

굴착 관리 정보화 시스템의 개발 및 적용

Development and Application of Construction Control System for Excavation

권 오 순*¹

Kwon, O-Soon

정 충 기*²

Chung, Choong-Ki

김 재 관*²

Kim, Jae-Kwan

이 해 성*³

Lee, Hae-Sung

김 명 모*⁴

Kim, Myoung-Mo

Abstract

Since the reliability of results by the existing analyzing method is low, in the case of for excavation performed in urban area whose stability is of great importance, construction control based on field monitoring is always necessary. But the field monitoring reflects only the behavior of construction process that has already been carried out, and it has limitations in predicting the behavior of the expected construction process, which is practically more important for construction control.

In this study, construction control system for excavation which can predict the behavior of the expected processes during construction with high degree of accuracy, is developed by adopting inverse analysis. The inverse analied applied field monitoring results to excavation analysis can improve the reliability of predicted results. The developed system uses an elasto-plastic soil spring model for the excavation analysis and the minimization of least squared errors between measured displacements and calculated displacements for the inverse analysis. All the required processes for construction control can be performed as an integrated work within the system reflecting real time application and user's convenience. Their applicabilitis are confirmed by two case studies.

*¹ 정희원, 한국해양연구소 연안항만공학연구센터 선임연구원

*² 정희원, 서울대학교 공과대학 토목공학과 부교수

*³ 정희원, 서울대학교 공과대학 토목공학과 조교수

*⁴ 정희원, 서울대학교 공과대학 토목공학과 교수

요 지

일반적으로 도심지에서 이루어지는 굴착은 안정성의 중요도에 비하여 해석의 정확도가 떨어지기 때문에 시공 중 현장계측관리가 필수적으로 수반된다. 그러나 계측은 이미 진행된 공정의 거동을 나타내는 것이고, 실제로 시공관리에 도움이 되는 향후 예정된 공정에 대한 예측에는 한계가 있다. 본 연구에서는 계측결과를 해석에 반영하여 예측 결과의 신뢰성을 제고하는 역해석기법을 이용하여 굴착 시공 중 차후 공정의 거동예측을 정확하게 예측할 수 있는 굴착 관리 정보화 시스템을 개발하였다. 개발시스템은 탄소성 지반스프링 모델을 이용한 탄소성 기법을 토대로 측정변위와 모델에 의하여 계산된 변위간의 최소자승 오차를 최소화하는 역해석 기법을 사용하였으며, 정해석, 계측관리, 역해석을 시스템 내에서 일관되게 수행할 수 있고, 실시간 적용과 사용자의 편의를 감안하였다. 개발된 시스템을 두 가지 사례에 적용한 결과 굴착 지반의 거동을 정확하게 예측할 수 있음을 확인하였다.

Keywords : Excavation, Field monitoring, Wall displacement, Inverse analysis

1. 서 론

굴착 특히 도심지에서 이루어지는 대심도 굴착은 굴착 구조물뿐만 아니라 인근에 위치한 구조물의 안정성에도 영향을 줄 수 있으므로 합리적인 설계와 함께 철저한 시공관리가 필수적이다. 그러나 일반적으로 굴착공사는 본 구조물의 설계를 위한 가설구조물이기 때문에 일반 영구 구조물보다 설계 및 공정관리가 상대적으로 허술하고 설계시 조건과 시공 중 조건이 상이한 경우가 많다. 뿐만 아니라 다양한 굴착공정은 해석에 필요한 경계조건을 복잡하고 가변적으로 만들며 지지부재의 선행 재하와 부재간의 접합점의 구속조건, 벽체-지반 상호작용 효과 등 아직 명확하게 밝혀지지 않은 매카니즘이 많이 존재하고 있다. 따라서 설계시 정확한 거동을 예측하기는 어려운 실정이므로 시공 중 지속적인 현장 계측을 통한 굴착구조물과 인근 구조물의 안정성 검토는 필수적이다.

국내에서 굴착구조물의 해석과 설계를 위해서 사용되고 있는 해석법은 탄소성 지반스프링모델을 이용한 방법(탄소성법)과 유한요소법이 있다.

유한요소법은 거동예측에 필요한 이론적 근거가 분명하고 굴착시 전반적 거동을 종합적으로 평가할 수 있는 장점은 있으나, 해석방법이 복잡하고 설계 입력치의 선정에 어려움이 있어서 실무에서의 사용성은 아직은 낮은 편이다. 탄소성법은 지반의 특성을 지나치게 단순화하였기 때문에 이론적 근거가 미흡하다는 단점은 있지만 설계입력치의 선정을 비롯하여 사용성이 간편하다는 장점 때문에 국내에서 널리 사용되고 있다.

대부분 국내 굴착공사 현장에서는 탄소성법에 의하여 관련 구조물을 설계하고, 그에 따라 시공하면서 안정성은 현장계측만을 통하여 이루어지고 있으며, 설계시의 예측치를 이용한 시공관리는 전혀 이루어지고 있지 않다. 이는 설계 예측치와 현장 계측치의 심각한 괴리 때문에 예측치에 대한 신뢰성이 매우 낮기 때문이며, 이는 또한 해석방법의 부정확성에도 원인이 있지만 불확실한 지반정보와 굴착공사의 특징인 시공조건 의 복잡성과 가변성에서 기인한다고 볼 수 있다. 최근 현장계측이 실제 지반조건과 시공조건을 반영한다는 점에서 계측자료를 다시 해석에 반영하여 예측치의 신뢰성을 제고하는 역해석 기

법에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. 즉, 불확실한 정보를 계측된 자료를 통하여 보완하여 해석에 반영함으로써 예측에 대한 신뢰도를 증진시키는 방법이다. 이러한 역해석 기법이 굴착시 시공관리에 도입이 된다면 현재 공정의 계측을 통하여 차후 공정의 거동을 정확하게 예측함으로써 효율적인 시공관리를 이룰 수 있을 것이다.

이 연구에서는 이러한 역해석 기법을 이용한 효율적인 굴착 관리 정보화 시스템을 개발하였으며, 본 논문에서는 개발된 프로그램의 구성 및 특성과 함께 실제 적용 사례에 대하여 설명하고자 한다.

2. 굴착 관리 정보화 시스템

일반적으로 굴착은 가시설물이라는 개념으로 인하여 정확한 설계 및 해석 그리고 정밀한 시공의 중요성에 대한 인식이 다른 구조물에 비하여 낮을 뿐만 아니라, 다양한 시공방법 및 그에 따른 복잡한 해석조건 등과 함께 시공의 가변성도 매우 커서 그 거동을 정확하게 예측하기는 매우 어렵다. 그러나 특히 도심지에서의 굴착은 그 영향범위가 공사장 내부에 한정되는 것이 아니라 인근 구조물에 영향을 미칠 수 있어 그 시공관리가 매우 중요하기 때문에 현장계측에 의한 구조물의 안정성을 주기적으로 점검해야 한다. 그러나 현장계측에만 의존한 시공관리는 계측치의 크기 또는 변화 추세에만 의존하기 때문에 시공관리에 실제로 도움이 되는 차후 공정의 거동을 예측하는 것에는 한계가 있다.

차후 시공과정에서의 정확한 거동 예측을 위해서는 해석기법의 적용이 필요하며, 이 때 현장 계측 결과를 이용한 역해석 기법을 적용하여 신뢰성 있는 해석결과가 제공된다면 굴착 시공관리에 크게 도움이 될 것이다. 이러한 정보화 시스템의 효용성을 위해서는 정해석 및 역해석 기

법과 계측 결과들의 신뢰성뿐만 아니라 계측과 해석기법과의 긴밀한 연계체제 구축(시공 중 계측결과를 이용한 해석을 통한 차후 공정의 거동에 대한 실시간 예측결과와 제공)이 필수적이다.

일반적인 정보화 시공관리를 위한 과업의 흐름은 4단계로 구분될 수 있다.

- 1) 계획 구조물의 설계
- 2) 시공 및 계측
- 3) 계측결과를 이용한 역해석 및 역해석 결과를 이용한 차후 공정의 재해석
- 4) 해석결과를 이용한 차후 공정에 대한 안정성 검토 및 대책수립

이러한 정보화 시공 관리 시스템의 체계를 위하여 관건이 되는 사항은 설계에 필요한 정해석 기법과 계측과 해석의 접목에 필요한 역해석기법을 구축하고 계측결과와 함께 신속하고 간편하게 연계하여 사용할 수 있도록 하는 것이다.

이 연구에서는 굴착 정해석을 위해서는 탄소성법을 토대로 하여 김재관 등(1996)에 의하여 개발된 기법을 적용하였으며, 역해석을 위해서 이 해성 등(1996)에 의하여 개발된 RQP(Recursive Quadratic Programming)를 이용한 최적화기법을 사용하였다. 그리고 정해석과 역해석 및 계측 결과들의 입·출력에 대한 호환성을 갖도록 전체 시스템을 구축하였다.

2.1 굴착 해석기법

현재 굴착해석에 가장 널리 사용되고 있는 탄소성 해석법은 지반을 탄소성 지반스프링으로 모델링하여 굴착시 지보재 및 토류벽의 거동을 해석하는 방법이다. 탄소성 해석법은 지반의 모델링과 토압 분포의 가정에 따라 여러 가지 방법으로 사용되고 있으며, 지반을 탄소성 스프링으로 보고 인접한 스프링은 서로 독립적인 것으로 가정하는 탄소성 Winkler 모델이 주로 사용되고

있다. 토압 분포에 대한 가정 및 굴착과정에 대한 모사 측면에서는 굴착 배면측 토압을 유효주동토압으로 가정하는 야마가타 확장법(Yamagata 등, 1969; Nakamura와 Nakazawa, 1972)과 굴착 배면측 토압의 변화도 고려하는 모리시게 방법(森重, 1975)이 널리 활용되고 있다. 그러나, 기존의 탄소성 모사기법은 굴착단계와 무관한 유일해가 보장되지 못한다는 사실이 김재관 등(1996)에 의해 증명된 바 있다. 이 연구에서는 Ghaboussi와 Pecknold(1984)가 제안한 유한요소법에 의한 굴착 모사기법을 도입하여 탄소성 스프링으로 모델링된 지반에서도 영역단조수축 굴착 해석시 유일한 해를 주는 새로운 탄소성 지반 스프링 굴착해석기법(김재관 등, 1996)을 적용하였다.

토류벽 양쪽 지반, 지보재(스트럿 및 앵커) 그리고 토류벽체를 각각 탄소성 스프링, 탄성스프링, 단위길이의 연속보로 이상화하면 평형상태를 유지하고 있는 토류구조물의 지배방정식은 탄소성 지반 위의 탄성 보에 대한 미분방정식으로 주어진다 (이해성 등, 1996).

$$EI \frac{d^4 u}{dx^4} + F_L(u) + F_R(u) + \sum_{j=1}^{n_{sp}} K_{sp}^j (u(x_j) - u_{sp}^0(x_j)) = q \quad (1)$$

여기서, EI 는 토류벽의 강성, K_{sp}^j 는 j 번째 지보재의 강성, n_{sp} 는 지보재의 개수, x_j 는 j 번째 지보재의 위치, $u_{sp}^0(x_j)$ 는 j 번째 지보재 설치 직전의 j 번째 지보재 위치에서의 토류벽의 변위, q 는 외부하중, 그리고 F_L 과 F_R 은 전면측과 배면측의 토압함수를 나타낸다. 지보재에 가해지는 선행하중은 탄성스프링의 초기내력으로 고려하였다. 배면측에서는 지반의 깊이가 굴착 공정에 관계없이 일정하게 유지되기 때문에 토압 함수 F_R 은 일정하다. 그러나 토류벽의 전면측에서는 굴착의 진행에 따라 일정한 위치에서의 지반 깊이

가 달라지게 되어 토압함수 F_L 이 변하게 된다. 지보재에 가해지는 선행하중 그리고 배면에 작용하는 상재하중 및 벽체에 작용하는 수압은 외부하중으로 고려하여(김명모 등, 1997) 식 (1)의 오른쪽 항에 포함된다.

토압함수가 변위에 대한 이력의존성 함수이기 때문에 식 (1)은 비선형 미분방정식이 되어, 각 굴착 단계에서 증분식에 의하여 풀어야 한다. 김재관 등(1996)에 의하여 제안된 굴착해석 기법을 식 (1)에 적용하면 k 번째 굴착에 의하여 발생하는 변위 증분에 대한 지배방정식을 구할 수 있다.

$$EI \frac{d^4 \Delta u^k}{dx^4} + \Delta F_L^k + \Delta F_R^k + \sum_{j=1}^{n_{sp}} K_{sp}^j \Delta u^k(x_j) = \Delta q^k \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에 포함되어 있는 토압함수에 대한 자세한 정의는 참고 문헌 2(이해성 등, 1996)에 유도되어 있다. 변위의 증분을 적절한 형상함수를 사용하여 이산화하고 유한요소법을 식 (2)에 적용하면 다음과 같은 증분형 강성도 방정식을 구할 수 있다.

$$K_{\alpha}^k \Delta U = \Delta f \quad (3)$$

여기서, K_{α}^k , ΔU 그리고 Δf 는 각각 k 번째 굴착 단계에서의 접선 강성도 행렬, 절점 변위 증분 그리고 등가 절점 하중의 증분이다.

2.2 탄소성 역해석

공학적인 문제에서 사용되는 변수는 설계변수(design variable)와 응답변수(response variable)로 구별할 수 있다. 정해석은 설계변수가 주어진 상태에서 응답변수를 구하는 과정이며, 역해석은 응답변수를 이용하여 설계변수를 추정하는 과정이다. 이 논문에서는 벽체 변위를 응답변수로 사용하였으며, 토류구조물의 역학적인 특성을 결정

하는 지반의 지반반력계수, 점착력 및 내부마찰 각과 지보재의 강성을 설계변수로 설정하였다.

이해성 등(1996)은 굴착해석 모델에서 사용된 자유도 보다 작은 수의 측정변위를 전 해석영역으로 보간하기 위하여 식 (3)에서 정의되는 강성도 행렬의 고유 벡터를 사용하였다. 이러한 접근 방법은 측정변위에 오차가 포함되어 있지 않을 경우에는 대단히 효과적으로 사용될 수 있다. 그러나, 실제 상황에서는 측정 변위에는 측정 오차가 포함되어 있고 또한 탄소성 Winkler 스프링이 실제 토류구조물의 거동을 엄밀히 나타낼 수 없다. 따라서 이해성 등이 제한한 전 해석 영역에 대하여 주어지는 목적함수를 사용하면 측정치에 포함되어 있는 오차가 전 해석영역으로 전파되게 되어 역해석시 수치적 불안정이 발생할 수 있다. 이러한 단점을 극복하고 실제 시공조건에서 보다 정확한 설계변수를 추정하기 위하여 이 연구에서는 point-collocation 형식의 목적함수를 사용한다.

설계변수를 추정하기 위한 역해석은 계측지점에서 측정된 변위와 유한요소 모델에 의하여 계산된 변위간의 최소자승오차를 최소화하는 문제로써 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \text{Min } \Pi &= \frac{1}{2} \| \tilde{\mathbf{u}}^k(\mathbf{X}) - \bar{\mathbf{u}}^k \|^2 \\ &\text{subject to } \mathbf{R}(\mathbf{X}) \leq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $\tilde{\mathbf{u}}^k$ 와 $\bar{\mathbf{u}}^k$ 는 각각 k 번째 굴착 단계의 계측점에서 계산된 변위와 측정된 변위이고, \mathbf{R} 과 \mathbf{X} 는 각각 구속조건 및 설계변수이다. $\|\cdot\|$ 은 벡터의 Euclidean norm을 의미한다. 구속조건은 각각의 설계 변수가 물리학적 의미를 가지는 영역 내에서 존재하도록 하기 위하여 사용되며 각 설계변수의 상한치와 하한치에 대하여 선형으로 표시된다. 유한요소 모델에 의한 계산 변위는 설계변수에 대한 비선형함수이기 때문에 식 (4)에서 목적함수는 설계변수에 대한 비선형 함

수이다. 비선형 최적화 문제를 풀기 위하여 반복적 이차 근사법(Recursive Quadratic Programming; Luenberger, 1989)을 사용한다. 반복적 이차 근사법을 사용하여 최적화문제를 풀기 위해서는 설계변수에 대한 목적함수의 gradient와 hessian이 필요하며, 목적함수의 hessian을 구하기 위해서는 설계변수에 대한 변위의 1차 민감도 및 2차 민감도가 필요하다. 그러나, 변위의 2차 민감도를 구하기 어렵기 때문에 변위의 1차 민감도만을 사용하여 hessian 행렬을 근사하는 Gauss-Newton hessian을 사용한다. 변위의 1차 민감도는 식 (3)을 설계 변수에 대하여 직접 미분하여 구한다(이해성 등, 1996).

본 연구의 역해석에서 고려 가능한 설계변수들은 지보재의 강성과 지반정수들이다. 따라서 예측된 결과와 시공시 거동이 차이가 나타나는 것이 해석기법에서 반영할 수 없는 과다 굴착이나 소단의 영향 등 시공조건 변화 그리고 3차원 해석조건 등에 의한 것이라면 직접적으로 기법에 반영할 수는 없다. 그러나 본 역해석에서는 벽체 변위의 계측결과에 맞도록 발생 원인에 상관없이 지반정수 값들과 지보재 강성을 수정하도록 되어 있기 때문에 그러한 모든 발생 원인 등의 영향이 역해석 후 보정된 설계변수들을 통하여 간접적으로 반영되어 있다. 즉 역해석을 통하여 보정된 설계변수는 향후 굴착공정의 예측 결과의 신뢰성 제고에 사용되는 값이며, 그 값들이 실제 설계변수의 개선된 정확한 값은 아니다.

2.3 프로그램의 구성

2.3.1 개발 환경

개발된 프로그램은 C언어와 FORTRAN 언어로 제작되었다. 통합관리프로그램은 C언어인 GNU C/C++로 제작되었으며, 탄소성 정해석을 수행하는 해석 프로그램은 FORTRAN-77언어로

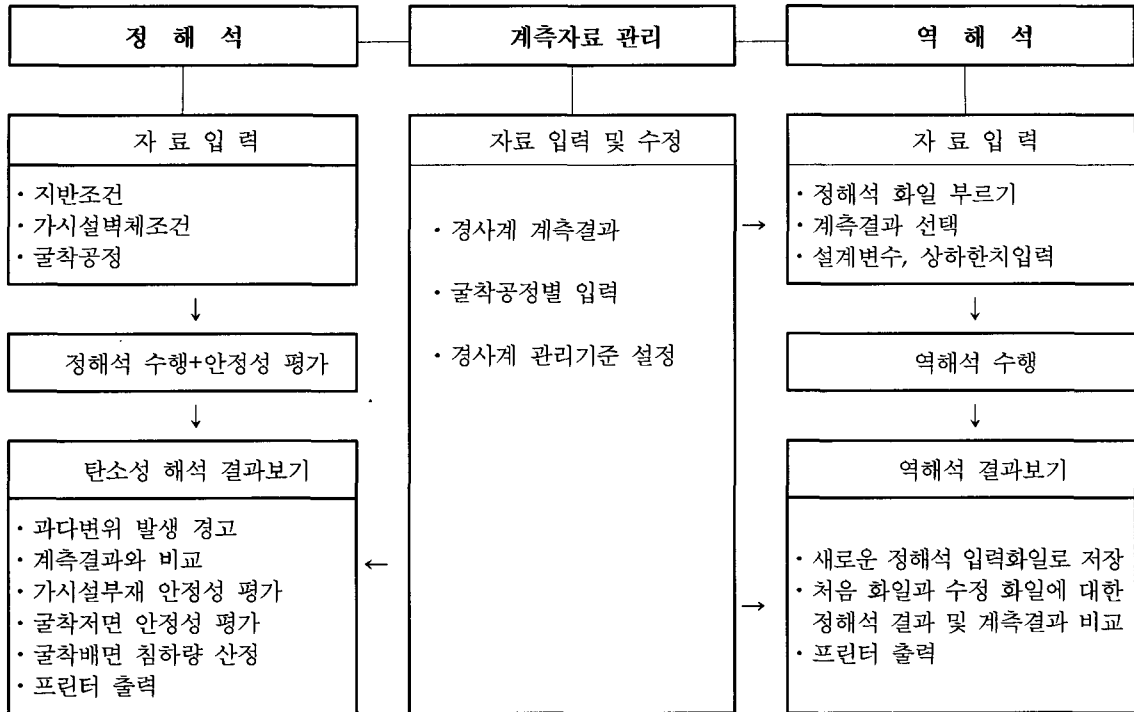


그림 1. 전체 프로그램의 흐름도

제작한 후 F2C를 사용하여 GNU C++언어로 바꾸어 사용하였다. C++언어의 컴파일러는 LINUX 제작 언어인 GNU C/C++를 DOS용으로 변환한 DJGPP를 사용하였으며, FORTRAN언어의 컴파일러는 F77L3을 사용하였다. 이 프로그램은 DOS용으로 제작되었으며, 보호모드 규약으로 VCPI (Virtual Control Program Interface)를 사용한다.

2.3.2 프로그램의 구성

개발된 정보화 시공관리시스템은 크게 탄소성 정해석을 수행하는 정해석과정과 현장에서 계측된 경사계 계측결과를 입력 또는 수정하는 계측자료 관리과정 그리고 경사계 계측결과를 이용하여 탄소성 역해석을 수행하는 역해석과정으로 구성되어 있다. 다음 그림 1은 개발된 프로그램 전체의 간략한 흐름도를 나타낸 것이다. 정해석 과정에서는 입력화일 작성과 정해석 수행 및 안정성 평가, 최종적으로 해석결과를 보여주는 결

과보기와 함께 다양한 후처리과정을 제공하고 있다. 계측결과 관리과정에서는 경사계에서 측정된 자료를 입력 또는 수정하는 과정과 경사계 계측결과에 대한 관리기준치를 설정하는 과정으로 구성되어 있다. 역해석 과정에서는 정해석 입력화일과 경사계 계측결과 화일을 선택한 후, 설계변수를 지정하여 역해석을 수행한다. 역해석 결과 얻어진 응답변수를 사용하여 새로운 정해석 입력화일을 작성하고, 원래의 입력화일과 역해석으로 얻어진 새로운 입력화일에 대한 정해석 결과를 계측결과와 비교하여 제공한다.

3. 적용 사례

3.1 사례-1 현장(서울특별시 수송동 소재)

3.1.1 현장 개요

서울특별시 수송동에 위치한 사례-1 현장의

표 1. 사례-1 현장의 지반조건

구분	깊이 (GL-m)	단위중량 (t/m^3)	점착력 (t/m^2)	내부마찰각 ($^{\circ}$)	지반반력계수 (t/m^3)
매립토층	0.0~2.0	1.53	0.0	30.0	3500
풍화토층1	2.0~15.5	1.64	0.0	40.0	6000
풍화토층2	15.5~20.0	1.64	1.0	42.0	8000
풍화암층	20.0~25.2	2.20	3.0	42.0	10000

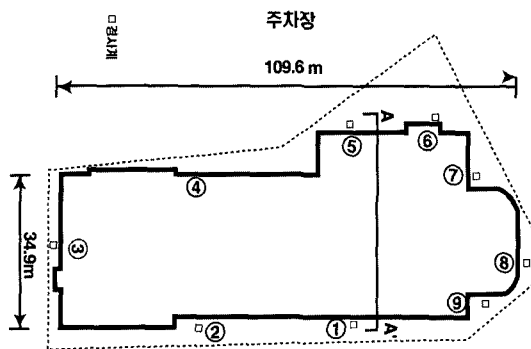


그림 2. 사례-1 현장의 평면도

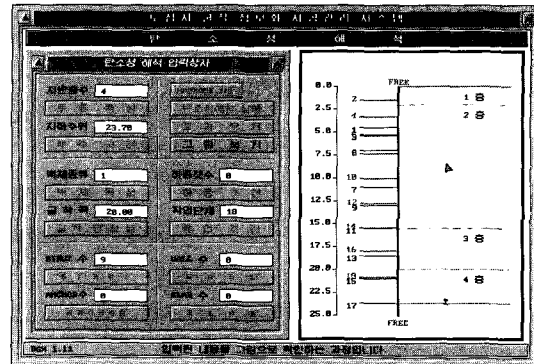


그림 3. 사례-1 현장의 해석단면

가시설 벽체형식은 엄지말뚝(H-300×300×10×15, CTC-1.5m)+토류판이며 스트럿을 지보재로 사용하였다. 해석단면에서 최종굴착깊이는 GL-23.7m이며, 최종굴착공정까지 9단의 스트럿을 설치하였다. H-말뚝은 최종굴착 바닥면 아래 1.5m까지 근입되었다. 스트럿은 H-300×300×10×15를 2열로 사용하였으며 평균 수평설치간격은 4.5m, 평균 수직설치간격은 2.7m이다. 지반조건은 지표에서부터 매립토층, 풍화토층, 풍화암층의 순이며, 지하수위는 굴착 바닥면(GL-23.7m)과 거의 일치하는 것으로 나타났다. 층의 두께와 현장시험(평판재하시험, pressuremeter시험) 및 실내시험을 통해 얻어진 지반의 특성은 다음 표 1과 같다. 풍화토층은 그 특성에 따라 2개 층으로 구분하여 적용하였다.

굴착평면도는 그림 2와 같고 시공 중 안정성 평가를 위하여 설치되는 경사계는 그림과 같이 9곳에 설치하였으며, 이 연구에서는 그 중에서 5번 경사계의 계측결과를 이용하였다.

3.1.2 정해석 및 안정성 평가

계획된 굴착구조물과 각 굴착 공정에 대하여 정해석을 수행하였으며, 이 때 개발된 시스템의 입력과정은 다음 그림 3과 같다. 지반조건과 스트럿 특성을 입력하고 지하수위와 침투조건을 지정하였으며, 굴착과 스트럿 설치를 계획 굴착 공정에 따라 적용하여 최종 18 단계의 공정에 대한 해석을 수행하였다. 해당 굴착 깊이와 스트럿 설치 위치는 그림 3에서 제시한 바와 같다. GL-20.0m 이하에서 나타나는 풍화암은 현장시험과 실내시험의 결과에서 견고한 상태인 것으로 확인되어 탄소성해석에서 적용하는 지반스프링을 탄성스프링으로 고려하였다. 그림 4는 탄소성해석을 수행한 결과를 보여주는 화면으로 최종 굴착단계에서의 토압과 벽체변위, 전단력 및 휨모멘트를 보여주고 있다. 개발된 시스템에서는 각 공정별 배면지반의 침하와 굴착저면의 용기 및 파이핑에 대한 안정성을 평가할 수 있으며, 가시설 구조물의 정보를 입력하면 벽체, 띠장, 스

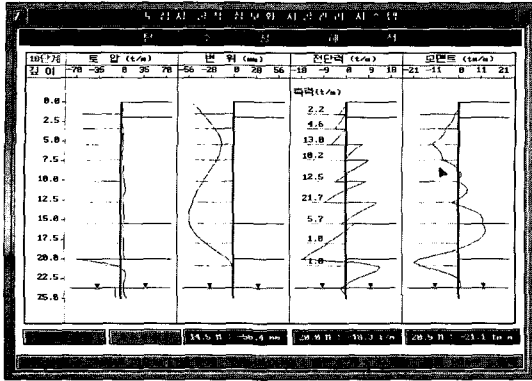


그림 4. 사례-1 현장의 탄소성해석 결과

트럿의 안정성을 평가할 수 있다. 해석 결과 계획 굴착구조물은 모든 굴착 공정에서 안정하며, 지반의 침하 및 굴착저면의 안정성뿐만 아니라 모든 가시설 부재도 안정한 것으로 나타났다.

3.13 역해석

탄소성해석에 의해 얻어진 가시설벽체의 변위와 실제 현장에서 계측된 경사계의 계측결과를 대부분 많은 차이를 보이며, 이는 최종 굴착단계의 가시설벽체 변위에 대한 본 사례의 해석결과와 계측결과를 보여주는 그림 5에서 확인할 수 있다. 이는 탄소성 해석기법의 한계와 함께 불확실한 지반정보 및 시공과정의 복잡성과 가변성 때문이다. 이러한 해석기법상의 문제점과 지반의 불확실성 등을 반영하여 예측의 정확도를 높일 수 있는 입력치들을 결정하기 위하여 개발된 시스템을 이용하여 역해석을 수행하였다. 역해석을 위한 입력과정은 정해석 입력과정과 계측결과를 결합하고 해석에 반영할 공정의 계측자료를 선택하며 역해석을 수행할 설계변수를 지정하는 과정으로 구성되어 있다. 사례-1 현장에서는 각 토층의 지반반력계수와 내부마찰각과 1~7단 스트럿의 강성(탄성계수)을 역해석을 수행할 설계변수로 지정하였다. 역해석에 반영할 계측자료는 각각 5공정(2단 스트럿 설치 후, 7m 굴착 상태)과 15공정(7단 스트럿 설치 후, 21m 굴착 상태)

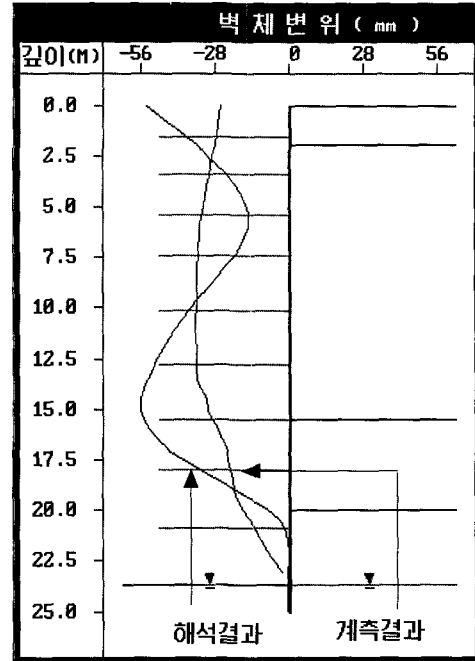


그림 5. 17공정에서의 벽체변위와 경사계 계측결과와의 비교 화면

에서 측정된 자료를 선택하였으며, 각각 역해석을 수행하여 17공정에 대한 벽체변위를 기준으로 그 결과를 비교하였다.

쉽게 예상할 수 있는 바와 같이 해당 공정에 가까운 15공정의 계측자료를 이용하여 역해석을 수행한 설계변수를 이용하는 것이 더 양호한 예측결과를 도출하는 것으로 나타났다(그림 6). 이는 해당 공정에 이르기까지 적용되고 나타난 지반 및 시공조건에 관련한 더욱 다양한 정보들에 근거한 계측결과가 활용되었기 때문이다. 이에 반하여 초기 공정(5공정)의 결과를 이용한 것은 계측결과와 큰 차이를 보이고 있으며, 오히려 초기 정해석과 유사한 결과를 보여 주고 있다. 이는 5공정 이후의 지반 및 시공에 관한 정보가 없는 것이 가장 중요한 원인이라고 할 수 있다. 특히 공정별 계측결과를 보면 9공정 이후 벽체변위가 크게 증가하는데 이러한 현상이 포함되지 못했기 때문으로 판단된다. 또한 초기 해석 및 초

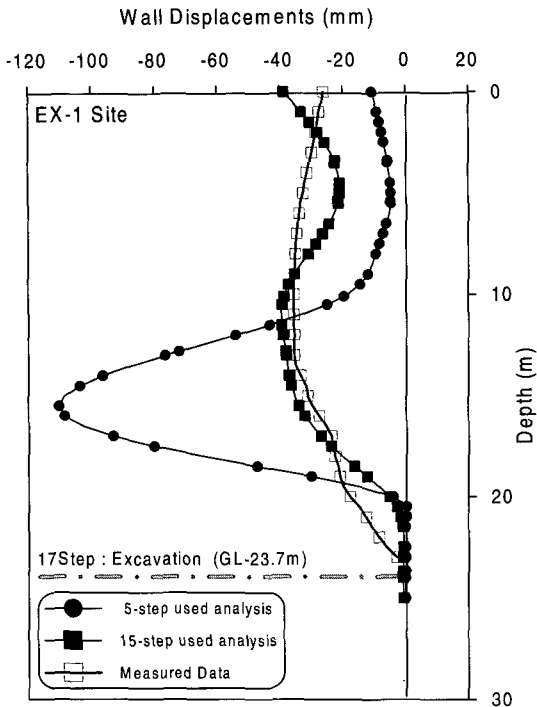


그림 6. 5공정 및 15공정 계측결과에 대한 역해석에서 얻어진 정해석 입력화일에 대한 정해석 결과 비교 (사례-1, 17공정)

기 공정 역해석에 의한 예측결과가 계측결과와 다르게 나타나는 것은 탄소성해석 기법의 한계

와 함께 지반의 불확실성 및 시공조건의 복잡성이 탄소성 역해석만으로 완전하게 해결되지는 않는다는 것을 의미하며, 따라서 이와 관련한 더욱 정확한 정보화 시공관리를 위해서는 지속적인 연구가 필요할 것이다.

다음 표 2는 역해석을 수행한 결과 변경된 설계변수를 정리한 것이다. 앞서 설명한 바와 같이 표에서 제시된 설계변수 값들은 다양한 지반 및 시공조건의 변화를 몇 개의 설계변수만으로 한정하여 반영한 값이기 때문에 실제 개선된 정확한 값은 아니다. 그러나 표 2에서 알 수 있는 바와 같이 벽체변위가 최대로 유발되는 위치인 4단과 최하단의 스트럿 강성이 크게 증가하고 다른 스트럿의 강성은 오히려 크게 감소하였다. 이는 굴착시 최대변위 발생 위치와 최하단의 스트럿이 중요 지보재로 작용한다는 것을 의미한다. 지반의 설계변수의 경우에는 풍화암보다 풍화토가 지반반력계수와 내부마찰각이 모두 크게 나타났는데 이는 시공 중에 최하단인 풍화암층에는 소단(berm)이 존재하기 때문에 그 영향으로 설계변수가 다소 작게 산정된 것으로 판단된다.

그림 7은 15공정 계측자료를 이용하여 역해석

표 2. 사례-1 현장의 역해석 결과로 변경된 지반조건 및 스트럿강성

구 분	내부마찰각 (°)				지반반력계수 (t/m ³)		
	기 준	5공정의 계측자료사용	15공정의 계측자료사용		기 준	5공정의 계측자료사용	15공정의 계측자료사용
매립토층	30.0	50.0	36.5		3500	100	1001
풍화토층1	40.0	50.0	49.8		6000	264681	1183
풍화토층2	42.0	10.0	50.0		8000	11642	16921
풍화암층	42.0	50.0	49.9		10000	300000	2930
스트럿강성 (×10 ² t/m ²)	1단	2단	3단	4단	5단	6단	7단
기 준	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10
5공정의 계측자료사용	0.06	0.37	2.10	2.10	2.10	2.10	2.10
15공정의 계측자료사용	0.04	0.03	0.05	13.30	0.75	1.47	13.48

표 3. 사례-2 현장의 지반조건

구 분	깊 이 (GL-m)	단위중량 (t/m ³)	점착력 (t/m ²)	내부마찰각 (°)	지반반력계수 (t/m ³)
사 력 층	0.0~6.5	1.85	0.0	35.0	3500
풍 화 토 층	6.5~8.5	2.18	1.0	39.0	5000
풍 화 암 층	8.5~12.5	2.20	3.0	42.0	8000
연 압 층	12.5~30.8	2.30	5.0	42.0	10000

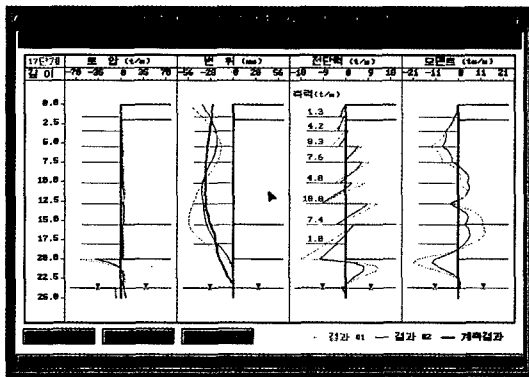


그림 7. 원 정해석 결과와 역해석으로 개선된 정해석 결과 비교. 결과 #1 : 원 정해석, 결과 #2 : 15공정 계측자료 사용

을 수행한 결과에서 얻어진 설계변수를 반영한 새로운 입력화일에 따른 가시설 벽체와 지보재 등에 관련한 해석결과를 보여주고 있다. 실제 벽체변위와 근사한 결과를 토대로 한 이 결과를 이용하면 향후 공정에 대한 정확한 거동예측과 함께 필요한 조치를 취할 수 있을 것이다.

3.2 사례-2 현장(대전광역시 탄방동 소재)

3.2.1 현장 개요

대전광역시 탄방동에 위치한 사례-2 현장의 가시설벽체형식은 지하연속벽과 CIP벽체이며, 앵커를 지보공으로 사용하였다. 해석단면에서 최종 굴착깊이는 GL-29.26m이며, 최종굴착공정까지 10단의 앵커를 사용하였다(수평설치간격 1.6m). CIP벽체(φ400, H-300×200×9×14, CTC-1.6m)가 형성된 후, 보강을 위하여 벽체 하단까지 JSP

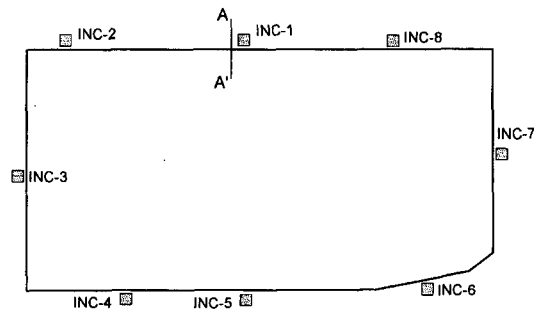


그림 8. 사례-2 현장의 단면도

(φ600, CTC-1.6m)를 시공하였으며, CIP벽체의 후면으로 0.8m 위치에 지표에서 GL-11m의 깊이 까지 SCW를 추가로 설치하였다. 지반조건은 지표에서부터 사력층, 풍화토층, 풍화암층, 연암층의 순이며 지하수위는 GL-2.0m이다. 층의 두께와 현장시험 및 실내시험을 통해 얻어진 지반의 특성은 다음 표 3과 같다.

굴착평면도는 그림 8과 같고 벽체변위의 측정을 위하여 총 8곳에 경사계를 설치하였으며, 이 연구에서는 그 중에서 1번 경사계의 계측결과를 이용하였다.

3.2.2 정해석 및 안정성 평가

그림 9는 사례-2 현장의 해석단면과 입력화면을 나타낸 것이다. 지반조건과 앵커특성을 입력하고 지하수위와 투수조건을 지정하였으며, 굴착과 앵커 설치를 반복적으로 적용하여 최종 21 단계의 공정에 대한 해석을 수행하였다. 해당 굴착 깊이와 앵커 설치 위치는 그림 9에 나타난 바와 같다. GL-12.5m이하에서 나타나는 연암은 탄성

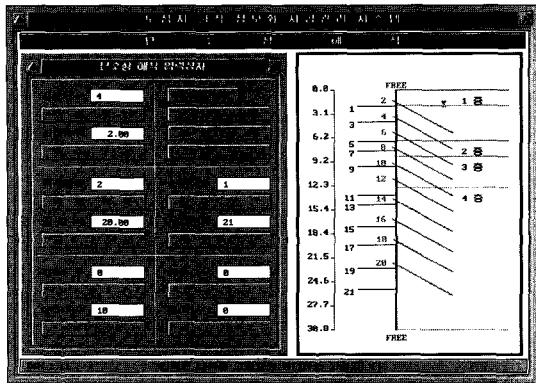


그림 9. 사례-2 현장의 해석단면

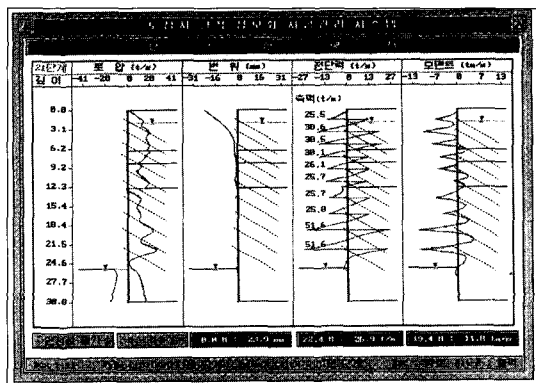


그림 10. 사례-2 현장의 탄소성해석 결과

스프링으로 고려하였으며, 굴착현장에 인접하여 위치한 주택은 상재하중으로 고려하여 적용하였다. 그림 10은 탄소성해석을 수행한 결과를 보여주는 화면으로 최종 굴착단계에서의 토압과 벽체변위, 전단력 및 휨모멘트를 그림으로 보여주고 있다. 해석 결과 계획 굴착구조물은 모든 굴착 공정에서 안정하며, 지반의 침하 및 굴착저면의 안정성뿐만 아니라 모든 가시설 부재도 안정한 것으로 나타났다.

3.2.3 역해석

그림 11은 사례-2 현장의 해석단면에 대한 탄소성 해석결과에서 얻어진 최종 굴착단계의 가시설벽체 변위와 경사계 계측결과를 비교한 것이다. 사례-1 현장과 마찬가지로 계측된 벽체변

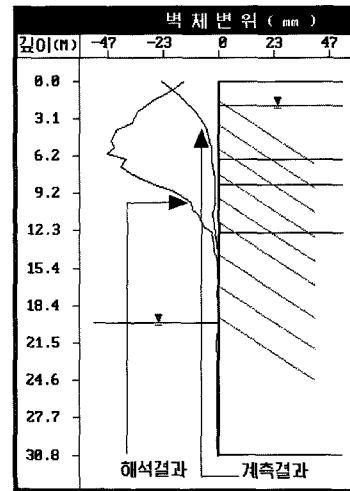


그림 11. 21공정에서의 벽체변위와 경사계 계측결과와의 비교 화면

위는 상당한 차이를 보이고 있는 것을 알 수 있다. 역해석을 위한 응답변수는 벽체변위로 설계변수는 각 토층의 지반반력계수와 내부마찰각이며, 앵커의 강성은 설계변수로 고려하지 않았다. 역해석에 반영할 계측자료는 7공정(3단 앵커 설치 후 7.8m 굴착 상태)과 17공정(8단 앵커 설치 후 19.9m 굴착 상태)에서 선택하였으며, 각각의 경우에 대하여 역해석을 수행하고 해석의 결과에서 얻어진 설계변수를 정해석에 반영하여 벽체변위를 계측결과 및 초기 정해석 결과와 함께 그림 12에 나타내었다.

사례-1과 마찬가지로 해당 공정에 가까운 17공정의 계측자료를 이용한 결과가 더 양호한 예측결과를 나타내는 것을 알 수 있다. 사례-1과 다르게 지보재의 강성을 설계변수로 활용하지 않았는데도 불구하고 예측의 정확도가 높게 나타난 것은 과다굴착이나 소단(berm) 등 스트럿 지보재를 사용할 때 나타날 수 있는 설계시와 다른 시공상황이 앵커 지보재를 사용하는 경우 발생할 수 있는 가능성이 적기 때문이다. 표 4는 역해석을 수행한 결과 나타난 설계변수를 나타낸 것이다. 이 사례의 경우 벽체 후면의 JSP와 SCW

표 4. 사례-2 현장의 역해석 결과로 변경된 지반조건

구 분	내부마찰각 (°)			지반반력계수 (t/m ³)		
	기 존	7공정의 계측자료사용	17공정의 계측자료사용	기 존	7공정의 계측자료사용	17공정의 계측자료사용
사 력 층	35.0	50.0	26.1	3500	27000	17511
풍화토층	39.0	37.5	10.0	5000	27090	16127
풍화암층	42.0	12.9	18.3	8000	23562	3058
연 암 층	42.0	50.0	30.3	10000	122025	12333

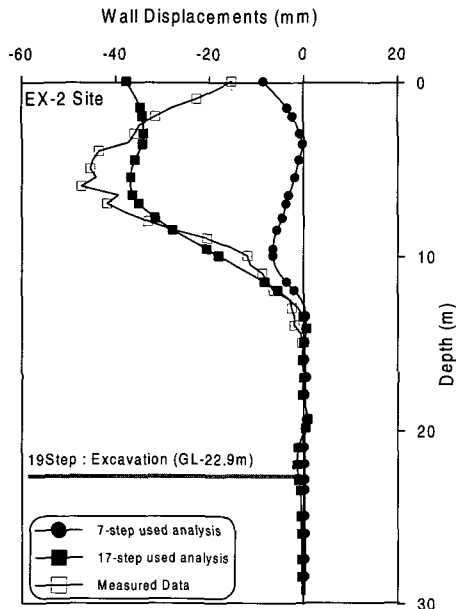


그림 12. 7공정 및 17공정 계측결과에 대한 역해석에서 얻어진 정해석 입력화일에 대한 정해석 결과 비교 (사례-2, 19공정)

등 지반 보강이 되었지만 초기 정해석에서 이를 반영하지 못했기 때문에 역해석 후 나타난 설계 변수에 이에 대한 효과가 반영되어 특히 지반반력계수가 토사층에 대하여 크게 나타났다. 그러나 내부마찰각이 처음 입력치보다 작게 평가된 것은 정확한 원인을 알 수 없지만 초기 정해석보다 크게 발생한 벽체변위의 효과를 역해석에서 앵커의 저항효과의 감소는 배제하고 지반의 강도만으로 고려했기 때문으로 추측된다. 그림 13은 17공정 계측자료를 이용하여 수행된 역해석

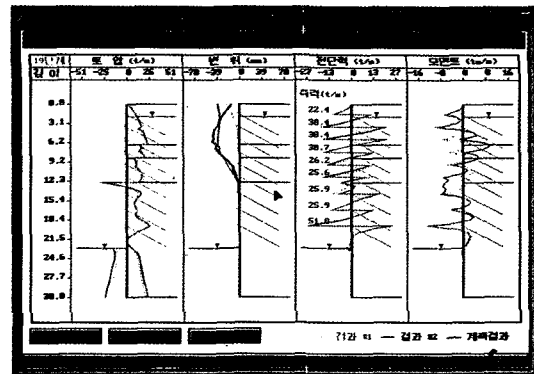


그림 13. 원 정해석 결과와 역해석으로 개선된 정해석 결과 비교. 결과 #1 : 원 정해석, 결과 #2 : 17공정 계측자료 사용

결과에 의해 얻어진 설계변수를 반영한 정해석의 결과를 보여주고 있다.

두 가지 사례를 통하여 개발된 굴착 정보화 시스템의 기법의 실제 현장에 대한 적용성을 확인할 수 있었다. 특히 개발된 시스템은 일반 PC용으로 각 공정별 역해석과 변경된 설계변수를 토대로 한 정해석에 의한 거동예측이 통합적으로 처리되고 수 분내로 그 결과를 얻을 수 있기 때문에 현장에서 실시간 거동예측을 통한 편리한 굴착 정보화 시공 시스템으로 활용될 수 있다. 그러나 실제 시공과 동시에 개발 시스템을 활용하여 그 적용성을 확인하고 문제점을 파악하고 개선하려는 연구가 앞으로 계속 필요할 것으로 생각된다.

4. 결 론

이 연구에서는 지반굴착의 설계와 효율적인 시공관리를 위한 굴착 관리 정보화 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템은 탄소성 기법을 이용하여 지반 굴착을 해석하고 역해석을 위한 최적화 기법에 RQP를 사용하였으며, 정해석과 역해석 및 현장계측을 통합하여 하나의 시스템으로 구성하여 굴착의 설계와 계측 관리 및 역해석을 이용한 정보화 시공 관리를 일관되게 수행할 수 있다. 또한 PC용으로 실시간 사용이 가능하고 사용자 편의를 감안하여 개발하여 실제 현업에서의 사용이 편리하도록 하였다.

두 가지 사례에 대하여 개발 시스템을 적용한 결과 역해석을 통하여 굴착 지반의 거동을 매우 정확하게 예측할 수 있는 것으로 나타나 그 적용성을 확인할 수 있었다. 특히 역해석에서 필요한 계측치를 대상 공정에 가까운 이전 공정을 사용할수록 그 정확성은 크게 향상되며 초기 공정에서의 역해석 결과는 정확성이 떨어지며 이는 차후 지속적인 연구가 필요할 것이다.

비록 역해석을 통하여 나타난 설계변수는 실제 정확한 값은 아니지만 시공 공정과 지반의 특성을 반영한 값들이기 때문에 이에 대한 검토는 설계 단계에서 반영하기 하기 어려운 시공 공정의 영향을 평가할 수 있는 지침으로서의 역할을 수행할 수 있을 것으로 판단되며, 따라서 지금까지 고려하지 못하고 있던 굴착 공정의 특성을 연구하는데 도움을 줄 것으로 생각된다.

감사의 글

이 논문은 현대건설주식회사 건설기술연구소의 연구비 지원(과제번호 94GEO02)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김재관, 이해성, 정충기, 양태석 (1996), "탄소성 지반스프링모델을 사용한 지반굴착해석에서의 해의 유일성," 대한토목학회논문집, 제16권, 제III-3호, pp. 295~301.
2. 이해성, 정충기, 김재관, 김봉균 (1996), "탄소성 지반스프링모델에 의한 굴착해석시 지반의 물성치 평가를 위한 역해석," 대한토목학회논문집, 제16권, 제I-5호, pp. 561~571.
3. 김명도, 정충기, 김재관, 이해성 (1996), "도심지굴착 정보화시공관리시스템의 개발 - 최종보고서," 현대건설주식회사 기술연구소, pp. 4~173.
4. Bjerrum, L. and Eide, O. (1956), "Stability of Struted Excavations in Clay," *Geotechnique*, Vol. 1, No. 1, pp. 32~47.
5. Caspe, M. S. (1966), "Surface Settlement Adjacent to Braced Open Cuts," *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, American Society of Civil Engineers, Vol. 100, pp. 1086~1089.
6. Ghaboussi, J. and Pecknold, D. A. (1984), "Incremental Finite Element Analysis of Geometrically Altered Structures," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 20, pp. 2051~2064.
7. Hansbo, S. (1994), *Foundation Engineering*, Elsevier, Amsterdam, London, New-York, Tokyo, pp. 382~386.
8. Horvath, J. S. (1993), "Bea-Column-Analogy Model for Soil-Structure Interaction Analysis," *Journal of Geotechnical Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 119, pp. 358~364.
9. Luenberger, D. G. (1989), *Linear and Nonlinear Programming*, Addison-Wesley Publishing Co.
10. Mana, A. I. and Clough, R. W. (1981), "Prediction of Movements for Braced Cuts in Clay," *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, American Society of Civil Engineers, Vol. 115, pp. 759~777.
11. Mana, A. I. and Clough, R. W. (1989), "Movement Control of Excavation Support System by Iterative Design," *Foundation Engineering*, Vol. II, American Society of Civil Engineers, Proceedings of Congress.
12. Nakamura, H. and Nakazawa, A. (1972), "Stress Calibration of Earth-Retaining Structures during Construction," *Soil and Foundation*, Vol. 12, No. 4.

13. O'Rourke, T. (1981), "Ground Movements Caused by Braced Excavations," *Journal of Geotechnical Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 107, pp. 1159~1178.
14. Peck, R. B. (1969), "Deep Excavation and Tunnelling in Soft Ground," *7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Mexico, Vol. I
15. Terzaghi, K. (1955), "Evaluation of Coefficients of Subgrade Reaction," *Geotechnique*, Vol. 5, No. 4, pp. 297~326.
16. Yamagata, K., Yoshida, Y. and Akino, N. (1969), "On the Lateral Supports in Temporary Open Cuts," *Soil and Foundation*, Vol. 17, No. 9, pp. 33~45.

(접수일자 1999. 3. 11)