

우기시 비탈면 안전을 변화 인자의 영향에 대한 수치해석적 비교연구

Numerical Analysis and Comparison of the Influence of Safety Factor Variations in Slope Stability During Rainy Season

송 평 현¹ Song, Pyung-Hyun

백 용² Baek, Yong

유 병 옥³ You, Byung-Ok

황 영 철⁴ Hwang, Young-Cheol

Abstract

Many studies have been made on investigation, design, explanation and treatments etc. to minimize slope failure. However, the problem is that failures of cutting slope and natural slope due to Typhoon and localized heavy rainfall are still not reduced. It is difficult to treat the problem by only strengthening the design standard. And it is very necessary to carry out design and safety analysis under the most suitable conditions considering foundation and rainfall characteristics. In this study, variations of safety factor were discussed from different aspects to investigate the influence of different parameters of rainfall and analysis conditions. Rainfall and foundation conditions are supposed to be the most sensitive parameters to slope stability, and numerical analysis were performed by changing parameters of the two conditions. Rainfall behavior is based on the domestic statistical rainfall and foundation condition is selected as unsaturated soils. Study results show that, application of rainfall characteristics in different area and parameters of unsaturated soils are responding sensitively to variations of slope safety. Therefore, the input parameters should be fully examined when performing the practical design.

요 지

비탈면 붕괴를 최소화 하기 위하여 조사, 설계, 해석, 대책방안 등의 연구가 많이 수행되고 있다. 그러나, 최근 태풍 및 집중호우로 인하여 비탈면 및 자연 사면의 산사태 발생빈도는 줄지 않고 있다. 단순한 설계 기준의 강화만으로는 적절한 대책을 마련하기 어려운 실정이다. 따라서, 지반과 강우를 고려한 최적의 조건에서 설계 및 안정해석을 실시하여야 한다. 본 연구는 비탈면 해석시 강우 및 해석조건에 대하여 각 변수의 영향을 살펴보고자 안전율의 변화를 다각도로 검토한 것이다. 연구방법으로는 비탈면 안정에 가장 민감하게 반응한다고 판단되는 강우조건과 지반조건을 선정하였고, 각각의 조건변수를 변화시켜가면서 수치해석적 검토를 수행하였다. 강우특성으로는 국내의 확률강우특성을 기반으로 해석을 수행하였으며 지반조건으로는 불포화토를 대상으로 검토를 실시하였다. 연구결과, 지역별 강우특성과 불포화토의 매개변수 적용이 비탈면 안전을 변화에 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 따라서, 설계시 입력변수에 대한 충분한 검토가 선행되어야 할 것이다.

Keywords : Seepage analysis, Rainfall intensity, Rainfall duration, unsaturated soil, Parameter of stability

1 정희원, 세일지오택 (Member, Manager, Professional Engineer, Soil & Foundations)

2 정희원, 한국건설기술연구원 Geo-인프라 연구실 (Member, Research Fellow, KICT, Tel: +82-31-910-0228, Fax: +82-31-910-0561, baek44@kict.re.kr, Corresponding author, 교신저자)

3 정희원, 한국도로공사 도로교통연구원 수석연구원 (Member, Research Director, Expressway & Transportation Research Institute, Korea Expressway Corporation)

4 정희원, 상지대학교 건설시스템 공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Sangji Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2014 by the Korean Geotechnical Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

최근 집중호우와 이상기온으로 인하여 비탈면 붕괴 및 산사태가 빈번히 발생하고 있다. 2011년 우면산 산사태로 인하여 수십명의 사상자가 발생하였으며 현재에도 복구작업이 지속되고 있다. 북구시 적절한 설계와 산사태 대책을 수립하기 위하여 가능한 최적의 설계를 시도하고자 노력하고 있다. 과거 기술력이 부족할 경우, 설계기준을 강화하여 구조물을 설계하는 경우가 빈번하였으나, 최근 기술력의 향상으로 인하여 보다 효율적인 설계를 제안하고 있다.

비탈면 설계기준에 관하여도 합리적인 방향으로 기준이 변화되었다. 2011년 건설공사 비탈면 설계기준(MLIT, 2011)에서도 우기시의 안전율에 대한 지하수위 해석조건을 현장의 여건에 맞추어 설계토록 개정이 되었다. 우기시 안전율 변화에 대하여 일부 연구자들에 의하여 연구가 된 상태이지만 활성화 되어 연구가 수행되지 않고 있다. Lee et al.(2008)에 의하여 불포화토의 매개변수에 대한 검토가 이루어졌으며, Lim et al.(2008)에 의하여 강우조건에 대한 비탈면 해석 연구가 수행된 바 있다. 이외에도 수자원 분야에서 소하천 설계기준(2012)에서 확률강우에 대한 조건을 제시하고 있는 실정이다. 그러나, 비탈면에서 강우조건과 지반조건에 따른 인자들의 해석영향에 대하여 다각도로 검토한 경우는 많은 연구

가 수행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 비탈면 안정 해석에서 영향을 미치는 인자들과 우기시 해석조건을 변화하면서 수치해석을 수행하였다.

2. 강우조건

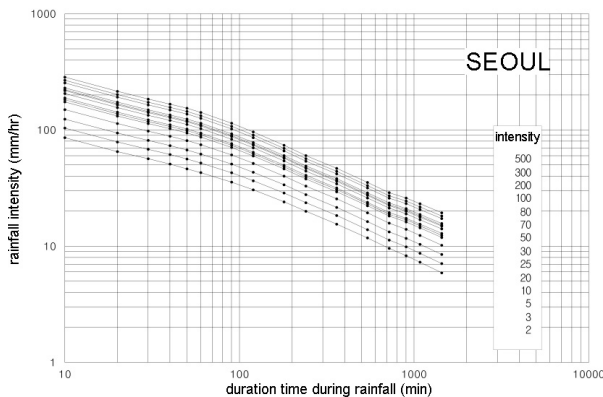
구조물인 경우에는 강우특성을 설계에 반영할 때 기본적으로 설계 강우를 가정하고 적용하게 된다. 수공구조물을 설계할 때 수문시스템의 입력자료로서 기본이 되는 설계 강우량은 과거로부터 최근까지 관측된 지점 강우자료를 가지고 빈도해석을 하여 확률강우량을 지점별로 산정하거나 강우강도-지속시간-빈도곡선으로 표시하여 이용한다. 비탈면에 적용하기 위하여 수공에서 적용하는 설계강우의 개념을 도입하였다. 현재 비탈면에는 설계강우라는 개념이 적용되고 있지 않고 있으므로 새로운 매개변수로 적용하여 해석해 보고자 한다.

2.1 비탈면에 도입된 확률강우

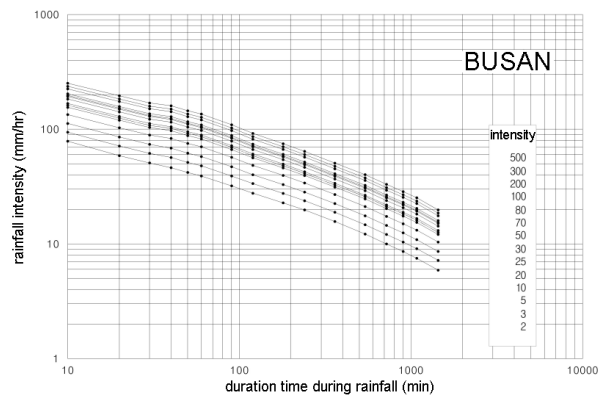
우기시 우수가 땅속으로 침투되는 양은 강우강도, 강우지속시간, 지반특성에 따라 달라질수 있다. 따라서 강우강도의 영향을 살피기 위하여 확률강우강도값을 적용하였다. 기존의 확률강우강도자료를 활용하였으며, 본 연구에서는 Heo et al.(1999)이 제안한 주요지점별 계수값을 인용하였다. 강우강도(intensity)는 단위시간당 강우량(mm/hr)을 말하며, 강우지속시간(duration)은 강우가 지속되는 기간(min), 강우재현기간(rainfall frequency)은 일정기간에 임의의 강우가 발생할 횟수를 말한다. 한국형 수정확률강우강도식(식 (1))의 주요도시의 지점별

Table 1. The factor of major cities (Heo, 1999)

Sites	a	b	c	d
Seoul	396.4	174.2	1.681	-.167
Busan	318.5	143.9	2.146	.655



Rainfall probability curve in Seoul



Rainfall probability curve in Busan

Fig. 1. Rainfall probability curve of major cities

계수 값은 Table 1과 같다. 본 연구에서는 주요도시로 서울과 부산을 선정하였다. 두 개의 도시를 대상으로 하여 강우지속시간을 10분에서 24시간, 재현기간을 2년에서 100년까지 확률강우량을 선정하고 확률강우강도 곡선을 작성하였다. Fig. 1은 서울과 부산지역의 확률강우강도 곡선이다.

$$I(T,t) = \frac{a + b \ln(T/t^{0.2})}{c + d \ln(\sqrt{T}/t) + \sqrt{t}} \quad (1)$$

(한국형 수정확률강우강도식)

여기서,

$I(\text{mm/h})$: 강우강도(단위시간당 강우량)

$T(\text{년})$: 강우재현기간(일정기간에 임의의 강우가 발생한 횟수)

$t(\text{분})$: 강우지속시간(강우가 지속되는 시간)

a, b, c, d : 지점별로 정해지는 상수

2.2 비탈면에 침투되는 강우량

일반적으로 집중호우시 비탈면에 강우가 발생할 경우 최대 30%가 비탈면으로 침투되어 지하수를 형성하게 되고 나머지 대부분은 법면을 타고 유출되는 양상을 나타낸다. 본 연구에서는 이런 자연현상을 유입조건으로 설정하였다. Fig. 2는 강우시 지표로 유출되는 우수

의 상황을 나타낸 사진이다.

강우시 지표면에 내린 우수의 양은 유역면적, 유출계수, 지형의 경사도 등에 따라 산정하게 되며 유출되지 않고 지표면에 침투된 우수는 투수과정을 거쳐 침윤선을 형성한 지하수를 형성하게 된다. 유출계수(run-off coefficient)란 전강우량에 대한 총 유출량의 비율로 나타내며 지표면에 침투되는 지하수량은 유출계수와 밀접한 관계가 있다.

식 (2)와 같은 합리식에서의 유출계수 C 는 유역면적의 상태에 따라 Table 2와 같다.

$$Q = \frac{1}{3.6} C \cdot I \cdot A \quad (2)$$

여기서 C :유출계수, Q :최대 강수유출량, I :강우강도, A :배수면적

3. 연구방법 및 조건

3.1 강우조건

비탈면 침투해석을 실시하기 위하여 다양한 조건의 매개변수를 변화시키면서 해석하였다. 대상지역은 서울을 선정하였다. 강우재현기간 및 강우지속시간별 확률강우강도는 재현기간 20년, 50년, 100년, 200년으로 하



(a) Runoff of surface slope



(b) Runoff of natural slope

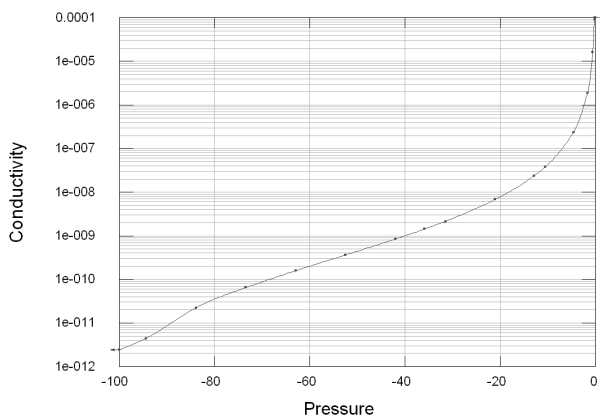
Fig. 2. Rainwater from flowing to the surface during rainfall

Table 2. Runoff coefficient C value (MOCT, 2001)

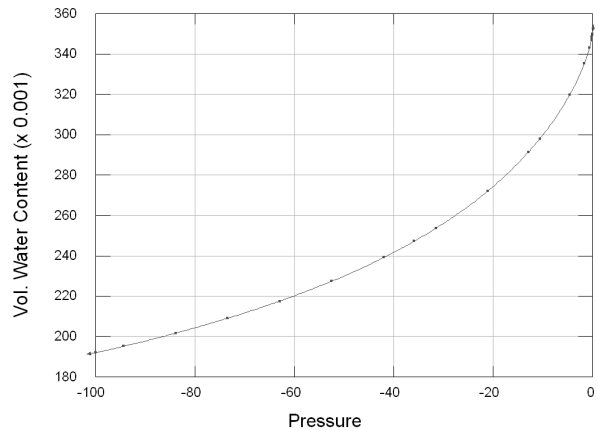
Pavement face	Steep mountain and slope	Steep valley, cropland	Smooth mountain, smooth cropland, urban areas	etc
0.9	0.8	0.8	0.7	0.6

Table 3. Return period penetrate to the ground and input value of probability rainfall intensity during rainfall time

Rainfall duration time		Period	20year	50year	100year	200year
1 (hr)	Rainfall probability		78.66 mm/hr	95.59 mm/hr	108.57 mm/hr	121.71 mm/hr
	Rainfall infiltration	100% penetration	2.2×10^{-5} m/sec	2.6×10^{-5} m/sec	3.0×10^{-5} m/sec	3.4×10^{-5} m/sec
		30% penetration	6.5×10^{-6} m/sec	7.9×10^{-6} m/sec	9.1×10^{-6} m/sec	1.0×10^{-5} m/sec
24 (hr)	Rainfall probability		16.38 mm/hr	20.35 mm/hr	23.36 mm/hr	26.39 mm/hr
	Rainfall infiltration	100% penetration	4.6×10^{-6} m/sec	5.6×10^{-6} m/sec	6.5×10^{-6} m/sec	7.3×10^{-6} m/sec
		30% penetration	1.4×10^{-6} m/sec	1.7×10^{-6} m/sec	1.9×10^{-6} m/sec	2.2×10^{-6} m/sec
48 (hr)	Rainfall probability		7.66 mm/hr	9.65 mm/hr	11.16 mm/hr	12.68 mm/hr
	Rainfall infiltration	100% penetration	2.1×10^{-6} m/sec	2.7×10^{-6} m/sec	3.1×10^{-6} m/sec	3.5×10^{-6} m/sec
		30% penetration	6.4×10^{-7} m/sec	8.0×10^{-7} m/sec	9.3×10^{-7} m/sec	1.1×10^{-6} m/sec



Unsaturated hydraulic conductivity curve



Volumetric water content curve

Fig. 3. Characteristic curve of Unsaturated soil

였으며, 강우지속시간 1시간, 24시간, 48시간 조건으로 계산하였다. 강우의 유입은 두가지의 조건으로 선정하였으며 100% 침투되는 경우와 일반적으로 30%가 침투되는 것을 가정하고 침투해석을 실시하였다. 강우강도 적용식은 식 (1)의 수정확률강우강도식을 이용하였다. Table 3은 강우강도식을 적용한 결과와 강우침투 입력치를 정리한 것이다.

3.2 지반조건

불포화지반은 흡입자, 물, 공기, 물-공기 접촉면의 4상으로 이루어져 있기 때문에 간극수와 간극공기사이의 압력차이로 유발되는 모관흡수력을 고려해야 한다.

Table 4. Parameters used for the stability analysis (Lee et al., 2009)

Classification	a	n	m
Upper	76.319	1.148	0.968
Mean	43.539	0.754	1.426
Lower	12.479	0.772	1.467
Inner	100.000	2.000	1.000

함수특성곡선은 흙속에 존재하는 물의 양과 모관흡수력의 관계로 정의되며 불포화정도에 따른 모관흡수력을 나타낸다. 본 연구에서 사용한 불포화토 함수특성곡선식은 Fredlund and Xing(1994)의 이론식을 이용하였다(식 (3)). 불포화토의 매개변수를 정리하면 Table 4와 같다.

$$\Theta = \frac{1}{(\ln[e + (\frac{\psi}{a})^n])^m} \quad (3)$$

여기서 Θ : 정규화된 체적함수비
 a, n, m : 불포화지반의 주요특성을 알 수 있는 매개변수

불포화토의 투수계수와 체적함수량은 매개변수를 a, n, m 을 이용한 Fredlund & Xing(1994)의 평가법을 적용하였다. 투수계수 $1 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 의 불포화투수계수곡선 및 체적함수량곡선(함수비 25%)은 다음 Fig. 3과 같다.

본 연구에서는 일반적으로 풍화토를 대상으로 가상의 지반모델을 선정하여 해석을 수행하였다. Table 5는 가상지반의 강도정수이다. 비탈면의 높이는 5m, 10m, 15m로 설정하였으며, 지반조건은 투수계수 $1 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$, $1 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ 의 조건에 대하여 해석을 수행하였다.

3.3 경계조건

침투해석시 초기 지하수위의 경계조건은 절취 후 바닥면으로 가정하고 H(전수두)조건으로 하였다. 경사면은 유출을 허용하는 조건으로 하였으며 강우가 침투되는 지표면은 단위침투량조건으로 다음과 같이 모델링

Table 5. Intensity curve of the virtual ground

Classification	Ground value	Classification	Ground value
Unit weight (γ_s)	1.80 t/m ³	Internal friction angle (ϕ)	30°
Adhesion (c)	1.0 t/m ²	Water content (w)	25.0%

Table 6. Two boundary conditions used in the stability analysis

Classification	Initial groundwater level	Slope face	Surface part
Boundary condition ①	Bottom, H (total water head)	Q=0	Unit infiltration (q, mm/hr)
Boundary condition ②	Bottom, H (total water head)	Unit infiltration (q, mm/hr)	Unit infiltration (q, mm/hr)

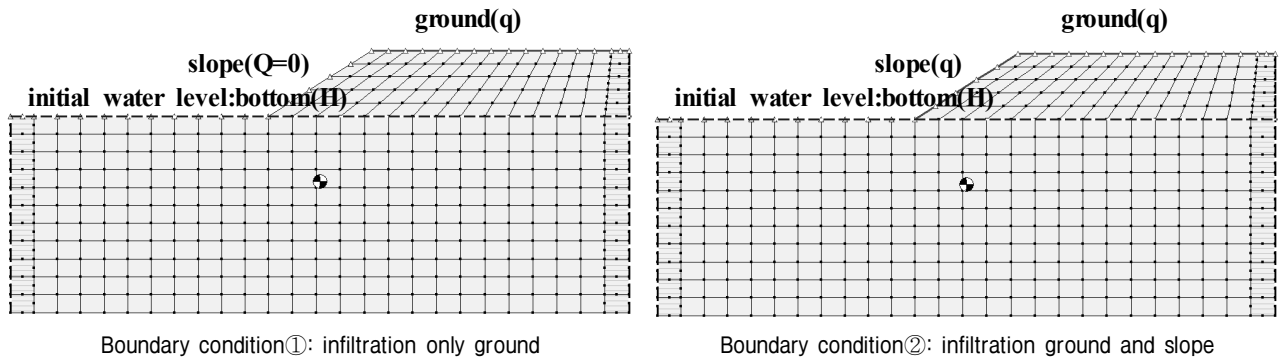


Fig. 4. Boundary conditions of modeling penetration analysis and slope shape

하였다(Table 6). 침투해석후 지하수위 변화양상은 총 4가지 경우를 설정하였다. 강우종료직후, 강우종료후 24시간 경과, 48시간 경과, 72시간 경과후로 구분하였으며 각각에 대하여 비탈면 안정성분석을 실시하였다. Fig. 4는 비탈면 형상과 침투해석 경계조건을 도시한 것이다.

3.4 해석 방법

강우 침투량에 따른 침투해석프로그램은 SEEP/W 프로그램(Geo-Slope International Ltd)을 이용하였다. 해석조건은 강우조건, 지반 투수계수변화, 비탈면 높이, 불포화토의 매개변수변화를 변화시켜가면서 실시하였다. 해석은 비정상상태(transient state)의 침투조건으로 하였으며 강우강도의 100%가 유입되는 조건과 30%만 유입되는 조건에 대하여 경계조건①과 지표면과 사면부에서 유입되는 경계조건②에 대하여 실시하였다.

4. 해석결과 및 토의

4.1 불포화지반에 있어서 매개변수와 지하수위의 상관관계

대상모델은 연구목적상 사면높이 10m에 대하여 투수

계수 $1 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$, 강우강도 200년 빈도, 강우지속시간 48시간 조건에 대하여 100%침투 조건시 결과분석을 실시하였다. 매개변수별 강우 종료 후 지속시간 48시간 경과에 따른 침투해석을 실시하였다.

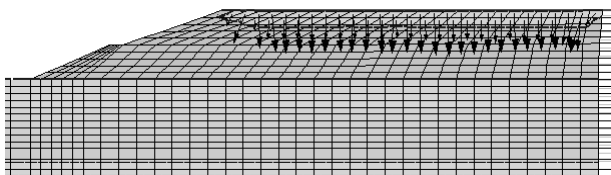
Lee et al.(2009)가 제시한 불포화토의 평균매개변수($a : 43.539, n : 0.754, m : 1.426$)를 사용한 경우, 해석결과는 Fig. 5와 같다. 경계조건①의 경우는 사면 상부의 일부구간에만 지하수 침투현상이 발생하나, 경계조건②의 경우는 사면상부와 경사면에도 지하수위가 상승하는 것으로 나타났다. 불포화토의 상한치 매개변수($a : 76.319, n : 1.148, m : 0.968$)를 사용한 경우, 경계조건①의 경우는 사면 상부는 완전 포화되는 것으로 나타나며 사면부에도 지하수위가 형성되는 것으로 나타났다. 경계조건②의 경우는 사면상부와 경사면에 거의 포화된 형태의 지하수위가 상승하는 것으로 나타났다(Fig. 6). SEEP/W 프로그램에 내장된 불포화토의 매개변수($a : 100, n : 2, m : 1$)를 사용한 경우, 경계조건①의 경우는 사면 상부는 완전 포화되는 것으로 나타나며 사면부에도 지하수

위가 거의 포화되어 형성되는 것으로 나타났다. 경계조건②의 경우는 사면상부와 경사면에 완전 포화되어 형성되는 것으로 나타났다(Fig. 7). 이상과 같이 검토한 결과 불포화토의 매개변수가 클수록 지하수위 상승은 높게 나타나며, 경계조건②의 조건이 지하수위 상승에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다.

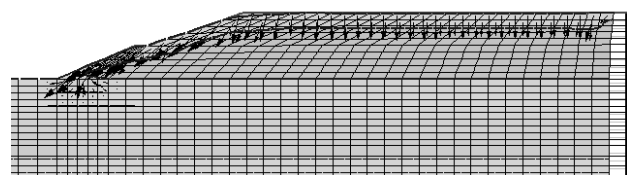
4.2 투수계수와 안전율 변화의 상관관계

투수계수와 안전율 변화의 상관관계를 검토하기 위하여 3가지의 사면 형상을 고려하여 검토하였다. 강우강도 200년 빈도, 강우지속시간 48시간, 강우침투 100% 조건에 대하여 사면해석을 실시하였다. 여기서 투수계수는 $1 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 과 $1 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ 의 두 경우를 적용하였다. Fig. 8은 사면 높이가 5m 일 경우의 해석 결과이다. 여기서, 각 그래프에서 e-3 평균은 투수계수 $1 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ 의 매개변수 평균을 나타내는 것을 의미한다.

안전율 해석 결과, 각각의 투수계수에 따라 강우 종료

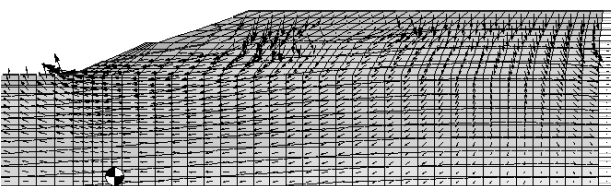


Total water level terminated at 48 hours after rainfall (boundary condition ①)

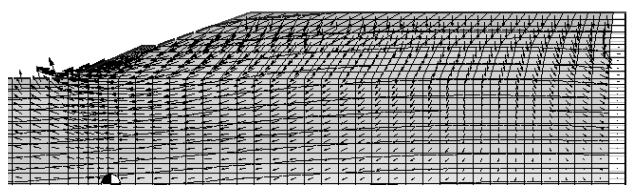


Total water level terminated at 48 hours after rainfall (boundary condition ②)

Fig. 5. Change of ground water under infiltration conditions in the mean factors

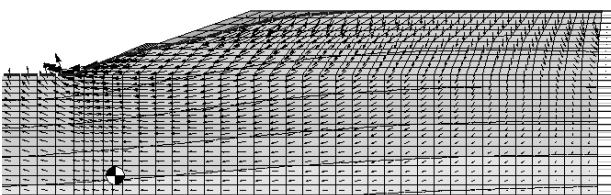


Total water level terminated at 48 hours after rainfall (boundary condition ①)

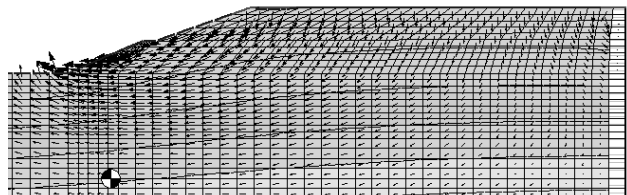


Total water level terminated at 48 hours after rainfall (boundary condition ②)

Fig. 6. Change of ground water under infiltration conditions in the upper factors



Total water level terminated at 48 hours after rainfall (boundary condition ①)



Total water level terminated at 48 hours after rainfall (boundary condition ②)

Fig. 7. Change of ground water under infiltration conditions in the inner factors

후 48시간이 경과하면 안전율의 변화는 적은 것으로 나타났다. 또한 투수계수가 작을 수록 안전율의 변화는 적으나 매개변수가 클 수록 안전율의 변화는 크게 나타났다. 프로그램에 내장된 불포화토 매개변수를 사용하는 경우 투수계수가 작을수록 안전율이 작아지는 경향을 보이나, 평균 및 상한값을 나타내는 불포화토 매개변수를 사용하는 경우는 투수계수가 작을수록 안전율이 높은 경향을 보였다. 또한 불포화토의 매개변수 값이 클수록 안전율은 급격히 작아지는 경향을 보이고 있다. 지반

의 투수계수보다는 매개변수의 영향을 더 많이 받는 것으로 나타났다.

Fig. 9는 사면 높이 10m 경우의 해석 결과를 나타낸 것이다. 해석 방법은 동일하게 하였다.

상기 조건에 대하여 안전율변화를 분석한 결과 프로그램에 내장된 불포화토 매개변수를 사용시 투수계수가 작을수록 안전율이 낮은 경향을 나타내고 있다. 불포화토의 매개변수의 상한치를 사용하는 경우 투수계수가 작을수록 안전율이 높게 나타나는 양상을 보인다. 또

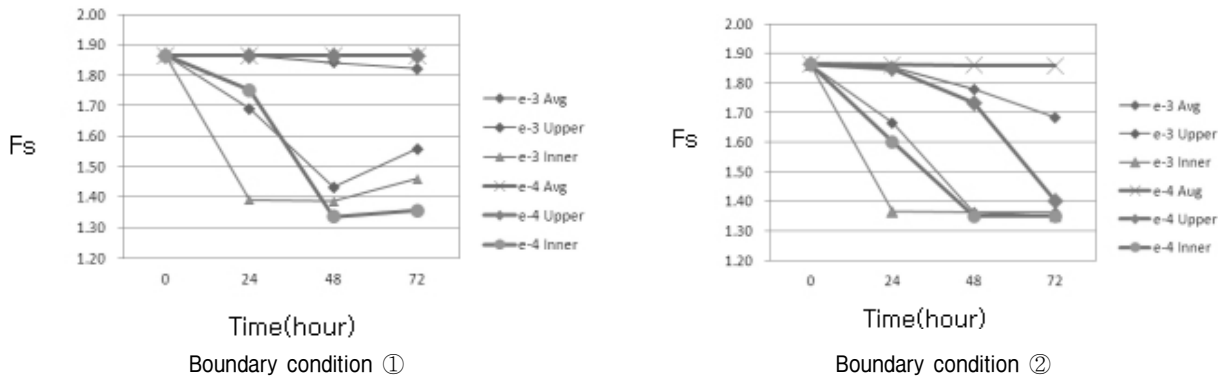


Fig. 8. Changes in slope safety factor at 5 m height and permeability parameters

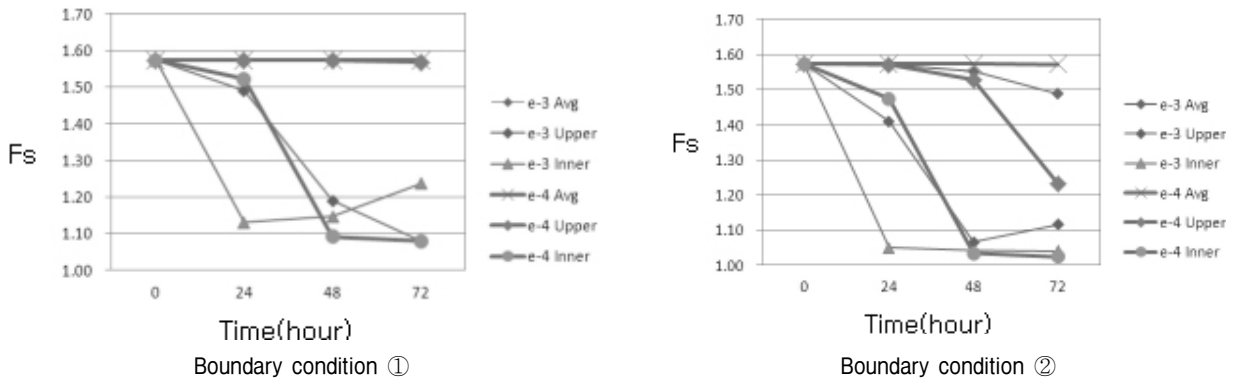


Fig. 9. Changes in slope safety factor at 10m height and permeability parameters

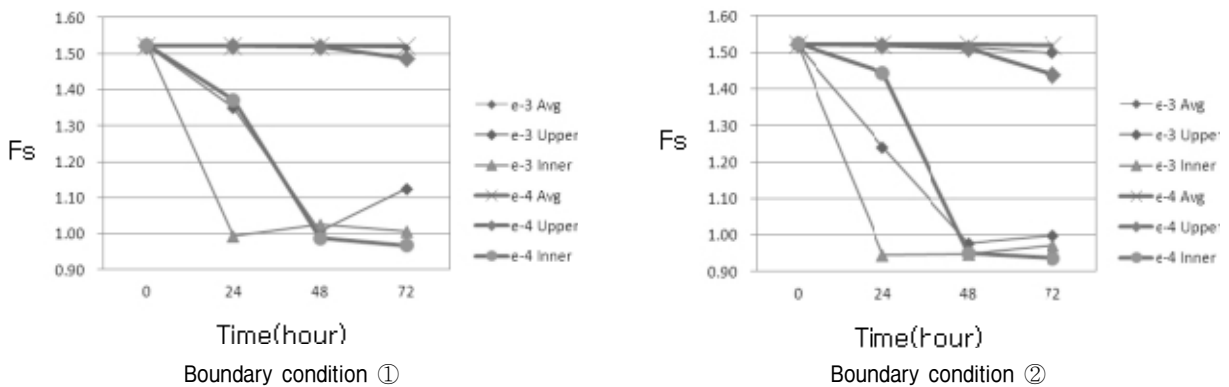


Fig. 10. Changes in slope safety factor at 15 m height and permeability parameters

한 불포화토의 매개변수 값이 클수록 안전율은 급격히 낮아지는 경향을 보이며 지반의 투수계수와도 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 또한 경계조건①이 안전율이 다소 크게 나타났다.

동일한 해석 방법으로 사면 높이 15m의 경우에 적용해 보았다. Fig. 10은 해석결과이다.

사면높이 15m조건에 대하여 안전율변화를 분석한 결과 프로그램에 내장된 불포화토 매개변수를 사용 시 투수계수가 작을수록 안전율이 작은 경향을 보이는 것으로 나타나며, 불포화토 매개변수의 상한치를 사용하는 경우 투수계수가 작을수록 안전율이 큰 경향을 보이는 것으로 나타났다. 또한 불포화토의 매개변수 값이 클수록 안전율은 급격히 작아지는 경향을 보이며 지반의 투수계수와도 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 경계조건에 따른 안전율의 변화는 경사면에서 강우가 유입되는 조건이 지표면에서만 강우가 유입되는 조건보다 안전율이 작아지는 경향을 보이며 내장매개변수를 사용하는 경우 강우 종료후 48시간 경과후에는 안전율의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 투수계수보다는 매개변수에 의해 안전율이 지배받는 것으로 분석된다.

사면 높이에 따라 안전율은 작아지나 높이변화와 투수계수변화, 매개변수변화와는 상관성이 크지 않은 것으로 나타났다. 사면의 높이가 높을수록 안전율은 적어지는 경향을 보이나 사면 높이에 따른 안전율 변화보다는 매개변수가 안전율에 더욱 많은 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

4.3 매개변수와 안전율 변화의 상관관계

매개변수와 안전율 변화의 상관관계를 검토하기 위하여 3가지 매개변수를 고려하여 검토하였다. 투수계수

1×10^{-3} (cm/sec), 강우지속시간 48시간, 강우침투(100%, 30%)의 조건하에 매개변수를 조절하면서 안전율 변화를 분석하였다. Fig. 11은 불포화토의 평균 매개변수를 사용한 경우의 해석 결과이다. 여기서, 각 그래프가 5m (100%)는 5m 사면높이의 100% 강우침투를 의미하는 것이다. Fig. 12와 13은 각각 상한 매개변수와 내장매개변수를 고려한 경우를 나타내고 있다.

1) 평균 매개변수 시

우수침투조건 100%와 30%시 불포화토의 평균매개변수 사용 시 경계조건 및 사면높이별 안전율변화를 분석한 결과 강우침투조건에 따른 안전율변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 그러나 사면높이 5m, 10m, 경계조건②의 조건에서 강우 종료 후 72시간이 경과하는 경우 급격히 안전율이 저하되는 것으로 나타났다. 이는 사면 내에서 우수를 침투 시키는 조건의 영향으로 강우종료 후 침투되는 시간이 72시간 경과시점에서 최대의 간극수압으로 작용하는 영향으로 판단된다.

2) 상한 매개변수시

우수침투조건 100%와 30%시 불포화토의 상한매개변수 사용시 경계조건 및 사면높이별 안전율변화를 분석하였다. 분석결과, 5m 높이의 사면에서 안전율변화 경계조건①이 경계조건②보다 안전율이 대체적으로 높게 나타났다. 이는 지표면에서 우수를 침투시키는 조건과 지표면과 사면내에서 동시에 우수를 침투시키는 조건의 영향으로 지표면에서만 강우를 침투시키는 조건이 상대적으로 간극수압이 작게 작용하는 영향으로 판단된다.

강우침투에 따른 안전율 변화는 규칙성이 없이 다양한 경향을 나타내는 것으로 해석되었으며, 강우 종료 후

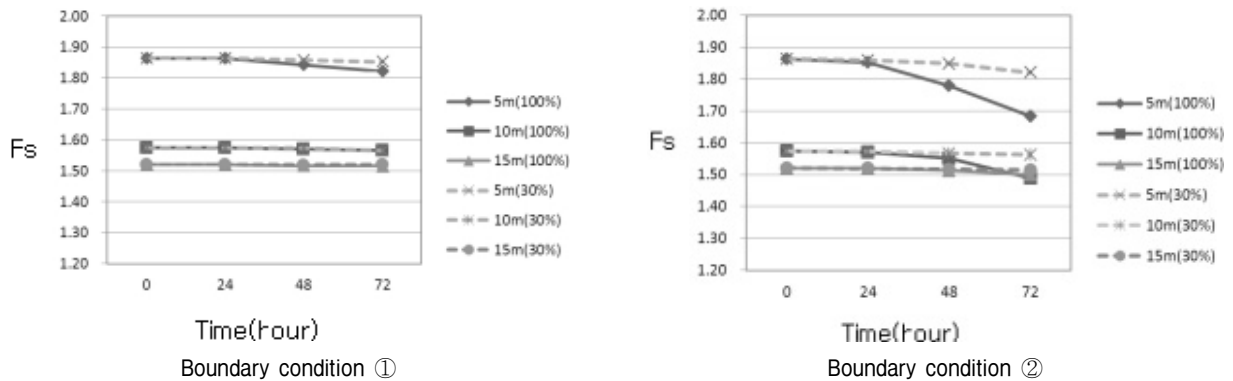


Fig. 11. Safety factors change with average height and slope parameters using penetration

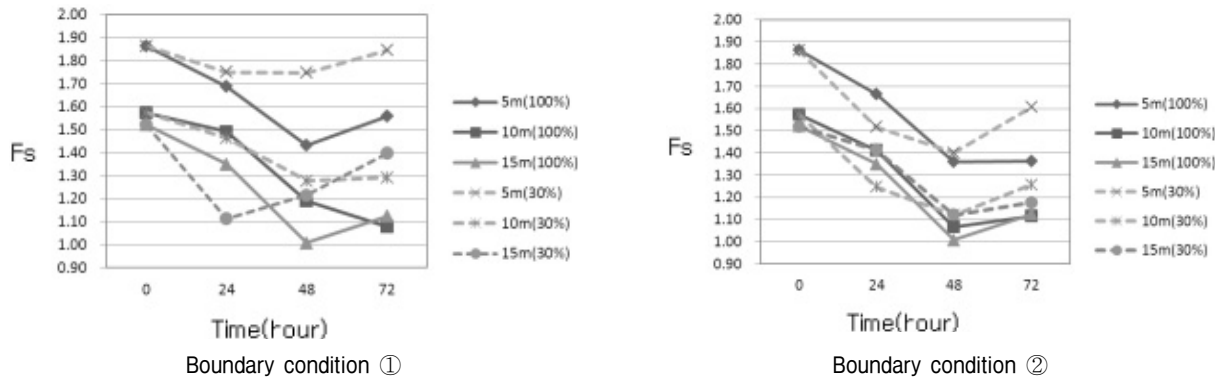


Fig. 12. Change of parameters using a safety factor to the upper surface height and penetration

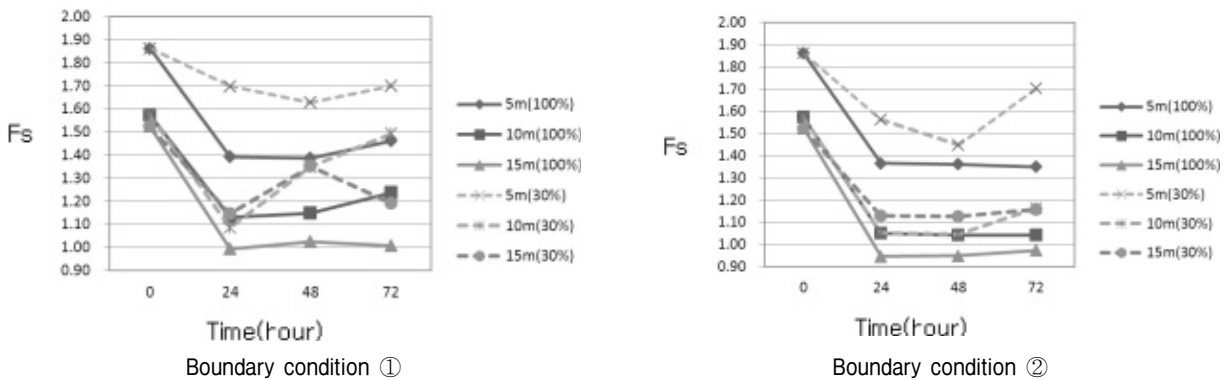


Fig. 13. Change of parameters using a safety factor to the inner surface height and penetration

48시간 경과시점까지 안전율이 급격히 감소되는 양상을 나타내고 있다.

3) 내장매개변수사용

불포화토의 내장매개변수 사용 시 경계조건 및 사면 높이별 안전율변화를 분석하였다. 분석결과 강우침투조건에 따른 안전율변화는 경계조건①이 경계조건②보다 안전율이 다소 높게 나타났다. 강우침투가 적은 30%조건이 100%침투조건보다 상대적으로 안전율이 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 강우 종료 후 24시간 경과 이후에 급격히 안전율이 감소하는 경향을 보이고 있으며 이후 안전율의 변화는 크지 않은 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 강우조건과 침투특성을 고려하여 비탈면 안정해석을 실시하였다. 비탈면 안정해석은 불포화토 지반의 매개변수를 변화시켜가면서 상관성에 대하여 비교 검토하였다. 연구결과 다음과 같은 결과를 도출하였으며 향후 본 연구결과를 토대로 하여 사면안정

해석 실무에 적극활용할 수 있을 것이라 판단 된다.

- (1) 강우강도 200년 빈도, 지속시간 48시간, 우수침투조건 100%,조건, 사면높이 10m조건에 대하여 불포화토의 매개변수, 경계조건, 강우 종료 후 지속시간에 대하여 안전율변화를 분석한 결과, 프로그램에 내장된 불포화토 매개변수를 사용시 불포화토의 매개변수가 클수록 지하수위 상승은 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 특히, 경계조건②의 경우가 지하수위 상승에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.
- (2) 투수계수와 안전율과의 상관성에 대하여 검토한 결과, 투수계수의 변화에 따른 안전율 변화는 48시간 이전에 급격한 변화가 발생하였으나, 48시간 이후에는 안전율 변화폭이 적은 것으로 나타났다. 지반의 투수계수와 매개변수와의 영향정도를 고려할 때 투수계수보다는 매개변수에 더 많은 영향을 받는 것으로 분석할 수 있다. 또한, 사면 높이가 높을수록 안전율의 변화는 안전율이 낮게 나타나는 경향을 보이고 있으며, 사면 높이에 따른 안전율 변화 보다는 매개변수가 안전율에 더욱 많은 영향을 미치는

것으로 분석되었다.

- (3) 매개변수와 안전율과의 상관성을 검토한 결과, 불포화토의 평균매개변수 사용 시 강우침투조건에 따른 안전율변화는 거의 없는 것으로 나타났으나 사면높이 5m, 10m인 경우 경계조건②의 조건에서 강우 종료 후 72시간이 경과시 안전율이 급격히 저하되는 것으로 나타났다. 이는 사면의 형상과 매개변수와의 상관성이 높은 것으로 해석될 수 있다. 강우 침투에 따른 안전율 변화는 규칙성이 없이 다양한 경향을 나타내는 것으로 해석되었으며, 강우 종료 후 48시간 경과시점까지 안전율이 급격히 감소되는 양상을 나타내고 있다.
- (4) 강우조건과 매개변수를 고려한 안정해석 결과를 검토한 결과, 지반특성에 영향을 미치고 있으나, 특히 강우종료후에 24시간이내에 안전율이 급격히 저하되는 것으로 나타났다. 이것으로 볼때, 집중강우가 발생후 24시간 이내에 사면 붕괴 발생확률이 높을 것으로 예상할 수 있다. 특히, 24시간과 48시간이내에 대부분의 안전율이 최저점을 나타내고 있는 것으로 보아 집중강우후에 사면붕괴에 대한 주의가 요구되는 것을 시사해주고 있다.

본 연구결과, 다양한 조건에서 사면의 안정해석을 실시하였다. 비탈면 설계기준의 변경으로 인하여 침투해석을 실시하여야 하는 시점에서 상호연관성에 대하여 검토한 결과, 지반의 매개변수에 영향이 있는 것으로 분석되었다. 따라서 불포화토의 매개변수를 측정된 후에 사면안정해석을 실시하는 것이 바람직하다고 판단된다. 최근 강우특성상 집중호우의 형태로 강우가 발생하는 것을 고려할 때, 강우종료후 48시간이내에 사면의 안전

율은 최저점을 나타내고 있는 것으로 분석되어 조기 안정화대책과 피난체계활동이 이루어져야 한다는 것을 간접적으로 의미하고 있다.

참고문헌 (References)

1. Ministry of Land Infrastructure and Transport (2011), Construction of slope design criteria.
2. Ministry of Construction and Transport (2001), Manual of road design Part 4.
3. NEMA (2012), Small river Design Criteria.
4. Lee, S. R. and Kim, Y. K. (2008), Slope Stability Evaluation Technique Considering Rainfall Infiltration, KGS National Conference, Committee of slope stability, pp.45-57.
5. Lee, S. R., Oh, T. K., Kim, Y. K., and Kim, H. C. (2009), Influence of Rainfall Intensity and Saturated Permeability on Slope Stability during Rainfall Infiltration, Journal of the KGS, Vol.25, No.1, pp. 65-76.
6. Lim, H. S., Cho, B. K., Lee, K. H., and Ahn, W. C. (2008), Slope Stability Comparison with methods considering precipitation, KGS National Conference, Committee of slope stability, pp.59-67.
7. Lim, H. S. (2008), Analysis of Slope Safety Considering Rainfall, Soil and Geotechnical Engineering, Vol.5, No1. pp.22-28.
8. Heo, J. H, Kim K. D., and Han, J. H. (1999), Derivation of Rainfall Intensity-Duration-Frequency Equation Based on the Appropriate Probability Distribution, Korea water resources Association, Vol.32, No.3, pp.247-254
9. Fredlund, D. G., Xing, A., and Huang, S. (1994), "Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve", Canadian Geotechnical Journal, Vol.31, pp. 533-546.
10. Geo-Slope International Ltd "SEEP/W User's Guide"
11. Geo-Slope International Ltd "SLOPE/W User's Guide".

Received : July 23rd, 2014

Revised : August 11th, 2014

Accepted : October 23rd, 2014