

개별요소법과 유전자 알고리즘에 근거한 사면안정해석기법의 개발 I. 검증

Development of Slope Stability Analysis Method Based on Discrete Element Method and Genetic Algorithm I. Estimation

박 현 일¹ Park, Hyun-Il

박 준² Park, Jun

황 대 진³ Hwang, Dae-Jin

이 승 래⁴ Lee, Seung-Rae

Abstract

In this paper, a new method composed of discrete element method and genetic algorithm has been introduced to estimate the safety factor and search critical slip surface on slope stability analysis. In case of estimating the safety factor, conventional methods of slope analysis based on the limit equilibrium do not satisfy the overall equilibrium condition; they must make assumptions regarding the inclination and location of the interslice forces. An alternative slope analysis method based on the discrete element method, which can consider the compatibility condition between force and displacement, is presented. Real-coded genetic algorithm is applied to the search for the minimum factor of safety in proposed analysis method. This search method is shown to be more robust than simple optimization routines, which are apt to find local minimum. Examples are also shown to demonstrate the applicability of the proposed method.

요 지

본 연구에서는 토사사면의 안전율을 산정하고 최소임계단면을 탐색하기 위하여 개별요소법과 유전자 알고리즘으로 조합된 새로운 해석방법이 제안되었다. 안전율 산정시, 한계평형법에 근거한 통상적인 사면안정 해석법들은 전체적인 힘평형을 만족하지 못하기 때문에 절편간에 작용하는 힘의 경사와 위치에 대한 가정이 불가피하다. 개별요소법에 근거하여 개발된 사면안정해석법은 힘과 변위간의 적합조건을 만족할 수 있다. 또한 제안된 해석기법에서는 최소임계 단면을 탐색하기 위하여 실수형 유전자 알고리즘이 적용되었다. 이 방법은 지역해에 쉽게 수렴하는 간편한 최적화기 법보다 안정적으로 전역해를 탐색할 수 있다. 제안된 해석기법의 적용성을 검토하기 위하여 예제해석이 수행되었다.

Keywords : Discrete element method, Equipment load, Liner, Slope stability, Waste landfill

1. 서 론

사면의 안정성을 평가하기 위해서는 다음과 같은 두 가지 사항에 대한 해석이 필요하다. 첫 번째는 주어진 임계단면 즉, 가상활동파괴면에 대하여 안전율이 산정

되어야 하며, 두 번째로는 최소안전율을 주는 가상활동면 즉, 최소임계단면을 찾을 수 있는 탐색기법의 적용이 함께 필요하다.

안전율을 산정할 수 있는 해석기법은 변분법, 한계 평형법, 한계해석법을 포함하는 간편해석법과 유한요

1 정회원, 삼성물산(주) 건설부문 기술연구소, 선임연구원 (Member, Senior Researcher, R & D Team, Samsung Corporation, gondori7@empal.com)

2 한국과학기술원, 건설 및 환경공학과, 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil & Envir. Engrg., KAIST)

3 정회원, 삼성물산(주) 건설부문 기술연구소, 수석연구원 (Member, Principal Researcher, R & D Team, Samsung Corporation)

4 정회원, 한국과학기술원, 건설 및 환경공학과, 정교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Envir. Engrg., KAIST)

소법, 유한차분법, 개별요소법을 포함하는 수치해석법으로 구분될 수 있다. 한계평형법은 사면을 다수의 절편으로 분할하여 해석하는 방법으로서 사면설계에 널리 사용되고 있다. 이 방법은 사면을 절편으로 나누어 해석하기 때문에 미지수의 수가 방정식의 수보다 많은 부정정 문제로 귀결되게 되며, 미지수의 수와 방정식의 수의 차이를 보완할 수 있는 개수만큼의 가정이 요구된다. 따라서, 각 절편의 측면에 작용하는 힘의 경사 및 위치에 혹은 힘평형과 모멘트 평형에 대하여 가정이 불가피하다. 한계평형법 가운데 Ordinary 방법(Fellenius 1936)과 Bishop(1955) 방법은 무한 사면해석과 썩기 해석에서 전체 힘평형을 만족하지 못하게 되며, Janbu의 간편법은 전체적인 모멘트의 평형을 만족하지 못한다. Spencer (1967), Morgenstern & Price(1965)와 Janbu(1956) 등은 절편에 작용하는 힘에 대한 추가적인 가정을 통하여 모든 힘 평형 조건을 만족할 수 있는 보다 정교한 방법들을 제안하였지만, 한계평형법 자체가 갖고 있는 단점을 피하기는 어렵다.

사면의 안전율만을 산정하는 한계평형법과 달리 유한요소법과 같이 힘과 변위의 적합조건을 고려할 수 있는 보다 정교한 해석기법들이 사면안정해석에 적용되었다(Huang와 Yamasaki, 1993; 김주용, 1998). 유한요소법은 탄소성 지반재료에 대한 응력해석 및 거동해석에 사용되는 수치해석법으로 지반재료의 다양한 특성인 소성경화(plastic hardening)와 소성연화(plastic softening)를 고려할 수 있으며, 압밀 등과 같이 지반응력이 시간에 따라 변화하는 경우 및 보강된 지반구조물에 대한 해석도 가능하다. 그러나, 사면에 대한 초기응력조건과 정교한 구성모델이 필요하며, 많은 구성모델 계수값들이 정확하게 적용되어야 한다. 이로 말미암아 해석과정은 보다 복잡하게 되며, 해석결과에 대한 불확실성이 증가할 수 있다.

사면안정해석 분야에서 최소안전율을 갖는 임계단면을 찾기 위하여 Simplex 방법, 민감도에 근거한 DFP 방법 및 BFGS 방법, Monte Carlos 기법, 유전자 알고리즘 등의 다양한 방법들이 적용되고 있다. Nguyen(1985)은 임계단면을 탐색하기 위하여 Simplex 기법을 적용하였으며, Bardet와 Kapuskar(1989), 황재안 등(1993)에 의해 보다 확장된 Simplex 최적화 기법이 적용되었다. Chen와 Shao(1988)는 한계평형법에 대한 임계단면을 찾기 위하여 민감도에 근거한 Davidon-Fletcher-Powell(DFP) 방법을 사용하였다. Malkawi 등(2001)은 임계단면 탐색

을 위하여 Monte Carlos 기법을 적용하였다. 위의 방법들은 설계변수의 수가 많아지거나, 사면이 복잡한 형상 혹은 다양한 지층으로 구성될 경우 전역해(global solution) 보다는 지역해(local solution)에 수렴하는 경향성을 갖는다. 따라서, 활동파괴 가능한 영역에 대하여 다양한 초기 가상활동면의 위치를 가정하여 최소임계단면을 반복적으로 탐색해야 한다. 특히, 초기 가상활동면의 선정에 있어서 최소안전율을 갖는 임계단면에 가능한 한 근접하도록 가정하는 것이 매우 중요하게 작용한다. 신방용 등(2002)과 McCombie & Wilkinson(2002)은 전역해를 보다 안정적으로 탐색할 수 있는 이진수형 유전자 알고리즘을 사면안정해석에 적용하였다. 유전자 알고리즘은 설계집단을 사용하여 확률론적인 탐색을 수행하기 때문에 다른 최적화 기법들의 설계변수값들의 초기 가정에 따른 지역해로의 수렴을 피하고, 전역해에 도달될 신뢰도가 크다고 할 수 있다(양영순과 김기화, 1995). 따라서, 복잡한 지층으로 구성된 사면에 대하여 최소임계단면을 보다 안정적(robust)으로 탐색할 수 있다.

본 연구에서는 개별요소법에 근거한 새로운 안전율 산정기법과 유전자 알고리즘에 근거한 최소안전율 임계단면 탐색기법을 조합하여 적용하였다. 박현일 등(2003)과 박현일과 이승래(2004b)은 Cundall(1971)과 Shi(1988)가 암반 해석에 적용한 개별요소법(discrete element method)을 확장 개발하여 쓰레기 매립지 차수시스템의 안정해석에 적용한 바 있다. 본 연구에서 저자들은 개발된 해석기법을 바탕으로 사면 내부의 힘 평형과 변위 적합조건이 동시에 고려할 수 있는 사면의 안전율 산정기법을 제안하고자 하였다. 사면은 각각의 절편으로 구성하였으며, 절편 요소들간의 힘과 변위의 관계를 고려하기 위하여 각각의 절편 요소들은 인접요소들과 탄소성 스프링으로 연결하였다. 지반 내에서 유발되는 탄소성관계를 탄소성 스프링으로 모사함으로써 한계평형법과 같이 부정정(indeterminate) 문제로 인한 절편 간의 추가적인 가정사항 없이 전체적인 적합조건을 만족하는 안전율을 구할 수 있다.

박현일과 이승래(2003; 2004a)는 유전자 알고리즘에 근거한 최적화 기법을 프로그래밍하여 지반공학 문제에 적용한 바 있다. 본 연구에서는 최소안전율을 갖는 사면의 임계단면을 탐색하기 위하여 유전자 알고리즘을 적용하였으며, Simplex 방법과 BFGS 방법과 비교함으로써 적용성을 검토하였다.

2. 제안된 사면안정 해석기법

2.1 개별요소법을 이용한 사면의 모델링

본 연구에서는 사면 안정해석을 수행하기 위하여 개별요소법에 근거한 사면안정 해석기법을 제안하였으며, 세부적인 설명은 다음과 같다. 그림 1과 같이 사면을 개별요소들로 절편화하였다. 여기서, 활동파괴면은 원호 형태를 갖는 것으로 가정하였다. 흙 절편 요소들간의 힘과 변위의 관계를 고려하기 위하여 각각의 흙 절편 요소들은 인접요소들과 Winkler 스프링으로 연결되도록 하였다. 이때 전단 스프링의 거동은 Mohr-Coulomb의 파괴규준을 적용하여 탄소성 거동을 따르는 것으로 모사하였다. 수직스프링에 대한 압축파괴는 발생되지 않는 것으로 가정하였다.

그림 2에 나타난 두 절편 사이의 중점 P에서의 상대변위는 식 (1)처럼 절편 A와 절편 B의 질량중심점에서의 변위향으로부터 다음과 같은 행렬형식으로 표현될 수 있다.

$$\Delta u^p = R^{pb} u^b - R^{pa} u^a \quad (1)$$

여기서, R^p 는 절편 질량중심에서의 변위 Δu 를 측면 중

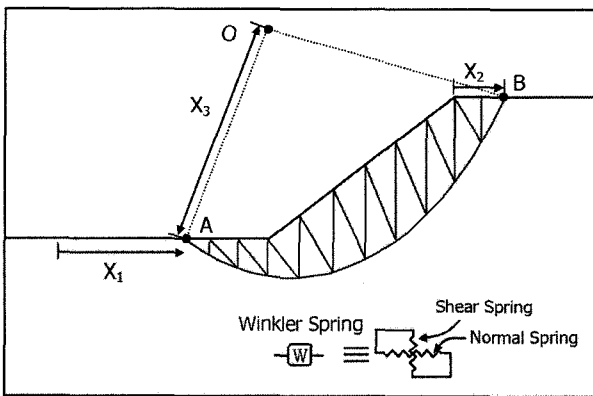


그림 1. 개별요소를 사용하여 모델링된 사면의 가상활동파괴면

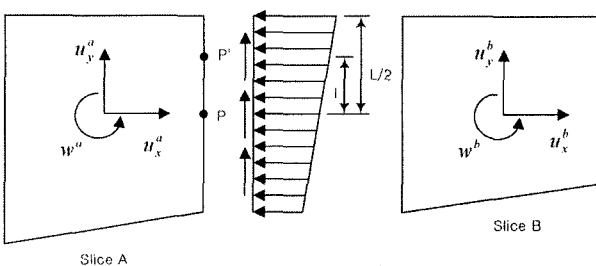


그림 2. 절편요소 간에 작용하는 전단 및 수직응력

심점 p 의 변위로 변화시켜주는 행렬이다.

따라서, 각 절편의 측면에서 유발되는 수직 및 전단 응력은 수직 스프링계수(k_n)와 전단 스프링계수(k_s) 및 상대변위(Δu^p)의 향으로 표현될 수 있으며, 절편의 측면에 작용하는 힘과 모멘트의 값은 다음과 같이 구해질 수 있다.

$$F_n^p = K \Delta u^p \quad (2)$$

여기서, $K_n = k_n L$; $K_s = k_s L$; $K_w = k_n L^3 / 12$ 이다.

주어진 사면의 가상활동면에 대한 안전율은 다음 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$SF = \frac{\sum_{i=1}^N \tau_f^i}{\sum_{i=1}^N \tau_d^i} \quad (3)$$

여기서, N 은 활동면에 포함되는 개별요소 경계면들의 갯수이며, τ_f^i 와 τ_d^i 는 활동면에 포함된 각각의 개별요소 경계면으로부터 산정된 전단강도 및 유발된 전단응력을 의미한다.

2.2 유전자 알고리즘에 근거한 임계단면 탐색기법

유전자 알고리즘은 최적화 문제를 해결하는 효율적인 기법으로서 여러 공학 분야에서 다양하게 적용되고 있다. 이 방법은 자연 선택 및 자연 유전자와 같은 생물학적 진화 이론 개념에 근거한 확률론적 최적화 기법으로 전역적이며 견고한 해를 구할 수 있다(Goldberg 1989; Holland 1975). 박현일과 이승래(2003; 2004a)는 기존 유전자 알고리즘의 는 본 연구에서는 순위적합선별(rank-based fitness assignment) 방법이 확률론적 비례추출(stochastic universal sampling)방법과 연계되어 사용되었다. 즉 각 세대에서의 개체들은 순위적합선별을 통하여 무작위로 선별된 이후 재생산과 돌연변이 과정을 거친 후에 다음 세대에 포함되게 된다. 이러한 과정을 거친 후에 최종 세대의 최적 개체가 최적화 문제의 최종 해로서 채택된다. 실수형 유전자 알고리즘에는 다양한 여러 변수들이 존재하지만, 기본적인 처리과정은 다음과 같다.

설계변수를 포함한 초기 개체군(initial individuals)을 생성하기 위하여 실수 벡터를 사용한다. 본 연구에서는 파괴면이 원호라 가정하였기 때문에, 설계변수로는 그림 1에 나타난 바와 같이 원호와 사면과의 좌우교차점과 원호의 반지름 즉, 총 3개의 설계변수가 적용되었다.

q 개의 개체군을 사용할 경우 다음 식 (4)과 같은 개체수의 모집단이 생성된다.

$$\begin{aligned} P^1 &= [a_1^1 \ a_2^1 \ a_3^1] \\ P^2 &= [a_1^2 \ a_2^2 \ a_3^2] \\ &\vdots \\ P^q &= [a_1^q \ a_2^q \ a_3^q] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, P 는 개체군에 존재하는 각 개체를 의미하며, a_j^i 는 i 번째 개체의 j 번째 설계변수를 의미한다.

최적화되는 목적함수는 각 개체를 평가하는 메커니즘을 제공한다. 이 때 각 개체의 적합도에 근거하여 유전적 처리과정(genetic manipulation process)에 사용될 개체들을 선별하게 된다. 동일한 개체수를 갖는 다음 세대를 생산하기 위하여 개체들이 각 적합도에 근거하여 선정되므로, 이전 세대보다 평균적으로 최종해에 보다 근접된 개체들로 구성될 수 있다. 이를 위해 여러 선택 방법들이 개발되어 있으며, 본 연구에서는 순위적합선별법이 사용되었다(Bäck와 Hoffmeister, 1991).

재생산(reproduction)은 선택된 개체군에서 무작위로 두 개체(parents)를 선택하는 것을 포함한다. 이와 같이 선택된 두 개체(parents)는 다음 세대에 적용될 새로운 개체(offspring)를 생산하기 위하여 교배된다. 다른 영역에 존재하는 해에 가장 근접한 개체가 현 세대의 개체군에 포함되어 있지 않은 경우에는 재생산 과정을 거치더라도 해에 보다 근접한 개체로 발전될 수 있는 가능성은 매우 낮다. 이 경우에 돌연변이 과정을 통하여 개체군과 다른 영역에 존재하는 개체를 생성시킴으로써 유전자 알고리즘의 조기 수렴을 방지할 수 있다.

3. 해석 결과

그림 3에 나타나 있는 두 가지 형태의 가상활동면에 대하여 기존 한계평형법과 제안된 해석기법이 함께 적용되었다. 그림 4에는 가상활동면-1에 대하여 각각의 방법들에 의해서 얻어진 가상활동면에 작용하는 전단응력과 수직응력의 값들이 비교되어 있다. 한계평형법들에 적용되는 가정사항이 각각 다르지만 전단응력과 수직응력의 분포는 큰 차이를 보이지 않으며, 제안된 방법의 결과도 한계평형법의 결과들과 유사하게 나타났다. 표 1에서 제안된 방법에 의한 안전율 값은 한계평형법들의 평균적인 값으로 예측되었다. 그림 5에는 가상활동면-2에 대한 해석결과들이 나타나 있다. 이 경우에도

한계평형법들에 의해 얻어진 전단 및 수직응력의 분포는 대체로 유사한 경향을 보이고 있다. 반면에 제안된 방법의 경우 수직응력 분포는 큰 차이를 보이지 않지만, 전단응력 분포는 한계평형법에 의한 결과와 비교해서 상당한 차이를 보이고 있다. 사면의 저점(toe)을 기준으로 왼편 활동면에서는 과소평가되었고, 오른편 활동면에서는 과대평가되었음을 알 수 있다. 그림 6에 나타난

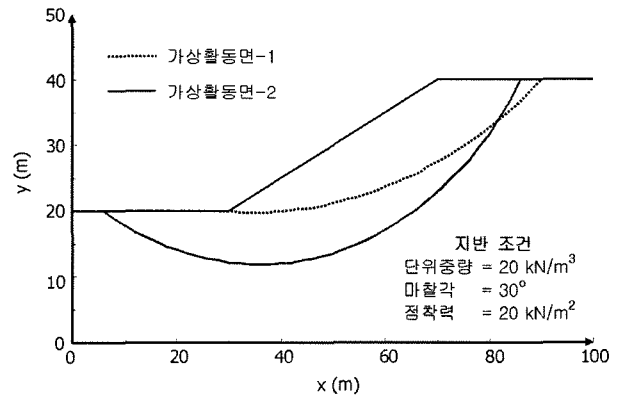


그림 3. 해석에 적용된 가상활동면

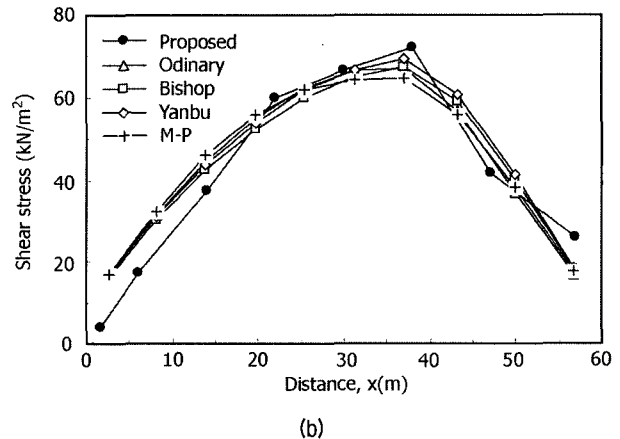
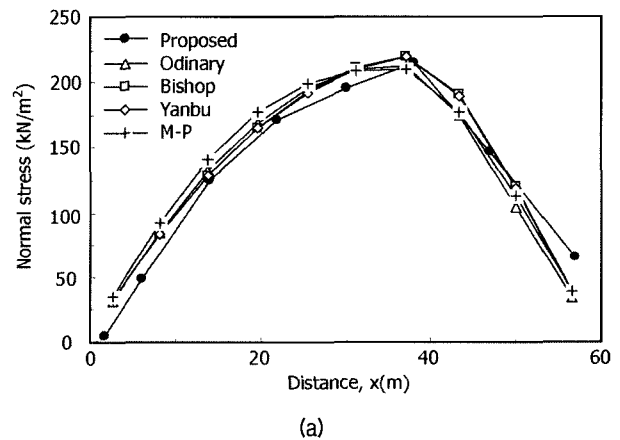
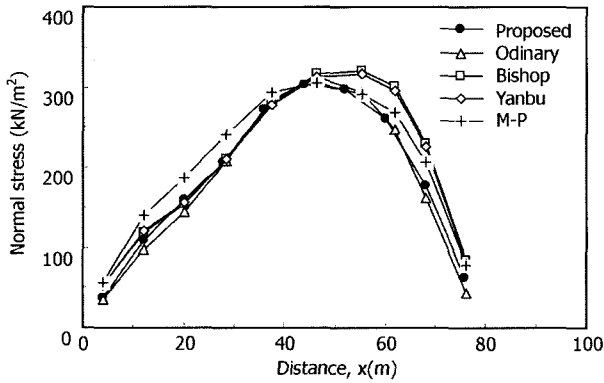


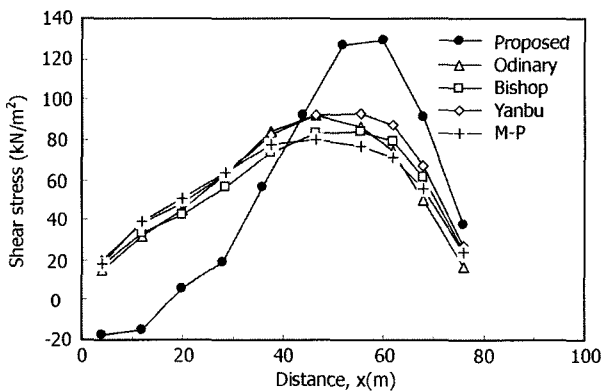
그림 4. 가상활동면-1에 대하여 각 방법들에 의해 산정된 전단 및 수직응력 분포

표 1. 각각의 안정해석기법으로부터 구해진 안전율

		Ordinary	Bishop	Janbu	M-P	Proposed
SF	가상활동면-1	1.30	1.34	1.30	1.34	1.32
	가상활동면-2	2.07	2.32	2.07	2.32	2.13
	가상활동면-1(전응력해석)	1.26	1.26	1.24	1.26	1.27



(a)



(b)

그림 5. 가상활동면-2에 대하여 각 방법들에 의해 산정된 전단 및 수직응력 분포

바와 같이 평평한 지반위의 가상활동면에 작용하는 전단응력은 y 축을 기준으로 서로 부호가 다른 값을 가질 것이다. 평평한 지반에 오른쪽에 사면이 형성될 경우 사면의 활동방향 때문에 오른쪽 활동면에서는 전단응력의 값이 증가하고, 왼쪽의 활동면에서는 전단응력값이 적용되는 사면의 높이가 높아질수록 감소하다가 전단응력의 방향이 바뀌게 될 것이다. 이와 같은 형태의 가상활동면의 경우 한계평형법은 활동면에 작용하는 전단응력의 분포가 활동면의 좌우로 대략 대칭적인 형태를 고려할 수 없는 것을 알 수 있다. 그림 7에서는 가상활동면-1에 대하여 전응력 해석을 수행한 결과들이 나타나 있다. 이 경우, 적용된 전단강도(c_u) 값은 55kN/m^2 이다. 한계평형법에서는 활동면에 대하여 전단강도에

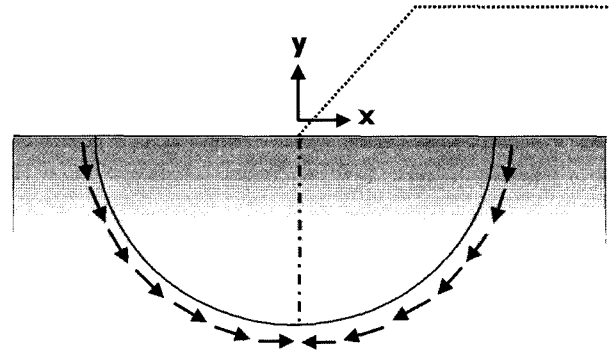


그림 6. 지반이 y 축 대칭인 경우의 가상활동면

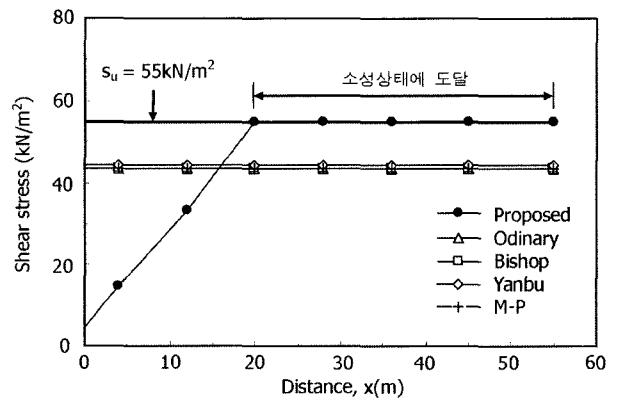


그림 7. 가상활동면-1에 대하여 전응력 해석시 산정된 전단응력 분포

안전율을 나눈 값이 전단응력 값으로 산정하게 된다. 따라서, 전응력 해석시 전단 응력 값이 활동면 전체에서 동일하게 산정된다. 그러나, 실제 사면에서는 활동면에서의 위치에 따른 전단변형량이 차이나게 된다. 그림 7에서 제안된 방법에 의해 산정된 전단응력분포를 살펴보면 활동면의 왼쪽에 비해 전단변형을 보다 많이 경험하게 되는 활동면의 오른쪽에서 전단거동이 소성상태에 도달되었음을 알 수 있다.

위의 예제해석 결과들을 살펴보면, 제안된 방법으로부터 구해진 안전율 값은 한계평형법으로부터 얻어진 값들의 범주에 포함되었지만, 전응력 해석과 특정 활동면의 위치에 대한 유효응력해석에서 제안된 방법이 활동면에서 유발되는 전단응력을 한계평형법에 비해 보다 신뢰성 있게 산정하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 소성연화현상이나 응력이력 등으로 인한 점진적인 파

괴(progressive failure)를 경험하는 즉, 힘과 변위의 적합 조건이 보다 중요하게 고려되어야 하는 지반조건에서의 사면안정해석시 한계평형법에 비하여 안전율을 보다 신뢰성 산정할 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구에서는 임계단면 탐색기법으로 사용한 유전자 알고리즘의 적용성을 검토하고자 기존에 널리 사용되는 최적화 기법인 BFGS 및 Simplex 방법을 사용하여 얻어진 결과들과 함께 비교하였다. 기존의 탐색기법들은 지역해로의 수렴을 피하기 위하여 예상되는 활동 파괴영역에서 다양한 초기 활동파괴면을 가정해야 한다 (그림 8 참고). 그림 9(a)에서 Simplex 방법의 경우 가상 활동면-1에서 최소안전율을 갖는 활동파괴면이 탐색되었고, 그림 9(b)에서 BFGS 방법의 경우 가상 활동면-2에서 최소안전율을 갖는 활동파괴면이 탐색되었다. 최소 안전율을 갖는 임계단면은 초기 가상 활동면-1, 2로부터 탐색될 수 있음을 알 수 있다. 초기 가상 활동면이 최종 임계단면에 근접하게 가정되는 것이 필요하며, 다양한 지층으로 구성된 사면에서는 보다 중요하게 작용될 것이다. 그림 9(c)에서 유전자 알고리즘에 의해 산정된 최소안전율은 기존의 두 방법들보다 안전율 값을 보다 작게 산정하였다. 이는 유전자 알고리즘이 다양한 가상 활동면 개체군을 다수 형성한 이후에 반복적인 유전자처리 과정을 거쳐서 최종적인 최소임계단면을 도출하는 확률론적인 방법이므로 다른 최적화 방법보다 지역해를 안정적으로 피하며 전역해를 탐색할 수 있기 때문이다. 특히 비원호 활동파괴면에 대한 최소임계단면 탐색하게 될 경우, 설계변수의 수가 원호 활동면보다 훨씬 많아지게 될 것이다. 이로 인해 지역해로의 수렴가능성은 더욱 증가하게 되며, 이 경우 유전자 알고리즘의 적용성은 더욱 크다고 할 수 있다.

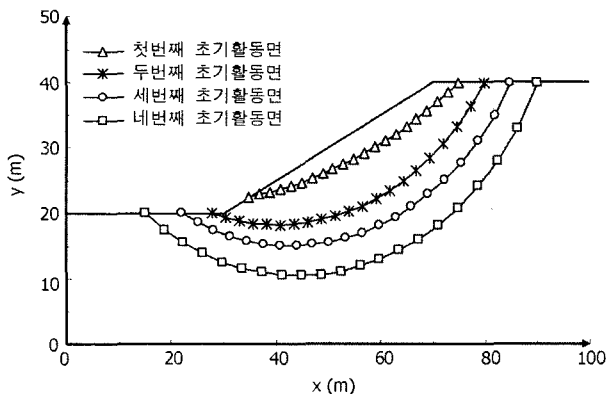
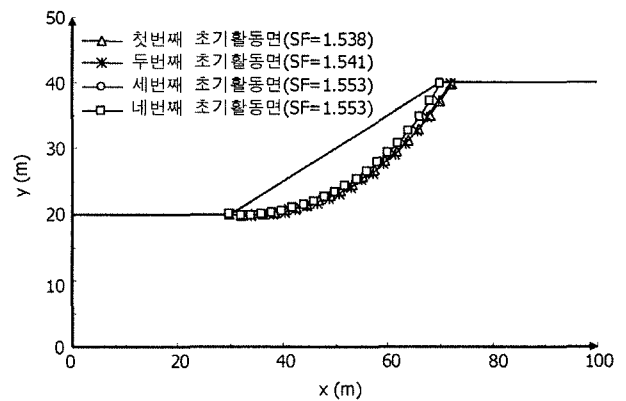
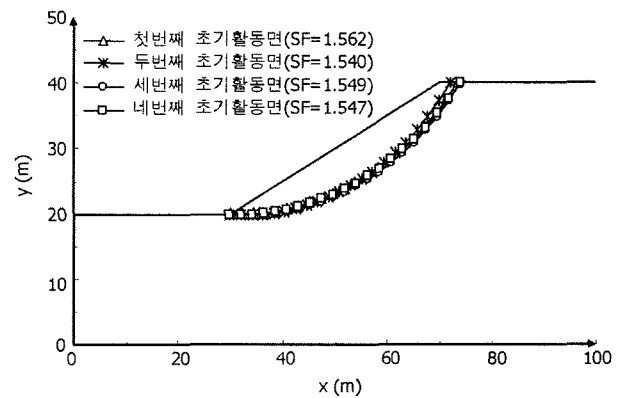


그림 8. 주어진 사면에 대한 초기 활동면

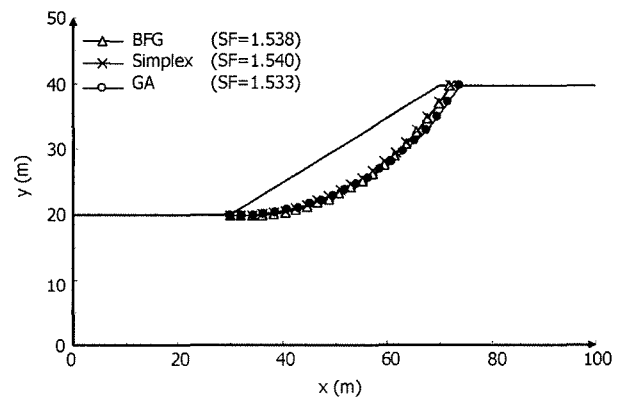
그림 10에서는 제안된 방법과 한계평형법으로부터 얻어진 결과들이 서로 비교되었다. 한계평형법들에 의한 해석은 상용프로그램인 GEO-SLOPE, SLOPE/W(1994)에 의해 수행되었다. 해석 결과를 살펴보면, Janbu 방법이 안전율 값을 1.532으로 가장 작게 예측하며, M-P 방법이 1.655으로 가장 크게 예측하였다. 제안된 방법은 1.533으로 예측하였고, 최소임계단면도 한계평형법으로부터 얻어진 임계단면들과 비교적 유사한 형태로 예



(a) Simplex 기법이 적용된 경우



(b) BFGS 기법이 적용된 경우



(c) 유전자 알고리즘이 적용된 경우

그림 9. 최적화 기법에 근거하여 산정된 최소안전율 활동면

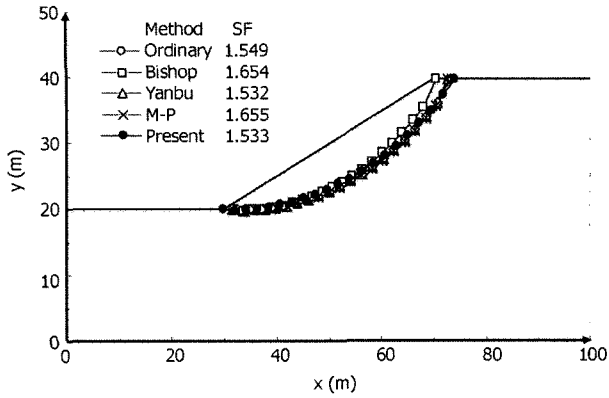


그림 10. 제안된 방법과 기존방법들과의 해석결과 비교

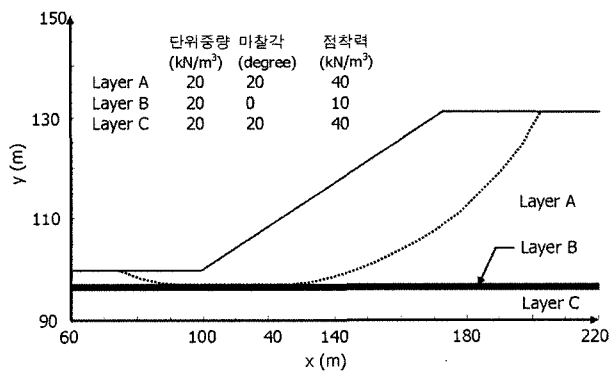
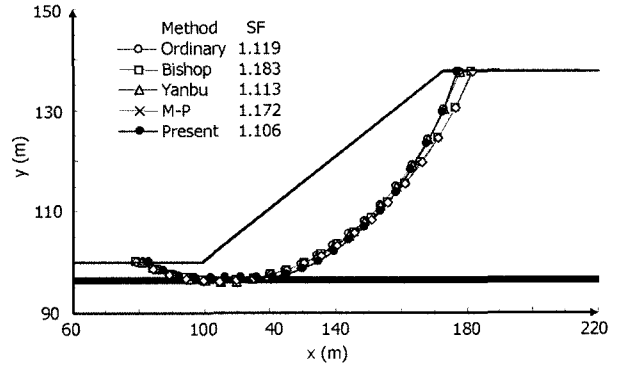
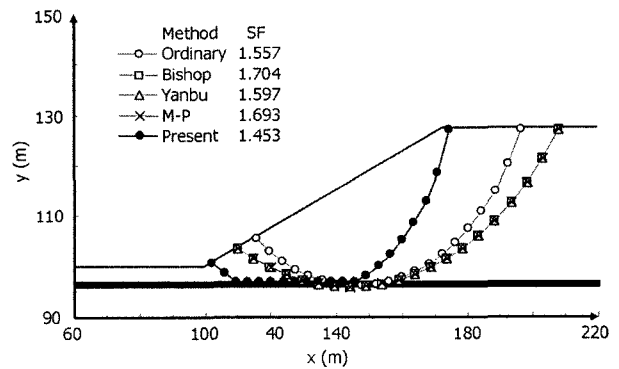


그림 11. 연약층 포함한 다층 사면



(a)



(b)

그림 12. 연약층 포함한 다층 사면에 대한 해석결과

측되었다.

그림 11의 토사사면은 하부에 연약점토층이 존재하는 다층지반으로 구성되어 있다. 제안된 방법의 경우 가상활동면이 원형파괴를 따르지만, 연약점토층을 통과할 경우에는 연약점토층을 따라 활동하는 것으로 가정하였다. 그림 12(a)에 주어진 사면에 대한 해석 결과를 살펴보면, 한계평형법에 의해 얻어진 안전율 값은 1.113~1.172의 범위에 존재하며 제안된 방법에 의한 안전율 값은 1.106으로 가장 작게 산정되었다. 최소안전율을 주는 임계단면은 모든 방법들이 유사하게 나타났다.

그림 12(b)와 같이 사면형태가 조정된 경우에는 구해진 활동파괴면의 형태도 서로 차이를 보인다. 한계평형법으로부터 얻어진 안전율 값은 1.557~1.704 범위에 존재하나, 제안된 방법은 1.453으로 한계평형법에 비해 작게 산정되었다. 이는 가상활동면 형태의 선정으로 말미암아 안전율 값의 차이가 유발되는 것으로 사료된다. 추후 연구에서 복잡한 지층으로 구성된 실제 사면에 대하여 비원호활동면의 적용할 경우 유전자 알고리즘은 보다 안정적인 최소임계단면 탐색을 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 토사사면의 활동파괴에 대한 안전율 값을 산정하고, 최소임계단면을 탐색할 수 있는 새로운 사면안정해석기법을 제안하고자 하였다. 개별요소법을 적용하여 사면의 가상활동파괴면 내부에서의 힘과 변위의 적합조건을 고려하였다. 또한 전역해를 보다 안정적으로 구할 수 있는 최적화 기법으로 알려진 유전자 알고리즘을 적용하여 최소임계단면을 탐색하였다.

동일한 가상활동 파괴면에 대하여 수행된 해석결과를 살펴보면, 제안된 방법의 안전율 값은 한계평형법으로부터 얻어진 안전율 값들의 범위 안에 존재하였다. 전응력 해석을 수행하거나 활동파괴면이 사면 하단부를 크게 포함하는 경우, 제안된 방법이 사면에서 유발될 수 있는 전단응력분포를 한계평형법들에 비해서 비교적 신뢰성 있게 예측함을 알 수 있었다. 추후에 제안된 해석기법을 확장하여 소성경화, 소성연화 및 응력이력 등과 같은 응력변화가 고려되어야 하는 사면에 대하여 적용하게 되다며, 유한요소법과 같이 복잡한 해석기법을 사용하지 않고 보다 간편하게 접근할 수 있을 것으로 사료된다.

다. 본 연구에서 적용된 유전자 알고리즘은 Simplex 및 BFGS 방법과 같은 기존 최적화기법들과 비교해 보다 작은 안전율 값을 산정할 수 있는 안정적인 최소임계단면 탐색기법임을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 스마트 사회기반시설 연구센터(SISTeC)의 연구비 지원에 대하여 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

- 김주용 (1998), 유한요소법을 이용한 사면안정해석, 박사학위논문, 건설 및 환경공학과, 한국과학기술원.
- 박현일, 이승래 (2003), “장비하중을 받는 매립지 차수 사면 시스템 설계를 위한 유전자 알고리즘의 적용”, 한국지반공학회논문집, 제19권, 제6호, pp. 1-8.
- 박현일, 이승래, 정구영 (2003), “개별요소법을 사용한 매립지 사면 차수시스템의 안정성 평가”, 한국지반공학회논문집, 제19권, 제2호, pp.87-95.
- 박현일, 이승래 (2004a), “유동학적 모델 및 유전자 알고리즘에 근거한 쓰레기 매립지 침하 모델의 제안”, 대한토목학회논문집, 제24권, 제2C호, pp. 135-145.
- 박현일, 이승래 (2004b), “장비하중을 받는 매립지사면 차수 시스템의 안정성 평가”, 대한토목학회논문집, 제23권, 제6C호, pp.365-372.
- 신방용, 백승철, 김홍택, 황정순 (2002), “유전자알고리즘을 이용한 사면안정해석”, 한국지반공학회논문집, 제18권, 제6호, pp.117-127.
- 양영순, 김기화 (1995), “실수형 Genetic Algorithm에 의한 최적 설계”, 전산구조공학회, 제8권, pp.123-132.
- 황재안, 이상덕, 전동각, 구자갑 (1993), “사면안정해석에 대한 Constrained Simplex Method 적용”, 대한토목학회 논문집, pp. 209-215.
- Bäck, T. and Hoffmeister, F. (1991). Extended Selection Mechanisms in Genetic Algorithms, 4th Int. Conf. of Genetic Algorithm, San Mateo, California, USA, pp.92-99.
- Bardet, J.P. and Kapuskar, M.M. (1989), “A Simplex Analysis of Slope Stability”, *Computers and Geotechnics*, 8, pp.328-348.
- Bishop, A.W. (1955), “The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes”, *Geotechnique*, Vol.10, No.1, pp.7-17.
- Chen, Z.Y. and Shao, C.M. (1988), “Evaluation of Minimum Factor of Safety in Slope Stability Analysis”, *Canadian Geotechnical Journal*, 25, pp.735-748.
- Cundall, P.A. (1971), “A Computer Model for Simulating Progressive, Large-scale Movements in Block Rock Systems”, *Proc. Int. Symp. On Rock Fracture*, Nancy, France, Vol.1, pp.8-17.
- Fellenius, W. (1936), “Calculation of the Stability of Earth Dams”, *Proceedings, of the Second Congress on Large Dams*, 4, pp. 445-463.
- GEO-SLOPE. SLOPE/W (1994) GEO-SLOPE International Ltd., Calgary, Alberta, Canada.
- Goldberg, D.E. (1989), *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, New York: Addison-Wesley.
- Holland, J. J. (1975), *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, The University of Michigan Press.
- Huang, S.L. and Yamasaki, K. (1993), “Slope Analysis Using Local Minimum Factor of Safety Approach”, *ASCE. J. Geotechnical Engineering*, Vol.119, No.12, pp.1974-1987.
- Janbu, N., Bjerrum, L., and Kjaernsli, B. (1956), *Stabilitetsberegning for fyllinger skjaeringer og naturlige skraninger*, Norwegian Geotechnical Publication No.16, Oslo, Norway.
- Malkawi, A.I.H., Hassan, W.F., Sarma, S.K. (2001), “Global Search Method for Locating General Slip Surface Using Monte Carlo Technique”, *ASCE. J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.127, No.8, pp.688-698.
- McCombie, P. and Wilkinson, P. (2002), “The Use of the Simple Genetic Algorithm in Finding the Critical Factor of Safety in Slope Stability Analysis”, *Computers and Geotechnics*, 29, pp.699-714.
- Morgenstern, N.R. and Price, V.E. (1965), “The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces”, *Geotechnique*, 15, pp.70-93.
- Nguyen, V.U. (1985), “Determination of Critical Slope Failure Surface”, *ASCE. J. Geotechnical Engineering*, 111, pp.238-251.
- Spencer, E. (1967), “A Method of Analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-slice Forces”, *Geotechnique*, 17, pp.11-26.

(접수일자 2005. 2. 24, 심사완료일 2005. 5. 6)