

# 이암 절토 사면의 붕괴 요인 분석 및 대책방안 제시

박민철  
금오공과대학교 토목공학과

## Analysis of collapse course of mudstone cut slope and suggest countermeasure

Min-Cheol Park

Department of Civil Engineering, Kumoh Institute of Technology

**요약** 본 연구는 ○○ 고속국도 공사 중 발생된 이암 절토 사면의 붕괴 요인 분석 및 대책방안을 제시하였다. 기반암인 이암에 대해 실내시험을 수행하고, 국제 기준에 의거해 공학적인 특성을 규명하였다. 그리고 설계 시 수행되었던 사면안정해석을 재검토 하였다. 또한, Swelling-Slaking 현상으로 인해 기반암인 이암의 강도열화특성을 고려한 안정해석을 추가적으로 수행하였다. 기반암인 이암에 대해 Swelling-Slaking Test 결과, 풍화내구성은 낮음-보통으로 나타났으며, 팽창변형률은 매우 낮음으로 나타났다. 설계 안정해석 검토 결과, 이암의 공학적 특성을 고려하지 않고, 한계평형해석을 이용해 실제와 상이한 결과가 나타났다. 강도열화특성을 고려한 추가안정해석 결과, 사면의 붕괴지점과 안정해석의 최대전단변형률 발생지점이 동일하게 나타났으며, 건기시 우기시 모두 기준 안전율을 만족하지 못하였다. 붕괴 사면의 대책방안으로는 사면경사완화공법이 가장 적절하였다. 유한요소해석을 통해 완화 경사를 산정하였다. 완화 경사의 현장 적용성을 위해 시추공영상촬영과 비교한 결과, 미고결된 이암의 대부분이 제거되는 것으로 나타나 미고결된 이암으로 인한 추가적인 붕괴 위험성은 현격히 저하되는 것으로 나타났다.

**Abstract** This study analyzed the collapse course of a mudstone cut slope during the construction of a express and suggested a countermeasure. Experiments were carried out on bedrock mudstone to investigate the engineering characteristics and the slope stability analysis at the time the design was reviewed. In addition, stability analysis, considering the strength softening characteristics of the slope due to the Swelling-Slaking phenomenon, was also performed. As a result of the Swelling-Slaking test, the slake durability was Low-Medium, and the swell potential was Very Low. A review of the stability analysis performed at the time of the design showed different results from the actual results because LEM analysis had been performed without considering the engineering characteristics of mudstone. As a result of additional stability analysis considering the strength softening characteristics, the slope collapse point and the maximum shear strain point of the stability analysis were the same and the standard safety factor was not satisfied. As a countermeasure, a slope mitigation method was found to be most appropriate. The mitigation slope was calculated by Finite element Analysis. A comparison with BIPS to determine the applicability of a mitigation slope revealed most of the unconsolidated mudstone.

**Keywords** : Mudstone slope, Slope collapse, Swelling, Slaking, Slope Stability Analysis.

### 1. 서론

이암(Mudstone)으로 구성된 지반은 절취 등으로 인

해 노출되면 급속도로 풍화가 진행되며, 강우 유입 시 전단강도가 현저히 저하되어 흩과 유사한 공학적 성질을 보이게 된다[1]. 이암은 쇄설성 퇴적암(Clastic rocks) 중

\*Corresponding Author : Min-Cheol Park(Kumoh Institute of Technology)

Tel: +82-54-478-7618 email: xlage0@naver.com

Received February 7, 2018

Revised (1st March 7, 2018, 2nd March 26, 2018)

Accepted April 6, 2018

Published April 30, 2018

수성쇄설암(Aqueous clastic rocks)의 일종으로 유수작용으로 운반된 퇴적물들이 수중에서 퇴적되어 생성되었으며, 수성쇄설암 중에서 입자의 크기가 1/256 (mm) 이하인 암석을 말한다. 이암은 다량의 팽창성 점토광물인 Montmorillonite를 함유하고 있어 흡수상태에서 상재하중을 제거하면 현저한 팽창성을 나타내며 연약화되고 이 경우 팽창을 제한하였을 때는 현저한 팽창압을 발생시킨다. 즉, 절토나 파쇄 등에 의한 응력해방 후 전단면을 따라 Slaking 및 Swelling 현상으로 인해 전단강도가 현저히 저하되며, 이암 표면부터 연약·세립화되어 수분을 흡수하면 토양화에서 점토화까지 되는 특성을 가지고 있다 [2].

Kim(2002)[3]은 이암의 공학적 특성 파악을 위해 여러 지역의 이암 시료를 통해 Slaking Test를 수행하여 Slaking 현상으로 인한 이암의 전단강도 저하정도를 파악하였다. Jeon et al.(2009)[4]는 이암의 공학적 특성을 고려하여 강우유형에 따른 침투해석을 수행하였으며, Jeong(2006)[5]는 포항지역 이암을 대상으로 여러 실내시험을 수행하여 이암의 풍화정도에 따른 강도열화특성과 잔류강도특성을 규명하였다.

국내외 연구동향을 분석한 결과, 이암의 강도열화특성에 대한 연구와 이암의 공학적 특성으로 인한 붕괴사태에 대한 연구만 수행되었고 본 연구와 같이 실제 이암의 공학적 특성으로 인한 붕괴와 그에 따른 대책방안을 제시한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 ○○고속국도 공사 중 발생된 이암 절토 사면의 붕괴 요인을 분석하고 보수방안을 제시하였다. 기반암인 이암의 공학적 특성을 고려하여 붕괴 원인을 규명하였다. 그리고 이암의 강도열화특성을 고려하여 역해석을 수행하여 붕괴 원인을 검증하였다. 또한 설계 당시 수행되었던 안정해석의 결과를 재검토하였다. 시추공영상촬영과 지층현황을 비교하여 연구지역에 공학적으로 적절한 보수방안을 제시하였다.

## 2. 붕괴사면의 토질·지질공학적 특성 규명

### 2.1 사면 붕괴 현황

Fig. 1은 붕괴사면의 현황을 나타낸 것이다. 사면의 붕괴는 절토 사면의 가법면을 형성한 후 설계 사면의 굴

착 전에 붕괴가 발생하였다. 붕괴 폭은 약 0.2 m ~ 2.0m 까지 이며, 종단면으로 약 60m로 발생하였다.

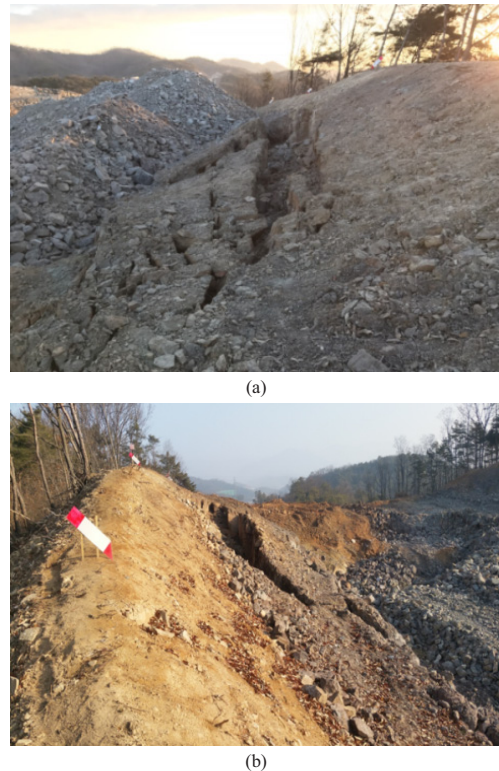


Fig. 1. Status of failure slope  
(a) Right side (b) Left side

Fig. 2는 사면의 붕괴 영역에 대한 세부현황을 나타낸 것이다. Fig. 2 (a)의 표층부에는 퇴적층을 따라 미고결된 이암이 분포되어 있으며 Fig. 2 (b)와 같이 사면의 지층에도 표층부와 동일하게 미고결된 이암이 나타났다.

강우 직후 현장답사 시 표층부와 굴착하면 모두 포화된 상태였으며, 하중을 가할시 토사와 같은 거동을 보였다.

### 2.2 지반조사

연구지역을 대상으로 지반조사를 수행하였다. 지반조사는 정확한 지층분포 파악과 붕괴지역의 지반 및 지질공학적 특성 규명을 위해 시추조사 수행 및 시료를 채취하여 실내시험을 수행하였다.

시추조사는 총 2개 공에 대하여 수행하였으며, 시추조사 결과는 Table 2과 같다. 연구대상지역은 이암과 사암이 기반암으로 구성되어있다. 연암층은 보통풍화 ~ 매

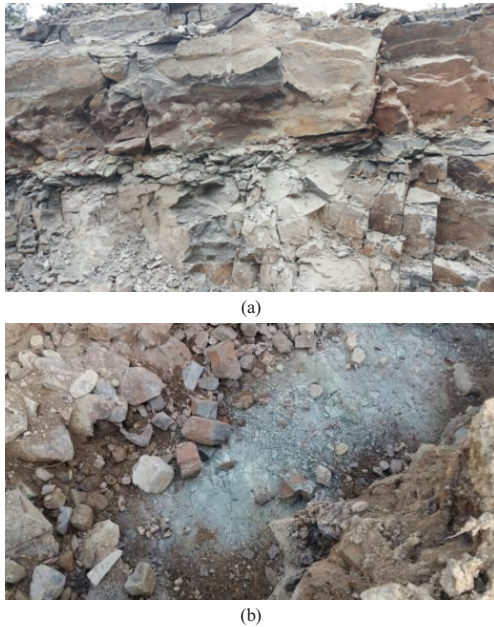


Fig. 2. Detailed status of failure slope  
(a) Surface (b) Underground

Table 1. Result of boring investigation

no.	Stratum	Depth (m)	Material
1	Regolith	0.0~0.2	Silty sand with gravel
	Weathered soil	0.2~0.6	Silty sand
	Soft rock	0.6~14.5	Mudstone and Sandstone
	Hard rock	14.5~27.0	Shale and Sandstone
2	Regolith	0.0~0.6	Silty sand with gravel
	Weathered soil	0.6~1.5	Silty sand
	Soft rock	1.5~23.0	Mudstone and Sandstone

우심한풍화를 보이고, 균열은 보통균열 ~ 매우심한균열을 보였다. 경암은 약간풍화 ~ 보통풍화를 보이고, 균열은 약간균열 ~ 심한균열을 보였다.

시추조사 시 병행한 표준관입시험에서 채취된 흐트러진 시료와 자연시료, 채취된 시료 중 각 지층의 대표적인 시료를 선정하여 한국산업규격(KS)에 준하여 실내시험을 수행하였다.

### 1) 토사 물성시험

함수비시험, 비중시험, 액성한계시험, 소성한계시험, 체분석 시험

### 2) 암석 물성시험

암석 비중·흡수율시험, 탄성계수시험, 포아송비시험, 탄성파속도 시험

### 3) 암석 역학시험

일축압축강도시험, 절리면전단시험, Swelling Test, Slaking Test

Table 2는 토사 물성시험 결과를 나타낸 것이고, Table 3은 암석 물성시험, Table 4는 암석 역학시험 결과를 나타낸 것이다.

Table 2. Result of soil properties Test

no.		2
Depth (m)		1.0
Moisture content (%)		5.0
Specific gravity		2.67
Atterberg Limits (%)	Liquid Limit	N.P
	Plastic Limit	N.P
Grain Size Distribution Finer than (%)	#4	57.7
	#10	49.1
	#40	37.5
	#200	12.4
2 $\mu$		-
USCS		SM

Table 3. Result of rock properties Test

no.		1	2
Depth (m)		15.2	9.0
Specific gravity		2.63	2.68
Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )		26.25	20.53
Absorption Ratio (%)		2.34	1.01
Modulus of Elasticity (MPa)		6,160	-
$\nu$		0.31	-
Elastic wave Velocity (m/sec)	Primary	2,193	-
	Secondary	1,220	-

Table 4. Result of rock mechanics Test

no.		1	2
Depth (m)		15.2	10.1
Compressive Strength (MPa)		31.3	74.6
Rock Joint	c (MPa)	-	0.028
	$\Phi$ (°)	-	31.4
Swelling Strain (%)		-	0.168
Slake durability index (%)	Id <sub>1</sub>	-	84.83
	Id <sub>2</sub>	-	80.50

### 2.3 공학적 특성 파악

#### 2.3.1 Slaking

Slaking 현상은 이암과 같이 연약하고 점토성분을 다량 함유한 암석이 강우 등에 의해 건조·습윤이 반복적으로 작용하여 고결력 내지 강도가 저하되며 심한 경우 입자가 분리되는 현상을 말한다[2].

Slaking 현상의 정도는 Slaking Test를 통한 Slake 내구성 지수로 판정된다. Gamble (1971)[6]은 Slake 내구성 지수를 통한 분류 기준을 Table 5와 같이 제시하였다.

Table 5. Slake durability classification system

Durability	Id <sub>1</sub> (%)	Id <sub>2</sub> (%)
Very High	> 99	> 98
High	98 ~ 99	95 ~ 98
Medium High	95 ~ 98	85 ~ 95
Medium	85 ~ 95	60 ~ 85
Low	60 ~ 85	30 ~ 60
Very Low	< 60	< 30

실내시험을 통해 산정된 Slake 내구성 지수를 Gamble (1971)[6]의 기준에 따라 분류하면 풍화내구성이 낮음-보통으로 나타났다(Table 6).

Table 6. Classification using slake durability index

Slake durability index (%)		Classification by Gamble
Id <sub>1</sub>	84.83	Low Durability
Id <sub>2</sub>	80.50	Medium Durability

#### 2.3.2 Swelling

흙이나 연암이 수분을 흡수하면 전체 체적이 증가하는 흡수팽창현상과 팽윤현상(Swelling)이 발생한다. 흡수팽창은 실질부분의 변화는 없고 유효간극이 물로 채워진 것에 의한 물리적 체적 증가를 말한다. 따라서 암석의 조직이나 구조에 지배되며 굴착에 의한 응력해방시 흡수 팽창에 의해 불안정한 거동을 보인다. 팽윤현상은 유효간극뿐만 아니라 실질부분에서도 물을 흡수하여 체적증가가 계속되는 현상을 말한다. 특히 이암의 점토광물인 Montmorillonite는 점토입자의 층 사이에 물 분자가 흡착하여 체적이 현저하게 증가한다. 따라서 구속압이 작용해도 상당한 팽윤압이 발생하게 된다[1].

팽윤현상으로 인한 팽창변형률에 대한 암석의 정확한 기준은 현재 존재하지 않다. 그러므로 토사의 관점에서 팽창 잠재성을 검토하여야 한다. 토사의 팽창 가능성은

나타내는 팽창지수(Expansion index, *EI*)는 Uniform building code, UBC(1968)[7]에서 제시한 식 1을 통해 구할 수 있다.

$$EI = 100 \times \text{percent swell} \times \#4 \text{ pass efficiency} \quad (1)$$

여기서, percent swell은 흡수팽창변형률지수이다.

Table 7은 UBC(1968)[7]에서 제시한 팽창지수에 따른 팽창 잠재성을 분류한 것이다.

Table 7. Identifying swell potential

Criteria	<i>EI</i>
Very high	> 130
High	91 ~ 130
Medium	51 ~ 90
Low	21 ~ 50
Very low	0 ~ 20

Swelling Test를 통해 산정된 Swelling Strain은 0.168%로 나타났으며, 이 결과를 식 1에 적용하여 팽창지수를 산정하면 Table 8과 같이 매우 낮음으로 나타났다. 그 결과, Swelling 현상으로 인한 체적팽창성이 낮을 것으로 판단되나 이암의 경우 물을 흡수하게 되면 팽창하면서 입자 구조가 변화하여 암의 성질을 잃어버리고 토양화되어 버리기 때문에 유의하여야 한다.

Table 8. Calculation result of swell potential

Swelling Strain	#4 pass efficiency	<i>EI</i>	Criteria
0.168 %	57.7 %	0.10	Very Low

## 3. 기존 사면안정해석결과 재검토

### 3.1 기존 사면안정해석 결과

○○ 고속국도의 설계 시 토사사면의 안정해석은 한계평형법을 통해 검토되었으며, 해석프로그램은 TALREN97을 이용하였다. 안정해석 시 적용된 강도정수는 ○○ 고속국도 지반조사보고서를 통해 산정되었다. 산정근거는 현장조사 및 실내시험 결과이다.

Table 9는 토사사면의 안정해석 조건을 나타낸 것이다. 해석단면은 붕괴가 발생한 사면의 횡단면도를 이용

하였으며, 높이는 23.07m, 지하수위는 기반암의 상부인 GL. (-) 8.4m이다.

Table 10은 설계시 수행된 토사사면 안정해석 결과를 나타낸 것이다. 건기시 안전율은 9.24로 산정되었고 우기시 9.03, 지진시 7.47로 산정되어 매우 안전한 결과가 나타났다.

Table 9. Condition of soil slope stability analysis (Design)

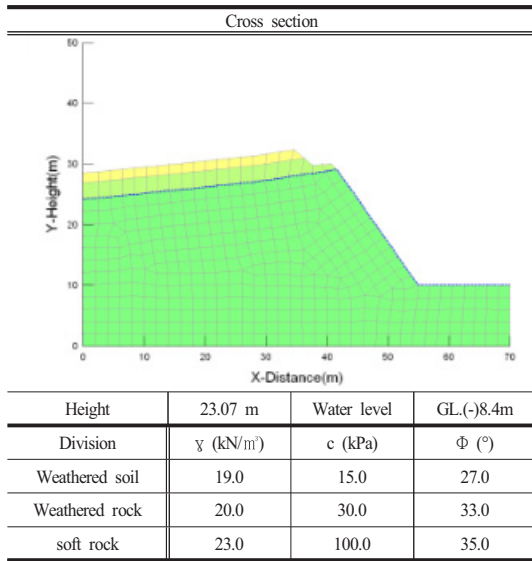


Table 10. Result of slope stability analysis (Design)

season	Image	Safety factor	Index
dry		Standard	1.50
		Result	9.24
		Decision	O.K
wet		Standard	1.20
		Result	9.03
		Decision	O.K
seismic		Standard	1.10
		Result	7.47
		Decision	O.K

### 3.2 기존 사면안정해석 결과 검토

설계 당시 수행되었던 사면안정해석 결과는 매우 안정한 것으로 나타났다. 하지만 기반암인 이암의 Slaking 및 Swelling 현상으로 인한 강도가 저하가 고려되지 않았다. 또한, 파괴면을 임의로 가정하는 한계평형법은 가정한 파괴면에 따라 극심한 안전율 차이를 보이며, 사면의 형성 과정에 따른 응력이력효과나 지하수에 의한 지반응력의 변화를 고려하기 어려운 단점이 있다. 이러한 요인들로 인해 설계 시 수행된 안정해석은 실제와 상이한 결과를 나타냈다.

## 4. 이암의 공학적 특성을 고려한 안정해석

### 4.1 강도정수 재산정

연구대상사면의 기반암은 미고결된 이암으로써 굴착으로 인한 응력해방과 Slaking 및 Swelling 현상으로 강도가 급격히 저하되어 사면의 붕괴가 발생하였다. 따라서 지반조사당시 산정된 강도정수와 달리 지반의 강도가 저하되었으며 이를 역해석 강도정수를 수정하였다.

강도열화특성은 Bishop et al.(1971)[8], Kim(2002)[3], No(2006)[2], Lee(2013)[1]의 문헌자료와 지반조사 당시 수행된 Swelling-Slaking 시험결과를 고려하였다. 또한, Kim(2014)[9]의 연구에 따르면 이암 절토사면의 안정해석시 강도정수 저감율은 점착력의 경우 기존 대비 36%, 내부마찰각 71%이다. 그러나 이는 과다설계될 가능성이 있다 판단되며 현장 이암의 풍화가 진행될 정도를 고려하여 재산정하였다(Table 11).

Table 11. Redetermination of strength parameter

Division	Regolith	Weathered soil	Weathered rock	soft rock	hard rock
$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	18.0	19.0	20.0 → 19.5	23.0 → 22.0	25.0
c (kPa)	5	15	30 → 20	100 → 50	300 → 200
$\Phi$ (°)	25.0	27.0	33.0 → 25.0	35.0 → 30.0	38.0 → 33.0
E (MPa)	15	30	200 → 100	1,000	10,000
$\nu$	0.38	0.33	0.32 → 0.35	0.27 → 0.28	0.25



## 4.2 강도저하를 고려한 안정해석조건

### 4.2.1 해석방법

수치해석을 통한 사면안정해석의 방법에는 한계평형법(LEM), 응력해석법(SAM), 강도감소법(SRM)이 있다. 이 중 한계평형법과 응력해석법은 파괴면을 가정하여 안정해석을 수행하게 되나, 가정된 파괴면에 따라 안전율의 차이를 보인다. 또한 사면전체의 안전율을 간단히 파악할 수 있지만 지반의 거동은 명확히 파악할 수 없는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 지반 내 응력 및 변형에 대해 보다 정확하게 파악할 수 있는 강도감소법을 이용하여 안정해석을 수행하였다.

강도감소법은 사면의 전단강도( $c, \phi$ )를 조금씩 감소시켜 계산이 수렴되지 않는 지점까지 해석을 수행한다. 수렴되지 않는 시점을 파괴로 간주하고 그 때의 최대 강도저하율을 사면의 최소 안전율로 산정한다. 강도감소법은 강도정수가 정확하다면 현장에서의 지반 거동을 명확히 파악할 수 있으며, 파괴과정뿐만 아니라 파괴 후의 정보도 얻을 수 있는 장점이 있다.

### 4.2.2 안정해석 조건

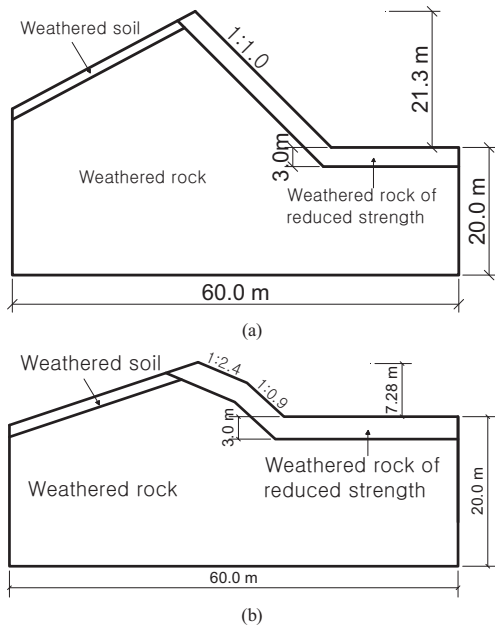


Fig. 3. Cross Section of Analysis  
(a) Design Slope (b) Failure Slope

강도감소법을 통한 안정해석은 지반 전용 유한요소해석 프로그램인 MIDAS Soilworks를 이용하였다. Fig. 3은 해석단면을 나타낸 것이며, 기존 설계단면과 붕괴가 발생한 후 현황측량을 통해 산정한 붕괴단면이다. 절토로 인해 표토층이 제거되어 대기의 영향으로 인해 강도가 저하되는 구간은 일반적으로 알려진 풍화심도 3.0m의 두께로 선정하였다. 지층분포는 표토층이 제거된 현장조건을 반영하여 풍화토층, 풍화암층으로 구성하였다.

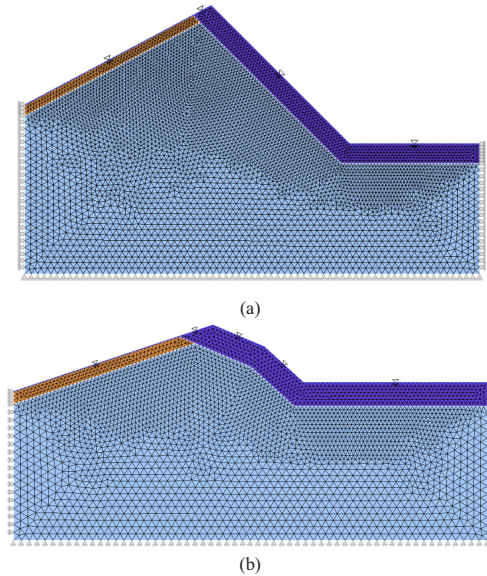


Fig. 4. Mesh of Analysis  
(a) Design Slope (b) Failure Slope

Fig. 4는 해석단면을 토대로 생성한 요소망을 나타낸 것이다. 설계단면의 사면 경사도는 1:1.0이며, 높이는 21.3m이다. 붕괴가 발생한 사면 상부 경사도는 1:2.4, 하부 경사도는 1:0.9이며 높이는 7.28m이다.

### 4.2.3 안정해석 결과

Table 12는 설계단면의 안정해석 결과를 나타낸 것이다. 건기시 최대전단변형률이 작용되는 지점이 사면의 붕괴가 발생한 지점과 일치하는 것으로 나타났으며, 검토 안전율은 1.39로 기준 안전율을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 우기시 수위는 지표면까지 도달하여 사면 전체가 포화되었다고 가정하여 보수적인 해석을 수행하였다. 건기시와 동일하게 붕괴가 발생한 지점에 최대 전단변형률이 작용되었고 검토 안전율은 0.64로 기준 안

전율을 만족하지 못하는 것으로 나타났다.

**Table 12.** Result of slope stability analysis (Design Slope)

season	Image	Safety factor	Index
dry		Standard	1.50
		Result	1.39
		Decision	N.G
wet		Standard	1.20
		Result	0.64
		Decision	N.G

Table 13은 사면의 붕괴가 발생한 단면의 안정해석 결과를 나타낸 것이다. 건기시 사면 뒷기슭부분에서 최대전단변형률이 집중하였고 검토 안전율은 1.83으로 선정되었다. 그러나 사면의 높이가 7.28 m의 낮은 높이임을 고려할 때 상대적으로 낮은 안전율이 나타났다. 우기시는 검토 안전율이 0.88로 기준 안전율인 1.20을 만족하지 못하는 것으로 나타났다.

**Table 13.** Result of slope stability analysis (Failure Slope)

season	Image	Safety factor	Index
dry		Standard	1.50
		Result	1.83
		Decision	O.K
wet		Standard	1.20
		Result	0.88
		Decision	N.G

## 5. 사면 보수방안 대책

### 5.1 사면 보수보강 공법 검토

절토사면의 보수보강 공법으로는 경사완화 및 구조물

에 의한 보강공법과 표면보호공법, 낙석방지공법, 배수공법이 있다. 그러나 대상 사면은 미고결된 이암이 기반암이고, 현재 굴착 및 풍화로 인해 Swelling-Slaking 현상이 발생되어 강도가 급격히 저하된 상태이다. 그로 인해 보강공법을 적용할 경우, 충분한 지지력과 전단강도의 증가 효과를 기대할 수 없다. 그리고 시간 경과에 따라 전단강도가 지속적으로 감소되고 우수의 유입 시 점토화가 될 가능성이 농후하다. 그로 인해 보수방안은 사면의 경사를 완화시켜 사면 자체의 활동력을 저하시킴으로써 안정을 확보하는 경사 완화공법을 적용하는 것이 공학적으로 적절하다.

### 5.2 사면 완화 경사 결정

사면의 안전성을 확보하기 위한 경사도를 산정하기 위해 강도감소법을 통한 유한요소해석을 수행하였다. 강도정수는 Table 11과 같으며, 단면은 Fig. 3(a) 설계단면을 이용하였다.

Table 14는 사면 완화 경사 결정을 위한 유한요소해석 결과이다. 경사도 1:2.2에서 건기시 우기시 기준 안전율을 만족하였다.

**Table 14.** Result of slope mitigation

Slope (Deg)	Dry season		Wet season	
	FOS	Decision	FOS	Decision
1:2.0 (27°)		2.43		1.14
		O.K		N.G
1:2.1 (25°)		2.56		1.18
		O.K		N.G
1:2.2 (24°)		2.59		1.23
		O.K		O.K
1:2.5 (22°)		3.00		1.29
		O.K		O.K

결정된 완화 경사의 현장 적용성 파악을 위해 시추공 영상촬영(BIPS)을 수행하여, 이를 비교하였다.

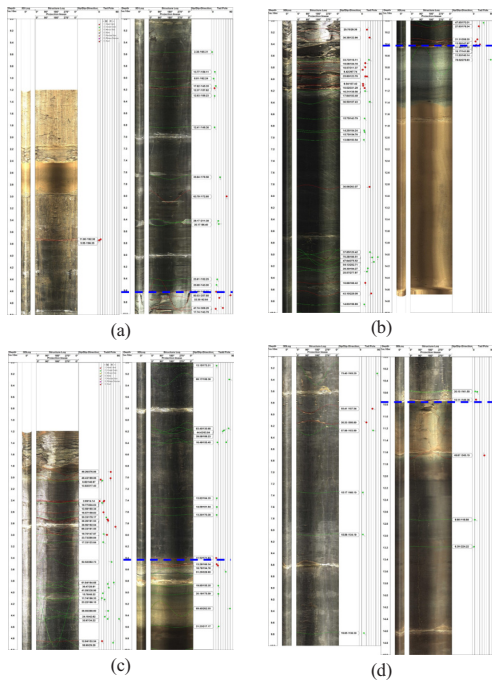


Fig. 5. Result of Borehole image processing system  
(a) NCB-13 (b) NCB-13-1  
(c) NCB-13-2 (d) NCB-13-3

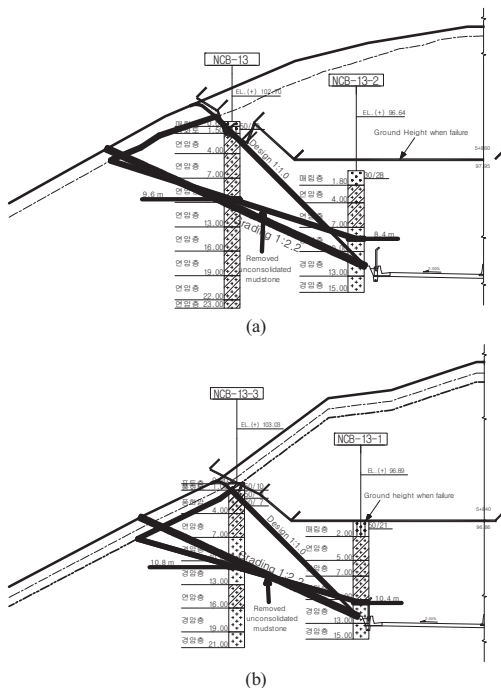


Fig. 6. Comparing of BIPS and mitigation slope  
(a) NCB-13, NCB-13-2  
(b) NCB-13-1, NCB-13-3

Fig. 5는 시추공영상촬영 결과를 나타낸 것이고, Fig. 6은 시추공영상촬영과 사면 경사 완화 공법을 비교한 것이다.

공내영상촬영과 사면 경사 완화 공법 적용 결과를 비교한 결과, 유한요소해석을 통해 산정된 사면 완화 경사를 적용할 경우 미고결된 이암의 대부분이 제거되는 것으로 나타나며, 미고결된 기반암으로 인해 발생하는 추가적인 사면 붕괴의 위험성이 현격히 감소된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 ○○ 고속국도 공사 중 발생한 이암 절토 사면의 붕괴 요인을 분석하고 보수방안을 제시하였다. 연구를 통해 도출한 결론은 다음과 같다.

- 1) 대상 사면의 현장답사 및 시추조사 결과, 퇴적층을 따라 미고결된 이암이 대기 중에 노출되어 있었으며, 보통-매우심한 풍화도를 보이고, 보통-매우심한 균열을 보였다.
- 2) 붕괴 사면의 기반암인 이암 시료에 대해 실내시험을 수행한 결과, 풍화내구성은 낮은-보통으로 나타났다, 체적팽창성은 매우 낮은 것으로 나타났다.
- 3) 이암의 강도열화특성을 고려하여 안정해석을 수행한 결과, 설계단면을 적용하였을 경우 최대전단변형률이 작용하는 지점이 사면의 붕괴가 발생한 지점과 일치하는 것으로 나타났으며 기준 안전율을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 또한 붕괴단면을 적용하였을 경우 불안정한 것으로 나타났다.
- 4) 사면 보수보강 공법을 검토한 결과, 굴착 및 풍화와 우수의 유입으로 인해 Swelling-Slaking 현상이 발생되었고, 그로 인해 기반암은 강도가 급격히 저하된 상태이다. 지반 보강공법을 적용할 경우 충분한 지지력과 전단강도의 증가 효과를 기대할 수 없으며, 사면 경사 완화공법이 가장 적절한 것으로 판단된다.
- 5) 사면 완화 경사를 산정하기 위해 유한요소해석을 수행한 결과, 경사도 1:2.2 에서 안정한 것으로 나타났고, 현장 적용성 파악을 위해 시추공영상촬영과 비교한 결과, 미고결된 이암의 대부분이 제거되는 것으로 나타났다. 따라서, 사면 경사 완화공법



을 적용할 경우 이암으로 인한 추가적인 붕괴의 위험성은 현격히 저하되며 공학적으로 안정한 상태가 될 것이다.

- 6) **Swelling-Slaking** 현상으로 인한 이암의 공학적 특성은 매우 불안정하며, 추가적인 연구를 통해 암반의 팽창변형률에 대한 명확한 기준과 **Swelling-Slaking** 현상과 전단강도 간의 상관관계 규명이 필요하다.

## References

- [1] H. Y. Lee, "Engineering Properties of Uncemented Mudrock in Yeosu Area, Gyeonggi-Do", Thesis, Department of Civil-Environment Engineering Graduate School Dankook University, 2013.
- [2] K. M. No, "The Study of Slaking and Residual Strength of The Mudston", Thesis, Department of Civil Engineering Graduate School Yeungnam University, 2006.
- [3] K. W. Kim, "Shear and Compression Characteristics of Mudstone Sedimentary Soils Based on Slaking", Thesis, Department of Civil Engineering Graduate School Dongshin University, 2002.
- [4] B. C. Jeon, S. G. Lee, Y. M. Kim, S. R. Chung, "The Effect of Rainfall on the Stability of Mudstone Slope in Consideration of Collapse Record", Journal of the Korean Geotechnical Society, vol. 25, no. 2, pp. 55-66, 2009.
- [5] G. B. Jeong, "The Study of Engineering Properties of Pohang Mudstone and Strain Behavior", Thesis, Ph. D, Department of Civil Engineering Graduate School Yeungnam University, 2006.
- [6] J. C. Gamble, "Durability-plasticity classification of shale and other argillaceous rocks", Thesis, Ph. D, Illinois University, 1971.
- [7] Uniform Building Code, UBS Standard no. 29-2, 1968.
- [8] A. W. Bishop, G. E. Green, V. K. Garga, A. Andressen, J. D. Brown, "A new ring shear application to the measurement of residual strength", *Geotechnique*, vol. 21, no. 4, pp. 273-328, 1971.  
DOI: <https://doi.org/10.1680/geot.1971.21.4.273>
- [9] H. Kim, "Evaluation of Strength Parameter Reduction Rate on Cut Slope Stability Analysis of Mudstone Fracture Zone", Thesis, Department of Civil Engineering Graduate School Joongbu University, 2014.

박민철(Min-Cheol Park)

[정회원]



- 2010년 2월 : 금오공과대학교 토목공학과 (공학사)
- 2012년 2월 : 금오공과대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2016년 2월 : 금오공과대학교 대학원 토목공학과 (공학박사)
- 2016년 2월 ~ 현재 : 금오공과대학교 응용지반연구실 박사후연구원

<관심분야>

토질 및 기초, 사면안정, 보강토 옹벽