

유전자 알고리즘 및 인공신경망 이론을 이용한 쏘일네일링 굴착벽체 시스템의 최적설계

Optimum Design of Soil Nailing Excavation Wall System Using Genetic Algorithm and Neural Network Theory

김 홍 택^{*1} 황 정 순^{*2}
Kim, Hong - Taek Hwang, Jung - Soon

박 성 원^{*3} 유 한 규^{*4}
Park, Sung - Won Yoo, Han - Kyu

Abstract

Recently in Korea, application of the soil nailing is gradually extended to the sites of excavations and slopes having various ground conditions and field characteristics. Design of the soil nailing is generally carried out in two steps. The first step is to examine the minimum safety factor against a sliding of the reinforced nailed-soil mass based on the limit equilibrium approach, and the second step is to check the maximum displacement expected to occur at facing using the numerical analysis technique. However, design parameters related to the soil nailing system are so various that a reliable design method considering interrelationships between these design parameters is continuously necessary. Additionally, taking into account the anisotropic characteristics of in-situ grounds, disturbances in collecting the soil samples and errors in measurements, a systematic analysis of the field measurement data as well as a rational technique of the optimum design is required to improve with respect to economical efficiency. As a part of these purposes, in the present study, a procedure for the optimum design of a soil nailing excavation wall system is proposed. Focusing on a minimization of the expenses in construction, the optimum design procedure is formulated based on the genetic algorithm. Neural network theory is further adopted in predicting the maximum horizontal displacement at a shotcrete facing. Using the proposed procedure, various effects of relevant design parameters are also analyzed. Finally, an optimized design section is compared with the existing design section at the excavation site being constructed, in order to verify a validity of the proposed procedure.

*1 정희원, 홍익대학교 공과대학 토목공학과 교수

*2 정희원, (재)한국철도기술공사

*3 정희원, 홍익대학교 토목공학과 대학원

*4 정희원, 한양대학교 공과대학 토목·환경공학과 조교수

요 지

국내에서는 근래에 들어, 다양한 지반조건 및 현장여건을 지닌 지하굴착 및 사면보강 등의 현장에 쏘일 네일링 공법의 적용이 점차 확대되어 왔다. 또한 쏘일네일링 공법의 설계는 일반적으로, 한계평형적 해석 방법에 의거해 보강토체의 활동에 대한 소요안전율을 만족하는 단면을 우선 결정한 다음, 수치해석 프로그램을 이용하여 이 단면 전면벽체에서 예상되는 최대변위를 추가로 확인하는 비교적 단순화된 과정을 통해 이루어져 왔다. 그러나 쏘일네일링 공법의 경우 관련 설계변수가 비교적 다양한 특징을 지니고 있으며, 따라서 이와 같은 설계변수들 사이의 상호 연관성을 고려하는 보다 합리적인 설계법 제시 차원의 노력이 지속적으로 요구되는 실정이다. 이외에도 원지반 흙의 비등방성, 채취시료의 교란 정도 및 측정상의 오차 등 설계에 적용되는 각종변수가 지니고 있는 불확실성 등을 감안할 때, 현재 시점에서는, 축적된 다양한 현장의 계측자료를 수집하여 관련 설계변수 사이의 상호 연관성을 체계적으로 분석하려는 노력과 더불어 신뢰성 있는 효율적인 기법을 이용하여 경제성이 강조되는 최적화 설계 차원의 노력도 요구되는 시점으로 판단된다. 이와 같은 목적의 일환으로, 본 연구에서는 유전자 알고리즘을 이용하여 쏘일네일링 굴착벽체 시스템의 시공비용 최소화를 위한 최적설계기법을 제시하였으며, 또한 제시된 최적설계기법의 전제조건중의 하나로 고려되는 슛크리트 전면벽체의 발생변위를 합리적으로 예측하기 위해 인공신경망 이론을 도입하였다. 다양한 비교·분석과 더불어, 최종적으로는 제시된 쏘일네일링 굴착벽체 시스템 최적화 기법의 적합성 여부를 종합적으로 확인하기 위해, 실제 시공이 이루어진 현장의 설계단면과 제시기법에 의거해 최적화된 설계단면을 서로 비교·분석하였다.

Keywords : Optimum design, Soil nailing excavation system, Genetic algorithm, Neural network theory

1. 서 론

국내에서는 1993년도경부터 쏘일네일링(soil nailing) 공법이 이용되기 시작하여, 다양한 지반 조건 및 현장여건을 지닌 지하굴착 및 사면보강 등의 현장에 그 적용성이 점차 확대되어 왔으며, 현재까지 계측결과도 어느 정도는 축적된 상황으로 판단된다. 또한 쏘일네일링 공법의 설계는 일반적으로 한계평형적 해석방법에 의거해 보강토체의 활동에 대한 소요안전율을 만족하는 단면을 우선 결정한 다음, 유한요소 또는 유한차분 해석 프로그램을 이용하여 이 단면 전면벽체에서 예상되는 최대변위를 추가로 확인하는 비교적 단순화된 과정을 통해 이루어져 왔다. 그러나 쏘일네일링 공법의 경우 관련 설계변수가 비교

적 다양한 특징을 지니고 있으며, 따라서 이와 같은 설계변수들 사이의 상호 연관성을 고려하는 보다 합리적인 설계법 제시 차원의 노력이 지속적으로 요구되는 실정이다.

이외에도 원지반 흙의 비등방성, 채취시료의 교란 정도 및 측정상의 오차 등 설계에 적용되는 각종변수가 지니고 있는 불확실성(uncertainty) 등을 감안할 때, 현재 시점에서는 축적된 다양한 현장의 계측자료를 수집하여 관련 설계변수 사이의 상호 연관성을 체계적으로 분석하려는 노력과 더불어 신뢰성 있는 효율적인 기법을 이용하여 경제성이 강조되는 최적화 설계 차원의 노력도 요구되는 시점으로 판단된다.

이와 같은 목적으로, 본 연구에서는 유전자 알고리즘(genetic algorithm)을 이용하여 쏘일네일

링 굴착벽체 시스템의 시공비용을 최소화하기 위한 최적설계기법을 제시하고자 하며, 또한 제시하고자 하는 최적설계기법의 제약조건중의 하나로 고려되는 슛크리트 전면벽체의 최대변위를 합리적으로 예측하기 위해 인공신경망(neural network) 이론을 도입하였다.

구체적으로 쏘일네일링 굴착벽체 시스템의 시공비용을 최소화하기 위한 최적설계는, 다음과 같은 조건들이 충족되는 범위내에서 수행되어야 한다.

- 1) 굴착벽체의 활동에 대한 안정성이 소요안전을 기준을 충족하는가?
- 2) 슛크리트 전면벽체의 두께 및 와이어매쉬량이 전단 및 휨에 대한 안정성 확보 기준을 충족하는가?
- 3) 전면벽체의 최대변위가 허용변위기준을 충족하는가?

본 연구에서는, 전술한 3가지 조건중, 쏘일네일링 굴착벽체의 활동에 대한 안정성 평가는 김등(1995)에 의해 제시된 한계평형해석법을, 또한 슛크리트 전면벽체의 최소요구두께 및 소요 와이어매쉬량의 산정을 위한 전면벽체의 안정성 평가는 김등(1999)이 제시한 기법을 각각 이용하였으며, 이에 대한 상세한 내용은 지면관계상 생략하였다.

2. 유전자 알고리즘을 이용한 최적설계기법의 체계화

쏘일네일링 굴착벽체 시스템의 시공상 소요비용을 최소화하기 위한 목적으로, 본 연구에서는 최적설계기법의 체계화를 시도하였다. 그러나 쏘일네일링 굴착벽체 시스템의 안정성 평가에 주로 적용되는 방법은 수학적 정밀해를 안전율로 산정하는 것이 아니라, 초기에 가정한 안전율과 예상파괴면에 대해 한계평형해석법에 의해

산정된 안전율을 서로 비교하여 그 차이가 설정된 오차범위 이내로 수렴하는 경우 이 값을 예상파괴면의 안전율로 결정하는 논리를 지니고 있다. 따라서 하나의 연속된 수식으로 표현하기가 여의치 않은 즉, 고전적인 최적화 기법을 적용하는 데에는 제약이 따르게 된다. 또한 이 경우에 산정된 안전율은 한 종류의 설계변수 집단(각 지층별 토질정수, 굴착벽체의 기하학적 특성 및 네일관련 제원 등)에 대한 최소안전율을 의미하는 것이 아니라, 예상파괴면에 한정된 안전율을 의미하며, 따라서 한 종류의 설계변수 집단에 대한 최소안전율을 결정하기 위해서는 예상파괴면의 위치를 계속적으로 바꾸어 가며 반복적인 계산을 수행해야 하는 제약성을 지니게 된다.

전술한 제약성 등을 감안하여, 본 연구에서는 유전자 알고리즘을 쏘일네일링 굴착벽체 시스템의 최적화를 위한 기본 기법으로 이용하였으며, 유전자 알고리즘에 대한 개요 및 특징을 우선 요약·정리하면 다음과 같다.

인공적인 유전시스템인 유전자 알고리즘은, 자연세계의 진화현상에 기초한 모델로서 Holland (1975)에 의해 개발된 전역적(global)인 최적화 알고리즘이다. 유전자 알고리즘은 자연계의 유전 과정을 모방하여 생물학적 유전인자인 염색체와 유사한 구조를 지니는 문자열들(string) 사이에서 선택(selection), 교배(crossover) 및 변이(mutation) 등의 연산을 거쳐 다음 세대의 새로운 연산자를 인공적으로 만들어 내는 과정을 통해, 적합한 해를 탐색한다. 전형적인 유전자 알고리즘은 프로그램에서 임의의 값으로 초기화된 개체들의 집합으로부터 시작하며, 중요한 구성요소들로는 적합도 함수(fitness function), 개체(individual) 표현법, 유전 연산자 및 알고리즘 제어 파라미터 등이 있다. 이중, 적합도 함수는 각 개체들 간의 우열 여부를 평가하는 기반이며, 유전자 알고리즘에 의한 최적해 탐색에 있어 그 근거가 되는

값이다. 최적해의 탐색을 위해 주어진 설계점에서 함수의 연속성과 미분가능 등의 수학적 제약조건을 포함하는 고전적인 최적화 기법과는 달리, 유전자 알고리즘은 목적함수의 평가결과에 의해 최적해가 결정되므로 전술한 수학적 제약성 등이 거의 없어 다양한 공학문제에 있어, 최적화를 위한 탐색 알고리즘으로서 광범위하게 사용될 수 있는 특징을 지니고 있다. 또한 유전자 알고리즘은 설계변수 그 자체를 사용하는 것이 아니라, 해석대상 문제의 설계변수들의 값을 이진 스트링으로 코딩하여 수행되며, 설계변수가 여러 개일 경우에는 이를 직렬로 연결함으로써 염색체(chromosome)라 불리는 하나의 개체를 형성하게 된다. 결국 유전자 알고리즘은 이렇게 생성된 개체들의 집단을 구성하여 최적해에 대한 탐색을 수행하므로, 한 점씩 탐색해 나가는 고전적인 최적화 기법과는 달리 많은 점을 동시에 탐색할 수 있는 능력을 가지게 된다.

전술한 특징 등을 지닌 유전자 알고리즘은, 한 계평형해석을 근간으로 하는 쏘일네일링 굴착벽체 시스템의 최적화를 위해 효율적으로 적용될 수 있는 장점이 예상되며, 따라서 본 연구에서는 이와 같은 유전자 알고리즘을 이용하여 쏘일네일링 굴착벽체 시스템의 시공상 소요비용 최소화를 위한 최적설계기법을 그림 1의 흐름도를 토대로 체계화 하였다.

그림 1에 도시된 흐름도에 따라, 최적설계기법의 체계화에 관련된 내용을 항목별로 순차적으로 정리하면 다음과 같다.

2.1 설계변수의 결정

유전자 알고리즘을 이용한 최적화의 선행조건은, 대상 시스템에 관련된 설계변수의 결정과 이를 고려한 목적함수의 정식화이다. 본 연구 쏘일네일링 굴착벽체 시스템의 해석에 관련된 설계변수를 정리하면 표 1과 같다.

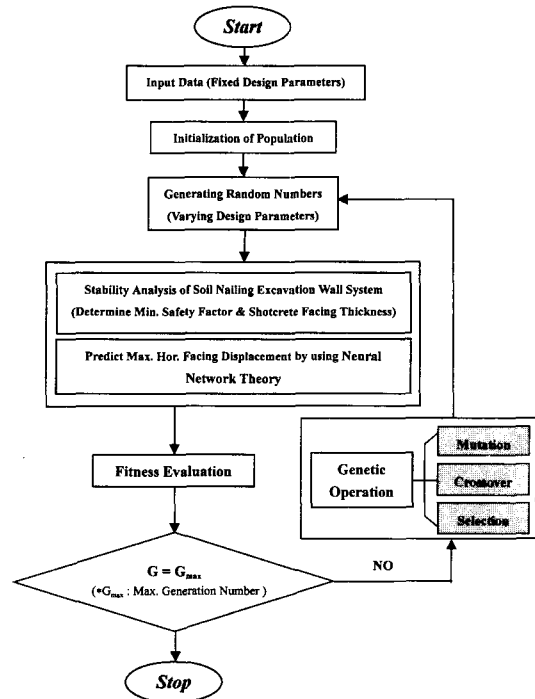


그림 1. 유전자 알고리즘 등을 이용한 쏘일네일링 굴착벽체 시스템의 최적화 절차 흐름도

표 1에 명시된 설계변수 중에서, 각 지층의 토질정수, 굴착벽체의 기하학적 특성을 정의하는 값, 그리고 기타변수로 분류한 천공반경 및 지하수위 등은, 일반적으로 현장여건 및 시공조건에 따라 미리 결정되는 고정설계변수(fixed design parameter)에 해당된다. 따라서 쏘일네일링 굴착벽체 시스템의 최적설계는, 네일의 연직 및 수평 방향 설치간격, 네일의 길이, 네일의 삽입각도 및 첫단 네일의 설치깊이 등, 표 1에서 네일관련 제원으로 분류된 변수를 중심으로 이루어짐이 합리적이다. 본 연구에서는 이를 가변설계변수(varying design parameter)로 정의하였으며, 이 중 4가지(네일의 연직 및 수평 방향 설치간격, 네일의 길이 및 삽입각도)는 기본적인 최적대상 변수로 분류하고, 지중매설물 등 현장여건에 따라 제약적으로 값이 결정되는 첫단 네일의 설치깊

표 1. 쏘일네일링 굴착벽체 시스템에 관련된 설계변수

토질정수	각 지층의 단위중량	네일관련 제원	각 지층별 네일의 연직방향 설치간격
	각 지층의 내부마찰각		네일의 수평방향 설치간격
	각 지층의 점착력		첫단 네일의 설치깊이
굴착벽체의 기하학적 특성	총굴착깊이		각 지층별 네일의 길이
	각 지층의 두께		네일의 삽입각도
	배면토체의 경사각		철근의 인장항복강도
	전면벽체의 기울기	철근의 직경	
		기타	천공직경
			지하수위

표 2. 본 연구 최적화에 적용된 가변설계변수 값의 변화범위 및 정밀도

가변설계변수		비트수	변수 값의 변화범위	정밀도
각 지층별 네일의 연직방향 설치간격	1 st 지층	8	0.5~3.0(m)	0.98 cm
	2 nd 지층	8	0.5~3.0(m)	0.98 cm
	3 rd 지층	8	0.5~3.0(m)	0.98 cm
각 지층별 네일의 길이	1 st 지층	10	$(0.7 \sim 1.3) \cdot H_{off}(m)$	$0.059 \cdot H_{off} \text{ cm}$
	2 nd 지층	10	$(0.7 \sim 1.3) \cdot H_{off}(m)$	$0.059 \cdot H_{off} \text{ cm}$
	3 rd 지층	10	$(0.7 \sim 1.3) \cdot H_{off}(m)$	$0.059 \cdot H_{off} \text{ cm}$
네일의 수평방향 설치간격		8	0.5~3.0(m)	0.98 cm
네일의 삽입각도		6	0~30°	0.47°

이는 보조적인 최적대상 변수로 분류하여 최적화를 시도하였다. 단 앞서 기본적인 최적대상 변수로 분류한 4가지 변수중, 네일의 수평방향 설치간격 및 삽입각도는 설치되는 깊이에 상관없이 모두 동일한 값으로 가정하였으며, 나머지 2개의 변수는 3개 지층으로 구분하여 각 지층에 따라 변화하는 것으로 가정하였다. 본 연구 최적화에 적용된 가변설계변수 값의 변화범위 및 정밀도는 표 2에 정리되어 있다. 표 1에 정의된 네일의 삽입각도는 수평방향과 네일이 서로 이루는 각도를, 지하수위는 지표면으로부터 지하수 위치까지의 깊이를, 또한 표 2에서 H_{off} 는 쏘일네일링 굴착벽체 시스템의 총굴착깊이를 각각 의미한다.

2.2 목적함수 및 제약조건

본 연구에서는 시공상의 소요비용 최소화를 최적설계를 위한 목적함수로 정의하였으며, 이를 위해 쏘일네일링 굴착벽체 시스템의 시공비용 결정에 직접적으로 연관된 단위폭당 네일의 총 길이를 총굴착깊이에 대한 비(ratio)로 무차원화 하여, 이에 대한 최소화를 시도하였다. 정의된 목적함수 (Q_{obj})를 수학적으로 표현하면 식 (1)과 같다.

$$Q_{obj} = L_{unit} T \{ \{ X_{soilP} \} \cdot \{ X_{geoP} \} \cdot \{ X_{nailP} \} \cdot \{ X_{etc} \} \} \quad (1)$$

Minimize :

여기서, L_{unitT} : 단위폭당 설치네일의 총길이

$$\left(= \frac{1}{S_h} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{H_{off}} \right)$$

{ X_{soilP} } : 토질정수와 관련된 변수들

{ X_{geoP} } : 굴착벽체의 기하학적 특성에 관련된 변수들

{ X_{nailP} } : 네일관련 제원 변수들

{ X_{etc} } : 기타 변수들

L_i : i번단 네일의 길이

S_h : 네일의 수평방향 설치간격

H_{off} : 총굴착깊이

n : 네일의 총개수

식 (1)에 정의된 소요비용 최소화를 위한 목적 함수를, 유전자 알고리즘에 적용되는 적합도 함수로 다시 표현하면 아래의 식 (2)와 같으며, 식 (2)는 실제의(raw) 적합도 함수를 의미한다.

$$F_r = \frac{1}{L_{unitT}} = S_h \cdot \sum_{i=1}^n \frac{H_{off}}{L_i} \quad (2)$$

또한 선형 표준화(linear scaling) 방법을 토대로 개체선택의 기준이 되는 함수로 위의 식 (2)를 수정하여 적합도 함수를 다시 표현하면 아래의 식 (3)과 같으며, 식 (3)의 값은 항상 양(+)의 값으로 평가된다.

$$F = a \cdot F_r + b \quad (3)$$

여기서, $a = F_{1(FS)} \cdot F_{2(disp)}$, $b = 0.5$.

식 (2) 및 (3)에 정의된 적합도 함수에 의한 소요비용 최소화는, 쏘일네일링 굴착벽체 시스템의 안정성을 평가하는 활동에 대한 최소안전율이 설계상의 소요안전율 기준에 충족되고, 또한 전면벽체의 최대수평변위가 허용변위기준을 충족하는 조건하에서 이루어져야 한다. 본 연구에서는 이와 같은 조건들을 목적함수에 대한 제약조건으로 설정하였으며, 각각의 제약조건은 값으로

평가되어(식 (3)의 a 에 포함된 $F_{1(FS)}$ 및 $F_{2(disp)}$), 식 (3)에 표현된 선형 표준화 적합도 함수에 곱하여지는 가중치의 역할을 하게 된다.

여기서 식 (3)에 가중치 형태로 정의된 각 제약 조건에 대해 구체적으로 기술하면 다음과 같다.

1) 제약조건 1

김 등(1995)이 제시한 한계평형해석법을 토대로 평가되는 쏘일네일링 굴착벽체 시스템의 활동에 대한 최소안전율(FS_{min})과 설계상의 소요안전율($FS_{req.}$) 등을 토대로, 시그모이드(sigmoid) 함수를 이용해, 제약조건 1에 관련된 $F_{1(FS)}$ (식 (3) 참조)의 값을 평가하기 위한 표현식을 제시하면 아래의 식 (4)와 같다. 식 (4)로부터 제약조건 1에 대한 가중치로 정의되는 $F_{1(FS)}$ 의 값은 굴착벽체의 최소안전율에 따라 0.0~1.0 사이의 값으로 평가된다.

$$F_{1(FS)} = \frac{1.0}{1 + e^{-\frac{1.0}{\alpha(FS_{min} - \beta)}}} \quad (4)$$

여기서, α : 최소안전율 함수의 기울기를 정의하는 계수(=8.67)

또한 식 (4)에서 β 는 설계상의 소요안전율에 의해 정의되는 계수로서, $FS_{min} > FS_{req.}$ 이면 $\beta = (FS_{req.} - 0.2)$ 로, $FS_{min} < FS_{req.}$ 이면 $\beta = FS_{req.}$ 로 각각 정의된다. 설계상의 소요안전율이 1.5 이상으로 요구되는 경우에, 만약 한계평형해석법에 의해 쏘일네일링 굴착벽체 시스템의 최소안전율이 1.5로 평가되면, 식 (4)에 의해 결정되는 제약조건 1에 대한 가중치($F_{1(FS)}$)는 0.85이나, 이와는 달리 최소안전율이 1.5 보다 작게 평가되면 가중치는 0.5 이하의 작은값에 해당되어 개체들간의 적합도에 영향을 미치게 된다. 그러나 최소안전율이 1.8로 평가될 경우에는 가중치가 0.99라는 높은 값을 지니게 됨을 알 수 있다(그림 2).

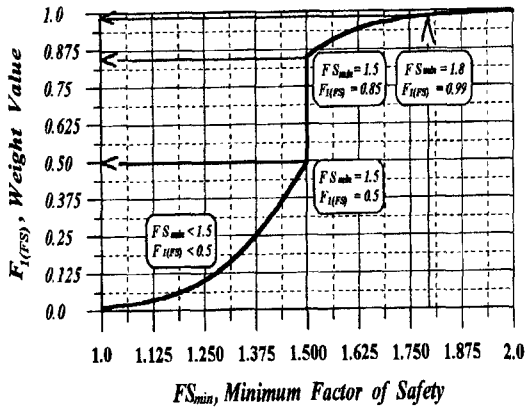


그림 2. 최소안전율과 가중치 사이의 관계곡선

2) 제약조건 2

쏘크리트 전면벽체에서 발생이 예상되는 최대 수평변위의 허용변위기준 충족 여부에 관련된 제약조건은, 식 (3)에 가중치 $F_{2(disp.)}$ 로 표현되어 있다.

제약조건 2에 관련된 허용변위기준은, 쏘일네일링 공법에 일반적으로 적용되는 기준(총굴착 깊이의 0.2~0.4% 범위, CLOUTERRE(1991))을 참고로 하여 0.3%로 결정하였다. 만약 예측된 전면벽체의 최대수평변위가 총굴착깊이의 0.3%로 정의된 허용변위기준을 초과할 경우에는, 제약조건 2의 가중치에 해당되는 $F_{2(disp.)}$ 의 값은 0으로, 또한 허용변위기준 이하에 해당되는 경우에는 $F_{2(disp.)}$ 의 값을 1로 각각 결정하였다. 즉 허용변위기준을 초과하는 개체들은 도태시키고, 허용변위기준이 충족되는 개체들은 발생변위의 크기에 의한 정량적 영향을 배제하였으며, 이를 식으로 표현하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \delta_h < \delta_{crit.} \text{ 인 경우, } F_{2(disp.)} &= 1.0 \\ \text{또한,} & \\ \delta_h \geq \delta_{crit.} \text{ 인 경우, } F_{2(disp.)} &= 0.0 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, $F_{2(disp.)}$: 발생변위에 대한 가중치

δ_h : 인공신경망 이론에 의해 예측

된 최대수평변위

$\delta_{crit.}$: 허용변위기준

여기서 발생변위의 크기에 의한 영향을 정량화 시키지 않고 선택형으로 처리한 것은, 그림 1의 흐름도에 도시된 바와 같이 향후 4장에서 인공신경망 이론을 토대로 평가하고자 하는 쏘크리트 전면벽체의 최대수평변위 예측을 위한 학습자료가 아직까지는 다소 제한적이라는 판단에 의거한 것이다.

2.3 신뢰도 확인 및 알고리즘 제어 파라미터 값의 결정

본 연구에서는 궁극적으로, 쏘일네일링 굴착벽체 시스템에 대한 최적설계단면 결정기법의 제시를 목적으로 하고 있으며, 이를 위해 유전자 알고리즘을 이용하였다. 유전자 알고리즘에 의한 최적화 탐색에 있어서, 기존의 탐색결과를 최대한 이용하려는 경향(exploitation, 개발)과 새로운 영역을 탐색하고자 하는 성질(exploration, 탐구)의 적절한 결합이 중요하며, 이를 제어하기 위한 알고리즘 파라미터에는 여러 가지가 있으나 그 중 중요한 것은 개체군의 크기(M), 교배확률(p_c) 및 변이확률(p_m) 등이다. 그러나 쏘일네일링 굴착벽체 시스템의 경우 최적점의 위치를 미리 예측하기가 여의치 않으며, 또한 이와 같은 알고리즘 제어 파라미터의 다양한 조합을 쏘일네일링 굴착벽체 시스템에 처음부터 직접 적용하여 제어 파라미터 값의 최적 설정치를 결정하기 위한 해석에는 과다한 시간이 요구되는 문제점이 있다. 따라서 ‘적절한 제어 파라미터의 값은 유전자 알고리즘의 적용대상과는 독립적’이라는 Schaffer 등(1989)의 연구결과를 근거로, 본 연구를 통해 전산화된 기본 유전자 알고리즘이 실제의 최적점에 근접하는 해를 제공하는지 여부에 대한 신뢰도 확인을 위해 Rosenbrock 함수

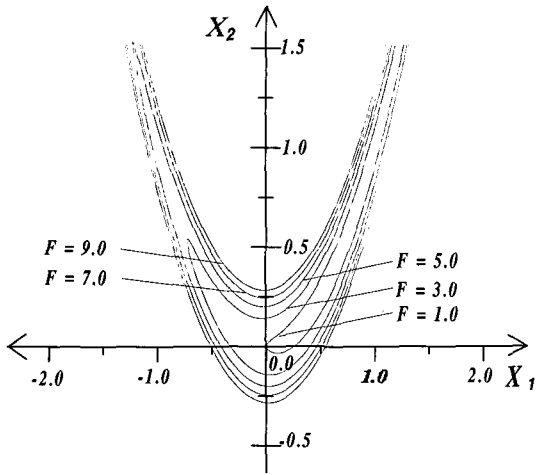


그림 3. Rosenbrock 함수 개요

를 이용한 기초탐색을 우선적으로 시행하였다.

본 Rosenbrock 함수의 기초탐색에 적용된 알고리즘 제어 파라미터 값의 범위는, De Jong(1975) 및 Grefenstette(1986)에 의해 제시된 연구결과를 참고로 하여, 교배확률은 0.6~0.95의 범위에서 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 및 0.95 등의 5가지 경우로 하였으며, 변이확률은 0.001~0.011까지 0.002씩 변화를 주었고, 또한 개체군의 크기는 30~60까지 10씩 변화를 주는 등, 총 120가지 경우의 제어 파라미터 조합에 대해, Rosenbrock 함수의 최소값에 근접하는 정도를 분석하였다. 식 (6) 및 그림 3 등을 통해 정의된 Rosenbrock 함수의 최소값은 $X_1 = X_2 = 1.0$ 에서 $F = 0.0$ 이며, 탐색 구간은 $-20.0 < X_1 < +20.0$, $-20.0 < X_2 < +20.0$ 로 제한하였다.

$$F(X_1, X_2) = 100(X_2 - X_1^2)^2 + (1 - X_1)^2 \quad (6)$$

탐색의 종료조건으로서 세대수 2000을 설정하였으며, 이는 반복계산의 회수가 2000에 도달했을 때 유전자 알고리즘에 의한 최적점 탐색은 종료됨을 의미한다. 탐색결과, 개체군의 크기가 50일 경우, 교배확률 및 변이확률에 따라 다소의 차이가 있긴 하나, Rosenbrock 함수의 값은 대체

적으로 0.015 정도에 해당되는 결과를 나타내고 있으며, 이는 Rosenbrock 함수의 실제 최소값인 0.0과 비교하여 1.5% 정도의 오차에 해당되는 결과이다. 그러나 이외의 경우에 대해서는 탐색결과, Rosenbrock 함수의 값이 0.000015~0.000012 정도일 때 탐색이 종료되어 실제의 최소값과 비교하여 0.0015~0.00012% 정도의 작은 오차에 머무는 즉, 본 연구에 적용된 유전자 알고리즘은 최적해를 위한 탐색 알고리즘으로 유효하다는 일차적인 결론을 얻었다. 결국 최적의 조건은 Rosenbrock 함수의 값이 0.000012인 경우 ($X_1 = 1.0011$, $X_2 = 1.0024$ 인 경우)에 해당되며, 이 경우 개체군의 크기(M)는 40이고 교배확률(p_c) 및 변이확률(p_m)은 각각 0.95와 0.003이다.

총 120가지 경우의 제어 파라미터 조합에 대해 실시된 Rosenbrock 함수의 기초탐색결과를 토대로 하여, 탐색속도와 수렴정도가 비교적 불량한 개체군의 크기($M = 60$ 인 경우)는 제외하고, 교배확률은 0.6, 0.8 및 0.95인 경우, 변이확률은 0.003, 0.006, 0.009 및 0.011인 경우 등으로 축소 조정한 다음 이를 쏘일네일링 굴착벽체 시스템에 직접 적용하여, 제어 파라미터 값의 최적 설정치를 결정하기 위한 해석을 계속 수행하였다. 해석이 수행된 단일지층의 쏘일네일링 굴착벽체 시스템에 대한 관련제원은 표 3과 같다. 탐색의 종료조건으로서 세대수 500을 설정하였고, 최적점에 대한 접근정도를 판정하는 기준으로는 연산에 소요되는 시간을 택하였으며, 연산의 종료시점은 활동에 대한 소요안전율 1.3을 만족하면서 동시에 단위폭당 총네일길이가 70m 이하인 경우로 하였다.

탐색결과를 그림 4에 도시되어 있으며, 이를 살펴보면, 세대수가 30인 경우 각 세대의 연산시간은 상대적으로 작았으나 최적해에 도달하기 위해서는, 세대수가 40 또는 50인 경우에 비해,

표 3. 유전자 알고리즘 제어 파라미터 값의 결정에 적용된 쏘일네일링 굴착벽체 시스템 관련 제원

토질정수	단위중량	1.8 t/m ³
	내부마찰각	30°
	점착력	1.0 t/m ²
굴착벽체의 기하학적 특성	총굴착깊이	10m
	배면토체의 경사각	0°
	전면벽체의 기울기	0°
네일관련 제원 등	첫단 네일의 설치깊이	1.0m
	철근의 인장항복강도	36000 t/m ²
	철근의 직경	2.5 cm
	천공직경	10.3 cm

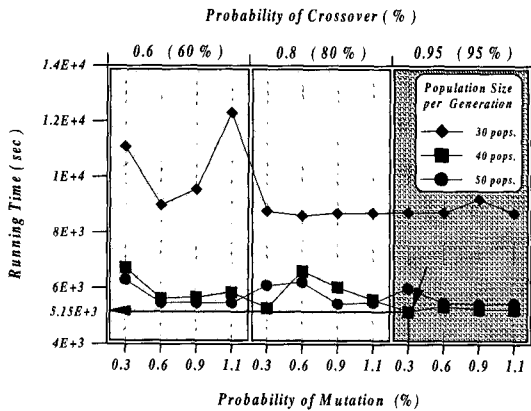


그림 4. 알고리즘 제어 파라미터 값의 변화에 따른 소요연산시간

과다한 연산시간이 소요됨을 알 수 있다. 또한 세대수가 각각 40과 50인 경우를 서로 비교하면 최적해에 도달하기 위한 소요연산시간은 교배확률 및 변이확률에 따라 다소 차이가 있긴 하나, 전체적으로 볼 때 거의 유사한 경향을 보이고 있다.

이외에도 그림 1의 흐름도에 도시된 바와 같이, 각 설계단면에 대한 전면벽체의 최대수평변위를 예측하기 위한 인공신경망 이론의 입력자료로 요구되는 즉, 전단 및 휨에 대한 안정성 확보 기준이 충족되는 쏘크리트 전면벽체의 최소요구두께 및 소요 와이어매쉬량은, 지층별 토질정수, 네일의 연직 및 수평 방향 설치간격 등 제

약조건 1을 충족시킨 설계변수값을 토대로, 김 등(1999)이 제시한 기법(쏘크리트 재료의 극한압축강도는 2100 t/m² 이상으로, 또한 와이어매쉬 재료의 인장항복강도 28000 t/m² 이상으로 하였음)에 의거해 산정된다. 그러나 쏘일네일링 굴착벽체 시스템의 경우 일반적으로, 극부적인 안정성을 충분히 확보하기 위한 차원에서 10 cm를 쏘크리트 전면벽체의 표준두께로 적용하고 있으며, 따라서 본 연구에서도 10 cm를 기준두께로 간주하여, 만약 김 등(1999)이 제시한 기법에 의거해 산정되는 최소요구두께가 기준두께를 초과하는 경우에 한해서만 산정된 최소요구두께를 쏘크리트 전면벽체의 두께로 간주하였고, 그 이외의 모든 경우에는 기준두께 10 cm를 쏘크리트 전면벽체의 두께로 간주하였다.

3. 인공신경망 이론을 이용한 전면벽체의 최대수평변위 예측기법

2장에 기술된 유전자 알고리즘을 이용한 최적설계기법(그림 1의 흐름도 참조)의 제약조건 2에 관련된, 쏘일네일링 굴착벽체 시스템 전면벽체의 최대수평변위를 예측하기 위해 본 연구에서는 Russell & Roy(1990)의 인공신경망 이론을 추가로 적용하였다.

3.1 기본접근

1) 인공신경망 이론의 개요 및 특징

인간의 두뇌는 복잡한 정보를 효율적으로 분산 병렬 처리할 수 있을 뿐만 아니라 학습능력이 있다는 사실에 근거하여, 문제 해결에 필요한 규칙 개발이 요구되지 않는 계산방법으로 인공신경망 이론이 개발되었으며, 여러 인공신경망 구조 중 다층역전파(multi-layer back-propagation) 기법을 이용한 인공신경망은 정확한 유형을 학

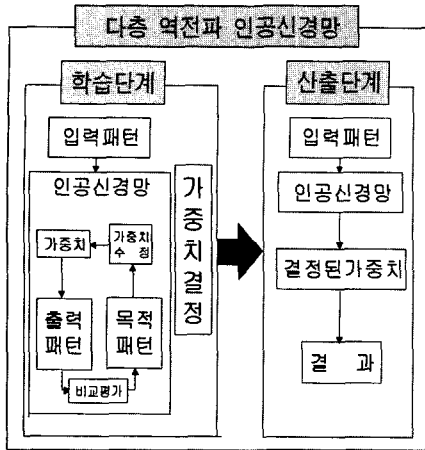


그림 5. 다층역전파 기법의 개념도

습하고 또한 유형 변화에 따라 조정이 가능하기 때문에 원하는 결과를 적절히 제시할 수 있는 장점이 있다.

여기서 학습이란 인공신경망에서 계산된 값과 목적값 사이의 오차를 줄이기 위해, 입력층과 은닉층 사이, 또한 은닉층과 출력층 사이의 가중치를 반복적으로 수정하는 것이다. 결국, 역전파기법을 이용한 학습의 최종적인 목표는 오차자승의 합(sum-squared error)을 최소화하는 것이다.

구체적으로 다층역전파 기법은 그림 5에 도시된 바와 같이 학습단계와 산출단계로 이루어진다.

학습단계에서는 입력패턴과 목적패턴이 입·출력 조합으로 주어지고, 입·출력 조합의 관계를 표현할 수 있는 가중치를 수정한다. 각 입력패턴에 대해 출력을 먼저 계산한 후, 실제 출력과의 차이를 줄이는 방식으로 연결강도를 조정함으로써 수행되며, 하나의 입력패턴에 대한 조정이 끝나면 새로운 입·출력 조합이 주어지고, 이와 같은 과정을 통해 반복학습을 시행함으로써, 입·출력 사이의 상관관계를 잘 묘사하는 가중치를 구한다(그림 6). 산출단계는 필요로 하는 결과에 대한 입력만 주어지면 기 결정된 입력층과 은닉층 사이의 상관관계에 의해 출력이 계산된다. 다층역전파 기법은 산출단계에서 활성화함수

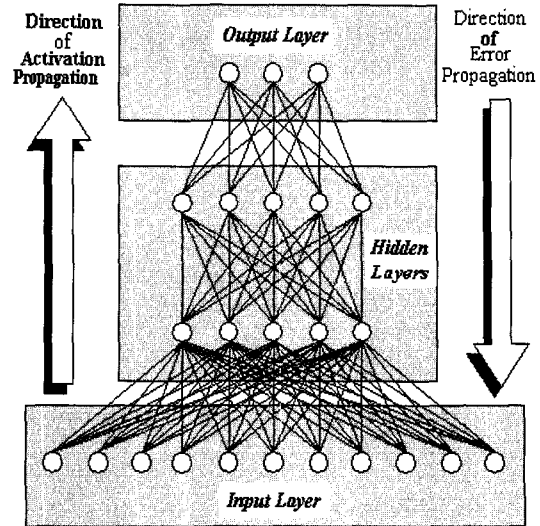


그림 6. 다층역전파 기법의 학습흐름도

를 통해 주어진 가중치와 입력치에 대한 출력치를 산정하며, 학습단계를 거치며 미리 정한 학습률(learning rate)과 모멘텀 상수(momentum factor)를 이용하여 입력된 목적치와 산출된 출력치 사이의 오차를 줄이기 위한 가중치의 변화값을 결정한다. 본 연구에서는 각 처리기의 활성화함수로, 출력값의 범위가 0~1 사이이고 또한 미분이 가능한 시그모이드 함수를 이용하였다.

2) 현장계측자료의 데이터 베이스화

쏘일네일링 공법에 관련된 다양한 현장계측자료의 데이터 베이스화를 위해서는, 지반조건 및 현장여건 등 발생변위에 영향을 주는 다양한 인자들의 세부 추출작업이 요구된다. 본 연구에서는 쏘일네일링 굴착벽체 시스템의 설계상 특성을 감안하여 표 4와 같이 총 61개 입력노드에 해당되는 정규화된 영향인자들을 결정한 후, 이에 의거해 수집된 다양한 현장의 계측자료들을 정리하였다.

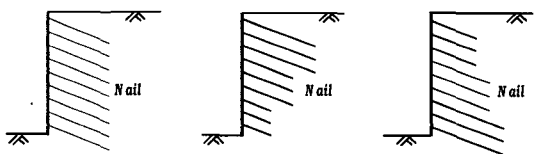
본 연구를 통해 계측자료 수집이 이루어진 14개 기존 쏘일네일링 굴착벽체 현장들의 경우, 대부분, 네일의 수평 또는 연직 방향 설치간격은

표 4. 데이터 베이스화를 위해 정규화된 영향인자들

굴착벽체의 기하학적 특성 등		총굴착깊이	전면벽체의 경사각	배면토체의 경사각	지하수위	인접터널과의 이격거리	인접건물과의 이격거리	1 - 6		
토질정수 등	매립층		단위중량		점착력	내부마찰각	지층두께	7 - 10		
	퇴적층		단위중량		점착력	내부마찰각	지층두께	11 - 14		
	풍화토층		단위중량		점착력	내부마찰각	지층두께	15 - 18		
	풍화암층		단위중량		점착력	내부마찰각	지층두께	19 - 22		
	연암층		단위중량		점착력	내부마찰각	지층두께	23 - 26		
	보통암층		단위중량		점착력	내부마찰각	지층두께	27 - 30		
	경암층		단위중량		점착력	내부마찰각	지층두께	31 - 34		
보	네일관련제원	삽입각도	설치단수	네일의 수평방향 설치간격	설치패턴(그림 7)			네일의 설치패턴(5 set)		35 - 50
					동일	上長-下短	上短-下長	동일길이의 네일단수	네일길이	
강	병행공법	Earth Anchor(E/A)		E/A + Corner Strut		E/A + Raker			51 - 53	
		전면벽체		Shotcrete		H-pile + Shotcrete		숏크리트 벽체두께		
조	차수 및 지반보강 공법	H-pile + 토류판		Shotcrete		H-pile + Shotcrete		숏크리트 벽체두께		54 - 57
		S.C.W.		JET Grouting		L.W.		C.I.P.		
건									58 - 61	

표 5. FLAC^{2D} 프로그램 해석에 적용된 네일의 설치패턴, 설치간격 및 길이 등

설치패턴	형태	동일	上長 - 下短	上短 - 下長
	자료수	10 set	13 set	13 set
네일의 연직방향 설치간격		1m ~ 4m		
네일의 수평방향 설치간격		1m ~ 2m		
삽입각도		10 ~ 15°		
네일의 길이	상부	10m ~ 15m	13m ~ 23m	7m ~ 10m
	중앙부		10m ~ 15m	10m ~ 15m
	하부		7m ~ 10m	13m ~ 23m
숏크리트 전면벽체의 두께		10 cm ~ 15 cm		



(a) 동일 (b) 上長-下短 (c) 上短-下長
그림 7. 네일의 설치패턴

등간격으로 설계가 이루어 졌으며, 각 네일의 길이 또한 깊이에 상관없이 동일한 길이로 설계되었다. 그러나 설계상의 최적화를 추구하는 차원에서 볼 때, 이와 같은 동일한 값의 설치간격 및

길이를 설계된 경우는 다양한 지반조건 및 현장 여건에 부합되지 않을 수도 있으며, 또한 그림 7에 도시된 설치패턴도 최적화에 고려되어야 할 항목으로 판단된다.

따라서 보다 다양한 설치간격, 길이 및 설치패턴 등을 지닌 현장계측자료의 수집이 예측의 신뢰성을 더욱 높이기 위해서는 반드시 필요하나, 이는 현재로서는 여의치 않은 실정이며, 따라서 간접적인 방법이긴 하나 본 연구에서는 쏘일네일링 공법이 적용된 도심지 14개 굴착현장 19개 측정점(19세트)의 현장계측자료 외에, 추가로 FLAC^{2D}

표 6. 분석에 적용된 인공신경망 모델

모델번호	입력층	은닉층	출력층	학습률	모멘텀 상수
1~45	61	61	2	0.1~0.5	0.1~0.9
46~90	61	61 - 61	2		
91~135	61	61 - 61 - 61	2		

프로그램 해석을 시행하여 자료를 보강하였다. 본 FLAC^{2D} 프로그램 해석을 통해 보강된 자료는 36세트로서, 네일의 설치패턴, 설치간격 및 길이 등은 표 5에 명시되어 있다.

본 FLAC^{2D} 프로그램 해석을 통한 보강자료 중에는, 실제의 현장계측자료 중에는 포함되지 않은 단면 - 즉, 전면벽체의 최대수평변위가 총 굴착깊이의 0.3%로 정의된 허용변위기준을 초과하는 7세트의 단면 - 에 대한 정보가 추가되어 예측의 신뢰성을 더욱 높이는 효과가 기대된다.

3) 최적의 인공신경망 모델 결정

수집 정리된 14개 현장 19개 측정의 현장계측 자료 및 추가로 FLAC^{2D} 프로그램 해석을 시행하여 보강된 36세트의 학습자료를 토대로, 최적의 인공신경망 모델을 결정하기 위한 분석을 우선 수행하였다. 본 분석에 적용된 다층역전파 기법은, 입력층, 출력층 및 은닉층 등의 구조에 따라 인공신경망의 학습효율 및 추론능력이 변화하게 되며, 이는 학습률 및 모멘텀 상수, 학습회수 등에 따라 영향을 받게 된다.

본 연구에서는 이와 같은 인공신경망의 특성을 고려하여, 표 6과 같이 3종류의 서로 다른 은닉층 구조를 지니는 신경망 구조와 45종류의 학습상수 조합을 설정하였으며, 조합된 총 135개의

인공신경망 실험모델을 대상으로 학습을 수행하였다.

표 6에 명시된 바와 같이, 입력층의 노드수는 61개로, 또한 출력층의 노드수는 쏘일네일링 굴착벽체 시스템 전면벽체의 최대수평변위와 그 발생지점의 위치(벽체 최상단으로 부터의 연직거리) 등 2개로 고정하고, 은닉층의 수를 1층, 2층 및 3층 등으로 변화시켜, 은닉층 구조를 최적 인공신경망 모델 결정의 기준으로 하였다. 또한 학습종료의 조건으로는, 시스템 오차 1.0×10^{-4} 과 반복회수 10^{15} 을 각각 적용하였다.

본 학습을 통해 학습시간과 오차의 수렴정도가 우수한 8개의 모델을 일차적으로 선정하였으며, 이를 정리하면 표 7과 같다.

일차적으로 선정된 표 7의 8개 우수 모델을 이용하여, 쏘일네일링 굴착벽체 시스템 전면벽체의 최대수평변위를 재추론하여 보았다. 식 (7)에 정의된 평균추론 오차율(Average Inference Error Rate, AIER) 산정식을 이용하여 표 7의 8개 모델 각각에 대해 재추론 오차율을 평가하고, 이를 근거로 최적의 인공신경망 모델을 결정하였다.

$$AIER(\%) = \frac{1}{n} \sum \frac{|K_m - K_p|}{K_m} \times 100 \quad (7)$$

여기서, n 은 추론자료수, K_m 은 실측치, 또한 K_p 는 예측치를 각각 의미한다.

평가된 재추론 오차율을 토대로 분석한 결과, 은닉층의 구조는 단층이고, 학습률과 모멘텀 상수의 값이 각각 0.1과 0.4인 4번 모델의 경우가 최대수평변위의 재추론 오차율이 33.1%로서 가

표 7. 본 학습을 통해 일차적으로 선정된 8개의 우수 모델

모델번호	입력층의 노드	은닉층의 구조	은닉층의 노드	출력층의 노드	매개변수	
					학습률	모멘텀 상수
1 ~ 5	61	1층 구조	61	2	0.1	0.1~0.5
10 ~ 11					0.2	0.1, 0.2
46	61	2층 구조	61 - 61	2	0.1	0.1

표 8. 다층지반의 토질특성 등

지층구분	지층별 깊이(m)	단위중량(t/m^3)	내부마찰각($^\circ$)	점착력(t/m^2)
매 립 층	0~4.5	1.7	28	0
퇴 적 층	4.5~8.0	1.8	30	0
풍화토층	8.0~11.5	1.9	33	0.3
풍화암층	11.5~24	2.0	35	3.0

표 9. 본 분석에 적용된 네일관련 제원

네 일 의 제 원			
네일의 연직방향 설치간격(m)	1.0	철근의 인장항복강도(t/m^2)	36000
네일의 수평방향 설치간격(m)	1.0	철근의 직경(cm)	2.5
첫단 네일의 설치깊이(m)	1.0	천공직경(cm)	10.3

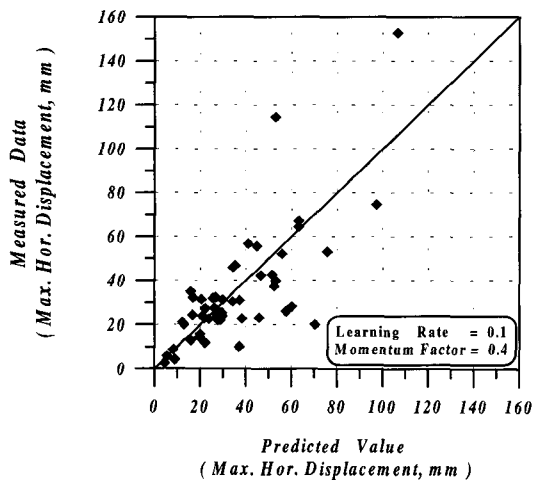


그림 8. 재추론 결과(4번 모델의 경우)

장 작은 값이며(그림 8), 또한 오차의 수렴경향도 다른 모델에 비해 상대적으로 우수한 것으로 인정되어, 본 연구에서는 4번 모델을 최적의 인공신경망 모델로 결정하였다.

3.2 학습자료 및 선정모델의 신뢰성 평가분석

본 연구에서는 쏘일네일링 공법이 적용된 도심지 14개 굴착현장 19개 축점(19세트)의 현장계측자료 외에, 추가로 FLAC^{2D} 프로그램 해석을

시행하여 36세트의 학습자료를 보강한 바 있다. 이와 같은 추가적인 학습자료의 보강이 인공신경망 이론을 이용한 발생변위 예측에 어느 정도 신뢰도를 높이는지 평가하기 위해, 또한 더불어 최적의 인공신경망 모델로 선정된 4번 모델의 신뢰성 확인을 위해 다음과 같은 분석을 시행하였다.

본 분석에서는 두가지 형태로 학습조건을 구분하여((1) 14개 굴착현장 19개 축점의 현장계측자료만을 토대로 학습이 수행된 경우와 (2) 이외에 FLAC^{2D} 프로그램 해석을 통해 보강된 36세트의 학습자료를 추가로 포함하여 총 55세트에 대해 학습이 수행된 경우), 네일의 설치패턴 및 수평방향 설치간격의 변화가 전면벽체 최대수평변위의 예측에 미치는 영향을 각각 살펴보았다. 유전자 알고리즘 탐색의 종료조건으로서 세대수 500을 설정하였고, 인공신경망 이론 학습종료의 조건은 시스템오차 1.0×10^{-4} 과 반복회수 10^{+5} 으로 설정하였고, 굴착면이 연직이고 지표면이 수평인 다층지반(표 8) 조건하의 본 분석에서, 총굴착깊이는 24m로, 네일의 총설치단수는 21단으로, 또한 슛크리트 전면벽체는 10 cm의 기준두께를 지니는 것으로 가정하였고, 아울러 추가적인 지반보강공법의 적용이나 지하수위, 인접건물 및

표 10. 설치패턴별로 적용된 각 네일의 길이

설치패턴 구분	상부 설치네일 (총 7단)의 길이	중상부 설치네일 (총 7단)의 길이	하부 설치네일 (총 7단)의 길이	네일의 평균길이	구분(그림 7 참조)
Case 1	24m	16m	8m	16m	上長-下短
Case 2	20m	16m	12m	16m	上長-下短
Case 3	16m	16m	16m	16m	동일
Case 4	12m	16m	20m	16m	上短-下長
Case 5	8m	16m	24m	16m	上短-下長

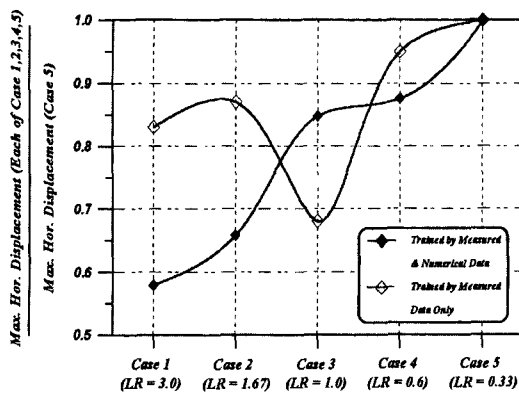


그림 9. 학습조건에 따라 예측된 전면벽체 최대수평변위의 비교

인접터널 등은 없는 것으로 가정하였다. 이외에 본 분석에 적용된 네일관련 제원은 표 9와 같다.

1) 네일의 설치패턴 변화에 따른 영향 분석

본 분석에서 고려한 네일의 설치패턴 개요는 그림 7에 도시된 바와 같으며, 설치패턴별로 적용된 각 네일의 길이는 표 10에 명시된 바와 같이 총 5가지 경우이다. 5가지 경우 모두 네일의 평균길이는 16m로 동일하며, 구체적으로 네일길이비(LR = 상부 설치네일의 길이/하부 설치네일의 길이)를 정의하면 3.0, 1.67, 1.0, 0.6 및 0.33인 5가지 경우이다.

전술한 바와 같이 두가지 형태의 학습조건 각각에 대해, 예측된 전면벽체 최대수평변위를 서로 비교한 결과는 그림 9에 도시되어 있다.

그림 9의 결과를 살펴보면, 14개 굴착현장 19

개 측정의 현장계측자료만을 토대로 학습이 수행된 경우, 상대적으로 약한 지층이 존재하는 벽체 상단부에서, 일반적으로 변위가 크게 유발될 가능성이 큰 Case 5와 변위 억제효과가 가장 클 것으로 기대되는 Case 1 사이에 최대수평변위는 17% 정도의 차이만을 보이고 있으며, 또한 Case 5에서 Case 1으로 갈수록 변위 억제효과가 점차 증대되는 일반적인 예측경향과도 부분적으로 상치되는 결과를 나타내고 있다. 이에 반해, FLAC^{2D} 프로그램 해석을 통해 보강된 36세트의 학습자료를 추가로 포함하여 총 55세트에 대해 학습이 수행된 경우에는, Case 5와 Case 1 사이에 42.1% 정도의 큰 차이를 보이고 있으며, Case 별 변위의 변화경향도 대체적으로 예측경향과 부합되는 결과를 나타내고 있다. 또한 본 결과에 대한 확인 차원에서, Case 5와 Case 1 모두에 대해 FLAC^{2D} 프로그램 해석을 시행하여 최대수평변위를 서로 비교하여 보았으며, 그 결과 최대수평변위의 차이는 50% 정도로서, 이를 통해 결국 제한적인 현장계측자료만을 토대로 학습을 시키는 경우 다양한 설치패턴의 영향을 적절히 반영하지 못함을 알 수 있으며, 아울러 추가적인 학습자료의 보강이 인공지능망 예측의 신뢰도를 더욱 높이는 데 효율적임을 간접적으로 확인할 수 있다.

2) 네일의 수평방향 설치간격 변화에 따른 영향 분석

본 분석은 표 10의 Case 3 설치패턴(그림 7 참

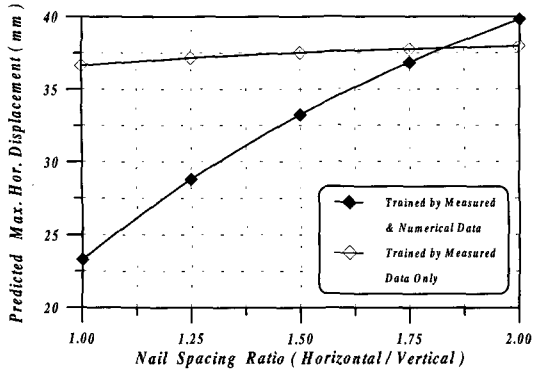


그림 10. 네일의 수평방향 설치간격 변화에 따른 최대수평변위 비교

조)에 한해, 동일한 제반 조건으로, 단지 네일의 수평방향 설치간격만 1.0, 1.25, 1.5, 1.75 및 2.0m의 5가지 경우로 변화시켜, 각 경우에 대해 본 연구 인공지능망 이론을 이용해 예측된 전면 벽체의 최대수평변위를 서로 비교하였다. 그림 10의 비교결과를 살펴보면, 14개 굴착현장 19개 측정점의 현장계측자료만을 토대로 학습이 수행된 경우 네일의 수평방향 설치간격 변화에 상관없이 최대수평변위가 거의 일정한 경향을 보이고 있으며, 구체적으로는, 수평방향 설치간격이 1.0 m인 경우 예측된 최대수평변위는 36.63 mm이며, 수평방향 설치간격이 2.0m인 경우에는 37.96 mm로서 그 차이가 비교적 미미한 결과를 나타내고 있다. 현장계측자료만을 토대로 학습이 수행된 경우, 네일의 수평방향 설치간격이 다양하지 못한 제한성과 또한 허용변위기준을 초과하는 자료가 전혀 포함되지 못한 제한성 등을 모두 지니고 있으며, 이로 인해 네일의 수평방향 설치간격이 변화함에 따른 영향이 적절히 반영되지 못하고 결국 최대수평변위 예측에 대한 신뢰도가 떨어지는 결과가 초래된 것으로 판단된다.

이에 반해, FLAC^{2D} 프로그램 해석을 통해 보강된 36세트의 학습자료를 추가로 포함하여 총 55세트에 대해 학습이 수행된 경우에는, 수평방향 설치간격이 1.0m인 경우 예측된 최대수평변

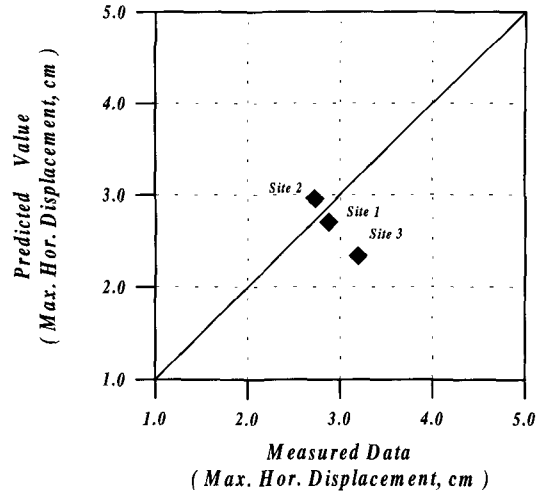


그림 11. 신뢰성 확인을 위한 비교

위는 23.29 mm이며, 수평방향 설치간격이 2.0m인 경우에는 39.80 mm로서 증가율이 41.5% 정도의 큰 범위에 해당되며, 또한 수평방향 설치간격이 넓어짐에 따라 최대수평변위도 점차 커지는 일반적으로 예상되는 경향과 대체적으로 부합됨을 확인할 수 있다.

1) 및 2)의 분석을 통해, 인공지능망 이론의 경우 학습에 사용된 자료와 관련특성 등이 유사한 경우에는 비교적 정확한 예측이 가능하나, 학습 자료가 상대적으로 부족한 경우에는, 예를 들어 상부와 하부의 네일길이가 변화하는 설치패턴이나 네일의 수평방향 설치간격이 통상적인 경우보다 작거나 또는 큰 경우에는 예측상에 오차가 비교적 크게 발생할 소지가 있음을 알 수 있다.

3) 신뢰성 확인

3.1절을 통해 최적의 인공지능망 모델로 선정된 4번 모델의 신뢰성 확인을 위해, 학습을 시키지 않은 3개 현장의 계측자료에 근거한 최대수평변위를 본 연구 인공지능망 이론에 의한 예측치와 서로 비교하였다.

비교결과는 그림 11과 같으며 이를 살펴보면, 현장 1 및 2의 오차율은 각각 5.8%(1.7 mm) 및

표 11. 본 분석에 적용된 네일관련 제원

네 일 관 련 제 원			
네일의 연직방향 설치간격(m)	1.0	철근의 인장항복강도(t/m ²)	36000
네일의 수평방향 설치간격(m)	1.0	천공직경(cm)	10.3
첫단 네일의 설치깊이(m)	1.0	철근의 직경(cm)	2.5

8.5%(2.3 mm) 정도로 비교적 양호한 경향을 보이고 있으나, 이에 반해 현장 3의 오차율은 26.8%(8.6 mm) 정도로 상대적으로 큰 경향을 보이고 있다. 이와 같은 경향은, 학습자료중 현장 3과 유사한 특성을 지닌 자료가 상대적으로 적었던 데 주원인이 있는 것으로 판단되며, 따라서 보다 다양한 현장특성을 지닌 충분한 학습자료의 획득이 인공신경망 이론을 통한 예측의 신뢰도를 높이기 위해 선행적으로 중요함을 알 수 있다.

4. 쏘일네일링 굴착벽체 시스템의 기반조건 관련 설계변수의 영향 분석

원지반의 단위중량(γ), 내부마찰각(ϕ) 및 점착력(c) 등 지반강도정수가 서로 다른 다양한 경우에, 본 연구 2장에서 제시된 기법(그림 1의 흐름도 참조)을 토대로, 전제조건이 충족되는 최적설계단면을 각각 결정한다 다음, 각 단면에 해당되는 네일의 총길이 및 네일의 삽입각도에 대해 이들 지반강도정수의 변화가 미치는 영향을 분석하였다. 최적설계단면의 결정에 적용된 전제조건은, 보강토체의 활동에 대한 소요안전율 기준은 1.3 이상, 또한 전면벽체의 허용변위기준은 총굴착깊이의 0.3% 이하 등이다. 유전자 알고리즘에 적용된 개체군의 크기, 교배확률 및 변이확률 등은 2.3절의 평가결과를 또한 탐색의 종료조건으로서 세대수 500을 설정하였고, 이외에도 인공신경망 이론에 적용된 모델, 학습률 및 모멘텀 상수 등은 3.1절의 평가결과를 각각 토대로 하였

다. 굴착면이 연직이고 지표면이 수평인 단일지층 조건하의 본 분석에서, 총굴착깊이는 10m로, 각 네일의 길이는 깊이에 상관없이 모두 동일하게, 또한 네일의 연직 및 수평 방향 설치간격은 모두 1.0m의 동일한 값으로 가정하였으며, 이외에 본 분석에 적용된 네일관련 제원은 표 11에 정리되어 있다.

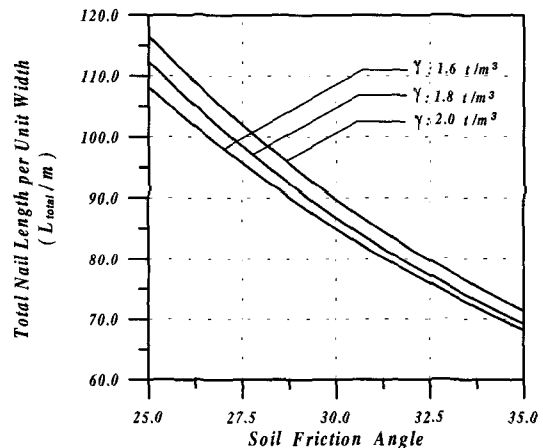


그림 12. 내부마찰각 - 네일 총길이 사이의 변화관계

1) 내부마찰각(ϕ)의 변화에 따른 영향 분석
 본 분석에서 지반흙의 단위중량은 1.6, 1.8 및 2.0 t/m³의 3종류로 구분하였고, 점착력은 1.0 t/m²의 일정값으로 하였다. 각 경우에 지반흙의 내부마찰각 변화에 따른, 최적설계단면의 단위폭당 요구되는 네일 총길이의 변화경향은 그림 12와 같다.

그림 12의 결과를 살펴보면, 내부마찰각이 커짐에 따라 최적설계단면의 네일 총길이는 감소하는 경향을 보이고 있으며, 구체적으로, 내부마

표 12. 내부마찰각 및 단위중량의 변화에 따른 네일의 최적삽입각도

단위중량 \ 내부마찰각	25°	30°	35°
1.6 t/m ³	11.4°	13.1°	15.6°
1.8 t/m ³	11.8°	13.9°	15.4°
2.0 t/m ³	12.3°	11.8°	14.7°
네일 삽입각도의 평균치	11.8°	12.9°	15.2°

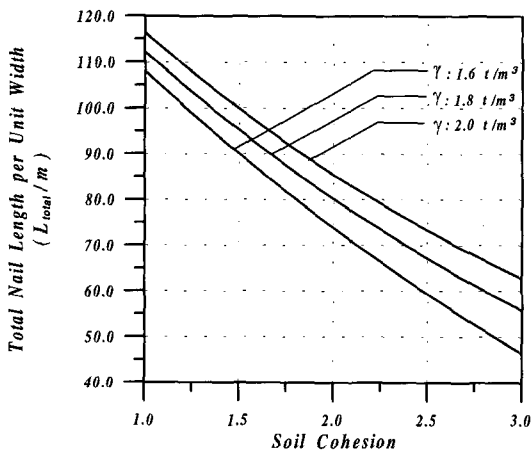


그림 13. 점착력 - 네일 총길이 사이의 변화관계

찰각이 25°에서 30°로 증가함에 따른 네일 총길이의 감소율은 20% 정도이고, 30°에서 35°로 증가함에 따른 감소율은 15% 정도이다. 또한 지반흙의 단위중량이 커짐에 따라 네일 총길이도 늘어나는 경향을 보이고는 있으나, 그 증가율은 2~5% 정도에 그쳐, 결국 최적설계단면의 네일 총길이는 지반흙의 단위중량 보다는 내부마찰각에 더욱 민감하게 영향을 받는 것으로 나타났다.

또한 각각의 최적설계단면에 해당되는 네일의 설치각도를 정리하면 표 12와 같으며, 표 12의 결과를 살펴볼 때, 결국 네일 설치각도도 지반흙의 단위중량 보다는 내부마찰각에 더욱 민감하게 영향을 받는 것을 알 수 있다.

이외에도 표 12에 의하면, 지반흙의 내부마찰각이 커짐에 따라 네일의 최적삽입각도도 커지는 경향을 보이나, 이와는 달리 단위중량이 크기

증가에 따라서는 설치각도가 대체적으로 작아지는 현상을 나타내고 있다.

2) 점착력(c)의 변화에 따른 영향 분석

본 분석에서 지반흙의 단위중량은 1.6, 1.8 및 2.0 t/m³의 3종류로 구분하였고, 내부마찰각은 25°의 일정값으로 하였다. 각 경우에 지반흙의 점착력 변화에 따른, 최적설계단면의 네일 총길이의 변화 경향은 그림 13과 같다.

그림 13의 결과를 살펴보면, 점착력이 커짐에 따라 최적설계단면의 네일 총길이는 감소하는 경향을 보이고 있으며, 구체적으로, 점착력이 1.0에서 2.0 t/m²으로 증가함에 따른 네일 총길이의 감소율은 26~31% 정도이고, 2.0에서 3.0 t/m²으로 증가함에 따른 감소율은 20~26% 정도이다. 또한 지반흙의 단위중량이 커짐에 따라 네일 총길이도 늘어나는 경향을 보이고는 있으나, 그 증가율은 7~25% 정도에 그쳐, 결국 최적설계단면의 네일 총길이는 지반흙의 단위중량 보다는 점착력에 더욱 민감하게 영향을 받는 것으로 나타났다.

5. 최적화 설계기법의 실제 현장에의 적용

본 연구를 통해 제시된 쏘일네일링 굴착벽체 시스템 최적화 기법(그림 1의 흐름도 참조)의 적합성 여부를 종합적으로 확인하기 위해, 실제 시공이 이루어진 현장의 설계단면과 본 연구 제시 기법에 의거해 최적화된 설계단면을 서로 비교·분석하였다. 본 비교에 적용된, 실제 현장의 지반특성 및 굴착벽체 관련 기하학적 제원 등은 표 13 및 그림 14에 각각 명시되어 있다. 유전자 알고리즘에 적용된 개체군의 크기, 교배확률 및 변이확률 등은 2.3절의 평가결과를 또한 탐색의 종료조건으로서 세대수 1000을 설정하였고, 이

표 13. 현장의 지반특성

지층구분	단위중량 (t/m ³)	점착력 (t/m ²)	내부마찰각 (°)	지반반력계수 (t/m ³)	탄성계수 (t/m ²)	포아손비
매립토	1.7	0.0	25	800	1,000	0.4
퇴적층	1.8	0.0	26	1,000	500~1,500	0.35~0.30
풍화암	2.2	2.5	24	3,500	14,000	0.3
연 압	2.2	5.0	26	5,000	25,000	0.25
경 압	2.5	8.2	34	12,000	300,000	0.20

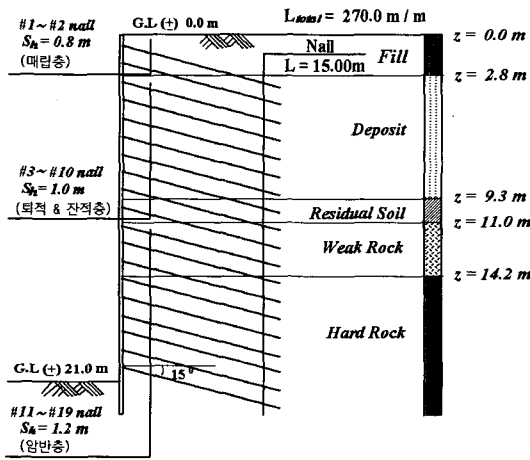


그림 14. 실제 현장 굴착벽체 관련 기하학적 제원 및 지층구조 개요

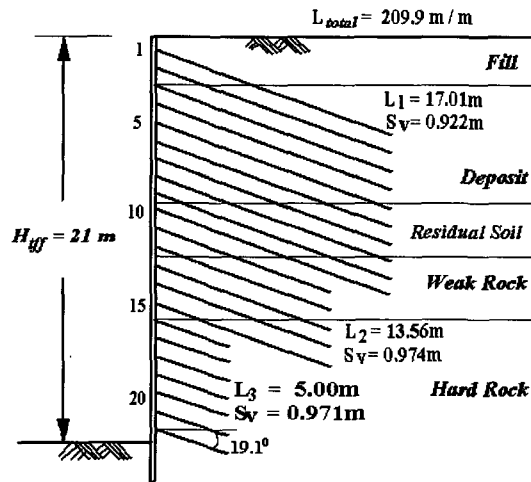


그림 15. 최적화된 설계단면

외에도 인공신경망 이론에 적용된 모델, 학습률 및 모멘텀 상수 등은 3.1절의 평가결과를 각각 토대로 하였다.

그림 14에 도시된 실제의 도심지 굴착현장은 설계시 활동에 대한 소요안전율 기준이 1.3 이상이었으며, 각단 네일의 삽입각도는 15°로 모두 동일하게, 각단 네일의 길이는 15m로 모두 동일하게, 또한 네일의 수평방향 설치간격은 지층에 따라 0.8~1.2m의 범위로 설계 및 시공이 되었으며, 이외에도 지하수는 존재하지 않았고, 전면벽체는 10cm 두께의 슛크리트로 설계 및 시공이 이루어졌다. 결국 본 현장의 경우 단위폭당 설치된 네일의 총길이는 270m이었다.

본 현장에 대한 지반특성 및 굴착벽체 관련 기하학적 제원(표 13 및 그림 14 참조), 설계상의 소요안전율 기준 등을 동일하게 적용하여, 본 연

구 제시 유전자 알고리즘 최적설계기법에 의거해 새로이 결정된 설계단면은 그림 16과 같다. 실제로 시공이 이루어진 상태(그림 14 참조)와는 달리, 최적화된 설계단면의 경우(그림 15)를 살펴보면, 1~10단까지 설치되는 네일의 경우 길이 및 연직방향 설치간격은 각각 17.01m 및 0.922m이며, 11~15단 네일의 길이 및 연직방향 설치간격은 각각 13.56m 및 0.974m이고, 또한 그 아래쪽에 설치되는 16~22단 네일의 길이 및 연직방향 설치간격은 각각 5.00m 및 0.971m로서, 지반강도가 비교적 약한 상부지층으로 부터 연·경암층의 견고한 하부지층 쪽으로 갈수록, 최적화된 네일의 길이는 지반강도의 상대적인 증가로 인해 점차 짧아지는 경향을 보이고 있다. 그림 15의 최적화 설계단면에 있어, 20단, 21단 및 22단 네일의 경우에는 주변마찰에 의해 예상

되는 발휘인장력이 철근의 인장항복강도를 초과하게 되어, 해석상 네일의 인장력은 철근의 인장항복강도에 의해 결정되는 상황이다.

이외에도 최적화된 그림 15 설계단면의 경우, 각단 네일의 수평방향 설치간격은 1.3m로, 또한 각단 네일의 설치각도는 19.1°로 각각 결정되었다. 본 경우 단위폭당 설치되는 네일의 총길이는 209.9m로서, 실제 시공된 현장(그림 14 참조)의 270m에 비해 본 최적화를 통해 22% 정도의 네일길이 감소효과가 예상되며, 또한 10m 폭당 요구되는 천공개소의 수자도 180개소에서 169개소로 11개소 감소하는 등 본 최적화를 통한 시공상의 비용 절감효과를 예상할 수 있다. 아울러 본 최적화 기법에 적용된 인공신경망 이론에 의거해 그림 15 최적설계단면에 대한 전면벽체 최대수평변위를 예측하면 31.14 mm이며, 이는 그림 14에 도시된 실제의 시공단면에 대해 계측된 최대수평변위 35.11 mm 보다 11% 정도 감소되는 결과에 해당된다. 이외에도 2장에서 언급한 바와 같이, 김 등(1999)이 제시한 기법을 토대로 평가된 슛크리트 전면벽체의 최소요구두께는 10 cm 보다 작아, 따라서 본 최적설계단면 슛크리트 전면벽체는 기준두께 10 cm를 적용하였다.

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 쏘일네일링 굴착벽체 시스템의 시공비용 최소화에 초점을 두고, (1) 보강토체의 활동에 대한 안정성 확보, (2) 슛크리트 전면벽체의 안정성 확보, 또한 (3) 전면벽체 발생변위의 허용변위기준 충족 등 3가지 전제조건이 모두 고려되는 최적화 설계단면 결정을 위한 기법을 체계화하여 제시하였으며, 이를 위해 유전자 알고리즘 및 인공신경망 이론을 도입하였다. 본 연구에서 수행된 내용중 주요 부분을 요약·정리하면 다음과 같다.

- 1) 본 연구를 통해 전산화된 기본 유전자 알고리즘이 실제의 최적점에 근접하는 해를 제공하는지 여부에 대한 신뢰도 확인을 위해 Rosenbrock 함수를 이용한 기초탐색을 우선적으로 시행하였다. 총 120가지 경우의 알고리즘 제어 파라미터 조합에 대해 실시된 Rosenbrock 함수의 기초탐색 결과를 토대로 하여, 탐색속도와 수렴정도가 비교적 불량한 개체군은 제외하고, 축소된 범위의 교배확률 및 변이확률 경우를 쏘일네일링 굴착벽체 시스템에 직접 적용하여, 알고리즘 제어 파라미터 값의 최적 설정치를 최종 결정하였다.
- 2) 다층역전파 기법을 이용한 인공신경망 이론의 도입과정에서 보다 합리적인 모델의 선정을 위해, 쏘일네일링 공법으로 직접 시공된 도심지 14개 굴착현장 19개 축점의 현장계측자료 외에도, 네일의 다양한 설치패턴, 설치간격 및 길이 등을 고려한 FLAC^{2D} 프로그램 해석을 통해 36세트의 자료를 추가로 보강하여 학습을 시행하였으며, 이와 같은 추가적인 학습자료의 보강이 인공신경망 이론을 이용한 발생변위 예측에 어느 정도 신뢰도를 높이는지 평가하고, 또한 더불어 선정된 모델의 신뢰성 확인을 위해, 네일의 설치패턴 및 수평방향 설치간격 변화에 따른 발생변위 예측 결과를 비교·분석하였다.
- 3) 제시된 기법을 직접 이용하여, 원지반의 단위중량, 내부마찰각 및 점착력 등 지반강도를 정의하는 설계변수 값이 서로 다른 다양한 경우에, 전제조건이 충족되는 최적설계단면을 각각 결정한 다음, 각 단면에 해당되는 네일의 총길이 및 네일의 삼입각도 등에 대해 이와 같은 쏘일네일링 굴착벽체 시스템 지반특성관련 설계변수 값의 변화가 미치는 영향을 분석하였다.
- 4) 최종적으로 제시된 쏘일네일링 굴착벽체 시

시스템 최적화 기법의 적합성 여부를 종합적으로 확인하기 위해, 실제 시공이 이루어진 현장의 설계단면과 제시기법에 의거해 최적화된 설계단면을 서로 비교·분석하였다.

제시된 쏘일네일링 굴착벽체 시스템 최적설계 기법의 효율성 및 신뢰성을 더욱 높이기 위해서는, 유전자 알고리즘 제어 파라미터 값을 보다 합리적으로 결정하기 위한 추가 분석과, 또한 지반조건 및 설계제원이 다양한 현장계측자료의 수집 등 학습자료의 지속적인 보완이 필요시 되며, 이외에도 네일의 발휘인장력 및 전면벽체 작용도압의 적절한 평가를 위한 전문가 시스템 개발로의 확대 연구가 요구된다.

감사의 글

본 논문은 한국학술진흥재단 지원(자유공모과제:1998-001-E01930)에 의한 연구성과의 일부임을 밝히며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. De Jong, K. A. (1975), An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems, Ph. D. thesis, University of Michigan.
2. Grefenstette, J. J. (1986), "Optimization of Control Parameters for Genetic Algorithms.", *IEEE Trans. on Syst., Man, and Cybernetics*, 16(1), pp. 122~128.
3. Holland, J. H. (1975), *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, The University of Michigan Press.
4. Eberhart, R. C. and Dobbins, R. W. (1990), *Neural Network PC Tools*, Academic Press Inc.
5. Schaffer, J. D. et. al. (1989), "A Study of Control Parameters Affecting Online Performance of Genetic Algorithms for Function Optimization", *Proc. of the 3rd Inter. Conf. on Genetic Algorithms.*, pp. 51~60.
6. Schlosser, F. (1991), *Recommendations Clouterre / Soil Nailing Recommendations*, French National Research Project Report, No. FHWA-SA-93-026.
7. 김홍택 등 (1995), "Nailed-Soil 굴착벽체의 발휘인장력 예측", *한국지반공학회지*, 제11권, 제2호, pp. 79~97.
8. 김홍택 등 (1999), "프리텐션 쏘일네일링 시스템의 안정해석 및 신뢰도 분석", *한국지반공학회지*, 제15권, 제2호, pp. 105~128.

(접수일자 1999. 3. 3)