

# 배수성능 평가를 위한 침투능 산정기법에 관한 연구 I

## Estimation Method of Infiltration Capacity for Assessment of Drainage Capacity I

정 지 수<sup>†</sup> · 심 정 훈<sup>1)</sup> · 황 영 철<sup>2)</sup> · 이 승 호<sup>3)</sup>

Jisu Jeong · Jeonghoon Shim · Youngcheol Hwang · Seungho Lee

Received: November 5<sup>th</sup>, 2019; Revised: November 13<sup>th</sup>, 2019; Accepted: November 25<sup>th</sup>, 2019

**ABSTRACT** : Slope failure analysis entails proper understanding of various factors as well as the characteristics of ground conditions, which are difficult to achieve due to technological limits. Despite a number of past studies to clarify possible factors triggering slope failures, the impact of rainfall characteristics and infiltration rate, which are the key to estimation of slope stability in wet condition, on slope failures still remains unclear. This study has estimated permeability against various unit weights of soil based on constant head permeability tests using Jumunjin standard silica sand. One dimensional infiltration tests were conducted to estimate the infiltration capacity and the amount of infiltration taking into account the permeability and rainfall intensity. The applicability of existing empirical equations for the estimation of infiltration to granular soils was verified on the basis of the test results.

**Keywords** : Sandy soil, Infiltration capacity, Permeability

**요 지** : 사면 붕괴에 대한 해석은 지반특성과 여러 가지 복합적인 인자들로 인해 정확한 해석은 어려운 것이 사실이다. 지속적으로 발생하는 사면재해로 인하여 사면재해 발생 원인을 규명하기 위한 많은 연구가 이루어지고 있지만, 사면 붕괴의 가장 중요한 요소인 강우특성 및 강우로 인한 침투능에 따른 사면 안정성 평가는 미흡한 실정이다. 본 연구에서는 주문진표준사를 이용하여 단위중량별 정수위 투수시험을 통한 투수계수를 산정하였으며, 투수계수와 강우강도의 영향을 고려하여 침투능 및 침투량을 산정할 수 있는 강우강도별 일차원 침투시험을 실시하였다. 실험결과를 바탕으로 사질토지반에서의 기존 경험식의 적용성을 분석하였다.

**주요어** : 사질토, 침투능, 투수계수

## 1. 서 론

강우에 의한 지반 내의 침투 과정은 물의 중력과 표면장력에 의한 모세관 현상에 의해 흙의 표면으로부터 침투하며, 침투된 물은 지반 내 흙 공극에 직접적인 영향을 미친다. 침투된 물은 연직방향으로 흘러감에 따라 지반 내의 흙은 포화에 이르게 되며, 공극이 포화됨에 따라 지반 내의 침투능이 변하게 되어 침투량은 감소하게 된다(Chu, 1978). 침투능이란 주어진 지반 조건에서 어떤 지면을 통해 물이 침투할 수 있는 최대율(mm/hr)을 말하며, 침투능 지배인자들은 지반의 초기조건과 강우침투에 의해 모두 연속적인 거동을 나타낸다. 침투깊이를 사면의 불안정성을 나타내는 중요한 인자로 활용하고자 많은 연구가 진행되었다(Fredlund & Rahardjo, 1993). 따라서 사면 설계, 시공 및 유지관리에 있어 침투깊이를 정확히 예측하여 사면의 불안정성을 쉽게

평가하는 것이 필요한 실정이다. 또한 Collins & Znidarcic (2004)은 강우 시 침투해석으로 사면 내 전단강도 저하로 인한 사면붕괴가 발생하는 침투깊이를 제안하였다. 그러나 기존의 지반침투공식들은 현장의 조건과는 다른 불연속적 침투거동을 고려한 식으로, 지반 침투량을 산정하기 위한 다양한 경험식 및 이론식이 제시되어 있다.

사질토지반에서 적용할 수 있는 합리적인 침투능 산정기법을 제시하기 위하여 실내실험결과를 분석한 결과, 단위중량이 감소함에 따라 침투속도는 증가하는 경향을 보였으며, 강우강도가 증가함에 따라 침투속도 또한 증가하는 것으로 나타났다. 또한 본 논문에서 제안한 초기침투능 감소상수( $\alpha$ 계수)를 적용한 침투능 변화 곡선에 대하여 비교·분석한 결과 시간에 따른 침투능 변화가 거의 일치하는 것으로 나타났다.

따라서, 본 연구에서는 침투능 및 침투량 산정 시 널리 사용되고 있는 경험식이 사질토지반에서는 적용이 어려운

† Research Professor, Department of Civil Engineering, SangJi University (Corresponding Author : jjs99@hanmail.net)

1) Graduate Student, Department of Civil Engineering, SangJi University

2) Professor, Department of Civil Engineering, SangJi University

3) Professor, Department of Civil Engineering, SangJi University

점을 개선하고자 하였으며, 실내투수실험으로 얻어진 포화 투수계수 값을 활용하여 보다 합리적이고 간편하게 시간 변화에 따른 침투능을 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 시험 계획 및 방법

### 2.1 정수위 투수시험 결과

컬럼을 이용한 일차원 침투실험에는 실험의 간편화 및 정량적인 실험데이터 비교를 위하여 주문진 표준사를 사용하였다.

주문진 표준사의 대한 입도분포곡선은 Fig. 1에 나타나 있으며, 기본 지반물성치는 Table 1에 요약되어 있다.

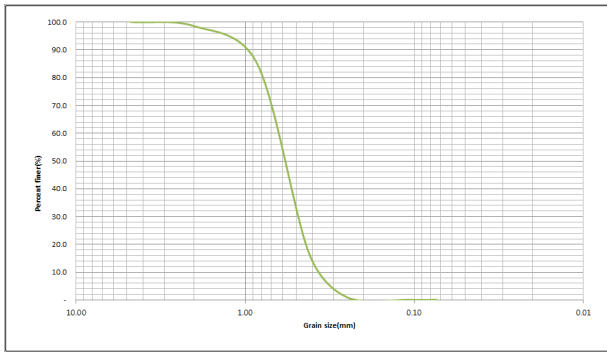


Fig. 1. Particle-size distribution curve

Table 1. Result of particle size distribution test

10% pass particle size (D10, mm)	0.35
30% pass particle size (D30, mm)	0.45
60% pass particle size (D60, mm)	0.55
Uniformity coefficient (Cu)	1.58
Coefficient of curvature (Cc)	1.06
Specific gravity (Gs)	2.62

### 2.2 정수위 투수시험 결과

주문진 표준사를 사용하여 정수위 투수시험을 실시한 결과 투수계수 값은 단위중량  $14.6kN/m^3$ 은 투수계수  $3.3 \times 10^{-2} cm/sec$ 의 평균 데이터 값을 얻을 수 있었으며, 단위중량  $15.6kN/m^3$ 의 투수계수는  $4.0 \times 10^{-2} cm/sec$ 의 평균 데이터 값, 단위중량  $16.6kN/m^3$ 의 투수계수는  $5.6 \times 10^{-2} cm/sec$ 의 평균 투수계수 값을 얻을 수 있었다(Table 2 참조).

Table 2. Permeability coefficient by unit weight

Unit weight ( $kN/m^3$ )	16.6	15.6	14.6
Permeability ( $cm/sec$ )	$3.3 \times 10^{-2}$	$4.0 \times 10^{-2}$	$5.6 \times 10^{-2}$

### 2.3 일차원 원형토조실험

지반으로의 강우침투현상은 지반의 포화도, 지반의 투수계수, 유체의 점성, 강우강도와 지속시간, 사면경사, 지표식생, 지표면 거칠기 등 여러 가지 요소에 영향을 받는다. 일반적으로 강우 초기에는 침투능이 높다가 급격히 감소하면서 점차 일정한 비율, 즉 지반의 투수계수값에 도달하게 된다(Leong & Rahardjo, 1997). 초기 함수비 분포와 지반의 포화투수계수는 지반의 침투과정에 영향을 주는 주요 요소이다. 초기에 지반이 높은 함수비로 유지되어 있으면 작은 흡수력 경사로 인해 초기 침투도는 낮아지기 때문에 더 빠른 시간에 일정한 침투율에 도달하게 된다. 그리고 일반적으로 포화투수계수가 크면 침투능 또한 높게 나타난다(Fredlund et al., 1994) 그리고 지반의 경사가 급할 경우 물이 침투하는데 필요한 시간에 영향을 주어 표면유출이 많이 발생하게 된다. 지표면에 분포된 식생은 지표 흐름의 속도를 늦추어 침투에 필요한 시간이 늘어나게 하므로 침투를 증가시키는 역할을 한다. 또한 식물의 뿌리는 지표면의 지반투수성을 증가시킴으로써 침투에 영향을 주게 된다.

본 연구에서는 투수계수와 입도분포 등 지반특성에 따른 강우침투 현상을 일차원적으로 구현하기 위하여 강우 재현 및 일차원 침투실험이 가능하도록 컬럼실험장비를 구축하고 주문진 표준사 시료에 대하여 실험을 수행하였다. 침투 실험을 위한 강우재현 장치는 Fig. 4와 같이 강우 면적을 4분할 제어가 가능하고, Fig. 5에서와 같이 노즐은 실제 강우와 유사하게 재현하기 위하여 노즐을 미세노즐(a), 중간노즐(b, c), 굵은노즐(d)의 타입별로 강우강도를 조절할 수 있도록 설치되었다.

일차원 침투 실험을 수행하기 위하여 원형시료를 형성

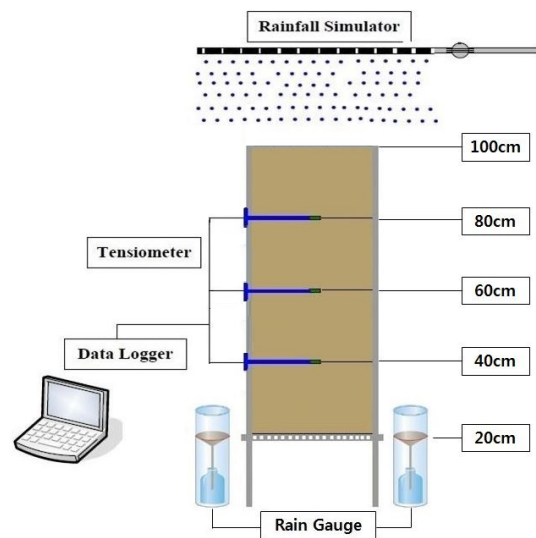


Fig. 2. Schematic diagram of one-dimensional circular soil experiment

할 수 있는 아크릴로 된 20cm 직경의 컬럼실험장비를 제작하였다. Fig. 2와 Fig. 3은 컬럼실험 장비의 개요와 사진을 보여준다. 원형토조는 20cm, 40cm, 60cm, 80cm, 100cm 높이의 세그먼트를 수직으로 연결하여 컬럼실험을 수행하였다.



Fig. 3. One-dimensional circular soil experiment



Fig. 4. Rainfall-simulated system

## 2.4 일차원 원형토조실험 방법

컬럼을 이용한 일차원 침투실험에는 주문진표준사의 시료가 이용되었다. 시료는 투수계수에 따른 침투효과를 확인하기 위해 흙의 단위중량과 강우강도를 다르게 하여 컬럼실험을 수행하였다. 본 실험에서는 원활한 다짐결과를 얻기 위하여 각 단위중량별 함수비 3%인 시료를 사용하여 강우강도 18mm/hr, 48mm/hr, 72mm/hr로 재현하였다.

컬럼 내부 시료의 단위중량을 깊이별로 일정하게 유지하기 위하여 각 다짐단계마다 형성되는 컬럼의 높이가 일정하도록 하였다. 컬럼의 높이를 4개 층으로 나누어 각 높이마다 일정한 단위중량이 되도록 시료를 성형하였다. 다짐 시 다짐에너지가 변하지 않도록 모든 다짐단계에서 동일한 타격횟수가 되도록 하였다.

컬럼실험에서는 전체 높이가 100cm가 되도록 하였고, 최

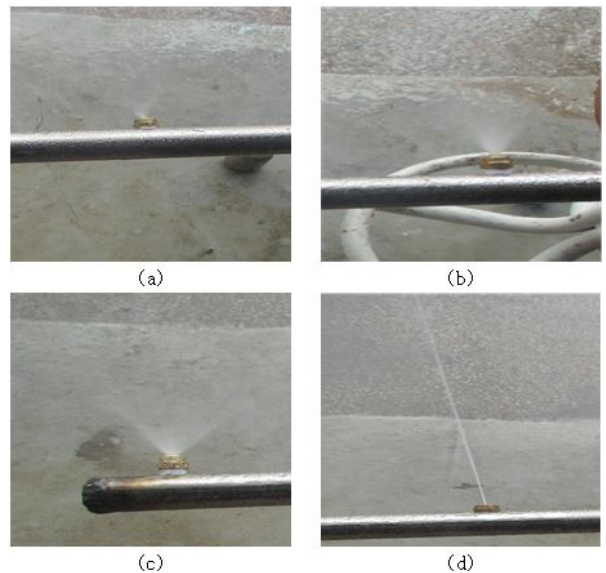


Fig. 5. Nozzle Type

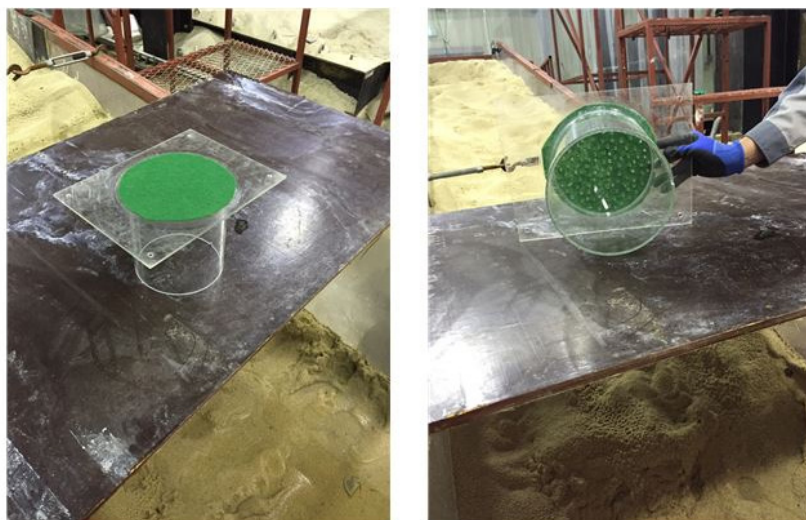


Fig. 6. Column equipment for bottom drain

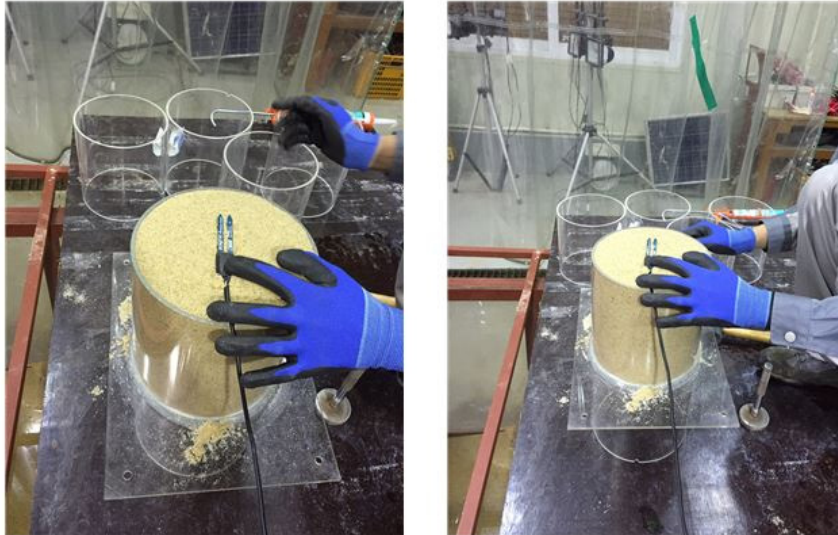


Fig. 7. Tensiometer installation (40cm)



Fig. 8. Complete tensiometer installation

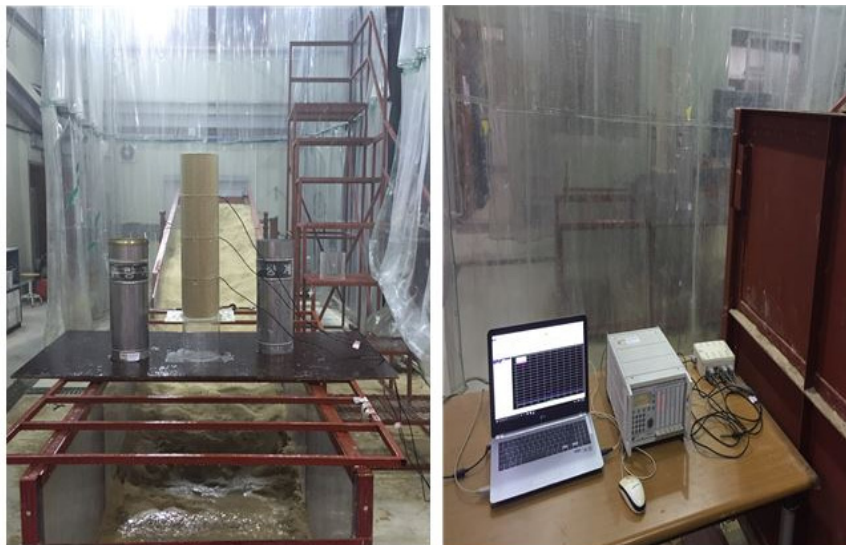


Fig. 9. Rain gauge installation and tensiometer data logger connection

상단으로부터 각각 20cm, 40cm, 60cm에 Tensiometer를 설치하여 함수비를 측정하였다(Fig. 6~9 참조).

### 3. 강우침투 실험 결과 분석

강우침투 시험 결과 다음과 같이 단위중량 및 강우강도 별 함수비 증가 양상이 도출되었으며, 컬럼(Column)에 조성된 사질토 지반에 강우로 인한 깊이별 침투를 확인 할 수 있었다. 강우에 의한 침투는 상부로부터 일정한 간격으로 증부, 하부 순으로 일정한 시간 간격을 두고 침투가 일어남을 확인 할 수 있었다. 또한, 침투실험 결과를 바탕으로 각 침투깊이별 침투속도와 평균값을 활용한 단위중량 및 강우강도별 침투속도를 산출할 수 있었다.

#### 3.1 일차원 원형토조실험 결과

단위중량  $14.6kN/m^3$ 에서 원형 컬럼을 통한 강우강도 18mm/hr 적용 시 침투 속도는 최초 200mm에서 0.172mm/sec, 400mm 깊이에서 0.168mm/sec, 600mm 깊이에서 0.150mm/sec로 측정되었다(Fig. 10, Table 3).

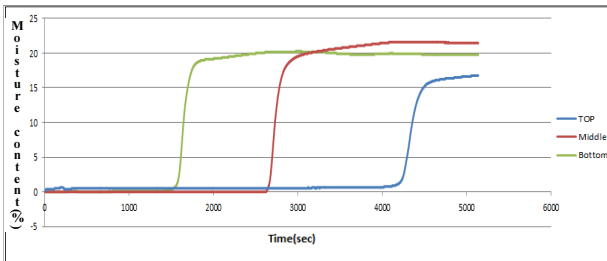


Fig. 10. Unit weight  $14.6kN/m^3$  / rainfall intensity 18mm/hr

Table 3. Unit weight  $1.46kN/m^3$ , seepage velocity of rainfall intensity 18mm/hr

Measurement position	200mm	400mm	600mm
Seepage velocity	0.172mm/sec	0.168mm/sec	0.150mm/sec

단위중량  $14.6kN/m^3$ 에서 원형 컬럼을 통한 강우강도 48 mm/hr 적용 시 침투 속도는 최초 200mm 깊이에서 0.22 mm/sec, 400mm 깊이에서 0.22mm/sec, 600mm 깊이에서 0.21mm/sec로 측정되었다(Fig. 11, Table 4 참조).

단위중량  $14.6kN/m^3$ 에서 원형 컬럼을 통한 강우강도 72 mm/hr 적용 시 침투 속도는 최초 200mm 깊이에서 0.33 mm/sec, 400mm 깊이에서 0.31mm/sec, 600mm 깊이에서 0.32mm/sec로 측정되었다(Fig. 12, Table 5 참조).

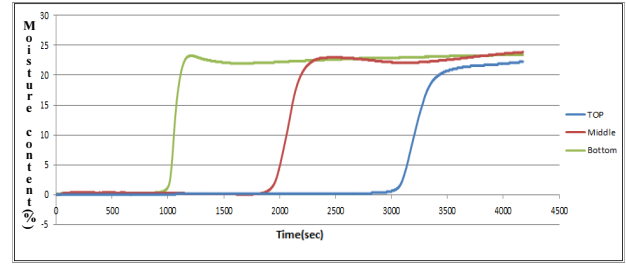


Fig. 11. Unit weight  $14.6kN/m^3$  / rainfall intensity 48mm/hr

Table 4. Unit weight  $14.6kN/m^3$ , seepage velocity of rainfall intensity 48mm/hr

Measurement position	200mm	400mm	600mm
Seepage velocity	0.22mm/sec	0.22mm/sec	0.21mm/sec

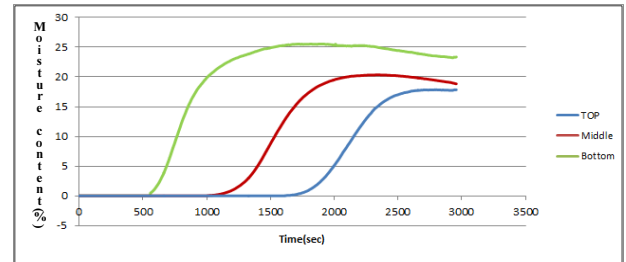


Fig. 12. Unit weight  $14.6kN/m^3$  / rainfall intensity 72mm/hr

Table 5. Unit weight  $14.6kN/m^3$ , seepage velocity of rainfall intensity 72mm/hr

Measurement position	200mm	400mm	600mm
Seepage velocity	0.33mm/sec	0.31mm/sec	0.32mm/sec

단위중량  $15.6kN/m^3$ 에서 원형 컬럼을 통한 강우강도 18 mm/hr 적용 시 침투 속도는 최초 200mm 깊이에서 0.13 mm/sec, 400mm 깊이에서 0.14mm/sec, 600mm 깊이에서 0.14mm/sec로 측정되었다(Fig. 13, Table 6 참조).

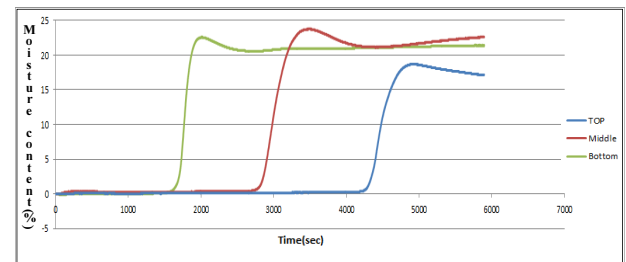


Fig. 13. Unit weight  $15.6kN/m^3$  / rainfall intensity 18mm/hr

Table 6. Unit weight  $15.6kN/m^3$ , seepage velocity of rainfall intensity 18mm/hr

Measurement position	200mm	400mm	600mm
Seepage velocity	0.13mm/sec	0.14mm/sec	0.14mm/sec

단위중량  $15.6kN/m^3$ 에서 원형 컬럼을 통한 강우강도 48 mm/hr 적용 시 침투 속도는 최초 200mm 깊이에서 0.15

mm/sec, 400mm 깊이에서 0.15mm/sec, 600mm 깊이에서 0.15mm/sec로 측정되었다(Fig. 14, Table 7 참조).

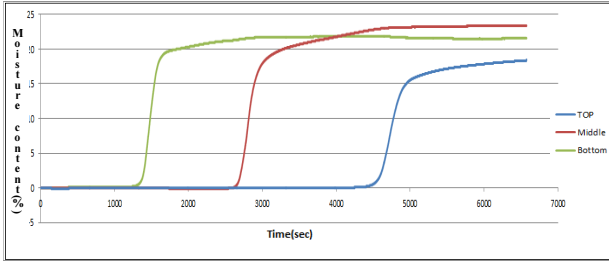


Fig. 14. Unit weight  $15.6kN/m^3$  / rainfall intensity 48mm/hr

Table 7. Unit weight  $15.6kN/m^3$ , seepage velocity of rainfall intensity 48mm/hr

Measurement position	200mm	400mm	600mm
Seepage velocity	0.15mm/sec	0.15mm/sec	0.15mm/sec

단위중량  $15.6kN/m^3$ 에서 원형 컬럼을 통한 강우강도 72 mm/hr 적용 시 침투 속도는 최초 200mm 깊이에서 0.22 mm/sec, 400mm 깊이에서 0.20mm/sec, 600mm 깊이에서 0.19mm/sec로 측정되었다(Fig. 15, Table 8 참조).

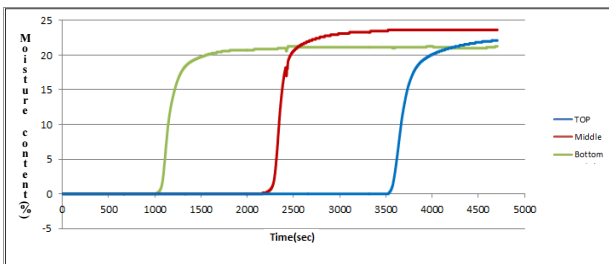


Fig. 15. Unit weight  $15.6kN/m^3$  / rainfall intensity 72mm/hr

Table 8. Unit weight  $15.6kN/m^3$ , seepage velocity of rainfall intensity 72mm/hr

Measurement position	200mm	400mm	600mm
Seepage velocity	0.22mm/sec	0.20mm/sec	0.19mm/sec

단위중량  $16.6kN/m^3$ 에서 원형 컬럼을 통한 강우강도 18 mm/hr 적용 시 침투 속도는 최초 200mm 깊이에서 0.11 mm/sec, 400mm 깊이에서 0.10mm/sec, 600mm 깊이에서 0.10mm/sec로 측정되었다(Fig. 16, Table 9 참조).

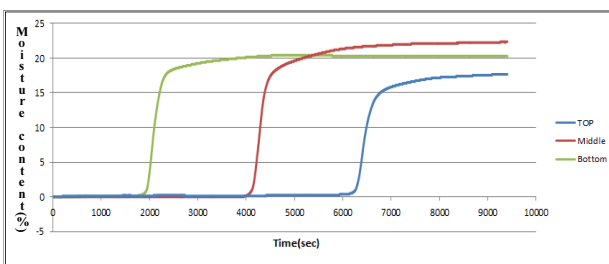


Fig. 16. Unit weight  $16.6kN/m^3$  / rainfall intensity 18mm/hr

Table 9. Unit weight  $16.6kN/m^3$ , seepage velocity of rainfall intensity 18mm/hr

Measurement position	200mm	400mm	600mm
Seepage velocity	0.11mm/sec	0.10mm/sec	0.10mm/sec

단위중량  $16.6kN/m^3$ 에서 원형 컬럼을 통한 강우강도 48 mm/hr 적용 시 침투 속도는 최초 200mm 깊이에서 0.17 mm/sec, 400mm 깊이에서 0.15mm/sec, 600mm 깊이에서 0.14mm/sec로 측정되었다(Fig. 17, Table 10 참조).

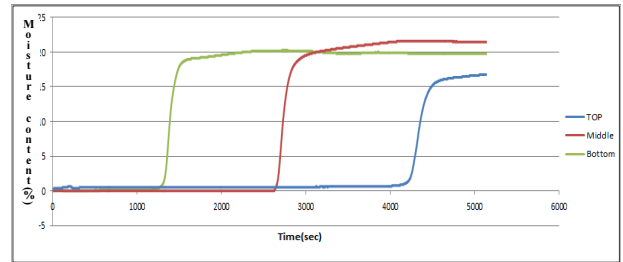


Fig. 17. Unit weight  $16.6kN/m^3$  / rainfall intensity 48mm/hr

Table 10. Unit weight  $16.6kN/m^3$ , seepage velocity of rainfall intensity 48mm/hr

Measurement position	200mm	400mm	600mm
Seepage velocity	0.17mm/sec	0.15mm/sec	0.14mm/sec

단위중량  $16.6kN/m^3$ 에서 원형 컬럼을 통한 강우강도 72 mm/hr 적용 시 침투 속도는 최초 200mm 깊이에서 0.15 mm/sec, 400mm 깊이에서 0.15mm/sec, 600mm 깊이에서 0.14mm/sec로 측정되었다(Fig. 18, Table 11 참조).

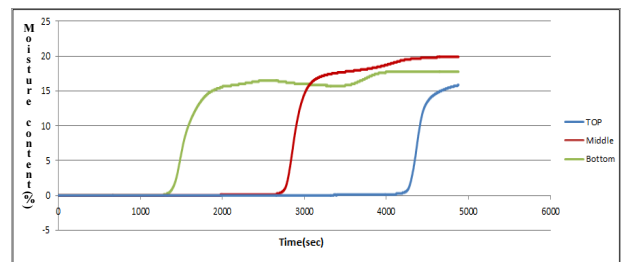


Fig. 18. Unit weight  $16.6kN/m^3$  / rainfall intensity 72mm/hr

Table 11. Unit weight  $16.6kN/m^3$ , seepage velocity of rainfall intensity 72mm/hr

Measurement position	200mm	400mm	600mm
Seepage velocity	0.15mm/sec	0.15mm/sec	0.14mm/sec

### 3.2 실내시험 결과분석

실내시험에 사용된 시료에 대하여 단위중량 및 강우강도에 따른 침투깊이별 침투속도를 비교한 결과 침투속도는 두

릿한 변화 양상을 찾아 볼 수 없었다. 분석 결과를 토대로 불포화토에서의 강우침투 시 연속적인 침투가 발생한다는 사실을 확인하였다(Fig. 19 참조). 따라서, 강우에 따른 일차원 침투속도는 깊이별 동일하게 적용 할 수 있을 것으로 판단된다.

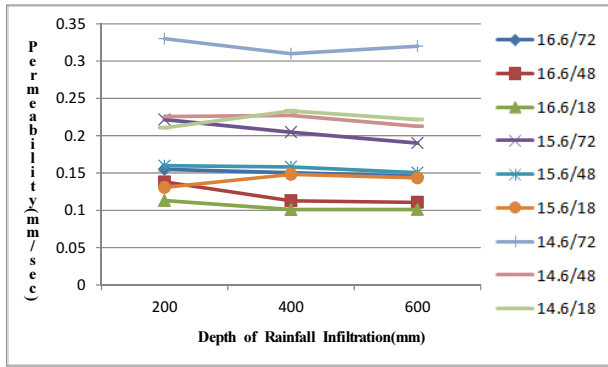


Fig. 19. Seepage velocity by unit weight and rainfall intensity

#### 4. 결론

본 연구에서는 사질토지반의 침투능을 산정하기 위하여 일차원컬럼 실내실험을 실시하였으며, 기존의 경험식에 사용되는 감소상수를 산정하는데 활용하고자 하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 사질토의 투수특성을 파악하기 위하여 단위중량 14.6, 15.6, 16.6 kN/m<sup>3</sup>에 대하여 실내 정수위투수실험을 실시하였으며, 실험결과 투수계수는  $3.3 \sim 5.6 \times 10^{-2}$  cm/sec의 범위를 나타내었다.
- (2) 강우침투 시험 결과 단위중량 및 강우강도별 함수비 증가 양상이 도출되었으며, 컬럼(Column)에 조성된 사질토 지반에 강우로 인한 깊이별 침투를 확인 할 수 있었다. 강우에 의한 침투는 상부로부터 일정한 간격으로 중부, 하부로 순으로 일정한 시간 간격을 두고 침투가 일어남을 확인 할 수 있었다.
- (3) 사질토지반에서 적용할 수 있는 합리적인 침투능 산정

기법을 제시하기 위하여 실내실험결과를 분석한 결과, 단위중량이 감소함에 따라 침투속도는 증가하는 경향을 보였으며, 강우강도가 증가함에 따라 침투속도 또한 증가하는 것으로 나타났다.

- (4) 본 연구 결과는 강우강도에 따른 침투능 산정 시 기초자료로 활용될 수 있으며, 또한 연구 결과를 토대로 실내투수실험으로 얻어진 포화투수계수 값을 활용하여 합리적이고 간편한 침투능 및 침투량 산정식을 도출하기 위해서는 산정식 및 경험식 분석을 통한 감소상수 산정에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업(NRF-2018R1A6A3A01013103)의 지원 및 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(비탈면 대상 조사·점검 개선 및 보강시설 노후화 대응 기술 개발, 19SCIP-C151408-01)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

#### References

1. Chu, S. T. (1978), Infiltration during an unsteady rain, Water Resource Research, Vol. 14, No. 3, pp. 461~466.
2. Collins, B. D. and Znidarcic, D. (2004), Stability analyses of rainfall induced landslides, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, New-York, Vol. 130, No. 4, pp. 362~372.
3. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1993), Soil Mechanics for Unsaturated Soils, John Wiley and Sons, Inc.
4. Fredlund, D. G., Xing, A. and Huang, D. (1994), Predicting of permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve, Can. Geotech. J., Vol. 31, pp. 533~546.
5. Leong, E. C. and Rahardjo, H. (1997), Review of soil-water characteristic curve equations, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 123, No. 12, pp. 1106~1117.