

CASE STUDY

지질횡단면도를 이용한 함탄층이암 비탈면의 안정성 검토

임명혁*

대전대학교 건설안전방재공학과 교수

Countermeasures for Slope Stability on Coal-Seam Bearing Mudstone Using the Geological Cross-Sections

Myeong-Hyeok Ihm*

Professor, Dept. Construction Safety and Disaster Prevention Engineering

*Corresponding author: mhihm61@hanmail.net

Received: February 15, 2021

Revised: March 15, 2021

Accepted: March 30, 2021

ABSTRACT

The subject of this study is a rock slope composed of coal bearing mudstone that unconformably covers the Cenozoic Tertiary basalt strata in Pohang. Discontinuities developed within the slope are stratification and nonconformity, cooling joint and shear joint. As for the type and size of rock-failure by section, circular failure is dominant in the upper coal bearing mudstone section, and toppling failure is dominant in the lower basalt section, and the failure size of rock body is about 0.02 m to 0.01 m³ on average. As a result of synthesizing face-mapping data, SMR, physical properties/mechanical tests of soil and rocks, stereonet projection analysis, geological cross-sectional view analysis and limit equilibrium analysis for each section, all of the representative sections were significantly less than the allowable safety factor, requiring a countermeasure method. After applying the slope relief method and the rock anchor method as well as the green soil surface treatment method + installation of rockfall prevention fence, the safety factors of slope exceeded the allowable safety factor. Creating a geological cross-section of a representative section perpendicular to the slope, face-mapping data, and a limit equilibrium analysis reviewed by using the geological cross-section as a representative cross-section will be a reasonable tool for three-dimensional analysis of the slope stability. In the case of rock slopes that have developed stratification and nonconformity and are loosed such as coal bearing mudstone, it is essential to prepare systematic geological cross-sections. For the representative cross section used in the limit equilibrium analysis, it is reasonable to set the geological cross section for each section as the basic cross section.

Keywords: Tertiary basalt, Coal bearing mudstone, Discontinuity, Face-mapping, Geological cross-section

초록

연구 대상은 포항 지역의 신생대 제3기 현무암 지층을 부정합적으로 피복하고 있는 함탄층이암으로 구성된 절취 암반비탈면으로서 불연속면은 층리와 부정합, 수축절리 및 전단절리가 발달한다. 구간별로 파괴의 유형과 규모는 상부 함탄층이암 구간은 원호파괴, 하부 현무암 구간은 전도파괴가 우세하며, 파괴 규모는 평균적으로 0.02 m~0.01 m³ 정도이다. face-mapping 자료, SMR, 토사와 암석의 물성·역학 시험, 평사투영해석과 구간별 지질횡단면도 분석 및 한계평형해석으로 종합한 결과, 대표단면 모두 허용 안전율에 크게 미달하여 대책공법이 필요하였다. 비탈면 안정성에 최적의 방안은 사면구배완화공법과



록앵커공법 시공과 더불어 녹생토 표면처리 공법 + 낙석방지책 설치를 적용한 후 비탈면의 안전율은 모두 허용안전율을 상회하였다. 법면 face-mapping 자료와 법면에 수직인 대표 구간의 지질횡단면도 작성, 지질횡단면도를 대표단면으로 활용하여 검토한 한계평형해석 및 그에 따른 대책공법 제시는 비탈면의 3차원 해석 및 안정성 검토의 합리적인 도구가 될 것으로 예상된다. 층리와 부정합이 발달하고 함탄층 이암과 같이 이완된 암반비탈면의 경우는 체계적인 지질횡단면도의 작성이 필수불가결하며, 한계평형 해석에 이용되는 대표단면은 반드시 구간별 지질횡단면도를 기본단면으로 설정하는 것이 합리적이다.

핵심어: 제3기 현무암, 함탄층이암, 불연속면, face-mapping, 지질횡단면도

1. 서론

연구지역은 경상북도 포항시 남구 동해면 신정리 우회도로 건설공사 현장으로서 비탈면에 일부 파괴가 발생하여 비탈면 안정성 검토와 보강대책이 필요하였다(Fig. 1). 비탈면의 안정성을 검토하고 대책공법을 제시하기 위하여 절취비탈면의 법면 face-mapping 및 주변 노두의 mapping 자료를 이용하여 비탈면의 대표적인 구간별 지질횡단면도 작성, 평사투영 해석, 암반의 지질공학 특성 분석, 대책공법 제시를 위한 토사와 암석의 물성 및 역학시험 및 비탈면의 원지반과 대책공법 적용 후의 한계평형해석을 수행하였다.

비탈면 안정성 해석 시 비탈면 내 연약층이 협재되어 있고 습곡이나 단층, 등 지질구조에 대한 고려가 필요하다는 연구(Koo et al., 2003), 비탈면이 화산암으로 주로 구성되어 있고 소규모 단층, 염기성 암맥, 지질학적 연약대 및 점토광물의 함유가 비탈면 붕괴 발생원인이라는 연구(Kim et al., 2011), 퇴적암 내 지질구조가 비탈면의 안정성에 미치는 영향이 있음을 보여준 연구(Ko et al., 2012), 누적강우량보다는 강우강도가 비탈면 안정성에 더 큰 영향을 미친다는 연구(Lee and Kim, 2009) 등 비탈면에 관한 안정성 검토 연구사례가 있다. 하지만 신생대 제3기층과 석탄층이 포함된 이암 및 특별한 지질구조요소인 부정합면을 비탈면 안정성 검토에 중요 파괴인자로 취급하거나, 비탈면의 법면 face-mapping 자료와 이를 수직으로 절단한 대표 구간의 지질횡단면의 자료를 기반으로 비탈면 안정성 분석 및 대책공법 등을 제시한 연구는 없다. 일반적으로 비탈면 법면의 face-mapping 자료에 근거하여 구간

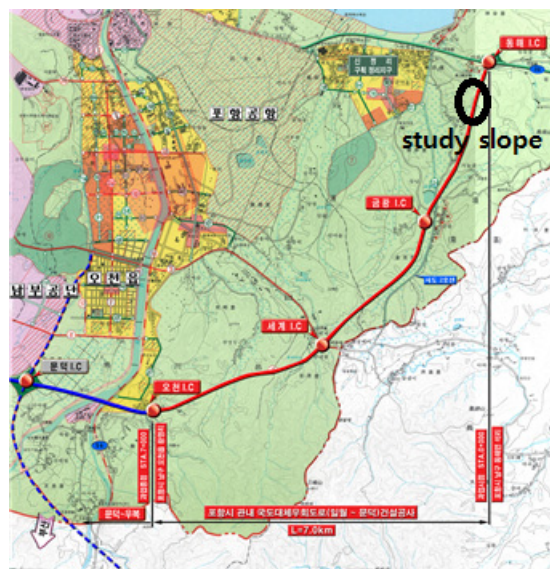


Fig. 1. The location map of the study area

별 지질횡단면도를 작성하기는 어려운 경우가 많아 체계적인 지질횡단면도를 활용하여 비탈면 안정성 검토를 수행한 사례는 극히 드물다. 따라서 본 연구의 목적은 비탈면이 신생대 제3기 현무암 위에 부정합적으로 석탄층이 협재된 이암으로 구성되고, 공학적으로 매우 취약한 석탄층이 협재하여 이에 따른 암반 파괴 위험성이 큰 비탈면을 대상으로 법면 face-mapping 자료와 지질전개도, 법면에 수직인 대표 구간의 지질횡단면도, 대표 구간 불연속면의 평사투영 해석, 강도정수 산정을 위한 토사와 암석의 물성시험 및 역학시험, 다양한 조건의 안전율 계산을 위한 한계평형해석 및 그에 따른 대책공법 등을 수립하여 향후 비탈면 안정성 검토에 체계적인 지질횡단면도가 필수적인 역할을 할 수 있음을 제시하고자 한다.

2. 지질

2.1 비탈면 현황과 법면 지질

연구대상 비탈면의 총 길이는 약 260 m이고, 높이는 최고 40.35 m로 되어 있으며(Park and Ihm, 2003), 비탈면의 배향은 55/132이며, 법면 구배는 거의 1:0.7(약 55도)에 가깝다. 연구 비탈면은 하부의 신생대 제3기 현무암류를 부정합적으로 피복한 상부의 신생대 제 3기 이암으로 구성되며, 일부 미사암과 셰일이 협재한다. 또한 수 cm 두께의 석탄층이 5매 협재된 고하상퇴적층(channel deposits)이 포함된 비탈면이다. 이들 고하상퇴적층은 완전한 암석화 과정을 겪지 못한 미고결 퇴적암으로서 거의 공학적으로 토사의 거동을 나타내는 암반 상태이다. 특히 협재된 석탄층에는 식물의 줄기 화석과 탄화목 등이 포함되어 있어 거의 이완된 지반상태를 보인다.

비탈면의 암반은 대부분 풍화암의 상태를 유지하고 있고, 특히 비탈면 상부는 심하게 풍화가 진행되고 있다. 하부의 현무암은 비교적 괴상의 암반으로 나타나나 수축절리 및 다양한 배향을 보이는 단열들의 발달로 암반이 이완되어 있는 상태여서 풍화작용이 급속히 진행될 수 있는 상황이다. 또한 암반 내 불연속면 특히, 부정합면과 층리 및 단열면간의 결속력이 매우 미약하여 강우기는 물론이고 동결-융해 특성에 기인한 암괴 이완현상이 발생할 가능성이 매우 높은 것으로 판단되며, 일부 구간에서는 원호파괴 및 평면파괴가 발생하고 있다(Fig. 2).

비탈면의 전경사진은 Fig. 2에 나타나있으며, Fig. 3은 비탈면의 구성 암석, 불연속면의 종류 및 배향, 간격, 연장성 등을 나타낸 비탈면의 지질전개도이다.



Fig. 2. The foreground photo for the slope of the study area

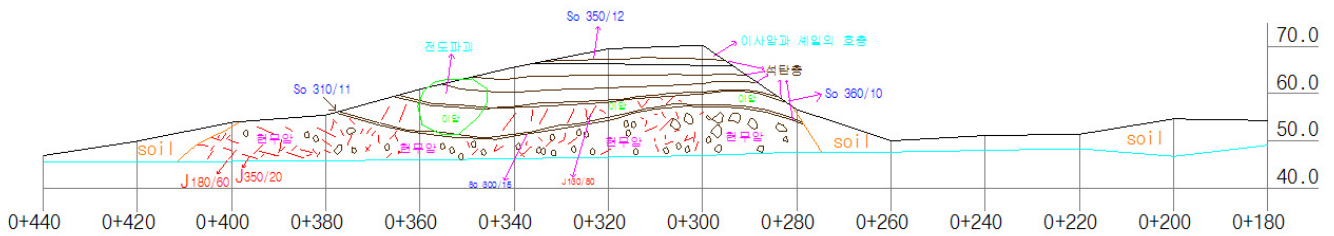


Fig. 3. The unfolded drawing map for geological face-mapping data of the slope

2.2 지표 지질

연구지역 일대에는 중생대 지층을 부정합적으로 덮고 있는 신생대 제3기 이암층과 현무암으로 대표되는 화산암류, 미고결 퇴적층에 해당하는 제4기 퇴적암류, 암반의 풍화산류토 및 충적층으로 구성된다(GSK, 1922). 또한 비탈면 지역 주변 일대에는 신생대 지층을 변위시킨 수많은 제3기 단층들이 발달하고 있고, 특정 인근 구간에는 제4기 지층을 변위시킨 활성단층도 존재한다. 연구 비탈면은 제3기 연일현무암과 상부의 함탄층으로 구성된 암반비탈면으로서(Fig. 4), 비탈면 내에 부정합과 규칙적인 층리 및 수축절리가 발달하고 있고, 작은 규모의 많은 단층과 5매의 석탄층 및 불규칙 절리가 비탈면 전체에 걸쳐 발달하고 있다. 따라서 비탈면의 안정성 검토 시 일반적인 해석 과정과는 달리 신생대 제3기 함탄층과 이암, 불연속면 중 부정합과 층리의 특성 및 이방성을 고려한 안정성 해석과 함탄층 특성을 반영한 지질횡단면도 작성이 한계평형해석의 근간으로 활용되었다.

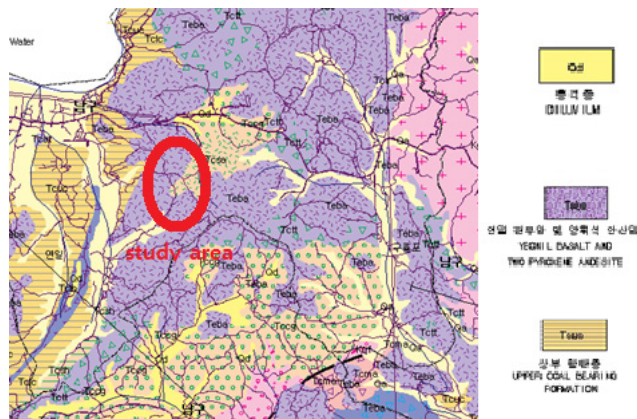


Fig. 4. The geological map of the study area

3. 안정성 해석

3.1 불연속면 특성

비탈면에 발달한 불연속면의 특성을 나타내기 위하여 종류, 간격, 연속성, 지하수 상태, 충전물 및 틈 등을 face-mapping하여 Table 1에 나타내었으며, 불연속면의 개략적인 양상파악을 위해서는 Fig. 3 face-mapping 지질전개도에 표시하였다. 또한 법면에

수직으로 대표적인 구간 2곳의 지질횡단면도를 작성하여 Fig. 5~Fig. 6에 나타내었으며, STA. No. 0+300 구간의 지질횡단면도와 STA. No. 0+360 구간의 지질횡단면도를 향후 비탈면 안정성 검토단면의 기본으로 이용하였다.

Table 1. Data of face-mapping for discontinuities on the slope

Characteristics Discontinuity	Spacing	Persistence	Roughness	Groundwater	Infilling	Aperture
Bedding	1~2 mm	infinite	gouge	dry	clay minerals	.
Cooling joint	10~25 cm	1~5 m	planar	dry	.	<10mm
Nonconformity	.	infinite	gouge	seepage	clay minerals	≥10mm
Shear joint	20~50 cm	1~6 m	planar	dry	.	≤2mm

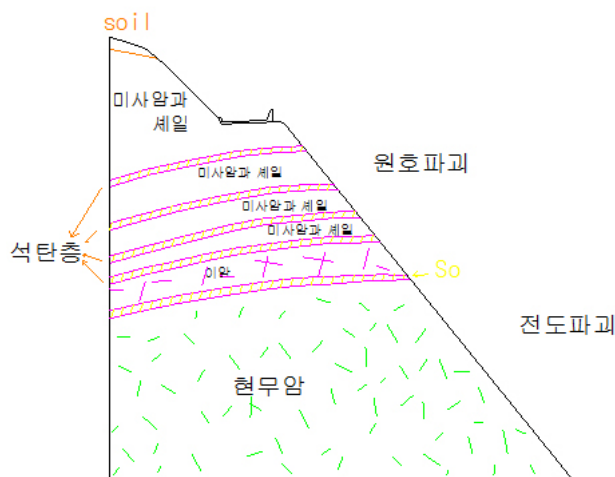


Fig. 5. Geological cross-section of STA. No. 0+300 on the cut-slope

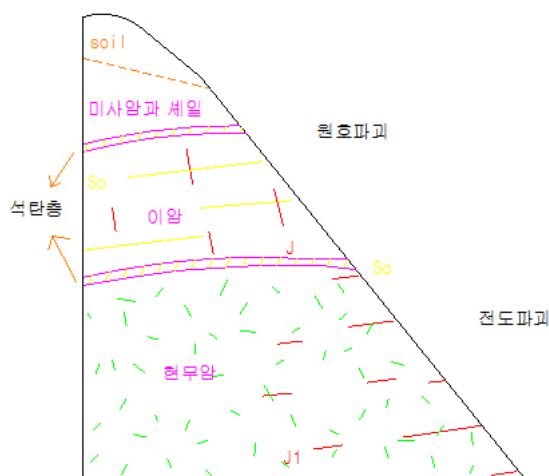


Fig. 6. Geological cross-section of STA. No. 0+360 on the cut-slope

3.2 지질횡단면도

비탈면의 법면 상 face-mapping한 자료와(Fig. 3) 주변 암반 노두에서 face-mapping한 자료에 근거하여, 가장 취약하거나 파괴가 발생한 구간을 중심으로 비탈면을 대표할 수 있는 2곳을 대표단면으로 선정하였다. 법면과 노두에서 측정한 불연속면의 특성(Table 1)이 법면에 수직으로 횡단한 지질횡단면에 유사하게 분포한다는 가정 하에 대표단면별 지질횡단면도를 작도하였다.

STA. No. 0+300 구간의 지질횡단면도를 작도하여 분석해 보면 수십 cm 두께의 함탄층 층리와 부정합면을 따라 원호파괴가 발생함과 더불어 전단절리를 따라 전도파괴가 예상되며, 규칙적인 전단절리와 비탈면 내부와 법면 부근에서 경사방향이 변화하고 저각인 층리가 만나는 소규모 암괴가 이완 및 붕괴가 예상된다. 또한 실제 법면에서도 원호파괴가 부분적으로 소규모 발생한 것을 알 수 있다(Fig. 2).

STA. No. 0+360 구간의 지질횡단면을 작도하여 분석해 보면 고각의 수축절리를 따라 전도파괴가 발생할 가능성이 있음을 알 수 있고, 실제 법면에서도 전도파괴가 소규모로 다수 발생한 것을 알 수 있다. 또한, STA. No. 0+300 구간과 마찬가지로 수많은 함탄층의 층리와 부정합면을 따라 원호파괴가 발생하거나 일어날 가능성이 큼을 알 수 있다(Fig. 6).

3.3 암석 시험

최상부 비탈면의 토사와 암석의 종류 및 불연속면의 특성을 반영한 비탈면 내 대표적인 위치에서 채취한 토사와 암석 4점에(Fig. 7) 대한 물성 및 역학적 시험을 실시하였다. 시험항목은 비중, 흡수율, 습윤단위체적중량 등의 물리적 시험과 일축압축시험 및 절리면 직접전단시험 등이며, 그 결과는 Table 2에 요약하였다.

Table 2. The result of physical property and mechanics test for soil and rock samples on the slope

Sample	Sta. No.	γ_t (tf/m^3)	Absorbion Ratio (%)	Uniaxial Compression Strength (tf/m^2)	Specific Gravity	c (tf/m^2)	ϕ (°)
soil	0+300	1.55	.	.	.	1.3	27.5
soil	0+360	1.54	.	.	.	2.0	18.5
rock	0+300	2.26	4.6	52.9	2.56	1.7	30.4
rock	0+360	2.32	4.6	699.2	2.68	2.0	30.8



Fig. 7. The location map of the rocks and soil samples on the slope (circle: rock, rhombo: soil)

3.4 SMR과 강도정수 추정

암반을 등급별로 나누는 방법은 다양하게 나와 있으나 비탈면의 경우는 SMR 분류법이 유용하다. 따라서 법면과 주변 암반 노두의 face-mapping 결과와 암석 물성시험 결과를 종합하여 비탈면의 대표구간별 SMR 분류한 값을 Table 3에 수록하였다. 대표구간별로 SMR 등급이 불량에서 매우 불량한 암반 등급으로 계산되었다(Table 3).

Table 3. The result of SMR on the slope

STA.	Spacing Average	Persistence	Main Discontinuity	Type Failure	Uniaxial Compressional Strength (tf/m ²)	Roughness	Groundwater	Angle between Slope-Face and Discontinuity	Score	Rating
No. 0+300	25 cm	.	bedding nonconformity	circular wedge	52.9	planar	dry	parallel	8	V
No. 0+360	30 cm	.	bedding cooling joint	circular toppling	699.2	planar	dry	subparallel	25	IV

암반 비탈면의 안정성해석 시에는 점착력(c)을 고려할 경우 실제보다 상당히 보수적으로 해석되기 때문에 거의 일정한 2.4 t/m²의 값을 적용하고(Park and Ihm, 2003), ϕ 값은 현장에서의 불연속면의 상태, 단열 및 불연속면의 간격, 풍화정도, 거칠기 등에 따라 강도 정수가 달라지므로 현장의 암반상태, 일축압축강도 및 불연속면 직접전단시험 등을 고려하여 ϕ 값을 적용하여 해석하였다. 따라서 비탈면 안정해석을 위하여 SMR 값과 face-mapping 결과를 RQD로 산정한 평가값과 문헌자료 및 흡수율, 일축압축시험, 절리면 직접전단시험의 실내시험 자료에 기초하여 내부마찰각 ϕ 는 28°~31°의 범위로 산정하였다. Table 4에 비탈면 안정성 검토를 위한 비탈면 암반에 적용한 강도정수를 나타내었다.

Table 4. Applied input-parameters on the slope

No.	Unit Volume Weight (t/m ³)	Cohesion c (t/m ²)	Internal Friction Angle ϕ (°)
Sta. No. 0+300	2.5	2.4	28
Sta. No. 0+360	2.5	2.4	31

4. 안정성 검토

4.1 평사투영해석

비탈면의 안정성 해석을 위하여 2개의 대표단면에서 불연속면의 특성 및 파괴형태에 대하여 분석하고, 불연속면의 평사투영을 실시하여, 비탈면의 예상 파괴방향을 추정하였다. 층리, 부정합, 전단절리 및 수축절리에 대한 평사투영도(등면적하반구입체투영법)를 작성하고, 그 결과를 각각 Fig. 8~Fig. 9에 나타냈다. 파괴암체의 크기는 평균적으로 0.02 m~0.01 m³ 정도이나 STA. No. 0+360 단면의 경우에 0.1 m~0.2 m³로 상대적으로 크다. 파괴암체의 하중은 평균 약 0.02 ton·m를 나타낸다. 파괴암체의 미끄러질

방향을 살펴보면 STA. No. 0+300단면은 층리면과 부정합을 따른 원호파괴가 남동 방향의 50° 및 중력 방향(Fig. 8), STA. No. 0+360단면의 경우는 수축절리와 전단절리를 따른 전도파괴가 남동 방향의 50° 및 중력 방향으로 분석된다(Fig. 9).

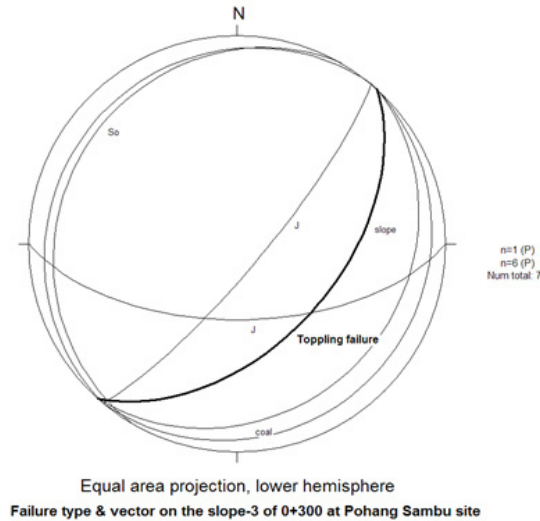


Fig. 8. The stereonet projection map of discontinuities at STA. No. 0+300 on the slope

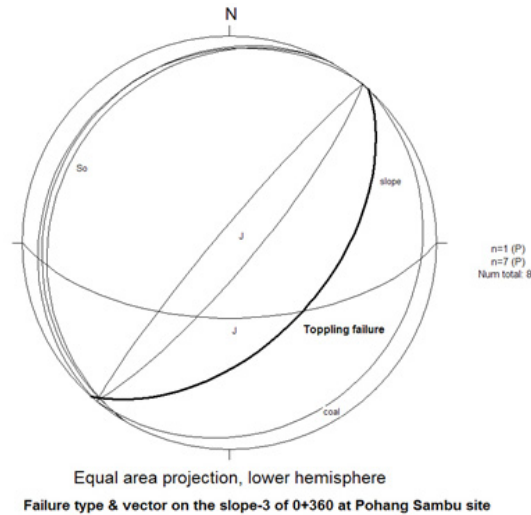


Fig. 9. The stereonet projection map of discontinuities at STA. No. 0+360 on the slope

Fig. 3 지질전개도 및 Fig. 5~Fig. 6 대표 구간별 지질횡단면도에서도 알 수 있듯이 비탈면의 전구간은 불안정한 상태를 나타내며 특히, STA. No. 0+280~380 구간은 함탄층의 층리와 부정합을 따른 원호파괴, STA. No. 0+380~410 구간은 현무암의 수축절리를 따른 전도파괴 등으로 매우 불안정한 상태를 나타낸다. 따라서 전체적으로 비탈면의 안정성을 증대시킬 수 있는 대책공법이 요구되는 상태이다.

4.2 한계평형해석

비탈면에 대한 안정성 해석을 실시하기 위하여 2개의 대표구간 지질횡단면도를 기본단면으로 하여 제 3.4절에서 도출한 강도정수를 입력값으로 건기와 우기에 대한 안전율을 구하였다. 비탈면의 안정성 해석을 위해 사용한 프로그램은 프랑스의 TERRASOL 사가 1997년에 지반구조물의 안정성 해석을 위해 개발한 TALREN 97을 주로 사용하였다. 임반 비탈면 지반의 안정성에 가장 큰 영향을 주는 주된 요인은 불연속면의 전단강도이므로 함탄층의 층리면과 절리면을 포함하고 있는 시료를 대상으로 절리면 전단시험과 각종 물성시험을 실시하였다. 도출된 결과값을 각 대표단면별 원지반에 적용하여 안전율 해석을 건기와 우기로 나누어 실시하였고, 그 결과를 지면 관계상 STA. No. 0+300과 STA. No. 0+360에 대한 우기 해석 그림만을 Fig. 10과 Fig. 11에 나타내었다. Table 5에는 비탈면 원지반의 대표단면별 우기 시 안전율을 정리하였다. 원지반 비탈면에 대한 분석 결과, 건기 시와 우기 시 모두 허용안전율에 미달하여 대책공법이 필요함을 보였다.

Table 5. Safety Factor (Fs) by section on the slope

No.	Program	Part	Safety Factor (Fs) Rainy	
STA. 0+300	TALREN	upper	0.88	NG
		lower	0.93	NG
STA. 0+360	TALREN	upper	0.91	NG
		lower	1.11	NG

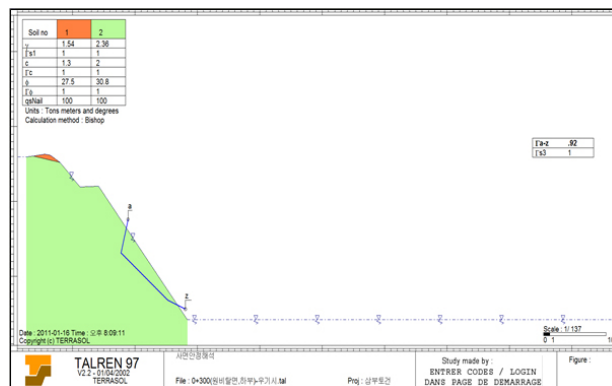


Fig. 10. The result of safety factor (Fs) at STA. No. 0+300 on the slope in the rainy season

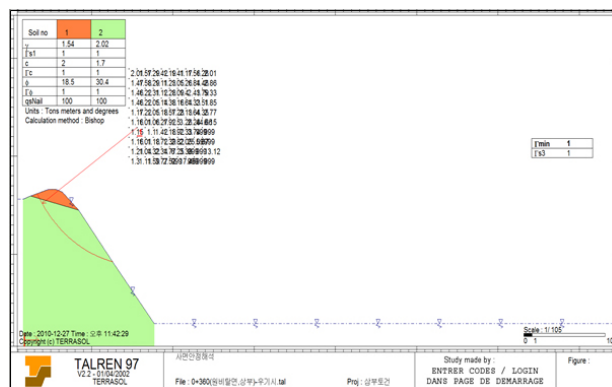


Fig. 11. The result of safety factor (Fs) at STA. No. 0+360 on the slope in the rainy season

4.3 대책 공법

지질횡단면도 분석과 평사투영 해석결과에 의한 비탈면의 대표단면별 파괴형태는 상부에 소규모 암괴가 이완되거나, 현무암의 수축절리면을 따른 전도파괴가 증력방향으로 예상되며, 함탄층의 층리면과 부정합면을 따른 원호파괴도 예상된다. 이에 따라 현장 여건을 종합적으로 고려할 때, 비탈면의 상부와 하부의 암반 특성을 고려하여 안전성이 확실하며 시공이 용이하고 경제적인 비탈면 구배완화공법, 록볼트공법, 영구앵커공법, FRP공법, 계단식옹벽공법 등을 적용함이 가장 합리적이라고 판단되어 각 대책공법에 대한 안전율을 계산하였다(Table 6). 지면관계상 각 대표단면별로 구배완화공법과 앵커공법 적용 후의 우기 시 안전율을 해석한 그림만을 Fig. 12~Fig. 15에 나타내었다.

Table 6. Safety Factor (Fs) by section after application of countermeasure methods on the slope

STA. No.	Countermeasure Methods	C.T.C, L	Safety Factors (Fs) Rainy	Remarks
0+300	relief gradient (1:1.3) + rock bolt	2.5 m×2.5 m, 6 m	1.31	Allowable Safety Factor Fs= 1.2 (rainy)
	relief gradient (1:1.3) + anchor	3 m×3 m, 8 m	1.35	
	relief gradient (1:1.3) + FRP anchor	1.5 m×1.5 m, 4 m	1.38	
	stepped retaining wall + anchor	3 m×3 m, 8 m	1.38	
0+360	relief gradient (1:1.3) + rock bolt	2.5 m×2.5 m, 6 m	1.33	
	relief gradient (1:1.3) + anchor	3 m×3 m, 8 m	1.30	
	relief gradient (1:1.3) + FRP anchor	1.5 m×1.5 m, 4 m	1.38	
	stepped retaining wall + anchor	3 m×3 m, 8 m	1.39	

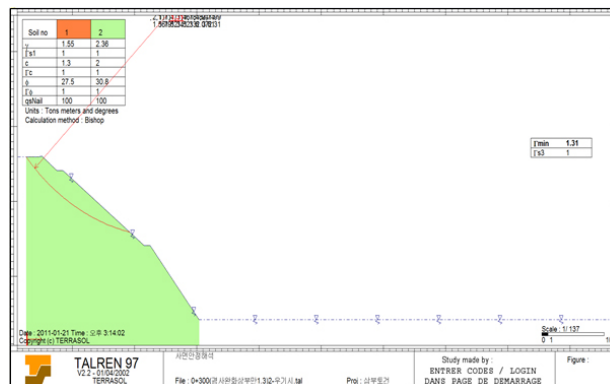


Fig. 12. The result of safety factor (Fs) at STA. No. 0+300 after relief of the gradient on the slope in the rainy season

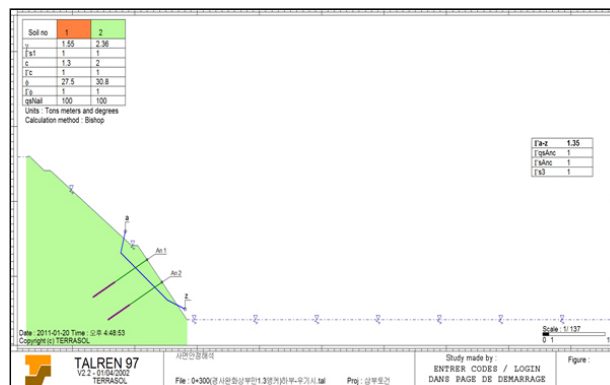


Fig. 13. The result of safety factor (Fs) at STA. No. 0+300 after rock anchors on the slope in the rainy season

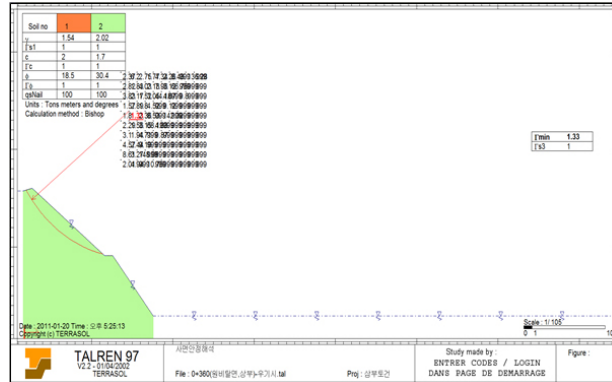


Fig. 14. The result of safety factor (Fs) at STA. No. 0+360 after relief of the gradient on the slope in the rainy season

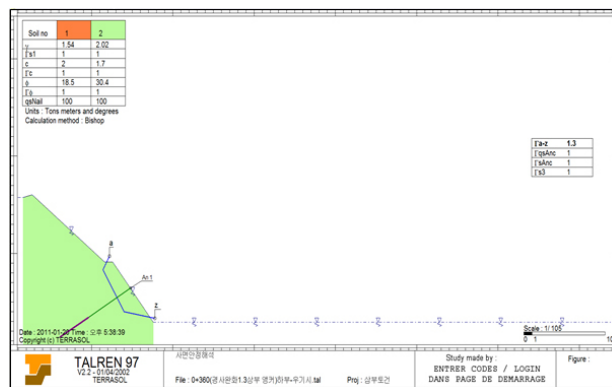


Fig. 15. The result of safety factor (Fs) at STA. No. 0+360 after rock anchors on the slope in the rainy season

4.4 토의

비탈면의 안정성 검토를 위해 법면과 주변 암반 노두의 face-mapping, 체계적인 지질횡단면도 작성, 암반의 공학적 분류(SMR), 토사와 암석의 물성 및 역학적 시험, 불연속면의 평사투영해석, 국내적용사례 및 관련문헌을 참고하여 합리적인 지반정수값을 산정한 후, 지질횡단면도를 비탈면의 대표단면으로 이용하여 원지반과 대책공법을 적용한 지반을 대상으로 한계평형해석을 수행하는 절차를 밟았다.

비탈면 안정성 해석에 관련된 국내 연구들은 일반적인 비탈면 조사법의 개선, 안정성 분석 모델링의 다양성 제시, 지역적인 사례 연구 등이 주로 제시되었다. 암반비탈면 내 암석과 불연속면이 위치에 따라 불균질성과 이방성(anisotropy)의 특성에도 불구하고 비탈면 하나에 통상 비탈면고가 제일 높은 부분을 대표적인 단면으로 설정하여 한계평형해석과 안정성 검토를 제시해 왔다. 또한 비탈면의 대표단면 하나를 지질횡단면도로 제시하여 안정성을 검토한 예(Ihm, 2016, Ihm and Park, 2017), 비탈면 내 존재하는 불연속면의 종류를 구분하여 붕괴의 원인분석과 대책에 관한 연구(Park et al., 2017), 3차원 한계평형법을 이용하여 산사태 안정성을 해석한 사례(Seo et al., 2008), 이종지질을 고려한 3차원 사면안정해석 연구(Seo et al., 2011) 등이 있다.

체계적인 지질횡단면도 작성은 비탈면의 불균질성과 불연속면의 이방성을 충분히 고려할 수 있는 안정성 검토 방법의 일환으로 법면의 face-mapping과 주변 암반의 face-mapping 자료를 주로 이용하였다. 법면의 face-mapping 자료를 근간으로 법면의 주향이 변화하면서 다양한 지질이 분포하고, 불연속면의 종류, 배향 및 지질공학적 특성이 구간에 따라 다양하게 나타나는 것을 충분히

안정성 검토에 반영할 수 있도록 법면에 수직인 여러 대표단면을 선정하여 지질횡단면도를 작성하고 분석하였다. 지질횡단면도 상에 나타나는 암석과 불연속면의 분포는 동일 구간의 법면 상에서 측정한 배향, 간격, 연장, 틈 등이 동일 구간의 지질횡단면에도 유사하다는 가정 하에 지질횡단면도가 지질도화적인 방법으로 작성되었다. 평사투영해석으로도 파괴 유무 및 파괴 유형이 파악되지만, 각 대표단면을 더욱 촘촘하게 지질횡단면도로 표현한다면 정확한 비탈면의 3차원적인 안정성 검토가 수행되리라 생각된다. 더불어 하나의 비탈면에서 더욱 좁은 간격의 많은 지질횡단면도를 한계평형해석의 기본 단면으로 이용한다면 더욱 정밀하고 3차원적인 비탈면 안정성 검토가 제시되리라 판단된다.

5. 결론

연구 대상은 하부의 신생대 제3기 현무암류를 부정합적으로 피복한 신생대 제3기 이암 및 수 cm 두께의 석탄층이 5매 협재한 고하상퇴적층으로 구성된 깎기비탈면으로서 고하상퇴적층은 완전한 암석화과정을 겪지 않은 미고결 퇴적암으로서 토사의 거동을 보이는 연약암반이며 특히, 협재한 석탄층 속에는 화석이 수반되어 있어 거의 이완된 지반특성을 보인다. 구간별로 파괴의 유형과 규모는 상부의 함탄층이암 구간은 원호파괴, 하부의 현무암류는 전도파괴가 우세하고, 비탈면의 대표구간별 SMR 등급은 불량에서 매우 불량한 암반 등급으로 계산되었다. 파괴암체의 크기는 평균적으로 0.02 m~0.01 m³ 정도이며, 파괴암체의 하중은 평균 약 0.02 ton·m를 나타낸다. 평사투영해석 결과, 이완 암체의 파괴 방향은 STA. No. 0+300 단면에서 층리면과 부정합을 따른 원호파괴가 남동 방향의 50° 방향이고, STA. No. 0+360 단면의 경우는 수축절리와 전단절리를 따른 전도파괴가 남동 방향의 50° 및 중력 방향으로 분석된다. Face-mapping 자료, SMR, 토사와 암석의 물성·역학시험, 평사투영법과 구간별 지질횡단면도 분석 및 한계평형해석으로 종합·검토한 결과, 대표적 2개 단면 모두 허용안전율이 크게 미달하여 대책공법이 필요하였다. 따라서 비탈면 안정성에 최적의 방안은 사면구배완화공법 및 록앵커공법을 대책공법으로 제시하였으며, 대책공법을 적용한 후 비탈면의 안전율은 모두 허용안전율을 상회하였다. 또한 직고 10 m에 폭 1 m의 소단을 설치하도록 하고, 추가로 법면에 낙석방지망 설치 또는 녹생토를 t=10 cm 설치함과 더불어 낙석방지울타리를 설치하도록 제시하였다. 법면 face-mapping 자료와 법면에 수직인 대표 구간의 지질횡단면도 작성, 지질횡단면도를 대표단면으로 활용하여 검토한 한계평형해석 및 그에 따른 대책공법 제시는 비탈면의 3차원 해석 및 안정성 검토의 합리적인 도구가 될 것으로 예상된다. 특히, 층리와 부정합이 발달한 함탄층이암 비탈면의 경우는 체계적인 지질횡단면도의 작성이 반드시 필요하며, 한계평형해석에 이용되는 대표단면은 반드시 구간별 지질횡단면도를 기본단면으로 설정해야 할 필요성이 요구된다.

REFERENCES

- Geological Survey of Korea, 1922, Geological Map of Korea, 1:50,000, Yeonil sheet, pp 45, (in Korean with English Abstract).
- Ihm, M.H., 2016, Case study of slope failure on fault planes in Cheongryangsan Formation due to ground excavation, Engineering Geological Society of Korea, 2016 Fall Conference, (in Korean with English Abstract).
- Ihm, M.H. and Park, J.Y., 2017, Study on the geological characteristics and slope stability of Nammyeom reservoir in Bonghwa County, Kyungpook Province, TUNNEL & UNDERGROUND SPACE, 27(2), 77-88, (in Korean with English Abstract).

- Kim, S.H., Koo, H.B., Hwang, J.Y., and Son, M., 2011, Case study on the cause of failure and characteristics of soil at a collapsed cut-slope at the ○○ detour, Jeonranam-Do, *The Journal of Engineering Geology*, 21(4), 313-322, (in Korean with English Abstract).
- Ko, K.T., Choi, J.H., and Kim, Y.S., 2012, Effects of geological structures on slope stability : An example from the Northwestern part of Daegu, Korea, *The Journal of Engineering Geology*, 22(1), 1-13, (in Korean with English Abstract).
- Koo, H.B., Kim, H.J., and Lee, D.Y., 2003, Slope stability analysis and suggestion of stabilization methods on failed cut-slope interbedded with weakness layer, 2003, *The Journal of Engineering Geology*, 13(2), 157-170, (in Korean with English Abstract).
- Lee, M.S. and Kim, G.W., 2009, Relationship between rainfall intensity and slope stability based on numerical analysis, *The Journal of Engineering Geology*, 19(1), 25-31, (in Korean with English Abstract).
- Park, B.S., Cho, H., Park, D.I., Kim, J.H., and Choi, J.H., 2017, Case study on rock slope failures caused by geologic structures, *The Journal of Engineering Geology*, 27(4), 417-427, (in Korean with English Abstract).
- Park, Y.M. and Ihm, M.H., 2003, Report of "Reinforcement for rock fall and landslide risk area", Daegu Office of Construction and Management, Ministry of Land, Infrastructure and Transportation in Korea, (in Korean with English Abstract).
- Seo, Y.S., Kim, S.K., and Lee, K.M., 2008, 3-D slope stability analysis on influence of grounwater level changes in Oksan landslide area, *The Journal of Engineering Geology*, 18(2), 167-173, (in Korean with English Abstract).
- Seo, Y.S., Lee, K.M., and Kim, K.Y., 2011, 3-D slope stability analysis of a dual-lithology slope, *The Journal of Engineering Geology*, 21(1), 57-64, (in Korean with English Abstract).