

## 절토사면의 전도파괴에 대한 안정성 평가 및 수치해석적 고찰

최지용\* · 김승현 · 구호본  
한국건설기술연구원 지반연구실

### A Study on the Stability Evaluation and Numerical Simulation of Toppling Failure on a Cut-Slope

Ji-Yong Choi\*, Seung-Hyun Kim, and Ho-Bon Koo

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

암반사면의 전도파괴는 암반이나 토체가 기존 파괴면을 따라 미끄러지는 다른 파괴형태와는 달리 압주 혹은 암블록의 회전을 동반하는 파괴형태로 정의된다. 이는 사면방향에 대해 역방향으로 발달된 불연속면이 존재하는 구역에서 주로 발생하며, 불연속면의 지질학적 특성뿐 아니라 기하학적인 특성도 사면의 안정성을 판단하는 중요한 요소로 작용된다. 본 연구에서는 역방향 불연속면이 발달된 절토사면에 대해 안정성을 평가하였다. 일반적으로 암반의 파괴거동은 불연속체 특성을 가지고 있으나 최근 연속체 해석에서 불연속면을 모사하는 수치해석방법들이 많이 논의되고 있다. 본 연구에서는 연속체 해석인 유한요소해석에 불연속면을 이질적인 경계특성에 적용되는 계면요소를 이용하여 모사함으로써 불연속면이 고려된 사면의 거동특성을 파악하였다.

**주요어** : 전도파괴, 불연속면, 유한요소해석, 계면요소

Toppling failure of a slope is defined as failure behavior accompanying the rotation of rock block which is different from other failure such as sliding along with discontinuities and so on. It generally occurs in the region that discontinuities were developed with inverse dip direction to a slope and it could play a critical role in judging stability of slope. In this study, the stability evaluation was performed about toppling failure on a jointed road cut-slope. To check the deformation behavior, numerical analysis is widely used. However common analysis programs are based on continuum model. Recently, many methods that discontinuity properties can be considered in continuum analysis are suggested. In this study, numerical analysis based on FEM(Finite Element Method) was performed using interface element applied in heterogeneous boundary to simulate effects of discontinuities.

**Key words** : toppling failure, discontinuity, FEM, interface element

### 서 론

암반사면의 안정성을 해석함에 있어 고려해야할 가장 중요한 요소는 경사면의 배후에 있는 암반의 기하학적 형상이다. 일반적인 암반사면의 붕괴는 그 형태에 따라 평면파괴, 쉐기파괴, 전도파괴 등으로 분류된다. 평면파괴와 쉐기파괴와는 달리 전도파괴는 층리나 엽리가 거의 수직으로 연속적으로 발달하는 습곡지대에서 관찰되어 오고 있다. 본 논문에서 언급된 지역은 화강암 지대에 역방향의 암맥들

이 관입하여 이들의 불연속면을 따라 전도파괴가 발생하는 일반적인 상황과는 다른 다소 특이한 붕괴형태에 해당된다.

연구대상 붕괴 절토사면은 강원도 평창군 방림면 운교리 지내 “국도42호선 방림지구(운교지서앞) 위험도로 개량공사” 관련 새로이 건설 중인 도로에 위치한다. 대상사면은 운교리의 계촌마을, 수동마을 등 주요 마을 진출입로에 위치하고 있으며, 최대높이가 45m로 대규모 절토사면에 해당된다. 사면 절취 과정 중에 우측부 구간에서 전반적으로 가로 방향의 인장균열이 발생되었다. 대상 구간은 풍화도가 깊고

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

완전풍화된 구간으로 진행성 균열로 인한 붕락이 우려되어 붕괴시 교통두절 및 안전사고가 우려되는 상황이었다. 대상 사면의 주요 기반암은 화강암이며, 화강암체 분포부에서는 화학적·물리적 풍화의 영향으로 빠른 풍화가 진행되고 있고, 사면 방향에 대하여 역방향으로 염기성암맥이 관입되어 있어 염기성암맥과 수반되어 나타나는 규칙절리를 따라 전도파괴 발생가능성이 잠재되어 있는 상황이었다.

본 연구는 도로변 절토사면에 대해 전도파괴에 대한 안정성을 평가하고 불연속면에 의한 사면의 거동양상에 대해 분석함으로써 추후 합리적인 대책공법을 적용하여 사면 붕괴에 대한 안정성을 확보하기 위한 기초 자료를 작성하는 것을 목적으로 한다. 이에 면밀한 현장조사를 통해 현황도를 작성하였으며, 사면의 지질학적, 지반공학적 특성의 파악과 더불어 적정 강도정수를 적용한 안정성 해석을 수행하였다.

암반사면의 안정성 검토를 위해서 우선적으로 평사투영해석을 수행하였다. 또한 사면의 거동 특성 파악을 위해서 수치해석법을 사용하였다. 수치해석법은 암반의 불연속면을 거시적 관점에서 연속체로 평가하여 해석하는 연속체 해석법과 암반 내의 개개 불연속면을 암반블록으로 된 불연속체로 간주하여 파괴 후 암반 블록의 거동, 영향 범위, 파괴 메커니즘을 해석하는 불연속체 해석법으로 대별된다. 최근 연속체 해석에서 불연속면을 고려하는 방법에 대해 여러 방법들이 제안되고 있으며 본 연구에서는 불연속면을 이질적인 경계특성에 적용하는 계면요소(interface element)를 이용하여 모사한 후 연속체 기반인 유한요소해석을 수행함으로써 불연속면을 고려한 사면의 변형 거동 양상을 고찰하고자 하였다.

### 연구지역 지형 및 지질

연구대상사면은 운교리 지역을 중심으로 암주상으로 관입한 직경 약 4 km의 화강암체의 중앙부에 위치한다(정창희 외, 1979). 이들 화강암체의 대부분은 흑운모화강암이며, 풍화등급은 심한풍화~잔류토양에 해당된다. 광물조성은 거의 조립질이며, 풍화에 약하므로 주변의 산지보다 낮은 구릉 지형을 형성하고 있다.

화강암 이외에 사면에서 나타나는 암석은 암맥류이며, 산성암맥과 염기성암맥으로 구분되어진다. 이들 암맥류는 화강암에 비하여 풍화에 강하기 때문에 대부분 원래의 암석의 형태를 그대로 가지고 있다. 특히 1~10 cm 두께의 산성암맥(석영세맥)의 풍화등급은 약간풍화(Slightly Weathered)에 해당될 정도로 암석 구조가 분명히 관찰된다. 염기성암맥은 화강암에 비하여 풍화등급은 좋으나,

화강암의 경계부에 다수의 점토광물이 충전되어 있는 등 다른 지점에 비하여 주의를 요하여야 할 상황이었다. 절토사면에서 관찰되는 암맥의 관입 방향은 방립단층의 방향과 유사한 북북동 방향의 것이 많다. 정창희 외(1979)에 의하면 본 지역에 나타나는 암맥류는 대체로 판상이며, 변성암체의 편리 또는 층리를 따라 관입한 것이 많아, 본 지역의 대부분의 구성암반의 분포방향인 북북동 방향의 주향을 가지는 것이 대부분이라고 기술하고 있다.

본 사면에 나타나는 대부분의 암맥 관입 방향은 N30E(경사방향으로는 330°)로 사면방향(경사방향 ; 140°)에 비하여 역방향을 이루고 있으며, 사면 내 나타나는 대부분 불연속면은 이들 암맥의 관입 방향의 영향을 받은 것으로 판단된다.

### 절토사면 현장조사

대상 붕괴절토사면은 총연장 124m(STA.0+296-0+420), 최대높이 45 m의 대규모 절토사면이다. 총 8소단이 설치되어 있으며, 소단 간 높이는 약 5 m이다. 절토사면의 경사는 약 45°(1:1.0 경사도)이며, 절토부의 경사는 각 소단을 중심으로 약간씩 상이하다. 즉 제 3 소단 하단부 법면은 평균 경사가 52°이며, 제3소단 상단부에서 제4소단 하단부 법면 경사는 약 44°, 제4소단 상단부 법면경사는 42°로 상단부로 갈수록 완만해지는 형태이다(Fig. 1).

현장조사 당시의 절취공사 공정률은 약 80% 정도이며, STA.0+320-0+380 구간은 제2소단 하단부의 암반을 제거하지 않은 상태이다. 소단의 경우, 폭이 1 m 내외이며, 전단면소단배수로 등 배수에 대한 일련의 조치가 취해지지 않은 상태로 지표수 유입시 전도파괴 유발 가능 불연속면의 확장을 우려할 수 있는 상황이므로 이에 대한 조치가 필요한 상태이다.

연구대상 붕괴절토사면의 주요 구간별 현장조사 결과를 살펴보면 다음과 같다.

STA.0+320-0+360 구간의 가장 큰 특성은 제2소단 하단부에 공학적 분류상 “경암” (본 지점에서 수행한 슈미트햄머치는 평균적으로 53.7이었으며, 암반의 환산일축압축강도는 148.2 MPa에 해당된다)의 암반강도를 가지는 거대한 화강암체 기반암이 하단부에 존재하는 것이다(Fig. 2). 본 구간에 발달하는 불연속면은 사면을 정면에서 바라보았을 때, 좌측하향사교절리의 형태로 발달하고 있는 염기성암맥과 염기성암맥에 수반된 규칙절리이다. 이들 불연속면의 발달 방향은 85/330으로 이 구간의 사면경사방향인 50/140 구간에 대하여 거의 역방향을 이루고 있다(Fig. 3). 이러한 불연속면의 발달 패턴으로 불연속면은 전도파괴의 형태를

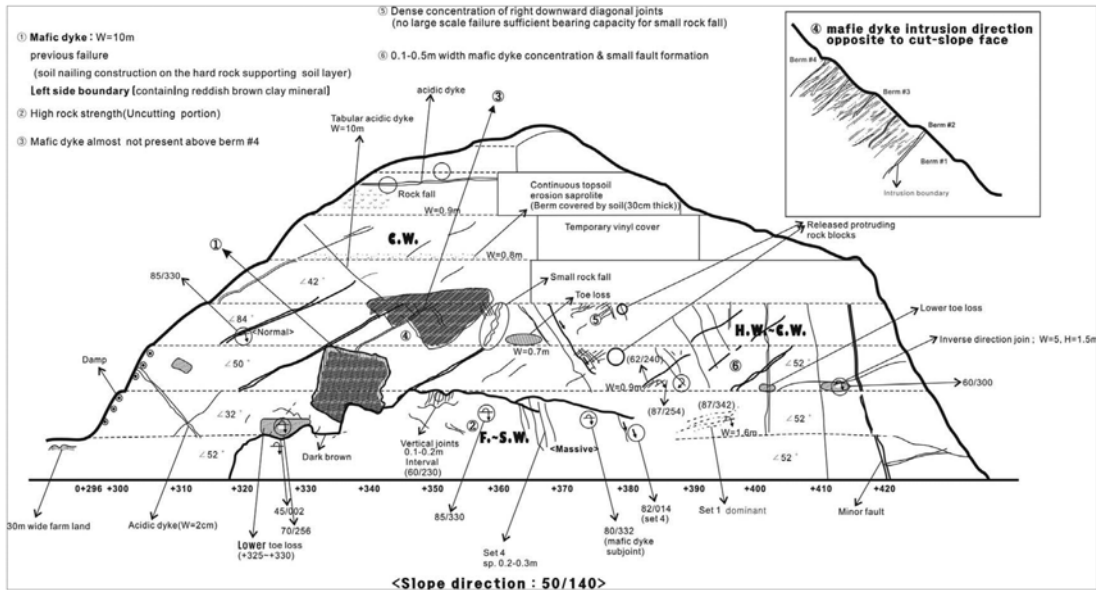


Fig. 1. Face map of the surveyed slope.



Fig. 2. Massive granite.

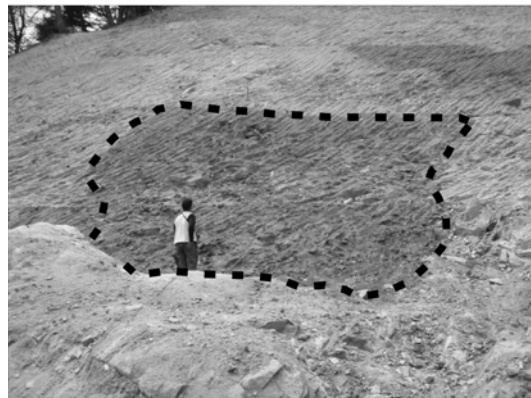


Fig. 3. Intrusive mafic dyke.

가지고 있으며, STA.0+320~0+330 구간 제1소단 직상단 부 범면은 하단부가 이탈되어 토우(toe)가 상실된 부분도 관찰된다(Fig. 4). 특히 STA.0+330~0+342 구간 제1소단과 제3소단 사이 범면, STA.0+340~0+360 구간 제3소단과 제4소단 사이 범면에는 폭 10m의 대형 염기성암맥이 관입되었다. 염기성암맥과 모암인 화강암체와의 관입경계면은 적갈색의 점토광물로 변질되어 있다. 과거 기록에 의하면 STA.0+330~0+342 구간 제1소단과 제3소단 사이 범면의 염기성암맥 관입부를 중심으로 붕괴가 발생된 이력이 있다. 이에 이 구간의 보강 효과를 도모하기 위하여 현재 쏘일 네일링이 설치되어 있는 상태이다.



Fig. 4. Rock loss of toe part at STA.0+315.



Fig. 5. Shallow failure at upper part of 4th berm.



Fig. 6. Non-existing rigid rock body at STA.0 + 380~0 + 420.

문제가 되는 염기성암맥과 동일 방향의 관입경계면 또는 수반된 규칙절리는 본 구간의 사면 전반에 걸쳐 나타나고 있으나, 이 후 후술할 STA.0+360 구간 이후에서 관찰되는 다양한 방향의 기타 불연속면의 발달은 거의 없다. 즉, 이 구간은 일방향의 불연속면이 문제가 되며, 정선 국도관리사무소 기록에 있는 가로균열과 방향적으로 동일한 방향일 뿐 진도파괴는 실질적으로 발생되지 않았고, 소규모 표층유실만이 진행될 뿐이었다(Fig. 5). 앞서 언급한 STA.0+340-360 구간의 역방향 절리, STA.0+360 구간 이후로 나타나는 수직절리 및 기타 불연속면의 경우, 후술할 STA.0+380 구간에서 관찰되는 인장균열을 충분히 유발시킬 것 같은 상황임에도 불구하고, 이를 지탱하는 보강 효과를 자연스럽게 발휘하고 있는 상황이었다. 이는 본 구간에 나타나는 거대한 암체가 상단부의 지반 이동을 억제하는 역할을 수행하고 있기 때문으로 판단된다.

STA.0+360~0+420 구간은 정밀현장조사시, 제4소단 상단부는 호우방호용 천막으로 피복된 상태로 직접적인 법면관찰이 어려운 상황으로 조사에 있어 다소 제약을 가지고 있었다.

본 구간은 염기성암맥과 동반된 규칙적인 역방향의 수직절리가 가장 우세하게 나타나며, 그 외 85/254 방향의 수직절리, 88/005 방향의 소규모 단층들이 혼재되어 나타나 STA.0+296-0+360 구간에 비하여 지반강도가 상대적으로 열악한 환경이다. 특히 이 구간 중 STA.0+380 지점 이후 구간은 앞서 언급한 거대 기반암체가 나타나지 않은 구간으로 하단부의 지지력이 충분히 확보되지 않은 상황이다(Fig. 6). 이러한 결과로, 상부 지반이 파쇄대 발달 방향에 기인한 진도파괴 형태로 연쇄적으로 회전하는 경향을 가지게 되며, 이러한 지반의 회전 결과, 가로 방향의 균열이



Fig. 7. Exposure at STA.0 + 400~0 + 420.

진행되고 있는 것이다.

STA.0+380~0+400 구간은 두 방향의 역방향 절리가 X자형 교호형태(conjugate joint)로 교차되어 있다(Fig. 7). STA.0+410 지점 부근은 사면 방향에 대하여 역방향인 절리가 잘 발달하고 있으며 이 절리와 동일한 방향으로 진도파괴가 진행 중에 있으며, 하단부 토우가 일부 빠져 있는 부분도 관찰된다(Fig. 8과 Fig. 9).

### 평사투영해석

대상 절토사면의 사면경사 및 사면경사방향은 50/140이며, 본 사면의 주요 불연속면의 대표값은 85/330(set 1), 85/255(set 2), 60/230(set 3), 80/015(set 4)이었다. 따라서 불연속면 발달 방향에 따른 암반사면의 안정성 평가를 위하여 평사투영해석을 근본으로 한 상용프로그램인 DIPS를



Fig. 8. Status of discontinuities at STA. 0 + 410.



Fig. 9. Tension crack by toppling failure.

이용하여 썩기파괴, 평면파괴, 전도파괴에 대한 안정성 해석을 실시하였다(Fig. 10과 Fig. 11). DIPS를 이용한 썩기파괴 안정성 결과, set 2와 set 3에 의한 썩기파괴 가능성이 인지되었다. 그러나, 현장조사에서 set 2와 set 3이 만나는 부분은 소규모 암탈락만이 발생하는 형태로 나타나며, 이들 불연속면의 연장성이 5 m 이하이므로 이 결과로 썩기파괴가 발생한다고 말하기는 어려우므로 최종적으로 썩기파괴 블록은 없는 것으로 판단하였다. 평면파괴 및 전도파괴 안정성 해석에서는 set 1의 불연속면의 극점(pole)이 전도파괴 불안정영역에 도시되어 전도파괴 가능성이 있는 것으로 확인되었으며, 이는 현장조사 결과와도 일치한다.

### 수치해석적 고찰

#### 수치해석 개요

평사투영해석은 불연속면의 특성(경사, 경사방향 등)을

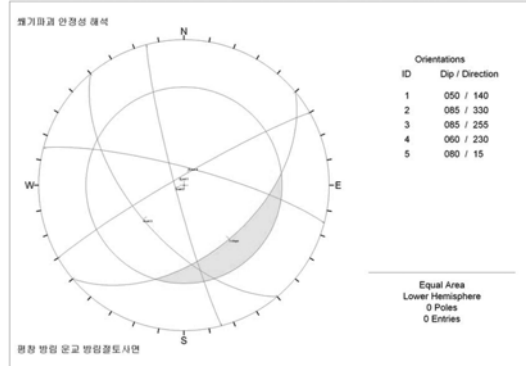


Fig. 10. Stability analysis of wedge failure using DIPS.

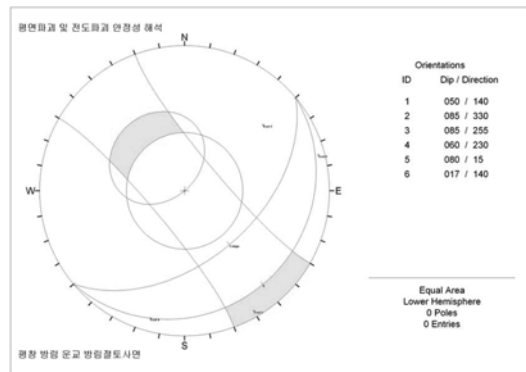


Fig. 11. Stability analysis of toppling and sliding failure using DIPS.

이용하여 파괴형태에 따른 파괴가능성 여부를 개략적으로 파악하는 해석방법일 뿐 실제 암반사면의 거동양상 및 변형정도는 파악할 수는 없다. 절토사면이나 터널 등의 안정성 검토 및 변형거동특성을 파악하기 위해 수치해석을 널리 사용하는데, 대부분의 상용화 된 프로그램들은 연속체 해석에 기반을 두고 있으므로 실제 불연속면의 지질 및 기하학적인 요인으로 인해 파괴가 발생하는 암반사면의 경우 연속체 수치해석 적용성에 한계가 있는 상황이다. 최근 불연속면을 고려하여 연속체 해석을 수행하는 방법에 대한 연구가 진행되고 있으며 그 중 대표적인 방법으로는 절리를 포함한 암반 자체의 강도를 감소시키는 방법이다. 그러나 실제 암반의 파괴형태가 암반자체의 변형이 아닌 불연속면을 중심으로 미끄러짐 및 회전에 의해 분리되며 발생하기 때문에 암반자체의 강도를 감소시킨다 할지라도 연속체해석으로 정확한 불연속 파괴거동양상을 규명할 수 없는 단점이 있다. 또 하나의 방법으로는 편재절리모델(ubiquitous joint model)을 적용함으로써 불연속면을 고려

하는 방법이 있다. 편재절리모델은 불연속면에 의해 블록으로 나누어진 불연속 암반을 불연속면의 특성이 반영된 물성을 가진 균질 연속체로 간주하여 해석하는 방법이다(박연준과 유광호, 1998). 그러나 편재절리모델의 경우 매질의 파괴는 불연속면에서 일어날 수 있지만 제한된 수(1, 2개)의 불연속면만을 고려할 수 있으므로 불연속면이 다양하고 복잡할 경우 이들의 위치, 분포 특성을 정확하게 반영할 수 없는 한계를 가지고 있다(박연준과 Dawson, 1997).

불연속면을 포함한 암반사면은 불연속면의 강도특성 뿐 아니라 실제 방향, 위치, 길이, 조합 등이 파괴여부를 결정짓는다. 그러므로 해석시 불연속면의 3차원 기하학적 특성을 정확히 반영하고 각각에 합리적인 강도특성을 부여하였을 경우 실제 발생하는 거동특성을 정확히 예측할 수 있다. 본 연구에서는 연속체해석에서 불연속면의 기하특성과 강도특성을 가능한 정확하게 모사할 수 있는 수치해석적 방법에 대해서 논하였다. 현장조사에서 획득한 불연속면의 지형특성을 반영하기 위해 3차원 해석을 수행하였으며 불연속면을 연속체해석에서 이질적인 경계특성에 주로 적용되는 계면요소(interface element)로 직접 모델링함으로써 불연속면이 사면거동에 미치는 영향을 정확히 파악하고자 하였다.

본 해석에서 사용된 프로그램은 유한요소법에 근거한 지반범용 수치해석 프로그램인 MIDAS/GTS (Geotechnical and Tunnel Software)를 이용하였다.

### RMR 시스템에 의한 강도정수 산정

조사대상 절토사면은 절취 암반 노두로 현장조사시 집중적으로 관찰되고 붕괴가 예상되는 구간에서 수집된 불연속면 자료를 바탕으로 강도정수를 산정하였다. 불연속면의 지반공학적 상태가 가장 불량한 불연속면은 set 1 (85/330)이므로 이를 대상으로 RMR 값을 도출하였으며 RMR 산정시 RQD 값은 Palmstrom(1982)에 의해 제안된 경험식을 이용하여 산정하였다. Table 1의 결과를 살펴보면 조사대상 절토사면의 전체적인 암반상태에 대한 RMR 값은 56.7점으로 등급인 양호(fair)한 암반으로 분류되었다.

대상사면의 지반강도정수는 산출된 RMR값을 이용하여 도출할 수 있다. 본 연구에서는  $RMR > 50$  인 암반에 대해 많은 시공 자료를 바탕으로 제안된 Bieniawski(1989)의 경험식을 적용하여 변형계수(E)를 산출하였다(식 (1)).

$$\text{Bieniawski} : E = 2RMR - 100 \text{ (GPa)} \quad (1)$$

암반의 점착력(c)과 내부마찰각( $\phi$ )은 각각 Bieniawski and Orr(1976)와 Truman(1988)이 제안한 경험식인 식 (2)와 식 (3)을 사용하였다.

**Table 1.** Values of RMR of the slope.

-	Classification	Status	Value	
RMR	Uniaxial Compressive Strength(MPa)	146.7	11.5	
	RQD (%)	64.8	13.0	
	Spacing(m)	0.2	8.2	
	Characteristics of Discontinuities	persistence(m)	21.0	0.0
		aperture(mm)	2.0	1.0
		roughness	slightly rough	3.0
		fill material	soil	4.0
	degree of weathering	high weathered	1.0	
	Hydraulic Condition	completely dry	15.0	
	Sum	(Fair)	56.7	

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

Name	Material Properties		
	Elastic Modulus (tonf/m <sup>2</sup> )	Cohesion (tonf/m <sup>2</sup> )	Internal Friction Angle(°)
Jointed Rock (Granite)	1340000	28.9	33

$$c = 5 \times RMR \text{ (Kpa)} \quad (2)$$

$$\phi = 0.5RMR + 5 \text{ (}^\circ\text{)} \quad (3)$$

위 경험식으로부터 산정한 암반의 강도정수는 다음과 같다.

### 계면요소

계면요소(interface element)는 균열면 또는 이질재료 간의 경계면 활동을 해석하기 위한 요소이다. 계면요소는 요소망을 세분화할 필요 없이 얇은 가상요소로 요소의 수직, 전단방향 강성계수와 점착력 및 내부마찰각 값을 적절히 사용하였을 경우 이질적인 경계에서 발생하는 미끄러짐 및 분리 거동특성을 파악할 수 있다(MIDAS IT, 2008).

계면요소는 일반적인 유한요소 정식화 과정을 사용하지만, 요소의 두께는 0으로 가정한다. 두께가 0인 계면요소를 수치 해석적으로 정의하기 위해서 벌칙강성(penalty stiffness)을 적용한다. 만약 벌칙강성이 너무 크게 되면 수치적인 문제가 야기되고, 너무 적은 경우에도 계면요소 상대변위의 정확한 결과값을 얻을 수 없으므로 적절한 벌칙강성값을 입력하여야 한다. 수치해석을 수행하기 위하여 벌칙방법에 근거하여, 상대변위(relative displacement)

$\Delta u$ 와 계면력(traction)  $t$ 의 관계는 식 (4)와 같은 구성방정식으로 정의된다.

$$t = D \cdot \Delta u \quad (4)$$

3차원의 경우  $t$ ,  $D$ ,  $\Delta u$ 값은 식 (5)와 같으며, 경계면상에 존재하는 적분점에서의 상대변위와 계면력을 Fig. 12와 같이 나타낼 수 있다.

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix}, \quad D = \begin{Bmatrix} k_n & 0 & 0 \\ 0 & k_s & 0 \\ 0 & 0 & k_t \end{Bmatrix}, \quad \Delta u = \begin{Bmatrix} \Delta u_n \\ \Delta u_s \\ \Delta u_t \end{Bmatrix} \quad (5)$$

계면요소에서의 상대변위  $\Delta u$ 는 상단(top)과 하단(bottom)에 위치하는 요소의 변위 차이를 이용하여 산정한다. 이를 위하여 계면요소의 상단 절점에서의 변위는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_i^{top} = \{u_i^{top}, v_i^{top}, w_i^{top}\}^T \quad (6)$$

요소내 임의의 좌표  $x$ ,  $y$ ,  $z$ 와 이동변위  $u$ ,  $v$ ,  $w$ 는 요소내 형상함수  $N$ 을 이용하여 식 (7), 식 (8)과 같이 나

타낼 수 있으며, 계면요소의 하단 절점에서의 변위 또한 같은 방식으로 산정될 수 있다.

$$x^{top} = \sum_{i=1}^N N_i^{top} x_i^{top}, \quad y^{top} = \sum_{i=1}^N N_i^{top} y_i^{top}, \quad z^{top} = \sum_{i=1}^N N_i^{top} z_i^{top} \quad (7)$$

$$u^{top} = \sum_{i=1}^N N_i^{top} u_i^{top}, \quad v^{top} = \sum_{i=1}^N N_i^{top} v_i^{top}, \quad w^{top} = \sum_{i=1}^N N_i^{top} w_i^{top} \quad (8)$$

**수치해석 조건**

해석 단면은 거대 기반암체가 나타나지 않으며 하단부의 지지력이 충분이 확보되지 않아 균열이 발생한 STA.0+380~STA.0+400 구간을 설정하였다. 균열이 집중적으로 발생한 6소단까지 해석에 반영하였으며 기하학적 특성을 반영하기 위해 3차원 비선형정적해석(Nonlinear Static Analysis)을 수행하여 사면의 변형양상 및 안전성을 판단하였다. 해석에 사용한 재료모델은 암반의 경우 탄소성 재료모델인 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였으며 RMR 값을 이용하여 사면의 강도정수인  $c$ 값과  $\Phi$ 값 및 변형계수  $E$ 값을 산정하였다. 절리면의 경우는 불연속경계면 특성을 나타

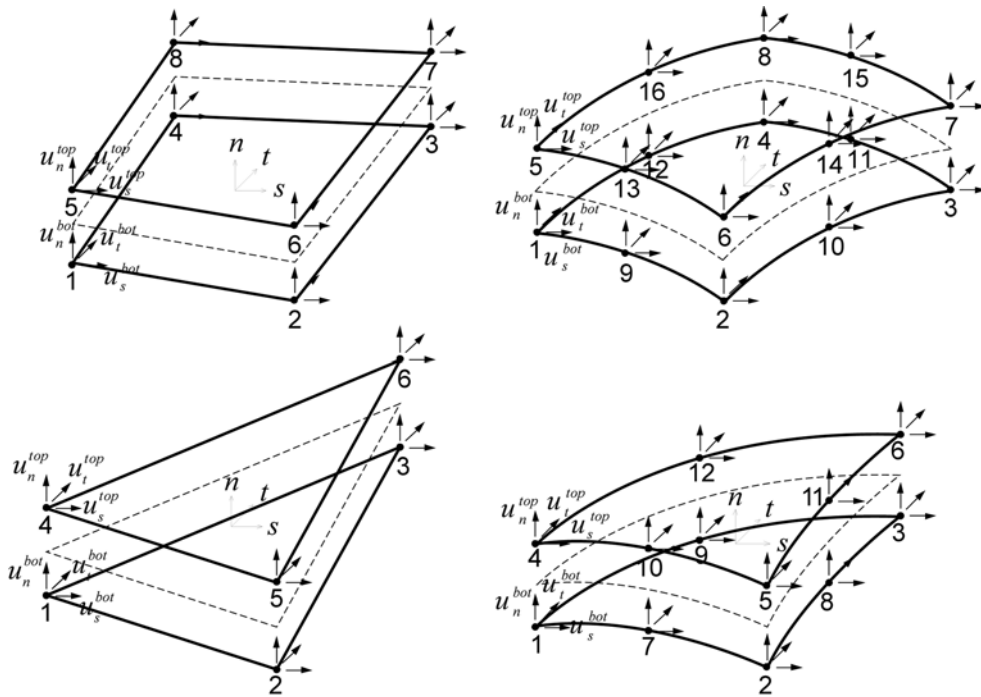


Fig. 12. Relative displacement and traction of surface interface element (MIDAS IT, 2008).

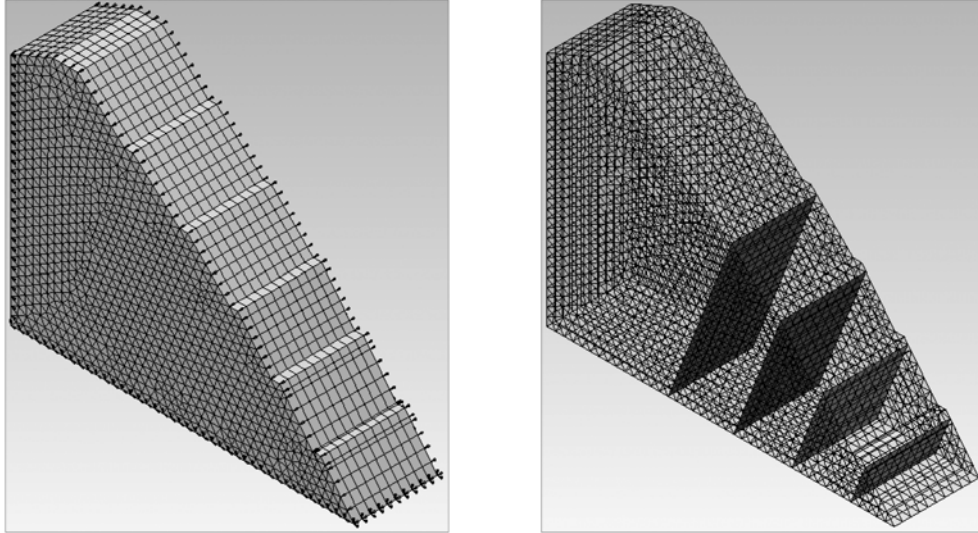


Fig. 13. 3D Modeling and boundary condition(left), Interface elements distribution(right).

Table 3. Material parameters in numerical analysis.

Classification	Elastic Modulus(tonf/m <sup>2</sup> )	Poisson's Ratio	Unit Weight(tonf/m <sup>3</sup> )	Cohesion(tonf/m <sup>2</sup> )	Internal Friction Angle(°)
Rock	1.34e+06	0.3	2.0	28.9	33
Discontinuity	-	-	-	0	20

내는 계면요소를 사용하여 모사하였으며 불연속면의 강도 특성은 현장에서 조사된 불연속면 특성(충진물, 거칠기 등)을 고려하여 경험식으로부터 산정하였다(Barton, 1973). 해석의 경계조건은 수직면(YZ 평면)의 경우 변위발생의 허용할 수 있도록 X방향만 구속하였고 전후면(XZ 평면)의 경우 인접구간의 지지력을 고려하기 위해 Y방향을 구속하였다. 해석모델 바닥면(XY 평면)의 경우 기반암에 의한 지지력 효과를 고려하기 위해 X, Y, Z 방향을 모두 구속하였다. 해석에 이용한 해석모델과 물성 및 경계조건은 다음과 같다(Fig. 13, Table 3).

### 해석 결과

변위거동양상을 살펴보면 전체적인 변형이 불연속면을 중심으로 집중되어 발생하는 것으로 나타났다. 변형정도는 상부에 위치한 계면요소 주변에서 더 큰 변형정도를 보이고 있다. 이는 불연속면의 연장성이 긴 특성으로 인한 것이기도 하며 해석 경계조건 설정시 바닥면에 대한 조건(모든 방향 구속)에 의해 상대적으로 경계조건과 인접한 하부 계면요소의 경우 변형이 억제되는 효과를 가져오기 때문인 것으로 판단된다. 만약 하부암 유실 등으로 인해 하부 지지력이 상실되거나 경사방향과 유사한 방향의 또

다른 불연속면이 공존할 경우 경계조건 설정시 이를 고려하여 경계조건을 설정해야 한다. 사면의 전체적인 변형거동양상은 Fig. 14와 같다.

불연속면에 의한 사면의 거동양상을 좀 더 자세히 살펴보면, 사면방향으로의 변위 즉, 수평변위의 경우 불연속면의 역방향 기하특성과 자중으로 인한 암반의 회전 거동양상이 관찰되었으며, 수직변위의 경우는 불연속면을 따라 미끄러짐이 발생하는 것으로 나타났다. 이는 급경사 절리면에 의해 분리된 암주들이 전방으로 경사짐에 따라 암주가 수평방향으로 이동하게 되고, 상대적으로 강도가 약한 불연속면 방향으로 암주사이에 미끄러짐이 발생하게 되는 거동양상으로 현장에서 관찰되는 인장균열 또한 이러한 거동으로 인해 발생한 것으로 판단된다. 해석결과 변위등고선을 살펴보면 계면요소를 중심으로 좌우 절점들이 분리되는 현상이 관찰된다(Fig. 15). 이는 실제 절점이 분리되는 것이 아니며 좌우 절점사이에 존재하는 계면요소의 변형에 의한 현상이다. 이는 전형적인 굴곡전도파괴의 거동특성으로 현장에서 관찰된 실제거동양상과 매우 유사하며 분리거동으로 인해 현장에서 관찰되는 균열 또한 해석결과 변형형상에서 관찰되고 있다(Fig. 16).



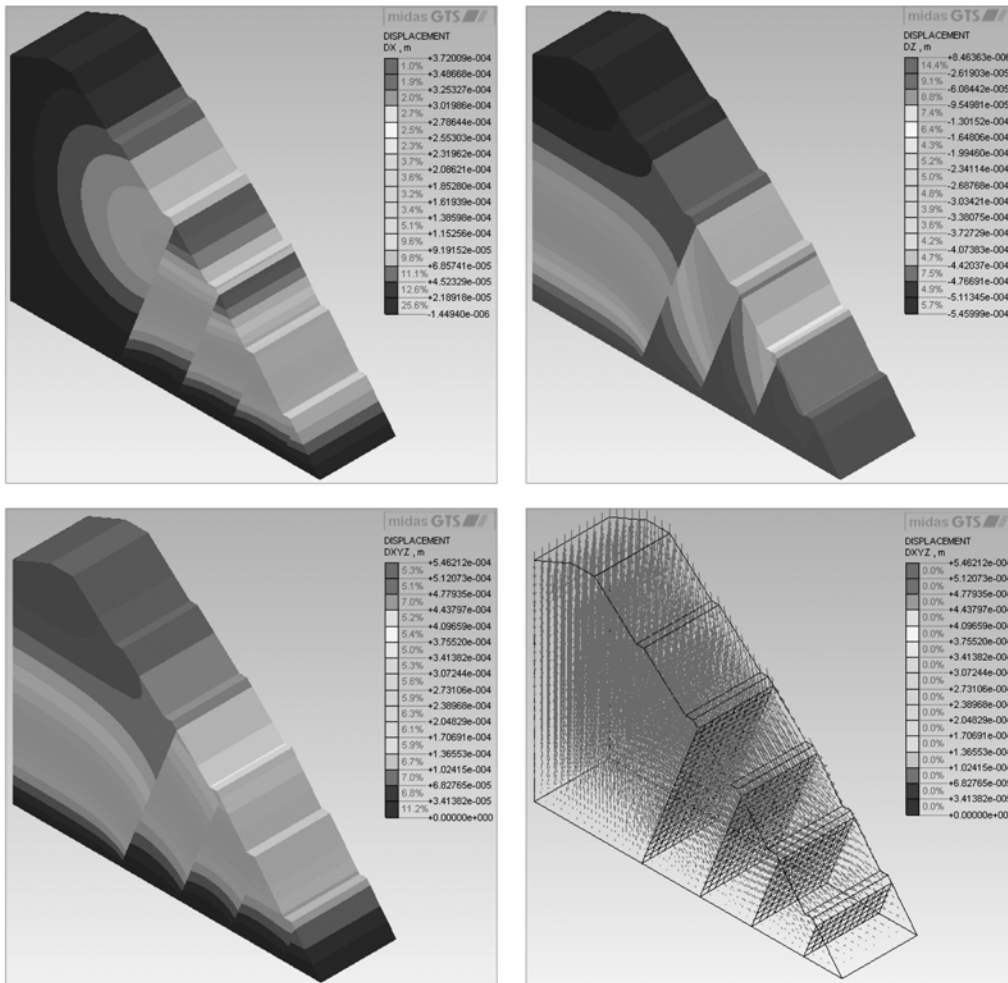


Fig. 14. Deformation contour of slope(DX, DZ, DXYZ, Vector Plot).

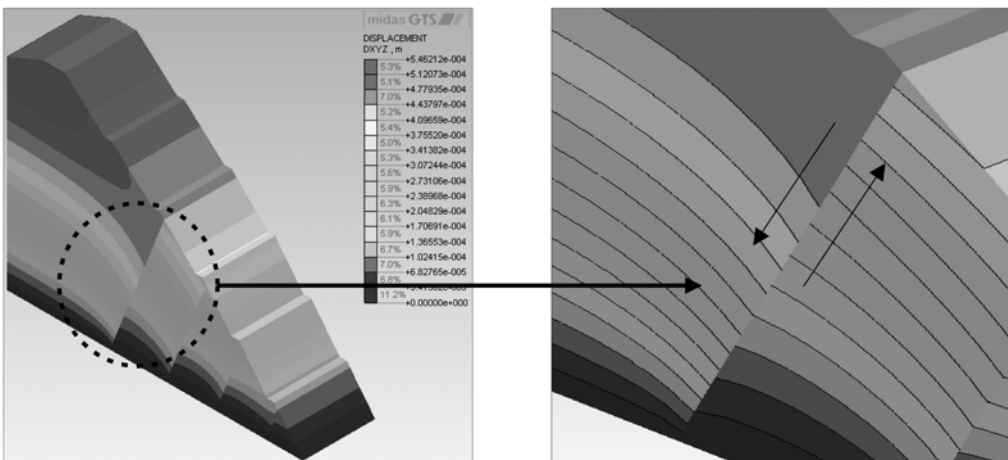


Fig. 15. Sliding behavior along discontinuity direction (Node separation in interface elements).

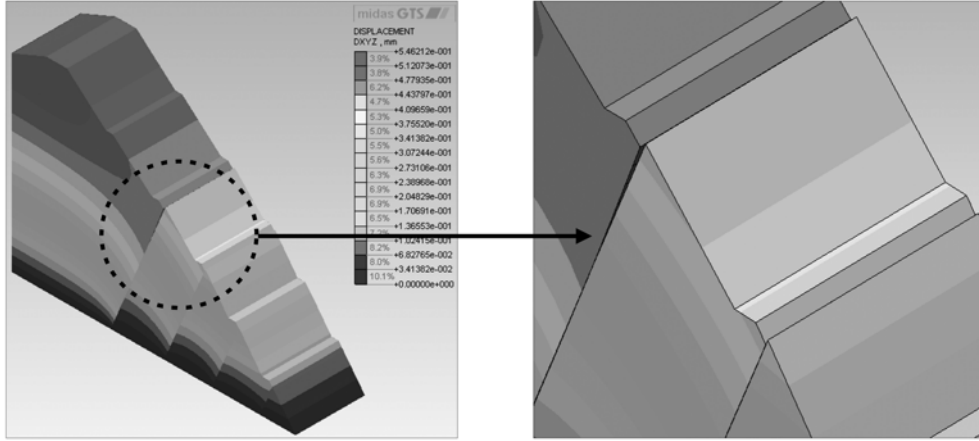


Fig. 16. Toppling behavior(cf. Fig. 9. Tension crack in situ.).

## 결 론

본 연구는 역방향 불연속면이 발달되어있는 암반사면에 대해 전도파괴에 대한 안정성을 평가하고 연속체해석에서 암반의 불연속면에 의한 변형거동특성을 모사할 수 있는 수치해석적 방법에 대해서 고찰하였다.

조사대상 사면은 화강암으로 구성되어있고, 염기성암맥이 사면방향에 대하여 역방향으로 관입되었으며, 현장조사를 통해 현황 및 불연속면 특성을 획득한 결과 이에 영향을 받은 역방향 불연속면들이 다수 분포되어 있는 특징을 보였다. 현장조사 시 획득한 자료를 바탕으로 평사투영 해석법을 이용하여 사면의 붕괴형태 및 가능성에 대해 평가하였다. 평가 결과 본 연구 사면은 썩기 및 평면파괴는 안정성을 확보하는 것으로 나타났으나 전도파괴에 대해서는 불안정성을 갖는 것으로 판단되었으며, 실제 현장에서 관찰되는 인장균열 역시 이를 뒷받침하고 있는 것으로 확인되었다.

평사투영해석으로부터 판단된 사면의 전도파괴 변형거동양상을 파악하기 위해 일련의 연속체 수치해석을 수행하였다. 암반사면의 붕괴는 불연속면의 기하형상, 위치, 조합에 의해서 결정되기 때문에 연속체해석에는 적용성에 한계가 있는 것으로 평가되어지나 최근 연속체 해석에서 불연속 거동특성을 모사할 수 있는 방법이 활발히 논의되고 있다. 본 연구에서는 사면내 불연속면의 기하특성 및 강도특성을 최대한 정확히 모사할 수 있도록 3차원 유한요소해석에 연속체 해석에서 불연속면 경계특성에 주로 적용되는 계면요소를 이용하여 수치해석을 수행하였다. 불연속면의 기하특성을 모사하기 위해서 현장조사시 획득

한 자료를 바탕으로 직접 3차원으로 모델링하였으며, 불연속면의 강도 및 변형특성을 부여하여 계면요소를 생성하였다.

해석 결과 사면의 거동양상이 실제 현장에서 발생한 변형특성과 매우 유사한 결과를 나타내었다. 전체적인 변형이 불연속면을 중심으로 발생하였으며, 사면방향으로는 암블록 자중에 의한 분리거동 현상이 관찰되고 불연속면 방향으로는 상대적으로 약한 전단강성에 의해 미끄러지는 전형적인 굴곡전도파괴 거동특성이 확인되었다. 이는 연속체 해석에서 불연속면의 거동특성을 모사할 수 있는 방법에 대한 가능성을 의미하며, 불연속면의 기하특성, 강도특성, 변형특성 등을 실내의 실험 혹은 경험식을 통해 정확히 산정하였을 경우 연속체해석에서 암반사면의 파괴거동을 정확하게 평가할 수 있는 방법으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- 박연준, Dawson E.M., 1997, 편리절리모델의 유용성과 한계성, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, 7, 202-207.  
 박연준, 유광호, 1998, 편재절리모델을 이용한 절리 암반 사면의 안정성 해석, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, 8, 287-295.  
 정창희, 이돈영, 유양수, 강기우, 1979, 평창·영월 지질도폭 설명서, 자원개발연구소, 19.  
 Barton, N.R. 1973, Review of a new shear strength criterion for rock joints, Engineering Geology, Elsevier, 7, 287-332  
 Bieniawski Z.T., and C.M. Orr., 1976, Rapid site appraisal for dam foundations by the geomechanics classification, Proc. 12th Congr. Large Dams, ICOLD, Mexico

City, 483-501.  
 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.  
 Bieniawski Z.T., 1989, *Engineering rock mass classification*, John Wiley & Sons.  
 MIDAS IT, 2008, *MIDAS/FEA analysis manual*, 153-164.  
 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  
 Truman, R., 1988, *An evaluation of strata support techniques in dual life gateroads*, Ph.D Thesis, Univ. of Wales.

---

2009년 9월 9일 원고접수, 2010년 3월 2일 게재승인

**최지용**

한국건설기술연구원 지반연구실  
 411-712, 경기 고양시 일산구 시민대로 1190  
 Tel: 031-910-0227  
 Fax: 031-910-0561  
 E-mail : chjy@kict.re.kr

**김승현**

한국건설기술연구원 지반연구실  
 411-712, 경기 고양시 일산구 시민대로 1190  
 Tel: 031-910-0524  
 Fax: 031-910-0561  
 E-mail : sshkim@kict.re.kr

**구호본**

한국건설기술연구원 지반연구실  
 411-712, 경기 고양시 일산구 시민대로 1190  
 Tel: 031-910-0217  
 Fax: 031-910-0561  
 E-mail : hbkoo@kict.re.kr