

상시 계측시스템을 이용한 붕괴 절토사면 거동 특성 분석 및 안정성 해석

백 용*¹⁾ · 구호본¹⁾ · 장기태²⁾ · 유병선³⁾ · 배규진¹⁾

¹⁾한국건설기술연구원 지반연구부, ²⁾국립구미공과대학교 토목공학과, ³⁾(주)GMG

The Stability and Characteristic Analysis of Cut Slope Behavior using Real-time Monitoring System

Yong Baek*¹⁾ · Ho-Bon Koo¹⁾ · Ki-Tae Jang²⁾
Byung-Sun Yoo³⁾ · Gyu-Jin Bae¹⁾

¹⁾Korea Institute of Construction Technology, Dept. Geo-technical Eng.,

²⁾Kumoh National Institute of Technology, Dept. Civil Eng.

³⁾GMG Corporation

토사면의 붕괴는 매년 해빙기와 여름철 집중호우기에 자주 발생한다. 본 연구는 지반의 거동에 대한 원인을 분석하고 향후 사면 붕괴의 거동을 예측하기 위하여 상시 계측시스템을 도입한 현장에서 수집된 자료를 해석한 것이다. 연구 방법으로 현장조사와 계측결과를 종합적으로 검토하여 붕괴 규모 및 붕괴 메커니즘을 분석하였다. 또한, 현장에 설치된 상시 계측시스템 전송 자료 분석과 수반하여 안정성 해석을 수행하였다. 본 절토사면은 총 17개의 신축계 센서를 설치하여 계측을 실시하였으며, 그 결과, 총 3회의 지반 변위가 발생하였고 부분적으로 다수의 인장균열이 발생하였다. 사암과 세일로 구성된 본 절토사면에서 집중호우와 하부 지지력 상실에 기인하여 초기 거동이 시작되었다. 지반거동 특성의 정량적 분석을 위하여 총 5개의 축선을 구성하여 계측을 실시하였다. 계측결과를 종합하여 보면 대책공법이 시공된 구간에서는 매우 미미한 변위가 발생되었으나, 대책방안이 마련되지 않은 구간에서는 최대 400mm 이상의 변위가 진행되고 있다. 변위 자료와 강우자료의 분석결과 지반의 거동과 강우와는 밀접한 관계가 있는 것으로 판단되었다. 지반의 포화도를 변화하면서 안정성 해석을 실시한 결과, 지반 포화도가 55% 이상 일때부터 안전율이 1.0이하로 나타나는 것을 알 수 있다. 현재의 지반거동 추이는 오차 범위내에 속하는 안정한 단계로 판단되어지나, 향후 동절기의 외부 온도 변화와 동반하여 지반의 변동이 우려되므로 인하여 지속적인 관찰과 자료 분석이 수행되어야 할 것으로 판단된다.

주요어 : 절토사면, 계측시스템, 신축계, 강우량, 대책공법

The failure of cut slopes frequently occurs particularly during the thawing season and the rain season in summer. This study interpreted data collected from site to which a real-monitoring system was applied in order to analyze the causes of ground behaviors and to forecast future slope failure. As for research methods, this study analyzed the size and mechanism of failure by integrating the results of field surveys and measurements. Furthermore, it analyzed data transmitted by the monitoring system installed in the a result, three times of ground displacement occurred as

*Corresponding author : baek44@kict.re.kr

well as a number of partial tension cracks. The cut slope composed of sandstone and siltstone started its initial behavior as a result of torrential downpour and the loss of support of the substructure. For quantitative analysis of the characteristics of ground behavior, this study measured 5 lateral lines. According to the result of the measurement, displacement happened little in the section to which countermeasure had been applied, but displacement of maximum 400mm happened in the section to which countermeasure had not been applied. The analysis of data on displacement and rainfall suggested a close relationship between ground behavior and rainfall. According to the result of stability interpretation along with the change of ground saturation, stability rate appeared to be less than 1.0 when ground saturation is over 55%. Although the current trend of ground behavior is at a stable stage falling within the range of tolerance, it is considered necessary to continue monitoring and data analysis because ground displacement is highly possible with the change of temperature during the winter.

Key words : cut slope, real-time monitoring system, extension meter, precipitation, countermeasures

서론

매년 발생하는 절토사면의 붕괴를 사전에 방지하고자 적지 않은 예산을 투자하여 대책을 수립하고 있다. 해빙기 및 여름철 게릴라성 호우로 인하여 붕괴가 발생하나 도로이용자에게 정보 제공은 매우 미약한 실정이다. 지반전문가 및 사면전문가 또한 절토사면의 붕괴를 미리 감지하여 대처하기는 지반의 불확실성 및 기존 기술의 한계로 어려움을 겪고 있다. 국내의 경우는 효율적인 국토 관리 차원에서 정책적으로 연구되는 사례 및 건설공사와 어울려 개별적인 사면 연구가 수행되고 있는 실정이다. 국가 정책 연구로 지리정보시스템(Geographic Information System, GIS)을 활용하여 수행되는 연구로는 국토의 경우, 절토사면에 대한 자료 분석에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(한국건설기술연구원, 2003). 자연사면 분야는 위험지도 작성 및 위험도 판단지역 선별에 역점을 두고 수행되고 있다(이천용, 2002; 한국자원연구소, 2000). 국외 경우를 살펴보면 홍콩은 지역적으로 산악지형에 형성된 도시로 인하여 사면 관리 선진국으로 많은 연구가 수행되고 있다(Dai et al., 2002). 일본의 경우도 산사태 위험지구를 관리하기 위하여 지반전문가 및 도로관리자에 의하여 안전점검을 실시하고 있다(Nakano and Milki, 2000).

최근 다양한 계측기기 및 첨단 계측장비의 활용으로 사면 붕괴를 예방하는 연구가 시도되는 단계이다. 국내 사면 계측에 대한 기존 연구로는 광섬유 센서를 이용한 실험적인 연구가 수행되었으며, 현장 실험으로는 간극수압계를 이용하여 사면에 계측기를 적용한 사

면이 최근 발표되고 있다(구호본 등, 2001, 이인모 등, 2003). 국외의 경우에는 수년 전부터 사면 모니터링 및 계측에 관한 연구가 진행되고 있었으며 계측기기별 적용성 연구, GPS, 강우계를 이용한 사면 모니터링 시스템 개발 및 계측연구가 진행되고 있다(Angeli et al, 2000; Corominas et al, 2000; Dai and Lee, 2001; Finlay et al, 1997; Gili et al, 2000; Matsuura et al, 2003).

본 연구에서 계측기기의 적용성 및 지반거동 특성 분석에 활용된 현장은 지난 2001년 7월 지반의 변동이 관측된 현장이다. 본 연구의 목적은 지반 거동과 계측기기를 설치 지반 거동을 분석하고 특성을 규명하는 것이다. 본 논문에 사용한 계측자료는 2003년 2월부터 2003년 12월 까지 수집된 10개월 간의 자료를 비교 분석한 것이다.

지질 및 현황

본 절토사면은 국토 34호선상에 위치하며 행정구역 상으로 경상북도 영덕군 지품면 황장재 정상부에 위치하고 있다. 본 절토사면을 구성하는 암석은 백악기 경상계 퇴적암인 적색 사암층의 일부인 적색사암과 세일이다. 암색은 적색에서 황갈색을 나타내고 있다(Fig. 1).

절토사면의 연장은 153m이며, 높이는 28m이다. 세부적인 현황은 Table 1과 같다. 절토사면내 불연속면은 층리면 방향은 032/15(dip direction/dip)와 수직인 2개의 절리군(285/85, 80/200)이 우세하게 관찰되고 있다. 풍화정도는 보통풍화에서 완전풍화의 등급이며 지질구조적인 특징으로 절토사면 방향과 사교하는 대규모 단층이 관찰되고 있다. 절토사면내 일부 인장균

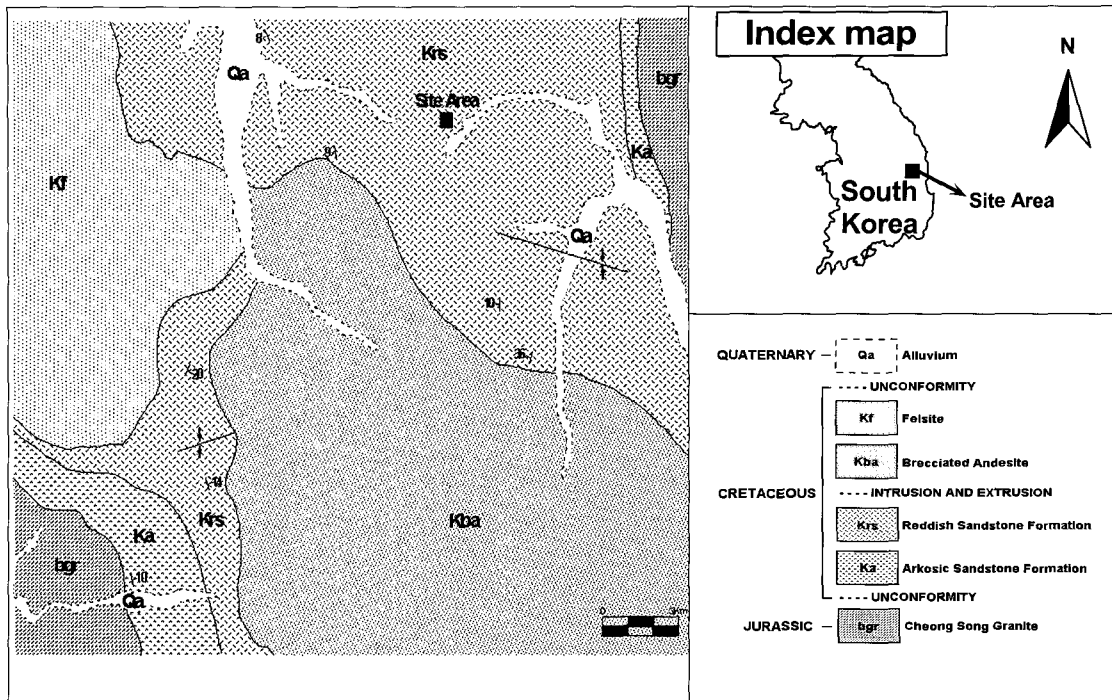


Fig. 1. A geological map in the study area

Table 1. Information on the slope in HwangJang area.

	width of road (m)	length of slope (m)	hight of slope (m)	direction	rock fall (m ³)	distance to road (m)	berm (m)	drainage system
data	13	153	28	N20W, 45SW	50	3~5	2	none

열이 발생하였으며 붕괴 원인으로는 차별풍화에 의한 지지력 약화로 일부 구간에서 붕괴 암괴가 이동하여 대규모의 붕괴가 발생된 것으로 사료된다.

절토사면내 인장균열의 상황을 살펴보면 단속적인 인장균열이 발달되어 있으며 최대인장균열의 연장은 15m에 달하고 있으며 이동 암괴의 낙차는 최대 1.0m에 달하고 있다. 인장균열의 폭은 최대 1.5m이며 방향은 190/80이다(Fig. 2).

인장균열부의 절토사면 안정화 대책공법으로 시점부에서 70m까지 계단식 옹벽 및 지지식 2단 앵커를 병행 시공하여 절토사면의 안정화를 도모하고 있다. 상부부분에 발달하는 인장균열 및 암괴가 이완된 블록에 대하여는 그라우팅을 실시하여 이완된 암반의 균열부를 일체화하는 방안이 제시되었다. 중점부에는 반중력식 옹벽 및 전도방지용 앵커를 설치하여 암반의 거동

을 억제하도록 설계되어 있다. 반면, 현시점에서 중점부의 대책방안은 미시공된 상태이다. Fig. 3은 지반 거동이 발생한 시점인 2001년 7월 1차 조사 당시의 상황을 나타낸 사진이며 Fig. 4는 항구 대책공법안으로 적용된 계단식 옹벽의 시공후 측면사진이다.

붕괴 특성

붕괴 규모

사면 붕괴의 규모를 파악하기 위하여 IAEG (International Association of Engineering Geology, 1990)에서 제안한 모식도(Fig. 5)를 이용하여 규모를 분석하였다. 붕괴 규모에 대하여는 붕괴 양상을 타원체로 가정하고 다음 식 (1)에 의하여 붕괴 토체량

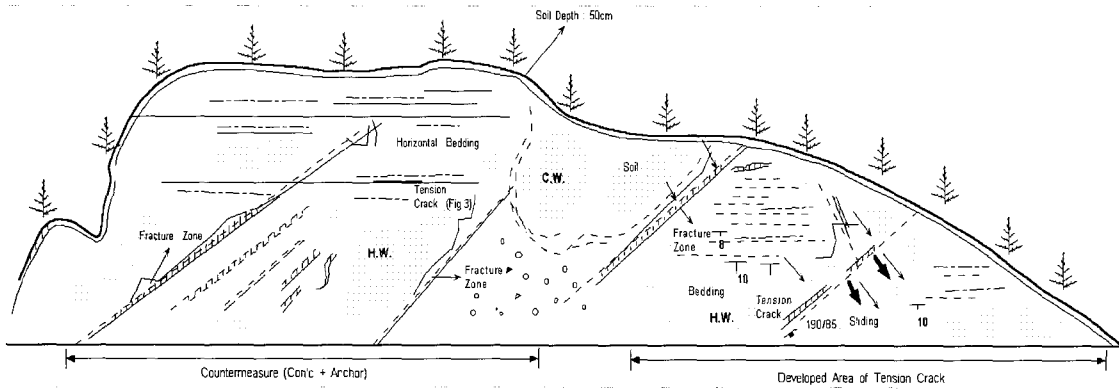


Fig. 2. The face mapping in the study area.



Fig. 3. Tension crack in the cut slope.

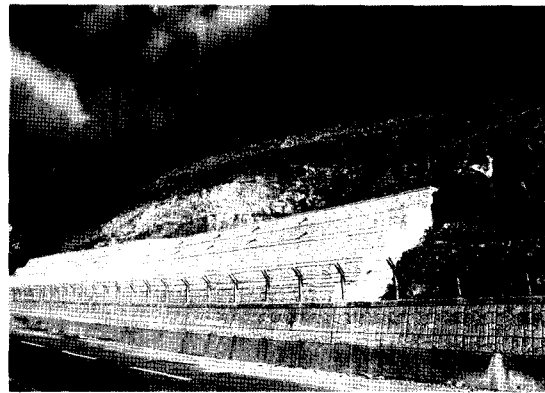


Fig. 4. Recovery after cut slope failure.

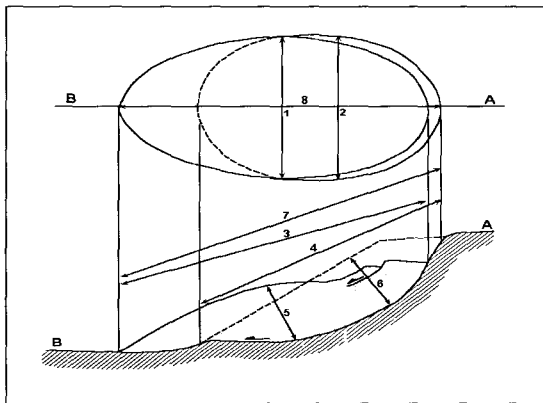
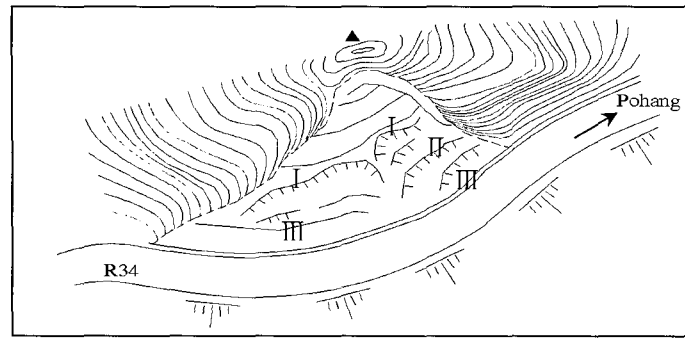


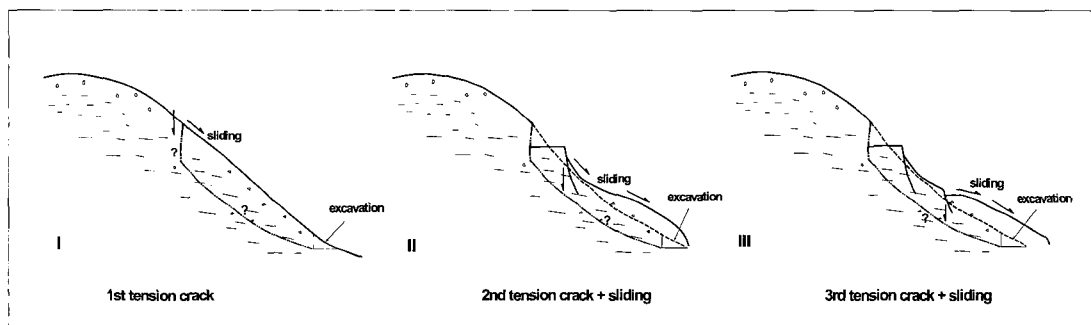
Fig. 5 A diagram of failure dimension in slope slide (IAEG, 1990).

($V_{landslide}$)을 계산하였다. 지중 변형계측결과와 현장 조사결과 붕괴 심도가 6.0m, 붕괴 폭이 35m, 붕괴 길이가 28m로 붕괴규모는 $3,077.2m^3$ 로 분석되었다.

- *1. Width of displaced mass, W_d
- 2. Width of surface of rupture, W_r
- 3. Length of displaced mass, L_d
- 4. Length of surface of rupture, L_r
- 5. Depth of displaced mass, D_d
- 6. Depth of surface of rupture, D_r
- 7. Total length, L
- 8. Length of center line, L_{cd}



(a) A plane figure of failure cut slope



(b) A diagram of progressive failure

Fig. 6. The plane figure and inferred progressive diagram of failure slope.

$$V_{\wedge slide} = \frac{1}{6} \pi D_r \cdot W_r \cdot L_r \quad (1)$$

붕괴 메카니즘

본 절토사면의 붕괴는 전체 3번의 지반변이가 발생하였으며 부분적으로 1번의 인장균열이 발생한 것으로 추정한다. 해당 절토사면의 붕괴에 대한 메카니즘을 살펴보면 Fig. 6과 같이 나타낼 수 있다. Fig. 6(a)는 본 절토사면의 평면도를 나타낸 것이며, (b)는 붕괴 진행과정을 도시한 단면을 보여준다. 지반이동의 발생기구는 크게 퇴행형(retrogressive type)과 전진형(progressive type)으로 구분할 수 있다(신윤식, 1998). 본 현장의 경우, 초기 지반의 활동은 하부 지지력의 제거에 의하여 인장균열이 발생하였다. 이후 교란된 지반은 여름철 강우와 동반하여 전진형 사면 붕괴의 형태로 재활동(reactivation)한 것으로 해석된다.

상시 계측시스템 설치 및 자료 수집

계측기기 설치

본 현장에는 지반 변형의 거동을 살펴보기 위하여 신축계(tension wire sensor, T/W sensor)를 이용하였다. 신축계에 의한 방법은 붕괴 예상구간 2점간의 거리 변동을 계측하여 지표면의 변위에서 붕괴의 변동상태를 파악하는 것이다. 또한, 지표의 변동이 나타나기 쉬운 장소에 적당한 간격으로 2개의 말뚝을 견고하게 타설하였다. 한쪽 끝에 강선을 고정시키며 반대쪽은 도르래를 이용 강선을 긴장시킨 상태로 신축량이 측정되도록 설계되었다.

본 현장의 경우, 절토사면 내 인장균열의 거동 뿐만 아니라 계단식 옹벽의 거동도 추가로 측정하기 위하여 대표적으로 총 5개의 단면을 선정하였다. 각 단면마다



Fig. 7. Monitoring instrument in the cut slope.

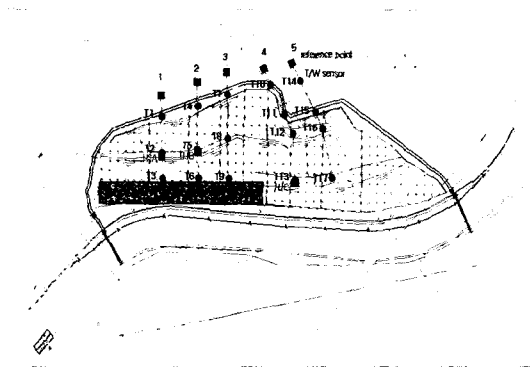


Fig. 8. Installation map of measuring system in the cut slope.

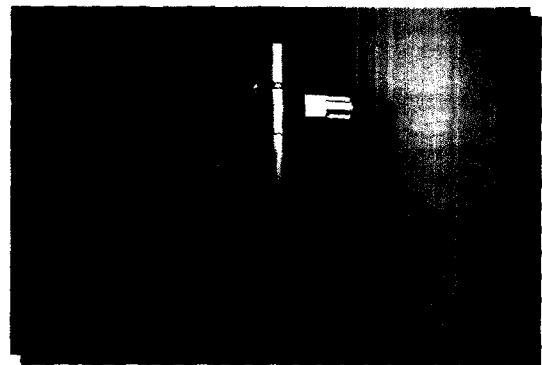


Fig. 9. The photograph of tension meter (right pencil is scale).

3개에서 4개의 계측센서를 설치하고 총 17개 신축계 센서를 부착하였다. 계측센서 평면도는 Fig. 7, 8과 같다. 적용된 신축계 센서의 특징을 살펴보면 센서의 정밀도는 $\pm 0.1\text{mm}$, 가용온도는 $-80\sim 120^\circ\text{C}$, 재질은 스테인리스 스틸/특수 플라스틱으로 되어 있다(Fig. 9).

자료 수집

개발된 시스템은 계측센서에서 측정된 자료가 네트워크 전송시스템을 통하여 관리자에게 자동으로 전송되도록 설계되었다. 기존의 방식은 현장에서 측정자가 자료를 수집하여야 하며 자료 전송에 많은 문제점을 안고 있었다. 본 연구에서는 기본적으로 신축계에서 발생한 계측결과치에 대하여 무선전화기를 이용하여 쌍방향 통신을 통하여 계측이 가능하도록 하였다. 또한, 무선 원격이 가능한 시스템으로 구성되어 있으

며 현장에 설치된 계측기로부터 원격지 센터에서 자동으로 측정하여 데이터를 무선전송 받을 수 있도록 하였다. 메인센터에서 일정시간 간격으로 제어기에 측정 명령을 내리면 이 명령은 무선 데이터로 바뀌어 현장의 제어기로 전달되며 제어기는 전달받은 명령에 따라 Multiplexing 기능을 사용하여 원하는 센서의 값을 실시간으로 측정하고, 이 측정값을 무선 데이터로 센터에 전송 저장하게 하게 되어 있다.

계측 결과 분석

상기에서 전송한 시스템과 센서를 이용하여 수집된 자료를 분석하였다. Fig. 10~15은 신축계 설치 5개 단면에 대한 계측결과를 나타낸 것이며, Fig. 15는 단면별 평균치를 구하여 전체적인 경향을 분석한 것이다.

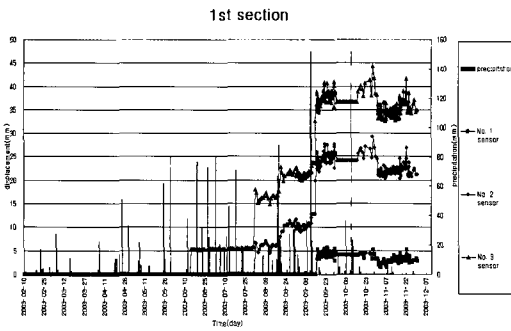


Fig. 10. The analyzed result of measuring data in the 1st section.

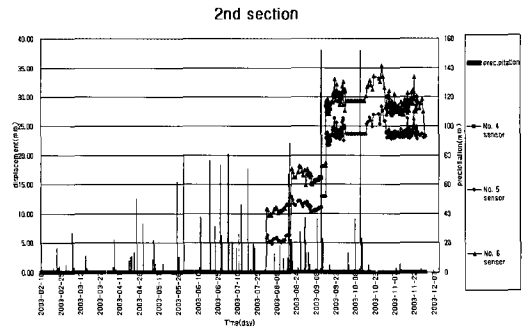


Fig. 11. The analyzed result of measuring data in the 2nd section.

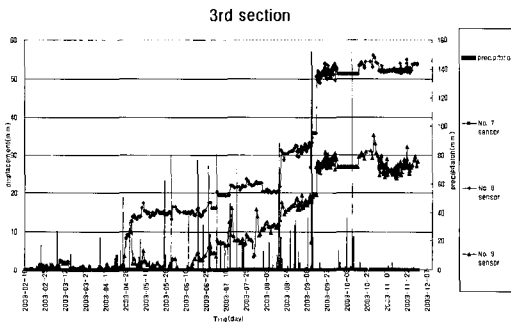


Fig. 12. The analyzed result of measuring data in the 3rd section.

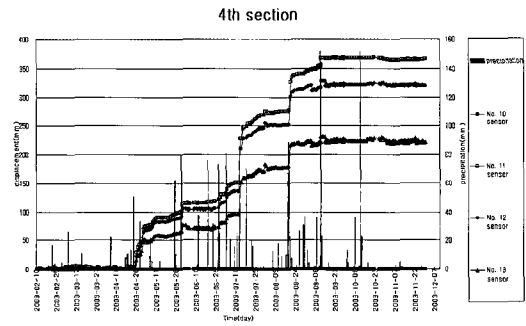


Fig. 13. The analyzed result of measuring data in the 4th section.

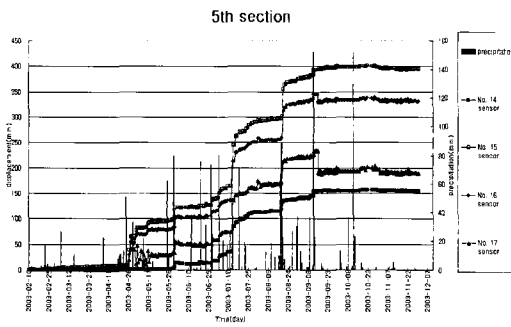


Fig. 14. The analyzed result of measuring data in the 5th section.

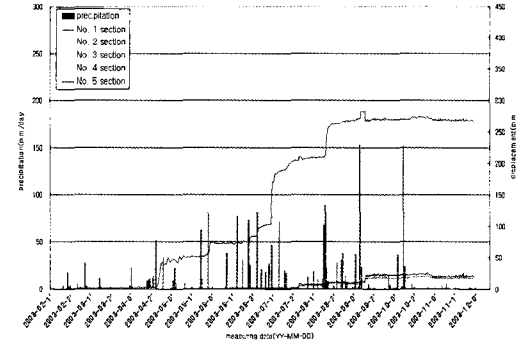


Fig. 15. The analyzed result of average data in each section.

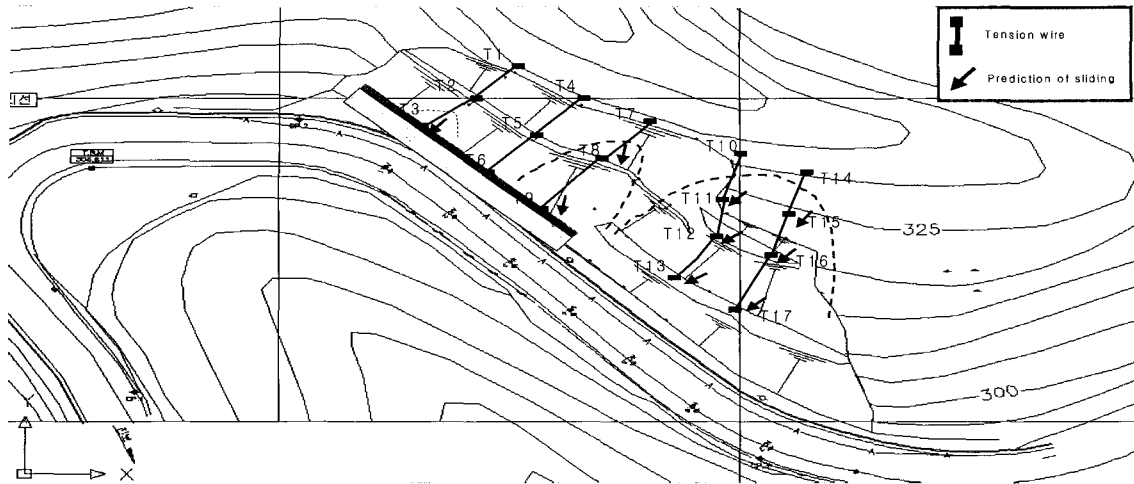


Fig. 16. The analyzed results of displacement data.

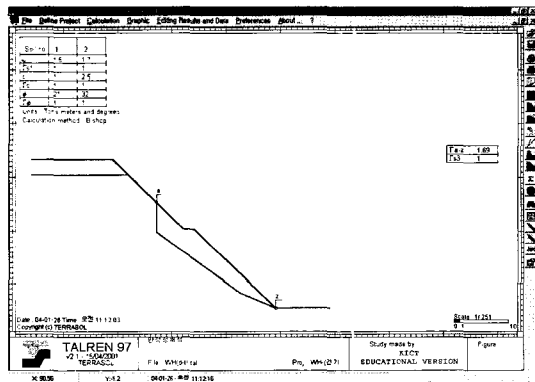


Fig. 17. The result of stability analysis under dry condition using the Talren 97.

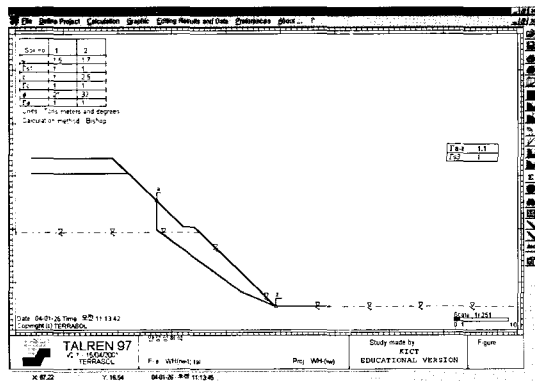


Fig. 18. The result of stability analysis under wet condition using the Talren 97.

Fig. 15에서 보듯이 최대 변이를 발생한 계측센서는 T-15로 누적변이량 400mm에 해당되며, 다음으로 T-11, T-16번 센서가 이동이 심한 것으로 나타났다.

또한, Fig. 12의 T-8번 센서는 변이량이 52mm로 다소 적은 양으로 나타났으며 점차 수렴되는 양상을 보이고 있다. 수집된 자료를 검토한 결과 절토사면의 하단부 계단식 옹벽이 설치된 구간은 지반의 거동을 인지하기 어려울 정도이나 하부의 대책방안이 미설치된 구간은 절토사면이 점차 이동(sliding)하고 있는 양상으로 나타났다. 또한, 강우량과 이동량과도 매우 관계가 밀접하여 강우가 집중될 때 변위 발생이 두드러지게 나타나고 있는 것이 지시되고 있다.

수집된 자료를 이용하여 벡터량으로 환산하여 평면도에 도시하면 Fig. 16과 같다. 결과 붉은색 점선의 방향으로 지반이 거동하는 것으로 분석되었다. 향후 동절기를 맞아 동결 융해 작용의 영향으로 다소간의 거동이 예상되고 있으나 현재 계측결과에서는 지반의 거동이 없는 것으로 판단된다.

안정성 해석

절토사면의 안정성을 해석하기 위하여 한계평형해석법을 이용하여 안정성 해석을 실시하였다. 본 연구에서는 한계평형상태에서 지반파괴면을 고려하여 TALREN 97을 이용하였다. 붕괴 추정면을 연약대로 추정하고 지반강도 물성치를 설정하였으며 암반의 물성치는 현장조사 자료를 인용하였다(한국건설기술연구원, 2002). 해석조건으로는 건기시와 우기시로 구분하였으며 우기시는 지반의 포화상태를 변화하면서 해

Table 2. The result of stability analysis with the saturation rate.

saturation rate(%)	safety of factor
0	1.69
30	1.41
50	1.10
55	1.0
60	0.96
70	0.91

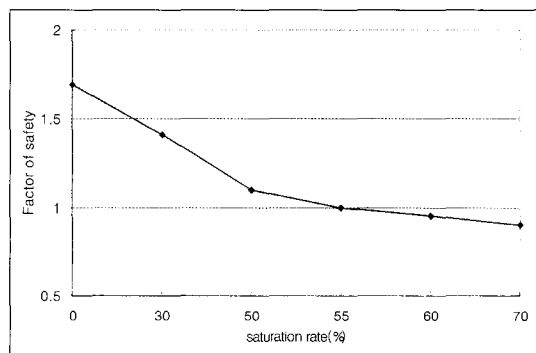


Fig. 19. The relationship between factor of safety and saturation rate of a cut slope.

석하였다. Fig. 17과 18은 건기시의 상태를 나타낸 결과이며 Fig. 18은 우기시 지반 포화도가 50% 상태를 나타낸 결과이다. 해석결과 안전율(Fs)은 건기시의 경우, 1.69로 도로설계 기준에 적합하였다. 반면 지반 포화도를 변화해 가면서 안전율을 검토한 결과, Fig. 19와 같은 그래프를 얻을 수 있으며 포화도가 55%일 경우 불안정한 상태로 전이되는 것을 알 수 있다. 지반포화도와 안전율과의 결과를 정리하면 Table 2와 같다.

결 론

최근 절토사면 붕괴를 적극적으로 대비하기 위해 계측시스템을 개발하여 대책을 마련하는 연구가 시도되고 있는 상황이다. 본 연구는 상시계측시스템 기술을 개발하고 현재 시범지구로 지정 운용 중에 있는 울진군 지품면 황장지구를 선정하여 수집된 자료와 결과

를 분석한 것이다.

연구결과를 정리해 보면 다음과 같다.

1. 본 절토사면 붕괴는 현장 조사자료와 계측결과 자료를 분석한 결과, 3,077m³의 토체가 이동을 하였으며, 총 3단계의 지반 거동이 인지되었으며 전진형 붕괴 형태를 나타낸다.

2. 지반의 거동은 강우와 매우 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났으며 현재에는 안정화 단계에 있는 것으로 판단된다. 현장에 적용된 대책공법은 1단면에서 3단면까지는 계단식옹벽과 인장균열부에 대한 그라우팅공을 시공하여 절토사면을 안정화 하고 있으나 4단면과 5단면에는 L형 측구와 낙석방지울타리만 시공되어 있어 항구 대책공법의 조속한 보강이 필요할 것으로 본다.

3. 지반의 거동을 파악하기 위하여 총 17개의 신축계를 설치하여 분석한 결과 단면별로 보면 대책공법이 시공된 1, 2, 3단면의 경우는 최대 변이 발생이 T-8지점이 52mm이다.

4. 반면 대책공법이 마련되지 않은 4, 5단면의 경우는 최대 변이 발생이 T-15지점이 400mm에 달하고 있다.

5. 붕괴 상태를 고려하여 안정성 해석을 실시한 결과, 건기시와 우기시로 구분하여 안전율을 산출하였다. 우기시의 경우, 지반의 포화도가 55%일 때 안전율이 1.0이하로 떨어져 불안정한 상태로 되는 것을 나타낸다.

향후 연구 방향은 현재의 계측결과와 동절기 외부 온도의 변화에 기인한 변이 발생 등의 변화에 대한 연구를 지속적으로 수행하여야 할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 건설교통부에서 지원하는 2003년 건설기반 기술혁신사업의 일환 (과제번호 C103A100013-03A0200-01310) 에 의하여 실시된 연구의 일부임을 밝히며, 동기관에 감사의 뜻을 표하는 바이다.

참고문헌

구호분, 백용, 三木博史, 2001, 광섬유 센서를 이용한 산사태 계측기법 개발, 한국건설기술연구원, 165p.
 신윤식, 1998, 최신 토픽스 지반활동공학-사면안정해석이론대책, 원기술, p.55~77.
 이인모, 조우성, 김영욱, 정상규, 2003, 풍화토 사면에

- 서 강우로 인한 간극수압 변화에 대한 실험 연구, v.19, n.1, p.41~49.
- 이천용, 최경, 이종학, 이창우, 2002, GIS를 이용한 산사태 위험지도 작성기법 개발, 산림과학논문집, v.65, p.1~10.
- (주)GMG, 2003, 국토 34호선 황장 2지구 낙석·산사태 위험지구 상시 계측시스템 설치 공사 계측보고서, 포항국도유지건설사무소, 건설교통부 p.52.
- 한국건설기술연구원, 2002, 도로절개면 안정성 해석 및 대책IV, 건설교통부, p.250.
- 한국건설기술연구원, 2003, 도로절토사면 유지관리 시스템 개발 및 운용, 건설교통부, p.302.
- 한국자원연구소, 2000, 산사태 예측 및 방지기술 연구, 과학기술부, p.642.
- Angeli, Maceo-G., Pasuto, A., and Silvano, S, 2000, A Critical Review of Landslide Monitoring Experiences, Engineering Geology, v.55, p.133~147.
- Corominas, J., Moya, J., Lloret, A., Gili, J. A., Angeli, M. G., Pasuto, A., and Silvano, S., 2000, Measurement of Landslide displacements using a Wire Extensometer, Engineering Geology, v.55, p.149~166.
- Dai, F. C., and Lee, C. F., 2001, Frequency-Volume Relation and Prediction of Rainfall-Induced Landslides, Engineering Geology, v.59, p.253~266.
- Dai, F. C., Lee, C. F., and Ngai, Y. Y., 2002, Landslide risk assessment and management: an overview, Engineering Geology, v.64, p.65~87.
- Finlay, P. J., Fell, R., and Maguire, P. K., 1997, The relationship between the probability of Landslide occurrence and rainfall, Canadian Geotechnical Journal, v.34, p.811~824.
- Gili, J. A. Corominas, J., and Rius, J., 2000, Using Global Positioning System Techniques in Landslide Monitoring, Engineering Geology, v.55, p.167~192.
- IAEG Commission on Landslides(1990), "Suggested Nomenclature for Landslides", Bulletin of the International Association of Engineering Geology, No. 41, pp. 13~16.
- Matsuura, S., Asano, S., Okamoto, T., and Takeuchi, Y., 2003, Characteristics of the Displacement of a Landslide with Shallow Sliding Surface in a Heavy Snow District of Japan, Engineering Geology, v.69, p.15~35.
- Nakano, J., and Miki, H., 2000, Risk Evaluation Method for Rock bed and Slope Failures in Road Disaster Management, An International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, p.83.
- Turner, A. K., and Schuster, R. L., 1996, Landslides Investigation and Mitigation special report 247, National Academy of Science, p.673.

투 고 일	2004년 1월 29일
심 사 일	2004년 1월 30일
심사완료일	2004년 2월 25일

백 용

한국건설기술연구원 지반연구부
411-712 경기도고양시 일산구 대화동 2311
Tel: 031-910-0228
E-mail: baek44@kict.re.kr

구호본

한국건설기술연구원 지반연구부
411-712 경기도고양시 일산구 대화동 2311
Tel: 031-910-0217
E-mail: hbkoo@kict.re.kr

장기태

국립구미공과대학교
730-070 경북 구미시 신평동 188번지
Tel: 054-467-4243
E-mail: ktchang@kumoh.ac.kr

유병선

(주)GMG
411-712 경북 구미시 형곡동 143-8
Tel: 054-456-6444
E-mail: bsyoo@kumoh.ac.kr

배규진

한국건설기술연구원 지반연구부
411-712 경기도고양시 일산구 대화동 2311
Tel: 031-910-0212
E-mail: gjbae@kict.re.kr