

터널 입구의 사면안정성 검토 및 보강대책

김교원 · 정영국(경북대학교 지질학과)

1. 서 론

사면 설계시의 지질조사는 전체적인 지질구조를 파악하고 각각의 절리군의 특성을 밝힘으로써 대 상 지반의 공학적 특성 및 위험요소를 사전에 인지하고, 사면 안정성 해석시의 기초자료를 제공한다 는 측면에서 매우 중요하다. 그 동안 국내의 사면에 대한 설계시의 지질조사는 피상적인 시추조사만 실시하여, 사면안정성에 큰 영향을 미치는 지질구조의 방향성을 정량적으로 파악하지 못한 경우가 빈번하였다. 그러나, 최근에 와서는 설계단계에서 지표지질조사와 아울러 지오토모그래피 등의 기법을 이용하여 지질구조를 보다 정확하게 파악하여 사면안정성이 검토되고 있는 추세이다. 공사 중 암반사 면 붕괴 사례, 특히 퇴적암 지역에서의 암반사면 파괴사례는 Kim 등(1999)에 의하여 다수 보고되어 있는 바와 같이 20도 내외의 경사각을 가진 층리면을 따라서 발생하는 경우가 많았다.

현재 공사 중인 국도 20호선 연장 공사 구간 중 집중호우로 인하여 터널 입구 암반사면이 불안정 하게된 나원터널 입구사면에 대한 정밀지질조사를 수행하고 다양한 조건하에서의 안정성을 검토하여 대책을 제시하였다.

2. 지질개요

경주시 현곡면에 위치하는 본 지역 일대는 중생대 경상누층군 하양층군 함안층으로서 사암, 셰일 및 열변성에 의한 혼펠스화된 셰일이 나타나는데, 층리면의 경사방향/경사는 230~259/34~48이다. 인접한 유천층군의 영향으로 산성 혹은 염기성 맥암류의 빈번한 관입 및 이들과 관련한 단층, 파쇄 대, 풍화대 등의 발달이 두드러지며, 맥암류의 열변성작용에 의해 셰일이 혼펠스화된 것도 관찰된다. 터널 입구부 사면에서 발견되는 단층은 099~119/85~89 및 072/85의 방위를 보이며, 단층주변에는 심한 파쇄대와 함께 지층들이 교란되어 있고, 단층의 방향은 맥암류의 방향과 거의 일치한다.

3. 분리면의 특성

본 지역에는 사암, 셰일, 호온펠스 등에 규칙 절리 5개조와 불규칙 절리조 2개조가 인지된다. 절리 조의 구분은 먼저 58개의 현장 측정자료에 대하여 분리면 통계처리 프로그램인 DIPS(version 5.0,

Rock Engineering Group,
University of Toronto,
1999)를 이용하여 하반구 투
영법으로 각 절리조별 극점
(pole)을 점시하여 대표 방
향성을 Figure 1과 같이 결
정하였다. 이 지역에는 경사
방향/경사각이
238/43(Set1),
117/76(Set2),
328/85(Set3),
352/44(Set4),
018/41(Set5)인 규칙 절리

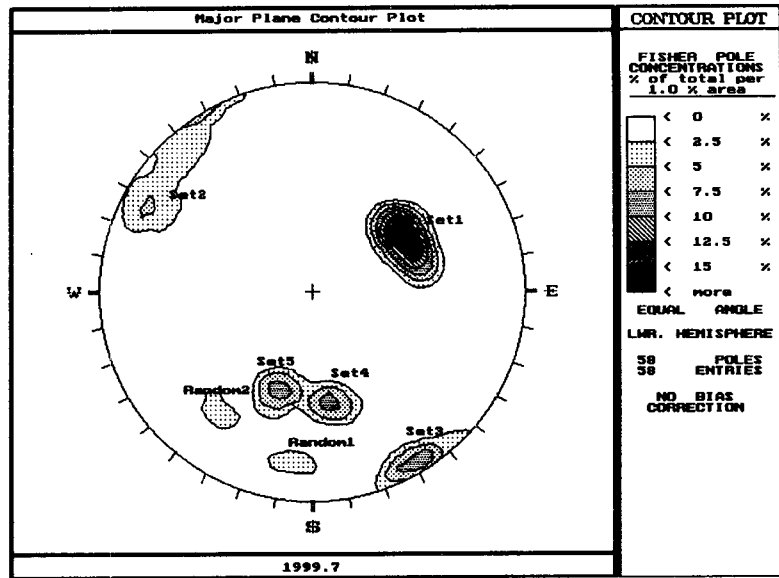


Figure 1. Contour plot of poles of discontinuities

조와 006/71(Rd1), 038/62(Rd2)인 불규칙 절리조가 분포한다.

현장 측정된 각 분리세트의 평균 분리간격을 기준으로 산출한 단위 길이 1m당 평균 분리빈도(Hudson and Priest, 1976) λ 는 $\lambda_{set1}=10.18$, $\lambda_{set2}=11.38$, $\lambda_{set3}=9.89$, $\lambda_{set4}=9.89$, $\lambda_{set5}=9.97$, $\lambda_{rd1}=11.64$, $\lambda_{rd2}=15.87$ 등으로 확인되었으며, 평균체적분리빈도(J_v)는 56.32이다. 본 지역에서의 암반분류 결과, Q-system(Barton, etc, 1973)의 Q값은 0.06~2.24의 범위로 Very Poor~Poor의 암반등급을 보이며, 지공학적 암반분류(Bieniawski, 1989)의 기초 RMR 값은 38.18~50.47, SMR 값은 38.18~63.97의 범위로 Poor~Good의 등급으로 확인되었다. SMR의 적용은 각 조사지점 중에서 최대로 위험한 절리를 기준으로 결정하였고, 다시 평면 파괴나 전도파괴가 예상되는 혹은 잠재적 파괴요인을 내포하고 있는 지점에 대하여만 분석을 한 결과 RMR 값과는 대체로 비례적 관계를 가지며 점수는 10정도 높은 것으로 나타났다.

4. 사면안정성 평가

본 지역에서 사면의 활동은 집중강우에 의한 전단응력의 증가와 발파 등에 의한 동하중의 추가 및 전단강도의 저감요인인 단층, 절리, 균열, 파쇄대 등의 약선대의 존재에 그 원인이 있다고 볼 수 있다. 따라서, 이러한 가능성을 고려하여 도해적 분석, 한계평형해석 및 수치해석을 통하여 사면의 안정성을 분석하였다.

□ 도해적 분석 : 암중에 따른 일반적인 파괴유형은 풍화된 화성암은 원호파괴 양상을 보이거나 붕괴 빈도가 낮고, 퇴적암에서는 평면파괴가 우세하며 변성암은 암질 불량으로 인한 원호 파괴, 단층구조

및 엽리 등으로 인한 썩기 파괴 및 평면파괴 양상을 주로 보이는 것으로 보고되고 있다. 본 조사지역은 퇴적암이 열변성될 당시 형성된 절리 및 단층의 발달이 사면의 안정성을 지배한다고 볼 수 있다.

안정성 분석은 각 구간별로 DIPS 프로그램을 이용한 평사투영해석 결과를 기초로 파괴유형을 분석하여, 썩기파괴 유형에 대하여는 프로그램 SWEDGE(version 3.0, Rock Engineering Group, University of Toronto, 1999)을 이용하여 정량적인 분석을 시도하였으며, 불안전 구간에 대하여는 록볼트의 적용을 검토하여 분석하였다. 분석결과 본 지역은 평면파괴 및 전도파괴가 우세하게 나타나며, 사면 경사각을 조정하면 안정성을 유지할 수 있었다. 썩기파괴에 대하여 일부 구간이 불안정하게 나타났는데, Figure 2에 나원터널 우측 사면부의 평면파괴, 전도파괴 및 썩기파괴의 가능성이 있는

구간을 도시하였다.

□ 한계평형 해석 : 해석은 프로그램 PCSTABL6 (Purdue University, 1999)를 이용하여 Janbu의 간편법(절편법)에 의한 원호활동 파괴에 대한 임계 파괴면의 안전율의 최소치를 구하였다. 해석은 상부 토사면과 하부 약선대에서 평상시의 지하수위가 낮은

경우와 호우시의 지하수위가 높은 경우를 가정하여 수행하였고, 각각의 경우에 수평 지진력 0.1g를 고려하여 분석을 수행하였다. 또한, 사면 안전율이 낮아서 불안정한 경우에는 Rock Anchor를 타설하여 적절한 안전율이 얻어지도록 하였다.

해석결과 상부 토사면에서는 평상시 수위가 낮은 경우에는 사면의 안정성이 유지되나 수위가 높은 경우는 불안정하게 나타났으며, 지진하중이 고려될 경우 지하수위가 낮아도 불안정한 것으로 나타났다. 이런 불안정한 경우들에 대해 Rock Anchor를 타설하였을 경우 안정성은 유지하나 항상 잠재적인 붕괴위험을 내포하고 있으므로 다른 보강공법이 필요할 것으로 판단되었다. 또한 하부 약선대에서는 상부 표토층 사면과 비슷한 결과를 보였지만, 특히 집중 호우시 지하수위가 높은 경우와 평상시 지하수위가 낮을 때 지진하중을 고려한 경우에는 Rock Anchor를 타설하더라도 불안정하게 나타났다. Figure 3은 지하수위가 높고 Rock Anchor를 타설한 경우의 해석결과를 보이고 있다. 즉, 본 사면은 집중호우시 매우 위험하고, 평상시에도 지진이나 발파 등의 동하중이 작용할 경우 매우 불안정한 것으로 나타났으며, Rock Anchor 보강만으로는 안정성을 유지하기 어려울 것으로 사료되므로 적절한 추가의 보강공법이 필요할 것으로 판단된다.

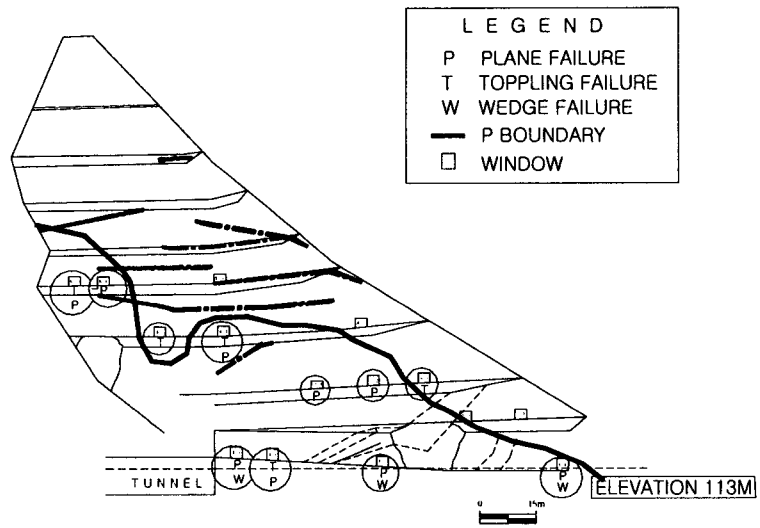


Figure 2. Expected failure modes of the slope

Table 1. Results of slope stability analysis using PCSTABL6 program

지역	지하수위	지진하중	최소안전율	Rock Anchor		
				개수	하중(t)	최소안전율
상부 토사면	높음	-	0.990	2	20	1.252
	낮음	-	1.262	-	-	-
		0.1	1.033	2	20	1.261
하부 약선대	높음	-	0.982	9	20	1.063
	낮음	-	1.306	-	-	-
		0.1	1.114	9	20	1.193

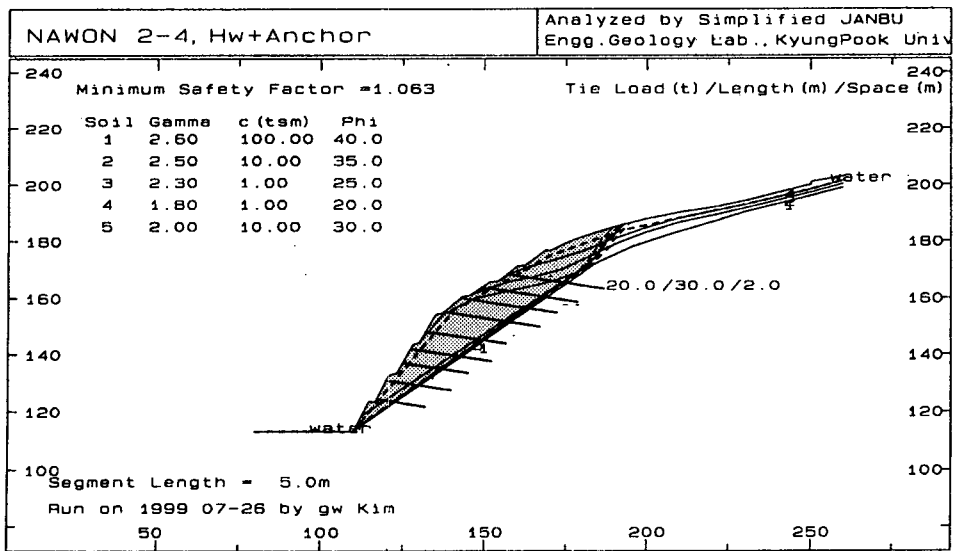


Figure 3. Result of slope stability analysis indicating a meta-stable condition with rock anchors under high water table.

□ 수치해석 : 수치해석에 사용된 프로그램 Phases2(version 4.0, Rock Engineering Group, University of Toronto, 1999)는 불연속체의 해석이 가능하고, 시공단계 별 해석이 가능한 2차원 유한요소 프로그램이며, 지반공학의 광범위한 문제 해결에 용이하다. 이 해석은 갱구부의 보강방안으로 개착식 터널을 설치하는 경우의 개략적인 터널구조물의 응력 상태를 확인하기 위하여 수행하였다.

해석영역은 해석대상 구간이 굴착 등에 의한 영향이 거의 없는 범위까지 크게 설정하였고, 영역경계의 좌우 및 하부는 roller로 연결하여 축방 및 연직변위를 구속하고, 하부 양 모서리는 hinge로써 회전만 허용하였다. 지층의 분포는 지질조사 결과에 의해 표토층, 풍화암층, 연암층 및 경암층으로 구분하였으며, 층리면의 경사는 30° 로 요소망의 우측으로 경사진다. 해석 순서는 원지반 상태-1단계굴착-2단계굴착-3단계굴착-터널구조물 설치 및 뒷채움 등 5단계로 나누었으며, 사면에 2조의 단층면이 존재하는 경우에 대하여 해석을 실시하였다. 수치해석의 기본 전제조건이 연속체 역학에 근거하기 때문에 실제 현장 암반의 불연속성과 불균질성 등을 충분히 반영한다고는 할 수 없지만, 이 해석 결과에서 사면의 거동 및 개착식 터널 구조물의 응력분포의 경향을 파악할 수는 있다.

현장 관찰된 사면 경사방향으로의 단층 등 불연속면을 고려하여 수행한 해석 결과는 단층면이 굴착지에 노출되는 2단계 및 4단계 굴착시 지반 변위량이 크게 증가하여 실제 시공시에 발생하였던 사면 상부의 인장균열이 이와 같은 단층 등의 영향임을 확인할 수 있다. 즉, 대부분의 변위는 단층면 상부 지괴에서 발생하고 있어 단층면을 따른 지반활동으로 인해 사면 표면에 인장균열이 발생한 것으로 볼 수 있다. 그러나, 굴착 완료 후 개착식 터널의 건설에 따른 추가 변위는 수 mm 정도 증가하는데 그치고 있으며, 응력의 변화도 미소한 것으로 나타났다. 지반강도비의 분포를 보면 사면 표면의 넓은 범위에 인장응력이 발생하여서 실제 발생한 인장균열을 대변하였다. Figure 4, 5 및 6은 3단계 굴착시의 변위분포, 최대주응력 분포 및 지반강도비의 분포를 나타내고, Figure 7, 8 및 9는 최종 굴착시의 변위분포, 최대주응력 및 콘크리트 라이닝의 최대주응력 분포를 나타내고 있다.

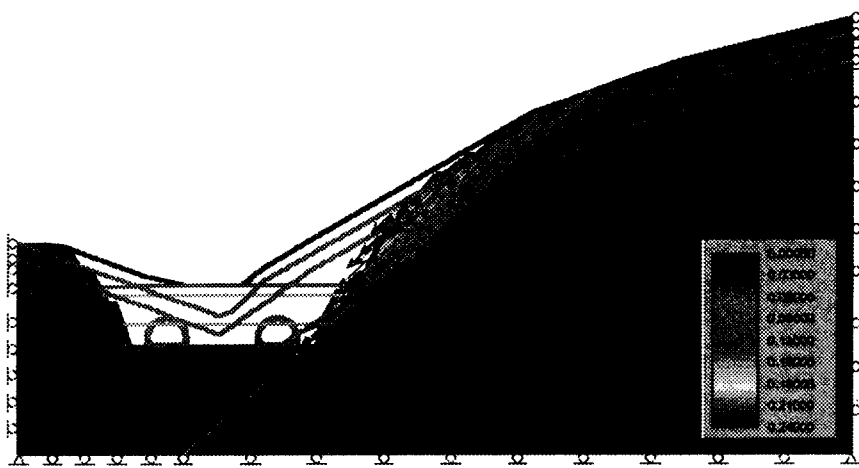


Figure 4. Distribution of displacement vectors at 3rd stage

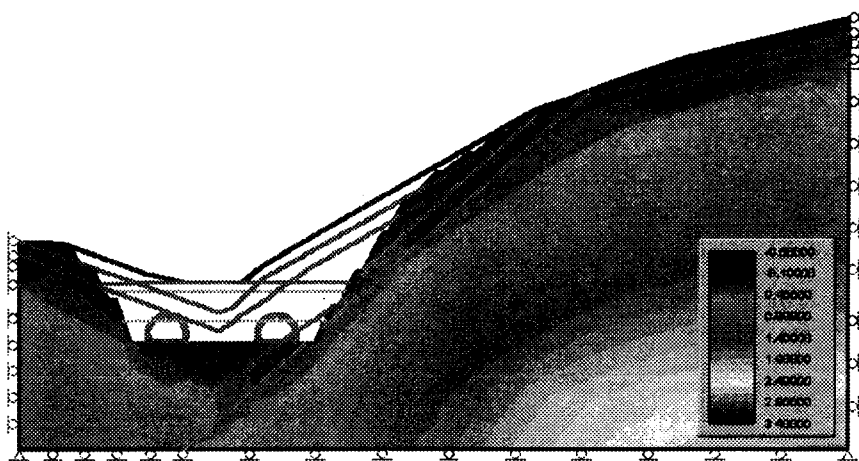


Figure 5. Distribution of maximum principal stress at 3rd stage

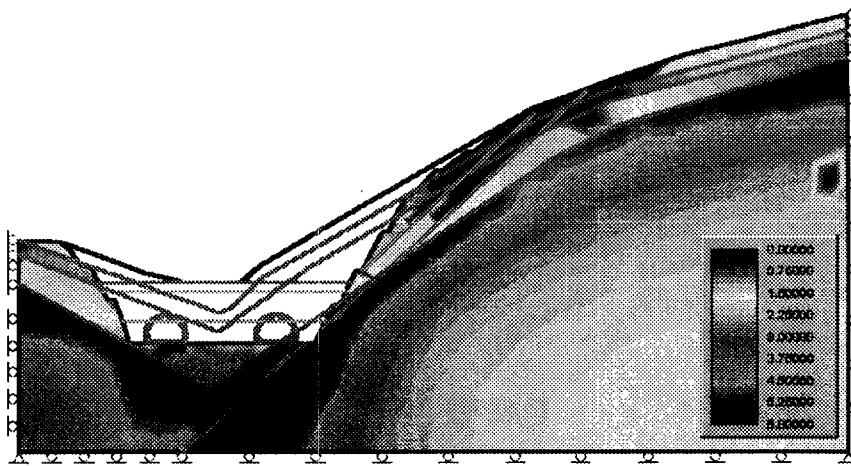


Figure 6. Distribution of strength ratio at 3rd excavation stage

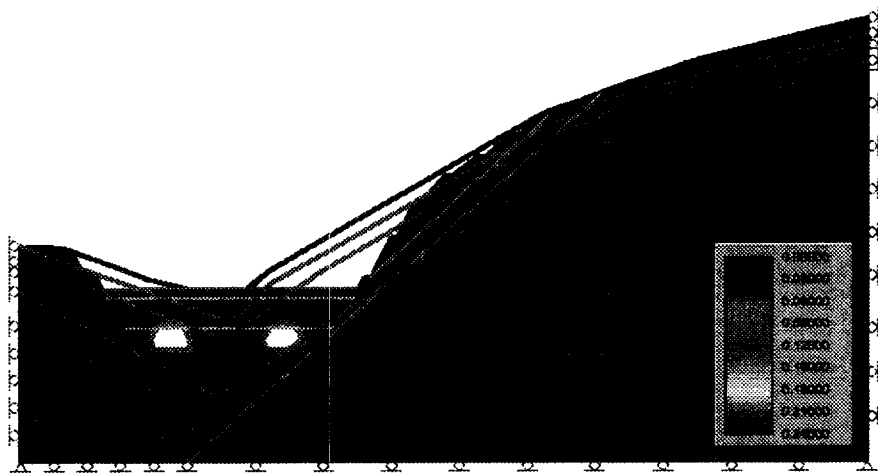


Figure 7. Distribution of displacement vectors at final stage

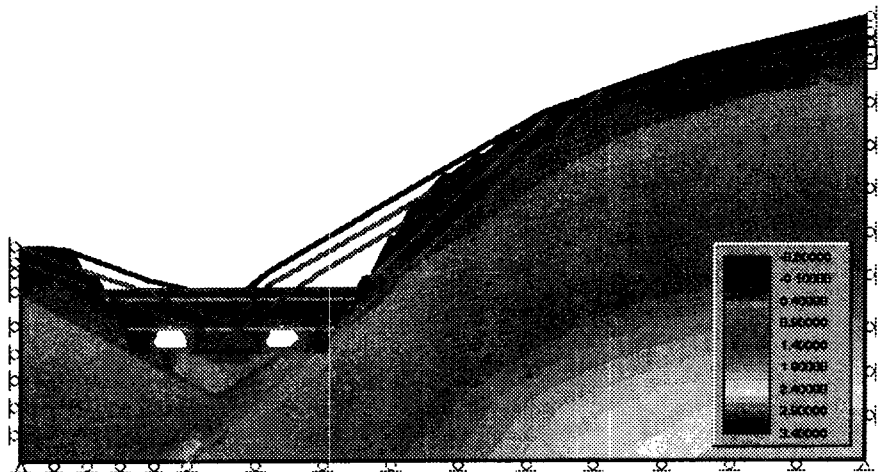


Figure 8. Distribution of maximum principal stress at final stage

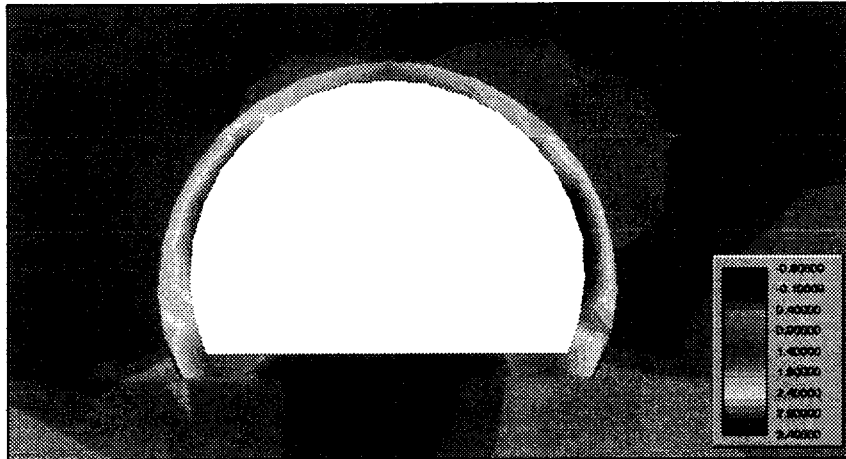


Figure 9. Maximum principal stress on lining of open tunnel which is covered by backfill materials

5. 결론 및 토의

사면의 대부분 지점에서의 평면파괴 및 전도파괴의 우려는 특정 부분에 대한 국부적인 보강만으로는 항구적인 안정성을 기대하기 어렵다. 특히, 터널 입구부 우측사면(하행선측)은 터널 굴진 방향과 아평행한 N27E/76SE 방향의 단층으로 인한 전도파괴 및 균열 형성이 가장 심각한 문제로 보여진다. 한계평형 해석 결과 지하수위가 상승하거나 지진하중을 고려할 경우 사면이 불안정하며, 앵커 타설만으로는 충분한 안전을 확보가 불가능하다. 따라서, 사면 구간까지 일정 길이로 터널을 연장하여 구조물을 설치한 후에 복토로 피복하여 사면의 높이를 줄이고 선단부를 지지하는 방법이 가장 바람직한 사면 보강대책이라고 생각된다.

입구부 우측사면 상단부에서 확인된 지표 함몰 및 인장 균열은 그 연장성 및 규모에서 직접 현 사면에 영향을 미칠 수 있으므로 이에 대한 조치로 균열부를 점토 등으로 봉합하고 지표수의 배수를 촉진하여 지표수의 사면내로의 유입을 차단하기 위한 배수설비의 정비가 필요하다. 또한, 사면에 수평 방향의 배수공을 설치하는 것도 사면내의 수압 상승에 따른 지반의 강도저하를 방지하는데 큰 도움이 될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. Barton, N., R.Lien, and J. Lunde, 1974, Engineering Classification of Rock Masses for the design of Tunnel Support, Rock Mech. 6, pp. 183-236.
2. Bieniawski, Z.T. 1989, Engineering Rock Mass Classifications, John Wiley & Sons,

pp.52-69.

3. Hudson, J. A. and S. D. Priest, 1976, Discontinuity spacing in rock, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 13, pp. 135-148
4. Kim, G. W., Y.S. Paik and D.K. Park, 1999, Slope Failures in Sedimentary Rocks in Kyoungsang Basin. Special Publication to Commemorate The Eleventh Asian Regional Conference on Soil Mech. and Geotechnical Engineering, KGS, Seoul, pp. 135-140.
5. Rock Engineering Group, 1999, Program Manuals, University of Toronto