

습윤 모래에서 인장강도의 예측 (I) : 이론

Prediction of Tensile Strength of Wet Sand (I) : Theory

김 태 형¹ Kim, Tae-Hyung

Abstract

At low normal stress levels tensile strength of sand varies with either saturation or suction of soil in an up-and-down manner with a peak tensile strength that can occur at any degree of saturation. A theory that accurately predicts tensile strength of wet sand is presented. A closed form expression for tensile strength unifies tensile strength characteristics in all three water retention regimes: pendular, funicular, and capillary. Three parameters are employed in the theory; namely, the internal friction angle (at low normal stress) ϕ_i , the inverse value of the air-entry pressure α , and the pore size spectrum parameter n . It is shown that the magnitude of peak tensile strength is dominantly controlled by the α parameter. The saturation at which peak tensile strength occurs only depends on the pore size spectrum parameter n .

요 지

낮은 응력 단계에서 모래의 인장강도는 포화도 또는 흡입력에 따라 증가하다 최대값에 도달한 후 감소한다. 최대인장강도는 어느 포화도에서든 발생될 수 있다. 본 연구에서는 이러한 습윤 모래의 인장강도를 정확히 예측할 수 있는 이론이 제시되었다. 이 이론은 달린 형태의 식으로 pendular, funicular, capillary 세 가지로 구분되는 함수특성곡선 전체 영역을 하나로 통일하여 표현하였다. 낮은 응력 단계에서 내부마찰각 ϕ_i , 공기침투압(air entry pressure)의 역수 값 α , 간극크기범위변수(pore size spectrum parameter) n 등 세 가지 변수가 이론에 사용되었다. 공기침투압 역수 값이 최대인장강도를 지배하는 주 요인으로 작용하고, 최대인장강도가 발생될 때 포화도는 오직 간극크기범위변수에만 의존한다.

Keywords : Saturation, Suction, Tensile strength, Water retention regime, Wet sand

1. 서 론

흙의 인장강도는 포화도와 종류에 따라 그 크기가 수십에서 수백 kPa에 이르기 때문에 많은 지반공사의 안정성과 성능에 중요한 영향을 미칠 수 있다. 그러나 많은 지반공학자는 인장강도가 압축강도와 비교하면 상대적으로 그 값이 작고, 적합한 인장력 측정법의 결여로 인한 신뢰할 수 있는 데이터의 부족과 이로 인한 인장강도 예측 이론의 부재 등으로 흙의 인장강도는 영에 가깝다고 생각하거나 무시되고 있다. 하지만 흙의 인장

에 관한 이전의 연구들을 살펴보면 인장강도의 중요성을 충분히 알 수 있다(Leonards and Narain, 1963; Spencer, 1968; Suklje, 1969; Fang and Fernandez, 1981; Allen, 2001). 도로포장, 흙 댐, 제방에서의 균열파괴, 피압수로 인한 굴착면 저면 점성토층에서의 인장균열, 낮은 압축응력 상태에서 옹벽 배면 또는 언덕의 정점에서 인장균열, 매립지 차단시스템에서의 인장 균열 등이 대표적인 사례이다.

최근에 지반공학 및 지반환경공학 분야에서 흙의 인장강도에 대한 새로운 이론적 실험적 연구가 활발히 진

¹ 정회원, 한국해양대학교 건설환경공학부 조교수 (Member, Assistant Prof., Division of Civil and Environmental Engrg., Korea Maritime Univ., kth67399@hhu.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

행이 되고 있다(Kim, 2001; Kim and Hwang, 2003; Lu et al., 2005; Lu et al., 2007, Kim et al., 2007). 이론 측면에서 살펴보면 지금까지 제안된 흡을 포함한 습윤조립재에 대한 인장강도를 예측하는 이론들은 불포화 영역에 일부에 대해서만 적용이 가능하다. 불포화 영역은 크게 세 부분으로 나눌 수 있는데 *pendular*, *funicular*, *capillary* 영역이다. 각각의 영역은 공기침투압과 잔류포화도를 사용하여 구분된다. 공기침투압은 포화된 흡에 흡입력이 작용하여 공기가 간극속에 침투하는 시점의 흡입력(공기침투압)이며, 잔류포화도는 매우 큰 흡입력이 작용해도 흙덩어리로부터 더 이상의 물을 제거할 수 없는 상태의 포화도를 나타낸다. 흡이 포화상태로부터 공기침투압이 발생하는 시점까지가 *capillary* 영역이고, 공기침투가 발생한 시점부터 잔류포화도 발생 시점까지가 *funicular* 영역이고, 잔류포화도 발생 이후부터가 *pendular* 영역이다.

Pendular 영역에서 두 입자간의 액체연결 결합력을 설명하기 위해 개발된 많은 모델들은 두 입자 시스템을 완전 구(smooth spheres), 거칠은 구(rough spheres), 평행한 판(parallel plates) 등 여러 형태로 단순화시켜 사용하였다(Fisher, 1926; Dallavalle, 1943; Ingles, 1962; Blight, 1967; Sparks, 1963; Mehrotra and Sastry, 1980; Schubert, 1982; Cho and Santamarina, 2001; Lu and Likos, 2004). 이들 모델에서 공통점은 입자 모양, 표면 거칠기, 크기, 간격, 표면장력, 입자-액체사이 접촉각 등에 대한 가정이 필요하고 이에 대한 분명한 이해가 요구된다. Rumpf(1961)는 동일한 크기의 구형 입자에 적용된 액체 연결 이론을 확대하여 *pendular* 영역에서 습윤 입자 결합체의 인장강도를 예측하기 위한 모델을 제안하였다. 일정한 간극률로 입자가 균등하게 분포되고 다짐되었다고 가정하였다. Schubert(1975)는 이 이론에 입자간 응력을 중첩하는 방법을 사용하여 *funicular*와 *capillary* 영역까지 확대시켰다. Rumpf와 Schubert 모델은 흡의 인장강도의 특성을 포화도의 함수로 나타냈지만, 이를 위해 필요한 가정들은 이 모델의 이론적인 접근과 실제적인 적용을 제한하게 되었다.

그래서 본 연구에서는 습윤조립재의 인장강도에 대한 이론을 흡입응력(suction stress)이라는 새로운 개념을 이용하여 개발하고자 한다. 흡입응력은 불포화 모래에서 모관현상에 의해 발생된 등방 입자간 응력으로 정의된 것으로 Lu와 Likos(2006)에 의해 제안되었다. 일반적으로 불포화토의 거동을 특징짓는 것으로 인식되는

겉보기 점착력을 이용하여 흡입응력을 전단저항으로 유도시켰으며, 재료의 내부마찰각과 함수특성곡선을 알면 흡입응력 개념으로 습윤모래 공시체의 인장강도를 정확하게 예측할 수 있는 닫힌 형태의 이론식이 제안되었다.

2. 모래에서 선형 Mohr-Coulomb 파괴규준

응력단계가 수십 또는 수백 kPa 정도의 모래질 흙과 관련된 대부분의 실제공학문제의 경우, Mohr-Coulomb(M-C) 파괴규준이 폭넓게 사용되고 있다. 이 규준을 그림으로 표시하면 그림 1과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 모래의 전단강도는 수직응력의 선형함수로 가정된다. 건조 모래의 경우, 흡의 영역에서 어느 위치 어느 방향에서 전단강도와 수직응력의 비가 한계상태 $\tan\phi$ 에 도달하면 파괴 또는 극한 상태에 도달된다.

$$\tau = \sigma \tan \phi \quad (1)$$

습윤 또는 불포화 모래의 경우, 액체로 연결된 입자들 사이에서 간극수의 메니스커스와 부의 간극수압 조건에서 포화된 간극수가 결합응력을 제공한다. 그림 1의 상부 왼쪽 그림처럼, 균질하고 등방인 모래의 경우 이 결합응력이 바로 등방인장강도 σ_{na} 이다. 이것은 수직응력축의 가장 왼쪽에 위치하고 있다. 이와 같은 조건에서, 어느 위치 어느 방향에서 전단강도는 존재하지 않는다. 파괴는 인장응력이 모관응력에 의해 발생된 결합력에 이르면 발생된다. 이 응력은 외부 응력의 존재에 상관없이 존재한다. 왜냐하면 흡이 등방인장응력으로 파괴되면 전단응력이 발생하지 않기 때문에 흡의 등방인장강도는 내부마찰각과는 관계가 없다.

일축인장강도 σ_{na} 는 흡 요소가 하나의 주응력 평면에 수직으로 인장응력이 작용하고 직각 평면에 작용하는 응력이 0인 상태에서 파괴되는 경우에 발생하는 것으로 정의된다. 실제로 일축이라는 조건이 일축인장강도 측정 실험에서 구현되지는 않는다. 이 부분에 대한 자세한 설명은 본 논문의 후속 논문인 검증 부분에서 다루어졌다.

만약 인장응력 영역에서 전단강도와 수직응력의 비가 압축응력 영역에서처럼 유지된다면, 즉 $\tan\phi$ 로, 논리적으로 일축인장강도는 최대주응력이 0인 상태로 유지될 때 등방인장강도로 여길 수 있을 것이다. 이 상태의 응력은 그림 1에서 원 A로 표시되었고 이에 해당되는

흙 요소는 그림의 상부 중간 그림으로 표현된다. 다르게 얘기하면, 파괴는 인장강도가 최대결합력에 이르렀기 때문에 발생하는 것이 아니라, 점 a 에서 전단강도와 수직응력의 비가 $\tan\phi$ 도달했기 때문에 발생된다. 그러므로 측정된 일축인장강도는 실제로 등방 결함응력의 발현의 결과로 발생된 마찰 강도인 것이다. 그림 1의 상부 중간 그림에 묘사된 것처럼, 그 상태에서 발현된 전단강도의 크기는 $\sin\phi \tan\phi(\pi/4 - \phi/2)\sigma_{tia}$ 가 된다.

등방인장강도에 의해 발현된 최대 전단강도는 M-C

기준과 전단응력축이 교차되는 부분으로(그림에서 점 C), 보통 문헌에서 겉보기 점착력이라 불려진다. 여기에 해당되는 응력상태(Mohr 원)는 그림 1에서 원 B로 표현되었고 흙 요소는 오른쪽 상부 그림과 같다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 C는 점착력 이라기보다는 전단응력으로 겉보기 점착력이라는 현재의 표현은 잘못된 것이다. 반면, 등방인장강도는 사실상 입자간 결합력으로 이것이 “겉보기 점착력”에 더 가깝다고 볼 수 있다. 이에 대한 것은 추후 추가적인 논의가 필요할 것으로 판단

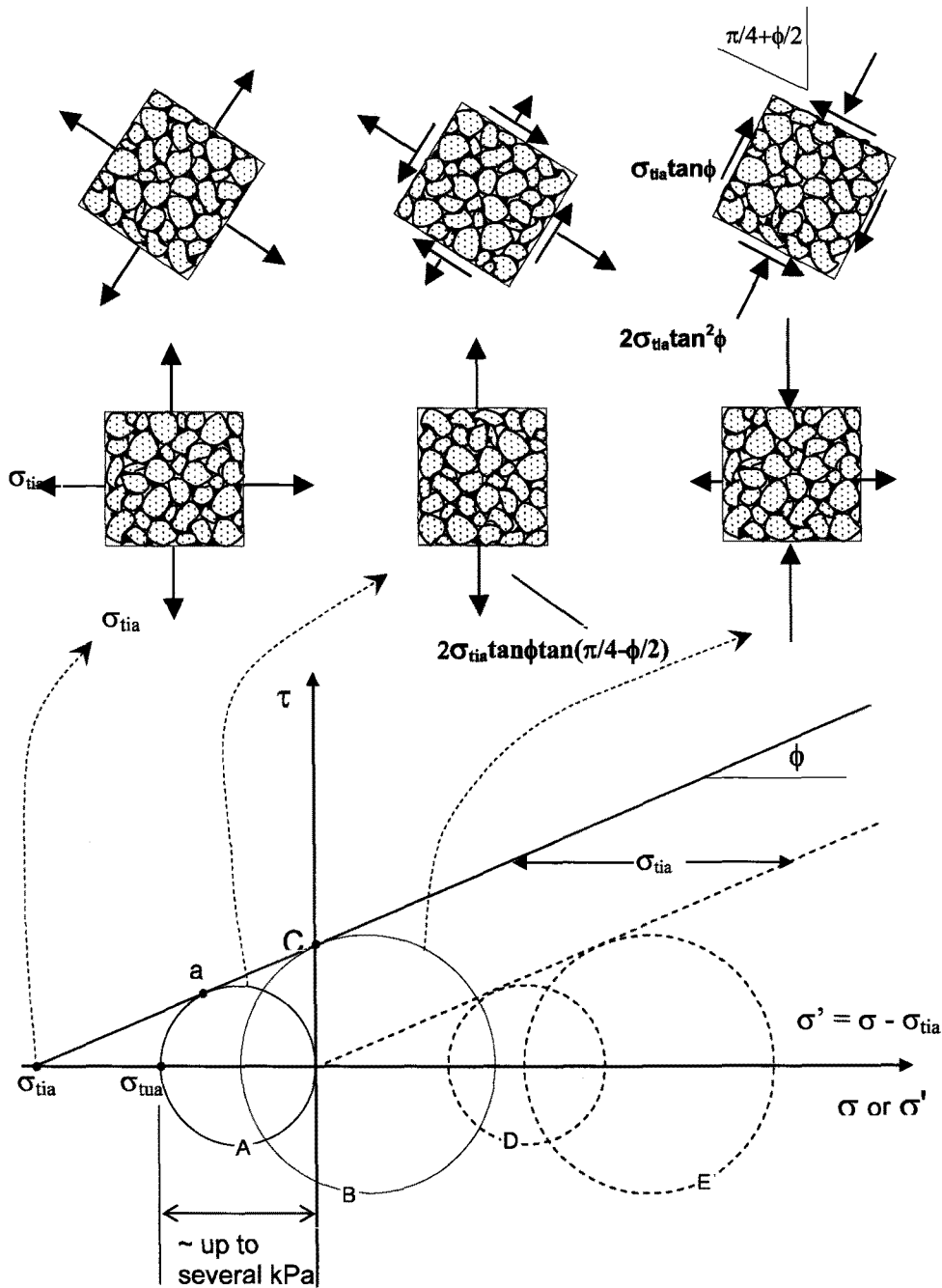


그림 1. Mohr-Coulomb 파괴기준에 의한 등방인장강도, 일축인장강도, 겉보기 점착력과 이에 대한 응력상태의 개념적인 도식

되며 본 논문에서는 용어의 혼선을 피하기 위해 현재의 사용법을 그대로 따르기로 한다.

등방인장강도 σ_{tia} , 겉보기 점착력 C , 일축인장강도 σ_{tua} 사이의 수학적 관계는 그림 1의 기하학적 관계를 고려하여 다음과 같이 정립될 수 있다.

$$\frac{C}{\sigma_{tia}} = \tan \phi \quad (2a)$$

$$\frac{C}{\sigma_{tua}} = \frac{1}{2 \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right)} \quad (2b)$$

$$\frac{\sigma_{tua}}{\sigma_{tia}} = 2 \tan \phi \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right) \quad (2c)$$

그림 2는 식 (2)의 관계를 설명한 것으로, 모래에서 발현된 등방결합응력 또는 등방인장강도에 대한 겉보기 점착력 C 의 효율은 마찰각 20° 에서 40% 인 반면 마찰각 70° 에서는 270% 이상으로 증가하였다. 마찰각 45° 에서 발현된 겉보기 점착력 C 는 등방인장강도와 같다. 등방결합응력에 대한 일축인장강도의 효율은 마찰각이 20° 에서 51% 이고 마찰각 70° 에서 97% 로 변화 하였다. 이것은 M-C의 재료의 경우 이상적인 직접인장실험에서 측정된 일축인장강도는 등방인장강도와 같거나 초과할 수 없다는 것을 보여주는 중요한 근거이다.

M-C 포락선과 교차하고 전단응력축의 점 C를 지나는 원 B는 몇 가지 흥미로운 특징이 있다. 첫 번째는 이 원

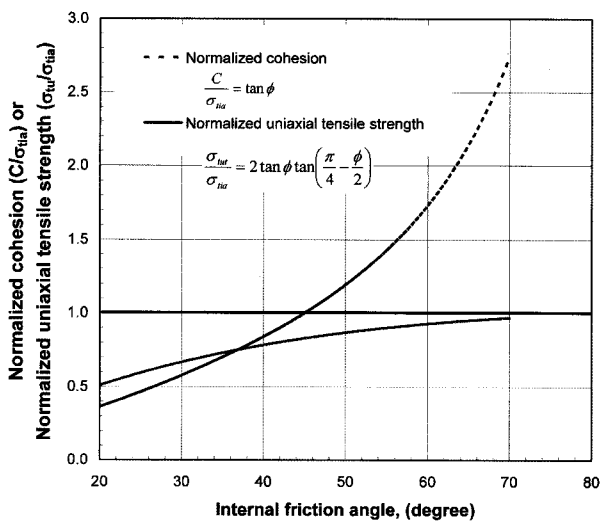


그림 2. 내부마찰각에 따른 등방인장강도에 의해 정규화된 일축인장강도와 겉보기 점착력의 변화 양상

은 그림 1의 오른쪽 상부에 볼 수 있는 바와 같이 한 쌍의 유일한 주응력상태에서만 얻어질 수 있다. 최대 주응력은 압축이고 최소 주응력은 인장이다. 최소 주응력과 최대주응력의 비는 주동토압계수와 같다. 최대주응력으로 부터 $\pi/4 + \phi/2$ 면에서 수직응력이 0인 유일한 하나의 평면이 존재한다. 그러나 이 순수 전단면에 대한 수직면에 추가적인 압축수직응력 $2\sigma_{tia}\tan 2\phi$ 가 존재한다.

등방인장강도를 건조모래와 습윤모래의 거동 차이를 양적으로 구분하기 위해 응력 변형 요소로 사용하였다. 이것은 그림 1에서 파괴포락선을 오른쪽으로 이동하여 표현하였다. Lu와 Likos(2006)는 등방인장강도를 유효응력의 한 부분으로 “흡입응력(suction stress), σ^s ”이라 정의 하였다. 흡입응력이라 불리는 입자간 응력은 Terzaghi의 유효응력에서 간극수압과 같은 역할을 한다. 일반적으로 흡입응력은 서로 다른 함수특성 메커니즘에서 발생된 van der Waals 인력, 전기이중층 척력, 모관응력 등 세 가지 요소로 구성된다. 이 중에서 앞의 두 가지 메커니즘은 모래의 입자간 응력에서 무시될 수 있어 모관응력이 모래의 결합력을 나타내는 주 요인이다. 불포화 상태에서 흡입응력의 크기는 간극수압 또는 흙의 흡입력의 크기와 같을 필요는 없다. 흡입응력개념의 테두리 안에서, 포화된 또는 불포화된 흙에 대한 유효응력은 하나의 통일된 형태로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma' &= \sigma - u_a - \sigma^s = \sigma - u_a - f(u_a - u_w) \\ &= \sigma - u_a - f(S) \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서 u_a 는 간극공기압, u_w 는 간극수압, S 는 포화도이다. 만약 위의 일반화된 유효응력개념을 사용하면, 그림 1에 점선으로 표현된 Mohr원 D와 E에서처럼, 모세관 현상에 의한 등방인장응력을 갖는 습윤 모래는 등방인장강도를 가지고 있지 않은 건조한 모래와 동등하게 취급될 수 있다.

3. 모래에서 비선형 Mohr-Coulomb 파괴기준

상대밀도, 응력이력, 응력크기에 따라 모래의 거동은 M-C 마찰거동을 따르지 않을 수도 있다. 일반적으로 수십에서 수백 kPa의 큰 압축범위에서 그림 3에서 원 A와 원 B로 표현된 경우, M-C 기준은 모래의 전단강도 표현에 적합하다. 하지만 수십 kPa이내의 낮은 압축응력범위에서와 특히 인장응력 영역에서, M-C 기준은 종종 모

래의 전단강도 거동을 표현하는데 있어 적합지 않을 수 있다.

그림 3에 표현된 것은 낮은 응력 단계에서 인장강도의 개념이다. 전단강도와 수직응력 사이의 비선형 관계는 작용 수직응력이 수 kPa 보다 작은 경우 종종 발생된다. 전단응력 대 수직응력의 비는 보통 수직응력이 감소함에 따라 급격히 증가한다. 예를 들어, Kim(2001)에 의하면 건조된 깨끗한 F-75 Ottawa 모래의 경우, 수직응력이 0.5~1.0kPa이내의 경우 마찰각이 23°이고, 수직응력이 0.25~0.5kPa 범위에서는 28°, 수직응력이 0.1~0.25kPa 범위에서는 47°까지 증가한다. 매우 낮은 수직응력에서 F-75 Ottawa 모래의 경우 70°까지 마찰각이 나타나는 것으로 보고된 경우도 있다(Sture et al., 1998).

낮은 수직응력 상태에서 측정된 모래의 큰 마찰각은 잇물림(interlocking) 메커니즘으로 주로 설명된다. 모래 입자의 거친 표면 형태와 입자간 접촉이 작용된 수직응력의 방향과 일치하지 않기 때문에, 작용된 낮은 수직응력은 입자간 전단응력을 발생시킬 수 있다. 이런 현상은 조밀한 모래에서 낮은 압축응력 조건에서 일정한 부피 팽창 현상과 관련된다. 이런 비선형 전단응력거동의 한 가지 중요한 점은 겉보기 점착력 값이 하나로 고정되지 않는다는 점이다. 심지어 건조한 모래의 경우 사용된 응력범위에 따라 수백에서 수천 Pa 크기의 낮은 겉보기 점착력이 종종 측정된다.

낮은 또는 0응력상태와 같은 낮은 압축응력 상황에서나 용벽 배면 또는 언덕의 정점에서 인장파괴가 진행 중인 상황에서 모래의 거동은 앞에서 언급된 비선형 거동을 고려하는 것이 중요하다. 또한 습윤조립재와 관련된 재료 가공, 제조, 이동, 낮은 압축응력 조건의 모래질 흩에서 인장파괴 등과 관련해서도 비선형 거동의 적

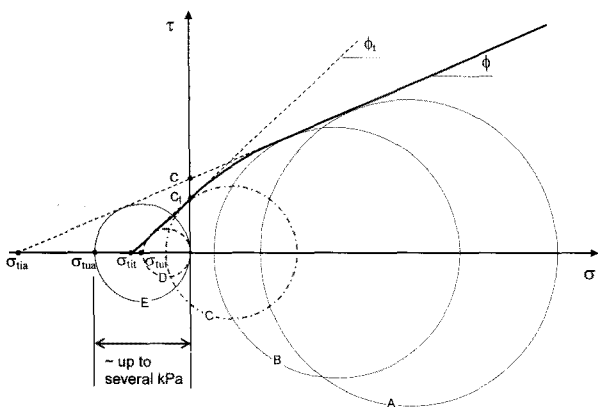


그림 3. 인장 영역에서 모래에 대해 제안된 비선형 Mohr-Coulomb 파괴규준의 개념적인 도식

용이 가능하다.

그림 3에서처럼, 일축인장강도에 대한 닫힌 형태의 식에 맞추기 위해 인장 영역에서 선형 전단강도거동이 가정 되었다. 인장영역에 대한 선형 부분을 정의하는데 필요한 마찰각은 압축 영역에서 수직응력이 거의 0인 지점에서 접선을 그어 구하였다. 인장 영역에서 선형 항복포락선 가정이 정당한 이유는, 일축인장강도 σ_{tut} 와 등방인장강도 σ_{iit} 사이의 차이는 마찰각이 증가함에 따라 감소한다. 마찰각이 50° 이상의 경우 그림 2에서 보는바와 같이 차이는 실제로 10% 미만이다. 그러므로 인장 영역에서 선형 항복포락선 가정은 타당하고 볼 수 있다.

등방인장강도 σ_{iit} , 겉보기 점착력 C_t , 일축압축강도 σ_{tut} 사이의 수학적 관계는 선형 M-C 재료에서와 같은 방법으로 기하학적 관계를 활용하여 다음과 같이 정립될 수 있다.

$$\frac{C_t}{\sigma_{iit}} = \tan \phi_t \quad (4a)$$

$$\frac{C_t}{\sigma_{tut}} = \frac{1}{2 \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi_t}{2}\right)} \quad (4b)$$

$$\frac{\sigma_{tut}}{\sigma_{iit}} = 2 \tan \phi_t \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi_t}{2}\right) \quad (4c)$$

여기서 아래 첨자 t는 비선형 M-C 파괴포락선 하에서 겉보기 점착력과 마찰각에 대한 값을 나타낸다.

비선형 M-C 거동을 고려해야 하는 이유는 식 (2b)와 식 (4b)의 비를 고려하여 검증할 수 있다.

$$\frac{\sigma_{tut}}{\sigma_{tut}} = \frac{C_t}{C} \frac{\tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi_t}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right)} \quad (5)$$

포화도 2%의 습윤 F-75 Ottawa 모래를 고려하면(Kim, 2001),

$$C_t = 263 \text{ (Pa), and } \phi_t = 49^\circ \quad \text{for } 100 \leq \sigma \leq 250 \text{ (Pa)}$$

$$C = 382 \text{ (Pa), and } \phi = 34^\circ \quad \text{for } 500 \leq \sigma \leq 1000 \text{ (Pa)}$$

다음과 같이 일축인장강도에서 100% 이상의 상대 오류가 발생된다. 그러므로 비선형 M-C 거동을 고려해야 한다.

$$\frac{\sigma_{int}}{\sigma_{inta}} = \frac{C_t}{C} \frac{\tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi_t}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2}\right)} = \frac{263 \tan(45 - 24.5)}{382 \tan(45 - 17)} = 0.48$$

4. 흡입응력과 인장강도와의 관계

Lu와 Likos(2004, 2006)에 의해 제안된 흡입응력은 현장 조건에서 흙의 흡입력 항($u_a - u_w$) (식 (6))이나 또는 이에 해당되는 포화도(S) 항(식 (7))으로 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \sigma^s &= u_w & \text{for } u_w \geq u_b \\ \sigma^s &= (u_a - u_w) \left\{ 1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n \right\}^{\frac{1}{n}-1} & \text{for } u_w \leq u_b \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \sigma^s &= u_w & \text{for } u_w \geq u_b \\ \sigma^s &= \frac{S_e}{\alpha} \left[S_e^{\frac{n}{1-n}} - 1 \right]^{\frac{1}{n}} & \text{for } u_w \leq u_b \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 u_b 는 공기침투압, α 는 공기침투압의 역수 값, n 은 간극크기범위변수, S_e 는 등가의 포화도이다. S_e 는 잔류포화도 S_r 에 의해 정규화된 포화도로 다음과 같이 정의된다.

$$S_e = \frac{S - S_r}{1 - S_r} \quad (8)$$

흙의 흡입력과 이에 해당되는 포화도의 관계(즉, 함수특성곡선)는 van Genuchten(1980)의 모델로 표현된다.

$$S_e = \left\{ 1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n \right\}^{\frac{1}{n}-1} \quad (9)$$

Lu와 Likos(2006)에 의해 정의된 흡입응력은 등방인장강도이므로 식 (6)과 식 (7)은 일축인장강도를 산정하는데 직접적으로 이용될 수 있다. 식 (6)과 식 (7)을 식 (4c)에 대입하면 일축인장강도 σ_{int} 는 다음과 같이 두 개의 형태로 표현될 수 있다.

$$\sigma_{int} = 2 \tan \phi_t \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi_t}{2}\right) (u_a - u_w) \left\{ 1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n \right\}^{\frac{1}{n}-1} \quad (10a)$$

$$\sigma_{int} = 2 \tan \phi_t \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi_t}{2}\right) \frac{S_e}{\alpha} \left[S_e^{\frac{n}{1-n}} - 1 \right]^{\frac{1}{n}} \quad (10b)$$

위 두 식은 내부마찰각과 함수특성곡선(α, n)이 주어지면 포화도나 흡입력 함수로 불포화토의 일축인장강도 예측에 사용할 수 있다.

5. 습윤 모래의 인장강도 특성

일반적으로 습윤 모래는 포화도 또는 습윤 정도, 입자 크기, 입자 분포, 간극률의 크기에 따라 서로 다른 크기의 점착력을 가진다. 또한 습윤 모래에서 가장 분명한 것은 인장강도가 비선형적 거동을 보이고 흙의 포화도나 흡입력에 의존한다는 것이다. 마른 모래에서 입자간 엇물림이 강할 수 있지만 최소한의 인장강도를 가지고 있다. 마른 모래는 보통 주변의 낮은 상대 습도에 의해 높은 흡입력을 가지고 있다. 모래가 점점 포화되어 습해짐에 따라 포화도는 증가하고 흙의 흡입력 감소한다. 하지만 결합응력(등방인장강도)은 입자크기와 간극률에 따라 다르지만 처음에는 최대값까지 증가한 다음 포화도가 거의 0 이거나 모래가 완전히 포화될 시점에서는 감소한다. 이와 같이 증가하다 감소하는 경향을 보이는 모래의 인장강도는 그림 4(a)와 같이 이상적으로 표현할 수 있다.

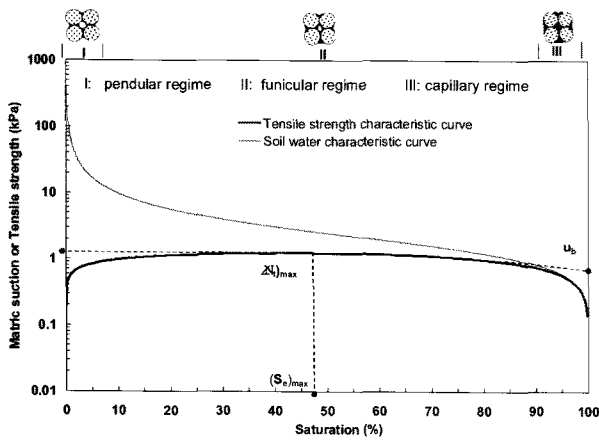
불포화 상태에서 모관의 물은 세 가지 pendular, funicular, capillary 영역에 머무를 수 있기 때문에 흙의 인장강도를 수식화 하는 것은 어려운 일이다. 거의 모든 대부분의 인장강도에 대한 이론은 pendular 영역에서 한 쌍의 이상화된 두 입자 사이의 함수곡선과 모관압의 상호관계에 기본을 두고 있다. 그러므로 funicular와 capillary 영역에서 여러 입자들의 인장강도를 정확히 표현할 수 없다. 보통 모래의 경우, 20% 포화도까지가 pendular 영역이고 funicular 영역은 포화도가 20~90% 이고, capillary 영역은 포화도가 90~100% 사이로, 결론적으로 대부분의 현재 존재하는 인장강도에 대한 이론들은 pendular 영역에서 인장강도의 크기를 예측할 수 있을 뿐, funicular 영역과 capillary 영역에서의 최대인장강도와 인장강도의 변화를 예측할 수 없다. 또한 불포화도 전체 영역에 대해 하나의 공식으로 인장강도의 변화를 예측하는 이론은 현재까지 제안되지 않았고, 실험으로 검증 되지 않은 상황이다.

본 논문에서 제안된 이론(식 (10))은 세 가지 불포화

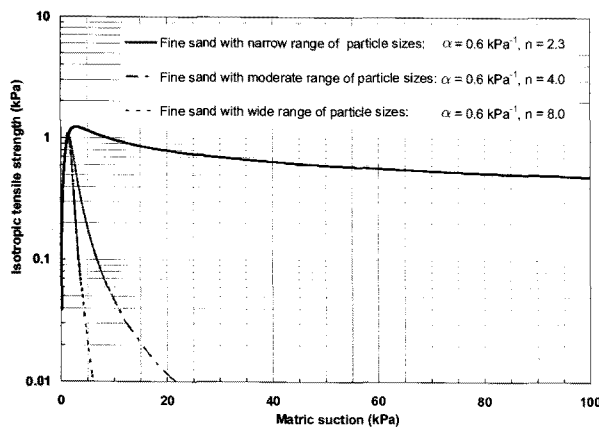
전체 포화 영역에서 인장강도의 거동을 예측할 수 있다. 이것을 설명하기 위해 세 가지 이상적인 경우를 고려하였다(그림 4(b)). 그림에서 세립 모래의 이상적인 세 가지 경우에 대한 인장강도를 흙의 흡입력 함수로 표현(식 (10a))한 것이다. 세 가지 세립 모래는 모두 똑 같은 공기침투압 1.76kPa를 가지고 있어 정수압 상태의 현장 조건에서 수위 위로 16.7cm의 모관영역이 형성된다. 입자크기분포가 좁은 세립 모래의 경우 간극크기분포도 좁다($n = 2.3$). 최대 인장강도는 1.23kPa로 흡입력이 2.81kPa(또는 포화도가 43.6%에서, 그림에 표시 되지 않음) 발생되었다. 최대값을 통과한 후 흡입력이 증가함에 따라 인장강도는 상대적으로 천천히 감소한다. 흡입력이 100kPa(포화도 0.5%)에서 인장강도는 0.48kPa로 유지된다. 입자크기분포가 중간이고 간극크기분포($n = 4.0$)인 세립 모래 경우, 최대 인장강도는 1.03kPa로 흡입력이 1.40kPa(또는 포화도 73.8%에서) 발생되었다. 최

대값을 통과한 후 흡입력이 증가함에 따라 인장강도는 빠르게 감소된다. 흡입력이 2.2kPa(또는 포화도 0.04%)에서 인장강도는 0.01kPa로 나타났다. 마지막으로 입자크기분포가 넓은($n = 8.0$) 세립 모래 경우, 최대 인장강도는 1.10kPa로 흡입력이 1.32kPa (또는 포화도가 83.0%)에서 발생되었다. 최대값 이후 인장강도는 급격히 감소되어 흡입력이 6.0kPa(포화도 0.03%)에서 0.01kPa의 인장강도가 발생되었다. 이들 세 가지 이상적인 경우로부터 얻은 결론은 인장강도의 크기가 공기침투압 변수 α 의해 크게 영향을 받고, 식 (10b)로 구한 이들 세 가지 모래에 대한 포화도는 상당히 서로 다르지만, 최대 인장강도는 매우 낮은 흡입력에 발생된다는 사실이다.

최대인장강도 값과 그 값이 발생하는 포화도의 정확한 예측은 식 (10a)나 식 (10b)로부터 결정될 수 있다.

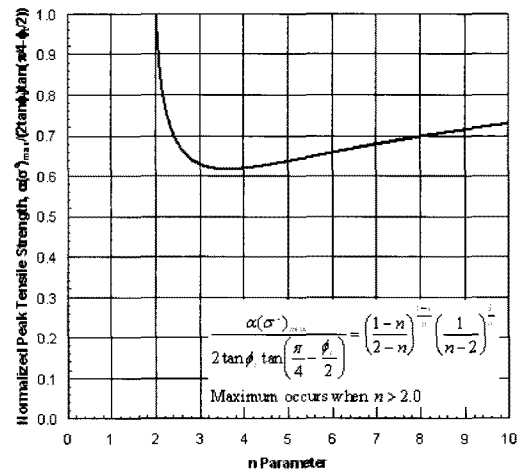


(a)

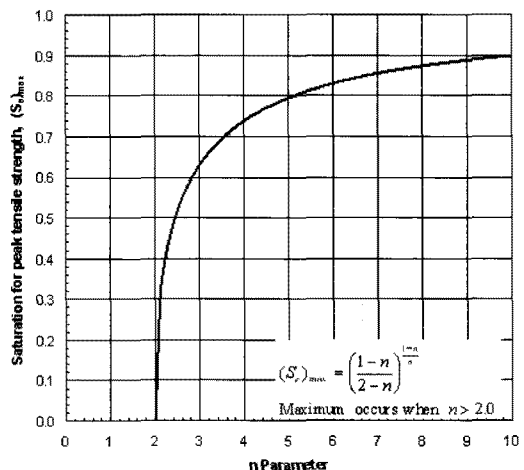


(b)

그림 4. 모래의 인장강도 특성 도식: (a) 전체 불포화 영역에서 함수특성곡선과 인장강도특성곡선의 상호관계, (b) 서로 다른 간극 크기 분포를 가진 세립 모래의 흡입력에 따른 인장강도



(a)



(b)

그림 5. 간극크기범위변수 n에 따른 (a) 최대 인장강도의 크기, (b) 최대 인장강도 값에 해당하는 포화도

예들 들어, 등가 포화도에 대해 식 (10b)을 미분하여 0으로 놓으면 최대일축인장강도는 다음과 같다.

$$(\sigma_{int})_{\max} = \frac{2}{\alpha} \tan \phi_t \tan \left(\frac{\pi - \phi_t}{4} \right) \left(\frac{1-n}{2-n} \right)^{\frac{1-n}{n}} \left(\frac{1}{n-2} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (11)$$

여기에 해당되는 포화도는

$$(S_e)_{\max} = \left(\frac{1-n}{2-n} \right)^{\frac{1-n}{n}} \quad (12)$$

여기서 보통 모래의 경우 n 은 2 이상 큰 것에 대해 유효한 것으로 나타났다.

식 (11)과 (12)에서 표현된 최대인장강도와 최대포화도의 간극크기범위변수 n 에 의존도는 그림 5와 같다. 정규화된 최대인장강도 값은 변수 n 값에 따라 감소하고 증가하는 경향을 나타낸다. 이에 상응하는 최대 포화도는 변수 n 값에 따라 증가하므로 최대인장강도는 어느 포화도에서든지 발생할 수 있다.

6. 결론

본 논문은 낮은 응력 단계에서 습윤 모래의 인장강도를 예측할 수 있는 이론에 대한 것으로 본 연구를 통하여 아래와 같은 몇 가지 결론을 도출하였다.

- (1) 제안된 이론은 낮은 응력 단계에서 파괴포락선의 비선형 특성과 세 가지 불포화 포화영역(pendular, funicular, capillary)에서의 모관응력을 분명하게 고려하여 정확하게 등방인장강도와 일축인장강도를 결정할 수 있다.
- (2) 제안된 이론은 Lu와 Likos(2004, 2006)가 제안한 흡입응력을 이용한 유효응력 개념을 이용하였다. 흡입응력이라 불리는 입자간 응력은 Terzaghi의 유효응력 개념에서 간극수압과 같은 역할을 하는 것으로, M-C 파괴규준의 선형 연장으로 추정된 등방인장강도를 의미한다.
- (3) 제안된 이론은 닫힌 형태의 식으로 표현되었으며 불포화영역 전체에 대해 인장강도 거동을 단일 식으로 표현하였다. 낮은 응력상태에서 내부마찰각 ϕ_b , 공기 침투압의 역수 값 α , 간극크기범위변수 n 등 세 개

의 변수가 사용되었다.

- (4) 제안된 식에서 최대 인장강도의 크기는 α 변수에 의해 주로 지배되며, 최대인장강도가 발생할 때 포화도는 오직 간극크기범위변수 n 에만 의존한다. 이것은 모래에서 등방인장응력에 의한 응력과 함수특성곡선이 α 와 n 변수로 충분히 설명되는 간극크기 분포라는 공통된 기본 요소를 서로 공유한다는 것을 의미한다.

감사의 글

본 논문을 위해 조언과 자료를 제공해주신 Lu 교수에게 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. Allen, A. (2001), "Contaminant landfills: the myth of sustainability", *Engineering Geology*, Vol.60, pp.3-19.
2. Blight, G.E. (1967), "Effective stress evaluation for unsaturated soils", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.93, SM. 2, pp.125-148.
3. Cho, G.C. and Santamarina, J.C. (2001), "Unsaturated particulate materials: Particle-level studies", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.127, No.1, pp.84-96.
4. Dallavalle, J.M. (1943), *Micrometrics*, Pitman, London.
5. Fang, H. Y. and Fernandez (1981), "Determination of tensile strength of soils by unconfined-penetration test", *ASTM STP 740*, pp.130-144.
6. Fisher, R.A. (1926), "On the capillary forces in an ideal soil: Correction of formula given by W.B. Haines", *Journal of Agricultural Science*, Vol.16, pp.492-505.
7. Ingles, O.G. (1962), "Bonding forces in soils, Part III: A theory of tensile strength for stabilized and naturally coherent soils", *Proceedings of the First Conference of the Australian Road Research Board*, Vol.1, pp.1025-1047.
8. Kim, T-H. (2001), Moisture-induced tensile strength and cohesion in sand, PhD Dissertation, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado, Boulder, CO.
9. Kim, T-H. and Hwang, C. (2003), "Modeling of tensile strength on moist granular earth material at low water content", *Engineering Geology*, Vol.69, pp.233-244.
10. Kim, T-H., Kim, C-K., Jung, S-J., Lee, J-H. (2007), "Tensile strength characteristics of contaminated and compacted sand-bentonite mixtures", *Environmental Geology*, Vol.52, No.4, pp.653-661
11. Leonards, G. A. and Narain, J. (1963), "Flexibility of clay and cracking of earth dams", *Jour. of Soil Mech. and Found. Div., Proc. ASCE*, Vol.89, No.SM2, pp.47-98.
12. Lu, N. and Likos, W.J. (2004), *Unsaturated Soil Mechanics*, Wiley, New York.
13. Lu, N. and Likos, W.J. (2006), "Suction stress characteristic curve for unsaturated soil", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.132, No.2, pp.131-142.

14. Lu, N., Wu, B., and Tan, C.P. (2005), "A tensile strength apparatus for cohesionless soils", *Proceedings of Experts 2005*, A. Tarantino et al. (eds.), Balkema.
15. Mehrotra, V.P. and Sastry, K.V.S. (1980), "Pendular bond strength between unequal-sized particles", *Powder Technology*, Vol.25, pp.203-214.
16. Rumpf, H. (1961), "The strength of granules and agglomerates", In *Agglomeration*, W.A. Knepper (ed.), Interscience, New York.
17. Schubert, H. (1975), "Tensile strength of agglomerates", *Powder Technology*, Vol.11, pp.107-119.
18. Schubert, H. (1982), *Kapillarität in Porösen Feststoffsystemen*, Springer Verlag, Berlin.
19. Sparks, A.D.W. (1963), "Theoretical considerations in stress equations for partly saturated soils", *Proc. 3rd Regional Conf. for Africa on Soil Mechanics*, Salisbury, Rhodesia, Vol.1, pp.215-218.
20. Spencer, E. (1968), "Effect of tension of stability of embankment", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol.94, No.SM5, pp.1159-1173
21. Sture, S., Costes, N. C., Batiste, S. N., Lankton, M. R., Alshibli, K. A., Jeremic, B., Swanson, R. A. and Frank, M. (1998), "Mechanics of Granular Materials at Low Effective Stresses", *Journal of Aerospace Engineering*, ASCE, Vol.11, No.3, pp.67-72.
22. Suklje, L. (1969), "Rheological aspects of soil mechanics", Wiley-Interscience, pp.456-473.
23. van Genuchten, M.T. (1980), "A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils", *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, pp.892-898.

수식 기호 설명

- u_a = 간극공기압
- u_w = 간극수압
- S = 포화도
- σ_{tia} = 등방인장강도
- C = 겔보기 점착력
- σ_{na} = 일축인장강도
- ϕ = 내부마찰각
- σ_{tit} = 비선형 Mohr-Coulomb 파괴규준에서 등방인장강도
- C_t = 비선형 Mohr-Coulomb 파괴규준에서 겔보기 점착력
- σ_{nat} = 비선형 Mohr-Coulomb 파괴규준에서 일축압축강도
- ϕ_t = 비선형 Mohr-Coulomb 파괴규준에서 내부마찰각
- u_b = 공기침투압
- α = 공기침투압의 역수 값
- n = 간극크기범위변수
- S_e = 등가포화도
- S_r = 잔류포화도

(접수일자 2007. 11. 9, 심사완료일 2008. 6. 26)