

Hotelling의 T-square 통계량을 이용한 강우유발 사면붕괴 예측

김슬비¹ · 나종화² · 서용석^{1*}

¹충북대학교 지구환경과학과, ²충북대학교 정보통계학과

Prediction of Rainfall-Induced Slope Failure Using Hotelling's T-Square Statistic

Seul-Bi Kim¹, Jong-Hwa Na², and Yong-Seok Seo^{1*}

¹Dept. of Earth & Environmental Sciences, Chungbuk National University

²Dept. of Information Statistics, Chungbuk National University

Received 6 June 2015; received in revised form 16 July 2015; accepted 20 July 2015

본 연구에서는 화강암 풍화토와 편마암 풍화토를 대상으로 모형시험 수행 중 획득한 간극수압, 함수비 데이터를 대상으로 Hotelling의 T² 분석을 실시하여 사면의 이상거동을 감지할 수 있는 기법을 개발하였다. 각 시험에서는 간극수압 3개와 함수비 3개가 동시에 측정되며, 이들의 상관관계를 이용하여 신뢰구간 95.0%와 90.0%를 기준으로 T² 통계량을 계산하였다. 분석결과에 의하면 모형사면 내의 국부적인 붕괴는 센서 위치에 따라 감지하지 못하는 경우가 있으며, 사면 전체붕괴의 경우 수백 초에서 수천 초 전에 T² 통계량이 신뢰구간 90%를 초과하여 이상거동을 감지할 수 있었다. Hotelling의 T² 분석은 동일 사면 내 다양한 측정치 간의 상관성을 분석할 수 있어 유일한 관리기준치를 설정할 수 있으며, 신뢰도 수준에 따라 단계적인 예경보 기준설정이 가능하다.

주요어: 모형시험, 강우, 간극수압, 함수비, Hotelling의 T² 통계량

A new technique is presented to detect unstable slope behavior, based on Hotelling's T² analysis of pore pressure and water content obtained during flume tests using granitic and gneissic weathered soils. Three sets of pore pressure-water content values were simultaneously obtained during each test, and T² statistics at the 90.0% and 95.0% confidence levels were calculated based on the correlations between values. The results show that unsuccessful detection of some local failures of the flume slope depended on the sensor position. In the case of global slope failures, anomalous behavior was detected between several hundred and several thousand seconds before the event as T² statistics exceeded the confidence interval 90%. Hotelling's T² analysis provides a single control criterion because it enables correlations between diverse measured values within the same slope; the criterion also includes stepwise criteria for a forecasting and warning system based on confidence levels.

Key words: flume test, rainfall, pore pressure, water content, Hotelling's T² statistic

*Corresponding author: ysseo@cbu.ac.kr

© 2015, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

산사태는 사면 아래로 작용하는 힘이 흙 입자 사이의 점착력과 사면의 마찰력보다 큰 경우에 발생한다. 일반적으로 산사태를 유발하는 외적요인으로는 집중강우, 급격한 해빙, 사면 하부에서의 수위변화, 지진 등이 있으며, 집중강우가 산사태 발생의 가장 주요한 유발요인이다(Wieczorek, 1996; Crosta and Frattini, 2008). 강우는 토층 내 흙의 체적함수비 및 단위중량을 증가시키고 간극수압의 상승을 유도하여 전단강도를 저하시키기 때문에 자연사면 붕괴의 주요한 원인으로 작용한다. 또한 표면유수의 침투로 인한 표층의 침식 및 파이프(piping) 현상으로 사면 내 국부과파 등이 발생하여 사면에 분포하는 전반적인 원지반의 안정상태를 저하시킨다(Brand, 1981; Yoshida et al., 1991; Meilani et al., 2005; Kim and Nishigaki, 2006; Lee et al., 2006; Kim and Jeong, 2008).

강우에 의해 유발되는 산사태에 대한 조기경보체계 수립은 사면재해 피해예방을 위해 매우 중요하다(Yune et al., 2010). 산사태 발생의 취약성 및 예측을 위한 연구들은 경험적·통계적 조사자료에 근거하여 지역단위로 지형 및 지반의 특성을 조사하여 산사태 발생가능성을 예측하는 방법으로 접근되어 왔다(Kang et al., 1993; Kim et al., 2003; Hong et al., 2004; Lee et al., 2012). 그리고 산사태 발생과 강우의 상관성에 관한 연구들은 토석류를 유발하는 임계강우기준 설정, 선행 일강우량 산정(Caine, 1980; Oh and Park, 2014)을 통하여 산사태 조기경보를 위한 강우기준 설정을 위한 연구들이 진행되고 있다.

Crozier (1986)는 산사태 발생에 미치는 선행 일강우량(antecedent daily rainfall)의 영향도 분석에서 시간에 따라 저감되는 선행강우 효과에 대해 감소계수(decay coefficient)를 적용하였으며, Huang and Yuin (2010)은 얇은 흙사면에 인공강우를 침투시켜 함수비와 지하수위 변화를 I-D (rainfall intensity-duration) 그래프에 적용하여 사면붕괴를 예측한 바 있다. Collins and Znidarcic (2004)는 불포화사면에서 강우침투에 의해 변화하는 간극수압을 구성식으로 제한하여 사면안정성을 평가하였고, Reid (1994)는 지표에서의 강우강도/기간과 사면내부의 간극수압 간의 수리학적 관계 설정을 통해 간극수압 확산모델을 제시하였다.

Kim et al. (2014)은 시간당 200 mm라는 극한강우조건 하에서 화강암 풍화토와 편마암 풍화토를 대상으로

실시한 실내모형시험 중 획득한 간극수압 및 함수비 데이터를 대상으로 x-MR 단변량 통계분석법을 적용하여 사면의 이상거동을 감지하는 기법을 제안한 바 있다. 이 기법은 개별센서에 대한 감지확률이 높은 장점에도 불구하고 감지센서의 위치와 종류에 따라 예측시간에서 차이를 보이며, 데이터 오류를 이상거동으로 판단하는 단점이 있었다. 본 연구에서는 이러한 문제점들을 보완하기 위하여 다양한 센서들의 상관성을 고려하여 예측시점을 단일화 하고, 일부 센서의 오류를 걸러낼 수 있도록 다변량 분석 중 T^2 관리도 분석을 적용하여 사면의 이상거동을 감지할 수 있는 기법을 개발하였다.

실내시험 및 시료

본 연구에서 분석에 사용한 기초 자료는 Kim et al. (2014)에 의해 제시된 산사태 모형시험 결과(Fig. 1)와 동일하며 이를 요약하면 다음과 같다. 모형시험장치는 사면의 경사를 조절할 수 있으며, 크기는 길이 2.0 m, 폭 0.3 m, 높이 1.4 m이고, 상부토조, 경사토조, 하부토조 및 강우장치로 구성되어 있다. 각 실험에서 모형사면은 균질한 토사로 이루어져 있기 때문에 사면거동을 감지할 수 있는 센서를 등간격으로 설치하였으며, 경사토조의 하단으로부터 0.1 m, 0.3 m, 1.3 m에 간극수압계, 0.25 m, 0.7 m, 1.15 m에 ADR 함수비 센서를 설치하여 10초간격으로 데이터를 획득하였다. 모형시험에 사용된 시료는 경북 상주지역에서 채취한 화강암 풍화토(GR)와 전북 장수지역에서 채취한 편마암 풍화토(GN)이며, 통일분류법에 의한 흙의 분류에 의하면 SP에 해당한다. 시험조건으로는 극한강우조건 하에서 발생하는 산사태 실험을 위해 강우강도를 200 mm/hr로 설정하였으며, 토조 내 시료의 초기함수비는 7%~22%, 사면경사는 25°~35° 범위에서 설정하고 시험을 반복적으로 수행하였다.

붕괴예측 분석

분석이론

다변량 통계분석은 통계적으로 종속변수의 상관성을 고려한 상태에서 여러 개의 종속변수를 동시에 분석하는 통계적 방법이다. 개별적인 데이터 계열을 분석하는 단변량 분석은 상관성 있는 변수들이 결합하여 임의의 공정에 미치는 영향을 간과하기 때문에 공정과정에 대한 잘못된 판단을 유도할 수 있다. 본 연구에서는 모형사면 내 3지점에 설치된 간극수압, 함수비 센서에서 획

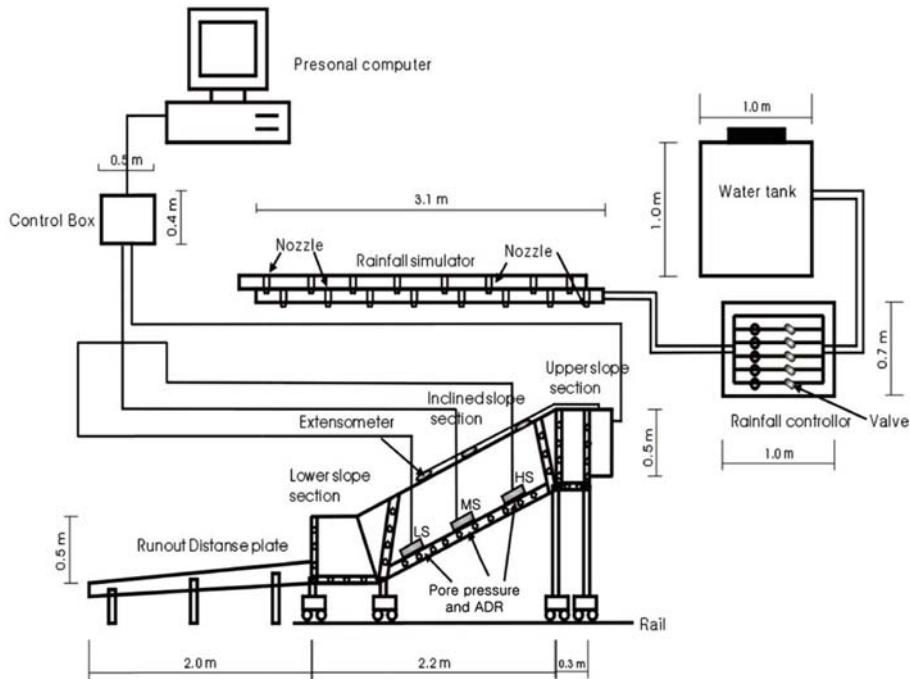


Fig. 1. Configuration of the flume test equipment (a side view).

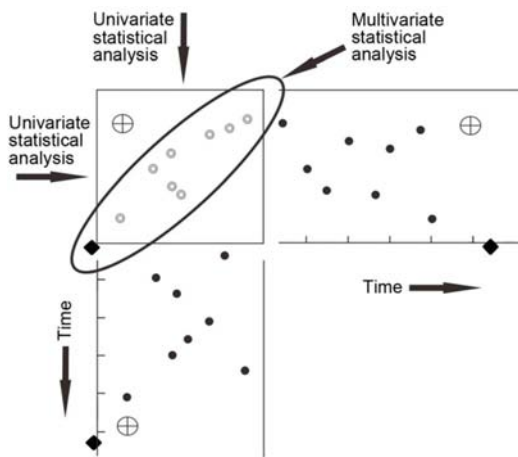


Fig. 2. Comparison of univariate versus multivariate statistical analysis (Kourti and MacGregor, 1995).

특한 시계열 데이터를 종속변수로 설정하고 다변량 분석을 실시하였다. Fig. 2는 데이터를 각각 분석하는 단변량 분석보다 동시에 분석하는 다변량 분석을 실시함으로써 더 나은 민감도를 얻을 수 있다는 것을 보여준다. 개별 데이터를 분석하면 관리상한선과 관리하한선을 초과하는 데이터(◆)는 이상상태로 판단되고, 관리범위

내에 포함되는 ⊕ 점은 정상상태로 판단된다. 하지만 단변량 분석에 사용된 데이터(●)가 상관관계가 있으면 다변량 분석을 통해 ⊙로 타점되고, 관리 타원(control ellipse)이 설정되며, 이 경우 단변량 분석 결과와는 달리 관리 타원을 기준으로 내부에 타점된 ◆점은 정상상태로, ⊕ 점은 이상상태로 판단된다.

Hotelling의 T^2 통계량은 하나의 관측값이 다변량 정규분포의 중심에서 얼마나 떨어져 있는가를 측정하는 값으로 식 (1)과 같이 산정된다. 여기서 \bar{x} 는 i 번째 부분군의 평균벡터, $\bar{\bar{x}}$ 는 \bar{x} 의 평균, S 는 표본공분산 행렬, n 은 부분군 크기, n_s 는 부분군이다. T^2 관리도는 식 (1)에 의해 계산된 T^2 통계량으로 모니터링을 수행하며, 관리한계선을 넘어 타점되는 경우를 이상상태로 간주한다. 관리한계선은 공정이 안정되어 있다는 가정 하에서 T^2 통계량이 자유도 m 과 $gn - g - m + 1$ 의 자유도를 갖는 F-분포를 따른다는 사실로부터 유도된다(식 (2)).

$$T_i^2 = n(\bar{x}_i - \bar{\bar{x}})' S^{-1} (\bar{x}_i - \bar{\bar{x}}) \quad (1)$$

$$\frac{m(g-1)(n-1)}{gn-n-m+1} T^2 \sim F_{(m, gn-g-m+1)} \quad (2)$$

T^2 관리도의 관리한계선은 α 를 이용하여 식 (3) 및

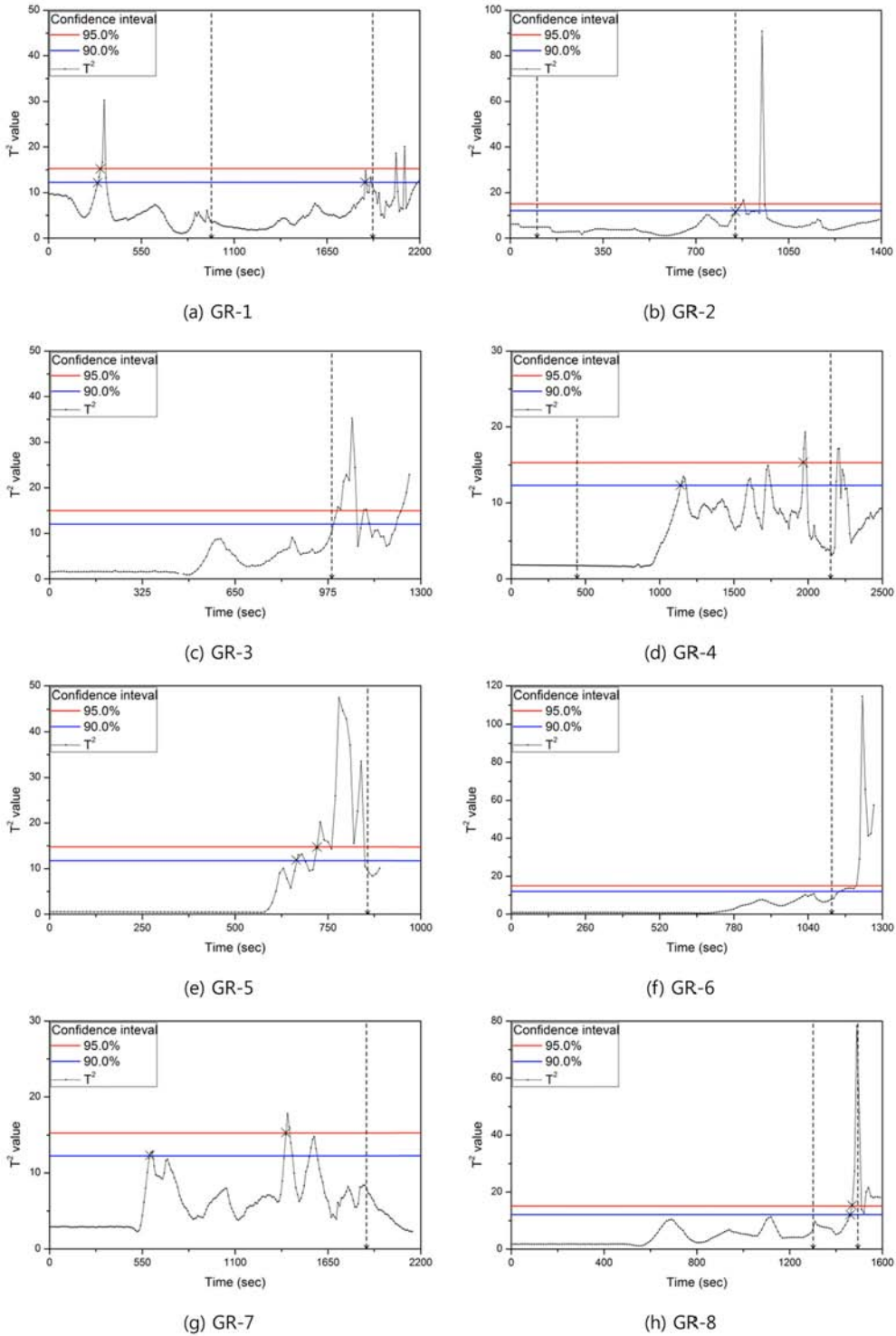


Fig. 3. Results based on the T^2 -statistic, showing temporal monitoring data at three positions and using two types of sensor in a granitic weathered soil.

식 (4)와 같이 설정할 수 있다. 여기서 m 은 변수들의 수, g 는 부분군들의 수, α 는 유의수준이다(Ahn, 2012). 식 (3)과 (4)로 계산된 관리한계선을 설정하면 관측치에 대한 T^2 통계량이 관리상한선보다 큰 경우 이상거동으로 판단한다. 본 연구에서는 α 를 0.05와 0.10으로 설정하여 모니터링을 수행하였다. 각각 관리한계선의 신뢰구간은 95.0%, 90.0%이며, 신뢰구간은 분산시점이 이상거동일 확률을 의미한다(이하 $\alpha=0.05$ 는 95.0%, $\alpha=0.10$ 은 90.0%).

$$UCL = \frac{m(g-1)(n-1)}{gn-n-m+1} \cdot F_{\alpha/2, m, gn-g-m+1} \quad (3)$$

$$LCL = 0 \quad (4)$$

분석결과

다변량 통계분석은 센서의 위치, 계측되어지는 물성 등 여러 조건에 상관없이 변량간의 상관성이 있는 경우 상관관계를 고려한 분석을 수행할 수 있다. 본 연구에서

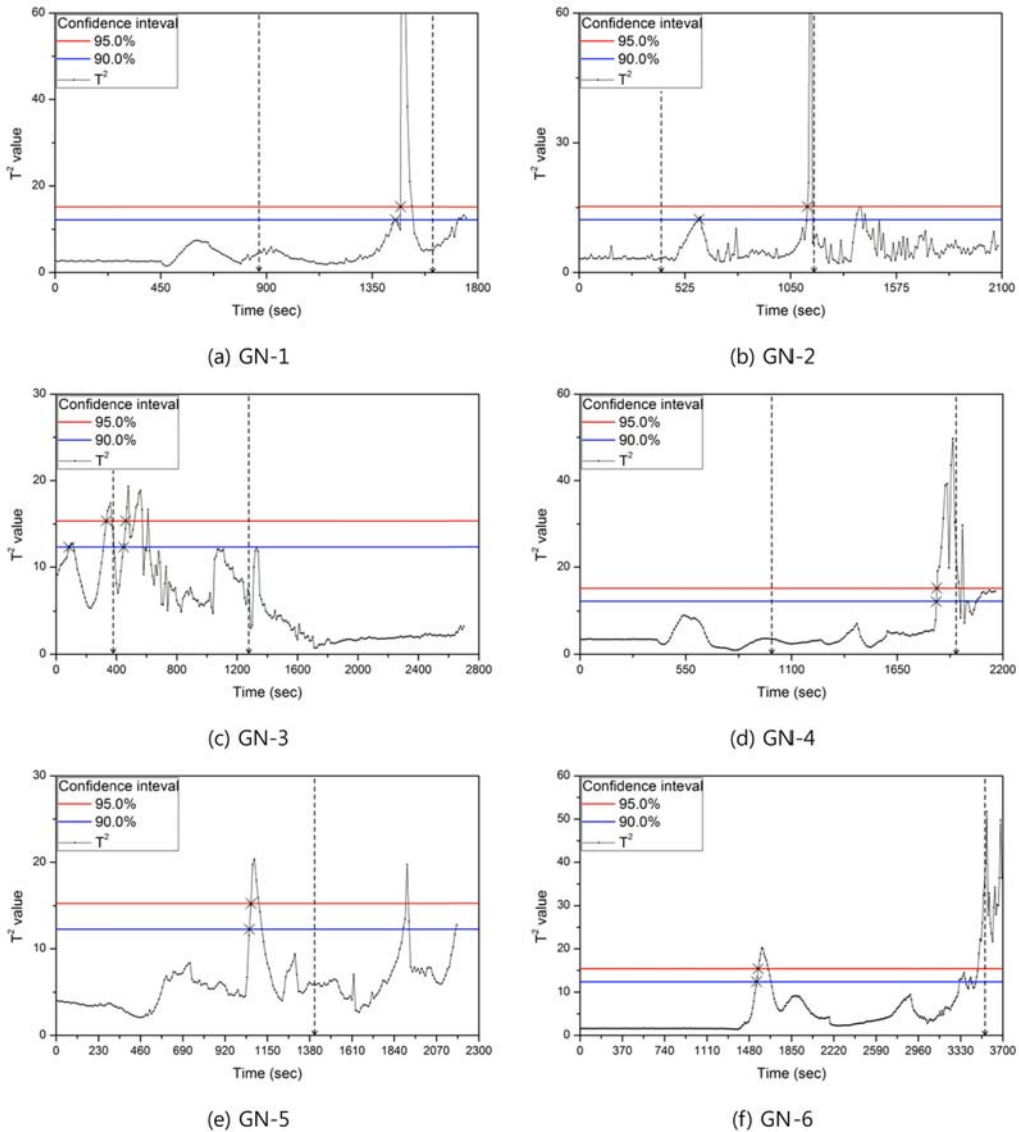


Fig. 4. Results based on the T^2 -statistic, showing temporal monitoring data at three positions and using two types of sensor in a gneissic weathered soil.

는 모형사면 붕괴시점을 조기에 감지하기 위하여 T^2 통계량을 타점하여 그래프에 도시하고, 신뢰구간을 95.0%와 90.0%로 구분하여 분석을 수행하였다. T^2 통계량이 신뢰구간 90.0%가 넘는 값이 타점되면 이상상태로 판단하였다.

Fig. 3은 GR-1~8의 세 지점에서의 두 가지 센서 데이터를 이용한 다변량 통계분석 결과이다. 사면파괴가 발생한 시점을 세로 점선으로 표시하였으며, 사면파괴 전에 관리한계선을 초과한 시점을 X로 나타내었다. 사면파괴 발생 시점(점선)이 2개인 경우, 더 빠른 시간에 표시된 점선은 사면 전체파괴가 발생하기 전에 부분적인 파괴가 발생한 시점이다.

시점으로 판단하였다. GR-2의 경우 전체 붕괴발생 전 약 200초 전에 신뢰구간을 연이어 초과하고 있다. GR-3, 6은 붕괴발생 시점보다 수십 초 늦게 신뢰구간 90.0%를 초과하였다. 즉 이 모델에서는 붕괴를 사전 예측하는 것이 불가능하였다. GR-4는 사면 붕괴가 발생하기 약 1,000초 전에 신뢰구간 90.0%를 초과하였으며, 약 200초 전에 신뢰구간 95.0%를 기준으로 분산이 발생하여 이상거동을 조기에 감지할 수 있었다. GR-4와 마찬가지로 GR-5, 7, 8도 수십 초 전에 관리한계선 90.0%과 95.0%를 넘어 사면 이상거동을 감지하였다.

Fig. 4는 GN-1~6의 세 지점에서의 두 가지 센서 데이터를 이용한 다변량 통계분석 결과이다. 편마암 풍화토는 화강암 풍화토와 달리 모든 모형시험 모델에서 T^2 관리도 분석을 이용한 조기 감지가 가능하였다. GN-1은 사면 전체붕괴 시점 이전에 T^2 통계량이 신뢰구간 90.0%와 95.0%를 넘으므로 사면 붕괴를 조기 감지한 것으로 판단하였다. 이와 마찬가지로 GN-2~6의 모든 모델에서도 사면 이상거동을 조기 감지하였다. GN-2는 전체 사면 붕괴시점보다 약 500초 빠른 시점에서 신뢰구간 90.0%를 넘었으며, 약 50초 전에는 신뢰구간 95.0%를 초과하였다. GN-3와 GN-6는 신뢰구간 90.0%를 초과하는 시간과 95.0%를 초과하는 시간이 약 10초 차이를 보이며, 사면 붕괴시점 보다 약 900초~2000초 빨리 이상거동을 감지하였다. GN-4와 GN-5는 GN-3, GN-6보다 늦게 감지되었으며, 사면 붕괴시점보다 약 100초~350초 전에 이상거동을 감지하였다.

위에서 살펴본 바와 같이 사면의 부분적인 파괴 전에 T^2 통계량이 관리기준치를 초과하여 조기 감지된 경우는 GR-1과 GN-3뿐이며, 대부분의 경우 전체붕괴 전에 신뢰구간 90.0%의 관리기준치를 초과하여 조기 감지되었다. 이러한 결과는 센서의 위치가 부분적인 붕괴영역

에 포함되지 않으면 감지하지 못함을 나타내는 것이다. 하지만 GR-3, 6과 같이 붕괴발생 시점보다 수십 초 늦게 신뢰구간 90.0%를 초과한 경우를 제외하면, 대부분의 모델에서 수백 초에서 수천 초 전에 전체붕괴를 조기 감지 하였다. 그리고 관리기준치의 신뢰구간 90%를 초과하는 모든 모델에서 붕괴가 발생하였으므로 이를 관리기준치 설정 시 적용하는 것이 적절한 것으로 나타났다.

결 론

본 연구에서는 산사태 실내모형 시험 중 측정된 간극수압 및 함수비 데이터를 대상으로 다변량 통계분석의 일종인 Hotelling's T^2 분석을 수행하여 사면의 이상거동을 분석하였다. 실내시험은 극한강우조건을 모사하여 시간당 200 mm 강우 하에서 실시되었으며, 대상토질은 화강암 풍화토와 편마암 풍화토이다.

모형사면의 하부로부터 일정 간격의 세 지점에서 계측된 간극수압 및 함수비 데이터 분석에서 신뢰도 95.0%와 90.0%의 관리한계선을 설정하였으며, 관리한계선을 초과한 시점을 예측시간으로 간주하면 측정치의 이상거동은 사면의 전체붕괴 시점보다 수 백 초~수 천 초 전에 감지되었다. 하지만 부분붕괴의 경우 센서의 위치가 한정되어 있어 감지하지 못하는 경우가 다수 발생하였다. 측정치의 이상거동 관리기준치 설정 시 적용되는 신뢰구간은 90%를 초과하는 모든 모델에서 붕괴가 발생하였으며, 이를 관리기준치 설정 시 적용하는 것이 보다 빠른 예측을 위하여 적절한 것으로 나타났다.

다변량 통계분석법을 산사태 예경보시스템에 적용하는 경우 여러 지점에서의 다양한 측정치 간 상관분석을 통해 유일한 관리기준을 제시할 수 있고, 신뢰도에 따른 관리한계선을 구분함으로써 단계적인 예경보가 가능할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 2014년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 공공복지안전연구사업 (2012M3A2A1050985)의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Ahn, S. J., 2012, Statistical quality control: MINITAB, Freecademy, 331-333.
- Brand, E. W., 1981, Some thoughts on rain-induced slope

- failures, In Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, 3, 373-376.
- Caine, N., 1980, Rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows, *Geografiska Annaler Series A, Physical Geography*, 62(1/2), 23-27.
- Collins, B. D. and Znidarcic, D., 2004, Stability analyses of rainfall induced landslides, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(4), 362-372.
- Crosta G. B. and Frattini P., 2008, Rainfall induced landslides and debris flows, *Hydrological Processes*, 22(4), 473-477.
- Crozier, M. J., 1986, Landslides: causes, consequences and environment, *Journal of the Royal Society of New Zealand*, 18(3), 343p.
- Hong, W. P., Kim, W. Y., Song, Y. S., and Lim, S. G., 2004, Prediction of landslide using artificial neural network model, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 20(8), 67-75 (in Korean with English abstract).
- Huang, C. C. and Yuin, S. C., 2010, Experimental investigation of rainfall criteria for shallow slope failures, *Geomorphology*, 120(3), 326-338.
- Kang, I. J., Chang, Y. K., and Kwak, J. H., 1993, Forecasting of landslides using geographic information system, *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 11(2), 53-58.
- Kim, M. I. and Jeong, G. C., 2008, Characterization of physical factor of unsaturated ground deformation induced by rainfall, *The Journal of Engineering Geology*, 18(2), 117-126 (in Korean with English abstract).
- Kim, M. I. and Nishigaki, M., 2006, Slope failure predicting method using the monitoring of volumetric water content in soil slope, *The Journal of Engineering Geology*, 16(2), 135-143.
- Kim, S. B., Seo, Y. S., Kim, H. S., Chae, B. G., Choi, J. H., and Kim, J. S., 2014, Development of a method for detecting unstable behaviors in flume tests using a univariate statistical approach, *The Journal of Engineering Geology*, 24(2), 191-199.
- Kim, W. Y., Chae, B. G., Kim, J. S., Cho, Y. C., Choi, Y. S., Lee, C. O., Lee, C. W., and Kim, G. Y., 2003, Prediction and mitigation of landslide hazards, Report of Ministry of science and technology, 18-20 (in Korea).
- Kourti, T. and MacGregor, J. F., 1995, Process analysis, monitoring and diagnosis, using multivariate projection methods, *Chemometrics and Intelligent Laboratory System*, 28, 3-21.
- Lee, K. I., Chang, Y. C., Kim, T. H., and Chung, Y. I., 2006, Stability Analysis of a slope in unsaturated weathered residual soil considering the rainfall characteristics, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 7(2), 5-14 (in Korean with English abstract).
- Lee, S. W., Kim, G. H., Yune, C. Y., Ryu, H. J., and Hong, S. J., 2012, Development of landslide-risk prediction model through database construction, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 28(4), 23-33 (in Korean with English abstract).
- Meilani, I., Rahardjo, H., and Leong, E. C., 2005, Pore-water pressure and water volume change of an unsaturated soil under infiltration conditions, *Candian Geotechnical Journal*, 42(6), 1509-1531.
- Oh, J. R. and Park, H. J., 2014, Analysis of landslide triggering rainfall threshold for prediction of landslide occurrence, *Journal of Korean Society Hazard Mitigation*, 14(2), 115-129 (in Korean with English abstract).
- Reid, M. E., 1994, A pore-pressure diffusion model for estimating landslide-inducing rainfall, *The Journal of Geology*, 102(6), 709-717.
- Wieczorek, G. F., 1996, Landslide triggering mechanisms, in Turner, A. K., and Schuster, R. L.(eds), *Landslides: Investigations and Mitigation: Transportation Research Board, Special Report 247*, Washington, D.C., USA, 76-90.
- Yoshida, Y., Kuwano, J., and Kuwano R., 1991, Rain-induced slope failures caused by reduction in soil strength, *Soils and Foundations*, 31(4), 187-193.
- Yune, C. Y., Jun, K. J., Kim, K. S., Kim, G. H., and Lee, S. W., 2010, Analysis of slope hazard-triggering rainfall characteristics in Gangwon province by database construction, *Journal of Korean Geotechnical Society*, 26(10), 27-38 (in Korean with English abstract).

김슬비

충북대학교 지구환경과학과
28644 충북 청주시 서원구 충대로 1
Tel: 043-261-2765
E-mail: 1798560@naver.com

나종화

충북대학교 지구환경과학과
28644 충북 청주시 서원구 충대로 1
Tel: 043-261-2232
E-mail: cherin@cbnu.ac.kr

서용석

충북대학교 지구환경과학과
28644 충북 청주시 서원구 충대로 1
Tel: 043-261-2765
E-mail: ysseo@cbsu.ac.kr