

불연속면의 특성을 고려한 보은지역 암반사면 안정성해석

이지수^{1*} · 박혁진² · 민경덕¹ · 구호본²

¹연세대학교 지구시스템학과, ²한국건설기술연구원 토목연구부

Rock Slope Stability Analysis in Boeun Region Considering Properties of Discontinuities

Ji Soo Lee^{1*}, Hyuck Jin Park², Kyung Duk Min¹ and Ho Bon Koo²

¹Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul, 120-749, Korea

²Civil Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Koyang, 411-712, Korea

The study area, Boeun-eup Boeun-kun, belongs to Ogchon metamorphic belt which is highly metamorphosed and consisted of complex geologic formations. Even though the geological structures and formations are complex and metamorphosed, the geological investigation and consideration are not enough and consequently the plane failure is occurred in the rock slope which was under construction on 1 : 0.5 gradient. This area is assessed as unstable and additional failure is possible by the discontinuity with same direction of failure surface. Therefore, the authors evaluate the slope stability using various analysis methods such as SMR, stereographic projection method, and the limit equilibrium analysis. In order to analyze stress redistribution and nonlinear displacement behavior caused by stress release, the authors conduct numerical analysis with UDEC and then the behavior of rock mass is analyzed after reinforcements are applied.

Key words : plane failure, SMR, stereographic projection method, limit equilibrium method, UDEC

본 연구지역인 충북 보은군 보은읍 일대는 옥천변성대에 속하며, 도로공사구간 중 1 : 0.5의 구배로 절취한 암반사면내의 일부구간에서 평면파괴가 발생하였다. 이 구간은 파괴면과 동일한 방향성을 갖는 불연속면에 의해 추가붕괴가 예상되는 등 불안정한 상태이다. 따라서, 본 사면에 대해 SMR, 평사투영법, 한계평형법으로 안정성을 해석하였다. 그러나, 이러한 방법으로 해석할 수 없는 절취에 따른 암반사면의 응력재분배 및 비선형적인 변위거동에 대해서는 UDEC을 이용하여 수치해석하고, 보강공법을 적용하여 안정성을 해석해 보았다.

주요어: 평면파괴, SMR, 평사투영법, 한계평형법, UDEC

1. 서 론

도로확장공사로 인해 발생하는 절취사면은 현장상황을 반영하여 안정성을 해석해야 한다. 특히, 암반사면인 경우 암반중의 절리, 층리, 단층과 같은 불연속면의 방향성 및 물리적 특성이 사면안정성에 미치는 영향이 가장 크므로 이들의 특성을 고려해야 함이 필수적이다. 그러나, 국내의 사면절취공사는 일반적으로 암반강도에 의해 정해진 획일적인 절취구배를 따르는 경향이 있다.

본 연구지역의 경우에는 다양한 암종과 연장성이 발달하는 불연속면들이 사면내에 분포하나 이들 불연속면의 특성을 충분히 고려하지 않고 기존의 도로시방서에 규정된 절취구배로 공사도중 붕괴가 발생하였다.

본 연구대상 사면은 충북 보은군 보은읍 일대의 도로공사구간에 위치한 암반절취사면으로 1999년 4지구 사면에서 평면파괴가 발생하였다. 이는 사면의 주향과 유사한 방향성의 불연속면과 이를 수직으로 가로지르는 암맥에 의해 붕괴가 발생한 것으로서, 본 사면은 옥천변성대에 속하는 지역으로 높은 변성도와 심한 풍화도 및 복잡한 지질구조를 나타낸다. 따라서, 단일한

*Corresponding author: idjslee@hanmail.net

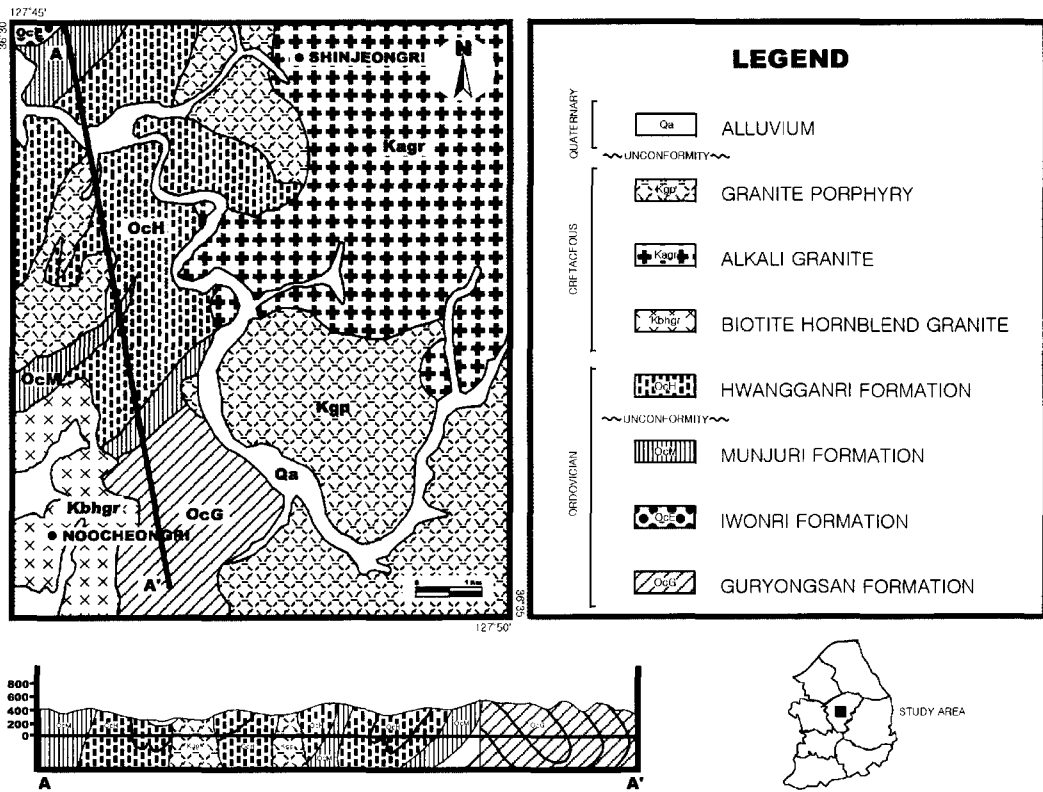


Fig. 1. Geologic map of the Boeun area (Lee et al., 1973).

사면안정성 해석방법으로 본 연구지역에 대해 적용시 부정확한 결과를 나타낼 수 있으므로, 본 연구에서는 Slope Mass Rating(SMR), 평사투영법, 한계평형법, 수치해석을 통하여 다각도의 사면안정해석을 수행하고자 하였다.

2. 현장 조사

본 연구에서는 대상사면에 대한 안정성해석에 필요한 입력자료들을 구하기 위한 현장조사를 수행하였으며, 이를 위하여 현장 지표지질조사, face mapping, scanline survey를 통한 불연속면 조사 등이 수행되었다.

2.1. 일반 지질

연구대상 사면은 옥천대에 위치하며, 옥천대는 제천-문경선을 경계로 하여 북동부의 옥천비변성대와 남서부의 옥천변성대로 구분된다. 옥천층군은 옥천변성대의 주된 구성원으로 제천-문경선에서 남서쪽으로 갈수록 변성도가 높다. 연구대상 사면이 위치한 보은은 변성

도가 높은 지역에 속하며, 따라서 본 사면은 높은 변성도를 보이며 복잡한 지질구조를 나타낸다.

보은지역에는 화강암류가 옥천층군을 관입하고 있으며, 보은 화강암체는 이 지역에서 저반상으로 분포한다(Fig. 1). 백운모를 포함하는 규장질 암맥(폭 수 십 cm 정도)이 암체 곳곳을 관입하고 있으며, 반화강암질 암맥 및 염기성 암맥들도 역시 화강암체의 곳곳에 관입해 있는데, 그 경계부는 매우 뚜렷하고 암상에서도 위의 규장질 암맥과는 다르며, 규장질 암맥보다도 후기의 관입으로 생각된다(좌용주, 1996). 연구지역의 암반사면에서도 이러한 양상이 뚜렷하게 나타난다.

2.2. 현황 및 현장 지표지질 특성

본 절취사면은 60°/230°(경사/경사방향)의 방향성을 가지며, 사면의 길이는 약 140 m, 최대높이는 약 35 m이다. 본 사면의 구성암종은 0~60 m 구간에서는 셰일이 분포하며, 60~100 m 구간에서는 점판암이, 100~140 m 구간에서는 화강섬록암이 분포되고 있다. 사면의 풍화정도는 셰일부가 심한 풍화(highly

STUDY AREA

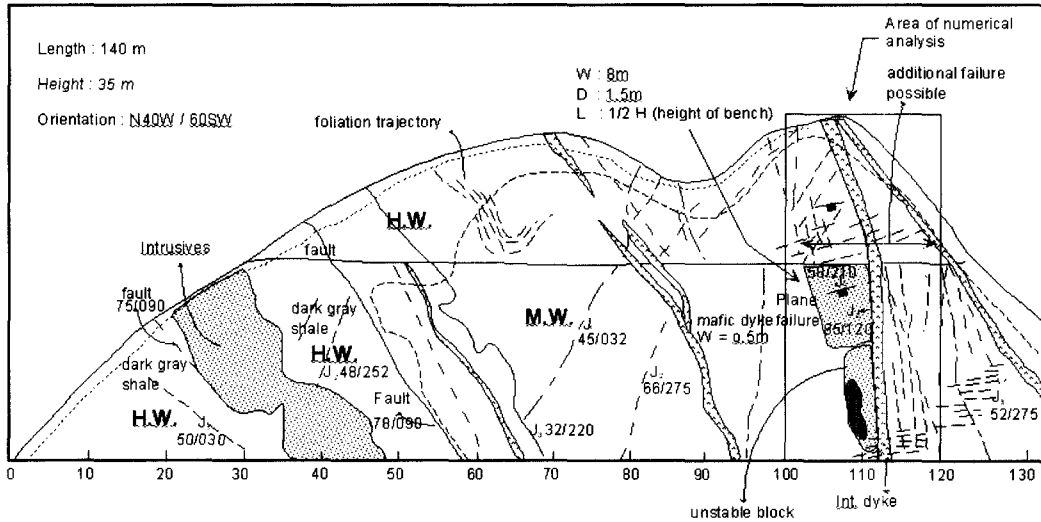


Fig. 2. Face mapping for study region of numerical analysis

weathered)를 보이며, 나머지 부분은 보통 풍화 (moderately weathered)를 보인다. 사면 전반적으로 암맥이 우세하며, 사면의 좌측부에는 세일부가 심하게 습곡되었고, 중앙부에는 단층 및 파쇄대가 분포하며, 우측부의 파괴발생 구간에는 사면의 주향과 유사한 방향의 불연속면이 발달하고 있다. 특히 절취사면의 102~113 m 구간은 58°/210°의 방향성을 갖는 불연속면을 따라 평면파괴가 발생하였으며, 이 불연속면으로 인해 파괴구간 직하부에서 추가붕괴가 예상되는 등 본 절취사면의 안정성이 가장 취약한 구간이다(Fig. 2). 이 구간에는 85°/120°의 방향성을 갖는 염기성 암맥이 발달하며, 암맥의 접촉부를 따라 접촉변성작용에 의한 불연속면 전단강도의 감소와 연약면의 형성으로 불안정화된 것으로 보인다. 파괴구간 우측부에는 절취공사시 발파로 생긴 조밀한 인장균열들로 인해 소규모 낙석이 예상된다.

2.3. 불연속면의 특성

본 연구지역 일대는 6개 지구의 절취암반사면이 존재하며, 본 연구에서는 이 중 평면파괴가 발생한 4지구 사면에 대하여 정밀 현장조사 및 안정성해석을 수행하였다. 앞서 논의된 바와 같이 본 지역 암반사면의 안정성은 불연속면에 의해 크게 좌우되고 있으며, 따라서 불연속면의 특성을 파악하기 위해 ISRM(1978b)에 제시된 기준에 의거하여 scanline 조사를 수행하였다. Scanline 조사에 의해 본 대상사면으로부터 총

219개의 불연속면 특성이 획득되었으나, 현장조사시 육안관찰에 의해 본 사면안정성에 가장 영향을 미칠 수 있는 3개의 불연속면군을 선정하였다.

현장에서 관찰된 3개의 불연속면군 중 set 1(58°/210°)은 평면파괴가 발생한 불연속면으로서 사면의 방향(60°/230°)과 유사하며, 파괴구간 주변에서 8~10 m의 연장성을 보이므로 추가파괴의 가능성이 있을 것으로 판단된다(Fig 2). Set 2는 set 1을 수직으로 가로지르며 연장성이 10 m 이상인 염기성 암맥의 접촉부에 발달한 불연속면으로, 파괴구간의 측면 경계부로서 미끄러짐에 저항하지 못하는 이완면으로 작용하여 평면파괴가 발생한 것으로 보인다. 또한, Set 3는 파괴구간 우측부의 조밀한 인장균열로서, 이는 발파에 의해 생긴 것으로 추정되며 이로 인한 소규모의 낙석이 예상된다. 100~120 m 구간의 대부분의 불연속면들에서 충전물로는 미사(silt)가 협재되어 있으며, 지하수의 누수정도는 축축한(damp)편으로 관찰되었다. 이를 요약하면 Table 1과 같다.

3. 실내 암석시험

본 연구대상 사면을 구성하고 있는 암반의 강도 특성을 파악하기 위하여 현장조사시 채취한 신선한 암석 블록들을 NX size(54mm)로 성형 후, ISRM(1974a, 1978b, 1978c)에서 제시한 기준에 의해 일축압축 및 삼축압축시험과 직접전단시험을 수행하였다.

Table 1. Quantitative description of discontinuities.

	Set 1	Set 2	Set 3
방향성	58°/210°	85°/120°	52°/275°
간격(m)	0.8~1	0.1~0.3	0.3
틈(mm)	1~5	1	0~2
연장성(m)	8~10	10	0.5
거칠기	거칠 (rough)	거칠 (rough)	부드러움 (smooth)
충진물	미사(silt)	미사(silt)	미사(silt)
벽면강도(MPa)	180	180	180
누수	축축함 (damp)	축축함 (damp)	축축함 (damp)

Table 2. Uniaxial compressive strength of rocks (Kim *et al.*, 1994).

암석	일축압축강도 (kgf/cm ²)	암석	일축압축강도 (kgf/cm ²)
화강암	1,000-2,500	석회암	300-2,500
섬록암	1,800-3,000	석탄	50-500
감람암	1,800-3,500	규암	1,500-3,000
현무암	1,500-3,000	편마암	500-2,000
사암	200-1,700	대리석	1,000-2,500
세일	100-1,000	슬레이트	1,000-2,000

Table 3. Classification of rocks in terms of strength (Lee *et al.*, 1997).

암반분류	풍화암	연암	중경암	경암	극경암
일축압축강도 (kgf/cm ²)	125이하	125-400	400-800	800-1,200	1,200이상

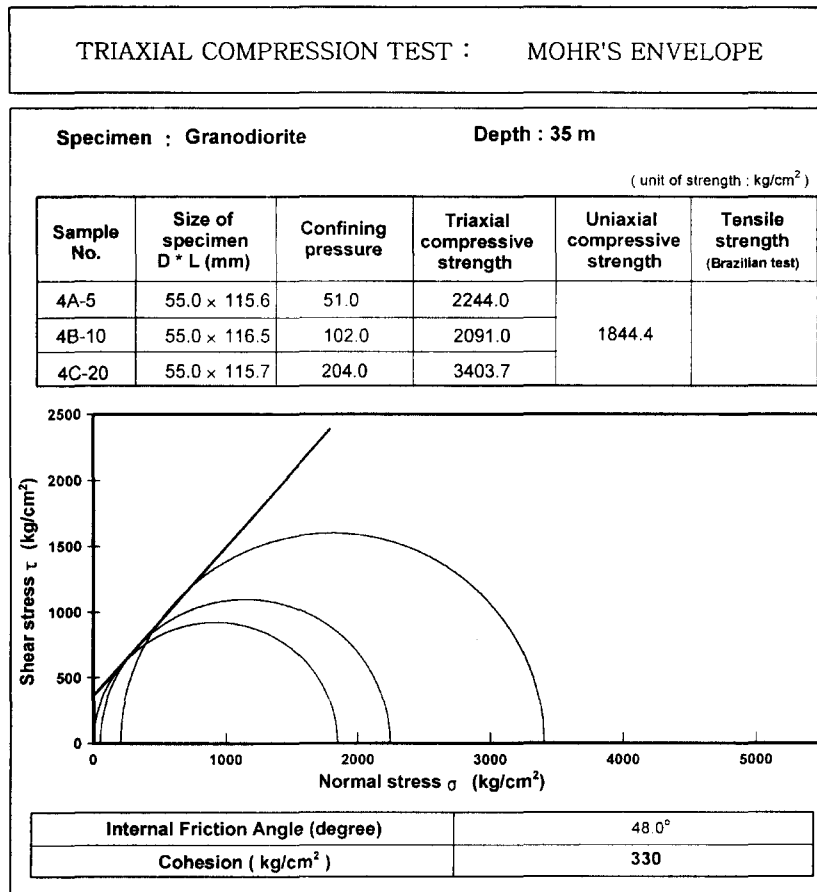


Fig. 3. Mohr's envelope.

3.1. 일축압축시험

일축압축시험은 수치해석시 암석의 영율(E)와 포아송비(ν)를 구하기 위해 수행되었다. 본 연구에서 사용된 일축압축시험기는 SHIMADZU사의 UTM UH-100A로 총100톤의 하중을 가할 수 있다. 본 사면내 평면파괴 구간에서 채취한 신선한 화강섬록암 시료를 공극수압의 영향을 배제하기 위해 실내에서 자연건조시킨 후 시험을 수행한 결과 일축압축강도는 1844.4 kgf/cm²이다. 일반적인 암석의 일축압축강도는 Table 2와 같으며, 본 시험에서 구한 강도값이 화강암과 섬록암의 일축압축강도 범위에 해당함을 알 수 있다. 또한, Table 3의 암석 강도분류에 의하면 본 암석은 암질이 아주 밀착된 단단한 극경암임을 알 수 있다.

3.2. 삼축압축시험

삼축압축시험은 본 수치해석에서 암석의 점착력(c)와 내부마찰각(ϕ)를 구하기 위해 수행되었다. 본 연구에서 사용된 삼축압축시험기는 SBEL사의 Stiff Test System Model STS-1000으로 총 하중 1,000,000 lbs(4.45MN)을 가할 수 있으며, 30×10⁶ lbs/inch(5.25MN/mm)의 강성을 갖는다. 본 시험의 결과를 이용하여 작도한 모어원은 Fig. 3과 같다. 모어원을 도식하여 암석의 내부마찰각과 점착력을 구하기 위해 구속압을 5, 10, 20 kg/cm² 등으로 가하여 실시하였다. 파괴포락선을 작도한 결과 암석의 내부마찰각은 48.04°, 점착력은 330 kg/cm²이다. 일축압축 및 삼축압축시험에서 구한 암석에 대한 영율, 포아송비 및 기타 자료들을 요약하면 Table 4와 같다.

3.3. 직접전단시험

직접전단시험은 불연속면의 특성을 고려한 수치해석을 하기 위하여 절리면의 점착력과 내부마찰각을 구하기 위해 수행되었다. 암반사면의 붕괴는 불연속면의 특성에 크게 좌우되므로 전단시험을 통한 절리면의 물성 획득이 필수적이다. 본 연구에서 사용된 전단시험기는

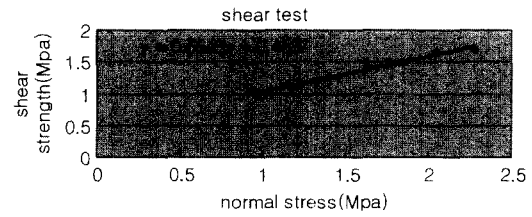


Fig. 4. Shear strength-normal stress graph.

ELE사의 Portable Shear Box Assembly 77-1030으로, 시료의 최대면적 155 mm×125 mm(4.5 inch×5in) 혹은 최대 직경 102 mm(4in)에 대해서 시험할 수 있다. 본 직접전단시험은 전단면에 대한 수직응력의 함수로써 잔류전단강도를 구하였으며, 그 결과는 Fig. 4와 같다. 잔류전단강도는 시험면에 대해 핸드펌프로 가한 수직응력외에 상부 전단박스의 무게와 시료의 상부를 고정시킨 시멘트의 무게를 더한 2208.74N, 2708.74N, 3208.74N, 3708.74N, 4208.74N, 4708.74N, 5208.74N의 7단계로 수직응력을 증가시키며 실험을 실시하였고, Coulomb의 직선파괴식으로 시험결과를 선형 회귀분석하여 마찰각과 점착력을 구하였다. 점착력은 겔보기 점착력으로서 0.4587MPa이나, 본 연구에서는 대상 사면의 안정성을 보수적으로 해석하기 위해 점착력을 0으로 고려하였다.

4. 암반사면 안정성 해석

4.1 SMR에 의한 암반사면평가

SMR(Slope Mass Rating)은 Bieniawski(1976)에 의해 제안된 RMR(Rock Mass Rating)을 수정하여

Table 5. RMR classification of jointed rock mass (Bieniawski, 1976).

	고려 사항	기재	등급	
RMR	일축압축강도 (MPa)	180	13.8	
	R.Q.D. (%)	66.9	13.4	
	불연속면 간격 (m)	0.8	13.5	
	불연속면 상태	연장성 (m)	9	0.7
		틈 (mm)	3.0	1.0
		거칠기	거침(Rough)	5.0
		충진물	미사(Silt)	2.0
		풍화도	보통 풍화	3.0
	지하수 상태	촉촉함 (Damp)	10.0	
	총합	II (양호)	62.4	

Table 4. E, estimated from triaxial compression test.

Diameter (mm)	55.0
Height (mm)	115.6
Weight (gf)	700.0
Weight of unit (kgf/cm ³)	2.55
Deviatoric Stress (kgf/cm ²)	2258.28
Confining Pressure (kg/cm ²)	51.0
Young's modulus(E) (×10 ⁵ kgf/cm ²)	7.0
Poisson's ratio (γ)	0.27

Table 6. SMR classification of jointed rock mass (Romana, 1993).

SMR	F1 : 불연속면과 사면 주향 사이의 차이각	20°	0.7
	F2 : 평면파괴 형태를 갖는 불연속면의 경사각	58°	1
	F3 : 사면과 불연속면 경사각 사이의 관계	-2°	-50
	F4 : 사면의 굴착방법	제어발파	8
	RMR+(F ₁ ×2×3)+F ₄	IV(불안정)	35.4

Romana(1993)에 의해 제시되었으며, 암반사면의 1차적인 안정성을 평가하는데 매우 유용한 방법으로, 불안정한 파괴형태와 이를 안정화시키기 위해 요구되는 지보에 관한 대책공법을 제시하고 있다. SMR에서는 RMR에서 획득된 값을 근거로 사면에 대한 요소들을 보정하여 그 값을 획득한다.

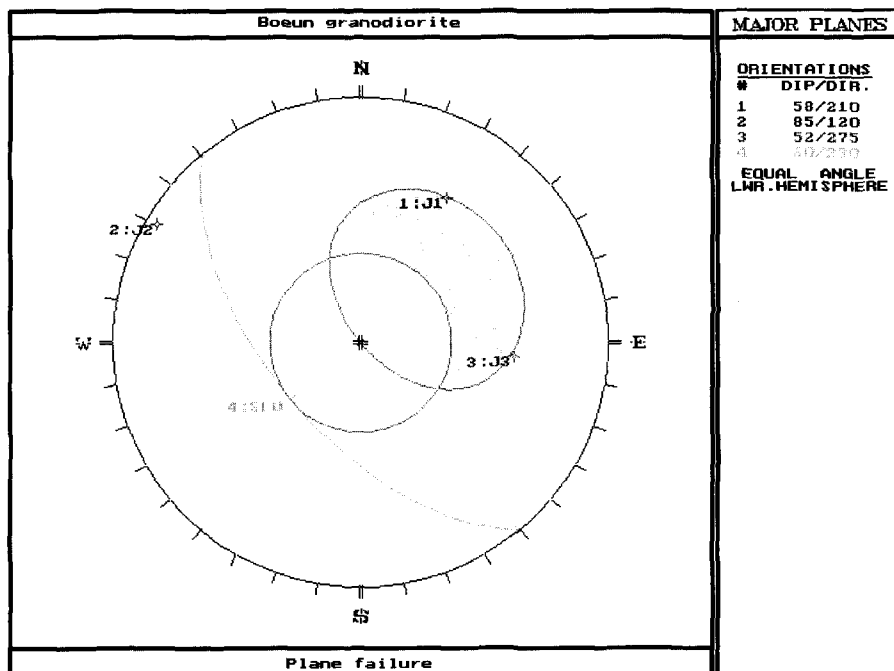
본 연구대상 암반사면평가에서 평면파괴구간에 대한 RMR은 62.4점으로 등급 II(Favorable)에 속하나(Table 5), SMR은 35.4점으로 등급 IV(Unstable)에 속한다(Table 6). SMR의 등급 IV는 암반상태 및 사면안정성이 불안정함을 나타내며, Romana(1993)에 의하면 붕괴형태는 평면파괴, 대규모 썩기파괴가 발생될 수 있고, 이에 대한 보강대책으로는 광범위한 보강이 요구됨을 나타낸다. 평가결과 RMR과 SMR의 값이 크게 차이가 나는 이유는 SMR을 구할 때 평면파괴를 유발시킬 가능성이 있는 불연속면에 대한 방향보정에 따른

결과이다. 본 연구대상 사면에 대한 SMR 평가결과는 등급 IV(Unstable)로서 사면이 전반적으로 불안정하다고 판정되며, 이미 평면파괴가 발생하였고 추가붕괴가 예상되는 현장상황과 일치함을 알 수 있다.

4.2. Kinematic slope stability analysis

Kinematic analysis는 대상 암반사면내의 불연속면과 사면의 상대적인 위치에 의해 발생가능한 사면파괴의 유형을 기하학적으로 분석하는 방법이다. Kinematic analysis는 불연속면, 사면, 상부사면의 방향성을 조합하여 분석하며, 이 분석은 일반적으로 불연속면의 방향성 또는 불연속면들 교차선의 방향성에 대하여 평사투영망 위에 도시함으로써 수행되어진다(Kliche, 1999).

해석결과 Fig. 5에서와 같이 J₁(58°/210°)이 평면파괴의 불안정영역 내에 도시되어 불안정한 것으로 보인다. 이는 100~120 m 구간에서 평면파괴를 발생시킨 불연

**Fig. 5.** Plane Failure

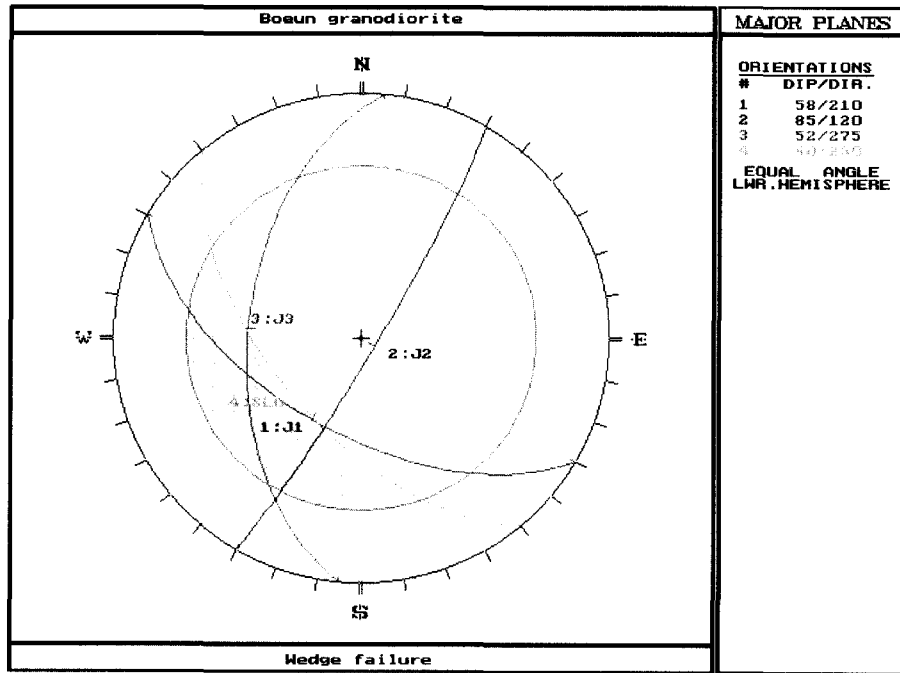


Fig. 6. Wedge Failure.

속면과 동일한 방향으로 현장의 상황과 잘 일치되고 있다. J₃(52°/275°)도 불안정 영역에 근사하게 도시되나, J₃의 경우 불연속면과 사면의 주향차이가 20° 이상 나므로 Norrish&Willey(1996)의 평면파괴 발생조건에 해당되지 않는다.

췌기파괴 해석에서는 J₁과 J₃의 불연속면 교차선이 불안정영역에 도시되며(Fig. 6), J₁과 J₂의 불연속면 교차선이 이 영역에 근사하게 도시되므로 이들 불연속면 조합에 대해서도 안전율을 구해야 한다. 그러나, 본 췌기파괴 해석에서는 사면내 100~120 m 구간을 대상으로 하였으며, 현장조사결과 J₁과 J₃는 발달하는 위치가 달라 두 불연속면이 서로 교차하지 않으므로 췌기파괴의 가능성은 없는 것으로 판단된다. 또한, J₁과 J₂의 불연속면 조합은 평면파괴가 발생한 주 불연속면인 J₁과 이에 대해 이완면으로 작용한 J₃로, 현장조사결과 추가적인 평면파괴의 가능성은 있으나 췌기파괴의 가능성은 거의 없는 것으로 판단되었다.

4.3. Kinetic slope stability analysis

Kinematic analysis 결과 사면이 불안정할 가능성이 있다고 판단되면, kinetic stability 분석을 수행하여야 하며 대개 한계평형해석을 이용하여 안전율을 구함으

로서 평가한다(Park, 1999). 따라서 본 연구에서도 kinematic stability analysis를 통해 불안정한 것으로 판단된 불연속면들에 대하여 kinetic analysis를 수행하였다. 본 연구에서는 지하수위가 사면의 안정성에 미치는 영향을 검토하기 위해 kinematic analysis 결과 평면파괴 가능성이 있는 J₁(58°/210°)에 대하여 kinetic analysis를 수행하였으며, 사면건조시(건기시) 안전율과 사면높이의 1/2에 이르는 지하수위(우기시)를 가정하여 안전율을 구하였다.

(i) 건조사면인 경우

건조사면은 사면이 완전배수가 된다고 가정하는 상태로 인장균열이나 미끄러짐면에 작용하는 수압이 없음을 의미한다. 사면내에 수분이 있을 수는 있지만 수압이 작용하지 않는 한 사면의 안정성에 영향을 미치지 않는다고 볼 수 있다. 이러한 건조사면에서는 부양력U, 수압 V는 모두 0이 되고, 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

$$F = \frac{cA}{W \sin \phi_p} + \cot \phi_p \tan \phi \tag{1}$$

연구지역의 시료에 대한 직접전단시험을 통해 불연속면의 내부마찰각 30°, 겉보기 점착력 458.7 KPa을 구

했으나, 본 연구에서는 대상사면에 대한 건조시의 점착력을 5 KPa(=kN/m²)로 낮게 가정하여 보수적인 안정성 해석을 수행하였으며, 이 때의 안전율은 0.665이다.

(ii) 사면높이의 1/2까지 지하수위를 고려한 경우

본 연구대상 사면에 대한 지하수위의 실제 측정이 이루어지지 않았으며, 따라서 본 사면에 대한 지하수의 영향을 고려하여 안정성을 해석하기 위하여 사면높이의 1/2까지 지하수위가 상승할 수 있는 것으로 가정하고 식(2)를 이용하여 안전율을 구하였다.

$$F = \frac{cA + (W \cos \phi_p - U - V \sin \phi_p) \tan \phi}{W \sin \phi_p + V \cos \phi_p} \quad (2)$$

이때 지하수의 영향에 의해 불연속면 점착력은 0으로 가정하였으며, 이러한 조건으로부터 획득한 안전율은 0.28로서 매우 불안정한 상태이다. 건기시에 비해 안전율이 현격히 낮은 이유는 불연속면에 작용하는 지하수에 의한 부양력으로 인해 미끄러짐에 저항하는 힘이 감소했기 때문인 것으로 판단된다.

그러나, 한계평형법은 결정론적인 해석(deterministic analysis)으로서, 결정론적인 방법은 단일 안전율에 의거하여 전체사면의 안정성을 평가하므로 분석결과의 정확도에 논란의 여지가 있다(Priest and Brown, 1983). 한계평형법은 기하학적으로 불안정한 불연속면에 대하여 안전율을 구하나, 실제로 자연암반이나 지반은 그 형상이 복잡하고 지질구조가 다양하게 나타나기 때문에 사면내부에서 임의의 취약한 부분에서부터 붕괴가 시작될 수 있다. 따라서 한계평형법으로 이러한 사항들을 추정하기에는 불가능한 단점이 있다.

최근에는 보다 신뢰성 있는 암반사면에 대한 안정성 해석을 위해 수치해석이 대두되고 있다. 사면안정에서 설계 및 해석방법의 하나로 적용되는 수치해석은 사면 절취로 인해 발생하는 응력해방에 의한 암반의 역학적 거동을 규명하고 예측하는데 주된 목적을 두고 있다. 본 연구에서는 개별요소법에 근거하여 불연속체 암반에 대해 불연속면 특성을 고려할 수 있는 UDEC 프로그램을 이용하여 대상사면에 대해 안정성을 해석하였다.

4.4. UDEC을 이용한 수치해석

본 연구에서 사용된 UDEC(Universal Distinct Element Code)은 모암과 불연속면을 각각 독립적으로 처리함으로써 개별 불연속면의 파괴 메커니즘을 규명할 수 있고, 균열암반의 역학적인 거동을 불연속적으로 모사할 수 있다. 또한 양적해(explicit) 프로그램으로

서, 변위거동을 역학적 시간에 따라 계속 추적할 수 있는 장점이 있으므로 보강공법을 단계별로 적용하여 효율적인 보강대책 수립에 응용할 수 있다.

Barton-Bandis 절리모델 : 일반적으로 토사나 암반으로 구성되어 있는 지반의 거동 특성은 Mohr-Coulomb (MC)의 소성모델로써 흔히 표현되고 있다. 그러나 절리를 MC 모델로 표현할 경우, 절리의 미끄러짐이나 분리현상, 그리고 절리의 움직임에 따른 암반 블록의 회전 및 이동 현상 등을 정확히 모사하지 못한다는 사실 때문에 최근 Barton과 Bandis(1990)에 의해 제시된 비선형 Barton-Bandis(BB)모델이 사용되고 있다(최성웅과 정소걸, 1999). Barton과 Bandis에 의해 경험적으로 제안된 모델의 특징은 불연속면의 엇물림에 따른 수직강성변화의 허용, 불연속면의 거칠기에 따른 틈새(aperture)의 자동계산, 파괴이후 거동에 따른 불연속면의 손상정도의 파악, 전단변위에 따른 팽창(dilation)의 발생 허용 등이 있으며, 따라서 불연속면의 내부마찰각 및 점착강도에 의해 불연속면의 미끄러짐 여부만을 해석에 고려하는 Mohr-Coulomb Joint Slip Model에 비하여 현실성이 뛰어나다(선우 춘의, 1999).

BB 비선형 절리 모델에서는 Barton(1973)에 의해 제안된 식(4)와 같이 절리의 거칠기, 압축강도, 잔류마찰각을 이용하여 절리의 전단강도를 표현한다.

$$\tau = \sigma_n \tan \left[JRC \log \left(\frac{JCS}{\sigma_n} \right) + \phi_r \right] \quad (4)$$

여기서, σ_n : 절리면에 작용하는 유효수직응력

JRC : 절리의 거칠기계수(joint roughness coefficient; 0-20)

JCS : 절리면의 압축강도(joint wall compressive strength)

ϕ_r : 잔류마찰각

Barton-Bandis 절리모델을 적용하기 위한 입력자료는 절취면상에서 비교적 신선한 모암블록을 채취하여 NX size(54 mm)로 성형 후 일축 및 삼축압축시험, 직접전단시험을 통해 구하였다. 시험결과 암석의 체적강성계수는 50,725 MPa, 전단강성계수는 27,559 MPa이며, 점착력은 0.33 MPa, 내부마찰각은 약 48°이다. 또한, 실내에서 불연속면에 대해 직접전단시험을 수행한 결과 점착력은 건기시 0.005 MPa로 측정되었으며, 우기시는 0 MPa로 가정하였고, 내부마찰각은 약 30°이다. 불연속면의 수직강성과 전단강성은 각 10,000 MPa/m로 가정하였다.

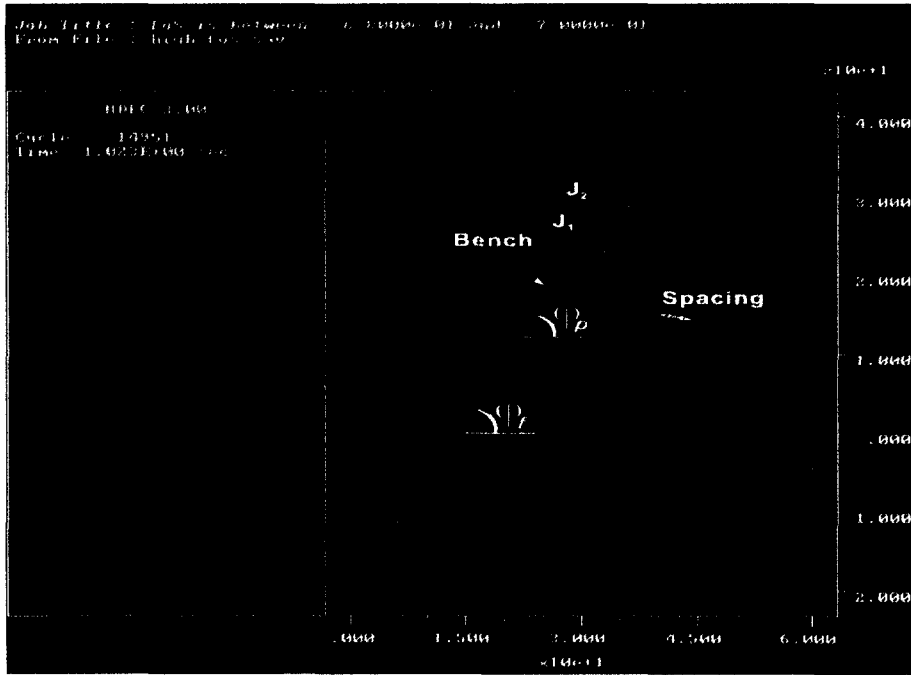


Fig. 7. Cross section for block modeling.

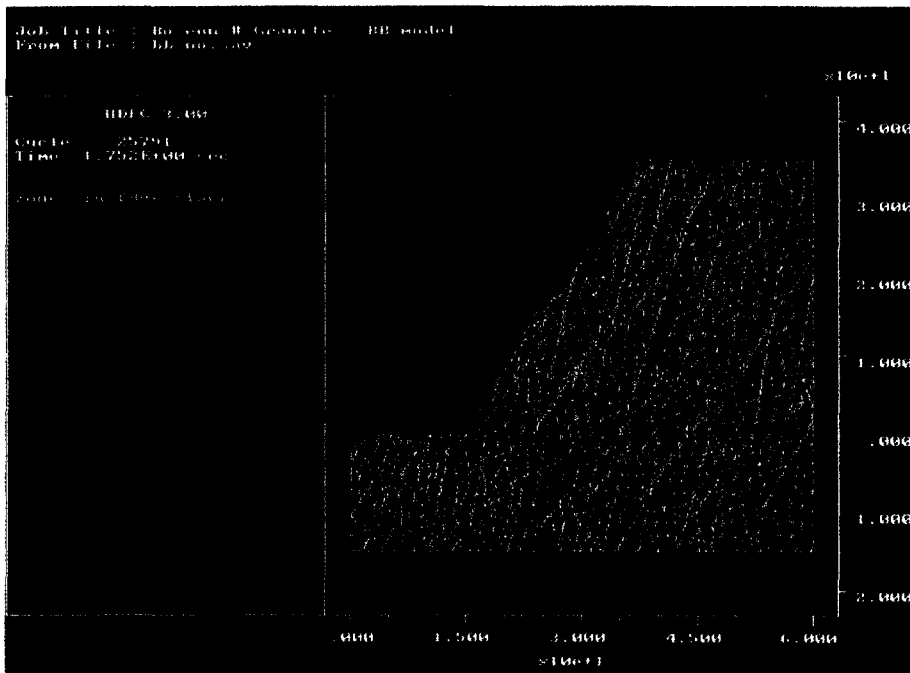


Fig. 8. Zones in deformable block.

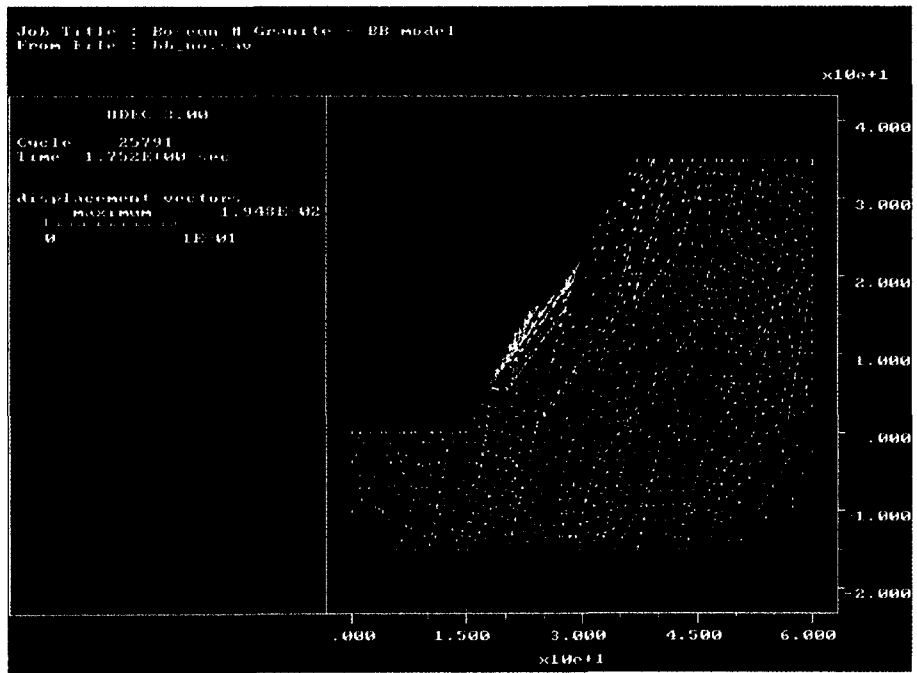


Fig. 9. Displacement vectors of natural slope.

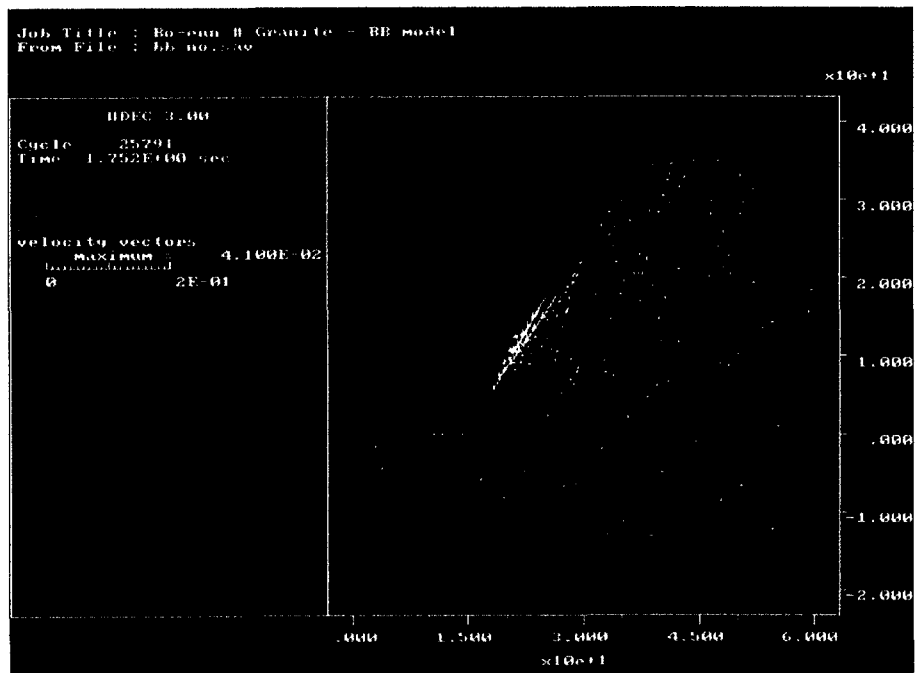


Fig. 10. Shear displacement and velocity vectors of natural slope.

Fig. 7은 연구대상 사면에 대한 수치해석상의 단면을 나타낸다. 본 수치해석에서는 사면의 안정성에 영향을 줄 수 있는 두 조의 불연속면을 선정하여 입력하였으며, 평면파괴가 발생한 주불연속면인 $J_1(58^\circ/210^\circ)$ 과 이완면으로 작용한 염기성 암맥의 접촉면인 $J_2(85^\circ/120^\circ)$ 로 표시하였다. Fig. 7은 수치해석상의 단면이므로, 이 방향에 대한 위경사로 보정해야 하며, 따라서 J_1 은 55° 로, J_2 는 76° 로 보정하여 입력하였다. 또한, 사면의 경사(60°)는 ϕ_p 로, 불연속면의 경사(58°)는 ϕ_p 로 표시하였고, 불연속면의 간격과 연장성 등을 현장에서 측정된 결과를 고려하여 모델링하였다.

본 연구에서는 암반을 나타내는 개별블록들을 변형 가능한 블록으로 고려하였으므로, 이 변형가능한 블록은 내부에 유한차분망 즉, zone으로 세분화되며, 이는 Fig. 8과 같이 블록은 밝은 녹색으로, zone은 회색으로 구분하여 표시하였다. 강성블록이 블록자체의 절점에 작용하는 응력증분과 변위로 계산되어지는 반면, 변형가능한 블록은 블록내부의 모든 zone에서의 절점들에 작용하는 응력증분과 변위의 총합으로 계산되어진다. 따라서, 강성블록에 비해 계산시간이 훨씬 길어지지만 사면의 경우 절취면 주위의 응력분포 및 변위거동에 대해서 보다 세밀한 계산이 가능하므로 안정성 해석에 있어서는 변형가능한 블록이 적합하다고 판단된다. 따라서, 본 수치해석에서는 현장 암반을 변형가능한 블록으로 모델링하여 안정성을 해석하였다.

Fig. 9는 본 사면의 평면파괴구간에 대해 건조상태를 고려한 수치해석 결과이다. 불연속면의 경사가 사면의 경사와 유사하며, 이를 수직으로 관통하는 85° 의 암맥이 이완면으로 작용하기 때문에 상당히 불안정한 상태이다. 특히, 소단 하부의 암석블록이 불안정한 거동을 보이는데, 이 블록의 최대 변위벡터는 약 1.95 cm이다. 우기시 불연속면내로 지하수 유입 혹은 직접적인 강우의 유입이 발생하면 변위는 더욱 증가될 것이므로 사면의 불안정이 커질 것으로 판단된다.

Fig. 10은 암반블록이 불연속면을 따라 미끄러지는 수평적인 거리만을 나타내는 전단변위와 이때 블록이 미끄러지는 속도벡터를 나타내는 결과이다. 최대 전단변위는 약 1.3 cm가 발생하였고, 최대 속도벡터는 약 $4.1 \times 10^{-2} \text{m/s}$ 이다. 동일한 암반블록에 대해 변위벡터와 전단변위가 다르게 나타나는 이유는 전단변위가 변위벡터와는 달리 미끄러지는 방향성을 고려하지 않고 단지 이동거리만을 나타내기 때문이다. 이 상태의 한계 평형법에 의한 안전율은 0.665로서 본 사면이 불안정한 상태라고 판단된다.

Table 7. Input properties of shotcrete.

쇼크리트	암반/ 쇼크리트 접촉부	록볼트	그라우팅/ 록볼트 접촉부
밀도(kg/cm ³)	2,500	수직강성(GPa/m)	1.0
탄성계수(GPa)	20.0	전단강성(GPa/m)	1.0
압포아송비	0.15	내부마찰각(°)	45
축방향복강도(MPa)	8.4	접착강도(MPa)	2.0
인장방향복강도(MPa)	0.6	인장강도(MPa)	1.0
잔류방향복강도(MPa)	0.6		

Table 8. Input properties of rockbolt.

록볼트	그라우팅/ 록볼트 접촉부	록볼트	그라우팅/ 록볼트 접촉부
단면적(m ²)	5×10^{-4}	수직강성(GPa/m)	1.5
밀도(kg/cm ³)	7,500	전단강성(GPa/m)	0.8
탄성계수(GPa)	200	접착강도(MPa)	2.0
압축방향복강도(MPa)	100	인장강도(MPa)	1.0
항복강도(MPa)	10		

보강 공법 : 본 사면은 건기시 안전율이 0.665로서, 도로절취사면에 필요한 최소안전율 1.3에 못 미치는 상당히 불안정한 상태이다. 따라서, 본 사면에 대한 안정성을 향상시키기 위하여 SMR의 불안정등급에 따라 제시된 지보재인 쇼크리트와 록볼트를 수치적으로 적용하여 보았다. 즉, 다음 Table 7과 8은 UDEC에 입력한 쇼크리트와 록볼트에 대한 물성을 나타낸다.

본 수치해석에서 쇼크리트는 10 cm 두께로 1회 타설을 적용하였다. Fig. 11에서 소단 상하부의 절취면을 덮는 흰색 선이 쇼크리트로, 이에 걸리는 축력은 약 $1.47 \times 10^{-1} \text{MN}$ 이다. 그러나, 쇼크리트를 적용한 결과 변위벡터 및 속도벡터 등이 감소하지 않는 등 보강효과가 없는 것으로 결과가 나왔다. 그 이유는 Fig. 12와 같이 소단 직하부에서 쇼크리트가 인장파괴되었기 때문인데, 이는 미끄러지는 암반블록의 전단강도가 쇼크리트의 허용강도를 초과했기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, 본 사면에 대한 보강공법으로는 쇼크리트는 적당하지 않다고 판단이 되며, 가장 불안정한 거동을 보이는 암반블록에 대해 집중적인 록볼트 보강공법이 필요하다고 판단되어 수치적으로 적용하여 보았다.

Fig. 13에서 불안정한 암반블록에 대해 타입한 록볼트는 갈색으로 표시하였으며, 설치간격은 1.5 m, 길이는 7.5 m로 총 10개가 타입되었고, 이에 걸리는 축력은 각 케이블의 번호순으로 나와 있다. 록볼트 길이는

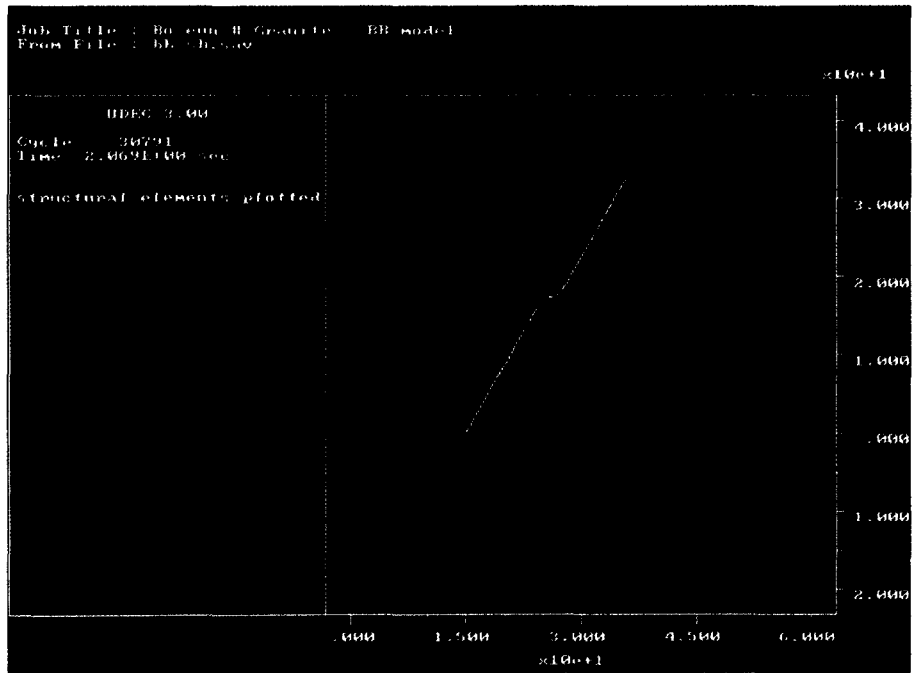


Fig. 11. Shotcrete reinforcement.

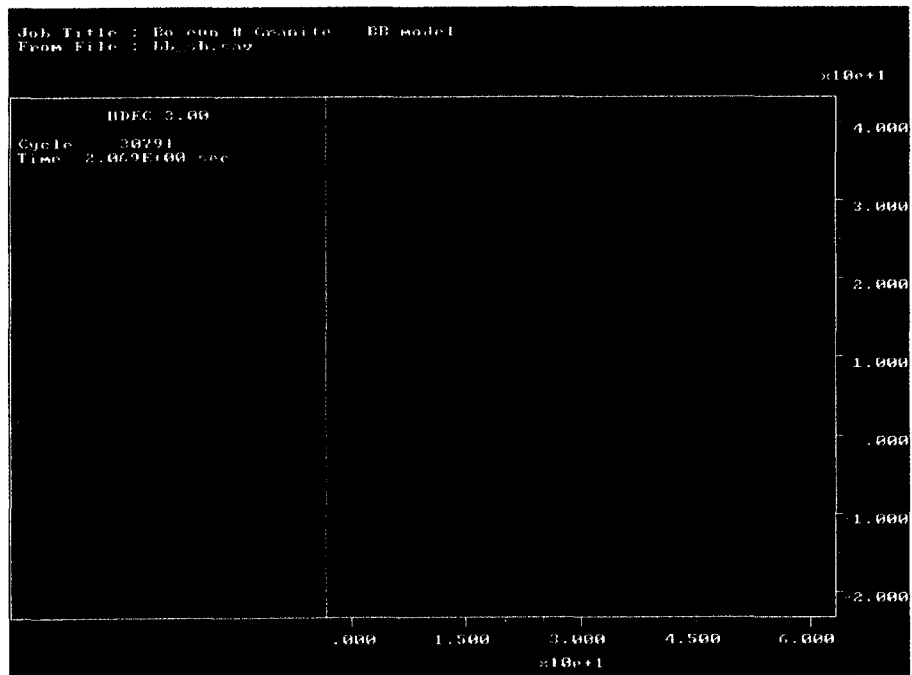


Fig. 12. Shotcrete failure.

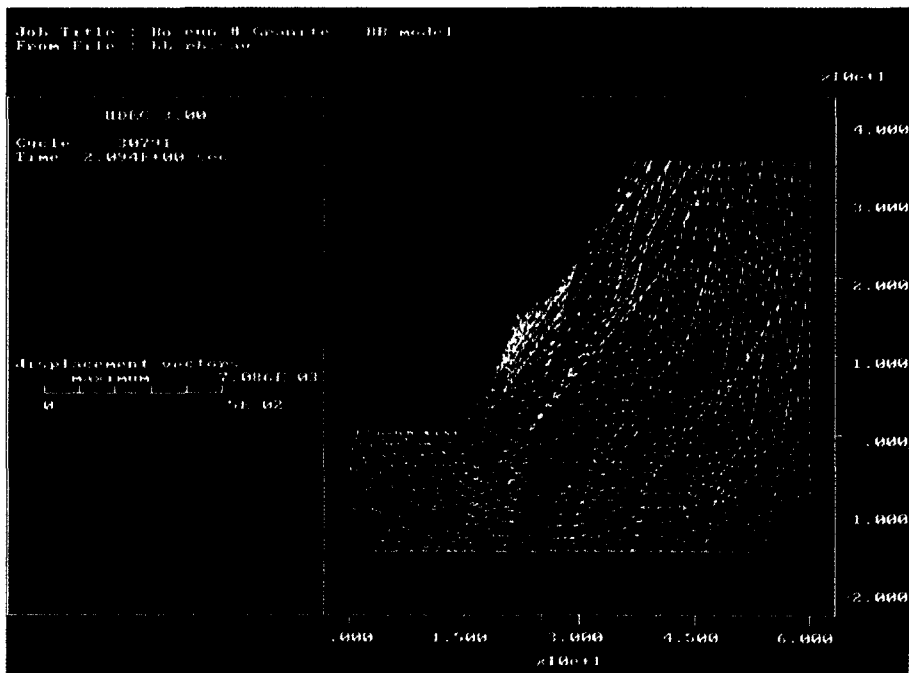


Fig. 13. Displacement vectors of supported slope.

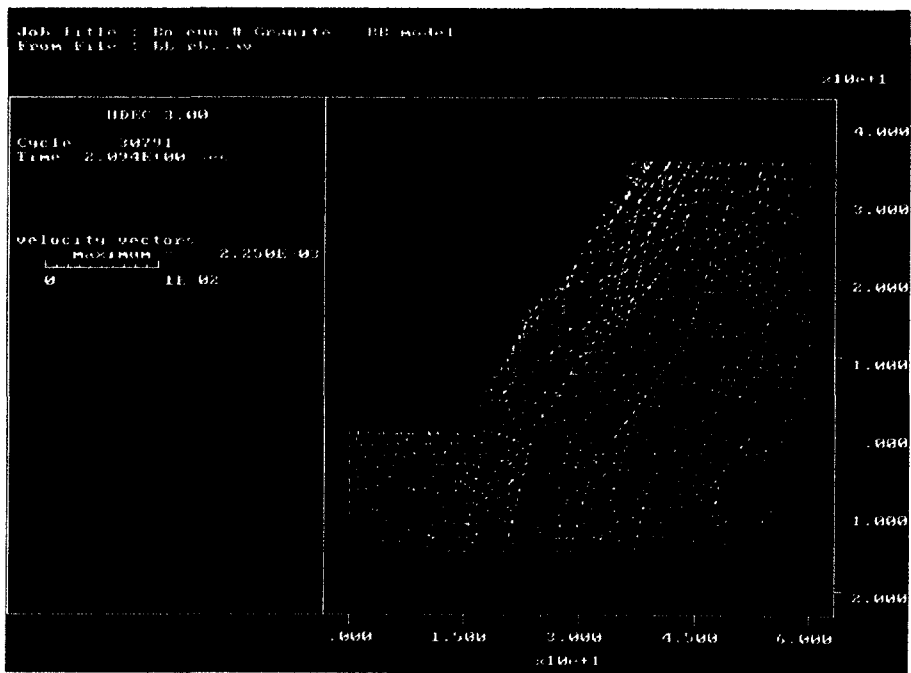


Fig. 14. Shear displacement and velocity vectors of supported slope.

일반적인 타입경향에 비해 긴 편이나 모암과 불안정한 블록의 일체화를 위해 7.5 m를 적용하였으며, 타입각은 파괴면에 대해 55°로 적용하였고, pretension은 각 볼트에 대해서 10톤을 적용하였다. 록볼트 보강공법을 적용한 결과 변위벡터는 약 7 mm로 감소하였으며, 속도벡터도 약 2.25×10^{-3} m/s로 감소하였다(Fig. 14). 따라서, 추가붕괴가 예상되는 본 사면에 대해 록볼트를 적용하면 사면의 안정성이 다소 증가된다고 판단된다.

5. 결론 및 토의

연구지역인 보은 도로공사 구간에서 1:0.5의 구배로 암반절취공사 중 일부구간에서 평면파괴가 발생하였고, 특히 파괴구간 직하부에 추가붕괴가 예상되는 암석블럭이 파괴면과 동일한 방향성을 갖고 존재하고 있다. 이에 대해 SMR, 평사투영법, 한계평형법을 이용하여 안정성을 해석하였다. 또한, 수치해석을 통하여 파괴면에 대해 역해석을 수행하여 추가붕괴의 잠재성을 예측해 보았고, 보강공법을 적용하여 시공후 사면의 안정화정도를 예측해 보았다.

1. SMR은 암반사면의 1차적인 안정성을 평가하는 방법으로 본 사면에 대한 SMR은 35.4점으로 등급 IV(불안정)에 속한다. 이 결과는 본 연구지역의 암반상태 및 사면안정성이 불안정함을 나타내며, 붕괴형태는 평면파괴, 대규모 켜기파괴가 발생할 수 있고, 보강대책으로는 광범위한 보강이 요구됨을 나타낸다.

2. Kinematic analysis는 대상 암반사면 내의 불연속면과 사면의 상대적인 위치에 의해 발생가능한 사면파괴의 유형을 기하학적으로 분석하는 방법이다. 본 사면에서는 $J_1(58^\circ/210^\circ)$ 이 평면파괴의 불안정영역 내에 도시되며, 100-120 m 구간에서 실제로 평면파괴를 발생시킨 불연속면이다. 또한, J_1 은 추가붕괴의 가능성을 내재하고 있으므로 이에 대해서는 안전율을 구하여 안정성을 해석함이 필요하다.

3. Kinetic analysis는 kinematic analysis 결과 불안정하다고 판정된 불연속면에 대해 한계평형해석을 이용하여 안전율을 구하는 방법이다. 기하학적으로 불안정하다고 판정된 J_1 에 대해 건조시와 우기시로 고려하여 안전율을 구한 결과 건조시 0.665, 우기시에는 0.28로, 도로절취사면에서 요구되는 최소안전율 1.3에 크게 미치지 못하는 불안정한 상태임을 알 수 있다.

4. UDEC을 이용한 수치해석은 한계평형법으로 해석할 수 없는 절취에 따른 응력변화로 인한 균열암반의 역학적인 거동을 불연속적으로 모사할 수 있다. 이

에 대한 입력자료를 구하기 위해 일축압축 및 삼축압축시험, 직접전단시험을 수행하였다. 건조시 소단 하부의 암석블럭이 불안정한 거동을 보이는데, 이 블록의 최대 변위벡터는 약 1.95 cm이다. 우기시 더욱 불안정해질 수 있으므로 이 부분에 대해서는 보강공법의 적용이 필요하다고 판단된다. SMR 결과 광범위한 보강대책 제시에 따라 쇼크리트 및 록볼트를 수치적으로 적용하였다. 쇼크리트를 적용한 결과 소단 직하부에서 쇼크리트가 붕괴되어 보강효과가 없었다. 이는 미끄러지는 암반블럭의 전단강도가 쇼크리트의 허용강도를 초과했기 때문인 것으로 판단되며, 실제로 본 사면에서 평면파괴가 발생한 위치와 일치한다. 따라서, 본 사면에 대한 보강공법으로 쇼크리트는 적당하지 않는다고 판단이 되며, 가장 불안정한 거동을 보이는 암반블럭에 대해 록볼트를 적용한 결과 변위벡터는 약 7 mm로 감소하였으며, 속도벡터도 약 2.25×10^{-3} m/s로 감소하였다. 따라서, 추가붕괴가 예상되는 본 사면에 대해 록볼트를 적용하면 사면의 안정성이 다소 증가함을 알 수 있다.

상기한 바와 같이 본 연구대상 사면에 대한 안정성 해석을 위해 불연속면의 특성을 고려하여 SMR, 평사투영법, 한계평형법 및 수치해석을 순차적으로 수행하였다. SMR은 사면내에서 가장 안정성에 영향을 주는 단일한 불연속면에 대한 결과를 반영할 수 있으므로 평면파괴와 전도파괴에 적용시 적합한 결과를 얻을 수 있으나, 켜기파괴와 같이 두 불연속면에 의해 파괴가 발생하는 경우에는 적용할 수 없는 단점이 있다. 평면파괴가 발생한 본 사면에 대한 SMR 결과는 등급 IV로 불안정함을 나타낸다. 또한, Kinematic analysis에 근거한 평사투영법 결과 실제로 파괴가 발생한 불연속면($58^\circ/210^\circ$)이 평면파괴영역에 도시되었고, 이 불연속면에 대해 kinetic analysis에 근거한 한계평형법 결과 안전율이 1이하로 불안정한 상태임을 나타내었다. 일반적으로 사면안정해석에서 kinematic analysis와 kinetic analysis는 독립적으로 수행되어지는 경우가 많으나, 이 두 해석방법은 동시에 수행되어야 사면에 대한 안정성을 보다 정확히 해석할 수 있다.

본 사면은 절취공사도중 붕괴가 발생하였으므로 절취로 인한 불연속면상의 변위거동을 고려하여 안정성을 해석해야 한다. 그러나, 평사투영법 및 한계평형법은 기하학적으로 불안정한 암반사면에 대한 안전율을 구하나, 본 사면과 같이 복잡한 지질구조를 나타내고 절취로 인한 개별암석블럭들의 역학적인 거동에 대해서는 해석할 수 없는 단점이 있다. 따라서, 이를 규명

하기 위하여 UDEC을 이용한 수치해석을 수행하였으며, 수치해석 결과 파괴가 발생한 영역에서 상대적으로 불안정한 변위거동을 나타내므로 사면이 불안정하다고 판단된다.

이상으로 본 연구에서 수행한 각 안정성 해석결과들을 종합해보면 연구대상 사면이 불안정하다고 판단되며, 이는 평면파괴가 발생하였고 추가붕괴가 예상되는 현장상황과 일치함을 알 수 있다. 그러나, 본 수치해석은 지하수의 영향을 배제한 사면건조시에 해당하는 결과로서, 집중호우기에 불연속면내에 수압이 작용하면 보다 더 사면이 위험해 질 가능성이 크다.

따라서, 본 사면에 대해서는 도로절취사면에 필요한 최소안전율 1.3을 확보하기 위해서 추가적인 안정화 대책이 필요하며, 절취면 전반적으로 낙석방지망 설치 및 위험구간으로서 본 수치해석 영역인 100~120 m 구간에 대해서는 낙석방지책의 설치가 필요하다고 판단된다.

참고문헌

김성균, 김영화, 박창업, 서만철, 송무영, 장보안, 정상용, 조봉곤 (1994) 지질공학원론, 교학 연구사, p. 58.
 선우춘, 정소걸, 신희순, 한공창, 송원경, 최성용 (1999) 불연속면을 고려한 도로절취사면에서 의 사면안정성 해석, 사면안정위원회 세미나 및 연구성과 발표회, 한국지반공학회 사면안정위원회, p. 67-103.
 이흥규, 유의규, 홍승호 (1973) 한국지질도 용유리도폭 (1:50,000) 및 도폭설명서. 국립지질광물연구소.
 이희근, 양형식, 김호영, 신중호, 이경주, 윤용균, 김종우, 김영근, 최성용, 박의섭, 이대혁, 김택근, 김재동, 정소걸 (1997) 응용암석역학, 서울대학교 출판부, p. 163.
 좌용주 (1996) 중부 옥천대에 분포하는 주라기 보은 화강섬록암의 암석화학과 마그마과정, Jour. Petrol. Soc. Korea, 5권, p. 188-199.
 전인식, 정규영, 신현직, 천병직, 고복영 (1998) 토목용어사전, 건설연구사.

최성용, 정소걸 (1999) Barton-Bandis joint model을 이용한 절리 암반 사면의 안정성 해석, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, v. 9, p. 141-148.
 Barton, N.R. (1973) Review of a new shear strength criterion for rock joints. Engineering Geology, v. 7, p. 287-332.
 Bieniawski, Z.T. (1976) Rock mass classification in rock engineering, In Proc. Symp. Exploration for Rock Eng, v. 1, p. 97-106, Balkema, Rotterdam.
 ISRM (1974a) Suggested Methods for Determining Shear Strength, Committee on Field Tests Document n. 1, Final Draft.
 ISRM (1978b) Suggested Methods for Determining the Strength of Rock Materials in Triaxial Compression, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. v. 15, n. 2, p. 47-51.
 ISRM (1978c) Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. v. 16, n. 2, p. 135-140.
 ISRM (1978d) Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. v. 15, n. 6, p. 319-368.
 Kliche, C.A. (1999) Rock slope stability. The Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.
 Norrish, N.I. and Wyllie, D.C. (1996) Rock slope stability analysis, Landslides; Investigation and Mitigation, Special Report 247, National Science Council.
 Park, H.J. (1999) Risk Analysis of Rock Slope Stability and Stochastic Properties of Discontinuity Parameters in Western North Carolina, Ph. D. Thesis, Purdue University, Department of Earth and Atmospheric Sciences
 Priest, S.D. and Brown, E.T. (1983) Probabilistic stability analysis of variable rock slopes. Trans. Instn. Min. Metall. (Sect. A: Mining industry), 92, A1-12
 Romana, M.R. (1993) A geomechanical classification for slopes: Slope Mass Rating. Comprehensive Rock Engineering. v. 3, p. 575-601.
 UDEC User's Manual, Ver 3.0 (1996) Itasca Consulting Group, Inc.

2001년 10월 25일 원고접수, 2001년 12월 19일 게재승인.