

절토사면의 안정해석시 SMR 평가법의 적용사례 Case Study of Slope Analysis by Slope Mass Rating

정형식¹⁾, Hyung-sik Chung, 이승호²⁾, Seung-Ho Lee, 황영철³⁾, Young-cheol Hwang

요약(Abstract)

In order to evaluate the safety of collapsed rock slopes and to attain appropriate countermeasures for it, this case study has applied SMR(Slope Mass Rating) Method to construction sites. By accompanying Stereographic Projection and Limit Equilibrium Analysis, the appropriateness of the SMR method has been studied. The result of this case study is that eventhough the safety evaluation and countermeasures should be done through strict methods of analysis, by utilizing the SMR method an outline of the failure modes and countermeasures can be achieved.

본 연구는 붕괴가능성이 있는 암반사면에 대하여 안정을 검토하고 대책방안을 수립함에 있어 암반사면평가방법 중의 하나인 SMR(Slope Mass Rating) 방법을 적용하고 평사투영해석 및 한계평형해석 등을 병행하여 SMR 평가에 의한 적정성을 비교하였다. 암반사면에 대한 안정검토 및 대책수립은 여러 가지 해석방법을 이용할 수 있으나 SMR에 의한 평가법을 적용하므로써 개략적인 사면파괴형태나 보강방안 등에 대한 정보를 얻을 수 있을 것으로 평가할 수 있다. 본 연구에도 현장사례를 통하여 이를 확인하고자 하였다.

주요어(Key Words) : 암반사면, SMR(Slope Mass Rating), RMR, 절리, 평사투영법

1. 서 론

본 연구의 목적은 현재 시공중 일부지점에 붕괴가 예상되는 도로개설공사 구간중 2개 지역의 절취사면에 대한 안정성 평가시 SMR(Slope Mass Rating)에 의한 방법을 적용하고 이로 부터 대상사면에 대한 합리적인 대책방안을 수립·제시하는데 있다.

본 조사연구대상사면에 대한 풍화상태, 지하수상태, 식생상태 등을 파악하고 암반사면의 안정성을 파악하기 위하여 불연속면에 대한 방향, 빈도, 거칠기 등을 조사분석하였다. 그리고 현장시험으로 슈미트해머시험, Profile Gauge Measurement 및 Tilt Test를 수행하여 그 결과를 토대로 암반 및 토층사면에 대한 안정해석을 실시하였다.

2. 연구대상구간 및 범위

본 연구는 도로개설을 위한 암반절취구간중 붕괴가능성이 있는 2개 구간을 연구대상구간으로 하였다. 조사범위는 계획도로면 높이의 사면하단부에서부터 사면정상부까지이며 이 범위에 대해 현장조사 및 실내·현장실험을 실시하였다.

-
- 1) 한양대학교 토목공학과, 교수
 - 2) 상지대학교 토목공학과, 조교수
 - 3) 한양대학교 환경과학연구소, 선임연구원

각 조사구간의 조사위치 및 구간은 다음 표 1과 같으며 현장의 정면도는 그림 1, 2와 같다.

표 1. 연구대상구간의 위치, 구간 및 높이

구 분	구 간	좌우측	연 장 (m)	높 이 (m)	비 고
제 1 구간	STA. 20+280~380	좌	100	35	
제 2 구간	STA. 0+600~820	우	220	50	

검토대상 구간의 구성암은 편암 내지는 편마암에 해당하며 기반암의 특징인 편리 또는 엽리가 뚜렷하게 나타나고 있었는데, 대체로 편리 또는 엽리면은 매끄럽고(Smooth) 평탄한(Planar) 상태였다.

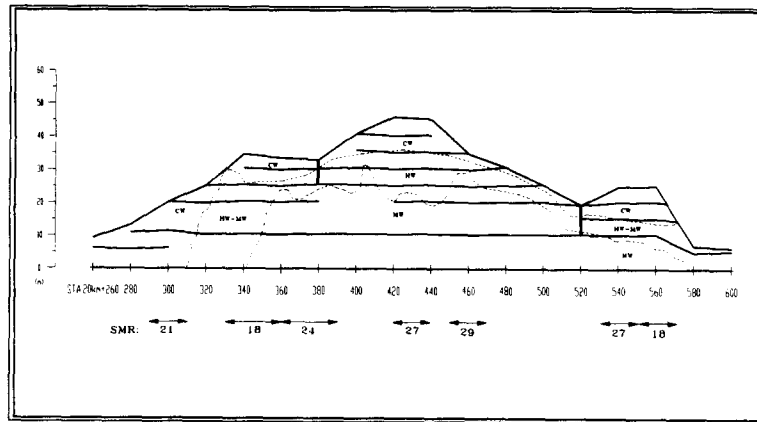


그림 1. 제 1구간 사면현황 및 지점별 SMR 값

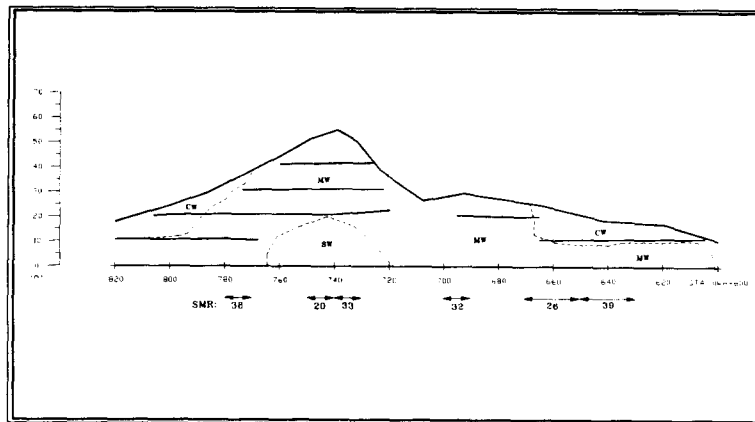


그림 2. 제 2구간 사면현황 및 지점별 SMR 값

부분적으로 습곡 등에 의해 뒤틀린 엽리면을 따라 불규칙한(Undulating, Rough) 절리면도 나타난다. 지표에 노출된 부분은 풍화가 심하게 진전되어 연약한 상태이며 강우시 지하수 침투가 용이하여 전단 저항력 감소로 인한 사면활동이 주 활동면으로 작용하고 있다.

3. SMR(Slope Mass Rating)의 암반사면평가

3.1 SMR의 개념

사면안정검토에 있어 RMR의 적용은 사면의 절리면방향 및 경사에 대한 수정점수를 고려하여 5개 등급 (매우 양호(very favorable) 0, 양호(favorable) -5, 보통(fair) -25, 불량(unfavorable) -50, 매우 불량(very unfavorable) -60)으로 나누었으나, 각 등급별 세부분류 지침이 없으며 각 등급에 따른 안정검토에 대한 대안을 제시하지 못하고 단지 점착력 및 마찰각에 대해서만 언급되어 있을 뿐이다.

SMR은 RMR 값에 사면과 절리면의 방향·경사각의 관계를 고려한 F₁, F₂, F₃, 요소를 곱하고 굴착방법에 의한 요소를 더함으로써 식(1)와 같이 얻어진다.

$$SMR = RMR + (F_1 \cdot F_2 \cdot F_3) + F_4 \quad \text{-----(1)}$$

- 여기서, F₁ : 절리와 사면주향사이의 평행성
- F₂ : 평면파괴형태에서 절리경사각
- F₃ : 사면과 절리경사각 사이의 관계를 반영
- F₄ : 발파 등의 굴착방법에 따른 경험적 계수

3.2 안정성 평가방법

위의 평가지침에 의해 사면의 암반조건에 따라 분류 점수를 기준으로 표 2와 같이 5등급으로 사면을 분류한다.

표 2. SMR분류에 대한 안정성 평가 및 붕괴유형

분 류	SMR	암반상태	안 정 성	붕 괴	보 강
I	81-100	매우 좋음	완전히 안전함	없음	필요 없음
II	61-80	좋은	안 전	일부 블록	때때로 필요
III	41-60	보 통	부분적으로 안전	일부 절리 혹은 많은 썩기파괴	체계적인 보강
IV	21-40	나쁨	불 안 정 함	평면 또는 대규모 썩기파괴	중요/보완
V	0-20	매우 나쁨	완전히 불안정함	대규모 썩기파괴 또는 원호파괴	재굴착

많은 사면에 대해 SMR 분류를 실시하여 경험적으로 붕괴유형을 구분하여 보면 표 3.3에 나타나는 것과 같다. 경험적으로 20점 이하의 SMR점수를 가진 모든 사면은 빠른 시일안에 붕괴가 발생했고 10점 미만의 점수를 갖는 사면은 드물게 분포한다.

표 3. 다른 붕괴유형에 대한 SMR의 제한값

SMR	평면파괴	썩기파괴	SMR	전도파괴	SMR	원호파괴
>75	None	None				
60-75	None	Some	>65	None		
40-55	Big	Many	50-65	Minor	>30	None
15-40	Major	No	30-35	Major	10-30	Possible

3.3 보강방법

위에서 SMR에 의해 평가된 불안정한 사면은 현장여건, 시공성 및 경제성 등을 고려하여 여

러 가지 사면안정공법을 적용할 수 있으나 크게 다음 표 4로 분류될 수 있다.

표 4. 각 등급별 추천 보강방법

등급	SMR	보 강 방 법
I a	91~100	필요없음
I b	81~90	필요없음, 부석돌제거
II a	71~80	(필요없음, 사면하단 도랑설치 또는 펜스), 구간 불팅
II b	61~70	사면하단 도랑설치 또는 펜스, 네트설치, 구간 또는 일률적인 불팅
III a	51~60	사면하단 도랑설치 또는 펜스, 구간 슛크리트
III b	41~50	(사면하단부 도랑설치 또는 네트) 일률적인 불팅, 앵커전면 슛크리트, 하단부 벽체 설치 및 dental concrete
IV a	31~40	앵커, 전면부 슛크리트, 하단부 벽체 및(또는) 콘크리트, (재굴착) 배수
IV b	21~30	전면부 보강스�크리트, 하단부벽체 및 (또는) 콘크리트, 재굴착, 깊은 배수
V a	11~20	중력식 또는 앵커를 가진 벽체, 재굴착

()는 별로 사용하지 않는 방법

그리고 경험적으로 여러 사면에 SMR을 사면평가 및 사면보강을 실시하여 그 적용성을 평가하여 위에서 제안된 방안을 수정한다.

4. 사면안정검토

4.1 안정성 검토방법

토사층과 풍화토층으로 구성된 상부는 원호파괴가능성에 대하여 검토하였으며 안정검토는 SLOPE/W 프로그램을 이용하였다.

암반층에 대한 안정검토는 풍화암, 연암, 경암층을 대상으로 현장조사자료를 분석하여 주절리를 측정하고 이로부터 강도정수를 추정하여 평사투영법을 이용하여 사면의 전반적인 안정성을 검토하였다. 또한 세부검토시 평면파괴에 대한 해석은 한계평형식을 이용하였고, 썩기파괴에 대한 해석은 *Swedge* 프로그램을 이용하였다. *Swedge* 프로그램은 교차하는 두 절리의 Mohr-Coulomb 강도정수 외에 인장균열, 외부하중, 파괴면과 인장균열에 걸리는 수압 등을 고려할 수 있으며, 사면내에 록볼트의 3차원적 보강을 통한 썩기의 안전율도 계산할 수 있다. 지층에 따른 안정해석방법은 다음 표 5와 같다.

표 5. 지층에 따른 안정해석방법

지층구분	검토방법(사용프로그램)
토사층, 풍화토층	절편법(SLOPE/W)
풍화암, 연암, 경암	평사투영해석(Dips) 한계평형해석(수계산, <i>Swedge</i>) SMR평가

4.2 암반절리면의 강도정수 추정

조사사면 절리면의 JRC는 평균 5~6 정도의 범위 값을 가지고 있으며 절리면에는 비교적 충전물질이 충전되지 않았으나 절리면에 산화작용을 받아 붉은 색을 띠는 양상을 보인다.

본 안정성 검토에서는 절리면의 전단강도를 추정하기 위하여 현장에서 Tilt Test를 실시한 결과와 Robertson의 RMR분류에 의한 강도정수 추정결과 및 절리면의 거칠기 측정에 의한 강도정수추정 결과를 이용하였으며, 주로 절리면의 거칠기정도를 참고하였다.

완전히 분리된 절리면의 점착력은 무시할 수 있으나 실제 암반의 상태는 절리면이 완전히 분리되지 않은 상태에 있으므로 어느 정도의 점착력이 존재한다. 그러나 절리면의 연결성은 절리면의 풍화와 관계되며 시간에 따른 풍화속도에 대해서는 아직까지 정확한 시험자료 및 정립화된 이론이 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서 사용된 절리면의 점착력은 장기적으로 절리면이 완전히 분리된다고 가정하고 $c=0$ 으로 추정하였다. 그 결과를 종합하여 조사사면에서의 안정해석에 필요한 강도정수를 추정하면 표 6과 같다.

표 6. 대상사면의 절리면 마찰각 추정결과

구 간	JRC	암반사면상태	추정 마찰각	추정 점착력
제 1구간	4-10 (평균6)	사면붕괴가 일부 발생한 지역으로 암반의 풍화가 많이 진행된 상태에 있으며 절리의 빈도가 10-수십cm 정도로 암질상태가 불량하다.	46°	0
제 2구간	3-9 (평균6)	사면내에 대규모의 단층이 존재하고 있어 썩기파괴 또는 평면파괴가 예상된다. 암반의 풍화는 하단부는 비교적 강한 양상을 보이거나 상부에서는 사면방향과 유사한 방향으로 발달하는 절리가 주를 이룬다.	48°	0

4.3 조사구간의 SMR 평가

위에서 제시된 SMR 방법에 의해 본 조사사면에 의해 분석을 실시한 결과, 다음과 같은 결과를 얻었다.

제 1 구간의 경우 SMR 값은 18~32 범위에 분포하는 것으로 나타났는데 이는 표 4에서 주로 IVb에서 Va 사이의 분류에 놓인다. 그러므로 본 사면은 재굴착 등의 사면안정대책이 요구되는 것으로 나타났다.

제 2 구간은 20~38 범위에 분포하는 것으로 나타났는데 이는 주로 IVa~IVb 사이의 분류에 놓인다. 그러므로 본 사면은 재굴착 또는 보강방안 등의 사면안정대책이 요구되는 것으로 나타났다.

다음 그림 3은 암반사면의 각 지점에 대하여 조사한 RMR값과 SMR값을 비교한 것이다. 이 결과 SMR값이 RMR값보다 전반적으로 작게 나타났다.

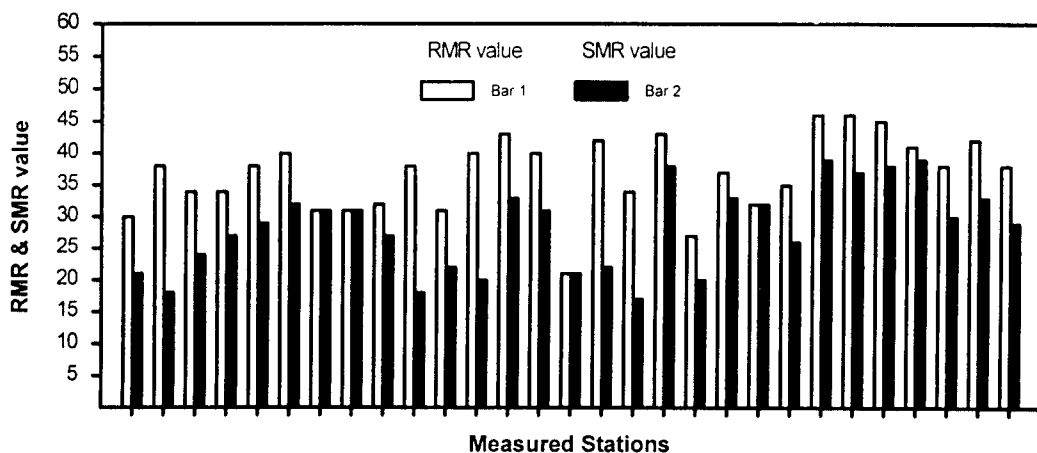


그림 3. 사면 각 지점의 RMR과 SMR 값의 비교

4.4 평사투영법 및 한계평형해석을 이용한 안정성평가

본 2개 구간의 사면에 대하여 Dips 프로그램을 이용하여 평사투영법으로 사면안정성을 평가한 결과는 그림 4, 5와 같으며 전반적으로 평면파괴가 우세하게 발생할 가능성이 크며, 국부적으로 쉐기파괴의 가능성이 있는 것으로 나타났다. 대상사면에 대한 안정검토 결과를 SMR에 의한 평가결과와 비교하면 다음 표7과 같다.

표7. 각 지점별 사면안정해석 결과 및 SMR 평가결과의 비교

구간	평사투영해석결과 파괴유형	지점(STA)	한계평형해석결과		SMR 평가결과							
			안전율	파괴형태	RMR	F1	F2	F3	F4	SMR	붕괴유형	안정성
1	평면파괴 및 쉐기파괴	20K+330	1.18	쉐기파괴	38	0.4	1	-50	0	18	대규모 쉐기파괴, 원호파괴, 평면파괴	완전히 불안정함
		20K+340	0.93	평면파괴								
2	평면파괴 및 쉐기파괴	0K+640	1.33	쉐기파괴	46	0.15	0.85	-60	0	39	평면 또는 대규모 쉐기파괴	불안정함
		0K+700	1.23	평면파괴	32	0.4	1	0	0	32		불안정함
		0K+740	0.93	평면/쉐기파괴	27	0.15	1	-50	0	20		안전히 불안정함
		0K+760	1.23	평면파괴	43	0.15	0.7	-50	0	38		불안정함

상기의 비교검토 결과 한계평형해석 결과와 SMR 평가결과가 대체로 유사한 경향을 나타내며, 극히 일부분 한계평형해석에 의해 안전하게 평가된 지점이 SMR 평가결과에서 파괴가 예상되는 지점이 있어 SMR평가가 다소 과대평가되는 부분이 있다. 그러나 전반적으로 평가해보면 SMR평가결과가 세부 안전검토 수행전 사면에 대한 위험여부의 판단에 충분히 도움을 줄 수 있는 자료가 될 것이라고 판단된다.

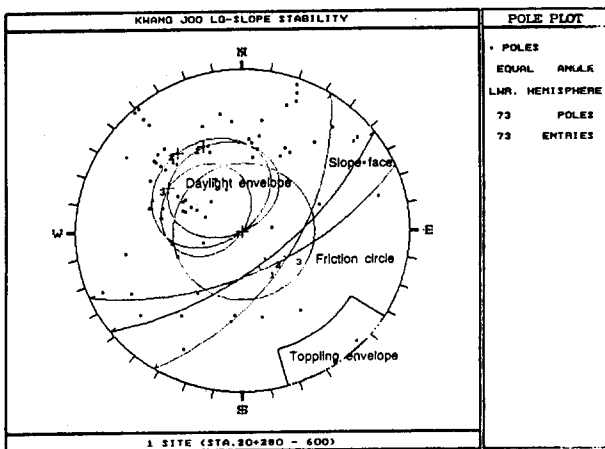


그림 4. 제 1구간의 평사투영법에 의한 사면안정해석

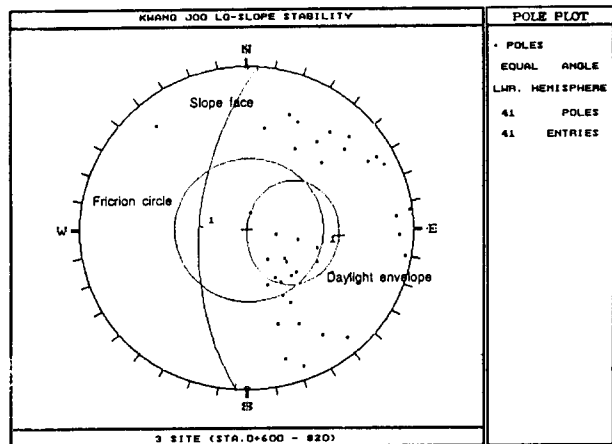


그림 5. 제 2구간의 평사투영법에 의한 사면안정해석

5. 사면안정대책

본 조사현장에는 대상사면의 조건을 고려하여 적절한 안정공법을 적용하였다. 대책공법의 선정배경 및 대책방안결과는 다음 표 8과 같다.

표 8. 대책공법선정배경 및 대책방안결과

구분	대책공법선정배경	대책방안결과
제 1 구간	본 지역은 편마암이 풍화를 심하게 받고 있으며 여러 구간에서 붕괴가 발생되었거나 붕괴가능성이 농후한 상태이다. 절리면의 발달양상으로 보아 평면파괴, 썩기파괴의 가능성이 있고, 토사층 및 풍화토층에서는 원호파괴의 가능성이 있다. 또한 풍화가 많이 진행된 곳이므로 록볼트의 효과를 기대하기는 어렵다고 사료된다. 그러므로 본 구간의 암반은 풍화정도가 심하여 Rock Bolt 설치보다는 사면의 경사각을 낮추어 안정처리를 하는 것이 적당하다.	대책단면의 경사각을 파괴면 경사각보다 완화하므로써 평면파괴와 썩기파괴에 대한 위험은 없으며, 상부토사층의 원호파괴에 대한 안전율을 계산한 결과 1.38 정도므로써 안전할 것으로 사료된다. 또한 SMR값도 증가하였다.
제 2 구간	본 구간은 대규모의 단층 및 파쇄대가 존재하고 있으며 일부 구간에서는 대규모의 붕괴가 발생된 상태이다. 그리고 사면상부에서는 평면파괴 및 썩기파괴의 가능성이 있다. 암반의 풍화정도는 하단부에서 SW-MW 정도이나 불연속면의 발달로 인해 평면파괴나 썩기파괴의 위험도가 높은 구간이다. 이 구간은 비교적 암질이 좋으므로 대형 썩기블록이 형성된 부분에는 경사를 완화시키는 것보다는 Rock Bolt의 설치가 효과적이라고 사료된다. 상부쪽으로는 MW정도의 풍화대가 발달하므로 이부분에 대해서는 풍화정도에 따른 적절한 경사완화가 필요하다고 판단된다. 경사각을 완화시키는 방법과 Rock Bolt 설치하는 두가지 방법 중 현장에 적절한 대책방안을 선정하는 것이 중요하며 이 두가지 방법을 병용하는 것도 좋은 방법이라고 사료된다.	대책 1안: 위험구간 암괴에 대한 썩기파괴 안정성 해석결과 현 시공단면의 안전율이 0.93으로 나타났으나 Rock Bolt보강 후에는 1.92로 증가하고 같은 지점의 평면파괴에 대한 안정성 해석결과 역시 안전율이 0.93에서 1.56으로 증가하므로 안전할 것으로 판단되며, SMR값도 증가하였다. 상부의 대책단면은 경사각을 파괴면 경사각보다 완화하므로써 평면파괴에 대한 위험은 없는 것으로 사료된다. 대책 2안: 상부의 암반을 제거하여 상부하중을 줄임으로써 장기적인 큰 거동에 대한 안정성이 훨씬 증가할 것으로 사료된다. 그리고 낙석예상지역에 대하여 암괴를 제거하고 상부 토층유실에 대해서는 경사를 완화하고 사면보호공을 실시하여 안정화시키는 방법을 추천한다.

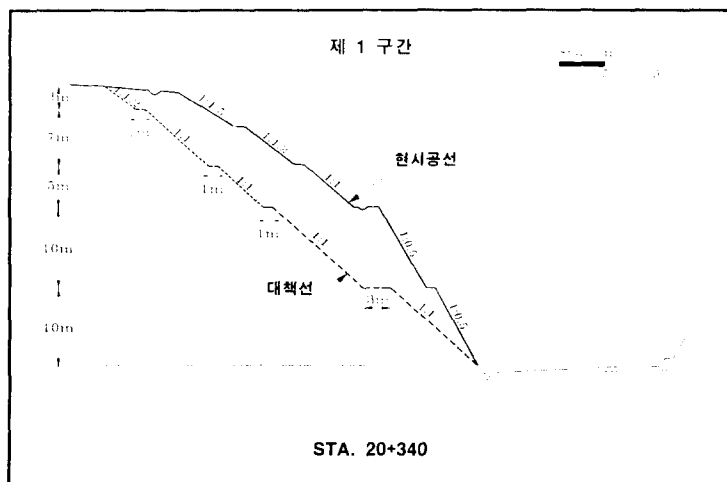


그림 6. 제 1구간 보강대책단면도

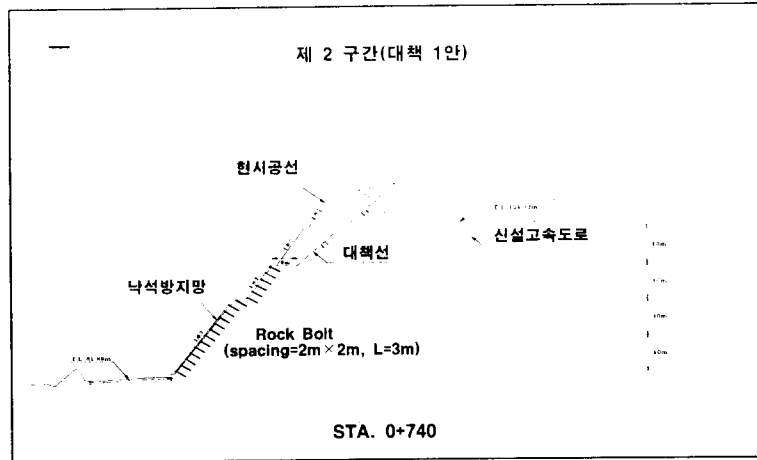


그림 7. 제 2구간 보강대책단면도(대책1안)

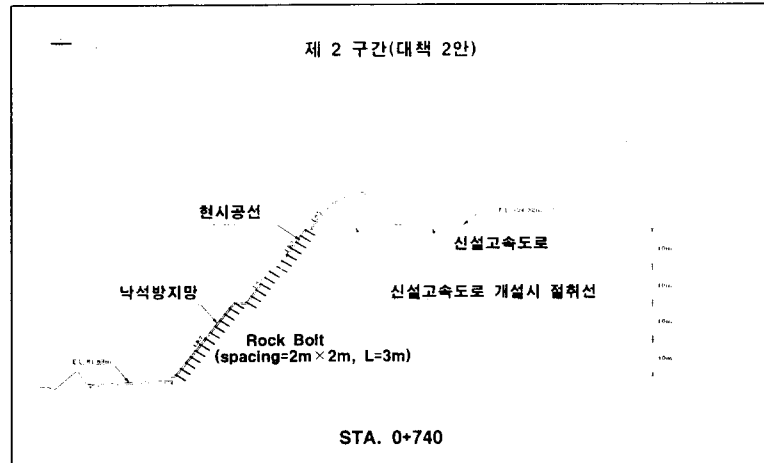


그림 8. 제 2구간 보강대책단면도(대책2안)

6. 결론

본 연구에서는 사면을 정밀조사하여 SMR(Slope Mass Rating)평가방법으로 대책을 수립하였고 평사투영법 및 한계평형해석결과와 비교검토 하였다.

현장사면에 대한 SMR값 평가결과 대상 암반사면은 제 1구간의 경우 평가등급 IVb에서 Va사이의 분류에 놓이므로 재굴착 등의 사면안정대책이 요구되었고 제 2 구간은 주로 IVa~IVb 사이이므로 재굴착 또는 보강방안 등의 사면안정대책이 요구되었으며 현장사면에 대한 평사투영 해석이나 한계평형해석 등에 의한 정밀조사 결과도 이에 부합하는 것으로 나타났다.

사면에 대한 안정검토 및 보강방안 수립은 여러 가지 해석방법을 이용할 수 있으나 현장 암반에 대한 SMR해석방법을 적용하므로써 절리면의 특성이 고려된 사면의 파괴형태나 이에 대한 개략적인 보강대책방안을 수립할 수 있을 것으로 평가된다.

참 고 문 헌

1. 정형식, 이승호. (1990), “신선한 화강암 절리면에서 약액에 의한 전단강도 변화에 대한 연구” 대한 토목학회지, 제10권 3호.
2. 이승호 (1997), “불연속면의 경사와 강성을 고려한 지하구조물 안전성에 관한 연구”, 한국 암반공학회지, 제7권 1호, pp. 65~74.
3. 정형식, 이승호, 황영철. (1993), “Tilt Test를 이용한 암반절리면의 특성에 관한 연구” 대한 토목학회 개요집, pp. 557~580.
4. Dips Program manual, Developed by Rock Engineering Group, University of Toronto.
5. Goodman. R.E. and G. Shi, (1985), Block Theory and Its Application to Rock Engineering, Prentice-Hall.
6. Hoek, E. and J.W. Bray, (1981), Rock Slope Engineering, Inst. Min. Metall., London.
7. Romana, M,R. (1993), A geomechanical classification for slope : Slope Mass Rating, in Comprehensive Rock Engineering, Pergamon Press, Vol 3.
8. Swedge Program manual, Developed by Rock Engineering Group, University of Toronto.