

개착사면의 안정성 해석을 위한 횡단면 기법의 활용성 고찰

조태진¹⁾, 황택진^{2)*}, 이근호³⁾, 조계성⁴⁾, 이상배⁵⁾

A Study of the Applicability of Cross-Section Method for Cut-Slope Stability Analysis

Tae-Chin Cho, Taik-Jean Hwang, Guen-Ho Lee, Kye-Seong Cho, Sang-Bae Lee

Abstract Stability of cut-slope, the orientation and dimension of which are gradually changed, has been analyzed by employing the cross-section method capable of comprehensively considering the lithological, structural and mechanical characteristics of slope rock. Lithological fragility is investigated by inspecting the drilled core logs and BIPS image has been taken to delineate the rock structure. Engineering properties of drilled-core including the joint shear strength have been also measured. Potential failure modes of cut-slope and failure-induced joints are identified by performing the stereographic projection analysis. Traces of potential failure-induced joints are drawn on the cross-section which depicts the excavated geometry of cut-slope. Considering the distribution of potential plane failure-induced joint traces blocks of plane failure mode are hypothetically formed. The stabilities and required reinforcements of plane failure blocks located at the different excavation depth have been calculated to confirm the applicability of the cross-section method for the optimum cut-slope design.

Key words Cut-slope, Cross-section method, Joint trace, Plane failure block, Optimum design

초 록 개착면의 방향성과 규모가 점진적으로 변화되는 개착사면의 안정성을 지반의 암석학적, 구조적 및 역학적 특성을 종합적으로 고려한 횡단면 분석기법을 활용하여 분석하였다. 시추작업을 수행하여 획득한 코어시료를 관찰하여 사면지반의 암석학적 취약성을 조사하였으며, 시추공 내 BIPS 영상을 획득하여 사면 내부의 구조적 특성을 규명하였다. 시추코어 및 코어절리시료를 이용한 암석실험을 통해 사면 지반의 공학적 특성을 분석하였다. 평사투영해석을 수행하여 잠재적인 사면거동 양상과 거동유발 절리들을 분석하였으며, 거동유발 절리들의 트레이스 분포를 개착 형상이 고려된 횡단면상에 도시하였다. 횡단면에 분포된 평면파괴 절리들이 지지면을 형성하는 평면블록들을 절리 트레이스 분포를 고려하여 설정하였다. 횡단면 상에서 심도별 평면블록들의 안정성과 적정 안전율을 유지하기 위하여 요구되는 지보량을 산정하여 최적 사면 설계안 수립에 대한 횡단면 기법의 활용성을 고찰하였다.

핵심어 개착사면, 횡단면 기법, 절리 트레이스, 평면파괴블록, 최적 설계

1. 서 론

개착사면의 안정성 분석을 위한 다양한 실험적·수치

해석적 기법들이 개발되어 왔다. 해석 결과의 신뢰성을 증대시키기 위해서는 사면 지반의 구조적 및 역학적 특성들이 도출되어 해석기법에 적용되어야 한다. 암반의 구조적 특성 분석을 위하여 현장 암반에 분포된 불연속면의 방향성과 위치를 산정할 수 있는 BIPS 영상해석기법(Raax, 1997)과 DOM 시추기법(Yoon et al., 2003)이 개발되었다. 불연속면의 균집성을 분석하기 위하여 클러스터링 알고리즘(Mahtab and Yegulalp, 1982)이 제시되었으며, 불연속면 법선 벡터들의 eigenvalue 산정에 의한 fabric shape 분석법(Woodcock, 1977), 반구투영도 상의 극점분포에 대한 1% contour 면적($A_{1\%}$)과 최

¹⁾ 부경대학교 에너지자원공학과 교수

²⁾ 동의대학교 토목공학과 교수

³⁾ (주)호승이앤씨 대표

⁴⁾ 두산건설(주) 인프라BG 상무

⁵⁾ (주)락인포 연구개발부

* 교신저자 : tajhwang@deu.ac.kr

접수일 : 2012년 2월 8일

심사 완료일 : 2012년 2월 27일

게재 확정일 : 2012년 2월 27일

대 집중도(C_{max})를 산정하여 절리분포패턴(defect pattern)을 규명하고 사면 개착 방향성에 연관된 암반강도를 추정하는 방법(Read et al., 2003) 등이 발표되어 있다. 암반사면의 거동에 가장 큰 영향을 끼치는 요소 중 하나인 불연속면의 전단 특성에 대한 연구는 Barton et al.(1985) 외 수많은 학자들에 의해 연구되고 있다. 개착사면의 안정성 해석을 위해 평사투영해석기법(Hoek and Bray, 1974)이 제기된 이후에 한계평형이론에 근거한 수치해석모델들이 개발되었다. 최근에는 시추공에서 조사된 불연속면들의 방향성과 위치를 산정하여 개착사면의 점진적인 슬라이딩 거동을 예측하는 연구(조 등, 2004)와 개착면에서의 표출성을 검토하고 개별 절리면의 잠재적 거동 가능성을 고찰하여 계측 결과를 해석하는 연구(조 등, 2006)가 수행되어 졌다. 이 연구에서는 개착진행에 따라 방향성이 변화되고 개착심도에 따라 단계별로 경사도가 증가하는 사면의 안정성을 횡단면 기법을 활용하여 분석하였다. 이를 위하여 시추작업을 수행하여 지반구조 특성을 분석하고 직접전단시험에 의해 절리면 전단강도를 측정하였다. 시추공에서 측정된 개별 절리면의 위치와 방향성에 의거하여 개착면에서의 표출성과 잠재적인 파괴 거동 양상을 분석하였으며, 평면파괴 거동이 유발될 수 있는 블록들을 설정하고 안전율을 산정하였다. 횡단면 상에서의 심도별 블록 안정성을 분석하여 개착단계별 적정 보강량 변화 추세를 고찰하였다.

2. 사면현황

연구대상 개착사면의 현황을 Fig. 1에 도시하였다. 기반암은 편마암과 편암 등의 변성암으로 구성되어 있다. 전체사면 영역에서 소규모 단층과 파쇄대가 분포하고 있으며, 국지적으로 약 1~2 m의 층후를 가진 탄질물이 연약층을 이루고 있어서 사면 안정성에 매우 불리한 공학적 특성을 나타낸다. 단층면에는 점토물질이 충전되어

있거나 산화철이 피복되어 있다. 개착사면 암반의 전반적인 개착사면의 풍화도는 HW(highly weathered)~SW(slightly weathered)의 분포를 나타낸다. 개착사면 상부지반은 HW 풍화상태를 나타낸다. 하부지반은 MW~SW 풍화상태를 나타내며 엽리, 편리 및 단층대의 발달에 기인하여 심한 파쇄구간이 분포한다.

연구사면은 약 120 m의 폭을 갖는 대규모 사면이며, 지점별로 개착규모와 방향성이 변화된다. 개착 40 m 지점을 기준으로 좌측부의 대표 경사방향은 216°이며, 우측부의 대표 경사방향은 185°이다. 개착면의 단면도 개착 위치에 따라 변화된다(Fig. 2). 개착 20 m 지점에서는 하부 영역에서 1:0.5 경사율을 갖으며, 지반 고도 20 m 이상에서는 상부방향으로 경사도가 감소된다. 사면고는 전체사면에서 가장 낮은 32 m이다. 개착 40 m 지점에서의 사면고는 44 m이며, 최하부에 수직 개착면이 설계되었다. 개착 60 m 지점에서는 수직 개착면 영역이 확대되며, 사면고는 50 m로 증가한다. 개착 80 m 지점은 60 m 지점과 유사한 개착 단면 형상을 나타내지만, 수직 개착면 상부의 고경사율(1:0.5) 영역이 확대되어 있다.

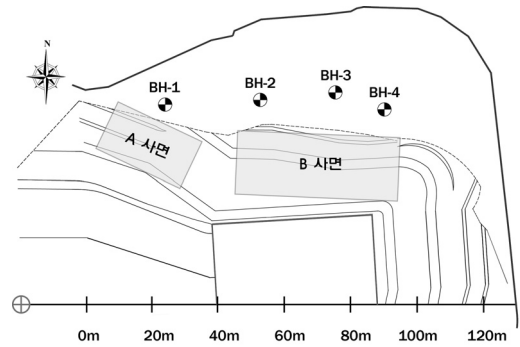


Fig. 1. 개착사면 현황

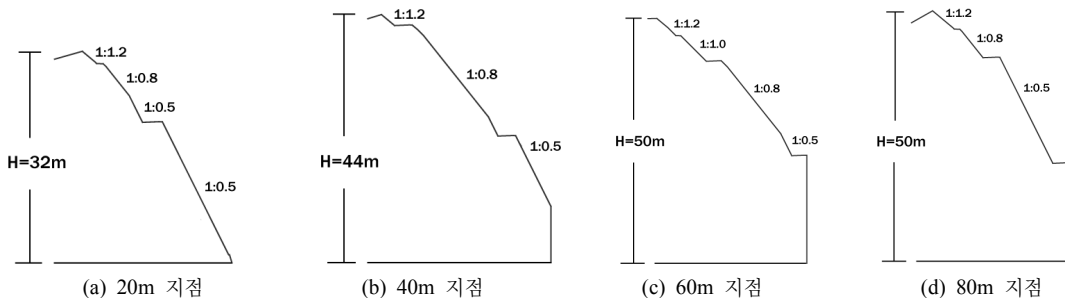
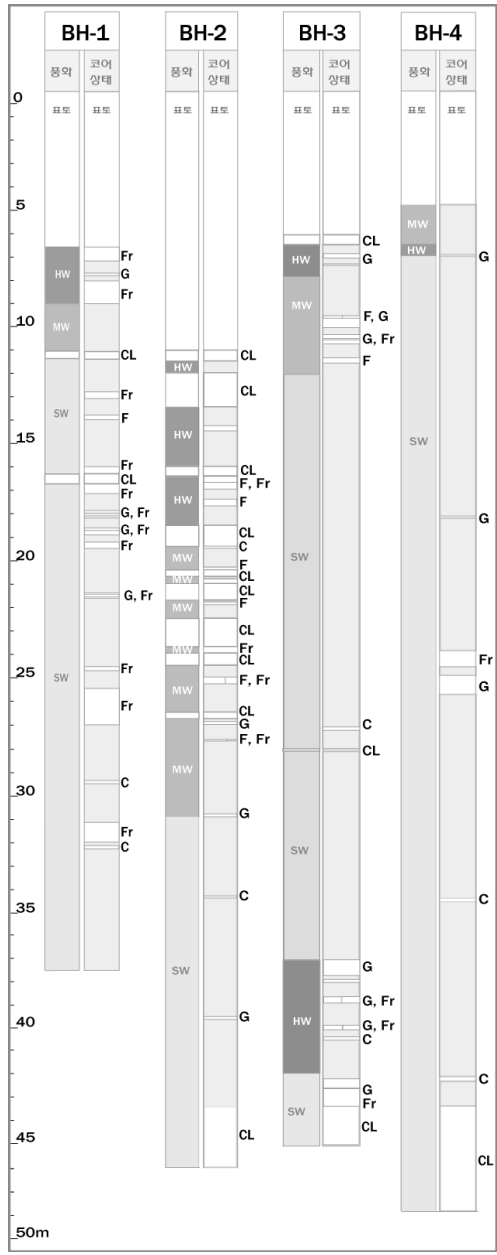


Fig. 2. 개착사면의 단면도

3. 시추조사

개착사면 지반의 암석학적 특성과 구조적 특성을 분석하기 위하여 Fig. 1에 도시된 4개 지점에서 시추작업을 수행하였으며 시추코어 관찰결과를 Fig. 3에 도시하였다.



CL: core loss F: 단층 C: 탄질물
Fr: 파쇄 G: 점토층전

Fig. 3. 시추코어 상태

시추공 BH-1에서 회수된 시추코어의 경우 시추심도 6.60~27.00 m 구간에서는 편마암이 분포하며 부분적으로 석영맥들이 협재되어 있다. 시추심도 27.00~37.00 m 구간에는 편암이 분포하며, 부분적으로 탄질물이 협재되어 있다. 심도 6.60~9.10 m 구간에서는 심한 풍화상태에 의한 파쇄구간이 나타나며, 불연속면에 점토가 충전되어 나타난다. 29.40~29.50 m 및 32.20~32.30 m 구간에는 탄질물이 협재되어 있다.

시추공 BH-2에서 회수된 시추코어에는 편마암이 분포한다. 국지적으로 약 1~2 m의 층후를 가진 탄질물이 연약층을 이루고 있으며, 소규모 단층과 파쇄대(16.40~17.00 m, 20.30~20.40 m, 21.80~24.00 m, 25.00~25.30 m)가 국소적으로 분포하고 있다. 심도 11.55~18.50 m 구간에서는 심한 풍화상태를 나타낸다. 특히 13.50~14.80 m 구간에서는 열수변질에 의한 변색 및 풍화가 진행되어 불연속면 간격이 대부분 6 cm 이하인 심한 파쇄대 구간이다. 또한 탄질물이 분포하는 구간(19.40~19.50 m, 44.70~44.80 m)은 엽리방향(N33E/58SE)과 평행한 방향으로 파쇄대가 발달되어서 지하수 존재에 의해 역학적 특성이 크게 영향을 받을 것으로 사료된다.

시추공 BH-3에서 회수된 시추코어는 편마암과 편암으로 구성되어 있다. 편마구조인 엽리와 편리가 잘 발달되어 있으며, 국지적으로 연약층인 탄질물이 협재되어 있다. 소규모 단층과 파쇄대에 의한 단층각력(breccia)과 점토 충전물이 국소적으로 분포한다(9.50~9.60 m, 11.30~11.50 m). 시추심도 27.00~27.15m, 40.30~40.35m, 43.40~43.45 m 구간에는 연약층인 탄질물이 협재되어 있다.

시추공 BH-4에서 회수된 코어에는 편마암이 분포한다. 시추심도 전 구간에서 편리를 따라 불연속면이 발달하며, 부분적으로 파쇄구간이 존재한다(6.95~7.00 m, 23.90~24.50 m). 시추심도 34.50~34.60 m, 42.20~42.40 m 구간에 연약층인 탄질물이 협재되어 있다. 암석의 풍화정도는 시추심도별로 차이는 있으나 대부분이 약간 풍화(SW) 상태이며, 시추심도 6.50~7.00 m 구간은 단층파쇄에 의한 심한 풍화상태를 나타낸다.

개착사면 암반의 구조적 특성을 분석하기 위하여 시추공 BH-1, BH-2, BH-3 및 BH-4에서 획득한 BIPS영상을 이용하여 불연속면의 방향성과 시추공 내에서의 위치를 산정하였다. 시추공 BH-1 심도 19.93~21.23 m 구간에서 촬영된 BIPS 영상을 Fig. 4에 도시하였다. 시추심도 6.9~37.3 m 구간에서 총 114개 불연속면이 관찰되었다. 개별 불연속면의 방향성을 자취선(trace) 상의 3점에 대한 위치를 고려하여 산정하였다.

평사투영도상에 절리 방향성 극점을 도시하였다(Fig. 5(a)). 절리군집 형성도를 해석하기 위하여 클러스터링

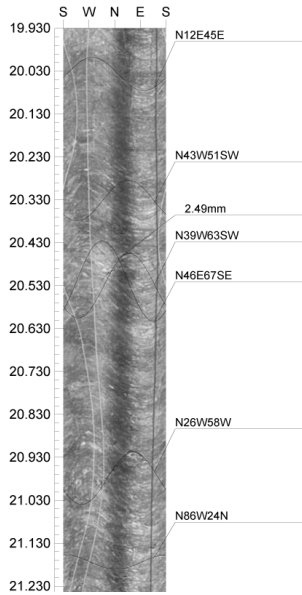
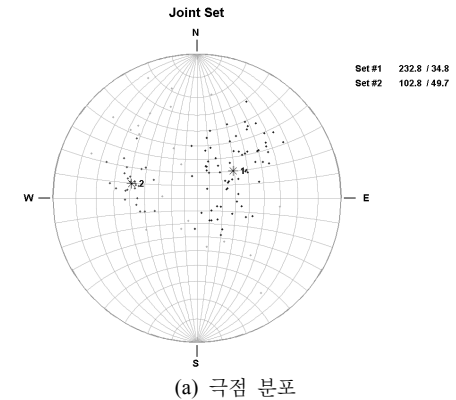
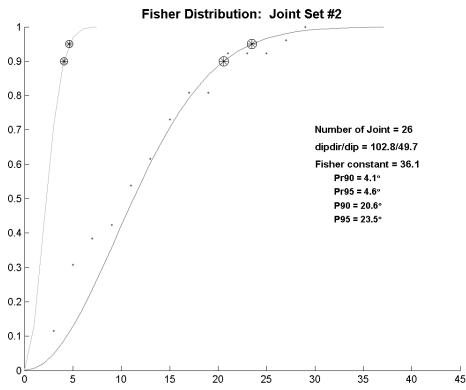


Fig. 4. BIPS 영상; 시추공 BH-1



(a) 극점 분포



(b) Fisher 분포도

Fig. 5. 절리군 형성도 - BH-1

Table 1. 시추공별 절리군 방향성

시추공	절리군 방향	Fisher 상수(K)
BH-1	233/35 (67)*	9.2
	103/50 (26)	36.1
BH-2	182/36 (43)	28.7
	042/38 (105)	10.8
BH-3	081/56 (17)	65.0
	325/45 (78)	10.6
BH-4	201/38 (11)	68.5
	309/43 (19)	43.1
	107/52 (69)	21.6

* 절리 수효

알고리즘(Mahtab and Yegulalp, 1982)을 사용하였으며, 콘각=15°를 적용하여 통계확률적으로 해석한 결과 2개 절리군이 도출되었다. 절리군 #1에는 67개 절리가 소속되어 있으며, 대표 방향성은 경사방향/경사 = 233/35이다(Table 1 참조). 한편 절리 극점의 집중성을 지시하는 Fisher 상수(K)는 9.2 이어서 절리군 형성도는 매우 낮은 상태이다(Fig. 5(b)). 절리군 #2에는 26개 절리가 소속되어 절대적인 절리수효는 낮으나 집중성은 양호한 수준(K = 36.1)을 나타낸다. 대표 방향성은 경사방향/경사 = 103/50으로 산정되었다.

시추공 BH-2에서는 표층심도 11.0~45.0 m 구간에서 총 192개 불연속면이 관찰되었다. 클러스터링 알고리즘을 활용한 분석(콘각=15° 적용)에 의해 2개 절리군이 도출되었다. 절리군 #1에는 43개 절리가 소속되어 있으며, 대표 방향성은 경사방향/경사 = 182/36이다(Table 1). 절리 극점의 집중성을 지시하는 Fisher 상수(K)는 28.7 이어서 절리군 형성도는 약간 낮은 수준이다. 절리군 #2에는 105개 절리가 소속되어 있으며, 대표 방향성은 경사방향/경사 = 042/38이다. 시추공 BH-3 및 BH-4 경우에도 동일한 절리군 해석을 수행하였으며, 해석 결과를 Table 1에 수록하였다.

4. 역학적 특성

시추공 BH-1~BH-4에서 추출된 코어에는 편마암과 편암이 분포하며, 석영맥 및 탄질물이 협재되어 있고, 풍화상태도 심도별로 변화된다. 사면거동해석에 유용한 역학적 특성 결과를 도출하기 위하여 암종과 풍화도를 고려하여 시료 채취구간을 선정하였다. 구간별로 채취된 코어시료를 사용하여 역학적 특성을 분석하였으며, 결과를 Table 2에 수록하였다. 시추공 BH-1 ~ BH-4에

Table 2. 암석의 역학적 특성

시추공	심도 (m)	풍화	dry density (g/cm ³)	porosity (%)	UCS (MPa)
BH-1	8.30 ~ 8.40	HW	2.48	8.77	11.5
	37.40 ~ 37.60	SW	2.74	0.14	66.0
BH-2	14.50 ~ 14.70	HW	2.42	9.69	-
	28.60 ~ 28.80	MW	2.78	0.36	44.3
	34.70 ~ 34.90	SW	2.73	0.11	92.0
BH-3	6.60 ~ 6.80	HW	2.36	11.89	6.5
	7.80 ~ 8.00	MW	2.76	0.29	149.0
	15.10 ~ 15.30	SW	2.76	0.15	83.7
	41.20 ~ 41.30	HW	2.45	10.62	-
BH-4	6.10 ~ 6.25	MW	2.74	0.71	36.3
	6.50 ~ 6.60	HW	2.44	8.82	-
	35.90 ~ 36.10	SW	2.76	0.07	115.9

서 공통적으로 심한 풍화등급(HW) 구간에서의 건조밀도는 매우 낮고 공극율은 매우 높게 나타난다. 일반적으로 공극율은 풍화작용에 큰 영향을 받는다. Table 2에 수록된 풍화등급별 공극율은 HW 경우 8.77~11.89%, MW 경우 0.29~0.71%, SW 경우 0.07~0.15% 범위를 나타낸다. 이는 풍화진행에 의해 암석의 공학적 특성이 현저하게 훼손된 것을 지시한다. 일축압축강도도 풍화진행에 따라 크게 변화된다. 심한풍화 구간의 암석시험편에 대해서는 점하중강도 시험법을 통하여 일축압축강도를 산정하였다. 시추공 BH-1과 BH-3 경우에는 HW 등급 구간에서의 일축압축강도가 10 MPa 정도로 급격하게 저하되며, BH-2와 BH-4에서 추출된 코어들은 시료성형이 불가능하였다. 보통 풍화(MW) 및 약간 풍화(SW) 등급의 암석시료들은 편암과 편암의 일반적인 강도를 유지하고 있으며, 국제암반역학회(ISRM, 1981)의 일축강도에 의한 무결합 분류 기준에 의거할 때 medium~high strength 범위에 속한다.

시추코어에서 추출한 절리시료에 대하여 프로파일계 이자를 이용하여 측정된 절리면 거칠기(JRC)는 6~14 범위를 나타낸다(Table 3). 절리면의 전단강도 계수인 점착력과 마찰각을 서보제어전단시험기를 활용하여 측정하였다. 점착력은 시추공 BH-2 심도 17.30~17.40 m 구간에서 HW 풍화등급의 경우에도 불구하고 40 kPa의 높은 값을 나타내는 경우를 제외하고는 풍화진행에 따라 감소되는 경향을 나타냈다. 마찰각은 절리암반의 풍화상태와 거칠기에 의한 영향이 복합적으로 반영되어 일정한 경향을 형성하지는 않았다. 시추공 BH-1에서의 마찰각은 24.73 ~ 31°, BH-2에서는 27.07 ~ 33.52°,

BH-3에서는 22.14 ~ 43.84°, BH-4에서는 31.49 ~ 34.18° 정도의 범위를 나타냈다. 잔류 마찰각은 일반적인 경향에 부합되게 침단 마찰각보다 작게 측정되었으나 마찰각 감소 정도가 매우 제한적이다. 이는 시추공에서 추출된 절리시료의 표면이 풍화되어 침단 마찰각이 원천적으로 저하되어 있는 것에 기인하는 것으로 사료된다.

절리 충전물에 풍화 및 변질에 의한 2차 변질광물 및 점토광물의 형성과 종류를 파악하기 위하여 X-선 회절 분석(XRD)을 실시하였다. 시추공 BH-1 7.70~7.80 m 구간은 심하게 풍화되었으며, X-선 회절분석 결과 주 구성광물은 kaolinite와 clinocllore이다(Fig. 6 참조). 캐울린족에 속하는 kaolinite는 $Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$ 화학식을 가지며, 장석(長石)을 비롯하여 산화알루미늄을 많이 함유하는 광물이 분해하여 생긴다. Clinocllore는 녹니석군의 광물이고, 마그네슘(Mg)이 우세한 청색-암록색의 단사정계 광물이다. 4개 시추공에서 추출된 충전물 시료에서 점토광물인 kaolinite와 montmorillonite 등이 검출되었으며, 시추공별로 상이한 심도 구간에서의 XRD 분석 결과를 Table 4에 수록하였다.

5. 안정성 해석

사면해석 영역을 개착면의 방향성과 개착단면의 형상에 의거하여 2개 지역으로 구분하였다(Fig. 1 참조). 개착지점 0~40 m 구간에 설정된 A 사면은 경사방향 = 208°이며, 20 m 개착지점의 단면형상(Fig. 2(a))에 기초하여 대표경사 = 56°를 설정하여 사면해석을 수행하였다. 개착면 우측 40 m~90 m 개착 구간에 설정된 B

Table 3. 절리면 전단강도

시추공	심도 (m)	풍화	JRC	cohesion (kPa)	friction angle(°)
					Peak (residual)
BH-1	7.20 ~ 7.30	편마암 (HW)	10~12	12	24.7 (22.2)
	9.70 ~ 9.80	편마암 (MW)	8~10	15	31.8 (27.2)
	34.10 ~ 34.30	편암 (SW)	10~12	34	30.1 (25.3)
BH-2	17.30 ~ 17.40	편마암 (HW)	8~10	40	32.3 (31.3)
	30.40 ~ 30.70	편마암 (MW)	10~12	28	33.5 (31.1)
	43.10 ~ 43.20	편마암 (SW)	12~14	31	27.1 (23.4)
BH-3	7.40 ~ 7.55	편마암 (HW)	14~16	5	32.4 (27.7)
	8.80 ~ 9.00	편마암 (MW)	10~12	16	22.1 (20.0)
	24.10 ~ 24.30	편암 (SW)	12~14	44	40.8 (36.0)
BH-4	6.00 ~ 6.10	편암 (MW)	6~8	14	34.2 (28.2)
	27.80 ~ 28.00	편암 (SW)	10~12	51	31.5 (26.2)

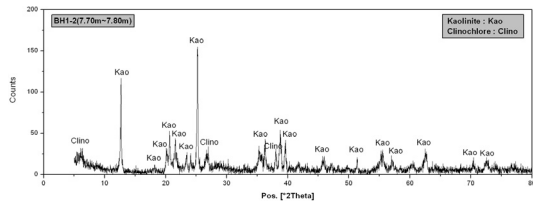


Fig. 6. X-선 회절분석 결과

사면은 경사방향 = 185°이다. 60 m 개착 지점의 단면 형상(Fig 2(c))에 기초하여 상부지역의 대표경사 = 56°를 설정하였으며, 하부지역 수직개착부를 포함한 전체 개착단면의 안정성을 횡단면 해석을 수행하여 고찰하였다.

5.1 A 사면

시추공 BH-1에서 조사된 절리면의 방향성과 위치 자료에 근거하여 개착면 상에 표출되는 절리 트레이스를 대수학 투영기법을 활용하여 Fig. 7에 도시하였다. 불연속면의 형태는 원형으로, 중심은 시추축 상에 위치하는

Table 4. 시추공별 점토광물

시추공	심도(m)	광물
BH-1	7.7	kaolinite, clinocllore
	17.9	muscovite, chlorite
	31.6	kaolinite, vermiculite, montmorilonite
BH-2	26.9	muscovite, vermiculite, montmorilonite
	39.6	muscovite, chlorite
BH-3	7.3	muscovite
	38.4	chlorite, muscovite
BH-4	7.1	muscovite, vermiculite, clinocllore

것으로 가정하였다. 불연속면의 반경은 20 m로 설정하였다. 시추공에서 관찰된 절리수효는 114개이며, 개착면에는 99개 절리면이 표출되었다. 절리방향성 자료에 대하여 클러스터링 알고리즘을 적용하여 산정된 대표 방향성에 의거하여 평사투영해석을 수행하였다. 시추공

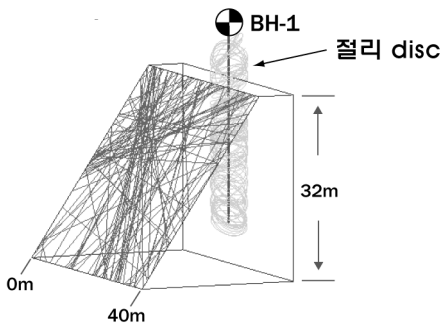


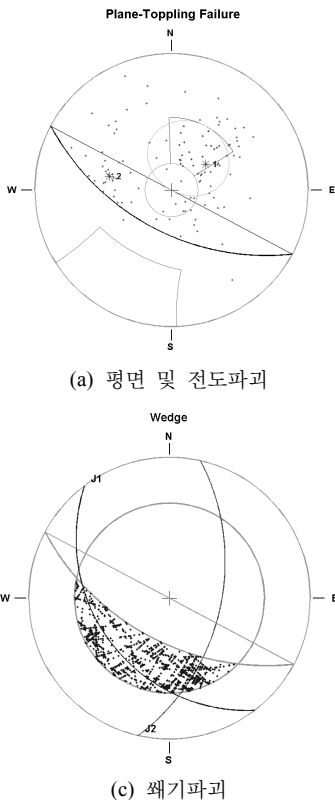
Fig. 7. A 사면에 표출된 절리 트레이스

에서 회수된 코어 절리면에 풍화 진행에 의해 형성된 팽윤성 점토광물이 존재하기 때문에 가장 풍화가 진행된 절리 시료에서 측정된 잔류전단강도 $\phi_r = 22^\circ$ 를 사용하였다.

A 사면의 방향성을 208/56으로 설정하여 수행된 평사투영해석 결과를 그림 9에 도시하였다. 평사투영도상에 설정된 평면파괴 영역에는 절리군 #1의 대표 방향성

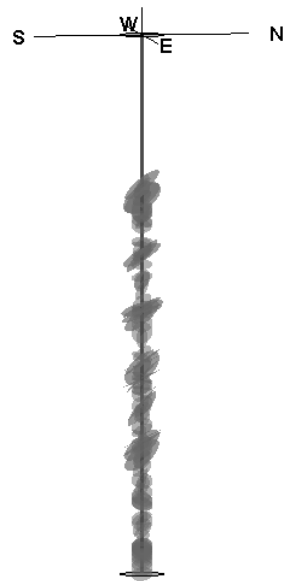
이 위치하며 다수의 절리 극점들도 분포되어 있다(Fig. 8(a)). 평면파괴를 유발시킬 수 있는 절리들은 시추공 전체 시추심도에서 분포하여(Fig. 8(b)) A 사면에서 평면파괴가 유발될 가능성이 높은 것으로 사료된다. 전도 파괴영역에는 절리군 대표 방향성이 위치하지 않으며 극점들도 분포하지 않는다(Fig. 8(c)). 시추공 BH-1에서 산정된 2개 절리군 대표 방향성 대원의 교차점이 썩기파괴 영역에 매우 근접되어 있어서 썩기파괴 가능성을 배제할 수는 없으나, 교차점이 지시하는 썩기 기저선의 선경사가 매우 낮아서 썩기블록이 형성되어도 실제적인 거동 가능성은 매우 낮을 것으로 고찰된다(그림 9).

A 사면 중앙인 20 m 개착 지점에 횡단면을 설정하여 시추공 BH-1에서 조사된 절리 방향성과 위치자료를 이용하여 절리 트레이스 분포와 사면체 블록형성 범위를 추출하였다(Fig. 9). 횡단면 상에 도시된 평면파괴 유발 절리들의 트레이스를 기반으로 잠재적 평면블록을 형성하였으며, 코어절리시료에 대하여 직접전단시험을 수행하여 측정된 전단강도(Table 3 참조)를 사용하여 Mohr-Coulomb 파괴기준에 입각한 평면파괴블록의 안정성을



(a) 평면 및 전도파괴

(c) 썩기파괴



(b) 평면파괴 유발절리

Fig. 8. 평사투영해석 결과 - A 사면

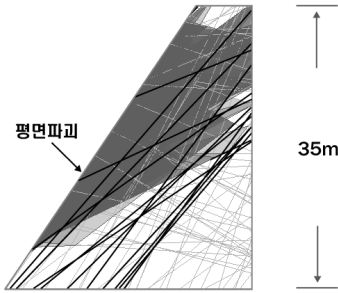


Fig. 9. A 사면 횡단면도

산정하였다. 횡단면 최상부에 형성된 평면파괴 블록의 경우 건조상태에서의 안전율은 1.5 정도이며, 최대 수두 2.5 m에서도 최소 안전율 1.2 정도가 유지된다(Fig. 10(a)). 횡단면 중앙부에 소규모 평면파괴 블록이 형성된 경우에는 안전율이 2.0 이상을 상회하지만(Fig. 10(b)), 하부지역에서 평면파괴 블록의 규모가 증가할수록 건조상태의 기본 안전율은 감소하고, 수압발달에 의한 위해성은 증대된다(Fig. 10(c) 및 (d)). 또한 건조상태의 안전율 1.5 및 포화상태의 안전율 1.2를 유지시킬 수 있는 보강량도 6.2 ton/m → 19.2 ton/m 및 3.5 ton/m → 17.6 ton/m로 블록 규모에 따라 증가한다. 결과적으로 A 사면 지역에서는 개착면 하부에서 블록 규모가 증가할수록 안정성이 감소하기 때문에 개착면 하부지역 보강작업의 적정성이 전체 개착사면의 안정성 확보에 매우 중요한 것으로 판단된다.

5.2 B 사면

B 사면은 상부의 경사진 개착부와 하부의 수직 개착부로 구성되어 있다. 상부 개착부 지역의 경사방향/경사 = 185/56으로 설정하고, 시추공 BH-2에 인접한 좌측부, BH-3에 인접한 중앙부 및 BH-4에 인접한 우측부에 대한 평사투영해석을 수행하였다.

좌측부에 대하여 절리면 마찰각 $\phi = 27^\circ$ 를 사용하여 수행된 평사투영해석 결과를 Fig. 11에 도시하였다. 평사투영도 상에 설정된 평면파괴영역에 절리군 #1의 대표 방향성이 위치하며 다수의 절리 극점들도 분포되어 있다. 전도파괴 영역에는 절리군 대표 방향성은 위치하지 않으나 3개 절리면이 전도파괴를 유발시킬 수 있는 방향성을 갖고 있다. 절리군 #1 및 #2 대표 방향성 대원의 교차점이 썩기파괴 영역 외각에 위치하여 썩기파괴 가능성이 매우 낮다(Fig. 11(a)).

중앙부에 대하여 시추공 BH-3 코어절리시료에서 측정된 전단강도 $\phi = 22^\circ$ 를 사용하여 평사투영해석을 수행하고 결과를 Fig. 11(b)에 도시하였다. 평사투영도 상에 설정된 평면파괴 영역에 절리군 #3의 대표 방향성이 위치하며, 12개 개별 절리들의 방향성이 평면파괴를 유발시킬 수 있는 잠재성을 보유하고 있다. 전도파괴 영역에는 절리군 대표 방향성은 위치하지 않으나 14개 랜덤절리들이 전도파괴에 대한 잠재성을 보유하고 있다. 절리군 #1 및 #3 대표 방향성 대원의 교차점이 썩기파괴 영역에 위치하며, 절리군 #2 및 #3 대표 방향성 대원의 교차점은 썩기파괴 영역 경계부에 위치한다. 썩기블

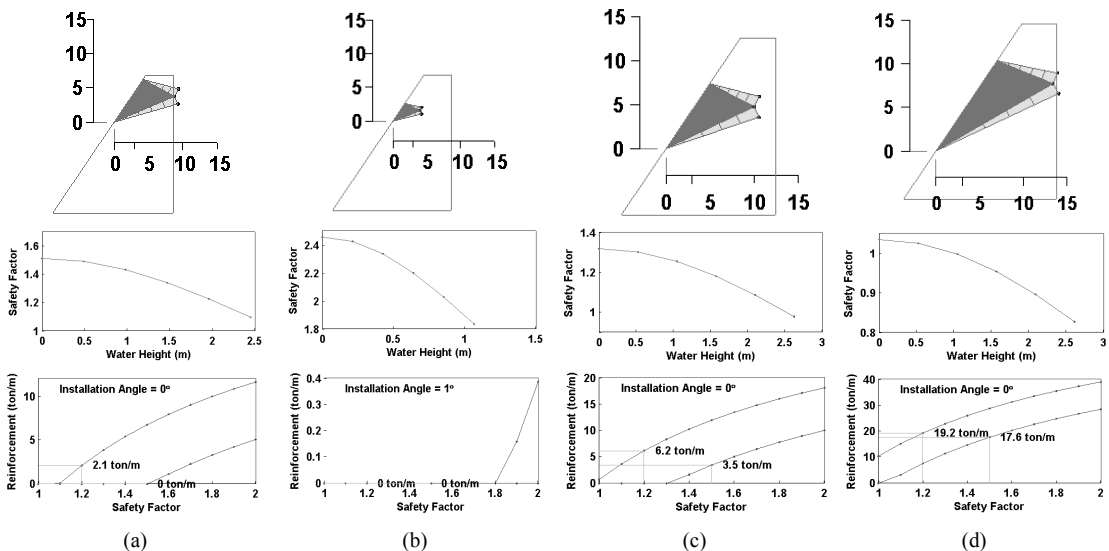


Fig. 10. 횡단면 해석 결과 - A 사면

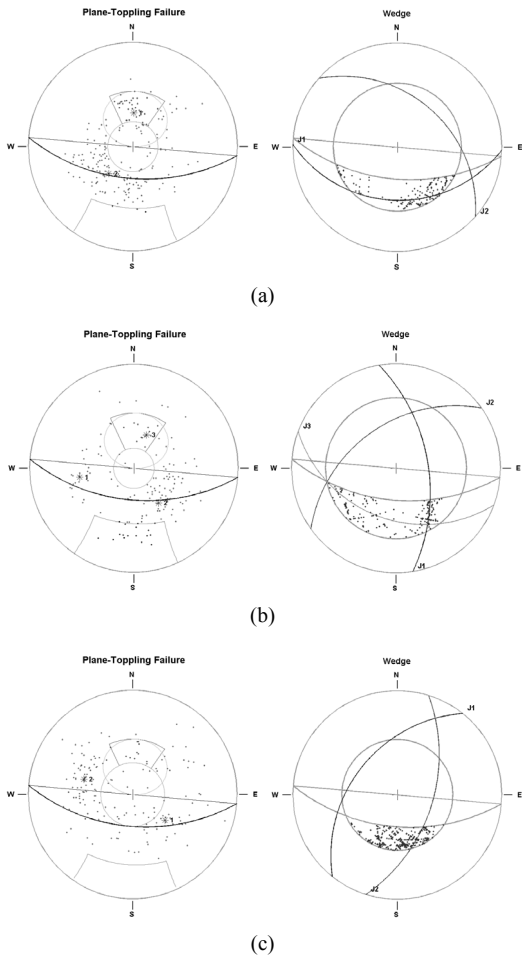


Fig. 11. 평사투영해석 결과 - B 사면 (a) 좌측부 (b) 중앙부 (c) 우측부

록의 기저선이 될 수 있는 절리면 교선의 위치가 파괴 영역 좌우 경계구역에 집중되어 있어 실제 형성되는 썩기 블록의 거동은 상당 수준 제한될 것으로 고찰된다.

우측부에서는 시추공 BH-4 코어절리 시료에서 측정된 절리면 마찰각 $\phi = 34^\circ$ 를 사용하여 평사투영해석을 수행하고 결과를 Fig. 11(c)에 도시하였다. 평사투영도상의 평면 및 전도파괴 영역에는 절리군 대표 방향성이 위치하지 않는다. 평면파괴 영역에 랜덤 절리 11개가 위치하며, 전도파괴 유발절리들은 시추구간 내에는 존재하지 않는다. 절리군 #1 및 #2 대표 방향성 대원의 교차점이 썩기파괴 영역 반대쪽에 위치하여 2개 절리군이 연계된 썩기블록은 형성되지 않으나, 랜덤 절리들이 교차하여 개별 블록의 기저선을 형성할 수 있는 것으로

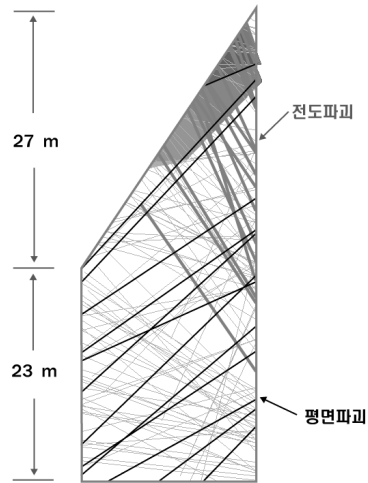


Fig. 12. B 사면 횡단면도 - 개착 75 m 지점

분석되었다.

이상에서 고찰된 사항들을 종합할 때 평면파괴 양상은 B 사면 전체영역에서 발생될 잠재성이 있으며, 전도파괴는 중앙부 영역에 국한되어 있다. 또한 중앙부에서는 썩기 파괴도 발생될 가능성이 있어서 B 사면 영역에서 가장 불안정한 지역으로 판단되었다.

B 사면 중앙부 75 m 개착 지점에 횡단면을 설정하여 평면 및 전도파괴 유발 절리들의 트레이스 분포와 사면체 블록 형성 범위를 도출하였다(Fig. 12). 횡단면 전체영역에서 평면파괴 유발절리들이 분포하여 상부 경사면과 하부 수직 개착부에 표출된다. 전도파괴유발절리들은 횡단면 상부에 분포되어 경사면에 표출된다.

횡단면 최상부 지역에서는 평면파괴블록들이 건조상태에서 안전율 2.0을 유지하며, 완전 포화된 경우에도 안전율은 1.0 이상으로 유지된다(Fig. 13(a)).

경사면 하부 지역에서는 평면파괴 블록의 안전도가 감소되어 건조상태에서 안전율 1.2, 포화상태에서 안전율 1.0 이하를 나타낸다(Fig. 13(b)). 수직 개착부 지역에서는 평면파괴블록들의 안정성이 매우 저하되어 건조상태에서의 예상 안전율이 1.0 이하인 매우 불안정한 상태를 나타낸다(Fig. 13(c)와 (d)). 또한 완전 포화된 상태에서 안전율 = 1.2를 확보하기 위하여 요구되는 보강량도 상부 경사면에서는 5.5 ton/m이지만 하부 수직 개착부에서는 25.1 ton/m 이상으로 급격하게 증가된다. 이상의 결과들을 고려할 때 B 사면의 경우에도 개착심도가 증가할수록 안정성이 저하되며, 특히 수직 개착부에서의 안정성 확보가 중요한 것으로 판단되었다.

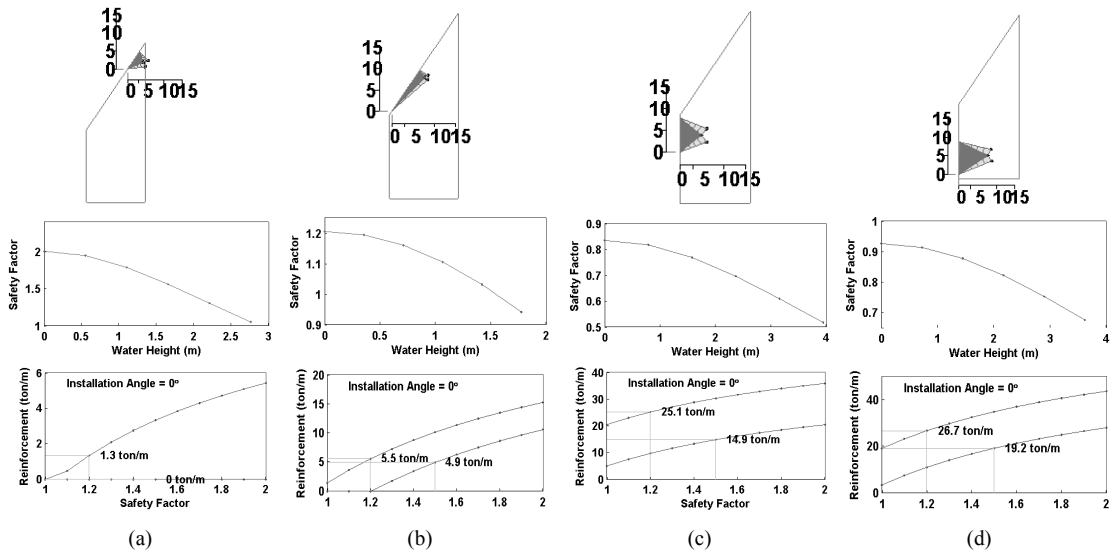


Fig. 13. 횡단면 해석 결과 - B 사면

6. 결론

사면의 방향성과 규모가 개착 지점에 따라 변화되는 개착 사면에 대하여 횡단면 분석기법을 활용하여 안정성을 분석하였다. 개착사면 전체 영역에서 임의의 지점에서 설정될 수 있는 횡단면에는 평사투영기법을 사용하여 분석된 잠석적 평면 및 전도파괴 유발절리들의 트레이스 분포 및 사면체 블록들의 형성 범위가 도시된다. 현장 절리 시료를 이용하여 측정된 절리면 전단강도를 사용하여 횡단면에 형성되는 평면블록의 안정성을 분석하였으며, 건기 및 우기 시에 요구되는 안전율을 유지하기 위한 적정 보강량 산출도 가능하였다. 특히, 횡단면 상의 블록 위치별 안전율과 적정 보강량을 분석하여 단계별 사면 개착에 대한 최적 설계안 수립에 대한 활용가능성도 확인하였다.

사 사

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

참고문헌

1. 조태진, 박소영, 이상배, 이근호, 원경식, 2006, “개착사면

의 구조적 특성과파괴양상을 고려한 계층 해석”, 한국암반 공학회지, 16, pp. 451-466.
 2. 조태진, 이창영, 고기성, 2004, “개착과정에서 인장균열이 발생된 동해고속도로 건설현장 암반사면의 거동해석”, 한국지반공학회지, 20.8, pp. 15-27.
 3. 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, pp. 121-140.
 4. Hoek, E. and Bray, J., 1974, Rock slope Engineering, The Institution of Mining and Metallurgy, London.
 5. ISRM, 1981, Rock characterization, testing and monitoring, In: Brown ET (ed) Suggested methods. Pergamon Press, Oxford, pp. 211.
 6. Mahtab, M. A. and Yegualp, 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, pp. 116-23.
 7. Woodcock, N. H., 1977, “Specification of fabric shapes using an eigenvalue method”, Bulletin of the Geological Society of America, Vol. 88, pp. 1231-1236.
 8. Raax, 1997, Borehole Image Processing System Information. Sapporo, Japan.
 9. Read, S., Richards, L. and Cook, G., 2003, “Rock mass defect patterns and the Hoek-Brown failure criterion”, Proc. 10th Cong. ISRM, South Africa. pp. 947-954.
 10. 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, pp. 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 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

이 근 호



1988년 연세대학교 토목공학과 공학사
2008년 부경대학교 환경탐사공학과 석사

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

조 계 성



1989년 고려대학교 토목공학과 공학사
2007년 공주대학교 교통공학과 공학석사

Tel: 02-510-3263
E-mail: chokkss@doosan.com
현재 두산건설(주) 인프라BG 상무

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