

유전자 알고리즘을 이용한 사면안정 해석

Slope Stability Analysis Using the Genetic Algorithm

신 방 웅*¹ Shin, Bang-Woong

백 승 철*² Baek, Seung-Cheol

김 홍 택*³ Kim, Hong-Taek

황 정 순*⁴ Hwang, Jung-Soon

Abstract

A deterministic approach of slope stability, which is generally corresponding to the model of a simple non-linear function for slopes, is problematic in that it does not account the versatile characteristics of ground layers in an effective way. To resolve this problem, this study proposes a new way of analyzing slope stability, so-called "genetic algorithm method," so as to reflect some particular conditions pertaining to the grounds under concern. Similarities and differences in slope stability that may exist between homogeneous and multiple ground layers are examined in a competitive manner. Overall, though similarities deemed a little bit salient, the algorithm method turned out to be very applicable to estimating the validity of slope stability. Furthermore, an additional effort to consider long-standing sequential and dynamic changes in both the amount of rainfall and the underground water level is made in order to improve the results.

요 지

사면의 파괴면 형태를 간단한 비선형 함수로 모델링하여 해석하는 결정론적인 사면안정 해석은 지층의 복합 특성과 불연속적인 특성을 효과적으로 반영하지 못하는 단점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 결정론적인 방법 보다 지층의 제반조건들을 다양하게 반영할 수 있는 임의 탐색기법인 유전자 알고리즘을 이용한 사면안정 해석 방법을 제시하였다. 제시된 방법의 적합성을 확인하기 위해 단일지층 및 복합지층을 대상으로 하여 제안된 방법과 결정론적인 방법을 비교·검토하였으며, 검토결과 유전자 알고리즘을 이용한 사면안정해석 방법의 적용성을 검증할 수 있었다. 또한 제시된 사면안정 해석 방법에 강우강도에 따른 지하수위의 변화 예측모델을 적용하여 보다 합리적인 사면안정 해석 방법을 제시하였다.

Keywords : Critical slip surface, Genetic algorithm, Random searching, Slope stability

1. 서 론

사면안정 해석에 있어 파괴면의 결정과 지하수위의 합리적인 결정은 중요한 요소 중의 하나이다. 파괴면의 경우 일반적으로 파괴면의 형태를 원호, 대수나선 등으로 가정하여 최소 안전율이 계산되는 파괴면을 임계파괴면으로 결정한다. 이와 같이 파괴면의 형상을 미리

가정된 수학적 함수식으로 제한하는 방법은 해석시간의 단축, 모델 개발의 편리성 및 프로그램의 작성이 용이하다는 등의 장점들에 의해 사면안정 해석에 널리 적용되고 있다. 그러나 지층이 다층으로 구성된 경우, 지표면 아래 비교적 얇은 심도에 굳은 지층이 존재하는 경우 및 사면이 불균질 또는 비등방성인 경우에는 파괴면의 형상이 복합곡선이 되어 수학적 함수식으로

*1 정회원, 충북대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Chung-Buk National Univ.)

*2 정회원, 안동대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Andong National Univ., civilb@andong.ac.kr)

*3 정회원, 홍익대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Hongik Univ.)

*4 정회원, (재)한국철도기술공사 대리 (Member, Senior Engrg., Korea Railroad Technical Corp.)

정의하기에는 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 지반 내부에 존재하는 지층의 조건들과 불연속적인 특성 등을 고려하기 위해 파괴면의 형태가 미리 특정한 함수로 정의되지 않고 임의탐색 기법에 의해 임계파괴면을 예측하는 접근이 이루어졌다. 이를 위해 본 연구에서는 유전자 알고리즘을 적용하였으며, 유전자 알고리즘의 적용성을 확인하기 위해 지금까지 제안된 결정론적인 방법의 해석 결과와 비교·분석을 수행하였다. 또한 단일지층과 복합지층의 임계파괴면을 기존의 결정론적 방법과 비교하여 파괴형상의 차이와 사면 경사지층이 임계파괴면 결정에 미치는 영향 등을 분석하였다.

2. 유전자 알고리즘을 이용한 사면안정해석

2.1 유전자 알고리즘의 개념

유전자 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)은 생물의 진화 메커니즘을 모방한 것으로 John Holland(1975)에 의해 개발된 전역적(global)인 최적화 알고리즘이며, Darwin이 주장한 적자생존과 자연도태의 원리를 컴퓨터에 의해 인공적으로 구현한 인공지능의 한 분야이다. GA는 생물학적 유전인자인 염색체와 유사한 구조인 문자열로 자연계의 유전과 진화의 과정을 모방하여 선택, 교차 및 변이연산에 의해 점차 최적점에 근접하는 개체들을 생성하여 주어진 문제에 적합한 해를 탐색하는 작업을 수행한다. 여기서 문자열은 최적화하기 위한 입력변수들을 이진 정수화하여 일렬로 길게 연결한 것으로 한 개의

설계변수 집단을 개체라고 한다.

기존의 최적화 방법은 국부탐색을 수행하여 전체 최적점을 찾기 위해 다수의 초기점에 대한 반복계산이 필요하다. GA는 하나의 설계점이 아닌 설계집단을 사용하여 확률론적인 탐색을 수행함으로써 전체 최적점에 도달할 신뢰도가 크다(양영순 등, 1995). 또한 기존의 최적화 방법들이 함수의 연속성과 임의의 점에서의 미분이 가능해야 하는 등 수학적 제약조건들이 있으나, GA는 이러한 제약조건 없이 적합도 함수만으로 최적해를 탐색하므로 공학문제의 적용성이 우수한 특징이 있다. GA는 Goldberg(1987)에 의해 처음으로 공학분야에 적용된바 있으며, 전역적인 최적해의 탐색이 가능하고 목적함수에 대한 수학적 제약이 거의 없는 등 공학적 문제의 적용에 많은 이점이 있다.

2.2 유전자 알고리즘에 의한 가상 파괴면의 설정

최소안전율을 나타내는 임계파괴면의 탐색은 지질조건, 사면의 형상 및 경계조건들에 의해 파괴면을 형성하는 각 절편들의 저부 파괴각을 결정하는 것이다. 그림 1에서 임계파괴면을 결정하기 위해 임의의 파괴면을 생성하는 방법을 나타내고 있다. 파괴면의 가정은 해석 대상의 사면에서 파괴면의 시작점과 종료점을 유전자 알고리즘을 이용하여 각각 주어진 범위 내에서 임의의 좌표로서 결정한다. 그 다음 일정한 개수로 분할된 절편들의 저부 파괴각을 유전자 알고리즘을 이용하여 임의의 각도들로 가정하는 과정으로 가상 파괴면을 생성하게 된다. 이때 가장 마지막 절편의 저부 파괴각은 유전자 알고리즘

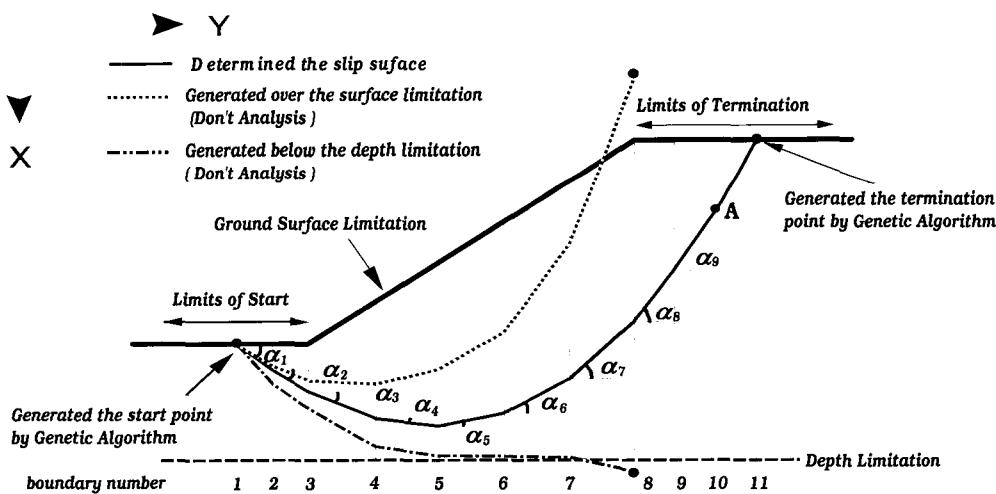


그림 1. 유전자 알고리즘에 의한 가상파괴면 탐색

을 이용하여 생성하지 않고 이전 절편의 우측 저부 파괴점(그림 1의 A점)과 임의의 좌표로 결정된 종료점을 연결하는 선으로서 결정된다. 또한 가상의 파괴면을 생성하는 과정에서 저부 파괴각에 의해 결정되는 각 절편 바닥면의 좌·우측점이 한계깊이(depth limitation) 하부에 위치하거나 혹은 지표면 상부에 위치할 경우에는 안정 해석의 과정을 거치지 않고 적합도 함수값에 의해 도태시키는 과정을 거치게 된다.

2.3 사면의 안정해석 이론

유전자 알고리즘에 의해 결정된 가상파괴면에 대한 사면의 안전율을 계산하기 위해 Janbu의 방법을 사용하였다. Janbu의 방법은 절편법의 일종으로 각 절편들간의 전단력은 없는 것으로 가정하여, 파괴토체 내의 수평 방향 및 연직방향의 힘평형 관계를 이용하여 사면의 안전율을 평가한다. 그림 2와 같이 임의의 절편에 작용하는 힘들간의 평형조건을 이용한 안전율 산정절차를 요약하면 다음과 같다.

각 절편 저부에 간극수압 u 및 수직응력 σ 가 작용하면, Mohr-Coloumb의 파괴기준에 의한 전단강도 τ 는 식 (1)과 같이, 이에 따른 전단응력 τ 는 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\tau_f = c' + (\sigma - u) \tan \phi' \quad (1)$$

$$\tau = \tau / F_S \quad (2)$$

여기서, c' 는 유효 점착력, ϕ' 는 유효 내부마찰각이며 F_S 는 안전율이다.

또한 절편에 작용하는 수직력 P 와 전단력 T 는 식 (3)과 식 (4)와 같이 표현된다.

$$P = \sigma l \quad (3)$$

$$T = \tau l = \frac{\tau_f l}{F_S} = \frac{1}{F_S} [c' l + (P - u) \tan \phi'] \quad (4)$$

여기서, l 은 각 절편 저부의 길이이다.

식 (3)과 식 (4)를 연직방향의 힘평형 관계에 대해 정리하면 식 (5)와 같다.

$$P \cos \alpha + T \sin \alpha = W - (X_R - X_L) \quad (5)$$

여기서, W 는 절편의 무게, X_L 은 절편 좌측면에 작용하는 수직력, X_R 은 절편 우측면에 작용하는 수직력이며, α 는 절편 저부의 파괴각이다.

식 (5)에 $X_R = X_L = 0$ 라는 Janbu의 방법의 가정사항과 식 (4)를 대입하고, 이를 P 에 대해 정리하면 식 (6)과 같이 된다.

$$P = [W - \frac{1}{F_S} (c' l \sin \alpha - u \tan \phi' \sin \alpha)] / m_\alpha \quad (6)$$

여기서, $m_\alpha = \cos \alpha (1 + \tan \alpha \cdot \tan \phi' / F_S)$ 이다.

다음으로 절편에 작용하는 힘들을 절편 저부의 파괴각 방향에 대해 정리하면, 식 (7)을 구할 수 있다

$$T + (E_R - E_L) \cos \alpha = [W - (X_R - X_L)] \sin \alpha \quad (7)$$

여기서, E_R 과 E_L 은 각각 절편 우측면과 좌측면에 작용하는 수평력이다.

$X_R - X_L = 0$ 이라 가정하고, 위 식에 식 (4)를 대입하여 정리하면 식 (8)과 같이 된다.

$$E_R - E_L = W \tan \alpha - \frac{1}{F_S} [c' l + (P - u) \tan \phi'] \sec \alpha \quad (8)$$

전체 힘의 평형 필요조건을 고려하여 안전율에 대해

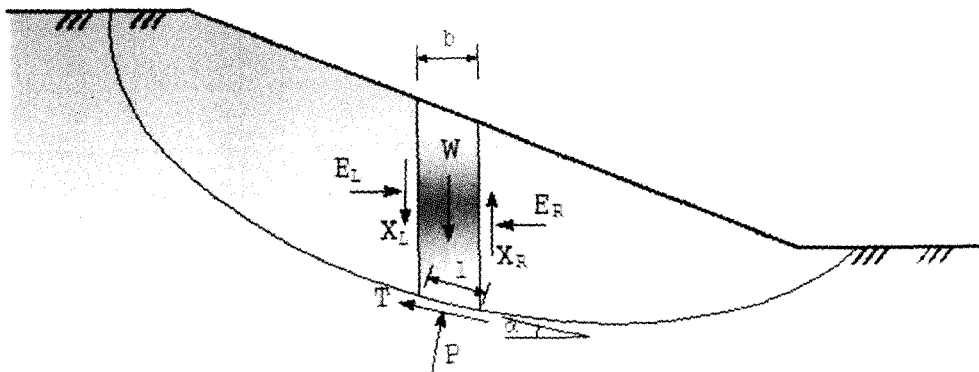


그림 2. 절편에 작용하는 힘

정리하면 식 (9)와 같다.

$$F_s = \frac{\sum [c' l + (P - u) \tan \phi'] \sec \alpha}{\sum W \tan \alpha} \quad (9)$$

결국, Janbu 방법은 초기 가정된 안전율에 대해 힘 평형 관계에 의해 유도된 식 (6)과 식 (9)를 모든 절편에 대해 적용하여 산정된 안전율을 비교하여 가정된 활동에 대한 안전율을 산정한다.

2.4 적합도 함수와 파괴면 제약조건의 설정

유전자 알고리즘은 다수의 설계점들이 설계영역을 탐색하며, 각 설계변수는 코드 형태의 문자열 구조를 가지고 있다. 설계점들은 탐색의 과정을 거치며 점차 좋은 설계점과 비슷한 형질의 설계점들이 보다 많이 생성되어 전체 설계점들은 보다 좋은 방향으로 이동하게 된다. 이러한 설계점들의 이동이 효과적으로 수행될 수 있도록 하기 위해서는 각 설계점들의 평가기준인 적합도 함수가 필요시 된다.

유전자 알고리즘은 적합도 함수(F_s)와 제약조건에 의해 주어지는 값만을 사용하여 최적화 대상문제의 해를 탐색하며, 함수의 연속성이나 미분가능성 등의 수학적 제약조건을 필요로 하지 않는 특성이 있다. 여기서 적합도 함수란 최적화 하고자 하는 대상 개체들이 지니는 적합도의 정도를 평가하는 기준이며, 가장 높은 적합도 값을 지니는 개체가 최적의 개체로서 결정된다. 본 연구에서는 최적화 대상물 사면의 최소안전율(F_s)로서 설정하였으며, 산정된 안전율 값에 의해 평가되는 개체들간의 우열을 수치적으로 더욱 명확하게 판별하기 위해 식 (10)과 같이 안전율의 역수에 자승으로 설정하였다. 여기서 상수 1은 적합도 함수값이 0에 근접하여 발

생 가능한 탐색상의 오류를 피하기 위한 목적으로 설정된 값이다.

$$F_r = \left(\frac{1}{F_s} \right)^2 + 1 \quad (10)$$

일반적으로 유전자 알고리즘을 이용한 최적해의 탐색에 정적스케일링(static scaling) 기법을 적용할 경우, 적합도 함수는 탐색의 방향성과 설계점들간의 우열을 제시하는 값이나, 동일 방향에 대한 탐색의 결과에는 영향을 미치지 않는 것으로 알려져 있다(Gen 등, 1997). 적합도 값의 결정을 위한 제약조건으로서서는 그림 1과 같이 임의로 생성된 파괴면의 좌표 값이 상부와 하부의 경계면을 벗어나면 적합도 값을 매우 낮은 값으로 설정하여 탐색 과정에서 도태되도록 유도된다.

2.5 강우시 지하수위의 변화예측

강우량과 강우지속시간에 따른 지하수위의 변화를 예측함으로써 사면안정 해석시 강우나 집중호우 등으로 인한 지하수위의 상승 등을 고려하여 실제조건에 보다 가까운 해석을 실시하기 위해 Sangrey 등(1984)이 제안한 강우시의 지하수위 예측모델을 수정·보완하였다. 그림 3에 개략적으로 도시된 강우시 지하수위 예측모델은 대수층은 균질하며, 지하수 공급의 증가는 시간에 따라 일정하게 변화하며, 유출량은 상수의 값을 갖는다고 가정하였다.

이러한 가정에 의해 지하 대수층(지하수를 함유하고 있는 침투성 지층)의 단위요소당 유량은 Darcy의 법칙을 이용하여 식 (11)과 같이 표현할 수 있다.

$$Q = -k \cdot H \cdot \nabla H \quad (11)$$

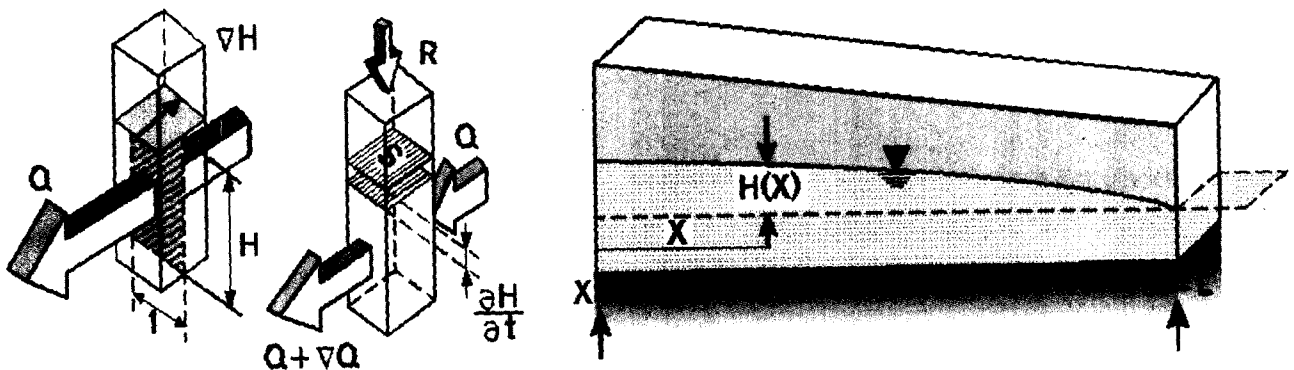


그림 3. 강우시 지하수위 변화 예측 모델

여기서, k 는 대수층의 투수계수, H 는 지하수위의 높이, ∇H 는 동수경사 및 Q 는 유량이다.

또한 대수층의 지하수 저류계수를 S 라고 정의하고, 공급되는 지하수의 유입량을 R 이라고 하면, 식 (12)와 식 (13)에 의해 시간 t 에 따른 지하수의 변동상황을 고려할 수 있다.

$$S \frac{\partial H}{\partial t} = R - \nabla Q \quad (12)$$

$$S \frac{\partial H}{\partial t} = R + k \cdot \nabla (H \cdot \nabla H) \quad (13)$$

식 (13)에 나타난 초기 지하수의 높이(H)를 선형화하기 위해 평균값 h_a 로 치환하면 식 (14)와 같다.

$$S \frac{\partial H}{\partial t} = R + k \cdot h_a \cdot \nabla^2 H \quad (14)$$

또한 경사진 대수층의 흐름을 그림 3과 같이 1차원 흐름으로 간주할 수 있으므로 식 (14)는 식 (15)와 같이 표현할 수 있다.

$$S \frac{\partial H}{\partial t} = R + k \cdot h_a \cdot \frac{\partial^2 H}{\partial x^2} \quad (15)$$

다음으로 식 (15)에 경사진 대수층의 경계조건 ($H = 0$ at $x = L$, $\partial H / \partial x = 0$ at $x = 0$)을 적용하여 식 (16)과 같이 해를 구할 수 있으며, 식 (16)으로부터 강우시 임의의 시간 및 임의의 지점에서 지하수위의 변화를 예측할 수 있다.

$$H(x, t) = \frac{RL^2}{k \cdot h_a} \frac{16}{\pi^3} \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \cdot \exp[-(2n+1)^2 \frac{t}{t_0}] \times (2n+1)^{-3} \cdot \cos(2n+1) \frac{\pi x}{2L} \quad (16)$$

여기서 $t_0 = 4 \cdot S \cdot L^2 / \pi^2 k \cdot h_a$, L 은 사면의 수평길이이다.

강우시 임의의 시간간격에 대한 지하수의 유입량(R)은 식 (17)과 같이 강우강도의 함수로 표현할 수 있다.

$$R = I \cdot (1 - \alpha) \cdot \cos \theta \quad (17)$$

여기서, I 는 강우강도, α 는 유출계수(통상적으로 0.35), θ 는 사면의 경사이다.

3. 분석 및 고찰

3.1 제어변수의 결정

유전자 알고리즘의 제어변수(control parameter)로는 개체수, 세대수, 교차확률 및 변이확률 등이 있으며, 이들 제어변수의 범위는 De Jong(1975)에 의해 제안된 값을 참고로 하여 설정하였다.

적정한 제어변수의 결정을 위해 제어변수의 변화에 따른 소요 연산시간을 분석하였으며, 제어변수의 변화는 개체수의 경우 30, 40, 50으로 변화시켰으며, 교차확률의 경우에는 0.6, 0.8, 0.95로 변화시켰다. 또한 변이확률은 0.003, 0.006, 0.009, 0.012로 변화시켜 분석하였으며, 탐색의 종료조건인 세대수는 200으로 설정하였다. 분석결과 표 1 및 그림 4와 같이 교차확률과 변이확률의 변화에 따라 적합도 함수값의 수렴을 위해 요구되는 소요 연산시간의 차이는 미소하나, 개체수의 크기에 따라서는 차이가 나타나는 것으로 분석되었다. 표 1에서 개체수가 30과 50의 경우는 수렴속도가 빠르나 안전율이 크게 산출되었으며, 개체수가 40인 경우에는 소요 연산시간이 크나 안전율이 가장 작은 값으로 계산되어 최적해를 탐색하기에 가장 적정한 개체수로 판단되었다. 따

표 1. 적합도 값의 수렴을 위해 요구되는 연산시간

| 개체수 | 세대수 | 소요시간 (CPU time) | 안전율 |
|-----|-----|-----------------|-------|
| 30 | 200 | 16 | 1.465 |
| 40 | 200 | 53 | 1.412 |
| 50 | 200 | 6 | 1.480 |

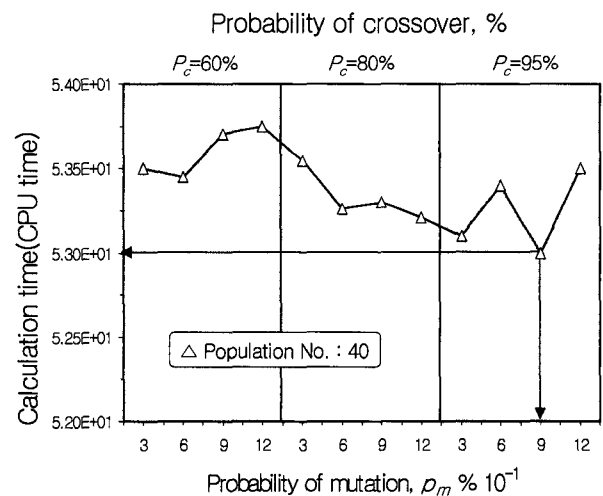


그림 4. 알고리즘 제어 변수 값의 변화에 따른 소요연산시간

라서 본 연구에서 사용한 제어변수는 개체수 40, 교차확률 0.95 및 변이확률 0.09로 결정하였다.

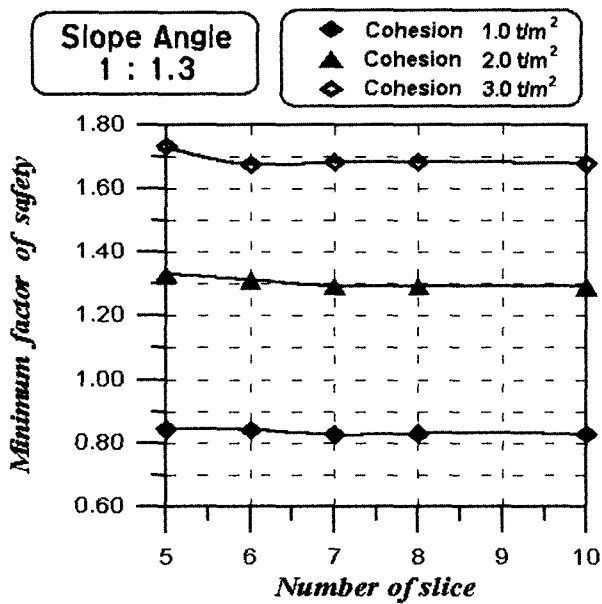
3.2 절편수의 결정

유전자 알고리즘에 의한 사면안정 해석은 초기점 및 종료점과 동시에 각 절편들의 저부파괴각에 대해서도 탐색을 수행해야 하므로 절편수의 크기가 해석시간을 좌우하게 된다. 따라서 해석시간을 최소화하기 위해서는 안전율이 일정한 값에 수렴하게 되는 적정 절편수에 대한 평가가 필요하며, 본 분석에서는 이를 결정하기 위

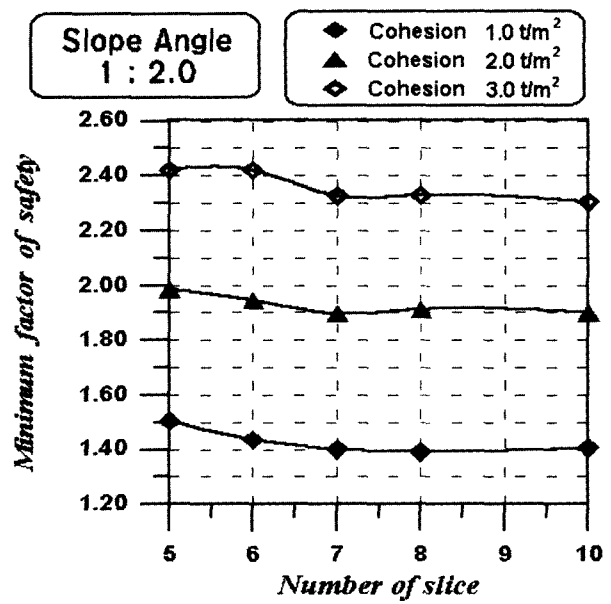
표 2. 절편수 추정을 위한 대상사면의 제원

| 단위중량 (tonf/m ³) | 내부마찰각 (°) | 구분 | 사면경사 | 점착력 (tonf/m ²) | 절편수 |
|-----------------------------|-----------|--------|---------|----------------------------|------|
| 1.5 | 30 | case 1 | 1 : 1.3 | 1.0 | 5~10 |
| | | | | 3.0 | 5~10 |
| | | | | 5.0 | 5~10 |
| | | case 2 | 1 : 2.0 | 1.0 | 5~10 |
| | | | | 2.0 | 5~10 |
| | | | | 3.0 | 5~10 |

해 사면경사와 점착력을 변화시켜 가며 분석을 수행하였다. 적정 절편수의 결정에 사용한 대상사면의 각종 제

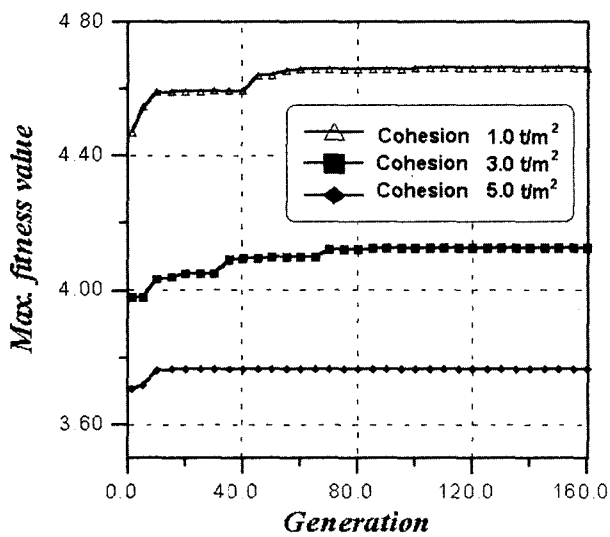


(a) case 1

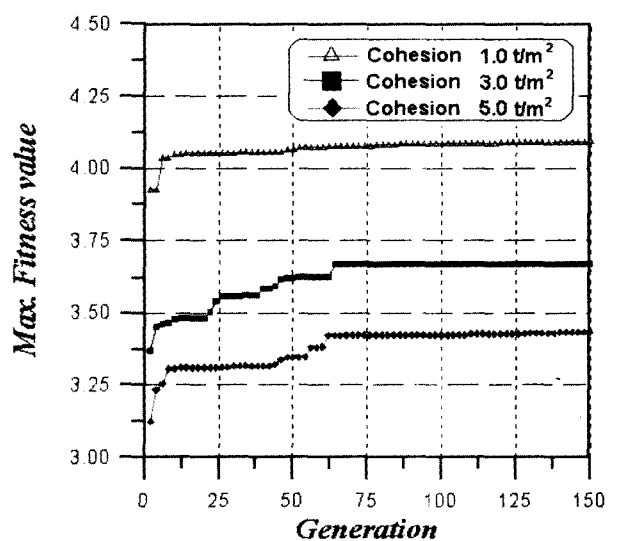


(b) case 2

그림 5. 점착력과 절편수의 변화에 따른 최소 안전율

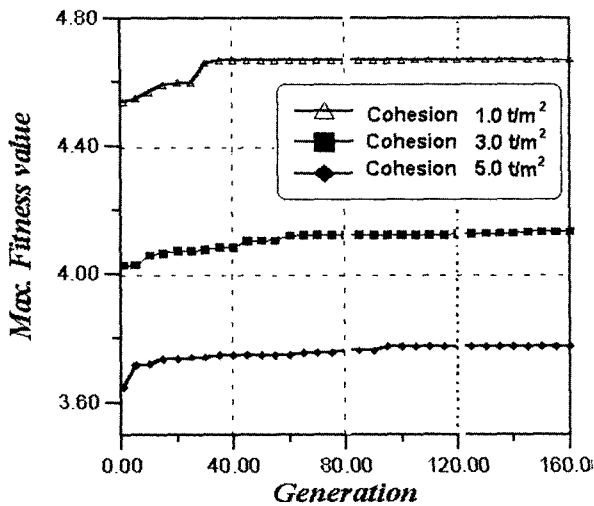


(a) case 1

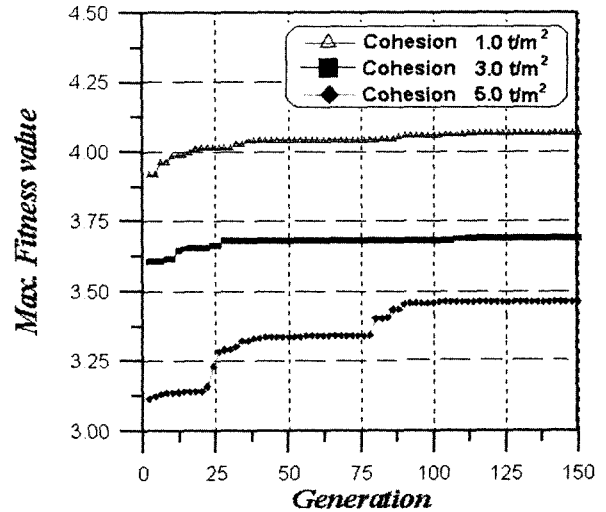


(b) case 2

그림 6. 세대에 따른 최대적합도 값(절편수=8개)



(a) case 1



(b) case 2

그림 7. 세대에 따른 최대적합도 값(절편수=10개)

원 등은 표 2와 같다.

그림 5에 도시된 바와 같이 점착력과 절편수의 변화에 따른 최소 안전율의 변화는 점착력에 따라 다소 차이는 있으나 일반적으로 절편수 7~8개에서 안전율이 수렴하고 있음을 확인할 수 있었다. 절편수 8개 이상에서 미소한 안전율의 변화가 있으나 이는 유전자 알고리즘에 의한 확률론적 탐색에 기인한 결과라 판단되므로 적정 절편수는 8개로 결정하였다.

절편수가 8개일 경우 사면경사에 따른 최대 적합도 값의 변화 경향을 살펴보면 그림 6과 같이 점착력 값에 따라 다소 차이는 있지만 case 1의 경우에는 세대수 80에서 최대 적합도 값이 수렴하는 경향을 나타내고 있으며, case 2의 경우에는 세대수 65에서 최대 적합도 값이 수렴하는 경향을 보이고 있다. 또한 절편수가 10개인 경우에는 그림 7과 같이 case 1의 경우에는 세대수 100에서 최대 적합도 값이 수렴하는 것으로 나타났으며, case 2의 경우에는 세대수 95에서 최대 적합도 값이 수렴하는 것으로 나타났다. 이와 같이 절편수에 따라 최대 적합도 값이 수렴하는 세대에 차이가 나타나는 것은 절편수의 증가만큼 임계파괴면의 탐색을 위한 경우의 수도 증가되기 때문에 최대 적합도 값이 수렴하는 세대수 역시 증가하는 것으로 판단된다.

3.3 단일지층 사면에 대한 분석

유전자 알고리즘에 의한 사면안정 해석의 적용성을 분석하기 위해 단일지층을 대상으로 분석을 수행하였

다. 사면형상 및 입력변수는 그림 8과 같으며 절편수는 8개로 하였다. 또한 탐색의 종료조건은 세대수 500으로, 제어변수는 교차확률 95%, 변이확률 0.9%로 설정하였으며, 각 세대당 개체수는 40으로 적용하여 분석을 수행하였다.

유전자 알고리즘에 의한 임계파괴면의 탐색과정을 파괴면 및 안전율의 변화에 따라 도시하면 그림 9와 같다. 단일지층에서 유전자 알고리즘을 이용한 사면안정 해석 결과를 살펴보면 1세대에서는 파괴면의 형상이 매우 불규칙하나, 30세대에서는 어느 정도 수렴하기 시작하여 마지막 500세대에서는 기존의 방법에 의한 파괴면과 비슷한 양상을 나타내는 것을 알 수 있다. 또한 기존의 방법과의 파괴면 형상 및 최소안전율을 비교한 결과는 그림 10 및 표 3과 같다. 이에 의하면 단일지층의 경우 파괴면의 형상 및 산정된 최소안전율이 상호 유사한 것으로 평가되었다.

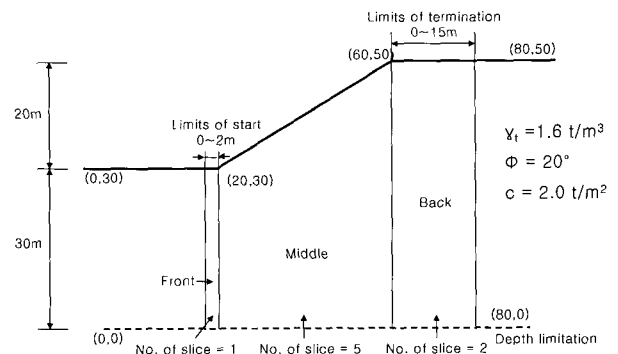
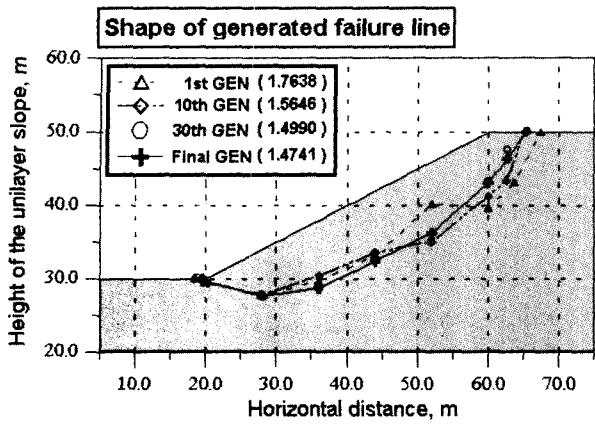
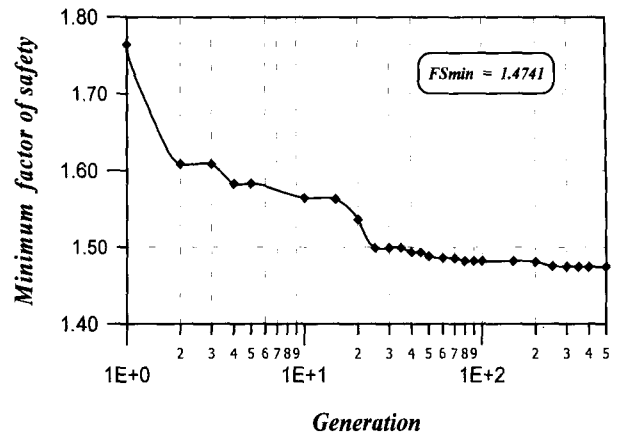


그림 8. 단일지층 사면의 형상(사면경사 1 : 2)



(a) 파괴면의 변화



(b) 안전율의 변화

그림 9. 세대에 따른 파괴면 및 안전율의 변화(단일지층)

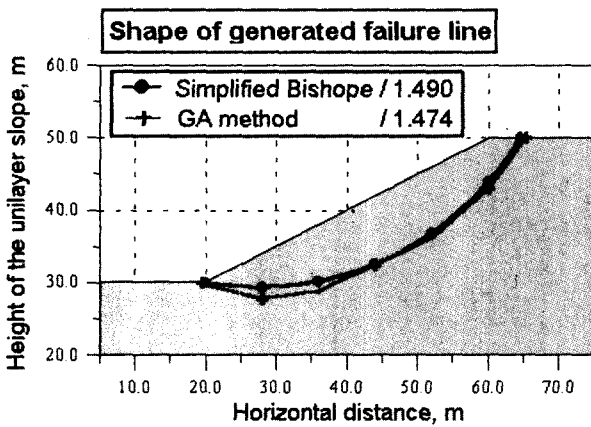


그림 10. 기존의 방법과의 파괴면 형상비교

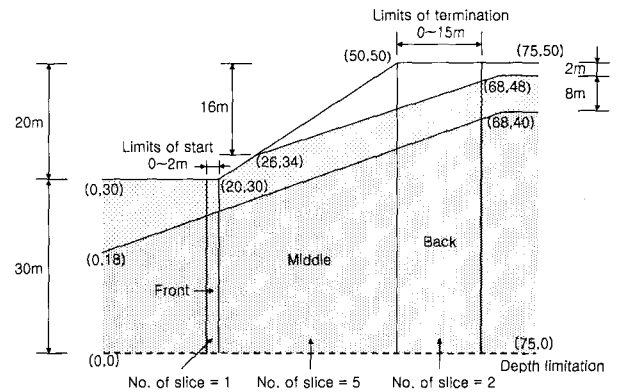


그림 11. 복합지층 사면의 형상

표 3. 최소 안전율의 비교

| 해석방법 | 최소안전율 | 해석방법 | 최소안전율 |
|-----------------|-------|-----------------|-------|
| Ordinary method | 1.406 | Bishop's method | 1.490 |
| Janbu's method | 1.469 | GA method | 1.474 |

3.4 복합지층 사면에 대한 분석

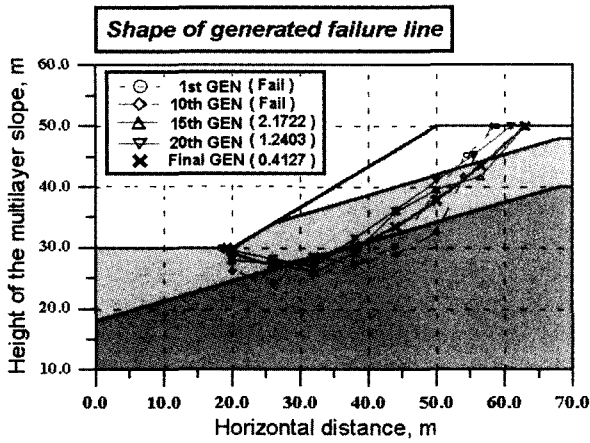
복합지층으로 이루어진 사면에 대해 유전자 알고리즘에 의한 탐색을 수행하여 지층 경계면에서의 파괴면

형상 및 적합도 함수의 변화와 안전율의 수렴경향을 분석하였다. 특히 일반적인 결정론적 방법에 의한 원호파괴와 단일토층에서 나타나는 파괴형상과는 달리 지층 경계면의 경사가 임계파괴면에 어떻게 반영되는지 분석하였다.

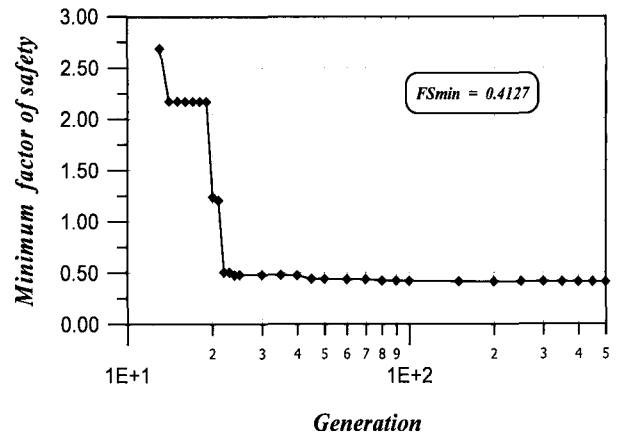
복합지층 사면에 대한 개략적인 형상은 그림 11과 같이 1:1.5의 경사도와 3개의 지층으로 구성되어 있으며, 해석을 위한 지반강도정수 및 탐색의 조건 등은 표 4에 제시하였다. 유전자 알고리즘의 탐색 종료조건은 세대수

표 4. 복합지층 사면해석을 위한 지반강도정수 및 탐색의 조건

| 지반정수 | 토 층 | 단위중량(tonf/m ³) | 내부마찰각(°) | 점착력(tonf/m ²) |
|---------|-------|----------------------------|----------|---------------------------|
| | 1st | 1.9 | 12 | 3.0 |
| | 2nd | 1.9 | 5 | 1.0 |
| | 3rd | 1.9 | 40 | 30.0 |
| 파괴면 한 계 | 시작점 | 종료점 | 하한계면 | |
| | 0~2 m | 0~15 m | 10 m | |
| 절편의 개 수 | 전면부 | 사면부 | 배면부 | |
| | 1 개 | 5 개 | 2 개 | |



(a) 파괴면의 변화



(b) 안전율의 변화

그림 12. 세대에 따른 파괴면 및 안전율의 변화(복합지층)

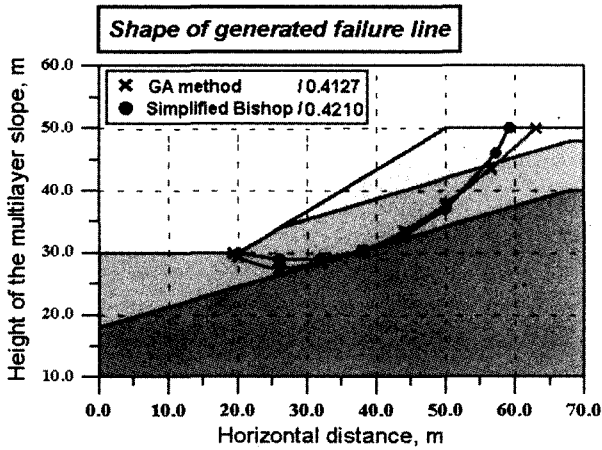


그림 13. 기존의 방법과의 파괴면 형상 비교

500으로, 제어변수는 교차확률 95%, 변이확률 0.9%로 설정하였으며, 각 세대당 개체수는 40으로 적용하였다. 복합지층에 대한 탐색결과, 세대에 따른 파괴면 및

안전율의 변화(그림 12)는 단일지층의 경우보다 더욱 불규칙하며 임계파괴면의 형상도 결정론적인 방법에 의한 형상과 다소 상이하다. 또한 결정론적 방법으로 해석한 경우 최소안전율은 0.421이며 본 연구에 의한 방법은 0.413으로 평가되었다. 이는 그림 13에 도시된 바와 같이 결정론적 방법의 경우 파괴면이 두번째 지층과 세번째 지층의 경계면상에서 한 점으로 접하는 원호로서 결정되나, 본 연구의 경우 견고한 지층의 상부 경계면을 따라 파괴면이 형성되는 것에 기인한 결과라 판단된다. 이는 실제 파괴조건과 가까운 즉, 지층 경계면에 존재하는 지층조건이 파괴면의 결정에 반영된 결과로 평가된다.

3.5 사면 파괴사례와의 비교 · 검토

유전자 알고리즘 기법의 적용성을 검토하기 위해 실제 사면의 붕괴사례를 대상으로 기존의 결정론적 방법

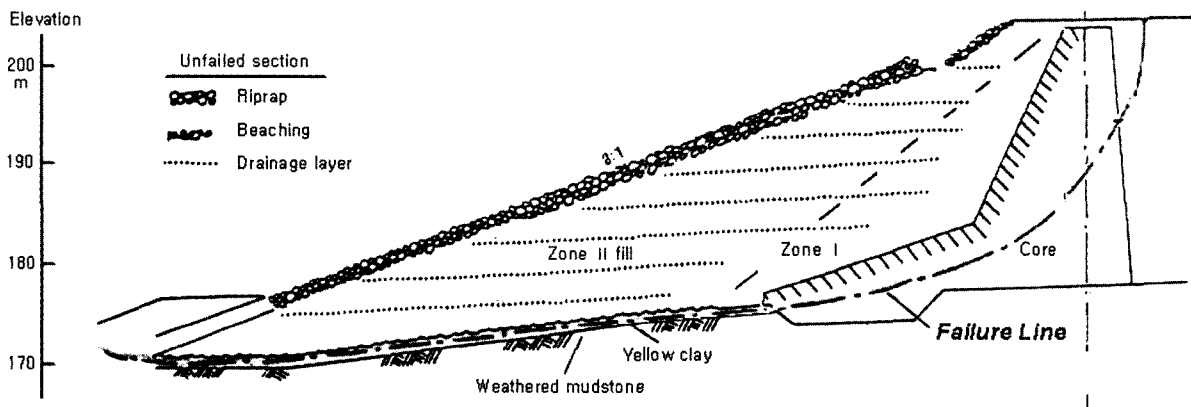


그림 14. Carsington 댐의 대표단면 및 파괴형상

표 5. 강우해석을 위해 가정된 지반형상, 투수계수 및 강우특성

| 내 용 | 값 | 단위 | 내 용 | 값 | 단위 |
|---------------|-------|--------|----------------|--------------------|--------|
| 단위유입수량, R | 0.074 | m/day | 지반투수계수, K | 5×10^{-3} | cm/sec |
| 저류계수, S | 0.1 | - | 배수층 두께, h_a | 5.8 | m |
| 유출율, α | 0.35 | - | 사면길이, L | 74.0 | m |
| 강우강도, I | 120 | mm/day | 사면경사, θ | 18.4 | deg. |

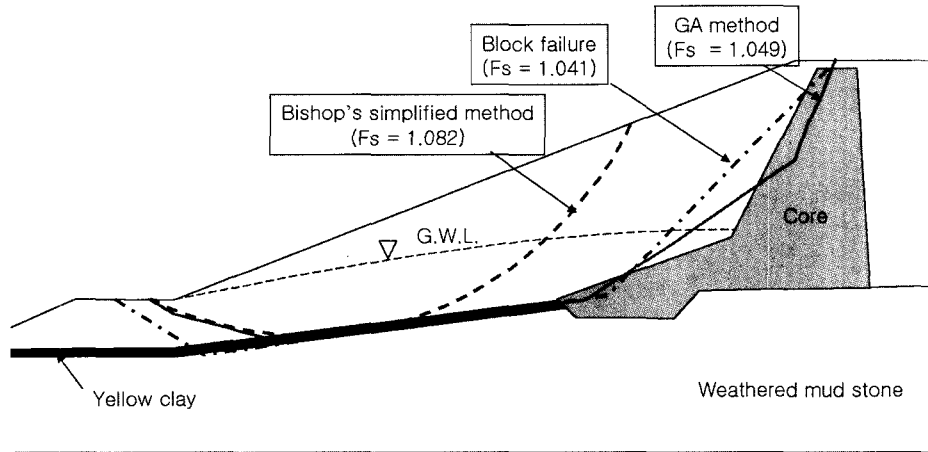


그림 15. 실제 파괴사면에 대한 분석결과 비교

에 의한 해석결과와 유전자 알고리즘에 의한 탐색결과 간의 비교·검토를 수행하였다. 본 분석은 그림 14와 같이 영국 잉글랜드 중부의 Carsington 댐의 제방붕괴 사례를 대상으로 하였다. 길이 120 m, 최고높이 37m인 이 댐은 성토가 끝난 상태에서 단시간에 내린 폭우로 인해 활동파괴가 발생하였다고 보고되고 있다(한국지반공학회, 1991). 본 검토에서는 유전자 알고리즘을 이용한 사면안정 해석 결과와 기존의 방법에 의한 해석결과를 서로 비교하였으며, 지반의 투수계수, 강우강도 및 강우 지속시간 등에 대한 자료를 가정하여 강우시에 대한 분석을 수행하였다.

분석을 위해 가정된 지반형상, 투수계수 및 강우특성은 다음 표 5와 같으며, 강우에 따른 지하수위 변화를 산정하여 강우시 사면안정 해석을 수행하였다.

해석에 적용된 지반의 강도정수는 표 6과 같으며, 기

표 6. 해석에 적용된 지반의 강도정수

| 토층 구조 | 단위 중량 (tonf/m^3) | 점착력 (tonf/m^2) | 내부마찰각 ($^\circ$) |
|---------------------|--------------------------------|------------------------------|-----------------------|
| Core | 18.5 | 0 | 22 |
| Zone I and II Fills | 21.0 | 0 | 25 |
| "Boot"* | 18.5 | 0 | 22 |
| Yellow clay | 18.5 | 0 | 18 |
| Slope Protection | 18.5 | 0 | 35 |
| Weathered Mudstone | 18.0 | 100 | 30 |

존의 해석방법과 유전자 알고리즘을 이용한 사면안정 해석 결과를 정리하면 그림 15와 같다.

그림 15에 도시된 결과를 살펴보면 유전자 알고리즘을 이용한 사면안정 해석결과와 기존방법에 의한 해석결과를 비교할 임계 활동면의 형상에서 상호간의 특성이 확실히 드러나는 것을 확인할 수 있다. 기존의 해석방법의 경우 파괴면의 형상이 비교적 점착력에 의한 저항력이 큰 weathered mudstone층에 접하며 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 유전자 알고리즘을 이용한 해석의 경우 파괴면이 yellow clay층을 통과하여 형성되는 것으로 나타났으며, 서로 다른 층들을 통과할 때마다 곡률이 변화하는 것으로 나타났다. 이는 지층 불연속면의 상황이 파괴면의 형상에 반영된 결과로 판단되며, 유전자 알고리즘을 이용한 임계 활동면 탐색의 특성과 효율성을 드러내는 사례라 하겠다. 또한 그림 14에 도시된 실제 파괴가 발생한 형상과 비교할 때, 유전자 알고리즘을 적용한 해석이 보다 합리적인 결과를 제시하고 있음을 확인할 수 있었다.

각 방법들에 의해 산정된 안전율을 비교해보면 본 연구의 안정해석 결과가 기존의 방법보다 낮게 산출되었음을 알 수 있다. 본 사례는 제방붕괴가 발생한 댐 사면에 대한 해석결과이므로 산출되는 최소 안전율이 낮을수록 실제 현장조건에 부합됨을 의미한다. 추가적으로

유전자 알고리즘을 이용한 사면안정 해석결과의 적정성을 확인하기 위한 목적으로 블록파괴 모델 적용한 해석을 실시하였다. 블록 파괴 모델의 적용을 위한 파괴면 좌우측의 구역은 유전자 알고리즘을 이용한 해석결과를 토대로 하여 결정하였다. 본 결과 역시 블록파괴 모델과 본 연구결과는 상호 유사한 안전율값을 보이는 것으로 나타났으며 기존방법에 의한 해석결과와는 많은 차이를 보였다. 따라서 본 연구에서 제시하고 있는 안정 해석 기법은 사면의 불연속적 특성 및 지층의 경사 등을 반영하여 보다 실제 현장여건에 근접한 해석을 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 다양한 지반조건을 고려할 수 있는 임의탐색 기법을 이용하여 임계파괴면의 형태를 예측하고자 유전자 알고리즘을 이용하여 사면의 임계파괴면을 보다 현실적으로 평가할 수 있는 접근방법을 제시하였으며, 연구결과는 다음과 같다.

- (1) 유전자 알고리즘 탐색에 필요한 최적의 절편수를 구하기 위하여 사면의 경사 및 지반강도정수 등을 변화시켜 분석한 결과 절편수 7~8개 사이에서 안전율이 일정한 값에 수렴하였다.
- (2) 교차확률과 변이확률 변화에 의한 연산시간의 차이는 없으나, 세대수의 변화에 따라 소요 연산시간에 차이가 나타났다. 따라서 유전자 알고리즘을 이용한 사면안정 해석시 소요 연산시간을 최소화시키기 위해서 최적의 세대수를 선정하는 절차가 필요하다.
- (3) 단일지층의 경우 임계파괴면의 형상은 기존의 한계평형 해석방법들과 비교하여 차이가 없었으며 안전율도 유사한 결과를 나타내고 있다. 따라서 유전자 알고리즘에 의한 사면안정해석 방법의 적용성을 확인할 수 있었다.
- (4) 복합지층의 경우 유전자 알고리즘에 의한 임계파괴면이 내부지층 경계면을 따라 형성되는 것을 확인하였다. 이는 내부지층의 경사가 임계파괴면 결정에 반영된 결과라 할 수 있다. 또한 안전율도 기존의 방법에 비해 다소 작은 값으로 산출되는 것으로 나타났으며, 이는 파괴면의 형상이 임의로 가정된 함수에 의하지 않고 지반여건에 따라 변화하면서 실제 조건에 가까운 최적의 임계파괴면을 형성하기 때문인 것으로 판단된다.
- (5) 강우시 시간과 거리에 따라 변화하는 지하수위 예측

모델을 적용하여, 보다 정량화 된 우기시 사면안정 해석기법을 제시하였으며, 이를 통해 보다 합리적인 우기시 해석결과를 산출할 수 있다고 판단된다.

- (6) 실제 사면파괴 사례와의 비교·검토를 실시한 결과, 본 연구 제시기법에 의해 산출되는 최소 안전율이 기존의 방법보다 다소 낮게 산출되었으며, 임계 활동면의 위치도 지층조건이 변화함에 따라 파괴면의 곡률이 변화함을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제시하고 있는 사면안정 해석기법은 사면의 불연속적 특성 및 지층의 경사 등을 반영하여 보다 실제 현장여건에 근접한 해석을 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서 제시한 유전자 알고리즘을 이용한 사면의 임계파괴면 예측기법을 확대·적용시키기 위해서는 보다 다양한 현장사례에 대한 분석 및 검증과 유전자 알고리즘의 수렴속도의 향상을 위한 보완이 지속적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 양영순, 김기화(1995), "실수형 Genetic Algorithms에 의한 최적 설계", *전산구조공학회*, 제8권, pp.123-132.
2. 한국지반공학회(1991), "지반공학에서의 컴퓨터 활용", *91년도 추계학술발표회 논문집*, pp.23-33.
3. Bishop, A. W.(1955), "The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes", *Geotechnique*, Vol.10, No.1, pp.7-17.
4. David E. Goldberg(1989), "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning.", *Addison-Wesley Publishing Company, Inc.*, pp.1-35.
5. De Jong, K. A.(1975), "An Analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems", Ph. D Thesis, University of Michigan.
6. Gen, M., and Cheng, R.(1997), "Genetic algorithms and engineering design", John Wiley & Sons, Inc.
7. Goldberg, D. E. and Deb, K.(1991), "A Comparative Analysis of Selection Schemes Used in Genetic Algorithms.", *Found. of Genetic Algorithms*, 1, pp.69-93.
8. Goldberg, D. E. and Kuo, C. H.(1987), "Genetic Algorithms in Pipeline Optimization." *ASCE, J. Comp. in Civ. Engrg.*, 1(2), pp.128-141.
9. Janbu, N.(1954), "Application of Composite Slip Surface for Stability Analysis." *Eur. Conf. Stability Earth Slopes, Stocholm*, 3, pp.43-49.
10. Janbu, N.(1957), "Earth Pressure and Bearing Capacity Calculations by Generalized Procedure for Slices.", *Proc.4th Int. Conf. SMFE, London*, 2, pp.207-212.
11. Sangrey, D. A., Harrop-Williams, K. O. and Klaiber, J. A.(1984), "Prediction Ground-Water Responce to Precipitation", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.110, No.7, pp.957-975.

(접수일자 2002. 9. 6, 심사완료일 2002. 12. 10)