

개착사면의 구조적 특성과 파괴양상을 고려한 계측 해석

조태진^{1)*}, 박소영²⁾, 이상배³⁾, 이근호⁴⁾, 원경식⁵⁾

Monitoring of Cut-Slope Behavior with Consideration of Rock Structure and Failure Mode

Tae-Chin Cho, So-Young Park, Sang-Bae Lee, Geun-Ho Lee and Kyung-Sik Won

Abstract Analysis of slope behavior concerning the structural characteristics of field rock mass can be processed by virtue of borehole information of joint orientation and position acquired from DOM drilled core. Anticipated sliding potential of pre-failed rock slope is analyzed and the regional slope instability is investigated by inspecting the hazardous joints and blocks the traces of which is projected on the cut-face. Cross section has been set at the center of rock slope and the traces of both joints and tetrahedral blocks, which potentially can induce the slope failure, are drawn to investigate the failure modes and the triggering mechanism. Automated monitoring system has been established to measure the slope movement and especially, inclinometer has been installed inside DOM borehole to analyze the slope movement by considering the internal rock structure. Algorithms for predicting the slope failure time have been reviewed and the significance of heavy rainfall on the slope behavior has been investigated.

Key words DOM drilling, Cut slope, Cross section, Depth of sliding, Monitoring, Prediction of Failure time

초 록 DOM 시추코어에서 측정된 불연속면의 위치 및 방향성 자료를 이용하여 현장암반의 구조적 특성을 고려한 사면거동 해석이 가능하였다. 3차원 공간에서 설정된 절리들의 위치에 의거하여 붕락 현상이 발생한 개착사면의 추가적인 파괴양상을 예측하였으며, 개별 절리면의 붕락위해 가능성과 개착면 상에서의 trace 위치를 파악하여 세부적인 사면거동 양상을 파악하였다. 개착사면 횡단면에서 개별절리들의 파괴거동 양상과 사면체 불룩형성을 대수학적으로 산출하여 사면 붕락심도를 규명하였다. 현장사면에 자동화 계측시스템을 설치하여 사면거동에 대한 계측자료를 수집하였으며, DOM 시추공 내에 지중경사계를 설치하여 사면거동 양상을 횡단면 해석결과와 대비시켜 분석하였다. 지중경사계를 이용하여 측정된 개착면의 표면변위 자료에 의거하여 사면 파괴시기를 예측할 수 있는 방법론을 고찰하였으며, 강우가 사면거동에 끼치는 영향성을 분석하였다.

핵심어 DOM 시추, 개착사면, 횡단면, 붕락심도, 계측, 파괴시기 예측

1. 서 론

국토의 대부분이 산악지형인 우리나라는 조사 및 설계단계에서 절취사면에 대한 조사접근성이 제한되어 충분한 지반자료 획득이 곤란하고, 외국에서 개발된 토

사면 해석기법이 암반사면에도 획일적으로 적용되어 사면 안정성 해석이 불완전하게 수행되고 있다. 또한, 유지관리 차원에서 수행되는 계측작업도 암반구조에 의거한 사면거동 특성을 자료해석에 반영시키지 못하고 명목적으로 수행되는 경우가 빈번하다. 본 연구에서는 시추작업에 의거한 현장조사 기법을 발전시켜 암반구조에 대한 명확한 분석 자료를 획득하고, 이를 기반으로 하는 사면해석 및 계측자료해석 기법을 체계화하여 효율적인 사면유지관리시스템 구축을 도모하였다. 이를 위하여 일차적으로 개착대상 암반의 구조적 특성을 DOM 시추조사(조 등, 2003; Yoon et al., 2003; Cho et al., 2004)를 통하여 측정된 절리들의 위치 및

¹⁾ 부경대학교 환경탐사공학과 교수
²⁾ 삼원지질(주)
³⁾ 부경대학교 응용지질학과 박사수료
⁴⁾ (주)호승ENC, 대표이사
⁵⁾ 지오텍컨설팅(주), 대표이사
* 교신저자 : chotc@pknu.ac.kr
접수일 : 2006년 9월 8일
심사 완료일 : 2006년 11월 1일

방향성에 의거하여 해석적 및 통계적으로 분석하는 방법론을 고안하였다. 조사지역 암반의 구조특성을 정량적으로 분석하기 위하여 fabric shape(Woodcock, 1977) 산정기법을 도입하였으며, defect pattern(Read et al., 2003) 해석방법을 초기에 제안된 평사투영도상에서의 컨터링 영역을 이용하는 방법론상의 어려움을 극복하기 위하여 patch를 사용하여 수행할 수 있도록 개정하였다.

현장 암반에 발달된 절리들의 3차원 공간에서의 분포양상을 고려한 사면해석을 수행하였다. 국내에서 수행되는 평사투영기법에 의거한 사면해석에서는 절리 군집성을 DIPS 프로그램을 사용하여 해석자가 반구투영도 상에서 결정하고 절리군 대표방향에 의거하여 개착(예정)사면의 거동양상을 판단한다. 이 경우 해석자가 주관적으로 절리군 형성 가능성 및 대표 방향성을 결정하기 때문에 분석 수행의 객관성 및 재현성이 매우 저하되어 있으며, 사면거동 해석에도 절리군의 대표 방향성만이 반영되어 절리군 군집정도가 낮을 경우 비현실적인 해석결과가 도출된다. 본 연구에서는 절리군 형성 분석에 Mahtab and Yegulalp(1982)가 제안한 clustering algorithm을 도입하여 통계학 이론에 근거한 결과를 도출하였다. 또한 평사투영기법을 이용한 사면거동 분석에서도 절리들의 위치와 방향성을 고려하여 개별절리들의 봉락유발 가능성과 개착면에서의 위치 및 규모를 파악하여 국지적 봉락위해성을 추정하였다.

개착면에 형성되는 잠재적 사면체 블록의 형성 및 봉락 가능성 해석도 개별 절리들의 평면식을 이용하여 대수학적으로 산정하였다. 국내에서 사용되는 Unwedge 프로그램의 경우 블록 형성에 대한 입력 자료로 2개 절리군의 대표 방향성이 요구되며, 사면 천장면을 임의로 설정하여 사면체 블록 형성을 개념적으로 예상하기 때문에 현장사면 조건과는 괴리된 해석결과가 도출된다. 이에 비해서 연구대상 사면의 블록해석에 사용된 모델(Cho et al., 2004)에서는 DOM 시추코어에서 산정된 절리 자료를 이용하여 개착면에서의 사면체 블록 형성을 판단한다. 이를 위하여 개착면 상에 절리 trace가 도시된 전산절리도를 3차원 공간기하학 원리를 이용하여 대수학적으로 작성하고, trace 교차지점에서 해당 절리 교차선의 미끄러짐 가능성과 새로운 불연속면이 교차되어 실제적으로 블록을 형성하는지를 판단한다. 결과적으로 개착사면에서 블록 형성 위치, 규모, 봉락 거동성에 대한 종합적인 해석이 가능한 분석 자료가 도출된다. 또한, DOM 시추작업에 의해 개착사면 내에서 불연속면의 위치 설정이 가능한 점에 착안하여 횡단면 해석법을 고안하였다. 개착면에 대해 법선방향으로 횡단면이 설정되면 개착전면부 해석에서 도출된 봉락 가능 불

연속면들의 trace 분포와 사면체 블록들의 단면이 도시되어 사면 내부에서의 거동양상 및 봉락심도 해석이 용이하게 수행될 수 있다.

사면거동을 모니터링하고 봉괴시기를 예측하기 위하여 현장사면에 대해 자동화 계측시스템을 구축하였다. 계측기기 및 자동화 계측체계는 기존 국내에서 수행되는 체제를 도입하였으나 계측기 설치위치는 사면해석 결과에 의거하여 실제 거동이 유발될 가능성이 높게 판단되는 지점으로 결정하였다. 사면 표면변위 자료들을 이용한 계측자료 해석도 기존의 수렴/발산 판정의 범위를 벗어나 사면파괴 거동 단계를 판정하고 파괴시기를 실시간적으로 예측할 수 있도록 개발된 방법론(Fukuzono, 1990)을 활용하였으며, 사면거동 유발인자들 간의 상호관계, 특히 강우가 사면거동에 끼치는 영향성을 강우-사면거동에 대한 time-lag 해석 기법(Lollino et al., 2002)을 도입하여 분석하였다.

2. 사면 현황

경부고속도로 확장공사구간에서 일차적인 파괴가 발생한 사면(Fig. 1)의 지질구조특성과 거동양상을 분석하였다. 해석대상 사면에는 중생대 퇴적암인 세일이 우세하게 분포하며, 퇴적층리면이 사면방향과 유사한 방향으로 발달되어 있다. 층리면 경사는 10° - 15° 정도로 비교적 낮으며, 절리들은 수직에 가까운 고경사를 나타내고 있다. 현장조사 결과 사면방향으로 경사진 층리면 내에 점토가 충전되어있는 것이 관찰되었다. 점토가 충전된 층리면은 경사가 15° 이며, 추가적인 사면 굴착에 의해 개착면 중앙부에 노출되어 평면파괴 거동을 유발할 수 있을 것으로 판단되었다.

해석대상 사면은 추가적인 봉락 방지를 위해 재개착되었으며, 영구적인 안정성 확보를 위해 중앙부 20 m



Fig. 1. Slope failure in the primary excavation stage

구간에 대해 지보재 설치 계획되었다. 최종 개착후의 사면 방향은 경사방향/경사 = 172/55이며, 높이는 10.4 m로 설계되었다(Fig. 2). 지보재가 설치될 개착구간의 불연속면 분포양상 및 암반구조 특성을 분석하기 위하여 3개 시추공에서 DOM 시추작업을 수행하였다. DOM 시추코어에 분포된 절리면의 방향성은 대수학적으로 산정되었다. Fig. 3에 도시된 바와 같이 절리면 상의 3개 지점(P_{DOM} , P_1 , P_2)의 국지좌표 값을 시추코어 상에서 측정하고, 국지좌표계에서의 위치좌표(P_{local})를 전체 좌표계에서의 위치좌표(P_{global})로 변환시켰다. DOM 시추축의 선추향/선경사 = α_D/β_D 이면 국지 좌표계에서 전체 좌표계로의 변환은 다음의 변환행렬 [T]를 이용하여 수행되었다.

$$P_{local} P_{global} = [T] P_{local} \quad (1)$$

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos\alpha_D & \sin\alpha_D \cos\beta_D & \sin\alpha_D \sin\beta_D \\ -\sin\alpha_D & \cos\alpha_D \cos\beta_D & \cos\alpha_D \sin\beta_D \\ 0 & -\sin\beta_D & \cos\beta_D \end{bmatrix}$$

전체좌표계에서의 위치좌표가 결정되면, 3개 지점에 대한 벡터 연산을 수행하여 절리면 단위 법선벡터 \vec{n} 의 성분값 a, b, c를 산정하였다(Cho et al., 2004). 절리면의 위치를 대표하는 상수 d는 전체 좌표계에서의 P_{DOM} 위치(X_{DOM} , Y_{DOM} , Z_{DOM})을 활용하여 결정되어 개별 절리면에 대한 평면식이 구성되었다.

$$d = a \cdot X_{DOM} + b \cdot Y_{DOM} + c \cdot Z_{DOM} \quad (2)$$

시추공 BH-1에서 지하 12 m 깊이까지 DOM 시추조사를 수행하였으며, 회수된 시추코어를 분석하여 도출된 시추공 내의 불연속면(이하 절리로 지칭) 발달 양상을 개별 절리면의 방향성과 위치에 근거하여 대수적으로 모사하여 Fig. 4에 도시하였다. 총 25개의 절리면이 관찰되었으며, 대부분의 절리들은 층리면으로 구성되어 있다. 절리들은 비교적 일정한 출현 빈도를 나타낸다. 일부 구간에서는 50°내외의 비교적 높은 겹보기 경사로

지니고 있으나 대체적으로 25°이내의 저경사로 발달되어 있고, 경사방향은 정남쪽으로 우세하다. 전체 절리면을 대상으로 군집(clustering) 알고리즘(Mahtab & Yegulalp, 1982)을 활용하여 절리군집성을 분석하였다. 절리 극점들이 1개의 중심축에 군집되어 분포하며, 군집 알고리즘에서 제시된 cone angle = 15°를 적용하여 해석된 절리군의 대표적인 방향성은 경사방향/경사 = 171/08 이다. Fisher 상수는 48.7로 비교적 높은 집중성을 나타낸다. 시추 축을 스캔라인으로 가정하여 산정된 전체 절리간격은 0.47 m(± 0.37)이고, 시추구간에서 RQD = 96.9%의 매우 양호한 암반상태를 유지한다.

시추공 BH-2 및 BH-3에 대해서도 동일한 분석을 수행하였다. 시추공 BH-2의 수직심도는 13 m이며, DOM 시추코어에서 총 35개의 불연속면이 관찰되었다. 1개 절리면을 제외한 층리면들의 경사는 매우 낮으며, 주된 경사방향은 남남서 방향이다. 불연속면들은 단일군을 형성

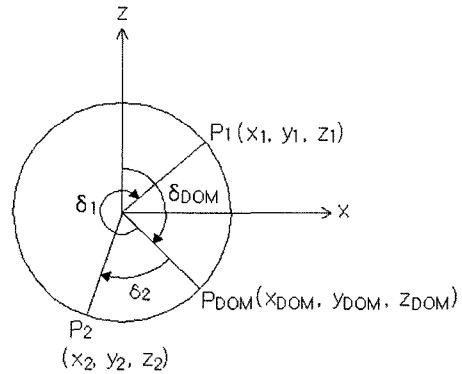


Fig. 3. Schematic diagram of intersected joint plane in DOM core

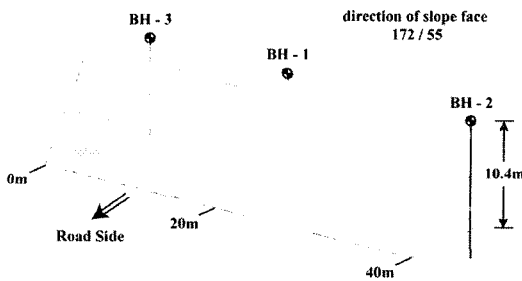


Fig. 2. Final layout of slope

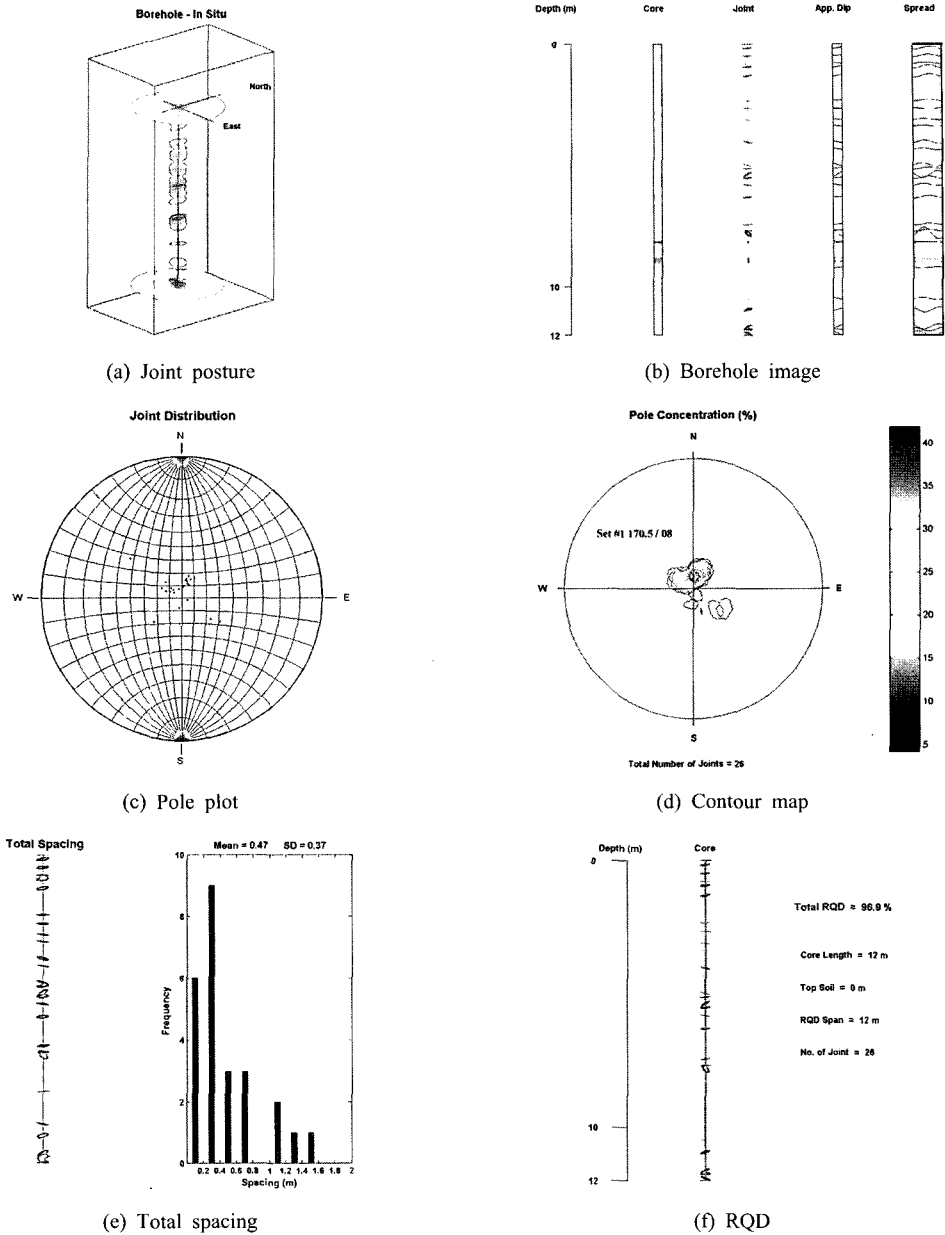


Fig. 4. Joint distribution in the borehole BH-1

한다. 대표 방향성은 198/7.5이며, Fisher 상수는 30으로 상대적으로 낮은 집중성을 나타낸다. 시추코어상의 전체 절리간격은 0.36 m(± 0.25)이고, RQD는 99.5%로 극히 양호한 암반상태를 지시한다. 시추공 BH-3에서는 13 m 코어 연장에서 총 27개의 불연속면이 관찰되었다. 주된 경사방향은 서남서 방향이며, 형성된 단일군의 대표 방향성은 248.7/10.1이다. Fisher 상수는 40.7로 보통 정

도의 집중성을 나타낸다. 전체 절리간격은 0.41 m(± 0.24)이며, 전체 시추구간에서 RQD = 98.4%의 극히 양호한 암반상태를 나타낸다.

3개 시추공에서 측정된 층리면들은 매우 낮은 경사각을 가져서 절리 극점들이 반구투영도 중앙부분에 집중되어 분포하며(Fig. 5), 절리집중도가 비교적 높은 단일 절리군을 형성하고 있다(BH-1: 171/08, K=48.8; BH-2:

198/08, K=30.0; BH-3: 249/10, K=40.7). 퇴적층리면으로 구성된 절리들의 편향성은 defect pattern(Read et al., 2003) 분석 결과에 의해서도 확인된다. Read et al. (2003)은 McMahon(1968)의 Joint Dispersion Index (JDI) 개념을 바탕으로 반구투영도에 도시된 극점분포에 대한 컨터맵 상에서 1% contour 면적($A_{1\%}$)을 산정하여 defect pattern을 구분하였다. 본 연구에서는 경사각에 따른 투영면적 왜곡과 contour 면적 산정에 대한 부정확성을 타파하기 위하여 반구투영도 상에 100개의 동일한 투영 범위를 갖는 격자를 설정하고 전체 절리수효에 대해 1% 이상의 절리 극점이 투영된 격자 수와 최대 투영률을 산정하여 $A_{1\%}$ 및 C_{max} 를 도출하였다. Read et al.(2003)의 분류에 의거한 defect pattern 해석 결과는 인접한 지역인 BH-1 및 BH-3 호공(Fig. 2 참조)에서는 $A_{1\%} = 16-18\%$ 인 highly regular pattern 양상을 나타내며, BH-2 호공에서는 $A_{1\%} = 23\%$ 로 moderately regular pattern 양상을 나타낸다. 또한, 3개

시추공에서 $C_{max} = 18.5-20.0\%$ 가 산정되어 절리 방향성의 집중도가 매우 높은 것을 지시한다. 이상의 결과에 의거할 때 사면의 암반구조는 매우 편향되어 있으며, 최대 편향성도 개착사면의 평면파괴에 매우 취약한 것으로 고찰되었다.

3. 사면 거동

해석대상 사면에서 예상되는 거동양상을 분석하기 위하여 3개 DOM 시추공에서 획득한 불연속면 자료들을 종합하여 사면해석을 수행하였다. 해석대상 사면의 설계 제원은 경사방향/경사 = 172/55, 높이 = 10.4 m 이다. 일차적으로 개착면에 표출되는 절리 trace 들을 대수학적으로 투영하여 사면 절개면에서의 불연속면 발달양상을 가시적으로 예측하였다(Fig. 2). 절리들의 평면식을 이용한 trace 투영은 조 등(2004)에 기술된 원리를 활용하였다.

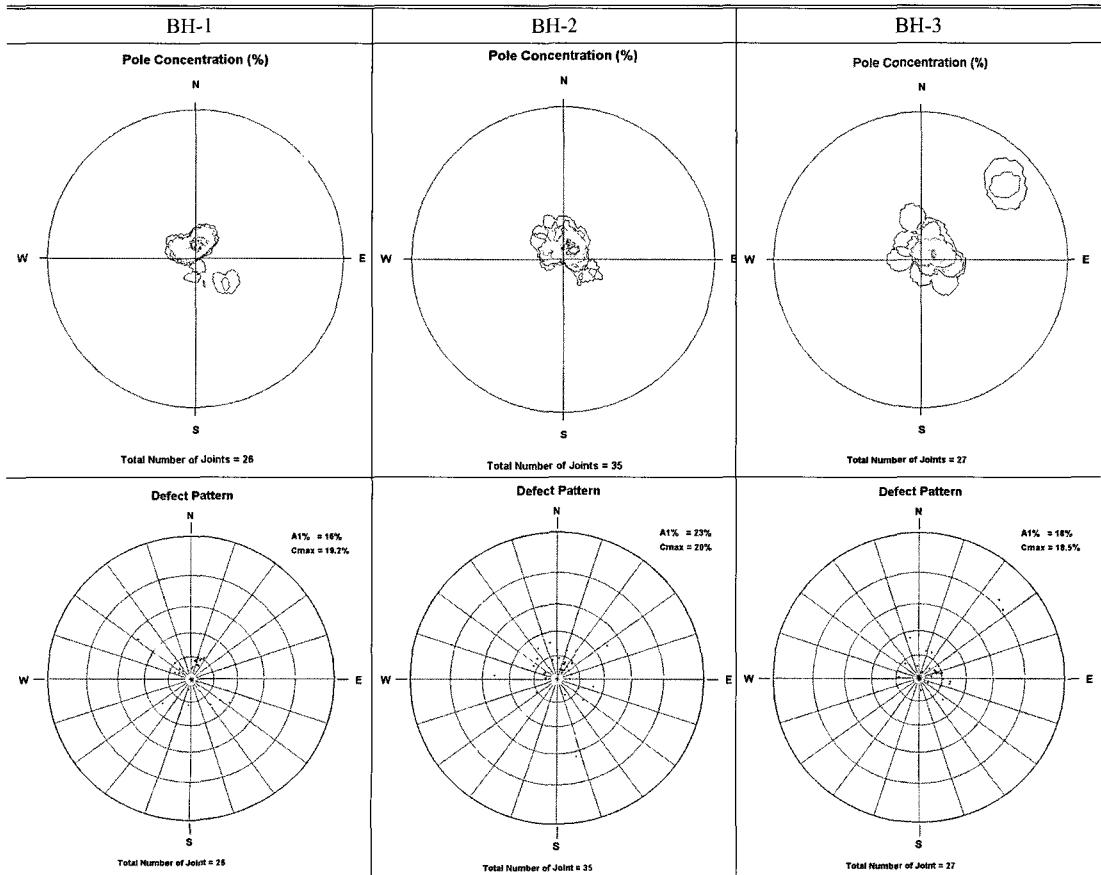


Fig. 5. Joint pole concentrations and defect patterns

개착사면 암반에 발달한 불연속면의 방향성에 대한 극점 분포를 Fig. 6에 도시하였다. 불연속면들은 대부분 층리면이며 경사가 작아 경사방향이 매우 산만하게 변화되는 양상을 보인다. Mahtab and Yegulalp(1982)가 제시한 clustering algorithm에 의거하여 cone angle = 15°를 사용한 결과 단일 절리군이 형성되었으며, 대표군 방향은 216/07로 산정되었다. 저경사인 층리면의 방향성 변화가 심하여 절리군의 Fisher 상수는 28.6으로 비교적 낮게 산출되었다.

개착사면에 분포된 층리면에 점토광물이 충전된 것을 고려하여 불연속면의 마찰각을 10°로 가정하고 평사투영기법을 이용하여 사면거동 양상을 분석하였다. Fig. 7에 도시된 결과에 의거할 때 개착사면에 분포된 불연속면의 대표 방향성은 평면파괴 및 전도파괴를 유발시키

지 않는 것으로 분석되었다. 그러나 개별 불연속면들의 극점 분포를 고려할 때 다수의 층리면들이 평면파괴를 유발시킬 수 있으며, 전도파괴를 유발시킬 수 있는 고경사 절리도 분포되어 있다. 평면파괴 및 전도파괴를 유발시킬 수 있는 불연속면들이 개착 설계면에 표출되어 형성되는 trace 분포를 Fig. 8 및 Fig. 9에 각각 도시하였다. 잠재적으로 평면파괴를 유발할 수 있는 절리 trace 들이 사면 상부 및 하반부에서 연속적으로 발달되어 있어서 개착사면의 주된 파괴모드가 평면파괴일 것을 지시한다. 전도파괴를 유발시킬 수 있는 절리 극점은 반구투영도상에 1개가 파괴영역에 위치하며(Fig. 7), 개착면 최상부에서 trace 가 표출된다(Fig. 9). 잠재적인 전도파괴 유발 절리의 방향성은 346/57이다. 이와 같은 고경사 절리면들은 수직으로 시추된 코어와 교차될 확률이 상대적으로 낮으며, 해석사면 암반에서 수직방향으로 수행된 시추작업에 의해서도 수 개의 절리들만이 측정되었다(Fig. 7). 따라서 Fig. 9에 도시된 개체 이외의 고경사 절리들이 분포될 가능성이 매우 높으며, 일차적인 사면파괴 과정에서 평면파괴 블록의 규모를 제한시키는 역할을 했던 것으로 고찰되었다.

평사투영기법을 이용한 관례적인 썩기파괴 분석에서는 2개 이상의 대표 절리군이 형성될 것이 요구되며, 해석 대상사면에서는 3개 시추공 자료를 종합하여도 단일 절리군만 형성되어 썩기 형성이 불가능한 것으로 분석

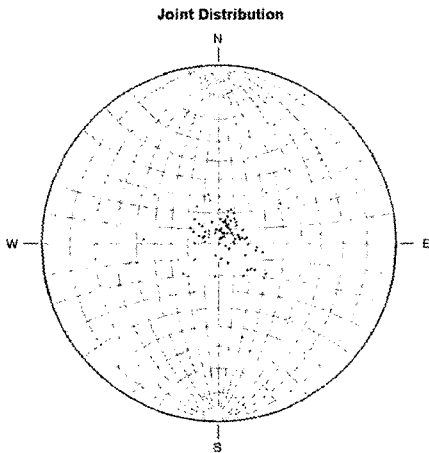


Fig. 6. Pole plot

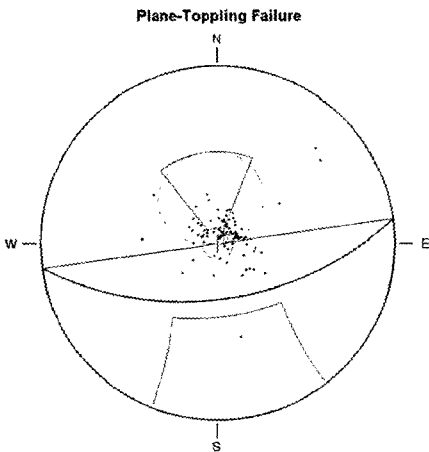


Fig. 7. Lower hemi-spheric analysis for slope failure

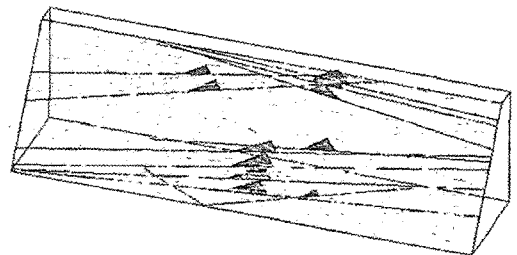


Fig. 8. Joint traces for plane failure

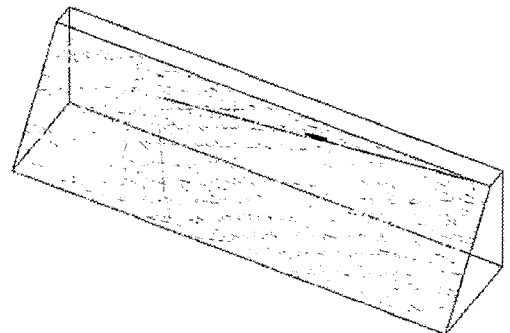


Fig. 9. Joint traces for toppling failure

된다. 연구사면의 개착면에는 수많은 불연속면 trace들이 교차된다. 이는 개착면 내부에서 불연속면이 교차됨을 의미하며, 교차선은 제 3의 불연속면과 교차될 경우에 형성되는 잠재적 사면체 블록의 기저선을 형성한다. 결과적으로 불연속면 교차선의 방향성에 의거하여 잠재적 사면체 블록의 거동양상이 결정된다. 3개 DOM 시추공에서 조사된 불연속면의 위치와 방향성을 고려하여 개착면에 형성되어 붕락을 야기할 수 있는 사면체 블록들을 도출하였으며, 사면체 모서리 길이가 5 m 이하인 소규모 블록들의 분포도를 Fig. 10에 도시하였다.

사면 개착면에서의 파괴양상 분석결과는 사면 거동에 대한 전반적인 양상을 제시하기는 하나 개착면 내부거동을 예측하는데 활용되지는 못한다. 이와 같은 한계성을 극복하고 사면의 내부거동에 대한 해석을 수행하기 위해서 개착면 중앙부에 횡단면을 설정하고 파괴 유발 불연속면 및 사면체 블록과의 교차선을 도시하였

다(Fig. 11). 평면파괴를 유발시키는 불연속면은 횡단면 최상부 및 하부에 분포한다. 최상부에 위치한 불연속면은 trace 규모를 고려할 때 사면거동에 큰 영향을 끼치지 못하며, 하부에 위치한 불연속면에서 평면파괴 거동이 유발될 때 사면 안정성에 커다란 영향을 끼치는 것으로 고찰된다. 전도파괴 불연속면은 상대적으로 저경사를 갖고 있어서 직접적으로 전도파괴를 유발시키기 보다는 평면파괴에 연관되어 사면거동 범위를 규정하는 것으로 사료된다. 횡단면 중앙부에는 잠재적 사면체 블록들이 무수히 형성되어 있으나 블록규모가 크며, 실제적인 거동이 유발될 가능성이 높은 규모가 작은 블록들은 하부에 집중되어 있다(Fig. 10).

4. 계 측

일차적인 파괴가 발생된 사면의 안정성을 확보하기

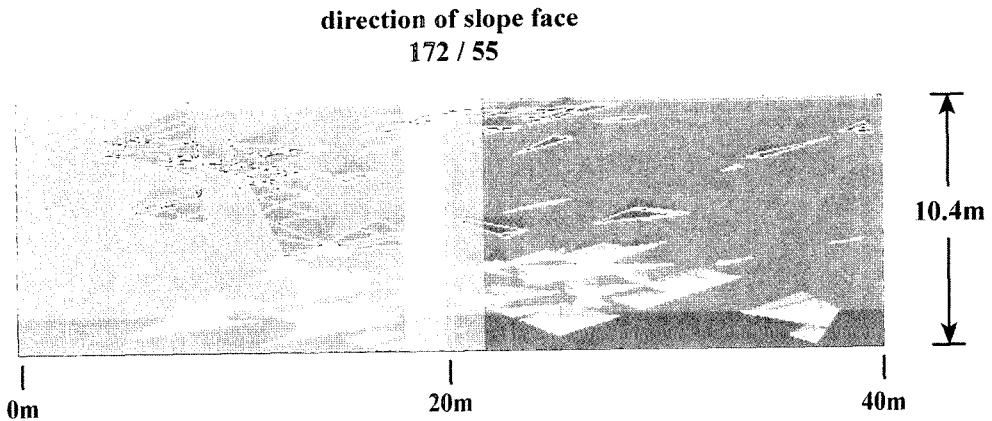


Fig. 10. Small-scaled potential tetrahedral blocks on the cut-face

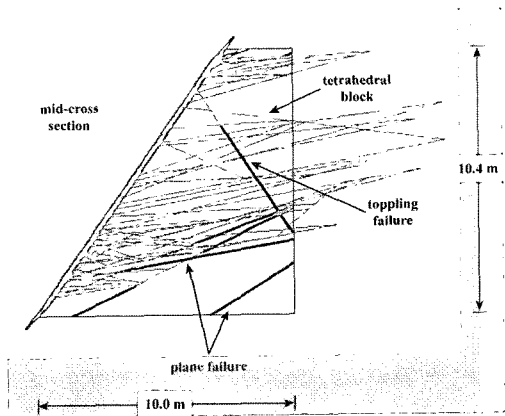


Fig. 11. Anticipated slope behavior at the mid-cross section

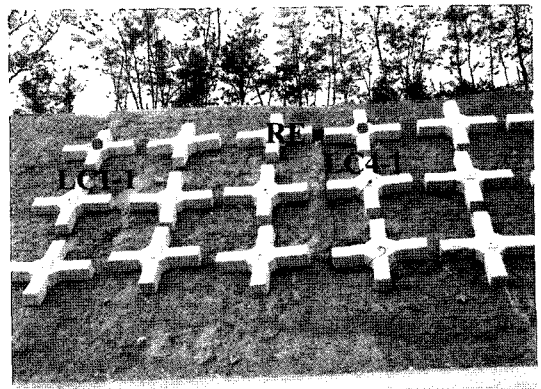


Fig. 12. Installation of cable anchor

위하여 최종적으로 개착된 사면 전면부에 케이블 앵커가 3 m 간격으로 설치되었다(Fig. 12). 앵커 인장력에 의한 지보효과를 검증하기 위하여 하중계를 설치하였으며, 전체적인 사면거동을 모니터링하기 위하여 지중경사계, 지중변위계, 수압계 및 강우량계를 추가적으로 설치하고 자동화계측시스템을 구축하였다. 사면거동에 대한 계측작업은 계측프로그램에 의해 자동적으로 수행되었으며, 각각의 계측기에서 수집된 자료는 현장에서 무선으로 전송되어 계측시스템의 데이터베이스에 저장되어 사면거동 해석에 활용되었다.

연구사면에 시공된 케이블 앵커의 보강효과를 검증하기 위하여 앵커 설치 1단의 2개 지점(LC1-1, LC4-1)에 하중계를 설치하였으며(Fig. 12), 앵커 인발 이후의 앵커 인장력 변화를 수집하여 Fig. 13에 도시하였다. 계측 개시 45-75일 구간은 여름철 장마기간에 속하여 현장에 설치된 전원공급 장치인 태양열 전지가 작동되지 않아서 계측자료의 획득이 불가능하였다. 일반적으로 인발된 앵커의 하중변화 양상은 인장력 도입 구간, 하중 재하 구간, 하중 유지 구간으로 구분되며(이호문, 2005), 연구사면에 설치된 하중계에서도 매우 유사한 인장력 변화 양상이 관찰되었다. 앵커 인장력은 계측 개시 150일 까지 초기 인장력의 90%를 상회하는 수준을 유지하였으며, 이후에 매우 완만하게 감소하는 추세가 관찰되었다.

조사대상 사면의 거동양상을 관찰하기 위하여 개착구간에 시추된 BH-3 호공에(Fig. 2) 지중경사계를 설치하였다. 지중경사계에는 2 m 간격으로 총 6개의 센서가 부착되었고, 최하부 고정점은 개착면의 높이 10.4 m를 고

려하여 심도 12 m에 설정되었다(Fig. 14). 케이블 앵커가 시공된 이후의 사면거동 추이를 고찰하기 위하여 지중경사계에서 수집된 사면의 횡방향 표면변위 양상과 하중계 LC1-1을 통해 수집한 앵커 인장력 변화를 비교하였다. Fig. 15에 도시된 바와 같이 계측경과 14일을 기준으로 약 20일 동안에는 표면변위가 발생되지 않았으며, 이 기간은 앵커 보강에 따른 초기 인장력 도입구간

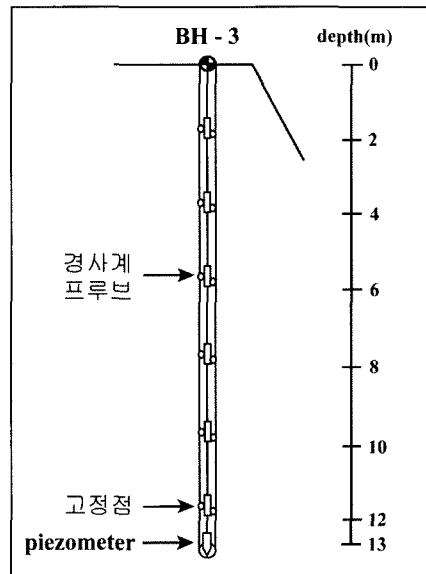


Fig. 14. Installation of clinometer in DOM drilled borehole BH-3

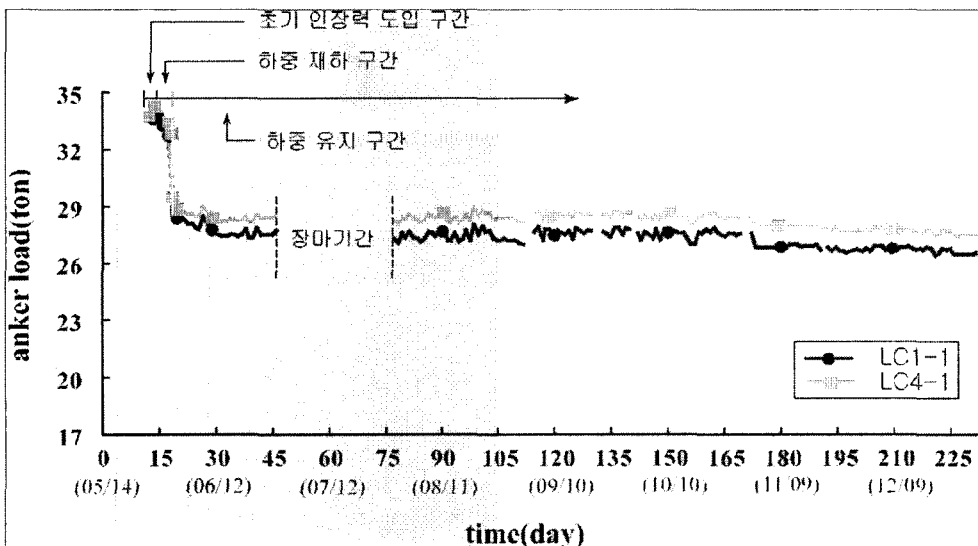


Fig. 13. Variation of anker load

과 하중재하 구간에 대응되는 시기이다. 따라서 계측 개시 14일에 설치한 앵커의 인장력이 사면거동을 억제 한 것으로 판단된다. 그러나 계측 경과 30일 이후에는 앵커 하중이 일정하게 유지되는 상황에서도 표면변위가 발생하였으며, 150일을 기준으로 앵커축력의 손실로 인한 사면거동 억제력이 감소하여 표면변위가 점진적으로 증가되는 양상이 관찰되었다.

지중경사계가 설치된 시추공 BH-3 지점에 횡단면을 설정하여 파괴거동을 야기 시킬 수 있는 불연속면과 사

면체 블록과의 교차선을 대수학적으로 산정하여 Fig. 16에 도시하였으며, 지중경사계의 프루브 설치 위치도 도면에 표시하였다. 자동화된 지중경사계의 프루브를 이용하여 측정한 계측결과 초기 66일까지는 심도 2-4 m, 6-8 m 및 8-10 m 구간에서의 횡방향 변위가 증가하였으며, 심도 0-2 m, 4-6 m 및 10-12 m 구간에서의 변위는 미약하였다(Fig. 17). 이와 같은 양상은 Fig. 16에 도시된 사면거동을 야기시키는 불연속면 및 블록들의 위치와 일치한다. 초기 단계에서의 사면거동은 평면파괴

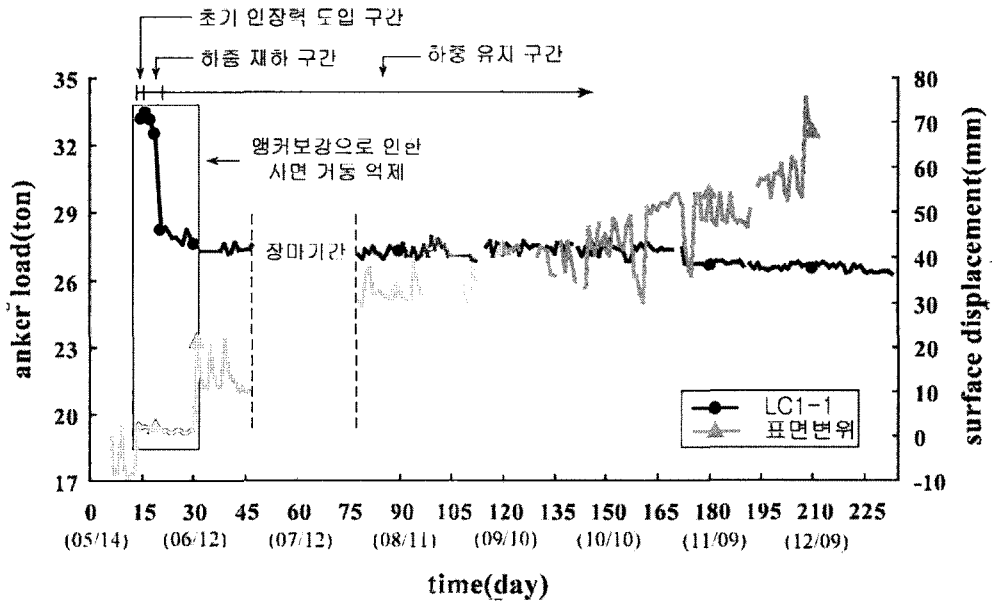


Fig. 15. Slope surface movement with respect to the anker load

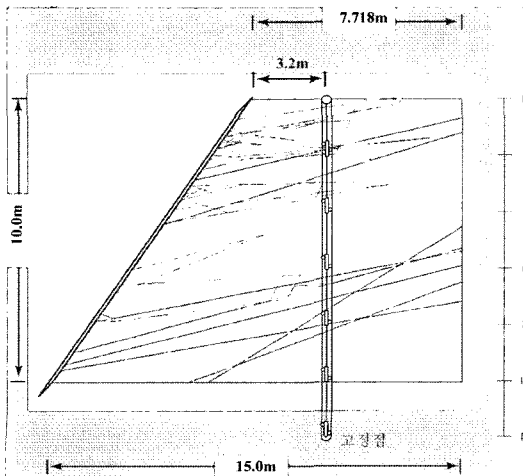


Fig. 16. Sliding joints and blocks on the cross section containing clinometer

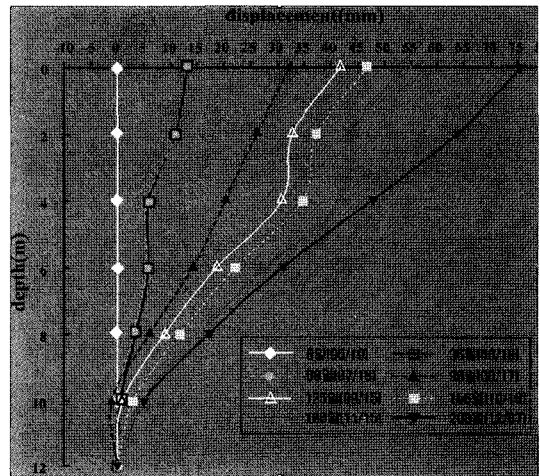


Fig. 17. Lateral displacement of slope

를 유발시킬 수 있는 심도 2-4 m 및 6-8 m에 위치한 층리면 활동이 주된 요인인 것으로 사료되었다. 계측 시기 96일에는 전체 심도 구간에서 일정한 변위 증가량을 나타낸다. 한편, 계측 125~186일까지는 전반적으로 횡방향의 변위가 증가하지만 심도 2-4 m 구간에서는 변위 증가가 발생되지 않았다. 이후 208일 경과시점에서 2-4 m 구간에서 횡방향 변위가 크게 증가하여 전체 심도에서의 변위 증가량이 계측 96일 경우와 같이 일정한 상태를 이루게 된다(Fig. 18 참조). 이와 같은 구간별 변위발생 양상을 심도별 RQD와 연관시켜 검토하기 위하여 계측 186일에 측정된 구간별 누적변위와 심도별 RQD를 Fig. 19에 도시하였다. 지중경사계의 고정점인 심도 12 m 지점은 RQD가 100%로 거의 무결하여 지중경사계의 고정점 역할을 완벽하게 수행하고 있는 것으로 판단된다. 대부분의 구간에서 암질지수가 50~80% 인 반면에 2-4 m 구간의 RQD는 100%이다. 이 구간에서는 위에서 기술된 바와 같이 계측 초기에는 횡방향 변위가 발생하였으나, 125일을 시작으로 약 3개월 동안은 거동이 발생하지 않았다. 반면에 RQD가 87% 이하인 기타 구간에서는 계측시기 동안 연속적으로 변위 증가량이 발생하였다. 결과적으로 연구사면의 횡방향 변위는 심도 2-4 m 구간에서의 변위 증가 - 고정 - 증가 양상에 따라 전체심도의 변위추세가 결정되며, 이 거동 양상은 Fig. 16에 도시된 심도 2 m 부근에 존재하는 평면파괴를 유발시킬 수 있는 층리면의 거동과 밀접하게 연관되는 것으로 고찰되었다.

Voight(1988)는 파괴시점에 임박한 상태에서의 물체 거동에 관한 구성방정식을 고찰하여 지진, 단층, 화산

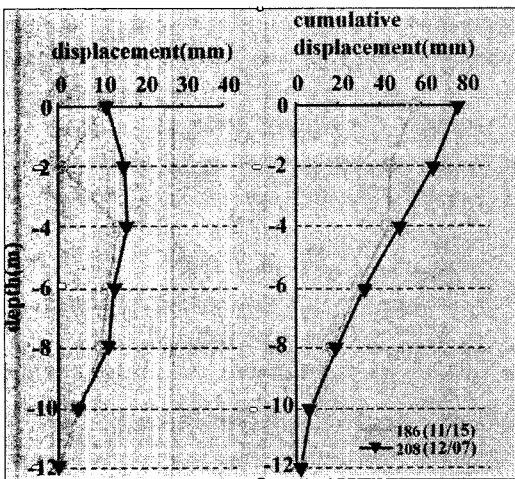


Fig. 18. Lateral displacements and the cumulative lateral displacements along the borehole BH-3

가스분출 등의 지반거동을 예측할 수 있는 방법론을 제시하였으며, Crosta and Agliardi(2002)는 사면에서의 creep 현상에 적용시켜 파괴 경보기준 선정에 활용하였다.

$$\dot{\Omega}^{-\alpha} \ddot{\Omega} - A = 0 \tag{3}$$

여기서, Ω : 측정치
A, α : 상수

식 (3)을 Ω 에 관해 이중 적분하면 시간에 따른 거동 양상이 도출된다.

$\alpha=1$ 일 때,

$$\Omega - \Omega_0 = \frac{\Omega_0}{A} (e^{A(t-t_0)} - 1)$$

$\alpha=2$ 일 때,

$$\Omega - \Omega_0 = \frac{1}{A} [\ln(t_f - t_0) - \ln(t_f - t)] \tag{4}$$

$\alpha > 1, \alpha \neq 2$ 일 때,

$$\Omega - \Omega_0 = \frac{1}{A(\alpha-2)} [\dot{\Omega}_0^{2-\alpha} - [A(1-\alpha)(t-t_0) + \dot{\Omega}_0^{1-\alpha}]^{(2-\alpha)/(1-\alpha)}]$$

여기서, Ω_0 : 초기 거동 측정치

t_0 : 초기 시간

t_f : 파괴 시간

식 (4)로 표현된 거동 함수는 $\alpha=1$ 일 때는 지수함수,

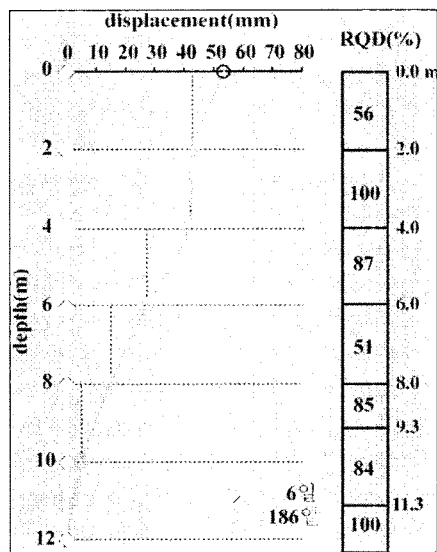


Fig. 19. Regional RQD and the cumulative lateral displacement at the monitoring date of 186

$\alpha=2$ 일 때는 자연로그 함수, $\alpha>1, \alpha\neq 2$ 일 때는 음의 거듭제곱 함수 형태를 나타낸다.

현장사면에서 지중경사계로 측정된 횡방향 표면변위에 의거하여 사면의 거동 특성을 고찰하였다. 계측 개시 이후의 표면변위(Fig. 20)는 일정한 범위 내에서 진동하지만 전체적으로는 시간 경과에 따라 증가하는 양상을 보인다. 계단식으로 증가하는 변위구간에서 증가양상을 대표한다고 판단되는 9개 시점의 변위량(Fig. 20 참조)을 선택하여 회귀분석을 실시하였다. 식 (4)에서 명시적인 함수(explicit function) 형태가 제시된 $\alpha=1$ 경우의 지수함수는 실제 측정된 표면변위 변화 양상과 매우 차이가 나서 $\alpha=2$ 경우의 로그함수를 이용하여 회귀분석을 수행하였다(Fig. 20). 통계학적으로 설정된 회귀분석식의 정확도를 지시하는 결정계수 $R^2=0.9576$ 이

어서 연구사면의 시간에 따른 횡방향 표면변위가 자연로그함수 형태로 증가하며, Voight(1988)가 제안한 거동특성계수 $\alpha=2$ 를 사면거동 분석에 사용할 수 있을 것으로 판단되었다.

Voight(1988)는 변위속도의 역수에 대한 함수를 도출하여 파괴시기를 추정하는 방법론을 제안하였다.

$$\dot{\Omega}^{-1} = [A(1-\alpha)(t-t_0) + \dot{\Omega}_0^{1-\alpha}]^{1/(\alpha-1)} \quad (5)$$

여기서, $\dot{\Omega}_0$ 는 초기 변위 속도이다. 식 (4)로 기술된 변위속도의 역수는 시간에 따라 감소되며, α 값에 의해 감소되는 양상이 달라진다. $1 < \alpha < 2$ 일 때는 오목(concave)한 형태, $\alpha < 2$ 일 때 볼록(convex)한 형태를 나타내며, 연구대상 사면의 경우인 $\alpha=2$ 에 대해서

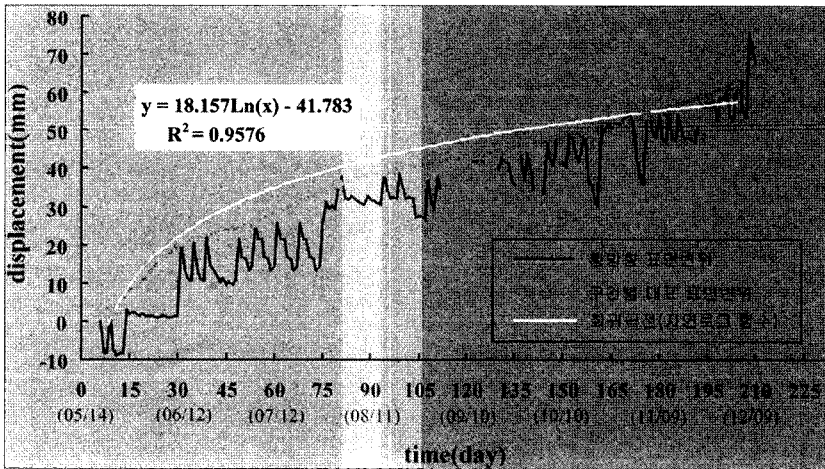


Fig. 20. Lateral displacement at the slope surface

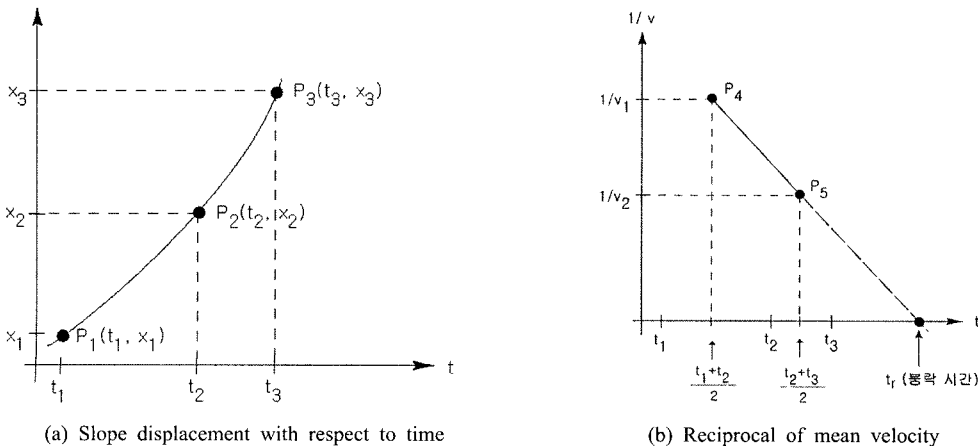


Fig. 21. Prediction of slope failure time (after Fukuzono, 1990)

는 직선적으로 감소되는 특징을 나타낸다. 식 (5)를 활용하여 파괴시기를 예측하기 위해서는 파괴시점에서의 변위속도의 역수(Ω_f^{-1})가 알려져 있어야 하지만, 변위속도가 매우 커서 Ω_f^{-1} 를 무시할 수 있는 경우에는 식 (5)의 함수가 시간축과 교차되는 지점을 파괴시점으로 간주할 수 있다. 이와 같은 이론적 원리에 입각하여 Fukuzono(1990)는 $\alpha = 2$ 인 직선 형태의 변위속도의 역수($1/v$) - 시간(t) 관계를 이용하여 도시적인 파괴시기 추정법을 제안하였다. Fig. 21(a)에서와 같이 시간에 따른 표면변위를 도시한 그래프에서 점 P_1, P_2, P_3 을 선정하여 시간 증가분에 따른 표면변위 증가량 즉, 변위 속도 v_1 과 v_2 를 산정한다.

$$v_1 = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}, v_2 = \frac{x_3 - x_2}{t_3 - t_2} \quad (6)$$

변위속도 v_1 과 v_2 의 역수를 취하고, 속도가 산정된

시간구간의 중간지점을 결정하여 $P_4(\frac{t_2+t_1}{2}, \frac{1}{v_1})$ 및 $P_5(\frac{t_3+t_2}{2}, \frac{1}{v_2})$ 을 도시한다(Fig. 21(b)). 두 점 P_4 와 P_5 를 지나는 직선을 시간을 나타내는 가로축과 교차되도록 연장한다. 이때, 가로축과 만나는 t_f 값이 파괴시기이다. 연구사면의 파괴시기 추정을 위해 Fukuzono(1990)에 의해 제안된 파괴시기 추정방법을 적용하였다. Fig. 20에 제시된 횡방향 표면변위를 이용하여 변위속도를 산정하였으며, 결과적인 변위속도의 역수 - 시간 관계를 Fig. 22에 도시하였다. 계측시점 108일을 기준으로 변위속도의 역수가 점진적으로 감소한다. Fig. 22에 표시된 4개 지점(F_1-F_4)을 이용하여 추정된 파괴시기는 계측일수 217.08, 242.08일 및 484.84일로 연속적으로 지연되고 있으며, 실제로 이 시기에 연구사면의 파괴는 발생하지 않았다. 이상의 결과에 의거할 때 지중경사제에서 측정된 표면변위가 식 (3)의 전제조건인 파괴임박

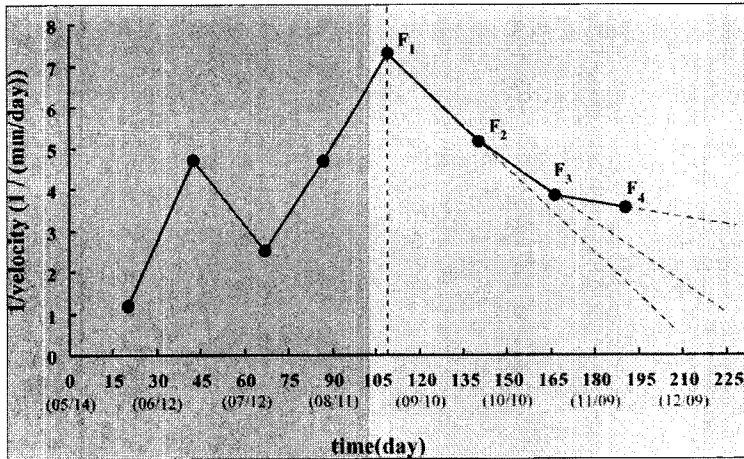


Fig. 22. Failure prediction using the reciprocal of surface displacement velocity

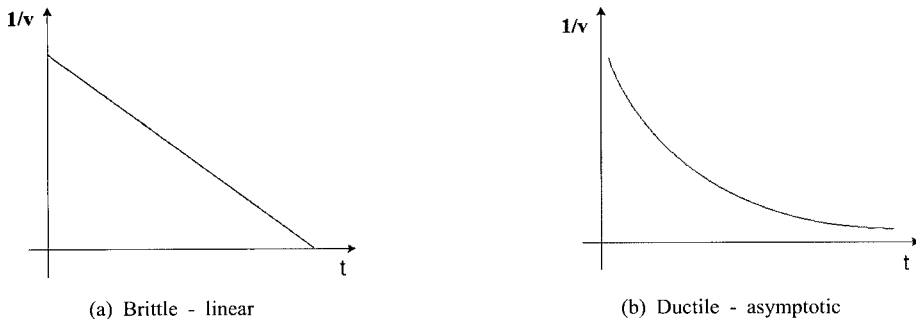


Fig. 23. Decaying mode of the reciprocal of displacement velocity with time according to the property of slope rock (after Petely et al., 2004)

시기 이전에 발생되고 있는 사면거동이며, 연구사면의 안정성도 인장 케이블 앵커를 이용한 보강대책에 의해 유지되고 있는 것으로 판단되었다.

Petley(2004)는 지중경사계를 이용하여 사면의 표면변위 거동을 관찰하여 사면 거동이 취성(brittle)인 경우에는 $1/v-t$ 관계가 직선형태(linear form), 연성(ductile)인 경우에는 점근형태(asymptotic form)로 나타난다고 보고하였다(Fig. 23). Petley(2004)가 제시한 직선적인 $1/v-t$ 함수 형태는 Voight(1988)가 제안한 $\alpha = 2$ 일 때의 $1/v-t$ 함수와 같은 형태이다. 연구사면에서 계측초기에는 시간에 따라 $1/v$ 의 증가와 감소가 반복되어 직선적인 형태나 점근적인 변화 형태를 발견할 수 없었다(Fig. 22 참조). 그러나 계측 109일 이후에는 $1/v-t$ 형태가 점차 점근적인 형태로 접근하고 있음을 관찰할 수 있었다. 이와 같은 양상은 사면거동에 직접적인 영향을 끼치는 물성이 연성의 특성을 지니고 있다는 것을 의미하며, 이는 연구사면의 층리면에 협제된 점토물질의 거동이 사면변위에 큰 영향을 끼치기 때문인 것으로 고찰된다.

사면 내부에서의 암반거동 양상을 관찰하기 위해 지중변위계를 Fig. 12에 표시된 RE 지점에 수평방향으로 설치하였다. 개착면을 기준으로 1, 3, 7, 18 m 지점에 앵커를 설치하여 개착면 0 m - 1 m(A 구간), 1 m - 3 m(B 구간), 3 m - 7 m(C 구간), 7 m - 18 m(D 구간) 총 4 구간의 지중변위를 관찰하였다. 앵커 인장일을 계측 기준일로 설정하여 15일, 79일, 135일, 195일, 232일의 구간별 지중변위와 개착면에서 고정점까지의 사면변위를 지시하는 표면변위를 Fig. 24에 도시하였다. 연구사면의 표면변위는 계측 일시 79일에 최대 0.17 mm의 인장 거동이 관찰되었다. 이것은 개착으로 인한 응력해방 현

상에 의해 전체적으로 사면이 이완된 양상이 나타난 것으로 판단된다. 이후에는 이완현상이 증대되지 않고 일정한 값으로 수렴하였다. 이것은 앵커 보강력이 지속적으로 작용하여(Fig. 13 참조) 사면거동이 억제된 결과로 판단되었다. A 구간과 B 구간에서는 최고 (-)0.01 mm의 변위가 측정되었다. 연구사면에 설치된 지중변위계의 정밀도(0.01 mm)를 감안할 때 A 구간과 B 구간에서의 거동은 거의 발생하지 않은 것으로 판단된다. C 구간에서는 최고 (+)0.30 mm의 압축 거동이 관찰되었고, D 구간은 최고 (-)0.46 mm로 인장 거동이 관찰되었다. 결과적으로 내부에서는 사면파괴를 유발시킬 수 있는 인장 거동이 발생되나 개착면 인접구간에서는 케이블의 지보력에 의해 압축거동이 유발된 것으로 고찰되었다. 또한, 이들 구간의 이완과 압축 변위 양상이 시간에 따라 감소되는 양상을 보여서 앵커보강으로 인해 사면 거동이 억제되고 있는 것으로 판단되었다.

사면의 안정성에 영향을 미치는 간극수압을 관찰하기 위하여 간극수압계를 지중경사계 하부에 설치하였다(Fig. 14 참조). 간극수압계의 설치 심도는 13 m이며, 간극수압계를 이용하여 측정된 지하수위 변화와 강우량의 관계 Fig. 25에 도시하였다. 강우량 자료는 기상청에서 발표한 일강우량을 이용하였다. 강우량은 계측일시 132일을 기준으로 건기와 우기가 뚜렷이 구분된다. 건기와 우기의 차이는 강우의 영향을 받는 지하수위 변동에서도 확인될 수 있다. 우기에는 지하수위 변동이 빈번하게 관찰되나, 건기에는 지하수위가 점진적으로 하강하여 최저 -11.61 m에 이르는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 지하수위 변화는 강우발생 이후에 시간적 차이를 두고 발생하는 것이 관찰되었다. 지연시간은 우기에는 1-2일 정도이며, 건기에는 최대 7일이다. 계측기간 동안에 산

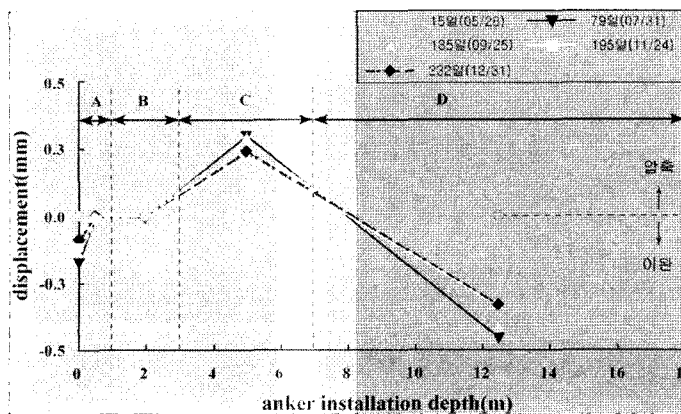


Fig. 24. Monitoring results of extensometer

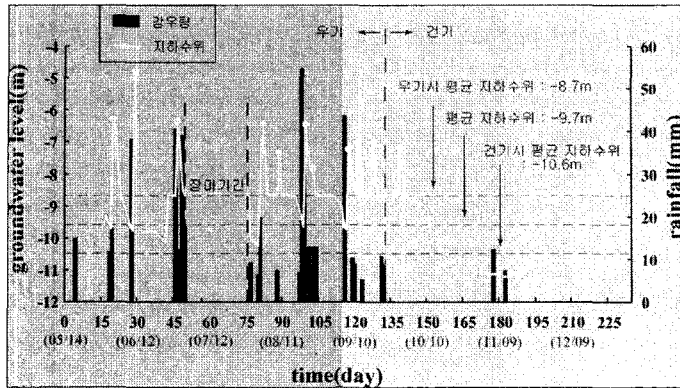


Fig. 25. Variations of groundwater level and rainfall

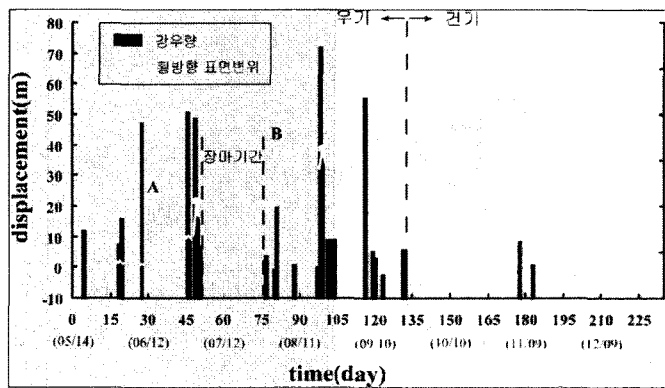


Fig. 26. Variations of lateral slope surface movement and rainfall

정된 평균 지연시간은 2.42일이다. 또한 지하수위가 상승한 날부터 최소 1일에서 최대 4일 이후에 지하수위가 감소하는 것을 확인하였다. 이러한 지하수위 감소현상은 사면배수 영향에 의한 것으로 판단되며, 계측기간에 산정된 평균 배수시간은 2.44일이다.

지중경사계를 통해 수집된 횡방향 표면변위와 강우량의 관계를 Fig. 26에 도시하였다. 지하수위 경우와 마찬가지로 강우발생 이후 횡방향 표면변위가 증가하기까지 시간적으로 지연되는 현상이 관찰되었다. Lollino et al. (2002)은 지중변위 발생시기를 강우량 측정 결과에 대비시켜 강우 이후 사면거동이 발생될 때까지의 지연시간 (time-lag)을 산정하였다. 이를 위해서 지중변위와 강우량이 발생된 시점에 대한 상호상관관계(cross correlation)를 아래에 기술된 식 (7)을 이용하여 분석하였다.

$$\Phi_{yx}(\tau) = \sum_{t=-\infty}^{\infty} x_t y_{t+\tau} \quad (7)$$

여기서, x_t : 시간 t에서의 강우량

$y_{t+\tau}$: t+τ 시기의 변위

연구사면에서는 Fig. 26에 도시된 A 시점의 30~31일 동안 약 19.1 mm의 변위가 발생하였다. 이것은 28일에 발생한 38 mm의 강우로 인해 나타난 결과로 보인다. B 시점에서는 장마기간 후에 약 16.2 mm의 변위가 발생하였으며, 이는 장마기간 동안 발생한 강우로 인한 것으로 판단된다. Lollino et al.(2002)에 의해 제안된 방법을 사용하여 계측기간 동안에 발생한 횡방향 표면변위 및 강우발생 시기에 대하여 산정된 지연시간 (time-lag)은 4일이다.

5. 결론

DOM 시추작업에 의해 측정된 불연속면의 방향과 위치 자료를 활용하여 압반의 구조적 특성을 고려한 개착사면의 안정성 해석을 수행할 수 있었다. 개착사면의 전면부 및 횡단면에서의 개별적 절리거동양상과 붕락심도

를 규명하였으며, 계측기 설치 위치 및 계측심도 결정과정에서 횡단면 해석결과가 고려된 자동화 계측시스템이 구축되었다. 계측자료 분석과정에서 사면 내부의 구조적 특성을 고려한 사면거동 해석이 수행되었으며, 사면거동 양상을 고려하여 파괴시기를 예측하는 방법론의 현장 적용성이 고찰되었다. 사면거동의 주요 인자인 강우의 영향성을 분석하여 강우 이후 사면 거동이 발생되기까지의 지연시간(time-lag)을 산정하였다. 이 분석 결과는 사면의 붕락시기를 직접적으로 예측하는데 활용되지는 않으나, 사면 거동에 중대한 영향을 끼치는 요소가 작용할 때 응급상황 발생에 대처할 수 있는 시간적 허용기간을 제공하는 측면에서 사면관리에 중요한 자료를 제공한다.

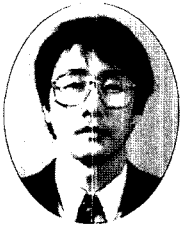
사 사

이 연구는 2006년 소방방재청 자연재해방재기술사업의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 이호문, 2005, 절개사면에 설치된 활동역지 시스템의 거동에 관한 연구. 중앙대학교 석사학위 논문.
2. 조태진, 유병욱, 원경식, 2003, Discontinuity Orientation Measurement(DOM) 시추장비 및 코어절리 해석모델 개발. J. of Korean Society for Rock Mech. Vol. 13, No. 1, p33-43.
3. 조태진, 이창섭, 정진호, 2005, 개착면 내부에서의 절리분포 예측을 통한 사면 해석, J. of Korean Society for Rock Mech Vol. 14, p391-398.
4. Cho, T.F., K. Won, B. You and S. Lee., 2004, Application of a discontinuity orientation measurement drilling system to the characterization of an in situ rock mass and the prediction of cut-slope stability. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 41(3).

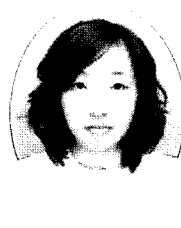
5. Fisher, R., 1953, Dispersion on a sphere. Proceedings of the Royal Society of London, A217, p295-305.
6. Crosta, G.B. and F. Agliardi, 2002, How to obtain alert velocity thresholds for large rockslides, Physics and Chemistry of the Earth, Vol. 27, p1557-1565.
7. Fukuzono, T., 1990, Recent Studies on Time Prediction of Slope Failure. Landslide News, No. 4, p9-12.
8. Lollino, G., M. Arattano and M. Cuccureddu, 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, Vol. 27, p1545-1550.
9. Mahtab, M.A. and T.M. Yegulalp, 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, Berkeley. American Institute of Mining Metallurgy and Petroleum. Engineers, New York: p116-23.
10. McMahon, B.K., 1968, Indices related to the mechanical properties of jointed rock. Proceedings of the Ninth Symposium on Rock Mechanics - Status of Practical Rock Mechanics, Colorado, p117-133.
11. Petley, D.N. and D.J. Petley, 2004, On the initiation of large rock-slides : perspectives from a new analysis of the Vaiont movement record, in : Large Rock slope failures. edited by Paper Evans, S., Balkema, Rotterdam.
12. Read, S., L. Richards, and G. Cook 2003, Rock mass defect patterns and the Hoek-Brown failure criterion., *Proc. 10th Cong. ISRM*, South Africa.
13. Voight, B., 1988, A method for prediction of volcanic eruption. Nature, Vol. 332, No. 6140, p125-130.
14. Woodcock, N. H., 1977, Specification of fabric shapes using an eigenvalue method. Bulletin of the Geological Society of America, Vol.88, p1231-1236.
15. 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 Congress of the ISRM: p 1355-1358.



조 태 진

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

Tel: 051-620-6238
E-mail: chotc@pknu.ac.kr
현재 부경대학교 환경탐사공학과 교수



박 소 영

2004년 부경대학교 환경탐사공학과
공학사
2006년 부경대학교 환경탐사공학과
석사과정수료

Tel: 055-277-2515
E-mail: qkrth5151@hanmail.net
현재 삼원지질(주)



이 상 배

1999년 부경대학교 해양학과 이학사
2001년 부경대학교 해양학과 이학석사

Tel: 051-620-6238
E-mail: leesb@pknu.ac.kr
현재 부경대학교 응용지질학과 박사과정
수료



이 근 호

1988년 연세대학교 토목공학과 공학사
2006년 부경대학교 환경탐사공학과 석사
과정

Tel: 02-529-1213
E-mail : hamspro@hotmail.com
현재 (주)호승ENC 대표이사



원 경 식

1983년 충남대학교 지질학과 이학사
2001년 부경대학교 지구환경과학과 이학
석사
2006년 대전대학교 환경공학과 박사과정
수료

Tel: 031-436-0831
E-mail: geoinfo@geoinfo.co.kr
현재 지오텍컨설팅(주) 대표이사