

## 함수특성곡선을 고려한 불포화토 사면의 안정성 연구

### A study on the Stability Analysis of Slope in Unsaturated Soil Based on the Soil-Water characteristic curve

윤민기<sup>1)</sup>, Min-Ki Yoon, 김종성<sup>1)</sup>, Jong-Sung Kim, 김효중<sup>1)</sup>, Hyo-Jung Kim, 이영생<sup>2)</sup>, Yeong-Saeng Lee

<sup>1)</sup> 경기대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Kyonggi University

<sup>2)</sup> 경기대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyonggi University.

**SYNOPSIS** : The finite element analysis of transient water flow through unsaturated soils was used to investigate effects of hydraulic characteristics, initial relative degree of saturation, methods to consider boundary condition, and rainfall intensity and duration on water pressure in slopes. The finite element method with shear strength reduction technique was used to evaluate the stability of slopes under rainfall.

The slope-related disasters in Korea usually occur between July and September during the typhoon and localized heavy rain. This means that the rainfall is the most important factor that leads to the slope-related disasters. The slope-related disasters can happen at very short time and lead to big damage.

To forecast the change of the heave of the groundwater in slope the Seep/w program was used.

**Key Words** : rainfall , slope-related disasters , groundwater level, Seep/w

## 1. 서 론

우리나라는 국토가 좁고 산지가 전체면적의 70%를 차지함에 따라 주거 지역은 물론 공업단지의 조성, 도로와 철도의 개설 등에 있어서 산지를 이용하지 않을 수 없다. 또한 토지 개발로 인하여 변형된 지형은 사면 파괴와 같은 자연 재해에 대하여 취약성을 가지게 된다. 이러한 얇은 사면 파괴의 원인은 지질구조, 토질 조건, 강우, 강설, 지진, 절토, 성토 등 여러 가지 요인들을 들 수 있다. 즉 지질적, 지형적 약조건을 가지고 있는 사면에 집중호우가 내리면 얇은 파괴가 발생하게 되는 것이다. 우리나라의 경우 대부분의 얇은 사면 파괴는 6월에서 9월 사이에 집중적으로 발생하고 있는데, 그 이유는 우리나라의 강우강도 특성과 큰 연관을 가지고 있다.

연구 대상인 얇은 사면인 경우, 강우로 인한 침투가 발생한 후 침투압의 증가에 의해 파괴가 일어난다. 침투는 불포화 지반을 통해 발생하므로 불포화 흐름에 대한 지배 방정식을 산정하여 강우에 의한 침투심도를 Pradel & Raad 방법으로 수치화 하였다. 이 방법은 강우시 사면의 시간 종속적인 강우강도 해석이 가능하다. 따라서 이 방법은 한계평형법으로 규명할 수 없는 사면변형의 변화과정을 알 수 있을 뿐만 아니라 활동 형상 및 파괴시간을 예측 할 수 있다.

본 연구에서는 강우로 인한 불포화 사면의 안정해석을 위하여 적절한 지반 정수를 선정하여 해석 조건에 맞는 깊이, 투수계수, 침투와 관련한 강우강도와 지속시간 등의 여러 매개 변수의 변화를 통한 불포화 사면의 거동을 결정짓는 요소를 파악하고 사면파괴의 가능성을 평가하기 위하여 Green-Ampt 모델에 근거한 Pradel & Raad 방법을 적용하여 분석하고자 하였다.

## 2. 불포화토의 함수특성

### 2.1 불포화토의 기본 이론

불포화토는 일반적으로 흡입자와 간극을 이루는 물, 공기의 삼상구조로 이루어져 있다. 포화토와 다르게 불포화토의 간극은 물로 채워져 있지 않으며 공기와 물이 접촉되어 있는 상태로 존재한다. 이 접촉면을 물-공기 접촉면(contractile skin)이라 하며, 이 접촉면을 통해 표면장력이 작용하고 있으며 이 힘은 흡입자와의 상호작용을 통해 불포화토의 역학적 거동특성에 중요한 영향을 끼친다.

### 2.2 불포화토의 함수특성곡선

불포화 지반에서의 물의 흐름은 포화 지반에서의 물의 흐름과는 달리 공기의 흐름과 더불어 물과 공기 혼합체의 흐름, 그리고 이들 상호간의 작용에 대해서 규명되어야 적절한 해석이 가능하다. 불포화 지반의 경우에는 신뢰성 있는 물, 공기의 흐름을 해석하기 위하여 포화 지반에서는 고려하지 않아도 될 공기의 확산, 모관흡수력(matric suction, 이하 생략)의 변화에 따른 투수계수의 변화 등이 반드시 고려되어야 한다.

불포화 지반에서의 물의 흐름은 포화 지반에서와는 달리 균질한 흙이라 할지라도 포화도 또는 모관흡수력의 크기에 따라 투수계수가 달라지기 때문에, 포화된 비균질한 흙에서 물의 흐름과 비슷한 양상을 보이게 된다. 따라서 불포화토 사면의 경우 모관흡수력이 지반의 거동특성에 매우 중요한 역할을 하는 설계변수이므로 불포화토와 관련된 흐름특성, 변형특성 및 강도특성을 적절히 고려하기 위해서는 이들 거동특성에 대한 모관흡수력의 영향을 반드시 고려하여야 한다(Fredlund & Xing, 1994). 불포화 지반의 고유한 특성은 함수특성곡선(soil-water characteristic curve, 이하 생략)으로 나타낼 수 있으며, 그림 2.1은 일반적인 함수특성곡선을 도시한 것이다. 이는 지반의 강도나 거동특성을 결정하는 매우 중요한 기본 물성이라고 할 수 있다. 일반적으로 함수특성곡선은 흙이 지니고 있는 물의 양과 모관흡수력의 관계로 정의된다.

흙 속의 수분의 양은 중량함수비, 체적함수비, 그리고 포화도로 표현할 수 있으나, 침투해석을 위해서는 불포화 지반의 구성요소인 흙 입자, 물, 공기의 세 가지 구성요소로 고려되어야 한다. 이러한 특성 때문에 불포화 지반해석에서는 중량 함수비의 개념보다는 간극의 공기를 고려하는 체적 함수비 개념으로 설명된다, 그러므로 불포화 지반의 함수특성곡선은 체적함수비(volumetric water content)와 모관흡수력과의 관계를 곡선으로 나타낸다.

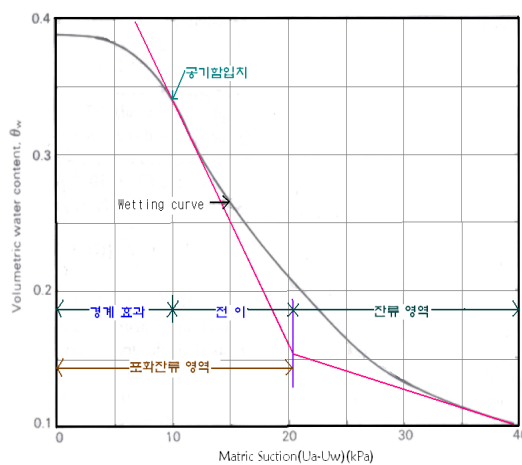


그림 2.1 불포화토의 함수특성곡선

이러한 이론들을 바탕으로 함수특성곡선의 방정식들은 대부분 함수특성곡선의 실험값들이 이루는 형태를 바탕으로 경험적으로 표현되었다. 그 후 계속적인 실험으로 근래에 일반적인 함수특성곡선의 형태를 제안하였으며, 여러 학자들에 의하여 여러 지역의 지반특성에 맞는 함수특성곡선 유형에 따라 방정식을 간편화시켜 제안하게 되었다. 함수특성곡선의 방정식들 중 Fredlund & Xing의 방정식은 상단부위의 공기함입값 굴곡과 하단부위의 잔류함수비를 결정하는 부분을 보완할 수 있도록 보정계수를 사용한 식을 제안하였다.

보정계수에 의한 Fredlund & Xing(1994)방정식은 모관흡수력의 최대 제한값( $10^6$  kPa)을 고려하여 전체 모관흡수력 범위를 적용할 수 있으며, 보다 정확한 결과를 얻을 수 있는 함수특성곡선을 다음과 같이 제안하였다.

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

여기서  $e$  : 자연수(=2.71828...),  $a, n, m$  : 보정계수

위 식에 보정계수  $C(\psi)$ 를 이용하여 체적함수비( $\theta_w$ )로 나타낼 수 있으므로, 잔류 체적함수비( $\theta_r$ )을 알 수 없는 경우에는  $\theta_r = 0$ 으로 가정하면 아래와 식과 같이 된다.

$$\theta = C(\psi) \cdot \frac{\theta_s}{\left( \ln \left[ e + \left( \frac{\psi}{a} \right)^n \right] \right)^m} \quad (2)$$

$$\text{보정계수 : } C(\psi) = 1 - \frac{\ln \left[ 1 + \frac{\psi}{\psi_r} \right]}{\ln \left[ 1 + \frac{1000000}{\psi_r} \right]}$$

여기서,  $\theta_s$  : 포화함수비,  $\psi$  : 임의의 모관흡수력  
 $\psi_r$  : 잔류함수비에 대응하는 모관흡수력

곡선보정계수  $a$ (kPa)는 공기함입치와 관련된 값으로 공기함입치보다 큰 값을 가지며, 함수특성곡선의 변곡점에서 모관흡수력으로 정의된다. 그러나 보정계수  $n$ 이 작을 경우,  $a$ 는 공기함입치와 같게 된다. 보정계수  $m$ 은 높은 모관흡수력 범위에서의 함수특성 곡선의 변화와 관련성이 존재한다.

### 3. 강우시 사면 안정해석

#### 3.1 검토개요

사면 안정해석에 있어 지하수위는 사면 안정에 중요한 영향을 미치며, 안정해석시 건기와 우기로 나누어 지하수위 변화를 고려하는 실정이다. 하지만 실제의 사면의 경우 지하수위와 사면 표층부의 강우 사이에 불포화 영역이 존재하게 된다. 따라서 우기시에 지하수위를 표층부의 위치한다는 규정으로 분석을 한다는 것은 과대설계의 사례라 판단되어 지므로 본 연구에서는 지하수위를 사면의 1/2~1/3 가량에 존재한다는 가정하에 불포화 사면에 대한 침투해석을 실시하여 경제적인 설계를 실시하고자 한다.

### 3.2 검토조건

본 연구에서의 검토조건은 국내사면 설계에 적용하고 있는 풍화토지반의 설계지반강도를 참고하여 표 3.1과 같이 제시한다.

표 3.1 풍화토지반의 설계지반정수 (적용)

구 분	단위중량 (tonf/m <sup>3</sup> )	점착강도 (tonf/m <sup>2</sup> )	내부마찰각 (°)
풍 화 토	2.0	0.51	30

풍화토지반의 설계시 지반정수는 단위중량 1.7~2.0 tonf/m<sup>3</sup>, 점착력 0~10 tonf/m<sup>2</sup>, 내부마찰각은 산사태가 가장 손쉽게 일어날 수 있는 범위인 25~35°를 사용하는 것이 일반적이다. 이에 따라 표 3.1와 같이 지반정수를 적용하였으며, 적용한 대상지반은 사면고 40m, 거리 80m의 단면으로 투수계수와 강우강도는 각각 4.3×10<sup>-6</sup>m/sec, 15.48 mm/hr을 적용하여 투수계수와 강우강도의 비를 1로 하였다. 이에 따른 대상지반에 적용된 물성치는 아래와 같이 나타내었다.

표 3.2 대상지반의 적용된 물성치

구 분	경사 (°)	사면고 (m)	포화투수계수 (m/sec)	강우강도 (mm/hr)
검토 단면	2:1 (26.6°)	40	4.3×10 <sup>-6</sup>	15.48

또한, 강우에 의한 불포화지반의 지하수위 변화 및 간극수압변화를 파악하기 위해 전형적인 설계지반정수 표3.1과 대상지반의 적용된 물성치인 표3.2를 토대로 Fredlund & Xing(1994)의 함수특성곡선 방정식에 적용하여 불포화토의 투수계수곡선을 결정하였다.

표 3.3 불포화 풍화토 지반의 수리특성치

구 분	함수특성곡선 보정계수			포화시 수리특성	
	a	n	m	함수비 (%)	투수계수 (m/sec)
Find Sand	4.6	7	0.2	35	4.3×10 <sup>-6</sup>

표 3.3은 전형적인 불포화 풍화토 지반 해석 방법인 Fredlund & Xing(1994)의 함수특성곡선 보정계수 및 포화시 수리특성을 나타낸 것이다. 이에 따라 함수특성곡선 및 투수계수곡선을 표 3.3의 자료를 적용하여 아래와 같이 그림 3.1, 3.2로 나타내었다.

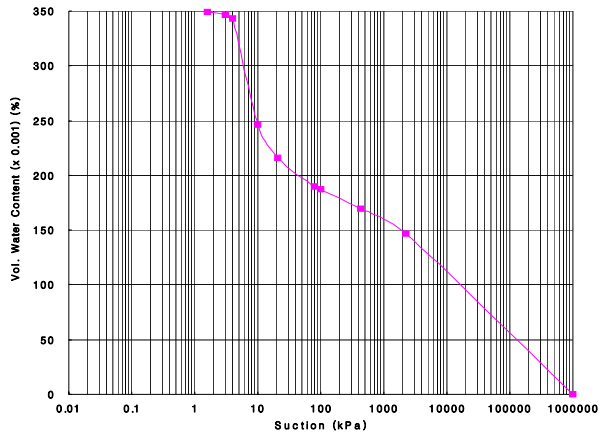


그림 3.1 함수특성 곡선

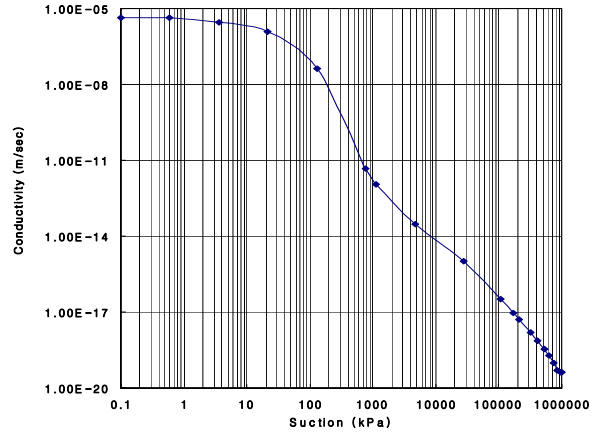


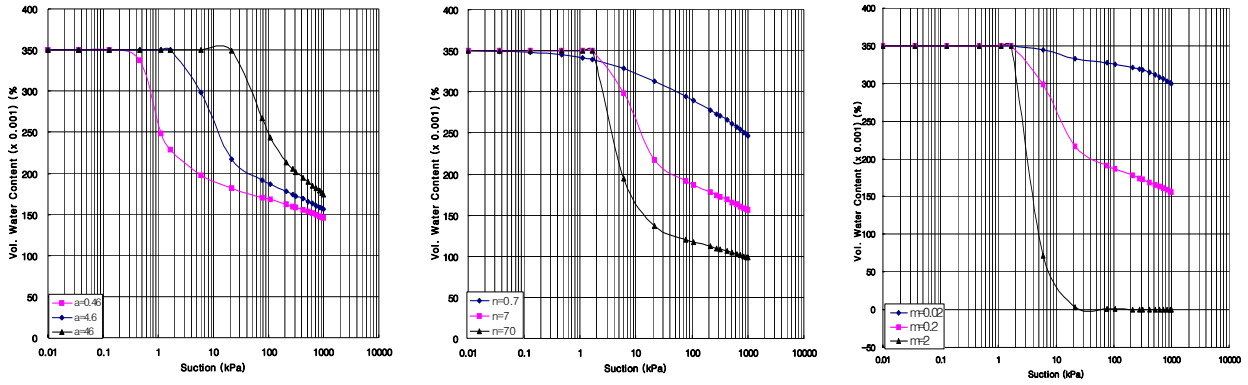
그림 3.2 투수계수 곡선

일반적으로 함수특성곡선 및 투수계수 곡선은 사면 안정성에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서는 함수특성곡선을 형성하는 수리특성치인  $a$ ,  $n$ ,  $m$  계수를 변화시켜 계수 변화에 따른 사면안정해석을 실시하고자 한다. 적용방법은 표3.3의 계수 값을 기본으로 하여  $0.1a$ ,  $a$ ,  $10a(a=4.6)$ 와 같은 방법을 사용하여 아래 표 3.4와 같이 나타내었다.

표.3.4 함수특성곡선의 각 계수별 비교

계수 (parameter)	$a$	$n$	$m$
Fredlund & Xing(1994)	0.46	7	0.2
	4.6	7	0.2
	46	7	0.2
	4.6	0.7	0.2
	4.6	7	0.2
	4.6	70	0.2
	4.6	7	0.02
	4.6	7	0.2
	4.6	7	2

이를 토대로 표 3.4와 같이 9개 경우를 선정하였으며, 각각의 계수의 증감에 따라 상호 비교하여 아래와 같이 그림 3.3으로 나타내어 각 계수에 따라 함수특성 곡선에 어떠한 영향을 미치는지 알아보았다.



(a) 함수특성 곡선의 a계수 변화 (b) 함수특성 곡선의 n의 변화 (c) 함수특성 곡선의 m의 변화

그림 3.3 함수특성곡선의 계수 변화

결과적으로 표3.3을 적용한 그림 3.3(a)인 경우 a계수의 변화에 따라 평행이동한 곡선이 나타났으며, (b)의 n계수의 변화에서는 기울기의 변화를 볼 수 있었다. 또한 (c)인 m계수인 경우에는 잔류흡수력에 대한 변화가 발생한다는 것을 추정할 수 있다.

#### 4. 사면안정해석 및 분석결과

이 절에서는 3.2절의 검토조건을 토대로 한 단면을 가정하여, 각 함수특성 곡선의 매개변수들로 하여금 안정성에 미치는 영향을 판단하기 위하여 높이 40m, 거리 80m, 경사 2:1 단면(표 3.1, 3.2 참고)을 설정하였다. 단면의 형상은 아래와 같다.

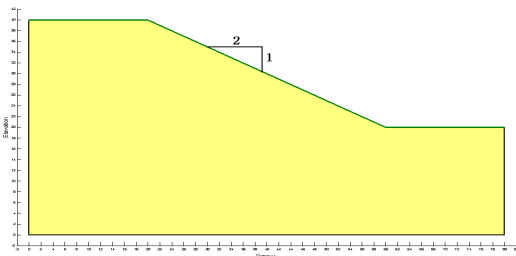


그림 4.1 기본 해석 단면

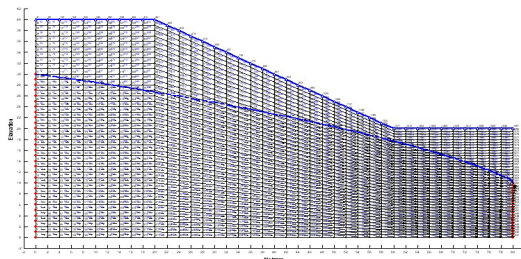


그림 4.2 초기지하수위

강우시 토사사면의 파괴는 주로 표층부 강우 침투에 의한 습윤대의 형성과 관련되어 있다. 이는 사면의 안정성을 유지하고 있던 지표부근에서의 흡수력의 변화로 인한 강도의 감소가 주원인인 것으로 알려져 있으며, Pradel & Radd는 사면에서 습윤대 깊이인  $z_w$ 까지 포화되기 위해서 강우는 지반의 침투능을 초과 해야 하고 깊이  $z_w$ 까지 포화되도록 강우가 충분히 오래 지속되어야 한다고 하였다. 따라서, 본 연구에서는  $i/k_s=1$ 을 적용하여 지하수위의 상승과 습윤대의 발달을 분석하였다. 결과적으로 강우에 의한 포화가 표층부에서부터 사면내부로 증가하게 되며, 복합적으로 지하수위의 상승으로 인하여 중간지점에 불포화 존이 발생되었다. 따라서 각 계수별 포화량과 안전율을 살펴보면 다음과 같다.

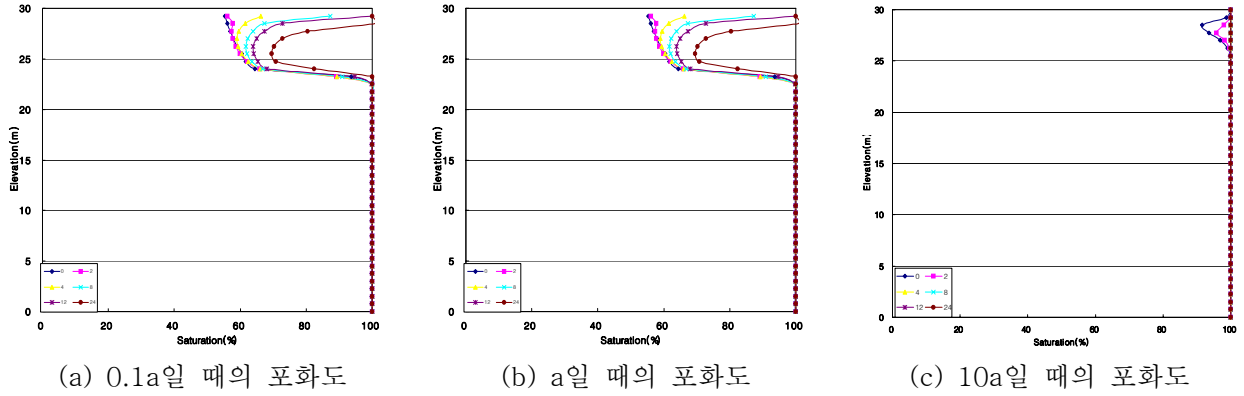


그림 4.3 함수특성곡선 계수 a의 변화에 따른 포화도 (a=4.6)

함수특성 곡선 수리특성치 중인 a계수는 습윤곡선 상의 wetting front suction의 변화 값에 따라 위와 같은 포화도의 형태가 변화하는 것을 판단하였다. 결과적으로 a계수가 증가함에 따라 시간에 따른 포화도가 점차적으로 증가하여 0.1a 일 때보다 10a일 때 사면의 포화도가 빠르게 진행되었다.

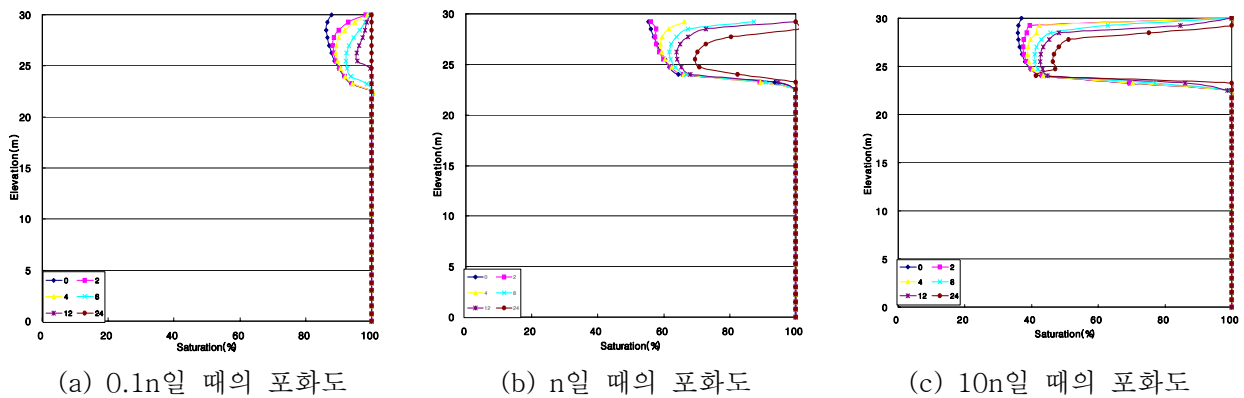


그림 4.4 함수특성곡선 계수 n의 변화에 따른 포화도 (n=7)

함수특성 곡선 수리특성치 중인 n계수인 경우에는 그림 3.3(b)의 경우에서 볼 수 있듯이 기울기의 변화에 따른 포화도가 변화하는 것을 알 수 있었다. a계수와 대조적으로 계수값이 작은 경우 사면의 포화가 빠른 속도로 진행되는 반면, n계수가 커질수록 사면에 있어서의 포화도가 낮은 것으로 나타났다.

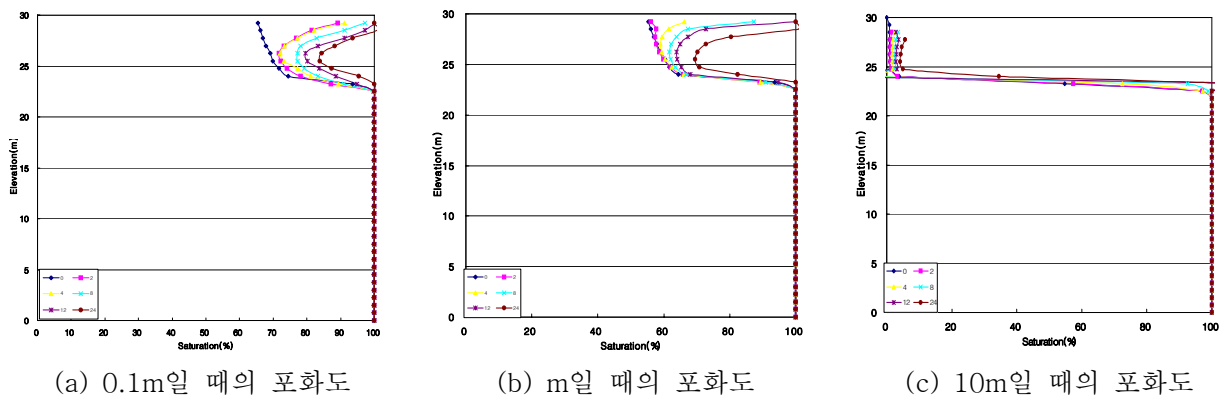
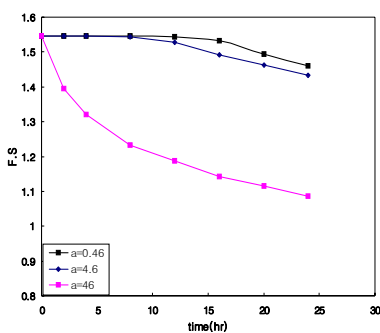
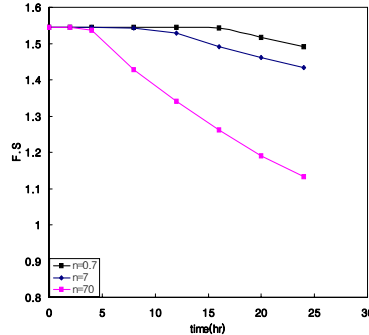


그림 4.5 함수특성곡선 계수 n의 변화에 따른 포화도 (m=0.2)

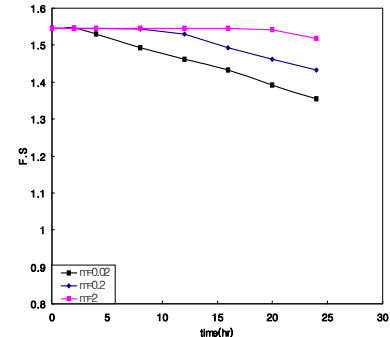
위의 그림 m계수의 변화에 대한 결과, 함수특성 곡선 수리특성치 중인 m계수인 경우에는 계수가 커질수록 사면의 포화도는 감소하는 것을 알 수가 있었다. 이는 안전율에 영향을 끼치며, 사면 안정성에 영향을 미치는 것으로 판단된다. 이에 따라 각각의 계수에 따른 시간-안전율 변화를 살펴보면 다음과 같이 나타났다.



(a) a계수에 대한 안전율



(b) n계수에 대한 안전율



(c) m계수에 대한 안전율

그림 4.6 계수에 따른 안전율 변화

각 계수에 증감에 따른 해석에서 안전율이 감소함에 따라 초기 4~5시간 동안은 각 계수에 따른 안전율의 변함이 없었다. 이는 사면 지반내 포화대가 형성될 만큼 강우 침투시간이 충분하지 않았음을 나타내며, 침윤전선은 각기 다른 시간동안 형성된 것으로 판단되어진다. 또한 침윤전선은 지표면 아래 2~3m 구간에 형성되어 사면의 안정성에 영향을 미친 것으로 판단된다.

그림 4.6은 각 계수에 따른 안전율 변화를 24hr동안 지켜본 결과로서 a와 n인 경우에는 계수의 값이 증가할수록 안전율이 급격히 떨어지는 것을 확인하였으며, m인 경우는 m값이 증가함에 따라 안전율이 오히려 상승하는 것으로 나타났으며, 안전율의 기울기는 완만한 경사를 보이고 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 기본적인 불포화 풍화토의 물성치를 가지고 수치해석을 실시하였다. 이에 따라 함수특성곡선과 투수계수 곡선을 사용하였으며, 집중적으로 함수특성곡선의 보정계수인 a, n, m을 순차적으로 적용시키며, 사면의 안정성에 미치는 영향을 판단하고자 하였으며, 강우조건은 투수계수와 강우강도의 비를 1로 하여, 강우가 전부 사면에 침투하게 하여 강우의 영향을 포함하였다. 따라서 안정해석을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 사면안정해석 결과로, 사면의 안정성은 사면의 경사, 깊이, 사면 구성 지반의 역학적 특성, 함수특성, 투수계수, 강우강도와 지속시간 등과 같은 여러 가지 변수에 의해 달라지는데, 불포화 지반의 경우 투수계수와 강우강도, 강우지속시간, 함수특성곡선 등이 사면안정에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.
- (2) 침투해석 결과 우기시 지하수위 상승량은 사면높이의 약 10% 범위에 있으며, 습윤전선은 지표면 아래 2.0m~3.0m에서 형성되어 사면의 안정성에 영향을 주며, 그 아래는 습윤전선의 형성에 대한 안정성 평가에서는 미비한 것으로 판단된다.
- (3) 습윤곡선 상의 wetting front suction의 변화를 나타내는 계수인 a와 기울기 변화를 나타내는 계



수인  $n$ 값인 경우, 계수의 값이 증가할수록 안전율이 급격히 떨어지는 것을 확인하였으며 이는 사면의 안정성에 (-)인자로 작용하여 사면의 안정성 평가에 역효과를 발생시키는 것으로 판단된다.

- (4) 잔류흡수력을 나타내는 계수인  $m$ 인 경우,  $m$ 값이 증가함에 따라 안전율이 상승하여 사면의 안정성에 다소 도움을 주는 것으로 판단되었지만, 다른 계수들의 영향에 비해  $m$ 의 영향은 상대적으로 미비하였다.
- (5) 함수특성 곡선의 수리특성치는 각각의 요소가 사면에 영향을 미치는 것으로 판단되어 지므로, 사면안정해석시 더욱더 정밀한 실험이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설기술혁신사업 (03산학연C01-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구단의 연구성과입니다.

## 참고문헌

1. 이관영(2004), "강우특성을 고려한 불포화토 사면의 안정성 해석", 석사학위논문.
2. 김윤원(1989). "우리나라의 강우특성으로 인한 산사태에 관한 연구", 중앙대학교 석사학위논문.
3. 김재홍, 박성환(2002). "강우시 사면의 침투거동에 관한 연구", 홍익대학교 석사학위논문.
4. 안일환(2001) "강우 침투시 얇은 파괴가 발생하는 토사 사면에 대한 안정해석", 경기대학교 석사학위논문.
5. 신길호(2005) "강우 침투 중 함수특성이력을 고려한 불포화 풍화사면에서의 안정성 평가", 단국대학교 석사학위논문
6. 윤민기, 김종성, 이영생(2007) "도시 도로변 사면부 표면파괴에 대한 안정해석 연구", 제33회 대한토목학회 학술발표회논문집, pp.2816~2819.
7. 윤민기, 김종성, 이영생(2008) "집중호우로 인한 도시 도로변 사면부 표면파괴에 대한 안정성 연구", 제24회 한국지반공학학회 학술발표회논문집, pp.1386~1394.
8. Fredlund & Xing(1994), Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve, pp.35~533.