

특정 사례사면 해석 결과 및 평가

서울대학교 교 수 김 명모

경기대학교 부교수 이 영생

육군사관학교 조교수 김 운영

Abstract

The slope stability analyses for Carsington dam were performed by using the computer program STABL and PC-SLOPE. The slip surface predicted by STABL can differ from the true slip surface. This is due to the characteristics of searching technique of the program STABL. Hence various possible potential slip surfaces must be examined using the program STABL. Various methods of analysis are employed in the program PC-SLOPE. A reasonable factor of safety can be obtained by comparing the various values, and the potential slip surface can be predicted well relatively. The shear strength parameters of critical or residual state must be investigated as well as the peak strength for the case of the Carsington dam, where the deformation took place over long periods.

1. 프로그램 개요

사용 프로그램은 미국 퍼듀대학교의 "STABL"과 캐나다 Geo-Slope사의 "PC-SLOPE"로서 이들에 대해 간략히 설명하면 다음과 같다.

1.1 STABL

미국 Purdue 대학에서 개발한 프로그램으로서

- 원호활동면에 대해서는 Bishop의 간편법을
- 일반활동면에 대해서는 Janbu의 방법을 사용하고 있으며 원호활동면으로부터 시작하여 임의 형상의 활동면까지의 단계를 거치면서 최소안전율을 갖는 파괴면을 추적한다.(6)

1.2 PC-SLOPE

PC-SLOPE는 퍼스날컴퓨터 전용 프로그램으로서 software system은 표 1과 같이 크게 3개로 구분되어 있다.

표 1 PC-SLOPE의 시스템 구성

성격	명칭	기능
pre-processor	PROMSL	자료 입력
main-processor	SLOPE	안정해석 실행
post-processor	DOT	결과 圖化

PC-SLOPE 에서 이용할 수 있는 해석법으로서는(1)

- Fellenius 방법
- Bishop의 간편법
- Janbu의 간편법
- Spencer 방법
- GLE(General Limit Equilibrium)방법
- Morgenstern-Price 방법
- Lowe-Karafiath 방법
- CoE (Corps of Engineers) 방법

이 있으며 이 중 앞의 세 방법은 기본적으로 자동계산된다. 선택할 수 있는 滑動形象으로는 圓弧滑動面(circular surface), 指定平面滑動面(fully specified surface) 및 원호 및 평면의 複合活動面(composite surface)이 있다.

2. 입력자료

斜面의 기하적 형상은 문제에서 주어졌으므로 생략하기로 하며 여기서는 안정해석에 사용된 토질특성을 요약하면 표 2 및 표 3 과 같다. 안정해석은 표 2의 ㉠~㉢ 와 같이 다섯가지 경우로 구분하여 실시하였다.

표 2 Core 및 Yellow Clay의 토질특성변화

경우	Condition	Core			Yellow Clay		
		c(kPa)	ϕ' (도)	r_u	c(kPa)	ϕ' (도)	r_u
㉠	Design	0	22	0.40	무시		
㉡	Peak, intact	15	21	0.42	10	20	
㉢	Peak, with pre-existing shear	6	20		5	17	
㉣	"Critical State"	0	20		0	18	
㉤	Residual	0	13		0	12	

표 3 설계에 적용한 토질특성치

Material	단위중량 (kN/m ³)	점착력 (kPa)	마찰각 (도)	간극수압비	
				경우 ㉠	경우 ㉡~㉤
Core	18.5	0	22	0.4	0.42
Zone I, II	21.0	0	25	0	0
"Boot"	18.5	0	22	0.5	0.53
Slope Protection	18.5	0	35	0	0
Weathered Mudstone	18.0	100	30	0	0

* 문제에서는 Yellow Clay의 단위중량이 주어지지 않았으므로 18.0 kN/m³으로 가정하여 사용하였다.

3. 계산 및 결과

3.1 STABL

STABL은 원호활동면에서 시작하여 임의형상파괴면에 이르기까지 예상파괴면의 단계적인 추적을 통하여 최소안전율을 산정하게 되어 있다. 표 2의 ㉠~㉡에 대한 안정 해석 결과를 표 4 에 나타내었고, 이 때 제시된 예상파괴면은 그림 1 과 같다.

표 4 STABL 에 의한 안정 해석 결과

	㉠	㉡	㉢	㉣	㉤
최소 안전률	1.170	1.141	0.981	0.960	0.776

다음으로는 그림 2와 같이 임의로 가정한 몇 개의 예상 파괴면에 대하여 해석한 결과를 표 5 에 나타내었다.

표 5 Specified Slip Surface에 대한 안정해석결과 (STABL)

	㉠	㉡	㉢	㉣	㉤
최소 안전률	1.210	1.183	0.977	0.943	0.743

3.2 PC-SLOPE

여기서는 PC-SLOPE를 사용하여 다음과 같이 두 가지로 구분하여 해석하였다.

- ① 원호활동 : 활동원의 중심점과 반경범위를 가정, Bishop의 방법에 따라 해석하였다
- ② 평면활동 : 황색점토층과 下部 암반의 효과를 고려, 일련의 평면으로 연결되는 파괴면을 가정하여 Morgenstern-Price방법과 Corps of Engineers방법에 의하여 해석하였다.

상기 ①, ②에 사용된 해석방법들의 가정과 안전율이 산출되는 한계평형식의 개념을 요약하면 표 6과 같으며, 그림 3 및 그림 4는 상기 ①, ②의 결과를 圖化한 예를 보여주고 있다.

표 6 해석방법들의 가정과 한계평형식

방법	가정	한계평형		
		모멘트 평형	수직력 평형	수평력 평형
Fellerius	neglect	O	X	X
Bishop ¹⁾	no ISF ³⁾ horizontal RIF ²⁾	O	O	X
Janbu ¹⁾	no ISF horizontal RIF	X	O	O
Morgenstern-Price	임의식에 의해 RIF작용방향 결정 $X/E = \lambda f(x)$	O	O	O
Corps of Engineers	사면평균경사를 RIF작용방향으로	X	O	O

1) Simplified Method

2) RIF : Resultant Interslice Force (절편측면의 전단력과 수직력의 합력)

3) ISF : Inter-slice Shear Force (절편측면의 전단력)

먼저 Slip surface를 원호로 가정하여 Bishop의 간편법에 따라 계산한 결과중 주요 사항을 요약하면 표 7과 같다.

다음으로 그림 4와 같이 예상파괴면(fully specified slip surface)에 대한 안정해석결과를 요약하면 표 8과 같다.

표 7 Bishop의 간편법 (원호 활동)에 의한 안정 해석 결과

경우	Critical Center		원호반경	최소안전률
	X 좌표	Y 좌표		
㉠	48.75	265.00	92.00	1.195
㉡	48.50	269.75	96.85	1.189
㉢	48.50	269.75	96.85	1.165
㉣	48.50	269.75	96.85	1.151
㉤	49.00	259.00	87.60	1.065

- 1) 경우 ㉠~㉤는 본문의 ㉠~㉤에 해당한다.
 2) 좌표 및 원호반경의 단위 : meter

표 8 Specified Slip Surface에 대한 안정 해석 결과 (by PC-SLOPE)

경우	PC-SLOPE가 자동적으로 계산하는 안전률			선택한 해석방법에 의한 안전률		
	Fellenius	Bishop	Janbu	해석방법	안전률	비고
㉠	0.804	1.020	0.896	M-P CoE 1 ¹⁾ CoE 2 ²⁾	0.990 1.006 1.050	
㉡	0.779	0.997	0.874	M-P CoE 1 CoE 2	0.969 0.982 1.027	
㉢	0.761	0.974	0.854	M-P CoE 1 CoE 2	0.944 0.959 1.002	
㉣	0.752	0.964	0.845	M-P CoE 1 CoE 2	0.933 0.948 0.991	
㉤	0.714	0.916	0.804	M-P CoE 1 CoE 2	0.880 0.897 0.938	

- 1) average slope between extreme entrance and exit of slip surface
 2) changing slope of ground surface

4. 결과 고찰

4.1 STABL

STABL 에 의한 계산 결과인 표 4 및 표 5 로 부터 관찰할 수 있는 주요 사항들을 기술하면 다음과 같다.

○ 土質 強度

표 2에서 보다시피 토질 강도는 ㉔에서 ㉔로 가면서 전반적으로 저하되고 있음을 볼 수 있는데 표 4 및 표 5 에서도 이에 비례하여 안전율이 낮아지고 있다.

○ 滑動面 形象

STABL에 의한 해석 결과는 그림 1 및 표 4 와 같은데 이것은 파괴후 관찰된 실제 파괴면형상과 약간 차이가 있다. 실제파괴면과 비슷한 형상으로 가정한 예상파괴면(그림 2)에 대하여 해석한 결과인 표 5를 보면 ㉔~㉔ 의 조건에서는 표 4의 경우보다 더 작은 최소안전율을 나타냈다. 이것은 STABL 프로그램의 특성상 표 5에 해당하는 파괴면(그림 2)은 추적되지 않기 때문이다. 따라서 이 프로그램을 사용할 때는 manual 에 의한 일반적인 방법으로 추적할 수 없는 여러가지 가상파괴면에 대해서도 적용해 보아야 한다.

4.2 PC-SLOPE

PC-SLOPE 에 의한 계산 결과인 표 7 및 표 8로부터 관찰할 수 있는 주요사항들을 기술하면 다음과 같다.

○ 土質 強度

STABL에서와 같이 강도정수의 감소에 비례하여 계산안전율도 저하하였다 (표 7 및 표 8 참조).

○ 滑動面 形象

표 7 의 圓弧滑動面이 표 8의 指定滑動面에 비하여 계산안전율이 다소 높았다. 이는 원호활동면의 경우 원호의 기하학적인 특성상 활동면이 Zone I, II 보다 토질강도가 상대적으로 낮은 "Boot" 및 薄層인 Yellow Clay를 통과하는 확률이 별로 없기 때문으로 생각된다. 따라서 이러한 지반조건의 경우 원호파괴면에 근거한 해석은 비현실적이라 하겠다.

○ 解析 方法

指定滑動面인 표 8에서 PC-SLOPE가 자동적으로 계산하는 안전률을 보면 Fellenius-Janbu-Bishop의 순으로 안전률이 커졌다. 즉 Fellenius의 해석 방법은 안전률을 過小 評價한다(2)는 지적이 여기에서도 드러나고 있음을 알 수 있다. 그리고 Bishop에 비해 Janbu의 안전률이 낮게 나타난 것은 Bishop의 원호활동면에 비해 Janbu의 경우 非원형활동면(non-circular slip surface)을 취하고 있는 만큼 위에서 논의한 활동면 형상의 영향에 그 원인이 있다고 보여진다. 안전율의 신뢰성이 좋은 M-P(Morgenstern-Price) 내지 CoE(Corps of Engineers)의 경우 兩者의 안전율 차이가 그리 크지 않음을 알 수 있고, 그리고 Bishop의 간편법이 이들의 안전율에 비교적 近似하고 있음을 알 수 있다.

5. 托의

백 영식(4)교수에 따르면 Carsington Dam에 대해 가용한 프로그램을 사용하여 안정 해석을 실시한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다고 한다.

프로그램명	프로그램 작성자	계산 안전률
STABL 5	Siegel (1975)	0.964
REAME	Huang (1983)	0.960
SSTAB II	Wright (1969)	1.090
MALE	Schffman and Jubenville (1975)	1.030

상기와 같이 동일한 조건을 입력하더라도 프로그램에 따라 안전률에 약간의 차이가 있음을 볼 수 있다.

De Mello(3)에 따르면 계산안전율 1.0 이 곧 사면파괴를 가르키는 것이 아니라고 지적하면서 실제 안전률에 상당한 영향을 미치는 요소로서 다음을 열거하였다.

- 지질적 문제 (minor geological details)
- 흙의 응력-변형 특성
- 간극 수압의 실제 분포 상태
- 초기응력상태
- 점진파괴(progressive failure)의 문제

문제 출제자는 위 요소들중 minor geological details에 대한 논의를 요구하고 있는데 출제자의 논문(4)에 따르면 “원래의 설계에는 Yellow Clay층은 분리된 토층으로 고려되지 않은듯 하며 파괴후의 정밀 조사 결과로 이 흙의 존재가 확인되었다. 본격적인 시험 결과 황색 점토와 코아의 강도는 미리 존재하고 있던 전단력과 전단변위에 의하여 영향을 받았음이 밝혀졌다”고 기술하고 있다.

위의 내용을 바꾸어 말한다면 본격적인 활동 파괴 이전에 이미 일종의 progressive failure 상태에 놓여 있었음을 시사한다. Progressive failure의 주원인 으로서는 그동안 non-uniform stress distribution을 생각하였으나 최근에 Skempton등에 의하여 peak strength로부터 residual strength로의 強度 감소 정도가 클수록 progressive failure 발생의 好條件이 된다는 사실이 제기되었다(5). 이러한 관점에서 볼 때 peak에서 residual까지의 강도 변화를 보면 Core Clay의 경우 ϕ 는 21도에서 13도까지, 점착력은 15 kPa에서 0 kPa까지, Yellow Clay의 경우 ϕ 는 20도에서 12도까지, 점착력은 10 kPa에서 0 kPa까지 크게 감소하는 특성을 나타내고 있는 점으로 보아 progressive failure가 발생하기 쉬운 흙임을 알 수 있다.

따라서 안정문제해석시 흙의 特定 강도특성치를 대입하여 계산된 안전율만을 가지고 안전여부를 논할 것이 아니라 上記현상의 가능성까지 생각해보는 즉, minor geological detail에 대한 검토가 필요하다. 이러한 측면에서 볼 때 Carsington댐의 경우 強度特性조사시 應力-變形특성을 면밀히 조사하여 progressive deformation에 의한 pre-existing shear의 발생가능성이 함께 검토되었어야 했다.

6. 결론

STABL과 PC-SLOPE에 의한 사면 해석으로부터 얻은 주요 결론은 다음과 같다.

- 일부 해석방법들을 제외하고는 전반적으로 각 해석방법간의 안전율 편차는 그리 크지 않음을 볼 수 있으며, 그리고 계산에 의한 역학적 안전성과 더불어 계산으로 드러나지 않는 안전률 영향 요소에 대한 평가의 중요성을 확인할 수 있다.
- 본 Carsington Dam의 경우 peak와 residual 간에 큰 차이를 보이는 응력-변형 특성, 이에 따른 progressive failure의 가능성, 폭우로 인한 간극 수압 및 유효 응력 상태의 변화등이 복합적으로 작용하여 파괴가 유발되었다고 보여진다.
- 절편 측면에 작용하는 힘을 무시하거나 간편화한 해석 방법보다 절편 측면에 작용하는 힘들을 고려한 해석 방법이 실제 안전률에 보다 近似함을 확인할 수 있다.

- 본 문제와 같이 암반과 軟弱 薄層이 존재하는 경우 원호 파괴면의 가정은 비현실적이며 이 중에서 특히 Fellenius 방법은 지나치게 안전률이 과소 평가됨을 확인할 수 있다.

참고 문헌

- (1) 권 호진, 변 광욱, “퍼스날컴퓨터용 사면안정해석 프로그램 「PC-SLOPE」의 소개”, 대한토질공학회, 제5권, 제4호, pp.69-75, 1989년
- (2) 백 영식, “사면안정 (II)”, 대한토질공학회, 제4권, 제2호, pp.74-104, 1988년
- (3) De Mello, V.F.B., “Reflections on Design Decisions of Practical Significance of Slope Stability Analysis”, Geotechnique, 27, pp.279-355, 1977
- (4) 백 영식, 김 일헌, 김 기웅, 양 우식, “事例 解析에 의한 斜面解析의 比較研究” 대한토질공학회, 제6권, 제2호, pp.47-54, 1990년
- (5) Chowdhury, R.N., Slope Analysis, Elsevier Scientific Publishing Company, 423p, 1978
- (6) R.A.Siegel, Computer Analysis of General Slope Stability Problems, JHRP-75-8, School of Civ.Eng.,Purdue Univ.,1975

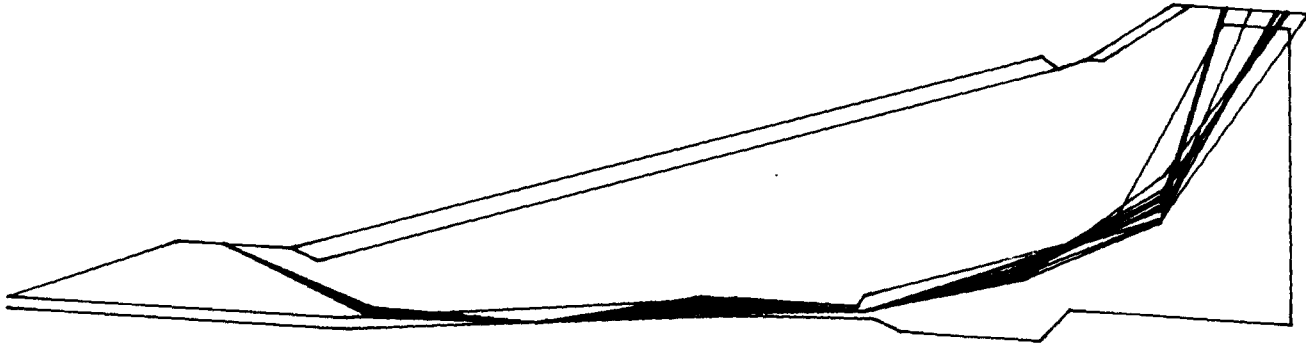


그림 1 프로그램이 추적한 예상파괴면 (STABL)

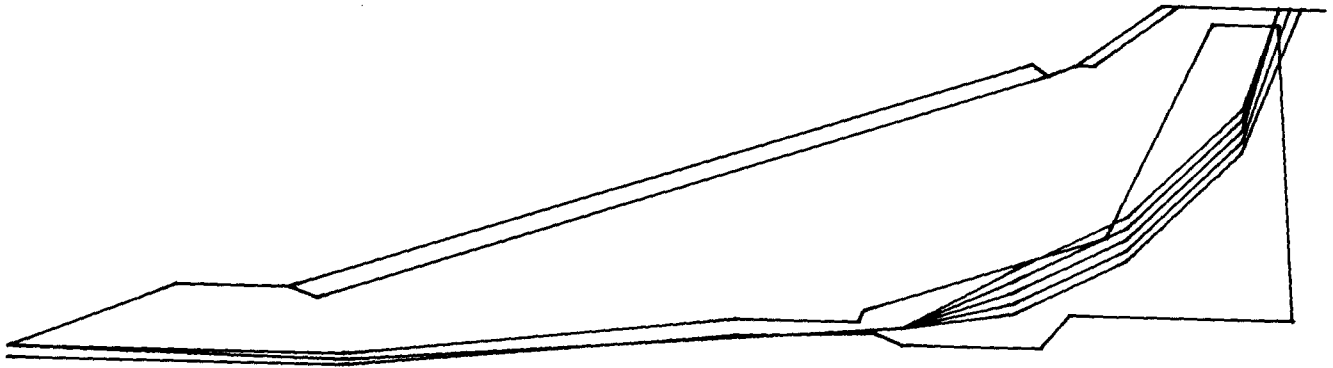


그림 2 임의로 가정한 예상파괴면 (STABL)

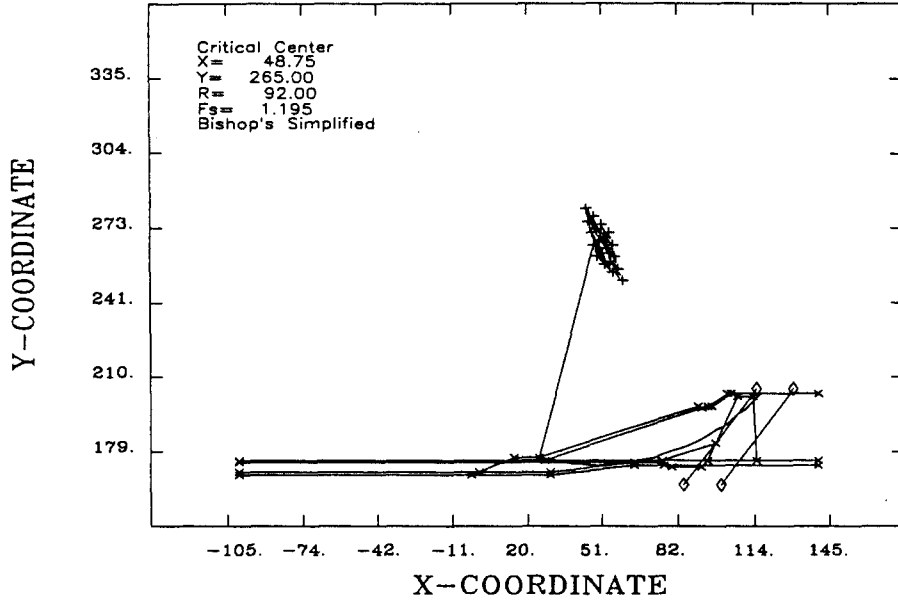
CROSS-SECTION OF GEOMETRY

CARSINGTON DAM FAILURE

ONE

AUG. 17, 1991

GENERAL LIMIT EQUILIBRIUM METHOD



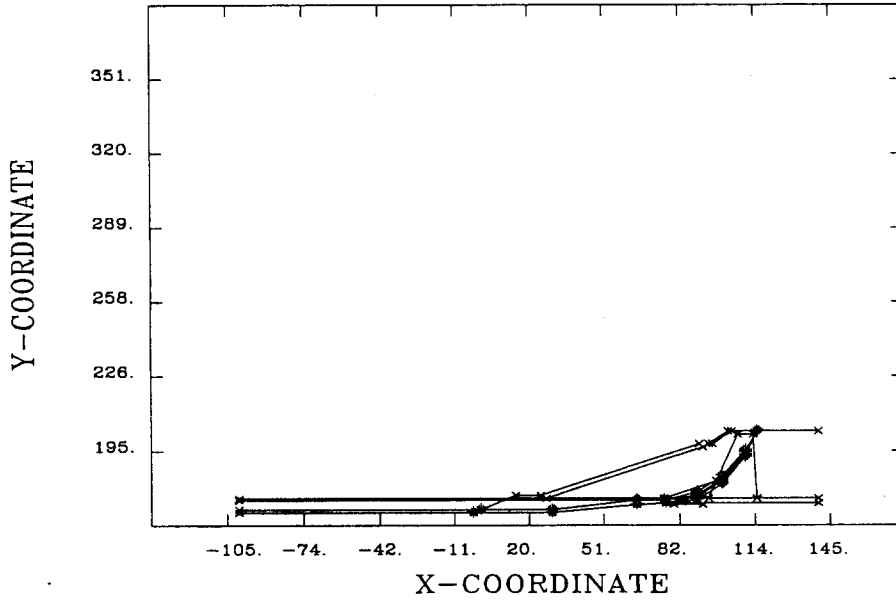
UNIT WEIGHT	COHESION	PHI	DESCRIPTION
18.50	.00	35.00	SLOPE PROTECTION
21.00	.00	25.00	ZONE I AND II
18.50	.00	22.00	CORE
18.50	.00	22.00	BOOT
21.00	.00	25.00	ZONE I AND II
18.00	100.00	30.00	MUDSTONE

File name : CCCC-1.SET

그림 3 PC-SLOPE에 의한 斜面解析결과에 : Circular Slip Surface

CROSS-SECTION OF GEOMETRY

CARSINGTON DAM FAILURE
 ONE AUG. 17, 1991
 GENERAL LIMIT EQUILIBRIUM METHOD



UNIT WEIGHT	COHESION	PHI	DESCRIPTION
18.50	.00	35.00	SLOPE PROTECTION
21.00	.00	25.00	ZONE I AND II
18.50	.00	22.00	CORE
18.50	.00	22.00	BOOT
21.00	.00	25.00	ZONE I AND II
18.00	100.00	30.00	MUDSTONE

File name : A11.SET

그림 4 PC-SLOPE에 의한 斜面解析결과에 :Fully Specified Slip Surface