

암반사면 안정성 평가 및 보강설계 Stability Evaluation and Reinforcement Design Method of the Rock Slope

안 윤 성 (Ahn, Yoon Sung)
김 연 중 (Kim, Yun Joong)

한국전력기술주식회사
한국전력기술주식회사

요약/Abstract

대형구조물 및 발전소 또는 도로, 철도 등 모든 산업 및 사회간접시설물을 건설할 때, 새롭게 영구사면들이 조성되며 이러한 사면에서 지질재해인 암반의 사면붕괴가 종종 발생한다. 붕괴된 사면은 붕괴원인 및 붕괴형태 그리고 안정성 평가를 위한 현장조사 및 실내시험을 통하여 붕괴모델링(Failure Modelling)을 설정하게 되며, 이에 따른 사면의 안전율을 구하고 설계 기준에 맞도록 사면을 보강하게 된다. 사면의 보강은 현장여건이 최대한 반영된 최적의 붕괴모델링이 요구되며, 이에 따른 보강공법으로는 사면 경사각을 낮추거나 사면을 보강 처리하므로써 안전율을 증가시키는 방법 등이 있다.

When most of the industry and social indirect facilities such as the large structure, power plant or road, rail-road are constructed, the new slope may lead to the slope failure. The failure models for slopes have been developed by using the results of in-situ and laboratory tests to investigate the mechanisms and types of the slope failure. The safety factor of a slope may be obtained based-on the proposed model and the slope can be reinforced to meet the design criteria. The slope should be reinforced by using the optimum model that properly reflects the site condition, the method of reinforcement includes the increased safety factor either by decreasing a slope angle or by reinforcing the slope.

서 언

지표지질조사

일반적으로 암반사면의 붕괴는 암반내에 발달한 불연속면(단층, 절리)과 사면 구성물질의 공학적 특성(점착력, 내부마찰각), 지하수 유동 및 분포상태, 지표수 유입 가능성 여부의 요인들에 의해 발생한다. 따라서 사면붕괴가 발생한 지역에 대한 붕괴형태와 발생원인을 파악하고 사면해석을 위한 기본자료들을 수집하여 붕괴모델링에 의한 안정성을 평가한 후 이에 따른 보강대책을 수립하게 된다. 본 논문에서는 표고 약 65m 정도의 산을 경사구배 1:1.5로 절취하여 형성된 암반사면의 붕괴에 대한 안정성 평가와 붕괴형태에 따른 보강설계 결과를 제시하였다.

조사 내용

영구사면에 대한 안정성 평가와 보강설계를 위하여 일차로 지표지질조사를 통해 붕괴형태와 발생원인 등을 추정하였고, 이차로 현장조사를 실시하여 붕괴형태에 따른 보강설계를 위한 자료 등을 수집하였다. 현장조사에서는 사면내 붕괴발생지역에서 6개 지점에 시추조사를 수행하였고, 채취한 토양 및 암석시료 등을 이용하여 실내시험을 수행하여 사면내의 지층상태(풍화암과 연암 경계선), 지질구조선(단층, 절리) 발달상태, 사면 구성물질의 공학적 특성, 지하수 분포상태 등을 파악하였다. 그리고 이들 자료를 근거로 최적의 붕괴형태를 모델링한 후 보강방법을 선정하여 설계, 시공하였다.

영구사면을 형성하기 위한 굴착과정에서 표고 50.0m 이상의 굴착사면 정상부에 층후 0.5m 내지 6.0m 범위의 느슨한 실트질 모래 등으로 구성된 풍화토층 내로 지표수가 유입되었으며 이로인한 간극수압 증대로 인장균열(Tension Crack)이 발생하였고, 변위 활동은 슬리큰사이드면을 따라 발생되어 상부 5단 Bench 및 4단 Bench 일부지역이 함몰되었다(그림 1). 특히 5단 Bench에는 벌어진 틈이 15~20cm, 깊이 1.5~2.5m 정도로 발달한 인장균열(Tension Crack)이 완만한 원호(Arc)형태로 형성되어 있고 활동체의 미끄럼(Sliding)으로 5단 Bench내에서 함몰된 깊이는 최대 30cm까지 나타나 있다. 변위된 활동면은 슬리큰사이드면으로 소규모 단층대(Minor Fault)가 형성된 지질구조선을 따라 붕괴가 발생하였다. 이같이 소단(Bench) 상단부에 형성된 함몰지점은 슬리큰사이드면을 따라 활동체가 경사면에서 수직 상승하여 형성되었고, 돌출 표면의 최대변위는 20cm 정도로 나타났다. 사면의 구성물질은 풍화토(실트질모래)로서 굳기정도는 중간조밀(Medium Dense)내지 조밀(Dense)하나 굴착면에 지표수 유입은 용이한 상태이다. 5단 Bench에서 활동한 암괴(Mass)의 거동은 4단 Bench 상단부와 경사면에 영향을 미쳐 5단 Bench에서 나타난 붕괴형태와 동일한 현상이 나타났고, 3단 사면의 경사면에는 부풀음(Buckling)현상이 나타나 있다.

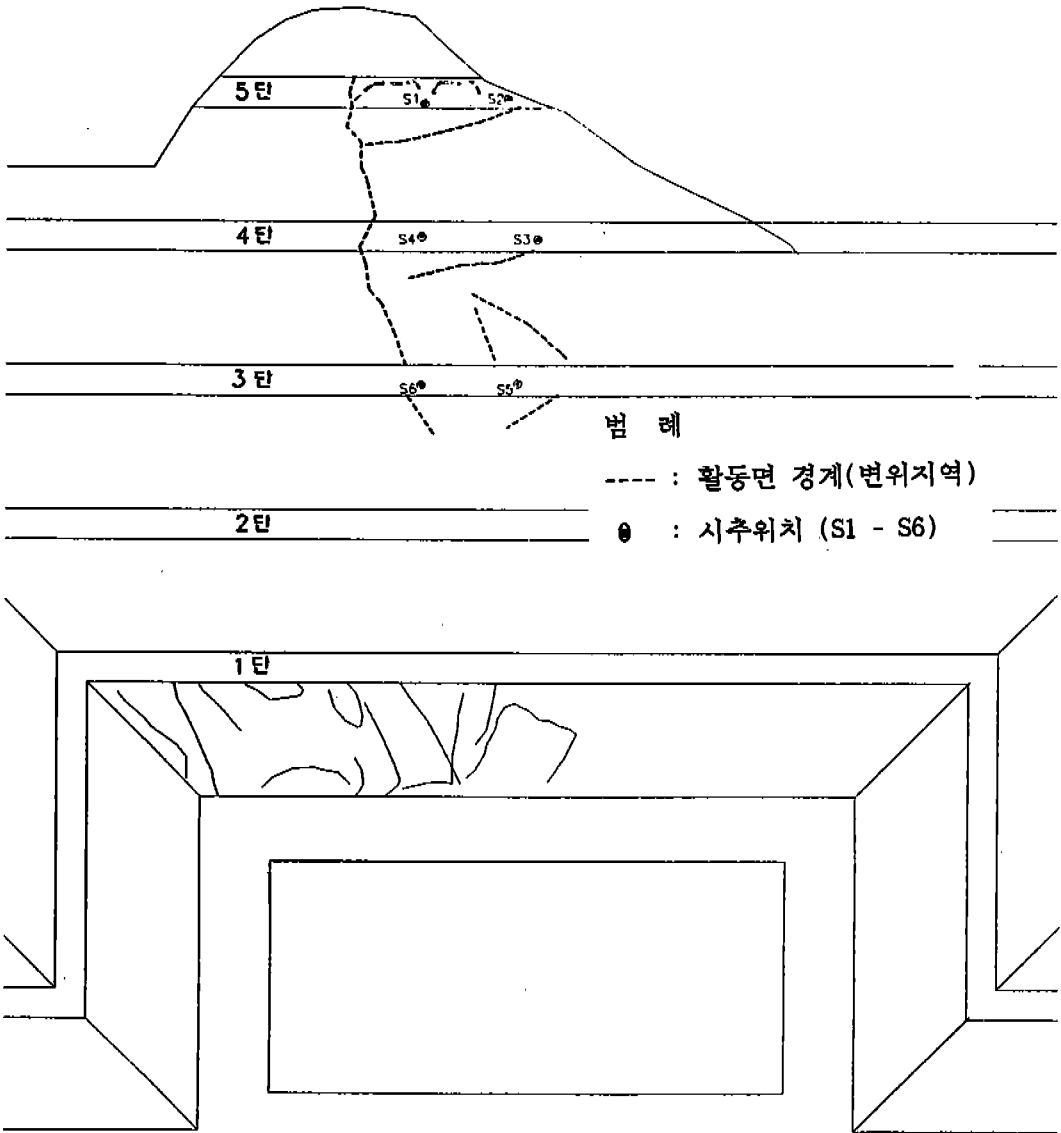


그림 1. 사면 붕괴지역 및 시추위치도

시추조사

일차 지표지질조사를 통해 얻어진 자료를 근거로 붕괴형태에 따른 사면붕괴 모델링을 위해 6개 지점을 선정하여 붕괴지역의 파괴

활동면 및 풍화진행상태 그리고 지하수위와 지질구조선 발달 등을 파악하기 위한 시추조사 및 표준관입시험을 실시하였다. 또한 채취한 토사 및 암석시료에 대하여 실내시험을 실시하여 풍화토 및 풍화암의 단위중량 그리

고 암석의 단위중량, 일축압축강도 및 인장강도 등을 구하였다.

사면내의 붕괴활동면과 지층발달상태 그리고 붕괴원인 등을 정밀하게 분석하기 위하여 풍화토와 풍화암 등의 시료를 거의 100% 회수가 가능한 시추장비를 투입토록 하였다. 따라서 투입된 시추장비는 삼중 코아바렐 (Triple Core Barrel)로서 내장된 튜브 (Inner Tube)내에 한정된 길이(1.0m)의 비닐주머니를 장착하여 비닐주머니 내부로 토사시료가 유입되도록 고안된 장비로서 매 1.0m마다 토양시료를 채취하는 방법으로 굴진하였다.

5단 Bench의 인장균열(Tension Crack)이 발생한 지역에 2개 지점, 4단 Bench의 함몰 지역에 2개 지점 그리고 3단 Bench지역의 2개 지점 등 총 6개 지점에 대하여 시추조사를 실시하였다. 이같은 시추위치는 5단 Bench에서 3단 Bench 하부지역까지 연결되는 붕괴형태가 지질구조선(단층, 절리면) 또는 토양층과 암반층의 경계선을 따라 평면 파괴 형태를 갖는 것으로 인지되어 각 소단 (Bench)에서 평면파괴의 활동면을 파악하기 위해 시추위치를 선정하였다.

시추조사 결과 각 지점에서 나타난 지층상태는 표 1과 같다.

표 1. 공별 지층상태

시 추 공	지 층 상 태				지하수위	비 고
	풍화토	풍화암	연 암	보통암		
S-1	0.0~3.0m	3.0~10.0m	—	—	9.2m이하	지하수위는 굴진후 48시간이 경과한 이후 관측된 자료이며 S-5, S-6 두 시추공은 7.0m까지 양수 후 측정된 자료임.
S-2	0.0~6.0m	6.0~10.0m	—	—	10.0m이하	
S-3	0.0~2.0m	2.0~6.0m	6.0~10.0m	—	6.6m이하	
S-4	0.0~3.5m	3.5~6.5m	6.5~10.0m	—	4.9m이하	
S-5	—	0.0~1.5m	1.5~10.0m	—	2.8m이하	
S-6	0.0~0.5m	0.5~3.5m	3.5~6.2m	6.2~10.0m	7.3m이하	
회수율		65%~100%	75%~100%	100%		
RQD			0%	20%~60%		

실 내 시 험

각 시추지점의 상부층에 분포하는 풍화토 및 풍화암은 시료성형이 불가능하여 물리적 특성인 단위중량만을 구하였다(표 2). 또한 암석시료로 이용 가능한 최소한 12cm 이상의 길이를 갖는 코아(Core)가 단지 S-6 시추공에서만 채취되어(1개시료) 이를 시험대

표 2. 사면활동체의 공학적 특성

구 분	단위중량 (g/cm ³)	내부마찰각 (φ, o)	점 착 력 (C,Kg/cm ²)
풍 화 토	1.85	21	0.37
풍화암(I)	2.11	29	0.43
풍화암(II)	2.36	29	0.55
기 반 암	2.60	40	1.29
활동파괴면	—	0	0.55

상으로 하였다. 시험결과, 풍화토의 단위중량은 2.11~2.18g/cm³ 범위를 가지며 풍화암은 2.36g/cm³, 연암은 2.31~2.49g/cm³ 값의 단위중량을 갖는 것으로 나타났다. S-6 지역에서 채취한 연암시료의 일축압축강도는 10.5kg/cm²로 매우 낮게 나타났고 인장강도 또한 5.1kg/cm²로 낮게 나타났다. 이같은 결과는 연암시료내에 발달한 미세균열 및 절리 등에 의한 영향으로 판단된다. 따라서 실내 시험의 결과치는 대상시료의 절대부족 그리고 일반 범주에 벗어나는 낮은 값으로 나타나 설계값을 선정하는데 단지 참고자료로 활용하였고, 풍화암의 단위중량만 실제 설계에 반영하였다.

분 석

예상파괴 활동면

5단 Bench 지역

인장균열이 폭 20~30cm 정도로 틈이 벌어져 있고 분리 이완된 틈새는 지표면 하부 1.5~2.0m 지점까지 연장되어 있다. 따라서 본 지역에 두개 시추공(S-1, S-2)을 배치하여 이같은 현상이 나타나게된 파괴활동면을 추정하였다. 시추결과, S-1 지역의 풍화토 층후는 3.0m로서 S-2 지역의 층후 6.0m 보다는 얇게 나타났다. 그러나 S-1 지역의 6.0~6.2m 지점에 얇은 점토층(Clay Seam)이 분포하므로 활동면으로 예상되는 지점은 S-2 지역의 풍화토와 풍화암의 경계지역, 그리고 S-1 지역의 점토층이 얇게 분포하고 있는 지점으로 가정하여 지표하 6.2m 지점을 파괴활동면으로 추정하였다. 이는 본 지

역이 절토사면 정상부에 인접한 지역으로 지표수 유입에 따른 지층내의 풍화토와 풍화암 경계지점에서의 유로(Flow Channel)형성 가능성과 이 지점에 분포하는 점토층이 활동면으로 작용할 수 있는 가능성을 고려한 것이다.

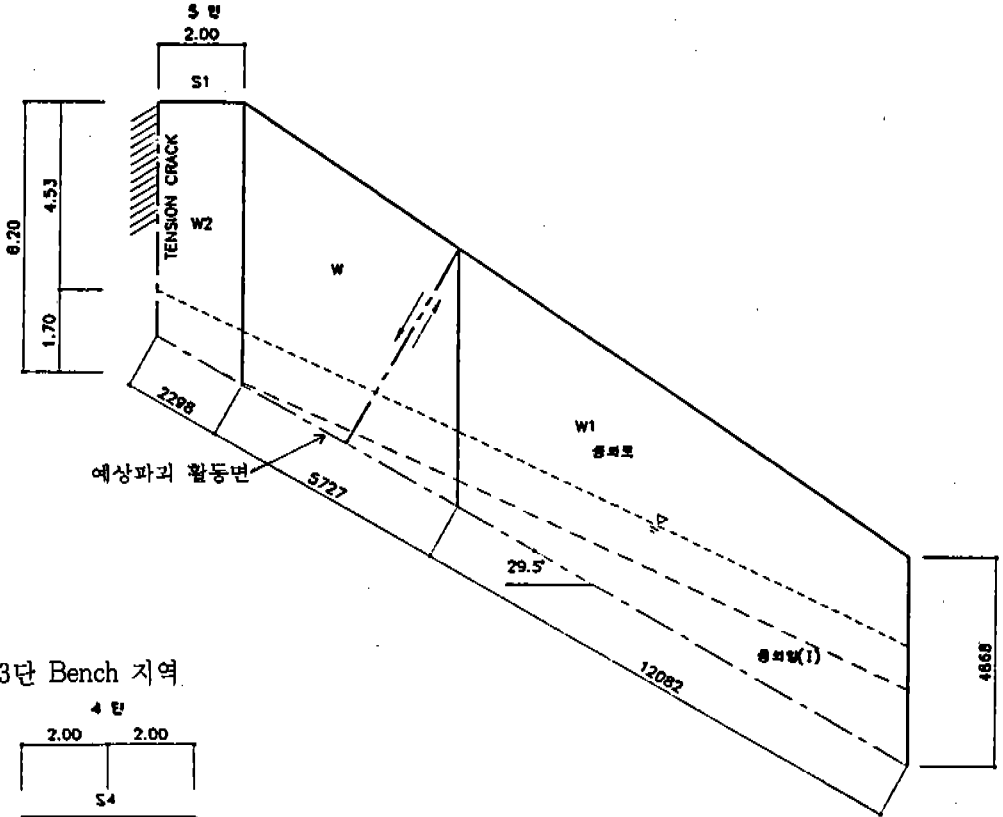
4단 Bench 지역

5단 Bench 지역으로부터 사면 붕괴활동이 연장된 지역으로 슬리큰사이드면을 따라 변위된 지역에 일부 함몰 지점이 나타난다. 4단과 5단 Bench 사이의 경사면에는 주향 N 60°E, 경사 60°NW 방향의 슬리큰사이드면을 따라 변위가 약 20cm 정도 발생하였고 그 연장성은 3단 Bench 지역까지 확장되어 있다. 본 지역에 배치한 두개 시추공(S-3, S-4)의 시추결과, S-3 지역에서는 풍화암층이 지표하 2.0m 지점부터 분포하나 지표하 4.1~5.0m 구간에서 코아회수가 매우 불량하고 굴진작업중 연약한 물질이 존재하는 것으로 인지되어 파괴활동면은 지표하 6.0m 지점의 풍화암과 연암층 경계부에 형성된 것으로 추정하였다(그림 2). 또한 S-4 지역에서는 지표하 6.5m 지점부터 연암층이 존재하나 5.0~5.8m 구간의 암맥(Dyke Rock)과 연암층과의 경계부에 점토성분이 협재되어 지표하 6.0m 지점을 파괴활동 가능 경계면으로 추정하였다. 따라서 4단 Bench 지역의 시추결과를 근거로 할때, 지표하 6.0m 지점을 파괴활동 가능 경계면으로 추정함이 타당한 것으로 평가하였다.

3단 Bench 지역

상부 5단 및 4단 Bench 및 경사면 지역에는 주향 N 30°~60°E, 경사 60°~80°NW

(1) 4단 Bench 지역



(2) 3단 Bench 지역

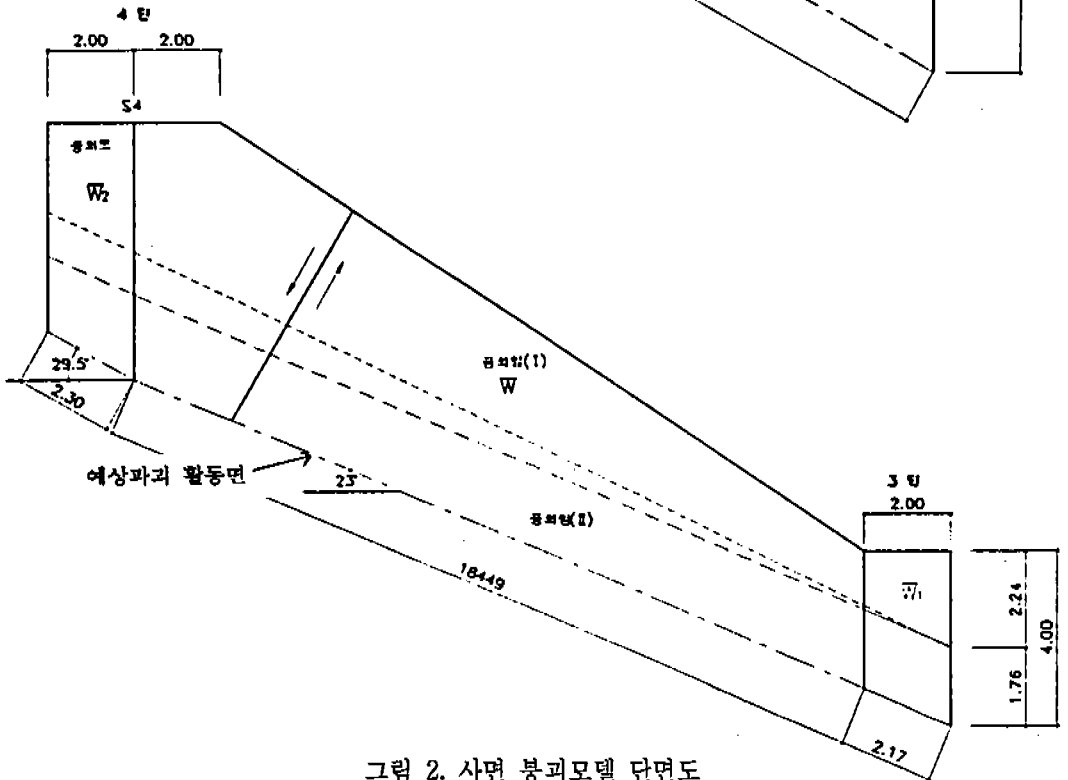


그림 2. 사면 붕괴모델 단면도

방향의 슬리큰사이드면을 따라 변위현상이 나타난다. 본 지역은 이같은 활동변위면 연장선상의 하부지역에 위치하므로 3단 Bench 경사면 하부지역에서는 활동변위면 발달 연장선이 거의 소멸되고 있다. 따라서 활동변위면이 인지되는 지역내에 2개 시추공(S-5, S-6)을 배치하여 지층상태를 파악하였다. 시추결과, S-5 지역에서는 연암층이 지표하 1.5m 지점부터 분포하고 영구사면 하부지역으로 갈수록 암반층이 굴착경사면 표면에 노출되어 있다. S-6 지역에서도 지표하 3.5m 지점부터 연암층이 나타났고 특히 지표하 6.2m 지점부터는 풍화정도가 보통풍화(MW) 이상인 암반이 분포한다. 따라서 본 지역의 파괴활동면은 S-5 지역의 경우, 풍화와 연암층과의 경계지점보다 코아회수율이 급격하게 떨어지는 지표하 4.0m 지점을 활동가능 경계면으로 추정하였다. 이 구간에서의 코아회수율 감소현상은 구성광물중 장석의 함유량 증가로 암석이 심하게 풍화(HW)되었고, 암석강도 또한 급격히 저하되는 약선대(Weak Zone)가 발달하고 있기 때문이다. S-6 지역에서는 연암층이 지표하 3.5m 지점부터 나타났으나 지표하 4.0m 지점의 절리면에 점토성분이 충전되어 나타나므로 이러한 불연속면을 활동가능 경계면으로 추정하였다. 따라서 3단 Bench 지역에서의 파괴활동면은 지표하 4.0m 지점에 형성된 것으로 추정하였다. (그림2).

사면붕괴 모델링

본 지역의 붕괴형태를 파악하기 위해 6개 지점에서 시추조사를 실시하였고 이를 근거로 예상 파괴활동면을 추정하여 평면붕괴형태를 갖는 것으로 분석하였다. 실제 영구사

면 정상부에는 인장균열에 의한 틈새의 확장과 슬리큰사이드면을 따라 변위가 발생하였고 5단 Bench 및 4단 Bench 지역에는 붕괴에 의한 함몰현상이 나타났다. 따라서 이같은 붕괴현상과 시추조사 결과를 종합해 볼 때, 본 지역의 붕괴발생 원인은 상부 풍화토층을 통해 지표수 유입이 있었고, 이어 지층내에 간극수압의 증대로 일부 경사면에 발달한 소규모 단층대의 슬리큰사이드면을 따라 활동변위가 발생한 것이다. 그리고 활동암체가 사면의 변위면을 따라 돌출되므로서 각 소단(Bench) 지역에 함몰대가 형성된 것이다. 따라서 이같은 사면활동체의 변위가 발생하기 위하여는 지층내의 임의의 파괴활동면을 따라 이동현상이 있었던 것으로 판단하였다.

다음은 사면붕괴 활동체의 변위에 영향을 미치는 구성물질들의 공학적 특성치와 파괴활동면의 특성을 나타내었고 설계에 적용한 지하수위는 시추조사시 측정된 관측자료를 근거로 지역별로 산정하였다.(표3).

표 3. 설계 지하수위(각 소단별 지표면하 심도)

지역	설계 지하수위(m)	관측 지하수위(m)	비고 최대 양수후 관측
5단 Bench	4.5	9.2-10.0이하	"
4단 Bench	3.0	4.9-6.6	"
3단 Bench	2.0	2.8-7.9	

전산에 의한 사면안정성 분석

분석개요

붕괴지역에 대한 붕괴형태를 고려하여 사면안정성을 분석하기 위하여 전산프로그램

을 이용하였다. 먼저 붕괴 이후 안정화된 상태의 사면안전율을 붕괴모델에 따라 구하였고, 설계기준으로 제시된 허용안전율에 적합하도록 사면을 보강하였다. 사면안정 해석에 사용된 방법은 한계평형방법(Limit Equilibrium Method)으로 허용안전율 이상으로 보강되면 사면은 파괴에 안전하고 변형은 허용치 이내인 것으로 분석하였다. 사면 붕괴모델에 따라 프로그램 SWASE를 이용하여 측면력에 대한 평형조건을 모두 만족시키는 방법으로 안전율을 구하였다.

정적안정해석

한계평형방법에서 파괴면 형상의 기하학적 조건으로 사면의 파괴는 활동체(풍화토 또는 단층파쇄암)가 파괴면을 따라 활동함으로써 발생한다고 해석하므로 무한사면의 안정해석에 따라 임계 파괴면은 하부의 견고한 풍화암층 표면을 따라 사면경사와 평행한 평면을 이루는 파괴로 해석하였다.

동적안정해석

본 지역은 지진발생시 안전정지지진(SSE) 0.2g 값이 적용될 때의 지진계수를 산정하여 사면안정성을 검토하였다. 본 지역에서 동하중(지진하중)에 의한 사면 불안정 원인은 임의 활동면에서 전단응력의 증가로 해석하였고 해석방법으로는 유사정적해석(Pseudo-static Analysis)방법을 적용하였다. 따라서 설계시 산정된 동하중은 기존사면의 정적 초기응력 상태 외에 추가로 작용하는 동하중을 유사정적하중으로 대체하여 고려하였고, 정적안정 해석시 적용한 한계평형방법을 이용하였다.

유사정적 해석방법

지진발생에 의한 동하중으로 실제 가속도 변화는 $A \times G$ 의 평균가속도 성분으로 대체할 수 있다고 가정하였다. 여기에서 A 는 지진계수(Seismic Coefficient)이며 G 는 중력 가속도이다.

상기 가속도성분에 의한 임의 파괴활동체에는 $A \times W$ 의 관성력이 수평방향으로 작용하며 여기에서 W 는 임의 파괴활동체의 무게이고 $A \times W$ 의 관성력은 시간에 따른 동적하중이 아닌 유사정적하중으로 고려하여 동적하중에 대한 안전율을 산정하였다.

사면의 동적안정성을 해석할때 동하중 효과를 고려하기 위하여 유사정적하중 산정시 이용하는 지진계수 A 는 발전소 설계시 적용하는 최대가속도 0.2g를 고려하였고, 실제 사면안정성 해석시 이용되었던 경험 및 실제 적용예 등을 활용하였다. 지진계수 A 는 미국의 경우 약 0.1~0.15값의 범위를 일본은 약 0.15~0.25 범위의 값들을 적용한다.

설계기준

사면의 안정성은 주어진 활동면에 대해 전단강도를 현재의 전단응력으로 나눈값 즉 안전율로서 평가하는데 산정된 안전율이 1.0보다 크면 이론상 사면은 안전(Safe)한 상태이다. 그러나 실제로 안전율은 최소 허용안전율 이상이 되어야 안전한 것으로 평가한다. 급변 사면안정성 분석시 설계기준으로 적용한 허용안전율은 정적 및 동적상태로 구분하여 산정하였다. 일반적으로 허용안전율은 산정된 하중, 파괴모델 그리고 적용된 강도정수 등의 불확실성을 내포하고 있으나 본 설계에서는 정적상태에서의 최소안전율을 1.4

로 그리고 동적상태의 최소안전율은 1.1로 산정하였다.

전산 해석이론(프로그램 SWASE)

파괴활동면을 내재하고 있는 사면의 안전율을 결정하기 위하여 사용한 프로그램은 SWASE(Sliding Wedge Analysis of Sidehill Embankments)로서 최대 3개 파괴활동면까지 해석이 가능하다. 본 프로그램은 미국 광상, 광물연구소의 지원으로 캔터키 대학 Yang H, Huang 교수가 저술한 "Stability Analysis of Earth Slopes"에 상세 언급되어 있다. 그림 3은 사면안전율을 산정하기 위하여 입력해야 할 요소들과 6개의 미지수(P_1, P_2, N_1, N_2, N, F)를 나타낸 것으로, 상호 힘 평형 관계를 이용하여 연립방정식의 해를 구함으로써 각 요소들의 값을 구할 수 있다.

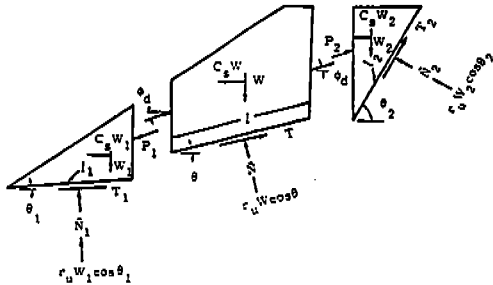


그림 3. 가상의 세계의 블럭으로 조합된 붕괴사면에 작용하는 요소들

하단블럭에 작용하는 힘들의 수직방향 성분의 합을 구하면 아래와 같다.

$$W_1 + P_1 \sin \phi_0 - \bar{N}_1 \cos \theta_1 - r_u W_1 \cos^2 \theta_1 - T_1 \sin \theta_1 = 0 \quad \dots\dots\dots(1)$$

여기서 $\phi_0 = \tan^{-1}[(\tan \bar{\phi})/F]$ 는 블럭의 내부마찰각이며, T_1 은 파괴사면에 작용하는

전단력이다.

$$T_1 = (\bar{c}_1 l_1 + \bar{N}_1 \tan \bar{\phi}_1) / F \quad \dots\dots\dots(2)$$

수평방향 성분들의 합을 구하면 다음과 같다.

$$P_1 \cos \phi_0 + N_1 \sin \theta_1 + r_u W_1 \sin \theta_1 \cos \theta_1 + C_s W_1 - T_1 \cos \theta_1 = 0 \quad \dots\dots\dots(3)$$

식 (1), (2), (3)으로부터

$$\bar{N}_1 = \{W_1 [\cos \phi_0 - r_u \cos \theta_1 \cos (\phi_0 - \theta_1) - C_s \sin \phi_0] + [\bar{c}_1 l_1 \sin (\phi_0 - \theta_1)] / F\} / \{\cos (\phi_0 - \theta_1) - [\tan \bar{\phi}_1 \sin (\phi_0 - \theta_1)] / F\} \quad \dots\dots(4)$$

식 (3)으로부터,

$$P_1 = (T_1 \cos \theta_1 - \bar{N}_1 \sin \theta_1 - r_u W_1 \sin \theta_1 \cos \theta_1 - C_s W_1) / \cos \phi_0 \quad \dots\dots\dots(5)$$

같은 방법으로 상단블럭에 대하여 힘 평형식을 구하면 다음과 같다.

$$W_2 - P_2 \sin \phi_0 - \bar{N}_2 \cos \theta_2 - r_u W_2 \cos^2 \theta_2 - T_2 \sin \theta_2 = 0 \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$T_2 = (\bar{c}_2 l_2 + \bar{N}_2 \tan \bar{\phi}_2) / F \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$P_2 \cos \phi_0 - \bar{N}_2 \sin \theta_2 - r_u W_2 \cos \theta_2 \sin \theta_2 - C_s W_2 + T_2 \cos \theta_2 = 0 \quad \dots\dots\dots(8)$$

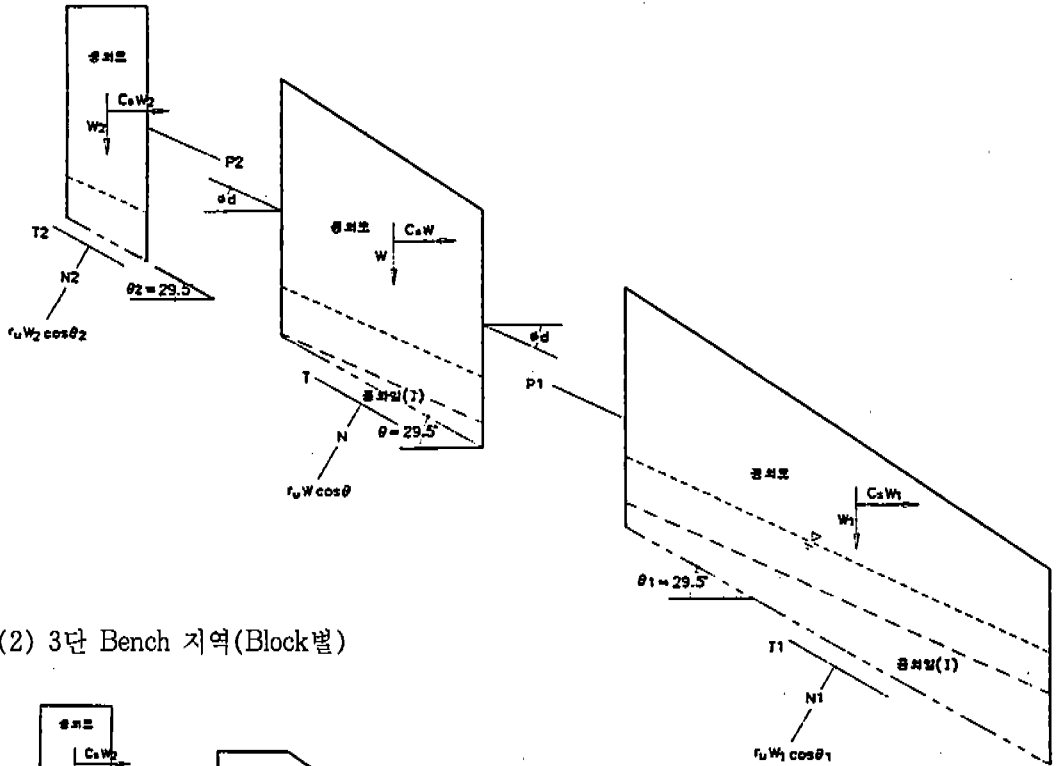
상기 식 (6), (7), (8)로부터,

$$\bar{N}_2 = \{\omega_2 [\cos \phi_0 - r_u \cos \theta_2 \cos (\phi_0 - \theta_2) - C_s \sin \phi_0] + \bar{c}_2 l_2 [\sin (\phi_0 - \theta_2)] / F\} / \{\cos (\phi_0 - \theta_2) - [\tan \bar{\phi}_2 \sin (\phi_0 - \theta_2)] / F\} \quad \dots\dots(9)$$

상기 식 (8)을 P_2 에 대해서 정리하면,

$$P_2 = (\bar{N}_2 \sin \theta_2 - T_2 \cos \theta_2 + r_u W_2 \cos \theta_2 \sin \theta_2 + C_s W_2) / \cos \phi_0 \quad \dots\dots\dots(10)$$

(1) 4단 Bench 지역(Block별)



(2) 3단 Bench 지역(Block별)

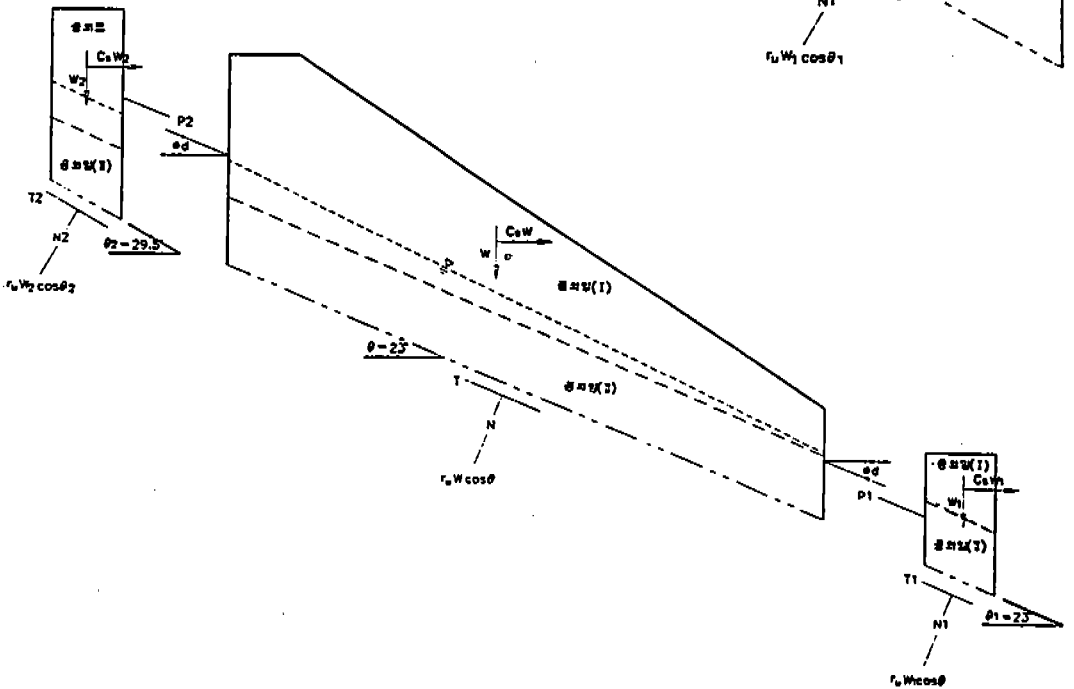


그림 4. BLOCK별 힘평형 단면도

중간 블럭에 대한 힘 평형식은,

$$W + P_2 \sin \phi_a - P_1 \sin \phi_a - \bar{N} \cos \theta - r_v W \cos^2 \theta - T \sin \theta = 0 \dots\dots\dots(11)$$

$$T = (\bar{c} + \bar{N} \tan \bar{\phi}) / F \dots\dots\dots(12)$$

$$-P_2 \cos \phi_a + P_1 \cos \phi_a - \bar{N} \sin \theta - r_v W \cos \theta \sin \theta + T \cos \theta - C_s W = 0 \dots\dots\dots(13)$$

상기 식 (11), (12), (13)으로부터

$$\bar{N} = \{W(1 - r_v \cos^2 \theta) + (P_2 - P_1) \sin \phi_a - (\bar{c} \sin \theta) / F\} / [\cos \theta + (\tan \bar{\phi} \sin \theta) / F] \dots\dots\dots(14)$$

상기 식 (13)을 다시쓰면

$$\text{Function}(F) = (P_1 - P_2) \cos \phi_a - \bar{N} \sin \theta - r_v W \cos \theta \sin \theta + T \cos \theta - C_s W = 0 \dots\dots(15)$$

P_1, P_2, T 와 N 은 F 의 함수이며 식 (5), (10), (12)와 (14)로부터 각각 구해질 수 있다. F 값은 IBM360 Scientific Subroutine Package의 Subroutine에 의해 구하였다.

분석결과

연구사면의 붕괴지역에 대한 안전율을 구한 결과는 표 4와 같다.

표 4. 지역별 정적 및 동적 안전율

지역	정적상태		동적상태		보강 저항력 (T/M)
	설계 안전율	현상상태 안전율	설계 안전율	현상상태 안전율	
4단 Bench 지역	1.4	1.19	1.1	0.88	34
3단 Bench 지역	1.4	1.40	1.1	0.96	21

사면보강 설계시 저항력을 증가시켜 주는 안전율 증가법으로 해석한 결과, 모든 지역

에서 정적상태 안전율 1.4 보다 동적상태의 안전율 1.1을 유지하기 위해 요구되는 저항력이 크게 나타나 이를 보강해야할 저항력으로 선정하였다.

사면보강 방안

절토 및 암절취로 형성된 사면의 안정성을 개선하기 위해 사면 붕괴형태에 따라 안정화(Stabilization)공법을 채택하여 최적의 보강 방안을 제시하였다. 안정화공법의 효과는 안전율을 기준으로 정량적으로 평가되며 이는 불안정 활동체(암괴 또는 토사)의 활동력 감소 또는 저항력 증대로 나타난다. 따라서 사면붕괴를 방지하기 위한 대책공법으로는 강우, 눈 등과 같은 물의 영향에 의해 사면의 안전율이 감소하는 것을 방지하는 안전율감소 방지법과 억지말뚝 또는 앵커공법 같이 저항력을 증가시켜 주는 안전율 증가법 등이 있다. 이중 억지말뚝공법은 사면의 활동경계면을 통과하여 지층내의 안정한 지반까지 말뚝을 일렬로 삽입, 설치하여 활동하중을 말뚝의 수평저항력으로 안정된 지반에 전달시키는 공법이다.

보강지역의 붕괴형태는 평면파괴(Planar Failure)로서 사면안정 대책공법으로 억지말뚝공법을 채택하였다. 보강설계시 적용한 축압력은 현 붕괴사면의 안전율을 프로그램 SWASE로부터 구한 후 최소 허용안전율(정적 1.4, 동적 1.1)과의 차이 만큼 평형을 이루기 위해 요구되는 축압력을 정적 및 동적상태 두가지 경우로 비교한 후 큰 값으로 나타난 동적상태에 만족하는 축압력을 억지말뚝의 수평저항으로 안정성을 확보하도록 하

였다(표 5). 이때 설계에 적용된 축압력은 사면활동의 진행에 의해 파괴면의 전단 저항력의 저하가 거의 없는 값으로 가정하였다. 붕괴형태로 모델화된 평면파괴면의 내부마찰각은 0°로 점착력은 0.55Kg/cm²로 산정하였다. 본 지역에서 억지말뚝 수평력으로 대응

해야하는 축압력은 4단 Bench 지역의 붕괴 활동체를 임의로 상부블럭과 하부블럭으로 구분하여 산정한 축압력을 이용하였다. 따라서 억지말뚝 설치지역은 4단 Bench와 3단 Bench내에 위치하도록 설계하였다(표 6, 그림 5)

표 5. 지역별 보강축압 및 말뚝간격

구 분	안전율(F.S.)		보강 축압력 (Q)	설계 축압산정 (Q/cosθ°)	말뚝 축압력(Q')	말뚝간격
	보강전	보강후				
4단	정적	1.19	1.4	15.6	28.2t/cosθ=17t	17t/m
	동적	0.88	1.1	28.2		
3단	정적	1.4	1.4	—	17.5t/cosθ=15.8t	15.8t/m
	동적	0.96	1.1	17.5		

$$\text{전단력}(\tau) = \frac{4(R_1^2 + R_1 R_2 + R_2^2)}{3(R_1^2 + R_2^2)} \times \frac{Q'}{A}$$

여기서

Q' = Pile에 작용하는 축압

A = 강관Pile유효 단면적

2·R₁ = 강관 내경

2·R₂ = 강관 외경

- 강관Pile허용응력(SS 41) :

$$\tau_s = 800\text{kg/cm}^2 \quad \sigma_s = 2400\text{kg/cm}^2$$

- 강관Pile직경 :

외경 : 31.85cm(부식고려 2m/m→ 31.65cm)

내경 : 30.45cm(부식고려 2m/m→ 30.65cm)

- 강관Pile두께 : 7m/m

- 강관Pile유효단면적(A)

$$A = \{(31.65)^2 - (30.65)^2\} \times \pi/4 = 48.93\text{cm}^2$$

표 6. 억지말뚝 주변물질의 공학적 특성치 및 관입심도

(1) 공학적 특성

구 분	4단 Bench 지역	3단 Bench 지역
파일직경	30cm	30cm
파일간격	50cm	75cm
단위중량(γ)	1.85T/m ²	2.11T/m ²
점착력(C)	3.7T/m ²	3.7T/m ²
내부마찰각(φ)	21°	29°

(2) 4단 Bench 지역 관입심도

Pile직경 : 30cm

활동면 심도 : 5.4m

파일 근입깊이 : 5.6m

파일 총 길이 : 11.0m

(3) 3단 Bench 지역 관입 심도

Pile직경 : 30cm

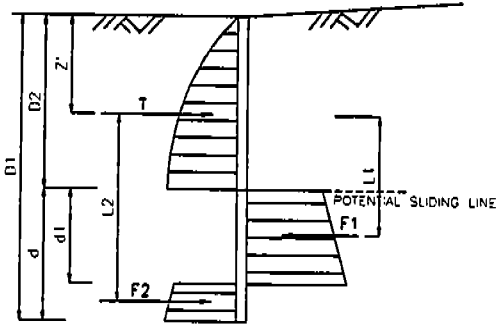
활동면 심도 : 4m

파일 근입깊이 : 3.5m

파일 총 길이 : 7.5m

(4) Pressure Diagram on Stabilizing Pile

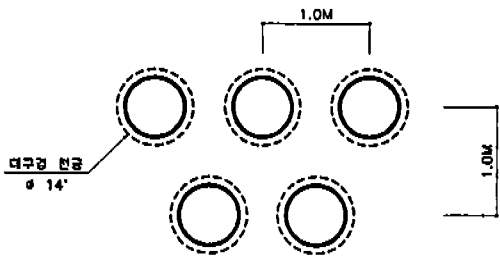
결 론



※ $\sigma L = \sigma v \times Kq + C \times Kc$ (By Brinch Hansen's Method)

- σL : 지중 수평응력
- σv : 지중 수직응력
- Kq : 수직응력 계수
- Kc : 점착력 계수
- C : 점착력 t/m^2
- γ : 단위중량 t/m^3
- ① $T + F_2 = F_1$
- ② $F_1 \times L_1 = F_2 \times L_2$

(1) 4단 Bench 지역 : 복열배치(간격 0.5m)



(2) 3단 Bench 지역 : 복열배치(간격 0.75m)

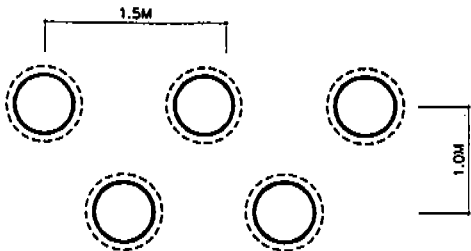


그림 5. 억지말뚝 배열

붕괴된 암반사면의 붕괴원인은 지층내의 불연속면들을 따라 지표수가 유입되어 풍화토와 풍화암 또는 연암층 경계지점에 유로(Flow Channel)가 형성되었고, 슬리콘사이드면을 따라 암괴들이 상호 활동하므로서 사면소단(Bench)내에 인장균열 및 함몰현상이 나타났다. 따라서 현장조사 및 실내시험을 통해 지층내에 임의의 파괴활동면을 선정하여 붕괴모델링을 한 후 프로그램 SWASE를 이용하여 사면안정성을 분석하였다. 분석결과로부터 구한 붕괴사면의 안전율에 대하여 동적 및 정적 설계안전율을 근거로하여 사면이 보강설계되었고, 보강방법으로 억지말뚝을 선정하여 보강토록 하였다. 억지말뚝공법은 현장조건을 최대한 반영하여 설정된 붕괴모델링에 의해 선정된 공법으로서 시공과정에서 강관말뚝 삽입을 위한 대구경 굴진작업이 요구되므로 현재 붕괴이후 안정상태를 유지하고 있는 사면에 더 이상의 붕괴요인이 발생하지 않도록 회전식 굴진장비를 투입하였다. 또한 보강작업 이전까지 붕괴사면의 활동이 계속되는 것을 방지하기 위하여 인장균열 틈새에 시멘트모탈 등을 채워 주변지역과 일체되도록 하고 사면의 지층내로 지표수 또는 우수 등이 유입되지 않도록 비닐등으로 덮어 보호하도록 하였다.

참 고 문 헌

Yang.H.Huang.,(1983) : "Stability Analysis of Earth Slope", University of Kentucky, PP.131-142

Department of the Navy,(1982) "Soil Mechanics", Design Manual 7-1, PP 338-346.

김수일, 이승일.,(1974) : "사면안정(동적안정해석)", 한국지반공학회, (1994), PP 319-395.

E.Hoek & J.W.Bray.,(1981) : "Rock Slope Engineering", Revised Third Edition, PP 150-198.

Robert.L.Weigel.,(1970) : "Earthquake Engineering", Prentice-Hall,Inc., PP 383-390

김주범,(1987.9) : "암반의 보강공법", 대한토질공학회지(제3권 제3호), PP 75-96.

백영식,(1988.6) : "사면안정(II)", 대한토질공학회지(제4권 제2호), PP 74-104.

홍원표,(1991.12) : "말뚝을 사용한 산사태억지공법", 한국지반공학회지(제7권 제4호), PP 75-87.

안윤성, 김연중 :
한국전력기술주식회사
서울 강남구 삼성동 87
TEL : (02) 510-5261
FAX : (02) 540-4184