

수치해석에 의한 강우강도와 사면 안정성의 상관성 분석

이민석¹ · 김교원^{2*}

¹국립방재연구소, ²경북대학교 지질학과

Relationship between Rainfall Intensity and Slope Stability based on Numerical Analysis

Min-Seok Lee¹ and Gyo-Won Kim^{2*}

¹National Institute for Disaster Prevention

²Department of Geology, Kyungpook National University

본 연구는 수치해석을 이용하여 강우강도와 사면 안정성의 상관성을 파악하기 위하여 수행되었다. 지난 36년간의 기상청 자료를 조사하여 10분, 1시간, 일 최대강수량이 각각 28 mm, 70 mm, 271 mm 로 집계되었다. 그때 침투류 해석은 프로그램 SEEP/W를 이용하여 사면의 지하수위를 획득하기 위해 수행되었고, 안정성 분석은 프로그램 SLOPE/W를 이용하여 시간 단계별로 수행되었다. 10분 강수량 28 mm일 경우 2시간, 1시간 강수량 70 mm일 경우 7시간, 1일 강수량 271 mm일 경우 72시간에 사면내의 지하수위가 포화상태에 도달하였다. 10분 강우강도가 28 mm일 경우, 누적강수량 196 mm 일 때, 안전율이 1.0 이하가 되었으며, 10분 강우강도가 13 mm, 1.9 mm 일 경우에는 누적강수량이 각각 468 mm, 820 mm 일 때, 안전율이 1.0 이하가 되었다. 이 결과는 누적강수량보다는 강우강도가 사면안정성에 더 큰 영향을 미치고 있다는 것을 시사한다.

주요어 : 수치해석, 강우강도, 사면 안정성, 누적강수량

This study was conducted to characterize the relationship of rainfall intensity and slope stability by using numerical analysis. The maximum precipitation rate for 10 minutes, 1 hour and 1 day was determined as 28 mm, 70 mm and 271 mm, respectively, by investigating 36 years of KMA data. Then slope infiltration analysis was performed to obtain the ground water level in the slope by using computer programming SEEP/W, and slope stability analysis was done for each time step by using program SLOPE/W. The factor of safety was minimized when the slope was saturated under each rainfall intensity; the time required for saturation was 2 hours with 10 minutes rainfall intensity of 28 mm, 7 hours with 1 hour rainfall intensity of 70 mm and 3 days with 1 day rainfall intensity of 271 mm. When accumulated rainfall was 196 mm for the 10 minutes rainfall intensity of 28 mm with duration of 2 hours, the factor of safety was decreased to 1.0, while accumulated rainfall of 468 mm and 820 mm for the 1 hour and 1 day rainfall intensity, respectively, was required to reach the factor of safety, 1.0. Since the normalized rainfall intensity was 13 mm and 1.9 mm for 1 hour and 1 day maximum rainfall, respectively, those results showed that the rainfall intensity could have a more effect on the slope stability than the accumulated rainfall.

Key words : numerical analysis, rainfall intensity, slope stability, accumulated rainfall

서 론

최근 우리나라에서도 기상이변으로 인한 국지성 집중 호우와 산지지역의 개발로 인하여 자연사면 및 절취사

면에서 많은 산사태가 발생하고 있다. 이와 같은 산사태는 직접적인 인명피해 뿐만 아니라 심각한 경제적 손실을 초래하게 된다. 대부분의 산사태는 우기에 집중적으로 발생되므로 이와 같은 사면 붕괴의 가장 주요 원인은

*Corresponding author: gyokim@knu.ac.kr

강우에 의한 것으로 예측할 수 있다(김교원 외, 2000).

특히 국내에서 2002년 8월 31일, 제15호 태풍 루사(RUSA), (최대시우량 76 mm/hr, 일일강우량 897.6 mm/day)의 기록적인 강우에 의해 다수의 절토사면 붕괴가 발생하는 등 최근에는 지역적인 집중강우에 의하여 절토사면의 붕괴가 빈번히 발생하고 있다(한국건설기술연구원, 2000). 사면붕괴의 주된 원인이 강우라는 사실에 기초하여 강우와 사면붕괴 사이의 관계를 분석하기 위한 연구가 세계적으로 활발히 수행되고 있다(Mathewson et al., 1990, Sitar et al., 1992, Anderson and Sitar, 1995, Montgomery et al., 1997).

이러한 연구는 기본적으로 사면붕괴자료 및 기상·수문자료의 축적에 의한 통계적인 방법과 강우에 따른 사면의 변화를 계측하여 분석하는 방법으로 구분할 수 있으며 사면붕괴의 원인을 파악하는 데 사용될 뿐만 아니라 예·경보를 위한 기초자료로의 활용도 역시 크다고 할 수 있다(백용 외, 2000). 통계적 해석방법은 선형강우량과 최대강우강도를 이용하여 사면붕괴와 강우와의 관계를 규명하기 위한 방법으로 Lumb(1975), Brand(1984)등이 수행된 바 있다.

본 연구에서는 경상남도 밀양시 부북면 용지리 일원 ‘○○시설 절취사면’ 구간의 강우강도에 따른 사면의 안정성을 분석하였다. 이를 위하여 대상 사면을 포함하는 인근의 지표지질조사를 실시하였고, 기상수문자료의 분석 조사 시험으로 얻어진 자료를 바탕으로 캐나다 Geo-Slope International Ltd.의 프로그램 Geo-studio SEEP/W 와 SLOPE/W를 이용하여 강우시의 사면의 침투 특성을 해석하고 시간대별로 사면의 안정성을 해석하였다.

침투를 고려한 사면 안정성 분석

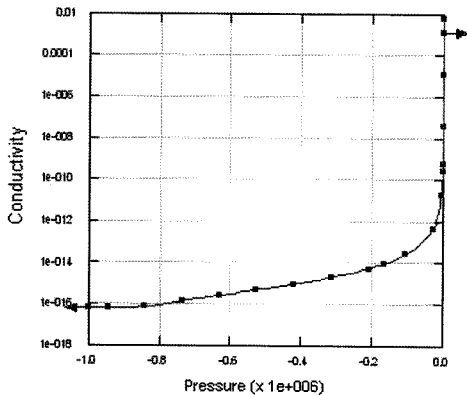
본 해석에서는 유한요소법(Finite Element Method)을 이용한 SEEP/W 프로그램을 사용하여 2차원 비정상류 해석을 실시하였다. 암종별 투수계수를 차별 적용하고, 초기 지하수위를 고정시키고 시간대별 강우강도에 따른 지하수위의 변화를 관찰하였다. 침투 해석에 사용된 지반의 포화 상태에서의 투수계수는 Uniform Sand, Uniform Silt의 함수를 적용하여 결정하였으며, 그 값은 Table. 1에 나타내었다. 모관흡입력에 대한 투수계수의 변화는 불포화도 함수특성시험으로 산출된 모관흡입력에 대한 부피함수비의 변화와 포화 시 투수계수로부터 Fredlund 등(1994)이 제안한 방법을 통해 예측하였다(Fig. 1).

강우를 고려하기 위해서 사면 표면에 강우 강도에 해당하는 일정한 유량이 유입되도록 경계조건을 설정하였으며, 강우 강도는 최근 36년간 기상청 자료를 조사하여 연구지역의 시간대별(10분, 1시간, 24시간) 최대 강수량을 적용시켰다(Fig. 2). 사면안정해석은 초기 지하수위를 고정시키고 강우의 사면 내부로의 침투 소요시간을 고려하기 위하여 침투해석에서 산정된 간극수압 분포는 사면안정해석에 적용되어 강우에 의한 침투를 고려하였다.

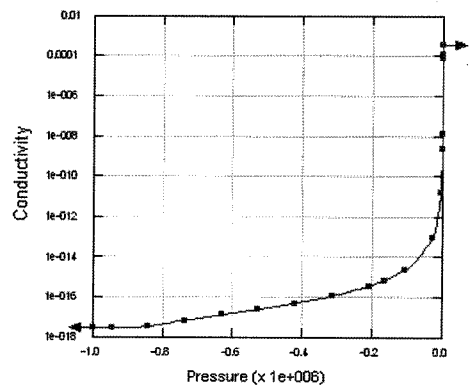
총 830개의 요소망을 생성하였으며, 초기 지하수위를 30m로 고정시켰으며, 최근 36년간 시간대별(10분, 1시간,

Table 1. Coefficient of permeability used for the infiltration analysis.

Classification	Weathered Rock	Soft Rock
(m/day)	1.17×10^{-3}	3.50×10^{-4}



(a) Weathered Rock



(b) Soft Rock

Fig. 1. Hydraulic conductivity of classification by geological layers.

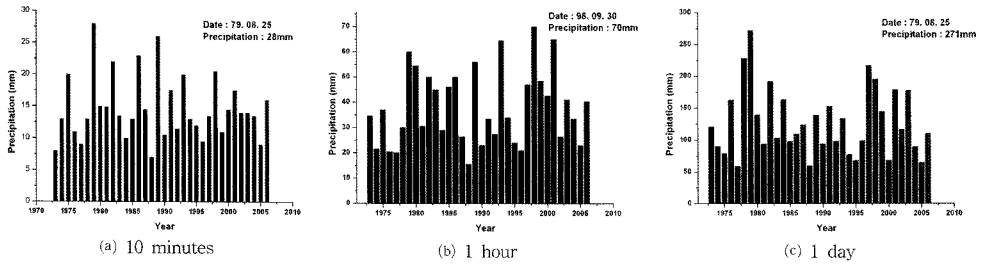


Fig. 2. Relationship of the maximum precipitation rate and time (KMA, Korea Meteorological Administration).

1일) 최대 강수량을 적용해 해석을 실시하였다. 시간에 따라 지하수위의 변화양상을 볼 수 있었다(Table. 2).

10분간 최대강수량(28 mm)을 적용시킨 결과 포화상태 사면으로 변환 시간은 2시간이었다. 이와 같이 1시간 최대강수량(70 mm)을 적용시킨 결과 포화상태에 이르는 시간은 7시간이었다. 마지막으로 1일 최대강수량(271 mm)을 적용시킨 결과 포화상태에 이르는 시간은 72 시간이었다(Fig. 3-5).

시간대별 10분, 1시간, 1일의 최대강수량 자료를 적용해 지속시간대 별 지하수위 변화를 분석하였다. 이 자료를 10분 강수량으로 환산하면 28 mm, 1시간 최대강수량의 10분 환산 강수량일 경우는 13 mm이며, 1일 최대강수량의 10분 환산 강수량 경우는 1.9 mm이었다. 이에 근거하여 지속시간대별 지하수위의 변화 그래프를 도식화 한 결과, 10분간 최대강수량일 경우 가장 큰 것으로 나타났었다(Fig. 6).

Table 2. Diversity of the ground water elevation.

Maximum precipitation rate for 10 minutes, 28 mm		Maximum precipitation rate for 1 hour, 70 mm		Maximum precipitation rate for 1 day, 271 mm	
Time duration (min)	Ground water elevation (m)	Time duration (min)	Ground water elevation (m)	Time duration (min)	Ground water elevation (m)
1	30	1	30	1	30
10	32	60	32	720	45
30	40	120	34	1,440	56
50	45	180	40	2,880	57
60	50	360	60	3,600	60
70	65	400	65	3,900	65
120	76	420	76	4,320	76

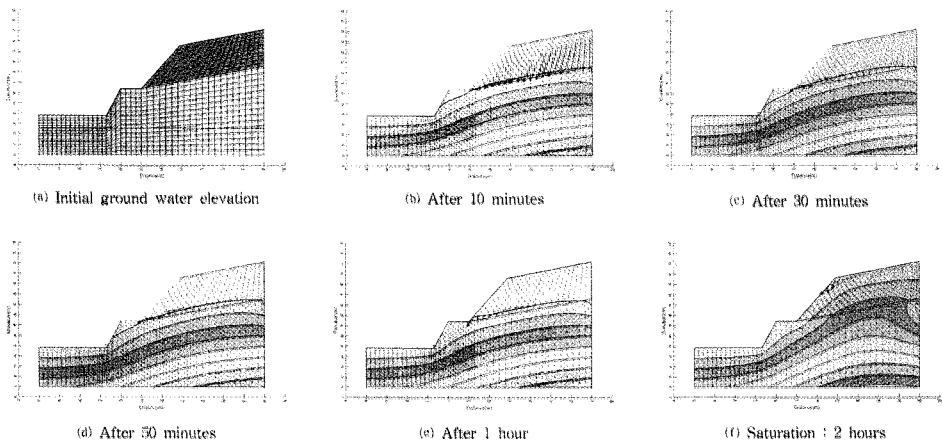


Fig. 3. Variation of ground water elevation with time lapse when the maximum precipitation rate of 28 mm for 10 minutes was applied.

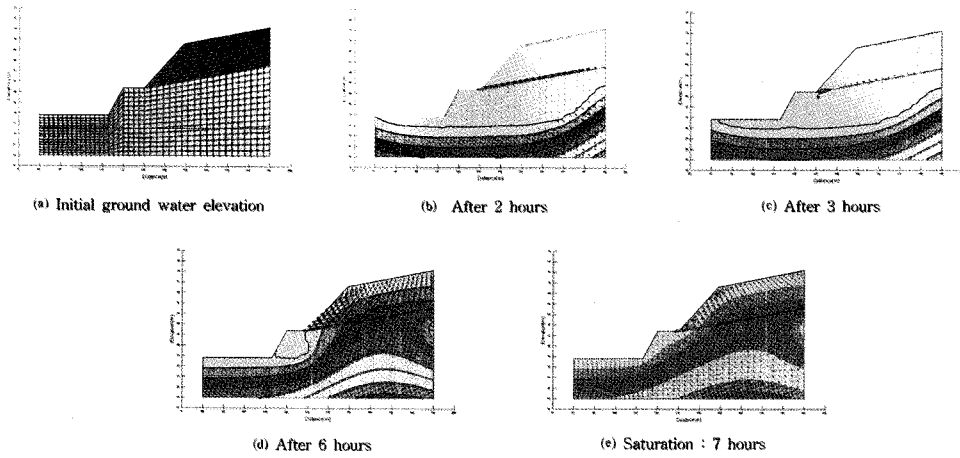


Fig. 4. Variation of ground water elevation with time lapse when the maximum precipitation rate of 70 mm for 1 hour was applied.

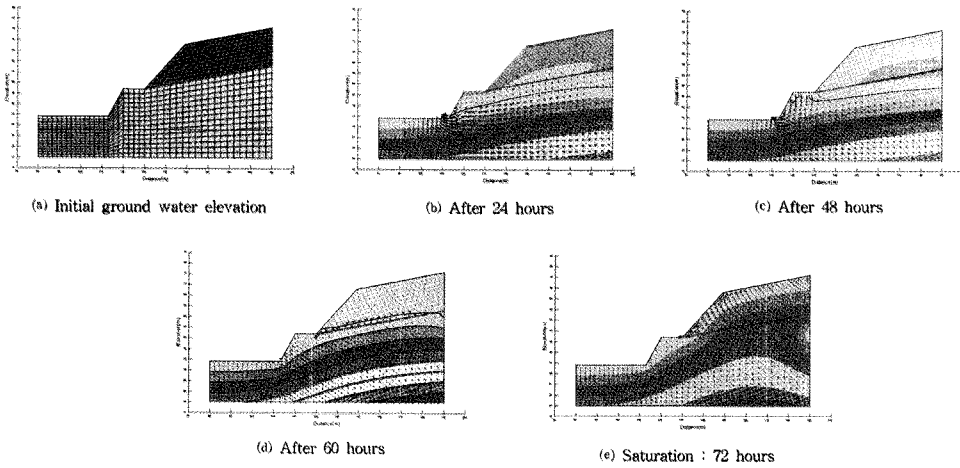


Fig. 5. Variation of ground water elevation with time lapse when the maximum precipitation rate of 271 mm for 1 day was applied.

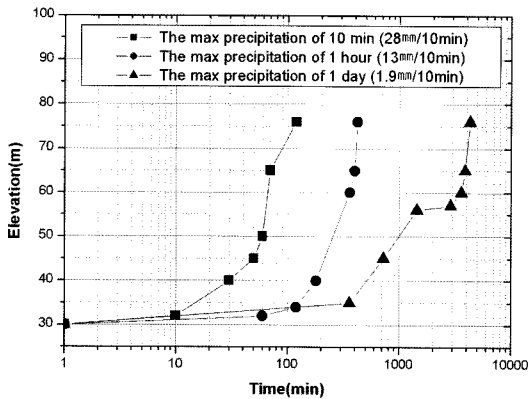


Fig. 6. Classification by the duration of precipitation time to the ground water elevation in slope.

Table 3. Input data used for the slope stability analysis.

	Unit weight, γ (t/m^3)	Phi, F ($^\circ$)	Cohesion, c (t/m^2)
Weathered Rock	2.0	30.0	4.0
Soft Rock	2.5	35.0	15.0

강우시 사면안정해석법

강우시 지하수위 상승에 의한 사면의 안정성을 검토하기 위하여 초기 지하수위를 30m로 고정시키고, 침투류 해석의 결과를 적용시켜 시간대별 지하수위 상승하는 결과에 따라 사면안정해석을 수행하였다. 해석 시 적용한 지반정수는 다음과 같다(Table. 3).

또한 강우 시 지하수위 상승의 시간에 따른 사면 안전율을 서로 비교하기 위하여 강우강도를 변화시켜 사면안정해석을 수행하였다. 침투류 해석결과와 지하수위의 상승에 따라 사면 안전율의 변화와 밀접한 관련이 있었다. 대표적으로 Bishop의 간편법으로 안전율을 비교해 본 결과는 다음과 같다(Fig. 7-9).

침투류 해석결과 최근 36년간 연구지역의 시간대별 최대강수량을 적용시킨 결과, 10분 강수량 28 mm일 경우 2시간, 1시간 강수량 70 mm일 경우 7시간, 일 강수량

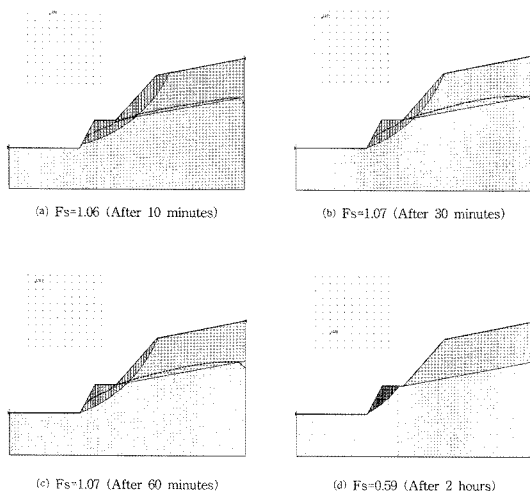


Fig. 7. Variation of safety factors with time lapse when the maximum precipitation rate of 28 mm for 10 minutes was applied.

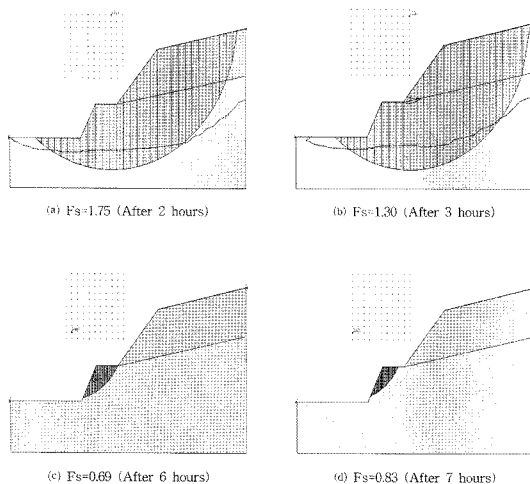


Fig. 8. Variation of safety factors with time lapse when the maximum precipitation rate of 70 mm for 1 hour was applied.

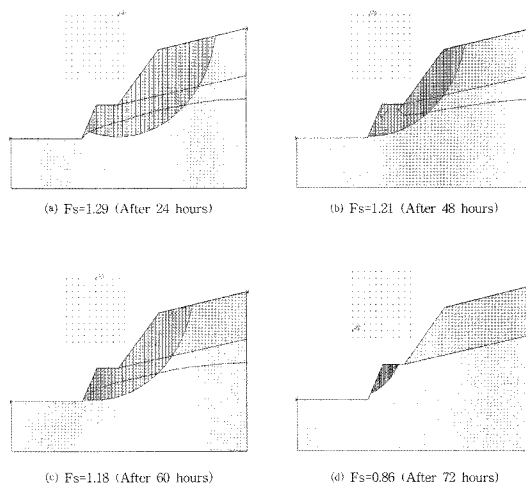


Fig. 9. Variation of safety factors with time lapse when the maximum precipitation rate of 271 B/AE for 1 day was applied.

271 mm일 경우 72시간에 사면내의 지하수위가 포화상태에 도달하며 사면안정성해석결과 안전율은 각각 0.59, 0.83 및 0.86이었다. 사면 불안 요인 중 가장 중요한 것이 사면내의 지하수위의 상승이기 때문에 사면붕괴는 주로 호우가 집중되는 시기에 빈번하게 발생하게 된다.

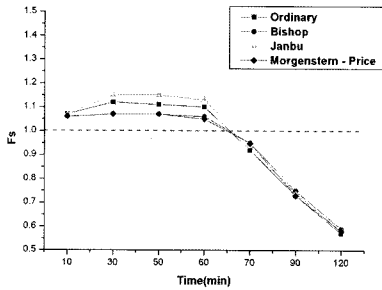
10분으로 환산한 시간대별 최대강수량의 자료를 사면안정해석에 적용한 결과, 시간대별 안전율은 10분 최대강수량 28 mm일 경우 70분일 때 불안정하다는 것으로 나타났고, 1시간 최대강수량 13 mm일 경우 360분일 때 불안정하다는 것으로 나타났으며, 1일 최대강수량 1.9 mm일 경우 4,320분일 때 불안정하다는 것으로 나타났다(Fig. 10).

결론

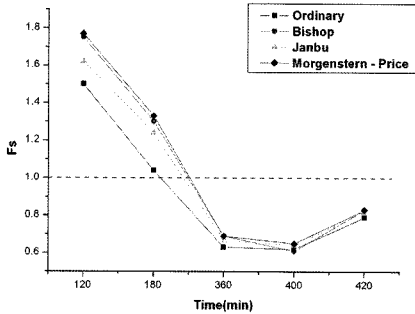
본 연구지역 절취사면에 대한 강우강도에 따른 누적 시간별 사면의 안정성을 분석한 본 연구의 결론은 다음과 같이 정리된다.

1. 침투류 해석결과 최근 36년간 연구지역의 시간대별 최대강수량을 적용시킨 결과, 10분 강수량 28 mm일 경우 2시간, 1시간 강수량 70 mm일 경우 7시간, 1일 강수량 271 mm일 경우 72시간에 사면내의 지하수위가 포화상태에 도달하며 사면안정성해석결과 안전율은 각각 0.59, 0.83 및 0.86이었다.

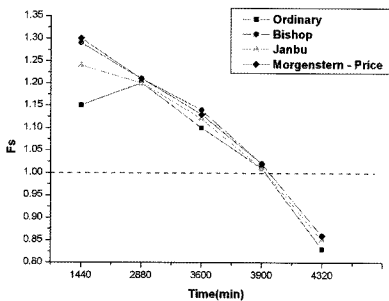
2. 10분 강수량 28 mm일 경우, 지속시간 68분에서 사면 안전율이 1.0 이하가 되고, 1시간 강수량 70 mm일 경우, 지속시간 190분(3시간 10분), 1일 강수량 271 mm일 경우, 지속시간



(a) maximum precipitation rate 10 minutes (28mm).



(b) maximum precipitation rate 1 hour (70mm).



(c) maximum precipitation rate 1 day (271mm).

Fig. 10. When accumulated rainfall is 196mm for the 10 minutes rainfall intensity of 28 mm with duration of 2 hours, the factor of safety is decreased to 1.0, while accumulated rainfall of 468 mm and 820 mm for the 1 hour and 1 day rainfall intensity, respectively, is required to reach the factor of safety, 1.0.

60시간(2일 12시간)일 때 사면 안전율이 1.0 이하가 되었다.

3. 시간대별 최대강수량의 자료를 10분으로 환산하여 사면안정해석에 적용한 결과, 10분 강수량 28mm일 경우 70분일 때 불안전하게 나타났고, 1시간 최대강수량의 10분 환산 강수량 13 mm 경우 360분일 때 안전율이 1.0 이하가 되어 불안정한 것으로 나타났으며, 1일 최대강수량의 10분 환산 강수량 1.9mm일 경우 4,320분일 때 불안정하게 분석되었다.

4. 사면 불안 요인 중 가장 중요한 것이 사면 내의 지하수위의 상승이기 때문에 사면붕괴는 주로 호우가 집중되는 시기에 빈번하게 발생하는데, 10분 강우강도가 28 mm일 경우, 누적강우량 196 mm 일 때, 안전율이 1.0 이하가 되었으며, 10분 강우강도가 13 mm, 1.9 mm 일 경우에는 누적강우량이 각각 468 mm, 820 mm 일 때, 안전율이 1.0 이하가 되었다. 이 결과는 누적강우량보다는 강우강도가 사면안정성에 더 큰 영향을 미치고 있다는 것을 시사한다.

사 사

본 논문은 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술 평가원에서 위탁시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발 사업(04핵심기술C01)의 지원으로 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

김교원, 정영국, 2000, 터널입구의 사면안정성 검토 및 보강대책, 대한지질공학회 창립10주년기념 학술발표회 논문집, 147-154.

백용, 김교원, 구호본, 2000, 건설공사와 사면안정성, 지질재해관측 및 방지기술 심포지움 논문집, 1-17.

한국건설기술연구원, 2000, 산사태 발생 사례 및 대책방안, 한일건설기술워크샵 논문집, 42-68.

Anderson, S.A., and N. Sitar, 1995, Analysis of rainfall induced debris flow, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASEC, 121(7) 544-552.

Brand, E.W., 1984, Predicting the Performance of Residual Soil Slopes, *Proc. of the 11th Int. Conf. on SMFE.*, San Francisco, Dec., pp.38.

Fredlund, D.G., Anqing Xing, A., and S. Huang, 1994, Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve, *Canadian Geotechnical Journal*, 31, 533-546.

Lumb, P., 1975, Slope Failures in Hong Kong, *Qtrly Jour. Geol.*, 8, 31-65.

Mathewson, C.C., J.R. Keaton, and P.M. Santi, 1990, Role of bedrock ground water in the initiation of debris flow and sustained post flow stream discharge, *Bulletin of Association of Engineering geologists*, 27(1), 73-83.

Montgomery, D.R., W.E. Dietrich, R. Torres, S.P. Anderson, J.T. Hefner, and K. Loague, 1997, Hydrologic response of a steep, unchanneled valley to natural and applied rainfall, *Water Resources Research*, 33(1), 91-109.

Sitar, N., S.A. Anderson, and K.A. Johnson, 1992, Conditions leading to the initiation of rainfall-induced debris flows, *Geotech Engrg, Div. Specialty Conference: Stability and performance of Slopes and Embankments - ASEC*, 834-839.

2009년 1월 10일 원고접수, 2009년 3월 23일 게재승인

이민석

국립방재연구소

121-719, 서울시 마포구 마포로 135 지방재정회관 6층

Tel: 02-3271-3264

Fax: 02-3271-3269

E-Mail: sky2ms@nema.go.kr

김교원

경북대학교 지질학과

702-701, 대구시 북구 산격동 1370

Tel: 053-950-5357

Fax: 053-950-5362

E-Mail: gyokim@knu.ac.kr