

**사면 안정해석과 댐 거동 분석을 통한
Carsington Dam 파괴의 고찰**
(Assessment of Carsington Dam Failure by Slope Stability
and Dam Behavior Analyses)

송정락 (Song, Chung-Rak)* 김성인 (Kim, Sung-In)*
박광준 (Park, Kwang-Jun)* 유태성 (Yoo, Tai-Sung)*

*(주)대우엔지니어링

Abstract

It has been reported that the failure of Carsington Dam in England occurred due to the existence of a thin yellow clay layer which was not identified during the design work, and due to pre-existing shears of the clay layer. The slope stability analyses during the design work, which utilized traditional circular arc type failure method and neglected the existence of the clay layer, showed a safety factor of 1.4. However, the post-failure analyses which utilized translational failure mode considering the clay layer and the pre-existing shear deformation revealed the reduction of safety factor to unity. The post-failure analysis assumed 10° inclination of the horizontal forces onto each slice based on the results of finite element analyses.

In this paper, Bishop's simplified method, Janbu method, and Morgenstern-Price method were used for the comparison of both circular and translational failure analysis methods. The effects of the pre-existing shears and subsequent movement were also considered by varying the soil strength parameters and the pore pressure ratio according to the given soil parameters. The results showed factor of safety 1.387 by Bishop's simplified method(STABL) which assumed circular arc failure surface and disregarding yellow clay layer and pre-failure material properties. Also the results showed factor of safety 1.093 by Janbu method(STABL) and 0.969 by Morgenstern-Price method(MALE) which assumed wedge failure surface and considered yellow clay layer using post failure material properties.

In addition, dam behavior was simulated by Cam-Clay model FEM program. The effects of pore pressure changes with loading and consolidation, and strength reduction near or at failure were also considered based on properly assumed stress-strain relationship and pore pressure characteristics. The results showed that the failure was initiated at the yellow clay layer and propagated through other zones by showing that stress and displacement were concentrated at the yellow clay layer.

요지

영국 잉글랜드 지방의 Carsington Dam의 파괴원인은 설계시 발견되지 못한 댐 상류 사면 하부의 황색점토층의 존재와 이미 존재하던 전단변형에 기인한 것으로 보고되었다. 설계시 황색 점토층과 이미 존재하던 전단변형을 고려하지 않고 전통적인 원호파괴 양상으로 검토된 사면의 안전율은 1.4 이상으로 나타났다. 그러나 댐 파괴후 황색 점토층과 이미 존재하던 전단변형을 고려한 사면의 안전율은 약 1.0 으로 보고되었다. 또한 파괴후 사면에 대한 유한 요소 해석결과로 부터 파괴 토괴의 절편에 작용하는 수평력은 수평에 대해서 약 10° 아래로 작용하고 있음이 보고되었다.

본 고에서는 Bishop의 간편법과 Janbu 방법 및 Morgenstern - Price 방법을 이용하여 원호형 사면파괴양상과 특정 파괴면을 따라서 일어나는 쉐기형 파괴양상에 대하여 사면안정을 검토하였으며, 이미 존재하던 전단변형과 이에 따른 토괴의 연속적인 거동은 이미 주어진 지반 특성을 이용한 강도정수와 간극수압비에 의하여 고려하였다. 그 결과 황색 점토층을 무시하고 원호형 파괴 양상에 대하여 Bishop의 간편법에 의한 설계 시점에서의 안전율은 1.387 로 나타났으며(STABL), 파괴 후의 지반자료를 이용하고, 황색점토층을 고려한 안전율은 Janbu 방법의 경우 1.012(STABL), 그리고 Morgenstern-Price 방법의 경우 0.969을 보여주었다(MALE).

또한 Cam-Clay Model을 이용한 유한 요소 해석용 프로그램을 이용하여 댐 제체의 거동을 검토하였다. 이때 댐 제체의 성토 작업 및 압밀진행에 따른 간극수압변화와, 파괴시 혹은 파괴에 임박한 상태에서의 제체의 거동은 적절하게 가정된 지반의 응력-변형을 관계와 간극수압특성에 의하여 고려되었다. 그 결과 응력 및 변위가 심하게 발생하는 지역은 황색 점토층이었으며 이로부터 황색 점토층에서 부터 파괴면이 생성되어 다른 지역으로 전파되었음을 유추할수 있었다.

1. 서론

Carsington 댐은 계획고 37 M 로 영국 잉글랜드 지방에 건설예정이던 댐이며, 계획고에서 1 M 부족한 36 M 까지 시공된 1984 년 6월 7일 집중호우시에 댐 상부사면에 길이 약 500M 의 대규모의 파괴가 발생하였다. Carsington 댐의 파괴는 비교적 최근에 발생한 것이며, 그 파괴 원인으로서는 댐 제체 하부의 연약한 황색 점토층의 존재를 파악하지 못한때문인 것으로 알려져 있다(Penman, 1986)⁸). 그러나 정확한 원인 규명은 London의 Imperial College 등에서 광범위한 실험과 이론적 해석으로 아직도 진행되고 있는 상태이다(Potts et al. 1990)⁹). 또한 Carsington Dam의 파괴는 지반공학이 가장 잘 발달한 국가중의 하나인 영국에서 발생하였다는 측면에서 이에 대한 고찰은 국내외의 기존 댐과 장래 건설될 댐의 안정해석을 위하여 매우 유익한 일일 것이다.

본 고에서는 기존의 문헌상에 나타난 Carsington 댐의 파괴 연구자료와, 비교적 널리 알려져 있는 사면 안정해석 프로그램인 STABL 과 MALE 을 이용하여 Carsington 댐의 파괴를 재 고찰 하였다. 또한 댐 제체의 사면 해석뿐만 아니라 Cam-Clay Model 에 근거한 유한요소 해석 프로그램을 이용한 댐 제체의 총체적 거동해

석을 통해서 Carsington 댐의 파괴 사례를 보다 심층적으로 살펴보았다. 또한 사용된 프로그램의 결과를 비교함으로써 프로그램의 특성들을 고찰하고자 하였다.

2. Carsington 댐의 일반사항

기존 문헌상에 나타난 Carsington 댐의 형상 및 일반사항은 표 1 및 그림 1 과 같다.

표 1. Carsington 댐의 일반사항

항 목	내 용				
제체의 계획고	37 M				
파괴 발생년월일	1984 년 6월 7일				
설계시 사면 안정해석을 위한 지반조건	Material	Unit Weight (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	r _u
	Core	18.5	0	22	0.4
	Shell	21.0	0	25	0.0
	Boot	18.5	0	22	0.5
	Riprap	18.5	0	35	0.0
	Mudstone	18.0	100	30	0.0
*제체 하부의 연약한 황색점토는 발견되지 않음 *r _u =수압/상재하중(전응력)					
파괴후 조사에 의하여 밝혀진 지반조건	Condition	Core		Yellow Clay	
		c'(kPa)	ϕ'	c'(kPa)	ϕ'
	Peak, intact	15	21	10	20
	Peak, with pre-shears	6	20	5	17
	"Critical State"	0	20	0	18
	Residual	0	13	0	12
	Material	r _u			
Core	0.42				
Boot	0.53				
Yellow Clay	0.00				
파괴 이유	<p>.설계시 댐 제체 상부사면 하부의 연약한 황색점토(Yellow Clay)를 발견하지 못함</p> <p>.댐 건설로 인하여 하부 점토에 발생한 전단변위를 고려치 않음</p> <p>.위의 2 가지 주요 이유로 인하여 설계시 수행된 원호 파괴 양상의 파괴면이 실제 파괴면(Wedge Failure Surface)과 차이가 있음.</p>				

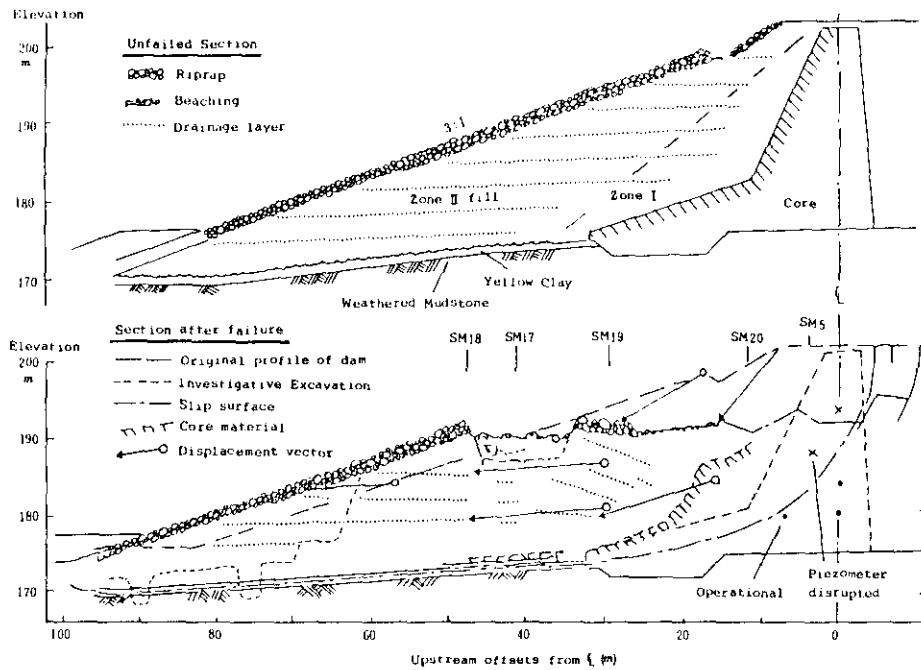


그림 1. Carsington 댐의 파괴형상

3. 사면안정해석

사면의 활동을 해석하는 방법은 유한요소법과 같은 수치해석법을 이용하여 지반의 변형을 고려하는 탄성 혹은 탄소성 해석과, 파괴가 발생하는 임계면에서의 역학적인 평형관계만을 해석하는 한계 평형해석법으로 대별되며, 그 종류만도 십여개가 넘는 것으로 알려져 있다(Wright, 1969)¹³⁾. 그런데 유한요소법과 같은 수치해석법은 실제로 사용이 어렵고 해석시간이 많이 소요되므로 해석이 비교적 용이한 한계 평형해석법이 실용적으로 널리 사용되고 있다.

한계 평형해석 이론은 Coulomb 이론에 기초하며 본질적으로 $2n-2$ 차의 부정정 방정식이 되며 이의 해법은 적절한 가정을 통하여 이루어지고 Bishop(1954)¹¹⁾, Morgenstern & Price(1965)⁷⁾, Spencer(1967)¹¹⁾, Janbu(1968, 1973)^{4, 5)} 등은 각각 다른 가정을 도입하여 사면 안정해석법을 개발하였다.

즉 Bishop(1954)¹²⁾은 Fellenius의 절편법(일명 Swedish Slice Method)을 수정하여 원호 파괴양상의 사면에 대하여 절편 사이의 수직력을 무시하는 가정을 도입하였으며(그림 2에서 $X/E=0$), Morgenstern & Price(1965)⁷⁾는 비원호 파괴사면에 대하여 절편 사이의 수평력과 수직력과의 관계를 일정한 함수로 가정하였으며(그림 2에서 $X/E=\lambda f(x)$), Spencer(1967)¹²⁾는 비원호 사면에 대하여 절편사이의 수평력과 수직력이 일정한 비율을 취한다고 가정하였으며(그림 2에서 $X/E=\tan\theta$), Janbu(1973)⁵⁾는 비원호 사면에 대하여 절편사이의 수평력과 수직력을 무시하거나(Janbu's Simplified Method) 혹은 수평력의 작용점을 가정하였다(Janbu's Rigorous Method) (Fredlund et al., 1977)³⁾.

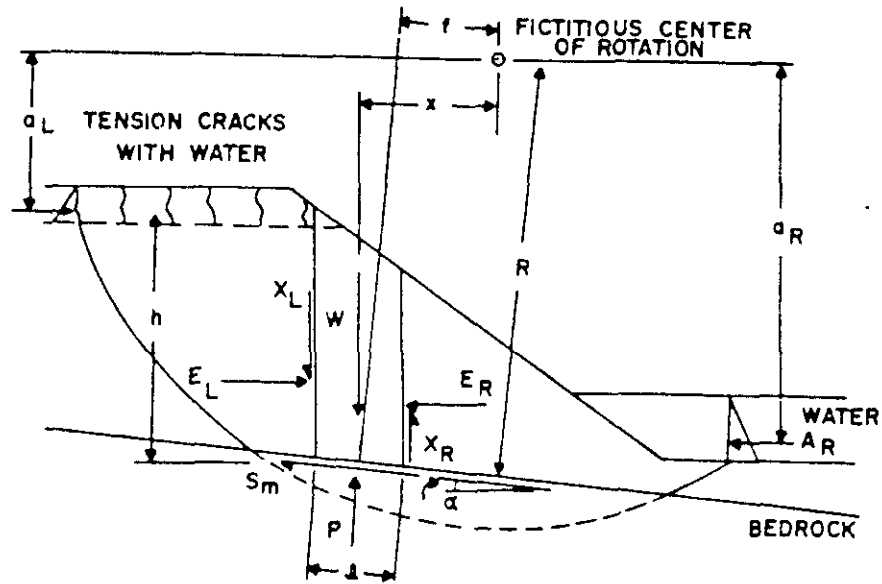


그림 2, 절편에 작용하는 힘

이중 Spencer 의 방법은 모든 절편에 대하여 X/E 의 비율을 일정한 것으로 가정하였으므로 Morgenstern & Price 방법의 특수한 경우 ($f(x)=1$, $\lambda=\tan\theta$)와 같은 것임을 알 수 있다.

이후 Carter(1971)²⁾는 각 절편에서 $\Delta X=0$ 으로 가정했을때 전체 모멘트 평형과 각 수직력 평형을 충족시킴으로서 결정되는 안전율은 전체 모멘트 평형이 충족되는 점의 위치에 따라 변한다는 사실에 근거하여 Janbu 이론에서 발전된 새로운 방법을 제시하기도 하였다.

본 고에서의 사면 안정 해석은 사면 안정해석용 컴퓨터 프로그램인 STABL과 MALE을 사용하여 수행되었다. 이때 표 1 에 나타난 설계 시점 및 댐 파괴후 조사 결과 밝혀진 자료를 이용하여 각 경우별로 사면 안정해석이 수행되었다.

프로그램 소개

STABL : STABL 은 SIEGEL 에 의해 1975년 개발된 사면 안정 해석용 프로그램이며 (Siegel, 1975)¹¹⁾, 원호형 파괴면에 대하여는 Bishop(1954)¹⁾ 의 간편법을, 쉐기형 파괴에 대하여는 Janbu(1968)⁴⁾ 방법을 사용한다. 간편한 사용법으로 인하여 가장 널리 사용되는 사면 안전 해석용 프로그램중의 하나이다.

MALE : MALE 은 Colorado 대학(Boulder) 에서 1972년 개발된 사면 안전 해석용 프로그

램으로(Shiffman, 1972)¹⁰⁾ Morgenstern-Price(1965)⁶⁾ 방법을 사용하여 쉐기형 파괴에 대한 사면 안전율을 계산하며, 한번에 여러개의 파괴면에 대하여 사면 안정을 검토할수 있는 특징이 있다.

Program 의 능력 및 특징 : 본고에서 사면 안정의 해석에 쓰인 Program 의 능력 및 특징은 표 2 에 나타난바와 같다.

표 2. Program 의 능력 및 특징

항 목	Program 이 름		
	STABL	MALE	FEM PROGRAM
파괴단면의 예측능력	원호형 파괴 단면 및 비 원호형 파괴 단면 모두를 예측할수 있다.	비 원호형 파괴 단면에 적용되며, 파괴 단면을 사용자가 입력한다.	댐 체체의 전반적 응력 및 변위상태를 고려하므로 가장 정확한 파괴단면을 예측한다.
간극수압의 적용	정수위에 의하거나, 간극수압비(r_u)를 이용하여 간극수압을 적용한다.	정수위에 의하거나, 간극수압비(r_u)를 이용하여 간극수압을 적용한다.	정수위와, 지반재료의 포화도 등에 의하여 간극수압을 적용하며, 재료의 변형에 의한 과잉 간극수압도 계산한다.
절편의 수직면에 작용하는 토압의 영향	무시한다(Bishop). 토압의 작용점을 가정한다(Janbu).	절편에 작용하는 수직력과 수평력의 일정한 관계를 가정한다($X/E=\lambda f(x)$)	절편의 개념을 사용하지 않고, 지반의 응력 재배치에 의하여 수평력을 산정한다.
사용 이론	Bishop's Simplified Method Janbu Method	Morgenstern - Price Method	Extended Cam-Clay Model

STABL 에 의한 사면 안정해석

STABL 에 의한 사면 안정해석은 설계 시점에서의 안전율과 댐 파괴후의 조사 자료를 이용한 안전율로 구분되어 수행되었다. 설계 시점에서의 안전율은 기존 문헌을 참고하여 원호형 파괴양상과 이때의 지반 특성을 이용하여 산정되었다. 따라서 Bishop's Simplified Method를 이용하였다.

댐 파괴후 조사 자료를 이용한 댐 사면의 안정해석시에는 이미 파괴면의 형상이 비 원호임이 밝혀졌으므로 비원호 파괴양상과 여러 변형률 상태에서의 지반 강도를 적용하였다. 따라서 Janbu 의 방법을 적용하였다.

STABL 에 의한 사면 안정해석시 파괴면의 형상과 기타 일반사항들은 그림 3 과 같으며, 각 상태에서 강도정수를 적용한 결과는 표 3 과 같다.

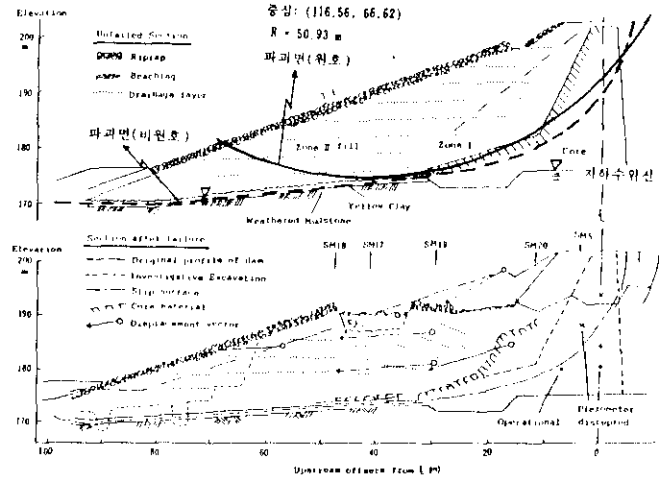


그림 3, STABL 에 의한 Carsington 댐의 사면 안정해석(Bishop 의 간편법)

표 3, STABL 에 의한 사면 안정해석 결과

Condition*	Safety Factor	Remarks
Design Condition	1.387	Circular (Bishop)
Peak, intact	1.304	Non-Circular (Janbu)
Peak with pre-existing shears	1.211	Non-Circular (Janbu)
"Critical State"	1.066	Non-Circular (Janbu)
Residual	0.798	Non-Circular (Janbu)

* Soil parameters at each condition were used due to Table 1.

MALE 에 의한 사면 안정해석

MALE 에 의한 사면 안정해석 역시 설계 시점에서의 안전율과 댐 파괴후의 조사 자료를 이용한 안전율로 구분되어 수행되었다. 설계 시점에서의 안전율은 기존 문헌을 참고하여 원호형 파괴양상과 이때의 지반 특성을 이용하여 산정되었다. MALE 은 본래 비원호 파괴면에 대하여 개발되었으나, 파괴면을 원호로 지정하여 좁으로서 원호 파괴양상에 대하여 사면의 안전율을 계산하였다.

댐 파괴후 조사 자료를 이용한 댐 사면의 안정해석시에는 이미 파괴면의 형상이 비원호임이 밝혀졌으므로 비원호 파괴양상과 여러 변형률 상태에서의 지반 강도를 적용하였다.

MALE 에 의한 사면 안정해석시 파괴면의 형상과 기타 일반사항들은 그림 4 와 같으며, 각 상태에서 강도정수를 적용한 결과는 표 4 와 같다.

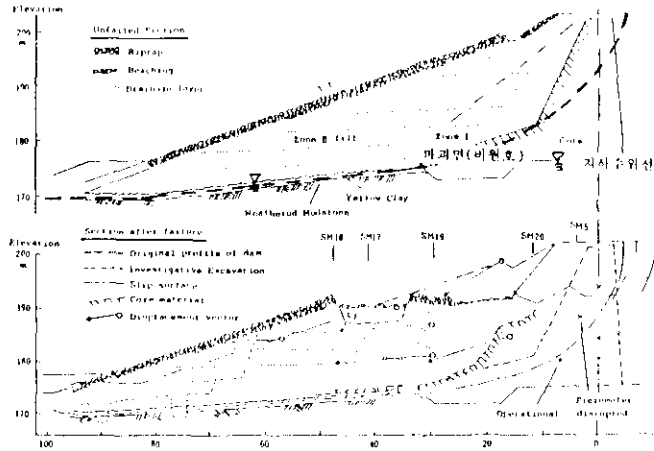


그림 4. MALE 에 의한 Carsington 댐의 사면안정해석

표 4. MALE 에 의한 사면 안정해석 결과

Condition*	Safety Factor by Spencer	λ	$f(x)$	Remarks
Design Condition	1.312	0.302	1	
Peak, intact	1.224	0.294	1	
Peak with pre-existing shears	1.156	0.312	1	
"Critical State"	0.969	0.282	1	
Residual	0.765	0.352	1	

* Soil parameters at each condition were used due to Table 1.

4. 댐 제체 거동분석

Carsington 댐은 그 계획고가 37 M로서 ICOLD(국제 대담학회) 분류에 의하면 대규모 댐에 속한다. 이와 같은 대규모의 사력댐은 그 제체에 발생하는 응력구조가 대단히 복잡하여, 미리 성토된 제체하부는 나중에 성토된 제체상부에 의하여 수직응력을 받게되어 제체하부에서 상당한 량의 변위가 발생하는등의 문제가 발생하며, 합리적인 거동해석을 위해서는 실제 시공단계별로 구별된 하중을 고려하여 댐 제체의 거동분석을 실시하는 것이 타당하다. 또한 지반의 강도 특성의 적용에 있어서도 응력-변형률 관계를 무시한 일반적인 전단강도를 적용시키기 보다는 변형률에 따라서 전단강도가 변하는 Strain-Softening 혹은 Strain-Stiffening 현상을 고려하는 것이 타당하다.

즉 댐 제체와 같이 대규모의 성토 구조물인 경우 하부의 지반은 상부의 상재하중에 의해 상당한 량의 변형을 경험하게 되며, 사면 파괴등이 발생하기 이전에도 그림 5 와 같이 제체 하부 지반과 제체 상부 지반은 강도 특성에 있어서 상당한 차이를 가지게 된다.

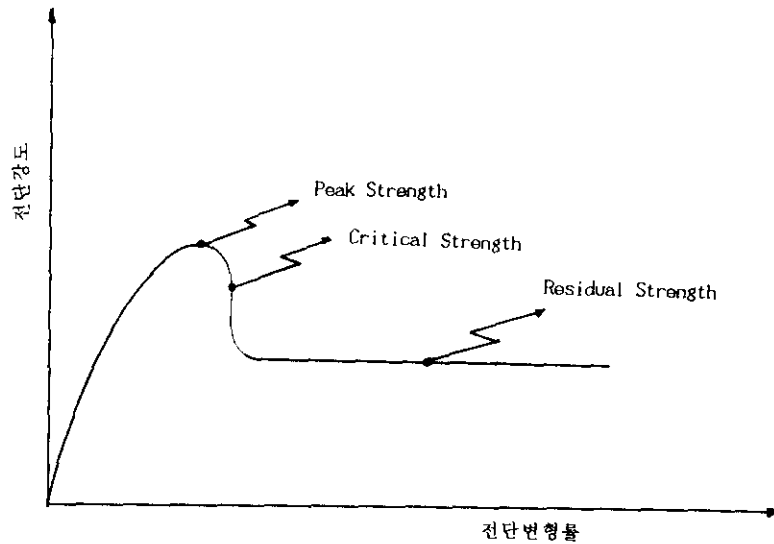


그림 5. 강도 특성과 변형률 관계

따라서 댐 제체의 정밀한 거동 분석은 전술한 강도 특성과 변형률과의 관계 및 지반의 압밀특성등 여러가지 문제를 복합적으로 고려해야하는 매우 방대한 작업이며, 본 고에서는 이러한 목적으로 이미 개발된 컴퓨터 프로그램을 이용하여 Carsington 댐의 파괴를 고찰하였다.

프로그램 소개

제체 해석용 유한 요소 Program : 제체 해석용 유한 요소 프로그램은 Duncan et al.에 의해 개발되었으며, Cam-Clay Model에 의한 포화도 및 불포화도에 대한 압밀해석과 유한 요소해석법을 통해 댐 제체의 거동을 분석하는 프로그램이며, Program의 특성 및 능력은 표 2에 나타난바와 같다.

거동 분석 : 제체 해석용 유한 요소 프로그램을 이용한 Carsington 댐 제체의 거동 해석은 설계시점과 댐 파괴후 현장조사에 의하여 얻어진 자료들을 사용하여 수행되었으며, 압밀특성에 필요한 자료들은 통상적 댐 제체에서의 자료와 유사한 특성으로 간주하여 수행되었다. 이때 가정된 지반 특성들은 표 5와 같다.

표 5. FEM 해석을 위해 가정된 지반의 특성

Material	K	P _r	M _t	k _v	k _h	S _o	e _o	S _f	P _{bra}	P _r '	M _t '	P _p	σ _t
Core	.003	7.2	1.51	4.454	.462	.1	.35	.74	100	7.2	1.51	0	3.0
Yellow Clay	.003	7.2	1.51	4.454	.462	.1	.35	.74	50	7.2	1.51	0	3.0
Shell	.004	7.6	1.55	10.310	9.08	.1	.45	.81	1000	7.6	1.55	0	3.0
Boot	.004	7.6	1.55	10.310	9.08	.1	.45	.81	1000	7.6	1.55	0	3.0
Riprap	.009	0.0	1.77	31500	31500	.0	.42	.49	1000	.0	1.77	0	0.0
Mudstone	.003	7.2	1.51	0.454	.962	.1	.35	.74	1000	7.2	9.51	99	3.0

- * $K=e-\log P$ 곡선의 비탄성 구간에서의 기울기
- P_r=Reference Pressure(t/m²)
- M_t=Strength parameter, slope of line describing variation of q_f with p'
- q_f=Deviatoric stress at failure(t/m²)
- p'=Effective mean normal stress(t/m²)
- k_v=Vertical permeability coefficient (m/year)
- k_h=Horizontal permeability coefficient (m/year)
- S_o=Initial degree of saturation
- e_o=Initial void ratio
- S_f=Degree of saturation for free drainage
- P_{bra}=Pressure at junction between two branches of failure envelope(t/m²)
- P_r'=Reference pressure for p' > p'_{break} (t/m²)
- M_t'=M_t with p' > p'_{break}
- P_p=Preconsolidation pressure(t/m²)
- σ_t=Tensile strength(t/m²)

또한 시공 순서에 따른 제체의 거동을 살펴보기 위하여 성토 하중을 9 단계로 나누어 시공하는것으로 현장 시공상태를 Simulation 하였다. 이미 존재하던 전단변위는 지반의 강도와 변형률 관계에서 고려되도록 하여 제체의 변위에 의하여 지반재료의 최대 전단강도와 잔류 전단강도가 모두 고려되는 Strain Softening 현상이 발생되도록 하였다. 이때 해석시 사용된 Mesh는 총 요소수 328 개, 총 절점수 364 개로 그림 6 과 같이 구성되었다.

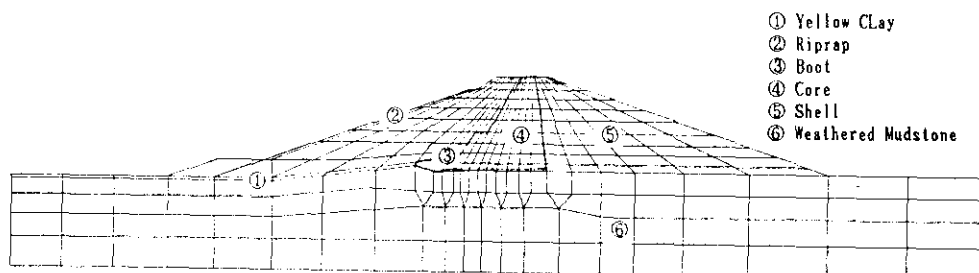
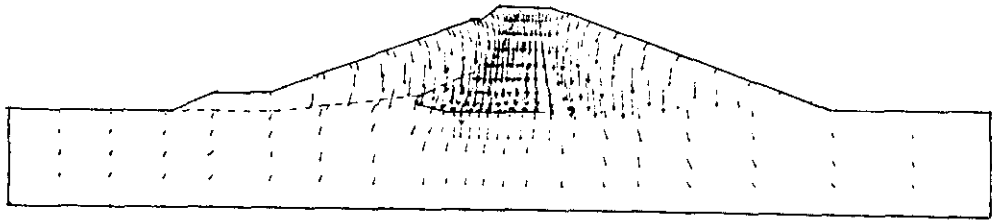
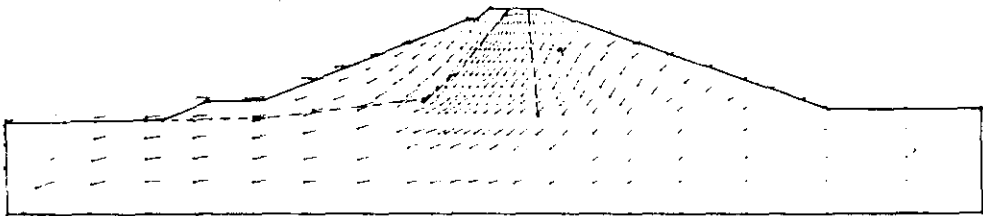


그림 6. FEM 해석을 위한 MESH

그림 7, 8, 9, 10 은 각각 FEM 해석에 의해 작성된 Carsington 댐 제체내 변위, 주응력 및 과잉 간극수압의 분포양상을 보여준다.

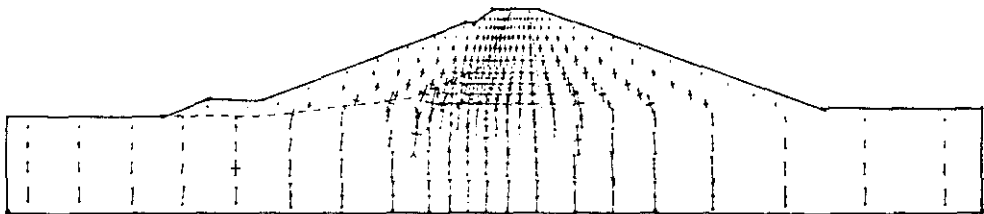


(a) 황색 점토층이 존재하지 않는 경우

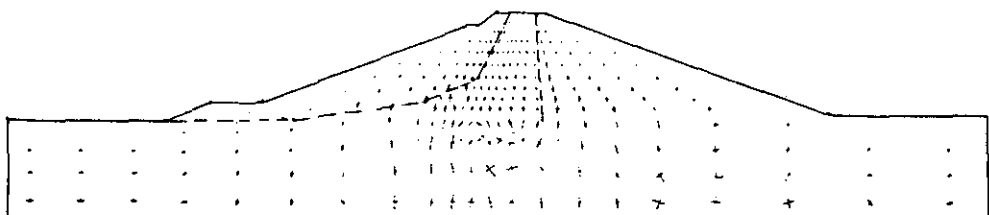


(b) 황색 점토층이 존재하는 경우

그림 7. FEM 해석에 의한 Carsington 댐 제체내의 변위 분포양상

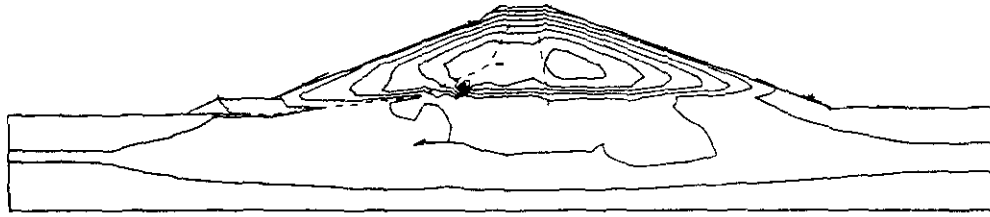


(a) 황색 점토층이 존재하지 않는 경우

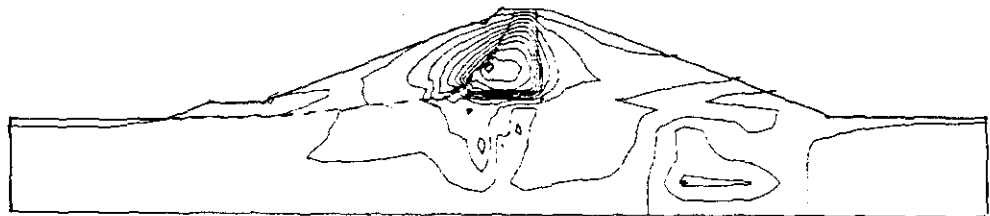


(b) 황색 점토층이 존재하는 경우

그림 8. FEM 해석에 의한 Carsington 댐 제체내의 주응력 분포양상



(a) 황색 점토층이 존재하지 않는 경우



(b) 황색 점토층이 존재하는 경우

그림 9. FEM 해석에 의한 Carsington 댐 제체내의 수직 변위

5. 결과 분석

STABL 의 결과 분석 : 그림 2 및 표 3 은 STABL 에 의한 사면 안정해석 결과이며, 이로부터 다음 사항을 알수 있다.

. Bishop's Simplified Method 를 사용하여 원호형 파괴단면에 대한 설계 시점에서의 사면 안정해석은 안전율 1.387 을 보여주었으며, 이 결과는 Penman(1986)⁸⁾의 결과(안전율 \approx 1.4)와 잘 일치하고 있다. 그러나 설계 시점에서의 사면 안정해석은 댐 제체 하부의 연약한 황색 점토를 무시한 관계로 파괴면이 연약한 황색 점토를 통과하지 않으며(그림 2 참조), 사용된 지반 특성 또한 파괴후 조사된 지반 특성과 다르다는 것을 감안하면 설계시의 사면 안정해석은 잘못된 조사사항으로 인하여 잘못된 결과를 초래하였다는 것을 알수 있다.

. 댐 파괴후 조사된 지반 특성을 사용하고 댐 제체 하부의 연약한 황색점토층을 고려한 사면 안정해석 결과중 Peak, intact 강도 특성을 이용한 경우의 안전율은 1.304 로서 비교적 높게 나타났다. 그러나 이 값은 댐 제체 하부에 존재하던 전단 변형을 무시한 지반 특성을 사용하여 산정되었으므로 실제의 안전율보다 크게 산정되었음을 유추할수 있다.

. Peak with Pre-existing Shear 강도 특성을 이용한 경우의 안전율은 1.211 로서 Potts et al. (1990)⁹⁾의 FEM 해석 결과인 안전율 1.2 와 매우 잘 일치

하고 있다. Peak with Pre-existing Shear 강도 특성은 파괴가 일어나기 전 실제 댐 체계의 안전율을 가장 잘 대표하는 상태이므로 파괴가 발생하기 전 Carsington 댐의 실제 안전율은 약 1.2 정도이었음을 유추할수 있다. 이 경우 안전율이 1 이상이므로 파괴가 발생하지 않아야 하나 파괴가 일어난 것은 성토사면의 Progressive 파괴에 기인하는 것으로 보고되고 있다(Potts et al. 1990)⁹⁾. 즉 황색 점토층과 같이 Pre-existing shear 의 영향을 받은 지역에서의 지반의 강도 특성은 Residual 강도 상태에 가깝고, 체계의 상부에서는 Peak Strength 상태에 가까우므로 지반의 전체적인 강도 특성은 Residual Strength 와 Peak Strength 의 사이에 위치하게 되어 전체적인 안전율은 1 이상이 될수 있다. 그러나, 댐 체계 하부의 연약한 황색점토등에서 파괴가 발생하게 되면 이에 인접한 지역에서 연속해서 파괴가 발생하게 되며, 이는 전체파괴로 이어지게 된다. 실제로 Carsington 댐의 중심부분(과거 물이 흐르던 강바닥 부근)에는 유수에 의해 연약한 황색점토가 씻겨 나가서 존재하지 않고, 중심에서 양안부로 가면서 황색점토가 약 1 m 정도 두께를 분포하는 것으로 조사결과 밝혀졌으며, 사면의 파괴는 황색점토가 존재하는 지역에서 먼저 발생하고, 가운데 중심부분은 측면이 먼저 파괴된 후 파괴된 것으로 보고되고 있다(Potts et al., 1990)⁹⁾.

.Critical State 강도 특성은 실제 파괴가 발생하고 있는 시점에서의 강도 특성으로(그림 5 참조), 이를 이용한 경우의 안전율은 1.066 으로서 이 상태에서는 파괴가 거의 임박하고 있거나 발생하고 있음을 나타낸다.

.Residual 강도 특성은 지반의 전단 작용을 받아 전단 변위가 충분히 발생하여, 추가적인 전단 변위에 의하여 전단강도가 변하지 않는 상태의 강도를 말하며, 사면 안정측면에서는 일단 파괴가 발생하여 토괴의 운동이 진행중인 상태에서의 파괴단면에서 발휘되는 지반의 강도 특성이다. 이를 이용한 경우의 안전율은 0.798 로서 1 보다 현저히 낮은 값을 보여주어 파괴후 몇개의 균열로 그치지 않고 파괴 토괴가 비교적 원거리까지 이동할수 있음을 보여주어 실제 댐 체계의 파괴 토괴가 수평거리 15m 까지 이동된 사실을 뒷받침한다.

MALE 의 결과 분석 : MALE 에 의한 사면 안정해석 결과는 표 4 에 제시된 바와 같으며, 전체적으로 STABL 의 결과와 유사한 추세를 보이고 있으며 그 값이 약간 작은 경향을 보여주어 안전측의 결과를 나타내고 있다. 그러나 그차이는 대개 5% 내외로 무시할 정도이다. 따라서 지반의 변형을 고려한 강도 정수와 안전율의 관계는 STABL의 경우와 동일할것으로 판단된다.

체계 해석용 FEM 프로그램의 결과 분석 : 그림 7 - 9 는 FEM 해석 결과이며 이로 부터 다음 사항을 알수 있다.

.그림 7 은 댐 체계내의 변위벡터의 분포를 나타내고 있으며, 변위 벡터는

댐 제체 하부의 연약한 황색점토층을 고려치 않은 경우에는 대칭에 가까운 변위벡터의 분포를 보여주나 황색점토층을 고려한 경우에는 황색 점토층이 있는 방향으로 전반적인 변위 벡터가 발생하며, 황색 점토층에서는 변위벡터의 방향이 황색 점토층과 나란하게 나타나는 현상을 나타내어 황색 점토층의 존재가 사면파괴의 주 원인임을 보여주고 있다.

.그림 8 은 댐 제체내의 주응력의 분포를 나타내고 있으며, 댐 제체 하부의 연약한 황색점토층을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우 황색 점토 부근의 주응력은 수직 방향이 되고, 황색 점토를 고려한 경우는 수평방향임을 보여 주어 황색 점토를 따라서 주응력의 재배치가 발생함을 알수 있다.

.그림 9 는 댐 제체 하부의 수직 변위의 등고선으로서 황색 점토층을 고려하지 않는 경우는 대칭에 가까운 양상을 보여주나 황색 점토층을 고려한 경우에는 Core 및 이와 연결된 황색점토 방향으로 변위가 집중적으로 발생하여 Core 및 이와 연한 황색 점토가 취약지역임을 보여준다.

6. 결론

Carsington 댐의 파괴는 이미 여러 문헌에서 연구되었으나 사면 안정해석과 댐 거동 분석을 동시에 수행한 본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻을수 있었다.

. 댐 사면의 안전율은 원호형 파괴의 경우 1.4 정도이나 썰기형 파괴의 경우 이보다 훨씬 작은 값을 나타내어, 사면 하부에 연약층에 존재하는 경우 썰기형 파괴를 적용하여야 한다.

. 지반의 변위에 따른 강도 전수를 적용 시킬경우 Peak with pre-existing shears 강도를 적용한 경우의 안전율이 1.2 정도로 산출되었으며, 이는 다른 연구결과와도 일치하여 파괴전 댐 사면의 안전율은 약 1.2 인것으로 나타났다.

. 안전율 1.2 에서 파괴가 발생한 것은 국부파괴에 이은 progressive failure 가 발생하였기 때문이다.

. 하부 황색 점토층을 고려한 썰기 형태의 사면해석에서 STABL 의 경우 안전율 1.211, MALE 의 경우 안전율 1.156 을 나타내어 MALE 이 약간 안전측의 결과를 나타내나 그 차이는 실질적으로 거의 없다.

. 파괴전 댐 사면의 안전율이 1.2 정도임에도 파괴가 발생한 것은 국부파괴의 전파에 의한 파괴 즉 Progressive 파괴에 의한 것으로 나타났다.

. FEM 해석 결과 댐 제체 하부의 연약한 황색점토가 있는 경우의 변위, 응력 등은 그렇지 않는 경우에 비교하여 현저한 차이를 나타내어 댐 파괴의 주 원인은 제체 하부의 연약한 황색점토층에 의한 것으로 확인되었다.

. 댐 제체에 대한 FEM 해석은 댐의 전체적 거동을 검토하는데 매우 유용한 도구이다

7. 참고문헌

1. Bishop, A.W. (1954). "The Use of The Slip Circle on The Stability Analysis of Slopes," *Geotechnique*, Vol. No. , pp.7-17
2. Carter, R.K. (1971), "Computer Oriented Slope Stability Analysis by Method of Slices," Master's Thesis, Purdue University, West Lafayette, Indiana
3. Fredlund, D.G., Krahn, J. and Pufahl, D.E. (1981), "The Relationship between Limit Equilibrium Slope Stability Methods," 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Vol.3, pp.409-416
4. Janbu, N. (1968). "Slope Stability Computations," *Soil Mechanics and Foundation Engineering Report*, The University of Norway, Trondheim
5. Janbu, N. (1973). "Slope Stability Computations," Published in *Embankment-Dam Engineering*, The Casagrande Volume, John Wiley and Sons, pp.47-86
6. Morgenstern, N.R. & Price, M.A. (1965). "The Analysis of The Stability of General Slip Surface," *Geotechnique*, Vol.15, No.1, pp.79-91
7. Nonveiller, E. (1965), "The stability analysis of slopes with a slip surface of general slope," 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.2, pp.522-525
8. Penman, A.D.M. (1986). "On The Embankment Dam," *Geotechnique*, Vol.36, No.3, pp.303-348
9. Potts, D.M., Dounial, G.T. and Vaughan, P.R. (1990), "Finite element of progressive failure of Carsington embankment," *Geotechnique*, Vol.40, No.1, pp.79-101
10. Shiffman, R.L. (1974), "MALE-I, A computer program to analyse the stability of slopes by Morgenstern Method," MALE-I Manual
11. Siegel, R.A. (1975), "STABL USER MANUAL," Purdue University & Indiana State Highway Commission

12.Spencer,E. (1967). "A Method of Analysis of the Stability of Embankments Assuming Parallel Inter-Slice Forces," Geotechnique, Vol.17, NO.1, pp.11-26

13.Wright,S.G. (1969), "A study of slope stability and undrained shear strength of clay shales", Ph.d. Thesis, University of California at Berkeley