터널출입구 시공에 따른 석회암 사면의 안정성 및 거동 분석

송영석^{1*} · 윤중만²

¹한국지질자원연구원 지구환경연구본부, ²신안산대학교 건설정보시스템학과

Analysis of the Stability and Behavior of a Calcareous Rock Slope During Construction of a Tunnel Entrance

Young-Suk Song^{*1} and Jung-Mann Yun²

¹Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

²Dept. of Construction Information System, ShinAnsan University

석회암 사면에서 터널 출입구를 시공하기 위하여 진입로를 개설하던 중 사면붕괴가 발생되었다. 사면의 붕괴원인을 조사하기 위하여 현장조사, 실내시험 및 수치해석을 수행하였다. 수치해석결과에 따르면 터널 출입구 진입로 개설이전 사면안전율은 1.0이상이며, 진입로 개설이후 사면안전율은 더 저하되는 것으로 나타났다. 그리고 진입로 개설이후 전단변형률 및 소성영역은 사면상부에서 하부로 전이되므로 사면활동영역이 증가되어 사면안정성을 저하시키는 것으로 해석되었다. 터널 출입구 시공을 위해서는 해당사면에 대한 안정성을 확보하여야 하므로, 대상현장의 조건을 고려하여 록볼트, 록앵커 및 FRP 그라우팅을 사면에 보강하는 것으로 결정하였다. 적용된 사면보강공법의 효과를 확인하기 위하여 현장계측을 수행하였다. 현장계측결과 사면지반의 수평변위는 매우 미소하며, 대부분 발생된 이후 다시 회복되는 탄성거동을 보였다. 그리고 록볼트 및 앵커축력은 터널굴착작업 및 장마기간에 의한 영향보다는 사면굴착작업시 영향을 가장 크게 받으며, 터널굴착작업이후 수렴하는 경향을 보이므로 대상사면은 안정한 상태를 확인할 수 있다.

주요어 : 사면붕괴, 석회암 암반사면, 사면보강공법, 수치해석, 현장계측

A calcareous rock slope failed during excavation of the slope for construction of a tunnel entrance. The slope is located at the construction site for widening highway in Yeongwol, Korea. Field surveys, laboratory tests, and numerical analyses were performed to determine the reason for the slope failure. The numerical analysis revealed that the safety factor of the slope before construction of the entrance was less than 1, and that this decreased after construction. After construction of the entrance, the sliding zone of the slope increased and slope stability decreased because the shear strain and plastic zone in the slope over the tunnel entrance showed an increase relative to the lower part of the slope. To enhance the stability of the slope for construction of the tunnel entrance, countermeasures such as rock bolts, rock anchors, and FRP (Fiber glass Reinforced Plastic) grouting were adopted in light of the field conditions. Serial field monitoring performed to confirm the reinforcing effects of the adopted countermeasures revealed a small amount of horizontal deformation of the slope soils, most of the elastic deformation that can regain its former value. In addition, the axial forces of the rock bolt and anchor were more strongly affected by slope excavation during construction of the tunnel entrance than by tunnel excavation or the rainy season, and the axial forces tended to converge after excavation of the tunnel. Therefore, we can confirm that the slope is currently safe.

Key words : Slope failure, Calcareous rock slope, Slope reinforcement method, Numerical analysis, Field monitoring

*Corresponding author: yssong@kigam.re.kr

© 2013, 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.

서론

산업 사회가 변화하면서 도시도 점차 발달되어 도시의 과밀화 현상이 나타나고, 인간생활의 편리를 위해 보다 많은 인프라 구조물의 건설이 요구되고 있다. 그리고 구조물의 규모가 증가 되어가고 있어 토지의 입체적 공간 활용도와 평면적 확장이 요구됨에 따라 열악한 환경에서 구조물 건설이 이루어지고 있다. 특히, 국토개발이 다양하게 진전됨에 따라 이에 부응한 토지수요를 충족하기 위하여 산지나 구릉지를 절개하는 사례가 빈번히 발생한다. 이로 인하여 수많은 절개사면이 생성되었고, 인명과 재산을 재해로부터 보호하기 위하여 사면안정의 중요성에 대한 인식이 강조되고 있는 실정이다.

이와 같이 절개사면을 형성하여 구조물이 건설되는 경우 절개사면에 대한 적절하지 못한 대응으로 인하여 사면활동이 시작되고 대규모 사면붕괴로 이어지면서 많은 인명과 재산상의 피해를 주게 되는 것을 종종 볼 수 있다. 따라서 지반공학적 입장에서 사면붕괴에 대한 원인을 규명하고 그 대처 방안을 마련하는 것은 매우 중요하다 할 수 있다. 효과적인 사면붕괴를 방지하기 위해서는 대상지역의 지질학적, 지형학적, 기상학적 및 지반공학적 특성에 따라 차이가 크므로 대상지역의 특성에 적합한 대책공법이 마련되어야 한다(Schuster, 1992; Hong, 1999; Ho, 2004).

최근 우리나라에서는 사면붕괴의 발생을 더 이상 방치하여 둘 수 없는 시점에 도달하였다는 인식을 가지고 각종 토목공사에서 사면붕괴 발생을 예측하고 이를 사전에 예방할 수 있는 대책공법에 대한 연구가 수행되고 있다(Kim et al., 2000; Hong et al., 2003; Chae et al., 2009; Song et al., 2009). 종래의 사면안정공법으로는 경사면을 식물이나 블록으로 피복하여 강우에 의한 세굴을 방지하는 소규모의 공법이나, 사면의 구배를 완만하게는 단순한 공법이 많이 사용되었다. 그러나 최근에 이르러서는 기후변화로 인한 집중호우의 증가로 사면붕괴의 규모가 증가되고 있으며, 이를 안정화시키기 위하여 억지말뚝, 앵커, 쏘일네일링, 옹벽 등으로 절개사면의 저항력을 증대시키는 적극적인 공법이 많이 사용되고 있다(Kang et al., 2009; Song et al., 2012).

본 연구에서는 터널 출입구 진입로를 개설하는 중에 사면붕괴가 발생된 암반사면을 대상으로 현장조사 및 수치해석을 통하여 사면붕괴 원인을 분석하고, 현장계측을 통하여 적용된 사면보강공법의 안정성을 검토하고자 한다. 현장조사를 통하여 대상사면에 대한 대표단면을 선

Fig. 1. Panoramic view of the study area.

정하고, 한계평형해석 및 유한차분해석을 수행하여 터널 출입구의 시공에 따른 암반사면의 안정성 및 거동을 분석한다. 한편 터널 출입구의 시공시 대상사면의 안정성을 확보하기 위하여 다양한 사면보강공법을 적용하였다. 대상사면에 설치된 사면보강공법의 효과를 확인하기 위하여 현장계측을 수행하였으며, 현장계측결과를 이용하여 적용된 사면보강공법의 적합성과 보강사면의 안정성을 검토하고자 한다.

사례현장

현장개요

대상현장은 강원도 영월군 남면 연당리 및 영월읍 방절리, 홍월리, 연하리에 걸쳐 수행되었던 영월-덕포간 도로확장공사의 서쪽지점에 있는 ○○터널의 종점부에 위치한 암반사면구간이다. 대상현장에서 ○○2교 지점부의 교대 및 ○○터널 종점부 출입구 사면의 시공을 위하여 진입로를 개설하던 중 2차레에 걸쳐 사면붕괴가 발생하였다. 이는 진입로 확보를 위한 사면굴착 작업시 연약한 풍화대에서 사면붕괴가 발생된 것으로 판단되며, 붕괴된 사면은 터널 출입구 시공과정에서 추가적으로 붕괴위험이 있는 것으로 판단되었다. Fig. 1은 사면붕괴가 발생된 대상현장의 전경을 나타낸 것이다.

지형 및 지질

대상현장은 차령산맥의 연변부인 영월-단양 분지의 일부로 서쪽은 도덕산(685 m), 오노산(520 m), 초로봉, 삼태산(875 m), 용산봉(943 m) 등이 N10-30° 방향의 능선이 이어지며, 남쪽은 국지산(625 m), 태하산(1027 m) 등이, 북쪽에는 시루산(685 m), 봉래산(799 m) 등이 N30-50°W 방향으로 발달하고 있다.

Fig. 2. Geological map of the study area.

전체적인 산세는 높고 험준한 고위 평탄면의 산악지에 해당되고, 서쪽으로는 지구조운동의 결과 융기 및 침식과정 중의 중간 평탄면에 형성된 산세를 이루며, 산사면은 대부분 급경사로 부분적으로 절벽을 이루기도 한다.

Fig. 2는 대상현장의 지질도를 나타낸 것이다. 대상현장의 북쪽은 상위 석탄계 지층인 홍점층이 넓게 분포하며 동남쪽에는 쥐라기 지층인 반송층이 분포한다. 그러나 대상현장과 인근지역은 주로 시대미상의 암회색 돌로마이트질 석회암으로 구성된다. 대상현장에는 크고 작은 구조대가 복잡하게 분포하지만 두가지 특징적인 구조대를 파악할 수 있다. N10-30°E 방향의 단층대와 습곡의 반복으로 삼태산층과 홍월리층이 교대로 나타나며, 영월읍 부근을 지나가는 N20-30°E 방향의 단층은 서쪽의 고생대와 동쪽의 중생대 반송층을 가르는 것으로 가장 큰 규모로 나타난다. 그리고 대상현장의 지층은 차별 풍화작용으로 사면이 고르지 못하여 요철이 두드러지며, 이로 인하여 돌출형(overhang) 암괴가 관찰되는데 이러한 특성은 담회색의 이질석회암에서 주로 관찰된다.

Fig. 3. Cross-section (A-A') through the slope.

지반조건

대상현장의 사면경사는 45°에서 83°의 범위에 있으며,

대부분의 사면경사가 60° 이상이므로 매우 가파른 것으로 조사되었다. 대상현장의 사면 내부의 암질 및 지층변화를 조사하기 위하여 사면붕괴가 발생된 터널 출입구 주변에서 수직방향 1개소, 수평방향 2개소를 선정하여 시추조사를 수행하였다. Fig. 3은 대상현장의 AA'구간 (Fig. 1 참조)에 인접한 지층구조를 나타낸 것이다. 시추조사결과 대상현장의 지층은 지표면으로부터 봉적토층, 연암층, 보통암층 및 연암층의 순서로 구성되어 있다. 상부 봉적토층은 사면붕괴로 인하여 형성되었으며, 지표면으로부터 2.5-3.8 m 깊이에 존재하고 있다. 연암 및 보통암은 봉적토층의 아래에 위치하고 있으며, 연암층의 경우 RMR 값은 24-31 범위를 갖는다.

사면안정해석

지반강도정수 산정

대상현장의 연암층과 보통암층의 공학적 특성을 파악하고 사면안정해석시 적용될 강도정수를 산정하기 위하여 다양한 현장시험과 실내시험을 수행하였다. Table 1은 지반의 강도정수를 산정하기 위하여 본 연구에서 수행된 시험종류를 나타낸 것이다. 현장시험으로 공내재하시험을 수행하였으며, 실내시험으로 일축압축시험, 삼축압축시험, 절리면 전단시험 등을 수행하였다.

암반의 변형계수를 산정하기 위하여 실내시험결과, 현장시험결과 및 시추조사시 RMR 값을 활용하였으며, 현장시험인 공내재하시험으로부터 구한 값을 적용하였다.

암반의 강도정수(점착력 및 내부마찰각)도 실내시험결과와 시추조사시 RMR 값을 활용하였으며, Kim (1993)에 의해 제안된 RMR 값을 이용한 강도추정식으로 구한 값을 적용하였다. 절리면의 전단강도는 절리면전단시험 결과의 값을 활용하였다. 이와 같이 실내시험결과, 현장시험결과 및 RMR 값을 활용하여 사면안정해석을 위한 지반강도정수를 산정하였다. Table 2는 본 연구에서 사용된 지반강도정수를 나타낸 것이다.

해석단면 선정

일반적으로 터널 출입구 사면은 갱문의 주향과 직각 방향으로 형성되는 경우가 많으나 대상현장에 시공되는 터널의 경우는 터널 축의 선형이 N45W 방향으로 사면의 주향(EW 방향)과 45° 정도의 경사를 이루고 있다. 따라서 상부 자연사면의 대표적인 주향은 EW 방향으로 사면은 전반적으로 남측방향으로 경사를 나타내고 있으며, 진입로 굴착시 붕괴된 사면의 주향 역시 EW 방향을 나타내고 있다.

이와 같은 지형적인 특성을 감안할 때 사면안정성 검토단면은 경사가 가장 심하게 발달한 NS 방향을 설정하는 것이 타당하며, 대상현장을 대표할 수 있는 위치의 사면을 해석단면으로 검토하여야 한다. 따라서 해석단면은 붕괴사면의 횡단면을 대표할 수 있는 Fig. 1에서의 AA'단면을 선정하였다.

Fig. 4는 본 연구에서 선정된 해석단면을 나타낸 것으로, 앞서 설명한 지층구조와 지형특성을 토대로 선정하

Table 1. Tests for measuring geotechnical properties.

Test		Geotechnical properties
Boring test	RQD, RMR	deformation modulus, strength parameter, Poisson's ratio
Field test	Pressure meter test	deformation modulus
Laboratory test	Uniaxial compression test	uniaxial compression strength, Poisson's ratio
	Triaxial compression test	strength parameter
	Shear test on rock joint	strength parameter of joint
	Specific gravity test	unit weight

Table 2. Geotechnical properties for numerical analysis.

Rock type	Elastic modulus (t/m ²)	Poisson's ratio	Internal frictional angle (°)	Cohesion (t/m ²)	Unit weight (t/m ³)
Colluvial soil	4.2×10^3	0.32	27	1	1.8
Soft rock	3.5×10^4	0.25	36	30	2.5
Medium rock	1.6×10^5	0.23	42	190	2.7
Joint	-	-	21	3.4	2.0

Fig. 4. Representative cross-section for slope stability analysis.

였다. 연암사이에 위치하고 있는 보통암의 경우 해석단면을 단순화시키기 위하여 연암으로 간주하여 해석을 수행하였다. 실제로 표시된 부분은 붕괴후 단면을 나타낸 것이고, 점선으로 표시된 부분은 붕괴전 단면을 나타낸 것이다. 한편 지층구조는 Fig. 3의 조사결과를 토대로 선정하였다.

한계평형해석

해석단면의 중앙부 즉 Fig. 4에서 붕괴사면구간 및 붕괴사면구간은 진입로 굴착으로 인하여 전단저항력이 저하된 암반블록이 불연속면을 따라 사면붕괴가 발생된 구간이다. 현장조사결과 불연속면에서 절리간격은 15-27 cm, 연속성은 0.3-5.0 m, 간극은 0.25-2 mm 이상인

것으로 나타났다. 해석단면의 중앙부 사면의 경우 불연속면이 45-76°의 경사를 이루고 있으므로 활동면의 경사를 상기 범위 내에서 변화시키면서 한계평형해석을 수행하였다. 이와 같이 블록활동에 대한 한계평형해석을 위하여 TALREN 프로그램을 사용하였으며, 터널 출입구 주변 진입로 개설 전후의 사면안정해석을 수행하였다. Fig. 5는 해석단면 중앙부 사면에서 터널 출입구 주변 진입로 개설 전후에 대한 한계평형해석결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 터널 출입구 진입로 개설전 사면안전율은 0.95이고, 불연속면을 따라 사면활동면이 형성되며 실제 붕괴면까지 사면활동이 발생하는 것으로 나타났다. 한편 터널 출입구 진입로 개설후 사면안전율은 0.82이며, 불연속면을 따라 사면활동면이 형성되며 진입로 개설위치에서 사면붕괴가 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 진입로 개설후 사면안전율이 저하되며 해석단면에 대한 사면안전율이 1.0이하로 나타났으므로, 실제 해석단면에 대한 사면붕괴현상을 잘 묘사하고 있음을 알 수 있다.

유한차분해석

해석단면에서 사면의 거동을 평가하기 위하여 유한차분해석을 실시하였다. 유한차분해석시 암반사면에 존재하는 불연속면의 방향성을 고려하기 위하여 편재절리모델(ubiquitous joint model)을 적용하였다. 편재절리모델은 불연속면의 미끄러짐 및 파괴를 고려한 탄소성 등가연속체 모델로서 절리면의 마찰각(joint friction angle)과 방향각(joint angle)의 변화에 따른 미끄러짐 소성영역(slip zone)을 평가할 수 있다. 편재절리모델에서 암반에 대한 응력계산은 일반 연속체 해석과 동일하나 파괴기준은 편재절리군의 좌표계에 대한 응력으로 변환하여 적

Fig. 5. Results of limit equilibrium analysis considering the access road construction, showing before (a) and after (b) construction of the road.

Fig. 6. Analysis mesh for finite difference analysis.

(a) before constructing the access road

(b) after constructing the access road

Fig. 7. Shear strain increment induced by construction of the access road, showing before (a) and after (b) construction of the road.

용하며 이 때 발생하는 소성에 대한 응력보정이 추가적으로 이루어진다. 편재절리모델 적용시 절리에 대한 입력값은 절리면 전단시험으로부터 구한 강도정수를 적용하였으며, 절리의 경사는 현장지표지질조사결과를 적용

(a) before constructing the access road

(b) after constructing the access road

Fig. 8. Development of the plastic zone induced by construction of the access road, showing before (a) and after (b) construction of the road.

하였다. 이와 같이 유한차분해석을 위하여 FLAC 프로그램을 사용하였다.

해석단면구간에 대한 현장지표지질조사 결과를 토대로 편재절리를 고려한 유한차분해석을 수행하였다. 현장지표지질조사 결과 해석단면구간에서의 불연속면 경사는 65°이므로 이 값을 편재절리군의 경사로 적용하였다. 해석단면에 대한 유한차분망(Mesh), 경계조건 및 지층구분은 Fig. 6에 나타내었다.

터널 출입구 주변 진입로 개설 전후에 따른 유한차분해석을 수행하였으며, Fig. 7은 유한차분해석 결과 가운데 전단변형률을 이용하여 진입로 개설 전후 사면활동형상을 예측한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 진입로 개설 전 전단변형률은 붕괴사면의 상부에 집중되어 나타나고 있으나, 진입로 개설 후 전단변형률은 사면상부에서 하부로 발달하므로 사면활동영역이 증가되어 사면안정성을 저하시키는 것으로 나타났다. 또한 Fig. 8은

Fig. 9. Slope deformation after excavation for the access road.

진입로 개설 전후 사면에서의 소성영역 발생위치를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 진입로 개설 후 사면 내에서 소성영역이 발달되고 있으며, 소성영역이 발달되면서 사면활동면이 발생됨을 예상할 수 있다. 한편, Fig. 9은 진입로 개설 후 대상사면에서 발생하는 지반 변위를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 진입로 개설 후 굴착면 상부사면에서 약 4cm의 지반변위가 발생하는 것으로 나타났다. 그리고 진입로 개설로 인하여 굴착면 상부사면의 변위는 전체적으로 소성영역이 발생하는 구간에서 아래로 이동함을 알 수 있다.

사면보강 및 현장계측

사면보강공법 선정

사면보강공법을 방지능별로 안전율유지법과 안전율증가법의 두가지로 크게 구분할 수 있다. 안전율유지법은 강우 등과 같은 물의 영향에 의하여 사면의 안전율이 감소하는 것을 방지하는 방법이다. 예를 들면 식생공, 블록공, 슛크리트, 배수공 등을 들 수 있다. 한편 안전율증가법은 불안전하게 판단된 사면을 대상으로 말뚝, 앵커, 네일 등의 역학적인 저항특성을 이용하여 사면의 안전율을 증가시켜 주는 방법이다. 전자는 산사태를 발생시키는 직접적 유인으로부터 사면을 보호하는 소극적 대책방법이라 할 수 있으며, 후자는 산사태의 잠재적 취약성을 개선시키려는 적극적 대책방법이라 할 수 있다 (Hong et al., 2003).

전술한 바와 같이 터널 출입구 주변 진입로를 개설하는 도중 사면이 붕괴되었으며, 해당사면에 대한 안정성을 확보하기 위하여 적절한 사면보강공법이 마련되어야 한다. 사면의 안전율을 증가시키기 위한 방법으로 사면

Fig. 10. Earth retention system applied to the failed slope.

절취공법을 고려할 수 있으나 대상사면의 절취규모와 환경적인 측면을 감안할 때 경제성 및 시공성이 좋지 않은 것으로 나타났다. 특히 사면절취시 장비의 진입을 위한 임시도로 개설이 불가피하며, 임시도로 개설시 추가적인 사면붕괴의 위험성과 자연훼손 등의 문제가 발생할 수 있다. 또한 암반 굴착에 따른 발파진동으로 인하여 불연속면에서의 추가적인 붕괴가 발생할 수 있다. 그리고 대규모의 사면절취로 인하여 증가되는 사토처리문제, 절취된 사면의 불연속면에 대한 추가적인 보강 등을 고려하면 공사비가 크게 증가될 것으로 예상되었다. 따라서 대상사면을 안정화시키기 위하여 현상태를 유지하면서 적절한 보강재를 적용함으로써 사면안전율을 증가시키는 방법을 대책공법으로 채택하였다.

Fig. 10은 대상사면에 적용된 보강공법을 개략적으로 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 대상사면에 대한 주요 보강공법으로는 록볼트, 록앵커, FRP 그라우팅을 적용하였다. 대규모 보강이 요구되는 경우는 록앵커, 낙반 등 부분적인 보강을 위해서는 록볼트를 적용하였으며, FRP 그라우팅은 록앵커의 적용이 곤란한 터널 주변과 일시적인 보강에 적용하는 것으로 하였다.

록볼트, 록앵커, FRP 그라우팅 등으로 보강된 사면을 대상으로 TALEN을 이용한 한계평형해석과 FLAC을 이용한 유한차분해석을 수행하였다. Fig. 11은 보강공법이 적용된 사면을 대상으로 해석한 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 한계평형해석결과를 살펴보면 보강된 사면의 안전율은 1.37로 소요안전율인 1.3을 만족하는 것으로 나타났다. 그리고 유한차분해석결과를 살

(a) Limit equilibrium analysis

(b) Finite difference analysis

Fig. 11. Results of numerical analysis of the slope after reinforcement by the earth retention system: limit equilibrium analysis (a), and finite difference analysis (b).

퍼보면 진입로 개설을 위한 굴착면 상부에서의 지반변위는 3.8cm에서 0.8cm로 감소하는 것으로 나타났다 (Yooshin Engineering Corporation, 2001). 따라서 록볼트, 록앵커, FRP 그라우팅 등으로 보강된 사면은 터널 출입구 주변 진입로 개설후에도 안정성을 유지할 것으로 판단된다.

현장계측

본 연구에서는 보강사면 및 보강재의 거동을 측정하고, 사면에 적용된 보강공법의 안정화 효과를 확인하기 위하여 현장계측을 수행하였다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 대상사면에 변형률계, 하중계 그리고 경사계를 설치하였다. 먼저, 사면의 상부에 설치된 록볼트의 축력을 측정하기 위하여 변형률계를 설치하였다. 그리고 사면의 중앙부에 붕괴된 사면을 안정시키기 위하여 설치된 록앵커의 축력을 측정하기 위하여 하중계를 설치하였다. 또한 사면지반의 변형을 측정하기 위하여 록앵커가 설치된 사면 중앙부의 배면에 인접하여 경사계를 설치하였다.

Fig. 12. Horizontal deformation of the slope with depth.

현장계측 결과 및 고찰

사면지반의 수평변위

Fig. 12는 대상사면의 중앙부 경사계 설치위치에서 깊이에 따른 사면지반의 수평변위를 측정한 결과이다. 그림을 살펴보면 최대수평변위는 지표면에서 발생되고 있으며, 지표면으로부터 GL(-)30m 깊이까지 전체적으로 수평변위가 발생되고 있는 것으로 나타났다. 그러나 사면지반에서 발생한 최대수평변위는 약 5 mm 정도로 매우 미소한 값을 나타내므로, 사면지반은 안전한 상태에 있음을 알 수 있다.

Fig. 13은 시공단계에 따른 사면지반의 최대수평변위를 나타낸 것이다. 그림을 살펴보면 초기 사면굴착 및 정지작업시 사면지반의 수평변위가 증가하며, 터널굴착 작업시와 장마기간에 수평변위가 급격하게 증가하였음을 알 수 있다. 먼저, 사면굴착 및 정지작업시 사면지반의 수평변위는 약 1 mm가 발생되었고, 터널굴착 작업시 사면지반의 수평변위는 약 2.5 mm가 발생되었으나 이후 약 1개월 동안 약 2 mm의 수평변위가 회복되었다. 그리고 장마기간 중에도 사면지반의 수평변위는 약 2.5 mm가 발생되었으나, 장마기간 이후에는 다시 수평변위가 전체적으로 회복되고 있음을 알 수 있다. 따라서 대상현장에서 발생한 사면지반의 수평변위는 매우 미소하며, 발생한 이후 회복되는 탄성적인 변형거동을 주로 나타내므로 보강공법을 적용한 이후 대상현장의 사면지

Fig. 13. Horizontal deformation of the slope at each construction stage.

Fig. 15. Axial force of rock anchor at each construction stage.

Fig. 14. Axial forces of rock bolt at each construction stage.

반은 매우 안정한 상태임을 확인할 수 있다.

록볼트 축력

Fig. 14는 시공단계에 따른 록볼트의 축력을 나타낸 것이다. 록볼트의 축력을 측정하기 위하여 록볼트에 변형률계를 지표면으로부터 각각 1m, 2m 및 4m에 설치되었다. 그림에서 보는 바와 같이 최대축력이 발생하는 위치는 지표면으로부터 4m 지점이며, 최소축력이 발생하는 위치는 지표면으로부터 1m 지점인 것으로 나타났다. 그리고 시공단계별 록볼트 축력을 살펴보면 초기 사면굴착 작업시 급격하게 증가하며, 그 이후에는 감소하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 터널굴착 작업시 일부 증가하는 경향을 보였으나, 장마기간 이후에는 록볼트 축력이 수렴하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 록

볼트로 보강된 대상사면은 안정한 상태임을 확인할 수 있다.

록앵커 축력

Fig. 15는 시공단계에 따른 앵커의 축력을 나타낸 것이다. 앵커의 축력을 측정하기 위하여 앵커두부에 하중계를 설치하였다. 그림에서 보는 바와 같이 앵커축력은 사면굴착 작업시 증가한 이후 일정하게 유지되다가 터널굴착 작업시 다시 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 장마기간에는 증가하였다가 다시 감소되는 것으로 나타났다. 따라서 앵커축력은 사면굴착 작업시와 터널굴착 작업시 영향을 받는 것으로 나타났다. 그리고 터널굴착 작업이후 대상사면은 비교적 안정한 상태임을 알 수 있다.

결론

본 연구에서는 터널 출입구를 시공하기 위하여 진입로를 개설하던 중 사면붕괴가 발생된 암반사면을 대상으로 한계평형해석 및 유한차분해석을 통하여 사면붕괴 원인을 분석하고, 현장계측을 통하여 사면보강공법이 적용된 사면의 안정성을 검토하였다. 이들 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 터널 출입구 진입로 개설 전 대상단면에 대한 사면안전율은 1.0 이하이므로 사면붕괴가 발생할 수 있으며, 진입로 개설 후 사면안전율은 더 저하되므로 사면붕괴 발생가능성이 높게 평가되었다.
2. 터널 출입구 진입로 개설전후 대상사면내 전단변형을 및 소성영역의 변화를 살펴보면 진입로 개설 전 전

단변형을 및 소성변형은 붕괴사면의 상부에 집중되어 나타나고 있으나, 진입로 개설 후 사면상부에서 하부로 발달하므로 사면활동영역이 증가되어 사면안정성을 저하시킬 수 있다.

3. 터널 출입구 시공을 위해서는 해당사면에 대한 안정성을 확보하여야 하므로 대상현장조건을 고려하여 록볼트, 록앵커 및 FRP 그라우팅을 사면보강공법으로 선정하였다. 사면보강공법을 적용하여 사면안정해석을 수행한 결과 사면안전율은 1.3 이상 이므로 보강사면은 안정함을 알 수 있다.

4. 적용된 사면보강공법의 효과를 확인하기 위하여 현장계측을 수행하였으며, 경사계를 이용하여 측정된 사면지반의 수평변위는 매우 미소하며, 대부분 발생된 이후 다시 회복되는 탄성거동을 보인다.

5. 변형률계 및 하중계를 이용하여 측정된 록볼트 및 앵커축력은 터널굴착작업 및 장마기간에 의한 영향보다는 사면굴착작업시 영향을 가장 크게 받으며, 터널굴착작업이후 수렴하는 경향을 보이므로 대상사면은 안정한 상태임을 확인할 수 있다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 주요사업인 '광산개발에 따른 지질환경재해 확산제어 기술 개발' 과제의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

- Chae, B. G. Cho, Y. C., Song, Y. S., Kim, K. S., Lee, C. O., Lee, B. J., Kim, M. I., Seo, Y. S., Seo, K. W. and Liu, K. F. 2009, Development of landslide prediction technology and damage mitigation countermeasures (NEMA-06-NH-04), National Emergency Management Agency, 590p. (in Korean)
- Ho, K. K. S., 2004, Recent advances in geotechnology for slope stabilization and landslide mitigation-perspective from Hong Kong, Proc. 9th International Symposium on Landslides, Rio de Janeiro, Brazil, 1507-1560.
- Hong, W. P., 1999, Slope stabilization to control landslides in Korea, Geotechnical Engineering Case Histories in Korea, Special Publication to Commemorate the 11th ARC on SMGE, Seoul, Korea, 141-152.
- Hong, W. P., Han, J. G., Yun, J. M., Kim, T. H., Song, Y. S., Lee, H. M., Im, S. G., Sin, G. Y., Lee, Y. H., Kim, W. Y. and Sin, D. S., 2003, Development of computer program and design method for stability analysis of slopes reinforced by earth retention system (R&D/

2001-B04), Ministry of Construction and Transportation, 365p. (in Korean)

- Kang, G. C., Song, Y. S. and Kim, T. H., 2009, Behavior and stability of a large-scale cut slope considering reinforcement stages, Landslides, 6(3), 263-272.
- Kim, G. W., 1993, Evaluation of geomechanics classifications of rock masses, Proc. Korean Geotechnical Society Spring '93 National Conference, Geotechnical Engineering and Tunneling Technology, 33-40. (in Korean)
- Kim, W. Y., Chae, B. G., Kim, K. S., Cho, Y. C., Choi, Y. S., Lee, C. W., Kim, G. Y., Kim, J. H. and Kim, J. M., 2000, Prediction and mitigation of landslides hazards, Natural Hazard Prevention Research (N2-03-01-A-02), Ministry of Science and Technology, 642p. (in Korean)
- Schuster, R. L., 1992, Keynote paper : Recent advances in slope stabilization, Proc. 6th ISL, Christchurch, New Zealand, 1715-1745.
- Song, Y. S., Chae, B. G., Cho, Y. C., Kim, K. S. and Lee, C. O., 2009, Research on a decision method for susceptible area of slope hazards using GIS technique (R&D/06-Construction Core-B5), Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 118p. (in Korean)
- Song, Y. S., Hong, W. P. and Woo, K. S., 2012, Behavior and analysis of stabilizing piles installed in a cut slope during heavy rainfall, Engineering Geology, 129, 56-67.
- Yooshin Engineering Corporation, 2001, Working design report on the project of slope reinforcement at the end point of ○○ tunnel, Doosan Engineering & Construction, 170p. (in Korean)

원고접수일 : 2013년 8월 26일

수정본채택 : 2013년 9월 2일

게재확정일 : 2013년 9월 6일

송영석

한국지질자원연구원 지구환경연구본부
350-305 대전광역시 유성구 과학로 124
Tel : 042-868-3035
Fax : 042-868-3414
E-mail : yssong@kigam.re.kr

윤중만

신안산대학교 건설정보시스템과
425-792 경기도 안산시 단원구 신안산대학로 135
Tel : 031-490-6155
Fax : 031-490-6075
E-mail : jmyun@sau.ac.kr