

# 有限要素法을 利用한 斜面安定 解析技法에 관한 研究

A Study of Analytic Techniques by FEM on the Slope Stability

韓 榮 哲\*

Han, Young Chul

金 周 用\*\*

Kim, Ju Yong

---

## 要 旨

사면안정 해석에서 널리 사용되고 있는 절편법은 사용이 간편한 반면에 각 절편들간의 상호 작용하는 힘에 대한 가정에 따라 다양한 방법이 제시되고 있으며 각각의 방법에 의해 산정된 결과가 서로 다르게 산정되는 단점이 있다. 따라서 본 고에서는 이러한 문제에 대한 해결방안의 하나로 유한요소법을 이용한 사면의 안정 해석기법에 대해서 고찰하고자 한다. 특히 최근에 제안되고 있는 유한요소법에 의한 강도감소법과 응력장을 이용한 안정해석방법에 대하여 특징 및 이용사례에 대하여 살펴 보았다.

## Abstract

Various conventional methods of the stability analysis of slopes based on the concept of limit equilibrium have been mainly used because of their simplicity. However these methods show the different results from each other due to different assumptions on the inter-slice forces. This paper presents a new method to determine the safety factor of slope by finite element method(FEM). Especially Strength Reduction Method(SRM) and the stability method using stress fields by FEM recently introduced are described along with their applications and case studies

---

\* (株)大宇엔지니어링 土木1本部 常務

\*\* (株)大宇엔지니어링 土木1本部 次長

## 1. 머릿말

사면의 안정해석에는 사용이 간편하다는 장점으로 한계평형법을 기조로 한 절편법(Method of Slice)이 널리 사용되고 있다. 그러나 각 절편들 사이에 작용하는 힘에 대한 가정에 따라 여러 가지 방법으로 분류되며 그 결과 또한 다르게 나오는 단점이 있다. 이는 한계평형법이 미지수가 방정식의 수보다 많은 부정적 문제이기 때문에 적정해를 구하기 위해서는 미지수를 보완할 수 있는 갯수만큼의 가정을 필요로 하며, 주로 각 절편의 측면에 상호 작용하는 힘의 조건으로부터 가정을 설정하게 되므로 조건에 따라 각기 다른 결과가 산정될 수 있다.

이러한 문제점에 대한 해결방안의 하나로 수치해석법(유한요소법, 유한차분법 등)을 이용한 사면의 안정해석방법들이 여러 연구자들에 의하여 제시되어 왔다. 따라서 본 고에서는 기존에 제안되고 있는 각종 해석방안에 대하여 주요 특징들을 살펴보고 적용성에 대한 평가를 실시하여 향후 유한요소법을 이용한 사면안정 해석을 위한 지침을 제안하고자 한다.

## 2. 사면 안정성 검토를 위한 해석기법의 개요

사면의 안정 해석에 필요한 요소는 안전율과 가상활동면의 임계단면이라 할 수 있다. 한계평형법은 단지 사면에 대한 안전율을 산정하며 임계단면에 대한 분석은 별도로 수행되어야 한다. 그러나 최소 안전율을 갖는 가상활동면으로 정의되는 임계단면은 안전율과 밀접하게 관련이 있으므로 본 고에서는 안전율을 산정하는 해석기법들에 대하여 특징 및 적용성을 평가하고자 한다.

한계평형법은 사면에 대한 전체 안전율만을 평가할 수 있으며 Bishop(1955), Fredlund et al.(1980), Janbu(1973), Morgenstern & Price (1965), Spencer(1967) 등에 의하여

다양한 해석기법이 제안되고 있다. 이러한 해석기법들은 활동면을 가정하여 지반의 전단강도를 감소시켜 가면서 한계평형을 이루는 조건에서 안전성을 평가하는 방법으로 절편간의 경계면에서의 수직 및 수평력의 방향과 힘의 평형조건에 따라 각기 다른 안전율이 산정되고 있다. 따라서 동일한 사면에 대하여 각각의 한계평형법들에 의해 산정되는 안전율은 차이가 있으며 이와 관련하여 Fredlund(1984)는 수치적인 연구를 통하여 이를 확인하였다.

사면안정성 평가에 있어 안전율만을 산정하는 한계평형법과는 달리 유한요소법은 탄소성 지반 특성에 대한 응력해석과 거동해석에 널리 사용되고 있는 수치해석법으로 지반의 다양한 특성인 이방성(Anisotropic), 소성경화(Plastic Hardening), 소성연화(Plastic Softening) 등을 고려할 수 있으며 지반의 응력이력에 대한 효과도 고려할 수 있다. 또한 사면내부의 각 요소의 변형으로 인한 사면형상의 변화를 미리 예측할 수 있으며, 압밀 등과 같이 지반응력이 시간에 따라 변화하는 경우뿐만 아니라 보강된 지반구조물에 대한 해석도 가능하다. 이러한 유한요소법과 한계평형법의 장단점에 대한 비교를 <표 1>에 나타내었다.

<표 1> 한계평형법과 유한요소법의 비교

사면해석	한계평형법	유한요소법
해석원리	- 절편법 - 힘 또는 모멘트 평형 적용	- 유한요소로 모델링 - 구성방정식, 힘의 평형, 변위의 적합조건
해석결과	- 안전율 (또는 임계단면)	- 변위 및 응력
장점	- 간단한 이론 - 실제 및 시공사례가 다수 - 계산시간이 짧음	- 다양한 지반거동 특성을 평가 - 해석결과로부터 다양한 정보 확보 (변위 및 응력 분포 등)
단점	- 다양한 지반특성 고려가 어려움(다양한 구성모델, 응력이력, 지하수흐름, 시간효과 등)	- 상대적으로 많은 시간이 소요 - 안전율 평가에 미흡
입력자료	- 점착력과 내부마찰각 (필요시 지하수위)	- 구성모델에 필요한 모델정수

상기 표에서 보는 바와 같이 유한요소법은 해석결과로부터 많은 정보를 확보할 수 있는 장점을 가지고 있으나 실용적으로 안전율이란 개념을 직접적으로 제시하지 못하기 때문에 사면안정 해석에 있어 적용성이 낮았다. 따라서 본 고에서 제안하고 있는 유한요소법을 이용한 사면 안정을 위한 해석기법은 유한요소법의 장점과 한계평형법의 안전율이란 개념을 유한요소법에 도입하는 방법이라 할 수 있다.

이와 같이 유한요소법을 이용한 사면안정 해석기법에 대하여 최근 몇 편의 연구결과가 발표되고 있으며 이들 방법은 크게 두가지로 구분할 수 있다.

첫째, 강도감소법으로 안전계수를 사용하여 강도를 감소시키면서 사면파괴상태에 도달할 때까지 반복하여 수치해석을 수행하여 안전율을 산정하는 방법이다.

$$c^{trial} = \frac{1}{FS^{trial}} \times c \quad (2.1)$$

$$\phi^{trial} = \arctan\left(\frac{1}{FS^{trial}} \times \tan \phi\right) \quad (2.2)$$

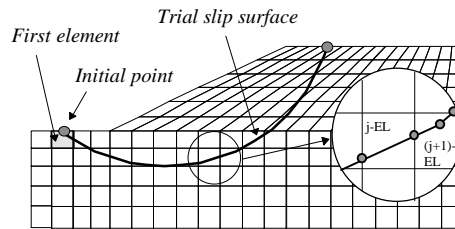
이 방법은 많은 반복적 해석을 수행해야 하며 수치해석의 특성상 파괴상태에서 수렴이 곤란하므로 파괴상태에 대한 정확한 정의를 세우기가 어려운 단점을 가지고 있는 반면에 수치해석 프로그램만 있으면 강도정수를 바꾸어 가면서 안전율을 산정할 수 있어 이용성이 편리하다는 장점을 가지고 있다. 국내의 다수의 연구자들도 이 방법을 이용한 사례가 많은 실정이다.

또 다른 방법으로 유한요소법을 이용한 사면의 안정성 평가방법으로 다음과 같이 안전율을 정의하고 있다.

$$F_s = \frac{\int_{\Gamma} \tau_f d\Gamma}{\int_{\Gamma} \tau d\Gamma} \quad (2.3)$$

단,  $\tau$ 는 가상활동면 상의 임의 점에서 유발된 전단응력,  $\tau_f$ 는 전단강도,  $\Gamma$ 는 활동면의 길이를 나타낸다.

이러한 방법은 강도감소법과는 달리 한번의 응력해석 결과로부터 가상활동면에 대한 안전율을 산정하는 방법으로 한계평형법에서 안전율을 산정하는 개념을 변형하여 적용할 수 있다. 즉 해석과정이 <그림 1>과 같이 우선 유한요소법을 사용하여 사면 및 주변 지반에 대한 응력해석을 수행하고 해석결과로부터 한계평형법에서 사용하는 가상활동면을 정의하고 이로부터 사면의 안전율을 산정하는 방법이다.



<그림 1> 유한요소 단면과 가상활동면

유한요소법의 해석결과로부터 사면내의 응력장 (Stress Field) 내에서 유발되는 가상활동면 상의 전단응력과 Mohr-Coulomb의 파괴규준에 따른 전단강도는 다음 식에 의해 계산할 수 있다.

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \phi$$

$$\tau = \frac{1}{2} (\sigma_y - \sigma_x) \sin 2\alpha + \tau_{xy} \cos 2\alpha \quad (4)$$

$$\sigma_n = \sigma_x \sin^2 \alpha + \sigma_y \cos^2 \alpha - \tau_{xy} \sin 2\alpha$$

단,  $c$ 는 지반의 점착력,  $\phi$ 는 내부마찰각,  $\sigma_n$ 은 유한요소 해석결과인  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  으로부터 산정되는 가상활동면에 연직 방향으로 작용

하는 법선응력(Normal Stress)이고  $\alpha$ 는 수평면과 활동면이 이루는 각도를 나타낸다.

이 방법은 강도감소법과는 달리 단 한번의 유한요소 해석을 수행하기 때문에 상대적으로 적은 시간이 소요되며 실제의 강도정수를 사용하기 때문에 지반의 응력이력도 효과적으로 고려할 수 있다. 그러나 유한요소 해석으로부터 얻어지는 응력결과를 바탕으로 가상활동면에 작용되는 전단력과 전단강도를 산정하는 프로그램이 별도로 요구되며 이러한 방법들에 대한 상호 장단점 비교는 <표 2>와 같다.

<표 2> 유한요소법에 의한 사면안정 해석기법의 비교

구 분	강도감소법	응력장 안정해석 기법
해석원리	- 강도정수를 파괴상태에 도달 때까지 감소시켜 반복 수행	- 유한요소법의 응력해석결과로부터 가상활동면을 가정하여 전단력과 전단강도를 산정하고 안전율 계산
연구자	- Masui & San (1990, 1992)	- Yamagami & Uetai(1988) - Zou et al.(1994)
장점	- 간단한 이론 - 별도의 프로그램이 필요하지 않음	- 계산시간이 상대적으로 적게 소요 - 파괴상태가 아닌 현 응력상태에 대한 해석으로 수렴성 및 정확성 확보
단점	- 반복해석이 요구됨 - 파괴상태에서의 수렴성과 정확성이 부족 - 파괴상태 정의에 따라 안전율 변화	- 별도의 안정성 평가 프로그램이 요구됨
상용프로그램	- 기존 수치해석 프로그램 이용	- Slope/w에서 옵션기능으로 지원

상기 표에서 보는 바와 같이 간편한 편리성으로서는 강도감소법이 적합하나 해석결과와 정확성 및 객관적인 관점에서 응력장을 이용한 안정해석 기법이 보다 양호한 결과를 나타내므로 이와같은 기법을 사면안정 해석에 대한 사례를 통하여 적용성에 대한 비교분석을 수행하고자 한다.

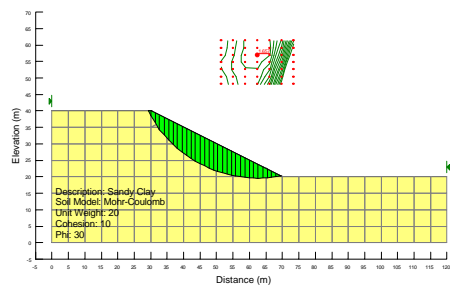
### 3. 사면안정해석 사례 분석

#### [사례 1] Slope/w를 이용한 안정성 평가

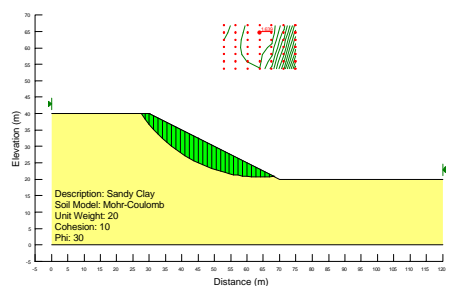
Slope/w를 이용하여 안정해석을 수행시 우선 수치해석법(Sigma/w)을 이용하여 Slope/w에 필요한 정보를 구한다.

- 사면형상 및 Mesh정보(확장자 \*.SLP)
- 총 응력자료(확장자 \*.S01)
- 간극수압 자료(확장자 \*.h00)

이러한 자료를 기준으로 유한요소법과 한계평형법에 의한 안정 해석결과는 <그림 2> 및 <표 1>과 같으며 각 절편의 법선응력, 전단응력 및 Local 안전율은 <그림 2>에 나타내었다.



(a) 유한요소법 해석결과

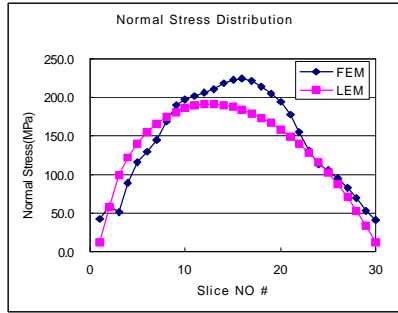


(b) 한계평형법 해석결과

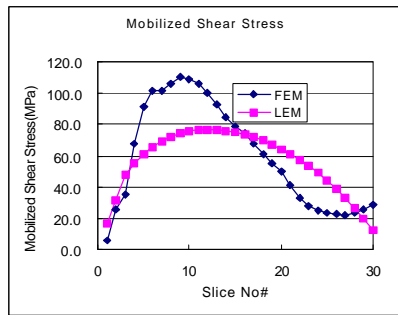
<그림 2> 유한요소법과 한계평형법의 안정해석 결과

<표 3> 안전율 산정 결과에 대한 비교

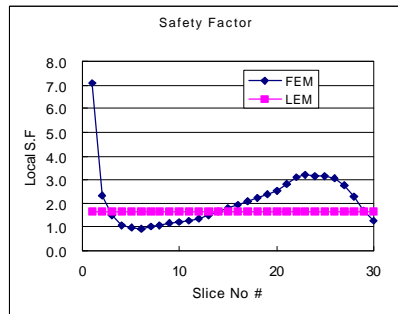
해석 방법	유한 요소법	한 계 평 형 법		
	FEM	Bishop	Janbu	Ordinary
안전율 (Fs)	1.657	1.630	1.536	1.548



(a)



(b)

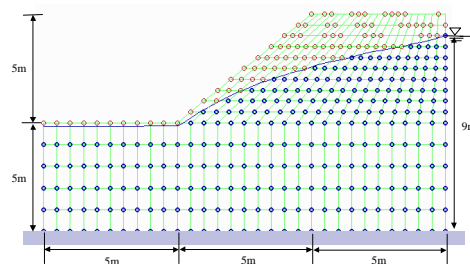


(c)

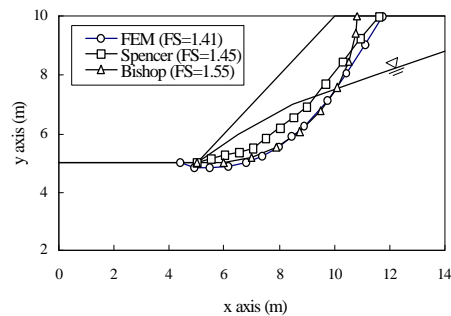
<그림 3> 각 절편에서의 법선응력, 전단응력 및 Local 안전율

[사례 2] 지하수 흐름을 갖는 사면

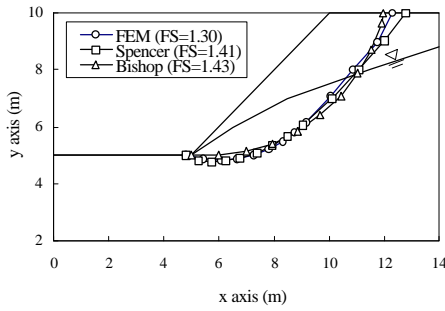
사면경사가 1:1인 균질한 사면에 대하여 유한 요소해석으로 부터 얻어지는 응력장을 이용하여 사면안정해석을 수행하였다. 지반 물성치로서 탄성 계수  $E=15,000\text{kPa}$ , 포아송비  $\nu=0.3$ 이며 투수계수  $k_{11}=k_{22}=10^{-3}(\text{m/day})$ ,  $\gamma_w=10(\text{kN/m}^3)$ ,  $\varepsilon_1=0.0$ ,  $\varepsilon_2=1.0$ 을 사용하였다. 또한 지반의 포화단위중량  $\gamma_t=20(\text{kN/m}^3)$ , 불포화 지반의 단위중량  $\gamma_d=18(\text{kN/m}^3)$ 을 적용하였다. 지반의 구성모델은 Mohr-Coulomb항복면을 갖는 탄소성모델을 사용하였으며 초기 지하수위는 <그림 4>에서 보는 바와 같이 기준면으로부터 9m 높이에서 굴착면에 강하된 자유수면이 형성되도록 하였다. 이로 부터 유한요소법을 이용한 사면의 안정성 해석결과를 한계평형법과 비교하여 <그림 5>에 나타내었다.



<그림 4> 굴착사면에 대한 자유수면의 해석단면



(a)  $c=5.0\text{ kPa}$ ,  $\phi=35^\circ$

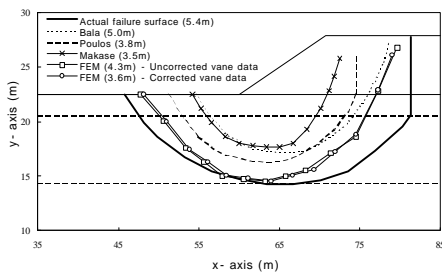


(b)  $c=10.0 \text{ kPa}$ ,  $\phi=20^\circ$

<그림 5> 유한요소법과 한계평형법의 해석 결과에 대한 비교

#### [사례 3] 연약지반 상의 성토사면

1986년 말레이시아 고속도로협회에서는 Muar 지방의 연약한 해성 점성토 지반에 고속도로를 건설을 목적으로 최적의 연약지반 개량공법을 선정하기 위하여 9가지의 각종 지반개량공법에 대하여 13개소에서 대형 시험성토를 실시하였다. 그 중 한 지역에서 약 5.5m의 시험성토에서 성토사면의 활동파괴가 발생되었으며 파괴가 발생된 성토고 및 활동파괴면을 파악하기 위하여 유한요소법을 이용한 사면안정해석을 수행하였다. 기준면은 지표로부터 약 22.5m 깊이로 하고 심도에 따라 연약지반을 7개의 층으로 구분하여 비배수 전단강도를 구분 적용하여 사면 안정해석을 수행하였으며 해석결과를 <그림 6>에 나타내었다.



<그림 6> 연약지반상의 성토사면의 안정 해석 결과

#### 4. 결 론

본 고에서는 한계평형법의 단점을 극복하기 위하여 최근에 소개되고 있는 유한요소법을 이용한 사면안정해석 기법들에 대한 특징을 파악하고 각종 사례에 대한 비교분석을 통하여 적용성을 평가하였다. 유한요소 사면안정법은 크게 강도감소법과 응력장을 이용한 안정해석법으로 구분할 수 있으며 안정평가의 정확성 및 객관적 타당성 측면에서 후자의 기법이 보다 양호한 결과를 나타내고 있는 것으로 판단되었다. 이러한 해석 기법은 유한요소 해석결과로부터 응력장을 이용하므로 향후 보강사면, 동적하중 및 압밀과정 중의 연약지반 등의 사면안정해석에 그 적용성을 확대할 수 있을 것으로 판단된다.

#### References

- [1] 박연준, 채영수, 유광호, 백영식(1997), "절편법과 유한차분법에 의한 사면안정해석 비교연구", 한국지반공학회 논문집, Vol 15, No 6, pp.263-272.
- [2] 이종규, 장서만(1996), "사면안정해석 방법에 관한 비교 연구", 대한토목학회 논문집, pp.359-368.
- [3] Yamagami, T. and Ueta, Y.(1988), "Search for Critical slip Lines in Finite Element Stress Fields by Dynamic Programming", Proceedings, 6th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Innsbruck, Austria. A.A. Balkema, Rotterdam, pp.1335-1339.
- [4] Zou, J. Z., Williams, D. J. and Xiong, W.L. (1995), "Search for Critical Slope Surfaces Based on Finite Element Method", Geotechnique, Vol 32, pp.233-246.