

능선부 개착에 의해 형성된 암반사면 거동해석

조태진, 황택진*, 신선미, 이근호

Analysis for the Behavior of Ridge-Cut Rock Slope

Tae-chin Cho, Taik-Jean Hwang*, Sun-mi Shin, Guen-Ho Lee

Abstract A behavior of ridge-cut rock slope had been monitored by installing inclinometers and regional slope movement toward rear side of cut face was detected. To delineate the governing factors of slope behavior, especially backward slip of ridge-cut slope, petrographic characteristics of rock cores obtained from four drilled boreholes had been examined. BIPS images inside boreholes had been acquired and structural characteristics of slope rock had been studied. Mechanical properties of discontinuity planes distributed in the drilled core had been measured and the shear strength of coal seam imbedded-discontinuity planes also had been obtained by performing the direct shear test. Monitoring results of slope behavior had been analyzed by comprehensively considering both the mechanical and structural characteristics of slope rock and coal seam-imbedded discontinuity planes, and the potential governance of coal seam and clay minerals embedded in the joint plane on the regional slope behavior has been also identified.

Key words Ridge-cut, Inclinometer, Backward slip, Coal, Shear strength, Slope behavior, Monitoring

초 록 정상부가 개착된 암반사면에 지중경사계를 설치하여 개착사면의 내부 거동을 계측하였으며, 국지적으로 배후면 방향으로의 거동이 관찰되었다. 사면 거동, 특히 배후면 방향으로의 거동을 유발시키는 원인을 분석하기 위하여 시추작업을 수행하였다. 추출된 시추코어를 관찰하여 사면 암반의 암석학적 취약성을 조사하였으며, 공내 BIPS 영상을 취득하여 암반의 구조적 특성을 분석하였다. 코어 절리 시료를 이용하여 불연속면의 역학적 특성을 측정하였으며, 탄질물이 협재된 절리 시료에 대한 직접전단시험을 수행하여 전단강도를 측정하였다. 사면 거동에 대한 계측결과를 사면 암반과 탄질물이 협재된 절리들의 구조적 및 역학적 특성을 종합적으로 고려하여 해석하였으며, 절리에 협재된 탄질물 및 팽윤성 점토광물의 존재에 의해 국지적인 사면거동이 지배될 수 있는 잠재성을 확인하였다.

핵심어 능선부 개착, 지중경사계, 배후면 거동, 탄질물, 전단강도, 사면 거동, 계측

1. 서 론

국토의 대부분이 산악지형인 우리나라의 경우 개착 사면의 안정성 확보는 지반 구조물의 건설에 있어 매우 중요한 사항이다. 개착 사면의 거동 양상과 안정성 분

석을 위하여 지질 구조 및 암반의 역학적 특성이 충분히 도출되어야 한다. 그러나 조사 및 설계 단계에서 현장 접근성이 제한되어 충분한 지반 자료의 획득이 곤란한 경우가 발생된다. 대규모 사면 또는 상대적으로 안정성이 중요한 사면의 경우 현장조사의 한계성을 보완하기 위하여 개착과정 및 개착 이후에 사면거동을 측정하여 안정성을 파악할 수 있는 계측시스템이 설치된다. 사면계측에서는 표면 변위, 지중 변위, 지중 경사 등 사면거동을 직접적으로 측정하는 요소와 응력계를 사용하여 보강재의 보강력 발휘 상태를 측정하는 요소로 구분된다. 인장 케이블 계측과 같이 보강재가 발휘하는 보강력을 측정할 경우에는 보강력 변화가 안정성에 미

Received: Oct. 19, 2012

Revised: Nov. 6, 2012

Accepted: Nov. 6, 2012

***Corresponding Author:** Taik-Jean Hwang

(Tel) +82518901638, (Fax) +82518902633

(E-Mail) tajhwang@deu.ac.kr

Department of Civil Engineering, Dong-eui University, 176, Eomgwangno, Busanjin-gu, Busan, 614-714, Rep. of KOREA

치는 영향이 직접적으로 산정될 수 있다. 그러나 사면 거동을 직접 측정할 경우에는 계측기가 설치된 시점 이후부터의 변위만 측정되기 때문에 측정자료의 수렴/발산 양상을 도출하여 안정성 해석에 활용하고 있다. Fukuzono(1990)는 사면 표면변위 자료를 이용하여 사면파괴거동 단계를 판정하고 파괴시기를 예측하는 방법론을 제안하였으며, Lollino et al.(2002)는 강우가 사면 거동에 끼치는 영향성을 분석하는 time-lag 해석 기법을 개발하였다.

일반적으로 개착사면의 경우 개착면 방향으로의 사면 거동이 발생되며, 현재까지 개발된 사면해석 기법에서도 개착면 방향으로 발달된 구조적 특성의 중요성이 강조되어왔다. 그러나 산 정상부가 개착되어 형성된 연구대상사면에서는 지중 경사계 계측 결과 개착과정에서 개착면 방향과 배후면 방향으로의 국지적인 거동이 관찰되었다. 본 연구에서는 개착면 및 배후면 방향으로의 거동 메커니즘을 암반의 구조적 특성 및 탄질 협재 불연속면의 역학적 특성을 고려하여 규명하였다(Cho et al., 2006; Cho et al., 2011).

2. 사면현황

연구 지역의 지층은 경기 편마암 복합체의 일부로 편마암류, 화성암류 및 제 4기 충적층으로 이루어져 있다. 기반암에는 선캠브리아기 변성암인 흑운모호상편마암과 흑운모편암이 분포하며, 편리는 N31°~36°E, 48°~68°SE의 방향성을 가진다. 연구사면은 도로건설의 일환으로 개착되었으며, 능선 정상부가 절취되어진 특이한 개착양상을 나타낸다(Fig. 1 참조).

전체 사면구간에 소규모 단층과 파쇄대가 분포한다. 단층에는 점토 충전물이 존재하며, 단층면은 풍화에 기인하여 산화철로 피복되어 있다. 개착사면 상부는 HW (highly weathered)의 풍화등급을 가지는 제 4기 충적

층이 발달되어 있으며, 하부 지반 상태에 비해 상대적으로 풍화진행상태가 급속한 편이다. 개착 사면의 하부는 전반적으로 MW(moderately weathered)~ SW(slightly weathered)의 풍화 분포를 보이며 엷리, 편리 및 단층대의 발달에 기인한 심한 파쇄구간이 분포한다. 특히 파쇄 영역을 따라 심한 풍화가 진행되면서 우측질 부분이 점토화되어 있다. 또한 약 1~2 m의 층후를 가지는 탄질물로 구성된 연약층이 존재하여 역학적 특성이 매우 저하된 상태이다.

3. 암반특성

개착사면의 암반 특성을 분석하기 위하여 4개 지점에서 시추작업을 수행하였다(Fig. 2 참조). 시추공 BH-1, BH-2, BH-3, BH-4에서 Borehole Image Processing System(Raax, 1996)을 이용한 공내 영상을 촬영하여 불연속면의 방향성을 측정하였으며, 콘각=15°를 적용한 균집알고리즘(Mahtab and Yegulalp, 1982)을 활용하여 절리군을 도출하고 대표 방향성을 산정하였다(Table 1). 4개 시추공 지역에서의 절리군 형성도는 보통-낮음(K=10~70) 상태를 나타낸다. 시추공 BH-3에서 3개 절리군이 도출되었고, BH-1, BH-2 및 BH-4에서는 2개 절리군이 도출되었다. 절리군 대표 방향성을 기준으로 시추공 BH-3 와 BH-4 지역에서는 절리 균집상태가 매우 유사하며, BH-1 ~ BH-3 지역에서는 약간 상이한 절리군 분포상태가 나타난다. 서로 인접된 지역에서 조사된 절리 방향성 자료의 통계학적 유사성을 분석하기 위하여 Mahtab and Yegulalp(1984)가 제시한 유사성 검증을 수행하였다. 절리군을 형성하는 최소 절리수효의 cut-off 한계를 10%로 설정하였으며, 이에 따라 시추공 BH-3에서 도출된 3번째 절리군 방향성은 해석에서 제외되었다. 신뢰성 큰 영역은 90%의 콘각(ψ)을 활용하였다.

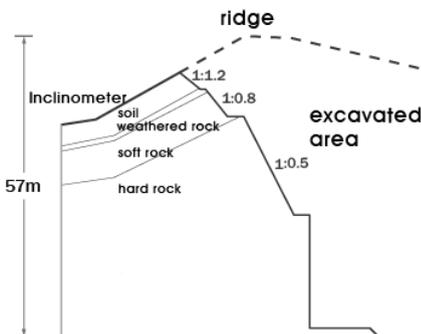


Fig. 1. Cross section of ridge-cut slope

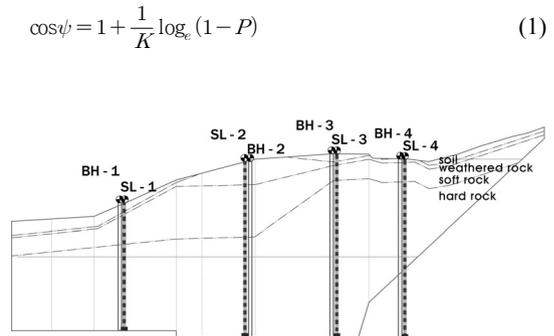


Fig. 2. Front view of ridge-cut slope

$$\cos\psi = 1 + \frac{1}{K} \log_e (1 - P) \tag{1}$$

Table 1. Joint set orientations

borehole	dipdir/dip	Fisher constants (K)
BH-1	233/35	9.2
	103/50	36.1
BH-2	182/36	28.7
	042/38	10.8
BH-3	081/56	65.0
	325/45	10.6
BH-4	201/38	68.5
	309/43	43.1
	107/52	21.6

여기서, K : Fisher 상수
P : 신뢰도

시추공 BH-1에서 산정된 대표 방향성 233/35의 90% 신뢰성 콘 영역 내에 BH-2에서 산정된 대표 방향성 182/36이 위치하여(Fig. 3(a)) 2개 시추 지역에서 추출된 절리 방향성의 유사성은 확보되었다. 동일한 방법으로 시추공 BH-2 및 BH-3에서 추출된 절리들의 방향성도 유사성을 보여주는 것으로 분석되었으며, 시추공 BH-3 및 BH-4 경우에는 2개 대표 절리군 방향성이 모두 신뢰영역에 포함되어 가장 유사성이 높은 것으로 파악되었다. 결과적으로 개착사면에서의 지역별 절리 방향성은 모두 유사하며 4개 시추공 지역이 동일 암반구조영역에 속하는 것으로 분석되었다.

시추공 BH-1 ~ BH-4에서 회수된 시추코어에서 절리 시료를 추출하여 측정된 절리면 전단강도(Cho et al., 2012)를 Table 2에 수록하였다. 시추공 BH-2 심도 17.3-17.4 m 구간에서 심한 풍화(HW) 등급임에도 불구하고 높은 점착력을 갖는 경우를 제외하고는 대체적으로 풍화도에 따른 강도저하 현상을 나타낸다. 약간 풍화(SW) 상태에서는 35~50 kPa이며, HW 상태에서는 10 kPa 이하로 감소한다. 마찰각의 경우에는 잔류 마찰각이 최대 마찰각보다 낮게 측정되었으나 감소폭은 매우 제한적이다.

시추공 BH-2와 BH-4에서 회수된 시추 코어에 탄층이 협재된 절리시료를 추출하고 전단강도를 측정하였다(Table 2). 지층에 탄질이 협재된 경우에는 지표수 및 지하수와 접촉되거나 대기에 노출되면 풍화가 급속히 진전되어 단기간 내에 강도가 급격히 저하되는 매우 취약한 특성을 나타낸다(Bieniawski, 1989). 특히, 개착사면에서는 탄질을 포함하는 절리면의 전단강도 감소로 인하여 사면 활동의 가능성이 증가된다(Bae et al., 2006; Kim et al., 2007). 시추공 BH-2에서 탄층이 협재된 절리면의 마찰각은 26.2°로 측정되었다. 해당 시추

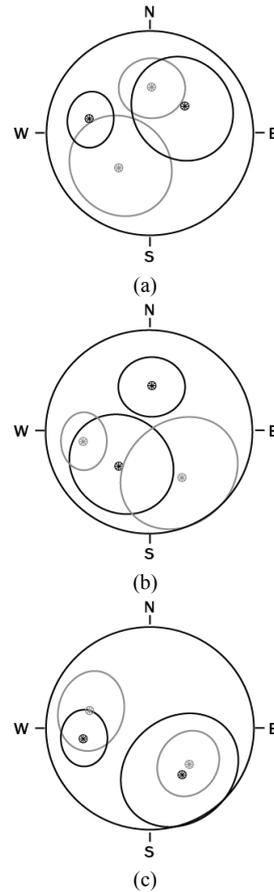


Fig. 3. Similarity (a) BH-1 vs BH-2 (b) BH-2 vs BH-3 (c) BH-3 vs BH-4

공에서의 탄질물이 미협재된 구간에서의 마찰각은 27.0~33.5° 범위를 나타낸다. 따라서 탄층이 협재됨에 따라 마찰각이 최대 22% 정도 감소되는 것을 확인할 수 있었다. 시추공 BH-4에서 탄층이 협재된 심도 34.5~34.6 m 구간에서의 절리면의 마찰각은 25.7°로 측정되었으며, 탄질물이 미협재된 구간의 마찰각을 고려할 때 탄층 협재에 의한 마찰각 감소 정도는 20%를 상회한다.

4. 계측결과

개착사면 내부에서의 암반 거동을 파악하기 위해서 지중경사계를 설치하였다(Fig. 2 참조). 시추공 BH-1에 설치된 지중경사계(SL-1)는 수직심도 37m를 고정점으로 2 m 간격으로 설치되었다. 시추공 BH-2, BH-3 및 BH-4에도 심도 46 m, 46 m 및 47 m를 고정점으로 2 m 간격으로 지중경사계 센서를 설치하였다. 지중 경사계

Table 2. Joint shear strength

borehole	depth (m)	weathering	cohesion (kPa)	friction angle (°)
				peak (residual)
BH-1	7.20~7.30	HW	12	24.7 (22.2)
	9.70~9.80	MW	15	31.8 (27.2)
	34.10~34.30	SW	34	30.1 (25.3)
BH-2	17.30~17.40	HW	40	32.3 (31.3)
	19.40~19.50	coal seam	14	(26.2)
	30.40~30.70	MW	28	33.5 (31.1)
	43.10~43.20	SW	31	27.1 (23.4)
BH-3	7.40~7.55	HW	5	32.4 (27.7)
	8.80~9.00	MW	16	22.1 (20.0)
	24.10~24.30	SW	44	40.8 (36.0)
BH-4	6.00~6.10	MW	14	34.2 (28.2)
	27.80~28.00	SW	51	31.5 (26.2)
	34.50~34.60	coal seam	12	(25.7)

의 측정 한계는 $\pm 30^\circ$ 이며, $\pm 0.01^\circ$ 의 오차를 가진다. 계측이 원만하게 수행되지 못한 시추공 BH-3을 제외한 지점에서 지층경사계 SL-1, SL-2 및 SL-4를 이용하여 측정된 사면거동 계측결과를 Fig. 4 및 Fig. 5에 도시하였다.

계측기간 516일 동안에 발생된 심도별 거동 양상은 계측 지점에 따라 개착면/배후면 방향으로의 상이한 결과를 보여준다(Fig. 4a). 경사계 SL-1(Fig. 2)의 경우 심도 0~13 m 구간에서는 표층으로 인접할수록 개착면 방향으로 변위가 증가하는 형태를 보인다. 심도 13~17 m 구간에서는 배후면 방향으로의 거동이 관찰된다. 17~19 m 구간에서는 개착면 방향으로 역전된 거동 양상이 나타나지만 하부 심도 19~27 m 구간에서는 전반적으로 배후면 방향으로의 거동이 우세하다. 경사계 SL-2 경우 표층~13 m 심도 구간에서는 개착면 방향으로 거

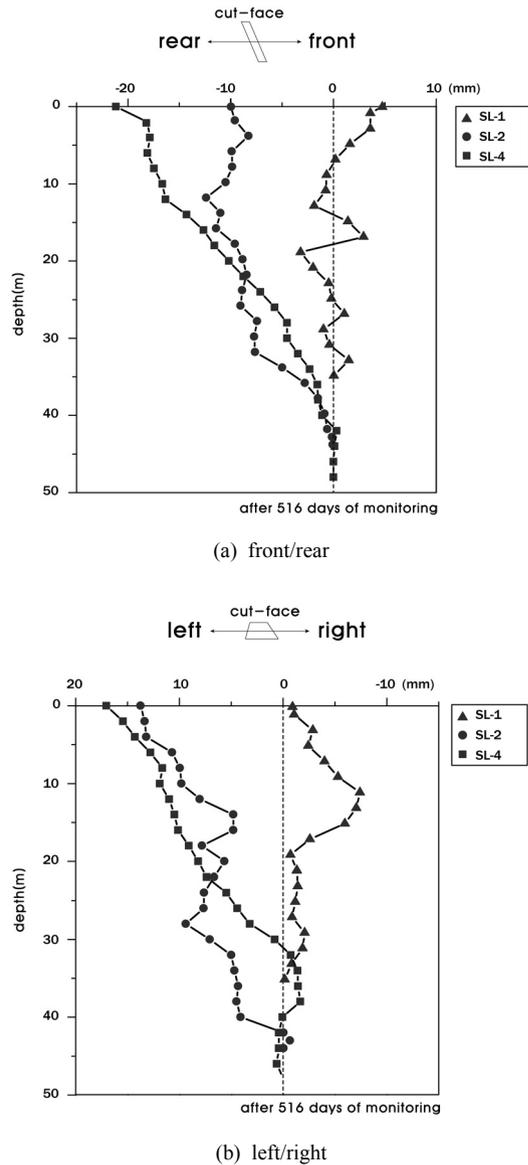
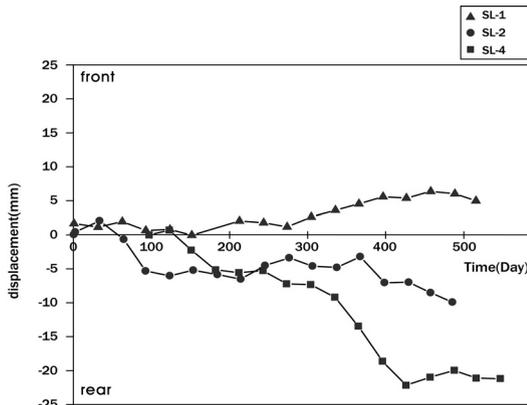


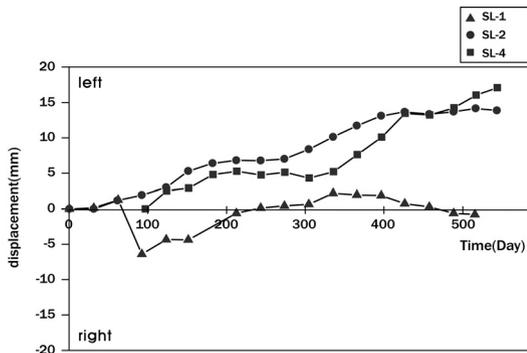
Fig. 4. Readings of inclinometer sensors at the different depths

동이 미약하게 발생되지만, 하부 심도에서 배후면 방향으로의 거동이 우세하여 전체심도에서의 거동양상이 반영된 표층에서는 배후면 방향으로의 변위가 발생되었다. SL-4 경우에는 42 m 심도에서 발생한 배후면 방향으로의 거동 양상이 표층까지 지속적으로 유지되었다.

심도별 좌측/우측 방향으로의 거동 양상을 Fig. 4b에 도시하였다. SL-1 경우 전반적으로 개착면 우측 방향으로 변위가 발생하였다. 심도 15-19 m 구간에서 개착면



(a) front/rear



(b) left/right

Fig. 5. Surface displacement

우측 방향으로의 변위 발생이 급진적으로 일어나며, 심도 11 m 상부 지역에서는 좌측 방향으로 변위 발생이 역전되는 현상이 나타난다. SL-2 경우에는 심도별로 좌측-우측 방향으로의 거동이 변화되지만 전체 심도구간에서 좌측 방향으로의 변위가 발생되었다. SL-4 경우에는 심도 40 m 구간을 제외하고는 전체심도에서 일정하게 좌측 방향으로의 거동이 발생되었다.

표면 변위의 경우 초기 계측일 100일 시점까지는 3개 시추공 지점에서 공통적으로 개착면 방향으로 형성되나, 이후에는 시추공 BH-2 및 BH-4에서 배후면 방향으로 역전되는 양상을 나타낸다(Fig. 5a). 계측 100일 시점을 기준으로 일정한 변위량을 유지하던 개착면/배후면 방향 및 좌측/우측 방향 표면변위는 계측 300일 시점에 2차적인 거동이 유발된 양상을 나타낸다. 계측일 516일을 기준으로 시추공 BH-4에서 좌측 방향으로 거동이 진행 중인 것을 제외하고는 시추공 BH-1 및 BH-2에서의 표면변위는 수렴되는 양상을 나타낸다.

Table 3. Face orientations and friction angles used for stereographic analysis

borehole	face orientation (dipdir/dip)		friction angle (°)
	front	rear	
BH-1	208/56	005/59	22
BH-2	185/56	005/59	23
BH-3	185/56	005/59	20
BH-4	185/56	005/59	26

5. 사면거동 해석

사면 거동은 지형, 사면 형상, 지반의 수리학적 조건 및 발파진동과 같은 인위적인 원인에 큰 영향을 받으며 (Hutchison, 1995; Yoon, 2002), 특히 불연속면의 분포 특성은 암반사면의 거동에 가장 중요한 영향 요소이다. 연구대상 개착사면의 인근 지역에서는 터널 굴착을 위한 발파작업이 주기적으로 진행되고 있다. 개착사면의 잠재적인 거동 양상을 고찰하기 위하여 상대적으로 점진적인 대규모 거동을 유발시키는 평면파괴 발생 가능성에 대한 평사투영해석을 수행하였다. 해석 사면은 방향성에 따라 2개 지역으로 구분된다. 시추공 BH-1 인근 지역은 개착면의 경사방향/경사 = 208/56 이며, 배후면의 경사방향/경사 = 005/59이다. 시추공 BH-2, BH-3, BH-4 인근 지역은 개착면의 방향성은 185/56 이며, 배후면은 005/59의 방향성을 가진다. 평사투영해석(Hoek and Bray, 1974)에 사용된 강도정수 및 사면 방향성을 Table 3에 수록하였다. 해석에 사용되는 마찰각은 각 시추공에서 측정된 잔류전단강도의 최소값을 사용하였다.

시추공 BH-1 지역에서의 평사투영해석 결과를 Fig. 6에 도시하였다. 개착면 방향으로 1개 절리군의 대표 방향성 극점 및 다수의 개별 절리 극점들이 평면파괴 영역 내에 위치하여 개착면 방향으로의 거동 가능성이 높다(Fig. 6a). 배후면 방향으로는 소수의 개별절리 극점들만 평면파괴 영역 내에 위치하여 국지적인 거동 잠재력만 존재한다(Fig. 6b). 한편, 개착면 좌측/우측 방향으로는 평면파괴 영역 내에 절리군 대표 방향성 극점이 각각 위치하여 개별 불연속면의 방향성에 따라 심도 별로 양쪽 방향으로 거동이 교차적으로 발생될 가능성이 높다.

시추공 BH-2 인근 지역에서는 개착면 및 배후면 방향으로의 거동 발생이 가능하며, 개착면 좌측보다는 우측 방향으로의 평면파괴 거동이 우세할 것으로 분석되었다(Fig. 7). BH-3 지역에서는 개착면 방향으로의 평

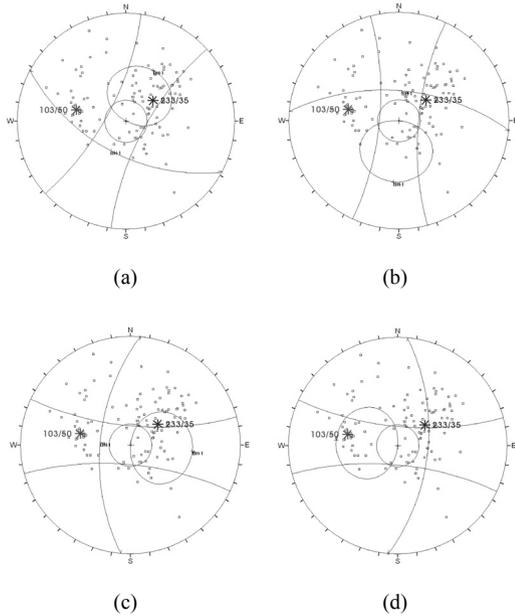


Fig. 6. Stereographic analysis - BH-1
(a) front (b) rear (c) left (d) right

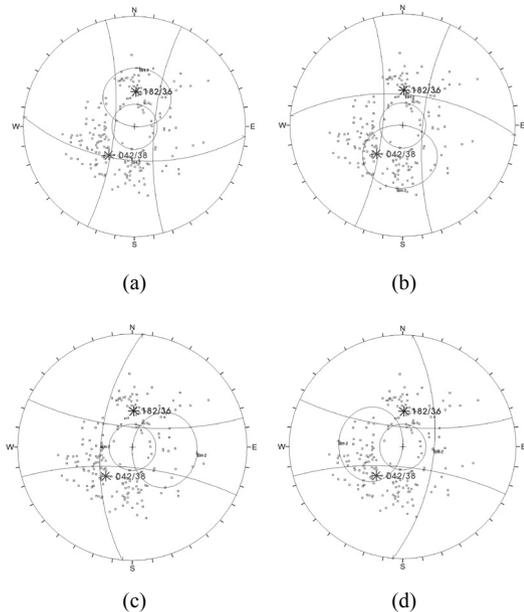


Fig. 7. Stereographic analysis - BH-2
(a) front (b) rear (c) left (d) right

면파괴 거동을 유발시키는 대표 절리군 극점이 파괴기 준영역의 중심부에 위치하여 파괴거동이 배후면 방향 보다 우세할 것으로 고찰되지만, 평면파괴 거동에 연관

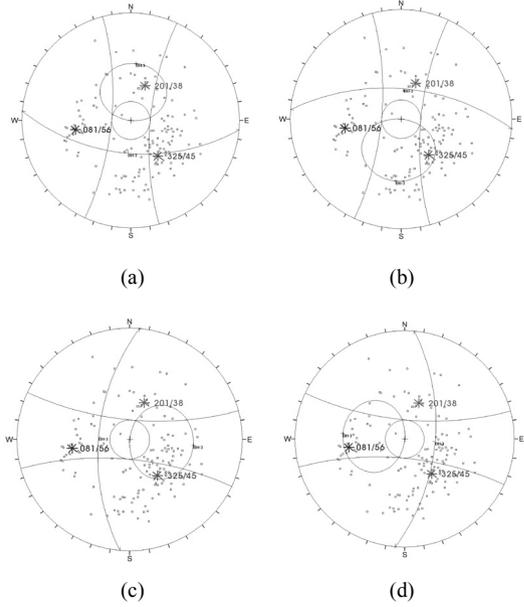


Fig. 8. Stereographic analysis - BH-3
(a) front (b) rear (c) left (d) right

된 불연속면의 분포 밀도는 배후면 방향에서 더 높게 도출되었다. 개착면 좌우측 방향으로의 거동 가능성은 유사한 것으로 판단되었다(Fig. 8).

BH-4 지역에서는 배후면 방향으로의 평면파괴 거동이 우세할 것으로 분석되며, 개착면 좌측 방향으로의 거동 발생도 가능하지만 주된 거동은 우측 방향인 것으로 판단되었다(Fig. 9). 그러나 지중경사계 SL-4를 이용하여 측정된 주된 거동은 좌측 방향이다(Fig. 4 참조).

지중경사계를 이용하여 측정된 시추공에서의 심도별 사면 거동 양상을 동일 심도에 분포된 불연속면의 방향성을 고려하여 고찰하였다. 시추공 BH-1에서 측정된 심도별 사면 거동과 평사투영해석에 의해 추출된 개착면 및 배후면 방향으로의 평면파괴유발가능 불연속면을 Fig. 10에 도시하였다. 지중경사계 SL-1에 의해 측정된 총 지중변위는 심도 7~13 m 구간에서 배후사면 방향인 (-) 변위를 나타내지만, 구간 변위 변화양상은 (+) 변위 방향, 즉 개착면 방향으로의 거동이 관찰되었다. 평사투영해석 결과 해당 심도 구간에서 개착면 방향으로 평면파괴를 유발하는 개별 불연속면들이 추출되어 불연속면에서의 점진적인 미끄러짐에 의해 사면 거동이 유발된 것으로 사료되었다. 심도 13~17 m 구간에서는 배후면 방향으로의 거동이 관찰되었으며, 평사투영해석 결과 개착면 및 배후면 방향으로의 평면파괴를 유발시킬 수 있는 불연속면의 존재성이 모두 확인되

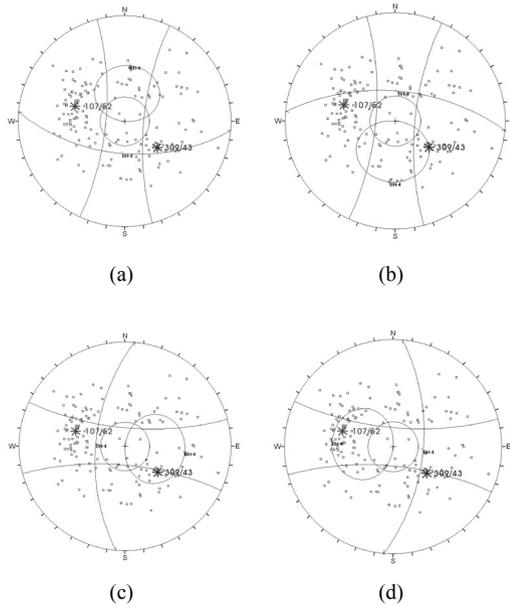


Fig. 9. Stereographic analysis - BH-4
(a) front (b) rear (c) left (d) right

었다. 배후면 방향으로의 거동 요인을 판단하기 위하여 시추 코어 상태를 고찰하였다. 심도 16~17 m 구간에는 풍화 진행에 따른 파쇄대가 분포한다. 파괴를 유발하는 불연속면이 파쇄대에 혼재되어 발달할 경우 파쇄대 구간에서의 지지력 상실로 인하여 파괴가 발생할 가능성이 매우 높다(Kwon et al., 2010). 따라서 16~17 m 구간에서의 배후면 방향으로의 거동은 파쇄대 영역 내에 존재하는 불연속면의 방향성을 따라 유발된 것으로 고찰되었다. 심도 17~19 m 구간에서는 개착면 방향으로의 파괴 유발 절리들의 분포밀도에 비해 상대적으로 큰 폭의 거동 변화를 보이고 있다. 시추코어 심도 17.90~17.91 m 및 18.60~18.90 m 구간에서는 불연속면 내에 점토 충전물이 혼재되어 있으며, X-선 회절(XRD) 분석에 의해 muscovite 및 chrolite가 추출되었다. Muscovite (백운모)는 팽윤성 점토광물로서 팽창력을 발생시켜 사면 거동을 유발시키는 주요인으로 작용한다(Min et al., 2007). 결론적으로 17~19 m 구간에서는 불연속면 내에 혼재된 팽윤성 점토광물에 의하여 개착면 방향으로의 거동이 촉진된 것으로 고찰되었다. 심도 19~27 m 구간에서는 배후면 방향으로의 점진적인 거동 양상을 보인다. 해당 구간에는 배후면 방향으로 거동을 유발하는 절리면이 존재하며, 심도 19~21 m 구간에서는 개착면 방향으로의 거동을 야기하는 불연속면도 분포한다. 시추코어 관찰결과 심도 19~21 m 구간에 분포하는 불연

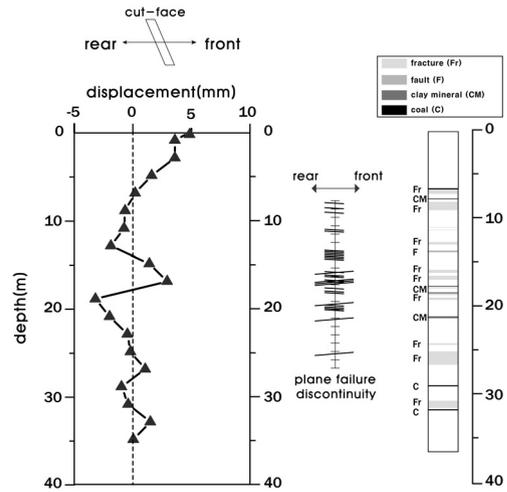


Fig. 10. Slope behavior at BH-1 - front/rear

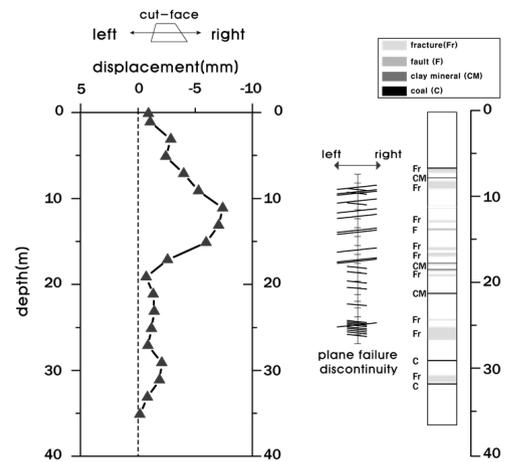


Fig. 11. Slope behavior at BH-1 - left/right

속면에서는 역학적 특성 저하를 야기시킬 수 있는 지질학적 요인을 발견할 수 없었으며, 심도 21.40~27.00 m 영역에서는 전반적으로 파쇄가 진행되었다. 특히 21.40~21.60 m 구간에는 배후면 방향으로의 거동을 유발하는 불연속면 내에 팽윤성 점토광물인 muscovite가 혼재되어 있어 배후면 방향으로의 거동이 촉진된 것으로 판단되었다(Kim et al., 2006). 지중경사계 SL-1에서 관측된 개착면 좌측 및 우측 방향으로의 거동을 유발하는 요인을 분석하였다. Fig. 11에 도시된 바와 같이 심도 7~11 m 구간은 전체 지중변위는 우측 방향인 (-) 변위를 나타내지만 구간별 변위 변화양상은 (+) 변위 방향인 좌측 방향으로의 거동을 나타내며, 평사투영해석에 의해 좌측 방향으로의 거동을 유발하는 절리들이 다수

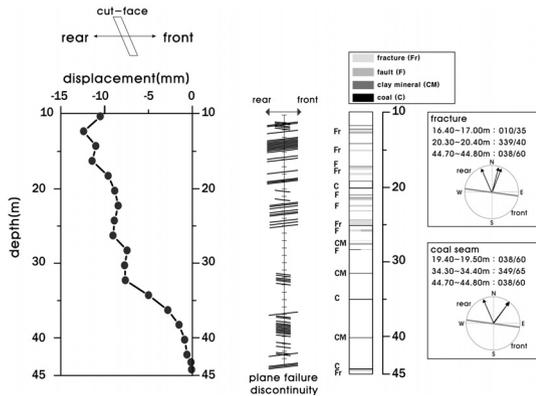


Fig. 12. Slope behavior at BH-2 - front/rear

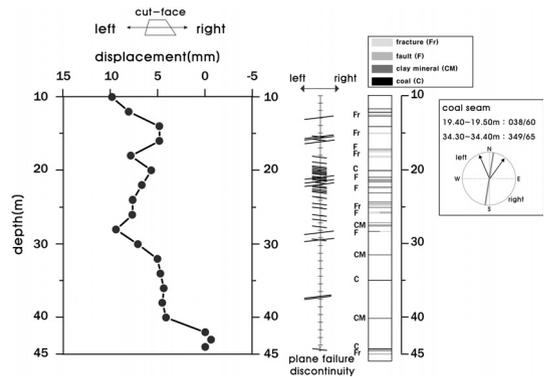


Fig. 13. Slope behavior at BH-2 - left/right

존재하는 것이 확인되었다. 또한 파쇄대가 발달하였으며, 팽윤성 점토 충전물(kaolinite)도 검출되었다. 심도 11~27 m 구간에서는 전반적으로 우측 방향으로의 거동이 관찰되었으며, 평사투영해석에 의거할 때 우측 방향으로의 미끄러짐을 유발하는 불연속면이 다수 존재하고 있다. 또한 전체적으로 파쇄대가 발달하여 사면거동에 불리하게 작용하며, 17.90~17.91 m, 18.60~18.90 m 구간에는 muscovite(백운모)가 협재되어 있다.

지중경사계 SL-2에서 관측된 개착면 및 배후면 방향으로의 거동 유발요인을 분석하였다. 심도 10~12 m 구간에서는 개착면 방향으로의 거동 양상을 보이며, 개착면 방향으로 평면파괴 거동을 야기시킬 수 있는 불연속면의 수효가 우세하다(Fig. 12). 심도 12~22 m 구간에서는 전반적으로 배후면 방향으로의 거동이 관찰되며, 이는 배후면 방향의 거동을 유발하는 다수의 불연속면이 분포되어 있는 것에 기인하는 것으로 판단된다. 또한 심도 16.40~17.00 m와 20.30~20.40 m 구간에는 단층파쇄 구간이 존재하며, BIPS 영상에 의해 확인된 단층파쇄면의 방향성(010/35, 339/40)도 배후면 방향(005/59)에 근접되어 있다. 심도 19.40~19.50 m 구간의 불연속면 내에는 탄질물이 협재되어 있다. 일반적으로 탄질물이 협재된 연약층일 경우에는 풍화에 아주 민감하여 지표수 및 지하수에 접하거나 대기에 노출되는 경우 단기간 내에 강도가 급격히 저하되거나 풍화가 급속히 진전되는 매우 취약한 특성을 나타낸다(Bieniawski, 1989). 탄층에 대한 직접전단시험을 수행한 결과 탄질물이 협재된 절리면의 마찰각은 26°이며, 탄질물이 협재되지 않은 절리면의 마찰각에 비하여 20% 감소율을 보이는 것으로 확인되었다. 또한 탄질물 협재층의 방향성도 경사방향/경사=036/56으로 탄질 협재층의 존재성에 의해 배후면 방향으로의 거동이 촉진된 것으로 판단되었다.

심도 22~30 m 구간에서는 배후면 방향으로 미세한 거동이 관찰되었으며, 평면파괴 유발 불연속면의 방향성도 배후면 방향을 지시한다. 심도 30~45 m 구간에서는 개착면 방향으로의 거동을 야기하는 불연속면이 집중적으로 분포하지만, 배후면 방향으로 지속적인 변위 발생 양상이 나타난다. 배후면 방향의 거동을 유발하는 불연속면은 43~44 m 구간에서만 우세하게 분포한다. 배후면 방향으로의 거동은 심도 34.30~34.40 m와 44.70~44.80 m 구간에 분포한 탄질물 협재층에서의 거동 발생에 큰 영향을 받은 것으로 추론된다. 탄질 협재층의 방향성이 평면파괴 기준 영역에는 벗어나 있지만 경사방향/경사=346/65 및 038/60으로 개착면보다는 배후면 방향에 근접되어 있다.

지중경사계 SL-2에서 관측된 개착면 좌측 및 우측 방향으로의 거동과 평면파괴 유발절리들의 분포를 Fig. 13에 도시하였다. 심도 10~16 m 구간에서는 좌측 방향으로의 거동이 관찰되며, 이는 파쇄대 구간에 분포하는 평면파괴 유발 불연속면의 영향으로 사료된다. 심도 16~28 m 구간에서는 18~20 m 구간을 제외하고는 전반적으로 우측 방향으로의 거동을 보인다. 이는 사면우측 방향으로의 거동을 야기하는 평면파괴 유발 불연속면들이 집중적으로 분포하는 것에 기인하는 것으로 판단된다. 또한 소규모 단층에 따른 파쇄 구간이 21.80~24.00 m 및 25.00~25.30 m 구간에 존재하며, 파쇄대 방향성도 우측사면 방향으로 발달하고 있어 해당 구간의 거동 양상과 부합한다. 심도 28~32 m 구간에서는 좌측 방향으로 비교적 급격한 변위 증가 추세를 보인다. 이는 심도 29.80~29.90 m 구간 내에 협재된 점토광물의 영향에 기인한 것으로 사료된다. X-선 회절(XRD) 분석에 의해 팽윤성 점토광물인 muscovite와 montmorillonite가 검출되었다.

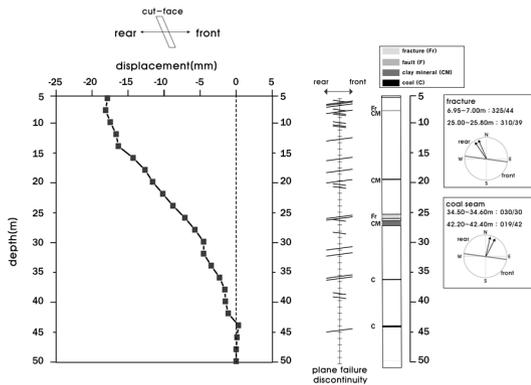


Fig. 14. Slope behavior at BH-4 - front/rear

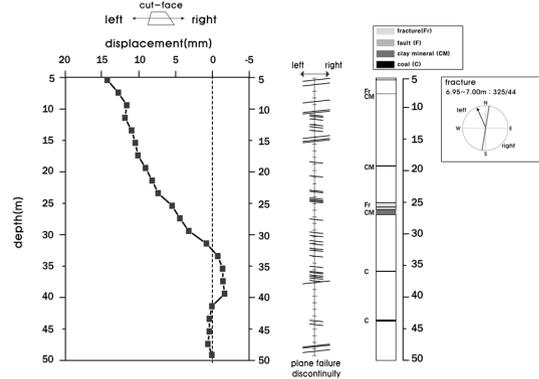


Fig. 15. Slope behavior at BH-4 - left/right

시추공 BH-4에서는 전체 계층 구간에서 배후면 방향으로의 지속적인 변위 발생 추세를 보인다(Fig. 14). 배후면 방향으로의 거동을 야기하는 평면파괴 유발 불연속면이 전체 심도에서 다수 분포하며, 단층파쇄면도 배후면 방향으로 발달하여 단층 점토에 의한 거동 가능성도 높을 것으로 사료된다. 심도 25.00~25.80 m 구간에서 팽윤성 점토광물(muscovite, vermiculite) 협재층이 확인되었으며, 34.50~34.60 m 및 42.20~42.40 m 구간에 위치한 탄질 협재층도 배후면 방향으로 분포되어 있다.

지중경사계 SL-4를 이용하여 측정된 개착면 좌우측 방향으로의 심도별 거동을 Fig. 15에 도시하였다. 심도 38~40 m 구간에서 국지적으로 우측 방향으로의 거동을 나타내는 하지만 전체적으로 개착면 좌측 방향으로의 거동을 나타낸다. 평면파괴를 유발시킬 수 있는 절리들을 추출한 결과 전체 구간에서 우측 방향으로의 거동 유발 불연속면의 분포가 우세하며, 좌측 방향으로의 거동 유발 불연속면들은 5~15 m, 36~38 m 및 46~48 m 구간에서만 분포한다. 그러나 단층 파쇄대 및 탄질물이 협재된 층의 방향성이 배후면-좌측 방향이어서 단층면에 피복된 점토 및 팽윤성 점토광물의 복합적인 요인에 기인하여 사면 좌측 방향으로의 거동이 유발된 것으로 판단되었다.

6. 결론

산 정상부가 개착된 연구대상 사면의 경우 개착면 방향으로 지지력이 저하되고 배후면 방향으로는 거동제어 인장력이 상실되어 양쪽 방향으로 사면 거동이 발생할 잠재성이 존재한다. 실제적으로 시추공내에 지중경사계를 설치하여 사면 거동을 측정한 결과 시추공 심도 별로 개착면/배후면 및 좌측/우측 방향으로의 상이한 거

동 양상이 관찰되었다. 사면 거동 방향은 전반적으로 시추공내에 분포된 평면파괴 유발절리들의 방향성과 일치하여 불연속면에서의 점진적인 평면파괴 미끄러짐에 의해 일차적인 사면 거동이 발생된 것으로 분석되었다. 한편 파쇄대 구간에 발달한 불연속면과 탄질 및 팽윤성 점토광물이 협재된 불연속면에서는 역학적 특성 저하 및 팽윤압 발생 등에 의해 사면 거동이 촉진되어 개별 불연속면의 방향성이 해당 심도구간의 거동 양상을 지배하는 요인으로 작용된 것으로 고찰되었다.

감사의 글

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

참고문헌

1. Bae, W.S., Kwon, Y.C., Oh, S.W., Lee, B.J., 2006, A case study on evaluation stability of slope in coaly shale, 2006 KSCE Annual Conference, 3821-3824.
2. Bieniawski, Z.T., 1989, Engineering rock mass classification, John Wiley, New York, 237-247.
3. Cho, T.F., Hwang, T.J., Lee, G.H., Cho, K.S., Lee, S.B., 2012, A study of the applicability of cross-section method for cut-slope stability analysis, Tunnel & Underground Space (Journal of Korean Society for Rock Mechanics), 21, 1, 20-32.
4. Cho, T.F., Lee, S.B., Lee, G.H., Hwang, T.J., Kang, P.G., Won, B.N., 2011, Identification of dominant cause of cut-slope collapse and monitoring of reinforced slope behavior, Tunnel & Underground Space (Journal of Korean Society for Rock Mechanics), 21, 1, 20-32.
5. Cho, T.F., Park, S.Y., Lee, S.B., Lee, G.H., Won, K.S.,

- 2006, Monitoring of cut-slope behavior with consideration of rock structure and Failure Mode, Tunnel & Underground Space (Journal of Korean Society for Rock Mechanics), 16, 6, 451-466.
6. Fukuzono, T., 1990, Recent studies on time prediction of slope failure, Landslide News, 4, 9-12.
 7. Hoek, E. and Bray, J., 1974, Rock slope Engineering, The Institution of Mining and Metallurgy, London, 300p.
 8. Hutchison, J.N., 1995, Landslide hazard assessment. In Landslides, Proc. Sixth Int. Symp. on Landslides(ed D.F. Bell), 3, 1805-1841.
 9. Kim, K.Y., Kim C.Y., Lee, S.D., Seo, Y.S., Lee, C.I., 2007, Measurement of tunnel 3-D displacement using digital photogrammetry, The Journal of Engineering Geology, 17, 4, 567-576.
 10. Kim, Y.J., Lee, Y.H., Kim, S.K., Kim, J.H., 2006, Case study on failure of rock slope caused by filling material of clay, Tunnel & Underground Space (Journal of Korean Society for Rock Mechanics), 16, 5, 368-376.
 11. Kwon, O.I., Back, Y., Park, C.H., 2010, A case study on stability analysis of tunnel portal slope, 2010 KSEG Conference, 249-253.
 12. Lollino, G., Arattano, M., Cuccureddu, M., 2002, The use of the automatic inclinometric system for landslide early warning: the case of Cabella Ligure(North-Western Italy), Physics and Chemistry of the Earth, 27, 1545-1550.
 13. Mahtab, M.A. and Yegulalp, T.M., 1984, A similarity test for grouping orientation data in rock mechanics, Proc. of 25th U.S. Symposium on Rock Mechanics, 495-502.
 14. Mahtab, M.A. and Yegulalp, T.M., 1982, A rejection criterion for definition of clusters in orientation data, Proc. 22nd Symposium on Rock Mechanics, R. E. Goodman and F. E. Heuze ed., Berkeley, 116-123.
 15. Min, K.N., Ahn, T.B., Yang, S.J., Back, S.G., Lee, T.S., 2007, A study on the analysis of the slope stability considering clay filling in discontinuity, Tunnel & Underground Space (Journal of Korean Society for Rock Mechanics), 17, 3, 175-185.
 16. Raax, 1996, Borehole Image Processing System Information. Sapporo, Japan.
 17. Yoon, W.S., 2002, Characterization of fracture distribution and its application to slope stability analysis, Seoul National University, 288p.

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 에너지자원공학과 교수

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

신 선 미



2009년 부경대학교 환경탐사공학과 공학사
2012년 부경대학교 에너지자원공학과 공학석사

Tel: 051-629-6550
E-mail: opl0121@pknu.ac.kr
현재 부경대학교 에너지자원공학과 조교

이 근 호



1988년 연세대학교 토목공학과 공학사
2008년 부경대학교 환경탐사공학과 석사

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