

단양 지역 터널입구부 붕괴절토사면 현장조사 및 안정성 해석 사례 연구

김승현^{1*} · 구호본¹ · 김승희²

¹한국건설기술연구원 지반연구실, ²미국조지아공대 토목환경공학과

A Case Study on the Field Investigation and Stability Analysis of the Collapsed Cut-Slope in Tunnel Portal, Danyang

Seung-Hyun Kim^{1*}, Ho-Bon Koo¹, and Seung-Hee Kim²

¹Geotechnical Engineering & Tunnelling Research Div., Korea Institute of Construction and Technology

²Department of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, USA

단양과 가곡을 잇는 기존 구국도 59호선에는 35개소의 절토사면이 존재한다. 본 구간은 도로선형이 복잡하고, 폭이 협소하며, 2002년과 2006년 집중강우의 영향으로 절토사면 붕괴, 산사태, 도로침하 현상이 발생되는 등 위험성이 높아 신설국도를 계획하게 되었다. 2006년 12월 신설국도 공사 중 터널입구부사면이 붕괴되었으며, 상부에 존재하는 군도의 중앙선을 따라 인장균열이 발생되었다. 붕괴원인 파악 및 대책공법 제시를 위해서 면밀한 현장조사 및 인장균열에 대한 모니터링을 실시하였고, 스테레오투영망 해석, 한계평형해석, 유한차분해석을 수행하였다.

주요어 : 절토사면, 인장균열, 현장조사, 모니터링, 안정성해석

Old national Road No. 59 that connects Danyang and Gagok has 35 dangerous cut slopes. It is relatively narrow and has a poor alignment. The torrential rains in 2002 and 2006 has caused numerous slope collapses, landslides and road settlements in this area. The old road's high risk level lead to the planning and construction of a new national road. During the construction of the new road in December 2006, the right side of Dugcheon Tunnel entrance has collapsed and tension cracks were observed on the district road above the tunnel. In order to determine the cause of failure, intensive field investigation and monitoring cracks were performed together with Lower Hemisphere Projection Analysis, Limit Equilibrium Analysis and Finite Difference Analysis.

Key words : cut-slope, tension crack, field investigation, monitoring, stability analysis

서 론

절토사면 붕괴 또는 산사태는 많은 수의 인명 사상과 재산의 피해를 불러일으키며 이를 해소하기 위한 많은 비용이 매년 투자되어 오고 있다. 특히, 1990년 이전에 만들어진 도로들은 도로의 안전성보다는 통행 자체에 관심을 가진 도로설계로 인하여 도로 폭이 매우 협소하고, 도로의 선형이 매우 복잡하게 변화한다. 또한 지반공학 적, 지질학적으로 불안정한 요소를 포함하는 사면들이 다수 분포하고 있어 집중적 관리가 요구되는 사면들이 많다(한국건설기술연구원, 2006, 2007, 2008).

산사태 및 절토사면의 붕괴의 직접적인 원인(trigger)으로 작용하는 인자로 “강우”는 절대적 요소로 잘 알려져 있으며, GIS 기법, 레이저스캐닝 기법, 물리탐사, 계측, 지형조건이나 지질조건 등을 결합시킨 요소 분석, 실내 시험 등을 이용한 강우와 산사태와의 관계 규명 등 국내에서 활발한 연구가 진행되어 왔다(국동식, 1982; 김경수의, 2007; 김만일과 정교철, 2008; 김윤중외, 1993; 김종렬외, 2005; 송영석외, 2005; 채병근외, 2006; 홍성진외, 2005). 또한 겨울철 산사태나 사면 붕괴는 온도의 급작스러운 변화에 기인한 눈융입물(snowmelt)이 사면 붕괴의 직접적인 원인으로 알려져 있으며, 국외에서는 활

*Corresponding author: sshkim@kict.re.kr

발한 관련 연구가 진행되고 있다(Ayalew et al., 2005 : Coe et al., 2003 : Gokceoglu et al., 2005 : Han et al., 2007 : Harr, 1981 : Jong et al., 2008 : Julian and Anthony, 1996 : Naudet et al., 2008). 그러나, 국내 연구들은 대부분 여름철 집중호우기에 발생하는 산사태 및 절토사면 붕괴에 집중된 연구로 겨울철 사면 붕괴에 관한 연구나 사례 연구에 대한 보고는 매우 미흡한 편이다.

본 논문은 겨울철에 붕괴된 신설도로공사 중 터널입구부 절토사면에 대한 사례연구로서, 붕괴 발생사면에 대한 현장조사 및 상부 도로에서 인지되었던 인장균열의 모니터링의 분석을 수행하였다. 또한 붕괴사면과 터널입구부에 대한 안정성 해석을 함께 수행하여 사면 안정성 평가와 함께 터널입구부 보강 적용 공법을 고려한 사례에 해당된다.

연구대상 지역

연구대상 지역은 한반도 중앙부의 충청북도 단양기곡 지역에 위치한다. 원래 본 지역의 단양군과 영월군을 잇는 국도 59호선이하, 구국도는 과거 2001년 하반기 국가의 정책에 따라 지방도였던 도로가 국도로 승격된 도로에 해당된다.

승격국도 구간 중 신설국도 공사 구간에 해당되는 기존 국도 부분은 단양읍 단양읍 고수리와 단양군 가곡면 사평리를 잇는 총 6km의 구간으로 한국건설기술연구원(2006, 2007)의 현황조사 결과에 따르면 구국도 구간에 존재하는 절토사면은 총 35개소가 존재하는 것으로 파악되어 있다. 구국도 구간의 사면 연장 평균은 113m이며, 사면 높이 평균은 23m 이고, 평균 경사가 62°로 단양군-영월군을 잇는 국도 59호선의 사면 평균 제원(국도 총연장 : 51.6 km, 전체 절토사면 개소수 : 172개소, 절토사면 연장 평균 : 96m, 절토사면 높이 평균 : 15 m, 절토사면 경사평균 : 59°)보다 규모면이나 개소, 분포면에서 국도 59호선의 타 구간에 비해 크게 나타난다. 김진환 외(2008)는 충청국도관리사무소 현황조사 자료의 위험도 분석을 통한 배점 부여 결과, 상기 구간 35개소 현장의 배점 평균 값은 161.1점으로 전체적인 배점 평균 값인 158.8점보다 높은 값을 보이는 결과를 제시한 바 있다.

구국도 구간은 2002년과 2006년 태풍 루사 및 에위니아에 동반된 집중호우의 영향으로 대규모 산사태 및 절토사면 붕괴가 발생되었을 뿐만 아니라 최대 2m 이상의 도로침하 현상이 관찰되는 등 도로의 정상적인 운영에 있어 많은 문제점이 노출되었으며, 이를 보완하기 위하여 주요 위험사면에 대하여는 상시계측시스템 및 웹카메라, 낙석신호등 등을 설치 운영하고 있다(김승현외, 2007).

본 지역은 시멘트 공장이 밀집되어 있어 중차량의 기존 국도 이용율이 매우 높았다. 따라서 안정적인 물류 이동 확보를 위하여 단양-기곡을 잇는 신설국도가 새롭게 계획·공사 중에 있으며, 신설국도가 완공되기 전까지는 구국도에서 서쪽으로 약 3km 떨어진 군도 6호선으로 중차량의 이동을 유도시켜 구국도의 중차량 통행을 완전히 제한시켰다. 신설국도는 단양군과 가곡면을 잇는 북서-남동 방향의 도로이며, 군도 6호선은 동북동-서북서 방향의 도로로서 신설국도의 일부 구간과 군도 6호선이 겹치는 부분이 존재한다. 신설국도 계획 구간은 옥천대 중 구조지질학적으로 중요한 위상을 차지하는 송림운동과 관련된 각동드러스트(NE-SW 주향)와 거의 일치한다. 각동드러스트를 기점으로 서쪽은 고생대 캄브로오도비스기의 영월형 조선누층군에 해당되며, 동쪽은 보다 신기의 암석인 고생대 트라이아스기의 상부평안층군과 중생대 유라기의 반송층군으로 이루어져 있다. 이러한 지질학적 복잡성으로 인하여 신설국도 구간 주변의 지질학적인 암상의 변화가 매우 심하여, 소규모 습곡 및 단층이 다수 출현하는 등 사면 조성에 있어 불안정한 지질학적 요인이 많은 상황이었다.

2006년 12월 3일 18:00경 신설국도 공사 구간 중 터널이 계획된 구간 입구부 절토사면 중 우측사면에서 붕괴가 발생되었다(Fig. 1과 Fig. 2). 우측사면 상단에는 군도

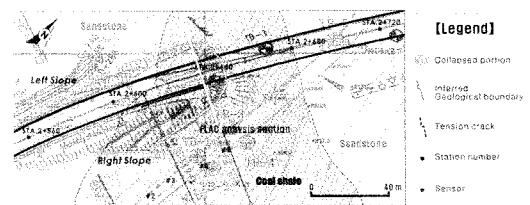


Fig. 1. Geological map of the study area.



Fig. 2. Collapsed right slope.

6호선이 통과하고 있으며, 군도 6호선의 중앙선을 따라 붕괴의 영향으로 인한 인장균열이 발견되었다. 만약 이 붕괴가 추가적으로 진행되어 군도 6호선까지 완전히 폐쇄될 경우 차량 운행에 긴급한 문제가 발생될 수 있으므로 이에 대한 조속한 처리가 요구되었다.

현장조사 및 인장균열 모니터링

현장조사

연구대상 절토사면의 경우, 현장조사 당시에 대부분의 지반이 슛크리트(shotcrete)로 피복되어 있어 전반적인 지반 상태를 파악하는 데 어려움이 있었다. 대상 사면의 전반적인 지형은 북서쪽으로 하향하는 형태를 가지며, 자연사면 및 지반 표피 두께 약 1~2m의 경우, 붕괴층으로 피복되어 있고, 붕괴층 하부에 암반이 노출된 형태로 노출된다. 붕괴 발생부 및 슛크리트 이탈부를 중심으로 관찰된 지질은 대부분 화학적 풍화에 취약한 흑색의 탄질세일 및 석회암 계통의 탄산염류암이 주를 이루고 있었으며, 본 사면의 붕괴는 이들 암석에 집중되었다(Fig. 3). 그 외 유백색 내지 황색 계열의 사암 계통의 쇄설성 퇴적암이 관찰된다.

본 지역은 대규모 역단층과 수반된 다양한 파쇄대들이 통과하고 있으며, 사면 내 소규모 파쇄대가 발달되는 부분은 사면 내로 유입되는 유수의 이동통로로 이용되어 빠른 풍화가 진행 중이며, 다수의 점토질 토사로 변질되어 있어 사면안정성 측면에서 위험성이 크다고 할 수 있다. 또한 소습곡 구조의 발달로 인하여 습곡축 부분을 중심으로 균열이 존재하며, 습곡축을 중심으로 붕괴가 발생할 가능성도 높다. 이 지역의 세일은 탄질 물질을 다수 포함하고 있을 뿐만 아니라 여러 지질 구조적 활동의 영향으로 인한 변성작용의 영향을 받았다. 세일에 부분적으로 탄질이 협재되는

경우, 탄질에 의해 지반강도정수가 저하되게 되어 안전율이 급격히 떨어지게 되며, 특히 지하수가 존재하는 구간에서는 암석 자체의 지지력이 상실되어 마치 균주과 같은 상태의 유동성을 가지는 물성체로 변화하게 되므로 사면 설계시 주의가 요구되는 암석이라고 할 수 있다.

붕괴가 발생된 우안사면은 총연장 100m (STA.2+540~2+640), 최대높이 28m로 높이 20m까지는 탄질세일이 분포하고, 탄질세일 상부에 석회암이 그 상부에 1.0~1.5m 두께의 붕괴층이 발달하고 직 상부에 왕복 2차선의 군도 6호선이 위치한다. 절토사면에는 총 4개의 소단이 설치되어 있으며, 제3소단 이하 법면은 약 1:0.7 경사도의 경사를 유지하고 있으며, 제3소단 이상 법면은 약 1:1.0 경사도를 유지하고 있다(사면방향 : 45~55/330(dip/dip direction)). 제4소단 상부는 자연사면 형태로 노출되며, 연장 사거리는 군도6호선 직하부까지 약 10m 정도이며, 경사도는 40° 정도이다. 이 후 군도 6호선 상부에 다시 노출되는 상부자연사면은 평균 10° 내외로 비교적 완만한 구배를 유지하고 있다. 군도 6호선 차선 바깥쪽으로 경사 약 10° 내외의 자연사면이 약 100m 연장성을 가지며 발달하고 있다. 군도와 자연사면 사이에는 배수를 위한 낙석흡수 도랑(ditch)이 형성되어 있는데 시공한 지 오래되어 나뭇가지 등이 배수로를 피복하고 있으며 시멘팅을 실시하지 않아 유입되는 유수가 지반으로 그대로 침투하고 있어 자연배수로로의 역할을 매우 미미한 상태였다.

우안사면에 대하여 구간별로 중요한 아의 특성을 살펴보면 다음과 같다.

STA.2+600-2+620 구간은 원래 슛크리트(Shotcrete)로 피복되어 있어 직접적인 법면의 관찰은 불가능한 상태였다. 그러나 붕괴 발생으로 인하여 일부 노출된 암반 특성과 슛크리트(Shotcrete) 내 관찰되는 여러 균열의 상태로부터 하부의 지반 상태를 직·간접적으로 유추할 수 있었다. STA.2+600-2+610 구간 제3소단 상단부 지반 슛크리트(Shotcrete) 내에 수직의 균열이 발생하였다(Fig. 4). 균열의 폭은 20~25cm로 비교적 넓은 편이며, 붕괴부에서 발달하는 주 전단대의 발달 방향과 거의 유사하다. 또한 소단부의 경우, 붕괴의 영향으로 약 15cm 정도 함몰된 형태를 가진다(Fig. 5).

STA.2+620-2+640 구간 붕괴부 내의 지반은 1.0~1.5m의 붕괴층 아래 기반암이 존재하는 형태이며, 층리면이 0.06m 이하로 매우 조밀하게 발달하고 있고, 운모류 광물이 층리면을 따라 집중적으로 발달하고 있는 상태였다(Fig. 6). 본 구간의 불연속면 발달 방향은 켄트파괴 및 평면파괴를 유발할 수 있는 방향이었으며, 붕괴부 주



Fig. 3. Rock of collapsed portion.



Fig. 4. Vertical crack on shotcrete.



Fig. 5. Settlement of berm.

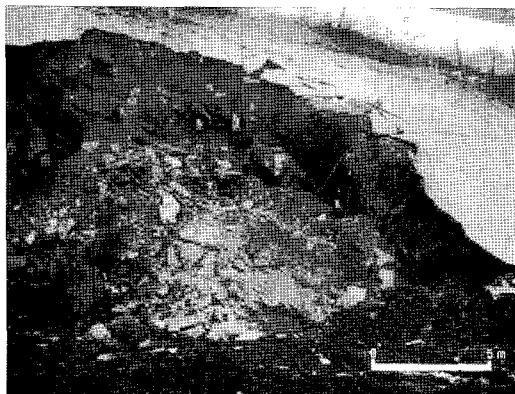


Fig. 6. Main collapsed portion.

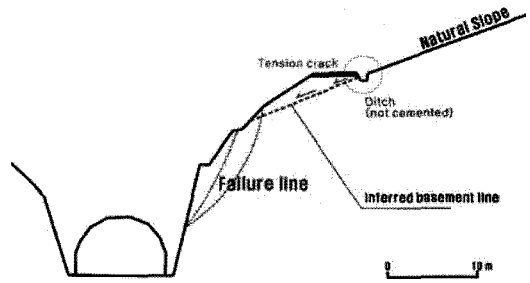


Fig. 7. Diagram of collapsed portion.

변으로 층리 및 절리의 발달 방향이 매우 다양하게 노출되고, 지반의 교란이 뚜렷한 상태였다.

현장조사를 통하여 유추한 붕괴 발생 시나리오는 다음과 같다. 층리면을 따라 협재된 탄질 토사가 우기시 유수의 주입으로 지하수와 탄질이 혼재되어 흙탕물 상태로 서서히 빠지기 시작하면서 붕괴 영역이 확장됨과 동시에 별도의 배수처리가 되지 않았던 낙석흡수도랑으로 유입된 유수가 원지반추정선을 따라 이동하면서 도로 하부 세립자가 탈락되어 세굴 현상이 발생되었고 지속적 변위가 진행되어 붕괴가 발생한 것으로 추정되어진다(Fig. 7).

본 구간의 붕괴는 상부 군도 6호선 도로기층의 지지력 상실로 이어져 군도 중심부에 인장균열이 발생시키는 등 파급효과를 크게 하였다. 또한 군도 6호선을 이용하는 중차량의 잦은 통행으로 인하여 도로 아스팔트에 골이 파여 있어 우기시 아스팔트를 따라 흐르는 유수의 방향이 사면 쪽으로 향하게 되어 있으므로 우안사면 쪽의 붕괴를 유발시킨 또 다른 잠재적 인자가 되었던 것으로 판단된다. 우안사면의 붕괴는 군도의 인장균열에 직접적인 영향을 미치는 것으로 조치를 취하지 않을 경우, 군도의 도로 전반에 걸쳐 붕괴가 이어질 수 있는 상황이었다.

인장균열 모니터링 및 응급조치

붕괴와 더불어 우안사면 상단부 군도 6호선 중앙선을 따라 발생한 인장균열이 확대되기 시작했다. 인장균열은 STA.2+540~2+640 구간을 따라 길이 100m로 발달되어 있다. 인장균열은 12월 1일에 최초로 매우 얇은 균열의 형태로 발견되었다. 이들 인장균열의 거동을 파악하기 위하여 총 5개의 간이 센서를 현장에 설치하였으며, 인장균열 설치 위치는 각각 STA.2+560(센서 1), STA.2+580(센서 2), STA.2+600(센서 3), STA.2+620(센서 4), STA.2+640(센서 5) 지점을 선정하였고, Fig. 9는 2007년 12월 1일부터 2008년 1월 28일까지 동일시각에 측정된 각각 인장균열의 센서 변위량에 대한 누적변위량을 나

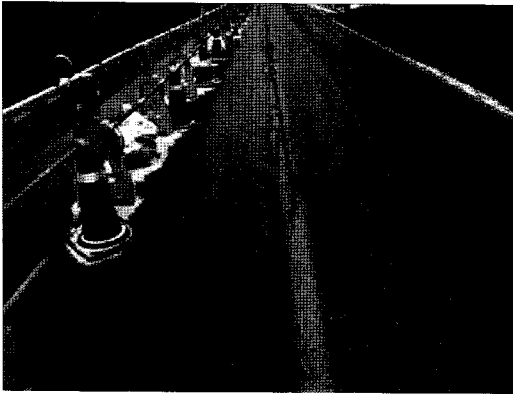


Fig. 8. Tension crack on provincial road.

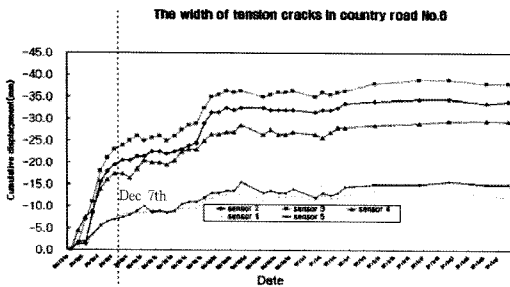


Fig. 9. Cumulative displacements of tension cracks.

타낸 것이다.

실근열을 발견한 12월 1일 측정 이후로 실제로 붕괴가 발생된 12월 3일을 포함하여 12월 7일까지는 붕괴부에 인접한 센서 2, 센서 3, 센서 4에서 급격한 변위(최대 25 mm)가 진행 중인 것이 확인되었다. 현장조사를 통하여 본 사면의 붕괴 원인은 사면 구성 지반의 열악성, 인장균열 및 낙석흡수도랑으로 유입되는 유수, 군도 6호선 불량한 포장 상태 등으로 요약될 수 있으며, 이를 1차적으로 방지하기 위한 응급조치가 실시되었다.

응급조치는 12월 7일에 진행되었으며, 응급조치 내용은 낙석흡수도랑 청소 및 시멘트 코팅, 인장균열 내부 그라우팅, 군도 6호선 사면 쪽 유수 유입 방지턱 설치 등이었다. Fig 9에서 보는 바와 같이 응급조치를 실시한 이후, 모니터링 센서의 변위가 수렴되는 양상을 가지는 것으로 확인되었다. 이러한 변위의 특성으로 보아 만약 긴급 응급조치를 실시하지 않았을 경우, 지속적인 변위의 증가로 인한 추가적인 대규모 붕괴가 발생할 가능성이 잠재되어 있는 상황이었으며, 붕괴로 인한 군도 6호선의 도로 포장 파손으로 인한 심각한 물류 제한 문제가 발생할 수 있었다고 판단된다.

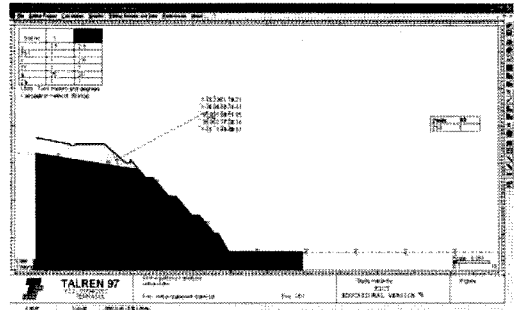


Fig. 10. Limit equilibrium analysis result (fully saturated state).

안정성해석

우안사면 안정성해석

우안사면의 안정성 평가를 위하여 우안사면 붕괴부에서 노출된 지반의 불연속면 자료의 분석을 실시하였고, 이를 통하여 하반구등면적투영망해석을 실시하였다. 또한 사면의 안전율을 산출하기 위하여 한계평형해석을 실시하였다. 이 때 사용된 지반강도정수는 경험식, 실내시험, 관련문헌 등을 참조로 산출되었으며, 붕적층은 $c=1.0 \text{ t/m}^2$, $\phi=20^\circ$, 탄질 세일은 1.6 t/m^2 , $\phi=25^\circ$ 의 값을 사용하였다. 하반구등면적투영망해석에 사용된 대표 불연속면은 45/355(set 1), 45/215(set 2), 60/055(set 3), 70/130(set 4)였으며, set 1과 set 2, set 1과 set 3 불연속면에 의한 쉐기파괴가 인지되었다. 우기시 한계평형해석 결과, 산출 안전율이 0.93으로 우기시 허용안전율 값인 1.2에 미달되므로 추가적으로 보강이 요구됨이 확인되었다(Fig. 10).

터널입구부 안정성해석

우안사면과 인접한 터널의 경우, NATM 공법을 이용한 굴착이 예정되어 있다. 터널입구부 지반의 안정성 평가를 위하여 유한차분이론에 근거한 FLAC 프로그램을 사용하여 터널입구부 지반을 안정하게 보강하기 위한 방안에 대한 평가를 실시하였다. 현재 본 터널입구(STA.2+640 지점)은 굴착 이전 상태이며, 터널 단면의 바깥쪽으로 록볼트(Rock Bolt), 쏘일네일링(Soil Nailing) 보강을 실시한 상황이었다. 터널입구부 안정성 확보를 위한 방안으로 강관다단그라우팅을 추가적으로 고려하고 있으며, 이를 위하여 강관다단그라우팅을 1열(section 1)로 적용하였을 경우, 3열(section 2)로 적용하였을 경우에 대하여 Table 1과 같은 개요로 수치해석을 실시하였다. 수치해석에 사용된 지반정수는 RMR을 고려한 경험치, 실내시험 등을 통하여 산출된 값을 활용하였으며, 탄질 세일의 경우는

Table 1. Tunnel section for FLAC analysis.

Name	Section	Reinforcement	Excavation	Load allocation
Dugcheon Tunnel	STA. 2+640 (Tunnel portal)	- 1 row steel pipe support - Type (section 1) - 3 row steel pipe support - Type (section 2)	Upper half	40-30-30

Table 2. Geoparameters for the FLAC analysis at tunnel portal.

Classification	Elastic Modulus × 10 ³ (t)	Unit Weight(t)	Poisson Ratio	Cohesion (t)	Internal Friction Angle (degrees)	Lateral Pressure Coefficient	Remarks
Colluvium	3	1.5	0.35	1	25	1.0	
Coal shale	52	2.3	0.26	2.6	20	1.0	
Steel pipe grouting	60	2.0	0.30	5	20	1.0	1 row
	85	2.2	0.25	14	40	1.0	3 rows

Table 3. Results of the FLAC analysis.

Classification	Type	Maximum displacement (mm)	Shotcrete Strength (tf/m ³)			Rockbolt axial strength (tonf)
			axial	moment	shear	
section 1		2100	71.0	28.4	15.5	20.0
section 2		58.5	38.4	5.7	5.7	1.84

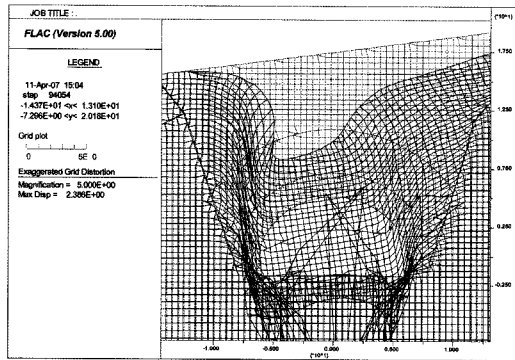


Fig. 11. Tunnel displacement at section 1.

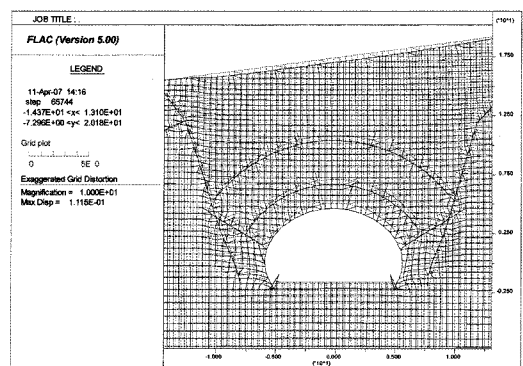


Fig. 12. Tunnel displacement at section 2.

김중욱(2002)이 제시한 값을 사용하였다(Table 2).

FLAC 안정성 해석결과, section 1에서는 터널 천단부의 변위량은 최대 2,100 mm까지 발생하는 것으로 확인되었으며, 반면 section 2에서는 58.5 mm로 그 변위량이 대폭 감소하는 것으로 확인되었으며, 그 외 수치해석 결과는 Table 3과 같다(Fig. 11과 Fig. 12). 상기 결과에 대하여 터널에 대한 일본 천단침하 관리기준(1986)과 미국의 ASCE(Franklin, 1976) 기준을 비교하였을 때, 강관다단 1열 적용시의 변위량 값은 명확한 이완영역이 발생하는 주의레벨에 해당되는 것으로 판정되며, 강관다단 3열 적용시의 변위량 값은 강관다단 1열 적용시보다는 안정

성은 확보되나, 주의레벨에 해당되므로 터널 굴착시 주의가 요구되는 상황이라고 판정하였다.

결론

도로절토사면 관련 설계단계에서는 시추조사 등 한정된 조사에 의해 지반상태를 예측하고 사면 설계를 하기 때문에 항구적인 절토사면 시공의 한계성을 가진다. 절토사면 시공 단계별로 노출된 사면의 지반상태를 면밀히 파악함으로써 정확한 지반 정보에 의해 조사, 안정성 해석을 수행하게 되면 보다 정확한 사면의 거동 예측이 가능하고

사면의 항구대책을 수립할 수 있지만, 대부분의 사면 설계나 터널 설계는 설계 최초로 제반 업무를 마무리하여 시공 중에 발생하는 문제에 대하여 능동적으로 대처하지 못하는 경우가 매우 많다.

본 논문은 신설국도공사구간에서 겨울철 붕괴가 발생한 사면에 대하여 연구한 사례로서 일반적으로 알려진 사면 분석과 더불어 지형적 특성으로 존재하는 사면 상단부 도로의 안정성 확보를 위한 연구, 장기적인 인장균열 모니터링 결과, 터널입구부 안정성 검토 등 다양한 시도가 실시된 사례이다.

조사대상 절토사면을 구성하는 암석은 설계 단계에서 반영하지 못하였던 탄질세일이며, 부분적으로 유백색 사암이 분포하였다. 탄질세일 분포지에는 다양한 방향과 조밀한 빈도의 파쇄대가 발달하고 있어 매우 열악한 지반환경을 가진다. 특히 탄질의 경우 지하수가 유입되게 되면 지지력 상실, 반고체상태의 유동성 지반 등 매우 열악한 지반특성을 나타낸다. 붕괴가 발생한 우안사면의 경우, 대부분 열악한 탄질 세일로 구성되어 있었으며, 사면의 최대 높이는 28m에 해당된다. 붕괴 구간에서는 다양한 방향의 파쇄대가 발달하며, 이를 중심으로 붕괴가 발생되었고 발달 불연속면에 대한 안정성 평가 결과 썩기파괴를 유발할 수 있는 상태임이 확인되었다. 본 사면의 붕괴는 열악한 지반 내로 우기시 우수가 침투함으로써 토립자가 이동되어 점토로 충전된 파쇄대를 따라 슬라이딩이 발생한 상황으로 추가적인 안정화 공법의 적용이 요구되는 상황이었다.

상부 군도 6호선에 발생한 인장균열은 붕괴 발생 이전 이들 전에 그 조짐이 인지되었으며, 붕괴 발생과 더불어 응급조치를 실시하기 전까지 지속적인 변위가 발생되는 것으로 확인되었다. 실시된 응급조치는 사면 내부 또는 사면 표면으로 지표수 및 지하수의 유입을 최대한 제어하는 것으로 실시되었으며, 이를 통하여 1차적인 사면의 안정성과 군도의 안정성을 확보할 수 있었다.

사면 및 터널에 대한 안정성 해석 결과, 사면에 대한 추가적인 보강이 필요함이 확인되었고, 터널 입구에 대하여는 이미 실시된 록볼트(Rock Bolt) 및 샷크리트(Shotcrete) 보강에 추가하여 강관다단 3열을 터널 단면을 따라 적용함으로써 안정성이 확보될 수 있을 것으로 판단되어진다.

참고문헌

국동식, 1982, 1972년 8월 경기지방에 내린 집중호우에 관한 연구, 한국지구과학회지, 3(1), 7-12.
 김경수, 송영석, 채병근, 조용찬, 이준우, 2007, 지질조건에

다른 자연사면 산사태의 기하학적 특성, 대한지질공학회, 17(1), 75-87.
 김만일, 정교철, 2008, 강우를 고려한 불포화 지반변형의 영향인자 평가, 대한지질공학회, 18(2), 117-126.
 김윤중, 김원영, 유일현, 1993, 지질재해 분석을 위한 GIS 응용 연구, 한국GIS학회, 1(1), 89-94.
 김종렬, 강승구, 강희복, 박승균, 박철원, 2005, 강우 시 석회암 풍화토 사면의 안정해석에 관한 연구, 대한지질공학회, 15(1), 9-17.
 김중옥, 2002, 석탄광에 인접하여 굴착되는 터널의 안정성에 관한 수치해석, 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사학위논문, 108p.
 김승현, 구호분, 이종현, 백용, 2007, 사면붕괴 피해 예방을 위한 낙석인호등 설치 사례 연구, 대한지질공학회, 17(2), 253-261.
 김진환, 구호분, 이종현, 윤천주, 2008, 현황조사 자료를 이용한 충청도 관내 위험절토사면 분포도 작성 연구, 대한지질공학회, 18(1), 37-44.
 송영석, 장윤호, 김진석, 2005, 집중호우시 발생된 삼척 지역의 산사태 특성, 대한지질공학회, 2005, 435-445.
 채병근, 송영석, 서용석, 조용찬, 김원영, 2006, 모형실험 장치를 이용한 산사태 발생 및 사체물질 거동특성 실험, 대한지질공학회, 16(3), 275-282.
 한국건설기술연구원, 2006, 2005년도 도로절토사면 유지관리시스템 업무대행, 국토해양부.
 한국건설기술연구원, 2007, 2006년도 도로절토사면 유지관리시스템 업무대행, 국토해양부.
 한국건설기술연구원, 2008, 2007년도 도로절토사면 유지관리시스템 업무대행, 국토해양부.
 홍성진, 장기태, 한희수, 2005, 사면보강재의 강우 및 온도에 의한 변형 해석, 대한지구물리학회지, 2005, 8(2), 97-103.
 Ayalew, L., Yamagishi H., Marui H., Kanno T., 2005, Landslides in Sado Island of Japan: Part I. Case studies, monitoring techniques and environmental considerations, Engineering Geology, November 2005, 81(4), 419-431.
 Coe J. A., Ellis W. L., Godt J. W., Savage W. Z., Savage J. E., Michael J. A., Kibler J. D., Powers P. S., Lidke D. J., Debray S., 2003, Seasonal movement of the Slumgullion landslide determined from Global Positioning System surveys and field instrumentation, July 1998-March 2002, Engineering Geology, 68(1-2), 67-101.
 Gokceoglu Candan, Sonmez Harun, Nefeslioglu Hakan A., Duman Tamer Y., Tolga Can, 2005, The 17 March 2005 Kuzulu landslide (Sivas, Turkey) and landslide-susceptibility map of its near vicinity, Engineering Geology, 81(1), 65-83.
 Han Jinliang, Shuren WU, Huabin WANG, 2007, Preliminary Study on Geological Hazard Chains, Earth Science Frontiers, 14(6), 11-20.
 Harr R. D., 1981, Some characteristics and consequences of snowmelt during rainfall in western Oregon, Journal of Hydrology, 53(3-4), 277-304.
 Jong C. de, Cappy S., Finckh M., D. Funk, 2008, A transdisciplinary analysis of water problems in the mountainous karst areas of Morocco, Engineering Geology, 99(3-4), 228-238.
 Julian Maurice, Anthony Edward, 1996, Aspects of landslide activity in the Mercantour Massif and the

French Riviera, southeastern France Geomorphology, 15(3-4), 275-289.

Naudet V, Lazzari M., Perrone A., Loperte A., Piscitelli S., Lapenna V., 2008, Integrated geophysical and geomorphological approach to investigate the snow-melt-triggered landslide of Bosco Piccolo village (Basilicata, southern Italy), Engineering Geology, 98(3-4), 156-167.

구호본

한국건설기술연구원 지반연구실

411-712 경기 고양시 일산구 시민대로 1190

Tel: 031-910-0217

Fax: 031-910-0561

E-mail : hbkoo@kict.re.kr

2009년 6월 9일 원고접수, 2009년 9월 17일 게재승인

김승현

한국건설기술연구원 지반연구실

411-712 경기 고양시 일산구 시민대로 1190

Tel: 031-910-0524

Fax: 031-910-0561

E-mail : sshkim@kict.re.kr

김승희

Department of Civil and Environmental Engineering

Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA

Tel: 1-404-805-3724

Fax: 1-404-894-2281

E-mail : simseung@gatech.edu