

지표변위계를 활용한 비탈면 안정성 예측

Analysis of Slope Safety by Tension Wire Data

이 석 영¹⁾ · 장 서 용[†] · 김 태 수²⁾ · 한 희 수³⁾

Seokyoung Lee · Seoyong Jang · Taesoo Kim · Heuisoo Han

Received: November 4th, 2014; Revised: November 21st, 2014; Accepted: March 2nd, 2015

ABSTRACT : Civil engineers have taken the numerous slope monitoring data for an engineering project subjected to a potential of slide. However, the topics on how to deal with and draw out proper information from the data related to the slope behavior have not been widely discussed. Recently, several researchers had installed the real-time monitoring system to cope with slope failure; however they are mainly focused on the hardware system installation. Therefore, this study tries to show how the measured data could be grouped and connected each other. The basic idea of analyzing method studied in this paper comes from the clustering, which is the part of data mining analysis. Therefore, at the base of classification of time series data, the authors suggest three mathematical data analyzing methods; Average Index of different displacement ($AD_{i,j}$), Difference of average relative displacement ($\overline{RD}_{i,j}$) and Coordinate system of average and relative displacement (\overline{RD}, AD). These analyzing methods are based on the statistical method and failure mechanism of slope. Therefore they showed clustering relationships of the similar parts of the slope which makes the same sliding mechanism.

Keywords : Slope, Real-time monitoring, Average index of different displacement, Difference of average relative displacement

요 지 : 사면붕괴의 위험성이 있는 다양한 실계측 데이터들이 토목기술자들에게 주어졌지만 이를 해석, 가공 후 실시간 사면거동 양상을 분석하고 사면안정에 대한 결론을 유도하는 일은 결코 쉬운 일이 아니다. 최근 많은 연구기관들이 실시간 계측시스템을 위험 사면 현장에 설치하고 이를 계측하고 있으나, 대부분이 하드웨어 시스템의 설치에 초점을 맞추고 있어 이들 계측시스템에서 구한 실시간 계측자료를 해석하는 소프트웨어는 상대적으로 부족하고 할 수 있다. 그러므로 이 연구는 시간에 따라 변위가 지속적으로 증가하는 사면거동에 대한 계측자료들이 서로 어떤 상호관련성이 있고 군집화되는지를 보여주고자 하는 데 목적이 있다. 실시간 계측자료들을 분류함에 있어 저자들은 세 가지의 수학적 개념을 사용하고자 한다. 즉 평균변위차지수($AD_{i,j}$), 평균상대변위차($\overline{RD}_{i,j}$) 및 평균상대좌표시스템(\overline{RD}, AD)을 사용하고자 한다. 이 세 가지 개념은 통계학적 방법 및 사면파괴거동에 토대를 두고 있다. 그러므로 이 방법들은 파괴거동을 일으키는 같은 대상 사면영역의 군집특성을 보여준다.

주요어 : 비탈면, 실시간 모니터링, 평균변위차지수, 평균상대변위차

1. 서 론

산사태는 중호수가 내리는 경우 많이 발생되는데 이를 사전에 예방하기란 현실적으로 불가능하고, 특히 암반 사면에서는 붕괴까지의 변형이 작고 종래부터 일반적으로 쓰이고 있는 변위계측에서는 그 전조현상을 포착하기 어려워 붕괴의 사전 예지가 거의 불가능하다. 뿐만 아니라, 지반의 불균질로 인해 지반성상의 완벽한 파악이 현실적으로 불가능하여 설계 및 시공의 불확실성 인자의 포함은 피할 수 없다. 그러므로 사면에 발생할 수 있는 돌발 상황 및 사면거동을 지속적/상시적으로 파악하기 위하여 다양

한 실시간 계측기술 및 효과적인 분석기법이 있어야 할 것이다.

사면의 지표변위자료를 이용하여 거동을 해석하는 기법들에는 크게 두 가지로 구분된다. 방정식을 이용하는 결정론적 방법과 통계기법을 이용한 확률론적 방법이 있다(Han & Chang, 2005). 외국의 경우 비탈면 변위자료를 이용하여 붕괴 시점을 예측하는 다양한 방법들이 제시되었다(Saito & Uezawa, 1961; Voight, 1988; Fukuzono, 1990).

본 연구에서는 기존 비탈면 변위 해석기법의 문제점을 해결하고자 시계별 변위와 계측지점 간의 상호관련성을 분석하여 사면 안정성을 예측할 수 있는 기법을 개발하였다.

1) Department of Construction & Transportation, Yeongdong-gun Conuntry

† Department of Civil Engineering, Chonnam National University (Corresponding Author : prakash@nate.com)

2) Highway & Transportation Technology Institute, Korea Expressway Corporation

3) Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology

2. 계측 사면의 관련성

2.1 평균변위차지수

사면에 설치된 각 관측점의 시계열 변위데이터의 상호 관련 정도를 측정하기 위하여 각 관측점의 변위 데이터를 비교하여 관측점들의 연동성, 즉 거동양상을 분석하여 거동하는 사면의 크기와 속도 등을 확인할 수 있다.

계측대상 사면 표면에 관측점 혹은 pole이 N 개 있다고 가정하고, 각각의 관측점을 P_1, P_2, \dots, P_n 라고 한다(Fig. 1 참조). 데이터를 측정하는 시간분포를 t_1, t_2, \dots, t_n 이라 하고 시간에 따른 각 관측점의 위치변화, 즉 사면상부의 변위를 D 라고 표현하기로 한다. 그러므로 시간에 따른 P_i 점의 변위는 $D_i(t_1), D_i(t_2), \dots, D_i(t_k)$ 로 표현하거나 간단히 $D_i(t_k), k=1, 2, \dots, n$ 으로 표현할 수 있다. 같은 방법으로 P_j 점의 시계열에 따른 변위는 $D_j(t_1), D_j(t_2), \dots, D_j(t_n)$ 로 표현된다.

시간이 t_k 일 때 두 관측점 P_i 와 P_j 사이의 변위차는 Eq. (1)과 같이 정의한다. 두 지점 간 변위차이므로 절대값으로 계산한다.

$$D_{i,j}(t_k) = |D_i(t_k) - D_j(t_k)|, k=1, 2, \dots, n \quad (1)$$

두 관측점 P_i 와 P_j 사이의 시간영역이 t_1, t_2 일 때, 두 점에 관한 시계열 데이터 $D_{i,j}(t_k)$ 의 평균값은 Eq. (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\overline{D_{i,j}} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n D_{i,j}(t_k) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |D_i(t_k) - D_j(t_k)| \quad (2)$$

그러나 절대값을 이용하지 않는다면 변위차 $D_i(t_k)$ 는 영역이 $[-\infty, \infty]$ 사이의 거리차원을 가지고 있다. Fig. 1에서 보듯이 사면의 파괴가 사면하단으로 파괴가 일어나는 알

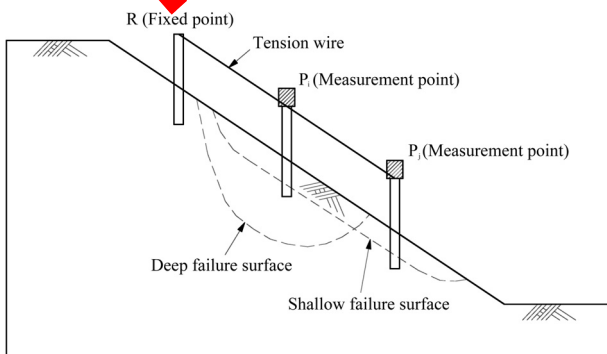


Fig. 1. Failure surface in slope

은 파괴 같은 경우 변위가 $+\infty$ 방향으로 발생할 것이며, 깊은 파괴와 같이 파괴 면이 회전할 경우 변위는 $-\infty$ 방향으로 움직일 것이다. 여기서 ∞ 의 공학적 의미는 사면파괴에 해당하며 $+$ 는 두 측정점간의 변위의 증가, $-$ 는 변위의 감소를 의미한다. 사면에서 발생한 변위차는 추후 전개될 공식 및 그래프 상에서 비교·분석되어야 하므로 변위차를 무차원의 간단한 상수로 바꾸어 계산하는 것이 좋을 것이다. 그러나 변위차는 절대값으로 표현되므로 $[0 \sim \infty]$ 사이에서 움직이고 있으므로 $[0^\circ \sim 90^\circ]$ 사이에서 $[0 \sim \infty]$ 로 움직이는 \tan 함수의 특성을 이용할 경우, 함수를 무차원 상수로 변환할 수 있다. 변환된 무차원 상수는 $[0 \sim 1]$ 구간에서 움직일 것이다. 이 변환방법은 아래에 전개하고 같다.

$$\tan \alpha_{i,j} = \overline{D}_{i,j} \quad (3)$$

$$0^\circ \leq \alpha_{i,j} \leq 90^\circ \quad \text{or} \quad \alpha_{i,j} = \tan^{-1} \overline{D}_{i,j}$$

이 식은 Eq. (4)와 같이 다시 정리할 수 있다.

$$\sin^2 \alpha_{i,j} = \frac{\tan^2 \alpha_{i,j}}{1 + \tan^2 \alpha_{i,j}} = \frac{(\overline{D}_{i,j})^2}{1 + (\overline{D}_{i,j})^2} = AD_{i,j} \quad (4)$$

$\alpha_{i,j}$ 의 영역은 $0^\circ \leq \alpha_{i,j} \leq 90^\circ$ 이므로 $\sin^2 \alpha_{i,j}$ 는 $[0 \sim 1]$ 구간 내의 상수값으로 계산된다. 그러므로 $\sin^2 \alpha_{i,j}$ 는 두 사면 관측점의 계측변위 데이터의 차이를 거리차원이 아닌 무차원 상수로 나타낼 수 있는 값이다.

이를 평균변위차지수(Average index of different displacement, $AD_{i,j}$)라 하면 이 지수가 0일 경우 전반적으로 변위가 없는 것을 의미하고, 1이면 전반적 변위가 큼을 의미한다. 이 지수는 전체 변위의 평균 변위자료에서 구한 값이므로 일시적 변위에 대한 값이 아니라 전반적 변위 값이다.

2.2 평균상대변위차

평균변위차지수($\sin^2 \alpha_{i,j}$)를 이용하여 전체 변위의 평균 변위자료에서 사면의 두 지점간 전반적 변위 거동차를 구하였으나 사면의 각 지점이 시간별로 얼마나 같이 연동하는가의 여부를 알면 사면 파괴 면의 영역을 알 수 있을 것이다. 다시 말하면 사면 내 두 관측점의 같은 시간대 변위차가 크면 두 지점은 서로 다른 영역 위에서 따로 움직이고 있는 것이고, 변위차가 적거나 거의 없다면 두 관측점은 같은 영역 상에서 움직이고 있으므로 파괴 면의 크기와 속도 등을 유추할 수 있다. 그러므로 시간에 따른 관측점의 연동에 관

한 지수를 추가 도입할 필요가 있다.

평균변위차지수는 각 관측점 사이의 전체 시계열 데이터를 단순히 하나의 지수로 나타내므로 각 관측점 사이의 시간적인 거동차이가 일어나는 과정을 분석하기가 힘들다. 사면의 파괴에 따른 거동양상은 긴 시간에 걸쳐 일어나므로 두 관측점 사이의 변위차가 시간에 따라 다른 거동을 보이는 형상을 찾는 것이 유리하다. 즉 전체 거동차이를 하나의 값으로 나타내는 평균변위차지수도 필요하지만, 각 시간별 변위과정을 알 수 있는 값 또한 필요하다. 그러므로 이러한 요구에 합당하게 평균상대변위차라는 개념을 도입하고자 한다.

상대변위차는 두 관측점 사이의 최대 변위차($M_{i,j}$)와 최소 변위차($m_{i,j}$)와 해당시점의 변위차를 사용하여 구할 수 있다. 절대값을 이용한 두 관측점의 최대 변위차와 최소 변위차의 차이가 변위차 사이의 최대값이 될 것이며, 이는 두 관측 데이터를 이용한 변위차 그래프의 최대간격($M_{i,j}-m_{i,j}$)이 될 것이다. 그리고 최대변위차값을 해당시점의 변위차값으로 빼면 이는 변위차 그래프의 해당시점의 간격이 되며 ($M_{i,j}-D_{i,j}$), 해당간격을 최대간격으로 나누면 이는 상대변위차가 될 것이다. 먼저 최대 및 최소 상대변위차는 Eq. (5)~(6)으로 정의되며, 이는 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다.

$$D_{i,j}(t_k) = |D_i(t_k) - D_j(t_k)|, k = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$\begin{cases} M_{i,j} = \max_k [D_{i,j}(t_k)] \\ m_{i,j} = \min_k [D_{i,j}(t_k)] \end{cases} \quad (6)$$

두 관측점의 관측시간 i, j 구간에서 어떤 시간 t_k 에 해당하는 시계열 데이터를 절대값으로 처리한 상대변위차는 Eq. (7)로 정의할 수 있다.

$$RD_{i,j}(t_k) = \frac{D_{i,j}(t_k) - m_{i,j}}{M_{i,j} - m_{i,j}}, k = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

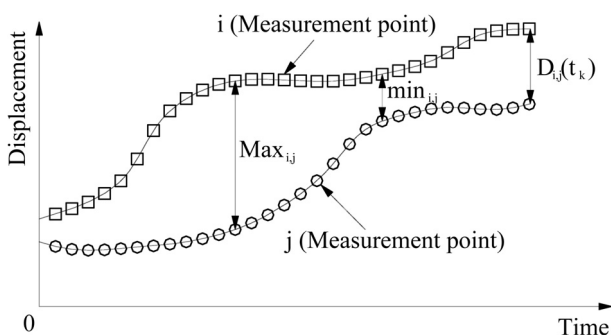


Fig. 2. Displacement difference of slope behavior

상대변위차의 경우 실시간 변위차 $D_{i,j}(t_k)$ 값이 최대값 ($M_{i,j}$)에 가까울수록 0에 가까운 값을 보여줄 것이며, 이는 두 지점사이의 변위가 크며 다른 거동영역임을 의미한다. 그리고 $D_{i,j}(t_k)$ 값이 $m_{i,j}$ 에 가까울수록 1에 근접함을 알 수 있으며, 이는 두 지점 사이의 변위가 작음을 의미하며 같은 거동영역임을 알 수 있다. 이는 i 지점의 각 값과 j 지점의 각 값의 차이에 따라 상대변위차가 달라질 것이나 작은 상대변위차 값이 안정된 상태임을 알 수 있다. 지속적인 상대변위차를 알기 위해 두 지점 간 시계열 상대변위차의 평균값을 구하면 Eq. (8)로 정의할 수 있다.

$$\overline{RD}_{i,j} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n RD_{i,j}(t_k) \quad (8)$$

상대변위차($RD_{i,j}(t_k)$)의 범위는 $[0 \sim 1]$ 인 무차원수이므로 당연히 이의 평균값인 평균상대변위차($\overline{RD}_{i,j}$) 역시 범위가 $[0 \sim 1]$ 사이의 무차원수이다. $\overline{RD}_{i,j}$ 값이 크거나 혹은 1에 근접할 때 i, j 시간구간의 데이터 series는 변위가 없는 안정된 모양을 보게 될 것이다. 다시 말하면 $\overline{RD}_{i,j}$ 값이 작거나 0에 근접하면 i, j 시간 구간의 데이터 series는 변위가 큰 불안정한 모양을 갖게 될 것이다.

즉, 평균상대변위차는 평균치라는 개념을 이용하고 있으므로 안정적인 데이터와 불안정한 데이터 모두 평균치는 같을 수 있으나, 계측 데이터를 시간별 그래프로 그려보면 유사한 거동을 보이는 각 관측점의 시간별 데이터는 같은 사면 내 영역이며, 거동이 다른 경우 다른 사면 영역임을 쉽게 알 수 있다.

2.3 평균상대좌표시스템

두 관측점의 시계열 데이터의 전반적 차이, 즉 두 지점의 평균 변위량 차이를 수치화하기 위하여 평균변위차지수($AD_{i,j}$)라는 개념을 정의하였고, 계측 데이터 series의 시계열 그래프 형상의 크기 및 유사성을 나타내기 위하여 평균상대변위차($\overline{RD}_{i,j}$)라는 개념을 정의하였다. 그러므로 이 두 가지 개념을 각각 사용하는 것이 아니라 함께 사용한다면 두 관측 지점의 시계열 데이터의 변위차의 정도 및 시계열 그래프로 나타난 모양이 비슷한 정도(각 지점의 시간에 따른 데이터의 증감 정도)를 동시에 나타낼 수 있을 것이다. 이 평균변위차지수와 평균상대변위차를 각각 좌표의 한 축으로 하여 그래프로 표현할 수 있으며, 같은 무리에 속하면 같은 전반적 거동 및 실시간 거동을 나타내고 있다고 할 수 있을 것이다. 그러므로 파괴영역 구분 및 파괴거동에 대한 훌륭한 지표가 될 수 있을 것이다.

두 관측점의 시계열 i 와 j 에서 만들어진 평균변위지수($AD_{i,j}$)와 평균상대변위차($\overline{RD}_{i,j}$)를 이용하여 평균상대좌표시스템(Coordinate system of average and relative displacement)을 정의한다. 평균상대좌표시스템의 X축은 평균상대변위차($\overline{RD}_{i,j}$), Y축은 평균변위차지수($AD_{i,j}$)로 하여 각 상대변위의 군집성을 검토하며, Eq. (9) 및 Fig. 3과 같이 정의한다.

$$(\overline{RD}, AD) = (x - axial, y - axial) \quad (9)$$

Fig. 3과 같이 같은 거동을 하는 무리들을 구분하여 사면의 거동 영역을 파악한다. Fig. 3의 경우 같은 사면 내 거동 A 무리와 거동 B 무리를 별도로 구분할 수 있다.

3. 현장 적용 및 데이터 분석

3.1 현장 계측기 배치

본 해석 모델을 충청북도 D사면의 계측 데이터에 적용하였다. 대상사면은 국도의 절취사면부로 1~3단면은 사면하부의 남한강을 기준으로 봉적사면에서 마을 진입로 상의 콘크리트 도로와 상부의 폐석 성토층에 이르는 단면으로 진입로 하부 사면에서 인장균열이 발견된 지점이다. 4~5단면은

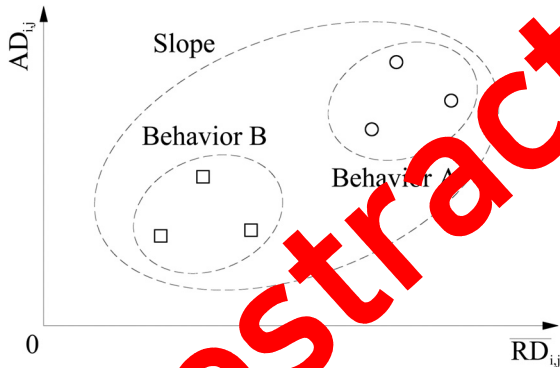


Fig. 3. Coordinate system of $AD_{i,j}$, $\overline{RD}_{i,j}$

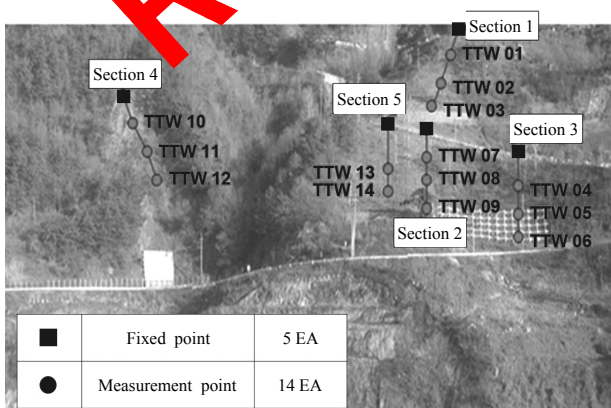


Fig. 4. Arrangement of sensor in D slope

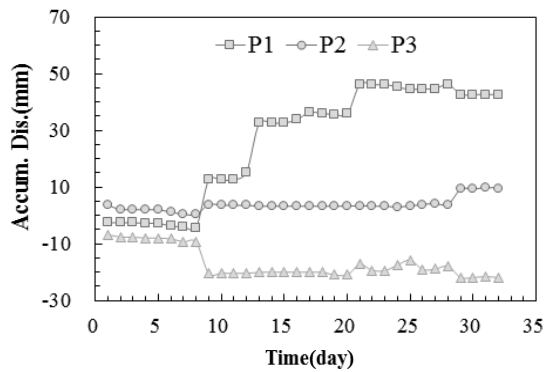
전석과 봉적토(H.W.~C.W.)로 피복되어 있고 노두가 들어난 암반부는 풍화의 진전으로 인하여 변색이 진행되고 있으며 손으로도 암편이 쉽게 탈락되는 상황이다. 또한 지표토양의 침식 및 활동을 억제하기 위하여 부분적으로 돌망태공 및 목재 막음으로 처리되어있으나 돌망태공의 경우 느슨한 상태이고 목재 막음 또한 부식 및 낙석으로 인하여 파손된 지점이다(Fig. 4 참조). 3단면의 4~6지점 중 5, 6지점은 어스앵커로 보강된 지점이다.

3.2 계측데이터 분석

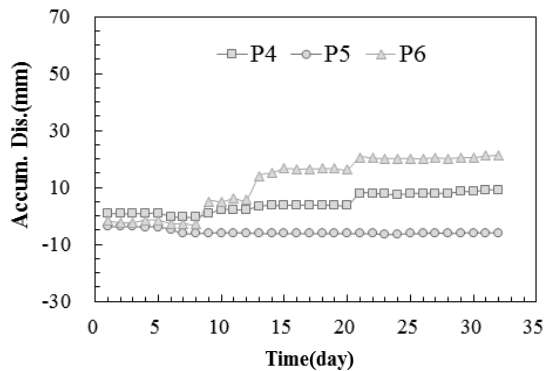
현장의 계측 자료 중 사용된 부분은 1단면의 관측점 P1~P3과 3단면의 관측점 P4~P6이다. 사면거동의 극한성을 계산

Table 1. Accumulated displacement data

Time (day)	Section 1			Section 3		
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
1	-2.51	3.50	-6.72	0.88	-3.77	-1.76
2	-2.51	2.10	-7.65	0.75	-3.79	-2.31
3	-2.51	2.10	-7.65	0.75	-3.79	-2.31
4	-2.81	2.04	-7.96	0.86	-3.84	-1.46
5	-2.81	2.04	-7.96	0.99	-3.84	-1.46
6	-3.72	1.14	-8.26	-0.21	-4.77	-2.66
7	-4.04	0.49	-9.27	-0.46	-6.19	-2.61
8	-4.32	0.30	-9.40	-0.46	-6.19	-2.61
9	12.49	3.84	-20.38	0.77	-5.95	4.87
10	12.53	3.60	-20.32	2.26	-5.89	4.93
11	12.53	3.54	-20.38	2.20	-5.95	6.08
12	15.17	3.54	-20.38	2.20	-5.95	5.83
13	32.54	3.30	-20.01	3.46	-6.19	13.89
14	32.57	3.30	-20.01	3.71	-6.19	15.09
15	32.67	3.30	-20.01	3.73	-6.19	16.59
16	33.71	3.30	-20.01	3.77	-6.19	16.46
17	36.45	3.30	-20.01	3.77	-6.19	16.50
18	35.85	3.30	-20.01	3.77	-6.19	16.59
19	35.72	3.30	-20.94	3.77	-6.19	16.59
20	35.76	3.30	-20.94	3.77	-6.21	16.35
21	46.26	3.41	-17.28	7.93	-6.25	20.49
22	45.97	3.30	-19.39	7.93	-6.25	20.27
23	46.19	3.25	-19.45	7.68	-6.55	20.19
24	45.18	3.00	-17.43	7.45	-6.45	20.17
25	44.48	3.30	-15.74	7.93	-6.19	20.19
26	44.67	3.90	-19.08	7.98	-6.19	20.12
27	44.69	4.18	-18.83	7.98	-5.93	20.42
28	46.23	3.90	-17.92	7.98	-6.19	20.12
29	42.67	9.29	-21.87	8.53	-5.95	20.51
30	42.67	9.29	-21.87	8.53	-5.95	20.46
31	42.67	9.87	-21.56	9.13	-5.95	21.08
32	42.67	9.59	-21.87	9.13	-5.95	21.21

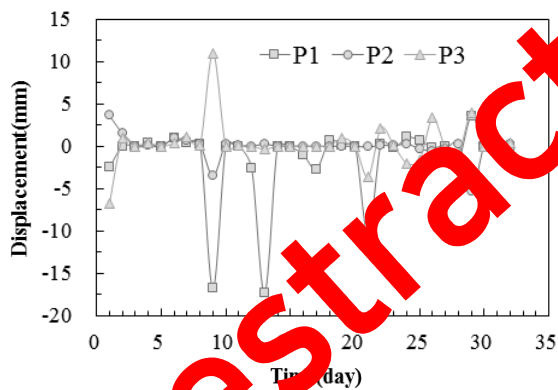


(a) Section 1

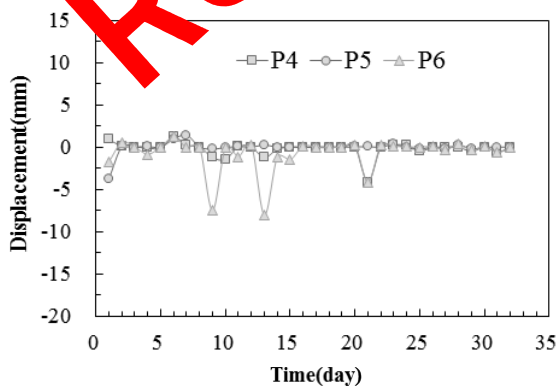


(b) Section 3

Fig. 5. Accumulated displacement data



(a) Section 1



(b) Section 3

Fig. 6. Raw displacement data

하는 과정을 Table과 Figure로 구현하여 보았다. Table 1 및 Fig. 5는 각 지점의 누적변위데이터(Accumulated displacement data)를 Table 2 및 Fig. 6은 각 지점의 실제 변위데이터(Raw displacement data)를 나열 및 도시하였다.

이를 이용한 지점 간 절대변위차와 평균변위차, 평균변위차지수는 Table 3에 나열하였다. 각 지점의 연관성을 고려하여 사면의 파괴영역을 구분하기 위한 각 관측점간 절대변위차는 Fig. 7에서 보여준다.

Table 4는 상대변위차와 평균상대변위차를 계산하였다. 사면거동의 각 관측점간 상대변위차를 보여주는 Fig. 8의 그래프를 보면 상대변위차가 작을수록 지점간 안정한 거동을 하므로 3단면의 경우 20~30일 사이 대부분의 상대변위

Table 2. Raw displacement data

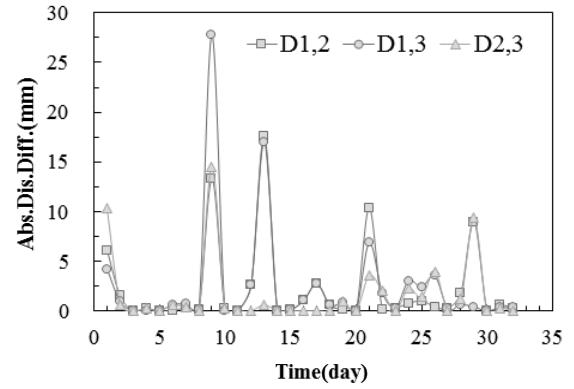
Time (day)	Section			Section 3		
	P1	P2	P3	P4	P5	P6
1	-2.51	3.50	-6.72	0.88	-3.77	-1.76
2	0.00	1.50	0.93	0.13	0.02	0.55
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.30	0.06	0.31	-0.11	0.05	-0.85
5	0.00	0.00	0.00	-0.13	0.00	0.00
6	0.91	0.90	0.30	1.20	0.93	1.20
7	0.32	0.65	1.01	0.25	1.42	-0.05
8	0.28	0.19	0.13	0.00	0.00	0.00
9	-16.81	-3.54	10.98	-1.23	-0.24	-7.48
10	-0.04	0.24	-0.06	-1.49	-0.06	-0.06
11	0.00	0.06	0.06	0.06	0.06	-1.15
12	-2.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25
13	-17.37	0.24	-0.37	-1.26	0.24	-8.06
14	-0.03	0.00	0.00	-0.25	0.00	-1.20
15	-0.10	0.00	0.00	-0.02	0.00	-1.50
16	-1.04	0.00	0.00	-0.04	0.00	0.13
17	-2.74	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.04
18	0.60	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.09
19	0.13	0.00	0.93	0.00	0.00	0.00
20	-0.04	0.00	0.00	0.00	0.02	0.24
21	-10.50	-0.11	-3.66	-4.16	0.04	-4.14
22	0.29	0.11	2.11	0.00	0.00	0.22
23	-0.22	0.05	0.06	0.25	0.30	0.08
24	1.01	0.25	-2.02	0.23	-0.10	0.02
25	0.70	-0.30	-1.69	-0.48	-0.26	-0.02
26	-0.19	-0.60	3.34	-0.05	0.00	0.07
27	-0.02	-0.28	-0.25	0.00	-0.26	-0.30
28	-1.54	0.28	-0.91	0.00	0.26	0.30
29	3.56	-5.39	3.95	-0.55	-0.24	-0.39
30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05
31	0.00	-0.58	-0.31	-0.60	0.00	-0.62
32	0.00	0.28	0.31	9.13	0.00	-0.13

Table 3. $D_{i,j}$ and $AD_{i,j}$

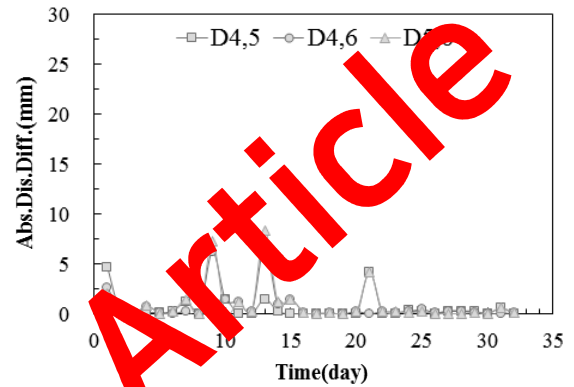
Time (day)	Section 1			Section 3		
	$D_{1,2}$	$D_{1,3}$	$D_{2,3}$	$D_{4,5}$	$D_{4,6}$	$D_{5,6}$
1	6.11	4.21	10.32	4.65	2.64	2.01
2	1.50	0.93	0.57	0.11	0.42	0.53
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	0.24	0.01	0.25	0.16	0.74	0.90
5	0.00	0.00	0.00	0.13	0.13	0.00
6	0.01	0.61	0.60	0.27	0.00	0.27
7	0.33	0.69	0.36	1.17	0.30	1.47
8	0.09	0.15	0.06	0.00	0.00	0.00
9	13.27	27.79	14.52	0.99	6.25	7.24
10	0.28	0.02	0.30	1.43	1.43	0.00
11	0.06	0.06	0.00	0.00	1.21	1.21
12	2.64	2.64	0.00	0.00	0.25	0.25
13	17.61	17.00	0.61	1.50	6.80	8.30
14	0.03	0.03	0.00	0.25	0.95	1.20
15	0.10	0.10	0.00	0.02	1.48	1.50
16	1.04	1.04	0.00	0.04	0.17	0.13
17	2.74	2.74	0.00	0.00	0.04	0.04
18	0.60	0.60	0.00	0.00	0.09	0.09
19	0.13	0.80	0.93	0.00	0.00	0.00
20	0.04	0.04	0.00	0.02	0.24	0.22
21	10.39	6.84	3.55	4.20	0.02	4.18
22	0.18	1.82	2.00	0.00	0.22	0.22
23	0.27	0.28	0.01	0.05	0.17	0.22
24	0.76	3.03	2.27	0.33	0.21	0.12
25	1.00	2.39	1.39	0.22	0.46	0.12
26	0.41	3.53	3.94	0.05	0.12	0.07
27	0.26	0.23	0.03	0.26	0.30	0.01
28	1.82	0.63	1.19	0.26	0.16	0.04
29	8.95	0.39	9.34	0.27	0.16	0.15
30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.05
31	0.58	0.31	0.27	0.60	0.02	0.62
32	0.28	0.31	0.03	0.00	0.13	0.13
ave.	2.24	2.48	0.74	0.53	0.79	0.98
$AD_{i,j}$	0.8340	0.6971	0.7274	0.2205	0.3846	0.4912

차는 거의 0에 수렴하여 작은 값을 보이므로 지점간 변위차가 거의 없어 안정적이다. 1단면의 경우 초기는 불안정하나 현재는 안정적인 추세로 가고 있음을 알 수 있다.

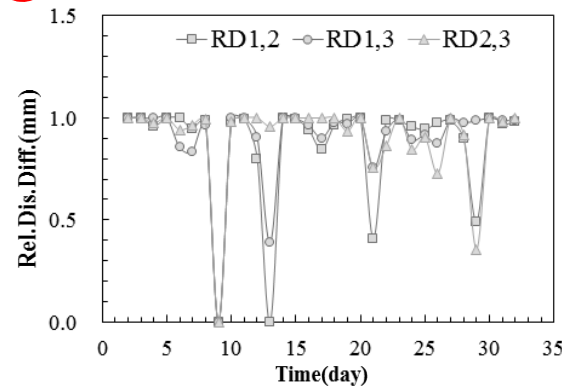
Table 5는 평균변위차지수 및 평균상대변위차를 이용한 평균상대좌표를 계산한 것이며, Table 6은 평균변위차지수 및 평균상대변위차의 공학적 특성을 정리한 것이다. Fig. 9는 Table 6의 공학적 특성에 따라 평균 좌표시스템의 안정 및 불안정 상태를 구분한 것이다. Fig. 9의 좌표시스템은 (RD, AD) = (현재 거동, 전반적 거동)으로 구분된다. Fig. 10은 현장 사면의 평균상대변위차 및 변위차지수를 도시한 것으로 1단면 = (안정, 불안정) 영역, 3단면 = (안정, 안정) 영역에



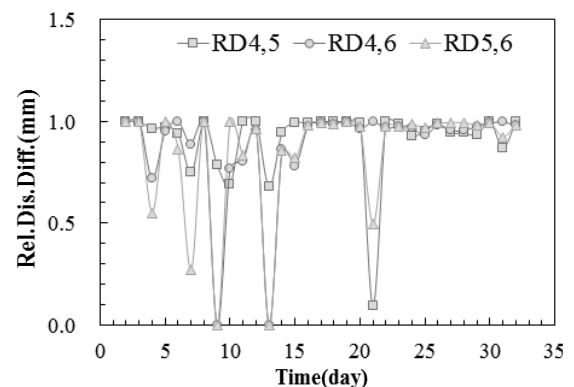
(a) Section 1



(b) Section 3

Fig. 7. Difference of absolute displacement, $D_{i,j}$ 

(a) Section 1



(b) Section 3

Fig. 8. Difference of relative displacement, $RD_{i,j}$

Table 4. $RD_{i,j}$ and $\overline{RD}_{i,j}$

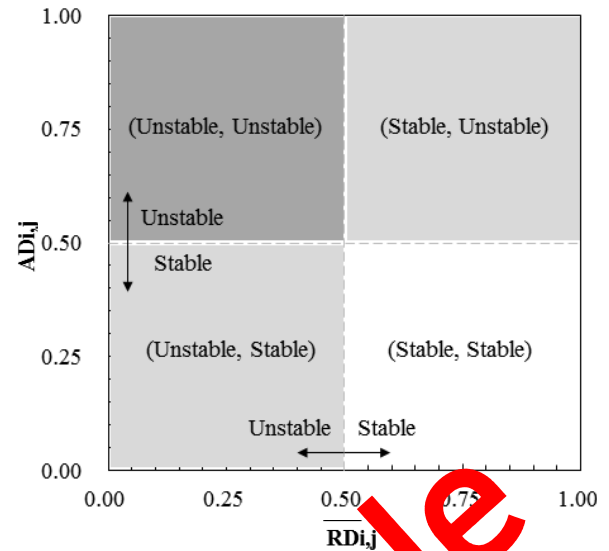
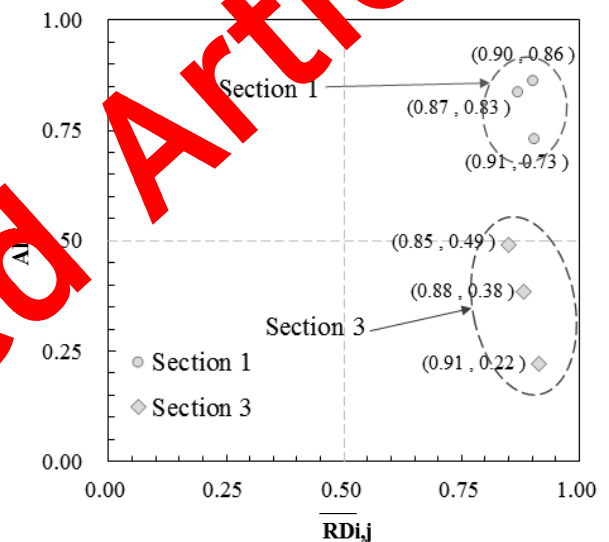
Time (day)	Section 1			Section 3		
	$RD_{1,2}$	$RD_{1,3}$	$RD_{2,3}$	$RD_{4,5}$	$RD_{4,6}$	$RD_{5,6}$
1						
2	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
3	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
4	0.961	0.998	0.976	0.966	0.720	0.552
5	1.000	1.000	1.000	0.972	0.951	1.000
6	0.998	0.855	0.942	0.942	1.000	0.866
7	0.946	0.836	0.965	0.748	0.886	0.269
8	0.985	0.964	0.994	1.000	1.000	1.000
9	0.000	0.000	0.000	0.787	0.000	0.000
10	0.979	0.999	0.979	0.692	0.771	1.000
11	0.995	0.998	1.000	1.000	0.806	0.833
12	0.801	0.905	1.000	1.000	0.960	0.965
13	0.000	0.388	0.958	0.677	0.000	0.000
14	0.998	0.999	1.000	0.946	0.860	0.855
15	0.994	0.996	1.000	0.996	0.782	0.819
16	0.941	0.963	1.000	0.991	0.975	0.984
17	0.844	0.901	1.000	1.000	0.994	0.995
18	0.966	0.978	1.000	1.000	0.987	0.989
19	0.993	0.971	0.936	1.000	1.000	1.000
20	0.998	0.999	1.000	0.996	0.965	0.973
21	0.410	0.754	0.756	0.097	0.997	0.496
22	0.990	0.935	0.862	1.000	0.968	0.973
23	0.985	0.990	0.999	0.989	0.975	0.973
24	0.957	0.891	0.844	0.929	0.969	0.986
25	0.943	0.914	0.904	0.953	0.932	0.971
26	0.977	0.873	0.729	0.989	0.982	0.975
27	0.985	0.992	0.998	0.944	0.956	0.995
28	0.897	0.977	0.918	0.944	0.956	0.995
29	0.492	0.986	0.357	0.933	0.975	0.982
30	1.000	1.000	1.000	1.000	0.993	0.994
31	0.967	0.989	0.981	0.991	0.977	0.925
32	0.984	0.989	0.999	1.000	0.981	0.984
$\overline{RD}_{i,j}$	0.871	0.905	0.906	0.915	0.882	0.851

Table 5. Procedure of $AD_{i,j}$ and $\overline{RD}_{i,j}$

	Section 1			Section 3		
	D_{12}	D_{13}	D_{23}	D_{45}	D_{46}	D_{56}
Max.	17.61	27.79	14.52	4.65	6.80	8.30
min.	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$AD_{i,j}$	0.834	0.860	0.729	0.221	0.385	0.491
$\overline{RD}_{i,j}$	0.871	0.905	0.906	0.915	0.882	0.851

Table 6. Engineering characteristics of $\overline{RD}_{i,j}$ and $AD_{i,j}$

Behavior	Presnet behavior	General behavior
Index	Average difference of relative displacement	Average index of different displacement
Formular	$\overline{RD}_{i,j}(t_k) = \frac{M_{i,j} - D_{i,k}(t_k)}{M_{i,j} - m_{i,j}}$	$AD = \frac{(\overline{D}_{i,j})^2}{1 + (\overline{D}_{i,j})^2}$
Range	0(Unstable) ~ 1(Stable)	0(Unstable) ~ 1(Stable)

Fig. 9. Separation of $AD_{i,j}$, $\overline{RD}_{i,j}$ coordinate systemFig. 10. Application of $AD_{i,j}$, $\overline{RD}_{i,j}$ coordinate system

위치하고 있다.

1단면의 평균변위차지수들은 거의 1에 가까운 값이 나왔다. 이는 각 관측지점들의 전반적 사면 거동의 변위차가 크다는 것을 의미한다. 3단면의 평균변위차지수는 1단면에 비해 매우 낮은 값들이 나왔다. 이는 각 관측지점들의 전반적 사면 거동의 변위차가 거의 없다는 것을 의미한다. 즉 각 지점 간 변위차가 평균적으로 크게 차이가 나지 않아 같은 거동 영역 내에 있음을 의미하거나, 전체 사면이 안정정인 상태를 의미한다.

평균상대변위차의 경우 0.851~0.915 정도에서 움직여 평균변위차지수보다 높은 값을 보여주고 있다. 이는 Fig. 9에서 보듯이 현재 사면의 상대변위가 거의 없는 안정적인 사면 상태를 알 수 있다.

4. 결 론

사면의 다양한 실제측 데이터들을 해석, 가공 후 실시간 사면거동양상을 분석하고, 사면안전에 대한 결론을 유도하기 위해 실시간 계측자료들을 분류함에 있어 원 계측자료, 지점 간 절대변위차 및 상대변위차를 이용하였다. 각 지점 간 변위차를 명확히 하기 위하여 평균변위차지수, 평균상대변위차 및 평균상대좌표체계를 이용하여 사면의 실시간 거동을 해석하였다.

- (1) 각 사면의 파괴에 따른 거동양상 중 각 관측점의 시계열 데이터의 전반적 차이, 즉 두 지점의 평균 변위량 차이를 수치화하기 위하여 평균변위차지수($AD_{i,j}$)라는 개념을 정의하였다.
- (2) 계측 데이터 series의 시간별 그래프 형상의 변위차를 나타내기 위하여 평균상대변위차($\overline{RD}_{i,j}$)라는 개념을 정의하였다.
- (3) 평균변위차지수 및 평균상대변위차를 조합하여 사면의 안정성 평가를 하기 위하여 이를 각각 좌표의 한 축으로 하는 평균상대좌표시스템을 정의하여 사면 파괴영역 구분 및 파괴거동에 대한 지표를 정의하였다.
- (4) 사면 3단면의 경우, 20~30일 사이 대부분의 상대변위차는 거의 0에 수렴하여 작은 값을 보이므로 지점 간 변위차가 거의 없어 안정적이다. 1단면의 경우 초기에는 불안정하나 현재는 안정적인 추세로 가고 있음을 알 수

있다.

- (5) 사면 1단면의 평균변위차지수들은 거의 1에 가까운 값이 나와 각 관측지점들의 전반적 사면 거동의 변위차가 크다. 그러나 3단면의 평균변위차지수는 1단면에 비해 매우 낮은 값들이 나와 각 지점 간 변위차가 평균적으로 크게 차이가 나지 않아 안정적인 상태임을 의미한다.
- (6) 평균상대변위차의 경우, 1 및 3단면이 0.851~0.915 정도에서 움직여 현재 사면의 거동이 안정적인 상태로 가고 있음을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(14SCIP-B065965-02)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Fukuzono, T. (1990), Recent studies on time prediction of slope failure, Landslide News, No. 4, pp. 9~12.
2. Han, H. S. and Chang, K. T. (2005), Predicting the Failure of Slope by Mathematical Model, Journal of the Korea Geotechnical Society, Vol. 21, No. 2, pp. 145~150.
3. Saito, M. and Uezawa, H. (1961), Failure of soil due to creep, Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1, pp. 315~318.
4. Voight, B. (1988), A method for prediction of volcanic eruption, Nature, London, No. 332, pp. 125~130.