

경남 대합지구 절취사면의 붕괴 및 보강대책에 관한 사례연구 A Case Study on Collapse and Reinforcement of Cut-slope in Gyeong-Nam Dae-Hap

이진권¹⁾, Jin-Kwon Lee, 박춘식²⁾, Choon-Sik Park, 장정욱³⁾, Jeong-Wook Jang

¹⁾ 국립 창원대학교 공과대학 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Changwon National Univ.

²⁾ 국립 창원대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Changwon National Univ.

³⁾ 국립 창원대학교 공과대학 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Changwon National Univ.

SYNOPSIS : The objective of this study is to acquire stabilization of collapse of cut-slope in Chang-Nyung, Gyeong-Nam. The following shows the results of this study. We applied a reinforcement method with the latticed beam (0.50×0.50) + permanent anchor(PC 6×φ12.7mm, Ta = 50.0t/EA, etc 3.0m), and fill gravels(D=35cm) in the latticed beam. We attenuated the slope (1:2.0), and stabilized the slope pace by ASANA method. We planned a drainage way(U-type, 0.40×0.40) in order to prevent surface water from inflowing into underground.

Key words : Cut slope, Fault zone, Latticed beam, Permanent anchor

1. 서론

국내 산업화에 따른 인구의 밀집현상과 차량 및 산업유통량 증가는 주택 및 산업단지 등 건설용지의 고갈과 국내 도로망확보의 문제점을 안고 있다. 이로 인해, 대부분의 신설도로가 산악지형을 경유하게 됨으로써 자연사면을 절취 및 성토하여 부지를 확보하게 되었다. 이러한 과정에서 야기되는 사면 안정 문제는 지형, 토질, 기후 등 여러 요인이 복합적으로 작용하여 발생한다. 따라서, 국내 지형 및 지반 특성에 적합한 사면설계법이나 안정화 공법의 도출은 이론적인 연구와 더불어 사례 위주의 실용연구를 통해 이루어져야 하는 것으로 사료된다.

본 논문에서는 경상남도 창원군 대합면 십이리의 지방도 1034번 십이리도로 사면으로서 2003년 9월 12일의 제14호 태풍 “매미”의 영향으로 지표수가 사면의 배면에 위치하는 수직단층의 인장균열부로 유입되면서 큰 수압이 작용하여 점토로 충전된 층리면을 따라 붕괴가 발생되었다. 대상사면은 지속적으로 사면활동이 진행되고 있으며, 또한 배후에는 추가적으로 수직단층이 위치하고 있는 것으로 조사되었으며 이 단층대로 추후 붕괴의 우려가 높은 것으로 판단되었으며, 추가 붕괴의 가능성을 검토하기 위해 현황 및 대횡단 측량, 정밀지표 지질조사, 사면안정해석 등을 실시하였고, 추가 붕괴가능구간에 대해 경제적이고 항구적인 안정성을 고려하여 보강대책을 제안하는 과정을 기술하고자 하였다.

2. 조사 및 시험방법

2.1 지표지질조사

현장의 지질조사는 지표에 분포된 토질과 암석의 분포양상 및 불연속면의 특성분석에 대해 수행된다. 암반분포 구역에 대해서 암종, 풍화정도, 지하수 유출 상태들을 조사한다. 불연속면의 특성 조사는 해당 지역의 절리분포 양상에 따라 차별적으로 수행한다. 절리가 매우 조밀하게 분포된 경우에는 대표적인 절리군 방향성을 조사한다. 절리간격이 비교적 넓고 블록 형성에 의한 안정성 저하가 예상되는 지역에서는 개별 절리들의 위치 및 방향성을 측정하여 평사투영망을 이용한 사면안정해석 프로그램인 DIPS의 자료로 사용하였다.

2.2 선구조 분석

선구조란 일반적인 정의로는 영상에서 선상 혹은 좁고 긴 선으로 나타나는 선상구조를 칭하며, 선구조를 관찰 혹은 추출하기 위해서는 일반적인 야외조사보다는 항공사진이나 위성사진, 지형도가 사용된다.

전국토의 70% 이상이 산지로 구성된 우리나라에서는 지형이 지질 및 지질구조와의 연관성이 매우 높게 나타나고 있어, 지형분석을 통하여 지질, 지질구조 등의 정보의 유추가 가능하다. 기존 지질도상에 기재된 대부분의 대규모 단층선들도 원격탐사자료나 DEM으로부터 판독된 선구조선과 거의 일치된다는 사실은 선구조선의 중요성이 부각된다고 볼 수 있다.

지질학적인 측면에서의 선구조는 직선 혹은 완곡의 지형요소로서 인접한 표면 및 천부의 지형요소와 구분이 명확한 단층, 습곡층, 절리 및 파쇄대 등의 지질구조선과 암석경계를 나타내는 요소로, 단층 및 파쇄대 등의 지질구조는 침식작용에 취약하므로 지형적으로 선형의 요소로 지표에 나타나며, 대규모 관입암체의 분포지, 또는 수직한 습곡의 경우는 환형의 선구조로 확인된다.

추출된 선구조는 광역적인 단층/파쇄대의 위치, 발달방향, 길이/밀도를 파악하여 일반지질학적 연구, 광상탐사, 지하수 탐사 또는 댐, 도로 및 터널 등의 구조물계획지점에 대한 지질구조적 취약부를 파악하여 구조물의 최적위치선정, 재해 예측 등과 관련된 보강방안 및 차수대책 수립 등을 위한 설계 기초자료로 활용되고 있다.

선구조의 분석방법은 크게 육안판독 방법과 컴퓨터에 의한 자동 추출방법으로 구분할 수 있다. 육안판독 방법은 항공사진이나 원격탐사 영상, 음영기복도 또는 수치고도자료 등을 이용하여 연구자의 판단에 의해 선형 또는 환형의 선구조 추출하는 방법이며, 자동추출 방법은 영상처리기법으로 소프트웨어를 이용하여 분석하는 방법이다.

2.3 분리면 특성조사

암반에서의 불연속면은 암반내에 발달하는 단층, 절리, 틈, 균열 등을 총칭하는 용어이며, 일반적으로 절리로 표현된다. 지반조사시 지표 혹은 지하구조물의 안정성에 가장 직접적인 영향을 미칠 것으로 판단되는 절리 및 단층을 대표적인 불연속면으로 취급하며 현장암반 강도와 함께 불연속면의 방향성 및 간격의 측정이 필수적이다. 특히 지하굴착시 응력의 조건 및 암반의 거동에 심각한 영향을 미치는 암반 지하수의 유동 및 집적이 대부분 불연속면을 통하여 이루어지기 때문에 불연속면의 간극 및 충전물의 특성 또한 중요한 요소로 취급된다. 현장에서의 불연속면 측정은 가장 체계적인 발달을 보이는 절리계를 대상으로 하는데, 이들이 평행 혹은 아평행하고 절리면이 평탄하다는 가정이 충족될 수 있는 것이어

야 하며, 특히 사면의 개착 및 발파등으로 인한 균열 및 이완, 풍화로 인한 절리 등은 측정대상에서 제외된다.

불연속면의 특성 조사는 지표지질 및 정밀지질구조 조사와 병행하여 수행되며, 과업의 목적에 적합하게 별도로 수행될 수도 있다. 이는 암상변화와 절리, 단층, 균열등 불연속면 조사를 포함한 정밀 지질구조조사, 시추코어에 대한 조사 등으로 수행될 수 있다.

3. 지형 및 지질

3.1 지형 및 광역지질

조사지역은 진동층의 분포지에 위치하며, 사면을 구성하는 암석은 암회색~흑색의 셰일이다. 셰일은 박리가 현저하게 층리방향으로 쉽게 쪼개지고 층리면은 철산화물 및 박층의 점토가 충전되거나 피막되어 있었다. 사면의 최상부는 표토 및 풍화토로 구성되는 토사가 얇게 피복되어 나타나고 그 하부에는 셰일로 구성되는 암반이 위치하며, N30°E 방향의 인장균열과 관련되는 단층선이 조사지역에 광역적으로 발달되어 있었다.

3.2 선구조 분석

조사지역의 선구조 분석결과 NE방향의 선구조가 가장 우세하게 발달하며 2차적으로 EW 방향의 선구조가 발달한다. NE방향의 선구조는 조사지역이 발달하는 단층의 방향과 일치하며, 조사지역의 단층은 광역선구조와 성인적으로 연계된 것으로 판단된다. 음영기복도상에서의 광역적인 지형 분석결과에 의하면 조사지역을 포함하는 산체는 과거 상당한 규모의 슬럼프가 발생했던 지역으로 추정되면 슬럼프는 남동방향으로 발생했던 것으로 판단된다.

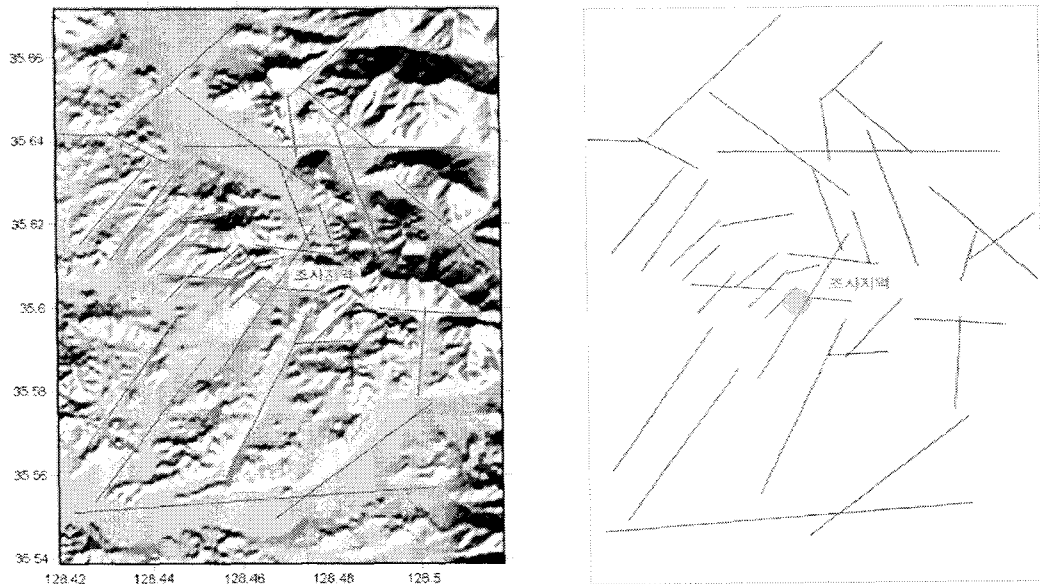


그림 1. 조사지역의 선구조도

4. 불연속면의 특성

대상지역 사면구간의 불연속면을 대상으로 분리면 특성조사를 실시하였고, 이로부터 RMR분류를 실시하였다. 대상지역의 암반사면에 발달되어 있는 불연속면의 방향성을 파악하기 위하여 사면구간에서 측정된 분리면에 대하여 분리면처리 프로그램인 DIPS를 이용하여 하반구 투영법으로 분리면의 대표적인 집중 방향성을 결정하였다. 조사지역의 퇴적암내에 발달되는 층리, 단층, 및 절리가 주요 불연속면이다. 층리는 050~055/10~23의 자세를 보여주며, 절리는 2 SET의 절리면이 발달하고 사면의 파괴가 발생한 곳을 중심으로 수개조의 단층이 발달한다. 주요 불연속면의 층리, 절리, 단층의 방향성은 표 1에 정리하였다.

표 1. 불연속면의 자세

구분	자세(경사방향/경사)	비고
층리	050/15, 050/10, 055/23	
절리	245/73(J ₁), 352/87(J ₂)	J ₁ , J ₂
단층	195/83, 235/80, 245/80, 120/80, 010/85, 340/85	

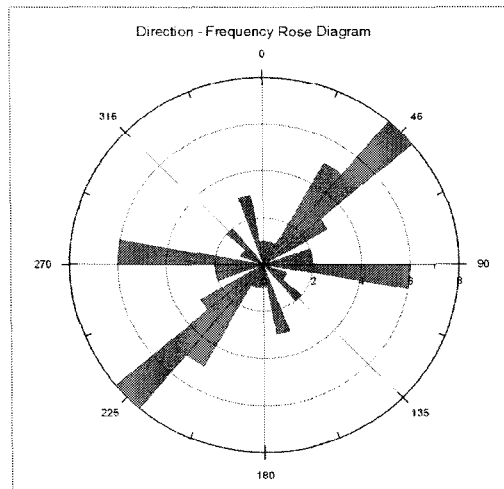


그림 2. 불연속면의 방향성

층리면 및 단층면은 점토로 충전되어 나타난다. 절리면은 산화철이 피막되어 있다. 층리는 연속성을 가지고 측면으로 계속 연장 발달되었다. 단층은 5~20m의 규모를 보여준다. 절리는 3m 내외의 연속성을 보여준다. 단층면은 단층활면이 발달하고, 층리면도 비교적 slightly rough~smooth한 거칠기를 보여주며, 절리면 또한 slightly rough~smooth한 거칠기를 보여준다. 절리 거칠기 측정은 profile gage를 이용하여 측정하였으며 측정된 거칠기는 Barton(1982)의 도표를 이용하여 등급화하였다.

층리		2~3
단층		2~3
절리		3~5

불연속면의 벽면강도를 추정하기 위하여 현장에서 암반용 슈미트해머를 이용하여 반발경도(SHV)를 측정하였으며 이로부터 일축압축강도를 추정하였다.

표 2. 반발경도에 따른 추정 일축압축강도

SHV	추정 일축압축강도(σ_c)		비고
	MPa	kg/cm ²	
31~37(*34)	27.3	279	* 평균값

기반암인 셰일의 풍화정도는 보통풍화의 상태이며 연암으로 분포한다. 점토가 충전되어 분리면으로 작용하는 곳 사이의 간격을 기준할 때 층리의 간격은 0.3m 내외이며 간극은 2mm 내외이다. 절리의 간격은 0.5m 내외, 간극은 0.5~1.0mm 정도이다. 조사 당시 누수가 되거나 지하수의 유출흔적은 확인되지 않았다. 지표근처의 셰일은 층리, 단층, 절리등의 불연속면 발달과 풍화로 상당히 파쇄되고 분리되어 나타나며, 강우시는 지표수가 쉽게 지하로 유입되어 암반내부로 이동할 것으로 판단된다. RQD의 산정 방법은 각 연속면의 균을 설정하고 개별 불연속면균의 평균 간격으로부터 RQD를 산정하는 방법과 단위 길이당 절리수로부터 절리빈도를 구한뒤 이로부터 통계적 수식으로 구하는 방법이 있다. 조사시는 절리빈도($avg.\lambda=21$)로부터 RQD를 산출하였으며 산출된 RQD 값은 35%이다. 분리면의 특성조사를 바탕으로 현지암반에 대한 RMR 분류를 실시하였으며, 분류시 암반의 활동면으로서의 역할을 하는 층리를 대상으로 하였고 산출된 값은 46(fair)이다

표 3. 현지암반에 대한 RMR 분류 결과

일축강도 (Mpa)	RQD(%)	절리간격 (m)	연장 (m)	간극 (mm)	거칠기	협재물폭 (mm)	풍화	지하수	RMR
27.3	35	0.3	30	2	SM	2/S	MW	FW	26(V)
3.3	6.3	9.5	0.0	1.0	1.0	2.0	3.0	0	Poor

5. 사면의 안정해석

5.1 암반사면 해석시의 강도정수의 결정

불연속면의 전단강도는 RMR에 의한 경험식(Bieniawski), Barton의 파괴기준에 의한 식을 기준으로 불리한 값을 채택하였다. 또한 현장에서 10°내외의 경사를 보이는 층리면을 따라 파괴가 발생한 점을 고려하여 ϕ_p 값을 10°로 채택하였다.

표 4. 적용된 전단강도

구 분	RMR	Barton	틸트시험	적 용
C(t/m ³)	13	0.34	-	0.34
$\phi(^{\circ})$	18	28.5	30	18

5.2 평사투영해석

암반사면의 평사투영해석은 암반사면의 안정성 분석에 이용할 수 있는 방법으로 암반 사면의 안정성은 주로 암석 자체의 전단강도보다는 암반내에 분포하는 불연속면의 특성에 의하여 크게 좌우되므로 불연속면의 주향과 경사, 내부마찰각 및 사면의 경사방향과 경사를 이용하여 암반사면의 안정성을 신속하게 개략적으로 판정하는 방법이다.

본 방법은 사면의 안정성에 중요한 영향을 미치는 요소인 단위중량, 점착력, 지하수의 상태, 사면의 높이 등이 고려되지 않기 때문에 중요한 사면의 안정성을 최종 평가하기 위하여 2차 정밀분석을 수행해야 한다. 본 방법은 설계시 암반사면의 구배결정, 암반사면의 붕괴 가능성 예측, 정밀분석이 곤란한 소규모 현장의 암반사면 안정성 분석에 활용하면 신속한 해석이 가능하다.

평사투영해석은 캐나다 Rocscience 회사의 DIPS 프로그램을 이용하여 사면안정성을 분석하였다. DIPS는 절리면의 방향분석 및 통계처리를 이용하여 사면안정해석에 사용하는 프로그램으로 토론토대학교의 토목공학과 암반공학팀에 의해서 개발되었다. 이 프로그램은 평사투영법을 이용하며 암반의 절리, 단층 및 파쇄대 등과 같은 불연속면에 대한 암석구조의 공학적인 해석에 관련되어 암반사면 등에서 주로 사용되는 프로그램이다.

해석결과 조사지역은 단층, 절리 및 층리면등 다양한 불연속면이 발달하며, 2003년 9월 강우를 동반한 태풍(매미)시 단층 및 층리면에 규제되어 파괴가 발생하였다.

분석결과 절리 및 단층은 평면파괴, 썩기파괴, 전도파괴등에 직접적으로 연관되지 않는 것으로 나타났으나, 이들은 사면파괴시 인장균열의 역할을 한 것으로 평가된다.

완만한 경사를 보이는 층리는 평면파괴영역의 가장자리에 위치한다. 현장에서의 관찰에 의하면 층리는 10~23°각도로 50~55(N35°~40°W)의 경사방향을 보이며, 사면의 경사방향은 110°(N20°E) 방향이다.

일반적인 경우 사면 경사방향과 파괴면의 경사방향의 차이가 30° 이상일 경우 파괴가 발생하지 않으나, 조사지역의 경우 사면의 파괴는 세일의 층리경사방향이 아닌 중력방향(사면방향)으로 발생하였으며, 중력방향(사면방향)으로 층리면의 위경사는 10° 내외를 이룬다.

따라서 사면파괴시 수압이 작용하는 조건하에서 10° 내외의 경사를 보이는 사면방향(중력방향)으로 사면활동이 발생한 것으로 판단된다.

표 5. 평사투영 해석결과

사면자세 (Dip/Dip D)	불연속면	예상파괴 유형		
		평면	썩기	전도
110/30	절리	×	×	×
	단층	×	×	×
	층리	○	×	×

5.2 사면파괴 원인분석

조사지역을 포함하는 산체는 과거 상당규모의 슬럼프가 발생했던 지역으로 추정되며, 이에 연계되어 NE방향의 소단층이 조사지역에 발달한다. 인장균열의 역할을 하는 수조의 NE방향의 단층이 사면의 배후에 위치하고 암반의 상부구간은 균열 및 파쇄가 진행되고, 수직절 리가 발달하여 우기시나 집중호우

시 파쇄대 및 균열면을 따라 쉽게 암반내로 유입된 지하수는 단층 및 층리면을 EK라 수압을 발생시켰고 특히 세일의 층리면내에 협제되는 점토는 파괴면 및 누수통로의 역할을 하고 이 면을 따라 작용하는 수압은 사면파괴를 촉진시켰다. 따라서 우기시 수위상승 또는 지표수의 지하유입에 의해 층리면을 따른 큰 부양력과 단층면에 따른 큰 수압이 작용하는 조건하에서, 점착력을 거의 상실하거나 감소된 층리면 내의 점토층을 따라 사면활동이 발생되며, 단층면은 인장 균열의 역할을 하면서 사면이 파괴된 것으로 판단된다.

5.3 한계평형해석

사면의 파괴구간과 전기비저항 탐사로부터 확인된 단층분포 지역을 중심으로 추후 사면파괴가 예상되는 구간에 대하여 한계평형해석을 수행하였다.

사면의 파괴범위는 전기비저항 탐사에서 확인되는 추정 단층선 분포지역까지로 하였으며, 해석시 강도정수는 표 3의 값을 이용하였고 파괴각은 사면방향으로의 위경사 값인 10°를 적용하였다.

조사지역의 경우 파괴가 이미 발생하여 암반은 선행전단운동에 의해 전단강도의 대부분을 상실하였을 것으로 판단되어 전단강도가 상실된 경우($C=0(t/m^3)$, $\phi=18(^{\circ})$)와 전단강도가 존재하는 경우($C=0.34(t/m^3)$, $\phi=18(^{\circ})$), 집중호우시(인장균열 및 파괴면에 수압작용)로 나누어 해석을 수행하였다. 한계평형해석결과는 다음과 같다.

표 6. 한계평형해석 결과

구 분	안 전 율 (F.S)			보 강 력 (t/H)		
	건기시	우기시	집중 호우시	건기시	우기시	집중 호우시
전단 강도상실	1.843	1.06	0.705	-	15(F.S=1.21)	52(F.S=1.22)
전단 강도유지	1.967	1.14	0.77	-	7(F.S=1.21)	44(F.S=1.21)

5.4 사면의 안정대책 수립

현장 조사결과, 단층 및 층리에 규제되어 세일로 구성되는 암반구간에서 완만한 경사를 갖는 층리면의 위경사 방향(사면방향/중력방향)을 따라 평면파괴가 발생하였으며, 추후 사면상단에 위치하는 단층선을 중심으로 사면파괴의 우려가 있는 것으로 평가되었다. 따라서 파괴우려 구간에 대한 보강이 필요하며 대상사면의 현장여건을 충분히 고려하여, 공학적인 충분한 안정성과 경제성을 비교, 검토하여 대책공법을 수립하였다.

6. 결 론

본 연구에서는 경상남도 창원군 대합면 십이리에 소재하며 성산면과 대합면을 연결하는 1034호 지방도로의 사면부를 대상으로 하여 붕괴원인을 파악하여 장기적으로 안정성을 확보하고 주위 자연환경과 조화를 이룰 수 있는 보강대책을 제안하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 대상지역은 진동층의 분포지에 위치하며, 사면을 구성하는 암석은 암회색~흑색의 세일이다. 세일은 박리가 현저하게 층리방향으로 쉽게 쪼개지고 층리면은 철산화물 및 박층의 점토가 충전되거나 피막되어 있었다.

- (2) 대상지역의 퇴적암내에 발달되는 층리, 단층 및 절리가 주요 불연속면이며, 사면의 파괴가 발생된 곳을 중심으로 수개조의 단층이 발달된 것으로 조사되었고 층리면 및 단층면에는 점토가 협재되어 있었으며, 지표근처의 세일은 층리, 단층, 절리 등의 불연속면 발달로 풍화로 상당히 파쇄되고 분리되어 파괴면 역할을 한 것으로 판단되었다.
- (3) 대상 사면의 붕괴는 우기시 지표수가 단층면의 인장균열부로 침투되어 층리면의 점토충진물로 인해 완전히 배수시키지 못하므로 지하수위가 상승되고, 층리면에 따른 큰 부양력과 단층면에 따른 큰 수압이 작용되면서 발생된 것으로 판단되었고, 지속적으로 사면활동이 진행되고 있으며, 또한 배후에는 추가적으로 수직단층이 위치하고 있는 것으로 조사되었으며 이 단층대로 추후 붕괴의 우려가 높은 것으로 예상되었다.
- (4) 사면 상단부는 인장균열 배면에 관찰되는 단층선 및 점토로 충전된 층리면을 따라 추가적인 붕괴가 예상되므로 사면붕괴에 대한 억지공법으로 격자빔 + 영구 Anchor공법을 적용하였으며 사면표면의 침식 및 쇄굴에 의한 낙석, 붕락에 대한 안정성을 확보함과 배면의 원활한 배수를 위해 격자빔내 전석쌓기공법을 적용하였고, 하단부는 사면붕괴에 대한 억지공법으로 구배완화공법을 적용하였으며, 사면표면의 자연경관과의 조화를 위해 ASNA공법을 적용하였다. 전체적으로 산지측에서 유입되는 지표수를 사면내로 유입되는 것을 방지하기 위해 산마루측구를 설치하였으며, 사면부의 지표수를 원활히 배제시키고, 도로부로 유출되지 않도록 사면하단부에 도수로를 설치하였으며, 도로부의 지표수를 원활히 배제시켜 차량주행성을 확보하기 위해 도로와의 접속부에는 L형 측구를 설치하였다.

참 고 문 헌

1. 박준식, 장정욱(2003), “경상남도 창원군 대합면 십이리(지방도 1034호선) 십이리도로 사면안정성 검토 및 보강대책수립”, 연구보고서, 창원대학교
2. 사단법인 한국지반공학회, “사면안정”, 지반공학시리즈5