

한계평형법과 개별요소법을 이용한 보은지역 암반사면 안전을 비교해석 Comparison Analysis of Factor of Safety on Rock Slope in Boeun Region Using Limit Equilibrium Method and Distinct Element Method

이지수¹⁾, Ji-Soo, Lee, 유광호²⁾, Kwang-Ho, You, 박혁진³⁾, Hyuck-Jin, Park, 민경덕⁴⁾, Kyung-Duk, Min

¹⁾ 연세대학교 이과대학 지구시스템과학과, Dept. of Earth System Sciences, Yonsei Univ.

²⁾ 수원대학교 공과대학 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Suwon Univ.

³⁾ 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원, Senior Researcher, Civil Engineering Division, Korea Institute of Construction Technology

⁴⁾ 연세대학교 이과대학 지구시스템과학과 교수, Professor, Dept. of Earth System Sciences, Yonsei Univ

SYNOPSIS : The large planar failure has occurred in a rock cut slope of highway construction site in Boeun. This area is considered as unstable since the discontinuities whose orientations are similar to the orientation of the failure plane, are 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 obtained in limit equilibrium method, the UDEC 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.

Key words : planar failure, limit equilibrium method, UDEC, factor of safety, shear strength reduction technique

1. 서론

일반적으로 국내의 사면절취공사는 암반강도에 의해 정해진 획일적인 절취구배를 따르는 경향이 있다. 그러나, 암반사면인 경우 암반중의 절리, 층리, 단층과 같은 불연속면의 방향성 및 물리적 특성이 사면안정성에 미치는 영향이 가장 크므로 이들의 특성을 고려해야 함이 필수적이다. 본 연구대상 사면은 보은지역의 도로공사구간에 위치한 암반절취사면으로 1999년 4지구 사면에서 평면파괴가 발생하였다.

이는 사면의 주향과 유사한 방향성의 불연속면과 이를 수직으로 가로지르는 암맥에 의해 붕괴가 발생한 것으로, 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 다각도의 사면안정성 해석을 수행하였다. 그러나, SMR, 평사투영법, 한계평형법은 절취에 따른 암반사면의 응력재분배 및 비선형적인 변위거동, 불연속면을 통한 지하수의 유동특성 등에 대해서는 해석할 수 없는 한계점이 있으므로 이를 고려하기 위하여 수치해석을 수행하였다.

절리가 발달한 암반사면의 경우 사면의 파괴는 사면과 절리의 상대적인 방향성 및 파괴특성에 지배되므로 임의의 활동면을 가정해야하는 한계평형법을 이용한 해석법은 적용하기가 어렵다(유광호와 박연준, 2001). 본 연구에서는 UDEC의 전단강도 감소기법(박연준과 유광호, 1998)으로 구한 안전율과 한계평형법의 안전율을 비교분석하여 본 사면에 대한 안정성을 해석하였다. 또한, 본 사면에 대해 지하수를 고려하여 한계평형법과 UDEC으로 사면안정성을 비교해석 하였다.

2. 현장 조사

STUDY AREA

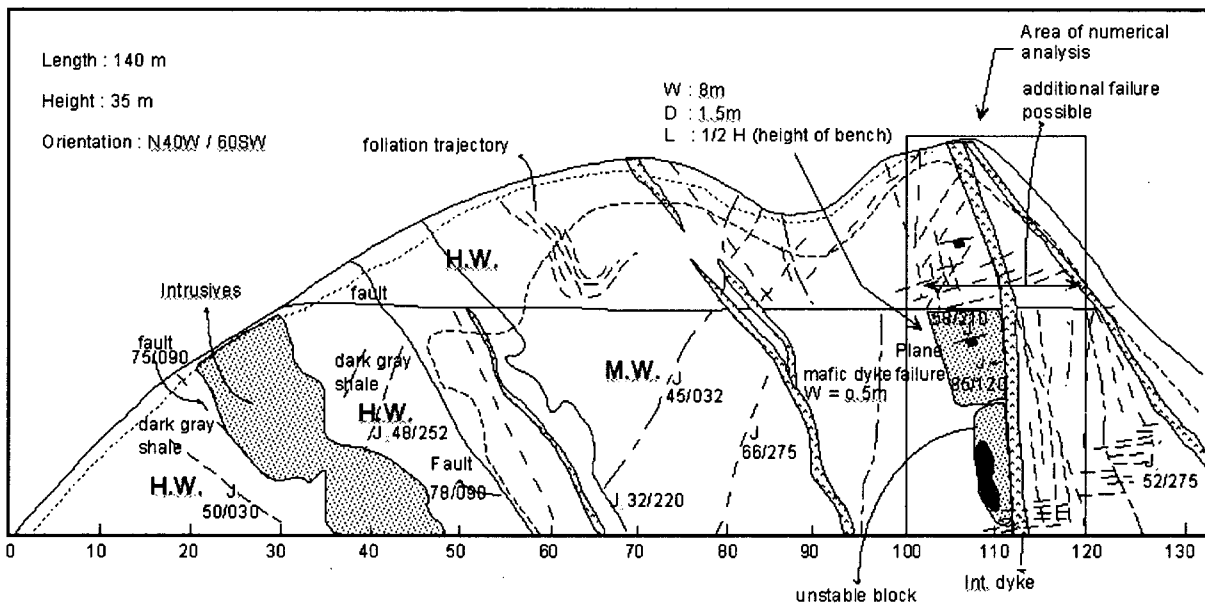


그림 1. Face mapping for study region of numerical analysis(이지수의, 2001)

본 연구대상 절취사면의 방향성은 $60^\circ / 230^\circ$, 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, 이 중 열기성 암맥은 연장성이 크

다. 사면의 좌측부에는 세일부가 심하게 습곡되었으며, 중앙부에는 단층 및 파쇄대가 분포하고, 우측부 파괴구간에는 사면의 주향과 유사한 방향의 불연속면이 발달한다. 현장에서 관찰된 3개의 불연속면군 중 set 1($58^\circ / 210^\circ$)은 평면파괴가 발생한 불연속면으로서 사면의 방향($60^\circ / 230^\circ$)과 유사하며, 파괴구간 주변에서 8~10m의 연장성을 보이므로 추가파괴의 가능성이 있을 것으로 판단된다(그림 1). Set 2($85^\circ / 120^\circ$)는 set 1을 수직으로 가로지르며 연장성이 10m 이상인 염기성 암맥의 접촉부에 발달한 불연속면으로, 이 부분은 접촉변성작용에 의해 불연속면의 전단강도가 감소되었으며, 파괴구간의 측면 경계부로서 미끄러짐에 저항하지 못하는 이완면으로 작용하여 평면파괴가 발생한 것으로 보인다. 또한, Set 3($52^\circ / 275^\circ$)는 파괴구간 우측부의 조밀한 인장균열로서, 이는 발파에 의해 생긴 것으로 추정되며 이로 인한 소규모의 낙석이 예상된다. 100~120m 구간의 대부분의 불연속면들에서 충전물로는 미사(silt)가 협재되어 있으며, 지하수의 누수정도는 축축한(damp)편으로 관찰되었다.

3. 실내 암석시험

3.1 일축압축시험

일축압축시험은 수치해석시 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 1844.4 kgf/cm^2 이다.

3.2 삼축압축시험

삼축압축시험은 본 수치해석에서 암석의 점착력(c)과 내부마찰각(ϕ)을 구하기 위해 수행되었다. 사용된 장비는 SBEL사의 Stiff Test System Model STS-1000으로 총 하중 1,000,000 lbs(4.45MN)을 가할 수 있으며, $30 \times 10^6 \text{ lbs/inch}$ (5.25 MN/mm)의 강성을 갖는다. 모어원을 도시하여 암석의 내부마찰각과 점착력을 구하기 위해 구속압을 5, 10, 20 kg/cm^2 등으로 가하여 실시하였다. 파괴포락선을 작도한 결과 암석의 내부마찰각은 48.04° , 점착력은 330 kg/cm^2 이다.

3.3 직접전단시험

직접전단시험은 불연속면의 특성을 고려한 수치해석을 위하여 절리면의 점착력과 내부마찰각을 구하기 위해 수행되었다. 암반사면의 붕괴는 불연속면의 특성에 크게 좌우되므로 전단시험을 통한 절리면의 물성획득이 필수적이다. 사용된 장비는 ELE사의 Portable Shear Box Assembly 77-1030으로, 시료의 최대면적 $155 \text{ mm} \times 125 \text{ mm}$ ($4.5 \text{ inch} \times 5 \text{ in}$) 혹은 최대 직경 102mm(4in)에 대해서 시험할 수 있다. 본 시험은 전단면에 대한 수직응력의 함수로써 잔류전단강도를 구하였으며, 잔류전단강도는 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 겉보기 점착력으로서 0.4587 MPa 이나, 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 암반사면의 1차적인 안정성을 평가하는데 유용한 방법으로, 불안정한 파괴형태와 이를 안정화시키기 위한 지보에 관한 대책공법을 제시하고 있다. 본 암반사면평가에서 평면파괴구간에 대한 SMR은 35.4점으로 등급 IV(Unstable)에 속한다(표 1). 이는 암반상태 및 사면안정성이 불안정함을 나타내며, 붕괴형태는 평면파괴, 대규모 쉐기파괴가 발생할 수 있고, 이에 대한 보강대책으로는 광범위한 보강이 요구됨을 나타낸다. 본 사면에 대한 SMR 평가결과는 등급 IV로서 사면이 전반적으로 불안정하다고 판정되며, 이미 평면파괴가 발생하였고 추가붕괴가 예상되는 현장상황과 일치한다.

표 1. SMR classification of jointed rock mass(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

4.2 Kinematic Slope Stability Analysis

Kinematic analysis는 대상 암반사면내의 불연속면과 사면의 상대적인 위치에 의해 발생가능한 사면 파괴의 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).

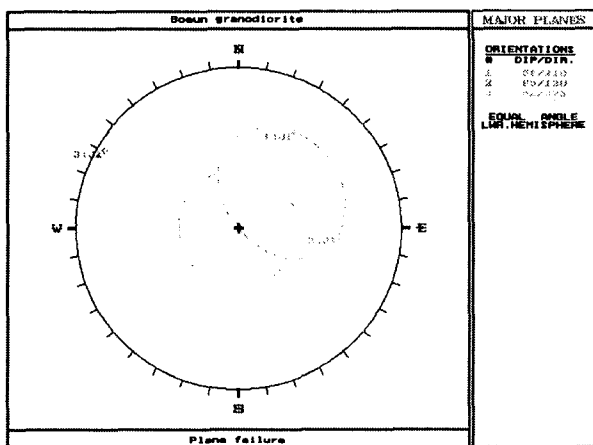


그림 2. Plane Failure

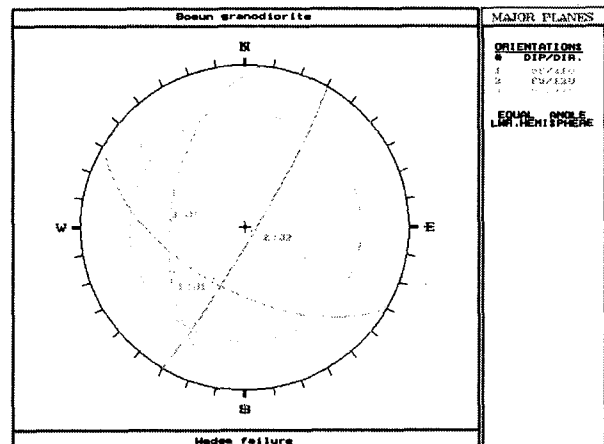


그림 3. Wedge Failure

해석결과 그림 2에서와 같이 $J_1(58^\circ / 210^\circ)$ 이 평면파괴의 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&Willey(1996)의 평면파괴 발생조건에 해당되지 않는다.

썩기파괴 해석에서는 J_1 과 J_3 의 불연속면 교차선이 불안정영역에 도시되며(그림 3), 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 발달하는 위치가 달라 두 불연속면이 서로 교차하지 않으므로 썩기파괴의 가능성은 없는 것으로 판단된다.

4.3 Kinetic Slope Stability Analysis

Kinematic analysis 결과 사면이 불안정할 가능성이 있다고 판단되면, kinetic stability 분석을 수행하여야 하며 대개 한계평형해석을 이용하여 안전율을 구함으로써 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 J_1 에 대하여 kinetic analysis를 수행하였으며, 사면건조시(건기시) 안전율과 사면높이의 1/2에 이르는 지하수위(우기시)를 가정하여 안전율을 구하였다.

직접전단시험을 통해 불연속면의 내부마찰각 30° , 겉보기 점착력 458.7 KPa을 구했으나, 본 연구에서는 건조시 점착력을 5 KPa(=kN/m²)로 낮게 가정하여 보수적인 안정성 해석을 수행하였으며, 이 때의 안전율은 0.665이다. 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 가정하였다. 이때 지하수의 영향에 의해 불연속면 점착력은 0으로 가정하였으며, 이러한 조건으로부터 획득한 안전율은 0.28로서 매우 불안정한 상태이다. 건기시에 비해 안전율이 크게 낮은 이유는 불연속면상의 지하수에 의한 부양력으로 인해 미끄러짐에 저항하는 힘이 감소했기 때문이다.

그러나, 한계평형법은 결정론적인 해석(deterministic analysis)으로서, 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 불가능하므로 개별요소법에 근거하여 불연속체 암반에 대해 불연속면 특성을 고려할 수 있는 UDEC을 이용하여 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 묘사할 수 있다. 본 연구에서는 UDEC의 FISH macro 언어로 작성한 전단강도 감소기법에 의한 안전율 프로그램(박연준과 유광호, 1998)을 이용하여 안전율을 구하고, 한계평형법으로 구한 안전율과 비교하였다. 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 c 와 내부마찰각 ϕ 를 trial 안전율 F^{trial} 로 나누어 일련의 해석을 반복 수행한다.

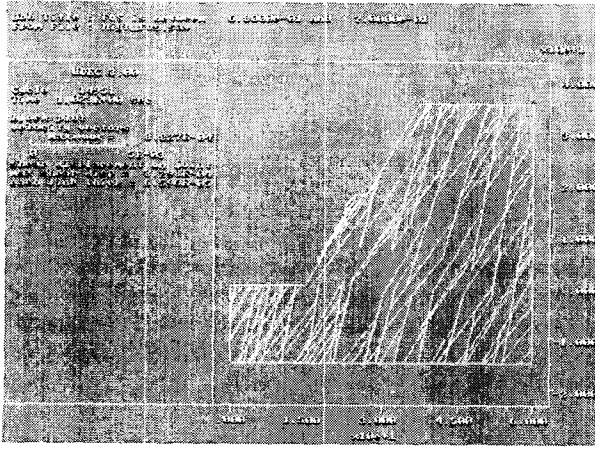


그림 4. Shear displacement and velocity vectors of dry slope

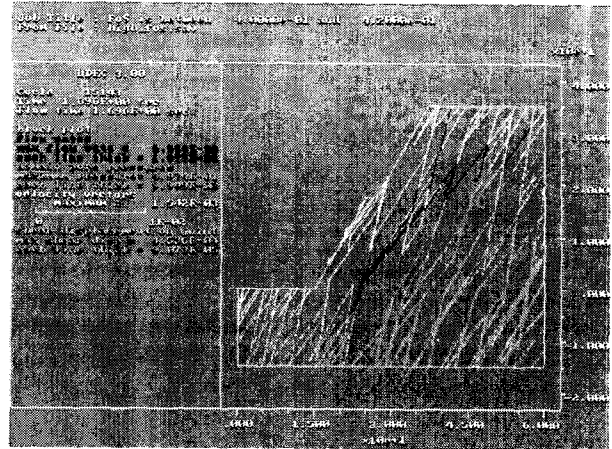


그림 5. Shear displacement and velocity vectors of saturated slope

그림 4는 사면의 건조상태를 고려한 결과로, 소단하부의 암석블록이 불안정한 거동을 보이는데 최대 전단변위는 약 0.33mm 이고, 이때 미끄러지는 최대속도는 $8.827 \times 10^3 \text{m/s}$ 이다. 전단변위 및 속도벡터는 크게 발생하지 않으나 불연속면의 경사가 사면의 경사와 유사하므로 불안정하다. 전단강도 감소기법에 의한 안전율은 0.69이며, 한계평형법에 의한 안전율은 0.65로 유사한 결과를 나타낸다.

그림 5는 사면의 포화상태를 가정한 결과로, 전단변위는 약 0.45mm 로서 건조시의 약 0.33mm 에 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, 한계평형해석 안전율은 0.28로서 수치해석 안전율보다 낮다. 이는 한계평형해석에서는 불연속면상의 부양력을 고려하기 때문인 것으로, 수치해석 결과와는 다르게 나타난다. 따라서, 본 수치해석은 지하수의 동점성계수, 불연속면 투수계수를 고려할 수 있는 반면, 한계평형해석은 실제 자연압반의 전체적인 기하학적 상태를 고려할 수 없는 단점이 있다.

본 사면에 대한 최소안전율을 확보하기 위해 SMR의 불안정등급에 따라 제시된 지보재인 쇼크리트와 록볼트를 적용하였다. 쇼크리트는 10cm 두께로 1회 타설을 적용하였고, 록볼트는 축력만 고려할 수 있는 케이블요소로 모사했으며 쇼크리트 요소와 마찬가지로 록볼트의 인장파괴를 허용한다.

본 사면은 건기시 안전율이 0.69로서 불안정한 상태이다. 록볼트와 쇼크리트를 적용하면 그림 6과 같이 안전율이 1.71로 증가한다. 속도벡터가 사면전체에 걸쳐서 균일하게 분포하며, 이는 사면에서 상대적으로 크게 불안정한 거동을 보이는 암석블럭이 없음을 의미한다. 소단 상하부의 절취면을 덮는 흰색선이 쇼크리트로, 이에 걸리는 축력은 약 $3.189 \times 10^1 \text{MN}$ 이다. 불안정한 암반블럭에 타입한 록볼트는 갈색으로 표시하였다. 록볼트의 설치간격은 1.5m이며, 길이는 7.5m로 총 10개가 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.

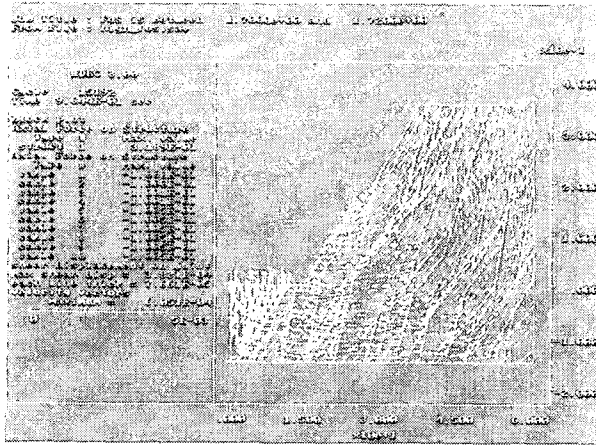


그림 6. Shear displacement and velocity

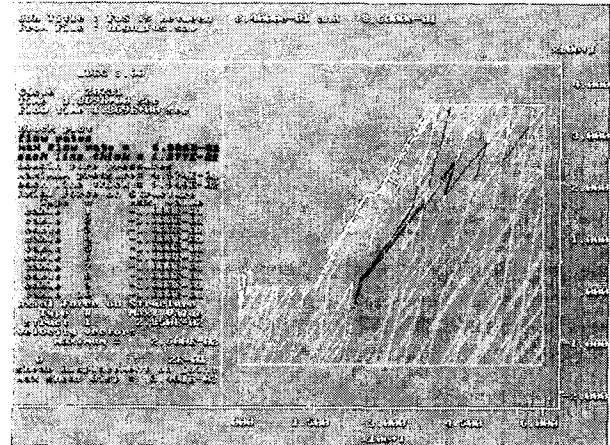


그림 7. Shear displacement and velocity
vectors of supported dry slope

vector of supported saturated slope

그림 7은 쇼크리트와 록볼트 보강공법을 적용한 본 사면에 대해서 집중적인 강우기간 동안에 다량의 지하수가 공급됨으로 인해 절취면 높이까지 포화되었다고 가정하여 그때의 안정성을 나타내는 결과이다. 이때 사면의 안전율은 0.85으로서 무보강시 포화된 사면의 안전율인 0.41보다는 증가했으나 불안정한 상태이다. 건조사면에서의 쇼크리트 축력은 $3.189 \times 10^1 \text{ MN}$ 이나 포화사면에서의 쇼크리트 축력은 $2.85 \times 10^2 \text{ MN}$ 으로 다소 감소하였으며, 록볼트의 축력도 건조사면에서보다 포화사면에서 조금 감소하였다. 이는 불연속면을 따라 유동하는 지하수의 공극수압으로 인해 쇼크리트와 록볼트의 보강효과가 감소했으며, 결국 안전율도 감소하였다. 그러므로, 집중호우기에는 포화될 가능성이 크므로 본 사면에 대해서는 추가적인 안정화 대책이 필요하다고 판단된다.

5. 결론 및 토의

연구지역인 보은 도로공사 구간에서 1:0.5의 구배로 암반절취공사 중 일부 구간에서 평면파괴가 발생하였고, 특히 파괴구간 직하부에 추가붕괴가 예상되는 대규모의 암석블럭이 파괴면과 동일한 방향성을 갖고 존재하고 있으므로 SMR, 평사투영법, 한계평형법, 수치해석으로 본 사면의 안정성을 해석하였다.

본 사면에 대한 SMR은 35.4점으로 등급 IV(불안정)에 속한다. 이 결과는 본 연구지역의 암반상태 및 사면안정성이 불안정함을 나타낸다. Kinematic analysis 결과 $J_1(58^\circ/210^\circ)$ 이 평면파괴의 불안정영역 내에 도시되며, 100-120m 구간에서 실제로 평면파괴를 발생시킨 불연속면이다. 또한, J_1 은 추가붕괴의 가능성을 내재하고 있으므로 이에 대해서는 안전율을 구하여 안정성을 해석함이 필요하다.

Kinetic analysis는 kinematic analysis 결과 불안정하다고 판정된 불연속면에 대해 한계평형법으로 안전율을 구하며, 불안정하다고 판정된 J_1 의 안전율은 건조시 0.665, 우기시 0.28로 불안정한 상태이다.

UDEEC의 건조시 안전율은 0.69, 완전포화시는 0.40으로 불안정한 상태이다. 지하수위를 사면높이의 1/2까지 가정한 한계평형해석 결과 안전율이 0.28로 매우 불안정한 상태이다. 그러나, UDEC 해석에서는

본 사면의 경우 불연속면이 고각으로 지하수의 유동에 의해 직접적으로 붕괴면에 영향을 받지 않으므로 완전포화된 경우를 가정하였으며, 이 때의 안전율은 0.40이다. 한계평형해석은 파괴면에 대해서 부양력을 고려하여 지하수에 의한 안정성을 해석하지만, 본 사면과 같은 경우에는 사면이 포화된다고 가정하더라도 직접적인 강우에 의해 파괴면에 공극수압이 작용하지 않으면 지하수에 의한 영향은 사면안정성에 크게 영향을 미치지 않는다. 따라서, 불연속면을 통한 지하수 유동에 대해 자연압반의 특성을 고려하여 현실적으로 반영할 수 있는 개별요소법에 근거한 수치해석이 적합하다고 판단된다.

본 사면에 대해 건조상태를 고려했을 때 한계평형해석에 의한 안전율은 0.665, UDEC 수치해석에 의한 안전율은 0.69로 사면에서 요구되는 최소안전율 1.3에 크게 미치지 못하는 불안정한 상태로 추가파괴의 잠재성이 있다. 따라서, 본 사면에 대해서 SMR의 등급판정에 따라 제시된 보강공법으로 쇼크리트와 록볼트를 적용한 결과 절취면상에서 발생한 전단변위와 속도분포가 급격히 줄어들었고, 불안정한 거동을 보이는 암석블럭이 록볼트에 의해 모암과 일체화되는 것을 알 수 있다. 건조사면에서는 UDEC에 의한 안전율이 1.71로 증가하였고, 포화사면에서는 0.85로 증가하였다. 건조사면에서는 사면이 안정화된다고 판단할 수 있으나, 포화사면에서는 안전율이 증가하지만 역시 불안정한 상태이다. 따라서, 시공후 본 사면이 포화될 때에는 불안정하다고 예측되므로 추가적인 안정화대책이 필요하다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. 박연준, 유광호(1998), 편재절리모델을 이용한 절리 암반 사면의 안정성 해석, *터널과 지하공간*, 한국 암반공학회, Vol.8, pp.287~295.
2. 유광호, 박연준(2001), 개별요소법에 의한 절리 암반사면의 안전율 평가, *한국지반공학회지*, Vol.17, No.4, pp.241~247.
3. 이지수, 박혁진, 민경덕, 구호본(2001), 불연속면의 특성을 고려한 보은지역 암반사면 안정성해석, *대한자원환경지질학회지*, Vol.34, No.6, pp.601~615.
4. Bishop, A.W.(1995), The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, Vol.5, pp.7~17.
5. Duncan, J.M.(1996), State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes. *J. Geotech. Engng. Div. Am. Soc. Civ. Engrs.* Vol.22, No.3, pp.577~596.
6. *Itasca Consulting Group, Inc.*(1996), UDEC User's Manual, Ver 3.0
7. Kliche, C.A.(1999) ROCK SLOPE STABILITY. *The Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.*
8. Norrish, N.I. and Wyllie, D.C.(1996) Rock slope stability analysis, Landslides; Investigation and Mitigation, Special Report 247, *National Science Council.*
9. 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.*
10. 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.
11. Romana, M.R.(1993), A geomechanical classification for slopes: Slope Mass Rating.