

불포화토 겉보기 점착력이 지하굴착시 거동에 미치는 영향

이인모^{1*}, 정지희², 김경렬³, 김도훈⁴, 현기창⁵

Effect of apparent cohesion in unsaturated soils on the ground behavior during underground excavation

In-Mo Lee, Jee-Hee Jung, Kyung-Ryeol Kim, Do-Hoon Kim, Ki-Chang Hyun

Abstract Ground excavation is frequently executed in unsaturated soil conditions. In this paper, the effect of apparent cohesion in unsaturated soils on the ground behavior during underground excavation is studied. The VPPE (Volumetric Pressure Plate Extractor) test, the unsaturated triaxial test and the trap-door test were carried out to figure out how the behavior of soils varies depending on the variation of apparent cohesion. The test results show that the ground behavior is almost identical if the soil is either fully dry or fully saturated. However, if the soil is partially-saturated with the increase of water content, the ground behaves quite differently. In summary, the apparent cohesion in unsaturated soils plays key roles when excavating underground structures.

Keywords: Apparent cohesion, trap-door test, unsaturated soils, underground excavation

요지 대부분의 지하구조물들은 불포화 지반에 건설되어있는 경우가 많으므로, 본 논문에서는 불포화토의 겉보기 점착력이 지반 굴착시 거동에 미치는 영향에 관하여 연구하였다. 이를 위해 압력판 추출시험, 불포화 삼축압축시험, Trap-door 시험을 수행하여 다양한 범위의 겉보기 점착력에서 지반의 거동이 어떻게 변화하는지 관찰하였다. 그 결과 완전 포화와 완전 건조 상태일 때는 지반이 거의 같은 거동을 보이고, 불포화 상태일 때는 함수비의 증가에 따라 그 거동이 매우 달라짐을 알 수 있었다. 이를 통해 겉보기 점착력이 지하 구조물 굴착 시 매우 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있었다.

주요어: 겉보기점착력, Trap-door test, 불포화토, 지하구조물

1. 서론

일반적으로 지반은 완전 건조나 완전 포화 상태가 아닌 불포화 상태로 존재하기 마련이다. 그러나 학문적 연구나 지중에 구조물 설치를 위해 지반 특성을 고려한 설계를 할 시 불포화 상태를 적용하기 보다는 포화 상태로 간주하는 경우가 대부분이다. 그는 불포화 상태의 복잡한 특성상 포화 상태로 간주하는 것이 보다 간편하고 안전측이기 때문이다.

그러나 지반이 불포화 상태로 존재한다면, 완전 포화나 완전 건조 상태일 때와는 다르게 그 지반은 불포화토가 가지게 되는 흡인력에 의해 겉보기 점착력이 발현되어 전단강도 면에서 우위적인 면을 보이게 된다. 그렇기

때문에 이를 설계에 반영하지 않는다면 매우 보수적인 설계가 될 것이다.

하지만 앞에서 언급하였듯이 불포화토는 복잡한 특성을 가지기 때문에 이를 시험을 통해 직접적으로 증명하는 것은 매우 어렵다. 또한 겉보기 점착력은 중량 함수비에 따라 유발되는 흡인력이 매우 큰 변화를 보이기 때문에 시험을 통해 불포화토의 겉보기 점착력 특성을 규명하는 것은 매우 복잡하고 긴 시간이 소모되는 일이라고 할 수 있겠다. 이러한 이유에서 일반적인 지중 구조물의 설계나 연구 시 불포화토의 겉보기 점착력 증가 효과가 간과되고 있는 것이다.

이렇듯 복잡하고 시험을 통한 규명이 힘들다는 특성 때문에 불포화토를 이론적으로 정의 내리기 위해 많은 선행 연구가 이루어져 왔고, 그 중에서 특히 불포화토의 전단강도에 관한 연구는 수없이 이루어져 왔다.

최근에는 이 중에서 실제 불포화토의 전단 거동과도 매우 유사한 거동을 보이는 이론적인 model들이 제시되기도 했다(이성진, 2002; Lu, 2004). 그러나 이러한 model

¹정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 교수

²정회원, (주)삼보기술단 지반사업부

³정회원, 한국전력공사 전력연구원 선임연구원

⁴정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정

⁵고려대학교 건축·사회환경공학부 박사과정

*교신저자: 이인모 (E-mail: inmolee@korea.ac.kr)

들도 그 검증을 위해서는 시간 소모가 큰 불포화토 시험을 수행해야 하는 것은 마찬가지이다.

그래서 본 논문에서는 이러한 새로운 model들을 참고하여 불포화 삼축압축시험을 수행하여 불포화토의 겔보기 점착력을 구하고, 이를 조금 더 간편하고 시간 소모가 적은 수정된 Trap-door 시험에 적용하여 지반의 중량 함수비에 따른 겔보기 점착력 변화 특성을 검증하였다.

또한 수정된 Trap-door 시험 장비를 통해 이러한 중량 함수비에 따른 지반의 겔보기 점착력의 변화가 지중 구조물에 어떠한 영향을 미치는지를 확인 할 수 있도록 하였다.

2. 불포화토의 전단강도 예측모델

2.1 개요

불포화토의 전단강도의 가장 큰 특징은 흡인력이 증가함에 따라 전단강도의 크기가 비선형적으로 증가한다는 것이다. 이러한 비선형적인 특성 때문에 불포화토의 전단강도는 예측하는 것이 매우 복잡하고 어려운 것이 사실이다. 그러나 불포화 전단강도에 대한 선행 연구가 꾸준히 이루어져 왔고, 그 결과로부터 크게 두 가지의 불포화 전단강도 결정법이 제시되었다. 그 중 한 가지는 독립상태변수 접근법(Fredlund 등, 1977)으로 불포화 전단강도의 비선형성을 다음 식 (1)과 같이 겔보기 마찰각(ϕ)의 변화에 의존하여 구하도록 한 것이다.

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u_a) \tan \phi' + (u_a - u_w) \tan \phi^b \quad (1)$$

그러나 겔보기 마찰각 역시 비선형적으로 변하기 때문에 이 접근법의 예측 능력이 현장에서 관심 있는 흡인력의 범위에 제한된다는 한계성이 있다.

다음으로 유효응력 접근법(Bishop, 1959)은 유효응력으로 정의되는 하나의 응력상태변수를 사용하여 나타낸 것으로 다음 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\tau_f = c' + [(\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)] \tan \phi' \quad (2)$$

이러한 방법은 전응력, 간극수압, 공기압에 의해서 변

화하는 전단강도를 하나의 응력상태변수에 의해 연관시킴으로써 매우 한정된 불포화상태의 시험이 요구되어 실무에서 이를 적용하기가 간편하기는 하나, 유효응력 계수 χ 를 결정함에 있어 대부분의 연구가 포화도와의 관계를 규명하는데 초점을 맞추므로써 사실상 실무에서 이를 적용기 위해서는 흙의 함수특성을 시험을 통해 규명해야 하는 번거로움이 있다.

위에 제시된 불포화 전단강도 예측 모델 들은 불포화 전단강도의 비선형적인 특성을 잘 나타낼 수는 있으나, 식 자체에 불확실하거나 구하기 어려운 계수가 포함되어 있기 때문에 이를 실제로 시험 결과에 적용하는 것은 매우 까다로운 작업이 아닐 수 없다. 그래서 최근에는 보다 손쉽게 실제 시험 결과를 이용하여 불포화토의 전단강도를 예측할 수 있는 모델들이 제시되고 있다.

2.2 전단강도 예측모델의 발전

Lu(2004)는 앞서 발표된 Bishop(1959)의 유효응력 접근법을 변형하여 새로운 접근 방식을 제시하였는데, 그 방식의 기본적인 개념이 되는 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \tau &= c' + \chi(u_a - u_w) \tan \phi' + (\sigma - u_a) \tan \phi' \\ &= c' + c'' + (\sigma - u_a) \tan \phi' \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)의 c' 과 c'' 두 항은 각기 포화시의 점착력과 불포화시의 모관 점착력을 나타내는 것으로, 두 항을 더한 값은 일반적으로 겔보기 점착력(apparent cohesion)이라고 불린다. 겔보기 점착력의 첫 번째 항인 기본적인 점착력 c' 은 반데르발스 인력에 의한 분자간의 힘으로 이루어지고, 두 번째 항인 c'' 은 모세관 현상 효과로 인해 생기는 전단 저항 정수이다. 이 제안 식은 불포화토의 전단강도 증가 효과를 포화 파괴 포락선의 평행 이동만으로 간편하게 얻을 수 있도록 했다는데 의의가 있다.

다음은 이성진(2002)이 제안한 불포화 전단강도 예측 식인데, 이 식은 불포화토의 비선형적인 특성을 겔보기 점착력의 비선형성으로 표현했다고 볼 수 있다. 즉, 흡인력에 따른 겔보기 점착력의 비선형적인 증가를 쌍곡선 형태의 수식으로 가정하여 새로이 제안했다는데 특징이 있으며, 그 식은 다음 식 (4)와 같이 나타난다.

$$C_{A,max} = C_{max} + c'$$

$$C = c' + \frac{(u_a - u_w)}{a + b(u_a - u_w)} \quad (4)$$

$$a = \frac{1}{\tan \phi'}, \quad b = \frac{1}{C_{max}}$$

위의 식 (4)에서 볼 수 있는 바와 같이 임의의 조건을 가진 시료의 불포화 전단강도는 기존의 포화 전단 강도 정수인 c' 과 ϕ' , 그리고 최대 겉보기 점착력을 나타내는 경험적 계수인 C_{max} 를 이용하여 표현되어질 수 있다. 따라서 이성진(2002)은 불포화 전단강도의 증가분에 영향을 미치는 지반의 기본 물성들을 입력하여 최대 겉보기 점착력(C_{max})을 예상할 수 있는 인공신경망 모델을 제시하였는데, 그 결과 예측값이 시험값과 매우 비슷한 경향을 보였으므로 본 논문에서는 이성진(2002)의 제안식을 사용하여 시험 결과를 해석하였다.

3. 지하굴착시 Arching 현상과 이완토압

3.1 지반에서의 Arching 현상

지반의 저면 지지부의 일부가, 나머지 부분이 정지해 있는 가운데 침하 한다면 침하부분 근처의 흙은 부근의 정지해있는 지반 사이에서 그 원위치로부터 움직인다. 이 지반 내의 상대운동은 움직이는 부분과 정지한 지반 사이의 접촉 지역에서의 전단저항에 의해 저항되어 진다. 이 전단저항이 움직이는 부분을 원 위치에 그대로 유지시키려 하기 때문에 저면 지지부 중 침하하는 부분에 작용하는 압력을 감소시키고 또한 인접한 정지 지반에 작용하는 압력을 증가시킨다. 이처럼 침하하는 부분의 토압이 주변의 정지하고 있는 지반으로 전이되는 현상을 일반적으로 arching 효과라고 하고, 그 종류에는 convex arch와 inverted arch현상이 있다.

Convex arch는 예를 들어서 지중에 터널을 굴착한다면 터널 상부에서의 하중이 접선방향으로 돌아가는 아치이다. 당연히 아치의 모양은 위로 볼록한 형태이며, 접선방향의 응력이 최대 주응력이 될 것이다. Inverted arch는 터널상부의 변위가 과다하면 터널 상부의 지반이 아래로 침하하게 되어 상대적으로 침하가 적은 지반

에서 전단력으로 하중을 어느 정도 경감시켜주는 아치 현상으로서 이 경우는 중심부가 더 많이 침하하므로 아래로 볼록한 아치 모양이 될 것이다.

3.2 Arching 현상에 영향을 미치는 이완토압식

Arching 현상 중 inverted arch의 경우는 arching 현상으로 인해 전체적인 침하량이 줄어들게 되기는 하지만, 완벽하게 침하를 막을 수는 없다. 그렇기 때문에 지반 침하로 인한 이완토압이 작용하게 된다. 이때 이완토압은 앞서 말한 것과 같이 inverted arch에 의해 침하하는 지반의 연직토압 중 일부만이 작용되는 것으로, 이 값을 산정하기 위한 이론식들이 꾸준히 제시되어 왔다. 그 중 본 논문에서는 Terzaghi(1943)의 식을 사용하여 이완토압을 산정하였다.

Terzaghi(1943)는 그림 1에서와 같이 터널 천정 상부의 폭 2B 부분이 이완토압으로 터널에 작용된다고 가정하였다. 만일 CDEF 부분의 침하량이 주변보다 크다고 가정하면 CD, EF 면에는 그림에서와 같이 상방향의 전단응력이 작용 될 것이다. 그림 1에서의 연직방향 평형 조건을 고려하면 다음 식 (5)와 같다.

$$\sigma_v \cdot (2B) + \gamma \cdot (2B) \cdot dz = \left(\sigma_v + \frac{\partial \sigma_v}{\partial z} dz \right) (2B) + 2\tau dz \quad (5)$$

단, 전단응력 τ 는

$$\tau = c + \sigma_h \tan \phi = c + K \sigma_v \tan \phi \quad (6)$$

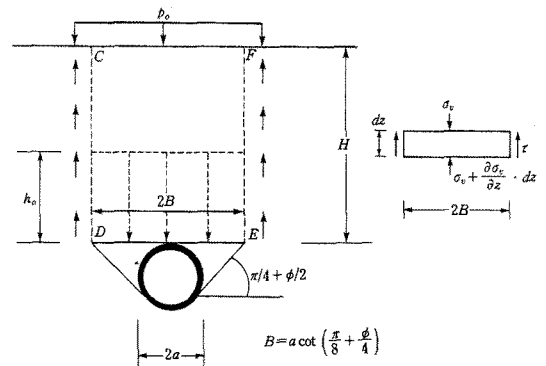


그림 1. Terzaghi의 이완토압.

여기서, K는 수평토압계수로 대부분의 경우 'K=1'로 가정한다. 식 (5)를 적분하여 정리하면 z=H에서의 연직 방향토압 α_v , 즉 P_k 는 다음 식 (7)과 같이 된다.

$$p_{fc} = \sigma_v(z=H) = \gamma h_0 \quad (7)$$

$$h_0 = B \left\{ 1 - \frac{c}{B\gamma} \right\} \left\{ 1 - \exp\left(\frac{-K \tan \phi \cdot H}{B}\right) \right\} / \left\{ K \tan \phi + \frac{P_0}{\gamma} \exp\left(\frac{-K \tan \phi \cdot H}{B}\right) \right\} \quad (8)$$

여기서, ' $h_0 \geq 4a$ '이어야 하고,

$$B = a \cot\left(\frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4}\right); K \approx 1$$

P_0 =지표면에 작용되는 상재하중

4. 실내 시험

4.1 개요

본 논문에서는 총 두 가지의 시료인 화강 풍화토와 주문진 여과사를 사용하여 압력판 추출시험, 불포화 삼축 압축시험, Trap-door 시험을 실시하였다. 화강 풍화토는 국내에서 가장 흔히 볼 수 있는 흙으로 현장에서 가장 많이 사용 되므로 그 대표성이 있으며, 주문진 여과사 역시 모래 종류의 흙을 대표하는 성질을 가지므로 그 시험 결과를 일반적으로 적용할 수 있다는 장점을 가진다. 사용된 두 시료의 기본 물성은 표 1, 2와 같다.

표 1. 화강 풍화토의 기본 물성치

Compaction		Atterberg limit		#200 (%)	간극비 e	비중 Gs	USCS
yd(max)(kN/m ³)	O.M.C(%)	Liquid limit	Plastic limit				
18.86	9.5	NP		24.99	0.451	2.64	SC

표 2. 주문진 여과사의 기본 물성치

D ₁₀ (mm)	0.46	비중, Gs	2.626
D ₁₅ (mm)	0.48	USCS	SP
D ₃₀ (mm)	0.55	e _{min}	0.579
D ₆₀ (mm)	0.75	e _{max}	0.851
균등계수, Cu	1.630	곡률계수, C _c	0.877

4.2 압력판 추출 시험

화강 풍화토는 최대건조단위중량의 95%의 다짐도로 시료를 성형하였고, 시료의 교란을 최소로 줄이기 위해 정다짐 하였다. 주문진 여과사의 경우는 강사법을 이용하여 다짐 하였는데, 이때의 단위중량은 16.28 kN/m³이었고, 상대 밀도는 약 98.9%로 나타났다. 시료를 다짐한 후에는 포화 상태를 모사하기 위해 성형 틀의 다공질 판에 증류수를 충분히 채워주어야 한다. 시료 성형 후에는 수압을 대기압으로 하고, 공기압을 가하여 원하는 흡인력을 유지하며 시료가 평형 상태에 도달할 때까지 시험을 계속한다. 본 논문에서는 공기압이 10, 30, 50, 100, 200, 400, 800 kPa이 되도록 하여 실험하였다. 이때, 가해진 공기압이 유지되기 위해서는 특별한 다공판을 사용하게 되는데, 바로 HAED(high air entry disk)이다. 이 다공판은 물은 통과 시키지만, 공기의 경우는 그 다공판이 가지는 한계 압력 전까지는 통과 시키지 않는 성질을 가지므로 시료 내에 원하는 공기압을 유지할 수 있도록 해준다. 이 다공판은 시험 시작 전에 충분히 포화되어 있어야 하며, 가하고자 하는 공기압에 맞는 용량의 다공판을 사용하여야 정확한 결과를 얻을 수 있다.

시료가 평형 상태에 도달하기 위해서는 적어도 24시간 이상의 시간이 필요한데, 흡인력이 작은 범위 일수록 그 시간이 더 오래 걸리게 된다. 평형 상태는 압력판의 배수관에서 더 이상 물이 흘러나오지 않는 시점을 기준으로 하고, 평형 상태에 도달 한 후에는 공기압을 제거하고 시료를 추출하여 중량 함수비를 측정하도록 한다.

4.3 불포화 삼축압축시험

불포화 삼축압축시험의 가장 큰 특징은 셀 자체에 HAED(high air entry disk)가 내장되어 있다는 것이다. 그것은 불포화토의 특성상 가지고 있는 간극 수압과 간극 공기압의 차이를 압력판 추출시험과 같은 원리로 적용하여 모사하기 위함이다. 그러나 압력판 추출시험과 달리 삼축시험의 경우에는 흡인력 모사 후 전단 과정을 거치기 때문에 조금 더 정교한 장비가 필요하게 된다. 이를 위하여 포화 삼축압축시험 장비를 수정하여 사용하게 되는데 그 모식도는 그림 2와 같다.

시료의 크기는 직경 5 cm, 높이 10 cm로 압력판 추출시험과 같은 조건으로 조성하고, 멤브레인을 이용하여 자립시킨다. 그 후 시료를 감싸고 있는 멤브레인과 캡 사이를 고무링으로 삼중 처리하여 시료로부터 셀로의 공기 확산을 막게 되는데, 불포화토의 경우는 일반 삼축압축시험보다 그 기간이 매우 오래 걸리므로 보통 많이 쓰는 이중 O-ring을 대신하여 삼중으로 처리하였다. 시료의 성형이 모두 끝난 후에는 포화를 진행하는데, 본 논문에서는 그림 3과 같이 새로운 방식을 도입하여 시료를 3차 포화시켜 100% 포화도를 만든 후에 삼축압축시험을 수행하였다. 포화가 완료된 시료는 순구속압을 50,

100, 200 kPa로 증가시켜가며 포화 삼축압축 시험을 먼저 진행하고, 순구속압을 100 kPa로 유지하면서 흡인력을 50, 100, 200 kPa로 변화시켜 가며 불포화 삼축압축 시험을 진행하였다. 이때 불포화 삼축압축시험은 CD Test로 수행하였으며, 변형률 속도는 0.00102 mm/min으로 채택하였다.

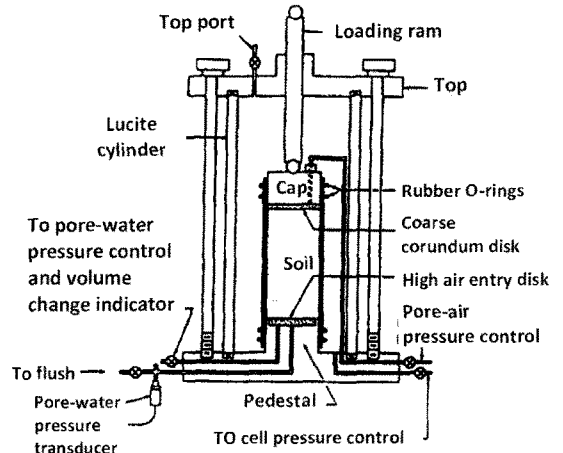


그림 2. 수정된 삼축셀 모식도.

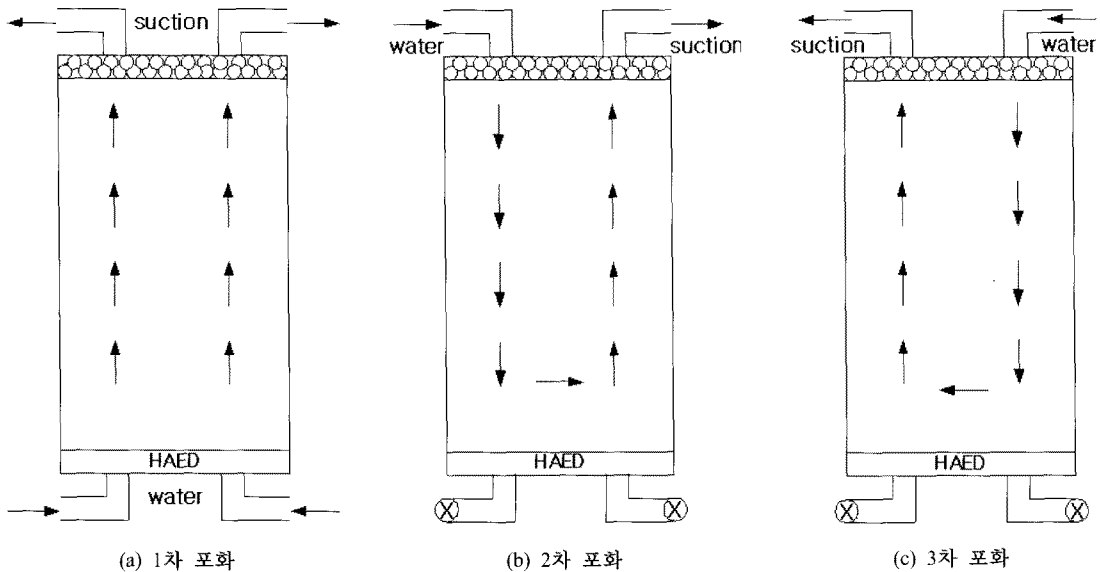


그림 3. 수정된 불포화 삼축압축시험의 포화 방식.

4.4 Trap-door 시험

일반적인 지중 구조물의 토압 문제와 연관된 물리적 모형 시험 중 흔히 이용되는 시험 중 하나가 바로 Trap-door 시험이다. 이는 지반 내 부분 침하 현상을 가장 직접적으로 모형화 할 수 있는 시험으로써, 모형 토조의 바닥 부분에 설치된 Trap-door를 위(passive mode)·아래(active mode)로 움직여가면서 판에 작용하는 압력을 계측해 나가는 방법을 기본으로 하며, 주로 완전 건조토나 알루미늄 봉을 이용하여 시행되어 왔다. 하지만 본 논문에서 Trap-door 시험의 목적은 함수비별 겉보기 점착력을 얻어, 이 겉보기 점착력이 지하구조물 거동에 어떠한 영향을 미치는지를 확인하는데 있다. 그러므로 기존의 Trap-door 장비를 수정하여 목적에 부합하는 결과를 얻을 수 있도록 하였다. 특히 완전 포화 상태의 점착력과 흡인력이 존재하는 함수비대의 점착력 비교를 위하여, 완전 포화 상태의 시료를 조성하여 시험을 할 수 있도록 하는 것에 초점을 두어 그림 4와 같이 시험 장비를 변형시켰다.

모형 토조의 크기는 45×15×37cm로 5 cm마다 눈금을 표시하여 한 층으로 보고 시료를 조성하였다. 시료는 총 3개의 층으로 나뉘 성형하였으며, 함수비를 맞춘 시료를 다짐하여 넣는 방식으로 진행하였다. 시료를 성형 한 후에는 Trap-door를 5 mm씩 하강하고 5분간의 안정화 시간을 두어 마찰력을 줄여가며 로드셀과 변위계로 토압과 지중 침하의 변화량을 측정하였다. 완전 포화 상태의 지반은 노건조 시료로 지반을 조성 한 후, 볼탱크를 통

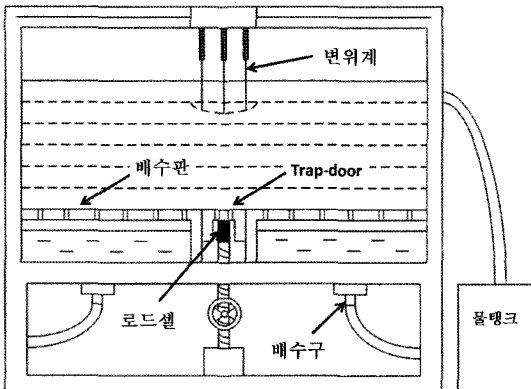


그림 4. 수정된 Trap-door 시험 장비 모식도

해 천천히 물을 주입하고 배출되는 물의 양을 측정하여 완전 포화를 결정 한 후 같은 방법으로 진행하였다. 화강풍화토는 각각 0, 2, 4, 8%의 함수비와 완전 포화 상태를, 주문진 여과사는 0, 1, 2%의 함수비와 완전 포화 상태를 각각 시험하였다.

5. 시험 결과

5.1 흙-수분 특성곡선

일반적으로 흙-수분 특성곡선은 방대한 흡인력 범위에 대한 체적 함수비를 나타나게 되는데, 시험을 통하여 이 모든 값을 구하는 것은 매우 어렵다고 볼 수 있겠다. 또한 흙-수분 특성곡선은 흡인력의 범위에 대해서 S자 형태의 곡선을 띄고 있으므로 그 값을 예상하기도 매우 까다로울 수밖에 없다. SoilVision(SoilVision Systems Ltd., 2000)은 이러한 문제점을 해결하기 위해 간단한 해석 시 사용 할 수 있는 프로그램으로, 경험적으로 얻어진 5000개 이상의 데이터들을 바탕으로 하여 시험 값을 기본으로 이론에 맞도록 fitting해 준다는 장점이 있다.

본 논문에서는 각각의 시료에 대하여 7 단계의 흡인력에서의 압력판 추출 시험을 시행하였는데, 그 결과를 SoilVision을 이용하여 Fredlund와 Xing의 이론으로 해석하여 흙-수분 특성곡선을 얻었다. 각 시료에 대한 흙-수분 특성곡선은 그림 5, 6과 같은데, 상대적으로 입자의 크기가 일정한 주문진 여과사의 경우 특정 흡인력 이후 함수비가 급격하게 감소하는 것을 알 수 있다.

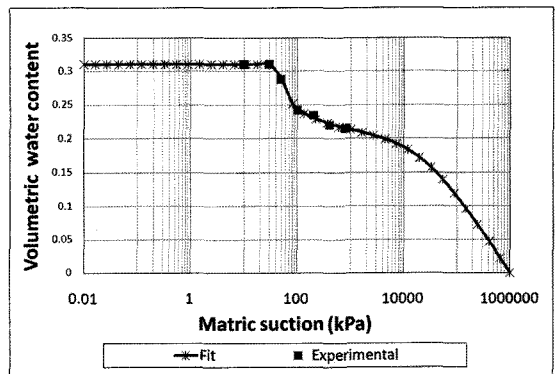


그림 5. 화강 풍화토의 흙-수분 특성곡선

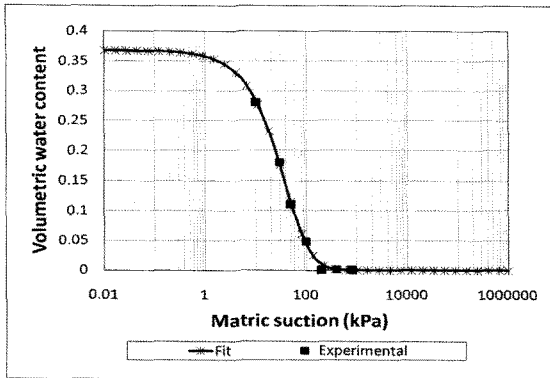


그림 6. 주문진 여과사의 흡수분 특성곡선

5.2 불포화토의 전단강도 정수

본 논문에서 사용하고자 하는 불포화토의 전단강도 예측식은 기본적으로 완전 포화 시의 전단 강도 정수인 c' 과 ϕ' 을 필요로 한다. 그러므로 흡인력이 0 kPa인 완전 포화 상태의 시료를 이용하여, 각기 순수속압($\sigma_3 - u_a$)이 50, 100, 150 kPa이 되도록 하여 총 3번의 시험을 수행하였고, 그 결과는 표 3과 같다.

이를 토대로 불포화 전단강도 정수를 구한 결과가 그림 7과 8에 나타나 있는데, 이것은 앞에서 가정한대로 본 논문에서는 이성진(2002)과 Lu(2004)가 제안한 것처럼 불포화 전단 강도 정수 중 파괴시의 내부 마찰각(ϕ')은 흡인력이 변화하여도 일정하다고 간주하였기 때

표 3. 완전 포화시의 삼축압축 시험결과

시료 종류	건조 단위중량 (kN/m ³)	순수속압 (kPa)	파괴식 전단응력 (kPa)	파괴시 내부 마찰각 (°)	파괴시 점착력 (kPa)
화강 풍화토	17.854	50	103.986	42.27	0.5685
	17.854	100	205.520		
	17.854	150	309.506		
주문진 여과사	16.285	50	89.973	40	0
	16.285	100	179.946		
	16.285	150	269.918		

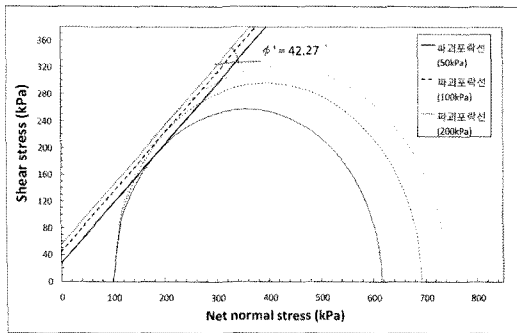


그림 7. 다양한 흡인력에 대한 화강 풍화토의 파괴 포락선.

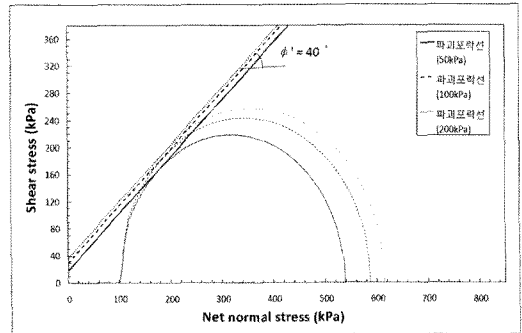


그림 8. 다양한 흡인력에 대한 주문진 여과사의 파괴 포락선.

표 4. 불포화 삼축압축시험 결과

시료 종류	흡인력 (kPa)	순수속압 (kPa)	파괴식 전단응력 (kPa)	파괴시 내부 마찰각 (°)	파괴시 점착력 (kPa)
화강 풍화토	50	100	257.580	42.27	26.16
	100	100	296.262		43.49
	200	100	320.787		54.47
주문진 여과사	50	100	219.068	40	18.24
	100	100	243.896		29.82
	200	100	257.5125		36.17

문에 가능한 것이다. 표 4는 이들 결과를 정리하여 나타낸 것이다.

5.3 Trap-door 시험 결과

Trap-door 시험에서는 일반적으로 Trap-door가 하강할 때 측정되는 Trap-door 판의 압력과 지표면의 변위를 측정하게 된다. 지반의 중량 함수비별 시험 결과의 차이점은 최종 하강 단계에서의 지반 형상을 보면 쉽게 찾을 수 있는데, 중량 함수비가 증가할수록 Trap-door 판으로 떨어져 내리는 흙의 양이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 그러나 지반이 완전 포화 상태에 이르면 모형 지반은 완전 건조시의 지반과 거의 같은 거동을 보임을 알 수 있다. 이러한 결과는 그림 9~11을 통해서 잘 관찰 할 수 있다.

그림 12와 13과 같이 각 중량 함수비별로 침하비와 압력비 사이의 관계 그래프를 비교해 보면, 건조와 포화 시에는 판에 작용되는 압력이 점점 감소하다가 변위가 커지면 압력이 증가하는 형상을 띄지만, 그 외의 중량

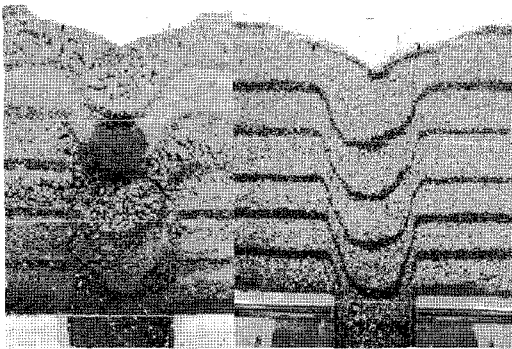


그림 9. 완전 건조시의 최종 하강 단계.



그림 10. 중량 함수비 2%의 최종 하강 단계.

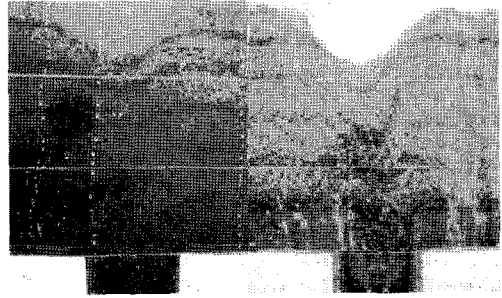


그림 11. 완전 포화시의 최종 하강 단계.

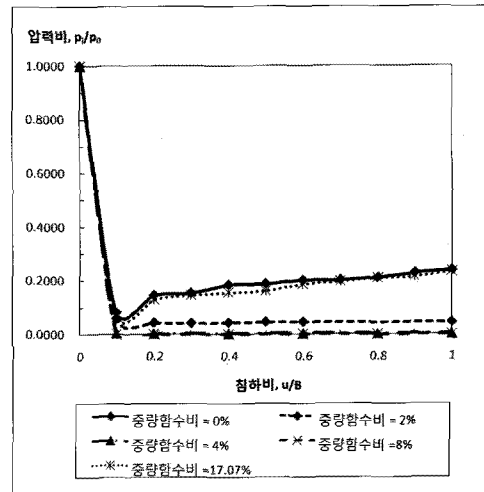


그림 12. 화강 풍화토의 중량 함수비별 침하비와 압력비 사이의 관계.

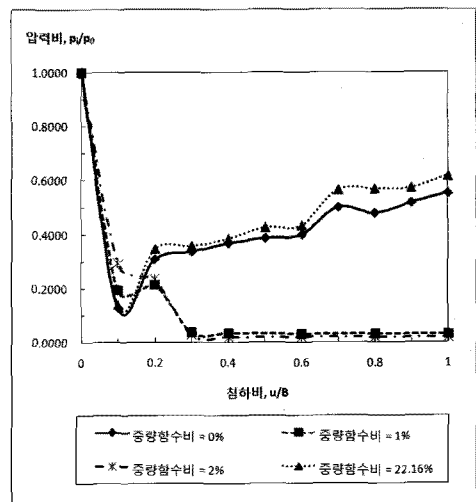


그림 13. 주문진사의 중량 함수비별 침하비와 압력비 사이의 관계.

함수비에서는 변위가 커질수록 압력비도 점점 감소하는 것으로 나타났다. 이는 완전 건조상태의 지반에 아주 적은 양의 중량 함수비가 더해지더라도 지반 내에 겔보기 점착력이 증가하여 변위가 증가하여도 흙 입자간의 당김 현상이 발생하여 지반이 붕괴에 이르는 것을 막아주기 때문인 것으로 생각된다. 또한 이것은 반대로 완전 포화 상태에서 중량 함수비가 적어질수록 겔보기 점착력이 증가한다는 것을 말해주기도 한다. 이러한 특징은 화강 풍화토와 주문진 여과사 모두에서 비슷하게 관찰되지만, 완전 건조와 포화 시 최종적으로 수렴하는 압력비의 값이 화강 풍화토는 약 24%, 주문진 여과사는 약 55%로 약간의 차이를 보임을 알 수 있다.

6. 이론과 시험 결과의 비교 및 분석

6.1 겔보기 점착력의 추정

불포화 삼축압축시험결과를 이성진(2002)이 제안한 인경신경망 모델 예측값과 비교해 보면 그림 14, 15와

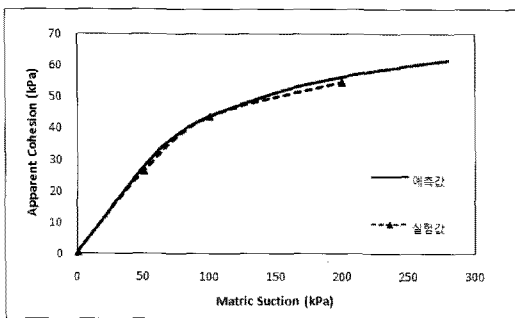


그림 14. 화강 풍화토의 겔보기 점착력 예측값과 시험값의 비교.

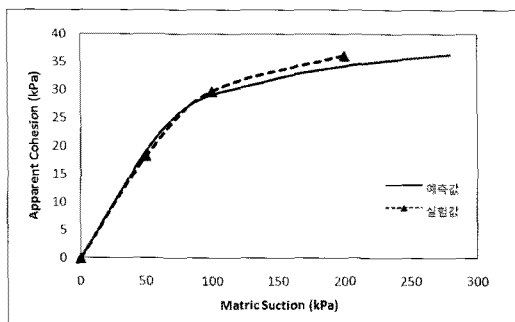


그림 15. 주문진 여과사의 겔보기 점착력 예측값과 시험값의 비교.

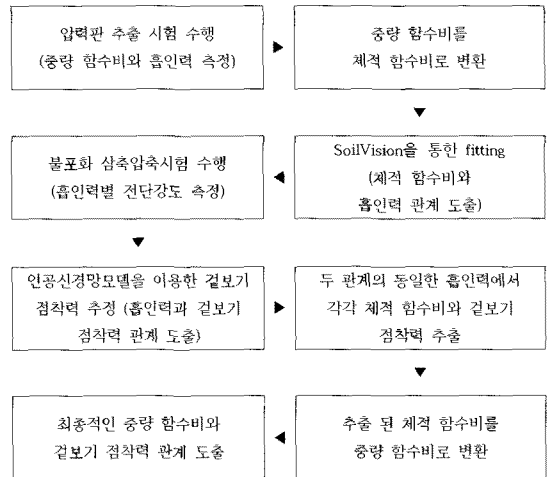


그림 16. 중량 함수비와 겔보기 점착력 관계 도출 순서.

같이 그 값이 매우 비슷함을 알 수 있다. 그러나 실제로 좀 더 손쉽게 지반에서의 겔보기 점착력 발현 정도를 비교하기 위해서는 겔보기 점착력을 흡인력과 비교하는 것보다 중량 함수비와 비교하는 것이 좋다. 그러므로 본 논문에서는 압력판 추출시험과 불포화 삼축압축시험 결과 값으로부터 최종적으로 중량 함수비와 겔보기 점착력의 관계를 비교할 수 있도록 하였다. 그 순서는 그림 16과 같다.

6.2 겔보기 점착력에 의한 Arching 현상

Terzaghi 이완토압 이론식을 이용하면 Trap-door 시험을 통해서도 지반의 점착력을 예상할 수 있다. 단, Terzaghi 이완토압 이론의 가장 기본이 되는 가정 사항인, 이완영역이 존재할 때만 이 식을 적용할 수 있다. 즉, 시험 결과 중 이완영역이 존재하여 inverted arch의 현상을 보인 완전 건조토와 완전 포화토에 관해서만 이 식을 적용하였다. Trap-door 시험의 측정값을 이론식에 적용하기 위한 방법은 다음과 같다.

먼저 제안된 식과 같이 B의 값을 식을 이용하여 구하지 않고, Trap-door 시험 결과로부터 얻어진 이완 영역의 폭을 사용한다. 그런 후 B값을 이용하여, 최종적으로 침하비가 1일 때 Trap-door 판에 가해지는 압력(P_1)으로부터 h_0 를 구한다. 그리고 마지막으로 침하비가 0일 때 (초기 토압)의 압력을 P_0 로 놓고, 식 (8)에 넣어 c' 값을 구하면 된다. 이때 σ' 은 포화 삼축압축시험으로부터 구

한 값을 적용하였고, 완전 건조와 완전 포화시 일정하다고 가정하였으며, K값은 1로 적용하였다. 표 5는 Trap-door 시험 결과로 구한 각 시료의 함수비별 겔보기 점착력의 값이 나타나 있으며, 그림 17과 18에는 Trap-door

표 5. Trap-door 결과를 이용한 중량 함수비별 겔보기 점착력

시료 종류	중량함수비(%)	h ₀ (cm)	c'(kPa)
화강 풍화토	0(건조)	2.80	0.422
	2	-	예측 불가
	4	-	예측 불가
	8	-	예측 불가
	17.07(포화)	2.13	0.591
주문진 여과사	0(건조)	6.04	0
	1	-	예측 불가
	2	-	예측 불가
	22.16(포화)	5.16	0.045

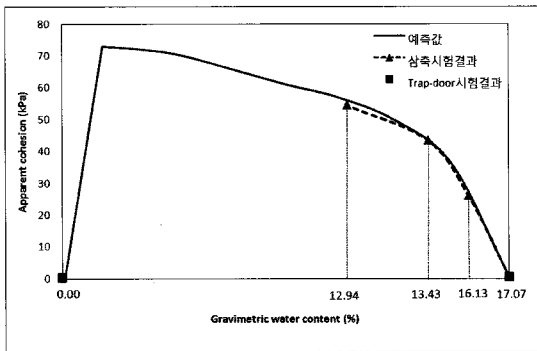


그림 17. 화강 풍화토의 시험 종류에 따른 중량 함수비별 겔보기 점착력 관계.

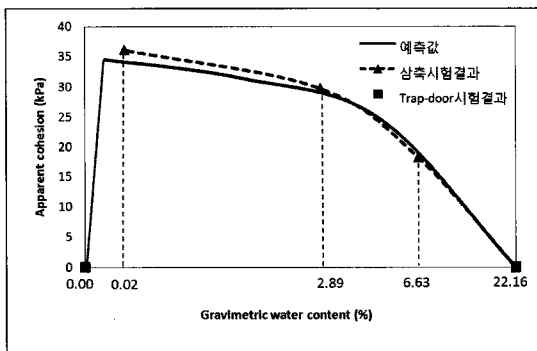


그림 18. 주문진 여과사의 시험 종류에 따른 중량 함수비별 겔보기 점착력 관계.

결과와 6.1절 방법을 이용한 시료 별 중량 함수비와 겔보기 점착력의 관계를 비교하여 나타내었다. 이 그래프들을 보면 겔보기 점착력은 완전 포화 상태에서 중량 함수비가 작아질수록 급격히 증가하는 것을 알 수 있으며, 그 증가 값이 최대 겔보기 점착력에 다다른 후에는 완전 건조 상태에 이를수록 겔보기 점착력이 급격하게 감소함을 알 수 있다.

7. 결론

본 논문은 불포화 지반의 중량 함수비와 겔보기 점착력의 관계를 규명하여 이것이 지반의 굴착단계에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보았다. 그 내용을 정리하면 다음과 같다.

1. 압력판 추출 시험을 통한 흡수분 특성곡선에서 체적 함수비와 흡인력의 관계를 얻었고, 불포화 삼축압축 시험을 통해 흡인력과 겔보기 점착력의 관계를 얻을 수 있었다. 또한 이 두 시험 결과를 통해 결과적으로 중량 함수비와 겔보기 점착력 사이의 관계를 나타낼 수 있었다.
2. 기존에 발표된 인공신경망 모델로부터 흡인력에 따른 겔보기 점착력을 예상할 수 있었고 이를 불포화 삼축 압축시험으로 검증한 결과 이 모델은 불포화토 겔보기 점착력의 비선형적 증가 특성을 잘 모사하고 있는 것으로 나타났다.
3. 기존의 Trap-door 장비를 수정하여 포화 지반의 상태를 모사한 후 시험을 수행한 결과, 수정된 Trap-door 장비는 포화 지반의 거동을 매우 잘 나타냈으며, 이 결과로부터 완전 포화 지반과 완전 건조 지반은 지반 침하 시 거의 같은 거동을 보인다는 것을 증명하였다.
4. 중량 함수비별로 Trap-door 시험을 수행한 결과, 지반은 아주 적은 중량 함수비의 증가만으로도 convex arch의 형상을 띄었으며, 이는 적은 중량 함수비의 증가로 겔보기 점착력의 증가가 일어나면 이것이 지하 구조물의 거동에 매우 큰 영향을 미친다는 것을 보여준다.
5. Trap-door 시험 장비로 완전 건조와 완전 포화 상태의 지반을 시험한 결과, 이들은 inverted arch 형상을 띄며 무너져 내렸고, 나머지 중량 함수비대의 지반들

은 convex arch 형상을 띄며 지중 침하를 일으키지 않았다. 이것으로 보아 지하에 구조물을 설치하기 위한 굴착을 진행할 때 지반이 불포화 상태로 존재한다면 이 지반이 소성영역에 다다르더라도 convex arch 형상을 이루므로 원지반보다 큰 안정성을 가질 것으로 예상된다. 하지만 갑작스러운 집중하중으로 인해 영향을 받을 수 있는 얇은 지반의 굴착이나, 지나친 지하수의 유입이 의심되는 곳의 경우에는 지반이 포화되어 무너져 내릴 수 있으므로 유의하여야 한다.

감사의 글

본 연구는 한국전력공사 전력연구원의 지원으로 이루어진 연구로서 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 성상규, 이인모 (2003), “화강풍화잔적토의 불포화전단강도에 미치는 순연직응력의 영향”, 한국지반공학회논문집, 제19권, 제2호, pp. 27-38.
2. 이성진, 이승래, 장범수 (2002), “인공신경망 모델을 이용한 불포화토 겔보기 점착력 추정에 관한 연구”, 대한토목학회논문집, 제22권, 제3-C호, pp. 331-344
3. 이성진, 이승래, 장범수 (2002), “화강풍화토의 불포화전단강도 특성에 관한 연구”, 대한토목학회논문집, 제22권, 제1-C호, pp. 81-88.
4. 이인모 (2004), 터널의 지반공학적 원리, 새론 출판사.
5. 이인모, 성상규, 양일순 (2000), “풍화잔적토의 불포화전단강도 예측 및 특성연구”, 한국지반공학회 2000 가을 학술발표회 논문집, pp. 377-384.
6. 이인모, 이형주, 김기섭, 김영욱 (2000), “체적이 변하는 흙의 흙-수분 특성곡선식 개발 비교”, 한국지반공학회 논문집, 제16권, 제6호, pp. 15-21.
7. Fredlund, D. G. and Morgenstern, N. R. (1977), “Stress state variables for unsaturated soils”, Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 103(GT5), pp. 447-466.
8. Lu, N. and Likos, W. J. (2004), Unsaturated Soil Mechanics, John Wiley and Sons, Inc., pp. 173-266.
9. SoilVision Systems Ltd. (2000), “Soilvision”, New York.
10. Sung, S. K. (2003), A New Prediction Model of Unsaturated Residual Soil Behaviors, Ph. D. dissertation, Department of Civil Engineering, Korea University.
11. Terzaghi, K. (1936), “Stress Distribution in Dry and in Saturated Sand above a Yielding Trap-door”, Proc. 1st Int. Conf. SoilMech. Found. Engng., Cambridge, Vol. 1, pp. 307-311.
12. Terzaghi, K. (1943), Theoretical Soil Mechanics, John Wiley and Sons, Inc., New York., pp. 66-76.

접수일(2009.12.16), 수정일(2009.12.31), 게재확정일(2010.1.6)