

## 지구물리탐사를 이용한 산사태지역의 지하수위에 따른 안정성 해석

이경미 · 김 현 · 이재혁 · 서용석 · 김지수\*

충북대학교 지구환경과학과

### Analysis on the Influence of Groundwater Level Changes on Slope Stability using a Seismic Refraction Survey in a Landslide Area

Kyoung-Mi Lee, Hyun Kim, Jae-Hyuk Lee, Young-Seok Seo, and Ji-Soo Kim\*

Department of Earth & Environmental Sciences, Chungbuk National University

자연사면 산사태는 주요 유발인자인 강우나 지진 이외에 토질특성, 지형 및 지질요소 등 다양한 인자의 영향으로 발생될 수 있다. 본 연구지역의 경우 파괴의 시점에 인공구조물이 시공되어 있어 이들과 사면붕괴와의 관련성을 밝히는 것은 매우 의미가 있다. 이를 위해 원지반의 물성을 추정하여 자연사면 자체의 붕괴에 대한 취약성을 파악하고 구조물에 의해 변화된 지반에 대한 불안정성을 비교하여 붕괴원인을 살펴보았다. 현장조사와 실내시험으로 원지반과 성토지반의 물성을 구하였고, 지구물리탐사를 통해 추정된 파괴면의 심도를 이용하여 지하수위 변화에 따른 2차원과 3차원 한계평형해석을 각각 수행하였다. 해석결과는 지반의 토질특성과 강도정수에 상관없이 비슷한 안전율을 보였고, 지하수위는 만수위시 불안정해지는 것으로 나타났다.

**주요어** : 산사태, 직접전단시험, 탄성파 굴절법 탐사, 3차원 사면안정해석

Landslides is mainly induced by a heavy rainfall, earthquake ground motion, and some other factors like soil mechanics, morphological-geological factors etc. Since the starting point of the failure seemed to be originated at a construction site in the study, it is meaningful to find out the relationship between the landslide and the construction. For this study, the slope failure factor was examined carefully to see that the original natural slope had vulnerability and that the complex ground had instability changed by construction. A field survey was conducted on the original ground surface and filled-up ground. A laboratory test was also conducted to determine the geo-mechanical properties of soil samples. 2D and 3D limit equilibrium analysis with changing groundwater level were conducted at the failure depth using a seismic refraction survey. The result shows that the factor of safety is similar stability under all condition, but unstable under saturated condition.

**Key words** : landslide, direct shear test, seismic refraction survey, 3D slope stability analysis

## 서 론

국내의 자연사면에서 발생하는 산사태는 산사면 계곡부를 따라 발생하는 쇄설성유동 형태가 가장 많고, 이러한 쇄설성유동은 산사면 상부의 잔류토양과 붕적토에서 발생되어 계곡부로 물질이 이동하며, 그 규모가 크지 않은 것이 특징이다(김원영 외, 2000). 산사태 유발의 가장 큰 원인은 강우에 의한 것으로 국내의 경우 강우는

여름철에 집중되며, 국지성 집중호우 양상을 보이고 있어 그 피해가 심각하다.

일본의 경우 일반적으로 산사태 발생전 3일 또는 7일 선행강우량과 발생 당일의 강우강도가 산사태 발생과 밀접한 관계가 있는 것으로 보고되고 있다(구호분 외, 1990). 그러나 국내의 경우 산사태와 강우강도, 누적강우량의 관계는 명확하게 밝혀지지 않고 있다. 특히 강우자료의 수집 및 분석에 있어서 강우관측소 분포지를 중

\*Corresponding author: geop22@cbu.ac.kr

심으로 강우 분포도(contour map)를 이용하게 되므로 산사태 발생지의 정확한 강우 조건을 파악하기 어려운 문제점이 있다. 다만, 토사층이 비교적 얇은 국내의 지형조건상 1일 최대 강우량의 영향정도가 누적강우량보다 강하게 작용하며(이준용과 박형동, 2004), 2-3일간의 짧은 기간에 내리는 집중강우는 지질조건이나 수문지질 조건에 관계없이 산사태를 발생시킬 우려가 있다(김경수 외, 2005)는 연구결과가 있다.

본 연구는 집중강우로 유발된 진천 산사태 지역의 붕괴에 대한 취약성을 파악하고, 붕괴원인의 규명에 있어서 강우에 따른 지하수위 변화와 파괴의 시점부에 시공되어 있는 인공구조물의 영향도를 알아보는 것이 목적이다. 연구방법으로는 현장조사와 실내시험을 수행하여 원지반과 성토(복합)지반의 토질특성을 비교·분석하고, 지구물리탐사를 통해 추정된 파괴면의 심도를 이용하여 지하수위 변화에 따른 2차원 한계평형해석과 3차원 사면안정해석을 수행하였다.

**연구지역**

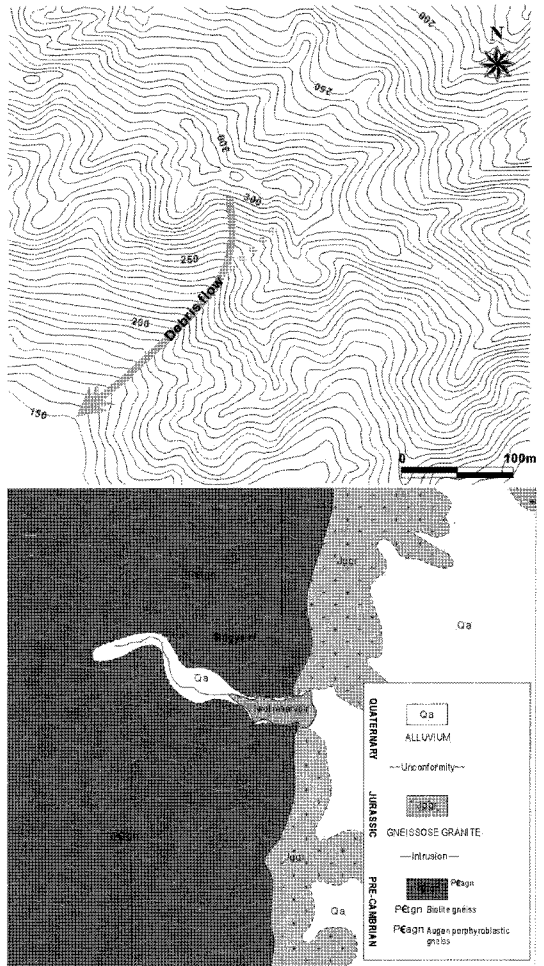
연구지역은 진천군 이월면 신계리 일대의 자연사면으로 2006년 7월의 집중강우에 의해 산사태가 발생한 현장이다. 지형은 해발고도 300 m 내외의 능선이 이어지는 구릉지이며, 계곡지형의 형태를 가진다(Fig. 1). 연구지역의 전방에는 지방도와 하천이 분포하며, 인근에 이월저수지가 위치한다. 연구지역 일대의 지질은 선캠브리아기의 흑운모 편마암과 이를 관입한 주라기 편마상 화강암으로 대별될 수 있다(Fig. 1). 흑운모 편마암은 퇴적기원 변성암으로 엽리가 뚜렷이 잘 발달하는 특징을 가지며, 편마상 화강암은 조립질 화강암으로 남북방향의 구조선을 따라 관입하였다(진천도폭, 1980).

연구지역의 기반암은 대부분 쓸려 내려온 토사와 전석으로 덮여있어 노두와 전석의 구분이 불분명하며, 하부의 계곡부에 소규모로 일부 노출되어 있는 기반암에서 연장성이나 절리간격과 같은 불연속면의 특성을 관찰하기 어렵다. 불연속면은 편마암의 엽리를 포함하여 4 방향이 관찰되는데, 엽리의 경우 국지적으로 방향이 바뀌고 있어 대표값으로 볼 수는 없으나, 63°/325° 방향이 비교적 잘 나타난다. 절리군은 소규모의 노두상에서 우세한 절리군을 규정하기 어려우므로 임의로 기재하면 34°/232°, 54°/065°, 75°/148° 방향이다. 전석의 크기는 0.7×0.3×0.2 m<sup>3</sup>~1.6×1.2×0.8 m<sup>3</sup>의 범위를 보이는데, 이를 통해 블록의 형상을 추정해보면 판(tabular)형임을

알 수 있다.

파괴면의 정상부에서 계곡 하부로 내려갈수록 화강암이 관입된 흔적이 자주 관찰된다. 산사태 발생지의 우측 사면에 좁고 얇은 골짜기가 분포하고 있는데 이 골짜기는 산사태 발생물질 이동 구간의 하부에서 합류하고 있으며, 합류지점의 토층심도는 양쪽에서 이동된 쇄설물이 퇴적되어 1.7 m에 이르기도 한다.

신계리 지구의 산사태의 주요 원인은 집중강우에 의한 것으로 많은 양의 토사가 발생되어 계곡하부로 이동하였다(Fig. 2). 연구지역은 강우관측소가 없는 지역이므로 최근 10년간 강우자료를 명확하게 밝힐 수는 없지만 주변의 천안, 청주, 충주지역에서 관측된 자료를 분석하면, 산사태가 발생한 2006년 7월의 경우 월별 최대 누



**Fig. 1.** Landslide location and geological map of the study area.

적강우량은 지역별로 각각 535.1 mm, 508 mm, 666.9 mm로 나타났고, 일일최대강우량은 137.5 mm, 154 mm, 178 mm로 기록되었다. 일일최대강우량의 경우 평균 강우량의 20%를 훨씬 초과하는 수치이며, 만일 일일최대강우량이 누적되어 있는 상태에서 시간당 강우량이 35 mm가 될 경우(Ikeya, 1989) 산사태가 발생하는 조건에 들게 됨을 알 수 있다.

산사태가 발생한 시점은 능선 상부의 완만한 계곡지형에 시공되어 있는 인공구조물의 말단이며(Fig. 2(a)),



(a) The starting point of landslide



(b) Mass movement causes trees to lean downhill



(c) Tip of debris flow

Fig. 2. Photographs of the landslide area.

쇄설성유동이 하부의 가파른 계곡으로 이어진다. 하부의 계곡부에서는 사태물질이 이미 쓸려 내려가 제거되어 있는 상태여서 토사량을 산정할 수 없으므로 해석상의 편의를 위해 산사태 활동범위는 자연사면 정상부에서 완만한 계곡지형의 말단까지로 한정하였다. 그러나 최종 이동거리는 사면의 전방에 있는 도로를 끝점으로 두고 산정하였다. Figure 3의 모식도는 Varnes(1978)가 제안한 complex earth slide-earth flow에 기초하여 연구지역의 산사태 발생 범위와 규모를 파악하기 용이하도록 작성된 것이다. 이들은 모두 실제 현장조사와 지구물리탐사에 의해 얻은 값으로 변위가 발생된 사태물질의 최대 폭은 15 m 내의 이고, 최대 심도는 4~5 m인 것으로 추정되었다. 연구범위 내의 사태물질의 총 연장은 166 m이며, 평균경사는 26°~29°를 나타낸다.

사태물질의 이동이 시작되기 전의 체적은 Beyer(1978)가 제시한 타원체의 체적을 구하는 방법(Fig 4)으로 구할 수 있으나, 산사태 발생 후 변위가 발생된 물질의 체적은 다음 식 (1)을 이용하여 구할 수 있다(WP/WLI, 1990, Fig. 5).

$$vol_{ls} = \frac{4}{6}\pi abc = \frac{4}{6}\pi D_r \frac{W_r}{2} \frac{L_r}{2} = \frac{1}{6}\pi D_d W_d L_d \quad (1)$$

계산결과, 연구지역의 사태물질 체적은 약 5,215 m<sup>3</sup>으로 산정되었다.

산사태 발생시점부터 최종 도달지점까지의 전체 거리 L은 Fig. 6에 제시된 방법으로 간단히 구할 수 있다. 먼저 지형도를 이용하여 해발고도 차를 구하고, CAD상에서 수치지도의 단면을 추출하면 이동 경사각(travel angle)이 구해지는데, 연구지역의 이동 경사는 약 31.5°이며, 사태물질의 총 이동거리는 300 m 이상인 것으로 계산되었다. 이는 앞서 모식도에서 해석을 위해 규정한 거리 L = 166 m가 아니라 정상부의 파괴시점에서 완만한 계곡부를 지나 가파른 경사의 하부 계곡을 통과하면서 가속된 토석류가 도로에 이르기까지의 총 거리를 구한 것이다.

### 탄성파굴절법 탐사

탄성파굴절법 탐사는 산사태의 파괴 심도를 파악하기 위해 수행되었으며, 파괴면에 수직된 N80W 방향으로 실시하였다. 측선은 각각 60 m의 전개거리로서 측선 당 7개의 발파점 자료를 얻었다. 측선은 사면파괴지역에 대한 천부 탄성파속도 분포를 알기 위해 자연사면 정상부

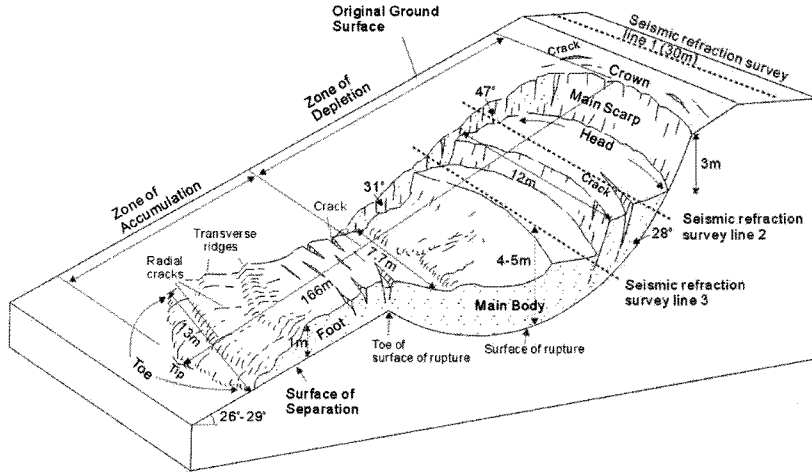


Fig. 3. Block diagram of the landslide area and seismic refraction survey lines.

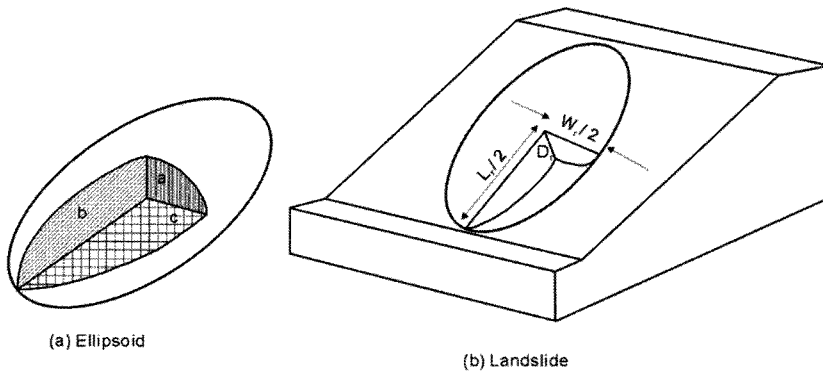


Fig. 4. Estimation of landslide volume assuming a half-ellipsoid shape(Beyer, 1978).

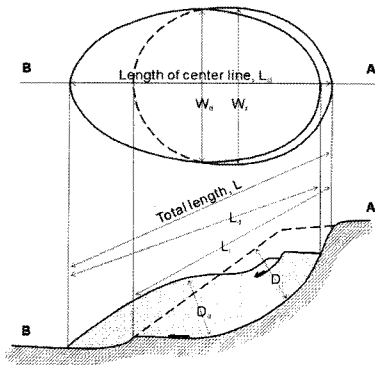


Fig. 5. Landslide dimension after moving(IAEG Commission on landslides, 1990).

의 등산로 (고도 310m)를 따라 Line1, 낙차발생 및 쇄설물의 이동이 시작된 파괴면의 두부(고도 302 m)에서

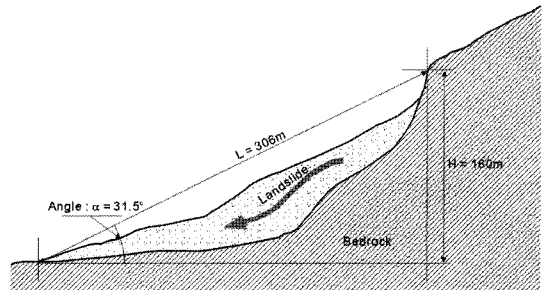


Fig. 6. Definition of travel angle ( $\alpha$ ) of a landslide.

Line2, 이로부터 하단으로 10m 떨어져 있으며(고도 297m) 지형경사도에 의해 심도가 가장 깊은 곳으로 추정되는 지점에 Line3를 운용하였다(Fig. 3). 자료 수집은 ABEM사의 24 채널을 가지는 Terraloc Mark6를 사용하였다. 파원으로는 4.7kg 해머를 사용하였으며 탐사에

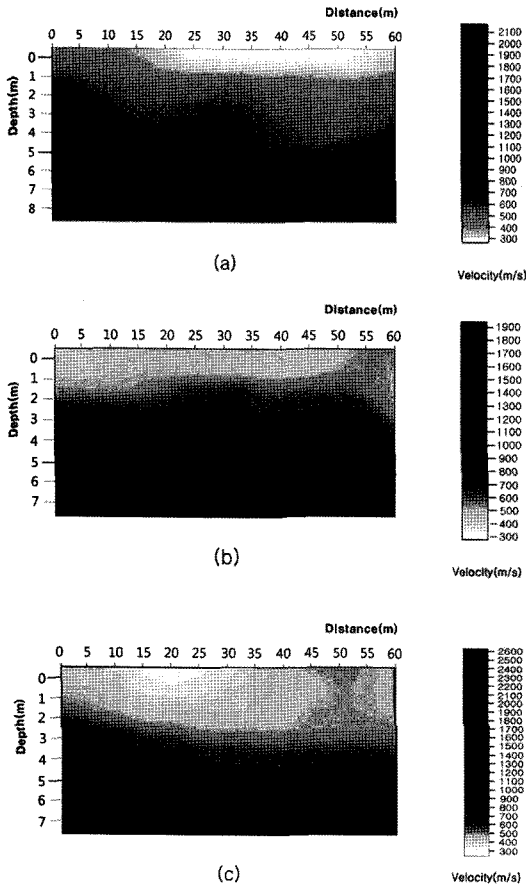


Fig. 7. Seismic refraction results for the lines of (a)Line1, (b)Line2, and (c)Line3. Subsurface velocity structures for the three lines commonly show large velocity contrast at depth of 4-5m as represented by grey dashed line

사용된 지오폰 규격은 10Hz로서 모두 2m 간격으로 설치하였다. 자료의 S/N을 높이기 위해 기록 당 6회 연속 타격하여 수직 중합하였으며, 샘플링 간격은 100 μs로

설정하였다. 탐사자료는 지하 매질을 여러 개의 셀로 나누어 반복적으로 수치모형 반응계산을 수행하여 측정 자료와의 오차가 작은 탄성과 속도구조를 찾아가는 방법인 토모그래피법 프로그램(조창수 외, 2002)을 사용하였다. 역산결과 탄성과 속도 분포를 알아볼 때 3개 측선 모두 속도대비가 크게 나타나는 속도 600~700 m/s의 경계면이 약 4~5m 내외에서 확인된다(Fig. 7). 3개 측선의 고도 차이에도 불구하고 동일한 깊이에서 속도의 변화가 뚜렷이 나타나고 있으며 지질공학 자료와의 상관해석을 통해 파괴면의 깊이는 4~5m로 해석된다.

### 실내시험

토층시료의 물리적 및 공학적인 특성을 파악하기 위하여 실내에서 토질시험을 실시하였다. 불교란 시료는 산사태가 발생하지 않은 자연사면의 정상부와 인공구조물이 시공되어 있는 성토사면 그리고 산사태가 발생한 파괴면에서 각각 채취하였고, 이를 이용하여 간극비, 함수비, 밀도 등을 구하였다(Table 1). 또한 입도분석시험을 통해 균등계수와 곡률계수를 구하였고, 식에 의한 투수계수(Taylor, 1997)를 산정하였다. 전단강도는 자연사면과 성토부에서 불교란 시료를 채취하여 직접전단시험을 통해 구하였으며, 급속압밀배수법으로 수행하였다(Table 1). 산사태의 파괴면에서는 시료채취가 용이하지 않아서 전단강도를 구할 수 없었다.

토층의 간극비와 공극률 그리고 밀도는 토층의 느슨함과 조밀한 정도, 즉 다짐상태와 밀접한 관계가 있다. Table 1에서 간극비와 공극률은 성토사면의 시료에서 다소 높고, 밀도는 자연사면과 파괴면에서 조금 더 높다. 김경수(2006)에 따르면 산사태 발생지역이 미발생지역에 비해 대체로 큰 간극비를 보이며, 낮은 밀도를 나타낸다. 신계리지구의 경우 세 개의 시료에 대한 실험결과

Table 1. Physical and mechanical properties of soil samples.

Sample name	Specific gravity	Moisture content (%)	Grain size (%)				USCS	
			Gravel	Sand	Silt/clay	Cu		Cg
Natural slope	2.49	23.42	24.12	57.96	17.92	182.6	7.7	SC
Complex slope	2.32	22.83	11.20	56.18	32.62	107.7	0.8	SM
Failure surface	2.09	14.82	14.48	54.39	31.13	183.3	0.7	SM

Sample name	Void ratio	Porosity (%)	Degree of sat. (%)	Unit weight (t/m <sup>3</sup> )			Permeability (cm/sec)	Shear strength (t/m <sup>2</sup> )	(°)
				Dry	Wet	Sat			
Natural slope	0.86	46.28	68.22	1.34	1.65	1.80	9.92×10 <sup>-5</sup>	8.63	30.8
Complex slope	1.41	58.43	37.90	0.96	1.18	1.55	8.45×10 <sup>-5</sup>	6.69	36.2
Failure surface	0.41	29.19	76.81	1.48	1.70	1.77	6.17×10 <sup>-6</sup>	-	-

를 비교해볼 때, 성토부의 간극비가 크고 건조밀도가 낮으며, 자연사면과 파괴면에서는 간극비가 작고 건조밀도가 높게 나타난다. 성토사면의 경우 자갈의 함량이 적고 세립토가 상대적으로 많이 포함되어 있어 밀도가 낮을 수 있다. 그러나 성토부에서 세립토의 함량이 많음에도 불구하고 간극비와 공극률이 큰 것은 성토부의 흙이 다른 사면에 비해 느슨함을 보여준다. 파괴면에서 매우 낮은 간극비와 공극률을 보이는 것은 사면활동에 의한 압밀로 인해 공극수가 소산된 결과로 생각된다.

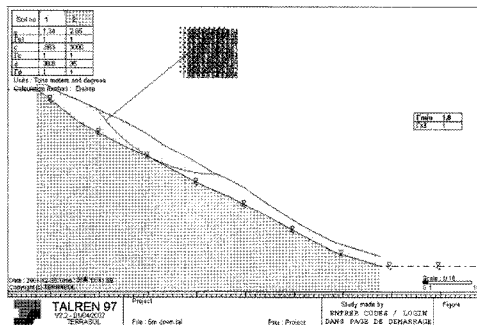
사면 구성물질의 입도분석시험 결과, 균등계수와 곡률계수는 전체적으로 불량한 입도분포를 지시한다. 즉, 자연사면에서는 모래와 자갈의 구성비가 높고, 성토부에서는 모래와 점토의 비율이 높다. 그리고 파괴면에서는 다른 두 지점에 비해 모래의 구성비가 상대적으로 낮은 결과를 보인다. 토층내의 투수계수는 실트질 지반에 해당하는 것으로 배수가 불량한 상태임을 보여주며, 자연사면과 성토부에 비해 파괴면에서 낮게 나타난다. 액소성한계 시험 결과, 성토부와 파괴면의 소성지수는 매우

낮고 자연사면은 액성한계와 소성지수가 높게 나타나는데, 이를 통해 마찰각이 상대적으로 낮고, 유동되려면 높은 함수상태가 되어야 함을 알 수 있다. 각 사면의 흙은 통일분류법에 따라 SC, SM 등으로 분류된다. 함수비는 자연사면과 성토부에 비해 파괴면에서 낮게 나타난다. 전단시험결과 자연사면의 점착력은  $8.63 \text{ t/m}^2$ , 성토부는  $6.69 \text{ t/m}^2$ 로 자연사면에서 다소 높고, 마찰각은 자연사면에서  $31^\circ$ , 성토부에서  $36.2^\circ$ 로 성토부가 더 높은 것으로 산정되었다.

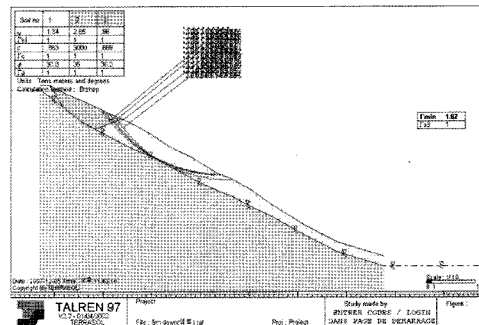
### 안정성해석

안정성 해석에 있어서 연구지역은 인공구조물이 설치되기 전의 원지반과 구조물이 설치된 이후의 복합지반으로 구분할 수 있다. 지반을 구분한 이유는 파괴면의 시점이 인공구조물의 말단에서 시작되므로 산사태 발생의 원인에 구조물 시공이 영향을 미쳤는지를 알기 위함이며, 만일 구조물이 시공되지 않아도 원지반이 경우에

Natural slope

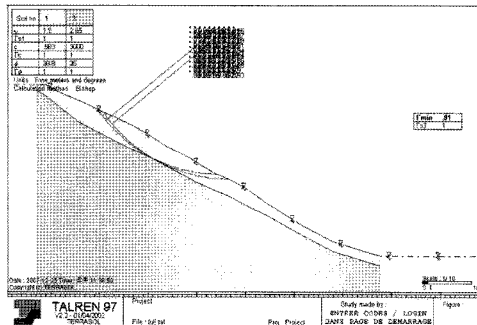


Complex slope

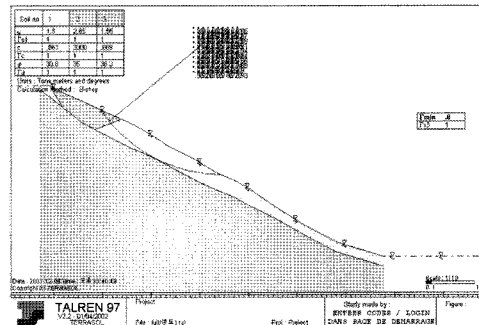


(a) Dry

Natural slope



Complex slope



(b) Saturated

Fig. 8. Results of slope stability analysis using TALREN 97

**Table 2.** Safety factor of 2D limit equilibrium analysis with changing groundwater level.

Groundwater level	Factor of safety	
	Natural slope	Complex slope
Dry	1.90	1.92
Saturated	0.78	0.77
-1m below the slope surface	1.03	1.02
-2m below the slope surface	1.30	1.29
-3m below the slope surface	1.56	1.54
-4m below the slope surface	1.77	1.75

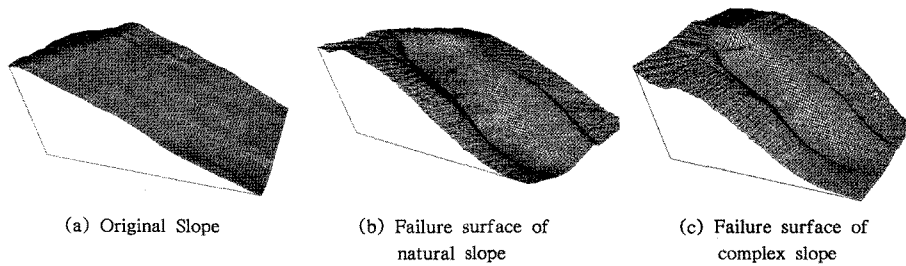
의해 영향을 받는다면, 지하수위의 변화가 어떤 심도에 도달해야 붕괴가 발생되는지를 파악하기 위해서이다. 해석방법은 2차원 및 3차원 한계평형해석을 실시하였다. 2차원 한계평형해석은 지하수위 변화에 따라 어떤 위치에서 사면이 가장 취약한지를 보여주며, 3차원 해석은 2차원 단면상에서 보여줄 수 없는 힘의 모멘트를 정의하고 활동력과 저항력의 크기와 방향을 추정할 수 있다. 2차원 해석에는 TALREN 97을 이용하였고, 3차원 해석에는 3D Slide Software를 사용하였으며, 해석에 사용된 물성치는 Table 1에 제시되어 있는 전단강도 값을 이용하였다.

**2D 한계평형해석**

TALREN 97은 한계평형상태에서 지반파괴면을 고려하는 사면안정해석법으로 원호 또는 비원호 파괴의 해석에 이용될 수 있다. 즉, 정적평형의 지반해석으로써 지반을 절편으로 분할하여 해석하며, 파괴면을 따라 일정

하다고 가정된 안전계수 $F$ 는 파괴면의 실제 전단응력  $\tau$  와 최대전단응력 $\tau_{max}$ 와의 비로써 결정된다.

TALREN 97을 이용한 2D 한계평형해석결과 건조시 는 원지반과 복합지반 모두 안전율이 1.9 이상으로 안정한 사면으로 나타났다(Fig. 8(a)). 포화시는 지구물리 탐사 해석을 통해 얻어진 토층심도 5m를 고려하여 지하수를 만수위로부터 1m씩 하강시키면서 안정성해석을 실시하였다(Table 2). 포화시의 해석 역시 지반조건과 물성치가 다름에도 불구하고 원지반과 복합지반 모두 비슷한 안전율 수치를 보여준다. 지하수위의 변화는 만수위에서 1m만 하강하여도 안전율이 1 이상 됨을 볼 수 있다. 프로그램 해석에서 알 수 있는 것은 해석상 가장 취약한 안전율을 보여주는 활동구간이 실제 파괴면의 발생지점과 일치한다는 것이다. 이를 통해 신계리 지구의 자연사면은 구조물 시공에 따른 지반물성 변화와 상관 없이 자연사면의 토층이 만수위가 될 경우 급격히 불안정한 사면이 됨을 알 수 있다.



**Fig. 9.** 3D configurations of the ground and failure surface of each slope.

**Table 3.** Safety factor of 3D limit equilibrium analysis with changing groundwater level.

Groundwater level	Factor of safety	
	Natural slope	Complex slope
Dry	1.909	1.909
Saturated	0.825	0.816
-1m below the slope surface	1.071	1.069
-2m below the slope surface	1.315	1.319
-3m below the slope surface	1.553	1.560
-4m below the slope surface	1.774	1.780

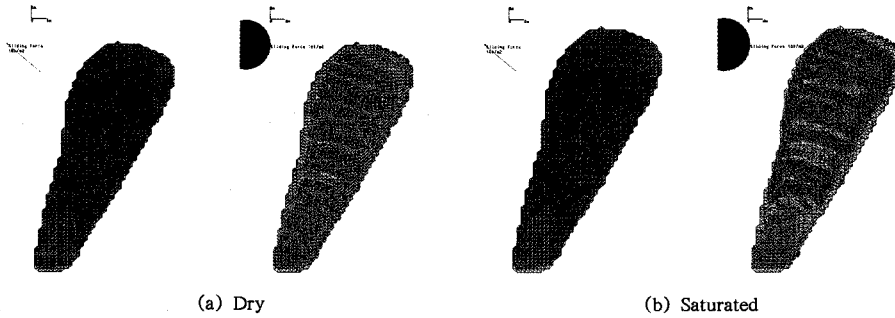


Fig. 10. Sliding forces and vectors of natural slope.

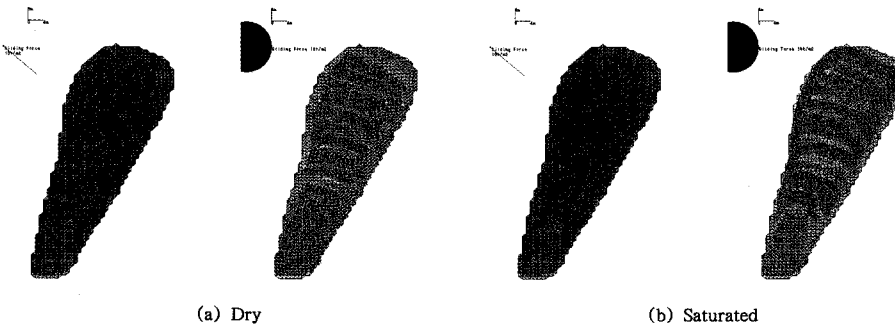


Fig. 11. Sliding forces and vectors of complex slope.

Table 4. Forces and factors of safety calculated by 3D limit equilibrium analysis.

Slope type	Condition of groundwater	Driving force (ton)	Resisting force (ton)	Factor of safety
Natural slope	Dry	2.026	3.869	1.909
	Saturated	3.014	2.508	0.825
Complex slope	Dry	2.068	3.949	1.909
	Saturated	3.050	2.489	0.816

3D 한계평형해석

2차원 사면안정해석은 실제 3차원적인 지형 형상을 2차원 단면상에서 표현할 수 없고 해석 수행에 있어서도 활동의 중심부와 가장자리와의 힘의 평형이 다를 수 있어 줄 수 없으므로 인해 안전율이 과다하게 설정될 수 있는 문제점이 있다. 따라서 본 연구에서는 2차원 사면안정해석 외에 현실적인 사면의 안전율과 활동력의 크기 및 방향을 알아보기 위해 3D Slide Software를 이용하여 3차원 사면안정해석을 수행하였다. 해석을 위해 수치지형도에서 추출한 원지반의 지형등고선을 표고 속성을 가진 3차원 데이터로 변환하였고, 활동면 데이터와 지하수위 데이터를 작성하였다(Fig. 9). 사면의 해석모델은 각 지점에 대해 건조시와 포화시로 가정하여 작성하였으며, 해석

에 사용된 지반정수는 Table 1에 제시되어 있다.

3차원 사면안정 해석 결과, 건조시는 자연사면과 성토부를 포함하는 복합사면의 안전율이 각각 1.9 이상으로 안정하게 나타났다(Table 3). 포화시는 지하수위를 만수위로 가정하고 1m씩 수위를 하강시켜 해석하면, 만수위로부터 -1m 이하로 갈수록 안전율이 1.0을 넘는 것으로 해석되었다. 이는 2차원 한계평형해석에서와 같은 결과를 보이는 것으로 수치에 있어서도 거의 유사하다.

Fig. 10과 11은 자연사면과 복합사면의 활동방향과 크기를 나타낸 것이다. 붉은색 벡터는 사면의 주 활동방향을 의미하며, 원으로 표현된 그림은 파괴면에 작용하는 힘의 상태를 보여주는 것으로 활동력과 저항력을 합한 응력의 크기로서 붉은색 원은 활동력이 우세하게 작용하는 요소주이며, 푸른색 원은 저항력이 우세하게 작용하



는 요소주이다. 스케일은 활동력 단위로  $10t/m^2$ 의 상대적인 크기를 나타낸다. 활동방향벡터는 상부의 파괴면에서부터 초록색 원으로 집중됨을 보여주며, 건조시에는 저항력이 우세하고 포화시에는 활동력이 우세함을 잘 보여준다.

3차원 해석에 의하여 도출된 활동력, 저항력 그리고 안전율을 정리하여 나타내면 Table 4와 같다. 한계평형 해석상에서 자연사면과 복합사면의 안전율은 거의 비슷하게 나타나지만 개별적인 활동력과 저항력은 흙의 밀도 차이에 의해 차별적인 것을 확인할 수 있다.

## 결 론

1. 토질시험은 성토부의 흙이 자연 사면에 비해 느슨한 흙으로 구성되어 있음을 보여준다.

2. 전단강도 시험결과 점착력은 자연사면에서 다소 높고, 마찰각은 성토부가 더 높다.

3. 2차원 및 3차원 사면안정해석 결과 지반조건과 물성치가 다름에도 불구하고 원지반과 복합지반 모두 비슷한 안전율 수치를 보이며, 지하수위의 변화에 따른 안전율은 만수위시 두 조건의 사면이 모두 불안정해짐을 알 수 있다.

4. 본 연구지역은 지반의 물성조건과 강도정수에 상관 없이 강우에 의해 지하수위가 만수위가 될 경우 산사태 발생 가능성이 높다. 또한 구조물에 의한 지반물성변화는 사면붕괴 요인에 미치는 영향이 비교적 미미함을 알 수 있다.

## 사 사

본 연구는 2006년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

구호본, 나경준, 조천환, 홍성원, 1990, 산사태와 강우의 관계, 대학토목학회 학술발표회 개요집, 393-396.  
 김경수, 2006, 산사태지역 토층사면의 지질조건별 토질 특성, 지질공학회지, 16(4), 359-371.  
 김경수, 김원영, 채병근, 송영석, 조용찬, 2005, 강우에 의해 발생된 산사태의 지질공학적 분석 - 용인·안성 지역을 대상으로 -, 지질공학회지, 15(2), 105-121.  
 김원영, 채병근, 김경수, 기원서, 조용찬, 최영섭, 이사로, 이봉주, 2000, 산사태 예측 및 방지기술연구, 한국자원연구소, KR-00-(T)-09.  
 이준용, 박형동, 2004, 산사태발생의 강우에 대한 의존도, 한국지구시스템공학회지, 41(1), 77-82.

조창수, 이희일, 서정희, 2002, 탄성과 굴절법 토모그래피를 이용한 지반의 속도분포 해석, 물리탐사, 5(1), 6-12.

진천도폭, 1980, 한국지질자원연구원.

Beyer, W. H., 1987, Handbook of Mathematical Sciences. 6th ed, CRC Press, Inc., Boca Raton, Florida, 860p.

IAEG Commission on Landslides, 1990, Suggested Nomenclature for Landslides, Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 41, 13-16.

Ikeya, Hiroshi, 1989, Debris flow and its countermeasures in Japan, Bull. of the IAEG, 40, 15-33.

Taylor, D. W., 1948, Fundamentals of Soil Mechanics, John Wiley and Sons, New York.

Varnes, D. J., 1978, Slope Movement Types and Processes, In special Report 176: Landslides: Analysis and Control(R. L. Schuster and R. J. Krizek, eds.), TRB, National Research Council, Washington, D. C., 11-33.

WP/WLI, 1990, A Suggested Method for Describing the Activity of a Landslide, Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 41, 5-12.

2007년 10월 30일 원고접수, 2007년 12월 13일 게재승인

## 이경미

충북대학교 지구환경과학과

361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)

Tel: 043-261-2765

Fax: 043-273-9645

E-mail: kmlee924@hanmail.net

## 김 현

충북대학교 지구환경과학과

361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)

Tel: 043-261-2765

Fax: 043-273-9645

E-mail: Icaluswings@hanmail.net

## 이재혁

충북대학교 지구환경과학과

361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)

Tel: 043-261-2765

Fax: 043-273-9645

E-mail: Zaqwe77@hanmail.net

**서용석**

충북대학교 지구환경과학과  
361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)  
Tel: 043-261-2765  
Fax: 043-273-9645  
E-mail: yssseo@cbu.ac.kr

**김지수**

충북대학교 지구환경과학과  
361-763, 충북 청주시 흥덕구 성봉로 410(개신동)  
Tel: 043-261-3201  
Fax: 043-273-9645  
E-mail: geop22@cbu.ac.kr