

## 개착사면의 구조적 특성과 파괴양상을 고려한 계측 해석

박소영(삼원지질(주))

조태진(부경대학교)

이근호((주)호승 E&C)

### 1. 서론

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. DOM 시추(조 등, 2003; Yoon et al., 2003; Cho et al., 2004) 자료를 이용하여 현장 암반에 발달된 절리들의 3차원 공간에서의 분포 양상을 고려한 사면해석을 수행하였다.

현장 사면의 거동을 모니터링하고 붕괴시기를 예측하기 위하여 현장사면에 자동화 계측시스템을 구축하였다. 계측기 설치위치는 기존 국내에서 수행되는 체제를 벗어나 사면해석 결과에 의거하여 실제 거동이 유발될 가능성이 높게 판단되는 지점으로 결정하였다. 또한 사면 표면변위 자료들을 이용한 계측자료 해석도 기존의 수렴/발산 판정의 범위를 벗어나 사면파괴 거동 단계를 판정하고 파괴시기를 실시간으로 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

#### 2.1 사면현황

경부고속도로 확장공사구간에서 일차적인 파괴가 발생한 사면(Fig. 1)의 지질구조특성과 거동양상을 분석하였다. 해석대상 사면에는 중생대 퇴적암인 셰일이 우세하게 분포하며, 퇴적층리면이 사면방향과 유사한 방향으로 발달되어 있다. 층리면 경사는  $10^{\circ}$  - $15^{\circ}$  정도로 비교적 낮으며, 절리들은 수직에 가까운 고경사를 나타내고 있다. 현장조사 결과 사면방향으로 경사진 층리면 내에 점토가 충전되어있는 것이 관찰되었다. 점토가 충전된

층리면은 경사가  $15^\circ$  이며, 추가적인 사면 굴착에 의해 개착면 중앙부에 노출되어 평면파괴 거동을 유발할 수 있을 것으로 판단되었다.



Fig. 1. Slope failure in the primary excavation stage.

해석대상 사면은 추가적인 붕락 방지를 위해 재개착 되었으며, 영구적인 안정성 확보를 위해 중앙부 20m 구간에 대해 지보재 설치가 계획되었다. 최종 개착후의 사면 방향은 경사방향/경사 =  $172/55$ 이며, 높이는 10.4m로 설계되었다(Fig. 2).

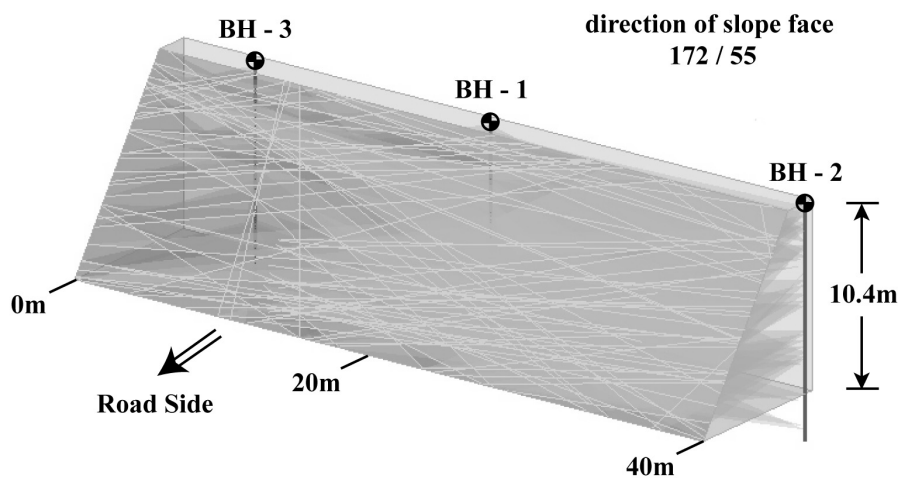


Fig. 2. Final layout of slope.

## 2.2 DOM 시추 분석

지보재가 설치될 개착구간의 불연속면 분포양상 및 암반구조 특성을 분석하기 위하여 3개 시추공에서 DOM 시추작업을 수행하였다. 분석 결과 시추공 BH-1에서 총 25개의 절리면이 관찰되었으며(Fig. 3 참조), 대부분의 절리들은 층리면으로 구성되어 있다. 일부

구간에서는  $50^\circ$  내외의 비교적 높은 겉보기 경사를 지니고 있으나 대체적으로  $25^\circ$  이내의 저경사로 발달되어 있고, 경사방향은 정남쪽으로 우세하다. cone angle =  $15^\circ$  를 적용하여 해석된 절리군의 대표적인 방향성은 경사방향/경사 = 171/08이다. 시추공 BH-2 및 BH-3에 대해서도 동일한 분석을 수행하였다. BH-2의 경우 수직심도는 13m이며, DOM 시추코어에서 총 35개의 불연속면이 관찰되었다. 1개 절리면을 제외한 층리면들의 경사는 매우 낮으며, 주된 경사방향은 남남서 방향이다. 불연속면들은 단일군을 형성하며, 대표 방향성은 198/7.5이다. 시추공 BH-3에서는 13m 코어 연장에서 총 27개의 불연속면이 관찰되었다. 주된 경사방향은 서남서 방향이며, 불연속면들은 단일군을 형성한다. 대표방향성은 248.1/10.1이다. 3개의 시추공에서 측정된 층리면들은 매우 낮은 경사각을 가져서 절리 극점들이 반구투영도 중앙부분에 집중되어 분포하며, 절리집중도가 비교적 높은 단일 절리군을 형성하고 있다(Fig. 4 참조).

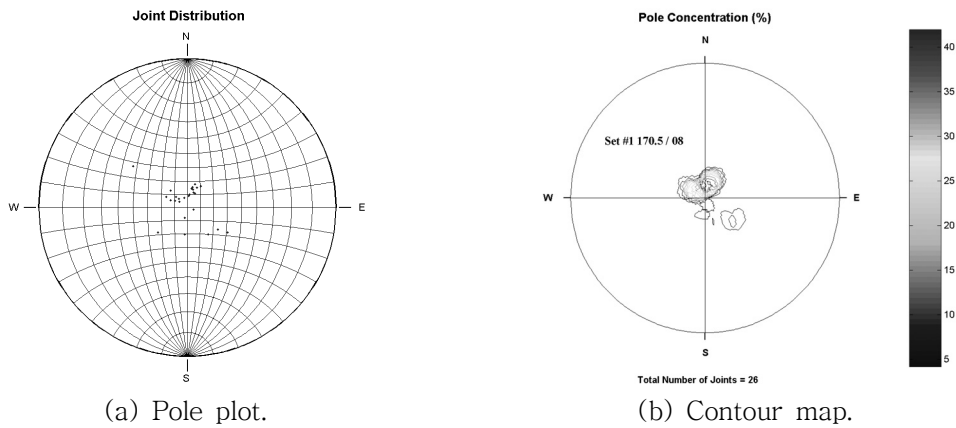


Fig. 3. Joint distribution in the borehole BH-1.

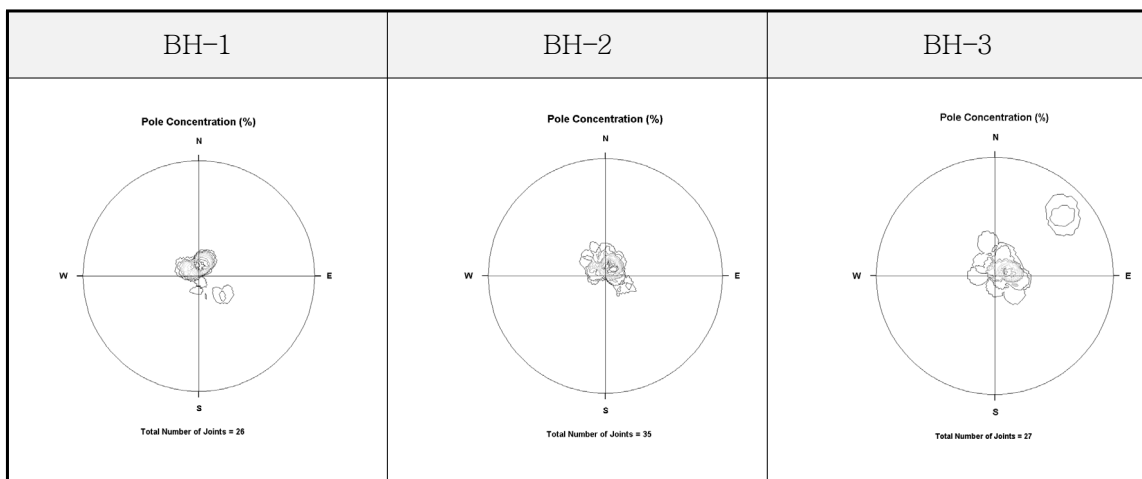


Fig. 4. Joint pole concentrations.

## 2.3 사면거동

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

개착사면 암반에 발달한 불연속면의 방향성에 대한 극점 분포를 Fig. 5에 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. 6에 도시된 결과에 의거할 때 개착사면에 분포된 불연속면의 대표 방향성은 평면파괴 및 전도파괴를 유발시키지 않는 것으로 분석되었다. 그러나 개별 불연속면들의 극점 분포를 고려할 때 다수의 층리면들이 평면파괴를 유발시킬 수 있으며, 전도파괴를 유발시킬 수 있는 고경사 절리도 분포되어 있다. 잠재적으로 평면파괴를 유발할 수 있는 절리 trace 들이 사면 상부 및 하반부에서 연쇄적으로 발달되어 있어서 개착사면의 주된 파괴모드가 평면파괴일 것을 지시한다. 전도파괴를 유발시킬 수 있는 절리 극점은 반구투영도상에 1개가 파괴영역에 위치하나(Fig. 6), 고경사 절리면들은 수직으로 시추된 코어와 교차될 확률이 상대적으로 낮으며, 해석사면 암반에서 수직방향으로 수행된 시추작업에 의해서도 수 개의 절리들만이 측정되었다(Fig. 6 참조). 따라서 앞서 언급한 개체 이외의 고경사 절리들이 분포될 가능성이 매우 높으며, 일차적인 사면파괴 과정에서 평면파괴 블록의 규모를 제한시키는 역할을 했던 것으로 고찰되었다.

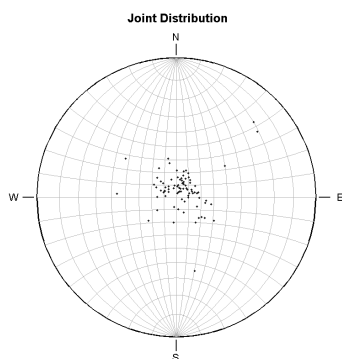


Fig. 5. Pole plot.

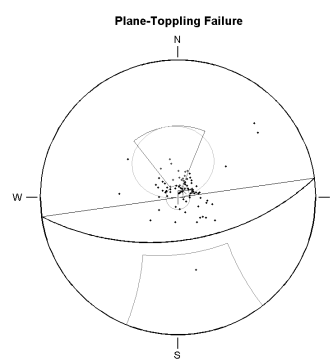


Fig. 6. Lower hemi-spheric analysis for slope failure.

### 3. 사면 계측

일차적인 파괴가 발생된 사면의 안정성을 확보하기 위하여 최종적으로 개착된 사면 전면부에 케이블 앵커가 3m 간격으로 설치되었다(Fig. 7). 앵커 인장력에 의한 지보효과를 검증하기 위하여 하중계를 설치하였으며, 전체적인 사면거동을 모니터링하기 위하여 지중경사계, 지중변위계, 수압계 및 강우량계를 추가적으로 설치하고 자동화계측시스템을 구축하였다.

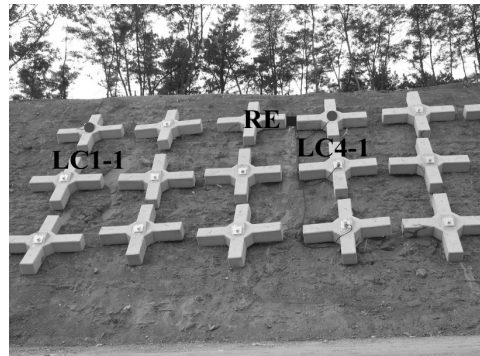


Fig. 7. Installation of cable anchor.

#### 3.1 앵커하중

앵커 인발 이후의 앵커 인장력 변화를 수집하여 Fig. 8에 도시하였다. 일반적으로 인발된 앵커의 하중변화 양상은 인장력 도입 구간, 하중 재하 구간, 하중 유지 구간으로 구분 할 수 있다(이호문, 2005). 연구사면에 설치된 하중계에서도 매우 유사한 인장력 변화 양상이 관찰되었다. 앵커 인장력은 계측 개시 150일 까지 초기 인장력의 90%를 상회하는 수준을 유지하였으며, 이 후에 매우 완만하게 감소하는 추세가 관찰되었다.

#### 3.2 지중경사

조사대상 사면의 거동양상을 관찰하기 위하여 Fig. 9와 같이 개착구간에 시추된 BH-3 호공에(Fig. 2 참조) 지중경사계를 설치하였다. 케이블 앵커가 시공된 이후의 사면거동 추이를 고찰하기 위하여 지중경사계에서 수집된 사면의 횡방향 표면변위 양상과 하중계 LC1-1을 통해 수집한 앵커 인장력 변화를 비교하였다. Fig. 10에 도시된 바와 같이 계측경과 14일을 기준으로 약 20일 동안에는 표면변위가 발생되지 않았으며, 이 기간은 앵커 보강에 따른 초기 인장력 도입구간과 하중재하구간에 대응되는 시기이다. 따라서 계측 개시 14일에 설치한 앵커의 인장력이 사면거동을 억제한 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.

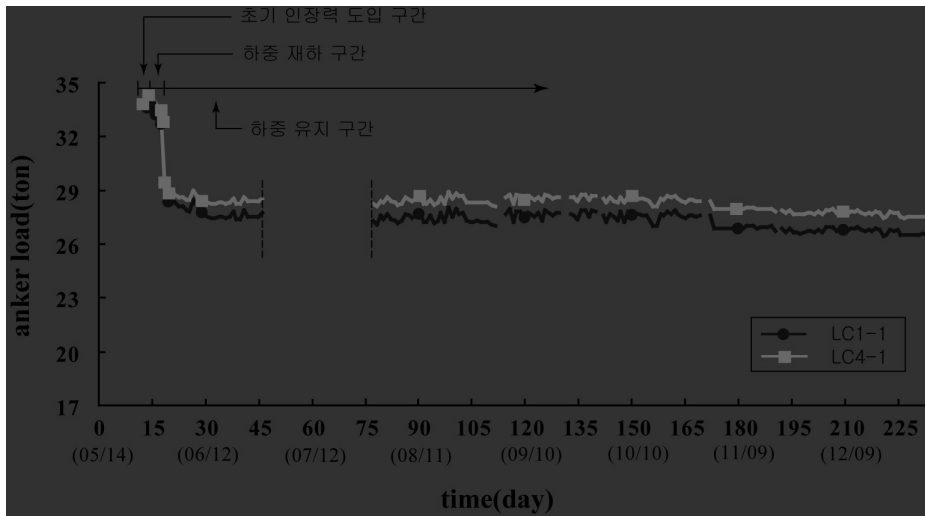


Fig. 8. Variation of anker load.

지중경사계가 설치된 시추공 BH-3 지점에 횡단면을 설정하여 파괴거동을 야기 시킬 수 있는 불연속면과 사면체 블록과의 교차선을 대수학적으로 산정하여 Fig. 11에 도시하였으며, 지중경사계의 프루브 설치 위치도 도면상에 표시하였다. 자동화된 지중경사계의 프루브를 이용하여 측정한 계측결과 초기 66일까지는 심도 2-4m, 6-8m 및 8-10m 구간에서의 횡방향 변위가 증가하였으며, 심도 0-2m, 4-6m 및 10-12m 구간에서의 변위는 미약하였다(Fig. 12). 이와 같은 양상은 Fig. 11에 도시된 사면거동을 야기 시키는 불연속면 및 블록들의 위치와 매우 부합되었다. 초기 단계에서의 사면거동은 평면파괴를 유발시킬 수 있는 심도 2-4m 및 6-8m에 위치한 층리면 활동이 주된 요인으로 사료되었다. 계측 시기 96일에는 전체 심도 구간에서 일정한 변위 증가량을 나타낸다. 한편, 계측 125~186일까지는 전반적으로 횡방향의 변위가 증가하지만 심도 2-4m 구간에서는 변위 증가가 발생되지 않았다. 이후 208일 경과시점에서 2-4m 구간에서 횡방향 변위가 크게 증가하여 전체 심도에서의 변위 증가량이 계측 96일 경우와 같이 일정한 상태를 이루게 된다(Fig. 13 참조).

이와 같은 구간별 변위발생 양상을 심도별 RQD와 연관시켜 검토하기 위하여 계측 186일에 측정된 구간별 누적변위와 심도별 RQD를 Fig. 14에 도시하였다. 지중경사계의 고정점인 심도 12m 지점은 RQD가 100%로 거의 무결하여 지중경사계의 고정점 역할을 완벽하게 수행하고 있는 것으로 판단된다. 대부분의 구간에서 암질지수가 50~80% 인 반면에 2-4m 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 - 4m 구간에서의 변위 증가 - 고정 - 증가 양상에 따라 전체심도의 변위추세가 결정되며, 이 거동 양상은 Fig. 16에 도시된 심도 2m 부근에 존재하는 평면파괴를 유발시킬 수 있는 층리면의 거동과 밀접하게 연관되는 것으로 고찰되었다.

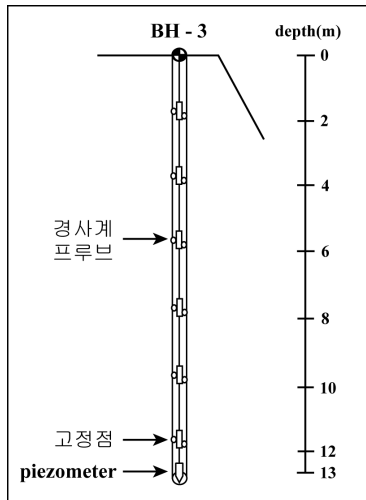


Fig. 9. Installation of clinometer in DOM drilled borehole BH-3.

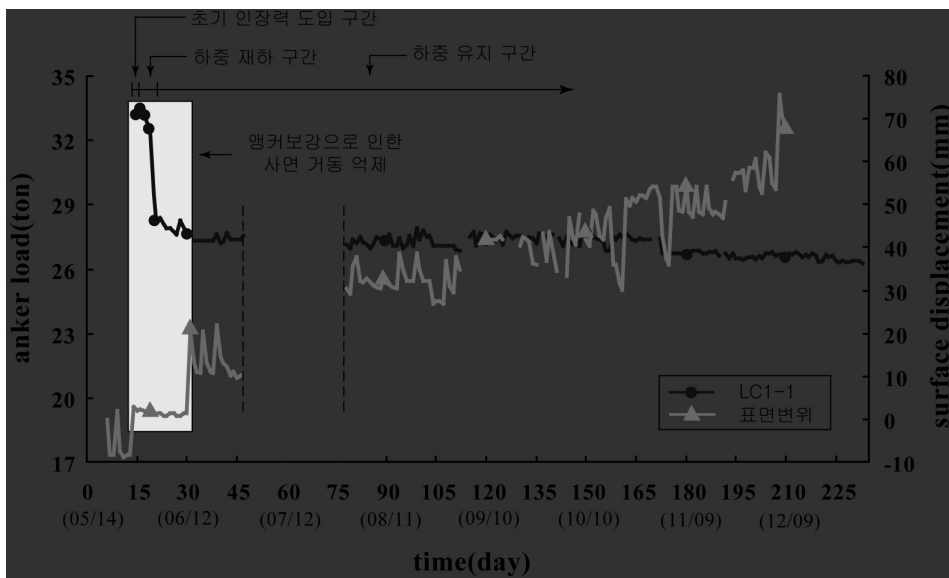


Fig. 10. Slope surface movement with respect to the anker load.

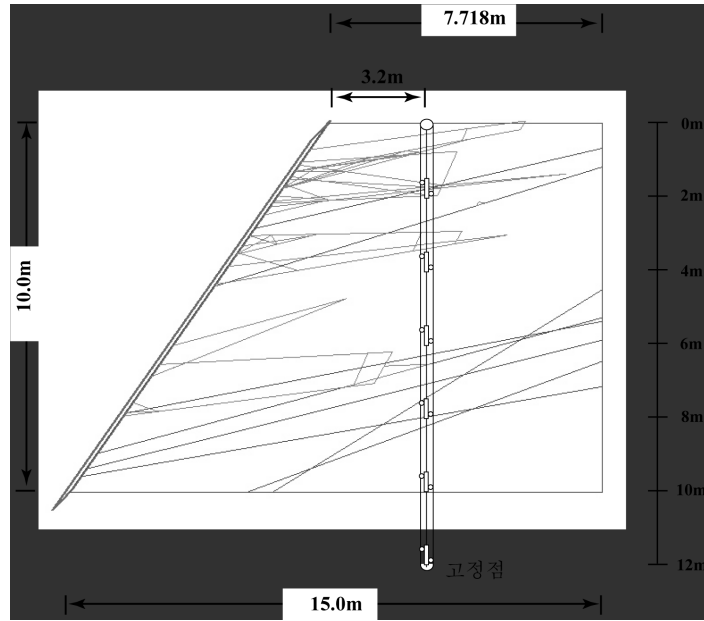


Fig. 11. Sliding joints and blocks on the cross section containing clinometer.

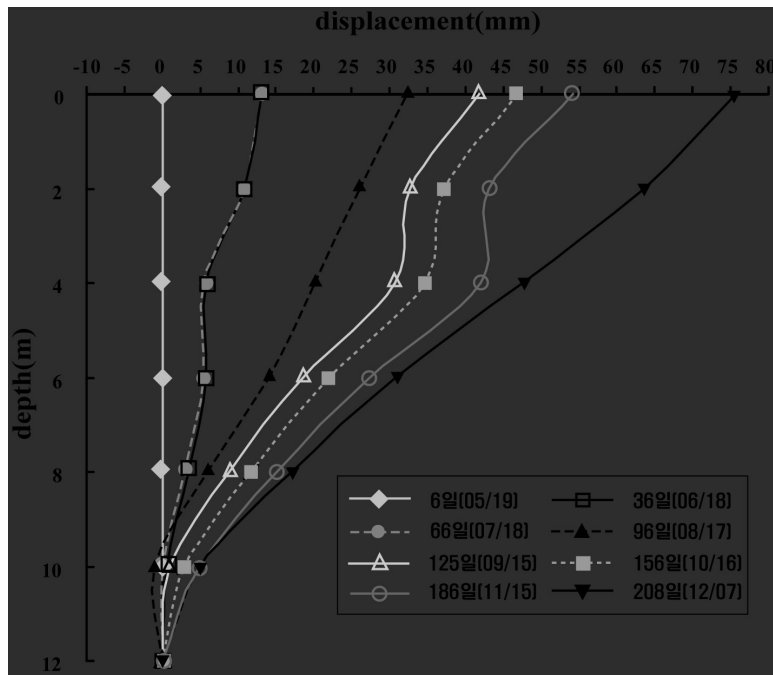


Fig. 12. Lateral displacement of slope.



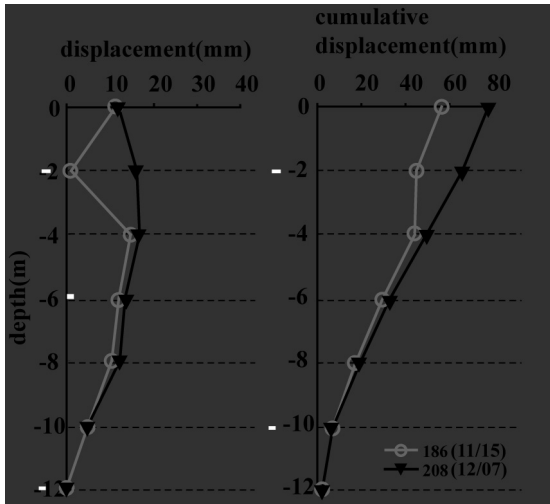


Fig. 13. Lateral displacements and the cumulative lateral displacements along the borehole BH-3.

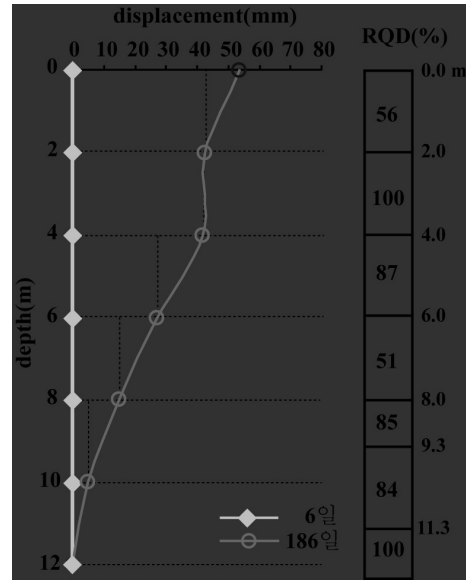


Fig. 14. Regional RQD and the cumulative lateral displacement at the monitoring date of 186.

Voight(1988)는 파괴시점에 임박한 상태에서의 물체거동에 관한 구성방정식을 고찰하여 지진, 단층, 화산가스분출 등의 지반거동을 예측할 수 있는 방법론을 제시하였다.

$$\dot{\Omega}^{-\alpha} \ddot{\Omega} - A = 0 \tag{1}$$

여기서,  $\Omega$  : 측정치  
 $A, \alpha$  : 상수

식 (1)을  $\Omega$ 에 관해 이중 적분하면 시간에 따른 거동양상이 도출된다.

$$\begin{aligned} \alpha = 1 \text{ 일 때, } \Omega - \Omega_0 &= \frac{\Omega_0}{A} (e^{A(t-t_0)} - 1) \\ \alpha = 2 \text{ 일 때, } \Omega - \Omega_0 &= \frac{1}{A} [ \ln(t_f - t_0) - \ln(t_f - t) ] \\ \alpha > 1, \alpha \neq 2 \text{ 일 때, } \Omega - \Omega_0 &= \frac{1}{A(\alpha - 2)} [ \dot{\Omega}_0^{2-\alpha} - [A(1-\alpha)(t-t_0) + \dot{\Omega}_0^{1-\alpha}]^{(2-\alpha)/(1-\alpha)} ] \end{aligned} \tag{2}$$

여기서,  $\Omega_0$  : 초기 거동 측정치  
 $t_0$  : 초기 시간  
 $t_f$  : 파괴 시간

식 (2)로 표현된 거동 함수는  $\alpha=1$  일 때는 지수함수,  $\alpha=2$  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. 15)는 일정한 범위 내에서 진동하지만 전체적으로는 시간 경과에 따라 증가하는 양상을 보인다. 계단식으로 증가하는 변위구간에서 증가 양상을 대표한다고 판단되는 9개 시점의 변위량(Fig. 15 참조)을 선택하여 회귀분석을 실시하였다. 식 (2)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. 15). 통계학적으로 설정된 회귀분석식의 정확도를 지시하는 결정계수  $R^2=0.9576$  이어서 연구사면의 시간에 따른 횡방향 표면변위가 자연로그함수 형태로 증가하며, Voight(1988)가 제안한 거동특성계수  $\alpha=2$  를 사면거동 분석에 사용할 수 있을 것으로 판단되었다.

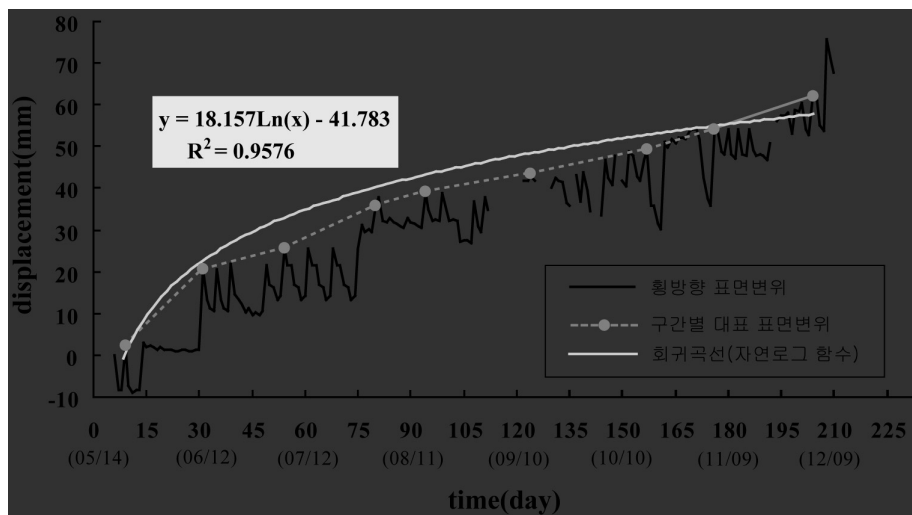


Fig. 15. Lateral displacement at the slope surface.

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

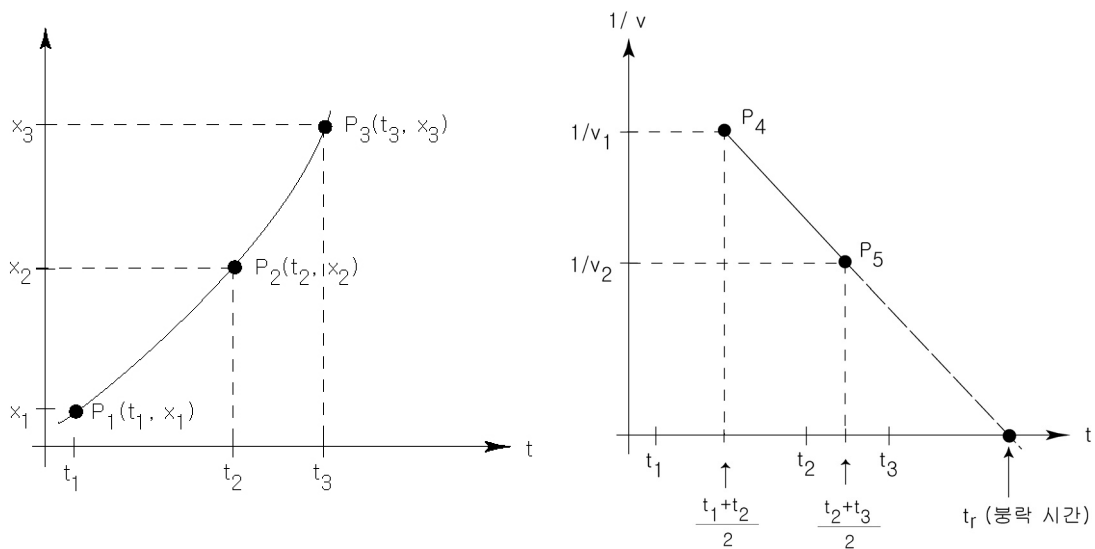
$$\dot{\Omega}^{-1} = [A(1-\alpha)(t-t_0) + \dot{\Omega}_0^{1-\alpha}]^{1/(\alpha-1)} \quad (3)$$

여기서,  $\dot{\Omega}_0$  는 초기 변위 속도이다. 식 (2)로 기술된 변위속도의 역수는 시간에 따라 감소되며,  $\alpha$  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 대해서는 직선적으로 감소되는 특징을 나타낸다. 식 (3)을 활용하여 파괴시기를 예측하기 위해서는 파괴시점에서의 변위속도의 역수( $\dot{\Omega}_f^{-1}$ )가 알려져 있어야 하지만, 변위속도가 매우 커서  $\dot{\Omega}_f^{-1}$ 를 무시할 수 있는 경우에는 식 (3)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. 16(a)에서와 같이 시간에 따른 표면변위를 도시한 그래프에서 점  $P_1, P_2, P_3$ 을 선정하여 시간 증가분에 따른 표면변위 증가량 즉, 변위속도  $v_1$ 과  $v_2$ 를 산정한다.

$$v_1 = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1}, \quad v_2 = \frac{x_3 - x_2}{t_3 - t_2} \quad (4)$$

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. 16(b)). 두 점  $P_4$ 와  $P_5$ 를 지나는 직선을 시간을 나타내는 가로축과 교차되도록 연장한다. 이때, 가로축과 만나는  $t_r$  값이 파괴시기이다.



(a) Slope displacement with respect to time. (b) Reciprocal of mean velocity.

Fig. 16. Prediction of slope failure time (after Fukuzono, 1990).

연구사면의 파괴시기 추정을 위해 Fukuzono(1990)에 의해 제안된 파괴시기 추정방법을 적용하였다. Fig. 15에 제시된 횡방향 표면변위를 이용하여 변위속도를 산정하였으며, 결과적인 변위속도의 역수-시간 관계를 Fig. 17에 도시하였다. 계측시점 108일을 기준으로 변위속도의 역수가 점진적으로 감소한다. Fig. 17에 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 지중경사계에서 측정된 표면변위가 식 (1)의 전제조건인 파괴임박시기 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. 18). 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. 17 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 지시하며, 이는 연구사면의 층리면에 협재된 점토물질의 거동이 사면변위에 큰 영향을 끼치는 것으로 고찰되었다.

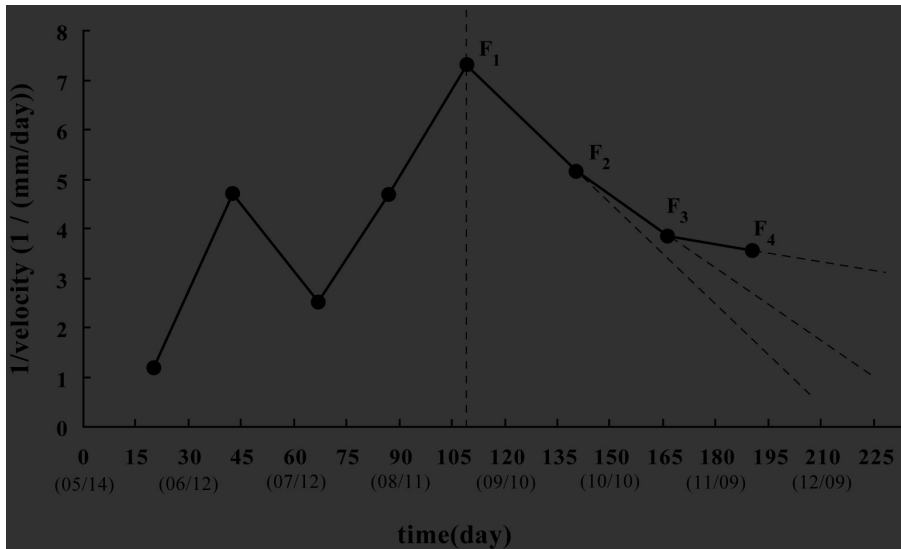


Fig. 17. Failure prediction using the reciprocal of surface displacement velocity.

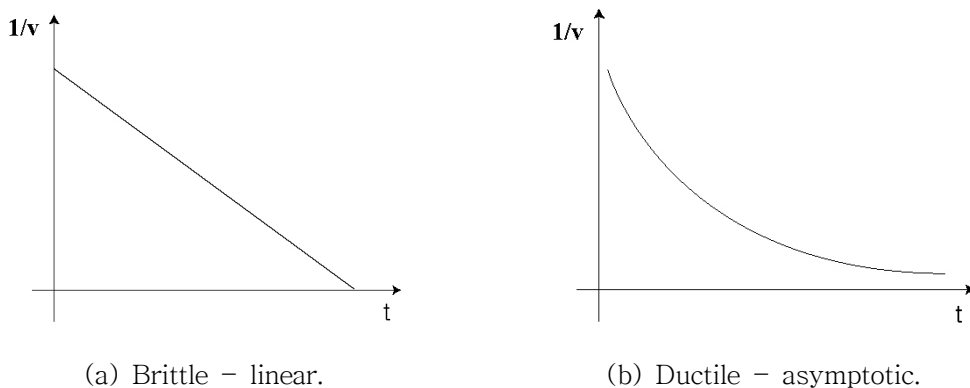


Fig. 18. Decaying mode of the reciprocal of displacement velocity with time according to the property of slope rock (after Petely et al., 2004).

### 3.3 지중변위

사면 내부에서의 암반거동 양상을 관찰하기 위해 지중변위계를 Fig. 7에 표시된 RE 지점에 수평방향으로 설치하였다. 개착면을 기준으로 1, 3, 7, 18m 지점에 앵커를 설치하여 개착면 - 1m (A 구간), 1m - 3m (B 구간), 3m - 7m (C 구간), 7m - 18m (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. 19에 도시하였다. 연구사면의 표면변위는 계측 일시 79일에 최대 0.17mm의 인장 거동이 관찰되었다. 이것은 개착으로 인한 응력해방 현상에 의해 전체적으로 사면이 이완된 양상이 나타난 것으로 판단된다. 이후에는 이완현상이 증대되지 않고 일정한 값으로 수렴하였다. 이것은 앵커 보강력이 지속적으로 작용하여(Fig. 8 참조) 사면거동이 억제된 결과로 판단되었다. A 구간과 B 구간에서는 최고 (-)0.01mm의 변위가 측정되었다. 연구사면에 설치된 지중변위계의 정밀도(0.01mm)를 감안할 때 A 구간과 B 구간에서의 거동은 거의 발생하지 않은 것으로 판단된다. C 구간에서는 최고 (+)0.30mm의 압축 거동이 관찰되었고, D 구간은 최고 (-)0.46mm로 인장 거동이 관찰되었다. 결과적으로 내부에서는 사면파괴를 유발시킬 수 있는 인장거동이 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.

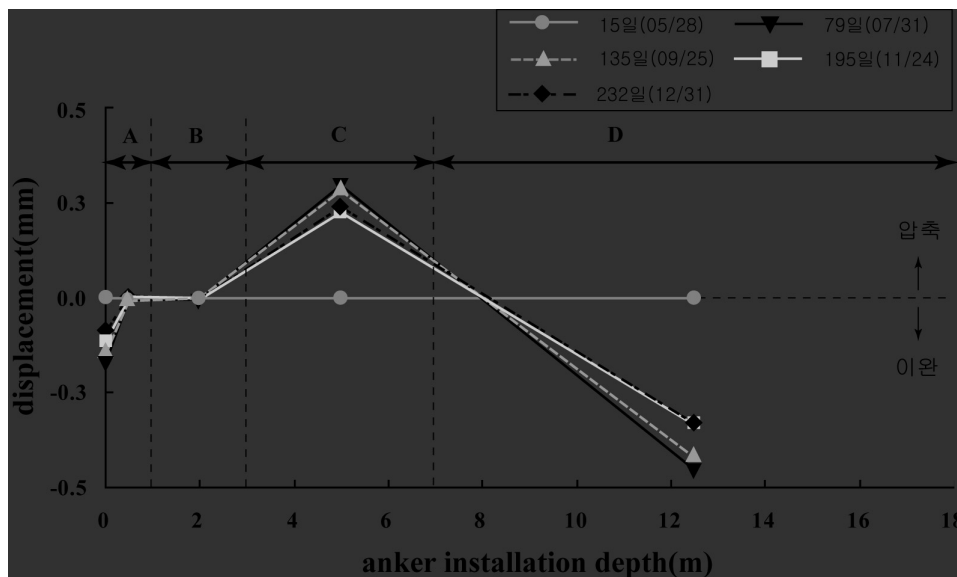


Fig. 19. Monitoring results of extensometer.

### 3.4 간극수압

사면의 안정성에 영향을 미치는 간극수압을 관찰하기 위하여 간극수압계를 지중경사계 하부에 설치하였다(Fig. 9 참조). 간극수압계의 설치 심도는 13m 이며, 간극수압계를 이용하여 측정된 지하수위 변화와 강우량의 관계 Fig. 20에 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 -11.61m에 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 산정된 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.

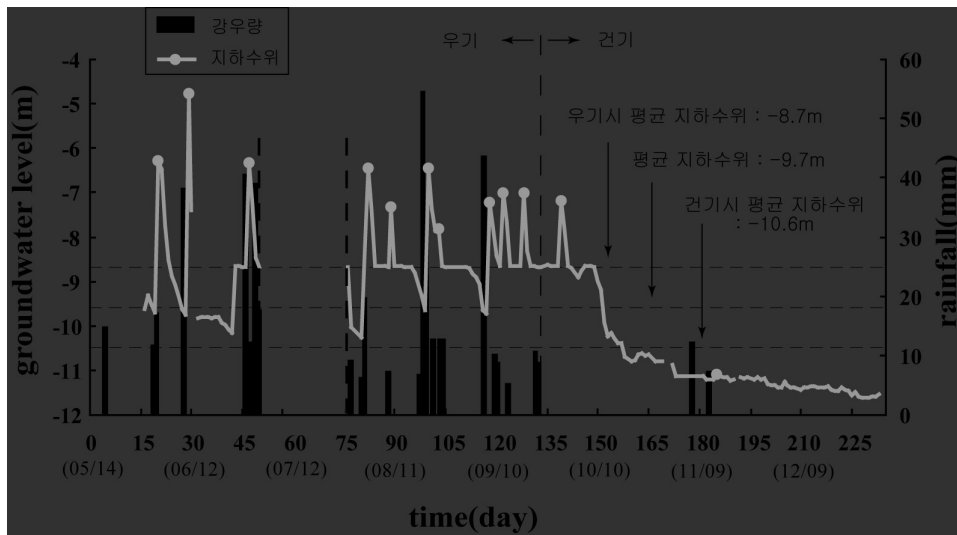


Fig. 20. Variations of groundwater level and rainfall.

지중경사계를 통해 수집된 횡방향 표면변위와 강우량의 관계를 Fig. 21에 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 발생할 때까지의 지연시간(time-lag)을 산정하였다. 이를 위해서 지중변위와 강우량이 발생된 시점에 대한 상호상관관계(cross correlation)를 아래에 기술된 식 (5)를 이용하여 분석하였다.

$$\Phi_{yx}(\tau) = \sum_{t=-\infty}^{\infty} x_t y_{t+\tau} \quad (5)$$

여기서,  $x_t$  : 시간  $t$ 에서의 강우량

$y_{t+\tau}$  :  $t+\tau$  시기의 변위

연구사면에서는 Fig. 21에 도시된 A 시점의 30~31일 동안 약 19.1mm의 변위가 발생하였다. 이것은 28일에 발생한 38mm의 강우로 인해 나타난 결과로 보인다. B 시점에서는 장마기간 후에 약 16.2mm의 변위가 발생하였으며, 이는 장마기간 동안 발생한 강우로 인한 것으로 판단된다. Lollino et al.(2002)에 의해 제안된 방법을 사용하여 계측기간 동안에 발생된 횡방향 표면변위 및 강우발생 시기에 대하여 산정된 지연시간(time-lag)은 4일이다.

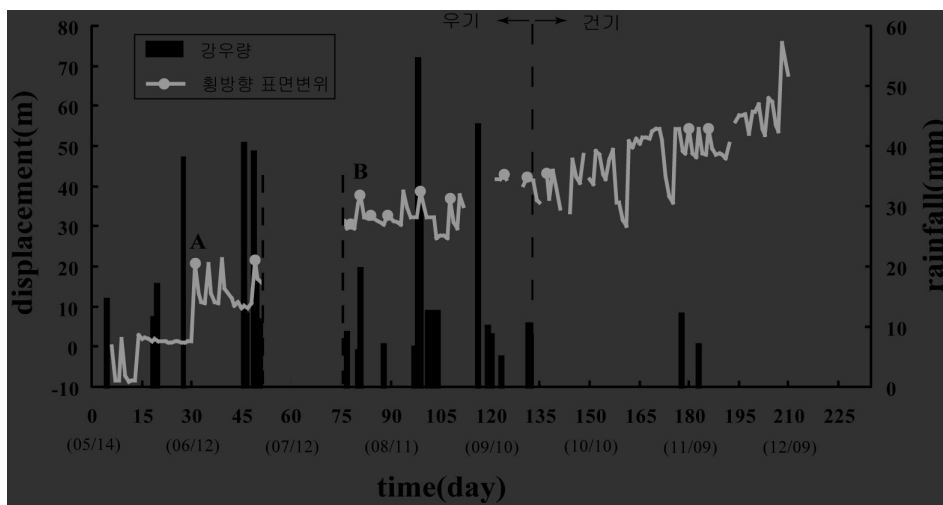


Fig. 21. Variations of lateral slope surface movement and rainfall.

## 5. 결론

DOM 시추작업에 의해 측정된 불연속면의 방향과 위치 자료를 활용하여 암반의 구조적 특성을 고려한 개착사면의 불연속면 분포와 안정성을 판단할 수 있었다. 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.

## 참고문헌

1. 이호문, 2005, 절개사면에 설치된 활동역지 시스템의 거동에 관한 연구. 중앙대학교 석사학위 논문.
2. 조태진, 유병옥, 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. 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).
4. Fukuzono, T., 1990, Recent Studies on Time Prediction of Slope Failure. Landslide News, No. 4, p9-12.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Voight, B., 1988, A method for prediction of volcanic eruption. Nature, Vol. 332, No. 6140, p125-130.