

복합사면의 사면안정해석에 관한 연구 Slope Stability Analysis for Compound slope

신은철¹⁾, Eun-Chul Shin, 김진수²⁾, Jin-Soo Kim

¹⁾ 인천대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, University of Incheon

²⁾ 인천대학교 토목환경공학과 박사과정, Ph.D. Student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, University of Incheon

SYNOPSIS : Our country has a tendency to build many structures by cutting mountainous areas due to geographical features. Among these construction done in our country, road construction take the first spot in rank. As the construction is done, fractured inclining plane is created inevitably because of the natural properties of mountainous areas. The stability of the fractured inclining planes and slope formed in the opening, which are developed at the time of construction, need to be evaluated, Also, reinforcement plans for these matters are necessary. This paper is to go through an examination on the fractured inclining surface that is developed at the time of construction, especially the composite inclining plane that consists of soil and rocks. Furthermore, evaluating the stability by performing an analysis on stereographic projection and limit equilibrium, based on the examination results. using the stability evaluations, applications were explored for reinforcement methods of construction that fits the geological characters of this inclining surface.

Keywords : Slope stability, Stereographic projection, Limit equilibrium, Reinforcement method

1. 서 론

우리나라의 경우 교통과 물류의 대부분을 도로교통이 차지하고 있으며, 이에 따른 도로의 신설, 확장 및 보수 등이 꾸준히 증가하는 추세를 보이고 있다. 특히, 우리나라는 국토의 70% 이상이 산지로 이루어져 있어 도로의 신설 시 많은 절취사면을 형성하게 되면 절취사면의 규모 또한 점점 커지고 있다. 우리나라 산악지역에 형성되어 있는 대부분의 절취사면은 표층에서부터 수 미터 아래까지는 토사로 존재하고, 그 하부는 암반으로 이루어져 있는 경우가 대부분을 차지하고 있다. 이러한 지질구조의 절취사면은 암반층의 안정성에 의해 전체 사면의 안정성이 좌우되는 경우가 많으며 사면고가 높을수록 암반사면의 안정성이 전체사면의 안정성에 미치는 영향은 더욱 커진다. 그러므로 토사와 암반으로 이루어진 복합사면의 안정성을 평가하기 위해서는 암반사면의 안정성을 정확히 평가하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다. 복합사면의 붕괴는 암반 내에 존재하는 불연속면의 공학적인 특성에 의해 크게 좌우되며 절리면을 따라 발생하는 것이 일반적이다. 따라서, 본 논문에서는 토사와 암반으로 이루어진 절취사면의 안정성에 절대적으로 영향을 미치는 불연속면의 공학적 특성 및 파괴유형 등을 실제 현장사례를 통해 검토하고, 사면의 안정성 확보를 위한 보강대책에 대한 분석을 실시하여 본 연구 지역에 적합한 보강공법을 제시하여 향후 이와 유사한 조건의 사면보강 설계와 시공에 기여하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 암반사면 안정성

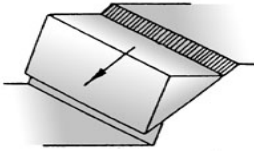
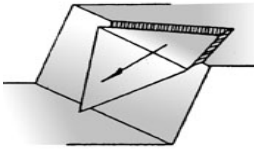
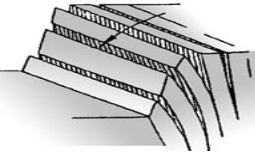


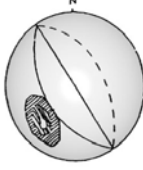
암반사면의 안정성에 대한 연구는 주로 현장사례 연구를 중심으로 이루어져 왔다. 1980년대 Patton(1966), Goodman(1970), Barton(1973), Hoek(1980) 등 암반에서 행해지는 건설공사에서 불연속면의 중요성을 계속해서 주시시켜 왔다. 먼저 Patton은 암반사면의 안정성 해석에 있어서 전단응력과 수직응력사이의 관계식 중 층리면 윤관선의 기울기가 평균각 i 와 매끈한 평면에 대한 실험실 시험에서 구한 기본 마찰각 ϕ 의 합과 같다는 개념을 연구하였으며, Barton은 Patton의 연구결과들이 그가 관찰했던 사면들에서의 층리면을 가로질러 작용하는 수직응력과 관련 있음을 보여주었으며 거친 절리의 전단강도를 예견하는 문제에 대한 다른 접근 방법을 제시하였다. 사면 거동의 모형 연구들에 사용된 재료내의 거친 인공절리에 대해 시험자 입장에서 관찰을 수행하고, 이에 기초하여 Barton은 절리거칠기계수 JRC(Joint Roughness Coefficient)를 이용하여 경험식을 유도하였다.

우리나라에서도 몇몇 토목공학자들에 의해서 암반의 불연속면의 중요성이 논의되기 시작했다. 이정인(2001)은 국내에 분포하는 주요 암석의 절리면 전단강도에 대한 공학적 성질을 연구하여 Barton의 경험식을 이용한 전단강도와 절리면 전단시험을 이용하여 구한 전단강도가 거의 유사함을 연구하였다. 또한, 불연속면에 대한 연구와 컴퓨터의 발달이 진행됨에 따라 암반내의 불연속면이 구조물에 미치는 영향을 손쉽게 해석할 수 있게 되었다.

2.2 암반 비탈면 안정성 해석방법

암반 비탈면에 대한 안정해석은 과업구간의 암반 시추공에서 시추한 암반절리분석결과와 지표지질조사를 통한 절리면의 주향과 경사를 측정, 비교 분석한 후 평사투영 해석을 실시하여 예상 파괴 범위를 산정한다. 예상파괴 범위에 해당되는 대표단면을 선정하여 한계평형 해석에 의해 안정성 파악한다. 평사투영법은 신속하고 개략적인 암반 비탈면의 안정성을 조사하기 위하여 주로 사용되는 방법이며, 평사투영법은 대원(Great Circle)과 극점(Pole)으로 해석하는 두 가지 방법으로 해석하여 수행하는 것이다.

표 1. 암반 비탈면의 파괴형태 및 평사투영 해석

구 분	평면파괴	썰기파괴	전도파괴
파괴형태			
평사투영도 형태			
특 징	• 극밀도가 Daylight Envelope 의 중앙에 존재	• 극밀도가 Daylight Envelope 의 양측면 존재	• 극밀도가 Toppling Zone에 존재
파괴조건	• 절취면 경사 > 절리면 경사 > 절리의 마찰각 • 암괴의 측면이 절단	• 절취면 경사 > 절리 교선의 경사 > 절리의 마찰각 • 절리의 교선과 절개면의 방향이 같다	• 절취면의 주향과 절리면의 주향차가 $\pm 30^\circ$ 이내 불안정 $\pm 10^\circ$ 전도가능성이 높음

2.3 토사 비탈면 안정성 해석방법

한계평형 해석법은 일반적으로 깎기부 토사 및 풍화암 비탈면, 쌓기 비탈면의 안정성 해석시 널리 사용되는 해석방법들은 한계평형이론을 적용하고 있으며 이 방법으로 산정한 안전율이 허용안전율 이상이 되면 비탈면은 파괴에 대해 안전하고, 변형은 허용치 이내인 것으로 판단한다. 한계평형방법(Limit Equilibrium Method)의 목적은 활동면을 따라 파괴가 일어나려는 순간에 있는 토체의 안정성을 해석하는 것으로 문제를 단순화하기 위한 가정을 설정하고 이를 이용하여 간단한 정역학 이론으로 해를 얻을 수 있다. 한계평형이론에 의한 비탈면안정해석방법은 여러 가지가 있으나 그 정확성은 강도정수와 비탈면의 기하학적 조건의 정확도 및 각 해석방법 고유의 정밀도에 좌우된다.

표 2. 토사 비탈면의 한계평형 해석 프로그램

Program명	개발자	해석방법	활동면 형상	활동면 추정 유무	외부 하중 적용	간극수압	
						정수압	간극수압 계수
PCSTABL5 PCSTABL6	J.R Carpenter (1985)	Bishop, Janbu, Spencer	원호,비원호 BLOCK	○	○	○	○
STABR	Guy Lefevre (1971)	Bishop, Fellenius	원호	○	×	○	×
TALREN	—	Bishop, Fellenius	원호,비원호 BLOCK	○	○	○	○
SLOPER	S.G Wright J.M Duncan(1986)	Spencer	비원호	×	×	○	×
SLOPE/W	Fredlund Krahn (GEO-SLOPE)	Fellenius, Bishop, Janbu	원호,비원호 BLOCK	○	○	○	○

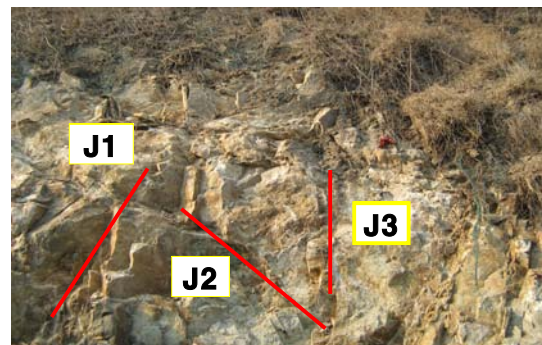
3. 연구대상 구조물 현황

3.1 구조물 현황

사례 대상 구조물인 도로공사 중 발생한 절개지를 시공하는 과정에서 일부구간의 당초 설계시 고려되었던 지층구조 및 실제 암반선의 위치가 다소 상이하여 부득이 기존 설계가 변경되어 시공되었으므로 이에 대한 안정성의 검토가 필요하며, 검토 후 필요시 적절한 보강공법을 적용하고자 하였다. 사면의 최고높이 약 14.0m, 법면구배는 1:1.0~1:0.3로 조성되어 있다. 암반 노두는 화강암으로 대체로 풍화에 안정한 것으로 판단되나, 일부 구간에 존재하는 염기성 암맥은 풍화에 취약하여 충화가 진행되고 있으며, 일부 절리가 심한 구간은 낙석의 우려가 있다. 그림 1은 사면의 노두 및 노두 상세전경이다.



(a) 노두 전경



(b) 노두 상세전경

그림 1. 대상 구조물 현황

3.2 사면의 설계기준

비탈면 안정 해석을 위하여 본 연구에서는 대상구간의 STA.0+00 ~ STA.0-56 구간에 대해 4개 단면으로 분할하여 토사비탈면과 암반비탈면으로 구분하고 검토단면과 현장조사 내용을 기초자료로 하여 비탈면 안정 해석을 수행하였다. 사면안정해석시 이용되는 지반정수로는 지반의 파괴에 저항하는 정도를 표시하는 전단강도정수와 활동력 산정에 이용되는 단위중량 등이 있다. 표 3은 대상 구조물 지층에 적용한 지반정수를 나타낸 것이다. 최소안전율은 건기시 1.5이상, 우기시, 1.2 이상으로 적용하였으며, 우기시 지하수위는 지표면에서 1m하부인 경우로 검토를 수행하였다.

표 3. 대상 구조물에 적용한 지반정수

구 분	강도정수		단위중량 (tf/m ³)
	점착력(tf/m ²)	내부마찰각(°)	
매 립 층	0.0	30	1.9
풍 화 토 층	2.5	30	1.9
풍 화 암 층	3.4	33	2.0
연 암 층	3.4	32	2.1

4. 사면안정 해석결과

4.1 암반사면 안정성 해석 결과

암반사면의 평사투영해석은 암반사면의 안정성 분석에 이용할 수 있는 방법으로 암반 사면의 안정성은 주로 암석 자체의 전단강도보다는 암반내에 분포하는 불연속면의 특성에 의하여 크게 좌우되므로 불연속면의 주향과 경사, 내부마찰각 및 사면의 경사방향과 경사를 이용하여 암반사면의 안정성을 신속하게 판정하는 방법이다. 분석결과, 전반적으로 STA. 0+00 ~ 0-56 구간의 암반 비탈면은 평면, 췌기, 전도파괴에 안정한 것으로 분석되었으나, 일부 염기성 암맥은 풍화에 취약하여 풍화가 진행되고 있어 절리가 다소 발달한 STA.0-40 ~ 0-56구간에 대해서는 낙석의 우려가 있는 것으로 판단된다. 표 4는 암반사면의 강도정수 및 불연속면의 특성, 경사등을 나타낸 것이며 표 5는 해석결과를 나타낸 것이다.

표 4. 암반사면의 강도정수 및 불연속면 특성

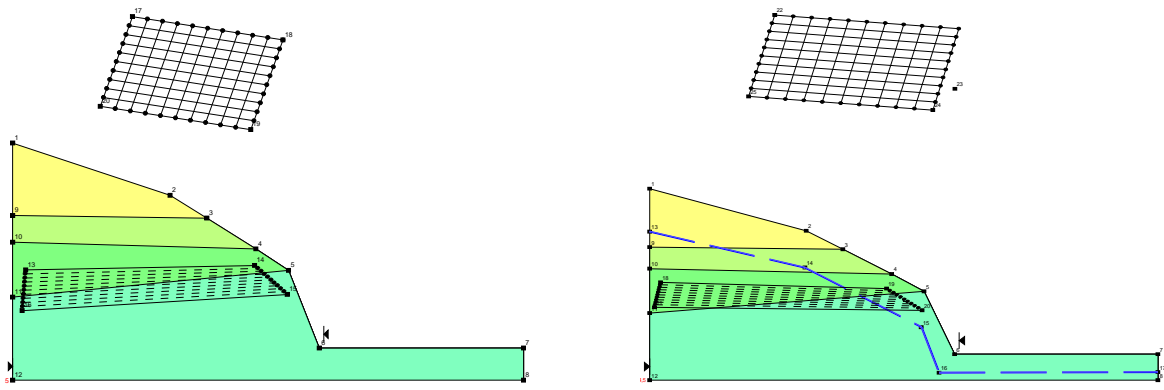
해석단면 (STA.)	비탈면 높이(m)	비탈면 경사방향	불연속면(Dip/Dipdirection)			C (tf/m ²)	φ (°)	γ _t (tf/m ³)
			J1	J2	J3			
0+0	11.4	86/144	77/250	83/104	81/344	3.4	33	2.0
0-20	13.6	72/122	77/250	85/100	84/300	3.4	33	2.0
0-40	12.6	72/150	72/150	85/156	90/300	3.4	33	2.0
0-56	11.5	82/136	82/140	89/300	82/136	3.4	33	2.0

표 5. 암반사면의 안정성 해석결과

해석단면 (STA.)	평면·전도과괴 해석(극점법)	썰기과괴 해석(대원법)	해석결과
0+0			평면, 전도, 썰기과괴 안정
0-20			평면, 전도, 썰기과괴 안정
0-40			평면, 전도, 썰기과괴 안정하나 일부 낙석 우려
0-56			평면, 전도, 썰기과괴 안정하나 일부 낙석 우려

4.2 토사사면 안정성 해석 결과

본 연구에서 사용된 프로그램은 Geo-slope International Ltd의 SLOPE/W이다. 그리고 안전율을 계산하는 방법으로는 Fellenius 방법, Bishop 간편법, Janbu 간편법, Spencer 방법, Morgenstern-Price 방법, Corps of Engineers 방법, Lowe-Karafiath 방법, GLE (Generalized Limit Equilibrium)등이 있다. 그리고 파괴 활동면은 원호 활동면, 원호와 직선 복합형, 직선형, 블록형등이 있다. 그리고 파괴 활동면은 해석단면의 지형을 자유롭게 지정할 수 있고 비선형 토질 정수의 적용도 가능하다. 그리고 파괴 활동면의 하중 조건으로 상재하중, 선하중, 앵커하중, Geo-fabric 하중, 지진하중 등을 고려할 수 있다. 프로그램 해석시 복합사면의 층을 4개층으로 나누어 모델링 하였으며, 각 층에 적용된 지반정수는 표 3에 나타난 바와 같다. 안정성 평가는 각각 우기시와 건기시로 나누어 해석을 수행하였다. SLOPE/W에 의한 해석은 계산이 비교적 간단하면서 충분한 정밀도가 있는 Bishop의 간편법을 이용하여 사면안정성을 검토하였다. 그림 2는 건기시와 우기시의 경우를 모델링한 것이다. 표 6은 토사사면 안정성 해석 결과를 나타낸 것이다.



(a) 건기시

(b) 우기시

그림 2. 토사사면 안정성 해석모델링

표 5. 암반사면의 안정성 해석결과

해석단면 (STA.)	건기시	우기시	해석결과
0+0			건기시, 우기시 안정
0-20			건기시, 우기시 안정
0-40			건기시, 우기시 안정
0-56			건기시, 우기시 안정

5. 결론

본 연구는 도로개설공사 구간의 토사와 암반으로 구성된 복합사면에 대한 현장지표지질조사 결과와 한계평형해석을 이용한 안정성 평가를 실시하였다. 분석결과에 대한 종합 결론은 다음과 같다.

1. 연구대상지역의 암반은 화강암으로 이러한 암반은 풍화에 대하여 안정한 특성을 갖고 있으며, 일부 구간에 염기성 암맥은 풍화에 취약하여 충화가 진행되고 있으며, 일부 절리가 심한 구간은 낙석의 우려가 있으나. 전체적인 사면의 안정성에는 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다.
2. 본 검토에서는 전술된 여러 단계의 조사방법에 의해 획득된 자료를 참조로 대상암반의 대표적인 불연속면에 대한 공학적인 특성을 고려하여 평사투영법 및 한계평형법등의 방법을 통해 비탈면의 안정성 분석하였다. 분석결과 연구대상 사면 구조물은 안정한 것으로 검토되었다.
3. 토사 및 풍화암은 절취 후 장기간 대기에 노출됨으로서 토사의 공학적인 특성이 약해지므로 시공시 굴착공사 후에 가능한 신속한 시간내에 비탈면의 보호가 필요하다. 특히 토층이 포화되면 비탈면 경사를 낮추는 것으로도 비탈면의 안정을 유지할 수 없다. 깎기비탈면의 지형을 고려하여 우기시 지표수의 원활한 배수가 이루어지도록 비탈면 상부에 산마루 측구와 봉우리사이의 비탈면 중앙부에 도수로를 설치하며, 소단내 배수로를 설치하여 강우의 침투로 인한 토사 및 암반에 포화가 발생하지 않도록 하여야 한다. 수압은 비탈면의 안정에 대단히 중요한 영향을 미친다. 따라서, 비탈면 내부의 불연속면에 작용하는 수압을 낮추어야 비탈면의 안정성을 높여 보강효과를 얻을 수 있다. 비탈면의 수압을 낮추기 위해서는 먼저 전술한 바와 같이 지표수가 인장균열이나 절리등의 틈새를 통하여 비탈면 내부로 들어오지 못하도록 막아야 한다. 잠재적인 비탈면의 파괴면 근처에 수압이 작용하고 있으면 지표배수 및 맹암거공, 수평내지 수직 배수공과 같은 적절한 배수공법을 적용하여 수압을 완화시켜 주어야 한다.
4. 본 검토에서 설정된 비탈면 경사는 차후 시공시 비탈면 굴착과 병행하여 현장에서 정밀조사를 실시 하므로써 실제 확인되지 않은 사항이 발생할 경우는 비탈면 경사를 변경하여 시행하여야 하고, 이에 따른 보강대책과 계획된 비탈면경사 및 안정성 검토를 재검토하여야 한다.

참고문헌

1. 김정주(2007), “경남 통영지역 붕괴사면의 보강대책 사례에 관한 연구”, 창원대학교 석사학위논문.
2. 박남서(1998), “도로 절토부 암반사면의 안정성 검토사례”, 한국지반공학회 사면안정학술발표회 논문집, pp.111-124.
3. 신경원(2003), “도로 절토부 암반사면의 안정성 및 보강대책”, 충북대학교 석사학위논문.
4. 안정호(2008), “암반절토 사면의 안정성 및 보수보강 기법”, 충남대학교 석사학위논문.
5. 진영식(1999), “토사와 암반으로 구성되 복합사면의 안정성 해석”, 전남대학교 석사학위논문.
6. Barton, N. R.(1973), Review of a New Shear Strength Criterion for Rock Joints, *Engineering Geology*, Vol. 7, pp. 287~332.
7. Goodman, R.E.(1989), "Introduction to Rock Mechanics", Jhon Wiley & Sons.
8. Heok, E. and Brown, E.T.(1980), Empirical Strength Criterion for Rock masses, *ASCE*, Vol. 106, No. GT9, oo. 1013~1035.