

## 탄소성 해석프로그램에 의한 버팀지지 흠막이벽의 변위 비교 Displacement Comparison of a Braced Retaining Wall by Elasto-Plastic Analysis Program

신방웅<sup>1)</sup>, Bang-Woong Shin, 김상수<sup>2)</sup>, Sang-Su Kim, 오세욱<sup>3)</sup>, Se-Uk Oh, 김동신<sup>4)</sup>, Dong-Shin Kim

1)충북대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng. Chungbuk Nat. Univ.

2)충북대학교, 대학원 토목공학과 박사과정 수료, Ph. D. Student, Dept. of Civil Eng. Chungbuk Nat. Univ.

3)충북대학교, 대학원 토목공학과 박사, Ph. D, Dept. of Civil Eng. Chungbuk Nat. Univ.

4)충북대학교, 대학원 토목공학과 석사과정, M. S. Student, Dept. of Civil Eng. Chungbuk Nat. Univ.

**SYNOPSIS** : Recently, the deep excavations have been performed to utilize the under ground space. As the ground excavation is deeper, the damage of the adjacent structure and the ground occurs frequently. The analysis of the retaining structures is necessary to the safety of the excavation works. There are many methods such as elasto-plastic, FEM, and FDM to analyze the displacement of the retaining structure. The elasto-plastic method is generally used in practice.

In this thesis, GEBA-1 program by the Nakamura-Nakajawa elasto-plastic method was developed. The program for Windows was used the Visual Basic 6.0, and the Main of the program consists of three subroutines, SUB1, SUB2, and SUB3.

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 Inclinator(at three excavation work sites). The excavation method of each site is braced retaining wall using H-pile. Each excavation depth is 14m, 14m, or 8.2m.

The results of the analyses are the followings

① In the multi-layer soil, the lateral displacement by the GEBA-1 and EXCAD which is considering the distribution of the strut load is equal to the measured displacement. ② Elasto-plasto programs can't consider the change of the ground water in clay. Therefore, the analysis displacement was expected only 20% of the measured wall displacement. ③ At the final excavation step, the maximum lateral displacement of analysis and field occurred 7~18mm at the 85~92% of the excavation depth. ④ The maximum lateral displacement in clay, as 50mm, occurred on the ground surface.

**Keywords** : Elasto-plastic method, Nakamura-Nakajawa Elasto-plastic method, Braced retaining wall,

### 1. 서론

급속한 경제성장과 인구증가에 의해 도심지에서는 대심도 굴착이나 인접굴착이 행해지고, 이로 인하

여 인접지반의 변위나 주변지반의 침하와 같은 피해가 빈번히 발생하게 된다. 따라서, 굴착 동안의 흙막이 구조물의 안정 해석에 대한 관심이 증대되고 있다. 흙막이 구조물의 안정성 해석이 필요하고, 여기에 간편해석법, 탄소성법, 유한요소법, 유한차분법 등이 있다. 간편해석법은 계산이 간편하나 실제의 굴착을 잘 모델화한 것이 아니므로 도심지의 굴착에는 거의 사용되지 않고, 유한요소법과 유한차분법은 실제의 굴착은 잘 묘사할 수 있으나 수식이 복잡한 특성을 지니고 있다. 반면, 탄소성 해석법은 벽체와 배면지반과의 상호작용을 고려하고 지반을 탄소성의 지반반력 스프링으로 모델링하여 해석하는 기법으로 입력자료가 다른 해석기법보다 간단하고, 벽체의 거동을 효과적으로 해석할 수 있어 실제로 설계의 검토 및 해석에 널리 사용되고 있다. 국내에서도 범용 탄소성 해석 프로그램이 사용되고 있으나, 주로 DOS용 프로그램으로 물성치 입력과 결과 도면이 DOS상에서 구현된다는 단점을 가지고 있다. 따라서, 본 연구에서는 Visual Basic 6.0을 사용하여 GUI(Graphic User Interface)환경으로 각 굴착 단계마다 지반 물성치 입력이 가능하고, 버팀보에 의해 가해지는 하중을 분포하중으로 해석하는 윈도우용 탄소성 해석 프로그램을 개발하였으며, 이 프로그램을 이용하여 도심지 버팀지지 굴착현장을 해석하고, 계측결과 및 기존의 범용프로그램 해석 결과와 비교를 하여 벽체의 변위 특성에 대해 연구하고자 하였다.

## 2. 탄소성 해석 및 프로그램

### 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 아래와 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.

#### 2.1.1 굴착면 상부 및 소성영역

토류벽체를 두 부분으로 나누어 기본 방정식을 유도하고 이 기본 방정식을 적당한 조건하에서 행렬형태로 나타내어 천이행렬을 구한다.

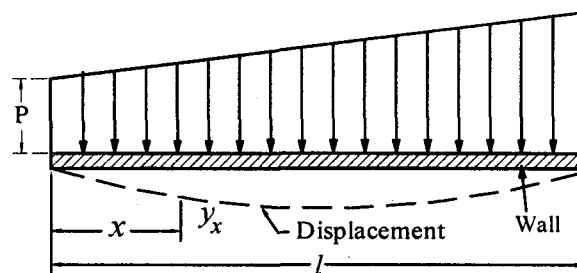


그림. 2.1 소성영역에서의 하중-변위 보 모델

그림. 2.1은 벽체를 여러개의 요소로 나누었을 경우 굴착면 이상 및 이하의 소성영역의 요소에 대한 하중 및 변위를 보여주고 있다. 그림으로부터 보에 대한 미분방정식은

$$EI \cdot \frac{d^4 y_x}{dx^4} - (P + q \cdot x) = 0 \quad (2.1)$$

여기서,  $E$ 는 토류벽 재료의 탄성계수,  $I$ 는 토류벽의 단면 2차 모멘트,  $P$ 는  $x=0$ 의 하중강도,  $q$ 는 하중

의 증가율,  $x$ 는 부재의 단에서 임의점까지의 거리,  $y_x$ 는  $x$ 점에서의 토류벽의 변위 이다. 식(2.1)를 적분하여 풀면 식(2.2)와 같은 처짐  $y_x$ , 처짐각  $\theta_x$ , 모멘트  $M_x$ , 그리고 전단력  $S_x$ 에 대한 기본식

$$\begin{aligned} y_x &= y_0 + \theta_0 x - \frac{1}{EI} \left( \frac{1}{2} M_0 x^2 + \frac{1}{6} S_0 x^3 - \frac{1}{24} P x^4 - \frac{1}{120} q x^5 \right) \\ \theta_x &= \theta_0 - \frac{1}{EI} \left( M_0 x + \frac{1}{2} S_0 x^2 - \frac{1}{6} P x^3 - \frac{1}{24} q x^4 \right) \\ M_x &= M_0 + S_0 x - \frac{1}{2} P x^2 - \frac{1}{6} q x^3 \\ S_x &= S_0 - P x - \frac{1}{2} q x^2 \end{aligned} \quad (2.2)$$

이다. 위 식에서  $y_0, \theta_0, M_0, S_0$ 는 각각  $x=0$ 점의 변위, 회전각, 휨모멘트, 전단력이 된다

### 2.1.2 탄성영역

그림. 2.2는 탄성영역의 보요소에 대한 모델을 보여주고 있다. 그림과 같은 탄성지반에서 탄성보의 기본 미분방정식은(여기서,  $k_h$ 는 흙의 수평지반 반력계수)

$$EI \frac{d^4 y_x}{dx^4} + k_h \cdot y_x - (P + q \cdot x) = 0 \quad (2.3)$$

와 같다.

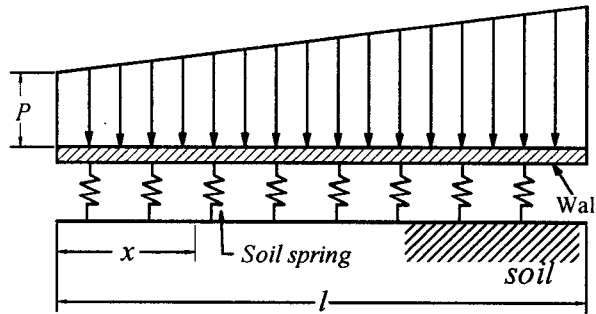


그림. 2.2 탄성영역에서의 보 모델

## 2.2 해석 프로그램

### 2.2.1 개발도구

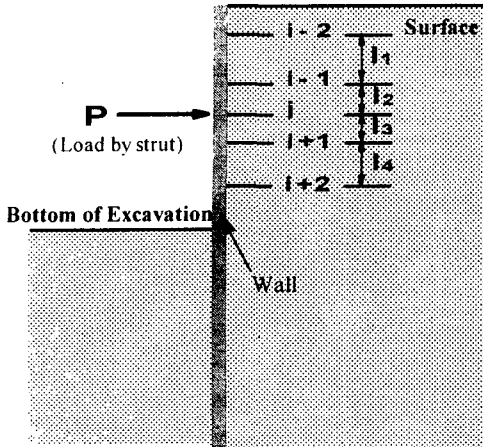
본 연구에서는 프로그램의 개발을 Visual Basic 6.0을 사용하여 굴착 토류벽을 해석하도록 하였다. 본 프로그램의 개발에 사용된 비주얼 베이직은 아래와 같은 장점이 있다.

- ① 비주얼 베이직이 가지고 있는 메뉴나 도구들이 굉장히 다양하고, 손쉽게 익힐 수 있으므로 폼(form)에 디자인이 용이하고 개발환경이 편리하다.
- ② OOP(object oriented programming)를 거의 완벽하게 지원해 주어 프로그램의 유지보수 및 확장성, 재사용성을 높여준다.
- ③ 소단위의 구성요소인 컴퍼넌트(component)의 제작이 가능하여 요구에 따라서 다른 프로그램에서도 사용이 가능하다.
- ④ JET(joint engine technology)라고 하는 데이터베이스 엔진을 제공해 준다.

### 2.2.2 GEBA-1 프로그램

본 연구에서 개발한 GEBA-1은 같은 토층 내에서도 굴착이 진행됨에 따른 깊이별 물성( $C, \phi, K_s$ )의 변화가 가능하며, GEBA-1에서 지지구조의 반력은 분산하중으로 고려하여 지반의 반력을 토압과 유사

한 형상을 갖도록 하였다. 이 분배방법은 탄성보 해석시 불규칙한 지반의 스프링형성에 따라 발생하는



$$P_{i-2} = 0.2P \frac{l_2^2 + l_2 \cdot l_1}{(l_1 \cdot l_2)^2}$$

$$P_{i-1} = 0.2P \frac{l_1^2 + l_2 \cdot l_1}{(l_1 \cdot l_2)^2}$$

$$P_i = 0.6P$$

$$P_{i+1} = 0.2P \frac{l_4^2 + l_3 \cdot l_4}{(l_3 \cdot l_4)^2}$$

$$P_{i+2} = 0.2P \frac{l_3^2 + l_3 \cdot l_4}{(l_3 \cdot l_4)^2}$$

그림. 2.3 토류벽에서의 반력의 분배

반력에 대한 오차를 최소화시킬 수 있는 것이다. 또한, 물성치 입력형태는 메뉴방식으로 다양한 값을 손쉽게 입력·수정이 가능하고 굴착 모식도를 단계별로 출력하여 해석시의 오류를 손쉽게 인지할 수 있도록 하였다.

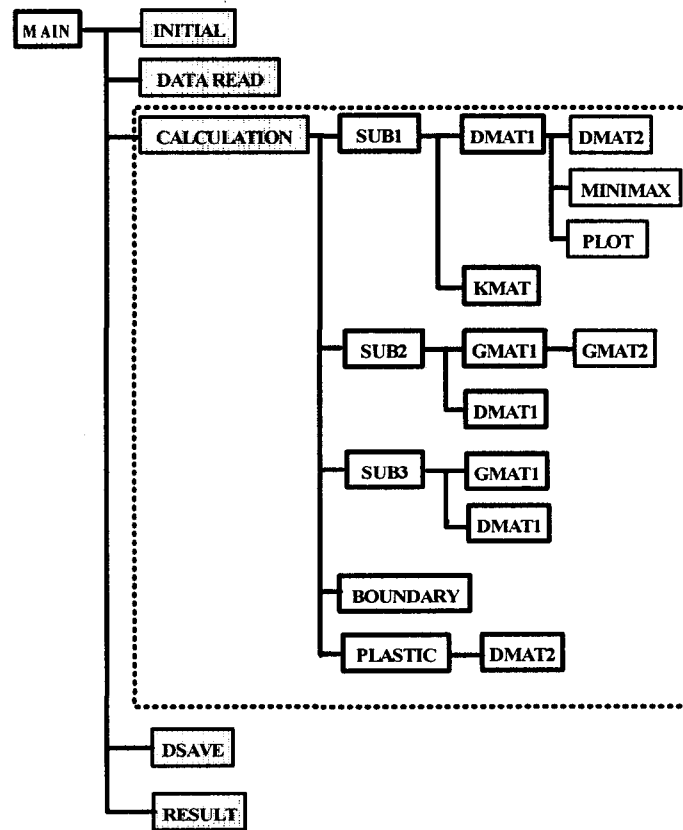


그림. 2.4 Main 품의 해석 구조

그림. 2.4는 프로그램의 MAIN해석 구조를 나타낸 것으로 전체 프로그램을 총괄하며 변수의 초기화, 데이터 입력, 탄소성해석 결과출력 및 그래프 화면출력 등의 서브 프로그램(sub program)을 구동하는 역할을 한다. INITIAL은 사용된 변수들을 초기화하고, DATA READ는 데이터를 입력한 후, 계산을 할 때 입력된 데이터들을 읽어들이는 것이다. 또한, CALCULATION은 SUB1, SUB2, SUB3 등 3개로 구성되어 있고, SUB1은 굴착면 상단부를 해석하고, SUB2는 굴착면 하단 경계부를 해석하고, SUB3는 굴착면 하단부를 해석하게 된다.

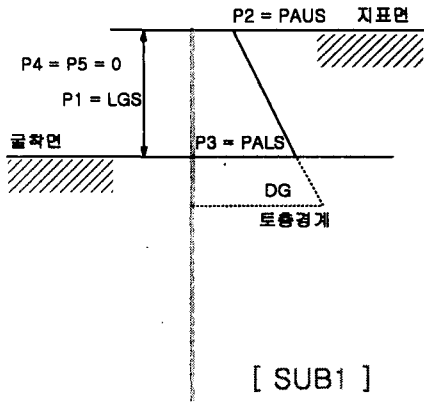


그림. 2.5 SUB 1

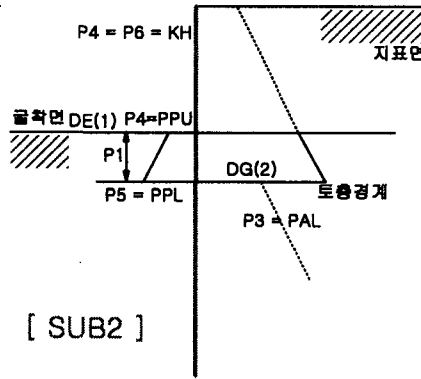


그림. 2.6 SUB2

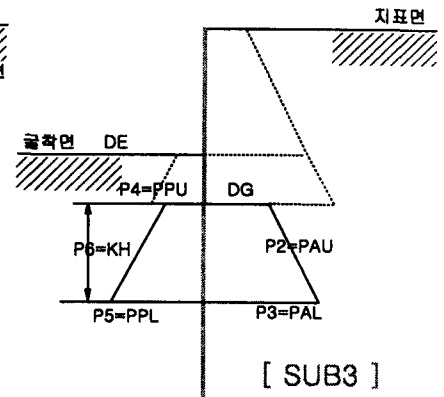


그림. 2.7 SUB3

소성화 조건, 지반의 탄·소성, 버팀보의 유무에 따라 탄성해석을 하는 PLASTIC, DMAT, GMAT, KMAT로 구성되어 있다. 또한, 토층 경계면, 버팀보 설치지점, 지하수위면, 굴착깊이를 각각 다른 토층으로 구분하여  $K_o$ ,  $K_p$ ,  $K_A$ 를 계산하고, 토층 경계면의 0.1, 버팀보 설치지점의 0.1, 굴착면 상·하부 0.2되는 지점에는 이미 정해둔 절점 이외에 추가로 절점을 생성시켜서 좀 더 세밀한 계산이 가능하게 하였다. 각각에 대해서는 그림. 2.5~2.7에서 그림으로 나타내었다.

본 연구에서 개발한 GEBA-1의 실행시 초기화면과 B지구 현장의 경사계 1번을 해석한 결과값의 출력화면을 그림. 2.8~2.9에 나타내었다.

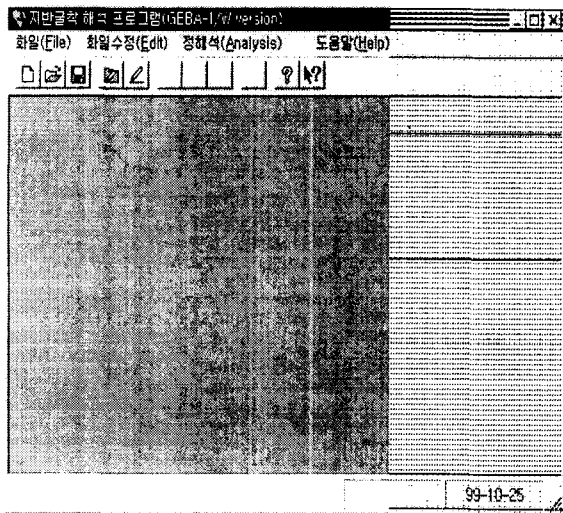


그림. 2.8 GEBA-1프로그램의 초기화면

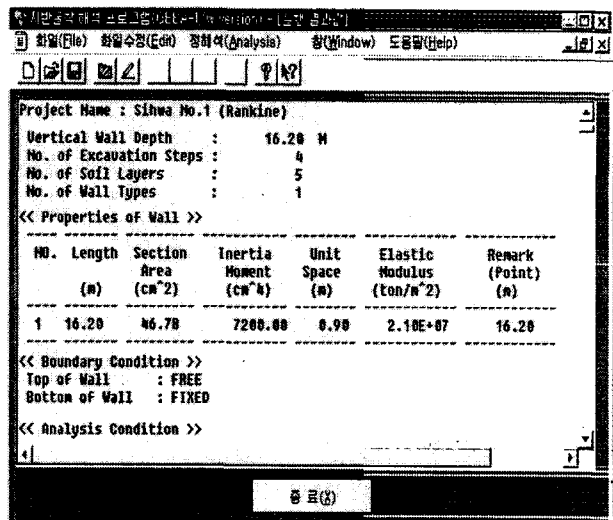


그림. 2.9 B지구 경사계 1번의 해석결과 화면

### 3. 현장 계측

#### 3.1 굴착 현장

표 3.1 굴착현장 개요

현 장	A지구	B지구	C지구
굴착심도(m)	14	8.2	14
굴착공법	엄지말뚝	엄지말뚝	엄지말뚝
보강공법	Jet grouting	Soil Cement Wall	C.I.P./J.S.P.
지지방법	strut	strut	strut
지하수위	GL-13.2m	GL-2.2m	GL-8.6m

### 3.2 굴착 공정

표 3.2 굴착 공정

굴착현장	A지구		B지구		C지구	
	H-Pile	H-300x300x10x15	H-300x150x6.5x9	H-300x300x10x15	H-300x300x10x15	H-300x300x10x15
Strut	H-300x300x10x15		H-300x300x10x15		H-300x300x10x15	
No.	Strut(m)	Excav.(m)	Strut(m)	Excav.(m)	Strut(m)	Excav.(m)
1 단계	1.6	2.2	1.0	1.5	1.2	1.7
2 단계	4.2	5.0	3.1	3.6	3.7	4.2
3 단계	6.9	7.5	5.4	5.9	6.0	6.5
4 단계	9.7	10.7	8.2		8.4	8.9
5 단계	12.0	12.5	-		10.8	11.3
6 단계	-	14.0	-		-	14.0

표 3.3 해석에 사용된 지반조건 입력 자료

현 장	토 층	$\gamma_{wet} (t/m^3)$	$\gamma_{sat} (t/m^3)$	$C (t/m^2)$	$\phi (deg)$	$K_s (t/m^2)$
B지구	매립토층	1.8	1.9	0.0	19	920
	상부 점토층	1.7	1.8	2.4	15	700
	중간 점토층	1.7	1.8	2.4	17	800
	하부 점토층	1.8	1.9	2.4	19	900
C지구	매립토층	1.8	1.9	3.0	25	2500
	퇴적토층	1.6	1.7	3.0	20	1000
	풍화토층	1.8	1.9	3.0	35	3000
	풍화암층	1.9	2.0	2.0	35	4500
	연 압 층	2.0	2.1	4.0	38	6000
A지구	매립토층	1.8	1.9	3.0	30	1200
	점토&실트층	1.6	1.7	3.0	15	1000
	모 래 층	1.7	1.8	0.0	35	3000
	자갈질 모래층	1.7	1.8	0.0	35	3000
	풍화암층	2.0	1.9	1.0	35	5000
	연 압 층	2.0	1.9	1.0	35	5000

## 4. 비교 및 분석

### 4.1 A지구 현장

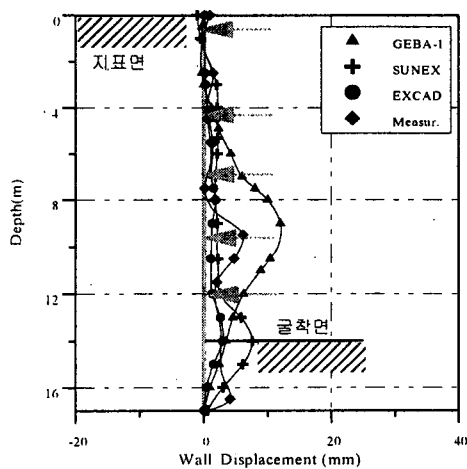


그림. 4.1 최종굴착 단계의 벽체변위(경사계 1번)

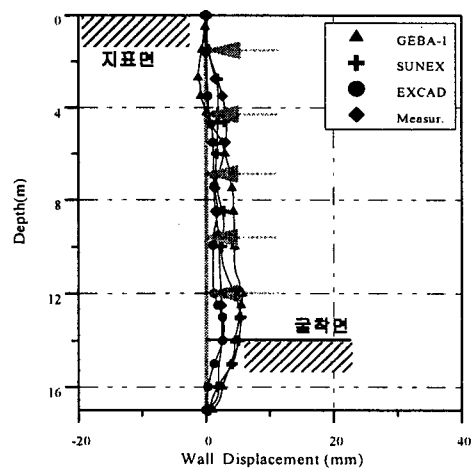


그림. 4.2 최종굴착 단계의 벽체변위(경사계 2번)

## 4.2 C지구 현장

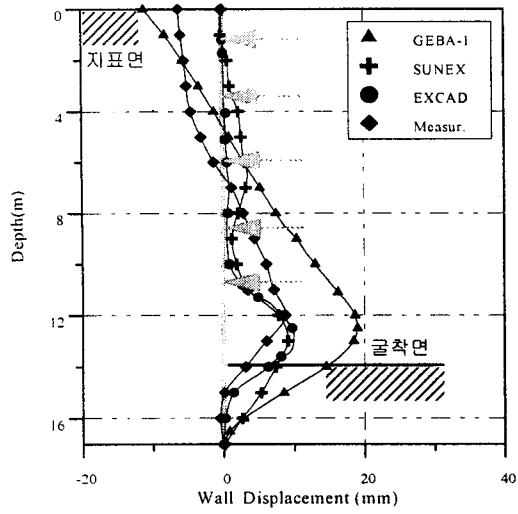


그림. 4.3 최종굴착 단계의 벽체변위(경사계 1번)

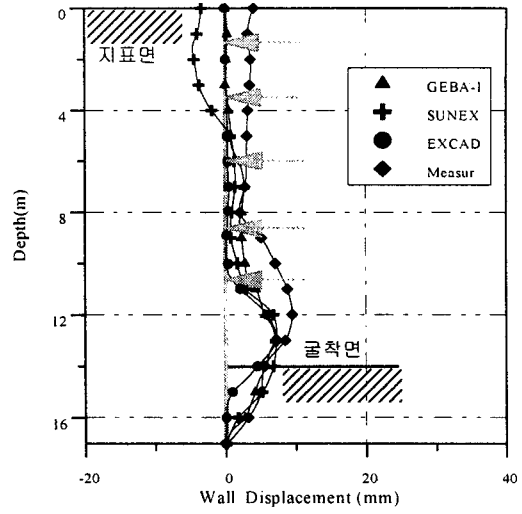


그림. 4.4 최종굴착 단계의 벽체변위(경사계 2번)

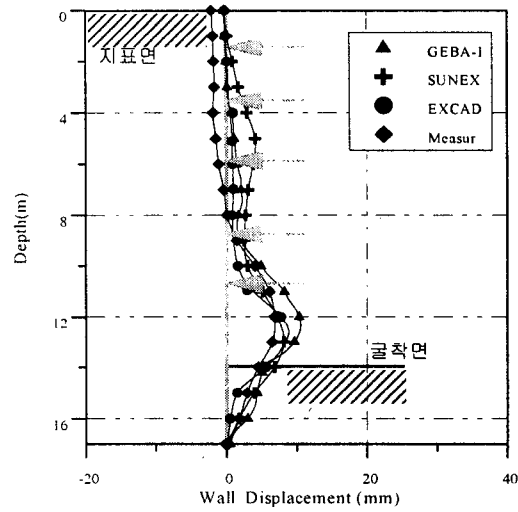


그림. 4.5 최종굴착 단계의 벽체변위(경사계 3번)

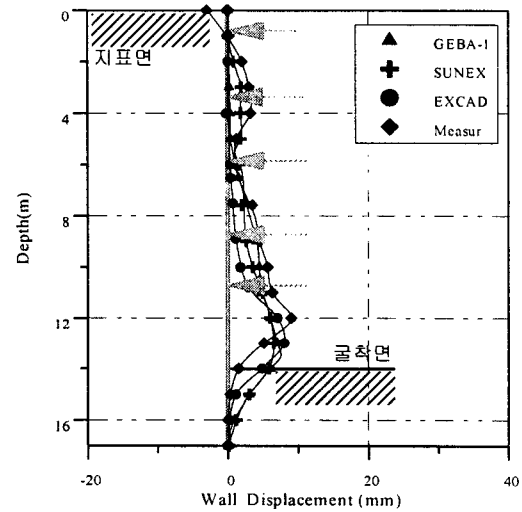


그림. 4.6 최종굴착 단계의 벽체변위(경사계 4번)

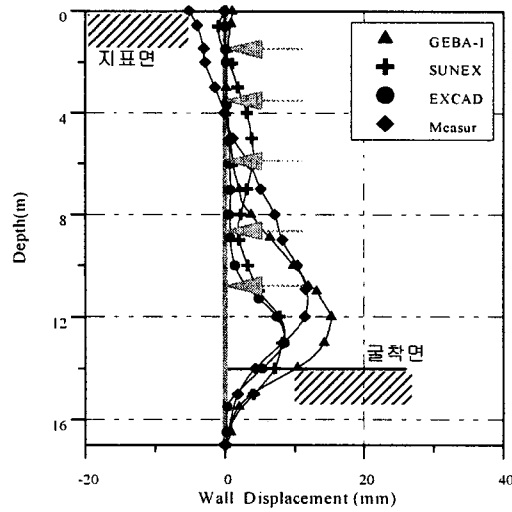


그림. 4.7 최종굴착 단계의 벽체변위(경사계 5번)

### 4.3 B지구 현장

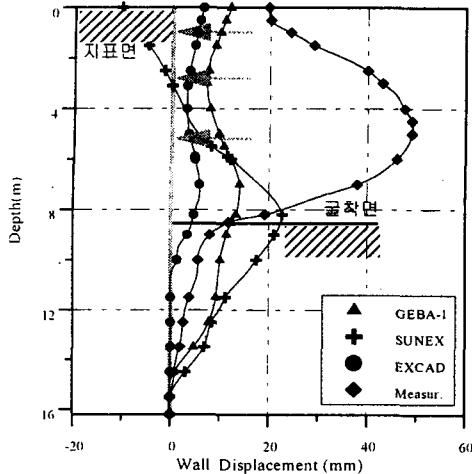


그림. 4.8 최종굴착 단계의 벽체변위(경사계 1번)

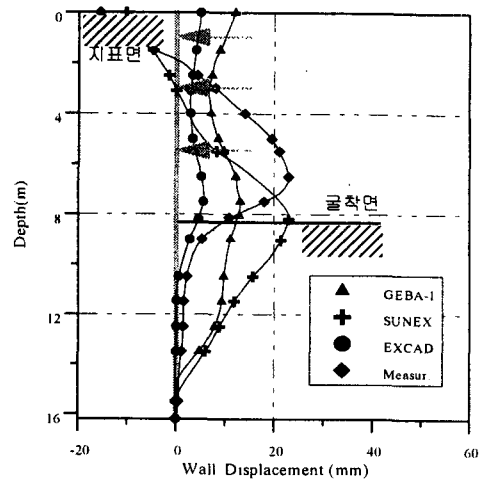


그림. 4.9 최종굴착 단계의 벽체변위(경사계 2번)

### V. 결론

Nakamura-Nakajawa법을 이용하여 Visual Basic 6.0으로 개발한 탄소성 해석 프로그램 GEBA-1을 기존의 범용 프로그램과 비교하였다. 3개 지역의 현장 계측자료를 이용하여 최종굴착시의 벽체의 변위를 비교·분석해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 다층지반으로 이루어진 A지구, C지구 현장에서는 계측 결과와 해석결과가 비교적 일치하였으나, 연약한 점토지반으로 구성된 B지구 현장에서의 프로그램에 의한 해석변위는 계측변위의 20%정도 과소 평가 되는 것으로 나타났다.
2. 최종굴착 단계에서 다층지반의 변위양상은 최대변위가 85%~92%H되는 지점에서 발생하였고, 최대변위량은 7mm~18mm로써 0.14%H에 해당되는 변위를 나타냈다.
3. 다층지반에서의 해석결과 하중분배를 고려한 GEBA-1과 EXCAD가 계측변위와 최대변위 발생심도, 거동양상 면에서 좋은 일치성을 나타내고 있다.
3. 탄소성 해석 프로그램에서는 굴착공정의 진행에 따른 차수벽 설치시 점토지반에서는 지하수의 유출에 대한 시간적인 영향을 고려하지 못하는 것으로 나타나 이에 대한 추가보완이 필요하다.

### 참 고 문 헌

1. 김낙경(1998), "앵커토류벽의 탄소성보 해석에 관한 연구", 한국지반공학회지, Vol.14, No.6, pp.81~92.
2. 박수용(1999), "탄소성 해석법을 이용한 굴착 토류벽의 거동 해석", 서울대학교 석사학위 논문.
3. 서민우(1998), "깊은 굴착에 의한 인접지반의 거동 분석", 서울대학교 석사학위 논문.
4. 양구승(1996), "도심지 깊은 굴착시 인접지반 거동에 대한 분석", 서울대학교 박사학위 논문.
5. G. Wayne Clough(1975), "Temporary Excavation in Varved Clay", ASCE, Vol. 101, No. GT3, pp.279~295.
6. John S. Horvath(1993), "Beam-Column-Analogy Model for Soil-Structure Interaction Analysis", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 119, No.2, pp. 358~364.
7. Richard J. Finno(1989), "Observed Performance of a Deep Excavation in Clay", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 115, No. 8, pp. 1045~1064.
8. Roberto Maldonado(1998), "Big Digs in the Lacustrine Soil of Bogotá, Colombia", ASCE Geo-Congress '98, Boston Massachusetts, Geotechnical special publication, No.86, pp. 252~272.
9. Youssef M. A. Hashash(1996), "Ground Movement Prediction for Deep Excavations in Soft Clay", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 122, No. 6, pp. 474~486.