hδ)을 실측치와 비교·분석함으로써 보다 안정적인 도심지 굴착이 가능하도록 하는데 연구의 중점을 두었다.

2. 해석에 적용된 탄소성론

2.1. Nakamura-Nakajawa법의 가정

Nakamura-Nakajawa는 1969년에 발표된 야마가타의 이론을 보다 범용성 있게 확장한 이론으로 야마가타 확장법이라고도 하는데, 해석에 있어 구조계와 측압에 대한 기본가정은 다음과 같다.

- ① 흙막이벽의 근입은 유한한 길이로 고려하고 근입선단부는 지반조건에 따라 힌지, 고정, 자유단의 3가지 조건 중에서 선택한다.
- ② 배면토압 및 굴착측의 유효수동토압은 굴착에 의해 지반조건이 변화하므로 굴착단계마다 입력한다.
- ③ 굴착면 이하에서 토류벽에 작용하는 저항토압은 토류벽의 변위에 1차적으로 비례하고 유효수동토압을 초과하지 않는 것으로 한다.
- ④ 버팀보(strut) 설치후의 버팀보 설치지점은 버팀보의 간격, 길이 및 재료의 탄성계수 등이 고려된 탄성스프링으로 해석한다.
- ⑤ 버팀보 설치지점에서는 설치 이전에 발생한 지중선행변위를 고려한다.

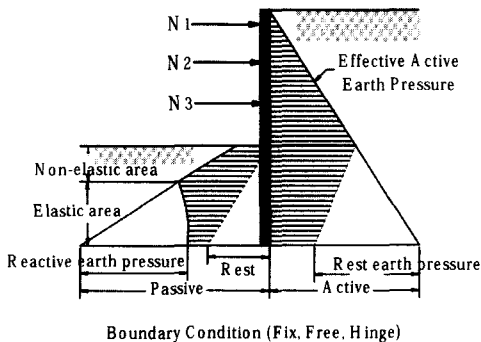


Fig. 1. Nakamura-Nakajawa method diagram

Fig. 1에서 탄성역이란 정지토압과 탄성반력의 합이 극한수동토압 보다 작은 부분이고, 비탄성역이란 탄성역을 계산할 때 탄성반력과 정지토압의 합이 극한수동토압 이상이 되는 부분이다. 유효주동토압은 벽체의 변위에 영향없이 작용하는 굴착면측의 정지토압을 배면의 주동토압으로부터 뺀 값이다. 유효수동토압은 굴착면측의 극한수동토압에서 굴착면측의 정지토압을 뺀 값이다.

탄소성보법에 의한 해석과정은 먼저, 정지토압 P_0 및 버팀보의 선행하중 또는 온도수축에 의한 버팀보의 반력 R_0 를 구하고 지반계수 K 를 결정한 후, 변위를 계산하고 토압을 보정하는 반복과정을 수행한다.

3. 현장계측

본 연구에서는 여러 가지 탄소성 이론과 실측된 흙막이 벽체의 변위를 연구하고자 3개의 대상지역을 선정하였다. S-I현장은 굴착심도 14m로 6단계 굴착을 수행하였으며, 지하수위는 평균 G.L.-13.2m, 흙막이벽은 H말뚝+토류판과 벽체의 배면측에 그라우팅을 시공하였다.

S-II은 굴착면적 735m²이고, 굴착심도 14m이며 우측에는 지상 8층 지하 2층인 건물이 있고, 좌측의 8m 도로 건너편에는 지상 11층 지하 2층 건물이 있다. 엄지말뚝과 토류판으로 벽체를 형성하고 차수 등의 목적으로 벽체의 배면측에 부분적으로 C.I.P.와 J.S.P로 보강을 한 버팀보 지지형식의 현장이다.

S-III은 굴착심도 8.2m, 굴착면적은 871m²이며 차수 및 지반보강을 목적으로 연속성이 뛰어난 S.C.W 벽체를 시공하였다. 계측을 수행한 각각의 현장개요 및 공법은 Table 1과 같고, 각 현장의 계측기 설치개요는 Table 2와 같다.

Table 1. Work site summary

Site	S- I	S- II	S- III
Excavation depth(m)	14	14	8.2
Reinforcement method	Jet grouting	C.I.P./J.S.P.	S.C.W
Ground water level	GL-13.2m	GL-8.6m	GL-2.2m

Table 2. Number of the monitoring instrument at the each work site

Site	S- I	S- II	S- III
Inclinometer	5	5	2
Piezometer	2	2	1
Strain gauge	32	6	12
Tiltmeter	4	3	4

탄소성 해석에 사용된 매개변수는 다음과 같다.

Table 3. Soil parameters used for elasto-plastic analysis

	soil layer	G.L (m)	γ_{wet} (t/m ³)	γ_{sat} (t/m ³)	C (t/m ²)	ϕ (deg)	K_v (t/m ²)
S-I	fill	-1.2	1.8	1.9	3.0	30	1200
	clay&silt	-3.8	1.6	1.7	3.0	15	1000
	sand	-5.5	1.7	1.8	0.0	35	3000
	sandy gravel	-15.2	1.7	1.8	0.0	35	3000
	weathered rock	-15.8	2.0	1.9	1.0	35	5000
	weak rock	-18.0	2.0	1.9	1.0	35	5000
S-II	fill	-4.4	1.8	1.9	3.0	25	2500
	deposit soil	-6.8	1.6	1.7	3.0	20	1000
	weathered soil	-8.6	1.8	1.9	3.0	35	3000
	weathered rock	-19.2	1.9	2.0	2.0	35	4500
S-III	weak rock	-20.2	2.0	2.1	4.0	38	6000
	fill	-2.5	1.8	1.9	0.0	19	920
	clay	-6.0	1.7	1.8	2.4	15	700
	clay	-12.0	1.7	1.8	2.4	17	800
	clay	-18.0	1.8	1.9	2.4	19	900

4. 흙막이벽체의 변위거동

4.1. S-I 현장

Fig. 2는 S-I지역의 경사계 1번에 해당하는 곳으로 풍화암에 근입된 길이 17m의 엄지말뚝 변위를 비교한 것으로 버팀보의 설치지점에서 상당히 급격한 변위양상을 나타내고 있다. G.L.-10m부근에서 최대 변위가 발생하고 최대 변위량은 6mm이다.

Nakamura-Nakajawa의 이론을 적용한 GEBA-1의 해석변위는 10m부근에서 최대변위 13mm가 발생하고 있다. SUNEX해석 결과 최대변위량은 실측치와 유사하나, 최대변위 발생지점은 굴착심도인 14m인 것으로 나타났다. EXCAD는 14m지점에서 5mm미만의 아주 미소한 변위가 발생하는 것으로 해석되었다.

Fig. 3은 버팀보가 벽체와 45°기울어져 있는 지점의 변위를 나타낸 것으로 실측결과 최대변위 발생지점은 4.5m이고, 최대 변위량은 3mm로 예측되었다. GEBA-1, EXCAD, SUNEX에 의한 변위해석 결과 각각 12m, 13m, 14m 지점에서 최대 변위가 발생하고 있으며, 7m이하에서는 해석변위가 실측값보다 크게 평가되는 것으로 나타나고 있다. 변위 발생지점은 실측치와 해석치가 모두 매우 유사하게 나타났으며, 변위량은 3mm이내의 미소한 차이를 보이고 있다.

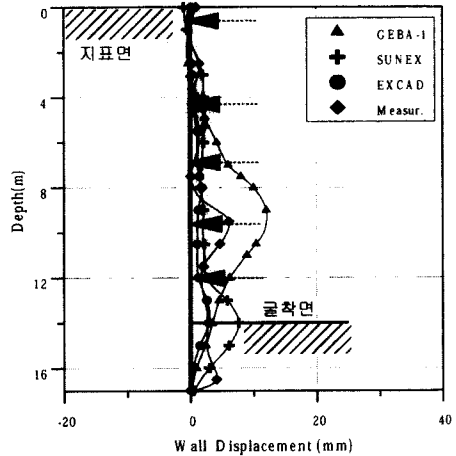


Fig. 2. Wall displacement of final step on S-I(Inclinometer No.1)

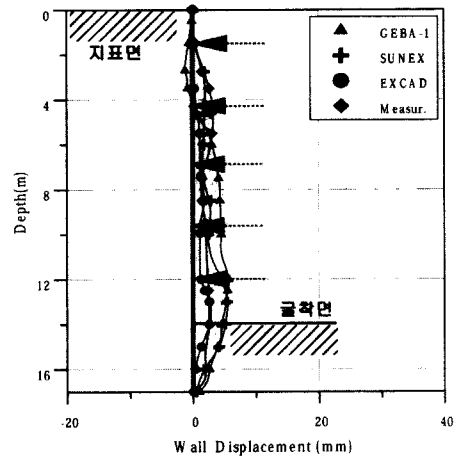


Fig. 3. Wall displacement of final step on S-I(Inclinometer No.2)

4.2. S-II현장

Fig. 4는 풍화암에 근입되어 있는 길이 17m인 벽체의 변위를 해석한 것이다. 이 지점은 버팀보가 벽체와 45°기울어져 설치된 곳으로 실측변위량은 지표에서 굴착배면 방향으로 10mm, G.L.-12m지점에서 8.5mm가 발생하고 있다. 탄소성이론에 의해 계산된 변위는 모두 G.L.-12.5m지점에서 최대변위가 발생하고 있으며, 변위량은 SUNEX와 EXCAD의 경우 10mm, GEBA-1은 18mm로 나타나 과대평가되는 것으로 나타났다. SUNEX와 EXCAD의 해석변위는 실측치와 근접한 경향을 보이고 있고, GEBA-1은 최대 변위량은 차이를 보이지만 지표면 부근의 변위 거동은 비교적 유사한 경향을 보이고 있다.

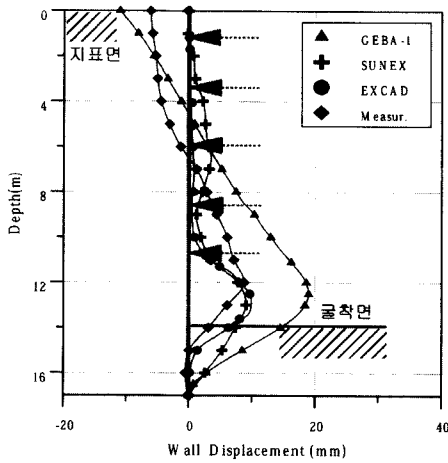


Fig. 4. Wall displacement of final step on S-II(Inclinometer No.1)

Fig. 5는 지상 8층, 지하 2층 건물이 인접해 있는 현장으로 실측변위는 지표면에서 굴착측으로 5mm의 변위를 보이며, 하부로 갈수록 점점 커져서 G.L.-12m지점에서 약 10mm의 최대변위를 보이고 있다.

GEBA-1과 EXCAD의 해석변위는 지표에서는 거의 변화가 없다가 G.L.-13m에서 7mm의 최대변위를 나타내고 있다. SUNEX 역시 G.L.-13m에서 7mm 정도의 최대변위를 보이고, 지표부근에서는 배면측으로 변위가 발생하는 것으로 해석이 되었다. 경사계 2번의 경우, GEBA-1, EXCAD의 해석변위 사이에 2mm이내의 미소한 차이가 해석되었다. G.L.-12m 지점에서 최대변위량 7~10mm가 발생하여 실측변위와 해석변위가 일치하고 있다.

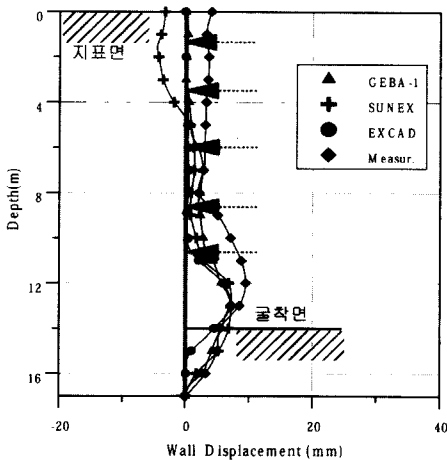


Fig. 5. Wall displacement of final step on S-II(Inclinometer No.2)

Fig. 6은 경사계 3번이 설치된 곳으로 굴착배면에 지상 8층, 지하 2층 건물이 인접해 있는 단면으로 실측변위는 지표면에서 -2mm, G.L.-12m에서 최대변위 7mm가 발생하였다. GEBA-1, SUNEX, EXCAD을 이용한 해석결과 최대변위는 G.L.-12m 지점에서 각각 10mm, 7.5mm, 8mm가 발생했다. S-II현장에 설치된 경사계 3번의 경우, 매우 만족할 만한 해석결과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다. G.L.-12m 지점에서 해석치와 실측치의 최대변위는 7mm~10mm로 최대 변위량은 0.2% H 이내이고, 최대변위 발생지점은 85% H 로써 암반을 포함한 다층지반으로 구성된 여러 현장의 계층자료로부터 얻은 기존의 연구결과와 일치하고 있다.

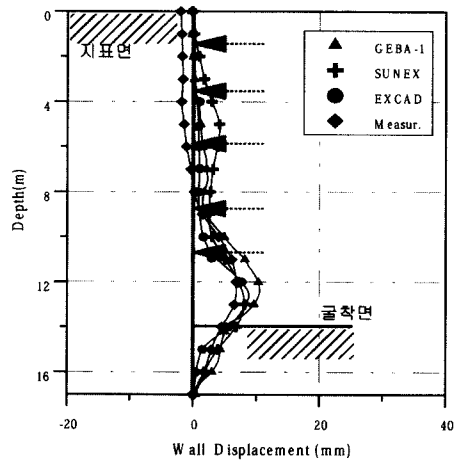


Fig. 6. Wall displacement of final step on S-II(Inclinometer No.3)

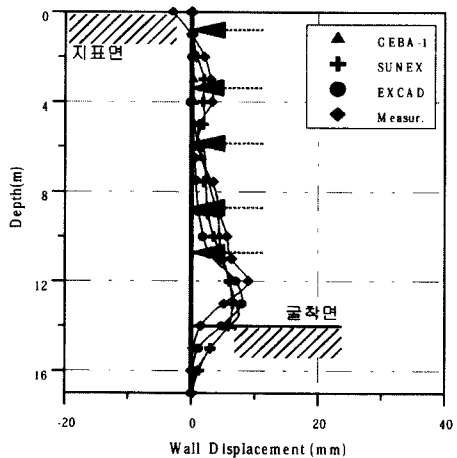


Fig. 7. Wall displacement of final step on S-II(Inclinometer No.4)

Fig. 7은 길이가 15m인 버팀보가 벽체와 45°만큼 기울어져 있고, G.L.-17m의 H-pile은 연암층에까지 근입된 지점으로 실측된 변위는 지표에서 배면쪽으로 3.5mm, G.L.-12m지점에서 8.5mm가 발생했다.

해석에 의한 변위는 모두 지표에서는 변위가 발생하지 않다가, G.L.-13m 지점에서 최대변위가 발생하는 것으로 나타났으며, 최대변위량은 GEBA-1이 8mm, SUNEX가 7mm, EXCAD가 8.5mm였다. 해석에 의한 최대변위 발생지점은 굴착심도 H의 92%에 해당된다. 경사계 4번의 경우, GEBA-1과 EXCAD의 해석변위는 변위량과 변위의 경향이 일치하고 있으며 실측변위와 해석변위는 5mm이내의 차이를 보이며 일치하고 있다.

Fig. 8은 경사계 5번이 매설된 지점으로 굴착배면에 8m도로와 도로에 인접하여 건물이 위치하고 있는 곳으로 실측변위는 지표에서 배면쪽으로 5mm가 발생하고, 하루로 내려갈수록 변위는 점점 커지다가 G.L.-12m 지점에서 최대변위 12mm가 발생했다. GEBA-1에 의한 최대변위는 G.L.-12m에서 15mm, EXCAD와 SUNEX는 G.L.-13m에서 8mm의 최대변위를 보이고 있다. G.L.-12m지점에서 GEBA-1의 해석변위가 실측변위보다 3mm정도 크게 평가되고 있으나 그 양은 아주 미소하고, 변위 변화양상은 GEBA-1이 계측변위를 잘 예측하고 있음을 알 수 있다. 또한, 최대변위 발생지점은 85%H~92%H에 해당되는 지점이다.

Fig. 4~Fig. 8은 S-II현장의 벽체변위를 여러 가지 탄소성해석법과 실측치를 비교한 것으로 경사계

2, 3, 4번의 경우 실측치와 SUNEX, EXCAD, GEBA-1에 의한 해석치가 모두 비교적 잘 일치하고 있다. 최대변위는 G.L.(-)12m~13m에서 발생하였고, 최대변위량은 10mm 이내인 것으로 나타났다. 최대변위 발생지점은 굴착심도의 약 85%~92%에 해당되는 위치에서 나타나고 있다. 경사계 1번은 최대변위 지점이 실측치와 해석치가 모두 유사한 거동을 보이고 있으며, 경사계 5번은 GEBA-1에 의한 벽체변위가 비교적 일치하는 경향을 보이고 있다. EXCAD와 GEBA-1은 버팀보의 하중분배법에 대해 고려를 해주고 있으므로 GEBA-1과 EXCAD의 해석 결과는 서로 유사한 최대변위량, 발생지점, 거동양상을 보이는 것으로 사료된다.

4.3. S-III현장

Fig. 9는 주로 점토지반으로 이루어져 있고 굴착심도가 8.2m이며, 배면에는 30m도로가 인접해 있는 곳이다. 계측변위는 지표에서 20mm, G.L.-5m에서 48mm의 최대변위가 발생하고 있다.

GEBA-1의 해석변위는 G.L.-7m 지점, EXCAD는 지표면, SUNEX는 굴착심도인 G.L.-8.2m지점에서 최대변위가 발생하고 있다. 변위량은 GEBA-1이 13mm, EXCAD는 7mm, SUNEX는 23mm로 나타났다. S-III현장 경사계 1번의 경우, 실측치와 탄소성법에 의한 변위는 상당한 차이를 보이고 있다.

Fig. 10은 배면에 15m도로가 인접해 있는 곳의 벽체 변위를 나타낸 것이다. 실측변위는 지표면에서 배면쪽으로 16mm, G.L.-6.5m지점에서 23mm의 최대

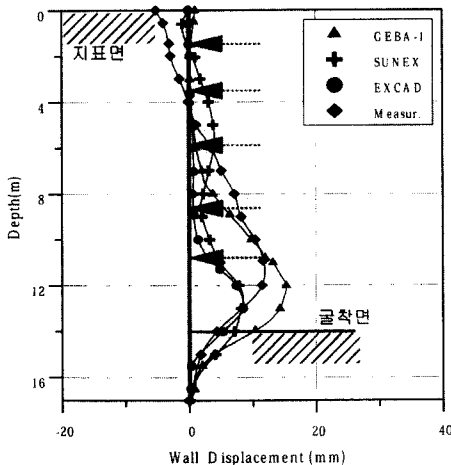


Fig. 8. Wall displacement of final step on S-II(Inclinometer No.5)

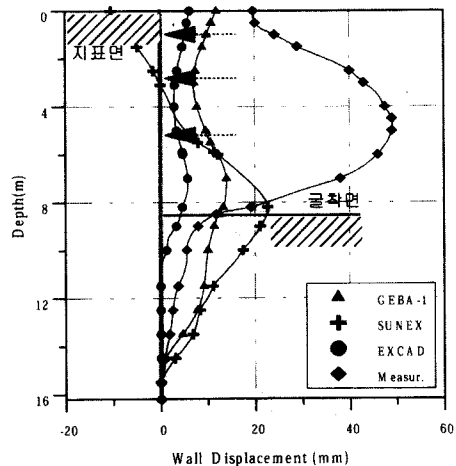


Fig. 9. Wall displacement of final step on S-III(Inclinometer No.1)

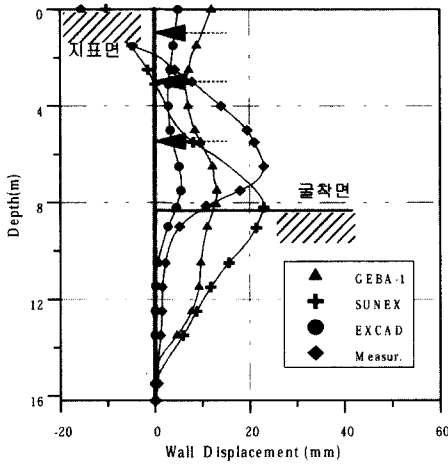


Fig. 10. Wall displacement of final step on S-III(Inclinometer No.2)

변위가 발생했다. GEBA-1에 의한 변위량은 G.L.-7.5m지점에서 13mm, SUNEX는 지표면에서 배면측으로 11mm 이고, 굴착심도인 G.L.-8.2m지점에서 23mm의 최대변위가 예측되었으며 EXCAD는 G.L.-7.5m 지점에서 6mm의 최대변위가 나타났다.

각각의 최대변위 발생지점은 G.L.-6.5m~G.L.8.2m에서 나타나고 있으며, 이는 굴착심도의 79%~100%에 해당되며, SUNEX에 의한 변위가 실측치에 가장 접근하는 것으로 나타났다.

Fig. 11은 각 단계별 해석에 의한 최대 수평변위 발생지점(H_b)과 굴착심도(H_{ex})를 실측결과와 비교한 것이다. S-III현장은 점토가 20m이상의 두께로 분포하고 있고, 표준관입시험치 $N=4\sim9$ 정도인 점토가 10m이상의 두께이며, 나머지 점토는 $N=36$ 정도까지 분포하고 있다. 각 굴착 단계마다 대부분의 해석변위는 지표에서 최대변위가 발생하는 캔틸레버양상을 보이고, 계측변위의 경우는 H_b 와 H_{ex} 가 거의 같은 지점에서 발생하고 있다. 지반강성이 작은 경우에 초기에는 캔틸레버식의 거동을 보이다가 최대변위가 굴착면 부근에서 발생한다는 기존의 연구결과와 잘 부합하고 있다. 이것은 굴착 바닥면 근처를 포함하여 토류벽이 근입되어 있는 지반이 연약한 경우, 굴착 바닥면 부근에서 토류벽 배면측의 하중 감소 및 토류벽 근입부의 고정효과가 풍부함이나 연암에 근입되어 있는 경우 보다 적으므로 토류벽의 수평변위 억제효과가 적기 때문에 굴착 바닥면과 거의 같은 지점에서 최대변위가 발생하게 된다.

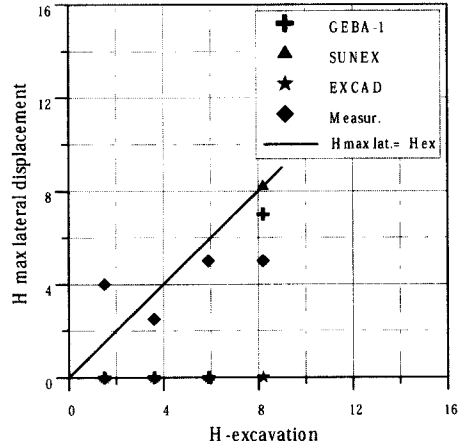


Fig. 11. Relationship between H_b and H_{ex}

5. 결론

3개 지역의 현장 계측자료를 이용하여 기존의 탄소성 이론 및 Nakamura-Nakajawa법을 이용하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 다층지반으로 이루어진 현장에서는 지반물성의 변화만을 고려한 SUNEX보다 버팀보의 하중분배를 고려한 GEBA-1과 EXCAD가 최대변위량, 최대변위 발생지점, 거동양상이 유사한 것으로 나타났다.
- 2) 암에 근입된 다층지반의 굴착 해석시 Nakamura-Nakajawa법이 실측값과 비교하여 최대변위 발생심도는 유사하게 예측하였으나 변위량이 과대하게 나타났다(S-I, No.1), SUNEX와 EXCAD는 변위량이 비교적 유사한 것으로 나타났다.
- 3) 탄소성 해석 프로그램에서는 굴착공정의 진행에 따른 차수벽 설치시 점토지반에서의 지하수의 유출에 대한 시간적인 영향을 고려하지 못하고 있다. 따라서, 연약한 점토지반으로 구성된 S-III현장에서의 해석변위는 실측변위량을 계산하는데 상대적으로 신뢰도가 작은 것으로 나타났다.
- 4) H-pile의 하부가 암에 고정된 경우 평균 최대변위 발생지점은 굴착심도의 85%에 해당되며, 점토지반에서의 변위량은 SUNEX에 의한 값이 실측치에 가장 접근하는 것으로 나타났다. 향후 보다 많은 실측 데이터를 비교 분석하여 지반조건에 가장 적합한 해석방법을 제시한다면, 보다 안정적인 도심지 굴착이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) G. Wayne Clough, "Temporary Excavation in Varved Clay", ASCE, Vol. 101, No. GT3, pp. 279~295, 1975.
- 2) Terzaghi, K., "Evaluation of Coefficients of Subgrade Reaction", Geotechnique, Vol. 5, No. 4, pp. 297~326, 1955.
- 3) Borin, D.L., "WALLAP Anchored and Cantilevered Retaining Wall Analysis Program : User's manual", 1988.
- 4) 김낙경, "앵커토류벽의 탄소성보 해석에 관한 연구", 한국지반공학회지, Vol. 14, No. 6, pp. 81~92, 1998.
- 5) Bjerrum, L., Clausen, C.J.F. & Duncan, J.M., "Earth pressures on flexible structures-a state-of-the-art report", proceedings of the Fifth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Madrid, Vol. 2, pp. 169~196, 1972.
- 6) 양구승, "도심지 깊은 굴착시 인접지반 거동에 대한 분석", 서울대학교 박사학위 논문, 1996.