

[기술보고]

터널 입구부 대절토 사면 안정성 사례 연구

박동순* · 배종섭

K-water연구원 기반시설연구소

[Technical Report]

Case Study of the Stability of a Large Cut-Slope at a Tunnel Portal

Dong Soon Park* and Jong-Soem Bae

K-water Research Institute, Korea Water Resources Corporation

Received 21 November 2014; received in revised form 4 December 2014; accepted 7 January 2015

대단면 터널 입구부의 대절토 사면은 불안정한 응력분포 및 소성변형 가능성으로 인해 잠재적 취약부로 인식되고 있다. 본 사례연구에는 대단면 터널 갱구부 대절토 사면의 강우 후 유실사고 및 원인규명, 복구공법을 분석하여 제시하였다. 대상 현장은 46 mm의 강우 후 암반의 불연속면을 따라 대규모 평면파괴가 발생하였으며, 상부 절토사면의 불안정을 야기하였다. 지질조사 및 매핑 자료 분석 결과, 붕괴 원인은 풍화된 암반의 불연속면에 협재된 충전물과 지반 포화로 인한 질리면 연화(softening)로 판단되었다. 일갈리 장석이 풍부한 화강편마암은 풍화에 취약한 것으로 나타났다. 침하량 계측자료 분석 결과, 붕괴 직전에 급격한 변위량 증가를 관찰하였으며, 향후 사면 계측관리에 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 응급복구 대책으로 콘크리트 공동충전 및 외부로부터 압성토 채움을 성공적으로 시행하였다. 갱구부 대책으로 사면부에는 격자블럭 및 지중 앵커 시스템을, 터널 측벽부에는 추가 락볼트 보강 및 그라우팅 공법을 성공적으로 적용하였다. 한계평형해석과 평사투영해석을 통해 원 사면의 불안정성과 보강방법의 유효성을 확인하였다. 본 사례연구는 향후 유사한 대절토 사면에 귀중한 참고자료로 활용될 것으로 기대된다.

주요어: 대단면 터널, 사면 안정, 터널 갱구부, 복구, 암사면

The cut-slope of a large-sectional tunnel portal is recognized as a potential area of weakness due to unstable stress distribution and possible permanent displacement. This paper presents a case study of a slope failure and remediation for a large-scale cut-slope at a tunnel portal. Extensive rock-slope brittle failure occurred along discontinuities in the rock mass after 46 mm of rainfall, which caused instability of the upper part of the cut-slope. Based on a geological survey and face mapping, the reason for failure is believed to be the presence of thin clay fill in discontinuities in the weathered rock mass and consequent saturation-induced joint weakening. The granite-gneiss rock mass has a high content of alkali-feldspar, indicating a vulnerability to weathering. Immediately before the slope failure, a sharp increase in displacement rate was indicated by settlement-time histories, and this observation can contribute to the safety management criteria for slope stability. In this case study, emergency remediation was performed to prevent further hazard and to facilitate reconstruction, and counterweight fill and concrete filling of voids were successfully applied. For ultimate remediation, the grid anchor-blocks were used for slope stabilization, and additional rock bolts and grouting were applied inside the tunnel. Limit-equilibrium slope stability analysis and analyses of stereographic projections confirmed the instability of the original slope and the effectiveness of reinforcing methods. After the application of reinforcing measures, instrumental monitoring indicated that the slope and the tunnel remained stable. This case study is expected to serve as a valuable reference for similar engineering cases of large-sectional slope stability.

Key words: large sectional tunnel, slope stability, tunnel portal, remediation, rock slope

*Corresponding author: fulgent@kwater.or.kr

© 2015, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

산악지형이 많은 국내 여건에서 토목공사 시 대절토 사면은 빈번하게 접하는 공종으로서, 현재까지 다양한 사고 사례들과 보강공법 적용 사례들이 소개되고 있다 (Baek et al., 2002; Kim et al., 2004; Lee, 2009; Na, 2013; Yang, 2013; Wang, 2014). 특히 대단면 터널의 입구부는 주로 대절토 사면으로 시공되어, 불안정한 응력 상태 및 소성변위 발달 가능성으로 인해 시공 시 잠재적 취약부로 인식되고 있다 (Goodman and Kieffer, 2000). 터널 입구부 대절토 사면은 불연속면을 따른 토체의 활동 또는 켜기/뺨면 파괴의 사고 사례가 빈번하게 보고되고 있다 (Collins and Znidarcic, 2004; Jiaoa et al., 2005; Kim et al., 2006; Fuchsberger, 2008; Koo et al., 2008; Kim et al., 2010; Kwon et al., 2010). 본 논문에서는 대단면 터널 입구부 대절토 사면 현장에서 낮은 전단강도의 불연속면 협재물과 강우로 인한 지반 포화 등의 원인으로 발생한 사면 유실 사례와 그에 대한 원인조사, 안정성 해석, 응급복구 및 항구복구 사례연구를 요약하여 소개하고자 한다.

시공 개요 및 사고 현황

본 연구 사례는 대단면 수로터널 2열(터널 #1, #2)이 병렬로 시공되는 터널 입구부 대절토 사면 현장을 대상

으로 한다. 병렬로 시공되는 터널은 천이부 40m와 일만부 502m로 이루어져 있으며, 개착식과 NATM식 시공형식을 취하고 있다. 터널의 총연장은 542m에 달하며, 터널 단면은 직경 12.8m의 원형으로 시공되었다. 터널 시공 시 슛크리트와 강(격자)지보, 록볼트 처리와 함께 천단부 붕락 방지를 위해 일부구간 휘폴링을 40~50cm 간격으로 시행하고, 상대적 취약부인 터널 입구부 및 종점부에 강관다단그라우팅을 0.2~0.6m 간격으로 시공하였다.

터널의 유입부 사면은 최대 사면높이 56.4m, 깎기면 기울기 1:0.3~1:1.2의 대절토 사면으로서 토사구간은 소일네일링(간격 2.5m, 연장 L=4~16m) 보강과 암반구간은 록볼트(간격 2.0m, 연장 L=3m) 보강을 수행하였다 (Jang, 2013).

터널 유입부 사면의 유실은 46mm의 강우 후 #2 터널 유입부 우측 암사면에서 발생하였으며, 터널과는 약 5m 이격된 위치이다. 유실규모는 약 200m³에 달하며, 당시 즉각적인 피해원인은 갱구부 사면 암반의 불연속면 발달과 해빙기 및 강우로 인한 절리면 포화로 추정되었다 (Fig. 1~2).

본 현장에 대한 즉각적인 조사는 사고 발생 당일 및 익일 시행되었으며, 사고 전 현장 시공 사진 및 사고 당시 붕괴과정을 촬영한 동영상 등의 자료를 확보하여 분석에 활용하였다. Fig. 3은 터널 입구부 우측 사면에 대한 유실 전 및 강우 후 암사면 유실 과정을 시간 순

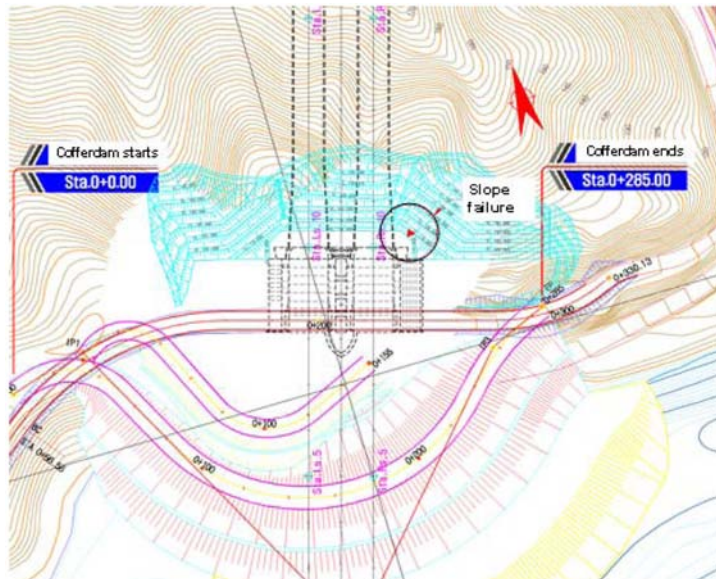


Fig. 1. Tunnel construction layout and location of the slope failure.

서별로 나열한 사진자료이다. 현장조사 및 암사면 유실 순간 동영상 분석 결과, 본 현장의 암사면은 다양한 불연속면이 분포하고 있으며, 절리면 사이에 전단력의 감

소를 초래할 수 있는 점토 협재물이 광범위하게 분포함으로써 절리면의 전단강도 저하가 전체 파괴를 지배하였을 것으로 추정되었으며, 단일 암석의 낙하로 확인되



Fig. 2. Slope failure of a large-scale cut slope at a tunnel portal.



Fig. 3. Time-lapse photographs of the rock-slope failure.



Fig. 4. Failed rock mass. Note the scale of the failed rock mass compared with the tunnel diameter of 12.8 m.



Fig. 5. Longitudinal tension crack developed along the berm above the failure slope.



Fig. 6. Damaged rock bolt and clay seam in discontinuities (left), and tension cracking of shotcrete on the side wall of the No. 2 tunnel.

는 파괴 시작부터 종료까지 불과 6초의 시간이 걸림으로서 비교적 급속한 평면파괴 형태의 붕괴 유형을 보였음을 알 수 있었다.

사면 유실 다음날 현장점검 결과, 유실 암사면 부위 상부의 슛크리트는 사고 전 이완된 상태와 비교적 유사하게 보존되어 있었다. 유실 암사면 상단면은 상대적으로 깊게 형성되어 있었으며, 유실 암체가 위치한 직상부 소단은 이완된 암반과 슛크리트가 여전히 남아 있었다 (Fig. 4). 유실 암사면 상부의 절토사면 소단에서 광범위한 인장균열이 발달되어 있었으며, 도수로 콘크리트 역

시 인장균열로 인한 변형으로 손상되어 있었다 (Fig. 5). 제2터널 입구부 강(steel) 아치와 슛크리트 지보재로 지지하고 있는 우측 어깨부에서 사면유실의 영향으로 판단되는 슛크리트 탈락이 소폭 관찰되기도 하였다 (Fig. 6). 유실된 사면 암석의 불연속면 사이에 협제되어 있는 점토는 매우 매끄럽고 윤기가 있는 상태였다 (Fig. 6).

추가적인 붕괴를 막기 위한 긴급 단기대책으로, 안전 확보 시까지 응급복구를 제외한 터널 입구부 공사를 중지하고, 노출사면에 대한 우수 차단시설(천막)을 설치하였으며, 사면에 표면침하게, 응력계 추가 설치 및 매설

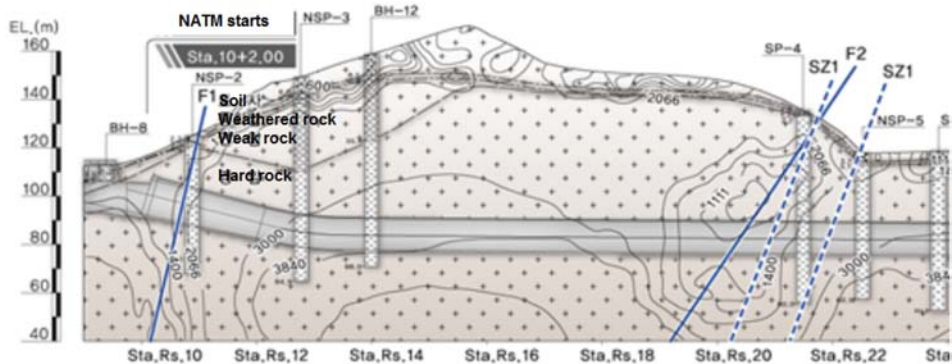


Fig. 7. Distribution of faults and shear zones within the No. 2 tunnel.

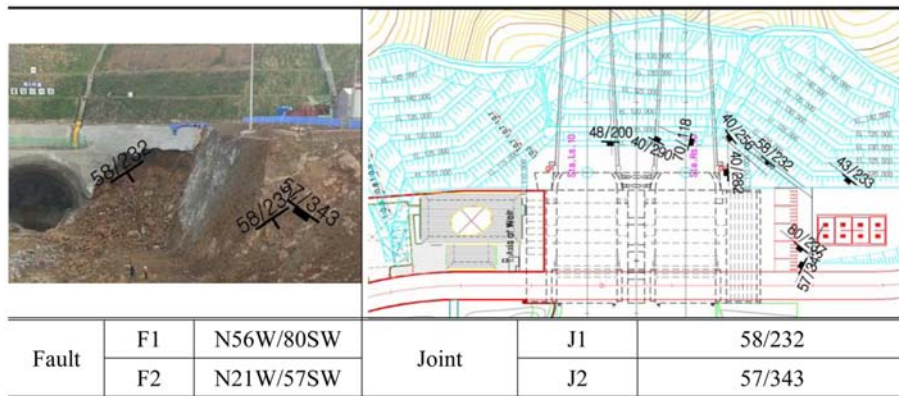


Fig. 8. Fault and joint orientations on the rock-slope surface.

계기 계측을 강화하고, 붕락부위에 대한 응급복구 방안을 강구, 시행하였다.

원인 분석

지질 분석

설계 당시 해당지역의 상세지질도에 따르면, 화강편마암이 지배적이었으며, 보다 자세하게는 알칼리장석이 풍부한 우백질 화강편마암과 사장석과 흑운모의 함량이 높은 화강섬록암질 편마암이 변화하며 혼재되어 있었다. 알칼리장석 함량이 높은 우백질 화강편마암 구간은 화강섬록암질 편마암에 비해 상대적으로 풍화에 약한 특성을 보여 갱구부 주변에서 특히 풍화정도가 심하고 풍화심도도 깊은 것으로 추정되었다. 터널 구간에 걸쳐 파악된 총 4매의 단층 중 F1 단층은 N58W/80SW의 방향성이 있고, 5 cm 내외의 단층갈라짐이 존재하며 폭 20 cm 내외의 파쇄대가 발달된 소규모 단층이었다(Fig. 7).

현장에서 face mapping 및 주향/경사 측정 결과에 의

하면, 붕괴 전·후 제 2터널 유입부 우측 비탈면에서 불안정한 상태를 보이고 있는 불연속면의 주향/경사(경사/경사방향)는 F1 단층 및 두 평면 사이에 습곡축으로 발달한 엇리궤적의 방향성과 같은 방향성을 나타내고 있었으며, 4개조의 절리군이 형성되어 있고, 불연속면내에 연약한 점토가 약 5 mm 내외로 충전되어 있어, 충전물에 의한 불연속면의 전단강도가 저하되어 비탈면에 불안정 요소로 작용하고 있었을 것으로 판단되었다(Fig. 8).

특히 유실 후 측정된 불연속면을 분석한 결과, 58/232의 방향으로 발달한 불연속면에 충전물이 협제되어 있어 강도 저하의 요인을 제공했을 것으로 판단되며, profile gauge로 측정한 결과 불연속면의 거칠기 정도 (profiling)가 평활에서 활면의 상태로서 측정된 불연속면에 의해 평면파괴가 발생된 것으로 판단되었다.

계측자료 분석

대단면 터널 입구부 대절토 사면에서의 계측은 사면의 안전관리를 위한 귀중한 자료를 제공한다. 본 대절토

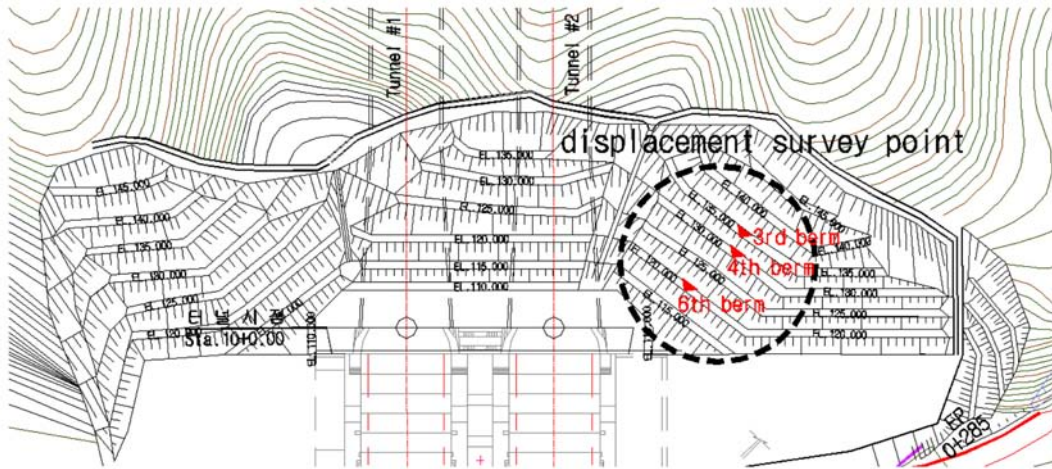


Fig. 9. Location of the displacement survey point on the berm of the slope.

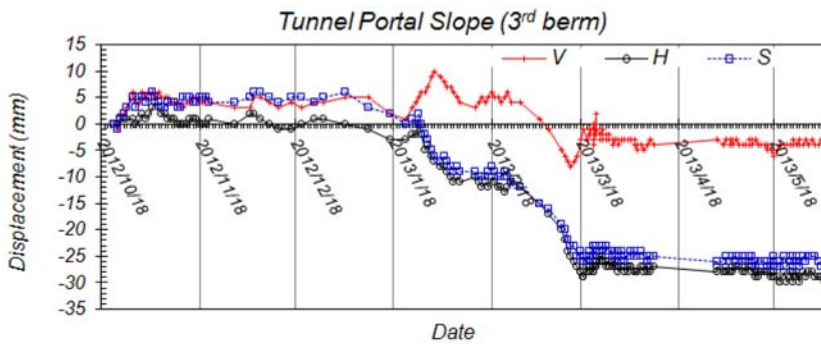


Fig. 10. Measured surface-displacement time history (3rd berm, EL. 135 m).

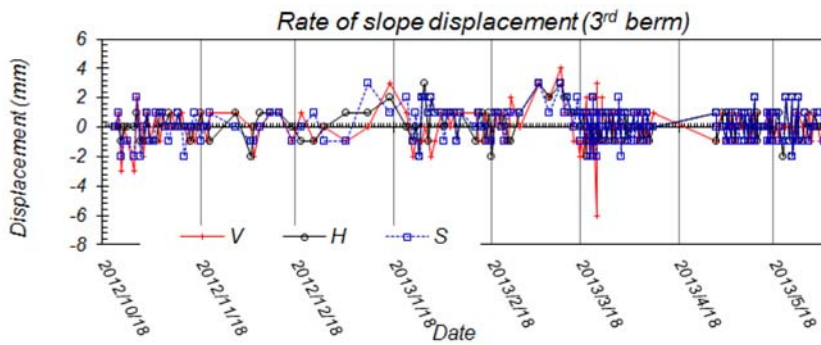


Fig. 11. Incremental displacement change rate (3rd berm, EL. 135 m).

사면에서는 소일네일링(soil nailing) 변형률계와 광과측량에 의한 변위측정계를 설치하여 운영 중에 있었으며, 관심 대상인 제2터널 우측 사면부에 설치된 변위측정계는 Fig. 9에 도시한 바와 같이 3단, 4단 및 6단 소단부

에 설치되어 있었으며, 설치 표고는 각각 EL. 135 m, 130 m, 115 m에 해당한다. 본 현장에서 시공당시 설정한 관리기준은 1차 10일간 5 mm 이상, 2차 5일간 5~50 mm, 3차 1일간 10~100 mm로 설정되어 있었다.

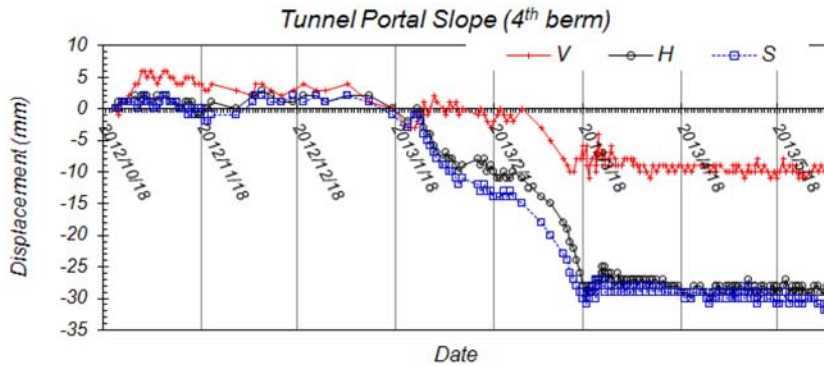


Fig. 12. Measured surface-displacement time history (4th berm, EL. 130 m).

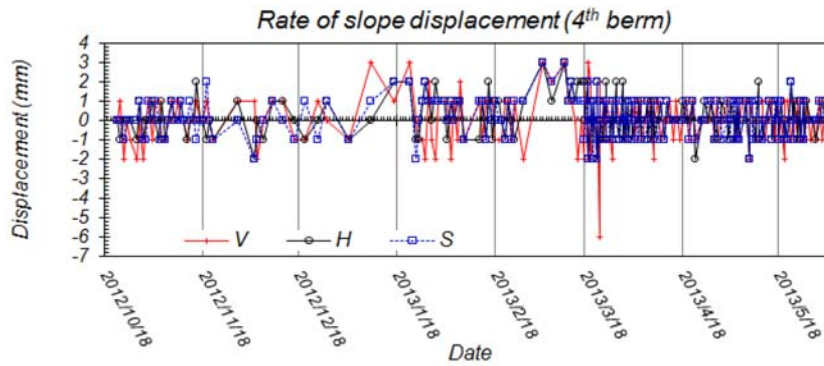


Fig. 13. Incremental displacement change rate (4th berm, EL. 130 m).

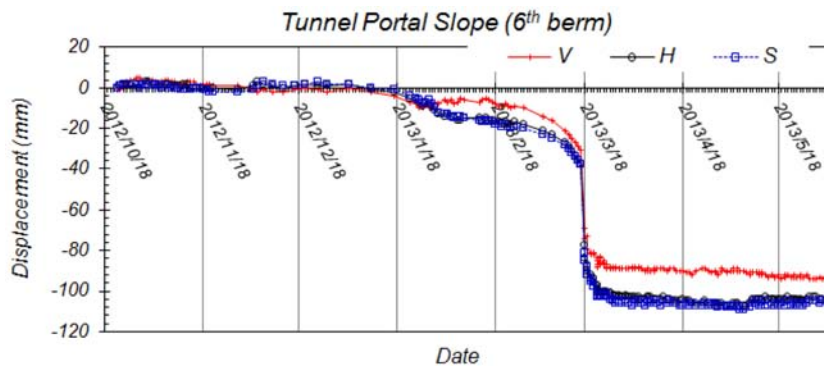


Fig. 14. Measured surface-displacement time history (6th berm, EL. 120 m).

Fig. 10~15는 본 현장에서 유입부 우측 사면 각 소단부에 설치된 광파측량 계측자료(accumulated) 경시변화도(시간경과에 따른 변위값의 변화도)와 계측자료의 측정단위 기간 별(incremental) 변위증감 속도를 보여주고 있다. 여기서 측정단위 기간은 기본적으로 일단위 계측을 기준으로 하되, 현장 상황에 따라 측정간격은 달라졌

으며, 사면유실의 사고 당일은 2013년 3월 18일로서 가독성을 위해 축 간격을 조정하여 도시하였다. 사고일 이후 측정간격은 단기적 변화 반응을 위해 수 시간으로 조정 측정되기도 하였다.

Fig. 10과 Fig. 12의 3단과 4단 소단 경시변화 자료로 볼 때, 설치 표고가 상대적으로 높음에도 불구하고

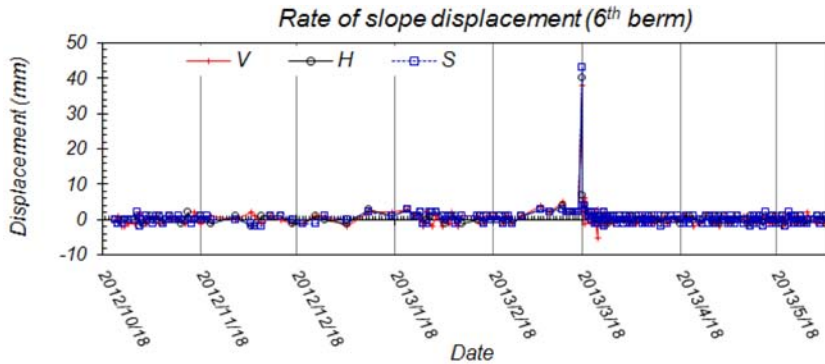


Fig. 15. Incremental displacement change rate (6th berm, EL. 120 m).

Table 1. In-situ boring status in the tunnel portal.

Boring ID	Location	Depth	Remark
HTB-1	#2 tunnel inlet	25.0 m	Horizontal boring NX size
HTB-2	#1 tunnel inlet	25.0 m	
BTB-1	#2 tunnel slope	20.0 m	

2013년 1월 24일 이후 사고일(2013.03.18.)까지 지반변형은 꾸준히 증가하고 있었음을 볼 수 있다. Fig. 14의 6단 소단 측정자료는 설치 표고가 유실 사면에서 가장 가까운 위치로서, 상당히 분명한 변위량 증가 유형을 보여준다. 사면유실 사고 당일(2013.03.18.)을 중심으로 EL. 120 m의 6단 소단에 설치된 변위계의 경시변화 자료가 급격히 변위증가를 동반함으로써 사면 변형이 빠른 속도로 진행되었음을 알 수 있다(Fig. 14).

Fig. 11, 13, 15에서는 3단, 4단, 6단 소단부 설치 측정점에 대한 측정기간 단위 변위 증가속도를 도시하였다. 6단 소단부 경시변화도를 제외하고는 단위 변위 증가속도는 분명한 유실 전 징후를 포착하기가 쉽지 않음을 볼 수 있다. 그러나 3단과 4단의 단위 변위 증가속도에서 3월 1일 이후 계측자료를 상세히 살펴보면, 변위 증가속도가 이전의 기간에 비해 상대적으로 빠름을 알 수 있으며, 이러한 유형은 6단 단위 변위 증가속도 변화도에서 보다 두드러진다. 현재 사면붕괴를 유발할 수 있는 계측 관리기준 설정을 위한 정량적인 증가율을 설정하기는 단일현장의 특성 상 무리가 있으나, 향후 연구에 유용한 참고자료가 될 것으로 판단된다.

Fig. 10~15에서도 알 수 있듯이 계측 안전관리를 위한 경시변화분석은 측정기간 단위 변위 증가속도 자료보다는 누적 변위 경시변화도가 보다 분명한 자료를 제공함을 알 수 있다. 따라서 현재의 시공 중 대절토사면

의 계측 안전관리에 일반적으로 활용되는 일간 변위증가량 설정보다는 누적 변위경시변화도 분석을 통한 누적 변위증가를 추세분석이 보다 효과적일 수 있을 것으로 판단된다.

본 계측분석을 통하여 하부 암사면의 유실은 유실면 상부 인접 소단 및 사면의 변형에도 영향을 미쳤으며, 사고일 이전의 점진적인 변위 증가(기울기 증가추세 지속)를 통해 사면 변형이 이미 진행되고 있었을 것으로 판단되며, 결정적으로 강우에 의한 사면의 포화는 사면 유실에 지배적인 영향을 미쳤을 것으로 검토되어, 향후 시공관리에서 계측의 중요성을 간과할 수 없을 것으로 판단되었다.

시추조사

보다 정확한 사면 유실 원인을 파악하기 위하여 붕괴된 암사면과 제2터널 갱구부를 중심으로 유실 전 시추조사(2공, HTB-1, HTB-2) 및 유실 후 시추조사(1공, BTB-1) 공에 대해 암반 특성을 파악하였다. 조사 위치 및 심도, 규격은 다음 Table 1 및 Fig. 16과 같다.

시추조사 검토 결과, 터널 #1, #2번 입구부의 암질상태는 암반 분류 상 연암으로 확인되었고, 풍화정도는 상당히 심한 편에 속하였으며, 절리면을 따라 철산화물, 지하수 유동흔적, 점토 충전물 등이 확인되어, 직접적인 파괴의 원인을 제공하였을 것으로 추정되었다.

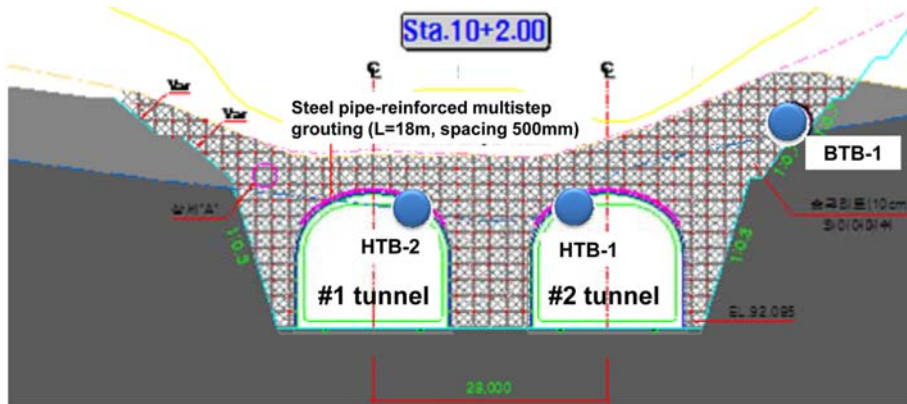


Fig. 16. Location of horizontal in-situ boring.



Fig. 17. Cavity concrete filling and counterweight fill construction (4 days after the slope failure).

제1터널 선진수평보링(HTB-2) 결과 코어회수율은 70~100%, RQD는 23~75%, RMR 등급은 28~46(IV~III)으로 평가되었고, 주로 편마암의 연암으로 굴진시 단주, 장주상 코어로 회수되었다. 풍화상태는 심한 풍화에서 보통 풍화로 분류되었고, 특히 0.0~6.0 m 구간은 절리 발달구간으로 심한 균열 양상을 보였다. 제2터널 선진수평보링(HTB-1) 결과 코어회수율은 73~100%, RQD는 40~95%, RMR 등급은 33~47(IV~III)로 평가되었고, 주로 편마암의 연암으로 심한 풍화에서 보통 풍화상태를 보였고, 특히 0.0~9.2 m 구간은 전반적으로 발달된 풍화대였다. 제2터널 우측 사면부 수평보링(BTB-1) 결과, 0.0~6.0 m 구간은 편마암 풍화대로서 전반적으로 풍화가 심하여 코어 회수율 17~30%, RQD는 0%였으며, RMR은 0점으로 등급으로 분류되었다. 6~20 m 구간은 편마암 연암 구간으로서 코어회수율 55~100%, RQD는 0~73%, RMR은 16~35(V~IV)로 평가되었다.

응급복구

본 대단면 터널 입구부 사면 유실에 대한 항구복구를 시행하기에 앞서, 추가적인 사면유실 가능성에 대비하고, 항구복구의 기반을 마련하기 위해 응급복구 방안을 검토하여 시행하였다. 우선 유실된 암사면이 단순 원호 파괴나 천부 표층파괴는 아니며, 지배적인 불연속면을 따르는 일종의 평면파괴 양상을 보이고, 상부 인장균열이 발달된 소단까지의 사면 변형이 이미 진행된 상태이므로, 추가적인 붕괴 가능성이 제기되었다.

따라서 유실된 사면의 공동을 우선 충전하는 것은 필요하되, 이완된 암반의 상태를 고려할 때, 천공에 의한 프리스트레스를 가하는 공법은 추가적인 이완 및 파괴의 위험으로 지양하였다. 결과적으로, 장비 진입로를 확보하고, 사면 이완 하중의 저항력 증대를 위해 외부에서 유실면 안쪽으로 채움재를 충전하는 방식의 콘크리트 충전 및 압성토 공법을 응급복구 방안으로 결정, 시행하여 소기의 성과를 거두었다(Chun and Shin, 2004; Fig. 17).

항구복구

본격적인 항구복구 방안 마련을 위해 관련 전문가 기술검토를 포함하여, 사면안정 검토, 터널 안정성 검토 등을 다각도로 시행하였다. 최종적으로 결정된 항구복구 방안은 사면 보강 측면과 터널의 안정성 확보 측면으로 나누어 계획하였다. 사면보강 방안으로는 현장여건을 고려하여, 상대적으로 암사면의 안전을 확보와 시공성 및 경제성이 양호한 편인 격자블럭 및 영구앵커 보강으로 결정하였다. 터널의 안정성 확보를 위해서는 사면유실이

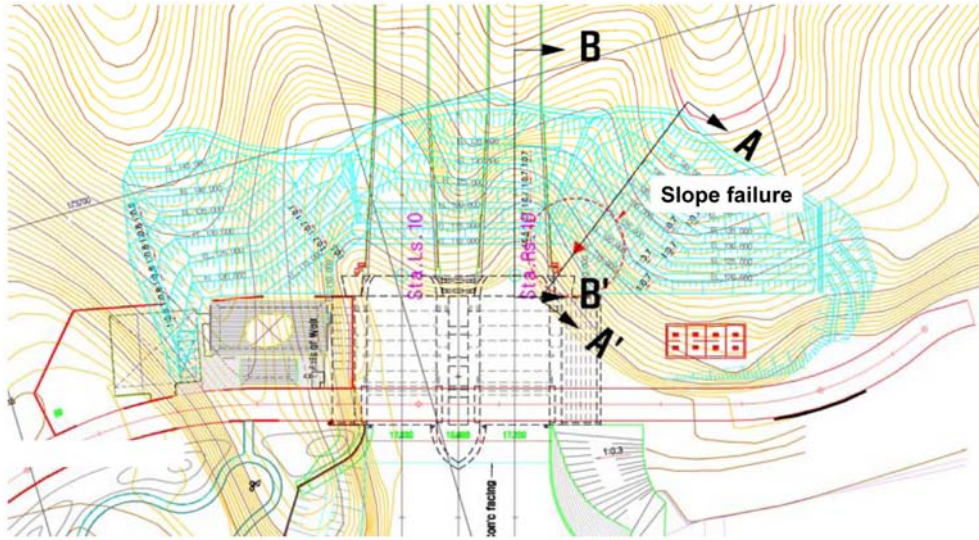


Fig. 18. Selected sections for slope stability analyses.

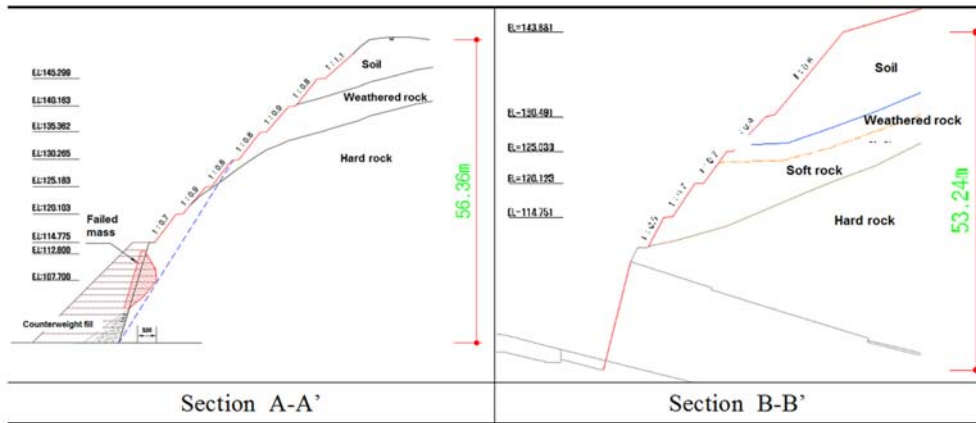


Fig. 19. Cross-section used for slope stability analyses.

터널의 안정성에 미치는 영향이 미미할 것으로 판단되었으나, 암반이완하중에 따른 잠재 영향을 고려하여 계측을 강화하고 국부적 이완대 그라우팅 등의 조치 계획을 수립하였다.

사면안정 검토

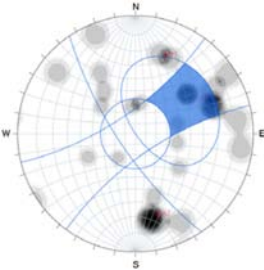
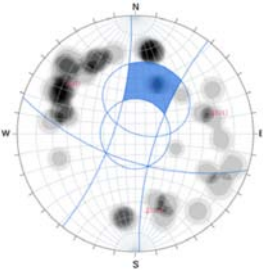
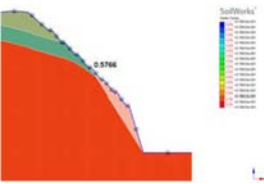
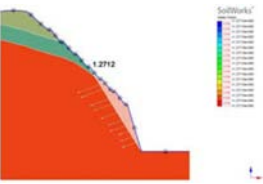
기존 사면에 대한 안정 검토는 사면유실이 발생한 우측 사면부(Fig. 18 A-A' 단면)와 배면 사면부(Fig. 18 B-B' 단면)에 대하여 평사투영해석 및 한계평형해석을 수행하였다. 시추조사공 HTB-1 및 BTB-1을 바탕으로 지층의 구성현황을 풍화토, 풍화암, 연암층으로 구분하

였다. 사면의 높이는 각각 약 56m와 53m에 이른다. A-A' 단면의 경우, 최상부층인 풍화토의 두께는 약 12.05m의 분포를 보이고 있으며, 풍화토층 하부에 풍화암층이 6.3m로 분포함을 확인하였다. 비탈면내에는 F1 (N56W/80SW)의 단층 및 습곡구조의 형태로 열리계적이 형성되어 있다. 사면 경사는 토사층 1:0.8~1.1, 풍화암층 1:0.8~0.9, 발파암 1:0.3~0.7에 해당하였다(Fig. 19). B-B' 단면의 경우, 최상부층인 풍화토의 두께는 약 17.75m의 분포를 보이며, 풍화토층 하부에는 풍화암층이 2.8m로 분포하고 있다. 사면의 경사는 토사층 1:0.8~0.9, 풍화암층 1:0.7~0.9, 발파암 1:0.3~0.7에 해당

Table 2. Material properties used for slope stability analyses.

Layer	Unit weight (kN/m ³)	Cohesion (MPa)	Friction angle (°)
Weathered soil	20.0	20	30
Weathered rock	21.0	32	33
Soft rock	23.0	350	31

Table 3. Result of slope stability analyses based on joint orientation.

Method	Type	Section A-A' (with rainfall)	Section B-B' (with rainfall)
Stereographic projection analysis	Slope direction	73/233	63/198
	Main joint set	Set1 : 65/245 Set2 : 71/345 Set3 : 70/201	Set1 : 70/126 Set2 : 68/351 Set3 : 68/256
	Planar failure	Yes (for 1:0.7 slope)	Locally Yes (for 1:0.5 slope)
	Overturning	Locally Yes	Locally Yes
	Wedge failure	Yes	Yes
	Result for planar failure		
Limit equilibrium analysis	Wedge failure	No (FS = 2.01 > 1.2)	No (FS = 1.56 > 1.2)
	Planar failure	Yes (FS = 0.58 < 1.2)	-
	Result for planar failure	 before reinforcement	 after reinforcement

하였다(Fig. 19).

사면안정 검토에 적용한 허용안전율은 일반적인 국내 깎기 비탈면의 기준(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2011)을 적용하여, 건기시 1.5, 우기시 1.2, 지진시 1.1로 채택하였다. 지반의 강도정수는 기 설계된 해당 현장의 지반조사보고서의 자료를 다음 Table 2와 같이 적용하였다. 지반의 강도정수의 산정에 있어, 실제 거동을 지배하는 암반층의 불연속면 강도정수는 불확실성을 내재하고 있으므로, 문헌조사에 의한 산정(Barton, 1973), 역해석을 통한 불연속면 지반정수 산정

(Korea Expressway Corporation, 1997), 절리면 전단시험에 의한 강도정수 산정, 경험식에 의한 강도정수 산정 등 다양한 방법을 동원하여 검토하였으며(Kyeryong Construction Industrial co., 2013), 결과적으로 Table 2와 같은 강도정수를 보수적으로 선택하여 안정해석에 적용하였다.

불연속면 조사결과에 기반한 평사투영해석 및 한계평형해석 결과는 다음 Table 3과 같으며, 안정성 확보를 위한 보강이 필요한 것으로 판정되었다. 결과적으로 터널 배면 사면부는 췌기파괴에 대하여 불안정한 상태로

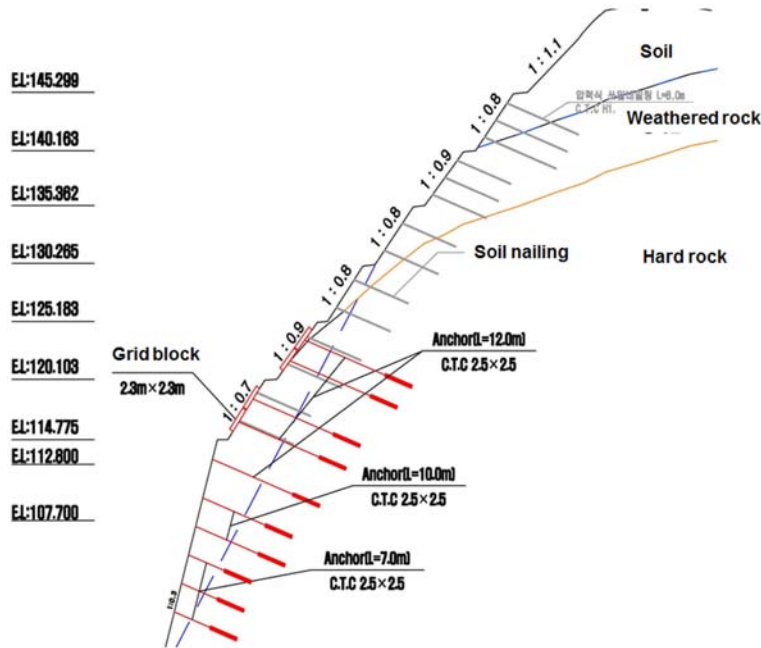


Fig. 20. Cross-sectional view of slope stabilization using a grid of anchor blocks. Note that the grid block spacing is 2.3 × 2.3 m.

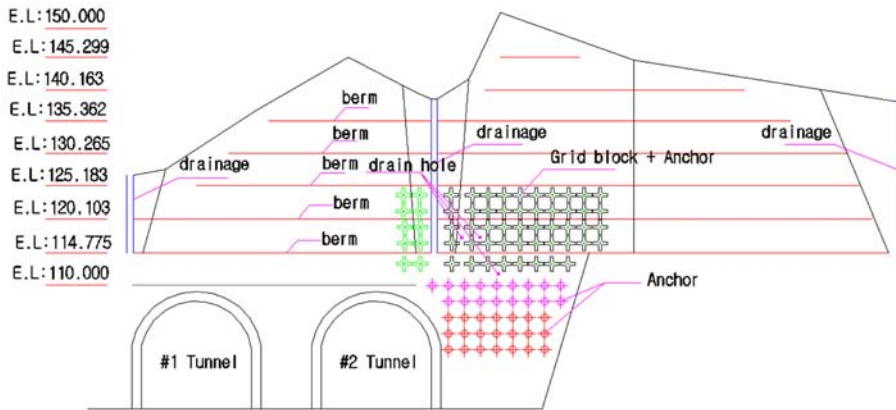


Fig. 21. Front view of the slope stabilization using grid anchor-blocks.

나타났으며, 평면 및 전도파괴에 대하여도 국부적으로 불안정할 수 있는 것으로 나타났으나, 사면의 연직고와 지표조사를 바탕으로 그 영향은 크지 않은 것으로 판단되었다. 그러나 터널 우측 사면부의 경우, 평면파괴 예상 불연속면의 한계평형해석결과 불안정한 상태로 나타났으며, 보강대책공법이 필요한 것으로 나타났다.

보강공법 선정

본 암사면 유실 현장에 대한 항구복구 보강공법의 적

정한 채택을 위해 활동력을 감소시키는 공법들과 저항력을 증대시키는 공법들을 종합적으로 검토하였다(Korea Expressway Corporation, 1997; Abramson et al., 2002). 활동력을 감소시키는 공법으로는 압성토, 사면 경사 완화, 활동토체 일부 제거 등을 검토하였으며, 저항력을 증가시키는 공법으로는 추가 soil nailing, rockbolt, 억지말뚝, 지중 앵커 공법, 옹벽공법, tension net 공법 등을 검토하였다.

종합적인 검토결과, 최종적으로 불안정 사면부에 대

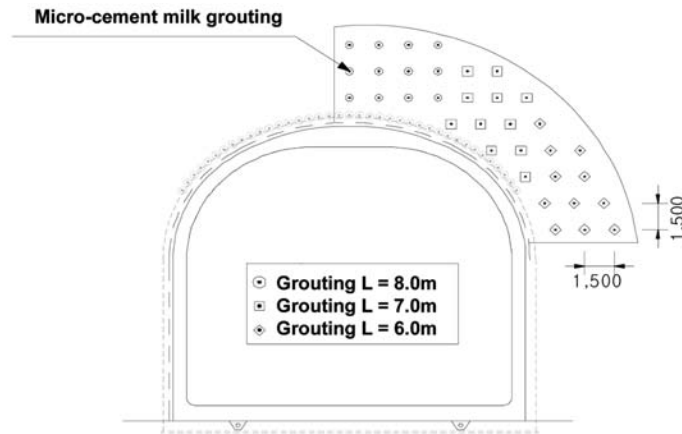


Fig. 22. Grouting applied around the No. 2 tunnel crown area.



Fig. 23. Site landscape after ultimate remediation using grid anchor-blocks and tunnel grouting.

하여 격자블럭 + 영구앵커 공법을 선정하였으며, 터널 내부 안정화를 위하여 추가적인 락볼트 + 그라우팅 공법을 선정하였다(Fig. 20~22). 본 현장의 경우, 대절토 사면의 지반이완이 이미 발생하였고, 연쇄적인 표토 토층부의 붕괴를 방지할 필요가 있으므로 보강효과가 확실한 앵커 공법이 필요하였다. 활동체 제거를 위한 경사완화 시비탈면 보강공 및 식생공이 제시공 되어야 하며, 인접부(갱구부 배면)와 접속부 처리가 곤란하였다. 계단식옹벽과 영구앵커의 조합은 주로 대규모 단층파쇄대가 발달한 경우에 적용되며 공사비가 고가이고 시공시간이 길어지는 단점으로 배제하였다. 따라서 기존 보강체(소일네일링)의 유용이 가능하며 공사시간이 상대적으로 빠른 격자블럭과 영구앵커 공법을 적정 공법으로 선정하였다.

사면 보강 공법은 공사 중 사면 이완의 우려가 있으므로 시공순서를 신중히 결정하고, 계측기 추가 설치 및

상시 모니터링을 강화하도록 조치하였다. 터널의 경우, 사면유실에 따라 국부적인 영향을 받은 것은 사실이나, 내공변위가 확장되지 않고 있어 터널 안전성은 문제가 없을 것으로 판단되었으나, 국부적인 변형 방지를 위해 2터널 우측 상반부에 대한 채움 그라우팅 및 측벽 균열부 락볼트 + 숏크리트 보강이 적절한 것으로 검토되었다. 그라우팅은 암반보강 개념보다는 이완부 일체화(변위 억제) 개념으로 정밀시공하고, 일반 시멘트보다는 마이크로 시멘트가 적합하다는 결론을 도출하였다. 터널 굴착 시 발파진동의 최소화(분할발파, 지발당 장약량 축소, 라인 드릴링) 및 라이닝 조기 시공이 필요한 것으로 검토되었다.

보강대책 공법 적용 후 사면 안정성 검토 결과, 건기시, 우기시, 지진시 모두 안정하였으며, 보강공법의 규모와 설계는 적정한 것으로 예측되었다. 사면과 터널의 항구복구 적용 공법 모식도는 다음 Fig. 20~22와 같다.

항구복구 시행 결과

본 현장의 2터널 유입부 대절토 사면은 항구복구 공법으로 격자블럭 + 영구앵커 공법을 적용하여 보강 완료하였으며, 터널 내 우측 상단부는 추가적인 락볼트 및 그라우팅 보강을 성공적으로 완료하였다. 또한 추가적인 계측기 설치(사면부 표면침하계 4개소 및 지중경사계 1개소 설치, 터널 내 내공변위 및 천단변위 계측) 및 분석을 통해 보강 후 안정성을 확인할 수 있었다. 항구복구를 완료한 뒤에는 후속 공정을 위해 응급복구 시 시공하였던 압성토를 제거하였다. 항구복구 적용 후 현장의 전경은 다음 Fig. 23과 같다.

결 론

대단면 터널의 입구부 대절토 사면은 표층의 지하 풍화 및 응력의 불균형, 불연속면의 선택적 분포 등으로 안정성에 취약한 경우가 많다. 본 사례연구에는 직경 12.8m의 대단면 병렬터널 입구부 대절토 암사면의 경우 후 유실사고 사례와 현장조사, 원인분석, 응급복구 및 항구복구 대책 마련과 시행결과 등을 제시함으로써 학문적으로 유용한 참고자료를 제공하고, 유사 현장의 설계와 시공에 기여하고자 하였다. 본 현장사례를 통하여 다음과 같은 결론을 제시할 수 있다.

(1) 본 사고현장의 대단면 터널 입구부 사면은 단일 암석의 낙하로 확인되는 파괴 시작부터 사면유실 종료까지 약 6초가 소요된 급속 암반 평면파괴 유형을 보였다. 현장조사 결과, 다양한 불연속면이 혼재하였으며, 절리면 사이에 전단력의 감소를 초래할 수 있는 점토 협재물이 광범위하게 분포함으로써 절리면 전단강도의 저하가 전체 파괴를 지배하였을 것으로 추정되었으며, 따라서 불연속면의 점토 협재물이 분포하는 암사면 현장의 경우 강우 시 급속파괴에 대한 철저한 대비가 필요할 것으로 판단된다.

(2) 사고 당시 유입부 우측 비탈면에 설치된 광파측량 계측자료에 의하면 사고일 이전, 경시변화에 있어 급격한 변위증가속도를 보였으며, 본 자료는 향후 합리적인 사면 변형의 위험성 결정에 참고자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 소단부의 측정단위 별 변위 증가 속도 경시변화도보다는 누적 변위 경시변화도 분석이 보다 분명한 계측 안전관리에 관한 참고자료를 제공하는 것으로 나타났다.

(3) 시추조사 검토결과, 연암의 풍화정도가 상당히 심한 편에 속하였으며, 절리면을 따라 철산화물, 지하수 유동흔적, 점토 충전물 등이 확인되어, 직접적인 파괴의 원인을 제공하였을 것으로 추정되었다. 알칼리장석이 풍부한 화강 편마암 구간은 특히 상대적으로 풍화에 약한 특성을 보였고, 풍화심도도 깊은 것으로 파악되었다.

(4) 유실된 암사면은 지배적인 불연속면을 따르는 평면파괴 양상을 보이고, 상부 인장균열 발달로 추가적인 붕괴 가능성이 제기되어, 우선적인 응급복구 방안으로 사면 공동을 우선 충전하되, 장비 진입과 이완 하중의 저항을 위해 외측에서 유실면 안쪽으로 밀고 들어오는 방식의 충전 공법을 적용하여 그 유효성을 확인할 수 있었다.

(5) 항구복구 방안으로, 사면보강의 경우 상대적으로

안전을 확보에 유리하면서 경제성과 시공성이 양호한 격자볼트 + 영구앵커 공법을, 터널 안정성의 경우 추가 락볼트 및 국부적 이완대 그라우팅 공법을 적용하여 결과의 유효성을 확인하였다.

본 사례 연구를 통하여 대단면 터널 입구부 사면 안정화 설계 및 시공에 귀중한 통찰력을 제시하고, 향후 유사사례에 대한 공학적 판단근거로서 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 원고를 검토해 주신 익명의 기술자들과 연구원들께 감사드립니다.

References

- Abramson, L. W., Lee, T. S., Sharma, S., and Boyce, G. M., 2002, Slope stability and stabilization methods, John Wiley & Sons, 736p.
- Baek, Y., Koo, H. B., and Yoo, K. J., 2002, A study on the stability analysis and countermeasure of tunnel portal failure slope - in Suambo hot springs 1 and 2 tunnel failure site, The Journal of Engineering Geology, 12(4), 367-378 (in Korean with English abstract).
- Barton, N., 1973, Review of a new shear-strength criterion for rock joints, Engineering Geology, 7(4), 287-332.
- Chun, B. S. and Shin, Y. W., 2004, Application of counterweight fill to insure slope stability near the tunnel entrance, Annual Conference of the Korean Geo-Environmental Society, September, Cheongju, Korea (in Korean with English abstract).
- Collins, B. and Znidarcic, D., 2004, Stability analyses of rainfall induced landslides, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130(4), 362-372.
- Fuchsberger, M., 2008, Slope failure at a major cut for a motorway in Austria - Its cause and its stabilisation, From Research to Practice in Geotechnical Engineering, 616-625.
- Goodman, R. and Kieffer, D., 2000, Behavior of rock in slopes, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 126(8), 675-684.
- Jang, J. H., 2013, The applicability of the pressure type nailing method to prevent the collapse of the cut slope, MSc thesis, Kyunggi University, 73p (in Korean).
- Jiaoa, J. J., Wangb, X. S., and Nandy, S., 2005, Confined groundwater zone and slope instability in weathered igneous rocks in Hong Kong, Engineering Geology, 80(1-2), 71-92.
- Kim, H., Lim, D. H., Park, S. H., Yoon, H. D., Lee, H. G., and Kang, M. G., 2004, The case study of slope failure on tunnel portal, Annual Conference of the Korean Society of Civil Engineers, December 16, Seoul, Korea, 109-121 (in Korean with English abstract).
- Kim, N. Y., Kim, H. J., and Park, Y. S., 2010, A study of

- road tunnel exit slope collapse by Gneiss foliation, Annual Conference of the Korean Geo-Environmental Society, September 2-3, Seoul, Korea, 487-496 (in Korean with English abstract).
- Kim, Y. J., Lee, Y. H., Kim, S. K., and Kim, J. H., 2006, Case study on failure of rock slope caused by filling material of clay, Tunnel & Underground Space, 16(5), 368-376 (in Korean with English abstract).
- Koo, H. B., Kim, S. H., Rhee, J. H., and Kim, J. H., 2008, A case study of collapse at tunnel portal adjacent to the large cut slope, Annual Conference of the Korean Society of Hazard Mitigation, February 28, 573-576 (in English with Korean abstract).
- Korea Expressway Corporation, 1997, A study on the stabilization and protection measures (II), Research Report (in Korean).
- Kwon, O. I., Baek, Y., and Park, C. H., 2010, A case study on stability analysis of tunnel portal slope, Annual Conference of the Korean Society of Engineering Geology, April 8-9, Gyeongju, Korea, 249-253 (in Korean).
- Kyeryong Construction Industrial co., Ltd., 2013, A report on slope stabilization near tunnel portal, April (in Korean).
- Lee, J. Y., 2009, Causal factor analyses and reinforcement scheme of big cut slope failure: an example in Okcheon area, MSc thesis, Paichai University, 79p (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2011, Design guideline for slopes in construction project (in Korean).
- Na, H. S., 2013, A case study on reinforcement method for failure of rock slope, MSc thesis, Chosun University, 64p (in Korean).
- Wang, Y., 2014, The Tom Lantos tunnels at Devil's Slide Project, The longest highway tunnels in California, Challenges and Advances in Sustainable Transportation Systems, 459-466.
- Yang, H. Y., 2013, A case study on the design and construction of large cutting-slope in colluvial soil, MSc thesis, Suncheon University, 58p (in Korean with English abstract).

박동순

K-water연구원 기반시설연구소
305-730 대전시 유성구 유성대로 1689번길 125
Tel: 042-870-7611
Fax: 042-870-7619
E-mail: fulgent@kwater.or.kr

배종섭

K-water연구원 기반시설연구소
305-730 대전시 유성구 유성대로 1689번길 125
Tel: 042-870-7642
Fax: 042-870-7619
E-mail: jsoem@kwater.or.kr