

개별요소법과 한계평형법을 이용한 보은지역 암반사면 안전을 비교해석

Comparison Analysis of Factor of Safety on Rock Slope in Boeun Region Using Distinct Element Method and Limit Equilibrium Method

이 지 수*¹ Lee, Ji-Soo

유 광 호*² You, Kwang-Ho

박 혁 진*³ Park, Hyuck-Jin

민 경 덕*⁴ Min, Kyung-Duk

Abstract

The large planar failure has occurred in a rock cut slope of highway construction site in Boeun. This area is considered to be unstable since the discontinuity, whose orientation is similar to the orientation of the failure plane, is observed in many areas. Therefore, several analysis techniques such as SMR, stereographic analysis, limit equilibrium, numerical analysis, which are commonly used in rock slope stability analysis, are adopted in this area. In order to analyze the stress redistribution and nonlinear displacement caused by cut, which are not able to be obtained in limit equilibrium method, DEM and shear strength reduction technique were used in this study. Then the factors of safety evaluated by shear strength reduction technique and limit equilibrium were compared. In addition, the factor of safety under fully saturated slope condition was calculated and subsequently, the effect of the reinforcement was evaluated.

요 지

연구대상 사면은 충북 보은군 보은읍 도로공사구간 내의 절취사면으로 절취시공 후 암반사면내의 일부 구간에서 평면 파괴로 인한 사면 붕괴가 발생하였다. 이 구간에서는 파괴면과 유사한 방향성을 갖는 불연속면이 암반사면 내에 다수 분포하여 추가 붕괴가 예상되는 불안정한 상태이다. 따라서, 본 사면에 대하여 암반사면의 안정성 해석에 보편적으로 사용되는 SMR, 평사투영법, 한계평형법 및 수치해석 등의 기법을 이용하여 사면의 안정성을 해석하였다. 사면의 안정성 평가에 보편적으로 사용되는 한계평형법은 간단한 계산에 의해 사면의 안정성을 평가할 수 있는 장점이 있으나 파괴 활동면을 가정할 수 없는 단일 안전율에 의해 전체 사면의 안정성을 평가하는 단점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 개별절리를 고려하여 사면의 안정성을 평가하는 전단강도 감소기법으로부터 안전율을 계산하였으며, 이를 한계평형해석의 결과와 비교·분석하였다. 또한 본 사면내에 지하수 영향을 고려하고 보강공법을 적용하여 종합적인 안정성을 검토하였다.

Keywords : DEM, Factor of safety, Groundwater, Limit equilibrium method, Planar failure, Reinforcement

1. 서 론

암반사면의 붕괴는 암반내에 발달한 불연속면(단층,

절리)과 사면 구성물질의 공학적 특성(점착력, 내부마찰각), 지하수 유동 및 분포상태, 지표수 유입 가능성 여부의 요인들에 의해 발생한다. 따라서 사면붕괴가

*1 정회원, 애리조나주립대학교 광산지질공학과 박사과정 (Member, Dept. of Mining & Geological Engrg., Univ. of Arizona, jslee@email.arizona.edu)

*2 정회원, 수원대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Suwon Univ.)

*3 정회원, 세종대학교 공과대학 지구정보공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Geoinformation Engrg., Sejong Univ., hjpark@sejong.ac.kr)

*4 연세대학교 이과대학 지구시스템과학과 교수 (Prof., College of Science, Earth System Sciences, Yonsei Univ.)

발생한 지역에 대한 붕괴형태와 발생요인을 파악하고 사면해석을 위한 기본자료들을 수집하여 붕괴모델링에 의한 안정성을 평가한 후 이에 따른 보강대책을 수립하게 된다(안윤성과 김연중, 1994). 본 연구대상 사면은 보은지역의 도로공사구간에 위치한 암반절취사면으로 시공 중에 평면파괴가 발생하였다. 이는 연구대상 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 사면안정성 해석방법으로 본 연구지역에 대해 적용시 부정확한 결과를 나타낼 수 있으므로, 본 연구에서는 SMR(Slope Mass Rating), 평사투영법, 한계평형법, 수치해석을 통하여 사면안정해석을 수행하였다.

절리가 발달한 암반사면의 경우 사면의 파괴는 사면과 절리의 상대적인 방향성 및 파괴특성에 지배되므로 입의의 활동면을 가정해야하는 한계평형법을 이용한 해석법은 적용하기가 어렵다고 할 수 있다(유광호와 박연준, 2001). 본 연구에서는 전단강도 감소기법(박연준과 유광호, 1998)으로 구한 안전율과 한계평형법의 안전율을 비교분석하여 본 사면에 대한 안정성을 해석하였다. 또한 지하수를 고려하여 한계평형해석과 개별요소해석으로 사면안정성을 비교해석 하였다.

2. 지반조사 및 실험

2.1 지표지질 특성

본 연구대상 절취사면의 방향성은 60°/230°, 길이는

약 140m, 최대높이는 약 35m이며, 소단은 17.5m 높이의 1단이다. 암종은 0~60m 구간에서는 셰일이 분포하며, 60~100m 구간에서는 점판암이 분포하고, 100~140m 구간에서는 화강섬록암이 분포한다. 풍화는 셰일부가 심한 풍화를 받았고, 나머지 부분은 보통 풍화이다. 지질구조는 사면 전반적으로 암맥이 우세하며, 이중 염기성 암맥은 연장성이 크다. 사면의 좌측부에는 셰일부가 심하게 습곡되었으며, 중앙부에는 단층 및 파쇄대가 분포하고, 우측부 파괴구간에는 사면의 주향과 유사한 방향의 불연속면이 발달한다. 절취사면의 102~110m 구간에서 58°/210°의 방향성을 갖는 불연속면을 따라 평면파괴가 발생하였다. 또한 85°/120°의 방향성을 갖는 염기성 암맥이 발달하며, 이 부분은 접촉변성작용에 의해 불연속면의 전단강도가 감소되었으며, 연약면이 형성되어 잠재적으로 불안정하다. 파괴구간 직하부에 추가파괴가 예상되는 대규모 암석블록이 존재하며, 파괴구간 우측부에는 절취공사시 발파로 생긴 조밀한 인장균열로 인해 소규모 낙석이 예상된다. 파괴구간의 낙석크기는 평균 0.42×0.25×0.35m³, 최대 2×1.2×2.3m³이며, 낙석의 양은 약 200~250m³이다.

2.2 불연속면 특성

현장조사시 육안관찰에 의해 본 사면안정성에 가장 영향을 미칠 수 있는 3조의 불연속면군을 선정하였고, 이 중 set 1(58°/210°)은 평면파괴가 발생한 불연속면으로서 사면의 방향(60°/230°)과 유사하며, 파괴구간 주변에서 8~10m의 연장성을 보이므로 추가파괴의 가능성이 있을 것으로 판단된다(그림 1). Set 2는 set 1을 수직

STUDY AREA

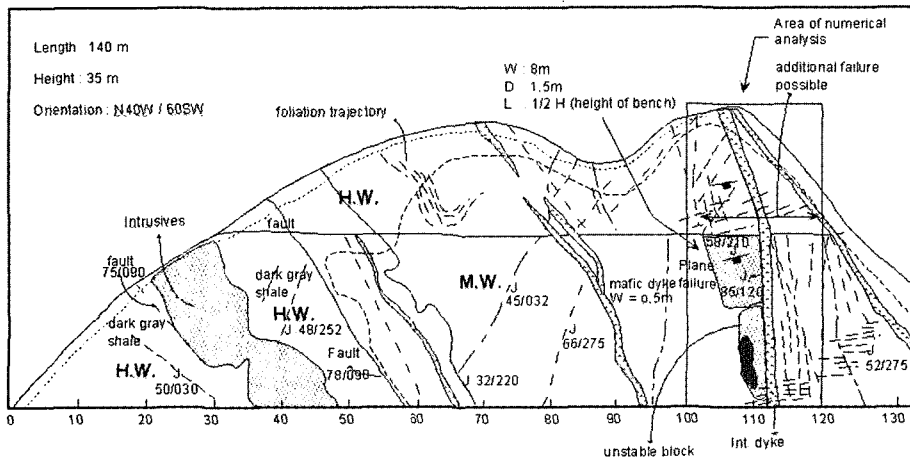


그림 1. 연구대상 사면에 대한 face mapping(이지수 등, 2001)

표 1. 불연속면의 정량적 기재

	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)	매끄러움(smooth)
충진물	미사(silt)	미사(silt)	미사(silt)
벽면강도(MPa)	180	172	165
누수	축축함(damp)	축축함(damp)	축축함(damp)

으로 가로지르며 연장성이 10m 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. 100~120m 구간의 대부분의 불연속면들에서 충진물로는 미사(silt)가 협재되어 있으며, 지하수 상태는 축축한(damp)편으로 관찰되었다. 이를 요약하면 표 1과 같다.

2.3 암석 역학시험

2.3.1 일축압축시험

본 시험은 개별요소 해석시 암석의 영율(E)과 포아송비(ν)를 구하기 위해 수행되었다. 시험에 사용된 장비는 SHIMADZU사의 UTM UH-100A로 총100톤의 하중을 가할 수 있다. 본 사면내 평면파괴구간에서 채취한 신선한 화강섬록암 시료를 공극수압의 영향을 배제하기 위해 실내에서 자연건조시킨 후 시험을 수행한 결과 일축압축강도는 1844.4kg/cm²이다.

2.3.2 삼축압축시험

삼축압축시험은 암석의 점착력(C)과 내부마찰각(ϕ)를 구하기 위해 수행되었다. 사용된 장비는 SBEL사의 Stiff Test System Model STS-1000으로 총 하중 1,000,000lbs(4.45MN)을 가할 수 있으며, 30×10⁶ lbs/inch(5.25MN/mm)의 강성을 갖는다. 본 시험의 결과로 작도한 파괴시 모어원은 그림 2와 같다. 모어원을 도시하여 암석의 내부마찰각과 점착력을 구하기 위해 구속압을 5, 10, 20kg/cm² 등으로 가하여 실시하였다. 파괴포락선을 작도한 결과 암석의 내부마찰각은 48.04°, 점착력은 330kg/cm²이다. 일축압축 및 삼축압축시험에서 구한 암

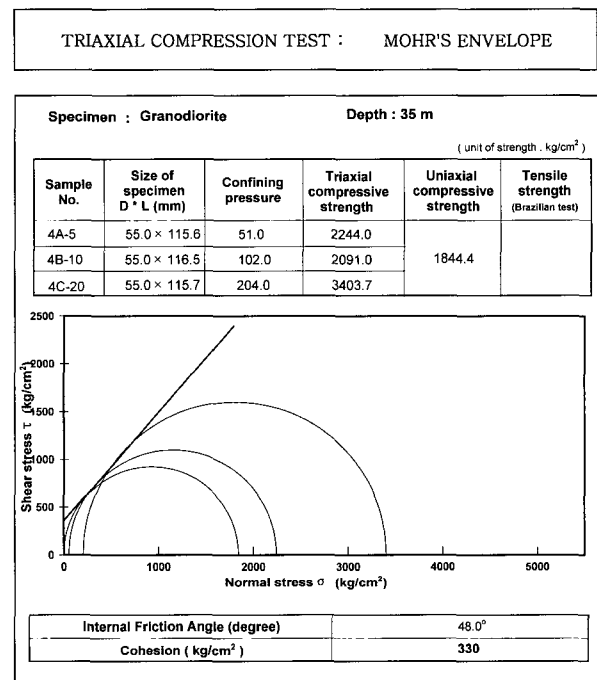


그림 2. 삼축압축시험 결과

표 2. 일축압축 및 삼축압축시험 결과

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(ν)	0.27

석에 대한 영율, 포아송비 및 기타 자료들을 요약하면 표 2와 같다.

2.3.3 직접전단시험

암반사면의 붕괴는 불연속면의 특성에 크게 좌우되므

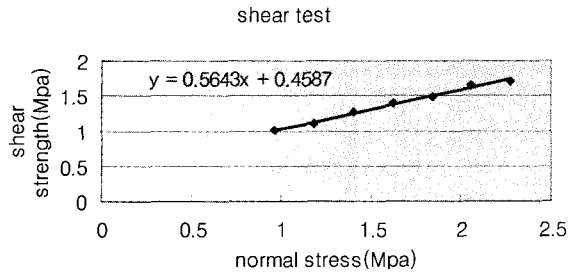


그림 3. 직접전단시험 결과

로 전단시험을 통한 절리면의 물성획득이 필수적이다. 직접전단시험을 위해 사용된 장비는 ELE사의 Portable Shear Box Assembly 77-1030으로, 시료의 최대면적 155mm×125mm(4.5inch×5in) 혹은 최대 직경 102mm (4in)에 대해서 시험할 수 있다. 본 시험은 전단면에 대한 수직응력의 함수로서 잔류전단강도를 구하였으며, 그 결과는 그림 3과 같다. 잔류전단강도는 시험면에 대해 핸드펌프로 가한 수직응력 외에 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, Mohr-Coulomb의 직선파괴식으로 시험결과를 선형 회귀분석하여 마찰각과 점착력을 구하였다. 점착력은 겔보기 점착력으로서 0.4587MPa이나, 본 연구에서는 대상 사면의 안정성을 보수적으로 해

석하기 위해 점착력을 0으로 고려하였다.

3. 암반사면 안정성 해석

3.1 SMR(Slope Mass Rating)

본 사면에서 평면파괴구간에 대한 RMR은 62.4점으로 등급 II(Good)이며, SMR은 35.4점으로 등급 IV(Unstable)에 속한다(표 3, 4). 이는 암반상태 및 사면안정성이 불안정함을 나타내며, Romana(1993)에 의하면 붕괴형태는 평면파괴, 대규모 썩기파괴가 발생할 수 있고, 이에 대한 보강대책으로는 광범위한 보강이 요구됨을 나타낸다.

3.2 운동학적 사면 안정성 해석(Kinematic Slope Stability Analysis)

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

해석결과 그림 4에서와 같이 J₁(58°/210°)이 평면파

표 3. RMR 결과(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	거칠(Rough)	5.0
		충진물	미사(Silt)	2.0
		풍화도	보통 풍화	3.0
	지하수 상태	촉촉함(Damp)	10.0	
총합	II (양호)	62.4		

표 4. SMR 결과(Romana, 1993)

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

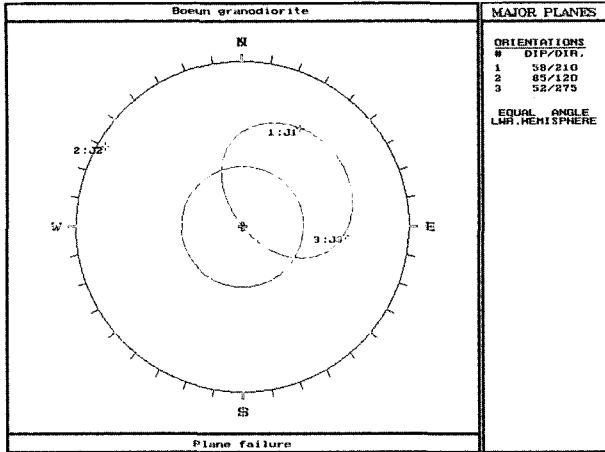


그림 4. 평면파괴 평사투영해석 결과

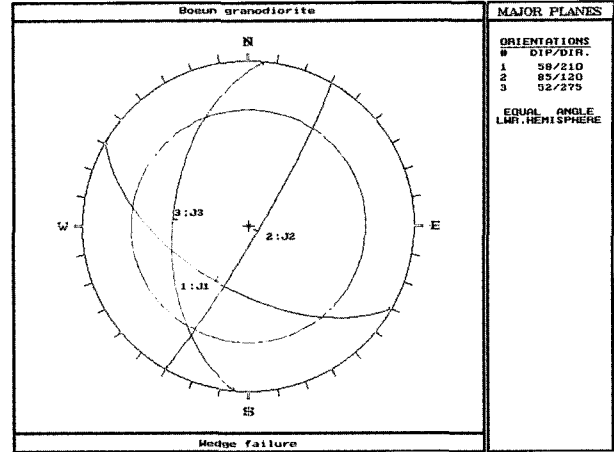


그림 5. 썩기파괴 평사투영해석 결과

괴의 불안정영역 내에 도시되어 불안정한 것으로 보인다. 이는 100-120m 구간에서 평면파괴를 발생시킨 불연속면과 동일한 방향으로 현장의 상황과 잘 일치되고 있다. $J_3(52^\circ/275^\circ)$ 도 불안정 영역에 근사하게 도시되나, J_3 의 경우 불연속면과 사면의 주향차이가 20° 이상 나므로 Norrish&Wyllie(1996)의 평면파괴 발생조건에 해당되지 않는다.

썩기파괴 해석에서는 J_1 과 J_3 의 불연속면 교차선이 불안정영역에 도시되며(그림 5), J_1 과 J_2 의 불연속면 교차선이 이 영역에 근사하게 도시되므로 이들 불연속면 조합에 대해서도 안전율을 구해야 한다. 그러나, 본 썩기파괴 해석에서는 사면내 100~120m 구간을 대상으로 하였으며, 현장조사결과 J_1 과 J_3 는 발달하는 위치가 달라 두 불연속면이 서로 교차하지 않으므로 썩기파괴의 가능성은 없는 것으로 판단된다. 또한, J_1 과 J_2 의 불연속면 조합은 평면파괴가 발생한 주 불연속면인 J_1 과 이에 대해 이완면으로 작용한 J_2 로, 현장조사결과 추가적인 평면파괴의 가능성은 있으나 썩기파괴의 가능성은 거의 없는 것으로 판단되었다.

3.3 동역학적 사면 안정성 해석(Kinetic Slope Stability Analysis)

운동학적 해석 결과 사면이 불안정할 가능성이 있다고 판단되면, 동역학적 안정성 분석을 수행하여야 하며 대개 한계평형해석을 이용하여 안전율을 구함으로써 평가한다(Park, 1999). 따라서 본 연구에서도 운동학적 안정해석을 통해 불안정한 것으로 판단된 불연속면들에 대하여 동역학적 안정해석을 수행하였다. 본 연구에

서는 지하수위가 사면의 안정성에 미치는 영향을 검토하기 위해 운동학적 해석 결과 평면파괴 가능성이 있는 J_1 에 대하여 동역학적 해석을 수행하였으며, 사면건조시(건기시) 안전율과 사면높이의 1/2에 이르는 지하수위(우기시)를 가정하여 안전율을 구하였다.

3.3.1 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 부양력 U , 수압 V 는 모두 0이 되고, 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

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

연구지역 시료에 대한 직접전단시험을 통해 불연속면의 내부마찰각 30° , 겉보기 점착력 458.7KPa 을 구했으나, 본 연구에서는 대상사면에 대한 건조시 점착력을 $5\text{KPa}(= \text{kN/m}^2)$ 로 낮게 가정하여 보수적인 안정성 해석을 수행하였으며, 이 때의 안전율은 0.665이다.

3.3.2 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 영향을 고려하여 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 분석결과에 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 있으므로 본 연구에서는 불연속면 특성을 고려할 수 있는 개별요소법을 이용하여 대상사면에 대해 안정성을 해석하였다.

3.4 개별요소법을 이용한 수치해석

절리가 발달한 암반사면의 경우 사면절취에 따른 암반거동을 보다 정확하게 규명하기 위해서는 암반거동을 지배하는 불연속면을 명확하게 해석하여야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 모암과 불연속면을 각각 독립적으로 처리하여 균열암반의 역학적인 거동을 불연속적으로 모사할 수 있는 UDEC을 사용하였다.

3.4.1 전단강도 감소기법에 의한 안전율의 계산

사면, 둑, 제방 등에 있어서 안전율은 ‘붕괴를 막을 수 있는 최소 전단강도와 실제지반의 전단강도와의 비’라고 정의된다(Bishop, 1955). 즉 안전율은 실제 지반강도와 사면의 붕괴될 때의 가상 지반강도와의 비를 비교함으로써 구할 수 있다. 따라서 안전율은 지반의 실제 전단강도를 파괴가 일어나기 시작하는 강도로 줄이기 위하여 나눈 값이 된다(Duncan, 1996).

본 연구에서는 UDEC의 FISH macro 언어로 작성한 전단강도 감소기법에 의한 안전율 프로그램(박연준과 유광호, 1998)을 이용하여 안전율을 구하고, 한계평형법으로 구한 안전율과 비교해석 하였다.

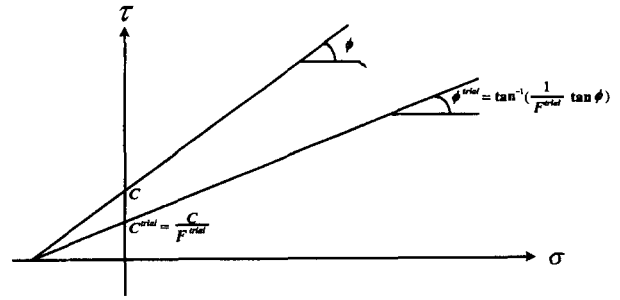


그림 6. Real and trial strength parameters의 관계(박연준과 유광호, 1998)

본 수치해석에서 적용한 전단강도 감소기법에 의한 사면안전율은 실제 불연속면에 대한 전단강도를 사면의 붕괴가 발생할 때까지 점진적으로 감소시켜가며 해석을 반복 수행하여 구할 수 있다. 즉, 실제 암석의 점착력 C와 내부마찰각 φ를 trial 안전율 F^{trial}로 나누어 일련의 해석을 반복 수행한다. 이때 trial 안전율과 이에 의해 감소된 암반 물성치는 그림 6에 나타난 바와 같이 원래의 물성을 선형적으로 감소시킨 것이며, 식 (3)의 관계를 갖게 된다.

$$C^{trial} = \frac{1}{F^{trial}} C$$

$$\phi^{trial} = \arctan\left(\frac{1}{F^{trial}} \tan \phi\right) \quad (3)$$

3.4.2 건조상태시의 해석결과

그림 7은 본 사면의 평면파괴구간에 대해 건조상태를 고려한 수치해석 결과이다. 소단하부의 암반블록이 불안정한 거동을 보이는데, 이 블록이 불연속면을 따라 미끄러지는 최대 전단변위는 약 0.33mm이고, 이때 블럭

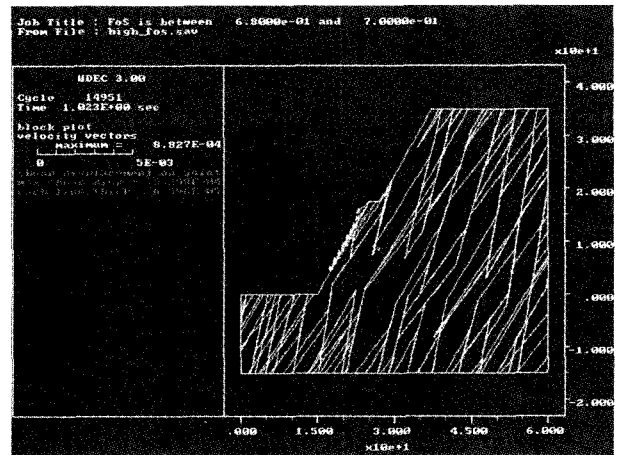


그림 7. 사면 건조시의 전단변위와 속도벡터

의 미끄러지는 최대속도는 $8.827 \times 10^{-3} \text{m/s}$ 이다. 전단변위 및 속도벡터는 크게 발생하지 않으나 불연속면의 경사가 사면의 경사와 유사하며, 이를 수직으로 관통하는 85° 의 압축이 이완면으로 작용하기 때문에 상당히 불안정한 상태이다. 전단강도 감소기법에 의한 안전율 계산 결과 이때의 안전율은 0.69로서, 불안정한 사면의 안정성을 정량적으로 제시하고 있다. 또한, 한계평형법에 의한 이때의 안전율은 0.65로서 수치해석결과와 근사하며, 이 근사한 차이가 나는 이유는 한계평형법과 UDEC에서 쓰이는 매개변수들이 다르기 때문인 것으로 판단된다.

3.4.3 지하수 영향을 고려한 해석결과

본 연구에서는 보어홀(borehole)에서의 지하수위를 직접 측정하지 못했으므로, 사면건조시와 포화시로 가정하여 지하수에 의한 영향을 해석하였다. 개별요소법에서의 지하수 유동해석은 유한요소법이나 유한차분법에서 사용되는 연속체개념처럼 대상요소를 포화된 투수성요소로 취급하는 것이 아니라, 개별블록요소들을 불투수성 매체로 취급하는 대신 이들 블록사이의 균열을 통해서만 유동이 가능하다는 가정을 하고 있다. 따라서, 암석을 나타내는 개별블록은 불투수성이라 가정하였고, 해석상의 알고리즘은 지하수위가 일정하게 유지되어 변화가 거의 없을 때의 지하수흐름을 나타내는 정류상태(steady-state flow)로 가정하였다.

그림 8은 본 사면을 포화상태로 가정하여 이때의 전단변위와 속도벡터를 나타내는 결과이다. 전단변위는 약 0.45mm로서 건조시의 약 0.33mm에 비해 조금 증가했으며, 속도벡터는 $1.542 \times 10^{-3} \text{m/s}$ 로서 건조시의 8.827

$\times 10^{-3} \text{m/s}$ 에 비해 역시 조금 증가했다. 이는 포화상태의 불연속면에 대해서는 점착력을 0으로 고려했기 때문이다. 본 사면은 불연속의 경사가 급하므로 사면이 절취면 높이까지 포화되었다고 가정하더라도, 지하수의 유동이 직접적으로 붕괴면에 영향을 주지 않는 경우이다. 본 수치해석 안전율은 0.41이나, 한계평형해석상의 안전율은 0.28로서 수치해석상의 안전율보다 낮다. 이는 한계평형해석에서는 불연속면에 작용하는 부양력을 고려하기 때문인 것으로, 본 수치해석 결과와는 다르게 나타난다. 따라서, 본 수치해석은 지하수의 동점성계수, 불연속면 투수계수를 고려할 수 있는 반면, 한계평형해석은 실제 자연암반의 전체적인 기하학적 상태를 고려할 수 없는 단점이 있다.

4. 암반사면 보강공법 검토

본 사면에 대한 최소안전율을 확보하기 위해 SMR의 불안정등급에 따라 제시된 지보재인 슛크리트와 록볼트를 적용하였다. 슛크리트는 10cm 두께로 1회 타설을 적용하였고, 록볼트는 축력만 고려할 수 있는 케이블요소로 모사했으며 슛크리트 요소와 마찬가지로 록볼트의 인장파괴를 허용한다. 표 5, 6은 본 해석에서 지보재로 적용한 슛크리트와 록볼트 물성치이다.

본 사면은 건기시 안전율이 0.69로서 사면안정에 필요한 최소안전율 1.3에 못 미치는 불안정한 상태이다. 따라서, SMR의 불안정등급에 따른 지보재로서 록볼트와 슛크리트를 적용하면 그림 9와 같이 안전율이 1.71로 증가하므로 사면이 안정화된다고 판단된다. 속도벡터가

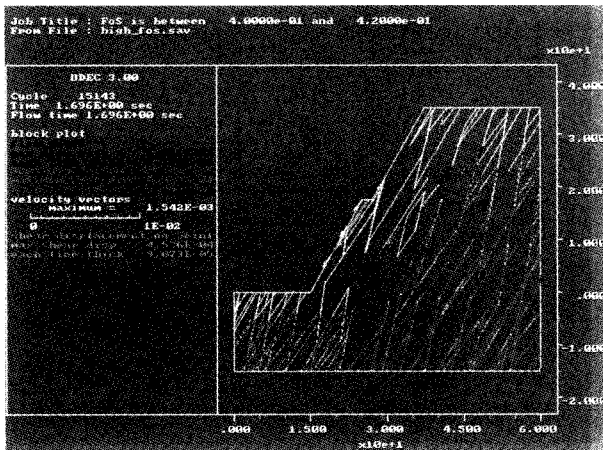


그림 8. 사면 포화시의 전단변위와 속도벡터

표 5. 슛크리트의 입력 물성치

스�크리트		암반 / 슛크리트 접촉부	
밀도(kg/cm ³)	2,500	수직강성(GPa/m)	1.0
탄성계수(GPa)	20.0	전단강성(GPa/m)	1.0
포아송비	0.15	내부마찰각(°)	45
압축항복강도(MPa)	8.4	점착강도(MPa)	2.0
인장항복강도(MPa)	0.6	인장강도(MPa)	1.0
잔류항복강도(MPa)	0.6		

표 6. 록볼트의 입력 물성치

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	점착강도(MPa)	2.0
압축항복강도(MPa)	100	인장강도(MPa)	1.0
항복강도(MPa)	10		

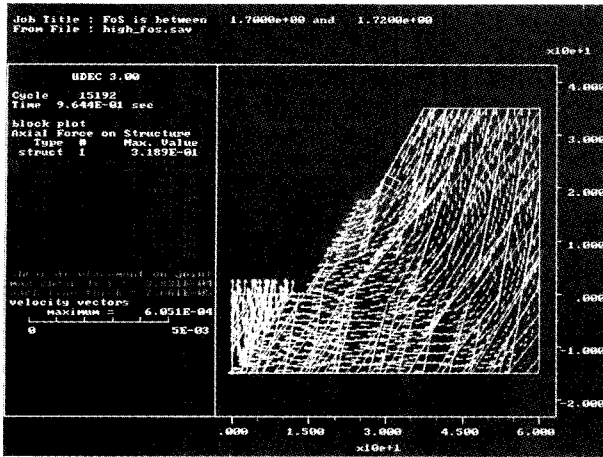


그림 9. 보강된 건조사면의 전단변위와 속도벡터

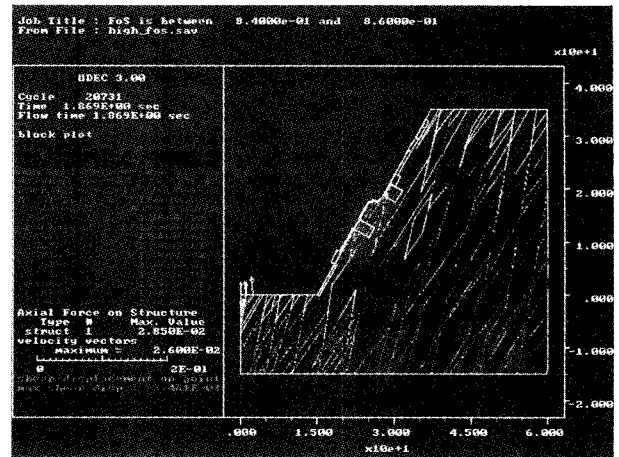


그림 10. 보강된 포화사면의 전단변위와 속도벡터

사면전체에 걸쳐서 균일하게 분포하며, 이는 사면에서 상대적으로 크게 불안정한 거동을 보이는 암반블럭이 없음을 의미한다. 소단 상하부의 절취면을 덮는 흰색선이 슛크리트로, 이에 걸리는 축력은 약 $3.189 \times 10^1 \text{MN}$ 이다. 또한, 불안정한 암반블럭에 타입한 록볼트는 갈색으로 표시하였다. 록볼트의 설치간격은 1.5m이며, 길이는 7.5m로 총 10공이 타입되었고, 이에 걸리는 축력은 각 케이블의 번호순으로 나와 있다. 록볼트 길이가 일반적인 타입경향에 비해 긴 편이나 모암과 불안정한 블록의 일체화를 위해 7.5m를 적용하였으며, 타입각은 파괴면에 대해 53° 로 적용하였고, pretention은 각 볼트에 대해서 10톤을 적용하였다.

그림 10은 슛크리트와 록볼트 보강공법을 적용한 본 사면에 대해서 집중적인 강우기간 동안에 다량의 지하수가 공급됨으로 인해 절취면 높이까지 포화되었다고 가정하여 그때의 안정성을 나타내는 결과이다. 이때 사면의 안전율은 0.85로서 무보강시 포화된 사면의 안전율인 0.41보다는 증가했으나 상당히 불안정한 상태이다. 건조사면에서의 슛크리트 축력은 $3.189 \times 10^1 \text{MN}$ 이나 포화사면에서의 슛크리트 축력은 $2.85 \times 10^2 \text{MN}$ 으로 다소 감소하였으며, 록볼트의 축력도 건조사면에서보다 포화사면에서 조금 감소하였다. 이는 불연속면을 따라 유동하는 지하수의 공극수압으로 인해 슛크리트와 록볼트의 보강효과가 감소했으며, 결국 안전율도 감소하였다. 따라서, 본 사면에 대해 슛크리트와 록볼트의 보강공법을 적용하면 건조시의 사면에서는 안정화된다고 판단할 수 있으나, 우기시 사면의 포화상태를 가정했을 때는 불안정하므로 추가적인 보강공법이 적용되어야 한다고 판단된다.

5. 결론 및 토의

본 연구는 보은지역에서 1:0.5의 구배로 암반절취공사 중 평면파괴가 발생한 구간이 추가붕괴의 위험성이 있으므로 SMR, 평사투영법, 한계평형법, 수치해석으로 연구대상사면의 안정성을 해석하고 안전율을 비교해 보았다.

- (1) 본 사면에 대한 SMR은 35.4점으로 등급 IV(불안정)이며, 붕괴형태는 평면파괴, 대규모 썩기파괴가 발생할 수 있고, 보강대책으로는 광범위한 보강이 요구됨을 나타낸다.
- (2) 운동학적 사면안정성 해석 결과 본 사면에서는 J_1 ($58^\circ/210^\circ$)이 평면파괴의 불안정영역 내에 도시되었으며, 이는 100-120m 구간에서 실제로 평면파괴를 발생시킨 불연속면이다.
- (3) 동역학적 사면안정성 해석 결과 기하학적으로 불안정하다고 판정된 J_1 에 대해 건조시와 우기시로 고려하여 안전율을 구한 결과 건조시 0.665, 지하수에 의한 영향을 고려한 결과 안전율이 0.28로 매우 불안정한 상태이다.
- (4) 개별요소해석으로 구한 건조시 안전율은 0.69, 완전포화시에는 0.40으로 상당히 불안정한 상태이다. 그러나, UDEC 해석에서는 본 사면의 경우 불연속면이 고각으로 지하수 유동에 의해 직접적으로 파괴면에 영향을 받지 않으므로 완전포화된 경우를 가정하였다. 한계평형해석은 파괴면에 대해서 부양력을 고려하여 지하수에 의한 안정성을 해석하지만, 본 사면과 같은 경우에는 사면이 포화된다고 가정하더라

도 직접적인 경우에 의해 파괴면에 공극수압이 작용하지 않으면 지하수에 의한 영향은 사면안정성에 크게 영향을 미치지 않았다. 따라서, 불연속면을 통한 지하수 유동에 대해서는 자연암반의 특성을 고려하여 현실적으로 반영할 수 있는 개별요소법에 근거한 수치해석이 적합하다고 판단된다.

(5) 본 사면에 대해 건조상태를 고려했을 때 한계평형해석에 의한 안전율은 0.665, 개별요소해석에 의한 안전율은 0.69로 불안정한 상태이며, 추가파괴의 잠재성이 있다. 따라서, 본 사면에 대해 SMR 결과 광범위한 보강대책 제시에 따라 슛크리트와 록볼트를 적용하였다. 그 결과 절취면상에서 발생한 전단변위와 속도분포가 급격히 줄어들었고, 불안정한 거동을 보이는 암석블럭이 록볼트에 의해 모암과 일체화되어 건조사면에서는 UDEC 안전율이 1.71, 포화사면에서는 0.85로 증가하였다. 보강공법을 적용하면 건조상태에서는 사면이 안정화된다고 판단할 수 있으나, 포화사면에서는 안전율이 증가하지만 역시 불안정한 상태이다.

이상으로 본 연구에서 순차적으로 수행한 각 안정성 해석결과들을 종합해보면 연구대상 사면이 불안정하다고 판단되며, 이는 평면파괴가 발생하였고 추가붕괴가 예상되는 현장상황과 일치함을 알 수 있다. 따라서, 본 사면에 대해 도로절취사면에 필요한 최소안전율 1.3을 확보하기 위해서는 추가적인 안정화 대책이 필요하다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. 박연준, 유광호(1998), 편재절리모델을 이용한 절리 암반 사면의 안정성 해석, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, Vol.8, pp.287-295.
2. 안윤성, 김연중(1994), 암반사면 안정성 평가 및 보강설계, 대한지질공학회, Vol.4, No.3, pp.343-356.
3. 유광호, 박연준(2001), 개별요소법에 의한 절리 암반사면의 안전율을 평가, 한국지반공학회, Vol.17, No.4, pp.241-247.
4. 이지수, 박혁진, 민경덕, 구호본(2001), 불연속면의 특성을 고려한 보은지역 암반사면 안정성해석, 대한자원환경지질학회, Vol.34, No.6, pp.601-615.
5. Bieniawski, Z.T.(1976), Rock mass classification in rock engineering, *In Proc. Symp. Exploration for Rock Eng*, Balkema, Rotterdam, Vol.1, pp.97-106.
6. Bishop, A.W.(1995), The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, Vol.5, pp.7-17.
7. Duncan, J.M.(1996), State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes. *J. Geotech. Engrg. Div. Am. Soc. Civ. Engrs.* Vol.22, No.3, pp.577-596.
8. ISRM(1974), Suggested Methods for Determining Shear Strength, Committee on Field Tests Document No.1, Final Draft.
9. ISRM(1978a), Suggested Methods for Determining the Strength of Rock Materials in Triaxial Compression, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol.15, No.2, pp.47-51.
10. ISRM(1978b), Suggested Methods for Determining the Uniaxial Compressive Strength and Deformability of Rock Materials, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol.16, No.2, pp.135-140.
11. Itasca Consulting Group, Inc.(1996), UDEC User's Manual, Ver 3.0
12. Kliche, C.A.(1999) ROCK SLOPE STABILITY. The Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.
13. Norrish, N.I. and Wyllie, D.C.(1996), Rock slope stability analysis, Landslides; Investigation and Mitigation, Special Report 247, National Science Council.
14. Park, H.J.(1999), Rick 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.
15. 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.
16. Romana, M.R.(1993), A geomechanical classification for slopes: Slope Mass Rating, *Comprehensive Rock Engineering*. Vol.3, pp.575-601.

(접수일자 2002. 6. 13, 심사완료일 2003. 6. 22)