

## 모형실험장치를 이용한 불포화토의 강우 침투특성 분석 Analysis of rainfall infiltration characteristics for unsaturated soils using a column test equipment

박규보<sup>1)</sup>, Kyu Bo Park, 채병곤<sup>2)</sup>, Byung-Gon Chae, 김경수<sup>2)</sup>, Kyeong-Su Kim

<sup>1)</sup> 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 석사연수생, Research student, Geologic Environment Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

<sup>2)</sup> 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원, Principal researcher, Geologic Environment Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

**SYNOPSIS** : This study was conducted to characterize on the relationships of rainfall intensity and infiltration rate of rainfall dependent on unit weight change in the gneissic weathered soil by a column test equipment. In this study, volumetric water content and pore water pressure were measured using TDR sensors and tensiometers at regular time intervals. Rainfall conditions including continuous rainfall and repeated rainfall were selected in order to know the effect of antecedent rainfall. In the condition of rainfall intensity 20mm/h and the unit weights of soil as 1.35g/cm<sup>3</sup>, 1.55g/cm<sup>3</sup> and 1.61g/cm<sup>3</sup>, average rainfall infiltration rate was  $2.814 \times 10^{-3}$  cm/sec,  $1.969 \times 10^{-3}$  cm/sec and  $1.252 \times 10^{-3}$  cm/sec respectively. The higher rainfall intensity and lower unit weight of soil, the faster average infiltration rate. Overflow in the column was happened except rainfall condition of rainfall intensity 20mm and soil unit weight 1.35g/cm<sup>3</sup>. Increasing the soil unit weight, overflowed water was increased and occurrence time was faster.

**Key words** : rainfall infiltration, infiltration rate, unsaturated soil, rainfall duration, volumetric water contents.

### 1. 서 론

국내의 지형학적 여건상 하절기 집중호우 등에 의해 발생하는 산사태의 경우, 풍화된 표층부에서 침투수에 의한 체적함수비의 증가로 인한 사면의 전단저항력이 저하되어 중력방향으로 산사태가 주로 발생된다(Sun et al., 1998). 강우에 따른 사면변화를 인지하는 방법은 크게 선행 강우량 해석과 강우강도 해석으로 대별할 수 있다. 홍콩의 경우 산사태 관계에 있어서 과거에는 Lumb(1975)에 의한 선행강우량 개념해석이 지배적이었고 현재는 Brand(1984)에 의한 강우강도 해석이 정립되고 있다. 학자마다 의견이 다르지만 일반적으로 산사태 발생 전 3일 또는 7일 선행강우량과 발생 당일의 강우강도와 밀접한 관계가 있는 것으로 보고 있다(채병곤 등, 2007). 홍원표 등은 지난 30년간 우리나라의 산사태 기록을 분석한 결과, 대규모 붕괴의 경우 최대 시간강우강도가 35mm/h를 초과하고, 2일간의 누적강우량이 140mm를 초과할 경우 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 24시간 내에 200mm 이상의 강우가 지속되거나, 강우가 하루이상 지속되면서 시간당 평균 강우량이 10mm/h이상일 경우에 산사태가 발생할 위험이 큰 것으로 나타났다(김선학, 2009). 강우 강도에 기인하는 산사태의 원인은 주로 지하수위 상승 및 간극수압의

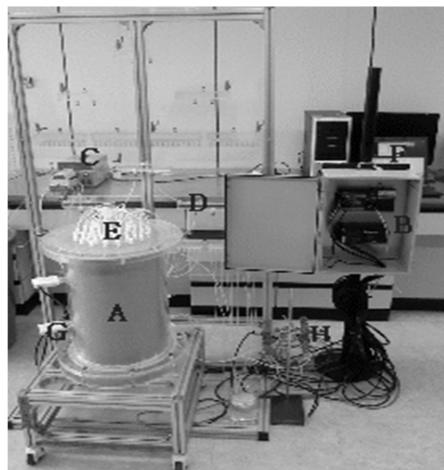
증가와 밀접한 관계를 가지고 있는 것으로써 이는 사면파괴 유형에 있어 가장 중요한 원인 요소로 작용한다. 또한, 강우에 의한 침투수의 침투거동 파악과 불포화 지반매질 내에서의 이동을 평가하기 위해서는 사면현장에서 강우에 의한 침투수의 영향을 민감하게 받는 지하수위의 측정이 필요하지만 현장 여건상 지하수 측정이 불리할 경우에는 강우에 의해 발생하는 침투수의 침윤선 거동 측정을 통하여 사면 안정성 평가와 사면 설계에 있어 중요한 설계 인자로서 반영할 수 있다(김만일 등, 2006; Sun et al., 1998).

본 연구에서는 강우조건과 흙의 단위중량에 따른 강우침투속도의 차이를 파악하기 위하여 실내 칼럼 시험을 실시하였다. 강우조건은 연속강우와 반복강우로 나누어 강우 상태와 지속시간에 따른 침투속도 변화를 관찰하였으며, 흙의 단위중량을 조절하여 단위중량 변화에 따른 강우침투속도 차이를 분석하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

강우 침투모형은 크게 인공강우 공급장치, 인공강우 분배장치, 인공강우 주입장치로 구성된다. 인공강우 공급장치는 정량펌프를 이용하여 일정하게 물 저장 공간으로부터 인공강우 분배장치로 물을 공급한다. 이렇게 주입된 물이 인공강우 분배장치의 튜브를 통해 일정량 인공강우 주입장치를 통해서 칼럼 내 흙에 접촉, 침투수를 발생시킨다. 불포화토 칼럼은 내경 33cm, 외경 35cm, 높이 50cm로 구성 되어있다. 이 칼럼의 상단으로부터 5cm, 15cm, 25cm, 35cm, 45cm의 깊이에 TDR함수비 측정센서를 삽입하였고, 상단으로부터 10cm, 30cm, 40cm 깊이에 간극수압계를 삽입하였다. 주입된 인공강우의 측정값은 TDR함수비 측정센서와 간극수압계를 이용하여 일정시간 간격으로 컴퓨터에 자동 저장된다.



- A: 시험칼럼
- B: 데이터로거
- C: 정량펌프
- D: 인공강우 분배장치
- E: 인공강우 주입장치
- F: 운영시스템
- G: TDR 함수비 측정센서
- H: 간극수압계

그림 1. 인공강우 분배 및 주입장치

TDR 함수비 측정센서는 흙과 물의 유전율 차이를 이용하여 매질의 체적함수비를 측정할 수 있다. 즉, 전기적 불연속성을 지닌 물질로부터 전자기파의 이동시간을 측정하여 체적함수비를 간접적으로 측정할 수 있는 장치이다. 본 연구에 사용한 TDR 함수비 측정센서는 Campbell사의 CS616을 사용하였다. 간극수압계는 튜브 끝에 달린 다공질의 세라믹컵을 흙속으로 삽입하여 세라믹컵 안의 물을 흙이 빨아들임으로써 간극수압을 측정하는 원리로, Soilmoisture사의 2100F를 사용하였다.

## 2.2 시료 및 실험방법

본 연구에서는 불포화 풍화토 강우 침투특성을 분석하기 위하여 실험을 크게 연속강우와 반복강우로 나누어 수행하였다. 시료는 강원도 인제군의 산사태 발생지역의 편마암 풍화토를 사용하였으며, 현장풍화토의 물성값은 표 1과 같다.

표 1. 편마암 풍화토 시료의 물성값

	Description	Property
현장조건	Specific gravity	2.637
	Wet density	1.769
	Dry density	1.548
	Moisture content	14.28%
입도시험결과	Effective particle size	0.084
	$D_{30}$ particle size	0.32
	$D_{60}$ particle size	0.895
	Uniformity coefficient	10.7
	Coefficient of curvature	1.4
액소성시험결과	Liquid limit	32.39%
	Plastic limit	19.85%
	Plasticity index	12.54
다짐시험결과	Max. dry density	1.768
	Min. dry density	1.322
	OMC	7.5%

흙의 단위중량은 다짐시험의 결과와 현장 단위중량조건으로부터  $1.35\text{g}/\text{cm}^3$ ,  $1.55\text{g}/\text{cm}^3$ ,  $1.61\text{g}/\text{cm}^3$ 으로 선정하였다. 칼럼 내 시료는 50cm 높이를 10층으로 나누어 다짐을 실시하여 목표 단위중량에 맞게 성형하였다. 정량펌프를 이용한 강우량의 산정방법은 다음과 같다.

$$\text{강우량}(\text{cm}/\text{min}) = \text{강우량}(\text{ml}=\text{cc}/\text{min}) / \text{칼럼단면적}((16.5\text{cm})^2 \times \pi \approx 854.87\text{cm}^2) \quad (1)$$

$$\text{강우강도}(\text{mm}/\text{h}) = \text{강우량}(\text{cm}/\text{min}) \times 10(\text{mm로 변환}) \times 60(\text{시간단위로 변환}) \quad (2)$$

먼저 연속강우의 경우, 강우강도와 흙의 단위중량에 따른 인공강우 침투특성을 분석하기 위하여 강우강도 20mm/h, 50mm/h로 선정하였다. 강우 지속시간은 강우강도 20mm/h에서 10시간, 강우강도 50mm/h에서 4시간으로 선정하여 총 강우량 200mm가 되도록 하였다. 칼럼 내에 인공강우를 주입하면서 칼럼 하단에서 인공강우가 배수되도록 하였다.

반복강우의 경우, 반복되는 강우에 의한 침투특성을 분석하기 위하여 강우강도 20mm/h, 흙의 단위중량  $1.35\text{g}/\text{cm}^3$ 로 하고, 강우 지속시간과 비강우 시간을 조정하여 체적함수비의 변화를 측정하였다(표 2).

표 2. 칼럼 실험조건

연속강우	강우강도		강우시간	흙의 단위중량	
	20mm/h		10h	1.35g/cm <sup>3</sup>	
	20mm/h		10h	1.55g/cm <sup>3</sup>	
	20mm/h		10h	1.61g/cm <sup>3</sup>	
	50mm/h		4h	1.35g/cm <sup>3</sup>	
	50mm/h		4h	1.55g/cm <sup>3</sup>	
50mm/h		4h	1.61g/cm <sup>3</sup>		
반복강우	강우강도	흙의 단위중량	강우 지속시간	비강우 시간	반복횟수
	20mm/h	1.35g/cm <sup>3</sup>	1h	1h	5회
	20mm/h	1.35g/cm <sup>3</sup>	1h, 1.5h, 2h, 2.5h, 3h	1h	1cycle
	20mm/h	1.35g/cm <sup>3</sup>	3h, 2.5h, 2h, 1.5h, 1h	1h	1cycle
	20mm/h	1.35g/cm <sup>3</sup>	1h	1h, 1.5h, 2h, 2.5h	1cycle
20mm/h	1.35g/cm <sup>3</sup>	1h	2.5h, 2h, 1.5h, 1h	1cycle	

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 연속강우

연속강우 조건에서 실시한 침투시험의 결과 체적함수비 및 간극수압의 변화는 그림 2와 같다(그림 2). 칼럼 상부로부터 순서대로 체적함수비 센서와 간극수압계가 반응을 하였으며, 체적함수비는 일정 값까지 증가하다가 수렴하였다. 강우 주입을 정지시키고, 칼럼 하단으로 배수가 이루어지면서 체적함수비와 간극수압 값은 감소하였다. 체적함수비 값의 범위는 0~38%, 간극수압 값의 범위는 -100~7kPa이었다.

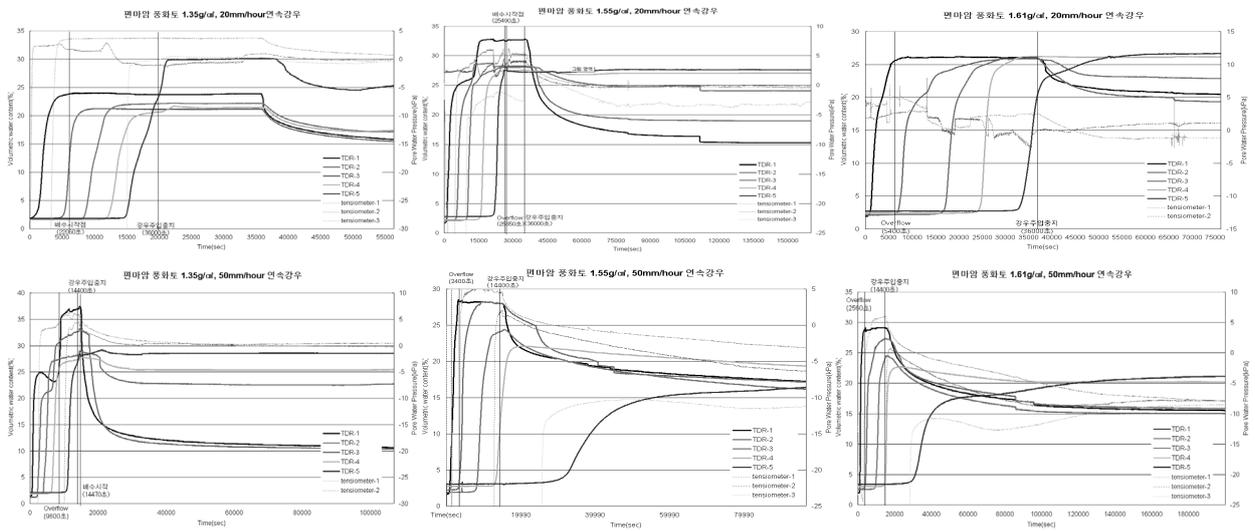


그림 2. 연속강우 조건별 체적함수비 및 간극수압 변화

인공강우가 범람되면서 칼럼 내 흙에 침투되는 강우량이 줄어들었고, 칼럼 내 가장 하단(45cm 깊이)에 위치한 TDR-5의 체적함수비는 실험종료 시까지 증가하는 값을 보였다. 연속강우 실험의 결과, 흙의 단위중량 1.35g/cm<sup>3</sup>, 강우강도 20mm/h 조건을 제외한 5가지 조건에서 모두 지표유출에 해당하는 범람현상이 일어났다. 범람현상은 강우강도가 증가하고, 흙의 단위중량이 높을수록 활발히 일어났다.

평균 강우침투속도는 5개의 TDR 함수비 센서의 변화 시작시간을 각각 측정 계산하여 평균을 계산한

수치이다. 연속강우 강도를 20mm/h, 50mm/h로 조절하여 실험을 수행한 결과 각각  $2.82 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ ,  $3.84 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 로 강우강도가 높을 때 강우 침투속도가 빨랐다. 같은 강우강도 조건에서 흙의 단위중량을 각각  $1.35 \text{g/cm}^3$ ,  $1.55 \text{g/cm}^3$ ,  $1.61 \text{g/cm}^3$ 로 조절하여 실험하였을 때, 20mm/h조건에서 각각  $2.82 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ ,  $1.97 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ ,  $1.25 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ , 50mm/h조건에서 각각  $3.84 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ ,  $2.19 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ ,  $1.61 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 로 흙의 단위중량이 작을수록 강우 침투속도가 빨랐다(그림 3). 이는 강우강도가 증가할수록 초기에 침투되는 인공 강우량이 많아지고, 흙의 단위중량이 낮을수록 흙의 공극률이 증가하여 흙내로 침투되는 강우량이 증가한 결과라고 판단된다.

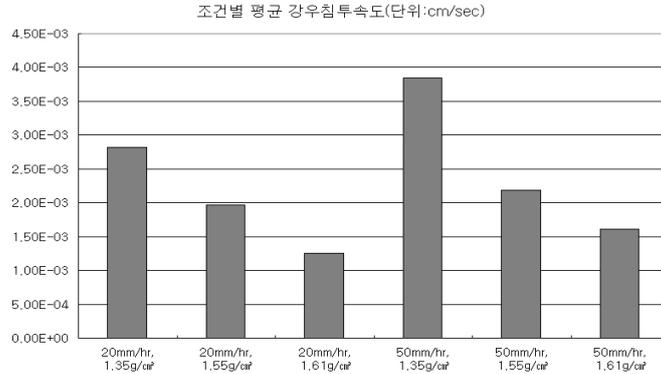


그림 3. 연속강우 각 조건별 평균 강우침투속도

### 3.2 반복강우

반복강우 실험에서는 연속강우 실험에서 일어난 범람현상이 일어나지 않는 조건을 선정하여 실험을 하였다(표 2). 5가지 조건 모두 강우강도 20mm/h, 흙의 단위중량  $1.35 \text{g/cm}^3$ 로 선정하였다. 실험결과 흙의 체적함수비는 강우주입을 중지할 때 감소하였고, 강우주입을 시작할 때 다시 증가하는 것을 볼 수 있었다. 강우주입이 중지되었을 때 증가추세에 있던 체적함수비 값은 강우주입을 다시 시작하면서 급격한 변화를 보였다(그림 4). 이러한 현상은 칼럼 상부에서 빨리 일어났고, 하부로 내려갈수록 천천히 일어났다.

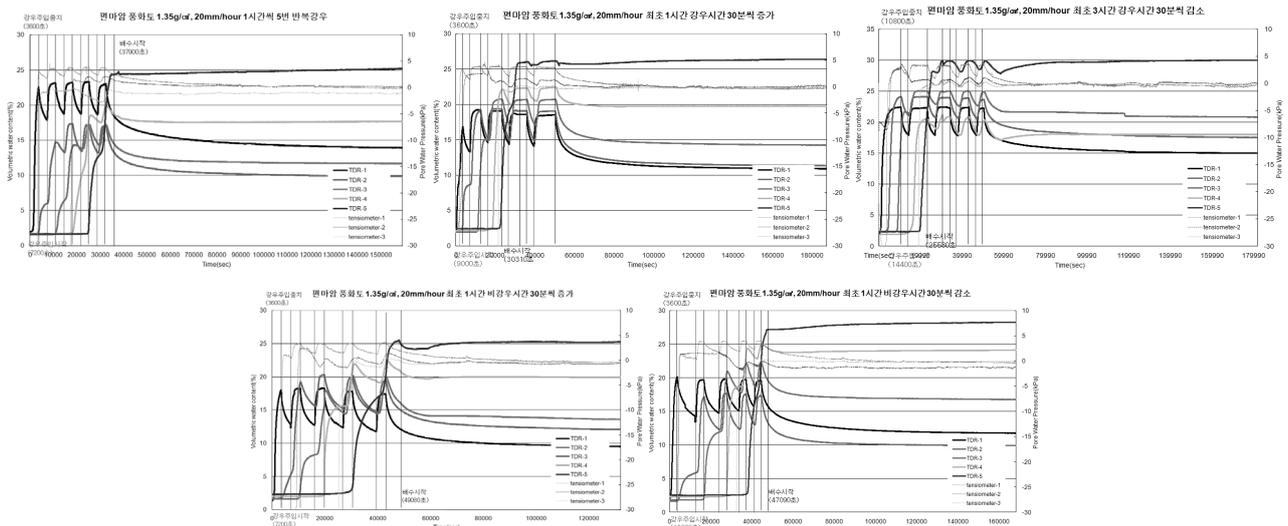


그림 4. 연속강우 각 조건별 체적함수비 및 간극수압 변화

반복강우에 의한 평균 강우침투속도는 실험결과 연속강우에 의한 평균 침투속도보다 느렸다. 강우시간

을 조절한 실험의 총 강우량이 연속강우에 의한 강우량과 같고 흙의 단위중량은 모든 반복강우 실험에 대하여 동일하게 성형하였다. 각 조건별 평균 강우침투 속도는 그림 5의 순서대로  $2.82 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ ,  $1.64 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ ,  $1.82 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ ,  $2.08 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ ,  $1.43 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ ,  $1.07 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 로 나타났다. 1시간 강우 1시간 중지를 5번 반복하는 실험에 비해서 비강우시간을 조절하는 실험이 평균 강우 침투속도가 낮았다. 이로써 총 강우량이 동일하여도 비강우시간이 길어질수록 평균 강우침투속도가 낮은 것을 알 수 있었다. 강우시간 조절실험과 비강우시간 조절실험에서 실험 초기 강우량이 많을수록 강우침투속도는 높았다. 즉, 선행강우량이 많을수록 강우침투속도는 높게 나타났다(그림 5).

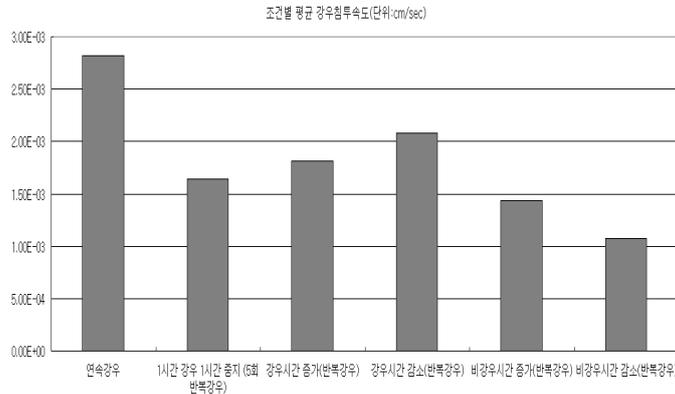


그림 5. 연속강우 및 반복강우 조건별 평균 강우침투속도

#### 4. 결론 및 요약

본 연구에서는 불포화 상태의 편마암 풍화토를 대상으로 강우에 의한 침투특성을 분석하였다.

1. 연속강우 실험에서 흙의 단위중량을 같게하고, 강우강도를 20mm/h, 50mm/h로 조절하여 실험을 수행한 결과 각각  $2.82 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ ,  $3.84 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 로 강우강도가 높을 때 강우 침투속도가 빨랐다. 같은 강우강도 조건에서 흙의 단위중량을 각각  $1.35 \text{g/cm}^3$ ,  $1.55 \text{g/cm}^3$ ,  $1.61 \text{g/cm}^3$ 로 조절하여 실험하였을 때, 20mm/h조건에서 각각  $2.82 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ ,  $1.97 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ ,  $1.25 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ , 50mm/h조건에서 각각  $3.84 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ ,  $2.19 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ ,  $1.61 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 로 흙의 단위중량이 작을수록 강우 침투속도가 빨랐다. 이는 같은 시간에 많은 양의 물이 공급되거나 흙의 공극율이 높아서 흙 속으로 많은 양의 물이 유입되어 침투속도가 빠르게 나타난 것으로 판단된다.

2. 연속강우 실험의 결과 20mm/h,  $1.35 \text{g/cm}^3$ 조건을 제외한 모든 조건에서 지표유출에 해당하는 범람이 일어났다. 강우강도가 높고, 흙의 단위중량이 클수록 많은 양의 강우가 범람하였다. 이는 강우가 흙내로 침투되는 속도보다 강우강도가 높아서 일어난 것으로 판단된다.

3. 반복강우 실험의 결과, 같은 단위중량과 총 강우량이 같은 조건의 연속강우 실험과 비교했을 때, 반복강우에 의한 강우침투속도가 연속강우에 의한 침투속도보다 늦었다. 또, 같은 조건의 반복강우 실험에서 선행강우량이 많을수록 강우침투속도가 빠르고, 비강우 시간이 짧을수록 강우 침투속도가 빨랐다.

#### 참고문헌

1. 김상규, 류지협, 송진규(1996), “불포화토의 함수특성 측정”, 한국지반공학회, Vol.12, No.6, pp.139~151.
2. 김선학(2009), “강우재현모형실험에 의한 불포화 화강풍화토 사면의 간극수압 특성”, 한국산학기술학회

논문지, Vol. 10, No. 11, pp.3287~3295.

3. 김만일(2007), “불포화토 유효공극 내 추적자 거동 특성 평가”, 지질공학, vol.17, No.1, pp.41~47.
4. 채병곤, 이성호, 송영석, 조용찬, 서용석(2007), “산사태 모형실험을 통한 강우강도 및 사면경사와 간극수압과의 관계 연구 : 편마암 풍화토를 대상으로”, 지질공학, Vol.17, No.1, pp.57~64.
5. Brand, E. W., 1984, “Predicting the Performance of Residual Soil Slopes, Proc. of the 11th Int. Conf. on SMFE., San Francisco, Dec., 38.
6. H. Rahardjo, T. H. Ong, R. B. Rezaur, E. C. Leong and D. G. Fredlund(2010), “Response parameters for characterization of filtration”, Environ Earth Sci, DOI 10.1007/s12665-009-0273-4.
7. Lumb, P., 1975, “Slope Failures in Hong Kong”, Qtrly Jour.Geol., 8, pp.31~65.
8. Sun, H. W., Wong, H. N. and Ho, K. K. S., 1998, “Analysis of infiltration in unsaturated ground”, Proceedings of annual seminar on slope engineering in Hong Kong, pp.36~40.
9. V.S Stekauerova, V.Novak and L.Lichner(1999), “Position of infiltration and redistribution front in an unsaturated soil : numerical simulation and tracer technique measurements”, Soil and Tillage Reserch, Vol 51, Issues 1-2, pp 25~33.