

Analyzing Infiltration Characteristics through Rainfall Infiltration Test and Numerical Analysis

Young Karb Song[#], Kwang Jin Jang⁺

National Disaster Management Research Institute, 365 Jongga-ro, Jung-gu, Ulsan, Korea

Abstract

This study conducted a rainfall infiltration test for weathered soils of different parent rocks in order to investigate infiltration characteristics. The changing pattern of pore water pressure was identified and compared with the numerical analysis results to analyze ground infiltration characteristics in relation to rainfall characteristics. The results of rainfall infiltration test and numerical analysis showed that the infiltration capacity became higher when the infiltration coefficient of weathered soil was large given that the same rainfall intensity was applied. Additionally, it was found that the movement of wetting front was fast in accordance with the changing rainfall intensity. The analysis results indicated that ground infiltration coefficient, rainfall intensity and duration were the major factors influencing ground infiltration process.

Key words: slope stability, rainfall infiltration, rainfall infiltration test, numerical analysis, liquefaction

1. 서론

지속적인 강우 혹은 집중강우가 지반에 침투됨에 따라 급경사지 붕괴가 발생한다. 많은 연구자들은 오랜 기간 동안 급경사지 붕괴에 대한 매커니즘을 연구하였다(Brand, *et. al.*, 1984; Finlay, *et. al.*, 1997; Au, 1998; Franks, 1999; Dai, *et. al.*, 1999; Wong, *et. al.*, 2001; Dai, *et. al.*, 2001). 이러한 연구결과에 의하면 대부분의 급경사지 붕괴는 불포화 상태의 지표면에 강우가 침투(rainfall infiltration)됨에 지반의 강도가 감소하여 발생되었다는 사실을 파악 할 수 있다.

강우발생에 따라 불포화 상태인 급경사지 지표면에 침투된 강우는 지표층의 모관흡수력을 감소시키고 급경사지 지반내부로 이동하면서 침윤선(water front)을 형성한다. 강우침투에 의해 형성된 침윤선의 깊이는 강우조건 및 지반특성, 풍화토 특성 등 다양한 요인들에 의해 결정된다. 모관흡수력은 지반의 강도를 증가시키는 역할을 하기 때문에 침투된 강우로 인하여 모관흡수력이 감소하거나 소멸하면 지반의 강도는 약해지게 된다. 이렇게 약해진 급경사지 지반에 지속적인 강우로 안정성을 확보할 수 없는 한계깊이(critical depth)까지 침투가 발생하면 급경사지 붕괴가 발생하게 된다

[#] The 1st author: Young Karb Song, Tel. +82-52-928-8041, Fax, +82-52-928-8149, e-mail, karb@korea.kr

⁺ Corresponding author: Kwang Jin Jang, Tel. +82-52-928-8043, Fax, +82-52-928-8149, e-mail, y13460@korea.kr

(Song, *et. al.*, 2013). 이러한 침투 메커니즘은 포화도와 간극수압(모관흡수력) 분포에 영향을 끼치게 되어 사면의 불안정 및 지반의 액상화(지진)에 의한 위험도 평가에 응용될 수 있다. 이에 많은 연구자들은 실내모형실험을 이용하여 실제 지반의 침투특성을 파악하고자 하는 연구가 수행되었다(Kim, *et. al.*, 2008; Park, *et. al.*, 2011; Kim, *et. al.*, 2012). 과거 연구사례를 바탕으로 수치해석과 실증실험을 기반으로 한 여러 종류의 지반, 강우강도, 침투에 의한 간극수압의 변화 등의 해석이 필요하다고 판단하였다.

본 연구에서는 강우량에 따른 불포화 지반의 침투특성을 파악하기 위해 규장질 화강암 풍화토, 석회암 풍화토, 편마암 풍화토 등 여러 종류의 시료와 자체적으로 제작된 모형실험장비를 이용하여 침투모형실험을 실시하였으며 간극수압 변화양상을 도출하여 수치해석 결과와 비교하여 강우량에 대한 지반 침투특성을 파악해보고자 하였다.

II. 1차원 침투모형시험

1. 침투모형시험

본 절에서는 1차원 침투모형시험 장치를 이용하여 불포화 지반의 강우 침투특성을 분석을 수행하였다. <Figure 1>은 침투모형시험 개요도를 나타낸 것이다. 1차원 침투모형시험 장치는 강우재현장치, 원형컬럼, 계측 및 데이터 측정기기로 구성된다. 원형컬럼의 내부 직경은 28cm이고, 각 20cm 높이의 컬럼 5개를 조립하여 총 1m 높이의 토층을 모사하였다. 시료를 채운 컬럼의 높이별 간극수압의 변화를 측정하기 위하여 텐시오미터(tensiometer)를 사용하였으며, 데이터로거를 연결하여 20분 간격으로 컬럼 높이별 간극수압을 측정하였다.

침투모형시험은 강원도 인제군, 삼척시, 춘천시 3개 지역의 규장질 화강암(felsic granite) 풍화토, 석회암(limestone) 풍화토, 편마암(gneiss) 풍화토를 대상으로 실시하였다. 대상지역은 13개 풍화토층으로 구분된

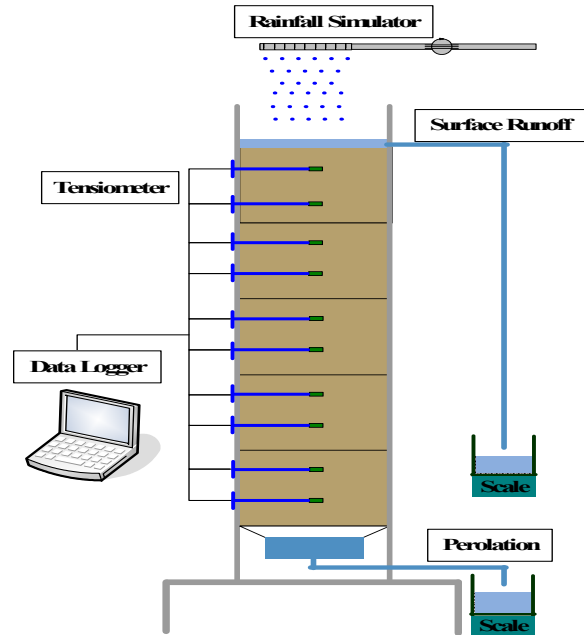


Figure. 1. Schematic diagram of instrument for rainfall infiltration

국립방재연구소의 지반공학도(국립방재연구소, 2010)를 기준으로 선정하였다. 시험시료는 표토층을 제거한 후 채취하였으며, 체분석을 통해 입경 4.76 mm 이하(No. 4체 통과시료)의 시료만을 사용하였다. 시료의 물리적 특성은 <Table 1>과 같다. 본 실험에 앞서 시험시료에 대해 현장투수계수(In-situ Permeability)를 측

Table 1. Basic geotechnical properties based on characteristic of weathered soil

Classification	Igneous rock	Sedimentary rock	Metamorphic rock
	felsic granite	limestone	gneiss
Moisture Content(%)	9.92	26.25	14.99
Specific Gravity	2.59	2.69	2.68
Unit weight (kN/m ³)	16.44	17.49	15.98
Density (kN/m ³)	16.80	17.80	16.30
Dry unit weight (kN/m ³)	14.98	13.87	13.90
Void ratio	0.736	0.92	0.89
Porosity (%)	42.40	47.51	47.14
Degree of saturation (%)	34.37	78.77	45.09
Gravel (%)	38.06	1.47	23.87
Sand (%)	58.89	15.67	57.46
Silt & Clay (%)	3.05	82.87	18.67
Liquid Limit (%)	-	38.67	24.19
Plasticity Index	-	13.67	15.71
USCS	SP, SW	CL, ML	SC

Table 2. In-situ conductivity according to weathered soil type

Weathered Soil Type		In-situ Permeability		
		Depth (cm)	k_s (m/s)	Average value of k_s (m/s)
igneous rock	felsic granite	20	3.00E-05	1.87E-05
		40	1.48E-05	
		60	1.12E-05	
sedimentary rock	limestone	20	2.25E-05	8.28E-06
		40	1.90E-06	
		60	4.41E-07	
metamorphic rock	gneiss	20	4.75E-05	2.28E-05
		40	1.34E-05	
		60	7.51E-06	

정하였다. 현장투수시험은 현장투수계수 측정장치 Model 2800K1 Guelph Permeameter를 이용하여 심도별(0.2m, 0.4m, 0.6m)로 측정하였으며, 측정값은 <Table 2>에 나타내었다.

불포화 지반의 강우 침투특성 분석을 위한 침투모형 시험 수행 시 동일한 초기조건을 형성하기 위해서 중량 함수비 15%를 유지하면서 동일한 습윤밀도를 가지도록 다짐하였으며, 다짐 후 흡수력의 변화가 발생되지 않을 때 강우재현을 실시하였다. 강우재현은 여름철 우기에 가우가 집중되는 우리나라 기상조건 및 강우조건에 따른 침투특성 분석을 위해 실제 자연현상에 비해 비교적 큰 강우강도(30, 40, 60, 90mm/hr)로 실험을 실시하였다. 침투모형시험에 적용된 강우조건을 <Table 3>에 나타내었다.

Table 3. Rainfall types and properties of instrument for rainfall infiltration

Petrogenesis	Weathered Soil Type	Rainfall Condition		
		Rainfall Intensity (mm/h)	Rainfall Duration (h)	Total Rainfall (mm)
Igneous rock	felsic granite	60	12	720
Sedimentary rock	limestone	30	12	360
		60	12	720
Metamorphic rock	gneiss	40	12	360
		60	12	720
		90	12	1,080

2. 침투모형시험 결과

강우침투에 따른 깊이별 간극수압의 변화 즉, 컬럼 깊이별 간극수압이 시간 경과에 따라 정상상태에 도달하는 과정을 풍화토별 및 강우시간에 따라 구분하여 <Figure 2> ~ <Figure 7>에 나타내었다. 침투모형시험을 통한 간극수압은 텐션미터에 측정된 데이터 값을 이용하여 산출하였다. 강우가 지표면으로부터 침투하여 각 깊이의 계측센서에 도달하게 되면 텐션미터로 측정되는 부(-)의 간극수압은 감소하게 된다. 각 그래프의 깊이별 초기 값은 시료 성형 후 안정화 상태에서의 간극수압이다. 각 시험마다 동일한 조건을 갖도록 불포화 풍화토층을 모사하려고 하였으나, 풍화토별 컬럼 상하부의 간극수압은 최대 -75.3kPa, 최소 -19.4kPa 차이가 발생하였다. 이는 시료종류에 따른 영향과 불포화 풍화토 시료다짐 시의 오차 등 실험조건에 기인한 것으로 판단된다.

1) 풍화토별 간극수압 변화

풍화토별 간극수압의 변화는 강우 발생 전(t=0) 불포화 풍화토층은 모관흡수력으로 인하여 부의 간극수압이 깊이별로 규장질 화강암 풍화토는 -29.1 ~ -19.4 kPa (<Figure 2>), 석회암 풍화토는 -69.4 ~ -28.4 kPa (<Figure 3>)와 -75.3 ~ -39.2 kPa (<Figure 4>), 편마암 풍화토는 -54.0 ~ -46.5 kPa (<Figure 5>), -60.7 ~ -59.0 kPa (<Figure 6>), -60.7 ~ -44.1 kPa (<Figure 7>)의 범위로 나타났다. 일반적으로 컬럼 상단부(H=0.95m)에서 부(-)의 간극수압이 큰 값을 나타내고, 하단부(H=0.05m)에서는 상대적으로 작은 값을 나타내는 것으로 분석되었다. 즉, 침투모형시험 컬럼의 상부영역으로 갈수록 부(-)의 간극수압이 큰 상태를 나타내었다. 본 연구에서는 측정된 간극수압의 변화가 거의 없는 상태, 간극수압이 -5kPa 이하의 값을 나타내는 상태를 정상상태로 간주하였다. 풍화토별로 강우재현이 60mm/hr로 동일한 규장질 화강암 풍화토(<Figure 2>), 석회암 풍화토(<Figure 4>), 편마암 풍화토(<Figure 6>))를 분석해 보면, 강우재현 후 규장질 화강암 풍화토는 약 2.2

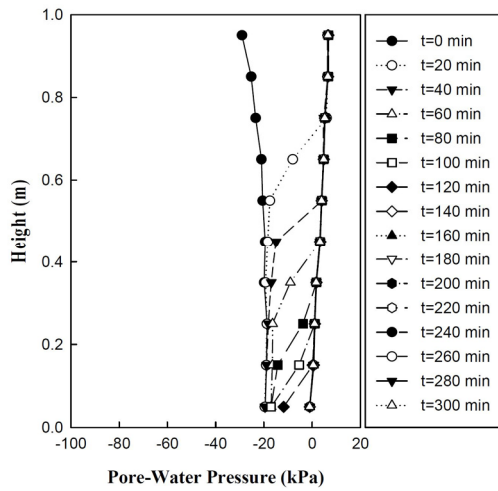


Figure 2. Variation of pore-water pressure by experiment (felsic granite, 60mm/hr)

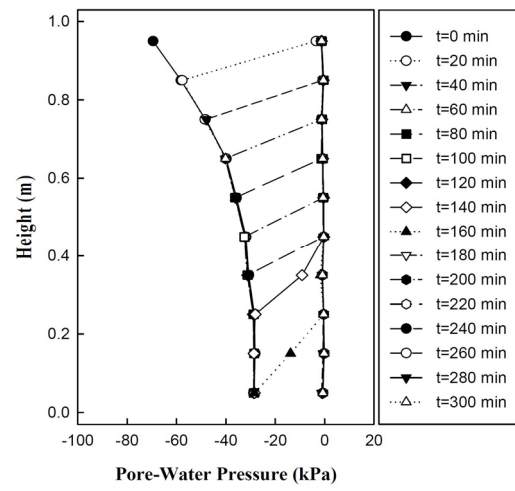


Figure 3. Variation of pore-water pressure by experiment (limestone, 30mm/hr)

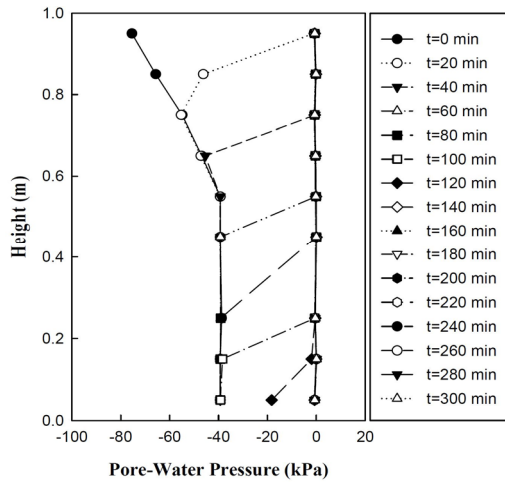


Figure 4. Variation of pore-water pressure by experiment (limestone, 60mm/hr)

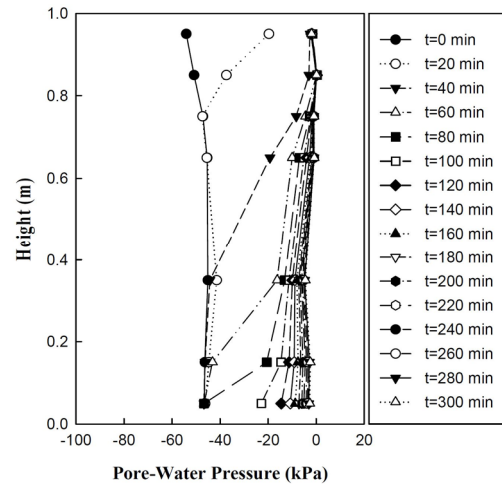


Figure 5. Variation of pore-water pressure by experiment (gneiss, 40mm/hr)

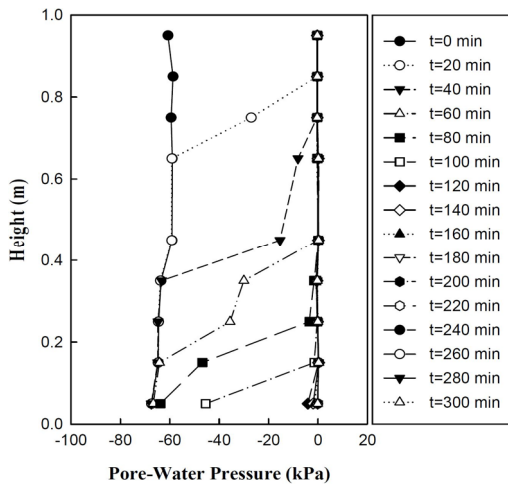


Figure 6. Variation of pore-water pressure by experiment (gneiss, 60mm/hr)

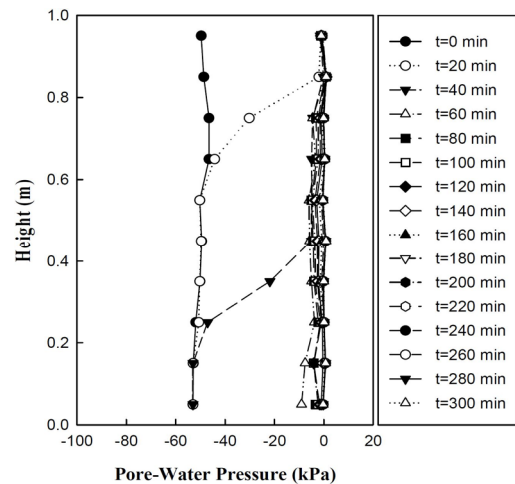


Figure 7. Variation of pore-water pressure by experiment (gneiss, 90mm/hr)

시간(130분), 석회암 풍화토는 2.1시간(126분), 편마암 풍화토는 약 2.0시간(122분)이 경과되면 간극수압은 정상상태를 유지하는 것으로 분석되었다. 풍화토별로 정상상태에 도달하는 시간은 최대 0.13시간(8분) 정도 차이로 신뢰성 있는 결과를 도출하였으나, 원지반의 투수성(편마암)규장질 화강암)석회암)에 비례하여 도출되지는 않았다.

풍화토별 시간 경과에 따른 간극수압을 분석해 보면 (<Figure 2>, <Figure 4>, <Figure 6>), 강우재현 후 시간경과에 따라 상단부(H=0.95)부터 간극수압이 감소하기 시작하여 점차 하단부로 확장되어 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 강우에 의한 습윤전선(wetting front)이 하방향으로 진행함을 의미한다. 풍화토별로 습윤전선의 진행은 시간별로 동일하게 나타나진 않았다. 강우재현 초기의 경우(t=20) 습윤전선의 진행은 많은 차이를 보였으나, 시간이 지남에 따라 풍화토별로 유사한 양상을 나타나는 것으로 분석되었다. 강우재현에 따른 간극수압은 경과시간에 따라 감소하여 결국에는 시간이 경과하더라도 더 이상 간극수압의 변화가 없는 상태에 도달하는 것으로 분석되었다.

2) 강우강도에 따른 간극수압 변화

강우강도에 따른 간극수압 변화양상을 파악하기 위해서는 동일 시료에 대한 시험결과를 비교해 볼 필요가 있다. <Figure 3>과 <Figure 4>, <Figure 5>~<Figure 7>은 석회암 및 편마암 풍화토시료에 대해 강우강도 변화에 따른 간극수압 변화를 나타낸 것이다. 석회암 풍화토시료의 경우 강우강도 30mm/hr로 강우재현 후 간극수압 감소시점(초기 간극수압에서 1kPa 이상감소)은 컬럼 상단부 계측지점(H=0.95m)에서 6분이었으며, 정상상태에 도달하는 시점은 모든 깊이(H=0.05m~0.95m)서 178분으로 나타났다(<Figure 3>). 강우강도가 60mm/hr로 재현하였을 경우에는 간극수압 감소시점은 7분(H=0.05m)이었으며, 정상상태에 도달하는 시점은 126분으로 분석되었다(<Figure 4>). 또 다른 동일 시료(편마암)에 강우강도를 달리 적용한 <Figure 5>

의 경우 강우강도 40mm/hr로 강우재현 후 간극수압 감소시점(초기 간극수압에서 1kPa이상 감소)은 7분이었으며, 정상상태에 도달하는 시점은 146분으로 나타났다. 강우강도가 60mm/hr로 재현하였을 경우에는 간극수압 감소시점은 5분이었으며, 정상상태에 도달하는 시점은 122분으로 분석되었다(<Figure 6>). 강우강도가 더욱 증가된 90mm/hr의 경우는 간극수압 감소시점은 10분이었으며, 정상상태에 도달하는 시점은 62분으로 분석되었다.

III. 침투 수치해석

1. 수치해석

침투모형시험으로 분석한 간극수압 변화양상을 수치해석 프로그램인 GEO-SLOPE사의 SEEP/W를 사용하여 비교검토하고자 하였다. 본 연구에서는 수치해석에 필요한 함수특성곡선을 구하기 위해 비교란 시료채취기를 이용하여 풍화토별 현장시료를 채취하였다. 채취된 비교란 시료에 대한 함수특성곡선은 SWC-150 Fredlund SWCC Device를 이용하여 습윤 및 건조과정의 함수특성곡선 실험을 수행하였다. 모관흡수력은 0.1~190kPa까지 실험을 수행하여 풍화토별 체적함수비를 도출하였으며, 이를 통해 Fredlund & Xing(1994)의 함수특성곡선 모델식에 적용하고 해석에 필요한 공기함입치와 관련된 곡선맞춤변수 a 와, 함수특성곡선의 기울기와 관련된 곡선맞춤변수 n , 함수특성곡선의 변화와 관련 있는 곡선맞춤변수 m 을 산정하였다. 또한, 불포화도에 대한 투수계수 추정을 위해 시험시료 채취 깊이를 고려하여 심도 20cm의 현장투수계수를 Fredlund, *et. al.*(1994)이 제안한 식(1)을 이용하여 풍화토별 불포화 투수곡선을 산정하였다(<Table 4>).

$$k_r(\psi) = \frac{\int_{\ln(\psi)}^b \frac{\theta(e^y) - \theta(\psi)}{e^y} \theta'(e^y) dy}{\int_{\ln(\psi_{acv})}^b \frac{\theta(e^y) - \theta_w}{e^y} \theta'(e^y) dy} \quad (1)$$

Table 4. Rainfall types and properties of instrument for rainfall infiltration

Petrogenesis	Weathered Soil Type	SWCC fitting parameter			In-situ Permeability k_s (m/s)
		a	m	m	
Igneous rock	felsic granite	8.64	1.18	0.90	3.00E-05
Sedimentary rock	limestone	3.77	0.67	1.25	2.25E-05
Metamorphic rock	gneiss	4.55	0.53	1.18	4.75E-05

여기서, ψ = 모관흡수력, θ = 체적함수비, $b = \ln(1,000,000)$, $y = \log$ 적분을 나타내기 위한 적분더미 변수, a_{ev} = 공기함입치(air entry value)이다.

수치해석 단면은 침투모형시험(〈Figure 1〉)시의 침투모형 컬럼과 동일한 크기(높이 1m, 폭 0.28m)로 실내시험 조건과 동일하게 모델링 하였다. 〈Figure 8〉은 수치해석 형상 및 경계조건을 나타낸 것으로 모델링 양측 경계면은 불투수층으로 모사하였고, 상부에는 침투모형시험 시의 강우재현(강우강도) 경계조건을 적용하였다. 또한 하부 경계조건은 자연배수가 되도록 하였다. 수치해석의 초기 간극수압 분포는 침투모형시험과 일치하게 간극수압이 분포하도록 모델링하는 것은 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 침투모형시험 시 심도

별로 측정된 컬럼 상하부 모관흡수력 평균값을 산정하여 컬럼 상·하부에 평균 모관흡수력 ($\pm 5kPa$)을 적용하여 선형적인 분포를 가질 수 있도록 모델링 하였다.

2. 수치해석 결과

1) 풍화도에 따른 간극수압 변화

수치해석을 이용하여 풍화도 및 강우강도에 따른 간극수압 변화양상을 〈Figure 9〉~〈Figure 14〉에 나타내었다. 수치해석을 통한 초기모델링 상태는 침투모형시험과 마찬가지로 부(-)의 간극수압이 상부영역으로 갈수록 커지는 분포양상을 나타낸다. 간극수압 감소 또한 시간경과에 따라 감소하여 결국에 시간이 경과하더라도 더 이상 간극수압의 변화가 없는 정상상태에 도달하였다. 침투모형시험과 동일하게 풍화도별로 강우강도가 60mm/hr를 적용한 간극수압 변화양상은 〈Figure 10〉, 〈Figure 11〉, 〈Figure 13〉에 나타내었다. 강우재현 후 모든 깊이(H=0.05m~0.95m)에서 규장질 화강암 풍화도는 147분, 석회암 풍화도는 195분, 편마암 풍화도는 145분이 경과되면 간극수압은 정상상태를 유지하는 것으로 분석되었다. 정상상태에 도달하는 시간은 침투모형시험 결과와 비교하여 규장질 화강암 풍화도는 17분(113%), 석회암 풍화도는 69분(154%), 편마암 풍화도는 23분(118%) 증가되어 나타났다.

2) 강우강도에 따른 간극수압 변화

강우강도에 따른 간극수압 변화양상을 파악하기 위해서는 동일 시료에 대한 시험결과를 비교분석하였다. 〈Figure 9〉과 〈Figure 10〉, 〈Figure 13〉~〈Figure 14〉는 석회암 및 편마암 풍화도시료에 대해 강우강도 변화에 따른 간극수압 변화를 나타낸 것이다. 석회암

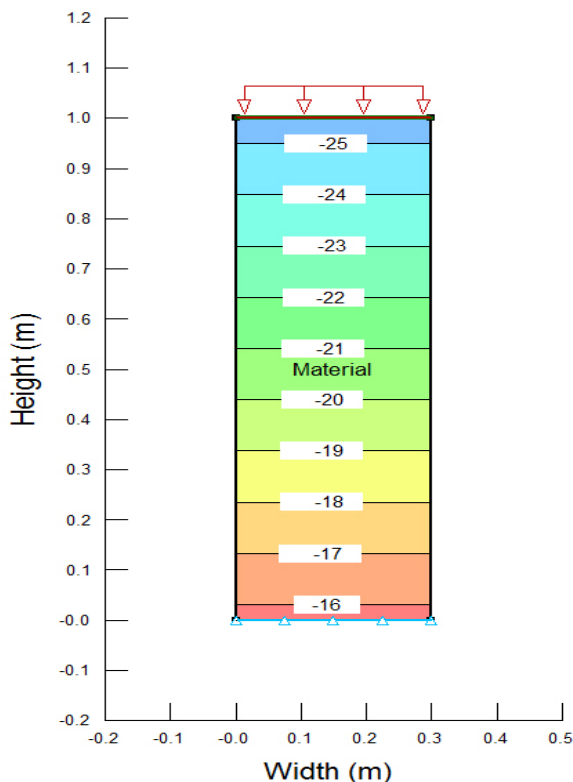


Figure 8. Initial boundary condition for Numerical Analysis

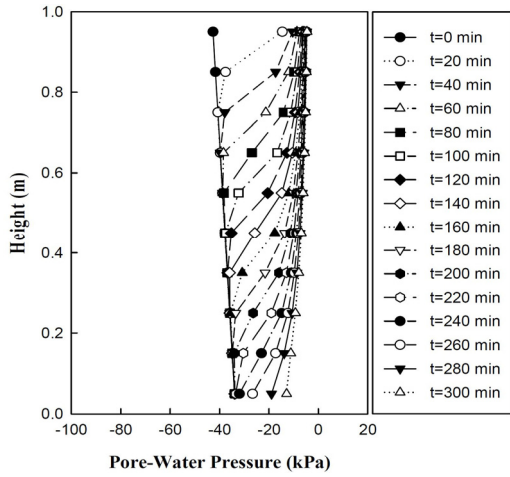


Figure 9. Variation of pore-water pressure by Numerical Analysis(limestone, 30mm/hr)

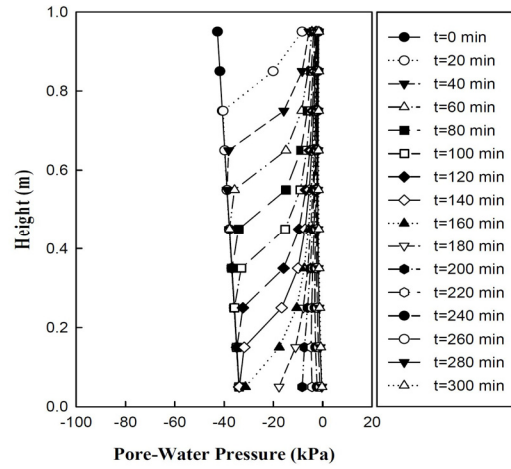


Figure 10. Variation of pore-water pressure by Numerical Analysis(limestone, 60mm/hr)

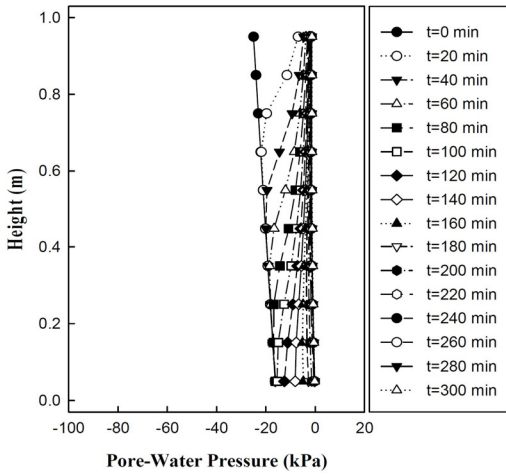


Figure 11. Variation of pore-water pressure by Numerical Analysis(granite, 60mm/hr)

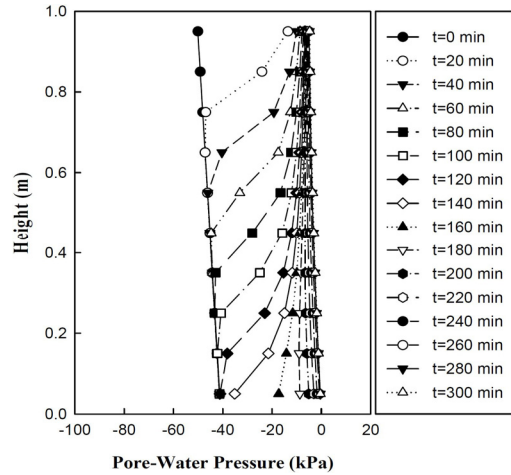


Figure 12. Variation of pore-water pressure by Numerical Analysis(gneiss, 40mm/hr)

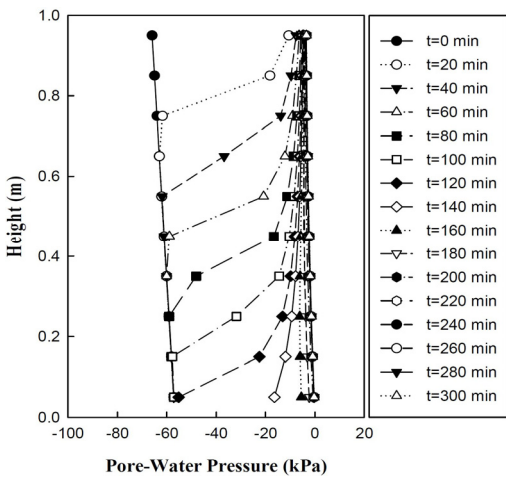


Figure 13. Variation of pore-water pressure by Numerical Analysis(gneiss, 60mm/hr)

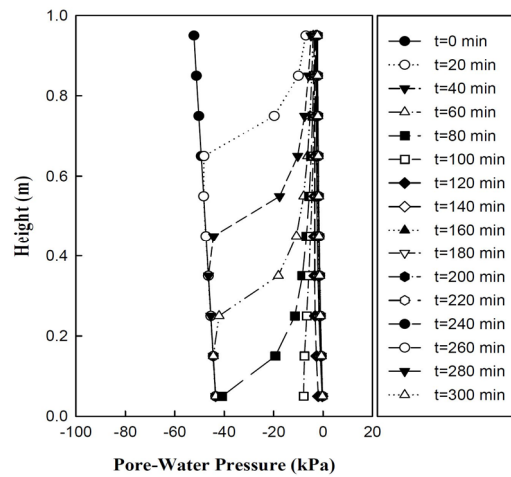


Figure 14. Variation of pore-water pressure by Numerical Analysis(gneiss, 90mm/hr)

풍화토의 경우 강우강도 30mm/hr로 강우재현 후 간극수압 감소시점(초기 간극수압에서 1kPa이상 감소)은 44분(H=0.95m)이었으며, 정상상태에 도달하는 시점은 314분(H=0.05m)으로 나타났다(Figure 9). 강우강도가 60mm/hr로 재현하였을 경우(Figure 10)에는 간극수압 감소시점은 20분이었으며, 정상상태에 도달하는 시점은 195분으로 분석되었다. 편마암 풍화토에 40mm/hr로 강우를 재현한 경우의 간극수압 감소시점(초기 간극수압에서 1kPa이상 감소)은 41분(H=0.05m)이었으며, 정상상태에 도달하는 시점은 176분으로 나타났다(Figure 12). 또한, 강우강도가 60mm/hr로 재현하였을 경우(Figure 13)에는 간극수압 감소시점은 23분(H=0.05m)이었으며, 정상상태에 도달하는 시점은 145분으로 분석되었다. 강우강도가 더욱 증가된 90mm/hr의 경우는 간극수압 감소시점은 11분(H=0.05m)이었으며, 정상상태에 도달하는 시점은 98분으로 분석되었다(Figure 14).

IV. 강우침투특성 비교분석

본 절에서는 침투모형시험과 수치해석을 통해 도출된 습윤전선의 깊이(wetting depth)를 비교·분석하고자 하였다. 침투모형시험과 수치해석 시 강우재현 초기에는 습윤대가 존재하지 않고 시간이 경과함에 따라 켈럼과 평행한 형태로 습윤대가 형성된다는 사실은 앞서 분석한 결과로부터 파악할 수 있었다. 강우발생시 지표 침투로 인하여 형성된 습윤대는 대상 시료의 물리적 특성, 함수특성, 투수특성 등에 따른 달라지는 고유한 값이다.

(Figure 15)는 풍화토 종류(규장질 화강암, 석회암, 편마암 풍화토)에 따라 강우강도 60mm/hr로 강우재현 후 경과시간에 따른 침투모형시험(experiment) 습윤전선의 실제 변화양상과 수치해석(Numerical Analysis)을 통해 도출한 습윤전선을 나타낸 것이다. 침투모형시험을 통해 도출한 습윤전선의 진행은 경과시간에 따라 직선적으로 증가되는 양상을 보이며, 켈럼하부(H=0.05m)까지 도

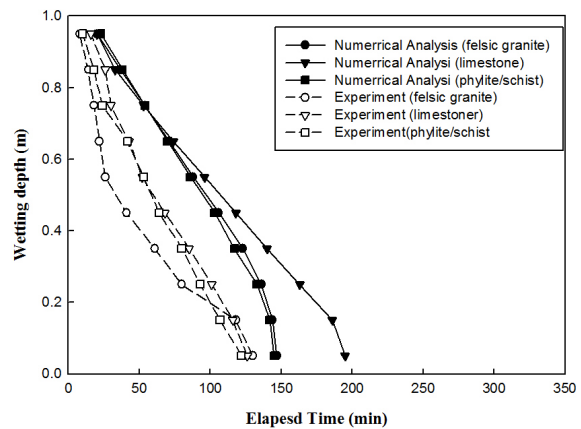


Figure 15. Results of wetting front depths according to time

달하는데 규장질 화강암 풍화토(experiment(felsic granite))는 130분, 석회암 풍화토(experiment(limestone))는 126분, 편마암 풍화토(experiment(gneiss))는 122분이 소요되는 것으로 분석되었다. 풍화토 종류별로 강우강도를 동일하게(60mm/hr) 적용한 결과, 습윤전선이 켈럼하부에 도달하는 시간차는 최대 0.13시간(8분) 정도의 차이를 나타냄으로써 비교적 신뢰성 있는 결과를 도출하였으나, 원지반의 투수성에 비례하여 습윤전선이 진행되지는 않았다. 풍화토 종류별로 습윤전선의 진행이 원지반 투수성과 비례하여 나타나지 않고, 이처럼 상이하게 나타나는 이유는 침투모형시험 시 시료 다짐조건과 간극비가 전 단면에 걸쳐 일정하지 않으므로 투수계수가 큰 불특정한 단면으로 침투가 발생하였기 때문이라 판단된다.

수치해석을 통해 도출된 풍화토별 습윤전선의 양상은 강우발생 초기에는 직선적으로 증가하나, 일정시점 이후부터는 급격히 감소하여 점차 일정한 비율로 수렴한다. 이는 풍화토별 투수계수 값에 도달하여 나타나는 현상인 것으로 판단된다. 수치해석을 통해 도출된 풍화토별 습윤전선은 규장질 화강암 풍화토(Numerical Analysis(felsic granite))는 147분, 석회암 풍화토(Numerical Analysis(felsic limestone))는 195분, 편마암 풍화토(Numerical Analysis(gneiss))는 145분 경과 후 켈럼하부까지 도달하는 것으로 나타났다. 수치해석으로 도출한 습윤전선의 진행양상은 침투모형시험

결과와 비교하여 습윤전선의 진행이 비교적 일정하게 진행되었으며, 풍화토 종류별로 정상상태에 도달하는 시간은 113 ~ 154% 증가되었다. 하지만, 원지반의 투수성에 비례하는 결과를 도출하였다. 즉, 투수계수가 크면 침투능 또한 높게 나온다는 사실을 파악할 수 있었다.

〈Figure 16〉 ~ 〈Figure 17〉은 강우강도 변화에 따른 석회암 및 편마암 풍화토의 침투모형시험과 수치해석을 통해 도출한 습윤전선을 분석한 것이다. 석회암 풍화토(〈Figure 16〉)의 경우 강우강도 30mm/h 및 60mm/h 강우재현 시 컬럼하부(H=0.05m)까지 습윤전선이 도달하는 시간은 침투모형시험의 경우(experiment(30mm/h)) 및 (experiment(60mm/h)) 178분, 126분, 수치해석은(Numerical Analysis(30mm/h)) 및 (Numerical Analysis(60mm/h)) 314분, 195분으로 분석되었다. 수치해석을 통해 도출한 침윤

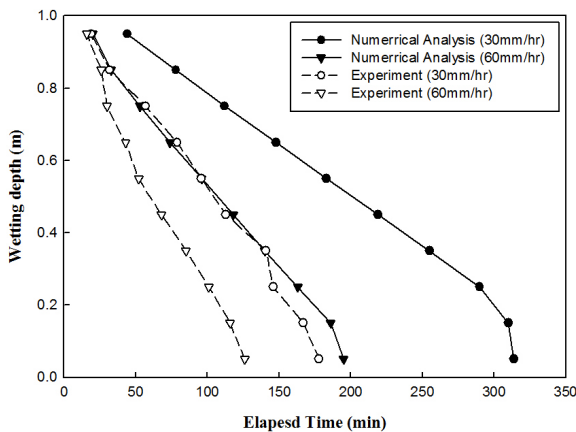


Figure 16. Results of wetting front depths according to rainfall intensity (limestone)

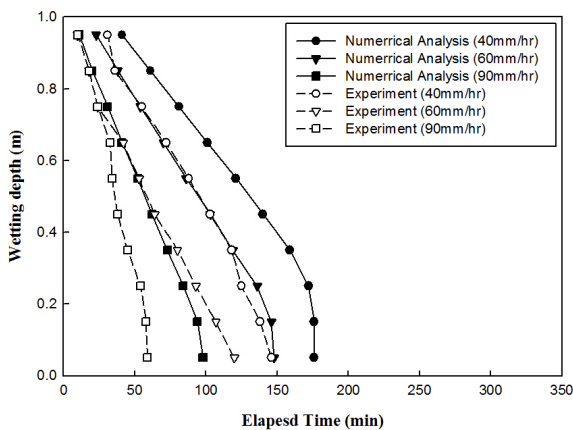


Figure 17. Results of Wetting front depths according to Rainfall intensity (gneiss)

선 도달시간은 침투모형시험 결과와 비교하여 154 ~ 176% 증가함을 보였다. 강우강도를 달리 적용한 편마암 풍화토(〈Figure 17〉)의 경우 40mm/h 및 60mm/h, 90mm/h 강우재현 시 컬럼하부까지 습윤전선이 도달하는 시간은 침투모형시험의 경우(experiment(40mm/h), (60mm/h), (90mm/h)) 146분, 122분, 62분 수치해석(Numerical Analysis (40mm/h), (60mm/h), (90mm/h))은 176분, 145분, 98분으로 분석되었다. 편마암 풍화토의 경우 또한 수치해석을 통해 도출한 침윤선 도달시간은 침투모형시험 결과와 비교하여 각각 120, 118%, 158% 증가함을 보였다.

석회암 및 편마암 풍화토 모두 초기 함수비 분포에 따라 모관흡수력의 차이가 발생함을 알 수 있었으며, 강우강도가 클수록 습윤전선의 진행이 빠르게 진행됨을 파악할 수 있었다. 이와 같은 결과는 앞서 분석한 바와 같이 강우강도가 크면 동일 강우지속시간 동안의 강우량이 커짐에 기인하는 것으로 판단된다.

V. 결론

본 연구에서는 침투모형시험 및 수치해석을 실시하여 불포화토의 강우 침투특성을 분석하였다. 풍화토 종류별로 강우강도(60mm/hr)를 동일하게 적용한 침투모형시험 결과, 습윤전선이 컬럼하부에 도달하는 시간차는 최대 0.13시간 정도의 차이를 나타냄으로써 비교적 신뢰성 있는 결과를 도출하였으며, 수치해석 결과를 통해 투수계수가 크면 침투능 또한 높게 나온다는 사실을 파악할 수 있었다. 강우강도(40mm/h, 60mm/h, 90mm/h) 변화에 따른 습윤전선의 깊이를 분석한 결과, 침투모형시험의 경우 컬럼 하부까지 습윤전선이 도달하는 시간은 146분, 122분, 62분으로 분석되었으며, 수치해석결과는 침투모형시험 결과와 비교하여 각각 120, 118%, 158% 증가된 양상을 나타내었다. 이러한 결과로부터 강우강도가 클수록 습윤전선의 진행이 빠르게 진행됨을 파악할 수 있었다. 이러한 분석결과를 통해 지반의 투수계수, 강우강도와 지속시간은 지반의

침투과정에 영향을 주는 주요 인자임을 확인할 수 있었다. 강우 외에 급경사지 붕괴 발생에 관련이 있는 요인으로는 지형과 지반, 식생 등이 있다. 급경사지를 구성하고 있는 지반은 붕괴 메커니즘을 해석하는 데 매우 중요한 요소이다. 따라서 실질적인 급경사지 거동해석을 위해서는 불포화 지반의 역학적 특성과 침투특성을 파악하는 것이 필수적이라 할 수 있다.

References

- Au, S. W. C. 1998. Rain-induced Slope Instability in Hong Kong. *Engineering Geology*. 51(1): 1-36.
- Brand, E. W. 1984. Landslides in Southeast Asia: A State of the Art Report. *Proc. 4th International Symposium. on Landslides*. 1: 17-59.
- Dai, F. C., C. F. Lee, and S. J. Wang. 1999. Analysis of Rainstorm-induced Slide-debris Flows on Natural Terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Engineering Geology*. 51(4): 279-290.
- Dai, F. C., C. F. Lee, J. Li, and Z. W. Xu. 2001. Assessment of Landslide Susceptibility on the Natural Terrain of Lantau Island, Hong Kong. *Environmental Geology*. 40(3): 381-391.
- Finlay, P. J., R. Fell, and P. K. Maguire. 1997. The Relationship between the Probability of Landslide Occurrence and Rainfall. *Canadian Geotechnical Journal*. 34(6): 811-824.
- Franks, C. A. M. 1999. Characteristics of Some Rainfall-induced Landslides on Natural Slopes, Lantau Island, Hong Kong. *Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 32(3): 247-259.
- Fredlund, D. G., A. Xing, and S. Huang. 1994. Predicting the Permeability Function for Unsaturated Soils Using the Soil-water Characteristic Curve. *Canadian Geotechnical Journal*. 31(4): 533-546.
- Kim, Hoon, Yun Tae Kim, Thk Ki Min, Ho Sung Shin, and Dug Keun Park. 2012. Analysis of Seepage Velocity in Unsaturated Weathered Soils Using Rainfall Infiltration Test. *Journal of the Korea Geotechnical Society*. 28(2): 71-78.
- Kim, Man Il, Byung Gon Chae, Yong Chan Cho, and Yong Seok Seo. 2008. Study on Rainfall Infiltration Characteristics for Weathered Soils: Analysis of Soil Volumetric Water Content and Its Application. *The Journal of Engineering Geology*. 18(1): 83-92.
- Nation Institute for Disaster Prevention. 2010. Assessment of Infiltration Phases Considering Ground Characteristics of Steep-Slope. Research Report.
- Park, Kyu Bo, Byung Gon Chae, and Hyuck Jin Park. 2011. Analysis of Rainfall Infiltration Velocity in Unsaturated Soils Under Both Continuous and Repeated Rainfall Conditions by an Unsaturated Soil Column Test. *The Journal of Engineering Geology*. 21(2): 133-145.
- Song, Young Karb, Young Uk Kim, and Dong Wook Kim. 2013. Recommendation of I-D Criterion for Steep-Slope Failure Estimation Considering Rainfall Infiltration Mechanism. *Journal of the Korea Geotechnical Society*. 29(5): 65-74.
- Wong, J. C., H. Rahardjo, D. G. Toll, and E. C. Leong. 2001. Modified Triaxial Apparatus for Shearing-infiltration Test. *Geotechnical Testing Journal*. 24(4): 370-380.
- Korean References Translated from the English*
- 국립방재연구소. 2010. 침투양상 분석에 따른 사면 거동특성 및 안전을 평가(I). 연구보고서.
- 김만일, 채병곤, 조용찬, 서용석. 2008. 국내 풍화토의 강우 침투특성 분석을 위한 실험연구: 토양 체적함수비 분석 및 적용성 평가. *지질공학회지*. 18(1): 83-92.
- 김훈, 김윤태, 민덕기, 신호성, 박덕근. 2012. 강우침투실험을 통한 불포화 지반의 강우 침투속도 분석. *한국지반공학 회논문집*. 28(2): 71-78.
- 박규보, 채병곤, 박혁진. 2012. 불포화토 칼럼시험을 통한 연속 강우와 반복강우의 강우침투속도 분석. *지질공학회지*. 21(2): 133-145.
- 송영갑, 김영옥, 김동욱. 2013. 강우침투 메커니즘을 이용한 급경사지 붕괴예측 I-D 기준식 제안. *지반공학회지*. 29(5): 65-74.

침투모형시험 및 수치해석을 통한 침투특성 분석

국문초록 본 연구에서는 강우침투특성을 규명하기 위해 모암의 성질이 다른 풍화토를 대상으로 침투모형시험과 수치해석을 실시하여 풍화토별 간극수압 변화와 강우강도에 따른 간극수압 변화양상을 분석하였다. 침투모형시험 장치는 자체 제작한 1차원 침투모형시험장비를 이용하였으며, 수치해석은 침투모형시험장비와 동일한 실내시험 조건 및 경계조건으로 모델링하여 분석하였다. 모형시험 및 수치해석 결과 동일한 강우강도를 적용한 결과 습윤전선이 컬럼하부에 도달하는 시간차는 유사하게 나타났다. 투수계수가 크면 침투능 또한 높게 나온다는 사실을 파악할 수 있었다, 또한 강우강도변화에 따라 습윤전선의 진행이 빠르게 진행됨을 파악할 수 있었다. 이러한 분석결과를 통해 지반의 투수계수, 강우강도와 지속시간은 지반의 침투과정에 영향을 주는 주요 인자임을 확인할 수 있었다. 이러한 침투 메커니즘은 사면 안정해석에 적용되며, 지반의 액상화(지진)에 의한 위험도 평가에 응용될 수 있다.

주제어 : 사면안정, 강우침투, 침투모형시험, 수치해석, 액상화

Profiles **Young Karb Song** : He received his M.A. and Ph.D. from Myongji University. He is a Principal Researcher of National Disaster Management Research Institute, Ministry of Interior and Security. His research interests included disaster management, Landslide, Steep Slope, Unsaturated soil(karb@korea.kr).

Kwang Jin Jang : He received his B.A. and M.A. from Yeungnam University. He is a Researcher of National Disaster Management Research Institute, in which he has worked as Professional Engineer(PE) and Project Management Professional(PMP). His interesting subject and area of research is Disaster Management, Hydrology and Hydraulics(y13460@korea.kr).