

언양지역 퇴적암층내 점토충전물에 의한 사면파괴 보강시공 사례고찰



이 상 진
(주)두우건설엔지니어링
지반부 상무



김 민 영
(주)두우건설엔지니어링
대표이사



이 양 상
한국철도시설공단 건설본부
경부고속철도PM팀장
(lysi@naver.com)

1. 서 론

최근 퇴적암 지역에서 집중적인 계절성 강우 등으로 인해 우기시 산사태 문제가 심각하게 대두되고 있다. 특히, 퇴적암층 불연속면내 점토 충전물은 우기시 우수의 침투로 인한 접촉면의 전단강도를 현저히 약화시켜 사면 붕괴의 주된 요인이 되고 있다.

지반조사는 지표지질조사, 전기비저항탐사(6추선), 시추조사(12공), 시추공영상촬영(2공), 공내전단시험(2회) 및 실내시험 등을 실시하여 지층분포상태, 기암반 불연속면 특성 및 지질구조를 분석하고, 지반파괴의 원인을 파악하여 본 사면 안정성 검토에 필요한 설계정수를 결정하고, 이를 통하여 합리적이고 경제적인 사면안정대책방안을 제시하였다.

2. 사면현황 및 지질특성

2.1 사면현황

본 사면은 「경부고속철도 00공구 노반신설 기타공사」중 두동 제2터널 개착(중점)부 사면으로 사면 최대높이 약 30m, 연장 160m, 5개의 소단 및 사면 경사 1:1.5~1:1.8로 절취공사 중 인장균열 발생으로 인해 시공이 중단된 상태였다. 2007년 6월 30일 사면내 주요 인장균열 4개소와 파생된 15개의 인장균열이 확인되었으며, 2007년 7월 10일 집중호우(태풍 에위니아)의 영향으로 기존 주요 인장균열부를 따라 기반암과 기반암 상부의 배면부 토사층이 계단형으로 수cm에서 최대 3.5m의 단차를 형성하며, 사면파괴가 발생하였다.

본 조사구간 인장균열 발생 현황은 그림 1과 같다.

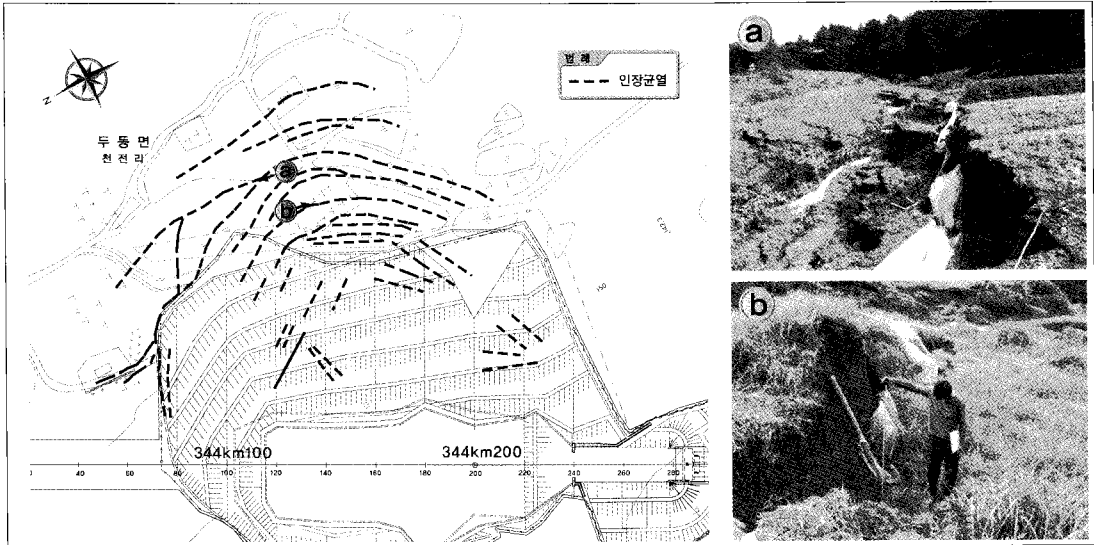


그림 1. 인장균열 발생 현황

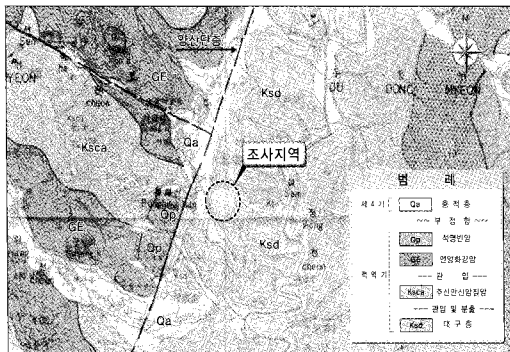


그림 2. 연구지역 지질분포도

2.2 지질특성

본 연구지역의 지질은 양산단층을 경계로, 단층 좌측지역은 백악기의 주산안산암(Ksca), 언양화강암(GE), 석영반암(Qp)이 분포하고 있으며, 조사구간을 포함한 단층 우측지역은 백악기 대구층(Ksd)이 분포하고, 이를 제4기 충적층(Qa)이 부정합으로 피복하고 있다(그림 2).

본 사면의 주요 분포 암종은 적색의 셰일 및 미사암으로 부분적으로 열수변질에 의해 녹회색을 보이며, 조사구간 중앙부를 제외한 사면 좌우측은 풍화대가 발달하고, 중심부는 연암이 분포하여 차별 풍화에 의한 국지적 풍화대 발달 양상을 보인다.

3. 사면 파괴원인 분석

본 연구지역의 사면 파괴원인을 분석하기 위하여, 현장 지반조사 결과를 근거로 굴착 전 원지형 산사태 지형분석, 평사투영해석, 인장균열 진행 양상, 불연속면 점토 충전물 및 강우 분석을 통해, 사면 파괴 원인을 상세하게 분석하였다.

주변 탐문조사 및 시공전 지형도 분석 결과, 본 조사지역은 사면 굴착 전에도 산사태가 빈번하게 발생하여 원지형의 자연 파괴 가능성이 큰 지역이며, 노선(사면)방향(284°)과 층리면 경사 방향(303°)이

유사하고, 사면 경사가 층리면 경사각(21°)보다 급해 평면파괴 조건이 충분한 상태에서, 굴착에 따른 저항체 제거로 층리면을 따른 평면파괴로 인해 사면 상부에 준수직 상태의 주절리면을 따라 인장균열이 발생된 것으로 분석되었다.

또한, 사면 굴착이 중단된 상태에서 집중 호우로 인해, 기반암 노출구간을 중심으로 기존의 인장균열과 층리면을 따라 평면파괴가 집중적으로 발생되었다. 특히, 시추조사결과 사면 불연속면내 점토 충전물 두께가 3~5cm로 나타났으며, 연암뿐만 아니라 경암에서도 두께 5mm 이하의 협재물이 다수 발견된 점으로 볼 때, 연·경암 등 암종에 관계없이 불연속면에 광범위하게 점토가 협재 또는 충전되어 있는 것으로 나타나, 강우가 인장균열을 통해 신속히 침투하여 불연속면 내 존재하는 점토 충전물이 연약화되고, 간극수압이 증가되어 사면 파괴가 진행되었을 것으로 판단된다.

결론적으로, 현 사면의 활동 파괴면은 사면 경사 방향과 동일하게 발달한 대표 경사각 21°의 층리면

이 암종과 무관하게 발달한 층리면내 점토 충전물과 층리 주변에 발달한 파쇄대를 통해 잠재적 파괴면으로 존재하고 있다가, 추후 굴착과정 및 최종 굴착시 활동 파괴면으로의 활성이 예측된다(그림 3).

이러한 시공 중 파괴 양상 및 활동 파괴면 예측을 활용하여 설계정수 산정과 최종 굴착시 사면의 안정성 해석에 적극적으로 반영하였다.

4. 사면 안정성 평가

4.1 점토 충전물을 고려한 불연속면 전단강도 산정

조사구간 암반 불연속면내에 존재하는 점토 충전물은 퇴적암내 퇴적 기원의 풍화잔류물 내지는 관입암맥의 풍화잔류물에 의한 생성물로 추정되며, 충전물의 두께가 3~5cm로 비교적 두껍고, 암종과 무관하게 광범위하게 협재된 것으로 나타나, 암반

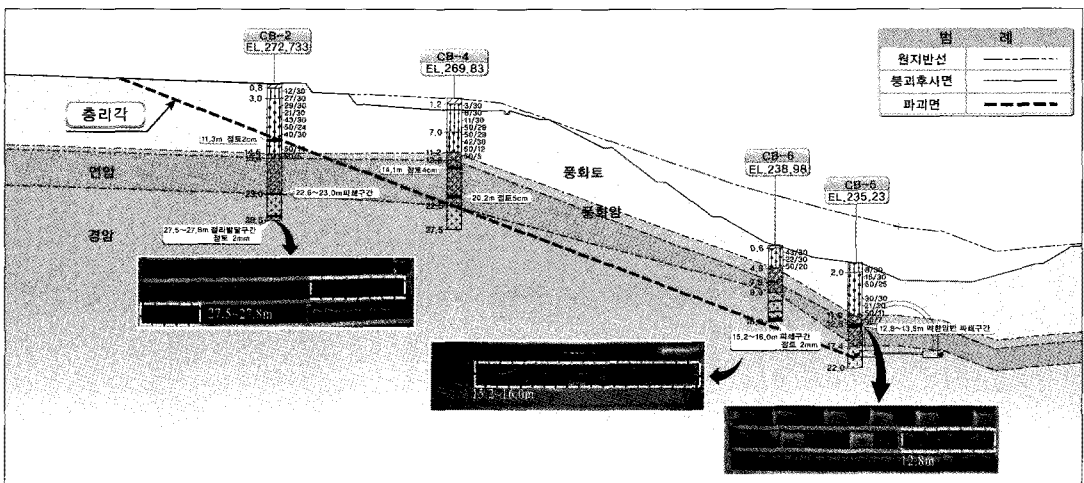


그림 3. 활동 파괴면 예측

연안지역 퇴적암층내 점토충전물에 의한 사면파괴 보강시공 사례고찰

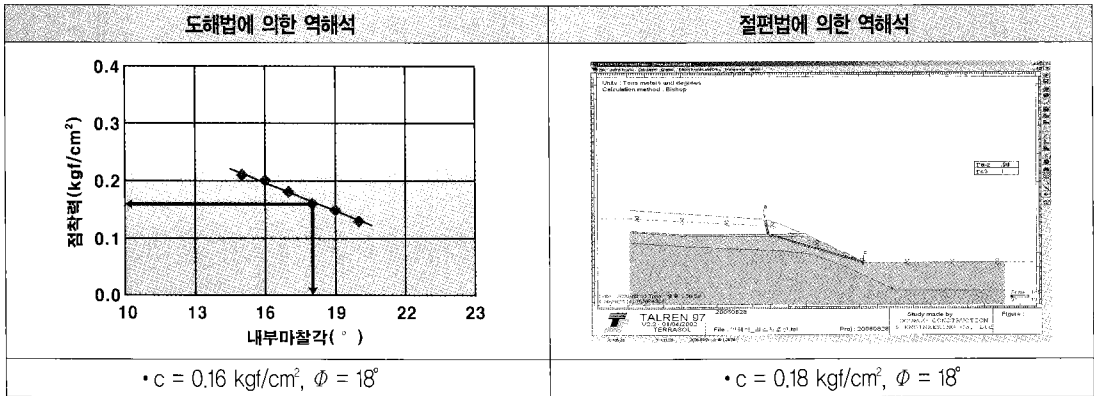


그림 4. 점토 충전물을 고려한 불연속면 전단강도 역해석

의 불연속면 전단강도가 암반자체보다는 점토 충전물의 전단강도에 의해 좌우(Goodman(1970))되는 것으로 판단되어, 점토 충전물을 고려한 불연속면에 대해 전단강도를 산정하였다.

일반적으로 암반 불연속면의 전단강도 산정시 보편적으로 적용하는 Barton 경험식은 점토 충전물 협재를 고려할 수 없는 깨끗한 불연속면에 대한 산정식이므로 적용에서 배제하였다.

본 현장의 불연속면 전단강도는 2006년 7월 9일 ~7월 10일에 걸쳐 발생한 집중 강우자료와 사면파괴 형상, 측정된 불연속면 자료를 토대로 사면파괴를 재현한 역해석을 통해, 상대적으로 신뢰성이 높고 합리적으로 산정하였다.

파괴면에 대한 역해석은 다음 그림 4와 같이 도해법과 절편법을 이용하여 산정하였다.

본 사면 역해석 분석 결과를 인근 유사지반의 불연속면 설계정수 적용사례를 참고하여, 불연속면 전단강도는 내부마찰각 18° , 점착력 0.16 kgf/cm^2 로 결정하였으며, 이를 사면 안정성 검토시 적용하였다.

4.2 사면 안정해석

굴착 사면과 층리, 절리 등 불연속면의 방향성 관계에 따른 파괴양상을 정성적으로 파악하기 위하여, 평사투영해석을 실시하였으며 해석 결과, 사면과 층리면 방향, 불연속면 주향과 경사 등을 고려할 때, 평면 파괴 가능성이 매우 큰 것으로 분석되었다(그림 5).

또한, 한계평형해석을 통해 정량적인 현 파괴 사면의 안정성을 검토하였으며, 사면 파괴양상은 사면내 발달한 절리면과 층리면을 따라 파괴가 발생하는 평면파괴 형태로 사면안정해석을 실시하였다. 안정해석 방법은 도해법과 절편법(전산 프로그램, Talren 97)을 사용하였으며, 검토 결과 안전율은 각각 0.96과 0.94로 공사중 임시사면 기준 안전율 1.1에 미달하여 불안정한 것으로 검토되었으며, 현 사면의 시공중 단기 우기시 조건에서 이미 파괴가 진행된 것과 일치하였다(그림 5).

사면안정성 확보를 위한 사면 절취는 이미 파괴가 진행된 구간의 버력과 토사(이하 "파괴토")를 제거하는 것을 원칙으로 하였고, 현 사면 배면 구간에

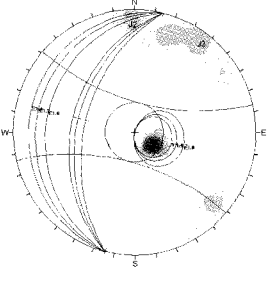
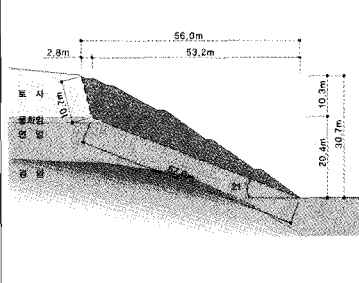
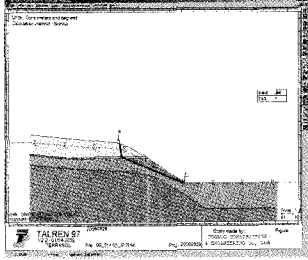
구분	평사투영 해석	도해법	절편법
해석결과			
판정	평면파괴 가능성 큼	0.96 < 1.1 (N.G)	0.94 < 1.1 (N.G)

그림 5. 평사투영 및 한계평형 해석

대한 추가 절취 범위는 인장균열 심도에 따른 파괴 구간 제거와 사면 안전율을 고려하여 산정하였다.

5. 사면안정 대책공법 검토

5.1 사면 보강공법 검토

본 사면 구간은 이미 전반적인 사면 파괴와 더불어 사면 배면 구간에서 대규모 인장균열과 단차가 발생한 단계이므로, 사면 안정성을 최우선적으로 고려하였다.

사면 안정 대책공법은 파괴토 제거를 통한 사면 경사 완화공법과 개착구조물 공사를 위한 추가 절토사면의 예상 파괴면에 대한 저항력 증가를 목적으로 한 앵커공법을 병행 검토하였다.

본 검토사면에 적용 가능한 사면 보강공법으로 「사면경사 완화 + Rock Anchor 공법」, 「층리면 기준 사면경사 완화 공법」, 「사면경사 완화 + 가시철 흙막이 공법」등을 비교·검토하였으며, 사면의 장기적 안정성과 경제성 및 시공 용이성을 고려하여,

「사면경사 완화 + Rock Anchor + Rock Bolt 공법」(그림 6)을 최종 선정하였으며, 현재 사면 보강 시공 전경은 다음 그림 7과 같다.

사면 상부의 경사 완화공법은 사면도괴 중량 제거에 따른 사면안정성과 경제성을 고려하여 계획하였으며, 사면 완화 경사는 암맥이 발달되어 있는 특성을 반영하여 평면파괴 근원적 제거를 고려한 층리각(21°)과 유사하게 1:2.5로 적용하고, 사면파괴 후 잔류강도로 전단저항력이 현저히 떨어지고, 파괴 토괴가 하중(전단력)으로 작용, 사면 안정성이 크게 저하되므로, 장기적인 사면 안정성 확보를 고려하여, 이완된 파괴 토괴를 제거하기 위해 사면 중간 소단 폭을 4~6m로 넓게 설치하였다.

사면 하부 경사각은 앵커보강구간은 1:1.0, NATM 갱구부는 평면파괴와는 직접적인 관련이 없으므로 사면안정성을 확보할 수 있는 1:2.0을 적용하였다.

사면의 보강은 복토계획고에 따라 임시 보강구간과 영구 보강구간을 구분하였으며, 벨마우스 개착 터널 갱구부 형상과 복토 시공성을 고려한 복토계획고 하부 구간은 임시앵커를 적용하고, 복토면 상

연양지역 퇴적암층내 점토층전물에 의한 사면파괴 보강시공 사례고찰

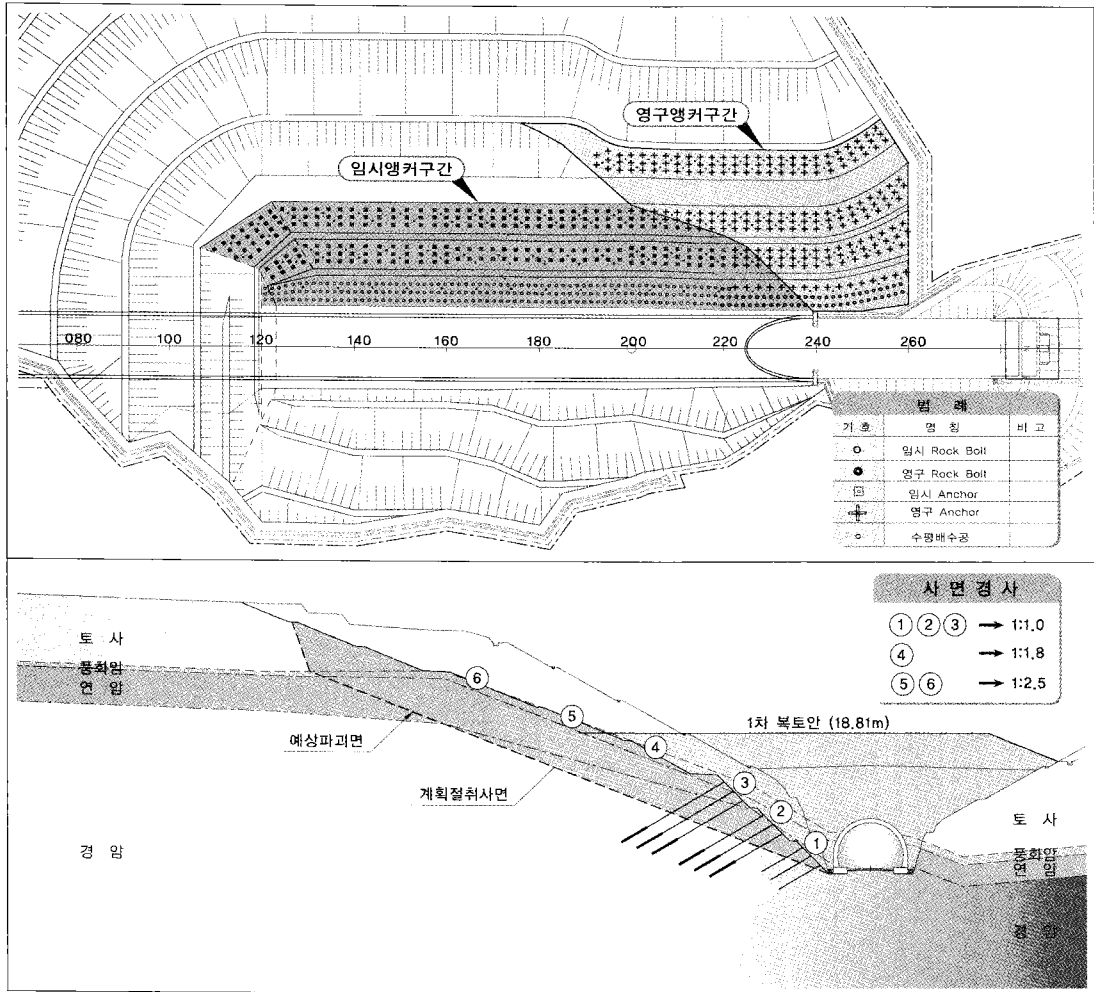


그림 6. 사면 보강공법 검토 (사면경사완화 + Rock Anchor + Rock Bolt 공법)

표 1. 앵커조건에 따른 정착장 및 PC Strand 수량

구분	설계하중(tf/본)	정착장(m)	PC Strand 수량	비고
임시앵커	80	5.0	7	
영구앵커	80	6.0	8	

부로 노출되거나 장기적인 복토 침식이나 세굴로 노출우려가 있는 구간은 영구앵커로 구분하여 적용하였다.

Rock Anchor 정착장은 지반과 앵커체와의 주변

마찰력을 통한 앵커지지력이 설계 인장력을 만족하는 길이로, 정착장 선정방법은 크게 최소 정착장, 앵커체와 그라우트 경계면을 고려한 앵커체 부착장 및 그라우트와 지반사이의 마찰력을 근거로 한 앵커



그림 7. 두동 제2터널 개착(중점)부 시공 전경사진

체 마찰저항장 산정결과 중 가장 큰 값을 적용하였다. 또한 임시 및 영구앵커 조건에 따라 PC Strand 수량 검토 결과, 임시앵커구간은 7EA, 영구앵커구간은 8EA로 적용하였다(표 1).

Rock Bolt 보강은 Rock Anchor가 설치되지 않는 암반 사면 최하단 구간에 암반 굴착시 국부적인 암괴의 붕락을 방지하고, 주변에 인접한 암괴 블록을 일체화시키기 위한 목적으로 적용하였다.

보강 사면에 대한 안정성 해석은 본 사면이 주로 암반으로 구성되고, 평면파괴를 해석할 수 있는 도해법을 적용하고, 사면해석 전용 프로그램인 「Talren 97」을 사용한 절편법으로 보완하였다. 또한, 사면의 임시노출기간을 고려한 안전율 적용, 예비해석을 통한 가장 불리한 파괴선과 평면파괴 가능범위, 영구앵거력 장기 손실 및 굴착후 기반암(세일)의 급속풍화 등 다각적인 분석을 통해 안정성을 확보하였다.

5.2 사면 보호공법 검토

사면 안정 해석결과 안정한 사면일지라도 방치하면, 우수에 의한 침식 및 세굴에 의해 토사유실과 이로 인해 보강력 감소가 발생될 수 있으며, 또 풍화작용 및 동상, 연화작용 등에 의해 사면의 표면부가 점점 연약화됨에 따라, 임시 및 영구사면의 보강 구간과 비보강 구간을 구분하여 적용하였다.

사면보호공법으로 보강사면 구간에는 슛크리트 ($T=10\text{cm}$) 타설과 주변미관을 고려하여 「덩굴식물 식재공법」을 병행하였으며, 비보강 영구사면구간에는 원설계와 같이, 토사·풍화암 구간은「코아네트 공법」, 연·경암 구간과 토사·풍화암 구간의 연속된 암반(맥)구간은 「녹생토 공법」을 계획하였다.

사면굴착과 개착구조물 공사 중 사면에 대한 지속적인 안정성 확인과 Rock Anchor 등 추가보강

여부를 결정하기 위해, 지중경사계, 지하수위계 및 로드셀을 설치하여 계측관리가 수행되도록 계획하였다.

5.3 사면 절취에 따른 복토 및 배수계획

사면 절취시 Face Mapping을 실시하여 안정성 확인에 반영하고, 세굴과 우수침투를 억제하기 위해 배수로를 동시 시공하고, 복토 시공의 경우 사면과 개착구조물 사이 터널아치 상부 2.0m 이하까지는 사면 활동 저항성을 고려하여 95% 다짐 기준으로 시행하고, 그 이상 구간도 장비 고르기와 다짐을 수행하여, 사면안정성을 확보하는 것으로 계획하였다.

본 사면 배수계획에서는 사면 외부에서 사면 내부로 침투하는 우수를 배제하기 위한 산마루 측구와 사면 내부에서 발생하는 유출수를 신속하게 배수하기 위한 소단 측구와 도수로를 설치하였다. 공사 착수시 공사현장 내로 유입되는 우수는 산마루 측구를 선시공하여 공사현장 외부로 배출하는 것으로 계획하였으며, 공사중 유입되는 우수는 소단 설치 즉시 L형 측구를 시공하여 산마루 측구와 연결하여 유입수 배출을 하는 것으로 계획하였다. 한편, 사면내 지하수위를 설계기준 심도이하로 배제시키기 위해 수평배수공(L=15m)을 설치하였다.

참고 문헌

1. 건설교통부(2006), "건설공사비탈면 설계기준", 한국시설안전기술공단, pp.117-157
2. 곽태영(2005), "울산지역의 퇴적암 사면 굴착시 안정평가", 울산대학교 석사학위논문, pp. 41-59.
3. 권오일, 김교원, 박덕근(2000), "퇴적암 지역의 자연사면 안정성", 대한지질공학회지, 제10권, 제3호, pp. 205-216.
4. 박덕근, 임경필, 김태훈, 김교원, 김홍택(1999), "사면 위험지대 평가방법 연구 : 경북지역 현장사례를 중심으로", 행정자치부 국립방재연구소, pp. 148-152.
5. 이윤중, 이인기(1972), 한국지질도(1:50,000) 연양도폭 지질도 및 설명서, 국립지질조사소
6. 이정인(2002), "암반사면공학", pp. 111-161.
7. 이태우(2005), "퇴적암층 암반사면 붕괴에 대한 사례연구", 계명대학교 석사학위논문, pp. 43-65.
8. Goodman, R.E. (1970), "The deformability of joints. In Determination of the In-situ Modulus of Deformation of Rock", American Society for Testing and Materials Special Technical Publications, No 477, pp. 174-196.
9. Hoek, E. and Bray, J.W. (1981), "Rock Slope Engineering", pp. 101-103.