

# 계측결과에 의한 절토사면의 거동 및 파괴예측

Failure Prediction and Behavior of Cut-Slope based on Measured Data

장 서 용\*

Jang, Seo-Yong

한 희 수\*\*

Han, Heui-Soo

김 종 렬\*\*\*

Kim, Jong-Ryeol

마 봉 덕\*\*\*\*

Ma, Bong-Duk

## Abstract

To analyze the deformation and failure of slopes, generally, two types of model, Polynomial model and Growth model, are applied. These two models are focused on the behavior of the slope by time. Therefore, this research is more focused on predicting of slope failure than analyzing the slope behavior by time. Generally, Growth model is used to analyze the soil slope, to the contrary, Polynomial model is used for rock slope. However, 3-degree polynomial( $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$ ) is suggested to combine two models in this research. The main trait of this model is having an asymptote. The fields to adopt this model are Gosujae Danyang(soil slope) and Youngduk slope(rock slope), which are the cut-slope near national road. Data from Gosujae are shown the failure traits of soil slope, to the contrary, those of Youngduk slope are shown the traits of rock slope. From the real-time monitoring data of the slope, 3-degree polynomial is proved as excellent system to analyze the failure and behavior of slope. In case of Polynomial model, even if the order of polynomials is increased, the  $R^2$  value and shape of the curve-fitted graph is almost the same.

## 요 지

사면거동 및 파괴를 분석하기 위하여, 일반적으로 암반사면에는 Polynomial model, 토사사면에는 Growth model을 별도로 적용하여 사용하여 왔다. 이 기법은 사면의 파괴예측보다 사면의 누적변위를 묘사하기 위한 그래프 형태 위주이다. 따라서 본 연구에서는 사면의 거동보다는 파괴 예측에 초점을 맞추어 일반적으로 사용되는 두 모델을 병합하여 파괴예측을 위한 Asymptote(점근선)과 누적변위량도 같이 묘사할 수 있는 3차 방정식 모델(3-degree polynomial model)로 단일화 할 것을 제안하여 현장 계측 data를 분석하였다. 국도 절취 사면부인 단양군 고수재 사면과 영덕군 축산면에 위치한 영덕 사면에 본 해석 모델을 적용하였다. 고수재는 토사사면으로 Growth model에 다른 거동을 나타내었고, 영덕사면은 Polynomial model에 따른 거동을 나타내었다. 분석결과, Polynomial model 과 Growth model로 구분된 해석 모델 형태를  $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$ 의 형태를 가지는 3차 방정식을 사용하면, 하나의 모델로 사면의 거동 및 파괴를 해석할 수 있으며, 그 거동 해석 및 파괴 예측능력이 더 우수하다는 것이 증명되었다. Polynomial model의 경우, 방정식의 차수를 증가시켜도, 그래프의  $R^2$  값과 형태가 유사함을 알 수 있었다.

**Keywords :** Slope, 3-Degree Polynomial, Asymptote, Failure Prediction, Accumulative Displacement

**핵심 용어 :** 사면, 3차방정식, 점근선, 파괴예측, 누적변위

## 1. 서 론

\* 전남대학교 토목공학과 박사수료

\*\* 금오공대학교 토목공학과 부교수

\*\*\* 전남대학교 토목공학과 부교수

\*\*\*\* 전남대학교 토목공학과 박사수료

E-mail : syjang@moizachonnam.ac.kr 062-530-1651

•본 논문에 대한 토의를 2006년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2006년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

우리나라의 경우 국토의 70%가 가파른 산지로 구성되어 있어 절토사면의 안정성 문제는 피할 수 없는 토목기술상의 과제이다. 산업의 발달과 더불어 국가 기반시설의 확충에 따른 신설 도로와 확장을 위한 도로 건설로 인해 도로사면의 수는 지속적으로 증가하고 있는 실정이다. 산사태는 집중호우 시 많이 발생되는데 이를 사전에 예방하기란 현실적으로 매우 어렵고, 특히 암반사면에서는 붕괴까지의 변형이 작아 종래부터 일반적으로 쓰이고 있는 변위계측에서는 그 전조현상을 포착하기 어려워 붕괴의 사전예지가 쉽지 않은 것으로 알려져 있다.

사면의 경우, 인위적인 구조계와는 달리 지반자체의 강도분산이 매우 크며, 사계절이 뚜렷한 기후적 특성 하에서의 풍화 진행상태가 급격함으로서 어떤 토목구조물보다도 지속적인 유지관리가 필요하다. 더욱이 태풍 루사, 매미 등과 같이 매년 홍수기에 수반되는 집중호우에 의한 토사유출로 인해 지형의 기하학적인 불안정성이 유발되어 사면이 안정한 상태에 있었다 하더라도 파괴가 발생할 수 있다. 이를 감안하면 교량, 터널 등과 같이 사면 혹은 사면보강 구조물도 동일한 하나의 토목 구조물이라는 인식 하에 지속적인 유지관리가 필요하다.

사면유지관리에 대한 국내 연구동향을 살펴보면 2002년부터 건설교통부와 한국건설기술연구원(2003, 2004) 등이 절개면 상시감지 시스템을 도입, 시범설치 운영하고 있다. 도로 절개사면 붕괴피해 예방을 위해 기존의 붕괴 후 대책을 탈피하여 사전에 위험 절토사면을 대상으로 현장조사, 안정성해석, 대책수립 등 적극적인 재해대책 방안인 도로 절토사면 유지관리 시스템을 운영 시행중에 있다.

해외의 경우 Saito(1965, 1969)가 creep 파괴에 근거한 사면파괴시간을 예측하는 기법을 제안한 이후 사면 파괴의 시간예측에 관한 연구가 이론적, 실험적으로 활발히 진행되어 왔다. Fukuzono(1985, 1990)등은 대규모 강우 시뮬레이터와 사면모델을 이용한 파괴실험을 수행하여, 가속도의 로그증분이 파괴전 바로 지표면 변위의 로그속도에 비례함을 발견하였다. Hayashi(1988)는 사면파괴 실험 결과분석과 과거 산사태에서 지표면 변위 측정 데이터의 재조정에 의해 3차(ter-

tiary) creep이 두 단계를 포함한다는 새로운 개념을 제안하였다. 또한 Salt(1988)는 대사면파괴가 발생한 것과 발생하지 않은 것을 포함한 사면파괴에 대한 현장 데이터를 재배열하여 critical 속도와 가속도를 이용한 경험적인 정보 규정을 제안하였다.

## 2. 3차 방정식을 이용한 사면해석

본 연구는 사면의 거동을 해석함에 있어, 3차 방정식에 의한 해석기법과 통계적 해석기법으로 자동화 계측시스템에 의한 데이터를 실시간으로 분석하여, 이상 징후 발생 시 사전에 예견하여 붕괴 및 대규모 산사태를 미연에 방지하기 위한 목적으로 시작되었다. 여기서 이용된 데이터는 국도변 위험사면을 위주로 시행되었으며, 최소 1년 단위 이상이거나 계측수행중 이상유무가 발견되어 붕괴가 일어났거나 붕괴를 예측하여 보강을 시행한 사면 위주로 분석결과와 현장의 거동간의 상관관계를 검토하여, 해석방법의 신뢰성을 검증하는 방법을 택하였다.

따라서 본 연구에서는 사면의 거동보다는 파괴 예측에 초점을 맞추어 일반적으로 사용되는 사면파괴 모델인 Polynomial model과 Growth model을 병합하여 파괴예측을 위한 Asymptote(점근선)과 누적 변위량도 같이 묘사할 수 있는 3차 방정식 모델(3-degree polynomial model)로 단일화 할 것을 제안하여 현장계측 data를 분석, 평가하고자 하였다.

### 2.1 점근선의 활용

Fig. 1과 같이 Polynomial model과 Growth model은 모두 점근선을 가지는 graph 형태임을 알 수 있다.

먼저, Growth model은 x축(시간축)에 평행한 점근선을 가지며, 점근선과 y축이 접하는 지점의 변위값은 상수이나, 이때 x축(시간축)은 계속 증가하는 것을 알 수 있다. 즉,  $\Delta \varepsilon = 0$ ,  $\Delta t = \infty$ 이다. 그러므로, Growth model은 점근선에서 시간에 따른 사면의 거동을 Eqs. (1)과 같이 나타낼 수 있다.

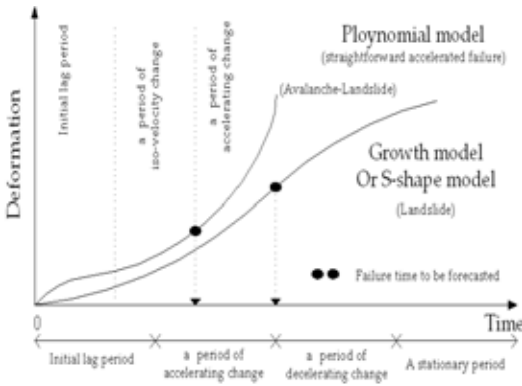


Fig. 1 사면의 일반적 파괴모델

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\text{변위차}}{\text{시간차}} = \frac{\Delta \beta}{\Delta t} = \frac{0}{\infty} = 0 \quad (1)$$

상기 Eqs. (1)에서 유추되는 바와 같이, 사면의 변위가 점근선에 도달하면 더 이상 변위가 증가할 수 없는 상황, 즉 시간에 따른 변위가 없는 상황인

$\frac{\Delta \beta}{\Delta t} = 0$ 으로 사면파괴에 도달함을 알 수 있다.

반면, Polynomial model의 경우는 y축(변위)에 평행한 점근선을 가지고 있음을 알 수 있다. 또한, 점근선과 x축이 접하는 지점에서 x축의 값(시간)은 상수이나 변위(y축)는 계속 증가하는 것을 알 수 있다.

즉,  $\Delta \beta = \infty, \Delta t = 0 \cong \frac{1}{\infty}$  이다.

그러므로, Polynomial model은 점근선에서 시간에 따른 사면의 거동은 Eqs. (2)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{\text{변위차}}{\text{시간차}} = \frac{\Delta \beta}{\Delta t} = \frac{\infty}{\frac{1}{\infty}} = \infty \quad (2)$$

사면의 파괴에 관한 graph가 x축에 접한 점근선에 도달하면 변위가 무한대로 증가하여, 다시 말하면 짧은 시간 내에 변위가 급속히 증가하여 파괴에 도달함을 알 수 있다( $\frac{\Delta \beta}{\Delta t} = \infty$ ). 사면은 시간에 따른 열화(degrading)에 의해 아주 조금씩 거동

하는 경우, 혹은 강우, 강설 등에 의하여 급격한 변화가 일어나는 경우 등, 모든 경우에서 지속적인 변위가 발생하므로, 사면 붕괴전 사면의 변위는  $\Delta \beta \neq 0, 0 < \Delta \beta < \infty$  이어야 한다.

그러나, 사면의 거동이 양극단의 값, 0 혹은  $\infty$ 의 값을 가지면, 사면은 붕괴가 발생한다. 그러므로, 두 모델의 파괴를 예측하기 위해서는 사면의 거동에 대해 누적변위량을 상세히 나타내는 graph 보다는, 점근선을 가지는 간단한 형태의 graph가 더욱 사면붕괴예측에 유리할 것이다. 따라서, 암반사면 혹은 눈사태등의 점착력이 약한 사면에 적용될 수 있는 Polynomial model과 점착력이 강한 토사사면에 적용되는 Growth model 등 두 가지 형태의 model을 별도로 적용하기보다는 두 상황 모두에서 점근선을 가지며, 누적변위량도 같이 묘사할 수 있는 3차 방정식 모델(3-degree polynomial model)로 단일화 할 것을 제안한다.

## 2.2 기존의 수학적 모델제안식과의 비교

3차 방정식을 사면의 거동 및 파괴를 해석하기 위한 모델에 적용하여 암반사면 및 토사사면의 거동을 분석할 경우, 각각의 지반특성에 따른 별도의 모델을 적용하지 않더라도 하나의 모델로서 가능하다. Polynomial model과 Growth model로 구분된 해석 모델 형태를  $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$ 의 형태를 가지는 3차 방정식을 사용하면, 하나의 모델로 사면의 거동 및 파괴를 해석할 수 있으며, 그 거동 해석 및 파괴 예측능력이 훨씬 우수하다.

지금까지 나온 사면해석을 위한 기존의 수학적 모델 제안식은 Table 1에서 보듯이 식 형태가 주로 사면의 누적 변위량을 나타내기 위한 그래프 위주이며, 식 형태가 복잡한 것을 알 수 있다. 이는 사면의 파괴시점보다, 시간에 따른 사면의 누적 변위량을 나타내는 graph의 형태에 맞추기 위해 식이 개발되었기 때문이다. 뿐만 아니라, 식 형태가 토사사면과 암반사면에 모두 적용할 수 있는 식은 없다.

그러므로, 주관심사를 시간에 따른 사면의 누적 변위량을 나타내는 graph의 형태보다, 파괴를 나

Table 1 기존의 수학적 모델 제안식

Model	제안식
Saito's model	$\log_{10} t_r = 2.33 - 0.916 \log_{10} \epsilon' \pm 0.59$
Fukuzono-Voigt's model	$\frac{d^2 D}{dt^2} = A \left( \frac{dD}{dt} \right)^a$
Su's model	$\frac{dy}{dt} = \frac{at}{b-t}$
Hayashi's model	$\frac{d\nu}{dt} = a\nu + b\nu^2$

타내는 점근선 위주의 방정식 형태로 만든다면, 파괴예측에 유용할 것이다. 또한 Polynomial형과 Growth형의 그래프 모양을 동시에 따르면서 점근선을 가지는 형태의 파괴모델을 만들면 더욱 유용할 것이며, 이 형태의 가장 간단한 식은 3차 방정식이다. 점근선의 형태가 y축과 평행한 경우, 3차 방정식의 계수  $a > 0$  이며, 점근선의 형태가 x축과 평행하면 3차 방정식의 계수  $a < 0$  이다.

### 3. 사면 파괴모델 적용 및 분석

#### 3.1 단양고수재(토사사면)

본 연구에서는 해석 모델을 2003년 12월~2004년 11월에 걸쳐 계측된 충청북도 단양군 고수재사면의 data에 적용하였다. 대상사면은 국도의 절취사면부로 1단면~3단면은 사면하부의 남한강을 기준으로 봉적사면에서 마을 진입로 상의 콘크리트 도로와 상부의 폐석 성토층에 이르는 단면으로 진입로 하부 사면에서 인장균열이 발견된 지점이다. 4~5단면은 전석과 봉적토(HW~CW)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 목재막음으로 처리되어 있으나 돌망태공의 경우 느슨한 상태이고 목재막음 또한 부식 및 낙석으로 인하여 파손된 지점이다.(Fig. 2 참조)

계측기 설치수량은 1단면 ~ 5단면을 통합하여



Fig. 2 단양고수재 센서 배치도

지표변위계 14개소, 지표변위계 상부에 각각 일직선으로 부착된 각도계 14개소, 강우계 1개소로 총3종의 계측기를 14개소에 설치하여 무선CDMA 모뎀을 통해 실시간 자동으로 계측하였다. 본 대상사면은 계측 수행기간 동안(1년간) 사면 전반에 걸쳐 거동이 감지되었다.

계측 수행전 대상사면은 강우로 인한 우수가 침투되어 배수가 이루어지지 않아 구조물이 부상되어 있었으며, 도로부의 이동에 의해 가드레일과 측대부가 밀려있었다. 이러한 구조물의 이동에 의해 국도 하부사면의 인장균열도 증대되고 있는 것으로 조사된 바 있다. 도로 하부 지반은 과거 시추조사 결과, 실트질 모래섞인 전석과 자갈로 구성되어 있는 매립층과 봉적층으로 이루어져 있다. 또한 시추작업시 100% 누수가 발생하는 것으로 미루어 볼 때 파쇄대의 발달과 큰 공극으로 인한 지반의 지지력 저하로 인해 상부 도로의 횡방향 균열 및 도로와 하부 사면의 추가적인 균열을 초래한 것으로 보여진다. 이와 같은 현상의 근본적인 원인은 사면부에 다량의 우수가 지반내로 유입됨으로써 지반의 변위를 유발한 것으로 이는 즉, 사면전반에 걸쳐 원활한 배수 시설 미비로 인한 것으로 지반의 변위를 최소화 하기 위해 지표수의 유도 배수를 위한 시설물이 필요할 것이다. 현재 하천부 법면으로 추가적인 버트리스식 개비온용벽이 보강 설치되었으며, 도로부 사면 상부로 산마루 측구를 설치하여 배수의 원활을 기하고 있다.

### 3.2 영덕사면(암반사면)

본 사면은 경상북도 영덕군 축산면에 위치하며, 토사와 풍화암이 혼재되어 있으나 토사성에 더 가까운 사면이다. 주로 세일성 암이 풍화를 받아 지표로부터 지중 5m~10m까지는 완전 풍화를 받은 토사층, 그 이하로는 상대적으로 강도가 높은 풍화암 및 핵석이 산재하고 있다. 깊이 10m~28m까지는 시추조사를 통해 Weathered Soil 임을 확인하였다. 지하수는 우안 하부에서 지속적으로 관찰되었다. Fig. 3은 본 사면의 계측현황도이다.

영덕사면구간 내 절토 사면의 안정 감지를 위한 사면계측을 최초 설치이후 2004년 12월까지의 정밀 계측수행 결과는 다음과 같다. 계측 수행은 최초 범면정리 후 작업공정과 병행하여 계측기 설치와 계측을 병행하였다. 계측기 설치 수량은 경사계 4개소, 지표변위 센서 11개소, 지반경사계 5개소로 총 3종의 계측기를 20여 개소에 설치하여 정밀 계측하였다.

본 사면은 초기 설치이후 계속되는 변위증가로 2003년 11월 중순 대규모의 붕괴가 발생하였다. 상부 단차는 1.8m, 6소단 콘크리트 바닥의 침하깊이는 1.5m 정도로 크게 발생하였다. 사면 선단까지 원호파괴가 발생하였으며, 아직까지 진행 중인것으로 확인되었다. 울진방향 약 9m까지 붕괴발생 범위가 확대되어 있는

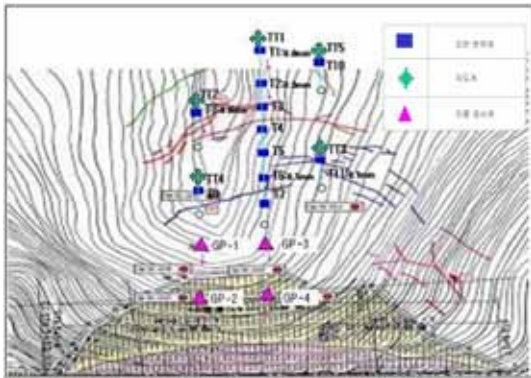


Fig. 3 영덕사면 센서 배치도

상태이다. 센서 1번을 경계로 최상부에서 균열 5cm 정도의 폭을 가지고 전체적으로 경향이 뚜렷하다. 센서 7번과 9번을 경계로 하여 균열 폭 대략 10cm 정도로 그 범위가 확대되어가고 있다. 대상사면은 상부는 토사로 이루어져 있지만, 하부에는 상대적으로 강한 암질인 풍화암이 산재되어 암반사면의 파괴 형태를 따랐으며, 파괴가 발생한 영역은 지하수위가 지속적으로 관찰되어 사면의 전단강도를 약화 시켰다고 추정된다. 파괴가 발생하기 전 1주일 정도 지속적인 강우가 유입되어 지반을 포화시켜, 지반의 단위중량을 높이고 있었다는 점이 복합적으로 작용하여 급격한 파괴가 발생 하였을 것으로 추정된다.

### 3.3 수학적 모델링

#### 3.4 단양고수재(토사사면)

분석 시스템을 적용하기 위해 1~5단면으로 구분하여 각 단면의 지표변위센서 중 각 단면의 특성을 대표할 수 있는 지점을 선정하여 3차방정식을 이용한 수학적 모델링을 정리하였다.

Fig. 4는 센서 1번에서 구한 계측 data의 3차 방정식 모델이며, 2004년 6월 20일 이후 급속도로 변위가 증가하였으며, 사면보강에 의하여 변위가 수렴하는 경향을 보였다. 이는 x축 접근선 모델의 파괴조건인  $\Delta\epsilon=0$ ,  $\Delta t=\infty$ 의 전형적인 토사사면의 거동을 보여준다. 최종 누적변위 약 45mm에 접근 했을시 경보를 발송하였다.

Fig. 5는 센서 6번에 대한 계측 data의 3차 방정식으로 2004년 6월 20일 보강이후 변위가 수렴하는 경향을 보였다. 최종 누적변위는 약 22mm이며, 접근선은 x축과 평행하며, 약 22mm에 접근했을 때 경고를 발송하였다. Fig. 6은 센서 7번에 대한 모델로 누적변위 40mm에서 1차 경보를 발송하였고, 사면보강 후에도 변위가 다소 발산 진행하는 경향을 보여 엄밀한 관리가 필요한 지점이다.

Fig. 7의 센서 12번에 대한 모델 역시, 사면보

강 후에도 변위가 다소 발산 진행되는 경향을 보이는 지점으로, 센서 7번과 유사한 형태의 진행성 파괴모델이다. 12번 센서 역시 누적변위값 약 40mm에서 경보발령을 발송하였다.

1~4단면에 설치된 계측기에 의한 data를 분석

한 결과 모두 변위가 증가하는 경향을 보였다. 이는 계측기가 고정점을 기준으로 아래 방향으로 이동하고 있음을 의미한다. 그러나 센서 13번에 대한 모델인 Fig. 8의 경우 그래프가 전체적으로 마이너스 방향으로 거동하고 있다.

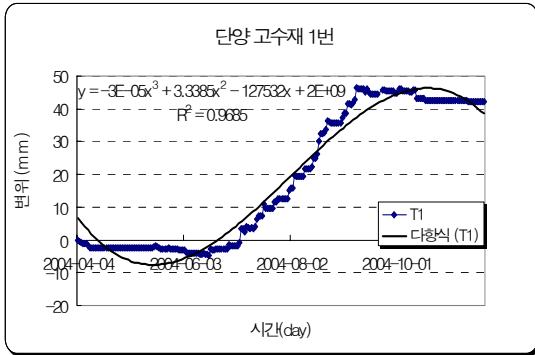


Fig. 4 단양고수재 1번 파괴모델

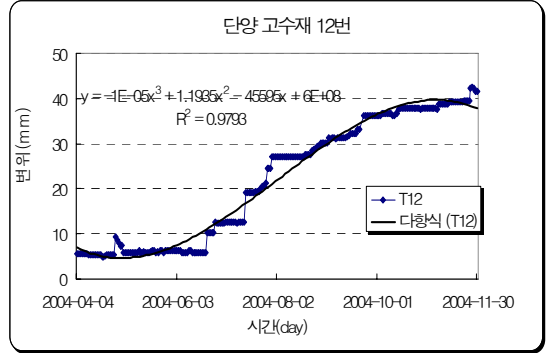


Fig. 7 단양고수재 12번 파괴모델

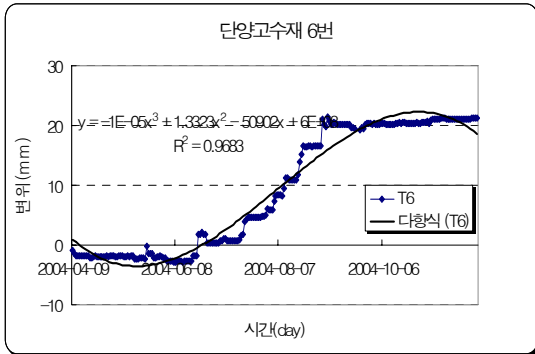


Fig. 5 단양고수재 6번 파괴모델

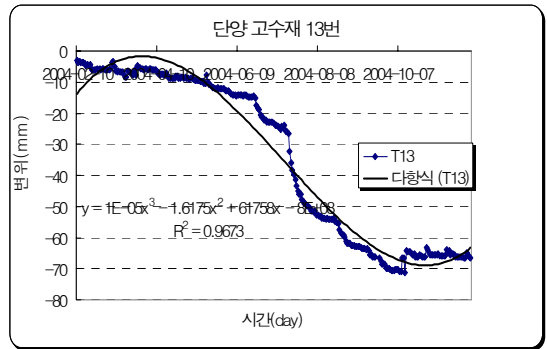


Fig. 8 단양고수재 13번 파괴모델

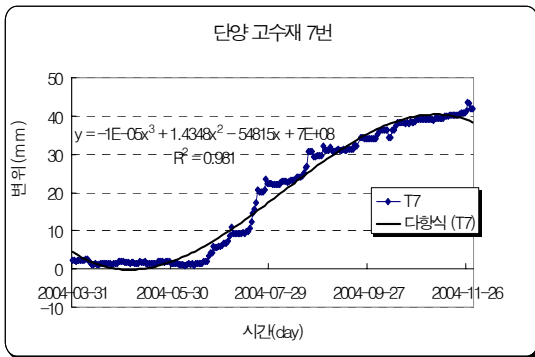


Fig. 6 단양고수재 7번 파괴모델

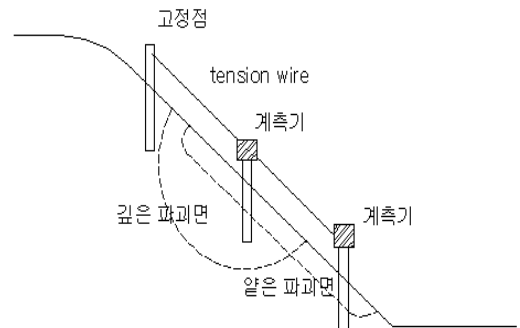


Fig. 9 얇은파괴와 깊은파괴의 구분

Table 2 단양고수재의 각 단면 대표지점별 지표변위계의 3차 방정식 모델

STA.	No.	3차 방정식	R <sup>2</sup>	Asymptote (접근선)
1단면	1	$y = -3E - 05x^3 + 3.3385x^2 - 127535x + 2E + 09$	0.9685	x축
3단면	6	$y = -1E - 05x^3 + 1.3323x^2 - 20902x + 6E + 08$	0.9683	x축
2단면	7	$y = -1E - 05x^3 + 1.4348x^2 - 54815x + 7E + 08$	0.9810	x축
4단면	12	$y = -1E - 05x^3 + 1.1935x^2 - 45595x + 6E + 08$	0.9793	x축
5단면	13	$y = 1E - 05x^3 - 1.6175x^2 + 61758x - 8E + 08$	0.9673	x축

Table 2는 각 단면을 대표하는 센서 5개소에 대하여 3차 방정식과 R<sup>2</sup>값을 정리한 것이다.

Table 2에서 보듯이, 대상사면이 주로 토사로 이루어져 각 지점의 계측 data의 그래프는 x축과 평행한 접근선을 갖는 3차 방정식의 형태를 보인다 (Growth Model Shape).

분석 시 유의해야 할 것은, x축 접근선 모델의 경우 3차 방정식의 계수 a는 변위가 증가할 경우 (고정점에서 중력방향으로 거동할 경우), 즉 a<0일 때 x축과 평행한 접근선을 갖는 특징이 있다.

이와 달리, 센서 13번의 경우는 변위가 감소하는 방향(변위가 중력의 반대방향)으로 움직이므로, a > 0인 것을 알 수 있다. 이는 13번 센서가 설치된 막대가 고정점 방향으로 회전하였다는 것을 의미한다. 이러한 사면의 거동은 Fig. 9와 같이 깊은 사면 파괴에서만 나타나는 형태로, 본 계측지점은 타 센서에 비하여 누적변위량이 상대적으로 크며, 누적변위량 약 70mm에서 경보 발송을 하였으며, 현재 하부에 보강을 완료한 상태이다.

사면보강 후 변위의 진행이 거의 발생하지 않아, 보강전후의 사면계측 data를 구별하여, 보강시점 이후 다른 파괴모델을 새롭게 만들어야 한다. 즉, 사면보강전의 모델과 보강 후의 모델로 이원화하여 계측 data의 그래프를 Cross Check 해야 할 것이다. 또한, 기존의 연구에서 제시된 Growth model의 형태와 3차 방정식 형태와 비교하기 위하여 Saito model을 적용하였으나, R<sup>2</sup>값이 너무 떨어져 공학적인 의미를 가질 수 없었다. Fukuzono model, Su's model 및 Hayashi model은 사면의 변위에 대한 가속도 및 속도를 규명하기 위한 것으로 본 논문의 방향과 달라 적용하기 어렵다.

### 3.5 영덕사면(암반사면)

영덕사면(암반사면) 역시, 1~5단면으로 구분하여 각 단면의 지표변위센서 중 각 단면의 특성을 대표할 수 있는 지점을 선정하여 3차방정식을 이용한 수학적 모델링을 정리하였다(5, 6, 8, 9 및 11번 지점 선택).

Fig. 10~Fig. 14는 각각 5, 6, 8, 9 및 11번 지점센서에서 구한 계측 data의 3차 방정식 모델이며, 2003년 10월 24일 이후 급속도로 변위가 증가하였으며, 사면보강에 의하여 변위가 수렴하는 경향을 보였다. 이 그래프들은 y축 접근선 모델의 파괴조건인  $\Delta\epsilon = \infty, \Delta t = 0$ 의 전형적인 암반사면의 거동을 보여준다.

Table 3에 각 단면을 대표하는 센서 5개소의 3차 방정식과 R<sup>2</sup>값을 정리하였다. Table 3에서 보듯이, 대상사면이 주로 암반으로 이루어져 각 지점의 계측 data의 그래프는 y축과 평행한 접근선을 갖는 3차 방정식의 형태를 보인다(Polynomial model shape).

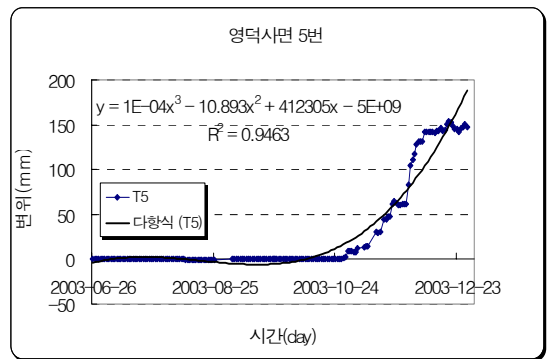


Fig. 10 영덕사면 5번 파괴모델

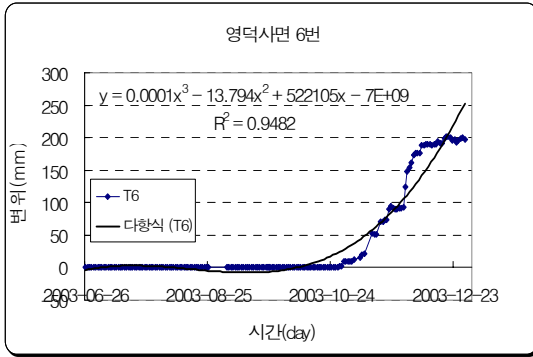


Fig. 11 영덕사면 6번 파괴모델

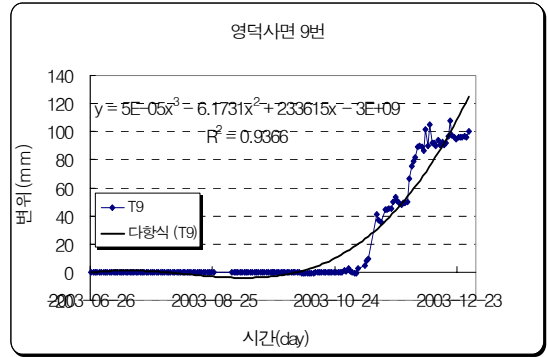


Fig. 13 영덕사면 9번 파괴모델

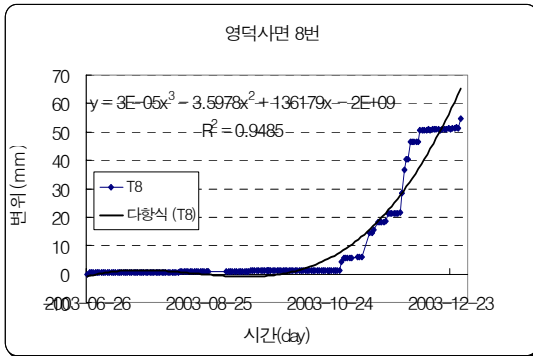


Fig. 12 영덕사면 8번 파괴모델

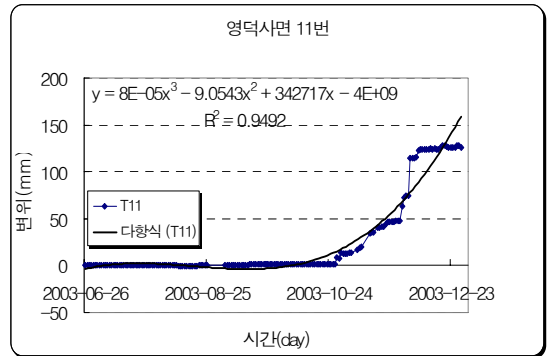


Fig. 14 영덕사면 11번 파괴모델

Table 3 영덕사면의 각 단면 대표지점별 지표변위계의 3차 방정식 모델

STA.	No.	3차 방정식	R <sup>2</sup>	Asymptote(접근선)
1단면	5	$y = 1E - 04x^3 - 10.893x^2 + 412305x - 5E + 09$	0.9463	y축
1단면	6	$y = 1E - 04x^3 - 13.794x^2 + 522105x - 7E + 09$	0.9482	y축
2단면	8	$y = 3E - 05x^3 - 3.5978x^2 + 136179x - 2E + 09$	0.9485	y축
3단면	9	$y = 5E - 05x^3 - 6.1731x^2 + 233615x - 3E + 09$	0.9366	y축
5단면	11	$y = 8E - 05x^3 - 9.0543x^2 + 342717x - 4E + 09$	0.9492	y축

영덕사면 역시, 사면보강 후 변위의 진행이 거의 발생하지 않아. 보강전후의 사면계측 data를 구별하여, 보강시점 이후 다른 파괴모델을 새롭게 만들어야 한다. 즉, 단양고수재와 같이 사면보강전의 모델과 보강 후의 모델로 이원화하여 계측 data의 그래프를 Cross Check 해야 할 것이다.

Polynomial 모델을 적용할 경우, 3차방정식이 아닌 4, 5, 및 6차 방정식으로 나타내면, 방정

식의 형태는 대동소이하다. 즉, y축에 평행한 접근선을 가지며, R<sup>2</sup> 값은 조금씩 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 증가하는 R<sup>2</sup> 값이 미소하며, 방정식의 형태는 차수에 따라 상당히 복잡해지므로, 3차 방정식이 y축과 평행한 접근선을 가지는 가장 간단한 형태로 실무에 적용가능성이 높음을 알 수 있다(Table 4 참조).



Table 4 영덕사면의 각 단면 대표지점별 R<sup>2</sup> 비교

센서번호	방정식 차수	R <sup>2</sup>
5번	4	0.9483
	5	0.9722
	6	0.9874
6번	4	0.9518
	5	0.9773
	6	0.9901
8번	4	0.9503
	5	0.9718
	6	0.9851
9번	4	0.9441
	5	0.9732
	6	0.9835
11번	4	0.95
	5	0.9675
	6	0.981

#### 4. 결 론

본 연구는 기존에 제안되었던 여러 가지 파괴모델을 실무에 용이하게 사용할 수 있도록 하나로 통합하고, 사면의 거동보다는 파괴예측에 초점을 맞추어 일반적으로 사용되는 사면파괴 모델인 Polynomial model과 Growth model을 병합하기 위하여 수행되었다. 따라서 본 논문에서는 파괴예측을 위한 Asymptote(접근선)이 매우 중요한 요소이며, x축 접근선과 y축 접근선을 동시에 가지면서 식을 간략화할 수 있는 3차 방정식 모델을 사면 거동분석에 적용하였다. 두 사면 모두 R<sup>2</sup>값이 0.9를 넘고 있어 data의 신뢰도는 매우 높다고 하겠다.

##### 4.1 단양고수재(토사사면)

1) Polynomial model 과 Growth model로 구분된 해석 모델 형태를  $y = ax^3 + bx^2 + cx + d$ 의 형태를 가지는 3차 방정식을 사용하면, 하나의 모델로 사면의 거동 및 파괴를 해석할 수 있으며, 그 거동 해석 및 파괴 예측능력이 훨씬 우수하다.

- 2) 토사사면의 경우 x축과 평행한 접근선을 가지며 누적변위량이 양의 값을 가지면 3차 방정식의 계수  $a < 0$ 이며, 음의 값을 가지면  $a > 0$ 이다.
- 3) 대상사면의 각 계측지점의 그래프의 형태가 x축에 평행한 접근선을 가지는 토사성 지반의 전형적인 붕괴형태 나타내고 있다.
- 4) 지표변위계 1, 6, 7, 12번 센서가 묻힌 지점의 경우, 변위가 중력방향으로 일어나며, 이는 계측기를 지지하는 막대가 지표와 함께 아랫방향으로 움직이고 있음을 나타낸다. 그러므로 이 지점들은 알은 파괴로 추론할 수 있으며, 13번 센서의 경우 누적변위가 음의 값을 나타내므로 고정점에 대해서 더 가까워지는 거동, 즉 중력 반대방향으로 움직이므로 이는 다른 지점의 파괴형태인 알은 파괴와 달리, 깊은 파괴 거동형태임을 알 수 있다.
- 5) 기존 연구에서 제시된 Growth model의 형태와 3차 방정식 형태와 비교하기 위하여 Saito model, Fukuzono model, Su's model 그리고 Hayashi model을 적용하려 하였으나, Saito model은 R<sup>2</sup>값이 너무 떨어져 공학적인 의미를 가질 수 없었고, Fukuzono model, Su's model 및 Hayashi model은 사면의 변위에 대한 가속도 및 속도를 규명하기 위한 것으로 본 논문의 방향과 달라 적용하기 어렵다.
- 6) 본 데이터는 경고 후 사면보강이 이루어진 사면에서 획득한 것으로서 사면보강 후 변위의 진행이 거의 없으므로, 보강전후의 사면계측 data를 구별하여, 보강시점 이후 다른 파괴모델을 새롭게 만들어야 한다. 즉, 사면보강전의 모델과 보강 후의 모델로 이원화하여 계측 data의 그래프를 Cross Check 해야 할 것이다.

##### 4.2 영덕사면(암반사면)

- 1) 암반사면의 경우 y축과 평행한 접근선을 가지며 누적변위량이 양의 값을 가지면 3차 방정식의 계수  $a > 0$ 이며, 음의 값을 가지면  $a < 0$ 이다.
- 2) 대상사면의 각 계측지점의 그래프의 형태가 y축에 평행한 접근선을 가지는 암반사면의 전형적인 붕괴

형태 나타내고 있다.

- 3) 지표변위계의 모든 data가 증가한다. 즉, 모든 변위가 증력방향으로 일어나며, 이는 계측기를 지지하는 막대가 지표와 함께 아랫방향으로 움직이고 있음을 나타낸다.
- 4) 영덕 사면에 적용된 Polynomial model의 경우, 3차방정식이 아닌 4, 5, 및 6차 방정식으로 하더라도, 나타나는 방정식의 형태는 대동소이하다. 방정식 차수의 증가에 따른  $R^2$  값이 미소하며, 방정식의 형태는 차수에 따라 상당히 복잡해지므로, 3차 방정식이 y축과 평행한 점근선을 가지는 가장 간단한 형태로 실무에 적용가능성이 높음을 알 수 있다.
- 5) 본 데이터 역시, 단양 고수재와 같이, 경고 후 사면보강이 이루어진 사면에서 획득된 것으로, 사면보강 후 변위의 진행이 거의 없으므로, 보강전후의 사면계측 data를 구별하여, 보강시점 이후 다른 파괴모델을 새롭게 만들어야 할 것이다.

#### 참고문헌

1. 구호본, 이종현, 김승현, 유기정, 김진환, 이정엽, "2003년 도로절토사면 유지관리시스템 개발 및 운용",

한국건설기술연구원 지반연구부 사이버 연구성과 발표회, 2004.

2. 한국건설기술연구원, "도로절토사면 유지관리시스템 개발 및 운용", I-VI, 2004.
3. Fukuzono T., "A New Method for Predicting the Failure Time of Slope", Proceedings of 4th I.C.F.L., Tokyo, 1985, pp 145-150.
4. Fukuzono T., "Recent studies on time prediction of slope failure", Landslide News, Vol. 4, 1990, pp 9-12.
5. Hayashi, S., "On the Forecast of Time to Failure of Slope(II)-Approximate Forecast in Early Period of the Tertiary Creep", Journal of Japanese Landslide Society, Vol. 25, 1988, pp 11-16.
6. Saito, M., "Forecasting the Time of Occurrence of a Slope Failure", Proc. of 6th I.C.S.M.F.E, Vol. 2, 1965, pp 537-541.
7. Saito, M., "Forecasting Time of Slope Failure by Tertiary Creep", Proc. of 7th I.C.S.M.F.E, Vol. 2, 1969, pp 677-683.
8. Salt, G., "Landslide mobility and Remedial Measure", Proc. of 5th I.S.L, Vol. 1, 1988, pp 757-762.

(접수일자 : 2006년 2월 1일)