

## 디지털 이미지 코릴레이션 기법으로 평가한 평면변형을 시험의 단부 구속 효과 Restrained Effect of End Plate on Plane Strain Test Evaluated by Digital Image Correlation Method

장의룡<sup>1)</sup>, Eui-Ryong Jang, 추윤식<sup>2)</sup>, Yoon-Sik Choo,  
이원택<sup>3)</sup>, Won-Taeg Lee, 정충기<sup>4)</sup>, Choong-Ki Chung

<sup>1)</sup> 서울대학교 건설환경공학부 박사과정, Graduate Student, School of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National Univ.

<sup>2)</sup> 서울대학교 건설환경공학부 석사과정, Graduate Student, School of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National Univ.

<sup>3)</sup> 호남대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Honam Univ.

<sup>4)</sup> 서울대학교 건설환경공학부 교수, Professor, School of Civil, Urban & Geosystem Engineering, Seoul National Univ.

**SYNOPSIS** : The plane strain test has been used widely in order to examine the stress-strain relation and failure behavior. Its advantages are more realistic simulation of deformation and failure behaviors of soils. Most plane strain tests have been carried out with restrained end plates due to difficulties in manufacturing the equipment with free end condition and also performing it. In this study, plane strain tests with/without bottom plate restraint were performed on Jumunjin-sand. The measurement of overall and local deformation was accomplished by digital image correlation technique as well as external LVDT. By applying digital image correlation method using two consecutive images captured through the transparent wall, local deformation behavior of various parts inside the specimen was estimated. From digital image analysis result, the restrained effect of end plate was examined about formation and development of shear band, and deformation mechanism of sand under plane strain condition.

**Key words** : Plane strain, Digital Image Correlation(DIC), Restrained effect, End plate, Strain localization, Shear band

### 1. 서 론

실내시험에서 현장 지반의 변형 특성을 파악하기 위하여 시료 내부의 파괴면 발생양상을 포함하는 위치별 변형 거동 메커니즘을 종합적으로 분석, 평가하는 연구가 이루어지고 있다. 대표적인 예로 삼축 시험의 전단 중에 시료를 굳힌 후 절단하여 살펴보거나 X-ray 단층 촬영하는 방법들이 있다. (Desrués et al., 1996; Alshibli et al., 1999, 2003) 그러나 이 기법들은 시료의 관찰이 일회적으로서 연속적이지 못하고, 값 비싼 장비의 사용을 필요로 한다는 단점이 있다. 반면에 평면변형을 시험에서는 시료의 변형이 구속되는 중간 주응력면에 투명한 측면판을 설치하여 재하 중에 발생하는 변형을 보다 쉽게 관찰 할 수

있다. 또한 평면변형을 조건에서는 변형이 중간주응력 방향으로 발생하지 않기 때문에 측면판에 나타난 변형이 시료 내부의 변형과 같다고 할 수 있다. 이러한 이유에서 평면변형률 시험기는 평면변형률 조건을 근사하게 모사하려는 목적 외에도 흙의 국부적인 변형을 포함하는 전체적인 파괴 거동을 보다 정확하게 파악하고 파괴면을 관찰하기 위한 목적으로 활용되어지고 있다. (Liang et al., 1997; Alshibli et al., 2003).

평면변형률 시험이 평면변형률 조건을 만족하여 그에 따른 정확한 응력-변형률 관계와 파괴 거동을 얻기 위해서는 시료 단부가 구속되지 않아야 한다. 시료의 주응력 면인 양 단부에 전단력을 발생시키는 구속 효과는 전단 중에 바닥판이 움직이는 시험기를 사용하여 제거할 수 있으며, 이로써 평면변형률 조건에서의 전단 변형 거동 관찰이 가능하다. (Finno et al., 1997, Alshibli et al., 2004) 그러나 대부분의 평면변형률 시험은 시험기 제작과 시험 수행의 어려움 때문에 시료 단부 구속 하에서 수행되고 있다. (Marachi et al., 1981; Tatsuoka et al., 1986, Wanatowski et al., 2006)

현장을 모사하려는 실내시험에서 시료의 명백한 변형 경계 조건의 차이는 흙의 특성을 실제와 다르게 평가하는 원인이 될 수도 있으며, 관찰되는 변형 거동의 차이를 유발할 수 있다. 이러한 문제를 인식하고 바닥판의 움직임을 조절할 수 있는 시험기를 개발하여 시료 단부 구속 여부에 따라 거동을 비교한 연구도 이루어져왔다. (Alshibli et al., 2004, 장의룡 등, 2006) 그러나 기존의 연구는 강도를 비롯한 응력-변형률 거동에만 초점을 맞추어 비교하여 왔으며, 파괴면의 발생 양상을 포함하는 시료 내부의 변형 거동을 관찰하고 분석하여 단부 구속 효과를 평가하는 연구는 이루어지지 않고 있다.

본 연구에서는 평면변형률 시험기의 단부, 즉 바닥판의 구속을 제어할 수 있는 시험기를 이용하여 바닥판이 구속되는 시험과 바닥판이 자유로이 움직일 수 있는 두 가지 시험을 주문진 표준사를 이용하여 수행하였다. 전단 중에 시험기의 투명한 측면판을 통하여 시료 내부의 변형 형상을 디지털 카메라로 연속 촬영하였다. 변형 거동을 파악하고자 하는 시간 간격의 이미지들을 선택하여 이미지 해석을 수행하였고, 원하는 변형률 영역에서의 변형을 측정하였다. 이를 활용하여 평면변형률 조건하에서의 사질토의 파괴면 형성과 발달과정 그리고 변형 메커니즘을 단부 구속에 따른 영향을 중심으로 규명하였다.

평면변형률 시험에서 변형 측정을 위한 이미지 해석은 일반적으로 멤브레인에 격자를 그린 후 전단에 따라서 변화하는 이미지를 추적하여 이루어져 왔다. (Liang et al., 1997; Alshibli et al., 2003) 이때 이미지의 변화는 제한적인 측정점을 이용하여 수작업으로 진행되기 때문에 시간이 오래 걸릴 뿐만 아니라 시료 전체 변형을 세밀하고 정확하게 측정하기 어렵다. 그러나 최근에는 자동화된 디지털 이미지 프로세싱 기술이 널리 개발 되어 활용되고 있다. (White et al., 2003; Rechenmacher et al., 2004) 본 연구에서는 서로 다른 시간에 캡처된 두 개의 디지털 이미지를 이용하여 픽셀의 상관성으로 원하는 위치에서 변위를 산정하는 디지털 이미지 코릴레이션 기법을 적용하였다. 이로써 평면변형률 시험에서 나타나는 전체적인 변형 거동뿐만 아니라 시료 내부 모든 위치의 국부적인 변형 거동을 파악하였다.

## 2. 시험 개요

### 2.1 시험기 개요

본 연구에서 수행된 평면변형률 시험은 그림 1과 같이 바닥판이 움직일 수 있는 평면변형률 시험기 (장의룡 등, 2006)를 이용하여 수행되었다. 시험기의 바닥판은 위, 아래 2개의 부분으로 나누어져 있으며, 하부 바닥판은 시험기 저판에 고정되어 있고, 리니어베어링 위에 놓인 상부 바닥판은 바닥판 고정 장치에 의해 움직이거나 구속될 수 있다. 두 개의 측면판 중 하나는 벽체 응력을 측정하기 위하여 토압계가 설치되어 있고 다른 하나는 시료 내부 변형 형상의 이미지 촬영을 위하여 투명한 아크릴로 만들어져 있다. 측면판의 하부는 고정된 하부 바닥판에 연결되어 있으면서 상부에는 Bracing을 설치하여 측면판의 횡방향 변위를 구속하여 평면변형률 조건을 구현하였다.

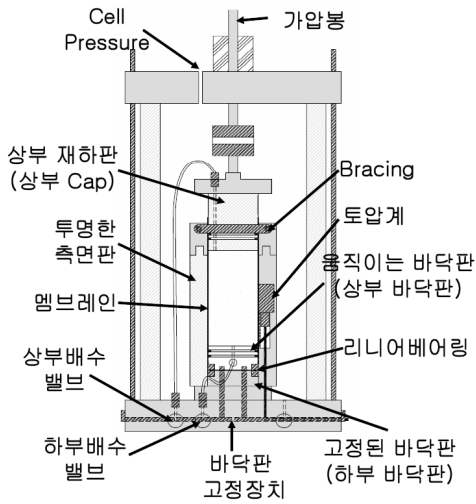


그림 1. 시험기의 개략도



그림 2. 직육면체 형상의 셀

기준에 개발 사용되어온 평면변형률 시험기 셀은 대부분 삼축시험기 셀의 형태와 동일한 실린더형이기 때문에, 굴절에 의하여 시료의 관찰이 정확하게 이루어질 수 없다. 본 연구에서 활용된 시험기의 셀은 실린더형이 아닌 직육면체 형상(그림 2)으로 투명한 측면판이 있는 방향에서 전단 과정 중에 시료의 변형 형상을 굴절 없이 관찰 하는 것이 가능하다.

## 2.2 사용 시료 및 시험조건

본 연구에서 수행된 평면변형률 시험은 74%로 성형된 주문진 표준사를 이용하였으며, 단부의 구속 여부, 즉 바닥판의 움직임에 따른 두 가지 시험으로 나누어 진행하였다. (UBP : 바닥판 움직임 허용한 시험, RBP : 바닥판 움직임 구속한 시험) 시료는 높은 포화도를 위하여  $CO_2$ 를 이용하여 배압 포화(Back Pressure Saturation) 과정을 거쳤다.  $K_0$  압밀을 수행할 때에는 횡방향 응력이 100 kPa에 도달될 때까지 진행하였으며, 전단은 일정 구속압 하에서 연직방향 하중을 파괴 시까지 재하하는 일반적인 압축시험 방식으로 수행하였다.

표 1. 주문진 표준사의 물성

통일분류	SP
비중 ( $G_s$ )	2.65
최대 간극비 ( $e_{max}$ )	0.992
최소 간극비 ( $e_{min}$ )	0.596
평균입경 ( $D_{50}$ , mm)	0.56
균등계수 ( $C_u$ )	1.53
곡률계수 ( $C_c$ )	0.94

표 2. 시험조건

UBP	RBP
Unrestrained	Restrained
Bottom Plate	Bottom Plate
바닥판 움직임 허용	바닥판 움직임 구속
상대밀도 74%	
$\sigma'_3 = 100kPa$	

## 2.3 디지털 이미지 캡처

디지털 이미지 분석을 위하여 300만 화소(2016×1512 Pixels)의 측정이 가능한 디지털 카메라(Sony SD-100)를 이용하였으며, 전단 시험 중 평균 연직 변형률 0.05~0.15 % 간격(약 1분 간격)으로 사진을 촬영하였다. 이때에 얻어진 사진은 그림 3과 같이 시료 전체를 모두 포함하게 촬영되었으며 해상도는 대

약 0.1mm/pixel을 가지게 된다. 시료는 시험기의 투명한 측면판을 통하여 관측하였으며, 고정된 카메라의 방향과 측면판은 수직을 유지하였다. 충분하고 일정한 밝기를 유지할 수 있도록 별도의 조명을 사용하였다.

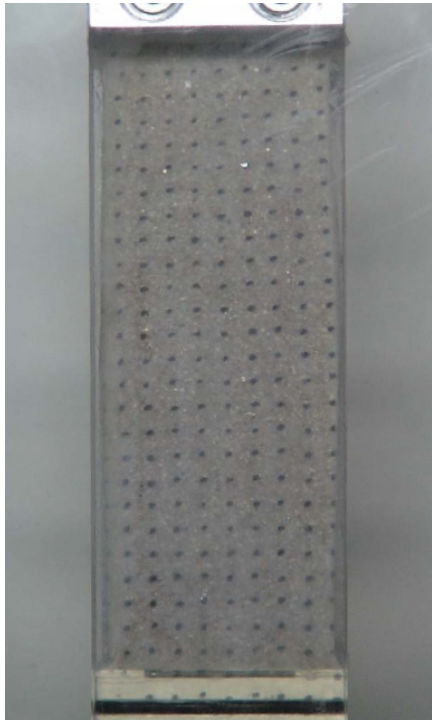


그림 3. 전단 중에 촬영된 디지털 이미지

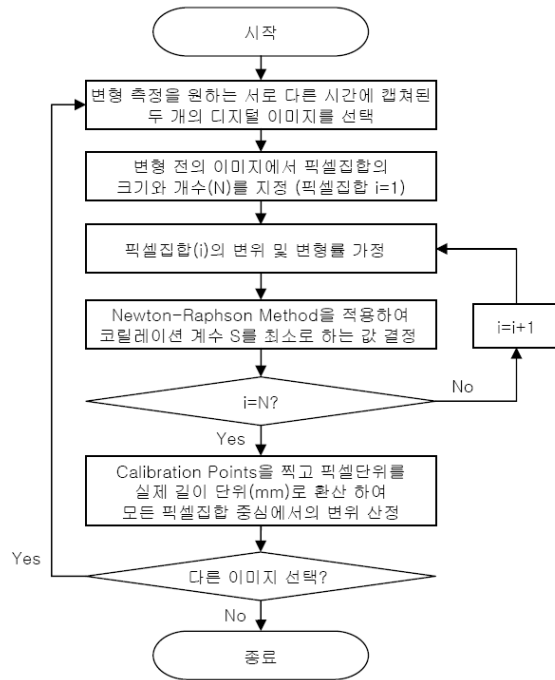


그림 4. 디지털 이미지 코릴레이션 기법을 적용하여 변형을 측정하는 절차

### 3. 디지털 이미지 코릴레이션

#### 3.1 디지털 이미지 프로세싱의 개요

여러 분야에서 관찰하고자 하는 대상 물체의 변형을 측정하기 위하여 디지털 이미지를 활용한 해석 기법이 이용되고 있다. 토질 역학의 분야에서도 PIV(Particle Image Velocity)나 DIC(Digital Image Correlation)기법들이 시료의 변형 측정을 위하여 적용되고 있다. (White et al., 2003; Rechenmacher et al., 2004) 이 기법들은 알고리즘에 차이는 있지만 서로 다른 시간에 캡처된 두 개의 디지털 이미지를 이용하여 픽셀(pixel)들의 상관성으로 상대적인 변위를 측정한다는 공통점을 가지고 있다. 본 연구에서는 두 이미지가 가지는 픽셀들의 상관성을 고려할 때에 변위 뿐 아니라 변형까지 동시에 고려할 수 있는 디지털 이미지 코릴레이션 기법(DIC)을 사용하여 해석을 수행하였다.

디지털 이미지 해석을 수행하기 위하여 관찰되는 대상은 굴곡이 없는 평면이어야 하며, 시료의 표면에서 관찰되는 거동이 그 내부와 동일해야 한다. 이는 평면변형을 시험에서 가장 적절하게 만족시킬 수 있으며, 이를 근거로 최근에 평면변형을 시험에 디지털 이미지 코릴레이션 기법의 적용을 검증한 연구가 진행되어 왔다. (Rechenmacher et al., 2004; 장의룡 등, 2007)

#### 3.2 디지털 이미지 코릴레이션 기법의 알고리즘

변형 측정을 원하는 서로 다른 시간에 캡처된 두 개의 디지털 이미지는 일반적으로 흑백 사진으로 변환되며, 각 픽셀은 0부터 255까지의 레벨로 구분되는 명암을 갖게 된다. 두 이미지를 맞출 때에 하나의

픽셀을 사용하지 않고 임의의 명암 패턴을 가지는 픽셀 집합을 이용한다. 단일 픽셀을 사용할 경우에는 변형 후의 이미지에서 같은 명암강도를 가지는 수많은 단일 픽셀들이 존재할 가능성이 있으므로 유일한 변위의 산정이 어렵기 때문이다. 즉, 그림 5과 같이 초기 이미지에서 임의의 명암 패턴을 가지는 사각형의 픽셀 집합을 만들고, 변형이 발생한 이미지에서 그와 가장 유사한 패턴을 가지는 픽셀 집합을 찾아서 위치의 변화를 결정하는 것이다. 픽셀 집합의 상관성은 식 (1)로부터 코릴레이션 계수  $S$ 를 구하여 결정한다.

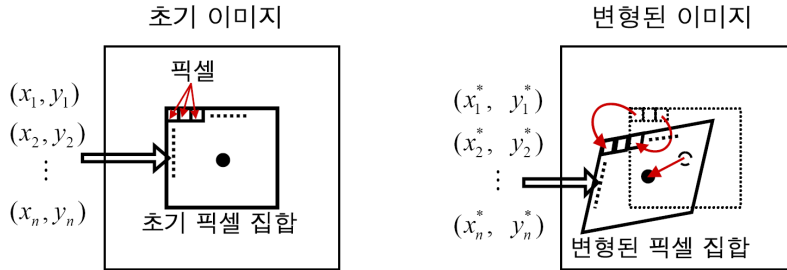


그림 5 초기 이미지와 변형된 이미지에서의 픽셀집합과 좌표

$$S\left(x, y, u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}\right) = 1 - \frac{\sum_i [F(x_i, y_i) \times G(x_i^*, y_i^*)]}{\left[\sum_i (F(x_i, y_i))^2 \times \sum_i (G(x_i^*, y_i^*))^2\right]^{1/2}} \quad (1)$$

여기서  $F(x_i, y_i)$ 는 초기 픽셀 집합에서  $(x_i, y_i)$  좌표에 해당하는 픽셀의 명암 값이며,  $G(x_i^*, y_i^*)$ 는 변형된 픽셀 집합의  $(x_i^*, y_i^*)$  좌표에 해당하는 픽셀이 가지는 명암 값이다. 변형된 픽셀 집합의  $(x_i^*, y_i^*)$ 는 그림 1에 나타난 것처럼 초기 픽셀 집합의  $(x_i, y_i)$ 에 위치한 시료의 포인트가 변화하여 옮겨진 좌표이다. 변형 전의 초기 좌표  $(x_i, y_i)$ 와 변형된 좌표  $(x_i^*, y_i^*)$ 의 관계는 이미지 코릴레이션을 통하여 구하고자 하는 변위  $u$ 와  $v$ 을 이용하여 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$x_i^* = x_i + u + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x_i + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y_i, \quad y_i^* = y_i + v + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x_i + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y_i \quad (2)$$

여기서  $u$ 와  $v$ 는 픽셀 집합 중심의 변위이며,  $\Delta x_i$ 와  $\Delta y_i$ 는 픽셀 집합 중심에서  $(x_i, y_i)$  좌표까지의 거리이다. 그리고  $\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}$ 은 변형률에 관계되는 값들으로써, 이 값들이 없을 경우 픽셀 집합의 모양은 변하지 않고 이동만 하게 된다. 하지만 이 값들로 인하여 픽셀 집합의 모양이 변하는 것을 고려할 수 있게 되며 더 정밀한 코릴레이션을 수행할 수가 있다. 이미지 코릴레이션의 목적은 식 (1)의  $S$  값을 최소화하는 최적의  $u, v, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}$ 을 찾는 것이며, 최적의 값을 효율적으로 찾기 위하여 Newton-Raphson 방법을 이용하였다. (Bruck et al., 1989) 위의 알고리즘을 그림 4에 요약된 절차처럼 여러 픽셀 집합에 대하여 적용하면 여러 지점에서의 변위를 얻어 낼 수 있다. 본 연구에서는 위에 설명된 디지털 이미지 코릴레이션 기법을 MATLAB을 활용하여 자동화된 프로그램으로 작성하여 사용하였다.

## 4. 시험 결과

### 4.1 $K_0$ 압밀

평면변형률 시험의  $K_0$  압밀은 시료가 측면판과 밀착된 상태에서 횡방향 변형이 일어나지 않으면서 연직 변형이 발생해야 한다. 이러한 조건을 만족시키면서 전단 중에 바닥판이 움직이는 시험(UBP)들의 압밀을 수행하여  $K_0$  값을 찾았다. 전단 중에 바닥판이 고정되는 시험(RBP)들의 압밀은 UBP 시험과 동일한 응력경로를 거쳐 같은  $K_0$  값에 도달하게 하였다. 표 3의 결과와 같이 동일한 응력경로, 같은  $K_0$  값이라고 하더라도 측면판에 작용하는 응력은 유효 구속압인 최소 주응력 보다는 크면서, 약간의 차이를 보여 주고 있다.

표 3.  $K_0$  압밀 결과

시험	$\sigma_3' (kPa)$	$\sigma_1' (kPa)$	$\sigma_2' (kPa)$	$K_0$
UBP	100	372	109	0.27
RBP		372	121	0.27

### 4.2 응력 변형률 및 부피변형률 거동

$K_0$  압밀이 수행된 후 바닥판의 구속을 조절하여 전단을 시킨 두 개의 시험에서 나타난 응력-변형률 관계와 부피변형률특성을 그림 6과 7에 각각 나타내었다. 두 시험에 작용하는 유효 구속압( $\sigma_3'$ )은 100kPa로 일정하게 유지시켰으며, 그림 6과 같이 측면판에 부착된 토압계를 이용하여 측정된 벽체에 작용하는 중간주응력( $\sigma_2'$ )도 연직응력( $\sigma_1'$ )과 함께 도시하였다.

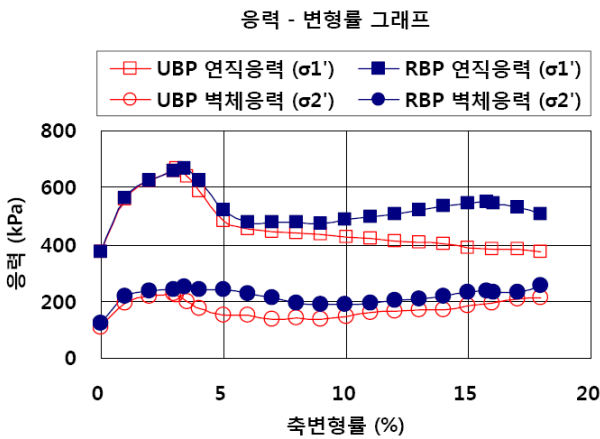


그림 6. 응력-변형률 그래프

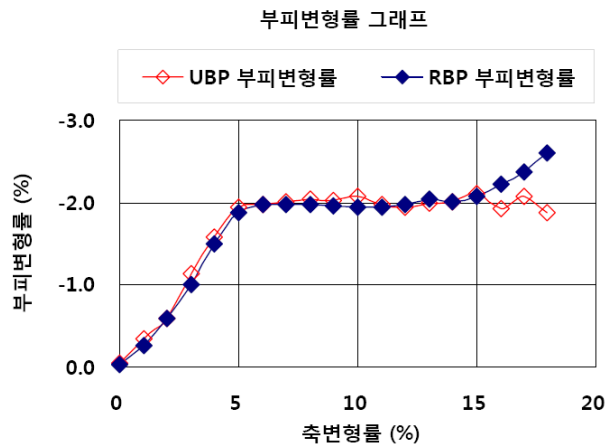


그림 7. 부피변형률 그래프

표 4. 최대 연직응력 상태에서의 응력, 마찰각 및 평균 연직 변형률

시험	$\sigma_1' (kPa)$	$\sigma_2' (kPa)$	$\phi' (^\circ)$	$(\epsilon_v)_{ave}$ at 1st peak (%)	$(\epsilon_v)_{ave}$ at 2nd peak (%)
UBP	664	223	47.6	3.09	-
RBP	667	250	47.7	3.41	15.75 ( $\sigma_1' = 550kPa$ )

두 경우 모두 최대 응력에 도달한 이후 응력이 감소하는 응력 변화 현상이 나타나며, 초기 응력-변형

를 관계에서는 바닥판 구속 여부에 따른 영향이 분명하게 나타나지 않는다. 그러나 응력 연화 이후에는 단부를 구속한 경우가 구속하지 않은 경우보다 연직 응력과 벽체 응력이 더 크게 나타났으며, 전단 변형이 크게 발생하여 잔류 응력에 도달한 이후로 판단되는 16 % 부근에서 두 번째 peak가 관찰되었다. 최대 연직응력을 가지는 평균 연직 변형률은 단부를 구속하지 않은 경우가 3.09%로 구속된 3.41% 보다 약간 작게 나타났으며, 이는 기존의 연구에서 제시된 결론과 유사하다. (Alshibli et al., 2004; 장의룡 등, 2007) 그러나 마찰각은 거의 차이가 발생하지 않아 바닥판이 구속된 경우에 더 큰 강도를 보이는 기존의 연구와 차이를 보였다. 부피 변형 특성의 경우 거의 일치하였으나 바닥판이 구속되었을 때는 연직응력이 두 번째 peak 값을 가지는 부분에서 다시 증가하는 경향을 나타내었다.

## 5. 디지털 이미지 해석 결과

이미지 해석은 하중 변화에 따라 변화하는 이미지 두 개를 비교함으로써 이루어진다. 본 연구에서는 평균 연직 변형률( $(\epsilon_v)_{ave}$ ) 1% 간격을 적용하였다. 디지털 이미지 코릴레이션 알고리즘에서 Newton - Raphson 방법을 적용할 때 수렴조건은 0.01pixel로 하였다. 이 수렴 조건은 대략 0.001mm의 정확도를 가지며,  $8 \times 10^{-4}$ % 변형률 증분을 표현할 수 있다. 변위가 구해지는 픽셀집합의 중심점들은 1000개 이상 설정하였으며, 각 픽셀집합은  $30 \times 30$  pixel로써 충분히 유일한 패턴을 가질 수 있는 크기로 결정하였다. 변형률을 산정할 필요가 있을 경우에는 변위가 구해진 점들을 이용하여 만들 수 있는 가장 작은 사각형 요소 내의 선형 변위장( $u^e, v^e$ )을 최소 오차법을 이용하여 위치에 따른 함수로 구하였다. 그리고 구해진 선형 함수를 식 (3)을 이용하여 요소 내에서 변형률 값들을 상수로 산정하였다.

$$\epsilon_{xx}^e = \frac{\partial u^e}{\partial x}, \quad \epsilon_{yy}^e = \frac{\partial v^e}{\partial y}, \quad \gamma_{xy}^e = \frac{\partial u^e}{\partial y} + \frac{\partial v^e}{\partial x} \quad (3)$$

전단이 진행되는 전 과정을 해석하였고, 그 중 대표적인 결과를 시각적으로 용이하게 확인할 수 있도록 명암에 따른 등고선을 활용하여 도시하였다. 제시된 변위 값 들은 비교되는 두 이미지 요소의 상대 변위(mm)이며 연직 방향(y축 방향)의 양의 변위를 위로, 횡방향(x축 방향)의 양의 변위를 오른쪽으로 정하였다. 또한 등고선에 표시된 변형률 값은 % 단위이며 일반적인 표현과 다르게 압축을 음수로 팽창을 양수로 표현하였다.

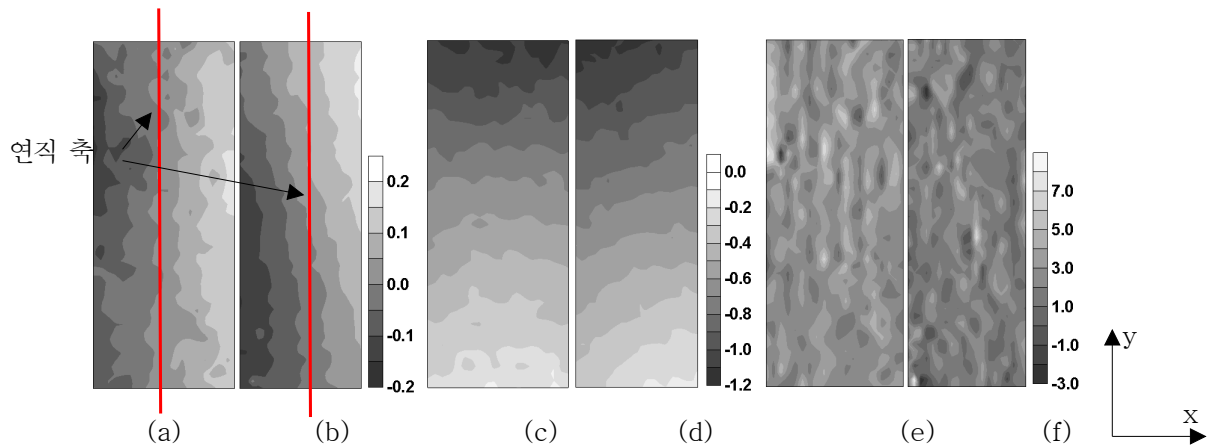


그림 8.  $(\epsilon_a)_{global}=0\sim 1\%$ 에서의 변위 및 변형률 분포 등고선

- (a) UBP 횡방향변위, (b) RBP 횡방향변위, (c) UBP 연직방향변위, (d) RBP 연직방향변위, (e) UBP 횡방향변형률( $\epsilon_{xx}$ ), (f) RBP 횡방향변형률( $\epsilon_{xx}$ )

전단 초기에는 그림 8과 같이 바닥판의 구속 여부에 따른 거동의 차이가 크게 나타나지 않는다. 두

경우 모두 횡방향 변형은 시료 가운데 연직 축을 중심으로 균일하게 좌, 우로 팽창하며, 연직방향 변위는 같은 높이에서 거의 동일한 값을 나타낸다. 각 요소의 변형을 기준으로 하는 변형률을 산정하면 모두 그림 8(e), (f)와 같이 위치에 따른 경향성이 초기 재하 중에는 나타나지 않는다.

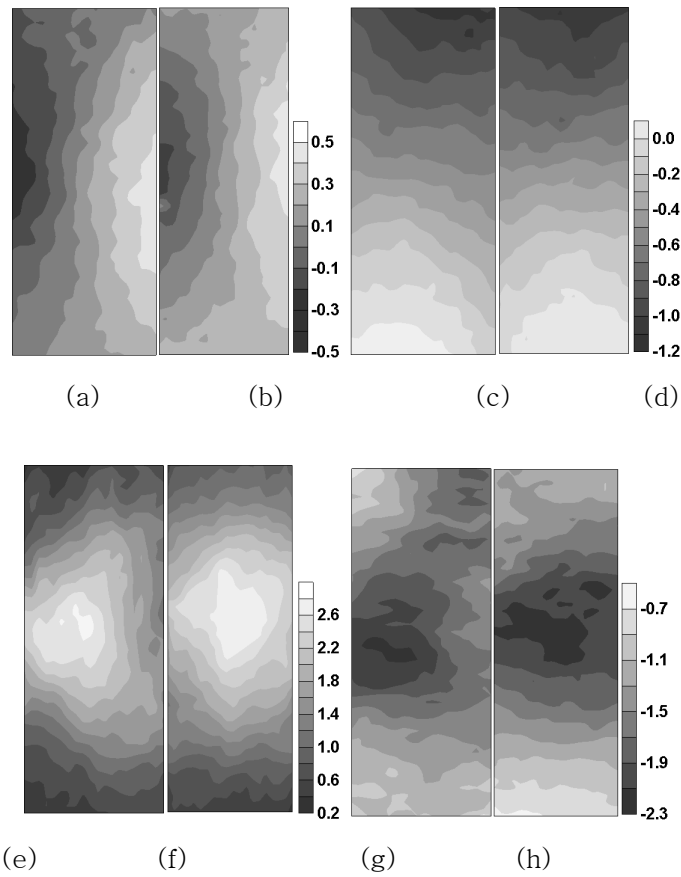


그림 9.  $(\epsilon_a)_{global}=2\sim3\%$ 에서의 변위 및 변형률 분포 등고선

(a) UBP 횡방향변위, (b) RBP 횡방향변위, (c) UBP 연직방향변위, (d) RBP 연직방향변위,  
 (e) UBP 횡방향변형률( $\epsilon_{xx}$ ), (f) RBP 횡방향변형률( $\epsilon_{xx}$ ), (g) UBP 연직방향변형률( $\epsilon_{yy}$ ), (h) RBP  
 연직방향변형률( $\epsilon_{yy}$ )

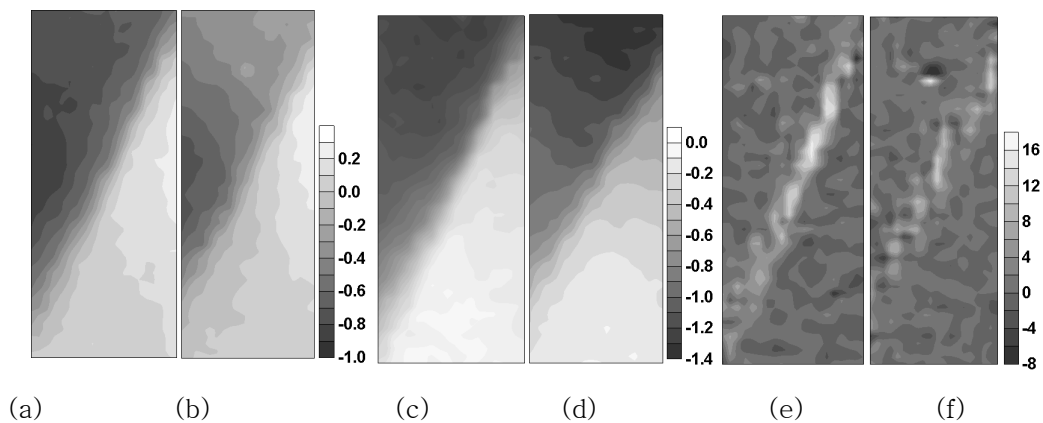


그림 10.  $(\epsilon_v)_{ave}=3\sim4\%$ 에서의 변위 및 변형률 분포 등고선

(a) UBP에서 횡방향변위, (b) RBP에서 횡방향변위, (c) UBP에서 연직방향변위, (d) RBP에서  
 연직방향변위, (e) UBP에서 전단 변형률( $\epsilon_{xy}$ ), (f) RBP에서 전단 변형률( $\epsilon_{xy}$ )



최대 연직응력에 도달하기 전까지는 그림 9에서와 같이 단부 구속효과가 명확히 관찰되지 않는다. 바닥판 구속여부에 상관없이 변형률이 증가함에 따라 시료 중앙의 좌, 우에서 횡방향 변위가 증가하며, 연직 변위의 등고선의 좁아진 간격에서 알 수 있듯이 위치별 변위 차이가 증가한다. 그리고 그림 9(e)~(h)처럼 시료 중앙에 횡방향 팽창과 연직방향 압축 변형률이 다른 부분과 비교하여 크게 나타나는 Bulging 현상이 관찰된다.

최대 연직응력이 포함되는 구간(그림 10)에서부터 단부 구속 효과가 나타나기 시작한다. 그림 10(a) - 10(d)에 나타난 바와 같이 구속여부에 상관없이 모두 연직 방향과 횡방향 변위가 급격하게 변화하는 전이 영역(즉 등고선 간격이 조밀하게 나타나고, 변위가 급격하게 변화하는 영역)이 그림의 대각선 방향으로 나타나지만, 바닥판이 구속된 경우(RBP)에는 구속되지 않은 것(UBP)과 비교하여 전이 영역이 뚜렷하지 않다. 그림 10(e)과 (f)에서 전단변형률이 큰 부분이 하얀 띠로서 나타나고 재하와 더불어 전단면(또는 전단파괴면)으로 발달하게 되는데, 바닥판이 구속되지 않은 시험(UPB)에서 더 큰 기울기와 함께 뚜렷하게 관찰된다. 이는 바닥판이 구속되었을 때에 최대 연직 응력이 더 늦게 발생 때문에 파괴면 형성 역시 늦게 나타나는 것으로 생각할 수 있다.

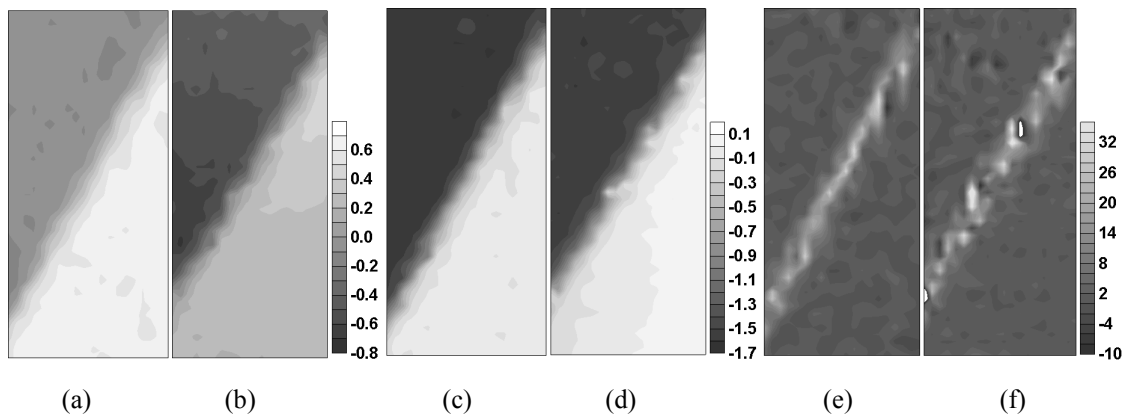
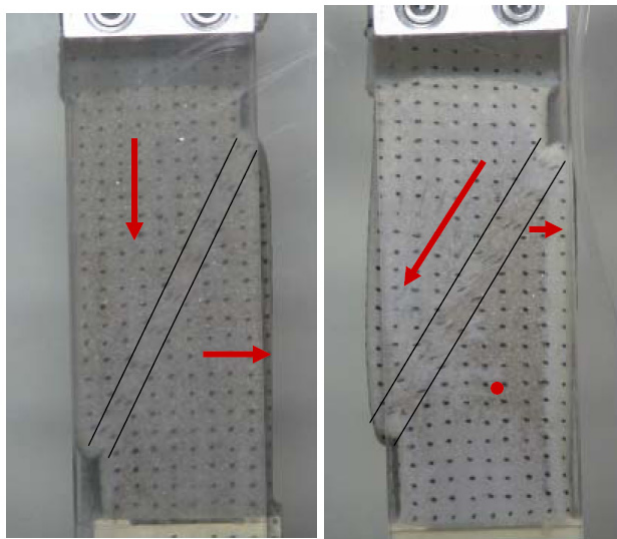


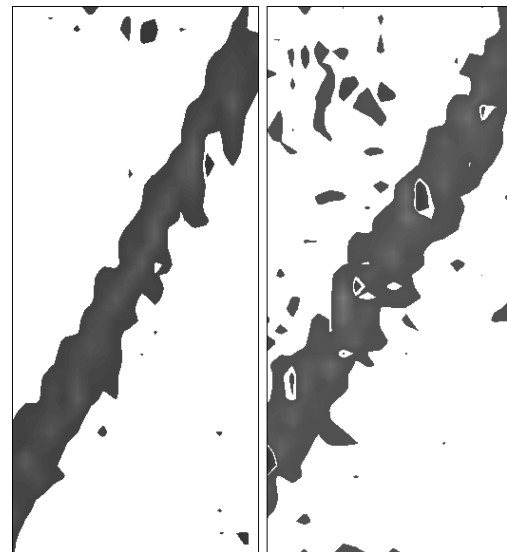
그림 11.  $(\epsilon_v)_{ave} = 7 \sim 8\%$ 에서의 변위 및 변형률 분포 등고선

(a) UB에서 횡방향변위, (b) RB에서 횡방향변위, (c) UB에서 연직방향변위, (d) RB에서 연직방향변위, (e) UB에서 전단 변형률( $\epsilon_{xy}$ ), (f) RB에서 전단 변형률( $\epsilon_{xy}$ )



(a) UB (b) RB

그림 12. 바닥판 구속여부에 따른 시료의 변형



(a) UB (b) RB

그림 13. 높은 전단변형률을 가진 영역

파괴 이후 전단면이 발생하면서 전단면 발생 영역과 그 외의 영역의 거동이 명확히 구분된다. 그림 11에 나타난 바와 같이 전단면 영역에서 위치별 변위 차가 더 크게 나타나고, 그에 따라서 변형률이 매우 크게 발생한다. 바닥판 구속에 따른 영향은 그림 12에 도시한 바와 같이 연직방향 보다는 횡방향 변형 양상에서 크게 다르게 나타난다. 바닥판이 구속되지 않은 경우에는 전단면 상부의 횡방향 변위는 거의 없으나 하부의 횡방향 변위가 크게 나타나는 반면에, 바닥판이 구속된 상황에서는 시료 중간 높이에 횡방향 변위가 크게 발생하며, 구속되지 않은 경우에 비교하여 전단면 상부에서 큰 횡방향 변위가 관찰되는 반면 하부에서는 상대적으로 작은 변위가 발생한다. 그러나 변형률로 비교하면 그림 11(e)과 (f)에서와 같이 육안으로 차이를 구별하기가 쉽지 않다. 더 자세히 전단 변형 상태를 비교하기 위하여 동일하게 낮은 전단 변형률을 제외하고 등고선을 재작성하여 그림 13에 나타내었다. 2% 이상의 높은 전단 변형률 발생 영역을 살펴보면, 바닥판이 구속된 시험이 상대적으로 두껍고 경사가 낮은 전단면을 형성하게 됨을 확인할 수 있다. 이는 바닥판 구속의 경우에는 전단면 하부 영역의 횡방향 움직임이 자유롭지 못하기 때문에 재하에 따른 전단면이 그림 12에 보여진 바와 같이 시료 높이의 중간 부분만이 횡방향으로 팽창하면서(Bulging) 전체적으로는 작은 횡방향 변위를 유발하고, 바닥판 구속이 전단면 발생에 저항을 하기 때문에 전단면이 커지고, 더 큰 변형률에서 peak가 나타난 것으로 판단된다. 반면에 바닥판이 구속되지 않은 경우에는 그림 12(a)에 나타난 바와 같이 재하에 의한 횡방향 변위는 시료 하부의 바닥판 움직임이 자유롭기 때문에 전단면 하부에서 크게 나타나고, 전단면 상부는 작은 횡방향 변위와 함께 연직 방향 변위가 크게 나타나며, 이러한 전단면 상하부의 변위 방향의 큰 차이로 인하여 보다 확실하고, 분명한 전단면이 나타난 것으로 판단된다.

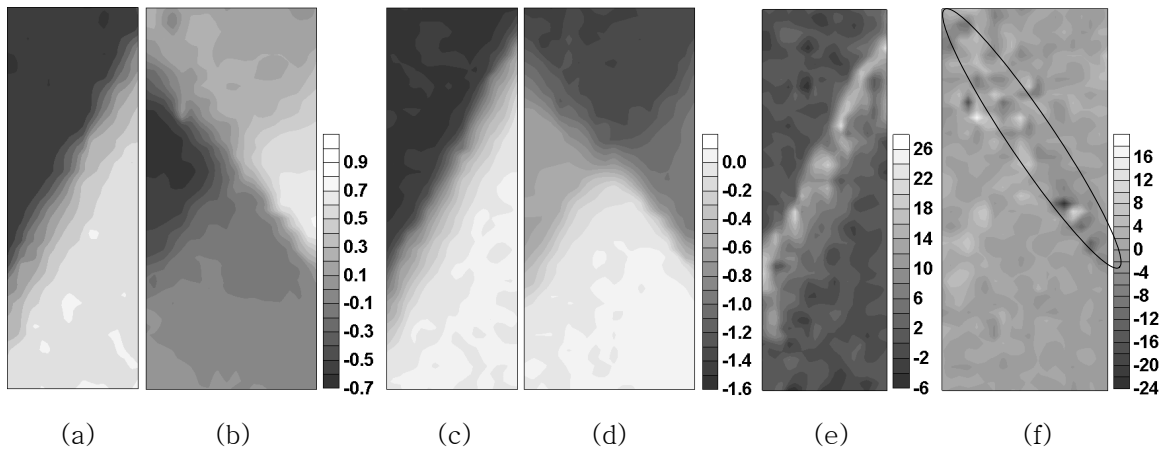


그림 14.  $(\epsilon_v)_{ave}=17\sim18\%$ 에서의 변위 및 변형률 분포 등고선

(a) UBP에서 횡방향변위, (b) RBP에서 횡방향변위, (c) UBP에서 연직방향변위, (d) RBP에서 연직방향변위, (e) UBP에서 전단 변형률( $\epsilon_{xy}$ ), (f) RBP에서 전단 변형률( $\epsilon_{xy}$ )

그림 14의 17-18% 평균 연직 변형률이 발생한 시험 마지막 부분에서는 바닥판 구속효과의 영향이 매우 크게 나타난다. 바닥판이 구속된 경우에는 기존의 전단면 외에 다른 방향의 전단면이 형성되기 시작하여 가운데 부분에서 X자를 형성하며 변형을 하게 된다. 이러한 새로운 전단면의 발생은 바닥판이 구속되지 않은 경우에서와 다른 응력 연화 이후 다시 증가하는 연직응력과 그 원인을 같이 한다고 볼 수 있다. 그림 14(f)에서 기존 전단면과 거의 직각을 이루는 새로 발생된 전단면의 형상이 관찰된다.

두 시험(UBP와 RBP)은 그림 6 응력-변형률 그래프의 경향대로 초기에는 매우 유사한 거동을 보이다가 최대 연직응력을 지나며 그 거동이 차이를 보이기 시작한 후 그 차이는 점점 증가하게 된다. 전단면 발생 후에 바닥판이 움직이는 시험에서는 모든 변형이 전단면에 집중되고 나머지는 강제운동을 하는 반면, 바닥판이 구속된 경우에는 전단면 외에서도 약간의 변형이 계속 발생한다. 그리고 바닥판의 움직임이 제한된 시험에서는 최종적으로 단부의 마찰에 의한 구속 효과로 인해 초기 전단면이 계속 발달하지 못하고 추가로 새로운 전단면이 발생함을 확인하였다.

전단 변형률이 큰 영역을 전단면으로 정하고 기울기를 산정하였다. 전단면이 형성되고 발달하기 시작하는  $(\epsilon_v)_{ave}=3\%$  이상에 대해서 측정된 전단면의 기울기를 정리하면 표 5와 같다. 바닥판이 구속된 시험에서 전단면의 기울기가 낮게 산정되었다. 이는 단부 구속에 의한 전단 응력이 전단면의 발달을 저해시키기 때문으로 판단된다. 또한 평균 연직 변형률이 증가함에 따라 기울기는 대체적으로 감소하는 경향을 보인다. 전단면의 두께는 전단변형률이 변화하는 영역이 존재하므로 정확한 값을 정하기 어려우나 바닥판이 움직이는 경우에는 일정하다가 후반부에 두꺼워지는 경향을 보이며, 바닥판이 고정된 시험에서는 전반적으로 큰 차이를 보이지 않는다.

표 5. 전단면 기울기의 변화

$(\epsilon_v)_{ave}$	3~4%	4~5%	7~8%	12~13%	17~18%
UBP	65~66°	64.5~65.5°	62~63°	60~61°	59~60°
RBP	59~60°	60~61°	58~59°	53.5~54.5°	54.5~55.5°

## 6. 결과

본 연구에서는 평면변형률 시험기의 단부, 즉 바닥판의 구속을 제어할 수 있는 시험기를 이용하여 바닥판이 구속되는 시험과 바닥판의 움직임이 가능한 두 가지 시험을 주문진 표준사를 이용하여 수행하였다. 전단 중에 시험기의 투명한 측면판을 통하여 시료 내부의 변형 형상을 디지털 카메라로 연속 촬영하였고, 디지털 이미지 코릴레이션 기법을 적용하였다. 전 영역과 일부 구간에서 산정된 변위와 변형률을 등고선도로 표현하였으며, 이를 해석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 응력-변형률 그래프의 초기 부분에서는 바닥판 구속 여부에 따른 영향이 분명하게 나타나지 않지만, 최대 연직응력을 가지는 평균 연직 변형률 이후에는 단부를 구속한 경우가 구속하지 않은 경우보다 응력 연화 이후 연직 응력과 벽체 응력이 더 크게 나타났다. 최대 연직응력을 가지는 평균 연직 변형률은 단부를 구속하지 않은 경우가 3.09%로 구속된 3.41% 보다 조금 더 작게 나타났으나 마찰각은 거의 차이가 발생하지 않았다.
- 2) 두 시험(UBP와 RBP)의 변형 거동은 응력-변형률 그래프의 경향대로 초기에는 매우 유사하며, 최대 연직응력을 지나며 차이를 보이기 시작한 후 그 차이는 점점 증가하게 된다.
- 3) 전단면 발생 후에 바닥판이 움직이는 시험에서는 모든 변형이 전단면에 집중되고 나머지는 강제운동을 하는 반면, 바닥판이 구속된 경우에는 전단면 외에서도 약간의 변형이 계속 발생한다. 그리고 바닥판의 움직임이 제한된 시험에서는 최종적으로 단부의 마찰에 의한 구속 효과로 인해 초기 전단면이 계속 발달하지 못하고 추가로 새로운 전단면이 생성된다. 이는 응력 연화 이후 다시 증가하여 두 번째 peak 연직응력을 가지는 것과 그 원인을 같이 한다고 볼 수 있다
- 4) 바닥판이 구속된 시험이 구속되지 않은 시험보다 전단면의 기울기가 낮게 산정되었다. 이는 단부 구속에 의한 전단 응력이 전단면의 발달을 저해시키기 때문으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 장의룡, 추윤식, 김창엽, 이원택, 정충기 (2006), “평면변형률 시험기의 바닥판 구속 효과”, 2006년 한국지반공학회 가을 학술발표회 논문집, pp.1862~1873
2. 장의룡, 정충기 (2007), “평면변형률 시험의 변형 특성 평가를 위한 디지털 이미지 코릴레이션 기법의 적용” 2007 대한토목학회 정기학술대회 논문집, pp.884~887
3. Alshibli, K. A., and Sture, S. (1999), "Sand Shear Band Thickness Measurements by Digital Image

- Techniques", *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 13, No. 2, pp. 103~109
4. 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.
  5. Alshibli, A. K., Godbold, D. L., and Hoffman, K.(2004), "The Louisiana Plane Strain Apparatus for Soil Testing," *Geotech. Test. J.*, Vol. 27, No. 4, pp. 1~10.
  6. Bruck, H. A., McNeill, S. R., Sutton, M. A., and Peter, W. H. (1989), "Digital Image Correlation Using Newton-Raphson Method of Partial Differential Correction", *Experimental Mechanics*, Vol. 29, No. 3, pp. 261~268
  7. Desrues, J.R., 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
  8. 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.
  9. Liang, L., Saada, A., Figueroa, J. L., and Cope, C.T. (1997), "The Use of Digital Image Processing in Monitoring Shear Band Development," *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 20, No. 3, pp. 324~339
  10. Rechenmacher, A. L., and Finno, J. F,(2004), "Digital Image Correlation to Evaluate Shear Banding in Dilative Sands", *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 27, No. 1, pp. 1~10
  11. Tatsuoka, F., Sakamoto, M., Kawamura, T., and Fukushima, S.(1986), "Strength and Deformation Characteristics of Sand in Plane Strain Compression at Extremely Low Pressures," *Soils Found.*, Vol. 26, No. 1, pp. 65~84.
  12. Wanatowski, D., and Chu, J.(2006), "Stress-Strain Behavior of a Granular Fill Measured by a New Plane Strain Apparatus", *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 29, No. 2, pp. 1~9
  13. White, D. J., Take, W. A., and Bolton, M. D. (2003) "Soil Deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry", *Geotechnique* 53, No. 7, pp. 619~631