

# 평면변형을 시험에서 디지털 이미지 해석을 통한 정규압밀 점성토의 파괴거동 분석

## Failure Mechanism Evaluation in Normally Consolidated Cohesive Soils by Plane Strain Test with Digital Image Analysis

곽 태 영<sup>1</sup> Kwak, Tae-Young  
김 준 영<sup>2</sup> Kim, Joon-Young  
정 충 기<sup>3</sup> Chung, Choong-Ki

### Abstract

Soil failure is initiated and preceded by forming and progressing of shear band, defined as the localization of deformation into thin zones of soil mass. To understand the failure mechanism of normally consolidated cohesive soil, the spatial distribution and evolution of deformation within the entire specimen need to be evaluated. In this study, vertical compression tests under plane strain condition were performed on reconstituted kaolinite specimens, while capturing digital images of the specimen at regular intervals during shearing. Overall stress-strain behavior from initial to post peak has been analyzed together with spatial distributions of deformations and shear band characteristics from digital images at 4 stages.

### 요 지

일반적으로 흙의 파괴는 전단 변형이 집중되는 영역인 전단면의 형성과 발달에 의해 발생한다. 정규압밀 점성토의 파괴거동을 확인하기 위해 시료 내부의 변형거동 분포에 대해 평가가 필요하다. 본 연구에선 재성형된 카올리나이트 시료에 대해 평면변형을 시험을 수행하였으며, 전단 과정에서 일정 변형률 간격에서 디지털 이미지 해석을 수행하였다. 시험 결과로 도출된 응력-변형률 결과를 통해 4개의 단계를 결정하여 시료의 변형거동과 전단면 특성을 평가하였다.

**Keywords :** Failure mechanism, Plane strain test, Digital image analysis, Strain distribution, Shear band characteristics

### 1. 서 론

일반적으로 사면과 구조물 등에서 발생하는 흙의 파

괴는 전단면이 생성되고 발달하면서 발생한다. 작은 크기의 하중이 재하되는 경우 흙의 요소 내에서 일정한 변위가 발생하지만, 과도한 하중이 재하되는 경우 요소

1 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (Member, Ph.D Student, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Seoul National Univ.)

2 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 박사 (Member, Ph.D, Dept. of Civil & Environmental Engrg., Seoul National Univ.)

3 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Seoul National Univ., Tel: +82-2-880-7347, Fax: +82-2-873-2684, [geolabs@snu.ac.kr](mailto:geolabs@snu.ac.kr), Corresponding author, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2016년 9월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2016 by the Korean Geotechnical Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

내에서 흙의 강성이 불균질하게 발현되어 지반에서 상대적인 변위가 발생하며, 전단면 부근에 전단 변형이 집중되는 현상이 나타난다(Lin et al., 2006). 흙의 단위요소에서 발생하는 전단 변형은 최종적으로 진행성 파괴에 도달하게 되어 지반 구조물의 변형거동과 안정성에 큰 영향을 미치게 된다. 전단 과정에서 발생하는 흙의 파괴거동은 실험을 통한 전단면 특성 평가를 통해 명확히 규명될 수 있다(Peters et al., 1988; Alshibli et al., 1999, 2003). 본 연구에서는 흙의 파괴거동을 분석하기 위하여 지반 내 전체 영역에서 발생하는 변형거동과 함께 기울기 및 두께로 정의되는 전단면 특성 평가를 수행하였다.

기존 연구에서 사질토의 전단면 특성은 다양한 시험 장비 및 기법을 활용하여 평가되었다. 지반공학 분야에서 널리 사용되는 삼축 시험에 대해 X선 단층 촬영(X-ray Computed Tomography) 또는 에폭시 주입 기법을 적용하여 시료 내부의 밀도를 파악하여 전단면을 평가하였다(Desruets et al., 1996; Wong, 2000; Jang et al., 2000, Alshibli et al., 2003). 그러나 이와 같은 기법은 고가의 장비가 필요하며, 시험 시작부터 종료에 걸친 전 과정의 변형거동을 연속적으로 관찰하는 것이 불가능하다는 한계점이 있다. 기존 연구의 한계점을 보완하기 위해 최근에는 전단면 평가에 자동화된 디지털 이미지 해석 기법이 널리 활용되고 있다(Finno et al., 1997; Alshibli et al., 2003, White et al., 2003; Jang et al., 2011). 전단면 특성 평가를 위해 적용되는 디지털 이미지 해석 기법은 삼축 시험보다 평면변형률 시험에 주로 적용되며, 이는 시료의 변형이 구속되는 주응력 면에 투명한 벽체를 설치할 경우 굴절과 왜곡을 방지하여 전단 과정 간 지속적으로 디지털 이미지 촬영이 가능하기 때문이다.

연속 기초, 댐 등의 구조물의 거동 평가 및 사면 안정 평가는 평면변형률 조건으로 모사하는 것이 축대칭 조건인 삼축 시험보다 실제 조건과 더 유사하다. 추가적으로, 평면변형률 시험에서 삼축 시험보다 전단면이 상대적으로 명확하게 관찰되며, 평면변형률 조건에서는 시료 외부의 변형이 내부의 변형과 동일하다는 가정 조건이 성립하기 때문에 파괴거동 모사에 더 적합하다. 그러나 기존 연구자들이 수행한 평면변형률 시험은 주로 사질토에 대해 수행되었으며(Peters et al., 1988; Alshibli et al., 1999, 2003; Jang et al., 2011), 점성토의 파괴거동은 주로 삼축 시험을 통 수행되었다. 삼축 시험을 통한

점성토의 파괴거동 평가는 주로 파괴의 진행에 따른 응력 거동 변화에 대한 연구가 주로 수행되었다(Saada et al., 1994; Callisto et al., 1998; Gylland et al., 2014). 삼축 시험에 디지털 이미지 해석 기법을 적용하여 흙의 변형거동을 관찰한 연구도 수행되었으나, 앞에서 언급한 바와 같이 축대칭 조건에서는 흙의 표면 거동이 내부 거동과 같지 않다는 한계점이 있다(Han et al., 2006). 삼축 시험을 통한 점성토의 파괴거동에 대한 연구의 한계를 보완하기 위해 Rhee(1991)와 Alshibli et al.(2007)은 평면변형률 시험을 통해 점성토의 파괴거동을 연구하였으나, 응력-변형률 거동을 위주로 분석하였으며, 파괴시의 전단면 기울기를 평가하였으나, 전단면의 연속적인 변화 및 시료의 변형거동은 확인하지 않았다.

본 연구에서는 정규압밀 점성토의 변형거동과 전단면 특성을 평가하기 위해 평면변형률 시험을 수행하였으며, 디지털 이미지 해석을 적용하여 분석하였다. 시료 내부의 전체적인 변형거동에 대해 분석하고자 최적의 디지털 이미지 해석 기법 및 조건을 설정하였다. 이미지 해석으로 산정된 변위를 이용하여 변형률 증분을 도출하여 전단 초기부터 한계 상태까지 전단 시험 전 과정에 대한 변형거동 특성을 평가하였다. 전단면의 특성을 평가하고자 기울기와 두께를 산정하여 기존 사질토 결과와 비교, 분석하였다.

## 2. 평면변형률 시험 (Plane Strain Test)

### 2.1 시험기 개요

본 연구는 Fig. 1과 같이 바닥판의 구속을 조절할 수 있는 평면변형률 시험기를 이용하여 수행되었다(Jang et al., 2011). 평면변형률 조건을 모사하기 위하여 두 개의 측면판이 적용되었으며, 상부와 하부는 각각 브레이싱과 바닥판에 연결되어 횡방향 변위를 구속하였다. 바닥판은 상부 판과 하부 판으로 구성되어 있으며, 하부 바닥판은 시험기 저판에 고정되어 있고 상부 바닥판은 리니어베어링 위에 설치되어 고정 장치에 의해 바닥판의 구속을 조절할 수 있다. 두 개의 측면판 중 한쪽 면과 시험기의 셸은 아크릴 판으로 제작되어 시험 중 시료의 이미지를 촬영할 수 있도록 하였으며, 셸은 빛의 굴절과 왜곡을 방지하기 위하여 기존 삼축 시험기의 실린더 형태가 아닌 직육면체 형상으로 제작되었다.

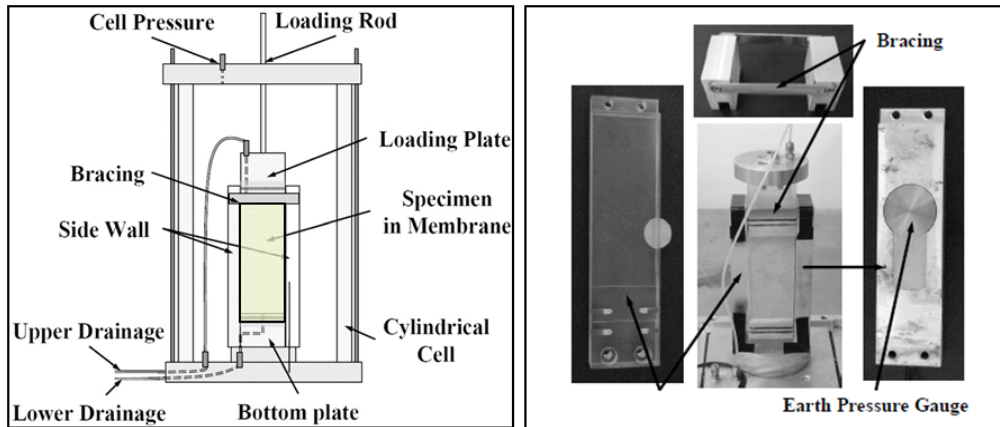


Fig. 1. Plane strain testing apparatus (Jang et al., 2011)

## 2.2 시험 시료 및 방법

본 연구에서는 점성토의 전단면 특성을 파악하기 위하여 재성형된 카올리나이트를 사용하여 시험을 수행하였다. 카올리나이트의 재성형 과정은 다음과 같다.

- (1) EPK 카올리나이트 분말과 물을 혼합하여 함수비 100%의 카올리나이트 슬러리 형태로 성형하였으며, 균질성 및 높은 포화도 확보를 위해 진공압과 회전 전단을 통한 혼합 과정을 3일간 적용하였다.
- (2) 성형된 카올리나이트 슬러리에 대해 10kPa의 연직하중을 점진적으로 재하하여 150kPa까지 도달시킨다. 목표 선행 압밀 하중에 도달한 카올리나이트 시료는 2주간 압밀 과정을 거쳐 재성형 과정을 완료한다.
- (3) 재성형된 카올리나이트 시료는 압축성이 높은 실트 질토로 나타났으며, 시료의 기본 물성치는 Table 1 과 같다. 재성형된 카올리나이트의 선행 압밀 하중을 확인하기 위하여 표준압밀시험 및 CRS(Constant rate of Strain) 압밀 시험을 수행하였으며, 각 시험 결과는 Table 2와 같다.

카올리나이트 시료는 길이 65mm, 폭 45mm, 높이 128mm 크기로 트리밍되어 두 개의 측면판 사이에 위치하게 된

다. 카올리나이트는 자연적인 명암 패턴이 없기 때문에 시료 표면에 검은색 스프레이를 뿌려서 임의의 이미지 패턴을 형성하여 디지털 이미지 해석 기법을 적용하였다. 시료는 100kPa의 배압(Back pressure)로 포화되었으며, 과잉간극수압 계수인 B 값이 0.95 이상을 만족하는 경우 압밀을 진행하였다. 포화 단계 이후 시료는 바닥판이 구속된 상태로,  $K_0$  값을 0.5로 가정하여 유효연직응력 200kPa, 유효구속압 100kPa으로 이방 압밀되었다. 압밀 완료 후 전단 단계에서는 100kPa의 유효 구속압에서 파괴 시까지 0.5%/hr의 속도로 하중을 재하하는 변위 제어 방식을 적용하였으며, 상부 로드셀과 가압봉은 고정된 상태로 셀을 올리는 방식으로 연직방향 하중을 재하하였다. 실제 전단면이 형성되는 조건을 모사하기 위하여 압밀 중 구속된 바닥판의 수평방향 움직임을 자유롭게 하였다(Alshibli et al., 2004; Finno et al., 1997).

## 3. 디지털 이미지 해석(Digital Image Analysis)

### 3.1 디지털 이미지 해석 개요

지반공학 분야에서 디지털 이미지 기법은 주로 대상 시료의 변형을 측정하기 위하여 사용되고 있다. 본 연구에서는 디지털 이미지를 이용한 해석 기법 중 지반 공학 분야에서 가장 널리 사용되고 있는 PIV(Particle Image

Table 1. Physical properties of reconstituted kaolinite

| Liquid limit (%) | Plastic index (%) | Gs   | USCS | Water content (%) |
|------------------|-------------------|------|------|-------------------|
| 65.3             | 23.1              | 2.62 | MH   | 53.3              |

Table 2. Maximum past pressure of reconstituted kaolinite

|                             | CRS Consolidation test | Oedometer test |
|-----------------------------|------------------------|----------------|
| Maximum past pressure (kPa) | 102                    | 106            |

Velocimetry) 기법을 통해 시료의 위치별 변위를 측정하였다(White et al., 2003). PIV 기법은 변형 전 이미지의 픽셀 집합과 변형 후 이미지의 픽셀 집합에 대해 크로스 코릴레이션(Cross-correlation)을 수행하고 상관계수를 보 간하여 상관성이 가장 높은 지점을 찾는다. 변형 전 이미지에서 각각의 픽셀 집합의 위치와 변형 후 이미지에서 구한 상관성이 가장 높은 픽셀 집합의 위치를 통하여 시료 각 위치에서의 상대적 변위를 산정하게 된다(Jang et al., 2011). 본 연구에서는 지반공학 분야에서 PIV 기법을 적용하기 위해 널리 사용되고 있는 상용 프로그램인 GeoPIV(White et al., 2002)를 적용하여 시료 내부의 변형을 측정하였다.

### 3.2 디지털 이미지 해석 조건

이미지 해석의 정확도를 높이기 위해 최적의 이미지 해석 조건을 결정하고, 결정된 최적의 조건을 적용하여

이미지 해석을 수행하여야 한다. 이미지 해석의 정확도와 관련된 영향 인자는 픽셀집합 크기로, 본 연구에서는 적절한 연직 변형률 간격을 결정하여 점성토에 대한 디지털 이미지 해석의 오차를 최소화하는 픽셀 집합의 크기를 결정하였다.

PIV 기법의 경우 변형률 간격이 작은 경우 이미지 해석의 결과의 정확성이 향상되며, 단계별 변형거동을 확인할 수 있다는 장점이 있다(Jang et al., 2009). 그러나 변형률 간격이 과도하게 작을 경우 해석 시간이 증가하며 변형특성을 파악하기 힘들기 때문에 적절한 변형률 간격을 결정할 필요가 있다. Kim et al.(2011)은 점성토 시료 표면에 검은색 스프레이를 뿌려 임의의 이미지 패턴을 형성한 후 PIV 기법을 적용할 경우 연직 변형률 간격 0.28%에서 0.0013%의 이미지 해석 최대 오차가 발생한다고 제시한 바 있다. 본 연구에서는 0.0013%의 최대 오차가 발생하는 경우, 본 연구의 결과의 신뢰성에 영향을 미치지 않을 것으로 판단하여 연직 변형률 간격

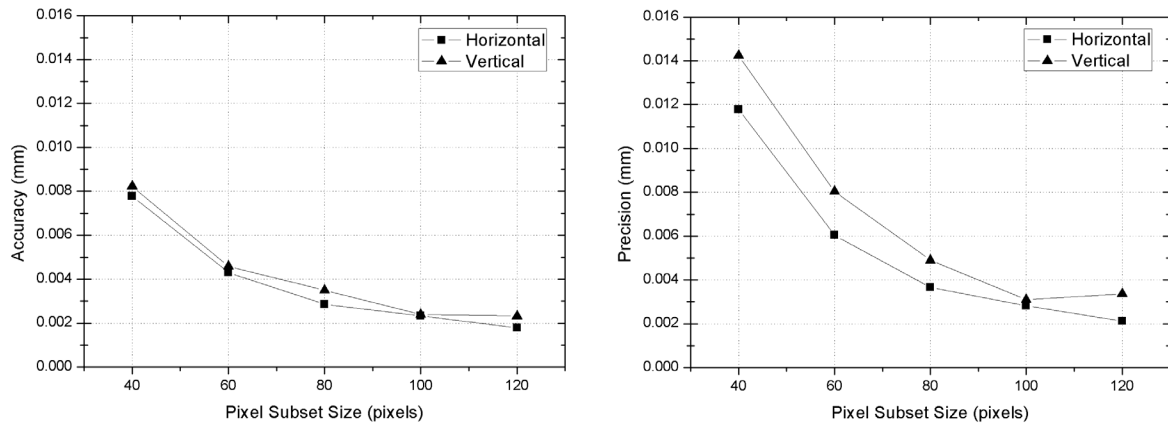


Fig. 2. Accuracy and precision verification by various pixel subsets

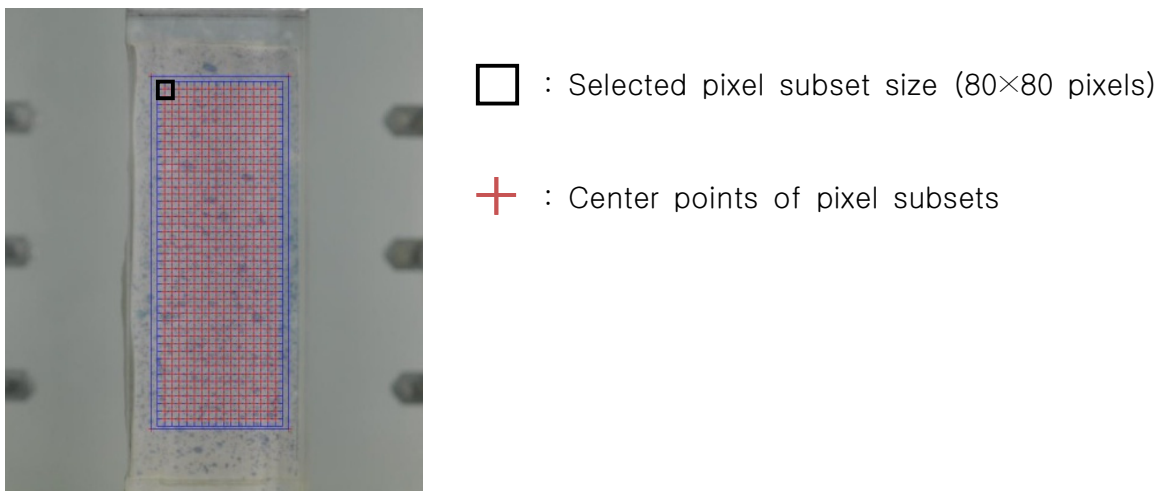


Fig. 3. Selected pixel subsets and center points for digital image analysis

0.25%를 적용하였다.

픽셀집합 크기의 경우 크기가 커질수록 픽셀 집합의 유일성이 증가하기 때문에 일반적으로 높은 정확도의 해석 결과를 얻을 수 있다. 하지만 다양한 위치에서의 변위를 산정하기 위해서는 적절한 픽셀 집합의 크기를 설정할 필요가 있다. 다양한 픽셀 집합 크기로 시료의 원본 이미지와 1픽셀 강제 이동한 이미지에 대해 이미지 해석을 수행하였으며, 이를 통해 GeoPIV 프로그램의 정확도 검증은 수행하였다. 검증 결과는 Fig. 2에 도시된 바와 같이 픽셀 집합의 크기가 커질수록 정확도가 높아지나, 80×80 픽셀 이후 정확도 향상의 증분은 작아지는 것을 확인하였다. 이에 대해 80×80 픽셀에서 충분히 작은 오차가 발생되었다고 판단하여 최적의 픽셀 집합의 크기로 설정하여 이미지 해석을 수행하였다.

시료와 측면판 사이에 발생하는 마찰의 영향을 최대한 배제하기 위하여 시료 중심부분에 대해 이미지 해석을 수행하였으며, Fig. 3과 같이 720(16×45)개의 위치에 대해 이미지 해석 기법을 적용하여 변위를 산정하였다.

### 3.3 디지털 이미지 해석 방법

디지털 이미지 해석을 위하여 1200만 화소(4288×4288 Pixels)의 측정이 가능한 디지털 이미지 카메라(Nikon D90)를 이용하였으며, 앞서 제시한 바와 같이 연직 변형률 0.25%(5분 간격)으로 사진을 촬영하였다. 5분 간격으로 촬영된 두 개의 사진은 GeoPIV 프로그램을 통해 해석이 수행되었으며, 각각의 픽셀 집합의 중심부에서 변위 벡터가 결정되었다. 재하 중 발생하는 시료의 변형거동을 확인하기 위하여 각 픽셀 집합의 중심부에서 나타난 변위 벡터를 이용하여 시료 대상 영역 내 변형률 증분을 산정하였다. Fig. 4와 같이 전단 영역을 결

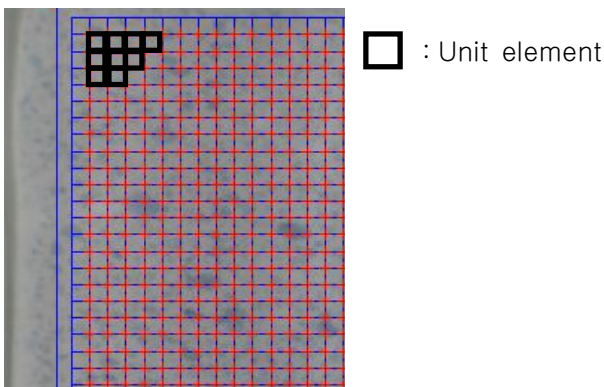


Fig. 4. Definition of unit element for evaluation of deformation

정하기 위하여 4개의 픽셀집합 중심부로 설정된 단위요소를 정의하고, 요소 내부의 변형률 증분을 산정하였다. 변형률 증분을 산정하는 과정은 다음과 같다.

- (1) 단위 요소 내부에 존재하는 4개의 변위 벡터를 이용하여 선형 변위장을 구한다.  $i$  번째 단위 요소에서의 선형 변위장은 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta u^i = a_u^i x + b_u^i y + c_u^i, \Delta v^i = a_v^i x + b_v^i y + c_v^i \quad (1)$$

여기서  $\Delta u(\Delta v)$ 는 수평(수직) 변위를 나타내며,  $x$ 와  $y$ 는 요소 내 좌표 값,  $a, b, c$ 는 회귀에서 구해지는 상수 값이 된다.

- (2)  $\Delta u$ 와  $\Delta v$ 를 이용하여  $i$  번째 단위 요소에서의 2차원 변형률 증분값을 산정하였다.

$$\Delta \epsilon_{xx}^i = \frac{\partial \Delta u^i}{\partial x} = a_u^i, \Delta \epsilon_{yy}^i = \frac{\partial \Delta v^i}{\partial y} = b_v^i \quad (2)$$

$$\Delta \epsilon_{xy}^i = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \Delta u^i}{\partial y} + \frac{\partial \Delta v^i}{\partial x} \right) = \frac{b_u^i + a_v^i}{2} \quad (3)$$

## 4. 시험 결과 분석

### 4.1 시료 변형특성 평가

Fig. 5에 평면변형률 시험에서 연직 하중 재하 중 측정된 변형률에 따른 축차응력과 간극수압을 도시하였

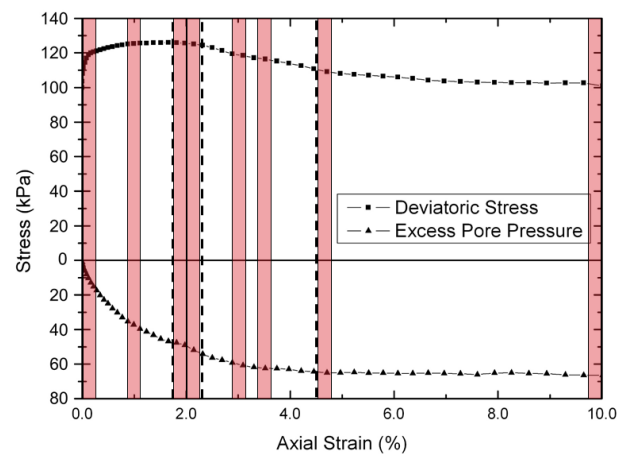


Fig. 5. Deviatoric stress and excess pore pressure with axial strain and the selected 4 strain intervals for image analysis

다. 응력 - 변형률 그래프를 통해 전단 과정은 점선으로 표시한 바와 같이 응력 증감에 따라 4가지 단계로 구분할 수 있다. 각각의 단계는 1) 초기 단계(연직 변형률  $\epsilon_a=0-1.75\%$ ), 2) 최대 축차응력 단계(연직 변형률  $\epsilon_a=1.75-2.25\%$ ), 3) 응력 연화 단계(연직 변형률  $\epsilon_a=2.25-4.5\%$ ), 4) 한계 상태 단계(연직 변형률  $\epsilon_a>4.5\%$ )로 구분할 수 있다. 각 단계에서의 점성토 거동 특성을 평가하기 위하여 위에서 언급한 바와 같이 0.25%의 연직 변형률 간격으로 디지털 이미지 해석을 수행하였다.

디지털 이미지 해석 결과를 이용하여, 각 단계에서 대표적인 변형거동을 보이는 연직 변형률 간격을 선정하였으며 Fig. 5에 막대의 형태로 표시하였다. 선정된 변형률 간격에 대해 연직방향 변위, 수평방향 변위, 전단 변형률 증분을 평가하여 등고선도를 도시하였다. 파란색으로 표시된 양(+)의 값은 연직방향 및 수평방향 변위 등고선도에서 각각 하부 방향과 우측 방향의 변위를 나타낸다. 반면, 음(-)의 값은 연직방향 및 수평방향 변위 등고선도에서 각각 상부 방향과 좌측 방향의 변위를 나타낸다. 각 등고선도에 최종 전단면의 위치를 검은색 선으로 표시하여 각 단계에서 발생하는 변형거동과 최

종 전단면과의 비교를 용이하게 하였다.

#### 4.1.1 초기 단계

전단 초기 단계에 대해서는 연직 하중 재하 직후의 연직 변형률 단계 0-0.25%와 최대 축차응력에 도달하기 전의 연직 변형률 0.9-1.15% 단계의 변형거동을 도시하였다. Fig. 6과 7에서 나타난 바와 같이, 연직 변형률 0-0.25% 단계의 수평방향, 연직방향 및 전단 변형률 증분 등고선도에서는 뚜렷한 변형거동이 나타나지 않았다. 그러나, 전단이 진행됨에 따라 연직 변형률 0.9-1.15% 단계에서는 수평방향 변위 등고선도를 통해 시료 상부는 좌측으로, 시료 하부는 우측으로 이동하려는 경향을 확인할 수 있으며, 연직방향 변위 등고선도에서 시료 좌측보다 우측에서 더 큰 상향 변위가 발생하는 경향을 확인할 수 있다. 전단 변형률 증분은 일부 변형이 집중되는 부분이 나타나기 시작하지만, 전체적으로는 여전히 뚜렷한 변형거동은 나타나지 않는다. 축차응력이 증가함에 따라 과잉간극수압은 비선형적으로 증가하여 연직 변형률 1.15%에서 38kPa로 나타났으며, 전단 초기 단계와 최대 축차응력 단계의 경계 부분인 연직 변형률

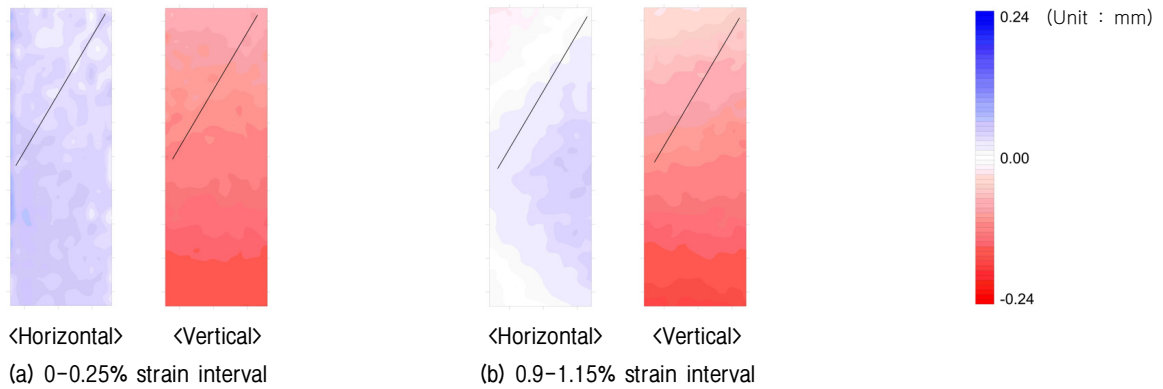


Fig. 6. Contour of horizontal and vertical displacement for initial stage

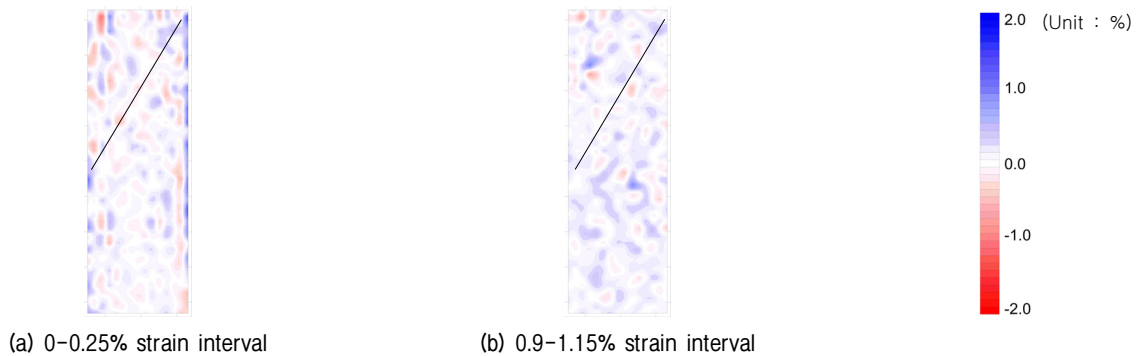


Fig. 7. Contour of shear strain increment for initial stage

1.75%에서는 48kPa까지 증가하였다. 전단이 진행됨에 따라 최종적으로 과잉간극수압이 63kPa까지 발생하는 것을 고려할 경우, 약 70%의 과잉간극수압 증분이 전단 초기 단계에서 발생하였다. 변위 및 전단 변형률 증분 등고선도를 통해 전단 초기 단계는 뚜렷한 변형거동이 나타나지 않지만, 과잉간극수압이 가장 크게 증가하는 경향을 확인할 수 있다.

#### 4.1.2 최대 축차응력 단계

최대 축차응력 단계에서는 Fig. 8과 9에 도시한 해석 구간 1.75-2.0%와 2.0-2.25%에서 모두 유사한 경향이 나타났다. 수평방향 변위 등고선도에서 시료 상부와 하부는 각각 좌측 방향 이동 및 우측 방향 이동을 보이며, 연직방향 변위 등고선도에서 시료 좌측보다 우측에서 더 큰 상향 변위가 발생하여 잠재적 파괴면을 경계로 상하부가 상반된 변위 거동을 보인다. 전단 변형률 증분 역시 전단 초기 단계보다 시료의 상부와 하부 사이에 집중되는 형태를 보이지만, 여전히 최종 전단면의 위치와 일치하지 않는다. 최대 축차응력 단계에서 과잉간극수압은 전단 초기 단계와 최대 축차응력 단계의 경계

부분인 연직 변형률 1.75%에서 측정된 48kPa부터 지속적으로 증가하여 최대 축차응력 단계와 응력 연화 단계의 경계 부분인 연직 변형률 2.25%에서 54kPa까지 발생하였다. 변위 및 전단 변형률 증분 등고선도를 통해 최대 축차응력 단계에서는 전단 초기 단계에 비해 변위 및 변형거동이 더 뚜렷하게 나타나게 되어 잠재적인 파괴면을 확인할 수 있다. 그러나 최대 축차응력 단계에서 나타난 잠재적인 파괴면의 위치는 여전히 최종 전단면의 위치와 일치하지 않으며, 과잉간극수압 역시 지속적으로 증가하지만 증분은 점차적으로 감소하는 것으로 나타났다.

#### 4.1.3 응력연화 단계

응력 연화 단계에서는 전단 변형이 뚜렷하게 집중되는 전단면과 강체 이동만 발생하는 시료의 상부와 하부 부분으로 구분된다. 응력 연화 단계는 연직 변형률 단계 2.9-3.15%와 3.4-3.65%의 결과를 도시하였으며, 두 해석 구간에서 나타난 수평방향 및 연직방향 변위는 유사한 경향을 보였다. 시료의 상부에서 수평방향 변위는 0.09mm의 좌측 방향 변위가 발생한 반면, 연직방향 변위는 거

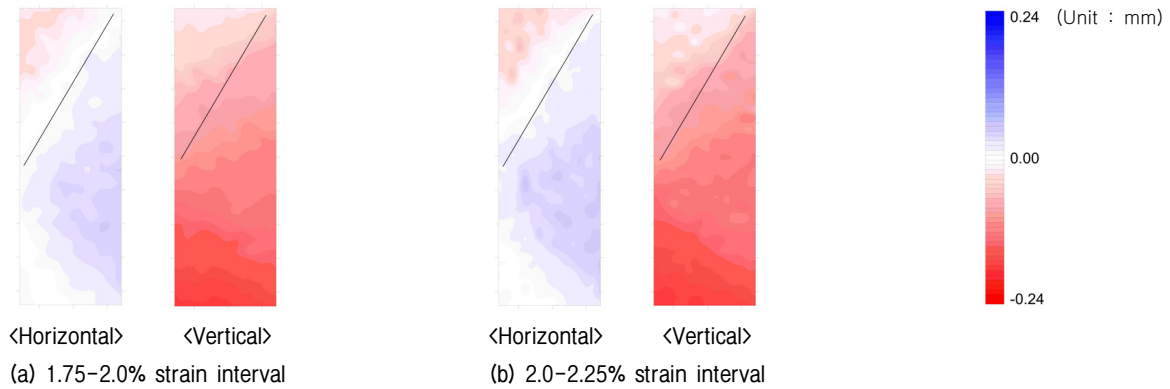


Fig. 8. Contour of horizontal and vertical displacement for peak stage

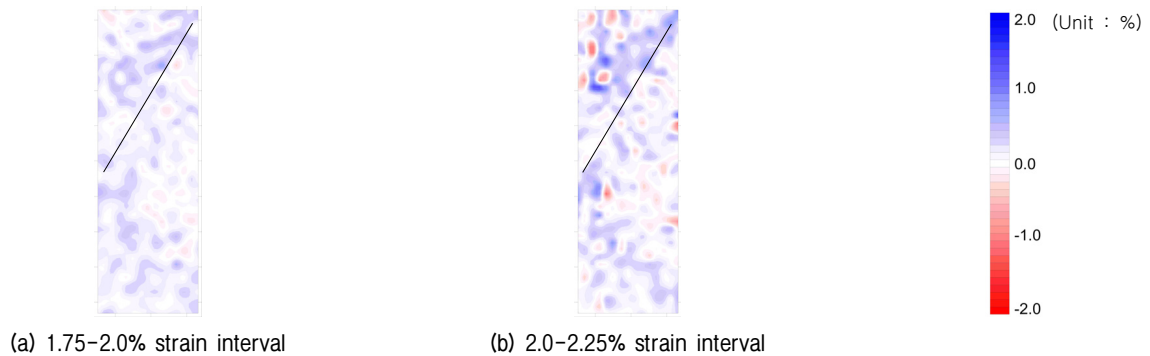


Fig. 9. Contour of shear strain increment for peak stage

의 발생하지 않았다. 이에 반해, 시료의 하부에서 수평 방향 변위는 거의 발생하지 않았으며, 0.24mm의 상향 변위만 발생하였다. 디지털 이미지 해석 결과로 산정된 0.24mm의 상향 변위는 실제 시험 중 LVDT를 이용하여 측정된 상부 방향 연직 변위인 0.27mm와 유사한 값으로 나타났다. 전단변형률 증분의 경우 2.9-3.15%와 3.4-3.65%의 해석 구간에서 모두 전단면 부근에 집중되어 발생하여 5%까지 증가하였으나, Fig. 10과 11에 도시된 바와 같이 응력 연화 단계가 진행됨에 따라 전단면 기울기는 각도가 커지는 것을 확인할 수 있다. 응력 연화 단계에서 나타난 전단면의 위치는 최종 전단면의 위치와 유사하게 나타났다. 응력 연화 단계에서 나타난 과잉간극수압은 최대 축차응력 단계와 응력 연화 단계의 경계 부분인 2.25% 변형률 단계에서 발현된 54kPa부터 지속적으로 증가하여 응력 연화 단계와 한계 상태 단계의 경계 부분인 변형률 4.5% 단계에서 65kPa까지 나타났다. 그러나 전단 초기 단계 및 최대 축차응력 단계에서 나타난 단위 연직 변형률 당 발생하는 과잉간극수압의 증가량 24.6kPa, 12kPa와 비교할 경우 응력 연화 단계에서는 단위 연직 변형률 당 과잉간극수압의 증가량이 4.9kPa까

지 감소하였다.

#### 4.1.4 한계상태 단계

한계 상태 단계의 연직 변형률 4.65-4.85% 단계에서는 Fig. 12에 도시한 바와 같이 변위 등고선도 및 전단 변형률 증분 등고선도가 응력 연화 단계에서 나타난 경향과 유사하게 나타났다. 전단면 부근에 전단변형률 증분이 집중되어 5%로 유지되었으며, 시료의 상부와 하부는 전단변형이 발생하지 않고 각각 0.09mm의 좌측방향 변위와 0.24mm의 상부방향 변위만 발생하는 강체 이동을 하였다. 그러나 한계 상태에서 전단이 진행됨에 따라, Fig. 13과 같이 연직 변형률 9.75-10.0% 단계에서는 시료의 상부는 변위가 발생하지 않고 시료 하부에서만 우상향 변위가 발생하는 강체 이동이 나타났다. 전단면의 기울기가 지속적으로 증가하는 응력 연화 단계와 달리, 한계 상태에서는 전단면의 기울기가 거의 변하지 않았다. 초기 단계에서부터 응력 연화 단계까지 63kPa 까지 증가한 과잉 간극수압 역시 한계 상태에서는 일정하게 유지되었다. 한계 상태 단계는 전단면의 위치, 전단변형률 증분의 크기 및 과잉간극수압이 일정하게 유

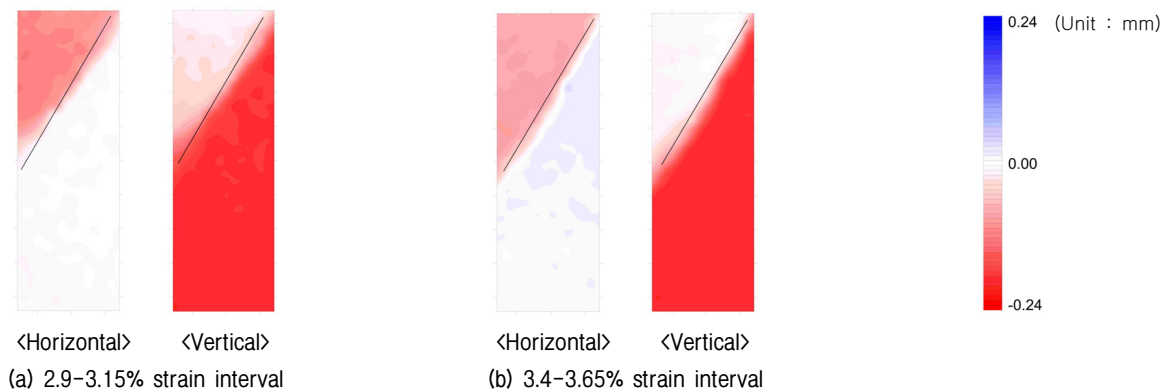


Fig. 10. Contour of horizontal and vertical displacement for softening stage

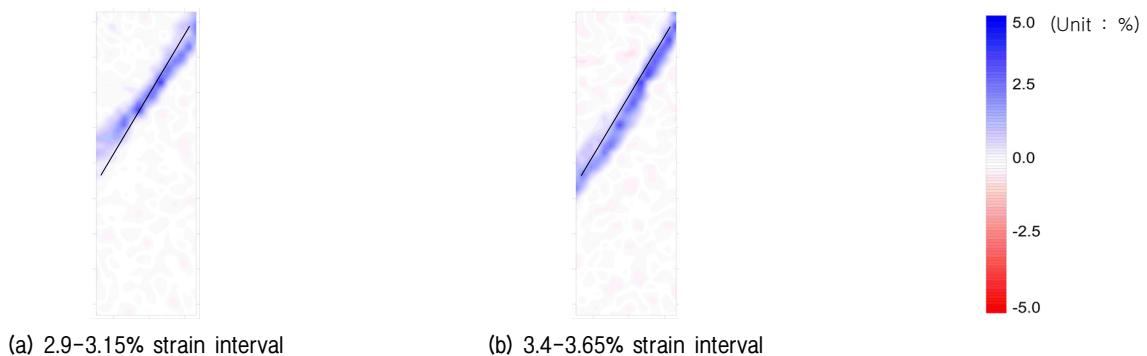


Fig. 11. Contour of shear strain increment for softening stage



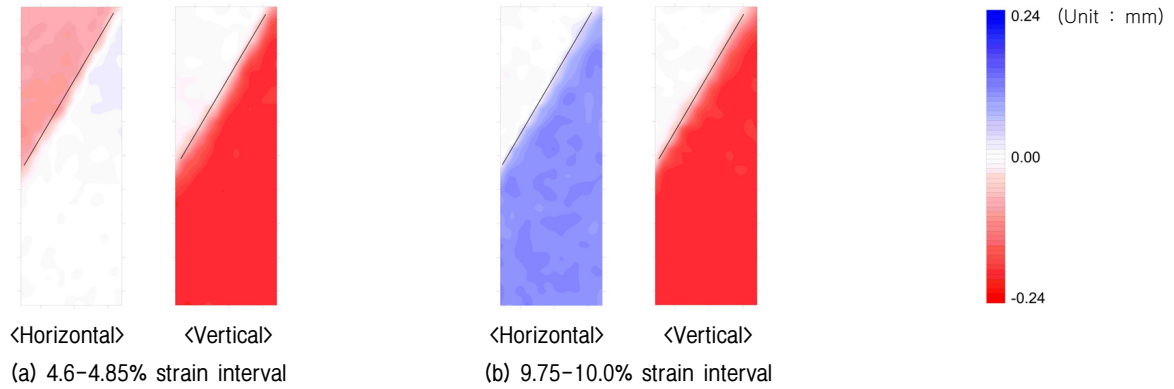


Fig. 12. Contour of horizontal and vertical displacement for steady state stage

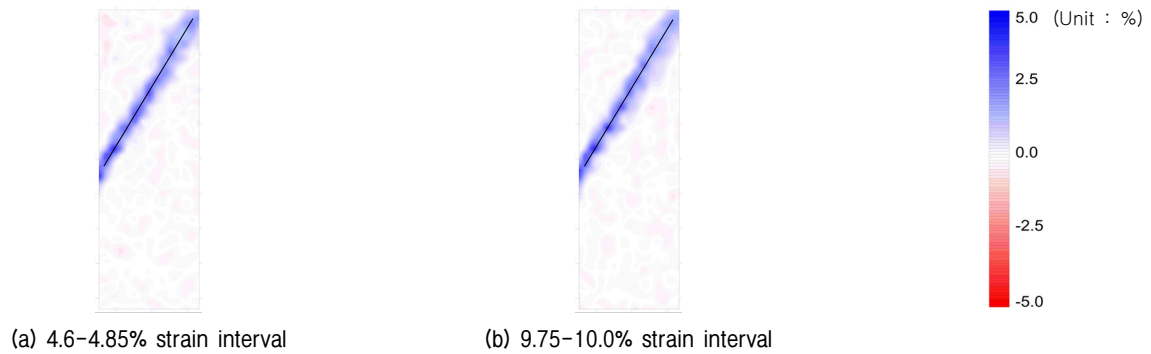


Fig. 13. Contour of shear strain increment for steady state stage

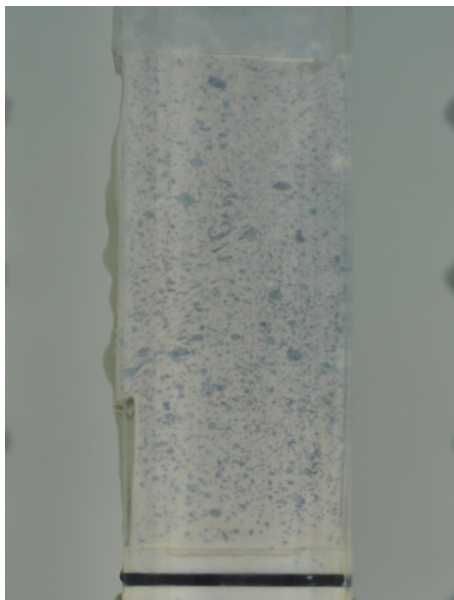


Fig. 14. Configuration of the specimen at the completion of failure

지되는 경향이 나타나며, 이를 통해 파괴가 완료되었음을 확인할 수 있다. 파괴 완료 후, 최종적으로 나타난 시료의 형상은 Fig. 14와 같이 나타났다.

#### 4.2 전단면 특성 평가

일반적으로 전단면의 특성은 전단면의 기울기와 두께의 관점으로 평가된다. 사질토의 전단면 특성은 입자 크기 및 구속압 조건에 따른 전단면 기울기와 두께로 평가되었으며(Oda et al., 1998; Alshibli et al., 1999; Jang et al., 2011), 점성토의 전단면 특성은 흙의 종류, 재하하는 하중의 크기 및 각도에 따른 전단면 기울기에 대해 주로 평가되었다(Rhee, 1991; Saada et al., 1994; Hicher et al., 1994; Alshibli et al., 2007). 본 연구에서도 점성토의 전단면 특성을 평가하기 위해, 시험 간 측정된 전단면의 기울기와 두께에 대해 분석을 수행하였다.

전단면 기울기는 전단면 근처의 등고선 각도를 측정하여 평균값으로 측정하였으며, 전단 완료 후에 측정된 전단면 기울기에 대해 기존 연구자들이 제안한 이론식과 비교 및 분석을 수행하였다. Mohr-Coulomb(1970)은 연직 구속응력에 대한 전단응력의 비가 최대로 작용하는 면에서 파괴가 발생한다고 명시하였으며, 다음과 같이 전단면의 각도를 산정하였다.

$$\theta_C = 45^\circ + \phi'/2 \quad (4)$$

여기서  $\phi'$ 은 흙의 내부 마찰각을 나타낸다. Roscoe (1970)는 실험을 통해 전단면의 기울기가 응력 상태보다 변형에 더 크게 관련되는 것을 확인하고, 팽창각의 개념을 도입하여 전단면의 기울기 산정식을 제안하였다.

$$\theta_R = 45^\circ + \psi/2 \quad (5)$$

여기서  $\psi$ 는 흙의 팽창각을 나타내며, Fig. 15에 도시된 바와 같이 전단 변형률에 대한 부피 변형률의 비로 산정할 수 있다. Arthur et al.(1977)은 기존에 제안된 식이 실험 결과와 부합하지 않음을 확인하고, 내부 마찰각과 팽창각을 모두 고려한 식을 제안하였다.

$$\theta_A = 45^\circ + (\phi' + \psi)/4 \quad (6)$$

기존 연구자들에 의해 평가된 점성토의 전단면 기울기는 대체로 Mohr-Coulomb의 해와 유사하거나 Mohr-Coulomb의 해와 Arthur의 해 사이에 존재한다고 명시되었다(Rhee, 1991; Saada et al., 1994; Hicher et al., 1994; Alshibli et al., 2004). 본 연구에서 평가된 전단 완료 후의 전단면 기울기도 58.6°로 산정되어 기존 연구자들이 제시한 바와 같이 Mohr-Coulomb의 해와 유사하게 나타났다. 그러나 본 연구에서 나타난 정규압밀 점성토의 전단면은 최대 축차응력이 발생한 이후에 뚜렷하

게 나타나기 시작하며, 전단이 진행됨에 따라 지속적으로 기울기가 증가하여 한계 상태에서 일정하게 유지된다. 이와 같이 전단면의 특성은 흙의 파괴 과정과 밀접한 연관이 있으나, 기존의 연구는 전단 완료 후의 전단면 특성에 대한 연구만 수행되었으며, 전단이 진행되는 전 과정에 대한 분석은 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 최대 응력 단계, 응력 연화 단계, 한계 상태의 세 가지 단계에 대해 전단면 기울기 분석을 수행하였으며, 각 단계에 대한 전단면 기울기는 Table 3과 같다. 최대 축차응력 단계에서의 점성토의 전단면 기울기는 46.8°로 나타나, Roscoe가 제안한 식을 통해 산정된 값과 유사하게 나타났다. 그러나, 응력 연화 단계 및 한계 상태 단계에서의 전단면 기울기는 각각 54.8°와 58.6°로 Mohr-Coulomb의 해와 유사하게 나타났다. 이를 통해 최대 축차응력 단계에서 점성토의 전단면 기울기는 팽창각의 영향을 받는 Roscoe의 해와 유사하게 나타나며, 전단면이 뚜렷하게 형성되는 응력 연화 단계 및 한계 상태 단계에서는 마찰각의 영향을 받는 Mohr-Coulomb의 해와 유사하게 나타난다는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 Roscoe의 해는 Mohr-Coulomb의 해 및 Arthur 등의 해보다 작게 산정되기 때문에(Hicher et al., 1994; Jang et al., 2011), 점성토의 전단면의 기울기는 파괴가 진행됨에 따라 점차적으로 증가하는 것으로 평가되었다.

전단면의 두께를 평가하는 경우, 전단 변형률 증분은 전단면 중심부로부터 거리가 멀어질수록 감소하기 때문에 최소 전단 변형률 기준을 설정하여 분석을 수행할

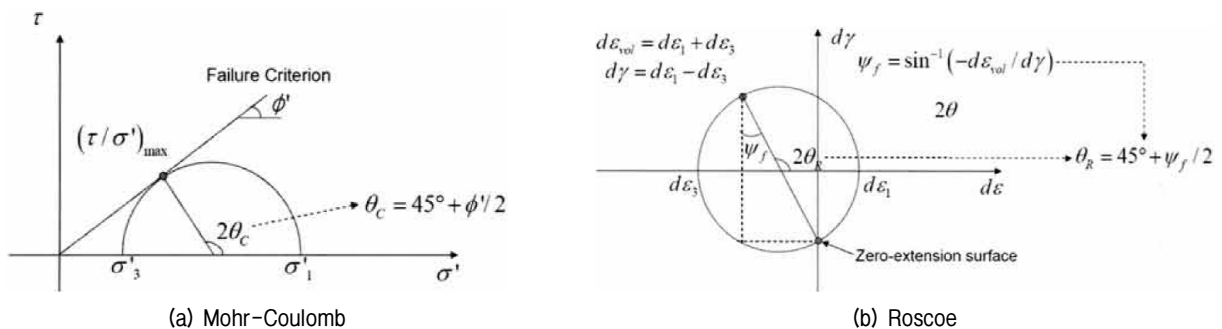


Fig. 15. Shear band inclination evaluation by Mohr-Coulomb and Roscoe

Table 3. Inclination angles for each stages with internal friction, dilation angle

| Stage        | $\phi'$ | $\psi$ | $\theta_C$ | $\theta_R$ | $\theta_A$ | $\theta_{measured}$ |
|--------------|---------|--------|------------|------------|------------|---------------------|
| Peak         | 23.0°   | 9.2°   | 56.5°      | 49.6°      | 53.0°      | 46.8°               |
| Softening    | 21.8°   | 6.5°   | 55.9°      | 48.2°      | 52.8°      | 54.8°               |
| Steady state | 20.9°   | 3.6°   | 55.4°      | 46.8°      | 51.1°      | 58.6°               |

필요성이 있다(Jang et al., 2011). 본 연구에서는 1.0%의 전단 변형률 이상이 발생한 영역을 전단면으로 정의하고 그 두께를 평가하였다. 기존 전단면 두께 평가에 대한 사례는 주로 사질토에서 수행되었으며, 점성토의 전단면 두께에 대한 연구는 전단 완료 후 측정된 전단면 두께의 결과값만 제시한 바 있다(Rhee, 1991; Hicher et al., 1994). 본 연구에서는 사질토의 전단면 두께 평가 방법을 적용하여 점성토의 전단면 두께에 대해 분석을 수행하였으며, 기존에 평가된 사질토의 전단면 두께의 특성과 비교하였다. 기존에 전단 완료 후 측정된 사질토의 전단면 두께는 입자 크기에 따라 다양하게 나타나기 때문에, 전단면의 두께에 미치는 입자 크기의 영향을 배제하기 위하여 입자 분포가 고른 흙에 대해  $D_{50}$ 으로 정규화하여 평가하였다(Roscoe, 1970; Oda et al., 1988; Alshibli et al., 1999; Jang et al., 2011). 일반적으로 사질토의 경우  $D_{50}$ 으로 정규화한 두께는 7-25 사이에 위치하며,  $D_{50}$ 이 작을수록 증가한다고 제시한 바 있다. 본 연구에서 산정된 점성토의 정규화한 전단면 두께( $t_{sb}/D_{50}$ )는 응력 연화 단계에서 약 151, 한계 상태에서는 약 144로 평가되어 기존 연구자들에 의해 평가된 사질토의 정규화한 두께와 비교할 경우 약 6-20배 크게 나타났다. 이를 통해 입경이 작을수록 정규화한 전단면 두께는 크기가 증가하며, 점성토의 정규화한 두께는 사질토의 정규화한 두께에 비해 크기가 더 커지는 것을 확인할 수 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 정규압밀 점성토의 파괴거동을 평가하기 위하여 연직응력 재하 간 시료의 변형 특성과 함께 전단면 특성을 평가하였다. 이를 위해, 재생형된 카울리 나이트에 대해 평면변형률 조건에서 압축 시험을 수행하였으며 전단 과정 중 시료의 디지털 이미지를 촬영하고 디지털 이미지 해석을 수행하였다. 시료 내부에서 발생하는 변형거동은 연직방향, 수직방향 변위 그리고 변형률 증분 등고선도로 평가하였으며, 전단면 특성을 기울기와 두께의 관점에서 평가하였다. 본 연구에서 평가된 결론은 다음과 같다.

- (1) 전단 초기 단계( $\epsilon_a=0-1.75\%$ )에서는 전단 변형이 뚜렷하게 나타나지 않았다. 최대 축차응력 단계( $\epsilon_a=1.75-2.25\%$ )에서 전단 변형이 집중되기 시작하지만,

여전히 뚜렷한 파괴면은 나타나지 않았다.

- (2) 응력 연화 단계( $\epsilon_a=2.25-4.5\%$ )에서는 전단 변형이 뚜렷하게 집중되는 전단면과 함께 전단 변형 없이 강제 이동만 발생하는 시료의 상부와 하부로 구분되었다. 전단면의 기울기는 점차적으로 증가하는 경향이 나타난다. 한계 상태 단계( $\epsilon_a>4.5\%$ )에서 전단면 발달이 완료되어 기울기의 변화가 나타나지 않으며, 과잉 간극수압도 일정하게 유지되었다.
- (3) 정규압밀 점성토의 전단면 기울기는 기존에 Mohr-Coulomb(1970)과 Roscoe(1970), Arthur et al.(1977)이 제시한 식과 비교하여 분석하였다. 점성토의 전단면 기울기는 최대 축차응력 단계에서는 Roscoe의 해와 유사하게 나타나며, 응력 연화 단계 및 한계 상태 단계에서는 Mohr-Coulomb의 해와 유사하게 나타났다.
- (4) 정규압밀 점성토의 전단면 두께는 사질토의 전단면 두께에 비해 작게 산정되었다. 그러나 입자 크기의 영향을 배제하기 위해  $D_{50}$ 으로 정규화한 두께로 분석한 결과 기존 연구자들이 제시한 바와 같이 평균 입경이 작은 점성토에서  $D_{50}$ 으로 정규화한 두께가 사질토에서 정규화한 두께보다 6-20배 크게 나타났다.

## 감사의 글

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (MSIP) (No. 2015R1A2A1A01007980).

## 참고문헌 (References)

1. Kim, J. Y., Jang, E. R., and Chung, C. K. (2011), "Evaluation of Accuracy and Optimization of Digital Image Analysis Technique for Measuring Deformation of Soils", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.27, No.7, pp.5-16.
2. Jang, E. R., Jung, Y. H., and Chung, C. K. (2009), "An Optimal Digital Image Analysis Technique for Measuring Deformation of Granular Soils", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.25, No.12, pp.119-130.
3. Jang, E. R., Jung, Y. H., Kim, J. Y., and Chung, C. K. (2011), "Assessment of Shear Band Characteristics in Granular Soils Using Digital Image Analysis for Plane Strain Tests", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.27, No.4, pp.51-65.
4. Alshibli, K. A. and Sture, S. (1999), "Sand Shear Band Thickness Measurements by Digital Imaging Techniques", *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol.13, No.2, pp.103-109.

5. Alshibli, K. A., Batiste, S. N., and Sture, S. (2003), "Strain Localization in Sand: Plane Strain vs. Triaxial Compression", *ASCE, Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering*, Vol.129, No.6, pp.1-12.
6. Alshibli, K., Godbold, D. L., and Hoffman, K. (2004), "Strain Localization in Clay: Plane Strain versus Triaxial Loading Conditions", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.27, No.4, pp.337-346.
7. Alshibli, K. A. and Akbas, I. S. (2007), "Sand Shear Band Thickness Measurements by Digital Imaging Techniques", *Geotechnical & Geological Engineering*, Vol.25, pp.45-55.
8. Arthur, J. R. F., Dunston, T., Al-Ani, Q. A. J., and Assadi, A. (1977), "Plastic Deformation and Failure in Granular Media", *Geotechnique*, Vol.27, No.1, pp.53-74
9. Callisto, L. and Calabresi, G. (1998), "Mechanical Behaviour of Natural Soft Clay", *Geotechnique*, Vol.48, No.4, pp.495-513.
10. Desreus, J., Chambon, M., Mokni, 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.
11. 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.
12. Gylland, A. S., Jostad, H. P., and Nordal, S. (2014), "Experimental Study of Strain Localization in Sensitive Clays", *Acta Geotechnica*, Vol.9, pp.227-240.
13. Hicher, P. Y., Wahyudi, H., and Tessier, D. (1994), "Microstructural Analysis of Strain Localisation in Clay", *Computers and Geotechnics*, Vol.16, pp.205-222.
14. Jang, D. J. and Frost, J. D. (2000), "Use of Image Analysis to Study the Microstructure of a Failed Sand Specimen", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.37, pp.1141-1149.
15. Jang, E. R., Chung, C. K., and Choo, Y. S. (2011), "Estimation of Spatial Deformation in Granular Soil Specimens by Plane Strain Test with Digital Image Analysis", *Proceedings of the Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp.397-404.
16. Kim, J. Y., Jang, E. R., Yune, C. Y., and Chung, C. K. (2011), "Internal Deformation of Soil during Consolidation in Radial Drainage Condition", *International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials*, pp.1144-1149.
17. Lin, H. and Penumadu, D. (2006), "Strain Localization in Combined Axial Torsional Testing on Kaolin Clay", *Journal of Engineering Mechanics*, Vol.132, No.5, pp.555-564.
18. 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.
19. Peters, J., Lade, P., and Bro, A. (1988), "Shear Band Formation in Triaxial and Planes Strain Tests", *Advanced triaxial testing of soil and rock*, ASTM, STP977.
20. Rhee, Y. (1991), "Experimental Evaluation of Strain-softening behavior of Normally Consolidated Chicago Clays in Plane Strain Compression", *Ph.D. Dissertation*, Northwestern University, Evanston, Illinois.
21. Roscoe, K. H. (1970), "The Influence of Strains in Soil Mechanics", *Geotechnique*, Vol.20, No.2, pp.129-170.
22. Saada, A. S., Bianchini, G. F., and Liang, L. (1994), "Cracks, Bifurcation and Shear Bands Propagation in Saturated Clays", *Geotechnique*, Vol.44, No.1, pp.35-64.
23. Wong, R. C. K. (2000), "Shear Deformation of Locked Sand in Triaxial Compression", *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol.23, No.2, pp.158-170.
24. White, D. J. and Take, W. A. (2003), "GeoPIV: Particle Image Velocimetry (PIV) Software for Use in Geotechnical Testing", *Technical Report*, Cambridge University Department of Engineering, Cambridge, UK.
25. White, D. J., Take, W. A., and Bolton, M. D. (2003), "Soil Deformation Measurement Using Particle Image Velocimetry (PIV) and Photogrammetry", *Geotechnique*, Vol.53, No.7, pp.619-631.

Received : February 26<sup>th</sup>, 2016

Revised : March 9<sup>th</sup>, 2016

Accepted : March 10<sup>th</sup>, 2016