

지하굴착의 역해석에 대한 유전알고리즘의 적용

Application of genetic Algorithm to the Back Analysis of the Underground Excavation System

장찬수¹⁾, Chan-Soo JANG, 김수삼²⁾, Soo-Sam KIM

1) 지오그룹 이엔지 사장, President of Geo Group ENG Co., LTD.

2) 한양대학교 교수, Professor of Han Yang University

개요(SYNOPSIS) : The Observational Method proposed by Terzaghi can be applied for the safe and economic construction projects where the exact prediction of the behavior of the structures is difficult as in the underground excavation. The method consists of measuring lateral displacement, ground settlement and axial force of supports in the earlier stage of the construction and back analysis technique to find the best fit design parameters such as earth pressure coefficient, subgrade reaction etc, which will minimize the gap between calculated displacement and measured displacement. With the results, more reliable prediction of the later stage can be obtained.

In this study, back analysis programs using the Direct Method, based on the Hill Climbing Method were made and evaluated, and to overcome the limits of the method, Genetic Algorithm(GA) was applied and tested for the actual construction cases.

주요어(Key words) : underground, excavation, back analysis, genetic algorithm, optimization, instrumentation

1. 서 론

여러 가지 요인에 의하여 실제 현장에서 발생하는 지반 거동은 설계 시 예측한 거동과 차이가 날 수 있다. 흙막이 벽의 경우에도, 설계 당시에는 충분하지 못하고 불확실한 물성치를 가지고 수행되므로 현장의 지반물성치와 차이가 있을 수 있다는 점, 해석모델이 실제지반의 거동을 완전하게 모사하지 못하는 점, 시공과정에서 단계별 굴착깊이, 지보공 설치순서 등이 설계와 다를 수 있다는 점, 과재하중, 지하수위 등이 설계 시 가정한 것과 다를 수 있다는 점등이 원인이 될 수 있다. 따라서, 조사, 설계, 시공 시에 부득이하게 발생하는 오차나 설계, 시공상의 오류를 보완하고 부족한 지반 정보에 기초한 설계상의 결함을 시공 기간 중에 제거하기 위해서 시공단계별로 계측을 실시하고, 이것으로부터 얻어진 계측자료를 이용하여 지반 물성을 재 산정하여 현재 단계에서의 안전성 확인과 잔여 공사단계에서의 예측의 신뢰성을 높이는 것이 필요하다.

이렇게 함으로써 불완전한 지반정보에 기초하여 과다하게 안전측으로 설계되었을 때는 잔여 시공구간에 대하여 지보공을 감소시키는 등의 방법으로 경제성을 얻을 수 있다. 반면에 지반조건이 설계 시 예측한 것보다 더 나빠서 잔여구간에 대한 위험이 예측된다면 지보공의 증가, 지반보강 등으로 안전성을 기할 수 있다.

그림 1.1은 지하굴착 시스템의 계측 예를 보여주며, 그림 1.2는 이들 계측치를 이용하는 Terzaghi와 Peck의 관측설계방법(1948)의 개념을 보여준다(S. Sakurai, 1999).

국내에서 탄소성보법에 의한 토류벽의 해석은 영국의 Geosolve사의 탄소성 해석프로그램인 WALLAP(retaining WALL Analysis Program)이 도입된 1990년경부터이며, 그 뒤로 국내에서 본 연구자가 개발한 SUNEX(elasto-plastic analysis of Step UNderground EXcavation, 1994)와 Excad(under

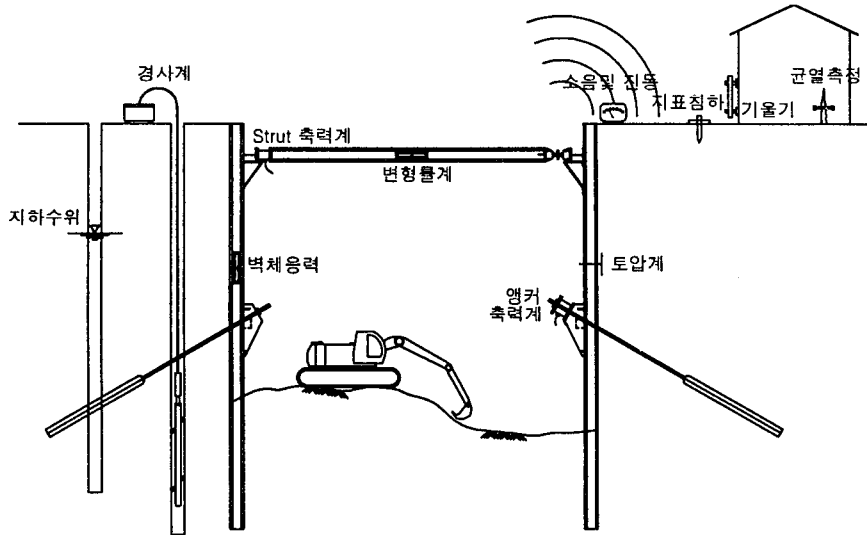


그림 1.1 지하굴착 시스템의 계측 예

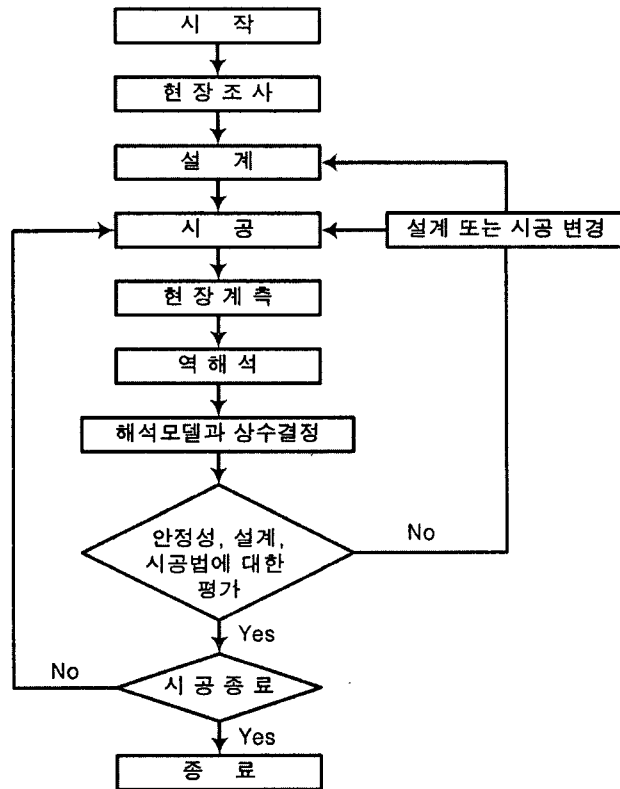


그림 1.2 관측설계방법(Observational method)의 개념도

ground EXCavation Analysis & Design program, 다산 컨설턴트,1993), Excav(한국지오컨설턴트, 1999), 현대건설기술연구소 등(1996) 및 김수일 등(1994, 1997)에서 개발한 프로그램들이 있다.

토류구조물에 대한 역해석으로는 양윤석(1998)과 김우식(1999)의 유한요소법을 이용한 지하굴착시스템의 물성치의 역해석에 대한 연구가 있으며, 최충식(1996), 김봉균(1996), 장범수(1997)는 현장계측결과를 이용한 토압계수 등의 역해석 기법 개발에 대한 연구를, 문준식(1997)은 토류벽의 역해석 대상변수에 대한

연구를 하였다. 현대건설기술연구소 등(1996), 김학문 등(1997), 권오순 등(1999)과 오정환(2001)은 역해석을 이용한 굴착관리 정보화 시스템의 개발에 관한 연구를 수행하였다.

유전알고리즘을 지반분야에 이용한 연구는 김홍택 등(1999)이 소일 네일 벽체의 최적화, 김홍택 등(1999)의 사면의 임계파괴면 예측기법에 관한 연구가 있다. 전용진(1999), 강인규(2001)는 유전 알고리즘을 이용한 piled raft 기초 시스템의 최적설계에 대한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 지하굴착의 역해석에 대한 기존의 방법들과 문제점을 고찰하고, 유전알고리즘을 적용하여 문제점을 극복할 수 있는지를 검토하였으며, 연구결과를 실제 현장에 적용하여 보았다.

2. 역해석의 정식화

2.1 목적함수

지하 굴착공에서는 변위의 계측치와 계산치의 차이가 최소로 되게 함과 동시에 지보공의 축력에 대한 계측치와 계산치의 오차를 최소로 하는 것이 목표이다.

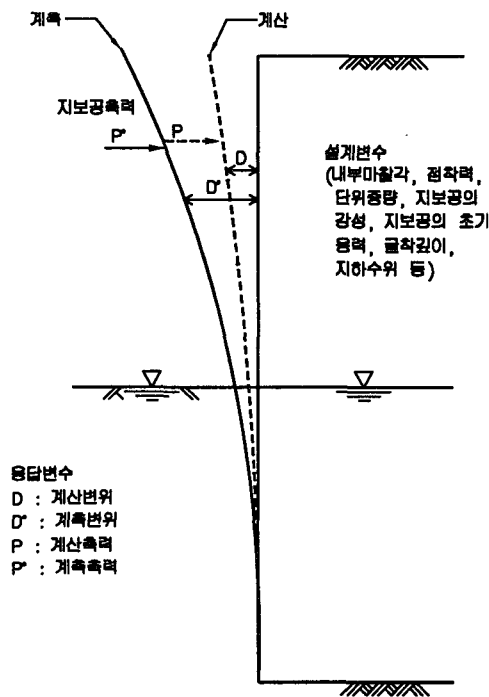


그림 2.1 지하굴착공에서의 계산치와 계측치

즉, 그림 2.1에서 변위의 목적함수는 식 (2.1)과 같고

$$F_1(X) = (D^* - D)^2 \quad (2.1)$$

지보공 축력의 목적함수는 식 (2.2)와 같다.

$$F_2(X) = (P^* - P)^2 \quad (2.2)$$

여기서, D : 계산변위

D^* : 계측변위

P : 계산축력

P^* : 계측축력

이와 같이 목적함수가 2개 이상인 경우를 다중목적함수라 부르며, 식 (2.3)과 같이 합성하여 단일 목적함수로 만들 수 있다.

$$F(X) = \alpha F_1(X) + \beta F_2(X) \quad (2.3)$$

여기서, α, β 는 다중목적함수들의 가중치.

X 는 주동토압계수, 수동토압계수, 지반반력계수등으로 설계변수의 벡터이며, 변위 및 축방향력은 이 설계변수의 결과로 얻어지는 응답변수라고 한다.

$$X = \begin{cases} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ x_n \end{cases} \quad (2.4)$$

2.2 설계변수의 선정

설계변수는 응답변수인 변위와 지보공축력에 영향을 미치는 요소들로서 지반의 점착력, 내부마찰각(토압계수), 지반반력계수, 지보공의 간격, 강성, 초기하중, 지보공의 크리프변형, 지하수위, 과재하중, 단계별 굴착깊이, 지보공의 시공시기 등이다. 이 중에서 역해석에서 구하고자 하는 대상은 계측치에 큰 영향을 미치며 그 값이 미지인 변수 중에서 선택하여야 한다(Arai 1987).

설계 변수들의 값을 변경시켜가면서 응답변수에 얼마나 영향을 미치는지에 대한 민감도 분석을 실시하였다. 그림 2.2와 2.3은 단위중량과 주동토압계수에 대한 민감도 분석결과의 예이다.

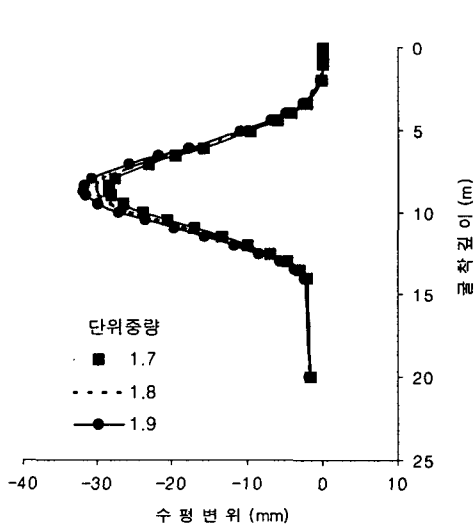


그림 2.2 단위중량에 대한 민감도 분석

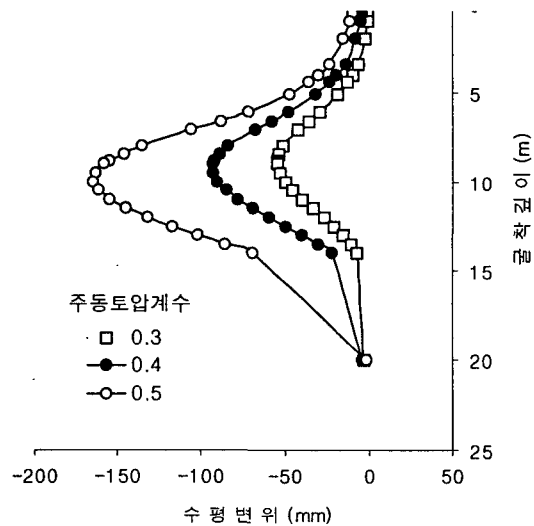


그림 2.3 주동토압계수에 대한 민감도 분석

같은 방법으로 정지토압계수, 수동토압계수, 지반반력계수, 지보공의 크리프 변형들에 대하여 민감도 분석을 하였으며 그 결과가 설계변수에 미치는 영향정도를 정리하면 다음과 같다.

- 단위중량은 통상적인 값의 범위 이내일 경우 거의 영향을 주지 않았다.
- 주동토압은 매우 직접적인 영향을 주었다.
- 정지토압은 실용적인 값의 범위 이내일 경우 거의 영향을 주지 않았다.

- d) 수동토압은 직접적인 영향을 주었다.
- e) 지반반력계수는 매우 낮은 값(500 이하)일 때는 변위를 증가시키는데 영향을 미치지만, 통상적인 값의 범위 내에서는 거의 영향을 미치지 않았다.
- f) 지보공의 크리프 변형은 직접적인 영향을 주었다.

지보공의 특성이나 굴착과정, 지하수위, 하중 등은 계측치에 영향을 미치기는 하지만 기지의 값이며, 지반반력계수, 흙의 단위중량 등은 영향이 적기 때문에 설계변수에서 제외하였다. 주동토압계수와 수동토압계수 및 지보공의 크리프 변형은 큰 영향을 미치므로 설계변수로 선정하였다. 점착력과 내부마찰각으로 토압계수를 구할 수 있지만, 같은 토압에 대하여 무수한 점착력과 내부마찰각의 조합이 가능하므로 Arai의 조건에 따라 토압계수를 선택하였다. 수동토압계수는 식 2.5와 같이 주동토압계수에 반비례하여 변화하는 것으로 하였다.

$$K_p = \tan^2(45 + \frac{\phi}{2}) = \frac{1}{K_a} \quad (2.5)$$

Arai 등(1987)은 역해석 조건에 따라, 어떤 시공단계에서 굴착면보다 토층이 깊은데 있어서 그 층의 토압계수가 별로 영향을 못 미치는 토층의 경우는 그 시공단계의 역해석 대상에서 제외하는 것이 필요하다고 하였다. 문준석(1997)은 다양한 지반조건과 벽체 강성에 대한 파라미터 연구를 수행하면서, 굴착면에서 보통 1.5 ~ 3 m 범위 내 또는 최대 5m의 범위 내에 있는 지반만 설계변수로 고려하면 된다고 하였다.

본 연구에서는 3 m 이내의 토층을 포함하되, 다이아프램월과 같이 지반에 비하여 상대적으로 높은 강성을 가지는 벽체와 같이 깊은 범위까지 상호 영향을 미칠 수 있는 경우 지반반력계수와 엄지말뚝의 강성을 모두 고려하는 특성장(1/β)을 구하여 특성장의 3배 이내의 토층을 포함하도록 함으로써 더 깊은 토층을 포함하도록 하였다.

즉, 영향깊이 = 3 m 또는 $3 \times \frac{1}{\beta}$ 중 큰 값

$$\text{여기서, } \beta = \sqrt[4]{\frac{K_h \cdot B}{4E \cdot I}} \quad (2.6)$$

3. 기존의 역해석 기법

3.1 기본원리

역해석은 목적함수가 최소로 되는 설계변수의 벡터 X를 구하는 것이며, 역산법, 직접법, 통계적인 방법이 있다.(Gioda 1988)

정해석에서는 설계변수를 입력하여 응답변수를 얻는 반면에 역산법은 정해석에 사용되는 방정식을 역으로 하여 응답변수로부터 설계변수를 구하는 방법이다. 대부분의 공학적 문제는 비선형이고 비가역적이기 때문에 역산법으로 풀기가 어렵다.

직접법은 가장 많이 사용되는 방법으로 정해석 방정식을 그대로 사용하여, 가정한 설계변수로부터 응답변수를 계산하고, 그 응답변수와 계측치의 차이를 구한 다음 그 차이가 작아지도록 설계변수를 수정하여 다시 계산하는 반복과정을 거쳐 최적의 설계변수를 구하는 방법이다. 많은 학자들에 의하여 반복과정을 최소로 하면서 효율적으로 설계변수를 구하는 방법들이 연구되어왔으나, 기본적인 원리는 그림 3.1과 같은 등산법(Hill Climbing Method) 또는 최급구배법(steepest Gradient method)이다. 최급구배법은 목적함수가 최대치(또는 최소치)에 도달하는 최대경사를 구하여 그 방향으로 설계변수를 수정해 나가는 방법이다. 최대경사는 목적함수의 미분이 최대가 되는 방향이 된다. 즉 탐색방향 S는

$$S = -\nabla F(X) = -\frac{\partial F(X)}{\partial X} \text{가 된다.}$$

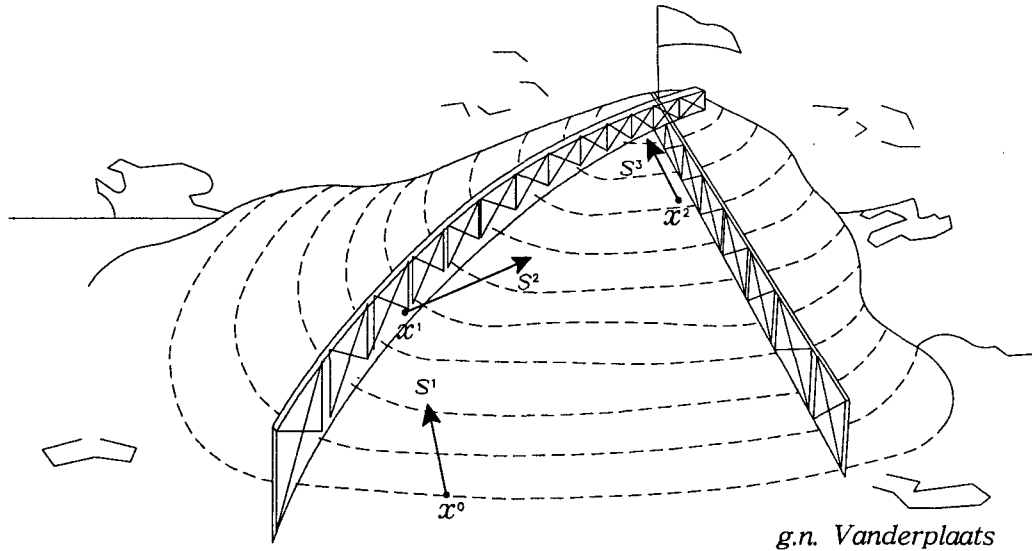


그림 3.1 등산법

3.2 개선된 최적화 기법들

최급 구배법은 합리적인 방법같이 보이지만 미분을 사용하는 탐색법 중에서 가장 성능이 나쁜 것으로 알려져 있다(Vanderplaats, 1984). 특히, 다변수 함수의 최적점 가까이서 수렴속도가 매우 나쁜데, 이는 그 전에 탐색해 온 정보를 이용하지 않고 최급 구배만을 이용하기 때문이다.

수렴 속도를 개선하기 위하여 Fletcher-Reeves는 공액구배법(conjugate gradient)을 개발했는데, 이는 매우 간단한 방법으로 반복 계산량이 작고 컴퓨터 메모리에 대한 제한이 별로 없다는 장점이 있다.

어떤 q 단계에서의 탐색 방향은 식 (3.1)과 같이 정의한다.

$$S^q = -\nabla F(X^{q-1}) + \beta S^{q-1} \quad (3.1)$$

$$\text{여기서, } \beta = \frac{|\nabla F(X^{q-1})|^2}{|\nabla F(X^{q-2})|^2} \quad (3.2)$$

최급 구배법에서는 그림 3.2와 같이 탐색방향이 직전탐색 방향과 직교했으나, 본 방법에서는 직전 탐색방향의 성분이 일부 포함된다는 것이다. 즉, 90°보다 둔각으로 탐색된다. 이 방법으로 탐색을 수행한 예는 그림 3.3과 같으며, 최급구배법에 비하여 매우 효율적임을 보여준다. n 개의 다변수 함수일 때, n 또는 그 이하의 반복계산으로도 수렴한다고 알려져 있다(DOT, 1995).

이 외에도 수렴속도를 개선하기 위하여 2차 미분을 사용하는 Newton법, 1차 미분을 사용하지만 Newton법과 유사한 Quasi-Newton 법 등이 있으며, 제약조건이 있는 설계변수의 문제를 풀기위한 방법으로 Sequential Linear Programming(SLP), Method of Feasible Direction, Sequential Unconstrained Minimization법 등이 있다.

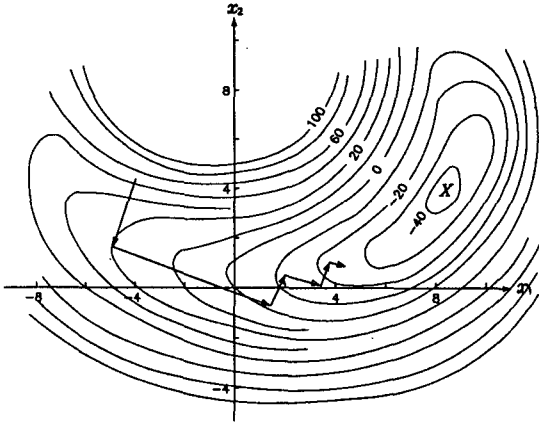


그림 3.2 최급구배법에 의한 탐색과정

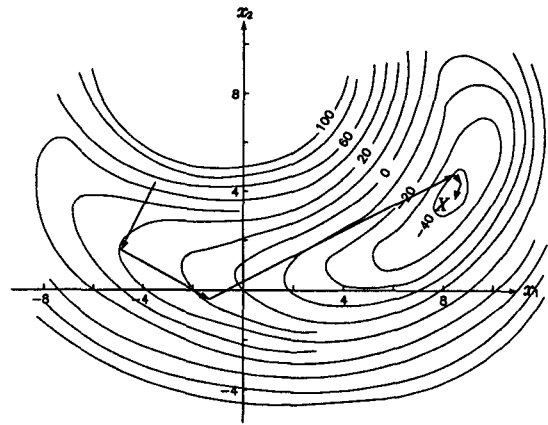


그림 3.3 Fletcher-Reeves 방법에 의한 탐색과정

3.3 직접법의 문제점

그림 3.4는 토류벽의 물성치를 변화시키면서 목적함수인 계산변위와 실측변위의 차이를 도기한 것으로 최적해 외에도 많은 국부해가 존재함을 알 수 있다(오정환, 2001).

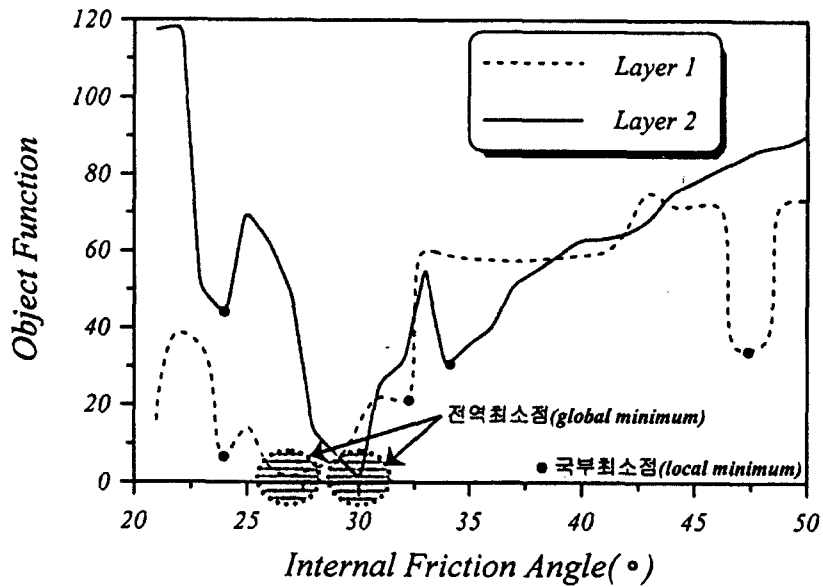


그림 3.4 내부마찰각 변화에 따른 목적함수의 변화(사질토 지반)

직접법은 목적함수의 미분을 사용하므로 탐색속도가 빠르지만 다음과 같은 문제점을 가진다.

- a) 수학적 방법에 의한 최적화는 다봉의 해가 있을 때 전역적인 최적해를 찾지 못하고 국부해를 찾는 경우가 있다.

b) 역해석 결과 구해지는 설계변수는 탐색을 시작하는 초기 설계변수에 의존적이며, 초기 설계변수에 따라 최적해가 아닌 국부해를 찾는거나, 해를 찾지 못하는 경우가 많다.

4. 유전 알고리즘의 적용

4.1 기본원리

유전 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)은 Darwin이 주창한 생명체의 자연진화 법칙인 적자생존과 자연도태의 원리를 토대로 정립된 최적해 탐색 알고리즘이다. 자연진화의 법칙에 의하면 일정한 환경에 무리를 지어 살고 있는 생명체들 중에서 그 환경에 적합한 형질을 가진 개체가 생존할 확률이 크며, 교배와 돌연변이의 과정을 통해 보다 좋은 방향으로 진화해 나가고 부적합한 형질의 개체들은 진화의 과정에서 점차 도태되어 간다고 하였다. 이와 같은 진화의 과정을 되풀이하면 결국 주어진 환경에 가장 적합한 형질의 개체들로 형성될 것이다.

유전 알고리즘은 Holland(1975)와 Goldberg(1987) 등이 이러한 생명체의 자연진화 법칙을 일반 최적화 문제에 적용한 방법으로 설계영역에 다수의 설계점을 분포시켜 목적함수 값과 제약조건의 위반 정도에 따라 각 설계점에 적합도를 부여한다. 적합도가 클수록 다음 단계인 교배와 돌연변이의 과정에 참여할 확률을 크게 하여 적합성이 좋은 설계점에 비슷한 형질을 가진 설계점들이 다음 단계에 보다 많이 형성되어 계산이 진행될수록 전체 설계점들은 좋은 방향으로 탐색이 진행된다. 또한 유전 알고리즘은 자연계의 유전과정을 모방하여 생물학적 유전인자인 염색체와 유사한 구조를 지니는 문자열들 간의 선택, 교배 및 변이연산을 거쳐 다음 세대의 새로운 연산자를 인공적으로 만들어 내는 과정을 통해 적합한 해를 탐색한다.

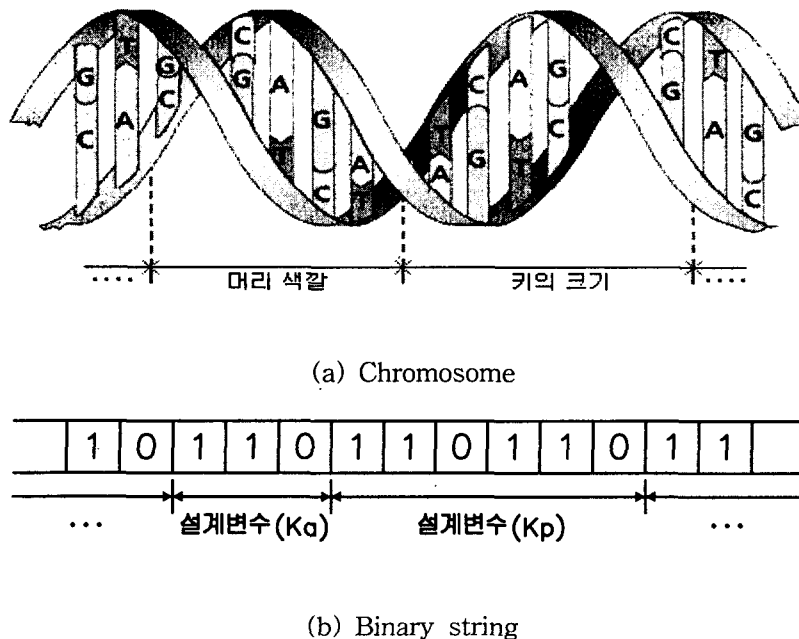


그림 4.1 자연계와 인위계의 유전자

그림 4.1은 자연계와 인위계의 유전자를 비교해서 나타낸 것으로, 유전알고리즘에서 초기모집단의 형성으로부터 적응도의 계산, 선택, 교배, 돌연변이 과정을 거치면서 최적해 해로 진화해 가는 과정은 그림 4.2와 같다.

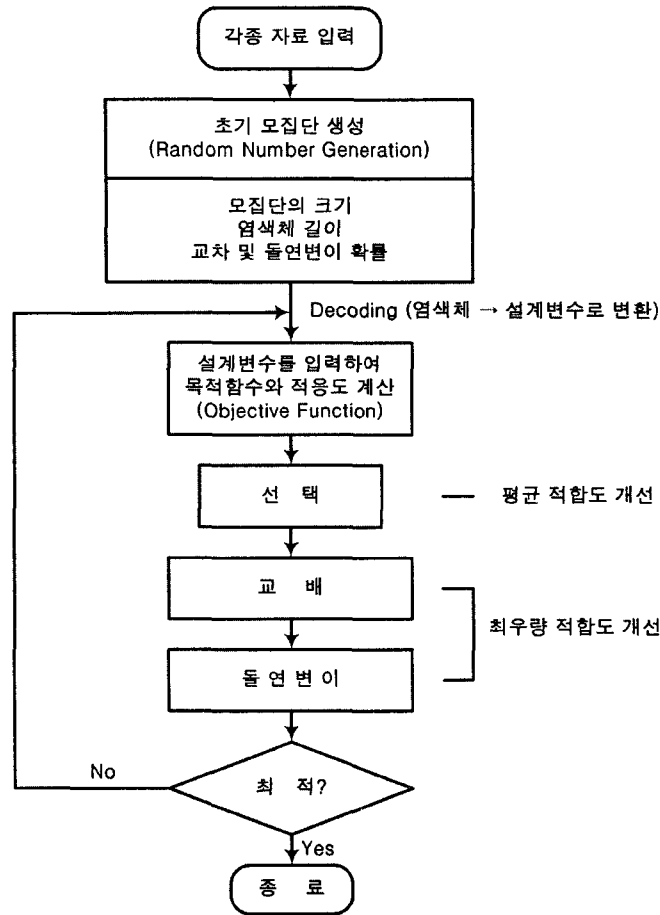


그림 4.2 유전 알고리즘에서의 진화과정

유전알고리즘을 이용한 최적화 기법은 종래의 직접탐색법에 비하여 다음과 같은 특징을 가진다.

1) 설계변수로 코드를 사용

설계변수의 실제 값을 사용하는 대신 2진수 코드 형태의 문자열을 사용한다. 이러한 문자열 형태의 설계변수의 사용은 염색체에 유전인자가 나열해 있는 것과 같은 형태를 지니고 있어 교배와 돌연변이의 변환 과정을 수행하기가 매우 단순하고 편리하다. 2진코드로 변환하지 않고 실수를 사용하는 유전 알고리즘도 있다.

2) 다수의 설계점들을 집단 탐색

대부분의 최적화 방법이 한 점에서 한 점으로의 이동에 의한 국부적인 탐색과정을 가지는 반면에, 유전알고리즘은 여러 개의 설계점들을 동시에 탐색을 행하여 보다 넓은 설계영역에 대한 정보를 활용함으로써, 전체 최적점에 수렴할 확률이 기존의 방법에 비해 상대적으로 매우 크다.

3) 직접 탐색방법

유전알고리즘은 목적함수와 제약조건의 값만을 사용하고 미분값이나 그 외의 다른 정보를 필요로 하지 않는 직접 탐색방법을 이용하므로 복잡하고 다양한 환경의 최적화 문제에 적합하며, 또한 기본 모델이 변경될 때 수정이 용이하다.

4) 확률론적 탐색

유전알고리즘은 탐색과정을 확률론적으로 행하므로 설계집단을 통한 탐색과 더불어 전역적으로 해를

탐색하게 된다. 확률론적 탐색은 유전 알고리즘의 가장 큰 특징중의 하나이며 단점인 동시에 장점이 된다. 미분 가능하며 연속적이고 단봉의 해를 가지는 문제에 있어서는 결정론적 방법에 비하여 탐색속도가 느리지만, 반대로 다봉의 불연속적인 문제에서는 고전적인 방법으로는 해가 보장되지 않지만 유전 알고리즘에서는 매우 효과적으로 전역해를 찾는다. 반면 확률론적으로 탐색하기 때문에 고전적인 방법에 비하여 종료 조건을 정하기가 어렵다는 것은 단점이다. 즉, 현재상태에서 최적의 해가 얻어졌는지 아니면 세대를 반복하면 더 좋은 해가 얻어질 수 있을 것인지의 판단이 어렵다는 점이다.

4.2 단순 유전알고리즘

1) 개체 표현방법

단순유전 알고리즘에서 설계변수의 벡터의 집합인 개체는 2진수로 표현된다. 그렇게 함으로써, 자연현상에서의 교배와 돌연변이에 대한 연산을 쉽게 모사 할 수 있게 된다. 실세계의 설계변수를 이진수로 변환하는 것을 부호화라고 하며 이진수를 다시 실세계의 설계변수로 변환하는 것을 복호화라고 한다.

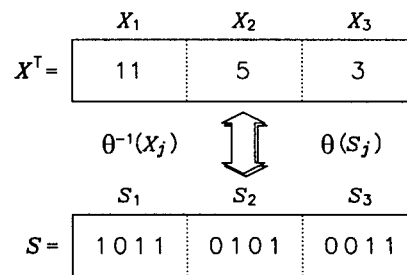


그림 4.3 설계변수의 이진표현

2) 초기 집단의 생성

탐색공간 상의 점들을 표현하는 방법이 결정되면 다음은 연산자를 통해 모의진화가 수행될 초기 개체집단을 생성하는 절차가 요구된다. 초기 집단 P(0)을 생성하는 방법에는 무작위 초기화(random initialization)법과 사전지식 또는 경험을 기반으로 하는 유도된 초기화(directed initialization)법이 있다.

3) 개체 선택법(Selection)

한 세대의 계산이 끝나고 나면 다음세대에 살아남을 개체를 선택하게 된다. 개체 선택에는 그림4.4와 같이 적합도가 큰 개체가 높은 선택확률을 가지는 비례선택법이 많이 사용되며, 이 밖에도 순위 선택법, 토너먼트 선택법등이 있다.

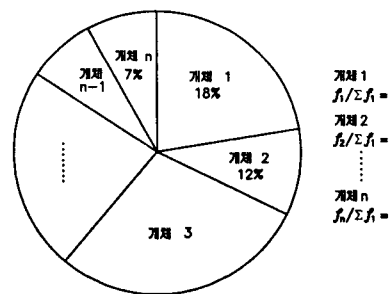


그림 4.4 룰렛휠 선택법

4) 교배 연산자(Crossover)

선택된 두 개의 개체는 교배를 통하여 부모와는 다른 그러나 같지 않은 새로운 개체를 생성함으로써, 넓은 해 공간을 탐색하게 된다. 교배는 보통 그림 4.5와 같은 일점 교배의 방법이 많이 사용되며 2점교배, 다점교배등이 있다.

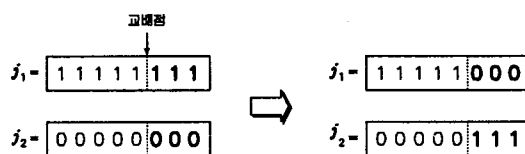


그림 4.5 일점 교배

5) 돌연변이 연산자(Mutation)

개체의 다양성을 유지하기 위한 돌연변이 연산자는 각각의 비트에 대해 돌연변이 확률 P_m 에 따라서 비트를 다른 값으로 치환하는 방법을 적용한다. 그림 4.6은 돌연변이 연산자에 의해 새로운 개체의 생성을 나타내는 그림이다.



그림 4.6 돌연변이 연산

6) 엘리트 선택전략(Elitist Strategy)

엘리트 선택전략은 집단 내에서 가장 우수한 개체가 다음 세대로 변경되지 않고 전달되도록 하여 우수한 개체가 계속 남겨질 수 있도록 하는 전략이다. 선택, 교배, 돌연변이 후 생성된 집단 중의 1개 개체와 가장 우수한 개체를 교체하는 전략이다.

7) 제어 파라미터

유전 알고리즘에서 이를 제어하기 위한 변수에는 여러 가지가 있으나 그 중 중요한 것은 개체군의 크기 (M), 교배확률(P_c), 그리고 돌연변이확률 (P_m)이다. 일반적으로 개체군의 크기 M은 30-200, 교배확률 (P_c)는 80%~95%사이에서, 돌연변이확률 P_m 은 0.5%~1% 좋은 성능을 발휘한다고 보고하고 있다.

4.3 개선된 유전알고리즘

유전알고리즘의 기본인 단순유전알고리즘(Simple Genetic Algorithm, SGA)은 2진수로 표현된 유전자를 이용하며 무작위 탐색에 가깝기 때문에 탐색속도가 느리다. 효과적인 탐색을 위하여 여러방안들이 제안되었으며, 본 연구에서 사용된 개선된 기법들은 다음과 같다.

1) 실수코딩 유전 알고리즘(Real Coding Genetic Algorithm, RCGA)

변수(표현형)와 유전자(유전자형)간에 일대일로 대응하므로 프로 그래밍이 간편해지고 단순유전알고리즘(SGA)에서 요구되는 부호화, 복호화의 프로세스가 필요 없게 되어 탐색속도를 높일 수 있다. 또 해에 관한 사전지식이 없는 경우에도 매우 큰 정의영역을 정하는 것도 가능하다. 이러한 장점이 있지만 실수코딩의 특성상 또는 성능향상을 위하여 교배나 돌연변이에는 이전코딩과는 다른 연산자의 사용이 필요하다.

2) 마이크로 유전 알고리즘(Micro Genetic Algorithm, μ -GA)

단순 유전 알고리즘에서는 반복되는 교배로 최적의 해를 찾기 전에 전체 집단이 동질화 되는 것을 막기 위하여 집단의 크기는 30과 200사이에서 유지되므로(Goldberg, 1989), 이로 인한 계산부담이 크고 속도가 늦다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 Goldberg는 직렬유전알고리즘(Serial GA)안에서 작은 집단을 효율적으로 다룰 수 있는 한 방법을 제시하였다. 이 방법은 그림 4.7과 같이 5개 정도의 작은 집단에서 시작하여, 유전정보의 다양성을 충분히 유지하기 위하여, 집단이 어느 한 점 가까이로 수렴하게 되면 최적의 개체만을 남기고 나머지 집단을 무작위로 재구성해서 다시 시동하게 되며, 계산 시간과 전역 해를 찾는 데 탁월한 성능을 가진 것으로 평가되었다. (Krisnakumar, 1989).

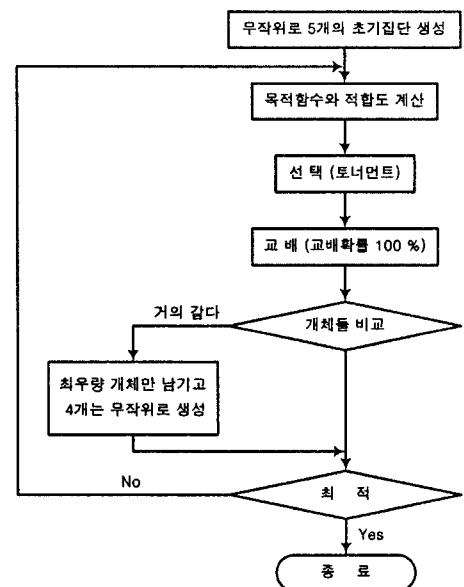


그림 4.7 마이크로 유전 알고리즘의 연산

3) 하이브리드 유전 알고리즘(Hybrid Genetic Algorithm, HGA)

단순 유전알고리즘에서 초기 세대에서 초우량 개체가 출현하면 이를 여러 번 복제하여 집단의 유전적 다양성을 감소시키고, 확률적으로 최적 개체를 반드시 선택하지 못하는 단점을 가지고 있다.

Pham(1995)과 Jin(1996)은 이러한 단점을 극복하도록 구배와 유사한 선택자(gradient-like selector)를 사용하는 하이브리드 유전 알고리즘(Hybrid Genetic Algorithm : HGA)을 제안하였다.

하이브리드 유전알고리즘에서 $k+1$ 세대의 집단은 다음과 같이 구성된다.

$$\overline{x}_{ij}(k+1) = x_{ij}(k) + \eta_i \frac{[f_b(k) - f_i(k)]}{f_b(k)} [x_{bj}(k) - x_{ij}(k)] \quad (1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq n) \quad (4.1)$$

여기서 $x_{ij}(k)$ 와 $x_{bj}(k)$ 는 각각 $x_i(k)$ 와 $x_b(k)$ 의 j 번째 요소이고, $f_i(k)$ 는 i 번째 개체의 적합도이고, η_i 는 양의 상수로서 개체마다 서로 다른 값을 적용할 수 있다.

식 (4.1)에서도 잘 알 수 있듯이 새로운 탐색점 $\overline{x}_{ij}(k+1)$ 은 벡터 $x_i(k)$ 와 최적 벡터 $x_b(k)$ 의 일차결합으로 정의된다. 최우량 개체에서 멀리 떨어진 개체는 최적 개체쪽으로 더 큰 움직임을 받게 되고, 가까이 있는 강한 개체는 더 작은 움직임을 받게 된다. 이렇게 함으로써 툐렛휠에서는 소멸되기 쉬운 약한 개체들을 최적 개체 부근으로 끌어 모으고, 반대로 경쟁자로서 강한 개체들을 원래 위치 부근에 머물게 해준다.

이 연산자의 탐색영역은 η_i 의 선택에 따라 달라진다. 그림 4.8은 이를 도식적으로 보여주고 있다.

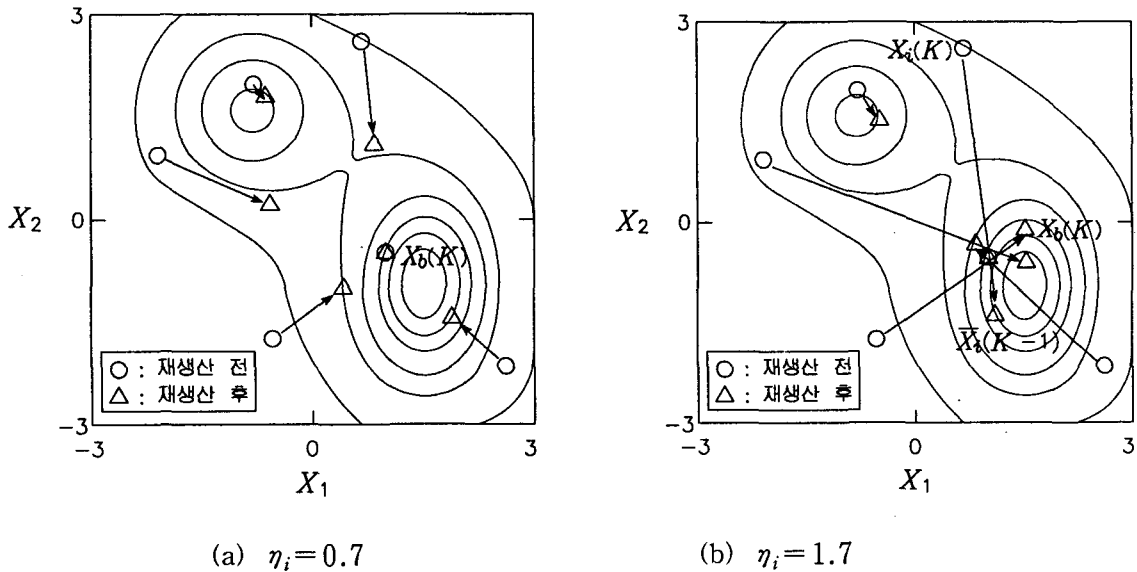


그림 4.8 재생산 전후의 벡터 위치 ($n=2$)

4.3 역해석 프로그래밍

본 연구에서는 탄 소정보법에 의한 단계별 지하굴착 정해석 프로그램과 직접법을 사용한 수학적 최적화 라이브러리 및 개선된 유전알고리즘에 의한 최적화 라이브러리들을 결합하여 역해석 프로그램을 제작하였다. 프로그램의 주요 흐름도는 그림 4.9와 같다.

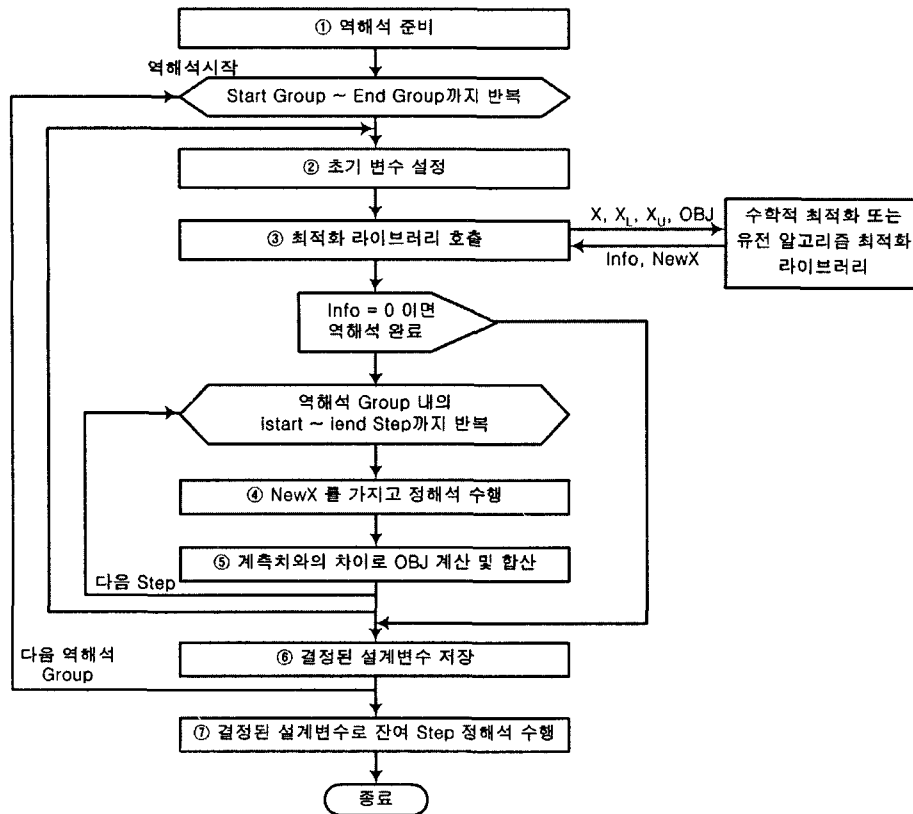


그림 4.9 역해석 프로그램의 흐름도

5. 현장적용사례

개발된 프로그램은 설계변수와 계측치를 알고 있는 가상의 이상적 지반과 SBS 신사옥 신축공사 현장, Texas 시험굴착 현장, 중앙대학교 부속병원 신축공사 현장 및 삼성자동차 강남대로영업점 신축공사 현장 등 실제지반 4개 현장에 대하여 적용하여 보았으며 그 중에서 대표적으로 2개 현장에 대한 적용결과를 수록한다.

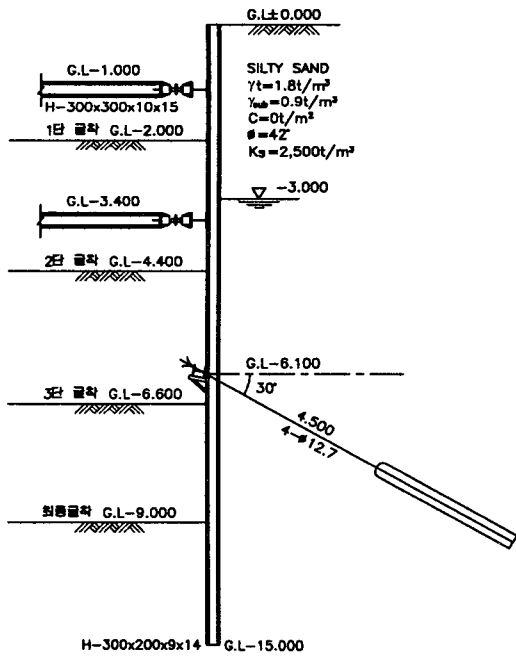
5.1 가상의 이상적인 지반

알고 있는 지반조건을 이용하여 정해석한 결과, 계산된 변위와 지보공의 반력을 계측치인 것처럼 입력하고 물성치를 실제 정해석시 사용된 값과 다소 다르게 입력하여 역해석을 수행하여 결정되는 설계변수가 정해석시 사용한 설계변수와 일치하는지를 비교해 보았다.

1) 현장조건

굴착단면과 시공순서는 그림 5.1과 같고 지반조건은 다음과 같다.

단위중량 = 1.8 tf/m^3 , 점착력 = 0 tf/m^2 , 내부마찰각 = 30° , 지반반력계수 2500 tf/m^3



- 스텝 1 : 2m 까지 굴착,
지하수위 3m.
- 스텝 2 : 1단 스트럿 설치.
- 스텝 3 : 4.4m 까지 굴착.
- 스텝 4 : 2단 스트럿 설치.
- 스텝 5 : 6.6m 까지 굴착,
지하수위 4.4m 까지
하강.
- 스텝 6 : 1 단 앵커 설치.
- 스텝 7 : 9.0m 까지 굴착,
지하수위 6.5m 까지
하강.

그림 5.1 해석대상 토류벽단면 및 계산순서(가상의 이상적 지반)

2) 최종굴착단계에서의 역해석 결과

계산초기 지반의 내부마찰각을 35° 로 하여 수학적 역해석 방법과 유전적 방법에 의한 역해석을 수행한 결과는 그림 5.2 및 표 5.1과 같으며, 두 기법 모두 계측치에 상당히 근접하고 있음을 보인다.

표 5.1 역해석 결과 (가상의 이상적 지반)

해석방법	최대변위 (mm)	토압계수
계측치	113.9	0.333
정해석	86.9	0.271
수학적 역해석	112.6	0.333
유전적 역해석	112.6	0.333

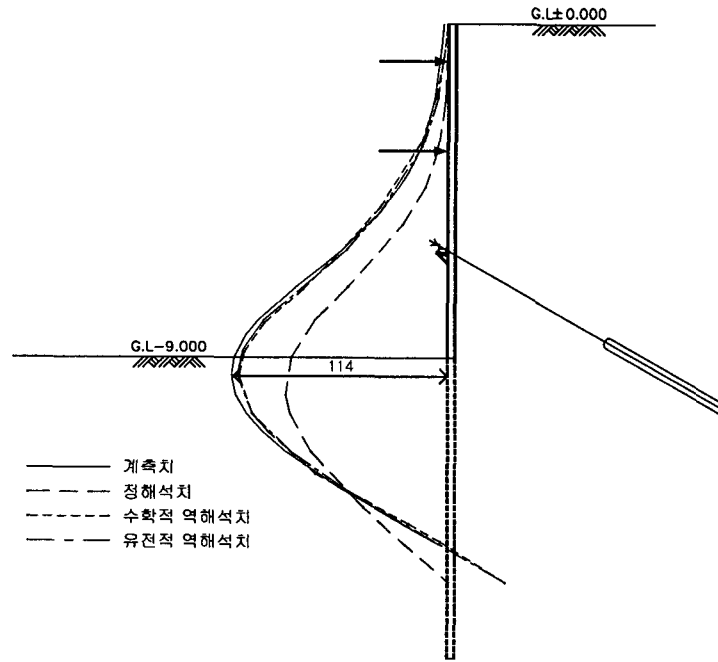


그림 5.2 두 가지 기법을 이용한 현장의 역해석 결과 (가상의 이상적 지반)

3) 초기단계 굴착후 잔여단계추정

공사 초기 단계에서 계측치를 가지고 역해석을 하여 설계변수를 산정하고 이 설계 변수를 이용하여 잔여 굴착단계를 추정했을 때 실제 계측치와 어느 정도 차이를 보이는지 테스트해보았다. 단일 토층 일 때는 당연히 일치할 것이나, 실제 현장지반은 다층토로 이루어져 있기 때문에 지반을 내부마찰각 35°를 갖는 3개의 토층으로 나누어 역해석을 수행하였다. 그림 5.3은 최종굴착 단계의 계측변위와 3단계 역해석 후 최종굴착단계의 추정변위를 나타낸다.

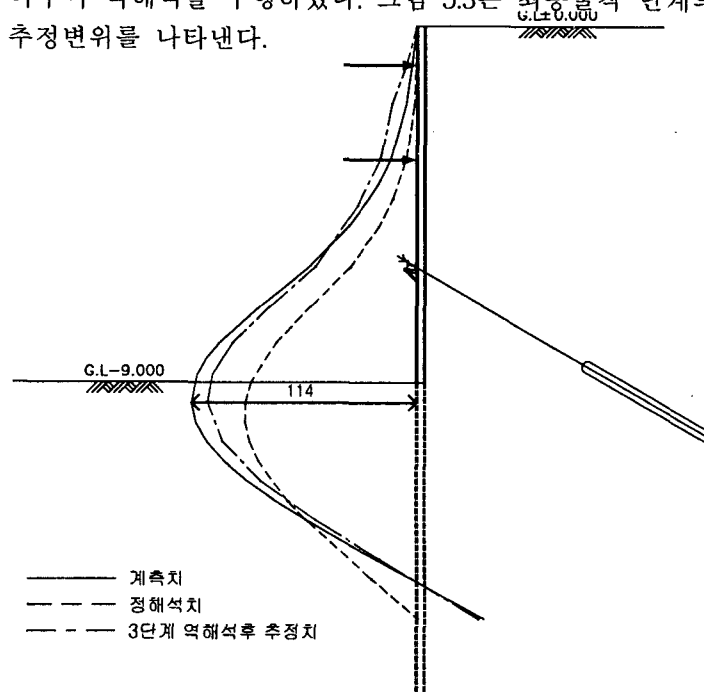


그림 5.3 초기단계 역해석후 잔여단계 추정결과 (가상의 이상적 지반)

그림에서 나타난 바와 같이 당초의 정해석 결과에 비하여 3단계 역해석 후 결정된 설계변수로 최종 굴착 단계를 추정한 것이 계획치에 더 가까움을 알 수 있다.

5.2 SBS신사옥 신축현장

1) 현장조건

본 현장은 양천구 목동에 소재하며 굴착예정부분에는 대체로 강도가 약한 퇴적층이 분포하며 굴착단면은 그림 5.4와 같으며 지반조건은 표 5.2와 같다.

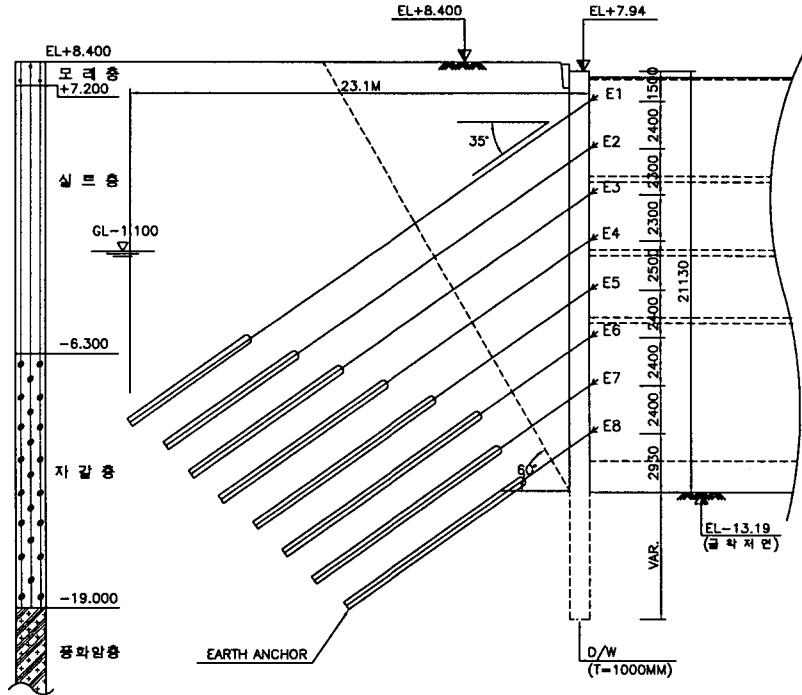


그림 5.4 표준단면 (SBS 현장)

표 5.2 지층의 분포상태 (SBS 현장)

지층	심도 (m)	단위중량 (tf/m ³)	점착력 (tf/m ²)	내부마찰각 (°)	지반반력계수 (tf/m ³)	
매립층	1.0	1.9	0.0	27	2500	
퇴적층	실트층	11.5	1.8	3.5	20	2000
	모래층	15.3	1.9	0.0	34	2750
	자갈층	25.5	1.9	0.0	37	3090
풍화암층	27.9	2.0	5.0	37	3380	
연암층	27.9m 하부	2.1	10.0	40	3500	

2) 역해석 결과

그림 5.5는 최종 굴착단계에서의 계측치, 수학적 및 유전적 방법에 의한 역해석 결과 변위를 비교하여 나타낸다.

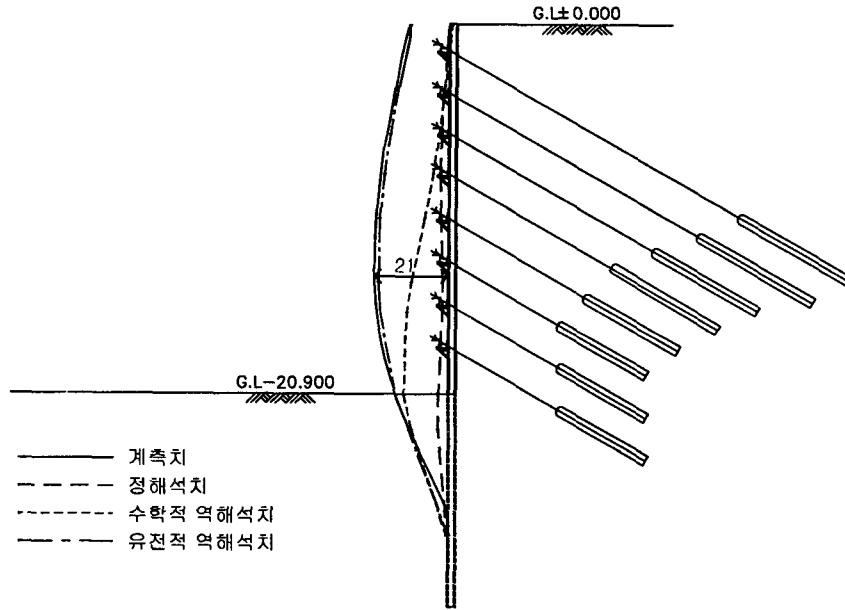


그림 5.5 계측변위와 역해석 변위의 비교 (SBS현장)

본 현장은 지반의 당초 가정치 보다 약하여 변위가 많이 발생한 현장으로써, 수학적 역해석 방법으로는 국부해에 빠져 실측치와 가까운 결과를 얻을 수 없었는데 반하여 유전 알고리즘을 이용한 방법에서는 실측치와 가까운 역해석 결과를 얻을 수 있었다.

그림 5.6은 4단 앵커의 계측된 축방향력을 정해석과 역해석 결과와 비교해서 나타냈다. 역해석 결과가 계측치에 더 근접하고 있다.

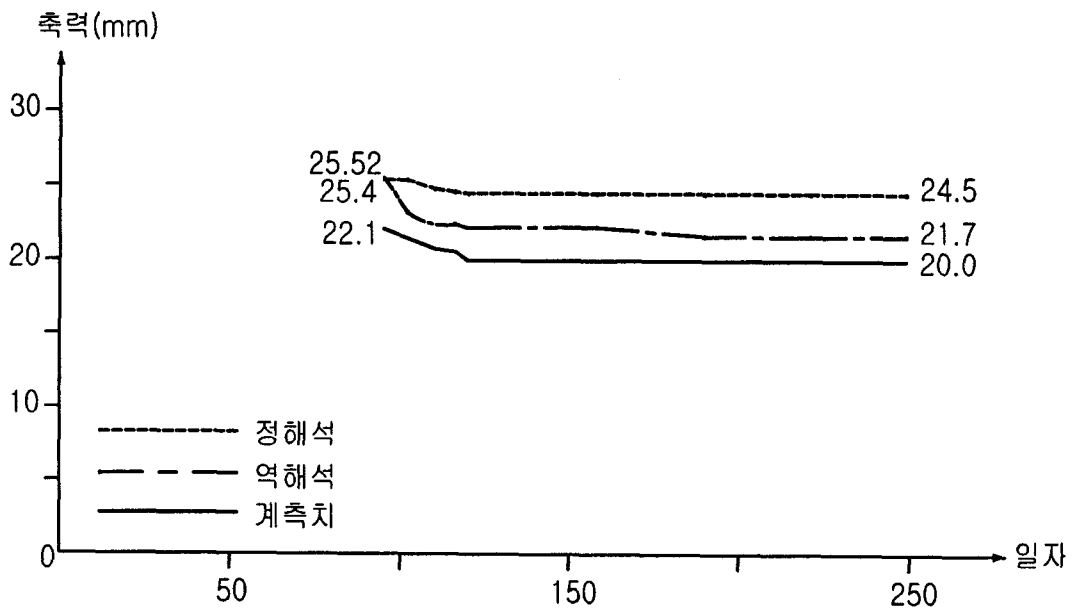


그림 5.6 4단 앵커의 축방향력 비교 (SBS 현장)

그림 5.7은 공사기간에 따른 변위의 증가와 역해석 결과 크리프변형을 나타낸다.

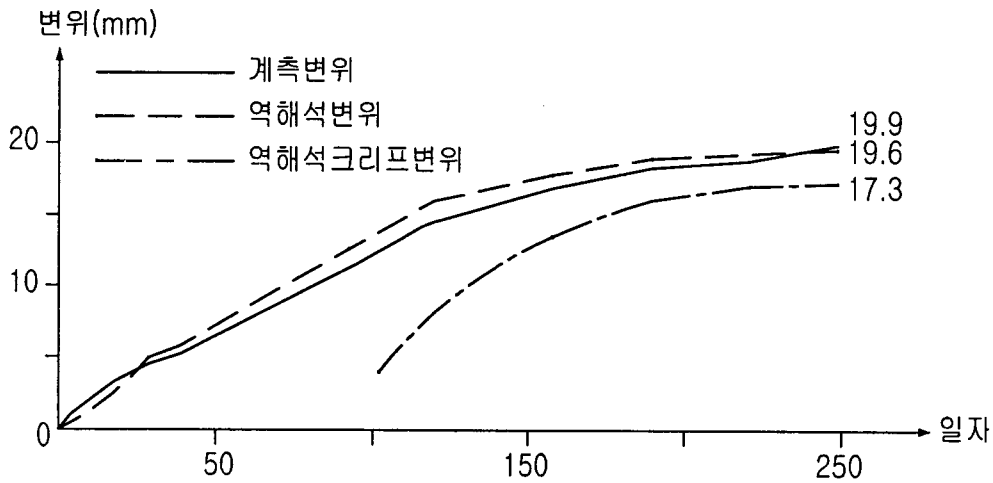


그림 5.7 시간에 따른 계측변위의 증가와 역해석 결과 (SBS 현장)

역해석 대상 설계변수에 크리프 변위를 도입함으로써 두 그림에서 보는 바와 같이 앵커축력의 증가 없이 변위가 증가하는 경우에 대하여도, 토압계수가 비현실적으로 커지지 않으면서, 축방향력 및 변위 모두 계측치와 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다. 크리프 변위를 역해석 대상 설계 변수에 포함시키지 않았을 경우, 공사 기간에 따라 증가되는 변위와 계산치가 일치되기 위하여 토압계수는 비현실적으로 커지고, 지보공의 축력도 계측치에 비하여 크게 산정 되었다.

6. 결론

본 연구에서는 기존의 수학적 역해석에 대한 연구결과 제시된 문제점들을 극복할 수 있는 유전 알고리즘을 토대로 한 역해석 프로그램을 개발하고, 실제 현장에의 적용성 여부를 검토하였으며 얻어진 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 수학적 방법에 의한 최적화 프로그램을 작성하고 테스트 함수를 사용하여 평가하였으며, 기존의 연구자들이 지적한 바와 같이 유일해를 가지는 문제에 대하여는 효율적으로 최적해를 찾을 수 있었으나, 다봉(多峰)의 문제에 대하여는 전역적인 최적해를 찾지 못하고, 국부해에 빠지며, 초기값에 따라 결과가 틀러지는 문제점을 보임을 확인하였다.
- (2) 단순유전 알고리즘과 개선된 유전 알고리즘으로 최적화 프로그램을 개발하고 테스트 함수를 이용하여 성능을 평가하였다. 본 연구에서 개발한 실수코딩 마이크로-하이브리드유전 알고리즘은 집단크기가 단순유전 알고리즘에 비하면 매우 작아 탐색시간이 단축되었고, 전역해를 찾는 성능이 탁월하였다.
- (3) 다중목적 함수를 사용함으로써 계측변위와 계산변위의 차이뿐만 아니라 계측축력과 계산축력 차이도 최소화할 수 있었다.
- (4) 설계대상 변수로써, 복수의 해를 주는 지반의 내부마찰각·점착력 대신에 주동토압계수, 수동토압계수(주동토압계수에 반비례하여 증감)를 채택하고 목적함수에 거의 영향을 주지 않는 지반의 단위중량, 정지토압계수, 지반반력계수 등은 제외하고, 실제현장에서 나타나는 크리프 변위를 도입함으로써, 역해석 결과 비현실적인 값이 산정 된다면, 복수해가 나온다면 하는 현상이 발생하지 않고 유일해를 얻을 수 있었다. 특히 계측된 지보공의 축력은 증가되지 않는 상태에서 계측변위는 시일의 경과에 따라 증가되는 현장의 경우에도 역해석 축력 및 변위 모두 계측치와 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.
- (5) 외국의 1개 현장 및 국내의 4개 현장에 대한 계측치를 이용하여 역해석을 수행한 결과, 정해석시 예

측한 변위와 실제 굴착 시 예측한 변위의 차이가 크지 않은 현장에 대해서는 수학적 방법과 유전적 방법에 의한 역해석 모두 만족할 만한 결과를 얻었다. 그러나 지반이 연약하여 예측변위가 당초 설계시 추정된 변위보다 훨씬 큰 현장의 경우, 수학적 방법에 의한 역해석으로는 예측치와 계산치가 일치하지 않고 국부해에 빠지는 문제점이 있었지만, 유전알고리즘을 이용한 방법으로 이 문제를 해결 할 수 있었다.

(6) 초기 몇 단계까지 시공하면서 예측한 결과로 역해석을 하여 결정된 설계변수로, 잔여단계에 대한 변위를 예측했을 때, 잔여단계의 예측치와 근접하는 결과를 보여 개발한 역해석 프로그램이 실제 현장의 안전관리에 사용할 수 있음을 보였다.

참고문헌

1. 강인규 (2001), “하이브리드 유전자 알고리즘을 이용한 Piled Raft 기초시스템의 최적설계”, *홍익대학교 박사학위 논문*
2. 권오순, 정충기, 김재관, 이해성, 김명모 (1999), “굴착 관리 정보화 시스템의 개발 및 적용”, *한국지반공학회논문집, 제15권, 제4호, pp. 153-166*
3. 김봉균 (1996), “탄소성 지반 스프링 모델에 의한 굴착 해석시 흙의 물성치 평가를 위한 역해석”, *서울대학교 석사논문*
4. 김수일, 정삼성, 장범수 (1994), “P-y특성곡선의 Coupling을 고려한 토류벽의 거동해석”, *토목학회 논문집, 제 14권, 제 3호, pp. 553~563*
5. 김수일, 장범수, 문준식 (1997), “앵커정착부의 지반물성을 고려한 널말뚝벽의 해석에 관한 연구”, *토목학회 학술발표회 논문집, 제 3권, pp. 371~374*
6. 김우식 (1999), “탄소성 보법에 의한 굴착지반 토질정수의 재평가”, *부경대학교 석사논문*
7. 김학문, 이봉열, 김명훈, 엄진석, 안명운 (1997), “깊은굴착 시 토류벽체의 거동에 관한 모형실험연구”, *토목학회 학술발표회 논문집, 제 3권, pp. 367~370*
8. 김홍택, 황정순, 박성원, 유한규 (1999), “유전자 알고리즘 및 인공신경망 이론을 이용한 쏘일네일링 굴착벽체 시스템의 최적 설계”, *한국지반공학논문집, 제15권, 제4호*
9. 문준식 (1997), “굴착단계별 토류벽 역해석의 대상범위 선정에 관한 연구”, *연세대학교 석사학위 논문*
10. 양윤석 (1998), “탄소성 유한요소 모델에 의한 굴착 해석시 흙의 물성치 평가를 위한 굴착 역해석”, *서울대학교 석사학위논문*
11. 오정환 (2001), “지반굴착 흙막이공의 정보화시공 종합관리 시스템 연구개발”, *경희대학교 박사학위 논문*
12. 장범수 (1997), “지반의 탄소성 하중-변위관계를 이용한 흙막이 벽의 역해석 기법 개발”, *연세대학교 박사학위논문*
13. 전용진 (1999), “유전자 알고리즘을 이용한 Piled Raft 기초의 최적설계”, *홍익대학교 석사학위 논문*
14. (주)다산컨설팅 (1993), “EXCAV 사용자 매뉴얼”
15. (주)천일지오컨설팅 (2000), “SBS 신사옥 신축공사 예측관리보고서”
16. (주)천일지오컨설팅 (1994), “단계별 지하굴착에 대한 탄소성해석 프로그램, SUNEX 사용자 매뉴얼”
17. (주)천일지오컨설팅 (2000), “중앙대학교 부속병원 신축공사 예측관리보고서”
18. (주)한국지오컨설팅 (1999), “EXCAV/W 프로그램 매뉴얼, Ver. 1.02”
19. 최충식 (1996), “직접탐색법에 의한 굴착단계별 토류벽의 역해석”, *연세대학교 석사학위 논문*
20. 현대건설주식회사 기술연구소, 김명모, 정충기, 김재관, 이해성 (1996), “도심지굴착 정보화시공관리시스템의 개발-최종보고서”, pp. 4~173
21. Arai, K., Ohta, H. and Kojima K. (1987), “Estimation of Nonlinear constitutive Parameters Based on Monitored Movement of Subsoil Under Consolidation”, *Soils and Foundations, Vol. 27, No.1, pp. 35-49*
22. DOT (1995), “Design Optimization Tools, User Manual”, *Vanderplaats Research & Development,*

Inc.

23. Gioda, G. Pandolfi, A. and Cividini, A. (1988), "A Comparative Evaluation of Some Back Analysis Algorithms and Their Application to In-Situ Load Tests", *2nd International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Kobe*, pp. 1131~1144
24. Goldberg, D. E. and Kuo, C. H. (1987), "Genetic Algorithms in Pipeline Optimization", *ASCE, J. comp. in Civ. Engrg.*, 1(2), pp. 128-141
25. Goldberg, D. E. (1989), "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning", *Addison-Wesley Publishing Co. Inc., N.Y.*
26. Holland, J. H. (1975), "Adaptation in Natural and Artificial System", *The University of Michigan Press*
27. Jin, G. (1996), "Intelligent Fuzzy Logic Control of Processes with Time Delays", *Ph.D Thesis, School of Engineering, University of Wales Cardiff, UK*
28. Krishnakumar, K. (1989), "Micro-genetic Algorithms for Stationary or Non-Stationary Function Optimization", *SPIE, Intelligent Control and Adaptive System, Vol. 196*, pp. 289-296
29. Pham, D. T., and Jin, G. (1995), "Genetic Algorithm using Gradient-like Reproduction Operator", *Electronics Letters, Vol. 31, No. 18*, pp. 1558-1559
30. Sakurai, S. (1999), "Interpretation of The Results of Displacement Measurements in Geotechnical Engineering Projects", *Field Measurements in Geomechanics, Leung, Tan & Phoon (eds), Balkema, Rotterdam*
31. Terzaghi, K. and Peck R. B. (1948), "Soil Mechanics in Engineering Practice Introduction", *John Wiley & Sons, Inc.*
32. Vanderplaats, G. N. (1984), "Numerical Optimization Techniques for Engineering Design with Application", *McGraw-Hill Book Company, N.Y.*