

사례연구를 통한 도로 절개면 설계 문제점 분석과 대책안 제시 Analysis of Problems in Road Cut-Slope Design Based on Practical Example

이기하¹⁾, Ki-Ha Lee, 백영식²⁾, Young-Shik Paik, 구호본³⁾, Ho-Bon Koo, 박혁진³⁾, Hyuck-Jin Park

¹⁾한국건설기술연구원 토목연구부 연구원, Researcher, Civil Eng. Dept., KICT

²⁾경희대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyunghee University

³⁾한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원, Senior Researcher, Civil Eng. Dept., KICT

SYNOPSIS : Profiles of discontinuities through scanline method were investigated for the analysis of rock slope stability. Lower hemispheric projection method was used to evaluate the geometric stability and failure potential of these discontinuities. Also, safety factor was evaluated for the discontinuities of failure potential using by limit equilibrium analysis. Then, displacements of rock block due to the discontinuities were displayed by using the program UDEC(Universal Distinct Element Code) which applied the Distinct Element Method. When we determine the cut-slope in design, the characteristics of discontinuities is not represented only by strength parameters of intact rock. Therefore it is more reasonable method in assuring stability that first, construction would be preceded by the cut-slope of preliminary design, and then, cut-slope would be redetermined by elaborate site investigation in processing construction.

Key words : Cut-slope, UDEC, Geometric Stability, Limit Equilibrium Analysis, Numerical Analysis

1. 서론

설계 및 시공과정에서 절정되는 절개면의 경사도는 절개면의 안정성 뿐만 아니라 이에 수반되는 절토량에 따라 공사기간, 도로 선형, 소요 예산 등에 영향을 미친다. 설계단계에서 절개면의 표준 경사도는 건설교통부, 한국도로공사, 토지공사 등과 같은 각 기관에 따라 상이한 표준 경사도가 제시되고 있다.

국내에서 일반적으로 적용되는 표준 경사도는 리핑암 1:1.0, 발파암 1:0.5 ~ 1:0.7, 풍화암 1:1.2의 절취 경사로 토목현장에서 시공되어 지고 있다. 이러한 절취경사는 건설부 표준품셈에서 제시하고 있는 암석의 강도에 의한 암반분류로 암석의 역학적 특성을 고려하였으나 암반절개면의 안정성에 중요한 영향을 미치는 불연속면에 대해서는 고려되어 있지 않다. 현재 설계과정에서는 절개면이 나타나지 않은 상태에서의 시추조사와 지표지질조사, 실내시험, 표준관입시험등을 통하여 암석의 물성치를 결정하고 있다. 그러나 절개면의 파괴에 중요한 영향을 미치는 불연속면에 대한 정밀한 조사는 이루어지지 못하고 있다. 특히 도로와 같은 연장이 긴 구간은 불연속면의 분포가 일정하지 않으므로 그 특성을 정확히 파악하기 어렵다. 이러한 현장조사과정에서의 제한성 때문에 적정한 절개면의 절취경사를 설계단계에서 결정하여 시공완료 하는데 많은 문제점을 가지고 있다.

본 연구에서는 설계기준의 문제점 도출과 함께 이에 대한 해결 방안을 제시하기 위해 절개면 표준 설계 기준에 의해 시공중인 현장에 대하여 암반의 강도정수 도출과 함께 불연속면을 고려한 안정성을 검

토하였다. 이를 위하여 암반 절리 방향성을 고려한 평사투영 해석방법과 한계평형 해석을 실시한 후, 개별 요소법을 이용한 해석프로그램인 UDEC(universal distinct element code)을 사용하여 수치해석을 실시하였다.

2. 국내 설계기준

암반사면 설계의 주요 항목인 절취경사 및 안전율을 결정하는 국내의 현행 방법은 각 기관이 수행하는 업무의 특징에 따라 설계기준을 달리 하고 있다. 국내 암반사면의 설계기준은 건설교통부, 도로공사, 토지공사, 주택공사에 의해 각각 제안되었으며 기관별 설계기준은 표 2.1과 같다.

표 2.1 절토사면의 표준경사

토 질 조건		사면높이	경 사 기 준			
			건설교통부	도로공사	토지공사	주택공사
리핑암(풍화암)		5m이상	1 : 0.7	1 : 1.0	1 : 1.0	1 : 1.2
		0 ~ 5m				1 : 1.0
발 파 암	연 암	5m이상	1 : 0.5	1 : 0.5	1 : 0.5	1 : 1.0
		0 ~ 5m				1 : 0.8
	경 암	5m이상				1 : 0.8
		0 ~ 5m				1 : 0.5

3. 설계에 적용된 연구 대상 지역의 특징

연구대상 지역은 충북 보은군 ○○지구의 1공구 공사구간으로 시추조사, 지표지질조사, 실내시험을 실시하여 물성치가 결정되었으며 조사된 자료는 아래와 같다.

3.1 시추조사

시추조사는 공사구간에 터널이 시공되고 있어 터널부를 중심으로 총 7개소에서 실시되었다. 시추공의 굴진심도는 터널부 및 절토부의 종단계획고하 1m~3m까지 굴진 하고 있다. 시추주상도에 의한 지반 물성치는 매립토층이 심도 3m내에 존재하고 있으며, 심도 2m~6m구간은 연암층이 존재한다. 이 연암층은 모암인 화강암이 부분적으로 풍화되어 형성된 층으로 절리 및 균열이 발달하여 코아회수율이 매우 저조한 것으로 조사되었다. 6m 이하에 대해서는 경암으로 판정하여 더 이상의 시추조사는 실시하지 않았다.

3.2 지표지질조사

지표지질조사는 1공구 4개소의 예상 절토부에서 실시되었다. 제1 절토부를 제외한 지질조사의 위치는 붕괴가 일어난 절개면과 거리가 1km 이상 떨어져 있어 검토대상에서 제외하였다. 본 절토부는 65° /23 3° 도로가 진행되고 연장거리 약 140m 정도의 구간으로, 최대 절토고가 약 96m인 사면이 형성되어 있다. 암상은 오도뷔스기 구룡산층의 퇴적암류(흑색점판암, 녹니석편암, 석회암 및 협탄층)가 분포하고, 흑색점판암이 주를 이루고 있다. 구성광물은 탄질물이 대부분이고 소량의 석영, 장석, 백운모 등이고 입자 크기는 거의 세립질로서 점파암상 벽개가 잘 발달되어 있다. 비교적 신선한 절리면의 슈미트 해머 수치 SHV(schmidt hammer value)는 46이다. 불연속면의 방향은 60~90/103~123·90/090~093·90/253~270(엽리), 30~45/188~214(절리)등이 존재한다.

3.3 실내시험

시추조사시 채취한 암석시료에 대하여 이들의 공학적 특성을 규명하기 위하여 선정된 코아시료에 대하여 실내시험을 I.S.R.M(International Society for Rock Mechanics, 1981)에 의해 제안된 방법에 의해 실시하였다. 실내시험에 의한 암석의 공학적 특성은 다음과 같다(표 3.1).

표 3.1 암석의 공학적 특성

공번	심도(m)	비중	공극율 (%)	탄성파속도(km/sec)		일축압축강도 (kg/cm^2)	탄성계수 (kg/cm^2)	포아송비	전단강도	
				P파	S파				점착력	내부마찰각
TB-1	21.3~22.0	2.78	0.17	5.02	2.61	720	4.14E+5	0.22	200	44
TB-2	25.0~25.5	2.73	0.46	4.65	2.28	610	4.12E+5	0.23	150	41

절개면의 물성치는 시추조사결과 및 지표지질조사시 절리면에 대한 현장시험 분석결과를 고려하여 결정되었다. 이렇게 결정된 심도는 10m정도의 연암층 아래에 경암이 존재하는 것으로 판단하였으며, 따라서 한국 도로공사의 경암 절취경사 1:0.5의 기준을 적용하여 시공하였다. 그러나 시공중 일부 구간에서 붕괴가 발생되어 절개면에 대한 안정성 검토가 필요하게 되었다. 붕괴의 원인은 하부의 암반 절개면이 붕괴되어 상부의 절개면이 연속적으로 붕괴되는 것으로 판단되었다. 따라서 하부 암반 절개면에 대한 안정성 검토를 실시하였다.

4. 현장재조사에 의한 지반물성치 산정

연구대상 절개면의 안정성 해석 구간은 연장이 100m이고, 절개면의 최대 높이는 약 38m이다. 절개면은 $62^\circ/235^\circ$ 의 방향성을 보이며, 절개면의 경사방향과 평행한 절리면들이 불연속적으로 나타난다. 일부 절리면의 연장성은 10m~20m로 소단까지 이어지고 있으며, 이러한 불연속면에 의해 소단아래 일부 구간이 붕괴되어 있다. 또한 소단 상부에는 풍화가 심하게 진행되어 붕괴된 토사와 전석들이 소단까지 덮여있다. 절개면의 주요 암종은 셰일, 슬레이트, 화강암으로 조사 대상지역은 지질학적으로 옥천대에 속하며, 이중 보은은 변성도가 높은 지역에 속한다. 따라서 본 조사 지역 절개면은 높은 변성도를 보이며 복잡한 지질 구조를 나타낸다.

4.1 슈미트 해머 반발시험

현장에서 가장 쉽게 암반의 일축압축강도를 판정할 수 있는 방법인 슈미트해머를 이용하여 암석의 일축압축강도를 측정하였다. 슈미트해머 반발시험은 조사대상 절개면을 10m 간격으로 구간을 나누어 70m 구간에서 실시하였다. 조사 방법은 같은 지점에 대하여 L형 슈미트해머를 10회 타격하여 최소값과 최대값을 제외한 평균값으로 암반의 물성을 조사하였다. 조사 결과 슈미트해머 값은 다음과 같다(표 4.1).

표 4.1 슈미트 해머 측정값

지 점	10m	20m	30m	40m	50m	60m	70m	평 균
측 정 값	37.5	34.2	38.4	36.7	37.9	35.8	35.7	36.6

측정값 전체의 평균은 36.6으로 나타났으며, 슈미트해머 반발값을 이용한 일축압축강도 추정은 Deer and Miller(1966) 등에 의해서 제안된 방법을 사용하였다. 이 방법은 슈미트해머 반발값과 암석의 체적단위중량을 곱한 값을 산술적으로 나타낸다. 조사대상 지역의 일축압축강도는 50MPa의 값을 산출하였다.

4.2 RMR(rock mass rating)을 이용한 강도정수

본 연구에서는 강도정수 도출을 위해 절개면의 예상파괴면을 중심으로 현장에서 획득된 RMR(rock mass rating)값을 이용하였다. 경험식에 의하여 구할 수 있는 설계정수는 영률 E, 점착력 C, 내부마찰각 ϕ 로 Serafim과 Pereira(1983), Trueman(1988)의 제안식을 사용하였다.

$$E = 10^{\frac{R-10}{40}} \quad (\text{GPa}) \quad (1)$$

$$C = 0.25 \cdot \exp(0.05 \cdot RMR) (\text{MPa}) \quad (2)$$

$$\phi = 0.5 \cdot RMR + 5 \text{ (도)} \quad (3)$$

RMR값을 이용한 경험식에 의한 설계정수는 영률은 8.66 GPa, 점착력은 0.59MPa, 내부마찰각은 20.75°로 산출되었다.

4.3 전단강도 시험

암반의 강도정수 값을 구하기 위하여 시험에 의한 방법으로 현장에서 채취한 시료를 직경 54mm로 성형하여 직접전단 시험을 실시하였다.

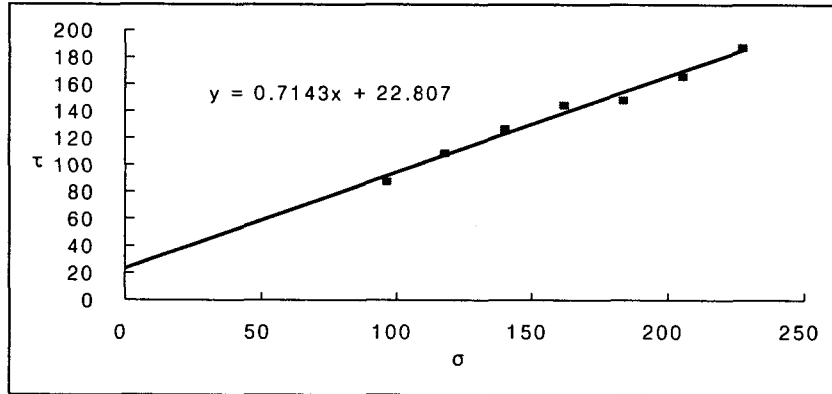


그림 4.1 전단강도 시험

전단시험에서 얻은 수직응력과 전단응력의 결과를 이용하여 구한 관계식으로부터 암석에 대한 ϕ 값을 도출한 결과 ϕ 값은 35.54°를 얻었다(그림 4.1). 이것은 무결점 암석을 성형하여 인공절리면을 만들어 실험을 하였기 때문에 값이 크게 나타난 것으로 한계평형 해석과 수치해석에 사용되는 강도정수값의 최대 값에 대한 기준이 된다.

5. 안정성 해석

5.1 불연속면의 특징

현장조사에서 나타난 불연속면 특징은 다음과 같다(표 5.1).

표 5.1 불연속면 특징

	절리군1	절리군2	절리군3
방 향 성	65° /254°	58° /178°	44° /202°
간 격	1.5m	1.0m	1~1.5m
틈 새	0~2mm	tight	tight
연 장	15~20m	15~20m	10m
거 칠 기	undulating/ smooth	planar/ smooth	planar/ smooth
충 전 물	soil	void	void
강 도	41MPa	41MPa	41MPa
누 수	damp	dry	dry
기 타			

5.2 평사투영법

조사대상 절개면의 기하학적 안정성 해석을 위해 현장조사에서 측정된 불연속면들의 대표값을 이용하여 하반구 등면적 투영법을 이용한 안정해석을 실시해 보았다. 이때 사용된 절리면의 마찰각은 전단시험 값으로부터 도출한 값인 35° 와 RMR분류법에 의해 구한 20.75° 를 사용하였다. 안정해석 결과 평면파괴의 경우 절리군3 ($44^\circ / 202^\circ$)만이 불안정영역에 도시되었다(그림 5.1). 썩기파괴의 경우 절리군1과 절리군2, 절리군1과 절리군3, 절리군2와 절리군3의 절리교차선이 불안정영역 내에 도시되어 썩기파괴에 가능성을 보여 주고 있다(그림 5.2). 평사투영법에 의한 안정성 해석은 절개면의 경사와 내부 마찰각의 관계에 의해 불연속면의 기하학적인 안정성을 알기 위한 것으로 실제 파괴가 발생하는 것은 아니다. 따라서 불안정 영역에 도시된 불연속면들에 대해 한계평형해석을 실시하였다.

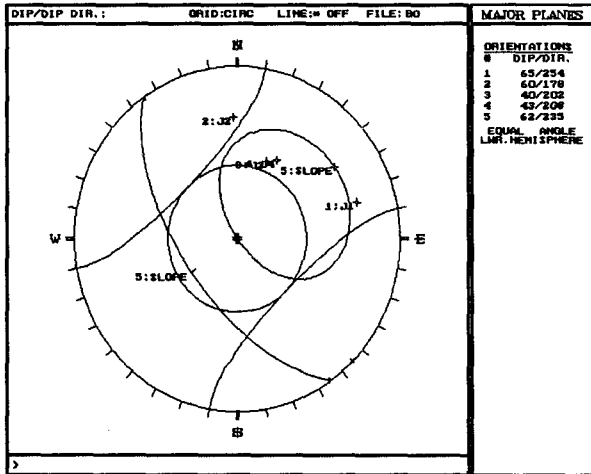


그림 5.1 평면파괴 해석결과

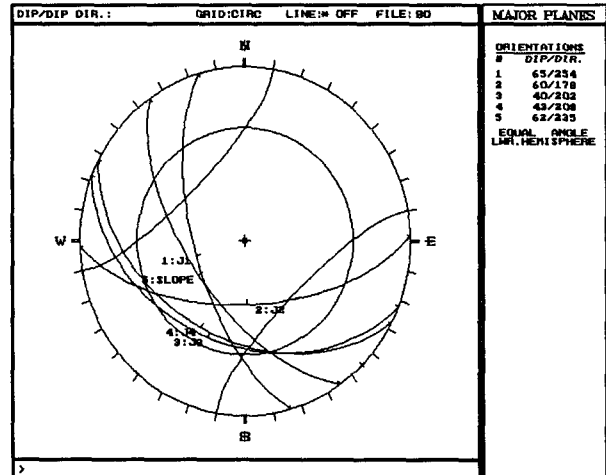


그림 5.2 썩기파괴 해석결과

5.3 한계평형 해석

한계평형 해석은 암반의 전부 또는 일부가 활동 예상면을 따라 재료의 전단강도가 최대로 발휘되는 순간 힘의 평형관계로부터 안전율을 구하는 방법이다. 본 연구에서는 Hoek & Bray(1981)가 제안한 파괴를 유발시키는 기하학적 형상을 이용하여 활동 예상면을 설정하였다. 평사투영법에서 불안정 영역에 도시된 절리군들에 대한 한계평형해석 결과 평면파괴의 경우 절리군3 ($44^\circ / 202^\circ$)의 안전율이 0.87로 계산되어 평면파괴의 발생이 예상된다. 또한 썩기파괴의 경우 절리군1과 절리군2는 0.61, 절리군1과 절리군3은 0.87, 절리군2와 절리군3은 3.16으로 계산되어 절리군2와 절리군3의 경우 안전한 것으로 절리군1과 절리군2, 절리군1과 절리군3의 경우는 썩기파괴의 가능성이 있는 것으로 판단된다.

5.4 수치해석

조사대상 절개면은 절개면의 방향과 평행한 불연속면들이 불연속적으로 발달되어 있다. 따라서 현장에서 관찰된 불연속면들이 절개면에 동시에 존재할 수 있는 모든 경우에 대해 변위특성을 분석하였다. 수치해석은 개별요소법 해석 프로그램인 UDEC(Universal Distinct Element code)을 사용하여 해석을 수행하였다. 개별요소법에서는 암반은 개별 블록들의 집합으로 표현되고, 절리들은 개별 물체 사이의 경계면으로 간주된다. UDEC은 개별 블록으로 매질을 구성하기 때문에 무결암의 변형 및 체적변화 뿐만 아니라 무결암과 무결암 사이의 불연속면에서 발생하는 전단 및 수직변위 발생에 대한 영향을 고려할 수 있는 장점이 있다. 해석에 사용된 모델은 RMR값과 실내시험에서 구한 점착력과 내부 마찰각을 고려

하기 위해 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였다. 또한 실제 파괴가 발생한 절개면의 안정성을 파악하기 위해 가장 취약하다고 판단되는 시점으로부터 45m 지점에 대해 1:0.5의 경사로 모델링하여 해석을 실시하였다. 절개면의 경사변화에 따른 암반불력의 변위특성을 살펴보기 위해 절개면의 경사를 1:0.7, 1:1.0으로 하여 해석을 실시하였으며, 상부 절개면의 경사변화에 따른 영향을 살펴보기 위해 상부사면의 경사를 1:0.7, 1:1.0으로 하여 안정성을 검토하였다.

5.4.1 설계에서 제안된 절개면 경사도에 대한 수치해석

조사대상 절개면은 절취경사 1:0.5의 경사로 시공중 절개면 시점으로부터 45m 지점에서 절개면의 일부가 파괴되었다. 이 지점에서는 절리군2와 절리군3이 우세한 것으로 현장조사 결과 파악되어 절리군2와 절리군3에 대해 수치해석을 실시하였다(그림 5.3).

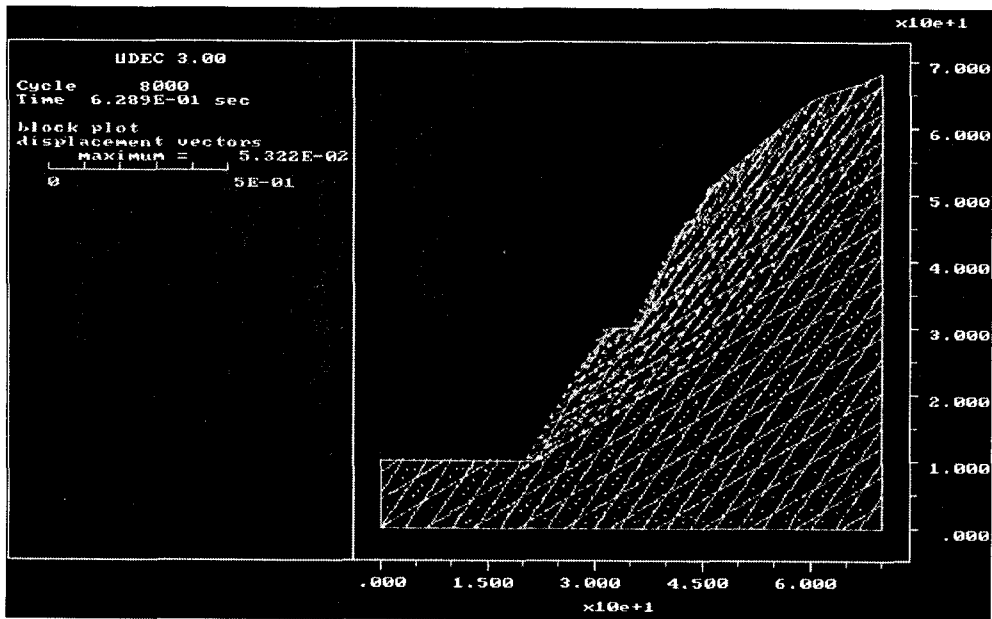


그림 5.3 절개면 경사 1:0.5인 경우

해석결과 최대변위가 5.32cm 발생하여 절리군2와 절리군3이 절개면의 안정성에 영향을 미치는 것으로 판단되었다. 또한 변위 발생이 소단아래 부분에서 허용변위이상으로 발생되고 현장에서도 소단아래 부분에서 파괴가 발생되어 현장의 상황과 일치하였다. 그러나 평사투영법에서 절리군2는 불안정영역에 도시되지 않았고, 절리군3은 한계평형 해석결과 안전율이 0.87로 파괴가능성이 있는 것으로 판단되었다. 이상의 결과를 종합해 보면 현장에서 일어난 파괴의 경우 절리군3의 평면파괴에 의한 영향으로 파괴가 발생된 것으로 판단된다.

5.4.2 소단상부 경사변화에 따른 변위 특성

소단상부 절개면의 절취경사 변화에 따른 영향을 살펴보기 위해 소단상부 절개면의 절취경사를 1:0.7로 절취하여 변위특성을 검토하였다. 소단상부 절개면의 절취경사를 1:0.7, 1:1.0로 낮추어 해석한 결과 표 5.2와 같이 나타났다. 소단 상부의 절취경사를 1:0.7과 1:1.0으로 낮출 경우 변위의 발생이 1cm내에서 발생되고 있어 소단의 위치와 소단상부 절개면의 절취경사를 조정함으로써 절개면을 안정화 할 수 있는 것으로 판단된다.

표 5.2 소단상부 경사변화에 따른 변위거동

경사도 \ 불연속면	절리군1과 절리군2	절리군1과 절리군3	절리군2와 절리군3
1 : 0.5	1.02 cm	1.72 cm	5.32 cm
1 : 0.7	0.50 cm	0.35 cm	1.22 cm
1 : 1.0	0.53 cm	0.12 cm	0.45 cm

5.4.3 절개면 전체 절취경사 변화에 따른 변위 특성

절개면 전체의 절취경사를 1:0.5, 1:0.7, 1:1.0로 변화하여 해석한 결과 안전율이 1보다 작게 나타난 절리군1과 절리군2의 경우 1:0.5의 경사에서 변위 발생이 0.84cm 발생하여 안전한 것으로 나타났으나, 절리군2와 절리군3의 경우 변위 발생이 5.32cm로 불안정한 것으로 나타났다. 이것은 평면파괴에서 절리군3의 안전율이 1보다 작게 나타나 절리군3에 의한 파괴가 발생한 것으로 사료된다. 따라서 이처럼 실제 절개면에서 발생하고 있는 파괴는 불연속면들의 복합적 작용에 의해 발생하므로 조사과정에서 오류를 수치해석을 실시하므로서 이러한 오류를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

표 5.3 전체 경사변화에 따른 변위거동

경사도 \ 불연속면	절리군1과 절리군2	절리군1과 절리군3	절리군2와 절리군3
1 : 0.5	0.84 cm	1.72 cm	5.32 cm
1 : 0.7	0.35 cm	1.03 cm	2.30 cm
1 : 1.0	0.14 cm	0.74 cm	0.71 cm

절개면 전체의 절취경사를 1:0.7의 경사로 결정하여 절취한 경우 절리군2와 절리군3에서 최대변위가 2.3cm로 감소하였다. 그러나 소단을 중심으로 발생하는 변위는 수mm내의 변위가 발생하여 절개면의 안정성에는 영향을 미치지 못하는 것으로 판단된다(그림 5.4). 또한 절개면의 경사를 1:1.0로 하여 해석한 결과 최대변위 값이 0.71cm로 줄어들었으며, y방향의 변위분포도 절개면 안쪽으로 이동하고 있어 절취 경사를 낮춤에 따라 절개면의 안정성 확보에 유리한 것으로 판단된다.

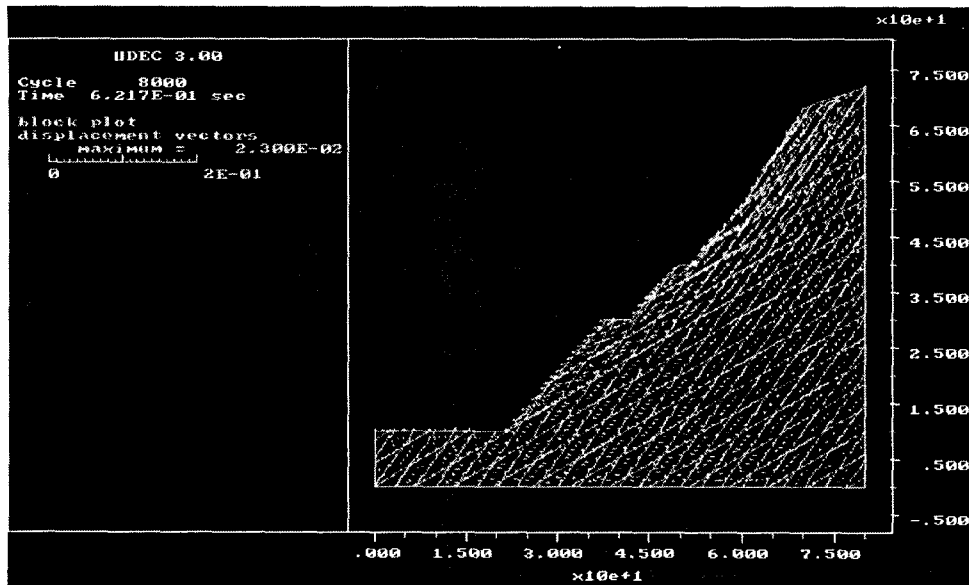


그림 5.4 전체 절취경사가 1:0.7인 경우

6. 결론

연구대상 지역은 설계시 시추조사, 지표지질조사, 실내시험이 실시되어 암석의 강도정수를 산출하였다. 시추조사와 실내시험으로 지표 6m이하에 경암이 존재하는 것으로 판단되었으며, 따라서 한국 도로공사에서 제시하고 있는 경암의 절취경사 기준인 1:0.5의 기준을 적용하여 시공되었다. 그러나 시공중 일부 절개면이 붕괴되어 안정성에 대한 검토가 필요하게 되었다. 따라서 연구대상 지역에 대해 현장조사를 실시하였다. 현장조사는 선조사 방법을 이용하여 절개면의 불연속면 분포특성을 조사하였다. 조사대상 절개면의 안정성 해석에 사용된 강도정수는 실내시험, 슈미트 해머 값과 RMR분류법을 이용하여 산정하였다.

평사투영법을 이용한 절개면의 기하학적 안정성은 평면파괴의 경우 절리군3이 불안정 영역에 도시되었으며, 썩기파괴의 경우 절리군1과 절리군2, 절리군1과 절리군3이 불안정 영역에 도시되어 파괴가능성이 있는 것으로 판단되었다. 또한 한계평형 해석에서도 이들 절리군들의 안전율이 1보다 작아 불안정한 것으로 예측되었다. 그러나 수치해석에서 썩기파괴는 해석단면이 2차원이므로 썩기파괴에 대한 해석은 고려되지 않았다. 수치해석의 결과 평사투영법에서 안정한 것으로 판단된 절리군2와 절리군3을 동시에 고려하였을 때 변위량이 가장 많이 발생되었다. 또한 절리군1과 절리군3을 고려하였을 때가 절리군1과 절리군2를 고려하였을 때 보다 변위가 크게 발생되고 있다. 그러므로 현장의 파괴형태는 절리군3에 의한 평면파괴가 지배적인 것으로 판단되었다. 반면 소단상부 절개면의 절취경사를 1:0.7, 1:1.0로 해석한 결과 변위 발생이 감소하고 있다. 또한 절개면 전체의 절취경사도 1:0.7, 1:1.0로 해석한 경우에도 변위가 감소하고 있어 절개면의 안정성 확보에 유리할 것으로 판단된다.

이상의 결과를 종합해 볼 때 설계시 절취경사를 결정하는 것은 무결점 암석에 대한 강도정수로 불연속면의 특성을 충분히 반영할 수 없다. 따라서 설계시 절취경사를 예비설계로 하여 시공을 한 후, 공정이 어느 정도 진행되었을 때 정밀 현장조사를 다시 실시하여 절개면의 절취경사를 결정하는 것이 안정성 확보에 보다 합리적인 것으로 판단된다.

7. 참고 문헌

1. 건설교통부, 도로절개면 유지관리시스템 개발 및 운용, 1998, pp.25-47.
2. 이정인譯, 암반사면공학, 엔지니어즈, 1997, pp.251-266
3. 한국도로공사, 도로설계실무편람, 1996, pp. 61-68.
4. Barton, N. R., Lien, R. and Lunde, J.(1974) Engineering classification of rock masses for design of tunnel support, Rock Mechanics, 6, 189-236.
5. Bieniawski, Z. T.(1973) Engineering Classification of Jointed Rock Masses, Transactions, South African Institution of Civil Engineers, 15, 335-344.
6. Deer, D. U. and Miller, R. P.(1966) Engineering classification and index properties for intact rock, Technical report, Air Force Weapons Laboratory.
7. Hoek, E. and Bray, J. W.(1981) Rock Slope Engineering, 3rd Edition, Institute of Mining and Metallurgy, London.
8. Serafim, J. L. and Pereira, J.P.(1983), "Consideration of the Geomechanical classification of Bieniawski, Proc. of the Int. Symp. on Engineering Geology and Underground Construction, Vol.2, pp.33~42.