

## 암반비탈면 활동에 의한 도로 융기현상 사례 연구 및 실시간 모니터링을 이용한 대책공법 검증

이종현<sup>1\*</sup> · 구호본<sup>1</sup> · 김승현<sup>1</sup> · 김승희<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국건설기술연구원 지반연구실

<sup>2</sup>조지아공과대학교 토목 · 환경공학과

### A Case Study of Road Upheaval caused by Slope Movement, and Verification of Reinforcement using Real-Time Monitoring

Jong-Hyun Lee<sup>1,\*</sup>, Ho-Bon Koo<sup>1</sup>, Seung-Hyun Kim<sup>1</sup>, and Seung-Hee Kim<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Geotechnical Engineering & Tunnelling Research Division, Korea Institute of  
Construction and Technology, Korea

<sup>2</sup>Department of Civil & Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, USA

암반비탈면의 활동에 의해 전방 도로부에 융기현상이 발생되었다. 국내의 대다수 비탈면은 암반으로 구성되어 있으므로 연 구지역과 같이 암반비탈면 활동에 의한 도로 융기현상을 관찰하기는 쉽지 않다. 본 연구를 통해 구성암 풍화와 지질학적 약대 형성이 진행된 암반비탈면은 불연속면을 따른 기하학적인 붕괴보다는 전체 구성암의 원호활동 지배를 더 크게 받을 수 있음을 파악하였다. 또한, 수치해석을 통해 편암 등 이방성이 강한 암석이나 특정 방향의 불연속면이 비탈면의 안정성에 영향을 미칠 경우에는 연속체 해석에 편재절리모델을 혼합하여 해석을 수행하는 것이 암반비탈면의 연속체 해석 수행에 매우 유용함을 확인하였다. 현장조사와 안정해석 결과를 근거로 본 비탈면의 안정화를 위해 계단식옹벽과 앵커공법을 제 안하였으며, 보강 완료 후에는 계측기를 설치하여 실시간 모니터링을 통해 적용 대책공법의 효과를 검증하였다.

**주요어** : 도로 융기, 원호활동, 수치해석, 편재절리모델, 실시간 모니터링

The movement of rock cut slopes may result in upheaval of an adjacent road. Because most cut slopes consist of rock, road upheaval due to the movement of a cut slope is a rare phenomenon in Korea. We found that the movement of rock slopes which are heavily weathered and with strongly developed weak zones is governed by circular failure of the overall rock formation rather than by failure along discontinuities. The results of a numerical analysis revealed that the application of a ubiquitous joint model in a continuum analysis is appropriate for anisotropic rocks (e.g., schist) and for slopes for which the stability is influenced by a particular discontinuity. The results of a field investigation and numerical analyses suggest that retaining walls and anchors should be used to stabilize rock slopes and that real-time monitoring equipment should be installed to assess the reinforcing effect of the remedial measures.

**Key words** : Road upheaval, Circular failure, Numerical analysis, Ubiquitous joint model, Real-time monitoring

### 서 론

일반적으로 암반비탈면은 암괴들의 슬라이딩, 탈락 등 개별적인 블록들의 활동에 의한 붕괴가 주를 이루기 때문에 썩기파괴, 평면파괴, 낙석 등의 형태가 주요 파괴 유형에 속하며, 토사로 구성된 비탈면은 원호성 활동이

주로 구현된다. 비탈면 활동에 의한 인접부 도로의 융기 현상은 비탈면의 깊은 심도를 보이는 원호파괴에 의해 도로 하부에서 도로 상부방향으로 변위벡터가 생성될 때 발생된다.

본 연구 비탈면은 2007년 8월 왕복 4차선 도로중 비탈면 인접 1개 차로에서 도로융기 발생이 보고되었다.

\*Corresponding author: jhrhee@kict.re.kr

현지조사 결과, 높이 63 m의 풍화암반으로 구성된 대규모 비탈면의 중간 높이(32 m 부근)에서 인장균열이 발생되어 있고, 그 하부의 소단배수구, 종배수구 등의 배수시설이 심하게 훼손된 상태를 확인하였으며, 전방 도로부에 약 30 cm 정도의 도로 융기가 발생된 상태를 확인하였다.

주로 암반으로 구성된 국내의 비탈면 분포 상황에서 암반비탈면 활동에 따른 도로 융기 현상은 흔히 않는 사례로써 본 연구를 통해 암반비탈면의 거동이 단순히 불연속면을 따르는 기하학적 붕괴와 임의적인 낙석 발생에만 국한되지 않음을 알 수 있었다. 또한, 연구 비탈면에서 관찰된 도로 융기 현상의 원인을 도출하고, 구성 암반의 불연속면 특성을 반영한 신뢰성 있는 해석 수행을 위해 암반을 불연속면의 특성을 반영한 균질 해석체로 간주하는 편재질리모델(ubiquitous joint model)을 대상 비탈면의 수치해석에 이용하였다.

끝으로, 비탈면 현장조사와 안정해석 결과를 토대로 암반비탈면이면서도 중하부로 원호활동성을 보이는 비탈면에 대한 대책 방안을 검토하였으며, 지표변위경사계(TRS센서)를 이용한 실시간 계측 모니터링으로 적용 대책공법의 효과를 검증하고자 한다.

## 연구지역 지질

연구대상지역은 전라남도 화순군 동북면에 해당하며 (Fig. 1), 이 지역에는 시대미상의 화강암질편마암과 고생대 변성퇴적암류가 광범위하게 분포한다. 시대미상의 화강암질편마암은 고생대 변성퇴적암류인 우산리층의 상부에 협재하는 함탄층과 접하며, 편리가 매우 잘 발달하는 특징을 보인다. 또한, 일대에서 관찰되는 화강암질편마암은 고생대 암석의 변질물로 생각되는 편암류와 규암 등을 포함하고 있다. 고생대 변성퇴적암류의 단층은 동북-서남 방향 습곡구조의 지배를 받고 있는 것으로 보고되었다(김봉균과 박병권, 1966).

일반적으로 화강암질암 또는 퇴적암이 광역변성작용을 받게 되면 엽리상구조 또는 누대구조를 가지는 편마암이나 편암으로 변성되게 되며, 비탈면 안정성 측면에서 엽리(편리)의 발달 방향이 비탈면 방향과 동일할 경우 발달한 우측대 부분이 점토광물로 변질됨으로써 슬라이딩이 발생하는 사례는 일반적이다. 또한, 습곡의 경우, 배사축 또는 향사축의 만곡부를 중심으로 균열(crack)이 발달되거나 잠재되어 있는 특성을 보이므로 비탈면 내 습곡축

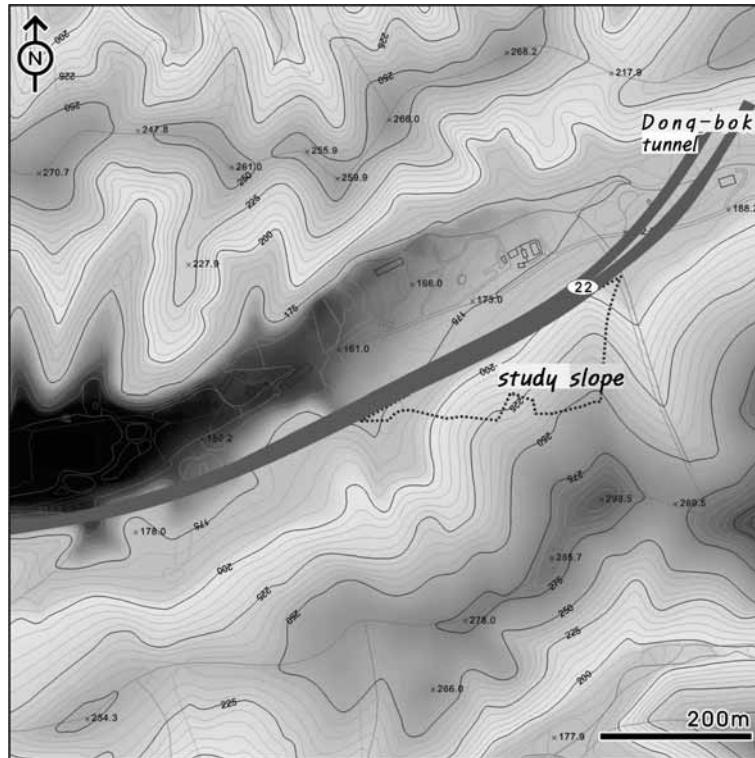


Fig. 1. Location of the study area.

주변에서는 불안정성이 야기될 수 있다(McClay, 1987).

연구 비탈면은 전구간이 식생 녹화로 피복되어 있는 상태이며, 활동면이 완전히 노출되는 양상이 아니므로 구성 암반의 상황을 육안 관찰하기가 용이하지 않은 상태이다. 단지 136~148 m 1소단 하부 구간에서 관찰되는 표면 붕괴부에서 비탈면 구성 암상 및 지질학적 불안정 요인을 조사하였다.

### 비탈면 현장조사

연구 비탈면은 2004년 9월 준공된 왕복 4차로의 국도 22호선에 인접하고 있다. 비탈면 연장은 308 m, 최대 높이 약 63 m 규모로 시트법상 2중시설물에 속하는 대규모 비탈면이다. 비탈면은 평균 42°(1:1.1)의 경사로 비교적 완만한 편에 속하며, 총 12개의 소단이 형성되어 있다. 비탈면의 풍화등급은 보통풍화(moderately weathered)에서 심한풍화(highly weathered)의 상태를 보이고 있으며, 심한풍화의 상태가 우세하게 관찰된다.

비탈면은 전구간에 식생 녹화와 L형축구가 시공되어 있으며, 202~284 m 구간으로 계단식옹벽이 설치되어 있다.

비탈면 1소단에서 5소단에는 소단배수구가 설치되어 있고, 계곡부인 110 m 부근에 종배수구가 시공된 상태에 있다.

본 비탈면의 전경 및 현황도(face-map) 자료는 다음의 Fig. 2, 3과 같다.

비탈면의 중간부(높이 약 32 m 부근)로 다수의 인장균열과 국지적 붕괴가 관찰되었으며, 특히 붕괴부의 최상단인 110~130 m 구간 5소단 직하부와 110~150 m 구간 5~6소단 사이 비탈면의 인장균열과 배부름(bulging) 현상은 20개월의 시간 경과후 균열부 확대 및 추가 붕괴로 이어져 비탈면의 붕괴가 진행되고 있는 것으로 판단하였다(Fig. 4~7).

비탈면 내 발달하는 인장균열과 배수로 구조물의 파괴 방향 등을 고려하였을 때, 90~150 m 구간에서 좌상에서 우하향의 대각선 방향으로 비탈면 활동이 진행 중에 있으며, 이로 인해 110~130 m 구간의 전방 도로에서 융기 현상이 발생되고 있다(Fig. 8). 도로 융기부는 비탈면 하단부의 축구로부터 2~2.6 m 이격되어 발생되고 있으며, 융기 폭 약 20 m, 융기 높이 약 30 cm 정도를 보이고 있고 계곡부인 110 m 부근에서 최대 융기를 보이고 있다.

연구 비탈면은 앞서 언급한 바와 같이 식생 녹화로



Fig. 2. Panoramic view of the studied slope.

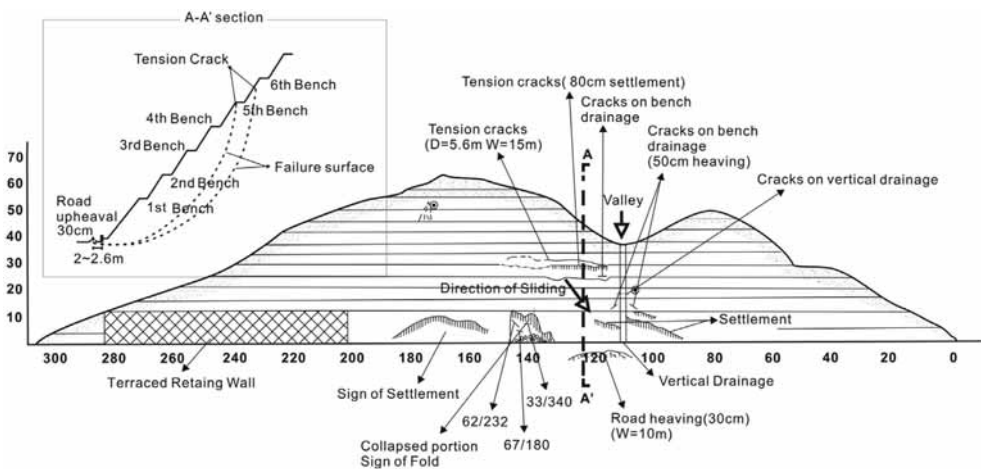


Fig. 3. Face-map of the study slope.



Fig. 4. Observation of tension cracks (July 2007).



Fig. 5. Failure due to tension cracks (20 months after investigation).



Fig. 6. Observation of tension cracks (July 2007).

구성 암반의 여러 특징을 파악하는데 어려움이 많은 상태이며, 136~148 m 1소단 하부 구간의 붕괴부에서 구성 암반의 상태, 불연속면 발달 양상 등을 파악할 수 있었다 (Fig. 9). 붕괴부 일대에서는 관찰되는 33/340(dip/dip



Fig. 7. Expansion of tension crack (20 months after investigation).



(a)



(b)

Fig. 8. Upheaval of road adjacent to the slope.

direction) 불연속면(편리)이 도로를 향하는 순방향에서 약 5~10° 정도 틀어져 발달하고 있어 슬라이딩 발생이 용이한 상태에 있으며(Fig. 10), 구성암인 편암은 심한풍화 상태를 보이고 있어 관열성(fissility)에 의해 쉽게 쪼개



Fig. 9. Failure zone at 136-148m portion of cut slope.



Fig. 11. Fold in the failure zone.

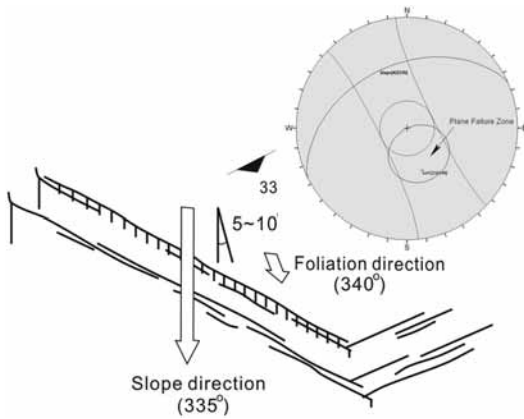


Fig. 10. Orientation of the main discontinuity and stability analysis of sliding failure using a stereographic projection.

짐을 보이고 있다. 또한, 봉괴부 상단의 암반에서 습곡의 배사구조(anticline)가 관찰되고 있으며, 습곡축의 방향(hinge line)이 비탈면의 경사방향과 유사한 방향을 보이고 있어 지질학적으로 비탈면 중하부에 불안정성을 내포하는 약대가 형성되어 있을 가능성을 배제할 수 없는 상태이고(Fig. 11), 연구 비탈면의 원호 활동을 설명하기 위해 필요한 가정으로 판단된다.

### 수치해석적 고찰

#### 수치해석 개요

대부분의 암반비탈면 수치해석용 프로그램들은 불연속체 모델링에 근거를 두고 개별적인 블록들의 움직임을 모사하기 때문에 연구 비탈면에서 관찰된 도로 융기 현상이 프로그램 내에서 구현되기는 쉽지 않다. 또한, 유한요소법/유한차분법에 바탕을 두고 연속체 해석 모델링

을 수행하는 수치해석 프로그램들을 이용할 경우 원호 파괴를 모사하고 도로 융기 현상을 도출하는 데는 어려움이 없으나, 불연속체에 가까운 암반비탈면을 신뢰성 있게 해석하고 주요 불연속면 등을 반영하는 데에는 한계가 있다.

따라서, 본 연구에서는 비탈면 내의 변위 벡터, 변형 형태 및 도로 융기 현상을 도출하기 위하여 유한차분법을 이용한 지반 범용 프로그램인 FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua)을 이용하였으며, 비탈면 활동과 깊은 관련이 있을 것으로 판단되는 33° 경사의 불연속면을 해석 모델 내에 적용하기 위해 편재절리모델(ubiquitous joint model)을 이용한 해석을 실시하였다. 편재절리모델은 등가연속체모델(equivalent joint model)이라고도 불리는 해석법으로 근본적인 원리는 불연속면에 의해 블록으로 나누어진 불연속 암반을 불연속면의 특성이 반영된 물성을 가진 균질 연속체로 간주하여 해석하는 것이다(박연준과 유광호, 1998). 즉 해석대상 물질은 절리와 같은 불연속면 방향으로 수많은 미끄러짐 면을 가지며, 절리에 작용하는 응력이 연속체 모델에 내재하는 절리면에 작용하는 응력과 같다는 가정하에 절리면에 작용하는 법선응력 및 접선응력이 정해지고 Coulomb의 항복조건에 의거 등가연속체 모델의 항복여부를 판단하는 것이다. 편재절리모델의 경우 매질의 파괴는 불연속면에서 일어날 수 있지만 제한된 수(1, 2개)의 불연속면만을 고려할 수 있으므로(박연준과 Dawson, 1997), 본 비탈면의 경우와 같이 주요 불연속면이 1개인 경우 적용이 가능하다. 편재절리모델은 항복이전에는 단성거동을 보이지만, 항복이 발생하면 완전 소성체의 거동을 하며 종래의 소성유동법칙을 따른다. 본 해석모델은 근본적으로 불연속면이

발달한 암반을 구현하는 것이므로, 매질의 파괴는 매질 내의 불연속면에서만 발생하고, 무결암(intact rock)은 파괴되지 않는다. 편재절리모델은 Fig. 12(a)와 같이 일정 방향의 불연속면이 무한히 내재되어 있는 형태라고 생각할 수 있으며, 절리암반의 물성치 중 특히 점착력 값에 의해 큰 영향을 받는다. 편재절리모델을 적용하여 암반의 강도를 평가한 사례가 Clark (2006)에 의해 제시되었다. Fig. 12(b)는 연속체 해석에 기반을 둔 Mohr-Coulomb 모형을 편재절리모델에 의해서 도출한 암반의 거동과 비교하고 있다. 두 모형은 항복 전까지는 비슷한 거동을 보이나, 항복점을 넘어서면서 Mohr-Coulomb 모형이 탄성 거동을 지속적으로 보여주는 것에 비해서 편재절리모델은 비선형 거동을 보이는 차이를 가진다.

**RMR 시스템에 의한 강도정수 산정**

암석의 일축압축강도, 암질지수(Rock Quality Designation, RQD), 불연속면 평균 간격 및 상태, 지하수 상태로부터 암반의 특성을 중요도에 따라 가중치를 주어 구한 RMR (Rock Mass Rating) 값으로부터 강도정수를 구할 수 있다. 연구 비탈면이 식생 녹화로 파괴된 상태로 활동면이 완전히 노출되지 않은 상태이므로 활동 구간 내 표면 붕괴부인 136~148 m 구간에서 수집된 불연속면 자료를 바탕으로 RMR 값을 도출하였다(Table 1). RMR 산정시 RQD 값은 Palmstrom (1982)에 의해 제안된 경험식을 이용하여 산정하였으며, 연구 비탈면의 암반에 대한 RMR 값은 29.8점으로 IV등급인 불량(Poor)한 암반으로 분류되었다.

암반의 변형계수(deformation modulus)는 대부분의

**Table 1.** Rock Mass Rating values of the slope.

-	Classification	Status	Value	
RMR	Uniaxial Compressive Strength(MPa)	39.0	4.1	
	RQD(%)	16.0	3.0	
	Spacing(m)	0.1	6.4	
	persistence(m)	20.0	0.3	
	aperture(mm)	5.0	1.0	
	Characteristics of Discontinuities	roughness	rough	5.0
		fill material	soil	2.0
		degree of weathering	highly weathered	1.0
	Hydraulic Condition	wet	7.0	
	Sum	(Poor)	29.8	

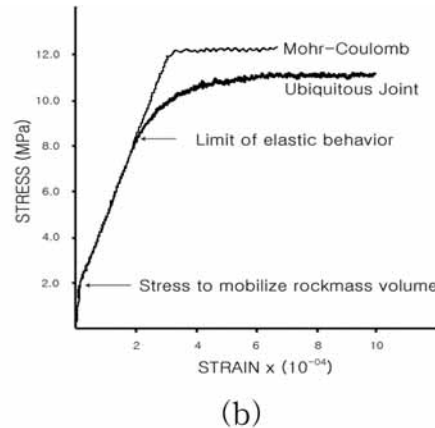
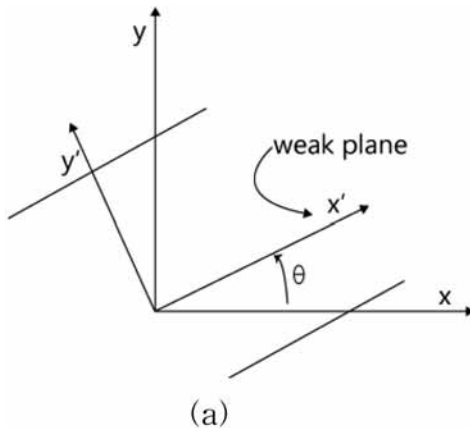
수치해석에서 중요한 변수로 작용하며, 본 연구에서는 Serafin 과 Pereira(1983)에 의해 제안된 식(1) 경험식에 의해 불연속면을 고려한 변형계수( $E$ )를 산출하였다. 또한 Bieniawski (1978) 및 Trueman (1988)에 의해 제안된 식 (2), 식(3) 경험식을 이용하여 점착력( $c$ ) 및 내부마찰각 ( $\Phi$ )을 산정하였다.

$$E = 10^{\frac{RMR-10}{40}}, (Gpa) \tag{1}$$

$$c = 5 \times RMR, (Kpa) \tag{2}$$

$$\phi = 0.5 \times RMR + 5, (^\circ) \tag{3}$$

위 경험식으로부터 산정한 암반의 강도정수는 다음의



**Fig. 12.** (a) Infinite discontinuity applied in the ubiquitous joint model; (b) difference between the ubiquitous joint model and the Mohr-Coulomb model.

Table 2와 같으며, 편재절리모델 적용을 위한 불연속면의 강도특성은 Table 3과 같이 현장에서 조사된 불연속면 특성(충전물, 거칠기 등)을 고려하여 경험식으로부터 산정하였다(Barton, 1973).

**수치해석 결과 고찰**

본 연구에서는 비탈면 형태를 모사한 해석 모델에 주요

**Table 2.** Material properties of the slope.

Name	Unit Weight (t/m <sup>3</sup> )	Internal Friction Angle (°)	Cohesion (t/m <sup>2</sup> )	Elastic Modulus (t/m <sup>2</sup> )
Schist	2.0	20	15.2	313,000

**Table 3.** Material properties of the discontinuity.

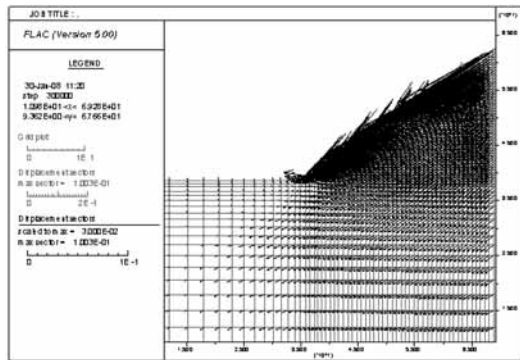
Name	Dip (°)	Cohesion (t/m <sup>2</sup> )	Internal Friction Angle(°)	Tensile Strength
Schist	33	0	15	0
Remarks	Ubiquitous Joint Model Only			

불연속면을 반영한 편재절리모델을 적용한 수치해석을 수행하였다. 비탈면 변위벡터 양상 중 평면파괴가 발생한 비탈면 중·하부 및 도로 용기가 발생한 도로 부분을 확대하여 Fig. 13(a)와 같이 나타내었으며, 분석의 편의성을 위해 변위벡터 크기를 과장하여 확대하였다. 변위벡터의 양상을 살펴보면, 비탈면 최하단에 해당하는 측구부분에서 전면으로 밀리는 현상의 벡터와 전면 도로 부분에서의 위로 상승하는 변위벡터가 모두 구현되었음을 확인할 수 있다. 이는 비탈면 및 도로면의 수직(y 방향) 변위(Fig. 13(b))를 살펴보았을 때 비탈면에서는 아래 방향에 해당하는 (-)부호의 변위가 발생한 것과 더불어 도로부에서는 위로 상승하는 것을 의미하는 (+)부호의 변위가 발생하였다.

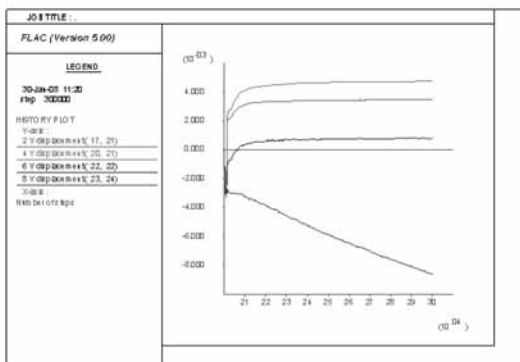
본 연구에서는 변위 양상을 살펴보는 것 외에 추가적으로 비탈면 내 소성영역의 발생을 살펴보았다. 비탈면 내부에서 소성영역으로 진입한 구간 외에 주 불연속면을 따라 슬라이딩이 발생했음을 확인할 수 있으며, 비탈면 내부의 슬라이딩은 주로 5 m 깊이 내외에서 발생하였고 특히 비탈면 상단보다는 중·하단에 집중되어 있음을 알 수 있다. 또한, 비탈면 심층부로 향하는 소성영역이 발견되는데, 이 영역을 지표면으로 연장하면 현장조사시 인장균열이 발생되었던 5, 6소단부의 높이와 크게 벗어나지 않은 지점으로 연결된다(Fig. 14). 즉, 편재절리모델을 혼합하여 연속체 해석을 수행하였을 경우, 변위 양상뿐만 아니라 비탈면 내 슬라이딩 및 균열부의 대략적인 지점까지도 해석을 통해 추정이 가능함을 확인할 수 있었다.

**비탈면 붕괴원인 및 대책(안) 검토/검증**

연구 비탈면의 붕괴 원인은 전반적인 구성 암반의 풍화등급이 심한풍화로 진행된 상태에서 발달하는 편리의

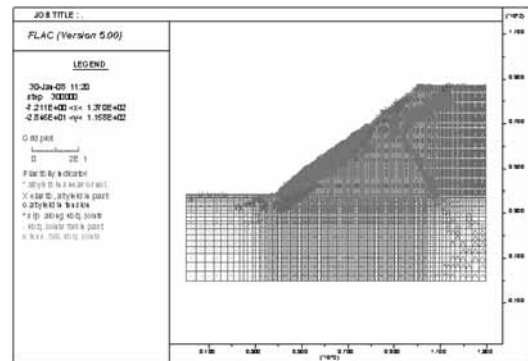


(a)



(b)

**Fig. 13.** (a) Displacement vector when applying the ubiquitous joint model; (b) displacement value.



**Fig. 14.** Plastic zone when applying the ubiquitous joint model.



Fig. 15. Installation of Translation-Rotation-Settlement sensors.

방향이 비탈면 방향과 거의 유사하게 도로 방향을 향하게 됨으로써 압반의 활동 가능성이 높아진 점과 비탈면 중하부로 습곡구조가 관찰되는 등 약대가 형성된 상태에서 지형적으로 비탈면 중앙 부근(110m)에 형성된 계곡부로 우수의 흐름이 집중되면서 비탈면의 활동력이 증대되어 발생된 것으로 판단된다. 또한, 비탈면 구성 지반의 풍화·파쇄 진행에 의한 중하부 약대 형성으로 활동면 전체의 양상은 단순한 압반의 평면활동이 아니라 깊은 심도의 원호 활동을 유발하는 것으로 판단된다.

본 비탈면의 활동으로 운영중인 도로부의 융기 현상이 발생된 사항이므로 원호활동면상에서 회전하는 비탈면 활동에 대하여 가장 유효한 공법은 활동토괴의 말단에 성토하여 비탈면의 안정화를 꾀하는 압성토 공법(counter weight fill method)이다(임종석 외, 1996). 그러나, 연구 비탈면은 도로에 인접한 상태로 부지의 제약이 있으므로 압성토 공법과 유사한 보강 효과를 발휘할 수 있는 대안 공법으로 비탈면 중하부 계단식옹벽의 설치와 앵커에 의한 비탈면 보강을 검토하였다. 이를 통해 비탈면 원호활동에 대한 억제 효과를 거둘 수 있을 것으로 판단되며, 대책 공법의 효과 검증과 비탈면 유지관리의 효율화를 위해 보강 구간 내 계측기를 설치하여 실시간 모니터링(real time monitoring)을 실시하였다.

연구 비탈면에 대한 계측기 설치 및 운영은 보강공사 종료시점(2009년 9월 29일)부터 실시되었으며, 총 4단면에 18개의 지표변위경사계 센서(TRS Sensors)를 설치하여 무선 CDMA 모뎀을 통해 실시간 모니터링을 수행하고 있다(Fig. 15).

계측이후 2011년 6월 30일 현재까지 각 단면의 센서별 최대변위는 -5.33 mm(압축)에서 6.33 mm(인장)의 범위에서 변위가 발생되고 있으며, 여름철 우기에는 압축에서 인장으로 계측 변위가 변화하는 경향을 보이고 있으며, 겨울철 동절기에는 인장에서 압축으로 계측 변위의 추세가 변화하는 경향을 보이는데 이는 계측기 센서의 신

축부를 담당하는 용수철의 온도 영향에 따른 기계적 변위 경향으로 판단된다(Fig. 16).

연구 비탈면에 공법을 적용한 후 약 1년 9개월 동안 계측을 수행한 결과, 계측기의 온도오차, 기계오차 등을 고려하였을 때 지반 활동과 관련한 이상 변위가 관측되지 않고 있으므로 계단식옹벽과 앵커에 의한 비탈면의 보강 효과가 발휘되고 있는 것으로 판단된다.

## 결 론

본 연구에서는 비탈면 활동으로 인접 도로부의 융기가 발생된 사례를 통해 암반비탈면에서 흔히 관찰되지 않는 원호활동 양상에 대해 고찰해 보았다. 연구 비탈면은 식생 녹화로 전구간이 피복된 상태이며, 비탈면의 활동에 의한 붕괴부가 완전히 노출된 양상이 아니므로 육안관찰에 의존하는 현장조사만으로는 신뢰성 있는 조사에 한계가 있었다. 따라서, 현장조사를 통해 비탈면 붕괴 양상 및 활동 방향, 붕괴 원인을 추정하였으며, 수집된 자료를 토대로 편재절리모델을 적용한 수치해석을 통해 암반비탈면의 활동에 의한 도로 융기 현상을 고찰해 보았다. 현장조사와 안정해석 결과를 근거로 본 비탈면의 안정화를 위해 계단식옹벽과 앵커의 적용을 제안하였으며, 적용된 공법의 검증을 위해 공법 적용 구간에 계측기를 설치하여 실시간 계측 모니터링을 실시하고 있다. 현재까지의 계측 결과에서 추가적인 비탈면 활동으로 판단되는 이상 변위가 관측되지 않고 있으므로 적용 공법에 의해 비탈면 안정화가 이루어진 것으로 판단된다. 본 연구의 결과를 종합하면 다음과 같다.

(1) 연구 비탈면의 구성암은 심한풍화의 상태를 보이는 편암으로 구성되어 있으며, 그 방향성이 비탈면 방향과 유사하므로 기하학적으로 편리를 따른 평면파괴 가능성이 인지된다. 그러나, 비탈면 구성 암반이 심한풍화 이상의 풍화 상태를 보이고, 지질학적 원인 등에 의해 하부로 약



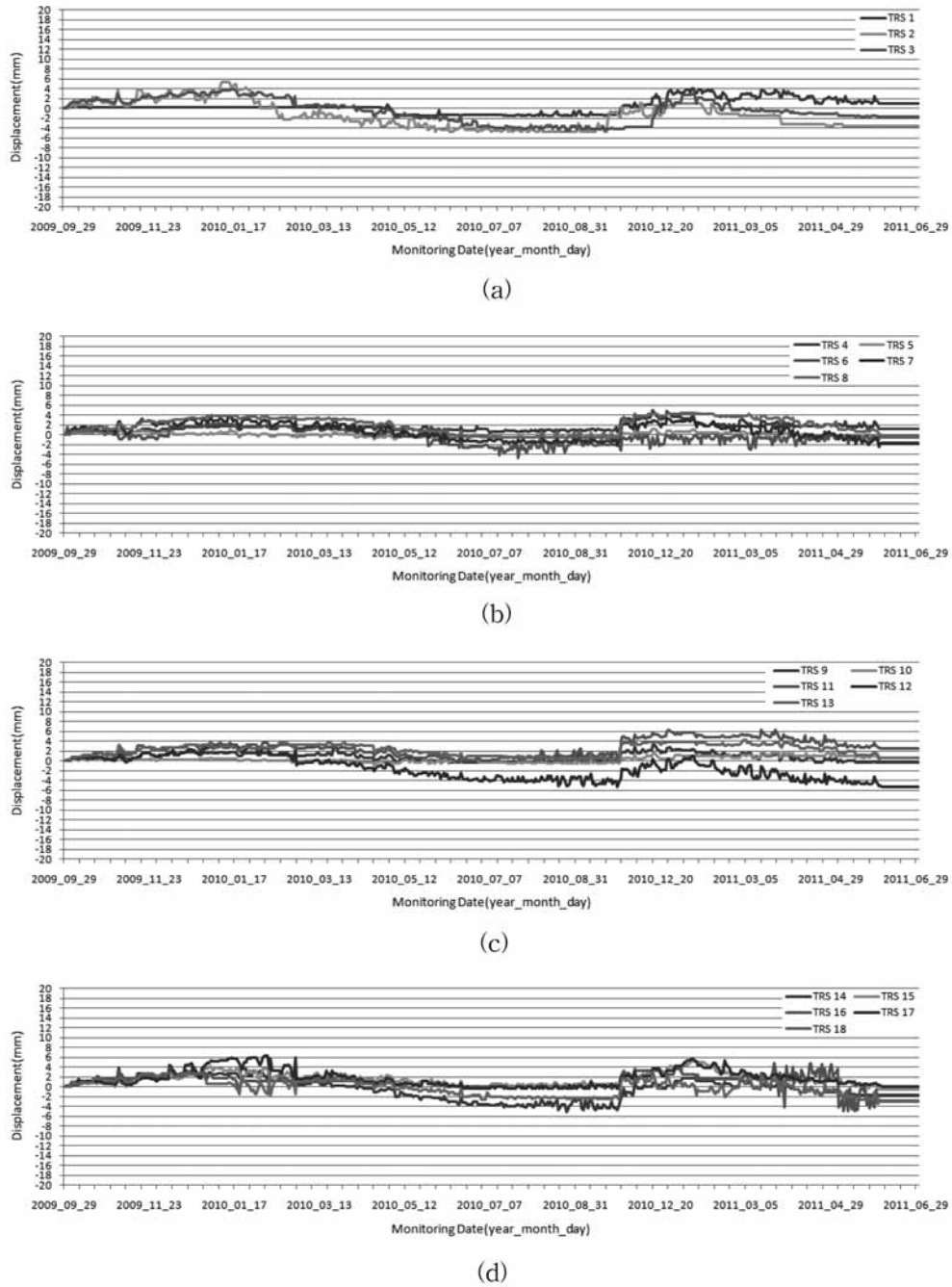


Fig. 16. Monitored displacement per section, showing displacement curves for (a) section 1, (b) section 2, (c) section 3, and (d) section 4.

대가 형성될 경우 암반 비탈면은 개별 블록의 평면과피 보다는 지반 연약화에 의한 구성 암반의 토사화 진행에 따른 원호과피의 지배를 더 크게 받는 것으로 판단된다.

(2) 편암 등 이방성이 강한 암석이나 특정 방향의 불 연속면이 비탈면 전체의 안정성에 영향을 미칠 경우, 연속체 해석에 편재절리모델을 혼합하여 수치해석을 수행

하면 단순 연속체 해석에서 확인할 수 없는 비탈면 하부 측구 밀립 현상, 도로부 용기 현상, 비탈면 중하부 슬라 이딩 및 중간부의 인장균열 발생 징후 등을 도출하는데 매우 용이하였다.

(3) 원호활동을 보이는 비탈면의 안정화 대책으로 압성토 공법이 유효하며, 운영중인 일반 국도상에 압성토 공법의 적용이 공간적으로 용이하지 않다. 따라서, 압성토 공법의 대안으로 비탈면 중하부 계단식옹벽 및 앵커의 설치를 통해 비탈면 활동력 억제에 제안하였으며, 적용 공법의 검증에 대해 보강공법 완료 직후부터 계측기를 설치하여 실시간 모니터링을 실시하고 있다. 계측 결과, -5.33~6.33 mm의 변위가 관측되고 있으며, 이는 계측기의 온도오차, 기계오차 등을 고려하였을 때 비탈면 활동과 관련된 이상 변위로 판단할 수 없으므로 적용된 계단식 옹벽 및 앵커공법의 보강 효과가 발휘되고 있는 것으로 판단된다.

### 참고문헌

- 김봉균, 박병권, 1966, 한국지질도 동북도폭, 국립지질조사소, 4, 11p.
- 박연준, 유광호, 1998, 편재절리모델을 이용한 절리 암반 사면의 안정성 해석, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, 8, 287-295.
- 박연준, Dawson, E.M., 1997, 편재절리모델의 유용성과 한계성, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, 7, 202-207.
- 임종석, 이원택, 권호진, 송영우, 박용원, 1996, 지반공학 용어사전, 엔지니어즈, 184p.
- Barton, N.R. 1973, Review of a new shear strength criterion for rock joints, *Engineering Geology*, Elsevier, 7, 287-332.
- Bieniawski, Z.T., 1978, Determining rock mass deformability-experience from case histories, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstract*, 15, 237-247.
- Clark, I.H., 2006, Simulation of rockmass strength using ubiquitous joints, In; R.Hart & P.Varona (eds), *Numerical Modeling in Geomechanics-2006*; Proc. 4th International FLAC Symposium, Madrid, Paper No.08-07, Minneapolis: Itasca.
- Itasca Consulting Group, 2005, *FLAC Version 5.0*, ICG, Minneapolis.
- McClay, K.R., 1987, The mapping of geological structures, *Geological Society of London Handbook*, Open University Press, 161p.
- Palmstrom, A., 1982, The volumetric joint count-a useful and simple measure of the degree of rock jointing, *Proc. 4th Int. Congr., Int. Assoc. Eng. Geol.*, 5, 221-228.
- Serafin, L.J. and Pereira, P.J., 1983, Consideration on the geomechanical classification of Bieniawski, *Proc. of the international symposium on engineering geology and underground construction*, 2, 33-42.
- Truman, R., 1988, An evaluation of strata support techniques in dual life gate roads, Ph.D Thesis, Univ. of Wales, 362p.

2011년 7월 29일 원고접수, 2011년 8월 31일 게재승인

#### 이종현

한국건설기술연구원 기반시설연구본부 지반연구실  
411-712 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283(대화동)  
Tel: 031-910-0227  
Fax: 031-910-0561  
E-mail: jhrhee@kict.re.kr

#### 구호본

한국건설기술연구원 기반시설연구본부 지반연구실  
411-712 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283(대화동)  
Tel: 031-910-0217  
Fax: 031-910-0561  
E-mail: hbkkoo@kict.re.kr

#### 김승현

한국건설기술연구원 기반시설연구본부 지반연구실  
411-712 경기도 고양시 일산서구 고양대로 283(대화동)  
Tel: 031-910-0524  
Fax: 031-910-0561  
E-mail: sshkim@kict.re.kr

#### 김승희

Department of Civil & Environmental Engineering,  
Georgia Institute of Technology  
790 Atlantic Dr., Atlanta, GA, 30332  
Tel: 404-805-3724  
Fax: 404-894-2281  
E-mail: seunghee.kim@gatech.edu