

절편법과 유한차분법에 의한 사면안정해석 비교연구

Slope Stability Analysis by Slice Method and Finite Difference Method - A Comparative Study -

박 연 준*¹
Park, Yeon-Jun

채 영 수*²
Chae, Young-Su

유 광 호*³
You, Kwang-Ho

백 영 식*⁴
Paik, Young-Shik

Abstract

Slice method is commonly used in solving slope stability problems since it is easy to use and its computation time is rather short. But depending upon the assumptions on the inter-slice forces, different methods are available. Quite often the difference between methods are so big that it is very difficult to make engineering decisions.

This paper describes a method to calculate the factor of safety of a slope using FLAC, a finite difference based program. A FISH routine is developed to calculate the factor of safety, and verified by comparing with Chen's limit equilibrium solution. An example problem was selected from Fredlund and Krhan's paper, and results were compared for different soil and water conditions. The difference was less than 0.01 when the soil is homogeneous, and less than 5 % when a weak layer is embedded.

Since most geotechnical application programs are capable of considering complicated ground conditions as well as the effect of ground supports, numerical methods are believed to be very useful in making engineering decisions. The developed routine can be applied to the calculation of the factor of safety of jointed rock slopes or weathered rock slopes where the use of slice method is limited.

요 지

사면안정 문제에 널리 이용되는 절편법은 사용이 간편하고 계산시간이 짧다는 장점이 있으나, 각 절편들 사이에 작용하는 힘에 대한 가정에 따라 여러 가지 방법으로 분류되며, 그 결과 또한 다르게 나오는 단점이 있다. 이러한 방법간의 차이는 경우에 따라 매우 심하여 공학적인 결정을 어렵게 하는 경우가 드물지 않다.

*1 정회원, 수원대학교 공과대학 토목공학과 전임강사

*2 정회원, 수원대학교 공과대학 토목공학과 부교수

*3 정회원, 수원대학교 공과대학 토목공학과 전임강사

*4 정회원, 경희대학교 공과대학 토목공학과 교수

본 논문에서는 이러한 문제에 대한 해결방안의 하나로 유한요소법 및 유한차분법을 이용한 사면의 안정성 해석 및 안전을 계산방법을 제시하고자 한다.

이를 위하여 유한차분법을 이용한 지반해석용 프로그램인 FLAC을 이용하여 사면의 안전율을 계산하는 routine을 작성하고, Chen의 한계평형해와 비교하여 검증하였다.

Fredlund 와 Krhan이 제시한 문제에 적용하여 그 결과를 흔히 사용되는 몇 가지 절편법에 대한 해석결과와 비교한 결과 균질한 지반의 경우에는 절편법과 0.01 이내의 차이를 보였으며, 연약면이 존재하는 경우에는 절편법에 의한 해와 5% 이내의 차이를 보였다.

대부분의 지반해석용 프로그램들은 복잡한 지반조건은 물론, 지반보강재의 효과도 고려할 수 있으므로 수치해석에 의한 해법이 공학적인 결정에 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 생각되며, 개발된 routine은 절편법이 제한적으로만 적용되는 절리암반사면이나 풍화암 사면의 안전을 계산에도 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Keywords : Slope stability, Factor of safety, Strength reduction technique, Limit equilibrium method, Finite difference method, Failure surface, Interface element

1. 서론

흙 사면의 안정성 해석에는 한계평형법을 기초로 한 절편법(method of slice)이 널리 이용되고 있다. 이 방법은 간단한 계산으로 신뢰할 수 있는 결과를 주며, 사용이 간편하다는 장점 때문에 타 방법에 비하여 선호되고 있다. 그러나 각 절편들 사이에 작용하는 힘에 대한 가정에 따라 여러 가지 방법으로 분류되며, 그 결과 또한 다르게 나오는 단점이 있다. 이러한 방법간의 차이는 경우에 따라 매우 심하여 현장 기술자들을 당황하게 하는 경우가 드물지 않다. 이러한 문제에 대한 해결방안의 하나로 유한요소법 및 유한차분법을 이용한 사면의 안정성 해석 및 안전을 계산방법을 제시하고자 한다.

유한요소법을 이용한 사면의 안전을 계산은 일찍이 1966년에 Brown & King에 의하여 시도된 바 있다. 그러나 그 당시 컴퓨터의 연산속도와 기억용량의 제한으로 인하여 제한적으로만 사용되었으나 최근 컴퓨터 성능의 향상으로 연산속도가

빨라지고 기억용량이 증대됨에 따라 유한요소법 및 유한 차분법을 이용한 사면의 안전을 계산이 종래의 절편법에 대한 대체법으로 부상되고 있다.

본 연구에서는 유한차분법을 이용한 지반해석용 프로그램인 FLAC을 이용하여 흙사면의 안전율을 계산하는 routine을 FLAC 내장언어인 FISH를 이용하여 작성하고, Fredlund 와 Krhan(1977)이 제시한 문제에 적용하여 그 결과를 흔히 사용되는 몇 가지 절편법에 대한 해석결과와 비교하였다.

2. 절편법에 대한 고찰

절편법은 한계평형이론을 바탕으로 사면안정을 해석하는 방법으로 토체 내부에서 활동면을 따라 전단파괴가 발생하는 순간 활동력과 활동에 대한 저항력이 평형을 이룬다는 가정하에 고안된 기법이다. 이 방법의 유용성과 신뢰성은 현재까지 축적된 경험과 자료로서 입증된 바 있으나 그 정확성은 타 방법과 마찬가지로 사면의 기하학적 조건의 정확도와 지반의 강도정수 및 해석법 고유의

Table 1. Methods of Analysis(Nash, 1987).

Method	Circular	Non-circular	Overall moment equilibrium	Overall force equilibrium	Assumptions about interslice forces
Infinite Slope		*		*	Parallel to slope
Wedge Analysis		*		*	Define inclination
$\varphi_u=0$	*		*		
Ordinary	*		*		Resultant parallel to base of each slice
Bishop	*	(*)	*		Horizontal
Janbu simplified	(*)	*		*	Horizontal
Lowe and Karafiath	*	(*)		*	Define inclination
Spencer	*	(*)	*	*	Constant inclination
Morgenstern and Price	*	*	*	*	$X/E = \lambda f(x)$
Janbu rigorous	*	*	(*)	*	Define thrust line
Fredlund and Krhan GLE	*	*	*	*	$X/E = \lambda f(x)$

* fully satisfies the specified condition

(*) partially satisfies the specified condition

정밀도에 좌우된다.

흔히 사용되는 해석법 및 이들의 해석조건은 Nash(1987)에 의하여 조사된 바 있으며 이를 Table. 1에 열거하였다. 이들 중 힘의 평형과 모멘트의 평형을 모두 고려한 해석법은 Spencer 법, Morgenstern and Price법, Janbu의 엄밀해법 및 Fredlund and Krhan의 GLE법 등을 들 수 있다. 이처럼 힘과 모멘트의 평형을 모두 만족시키는 경우 절편의 수가 n 일 때 각 절편에 대하여 수평방향력의 평형식, 연직방향력의 평형식 및 모멘트 평형식이 성립되므로 총 $3n$ 개의 방정식이 성립된다. 반면 관련된 미지수들은 n 개의 절편 저면에서의 유효수직력, $n-1$ 개의 절편간 측면 전단력, $n-1$ 개의 절편간 유효수직응력, 사면의 안전율(1개), n 개의 절편 저면 유효수직력의 위치(혹은 모멘트 팔길이), $n-1$ 개의 절편 축력의 작용점 위치 등 총 $5n-2$ 개의 미지수가 관여하게 된다. 따라서 원칙적으로는 미지수의 수가 방정식의 수보다 $2n-2$ 개 많은 부정정 문제가 되므로, 미지수의 수를 줄이기 위한 가정들이 설정된다.

우선 절편의 저면에 작용하는 유효수직력의 위치를 절편의 중점이라고 가정하여 n 개의 미지수를 소거하고, 다시 절편 측면에 작용하는 힘의 위치나 방향을 가정하여 다시 $n-1$ 개의 미지수를 제거한다. 이렇게 하면 총 $3n$ 개의 방정식에 $3n-1$ 개의 미지수를 가진 과지정 문제(overspecified problem)로 귀착된다. 모든 방법들이 가정들을 포함하므로 어떤 방법도 정해를 주지는 못하지만 전기한 힘과 모멘트의 평형을 모두 만족하는 해석법들은 공학적으로 인정받을만한 결과를 주는 것으로 알려져 있다.

각 해석법간의 차이는 상술한 바와 같이 미지수의 수를 줄이기 위하여 절편 측면에 작용하는 힘의 작용점이나 방향을 서로 다르게 가정한 데서 기인하는데, Fredlund and Krhan이 제안한 GLE법은 이들을 모두 포함한다고 볼 수 있다. 그러나 활동면의 기하학적 형태나 지반조건 등에 따라 절편간에 작용하는 힘에 대한 가정이 올바르지 못하게 되는 경우가 발생하며, 이 경우 해석결과는 신빙성이 결여되고 각 방법간의 결과들이 상이

하여 공학적인 결정을 어렵게 한다.

비록 절편법이 공학적으로 인정받을 만한 결과를 주며 지난 수십년간 토목공학자들에 의하여 선호된 해석법이나 다음과 같은 단점을 가지고 있다.

- (1) 절편 측면에 작용하는 힘(inter-slice force)을 가정하여야 한다.
- (2) 활동면의 모양 및 연약면, 인장 크랙의 위치를 사전에 설정해주어야 한다.
- (3) 각 절편들은 변형하지 않으며, 파괴는 활동면에 국한된다.
- (4) 횡방향으로 오목한 사면에 대한 3차원 해석이 불가능하지는 않으나 매우 어렵다.
- (5) 수많은 예상 활동면에 대하여 해석한 후 임계 활동면(critical failure surface)를 찾아내어야 한다.

따라서 이러한 단점을 가지지 않은 새로운 방법이 절실히 요구된다.

3. 유한차분법에 의한 안전율 계산

유한요소법과 유한차분법은 1960년대부터 항공공학분야에서 사용되기 시작하여 최근에는 역학과 관련된 전 분야에 걸쳐 널리 이용되고 있다. 토목공학 분야에서도 구조, 수리, 지반 및 측량분야 등에서 사용되어 왔으나 사면의 안정해석에 있어서는 제한적으로만 사용되었다. 사면안정 분야에서 제한적으로 사용된 가장 큰 이유는 유한요소 해석으로는 사면의 파괴 여부 및 활동 양태를 살펴볼 수는 있으나 안전율을 구할 수 없기 때문이었다.

사면이나 둑, 제방 등에 있어서 안전율은 '파괴를 막을 수 있는 최소 전단강도와 실제 지반의 전단강도와'의 비라고 정의된다(Bishop, 1955). 즉 안전율은 실제 물질과 가상의 물질, 혹은 실제

지반의 강도와 사면이 붕괴될 때의 가상 지반 강도와의 비를 비교함으로써 구할 수 있다. 따라서 안전율은 Duncan(1996)이 지적했듯이 지반의 실제 전단강도를 파괴가 일어나기 시작하는 강도로 줄이기 위하여 나눈 값이 된다고 할 수 있다.

유한 요소법이나 유한 차분법을 이용한 사면해석에서 안전율은 실제 지반의 강도를 사면의 파괴가 발생할 때까지 점진적으로 감소시켜가며 해석을 반복 수행하여 구할 수 있다. 이러한 전단강도 감소기법은 현재 흔히 쓰이고 있는 절편법에 비하여 여러 가지 장점이 있다. 가장 큰 장점은 임계파괴면이 자동으로 찾아지기 때문에 임계파괴면의 기하학적 형태를 사전에 원호, log spiral, 부분선형 등으로 가정할 필요가 없다는 점이다. 만일 탄성-완전소성 구성 방정식과 연상유동법칙(associated flow rule)이 적용될 경우, 전단강도 감소기법으로 구해진 안전율은 절편법에 의하여 구해진 안전율과 일치하며, 유일한 값을 가진다. 이 값은 탄성정수나 초기응력, 혹은 응력 경로와 무관하다(Dawson 등, 1998).

전단강도 감소기법은 이미 1975년에 Zienkiewicz 등에 의하여 사용된 바 있으며, 그 이후에도 Naylor (1982), Giam & Donald(1988), Matsui & San (1992), Ugai(1989), Kobayashi(1990), Ugai & Leshchinsky(1995) 등에 의하여 사용된 바 있다.

사면안정 해석에서 전단강도 감소기법을 사용하려면 실제 지반의 점착력 c 와 내부 마찰각 ϕ 를

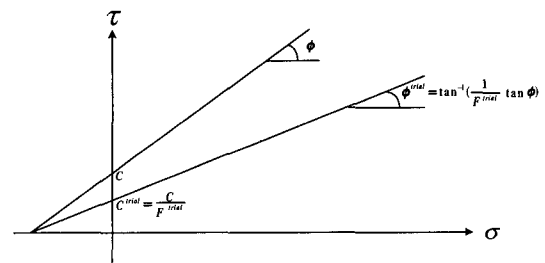


Figure 1. Relationship between real and trial strength parameters.

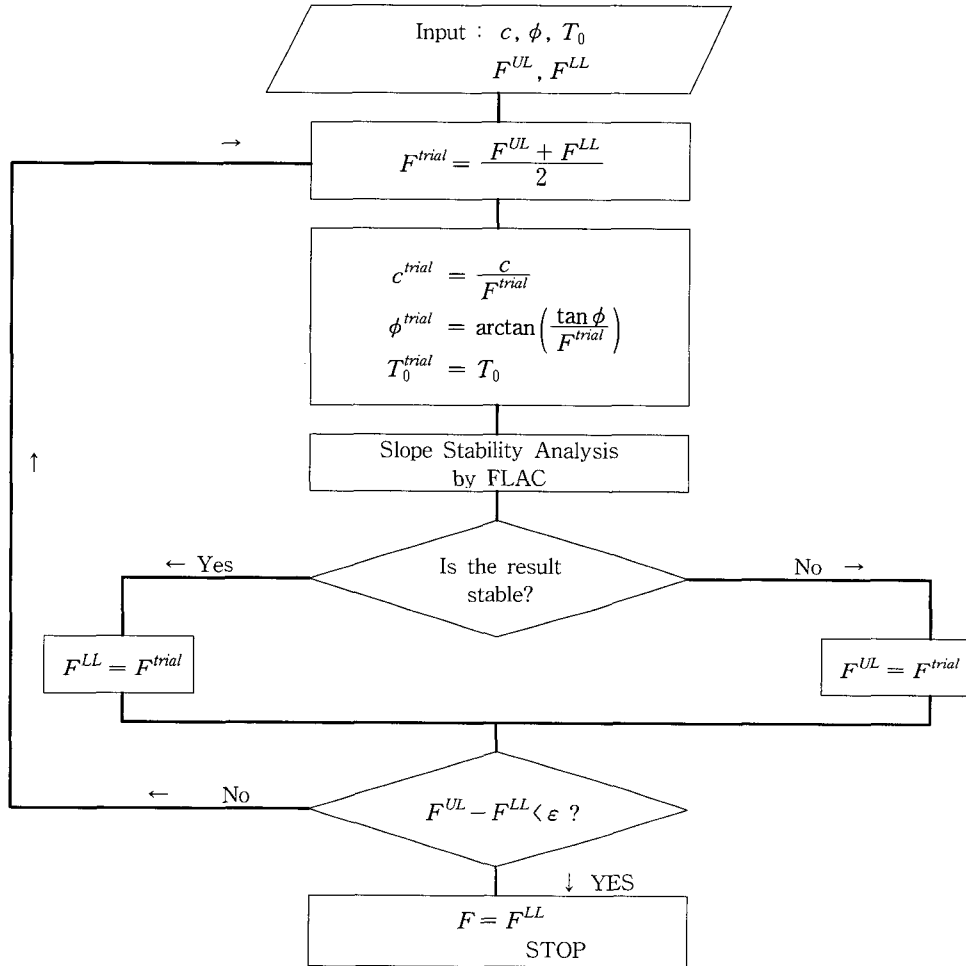


Figure 2. Flow chart of the routine for the calculation of factor of safety.

시험 안전율(trial factor of safety) F^{trial} 로 나누어 일련의 해석을 반복 수행한다. 이때 시험 안전율과 이에 의해 감소된 지반 물성치와는 Figure. 1에 나타낸 바와 같이 다음의 관계를 갖게 된다.

$$c^{trial} = \frac{1}{F^{trial}} c \quad (1)$$

$$\phi^{trial} = \arctan\left(\frac{1}{F^{trial}} \tan \phi\right) \quad (2)$$

한계상태를 점진적으로 전단강도를 낮추어 가며

찾아낼 수도 있으나, 반분법(bisection method)을 사용하면 훨씬 빨리 안전율을 구할 수 있다. 즉 Figure. 2의 안전율 계산 routine 흐름도에 나타낸 바와 같이 안전율의 상한값(upper limit : F^{UL})과 하한값(lower limit : F^{LL})을 정하되 하한값은 전산해석 결과가 평형상태에 도달하는, 즉 사면의 파괴가 발생하지 않는 시험 안전율이 되도록 하며, 상한값은 전산해석 결과가 평형상태에 도달하지 않는 값, 즉 실제 사면의 안전율 보다 높은 값이 되도록 정한다. 다음에는 이 두 값의 중간 값을 시험 안전율로 가정하여 해석을 수행하게 된

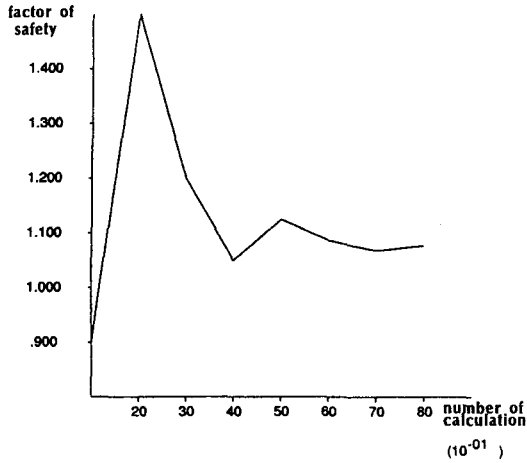


Figure 3. Calculation of factor of safety.

다. 만일 이 해석결과가 수렴하게 되면 사면의 파괴가 발생하지 않는 것이므로 하한값은 이 값으로 대체된다. 반대로 해석결과가 수렴하지 않으면, 이 시험 안전율은 실제 안전율 보다 높은 값이므로 이 값을 상한값으로 대체한다. 이러한 과정을 상한값과 하한값의 차이가 규정된 tolerance 보다 작게 될 때까지 반복함으로써 해당 사면의 안전율을 구하게 된다. 실제 안전율이 1.0687인 사면에 대하여 하한값 0.90, 상한값 1.5를 부여한 경우 8번의 반복 계산에서 안전율을 구하는 과정을 Figure. 3에 도시하였다.

개발된 routine의 적용성을 알아보기 위하여 안전율이 1.0인 Figure. 4의 사면을 선택하여 해석을 수행하였다. 본 사면은 높이 20m, 사면각 60°, 단위중량 25,975N/m³의 사면으로, Chen (1975)에 의한 한계평형 해석에 의하면 내부마찰각 $\phi=20^\circ$ 의 경우 무차원 안정수(stability number) $N_s=10.39$ 이다. $N_s=\gamma H/c$ 의 관계에서 점착력 c 를 구하면 50kPa이 된다. 파괴면은 log-spiral 형태로 발생한다고 하였다.

우선 FLAC의 Mohr-Coulomb 모델을 선택하여 주어진 물성을 가진 사면의 안전율을 구하고, 파괴면의 발달상황을 살펴보았다.

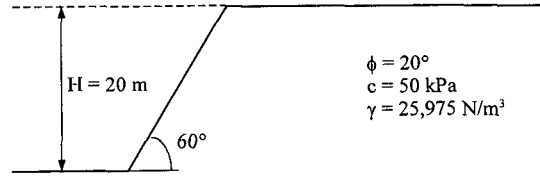


Figure 4. Soil slope with Factor of safety = 1.0.

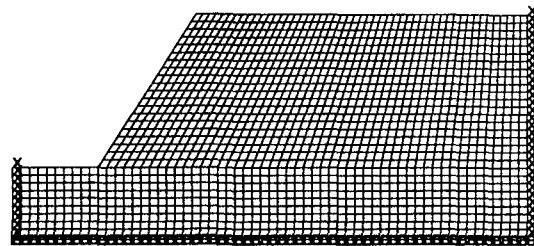


Figure 5. Finite element mesh with boundary condition for analysis

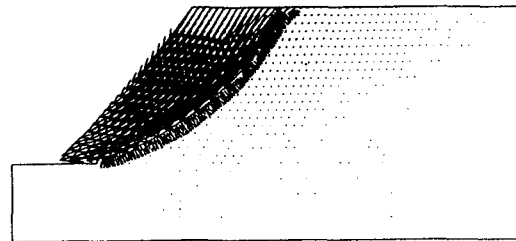


Figure 6. Failure plane and velocity vector field at slope failure(factor of safety=0.99).

Figure. 5는 사면 해석을 위한 유한요소망으로 약 1800개의 요소로 구성되었다. 좌우측 경계는 x방향 변위만을 구속하였고, 하부 경계는 x방향과 y방향을 모두 구속하였다.

Figure. 6는 해석결과 발생된 최대 변형률 변화량(maximum strain rate)의 contour와 파괴면 상부 활동토체의 속도벡터를 도시한 것이다. FLAC 해석결과에서 파괴면은 그 면을 중심으로 상부토체는 운동을 하고(즉 속도가 있으며), 그 하부 토체는 운동을 하지 않으므로(즉 속도가 0에 가까우므로) 파괴면은 최대 변형률 변화량 contour

Table 2. 6 different conditions posed by Fredlund and Krhan (Fredlund and Krhan,1977).

Case No.	Slope	Soil strength parameters	Ground water condition	Weak layer
1	1:2	$\phi' = 20^\circ$ $c' = 28.75 \text{KPa}$	None	None
2			None	$\phi' = 10^\circ$, $c' = 0$
3			$r_u = 0.25$	None
4			$r_u = 0.25$	$\phi' = 10^\circ$, $c' = 0$
5			Piezometric line	None
6			Piezometric line	$\phi' = 10^\circ$, $c' = 0$

의 중심부에 해당한다고 볼 수 있다. 그림에서 파괴면은 Chen(1975)의 해석과 동일한 log spiral 형태를 보이고 있으며, 발생위치도 동일하다. 원래 이 사면의 안전율은 1.0이나, 전산해석결과 0.99로 약 1%의 오차를 보였다. 이는 본 해석의 타당성은 물론, 본 연구에서 사용된 안전율 계산 방법의 타당성도 입증해 주는 결과라 할 수 있다.

4. 절편법과 유한차분법의 비교

비교적 복잡한 지반 조건에 대한 해석결과를 절편법에 의한 결과와 비교하여 보기 위하여 1977년 Fredlund와 Krhan이 발표한 예제를 유한요소법으로 해석하고, 동 논문에 발표된 여러 가지 절편법에 의한 해와 비교하였다.

Fredlund와 Krhan은 Figure. 7에 도시된 바와 같이 높이 12m의 1:2 사면에 지반 조건 및 지하수 조건을 달리하여 총 6가지 조건을 부과하고, 6가지 서로 다른 절편법을 적용하여 각각의 경우에 대한 안전율을 구하였다. 이 6가지 경우에 대한 해석조건을 요약하면 다음의 Table. 2와 같다.

동일한 문제를 FLAC으로 해석하기 위하여 폭 30 zone, 높이 20 zone의 요소망을 Figure. 8

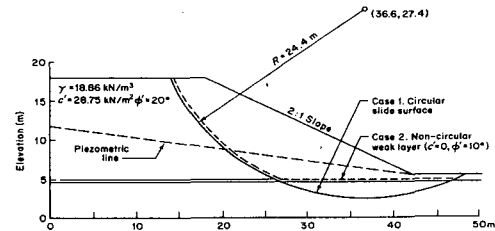


Figure 7. Example problem using circular and non-circular sliding surfaces (Fredlund and Krhan,1977).

과 같이 구성하고 좌우측 경계는 x-방향 변위, 하부경계는 x,y-방향 변위를 모두 구속하여 경계조건을 부과하였다.

간극수압계수의 고려

Piezometric line에 의한 유효수직응력의 감소는 지하수면을 설정해 줌으로써 자동으로 고려되며, 간극수압 계수(r_u)의 고려는 지하수면을 지표면과 일치시키고 다음의 관계식을 이용하여 물의 밀도를 환산하여 고려하였다.

즉, 간극수압 계수의 정의에 의하여

$$r_u = \frac{u}{\gamma h} \quad (3)$$

이고, 여기서 u 는 간극수압으로

$$u = \gamma_w h = \rho_w g h \quad (4)$$

이므로

$$r_u = \frac{u}{\gamma h} = \frac{\rho_w g h}{\rho g h} \quad (5)$$

가 되어 결국

$$\rho_w = r_u \rho = r_u \frac{\gamma}{g} \quad (6)$$

로 귀착된다. 여기서 ρ_w 는 환산된 물의 밀도이며, ρ 는 지반의 밀도, h 는 지반 내부 임의의 점의 심도이다.

Table 3. Comparison of factors of safety for example problem by slice methods and FLAC analysis.

Case no.	Ordinary method	Simplified Bishop method	Spencer's method			Janbu's simplifie method	Janbu's rigorous method	Morgenstern-Price method $f(x) = const.$		FLAC analysis by strength reduction	
			F	θ	λ			F	λ	zone	interface
1	1.928	2.080	2.073	14.81	0.264*	2.041	2.008	2.076	0.254	2.068	-
2	1.288	1.377	1.373	10.49	0.185	1.448	1.432	1.378	0.159	1.325	1.365
3	1.607	1.766	1.761	14.33	0.255	1.735	1.708	1.765	0.244	1.756	-
4	1.029	1.124	1.118	7.93	0.139	1.191	1.162	1.124	0.116	1.052	1.187
5	1.693	1.834	1.830	13.87	0.247	1.827	1.776	1.833	0.234	1.836	-
6	1.171	1.248	1.245	6.88	0.121	1.333	1.298	1.250	0.097	1.165	1.318

* This value is 0.237 in the original paper by Fredlund & Krhan(1977) but corrected herein as $\tan(14.81^\circ)$.

연약면의 고려

Fredlund와 Krhan은 연약층의 두께를 설정치 않았으나, 연약층의 성질로 보아 상부의 토사층과 하부 기반암과의 경계면으로 생각되어진다. 이 경우 FLAC에서는 두가지 해석방법을 적용할 수 있다.

첫째는 연약층이 seam 형태로 존재하는 경우로서 1 zone 두께의 수평층에 연약층의 강도 정수를 부여하는 방법이다. 이 경우 연약층과 원지반 모두가 수압의 영향으로 유효수직응력이 감소하여 강도가 감소된다.

두 번째 방법은 FLAC의 불연속면 요소(interface element)를 사용하는 방법이다. 이 방법은 불연속면으로 상부 지체와 하부지체가 분리된 상태를 말하며, 불연속면을 통한 응력의 전달은 불연속면의 강도정수 및 변형성에 의한다. 그러나 불연속면을 따른 파괴 여부는 불연속면의 변형성(즉 K_s 및 K_n)에는 둔감하며 거의 전적으로 불연속면의 강도특성에 의존한다. 이 경우에도 수압에 의한 유효수직응력의 감소가 고려된다.

본 해석에서는 불연속면의 전단 및 수직강성을 동일하게 100MPa/m로 사용하였으며, 기타 입력자료는 Table. 2와 같다. 이러한 입력자료에 의하여 해석한 결과를 Fredlund와 Krhan(1977)의 해석결과와 비교하여 Table. 3에 수록

하였다.

Fredlund와 Krhan(1977)의 6가지 경우에 대한 해석결과를 살펴보면 힘의 평형만을 고려하는 Janbu의 간편법과 모멘트의 평형조건을 만족시키는 하지만 모멘트에 의한 안전율을 별도로 계산하지는 않는 Janbu의 엄밀해법, 그리고 ordinary (Fellenius)법은 힘과 모멘트의 평형을 모두 고려하는 방법과 다소 동떨어진 결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 반면 힘과 모멘트의 평형을 모두 고려한 Spencer법과 Morgenstern-Price법에 의한 해는 안전율의 차이가 0.01 이하이며, 모멘트의 평형만을 고려한 Bishop법에 의한 해도 유사한 결과를 보여준다. 원전에서 Fredlund와 Krhan(1977)이 지적한 바와 같이 본 예제의 경우 모멘트의 평형조건으로 구한 안전율은 절편 측면에 작용하는 힘의 방향(즉 λ)의 변화에 매우 둔감하다. 반면 힘의 평형식으로부터 구한 안전율은 λ 값이 증가함에 따라 매우 민감하게 증가하는 경향을 보여 힘의 평형만을 고려하는 절편법의 문제점을 지적한 바 있다.

전단강도 감소기법을 사용하여 FLAC으로 안전율을 구한 결과 연약층이 없는 경우에는 Spencer법 및 Morgenstern-Price법에 의한 안전율과 0.01 이하의 차이를 보였으며, 활동면의 형태도 원호형을 나타내었다. Case 1에 대한 해석결과를

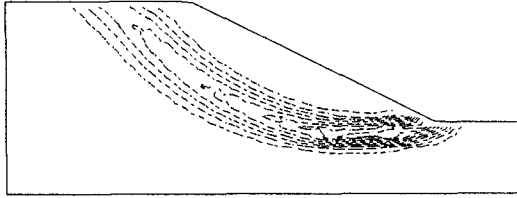


Figure 8. Circular failure sliding surface developed by FLAC analysis: Case 1.

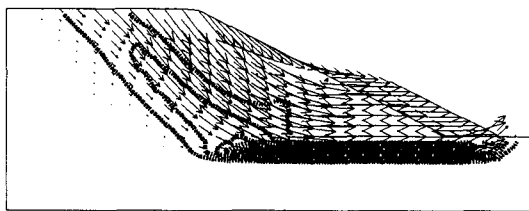


Figure 9. Sliding surface and velocity vectors developed by FLAC analysis: Case 2-zone.

Figure. 8에 도시하였다.

반면 연약층이 존재하는 경우에는 $\pm 5\%$ 정도의 차이를 보이고 있는데 이는 절편법과는 달리 연약면 상부 지반에서의 활동면이 원호형이 아니기 때문에 발생한 활동면의 기하학적 차이에 기인한 것으로 여겨진다. Case 2에 대하여 연약면을 zone으로 고려한 경우와 불연속면으로 고려한 경우에 대한 결과를 각각 Figure. 9과 Figure. 10에 도시하였다. 연약층 상부에서의 활동면은 원호형이라기 보다는 직선에 가까움을 알 수 있다.

연약층을 zone으로 고려한 경우에는 절편법보다 작은 안전율을, 불연속면을 사용한 경우에는 절편법보다 큰 안전율을 나타내었는데, zone을 사용한 경우 연약층의 두께를 1 zone의 두께인 1m로 모델링하였기 때문에 연약층의 파괴가 전체적인 사면의 거동에 과도한 영향을 준 것으로 생각된다.

불연속면을 사용한 경우는 불연속면의 미끄러짐만이 고려되므로 절편법에서의 연약면에 대한 가정과 일치하며, 결과적으로 좀더 유사한 결과를

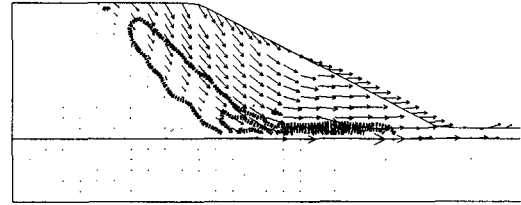


Figure 10. Sliding surface and velocity vectors developed by FLAC analysis: Case 2-interface.

보여주고 있다.

5. 결론

사면안정 해석에 흔히 사용되고 있는 절편법의 대체법으로 유한요소법 및 유한차분법이 사용될 수 있음을 보이기 위하여 유한차분법을 이용한 상용 프로그램인 FLAC의 내장언어(FISH)로 안전율 계산 routine을 작성하여 Chen(1975)의 한계평형해와 비교 검증하고, Fredlund and Krhan (1977)이 제시한 예제를 통하여 절편법에 의한 안전율과 비교하였다.

균질한 흙사면에 대한 해석결과 Chen의 한계평형해와 1%의 오차를 보였으며, 동일한 활동면을 나타내었다.

Fredlund 와 Krhan(1977)이 제시한 다소 복잡한 지반 및 수압조건의 사면에 대하여 해석한 결과 절편법에 의한 해와 최대 5% 이내의 차이를 보였다. 절편법의 해와 FLAC 해석에 의한 해들 중 어느 해가 정해에 가까운지는 알 수 없으나, 절편법 자체의 가정 때문에 절편법들 간에도 해석결과에 차이가 있음을 감안하면 지반조건이 복잡해져 갈수록 절편법에서의 가정이 실제 상황을 제대로 반영하지 못한다고 말할 수 있다.

대부분의 지반해석용 프로그램들은 복잡한 지반조건은 물론, 지반보강재의 효과도 고려할 수 있으며 활동면의 기하학적 형태도 사전에 지정할 필요가 없으므로 수치해석에 의한 해법이 공학적인

결정에 많은 도움을 줄 수 있을 것으로 생각된다. 또한 절편법의 적용이 불가능한 절리암반사면이나 풍화암 사면의 안전을 계산에도 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문 작성시 전산해석 및 결과 정리에 많은 도움을 준 전 수원대학교 토목공학과 대학원생 (현 한라 엔지니어링 지반공학부) 우승우군에게 감사의 뜻을 전합니다.

참고 문헌

1. Bieniawski, Z.T. (1976) "Rock mass classifications in rock engineering", Proceedings of Symposium on Exploration for Rock Engineering, Balkema, Rotterdam, Vol. 1, pp. 97-106.
2. Bishop, A.W. (1955). "The use of the slip circle in the stability analysis of slopes", Geotechnique 5, 7-17.
3. Brown, C.B. & King, I.P. (1966). "Automatic embankment analysis: equilibrium and stability conditions.", Geotechnique 16, No.3, 209-219.
4. Chen, W. F. (1975). Limit Analysis and Soil Plasticity. Amsterdam, Elsevier.
5. Duncan, J. M. (1996). "State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes.", J. Geotech. Engng. Div. Am. Soc. Civ. Engrs. 122, No. 3, 577-596.
6. Dawson, E.M., Roth, W.H., & Drescher, "A Slope stability analysis with finite element and finite difference methods", submitted to Geotechnique, June 1998.
7. Fredlund, D.G. and Krhan, J.(1977). "Comparison of slope stability methods of analysis.", Can. Geotech.J. 14, 429-439
8. Giam. S.K. & Donald, I.B. (1988). "Determination of critical slip surfaces for slopes via stress-strain calculations", Proc. Fifth Australia-New Zealand Conf. on Geomech., Sydney, Australia, 461-464.
9. Kobayashi, M. (1990). "A study on application of finite element method to stability and settlement analysis in geotechnical engineering", Technical Note of PHRIMT, Japan, No. 1 (in Japanese).
10. Matsui, T. & San, K.C. (1992). "Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique.", Soils and Found. 32, No. 1, 59-70.
11. Nash. D.(1987). "A Comparative Review of Limit Equilibrium Methods of Stability Analysis", Slope Stability, Edited by M.G. Anderson and K.S. Richards, John Wiley & Sons Ltd., p30.
12. Naylor, D.J. (1982). "Finite elements and slope stability", Numer. Meth. in Geomech., Proc. NATO Advanced Study Institute. Lisbon, Portugal, 1981, 229-244.
13. Ugai, K. (1989). "A method of calculation of total factor of safety of slopes by elasto-plastic FEM." ,Soils and Foundations29, No. 2, 190-195 (in Japanese).
14. Ugai, K. & Leshchinsky, D. (1995). "Three-dimensional limit equilibrium and finite element analyses: a comparison of results", Soils and Foundations35, No. 4, 1-7.
15. Zienkiewicz, O.C., Humpheson, C. & Lewis, R.W. (1975). "Associated and non-associated viscoplasticity and plasticity in soil mechanics", Geotechnique25, No. 4, 671-689.

(접수일자 1999. 9. 13)