

# 변위증분을 이용한 흙막이 벽의 역해석에 관한 연구

## Back Analysis of Earth Retaining Wall Using Increment of Sequential Displacement

장 범 수<sup>\*1</sup> Chang, Buhm-Soo

이 승 훈<sup>\*2</sup> Lee, Seung-Hoon

김 종 민<sup>\*3</sup> Kim, Jong-Min

김 수 일<sup>\*4</sup> Kim, Soo-Il

### Abstract

In the back analysis of braced excavation based on displacement measurements, the accumulated errors of abnormal displacement caused by unexpected loads are usually observed. To minimize such errors, in this study, displacement increment was used for back analysis rather than displacement for the conventional method. That is, the increment of sequential displacement is used as the objective function and the back analysis program is developed by taking advantage of sequential linear programming method by modified method of feasible directions. Based on small scale model test, the analysis of proposed method is verified.

### 요지

본 연구의 목적은 계측변위를 이용한 흙막이 벽체의 역해석시 예기치 못한 하중으로 인해 발생한 이상변위의 누적에 의한 오차를 최소화할 수 있는 기법을 개발하는 것이다. 이를 위해 단계별 변위증분으로 목적함수를 구성하고, 목적함수를 최소화시키는 최적화기법으로 직접탐색법중 유용방향법에 의한 순차선형계획법을 도입하여 역해석 프로그램을 개발하였다. 또한, 모형토조실험을 실시하여 측정된 실제변위와 예측변위를 비교·분석함으로써 개발된 역해석 프로그램의 신뢰성을 검증하였다.

**Keywords :** Back analysis, Braced excavation, Coefficient of earth pressure, Elastoplastic model, Optimum formulation, Sequential linear programming

### 1. 서 론

흙막이 벽은 굴착시에 토사의 붕괴를 방지하고 차수용으로 사용되는 구조물로써 흙막이 벽의 설계 및 시공에 있어서 모든 설계자는 실제의 지반조건이나 시공과정을 이상화한 후 수치해석이나 경험식에 의해 설계하게 된다. 흙막이 벽에 작용하는 토압에 관한 연구가 Rankine과 Coulomb 등에 의해 시작된 이래로 흙

막이 벽의 거동을 해석하기 위한 수많은 연구가 수행되어져 왔다(김수일 등, 1994; 김학문 등, 1997; 김황, 1996). 그러나, 지반구조물의 경우 지반의 초기응력상태, 복잡한 토질구조, 과거 지반의 응력이력 상태, 지하수의 영향 등과 같은 자연상태의 조건을 모두 고려하여 수치해석을 수행하는 것은 대단히 어려운 일이다. 최근에는 이런 문제를 해결하고 시공중 기설 구조물의 안전을 확보하는 합리적인 시공을 위해 현장

\*1 정회원, 시설안전기술공단 기술개발지원실 차장 (Member, Manager, Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation)

\*2 정회원, 현대건설기술연구소, 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Hyundai Institute of Construction Technology)

\*3 정회원, 세종대학교 토폭환경공학과 전임강사 (Member, Full-time Lecturer, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Sejong Univ., jongmin@sejong.ac.kr)

\*4 정회원, 연세대학교 토폭공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

계측공법으로 변형이나 응력 등의 정보를 얻고, 역해석을 통하여 다음 단계의 공사진행에 따른 지반거동을 예측하는 정보화시공에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다(Akutagawa, et al., 1991; Gioda and Jurina, 1981; Gioda and Sakurai, 1987).

일반적으로 흙막이 벽의 역해석은 시공단계별로 측정된 계측변위와 수치모델에 의한 계산변위간의 오차가 허용범위 이내에 들어올 때까지 지반의 특성을 대표하는 매개변수들을 조정하는 방법으로 이루어진다(이해성 등, 1996; 최충식, 1996). 계측된 변위는 수치모델에서 고려하기 어렵거나 시공중 원인이 불확실한 이상거동이 포함되어 있는 경우가 많기 때문에, 이를 역해석에 그대로 적용할 경우 역산된 지반물성에도 오차가 포함되게 된다. 또한 이상거동에 의한 오차는 이후 시공단계의 변위에 계속 누적되어 역해석이나 차기단계 거동예측에 영향을 미치게 된다(장범수, 1997).

본 연구에서는 계측자료를 이용하여 흙막이 벽의 변형 및 작용토압을 정확히 예측할 수 있도록 지반의 탄소성 하중-변위곡선을 토대로한 정해석 프로그램을 개발하고 이를 수치모델로 한 역해석 기법을 개발하였다. 역해석을 위한 최적화 이론으로는 직접법중 유용방향법을 이용한 순차 선형계획법을 사용하였다. 이상변위에 의한 오차의 누적을 방지하기 위하여 단계별 변위의 증분을 이용하여 목적함수를 구성하였으며, 역해석 대상변수로는 지반반력계수 및 토압계수를 사용하였다. 또한 개발된 역해석 프로그램을 검증하기 위하여 모형토조를 이용한 단계별 굴착실험을 실시하였다. 모형토조 실험으로부터 얻어진 계측변위로부터 역해석된 지반물성을 이용하여 차기굴착 단계의 예측변위와 실제변위를 비교·분석하였다.

## 2. 탄소성 하중-변위 관계를 이용한 흙막이 벽의 해석

### 2.1 흙막이 벽의 해석을 위한 수치모델

그림 1은 흙막이 벽의 해석을 위해 사용한 모델이다. 지반을 일련의 탄소성 스프링으로 가정하고 벽체를 휨강성을 갖는 보요소로, 보강재는 축방향 강성을 갖는 스프링으로 간주하였다. 벽체의 강성이  $EI$ 이고 벽체의 변위를  $y(x)$ 라 하면 벽체의 기본구성방정식은 식(1)과 같다. 벽체에 작용하는 횡하중  $P(x)$ 는 식(2)와 같이 표현

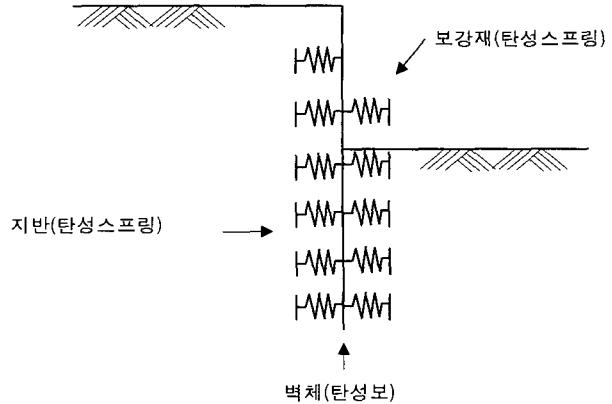


그림 1. 탄소성보법을 이용한 벽체의 모델링

할 수 있다(Kim, 1993).

$$EI \frac{d^4y(x)}{dx^4} = P(x) \quad (1)$$

$$P(x) = q - K_h y(x) \quad (2)$$

보강재가 설치된 경우 흙의 지반반력계수를  $K_h$ , 보강재의 축방향강성을  $AE'$ , 보강재의 설치간격을  $S$ , 보강재의 길이를  $L$ , 보강재의 설치각도를  $\theta$ 라 하면  $P(x)$ 는 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P(x) = q - K_h y(x) - \frac{AE'}{LS} \cos \theta \cdot y^* \quad (3)$$

여기서,  $y^*$ 는 보강재가 설치된 이후 발생한 벽체의 변위이다.

### 2.2 하중-변위 곡선의 작성

벽체의 변위 산정을 위하여 벽체 전면과 배면부의 지반 거동을 하중-변위 곡선을 이용하여 모델링하고 벽체의 변위에 따른 지반반력계수와 토압을 하중-변위 곡선으로부터 산정하였다. 벽체의 변위가 없는 경우에는 정지토압  $P_0$ 가 벽체에 작용하게 된다. 벽체가 양의 방향으로 움직인다면 벽체에 작용하는 횡토압은 감소하며, 수평변위가 한계주동수평변위  $y_a$ 에 이르면 주동토압  $P_a$ 가 벽체에 작용하게 된다. 반면 벽체가 음의 방향으로 이동할 경우 횡토압은 증가하며, 벽체의 변위가 한계수동수평변위  $y_p$ 에 이르면 수동토압  $P_p$ 가 벽체에 작용한다. 그림 2는 흙막이 벽 주변지반의 하중-변위 곡선을 도시한 것이다. 실선은 실제 지반의 하중-변위 관계를 나타낸 것이며, 이를 단순화하여 점선과 같은 하중-변위 곡선을 모델링하였다(김수일 등, 1994).

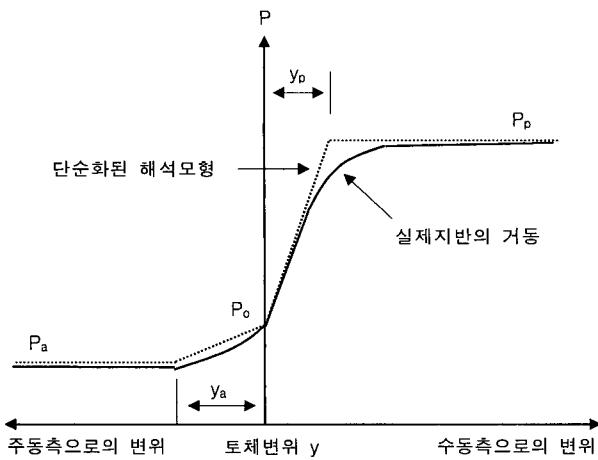


그림 2. 지반의 하중-변위 곡선 모델링

### 3. 변위증분을 이용한 흙막이 벽의 역해석

#### 3.1 최적화 기법

일반적으로 공학적 문제에서 변수의 종류는 설계변수와 응답변수로 구분할 수 있다. 정해석은 설계변수가 주어진 상태에서 응답변수를 구하는 과정이며, 역해석은 응답변수를 측정하여 설계변수를 추정하는 과정이다. 이때 응답변수는 설계변수의 함수이므로 지반을 다루는 문제의 경우 역해석은 일반적으로 비선형문제가 된다(Bazaraa, et al., 1993). 비선형계획문제를 푸는 한 가지 방법으로서 비선형문제를 일련의 선형문제로 바꾸어서 해결할 수 있다. 즉, 특정 문제를 선형화하여 이를 선형계획법들을 통해 해를 구하고, 이렇게 얻은 근사해에서 정확한 해를 얻을 때까지 다시 선형화하여 새로운 선형계획문제를 풀 수 있다. 이러한 과정을 순차선형계획(sequential linear programming, SLP)이라 한다. 일반적으로 선형문제의 해석을 위해서는 simplex 알고리즘을 사용하고 있으나, 본 연구에서 적용한 순차선형계획법에서는 선형문제를 좀 더 정확하고 잘 해석하기 위해, 개선된 유용방향법(modified method of feasible direction)을 사용하였다(Arai, et al., 1983; Arora, 1989).

그림 3은 순차선형계획을 그림을 통해 설명한 것으로 초기 설계값  $X^1$ 에서 목적함수와 제약조건은 함수를 직선으로 표현하기 위해 선형화되어있다. 이 선형문제의 최적값이 구해지고 이 최적값은 비선형 최적값에 다시 근사하게 나타난다. 그러나, 만약 이러한 최적점에서 다시 선형화시키고 이과정을 되풀이하면 몇 번의 반복과정을 거쳐 구하고자 하는 정확한 최적값을 구할 수 있게 된다(Vanderplaatts, 1984).

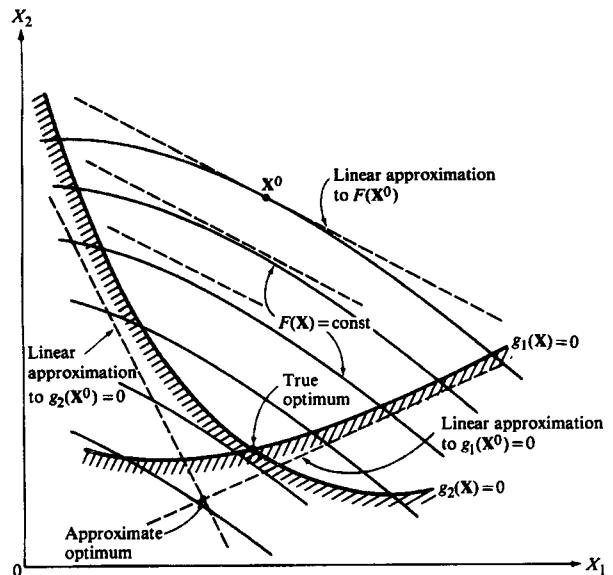


그림 3. 선형화된 문제

#### 3.2 단계별 변위증분을 이용한 목적함수의 구성

흙막이 벽에서의 역해석은 현 단계까지의 계측자료를 이용하여 현 단계 및 차기 단계에서의 구조물의 안정성 확보를 주목적으로 해석대상지반의 물성을 추정하는 것으로 크게 단단계 역해석과 다단계 역해석으로 나눌 수 있다. 단단계 역해석 기법은 해석대상 굴착단계의 계측결과만을 입력자료로 하기 때문에 이전 단계의 상태변화를 반영할 수 없으며 해의 유일성을 보장할 수 없는 단점을 갖고 있다. 반면 흙막이 벽의 굴착단계별 역해석을 통해 보다 정확한 결과를 얻기 위하여 사용되는 모든 굴착 단계의 측정치와 예측결과의 오차를 최소화하는 다단계 해석 기법은 전 굴착단계의 측정치 모두를 입력자료로 하기 때문에 이론적으로는 전 굴착과정의 상태변화를 반영할 수 있는 장점을 가지고 있으며, 어느 정도 해의 유일성을 보장할 수 있다. 이를 위한 최소자승법에 의한 다단계 역해석의 목적함수는 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (D_{ij}^* - D_{ij})^2 \quad (4)$$

여기서,  $n$  : 역해석 대상 시공단계

$m$  : 계측점의 수

$D_{ij}^*$  : i 시공단계의 j지점 계측변위

$D_{ij}$  : i 시공단계의 j지점 예측변위

그러나 이러한 장점을 가지고 불구하고 이와같은 해석방법 역시 계측상 오차의 누적이나 임의의 굴착 단계에서 벽체의 강성 및 지반물성에 의해 발생한 변위가 아닌

특이 변위가 발생했을 때에는 이의 누적으로 인하여 정확한 해를 얻는 것이 불가능하다.

본 연구에서는 이러한 단점을 보완하기 위해 j 단계의 계측변위를 이용한 역해석 시 j-1 단계의 계측변위로부터 실제 발생한 변위, 즉 변위증분을 역해석 대상으로 삼아 실제 현장의 지반물성을 정확히 산정하고 실제 변위에 근접한 해석을 하기 위해 연구를 수행하였다. 식(5)는 본 연구에서 제안한 역해석 기법에 의한 목적함수를 나타낸 것이다.

$$F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\Delta D_{ij}^* - \Delta D_{ij})^2 \quad (5)$$

여기서, n : 역해석 대상 시공단계

m : 계측점의 수

$\Delta D_{ij}^*$  : i 시공단계의 j 지점에서의 계측 변위증분

$\Delta D_{ij}$  : i 시공단계의 j 지점에서의 예측 변위증분

또한, 본 연구에서는 계측된 변위나 하중으로부터 흙막이 벽이 위치한 지반의 비선형적인 거동 특성을 표현할 수 있는 비선형 해석에 필요한 설계변수를 최적화하고자 하였다. 해석벽체의 거동에 영향을 주는 주요 인자로는 벽체의 강성, 토압계수 및 지반반력계수를 들 수 있다. 일반적으로 벽체의 강성은 실제 시공시 규격과 허용응력에 맞추어 생산된 강재가 사용되므로 그 변화 범위가 작고 신뢰성이 높다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 지반의 하중-변위곡선을 구성하는 변수인 주동토압계수, 정지토압계수, 수동토압계수와 지반반력계수

를 역해석 대상으로 선정하였다.

### 3.3 역해석 제약조건

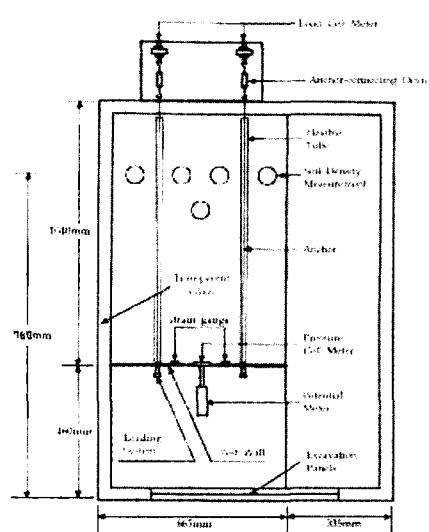
본 연구에서 개발한 변위증분을 이용한 역해석 프로그램의 적용시 제약조건은 다음과 같다.

- (1) 흙막이 벽의 보강재가 위치하는 땅장의 흙에 의한 변형은 고려하지 않는다.
- (2) 역해석 시 절대변위가 아닌 시공단계 별 변위증분을 사용하며, 특정변위량만을 만족시키는 특이해를 배제하기 위해 2개 이상의 단계별 변위증분을 사용한다.
- (3) 역해석 대상은 암반층을 제외한 일반토사층으로 한다.
- (4) 벽체에 작용하는 하중은 굴착에 의한 벽체변형으로 야기되는 하중만을 고려한다.

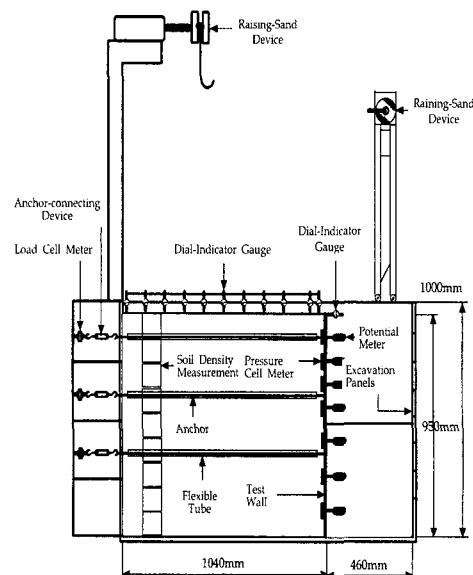
## 4. 개발된 역해석 프로그램의 검증을 위한 굴착 모형실험

### 4.1 흙막이 벽 모형토조의 제작 및 계측장비

모형토조의 크기는 가로 1.0m × 세로 1.5m × 높이 1.0m로, 흙막이 벽 측면에 아크릴로 된 투명창을 설치하여 흙막이 벽 굴착에 따른 지반의 거동을 관찰할 수 있도록 하였다. 폭 66.5mm × 높이 950mm의 아크릴 재



(a) 평면도



(b) 횡단면도

그림 4. 굴착 모형실험을 위한 모형토조

표 1. 모형실험용 벽체의 종류 및 제원

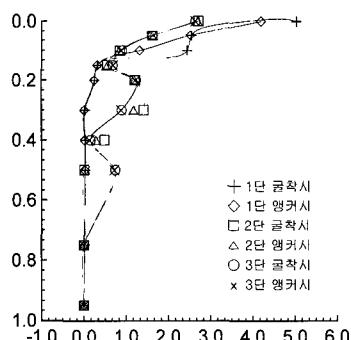
계측사례	두께 (mm)	탄성계수 ( $t/m^2$ )	단면2차모멘트 ( $m^4$ )	휨강성 EI ( $t/m^2$ )
#1	3.976	$2.72 \times 10^5$	$5.24 \times 10^{-9}$	$3.0 \times 10^{-4}$
#2	1.769	$2.65 \times 10^5$	$4.61 \times 10^{-10}$	$3.5 \times 10^{-5}$
#3	3.976	$2.72 \times 10^5$	$5.24 \times 10^{-9}$	$3.0 \times 10^{-4}$
#4	2.876	$2.70 \times 10^5$	$1.99 \times 10^{-9}$	$1.4 \times 10^{-4}$

표 2. 모형실험용 앵커의 제원

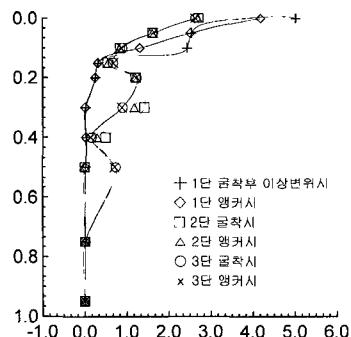
계측사례	단면적 ( $mm^2$ )	자유장(m)	탄성계수 ( $t/m^2$ )
#1, #2, #3, #4	0.385	1.04	$9.47 \times 10^6$

질 흙막이 벽 설치를 위해 모형토조의 내부에는 가로 66.5cm 지점에 세로방향 벽체를 설치하였다. 또한 흙막이 벽 굴착측에 위치한 토조벽에는 굴착시 발생한 토사 를 벽체거동에 영향을 주지 않고 효율적으로 제거할 수 있도록 격벽을 설치하였다. 그림 4는 본 실험에 사용된 모형토조의 평면도와 횡단면도를 도시한 것이다.

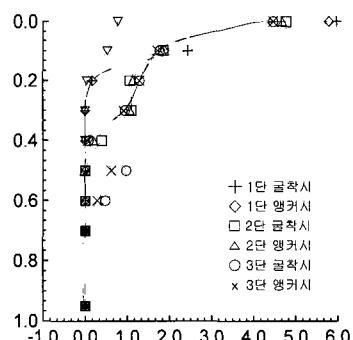
모형실험을 위해 사용된 지반재료로는 지반의 거동을 명확히 알 수 있는 모래인 주문진 표준사를 사용하였으며, 삼축압축시험을 실시한 결과 점착력은  $0 t/m^2$ 이고 내부마찰각은  $38^\circ$ 로 산정되었다. 표 1은 벽체로 사용된 아크릴판의 종류별 제원을, 표 2는 앵커의 제원을 나타낸 것이다.



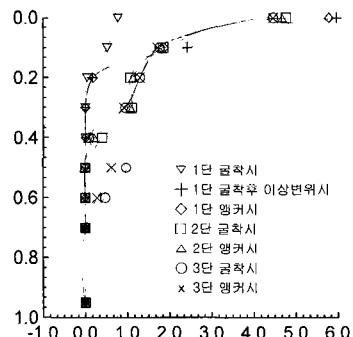
(a) 계측사례 #1



(c) 계측사례 #3



(b) 계측사례 #2



(d) 계측사례 #4

그림 5. 굴착단계별 계측변위

#### 4.2 모형토조 계측사례를 이용한 검증

모형실험을 통하여 실제 계측자료를 이용하여 개발된 역해석 프로그램을 검증하기 위해 다단계 굴착실험을 실시하여 얻어진 4개의 계측사례에 대한 역해석을 수행하였다. 그 중 2개 사례는 정상적인 굴착과정에서의 계측자료를, 나머지 2개 사례는 굴착 중 이상변위가 발생한 계측자료를 사용하여 본 연구에서 제안한 역해석 기법의

표 3. 모형실험의 계측사례별 시공단계

계측사례	단계	시공단계
#1, #2	1	1단 굴착 (15cm)
	2	1단 앵커 설치 (10cm)
	3	2단 굴착 (40cm)
	4	2단 앵커 설치 (35cm)
	5	3단 굴착 (65cm)
	6	3단 앵커 설치 (60cm)
#3, #4	1	1단 굴착 (15cm)
	2	인위적인 이상변위 야기
	3	1단 앵커 설치 (10cm)
	4	2단 굴착 (40cm)
	5	2단 앵커 설치 (35cm)
	6	3단 굴착 (65cm)
	7	3단 앵커 설치 (60cm)

타당성을 검증하였다. 이상변위는 벽체상단에 인위적인 외력을 가하는 방법과 배면에 상재하중을 가하는 방법으로 발생시켰다. 표 3은 각각의 계측사례에서의 시공단계를 나타낸 것이다. 지반의 깊이별 단위중량을 측정하기 위해 모형토조의 성토단계시 배면측 토체에 단위중량 측정용기를 설치하였다. 단위중량 측정용기는 직경 7.5cm, 높이 5cm, 중량 27.8gr.의 알루미늄캔을 이용하였으며, 실험이 끝난 후 단위중량 측정용기를 회수하여 시료의

단위중량을 깊이별로 측정하였다. 단위중량 측정결과는 표 4와 같으며, 그림 5는 모형실험에서 측정된 굴착단계별 계측변위를 계측사례별로 도시한 것이다.

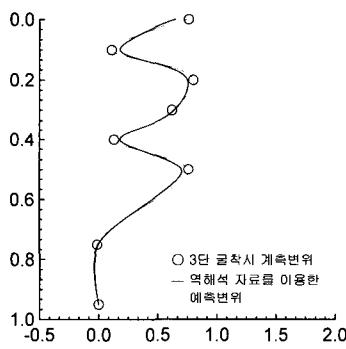
계측자료중 1단 굴착 및 2단 굴착시의 단계별 벽체 변위증분을 이용하여 지반반력계수 및 토압계수에 대한 역해석을 실시하였다. 계측사례 #3, #4에서는 굴착시 공단계중 벽체의 이상거동 발생에 대한 역해석을 수행하기 위하여 1단 굴착 후 인위적인 이상변위를 발생시

표 4. 단위중량 측정결과 (단위: cm, t/m<sup>3</sup>)

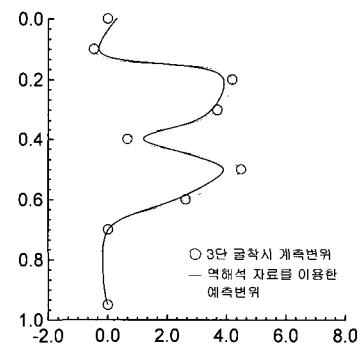
사례	깊이	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~80	80~95
계측사례 #1		1.571	1.591	1.587	1.625	1.615	1.620	1.626	1.609	1.611
계측사례 #2		1.599	1.598	1.620	1.627	1.639	1.654	1.630	1.630	1.618
계측사례 #3		1.566	1.588	1.599	1.610	1.610	1.610	1.717	1.601	1.608
계측사례 #4		1.566	1.588	1.599	1.610	1.610	1.610	1.717	1.601	1.608

표 5. 이론식과 역해석에 의해 산정된 토압계수 및 지반반력계수

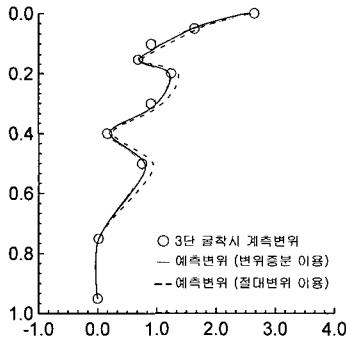
대상변수	이론식에 의한 값	역해석에 의한 값					
		계측사례 #1	계측사례 #2	계측사례 #3		계측사례 #4	
		기준방법;식(4)	본 연구;식(5)	기준방법;식(4)	본 연구;식(5)	기준방법;식(4)	본 연구;식(5)
K <sub>a</sub>	0.238	0.221	0.199	0.431	0.242	0.442	0.243
K <sub>o</sub>	0.384	0.343	0.352	0.532	0.397	0.541	0.411
K <sub>p</sub>	4.024	3.883	3.795	—	—	3.253	4.102
K <sub>h</sub> (t/m <sup>3</sup> )	—	2,340	2,370	1,934	2,340	1,973	2,396



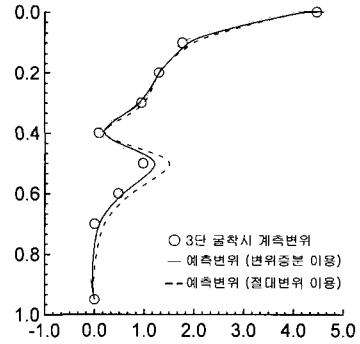
(a) 계측사례 #1



(b) 계측사례 #2



(c) 계측사례 #3



(d) 계측사례 #4

그림 6. 계측 변위와 역해석 자료를 이용한 예측변위 비교

표 6. 이상변위 발생시 본 연구과 기존연구의 변위예측 비교 (계측사례 #3)

깊이(m)	계측변위(mm)	본 연구 (변위증분 이용)		기존 연구 (절대변위 이용)	
		예측변위(mm)	오차(%)	예측변위(mm)	오차(%)
0.95	0.00	0.00	0.0	0.00	0.0
0.75	0.00	0.00	0.0	0.00	0.0
0.50	0.76	0.82	7.9	0.92	20.4
0.40	0.17	0.18	5.9	0.20	17.6
0.30	0.90	1.00	11.1	1.09	21.1
0.20	1.24	1.18	4.8	1.38	11.3
0.15	0.70	0.70	0.0	0.72	2.9
0.10	0.90	1.08	20.0	1.17	30.0
0.05	1.70	1.66	2.4	1.70	0.0
0.00	2.60	2.60	0.0	2.60	0.0

표 7. 이상변위 발생시 본 연구과 기존연구의 변위예측 비교 (계측사례 #4)

깊이(m)	계측변위(mm)	본 연구 (변위증분 이용)		기존 연구 (절대변위 이용)	
		예측변위(mm)	오차(%)	예측변위(mm)	오차(%)
0.95	0.00	0.00	0.0	0.00	0.0
0.70	0.00	0.12	-	0.18	0.0
0.60	0.50	0.58	16.0	0.76	52.0
0.50	1.00	1.18	18.0	1.50	50.0
0.40	0.10	0.18	80.0	0.18	80.0
0.30	0.98	0.94	4.1	1.03	5.1
0.20	1.33	1.33	0.0	1.33	0.0
0.10	1.80	1.98	10.0	2.00	11.1
0.00	4.50	4.50	0.0	4.50	0.0

겼다. 표 5는 삼축압축시험에 의한 물성치를 Rankine의 식 및 Jacky의 식에 대입하여 구한 토압계수와 지반반력계수를 본 역해석 기법에 의해 산정된 값들과 비교한 것이다. 그림 6은 본 역해석 기법에 의해 구해진 토압계수를 이용하여 예측된 3단굴착시의 벽체변형과 실제 변형계측치를 도시한 것으로 정확한 토압계수와 지반반력계수를 알지 못하더라도 시공단계별로 연속된 계측자료를 이용하여 지반물성을 산정하므로써, 차기 단계의 변형을 비교적 정확히 예측할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 계측사례 #3, #4에서와 같이 벽체에 이상변위가 발생하였을 경우 벽체의 절대변위를 이용한 기존의 역해석에 의한 예측변위보다 변위증분을 역해석에 이용한 본 연구의 예측변위가 실측변위에 보다 근접한 결과를 나타냄을 알 수 있다. 표 6과 7은 이상변위 발생에 해당되는 계측사례 #3, #4에 대해 변위증분을 이용하여 변위를 예측하는 경우, 예측값의 개선 정도를 정량적으로 분석하여 정리한 것이다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 흙막이 벽체의 시공시 계측자료를 이용한 역해석을 통해 차기단계의 벽체변위를 예측할 수 있는 흙막이 벽체의 거동해석 프로그램을 개발하였다. 역해석 프로그램은 시공시 임의의 변위에 의한 오차를 배제하고, 정확한 지반물성 산정을 위해 각 단계별 변위의 증분을 역해석 대상으로 하여 차기단계의 거동을 정확히 예측하도록 하였다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 흙의 비선형 거동을 고려한 하중-변위곡선을 산정하고, 흙막이 벽은 유한차분요소로 모형화하여 벽체의 거동을 해석할 수 있는 정해석 프로그램을 개발하였다.
- (2) 흙막이 벽의 굴착단계별 계측결과를 이용하여 흙막이 벽 주변 지반의 토압계수 및 지반반력계수를 추정할 수 있는 역해석 프로그램을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 역해석 프로그램은 Winkler해법을

기본으로 하여 지반의 하중-변위곡선을 적용한 정해석 프로그램에 직접탐색법 중 순차선형계획법을 조합하였다. 국내의 대표적인 현장조건을 입력자료로 한 정해석 결과를 실측변위로 가정하고 실시한 역해석 결과 및 모형토조실험을 이용한 역해석 결과를 통하여 본 연구에서 개발된 역해석 프로그램의 신뢰성을 검증하였다.

(3) 본 연구에서 개발된 변위증분을 이용한 역해석 기법이 이상거동에 의한 변위발생시에도 효율적임을 보이기 위해 모형토조실험에 의한 정밀 계측시 이상변위를 야기시켰다. 이상변위가 있는 계측자료를 역해석 기법에 적용하고 차기단계의 변위를 예측한 후 실제 변위와 비교 검토하므로써 본 연구의 역해석 기법이 지반물성에 의한 변위가 아닌 이상거동에 의한 변위가 발생하여도 효율적임을 밝혔다.

## 참 고 문 헌

1. 김수일, 정상섭, 장범수 (1994), “P-y특성곡선의 Coupling을 고려한 토류벽의 거동해석”, 대한토목학회 논문집, 제14권, 제3호, pp.553-563.
2. 김학문, 이봉열, 김명훈, 엄진석, 안명운 (1997), “깊은굴착시 토류벽체의 거동에 관한 모형실험 연구”, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 제3권, pp.367-370.
3. 김황 (1996), “지반반력계수 산정방법에 따른 토류벽의 굴착 단계별 거동 비교”, 석사학위 논문, 연세대학교.
4. 이해성, 정충기, 김재관, 김봉근 (1996), “탄소성 지반 스프링 모델에 의한 굴착 해석시 지반의 물성치 평가를 위한 역해석”, 대한토목학회 논문집, 제16권, 제5호, pp.561-571.
5. 장범수 (1997), “지반의 탄소성 하중-변위관계를 이용한 흙막이 벽의 역해석기법 개발”, 박사학위 논문, 연세대학교.
6. 최충식 (1996), “직접탐색법에 의한 굴착단계별 토류벽의 역해석”, 석사학위 논문, 연세대학교.
7. Akutagawa, S., Meek, J.L., and Brown, E.T. (1991), “The Back Analysis of In-situ Stresses in a Multiple Stage Excavation Problem”, *Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Balkema, Rotterdam, pp.937-942.
8. Arai, K., Otha, H. and Yasui, T. (1983), “Simple Optimization Techniques for Evaluating Deformation Moduli from Field Observations”, *Soils and Foundation*, 23(1).
9. Arora, J. S. (1989), *Introduction to Optimum Design*, McGraw-Hill, pp.347-371.
10. Bazaraa, M. S., Sherali, H. A. and Shetty, C. N. (1993), *Nonlinear Programming : Theory and Algorithms*, John Wiley & Sons. Inc.
11. Gioda, G. and Jurina, L. (1981), “Numerical Identification of Soil-Structure Interaction Pressures”, *International Journal of Numerical Analysis Methods in Geomechanics* 5, pp.33-56.
12. Gioda, G. and Sakurai, S. (1987), “Back Analysis Procedures for the Interpretation of Field Measurements in Geomechanics”, *International Journal of Numerical Analysis Methods Geomechanics* 11, pp.555-583.
13. Kim, N. (1993), A Beam-Column Method for Tieback Walls, Ph.D Dissertation, Texas A&M University.
14. Vanderplaats, G. N. (1984), *Numerical Optimization Techniques for Engineering Design*, McGraw-Hill, pp.153-177.

(접수일자 2001. 9. 20, 심사완료일 2003. 10. 14)