

건설공사와 사면 안정성

백용(한국건설기술연구원), 김교원(경북대학교), 구호본(한국건설기술연구원)

Slope stability associated with construction

Yong Baek(Korea Institute of Construction Technology), Gyo-Won Kim(Department of Geology, Kyungpook University), Hobon Koo(Korea Institute of Construction Technology)

요약 : 잠재적인 파괴위험 가능성이 있는 270여 개소의 절개사면을 조사하여 지반구성, 사면 높이 및 경사도 현황을 파악하였다. 위험 절개사면의 84% 이상이 암반사면 혹은 혼합사면이었으며, 위험 사면의 높이는 대략 10~30m인 경우가 72% 이었다. 또한, 일부 붕괴 사면에 대하여서는 다양한 방법에 의한 역해석을 실시하여 사면파괴의 원인을 분석하였다. 사면 파괴의 주원인은 하절기의 집중호우에 의한 것이 대부분이었으나, 건설 중의 발파진동도 공사 중의 사면 안정성에 영향을 주고 있다.

주요어 : 절개사면, 사면안정성, 사면붕괴, 사면활동, 역해석

Abstract : In this study, 270 cut-slopes are investigated and statistical analyses are performed. More than 84% of unstable slopes are rock slopes or rock-soil mixed slopes, and 72% of the slopes have 10 to 30 meter in height. And in order to clarify the cause of failure, 3 slopes which have been failed are back-analysed by using the computer programs such as DIPS, UDEC and PCSTABL5M. A heavy rainfall during rainy season is a main cause of slope failure, and a blasting vibration during construction could also give a significant influence on the slope instability.

Keywords : cut-slope, slope stability, slope failure, sliding, back analysis

1. 서언

전 국토의 70% 이상이 산지로 구성된 우리나라에서 도로 개설 및 확장으로 인한 도로 절개사면의 증가는 필연적인 현상이라 볼 수 있다. 더욱이 최근 산업의 발달과 국가 기반시설에 대한 투자 확충으로 인해 신설 도로의 건설이 급격히 증가하고 있고, 또한 기존의 도로 역시 지속적인 확장 및 선형 개선 등으로 인해 도로 절개사면의 수가 급속히 증가하고 있다.

1990년대 이전에 건설된 도로의 경우 건설 당시의 경제적, 기술적인 문제 등으로 인하여 절개사면의 안정성을 저하시키는 잠재적 요소들을 내포하고 있는 경우가 상당수에 달하고 있다. 이런 원인과 더불어 해빙기나 집중강우 시의 자연현상이 복합적으로 작용하여 절개사면의 붕괴가 빈번하고 그로 인한 물질, 인적피해 또한 지속적으로 증가하고 있는 실정이다.

본 고에서는 국내의 절개사면의 현황 및 문제점에 대하여 살펴보고 국내외의 절개사면의 설계기준 및 유지관리에 대하여 고찰한다. 또한 절개사면 설계 및 시공기준에 대하여 외국과 비교하여 개선방안을 제시하며, 최근 붕괴현상이 발생된 현장 사례를 토대로 대책방안 및 앞으로의 개선방안에 대하여 논하여 본다.

2. 위험 절개사면

2.1 현황

도로 절개사면의 설계와 시공에 대하여 논하기에 앞서 절개사면의 현황에 대하여 살펴보기로 한다.

절개사면은 구성 지반에 따라 암반사면, 토사사면 및 혼합사면으로 구분할 수 있다. 한국건설기술연구원의 자료(1999)에 의하면 국내 위험절개사면 270개소의 사면구성 지반에 대한 분석결과, Figure 2.1과 같이 전체적으로 볼 때, 암반사면 79%, 혼합사면 15% 및 토사사면 6%로 나타나서 위험사면의 절대 다수가 암반사면 혹은 암반-토사 혼합사면임을 알 수 있다. 또한, Figure 2.2에서 보듯이 전체 위험 절개사면의 83%가 사면 높이 30m 이내의 상대적으로 높지 않은 사면에 속하며, 화성암 지역보다는 퇴적암 지역의 사면이 높이가 높을수록 위험하게 되는 경향을 보이고 있다.

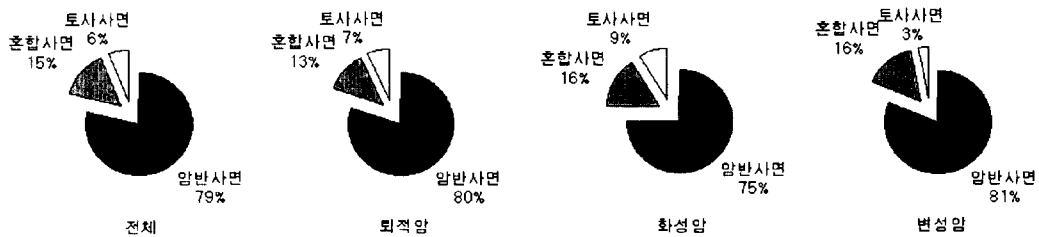


Figure 2.1 Distribution of constituent materials consisting of unstable cut-slopes

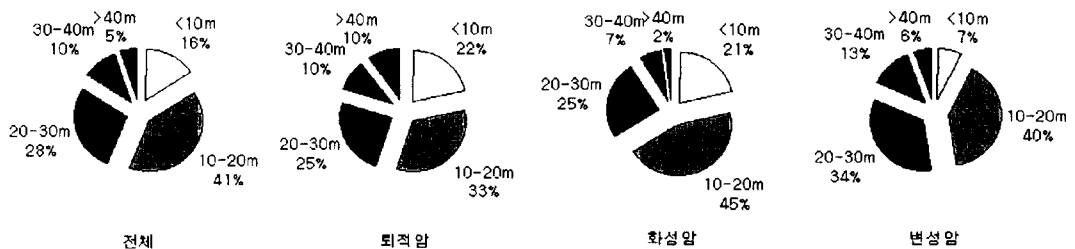


Figure 2.2 Distribution of height of unstable cut-slopes

이 결과로 볼 때 국내의 대부분 위험 절개사면이 암반 혹은 토사-암반 혼합체로 구성

되어 있으며 토사사면이 위험한 경우는 상대적으로 매우 낮게 나타나고 있다. 위험 절개사면의 높이도 낮은 것으로 나타나고 있는데, 이는 도로를 신설할 경우 경제성 제고를 위하여 토공량을 저감할 수 있는 산지의 계곡부나 지형적으로 낮은 곳으로 선형을 계획하기 때문인 것으로 사료된다.

위험 절개사면의 경사도는 암반사면이 많은 관계로 대부분이 1:0.5(63°) 이상의 고각 경사를 이루고 있다. 즉, 고각의 경사사면일수록 위험도가 증대한다고 볼 수 있다.

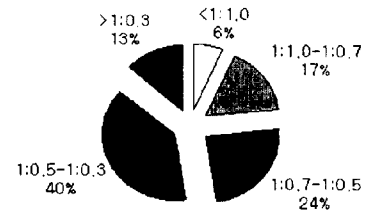


Figure 2.3 Distribution of inclination of unstable cut-slopes

2.2 문제점

국내의 위험절개사면에 대한 조사에서 확인된 설계·시공 시에 발생되거나 발생 가능한 문제점에 대하여 살펴보기로 한다.

1) 사면을 구성하는 암반의 다양성, 불확실성 및 현장시험의 한계성 등으로 인하여 현장 지반특성을 대표하는 설계정수의 선정이 어렵고, 그에 따른 과대 안전설계 혹은 불안전 축의 설계 가능성이 상존한다. 이러한 지반특성의 이해에 대한 문제는 설계 및 시공경험과 파괴사례에 대한 다양한 역해석을 통한 경험이 비축될 때 해소가 가능하게 될 것이다.

2) 설계 시에 실시되는 한정된 시추조사만으로는 사면의 지반구성을 파악하는데 한계가 있고 대부분의 암반사면의 불안정요인이 암반내의 불연속면과 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에, 설계 조사시에 물리탐사와 정밀 지표지질조사를 반드시 수행하여 사면 구간의 지질 구조에 대하여 정확히 이해하여야 한다.

3) 국내의 사면의 안정해석에서 토사사면과 암반사면의 해석프로그램을 지반의 특성 및 현장의 여건을 고려하지 않은 상태에서 무분별하게 사용하는 경향이 있다. 첫째, 프로그램의 사용자의 지반공학에 대한 기초지식의 결여로 인한 해석 입력치의 부정확한 선정, 둘째, 프로그램의 원리에 대한 이해의 부족과 해석 결과에 대한 맹신, 셋째, 해석결과에 대한 분석능력의 부족으로 인한 부적절한 해석 등의 문제가 빈번한 것으로 보인다.

4) 해당지역의 지반 및 지형 특성, 강우 및 기온 특성에 따른 안정 대책수립이 요구되나, 경제성 및 시공상의 문제점이나 기술 부족으로 인하여 확실적인 안정화 공법이 적용되는 경우가 많다.

5) 대책공법 중 식생공을 채택할 경우 지역의 특성과 상관없이 무분별한 품종이나 외래종의 도입으로 인하여 완공된 후 수개월이내에 무용지물이 되는 문제점이 발생한 경우가 많았다. 식생공은 현장의 기후조건에 맞는 적절한 식생을 채택할 필요가 있다.

6) 대책공법의 적용시 현장의 규모와 여건을 충분히 고려한 상황에서 공법의 선정이 이루어져야 하나 전문가의 부족과 기술력의 결핍으로 인하여 부적절한 공법이 선정이 되는 경우가 많았다. 규모가 작은 현장의 경우에 무리한 대규모 보강공법을 실시하여 오히려 사의 붕괴를 발생시키는 경우도 있었다.

7) 절개사면의 경사도에 관하여 설계기준이 명확하지 않고 단지 암반의 강도에 따른 설계기준을 제시하고 있다. 이는 국내의 대부분 절개사면이 암반의 불연속면 등의 약선대를 통하여 파괴된다는 점을 감안하여 조속히 해결되어야 할 것이다.

8) 절개사면공사에 대한 전문적인 조사, 설계 및 보강에 대한 성공 및 실패 사례에 대한 분석과 데이터 축적이 미흡하여 기술력 향상이 곤란하다.

9) 설계단계와 시공단계의 관계가 유기적이지 못하여 설계단계에서 이루어진 계획이 시공단계 중 불안정요소가 발견되더라도 조속한 대책을 마련하지 못하여 시공중이나 완공 후 붕괴가 발생할 소지가 있다.

2.3 사면관리

절취사면은 대체적으로 계획수립-현장조사-설계-시공-유지관리 단계를 거치게 되는데, 1990년대 초반부터 사면 붕괴에 따른 손실이 증대하게 됨으로서 국내에서도 절개사면의 체계적인 관리를 위한 시스템이 구축되어 운영되고 있다.

계획수립 단계에서 절개사면의 중장기적인 계획 및 소요예산 확보에 따라 계획이 수립된다. 계획이 수립되면 현장조사가 실시되지만 국내의 경우 설계를 위한 현장조사는 절개사면의 안정성에 대한 현장조사라기 보다는 토공량 산출을 위하여 한 두개소에 시추조사를 실시하는데 통상 발파암 확인단계에서 시추를 종료한다. 따라서, 사면 지반의 지질구조적인 특성을 파악하는데 한계가 있으며 또한, 사면 안정성 해석을 위한 지반자료의 획득이 불가능한 실정이다.

시공 후 유지관리에 대하여는 최근 국도의 경우는 한국건설기술연구원에서, 고속도로의 경우는 한국도로공사에서 유지관리시스템을 개발 중에 있거나 일부 운영 중에 있는 상태이다. 그 외의 지방도 등의 경우는 체계적인 유지관리가 이루어지지 않고 있으며 붕괴가 발생하면 사후 관리측면에서 보수가 진행되고 있다.

그러나, 전국도의 산지분포비율이 우리와 비슷한 일본의 경우는 절개사면에 대한 종합적인 시스템을 구축하여 절취사면을 다음 Figure 2.4와 같이 계획단계부터 유지관리단계까지의 전 과정을 체계적으로 관리하고 있다.

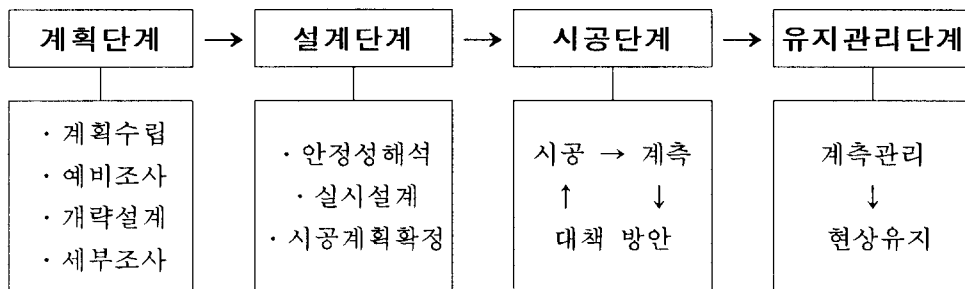


Figure 2.4 Flow chart for cut-slope management system in Japan

계획단계에서 절개사면을 시공하기 위한 입안, 예비조사 및 개략설계가 실시되며, 설계 단계에서 상세설계를 위한 조사와 시험, 안정성해석, 설계, 시공 계획이 수립된다. 시공단계에서는 원지반의 상태변화와 가시설물 계획, 계측 결과의 관리 기준치와의 비교에 의한 안정성의 평가가 실시되며, 안정성 평가의 결과에 따라 필요한 설계변경이나 대책공이 실시된다. 사면이 완공된 후, 유지관리단계에서는 시공완료후의 일상 점검에 의한 관찰이 주로 실시되나 변상이 큰 부위에 대하여서는 계측도 실시된다. 또한, 관찰이나 계측의 결과에서 사면의 안정성이 평가되며 이 평가의 결과에 따라서 대책공이 실시된다.

2.4 설계 및 시공기준

절개사면의 설계는 일반적으로 우선 안정성이 유지되도록 사면 경사를 결정하고, 표면 및 지하수의 배수공법을 선정하며, 장기적인 안정성 확보를 위한 보강 및 보호공법을 결정하는 것으로 나누어 생각할 수 있다. 이러한 사면안정성 확보를 위한 설계기준은 다양한 인자에 의하여 영향을 받기 때문에 사면 시공에 대한 많은 정보를 수집하여 지역별, 암종별 혹은 지반상태별 기준을 마련하는 것이 안정성 및 경제성 측면에서 바람직하다고 볼 수 있다.

국내의 여러 기관에서 권장하는 절개사면의 경사기준은 다음 Table 2.1과 같이 지반을 발파암, 리핑암, 토사 등으로 분류하거나 경암, 연암, 풍화암, 토사로 구분하여 지반별 및 사면 높이에 따라 사면 경사를 제안하고 있다. 이와 같은 권장 사면 경사는 대부분 일본 등에서 적용하는 기준을 준용한 것으로 생각되는데, 금후 국내의 적용사례를 재평가하여 국내의 지질이나 토질 특성 및 기후조건을 고려하여 지역적인 분류기준이나 암질에 따른 분류기준이 설정이 되어야 할 것으로 생각된다.

Table 2.1 Standard inclination of cut-slope suggested by Korean organizations

토 질 조 건		사면 높이	경 사 기 준				
			건교부	도로공사	철도청	토지공사	주택공사
토사(사질토, 점성토)		5m 이상	1:1.5	1:1.5	1:1.5	1:1.5	1:1.5
		5m 미만	1:1.2	1:1.2	1:1.3	1:1.2	1:1.2
리핑암(풍화암)		5m 이상	1:0.7	1:1.0	1:1.0	1:1.0	1:1.2
		5m 미만					1:1.0
발파암	연암	5m 이상	1:0.5	1:0.5	1:0.5	1:0.5	1:1.0
		5m 미만					1:0.8
	경암	5m 이상			1:0.3		1:0.8
		5m 미만					

이에 반하여 일본에서는 도로 절취사면에 적용하는 지반별 절취사면 구배는 다음

Table 2.2와 같이 지반 상태를 세분하여 적용하고 있으며, 이외에도 댐, 사방, 광산뿐만 아니라 세부적으로는 암종별의 기준까지 마련되어 있는 실정이다.

Table 2.2 Standard inclination of cut-slope used in Japan

지반 구분		절취 높이	구 배
경 암			1:0.3~1:0.8
연 암			1:0.5~1:1.2
모 래	밀실하지 않은 것, 입도분포 불량		1:1.5~
사 질 토	밀실한 것	5m 이하	1:0.8~1:1.0
		5~10m	1:1.0~1:1.2
	밀실하지 않은 것	5m 이하	1:1.0~1:1.2
		5~10m	1:1.2~1:1.5
자갈 또는 암괴 혼합 사질토	밀실한 것, 입도분포 양호	10m 이하	1:0.8~1:1.0
		10~15m	1:1.0~1:1.2
	밀실하지 않은 것, 입도분포 불량	10m 이하	1:1.0~1:1.2
		10~15m	1:1.2~1:1.5
점 성 토		10m 이하	1:0.8~1:1.2
암괴 또는 호박돌 혼합 점성토		5m 이하	1:1.0~1:1.2
		5~10m	1:1.2~1:1.5

3. 절취사면 붕괴사례

건설공사와 관련된 크고 작은 사면 붕괴사례는 공개되지 않은 것을 포함한다면 상당수에 달할 것으로 사료되나 몇 가지 사례에 대하여 요약한다.

3.1 왜관읍 지천면

경북 칠곡군 왜관읍 지천면에 위치하는 금무산(해발 268m)의 북측 사면이 1998년 9월 말경 붕괴되었다. 지질학적으로 이 지역은 경상누층군의 최하위 층군인 신동층군에 속하며 주로 황갈색의 사암과 담회색의 셰일이 노출되며 층리면의 방위는 N19~60E, 10~22SE이고 절리면은 N34~44W, 76~86NE, N19~28E, 84~90SE 및 N50~54E, 75~86NW의 방향성을 보여준다. 사면의 방위는 층리면과 유사한 N36E, 21SE을 보이며 파괴는 셰일과 사암 사이의 층리면을 따라서 발생하였다(Kim, et al, 1999). 이 지역은 지표면이 심하게 균열되고 함몰되었는데 균열 폭은 최대 수 m에 달하며 함몰 깊이는 4m 이상이였다. 붕괴가 발생한 면적은 50m x 150 m 로 좌우의 작은 계곡에 의하여 인접한 안정 사면과 경계된다. 붕괴부의

하향 이동 거리는 최대 7~8m에 달하였으나 논경지가 없는 임도변의 사면 붕괴로 인적 및 물적 피해는 없었다.

지표조사, 시추조사 및 물리탐사를 통하여 얻어진 지질정보에 근거하여 PCSTABL5M으로 사면안정성을 역해석한 결과는 Figure 3.1과 같이 건기에 지하수위(점선으로 표시)가 낮은 경우에는 사면 안전율이 1.2 이상으로 안전하였으나 집중호우에 의하여 사면내의 지하수위가 상승하는 경우에는 안전율이 1.0 이하로 나타나서(Figure 3.2) 불안정하였다.

기상연보(1998)에 의하면 1998년 9월 28일에서 30일 사이에 이 지역에서의 강수량이 290.6mm(구미측후소) 및 269.6mm(대구 측후소)를 기록하고 있으며, 특히 220mm 이상의 강우가 9월 30일에 집중되었는데 이러한 집중호우로 사면 지반의 지하수위가 상승하게된 것이 사면 붕괴의 직접적인 원인인 것으로 추정된다. 현재 이 지역은 임도 측부 옹벽과 계곡부 배수로를 설치하고 균열부를 정비하는 안정화 공사를 마무리하였다.

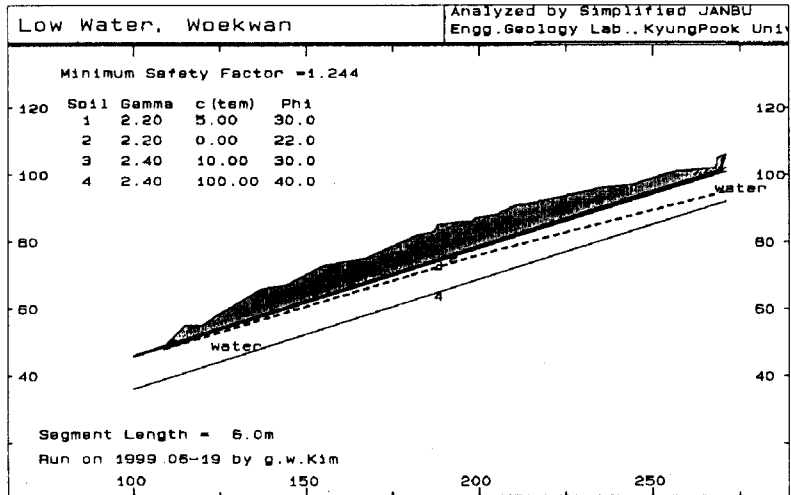


Figure 3.1 Result of analysis indicating a stable condition at a low water table under ordinary weather condition.

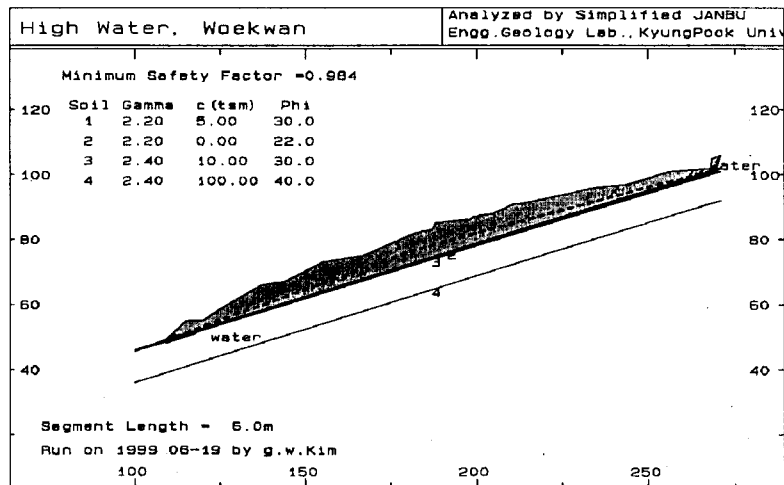


Figure 3.2 Result of analysis indicating an unstable condition at a high water table under heavy rain fall.

3.2 대구시 북구 읍내동

대구시 북구 읍내동의 중앙고속도로 변의 암반사면이 공사중 파괴의 징후가 발견되어 활동암괴 150m x 400m를 완전히 제거한 바 있다. 이 지역은 지질학적으로 하양층군 최하위 층인 칠곡층에 속하며 암회색 세일 및 사암이 주로 나타나며 평탄한 층리면은 N50~60E, 18~20SE의 방향성을 가지고 주 절리면은 N30E, 80~90SW and N60W, 70~85SE의 방향성을 보이며, Figure 3.3에서 보듯이 도로 절취사면과 같은 방향으로 18°로 경사진 층리면이 발달하고 있다.

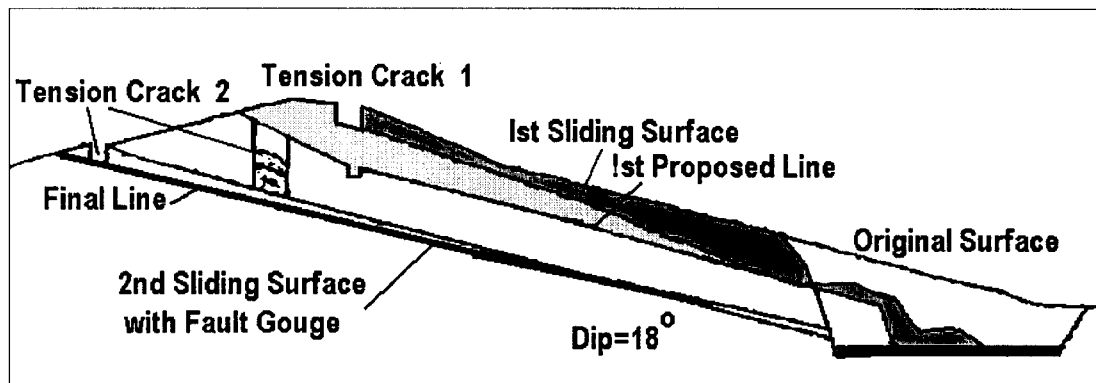


Figure 3.3 Schematic section view of the Eupnae slope

김과 유(1995)에 의하면, 점착력이 $0.8t/m^2$, 내부마찰각이 15° 인 점토층이 층리면 사이에 협재되었으며 파괴는 이 면을 따라서 발생하였다. 이 자료에 근거하여 역해석으로 사면 안정성을 검토한 결과는 지하수위가 낮은 경우라도 안전율이 겨우 1.0을 상회하며(Figures 3.4) 지하수위 상승을 고려한 경우(Figure 3.5)와 발파진동을 고려하는 경우(Figure 3.6)에는 안전율이 1.0 이하로 불안정한 것으로 나타났다. 여기서, 발파진동을 고려하기 위하여 도입한 입자가속도 $0.03g$ 는 건설진동의 주파수 범위인 20~100Hz인 진동에서 입자속도로 환산한다면 대략 $0.23\sim 0.05cm/sec$ 에 대비될 것으로 사료되는데, 암반절취공사에서 이 이상의 진동은 충분히 예상할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, 이 지역 사면 파괴의 원인은 집중호우시의 지하수위 상승 혹은 발파진동일 것으로 추정한다.

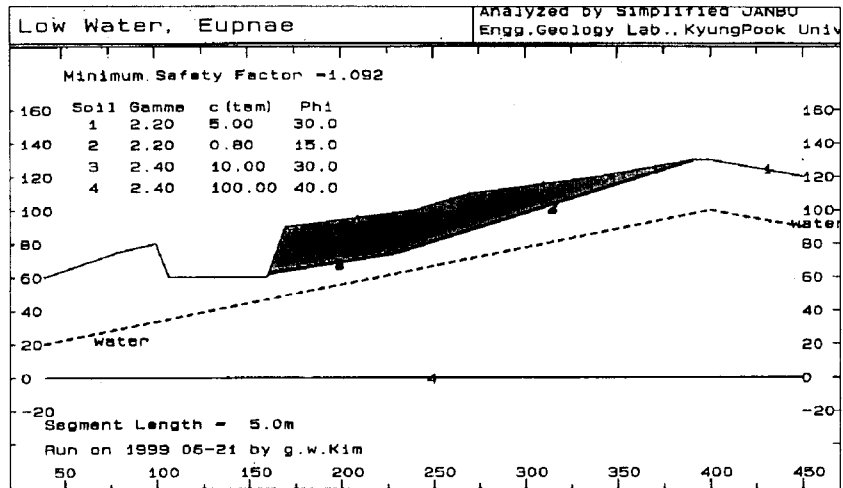


Figure 3.4 Result of analysis indicating a meta-stable condition at a low water table under ordinary weather condition.

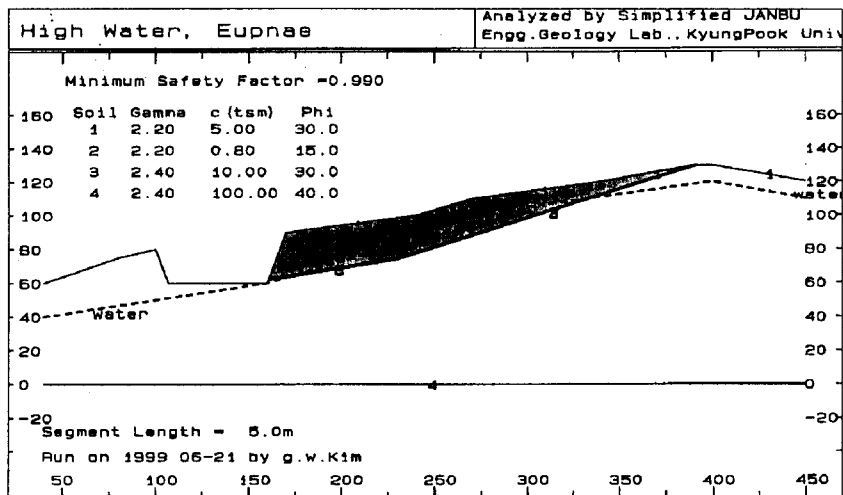


Figure 3.5 Result of analysis indicating an unstable condition at a high water table under heavy rain fall.

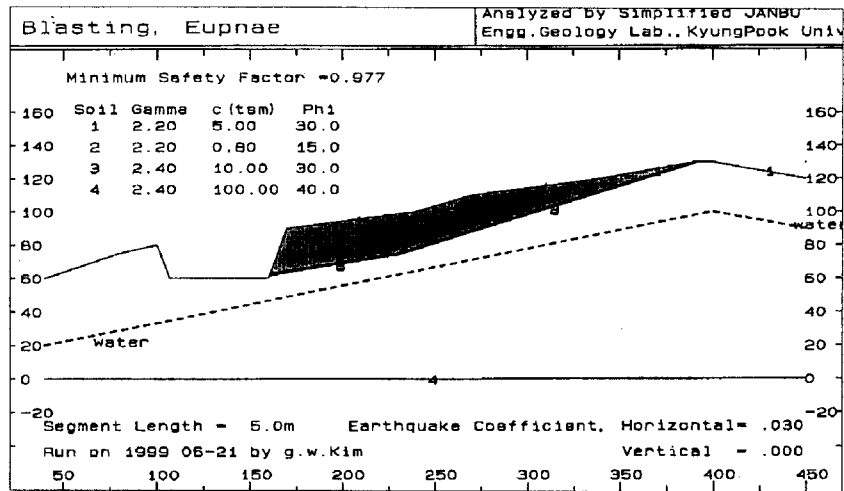


Figure 3.6 Result of analysis indicating an unstable condition under blasting vibration of 0.03g.

3.3 달성군 다사읍

대구시 달성군 다사읍에서 대구지하철 2호선 건설공사 중에 암괴가 활동 파괴되어 활동된 암괴를 완전히 제거한 바 있다. 이 지역은 전술한 사례와 같은 하양층군 칠곡층에 속하나 암종은 주로 적색계통의 셰일과 사암이 나타난다. 층리면은 N45~53E, 20~31SE의 방위를 보이며, 주 절리면은 NS~N12W, 79~90SW 및 N60~81E, 75~85NW의 방위를 보인다.

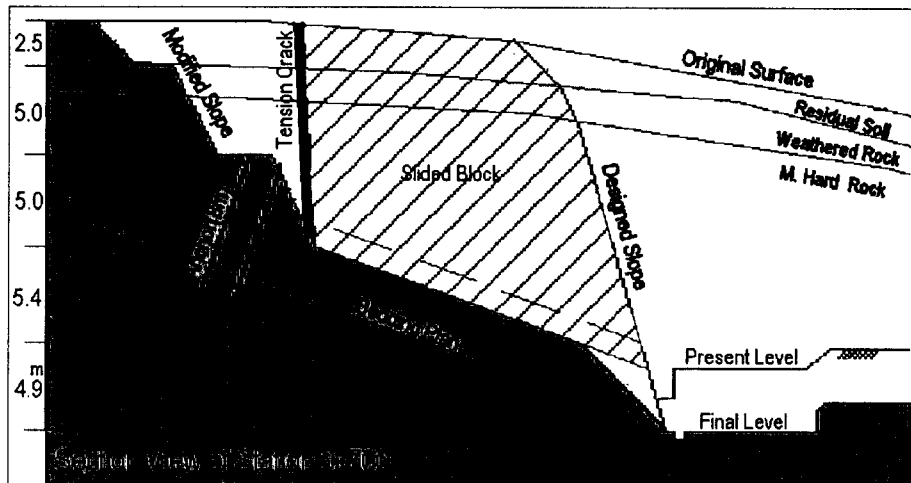


Figure 3.7 Schematic section view of failed slope in Dasa

Figure 3.7에서와 같이 사면 절취는 경사방향과 일치하며, 인접지역 발파작업 시에 23°로

경사진 층리면을 따라서 활동파괴 되었으며 배면에 여러 개의 폭 1 m 내외의 인장균열을 발생시켰으나, 사면 파괴로 다행히 인명피해나 물적 손실은 없었다.

이 지역은 인근지역에서의 발파로 인하여 사면활동이 시작되었기 때문에 Figure 3.8과 같이 현 상태에서의 안전율이 1.2 이상이었다고 가정하고 어느 정도의 발파진동이 사면 활동을 초래하였는가를 검토하였는데 Figure 3.9에서 보듯이 수평가속도 0.1g에서 안전율이 1.0 이하가 되었다. 전술한 바와 같은 방법으로 0.1g를 입자속도로 환산하면 대략 0.78 ~ 0.16 cm/sec에 속하며, 이는 개활지 발파작업시에 충분히 예상되는 진동치라고 볼 수 있다.

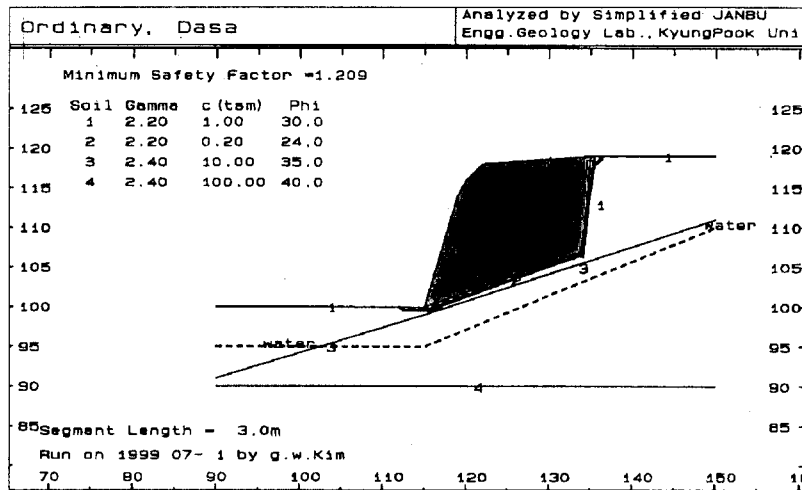


Figure 3.8 Result of analysis indicating a stable condition under ordinary weathered condition.

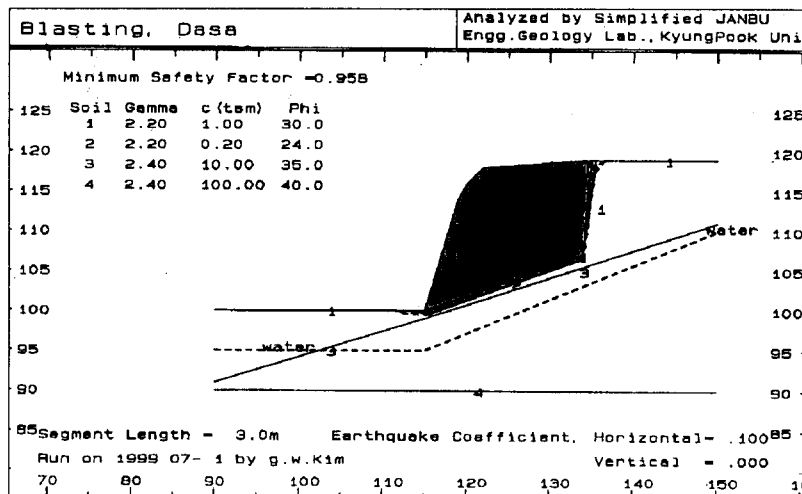


Figure 3.9 Result of analysis indicating an unstable condition under blasting vibration of 0.1g.

3.4 정선군 정선읍 연화리

이 지역 절개사면은 기존 수 차례 붕괴가 발생하여 이에 대한 절개사면 보강공사 (절개사면 경사도 완화, 앵커 및 수평배수공 시공, 낙석방지망, 낙석방지책 및 녹생토 시공, 산마루 측구 및 수직배수로 시공)가 완료된 상태에서 집중강우로 인해 상부 토층 및 풍화암층에서 또 다시 활동이 발생하였는데, N80W/48NE 방향의 절리를 따른 평면파괴의 양상을 보였다. 붕괴는 1999년 8월 6일 발생하였고 붕괴량은 약 500 m³ 이상일 것으로 추정된다. 붕괴지역 우측부는 이번 토층의 붕괴로 인해 낙석방지망 (녹생토)과 절개사면이 2~2.5 m 정도 이격이 발생하였다. 붕괴에 따른 피해는 인명피해는 없었으나 붕괴지역 주변 낙석방지망이 훼손 및 망실되었으며 절개사면 1 소단에 시공된 gabbion 파손 및 하부 낙석방지책, 측구식 옹벽 등이 일부 파손되었다.

절개사면 높이가 매우 높고 상부에 풍화암 및 토층의 두께가 매우 두꺼워 1차적인 불안정 요소를 내재하고 있었으며, 절개사면 전 지역에 걸쳐 평면 및 썩기파괴를 유발시키는 절리군들이 다수 발달하고 있다. 절개사면의 붕괴지역 주변으로 절리군을 따른 지하수의 누수 (약 100 ton/일)가 매우 심하였다. 본 절개사면은 1999년 8월 5일~6일 양일 간에 걸쳐 내린 집중강우에 의해 상부 토층이 포화되어 수입 및 토압의 상승작용을 수반하였다. 파괴면인 절리면을 따른 지하수의 침투로 인한 간극수압의 상승에 따른 암반의 유효응력 감소가 파괴의 주 요인으로 추정된다.

붕괴후 추가 붕괴의 우려가 없어서 2단계의 복구작업을 실시하였다. 1차 복구에서는 절개사면 하부 잔류낙석 제거 및 법면 정비를 실시하고 현재 gabbion이 시공되어 있는 지점에 낙석방지책을 설치하는 것으로 제안을 하였다. 2차 복구로는 Figure 3.10 과 같이 하부에 높이 3 m 옹벽 설치 및 낙석방지책 설치하고 상부 녹생토 시공구간에 대해 뒷채움을 실시하도록 하였다.

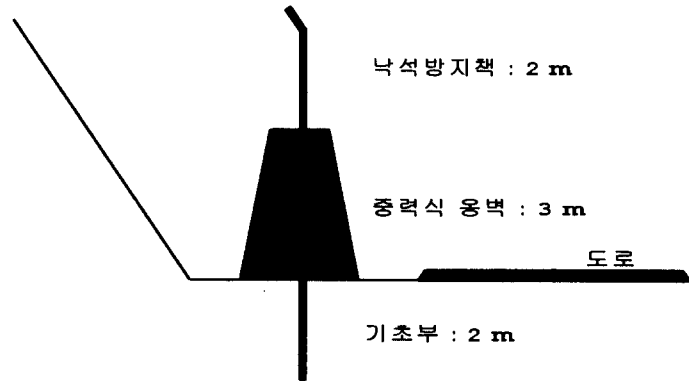


Figure 3.10 Suggested remedial works for failed slope

3.5 당진군 매산-가곡 도로공사 구간

국도 38호선 연장선(왕복 6차선)구간으로 매산-가곡 도로공사 시공 중 절개사면 절취가 일부 끝난 상태에서 붕괴가 발생하였다. 절개사면 남쪽으로 약 400m 떨어진 지점에 마을이 형성되어 있으며, 북쪽으로 부곡국가공단이 조성 중에 있다. 시공이 일부 완료된 조사대상 절개사면의 규모는 수평방향으로 총 연장 190m, 높이 약 35m, 설계 및 시공 절취면은 1:1.5로 약 34 °의 경사를 가지며, 절개사면 정점 35m를 기준으로 반대편 절개사면은 자연사면을 이루고 있으며 약 20 °의 하향경사를 이룬다.

1998년 4월에 절취공사가 일부 완료된 상태(경사도 1:1.5)에서 1999년 1월 24일에 붕괴되어 정점부 최대 변위량 3m의 침하와 균열폭 최대 8~10m, 연장 280m의 인장균열이 발생하였다. 절개사면 좌측부 하단에 지반응기와 1차 및 2차 붕괴가 순차적으로 발생하였다. 절개사면 붕괴지역은 편마암 및 파쇄대와 흑연층으로 구성되어 있다. 기반암은 점토성분 함량이 풍부하여 절개사면내의 암반의 투수계수가 매우 낮으며 절개사면이 포화되는데 오랜 시간이 걸려 포화된 후 지하수 유출에 오랜 시간이 소요될 것으로 추측할 수 있다. 그러므로, 1998년 7, 8월의 집중강우에 의한 지표수의 절개사면 내 유입에 의한 지반포화가 발생하였을 것이고, 이로 인하여 절개 사면의 지반하중이 증가되어 안전을 감소와 지속적인 소규모 포행(creep)을 발생케 하였다. 결국, 파괴면에서 지반의 강도감소로 인장균열 발생과 함께 절개사면이 붕괴 된 것으로 사료된다.

절개사면을 대상으로 역해석을 통한 안정성 해석을 수행한 결과 상부하중을 제거하여 활동 토괴중량과 활동력을 감소시켜 절개사면의 안정성을 확보할 수 있는 절취공법을 제시하였다. 절개사면은 하단의 경사도를 최소 1:2이상의 완만한 구배로 시공하고 절개사면 상부 제 1, 2 소단에 록볼트(간격 2m×2m, 길이 6m)로 보강한 후 절개사면 침식방지를 위하여 매트(mat)방식의 씨앗을 뿌리는 공법을 채택하였다. 한편 절개사면 하단부와 도로변 사이에 L형 옹벽을 설치하여 침식성 붕괴를 발생하였다. 절개사면 하부 제 1소단에서는 일부 침식성 토사를 흡수한 후 L형 옹벽으로 하여금 잔류붕괴 토사를 방지하도록 하였다.

3.6 단양군 영춘면 휴석동 일대

충북 단양군 영춘면 휴석동 위험사면은 1972년 집중강우에 의한 사면붕괴가 발생하였으나 예산상의 문제로 1994년 12월까지 방치하여 점진적인 사면붕괴가 진행된 현장이다. 1997년 중앙재해대책본부의 대책공사비 지원에 의하여 위험사면에 대한 현장조사와 안정성해석 및 적절한 대책공법이 제시되었다. 이 지역은 최초 붕괴가 발생한 이래 지속적인 포행성 활동이 진행되어 왔으며 활동면의 심도는 지표 하 약 8~10m이다. 사면붕괴의 형태는 두부의 경우 slump 형태를 보이며 중심부와 저부는 sliding 형태를 보이고 있다.

붕괴사면 상부에 지표면 함몰에 의한 강수 함양지역이 발달하고 있으며, 암반과 토층 특성 분석결과 지하수 함수량의 증가로 인한 자체하중의 증가가 붕괴의 원인으로 사료된다. 대책공법으로는 강수에 의한 지표수 및 지하수의 배수를 원활히 하기 위하여 수평 배수채 설치에 의한 지하수위 강하를 실시하였다. 수평 배수채에 의한 지하수 배출량은 강우 시 하루 약 700~1000m³에 달하여 사면의 붕괴 위험성을 감소시킬 수 있다. 또한, 사면의 중앙부에는 2단의 앵커공법을 설계하여 사면의 안전율을 1.5이상으로 향상시켰다. 사면저부 대책공법은 강성의 구조물보다 연성의 구조물인 섬유를 이용한 보강토 옹벽을 제안하였다.

4. 개선대책 및 토의

4.1 지반조사

국내의 절개사면의 특성을 살펴보면 표토 심도가 매우 낮고 대부분이 암반으로 구성되

어 있다. 특히 암반내부에는 많은 불연속면을 포함하고 있으므로 절개사면의 경사를 완화하는 공법의 적용 시에는 불연속면의 조사 및 시험 등에 매우 유의하여야 한다. 예를 들면, 불연속면이 많이 발달한 암반에서는 불연속면에 대한 방향성, 연속성, 간격, 충전물의 종류 및 공학적 특성 등에 대한 정확한 조사가 선행되어야 한다. 또한, 이들 불연속면에 대한 시험자료가 제시되어야만 사면해석에 필요한 지반정수를 현장조건에 맞게 산출할 수 있을 것이다. 암반 내에 존재하는 단층면과 같이 주활동면으로 작용하는 불연속면에 대한 조사에서는 단층점토의 전단특성 등도 간과해서는 안된다.

사면 붕괴원인 중 가장 중요하게 작용하는 요인 중 하나가 하절기의 집중강우와 누적강우량으로 밝혀졌다. 특히 국내의 암질 특성상 대부분이 심하게 풍화되어 있으며 지하수 함유율이 상당히 높은 것으로 밝혀져 있다. 또한, 지하에 유입된 지하수는 암반내의 불연속면을 따라 이동하며 이런 불연속면은 사면 활동면으로써 작용하게 된다. 그러므로, 초기조사단계에서부터 활동가능한 불연속면을 철저히 파악함으로써 예고된 재해를 최대한 방지할 수 있을 것으로 생각이 된다.

최근 국내에 널리 보급되고 있는 첨단 지반 탐사장비의 활용도를 최대한으로 높여서 지반 특성을 파악하는 일도 개선해야 될 중요한 일이다. 지층의 수직단면에 대한 물리탐사기법을 적용하고, 시추공 내 영상처리장치를 통한 불교란 암반을 직접 확인하는 등 체계적인 현장조사 방법의 도입이 필요하다.

4.2 계획 및 설계

위험절개사면의 경사별 분포현황을 국내의 설계기준에 비교하여 보면 절개사면의 53%가 발파암의 표준경사도 1:0.5 보다 높은 경사를 가졌으며, 리핑암의 표준경사도 1:0.7 보다 높은 경사를 가진 절개사면은 전체의 77%에 달한다. 즉, 위험절개사면의 상당수는 암반절개사면의 표준경사도보다 높은 경사를 갖고 있다. 이는 안정성보다는 도로 개설 자체에 주력한 부적절한 계획에 의한 도로건설의 결과로 볼 수 있다. 즉, 절개사면의 지반특성에 따른 적절한 경사도를 무시하고 획일적으로 계획되고 설계되어 시공이 이루어진 결과로 보인다. 앞으로는 현장의 지역이나 지질 및 토질의 특성에 맞게 절취경사도를 설계하여야 한다.

국내의 경우 기초 조사단계에서 수행된 한 두공의 시추조사 결과에 근거하여 각 기관별 표준 기준에 따라서 사면의 구배를 결정하고 소단을 결정하는 것만이 사면설계인 것으로 속단하는 경우가 많으나, 사면 설계는 필요한 보강방법까지를 포함하여야 한다. 특히, 국내의 경우 시공시 노출되는 지반 특성을 무시하고 설계안으로 시공되는 경우가 많은데, 굴착 완료 후 사면의 불안 요인이 발견되어 보강공사를 수행하게 되는 경우 시공이 매우 어렵고 경제적으로도 손실이 증대하게 되기 때문에 설계 단계에서 지반의 불연속면에 대하여 충분히 조사하여 필요한 보강방안을 제시하여야만 공사 중 안전하게 보강이 이루어 질 수 있다.

사전 조사가 잘 이루어진 경우라 하더라도 절개사면 공사 중 예상치 못한 지질적인 불안정 요소가 발견이 되어 시공단계에서 설계를 수정해야 할 불가피한 경우가 빈번하게 발생하게 된다. 그러므로, 시공전의 사면설계는 예비설계로 간주하고 시공단계별로 노출되는 지반상태에 대한 추가적인 관찰조사를 실시하여 설계내용을 보완하면서 시공하여야 안정성이 확보될 것이다.

4.3 시공 및 보강공법

도로절개사면의 설계과정에서는 현장여건으로 인하여 세부적인 조사가 이루어지지 않는 경우가 많다. 특히, 공사이전에는 사면이 토층과 식생으로 피복되어 있어 절개사면의 지반특성을 충분히 파악하기 어려운 한계성을 가진다. 따라서 절개사면 설계 단계에서 충분히 반영하지 못한 지반상태를 시공단계에서 상세한 조사가 이루어짐으로 인하여 현장조건에 적절한 설계변경 및 대책공법이 병행된 시공이 필요하다.

전문시공성의 결여로 인하여 시공과정에서 발생하는 불안정요소의 대처방안이 미비하여 완공 후 사면의 붕괴현상이 재차 발생하는 경우도 발생한다. 예를 들면, 격자 블록공 시공 시 다짐불량이나 우수에 의한 침식 등으로 오히려 사면의 자체하중을 증가시켜 붕괴를 유발하는 경우도 시공성의 문제점으로 대두된다. 시공과정에서 노출되는 지반상태가 설계 시에 설정하였던 지반조건과 상이한 경우에는 전문가에 의한 현장조사를 다시 실시하고, 안정성 해석을 수행하여 사전에 불안정 요인을 제거함으로써 사면 붕괴를 예방할 수 있을 뿐만 아니라 보다 저렴한 예산으로 보강대책공의 시공이 가능하게 된다. 절취가 완료된 후 사면이 불안정하여 대책을 수립하는 경우에는 과대한 노력과 비용이 요구되므로 시공 중에 지반의 불안정 요인이 감지되면 공사를 중단하고 전체적인 조사를 실시하고, 안정성해석 및 보강대책을 수립하는 것이 절개사면 안전성뿐만 아니라 경제성 측면에서도 매우 중요하다고 할 수 있다.

대책공법에 따라 시공된 현장에서 전문시공성의 결여에서 오는 붕괴현상이 많았다. 예를 들면, 산마루 측구의 불량시공이 사면의 붕괴현상을 가져온 경우이다. Figure 4.1은 붕괴 절개사면 상부는 경사가 거의 없는 평지가 비교적 넓게 발달하고 밭으로 활용된 현장의 사면으로, 강우 시 지표수의 절개사면내 유입량이 비교적 많을 것으로 예상된다. 그럼에도 불구하고 시공된 산마루 측구는 그림에서와 같이 평탄한 지표면의 지표수를 측구 내로 원활히 유도할 수 있는 방안이 강구되지 않은 채 시공되었다. 또한, 측구배수로 시공에 있어 기성제품의 플롯관을 설치하였으며 현장의 정밀시공의 한계성으로 인하여 플롯관이 경사면 보다 돌출되어 있어 결국 경사면을 따라 흐르는 지표수가 측구배수로 유입되지 않고 측구하부를 따라 절개사면 내부로 침투되어 사면붕괴를 촉진한 사례이다.

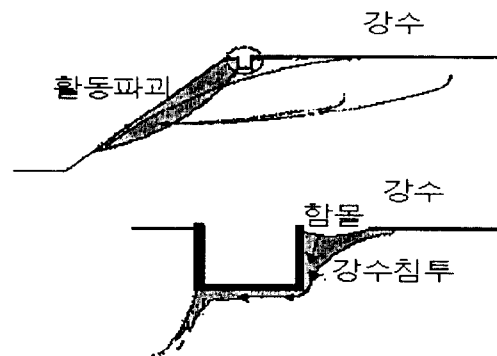


Figure 4.1 Penetration of surface water under the unsuitable drainage system located at the slope head is a cause of slope instability.

4.4 유지관리

예산부족과 안전 불감증 또한 사면붕괴로 인한 손실방지를 위하여 해결되어야 할 중요

한 문제이다. 충청북도 단양군 영춘면 휴석동 위험사면의 경우는 1970년대 초반 경부터 붕괴의 징후가 있었으나 예산의 부족과 전문성의 결여로 궁극적인 원인 치유가 되지 않고 임시 방편식의 공법이 적용되어오다가, 1990년대 후반에 들어서면서 대규모의 붕괴의 조짐이 보임으로 인하여 대책공법을 적용한 현장이다.

이처럼 국내의 사면에 대한 유지관리체계는 사후처리 식의 처방이 주를 이루어 왔다. 앞으로는 절개사면을 시공하기 전 공사 후 영향에 대하여 검토하고 붕괴현상이 발생하기 전에 경보체제를 구축하여 사고를 미연에 방지하는 방안이 요구된다.

국내 도로의 경우 절개사면에 대한 유지관리차원의 사업은 시행이 잘 이루어지지 않았으나, 최근 한국건설기술연구원과 한국도로공사의 도로 연구소를 중심으로 도로변 절개사면에 대한 유지관리시스템이 개발 운영이 되고 있다.

한국건설기술연구원에서는 전국 18개의 국도유지건설사무소에서 제출한 위험절개사면 900여 개를 선정하여 절개사면 현장조사를 수행하고 있다. 현장조사자료와 절개사면의 현황 및 이력자료를 지리정보시스템을 이용하여 관리하는 시스템을 개발중이다. 한국도로공사에서는 과학적인 사면유지관리를 목표로 사면에 식별번호를 부여하고 체계적인 관리를 위한 목적으로 시스템개발에 착수하였다.

5. 결론 및 제언

날로 늘어나는 국내 도로변의 절개사면에 대하여 총체적인 관점에서 분석 및 검토를 하였다. 절개사면에 대한 개괄적인 현황을 살펴보기 위하여 절개사면을 구성하고 있는 절개사면 구성 분포와 절개사면의 높이 및 경사에 대하여 조사한 결과, 국내의 절개사면은 약 75% 이상이 암반 절개사면으로 구성되어 있으며, 위험 절개사면의 79%가 암반사면으로 구성되어 있다. 이로 미루어 볼 때 암반 절개사면에 대한 과학적, 정량적인 설계기준 및 시공기준이 결정되어야 할 것이다. 이를 위하여 암반사면 붕괴사해에 대한 체계적인 평가가 선행되어야 한다.

또한, 사면 붕괴의 주요 원인이 집중강수에 있으므로 우리나라의 강우특성을 고려한 배수계획에 대한 연구가 필요하다. 지질특성 또한 사면 안정성의 중요인자이므로 지반조사, 현장시험 및 불연속면의 특성에 대한 체계적인 연구가 있어야 할 것이다. 아울러 공사 중의 사면안전성이 발파진동에 영향을 크게 받는 점을 고려하여 비록 개활지라 하더라도 지질적으로 사면활동 가능성이 있는 경우에는 발파진동을 제어할 필요가 있으며, 이에 대한 기준도 설정함이 바람직하다.

사면설계 시에는 기존의 시추조사에 추가하여 정밀 지표지질조사로 불연속면의 방향성과 특성을 파악하여 잠재적인 활동 가능성이 있는 불연속면을 확인하고 물리탐사기법을 이용하여 사면 계획 지점의 지질상태를 연속적으로 파악할 필요가 있다. 이러한 정보에 기초하여 필요한 보강방안을 제시하여 굴착 중에 적절한 보강이 이루어지도록 하거나, 공사 중 관찰된 지반상태에 근거하여 적절한 안전대책을 수립하여야 경제적인 건설이 가능하게 된다. 굴착완료 후에 사면파괴가 발생하면 보강대책을 적용하는데 많은 어려움이 뒤따르게 되거나 현실적으로 보강이 불가능하게 되는 경우도 있을 수 있다.

또한, 유지관리 시에도 위험 가능성이 있는 사면에 대하여서는 계측계획을 수립하여 사면 거동을 체계적으로 감시할 필요가 있다. 재해방지 차원에서 인명피해가 예상되는 사면에 대하여서는 경보체계를 구축하는 것도 검토할 필요가 있다.

참고문헌

기상청, 1998, 기상연보

김성환, 유병옥, 1995, 중앙고속도로 제1공구 STA.7+260-480구간(상) 전면부 옹벽설치방안 검토, 내부 보고서, 한국도로공사, 263-270.

박남서, 김성환, 이승호, 최용기, 박형동, 2000, 2000년 사면안정기술, Vol.16, No.5, 11~18, 한국지반공학회

암반역학위원회, 1996, 암반사면의 안정해석과 계측, 사면안정위원회(번역서)

한국건설기술연구원, 1997, 단양군 휴석동 불안정 사면 안정성 해석과 보강 대책안 제시 연구, 현대건설(주)·대화건설(주)

한국건설기술연구원, 1999, 당진군 매산-가곡 도로공사 구간 절개사면 안정성 해석과 대책안 제시, 한라건설(주)

한국건설기술연구원, 1999, 도로절개사면 유지관리시스템 개발 및 운용 II, 건설교통부

한국건설기술연구원, 2000, 정선군 정선읍 연화리 일대 사면안정성 해석과 대책안 제시, 정선군

Kim, G.W., Y.S. Paik and D.K. Park, 1999, "Slope failure in sedimentary rocks in Kyoungsang basin", Geotechnical Engineering case history in Korea, Special Publication to Commemorate the Eleventh Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul, 1999, Korean Geotechnical Society, 135-140