

흙의 변형국지화 편재에 관한 연구

Omnipresence of Strain Localization in Soils

권 태 혁*¹ Kwon, Tae-Hyuk

조 계 춘*² Cho, Gye-Chun

Abstract

The development of strain localization within shear zones is frequently observed during soil deformation. In fact, the phenomenon appears to be more often the norm rather than the exception. Conceptually, any soil condition that renders negative work increment is prone to localization. In this study, a broad range of soil and loading conditions are investigated to test this criterion, including: dilative soil subjected to drained shear (standard case), contractive soil sheared under undrained conditions, cavitation in dilative soil in undrained shear, inhomogeneous soils, particle alignment in contractive soils made of platy particles, soils that experience particle crushing, and the shear of low-moisture and/or lightly cemented loose soils. Unique specimens and test procedures are designed to separately test each of these soil conditions in the laboratory. According to experimental test results, soil specimens with post-peak strain softening behavior are prone to progressive failure, localization of deformations, and shear banding. The state of stress, the soil density, inherent mechanical and geometrical properties of soil particles, low water content, and heterogeneity can contribute to triggering strain localization. Considering all possible cases of localization, the best method to obtain the critical state line in the laboratory is to use contractive homogeneous specimens subjected to drained shear.

요 지

흙이 변형하는 동안 전단지역 내에서 변형국지화가 자주 관찰된다. 사실상, 그 현상은 예외적이라기보다는 전형적으로 보인다. 개념적으로, 행해진 일의 증가가 음인 경우 변형국지화가 쉽게 발생한다. 이러한 현상을 검증하기 위해서, 본 연구에서는 배수상태의 조밀한 흙, 비배수상태의 느슨한 흙, 비배수전단하의 조밀한 흙에서의 공동화, 비균질한 흙, 판상형의 입자로 된 흙에서의 입자배열, 입자 깨짐을 가지는 흙, 그리고 낮은 함수비나 약한 시멘트결합이 된 흙 등 다양한 흙과 다양한 조건에 대하여 조사를 수행하였다. 이러한 경우들의 각각을 독립적으로 시험할 수 있도록 시료를 제작하였고 실험절차를 구상하였다. 실험결과에 의하면, 최고점후 변형연화거동을 가지는 흙은 변형국지화, 전단대형성, 그리고 점진적 파괴가 되기 쉽다. 응력상태, 흙밀도, 흙입자의 고유적인 역학적·지형화적인 특성, 저함수비, 그리고 비균질성이 변형국지화를 일으키는데 공헌을 하였다. 국지화가 가능한 모든 경우들을 고려해 볼 때, 실내시험으로부터 한계상태정수를 결정하는 최선의 방법은 배수전단하의 느슨하고 균일한 포화시료를 사용하는 것으로 나타났다.

Keywords : Critical state parameters, Deformation, Dilative behavior, Drained behavior, Friction angle, Strain-hardening, Strain-softening, Undrained behavior

*1 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 대학원생 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environ. Engrg., KAIST)

*2 정회원, 한국과학기술원 건설 및 환경공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil and Environ. Engrg., KAIST, gyechun@kaist.ac.kr)

1. 서론

지반시스템의 파괴는 종종 전단변형(shear strain)이 집중적으로 국지화(localization)되는 전단지역(shear zone; 또는 전단대, shear band)의 형성과 전파(propagation)로 이루어진다. 파괴해석이나 파괴 후 거동현상은 국지화나 전단지역내의 흙의 특징적인 거동에 밀접하게 관련되어 있다. 그래서 흙에서의 국지화 현상과 공학적 설계와의 밀접한 연관성을 이해하는 것이 중요하다고 할 수 있다. 예를 들어, 파괴 및 파괴후 거동해석을 위하여 사용되는 구성법칙(constitutive law)들은 전통적으로 실내에서 수행된 “요소시험(element test)” 결과를 바탕으로 보정이 된다. 하지만 실내시험은 현장 원위치(in-situ)에서 전단되는 지역의 한 요소를 구현하는데 의미가 있기 때문에 실내시험용 시료들은 국지화없이 균일한 변형을 겪어야만 한다.

많은 연구자들이 국지화현상에 관하여 이론해석 및 수치해석으로 연구를 수행하였다. Rudnicki & Rice(1975)는 연속체역학을 근간으로 한 이분화(bifurcation) 이론을 통하여 압력에 민감한 팽창성 물질(pressure-sensitive dilatant material)에서의 변형국지화에 대한 임계조건을 분석하였다. Vardoulakis(1978)는 탄소성 모델을 바탕으로 과립매체(granular media)에 대하여 국지화된 이분화의 첫 번째 이론을 개발하였다. Muhlhaus & Vardoulakis(1987)는 증분 Cosserat 소성이론을 이용하여 전단대의 두께를 계산하였다. Jenkins(1991)와 Muhlhaus & Oka(1996)는 변형 불균등성과 변형 연화(strain softening)를 연속체역학으로 다루는데 있어서의 어려움을 극복하기 위하여 일반화된 연속체 이론(generalized continuum theory)을 개발하였다. Kolymbas(1991), Gudehus(1998), Bauer & Huang(1998), 그리고 Herle(1998)은 밀도와 과립특성(granulometric property)을 고려한 hypoplastic 구성모델을 개발하였다. 최근에는 컴퓨터 알고리즘의 높은 수행능력의 도움으로 개별요소법(DEM)과 같은 수치해석 모델들이 2-D나 3-D 과립배열에서의 입자 움직임이나 국지화를 구현하기 위해 개발되었다.

이론 및 수치해석 연구는 구성모델 개발이나 변형국지화를 분석하는데 초점을 두어온 반면, 실험연구는 분석이나 수치해석연구에 필요한 인자들을 제공하거나 국지화의 존재성 여부를 탐구해왔다. 실험연구는 배수 전단하의 조밀한 시료에 주로 시행되어 왔고 아주 이따금씩 비배수 전단하의 시료에 관심이 주어졌다. 최근의 실험연구는 평면변형(plane-strain) 압축시험을 바탕으로

배수조건이나 전체적으로 비배수 조건에서 하중이 가해졌을 때, 느슨하거나 조밀한 상태에 상관없이 사질토에서 전단대가 형성됨을 보여주었다(Han & Vardoulakis, 1991; Finno *et al.*, 1997; Mooney *et al.*, 1997).

본 연구에서는 다양한 흙과 하중조건하에서 국지화현상의 전개 가능성을 실내시험을 통하여 탐구하고자 한다. 먼저 국지화되기 쉬운 조건을 용이하게 선별하기 위하여 국지화가 시작되는 이론적 기준을 제시하였다. 이를 바탕으로 국지화가 가능한 다양한 흙의 조건들을 선별하였으며, 각각의 경우에 대해 실내시험을 통하여 국지화현상의 발생여부를 예측하였다. 또한 모든 가능한 국지화 현상을 고려하여 공학적 설계에 타당한 한계상태정수(critical state parameter)를 산정하기 위한 최선의 방법을 제시하였다.

2. 국지화 시작에 대한 이론적 조건

일반적으로 초기의 하중단계에서의 축방향 압축하중에 의한 응력-변형 반응은 단조로운 변형경화(strain-hardening) 거동을 보인다. 변형이 증가했을 때, 보여주는 작은 경화율(hardening rate)은 연화(softening)되는 지역과 경화(hardening)되는 지역의 공존가능성과 비균질한(heterogeneous) 변형의 시작을 암시한다. 이러한 경우에 평형(equilibrium)은 두 갈래로 나누어지는 이분화(bifurcation)를 시작한다. 이분화 후의 대역에서는 변형에 대한 전체적 응력반응이 연화되는 거동을 보여주면서 변형은 한개 이상의 전단대로 국지화된다. 실험적 관찰에 따르면 전단대 형성은 유효응력비(effective stress ratio; σ'_1/σ'_3)가 최고점 주변이나 갑자기 떨어질 때 발생한다(Finno *et al.*, 1996; Chu *et al.*, 1996; Mokni & Desrues, 1999). 누구보다도 Hill(1962), Hill & Hutchinson(1975), Rudnicki & Rice(1975), Rice & Rudnicki(1980), 그리고 Vardoulakis(1978) 등은 국지화와 전단대 형성의 시작에 대한 조건을 이론적으로 조사하였다.

2.1 유일성 정리 - 일 증분

대부분의 이론적 해석은 유일성 정리(unicqueness theorem)나 이차 일 증분(second order work increment)에 근거한다(상세한 내용은 Vardoulakis & Sulem, 1995 참조). 만일 이차 일 증분($\Delta_2 W$)이 양(positive)이면, 증분경계치문제(incremental boundary value problem)는

유일한 해를 갖는다. 반면에 아래와 같은 조건에서는 물질(material)이 불안정하게 된다(즉, 유일하지 않는 해가 존재한다):

$$\Delta_2 W \approx \Delta \sigma_{ij} \Delta \epsilon_{ij} < 0 \quad (1)$$

여기서 $\Delta \sigma_{ij}$ 는 미소응력증분텐서(infinitesimal stress increment tensor)이고 $\Delta \epsilon_{ij}$ 는 미소변형증분텐서(infinitesimal strain increment tensor)이다. 이러한 경우에 물질은 축적된 에너지의 일부를 되돌리고자 한다. 예를 들어, 한 물질의 응력-변형률 곡선에서 최고점 이전(경화) 지역은 안정하며($\Delta \sigma > 0$, $\Delta \epsilon > 0$, $\Delta_2 W > 0$), 최고점을 지난(연화) 지역은 불안정하다($\Delta \sigma < 0$, $\Delta \epsilon > 0$, $\Delta_2 W < 0$).

2.2 미시(microscale)사고적 시험

우선 변형경화거동을 가지는 흙을 고려해보자. 매체의 한 요소가 파괴상태에 접근할 때, 그 요소는 강해지다가 주변에 있는 요소들이 비슷한 강도에 도달하여 변형을 강요할 때까지는 변형이 억제된다. 다시 말하면, 변형경화하는 물질들은 균일한 변형장(deformation field)으로 전개하고자하는 경향이 있다.

다른 한편으로, 최고점을 지나면 변형연화거동을 나타내는 사질토와 같은 과립매체(granular media)를 고려해 보자. 매체에서 첫 번째로 응력최고점에 도달하는 한 요소는 더 큰 변형에 연화되기 시작하고 그 요소가 담당하는 하중의 일부를 주변의 요소들에게 전가한다. 차례로 이러한 요소들은 비슷한 운명을 겪으며 결국 파괴면을 전파하게 된다. 일단 메커니즘이 형성되면 파괴면에 의해 묶인 블락들은 강체(rigid body)로 움직이며 변형은 파괴면의 내부로 국지화된다. 식 (1)과 일치하는 이

러한 미시사고적 시험은 최고점 이후 변형연화거동을 가지는 물질에서 점진적 파괴(progressive failure)나 변형 국지화가 쉽게 발생함을 보여준다.

2.3 가정된 흙의 조건들

이러한 가설을 바탕으로 본 연구에서는 다음과 같은 경우들을 고려하여 심도 있는 연구를 수행하고자 한다: 배수전단하의 조밀한 흙; 비배수전단하의 느슨한 흙; 비배수전단하의 조밀한 흙에서 물 공동화(water cavitation); 판상형 입자(platy particle)로 구성된 흙에서의 입자배열(particle alignment); 약하게 시멘트결합이 된 느슨한 흙(lighty cemented loose soil); 낮은 함수비를 가지는 불포화토; 입자 깨짐을 가지는 흙; 그리고 비균질한 흙 등. 각각의 경우에 대하여 국지화 현상의 발생여부를 증명하기 위하여 실내시험을 수행하였다. 그 목적은 각각의 메커니즘에 대하여 설득력 있는 모델을 제시하여 입증하거나, 국지화 기준 또는 가설이 거짓임을 밝히는데 있다.

3. 실내시험

3.1 시험에 사용된 흙

시험에 사용된 흙들과 지반인자들을 요약하면 표 1과 같다. sandboil sand는 미국 Arkansas주의 액상화(liquefaction)를 겪었던 현장으로부터 채취된 자연 흙이며, 어느 정도의 세립분을 포함하고 있다. 입자배열에 의한 국지화를 연구하기 위하여 mica flakes를 사용하였고, 입자 깨짐이 국지화와 연관이 있는지를 알아보기 위하여 Fuller's earth를 사용하였다. 모든 시험은 삼축압축시험기를 사용하여 수행되었다.

표 1. 시험에 사용된 흙과 지반인자

Soil	e_{max}	e_{min}	D_{50} (mm)	D_{10} (mm)	C_u	C_c	G_s	R	S
Blasting sand	1.025	0.698	0.71	0.42	1.94	0.94	2.65	0.3	0.55
Fullers earth	-	-	1.6	0.77	2.64	0.77	2.30	0.3	0.5
Kaolinite	-	-	0.005	0.001	6.3	0.76	2.70	-	-
Mica flakes*	-	-	0.5	0.3	1.7	1.21	2.82	0.2	0.1
Ottawa 20-30 sand	0.742	0.502	0.72	0.65	1.15	1.02	2.65	0.9	0.9
Ottawa F-110 sand	0.848	0.535	0.12	0.081	1.62	0.99	2.65	0.7	0.7
Sandboil sand	0.790	0.510	0.36	0.17	2.41	1.29	2.62	0.55	0.7

주석: e_{max} = 최대간극비, e_{min} = 최소간극비, C_u = 균등계수(= D_{60}/D_{10}), C_c = 곡률계수(= $D_{30}^2/D_{10}D_{60}$), G_s = 비중, R = 입자의 원형성(roundness, 입자안에 내접시킬 수 있는 가장 큰 원의 반지름에 대한 입자표면형상의 평균곡률반경의 비), S = 입자의 구형성(sphericity, 입자에다 외접시킬 수 있는 가장 작은 구의 지름에 대한 내접시킬 수 있는 가장 큰 구의 지름의 비), 그리고 * 두께에 대한 직경비(the diameter to thickness ratio) = 10 to 15.

3.2 배수전단하의 조밀한 시료(가장 보편적인 경우)

sandboil sand로 성형된 조밀한(dense) 시료를 유효구속응력이 $\sigma'_3 = 160$ kPa가 될 때까지 점진적으로 증가시켜, 최종 간극비는 $e = 0.539$ 가 되었다. 시료에 편차압력을 가하며 배수 삼축압축시험을 실시하였고, 그 결과는 그림 1과 같다. 응력-변형 반응이 최고점후(post peak) 변형-연화거동(strain-softening behavior)을 보이며, 일정한 한계상태강도(critical state strength)에 접근한다(그림 1(a)). 간극비는 초기에 미세하게 수축(contraction)한 후 현저하게 팽창(dilation)하며, 일정한 값으로 접근한다(그림 1(b)). 응력 최고점을 막 지났을 때 첫 번째 전단대(shear band)가 시료의 측면에서 나타났고, 변형이 계속 증가하면서 다른 전단대들이 뒤를 이어 발생했다(그림 1(a)).

비교를 위하여 같은 sandboil sand로 느슨한(loose) 시료를 성형하였고, 조밀한 시료와 같은 응력경로를 적용하여 도달한 최종 간극비는 $e = 0.773$ 이다. 느슨한 시료의 응력-변형 반응(그림 1(a))은 최고점이나 최고점후 연화현상이 없는 변형경화거동(strain-hardening behavior)을 보여주며, 대변형에서는 일정한 강도로 접근한다. 간극비는 단조수축거동을 보여주며 한계상태(critical state) 간극비로 접근한다(그림 1(b)). 시료는 35% 변형에서 슬통과 같은 불룩한 형태를 보였으며, 전단대(국지화)를 전혀 보여주지 않았다.

Desrues *et al.* (1996)은 X-ray CT (computed tomography) 방법을 이용하여 관찰한 느슨한 시료는 무려 42% 변형까지 어떠한 국지화도 보여주지 않음을 보였다. 더욱이 느슨한 시료에서 국지적으로 측정된 간극비나 전

체적으로 측정된 간극비는 시료의 세장비(slenderness)나 끝단마찰(end-restraint friction)효과와 관계없이 일치하였다.

대변형에서 느슨한 시료와 조밀한 시료는 같은 축차응력에 도달한 반면, 전체적으로 측정된 간극비는 상당한 차이를 보여준다. 그 이유는 조밀한 시료에서 변형국지화가 전체적인 팽창을 방지했기 때문이다. 이러한 결과는 한계상태 마찰각(critical state friction angle)은 초기 간극비나 국지화효과에 의해 크게 영향을 받지 않는 반면, 외부에서 추정된 전체적인 최종 간극비는 현저하게 영향을 받음을 보여준다. 디지털영상처리기술을 이용한 Saada *et al.*(1999)의 결과에 의하면, 전체적인 전단변형이 8%일 때, 국지적인 전단변형이 대략 160%정도 된다. 따라서 배수시험시 시편이 국지화가 되면, 측정된 체적 데이터는 시료전체의 체적변화를 대변하지 못하지만 측정된 강도는 대변형 후의 전단저항값과 유사하다고 볼 수 있다.

3.3 비배수전단하의 느슨한 시료

그림 2는 느슨한 Ottawa 20-30 sand로 성형된 시료의 전형적인 수축(contractive)-비배수 거동을 보여준다. 시료는 습윤충진(moist-tamping)방법으로 성형되었고, 초기 유효구속응력 $(\sigma'_3)_0 = 160$ kPa에서 간극비는 $e = 0.707$ 이다. 매우 분명한 최고점후 변형연화반응을 보여주었다. 전단대를 시각화하기 위해서 초고속 디지털 사진기 등 다양한 실험용 장치를 고안하여 시도하였으나 간극수압생성에 의한 멤브레인(membrane)의 부풀림 때문에 전단대는 가려져 관찰되지 않았다. 하지만 입체사진기법

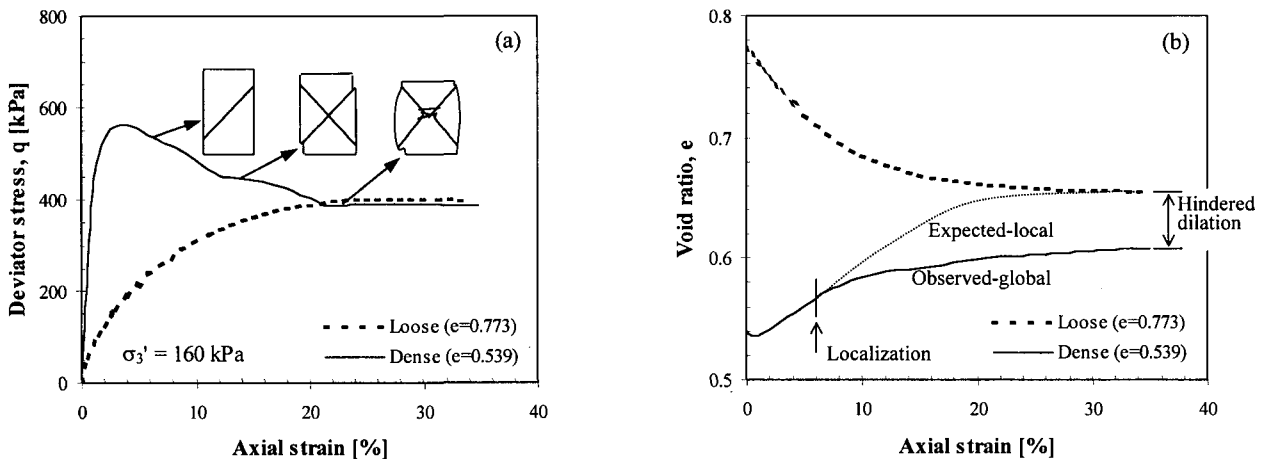


그림 1. sandboil sand로 성형된 느슨한 시료와 조밀한 시료에 대한 배수시험 결과

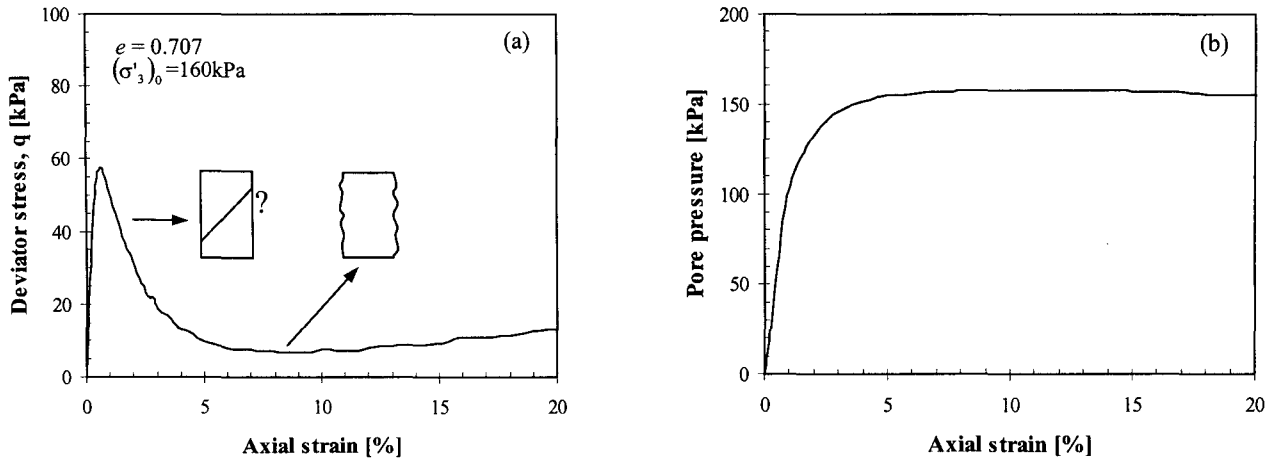


그림 2. Ottawa 20-30 sand로 성형된 느슨한 시료에 대한 비배수시험 결과

(stereophotogrammetry technique)을 이용하여 Finno *et al.*(1998)과 Mokni & Desrues(1999)는 비배수하의 느슨한 시료에서 최고응력비(peak stress ratio) 도달직전에 선명한 전단대를 관찰하였다. 이는 사질토의 액상화 문제에 있어서 통상적으로 느슨한 시료의 비배수시험으로부터 전단강도나 한계상태정수를 결정하는 것에 대한 오류가능성을 시사한다. 즉 시험동안 시료로부터 액상화거동을 관찰할 수 있을지는 모르지만 측정된 값들은 변형국지화에 의해 영향을 받아 흙의 진정한 특성을 대변한다고 할 수 없다.

3.4 비배수전단하의 조밀한 시료 - 공동화

일반적으로 비배수조건하의 조밀한(팽창하는) 시료는 변형경화 거동 즉 균질한 변형을 보여서 전단대의 생김은 기대되지 않는다. 그러나 음의 간극수압(negative

pore fluid pressure)이 상온에서 대략 100 kPa인 포화증기압(saturation vapor pressure)에 도달할 때는 유체공동화(fluid cavitation)가 발생한다. 이러한 포화토의 간극수가 공동화되는 현상이 발생할 때, 변형연화 메커니즘이 기대된다.

sandboil sand로 성형된 조밀한 시료의 전형적인 비배수 삼축압축시험 결과가 그림 3에 나타나 있다. 초기 유효구속압력 $(\sigma'_3)_0 = 160$ kPa에서의 간극비는 $e = 0.577$ 이었다. 변형에 따라 편차압력이 계속 증가하고(즉 변형경화 거동, 대략 20% 축변형에서 물의 공동화로 인한 최고점후 약간의 연화 거동을 보여주고 있다. 추정된 값들에 의하면 물이 -80 kPa에서 공동화되었다(또한 Schrefler *et al.*, 1996; Roger *et al.*, 1998; Mokni & Desrues, 1999 참조). 배압(back pressure)이 크면 클수록 공동화가 일어나는 편차응력이 더 커지므로, 모든 조건들이 같아도 다른 배압의 사용은 다른 응력-변형 거동을 낳게 된다.

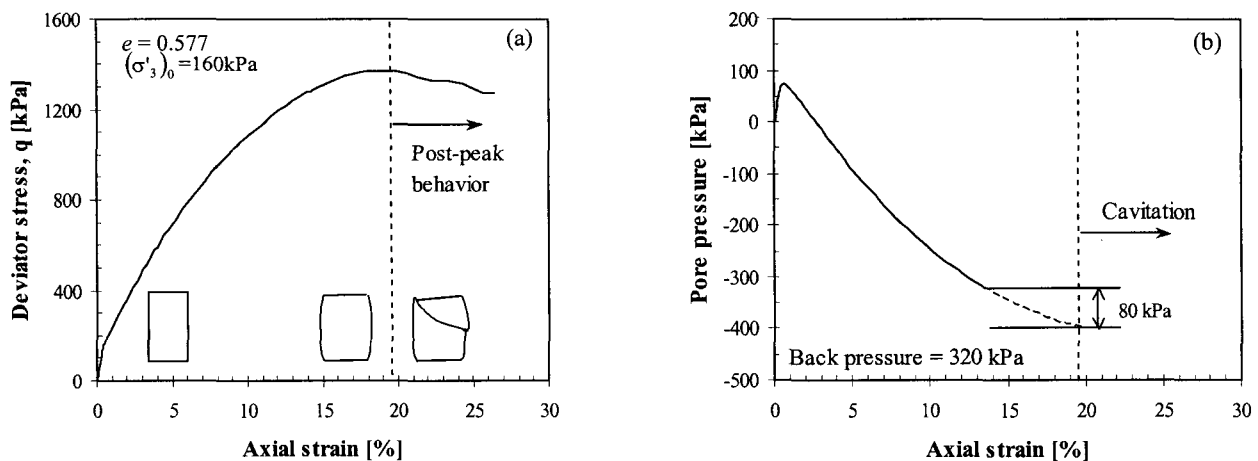


그림 3. sandboil sand로 성형된 조밀한 시료에 대한 비배수시험 결과

한 개의 전단대가 최고편차응력에서 보이기 시작했고 변형률이 더 증가함에 따라 명확해졌다. 시료안의 어느 한 지점에서 간극수 공동화가 생기면, 음의 간극수압은 감소하고, 국지적 유효응력이 떨어진다. 이로 인해 흙은 국지적으로 약해지고, 그 지역은 대변형을 경험하게 된다.

3.5 판상형입자의 배열

전단변형은 입자변위(*particle displacement*)와 회전(*rotation*)을 수반한다. 전단하는 동안 구형입자들은 선호하는 방향성(즉 지향성)을 가지지 않지만, 판상형 입자들은 전단하는 에너지를 최소화하기 위하여 전단방향에 따라 자기 자신들을 배열한다. 흥미롭게도 입자들이 전단면에 평행하게 배열하지 않고, 입자형태와 내부마찰각(*interparticle friction angle*)에 의존하여 전단방향에 일정한 각도로 배열한다는 것은 주목할만하다. Aloufi & Santamarina(1995)의 실험적 관찰에 의하면, 판상형입자(예: 쌀)로 구성된 과립매질은 부피수축(*volume contraction*)이 진행되는 경우에도 변형국지화를 겪을 수도 있다고 한다.

이러한 관찰을 증명하기 위해서 mica flakes(두께에 대한 직경의 비 = 10~15)의 느슨한 시료에 대하여 삼축압축시험을 실시하였다. 시료는 느린 침강법(*water-pluviation method*)을 사용하여 수평면으로 입자가 배열하도록 준비하였다. 간극비는 유효응력 $\sigma'_3 = 80$ kPa에서 $e = 1.36$ 이고, 결과는 그림 4와 같다. 편차응력은 최고점후 연화거동을 보여주었고, 한 개의 분명한 전단대가 최고편차응력 바로 후에 관찰되었다. 전단대가 형성

된 후에는 전체부피의 감소가 중단되었고 약간의 팽창이 관찰되었다. 이러한 결과를 판상형의 점토입자(예: kaolinite와 bentonite)에 연장시켜보면 느슨한 정규압밀 점토에서도 변형국지화의 가능성을 시사한다. 판상형입자의 존재는 낮은 “잔류(*residual*)” 강도를 만든다(강도는 세립자의 양과 입자들의 세장비의 함수이다; Skempton 1964, 1985).

3.6 약하게 시멘트결합이 된 흙

시멘트결합이 된 흙(*cemented soil*)의 입자상호간 접촉력(*bonding*)은 매우 작은 변형정도에서도 깨진다. 작은 구속에서(즉 시멘트결합이 거동을 주도하는 구간) 응력-변형 반응은 시멘트결합의 강도와 일치하는 최고점을 거쳐서, 한계상태 마찰 거동을 향하여 최고점후 변형연화거동을 보여준다(이러한 반응은 느슨하거나 조밀한 흙에서 비슷하다). 그러므로 시멘트결합이 된 흙은 국지화되기 쉽다.

이러한 거동을 규명하기 위해서 2% 포틀랜드 시멘트가 혼합된 Ottawa 20-30 sand로 시료를 성형하였다(물-시멘트 비는 1.0이다). 5분동안 충분히 혼합한 후, 다른 메커니즘들에 의한 국지화를 방지하기 위해서 삼축시험용 시료를 느슨($e = 0.754$)하고 균일하게 제작하였다. 유효구속응력 $\sigma'_3 = 80$ kPa를 가한 후, 일주일동안 시료를 양생하였다. 전단동안 부피변화를 효과적으로 측정하기 위하여 편차하중을 가하기 전에 시료를 포화시켰다. 실험결과는 그림 5와 같다. 비교를 위하여 Ottawa 20-30 sand로 만들어진 시멘트결합이 없는 느슨한 시료와 약간 조밀한 시료에 대한 결과도 함께 나타내었다. 약

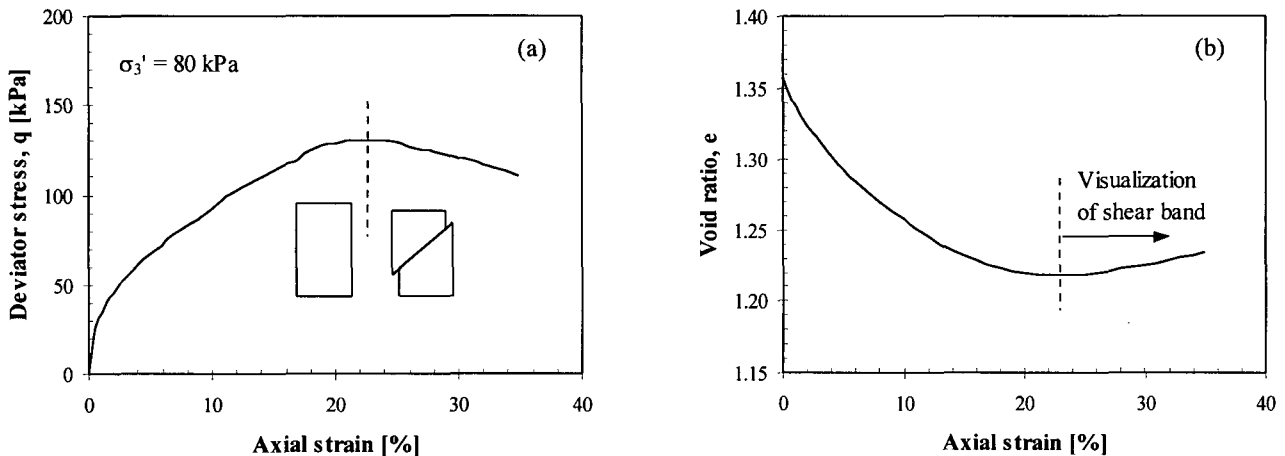


그림 4. mica flakes로 성형된 느슨한 시료에 대한 배수시험 결과

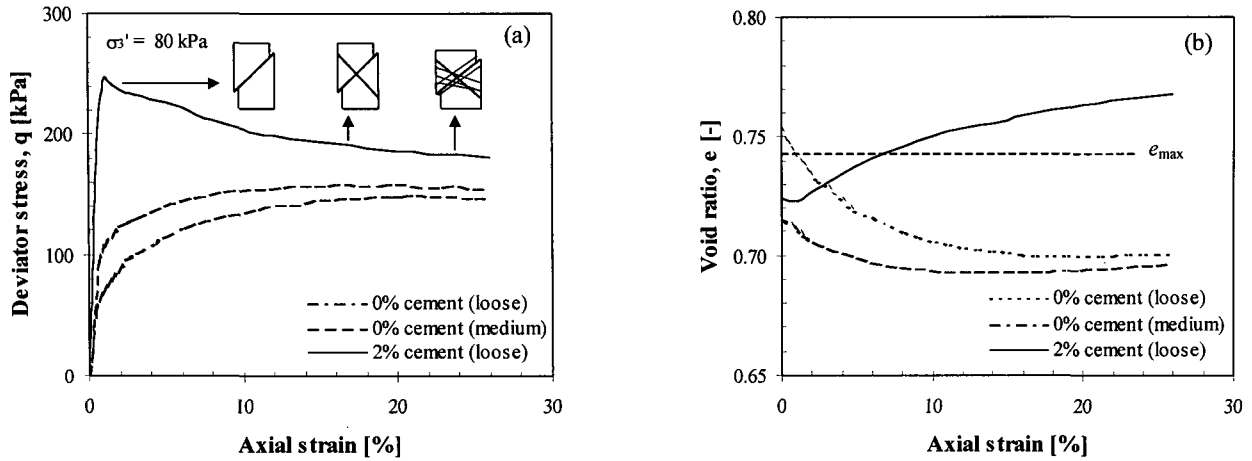


그림 5. Ottawa 20-30 sand로 성형된 느슨하고 균일한 시료에서의 시멘트결합 효과

하게 시멘트결합이 된 흙은 비록 느슨할지라도 최고점후 변형연화 거동을 보여준다(그림 5(a)의 2% cement). 첫 번째 전단대는 2% 축변형에서 관찰되었고 대략 6% 축변형에서 완전히 형성되었다. 두 번째 전단대는 16% 축변형 이후에 나타나기 시작했다. 비록 시멘트결합이 된 흙의 편차응력이 최고점후에 변형과 함께 감소하였지만, 삼축시험에서 가능한 변형정도 안에서는 시멘트결합이 없는 시료의 한계상태에 접근하지는 못했다.

시멘트결합이 없는 시료에서는 체적변화가 수축적인 반면, 느슨하나 시멘트결합이 된 시료는 팽창하는 거동을 보여주었다(그림 5(b)). 시멘트결합이 된 시료가 전단하에 있으면, 어떤 입자들 사이에서 시멘트결합이 깨지며, 개개의 입자처럼 거동하는 잘 조화된(즉 조밀한 배열구조의) “집합체(aggregate)”들을 형성한다. 이러한 집합체들의 초기조건은 팽창성을 가져 변형과 함께 체적이 증가한다(본 연구의 실험결과처럼 최대간극비보다 큰 체적변화를 가지기도 한다). 그러나 매우 높은 구속압력에서는 이러한 집합체들이 유지될 수 없어서 깨지고 전단되어, 전체적인 거동이 시멘트결합이 없는 흙의 연성적인(ductile) 수축거동으로 돌아간다.

3.7 불포화도

낮은 함수비를 가지는 불포화토는 연속적으로 연결된 입자들의 접촉부분에서 메니스커스(meniscus)를 형성한다(상세한 분석과 자료는 Cho & Santamarina, 2001을 참조). 메니스커스안의 음의 간극수압과 표면장력(surface tension)이 입자들 사이의 힘을 증가시키는데 공헌한다. 부가적인 입자간의 모세관력(capillary force)은

함수비와 입자크기나 비표면적(specific surface)에 좌우된다. 메니스커스가 파괴되는 임계변형(threshold strain)도 함수비에 의존한다. 메니스커스가 파괴되면, 최소한 잠시나마 모세관효과는 사라진다. 이에 따라 전단동안 불포화 시료의 한 영역은 변형국지화를 유발시키는 강도손실을 경험할지도 모른다.

이러한 메커니즘을 시험하기 위하여 무게의 비로 90% Ottawa F-100 sand와 10% kaolinite의 혼합흙을 사용하였다(흡입력을 증가시키기 위하여 kaolinite를 사용하였다). 모든 시료들을 습윤충전방법으로 성형하였고, 초기에 균일한 물의 분포를 보장하기 위하여 시료들을 포화시켰다. 그런 후 공기를 주입하여 다른 정도의 포화도를 얻었다. 건조과정동안 간극비의 변화를 산정하기 위하여 셀의 부피변화를 면밀하게 측정하였다. 다짐도 효과를 검증하기 위하여 추가적인 중간정도의 조밀한 시료를 준비하였다. 불포화토의 느슨한 시료들에 대한 시험 결과는 그림 6과 같다.

포화된 느슨한 시료 SAL4와 중간정도의 조밀한 시료 SAD5는 전단대를 형성하지 않고 변형-경화거동을 보여주었다(그림 6(a)). 불포화 시료 USL1과 USL2는 최고편차응력에서 첫 번째 명확한 전단대를 보여주었다. 변형이 계속 증가함에 따라 부가적인 전단대들이 뒤를 이었다(그림 6(a)). 불포화 시료 USL3는 전단대 형성없이 변형-경화거동을 보여주었다. 상당히 건조된 시료 USL1과 USL2는 다른 최종 간극비를 가지며 팽창거동을 나타낸 반면, 상대적으로 젖은 시료 USL3는 SAL4와 SAL5처럼 일정한 간극비에 근접하며 수축거동을 나타내었다. 상당히 건조된 흙에서는 부가적인 모세관력 때문에 몇몇의 입자들이 집합체를 이뤄 한 요소처럼 움직인다(시멘

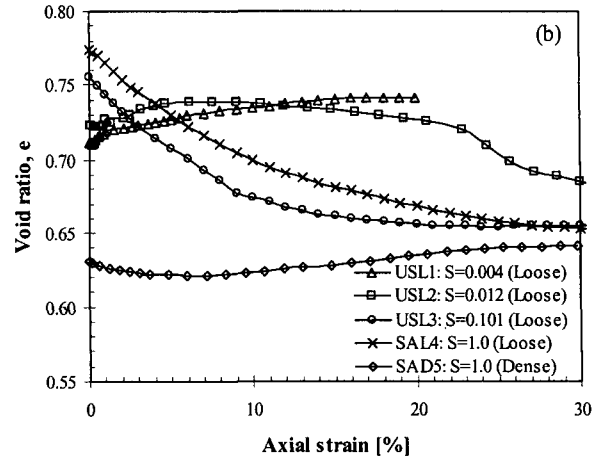
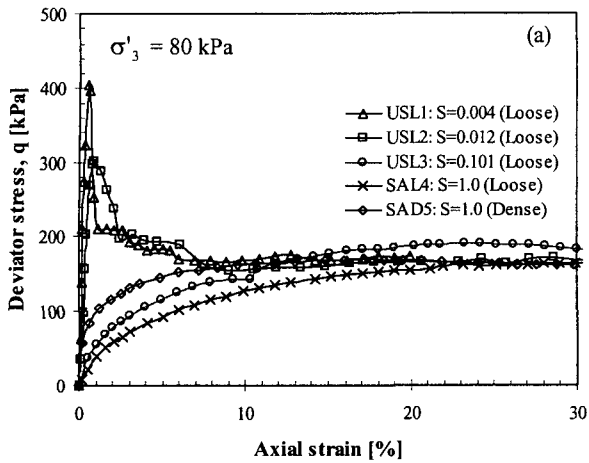


그림 6. Ottawa F-110 sand로 성형된 느슨하고 균일한 시료에서의 불포화 효과

트결합과 유사함). 이러한 특성은 전체적인 간극비가 느슨함에도 불구하고 관찰된 팽창거동을 잘 설명한다. 이러한 결과들은 메니스커스가 파괴될 때 변형국지화가 심지어 느슨한 시료에서도 일어날 수 있음을 확증한다. 대체적으로 낮은 함수비를 가지는 불포화 시료의 거동은 약하게 시멘트결합을 가진 흙의 거동을 닮을지도 모른다. 이것은 흡입압력이 증가하거나 구속응력이 감소할 때 불포화토의 응력-변형 반응이 취성적임을 보여준 Cui & Delage(1996)에 의해서도 확인되었다.

3.8 입자파쇄

바로 이전의 두 개의 절은 흙입자들로 구성된 집합체(모세관력 또는 시멘트결합)가 깨질 때 국지화의 전개를 보여주었다. 이번 절에서는 입자파쇄(particle breakage; 접촉부위 파쇄나 입자 쪼개짐)에 의한 국지화를 조사하고자 한다. 흙입자가 깨지면 입도분포와 개개 입자의 미

소형태(micro-feature)가 변하여 흙의 거동에 영향을 미친다(McDowell & Bolton, 1998).

입자파쇄의 영향을 연구하기 위하여 Fuller's earth를 사용하였다. Fuller's earth는 퇴적으로 형성된 점토로서 자연으로부터 채취하여 상용화된 제품이며, 매우 다공질이어서 동·식물성 기름과 광물성 기름을 정제하는데 사용되거나 유류(organic fluid)나 오염물질의 흡착제로 자주 사용된다. 보통모래와는 달리 함수비가 증가하면 Fuller's earth의 입자강도는 감소한다. 흙을 몇 초 동안 침수시킨 다음, 입자표면에 있는 물기를 종이수건을 사용하여 제거하였고 실온에서 공기 중 건조시켰다. 입자들 사이에서의 모세관력을 피하기 위하여 입자표면이 완전히 건조되었을 때 시료를 성형하였고, 삼축시험을 수행하였다. 그림 7이 배수삼축시험 결과를 보여준다. 자연함수비를 가지는 시료(dry specimen)들은 느슨하면 수축하고 조밀하면 팽창하는 단단한 알갱이 흩처럼 거동한다. 전반적 거동은 국지화현상을 보여주지 않았다.

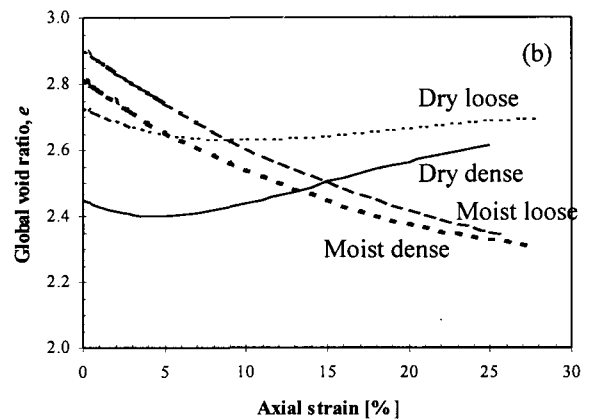
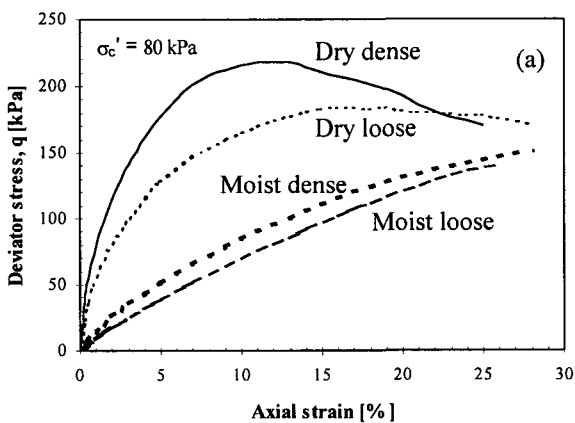


그림 7. Fuller's earth로 성형된 느슨하고 균일한 시료에 대한 입자파쇄 효과

젖은 시료(moist specimen)들은 초기의 밀도와 관계없이 입자파쇄 때문에 수축거동을 보여주었으나 전체적인 거동은 국지화현상을 보여주지 않았다. 입자레벨의 변형국지화(입자파쇄)가 전체적인 수축거동 안으로 가려진 것이다. 즉, 하중사슬(load chain)의 본성 때문에 입자파쇄가 동시에 발생하지 않고 한 사슬로부터 다음으로 점진적으로 일어나서 전단대 형성을 약하게 하거나 방지한다.

3.9 비균질 흡

비배수하의 시료가 조밀하지만 비균질(heterogeneous)하면 변형국지화가 상대적으로 좀더 느슨하고 약한 지역에서 일어날지도 모른다. 그림 8은 Ottawa 20-30 sand로 만든 균질한 시료와 비균질한 시료에 대한 비배수삼축 결과를 비교해서 보여준다. 두 시료는 전체적으로 같은 간극비를 가지며 같은 구속압력 ($(\sigma'_3)_0 = 160$ kPa)을 가하였다. 그러나 비균질한 시료는 중앙부위에서 더 느슨하고 가장자리에서 더 조밀하게 성형되었다. 균질한 시료는 공동화현상이 일어나기 전까지 변형-경화 거동을 보여주었다. 비균질한 시료는 양의 간극수압을 발생시키면서 액상화상태(liquefaction)에 근접했다; 최고점 후 연화거동은 매우 큰 변형에서 팽창이 유발될 때까지 계속되었다. Imposimato & Nova(1998)에 의해 관찰된 것처럼 간극수압의 갑작스런 증가는 시스템의 국지화 가능성을 증가시킨다. 사실상 변형은 이 시료의 중간부위 느슨한 지역에서 주로 국지화를 보여주었다.

변형되는 비가 간극수압이 균일화되는 비보다 낮으면, Darcy 흐름이 국지적으로 수축하는 지역으로부터 국지

적으로 팽창하는 지역으로 발생하며 층들 사이에서 변형 차이를 일으킨다(Han & Vardoulakis 1991, Vardoulakis 1996, Imposimato & Nova 1998). 이는 전체적인 조건보다는 국지적인 조건과 공간적 변이(spatial variability)의 관련성을 강조한다. 예를 들어, 습윤충전방법으로 제작된 조밀한 시료를 비배수조건하에 전단하면 충전층(tamping layer)들 사이의 얇고 느슨한 지역을 따라 분명한 전단대를 형성한다. 또한 비균질성은 시료를 성형하는 동안이나 흙형성(soil formation) 과정동안 입자들의 분리(segregation)에 의해 만들어질 수도 있다. 그래서 간극비의 공간적 변이성에 대한 정보와 흙형성에 대한 조건들이 적절한 자료 해석을 위하여 필요하다.

3.10 다른 경우들

시험조건들이 국지화를 직접적으로 일으킬 수 있거나 적어도 간접적으로 국지화 발생에 공헌할 수 있다(예를 들어, 비축대칭 시료형태, 끝단 마찰, 높은 세장비를 가지는 시료, 시료의 부적절한 안치, 그리고 비스듬한 테이블; Desrues *et al.*, 1996). 또한 주기적 하중(cyclic loading)이나 신장하중(extension loading)과 같은 하중을 가하는 방향이 국지화의 발생순간에 영향을 미친다(Tatsuoka *et al.*, 1990; Yamamuro & Lade, 1995; Ayoubian & Robertson, 1998).

4. 토론 - 함축성

국지화는 시험결과 해석에 어려움을 주게 된다. 즉 전체적으로 추정된 평균값으로서의 변형에 대한 개념은

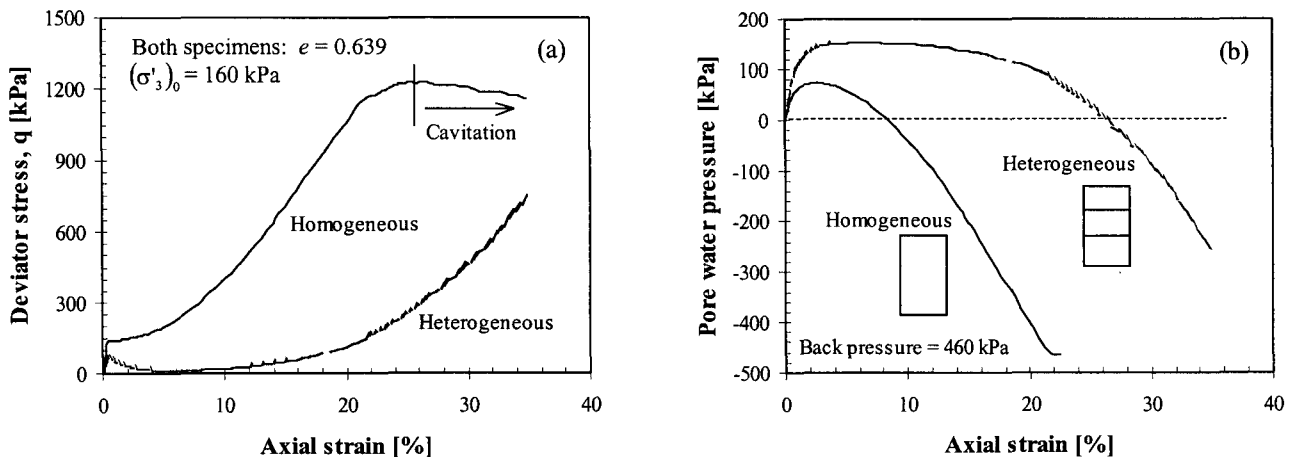


그림 8. Ottawa 20-30 sand로 만들어진 균질한 시료와 비균질한 시료사이의 비교

조 건	메커니즘	현 상	
		초 기	중 간
배수전단하의 조밀한 시료	팽창연화거동, 내부 힘전달시술의 비틀림파괴		
비배수전단하의 느슨한 시료	비정규적 높은 간극수압 생성 (짧은 시간 빠른 하중)		
비배수전단하의 조밀한 시료	Darcy의 흐름, 비균질성		
	유체 공동화		
배수전단하의 느슨한 시료	입자배열		
	메니스커스 파괴 (불포화토-저함수비)		
	시멘트결합 파괴		
	입자파쇄		

그림 9. 흙에서의 변형국지화 메커니즘

부적절하게 되고, 국지적 전단 및 체적 변형과 국지적 간극수압은 거의 측정되기 힘들다. 큰 변형에서 계산된 전체적 간극비는 시료에 대한 평균값이므로 한계상태에서의 흙에 대한 조건을 반영하지 못한다. 한계상태는 오직 전단대 안에서만 도달할지도 모르며, 형성된 흙구조(soil fabric)는 “한계상태구조(critical state fabric)”가 아닐 수도 있다(Oda & Kazama, 1998).

점진적 파괴(progressive failure)는 현장과 같은 큰 스케일에서 뿐만 아니라 실내실험과 같은 작은 스케일에서도 일어난다(Taylor, 1948). 점진적 파괴는 보다 낮은 최고저항을 만들고, 한 요소로서 흙의 진정한 하중-변형 거동을 보여주지 못한다. 또한 측정된 인자들은 시료 크기나 경계조건에 좌우되고 영향을 받는다.

변위조절시험(displacement-controlled test)이 최고점 후 변형-연화거동을 측정하기 위하여 선호되어지지만, 심지어 이런 실험도 정확한 국지적 간극비 획득의 어려

움 때문에 의심스러워진다. 짧은 시료(즉 세장비 = 1)와 윤활유로 처리된 끝단이 시료내부에서의 균일한 변형을 향상시킬 수 있어 자주 추천된다(Ibsen & Lade, 1998).

흙에서 기대되는 변형국지화 메커니즘들을 요약하면 그림 9와 같다. 한계상태정수(critical state parameter)를 결정하기 위한 가장 신뢰적인 시험은 국지화에 대한 모든 가능한 경우들을 피하는 배수전단하의 균일하고 느슨한 시료를 사용하는 것이다.

5. 결 론

다양한 흙과 하중조건하에서 국지화 현상의 전개 가능성을 실내실험을 통하여 탐구하고자 하였다. 먼저 국지화되기 쉬운 조건을 용이하게 선별하기 위하여 국지화가 시작되는 이론적 기준을 제시하였다. 이를 바탕으로 국지화가 가능한 다양한 흙의 조건들을 선별하였으

며, 각각의 경우에 대해 실내시험을 통하여 국지화현상의 발생여부를 예증하였다. 본 연구로부터 도출된 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 최고점후 변형연화거동을 가지는 흙은 변형국지화, 전단대형성, 그리고 점진적 파괴가 되기 쉽다. 이러한 거동은 흙의 응력상태, 흙밀도, 흙입자 고유의 역학적·지형학적 특성에 의해 지배된다.
- (2) 변형국지화는 배수전단하의 팽창, 비배수전단하의 수축경향, 유체 공동화, 판상형입자의 배열, 시멘트 결합의 깨짐, 낮은 함수비를 가지는 불포화토에서의 메니스커스 파괴, 시료의 불균질성, 그리고 이러한 요소들의 조합에 의해 촉진된다.
- (3) 시료에서 발생한 변형국지화는 배수시험일 때는 시료의 부피변화를, 비배수시험일 때는 유효응력에 올바르게 맞춘 측정치를 유도한다. 또한 국지화는 응력-변형 반응, 최고강도, 한계상태강도, 그리고 한계상태 간극비 등 흙의 관찰된 거동에 대하여 편향을 가지게 만든다.
- (4) 변형국지화의 영향을 받지 않는 올바른 지반강도정수나 한계상태정수는 배수전단하에서 균일하고 느슨한 포화시료로부터 얻어질 수 있다.

감사의 글

본 논문은 한국과학재단 2002 신규 우수연구센터(SISTeC, “스마트 사회기반시설 연구센터”)의 지원으로 이루어졌다.

참고 문헌

1. Aloufi, M and Santamarina, J.C. (1995), “Low and high strain macro behaviour of grain masses - The effect of particle eccentricity”, *Transactions of American Society of Agricultural Engineers*, Vol.38, No.3, pp.877-887.
2. Ayoubian, A. and Robertson, P.K. (1998), “Void ratio redistribution in undrained triaxial extension tests on Ottawa sand”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.35, No.2, pp.351-359.
3. Bauer, E. and Huang, W. (1998), “The dependency of shear banding on pressure and density in hypoplasticity”, *Proceedings of the fourth international workshop on Localization and Bifurcation Theory for Soils and Rocks*, T. Adachi, F. Oka, and A. Yashima (ed.), Balkema, Rotterdam, pp.81-90.
4. Bjerrum, L. (1966), “The third Terzaghi Lecture: Progressive failure in slopes of overconsolidated plastic clay and clay shales”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, SM5,

- pp.3-49.
5. Cho, G.C. and Santamarina, J.C. (2001), “Unsaturated particulate materials - Particle level studies”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.127, No.1, pp.84-96.
6. Chu, J., Lo, S.-C.R., and Lee, I.K. (1996), “Strain softening and shear band formation of sand in multi-axial testing”, *Geotechnique*, Vol.46, No.1, pp.63-82.
7. Cui, Y.J. and Delage, P. (1996), “Yielding and plastic behaviour of an unsaturated compacted silt”, *Geotechnique*, Vol.46, No.2, pp.291-311.
8. Desrues, J., Chambon, R., Mokni, M. and Mazerolle, F. (1996), “Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography”, *Geotechnique*, Vol.46, No.3, pp.529-546.
9. Finno, R.J., Harris, W.W., Mooney, M.A. and Viggiani, G. (1996), “Strain localization and undrained steady state of sand”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.122, No.6, pp.462-473.
10. Finno, R.J., Harris, W.W., Mooney, M.A. and Viggiani, G. (1997), “Shear bands in plane strain compression of loose sand”, *Geotechnique*, Vol.47, No.1, pp.149-165.
11. Finno, R.J., Viggiani, G., Harris, W.W. and Mooney, M.A. (1998), “Localization of strains in plane strain compression of sand”, T. Adachi, F. Oka & A. Yashima (ed.), *Localization and Bifurcation Theory for Soils and Rocks*, Balkema: Rotterdam, pp.249-257.
12. Gudehus, G. (1998), “Shear localization in dimple grain skeletons with polar effects”, *Localization and Bifurcation Theory for Soils and Rocks*, T. Adachi, F. Oka, and A. Yashima (ed.), Balkema, Rotterdam, pp.3-10.
13. Han, C. and Vardoulakis, I. (1991), “Plane strain compression experiments on water-saturated fine-grained sand”, *Geotechnique*, Vol.41, No.1, pp.49-78.
14. Herle, I. (1997), “A relation between parameters of a hypoplastic constitutive model and grain properties”, *Localization and Bifurcation Theory for Soils and Rocks*, T. Adachi, F. Oka, and A. Yashima (ed.), Balkema, Rotterdam, pp.91-98.
15. Hill, R.J. (1962), “Acceleration waves in solids”, *Journal of Mechanics, Physics, and Solids*, Vol.10, pp.1-16.
16. Hill, R.J. and Hutchinson, J.W. (1975), “Bifurcation phenomena in the plane tension test”, *Journal of Mechanics, Physics and Solids*, Vol.23, pp.239-264.
17. Ibsen, L.B. and Lade, P.V. (1998), “The role of the characteristic line in static soil behaviour”, T. Adachi, F. Oka, and A. Yashima (ed.), *Localization and Bifurcation Theory for Soils and Rock*, Balkema: Rotterdam, pp.221-230.
18. Imposimato, S. and Nova, R. (1998), “Instability of loose sand specimens in undrained tests”, T. Adachi, F. Oka, and A. Yashima (ed.), *Localization and Bifurcation Theory for Soils and Rocks*, Balkema: Rotterdam, pp.313-322.
19. Jenkins, J.T. (1991), “Anisotropic elasticity for random arrays of identical spheres”, *Modern Theory of Anisotropic Elasticity and Applications*, J. Wu (ed.), SIAM, Philadelphia.
20. Kolymbas, D. (1991), “An outline of hypoplasticity”, *Archive of Applied Mechanics*, Vol.61, pp.143-151.
21. McDowell, G.R. and Bolton, M.D. (1998), “On the micro mechanics of crushable aggregates”, *Geotechnique*, Vol.48, No.5, pp.667-679.
22. Mokni, M. and Desrues, J. (1999), “Strain localization measurements in undrained plane-strain biaxial tests on Hostun RF sand”,

- Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, Vol.4, pp.419-441.
23. Mooney, M.A., Viggiani, G. and Finno, R.J. (1997), "Undrained shear band deformation in granular media", *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol.123, No.6, pp.577-585.
 24. Muhlhaus, H.B. and Oka, F. (1996), "Dispersion and wave propagation in discrete and continuous models for granular materials", *International Journal of Solids and Structures*, Vol.33, pp. 2841-2858.
 25. Muhlhaus, H.B. and Vardoulakis, I. (1987), "The thickness of shear band in granular materials", *Geotechnique*, Vol.37, pp. 271-283.
 26. Oda, M. and Kazama, H. (1998), "Microstructure of shear bands and its relation to the mechanisms of dilatancy and failure of dense granular soils", *Geotechnique*, Vol.48, No.4, pp.465-481.
 27. Rice, J. and Rudnicki, J.W. (1980), "A note on some features on the theory of localization of deformation", *International Journal of Solids Structures*, Vol.16, pp.597-605.
 28. Roger, V., Desrues, J. and Viggiani, G. (1998), "Experiments on strain localization in dense sand under isochoric conditions", T. Adachi, F. Oka, and A. Yashima (ed.), *Localization and Bifurcation Theory for Soils and Rocks*, Balkema: Rotterdam, pp.239-248.
 29. Rudnicki, J.W. and Rice, J.R. (1975), "Conditions for the localization of deformation in pressure-sensitive dilatant materials", *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, Vol.23, pp.371-394.
 30. Saada, A.S., Liang, L., Figueroa, J.L. and Cope, C.T. (1999), "Bifurcation and shear band propagation in sands", *Geotechnique*, Vol.49, No.3, pp.367-385.
 31. Schrefler, B.A., Sanavia, L. and Majorana, C.E. (1996), "A multi-phase medium model for localization and postlocalisation simulation in geomaterials", *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, Vol.1, pp.95-114.
 32. Skempton, A.W. (1964), "Fourth Rankine Lecture: Long-term stability of clay slopes", *Geotechnique*, Vol.1, pp.77-102.
 33. Skempton, A.W. (1985), "Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory", *Geotechnique*, Vol.35, No.1, pp.3-18.
 34. Tatsuoka, F., Nakamura, S., Huang, G.-G. and Tani, K. (1990), "Strength anisotropy and shear band direction in plane strain tests of sand", *Soils and Foundations*, Vol.30, pp.35-54.
 35. Taylor, D.W. (1948), *Fundamentals of Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, New York.
 36. Terzaghi, K. (1956), *Theoretical Soil Mechanics*, Eighth Printing, John Wiley and Sons, New York.
 37. Terzaghi, K. & Peck, R.B. (1967), *Soil Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley & Sons, New York.
 38. Vardoulakis, I. (1978), "Equilibrium bifurcation of granular earth bodies", *Advanced Analysis of Geotechnical Instabilities*, Vol.13, pp.65-120.
 39. Vardoulakis, I. & Sulem, J. (1995), *Bifurcation analysis in geomechanics*, Blackie Academic and Professional, an imprint of Chapman & Hall.
 40. Vardoulakis, I. (1996), "Deformation of water-saturated sand: I. uniform undrained deformation and shear banding", *Geotechnique*, Vol.46, No.3, pp.441-456.
 41. Yamamuro, J.A. & Lade, P.V. (1995), "Strain localization in extension tests on granular materials", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.121, No.7, pp.828-836.

(접수일자 2003. 6. 2, 심사완료일 2003. 8. 13)