

Vanapalli 등의 제안식을 적용한 화강풍화토 불포화사면의 안정성해석

Slope Stability Analysis of Unsaturated Slope composed of Weathered Granitic Soils using the Equation of Vanapalli et al.

백 환 조* 김 경 만** 김 대 훈***
Baek, Hwan-Jo Kim, Kyung-Man Kim, Dae-Hoon

Abstract

The numerical study was conducted using the equation of Vanapalli et al.(1996) related shear strength of unsaturated soils. Angle of shearing resistance(ϕ^b) and angle of internal friction(ϕ') appear identically in lower suction range, but angle of shearing resistance(ϕ^b) has non-linearity as suction increases. Nevertheless, the numerical study was conducted using angle of shearing resistance(ϕ^b) in even lower suction range because of limit of program function. However, behavior of real ground on applying numerical study can be analysed wrong by it. Therefore in this paper numerical analysis on applying the equation of Vanapalli et al.(1996) and ϕ^b has been compared about unsaturated slope considering continuous rainfall.

키워드 : 불포화 전단강도, 불포화토, Vanapalli

Keywords : Vanapalli, Shear strength of unsaturated soils, unsaturated soil

1. 서론

최근 불포화토에 대한 관심이 급증하고 있다. 기존의 포화토의 원리를 이용하여 사면, 제방, 댐 등의 지반구조물의 안정성을 해석 하는 것은 실제 지반에서 발생하는 여러 현상과 거동 특성을 해석하는데 그 한계가 있으나 불포화토의 원리를 이용하면 더욱 실질적으로 해석할 수 있기 때문이다.

국제적으로는 불포화토의 개념을 설명하기 위해 1970년대부터 Fredlund 교수의 연구진들에 의해 불포화 토질역학에 관한 성과가 이루어져 왔다[10]. 그러나 국내에는 1990년대 들어 함수특성곡선, 불포

화 투수계수, 불포화 전단강도에 관한 실험과 이론에 대한 개념이 공유되면서 사면해석문제를 중심으로 연구가 진행 중이며 아직 불포화 지반정수가 실제 사면설계에서 활용되지는 못하고 있어 많은 연구가 필요한 실정이다.

기존의 경우 시 사면 안정성 분석은 지하수위를 기준으로, 아래로는 포화상태, 위로는 완전 불포화상태로 가정한 후 주로 한계평형법을 이용하여 해석한다. 그러나 이러한 연구에서는 국내 토사사면 파괴의 주된 원인이 되는 영향인자들을 적절히 고려할 수 없을 뿐 아니라 침투로 인한 불포화사면 지반 거동의 변화를 보다 합리적으로 고려하기가 어렵다. 따라서 최근에는 불포화토의 특성을 잘 나타내는 함수특성곡선 실험을 통해 사면안정성이 평가되고 있다.

국내 연구 결과에 의하면 국내의 대표적 풍화계열 지반인 화강풍화토의 경우 함수특성곡선의 예측에는 Fredlund and Xing(1994)의 경험식이 적용성이

* 강원대학교 에너지자원공학과 교수, 공학박사

** 강원대학교 에너지자원공학과 박사과정

*** 강원대학교 에너지자원공학과 박사과정, 교신저자

높고, 불포화 투수계수의 추정에는 Fredlund and Xing(1994)의 예측식이 잘 맞으며, 불포화 전단강도의 적용에는 Vanapalli 등(1996)의 제안식이 적합성이 높다고 증명되어졌다. 불포화토의 전단강도와 관련된 Parameter인 겉보기 마찰각, ϕ^b 값은 낮은 흡수력 값에서는 내부마찰각(ϕ')과 동일하게 나타나고 흡수력이 증가함에 따라 비선형적으로 거동하는 특성을 갖지만 일반적으로 국내 연구에서는 프로그램 기능의 한계로 낮은 모관흡수력에 대해서도 ϕ^b 를 적용하여 수치해석에 적용하고 있다. 하지만 이와 같이 수치해석에 적용시 실제 지반의 거동 특성과 다르게 해석할 수 있다.

본 논문에서는 국내의 대표적 풍화계열 지반인 화강풍화토를 대상으로 Vanapalli 등(1996)의 제안식을 적용했을 때와 현재 논문연구에 주로 사용되는 ϕ^b 적용 방법을 적용했을 때를 비교하여 지층강우 침투사면의 안전율에 관한 수치해석을 실시하여 거동특성을 분석하였다.

2. 이론적 배경

불포화토는 포화토와는 달리 흡입자(Soil particle)와 간극을 이루는 물(Water), 공기(Air)의 삼상구조로 이루어져 있다(Fig. 1.). 불포화토의 간극은 포화토와 같이 물로만 채워져 있지 않으며 공기와 물이 접촉되어 있는 상태로 존재한다. 이 접촉면을 물-공기 접촉면(Contractile skin)이라 부른다. 물-공기 접촉면에서는 표면장력이라는 힘이 작용하고 있으며 이 힘은 흡입자와의 상호작용을 통해 불포화토의 역학적 거동특성에 중요한 영향을 끼친다.

물-공기 접촉면(Contractile skin)에는 표면장력이 유발되는 성질이 있다. 표면장력현상은 이 면에 있는 분자들 상호간 작용하는 힘으로부터 발생한다.

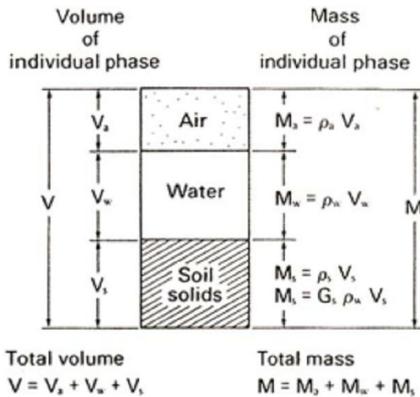


Fig. 1. Three-phase structure of unsaturated soil [10]

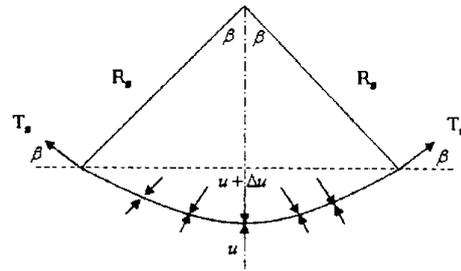


Fig. 2. Pressure and surface tension acting on a curved two-dimensional surface [18]

이러한 힘은 물 내부에 있는 분자에 작용하는 것과는 다르다. 물-공기 접촉면은 탄성 고무막처럼 거동하는데 접촉면을 따라 공기압이 작용하게 되면 접촉면은 곡선의 형태를 띠게 되며, 그 면을 따라 공기압에 저항하는 인장응력이 발생하게 된다. 이러한 인장응력으로 인해 불포화토는 일정 공기압에서 일정 수분을 유지할 수 있으며 이를 함수특성이라 한다.

2.1 함수특성곡선

함수특성곡선(Soil Water Characteristic Curve, SWCC)은 불포화토의 역학적 성질을 보여주는 가장 기본적인 요소 중의 하나로써 일반적으로 함수비와 모관흡수력의 관계로 정의된다(Fig. 3.). 불포화토의 경우에는 모관흡수력이 지반의 거동특성에 매우 중요한 역할을 하는 설계변수이기 때문에, 불포화토와 관련된 흐름특성, 변형특성 및 강우강도특성을 적절히 고려하기 위해서는 모관흡수력의 영향을 반드시 고려해야 한다[12][22].

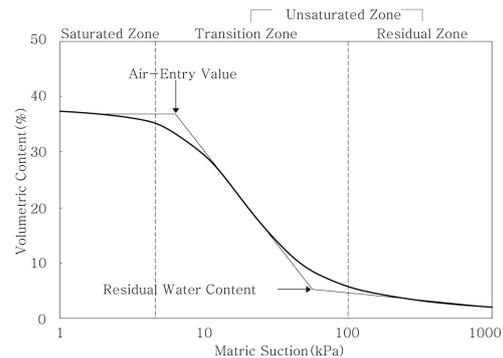


Fig. 3. Soil water characteristic curve illustrating the regions of desaturation [12]

함수특성곡선은 건조 과정과 습윤 과정이 다르게 나타나며, 이를 이력현상(Hysteresis)이라 한다(Fig. 4).

이력현상의 대표적인 원인으로는 잉크병 효과(Ink-bottle effect)와 접촉각의 변화(Different angle effect)를 들 수 있다. Guymon(1994)은 잉크병효과는 흙이 건조 상태에서 습윤 상태로 변화할 때는 큰 간극을 통해 물이 흡수되고 습윤 상태에서 건조 상태로 변화할 때는 작은 간극을 통해 물이 배수되기 때문에 발생하는 현상이라 설명하였다. 즉 건조 상태나 습윤 상태로 변화할 때의 간극의 반지름 차이에 의하여 같은 함수비에서도 모관흡수력의 차이가 발생하게 된다. 또한 기체와 액체의 접촉면을 기준으로 접촉각의 변화 또한 이력현상에 있어서 중요한 요인이다. 모관 상승과 수직 침투에 대한 모래의 실험적 연구에 의하면 습윤 접촉각(α_w)은 약 $60\sim 80^\circ$ 의 범위로 나타나며[16][19] 건조 접촉각(α_d)은 $0\sim 20^\circ$ 내지 30° 의 범위로 습윤 접촉각에 비해 작은 것($\alpha_w > \alpha_d$)을 확인하였다[17].

불포화토의 종류에 따른 함수특성곡선의 예측방법은 크게 두 가지 방법이 있다. 첫 번째 방법은 건조 및 습윤 곡선을 얻는 함수특성시험을 통한 경험적 예측방정식을 이용하는 방법이 있으며, 두 번째는 흡입자의 구조, 입도분포와 습윤단위증량으로 함수특성곡선을 예측하는 방법이 있다. 첫 번째 방법 중 Fredlund and Xing(1994)의 경험방정식은 연구를 통해 국내 화강풍화토에 대해 적합성이 가장 높음이 증명되어졌다[4][5].

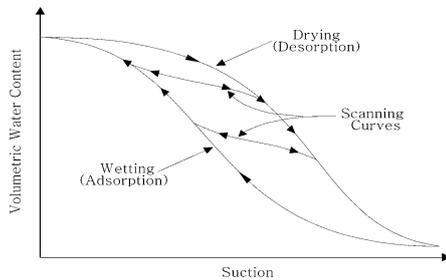


Fig. 4. Effect of hysteresis on the soil water characteristics curve [20]

2.2 불포화투수계수

포화토 뿐만 아니라 불포화토에서도 Darcy의 법칙이 적용 가능하나 포화토와 달리 불포화토는 간극 내에 존재하는 물의 양에 따라서 영향을 받는다. 즉 함수비에 따라서 투수성이 변하게 되는 것이다. 이러한 함수비를 표현하는 곡선이 함수특성곡선이므로 불포화토의 투수곡선은 함수특성곡선과 유사한 형태를 보이는 것이 당연하다. Fig. 5.은 이러한 유사성을 보여주고 있다.

불포화 투수계수를 얻기 위한 방법으로는 실험을

통해 데이터를 얻는 직접적인 방법과 기존에 제안되어 있는 경험식을 이용하는 간접적인 방법이 이용되고 있다. 첫째로 실험을 통해 데이터를 얻는 직접적인 방법은 1943년부터 Christensen에 의해 연구가 시작되었고[9] 현재 많은 발전을 이루었으나 결과를 얻기 위해 필요한 시간과 비용이 비효율적이고 실험 방법이 어려워 오차가 많이 발생하기 때문에 매년 실험을 수행하는 것은 한계가 있다.

따라서 함수특성곡선을 기본으로 제안된 경험식을 활용하여 불포화 투수계수를 얻는 간접적인 방법이 많이 이용되고 있고 여러 경험식 중 Fredlund and Xing(1994) 모델이 국내 화강풍화토의 불포화투수계수를 표현하는데 제일 적합함이 연구를 통해 증명되었다[1][8].

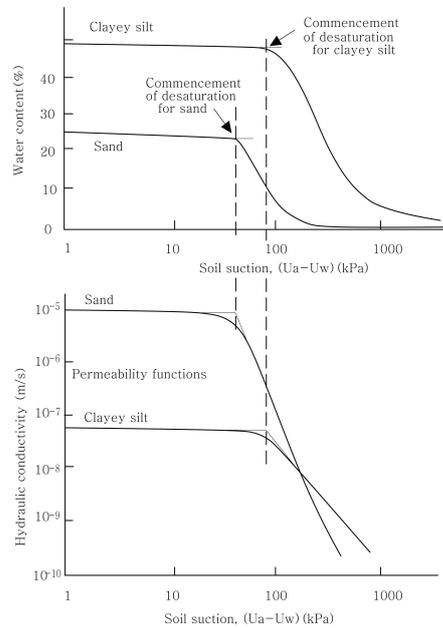


Fig. 5. Relationship of SWCC and unsaturated hydraulic conductivity curve [10]

2.3 불포화 전단강도

포화된 흙은 외적인 하중에 대응하여 평형상태에 있을 때 간극수압이 주로 0이상의 값을 가지기 때문에 유효응력에 불리한 영향을 미치게 되지만 불포화된 흙 상태에서 간극수압이 음으로 작용하기 때문에 유효응력을 증가시키는 역할을 한다.

Terzaghi에 의해 제안된 유효응력식은 포화토의 전단강도를 예측하기 위한 Mohr-Coulomb 이론식에 성공적으로 사용되어 왔지만 불포화토의 전단강도에 대해서는 적절히 설명하지 못하고 있고 수식은 (1)과 같다.

$$\tau_f = c' + \sigma' \tan \Phi' \quad (1)$$

여기서 τ_f = 파괴면의 전단강도
 c' = 유효 점착력(Cohesion)
 σ' = 파괴면의 유효 수직응력 ($\sigma - u$)
 Φ' = 내부 마찰각
 σ = 수직응력
 u = 간극수압

이에 Fredlund and Morgnstern(1978)은 순 수직 응력($\sigma - u_a$)과 모관흡수력($u_a - u_w$)을 서로 독립적인 상태변수(State variable)로 사용하여 불포화도에 적용할 수 있는 새로운 전단강도 식을 제안하였고 (2)와 같다.

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \Phi' + (u_a - u_w) \tan \Phi^b \quad (2)$$

여기서 u_a = 파괴면의 간극공기압
 u_w = 파괴면의 간극수압
 $(u_a - u_w)$ = 파괴면의 모관흡수력
 Φ' = 순 수직응력에 대한 내부 마찰각
 Φ^b = 모관흡수력에 대한 겉보기 마찰각

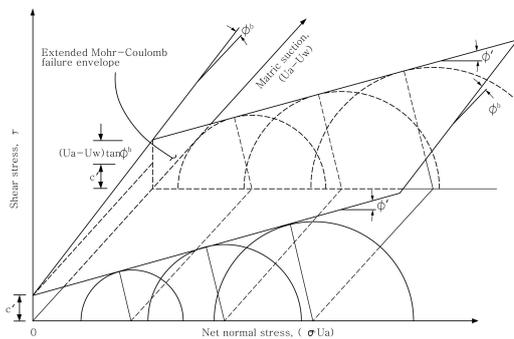


Fig. 6. Extend Mohr-Coulomb failure envelope for unsaturated soil [10]

Fredlund and Morgnstern(1978)의 공식에서 흡수력에 따른 전단강도의 증가를 나타내는 겉보기 마찰각, Φ^b 는 흡수력에 따라 선형적인 것으로 고려되어 졌다(Fig. 6). 하지만 이후 많은 연구가 진행되었고 겉보기 마찰각, Φ^b 는 낮은 흡수력 값에서는 내부마찰각(Φ')과 동일하게 나타나지만 흡수력이 증가함에 따라 비선형적으로 거동하는 특성을 알게 되었다(Fig. 7). Vanapalli 등(1996)은 흙의 함수특성곡선으로부터 정규화된 체적함수비와 fitting parameter(k)를 이용해 그 흙의 함수특성곡선으로부터 불포화 전단강도를 추정할 수 있는 공식(3)과

그 흙의 잔류체적함수비(Residual volumetric water content)를 구하여 불포화 전단강도를 추정할 수 있는 공식(4)를 제안 하였다.

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \Phi' + (u_a - u_w) [(\tan \Phi') (\Theta)^k] \quad (3)$$

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a) \tan \Phi' + (u_a - u_w) [(\tan \Phi') (\frac{\Theta_w - \Theta_r}{\Theta_s - \Theta_r})^k] \quad (4)$$

여기서 Θ_s = 포화체적함수비
 Θ_w = 각 흡수력에 따른 체적함수비
 Θ_r = 잔류체적함수비
 $(\Theta)^k = \Theta_w / \Theta_s$

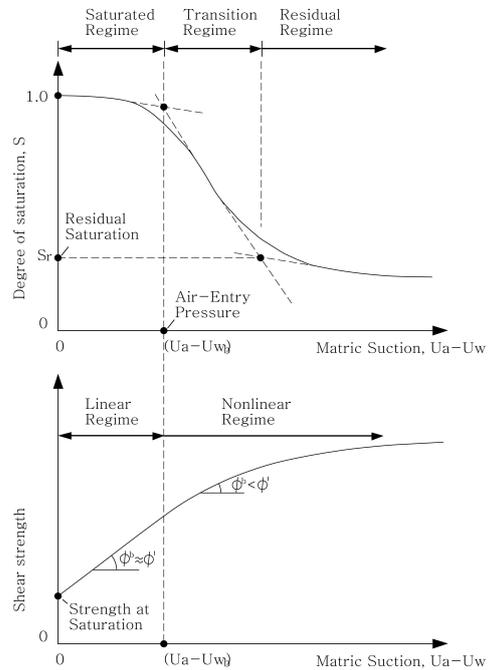


Fig. 7. Relationship between SWCC and shear strength [22]

Vanapalli 등(1996)의 제안식은 함수특성곡선으로부터 결정되기 때문에 Fig. 7.과 같은 특성이 나타나고 정확한 함수특성곡선을 얻는 것이 수치해석을 수행함에 있어 상당히 중요하다.

Vanapalli 등(2000)은 (3)식의 경우 fitting parameter (k)를 1로 산정하면 비소성의 조립토의 경우 실험값과 상관관계가 좋음을 보여준바 있으며 국내 연구 결과에 의하면 fitting parameter(k)를 1로 산정하면 국내 화강풍화도에 적합성이 높음이 검토된바 있다[6].

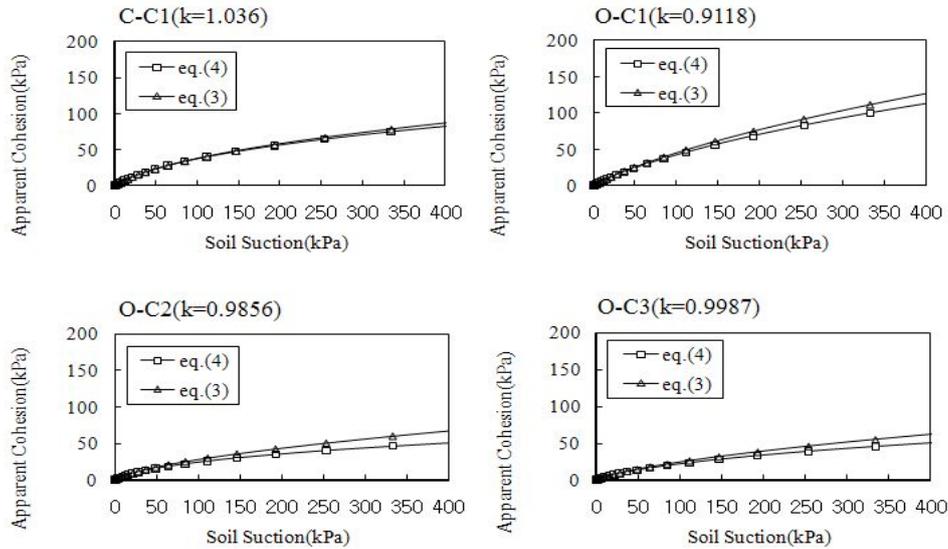


Fig. 8. Comparison between (3)equation result and (4)equation result

또한 성상규 등(2003)은 Vanapalli 등(1996)의 제안식이 순연직응력의 변화에 따라 변화하는 유효접촉면적의 변화를 추가적으로 고려할 수만 있다면 더 정확하게 불포화토의 전단강도를 예측할 수 있음을 언급하였다. 하지만 (4)식의 경우 국내 화강풍화토에 적용성에 관한 연구가 수행되지 않아 본 논문에서 부분적으로나마 그 적합성을 검토해 보고자 하였다.

먼저 오진규(2007)가 구한 실험 데이터 중 식 (3)을 이용해 구한 C-C1, O-C1, O-C2, O-C3시료의 불포화 전단강도 곡선 및 성상규 등(2003)이 구한 실험 데이터 중 순연직응력 값을 고려하지 않은 시료의 불포화 전단강도 곡선을 이용하여 식 (4)를 이용한 방법과 비교 분석하였다.

분석 결과 C-C1 및 성상규 등(2003)의 불포화 전단강도 곡선과 본 연구에서 식 (4)를 이용하여 구한 불포화 전단강도 곡선이 거의 일치함을 확인할 수 있었고 O-C1, O-C2의 경우 모관흡수력 값이 250 kPa, O-C3는 모관흡수력 값이 350 kPa를 넘어가면 서부터 식 (4)를 이용한 방법이 불포화 전단강도와 관련된 결보기 점착력(apparent cohesion) 값이 10kPa이상 적게 나타나기 시작해 조금씩 벌어져 다소 차이는 있었지만 적합성이 높음을 확인할 수 있었다(Fig. 8., Fig. 9.).

일반적으로 국내 불포화토 연구와 관련된 사면 안정성 수치해석에는 GEO-SLOPE사의 SLOPE/W가 주로 사용된다[15]. 하지만 프로그램 기능의 한계로 Vanapalli 등(1996)의 제안식을 직접적으로 적용할 수가 없어 Vanapalli 등(1996)의 제안식을 이용해 Fig. 11.과 같이 그래프를 구하고 ϕ^b 값을 산정한 후

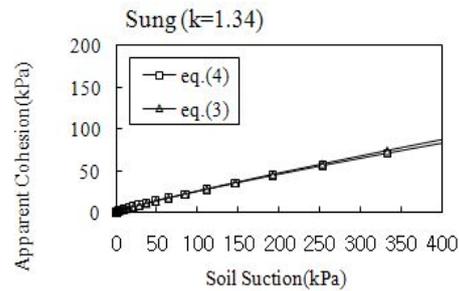


Fig. 9. Comparison between (3)equation result and (4)equation result

Fredlund and Morgnstern(1978)식만이 이용가능한 수치해석 프로그램에 적용하고 있다. 그러나 이와 같이 수치해석에 적용시 실제 지반의 거동 특성과 다르게 해석할 수 있는 문제점이 있다.

따라서 본 논문에서는 국내의 대표적 풍화계열 지반인 화강풍화토를 대상으로 Vanapalli(1996)의 제안식 중 (4)식이 적용 가능한 SLOPE/W 2007 version을 이용하여 Vanapalli 등(1996)의 제안식을 적용했을 때와 현재 논문연구에 주로 사용되는 ϕ^b 적용 방법을 적용했을 때를 비교하여 지속강우 침투사면의 안전율에 관한 수치해석을 실시하여 거동특성을 분석하고자 하였다.

3. 연구 방법

3.1 강우시 사면 붕괴 메커니즘

집중호우 시 토사사면의 주된 파괴는 사면의 지표 부근에 강우 침투(Infiltration)에 의한 포화대(Wetting band depth)가 형성되어 지표 부근의 흡수력의 변화로 강도를 감소시켜 사면의 안정성을 저하시킨다(Fig. 10). 강우로 인한 지하수위의 증가가 원인일 수도 있지만 지하수위가 낮을 경우 집중호우가 발생하여도 지하수위의 상승이 거의 일어나지 않는다[10][21]. 또한 현재 강우시 사면파괴에 대한 국내의 연구에 따르면 집중호우에 의한 사면파괴는 주로 지표부근 2m이내에서 발생된다고 보고하고 있다[7].

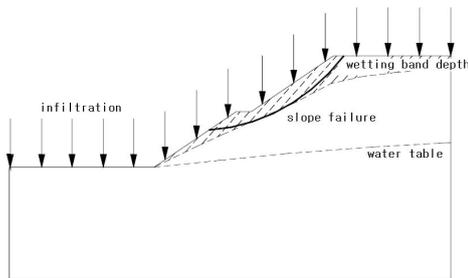


Fig. 10. Slope failure mechanism caused by rainfall infiltration

3.2 수치해석 및 결과

신민호 등(2003)은 국내 대표적 풍화계열 지반인 화강풍화토를 대상으로 함수특성곡선을 얻기 위해 압력관추출시험(volumetric pressure plate extractor, VPPE)을 실시하고 Fredlund and Xing(1994)의 경험식을 이용해 함수특성곡선을 최적화하였으며 Fredlund and Xing(1994)의 예측식을 이용해 불포화 투수곡선을 구하였다[3]. 또한 앞에서 언급했듯이 국내 연구에서 일반적으로 이용하는 방법을 이용해 ϕ^b 를 구하고 프로그램에 적용하여 수치해석을 실시하였다.

따라서 본 장에서는 국내 연구에서 주로 이용되는 신민호 등(2003)이 사용한 방법과 Vanapalli 등(1996)의 제안식(4)을 직접 적용하는 방법을 이용해 GEO-SLOPE사의 SEEP/W 프로그램으로 2차원 침투해석을 실시하고 SLOPE/W 프로그램을 연동 해석하여 지속강우 침투사면의 안전율에 관한 수치해석을 실시하여 그 결과를 비교하였다. 대상 시료의 물성은 Table 1., 2., 3., Fig. 11.과 같다.

Table 1. Physical properties of soils

γ_{dmax} (t/m^3)	w_{opt} (%)	k_s (cm/sec)	G_s	w_{sat}
1.82	11	4.41×10^{-4}	2.64	20.1

Table 2. Parameter for the Calculations of SWCC

a	40
m	2.14
n	1.06
ϕ_r	200
AEV	20
θ_r	0.03
θ_s	0.4

Table 3. Parameter about shear strength

c (kPa)	ϕ'	ϕ_b	$(\sigma_n - u_a)$ (kPa)
2.45	37.5	12	34

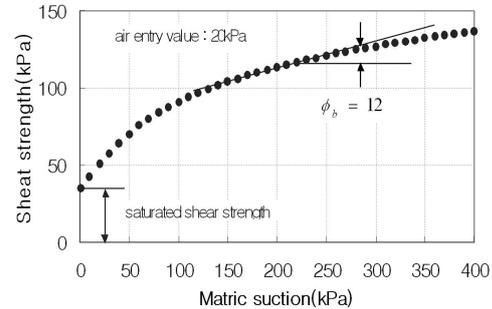


Fig. 11. Calculated ϕ^b from equation proposed by Vanapalli et al.

수치해석을 실시하기위해 먼저 1:1.2의 경사를 갖고 전체 폭 40m, 높이가 20m인 단층 무한 토사사면을 형성하고(Fig. 12.) 침투시 선행강우효과를 나타내는 초기흡수력은 10kPa, 지하수위는 사면 하단으로부터 1m 부분에 존재하는 것으로 설정하였다. 또한 해석 시간은 0.1, 0.5, 1, 2, 3, 5, 10, 24, 36, 48, 72, 96시간의 12단계로 선택하였으며 강우강도는 30mm/hr로 적용하였다. 그리고 사면 안정성 해석에는 Bishop의 간편법을 사용하였다.

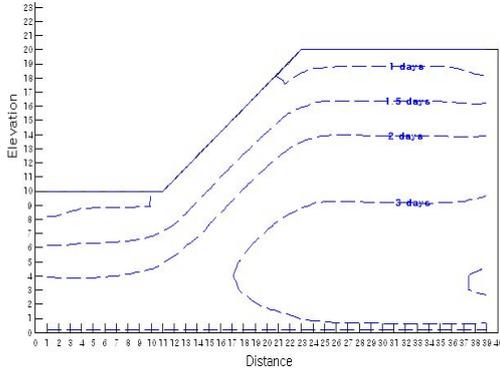


Fig. 12. Numerical analysis result of SEEP/W

SEEP/W를 이용한 침투 해석 결과 24시간 후 지반으로 강우가 침투하기 시작하고 36시간 이후에 지표면으로부터 포화대가 형성됨을 관찰할 수 있었으며 72시간 이후에는 지표로부터 침투된 강우가 지하수면과 만나는 것을 확인 할 수 있었다(Fig. 12.). SLOPE/W를 연동한 사면 안정성 해석 결과 강우가 침투한 10시간까지는 Vanapalli 등(1996)의 제안식(4)을 이용하여 해석한 안전율이 ϕ^b 를 적용한 방법보다 0.22-0.25 더 큰 값을 갖는 것을 관찰 할 수 있었고 24시간 이후부터는 두 가지 모두 지반내로 침투된 강우에 의해 겔보기 점착력이 점차 소실되며 안전율 차이가 0.1이하로 떨어짐을 관찰할 수 있었다. 계속해서 지반이 포화되면서 나중에는 그 차이가 더 작아져 96시간이 지난 후에는 안전율 차이가 0.034로 줄어들음을 확인 할 수 있었고 Vanapalli 등(1996)의 제안식(4)을 적용한 방법이 작은 크기였지만 어느 정도 지반이 포화된 후에도 안전율이 높게 나타남을 관찰할 수 있었다(Fig. 13.).

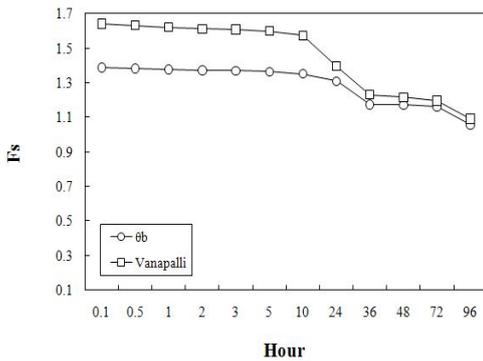


Fig. 13. Numerical analysis result of SLOPE/W

4. 결론

본 연구의 결론은 다음과 같다.

첫째, Vanapalli 등(1996)의 제안식 중 (3)식 뿐만 아니라 (4)식도 국내 화강풍화토에 적합성이 높음을 부분적으로 확인 할 수 있었다.

둘째, 침투된 강우에 의해 지반 내에 포화대가 형성되면서 겔보기 점착력이 소실되며 사면의 안전율이 급속히 떨어짐을 확인 할 수 있었다.

셋째, 강우가 지반내로 침투하기 전까지는 Vanapalli 등(1996)의 제안식을 이용하여 수치해석한 안전율이 ϕ^b 를 적용한 방법과 비교했을 때 0.22-0.25의 큰 값을 갖는 것을 확인 할 수 있었다.

넷째, 강우가 지반내로 침투한 이후부터는 Vanapalli 등(1996)의 제안식을 이용한 방법과 ϕ^b 를 적용한 두 가지 방법 모두 지반내로 침투된 강우에 의해 겔보기 점착력이 점차 소실되며 안전율 차이가 작아짐을 관찰할 수 있었고 Vanapalli 등(1996)의 제안식을 적용한 방법이 작은 크기였지만 어느 정도 지반이 포화된 후에도 안전율이 높게 나타남을 관찰할 수 있었다.

다섯째, 현재 불포화토 논문 연구에 사용되는 ϕ^b 적용 방법은 Vanapalli 등(1996)의 제안식을 적용했을 때보다 실제적 특성이 떨어지고 보수적인 안전율 값을 갖기 때문에 실제 사면의 거동을 수치해석적으로 모사하기 위해서는 Vanapalli 등(1996)의 제안식을 사용하는 것이 합당할 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] 김윤기, “투수시험결과 해석에 의한 불포화 풍화토의 투수성에 관한 연구”, 공학석사학위논문, 한국과학기술원, 2003.
- [2] 성상규, 이인모, “화강풍화잔적토의 불포화전단강도에 미치는 순연적응력의 영향”, 한국지반공학회논문집, 제19권, 2호, pp. 27-38, 2003.
- [3] 신민호, 김현기, 김정기, “강우시 사면안정성 변화를 고려한 열차운전규제 개발”, 한국지반공학회 2003년도 사면안정학술발표회, pp. 13-22, 2003.
- [4] 신방웅, 이홍길, “해안매립지 대심도 굴착지역의 불포화 함수특성에 따른 침투류 거동”, 한국지반공학회논문집, 제6권, 4호, pp. 47-58, 2005.
- [5] 신은철, 이학주, 오영인, “불포화 준설매립지반의 흙-수분 특성곡선 및 불포화 투수계수 예측”, 한국지반공학회논문집, 제20권, 1호, pp. 109-120, 2004.
- [6] 오진규, “강우침투를 고려한 불포화 사면 설계방안”, 공학석사학위논문, 한국과학기술원, 2007.

- [7] 이관영, “강우특성을 고려한 불포화토 사면의 안정성 해석”, 공학석사학위논문, 대전대학교, 2004.
- [8] 최경림, “화강풍화토에 대한 함수특성곡선으로부터 불포화투수계수 유추에 관한 연구”, 공학석사학위논문, 한국과학기술원, 2007.
- [9] Christensen, H. R., “Permeability capillary potential curves for three prairie soils”, *Soil Science*, Vol. 57, No. 5, pp. 381-390, 1944.
- [10] Fredlund, D. G., H. Rahardjo, *Soil Mechanics For Unsaturated Soil*, Wiley and Sons, Inc., 1995.
- [11] Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., Widger, R. A., “The shear strength of unsaturated soils”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 15, pp. 313-321, 1978.
- [12] Fredlund, D. G., Xing, “Equations for the Soil-Water Characteristic Curve”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, No. 4, pp. 521-532, 1994.
- [13] Guymon, L. G., *Unsaturated Zone Hydrology*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, pp. 210, 1994.
- [14] Geo-slope, *User's Guide for SEEP/W 2007*, Geo-slope International Ltd, Canada, 2007.
- [15] Geo-slope, *User's Guide for SLOPE/W 2007*, Geo-slope International Ltd, Canada, 2007.
- [16] Kumar, S., Malik, R. S. “Verification of Quick Capillary Rise Approach for Determining Pore Geometrical Characteristics in Soils of Varying Texture”, *Soil Science*. Vol. 150, No. 6, pp. 874-882, 1990.
- [17] Laroussi, C. H., De Backer, L. W., “Relations between geometrical properties of glass bead media and their main $\psi(\theta)$ hysteresis loops”, *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 43, pp. 646-650, 1979.
- [18] Leong, E. C. and Rahardjo, H. Permeability Function for Unsaturated Soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 123(12), p. 1118-1126, 1997.
- [19] Letey, J., Osborn, J., Pelishek, R.E., “Measurement of liquid - solid contact angles in soil and sand”, *Soil Science*. Vol. 93, pp. 149 - 153, 1962.
- [20] Liakopoulos, A. C., “Transient flow through unsaturated porous media, D. Eng. Dissertation”, University of California, Berkeley, Calif, 1965.
- [21] Ng, K. L., Shi, Q., “A numerical investigation of the stability of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage”, *Computer and Geotechnics*, Vol. 22, pp. 1-28, 1998.
- [22] Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E., Clifton, A. W., “Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, No. 3, pp. 379-392, 1996.
- [23] Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G. “Comparison of empirical procedures to predict the shear strength of unsaturated soils uses the soil-water characteristic curve”, *American Society of Civil Engineers, Special Publication*, Vol. 99, pp. 195-209, 2000.