

## 비탈면 침투해석시 지반 및 강우조건에 의한 포화깊이 분석

### Analysis of Saturation Depth by Rainfall Intensity and Soil Conditions on Slope

이승우<sup>1\*</sup>, 장범수<sup>2</sup>, 김성호<sup>3</sup>, 허인영<sup>4</sup>, 홍석표<sup>5</sup>

Seung-woo Lee<sup>1\*</sup>, Bhum-soo Jang<sup>2</sup>, Sung-ho Kim<sup>3</sup>, In-young Heo<sup>4</sup>, Suk-pyo Hong<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Member, Researcher, The Institute of Infrastructure Safety, Korea Infrastructure Safety Corporation, Republic of Korea

<sup>2</sup>Member, Research Fellow, The Institute of Infrastructure Safety, Korea Infrastructure Safety Corporation, Republic of Korea

<sup>3</sup>Member, Researcher, The Institute of Infrastructure Safety, Korea Infrastructure Safety Corporation, Republic of Korea

<sup>4</sup>Member, Researcher, The Institute of Infrastructure Safety, Korea Infrastructure Safety Corporation, Republic of Korea

<sup>5</sup>Nonmember, Action officer, The Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs

#### ABSTRACT

Climate change, according to the country to increase locality of slope collapse of heavy disaster, such as increasing the likelihood and prior in order to prevent these disasters, "Slope construction design standards (Ministry of Land, 2011)," is prescribed in the relevant guidelines. In recent years, guidelines Slope Stability Analysis of the existing methods when the rainy season infiltration of rainfall, taking into account have been revised to perform more realistic. In this study, according these trends to the analysis of saturation depth by rainfall intensity and soil conditions. Results as a whole, the larger the saturated hydraulic conductivity and depth of rainfall intensity also showed a tendency to rise in proportion but MH, CL did not occur in the saturation region. Analysis of antecedent rainfall case also reflects an overall increase of depth in the saturated, rainfall in many cases is less than the growth rate was higher in the saturation region.

#### 요 지

우리나라는 기후변화에 따른 국지성 호우의 증가로 비탈면 붕괴와 같은 재해 가능성이 높아지고 있으며, 이러한 재해를 사전에 예방하기 위해 「건설공사 비탈면 설계기준」에 관련 지침사항을 규정하고 있다. 최근에는 관련 지침 중 기존의 우기시 비탈면 안정성 검토 방법이 강우의 침투를 고려하여 보다 현실적으로 수행할 수 있도록 개정되었다. 본 연구에서는 이러한 동향에 따라 통일분류법에 따른 흙의 종류와 강우강도별 포화깊이를 분석하였다. 분석 결과, 전반적으로 투수계수와 강우강도가 클수록 포화깊이도 비례하여 증가하는 양상을 보였으나 MH, CL에서는 포화영역이 발생하지 않았다. 또한 선행강우를 해석상에 반영한 경우에 포화깊이가 전반적으로 증가하였으며, 강우량이 많은 경우 보다 적은 경우에 포화영역의 증가율이 높은 것으로 나타났다.

**Keywords** : Saturation depth, Rainfall intensity, Soil conditions, Antecedent rainfall

#### 1. 서 론

우리나라는 전 국토의 약 2/3가 산지로 이루어져 있으며, 지속적인 국토개발에 따라 해마다 비탈면의 수는 증가하고 있는 추세이다. 비탈면의 붕괴는 기후변화와 풍화에

취약한 지반의 영향 등 내외부적 요인에 의해 발생된다. 그 중 강우는 비탈면의 안정에 영향을 미치는 가장 중요한 외부적 요인이며, 최근 지속되고 있는 기후변화에 의한 국지성 호우의 증가 등으로 그 영향이 커지고 있다.

과거에는 강우시 비탈면의 붕괴원인이 지하수위 상승으로 인해 간극수압이 증가하는 것으로 가정하여, 지하수위를 지표면 아래의 얇은 깊이 또는 지표면까지 고려하여 해석을 수행하였다. 그러나 강우가 침투되어 지하수위가

Received 23 Oct. 2012, Revised 30 Nov. 2012, Accepted 3 Dec. 2012

\*Corresponding author

Tel: +82-31-910-6713; Fax: +82-31-910-4181

E-mail address: happyguy84@hanmail.net (S. Lee)

상승하는 것은 현실적으로 발생할 수 있는 가능성이 적으며, 실제 강우에 의해 비탈면이 붕괴되는 경우 침투수가 지표면부터 포화시키기 때문이다(Cho et al., 2000). 최근 개정된 「건설공사 비탈면 설계기준(Ministry of Land, 2011)」에서는 이러한 현상을 현실적으로 반영하기 위하여 우기 시 비탈면 안정성을 검토하는 경우 강우의 침투를 고려하여 수행할 수 있도록 개정되었다.

따라서, 본 연구에서는 흙의 분류 및 강우조건에 따른 포화깊이를 분석하고 선행강우가 포화깊이에 끼치는 영향에 대해 분석하였다. 포화깊이는 지반의 불투수특성과 지역별 강우특성을 고려하여 산정하게 되는데, 산정방법에는 포화깊이산정식을 이용하는 방법과 수치해석을 이용하는 방법이 있다. 본 연구에는 이러한 방법 중 프로그램(seep/w)을 이용한 수치해석법을 사용하였다. 강우를 고려한 침투해석에 이용되는 불투수계수곡선과 함수특성곡선은 프로그램에 내장된 DB파일을 이용하였다. 강우강도는 「도로배수시설 설계 및 유지관리 지침(Ministry of Construction and Transportation, 2003)」의 부록에 수록되어 있는 「우리나라의 관측지점 및 전국 주요지점의 확률강우량」을 참고하여 적용하였다.

## 2. 이론

### 2.1 함수특성곡선

함수특성곡선은 지반의 고유특성으로 불포화 지반의 특성을 결정하는 매우 중요한 기본물성이라 할 수 있다. 함수특성곡선은 흙 속의 물의 양과 모관흡수력과 관계로 정의되며, 물의 양은 중량 함수비, 체적함수비, 또는 포화도로 나타낼 수 있다. 일반적으로 Fig. 1과 같이 체적함수비와 모관흡수력의 관계로 나타낸다.

포화된 간극은 모관흡수력의 증가에도 불구하고 공기유

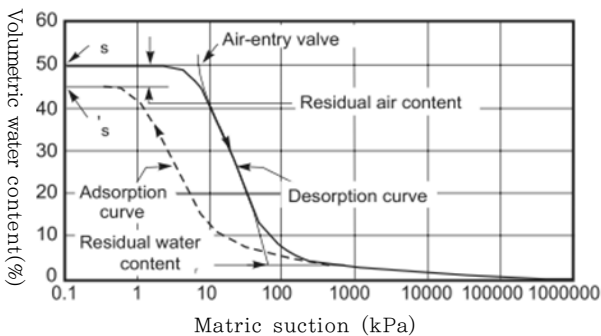


Fig. 1. SWCC (Fredlund and Xing, 1994)

입값(Air-entry value)을 초과할 때까지는 흙의 간극에서 물이 유출되지 않는다. 이러한 공기유입값은 간극으로 공기가 유입되기 시작하는 압력으로 정의된다. 그리고 모관흡수력의 증가에도 불구하고 더 이상 물이 추출되지 않는 함수비를 잔류함수비(Residual water content)라하며, 잔류한 물은 열에 의해서만 제거할 수 있다. 함수특성곡선은 압력관 추출 실험장비, 모관흡수력을 측정할 수 있는 센서 등을 이용하여 구할 수 있으며, 최근에는 인공신경망을 이용한 함수특성곡선 추정기법도 이용되고 있다(Oh et al., 2008).

### 2.2 불포화 투수계수 곡선

불포화토에서 물의 흐름은 간극내 공기가 차지하고 있는 부분으로는 흐르지 않으며, 연속된 물로 이루어진 통로를 통해서만 흐르고 간극내 공기는 흡입자처럼 여겨진다. 불포화토에서도 Darcy의 법칙이 적용 가능하나 이 때는 투수계수가 상수가 아닌 모관흡수력 또는 포화도 등의 함수로 표현된다. 불포화 투수계수곡선은 Fig. 2와 같이 나타나며 함수특성곡선과 유사한 경향을 보인다.

불포화 투수계수 곡선과 함수특성곡선은 함수비 조건에 따른 밀접한 관련성을 보이고 있다. 불포화 투수계수 곡선은 간극에 존재하는 물의 양에 영향을 받는다. 즉 함수비에 따라 투수성이 변하게 되므로, 함수특성곡선과 유사한 형태를 나타낸다. 불포화 투수계수를 측정하기 위한 방법은 실험이 수행 방법이 어렵고 비용이 많이 드는 문제점이 있다(Jeong et al., 2009).

### 2.3 모관흡수력

불포화토에서 물-공기 접촉면에는 수압보다 큰 공기압이 작용하게 되며, 이 압력차( $u_a - u_w$ )를 모관흡수력(Matric

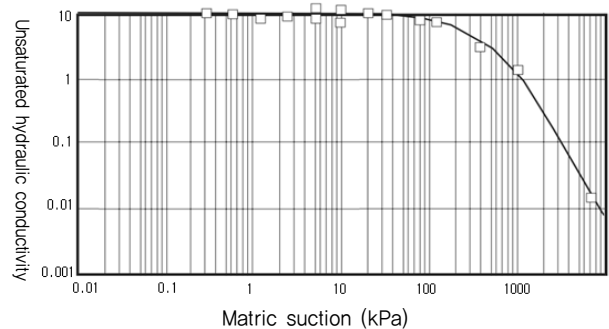


Fig. 2. Unsaturated Permeability Function (Fredlund and Xing, 1994)

suction)이라 한다. 즉 물표면에서 공기압과 수압의 차이를 나타내며, 외부환경에 의해 변하게 되고 흙의 평형상태에 영향을 미친다. 흙에서의 간극은 물이 지하수면 위로 상승하게 하는 모세관 같은 역할을 하며, 이러한 모세관 현상은 모관흡수력과 관련이 있다. 모관흡수력의 크기는 간극크기 분포에 따라 영향을 받으며, 간극내 물과 흙의 접촉면에서의 평형은 모관흡수력과 표면장력이 균형을 이루어 유지된다. 이때 물-공기 접촉면을 통해 물의 자중이 흡구조에 압축력을 가하여 결국 모관흡수력에 의해 전단강도가 증가하게 된다.

침투해석시 이러한 모관흡수력에 따라 침투깊이를 추정하게 된다. 지하수에 대해서는 계절적인 지하수위 변화 등을 고려하여 비탈면의 안정조건에 가장 불리한 상태를 해석에 적용하는 것이 바람직하다. 비탈면의 파괴는 일반적으로 우기시에 집중적으로 발생하므로 비탈면 안정성 검토 시 과업구간의 지역적 강우특성을 고려하여 비탈면 안정해석이 수행되어야 한다. 강우가 지속되면 비탈면 내로 지표수가 침투하여 일부 표면이 포화되며, 이로 인한 침투깊이를 적용하여야 한다.

### 3. 지반 및 강우조건에 의한 포화깊이 분석

#### 3.1 전제조건

해석 시 동일한 조건하에서 해석을 실시하기 위해 초기 간극수압의 분포, 요소망의 분포와 양상을 모두 동일한 조건으로 두었다. 이 조건은 매개변수를 흙의 분류와 강우량으로 제한하여 보다 객관적인 침투양상을 관찰하기 위함이다. 또한 지하수를 고려할 경우 지하수에 의한 간극수압 변화로 객관적인 해석 결과를 도출할 수 없으므로 지하수위에 영향을 받지 않는 범위에 위치시켜 해석을 수행하였다. 그 외 현재 상용프로그램에서 모사할 수 없는 증발현상이나 강우가 지반으로 유입된 후 다시 유출되는 일부 현상등은 제외하였다.

Table 1. Unified Soil classification System

Type of soil		Properties of soil	Soil classification	Permeability (m/sec)
Coarse	Sand	Well-graded Sand	SW	$1.0 \times 10^{-4}$
		Silty Sand	SM	$5.4 \times 10^{-5}$
Fine	Silt	Clayey Sand	SC	$4.3 \times 10^{-6}$
		Low compressibility Silt	ML	$2.5 \times 10^{-7}$
		High compressibility Silt	MH	$1.5 \times 10^{-8}$
	Clay	Low compressibility Clay	CL	$8.4 \times 10^{-9}$

### 3.2 모델 단면 선정

침투해석을 위한 비탈면의 단면을 선정함에 있어 보다 국내 토사비탈면과 가깝게 이해하기 위해서 국내 지반 특성을 반영할 수 있는 경사를 선정하였다.

다각적인 매개변수분석을 통해서 비탈면의 높이는 침투깊이를 객관적으로 측정할 수 있는 30m로 결정하였으며, 지표면하 깊이는 지하수가 포화깊이에 영향을 주지 않는 25m로 설정하였다. 이를 반영한 해석 단면은 Fig. 3과 같다.

### 3.3 불포화 투수계수곡선과 함수특성곡선 선정

불포화 투수계수곡선과 함수특성곡선(Soil-water characteristic curve)은 불포화 지반의 고유 특성이며, 지반의 거동 특성을 결정하는 매우 중요한 기본물성이라 할 수 있다. 따라서 Table 1과 같이 통일분류법의 기준에 따라 선정하였으며, 토질에 따른 불투수계수곡선과 함수특성곡선은 프로그램에 내장된 DB파일을 이용하였다.

### 3.4 초기 간극수압분포

불포화 토사비탈면에 대해 침투해석을 실시 할 경우에

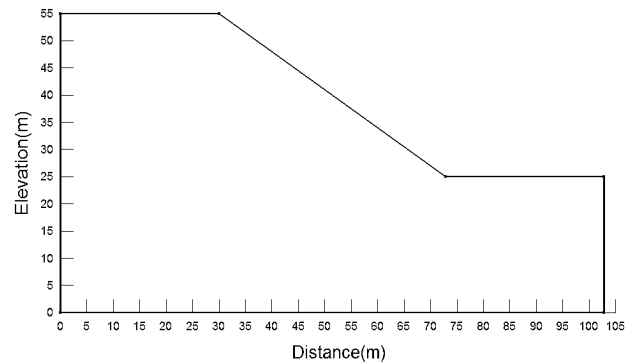


Fig. 3. Sectional analysis

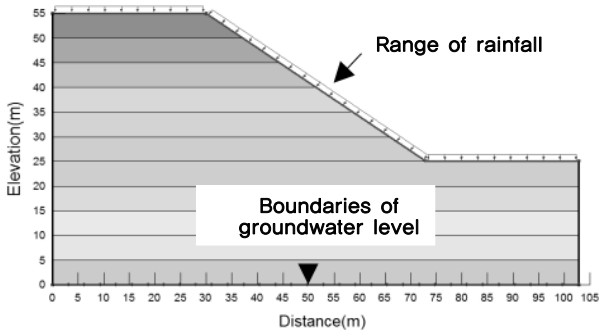


Fig. 4. Analysis of boundary conditions

초기 간극수압의 분포가 해석 결과에 큰 영향을 끼치므로 본 해석에서는 지하수위의 경계조건을 해석 단면의 최하부에 위치시켜 모든 해석의 초기 간극수압 분포를 Fig. 4와 같이 동일 시 하였다.

### 3.5 선행강우 및 강우강도 선정

침투해석 시 필요한 선행강우와 강우조건은 「도로배수시설 설계 및 유지관리 지침(Ministry of Construction and Transportation, 2003)」 부록에 수록되어있는 「우리나라의 관측지점 및 전국 주요지점의 확률강우량」을 참고하였다.

본 연구에서는 국내 배수시설 설계 시 적용되는 재현기간과 지속시간의 범위를 고려하여, 재현기간 10~100년, 지속시간 48시간 내 자료를 검토하여 최저확률강우량과 최대확률강우량을 분석하였다. 분석한 결과, 전국 지역 중 안동지역에서 재현기간 10년(지속시간 48시간)일 경우 145.0mm로 “최저 확률강우량”을 보이며, 철원지역에서 재현기간 100년 일 때 780.7mm로 “최대 확률강우량”을 나타내었다.

따라서 지속시간 48시간을 기준으로 국내에서 발생 가능한 확률강우량은 약 150mm에서 800mm정도의 분포로 예상할 수 있었다. 이에 본 연구에서는 150mm에서 850mm까지 50mm 간격으로 15단계의 경우의 수를 가정하여 분석하였다.

## 4. 해석결과 및 분석

### 4.1 흙의 분류와 강우강도에 따른 침투해석 결과

상기 조건을 반영한 침투해석은 Fig. 5와 같이 침투과정에서 의해서 100% 포화된 구간과 부분포화구간으로 나타났

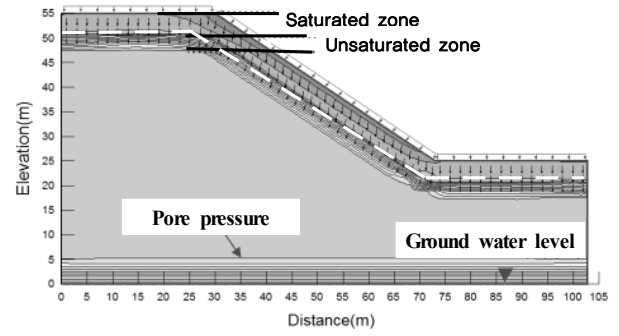


Fig. 5. 48 hours after rainfall results (Case by ML & Rainfall 850 mm)

으며, 각각의 깊이는 흙의 분류와 강우특성에 따라 다양하게 나타났다.

동일한 흙의 경우 강우강도가 증가할 경우 포화깊이도 증가하는 비례관계를 나타냈고, 흙의 투수계수가 작을 경우 포화깊이도 작아지는 경향을 나타냈으며, 투수성이 매우 낮은 MH와 CL의 경우 완전포화영역이 발생하지 않는 것으로 해석되었다. 각 조건별 포화깊이는 Table 2와 같다.

### 4.2 선행강우를 고려한 침투해석 결과

선행강우를 고려하지 않은 침투해석 결과와 고려한 결과의 정확한 비교를 위해서는 선행강우 후 비우기시에 수분이 증발되는 현상을 고려해야 한다. 그러나 현재 통용되는 침투해석프로그램에서는 이러한 조건을 반영하지 못하므로 이에 대한 조건은 배제하여 해석을 실시하였다. 그 외 조건은 선행강우를 고려하지 않은 침투해석과 동일한 조건하에 침투해석을 실시하였으며, 선행강우는 지속강우와 동일한 조건으로 적용하였다. 해석 결과 Fig. 6과 같이 선행강우를 고려하지 않은 침투양상과 동일하게 100% 포화된 구간과 부분포화된 구간으로 나타났으며, 각각의 깊이는 흙의 분류와 강우특성에 따라 다양하게 나타났다.

동일한 흙에서 강우강도가 증가할 경우 포화심도도 증가하는 비례관계를 나타냈고, 흙의 투수계수가 작을 경우 포화영역도 작아지는 경향을 나타냈으며, 선행강우를 고려하지 않았을 때 포화영역이 발생하지 않은 MH와 CL의 경우 선행강우를 고려하더라도 침투가 일어나지 않는 것으로 해석되었다. 각 조건별 포화깊이는 Table 3과 같다.

### 4.3 결과 비교 분석

상기 두 조건하에서의 침투해석은 Fig. 7과 같이 선행강

Table 2. Rainfall 48 hours after results

Type of Soil	Rainfall Intensity (mm)	Saturated depth (m)	Type of Soil	Rainfall Intensity (mm)	Saturated depth (m)
SW	150	0,5	SC	150	-
	200	1,0		200	-
	250	2,0		250	-
	300	3,0		300	-
	350	4,0		350	-
	400	4,0		400	0,5
	450	4,0		450	1,0
	500	5,0		500	1,5
	550	6,0		550	2,0
	600	6,0		600	2,0
	650	6,0		650	2,0
	700	7,0		700	2,0
	750	8,0		750	2,0
	800	8,5		800	2,0
	850	10,0		850	3,0
SM	150	-	ML	150	-
	200	1,0		200	-
	250	2,0		250	-
	300	2,0		300	-
	350	2,0		350	-
	400	3,0		400	-
	450	3,5		450	-
	500	4,0		500	-
	550	4,5		550	-
	600	5,0		600	1,5
	650	5,5		650	2,5
	700	6,0		700	2,5
	750	6,0		750	3,5
	800	7,0		800	3,5
	850	7,5		850	4,5

(- : unsaturated)

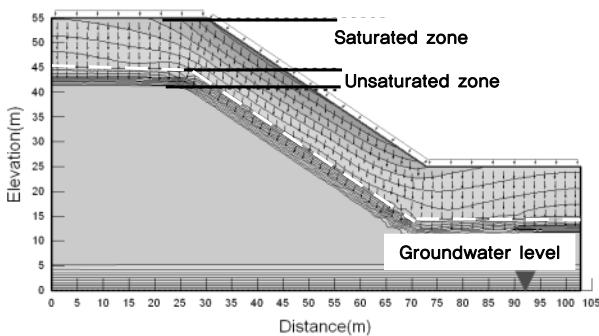


Fig. 6. Considering the preceding rainfall of 48 hours after rainfall results (Case by ML & Rainfall 850 mm)

우를 고려하지 않은 조건하의 포화깊이보다 선행강우를 반영한 조건의 포화깊이가 증가함을 알 수 있었다.

이러한 결과는 선행강우시 침투된 강우가 지반 내 잔류하게 되고 모관흡수력을 낮추게 된다. 또한 건기를 거치는 동안 지속적으로 하향 침투하게 되고, 이는 부분포화구간을 증가시키게 된다. 이 때 부분포화구간은 완전건조한 지반에 비해 모관흡수력이 낮아지기 때문에 이 후 내리는 강우는 선행강우를 고려하지 않은 지반에 비해 쉽게 침투가 발생되고 지반 특성에 따라 포화영역이 증가하는 것으로 판단된다.

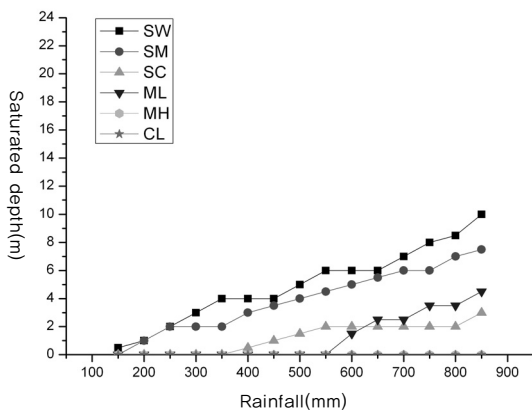
### 5. 결론

본 연구에서는 선행강우가 비탈면의 포화깊이에 어떠

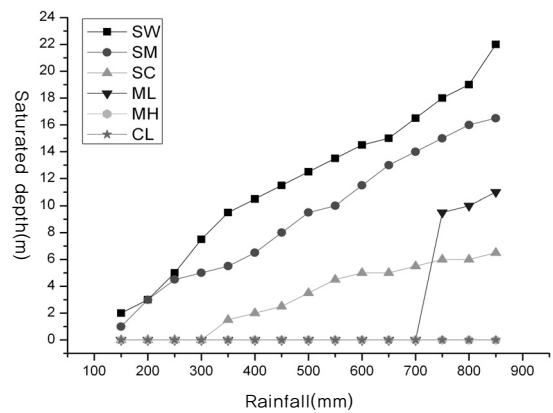
Table 3. Considering the preceding rainfall of 48 hours after results

Type of Soil	Rainfall Intensity (mm)	Saturated depth (m)	Type of Soil	Rainfall Intensity (mm)	Saturated depth (m)
SW	150	2	SC	150	-
	200	3		200	-
	250	5		250	-
	300	7,5		300	-
	350	9,5		350	1,5
	400	10,5		400	2
	450	11,5		450	2,5
	500	12,5		500	3,5
	550	13,5		550	4,5
	600	14,5		600	5
	650	15		650	5
	700	16,5		700	5,5
	750	18		750	6
	800	19		800	6
	850	22		850	6,5
SM	150	1	ML	150	-
	200	3		200	-
	250	4,5		250	-
	300	5		300	-
	350	5,5		350	-
	400	6,5		400	-
	450	8		450	-
	500	9,5		500	-
	550	10		550	-
	600	11,5		600	-
	650	13		650	-
	700	14		700	-
	750	15		750	9,5
	800	16		800	10
	850	16,5		850	11

(- : unsaturated)



(a) Antecedent rainfall is not consideration



(b) Antecedent rainfall consideration

Fig. 7. Saturated depth comparison chart

한 영향을 줄 수 있는지에 대해 분석하였다. 흙의 분류와 지속강우 특성에 따른 침투깊이의 영향을 줄 수 있는 조건을 제시하고자 침투거동특성을 상용프로그램인 SEEP/W로서 평가하였다. 그 결과, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.

- (1) 통일분류법으로 분류된 흙의 종류(SW, SM, SC, ML, MH, CL)별로 침투해석을 실시한 결과, MH, CL의 경우는 우리나라에서 발생할 수 있는 최대강우강도 범위 내에서는 완전 포화되는 영역은 발생하지 않는 것으로 나타났다.
- (2) 입도분포가 좋은 모래(SW)의 경우 선행강우를 고려하지 않은 경우보다 선행강우를 고려하여 침투해석을 실시한 결과 포화깊이가 강우강도에 따라 약 2~5배 이상 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 그 외 흙의 종류(SM, SC, ML)에서도 포화깊이가 약 2~3배 이상 증가하는 것으로 나타났다.
- (3) 선행강우의 경우, 강우강도가 낮을 때 포화깊이의 증가율이 더 높게 나타났다. 이는 적은 비가 내리더라도 선행강우의 영향으로 지표면이 포화되어 얇은 붕괴가

발생될 수 있음을 보여주는 결과이다.

## 참고문헌

1. Cho, S. E. and Lee, S. R. (2000), "Slope Stability Analysis of Unsaturated Soil Slopes Due to Rainfall Infiltration", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.16, No.1, pp.51-64.
2. Fredlund, D. G. and Xing. (1994), "Equations for the Soil Water Characteristic Curve", *Can. Geotech*, Vol.31, No.4, pp.521-532.
3. Jeong, S. S., Choi, J. Y. and Lee, J. H. (2009), "Stability Analysis of Unsaturated Weathered Soil Slope Considering Rainfall Duration", *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol.29, No.1, pp.1-9.
4. Ministry of Construction and Transportation. (2003), *Road Drainage Design and Maintenance Instructions(Appendix), Guideline*, pp.322-499.
5. Ministry of Land. (2011), *Construction of Slope Design Criteria, Guideline*, pp.119-133.
6. Oh, S. B., Mun, J. H., Kim, T. K. and Kim, Y. K. (2008), "A Case Study of Rainfall-Induced Slope Failures on the Effect of Unsaturated Soil Characteristics", *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol.28, No.3, pp.167-178.