터널 갱구지역 사면안정성 및 산사태 위험도 평가

정해근¹ · 서용석^{2*}

¹비회원, 한국수자원공사 K-water 연구원, 연구원

²정회원, 충북대학교 지구환경과학과, 교수

Slope stability analysis and landslide hazard assessment in tunnel portal area

Hae-Geun Jeong¹, Yong-Seok Seo^{2*}

¹K-water Institute, Korea Water Resources Corporation, Researcher

²Department of Earth and Environmental Sciences, Chungbuk National University, Professor

ABSTRACT: In this study, the slope stability analysis and the landslide hazard assessment in tunnel portal slope were carried out. First, we selected highly vulnerable areas to slope failure using the slope stability analysis and analyzed the slope failure scale. According to analyses results, high vulnerable area to slope failure is located at 485 ~ 495 m above sea level. The slope is stable in a dry condition, while it becomes unstable in rainfall condition. The analysis results of slope failure scale show that the depth of slope failure is maximum 2.1 m and the length of slope failure is 18.6 m toward the dip direction of slope. Second, we developed a 3-D simulation program to analyze characteristics of runout behavior of debris flow. The developed program was applied to highly vulnerable areas to slope failure. The result of 3-D simulation shows that debris flow moves toward the central part of the valley with the movement direction of landslide from the upper part to the lower part of the slope. 3-D simulation shows that debris flow moves down to the bottom of mountain slope with a speed of 7.74 m/s and may make damage to the tunnel portal directly after 10 seconds from slope failure.

Keywords: Tunnel portal, Landslide, Slope stability analysis, 3-D simulation

초 록: 본 연구에서는 터널 갱구사면을 대상으로 사면안정성 및 산사태 위험도를 평가하였다. 먼저 사면안정성 해석을 통해 붕괴위험도가 가장 높은 구간을 선정하고 구체적인 붕괴규모를 파악하였다. 해석결과 해발고도 485~495 m인 구간은 강우시 안전율이 0.99로 불안정한 상태로 나타났다. 이 때 붕괴심도는 최대 2.1 m이며 붕괴 길이는 사면의 경사방향으로 18.6 m로 분석되었다. 해당구간에서 사면붕괴 시 파생되는 사태물질의 이동특성을 실시간으로 분석하고 터널 갱구부에 미치는 영향을 파악하고자 산사태 시뮬레이션 해석을 수행하였다. 해석결과 사태물질은 7.74 m/sec의 평균속도를 보이며 주로 계곡부를 따라 산 하부로 이동하는 것으로 분석되었다. 사태물질은 산 하부로 갈수록 점차 확산되며 10초 후에 터널 갱구부 위를 지나고 20.2초 후에 산하부에 도달하는 것으로 분석되었다. 특히 터널 갱구부는 사태물질 이동경로의 중심부에 위치하고 있어 산사태 발생 시 직접적인 피해를 받는 것으로 나타났다.

주요어: 터널 갱구부, 산사태, 사면안정성 해석, 3차원 시뮬레이션

1. 서 론

산사태는 비탈 지대에서 암석과 흙더미가 하부로 무너져 내리는 현상으로 지표면 및 활동면의 형태에 따라 다양한 파괴양상을 보인다. 산사태로 인해 파생

되는 사태물질은 빠른 속도로 하부로 이동하여 도로, 가옥 및 농지 등에 직접적인 영향을 미칠 뿐만 아니라 수많은 인명피해를 야기한다. 특히, 터널 및 도로와 같은 기간시설이나 국가의 중요 문화재가 위치한 곳에 산사태가 발생할 경우 피해가 더욱 크다. 터널 갱구부는 터널 구조물 중 유일하게 외부와 연결되는 구간으로 산사태 피해를 직접적으로 받을 수 있는 구간이다. 최근에는 도로의 선형 개량 및 고속화로 산악지역에서 터널건설이 증가하고 있어, 터널 설계

*Corresponding author: Yong-Seok Seo

E-mail: ysseo@cnu.ac.kr

Received May 14, 2013; Revised June 5, 2013;

Accepted July 9, 2013

시 터널 갱구사면의 산사태 위험도 분석을 통해 갱구부의 안정성을 확보하는 것이 반드시 필요하다.

산사태를 예방하고 피해를 최소화하기 위해서는 산사태의 정확한 발생예측 및 사태물질의 이동특성을 파악하는 것이 필요하다. 산사태를 예측하는 방법으로는 확정론적 방법(deterministic approach), 퍼지로지(fuzzy logic) 및 인공신경망(artificial neural network) 기법 등이 있다. 국내에서는 산사태의 확률론적 예측을 위해 로지스틱 회귀분석(Kim et al., 2000; Chae et al., 2004a; Chae et al., 2004b; Cho et al., 2007)과 GIS (Geographic Information System) 기법(Lee et al., 2000)이 널리 사용되고 있다.

사면의 붕괴 가능성에 대한 평가는 사면에 분포하는 구성물질의 종류에 따라 암반사면, 토사사면 및 복합사면으로 구분하여 안정성 해석을 수행한다. 사면안정성 해석의 방법으로는 활동면을 기준으로 상부의 토괴 또는 암괴의 정역학적인 힘의 평형관계를 이용하여 안정성을 평가하는 한계평형해석(limit equilibrium analysis)과 변위의 속도장을 계산하여 에너지 분포를 구하고 안전율을 계산하는 상한이론(upper bound theory) 등이 있다. 또한 사면안정성 해석은 사면의 기하학적 형상의 반영여부에 따라 2차원 및 3차원 해석으로 구분되는데, 일반적으로 2차원 해석이 실용적인 목적으로 주로 사용된다.

사태물질의 이동특성을 파악하기 위한 방법으로는 인공신경망 기법, 시뮬레이션(simulation) 기법 등이 사용된다. Seo et al. (2005)는 사태물질의 이동거리를 산정하기 위해 기존 산사태 발생자료를 이용하여 인

공신경망 기법으로 다양한 예측모델을 개발하였으며, 이를 기존 산사태 발생자료를 통해 검증한 결과 사태물질의 이동거리를 약 10% 이내의 오차 범위로 추정하였다. 최근에는 화산쇄설류 및 산사태로 인한 사태물질의 이동특성을 3차원적으로 가시화시키는 연구가 일부 진행되고 있다(Zhang and Iwahori, 2003; Stevens et al., 2002; Stolz et al., 2008). 이러한 3차원 시뮬레이션 연구는 산사태로 인한 사태물질의 이동특성을 지형데이터에 기초하여 3차원적으로 가시화시킴으로써 피해범위를 효과적으로 판단할 수 있다. 하지만 복잡한 자연현상을 효과적으로 표현하기에는 정밀한 그래픽 기술이 요구되므로 이에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 터널 갱구사면을 대상으로 안정성 여부를 평가하고 불안정한 구간에 대해서 사면붕괴 규모를 파악하였다. 또한, 사면붕괴 시 발생하는 사태물질의 이동특성을 분석하고자 3차원 산사태 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램을 이용하여 사태물질의 이동특성을 실시간(real time)으로 분석하였으며 동시에 사태물질이 터널 갱구부에 미치는 영향을 파악하였다.

2. 연구지역

2.1 지형 및 지질

연구지역은 강원도 인제군에 위치하고 있는 터널공사 구간으로 높은 산악지형을 이루고 있다(Fig. 1).

Fig. 1. Aerial photography in the study area

Fig. 2. Panoramic photograph in the starting portal slope

Fig. 3. Geologic map in the study area

본 연구에서는 터널 갱구사면(Fig. 2)을 대상으로 사면 안정성 평가 및 3차원 산사태 시뮬레이션을 수행하였다.

연구지역의 광역지질은 선캠브리아기 편마암 복합체인 경기육괴와 이를 관입한 중생대 쥐라기 흑운모 화강암과 이들 두 지질 단위를 부정합으로 피복하는 제4기층으로 구성된다. 이 중 터널 갱구부는 호상편마암이 분포하고 있다(Fig. 3).

우리나라에서 발생하는 토석류 산사태는 대부분 가파른 산 사면에서 발생하고, 특히 편마암 지역은 지질조건에 따른 산사태 발생빈도가 다른 암석에 비해 가장 높은 것으로 알려져 있다(Kim et al., 2000). 상기 조건에 해당하는 인제지역은 매년 하절기 집중호우기간에 산사태로 인한 큰 피해를 입고 있다.

2.2 강우특성

강원도 인제군은 매년 집중강우로 인해 산사태가 빈번하게 발생하는 지역으로 2006년 7월에는 기록적인 폭우가 쏟아져 큰 경제적 및 인적 손실을 가져왔다(Table 1). 특히, 기상청 자료에 의하면 2006년 7월 15일 오전 9시부터 15시 사이에 최대강우량을 보이며(Fig. 4, Fig. 5), 인명과 재산 피해의 대부분이 이 기간에 발생한 것으로 나타났다. 이러한 집중강우량은 연 평균 강우량의 20% 이상일 경우 산사태 발생가능성이 높다는 연구결과와 일치된다(Oliver et al., 1994). 연구지역의 집중강우 현상은 강원도와 경기도의 경계에 위치하고 있는 광주산맥에서부터 시작되어, 중간의 여러 크고 작은 산지를 지나면서 춘천과 양구 등에서 지형성 강우특성을 보이다가 태백산맥으로 인하여 강화된 결과이다(Bae, 2007).

Table 1. The record of monthly rainfall during rainy season for the last 21 years (after Korea Meteorological Administration)
(unit : mm)

Yar \ Month	June	July	August	September
2008	88.2	460.2	243.0	68.6
2007	53.0	162.5	375.5	283.0
2006	255.5	886.0	114.0	29.0
2005	193.0	215.5	236.0	226.5
2004	120.5	436.0	205.0	219.0
2003	103.5	267.0	610.5	283.0
2002	97.0	192.5	507.5	45.5
2001	217.5	380.0	48.5	45.5
2000	89.0	204.0	392.0	149.5
1999	81.4	244.6	595.1	298.0
1998	134.0	297.5	566.0	104.5
1997	218.5	244.0	116.5	273.5
1996	169.0	433.5	67.0	6.0
1995	43.5	330.5	781.0	61.5
1994	90.5	129.0	183.0	43.0
1993	154.5	263.0	200.5	56.0
1992	91.5	204.5	311.5	106.0
1991	18.5	350.5	57.0	104.0
1990	276.7	316.0	176.1	527.5
1989	86.2	302.5	180.8	120.8
1988	68.8	325.0	62.5	63.8

Fig. 4. Temporal variation of hourly rainfall in 14~16 July, 2006 (after Korea Meteorological Administration)

Fig. 5. Effective accumulated rainfall in 12~16 July, 2006 (after Korea Meteorological Administration)

2.3 토질특성

연구지역에 분포하는 토층의 물리적·역학적 특성을 파악하고, 사면안정성 해석 시 입력되는 강도정수를 구하기 위하여 토질시험을 실시하였다. 토질시료는 지표 하 50 cm 정도의 위치에서 링 샘플러를 이용하여 교란 및 불교란 시료로 구분하여 채취하였다. Fig. 6은 불교란 시료를 채취하기 위해 링 샘플러를 토층에 관입하는 과정을 보여준다. 토질시험은 한국산업규격(KS)에 준용하여 실시하였다.

본 연구에서는 편의상 0.074 mm보다 큰 조립토를 대상으로 체분석(sieve analysis)을 실시하여 입도분

포를 파악하였다. Fig. 7은 터널 토층시료에 대한 입도 분석 결과를 나타낸 것이다. 그래프에서 표현된 입도 분포곡선은 대체로 완만한 기울기를 보이는데, 이는 다양한 입자가 골고루 분포되어 있음을 의미한다. 토질시료의 유효입경(D_{10})은 0.14 mm로 분석되었다. 균등계수는 15.9로 나타났으며 곡률계수는 1.2로 분석되었다.

투수계수는 Hazen (1911)에 의해서 제안된 경험식을 적용하여 산출하였다. Hazen의 경험식은 유효입경이 0.1~3.0 mm인 모래에 적용되며, 다음과 같이 표현된다.

(a) Selection of sampling point

(b) Sampler into soil layer

Fig. 6. Undisturbed soil sampling for laboratory test

Fig. 7. Grain size distribution curves of soils sampled from the study area

Table 2. Physical and engineering properties of soil

Unit weight (g/cm^3)		Moisture Content (%)	Specific gravity	Void ratio	Effective particle size (mm)
Dry	Sat.				
1.9	2.2	11	2.68	0.4	0.14
porosity (%)	Degree of saturation (%)	Permeability (cm/s)	Coefficient of Uniformity	Coefficient of gradation	
29	22	1.96×10^{-2}	15.9	1.2	

$$k = C_1 D_{10}^2 \quad (1)$$

여기서, k 는 투수계수, C_1 은 형상계수이다.

연구지역의 토질은 분급이 좋지 못한 중립질 모래 ($C_1=1$)에 해당하고 유효입경이 0.14 mm이므로 투수 계수는 1.96×10^{-2} cm/s이다. 이는 토질의 배수성이 양호함을 의미한다. 상기 토질특성을 포함한 실내 토질시험의 결과를 정리하면 Table 2와 같다.

3. 사면안정성 해석

3.1 해석내용 및 방법

본 논문에서는 한계평형해석 이론이 적용된 Talren 97 프로그램을 사용하여 갱구사면의 안정성을 평가하

고, 붕괴가능성이 높은 구간에 대해서는 구체적인 사면붕괴 규모를 파악하였다. 해석에 사용된 지형단면도는 터널 갱구부와 산정상부를 연결하는 최대단면을 이용하였다(Fig. 8). 사면의 붕괴유형은 원호파괴로 가정한 후 Bishop 방법을 적용하였으며 붕괴위험도가 가장 큰 구간은 해석을 통해 산출된 안전율이 가장 낮은 구간으로 선정하였다. 갱구사면에 대한 지층의 구분은 현장 시추조사자료 및 물리탐사자료의 결과를 토대로 토층, 풍화암층 및 연암층으로 구분하여 심도와 강도정수를 결정하고 사면안정성 해석을 수행하였다. 지하수 조건은 강우조건을 감안하여 건기시와 우기시로 구분하였다. 우기시는 지하수위가 지표면과 동일하게 되는 포화상태로 가정하였다. 해석에 사용된 지반정수는 실내 토질시험 결과와 현장 전단시험 결과를 통해 산정하였다(Table 3).

Fig. 8. Cross section line selected for slope stability analysis of a portal slope

Table 3. Parameters used for slope stability analysis

Layer	Dry unit weight (t/m^3)	Cohesion (t/m^2)	Internal friction angle ($^\circ$)
Soil	1.9	1.0	30
Weathered Rock	2.1	3.0	33
Soft rock	2.4	30.0	35

3.2 해석결과

터널 갱구사면에 대한 사면안정성 해석 결과, 사면 내에서 붕괴위험도가 가장 높은 구간은 해발고도 485 ~ 495 m 지점에 위치하는 것으로 분석되었다. 해당구간에서의 최소저항력을 보이는 구간은 토층구간이며 원호형태를 보인다. 이 구간은 건기시 안전율이 1.6으

로 안정한 상태에 있으나, 강우로 인해 사면이 포화되었을 경우에는 안전율이 0.99로 급격히 떨어져 불안정한 상태로 존재하는 것으로 나타났다(Table 4). 사면 붕괴 시 붕괴심도는 토층 표면에서부터 토층과 풍화암의 경계면 위치까지 다양하게 나타나며 최대 2.1 m로 분석되었다(Fig. 9). 붕괴 연장성은 사면의 경사 방향으로 18.6 m로 파악되었다.

Table 4. Safety factors calculated by limit equilibrium analysis of a portal slope

Condition of groundwater	Safety factor
Dry	1.6
Saturated	0.99

Fig. 9. Results of slope stability analysis of a portal slope

4. 산사태 시뮬레이션

4.1 산사태 시뮬레이션 프로그램

본 연구에서는 산사태로 인한 사태물질의 이동특성을 파악하기 위하여 3차원 산사태 시뮬레이션 프로그램을 개발하였다. 개발된 프로그램은 사면안정성 해석을 통해 선정된 붕괴위험도 구간에 적용하여 사면 붕괴로 인한 산사태 발생 시 사태물질의 실시간(real time) 이동양상을 분석할 수 있다.

4.1.1 적용이론

사태물질은 비압축성 유체로 취급되며 그 변화량을 운동방정식과 연속식에 적용하면 실시간 이동특성의 표현이 가능하다. Fig. 10(a)와 같이 미소 주상요소에 작용하는 활동력(DF), 활동면 및 지반 내부에서 작용하는 저항력(RF)은 다음과 같다.

$$DF = rgh \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2)$$

$$RF = (c_1 + c_2)dx + rgh(\tan \phi_1 + \tan \phi_2) \quad (3)$$

여기서, r 은 단위중량(t/m^3), g 는 중력가속도(m/s^2), h 는 활동토괴의 심도(m), c_i 는 활동면과 지반의 점착

력(tf/m^2), ϕ_i 는 활동면과 지반의 내부마찰각($^\circ$)이다. 운동방정식은 방향에 따라 식 (4) 및 식 (5)로 표현된다.

$$r \frac{dM}{dt} = rgh \frac{\partial h}{\partial x} + c_1 dx + c_2 dx + rgh \tan \phi_1 + rgh \tan \phi_2 \quad (4)$$

$$r \frac{dN}{dt} = rgh \frac{\partial h}{\partial y} + c_1 dy + c_2 dy + rgh \tan \phi_1 + rgh \tan \phi_2 \quad (5)$$

여기서, M 과 N 은 X방향 및 Y방향의 단위 폭 유량이 다. 일반적으로 유량은 식 (6)과 같이 속도와 속도 방향에 직교하는 평면의 곱으로 표현된다. 시간에 따른 X방향 및 Y방향의 변화량은 식 (7) 및 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$M = \int_h^H u dz, \quad N = \int_h^H v dz \quad (6)$$

$$\frac{dM}{dt} = \frac{\partial M}{\partial t} + u \frac{\partial M}{\partial x} + v \frac{\partial M}{\partial y} \quad (7)$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{\partial N}{\partial t} + u \frac{\partial N}{\partial x} + v \frac{\partial N}{\partial y} \quad (8)$$

여기서, u 및 v 는 X방향 및 Y방향의 속도이다. 또한 Fig. 10(b)에서와 같이 유입량과 유출량에 대하여 질량보존의 법칙을 적용한 후 유량으로 표현하는 연속식으로 유도하면 식 (9)와 같다.

$$\frac{dh}{dt} = \frac{\partial M}{\partial x} dx + \frac{\partial N}{\partial y} dy \quad (9)$$

이상의 식들은 유한차분법(Finite Difference Method, FDM)으로 이산화하여 시간에 따른 운동량의 변화를 계산하게 된다. 방향에 따른 운동방정식 및 연속방정식의 차분화는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$M^{K+1}(i,j) = M^k(i,j) - \Delta t \left(u \frac{\partial M}{\partial x} + v \frac{\partial M}{\partial y} \right) + \Delta t (F_1 + F_2 + F_3) / r \quad (10)$$

$$u(i,j) = \frac{M(i+1,j) - M(i,j)}{z(i+1,j) - z(i,j)} \quad (11)$$

$$N^{K+1}(i,j) = N^k(i,j) - \Delta t \left(u \frac{\partial N}{\partial x} + v \frac{\partial N}{\partial y} \right) + \Delta t (F_1 + F_2 + F_3) / r \quad (12)$$

(a) Landslide

(b) Changing flow rate

Fig. 10. Schematic diagram of landslide and changing flow rate

$$v(i,j) = \frac{M(i,j+1) - M(i,j)}{z(i,j+1) - z(i,j)} \quad (13)$$

$$h_{i,j}^{k+1} = h_{i,j}^k - \Delta t (W_1 + W_2) \quad (14)$$

$$\text{여기서, } W_1 = \frac{1}{\Delta x} (M_{i+1,j}^{k+1} - M_{i,j}^{k+1}),$$

$$W_2 = \frac{1}{\Delta y} (N_{i,j+1}^{k+1} - N_{i,j}^{k+1}) \text{이다.}$$

4.1.2 프로그램 구성

개발된 산사태 시뮬레이션 프로그램은 Visual C++을 기반으로 구현되었으며, 크게 입력모듈, 분석모듈 및 출력모듈로 구분된다(Fig. 11). 각 모듈에 대해 간략히 요약하면 다음과 같다.

① 입력모듈

입력데이터는 산사태 발생 전·후의 지형 데이터 및 지반정수 데이터로 구분된다. 지형데이터는 수치지형도(Digital Terrain Model, DTM) 및 수치표고모델(Digital Elevation Model, DEM)을 사용하며, 지반정수 데이터는 물성 및 역학적 시험을 통하여 산정된 값을 이용한다. 입력된 데이터는 계산을 위해 설정된

각각의 변수에 등록된다.

번호에 저장된다.

② 분석모듈

지형데이터에서 추출한 3차원 좌표 값은 각 격자별로 할당되며, 3차원 가시화 알고리즘에 적용되어 최종 3차원 지형을 생성한다. 각 격자에 지형 속성 및 지반정수 데이터가 저장되면 연산과정을 거쳐 시간에 따른 운동량을 계산한다.

③ 출력모듈

최종 계산된 결과는 속도, 시간, 토괴량 및 토층심도(활동토괴와 활동면의 심도 차이)로 구분되어 각 격자

4.2 산사태 시뮬레이션 해석

4.2.1 해석내용 및 방법

산사태로 인한 사면물질의 실시간 이동특성을 파악하기 위하여 사면안정성 해석을 통해 선정된 붕괴위험도 구간을 산사태 시점부로 설정하여 시뮬레이션 해석을 수행하였다. 개발된 시뮬레이션 프로그램의 입력데이터는 크게 지형 및 지반정수 데이터로 구분된다. 지형데이터는 산사태 발생 전후의 수치지형도 또는 수치표고모델을 이용한다. 본 연구에서는 국토

Fig. 11. Layout of 3-D program of simulating landslide

지리정보원에서 발간하는 1:5000 수치지형도를 산사태 발생 전의 지형데이터로 사용하였다. 그리고 동일 수치지형도에서 사면안정성 해석을 통해 파악된 붕괴 규모를 적용하여 산사태 발생 후의 지형데이터를 작성하였다. 사태 규모의 3차원적 표현을 위해서 사면의 붕괴 폭은 국내 편마암 풍화토 지역의 산사태 평균 붕괴 폭인 15 m (Kim et al., 2007)로 가정하여 해석모델을 작성하였다(Fig. 12). 지반정수 데이터는 단위중

량, 점착력, 동적 활동면 마찰각(ϕ_1) 및 동적 토괴 내부마찰각(ϕ_2)으로 구성된다. 단위중량 및 점착력은 Table 3에 제시된 값을 사용하였다. 동적 활동면 마찰각 및 동적 토괴 내부마찰각은 일반적으로 링 전단시험(ring-shear test)을 통해 구해지나, 본 연구에서 사용된 동적 마찰각은 다음의 경험식을 이용하여 구하였다.

$$\tan\phi_1 + \tan\phi_2 = 0.41\tan\phi_c + 0.10 \quad (15)$$

Fig. 12. Configuration of the landform before and after occurrence of landslide in the starting portal slope

Fig. 13. Relationship between static friction coefficient and kinetic friction coefficient (after Institute of Chubu Nihon Kogyo, 2007)

상기 식은 세계 20개 지역의 산사태 현장 데이터를 토대로 산출된 회귀식이다(Fig. 13).

일반적으로 산사태 발생지역과 같이 함수비가 높은 상태일 경우에는 동적 활동면 마찰각이 동적 토괴 내부마찰각의 약 1/4 이다. 이를 바탕으로 토질시험을 통해 획득한 정적 내부마찰각(ϕ_c) 30°를 식 (15)에 적용하였다. 도출된 동적 활동면 마찰각 및 동적 토괴 내부마찰각은 각각 3.8°, 15.1°로 나타났다.

4.2.2 해석결과

시뮬레이션 결과를 통해 산사태 발생시 사태물질의 이동속도와 산 하부까지의 도달시간을 분석하고, 사태물질로 인한 터널 갱구부의 피해여부를 분석하면 다음과 같다.

사면안정성 해석을 통해 선정된 붕괴위험구간에서 산사태가 발생할 경우 74.54 m³ 체적의 사태물질이 발생하는 것으로 나타났다. 사태물질은 7.74 m/s의 평균속도를 보이며 주로 계곡부를 따라 산 하부로 이동하며, 산 하부로 갈수록 점차 확산되면서 10초 후에 터널 갱구부 위를 지나는 것으로 나타났다. 특히,

터널 갱구부는 사태물질 이동경로의 중심부에 위치하고 있어 산사태 발생 시 직접적인 피해를 받는 것으로 나타났다. 사태물질은 산사태 발생 후 20.2초가 지난 후에 산 하부에 도달하는 것으로 분석되었다(Fig. 14).

5. 토 의

Stevens et al. (2002)는 LAHARZ (Iverson et al., 1998) 시뮬레이션 모델을사용하여 DEM (Digital Elevation Model) 해상도가 화산쇄설류의 확산범위 예측결과에 미치는 영향을 분석하였다. 그 결과 지형 데이터로 활용되는 DEM의 해상도에 따라 예측결과는 달라질 수 있다는 결론을 얻었다. 또한 Stolz et al. (2008)도 LAHARZ 시뮬레이션 모델에 30 m 와 90 m 해상도의 두 DEM을 적용하여 토석류의 확산범위를 분석한 결과 최종 이동거리가 15~20% 차이를 보인다는 결론을 얻었다. 이러한 연구결과는 시뮬레이션에 적용되는 지형데이터의 정밀도에 따라 예측결과는 달라질 수 있음을 의미한다. 따라서 본 연구에서 개발된 산사태 시뮬레이션의 이동특성을 보다 정확하

Fig. 14. Screen shots of simulation showing runoff behavior of debris flow with elapsed time at portal slope

게 분석하기 위해서는 지형 특성을 세밀하고 정확하게 표현한 수치지형 데이터 또는 고해상도의 DEM을 획득해야 한다. 또한 입력데이터로 사용되는 사태물질의 동적 전단강도를 정밀하게 측정할 수 있는 시험 방법이 요구된다. 또한 본 연구에서 개발된 시물레이션 시스템의 유효성 검증을 위해서는 실시간으로 수집된 현장 데이터와의 비교분석이 필요하다.

6. 결 론

본 연구에서는 터널 갱구사면을 대상으로 사면의 안정성 여부를 평가하고 붕괴위험도가 높은 구간에 대해서는 산사태 시물레이션을 수행하여 산사태 발생 시 사태물질의 이동특성을 파악하고자 하였다. 먼저 사면안정성 해석을 통해 갱구사면 중 붕괴위험도가 가장 높은 구간을 선정하였다. 해당 구간은 해발고도 485~495 m 지점에 위치하는 것으로 분석되었으며 건기 시에는 안전율이 1.6으로 안정한 상태에 있는 것으로 분석되었다. 하지만, 강우로 인해 사면이 포화되었을 경우에는 안전율이 0.99로 급격히 떨어져 불안정한 상태로 존재하는 것으로 나타났다. 사면 붕괴 시 붕괴심도는 토층 표면에서부터 토층과 풍화암의 경계면 위치까지 다양하게 나타나며 최대 2.1 m로 분석되었다. 붕괴 연장성은 사면의 경사방향으로 18.6 m로 파악되었다.

사면안정성 해석을 통해 선정된 붕괴위험구간에서 산사태가 발생할 경우 74.54 m³ 체적의 사태물질은 7.74 m/s의 평균속도를 보이며 주로 계곡부를 따라 산 하부로 이동하는 것으로 분석되었다. 사태물질은 산 하부로 갈수록 점차 확산되며 10초 후에 터널 갱구부 위를 지나고 20.2초 후에 산하부에 도달하는 것으로 분석되었다. 터널 갱구부는 사태물질 이동경로의 중심부에 위치하고 있어 산사태 발생 시 직접적인 피해를 받는 것으로 나타났다. 따라서 터널 시공 시 터널 갱구부 상부에 산사태 방호 시설을 설치할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 ‘공공복지안전기술개발사업(2012 M3A2A1050985)’의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

1. Bae, S.H. (2007), "Cause analysis of 2006 concentrated heavy rain which occurred in Inje-Gun", The Korean Association of Regional Geographers, Vol. 13, No. 4, pp. 396-408.
2. Chae, B.G., Kim, W.Y., Cho, Y.C., Kim, K.S., Lee, C.O., Choi, Y.S. (2004b), "Development of a logistic regression model for probabilistic prediction of debris flow", The Journal of Engineering Geology, Vol. 14, No. 2, pp. 211-222.
3. Chae, B.G., Kim, W.Y., Na, J.H., Cho, Y.C., Kim, K.S., Lee, C.O. (2004a), "A prediction model of landslides in the tertiary sedimentary rocks and volcanic rocks area", The Journal of Engineering Geology, Vol. 14, No. 4, pp. 443-450.
4. Cho, Y.C., Chae, B.G., Kim, W.Y., Chang, T.W. (2007), "A modified logistic regression model for probabilistic prediction of debris flow at the granitic rock area and its application - landslide prediction map of gangneung area", The Korean Society of Economic and Environmental Geology, Vol. 40, No. 1, pp. 115-128.
5. Hazen, A. (1911), "Discussion: dams on sand foundations", Transactions of the American Society of Civil Engineers, Vol. 73, pp. 199.
6. Institute of Chubu Nihon Kogyo (2007), Technical report for 3D landslide simulation.
7. Iverson, J.B. (1998), "Molecules, morphology, and mud turtle phylogenetics (Family Kinosternidae)", Chelonian Conservation and Biology, Vol. 3, No. 1, pp. 113-117.
8. Kim K.S., Song Y.S., Chae B.G., Cho Y.C., Lee Y.C. (2007), "Geometric characteristics of landslides on natural terrain according to the geological

- condition”, The Journal of Engineering Geology, Vol. 17, No. 1, pp. 75-87.
9. Kim, W.Y., Chae, B.G., Kim, K.S., Kee, W.S., Cho, Y.C., Choi, Y.S., Lee, S.R., Lee, B.J. (2000), “Study on landslide hazard prediction”, MOE, KR-00-(T)-09.
10. Korea Meteorological Administration (2008), Internet homepage (<http://www.kma.go.kr>).
11. Lee, S.R., Kim, Y.J., Min, K.D. (2000), “Development of spatial landslide information system and application of spatial landslide information”, The Journal of GIS Association of Korea, Vol. 8, No. 1, pp. 141-153.
12. Oliver, M., Bell, F.G., Jemy, C.A. (1994), “The effects of rainfall on slope failure, with examples from the greater durban area”, In: Proceedings Seventh Congress International Association Engineering Geology, Lisbon, A.A. Balkema, Rotterdam, Vol. 3, pp. 1629-1636.
13. Seo, Y.S., Chae, B.G., Kim, W.Y., Song, Y.S. (2005), “Assessment of runout distance of debris using the artificial neural network”, The Journal of Engineering Geology, Vol. 15, No. 2, pp. 145-154.
14. Stevens, N.F., Manville, V., Heron, D.W., (2002), “The sensitivity of a volcanic flow model to digital elevation model accuracy: experiments with digitised map contours and interferometric SAR at ruapehu and taranaki volcanoes”, New Zealand, Journal of Volcanology and Geothermal Research, Vol. 119, Issue 1-4, pp. 89-105.
15. Stolz, A., Huggel, C. (2008), “Debris flows in the swiss national park: the influence of different flow models and varying DEM grid size on modeling results, Landslides”, Vol. 5, Issue 3, pp. 311-319.
16. Zhang, C., Iwahori, Y. (2003), “Numerical prediction of mass movement due to slope collapse”, The Japan Landslide Society, pp. 555-558.