

# 대절토 암반 사면의 안정 해석 및 보강 대책 검토 사례

## A case study on stability analysis of a high cut rock slope and its reinforcing system

김 선 기(Kim, Sun-Ki)  
이 근 채(Lee, Kun-Chai)

대림산업 기술연구소  
대림산업 기술연구소

### 1. 서론

본 연구는 평택-안성간 고속도로 제 4 공구 현장 중 안성 방향 STA.3+100~3+500 구간과 평택 방향 STA.3+100~3+280 구간의 절토 사면에 대한 안정성 검토와 이에 따른 적절한 보강 대책에 관한 사례 연구이다. 연구 대상 사면은 총 연장 약 500m, 최대 높이 90m에 이르는 대절토 사면으로서 기존의 경부고속도로와의 접속부와 I.C.가 인접한 이유로 터널로 계획되지 못한 반면 풍화와 불연속면의 발달이 심하고 절취고가 높아 전반적인 사면 안정성에 대한 검토가 요구되었으며 이에 따라 자세한 현장 조사와 이에 따른 사면 안정 검토가 이루어졌다. 검토 결과 안정 대책으로는 사면의 절취 경사를 완화하는 방안과 록볼트 등에 의한 보강 방안을 제시하였다.

### 2. 현장 조사 결과

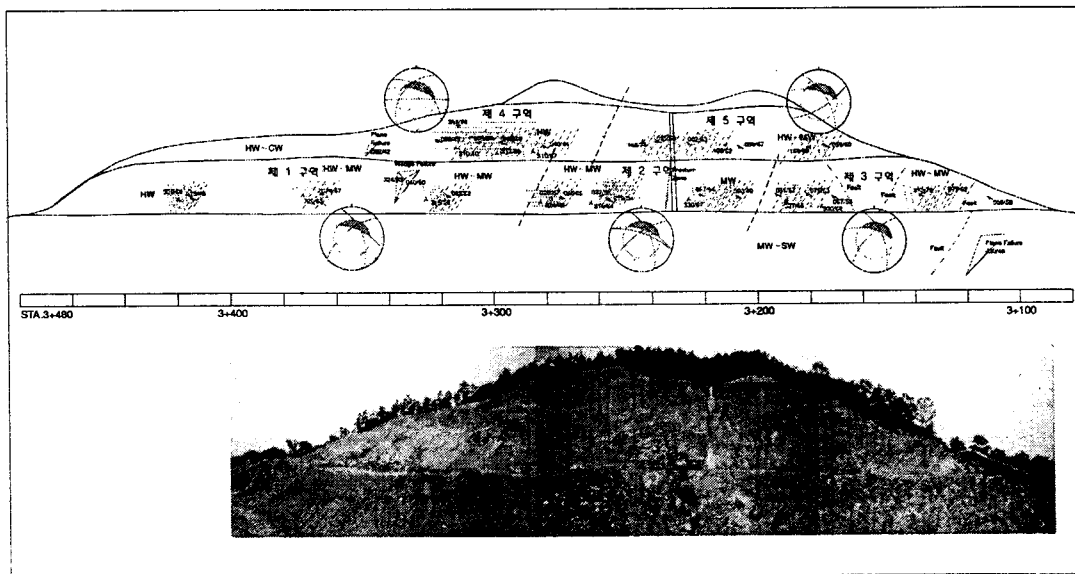


그림 1. 안성 방향 현장 조사 맵핑도

## 2.1 안성 방향 사면(STA.3+100~3+480)

안성 방향 사면의 조사 구간은 STA. 3+100~3+480에 해당하는 구간이며 조사는 현재 절취가 진행 중인 제 1 단은 제외하고 제 2 단 상부에 대하여 실시하였다. 조사는 제 2 단과 제 3 단을 5 개 구역으로 나누어 진행하였으며 각 구역에 대한 조사 결과는 다음과 같다.

### (1) 제 1 구역(2단 STA.3+480~3+320)

안성 방향 제 1 구역은 제 2 단의 STA.3+480~3+320 구간으로 기본적으로 편리 계열의 불연속면이 1개조 발달하고 있으며 그 평균 방향성은 070/52이며 이외에 평균 방향이 321/61인 1개조의 불연속면이 더 분포하고 있는 것으로 나타났다. 이 구역에서는 이 두 개조의 불연속면에 의한 썩기가 형성되어 있으며 소규모의 썩기 블록이 탈락 곳을 다수 관찰할 수 있었다. 또한 높이 약 15m에 이르는 대규모 활동 파괴가 일어난 것을 관찰할 수 있었는데 이 역시 이 두 불연속면군에 의한 썩기 활동인 것으로 판단된다. 모암의 상태는 종점 쪽으로 갈수록 풍화와 변질이 심하여 종점 쪽은 심한 풍화(HW) 정도의 상태를 보이고 시점 쪽으로 갈수록 보통 풍화(MW) 정도로 향상되는 것으로 관찰되었다.

### (2) 제 2 구역(2단 STA.3+320~3+200)

안성 방향 제 2 구역은 제 2 단의 STA.3+320~3+200 구간으로 이곳의 불연속면 발달 상태는 기본적으로 제 1 구역과 동일하다. 다만, 사면과 경사 방향이 거의 일치하는 고경사의 불연속면이 한 개조 더 존재하는 것으로 나타났으며 이 절리군의 평균 방향성은 020/67 이다. 이 구역은 심한 풍화(HW) 내지 보통 풍화(MW) 정도의 풍화 상태를 보이고 있으며 중앙부에 종배수로 위치에 수직 단층대가 존재하고 있는 것이 확인되었다.

### (3) 제 3 구역(2단 STA.3+200~3+100)

안성 방향 제 3 구역은 제 2 단의 STA.3+200~3+100 구간으로 이곳의 불연속면 발달 상태는 역시 1, 2 구역과 기본적으로 동일하여 편리 계열의 불연속면과 1개조의 불연속면군이 존재하고 있다. 시점 쪽에는 2개소 정도의 단층파쇄대가 존재하다.

### (4) 제 4 구역(3단 STA.3+460~3+260)

안성 방향 제 4 구역은 제 3 단의 STA.3+460~3+260에 해당하는 구간이다. 이 구역의 불연속면 분포 현황은 편리 계열의 불연속면과 2개조의 절리군이 발달하고 있는 것으로 나타났다. 편리의 방향성은 사면의 방향과 그 경사 방향의 차이가 적어 편리에 의한 평면 파괴의 가능성이 높으며 실제로 소규모의 평면 파괴 활동 흔적들을 관찰할 수 있었다. 이 구역은 풍화가 심한 편으로 종점측은 완전 풍화(CW) 내지는 심한 풍화(HW)의 상태를 보이고 있으며 시점측으로 오면서 심한 풍화 정도의 상태를 보이고 있다.

(5) 제 5 구역(3단 STA.3+260~3+140)

안성 방향 제 5 구역은 제 3 단의 STA.3+260~3+140의 구간으로 편리 계열의 불연속면과 1개조의 절리군이 존재하고 있으며 이 절리군의 평균 방향성은 149/68로 그 주향이 여타 구역의 절리군과는 다른 양상을 보이고 있다. 이곳의 풍화 정도는 심한 풍화(HW)에서 보통 풍화(MW) 정도의 양상을 보이고 있다.

2.2 평택 방향

평택 방향 사면의 조사 구간은 STA.3+100~3+280에 해당하는 구간으로 절취가 진행 중인 1단을 제외한 2단 이상에 대한 조사를 실시하였다. 조사는 2단을 기준으로 2개 구역으로 나누어 실시하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 제 1 구역(STA.3+100~3+200)

평택 방향의 제 1 구역은 STA.3+100~3+200에 해당하는 구간으로 이곳의 불연속면 분포는 편리 계열과 2개조의 절리군이 존재하고 있는 것으로 나타났으며 편리 계열은 안성 방향과 거의 유사하나 절리군의 방향은 안성 방향과 다소 차이가 나는 것으로 판단된다. 모암의 풍화 정도는 하부는 보통 풍화(MW)에서 약간 풍화(SW) 정도 상부는 심한 풍화(HW)에서 보통 풍화(MW) 정도로 판단된다.

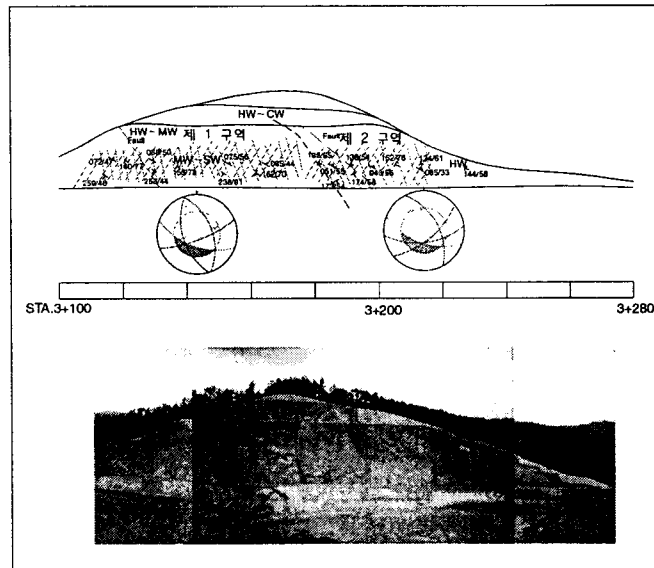


그림 2. 평택 방향 현장 조사 결과 맵핑도

(2) 제 2 구역(STA.3+200~3+280)

평택 방향의 제 2 구역은 STA.3+200~3+280에 해당하는 구간이다. 이곳의 풍화 정도는 심한 풍화(HW)에서 보통 풍화(MW) 정도이고 종점 쪽으로 갈수록 풍화의 정도가 심해지는

양상이 나타난다. 이곳의 불연속면 분포는 역시 편리 계열과 2개조의 절리군이 존재하고 있으며 절리군과 유사한 방향으로 사면과 교차하는 수직단층대가 2개소 정도 분포하고 있다.

### 3. 암반 불연속면의 전단 강도 산정

#### 3.1 Barton-Bandis의 절리 모델에 의한 방법

본 연구에서는 사면 안정 검토를 위한 불연속면의 전단 강도를 결정하기 위하여 Barton-Bandis 파괴 조건식을 적용하였다. Barton-Bandis 파괴조건식은 실제 거동과 유사한 비선형 파괴 조건식인 반면에 절리면 전단 시험 등을 시행하기 어려운 여건에서 경험적인 지수들을 사용함으로써 불연속면의 전단 강도를 추정할 수 있다는 장점이 있다. Barton-Bandis 파괴 조건식을 간단히 소개하면 다음과 같다.

Barton 등(1976)은 암반 절리 거동에 대한 매우 상세한 연구를 통하여 다음과 같은 불연속면의 파괴조건식을 제안한 바 있다.

$$\tau = \sigma_n \tan \left[ \phi_b + JRC \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma_n} \right) \right] \quad (1)$$

여기서,  $JRC$  = 절리 거칠기 계수 (Joint Roughness Coefficient)

$JCS$  = 절리면 압축 강도 (Joint Compressive Strength)

$\sigma_n$  = 절리면에 가해지는 수직 응력

$\tau$  = 절리면의 전단 강도

$\phi_b$  = 암석의 기본 마찰각

식 (1)을 잘 살펴보면 수직 응력이 증가함에 따라 기울기가 감소하는 비선형의 형태를 띠고 있음을 알 수 있다.

#### (1) 기본 마찰각의 결정

Barton의 식을 적용하기 위한 기본 마찰각  $\phi_b$ 는 다이아몬드 커터를 사용하여 절삭한 매끄러운 암석 표면에 대한 직접 전단 시험을 실시하여 구하는 것이 원칙이다. 또 다른 방법은 잔류 전단 강도( $\phi_r$ )를 사용하는 것인데 잔류 전단 강도는 시료에 대하여 상당한 변위가 발생할 때까지 전단 시험을 실시하여 얻어진다.

기본 마찰각을 구하는 또 다른 방법으로는 미끄러짐을 일으키는 데 필요한 사면의 경사각을 측정하는 tilt test를 이용할 수 있다. 이 시험에서는 시편에 경사를 증가시켜 미끄러짐이

일어나는 순간의 경사각을 측정하고 이를 기본 마찰각으로 간주하게 된다. 그러나, 이 방법은 시편을 주의 깊게 제작한다하더라도 아주 작은 규모의 표면 거칠기가 큰 영향을 끼치기 때문에 여기서 구한 기본 마찰각은 신뢰성이 매우 떨어진다.

본 검토의 경우와 같이 시험에 의한 결과를 얻을 수 없는 상황이라면 표 1에서 개략적인 기본 마찰각을 얻을 수 있다. 본 현장의 경우 편마암에 해당하므로 기본 마찰각은 27~31°에 해당함을 알 수 있고 본 검토에서는 보수적인 해석을 위하여 27°를 적용하였다.

표 1. 암석에 따른 기본 마찰각

암 석 명	기본 마찰각
각섬암	32
현무암	31~38
백운암	27~31
역암	35
백악	30
편마암(편암질)	27~31
화강암(세립질)	29~35
화강암(조립질)	31~35
석회암	33~40
반암	31
사암	25~35
셰일	27
미사암	27~31
점판암	25~30

## (2) 절리면 압축 강도의 결정

절리면 압축 강도, JCS는 불연속면을 관통하도록 코어를 제작하여(시추하여) 이 코어를 시험함으로써 구할 수 있다. 그러나, 이러한 복잡한 과정을 거치려면 차라리 직접 전단 시험을 수행하는 편이 나을 것이다. 따라서, 실내 시험으로 JCS를 구하는 것은 합리적인 방법은 아니다.

현장이나 실내에서 보다 간단하고 저렴하게 사용할 수 있는 방법으로는 점하중 시험(point load index test)과 Schmidt 해머를 이용하는 방법이 있을 수 있다.

마지막으로 현장 조사시 지질 해머나 주머니칼 등을 이용하여 개략적인 강도를 추정할 수 있는 방법이 있을 수 있다(표 2).

풍화나 변질 등에 의해 불연속면의 압축 강도는 현저하게 저하될 수 있는데 Barton에 의하면 풍화가 표면 근처 재질의 강도를 풍화되지 않은 신선암의 1/4까지 저하시킬 수 있다고 한다 (Barton, N. 1976).

당 현장의 경우 본 검토 대상 사면에 대한 시추 코어에 대한 일축압축 강도 시험 결과 (CB-3, CB-4) 평균 93.1MPa(913.3kgf/cm<sup>2</sup>)의 일축압축 강도를 나타내고 있으며 현장 조사 결과 암반의 신선한 부위는 R4~R5 정도에 해당하고 있으나 불연속면과 풍화가 진행된 부위의 경우는 R3 정도의 강도를 지니고 있는 것으로 판정되었다.

본 검토에서는 보수적인 해석을 위하여 절리면 압축 강도를 모암의 25%선인 약 23MPa 정도로 추정하였다.

표 2. 암석의 개략적인 일축 압축 강도 (after ISRM, 1981)

등급	설명	확인 방법	대략적인 일축 압축강도(MPa)
R0	극도로 연약한 암석	엄지 손톱으로 패인다	0.25~1.0
R1	매우 연약한 암석	지질 망치의 뾰족한 끝으로 세게 쳐서 부숴뜨릴 수 있고 주머니 칼로 베어진다.	1~5
R2	연약한 암석	주머니 칼로 어렵게 베어지고 지질 망치의 뾰족한 끝으로 세게 치면 얇게 패인다.	5~25
R3	보통 강한 암석	주머니 칼로 그어지거나 베이지 않으며 시료를 지질 망치로 한번 세게 치면 쪼개질 수 있다.	25~50
R4	강한 암석	시료를 지질 망치로 한번 이상 쳐야 쪼개질 수 있다.	50~100
R5	매우 강한 암석	시료를 지질 망치로 여러번 쳐야 쪼개질 수 있다.	100~250
R6	극도로 강한 암석	시료를 지질 망치로 쳐도 깨진 조각만 얻을 수 있다.	> 250

### (3) 절리 거칠기 계수 *JRC*의 결정

절리 거칠기 계수, *JRC*는 절리 표면의 외양을 Barton등이 제안한 표준 거칠기 윤곽 (standard profiles)과 비교함으로써 결정한다. 가장 쓸모있는 거칠기 윤곽은 Barton과 Choubey(1977) 에 의해 제공된 것으로 그림 3과 같다.

현장 조사 결과 편리 혹은 절리 등 불연속면의 거칠기는 *JRC* 2~6 정도의 범위인 것으로 판정되었으며 본 검토에서는 *JRC*값을 4로 선택하여 적용하였다.

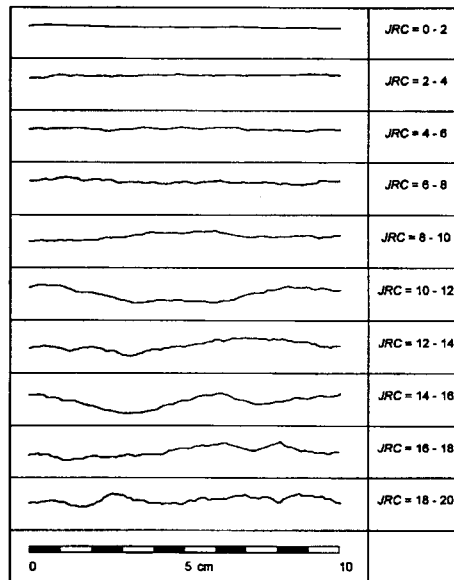


그림 3. Joint Roughness Profile과 이에 대한 *JRC*값

**(4) Mohr-Coulomb 전단 강도로의 환산**

암석역학에서 미끄러짐에 대한 안전율은 일반적으로 Mohr-Coulomb 파괴 조건식의 점착력  $c$ 와 마찰각  $\phi$ 로 표현되고 있다. 1970년대 이후로 전단 강도와 수직 응력의 관계는 Barton등이 제안한 바와 같이 비선형적인 관계가 더욱 정확하다고 인식되고 있다. 그러나, 이 관계는  $c$ 와  $\phi$ 로 표현되는 것이 아니기 때문에 이 관계로부터 등가의 점착력과 마찰각을 결정할 수 있는 수단이 필요하다. (Hoek, E et al., 1995)

본 검토에서는 스프레드시트를 이용하여 현장 조건에 부합되는 응력 범위에서 Barton-Bandis 파괴 조건의 수직응력-전단강도 곡선을 선형 회귀 분석하여 점착력과 마찰각을 구하였다(그림 4).  $JRC$ 를 4,  $JCS$ 는 23MPa, 그리고 기본 마찰각,  $\phi_b$ 는  $27^\circ$  로 가정

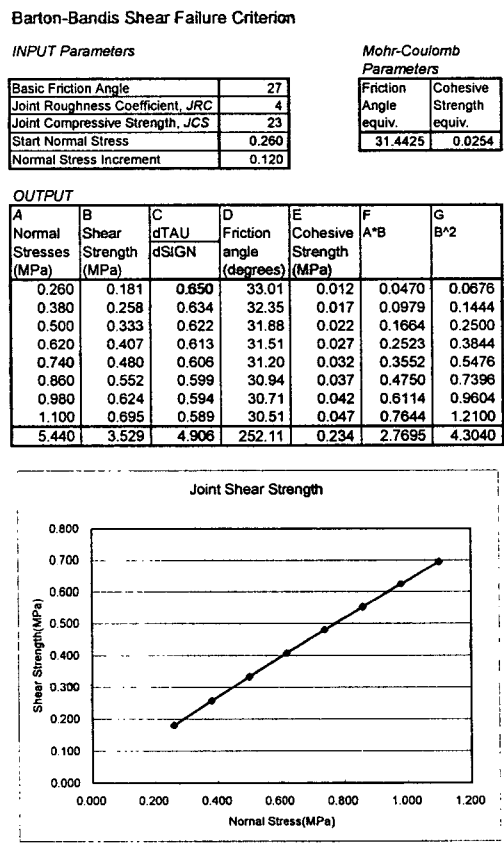


그림 4. Barton-Bandis 파괴조건식으로부터 Mohr-Coulomb 강도 환산

하고 대상 사면의 Overburden에 따른 대략적인 응력 범위 (0.26~1.10MPa) 에서의 Barton-Bandis 파괴조건식에서 구한 전단 강도를 회귀 분석하여 등가 점착력,  $c$ 와 등가 마찰각  $\phi$ 를 구한 결과 점착력은 0.0254MPa(2.54tonf/m<sup>2</sup>), 마찰각은 약  $31^\circ$  로 추정할 수 있다.

**3.2 역해석에 의한 전단 강도 추정**

본 검토에서는 앞서 시행한 전단 강도 추정 결과를 바탕으로하여 기 발생한 썩기 파괴에

대하여 역해석을 실시하여 보다 합리적인 전단 강도를 산정하였다.

역해석 대상은 현장 조사시 파악한 안성 방향 약 STA.3+300 지점의 두 번째 단에서 발생한 썰기 파괴 발생 부위로 썰기의 규모는 높이 약 15m, 폭 약 10m 정도이고 썰기를 형성한 불연속면은 060/45와 324/63의 방향성을 가진 것으로 조사되었다(그림 5). 편의상 마찰각은 3.1절에서 추정된  $31^\circ$  로 고정시키고 점착력을 변화시키며 안전율이 1에 가장 근접한 경우를 찾는 방법을 사용하였다. 역해석 결과 점착력은 추정한 값보다는 다소 작은 약  $1.54 \text{ tonf/m}^2$ 가 구해졌으며 본 검토에서 시행한 한계 평형 해석에 이 값을 적용하였다.



그림 5. 썰기 파괴 발생 사례

## 4. 사면 안정 해석

### 4.1 평사 투영 해석

본 검토에서는 현장 조사 결과 측정한 불연속면의 방향성과 현재 절취 사면의 경사와 대략적인 마찰각( $30^\circ$  로 가정)의 관계를 이용하여 평사 투영 해석을 실시하여 신속하게 각 구역별로 가능한 파괴 양상을 파악하였다.

평사 투영 해석은 안성 방향 사면의 경우 5개 구역으로 평택 방향 사면의 경우 2개의 구역으로 나누어 실시하였으며 해석 결과를 종합한 결과는 표 3과 같다. 해석 결과 안성 방향의 경우 편리 계열의 불연속면군과 이들과 교차하는 1개조의 절리군이 썰기를 이루는 양상이 매우 두드러지고 있으며 평면 파괴의 가능성은 1개 구역에서만 나타났고 전도 파괴의 가능성은 모든 경우에서 나타나지 않았다. 평택 방향의 경우는 2개조의 절리군에 의한 썰기 파괴의 양상이 제 1 구역에서 드러났으나 주된 불연속면인 편리 계열의 방향성이 안성 방향과 동일하므로 기본적으로 불연속면의 방향성은 유리한 방향으로 발달하고 있다고 판단할 수 있다.



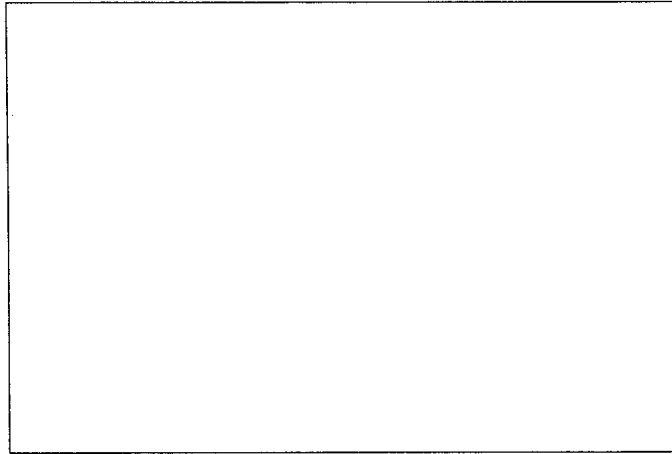


그림 6. 평사 투영 해석 결과

#### 4.2 한계 평형 해석

평사 투영 해석 결과 썩기 파괴와 평면 파괴의 가능성이 있는 것으로 판정된 구간에 대하여 앞서 구한 불연속면의 전단 강도와 사면과 불연속면의 기하학적 조건에 의한 구체적인 안전율을 구하고 보강 등 안정화 대책을 수립하기 위하여 한계 평형 해석을 실시하였다.

한계 평형 해석을 실시한 결과 안정 방향의 대다수 구역에서 기준 안전율 1.3을 만족하지 못하고 있는 것으로 나타났다. 사면 경사를 1:1까지 완화시켰을 경우 제 4 구역의 썩기 파괴 해석을 제외하고는 모든 경우에서 안전율 1.3을 만족하고 있으며 록볼트 보강을 실시하였을 경우 안전율 1.3을 만족시키기 위한 록볼트 간격은 최소 2.1m 정도가 필요한 것으로 나타났다.

평택 방향의 경우 제 1 구역에서만 썩기 파괴의 가능성이 있었으나 한계 평형 해석 결과 안전율 1.32로 1.3을 상회하고 있어 별다른 보강은 필요치 않다고 판단된다. 그러나, 본 검토에서 실시한 해석이 사면에 존재하는 전체 불연속면을 모두 반영한 것이라 볼 수 없으므로

구 분		평면 파괴	썩기 파괴	전도 파괴
안정 방향	제 1 구역	-	I <sub>12</sub>	-
	제 2 구역	-	I <sub>13</sub>	-
	제 3 구역	-	I <sub>12</sub>	-
	제 4 구역	J <sub>1</sub>	I <sub>13</sub>	-
	제 5 구역	-	-	-
평택 방향	제 1 구역	-	I <sub>23</sub>	-
	제 2 구역	-	-	-

※ 첨자는 불연속면군의 번호를 의미하며 모든 경우에서 1번 불연속면이 편리 계열의 불연속면이다.

극단적으로 불리한 방향성의 불연속면들이 존재할 수 있으며 확률적으로 낮은 가능성이지만 이들에 의한 부분적인 파괴 가능성 자체를 완전히 배제할 수는 없다.

표 4. 한계 평형 해석 결과

구 분	파괴 유형	현 조건	1:1 경사	록볼트 보강	
		안전율	안전율	C.T.C	
안성 방향	제 1 구역	썩기 파괴	0.88	1.96	3.11m
	제 2 구역	썩기 파괴	3.83	-	-
	제 3 구역	썩기 파괴	1.21	6.54	7.50m
	제 4 구역	썩기 파괴	0.47	0.60	2.30m
평면 파괴		0.62	1.66	2.10m	
평택 방향	제 1 구역	썩기 파괴	1.32	-	-

※록볼트 보강은 현 경사 조건에서 최소 안전율 1.3을 확보하기 위해 필요한 록볼트의 시공 간격임.

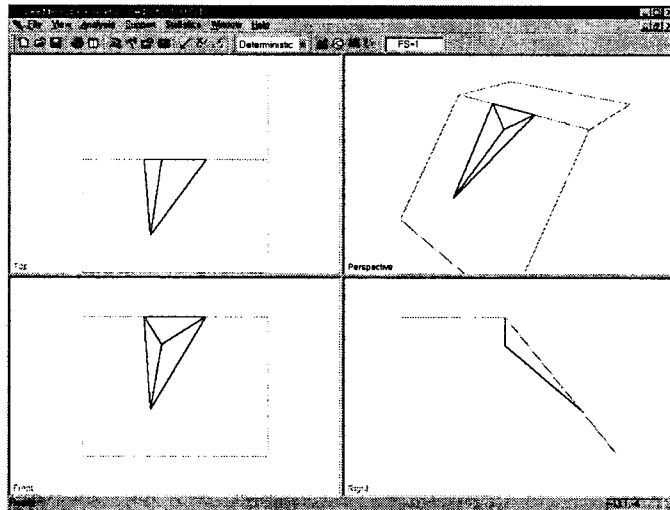


그림 7. 썩기 파괴에 대한 한계 평형 해석

## 5. 사면 안정 대책 및 공법 제안

본 검토 결과 안성 방향의 경우 주된 불연속면인 편리의 방향이 사면 안정에 불리한 방향으로 발달하고 있어 적절한 방향의 또 다른 불연속면을 만났을 경우 썩기 파괴의 가능성이 매우 크며 불연속면 사이로 지하수의 흐름에 의한 장기적인 불연속면의 강도 저하를 고려할 때 대규모 블록의 활동 가능성도 있다고 할 수 있다.

반면에 평택 방향의 사면은 편리의 방향이 동일하나 사면의 방향이 반대이므로 불리한 방향에 있지 않고 사면의 높이도 낮고 암반의 풍화 변질 상태도 양호한 편이므로 평택 방향에 비해서는 상대적으로 안정한 상태라고 볼 수 있다.

따라서, 이와 같은 사면 안정 공법들의 특성을 감안하면 본 현장의 사면 안정을 위해서는 안성 방향 사면의 경우는 사면의 경사를 현재 1:0.8에서 1:1로 완화하는 것이 가장 근본적인 대책이며 평택 방향의 경우 경사 완화는 필요치 않을 것으로 판단된다. 또한 현장 암반 특성상 불연속면을 따르는 차별 풍화가 급속히 진행될 것으로 예상되므로 소규모 암반의 탈락

과 풍화 방지를 위해 표면 보호공을 병행하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

현장 여건 상 경사 완화가 어려울 경우 록볼트에 의한 보강 방법도 채택 가능하나 이 경우는 설치 간격보다 좁은 암반 블록의 활동이나 탈락을 방지하기 위해 능형망의 병행 설치가 필수적이다.

이를 각 방안별, 구역별로 자세히 살펴보면 다음과 같다.

### 5.1 사면 경사 완화 방안

안성 방향 사면의 발파암과 리핑암 구간의 경사를 현재의 1:0.8에서 1:1로 완화하는 것을 기본으로하고 제 1 구역 종점부와 4 구역과 5구역에 대해서는 표면 보호를 위하여 녹생토를 병행 시공한다. 또한 단층 파쇄대가 발달한 제 3 구역의 시점부에는 단층 파쇄대를 따라 슛크리트를 타설하여 단층대의 풍화 진행을 방지하여야 한다. 다만, 1단 사면의 경우 2단 이상의 사면보다 양호한 상태로 파악되고 있으므로 현행의 1:0.8의 경사를 유지하고 대신에 1단과 2단 사이의 첫번째 소단의 폭을 3.0m에서 7.0m로 확대하여 확보함으로써 추후에 있을 수

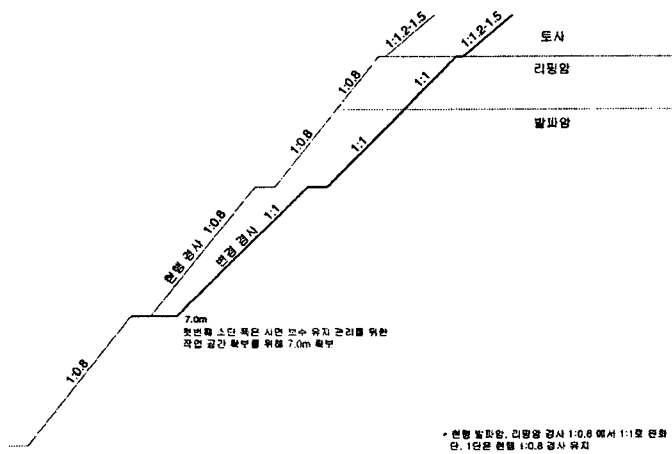


그림 8. 안성 방향의 사면 경사 완화 방안

수 있는 보수 작업등에 중장비의 작업 공간을 확보하도록 한다.

평택 방향 사면의 경우는 불연속면의 방향이 사면 안정에 불리하지 않은 방향이 주를 이루고 있으므로 경사 완화는 필요치 않을 것으로 판단되며 풍화 진행에 따른 소규모 낙석의 방지를 위하여 제 1 구역에는 능형망을 설치하고 상대적으로 풍화가 심한 제 2 구간에는 녹생토를 시공하도록 한다.

표 5. 사면 안정 공법 적용 방안: 경사 완화 방안

구분	적용 구간	적용 공법	목적
안성 방향	발파암, 리핑암 전구간	○경사 완화 1:0.8 -> 1:1 - 단, 1단 1:0.8 유지	평면, 썩기 블록의 활동 방지
	제 1 구역	○녹생토 (중점측)	표면 보호, 풍화 방지
	제 3 구역	○숏크리트 타설 (시점측)	단층파쇄대 보호
	제 4,5 구역	○녹생토 (전체)	표면 보호, 풍화 방지
	기타	○첫번째 소단폭 7m 확보	유지 관리 편의성
평택 방향	제 1 구역	○보호 철망	소규모 낙석 방지
	제 2 구역	○녹생토 (전체)	표면 보호, 풍화 방지

## 5.2 록볼트 보강 방안

안성 방향 사면의 보강은 록볼트 시공을 기본으로하고 록볼트의 설치 간격 크기 이하의 블록의 활동이나 탈락 방지를 위하여 보호 철망을 병행 시공한다. 한계 평형 해석 결과 안전율이 확보되는 구역은 보호 철망만을 설치하며 풍화의 정도가 심한 곳은 더 이상의 풍화 진행을 막기 위해 녹생토를 시공하도록 한다.

록볼트의 시공 간격은 한계 평형 해석상 최소 간격이 2.1m가 나왔으나 경험적인 수치로 2.0m를 채택하였으며 록볼트 길이는 현장 여건에 따라 조정할 수 있으나 블록을 고정시키기 위해서는 최소 5.0m 이상의 길이는 확보해야 할 것으로 판단된다. 단층파쇄대가 존재하는 3구역에는 숏크리트를 타설하여 풍화를 방지해야 하며 썩기나 평면 블록이 빠져나온 부위나 발파시 과굴이 일어난 부위 등은 over hang을 방지하기 위하여 숏크리트를 타설하여 채워야한다.

표 6. 사면 안정 공법 적용 방안: 록볼트 보강 방안

구분	적용 구간	적용 공법	목적
안성 방향	제 1 구역	○록볼트 설치 (전체) - C.T.C=2m, L=5m 이상 ○보호 철망	평면, 썩기 블록의 활동 방지 낙석 방지
	제 2 구역	○보호 철망	낙석 방지
	제 3 구역	○숏크리트 타설 (시점측)	단층파쇄대 보호
	제 4 구역	○녹생토 (중점측) ○록볼트 설치 (시점측) - C.T.C=2m, L=5m 이상 ○보호 철망 (시점측)	표면 보호, 풍화 방지 평면, 썩기 블록의 활동 방지 낙석 방지
	제 5 구역	○보호 철망	낙석 방지
	과굴 부위	○숏크리트 타설	over hang 방지
평택 방향	제 1 구역	○보호 철망	소규모 낙석 방지
	제 2 구역	○녹생토 (전체)	표면 보호, 풍화 방지

## 6. 결론

이상의 대절토 암반 사면의 안정성 및 보강 대책 사례 연구를 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 현장 조사 결과 안성 방향 사면의 경우, 편리 계열의 주 불연속면과 1개조 내지는 2개조의 부절리군의 방향성이 사면의 안정에 불리한 방향으로 발달하고 있어 대다수의 지역에서 썩기 파괴 또는 평면 파괴의 가능성이 높은 것으로 나타났다. 반면에 평택 방향 사면의 경우는 동일한 편리 계열의 주 불연속면이 사면의 방향이 역전됨에 따라 불리한 방향으로 작용하지 않으므로 활동의 가능성은 크지 않은 것으로 판단된다.

(2) 평사 투영 해석 결과에 따라 활동 가능성이 있는 구역에 대한 한계 평형 해석을 실시한 결과 안성 방향의 1, 3, 4 구역이 최소 안전율 1.3에 미치지 못하는 결과를 나타냈으며 평택 방향의 경우는 최소 안전율 1.3을 만족시키고 있다.

(3) 안성 방향에서 최소 안전율 1.3을 확보하기 한 록앵커 혹은 록볼트의 소요내하력을 계산한 결과 록볼트의 최소 설치 간격은 2.1m로 나타났으며 사면 경사를 1:1로 완화할 경우 4 구역을 제외하고는 모두 최소 안전율을 만족시키는 결과가 나타났다.

(4) 따라서, 사면 안정성을 확보하기 위한 공법으로는 안성 방향의 경우 발파암, 리핑암 구간의 사면 경사를 현재의 1:0.8에서 1:1로 완화하는 것이 가장 효과적이고 영구적인 보강 대책인 것으로 판단되며 선택적으로 현재 경사 조건에 록볼트에 의한 보강 방안도 가능할 것으로 판단된다. 또한, 다수의 단층대와 차별 풍화대 등이 존재하고 있으므로 기본적인 보강 공법 외에도 표면 보호와 소규모 낙석 방지를 위한 공법들이 병행되어야 할 것으로 판단된다.

(5) 평택 방향의 경우는 경사 완화 혹은 록볼트 시공의 필요성은 없으나 소규모 낙석이나 풍화방지를 위한 보호 철망과 표면 보호공이 부분적으로 필요한 것으로 판단된다.

## 참고 문헌

- Barton, N. 1976, The shear strength of rock and rock joints. *Int. J. of RockMech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 13:255-279.
- Hoek, E, Practical rock engineering, 1999. <http://www.rockeng.toronto.ca>.
- Hoek, E and Bray, J. W. 1981 *Rock Slope Engineering*, pages 83--126. The Institution of Mining & Metallurgy, London
- Hoek, E., Kaiser, P. K. and Bawden., W. F. 1995. *Support of Underground Excavations in Hard Rock*, pages 48-56. A.A.Balkema, Rotterdam
- ISRM. 1981. *Rock Characterization Testing & Monitoring - ISRM Suggested Methods*.

Pergamon Pres..

Priest, S. D. 1993. *Discontinuity Analysis for Rock Engineering*, pages 259--299.

Chapman & Hall, London