



불포화토 사면의 안정해석법에 대하여 설명하여 주시기 바랍니다.



안태봉 교수 / 우송대학교 철도건설환경공학과

### 1. 서론

우기시 강우에 의한 사면안정검토는 완전 포화된 상태로 간주하여 수행되고 있으나 대부분의 지반은 완전포화 상태가 아니라 부분적으로 포화된 상태(partially saturated state)로 존재하며, 이 경우 흙 입자와 물-공기 사이의 모세관 현상 등의 작용으로 인하여 포화토와는 매우 다른 거동특성을 나타낸다. 이러한 부분 포화된 지반(partially saturated soil)을 일반적으로 불포화지반(unsaturated soil)이라 부르며, 포화되거나 완전히 건조한 지반과는 매우 다른 거동특성을 보인다. 사면은 기하학적 특성상 아래 방향으로 배수가 발생하므로 지하수 윗부분은 불포화 상태로 존재하게 되며 일반적으로 간극수압은 대기압에 대하여 음의 값을 나타내므로 포화토에 대해 개발된 이론을 적용하는데 어려움이 따르며 이러한 모관흡수력의 존재와 크기는 사면의 안정에 매우 중요한 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다(Fredlund 등, 1995). 따라서 실제 불포화상태로 존재하는 사면의 파괴 메커니즘을 파악하기 위해서는 강우에 의한 불포화토의 거동 분석을 통한 사면 안정해석

법이 중요하며 그 방법을 소개하면 다음과 같다.

### 2. 불포화 지반의 설계지반정수 산정

#### 2.1 불포화 지반의 전단강도

불포화토의 전단강도를 표현할 때 상태변수로  $(\sigma - u_w)$ 와  $(u_a - u_w)$ 의 조합하여 이용할 수도 있으나 일반적으로는  $(\sigma - u_a)$ 와  $(u_a - u_w)$ 의 조합하여 사용한다. Fredlund & Morgenstern(1978)은 새로운 전단강도식을 제안하면서  $(\sigma - u_a)$ ,  $(u_a - u_w)$ 를 서로 독립적인 상태변수(state variable)로 사용하였다. 즉 불포화지반의 전단강도를 유효점착력(effective cohesion)  $c'$ , 순수직응력(net normal stress)  $(\sigma - u_a)$  및 모관흡수력(matric suction)  $(u_a - u_w)$ 의 세 가지 상태변수의 향으로 나누어 고려하여 순수직응력의 영향은  $\Phi'$ 으로, 모관흡수력의 영향은 새로운 강도정수 겉보기마찰각( $\Phi^b$ )으로 표현하여 다음 식과 같이 나타내었다.

- 불포화토의 전단강도

$$T_{ff} = c' + (\sigma_f - u_a)_f \tan \Phi' + (u_a - u_w)_f \tan \Phi^b$$



## 2.2 불포화 지반의 함수특성곡선

함수특성곡선(soil-water characteristic curve)은 지반의 고유 특성으로 지반의 불포화시의 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 있고 일반적으로 체적함수비와 모관흡수력과의 관계로 나타낸다.

전형적인 함수특성곡선의 모양은 그림 1과 같다. 포화된 간극은 모관흡수력의 증가에도 불구하고 공기함입치(air-entry value)를 초과할 때까지는 흙의 간극에서 물이 유출되지 않는다. 이러한 공기함입치는 간극으로 공기가 유입되기 시작하는 압력으로 공기가 유입되기 시작하는 압력으로 정의된다.

비교적 낮은 모관흡수력(0~1기압)에서 보유된 수분 함량은 주로 모세관효과와 간극크기의 분포에 따라 좌우되므로 흙 구조의 영향이 크다. 반면, 더 큰 모관흡수력 범위에서 보유된 수분은 흡착작용에 의해 점차적으로 더 크게 좌우되므로 흙의 비표면적과 흡입자 표면의 확산이중층이 더 큰 영향을 미친다.

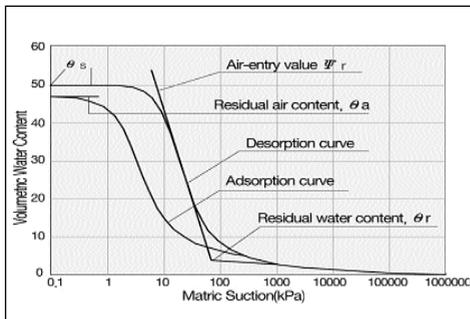


그림 2. 동다짐시 시간에 따른 지반거동

## 2.3 불포화 투수계수

불포화도 흐름문제의 경우 물, 공기 그리고 흡입자의 3상구조여서 물과 공기의 흐름을 동시에 고려하여야 한다. 불포화도에서 물의 흐름은 간극내 공기가 차지하고 있는 부분으로는 흐르지 않는다. 즉 물의 흐름은 연속된 물로 이루어진 흐름통로(flow channel)를 통해서만 발생하고 간극내 공기는 흡입자처럼 여겨진다. 따라서 불포화지반은 포화된 지반과 유사하게 생각할 수 있다. 즉 불포화도에서도 Darcy의 법칙이 적용가능하다. 다만 다른 점은 불포화도의 경우 포화도의 경우와 같이 투수계수가 상수가 아니며 모관흡수력 혹은 포화도 등의 함수로 표현된다는 것이다.

불포화도의 간극 속에는 물과 공기의 압력차에 의한 표면장력(surface tension)과 물 분자를 결합하는 표면력(surface force)이 발생한다. 전자를 모관흡수력(matric suction)이라 하는데, 이것이 모세관 현상과 흡착현상의 원인이 되고, 이 현상들로 불포화영역에서는 부의 간극수압이 발생하여 유효응력을 증가시킨다.

## 3. 침투 및 강우강도를 고려한 불포화 사면의 안정해석 방법

### 3.1 개요

불포화도에서 사면의 불안정성은 강우와 깊은 관련이 있으며 강우로 인하여 우수의 전부 또는 일부가 지반으로 침투되면 보다 큰 전단강도를 가지고 있던 불포화도의 지반은 함수비 증가로 인한 전단강도 감소에 의하여 사면의 불안정성이 증가

한다. 그러므로 불포화된 사면의 안정성에서 음의 간극수압의 존재와 크기는 절대적으로 중요하다. 강우에 의한 침투나 습윤대의 발달은 perched water table을 형성하고 지하수위를 상승시키게 된다. 또한 양의 간극수압 증가 또는 음의 간극수압 감소를 발생한다. 이것은 잠재적인 파괴면에서의 전단강도를 감소시키며 결국에 파괴가 일어난다. 우수가 지표면으로 침투해 들어가고 지반 내에서 흐르는 과정들은 여러 사람들에 의해서 연구되었으며 여러 식들과 수치적인 모델들이 제안되어 왔다. 하지만 이러한 식들과 모델들은 사용하는데 몇 가지 중요한 한계가 있다.

사면에서 한계 깊이  $z_w$ 까지 충분한 포화가 되는 경우에 Pradel와 Raad(1993)는 강우가 흙의 침투율을 초과할 만큼 충분히 강해야 하고 그 깊이까지 사면이 충분히 포화될 만큼 지속된다고 가정하였다. 이러한 가정에서 깊이까지 흙이 포화되는데 필요한 시간  $T_w$ 를 구하였다.

- 강우강도를 고려한 침투시간

$$T_w = \frac{\theta_s \times \theta_0}{k_w} \left[ z_w - C_s \ln \left( \frac{C_s \times z_w}{C_s} \right) \right]$$

여기서  $\theta_s$ 와  $\theta_0$ : 포화된 그리고 현장 체적 함수비

$k_w$ : 습윤지역에서의 흙의 투수 계수

$C_s$ : 습윤대에서의 모관흡수력

### 3.2 불포화토에서의 수정된 사면안정 해석

지하수위가 깊은 조건이나 또는 얇은 파괴가 일어날 수 있는 곳에서 지반이 불포화된 경우의 사

면안정해석을 어떻게 수행하는지 이해할 필요가 있다.

$$F_r = \frac{\sum \left\{ c' \beta + [N - u_w \beta \frac{\tan \Phi^b}{\tan \Phi'} - u_w \beta (1 - \frac{\tan \Phi^b}{\tan \Phi'})] \tan \Phi' \right\}}{\sum N \sin \alpha} \cos \alpha$$

공기압이 0이거나 또는 대기압인 경우 위의 식에서 공기압은 제거될 수 있으며 포화토와 불포화토인 경우 모두 적용할 수 있다. 지반이 포화토인 경우  $\Phi^b$ 는  $\Phi'$ 과 같다.

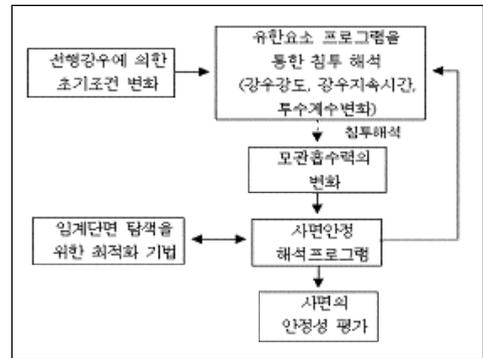


그림 2. 불포화 사면지반 안정해석 알고리즘

### 3.3 사면안정 해석의 예

#### 3.3.1 균일한 모관흡수력을 갖는 경우

사면안정해석방법과 불포화지반의 실험 결과를 실제 대상사면에 적용하여 그 효과를 검토했다. 하지만 실제사면 내부의 지층 구조와 물성 변화 등에 대한 상세한 조사는 이루어지지 않아, 깊이 1m 근처에서 채취되어 실험된 물성을 갖는 균일한 사면으로 가정하여 해석한 해석사례이다.

먼저 포화 강도정수만을 이용해서 실제 지반의 불포화 특성을 무시한 경우에 대해 사면의 안정성

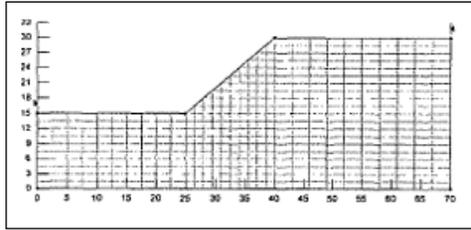


그림 3. 지반형상

해석을 수행하였다. 그리고 불포화 강도 특성을 고려하기 위해서는 겉보기 점착력의 증분을 선형으로 전체의 모관흡수력 단계에 대해 일정한 기울기( $\Phi$ )를 적용한 경우와, 비선형으로 수식화된 겉보기 점착력을 고려할 수 있도록 한 경우, 두 가지 경우에 대해 사면의 안정성을 해석해 보았다. 사면의 초기 모관흡수력은  $-50(kPa)$ 로 일정한 상태로 가정하였으며, 비교란 시료에 대해 수행된 실험결과로 얻어진 강도정수로  $C'=12.4(kPa)$ ,  $\Phi'=36.3^\circ$ 을 사용하였고, 모관흡수력에 대한 겉보기 점착력의 기울기( $\Phi$ )는 낮은 모관흡수력에서  $\Phi^b = \Phi'$ 인 점을 고려하여  $3.63^\circ$ 로 사용하였으며, 최대 겉보기 점착력은 실험결과를 가장 잘 표현한  $C_{max}=120(kPa)$ 로 추정하여 아래식과 같이 수식화함으로써 모관흡수력에 대한 겉보기 점착력을 추정하여 적용할 수 있도록 하였다.

$$C=12.4 + \frac{(u_a - u_w)}{1.36 + 0.0083 \times (u_a - u_w)}$$

해석방법과 조건을 달리해서 기존의 포화강도를 입력으로 하여 수행한 결과(I), 불포화 강도를 적용하지만 겉보기 점착력의 선형식을 이용한 경우(II), 불포화 강도를 적용하고 비선형 겉보기 점착력 식을 적용하여 수행한 경우(III), 3가지로 나누어서 수행한 결과는 다음 표 1과 그림 4에서 볼

표 1. 해석방법에 따른 안전율 비교

	포화강도 해석(I)	선형 불포화강도 해석(II)	비선형 불포화 강도해석(III)
안전율	1.32	2.34	2.14

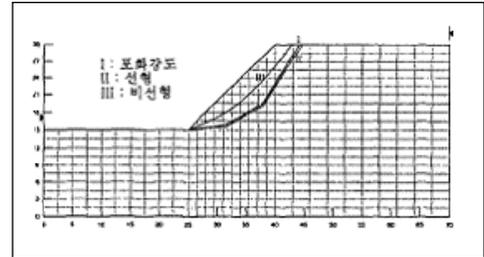


그림 4. 해석방법에 따른 임계면 차이

수 있는 바와 같이 안전율과 임계단면을 보였다. (I)의 경우는 1.32의 안전율로서 불포화 특성을 고려한 경우 (II, III)에 비해서 사면의 안정성을 매우 과소평가하는 것으로 나타났으며, 불포화 특성을 고려한 경우에도 모관흡수력에 대한 겉보기 점착력의 증분을 선형으로 가정한 경우(II)의 안전율이 2.34로 비선형을 고려한 경우(III)의 2.14에 비해 과대평가하는 것으로 확인할 수 있었다. 이러한 경향은 모관흡수력이 증가할수록 더 크게 나타나게 되므로, 불포화 강도의 비선형성을 고려하는 것이 사면의 안정성 해석에 중요한 영향 요소로 작용함을 알 수 있다.

### 3.3.2 침투해석 결과를 이용한 사면안정 해석

실제 사면은 강우와 침투로 인한 지반 내부의 간극수압의 변화에 의해 그 안정성이 크게 영향을 받게 된다. 따라서 보다 합리적이고 효율적인 사면안정 해석을 위해서는 강우로 인한 침투의 영향을 고려하고 그에 따른 강도 변화를 반영할 수 있어야 한다.

옥천지역 풍화토 사면을 대상으로 하여 대상지 반에서 실험으로 얻은 물성값을 바탕으로 함수특성곡선 결과와 침투해석 프로그램(SEEP/W)을 이용하여 주어진 강우강도에 대한 시간에 따른 간극수압의 변화를 해석한 후, 그에 따른 강도변화를 고려함으로써 안전율의 변화를 확인할 수 있다.

침투해석을 위해 포화투수계수는  $5.4e-5(m/s)$ 로 가정하였으며, 침투시 사면내에서 모관흡수력의 변화로 야기되는 투수계수는 실험으로 얻은 함수특성곡선과 Green & Corey(1971)식으로 추정하였다. 이때  $2.0e-5m/s$ 의 강우강도가 계속될 때 지속시간에 따른 안전율의 변화를 그림 6과 같이 얻을 수 있었다. 그림 7에는 강우가 지속됨에 따라 물이 침투되면서 단면 A에서의 간극수압 분포가 변화되는 과정을 안전율 변화와 함께 보여주고 있다. 그림 8에는 마지막 단계에서 얻어진 임계단

면을 보여주고 있다.

그림 6에서 보는 바와 같이 주어진 조건에서 강우가 지속될 때 물이 침투되면서 강도의 증분으로 작용되던 모관흡수력, 즉 음의 간극수압이 작아지면서 그에 따라 안전율도 낮아지고 있는 경향을 보이고 있다. 이러한 안전율의 변화 양상은 어느 정도의 강우지속시간이 지난 후 더욱 급격한 안전율의 변화를 나타내는데 이는 강우로 인해 임계단면과 가까운 부분까지 모두 침투되면서 간극수압이 증가되어 모관흡수력이 감소된 시점으로 판단된다.

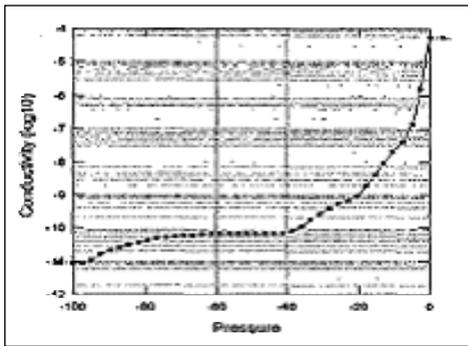


그림 5. 모관흡수력에 따른 투수계수

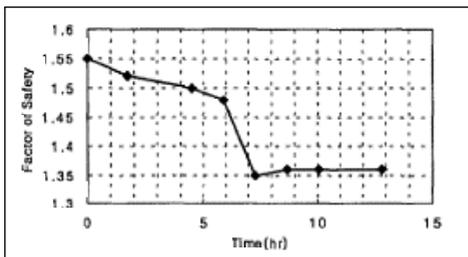


그림 6. 강우지속시간에 따른 안전율의 변화

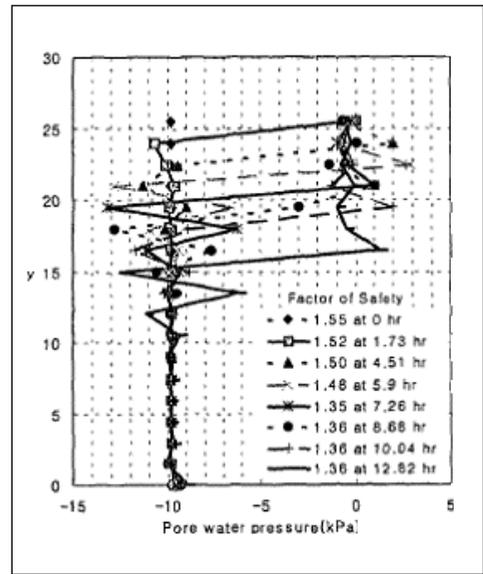


그림 7. A단면에서의 간극수압 분포 변화

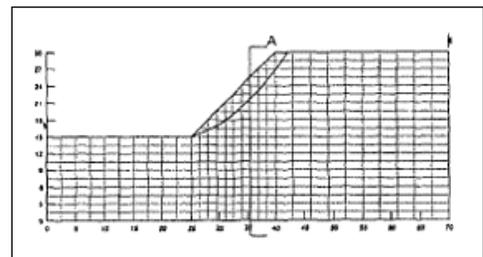


그림 8. 마지막 시간에서의 임계단면



이처럼 강우에 의한 지하수위 조건은 사면높이와 현 지하수위 및 대상토질의 투수계수 등에 따라 달라질 수 있으므로 특정한 수위를 강제 규정하는

것보다 불포화 특성을 고려한 침투해석 결과에 따른 지하수위변화를 적용하는 것이 바람직하다.

**[참고문헌]**

1. 신길호, "강우 침투중 함수특성이력을 고려한 불포화 풍화사면에서의 안정성평가", 단국대학교 석사학위논문, 2005.
2. 이관영, "강우특성을 고려한 불포화토 사면의 안정성해석", 대전대학교 석사학위논문, 2004.
3. 정명수, "불포화 사면지반내 강우 침투를 고려한 효율적인 사면안정해석", 한국과학기술원 석사학위논문, 2002.
4. 변위용, 불포화토 지반특성 및 최적화 기법을 적용한 사면안정해석 프로그램개발', 한국과학기술원 석사학위 논문, 2000.

**Safety SQ!**  
**Quality SQ!**

- ◆ 안전진단전문기관
- ◆ 시설물유지관리업

- ◆ 엔지니어링활동주체
- ◆ 기술연구소

**SQ SQ엔지니어링(주)**  
<http://www.sqeng.co.kr>

서울시 송파구 가락동 160-11 드림빌딩 / TEL : 02)400-5200(代), FAX : 02)400-9134