

Tension Wire 계측을 통한 비탈면의 3차원 거동 분석

3-D Analysis of Slope by Tension Wire Sensing

신 태 주¹⁾ · 김 태 수[†] · 황 상 구²⁾ · 한 희 수²⁾

Taeju Shin · Taesoo Kim · Sanggoo Hwang · Heuisoo Han

Received: December 3rd, 2014; Revised: December 5th, 2014; Accepted: January 15th, 2015

ABSTRACT : Several sensor systems are used to estimate and predict the slope behaviors, however though slope sensing systems are much up-to-dated compared to before, they are mainly focused on the hardware developing. It means the analyzing software is deficient to apply the examining slope behavior for slope stability. In real case, slope behavior shows the 3-dimensional movement and failure; however the modeling methods for 3-D behavior are more difficult and need more variables. 1-D analysis shows only the length variation, however the real slope makes the 3-D behaviors. To fix the 3-D space coordinate, three values should be determined such as length, horizontal angle and vertical angle. Therefore if the 3-D coordinate system were composed by the points considered of two directions and length, the 3-D space could be separated into horizontal plane and vertical plane. The data from DY-slope in Chungbuk province was analyzed to the developed 3-D coordinate system. It is concluded from the results of 3-D analysis, the slope is generally moving to transverse direction, also the displacements are happening to road and vertical direction at the same time. Presently, the accumulated displacement between sensing points shows small value within 4.3 cm, and the displacements of all sensing points show the similar directions and magnitudes.

Keywords : Slope, In-situ sensing, Surface displacement, Tension wire, 3-D analysis

요 지 : 비탈면 계측시스템이 예전에 비해 많이 개선되긴 했지만, 주로 하드웨어적인 측면의 개선에 치우쳤다. 실제 비탈면의 거동은 3차원 거동이며, 3차원 거동해석은 많은 변수를 함유하고 있어 비탈면 안정해석을 위한 비탈면 거동분석프로그램은 상대적으로 개발이 부족하였다. 일차원 해석은 방향의 고려 없이 길이의 증감만을 나타내나, 실제 비탈면 현장의 경우 3차원 공간상 변화를 나타낸다. 3차원상의 공간좌표를 확정하기 위하여 결정되어야 하는 값들은 길이, 수평각 및 수직각이다. 그러므로 두 방향 및 길이 변화를 고려한 좌표 시스템을 이용하여 새로운 좌표들을 구할 경우, 3차원의 공간을 분할하여 수평변화 및 수직변화를 구분하여 비탈면의 거동을 해석할 수 있다. 본 해석 모델을 충청북도 DY비탈면의 계측 data에 적용하였다. 현장 계측자료를 3-D 해석한 결과 비탈면은 전반적으로 오른쪽으로 이동하고 있으며, 변위가 도로방향으로 일어남과 동시에 수직변위가 발생하고 있음을 알 수 있다. 현재 비탈면은 계측지점 간 누적변위가 4.3cm 이내인 미소거동을 하며, 계측지점 모두 거동양상이 유사한 변위 방향 및 크기를 보이고 있음을 알 수 있다.

주요어 : 비탈면, 현장계측, 지표변위, Tension wire, 3차원 해석

1. 서 론

우리나라를 포함한 대부분의 비탈면 계측의 경우, Hardware 측면에서는 상당한 진보를 보고 있으나 지반의 불 균질성 및 외부 영향 등으로 인해 거동해석과 유지관리를 위한 Software 측면에서는 개선의 여지가 많다.

첨단화된 계측시스템을 이용하기 위해서는 적절한 해석 기법 또한 필요하며, 해석기법에서 유출된 비탈면의 계측관리기준은 일반적으로 절대관리기준 및 상대관리기준으로 구분할 수 있으나, 두 관리기준을 적용하기에 앞서 명확한 계측 자료를 구해야 한다.

국외의 경우 비탈면 변위자료를 이용하여 붕괴시점을 예측하는 방법이 있다(Fukuzono, 1990; Saito & Uezawa, 1961). 국내의 경우 비탈면 유지관리에 대해 건설교통부와 한국건설기술연구원 등이 절개면 상시감지 시스템을 도입, 시범설치 운영하고 있으며 Han & Chang(2005)이 3차원 방정식 및 통계기법을 응용한 수학적 모델을 이용하여 비탈면 파괴거동을 해석하였다. 그러나 이는 시계열 자료를 이용한 전반적인 거동해석으로 계측지점의 정확한 위치변화를 설명하지 못하였다.

본 연구는 비탈면의 거동을 해석함에 있어 비탈면의 각 지점을 선정한 후 공간 좌표상의 변화를 분석하여, 비탈면

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

† Highway & Transportation Technology Institute, Korea Expressway Corporation (Corresponding Author : tskim@ex.co.kr)

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

거동의 이상 징후를 사전에 예견하여 붕괴 및 대규모 산사태를 미연에 방지하기 위한 목적으로 시작되었다.

2. 좌표계의 이용

2.1 3차원 공간좌표의 확정과정

2.1.1 계측시스템

3차원 공간좌표를 확정함에 있어 Tension wire 등의 비탈면 계측시스템을 이용할 경우 비탈면의 1차원 길이변화는 알 수 있었으나, 비탈면 거동이 단순한 일차원 길이변화만이 아니므로 비탈면의 정확한 3차원 거동양상을 이해하기 어려웠다. 또한 비탈면 거동 각도변화 해석에 사용되는 것은 주로 지중경사계이다. 이는 비탈면 내 수직방향으로 설치된 관속에 작용하는 측압의 변화에 의한 관의 각도변화를 측정하는 것이므로, 비탈면의 지표거동과 비탈면 내의 각도변화가 서로 다른 지점에서 계측되어 한 계측지점의 거동양상을 이해하기 어렵다.

비탈면 내 붕괴 징후는 대부분 그 전조현상을 동반하는 것으로 보고되고 있으며, 대표적인 비탈면 붕괴 전조현상은 깊은 파괴와 얇은 파괴를 막론하고 비탈면 상부 지반이동을 유발한다. 따라서 상부 지반이동 감지를 통하여 비탈면 붕괴 거동해석이 가능하다. 그러므로 비탈면에 여러 계측 점을 설치하여 이를 통한 비탈면의 3차원 공간좌표의 변화를 알 수 있다면 파괴 전 거동양상을 분석하고 이해할 수 있을 뿐 아니라 비탈면의 구조적 안정성 확보를 위한 최적의 대책 강구가 가능하다.

두 지점 간 수평각/수직각 및 길이를 알면 3차원 공간 지점을 확정할 수 있으므로, 본 연구에 사용된 비탈면 지표계측기는 1m 길이의 강철봉 상부에 계측지점 간 길이변화를 측정하기 위해 Teflon으로 만들어진 Tension wire와 수평 및 수직 각도변화를 측정하는 2개의 각도계가 설치되어 있다.

2.1.2 공간좌표의 분할

3차원상의 공간좌표를 확정하기 위하여 결정되어야 하는 값들은 길이, 수평각 및 수직각이다. 그러므로 각 계측 지점 간 3차원 좌표를 선정하기 위하여 1) 각 지점 간의 길이, 2) 평면각 및 3) 수직각을 알아야 한다. 이 자료들을 이용하여 비탈면에 설치된 여러 지점의 3차원 공간좌표의 변화를 알 수 있으며, 이를 이용하여 비탈면의 각 계측 지점 간 3차원 공간거동 및 파괴형태를 유추할 수 있다. 즉 3차원 거동 해석 시 1) 길이변화 2) X-Y 평면상 좌표변환 3) X-Z 평면상 좌표변환 4) Y-Z 평면상 좌표변환 등을 통하여 비탈면 거동의 스칼라 값 및 단위 벡터 값을 유추할 수 있다.

Fig. 1에서 보이는 바와 같이 각 지점에 설치된 계측 점 사이의 길이 값(스칼라 값)이 증가하면 얇은 파괴일 것이고,

감소하면 비탈면 파괴면의 회전으로 인해 두 지점 사이에 깊은 파괴구간이 존재함을 알 수 있다.

일차원 해석은 방향의 고려 없이 길이의 증감만을 나타내나, 실제 비탈면 현장의 경우 3차원 공간상 변화를 나타낸다(Fig. 2(a)). 그러므로 두 방향 및 길이변화를 고려한 좌표 시스템을

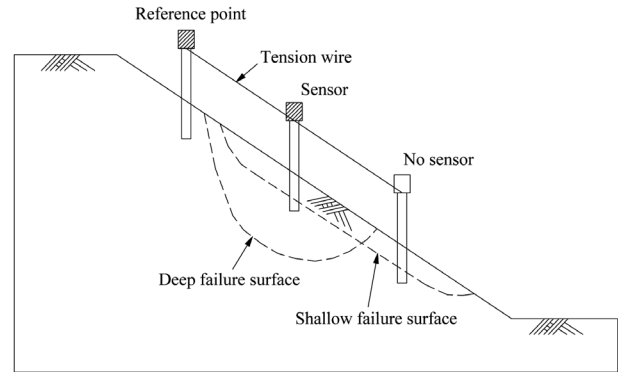


Fig. 1. Modes of slope failure

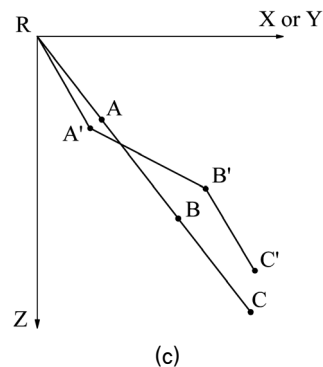
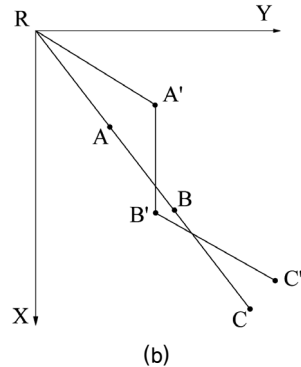
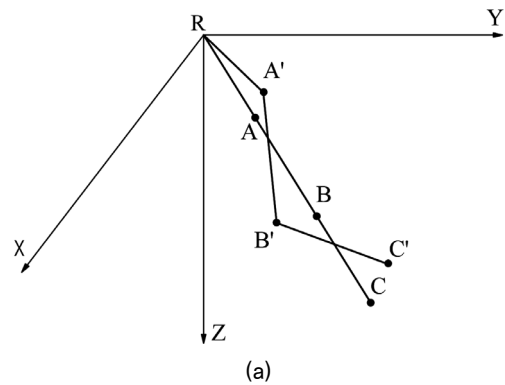


Fig. 2. Coordinate behaviors

이용하여 새로운 좌표들을 구할 경우, 3차원의 공간을 분할하여 수평변화(Fig. 2(b)) 및 수직변화(Fig. 2(c))를 구분하여 비탈면의 거동을 해석할 수 있다. Fig. 2에서 $R-A-B-C$ 는 길이방향 변화만을 나타내고, $R-A'-B'-C'$ 은 3차원 공간변화를 고려한 각 지점의 거동이다.

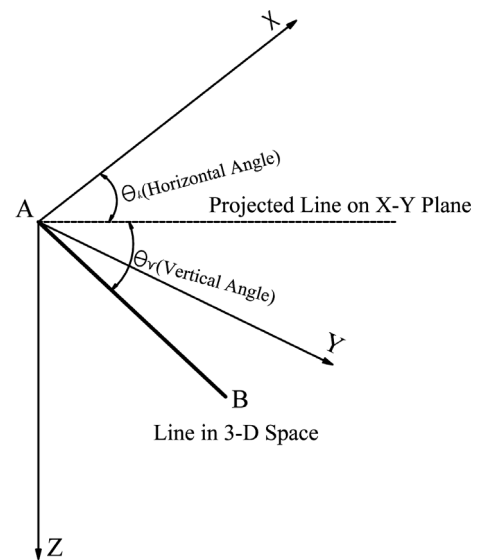
Fig. 3은 3차원 공간상의 좌표이동이 만들어 내는 3가지의 좌표분할형태를 나타낸다. Fig. 3(a)는 3차원 공간상 길이 및 수평 및 수직각을 보여준다. 이를 분할한 X-Y 평면상의 좌표변화를 통하여 수평면상 비탈면 파괴가 진행되는 파괴방향을 알 수 있으며(Fig. 3(b)), X-Z 혹은 Y-Z 평면상의 좌표변화(Fig. 3(c) 및 (d))에 따른 좌표 변화 값으로부터, 깊은 파괴 혹은 얇은 파괴거동을 알 수 있으므로 비탈면 파괴면을 예측할 수 있다.

2.1.3 공간좌표 확정과정

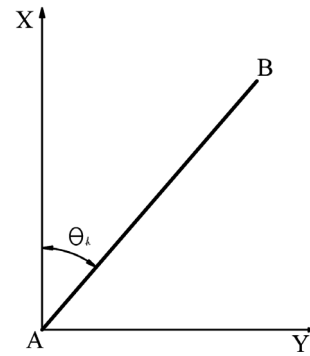
공간좌표를 이용하여 비탈면의 거동을 해석할 경우, 광파기를 이용하면 공간좌표의 계산과정이 없이 바로 변환좌표를 구할 수 있다. 그러나 광파기는 현장에 고정 설치를 할 수 없으므로 실시간 계측이 어렵다. 이에 반해 현장 고정설치가 가능한 Tension wire를 이용할 경우 비탈면의 3차원 거동해석이 가능하다. 예를 들어 Fig. 4의 비탈면에 관입된 4개의 막대가 계측 점들이고, 각 계측 점 상부에 계측센서로 Tension wire, 수평각 및 수직각을 측정하는 두 개의 각도 센서를 설치한다. 네 개의 계측 점이므로 세 개의 R-A 구간, A-B 구간 및 B-C 구간으로 나누어 계측기를 설치한다. R-A 구간의 경우 R 지점에 계측센서를 설치하고, A-B 구간의 경우 A 지점에 계측센서들을 설치하며, B-C 구간에는 B 지점에 설치한다. 즉 각 구간의 상부지점에 계측센서들이 위치하며, 맨 마지막의 C 지점에는 계측센서가 없다.

또한 각 지점의 거동을 계산하기 위해서는 변위가 발생하지 않는 고정점이 필요하므로, 광파기를 사용할 경우 광파기를 고정점으로 사용한다. 그러나 외부 고정점 없이 비탈면 내의 계측 점들만을 이용하여 거동을 해석할 경우 항상 $X=Y=Z=0$ 인 변위가 발생하지 않는 고정점(Reference point)이 반드시 필요하다. Fig. 4에서 보인 바와 같이 최상부에 변위가 발생하지 않는 고정점을 설치하고 하부구간의 3차원 변위거동을 계측 및 해석한다.

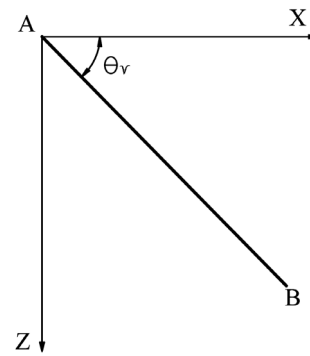
Fig. 5는 비탈면 내 각 계측지점의 좌표체계를 나타내며 A-B 구간의 좌표를 구하기 위한 길이, 수평각 및 수직각을 보여준다. 각 구간별 계측시스템의 경우 상부지점에 길이 및 각도 센서시스템이 위치하므로, 상부지점이 계산기준점이 된다. 변위벡터는 길이를 나타내는 스칼라 값과 방향을 나타내는 단위벡터로 구성되므로, 각 구간의 벡터는 좌표성분 벡터의 합으로 나타낼 수 있다. 3차원 공간상 좌표변화



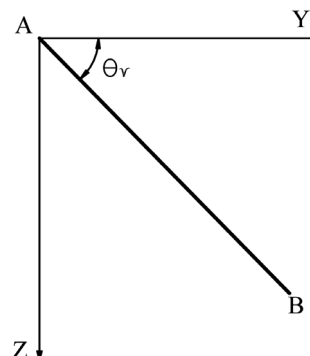
(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 3. Coordinate separation

는 Eq. (1)과 같이 표현될 수 있으며, 이는 스칼라와 단위벡터로 구분된다.

$$\begin{aligned}
 & \text{3차원 공간상 좌표변화} = \text{길이변화} \times \text{각 평면별} \\
 & \hspace{10em} \text{방향변화} \\
 & \text{3차원 변위벡터} = \text{스칼라} \times \text{3차원 단위벡터} \quad (1)
 \end{aligned}$$

각 상부지점을 기준점으로 하여 상기 언급된 식들을 반복 이용하여 각 계측지점의 변위벡터를 구할 수 있다.

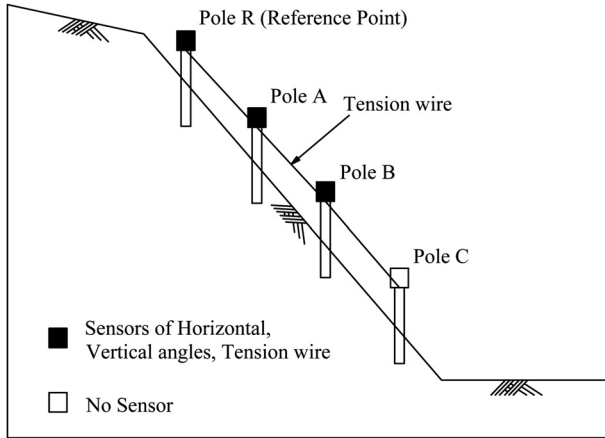


Fig. 4. Sensing points of slope

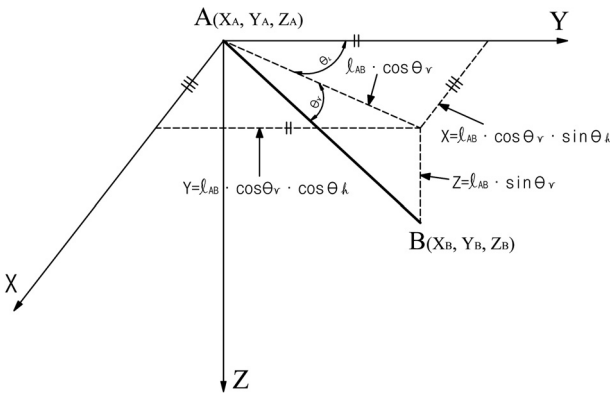


Fig. 5. Coordinate system

고정점 및 모든 계측 점 간의 최초 길이와 수평각 및 수직각을 계산하여 비탈면의 좌표변화에 대한 각 지점의 초기 좌표 치를 확정한다. 즉 Fig. 5에서 R-A, A-B 및 B-C 각 구간별 초기 길이 및 수직 및 수평각을 초기값으로 둔다. 삼차원 공간좌표는 길이 및 두 각을 알 수 있으면 구할 수 있으므로, 길이나 각도가 변하기 전의 좌표점을 $A(X_A, Y_A, Z_A)$ 라 하고, 변한 후의 좌표점을 $A'(X'_A, Y'_A, Z'_A)$ 라 하면 Eq. (2)와 같이 길이와 각을 정의할 수 있다.

Tension wire에서 구한 길이를 수평면(X-Y 평면)과 각도 차이인 수직각 θ_v 를 이용하여 높이 Z 지점좌표를 구한 후 X-Y 평면 내의 각도인 θ_h 를 이용하여 X 지점 및 Y 지점의 좌표를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 X' &= l_{AB} \cdot \cos \theta_v \cdot \sin \theta_h \\
 Y' &= l_{AB} \cdot \cos \theta_v \cdot \cos \theta_h \\
 Z' &= l_{AB} \cdot \sin \theta_v
 \end{aligned} \quad (2)$$

계산과정은 다음과 같다. 초기 A 지점의 3차원 공간좌표 (X_A, Y_A, Z_A) 를 설정하기 위한 입력자료를 tension wire에서 구간 A-B 지점 간 거리(l_{AB}), 수평각(θ_h) 및 수직각(θ_v)를 Eq. (2)에 대입하여 계산한다.

이후 비탈면의 변위거동에 따라 발생한 길이 및 각 변화를 고려한 길이 변화(Δl_{AB}), 수평각 변화($\Delta \theta_{AB,h}$) 및 수직각 변화($\Delta \theta_{AB,v}$)를 고려한 새로운 입력 요소들인 $l_{AB} + \Delta l_{AB}$, $\theta_{AB,h} + \Delta \theta_{AB,h}$ 및 $\theta_{AB,v} + \Delta \theta_{AB,v}$ 를 대입하여 A 지점의 새로운 공간좌표(X'_A, Y'_A, Z'_A)를 구한다.

Table 1은 각 계측구간별 변화량 및 변환좌표를 보여준다. Table 2는 3차원 공간상 각 계측지점의 초기좌표 및 변환좌표를 보여준다.

그리고 Fig. 5 및 Table 1~2에서 보는 바와 같이, 새로운 B 좌표(B')를 구하기 위한 기준점은 R-A 구간에서 새로 획

Table 1. Variation of each section

Section	Base coordinate	Data	Start	Variation	After variation	Changed coordinate
R-A	R(0, 0, 0) : Reference point of all section	Length	l_{RA}	Δl_{RA}	$l_{RA} + \Delta l_{RA}$	A(X'_A, Y'_A, Z'_A) : Base point of A-B section
		Horizontal angle	$\theta_{RA \cdot h}$	$\Delta \theta_{RA \cdot h}$	$\theta_{RA \cdot h} + \Delta \theta_{RA \cdot h}$	
		Vertical angle	$\theta_{RA \cdot v}$	$\Delta \theta_{RA \cdot v}$	$\theta_{RA \cdot v} + \Delta \theta_{RA \cdot v}$	
A-B	A(X'_A, Y'_A, Z'_A)	Length	l_{AB}	Δl_{AB}	$l_{AB} + \Delta l_{AB}$	B(X'_B, Y'_B, Z'_B) : Base point of B-C section
		Horizontal angle	$\theta_{AB \cdot h}$	$\Delta \theta_{AB \cdot h}$	$\theta_{AB \cdot h} + \Delta \theta_{AB \cdot h}$	
		Vertical angle	$\theta_{AB \cdot v}$	$\Delta \theta_{AB \cdot v}$	$\theta_{AB \cdot v} + \Delta \theta_{AB \cdot v}$	
B-C	B(X'_B, Y'_B, Z'_B)	Length	l_{BC}	Δl_{BC}	$l_{BC} + \Delta l_{BC}$	C(X'_C, Y'_C, Z'_C) : Last sensing point
		Horizontal angle	$\theta_{BC \cdot h}$	$\Delta \theta_{BC \cdot h}$	$\theta_{BC \cdot h} + \Delta \theta_{BC \cdot h}$	
		Vertical angle	$\theta_{BC \cdot v}$	$\Delta \theta_{BC \cdot v}$	$\theta_{BC \cdot v} + \Delta \theta_{BC \cdot v}$	

Table 2. Initial and changed coordinate

Point	Initial coordinate	Section variation	Changed coordinate
R	(0, 0, 0)	(0, 0, 0)	(0, 0, 0)
A	(X_{RA}, Y_{RA}, Z_{RA}) $= (X_A, Y_A, Z_A)$	R-A Section variation $(\Delta X_{RA}, \Delta Y_{RA}, \Delta Z_{RA})$	(X'_A, Y'_A, Z'_A) $= (X_A + \Delta X_{RA}, Y_A + \Delta Y_{RA}, Z_A + \Delta Z_{RA})$
B	(X_B, Y_B, Z_B) $= (X_{RA} + X_{AB}, Y_{RA} + Y_{AB}, Z_{RA} + Z_{AB})$	A-B Section variation $(\Delta X_{AB}, \Delta Y_{AB}, \Delta Z_{AB})$	(X'_B, Y'_B, Z'_B) $= (X'_A + X_{AB} + \Delta X_{AB}, Y'_A + Y_{AB} + \Delta Y_{AB}, Z'_A + Z_{AB} + \Delta Z_{AB})$
C	(X_C, Y_C, Z_C) $= (X_{RA} + X_{AB} + X_{BC}, Y_{RA} + Y_{AB} + Y_{BC}, Z_{RA} + Z_{AB} + Z_{BC})$	B-C Section variation $(\Delta X_{BC}, \Delta Y_{BC}, \Delta Z_{BC})$	(X'_C, Y'_C, Z'_C) $= (X'_B + X_{BC} + \Delta X_{BC}, Y'_B + Y_{BC} + \Delta Y_{BC}, Z'_B + Z_{BC} + \Delta Z_{BC})$

특한 A 좌표(A')를 기준으로 하여 계산한다. 그러므로 B'의 좌표 (X'_B, Y'_B, Z'_B)는 R-A 구간 변화좌표와 A-B 구간 변화좌표의 합으로 Eq. (3)과 같이 구성된다.

$$B' = (X'_B, Y'_B, Z'_B) = (X'_{RA} + X'_{AB}, Y'_{RA} + Y'_{AB}, Z'_{RA} + Z'_{AB}) \quad (3)$$

B' 좌표를 구하기 위한 A-B 구간의 벡터는 각 방향 벡터의 합이며, 각 방향 벡터는 Eq. (4)와 같이 구성된다.

$$\begin{aligned} \vec{l}_{AB} &= \vec{l}_{AB,X} + \vec{l}_{AB,Y} + \vec{l}_{AB,Z} \\ \vec{l}_{AB,X} &= l_{AB} \cdot \cos\theta_v \cdot \sin\theta_h = X'_{AB} \\ \vec{l}_{AB,Y} &= l_{AB} \cdot \cos\theta_v \cdot \cos\theta_h = Y'_{AB} \\ \vec{l}_{AB,Z} &= l_{AB} \cdot \sin\theta_v = Z'_{AB} \end{aligned} \quad (4)$$

새로운 A-B 구간의 길이변화는 Eq. (5)와 같이 나타나며, 초기 길이(l_{AB}) 및 변화된 길이 증감(Δl_{AB})은 계측기로부터 구한다.

$$l'_{AB} = l_{AB} + \Delta l_{AB} = \sqrt{(X'_{AB})^2 + (Y'_{AB})^2 + (Z'_{AB})^2} \quad (5)$$

3. 현장적용 및 데이터 분석

3.1 현장 계측기 배치

본 해석 모델을 충청북도 DY비탈면의 계측 Data에 적용하였다. 대상비탈면은 국도의 절취비탈면부로 1단면~3단면은 비탈면 하부의 남한강을 기준으로 봉적 비탈면에서 마을 진입로 상의 콘크리트 도로와 상부의 폐석 성토층에 이르는 단면으로 진입로 하부 비탈면에서 인장균열이 발견된 지점이다. 4~5단면은 전석과 봉적토(HW~CW)로 피복되어 있고 노두가 드러난 암반부는 풍화의 진전으로 인하여 변색이 진행되고 있으며 손으로도 암편이 쉽게 탈락되는 상

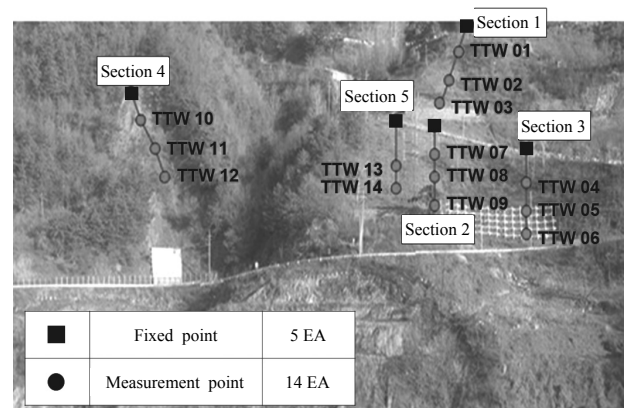


Fig. 6. Sensor arrangement of D slope

황이다(Fig. 6 참조). 본 비탈면은 계측 수행기간 동안(1년간) 비탈면 전면에 걸쳐 계측 점 양쪽에 설치된 Tension wire (TTW)에 의한 계측이 수행되었다.

3.2 Data 해석

공간좌표 확정 및 비탈면 거동분석의 실례로 Tension wire 및 각도계가 사용된 비탈면 계측시스템을 이용하여 3차원 공간상의 공간좌표 이동과정을 이용한 거동분석을 하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 현장의 비탈면은 다섯 종류의 계측단면으로 나누어져 있고 각 단면의 최상부 점들은 고정점으로 Data의 변환이 없다(X=Y=Z=0). 최상부 고정점들 아래 각 점들은 연동하여 3차원 공간상에서 움직인다. 본 논문 적용된 해석단면은 1단면으로, 각 지점은 R-A-B-C로 명명한 단면이다. 계측기간은 2009년 8월부터 2010년 8월까지 12개월이다.

3.2.1 1단면 거동분석

1단면은 상부의 고정점 포함 4개의 Pole이 설치되었으며, 각 Pole은 Tension wire 및 2개의 각도계가 설치되었다. 해석구간은 R-A 구간, A-B 구간 및 B-C 구간의 세 구간으로 나눌 수 있다. 이 세 구간은 서로 연동하여 거동하며, 각 구

간별 거동양상은 Table 3~5에서 보인 바와 같다.

Table 3은 초기 계측기 설치시점의 길이 및 두 각의 값을 보여준다.

Table 4는 30일 단위로 측정된 각 구간의 길이변화, 수평 각 및 수직각 변화를 정리한 표이다.

Table 5는 Table 4의 원자료를 이용하여 Eq. (2)를 적용하여 계산된 각 구간의 좌표변화 및 길이변화를 나타낸 값이다. R-A 구간은 고정점 R(0, 0, 0)을 기준점으로 계산되며, A-B 구간의 경우 R-A 구간에서 계산된 A' 점을 기준점으로 하여 계산된다. B-C 구간의 경우 A-B 구간에서 계산된 B' 점을 기준으로 하여 연동 계산된다.

Table 5에서 구한 각 구간의 변화된 좌표를 Eq. (3)을 이

용하여 합하면 R 점을 기준으로 하여 각 지점의 좌표들을 구할 수 있다.

Table 6은 고정점 R을 원점으로 하여 계산된 각 지점의 좌표변화를 보여준다.

Fig. 7은 현장비탈면의 좌표체계를 보여준다. Fig. 6의 현

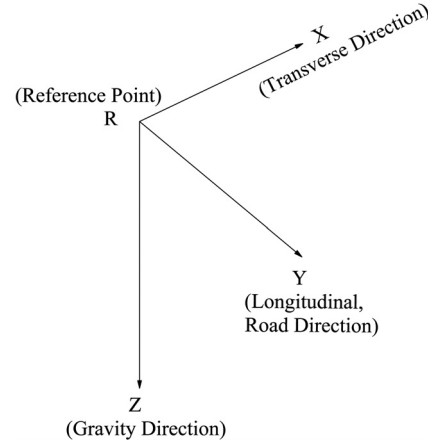


Fig. 7. Coordinate system of D slope

Table 3. Initial value of length and angles

Section	Length (mm)	Ver. angle (degree)	Hor. angle (degree)
R-A	289.00	5.20	18.70
A-B	231.00	-1.40	12.00
B-C	256.00	1.10	12.00

Table 4. Monthly data of length and angles

Day	$\Delta R-A$ (mm)	$\Delta \theta_{RA \cdot h}$ (degree)	$\Delta \theta_{RA \cdot v}$ (degree)	$\Delta A-B$ (mm)	$\Delta \theta_{AB \cdot h}$ (degree)	$\Delta \theta_{AB \cdot v}$ (degree)	$\Delta B-C$ (mm)	$\Delta \theta_{BC \cdot h}$ (degree)	$\Delta \theta_{BC \cdot v}$ (degree)
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0
30	2.25	-0.02	-0.01	1.44	0.09	0.24	-0.87	0.32	0.49
60	-1.96	-0.29	0.61	0.00	0.08	-0.14	-3.95	-0.09	-0.01
90	0.50	-0.40	0.90	0.96	-0.15	0.54	-5.49	-0.52	-0.27
120	-2.51	-0.43	1.00	-0.06	-0.21	0.42	-6.16	-0.36	-0.39
150	-2.81	-0.49	1.04	2.04	-0.16	0.47	-7.96	-0.26	-0.28
180	-3.11	-0.58	0.96	4.74	-0.09	0.37	-9.50	-0.23	-0.26
210	9.53	-0.75	1.35	4.20	-0.08	0.19	-20.01	-0.23	-0.27
240	32.54	-1.07	1.35	3.30	0.01	0.23	-20.01	-0.17	-0.29
270	44.48	-1.17	1.45	3.52	0.06	0.14	-15.74	-0.27	-0.27
300	42.67	-1.06	1.32	7.79	0.11	0.29	-20.86	-0.20	-0.18
330	42.06	-1.09	0.82	9.29	0.18	0.47	-21.56	0.09	-0.05
342	42.97	-1.10	0.69	9.59	0.12	0.47	-21.25	0.16	-0.03

Table 5. Changed coordinate and length

Day	X'_{RA}	Y'_{RA}	Z'_{RA}	l'_{RA}	X'_{AB}	Y'_{AB}	Z'_{AB}	l'_{AB}	X'_{BC}	Y'_{BC}	Z'_{BC}	l'_{BC}
0	24.81	272.62	92.66	289.00	-5.52	225.88	48.03	231.00	4.81	250.36	53.23	256
30	24.91	274.76	93.33	291.25	-5.19	227.10	49.28	232.44	6.17	249.02	55.18	255.13
60	23.19	269.90	94.92	287.04	-5.21	226.01	47.48	231.00	4.35	246.51	52.36	252.05
90	22.82	271.77	97.11	289.50	-6.12	226.34	50.36	231.96	2.48	245.27	50.93	250.51
120	22.43	268.79	96.57	286.49	-6.34	225.45	49.67	230.94	3.16	244.71	50.28	249.84
150	22.12	268.46	96.66	286.19	-6.19	227.46	50.32	233.04	3.56	242.84	50.38	248.04
180	21.69	268.35	96.18	285.89	-5.99	230.19	50.50	235.74	3.66	241.32	50.16	246.5
210	21.76	279.59	102.35	298.53	-5.94	229.82	49.66	235.20	3.51	231.04	47.98	235.99
240	21.75	301.27	110.24	321.54	-5.55	228.92	49.63	234.30	3.75	231.05	47.90	235.99
270	22.00	312.29	114.88	333.48	-5.36	229.21	49.32	234.52	3.41	235.22	48.84	240.26
300	22.50	310.82	113.55	331.67	-5.25	233.26	50.83	238.79	3.62	230.13	48.17	235.14
330	22.36	311.23	110.62	331.06	-5.00	234.57	51.89	240.29	4.76	229.31	48.54	234.44
342	22.39	312.34	110.21	331.97	-5.25	234.86	51.95	240.59	5.05	229.59	48.69	234.75

장비탈면에 적용하면 X 축은 비탈면의 횡방향, Y 축은 비탈면의 종방향으로 도로방향이다. Z 축은 중력이 작용하는 수직방향이다.

Fig. 8(a)는 각 계측점들의 3차원 공간변화를 보여주고 있다. R 점은 고정점으로 좌표변화가 없으며, R 점을 제외한 A, B 및 C 점 모두 상부로부터 아래로 회전하며 내려가는 유사한 거동을 하고 있음을 알 수 있다.

보다 자세한 거동해석을 위해 평면을 분할해보면 X-Y 평면인 Fig. 8(b)에서 A, B 및 C 점 모두 X 축 변위가 감소 후 다시 증가하는 것을 알 수 있다. R 점에서 도로방향으로 본다면 평면상 각 지점의 거동은 왼쪽으로 이동함과 동시에 도로방향인 Y 축 방향으로 이동하고 있음을 알 수 있다.

X-Z 평면인 Fig. 8(c) 역시 비탈면이 왼쪽으로 이동하면서 수직방향으로 이동하고 있음을 알 수 있다. 그리고 Y-Z 평면인 Fig. 8(d)의 경우 Y 방향 변위가 증가 및 Z 방향 변위 증가가 동시에 일어나므로 변위가 도로방향으로 일어나고 동시에 수직변위가 발생하고 있음을 알 수 있다.

각 평면거동을 종합하면 R-A, A-B 및 B-C 구간에서 미소한 지표변위 증가 및 각도변화 양상을 볼 수 있다. 즉 현재 비탈면은 안정적인 거동을 하고 있으며, 세 구간 모두 거동양상이 유사한 변위 방향 및 크기를 보이고 있음을 알 수 있다.

X-Y 평면 및 X-Z 평면에서 변위가 감소 후 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 계측기간이 2009년 8월부터 2010년 8월까지 12개월이므로, Tension wire의 재질이 대기 온도변화에 의해 수축 후 팽창하기 때문이다. Y-Z 평면에서는 지속적인 하향변위 증가 양상을 볼 수 있어, 중력에 의한 비탈면의 변위 역시 지속적으로 일어나고 있음을 알 수 있다. 즉 각 단면을 나누어 분석하면 열하중 및 중력에 의한 거동양상이 동시에 일어나는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 비탈면의 지표거동을 Tension wire를 이용하여 3차원 공간좌표로 해석한 것이다. 비탈면에 대한 현재까지의 계측방법은 지표변위와 비탈면 내 지중변위를 각각 계측하여 분석하였으나, 본 연구는 비탈면의 지표변위 계측자료를 각도변환을 통해 비탈면의 3차원 거동을 해석할 수 있도록 하였다. 이상의 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 공간좌표 확정 및 비탈면 거동을 분석하기 위해 Tension wire, 수평각 및 수직각을 이용하여 3차원 공간상의 공간좌표 이동과정을 분석하였다.

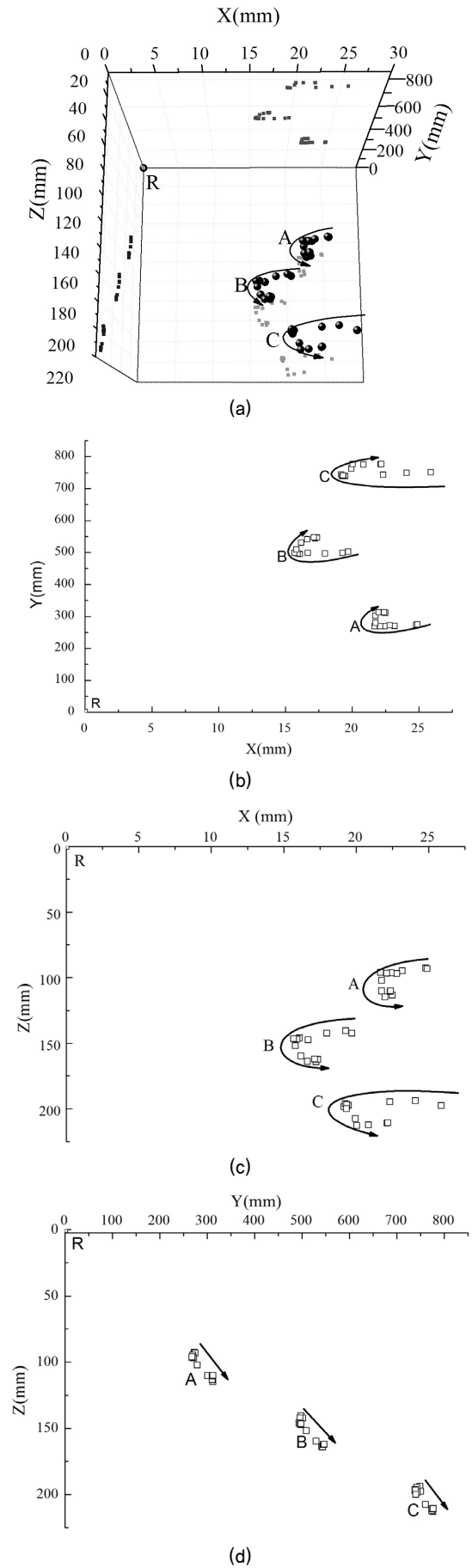


Fig. 8. Analysis result

- (2) 공간좌표 변환 값을 이용하여 1) 비탈면의 삼차원 거동 2) X-Y 평면 거동 3) X-Z 평면 거동 4) Y-Z 평면 거동 등의 네 가지 거동 상태를 해석할 수 있다.
- (3) 각 계측구간은 서로 연동하여 거동하며 비탈면의 계측 1단면은 전반적으로 왼쪽으로 이동하고 있으며, 변위가 도로방향으로 일어남과 동시에 수직변위가 발생하고 있음을 알 수 있다.
- (4) 각 단면을 나누어 분석하면 대기 온도변화에 의한 Tension wire의 수축/팽창 및 중력에 의한 지속적 하향거동이 동시에 일어나는 것을 확인할 수 있다.
- (5) 현재 비탈면은 최대누적변위가 R-A 구간 4.3cm, A-B 구간 1cm 및 B-C 2.2cm 이내인 미소거동을 하고 있으며, 세 구간 모두 거동양상이 유사한 변위 방향 및 크기를 보이고 있음을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(14SCIP-B065985-02)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 (in Korean).
3. Saito, M. and Uezawa, H. (1961), Failure of soil due to creep, *Proc., Int. Soil Mech., and Foundation Engrg.*, Vol. 1, pp. 315~318.