

특성곡선으로부터 불포화 투수계수를 유추하고자 하는 연구가 활발히 진행되었다.

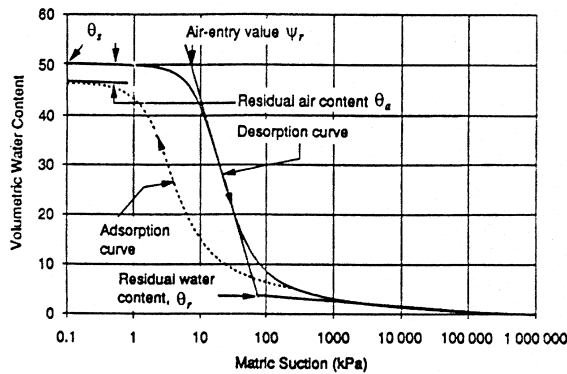
하지만 함수특성곡선을 위한 실험이나 불포화 투수계수에 대한 실험 등은 시간적, 경제적으로 모두 소비가 매우 크고 실험이 복잡하여 실질적인 공학적 적용을 위해 실험을 수행하기에는 큰 어려움이 있다. 그로 인해 외국의 경우 이러한 불포화 지반정수를 기본적 물성으로부터 간단한 방법으로 추정하여 사용하는 방법을 개발하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 하지만 이러한 추정방법들은 추정을 위해 사용되어진 자료에 크게 좌우되는 경향을 보이고 있고, 또한 흙의 종류에 따라 다른 결과를 유추해내는 결과를 보이고 있다. 따라서 국내 지반에 적용을 위해서는 국내 지반에 적합한 추정방법의 개발이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 국내에 가장 널리 분포되어 있으며 지반구조물의 재료로서 가장 많이 이용되고 있는 화강풍화토를 대상으로 함수특성곡선실험과 불포화 투수계수 실험을 수행하여 그 결과를 분석하고, 함수특성곡선을 추정할 수 있는 방법을 개발, 제안하여 그 결과를 투수계수 추정에 이용하고자 하였다.

2. 문헌연구

2.1 함수특성곡선

함수특성곡선은 흙 속의 물의 양과 모관흡수력과의 관계로 정의되며, 물의 양은 중량 함수비, 체적함수비, 또는 포화도로 나타낼 수 있다. 일반적으로는 체적함수비와 모관흡수력과의 관계로 나타내며, 전형적인 함수특성곡선의 모양은 그림 1과 같다. 그림에서 보듯이 포화된 흙의 간극에서 모관흡수력이 증가해도 공기함입치(air-entry value)를 초과할 때까지는 물이 유출되지 않는다. 이러한 공기함입치는 간극으로 공기가 유입되기 시작하는 압력으로 정의된다(그림 1의 ψ_r). 그리고 모관흡수력의 증가에도 불구하고 더 이상 물이 추출되지 않는 함수비를 잔류함수비(그림 1의 θ_r)라 한다.



1

2
Rahardjo, 1995).

(boundary effect stage)
(2 a).

(Fredlund &
meniscus)가
가

가
(transition stage)

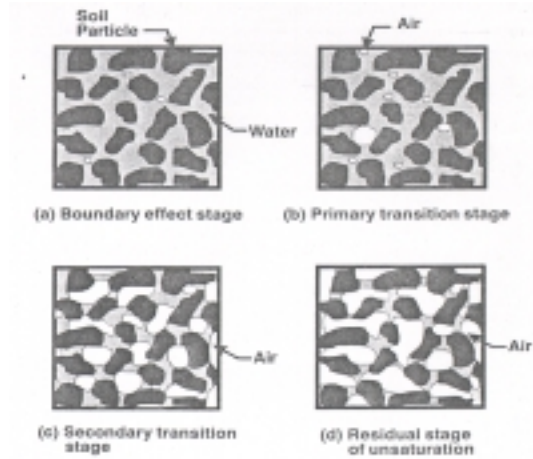
가 . (2 b, c)

가 가

가
(2 d).

가 가 가

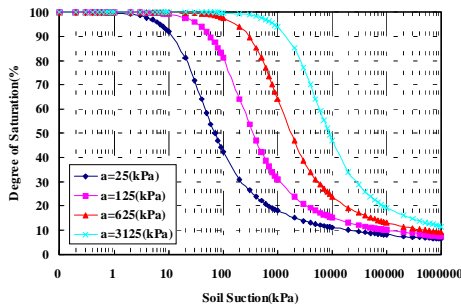
(residual stage)



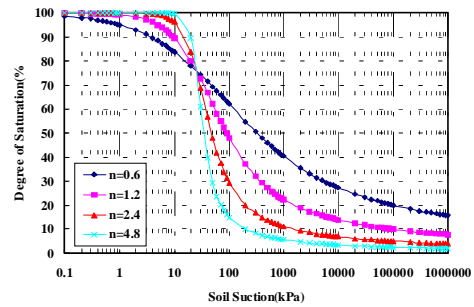
2

Fredlund & Xing(1994)은 이러한 특성을 갖는 함수특성곡선을 나타내기 위하여 3개의 계수(a, n, m)를 갖는 함수 특성곡선식을 다음과 같이 제안하였다.

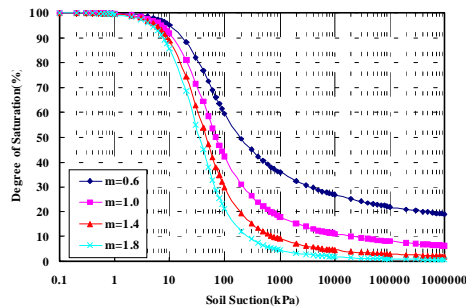
$$S = \frac{1}{[\ln(e + (\frac{\psi}{a})^n)]^m} \quad (1)$$



(a) m and n constant and a varying



(b) m and a constant and n varying



(c) a and n constant and m varying

3 Fredlund & Xing

이 식은 전체의 흡수력 범위에서 연속적인 함수특성곡선을 표현하게 되며, 이 식이 포함하는 계수 중 a 는 AEV(air entry value, 공기함입치)와 관련된 값으로써 변곡점과 관련된 값을 나타내며 전체적인 곡선 형태에는 영향을 주지

못하고 단지 a 값이 증가할 때 곡선이 높은 모관흡수력쪽으로 이동하는 결과를 주는 계수이다. n 은 흙의 간극 크기 분포와 관련된 계수로서 곡선의 기울기와 관련이 있다. 그리고 m 은 곡선의 대칭성에 관련된 계수로 m 값이 작을 때 낮은 모관흡수력 범위에서 완만한 경사를 높은 suction범위에서 급한 경사를 나타내는 계수로 설명이 가능하다.

이러한 Fredlund & Xing의 함수특성곡선 모델은 넓은 범위의 자료를 포함할 수 있는 유연성(flexibility)를 갖고 있으며, 각각의 계수들은 의미있는 값을 나타내고 하나의 계수가 다른 두개의 계수의 영향으로부터 구별되는 장점들을 갖고 있다. 따라서 본 연구에서도 함수특성곡선을 표현하기 위한 방법으로 Fredlund & Xing의 모델을 선택하여 본 연구에서 수행된 화강풍화토에 대한 함수특성곡선의 실험결과를 표현하고, 계수들을 계산하여 함수특성곡선을 추정하기 위한 자료로 사용하였다.

2.2 불포화 투수계수

Fredlund 등(1994)은 정규화된 불포화 투수계수를 얻고자 함수특성곡선을 모관흡수력 축을 따라 적분함으로써 얻어지는 다음과 같은 식을 제안하였다

$$k_r(\psi) = \frac{\int_{\psi}^{\psi_r} \frac{\theta_w(\vartheta) - \theta_w(\psi)}{\vartheta^2} \theta_w'(\vartheta) d\vartheta}{\int_{\psi_b}^{\psi_r} \frac{\theta_w(\vartheta) - \theta_w(\psi)}{\vartheta^2} \theta_w'(\vartheta) d\vartheta} \quad (2)$$

여기서, θ_w' 는 함수특성곡선의 미분형식을, ϑ 은 모관흡수력을 나타내는 적분 더미(dummy)를 의미한다.

이 투수함수식은 넓은

(0 1,000,000 kPa)

가 $(\theta_r \quad \psi_r)$

$\psi_b \quad 10^6 \text{kPa}$

$$k_r(\psi) = \frac{\int_{\ln(\psi)}^b \frac{\theta_w(e^y) - \theta_w(\psi)}{e^y} \theta_w'(e^y) dy}{\int_{\ln(\psi_b)}^b \frac{\theta_w(e^y) - \theta_w(\psi)}{e^u} \theta_w'(e^y) dy} \quad (3)$$

여기서, b 는 $\ln(1,000,000)$ 이고, y 는 대수축에서 나타내는 적분 더미를 의미한다.

3. 실험

3.1 함수특성곡선 실험

가

가

(, 2000).

(Volumetric Pressure Plate

Extractor)

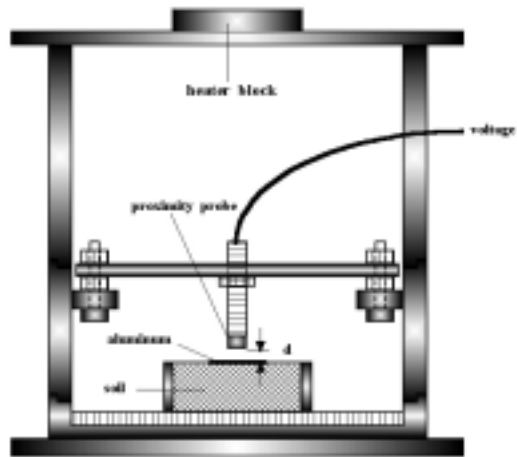
(4).

가

(drying)

(wetting)

(Ng & Pang, 2000).



4

4

3.2 불포화 투수계수 실험

5bar AEV

가 가

가 가

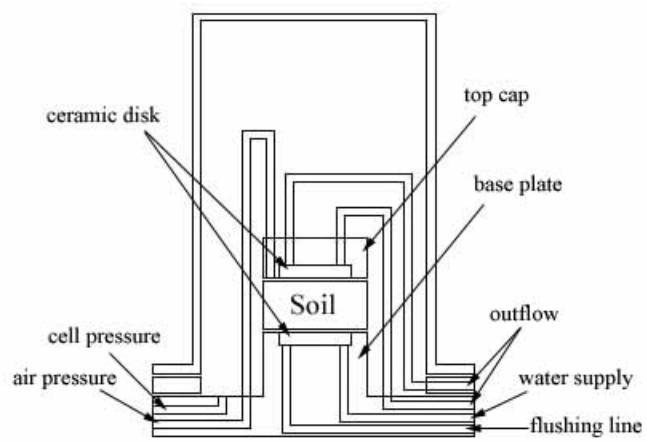
10 kPa

가

가

5

가
24



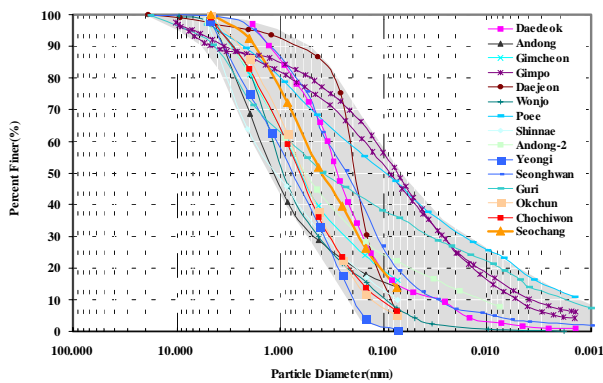
5

4. 함수특성곡선 실험 결과 및 분석

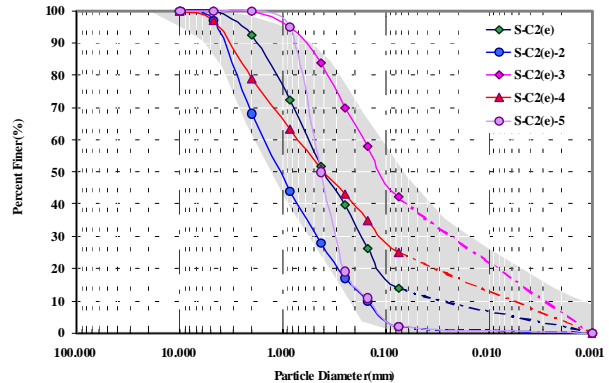
본 연구에서는 서창, 연기, 옥천, 조치원 등의 지역에서 시료를 채취하여 실험을 수행하였으며, 이와 함께 국내 풍화토에 대한 기본 물성과 함수특성곡선과의 상관성을 보다 효과적으로 규정하기 위하여 국내 풍화토에 대해 기존에 발표된 입도분포곡선의 범위를 참고하여 그림 6과 같이 시료의 입도분포와 간극비를 인위적으로 조성하여 실험을 수행하도록 하였다.

기존의 실험과정과 같이 초기에 포화과정을 거쳐서 건조와 흡윤과정을 통해 수행된 시료들은 포화과정 중에 부피가 증가하여 간극비가 크게 증가하는 경향을 볼 수 있었으나, 본 연구에서 실험 전에 포화시키는 과정을 없애고 바로 건조-흡윤과정을 반복하여 실험을 수행하고 부피변화를 보정한 경우에는 간극비 변화의 폭이 상대적으로 매우 작음을 알 수 있었다. 더불어 전자의 시료들이 함수특성곡선에서 그 이력현상(hysteresis)이 더 크게 나타나는 결과를 보였다. 이러한 현상은 포화 중에 간극의 크기가 크게 팽창하여 포화과정을 거치지 않은 시료들에 비해 보다 큰 간극이 많이 분포하게 되어 이력현상의 원인이 보다 많이 제공된 것으로 사료된다.

이상의 실험 결과를 분석하였을 때 함수특성곡선 모델은 흙의 몇가지 기본 물성과 관련성을 나타내고 있었다. 즉 흙의 입도분포에서 세립분이 많이 포함된 시료나 간극비가 작은 시료, 또는 흡윤측에서 다져진 시료들이 일반적으로 큰 a , n , m 값을 보였다.



(a) 국내 풍화토 입도분포곡선 범위
그림 6 국내 풍화토에 대한 입도분포곡선 범위와 본 연구에서 인위적으로 조성된 시료의 입도분포곡선



(b) 인위적으로 조성된 시료들의 입도분포곡선

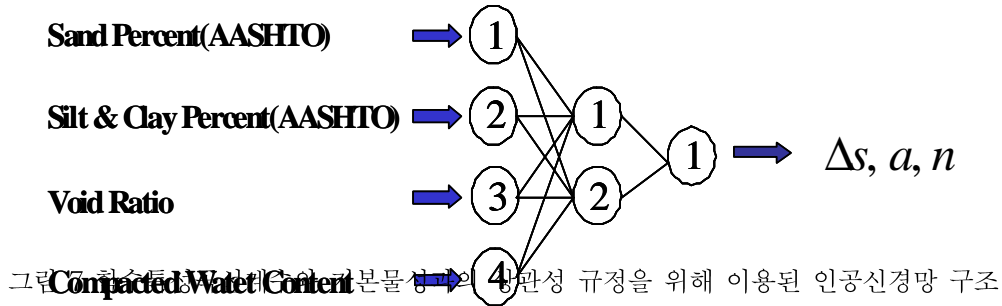
5. 함수특성곡선 추정

본 연구에서는 Fredlund & Xing의 함수특성곡선 모델을 기본으로 이용하였으나 부피변화 측정 결과를 적용하기 위해 계수 s 를 도입하여 다음 식과 같이 수정하여 이용하였다.

$$\theta = \frac{s}{\left[\ln \left(e + \left(\frac{\psi}{a} \right)^n \right) \right]^m} \quad (4)$$

따라서 함수특성곡선을 얻기 위해 필요한 계수는 s , a , n , m 으로 4개가 되었으나, 실험 결과 국내 풍화토에 대해서는 $m=1.7$ 로 고정하여 사용할 수 있는 것으로 판단되었으며, s 대신에 보다 효율적인 상관성 규정을 위하여 Δs (즉, 초기간극률과 포화 체적함수비와의 차, $n - \theta_s$)를 이용하도록 하여, 지반의 기본적인 물성으로 선택된 AASHTO

구분의 모래함유율(%), 실트와 점토의 함유율(%), 간극비, 다짐함수비와 수정된 Fredlund & Xing의 계수로서 Δs , a , n 과의 상관성을 인공신경망 기법을 이용하여 그림 7과 같이 규정하도록 하였다.



본 연구에서는 화강풍화토에 대한 실험을 수행하여 인공신경망 훈련자료로서 14개, 검증자료로서 6개의 자료를 활용할 수 있었다. 즉 14개의 함수특성곡선 실험 자료를 수정된 함수특성곡선 모델로 곡선맞춤하여 목표계수 즉, Δs , a , n 를 얻은 후, 인공신경망 구조의 훈련을 통해 입력자료로 이용된 4가지 기본 물성들과의 상관성을 인공신경망 내부의 가중값으로부터 얻을 수 있다. 이렇게 얻어진 가중값을 이용해서 나머지 검증 자료 6개의 시료에 대한 함수특성곡선을 추정할 결과 다른 흙의 실험결과를 바탕으로 제안되어진 기존의 몇몇 함수특성곡선 추정 방법들에 비해 신뢰할 수 있는 추정 결과를 제공하였다(그림 8).

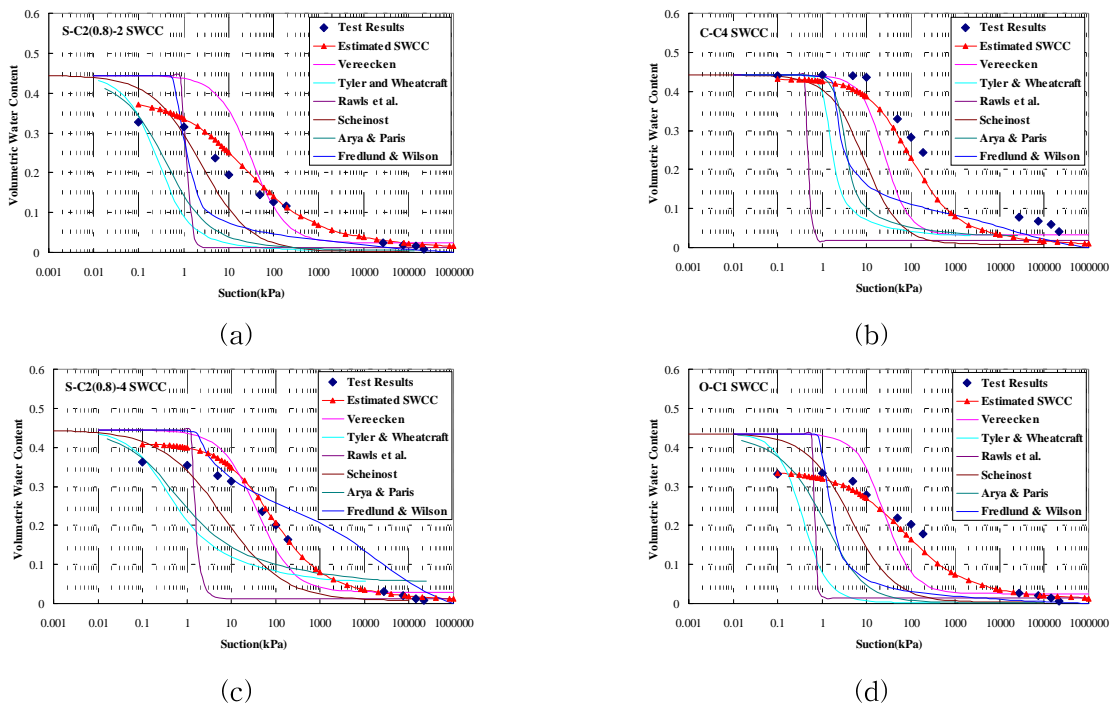
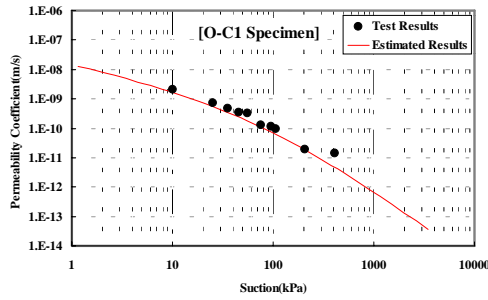


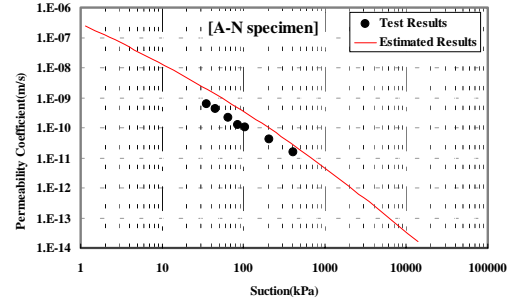
그림 8 추정된 함수특성곡선과 다른 예측 모델들의 예측 결과 비교

6. 불포화 투수계수 추정

위에서 추정된 함수특성곡선의 계수들을 이용하여 앞서 설명된 Fredlund 등의 투수계수 산정식으로 계산된 결과를 삼축셀을 이용한 불포화 투수계수 측정 실험 결과와 비교해 보았다. 그림 9에서 볼 수 있는 바와 같이 시료의 기본적인 물성만으로 추정된 함수특성곡선의 모델 계수를 이용하여 추정된 불포화 투수계수 함수가 비교적 신뢰성 있는 추정치를 보이는 것을 확인할 수 있었다.



(a) 다짐 시료(O-C1)



(b) 비교란 시료(A-N)

그림 9 예측된 불포화 투수계수함수와 실험결과의 비교

7. 결론

본 연구에서는 불포화 지반의 흐름 해석에 필요한 지반 물성인 불포화 투수계수 산정을 위하여 함수특성 곡선을 보다 간편하고 효율적으로 추정하는 방법을 제안하여 그 결과를 이용하고자 하였으며, 그 결과는 다음과 같이 요약할 수 있었다.

- 1) 기존의 함수특성곡선 실험 장비를 부피변화를 측정할 수 있도록 개조하여 구축하고 국내 풍화토를 대상으로 다양한 기본 물성의 조건들을 변화시켜가며 실험을 수행하였다.
- 2) 부피변화 보정과 초기침수과정 배제로 인하여 함수특성곡선에서 유발되던 이력현상이 감소하였다.
- 3) 풍화토를 대상으로 실험한 결과 얻어진 함수특성곡선 모델 계수와 기본 물성과의 상관성을 규정하여 기본 물성만으로 함수특성곡선을 추정하였고 이를 이용하여 불포화 투수계수를 산정할 수 있도록 하였다.
- 4) 함수특성곡선 추정 결과는 다른 예측 모델들의 결과에 비하여 신뢰성 있는 예측 결과를 보였다.
- 5) 예측된 함수특성곡선 계수 결과를 이용하여 산정된 불포화 투수계수 함수 또한 삼축셀을 이용한 불포화 투수계수 실험에서 얻어진 같은 시료에 대한 실험 결과를 비교적 신뢰성 있게 예측하고 있음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부가 선정한 스마트 사회기반시설연구센터(SISTeC, 생산기반분야/ERC)의 연구비 지원으로 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 이인모, 이형주, 김기섭, 김영욱(2000), "체적이 변하는 흙의 흙-수분 특성곡선식 개발 비교", 한국지반공학회논문집, 제16권, 제6호, pp. 15-21.
2. Fredlund, D. G. and Rahardjo, H.(1995), Soil Mechanics for Unsaturated Soils, John Wiley & Sons Inc.
3. 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, 31, pp. 533-546
4. Ng, C. W. W. and Pang, Y. W.(2000), "Experimental investigations of the soil-water characteristics of a volcanic soil", Canadian Geotechnical Journal, 37, pp. 1252-1264.
5. Ng, C. W. W. and Pang, Y. W.(2000), "Influence of stress state on soil-water characteristics and slope stability", ASCE. J. Geotechnical Engineering, 126, pp. 157-166.