

원형 및 비원형 활동파괴 해석을 다룬다

3. 안정성 판정방법 :  $X_1 - X_D = 0$

## 특정 사례사면 해석결과 및 평가

백규호\*, 오세봉\*, 이승래\*\*

---

### ABSTRACT

The slope stability analysis of Carsington dam is performed, considering the effects of pore water pressure, slip surface configuration, lateral stress and various shear strengths. Without yellow clay layer, the Bowles' and STABR programs were used to find the circular slip surface which has the maximum safety factor. At last using the Morgenstern-Price method, the effects of rainfall and strength of yellow clay were mainly considered in the back analyses after failure. It was found that (1) the potential slip was not predicted in the analysis based on the modified Bishop method without considering the yellow clay layer, and (2) the collapse of dam had been occurred according to the critical shear strength of the yellow clay and pore water pressure increase.

---

### 1. 서론

일반적으로 절·성토 사면의 안정성 해석시 널리 사용되는 해석법들은 한계평형이론에 근거하여 사면내부에 있는 절편의 측면에 작용하는 토압과 활동파괴면의 기하학적 형상을 가정하는 방법에 따라 여러가지가 개발되었다. 그 중 수정 Bishop 방법은 절편 측면의 전단력만을 고려한 원형활동 파괴에 적용되며, 절편 측면의 수평력까지 고려한 비원형 활동파괴 해석시에는 Janbu 방법 및 Morgenstern-Price 방법, 그리고 Spencer 방법 등이 널리 사용되고 있다.

이상에서 열거된 여러 방법들은 상이한 측면력을 가정함으로써 활동면의 수직응력과 전단응력을 서로 다르게 산정하여 결과적으로 안전율을 다르게 계산하지만, 그 차

---

\* 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

\*\* 한국과학기술원 토목공학과 조교수

이는 문제가 되지 않을 정도로 작은 것이 보통이기 때문에 해석결과의 정확성은 해석 방법의 차이보다는 활동면의 강도정수와 기하학적 조건에 더 큰 영향을 받는다[1].

따라서 사면의 안정성 해석시 지질학적인 면을 고려하여 예상되는 활동면을 지배하는 흙의 특성을 나타내는 여러 강도정수를 고려하고 각 활동면의 형상에 따라 활동파괴시의 안전율을 비교하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

본 논문에서는 설계당시의 Carsington 댐 상류측 사면의 안전율과 활동파괴면을 예측하기 위하여, 수정된 Bishop 방법에 근거한 Bowles의 프로그램[2]과 STABR 프로그램[3]을 사용하였다. 그리고 파괴후 활동면을 지배하는 core와 yellow clay의 강도정수 및 비원형 활동파괴면을 고려하기 위하여, 황토압의 변화를 고려할 수 있는 Morgenstern - Price 방법을 이용한 프로그램[4]을 이용하여 주어진 활동단면의 안전율을 계산하였다.

## 2. 설계시 활동파괴면 예측

### 2.1. 사용한 프로그램의 기능

본 논문에서 사용한 Bowles 프로그램과 STABR 프로그램은 원형파괴단면에 대하여 수정 Bishop방법으로 사면안정 해석을 수행한다. 설계시에는 사면의 최소 안전율을 예측하기 위하여 사면단면내에서 가능한 활동파괴면이 프로그램내에서 설정될 수 있도록 하는 것이 바람직하다. 즉 사면내에서 존재할 수 있는 여러 활동면에 대하여 안전율을 계산하고, 그들 값중 최소의 안전율을 주는 활동파괴면을 구할 수 있어야 한다. 따라서 활동면이 원형과 같은 연속적인 함수로 표현되어야 프로그램 내에서 자동적으로 여러 경우를 반복 계산하는 것이 용이해진다.

Bowles 프로그램은 사면위의 한점을 설정한후 바둑판처럼 원형 활동면의 중심을 옮겨가며 반복적으로 그 해석 결과를 구하고 그 결과로부터 안전율이 최소인 활동면을 찾게 된다. 이에 비해 STABR 프로그램은 주어진 사면내의 일정깊이에 활동면이 접하도록 하거나 한점을 지나도록 반복작업을 수행하고 그 과정에서 최소 안전율을 가진 활동면을 스스로 찾을 수 있다. 제한적이거나 STABR 프로그램은 프로그램내에서 자동적으로 안전율이 감소하는 방향으로 탐색할 수 있어 돋보이는 사면안정 해석 프로그램이라고 할 수 있다.

이 프로그램들은 일반적인 사면안정 해석 프로그램들과 마찬가지로 표.1과 같이 사면내 흙의 경계를 이루는 선으로 흙의 종류를 구분하며, 다양한 지반층의 특성 및

강도의 영향과 수두의 영향을 고려할 수 있다. 단 사용기술상 사면의 단면을 충분히 크게 경계짓고 프로그램마다 주어진 좌표계로 단면의 자료를 주의깊게 설정할 필요가 있다.

표.1 프로그램의 적용성

구 분	①Bowles 프로그램	S T A B R
사용이론 및 활동면	수정 Bishop방법 및 원형활동면 사용	
다양한 종류의 흙 및 지반층에의 적용성	가 능	가 능 ( 특히 지반층 깊이에 따라 변화하는 Cu고려 )
수압의 고려범위	정 수 압 가능	정수압, 투수압 가능
활동면 예측 기능	활동면이 시작되는 한점을 설정하여 여러 원의 중심을 이동하며 계산	활동면이 접하는 깊이를 설정하거나 활동면이 지나는 한 점을 지정하여 여러 원의 중심을 이동하며 계산

## 2.2. 설계시 사면안정 해석결과

위의 두 프로그램을 효과적으로 이용하기 위하여 본 사례사면의 해석은 다음과 같이 수행되었다. 첫째로 Bowles 프로그램으로 댐 상류측에서의 사면형태로부터 예상되는 활동의 시발점을 설정한 후 여러 원형활동면에 대하여 나타나는 최소 안전율을 구하고, 둘째로는 이러한 최소 안전율이 발생한 활동면의 하단깊이에 대해 STABR 프로그램으로 사면안정 해석을 수행하였다. 프로그램 해석시 그림 1에서 보여지는 것과 같이 지반의 강도에 따라 단면의 경계를 설정하였으며, 주어진 간극수압비로부터 예상되는 정수두를 단면에 고려할 수 있었다.

먼저 Bowles 프로그램을 수행한 결과 그림.1에서 보여주는 B1, B2등과 같이 안전율이 1.25-1.30 정도로 계산되었으며 활동면의 위치는 표.2에 나타났다. 그리고 최소 안전율이 발생한 B1의 활동면하단 깊이에 대하여 STABR 프로그램으로 해석한 결과, 그림 1의 S1-S3등 활동면에서 1.2정도의 안전율을 구할 수 있었으며 이중 S1에서 최소 안전율 1.18을 구할 수 있었다.

두 프로그램에서 구한 활동면의 중심위치에 따른 안전율은 대체로 일관된 경향을 보였으며, 유사한 활동면을 가지는 그림.1의 S3와 B1에서 비슷한 안전율을 구할 수

있었다.

표.2 설계시 활동면의 위치 및 안전율

활동면	활동면반경, m	활동 중심 좌표	안전율
S1	94.0	( 62.4 , 276.3 )	1.18
S2	73.0	( 53.7 , 255.3 )	1.20
S3	73.0	( 45.4 , 255.3 )	1.27
B1	73.1	( 42.0 , 258.0 )	1.25
B2	72.8	( 47.0 , 253.0 )	1.29

위와 같은 설계시의 해석결과 안전율이 대체로 1.2-1.3정도의 값을 가지는 것으로 밝혀졌으며 충분히 안정된 사면상태로 간주될 수는 없지만, 활동파괴를 일으킬만큼 뚜렷이 불안정한 상태로 판단될 근거는 보여지지 않았다.

### 3. Core 와 Yellow clay의 파괴시 평균강도 해석

#### 3.1. 사용 프로그램의 기능

해석에 사용된 프로그램은 Morgenstern-Price 방법을 사용한 것으로 활동파괴면이 여러개의 직선으로 정의되기 때문에 비원형 활동파괴에도 적용될 수 있다. 그리고 절편 측면에 작용하는 토압의 방향  $\theta$ 는 가정되는 경사함수  $f(x)$ 로 나타내며, 여러 경계선으로 구분되는 흙의 종류마다의 간극수압은 간극수압비  $ru$ 로 고려할 수 있어서, 절편간 내력의 분포,  $\lambda$ , 작용선의 위치, 저면의 수직력과 전단력을 모두 알아낼 수 있다는 것이 이 프로그램의 큰 장점으로 알려져 있다. 여기서  $\lambda$ 는 scaling factor로 안전율 계산시 구해지는 값이며,  $f(x)$ 는 가정해야 하는 임의의 함수로  $f(x)=0$  이면 Bishop의 간편법과 같아지고,  $f(x)=\text{일정}$  이면 Spencer 방법과 동일하게 된다. 프로그램에서 계산된 안전율은 가정한  $f(x)$ 에 따라 달라지므로 단일치는 아니지만  $f(x)$ 에 따른 안전율의 변화는 그리 크지 않으며, 해석하여 얻은 계산결과를 바르게 평가하여 해가 합당한지의 여부를 판단하는 것이 대단히 중요하게 된다[1, 5].

한계평형방법에서 구한 해의 적합성을 판별하는 기준은 여러 가지가 발표되었으며 그 중 Hamel(1968)은 토사지반의 경우 아래와 같은 판정기준을 발표하였다[6].

- ①. 절편의 저면과 측면에 작용하는 유효수직력은 압축력이여야 한다.
- ②. 절편 측면에 유효수직력의 작용점 높이는  $0.25H - 0.65H$  사이에 존재하여야

한다. 여기서 H는 절편 경계면의 높이이다.

- ③. 임의의 절편 측면에 유발되는 평균 마찰각은 활동파괴면을 따르는 평균 마찰각의 80%보다 작아야 한다.

그러나 모든 절편이 위의 모든 판정기준을 동시에 만족시키기는 어렵다. 더욱이 실험적·이론적 관찰결과 불안정한 사면의 경우 일반적으로 사면의 첨단부에서는 인장응력이 발생하는 것으로 나타나므로 이 부근에서는 위의 판정기준을 어느정도 여유를 두고 적용시킬 수 있다고 Hamel은 언급하고 있다.

### 3.2. 파괴시 평균강도의 해석결과

위에 언급한 사항들을 바탕으로 그림.2와 같이 사면내 core와 yellow clay의 강도 해석시 실제 활동파괴면은 7개의 점(Q1-Q7)으로 정의되는 6개의 직선으로 근사화시켰으며, 가정해야하는 경사함수  $f(x)$ 는 4가지가 사용되었다. 해석한 결과  $f(x)$ 가 sine 함수인 경우를 제외한 나머지 경우에는 dam 상단 부근에 존재하는 몇개의 절편에 인장력이 발생함과 동시에 절편 측면에 유효수직력의 작용점이 활동파괴면 아래로 내려가는 것으로 나타났으나 Hamel의 발표에 근거하여 이러한 모든 계산결과들을 타당한 것으로 간주하였다. 여기서 계산된 안전율은 표.3에서 보이는 바와 같이 활동파괴면이 지나가는 yellow clay의 강도정수에 따라 매우 큰 차이를 나타낸다. 특히 한계상태에서의 강도를 사용하여 사면을 해석한 경우에는 안전율이 1.0에 가까워 지는 것으로 보아서 사면의 활동파괴시 yellow clay는 한계상태에 있었음을 알 수 있으며, 그 당시 가정된 경사함수  $f(x)$ 의 변화에 대한 토체내 각 절편 측면에 작용하는 토압의 작용높이  $h$ 의 변화는 그림.2에 나타내었다.

표.3 강도 변화에 따른 안전율의 변화

강도 f(x)	안전율, F			
	Peak	Pre-shearing	Critical	Residual
const.	1.315	1.075	1.039	0.685
Trapezoidal	1.316	1.076	1.039	0.685
Sine	1.301	1.061	1.025	0.676
Specified	1.310	1.070	1.034	0.682

그리고 가정된 경사함수  $f(x)$ 에 의해서만 영향을 받는 측면 작용력의 경사,  $\theta$ 는  $f(x)=\text{const.}$ 를 제외한 나머지 경우는 절편마다 변하기 때문에 표.4와 같이 전체 토체

에 대한 경사각의 평균,  $\bar{\theta}$ 로 나타내었다.

표.4 함수  $f(x)$ 의 변화에 대한 경사각의 변화

$f(x)$	Const.	Trapezoidal	Sine	Specified
$f(x)$ 의 평균	1.0	0.714	0.373	1.369
$\lambda$	0.292	0.274	0.389	0.161
$\bar{\theta}$ (degree)	15.20°	11.07°	8.26°	12.43°

앞의 표.3과 표.4에서 보듯이 경사함수  $f(x)$ 의 변화에 대한 안전율,  $F$ 의 변화는 매우 작으며, 절편 측면 작용력의 평균 경사각,  $\bar{\theta}$ 는 8.3° - 15.2° 까지 변하는 것을 볼 수 있으나 경사함수  $f(x)$ 가 sine과 trapezoidal인 경우는 각각 8.3° 와 11.07° 로 문제에서 주어진  $\bar{\theta}=10^\circ$  와 비슷하게 계산된다. 특히 trapezoidal인 경우는 활동파괴면의 처음과 끝부분에 경사각만이 10° 보다 작고 그 외에 나머지 부분은  $\theta=15.20^\circ$  로 일정하게 된다. 이것은 Morgenstern-Price 방법으로 사면을 해석할 경우 사면 첨단부의  $\theta$ 는 다른 곳보다 완만하게 해야한다는 Spencer의 견해를 잘 반영한 것으로 볼 수 있다. 이상의 결과를 종합하여 볼 때 절편 측면의 토압 경사각을 고려하여 경사함수  $f(x)$ 를 sine이나 trapezoidal로 가정한 경우, 사면의 core와 yellow clay의 평균강도가 Peak상태일 때는 안전율이 각각 1.301과 1.316으로 파괴를 설명할 수 없으며, 평균강도가 이미 전단변위를 받은 상태와 한계상태 일 때는 1.061과 1.076 및 1.025와 1.039로 안전율이 1.0 근처의 값들을 나타냈다. 그리고 residual 상태일 때는 안전율이 0.676과 0.685로 1.0보다 상당히 작아지는 것으로 미루어 보아서 활동파괴시 core와 yellow clay의 평균강도는 한계상태로 규정될 수 있다.

#### 4. 사면의 활동파괴 원인

사면이 불안정하게 되는 원인은 여러가지가 있을 수 있으나 Terzaghi(1950)[7]는 그 원인을 외적인 요인과 내적인 요인으로 나누어 제시하였다. 외적인 요인으로는 강우로 인한 토체 무게의 증가와 전단강도의 감소, 침식등에 의한 토피 하중의 제거, 우수에 의한 침식때문에 발생하는 지형의 기하학적 변화 등을 들고 있으며, 내적인 요인으로는 물의 침투로 인한 침식과 풍화작용등을 제시하고 있다.

이상의 요인들을 바탕으로 현재 문제가 되고 있는 Carsington dam의 경우에도 불안정의 원인이 여러가지가 있을 수 있으나 여기서는 두가지로 압축하여 생각해 보기로 한다. 첫째, dam의 설계시 yellow clay층을 발견하지 못하여 사면의 설계시 yellow

clay의 강도대신 fill의 강도가 사용되어 활동면에 대한 안전율이 실제보다 크게 추정되었다는 것이다. 이것은 yellow clay가 한계상태에 있다고 볼 때 Morgenstern-Price 방법으로 시행한 yellow clay의 유·무에 따른 안정성 해석결과가 표.5에서 보듯이 상당히 큰 차이를 보이고 있다.

표.5 Yellow clay의 유·무에 따른 안전율의 변화

해석에 사용된 흙	Yellow clay	Fill
안전율, F	1.03 - 1.04	1.34 - 1.35

둘째로 강우로 인한 fill, core 및 boot 부분에서의 자중의 증가와 유효응력의 감소로 인한 전단강도의 감소를 들 수 있다. 한계상태에 있는 yellow clay가 존재하는 상태에서 dam이 물로 채워지기 전에 파괴되었으므로 강우전 core와 boot 부분에서의 간극수압비를  $r_u=0$  으로 보고 해석하였을 때와 사면의 활동 파괴시  $r_u$ 값을 이용했을 때 계산된 안전율의 차이는 약 0.4 정도로 이것 또한 상당한 차이를 보이고 있다(표.6).

표.6 강우 전·후에 활동면에서의 안전율

기후조건	강우 전, $r_u=0$	강우 후, $r_u \neq 0$
안전율, F	1.44 - 1.47	1.03 - 1.04

이상에서 서술한 요인들을 종합하여 보면 Carsington dam은 설계시, 전단강도가 상당히 작은 yellow clay의 존재를 예상하지 못하고 해석에 fill의 강도를 사용하여 안전율을 실제보다 크게 예측하였고, 주말에 내린 폭우로 인해 Dam 단면내의 전체중량은 증가한 반면 유효응력은 감소하여 강우 전보다 활동모멘트가 커지고 저항모멘트는 감소하여 Dam이 활동파괴를 일으킨 것으로 해석할 수 있다.

## 5. 요약 및 결론

Carsington 댐의 상류측사면의 안정해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) Bishop방법으로 설계시 예상한 토질특성과 원형 활동파괴면을 이용하여 사면안정

해석을 수행한 결과, 안전율이 1.2-1.3정도로 구해졌으며, 활동파괴가 발생할 것을 예측할 수가 없었다.

- (2) Morgenstern-Price방법으로 파괴후 발견된 yellow clay로 인한 비원형 활동파괴를 고려한 결과, 측면력이 trapezoidal함수와 sine함수로 가정한 경우에 대하여 적합한 해석을 수행할 수 있었다.
- (3) 사면의 활동을 지배한 yellow clay의 강도는 peak상태로는 파괴를 설명할 수 없었으며, critical상태의 강도가 이미 존재하였던 전단변위로 인한 강도와 유사하게 사면활동에 대한 안전율이 1.0 근처의 값들을 나타냈고 residual상태는 1.0보다 훨씬 작은 안전율 값을 나타내므로 활동파괴시 적절한 core와 yellow clay의 강도는 Critical상태로 규정될 수 있으며 이러한 강도는 실제 파괴가 일어나기 전에 상당한 변위가 이미 발생되고 있었다고 추정할 수 있다.
- (4) Carsington 댐은 이미 전단변위가 발생하였던 yellow clay가 존재하여 예측보다 활동을 지배하는 지반층의 강도가 감소하였고, 강우로 인하여 core 및 boot의 활동에 대한 안정성이 저하되어 활동이 일어난 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. 백영식, 사면안정(II), 대한토질공학회지, 1988, Vol.4, No.2, pp.74-104.
2. Bowles, J.E., Analytical and Computer Methods in Foundation Engineering, McGraw-Hill, 1974.
3. Duncan, J.M., and Wong, K.S., A Computer Program for Slope Stability Analysis with Circular Slip Surface (Microcomputer Version), Research Report No. UCB/GT/84-09, Civil Engineering, Berkeley, 1984.
4. Limit Equilibrium Analysis of Slope Stability by Morgenstern-Price Method, Research Report, Civil Engineering, Alberta, 1979.
5. Morgenstern, N.R., and Price, V.E., The Analysis of the Stability of Generalized Slip Surfaces, Geotechnique, 1965, Vol.15, pp.79-93.
6. Hamel, J.V., Morgenstern and Price Method of Slope Stability Analysis, Research Report, Civil Engineering, Pittsburgh, 1968.
7. Terzaghi, K., Mechanism of Land-Slides, Geological Society of America, Berkeley Vol., pp.83-123.



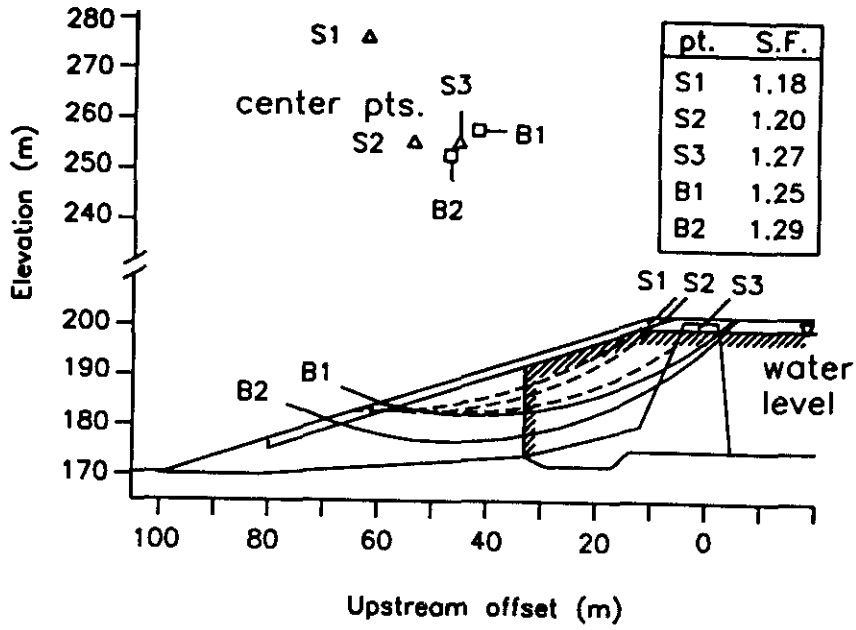


그림.1 원형활동면의 안전을 해석

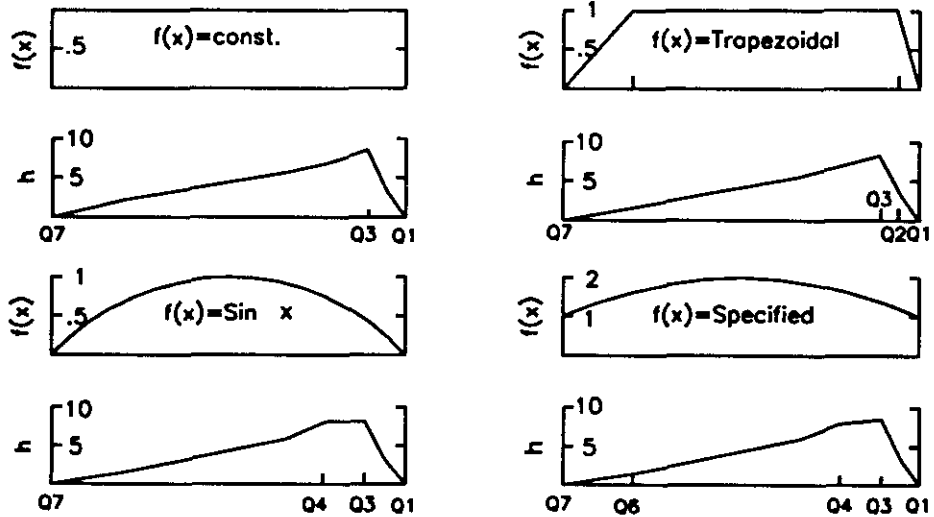
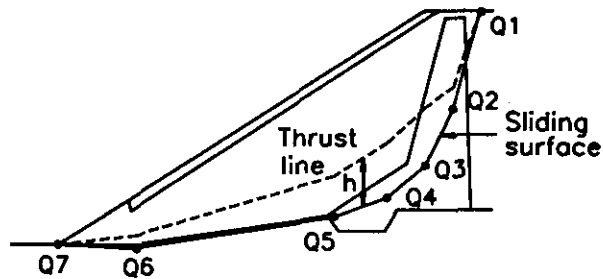


그림.2 경사함수  $f(x)$ 에 대한 토압 작용높이