터널과 지하공간, 한국암반공학회
Vol. 6, 1996, pp. 166~174

TUNNEL & UNDERGROUND Vol. 6, 1996, pp. 166-174
J. of Korean Society for Rock Mech.

절리가 심하게 발달된 암반사면의 최적 절취각 고찰

홍예성[1] · 조태진[2] · 한공창[3]

A study for the determination of optimum cutangle for the heavily jointed rock slope

Ye Sung Hong, Tae Chin Choo and Kong Chang Han

ABSTRACT Stability of rock slope is greatly affected by the geometry and strength of discontinuities developed in the rock mass. In this study an analytical method which is capable of analyzing the effect of relative orientation between the discontinuities and the slope face on the safety of slope by assessing their vector components was used to evaluate the stability and the maximum cut-angle for the proposed slope design. The results of computerized vector analysis revealed that slope area under investigation might be divided into 3 sections of different face directions. The safety factors for benches in each 3 sections were calculated using the limit-equilibrium theory. Then, by utilizing the concept of probabilistic risk analysis, the susceptibility of entire slope failure was estimated. Based on the distribution of safety factor in each bench, the maximum cut angle of each section could be selected differently to achieve the permanent stability of the entire slope.

1. 서 론

암반사면의 안정성은 암반내에 발달된 불연속면의 기하학적 속성과 강도정수에 크게 영향을 받는다. 사면방향에 대한 불연속면들의 상대적인 방향성들은 구조적으로 발생 가능한 붕괴양상을 결정하게 된다. 현재까지 암반의 구조적인 특성을 해석하는데 널리 이용되는 방법은 평사투영해석이다. 평사투영법은 불연속면의 방향성을 도식적으로 기술하여 가시적인 표현 효과를 나타내며, 상당량의 불연속면의 방향성에 대한 자료를 효과적으로 처리할 수 있다. 이를 이용한 방법에 대한 상세한 논의는 Phillips(1971)와 Goodman(1980) 등에 제시되어 있다. 그러나 평사투영해석은 도식적인 표현의 한계성에 기인하여 사면안정성 분석과 같이 세밀한 자료처리를 요구하는 분야에의 활용에는 많은 제약이 따른다. 한편, 수치해석적인 방법 중 연속체 개념을 이용한 분석은 절리거동 특성을 암반의 역학적 특성에 내재시켜 산정된 전체 강성도를 이용하여 분석하므로 지역적으로 변화되는 절리의 방향성 및 빈도수 변화에 능동적으로 대처할 수 있다(조 와 이, 1992). 그러나, 일반적으로 사면을 구성하는 표층 암반의 거동은 연속체적 거동보다는 개별체적 거동을 하는 경우가 대부분이다. 개별적 거동은 절리요소가 고려된 유한요소모델(Cho and Lee, 1993)이나 개별요소법을 이용하여 분석가능하나, 절리 개체수가 증가함에 따라 수치해석에 대한 시간과 비용이 증가하여 정확한 분석결과를 도출하기가 힘들다. 한편, 불연속면을 따라 미끄러짐이 발생하는 암반사면의 불안정성 분석에는 결정론적인 해석(deterministic analysis)과 확률론적인 해석(probabilistic analysis)들을 포함하여 수많은 방법들이 이용되고 있다. 결정론적인 해석은 한계평형이론(limit-equilibrium method)을 이용하여 산정된 안전율에 근거하여 현재의 사면 설계

* 1996년 3월 19일 접수
1) 아주지오시스템 지반공학부
2) 부경대학교 응용지질학과 교수
3) 한국자원연구소, 선임연구원

에 널리 이용되고 있다(Hoek and Bray, 1981). 그러나, 전통적인 결정론적 방법은 단일 안전율에 의거하여 전체사면의 안정성을 평가하여 분석결과의 정확도에 논란의 여지가 있다(Priest and Brown, 1983). 이에따라 보다 신뢰성 있는 사면안정분석을 실시하기 위해 확률론적인 방법들이 제안되어졌다. 이 방법론에 의하면 상당한 불확실성을 포함하고 있는 입력자료들을 확률이론에 근거하여 활용할 수 있으며, 전통적인 결정론적 방법에 의해 추정되는 안전율에 근거하여 파괴 확률(probability of failure)을 산정하기 때문에 사면안정의 해석 근거를 객관화시켜 주게 된다(Whittlestone *et al.*, 1995). 본 연구대상인 암반사면의 경우 지역적으로 사면방향이 변화되며, 기존설계에 의거해 다수의 소단으로 형성되어 있다. 따라서 암반의 구조적인 특징을 신속하고 정확하게 평가하여 지역적 사면 방향성을 고려한 소단별 안전율 분포를 산정하기 위해 벡터해석법(Leung and Kheok, 1987)을 활용하였다. 또한 사면의 영구적 안정성 확보 차원에서 제안된 안전율에 대해 Probabilistic Risk Analysis(Whittlestone *et al.*, 1995) 개념을 이용하여 위험감수도 허용한계내에서의 최적 절취각을 산정하였다.

2. 연구지역의 암반 특성

연구지역은 충청남도 보령군에 건설중인 보령댐의 여수로 사면으로 여러차례에 걸쳐 평면 및 쐐기파괴가 발생한 암반사면이다(Fig. 1 참조). 사면 전반에 걸쳐 전기 쥬라기에 속하는 대동계층군의 퇴적암류로 구성되어 있고, 이들을 맥암류(dykes)가 관입하고 있다. 중앙부의 역암층을 경계로 상류부는 변질사암으로, 하류부는 역암, 셰일 및 사암의 호층분포를 보이고 있으며, 하측부 상부에 풍화가 심한 염기성 맥암분포가 보인다(한국암반공학회, 1995). 사면의 경사방향은 15°N~35°N 범위에서 변화되는 양상을 나타낸다. 초기설계단계에서 64°NE(1:0.5) 경사로 개착되었으나 대규모 사면붕괴가 여러차례 발생하였다. 대상사면에 대한 재조사가 실시되어 40° NE(1:1.2) 경사로 재개착되었으며, 배수공 등 사면보호공이 추가되었다. 이로써 사면의 전반적인 불안정성은 감소되었으나, 변질사암에 밀집된 층리와 균열 등의 단열구조와 부분적으로 노출된 파쇄대에 의해 각 소단에서 소규모의 붕락이 지속적으로 발생하고 있다. 층리면과 단층에 의해 형성된 대형

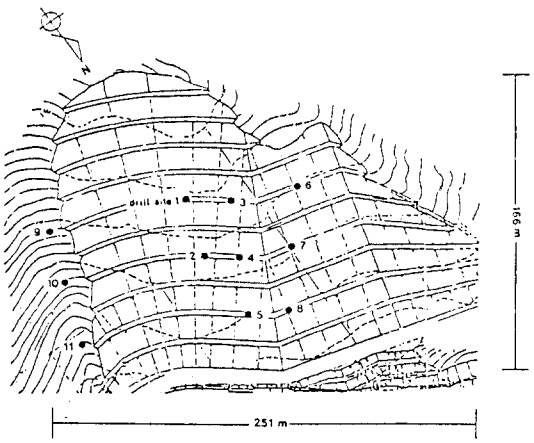

Fig. 1. Profile of study area.

쐐기부가 중앙부에 분포하며, 노출면은 황갈색으로 풍화정도가 심하고 층리면을 따라 사면내 지하수 용출이 다수 보여진다. 사면의 좌측은 특히 절리의 간격이 좁은 경우가 많고 단층면을 따라 암괴의 이동이 이미 진행된 곳이 많이 존재하고 있다.

사면의 대부분을 이루고 있는 사암 및 역암에는 층리, 절리, 단층 등이 3~4개의 주그룹과 2~3개의 부그룹으로 발달되어 암반내에는 많은 파쇄 구조선이 발달되어 있다. 사면 내부의 불연속면 발달 상태, 활동면의 존재 및 전단강도정수 추정을 위해 Fig. 1에 도시된 11개 지점에서 연직방향으로 시추작업이 실시되었으며, 불연속면에 대한 조사는 보령댐 절취사면의 좌측, 우측 및 중앙부 사면부분의 최하단(EL 79 m)에서 9단(EL 199 m)까지 15 m간격의 각 소단에서 수행되었다(한국암반공학회, 1995). 각 소단에서 조사된 주절리군의 방향성 분포를 Table 1에 수록하였으며, 주절리군의 분포밀도에 따라 최대 4개의 절리군 J_1, J_2, J_3, J_4로 기술하였다. 주절리군의 방향성은 Table 1에 수록된 바와 같이 각 소단에서 매우 유사하여 전체 사면에 대해 좌측 및 중앙사면의 경우는 J_1에서 J_4까지 4개 절리군을 우측사면의 경우에는 J_1에서 J_3까지 3개 절리군을 인지하였다(Table 2). 가장 높은 분포밀도를 나타내는 주절리군 J_1의 평균방향성은 좌측 사면의 경우 경사방향은 348°N, 경사는 33°이고 우측사면의 경우 경사방향은 332°N, 경사는 42°로 산정되어졌다. J_1의 경사방향은 사면의 경사방향에 가장 근접하여 사면의 안정성에 가장 영향을 주는 주절리 그룹을 형성한다. J_1의 경사는 우측 사면부쪽으로 증가하며, 경사방향도 점차적으로

Table 1. Orientation of joint sets at each level of study area

Location	Dip direction/dip (degree)							
	left and middle regions				right region			
Joint set	J_1	J_2	J_3	J_4	J_1	J_2	J_3	J_4
Level 1	353/30	220/74			331/42	097/88	206/74	
Level 2	349/34	200/60	256/75	093/77	338/37	196/67	090/90	
Level 3	171/61	050/88			339/40	092/73	200/82	
Level 4	351/31	102/78	250/77		341/41	085/81	209/68	078/50
Level 5	354/35	225/71	278/86		344/41	253/80		
Level 6	336/35	223/65	279/89	226/83	329/51	189/62		
Level 7	346/37	237/79	105/79	186/68	326/61	061/83		
Level 8	351/36	260/84	108/67	197/57				
Level 9	356/30	284/88	226/57					

Table 2. Orientation of joint sets

Joint set	Dip direction/dip (degree)	
	left and middle regions	right region
J_1	348/33	332/42
J_2	253/74	093/88
J_3	103/79	200/67
J_4	203/70	

사면방향과 차이가 나는 것이 관찰되었다. 결과적으로 평면파괴에 대한 J_1의 영향이 좌측사면에서 보다 크게 작용한다. 다음의 분포밀도를 나타내는 주절리군은 좌측 및 중앙 사면의 J_3 절리군과 우측 사면의 J_2 절리군으로(Table 2 참조) 경사방향은 100°N 전후이며 경사는 78°에서 거의 수직에 가까운 경사를 보이고 있다. J_2 그룹의 불연속면들은 J_1 그룹과 쐐기형의 블록을 형성한다. 쐐기선은 선주향 19°N이며, 선경사가 29°로 사면의 안정성에 크게 영향을 미치고 있다.

현장에서 시추된 코어시료를 이용하여 수행된 절리면 전단실험 결과를 기반으로 안정성 해석에 필요한 잠재적 파괴면의 전단강도 정수를 추정하였다. 절리면 전단실험은 5개 시추공에서 회수된 9개 시료에 대하여 법선응력을 4~5회 변화시키면서 최대전단응력을 측정하는 다단계 실험방법으로 실시되었으며, 표면 거칠기(JRC)도 ISRM 기준에 의거하여 판정되었다(한국암반공학회, 1995). 실험에서 얻어진 법선응력과 전단응력의 선형적인 관계에서 점착력과 마찰각이 산정되었으며, 전단강도시험 결과를 Table 3에 수록하였다. 절리면 전단시험 결과로 부터 추정된 마찰각은 암종별로 최대 · 최소값들을 제외할 경우 평균 ϕ=35°이며, 점착력은 실험에 사용된 상하의 두시편이 완전히 분리되어 있

Table 3. Results of direct shear test(after KSRM, 1995)

Rock type	JRC	ϕ (degree)	c (MPa)
sandstone	0-2	21.8	0.12
sandstone	0-2	22.3	0.04
sandstone	0-2	33.4	0
sandstone	2-4	41.7	0.03
shale	2-4	32.6	0.063
conglomerate	4-6	46.7	0
conglomerate	4-6	60.3	0.083
conglomerate	6-8	47.3	0.1
conglomerate	8-10	41.7	0.03

는 상태이므로 한국암반공학회(1995)에서는 c=0으로 인지하였다.

3. 벡터해석이론

암반의 구조적 특성에 따른 사면안정성을 신속하고 정확하게 평가하기 위해 Leung and Kheok(1987)에 의해 제안된 벡터해석이론에 기초한 Fortran 프로그램을 개발하였다. 불연속면의 주향 및 경사각도를 각각 α와 β라 두면(Fig. 2 참조) 경사벡터 d와 주향벡터 s는 아래의 식(1)과 (2)로 표현될 수 있다.

$$d = (\cos\beta\cos\alpha)i + (-\cos\beta\sin\alpha)j + (-\sin\beta)k \quad (1)$$

$$s = (\sin\alpha)i + (\cos\alpha)j \quad (2)$$

여기서, i, j, k는 각각 x, y, z방향에서의 단위벡터를 나타낸다. 면에 수직한 법선벡터 n은 하부쪽이 양의 방향으로 설정될 때 다음과 같은 경사벡터 d와 주향벡터 s의 벡터積(vector product)으로 표현된다.

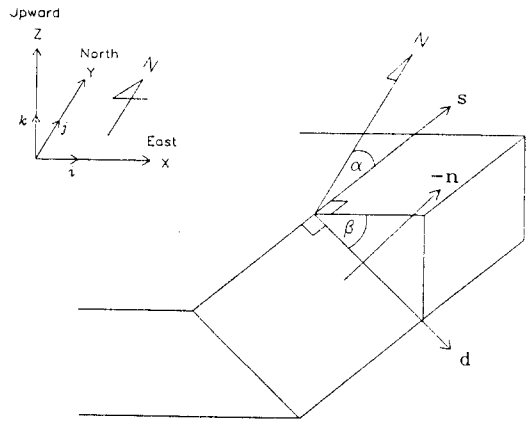

Fig. 2. Vector components of discontinuity.

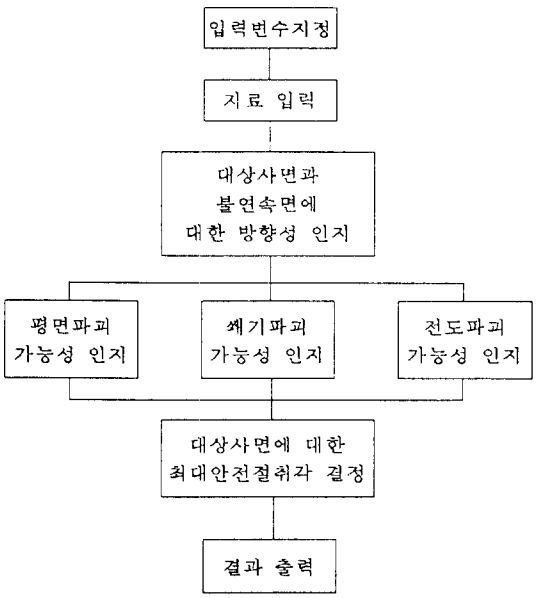

Fig. 3. Flow chart of computer program.

$$n = -s \times d \tag{3}$$

두 불연속면의 교차선을 따라 발생하는 쐐기파괴의 경우, 두 불연속면의 교선에 대한 벡터는 각 면의 법선벡터 n_1과 n_2의 벡터積(vector product)으로 표현된다.

$$\pm (n_1 \times n_2) = \pm \begin{Bmatrix} T1 \\ T2 \\ T3 \end{Bmatrix} \tag{4}$$

벡터해석법을 이용하여 최대가능한 사면절취각 산정을 수행할 수 있는 전산 프로그램을 개발하였다. 프로그램내에서 실행되는 전산처리작업의 흐름도를 Fig. 3에 도시하였다. 입력된 주절리군들의 방향성을 고려하여 평면파괴, 쐐기파괴, 전도파괴에 대한 가능성을 평가하고, 가능성이 인지된 파괴형태에 대한 최대가능 사면 절취각을 산정한다. 평면파괴의 경우 최대가능 절취각(θ) 산정은 Goodman(1980)에 의해 제안된 아래의 식을 이용하였다.

$$\theta = \tan^{-1}(\tan\delta / \sin\Sigma) \tag{5}$$

여기서 δ는 불연속면의 경사이며, Σ는 불연속면의 경사방향과 대상사면 주향사이의 각도이다. 따라서, 두개 분석 기준면의 방향성에 대한 3차원적 고려가 가능하다. 평면파괴 가능성이 인지되지 않을 경우의 최대 절취각은 90°(수직절개)로 평가된다.

쐐기파괴는 두 불연속면의 교선이 사면표면에 표출될 때 발생된다. 식 (4)를 이용하여 두 불연속면의 교선의 선경사(δ)와 선경사방향(γ)을 식(6)과 식(7)로 각각 유도할 수 있다.

$$\delta = \sin^{-1}\frac{|T3|}{\sqrt{(T1^2+T2^2+T3^2)}} \tag{6}$$

$$\gamma = \tan^{-1}(T1/T2) \tag{7}$$

쐐기파괴가 일어나기 위한 조건는 다음의 두가지로 요약된다. 첫째, 두 불연속면의 교차선의 선주향이 대상사면의 주향과 거의 평행해야 한다. 둘째, 두 불연속면의 교차선의 선경사가 대상사면의 경사보다는 작아야 하고 마찰각보다는 커야 한다. 쐐기파괴 가능성이 인지되지 않을 경우에는 평면파괴의 경우와 동일하게 수직절개 가능 사면으로 인지된다.

암반사면에서 전도파괴가 일어나기 위한 조건은 Goodman(1980)에 의해 제안되었다. 첫째, 불연속면의 주향이 대상사면의 주향과 거의 평행해야 한다(±30°이내). 둘째, 사면의 경사각이 (90-δ+ϕ)보다 작아야 한다. 여기서 δ는 사면의 경사이고, ϕ는 마찰각을 나타낸다. 이상과 같이 산정된 파괴형태별 최대가능 사면절취각 중 최소값을 나타내는 경우가 가장 가능성 높은 파괴형태로 결정된다.

4. 사면 안정성 분석

연구대상사면은 초기 설계단계에서 64°(1:0.5) 경사

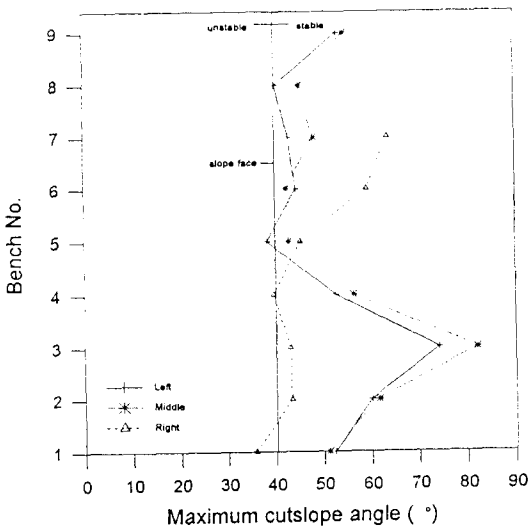

Fig. 4. Maximum cutslope angle in caes of ϕ=35°, c=0 kPa.

로 개착되었으나 대규모 사면붕괴가 발생하여 40° (1:1.2) 경사로 재개착되었다. 그럼에도 불구하고, 사면의 전반적인 불안정성은 해소되었으나, 각 소단에서 상당한 규모의 붕락이 지속적으로 발생하고 있는 상태이다. 이와같은 문제점을 해결하기 위하여 벡터해석법을 이용하여 대규모 다단 암반사면의 개착에 관한 최적 설계방안을 모색하였다. 일차적으로 암반사면의 구조적인 특징을 벡터해석법에 의거해 평가하였으며, 한계평형이론을 적용하여 각 소단별 안전율 분포를 조사하였다. 평면파괴 가능성이 인지되는 지역에 대한 안전율은 Hoek and Bray(1981)에 의해 제안된 한계평형식을 사용하여 산정하였으며, 쐐기파괴 가능성에 대한 안전율은 Hoek *et al.*(1973)에 의해 제안된 해법을 이용하여 평가하였다.

불연속면의 강도특성은 암반사면 파괴에 결정적인 영향을 끼치는 매우 중요한 요소이다. 한국암반공학회(1995)에서 결정한 조사사면에 발달된 불연속면의 평균 전단강도 ϕ=35°, c=0 을 이용하여 경사 40°인 현재 사면을 대상으로 벡터해석을 수행한 결과 Fig. 4에 도시된 것처럼 각 소단에서 더이상의 불안정성은 없는 것으로 평가되어졌다. 이와같은 분석결과는 지속적인 붕괴가 진행되는 현장상태와 매우 대치되며, 불연속면의 점착력을 무시할 경우 사면파괴가 발생되는 불연속면에서의 마찰각은 35°이하일 것으로 추정된다. 이에따라 가장 안전하다고 인지되는 역암을 제외한 사암과 셰일

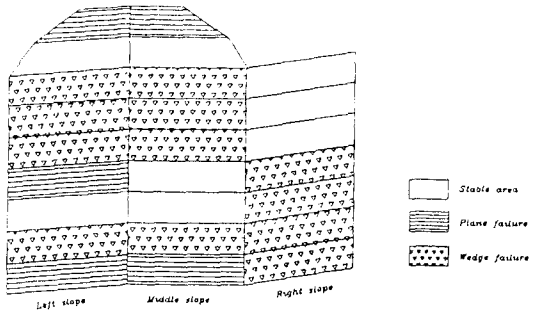

Fig. 5. Failure type at each bench when ϕ=30°, c=0 kPa.

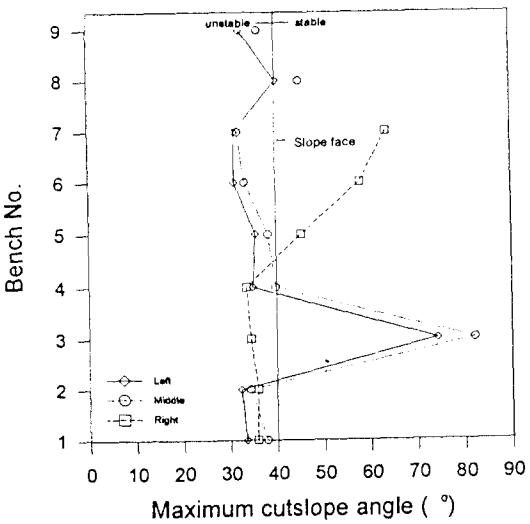

Fig. 6. Maximum cutslope angle in caes of ϕ=30°, c=0 kPa.

에서의 중간값인 ϕ=30°경우에 대한 안정영역과 불안정영역을 분석하였다. 추정된 전단강도정수 ϕ=30°, c=0 을 사용하여 분석된 소단별 파괴형태를 Fig. 5에 도시하였으며, 파괴형태별 안전율을 산정하였다. 그 결과 Fig. 6에 도시되는 것처럼 현장 사면과 유사한 불안정 상태가 나타남을 알 수 있었다. 산정된 안전율은 지하수압의 영향이 없는 건조상태일 경우에 대해서도 0.9~1.3 범위의 낮은 값을 나타내었고, 중앙이나 우측사면에 비해 좌측사면이 보다 낮은 값의 분포를 나타내었다.

굴착과정상 연구사면은 초기단계에서 대규모 붕괴가 발생하였다. 사면전반에 걸쳐 절리간격이 조밀하고 풍화정도가 심하여 보강공법보다는 경사완화 방안이 마

련되었고, 일차적인 경사완화 작업이 수행되어 사면의 전반적인 불안정성은 감소된 상태이다. 그러나 위에서 추정된 것과 같이 불연속면의 점착력이 실제로 없는 경우에는 경사완화에 따른 안전율의 증가를 기대할 수 없다(조와 김, 1995). 결과적으로 연구사면내에 전단파괴가 발생된 불연속면의 점착력이 실제적으로 존재하는 것으로 인식된다. 이에따라 한국암반공학회(1995)에서 수행한 절리면 전단시험 결과로부터 마찰각과 점착력을 재추정하였다. 다단계 전단실험 결과의 선형적 변화를 가정하여 추정된 전단강도정수는 Table 3에 수록되어 있다. 이들중 점착력이 없는 경우를 제외하고 가장 전단파괴에 취약할 것으로 판단되는 사암의 전단강도 ϕ=22.3°, c=40 kPa을 입력자료로 활용하여 벡터해석을 수행하였다. 사면경사도 40°에 대하여 분석된 세사면 방향에서의 소단별 안전율은 2.1~3.1의 높은 값을 나타낸다. 안전율이 매우 증가된 것은 한계평형이론에서 점착력에 의한 파괴 억제력이 매우 높게 형성된 결과이다. 실제로 다단계 전단실험에서의 법선응력범위는 대략 0.4~1.2 MPa이며, 이는 표층 암반사면에 작용될 법선응력보다 상당히 높은 수준이어서 실제보다 높은 점착력이 산정된 것으로 판단된다. 따라서 현장상태와 가장 유사한 안전율 분포를 나타내는 점착력을 역추정하였다. 그 결과 세방향 사면에서 c=5 kPa일 경우에 초기 점착력이 없는 경우에 추정되었던 안전율과 유사한 0.9~1.2사이의 안전율 분포를 나타내었다. 따라서 현장조사에서 인지된 대상사면의 불안정 상태로 보아 점착력을 고려할 경우에 대해 최종적으로 추정되는 전단강도 정수값은 ϕ=22.3°, c=5 kPa이다.

영구시설물인 댐의 안정성 확보를 위해서는 사면의 안전율이 매우 높게 유지되어야 한다. 그러나 분석대상 사면의 규모가 크고 현재 국부적인 파괴가 진행되는 점을 고려하여 안전율 1.5를 만족시키는 각 소단별 경사완화각을 기준 절취각으로 설정하였으며, Whittle-stone *et al.*(1995)이 제안한 Probabilistic Risk Analysis(PRA) 개념을 적용하여 소단별 경사완화에 따른 불안정 영역의 분포를 고려한 전체사면의 파괴가능성을 고찰하였다. 전통적인 결정론적 방법에 의해 도출되는 단일 안전계수 대신에 PRA 개념을 이용한 사면안정해석에서는 사면방향 변화에 따른 안전율의 분포를 인지하고 경사완화에 따른 불안정 영역의 증감을 고려하여 최적 절취각을 산정하였다. 위에서 추정된 불연속면의 전단강도 ϕ= 22.3°, c=5 kPa를 사용하여 사면경사완화에 따른 전체사면에서의 불안정 영역의 변화를 Fig. 7에 도시하였으며, 정밀한 분석을 위하여 안전율 1.5와 1.2에 대한 세 방향 사면에서의 불안정 영역 변화를 Fig. 8과 Fig. 9에 각각 도시하였다. 제안된 안전율 1.5에 대해 현재 상태인 40°(1:1.2) 경사에서는 Fig. 7에 도시된 것처럼 전체의 약 70%가 불안정 영역으로 평가되며, 안전율 1.2일 경우에서도 약 65%의 불안정 영역 분포를 나타내고 있다. 한국암반공학회(1995)에서 일차적으로 제안한 33.7°(1:1.5) 절취각에 대한 불안정 영역의 분포는 안전율 1.5와 1.2 모두에 대해 20% 이하의 낮은 값이 인지되어 상당한 수준의 안정성을 보장하는 절취각으로 인정된다. 그러나 안전율 1.5를 유지하기 위해 제안된 33.7°에 대해 3개 사면방향에서의 소단별 불안정 영역을 도시해 본 결과 Fig. 10에 제시된 것과 같이 우측사면은 모두 안정 영역으로 인지되는 반면, 중앙사면의 경우는 1, 9 소단이 불안정 영역으로 인지되며, 좌측사면은 3개 소단이 불안정 상태로 평가된다. Fig. 8에 도시된 안전율 1.5에 대한 분석결과에 의거할 때 가장 안정한 상태를 나타내는 우측사면의 경우에는 35°이하로 사면절취각을 선정할 필요가 없으며, 좌측 및 중앙사면의 경우에는 제안된 33.7°보다 약간 낮은 32~33°에서 최대 경사완화 효과를 기대할 수 있다. 즉 사면의 주향 변화에 따라 동일한 사면경사에 대한 안정성이 다르게 인지되며, 절취작업량을 절감시키기 위해서도 세방향사면에 대해 상이한 경사

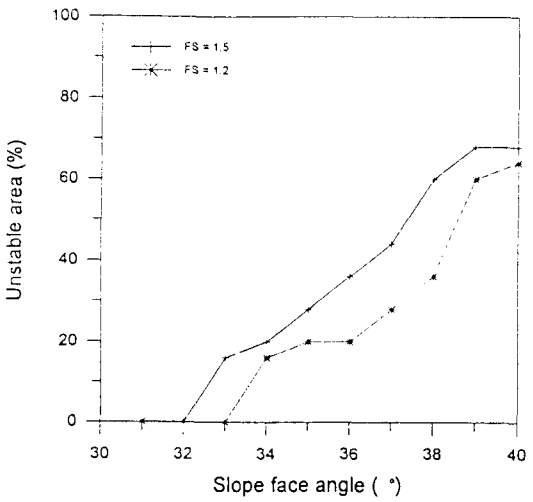

Fig. 7. Variation of the portion of unstable area for the entire slope.

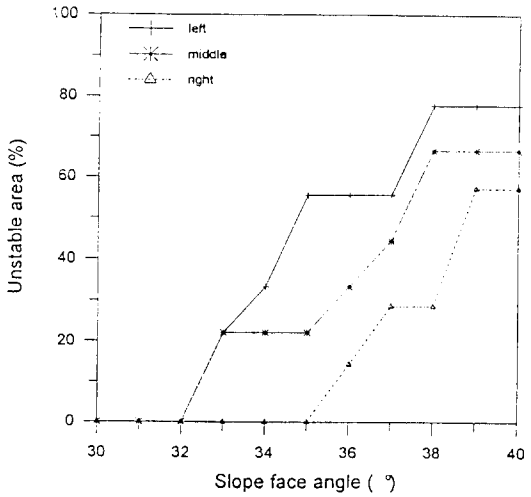

Fig. 8. Variation of the portion of unstable area with respect to the slope angle (FS=1.5).

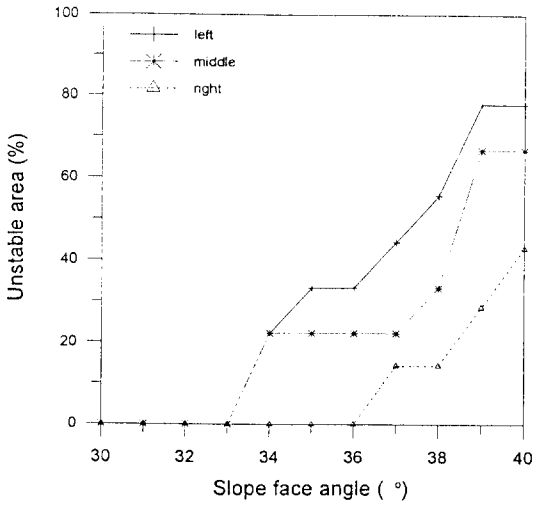

Fig. 9. Variation of the portion of unstable area with respect to the slope angle (FS=1.2).

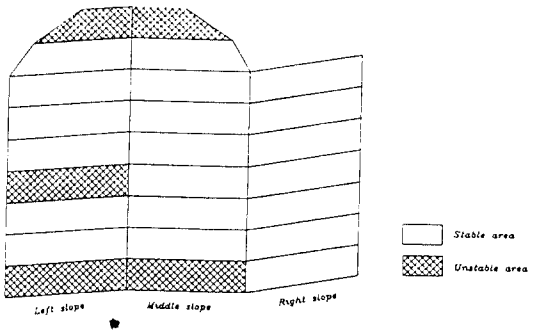

Fig. 10. Unstable area for slope face angle of 33.7° (FS=1.5).

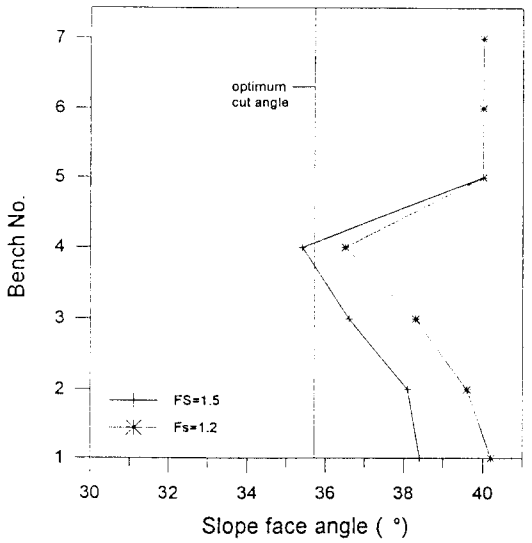

Fig. 11. Variation of cutslope angle for each bench (right slope).

완화각이 설정될 필요성이 절실히 요구된다.

가장 안정한 상태로 평가되는 우측사면의 경우 안전율 1.5를 기준으로 절취각에 따른 불안정 영역의 분포는 Fig. 8에 도시된 것처럼 40°(1:1.2) 경사에서 전체의 약 57%로 평가된다. 경사완화에 따른 불안정 영역 분포의 감소가 두드러지는 곳은 절취각 38°인 경우이다. 절취각 36°일 경우 약 14%의 불안정 영역 분포를 나타내며, 안전율 1.2일 경우에는 전반적인 안정성이 확보된다(Fig. 9 참조). 결과적으로 Fig. 11에 도시된 바와 같이 절취각 36°에서 가장 불안정한 상태인 소단 4에서의 안전율이 1.2를 초과하여 전체 우측사면의 안전성이 보장된다.

중앙사면은 제안된 안전율이 1.5일 경우에는 Fig. 8에서 인지되는 것처럼 사면 경사가 40°(1:1.2)일 때 전체의 약 70%가 불안정 영역으로 나타난다. 경사완화에 따른 불안정 영역 분포는 절취각 38°이하에서 효과가 발생하여 35°까지 불안정 영역의 감소가 증가한다. 한편 사면 경사를 35°이하로 완화했을 경우에는 안정성 증대효과가 매우 적으며, 안전율 1.2 경우에도 거의 동일한 현상이 나타난다(Fig. 8 참조). 따라서, 중앙사면에 대해 제안되는 최적 절취각은 약 20%가 불안정 영

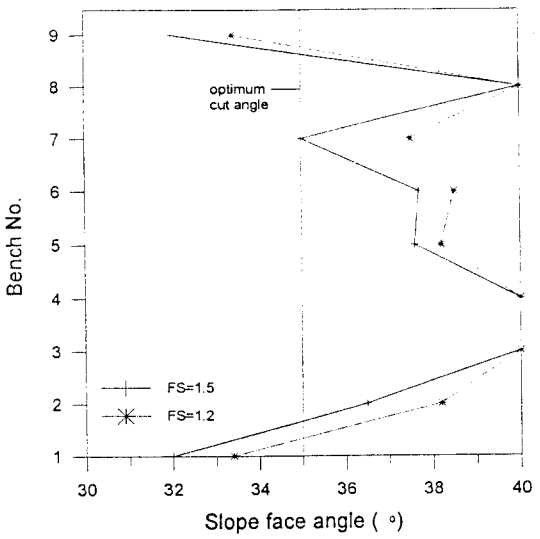

Fig. 12. Variation of cutslope angle for each bench (middle slope).

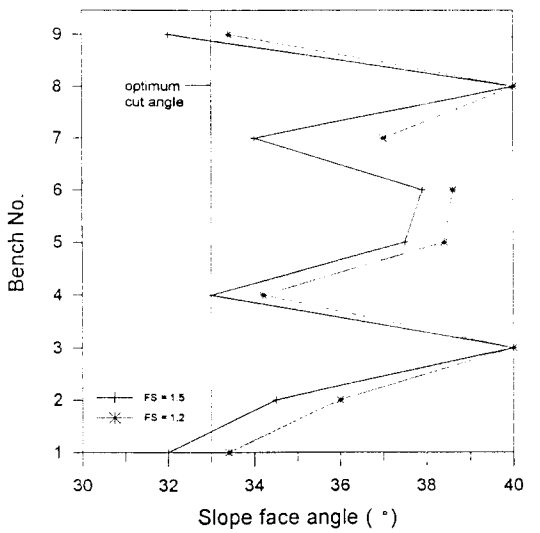

Fig. 13. Variation of cutslope angle for each bench (left slope).

역으로 평가되는 35°이며, Fig. 12에 도시된 것처럼 제안된 35°경사로 굴착할 경우 인지되는 불안정 영역은 평면파괴 가능성이 인지되는 1소단과 9소단이다. 1소단과 9소단에서 산정된 안전율은 사면경사가 35°일때 1.06이며, 경사가 33°로 완화되면 안전율도 1.26으로 증가한다. 그러나, 1소단은 중앙사면의 기저부를 형성하며, 절취각도가 완만하게 설정될 경우 상부개착작업에 의한 암반 절취량이 매우 증가하게 된다. 이와같은 현장작업상태를 고려할 때 1소단에서는 경사 35°로 개착한 후 안전율 증가를 위해 상당한 보강작업을 실시할 것을 제안하며, 최상부 9소단에서는 경사 33°로 개착할 것을 권장한다.

좌측사면의 경우 안전율 1.5에 대해 사면경사완화에 따른 불안정 영역의 분포는 40°(1:1.2)경사일 때 전체의 약 80%로 세방향 사면 중 가장 불안정한 상태를 나타내고 있다(Fig. 8 참조). 사면경사가 37°및 34°로 완화될 경우 불안정 영역의 감소가 두드러짐을 알 수 있다. 안전율 1.2의 경우도(Fig. 9 참조) 유사한 경사완화 효과를 나타내며, 특히 사면경사가 33°일 때 전 소단에서의 안전율이 1.2이상으로 매우 안정된 상태를 지시하고 있다(Fig. 13 참조). 결과적으로 좌측사면에 대해 제안되는 최적절취각은 3개 사면방향 중 가장 완만한 33°이다.

5. 결 론

암반사면의 안정성에 중요한 요소로 작용하는 암반의 구조적인 특성을 신속하고 정확하게 평가할 수 있는 벡터해석기법을 기반으로 한 전산 프로그램이 개발되었으며, 대규모 연구대상사면의 최적설계에 효율적으로 활용되었다. 벡터해석기법으로 분석된 연구대상사면의 안정성은 사면방향에 따라 변화되었다. 따라서 대상사면의 안정화 설계에 대한 합리적인 분석이 이루어지기 위해서는 전체사면에 대해 동일한 사면 안정화 방안을 모색하는 전통적인 해석기법보다는 사면 방향성 변화에 따라 세부적인 사면으로 분리시켜 각 지역별 안전율 변화상태 및 파괴가능성을 확률적으로 고찰하여 분석하는 것이 훨씬 효율적이었다.

참 고 문 헌

1. 조태진, 김영호, 1995, 일차파괴된 암반사면의 전단강도 및 보강설계법 고찰. 터널과 지하 공간, 5(2), 104-113.
2. 조태진, 이정인, 1992, 연속체 모델을 이용한 절리암반 거동의 수치해석. 한국자원공학회지, 29(5), 299-309.
3. 한국암반공학회, 1995, 保寧댐 切取 岩盤 斜面에 對한 安全 硏究. 한국자원연구소 연구보고서.
4. Cho, T. F. and Lee, C., 1993, A new discret

rockbolt element for finite element analysis. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 30(7), 1307-1310.

5. Goodman, R. E., 1980, Introduction to rock mechanics. 2nd edition. Wiley, New York.
6. Hoek, E., Bray, J. W., 1981, Rock slope engineering. Revised 3rd edition. Institute of Mining and Metallurgy, London.
7. Hoek, E., Bray, J. W., and Boyd, J. M., 1973, The stability of a rock slope containing a wedge resting on two intersecting discontinuities. Quarterly J. Engineering Geology. Vol.6, No.3.
8. Leung, C. F., Kheok, S. C., 1987, Computer Aided Analysis of Rock Stability. Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol.20, 111-122.
9. Phillips, F. C., 1971, The use of stereographic projections in structural geology. 3rd edition. Edward Arnold.
10. Priest, S. D. and Brown, E. T., 1983, Probabilistic stability analysis of variable rock slopes. Trans. Instn. Min. Metall. (Sect. A : Min. industry), 92, A1-12.
11. Whittlestone, A. P., Johnson, J. D., Rogers, M. E., and Pine, R. J., 1995, Probabilistic risk analysis of slope stability, Tran. Instn Min. Metall. (Sect. A : Min. industry), 104, A12-24.