

용해재료가 포함된 지반의 전단강도 특성

Shear Strength Characteristics of Geo - Soluble - Materials

짠 명 과학¹ Tran, M. Khoa

박 정 회² Park, Jung-Hee

변 용 훈³ Byun, Yong-Hoon

신 호 성⁴ Shin, Ho-Sung

이 종 섭⁵ Lee, Jong-Sub

Abstract

A fabric of soil media may change due to certain factors such as dissolution of soluble particles, desiccation, and cementation. The fabric changes affect the mechanical behavior of soils. The purpose of this study is to investigate the effects of geo-material dissolution on shear strength. Experiments and numerical simulations are carried out by using a conventional direct shear and the discrete element method. The dissolution specimens are prepared with different volumetric salt fraction in sand soils. The dissolution of the specimens is implemented by saturating the salt-sand mixtures at different confining stresses in the experimental study or reducing the sizes of soluble particles in the numerical simulations. Experimental results show that the angle of shearing resistance decreases with the increase in the soluble particle content and the shearing behavior changes from dilative to contractive behavior. The numerical simulations exhibit that macro-behavior matches well with the experimental results. From the microscopic point of view, the particle dissolution produces a new fabric with the increase of local void, the reduction of contact number, the increase of shear contact forces, and the anisotropy of contact force chains compared with the initial fabric. The shearing behavior of the mixture after the particle dissolution is attributed to the above micro-behavior changes. This study demonstrates that the reduction of shearing resistance of geo-material dissolution should be considered during the design and construction of the foundation and earth-structures.

요 지

흙입자의 구조는 흙을 구성하는 용해성 입자의 용해작용, 건조작용 그리고 고결화 현상과 같은 특정요인에 의해 영향을 받으며 입자구조의 변화는 흙의 역학적 거동에 큰 영향을 미친다. 본 논문에서는 흙속에 포함된 용해성입자의 용해작용이 전단강도에 미치는 영향을 조사하였다. 직접전단실험을 위해 소금과 모래로 구성된 혼합재를 이용하여 시료를 조성하고 전체시료에 대한 용해성 입자의 부피비를 조절하면서 실험을 수행하였으며 실험과 동일한 조건하에서 수치해석을 수행하였다. 입자의 소실과정을 위해 실험에서는 소금-모래 혼합재를 포화시켜 소금을 용해시켰으며 수치해석에서는 용해성 입자의 크기를 줄이는 것으로 용해과정을 모사하였다. 실험결과, 용해성 입자의 부피비가 증가할수록 내부마찰각은 감소하였고, 시료의 수직변형은 팽창거동에서 수축거동으로 변화하였다. 수치해석은 실험결과와 유사한 거시적 거동을 보여주었다. 미시적관점에서, 입자가 용해됨에 따라 간극비의 증가, 접촉점 수의 감소,

1 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea University)

2 고려대학교 건축사회환경공학부 석사과정 (Graduate Student, School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea University)

3 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정 (Ph.D. Student, School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea University)

4 정회원, 울산대학교 건설환경공학부 조교수 (Assistant Professor, Department of Civil and Environment Engineering, Ulsan University)

5 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 부교수 (Associate Professor, School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea University, jongsu@korea.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

전단접촉력의 증가, 접촉력 연결고리의 이방성에 의해 새로운 입자구조가 생성됨을 보여주었다. 이러한 미시적 거동의 변화는 입자의 용해작용 후 전단거동에 영향을 주게 된다. 본 연구에서는 기초나 지반구조물의 설계와 시공 시 지반재료의 용해에 따른 전단강도를 고려해야 함을 보여준다.

Keywords : DEM, Direct shear test, Dissolution, Fabric, Shear strength, Soluble mixtures

1. 서론

암염, 방해석, 백운석, 석고, 자철광과 같은 용해성 광물들은 흙속에 존재하며 특히 건조한 지역에서 자주 발견된다(Bell 2007). 이러한 광물들은 댐의 기초나 교대에서 발견되기도 한다(Craft와 Doug 2005). 용해성 입자의 용해는 흙입자의 구조를 변화시키며 이는 전단강도, 침하, 투수성등과 같은 지반공학적 특성을 변화시킨다. 이와 같은 이유로 용해성 입자를 포함하는 지반의 역학적 거동은 기초나 지반구조물의 설계와 시공에 있어 반드시 고려되어야한다. 지금까지는 주로 지반을 구성하는 입자들의 용해에 따른 역학적 거동에 대한 연구가 수행되어왔다(Azam 등 2000; Fam 등 2002; Shin과 Santamarina 2009; Truong 등 2010). 그러나 지반재료의 소실에 따른 전단강도의 영향에 대한 연구는 미비한 실정이다.

지반공학분야에서 널리 이용되고 있는 직접전단실험은 토목구조물의 안정성 및 기초해석에 필요한 내부마찰각과 같은 지반공학적 물성치를 제공하며(Jewell 1989), 이는 지반공학자들에게 여전히 관심 있는 연구주제이다(Lings와 Dietz, 2004; Shibuya, 1997). 이와 같은 이유로 본 연구에서는 직접전단장비를 이용하여 용해성 재료가 함유된 지반재료의 강도 특성을 연구하였다.

Cundall에 의해 제안된 개별요소법(Discrete Element Method, DEM)은 입자로 이루어진 흙의 거동을 다루며 입자간의 구성방정식을 세우거나 정적인 흙의 거동뿐만 아니라 동적인 흙의 거동을 분석하는데 매우 효과적이다. 개별요소법에서 입자간의 접촉력과 움직임은 각 시간간격마다 계산되었다. 각 접촉부에서 힘-변위 관계식과 입자의 운동법칙을 반복적으로 적용함으로써 입상체역학으로 계산한 결과로부터 연속체역학에서의 응력과 변형률을 산정하였다. 본 연구에서 사용된 개별요소법은 거시적인 관점과 미시적인 관점에서 2차원 또는 3차원적으로 모델링한 전단상자 안에서 모래 입

자의 거동을 관찰하기 위하여 널리 사용되어 왔다. 2차원적 수치해석은 3차원적 수치해석에 비해 실제현상을 정확히 반영할 수 없다는 한계가 있다. 그러나, 각 요소가 원형이라 접촉여부의 판단이 쉽고, 수행과정이 간편하며 결과분석이 용이한 2차원적 수치해석을 적용하였다.

본 논문에서는 지반재료의 소실에 따른 전단강도의 영향을 다루었다. 이를 알아보기 위해 모래와 소금으로 구성된 용해성 혼합재로 시료를 조성하였으며 소금을 용해시킨 후 전단실험을 수행하였다. 또한, 미시적 관점에서 입자의 역학적 거동을 관찰하기 위하여, 개별요소법을 이용한 수치해석을 수행하였다.

2. 실험적 연구

2.1 시료 특성

용해성 혼합재의 역학적 거동을 조사하기 위하여 일반적으로 사용되는 방법은 모래와 소금을 이용하는 것이다(Fam 등 2002; Shin과 Santamarina 2009; Truong 등 2010). 본 연구에서는 모래와 소금을 혼합하여 용해성 혼합재 시료를 조성하였다. 시료는 주문진 표준사로서 30번체와 40번체 사이의 균등한 모래를 사용하였다. 모래의 최대간극비는 0.927이며 최소간극비는 0.612이다. 실험에 사용된 소금은 정육면체 형상이며 균일한 소금을 얻기 위해 30번체와 40번체 사이의 균등한 소금을 이용하였다. 모래와 소금의 비중은 각각 2.62와 2.16이며 모래와 소금의 평균입경은 0.5mm로 동일하다.

2.2 시료 조성

모래와 소금이 균일하게 분포하도록 10분 동안 혼합한 후 모래부피에 대한 소금의 부피비(% of salt = $V_{\text{salt}}/V_{\text{sand}} \times 100\%$)가 0, 2, 5, 10%인 시료를 조성하였다. 혼합재를 4층으로 나눈 후 각 층마다 다짐봉을 이용하

여 같은 횡수로 시료를 다졌다. 수직하중이 가해지기 전, 모든 시료의 초기 간극비는 0.71이 되도록 조성하였다.

2.3 실험과정

직접전단실험을 수행하기 위해 시료를 전단상자에 설치한 후 3가지의 수직응력(50kPa, 100kPa, 150kPa)을 전단상자 상부에 가하여 실험을 실시하였다. 수직응력을 가하고 시료의 수직변위가 더 이상 발생하지 않았을 때 전단상자용 수조에 물을 흘려보내 수위를 전단상자의 상부와 일치시켰다. 소금의 용해도는 360g/L(Craft 2005)로써, 전단상자용 수조에 채운 물의 부피(868.2cm³)가 모래부피에 대한 소금의 부피비가 10%인 시료에 함유된 소금의 양(7.03g)을 용해시키기에 충분하므로, 모든 시료에서 소금은 100% 용해되었다고 판단하였다. 소금이 용해되는 동안 수직변위를 연속적으로 측정하였으며 소금을 용해시키고 30분이 지난 후, 수직변위가 더 이상 발생하지 않을 때 시료가 수침된 상태에서 1mm/min의 일정한 속도로 전단실험을 실시하였다. 전단이 진행되는 동안 시료의 수직변위, 수평변위, 전단력을 연속적으로 측정하였다.

2.4 응력-변형률 거동

모래부피에 대한 소금의 부피비가 0, 2, 5, 10%인 경우에 대해 수직응력 100kPa에서 수평변형률에 따른 전단응력의 변화양상과 수직변위의 변화양상을 그림 1(a)와 그림 1(b)에 각각 나타내었다. 모래로만 조성된 시료의 경우 수평변형률이 증가함에 따라 전단응력이 증가하였으며 첨두전단강도를 나타낸 후 잔류전단강도까지 서서히 감소하였다. 모래로만 조성된 시료의 첨두전단

강도가 소금이 용해된 혼합재의 첨두전단강도보다 더 크게 나타났다. 두 시료의 잔류전단강도는 수평변형률이 증가함에 따라 유사해짐을 알 수 있다. 그림 1(b)에서 수직변형률과 전단강도는 비슷한 양상을 보여주었다. 즉, 모래로만 조성된 시료의 경우 소금을 2, 5% 포함한 시료보다 더 큰 수직변형률이 발생한다. 용해성 입자를 더 많이 포함할수록 수직변형률은 감소한다. 소금부피비가 0, 2, 5%인 경우에 대해 수직변형률을 살펴보면 수축과 팽창을 관찰할 수 있었지만 소금부피비가 10%인 시료의 경우에는 수축거동만을 관찰할 수 있었다. 모래로만 이루어진 시료는 최종적으로 팽창하지만 소금부피비가 10%인 시료는 수축하였다. 용해 전과 용해 후의 시료의 내부마찰각을 비교한 결과 내부마찰각이 42°에서 33°로 감소하였다. 자세한 실험 결과를 표 1에 정리하였다.

3. 수치해석

3.1 직접전단 모델링

지반재료의 소실에 따른 전단강도의 영향을 알아보기 위해 실험에 사용된 직접전단상자와 크기가 동일하도록 PFC^{2D}(Particle Flow Code)를 이용하여 2차원의 직사각형 단면(폭:60mm, 높이:21.6mm)을 모델링하였으며 이를 그림 2에 나타내었다. 전단과정이 진행되는 동안 입자의 유실을 막기 위해 2개의 벽을 추가하였다. 전단상자를 구성하는 모든 벽은 상-하, 좌-우로만 움직일 수 있으며 회전할 수 없도록 하였다. 수직응력은 상부경계면을 이동시키면서 적용하였고 수직응력을 일정하기 유지하기 위해 Servo Function을 이용하여 상부경계면의 속도를 조절하였다. 입자에 의해 상부경계면에 작용

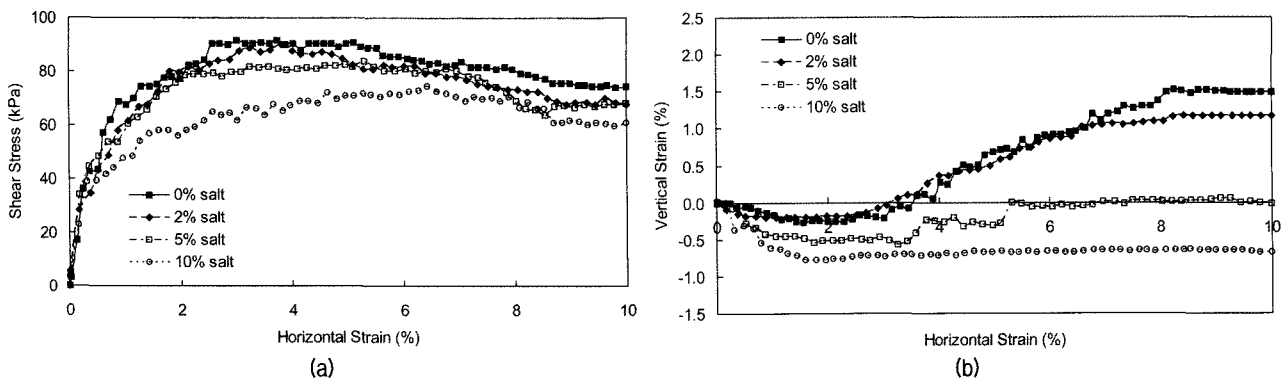


그림 1. 수직응력 100kPa에서 전단실험 결과: (a) 수평변형률-전단응력; (b) 수평변형률-수직변형률

표 1. 직접전단실험결과

| 시료조건 | 초기 간극비 | 수직응력 (kPa) | 용해 후 간극비 | 첨두전단강도 (kPa) | 잔류전단강도 (kPa) |
|--------|--------|------------|----------|--------------|--------------|
| DS-0% | 0.707 | 50 | 0.697 | 49 | 40 |
| | 0.707 | 100 | 0.689 | 90 | 74 |
| | 0.707 | 150 | 0.689 | 130 | 95 |
| DS-2% | 0.707 | 50 | 0.724 | 46 | 38 |
| | 0.707 | 100 | 0.717 | 88 | 68 |
| | 0.707 | 150 | 0.71 | 125 | 92 |
| DS-5% | 0.707 | 50 | 0.777 | 44 | 37 |
| | 0.707 | 100 | 0.759 | 82 | 68 |
| | 0.707 | 150 | 0.75 | 111 | 91 |
| DS-10% | 0.707 | 50 | 0.817 | 40 | 40 |
| | 0.707 | 100 | 0.815 | 70 | 70 |
| | 0.707 | 150 | 0.817 | 92 | 92 |

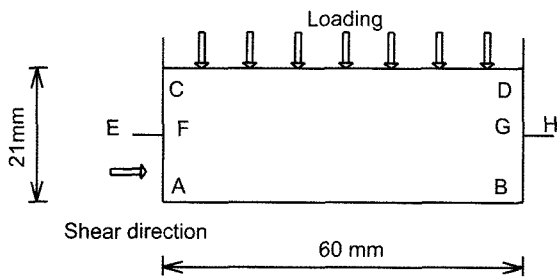


그림 2. 수치해석에 이용된 직접전단상자 측면도

하는 모든 수직력을 단면적으로 나누어 수직응력을 계산하였다. 전단응력은 상부전단상자에 작용하는 수평력을 전단면으로 나누어 산정하였다. 전단과정은 하부전단상자를 오른쪽으로 이동시키면서 모사하였다.

3.2 입력상수

상대밀도에 따라 시료의 거동을 파악할 수 있는 선형 접촉모델을 이용해 수치해석을 수행하였다. 용해성 입자와 비용해성 입자를 고르게 분포시켜 모델링하였으며, 입자크기는 실제 실험에 사용된 시료와 동일하게 설정하였다. 전단이 진행되는 동안 Density Scaling을 설정하여 해석과정에서 연산량을 줄였다. 수치해석시 사용된 모든 입력값을 표 2에 나타내었다.

3.3 시료생성

수치해석 시 시료를 생성하는 방법에는 Expansion Method와 Gravitational method가 있다. Expansion Method는 입자수를 미리 결정하고 초기에 생성된 입자의 반지

표 2. 수치해석 입력값

| | 입자 | 강체벽 |
|--------------------------|-----------------|-----------------|
| 수직강성, $K_n(N/m)$ | 1×10^7 | 2×10^9 |
| 전단강성, $K_s(N/m)$ | 5×10^6 | 1×10^9 |
| 최대입자반경, $r_{max}(m)$ | 0.0003 | |
| 최소입자반경, $r_{min}(m)$ | 0.000213 | |
| 비용해성입자밀도, $\rho(kg/m^3)$ | 2620 | |
| 용해성입자밀도, $\rho(kg/m^3)$ | 2160 | |
| 마찰계수 | 1 | 0.9 |

름을 원하는 크기만큼 점점 확대시켜 평형조건을 만족시키는 방법이다. 반면, Gravitational method은 시료의 높이를 목표로 하는 높이보다 크게 설정한 후 중력을 작용시켜 평형조건을 만족시킨다. 직접전단실험의 수치해석 시 앞의 두가지 방법으로 만들어진 시료의 거동은 동일한 것으로 알려져있다(Cui와 O'Sullivan 2006). 본 수치해석에서는 해석과정의 연산량을 줄이기 위해 Expansion method를 선택하였고, 시료의 간극률은 목표치보다 크게 설정한 후 수직응력을 가하여 압밀시킴으로서 목표로 하는 간극률로 맞추었다. 입자간의 마찰계수를 조절하여 상대밀도를 조절한 후 용해과정과 전단 전, 입자간 마찰계수를 실제값으로 재설정하였다. 2차원 상의 수치해석을 수행하였으므로 입자가 차지하는 면적을 통해 소금부피비를 결정하였다. 0, 2, 5, 10%는 비용해성 입자의 면적에 대한 용해성 입자의 면적비(% of soluble particles = $A_{soluble}/A_{non-soluble} \times 100\%$)를 의미하며 균질하고 등방성인 시료조건을 위해 용해성 입자를 먼저 생성하였다. 입자의 반지름은 최대, 최소 반지름 영역에서 임의로 결정되었다.

수치해석에서 상대밀도는 시료의 현재 패킹상태를 나타낸다. 실제 직접전단실험에서 입자의 거동을 구현하기 위해 2, 5, 10%의 소급부피비를 가지는 시료의 패킹밀도는 모래로만 이루어진 시료의 패킹밀도와 동일하게 설정하였다. 상대밀도는 다음 식 (1)을 이용하여 산정하였다.

$$D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (1)$$

여기서 D는 상대밀도이고 e_{\max} 는 최대 간극비이며, e_{\min} 은 최소 간극비이다. 3차원상의 간극률을 2차원으로 변환하기 위하여 다음과 같은 식 (2)를 사용하였다.

$$e_{2D} = e_{2D,\max} - D(e_{2D,\max} - e_{2D,\min}) \quad (2)$$

여기서 e_{2D} , $e_{2D,\max}$, 그리고 $e_{2D,\min}$ 은 수치해석의 2차원 간극비, 최대간극비 그리고 최소간극비이다.

2차원상 시료의 최대, 최소간극비는 등가직경을 갖는 원형입자로부터 산정되었다. 본 수치해석에서는 간극률을 변수로 설정하였으며 앞에서 구한 간극비는 식 (3)을 통해 간극률로 변환하였다.

$$n = \frac{e}{e+1} \quad (3)$$

여기서, n은 간극률이며 식 (1)과 식 (3)을 이용하여 산정한 간극비는 0.69이고, 간극률은 0.41이다. 이는 2차원 모델링상에서 계산한 간극률인 0.126과 일치한다. 본 수치해석은 100kPa의 수직응력 하에서 전단실험을 모델링한 것이다.

3.4 해석과정

수치해석시 전단상자를 먼저 만들고 입자를 생성하였으며, 시스템이 평형상태에 도달한 후 수직응력을 상부경계면에 작용시켰다. 소급의 용해과정은 각 단계마다 입자의 반경을 줄여가면서 수치해석에서 용해성 입자의 크기를 점차적으로 감소시키는 것으로 모사하였다. 용해성 입자의 반경을 0으로 근접시켰을 때 용해과정은 완료되었다고 간주하였으며, 시료를 전단하는 과정은 하부전단상자를 오른쪽으로 수평이동시킴으로써 모사하였다.

3.5 응력-변형을 거동

본 수치해석은 100kPa의 수직응력 하에서 전단실험을 모델링한 것으로 수평변형률에 따른 전단응력과 수직변형률의 변화를 그림 3(a)와 그림 3(b)에 각각 나타내었다. 용해성 입자를 0, 2, 5% 포함한 시료의 경우, 침투전단강도가 나타나는 반면에 용해성 입자를 10% 포함한 시료의 경우는 침투전단강도가 나타나지 않았다. 용해성 입자의 부피비가 증가할수록 침투전단강도는 감소하였으며, 잔류전단강도는 비슷하였다. 그림 3(b)와 같이 용해성 입자의 부피비가 0, 2, 5%인 시료의 경우, 수직변형률에서 수축과 팽창하는 반면, 용해성 입자를 10%포함하는 시료의 경우 수축하는 경향만 보였다. 수치해석 결과는 실험결과와 비슷한 경향을 보였으며 수치해석 결과를 표 3에 정리하였다. 여기서 주의해야 할 사항은 수치해석은 시료의 거시적 거동을 관찰하기 위해 실시한 것으로, 수치해석의 결과값과 실험결과값은 정확히 일치하지는 않는다는 것이다.

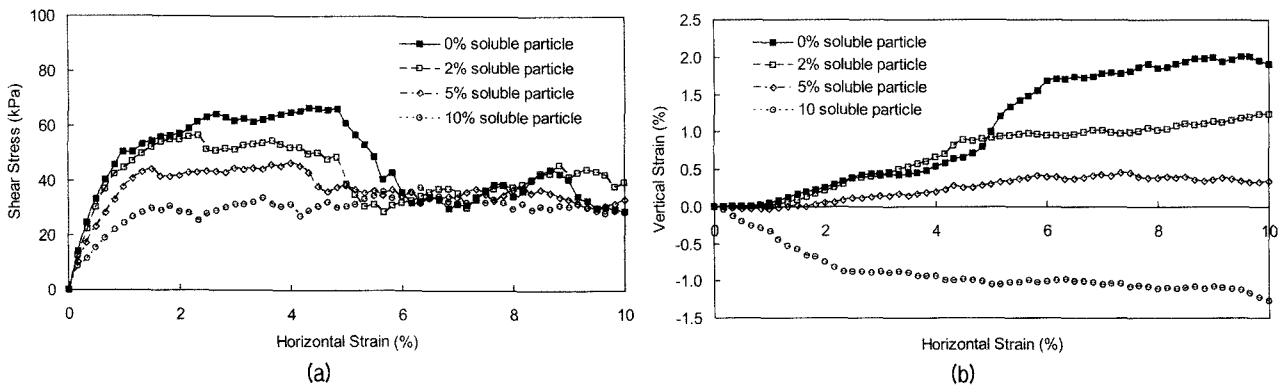


그림 3. 수직응력 100kPa에서 수치해석 결과: (a) 수평변형률-전단응력; (b) 수평변형률-수직변형률

표 3. 수치해석 결과

| 시료조건 | 초기 간극률 | 용해 후 간극률 | 전단발생 전 접촉점수 | 첨두전단강도 (kPa) | 잔류전단강도 (kPa) |
|--------|--------|----------|-------------|--------------|--------------|
| DS-0% | 0.126 | 0.126 | 4.59 | 65.4 | 37.7 |
| DS-2% | 0.126 | 0.143 | 4.49 | 54.6 | 36.3 |
| DS-5% | 0.126 | 0.165 | 4.28 | 43.5 | 35.7 |
| DS-10% | 0.126 | 0.195 | 3.91 | 31.2 | 31.2 |

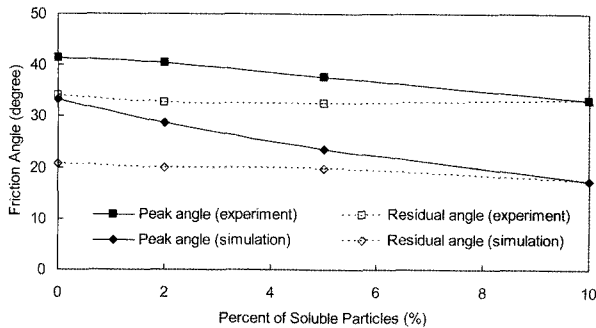


그림 4. 용해성입자의 부피비에 따른 첨두상태와 잔류상태에서의 내부마찰각

4. 분석 및 고찰

4.1 용해성 입자 부피비

그림 1(a)와 그림 3(a)는 용해성 입자의 부피비가 증가함에 따라 직접전단실험 시 첨두전단강도가 잔류전단강도로 수렴해 가는 것을 보여준다. 실험결과와 수치해석결과에서 산정된 강도값을 그림 4에 나타내었다. 소금부피비가 0%인 시료와 10%인 시료를 비교했을 때 실험의 경우 내부마찰각이 약 20% 감소하였으며 수치해석의 경우 48% 감소하였다. 이러한 결과는 용해성 입자가 용해되면서 시료에 함유된 용해성 입자의 부피비에 비례하여 시료의 간극비가 증가하고(Truong 등 2010), 간극비의 증가로 인해 시료의 최대내부마찰각이 감소한다는 것을 보여주고 있다.

4.2 접촉점 수

입자들의 평균 접촉점 수(coordination number)는 다음 식을 이용하여 산정하였다(Rotherburg와 Bathurst 1989).

$$CN = \frac{M}{N} \quad (4)$$

여기서 M은 물리적 접촉점 수를 2배한 것이며 N은 수치해석 모델링에 사용된 입자의 수이다. 식 (4)를 다

른 형태로 나타내면 아래와 같다.

$$CN = \frac{2M_{pp} + M_{pw}}{N} \quad (5)$$

여기서, M_{pp} 는 입자간의 물리적 접촉점 수이며, M_{pw} 는 입자와 전단상자간의 물리적 접촉점 수이다. 전단발생 전의 접촉점 수를 표 3에 정리하였다.

접촉점 수는 집합체의 패킹상태를 나타내는데 접촉점 수가 감소하면 입자조직(fabric)이 불안정해지므로 전단강도는 감소할 것이다. 수치해석 결과, 전단이 발생하기 전 용해성 입자의 부피비가 증가할수록 접촉점 수가 감소함을 보여준다. 용해성입자를 10% 포함한 시료의 경우, 용해과정이 완료된 후 접촉점 수는 3.91이었으며 이는 가장 느슨한 패킹상태인 단순입방구조의 패킹상태보다 더 작은 값이다. 따라서, 입자가 용해되면 입자조직이 불안정해지므로 전단강도는 감소한다.

4.3 입자구조와 접촉력

지반을 구성하는 흙 입자의 배열은 역학적인 거동에 있어서 중요한 역할을 한다. O'Sullivan(2004)은 균일한 구형입자의 거동을 관찰하기 위해, 이론적으로 유사한 패킹밀도를 나타내지만 등방성 구조인 면심입방체(face-centered-cubic)배열과 비등방성 구조인 사방십이면체(rhombic)배열에 대하여 삼축압축시험과 평면변형률시험을 수행하였고, 수치해석도 병행하였다. 그 결과 초기의 상대밀도가 비슷한 상태라도 흙 입자의 구조가 다르면 전단강도가 달라짐을 보여주었다.

본 연구에서 수행한 수치해석의 패킹상태와 접촉력 연결사슬(contact force chains)을 그림 5에 나타내었다. 용해로 인한 입자의 소실 때문에 국부적인 간극이 생기고 입자가 이방성을 나타내면서 입자간의 접촉력이 감소하게 된다. 용해작용으로 인한 입자구조의 변화를 더 면밀히 살펴보기 위해, 전단하기 전의 접촉방향성(contact normal), 수직접촉력(normal contact force), 그리고 전단

| 용해성 입자 부피비 | 패킹상태 | 접촉력 연결사슬 |
|---------------|------|----------|
| 0% | | |
| 2% | | |
| 5% | | |
| 10% | | |

그림 5. 수치해석에서 용해성 입자의 용해 후 패킹상태와 접촉력 연결 사슬

접촉력(shear contact force)의 극분포(polar distribution)를 식 (6)과 같이 계산할 수 있으며, 그 결과를 그림 6에 나타내었다.

$$P(\theta) = \Sigma p(\theta) \quad (6)$$

여기서, $\Sigma p(\theta)$ 은 법선방향이 θ 인 접촉점 수의 합, 연직접촉력 크기의 합, 또는 전단접촉력 크기의 합이다. 그림 6의 극분포 크기는 각각 접촉점의 수, 총 연직접촉력, 총 전단접촉력을 나타내고 있다. 이러한 극분포는 입자들이 어떻게 재배열되었는지 보여주고, 극분포가 원형에 근사한 경우 등방성, 원형이 아닌 경우 비등방성으로 배열되었음을 나타낸다(Rothenburg, 1980).

모래로만 이루어진 시료의 경우 수직접촉방향과 수직접촉력의 극분포는 균질하며 전단상자를 구성하는 벽의 영향으로 비등방성을 나타낸다. 전단접촉력은 초기 압밀과정에서 작게 설정된 입자간 마찰계수의 영향으로 매우 작음을 알 수 있다. 입자의 용해로 인하여 수직접촉방향, 수직접촉력은 감소하는데 반하여 전단접촉력, 접촉방향성의 비등방성, 수직접촉력, 전단접촉력은 증가하였다. 하지만 접촉방향성과 수직접촉력의 지배적 방향(preferential orientation)은 변하지 않고 동일하게

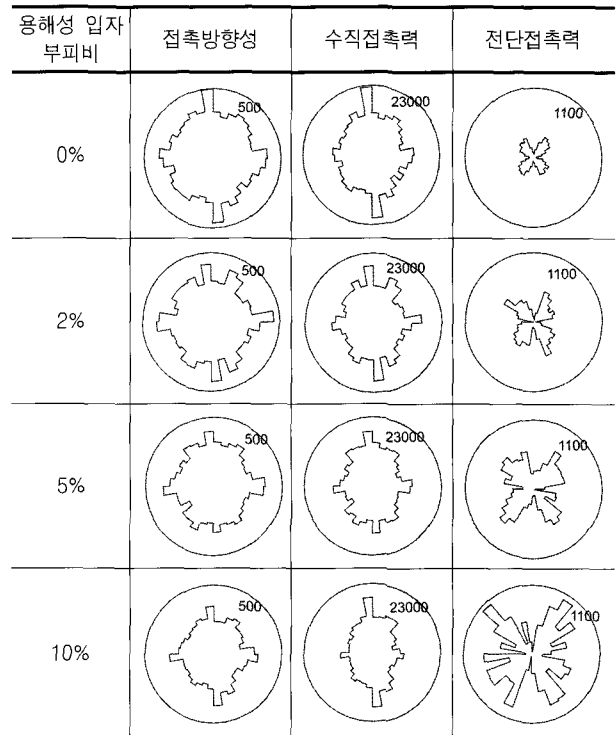


그림 6. 수치해석에서 용해성 입자의 용해 후 전단 전 접촉방향성, 수직접촉력, 전단접촉력의 극분포. 경계부근의 500, 23000, 1100은 해당 원의 반지름임.

수평축으로부터 약 90° 를 유지하였다. 용해성 입자의 부피비가 증가할수록 접촉방향성과 수직접촉력은 감소하지만 전단접촉력은 증가한다. 힘 네트워크(force network)의 변화는 입자 상태를 더욱 불안정하게 하고 그 결과 전단강도는 감소한다.

수치해석상 침투강도상태와 잔류강도상태에서 접촉방향성, 수직접촉력, 전단접촉력의 극분포를 그림 7과 그림 8에 나타내었다. 그림 6, 그림 7, 그리고 그림 8은 시료의 전단에 따른 입자구조, 수직접촉력, 전단접촉력의 전개과정을 보여준다. 전단이 진행됨에 따라 접촉방향성, 수직접촉력, 전단접촉력은 증가하며 비등방성은 침투강도상태에서 최대가 된다. 초기 용해성 입자 부피비가 클수록 비등방성은 커진다. 입자가 용해되면 접촉방향성, 수직접촉력, 전단접촉력이 감소하며, 이로 인해 전단강도가 감소한다. 접촉방향성, 수직접촉력, 전단접촉력의 지배적방향은 전단과정동안 변하였다. 수치해석 동안 침투상태 또는 잔류상태에서 접촉방향성과 수직접촉력은 일치하며 수평축으로부터 약 45° 에 근접한다. 접촉점들은 주로 최대경계하중의 방향과 동일한 방향으로 집중되며 이는 타 연구자(Rothenburg와 Bathurst 1989)의 결과와도 유사하다. 따라서 전단이 발생하면 시료내부 힘의 주방향은 수평축에서 약 45° 방향이며,

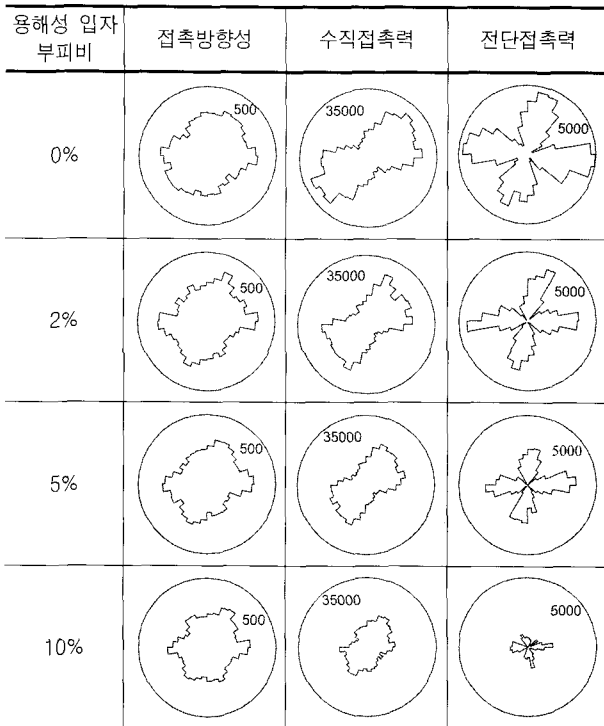


그림 7. 수치해석에서 수평변형률 4.17%(침투전단강도 근처) 발생 시 접촉방향성, 수직접촉력, 전단접촉력의 극분포. 경계부근의 500, 35000, 5000은 해당 원의 반지름 임.

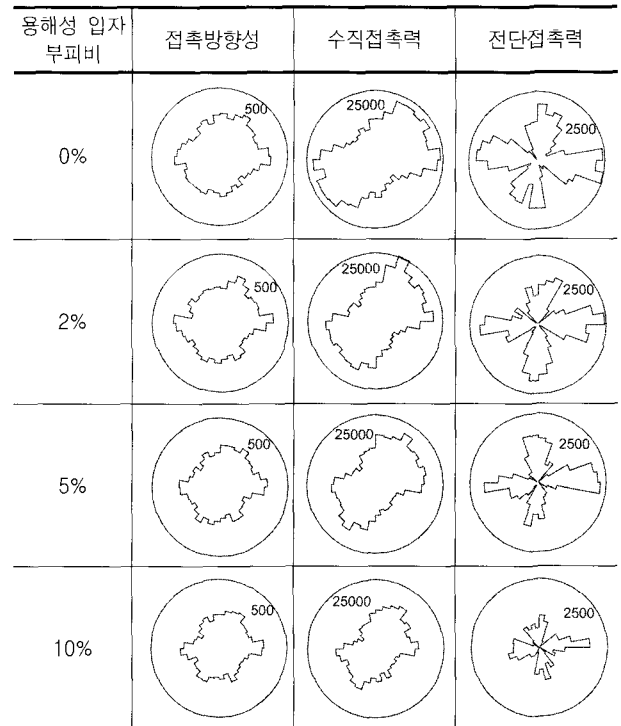


그림 8. 수치해석에서 수평변형률 8.33%(잔류전단강도 근처) 발생 시 접촉방향성, 수직접촉력, 전단접촉력의 극분포. 경계부근의 500, 25000, 2500은 해당 원의 반지름 임.

이는 접촉력 연결사슬을 관찰함으로써 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 지반재료의 소실에 따른 전단강도의 영향을 관찰하기 위하여 소금과 모래로 조성된 시료를 이용하여 직접전단실험을 수행하였다. 또한 입자의 크기를 감소시키는 방법을 이용하여 수치해석을 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 직접전단실험 결과, 용해성 입자가 용해됨에 따라 전단강도가 감소하였다. 용해성 입자의 부피비가 증가할수록 전단강도의 감소폭이 더 컸으며, 팽창 거동에서 수축거동으로 변화하였다. 용해성입자의 부피비가 0%인 시료와 10%인 시료를 비교하면, 용해성입자의 부피비가 10%인 시료의 경우 내부마찰 각은 20% 정도 감소하였다.
- (2) 수치해석 결과, 전단강도는 감소하였고 용해성 입자의 부피비가 증가할수록 팽창거동에서 수축거동으로 변화하였다.
- (3) 수치해석 결과를 미시적 관점에서 살펴보면, 입자의 소실에 따른 접촉방향성의 감소, 전단접촉력의

증가, 입자구조의 비등방성은 상당하였으며 접촉점 수는 감소하였다. 간극비의 증가, 접촉점 수의 감소, 접촉방향성과 수직접촉력의 감소, 전단접촉력의 증가, 입자구조의 비등방성 등이 전단강도의 감소에 기인한다는 것을 알 수 있었다.

- (4) 전단이 진행됨에 따라 힘의 지배적 분포를 보여주는 사슬방향은 90°에서 45°로 변하였다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 및 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(2010-0016605 및 2011-0018110)를 밝히며 깊이 감사드립니다.

참고 문헌

1. Azam, S. (2000), "Collapse and compressibility behaviour of arid calcareous soil formations", B. Eng. Geol. Environ, 59(3), 211-217.
2. Bell, F. G. (2007), Engineering Geology 2nd edn, Elsevier, Create Britain.
3. Craft, D. (2005), "Seepage chemistry manual", Report DSO-05-03, US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Dam Safety Technology Development Program, Denver, Colorado.

4. Cui, L., and O'Sullivan, C. (2006), "Exploring the macro- and micro-scale response of an idealised granular material in the direct shear apparatus", *Geotechnique*, 56(7), 445-468.
5. Cundall, P. A., and Strack, O. D. L. (1979), "A discrete numerical model for granular assemblies", *Geotechnique*, 29(1), 47-65.
6. Fam, M. A., Cascante, G., and Dusseault, M. B. (2002), "Large and small strain properties of sands subjected to local void increase", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(12), 1018-1025.
7. Jewell, R. A. (1989), "Direct shear tests on sand", *Geotechnique*, 39(2), 309-322.
8. Lings, M. L., and Dietz, M. S. (2004), "An improved direct shear apparatus for sand", *Geotechnique*, 54(4), 245-256.
9. Masson, S., and Martinez, J. (2001), "Micromechanical analysis of the shear behavior of a granular material", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(10), 1007-1016.
10. Mikheev, V. V., and Petrukhin, V. P. (1973), "Construction properties of saline soils used as foundation beds in industrial and civil construction", *Construction under special soil conditions*.
11. O'Sullivan, C. (2002), "The application of discrete element modelling to finite deformation problems in geomechanics", PhD thesis, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley.
12. O'Sullivan, C., Bray, J. D., and Riemer, M. (2004), "Examination of the Response of the Regularly Packed Specimens of Spherical Particles Using Physical Tests and Discrete Element Simulation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 130(10), 1140-1150.
13. PFC2D. User's manual, Itasca Consulting Group, Inc.
14. Rothenburg, L. (1980), "Micromechanics of idealized granular system", Ph.D. Dissertation, Carleton University, Ottawa, Ontario, Canada.
15. Rothenburg, L., and Bathurst, R. J. (1989), "Analytical study of induced anisotropy in idealized granular materials", *Geotechnique*, 39(4), 601-614.
16. Shibuya, S., Mitachi, T., and Tamate, S. (1997), "Interpretation of direct shear box testing of sands as quasi-simple shear", *Geotechnique*, 47(4), 769-790.
17. Shin, H., and Santamarina, J. C. (2009), "Mineral Dissolution and the Evolution of k_0 ", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(8), 1141-1147.
18. Thornton, C. (2000), "Numerical simulation of deviatoric shear deformation of granular media", *Geotechnique*, 50(1), 43-53.
19. Ting, J. M., Corkum, B. T., Kauffman, C. R., and Greco, C. (1989), "Discrete numerical model for soil mechanics", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 115(3), 379-398.
20. Truong, Q. H., Eom, Y. H., and Lee, J. S. (2010), "Stiffness characteristics of soluble mixtures", *Geotechnique*, 60(4), 293-297.
21. Wang, J., Dove, J. E., and Gutierrez, M. S. (2007), "Discrete-continuum analysis of shear banding in the direct shear test", *Geotechnique*, 57(6), 513-526.
22. Zhang, L., and Thornton, C. (2007), "A numerical examination of the direct shear test", *Geotechnique*, 57(4), 343-354.

(접수일자 2011. 5. 12, 심사완료일 2011. 12. 13)