

# 절리암반 사면의 안정성 해석 사례

## A case study on the stability analysis of rock slopes with discontinuities

송원경, 신희순, 선우춘, 박찬  
한국지질자원연구원

### 초 록

본 연구는 절리가 발달한 고속도로 절취 사면들의 안정성을 검토하기 위하여 수행되었다. 물성시험을 바탕으로 한 지질 강도지수(GSI)를 이용하여 절리가 발달한 암반에 대한 최적의 물성을 구하는 과정을 제시하였다. 안정성 검토를 위해 FLAC에 의한 수치해석을 실시하였으며 이 때 사용한 모델은 절리 발달 상태가 균일하게 분포하였으므로 Ubiquitous Joint Model을 선정하였다. 해석은 건기와 우기의 경우로 나누어 실시하였는데 조건에 따라 절리면의 강도를 달리 적용하였다. 본 논문은 굴착 사면에서 쉽게 접할 수 있는 절리암반 환경에서 최적의 물성을 결정하고 이를 이용하여 안정성을 분석할 때 하나의 참고자료로 활용할 수 있을 것이다.

**핵심어** : 절리, 암반사면, 암반물성, 수치해석

### 1. 서론

암반 사면의 안정성을 해석할 때 가장 중요하면서도 어려운 작업은 지반의 물성을 구하는 일이다. 일반적으로 암반 사면의 경우 실험실 및 현장 시험과 불연속면 조사 그리고 기존의 경험식을 이용하여 암반의 강도 정수의 범위를 결정한다. 해석에 사용되는 입력변수는 안전성을 우선하여 이렇게 결정된 값 중에서 낮은 값을 선택하는 것이 보통이므로 사면의 안정성을 확보하는 데는 큰 문제가 발생하지는 않을 것이다. 그러나 암석 자체의 강도는 높으나 절리가 발달한 암반사면일 경우에 사면의 거동은 암석 강도보다는 절리들의 구조와 절리면 물성이 지배하므로 통상적인 방법을 적용하는 것은 적절치 못하다.

본 연구는 이러한 지반 조건을 갖는 지역에 굴착중인 사면에서 최적의 암반물성을 결정하는 과정을 제시하고 이를 바탕으로 수치해석을 이용하여 안정성 해석을 실시한 사례이다. 연구 대상 사면은 OO고속도로 선형개량공사와 관련하여 굴착이 완료되었다가 다시 6차로로 확장하는 구간에 속해 있는 사면들로 그림 1은 그 중에서 대표적인 사면 모습을 보여주고 있다.

본 논문은 굴착 사면에서 쉽게 접할 수 있는 절리암반 환경에서 최적의 암반물성을 결정하고 이를 적용하여 안정성을 분석할 때 하나의 참고자료로 활용할 수 있을 것이다.

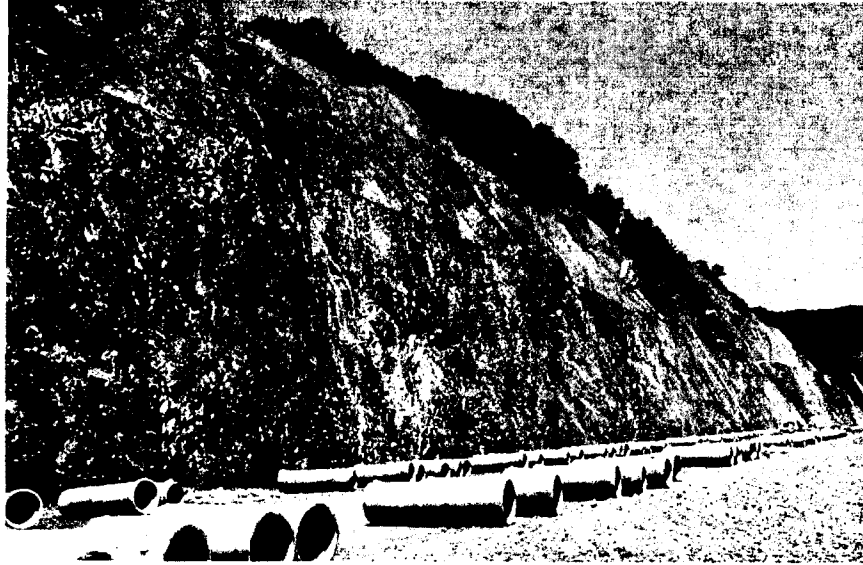


그림 1. 연구대상 사면 모습

## 2. 지질구조

조사 대상 사면은 OO고속도로 선형개량공사 구간에 있는 절취사면으로서 모두 5개의 사면으로 이루어져 있다(그림 2). 이곳은 옥천누층군이 분포하는 지역으로 세 번 이상의 습곡작용 및 트러스트 단층작용을 받는 등 한반도에서 가장 지질구조적으로 복잡한 곳이다. 본 구간은 주로 천매암 및 편암대와 함역(含礫) 천매암대 등 변성 퇴적암류가 분포하고 있으며 3-4 차례의 변형작용과 그 이후 단층작용에 의해 엽리들이 매우 교란되어 있어 풍화가 심하다.

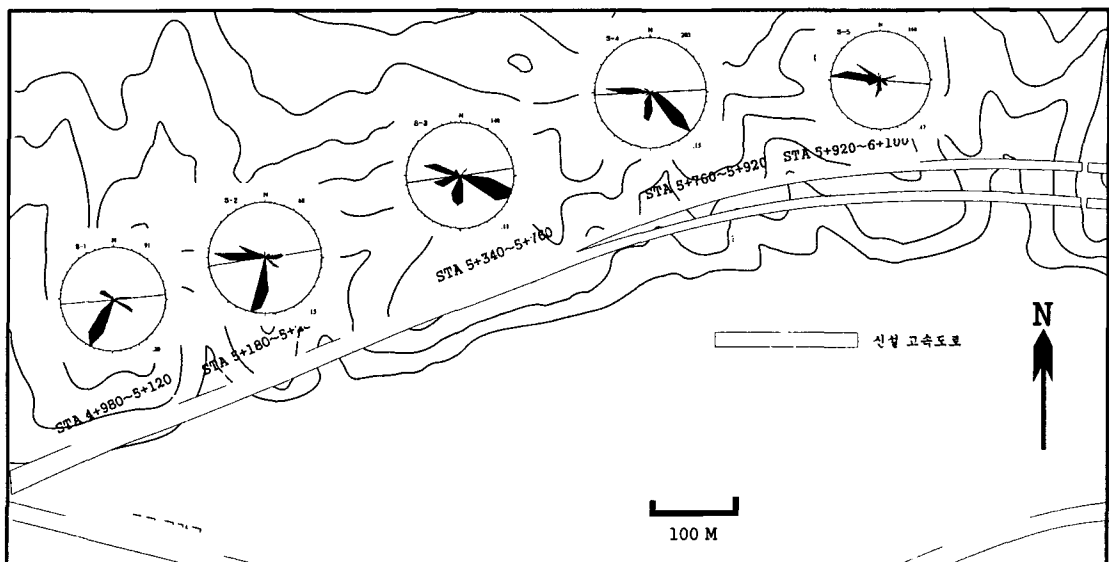


그림 2. 조사사면 주변 지질 및 불연속면들의 경사방향

조사구간 내의 천매암 또는 편암류 내에는 절리들이 평균 10-20cm의 간격을 가지며 발달하고 있다(그림 3). 표 1은 각 구간별 절리군들의 방향과 평균 간격을 표시한 것이다. 이 지역 전 구간의 대표적 절리는 대체로 북북서에서 북동방향의 주향을 가지며 동쪽으로 경사진 절리와 거의 남북에 가까운 주향에 남쪽으로 경사진 절리들이 발달하고 있다(그림 2 참조).

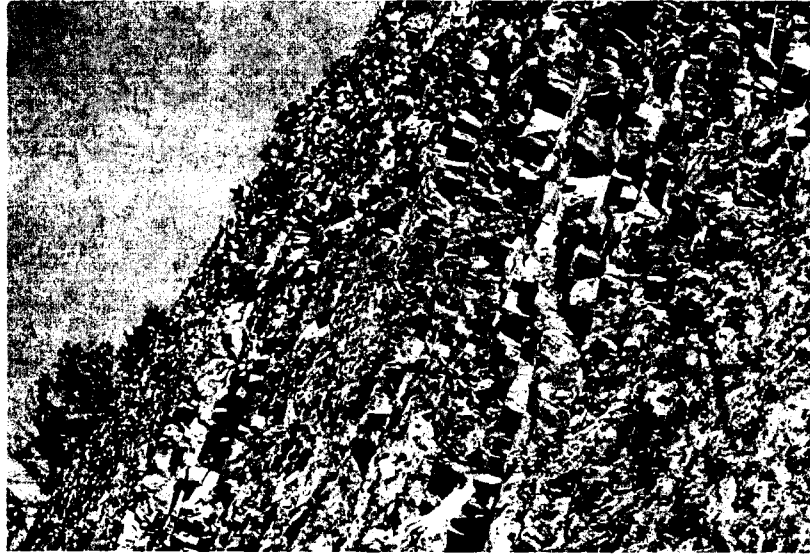


그림 3. 사면에 발달되어 있는 절리 모습

표 1. 사면별 절리군의 방향 및 간격

구간	절리군	경사방향 / 경사	간 격
사면 1 STA 4+980~5+120	set 1	207 / 62	17±14
	set 2	120 / 45	16±8
	set 4	081 / 52	46±23
사면 2 STA 5+180~5+280	set 1	185 / 77	14±5
	set 3	079 / 53	26±9
	set 4	130 / 83	
사면 3 STA 5+340~5+760	set 1	112 / 44	16±15
	set 4	186 / 78	17±11
	set 5	109 / 80	27±22
사면 4 STA 5+760~5+920	set 1	130 / 49	19±14
	set 3	192 / 74	24±17
사면 5 STA 5+920~6+100	set 2	073 / 64	20±16
	set 3	187 / 74	13±7
	set 4	286 / 76	42±40

### 3. 실험실 물성

#### 3.1 암석물성

현장에서 채취한 암석에 대하여 일축압축강도, 인장강도 시험결과 및 삼축압축강도 시험을 실시하였으며 그 결과는 표 2와 같다. 압축강도 평균이 1050kg/cm<sup>2</sup>로서 암석 자체는 매우 단단함을 알 수 있다.

표 2. 암석물성

Mechanical Properties	Sample No.			
	1-1	1-2	1-3	Average
Density(g/cm <sup>3</sup> )	2.77	2.80	2.78	2.78
Uniaxial Compressive Strength(kg/cm <sup>2</sup> )	930	1,160	1,050	1,050
Tensile Strength(kg/cm <sup>2</sup> )	130	150	130	140
Young's Modulus(10 <sup>9</sup> kg/cm <sup>2</sup> )	5.24	5.88	5.57	5.56
Poisson's Ratio	0.10	0.09	0.10	0.10
Cohesion(kg/cm <sup>2</sup> )	200			
Internal Friction Angle( ° )	45.1			

#### 3.2 절리면 전단강도

절리면을 포함하는 세 개의 시료에 대한 실내시험을 실시하여 절리면 거칠기 계수 JRC와 절리면 압축강도 JCS를 구하였다. 이를 이용하여 Barton(1976)이 제안한 식에 의하여 절리면에 대한 물성을 구하였으며 그 결과는 표 3과 같다.

표 3. 절리면 물성

Sample No.	JRC	JCS (MPa)	점착력 (MPa)	내부마찰각(°)
1	4-6	70	0.09	32.4
2	0-2	75	0	32.3
3	2-4	100	0.07	32.8
평균	2-4	82	0.05	32.5

### 4. 현지암반 물성

#### 4.1 암반 물성

절리가 발달한 암반의 강도와 변형률은 암반 파괴 시의 응력 관계로부터 유추할 수 있다. 암반 파괴시의 응력을 규정하는 관계식 중에서 가장 일반적인 형태는 Hoek-Brown 파

피조건식(1997)으로서 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (1)$$

- $m_b$       암반에 대한  $m$ 값
- $s, a$      암반 특성에 따른 상수
- $\sigma_{ci}$      실험실에서 구한 암석의 단축압축강도
- $\sigma_1'$      축압(axial stress)
- $\sigma_3'$      봉압(confining stress)

(1)식으로부터 암반의 인장강도는 다음 식으로부터 계산된다.

$$\sigma_{tm} = \frac{\sigma_{ci}}{2} \left( m_b - \sqrt{m_b^2 + 4s} \right) \quad (2)$$

(1)과 (2)식에서 상수  $m_b, s, a$ 를 구하기 위하여 Hoek(1994)이 도입한 Geological Strength Index(GSI)를 이용하였다. GSI는  $m_b/m_i, s, a$ 와 다음과 같은 관계를 갖는다.

▣ GSI ≥ 25 일 경우

$$\begin{aligned} \frac{m_b}{m_i} &= \exp\left(\frac{GSI-100}{28}\right) \\ s &= \exp\left(\frac{GSI-100}{9}\right) \\ a &= 0.5 \end{aligned} \quad (3)$$

▣ GSI < 25 일 경우

$$\begin{aligned} s &= 0.5 \\ a &= 0.65 - \frac{GSI}{200} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $m_i$ 는  $n$ 번의 삼축실험으로부터 구하는 상수로서 다음 식에 의하여 구한다.

$$m_i = \frac{1}{\sigma_{ci}} \left[ \frac{\sum xy - \sum x y / n}{\sum x^2 - (\sum x)^2 / n} \right] \quad (5)$$

위 식에서  $x = \sigma_3, y = (\sigma_1 - \sigma_3)$ 를 나타낸다. (5)식과 3장의 암석물성 시험결과로부터  $m_i$ 를 구하면 11.6이 된다.

GSI는 Hoek and Brown(1997)이 제안한 도표를 이용하여 결정할 수 있다(그림 4). 대상 사면의 암반은 절리들에 의해 블록이 매우 잘 발달되어 있고 약간 풍화된 상태이므로 GSI는 도표에서 원으로 표시된 영역에 속한다. 따라서 GSI는 40-50 사이의 값을 가지므로 그 중간 값인 45를 택하였다.

GEOLOGICAL STRENGTH INDEX	
<p>From the later codes describing the structure and surface conditions of the rock mass (from Table 4), pick the appropriate box in this chart. Estimate the average value of the Geological Strength Index (GSI) from the contours. Do not attempt to use the break (giving a range of GSI from 35 to 42) as more realistic than stating that GSI = 38.</p>	
STRUCTURE	SURFACE CONDITIONS VERY GOOD Very rough fresh unweathered surfaces GOOD Rough slightly weathered or stained surfaces FAIR Smooth moderately weathered or stained surfaces POOR Shattered highly weathered surfaces with large openings or things of angular fragments VERY POOR Shattered highly weathered surfaces with soft clay coatings or bluffs
	DECREASES IN SURFACE QUALITY
BLOCKY - very well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three orthogonal discontinuity sets	80
VERY BLOCKY - interlocked partially disturbed rock mass with multifaceted angular blocks formed by four or more discontinuity sets	70
BLOCKY-DISTURBED - a blocky and/or faulted rock mass with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets	60
DISTURBED-MASSIVE - poorly interlocked highly fractured rock mass with a mixture of angular and rounded rock pieces	50
	40
	30
	20
	10

그림 4. 절리 발달 상태에 따른 GSI 값(Hoek, 1997)

따라서 (3)식으로부터  $m_b$ ,  $s$ ,  $a$ 를 계산하면

$$m_b = 1.62$$

$$s = 0.0022$$

$$a = 0.5$$

그런데 Mohr 파괴포락선이 (1)식에 의하여 정의된다고 간주한다면 어떤 수직응력  $\sigma_n$ 이 암반에 작용할 때 점착력  $C$ 와 내부마찰각  $\phi$ 는 다음 식에 의하여 구할 수 있다(Hoek and Brown, 1997).

$$\phi = \arctan \left( AB \left( \frac{\sigma_n - \sigma_{tm}}{\sigma_{ci}} \right)^{B-1} \right) \quad (6)$$

$$C = \tau - \sigma_n \tan \phi \quad (7)$$

여기서

$$A = 10^{(\Sigma Y/T - B(\Sigma X/T))}$$

$$B = \frac{\Sigma XY - (\Sigma X \Sigma Y)/T}{\Sigma X^2 - (\Sigma X)^2/T} \quad (T \text{는 데이터 짝의 개수})$$

$$X = \log\left(\frac{\sigma_n - \sigma_{tm}}{\sigma_{ci}}\right)$$

$$Y = \log\left(\frac{\tau}{\sigma_{ci}}\right)$$

$$\tau = (\sigma_1 - \sigma_3) \sqrt{\partial \sigma_1 / \partial \sigma_3}$$

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial \sigma_3} = 1 + \frac{m_b \sigma_{ci}}{2(\sigma_1 - \sigma_3)}$$

또한 Hoek and Brown(1997)은 GSI로부터 암반의 탄성계수  $E_m$ 을 구하는 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$E_m (GPa) = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{(GSI-10)/40} \quad (8)$$

암석 시료에 대한 물성값과 (2), (6), (7), (8) 식으로부터 암반의 물성을 구하면 표 4와 같다. 그런데 실제 암반 물성은 안전 측면을 고려해야 하므로 GSI에 의해 구한 값보다 약간 낮은 값을 수치해석 입력자료로 사용하였다. 특히 점착력은 실제 암반 강도보다 크게 평가되는 것을 피하기 위하여 파괴조건식으로부터 구한 값의 75%를 적용하였다.

표 4. 수치해석 입력물성

물성	실험실	Hoek-Brown	입력값
단위무게, kg/m <sup>3</sup>	2780	-	2780
단축압축강도 $\sigma_{ci}$ , MPa	103	14.6	-
Poisson 비	0.1	-	0.1
탄성계수 $E_m$ , MPa	55000	7499	7500
점착력 $c_m$ , MPa	20	4.1	3
내부마찰각 $\phi_m$ , 도	45	31.4	30
인장강도 $\sigma_{tm}$ , MPa	14	0.14	0.1

## 4.2 절리면 물성

절리면 물성에 대한 입력자료는 표 3의 절리면 전단시험 결과를 근거로 표 5와 같이 결정하였다. 절리면 전단 시험은 사면 4에서 채취한 시료로만 수행되었으나 전 사면의 불연속면 상태가 거의 유사하므로 사면 2, 3의 절리면 물성도 사면 4와 동일하다고 간주하였다. 단, 표 5의 물성값은 건기에 해당하며 우기 시의 입력물성은 다른 값을 적용하였으며 이는 다음에 절에서 다루었다.

절리는 3개조로 형성되어 있으나 이중 사면에 가장 불리한 절리면을 선택하여 그 면이 수평면과 이루는 각을 입력자료로 정하였다. 점착력은 표 3의 시료 1과 3의 평균값을 취하였다. 또한 절리면의 인장강도는 암반과 같은 것으로 간주하였다.

표 5. 절리면 물성 입력자료(건기 시)

구분	시험값	입력값
경사*, 도	73.5	75
점착력 $c_m$ , MPa	0.08**	0.08
내부마찰각 $\phi_m$ , 도	32.5**	30
인장강도 $\sigma_{tm}$ , MPa	-	0.1

\*수평면에서 반시계 방향으로 잰 각. \*\*실험실 시험자료(표 3)

## 4.3 우기시 물성

우기 시 암반이 포화되어 수압이 작용할 가능성은 없는 것으로 판단된다. 그것은 사면 전면에 걸쳐 절리면이 매우 발달되어 있어서 사면내에 지하수가 유입되더라도 이 지하수는 절리면을 따라 쉽게 법면쪽으로 배출될 것이기 때문이다. 이는 실시설계 시 수행한 시추결과에서도 잘 나타나 있다. 당시 토질조사 보고서에 따르면 절토부 시추공인 CB-1공부터 6번 공까지 지하수가 전혀 관측되지 않았으며 CB-7번공(STA 5+850)에서만 사면 하부인 18.8m 심도에서 지하수면이 관측되었을 뿐이다.

이와 같이 지하수가 절리면을 따라 이동함에 따라 암반 자체의 강도에는 아무런 영향을 끼치지 않을 것으로 보이는데 반해 절리면 강도는 지하수 유동에 의해 상당한 영향을 받을 것으로 예상된다. 따라서 우기 시 모델에서는 지하수 유입에 따른 절리면의 강도 저하를 반영하기 위하여 점착력을 완전히 상실(점착력=0)하는 것으로 가정하였다(표 6).

표 6 절리면 물성 입력자료(우기 시)

경사	점착력	내부마찰각	인장강도
75 도	0.08 MPa	30 도	0 MPa



## 5. 수치해석

### 5.1 해석모델

암반은 천매암 또는 편암류의 매우 단단한 암석으로 구성되어 있는데 반해 전 구간에 걸쳐 절리들이 일정한 간격으로 매우 잘 발달해 있으므로 전반적인 암반의 거동은 이들 불연속면들에 의하여 결정될 것이다. 이러한 매질의 역학적 반응을 최적으로 구현할 수 있는 해석모델로서 ubiquitous joint model을 선정하였다.

ubiquitous joint model은 이방성 탄소성 모델의 하나로서 Mohr-Coulomb 고체에 연약면이 층을 이루면서 연속적으로 분포하는 경우에 적합한 모델이다. 이 모델에서 파괴는 암반 또는 미끄럼면(불연속면)에서 발생할 수 있으며 양쪽 매질에서 다 일어날 수도 있다. 이 때 암반의 역학적 거동은 고체와 절리면의 물성과 응력상태 그리고 미끄럼면의 각도에 의해 좌우된다.

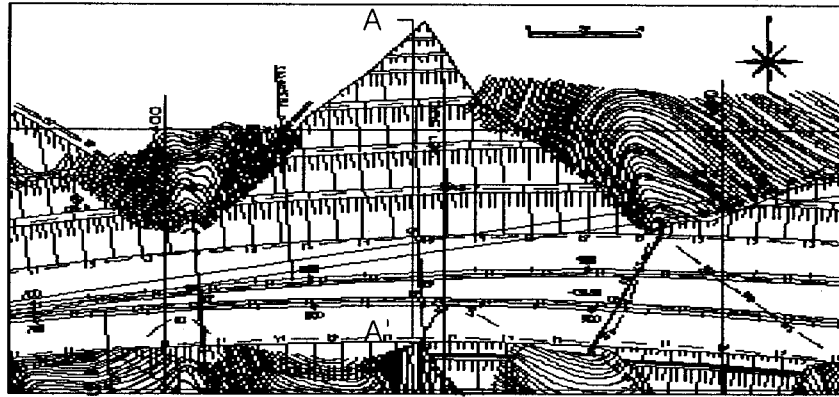
ubiquitous joint mode에 의한 수치해석을 위해서는 Mohr-Coulomb model에 필요한 입력 변수 외에 절리와 관련된 물성들이 추가되어야 한다. 여기에는 절리면의 점착력, 내부마찰각, 인장강도와 수평면에 대한 절리의 각도 등이 있다.

### 5.2 해석단면

실제 지층은 표토와 풍화암, 연암, 경암등으로 구성되어 있으나 표토와 풍화암층의 두께는 2-3m 내외로서 사면 규모로 볼 때 안정성에 있어서 역학적으로 중요한 역할을 하지 못할 것이므로 수치해석 모델은 단일 암반으로 구성되어 있는 것으로 간주하였다. 그림 5는 세계의 사면 중에서 가장 높은 사면 4에 대한 평면도와 단면도 그리고 실제 수치해석 모델을 보여주고 있다.

사면 3 (STA 5+840)

평면도



단면도

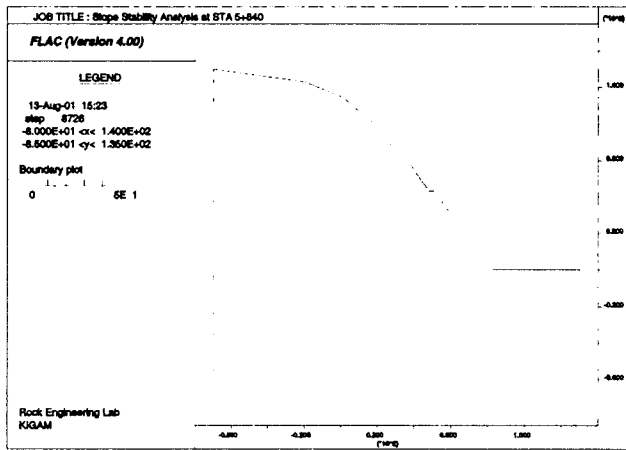
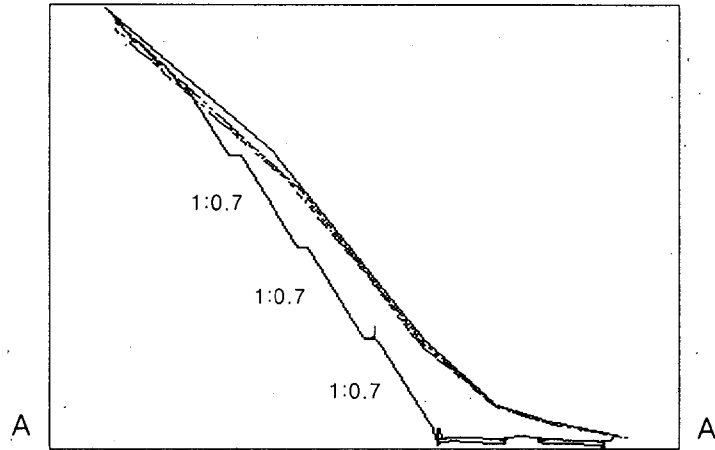


그림 5. 수치해석 단면

### 5.3 해석결과-건기

#### 5.3.1 사면 2

그림 6은 암반과 절리면에 발생하는 소성영역 분포를 보여주고 있다. 암반내에 국부적으로 인장파괴 영역(○로 표시된 부분)이 발생하며, 절리면에서는 미끄럼 파괴(△로 표시된 부분)가 발생하고 있다. 그러나 파괴영역은 일부 개소에 한정되어 발생하고 있으므로 사면의 전반적인 파괴는 일어나지 않음을 알 수 있다. 그림 7은 법면 중앙 일점에서의 x, y방향 변위 곡선으로서, 변위는 1cm 미만의 작은 값으로 수렴하고 있음을 볼 수 있다. 이러한 해석 결과로부터 사면 2는 붕괴가 발생하지 않으며 변형에 대한 불안정성도 없음을 알 수 있다.

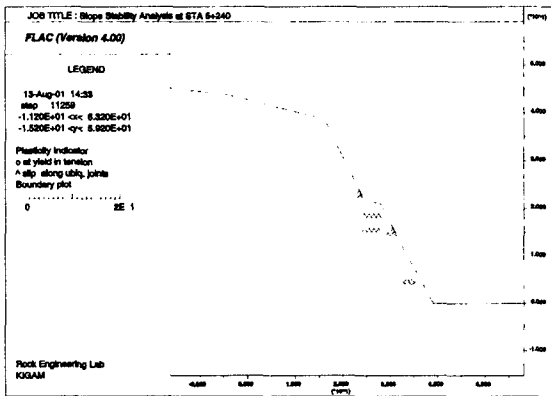


그림 6. 암반과 절리면 파괴영역 분포

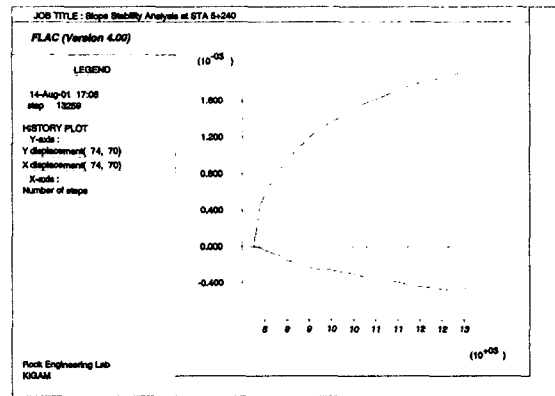


그림 7. 법면 일점에서의 x, y 변위

#### 5.3.2 사면 3

사면 3도 사면 2와 마찬가지로 암반내에 국부적으로 인장파괴 영역이 발생하며, 절리면에서는 미끄럼 파괴가 발생하고 있으나 파괴영역은 일부 개소에 한정되어 발생하고 있으므로 전반적인 파괴는 일어나지 않는 것으로 나타났다(그림 8). 또한 법면 일점에서의 x, y 변위는 1cm 미만의 작은 값으로 수렴하고 있다(그림 9). 따라서 사면에는 붕괴가 발생하지 않으며 변형에 대한 불안정성도 없음을 알 수 있다.

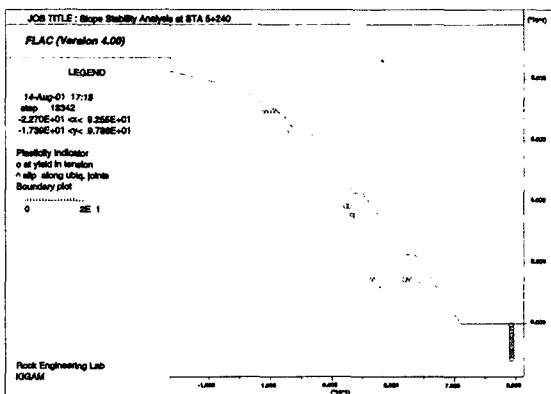


그림 8. 암반과 절리면 파괴영역 분포

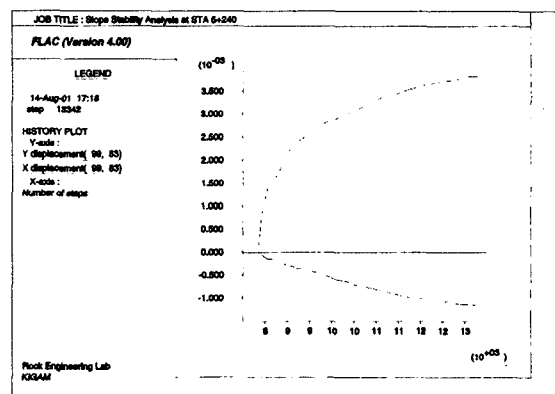


그림 9. 법면 일점에서의 x, y 변위

### 5.3.3 사면 4

사면 4의 경우에는 상당 부분에서 인장파괴 영역과 절리면의 미끄럼 파괴영역이 발생하고 있으므로 불안정한 상태임을 알 수 있다(그림 10). 그러므로 사면 중앙부를 중심으로 절리면을 따라 암석블록의 이탈로 인한 낙석이 우려되므로 이를 방지하기 위한 보강대책이 요구된다. 그러나 이들 파괴영역이 법면을 따라 연장되어 발달하지 않으며, 불평형력 곡선이 수렴(그림 11)하고 있으므로 사면의 전반적인 파괴는 일어나지 않을 것이다.

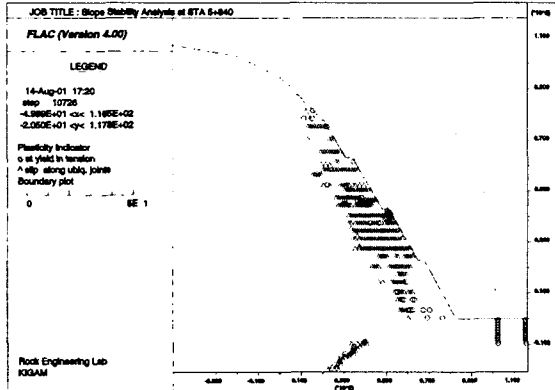


그림 10. 암반과 절리면 파괴영역 분포

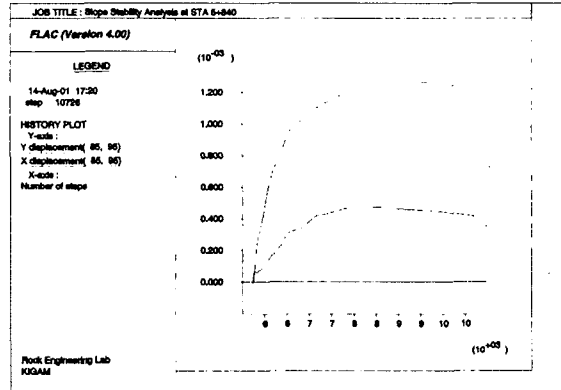


그림 11. 법면 일점에서의 x, y 변위

## 5.4 해석결과-우기

### 5.4.1 사면 2

우기 시 사면의 상당한 부분에서 인장파괴 영역과 절리면의 미끄럼 파괴영역이 발생하고 있으므로 불안정한 상태임을 알 수 있다(그림 12). 그러나 이들 파괴영역이 법면을 따라 연장되어 발달하지 않으며, 불평형력 곡선이 수렴하고 있으므로 사면의 전반적인 파괴는 일어나지 않을 것이다(그림 13). 따라서 사면 중앙부를 중심으로 절리면을 따라 암석블록의 이탈로 인한 낙석이 우려되므로 이를 방지하기 위한 보강대책이 요구된다.

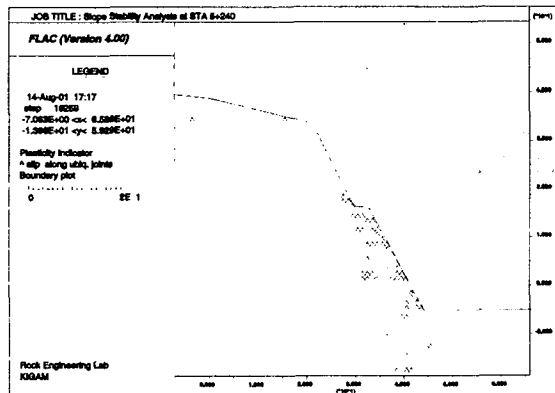


그림 12. 암반과 절리면 파괴영역 분포

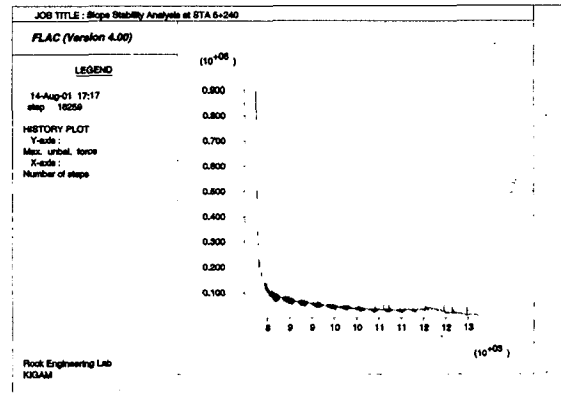


그림 13. 불평형력 곡선

### 5.4.2 사면 3

아래에서 두 번째 소단을 중심으로 넓은 범위에 걸쳐 인장파괴 영역과 절리면의 미끄럼 파괴영역이 발생하고 있으므로 불안정한 상태임을 알 수 있다(그림 14). 그러나 이들 파괴영역이 법면을 따라 연장되어 발달하지 않으며, 불평형력 곡선이 수렴하고 있으므로 사면의 전반적인 파괴는 일어나지 않을 것이다(그림 15). 따라서 사면 중앙부를 중심으로 절리면을 따라 암석블록의 이탈로 인한 낙석이 우려되므로 이를 방지하기 위한 보강대책이 요구된다.

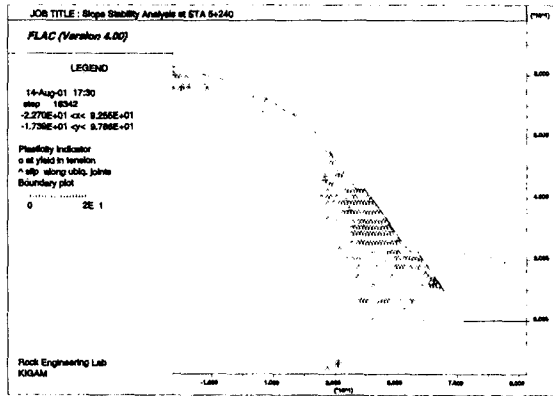


그림 14. 암반과 절리면 파괴영역 분포

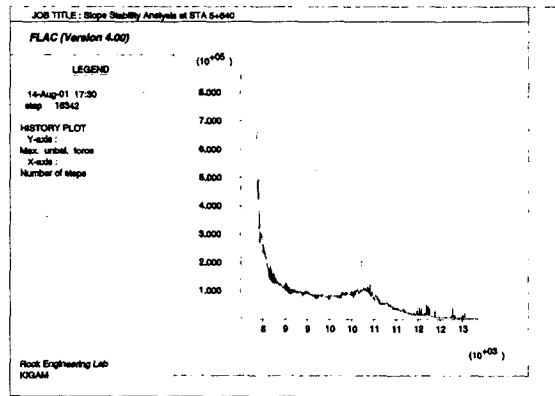


그림 15. 불평형력 곡선

### 5.4.3 사면 4

사면 전면에 걸쳐 인장파괴 영역과 절리면의 미끄럼 파괴영역이 발생하고 있으므로 불안정한 상태임을 알 수 있다(그림 16). 그러나 이들 파괴영역이 법면을 따라 연장되어 발달하지 않으며, 불평형력 곡선이 수렴하고 있으므로 사면의 전반적인 파괴는 일어나지 않을 것이다(그림 17). 따라서 사면 중앙부를 중심으로 절리면을 따라 암석블록의 이탈로 인한 낙석이 우려되므로 이를 방지하기 위한 보강대책이 요구된다.

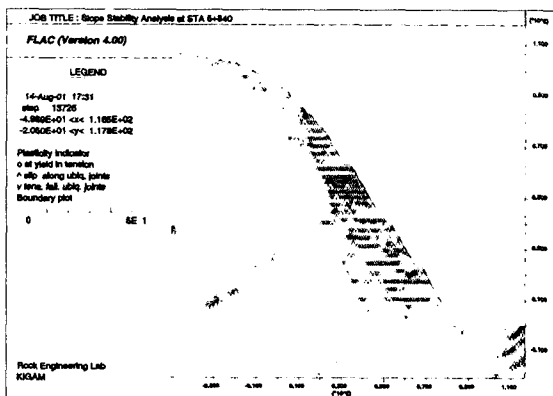


그림 16. 암반과 절리면 파괴영역 분포

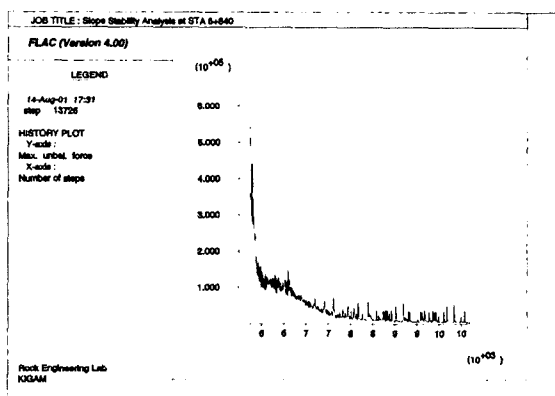


그림 17. 불평형력 곡선

## 6. 결론

불연속면이 발달한 지질조건에서 실제 암반 거동을 정확하게 예측할 수 있는 물성을 결정하는 일은 매우 어렵다. 특히 사면이 굴착되어 암반이 노출되면서 풍화가 동반될 경우에는 더욱 그러하다. 이러한 암반조건에서는 통상적인 방법으로 물성을 추정할 경우 지반 강도의 오차로 인해 안정성 분석 시 중대한 오차가 발생할 수 있다. 따라서 올바른 물성 결정을 위해서는 사전에 정밀한 지질조사를 통하여 지층상태를 명확히 파악하고 이에 알맞은 각종 실내 및 현장 시험을 실시하여 최적의 물성을 유추해 내야한다. 뿐만 아니라 암반조건에 따라 사면 거동을 가장 잘 예측할 수 있는 해석도구를 사용하여 안정성 분석을 실시하여야 한다.

본 연구에서는 지표지질조사를 통하여 절리발달 상태를 파악하였으며 실내 시험을 통하여 암석과 절리면의 물성을 구하였다. 이를 바탕으로 암반 물성은 GSI를 이용하여 구하였으며 FLAC의 수치해석 모델 중 지질조건에 가장 잘 부합하는 Ubiquitous Joint Model을 선정하여 안정성을 검토하였다. 이러한 일련의 해석과정은 절리가 발달해 있는 암반사면이라 하더라도 모든 경우에 일률적으로 적용할 수는 없으나 하나의 참고자료로 활용할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- Hoek, E and Brown, E. T., 1997, Practical estimates of rock mass strength, *Int. J. Rock Mech. Sci.*, Vol. 34, No. 8, pp. 1165-1186.
- Hoek, E, 1994, Strength of rock and rock masses, *ISRM News Journal*, Vol 2(2), pp. 4-16.
- Barton, N,R, 1976, The shear strength of rock and rock joints, *Int. J. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, V 13(10), pp 1-24.