

지하수위 변화에 따른 암반사면의 안정성 해석

장형두¹⁾, 양형식^{1)*}

An Analysis of Stability on Rock Slope by Changing Water Level

Hyong-Doo Jang, Hyung-Sik Yang

Abstract A quarry with 105 m height large cut slope was analyzed. Beside RMR and SMR methods, FLAC2D were adopted to analyze slope stability. As a result, slope of andesite had a possibility of failure. Wet slope showed low safety factor. Soil nailing was recommended to solve it. Since safety factor of slope largely depend on underground level, investigation for it seemed necessary.

Key words Rock slope, Water level, RMR, SMR, FLAC/slope

초 록 총 7단 105 m 높이의 대규모 절개면을 가진 석산에 대하여 안정성 해석을 하였다. RMR, SMR 해석과 함께 FLAC/slope를 이용하여 지하수위의 변화에 따른 안정성 해석을 실시하였다. 해석결과 안산암 부분에 파괴의 위험성이 나타났으며 습윤 시 안전율이 낮게 나타나서 soil-nailing과 같은 대책이 필요한 것으로 나타났다. 사면의 안정성은 지하수위에 따라 크게 변하여 지하수위에 대한 정밀한 조사가 필요한 것으로 판단되었다.

핵심어 암반사면, 지하수위, RMR, SMR, FLAC/slope

1. 서 론

암반사면의 안정성을 해석할 경우 사면 구성 암반의 지질학적인 요소, 사면 및 주변환경의 기하학적인 형태, 사면의 절개방법, 지하수에 의한 영향 등을 고려해야 한다. 우리나라의 경우 사면붕괴사고의 대부분이 장마철 전후로 발생되고 있으며, 이는 지하수의 변화가 사면의 안정성에 큰 변화를 주고 있다는 것을 말해준다.

이러한 지하수위의 변화에 따른 사면의 안정성을 고찰하기 위하여 해석 사면의 높이에 대한 50%, 100%의 전체 지하수위를 가정하고 각각의 지하수위에 대한 지하수가 절개면에서 관찰되는 높이를 10등분하여 FLAC^{2D}/slope 5.0(Fast Lagrangian Analysis of Continua/slope 5.0, Itasca, 2005)을 통해 안정성 해석을 하였다. 해석 사면은 총 7단으로 구성되어 있으며 전체 사면의 높이는 105 m, 폭 160 m 정도의 대규모 절개면이다. 사면의 높이는 각 단 15 m이며 매 단 마다 5 m의 소단으로

이루어져 있다. 총 7단으로 계획된 석산의 복구 계획이 마무리 단계에 접어들면서 암반 절개면에 대한 안정성 조사의 필요성이 대두되었다. 특히 좌측사면 60 m구간은 현장 우측 약 1.5 km에 형성되어있는 N20E의 주향을 갖는 단층의 영향으로 형성된 단층이 10~30 m 간격으로 다수 분포되어 있으며 이로 인한 불연속면 및 풍화가 다른 곳에 비해 심하여 사면 절개 후 안정성이 의심되는 곳으로 RMR, SMR에 의한 안정성 해석을 실시한 후 FLAC^{2D}/slope에 의한 수치해석을 실시하여 암반 사면 내의 지하수위의 변화에 따른 안정성을 평가하였다.

2. 해석 사면의 개요

안정성 분석을 실시한 좌측 사면은 백악기에 형성된 것으로 보이는 유문암, 안산암이 주를 이루고 있으며, 절개면 동쪽으로 형성되어있는 큰 단층의 영향으로 유사한 방향성을 갖는 단층(N20E 50SE)이 15~30 m 간격으로 노출되어 있다. 도곡유문암으로 분류되는 다소 밝은 색의 암석에서는 쉽게 유동구조가 관찰되며 슈미트헤머에 의한 강도 시험 결과 평균 1,068 kg/cm²의 값

¹⁾ 전남대학교 에너지자원공학과
* 교신저자 : hsyang@jnu.ac.kr
접수일 : 2009년 12월 23일
심사 완료일 : 2010년 1월 12일
게재 확정일 : 2010년 1월 19일

을 갖지만 부분적으로 심하게 풍화가 일어난 곳을 관찰할 수 있다. 화순안산암으로 분류되는 붉은색 빛의 암반은 반상조각이 보이며 슈미트 해머에 의한 강도 시험 결과는 평균 562 kg/cm²으로 유문암 보다는 더 풍화에 약한 것으로 판단된다. 이외에도 안산암질 및 유문암질 응회암이 혼재되어 있는 양상을 보인다. 해석 대상인 좌측사면은 N24W 80NE의 방향성을 보이며 이는 사면의 절개면에서 관찰되는 주요단층의 주향과 약 44°의 차이를 보인다. 그림 1에서 해석을 위한 좌측 사면은 크게 3개의 단층(J1, J2, J3)이 관찰되며 J1과 J3사이는 안산암으로 구성되어 있어 다른 구역에 비해 풍화가 심하게 일어난 것을 확인할 수 있다.

현장조사와 시료채취 후 실험실 실험을 통해 정한 해석을 위한 지반정수는 다음의 표 1과 같다.

3. RMR 및 SMR에 의한 안정성 평가

본 사면에 대한 수치해석을 실시하기 전에 1차적인 안정성 검토 및 해당 암반에 대한 설계정수를 RMR_{basic}

에 의한 경험식으로 구하여 현장과 실험실에서 구한 설계정수의 타당성 검토를 위해 RMR_{basic} 및 SMR 평가를 실시하였다. 좌측 사면은 그림 1과 같이 10개의 구역으로 구분하고 각 구역별 대상 암반을 선정하였다.

3.1 RMR 평가

RMR(Rock Mass Rating, Bieniawski, 1973)은 가장 보편적으로 사용되는 암반분류방법으로 널리 쓰이고 있다. 불연속면의 방향성을 제외한 RMR_{basic}의 5개 요소 중 불연속면 간격, 불연속면 상태, 지하수 상태는 현장조사를 통한 자료를 이용하였고 현장에서 시추코어를 실시하지 못하는 관계로 RQD는 Palmstone(1982)가 제안한 단위체적당 절리 수로부터 산출하는 방법을 이용하였으며 S_v는 표 1에서의 압축강도를 적용하였다.

표 2는 구역별로 산출된 RMR_{basic} 값을 보여준다.

$$RQD = 115 - 3.3J_v \quad (RQD \leq 100) \quad (1)$$

$$J_v = \sum 1/S_i \quad \text{단, } S_i \text{는 불연속면의 평균간격(단위 : m)}$$

표 1. 안정성 해석에 사용될 안산암 및 유문암에 대한 설계정수

Rock Type	S _c (kg/cm ²)	S _t (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)	v	Density (g/cm ³)	슈미트해머 강도 (kg/cm ²)	추정 JCS	JRC	φ _r (°)
Rhyolite	1,337	111	4.68×10 ⁵	0.25	2.58	1,068	85	8	30
Andesite	816	65	3.61×10 ⁵	0.27	2.68	562	39	8	30

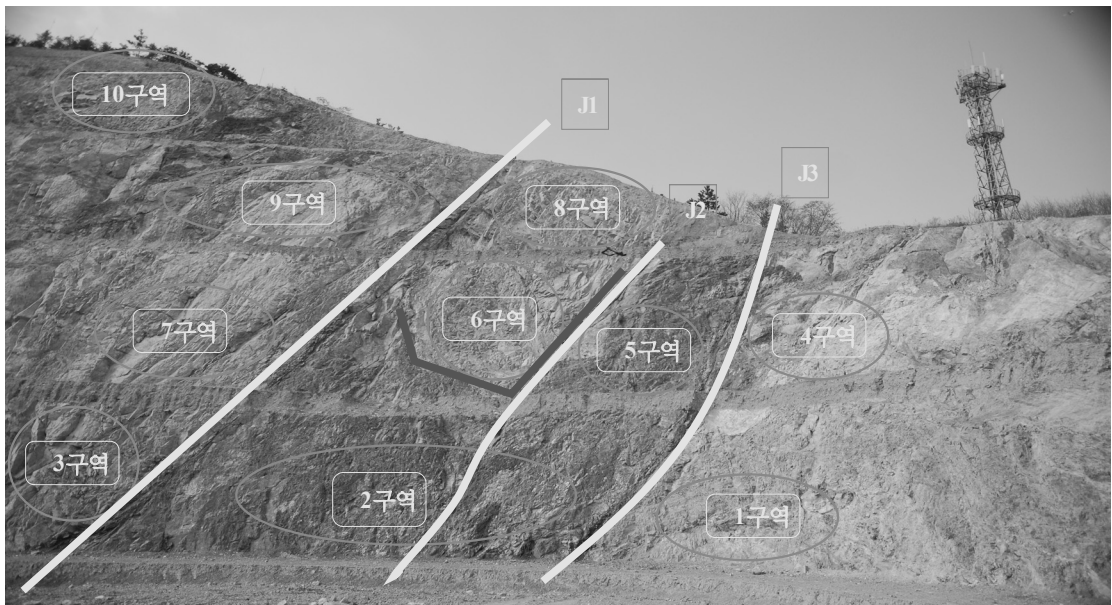


그림 1. 해석 사면 전경 및 RMR 평가를 위한 사면 구역 구분

표 2. 구역별 RMR_{basic}

구역	인자 암종	J_v	RQD	S_c kg/cm^2	J_s 점수	J_a 점수	지하수 상태점수	RMR basic
			점수	점수				
1	Rhyolite	2.5	100	1337.25	15	13	7	67
			20	12				
2	Andesite	5.1	83.17	815.77	15	14	7	60
			17	7				
3	Rhyolite	6.0	80.20	1337.25	10	20	10	69
			17	12				
4	Rhyolite	5.8	80.86	1337.25	10	15	15	69
			17	12				
5	Andesite	5.0	83.50	815.77	10	16	10	60
			17	7				
6	Andesite	6.6	78.22	815.77	10	14	10	58
			17	7				
7	Rhyolite	3.5	100	1337.25	10	21	15	78
			20	12				
8	Andesite	6.6	78.22	815.77	10	12	15	61
			17	7				
9	Rhyolite	3.0	100	1337.25	10	19	15	76
			20	12				
10	Rhyolite	6.6	78.22	1337.25	10	15	15	69
			17	12				

J1과 J3 사이의 안산암으로 구성된 구역(2, 5, 6, 8)은 평균 60 정도의 RMR값을 보이며 양호한 암반상태를 보이지만 이는 다른 구역(1, 3, 4, 7, 9, 10)에 비해 평균 10정도 낮은 RMR값이다.

3.2 SMR 평가

구역별로 평가된 RMR_{basic}값에 (2)와 같이 절리-사면과의 관계에 따른 보정계수를 가감하고 굴착공법에 따른 점수를 적용하는 방법으로 각 구역별 SMR(Slope Mass Rating, Romana, 1985)을 평가하였다.

$$SMR = R_{basic} + (F_1 \times F_2 \times F_3) + F_4 \quad (2)$$

F1 : 절리의 주향과 사면의 주향과의 차이에 의한 보정계수(1~0.15)

F2 : 절리의 경사각에 대한 보정계수(1~0.15)

F3 : 사면의 경사각과 절리의 경사각에 대한 보정계수(0~60)

F4 : 굴착방법에 대한 보정계수(15~8)

해석 사면 중 9구역(F1=0.4)을 제외한 모든 구역의 주요 절리 주향과 절개면의 주향은 약 44°의 차이가 있으므로 F1은 0.15가 반영되었으며, 3구역의 절리 경사각 약 40° 내외로 F2=0.85가 반영되나 다른 모든 구역 절리의 경사각이 45°보다 큰 것으로 나타나 F2는 매우 불리한 값인 1이 적용되었다. 또한 평면파괴를 기준으로 대부분의 구역에서 절리의 경사각에서 사면의 경사각을 뺀 값이 -10°보다 작은 값을 나타내어 F3는 2, 4, 8 구역을 제외하고 모두 -60이 적용되었으며, 현장의 절개면이 일반발파 후 브레이커에 의한 리핑으로 굴착되었으므로 F4는 모두 0이 반영되었다. 표 3은 구역별 SMR값을 나타낸 것이다.

안산암으로 구성된 2, 5, 6, 8 구역은 그림 1에서의 J1과 J3 사이에 해당하며 49~56의 SMR 값으로 III등급 중에서도 낮은 값을 갖는 것으로 나타났다. 유문암으로 구성된 다른 구역에 비해 강도가 1/2 정도로 낮아 상대적으로 낮은 RMR_{basic}값으로 판정됨이 SMR 값에 반영된 것으로 보인다. 위 4개 구역은 부분적으로 양호하나 썩기파괴나 평면파괴에 대한 체계적인 보강공법

표 2. 구역별 SMR

구역	인자 암종	RMR basic	SMR 보정치 $R=(F1 \times F2 \times F3) + F4$					SMR
			F1	F2	F3	F4	R	
1	Rhyolite	67	0.15	1	-60	0	-9.0	58.00
2	Andesite	60	0.15	1	-25	0	-3.75	56.25
3	Rhyolite	69	0.15	0.85	-60	0	-7.65	61.35
4	Rhyolite	69	0.15	1	-50	0	-7.5	61.50
5	Andesite	60	0.15	1	-60	0	-9	51.00
6	Andesite	58	0.15	1	-60	0	-9	49.00
7	Rhyolite	78	0.15	1	-60	0	-9	69.00
8	Andesite	61	0.15	1	-50	0	-7.5	53.50
9	Rhyolite	76	0.4	1	-60	0	-24	52.00
10	Rhyolite	69	0.15	1	-60	0	-9	60.00

표 4. 경험식을 통해 구한 지반정수

Rock Type	RMR	E(kg/cm ²)	C(ton/m ²)	φ(°)
Rhyolite	67	3.47×10 ⁵	33.50	38.50
Andesite	58	1.02×10 ⁵	29.00	34.00

표 5. 수치해석에 사용된 입력자료(Project file: 남평해석면.psl)

Class Name	Density kg/m ³	Cohesion Pa	Tension Pa	Friction Deg.	Dilation Deg.
Rhyolite	2580.0	335000.0	0.0	38.5	0.0
Andesite	2680.0	290000.0	0.0	34.0	0.0

Program: FLAC/Slope v5.0.355 &GIC/Slope v2.0.380

이 필요한 것으로 판단된다. 유문암으로 구성된 다른 구역(1, 3, 4, 7, 9, 10)도 대부분 52~69 사이의 우수하고 양호한 SMR 값으로 평가되었으나 일부 과상파괴가 일어날 확률이 있으므로 국부적으로 필요한 곳에 보강을 실시하는 것으로 전체사면의 안전성 향상을 꾀할 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 RMR의 경험식에 의한 지반정수의 결정

해석을 실시한 좌측사면 중 J1과 J3사이에 분포하는 안산암의 RMRbasic(이하 RMR)의 평균은 60이며(58~61) J1과 J3 외곽지역에 분포하는 유문암의 RMR 평균은 71(67~78)로 나타난다. 다음의 경험식 (3), (4), (5)를 이용하여 대략적인 암석의 물성을 확인할 수 있으며 이때 적용하는 RMR 값은 각 암석의 최빈값을 취하였다.

$$C = 0.5 \times RMR(\text{ton/m}^2) \text{ Bieniawski and Orr, 1976} \quad (3)$$

$$\phi = 0.5 \times RMR + 5^\circ \text{ (Mohammad, 1997)} \quad (4)$$

$$E = 2 \times RMR - 100 \text{ (GPa) (Bieniawski, 1978)} \quad (5)$$

4. 수치해석에 의한 안정성 평가

FLAC/slope 5.0은 FLAC의 mini-virion으로 사면의 안전을 계산하여 안정성을 손쉽게 평가하도록 만들어진 프로그램이다. 실험실 실험과 현장조사 및 RMR의 경험식으로 추정된 FLAC/slope 5.0에 적용할 암반의 물성은 다음의 표 5와 같다.

4.1 수치해석을 위한 단면 결정

해석 단면은 최대한 실제 현장 사면과 동일한 구성으로 해석의 신뢰성을 높이고자 하였다. 각 단별 사면의 높이는 현장과 동일한 15 m, 소단은 5 m으로 하였다. 1, 2단은 현장에서의 측정 결과 75°의 기울기를 보이거나 해석의 간소함을 위해 75.07°로 하여 경사구간의 너비

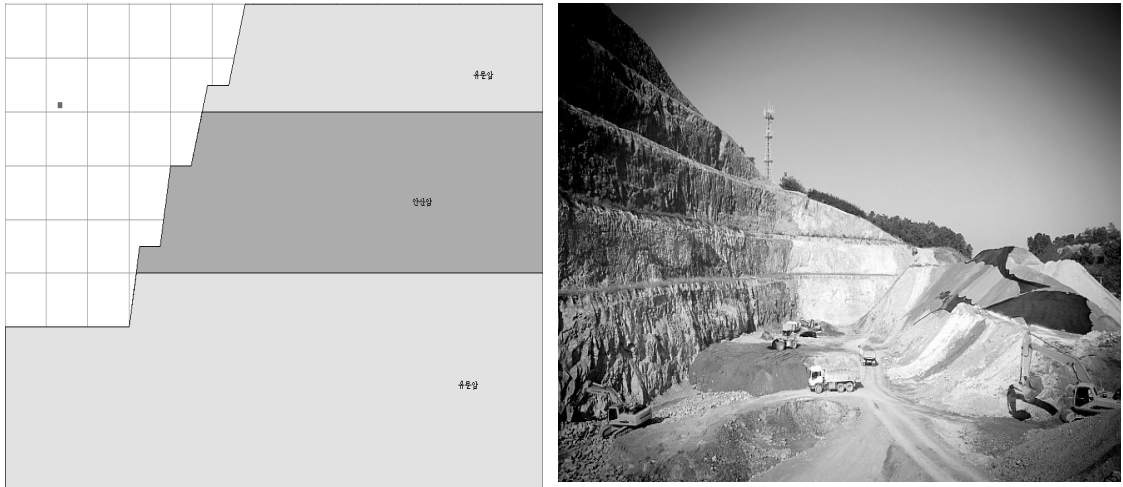


그림 2. 현장사면(우)과 FLAC/slope 해석을 위한 사면 구성(좌)

를 4 m로 하였으며 3, 4단은 현장 측정 결과 80°의 사면 기울기를 보이니 경사구간의 너비를 2.5 m로 통일시켜 경사각은 80.54°로 결정하였다. 사면 바닥부터 해석면 바닥까지는 30 m, 1단 사면 뒤로는 67 m로 여유 있는 범위로 구성하여 해석면의 협소함으로 인한 오류를 최소화 하였다. 현장의 안산암과 유문암의 분포는 단층에 의해 확연하게 구분되며 해석에는 해석면의 바닥에서부터 40 m~70 m의 30 m구간을 안산암으로 하고 나머지는 유문암으로 해석을 하였다. 그림 2는 현장사면과 해석사면의 구성을 보여준다.

4.2 지하수 변화에 따른 사면 안전율 검토

암반사면의 지하수위는 해당 암석의 투수율, 절리의 발달상황, 사면 주변의 기하학적 형태, 식생상황, 최근 강수량의 변화 등 많은 인자들에 의해 변화하며 이를 정확하게 가능하는 것은 현실적으로 힘들다. 본 해석에서는 사면의 높이에 대한 50%, 100%의 전체 지하수위를 가정하고 각각의 지하수위에서 지하수가 절개면에서 관찰되는 높이를 10등분하여 지하수의 영향에 의한 사면의 안정성을 조사하였다. 표 7과 표 8은 50%, 100%의 지하수위에 대한 각각 절개면에서 관찰되는 지하수 높이를 가정한 것을 보여준다. 장마철이 지난 9월에 실시한 현장조사에서 1, 2단은 매우 건조한 것으로 나타났다. 3단은 절개면 절리 밑 부분으로부터 1~2 m 범위에서 매우 약한 지하수의 용출을 관찰할 수 있었으며 4단 상부는 건조한 것으로 관찰되었으나 하부로부터 약 3 m까지 지하수로 인해 젖어있는 것을 관찰할 수 있었다.

표 6의 (A)는 건조한 사면의 경우로 전체사면의 안전율은 1.8로 계산되었으며, 현장조사를 통해 1, 2단은 건조사면, 3단은 사면의 10%, 4단은 사면의 20%까지 지하수위가 올라왔다고 가정한 상태로 해석한 사면 (B)는 1.27의 안전율을 보임으로서 사면의 복구가 끝난 이후 계속 유지되어야 하는 사면에 대한 보강공법이 적용되어야 할 것으로 판단되어 실제 현장에 실시한 soil-nailing을 적용한 (C)는 1.47의 다소 안정적인 안전율로 계산되었다.

표 7과 표 8은 절개면에서 지하수 관찰 위치에 따른 안전율을 FLAC/slope를 이용하여 구한 것이다. 전체 사면 중 50%의 지하수위를 가정했을 경우 절개면의 30%이상의 높이에서 지하수를 관찰할 수 있는 경우 안전율이 1.0이하로 평가되었으며 절개면의 50%이상에서 지하수의 흔적이 관찰될 경우 안전율이 0.03이하로 급감하는 것으로 나타났다. 100%의 지하수위를 가정한 경우는 모두 1.0이하의 안전율로 평가되었으며 절개면의 30%이상의 위치에서 지하수가 관찰될 경우 안전율은 0.03이하로 급감하는 것으로 나타났다.

이렇게 특정한 높이이상에서 지하수위가 발견될 경우 안전율이 급감하는 현상은 암반사면에서 지하수위가 사면의 안전율에 큰 영향을 미치고 있음을 보여주며 특정 높이 이상의 지하수위, 즉 50%의 지하수위를 가정한 경우 사면에 지하수가 나타나는 위치가 50%이상 100%의 지하수위를 가정한 경우 사면에 지하수가 나타나는 위치가 30%이상은 지하수의 영향으로 사면이 파괴된다고 볼 수 있다.

표 6. 건조사면, 현장사면, 보강된 사면의 안전율

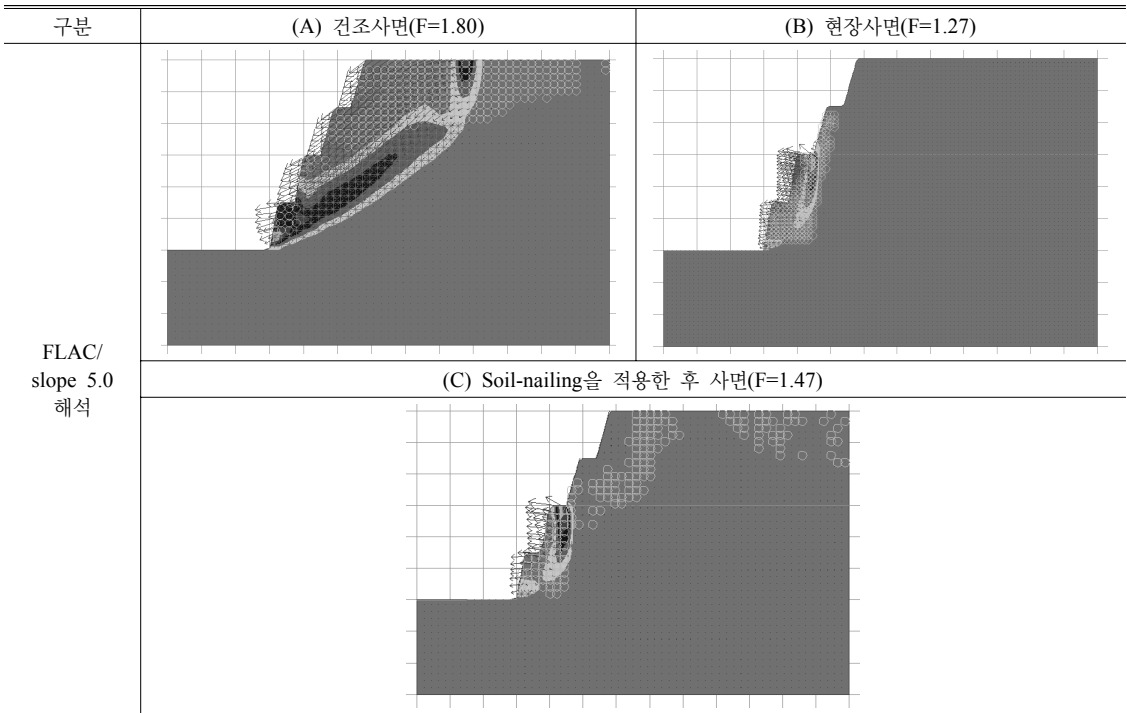


표 7. 절개면에서 지하수 관찰 위치에 따른 안전율(50% 지하수위)

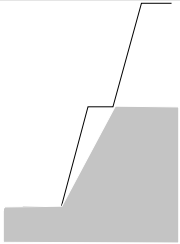
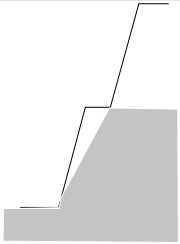
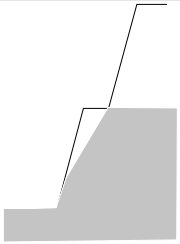
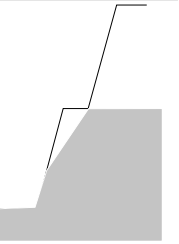
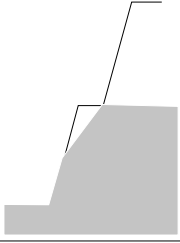
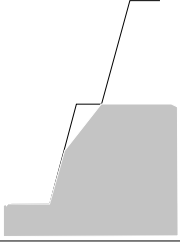
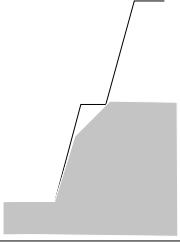
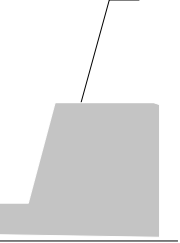
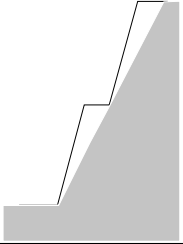
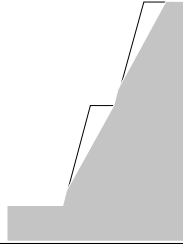
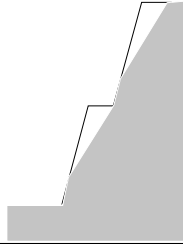
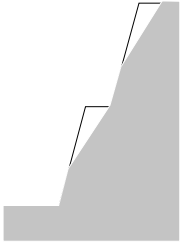
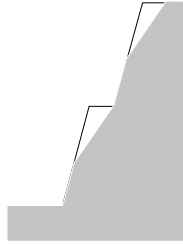
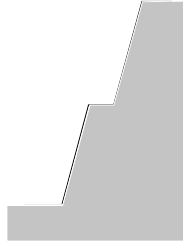
water Level 50%	% of water condition on the slope			
	0%	10%	20%	30%
FLAC No.	2-1	2-2	2-3	2-4
안전율	1.33	1.29	1.22	1.12
도면				
water Level 50%	% of water condition on the slope			
	40%	50%	60%	100%
FLAC No.	2-5	2-6	2-7	2
안전율	0.96	0.73	under 0.03	under 0.03
도면				

표 8. 절개면에서 지하수 관찰 위치에 따른 안전율(100% 지하수위)

water Level 100%	% of water condition on the slope		
	0%	10%	20%
FLAC No.	3-1	3-2	3-3
안전율	0.71	0.68	0.63
도면			
water Level 100%	% of water condition on the slope		
	30%	40%	100%
FLAC No.	3-4	3-5	3
안전율	0.53	under 0.03	under 0.03
도면			

5. 결론

(1) 단층을 포함한 폭 160 m 높이 105 m의 사면 중 풍화가 가장 심하며 단층의 간격이 좁은 사면 좌측의 폭 100 m, 높이 60 m에 대해 RMR, SMR을 통해 안정성 평가를 실시한 결과 비교적 안정 및 보통의 안정성을 갖는 것으로 평가되었으나 유문암에 비해 강도가 떨어져 풍화에도 약한 J1과 J3사이의 안산암 부분에서는 파괴위험이 있는 것으로 판단되었다.

(2) 건조한 사면의 경우 안전율은 1.8로 계산되었으며, 현장조사를 통해 1, 2단은 건조사면, 3단은 사면의 10%, 4단은 사면의 20%까지 지하수위가 올라왔다고 가정된 상태로 해석한 경우 1.27의 안전율을 보임으로서 사면의 복구가 끝난 이후 계속 유지되어야 하는 사면에 대한 보강공법이 적용되어야 할 것으로 판단되어 실제 현장에 실시한 soil-nailing을 적용한 후 1.47의 다소 안정적인 안전율로 계산되었다.

(3) 절개면의 지하수 관찰 위치에 따른 사면 안전율을 FLAC/slope로 해석한 결과 전체 사면 중 50%의 지하수위를 가정했을 경우 절개면의 30%이상의 높이에서 지하수를 관찰할 수 있는 경우 안전율이 1.0이하로 평가되었으며 절개면의 50%이상에서 지하수의 흔적이

관찰될 경우 안전율이 급감하는 것으로 나타났다. 100%의 지하수위를 가정한 경우는 모두 1.0이하의 안전율로 평가되었으며 절개면의 30%이상의 위치에서 지하수가 관찰될 경우 안전율은 0.03이하로 급감하는 것으로 나타났다. 특정 높이 이상의 지하수위, 즉 50%의 지하수위를 가정한 경우 사면에 지하수가 나타나는 위치가 50%이상 100%의 지하수위를 가정한 경우 사면에 지하수가 나타나는 위치가 30%이상은 지하수의 영향으로 사면이 파괴된다고 볼 수 있다.

참고문헌

1. Bieniawski, Z.T., 1973, Engineering classification of jointed rock masses. Trans. S. Afr. Ints. Civ. Eng. 15, 335-344
2. Bieniawski, Z.T. and Orr, C.M., 1976, Rapid site appraisal for dam foundations by the geomechanics classification, Proc. 12th Cong. Large Dams, ICOLD, Mexico City, pp.483-501.
3. Bieniawski, Z.T., 1978, Determining rock mass deformability: Experience from case histories, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 15, pp.237-247.
4. Itasca, 2005, FLAC/slope 5.0 manual.
5. Palmstrom, A., The volumetric joint count - a useful

- and simple measure of the degree of rock jointing, 1982, Proc. 4th Int. Cong. Int. Assoc. Eng. Geol., Delhi, vol. 5, E15-19.
6. Romana. M., 1985, New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. Proc. Int. Symp. Rock Mech. in Excav. Min. Civ. Works, ISRM, Mexico City, 59-68.
7. Mohammad, N., Reddish, D.J. and Stace, L.R., 1997, The relation between in-situ and Laboratory rock properties used in numerical modeling, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 34, No. 2, pp.289-297.



장형두

2003 목포대학교 이과대학 물리학과 이
학사

Tel. 062-530-0824
E-mail albaking@naver.com
현재 전남대학교 대학원 에너지자원공학과 석사과정



양형식

1979 서울대학교 공과대학 자원공학과
학사
1981 서울대학교 대학원 자원공학과 석사
1987 서울대학교 대학원 자원공학과 박사

Tel. 062-530-1724
E-mail hsyang@jnu.ac.kr
현재 전남대학교 에너지자원공학과 교수