

지반굴착 흙막이공의 정보화시공 종합관리 시스템

Total Management System for Earth Retaining Structures Using Observational Method

오 정 환^{*1}

Oh, Jung-Hwan

조 철 현^{*2}

Cho, Chul-Hyun

김 기 웅^{*3}

Kim, Khi-Woong

백 영 식^{*4}

Paik, Young-Shik

Abstract

Observational results of ground movement during the construction were very different from those predicted during the analysis of design step because of the uncertainty of the numerical analysis modelling, the soil parameter, and the condition of a construction field, etc., however accurately numerical analysis method was applied for prediction of ground movement per the excavation step. Therefore, the management system through the construction field measurement should be achieved for grasping the situation during the excavation. Until now, the measurement system restricted by 'Absolute Value Management system' analyzing only the stability of present step has been executed. So, it was difficult to expect the prediction of ground movement for the next excavation step. In this situation, this study developed 'The Management system TOMAS-EXCAV' consisted of 'Absolute value management system' analyzing the stability of present step and 'Prediction management system' expecting the ground movement of next excavation step and analyzing the stability of next excavation step by 'Back Analysis'. TOMAS-EXCAV could be applied to all the uncertainty of earth retaining structures analysis by connecting 'Forward analysis program' and 'Back analysis program' and optimizing the main design variables using SQP-MMFD optimization method through measurement results. The applicability of TOMAS-EXCAV was confirmed by back analysis selecting two earth retaing construction fields.

요 지

굴착단계별 지반거동을 예측하기 위해 아무리 정교한 수치해석기법을 적용하여도 수치해석 모델링, 토질정수, 현장 및 시공조건 등과 관련한 불확실성으로 인해 실제 시공시 관측되는 거동은 설계단계의 수치해석을 통한 예측과 상당히 다른 결과를 나타낸다. 따라서, 굴착과정에서 발생되는 지반거동을 파악하기 위해서 항상 현장계측을 통한 관리가 이루어져야 한다. 하지만 지금까지 수행된 계측관리는 현단계 안정성만을 판단하는 절대치 관리기법에 한정되어 있어 다음 굴착단계에 대한 지반거동의 예측이 어려운 실정이다. 이러한 측면에서 본 연구는 현단계 안정성 여부를 판단하는 절대치 관리기법 이외에 역해석을 통해 다음 굴착단계의 지반거동을 예측하고 안정성을 판단하는 예측관리기법을 도입한 지반굴착 흙막이공의 정보화시공 종합관리 시스템인 TOMAS-EXCAV를 개발하였다. TOMAS-EXCAV는 SQP-MMFD의 최적화기법을 적용한 역해석 프로그램을 정해석 프로그램과 연계하여 굴착 또는 시공 초기단계에 실시된 계측결과를 토대로 주요 설계변수의 최적화를 수행함으로써 흙막이구조물 해석시 모든 불확실성을 포괄적으로 반영한다. 본 연구에서는 이에 대한 검증을 위해 흙막이 현장 2개소를 선정하여 역해석을 중심으로 TOMAS-EXCAV의 적용성을 확인하였다.

*1 정회원, (주)한국지오컨설턴트 대표이사 (Member, Principle of Korean Geo-Consultants)

*2 정회원, (주)한국지오컨설턴트 책임연구원 (Member, Chief Researcher, Korean Geo-Consultants R&D Center, tech@koreangeo.co.kr)

*3 정회원, 인천전문대학 토폭과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil Engrg., Incheon City College)

*4 정회원, 경희대학교 토목건축공학부 교수 (Member, Professor, College of Architecture and Civil Engrg., Kyunghee Univ.)

1. 서 론

지반굴착을 실시하는 과정에 있어 지반의 평형상태가 흐트러지며, 이 평형상태를 유지하기 위해 흙막이가 이루어지고 동시에 굴착에 따른 흙막이구조물 자체 뿐만 아니라 인접구조물의 안정성 확보를 위한 정확한 해석과 합리적인 설계가 필요하다. 그러나 실제 흙막이구조물은 흙 - 구조물의 상호작용, 배먼지반의 초기 응력 상태 및 그 밖의 역학적으로 규명하지 못한 불확실한 요인들이 존재하기 때문에 실제 현장조건과 비슷한 지반상태를 반영하여 굴착단계별 흙막이벽 거동을 정량적으로 파악할 수 있는 방법은 상당히 제한되어 있다. 따라서, 설계단계에서 정확한 거동의 예측이 어려우므로 시공 중 계측을 통한 지속적인 관리가 필수적이다. 하지만 현재까지의 계측관리 형식은 현단계 안정성 여부만을 판단하는 절대치 관리기법에 의존하고 있어 다음단계 굴착시 내포해 있는 위험요소를 인지하지 못하고 굴착이 이루어지고 있는 실정이다. 이와 같은 측면에서 지반을 굴착함에 따라 단계적으로 변화하는 응력이나 변위 및 토압 등을 충실히 계산하여 현장조건과 지반상태를 적절히 반영할 수 있는 탄소성 해석기법의 개발이 요구되며, 이와 더불어 현상태의 안정성에 대한 판단만 이루어지는 절대치 관리기법의 한계성을 벗어나 역해석 기법을 도입한 예측관리기법을 병행하여 향후 안정성 여부를 예측할 수 있는 지반거동 해석 시스템을 통한 정보화시공의 필요성이 증대되고 있다. 이러한 증가추세는 굴착지반의 실내 및 현장시험에서 얻은 지반물성치를 적절한 해석기법에 의해 개발된 프로그램의 입력자료로 활용함에도 불구하고 실측치와 해석치간에 큰 차이를 보이기 때문이다. 이러한 한계를 극복하기 위해서는 지반 전체에 대한 특성을 보다 정확히 파악하기 위한 시추공 및 시험개소를 상당량 증가시켜야 하지만 많은 시간과 비용이 소요되는 문제점이 있다. 이와 같은 배경에서 본 연구에서는 역해석 기법을 통한 예측관리기법을 도입함으로써 현 시공단계의 안정성을 정확하게 판정할 뿐만 아니라 향후 계획 중에 있는 굴착공정에서의 위험여부를 예측할 수 있는 지반굴착 흙막이공의 정보화시공 종합관리 시스템인 TOMAS-

EXCAV(TOTAL MAnagement System using observational method for earth retaining structures under ground EXCAVation)를 개발하여 전반적인 시스템 구성 소개 및 역해석 프로그램을 중심으로 이에 대한 검증을 실시하였다.

2. 정보화시공 종합관리 시스템 개요

2.1 개발환경

본 시스템의 개발환경은 Windows 기반의 프로그램으로 정해석 및 역해석 프로그램의 계산과 결과값 출력을 극대화하기 위해 두 종류의 언어를 사용하여 개발하였다. 즉, 탄소성해석법에 의한 굴착단계별 해석은 신속하고 정확한 처리를 위해 FORTRAN F77L3 컴파일러를 사용하였고, 입력과 그래프 출력은 ANSI (American National Standard Institute)를 표준으로 한 유연한 개발 환경인 Visual C++ 6.0의 MFC(Microsoft Foundation Class)에 의해 SDI(Single Document Interface)로 제작하여 최적화 컴파일을 하였다. 또한, 데이터베이스 개발 도구는 MS 사에서 개발한 ACCESS 2000을 사용하였고 데이터베이스에 접근하기 위한 언어로써 구조적 질의어인 SQL(Structured Query Language)을 적용하였다. 이와 더불어 데이터베이스 엔진으로는 데이터베이스 관리시스템의 데이터를 응용프로그램에서 접근할 수 있도록 해주는 ODBC(Open Database Connectivity)를 도입하였다. 그림 1은 전술한 개발도구, 언어 및 엔진 등을 주축으로 한 데이터베이스 연결 흐름도를 나타낸 것이다.

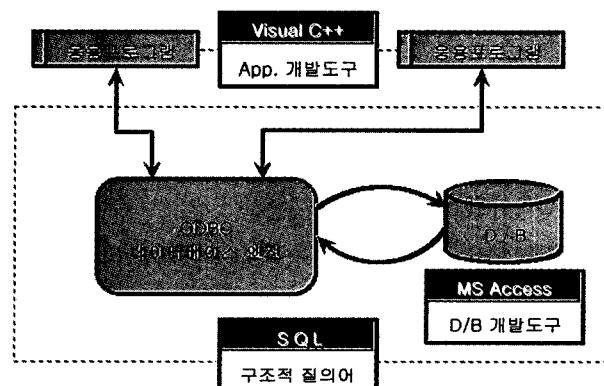


그림 1. 데이터베이스 연결 흐름도

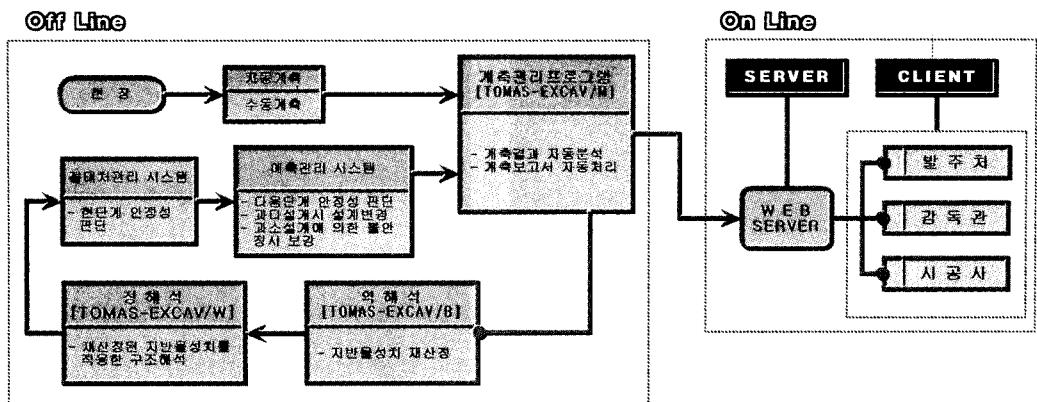


그림 2. 시스템 흐름도

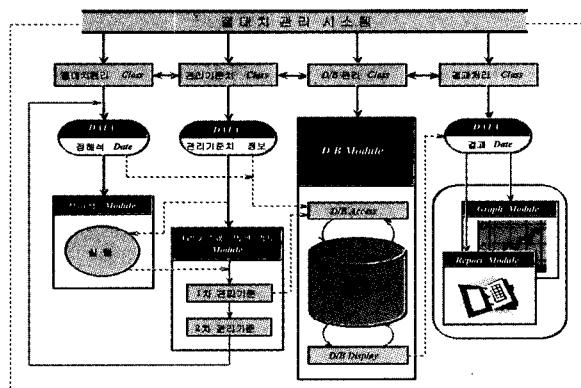


그림 3. 절대치 관리시스템의 class 구성도

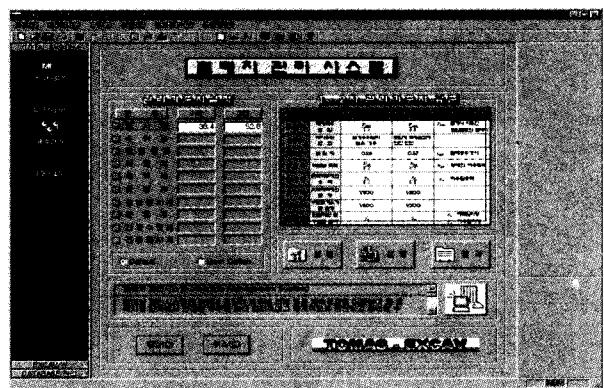


그림 4. 절대치 관리시스템 초기화면

2.2 시스템 구성

본 연구에서 개발된 TOMAS-EXCAV는 그림 2와 같이 On-Line과 Off-Line으로 구분된다. On-Line에서는 현장계측(자동계측 및 수동계측) 결과를 인터넷을 통한 웹서버에 실시간으로 전송 저장시켜 시간과 장소에 제약을 받지 않고 계측결과의 신속한 확인이 가능하다. Off-Line의 경우 계측결과를 토대로 절대치 관리기법에 의한 현단계의 안정성 판단과 예측관리기법에 의한 다음 굴착단계의 안정성 판단을 동시에 해석한다.

또한, 본 시스템에서의 Off-Line은 흙막이현장 시공 및 계측자료에 대해 데이터베이스를 구축하고 공사진행 중 각 굴착단계별 정해석 및 역해석을 수행하며, 이를 절대치 관리시스템과 예측 관리시스템으로 나누어 안정성 평가를 수행할 수 있도록 구성되어 있다.

2.2.1 절대치 관리시스템

절대치 관리시스템의 목적은 흙막이현장의 계측수행 결과를 이용하여 현 굴착시공 단계에서 안정성 유무를

보다 합리적이고 체계적으로 판단하고 관리할 수 있도록 하는 것이다. 따라서, 현장에서 측정된 결과를 그림 3과 같은 절대치 관리시스템 class 구성도에 의해서 일괄처리하여 신속하게 안정성 여부를 결정할 수 있다. 또한, 그림 4는 그림 3의 class들을 기반으로 보다 합리적인 안정성 평가를 할 수 있는 절대치 관리시스템의 원도우를 나타낸 것이다.

2.2.2 예측 관리시스템

예측 관리시스템은 각 굴착단계에서 얻은 계측결과를 토대로 전술한 절대치 관리시스템에 의한 현단계의 안정성 유무를 분석한 후 안정하다고 판단되었을 때 역해석을 수행하여 다음굴착 시 발생하게될 흙막이벽체의 변위량을 예측함으로써 차후 계획된 시공단계에서의 안정성 유무를 합리적이고 체계적으로 관리하는 것이다. 예측 관리시스템은 절대치 관리시스템과 연계하여 신속하고 정확하게 현장 시공관리를 할 수 있도록 그림 5와 같이 데이터베이스에 연결되어 있는 class로 구분하고 모듈단위로 구성하였다. 그림 5에서와 같이

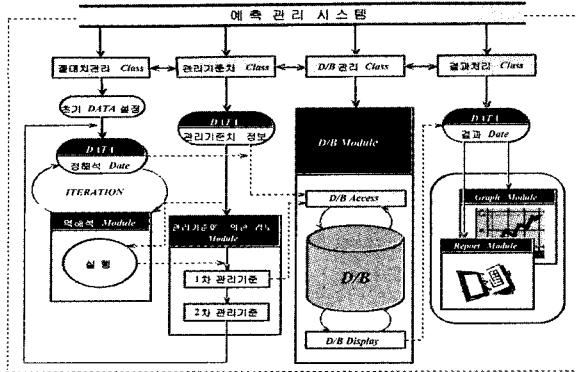


그림 5. 예측 관리시스템의 class 구성도

예측 관리시스템은 절대치 관리시스템과 유사한 class로 구성되며, 이들 class을 기반으로 보다 신속하고 합리적인 안정성 평가를 할 수 있도록 그림 6과 같은 원도우를 갖는다.

2.2.3 데이터베이스 시스템

본 데이터베이스 시스템은 36개의 필드로 설계하여 구축되어 있고 이를 중 주요한 항목들에 대하여 검색이 가능하도록 분류하였으며, 선택된 검색현장의 상세 정보를 그림 7과 같은 인터페이스 창으로 가시적인 확인을 할 수 있다. 이와 같은 데이터베이스를 구축함으로써 한 현장의 데이터가 추가되면 자동으로 방대한 자료에 대한 분석과 통계를 통하여 관리기준치를 더욱 신뢰성 있는 값으로 향상시킬 수 있다. 또한, 차후 흙막이구조물에 대한 전체적인 거동을 추적하여 흙막이 공법선정,

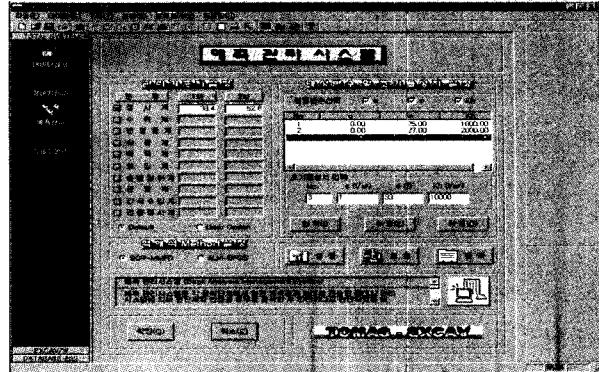


그림 6. 예측 관리시스템 초기화면

지반거동에 영향을 미치는 주요인자 등에 대한 정보를 얻어 대상현장에서 시공시 발생할 수 있는 위험요소에 대하여 예측할 수 있고, 이로써 정보화시공이 가능하도록 해주는 역할을 할 것으로 판단된다.

3. 해석이론

3.1 굴착단계별 탄소성 이론

3.1.1 굴착면 이상과 소성영역구간

그림 8은 벽체를 여러 개의 요소로 나누었을 경우 소성영역의 요소에 대한 하중과 변위를 나타낸 것이고, 이 탄성보의 기초 미분방정식은 식 (1)로 주어진다.

$$EI \frac{d^4 y_x}{dx^4} - (p + q \cdot x) = 0 \quad (1)$$

여기서, E : 흙막이벽재료의 탄성계수

I : 흙막이벽의 단면 2차 모멘트

y_x : x 지점에 있어서의 흙막이벽의 변위

x : 부재단에서 쟈안점까지의 거리

p : $x=0$ 에 대한 하중강도

q : 하중의 증가율

Project	제작자: 00000000000000000000	발주처:
Project Info.		
계속기 종류	그	계속기 단면
계속기 위치	IC-3	설계 단면
일자	2000-07-25	검증 단면
도료 구성		지지 시스템
예판도	1.6 m	<input checked="" type="checkbox"/> Earth Anchor
총회로	3.4 m	<input checked="" type="checkbox"/> Strut
총회암	0 m	<input checked="" type="checkbox"/> Raker
연 암	23.0 m	<input checked="" type="checkbox"/> Soil Nailing
장 암	0 m	<input checked="" type="checkbox"/> Tie rod
최종굴착깊이		보조 광법
21.2 m		<input checked="" type="checkbox"/> L.W. Grouting
		<input checked="" type="checkbox"/> J.S.P. Grouting
		<input checked="" type="checkbox"/> Jet Grouting
		<input checked="" type="checkbox"/> Rod Grouting
지하수위 GL(-)		
3.0 m		
Measured Data		
감사계	토압계	최대면위높이
수위계	총발적하계	47.04 m
반경률계	군집계	최대면위발행위치
하중계	각각수압계	13.50 m
액계	건물경사계	
입력(I) 수정(E) 삭제(D)		검색
확인(Q)		취소(C)

그림 7. 검색현장의 상세정보

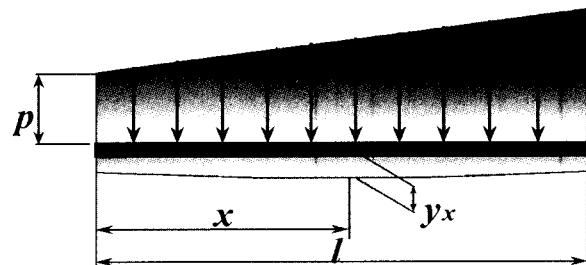


그림 8. 하중과 부재의 변위

따라서, 흙막이벽의 변위량 y_x , 처짐각 θ_x , 휨모멘트 M_x 및 전단력 S_x 는 식 (2)부터 식 (4)와 같다.

$$y_x = y_0 + \theta_x - \frac{1}{EI} \left(\frac{1}{2} M_0 x^2 + \frac{1}{6} \theta_0 x^3 - \frac{1}{24} px^4 - \frac{1}{120} qx^5 \right) \quad (2)$$

$$\theta_x = \theta_0 - \frac{1}{EI} \left(M_0 x + \frac{1}{2} S_0 x^2 - \frac{1}{6} px^3 - \frac{1}{24} qx^4 \right) \quad (3)$$

$$M_x = M_0 + S_0 x - \frac{1}{2} px^2 - \frac{1}{6} qx^3 \quad (4)$$

$$S_x = S_0 - px - \frac{1}{2} qx^2$$

여기서, y_0 , θ_0 , M_0 , S_0 는 $x=0$ 점에서의 변위, 처짐각, 휨모멘트, 전단력이다.

3.1.2 탄성영역구간

탄성영역의 유효주동토압이 그림 8과 같이 표시될 때, 탄성바닥상 보의 기초미분 방정식은 식 (5)와 같다.

$$EI \frac{d^4 y_x}{dx^4} + KDy_x - (p + qx) = 0 \quad (5)$$

여기서, K 는 수평지반반력계수, D 는 흙막이벽의 폭이다. 식 (5)의 일반식은 식 (6)과 같다.

$$y_x = C_1 e^{\beta x} \cos \beta x + C_2 e^{\beta x} \sin \beta x + C_3 e^{-\beta x} \cos \beta x + C_4 e^{-\beta x} \sin \beta x + \frac{p + qx}{KD} \quad (6)$$

여기서, C_1, C_2, C_3, C_4 는 부재양단의 상태에 따라 결정되는 적분상수이며, β 는 식 (7)에 의해 계산된다.

$$\beta = \sqrt{\frac{KD}{4EI}} \quad (7)$$

따라서 변위, 모멘트 및 전단력은 식 (8) ~ 식 (10)에 의해 주어진다.

$$\theta_x = \beta \{ C_1 e^{\beta x} (\cos \beta x - \sin \beta x) + C_2 e^{\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x) + C_3 e^{-\beta x} (-\cos \beta x - \sin \beta x) + C_4 e^{-\beta x} (\cos \beta x - \sin \beta x) \} + \frac{p}{KD} \quad (8)$$

$$M_x = -2EI \beta^2 (-C_1 e^{\beta x} \sin \beta x + C_2 e^{\beta x} \cos \beta x + C_3 e^{-\beta x} \sin \beta x - C_4 e^{-\beta x} \cos \beta x) \quad (9)$$

$$S_x = -2EI \beta^3 \{ C_1 e^{\beta x} (-\cos \beta x - \sin \beta x) + C_2 e^{\beta x} (\cos \beta x - \sin \beta x) + C_3 e^{-\beta x} (\cos \beta x - \sin \beta x) + C_4 e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x) \} \quad (10)$$

3.2 역해석 알고리즘

3.2.1 역해석 문제의 정식화

1) 목적함수

지반공학분야에서 수행되는 역해석은 대부분 현장에서 계측된 변위를 응답변수로 하여 설계변수인 지반의 물성치에 대한 역해석을 수행한다. 일반적으로 변위량 또는 응력 등이 목적함수의 설계변수가 될 수 있지만 변위의 측정이 가장 용이하기 때문에 변위로 정의하는 경우가 많다. 이처럼 응답변수로 현장에서 계측된 측정 데이터를 사용하였기 때문에 역해석에 의한 값은 실제 지반의 특성을 대변하는 값이라기보다 현장조건을 포함한 포괄적인 의미의 응답변수이다. 이는 역해석을 통하여 설계변수에 해당하는 지반물성치를 얻었을 경우 지반자체의 물성치가 아닌 현장지반의 물성치가 된다. 즉, 현장에서 시공시 발생된 모든 상황이 고려된 값을 얻게 되는 것이다. 이와 같이 현장지반의 물성치를 얻기 위해 목적함수를 구성하는데 있어 본 연구에서는 최소 자승법을 이용하여 식 (11)과 같이 각각의 굴착단계와 전체 굴착영역에 대한 적분함수 전체 합으로 이루었다.

$$F(X) = \sum_{k=1}^n \int_Q (\Delta D_k^* - \Delta D_k)^2 dQ \quad (11)$$

여기서 k 는 굴착단계이며, 목적함수는 n 단계까지의 오차를 더하여 계산된다. 목적함수 값인 오차는 $k-1$ 단계에서 k 단계로의 시공시 j 지점의 계측 변위의 증분인 ΔD_k^* 와 계산에 의해 산정된 변위의 증분인 ΔD_k 의 차로 되어 있다.

2) 설계변수

무수한 인자 중에서 어떤 인자가 흙막이벽의 거동에 영향을 크게 미치는 주요인자인가를 선택하여야 한다. 이는 역해석 대상변수 즉, 설계변수의 증가로 인해 역해석 수행능력의 저하와 많은 시간 및 노력이 소요되는 비효율성을 최소화하기 위해서이다. 흙막이벽의 거동에 영향을 미치는 인자는 여러 가지가 있을 수 있으나 대표적으로 지반물성치와 흙막이 부재의 강성을 인자로 할 수 있다. 이들 인자중 본 연구에서는 흙막이벽체의 수평 변위에 대해 가장 주된 인자로 판단되는 지반반력계수, 접착력 및 내부마찰각을 역해석 대상변수로 채택하였고 이들 설계변수는 정규화하여 적용하였다.

3) 제약조건

역해석이 수행되면 목적함수를 만족시키면서 설계변수를 최적화 기법에 의하여 인위적으로 변화시키는데 이때 최적해를 찾기 위해 목적함수를 최소화시키며, 설계변수를 올바른 방향으로 유도하고 수렴시키게 된다. 또한, 반복적인 과정 중 각 설계변수 뿐만 아니라 설계변수에 의한 기타 응답의 내용들이 합리적인 범위에 해당하도록 제약을 주며, 이러한 제약조건으로 최종 결과가 유용하면서 설계변수의 최적값을 구할 수 있도록 하여야 한다. 본 연구에서는 각 설계변수의 경계조건을 정규화하여 표 1과 같은 제약조건으로 규정하고 최적화 알고리즘에 적용하였다. 여기서, 정규화는 각 설계변수의 상한값 및 하한값을 상한값으로 나눈 값을 의미한다.

표 1. 역해석에 적용된 제약조건

구 분	내부마찰각	점착력	지반반력계수
하한값	0°	0 tf/m ²	1 tf /m ³
상한값	50°	100 tf/m ²	100000 tf/m ³
정규화	하한값	0	0
	상한값	1	1

3.2.2 최적화 이론

공학적인 관점에서 응답변수를 이용하여 설계변수를 재산정하기 위한 역해석시 적용된 최적화기법을 기술하면 다음과 같다.

1) MMFD

MMFD(Modified Method of Feasible Directions)는 등가 제약조건을 같이 사용할 수 있는 기법으로 push-off 백터를 '0'으로 하여 부문제에서 제약조건에 대하여 접선 방향의 탐색방향이 결정된다. 탐색방향은 제약조건의 경계를 따라 탐색을 하게 되며, MMFD의 부문제는 식 (12)과 같이 설정된다.

$$\begin{aligned} \text{목적함수} : & -\nabla F(X) \cdot S \quad \text{maximize} \\ \text{제약조건} : & \nabla g_j(X) \cdot S \leq 0 \quad j \in J \\ & S \cdot S \leq 1 \end{aligned} \quad (12)$$

2) SQP 방법

SQP(Sequential Quadratic Programming) 방법에서는 2차 목적함수와 선형 제약조건으로 부문제를 구성하여 해를 구함으로써 탐색방향이 결정되어 진다. 목적함수는 Lagrange multiplier와 외적 벌칙함수를 이용하여 구

성되어 1차원 탐색시 비제약조건의 문제로 접근한다. 탐색방향 결정문제는 식 (13)과 같이 설계변수의 벡터에 대하여 2차식으로 다시 설정된다.

$$\text{목적함수} : Q(S) = F(X) + \nabla F(X) \cdot S + \frac{1}{2} S^T B S$$

$$\text{제약조건} : \nabla g_j(X) \cdot S + \delta_j g_j(X) \leq 0 \quad j = 1, m \quad (13)$$

$$\nabla h_k(X) \cdot S + \bar{\delta} h_k(X) = 0 \quad k = 1, l$$

여기서, 설계변수는 S 벡터의 요소이며, B 행렬은 초기에 단위 행렬에서 반복을 통하여 개선되어 Hessian 행렬로 근접하게 된다.

4. 역해석 프로그램 적용 및 검증

4.1 역해석 대상변수 선정

역해석 대상변수를 선정하기 위한 매개변수의 민감도는 오정환 등(2001)에 의해 분석한 결과 내부마찰각, 수평지반반력계수, 점착력 및 벽체의 휨강성 등은 매개변수인 흙막이벽체의 변위에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으나, 흙의 단위중량의 경우에는 민감도가 뚜렷이 나타나지 않아 그다지 큰 영향을 주지 않는 것으로 분석되었다. 여기서, 흙막이벽체의 휨강성은 매개변수에 대한 민감도가 큰 것으로 나타났지만 일반적으로 실제 시공시 규격과 허용응력 등이 비교적 정확하게 생산되는 공장제품의 강재를 사용하므로 불확실한 요소가 적고 그 변화의 범위가 작기 때문에 신뢰성이 높다고 할 수 있다.

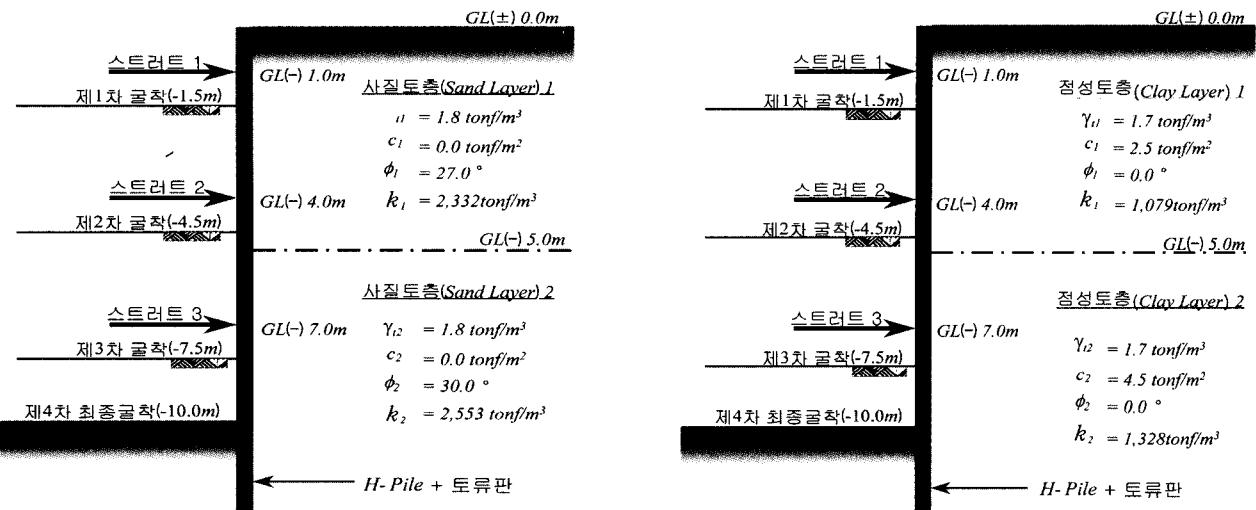
따라서, 흙막이벽의 거동에 영향을 미치는 특정변수들 중 민감도가 크다고 판단되는 내부마찰각, 수평지반반력계수 및 점착력을 역해석 대상변수로 선정하였다.

4.2 역해석 대상변수 고찰

4.2.1 해석모델 및 방법

역해석 대상변수를 고찰하기 위한 변수연구는 이상화된 사질토 지반 및 점성토 지반을 대상으로 실시하였으며, 토층구성 및 시공단계는 그림 9와 같이 지반강성이 다른 2개 토층으로 가정하였다.

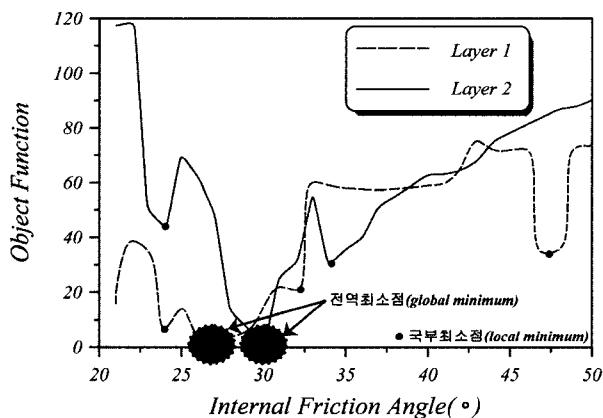
그림 9의 지반구성은 예상하지 못한 외력이나 시공상의 오차를 제거하여 정확한 설계변수의 고찰이 이루어 지도록 모델링한 것이며, 각 토층에 명시된 지반물성치



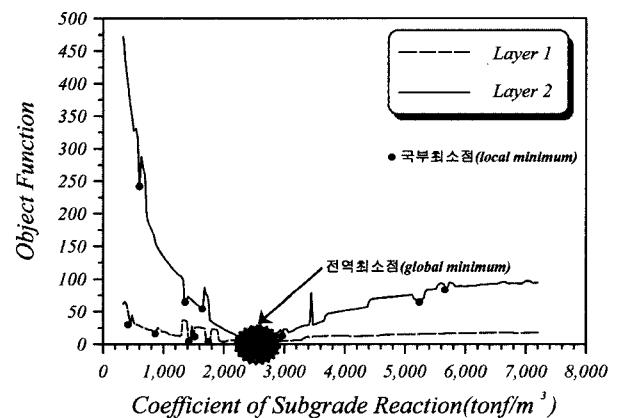
(a) 사질토 지반

(b) 점성토 지반

그림 9. 토층구성 및 지반물성치

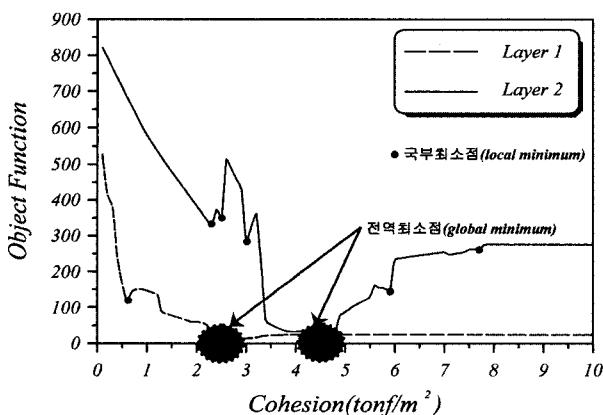


(a) 내부마찰각 변화

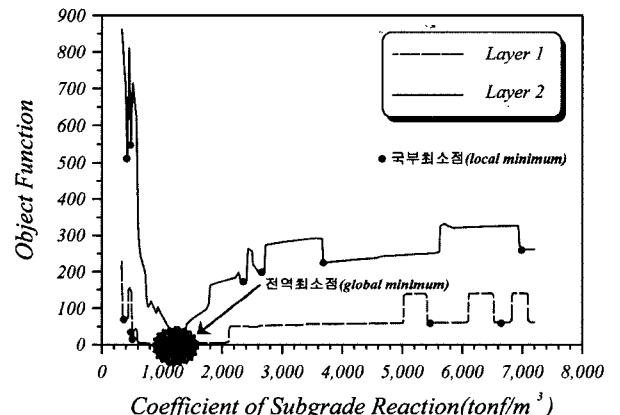


(b) 지반반력계수 변화

그림 10. 목적함수의 수렴성(사질토 지반)



(a) 점착력 변화



(b) 지반반력계수 변화

그림 11. 목적함수의 수렴성(점성토 지반)

를 실제 지반물성치로 가정하고 이를 이용한 해석변위를 실측변위로 가정하였다. 이렇게 가정된 실제 지반물

성치 및 실측변위를 토대로 역해석 대상변수로 선정된 각 토층의 내부마찰각, 점착력 및 지반반력계수를 실제

값과 다르게 일정범위에서 변화시키면서 변위를 산정한 후 실측변위와 예측변위의 오차로 구성되는 목적함수의 수렴정도를 분석하였다. 여기서, 역해석 대상변수의 변화는 두 가지 방법으로 수행하였는데 첫 번째는 각 토층 지반물성치를 하나씩만 실제값과 다르게 변화시키고 나머지는 실제값으로 고정시켜 설계변수가 하나가 되게 하는 경우이며, 두 번째는 각 토층의 내부마찰각, 점착력 및 지반반력계수의 물성치 중 동일 지반물성치 모두는 변화시키되 나머지는 실제값으로 고정시켜 설계변수를 두 개로 하는 경우이다.

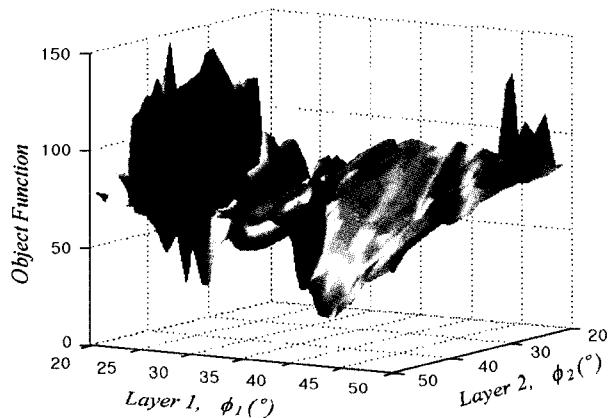
4.2.2 설계변수가 하나인 경우

그림 10 및 그림 11은 사질토 지반에서 내부마찰각을 $21\sim50^\circ$, 지반반력계수를 $330\sim7,200\text{tf/m}^3$ 의 범위에서 변화시키고, 점성토 지반에서 점착력을 $0.1\sim10.0\text{tf/m}^2$, 지반반력계수를 사질토와 동일하게 $330\sim7,200\text{tf/m}^3$ 의

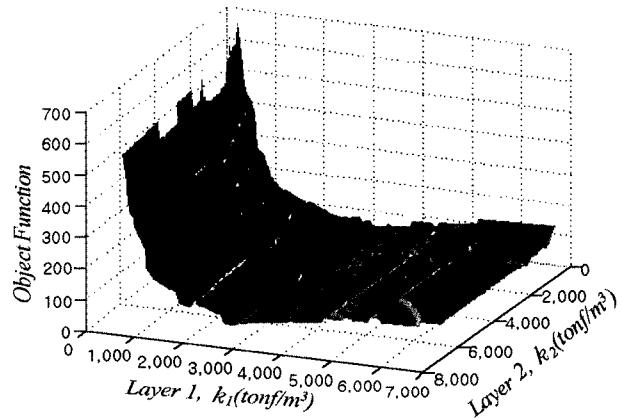
범위에서 변화시켰을 때 목적함수의 수렴경향을 도식화한 것이다. 이때, 각 토층의 내부마찰각, 점착력 및 지반반력계수를 변화시켰을 때 공통적으로 나타나는 현상이 최적의 해인 전역최소점(global minimum) 이외에 오목한 부분인 국부최소점(local minimum)이 다수 존재한다는 것이다. 이러한 결과는 역해석 수행 시 초기값 선택이 매우 중요하다는 사실을 나타내 주는 것으로 적용되는 초기값이 그림 10 및 그림 11에서 보는 바와 같이 실제값(전역최소점)과 차이가 클 경우 국부최소점으로 수렴되어 상이한 결과가 도출되는 것을 볼 수 있다.

4.2.3 설계변수가 두개인 경우

설계변수 변화가 두 개인 경우는 3차원적인 분석이 필요하기 때문에 각 토층의 동일 지반물성치를 모두 변화시켜 설계변수 변화가 두 개가 되도록 하여 이들의 변화에 따른 목적함수의 변화형상을 그림 12 및 그림

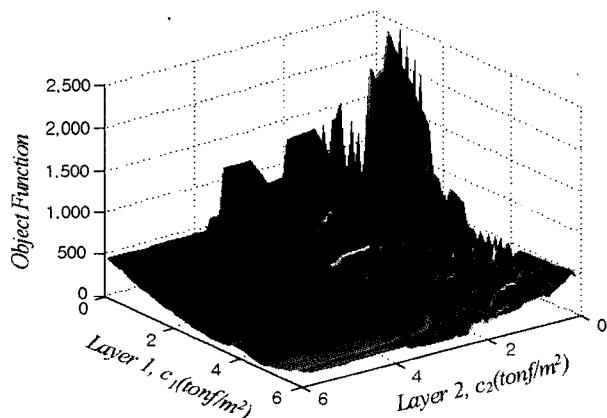


(a) 내부마찰각 변화

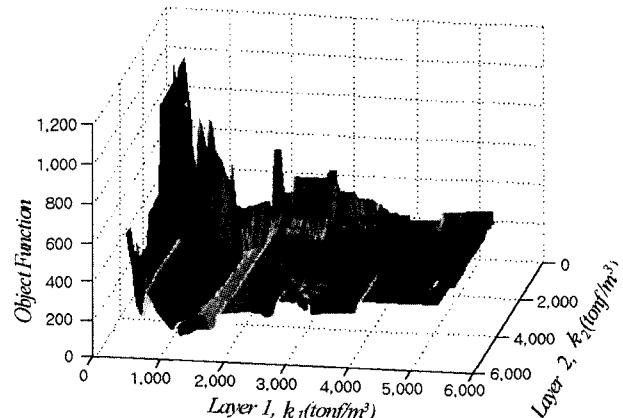


(b) 지반반력계수 변화

그림 12. 목적함수의 수렴성(사질토 지반)



(a) 점착력 변화



(b) 지반반력계수 변화

그림 13. 목적함수의 수렴성(점성토 지반)

13에 도시하였다.

설계변수를 고찰한 결과 사질토 및 점성토 지반의 단순한 토층구성과 비교적 간단한 H-pile + 토류판, 스트러트 공법을 적용한 모델링에도 불구하고, 지반물성치인 설계변수에 대하여 다수의 국부적 최적값을 갖고 있음을 알 수 있다. 이는 흙막이구조물의 해석이 탄소성적 거동을 바탕으로 비선형적인 특성을 나타내며, 초기에 적용되는 설계변수에 따라서 불연속적인 값이 해석에 사용되기 때문에 발생되는 현상으로 판단된다. 이렇듯 흙막이구조물의 역해석 문제는 가장 적절한 최적화기법의 도입만으로 국부적 최소점에 수렴되는 문제점을 해결하는데 한계가 있으며, 적용 대상지반의 다층구성과 다양한 흙막이공법 등에 의해 복잡한 문제가 될 수 있다. 그러나, 본 연구에서 설계변수에 대한 전체적인 경향을 분석하고 고찰한 결과 해당 지층에 대하여 설계변수의 초기값을 적절하게 선택함으로써 국부적최소점으로 수렴하는 문제를 극복할 수 있는 것을 알게 되었다. 다시 말해서 전 구간 토층에 대해 임의로 가정하여 적용되는 초기값에 대해서는 보장할 수 없는 값으로 최적화가 이루어지지만, 각 지층의 지반물성치를 공학적인 관점에서 예상할 수 있는 적절한 초기값을 선택할 경우 최적화 과정에서 더욱 신뢰성 있는 전역적 최소값으로 접근하는 결과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

4.3 최적화에 의한 역해석 알고리즘 선정

4.3.1 최적화기법의 비교분석 방법

일반적으로 최적화 문제의 해는 다음과 같은 전략기법, 최적화기법 및 일방향탐색 등의 세 가지 기본적인 단계로 적용되며, 세 가지 기본단계를 토대로 표 2와 같이 세 가지 case로 구성하여 가장 정확하고 효율적인 최적화방법을 본 연구의 역해석 프로그램에 적용하였다.

4.3.2 최적화기법의 비교분석 결과

굴착단계에 따른 흙막이벽의 거동을 역해석에 의해 예측하는데 있어 효율적인 최적화방법을 선정하기 위해 가상으로 모델링된 사질토 지반(그림 9(a))과 점성토 지반(그림 9(b))을 대상으로 지반물성치, 목적함수 및 연산회수에 대한 비교를 수행하였다. 분석결과 표 3 및 표 4, 그림 14~그림 17과 같이 사질토 지반은 Case 1, 점성토 지반은 Case 3이 효과적인 것으로 나타났다. 결과적으로 지반특성에 따라 Case 1과 Case 3의 방법이 좀더 정확한 역해석 수행결과를 나타내어 본 연구에서 개발된 역해석 프로그램의 최적화 방법은 이 두 가지 case를 선택적용할 수 있도록 하였으며, 본 논문에서는 Case 3(SQP-MMFD)의 방법만을 적용한 연구결과에 대해 기술하였다.

표 3. 사질토 지반의 최적화방법 비교

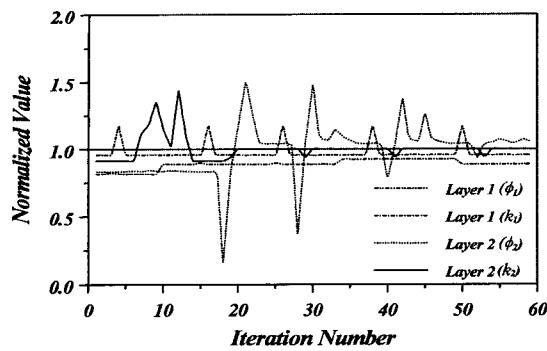
구 분	지 층	실 제 값		초 기 적용값		최종단계 역해석값		목적 함수	연산 회수
		ϕ (°)	k (tf/m ³)	ϕ (°)	k (tf/m ³)	ϕ (°)	k (tf/m ³)		
Case 1	Layer 1	27	2,332	22	2,234	24.2	2,232	16.63	58
	Layer 2	30	2,553	25	2,332	31.2	2,551		
Case 2	Layer 1	27	2,332	22	2,234	22.0	2,234	59.44	48
	Layer 2	30	2,553	25	2,332	25.0	2,831		
Case 3	Layer 1	27	2,332	22	2,234	22.0	2,220	15.80	22
	Layer 2	30	2,553	25	2,332	25.1	3,795		

표 4. 점성토 지반의 최적화방법 비교

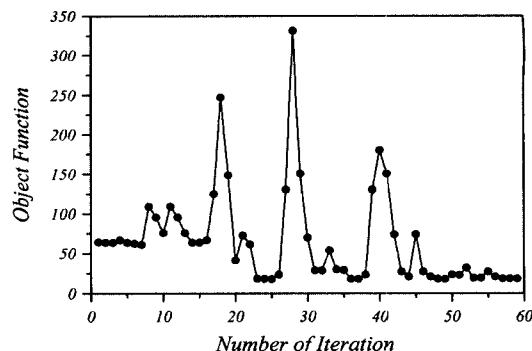
구 분	지 층	실 제 값		초 기 적용값		최종단계 역해석값		목적 함수	연산 회수
		C (tf/m ²)	k (tf/m ³)	C (tf/m ²)	k (tf/m ³)	C (tf/m ²)	k (tf/m ³)		
Case 1	Layer 1	2.5	1,079	2.2	1,002	2.21	1,003	31.30	54
	Layer 2	4.5	1,328	6.0	1,430	4.19	1,430		
Case 2	Layer 1	2.5	1,079	2.2	1,002	4.22	100,000	136.12	21
	Layer 2	4.5	1,328	6.0	1,430	0.00	1,430		
Case 3	Layer 1	2.5	1,079	2.2	1,002	2.25	921	21.17	119
	Layer 2	4.5	1,328	6.0	1,430	4.49	1,292		

표 2. 최적화방법의 구성

구 分	전략기법	최적화 기법	일방향 탐색기법
Case 1	ALM (Augmented Lagrange Multiplier)	BFGS (Broydon – Fletcher – Goldfarb – Shano)	다항식법 (polynomial)
Case 2	SLP (Sequential Linear Programming)	MFD (Method of Feasible Directions)	황금분할법 (golden section method)
Case 3	SQP (Sequential Quadratic Programming)	MMFD (Modified Method of Feasible Directions)	황금분할법 (golden section method)

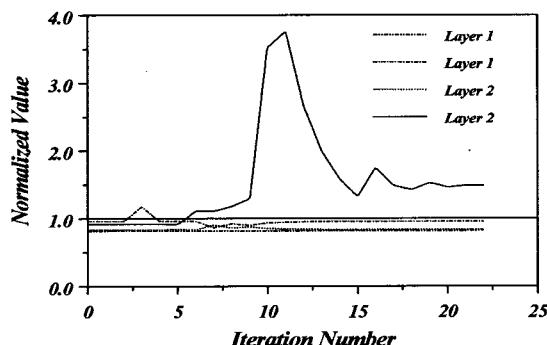


(a) 설계변수

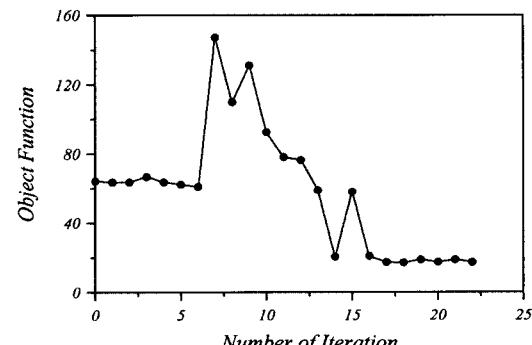


(b) 목적함수

그림 14. 사질토 지반에서 Case 1의 수렴과정

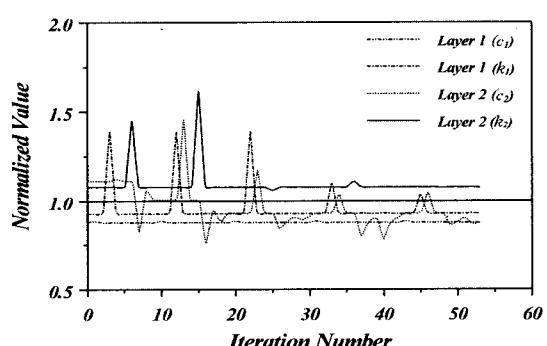


(a) 설계변수

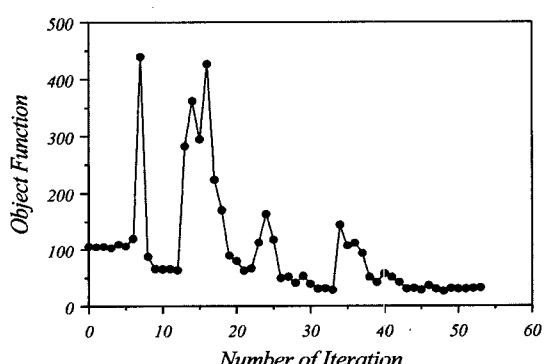


(b) 목적함수

그림 15. 사질토 지반에서 Case 3의 수렴과정

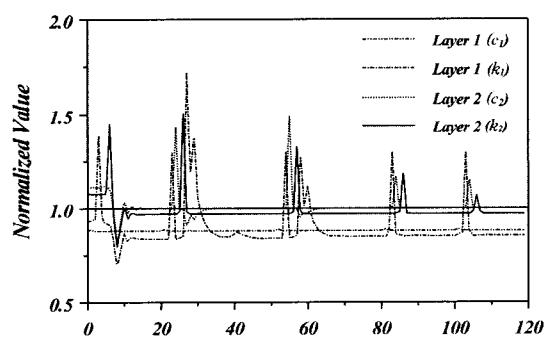


(a) 설계변수

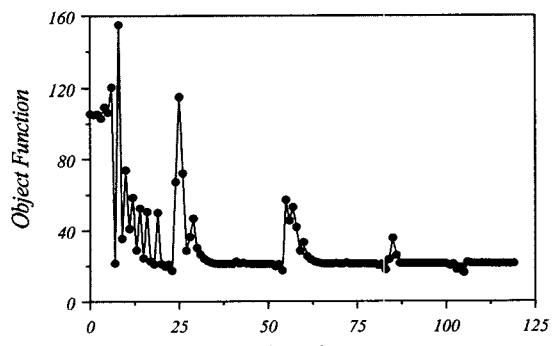


(b) 목적함수

그림 16. 점성토 지반에서 Case 1의 수렴과정



(a) 설계변수



(b) 목적함수

그림 17. 점성토 지반에서 Case 3의 수렴과정

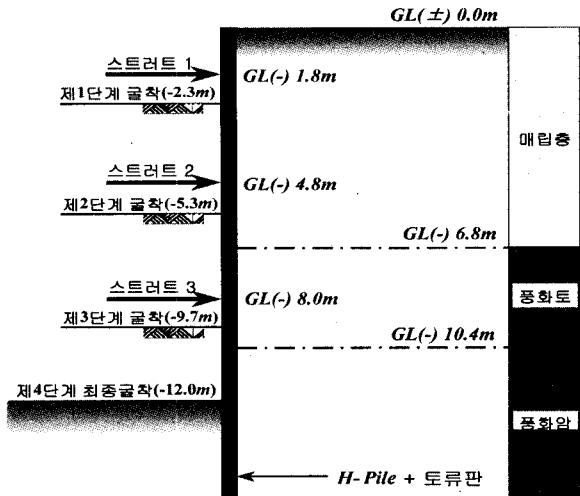


그림 18. A현장의 표준단면

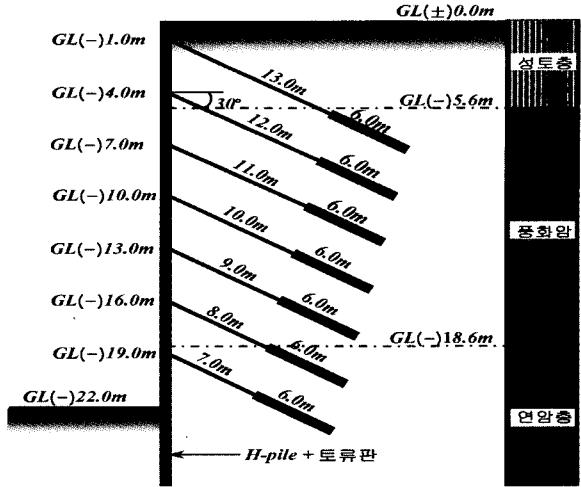


그림 19. B현장의 표준단면

4.4 역해석 프로그램 적용성 검증

일련의 흙막이공사를 수행하는 과정에서 설계시 고려하지 못한 지반특성 및 작용하중 등과 시공 및 계측상에 발생된 오차가 포함되어 있는 실제 2개 현장의 계측변위를 대상으로 개발된 역해석 프로그램의 검증을 수행하였다.

검증방법은 그림 18 및 19와 같이 각 현장의 표준단면에 대해 대표적인 시공단계를 선정하여 계측결과와 정해석 및 역해석 결과를 비교하는 한편, 현단계에서 역해석된 지반물성치를 이용하여 차기 굴착단계의 예측결과도 비교 분석하였다. 또한, 비교 대상 굴착단계의 역해석은 이전 단계까지의 모든 계측변위와 정해석에 의한 변위의 오차증분을 이용하는 다단계 역해석기법을 적용하였으며, 최적화방법은 앞서 분석한 바와 같이 SQP - MMFD 방법이 정확도가 높고 효율적인 것으로 분석되어 이를 적용하였다.

4.4.1 A현장 사례검증

그림 20부터 그림 22는 그림 18의 표준단면을 준용하여 시공단계별 측정한 계측치와 역해석 결과치 중 제3단계 이후의 분석결과를 나타낸 것이다. 그림 20은 9.7m 굴착시 측정한 계측값과 본 계측값을 이용한 역해석 변위를 정해석 변위와 함께 비교한 것이며, 그림 21은 12.0m 굴착시 측정한 계측값과 정해석 변위값을 전단계인 9.7m 굴착시 측정된 계측값을 이용한 역해석의 예측변위값과 비교한 것이다. 또한, 그림 22는 최종굴착시 비교값이다.

현 단계의 정해석 결과 및 역해석에 의해 재산정된 지반물성치에 의한 예측결과를 살펴보면 그림 20부터 그림 22에서와 같이 최대수평변위의 발생위치가 다소 차이를 보이고 있는데 이는 계측변위의 측정위치와 정해석 프로그램의 변위산정 위치가 상이하기 때문인 것으로 판단된다. 즉, 계측치의 측정위치는 0.5m 간격으로 일정하게 측정되지만 정해석 프로그램에 의한 변위 산정위치는 지층변환점, 베텀보 설치위치 및 지하수위 위치 등에 따라 유동적이므로 이를 선형보간법에 의해 보정하는 과정에서 발생된 절점 위치차이에 기인하는 것으로 판단된다. 하지만 변위의 변곡점 및 굴곡, 최대수평변위의 크기 등은 거의 일치하고 있어 전체적인 변위의 형태는 비교적 정확한 예측이 이루어지고 있다.

결론적으로 가정된 지반물성치를 이용하여 정해석으로 예측한 변위값은 실측한 계측과 전반적으로 상이하게 나타나고 있으나 역해석 과정을 통해 예측된 변위값은 실측한 계측치에 거의 근접함을 알 수 있다. 특히, 현단계 계측치를 이용한 역해석 변위값이 현단계 계측치(그림 20 및 그림 22) 뿐만 아니라 향후 시공에 따른 각 단계별 계측치도 정해석보다 잘 예측함을 확인할 수 있다.

표 5는 초기에 입력된 설계값과 각 단계에서 역해석 수행 결과값을 나타낸 것으로 풍화암층의 제 3단계는 굴착이 진행되지 않아 초기 설계값과 동일하며, 제 4단계에서는 점착력과 내부마찰각이 증가하였다. 이는 초기 설계값 적용 시 풍화암층의 점착력과 내부마찰각을 다소 과소평가하여 나타난 결과로 사료된다.

표 5. 초기 적용된 설계값과 역해석 결과의 비교

구 분	매립 토			풍화 토			풍화 암		
	$c(\text{tf}/\text{m}^2)$	ϕ°	$k(\text{tf}/\text{m}^3)$	$c(\text{tf}/\text{m}^2)$	ϕ°	$k(\text{tf}/\text{m}^3)$	$c(\text{tf}/\text{m}^2)$	ϕ°	$k(\text{tf}/\text{m}^3)$
초기 적용된 설계값	0.00	28.00	1759.86	0.00	30.00	2749.09	1.00	33.00	3382.67
제 3단계 역해석 결과	0.00	27.99	1254.48	0.00	30.00	2633.98	1.00	33.00	3382.67
제 4단계 역해석 결과	0.00	27.98	1058.03	0.00	29.91	2957.33	4.45	43.52	1958.93

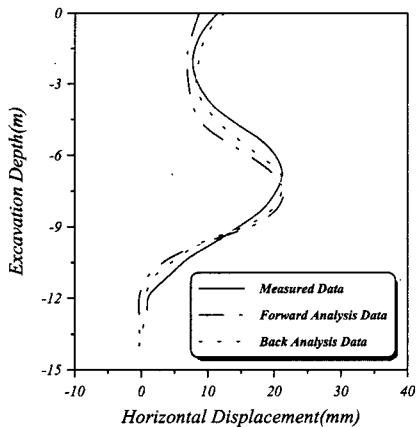


그림 20. 제 3단계(9.7m 굴착) 계측 결과를 이용한 역해석 변위

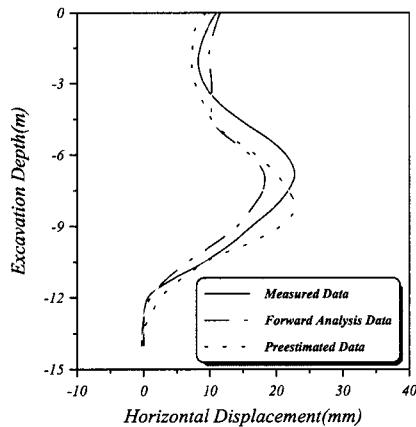


그림 21. 제 3단계 역해석 결과에 의한 제 4단계 (12.0m 굴착) 예측변위

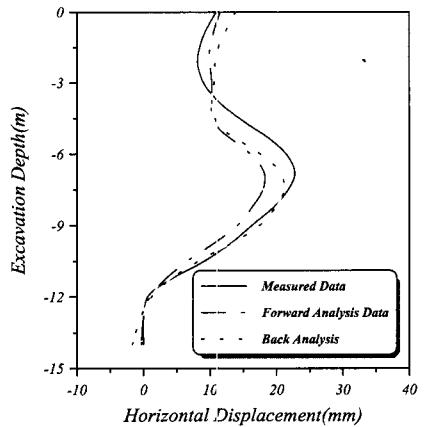


그림 22. 제 4단계(12.0m 굴착) 계측 결과를 이용한 역해석 변위

4.4.2 B현장 사례검증

그림 23부터 그림 25는 A현장 사례와 같은 의미의 B현장 해석결과로 각 단계별 해석결과치를 보면, 정해석에 의해 산정된 변위는 실측한 계측변위보다 큰 값을 보여주고 있으나 역해석을 통해서는 비교적 비슷한 값으로 계측변위의 추적이 잘 이루어지고 있다. 특히, 정해석 시 지반특성 및 어스앵커의 프리스트레스 등을 정확히 반영하지 못해 계측변위보다 약 2배정도 크게 발생된 중간부의 변위에 대해서는 역해석에 의해 산정한 변위값이 더욱 높은 신뢰성을 갖고 있는 것으로 분석되었다. 또한, 본 현장사례의 계측결과는 작고 큰 변위의 증감이 반복하여 나타나는 형상으로 다수의 굴곡점이 관찰되는데 본 연구에서 개발된 역해석 프로그램은 이를 잘 반영하여 정확히 예측함을 알 수 있다.

표 6은 초기에 입력된 설계값과 각 단계에서 역해석 수행 결과값을 나타낸 것이다. 표 6에서와 같이 가장 두

터운 풍화암층의 경우 점착력과 내부마찰각에 대한 초기 설계값 보다 각 단계 역해석결과값이 크게 산정되었는데 이는 초기 정해석 시 앵커의 구속효과를 실제보다 작게 고려되었기 때문에 계산된 변위값이 계측변위값에 근접하기 위해 증가된 것으로 사료된다.

또한, 표 6에서 연암 보다 풍화암의 지반물성치가 크게 산정되어 공학적 개념에서 벗어난 역해석 결과가 도출된 것을 알 수 있다. 이는 표 6의 결과가 풍화암과 연암의 고유물성치가 아닌 설계 및 시공상에 발생된 오차가 포함된 지반물성치이기 때문으로 사료된다.

5. 결 론

- (1) 절대치 관리기법 뿐만 아니라 역해석에 의한 예측관리기법을 적용하여 흙막이 시공 중에 흙막이구조물의 거동을 예측하고 이를 기반으로 현 굴착단계 및

표 6. 초기 적용된 설계값과 역해석 결과의 비교

구 분	성 토 총			풍화 암			연 암		
	$c(\text{tf}/\text{m}^2)$	ϕ°	$k(\text{tf}/\text{m}^3)$	$c(\text{tf}/\text{m}^2)$	ϕ°	$k(\text{tf}/\text{m}^3)$	$c(\text{tf}/\text{m}^2)$	ϕ°	$k(\text{tf}/\text{m}^3)$
초기 적용된 설계값	0.00	26.00	1759.86	2.00	33.00	3089.69	4.00	35.00	3642.57
제 6단계 역해석 결과	0.10	23.84	638.98	3.39	29.91	8481.72	2.52	44.28	2290.01
제 7단계 역해석 결과	0.20	24.02	1257.40	3.33	30.78	3206.99	5.13	51.63	4503.59

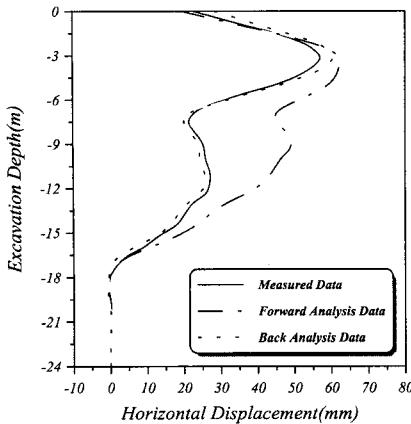


그림 23. 제 6단계(16.5m 굴착) 계측 결과를 이용한 역해석 변위

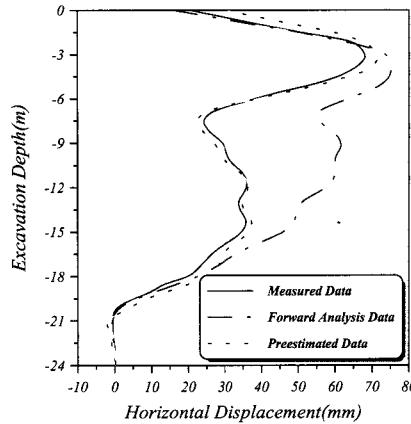


그림 24. 제 6단계 역해석결과에 의한 제 7단계 (19.5m 굴착) 예측변위

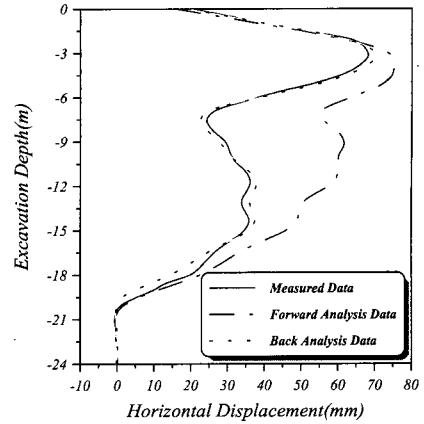


그림 25. 제 7단계(19.5m 굴착) 계측결과를 이용한 역해석 변위

다음 굴착단계의 안정성 여부를 판단할 수 있는 지반 굴착 흙막이공의 종합관리 시스템(TOMAS-EXCAV)을 개발하였다. 또한, GUI(Graphic User Interface)를 통해 실무에서 손쉽게 활용할 수 있으며, 적합한 보강대책 및 설계변경 등을 합리적으로 처리할 수 있도록 하였다.

- (2) 보다 효율적인 역해석이 수행될 수 있도록 역해석 대상변수를 내부마찰각(ϕ), 점착력(c) 및 지반반력계수(k)로 설정하였으며, 이를 변수에 대한 고찰을 위해 변수연구를 수행하였다. 변수연구 결과 각 역해석 대상변수를 일정범위에서 변화시켰을 때 공통적으로 나타나는 현상이 최적의 해인 전역최소점 이외에 국부최소점이 다수 존재하며, 이는 역해석 대상변수가 많을수록 뚜렷하게 나타났다. 그러나 대상변수의 초기값 설정시 실제값에 근접한 적절한 값을 적용하는 경우가 실제값과 큰 차이의 초기값을 적용한 경우보다 더욱 신뢰성 있는 전역적 최소값에 접근하였으며, 이러한 결과로 보았을 때 역해석 수행 시 각 변수의 초기값 선정이 역해석 결과의 정확도에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.
- (3) 본 연구에서 개발된 시스템의 신뢰성을 높이기 위해 3가지 case의 최적화기법을 대상으로 지반물성치 추적, 목적함수 수렴성 및 연산회수 등에 대해 비교 분석하였으며, 분석결과 지반특성에 따라 ALM-BFGS 방법과 SQP-MMFD 방법이 효과적인 것으로 나타났다.
- (4) 본 시스템의 적용성 및 신뢰성을 검증하기 위해 2개 소의 실제 흙막이현장 계측결과를 대상으로 역해석을 수행한 결과 계측된 변위의 형상 및 최대수평변

위량 등을 잘 추적하고 있어 본 시스템의 적용성 및 신뢰성을 입증하였다. 아울러, 본 연구에 적용된 2개 소의 흙막이 현장은 암반이 포함된 일반적인 지반에 해당되므로, 향후 연약 점성토지반의 흙막이 현장에 대해서도 실시하고자 하며, 현재 토질정수 만에 의한 역해석기법을 다양한 변수설정에 의한 역해석기법으로 확대하고자 한다.

- (5) 결론적으로 지반굴착 흙막이공사 시 본 연구에서 개발된 지반굴착 흙막이공의 정보화시공 종합관리 시스템을 활용하면 설계부터 굴착 및 지하구조물 시공 시까지 신속하고 합리적인 안정성 평가를 할 수 있게 되어 현재 절대치 관리에 의해 이루어지고 있는 지반굴착 흙막이공사를 예측관리에 의한 안전하고 경제적인 공사관리가 될 수 있는 한 단계 높은 정보화시공에 큰 기여를 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 건설교통부(1998), “토류벽의 굴착단계별 거동예보 시스템”.
2. 권오순, 정충기, 김재관, 이해성, 김명모(1999), “굴착 관리 정보화 시스템의 개발 및 적용”, 한국지반공학회지, 제15권, 제4호.
3. 이해성, 정충기, 김재관, 김봉균(1996), “탄소성 지반 스프링 모델에 의한 굴착 해석시 지반의 물성치 평가를 위한 역해석”, 대한토목학회 논문집, 제16권, 제I-5호.
4. 오정환, 조철현, 김성재, 백영식(2001), “지반굴착 흙막이공의 정보화시공 종합관리를 위한 역해석 프로그램 개발”, 정보화시공 학술발표회, 한국지반공학회.
5. Cividini, A., Gioda, G., Barla, G.(1985), “Calibration of a Rheological Material Model on the Basis of Field Measurements”, 15th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Nagoya.
6. Dunncliff, J.(1988), Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance, John Wiley & Sons, Inc.
7. Gioda G. and Marier, G.(1980), “Direct Search Solution of an

- Inverse Problem in Elastoplasticity : Identification of Cohesion, Friction Angle and In-situ Stress by Pressure Tunnel Tests", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol.15.
8. Goldberg-Zoino and Associates(1976), "Lateral Support Systems and Underpinning", *FHWA*, pp.257~210, Vol.1.
9. Hisatake, M. & Ito, T.(1985), "Back Analysis for Tunnels by Optimization Method", *Proceedings of 15th International Conference of Numerical Methods in Geomechanics*, Nagoya.
10. Sakurai, S. & Takeuchi, K.(1983), "Back Analysis of Measured Displacements of Tunnels", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol.16, No.3.
11. Sakurai, S.(1988), "Interpretation of the Results of Displacement Measurements in Cut Slopes", *2nd International Symposium on Field Measurement in Geomechanics*, Kobe.
12. Vanderpaats, G. N.(1984), *ADS-a Fortran Program for Automated Design Synthesis*, Ver 1.10, NASA CR 172460.
13. Vanderpaats, G. N.(1984), *Numerical Optimization Techniques for Engineering Design*, McGraw-Hill, Inc.

(접수일자 2001. 11. 1, 심사완료일 2002. 4. 10)