

다층지반에 근입된 흙막이 벽의 역해석에 관한 연구

Back Analysis of the Earth Wall in Multi-layered Subgrade

이승훈^{*1}

Lee, Seung-Hoon

김종민^{*2}

Kim, Jong-Min

김수일^{*3}

Kim, Soo-Il

장범수^{*4}

Chang, Buhm-Soo

Abstract

This paper presents a back-calculation technique for the prediction of the behavior of earth wall inserted in multi-layered soil deposit. The soil properties are back-calculated from the measured displacement at each construction stage and the behavior of earth wall for the next construction stage is predicted using back-calculated soil properties. For multi-layered soil deposit, the back-calculation would be very difficult due to the increase in the number of variables. In this study, to solve this difficulty, the back-calculation was performed successively from the lowest layer to the upper layers. An efficient elasto-plastic beam-column analysis was used for forward analysis to minimize the computation time of iterative back-calculation procedure. The coefficients of subgrade reaction and lateral earth pressure necessary for the formation of p-y curve were selected as back calculation variables, and to minimize the effect of abnormal behavior of the wall which might be caused by any unexpected action during construction, the difference between measured displacement increment and computed displacement increment at each construction stages is used as the objective function of optimization. The constrained sequential linear programming was used for the optimization technique to found values of variables minimizing the objective function. The proposed method in this study was verified using numerically generated data and measured field data.

요지

본 연구에서는 다층지반에 근입된 흙막이 벽의 단계별 계측변위로부터 각 층의 지반물성을 추정하고 이로부터 차기단계의 거동을 예측하기 위한 역해석 기법을 제안하였다. 지반이 다수의 층으로 구성되어 있을 경우 찾아야 할 대상변수가 많아지게 되며, 대상변수가 많아질수록 역해석에 상당한 무리가 따르게 된다. 이러한 층별 지반물성을 효율적으로 추정하기 위하여 최하단층부터 순차적으로 대상변수들을 찾아가는 방법을 이용하였다. 역해석은 상당량의 반복계산이 필요하기 때문에 정해석 방법으로는 해석시간이 짧고 시공단계별 해석이 가능한 탄소성보법을 사용하였다. 역해석 대상변수는 탄소성 하중-변위 곡선의 구성요소인 지반반력계수와 수평토압계수들을 취하였으며, 목적함수는 이상변위에 의한 오차를 최소화시키기 위하여 단계별 계측변위 증분과 해석변위 증분의 차이로 구성하였다. 목적함수를 최소화시키는 대상변수들을 찾기 위한 최적화 수법으로는 제약순차선형계획법을 이용하였다. 본 연구를 통하여 제안된 방법을 수치해석자료 및 현장계측자료를 이용하여 검증하였다.

Keywords : Back analysis, Beam-column analysis, Earth wall, Multi-layered subgrade, Optimization

*1 정희원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ., lsh2002@netian.net)

*2 정희원, 세종대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil Engrg., Sejong Univ.)

*3 정희원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

*4 정희원, 시설안전기술공단 기술개발지원실 (Member, Technical Development Div., Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation)

1. 서 론

기존의 흙막이 구조물의 해석은 단순히 지반조사 자료를 토대로 추정된 설계변수를 이용하여 수행되어져 왔다. 그러나 지반조사의 부정확성과 실제 시공현장에서 발생할 수 있는 수많은 불확실한 요소들로 인하여 해석을 통해 계산된 변위는 실제 현장에서 계측된 변위와는 큰 차이가 있는 경우가 많다. 지반조사 결과가 정확하더라도 해석모델의 제한성 때문에 흙막이 벽의 거동을 굴착단계별로 정확하게 예측한다는 것은 거의 불가능하다. 따라서 차기단계의 거동예측을 통한 정밀한 시공관리 및 안전성 확보를 위해서는 사용된 해석모델을 이용해서 실제의 거동을 정확히 예측할 수 있는 가장 적합한 입력변수의 추정이 필요하다. 이러한 입력변수의 추정은 역해석을 통해서 이루어지는데 역해석은 흙막이 벽의 거동을 대변할 수 있는 수치모델을 설정하고 입력변수를 변화시켜가면서 실제의 거동과 수치모델의 거동이 일치할 때의 변수를 찾는 과정이다. 따라서 역해석은 정해를 찾아가는 동안 수많은 반복계산을 필요로 하며, 많은 연구자들은 반복계산량을 최소화시키며 정해를 찾을 수 있는 탐색기법을 개발하기 위한 노력을 기울여왔다(Gioda, 1987 ; Akutagawa 등, 1991 ; 이해성 등, 1996).

대부분의 지반은 지반 물성이 다른 다수의 층으로 구성되어 있다. 최근 들어 지하공간 개발의 확대 및 고층 건물의 건설이 증가되어 깊은 굴착 심도에 대한 흙막이 구조물의 해석에 대한 중요성이 점차 증대되고 있다. 굴착심도가 깊어지게 되면 그만큼 다양한 지층이 해석 대상이 된다. 대상층의 수가 많아지면 역해석으로 구해야 할 대상변수의 수가 증가하여 정해를 구하기 위한 탐색에 많은 어려움이 따르게 되고 그 정확도 또한 감소하게 된다. 따라서 흙막이 구조물에 대한 정보화 시공을 실제적으로 구현하기 위해서는 다층지반에 대한 역해석 시 많은 대상변수를 효율적으로 정확하게 추정할 수 있는 기법의 개발이 필수적이다. 본 연구에서는 기존의 역해석 방법을 변형시켜 다수의 지층에 근입된 흙막이 구조물과 같이 많은 역해석 대상변수를 필요로 하는 경우에 적용할 수 있는 방법을 제안하였다.

2. 흙막이 구조물의 역해석

역해석은 수치모형의 미지량의 값을 결정하고 이를

실제 문제의 거동해석에 사용하였을 때, 해석된 결과가 현장계측의 결과와 가능한 동일하도록 미지량의 값을 수 정해가는 과정이라고 할 수 있다. 역해석은 최근 최적화 문제와 함께 다루어지면서 좀 더 체계적으로 지반공학적인 문제에 접근할 수 있게 되었다. 흙막이 구조물의 경우에는 추정하고자 하는 미지량인 설계변수로 지반물성이 나 지보재의 물성을 들 수 있으며, 실제의 거동을 대변하는 응답변수로는 흙막이 벽의 변위를 들 수 있다. 흙막이 구조물의 역해석은 수치모형과 현장에서 계측된 변위를 이용하여 지반물성을 추정하는 데 그 목적이 있다.

2.1 정해석 수치모형

흙막이 구조물의 정해석 수치모형은 지반의 물성과 구조물의 강성 등의 설계변수를 입력하여 굴착과 보강이 진행됨에 따른 각 단계에서의 거동을 응답변수로서 해석할 수 있어야 한다. 이러한 해석방법으로는 여러 가지가 있으나 현재 가장 많이 이용되고 있는 방법은 그림 1과 같이 분류된다(장범수, 1997). 고전토압론에 의한 해석법은 변위에 의존하는 횡토압의 변화를 적절히 고려할 수 없는 단점이 있으며, 유한요소 해석법은 복잡하고 해석시간이 길기 때문에 많은 반복계산을 필요로하는 역해석에는 부적합하다고 할 수 있다. 탄소성보법은 흙막이 벽체를 탄성보, 지보재를 탄성 스프링, 그리고 지반을 탄소성 스프링으로 모델링하며 시공단계에 따라 변화하는 응력이나 변형 및 굴착저면 이하의 토압을 적절하게 계산할 수 있는 방법으로 해석시간도 비교적 짧아 역해석시 정해석 수치모형으로 가장 많이 사용되고 있다(Kim, 1993).

2.2 역해석 알고리즘

흙막이 구조물의 역해석은 응답변수인 벽체의 변위를 측정하여 설계변수인 지반의 물성을 추정하는 과정이다. 계측결과와 해석결과와의 차이를 목적함수로 정의하고 반복계산을 통해 이를 최소화하는 설계변수를 찾기 위하여 최적화 기법이 사용된다. 목적함수 F 는 일반적으로 식 (1)과 같이 계측결과와 수치모형에 의한 해석결과간 차이의 절대값으로 정의한다.

$$F = \sum_{i=1}^m |D_i^* - D_i(p_m)| \quad (1)$$

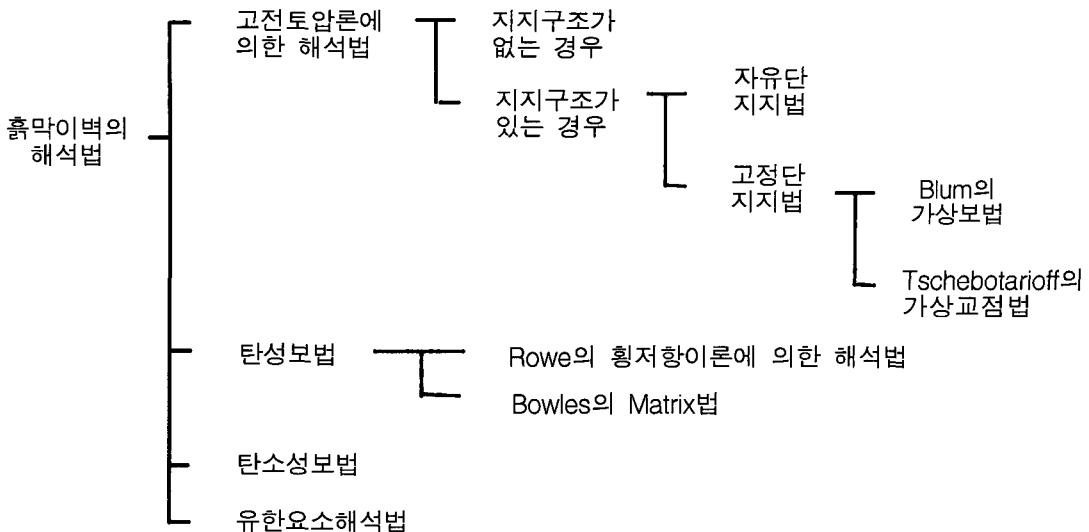


그림 1. 흙막이 벽의 해석방법

m 은 계측점의 수이고 D_i^* 는 i 번째 계측점에서 측정된 변위이다. $D_i(p_m)$ 은 설계변수 p_m 에 의해 해석된 i 번째 계측점에서의 변위이다.

최적화 기법은 크게 해석적 방법과 수치적 방법으로 구별되는데 흙막이 구조물을 비롯한 대부분의 공학적 문제들은 설계변수와 제약조건이 많고, 목적함수와 제약조건함수가 비선형이기 때문에 해석적 방법은 적절치 못하다. 수치적 방법은 식 (2)의 반복과정으로 표현할 수 있다. 각각의 반복단계 k 에서 목적함수와 제약조건함수의 경사도로부터 탐색방향 S^k 와 이동거리 α^k 를 계산하고 이에 따라 계측변위와 해석변위의 차이가 허용범위 이내에 들어올 때까지 설계변수 X^k 를 변화시킨다(류인선 등, 1999; Arora, 1989).

$$X^{k+1} = X^k + \alpha^k S^k \quad (2)$$

3. 다층지반에 근입된 흙막이 구조물의 역해석 기법

본 연구에서는 기존의 역해석 방법을 변형시켜 다수의 지층에 근입된 흙막이 구조물과 같이 많은 역해석 대상변수를 필요로하는 경우에 적용할 수 있는 방법을 제안하였다.

3.1 적용된 역해석 방법

역해석은 상당량의 반복계산이 필요하기 때문에 정

해석 방법으로는 해석시간이 짧고 시공단계별 해석이 가능한 탄소성보법을 사용하였다. 역해석 대상변수로는 벽체변위에 영향을 미치는 주요 설계변수를 선정해야 한다. 역해석 대상변수가 증가하게 되면 해석시간이 증가하게 되고 최적화 탐색에 어려움이 따르게 된다. 지반의 점착력과 내부마찰각만을 대상변수로 이용하는 경우에는 두 가지 변수에 의하여 하중-변위곡선이 결정지워지기 때문에 다양한 형태의 실제 거동을 모사하기에는 다소 무리가 따른다. 단위중량은 지반조사나 경험자료를 통하여 구할 수가 있고, 그 변화폭이 크지 않은 반면 역해석 대상변수에 포함시켜 되면 그 영향이 너무 커서 다른 대상변수들이 특이해에 빠지게 된다. 이러한 경우 대상단계의 변위는 맞출 수 있으나 차기단계 예측 시 큰 오류가 생기게 된다. 따라서 본 연구에서는 지반의 탄소성 하중-변위 곡선을 구성하는 요소인 지반반력 계수와 주동토압계수, 정지토압계수, 수동토압계수를 역해석 대상변수로 취하였다(문준식, 1998).

식 (2)의 반복과정을 통해 역해석 대상변수를 탐색하기 위한 최적화 기법으로는 개선된 유용방향법을 적용한 순차선형계획법을 사용하였다. 순차선형계획법은 비선형의 목적함수와 제약조건함수를 반복단계마다 근사적인 선형문제화하여 탐색방향과 이동거리를 산정하고 해의 수렴도가 만족될 때까지 이 과정을 반복한다. 유용방향법은 제약최적화 문제를 해석하는 방법들 중 가장 먼저 개발된 방법으로 이 방법은 하나의 유용설계값에서 또 하나의 유용설계값으로 이동하는 것이다. 개선된

유용방향법은 탐색방향이 제약조건에서 벗어난 경우 견인계수를 이용하여 탐색 방향을 적절히 수정해주는 방법이다(Vanderplaatts, 1984).

3.2 목적함수의 구성 및 역해석 과정

본 연구에서는 대상변수의 변화에 대한 민감도가 작은 최하단층부터 충별로 순차적인 역해석을 수행하는 방법을 사용하였다. 이 방법은 지층의 수가 증가하더라도 충별로 최적화가 적용되기 때문에 대상변수의 증가로 인한 탐색의 어려움을 방지할 수 있다. 목적함수는 지층별로 구성되며 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = \sum_{i=1}^n |\Delta D_i^* - \Delta D_i| \quad (3)$$

여기서, 1은 대상층의 하단 측점이고 u는 대상층의 상단 측점이다. ΔD_i^* 는 i지점에서의 계측변위 증분이고 ΔD_i 는 i지점에서의 예측변위 증분이다. 목적함수 구성 시 변위의 증분을 이용한 것은 예측할 수 없는 이상변위가 계측치에 포함되어있을 경우 이로 인한 오차의 누적을 피하기 위한 것이다(장범수, 1997). 본 연구에서 제안한 다층지반 역해석 과정을 요약하면 다음과 같다.

- 단계 1. 각 층의 설계변수 초기화
- 단계 2. 역해석 대상층을 최하단층으로 설정
- 단계 3. 대상층의 목적함수 구성
- 단계 4. 최적화 과정 수행
- 단계 5. 최적화 과정으로부터 결정된 값으로 대상층의 변수를 대체
- 단계 6. 역해석 대상층을 위로 이동하여 단계 3~단계 5의 과정 반복
- 단계 7. 벽체 전체에 걸친 변위 증분의 오차가 소정의 수렴단계 이내에 들어 올 때까지 단계 2~단계 6의 과정 반복

4. 수치해석 자료 및 현장계측 자료에 의한 검증

본 연구에서 제안한 다층지반 역해석 기법의 검증을 위하여 수치해석자료를 이용하였으며, 그 적용성을 검토하기 위하여 현장계측자료를 이용하였다.

4.1 수치해석 자료에 의한 수치적 검증

흙막이 구조물 및 지반물성에 대한 해석모델을 설정하고 대상모델에 대하여 정해석으로부터 변위를 산정하였다. 산정된 변위를 계측변위로 가정하고 제안된 방법을 이용하여 각 층의 지반물성에 대한 역해석을 수행하였다. 벽체는 염지말뚝식 토류판으로 가정하였으며, 지반의 입력물성 및 벽체와 베텀보의 제원을 표 1~표 3과 같이 설정하였다.

그림 2는 본 연구에 사용된 해석모델의 수치해석 결과로부터 가정된 단계별 변위이다. 1단계는 2.5m를 굴착한 후의 변위이고, 2단계는 1.5m 깊이에 1단 베텀보 설치 후 5m까지 굴착한 후의 변위이다. 3단계는 4m 깊이에 2단 베텀보를 설치한 후 8m까지 굴착한 후의 변위이다. 그림 3은 제안된 방법에 의한 역해석 과정으로 최하단층에서부터 순차적으로 각 층의 지반물성을 역해석하면서 계산된 변위와 가정한 변위를 비교하여 나타낸 것이다. 최하단층부터 순차적으로 충별 역해석을 하는 동안 가정한 변위와 계산된 변위의 차이가 감소하는 것을 알 수 있다. 목적함수가 허용범위 이내에 들어올 때까지 이러한 과정을 반복하여 지반물성을 추정하였으며, 그 결과로부터 예측된 차기단계 변위를 가정된 변위와 비교하여 그림 4에 나타내었다. 표 4는 역해석에 사용된 초기치와 추정된 지반물성을 가정한 정해와 비교하여 나타낸 것이다. 역해석시 총 반복계산수는 272회로 큰 무리없이 비교적 근사한 값의 지반물성을 추정할 수 있

표 1. 수치적 검증에 사용된 지반의 입력물성

구 분	깊이(m)	$\gamma t(t/m^3)$	$\gamma sat(t/m^3)$	$\phi(^{\circ})$	$c(t/m^2)$
LAYER 1	3.0	1.7	1.8	30.0	0.0
LAYER 2	6.0	1.6	1.8	10.0	1.0
LAYER 3	9.0	1.7	1.9	25.0	1.5
LAYER 4	20.0	2.0	2.2	35.0	2.0

표 2. 수치적 검증에 사용된 벽체의 제원

말뚝길이 (m)	단면적 (m^2)	$E(t/m^2)$	$I(m^4)$	설치간격 (m)	말뚝폭 (m)
15.0	8.336×10^{-3}	2.1×10^7	1.33×10^{-4}	1.8	0.3

표 3. 수치적 검증에 사용된 베텀보의 제원

설치간격(m)	단면적 (m^2)	$E(t/m^2)$	$L(m)$	초기인장력(t)
4.0	1.198×10^{-2}	2.1×10^7	15.0	30

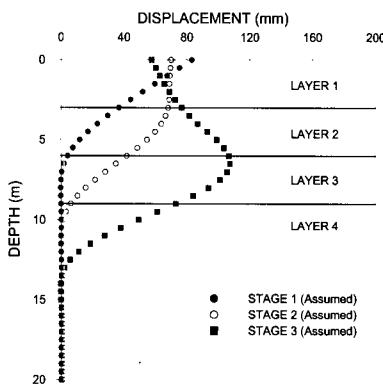


그림 2. 수치해석으로부터 가정된 변위

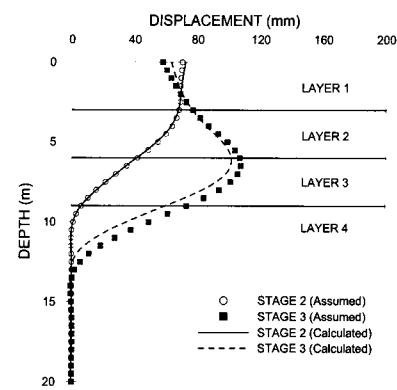


그림 4. 수치해석자료의 역해석으로부터 차기단계 거동 예측결과

표 4. 역해석 대상변수의 정해와 초기치 및 수렴치

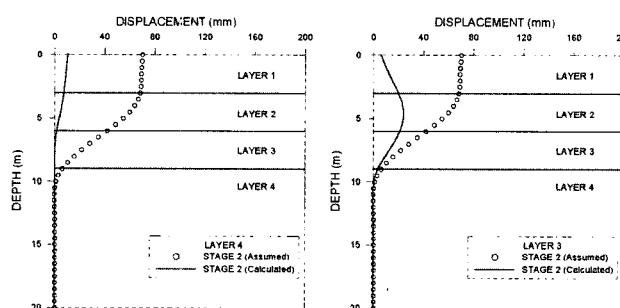
대상층	대상변수	하한치	상한치	정해	초기치	수렴치
LAYER 1	K_a	0.15	0.45	0.3	0.2	0.38
	K_o	0.25	0.75	0.5	0.7	0.59
	K_p	1.5	4.5	3.0	4.0	3.15
	K_h	400	1600	800	1300	928
LAYER 2	K_a	0.35	1.0	0.7	0.5	0.72
	K_o	0.4	1.0	0.8	0.9	0.79
	K_p	1.0	2.0	1.5	1.8	1.81
	K_h	250	600	500	800	597
LAYER 3	K_a	0.2	0.6	0.4	0.3	0.60
	K_o	0.3	0.9	0.6	0.7	0.62
	K_p	1.7	3.3	2.5	3.0	1.70
	K_h	800	2200	1500	2000	1187
LAYER 4	K_a	0.1	0.4	0.2	0.1	0.15
	K_o	0.2	0.6	0.4	0.6	0.26
	K_p	2.7	5.0	3.5	5.0	5.00
	K_h	1000	3000	2000	2500	2995

었으며, 그 결과로부터 예측된 차기단계의 변위 또한 가정된 변위와 큰 차이를 보이지 않았다.

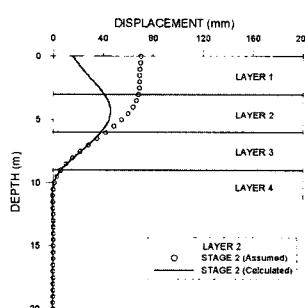
4.2 현장계측자료를 이용한 다층지반 역해석 기법의 검증

제안된 다층지반 역해석 기법의 현장 적용성을 검증하기 위하여 문현조사 및 현장방문을 통해 얻은 계측자료를 이용하였다. 싱가폴 지하철 MRT 북동선(north east line)에서 계측한 자료와 대만 World Trade Center 빌딩 건축현장에서 계측한 자료를 이용하였다.

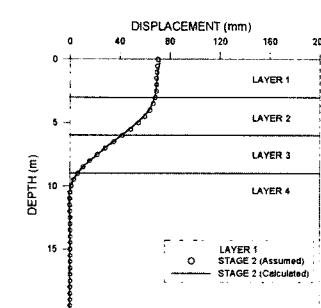
표 5는 싱가폴 대상구간의 흙막이 구조물 설계시 사용된 지층별 물성이다. 사용된 공법은 염지말뚝식 토류판 공법으로 벽체길이는 25m이다. 염지말뚝으로 사용된 H형강의 탄성계수는 $2.1 \times 10^7 \text{ t/m}^2$ 이고 단면 2차 모멘트는 0.000403 m^4 이다. 사용된 보강재는 두 개의 H형강을 합성한 베텀보로 단면적이 0.0209 m^2 이다. 그림 5는 현장에서 계측된 단계별 벽체변위를 도시한 것이다. 1단계는 5.9m를 굴착한 후의 변위이며, 2단계는 0.5m



(a) 4층에 대한 역해석 결과



(b) 3층에 대한 역해석 결과



(c) 2층에 대한 역해석 결과

그림 3. 수치해석자료에 의한 다층지반의 역해석 과정

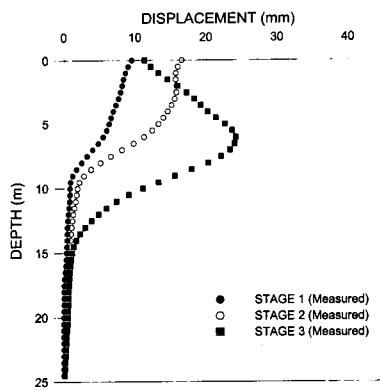


그림 5. 싱가풀 MRT 현장의 단계별 계측변위

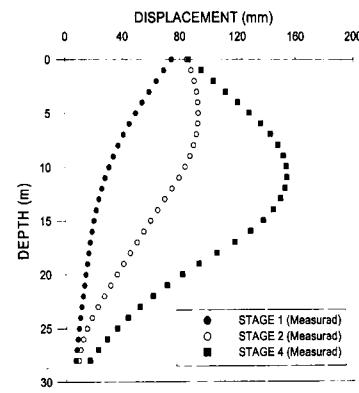


그림 7. 대만 World Trade Center 현장의 단계별 계측변위

표 5. 싱가풀 MRT 현장 흙막이 구조를 설계시 사용된 지층별 물성

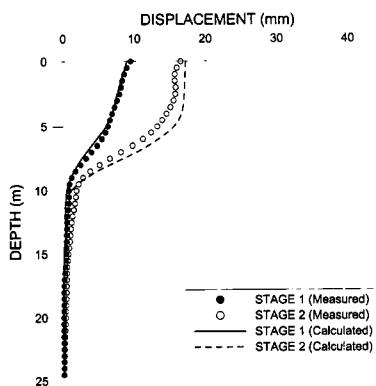
지층	깊이(m)	$\gamma_t(t/m^3)$	$c(t/m^2)$	$\phi(^{\circ})$	$K_h(t/m^3)$
Fill	2.0	1.94	0.0	33.0	2234
Clayey silt	4.0	1.89	2.55	0.0	2234
Peaty clay	9.0	1.53	1.53	0.0	1829
Weathered rock	15.0	2.11	38.3	40.0	6867
Rock	-	2.35	102	45.0	9559

깊이에 1단 베텀보를 설치하고 7.7m까지 굴착한 후의 변위이다. 3단계는 4.5m 깊이에 2단 베텀보를 설치하고 13.1m까지 굴착한 후의 변위이다.

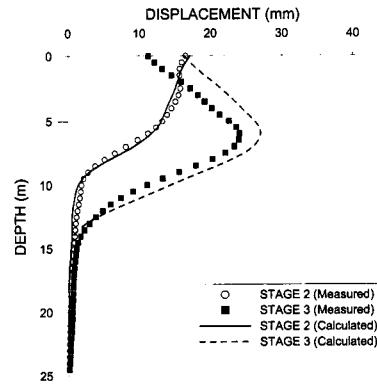
그림 6의 (a)는 1단계 변위를 이용한 역해석으로부터 2단계 변위를 예측한 결과를 도시한 것이고, 그림 6의 (b)는 2단계 변위를 이용한 역해석으로부터 3단계 변위를 예측한 결과를 도시한 것이다. 역해석으로부터 산정된 변위와 계측변위가 거의 일치하였으며, 차기단계 거동예측도 비교적 정확하였다. 해석결과를 통하여 본 연구에서 제안한 다층지반 역해석 기법이 타당성이 있음을 입증하였다. 또한 역해석시 총 반복계산수는 317회와 196회로 해석시간에도 큰 무리가 없음을 알 수 있었다.

대만 World Trade Center 현장은 2.9m까지는 점토질 실트로 된 매립층이고 그 이하는 실트질 점토층으로 구성되어 있다. 사용된 공법은 베텀보로 지지된 지하연속벽으로 벽체길이는 30m이다. 탄성계수는 $1.938 \times 10^6 t/m^2$ 이고 단면 2차 모멘트는 $0.0286 m^4$ 이다. 사용된 베텀보의 강성은 $1455.54 t/m^2$ 이다. 그림 7은 현장에서 계측된 단계별 벽체변위를 도시한 것이다. 1단계는 2.95m를 굴착한 후의 변위이며, 2단계는 2.9m 깊이에 베텀보를 설치하고 7.0m까지 굴착한 후의 변위이다. 4단계는 5.7m와 9.2m 깊이에 베텀보를 설치하고 12.3m까지 굴착한 후의 변위이다.

그림 8의 (a)는 1단계 변위를 이용한 역해석으로부터 2단계 변위를 예측한 결과를 도시한 것이고, 그림 8의 (b)는 2단계 변위를 이용한 역해석으로부터 3단계 변위를 예측한 결과를 도시한 것이다. 역해석시 총반복계산수는 282회와 199회로 해석시간상의 큰 문제는 없었다.

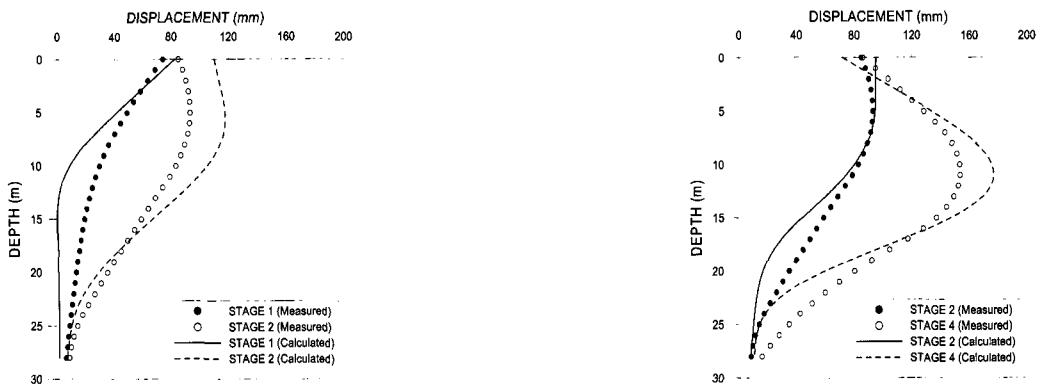


(a) 1단계 변위에 대한 역해석으로부터 2단계 변위 예측



(b) 2단계 변위에 대한 역해석으로부터 3단계 변위 예측

그림 6. 싱가풀 MRT 현장에 대한 역해석 및 차기단계 변위예측 결과



(a) 1단계 변위에 대한 역해석으로부터 2단계 변위 예측

(b) 2단계 변위에 대한 역해석으로부터 3단계 변위 예측

그림 8. 대만 World Trade Center 현장에 대한 역해석 및 차기단계 변위예측 결과

대상단면의 자료에서 3단계 굴착시의 변위가 누락되어 2단계 변위 역해석 결과로부터 4단계 변위를 직접 예측하였다. 싱가폴 대상구간에 비해서 역해석시 변위오차 최소화 및 차기단계 예측치의 정확도가 다소 떨어지지만 대만 대상구간은 상대적으로 변위가 크게 발생되었기 때문으로 판단된다. 굴착단 하부의 변위오차 수렴도가 굴착단 상부보다 떨어지는 것을 볼 수 있는데, 이는 탄소성보법 해석이 굴착부의 응기에 의한 하부 거동을 해석할 수 없기 때문으로 사료된다. 굴착단 상부에서는 예측치가 계측치보다 다소 크게 산정되었나, 안전측 설계에 유용할 것으로 판단된다. 이상의 검증 결과로부터 본 연구에서 개발된 역해석 프로그램이 계측자료를 이용한 흙막이 구조물의 실시간 시공관리에 유효함을 입증하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 다층지반에 근입된 흙막이 벽의 단계별 계측변위로부터 각 층의 지반물성을 추정하고 이로부터 차기단계의 거동을 예측하기 위한 역해석 기법을 제안하였다. 제안된 방법을 수치해석 자료 및 현장계측 자료를 이용하여 검증하였으며, 이로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 기존의 역해석 방법을 변형하여 대상변수의 변화에 대한 민감도가 작은 최하단층부터 층별로 순차적인 역해석을 수행하는 방법을 제안하였으며, 이 방법을 적용하여 다층지반에 근입된 흙막이 벽의 역해석시 대상변수의 증가로 인한 탐색의 어려움을 방지할 수 있었다.

(2) 제안된 방법을 검증하기 위하여 수치해석 자료를 이용하였다. 최하단층부터 순차적으로 층별 역해석을 하는 동안 가정한 변위와 계산된 변위의 차이가 감소하는 것을 알 수 있었으며, 목적함수가 허용범위 이내에 들어올 때까지 이러한 과정을 반복하여 지반물성을 추정하였다. 최종으로 계산된 변위는 계측변위와 거의 일치하였으며, 역해석시 총 반복계산수는 272회로 큰 무리없이 비교적 정확하게 지반물성을 추정할 수 있었다. 그 결과로부터 예측된 차기단계의 변위 또한 가정된 변위와 큰 차이를 보이지 않았다.

(3) 검증된 방법의 적용성을 검토하기 위하여 현장계측 자료를 이용하였다. 싱가폴 대상구간의 경우 역해석으로부터 산정된 변위와 계측변위가 거의 일치하였으며, 차기단계 거동예측도 비교적 정확하였다. 대만의 대상구간은 싱가폴 대상구간에 비해서 정확도가 다소 떨어지지만 상대적으로 변위가 크게 발생되었기 때문으로 판단되었다. 굴착단 하부의 변위오차 수렴도가 굴착단 상부보다 떨어지는 것을 볼 수 있는데, 이는 탄소성보법 해석이 굴착부의 응기에 의한 하부 거동을 해석할 수 없기 때문으로 보다 정확한 역해석을 위해서는 무엇보다 빠르고 정밀한 수치모델의 적용이 중요함을 알 수 있었다. 이상의 결과로부터 본 연구에서 제안된 역해석 기법이 다층지반으로 구성된 흙막이 구조물에 적용성이 있음을 입증하였다.

참 고 문 헌

- 김수일, 정상섭, 장병수 (1994), “P-y특성곡선의 Coupling을 고려한 토류벽의 거동해석”, 대한토목학회 논문집, 제14권, 제3호, pp.553~563.

2. 김황 (1996), “지반반력계수 산정방법에 따른 토류벽의 굴착 단계별 거동 비교”, 석사학위 논문, 연세대학교.
3. 문준식 (1998), “굴착단계별 토류벽 역해석의 대상범위 선정에 관한 연구”, 석사학위 논문, 연세대학교.
4. 서동희 (1999), “모형실험을 통한 사질토 지반에서의 굴착단계별 흙막이벽의 거동분석”, 석사학위 논문, 연세대학교.
5. 이해성, 정충기, 김재관, 김봉균 (1996), “탄소성 지반 스프링 모델에 의한 굴착 해석시 지반의 물성치 평가를 위한 역해석”, 대한토목학회 논문집, 제16권, 제5호, pp.561~571.
6. 장범수 (1997), “지반의 탄소성 하중-변위관계를 이용한 흙막이벽의 역해석기법 개발”, 박사학위 논문, 연세대학교.
7. 조성호 (1987), “널말뚝 벽의 역해석에 관한 비교 연구”, 박사학위 논문, 서울대학교.
8. 최충식 (1996), “직접탐색법에 의한 굴착단계별 토류벽의 역해석”, 석사학위 논문, 연세대학교.
9. 류인선, 임오강, 박경진 (1999), “최적설계입문”, 반도출판사.
10. 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.
11. Arora, J. S. (1989), *Introduction Optimum Design*, McGraw-Hill, pp.347~371.
12. Bazaraa, M. S., Sherali, H. A. and Shetty, C. N. (1993), *Nonlinear Programming : Theory and Algorithms*, John Wiley & Sons. Inc.
13. 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.
14. Kim, N. (1993), *A Beam-Column Method for Tieback Walls*, Ph.D Dissertation, Texas A&M University.
15. Vanderplaatts, G. N. (1984), *Numerical Optimization Techniques for Engineering Design*, McGraw-Hill, pp.153~177.

(접수일자 2001. 9. 20, 심사완료일 2001. 12. 26)