

# 핵석사면의 붕괴특성 연구

이 수곤, 금 동현  
서울시립대학교 토목공학과

## 1. 서 론

절취사면을 굴착하는 경우에 암반 절취면에서 핵석이 발달하는 경우가 절개지들 중에 약 20-30% 될 정도로 많은 편이다. 이러한 경우에 토층내에 연암이 같이 혼재하는 경우에는 굴착전 사전에 시추 지질조사로서 판단하면 연암 사면이므로 1 : 0.5 구배로 설계하는 경우가 대부분이다. 그런데 이렇게 토층 사이에 연암이 핵석 형태로서 존재하는 사면에서 빈번히 대규모 사면 붕괴가 발생하곤 한다. 사면이 붕괴된 후에도 사면의 안정성 분석을 위하여 전체적인 지반강도정수를 판단하는데도 어려움이 있어서 간혹 사면의 안정성을 오판하는 경우도 있다. 본 연구는 경상남도 청암 지역 도로개설공사의 시공사례에 따른 정밀지표지질조사, 지반강도정수산정, 수치안정성 해석, 보강대책연구 등을 수행함으로써 핵석 지반의 붕괴특성 및 대책사례를 제시한다.

## 2. 지반조사

### 2.1 정밀지표지질조사

본 조사지역의 10개의 사면에 관하여 정밀지표지질조사가 수행되었는데 본 연구는 그 중 사면붕괴가 일어난 1개의 사면에 관하여 대책을 제시한다. 본 연구지역은 핵석풍화된 암석이 절개지 사면의 전반에 걸쳐 나타나고 있으며 사면의 상부로 갈수록 풍화가 많이 진행되어 핵석들이 흙 속에 박혀있는 형태를 나타낸다. 특히 본 조사지역은 지하수의 유출이 많아 암반의 풍화를 촉진시킬 것으로 예상된다.(1)

#### 2.1.1 핵석풍화

핵석이란 암반이 풍화하면서 암반의 불연속면의 틈새를 따라서 열수변질 작용 및 열수광화작용을 받아 암석들이 토층 사이에 끼여져 있는 형태를 나타내는 암석이다. 암석이 풍화될 경우에 지표면으로부터 점이적으로 풍화되는 경우가 일반적이고 특이한 경우로서 풍화토 풍화암내에 핵석이 관찰되는 경우가 있다. 본 지역에서는 전반적으로 볼 때 불규칙한 암석풍화상태(핵석발달)가 관찰된다. 지하에서 분출되는 열수용액이 절리 또는 단층을 따라서 침투하므로 특히 수직절리를 따라서 암석의 변질이 심하여, 절리 발달 빈도가 비교적 적은 부분에서는 핵석 형태로 남게되는 이유이다.<sup>2)</sup>

본 지역은 핵석이 비교적 발달된 지역으로 절취면의 상부와 하부에 핵석이 분포한다

#### 2.1.2 불연속면의 측정

현장에서 관찰할 수 있는 불연속면의 방향성을 측정하기 위하여 주향과 경사에 대하여 클리노미터를 사용한 직접측정방법을 선택하였다. 이렇게 측정된 결과는 평사투영도를 이용한 사면안정해석 프

로그그램인 DIPS의 자료로 사용하였다. 본 조사지역은 대규모 원형파괴가 일어난 지역으로 전반적으로 토사로 되어 있으며 핵석들이 중간중간에 분포하고 있다. 지하수 누수로 인해 토사가 밀려 내려온 것으로 판단되나 수평절리와 수직절리들이 끊어주는 역할도 한 것으로 판단된다. 쉼기파괴와 전도파괴의 양상도 보이고 있다.(Figure 2)

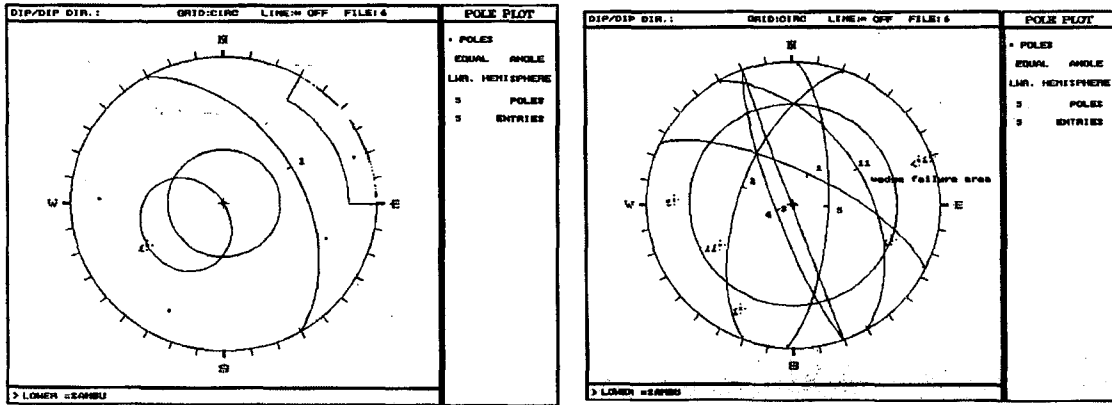


Figure 2. The analysis of stereonet(DIPS)

### 2.1.3 현장강도 측정

현장암반의 강도를 측정하기 위하여 슈미트 해머를 이용한 정량적인 방법을 사용하였다. 현장암반 강도의 측정은 현장 암반의 암질구분과 RMR을 이용한 암반분류를 위하여 반드시 필요한 측정항목이다. 본 지역의 현장암반강도를 판단하는데 있어서 전반적인 암반의 상태를 판단해야 하며 핵석은 본 사면의 강도에 큰 역할을 못하는 암석이므로 핵석에 슈미트 해머를 타격하여서 전반적인 현장암반 강도로서 판단하지는 말아야 한다. 본 지역의 평균슈미트 해머는 핵석은 35-40 정도로서 강한 암석이나 주변은 15-20 정도로 약한 경우도 있고 또한 토층도 많다.

## 2.2 지반강도정수 산정

본 연구의 지반강도정수 산정은 암석절리면 전단시험과 토질절리면 전단시험으로 얻어진 점착력과 마찰각과 RMR분류를 이용한 수치계산방법과 GSI를 이용한 방법으로 얻어낸 점착력, 마찰각을 비교하여 안전측의 설계를 하기 위한 값을 선택하였다. 다음 Table 1은 RMR, GSI 암석 및 토질 전단시험을 이용하여 가장 대표성이 있다고 판단되는 강도정수들을 사용한 것이다.

Table 1. Rock mass strength property for Program analysis

사면	위치	강도정수		
		C(kg/cm <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)	$r_f$ (t/m <sup>2</sup> )
1	풍화토	0.13	29	2.2
	풍화암	0.13	29	2.4

### 2.2.1 RMR 분류

본 지역은 점이적인 풍화형태 즉 하부에 연암이상의 암반, 상부에 풍화암, 풍화토가 존재하는 일반적인 사면이 아니며 핵석이 사면전반에 걸쳐 나타나고 있다. 따라서 사면을 5개로 나누어 측정하였으며 특히 이 지역은 지하수의 유동이 많으므로 지하수 항목에 대해서 매우 보수적인 점수를 부여하였다. 본 지역에 측정된 RMR분류는 Table 2와 같다.

Table 2. The result of Rock mass strength property used to RMR

사면		RMR에 따른 강도정수		
		RMR	C(kg/cm <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)
1	1소단	26	1~2	15~25
	2소단	29	1~2	15~25
	3소단	31	1~2	15~25
	4소단	40	1~2	15~25
	5소단	46	2~3	25~35

### 2.2.2 GSI

본 연구에서는 Hoek-Brown Model Program을 이용한 암반의 강도정수 해석방법과 RMR 분류 방법중의 등급에 따른 강도정수 해석방법, 그리고 삼축압축 강도시험을 통해서 수치해석을 통해 얻은  $m$ 값과  $s$ 값을 이용한 강도정수 해석방법을 이용하여 가장 안전측의 강도정수를 얻어내었다 각 방법에 의한 산출 값은 다음 Table 3과 같다.<sup>3)</sup>

Table 3. The result of Rock mass strength property used to GSI (Hoek-Brown Model Program)

사면		위치	GSI에 따른 강도정수		
			GSI	C(kg/cm <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)
1	1소단		10	2.20	35
	2소단		10	2.20	35
	3소단		10	2.20	35
	4소단		20	4.68	42
	5소단		25	6.88	46

### 2.2.3 암석절리면 전단시험

사면안정의 수치적 계산을 위한 재료의 전단강도 정수를 구하기 위하여 연암에서 경암까지의 암반에 대하여 마찰각과 점착력을 측정하기 위한 직접전단시험을 실시하였다. 본 지역을 연암과 경암으로 분류하여 직접전단시험을 통한 시료의 전단강도 정수를 구한 결과는 다음 Table 4와 같다.<sup>4)</sup>

Table 4. Physical properties of the specimens and the result of test

Site No.	Cohesion (kg/cm <sup>2</sup> )	Friction (degree; °)
1	1.79	35.76

### 2.2.4 풍화암/토질 직접전단시험

핵석 주변의 풍화암을 일반적인 실내암석시험으로 강도정수를 구하기에는 강도가 약하고 부스러지기 쉬워 Core 형태의 시료를 제작하는 데에는 어려움이 있다. 따라서 본 시험에서는 불교란 상태의 풍화토를 직접전단시험에 맞추어 점착력과 마찰각을 구하도록 하였다. 시료는 본 조사지역에서 3개 지역으로 나누어 각각 10개씩 직접 전단링으로 채취하였다. 시료의 채취방법은 사면의 하부에 존재하는 점토의 표면을 어느정도 제거한 이후 Sliding의 방향을 고려하여 같은 방향으로 실내에서 시험할 수 있도록 채취하였다. 본 지역을 풍화암과 풍화토로 분류하여 함수비시험과 직접전단시험을 통한 시료의 물성치와 전단강도 정수를 구한 결과는 Table 5와 같다.

Table 5. Physical properties of the highly weathered rock and completed weathered soil

Site No.	Class	Moisture content (%)	$\gamma_t$ (t/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (t/m <sup>3</sup> )	Cohesion (kg/cm <sup>2</sup> )		Friction (degree: °)	
					peak	resid.	peak	resid.
1	자연상태	24.3	1.80	144	peak	0.47	peak	33.5
					resid.	0.22	resid.	30.5
	함수상태	34.2	1.91	1.42	peak	0.25	peak	33.1
					resid.	0.13	resid.	29

### 3. 사면안정성 해석

본 연구의 사면의 안정성 해석은 수치해석 방법에 의하여 이루어졌다. 한계평형법은 안전율을 계산하기 위하여 사용되었으며 유한차분법(FDM)은 사면 전체의 안정성을 분석하기 위한 도구로 사용하였다. 한계평형 해석에는 SLOPE/W를, 유한차분법에는 FLAC을 이용하였다.

#### 3.1 한계평형법에 의한 안전율 계산

비교적 균질한 토사 및 풍화암층의 사면은 대부분 원호활동으로 붕괴되므로 표준구배에 의해 결정된 사면의 안정성검토는 캐나다 GEO-SLOPE사의 Dr. Fredlund와 Dr. Krahn이 개발한 PC-SLOPE/W Program을 이용한 한계평행법으로 실시하였다.

SLOPE/W Program을 Bishop의 간편법, Fellenius 방법, Janbu의 간편법, Spencer 방법, Morgenstern-Price 방법, Lowe-Karafiath 방법 및 Corps of Engineers 방법 등에 의해서 사용자가 지정한 가상활동면의 안전율을 구하거나 임의 발생에 의한 가상활동면의 안전율을 구하는 프로그램이다. 본 사면을 여러개의 절편(Slice)으로 나누어 임의의 가상파괴면(Potential Slip Surface)에서의 한계평형 상태를 가정하여 활동모멘트(Driving Moment)와 저항모멘트(Resisting Moment)의 비를 안전율로 계산하며, 가상파괴면중 최소의 안전율을 나타내는 가상 파괴면을 예상 파괴면으로 가정한다. 이 최소 안전율을 사면의 안전하기 위해서는 어느 기준을 만족해야 하며 이 때의 최소 안전율 기준은 일반적으로 적용하고 있는 절·성토부의 기준최소안전율을 적용하였다. 본 조사사면을 해석한 결과 건기시 안전율이 0.839이며 우기시 0.424로 측정되었다. 본 사면은 매우 위험한 사면으로 보강이 절실한 것으로 판단되었다. (Figure 3)

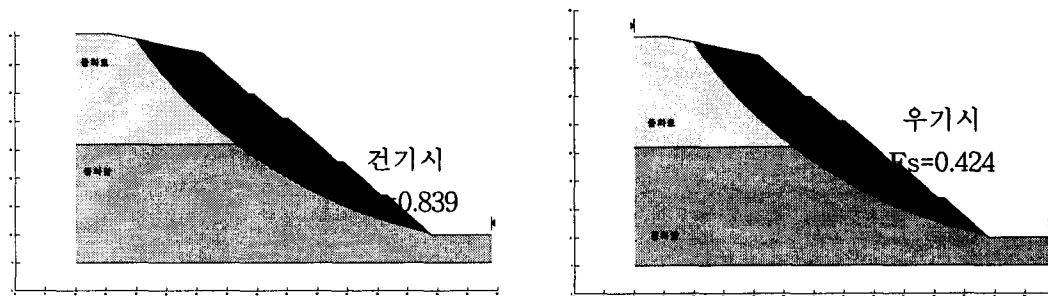


Figure 3. The result of SLOPE/W

#### 3.2 유한차분법에 의한 안정성 해석

본 조사사면은 유한 차분법을 사용하는 FLAC을 이용하여 암사면을 연속체로 보고 사면의 형상과 지질조건에 따른 안정성을 검토하였다. 본 사면의 해석결과 풍화암층 사면의 전체에 걸쳐 소성이완영

역과 전단파괴영역이 분포하고 있고, 사면의 내부까지 깊게 분포하는 양상을 보인다. 또한 풍화암층의 사면에서 가장 큰 변위를 보였으며 크기가 20mm 정도로 비교적 큰 값을 보였다. 따라서 본 사면에서는 풍화암층과 상부전체의 사면에 걸쳐 상당히 불안정한 것으로 판단되었다.(Figure 4)

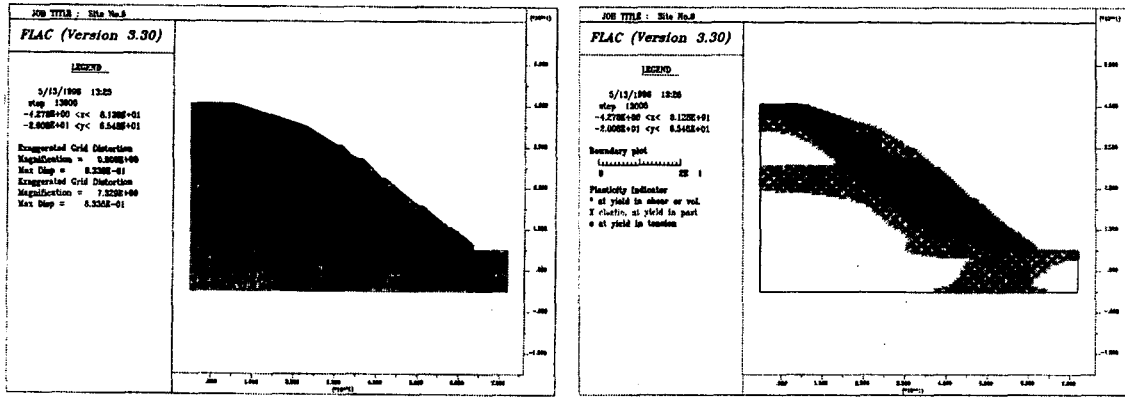


Figure 4. The result of FLAC

#### 4. 보강대책

본 조사사면은 핵석풍화된 지역이며 또한 지하수 누수가 많고 사면전반에 걸쳐 토사와 핵석이 분포하며 대규모 암맥이 존재하는 등, 매우 복잡한 지질형태를 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 프로그램 해석시 필요한 지반강도 정수를 매우 안전측으로 주어 사면을 설계하였다. 한계평형법에 의한 안전율과 수치해석에 의한 안정성 해석을 한 결과 4가지의 보강대책을 제시하고자 한다.

##### 4.1 제 1 안 Soil Nailing 보강방법

Soil Nailing 보강방법으로 안전율이 1.374가 나왔으나 Soil Nailing의 길이가 하부쪽에는 35m가 되어 시공성이 결여되어 있고, 또한 항구적인 안정성도 결여되어 있다. 지하수 조건과 지질조건을 고려 시 배수공을 설치하더라도 100%는 어렵고 억지력을 상실한다. 경제성도 결여되어 있다.(Figure 5)

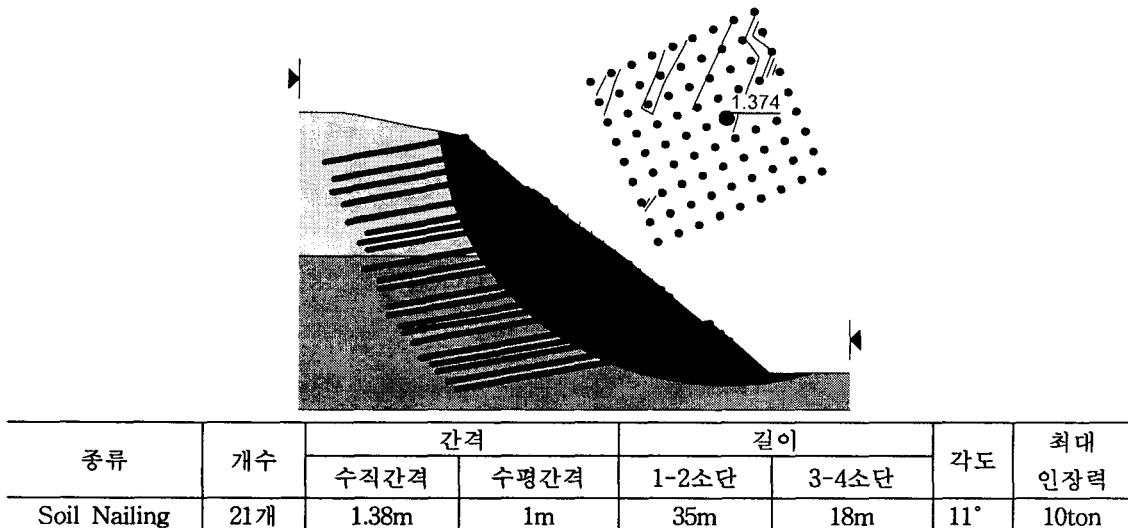
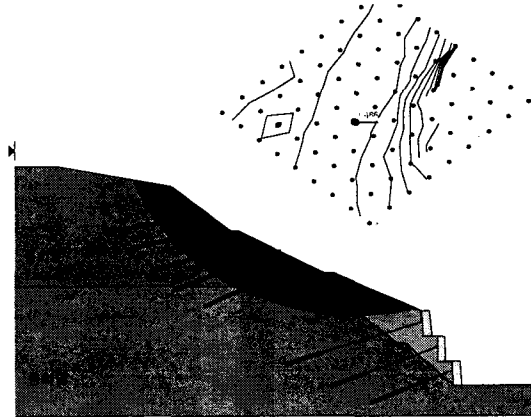


Figure 5. Soil Nailing reinforcement

#### 4.2 제 2 안 3단 옹벽설치 및 앵커보강방법

이 방법은 SLOPE/W 해석시 안전율이 1.466이 나왔다. 항구적인 안정성 확보가 어렵고 FLAC 해석시 옹벽에서 변위가 많이 발생하는 것으로 보인다. 시공성과 경제성이 결여되어 있다.(Figure 6)



##### 1) Soil Nailing

종류	개수	간격		길이		각도	최대 인장력
		수직간격	수평간격	1-2소단	3-4소단		
Soil Nailing	5개	2m	1m	-	13.45m	11.23°	10ton

##### 2) earth anchor

종류	개수	간격		길이		각도	최대 인장력
		수직간격	수평간격	자유장	정착장		
earth anchor (3개)	1단	4m	2m	11.75m	5m	25.31°	50ton
	2단			15.22m	5m	24.32°	50ton
	3단			19.37m	5m	20.56°	50ton

Figure 6. Retaining wall and earth anchor reinforcement

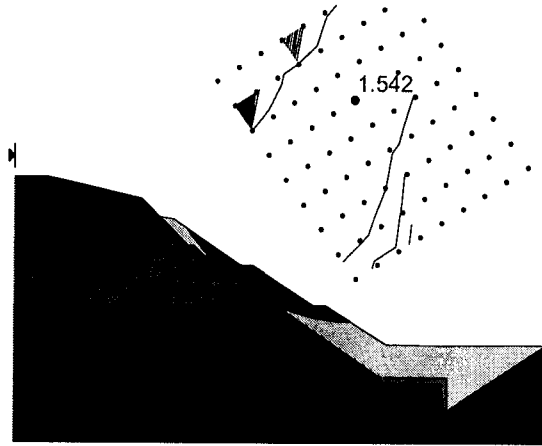
#### 4.3 제 3 안 BOX 설치 및 앵커보강방법

이 방법은 SLOPE/W 해석시 안전율이 1.542가 나왔다. 안정성이 용이하고 항구적인 안정성 확보가 보장되며 FLAC 해석결과도 비교적 변위가 적어 안전한 것으로 판단된다. 공사비가 다소 많이 들며 지하수 조건을 고려한 경우에 배수 시스템을 완벽하게 시공한다면 가장 바람직한 방법이다.(Figure 7)

#### 4.4 제 4 안 구배완화방법

이 방법은 SLOPE/W 해석시 안전율이 0.709가 나왔다. 절취구배를 1:1.5로 하였으나 안전율이 1.5 미만으로 위험한 것으로 판단된다. 더욱이 본 지역의 지역여건상 절취고가 급격히 증가하여 또 다른 비탈면이 불안정성을 유발시킬 수 있는 문제점도 있다.(Figure 8)

4개의 보강대책을 검토한 결과 경제성이 다소 떨어지지만 항구적인 절취면의 안정성 확보와 시공성을 고려해 볼 때 제 3 안이 가장 바람직한 것으로 나타났다.



**Earth Anchor**

종류		간격		길이		각도	최대 인장력
		수직간격	수평간격	자유장	정착장		
earth anchor	1단	3m	1.5m	20m	5m	15.64°	50ton
	2단			20m	5m	19.53°	50ton

Figure 7. BOX and earth anchor reinforcement

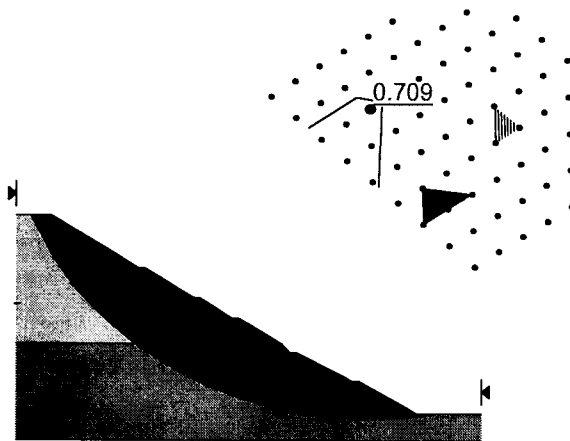


Figure 8. A slow gradient method(1 : 1.5)

Table 6. A comparative study of reinforcement on slope stability

	제 1 안 Soil Nailing 보강방법	제 2 안 3단옹벽 설치+앵커보강	제 3 안 Box설치+앵커보강	제 4 안 재절취
안정성	-안전율이 1.374 -항구적인 안정성은 결여	-안전율 1.466 -항구적인 안정성 확보가 어려움	-안전율이 1.542 -안정성 용이 -항구적인 안정성 확보가 보장됨	-현장 지질 및 지하수 조건을 고려시 1:1.5 이하로 하더라도 안정성 확보가 어려움
시공성	-시공성 확보가 어려움	-시공성 불량 -배수공 설치시 시공성이 결여	-시공성도 용이	-1:1.5-1:2로 재절취+역지공(Soil Nailing, 옹벽, 앵커 포함) -역지공 하중이 너무 과다하여 시공성 확보가 어려움
경제성	-공사비가 많음	-공사비가 많이 듦	-공사비가 다소 많이 듦	- 비 경제적임
기타	-지하수조건과 지질조건 고려시 배수공을 설치하더라도 100%는 어려움 -역지력 상실	-옹벽을 세우고 난후 성토를 할 경우 Refilling Material 다짐 철저히 -이 방법을 선택한다면 말뚝기초가 필요함 -지하수 조건 고려시 지반지역 확보 어려움	- 본 사면은 지하수 유출이 많으므로 배수 시스템을 완벽하게 시공요망	-지형조건시 절취고가 급격히 증가하여 또 다른 비탈면이 불안정성을 유발시킴
결과	경제성은 다소 떨어지더라도 항구적인 비탈면의 안정성 확보와 시공성을 고려해 볼 때 제 3 안 이 가장 바람직함			

## 5. 결론

핵석 지반은 일반적인 시추조사로서 설계하는 경우에 암반으로 고려되어서 가파르게 절취구배를 설계하곤 한다. 그러나 실제로는 핵석지반내에 존재하는 연암-경암질 암석은 지반강도에 큰 역할을 하지 못하고 주로 핵석주변의 풍화암-풍화토에 의해서 지반강도가 결정되므로 사전에 설계단계에서 이러한 핵석지반의 강도특성에 따른 사면안정성 검토를 수행한 후에 절취구배를 결정하여야 한다.

## 참고 문헌

1. Lee.S.G and de Freitas. M .H "A revision of Description and classification of weathered granite and its application to granite in Korea", Quaraterly Journal of Engineering Geology, London, 1989, Vol.22, pp. 31-48
2. Olliver, "Weathering", Longman, London 1984, pp.270
3. E. Hoek & E. T. .Brown "Underground Excavations in Rock", The Institution of Mining and Metallurgy, London, 1980, pp. 131-149
4. E. Hoek & J. W. Bray "Rock Slope Engineering", The Institution of Mining and Metallurgy, London, 1981, pp. 83-90