

# Carsington 댐의 사면안정 해석

Slope Stability Analysis of Carsington Dam

손 준 익\*1 안 상 로\*2

엄 용 섭\*2 홍 성 완\*3

---

## Abstract

In this paper the failure of Carsington Dam was discussed based on the informations reported in the first edition of Korean Geotechnical Society News. The causes of dam failure and its influences were evaluated based on the results of the slope stability analysis. The effects of the shear strain pre-existing in the yellow clay disclosed by the post-failure site investigation and the progressive nature of the dam failure were preponderantly evaluated.

Stability analysis was performed based on the proposed values of strength parameters characterizing possible field ground conditions at failure. The calculated safety factors were evaluated for different cases of strength parameters in order to find the most probable field ground condition at the dam failure.

## 요 지

본 논문에서는 지반공학 소식 창간호에 게재된 Carsington 댐의 파괴에 관하여 고찰 하였으며, 해석 결과에 근거하여 댐 파괴요인과 그 영향에 관하여 논술했다. 본 해석에서는 파괴후의 현장조사에서 나타난 황색점토층 내에 이미 존재하던 전단변위에 대한 영향과 이 연약점토층을 통과하는 파괴면의 진행성 파괴상황을 중점적으로 분석하였다. 가능한 현장조건을 대표하는 수치로 변화시켜 각 조건별 안전도 계산치를 비교하고, 댐 파괴시의 평균강도를 가장 잘 대표하는 현장 지반조건을 평가하였다.

---

\*1 정희원, 한국건설기술연구원 수석연구원

\*2 정희원, 한국건설기술연구원 연구원

\*3 정희원, 한국건설기술연구원 연구위원

## 1. 서론

댐 안전도 해석에 있어서는 가상 파괴면을 가정하여, 파괴 단면에 발생하는 전단력이 전단 저항력에 비하여 가장 큰 경우를 한계 평형 상태로 간주하여, 그때의 안전률을 구한다. 댐 파괴단면은 댐의 기하학적 형상과 재료의 비균질성에 따라 원호 혹은 원호가 아닌 불규칙한 형상이 될 수도 있다. 본 논문에서는 SLOPE 8R을 사용하여 Carsington 댐의 사면 안정 해석을 실시하였고, 해석 결과에 근거하여 댐 파괴 요인을 분석하였다.

Carsington 댐은 댐 하부에 불과 1 m 두께에 지나지 않는 연약한 황색 점토층이 존재하고 있었고, 이 연약한 점토층에 대하여 특별한 처리없이 시공하였던 것이 댐 파괴의 원인이 되었다(지반공학소식, 1991). 이 연약 점토층은 파괴 후 현장 조사에서 이미 전단 변형이 발생되었음이 발견되었고, 이 전단변형을 고려하여 4가지 현장 지반강도 조건을 제시하였다. 본 논문에서는 파괴시의 평균 강도를 가장 잘 대표하는 현장 지반 조건을 진형성 파괴 현상을 감안하여 평가하였고 폭우에 의하여 증가된 간극수압의 영향도 함께 분석하였다.

## 2. 해석 프로그램의 개요

본 연구에서 사용한 프로그램은 SLOPE 8R이다. SLOPE 8R은 1968년 California Berkerley 대학의 Stephen G. Wright에 의하여 개발되었으며, 1971년 Guy Lefebvre, R.M. Pylee, 그리고 J.M. Duncan에 의하여 보완되었다. 그 후 1983년 K.Wong에 의하여 P.C용으로 수정, 보완되므로써 현재의 2차원 사면안정 해석용 프로그램으로 완성되었다. 본 프로그램은 주프로그램 SLOPE 8R과 EFLAG, MESSAGE, CGXY, BISRIG, EFORCE, 그리고 THRUST 등 6개의 부 프로그램으로 구성되어 있으며, 비원호 파괴면의 안전률은 Spencer(1967)에 의하여 처음 제안되었으며 Wright에 의하여 비원호면을 고려할 수 있도록 확장되었다.

해석방법은 Spencer 방법을 이용하고 있으며, 원호 혹은 비원호 가상 파괴단면에서의 안전률을 구하는 프로그램으로 이질인 토층을 모델링할 수 있고, 각각의 절편에서 간극수압을 고려하여 해석할 수 있다.

본 해석 프로그램에서 사용되고 있는 Spencer의 해석 방법은 힘과 모멘트의 두가지 평형조건 방정식을 만족하도록 되어 있다. 절편 양측면의 힘은 서로 평행한 것으로 가정하고,  $\theta$ 의 초기치를 임의의 수치로 선택하여, 힘의 평형 조건과 모멘트의 평형 조건을 만족하는 안전률을 계산하여, 이들 안전률을 동시에 만족할 때까지 안전률과  $\theta$ 의 계산을 반복 수행한다. 활동면은 보통 원호로 하고, 흙의 자중  $W$  및 활동면에 연직으로 작용하는 힘  $P$ 의 작용선은 절편 저면의 중심을 지나는 것으로 가정한다. 또한 비원호 활동면에 대해서

도 적용이 가능하다. 그림 1은 Spencer방법에서 지정하고 있는 절편에 작용하는 힘들의 자유물체도와 힘의 다각형을 나타내고 있다.

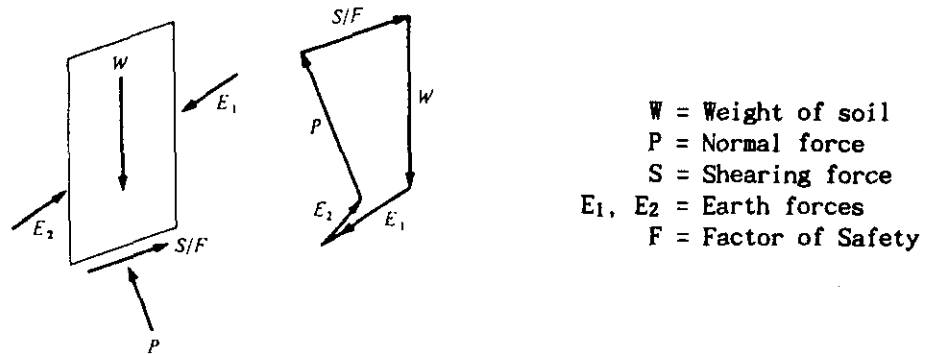


그림 1. 절편에 작용하는 작용력의 평형 조건(Spencer 법)

### 3. Carsington 댐의 파괴현상 고찰

Carsington 댐은 영국 잉글랜드 중부의 Derbyshire에 위치하고 있는 토사댐으로 길이 1200 m에 기초면으로부터의 최고 계획높이는 37 m이며, 댐 단면은 그림 1에 보인 바와 같다. 계획고 -1 m까지 성토가 끝난 시점은 1984년 6월 1일(금요일)이었고, 주말에는 폭우가 내렸다. 처음 사면활동이 시작된 시점은 6월 4일(월요일) 아침이었으며, 이때 상류측 사면 190 m 정도가 파괴되었다. 그 후 사면활동은 계속 서서히 진행되어 6월 7일(목요일)에는 500 m 정도의 연장에 걸쳐 파괴가 발생하였다.

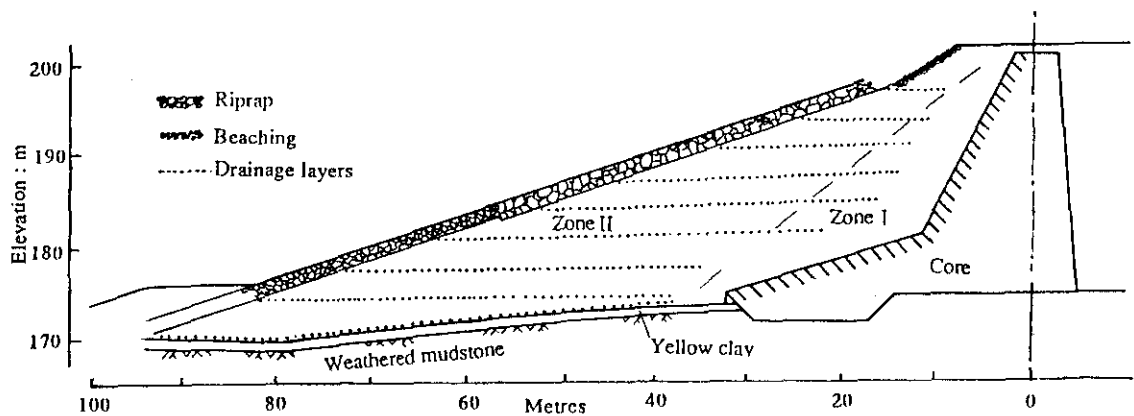


그림 2. Carsington 댐의 단면도

파괴후의 조사에서 댐파괴면의 형상은 그림 2와 같이 core, boot, 황색 점토층을 따라 댐 선단부까지를 통과하는 불규칙한 단면으로 나타났는데, 이는 통상적 사면안정해석에서 고려되는 원호파괴면과는 양상이 다르다. 이와 같이 비원호 형상의 파괴면이 발생되었음

은 댐체 하부에 연약한 황색점토층이 존재하고 있기 때문이었으며, 이 연약층은 파괴후의 조사에서 발견되었다.

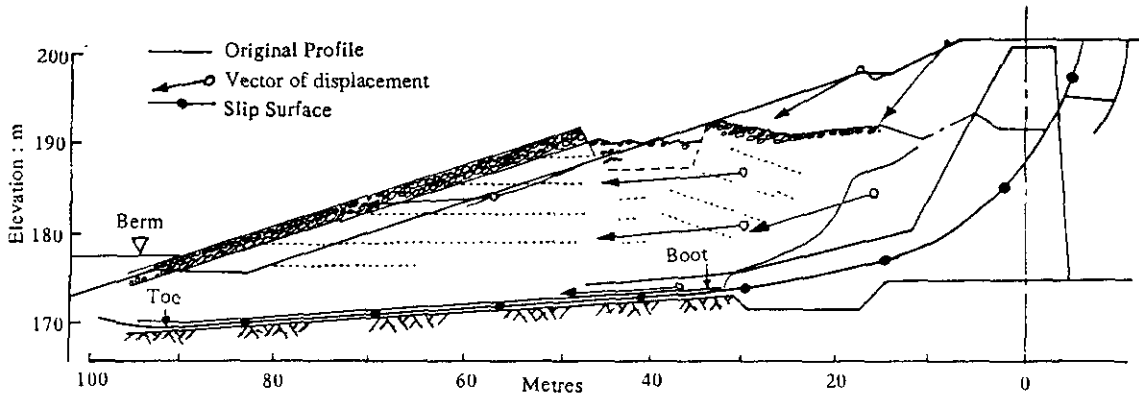


그림 3. Carsington 댐의 파괴후 단면도

이상의 파괴상황 개요로부터 댐 안전률에 영향을 미치는 가장 큰 요인은 두가지로 폭우에 의한 간극수압의 급격한 증가와 연약한 황색점토층의 존재임을 들 수 있다. 첫째, 6월 1일에 계획고 -1 m까지 성토가 끝난 상태에서 댐의 손상을 초래할 수 있는 특별한 징후가 보고되지 않았고, 주말에 폭우가 내린 후 2일내지 3일의 상당한 시간이 경과된 후에 상류측 사면활동이 시작되었다 함은 폭우에 의한 간극수압의 증가로 안전률이 저하되었고, 댐 붕괴가 시작되었음을 나타내 주고 있다. 둘째, 약 1 m 두께의 연약 황색점토층은 파괴후의 조사에서 발견되었고, 이 연약점토층은 성토 도중에도 조금씩 전단변위를 경험하고 있었음이 실험결과 판명되었다. 설계당시 황색 점토층을 고려하지 않았을 경우에 안전도는 충분히 크게 산출되었지만, 연약한 층을 따라 발생하는 파괴면을 고려할 경우는 그 안전률이 현저하게 저하된다.

폭우로 인하여 발생한 간극수압은 현장시험 결과로부터 구한 간극수압비 자료에 근거하여 산출할 수 있으며, 유효응력 감소로 인한 안전률의 감소효과를 간단히 분석할 수 있다. 그러나 황색점토층의 전단저항을 대표하는 물성치를 결정하는 것은 간단한 문제가 아니다. 실제의 댐 파괴단면을 따라 각 지점별로 응력수준과 전단변형률의 크기가 각기 다르므로 전체 파괴면에서 동시에 파괴가 일어날 수가 없고, 댐 선단하부의 연약 황색점토층에서 시작하여 점진적으로 코아 상부에까지 파괴면이 확산되었다고 생각할 수 있다. 따라서 댐 안전성 해석이 파괴현장조건을 잘 대표할 수 있으려면 이 진행성 파괴상황을 잘 모델링 할 수 있도록 재료의 물성치를 결정하는 것이 중요하다.

본 해석에서는 문제에서 제시된 5가지 현장지반 물성치 조건을 대상으로 안전도 계산을

실시하고, 그 결과를 비교분석 하였다. 또한 황색점토층과 코아 zone의 강도정수에 새로운 수치를 지정하여 안전도 계산을 실시하였고, 그 결과를 비교 분석함으로써 댐 파괴시의 평균강도를 가장 잘 대표하는 지반조건을 평가하고자 하였다.

#### 4. 댐 안전도 분석

##### 4.1 해석범위 및 댐 단면 분할

제시된 문제 개요에 따르면 Carsington 댐의 파괴는 시간이 지남(6월1일, 6월 4일, 6월 7일)에 따라 점진적으로 진행됨을 나타내고 있으나, 본 해석에서는 프로그램의 제한된 능력으로 시간의존적 파괴상황을 고려하지 않았으며, 단지 그림 2에 나타난 비파괴 상태의 댐 단면을 대상으로 한계평형상태의 안정해석을 실시하고자 한다. 또한 댐 안전도 해석에 있어서는 유효응력 해석과 전응력 해석의 두가지 개념이 있는데, 문제에서 제시된 재료의 강도정수는 유효응력 해석을 위한 수치이므로 안전률 계산은 유효응력 해석에 국한한다.

또한 댐 파괴 상황은 댐 단면의 형상과 댐 축방향의 파괴연장을 명시하며, 3차원적으로 묘사되고 있으나, 축방향의 파괴연장 차이는 댐 파괴가 점진적으로 일어나고 있음을 나타내는 정보로 간주하고, 단지 그림 2의 댐 단면에 의거하여 2차원적으로 해석하였다. 각 zone별 치수를 측정하여, 각점의 좌표를 구하고, 기하학적 형상을 결정하였으며, 각 zone을 적당한 수의 절편으로 그림 4와 같이 분할하였다.

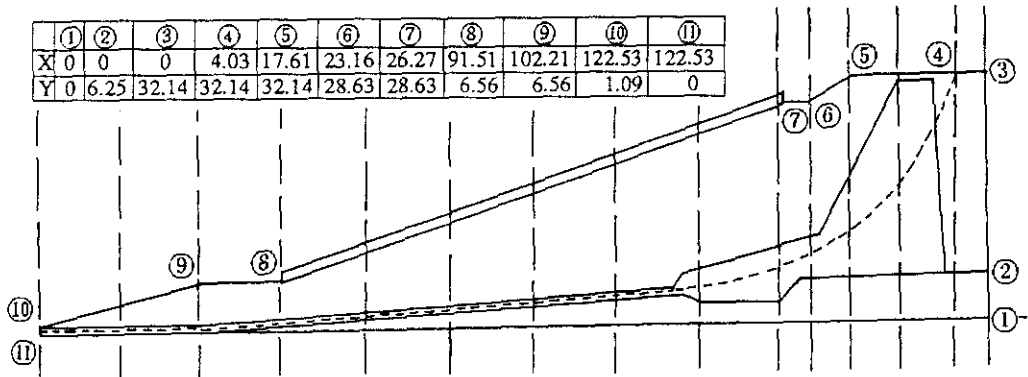


그림 4. 댐 안정해석을 위한 단면분할

##### 4.2 설계 조건에서의 안전도

문제에서 제시된 바와 같이 설계시에는 황색 점토층이 아직 발견되지 않은 상태이며, 단면 해석을 위한 댐 재료별 토질 물성치로는 표 1의 수치와 같다.

표 1. 댐 설계시 사용된 재료의 물성치

재 료	$\gamma$ ( t/m <sup>3</sup> )	C' ( t/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)	$r_u$
Core	1.90	0	22	0.4
Zone I and II Fills	2.16	0	25	0
Boot	1.90	0	22	0.5
Slope Protection	1.90	0	35	0
Weathered Mudstone	1.85	10.24	30	0

해석 결과는 표 2와 같이 요약되며, 최소 안전률은  $F_s = 1.44$ 에 해당된다. 따라서 설계시에는 댐 단면의 안전률은 충분하였음을 알 수 있다. 또한 절편 측면에 작용하는 힘의 방향각  $\theta$ 의 값은 약 15°로 계산되었으며, 이는 문제에서 제시된  $\theta = 10^\circ$ 보다 큰 값이다.

표 2. 댐 설계시 조건에서 계산된 안전률

조건	파괴원 중심점 좌표(m) (X)	좌표(m) (Y)	활동면 반경 (m)	안전률 $F_s$	$\theta$ (°)
1	66.14	64.04	61.93	1.4399	14.9
2	64.39	64.04	63.51	1.4649	14.9
3	66.14	67.55	63.69	1.5240	15.3
4	69.65	64.04	58.95	1.6955	15.4
5	66.14	60.53	60.18	1.5135	14.5
6	69.65	57.02	55.51	1.5141	14.4

#### 4.3 해석조건별 안전도 비교

문제에서 제시되었듯이 파괴후의 조사에서 황색점토층이 발견되고, 광범위한 실험결과 황색점토층의 강도는 이미 존재하던 전단변위의 영향을 받는 것으로 판명되었다. 이를 고려하여 문제에서는 총 4가지의 현장 지반조건을 제시하였는 바, 이미 존재하던 전단변형을 고려하여, core와 황색점토층의 강도정수 수치를 다소 변화시켜 표 3과 같이 각각 제시하였다. 간극수압비  $r_u$ 도 표 1과 약간의 차이가 있다.

표 3에 제시된 재료의 물성치는 유효응력 해석을 위한 수치들이다. 4가지 지반조건 of 물성치는 각 재료의 전단저항치를 각기 다르게 반영하고 있는데, 그 강도곡선은 그림 5와 같이 개념적으로 나타낼 수 있다. case 1의 peak, intact는 이미 존재하던 전단변형을 고려하지 않은 비 교란 시료가 변형경화(strain hardening) 상태의 정점에 도달할 때의 첨두치에 해당하는 전단강도를 나타내며, case 2의 peak, with pre-existing shears는 이미 존재하던 전단변형을 감안한 교란시료의 첨두치에 해당하는 전단강도를 나타낸다. case 4의

표 3. 해석조건별 재료의 물성치

case	조 건	Core			Yellow clay			Boot		
		$c'(t/m^2)$	$\phi(^{\circ})$	$r_u$	$c'(t/m^2)$	$\phi(^{\circ})$	$r_u$	$c'(t/m^2)$	$\phi(^{\circ})$	$r_u$
1	Peak, intact	1.53	21	0.42	1.02	20	0	1.53	21	0.53
2	Peak, with Pre-existing shears	0.61	20	0.42	0.51	17	0	0.61	20	0.53
3	Critical State	0	20	0.42	0	18	0	0	20	0.53
4	Residual	0	13	0.42	0	12	0	0	13	0.53

residual은 case 1과 case 2의 시료가 변형연화(strain softening)상태를 지속한 후 붕괴 직전에 발현되는 잔류전단강도를 나타낸다. case 3의 "critical state"는 극한상태(critical state)이론에서 제시된 파괴포락선 혹은 극한상태선(critical state line)의 기울기를 나타내는 강도 정수로 점착력은 영이 되며, 내부 마찰각은 case 4의 경우보다는 통상적으로 크게 나타난다. 여기에서는 case 1의 내부마찰각에 가까운 수치를 나타내고 있는데 다소 큰 것으로 여겨진다.

표 3의 해석 조건을 대상으로 댐 안정해석을 실시한 결과, 계산된 안전률은 각 조건별로 표 4와 같다. 안전률의 크기는 Case 1, 2, 3, 4의 크기 순으로 계산되었으며, 파괴 조건에 가장 가까운 안전률은 Case 3의 "Critical State" 조건으로  $F_s = 1.083$ 을 나타내고 있다. 각각의 해석 결과를 분석하면 다음과 같다.

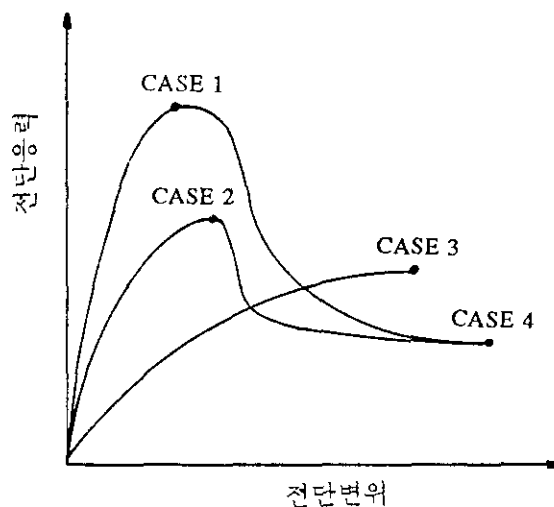


그림 5. 해석 조건별 물성치를 반영하는 강도곡선

표 4. 해석 조건별 안전률 계산치

case	해석 조건	안전률, $F_s$
1	Peak, intact	1.420
2	Peak, with pre-existing shears	1.136
3	Critical State	1.083
4	Residual	0.704

첫째, Case 1의 Peak, intact 조건은 현장 시험 결과에서도 판명되었듯이, 황색 점토층은 성토 도중에 이미 전단 변위를 경험하였기 때문에 현실적으로 현장 지반 조건에 부합되지 않는다. 안전률 계산에 있어서도  $F_s = 1.0$  보다 훨씬 큰 값이 계산되었다.

둘째, Case 2의 토질 특성조건은 이미 존재하고 있던 전단변위를 반영하고 있으나, 안전률은  $F_s = 1.136$ 으로 다소 파괴 조건보다 크게 산출되었다. 재료의 물성치가 현장 지반조건을 올바르게 반영한다고 가정할 경우, 이와 같이 안전률이  $F_s = 1.0$  보다 크게 계산된 것은 연약한 황색 점토층을 감안할 때에 진행성 파괴 현상에 기인됨을 생각할 수 있다. 댐 하부에서는 응력수준이 높고, 재료의 전단 강도가 낮기 때문에 먼저 파괴 시점에 도달하게 되고, 반면에 댐 상부에서는 응력 수준이 낮고, 전단 강도가 댐 하부에 비하여 높기 때문에 아직 전단 저항 최대치에 도달하지 않은 상태에서 댐 붕괴가 하부에서부터 일어나기 시작한다. 따라서 댐 파괴 단면은 댐 선단부 하부의 연약 황색 점토층에서 시작하여 점진적으로 댐 상부를 향하여 그림 3과 같은 형상으로 확산되었다고 생각할 수 있다.

셋째, Case 3의 "Critical State"는 시료의 파괴 상태 응력 조건을 대표하며, 통상적으로 침투 전단강도(시료 교란상태에 따라서 peak, intact 혹은 peak, with pre-existing shears)와 잔류 전단강도(residual) 사이의 값을 나타낸다. 따라서 Critical State는 비교적 현장 지반 조건을 대표하는 해석 조건으로 간주할 수 있으며, 해석 결과도 안전률이  $F_s = 1.0$ 에 제일 근사하게 나타났다. 그러나 안전률이 다소 1.0 보다 크게 나타났음은 앞에서도 언급하였듯이 내부 마찰각 수치가 다소 크게 결정됨에 기인한 것 같다.

넷째, Case 4의 Residual 상태는 시료의 극한 상태 이후의 잔류 전단강도를 나타내며, 댐 파괴가 완료된 후 파괴 단면을 따라 발전되는 전단 저항 조건을 대표한다. 따라서 Residual 조건은 진행성 파괴 상황을 감안할 때 최하 경제조건(lower bound)에 해당된다. 안전률은  $F_s = 1.0$ 에 비하여 매우 낮게 계산되었다.

#### 4.4 진행성 파괴에 의한 영향

진행성 파괴가 일어난 경우 파괴면을 따라 발전된 전단 저항응력 상태를 명확히 규명



하는 것은 매우 어렵고 거의 불가능한 일이다. 그러나 진행성 파괴의 메카니즘을 생각해 보면 파괴시에 발현된 지반 강도는 첨두 전단강도(peak strength)보다는 작고, 잔류 전단 강도(residual strength)보다는 큰 어떤 값이 될 것이다. 여기에서 첨두 전단강도란 시료의 교란 상태에 따라 peak, intact 조건 혹은 peak, with pre-existing shears 조건을 선택할 수 있다. Skempton은 London clay의 여러가지 사면붕괴 사례를 분석하여, 사면붕괴 면을 따라 발생된 평균 전단강도를 그림 6과 같이 평균 연직응력에 대하여 도시하였으며, 또한 이들을 실험실에서의 첨두 및 잔류 전단강도와도 상호 비교하였다(Lambe & Whitman, 1979). 그림에서 보이듯이 이 자료에서는 파괴시의 평균강도는 잔류전단강도에 더 가까운 수치를 나타내었다.

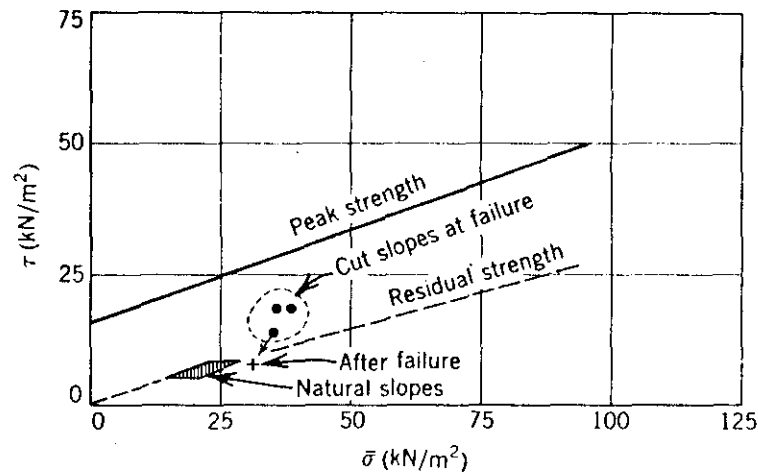


그림 6. Skempton의 사면전단파괴면에서의 평균 전단강도 자료(Lambe & Whitman,1979)

아무튼 Carsington 댐의 경우에는 진행성 파괴가 댐 체 하부의 연약 황색 점토층으로부터 시작하여 댐 상부로 발전되었다고 볼 때, 황색 점토층에는 잔류 전단강도에 가까운 지반 강도를, 댐 상부에는 첨두 전단강도에 가까운 지반 강도를 나타냄을 또한 생각할 수 있다. 이와 같은 점을 감안하여 해석 조건을 표 5와 같이 크게 두 종류로 구분하고, 각 종류별로 3가지 조건을 세분하여 각 조건별로 안전률을 계산해 보았다. 표 5에서 첫째 종류에서는 황색 점토층의 지반 강도 조건을 잔류 전단 저항 조건으로 고정시킨 후 core와 boot의 지반 강도 조건을 case 1, 2, 3의 것으로 변화시킨 조건들이며, 둘째 종류에서는 황색 점토층의  $c'$ ,  $\phi'$  값을 case 2 와 4의 평균치로 고정시킨 후 core와 boot의 매개변수는 앞에서와 같이 case 1, 2, 3의 것으로 변화시켰다.

표 5. 진행성 파괴의 영향 분석을 위한 해석조건 및 안전률 계산치

case	yellow clay	core/boot	안전률, $F_s$
4	residual	residual	0.704
4-1	"	case 1	0.900
4-2	"	case 2	0.827
4-3	"	case 3	0.788
5	(case 2 + case 4)/2	(case 2 + case 4)/2	0.918
5-1	"	case 1	1.054
5-2	"	case 2	0.980
5-3	"	case 3	0.940

표 5에서 제시된 해석조건별 안전률 계산치를 살펴보면, 황색점토층의 전단강도를 residual 상태로 간주할 경우 최대치는  $F_s = 0.900$ 이며, 최소치는  $F_s = 0.704$ 로 모두  $F_s = 1.0$ 에 미달됨을 알 수 있다. 이와같은 계산결과를 감안할 때, 황색점토층의 전단강도를 residual 상태보다는 더 큰 값으로 결정하여야 파괴가 일어나기 직전, 즉  $F_s = 1.0$ 에서의 강도조건을 나타낼 수 있다. 따라서 황색점토층의 전단강도를 residual과 Peak, with pre-existing shears조건인 평균치로 결정하고, core와 boot의 강도조건을 case 1, 2, 3의 것으로 변화시켜 본 결과 표 5에서와 같이 안전률의 계산수치는 case 5-2의 경우가  $F_s = 1.0$ 보다 약간 작으며 수치상으로 볼 때 가장 파괴조건에 가깝다 할 수 있다. 물론 황색점토층의 강도가 조금 더 작고, core와 boot의 강도가 조금 큰 상태에서  $F_s = 1.0$ 의 조건에 더 가까운 안전률이 계산될 수 있음을 생각할 수 있으나, 더 이상의 해석은 시도하지 않았다. 아무튼 case 5-2의 전단강도 조건은 파괴시의 평균 전단강도가 침투 전단강도와 잔류 전단강도 사이에 존재하고 있음을 보이며, 그림 6의 Skempton의 자료에서와 같이 유사한 경향을 나타내고 있다.

#### 4.5 폭우에 의하여 증가된 간극수압의 영향

6월 1일 이후 주말에 폭우가 내렸고, 월요일 아침에 사면활동이 시작되었다는 사실은 폭우로 인한 간극수압의 증가가 유효응력의 감소를 초래하게 되고, 이로 인한 전단강도의 감소가 파괴 요인으로 작용하였음을 생각할 수 있다. 따라서 본 해석에서는 각 해석조건별로 주어진 간극수압비  $r_u$ 의 값을 모두  $r_u = 0$ 의 조건으로 바꾸어 안전률을 계산한 후 비교하여 보았다. 해석조건별로 계산된 안전률은 표 6과 같다.

표 6에 계산된 바와같이 문제에서 제시된 지반조건 case 1, 2, 3, 4에서 residual조건을 제외하고는 모두  $F_s = 1.0$ 보다 훨씬 큰 안전률을 나타내고 있다. case 4의 안전률은  $F_s < 1.0$ 의 수치를 나타내고 있는데, 이는 간극수압의 증가요인을 고려하지 않아도 이미

표 6 간극수압의 유무에 따른 해석조건별 안전률

case	$r_u \neq 0$	$r_u = 0$
1	1.442	1.906
2	1.136	1.588
3	1.083	1.531
4	0.704	0.988
4-1	0.900	1.379
4-2	0.827	1.276
4-3	0.788	1.232
5	0.918	1.285
5-1	1.504	1.535
5-2	0.980	1.431
5-3	0.940	1.387

폭우가 내리기 전에 파괴조건에 도달되었음을 의미하는 것이므로 현실적으로 타당하지 못하다. 또한 파괴시의 현장 지반조건을 가장 잘 대표하고 있는 것으로 판명된 case 3 이나 case 5-2의 안전률은  $F_s = 1.531$ ,  $F_s = 1.431$ 로 모두 1.0보다 훨씬 큰 수치를 나타내고 있으며, 이는 폭우로 인하여 간극수압이 증가하기 전에는 댐 안전률이 충분히 큰 상태이었음을 알 수 있다.

여기에서 폭우에 의한 간극수압의 증가는 단기간 내에 이루어진 일이기 때문에 비배수 전단강도를 고려한 전응력 해석이 현실적으로 더 타당한 결과를 제공할 수 있으리라 판단되나, 본 문제에서는 전응력 해석을 고려하고 있지 않기 때문에 비배수 조건에서의 안전도 해석은 실시하지 않았다.

## 6. 결론 및 요약

본 논문에서는 Carsington 댐의 안전도를 분석하였으며, 현장지반조건을 대표하는 댐 재료의 강도정수를 다양하게 변화시켜 가며 해석조건을 구분하고, 각 조건별 안전도 계산치를 비교함으로써 댐 파괴요인과 그 영향에 관하여 분석하였다. 본 해석에서는 댐 하부에 존재하고 있는 연약한 황색점토층의 전단변형을 감안한 진행성 파괴에 의한 영향을 분석하였으며, 폭우에 의한 간극수압의 급증으로 인한 안전률 저하조건을 분석하였다. 해석 결과의 내용을 요약하면 다음과 같다.

1) 연약 황색점토층의 존재로 인하여 댐 안전도는 현저하게 감소함을 보였다. 점토층을 고려하지 않았을 경우에 안전률은  $F_s = 1.44$ 가 산출되었으며, 고려한 경우에는 문제에서 주어진 4가지 해석조건에서  $F_s = 0.704$ 에서  $F_s = 1.420$ 까지 산출되었다. 이중 가장 파괴

조건과 근사한 해석조건은 "critical state" 조건으로  $F_s = 1.083$ 을 나타내었다.

2) Carsington 댐의 파괴는 하부의 연약층의 존재로 말미암아 진행성 파괴가 발생하였음이 판단되어, 이에 따른 영향분석을 실시한 결과 황색점토층의 전단강도로는 실험실에서 구한 침투 전단강도와 잔류 전단강도의 평균치를 취하고, core와 boot의 전단강도는 critical state의 조건으로 간주할 경우가 가장 파괴조건에 근사한 결과를 나타내었다.

3) 폭우로 인한 간극수압의 증가로 안전률은 급격히 감소하였다. 이에 따른 영향분석을 실시한 결과 가장 파괴시의 현장 지반조건을 잘 반영하는 해석조건으로 판명된 "critical state" 조건에서 간극수압을 고려한 경우에  $F_s = 1.083$ 이었으나, 고려하지 않았을 경우에는  $F_s = 1.431$ 로서 충분히 큰 안전률을 보이고 있었다.

이상과 같은 결론은 해석조건별로 결정된 지반물성치가 현장 지반조건을 대표할 수 있다는 전제하에서 유효응력 해석을 바탕으로 이루어진 것이다. 또한 사용프로그램이나 해석이론의 가정사항 등을 감안할 때 계산된 안전률이 실제의 현장조건을 대표할 수 있다는 데에는 한계성이 있음을 전제로 하여야 한다.

#### 참고문헌

1. 지반공학소식(1991), "사례문제 I : 특정사례사면," 한국지반공학회 vol. 1, No.1, pp.2-3.
2. 백영식(1888), "사면안정(II)," 대한토질공학회, 제 4권 제 2호, pp.74-104.
3. Lambe, T.W. & Whitman, R.V.(1979), "Soil Mechanics, SI Version," John Wiley & Sons, pp.358-373<sub>000</sub>
4. Penman, A.D.M (1986), "On the Embankment Dam," Geotechnique 36, No.3, pp 303-348.
5. Potts, D.M, Dounias, G.T. & Vaughan, P.R. (1990), "Finite Element Analysis of Progressive Failure of Carsington Embankment," Geotechnique 40, No.1, pp 70-101.
6. Vaughan, P.R., Dounias, G.T. & Potts, D.M. (1989), "Advances in Analytical Technique and the Influence of Core Geometry on Behavior," Clay Barriers for Embankment Dams, Thomas Telford, London, pp.87-108.