

개착사면의 붕락요인 분석 및 보강거동 계측

조태진¹⁾, 이상배^{2)*}, 이근호³⁾, 황택진⁴⁾, 강필규⁵⁾, 원병남⁶⁾

Identification of Dominant Cause of Cut-Slope Collapse and Monitoring of Reinforced Slope Behavior

Tae-Chin Cho, Sang-Bae Lee, Guen-Ho Lee, Taik-Jean Hwang, Pil-Gue Kang, Byung-Nam Won

Abstract Failure aspects of cut-slope, which induce the sequential collapses during the excavation stage, have been analyzed. Slope rock structures are investigated by examining the orientations and positions of discontinuity planes calculated based on the BIPS image inside the boreholes. Drilled core log has been also used to identify the structural defects. Clay minerals of swelling potentials are detected through XRD analysis. Numerical analysis for slope stability has been performed by utilizing the joint shear strength acquired from the direct joint shear test. Cut-slope collapse characteristics have been studied by investigating the posture of failure-prawn joint planes and the stability of tetrahedral blocks of different sizes. Cross-section analysis has been also performed to analyze the cut-slope behavior and to estimate the amount of reinforcement required to secure the stability of cut-slope. Behavior of reinforced cut-slope is also investigated by analyzing the slope monitoring data.

Key words Cut-Slope, Shear Strength, Cross-Section Analysis, Block Analysis, Reinforcement, Monitoring

초 록 개착과정에서 붕락현상이 발생한 암반사면의 거동양상을 분석하였다. 개착사면 암반의 특성 분석을 위하여 시추작업을 수행하였으며, BIPS 영상 분석을 통하여 불연속면의 방향성과 시추공 내의 출현 위치를 측정하였다. 회수된 코어를 관찰하여 암반 내부의 구조적 취약성을 고찰하였다. 절리면에 협재된 팽윤성 점토광물의 조성을 X-선 회절분석을 통하여 조사하였으며, 직접전단실험을 수행하여 절리면 전단강도를 측정하였다. 사면과 괴를 유발시킬 수 있는 절리들의 위치 및 방향성을 고려한 블록해석을 수행하여 규모별 블록안정성을 산출하였다. 횡단면 해석기법을 이용하여 개착과정 중에 발생할 수 있는 지반거동 양상을 분석하였으며, 안정성 확보를 위하여 소요되는 보강량을 산정하였다. 보강작업이 수행된 개착사면의 추가적인 거동양상을 계측 해석을 통하여 고찰하였다.

핵심어 개착사면, 전단강도, 횡단면 해석, 블록해석, 보강, 계측

1. 서 론

개착사면의 안정성 확보는 지반 구조물의 전체적인 기능성을 결정하는 매우 중요한 사항이다. 개착사면의

안정성 해석을 위하여는 개착 암반의 구조적 특성과 파괴유발 요인에 대한 정밀한 분석이 수행되어야 한다. 암반의 구조적 특성을 해석하여 역학적 측면에서 활용할 수 있는 다양한 기법들이 개발되어 있다. 대표적으로 불연속면 법선 벡터들의 eigenvalue 산정에 의한 fabric shape 분석법(Woodcock, 1977), 풍화된 암반의 균열상태를 측정하여 fabric tensor를 해석하는 방법(Oda, 1982), 반구투영도 상의 극점분포에 대한 1% contour 면적($A_{1\%}$)과 최대 집중도(C_{max})를 산정하여 절리분포패턴(defect pattern)을 규명하고 사면 개착 방향성에 연관된 암반강도를 추정하는 방법(Read et al., 2003) 등이 활용되고 있다. 암반사면의 거동에 직접적으로 영향을 끼치는 불

¹⁾ 부경대학교 에너지자원공학과 교수

²⁾ (주)락인포 연구개발부

³⁾ (주)호승이앤씨 대표

⁴⁾ 동의대학교 토목공학과 교수

⁵⁾ 한국도로공사 흥천양양건설사업단 15~16공구 책임감독

⁶⁾ 한국도로공사 충청지역본부 도로팀 도로시설차장

* 교신저자 : rocinfo@naver.com

접수일 : 2010년 12월 31일

심사 완료일 : 2011년 1월 18일

게재 확정일 : 2011년 2월 15일

연속면의 전단 특성은 Barton et al.(1985)을 위시한 수많은 학자들에 의해 연구되었으며, 절리면 내의 팽윤성 점토광물의 존재성과 사면 안정성에 대한 영향이 황 등(1999)에 의해 조사되었다. 개착사면 설계를 위한 예비적 안정성 해석기법으로는 반구투영법(Hoek and Bray, 1974)에 의거한 도시적 해석, RocPlane 또는 Talren 모델을 사용한 수치해석적 평면 및 원형파괴 해석, Swedge 모델 등을 사용하여 개착면에 형성 가능한 썩기블록들에 대한 해석들이 사용되었다. 최근에는 개착사면에서의 현실적인 안정성 해석을 수행하기 위하여 DOM 시추기법(Yoon et al., 2003) 또는 BIPS 영상해석기법(Raax, 1997)을 활용하여 사면 내부에서의 불연속면 분포와 지반구조를 정량적으로 분석하여 개착사면의 점진적인 슬라이딩 방향을 고찰하는 연구(조태진 외, 2004) 및 개착면에서의 표출성을 검토하고 개별 절리면의 잠재적 거동성을 고찰하여 계측 결과를 해석하는 연구(조태진 외, 2006)가 수행되어졌다. 본 연구에서는 연쇄적인 붕락 거동이 발생된 개착사면에서 절리 분포 및 지반구조 특

성을 BIPS 영상해석 결과에 의거하여 결정론적으로 분석하고, 사면붕락 양상에 대한 지반역학적 속성을 횡단면 해석기법을 이용하여 고찰하였다. 개착사면 보강지구역에 계측 시스템을 설치하고 자료해석을 수행하여 추가 거동양상을 분석하였다.

2. 사면 현황

연구대상 사면(그림 1, 2 참조)은 연장 350 m, 높이 55 m인 대규모 개착사면이다. 기반암은 사암과 셰일 등의 퇴적암으로 구성되어 층리가 발달되어 있고, 국지적으로 관입된 화강암은 풍화대를 형성하고 있다. 사면 거동에 매우 불리한 방향성을 지닌 단층들이 지역적으로 분포하며, 단층면에는 점토물질이 충전되어 있다. 전반적으로 사면 하부지역에서는 층리, 절리 및 단층분포에 의해 블록상 형태(Terzaghi, 1946)를 나타내며, 상부지역에서는 화강암 관입부의 풍화작용이 상대적으로 급속하게 진행되어 있다. 단층 및 절리면을 통하여 지하수가 유출되지는 않으나 단층 점토층은 매우 습한 상태를 유지하고 있다. 사면 개착부 상부지역에는 붕적층이 발달되어 있다. 최초 개착설계에서는 사면 암반의 구조적 특성을 반영하지 않고 일반적인 개착경사 기준을 적용하여 개착작업을 수행하였다. 국지적인 보강작업에도 불구하고 개착부 중앙지역에서 3 차래 붕락현상이 발생하였다. 영구적인 안정성 확보를 위해 중앙지역에 계단식 옹벽을 포함하여 록앵커 등을 설치하였으며, 추가적인 거동 예측을 위해 자동계측시스템이 설치되었다.

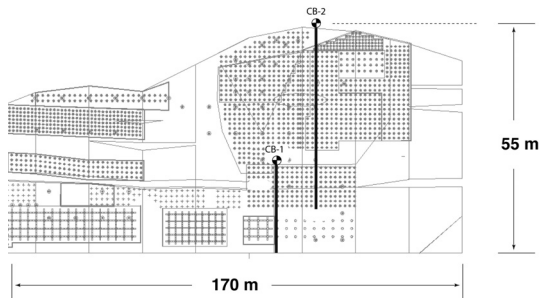


그림 1. 개착사면 설계도



(a)



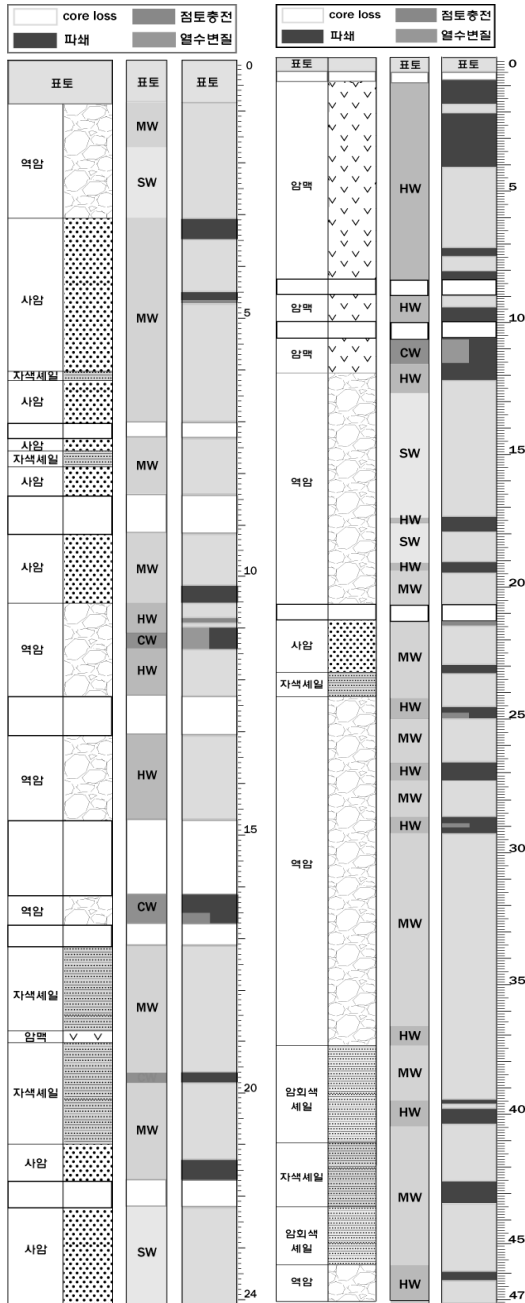
(b)

그림 2. 연구대상 사면. (a) 중앙부의 붕락 양상, (b) 보강작업

3. 지반 구조

3.1 시추코어 분석

사면 암반의 암석학적 및 구조적 특성을 분석하기 위



(a) 시추공 CB-1

(b) 시추공 CB-2

그림 3. 시추코어 상태

하여 2개 지점에서 시추작업을 수행하였다(그림 1 참조). CB-1 지점에서는 20 m 소단 상부에서 표층 심도 25 m까지 시추작업을 수행하였으며, CB-2 지점에서는 개착면 상부지역 표고 55 m 지점에서 표층 심도 47 m 까지 시추작업을 수행하였다.

시추공 CB-1에서 회수된 시추코어를 이용하여 사면 암반의 지질구조 특성 분석을 수행하였다. 심도 1~24 m 구간에서는 역암, 사암 및 셰일층이 혼재되어 있으며, 심도 19 m 지점의 자색 셰일층 내에는 암맥이 형성되어 있다(그림 3(a)). 암석의 풍화정도는 대부분 보통 풍화(moderately weathered, MW) 상태이다. 심도 10~17 m 구간에서는 풍화도가 급격히 증가하여 심한 풍화(HW) 상태를 나타내며 국부적으로 열수변질을 받아 완전풍화(completely weathered, CW)된 지층이 협재되어 있다. 특히, 심도 15~17 m 구간에서는 매우 취약한 시추조건을 반영하는 코어 미회수 구간과 완전 풍화된 역암층이 존재하여 역학적 특성이 가장 저하되어 있다.

시추공 CB-2에서 심도 12 m 까지는 마그마 관입에 의해 형성된 암맥이 분포하고 있으며, 하부 심도 37.5 m 까지는 역암, 최하부에는 셰일층이 약 8 m 두께로 분포한다(그림 3(b)). 심도 10 m 지점에서는 완전 풍화된 구간과 코어 미회수 구간이 집중되어 있어 역학적으로 가장 취약한 부분으로 고찰된다. 또한 역암과 사암의 경계부인 심도 21 m 지점은 코어 미회수 구간이 분포하고 사암에서는 점토 충전물이 존재하여 사면 전단 강도를 저하시킬 수 있는 요인으로 판단된다. 역암층 심도 25 m 및 29 m 지점도 심하게 풍화되고 점토가 충전되어 있어 연약대 특성을 지닐 것으로 사료되며, 셰일층 심도 40 m 지점도 매우 풍화되고 파쇄되어 역학적 불안정성을 야기시킬 수 있을 것으로 판단된다.

3.2 암반구조해석

개착사면 암반의 구조적 특성을 분석하기 위하여 시추공 CB-1과 CB-2(그림 1 참조)에서 BIPS 영상을 촬영하여 불연속면의 방향성과 시추공 내에서의 위치를 산정하였다. 시추공 CB-1 경우 표층심도 2.1~24.0 m 구간에서 총 140개 불연속면이 관찰되었다. 공내영상에 기록된 불연속면 자취선의 두께에 의거하여 판별된 개구성 불연속면은 38개이며, 폐쇄성 불연속면은 102개이다. 시추공 CB-2 경우 표층심도 2.8~44.2 m 구간에서 총 176개 불연속면이 관찰되었다. 자취선 영상 두께에 의거하여 판별된 개구성 불연속면의 수효는 78개이며, 폐쇄성 불연속면은 98개이다. CB-1 시추공에서의 개구성 불연속면 비율은 27.1%이며, CB-2 시추공에서는 44.3%로 증가된 양상을 나타낸다. 이는 시추공 CB-2

구역의 암반상태가 상대적으로 이완되어 있어 사면거동이 매우 불리한 양상인 것을 지시한다.

시추공 CB-1 및 CB-2 구역에서의 불연속면 군집성을 추출하고 대표 방향성을 산정하였다. 시추공 CB-1에서 측정된 불연속면 방향성에 대해서 $\text{con} = 15^\circ$ 를 적용하여 군집 알고리즘(Mahtab and Yegulalp, 1982)을 이용한 해석을 수행한 결과 2개의 불연속면 군(이하 '절리군'으로 지칭)이 형성되었다(그림 4(a)). 제 1 절리군의 대표 방향성은 054/30 이며, 절리군에 소속된 극

점 분포범위가 넓어 군집성 척도인 Fisher 상수 = 10.9로 상당히 낮은 편이다. 제 2 절리군의 대표 방향성은 298/64로 산정되었으며, Fisher 상수 = 43.6으로 매우 높은 군집성을 나타낸다. 시추공 CB-2에서는 총 3개의 절리군이 형성되었으며(그림 4(b)), 절리군의 대표 방향성과 Fisher 상수(K)는 다음과 같다. 제 1 절리군 = 312/52 (K=23.1); 제 2 절리군 = 128/39 (K =61.2); 제 3 절리군 = 044/19 (K=35.9).

시추공에서 촬영된 BIPS 영상에 근거하여 TCR = 100%

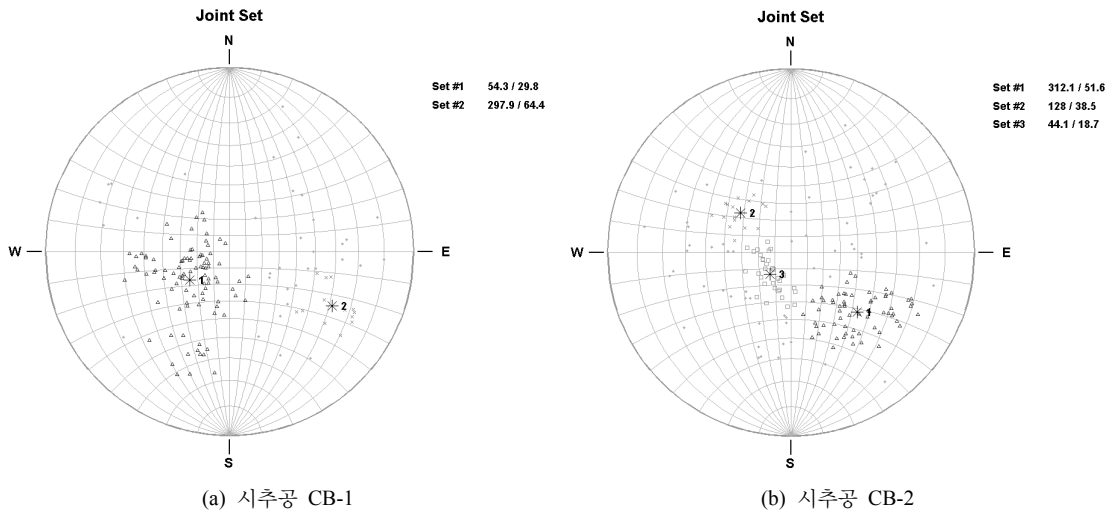


그림 4. 절리 군집성 해석 결과

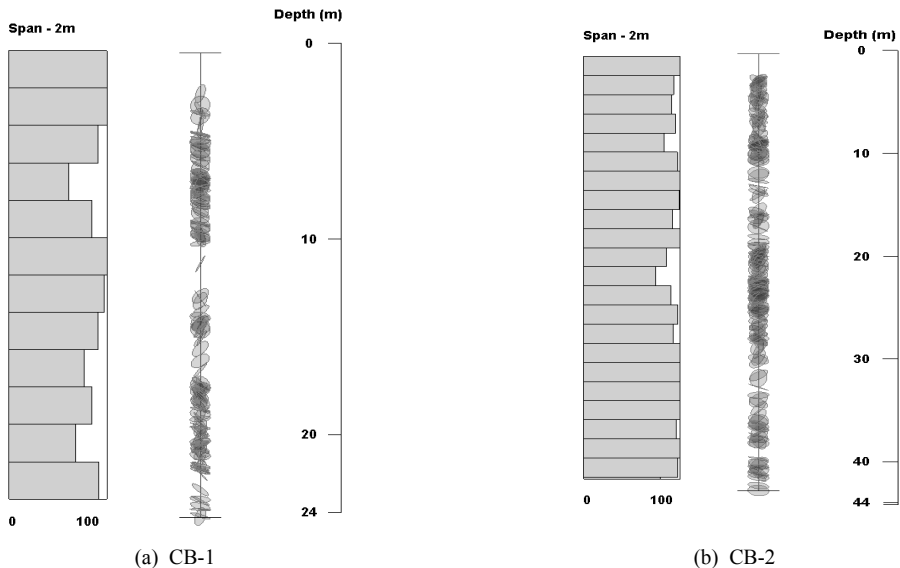


그림 5. RQD 산출결과

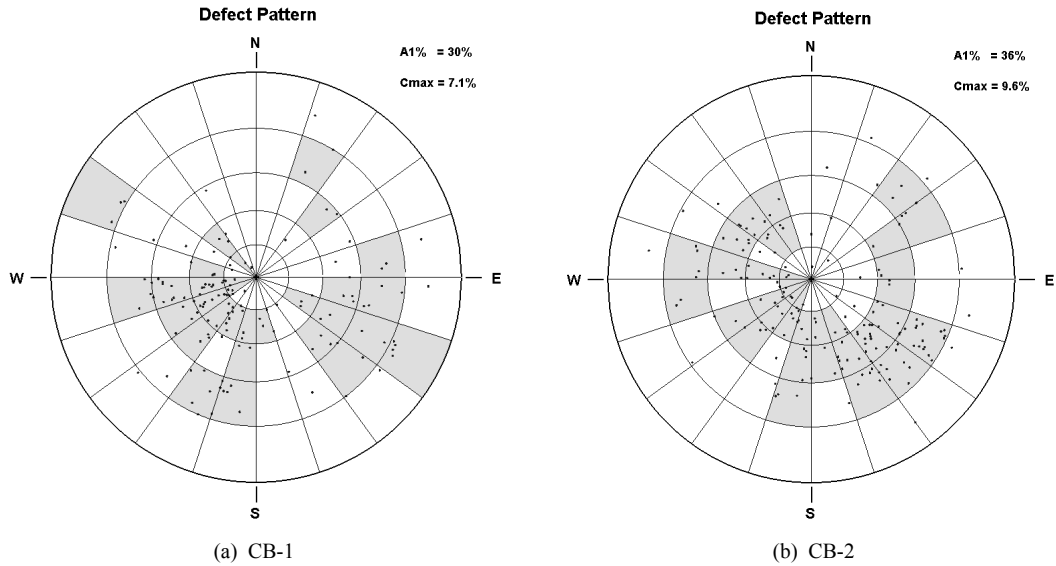


그림 6. Defect Pattern

경우를 가정하고 RQD 분석을 수행하였다. 시추공 CB-1 경우에는 전체 시추구간에서의 RQD = 87.1%이다(그림 5(a)). 구간별로는 표층심도 5~10 m 구간, 특히 6~8 m 구간에서 최저치인 61%를 나타내어 공학적으로 매우 취약한 구간으로 추정된다. 시추공 CB-2 경우에는 전체 시추구간에서의 RQD = 94.8% 이어서(그림 5(b)) 전반적으로 양호한 상태를 나타낸다. 구간별로는 심도 20~25 m 구간, 특히 22~24 m 구간에서 최저치인 74.7%가 산정되었다.

평사투영도상의 불연속면 극점 분포를 이용하여 1% contour 면적(A_{1%})과 최대 집중도(C_{max})를 산정하고 불연속면의 defect pattern(Read et al., 2003)을 규명하였다. 시추공 CB-1 경우에는 A_{1%} = 30%, C_{max} = 7.1% 인 moderately regular pattern을 나타낸다(그림 6(a)). 해석대상 개착사면의 경사방향이 012°인 점을 고려할 때 시추공 CB-1 구역의 불연속면은 사면 암반의 역학적 강도를 상당히 저하시키는 영향을 끼칠 수 있을 것으로 사료된다. 시추공 CB-2 경우에는 A_{1%} = 36%, C_{max} = 9.6% 인 moderately regular~random pattern을 나타낸다(그림 6(b)). A_{1%} 분포가 CB-1 경우에 비해 확장되었으나 경사방향 012° 영역에서의 극점 수효가 유사하여 절리 패턴에 의한 강도지수 저하는 동일한 것으로 고찰된다.

4. 역학적 특성

시추공 CB-1 및 CB-2에서 추출한 코어시료를 이용

하여 암석의 물리적 및 역학적 특성을 분석하고 결과를 표 1과 표 2에 수록하였다. 공극율의 경우 사암, 세일, 역암에서는 퇴적암의 일반적인 범주 내인 2.0~3.7% 범위를 갖으나, 암맥에서는 화성기원 암석의 범주를 상회하는 2.2%를 나타내고 있다. 이는 암맥이 심하게 풍화된(HW) 상태를 지시하며, 비중(specific gravity) 산정결과를 고찰하여 확인될 수 있다. 보통 풍화된(MW) 사암의 경우에 가장 높은 2.63을 나타내며, 역암과 세일에서는 각각 2.62 및 2.60을 나타낸다. 심하게 풍화된 역암에서는 2.61로 비중이 감소되어 있으며, 암맥의 경우에는 성인이 마그마 관입임에도 불구하고 암석의 풍화작용이 활발히 진행되어 가장 낮은 비중치 2.56을 갖

표 1. 암석의 물리적 특성

시추공	심도 (m)	암종 (풍화도)	Porosity (%)	Specific gravity
CB-1	10.20	사암 (MW)	2.81	2.63
	13.60	역암 (HW)	2.00	2.61
CB-2	5.90	암맥 (HW)	2.15	2.56
	33.75	역암 (MW)	3.69	2.62
	41.40	세일 (MW)	3.29	2.60

표 2. 암석의 역학적 특성

시추공	심도 (m)	암종 (풍화도)	UCS (MPa)	Static		Dynamic		Wave Velocity (m/sec)	
				Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Young's Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	P-파	S-파
CB-1	10.20	사암 (MW)	71.95	23.7	0.147	37.15	0.035	3,818	2,650
	13.60	역암 (HW)	128.09	24.7	0.193	39.96	0.049	3,965	2,731
CB-2	5.90	암맥 (HW)	36.07	61.3	0.039	60.01	0.032	4,896	3,405
	33.75	역암 (MW)	50.75	37.9	0.051	29.90	0.057	3,454	2,367
	41.40	셰일 (MW)	36.44	15.0	0.044	30.40	0.207	3,684	2,239

표 3. 절리면 전단강도

시추공	심도 (m)	암종 (풍화도)	JRC	JCS (MPa)	Cohesion (kPa)	Friction (°)	
						Peak	Residual
CB-1	2.95	역암 (SW)	8~10	59.0	0.005	23.16	22.35
	8.20	사암 (HW)	8~10	41.5	0.013	27.41	24.45
CB-2	32.20	역암 (MW)	12~14	22.0	0.041	37.59	32.77
	41.40	셰일 (MW)	6~8	46.0	0.037	37.50	33.31

고 있다.

일축압축강도는 시추공 CB-1 지점의 코어가 CB-2 지점의 코어보다 높게 측정되었다. 도로면을 기준으로 상대적으로 높은 고도에 위치한 시추공 CB-2에서 회수된 암석들의 풍화가 활발하게 진행되었으며, 이에 따라 강도 저하가 현저하게 발생된 것으로 판단된다. 압축실험을 수행하여 산정한 정탄성 상수는 일반적인 경향과 부합되게 탄성과 속도 측정에 의해 산정된 동탄성 상수보다 전반적으로 약간 낮은 수치를 나타낸다. 한편 CB-2 경우에 정탄성 상수인 포아송비가 극도로 저하되어 있어 풍화에 의해 암석 고유특성이 상당히 훼손된 것을 지시한다.

시추공 CB-1 및 CB-2에서 회수된 코어에서 4개 절리시료를 추출하여 전단강도 특성을 분석하고, 결과를 표 3에 수록하였다. 프로파일 게이지를 이용하여 측정된 절리면 거칠기(JRC)는 역암과 사암에서는 8~14, 셰일에서는 6~8 정도를 나타낸다. 절리면에 직접 Schmidt

Hammer 실험을 수행하여 획득한 절리면 압축강도(JCS)는 약간 풍화된(SW) 역암에서 최대값 59.0 MPa, 보통 풍화된 역암에서 최소값 22.0 MPa가 산정되었다. 사암과 셰일에서는 중간 정도인 41.5 MPa 및 46.0 MPa 강도값이 측정되었다. JCS 측정치를 암석의 일축압축강도(표 2)와 비교할 때 셰일을 제외한 역암 및 사암의 절리면 압축강도는 모암의 압축강도보다 다소 저하되어 있다.

Mohr-Coulomb 파괴이론에 근거한 절리면의 전단강도 계수인 점착력(cohesion)과 마찰각(friction angle)을 서보제어전단시험기를 활용하여 측정하였다. 4개 절리시료에서 공통적으로 점착력은 매우 미미하였다. 마찰각은 절리 암반의 풍화상태와 거칠기에 의한 영향이 복합적으로 반영되어 일정한 경향을 형성하지는 않으나, 시추공 CB-1에서는 23~27°, CB-2에서는 37.5° 정도의 상대적으로 높은 마찰각을 보유한다. 잔류마찰각은 일반적인 경향에 부합되게 침단 마찰각보다 작게 측정

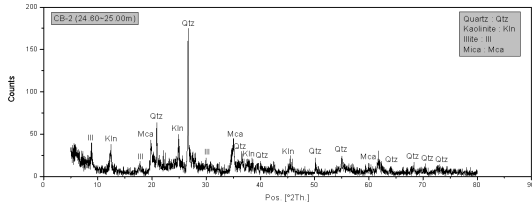


그림 7. X-선 회절분석 결과(시추공 CB-2 : 24.60~25.00 m)

되었으나 마찰각 감소정도가 매우 제한적이다. 이는 전단강도 표면에 이용된 절리시료의 표면이 풍화되어 첨단마찰각이 원천적으로 저하되어 있는 것에 기인하는 것으로 고찰된다.

풍화 및 변질에 의한 2차 변질광물 및 점토광물의 형성과 종류를 파악하기 위하여 시추공 CB-2 3개 지점에서 시료를 채취하고 X-선 회절(X-Ray Diffraction, XRD) 분석을 실시하였다. 시추공 CB-2의 21.32~20.50 m 구간은 심한파쇄 구간이며, X-선 회절분석 결과 구성광물은 조암광물인 석영이 주종을 이루고 있다. 절리면이 심하게 파쇄되고 풍화에 의해 점토화가 진행된 24.60~25.00 m 심도구간에서는 석영, 고령토, 일라이트(illite) 및 운모(mica)가 관찰되었다(그림 7). 심한 풍화구간인 28.70~29.30 m 심도구간에서는 석영, 고령토, 일라이트 및 몬모릴로나이트(montmorillonite)가 발견되었다. 결과적으로 팽윤성 점토광물이 분포하는 시추공 CB-2 구역에서는 강우나 지하수 유동에 의해 사면 안정성이 상당 수준 저하되었을 것으로 판단된다.

5. 사면해석

해석 대상 사면은 20 m 소단을 기준으로 하부지역과 상부지역으로 구분된다. 하부지역은 옹벽 + 락앵커가 설치되어 있으며, 경사는 54.5°(1:1.5)이다. 상부지역은 소일네일링 + 숏크리트가 설치되어 있으며, 국지적으로 락앵커가 시공되어 있다. 3차에 걸친 암반 붕괴로 인해 경사도가 일정하지 않으나 전체적으로는 41.8°(1:0.9)를 유지하고 있다. 본 연구에서는 암반붕락이 유발된 상부지역에 해석영역을 설정하였다(그림 8). BIPS 영상 해석에 근거하여 도출된 불연속면의 위치 및 방향성 자료와 절리면 전단실험을 수행하여 획득한 전단강도 계수를 이용하여 사면해석을 수행하였다. 절리면 관찰이 시추공 내부에서 수행되어서 연장성 측정이 매우 곤란하기 때문에 절리 연속성을 무한대로 가정하고 블록해석 및 횡단면 해석을 수행하였다.

시추공 CB-2에서 회수된 절리 시험편을 이용하여 측

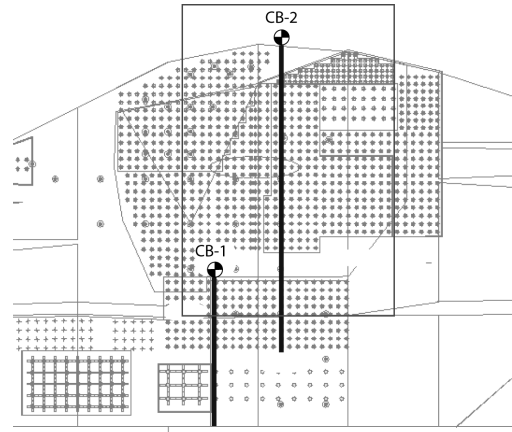


그림 8. 사면해석 영역

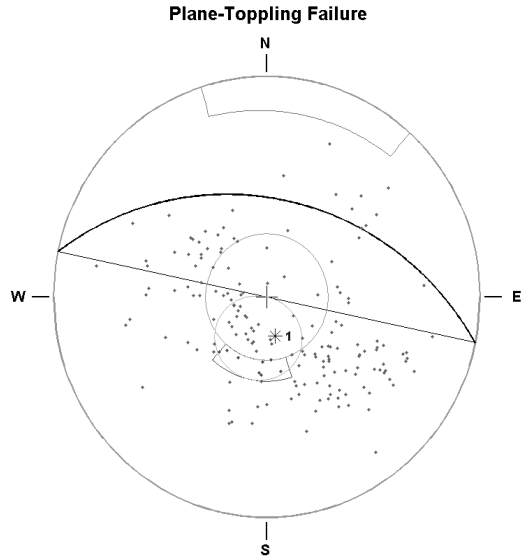


그림 9. 평사투영해석(평면 및 전도파괴)

정된 절리면 잔류전단강도 $\phi_r = 32^\circ$ 에 의거하여 평사투영해석을 수행하였다. 절리군 대표 방향성은 상대적으로 낮은 경사각에 기인하여 평면파괴 영역 외부에 위치하나(그림 9), 극점들이 집중적으로 분포되는 지점이 파괴영역에 근접되어 있어 평면파괴가 유발될 잠재성이 높은 것으로 고찰된다. 개별 절리들의 극점 위치를 고려하면 총 8개 절리면이 평면파괴를 유발시킬 수 있으며, 전도파괴에 대한 잠재성을 지닌 절리면은 분포하지 않는 것으로 분석되었다. 시추공 상부에서 관찰된 평면파괴를 유발시킬 수 있는 절리면들은 개착면에 표출되어, 평면파괴를 유발시킬 수 있다(그림 10 참조). 이와

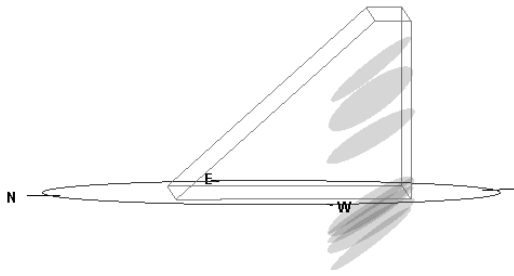


그림 10. 평면파괴 절리의 표출성

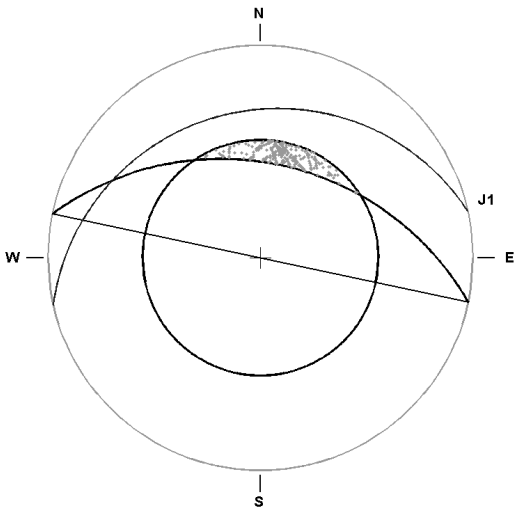


그림 11. 평사투영해석(썩기파괴)

같은 사실은 그림 2에 도시된 실제 사면 파괴양상에 반영되어 있다. 사면 붕괴는 다수 블록들의 붕락에 의해 유발되었으며 상부지역의 평면파괴 절리면은 블록들의 미끄러짐 면을 형성하여 붕락경로를 제공하고 있다. 절리면들이 상호 교차하여 형성된 교선(잠재적 썩기블록의 기저선)의 방향성은 썩기파괴가 유발될 수 있는 가능성이 상당히 높은 것을 지시한다(그림 11).

개착면에 형성되는 사면체 블록들 중에서 가장 규모가 작은 낙석 블록들의 분포양상을 그림 12에 도시하였다. 낙석들은 개착면 중앙부에 표출되는 2개 절리면과 연계되어 연쇄적으로 분포되고 있으며, 좌측부에는 독자적인 낙석블록들이 형성되어 있다. 낙석들의 부피는 0.8 m³ 이하인 것이 대부분이며, 안전율은 0.7~1.5 범위에서 한계평형상태에 접근된 상태인 것으로 판단된다.

슬랩블록의 분포양상도 낙석의 경우와 매우 유사하다. 개착면 중앙부에는 연쇄적으로 슬랩블록이 형성되어 있으며, 좌측부와 중앙 상부지역에 독자적인 슬랩블록들

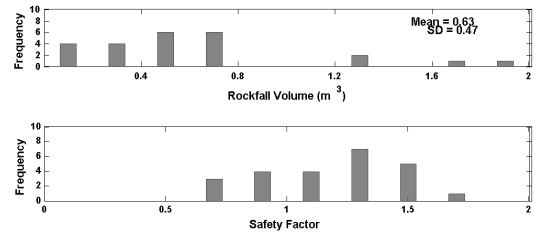
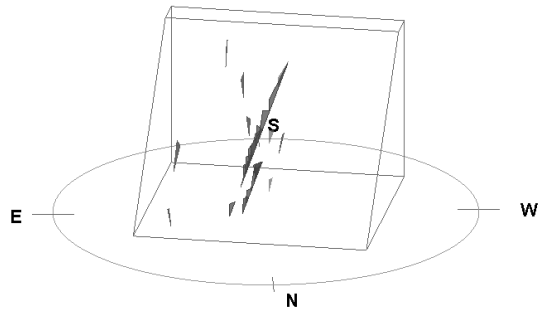


그림 12. 낙석 블록

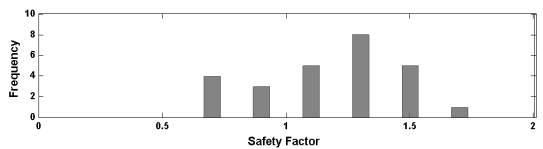
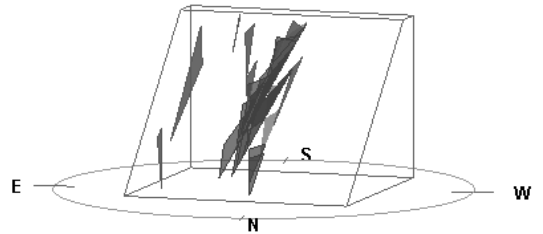


그림 13. 슬랩 블록

이 분포한다(그림 13). 연쇄적으로 형성된 슬랩블록들은 동일 기저선을 공유하며, 전체적으로 안전율 0.7~1.5 사이에서 한계평형상태에 접근된 상태인 것으로 고찰되었다.

사면체 블록의 정점이 개착면 기준 심도 2.0 m 이상에 위치하는 웨지블록의 분포양상도 낙석 및 슬랩블록 경우와 매우 유사하게 개착면 중앙부에 집중적으로 분포한다. 최저 안전율을 보유하는 최대위험 블록은 개착면 중앙부 상단에 위치한다(그림 14). 블록들의 안전율도 0.75~1.50 범위를 갖는 것으로 산정되었다.

블록파괴 양상이 집중되어 있는 해석사면 중앙부에 횡단면을 설정하고, 횡단면 상에 분포된 개착면 심도 5

m 정도의 썩기블록에 대한 안정성을 분석하였다(그림 15). 절리면 전단시험을 수행하여 측정된 사면체블록의 잔류전단강도 $\phi_3 = 32^\circ$ 를 적용시킬 경우 건조시기에도 안전율이 0.9 정도이며, 블록내의 지하수위가 3 m 상승하면 안전율은 0.6 이하로 저하된다. 건조시기에 안전

율을 1.5로 증가시키기 위해서는 단위면적당 1.09 ton의 보강력이 소요되는 것으로 분석되어서 자연상태에서 사면 안정성이 매우 취약한 것을 나타낸다.

6. 계 측

개착사면에서 붕괴가 발생된 중앙 구간에 계측기를 설치하고 자동화 계측시스템을 구축하였다(그림 16 참조). 계측기가 설치된 사면구간은 20 m 소단을 기준으로 하부에는 용벽 + 앵커보강, 상부에는 록볼트 + 슛크리트 보강이 완료되어 있다. 일반적으로 사면거동에 가장 큰 영향을 끼치는 자연적 인자인 강우량을 측정하기 위하여 우량계를 20 m 소단에 설치하였다. 지중변위계는 상대적으로 지보량이 작은 20 m 소단 상부지역 2개소에 설치되었다. 20 m 소단 상부지역의 사면거동을 고찰하기 위하여 시추

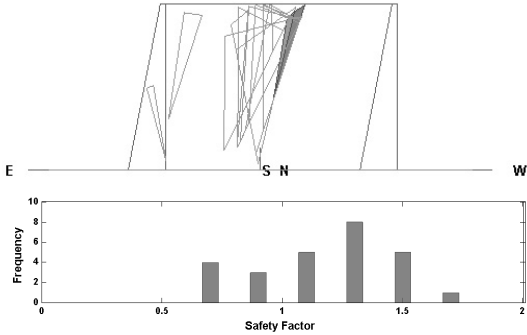


그림 14. 웨지블록

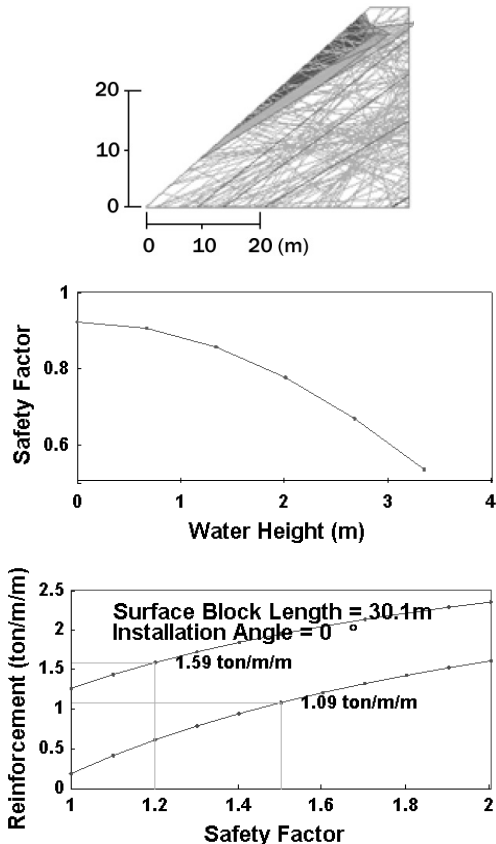
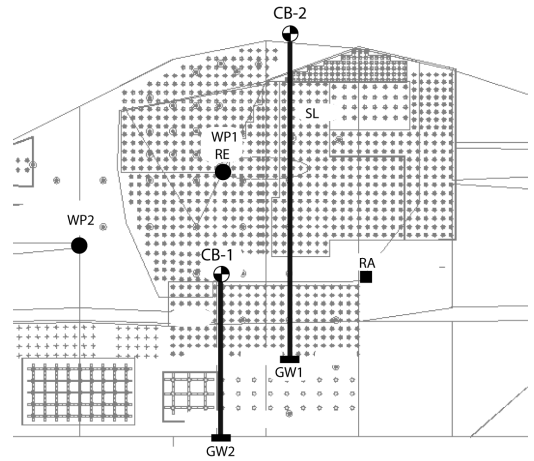
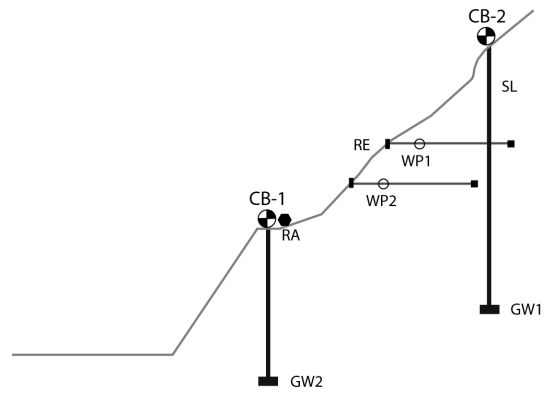


그림 15. 횡단면 분석 결과



(a) 정면도



(b) 횡단면도

그림 16. 계측기 위치도

공 CB-2 내에 2 m 간격으로 지중경사계 센서를 설치하였다. 또한 사면암반에 형성되는 지하수위를 측정하여 사면저동해석에 활용하기 위하여 시추공 CB-1 및 CB-2 최하단에 지하수위계를 설치하였다.

계측기간 730일간 동안에 우량계를 이용하여 측정된 일간 강우량을 그림 17에 도시하였다. 우기인 150~213 일 기간의 강우일수는 24일이며, 1일 강우량 최대 60 mm, 평균 14.29 mm를 나타낸다. 410~460일 기간에는 강우일수가 31일로 매우 빈번하였으며, 평균강우량은 약 6.4 mm 관측되었다. 우기인 계측일 495~608일 기간에는 최대 81.38 mm의 높은 강수량을 나타내며, 평균 14.78 mm의 비교적 높은 강우량이 지속된다. 계측기간 609~730일에는 강우일수는 58일이며, 최대 강우량은 26.27 mm, 평균 강우량은 약 3.15 mm로 나타났다.

지하수위계를 이용하여 2개 지점 GW1(도로면 하부 5 m) 및 GW2(도로면 상부 8 m)에서 측정된 지하수위

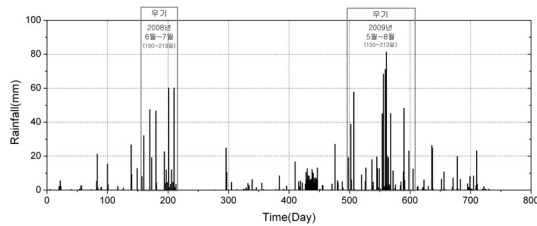


그림 17. 강우량

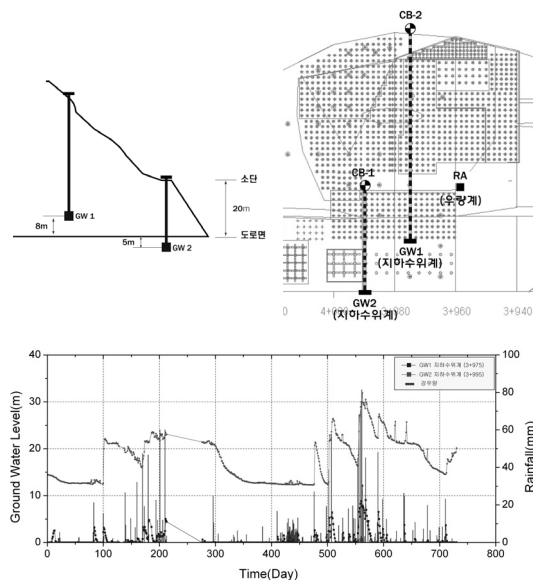


그림 18. 강우량 및 지하수위

변화양상을 강우량과 함께 그림 18에 도시하였다. 계측 기간 동안의 지하수위 변화는 강우량과 밀접하게 연관되어 있다. 우기기간(그림 17 참조) 동안에는 GW1과 GW2 지점에서의 지하수위가 높게 형성되어 있으며, 일 강우량 20 mm 이하인 건기동안에는 상대적으로 낮은 지하수위가 형성된다. 한편, GW2 지점에서의 상대적으로 높게 표기된 지하수위는 지하수위계의 위치에 기인한다. GW2 지점에서는 센서 위치가 GW1 지점에 비해 13 m 하부에 위치하고 있어 전반적으로 13 m 정도 높은 지하수위를 형성하고 있다. 2개 지점의 고도 차이와 지하수위 계측치를 비교할 때 강우량이 매우 제한적인 기간 동안의 지하수위는 도로면 상부 7~8 m 구간에 형성되는 것으로 고찰되며, 강우량 증가에 의해 도로면 상부 25~30 m 고도까지 지하수위가 상승된다.

간극수압계를 이용하여 측정된 간극수압변화를 그림 19에 도시하였다. 간극수압은 주기적으로 5 kPa까지 형성되며, 계측일 90일 경우에는 9 kPa 수압이 형성되었다. 한편 계측사면에 형성되는 간극수압은 강우량 변화에 즉각적인 영향을 받지 않는 것으로 판단된다.

개착사면 내부 암반의 심도별 수평적 거동양상을 측정하기 위하여 시추공 CB-2 내부에 2 m 간격으로 경사계 센서를 설치하였다(그림 20 참조). 각 지점에서의 지중경사계 센서는 개착면에 대하여 도로 방향(x-방향) 및 좌측 방향(y-방향)으로의 수평 변위량을 제공한다. 경사계 SL을 이용하여 측정된 도로방향(x-방향)의 심도별 누적변위 변화양상을 그림 21에 도시하였다. 심도 46~30 m 구간, 즉 옹벽설치 구간에 해당되는 심도에

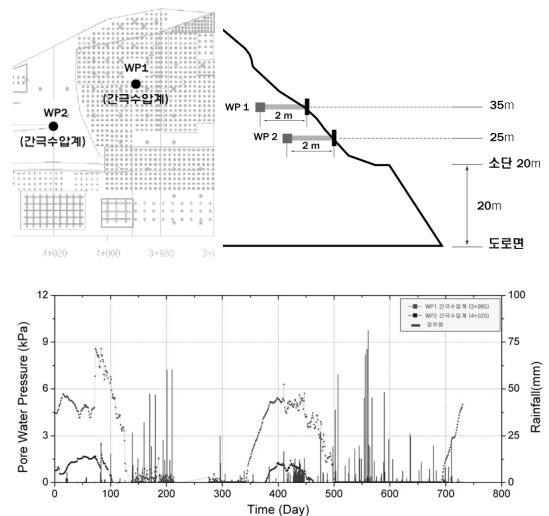


그림 19. 강우량 및 간극수압

서는 도로방향으로의 사면 거동은 미세하게 발생하고 있다. 심도 30 m~표층구간에서는 표층으로 인접할수록 변위의 증가 - 감소 양상이 상대적으로 크게 나타나고 있다. 특히, 암석이 완전풍화되고 코어 미회수구간이 집중된 심도 10 m 구역에서의 경사계 거동이 확연하게 증가되어 있다. 표면변위(그림 22(a))는 계측초기 증가

양상을 나타내며, 계측기간 200~400일 동안에 감소, 이후에는 증가 양상이 나타나며, 600일 이후에는 수렴 된다.

좌측방향(y-방향)의 심도별 누적변위 변화양상을 그림 21(b)에 도시하였다. 도로방향의 사면변위와 같이 하부심도 46~36 m 구간에서의 사면거동은 미세하게 나타났으나, 표층에 인접할수록 변위증가 추세가 상대적으로 크게 나타나고 있다. 표면변위(그림 22)는 계측 개시 50일 동안 비교적 급격한 증가 추세를 나타내고, 이후에는 상대적으로 안정적인 양상을 나타낸다. 계측 일 600일을 기점으로 표면변위가 점진적인 증가양상을 나타내지만 계측 종료일인 720일 지점에서의 증가율은 둔화되어 있다.

지중변위계 RE를 이용하여 측정된 지중변위 변화양상을 그림 23에 도시하였다. 개착면 내부 수평심도 20 m 지점을 고정점으로 가정하고 심도 8 m, 6 m, 4 m, 2 m 지점까지 설치된 측정봉을 이용하여 획득된 자료를 이용하여 변형률을 산정하였다. 계측일 140일 이전까지 수평심도 4 m 이상인 지점에서의 지중변위는 표면~4 m 심도구간에 비해 매우 미약하다. 심도 4 m 이상인 구간에서는 계측일 80일 이후에 미세한 인장거동이 측정되었으며, 표면~4 m 심도구간에서는 인장-압축 거동이 반복되는 양상이 나타난다. 계측일 140일 이후 심도 8 m 이하인 구간에서 인장-압축 거동이 불규칙적으로 반복되는 양상이 나타난다. 이와 같은 양상은 수평심도 2 m 지점에서 측정된 간극수압(WP) 변화와 잘 부합된다. 간극수압의 증가-감소가 불규칙적으로 반복됨에 따라 지중변위도 불규칙적인 인장-압축상태를 반복하고 있다. 계측일 450일을 기준으로 불규칙적인 거동양상이 완화된다.

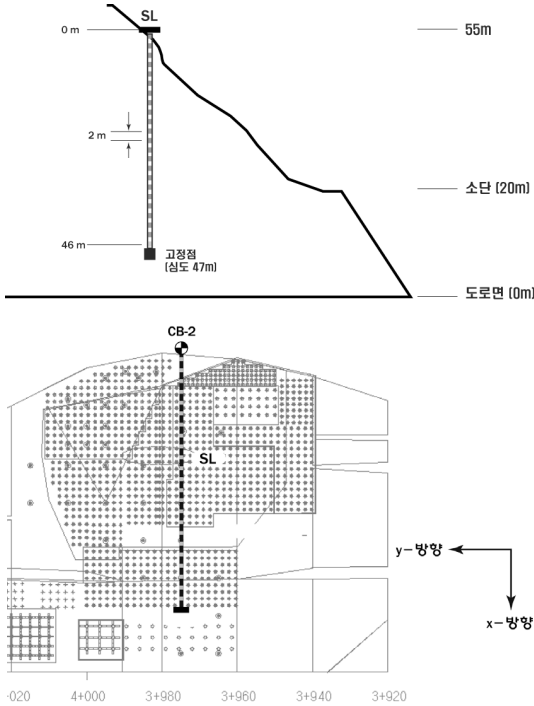


그림 20. 지중경사계 설치 지점

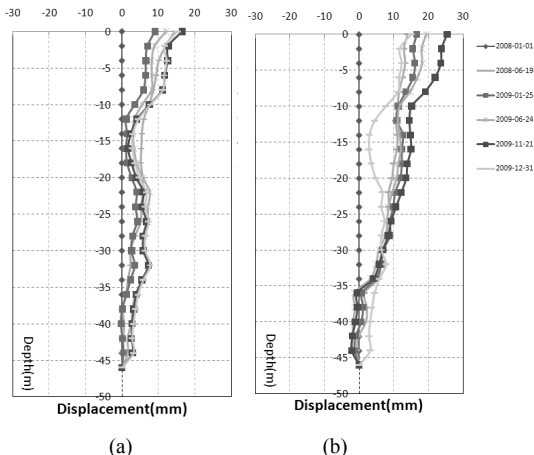


그림 21. 누적변위 (a) x-방향, (b) y-방향

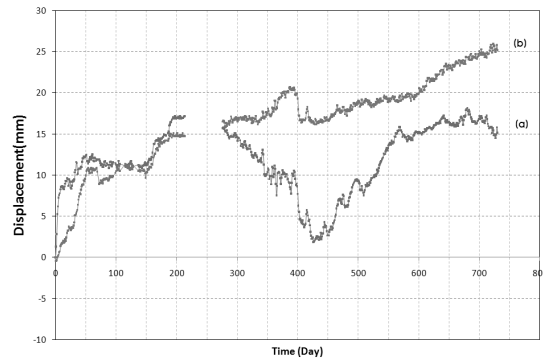


그림 22. 표면변위. (a) x-방향, (b) y-방향

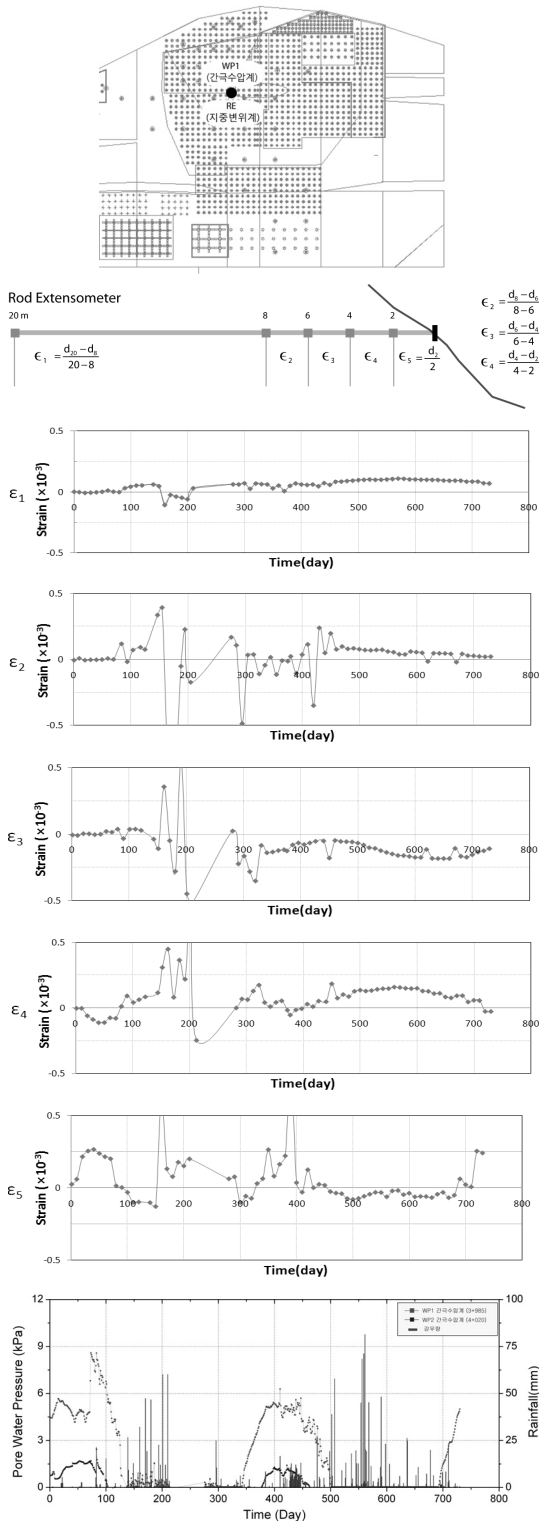


그림 23. 지중변위 및 간극수압 변화

7. 결 론

개착과정에서 연속적으로 봉락된 사면의 파괴거동을 고찰하기 위하여 지반구조 조사결과에 의거한 사면해석을 수행하였으며, 계측작업을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다. 개착사면 지반에는 심한 풍화대가 심도별로 협재되어 있으며, 단층과 절리들이 연계되어 봉락이 용이한 소규모 블록들을 형성시킬 수 있는 확률이 증폭되었다. 특히 개착 표면보다 내부 구역에서의 개구성 절리 비율이 증가하고, 절리면 내에 팽윤성 점토광물이 협재되어 블록거동의 잠재성이 확대되었다. 개착면 상부에 분포된 평면파괴 유발 절리들이 블록 거동의 활동면 역할을 수행하여 대규모 봉락 현상이 유발되었다. 이와 같은 봉락 양상은 개착면에 설정된 횡단면 해석을 수행하여 분석되었다. 보강이 완료된 사면은 도로면 좌측 방향으로의 거동이 발생되지만 계측일 500일 이후에 수렴되는 양상이어서 사면 안정성은 확보된 것으로 판단되었다.

사 사

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2008-0059249).

참고문헌

1. 조태진, 박소영, 이상배, 이근호, 원경식(2006), “개착사면의 구조적 특성과 파괴양상을 고려한 계측 해석”, 한국암반공학회지, 16, 451-466.
2. 조태진, 이창영, 고기성(2004), “개착과정에서 인장균열이 발생된 동해고속도로 건설현장 암반사면의 거동해석”, 한국지반공학회지, 20.8, 15-27.
3. 조태진, 유병옥, 원경식(2003), “개착면 내부에서의 절리분포 예측을 통한 사면해석”, 한국암반공학회지, 14, 391-398.
4. 황진연, 김선경, 김춘식(1999), “부산시 문현동 산사태지역의 지질 및 점토광물에 대한 연구”, 한국지반공학회지, 15.1, 113-125.
5. Barton, N., Bandis, S. C. and Bakhtar, K.(1985), “Strength, deformation and conductivity of rock joints”, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 22, No. 3, 121-140.
6. Hoek, E. and Bray, J.(1974), Rock slope Engineering, The Institution of Mining and Metallurgy, London.
7. Mahtab, M. A. and Yegulalp, T. M.(1982), “A rejection criterion for definition of clusters in orientation data”, In R. E. Goodman and F. E. Heuze (eds), In Issues in Rock Mechanics Proceedings of the 22nd Symposium on Rock Mechanics, American Institute of Mining Metallurgy and Petroleum. Engineers, New York, 116-123.
8. Oda, M.(1982), “Fabric tensor for discontinuous geological

- materials”, Soils and Foundations, Japanese Society of Soil and Foundation Engineering, Vol. 22, No. 4, 96-108
9. Raax(1997), Borehole Image Processing System Information. Sapporo, Japan.
 10. Read, S., Richards, L. and Cook, G.(2003), “Rock mass defect patterns and the Hoek-Brown failure criterion”, Proc. 10th Cong. ISRM, South Africa. 947-954.
 11. Terzaghi, K.(1946), Rock defects and loads on tunnel supports, In: rock tunnelling with steel supports, Youngstown, 15-99.
 12. Woodcock, N. H.(1977), “Specification of fabric shapes using an eigenvalue method”, Bulletin of the Geological Society of America, Vol. 88, 1231-1236.
 13. Yoon, K.S., T.F. Cho, B.O. You, B.O. and K.S. Won (2003), A new approach for borehole joint investigation development of discontinuity orientation measurement drilling system, Proc. 10th Cong. ISRM. South Africa, 1355-1358.

조 태 진



1980년 서울대학교 해양학과 이학사
 1986년 미국 위스컨신대학교 공학석사
 1988년 미국 위스컨신대학교 공학박사

Tel: 051-629-6557
 E-mail: chotc@pknu.ac.kr
 현재 부경대학교 에너지지원공학과 교수

이 상 배



1999년 부경대학교 해양학과 이학사
 2001년 부경대학교 해양학과 이학석사
 2008년 부경대학교 응용지질학과 이학박사

Tel: 051-629-7981
 E-mail: rocinfo@naver.com
 현재 (주)락인포 연구개발부

이 근 호



1988년 연세대학교 토목공학과 공학사
 2008년 부경대학교 환경탐사공학과 석사

Tel: 02-529-1213
 E-mail: hamspro@daum.net
 현재 (주)호승이앤씨 대표

황 택 진



1981년 연세대학교 토목공학과 공학사
 1987년 충남대학교 토목공학과 공학석사
 2007년 부산대학교 토목공학과 공학박사

Tel: 051-888-2800
 E-mail: tajhwang@deu.ac.kr
 현재 동의대학교 토목공학과 교수

강 필 구



1992년 영남대학교 토목공학과 학사

Tel: 033-673-9885
 E-mail: kpg12@ex.co.kr
 현재 한국도로공사 흥천양양건설사업단 15~16공구 책임감독

원 병 남



1981년 연세대학교 토목공학과 공학사
 1987년 충남대학교 토목공학과 공학석사
 2007년 부산대학교 토목공학과 공학박사

Tel: 042-630-7264
 E-mail: won153@ex.co.kr
 현재 한국도로공사 충청지역본부 도로팀 도로시설차장