

## 함수특성을 이용한 불포화토의 전단강도특성 연구

### A Study on the Shear Strength Characteristic of Unsaturated Soil using Soil-Water Characteristics

김효중<sup>1)</sup>, Hyo-Jung Kim, 윤준영<sup>1)</sup>, Jun-Young Youn, 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.

## 1. 서론

불포화토의 전단강도를 표현할 때 일반적으로는  $(\sigma - u_a)$ 와  $(u_a - u_w)$ 의 조합을 사용한다. Fredlund & Morgenstern(1978)은 새로운 전단강도식을 제안하면서  $(\sigma - u_a)$ ,  $(u_a - u_w)$ 를 서로 독립적인 상태변수로 사용하였다. 즉 불포화토의 전단강도를 유효점착력  $c'$ , 순수직응력  $(\sigma - u_a)$  및 모관흡수력  $(u_a - u_w)$ 의 세 가지 상태변수의 항으로 나누어 고려하여 순수직응력의 영향은  $\phi'$ 으로, 모관흡수력의 영향은 새로운 강도정수 겉보기마찰각( $\phi^b$ )으로 표현하였다.

불포화토의 해석에서 겉보기마찰각( $\phi^b$ )은 중요한 변수이고, 이를 합리적으로 산정하여 해석에 적용할 수 있어야 한다. 불포화토의 전단강도를 구하기 위하여 실험에 의해 대상지반의 함수특성곡선과  $\phi^b$ 를 얻어야 한다.  $\phi^b$ 값은 실험을 통해 얻는 것이 가장 정확하겠지만, 실험장비구축을 위한 비용과 실험수행시간이 비교적 많이 소요됨으로써 설계정수산출을 위한 실험비용 역시 높다고 할 수 있다. 따라서 함수특성곡선과 일반삼축압축실험만으로  $\phi^b$ 값을 합리적으로 유추할 수 있어야 한다.

본 연구에서는 함수특성곡선을 이용하여  $\phi^b$ 값을 산정하고 이를 이용한 수치해석을 통해 합리적인  $\phi^b$ 요소를 선정하는데 목적이 있다.

## 2. 불포화토의 전단강도특성

### 2.1 불포화토의 기본 이론

불포화토는 일반적으로 흡입자와 간극을 채우는 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

불포화토 사면의 경우에는 모관흡수력이 지반의 거동특성에 매우 중요한 역할을 하는 설계변수이다. 따라서 불포화토와 관련된 흐름특성, 변형특성 및 강도특성을 적절히 고려하기 위해서는 이들 거동특성에 대한 모관흡수력의 영향을 반드시 고려하여야 한다(Fredlund & Xing, 1994). 함수특성곡선은 지반의 불포화 정도에 따라 모관흡수력의 발생정도를 대변하며, 불포화정도에 따른 지하수 흐름, 강우로 인한

사면안정 등을 포함한 압밀특성 등을 규명하기 위해 반드시 고려해야 하는 지반 특성치이다.

전형적인 함수특성곡선의 모양은 그림 1과 같다. 포화함수비( $\theta_s$ )상태에서 모관흡수력의 증가에도 불구하고 공기함입치(AEV)를 초과할 때 까지는 흙의 간극에서 물이 유출되지 않는다. 이때의 체적함수비를 잔류함수비( $\theta_r$ )라 한다. 흙 속의 간극으로 공기가 계속 유입되면서 물이 유출되고 지반의 모관흡수력은 증가하게 된다. 여기서, 함수특성곡선의 전이영역 경사가 정해진다. 곡선의 경사는 AEV와 잔류함수비를 결정짓는 중요한 요소가 된다.

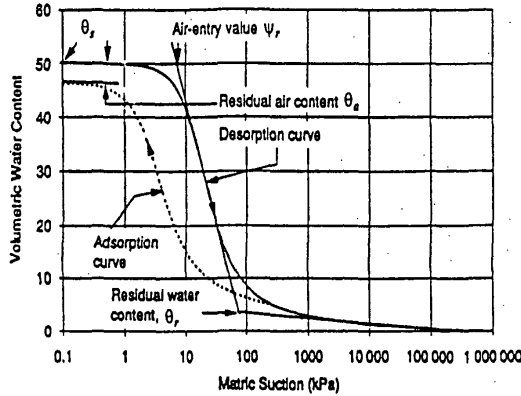


그림 1. 전형적인 함수특성곡선

### 2.3 불포화토의 전단강도특성

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 겔보기마찰각( $\phi^b$ )으로 다음 식(2.1)과 같이 표현하였다.

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - u_a)_f \tan\phi' + (u_a - u_w) \tan\phi^b \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

불포화전단강도를 실험을 통해 얻을 수 있지만, 그 실험을 위한 장비구축이 힘들고, 일반적으로 시간 소비가 많고 수행하기 어렵다. 따라서 직접적인 불포화토에 대한 실험을 수행하지 않고 함수특성곡선과 포화토의 강도정수를 이용하여 유추하는 방법이 제안되어 왔다(Vanapalli 등, 1996)

Fredlund 등(1996)은 새로운 식 (2.2)를 제안하였다.

$$\tau_{ff} = c' + (\sigma_f - u_a)_f \tan\phi' + (u_a - u_w) \left[ (\tan\phi') \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

이 식을 이용하면, 함수특성곡선만을 이용하여 모관흡수력에 의한 전단강도의 증진을 포함한 불포화지반의 전단강도를 구할 수 있다.

### 3. 전단강도특성분석

본 연구에서는 불포화토의 전단강도에 영향을 미치는 요소 중 겉보기마찰각( $\phi^b$ )의 합리적인 산정을 위하여 그림 2의 함수특성곡선을 기초로 하여 전단강도를 분석하였으며, 그 외 점착력( $c'$ ) 5kPa, 내부마찰각( $\phi'$ )은 30°의 값을 적용하였다.

식 (2.2)에서 보면 겉보기마찰각( $\phi^b$ )을 함수특성곡선과 내부마찰각( $\phi'$ )만을 이용하여 식 (3.1)과 같이 계산할 수 있다.

$$\tan \phi^b = (\tan \phi') \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \Rightarrow \phi^b = \tan^{-1} \left[ (\tan \phi') \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \right] \dots \dots \dots (3.1)$$

식 (3.1)로부터 내부마찰각( $\phi'$ )으로 30°, 그림 2의 함수특성곡선을 사용하여 겉보기마찰각( $\phi^b$ )을 계산하면 그림 3과 같다.

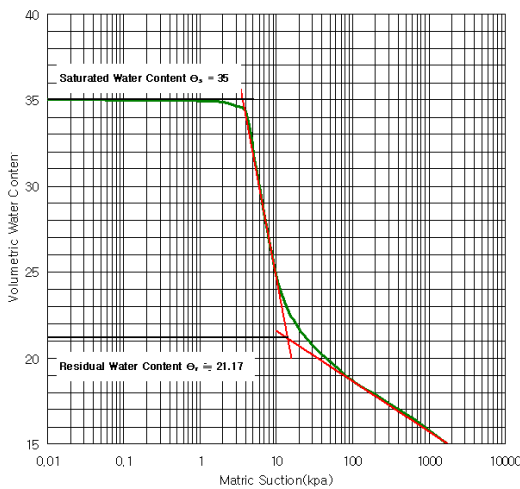


그림 2. 함수특성곡선

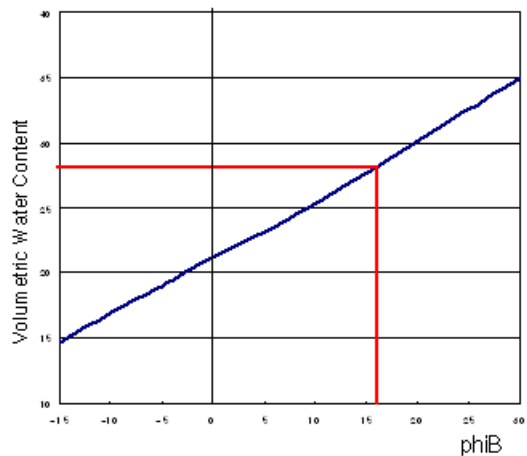


그림 3. 겉보기마찰각( $\phi^b$ )

그림 2와 같이 함수특성곡선에서  $\theta$ ,  $\theta_r$ ,  $\theta_s$ 를 구하고, 이를 식 (3.1)에 대입하여 겉보기마찰각( $\phi^b$ )을 계산하면 그림 3과 같은 결과를 얻을 수 있다. 그림 4를 보면,  $\theta$ 의 변화에 따라 포화영역에서는 내부마찰각( $\phi'$ )과  $\phi^b$ 가 같고 체적함수비( $\theta$ )가 감소함에 따라  $\phi^b$ 의 값도 감소되어  $\theta_r$ 보다 감소하면, 음수의 영역까지 나타나게 된다. 즉, 하나의 함수특성곡선에서 하나의  $\phi^b$ 값이 정의 되어지는 것이 아니라  $\theta$ 의 변화에 따라  $\phi^b$ 도 변한다. 따라서,  $\phi^b$  산정 요소인  $\theta$ 의 정리가 필요하다고 보여진다.

여기서,  $\phi^b$ 의 값이 0에서부터  $\phi'$ 인 구간을 볼 필요가 있다. 즉, 흙 속의 간극으로 공기가 계속 유입되면서 물이 유출되고 지반의 모관흡수력은 증가하게 되는 전이영역(transition zone)에서  $\phi^b$ 값이 산정되어야 할 것으로 보인다. 그림 4에서 보면,  $\theta_s$ 와  $\theta_r$ 의 평균값일 때의  $\phi^b$ 를 선정하였는데, 이는 약  $\phi^b \approx 0.537 \phi'$ 이다. 불포화삼축압축실험을 통해 구한  $\phi^b$ 와  $\phi'$ 을 ( $\phi^b = x \times \phi'$ )식으로 정리해보면 약  $\phi^b \approx 0.594 \phi'$ 정도가 나온다,  $\theta_s$ 와  $\theta_r$ 의 평균값으로  $\theta$ 를 산정한 값보다 약간 높은 값을 표시하게 된다.

식 (3.1)은 함수특성곡선으로부터  $\phi^b$ 값을 쉽게 구할 수 있다는 장점이 있지만, 함수특성곡선에서 전이영역의 기울기를 고려할 수 없는 단점이 있다. 따라서, 전이영역의 기울기가 고려될 수 있는 관계식의 개발이 요망된다.

이와 같이 계산되어지거나 실험에 의해 구해지는  $\phi^b$ 가 실제로 지반의 안정성에 어느정도의 영향을 미치는지 확인해보기 위하여 seep/w,slope/w프로그램을 사용하여 사면안정해석을 실시해보았다.

#### 4. 사면안정해석

$\phi^b$ 에 따른 안정성의 변화를 알아보기 위하여 seep/w를 통해 침투해석을 한 단면에 대하여 slope/w 프로그램으로  $\phi^b$ 의 변화와 안전율의 상관관계를 검토하였다. 사면안정해석에 적용한 기본해석조건은 표 1 과 그림 4, 그림 5 와 같다.

표 1 기본해석조건

경사 ( $\beta$ )	단위중량 ( $\text{kN/m}^3$ )	내부마찰각 ( $\Phi$ )	점착력 (c, kPa)	강우강도 (i, mm/hr)
2:1 (26.6°)	19.62	30°	5 kPa	18.576 mm/hr

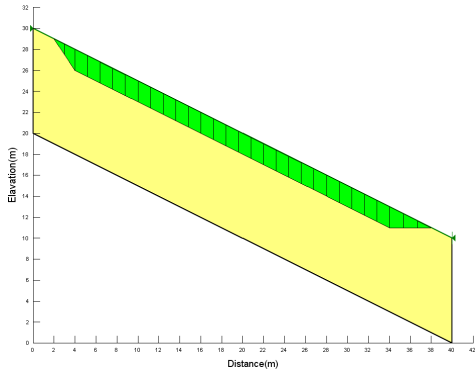


그림 4. 해석단면

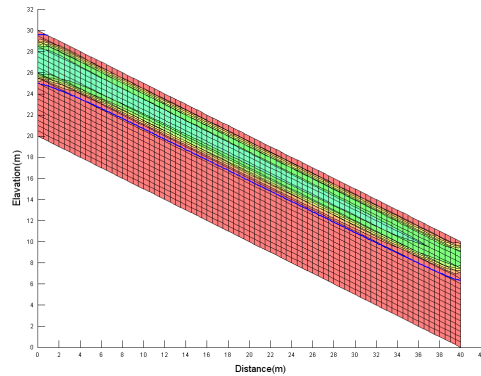


그림 5. 분석사면의 포화도상태

분석사면의 포화도는 강우강도 18.576 mm/hr으로 12시간동안 침투해석을 seep/w를 통해 실시한 상태에서 분석을 실시하였다.

$\phi^b/\phi'$ 의 값을 0에서부터 1까지 변화시킨 경우에 대해 안전율을 확인하였다.(그림 6)

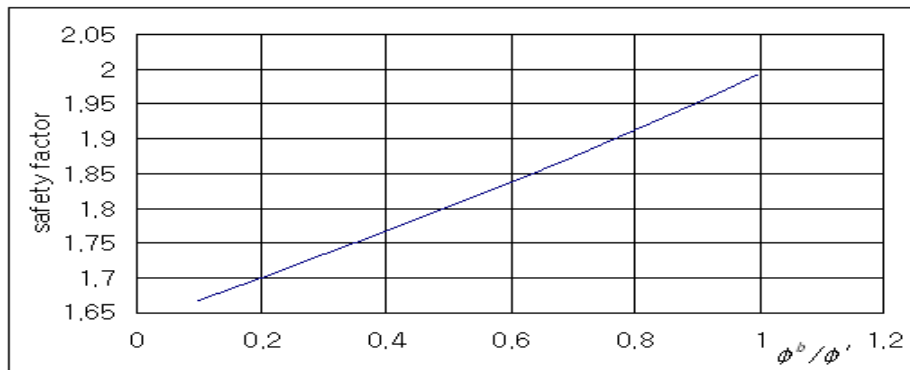


그림 6.  $\phi^b/\phi'$ 에 따른 안전율의 변화

본 연구에서 구한  $\phi^b/\phi' = 0.537$ , 실험에서 구해진  $\phi^b/\phi' = 0.594$ 이다. 그림 6 에서와 같이  $\phi^b/\phi' = 0.5 \sim 0.6$  에서의 안전율변화는 0.035이다. 또한, 이 경우에 대해  $\phi^b/\phi' = 1$ 을 적용한 경우와  $\phi^b$ 를 적용하지 않은 경우의 안전율차이는 약 0.325정도의 차이를 보인 것을 확인하였다.  $\phi^b/\phi' = 0.5$ 를 적용한 경우와  $\phi^b$ 를 적용하지 않은 경우의 안전율차이는 약 0.2정도의 차이를 보인다. 본 연구에서의 경우에 대해  $\phi^b$ 값의 적용여부에 따라 최소 0.2이상의 안전율이 차이가 생긴다고 할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 불포화토의 전단강도특성을 규명하기 위하여 함수특성곡선을 이용하여  $\phi^b$  값을 산정하고,  $\phi^b$ 와  $\phi'$ 의 관계를 검토하였다.

(1) 겔보기마찰각( $\phi^b$ )은 함수특성곡선과 내부마찰각( $\phi'$ )을 이용, Fredlund 등(1996)의 식을 적용하면 계산이 가능하다. 계산결과 체적함수비( $\theta$ )와  $\phi^b$ 는 비례관계임을 알 수 있고  $\phi^b$ 를 특정짓기 위해서는  $\theta$ 를 규명할 필요가 있다.

(2) 본 연구에서 적용한 함수특성곡선의 경우 겔보기마찰각( $\phi^b$ )값은 내부마찰각( $\phi'$ )의 0.5배정도로 나타낼 수 있을 것으로 보인다. 실험으로 구한 결과들의 평균값이  $\phi^b/\phi' = 0.6$ 이고,  $\theta$ 를 전이구간의 중간점( $\theta_s$ 와  $\theta_r$ 의 평균)의 값을 대입했을 때는  $\phi^b/\phi' = 0.53$  정도가 나왔으므로  $\phi^b$ 값은  $\phi^b/\phi' = 0.5 \sim 0.6$ 의 범위에 있을 것으로 판단된다.

(3)  $\phi^b/\phi'$ 를 0에서 1까지 변화시켜 해석한 결과 안전율은  $\phi^b/\phi'$ 가 0일 때보다 1일 때 0.33정도 더 높게 산정되었으며,  $\phi^b/\phi' = 0.6$ 으로 가정하면 약 0.2정도 높게 산정되었다.

불포화토의 강도분석에서 겔보기마찰각( $\phi^b$ )은 중요한 변수이다. 이를 합리적으로 산정하여 해석에 적용할 수 있어야 한다. 불포화토의 전단강도를 구하기 위하여 실험에 의해 대상지반의 함수특성곡선과  $\phi^b$ 를 얻어야 한다.  $\phi^b$ 값은 실험을 통해 얻는 것이 가장 정확하겠지만, 실험장비구축을 위한 비용과 실험수행의 시간이 비교적 많이 소요되어 설계정수산출을 위한 실험비용 역시 높다고 할 수 있다. 따라서 함수특성곡선과 일반삼축압축실험만으로  $\phi^b$ 값을 합리적으로 유추할 수 있어야 한다.

본 연구에서  $\phi^b$ 를  $\phi'$ 과의 관계식으로 대략  $\phi^b = (0.5 \sim 0.6) \times \phi'$ 으로 나타낼 수 있으나, 이 것은 연구과정에서 특정함수특성곡선을 통해 얻은 결과이므로 다양한 함수특성곡선에 대하여 적용함으로써 보다 합리적인 값이 산정될 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 김상규, 김영목(1991), “강우로 인한 사면 불안정”, 대한토질공학회지, 제7권 1호, pp.53-64.
2. 이상경 (2006) “불포화 무한사면의 침투거동에 관한 연구”, 홍익대학교, 박사학위논문
3. 이관영(2001) “강우시 사면의 침투거동에 관한 연구”, 홍익대학교 석사학위 논문
4. 윤민기 외 3명 (2008) “투수계수와 강우강도의 특성에 따른 사면안정성 연구”, 제34회 대한토목학회 정기 학술발표회, P2-202
5. Fredlund & Xing(1994), “Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve”, Can. Geot. Jr. Vol. 31, pp.533~546.
6. Fredlund D.G. & Morgenstern, N. R. and Widger, R. A. (1978), “The shear strength of unsaturated soils”, Can. Geot. Jr. Vol. 15, pp.313~321.
7. Fredlund D.G. and Rahardjo, H.(1995), Soil Mechanics for Unsaturated Soils, JohnWiley & Sons Inc.
8. Fredlund, D.G.(1979), “Appropriate Concepts and Technology for Unsaturated Soils”, Can. Geot. Jr. Vol.16 pp. 121-139.
9. Vanapalli, S. K., Fredlund, D.G., Pufahl, D. E. and Clifton, A. W.(1996), “Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction”, Can. Geot. Jr. Vol.33, No.3, pp.379-392