

침투해석시 토층심도 및 불투수층 유무에 따른 지반의 포화특성 분석

Analysis of Soil Saturation Characteristics According to the Presence or Absence of Soil Layer Depth and Impervious

이 승 우^{1)*} 장 범 수²⁾ 김 용 수³⁾ 이 종 건⁴⁾ 이 주 용⁵⁾
Lee, Seung Woo Chang, Bhum Soo Kim, Yong Soo Lee, Jong Gun Lee, Ju Yong

Abstract

In recent study, infiltration analysis considering rainfall intensity is more economical and practical than existing analysis method. Revised construction slope design standard is also stated to full-fill infiltration analysis considering rainfall for practical stability review. Infiltration analysis considering rainfall for practical stability review. But, to infiltration analysis, the process is complicated by ground impermeability and rainfall intensity.

In this study, we perform infiltration analysis to charge infiltration conditions, soil type and rainfall characteristics, for more practical stability review. Using the result, we can suggest construable condition on the assumption that soil is saturated up to surface zone.

Keywords : Infiltration analysis, Rainfall intensity, Soil type, Rainfall characteristic

1. 서론

우리나라는 전 국토의 약 2/3가 산지로 이루어져 있어 지속적인 국토개발에 따른 비탈면의 증가가 불가피한 실정이다. 최근에는 서울 우면산 일대, 강원도 춘천 등지에서 산사태가 발생하여 많은 인명 및 재산피해가 발생되는 등 비탈면 관련 재해는 현재 주요 관심 대상이 되고 있다.

비탈면의 안정성은 기후변화와 지반조건 등 내외부적 요인에 의해 좌우된다. 그 중 강우는 비탈면 내부의 전단 강도를 감소시켜 비탈면의 안정성을 위협하는 주요 요인이라 할 수 있다. 과거에는 이러한 현상이 강우에 따른 침투수가 지하수위를 상승시켜 발생되는 것으로 판단하여 지하수위를 지표면 아래의 얇은 깊이 또는 지표면에 위치시켜 해석을 수행하였다. 그러나 실제로 강우의 침투는 지표면에서부터 습윤대를 형성하며 발생한다. 그러므로

이를 반영하여 안정성을 검토하는 것이 보다 현실적이며 경제적이다는 주장이 제기되고 있으며(Cho et al., 2000; Jeong et al., 2009), 최근 「건설공사 비탈면 설계기준 (Ministry of Land, 2011)」에서도 보다 현실적인 안정성 검토를 위해 강우의 침투를 고려하여 안정성 해석을 수행할 수 있도록 개정되었다. 그러나 강우를 고려한 침투해석에서는 실제 침투과정에 영향을 미치는 지반 특성, 역학적 특성, 열역학적 특성 그리고 화학적 특성 등의 모든 인자를 고려하기에는 한계가 있다. 따라서, 침투과정에 큰 영향을 미치는 지반 특성(함수특성곡선, 불투수계수곡선)과 강우 특성을 반영하게 된다. 지반특성의 경우, 신뢰도가 높은 불포화 지반의 지반정수를 얻기 위해 다수의 현장 및 실내시험으로 획득되며, 강우 특성은 해당지역의 확률강우강도 분석을 통해 파악된다. 이처럼 침투해석방법은 다소 복잡한 과정을 포함하고 있어 기존의 해석

1) 정회원, 한국시설안전공단 시설안전연구소 연구원, 교신저자
2) 정회원, 한국시설안전공단 시설안전연구소 연구소장
3) 정회원, 한국시설안전공단 시설안전연구소 책임연구원
4) 정회원, 한국시설안전공단 시설안전연구소 선임연구원
5) 정회원, 한국시설안전공단 시설안전연구소 연구원

* Corresponding author : happyguy84@nate.com 031-910-6713

• 본 논문에 대한 토의를 2013년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2013년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

방법에 비해 해석과정의 속도가 저하될 뿐 아니라 추가 비용이 발생할 수 있다는 단점이 있다.

본 연구에서는 침투해석 과정의 효율적인 활용방안을 제시하기 위해 흙의 종류와 강우조건별 포화깊이를 분석하였으며, 그 결과를 이용하여 불투수층(지하수위)의 위치에 따른 포화깊이의 변화를 파악하고자 하였다. 해석에 이용된 불투수계수곡선과 함수특성곡선은 SEEP/W 프로그램에 내장된 DB 자료를 참고하여 적용하였으며, 강우강도의 경우, 「도로배수시설 설계 및 유지관리 지침(Ministry of Construction and Transportation, 2003)」 및 「우리나라의 관측지점 및 전국 주요지점의 확률강우량」을 참고하여 적용하였다.

2. 이론

2.1 함수특성곡선(Soil-Water Characteristic Curve)

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

포화된 간극은 모관흡수력의 증가에도 불구하고 공기 유입값(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)라 하며, 잔류한 물은 열에 의해서만 제거된다. 함수특성곡선은 압력판 추출 실험장비, 모관흡수력을 측정할 수 있

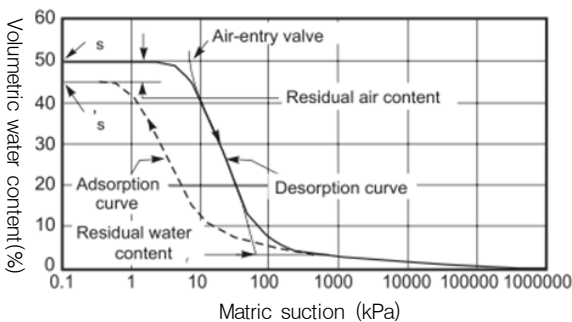


Fig. 1 SWCC (Fredlund and Xing, 1994)

는 센서 등을 이용하여 구할 수 있으며, 최근에는 인공지능 경향을 이용한 함수특성곡선 추정기법도 이용되고 있다 (Oh et al., 2008).

2.2 불포화 투수계수 곡선

불포화도에서 물의 흐름은 간극내 공기가 차지하고 있는 부분으로는 흐르지 않으며, 연속된 물로 이루어진 통로를 통해서만 흐르고 간극내 공기는 흡입자처럼 여겨진다. 불포화도에서도 Darcy의 법칙이 적용 가능하나, 이때는 투수계수가 상수가 아닌 모관흡수력 또는 포화도 등의 함수로 표현된다(Choi et al, 2000). 불포화 투수계수 곡선은 Fig. 2와 같이 나타나며 함수특성곡선과 유사한 경향을 보인다.

불포화 투수계수 곡선과 함수특성곡선은 함수비 조건과 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 실험은 수행 방법이 어렵고 비용이 많이 드는 문제점이 있으므로, 최근 Kunze, van Genuchten, Fredlund 등이 제안한 간결한 투수계수 추정방법들이 사용되고 있다(Jeong et al., 2009).

2.3 모관흡수력

불포화도에서 물-공기 접촉면에는 수압보다 큰 공기압이 작용하게 되며, 이 압력차($u_a - u_w$)를 모관흡수력(matric suction)이라 한다. 즉, 물표면에서 공기압과 수압의 차이를 나타내며, 외부환경에 따라 변하게 되고 흙의 평형 상태에 영향을 미친다. 흙에서의 간극은 물을 지하수면

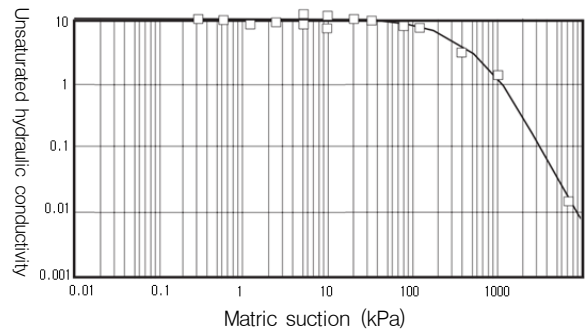


Fig. 2 Unsaturated permeability function (Fredlund and Xing, 1994)

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 되며, 지하수위의 경우 계절적인 지하수위 변화 등을 고려하여 비탈면의 안정에 가장 불리한 상태를 해석에 적용하는 것이 바람직하다. 비탈면의 파괴는 일반적으로 우기시에 집중적으로 발생하므로 비탈면 안정성 검토시 검토구간의 지역적 강우특성을 고려하여 비탈면 안정해석이 수행되어야 한다. 강우가 지속되면 비탈면 내로 지표수가 침투하여 일부 표면이 포화되며, 이로 인한 침투깊이를 적용하여야 한다.

3. 수치해석기법을 이용한 포화깊이 측정

본 연구에서는 여러 조건에 대해 해석을 수행하여 비탈면이 완전포화될 수 있는 조건을 검토하기 위하여 다음과 같은 과정을 통하여 연구를 수행하였다.

3.1 전제조건

본 연구에서는 흙의 종류와 강우량에 따른 침투양상만을 고려하여 침투되는 양상과 깊이를 객관적으로 관찰하기 위해 다음과 같은 전제조건하에 해석을 실시하였다.

1. 초기 간극수압의 분포는 동일하며, 지하수의 영향은 고려하지 않는다.
2. 지표면에서의 물의 흐름은 고려하지 않는다.
3. 초기 요소망의 분포와 양상은 모두 동일하다.
4. 강우 침투 시 한 번 유입된 우수는 다시 유출되지 않는 것으로 가정한다.

3.2 모델 단면 선정

침투해석을 위한 해석 단면은 불투수층(지하수위)의 유/무에 따라 2가지 경우로 선정하였다.

첫 번째, 흙의 종류와 강우강도에 따라 일반적으로 포화가 발생하는 최대깊이를 분석하기 위해 Fig. 3과 같이

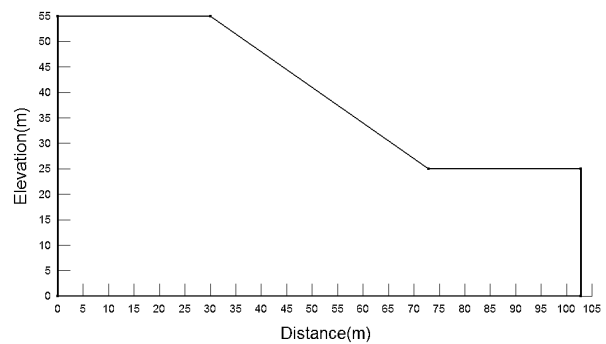


Fig. 3 1st analysis section

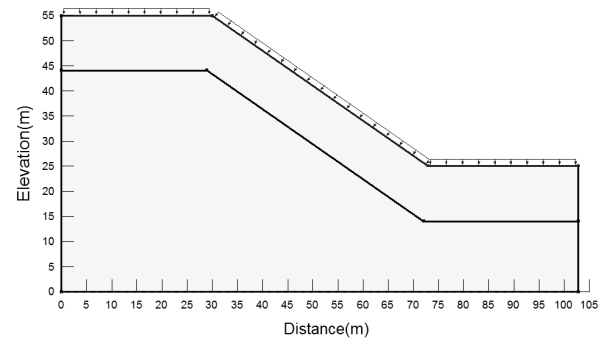


Fig. 4 2nd analysis section

단일토사비탈면 조건하의 포화 양상을 분석하였다.

두 번째, 불투수층이 존재하는 경우로 그 위치에 따라 변화되는 침투양상을 단일토사비탈면에서 나타나는 양상과 비교 분석하기 위해 Fig. 4와 같이 설정하였다. 이 때 해석상에서 불투수층은 0.5m간격으로 위치를 변경하여 위치에 따라 변화되는 포화 양상을 분석하였다.

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 토질의 종류를 Table 1과 같이 통일분류법의 기준에 따라 선정하였으며, 토질에 따른 불투수계수곡선과 함수특성곡선은 SEEP/W 프로그램에 내장된 DB 자료를 참고하여 적용하였다.

3.4 강우강도 선정

침투해석 시 강우조건은 「도로배수시설 설계 및 유지관리 지침(Ministry of Construction and Transportation,

Table 1 Unified Soil Classification System

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

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. 분석 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 150.0mm에서 800mm 정도로 예상할 수 있었다. 이에 본 연구에서는 150mm에서 850mm 까지 50mm 간격으로 15단계의 경우의 수를 가정하여 분석을 실시하였다.

4. 해석결과 및 분석

해석은 불투수층과 지하수위의 유/무에 따라 세가지 조건하에서 해석을 실시하였으며, 그 결과는 다음과 같았다.

4.1 불투수층(지하수위)이 존재하지 않는 침투해석 결과

일반적인 단일토사로 구성된 비탈면에서 침투되는 양상을 분석한 결과, 각각의 깊이는 흙의 분류와 강우특성에 따라 Fig. 5와 같이 다양하게 나타났다.

동일한 흙의 경우 강우강도가 증가할 경우 포화깊이도 증가하는 비례관계를 나타냈고, 흙의 투수계수가 작을 경우 포화깊이도 작아지는 경향을 나타냈으며, 대부분 Fig. 6과 같이 전반적으로 포화구간과 부분포화구간으로 구분되는 양상을 보였다.

그러나, 투수성이 매우 낮은 MH와 CL의 경우 완전포화영역이 발생하지 않는 것으로 해석되었다.

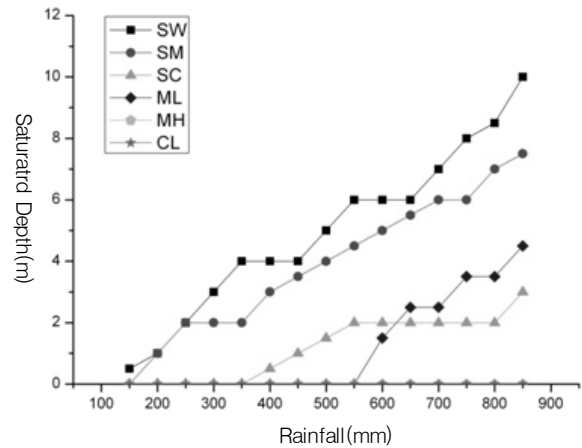


Fig. 5 Saturated depth comparison chart

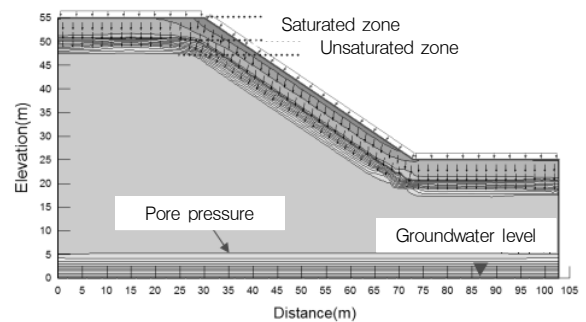


Fig. 6 Saturated section and Unsaturated section

4.2 불투수층(지하수위)이 존재하는 비탈면의 침투해석

불투수층 또는 지하수의 위치가 침투되는 깊이 이상에 존재하는 경우에는 불투수층이 존재하지 않는 경우와 동일한 양상을 보였다. 그러나, 불투수층이나 지하수위가 부분포화구간내 존재하는 경우에는 일정 위치부터 포화깊이가 증가하는 양상을 보였으며, 그 현상은 다음과 같이 설명될 수 있다.

첫째, 부분포화구간 내에 불투수층이 존재하는 경우는 Fig. 7과 같이 동일한 단일 토사에서 침투되는 깊이보다 침투가 진행되지 못하고 저류되게 된다. 이 때, 저류된 침투수가 일정량 모이게 되면, 포화가 발생하게 되는데, 이 때, 상부의 포화구간과 만나게 되면 토층이 완전포화 될 수 있다.

둘째, 지하수위가 부분포화 구간내 존재하는 경우는 Fig. 8과 같이, 부분포화 구간의 침투수가 원지반의 지하수위에 지속적으로 공급되는 과정에 의해서 지하수위가 상승하게 된다. 이 때, 지하수위가 상부의 포화구간과 만

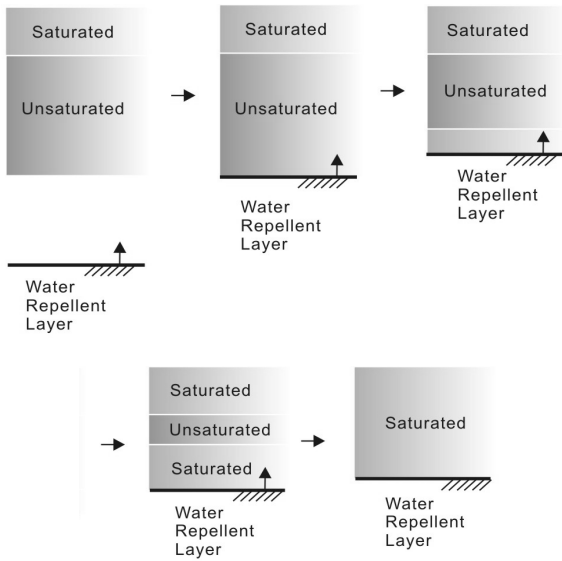


Fig. 7 Process saturating increase depth by water-repellent layer

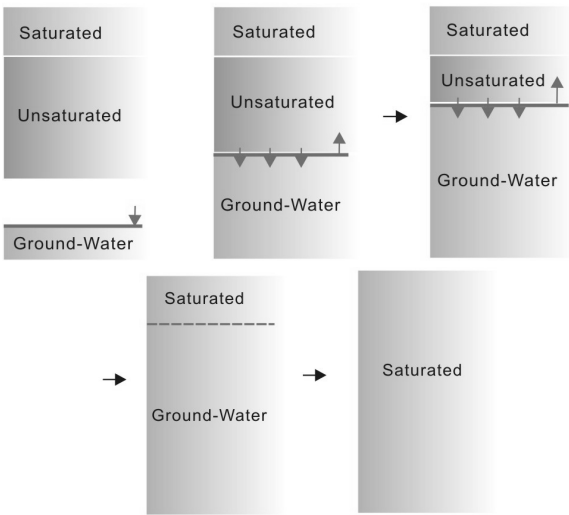


Fig. 8 Process saturating increase depth by groundwater-level

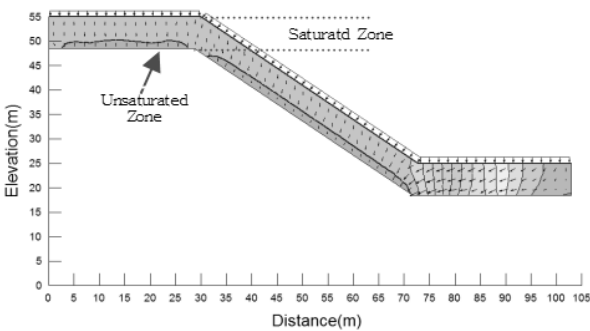


Fig. 9 Case by water-repellent layer position of the analysis

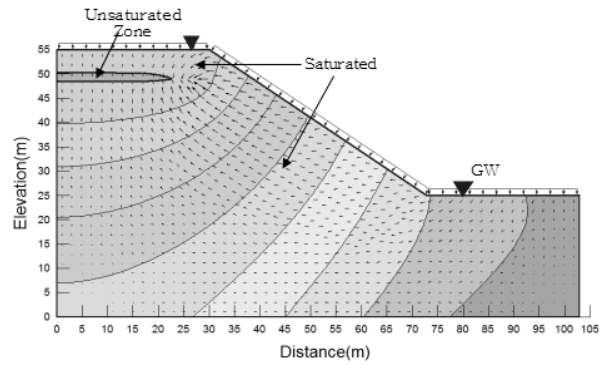


Fig. 10 Case by groundwater-level position of the analysis

나게 되면 비탈면 대부분이 포화될 수 있다.

분석 결과, 불투수층(지하수위)의 위치가 포화구간과 근접 할수록 Fig. 9, 10과 같은 과정을 통해 포화영역이 증가하게 되며, 일정깊이에 근접한 경우에는 토층 또는 비탈면 전체가 포화되는 것을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구에서는 흙의 분류와 지속강우 특성에 따른 침투 깊이를 파악하여 안정해석시 활용방안으로 제시하고자 하였다. 비탈면의 침투거동특성은 상용프로그램인 Seep/w 를 활용하여 분석하였으며, 결론은 다음과 같다.

- (1) 일반적으로 강우의 침투깊이는 투수계수와 강우강도가 높을수록 비례하여 증가하는 것으로 나타났으나, 일부 투수계수가 높은 매질의 경우에는 우리나라에서 발생할 수 있는 최대강우강도 범위 내에서는 완전 포화되는 영역이 발생되지 않는 것으로 나타났다.
- (2) 동일한 매질과 강우조건을 비탈면에서도 불투수층으로 유입되는 부분포화구간의 침투수로 인해 완전포화구간이 증가할 수 있다.
- (3) 동일한 매질과 강우조건을 적용하여 침투해석을 실시한 기존 자료가 존재하는 경우 다음과 같은 조건에서는 비탈면을 완전포화로 가정하여 안정해석을 수행할 수 있다.
 - 1) 기존 자료의 포화깊이보다 해석 대상 비탈면의 토층깊이가 작을 경우
 - 2) 불투수층(지하수위)이 완전포화가 발생하는 구간 내에 위치할 경우

감사의 글

본 연구는 국토해양부 도로비탈면유지관리시스템(CSMS)의 사업비 지원에 의해 수행된 연구로서 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. Cho, S. E., Lee, S. R., "Slope Stability Analysis of Unsaturated Soil Slopes Due to Rainfall Infiltration", Journal of Korean Geotechnical Society, vol. 16, No. 1, 2000, pp.51-64. (in Korean)
2. Choi, H. S., "Stability Analysis and Reinforcement of Large Excavated Slope considering Precipitation Infiltration in Rainy Season", Journal of Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, vol. 4, No. 1, 2000, pp.72-83.
3. Fredlund, D. G. and anqing Xing, Equations for the soil water characteristic curve, Can. Geotech, vol. 31, 1994, pp.521-532.
4. Geo-slope, User's Guide for SEEP/W v2007, Geo-slope international Ltd., 2007, pp.369-417.
5. Jeong, S. S., Choi, J. Y., Lee, J. H., "Stabiity Analysis of Unsaturated Weathered Soil Slope Considering Rainfall Duration", Journal of Korean Society of Civil Engineers, vol. 29, No. 1, 2009, pp.1-9. (in Korean)
6. Ministry of Construction and Transportation., Road Drainage Design and Maintenance Instructions (Appendix), Guideline, 2003, pp.322-499. (in Korean)
7. Ministry of Land., Construction of Slope Design Criteria, Guideline, 2011, pp.119-133. (in Korean)
8. Oh, S. B., Mun J. H., Kim, T. K., Kim, Y. K., "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, 2008, pp.167-178. (in Korean)

Received : 07/20/2012

Revised : 10/22/2012

Accepted : 11/12/2012

요 지

최근 많은 연구를 통해 비탈면의 우기시 안정성 검토 방법이 기존의 해석 방법에 비해 강우를 고려한 침투해석이 보다 경제적이고, 현실적이라는 주장이 제기되고 있다. 최근 개정된 건설공사 비탈면 설계기준에서도 보다 현실적인 안정성 검토를 위해우기시 강우를 고려하여 침투해석을 실시할 수도 있게 개정되었다. 그러나 침투해석 과정에는 지반의 불투수특성과 강우강도등 고려되는 인자들로 인해 그 과정이 복잡하다는 애로사항이 있다.

본 연구에서는 침투해석을 이용한 보다 효과적인 안정성 검토 방법을 제시하기 위해 흙의 종류와 지속강우 특성에 따른 침투 조건을 변화시켜 일반적인 침투양상을 파악하였다. 그 결과를 이용하여 지표면까지 포화된다는 가정하에 해석을 실시할 수 있는 조건을 제시할 수 있었다.

핵심 용어 : 강우, 침투해석, 흙의 종류, 지속강우
