

# 강제변위법을 이용한 굴착배면지반의 변형해석(I) - 프로그램 개발 및 검증 -

## Deformation analysis of Excavated Behind Ground by The Artificial Displacement Method (I) - Program Development and Verification -

윤 중 만<sup>1\*</sup> Yun, Jung-Mann  
한 중 근<sup>2</sup> Han, Jung-Gun

### ABSTRACT

The numerical analysis program using artificial displacement method is developed to analyze the deformation behavior of excavated behind ground of retention wall. The elasto-plastic model suggested by Drucker-Prager was used to represent soil behavior and the model's solution was obtained from the return mapping method. To validate of the program, the predicted results by the numerical analysis and the measured results by a field test are compared. The results of numerical analysis showed good agreement with the measured results in field and theoretical values.

### 요 지

흙막이벽 굴착배면지반의 변형거동을 해석을 하기 위하여 강제변위법을 이용한 수치해석 프로그램을 개발하였다. 굴착지반의 구성모델은 Drucker-Prager의 비선형 탄소성구성방정식을 적용하였으며, 리턴매핑법으로 탄소성해를 구하였다. 수치해석 프로그램의 타당성을 검증하기 위하여 수치해석으로부터 얻은 굴착배면지반의 수평변위와 현장계측결과를 비교하였다. 검토결과 수치해석 프로그램의 정확도는 상당히 높은 것으로 나타났다.

**Keywords :** Artificial displacement, Return mapping, Deformation behavior, Numerical analysis

### 1. 서 론

흙막이 굴착공사가 도심지에서 근접시공으로 이루어질 경우, 흙막이벽의 변형으로 인하여 굴착배면지반에 부등침하나 측방변위가 발생하게 된다. 이러한 배면지반의 변형은 인접구조물에 악영향을 미치게 되므로 굴착시공전은 물론 시공중에도 배면의 변형거동을 정확히 예측할 필요가 있다. 그러나 굴착으로 인한 주변지반 및 인접구조물의 변형문제에는 지반조건이나 흙막이구조물과 인접구조물

사이의 상호작용에 의한 불확정 요소가 많이 포함되어 있어 정확히 예측하는데 상당히 어려움이 있다.

흙막이굴착에 따른 굴착배면지반의 변형예측은 주로 현장계측에 의한 분석(Peck(1969), 坂本 등(1993), 유일형 등(1994), 양구승 등(1997)), 실내모형토조를 이용한 해석적 연구(岡原(1993)) 그리고 탄소성모델을 이용한 수치해석적 연구(Palmer 등(1972), 梶ヶ谷 등(1989), 中井(1994)) 등에 의하여 실시되고 있다.

흙막이벽 및 굴착배면지반의 변형거동을 해석하는 수

1\* 정회원, 안산공과대학 건설계열 건설전공 조교수 (Member, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Ansan College of Technology, E-mail: jmyun@act.ac.kr)

2 정회원, 중앙대학교 건설환경공학과 조교수 (Member, Assistant Professor, Dept. of Civil & Env. Engineering, Chung-Ang University)

치해석법에는 굴착에 의해 새로이 설정된 굴착계획면을 경계면으로 하여 경계면 외부의 토괴(요소)를 제거하여, 외력을 응력해방하는 것에 의해 흙막이구조물을 포함한 굴착배면지반의 변형거동을 검토하는 응력해방법(Duncan 등(1970), 市川 등(1988))과 실제 굴착현장에 발생된 흙막이벽의 수평변위를 강제적으로 입력하여 굴착배면지반의 변형을 해석하는 강제변위법이 있다.

본 연구에서는 굴착배면지반의 변형거동을 해석하기 위하여 흙막이벽에 강제변위를 입력하는 역해석기법의 수치해석프로그램을 개발하였다. 개발된 수치해석 프로그램의 적용성 여부를 판단하기 위하여 현장에서 계측된 굴착배면지반의 수평변위와 수치해석으로부터 얻은 결과를, 그리고 이론적으로 구한 지표면 침하량과 해석결과로부터 얻은 지표면 침하량을 비교하여 정확도를 검증하였다.

## 2. 지반모델링

지반은 Drucker-Prager의 항복함수 및 소성포텐셜을 가진 탄소성체로 모델링한다. 탄성계수는 구속압의 영향을 받으므로 굴착에 따른 응력변화가 지반의 강성에 미치는 영향을 고려하기 위하여 식 (1)과 같이 지반의 탄성계수를 고려하는 것으로 하였다.

$$E = E_0 \left( \frac{p'}{p_0} \right)^m \quad (1)$$

여기서,  $E_0$ 는 기준상태에 있어서 탄성계수,  $p_0$ 는 기준상태에 있어서의 유효응력,  $E_0$ 는 기준상태에 있어서 탄성계수,  $m$ 은 재료정수이며,  $m=0$ 의 경우 지반은 선형탄성거동을 한다. 그리고  $p'$ 은 평균유효주응력으로 식 (2)와 같이 주어진다.

$$p' = \frac{\sigma_x' + \sigma_y' + \sigma_z'}{3} \quad (2)$$

그리고, 식 (1)의 양변에 자연대수를 취하면 식 (3)과 같이 된다. 이것은 대수표현에 있어서 탄성계수와 평균주응력이 선형관계에 있다는 것을 의미한다.

$$\ln(E) = m \cdot \ln(p'/p_0) + \ln(E_0) \quad (3)$$

한편, 지반의 항복함수는 식 (4)와 같이 Drucker-Prager의 파괴규준을 적용하였다.

$$f = \sqrt{J_{2D}} - \alpha J_1 - k = 0 \quad (4)$$

여기서,  $\alpha$ 와  $k$ 는 재료정수,  $J_1$ 은 제1응력불변량,  $J_{2D}$ 는 제2축차응력불변량이다. 식 (4)를 정리하여 다시 풀면 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$f = q - \frac{6\cos\phi}{3 - \sin\phi} c - n_f p' \quad (5)$$

여기서,  $c$ 는 점착력,  $n_f$ 는 파괴시의 응력비,  $\phi$ 는 파괴시의 내부마찰각,  $q$ 는 일반화된 전단응력으로서 식 (6)과 같이 정의된다.

$$q = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x' - \sigma_y')^2 + (\sigma_y' - \sigma_z')^2 + (\sigma_z' - \sigma_x')^2 + 6\tau_{xy}^2 + 6\tau_{yz}^2 + 6\tau_{zx}^2} \quad (6)$$

소성포텐셜 함수는 지반의 다이런턴시 특성을 나타내기 위하여 식 (7)과 같이 고려하는 것으로 하였다.

$$g = q - n_d p' \quad (7)$$

여기서,  $n_d$ 는 지반의 다이런턴시 특성을 나타내는 파라메타로서 식 (8)과 같이 고려된다.

$$n_d = \frac{d_v}{d_r} = \frac{6\sin\phi_d}{3 - \sin\phi_d} \quad (8)$$

여기서,  $d_v$ 는 소성체적변형률증분,  $d_r$ 은 소성전단변형률증분비,  $\phi_d$ 는 다이런턴시각이다.

## 3. 수치해석법

### 3.1 강제변위법

굴착문제에 유한요소법을 적용하는 방법으로는 굴착이라는 외력을 응력해방하는 것에 의해 흙막이구조물을 포함한 굴착배면지반의 변형거동을 검토하는 응력해방법과 탄소성해석이나 현장계측으로부터 얻은 흙막이벽의 수평변위량을 입력자료로 하는 강제변위법이 있다. 응력해방법은 시공전에 시공상황을 시물레이션하여 단계별 굴착에 따른 흙막이벽 및 주변지반의 변형을 예측하여 이것을 설계에 반영하는 것이다. 그러나 강제변위법은 실제 굴착현장에 발생된 흙막이벽의 수평변위를 이용하여 굴착배면지반의 변형을 예측하는 역해석기법의 일종으로 시공중에 계측관리에 따른 굴착배면지반의 변형을 검토하는 것이

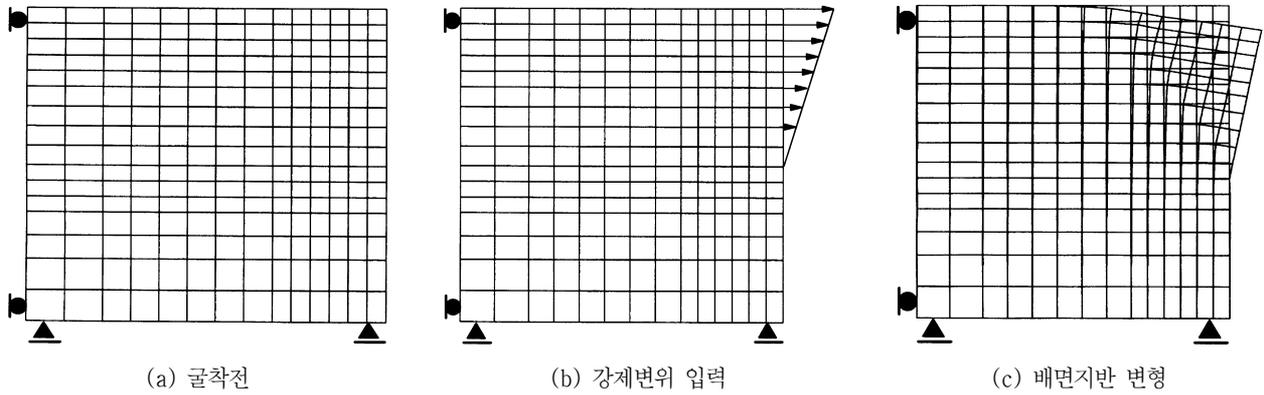


그림 1. 강제변위법

가능하다.

그림 1은 강제변위법의 기본개념도를 개략적으로 나타낸 것이다. 이 방법은 흙막이벽에 강제적으로 변위를 작용시켜 흙막이벽 변형에 따른 굴착배면지반에 변형을 발생시키는 방법이다. 응력해방법은 굴착에 따른 응력의 변화를 절점력으로 작용시킴으로서 흙막이벽 및 주변지반의 변형을 발생시키기 때문에 흙막이벽의 변형형태를 제어하는 것이 곤란하다. 따라서 흙막이벽의 변형형태 및 그 변형량의 크기가 굴착배면지반에 미치는 영향을 검토하는데 어려움이 있다. 그러나 강제변위법은 강제변위로서 입력하는 수평변위량의 크기에 의해 흙막이벽의 변형형태나 그 변형량을 변화 시키는 것이 가능하다. 따라서 흙막이벽의 변형형태나 그 변형량의 크기가 배면지반의 변형과 그 범위에 미치는 영향을 검토하는데 적합한 해석수법이라고 생각된다.

### 3.2 리턴매핑법

본 해석에서는 Ortiz 등(1986)에 의해 주어진 Return Mapping방법을 수정하여 이용한 것으로 탄소성상태의 해를 구하고 있다(Matsui 등(1995)). 이 방법은 탄소성 매트릭스를 사용하지 않고 탄성상태에 있는 응력-변형률관계 매트릭스만을 사용하고 이것을 반복계산하는 것에 의해 직접 응력상태를 결정하고 있다. 지반이 파괴상태에 도달하게 되면 지반의 응력은 식 (4)의 파괴기준을 만족해야만 한다.

현재 임의의 물체의 응력벡터를  $\{\sigma_n\}$ 으로 하고, 응력점이 항복기준내의 탄성영역내에 있다고 가정한다. 지금 새로운 변형률증분벡터  $\{d\epsilon_{n+1}^{(0)}\}$ 가 고려되어질 때, 변형률증분 전체가 탄성상태에 있다고 가정하면 이때의 응력증분

은 다음식과 같이 주어진다.

$$\{d\sigma_{n+1}\} = [D^e] \{d\epsilon_{n+1}^{(0)}\} \quad (8)$$

여기서,  $\{d\sigma_{n+1}\}$ 은 응력증분벡터,  $\{d\epsilon_{n+1}^{(0)}\}$ 은 탄성변형률증분이고,  $[D^e]$ 는 탄성상태의 응력-변형률관계 매트릭스이다. 따라서 새로운 상태에 있어서 응력벡터는 다음식에 의해 주어진다.

$$\{\sigma_{n+1}\} = \{\sigma_n\} + \{d\sigma_{n+1}\} \quad (9)$$

여기서,  $\{\sigma_{n+1}\}$ 은 새로운 상태에 있어서의 응력벡터이다. 이 새로운 응력상태가 응력공간에 있어서 항복곡면의 외측에 위치한 것으로 한다. 항복곡면의 외측에는 응력점이 존재해서는 않되기 때문에 식 (4)의 파괴기준을 만족하도록 응력상태를 리턴시키지 않으면 않된다. 이 리턴과정에 있어서 변형률증분이 변화하지 않는다고 가정하면 다음과 같이 성립된다.

$$\{d\epsilon_{n+1}^{e(1)}\} + \{d\epsilon_{n+1}^{p(1)}\} = \{d\epsilon_{n+1}^{(0)}\} \quad (10)$$

여기서,  $\{d\epsilon_{n+1}^{e(1)}\}$  및  $\{d\epsilon_{n+1}^{p(1)}\}$ 은 각각 리턴과정에 있어서 발생하는 탄성 및 소성변형률증분벡터이다. 이것은 크기는 같고 부호는 반대가 된다. 소성변형률증분  $\{d\epsilon_{n+1}^{p(1)}\}$ 은 소성 흐름법칙을 적용하면 식(11)과 같이 된다.

$$\{d\epsilon_{n+1}^{p(1)}\} = \Lambda \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma} \right\} \quad (11)$$

여기서,  $\Lambda$ 는 정의정수이고  $g$ 는 소성포텐셜이다. 식 (11)에서  $\Lambda$ 는 Ortiz와 Simo(1986)에 의하면 다음과 같이 개략적으로 주어진다.

$$A \approx AGEE\bar{A} = \frac{f}{\left\{ \frac{\partial f}{\partial \sigma} \right\}^T [D^e] \left\{ \frac{\partial g}{\partial \sigma} \right\}} \quad (12)$$

리턴된 응력증분벡터는 다음식으로 주어진다.

$$\{d\sigma_{n+1}^{b(1)}\} = - [D^e] \{de_{n+1}^p(1)\} \quad (13)$$

여기서,  $\{d\sigma_{n+1}^{b(1)}\}$ 은 B점으로 부터 리턴된 응력벡터이다. 따라서 수정된 응력증분벡터는 다음과 같이 된다.

$$\{d\sigma_{n+1}^{(1)}\} = \{d\sigma_{n+1}\} + \{d\sigma_{n+1}^{b(1)}\} = D^e (de_{n+1}^{(0)} - de_{n+1}^p(1)) = D^e de_{n+1}^{e(1)} \quad (14)$$

식 (9)에서  $\{d\sigma_{n+1}\}$ 을  $\{d\sigma_{n+1}^{(1)}\}$ 으로 대체하면 수정된 새로운 응력  $\{\sigma_{n+1}^{(1)}\}$ 이 주어진다. 따라서 소성변형률증분과 새로운 응력상태가 주어진다.

또한 본 해석에서는 소성변형률 내력과 외력사이의 차로 나타나는 불균형 하중(R)은 소변형률증분으로부터 다음과 같이 주어진다.

$$R^{(1)} = \int_{elem.} \delta \sigma_{n+1}^{b(1)} dv \quad (15)$$

본 해석에서 외력과 내력사이의 평형이 이루어 질때까지, 즉  $R^{(1)}$ 이 무시할 수 있을 정도로 미소하게 되거나 식 (5)에서  $f$ 가 0보다 작게 될 때까지 반복 계산하여 해를 구한다. 결국 파괴기준을 만족하는 새로운 상태의 응력이 결정된다.

#### 4. 프로그램의 타당성 검증

굴착현장에서 흙막이벽의 수평변위량과 흙막이벽으로부터 3m, 13m떨어진 지점에 있어서 지반의 변위량을 측정하여, 이 현장계측결과와 해석결과를 비교하였다. 그리고 해석결과로부터 얻은 배면지반의 지표면침하량과 배면지반의 침하량을 예측하는 방법 가운데 현재 굴착현장에서 많이 사용하고 있는 Caspe의 방법에 의해 산정된 침하량과 비교하였다.

##### 4.1 해석대상지반 모델링

해석대상지반은 우리나라 내륙지방의 전형적인 지층구조인 매립층, 풍화대층, 기반암(연암, 경암층)층으로 구성된 다층지반이며, 지하수위는 GL(-)6.4~10.8m정도에 형

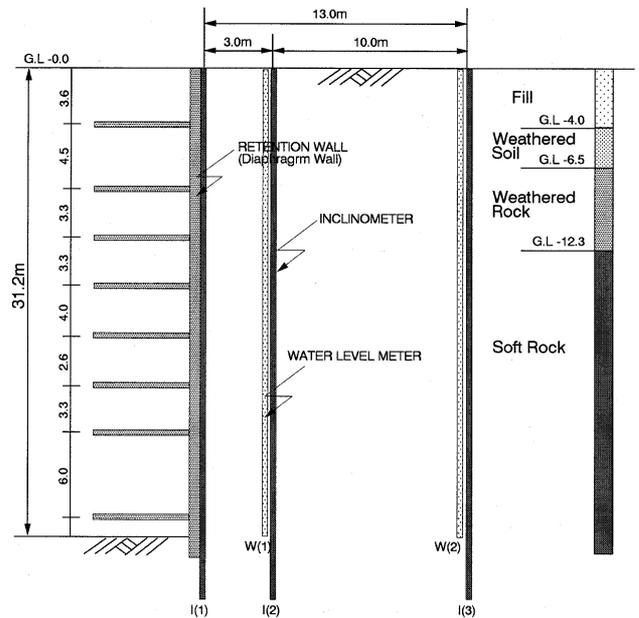


그림 2. 계측기 설치개략도 및 지반조건

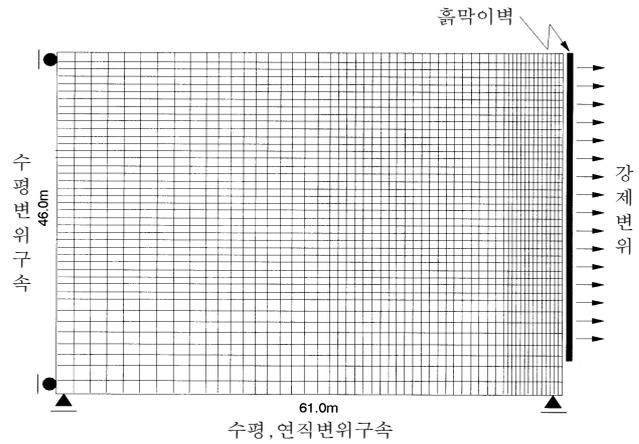


그림 3. 해석모델

성되어 있다. 굴착공사에 있어서 흙막이벽은 철근콘크리트의 지하연속벽으로 되어 있으며 굴착깊이 보다 2m 더 깊게 설치되었다. 굴착깊이는 27.0~31.2m, 굴착폭은 57~97m로 되어 있다. 그림 2는 흙막이벽 및 배면지반에 설치된 계측기의 위치와 지반조건을 개략적으로 나타낸 것이다.

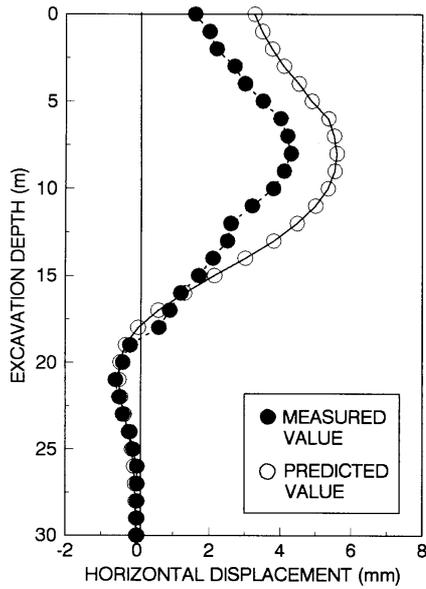
그림 3은 해석대상지반의 해석모델을 나타낸 것이다. 해석모델은 폭 61m, 깊이 46m로 하였으며 경계조건으로서 좌측벽은 수평변위만을, 저면은 수평과 연직변위 모두 구속하였으며 우측벽은 흙막이벽의 설치면으로 하였다. 현장에서 계측된 흙막이벽의 수평변위량을 그림 4의 좌측 흙막이벽에 강제변위로서 입력하였고 이 결과로부터 얻은 굴착배면지반의 수평변위량과 계측결과와 비교하여 타당성을 검증하였다.

## 4.2 굴착배면지반 수평변위

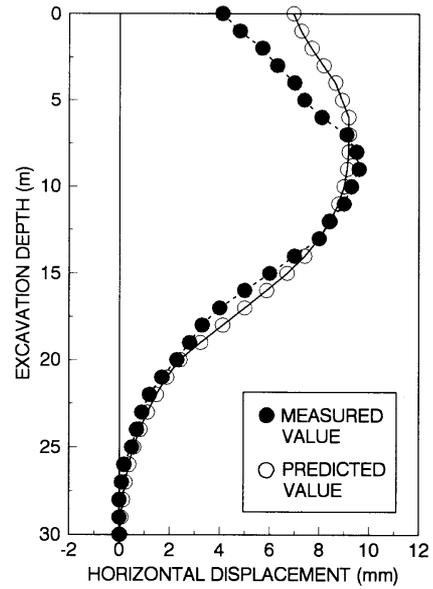
그림 4와 그림 5는 흙막이벽으로부터 각각 3m, 13m 떨어진 배면지반에 있어서 각 굴착깊이별 배면지반의 수평변위량에 대한 계측치와 그림 3에 나타난 흙막이벽의 수평변위량을 강제변위로서 입력하여 얻은 해석치를 비교하여 나타낸 것이다.

그림에서 지반의 수평변위는 지반상부에 있어서 계측치가 해석치보다 다소 크게 나타나고 있다 이것은 굴착공

사가 도심지에서 실시되었기 때문에 인접도로 및 보도공사시 상부지반에 대하여 다짐을 실시하였기 때문에 지반의 변형이 억제된 것으로 판단된다. 그러나 하부지반에서는 해석치와 계측치가 거의 일치하고 있는 것으로 나타나고 있다. 따라서 다짐에 의한 지표면 상부변위가 억제된 것을 고려하면 계측치와 해석치는 대체로 잘 일치한다고 판단된다.

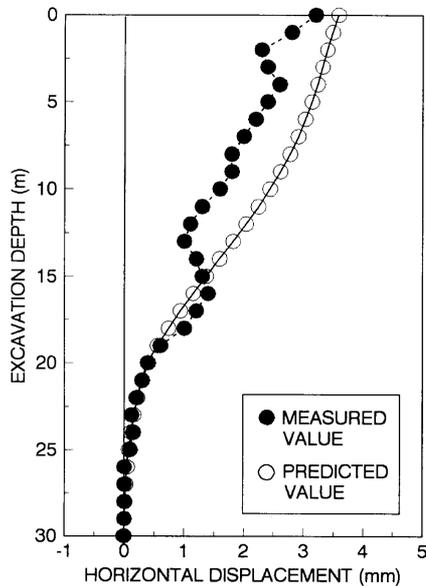


(a) 9.1m

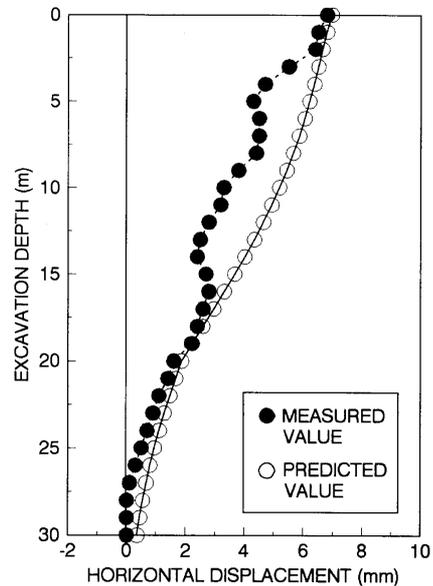


(b) 22.3m

그림 4. 배면지반의 수평변위량 비교(3m지점)

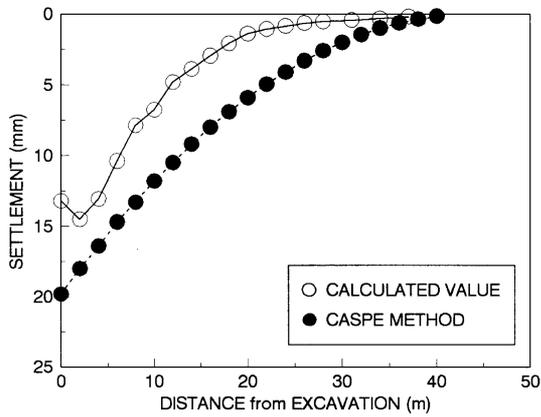


(a) 9.1m

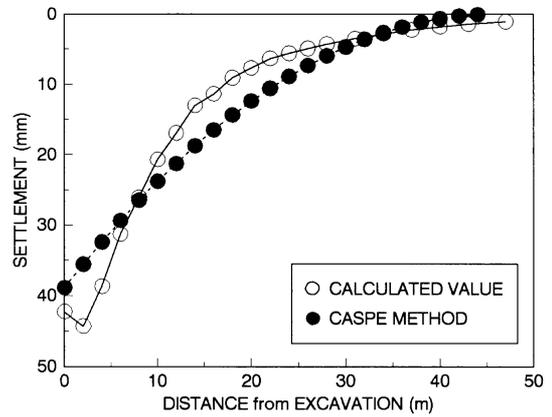


(b) 22.3m

그림 5. 배면지반의 수평변위량 비교(13m지점)



(a) A 단면



(b) B 단면

그림 6. 지표면침하량의 비교

### 4.3 굴착배면지반의 지표면침하량

그림 6은 Caspe의 방법에 의해 산정된 굴착배면지반의 지표면침하량과 수치해석으로부터 얻은 지표면침하량과 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 지표면침하량은 굴착현장에서 측정된 흙막이벽의 수평변위량 가운데 최대수평변위량을 이용하여 산정한 것이다.

그림에서 A단면에 있어서 Caspe의 방법에 의해 산정된 지표면 최대침하량은 19mm이고, B단면에서는 38mm 정도로 나타났다. 수치해석에 의한 지표면 최대침하량은 A단면의 경우 14.5m로 Caspe의 방법에 의한 값보다 작게 나타나고 있으며 B단면의 경우는 44mm 정도로 수치해석에 의한 값이 약간 크게 나타나고 있다. Caspe의 방법의 경우, 최대침하량은 굴착면에서 발생하고 있는 반면에 수치해석결과는 흙막이벽과 지반사이의 벽 마찰이 고려되어 굴착면으로부터 2m 정도 떨어진 위치에서 발생하고 있다.

한편, A단면에 있어서 굴착배면지반의 거리별 침하량은 Caspe의 방법에 의해 산정된 침하량이 수치해석결과보다 전반적으로 크게 발생하고 있다. 반면, B단면의 경우 흙막이벽 부근에서는 Caspe의 방법에 의해 산정된 침하량이 수치해석결과보다 약간 작게 나타나고 있으나 흙막이벽으로부터 멀어질수록 수치해석에 의해 산정된 것이 보다 크게 발생하고 있다. 또한, 굴착배면지반에 침하영향범위는 A, B단면 모두 Caspe의 방법에 의한 것과 수치해석결과가 비교적 잘 일치하고 있다. 해석치와 이론치에 의한 굴착배면지반의 침하량분포형상은 B단면이 A단면보다 대체적으로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

### 5. 결 론

강제변위법을 이용하여 개발된 굴착배면지반의 변형해석 프로그램의 타당성을 검토하기 위하여 수치해석결과와 굴착현장에서 측정된 배면지반의 수평변위와 Caspe의 방법으로 구한 지표면침하량을 비교검토한 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 굴착배면지반의 수평변위는 지반상부에 있어서 현장계측결과가 수치해석결과보다 다소 크게 나타나고 있으나 하부로 갈수록 수치해석결과와 현장계측결과가 거의 잘 일치하고 있다.
2. 최대침하량 발생 위치는 흙막이벽과 지반사이의 벽 마찰에 대한 고려 유무에 따라 Caspe의 결과와 수치해석결과와는 차이가 있는 것으로 나타났다. 그리고 굴착배면지반의 거리별 침하량 및 침하분포형상은 다소 차이는 있지만 대체적으로 Caspe의 결과와 수치해석결과는 잘 일치하고 있다.
3. 본 연구에서 개발된 프로그램은 굴착배면지반의 변형거동을 예측하는데 있어 그 타당성이 검증되었다. 따라서 본 수치해석법을 굴착현장에서 측정된 흙막이벽의 수평변위를 이용하는 역해석기법으로, 굴착배면지반의 변형거동 및 그 영향범위를 예측하는데 활용할 수 있다.

### 참고문헌

1. 양구승, 김명모 (1997), “도심지 깊은굴착으로 발생하는 인접지반 지표침하분석”, *한국지반공학회지*, 제13권, 제2호, pp.101-124.

2. 유일형, 김형탁, 이봉열, 김학문 (1994), “버팀굴착에서 인접구조물의 영향 평가”, 한국지반공학회, *94 가을 학술 발표회 논문집*, pp.139-148.
3. 市川康明, 龜村勝美(1988), “有限要素法による數値解析入門 ; 地盤の變形解析”, *土と基礎*, Vol.36, No.9, pp.81-88.
4. 梶ヶ谷勝, 尾崎純一 (1989), “軟弱地盤にあける大規模土留掘削の舉動と解析”, *土と基礎*, Vol.137, No.5, pp.23-28.
5. 坂本眞徳, 橋本良之 (1993), “土留周辺地盤の變形舉動計測”, *土木學會*, 第48回年次學術講演會, pp.534-535.
6. 岡原美知夫 (1993), “土留め壁の變形に伴う地盤變形に關する實驗および解析”, *第28回土質工學研究發表會*, pp.2003-2006.
7. 中井照夫, 田孝宏, 上田潤, 橋本正 (1994), “山留め掘削實驗と有限要素解析”, *第29回土質工學研究發表講演集*, pp.1369-1370.
8. Duncan, J. M. and Chang, C. Y. (1970), “Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils”, *Jour. of S.M.F. Div., ASCE*, Vol.96, No.SM5, pp.1629-1653.
9. Matsui, T., Oda, K., Mankii, N. and Hirai, T. (1995), “Simulation of Loading Tests on Model Ground Improved by Sand Pile”, *Proc. 30th Japan National Conf. on SMFE.*, pp.2155-2158.
10. Oritz, M. and Simo, J. C. (1986), “An Analysis of New Class of Integration Algorithms for Elastoplastic Constitutive Relations”, *International Journal for Method in Engineering*, Vol.23, pp.353-366.
11. Palmer, J. H. L. and Kenney, T. C. (1972), “Analytical Study of a Braced Excavation in Weak Clay”, *Canadian Geotechnical Jour.*, Vol.9, pp.145-164.
12. Peck, R. B. (1969), “Deep Excavations and Tunnelling in Soft Ground”, *7th ICSMFE., State-of-Art Volume*, pp.225-290.

(논문접수일 2006. 6. 14, 심사완료일 2006. 6. 23)