한국지반공학회논문집 제31권 3호 2015년 3월 pp. 51 ~ 62
JOURNAL OF THE KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY
Vol.31, No.3, March 2015 pp. 51 ~ 62

ISSN 1229-2427 (Print)
ISSN 2288-646X (Online)
http://dx.doi.org/10.7843/kgs.2015.31.3.51

직접전단실험시 전단상자의 종류에 따른 모래시료의 전단거동

Shear Behavior of Sands Depending on Shear Box Type in Direct Shear Test

홍 영 호[1] Hong, Young-Ho　　변 용 훈[2] Byun, Yong-Hoon
채 종 길[3] Chae, Jong-Gil　　이 종 섭[4] Lee, Jong-Sub

Abstract

Shear behavior obtained by direct shear tests is dependent on shear box and boundary condition. The objective of this study is to analyze problems of conventional direct shear test (type-A) and provide the reliable results by developing type-C direct shear apparatus. Experimental tests are carried out for Ulleung sand by using type-A and -C direct shear devices. The soil specimens, which are prepared at the relative density of 60%, and are applied to vertical confining stresses of 50, 100, 200, 300, and 400 kPa, are sheared at a constant shear strain rate of 0.5 mm/min. By comparing the results obtained by type-A and -C direct shear apparatus under constant normal load (CNL) condition, the performance of new one is verified. In addition, two constrained conditions including constant normal load (CNL) and constant pressure (CP) are applied to type-C one. Experimental results show that type-A direct shear apparatus has some problems such as rotating of loading plate and upper shear box, and the frictional forces between soil and inner wall of upper shear box. Thus, the shear strengths obtained by type-A device are overestimated or underestimated depending on shear box and boundary condition. On the other hand, type-C device produces clear and consistent test results regardless of constrained conditions. This study represents that type-C direct shear apparatus not only can solve the problems of type-A direct shear apparatus but provide the reliable results.

요 지

직접전단시험은 전단상자의 경계조건에 따라 흙의 전단거동이 달라지는 것으로 알려져있다. 본 연구의 목적은 Type-A 형태의 기존 직접전단시험기의 문제점에 대해 분석하고 Type-C 형태의 직접전단시험기의 개발을 통해 신뢰성 높은 직접전단결과를 도출하는데 있다. 기존 직전단시험기와 새로 개발된 직접전단시험기를 사용하여 상대밀도가 60%로 조성된 모래시료에 대해 초기 구속응력 50kPa, 100kPa, 200kPa, 300kPa, 400kPa에서 0.5mm/min의 일정한 전단속도로 직접전단시험을 수행하였다. 일정수직하중 조건에서 수행된 Type-A의 직접전단시험기와 Type-C 시험기의 결과를 비교하여 새로 개발된 시험기의 신뢰성을 평가하였다. 또한 새로 개발된 시험기를 사용하여 일정수직하중 조건과 정압조건의 두 가지 구속조건에 대한 직접전단시험을 수행하여 그 결과를 비교, 분석하였다. 실험결과, Type-A의 직접전단시험기에서는 하중재하판과 상부 전단상자가 기울거나, 흙의 체적변화로부터 발생되는

1 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정 (Member, Ph.D. Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)
2 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사후 연구원 (Member, Postdoctoral Fellow, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)
3 정회원, 삼성물산 TBM Engineering 과장 (Member, Manager, TBM Engrg. Team, Engrg. and Construction Group, Samsung C&T Corporation)
4 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ., Tel: +82-2-3290-3325, Fax: +82-2-3290-3838, jongsub@korea.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 9월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2015 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.

시료와 전단상자 내부 벽면간의 마찰이 전단면에 작용하는 응력에 영향을 끼치게 되는 문제가 발생하였다. Type-A의 직접전단시험기에서는 전단상자 형태와 경계조건에 따라 전단강도가 과대 혹은 과소평가 되었다. Type-C의 직접전단시험기에서는 구속조건에 상관없이 일관성있는 실험결과를 나타내었다. 본 연구는 Type-C의 형태로 개발된 직접전단시험기를 통해 Type-A 직접전단시험법의 문제점을 해결하고 신뢰성있는 결과를 도출할 수 있음을 보여준다.

Keywords : Constrained condition, Direct shear test, Frictional force, Shear box type, Shear strength

1. 서 론

사면 및 지반구조물을 경제적이면서도 안전하게 설계하기 위해서는 지반의 전단강도를 정확하게 평가해야한다. 전단강도를 평가하기 위한 실내시험은 삼축시험과 직접전단시험이, 그리고 현장시험은 베인시험이 주로 사용되고 있다. 베인시험의 경우는 현장의 구속조건과 응력상태 그대로 실험이 가능하다는 장점이 있으나 다양한 구속조건에서의 실험이 불가하며, 삼축시험은 실험과정이 복잡하며 시간이 오래 소모되는 단점이 있다. 그에 비해 직접전단시험은 소요시간이 짧고 시험방법이 간단하며, 시료의 전단파괴면을 임의로 설정하여 2차원 파괴를 재현함으로써 설정된 파괴면에서의 전단강도를 직접 구할 수 있다는 장점이 있다.

이러한 장점에도 불구하고 직접전단시험은 일반적으로 실험의 반복성 및 신뢰성이 떨어지는것으로 알려져 있다. 직접전단시험은 단순전단시험과는 다르게 전단면에서의 응력과 변형률이 불균등하게 발생하여 전단중에 설정된 전단면을 따라 진행성 파괴가 일어나게 된다(Morgenstern and Tchalenko, 1967; Airey et al., 1984; Budhu, 1984; Tejchman and Bauer, 2005; Wang and Gutierrez, 2010). 또한 실제 전단면이 전단방향과 평행하지 않고 대각선 방향으로 발생할 가능성이 있다(Potts et al., 1987; Dounias and Potts, 1993). 이러한 단점들은 직접전단시험의 결과분석을 어렵게 하는 요인이 된다(Shibuya et al., 1997).

직접전단시험은 몇 가지 단점을 내포하고 있으나 지반공학자들에게 여전히 매력적인 시험법이다. 이러한 직접전단시험기의 단점을 보완하기 위한 많은 연구가 수행되어왔으며, 주요 내용 및 연구내용을 요약하면 다음과 같다: 1) 시험기의 개선; 2) 영향인자들에 대한 분석; 3) 전단강도와 팽창각 사이의 관계; 4) 다른 전단시험법과의 비교. 직접전단시험은 여러 선행연구결과를 통해 신뢰성을 확보하였다고도 볼 수 있으나, 현재까지도 일반적으로 사용되는 전단상자와 변형된 여러가지의 전단상자를 통해 실험이 수행되고 있다. 또한 각각의 전단상자가 미치는 영향을 분석하고 실험적으로 이를 증명한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 다양한 구속조건의 모사가 가능한 Type-C 형태의 직접전단시험기의 개발을 통해 반복적이며 신뢰성 높은 전단강도를 획득하고자 하였다. 실험에 사용된 기존 Type-A의 직접전단시험기와 Type-C 형태로 개발된 직접전단시험기 각각의 특성에 대해 나타내었다. 본 연구에 사용된 시료인 울릉도 지역에서 채취된 흙의 기본물성실험 결과와 실험조건에 대해 기술하였다. 기존 직접전단시험기를 이용하여 수행된 실험결과로부터 기존 직접전단시험법의 문제에 대해 기술하였고, 이 결과를 새로 개발된 시험기에서의 결과와 비교 및 분석하여 새로 개발된 시험기의 신뢰성을 평가하였다. 또한 새로 개발된 시험기를 사용하여 일정수직하중조건과 정압조건의 두 가지 구속조건에 대한 실험을 수행하여 그 결과에 대해 토의하였다.

2. 직접전단시험기

2.1 직접전단시험법의 분류

직접전단시험기는 하중재하판과 전단상자의 형태에 따라 Fig. 1과 같이 Type-A, -B, -C 세 가지로 분류할 수 있다(Shibuya et al., 1997). Fig. 1(a)와 같은 Type-A는 상부 하중재하판과 상부 전단상자가 고정되어 있지 않아 각각 수직방향으로 회전과 이동이 가능한 형태로 일반적으로 널리 사용되고 있는 직접전단상자이다(Skempton and Bishop, 1950). Type-A는 전단중에 발생되는 모멘트에 의해 상부 하중재하판과 상부 전단상자가 기울게 되어 가해지는 하중이 시료에 제대로 전달이 되지 않을 수

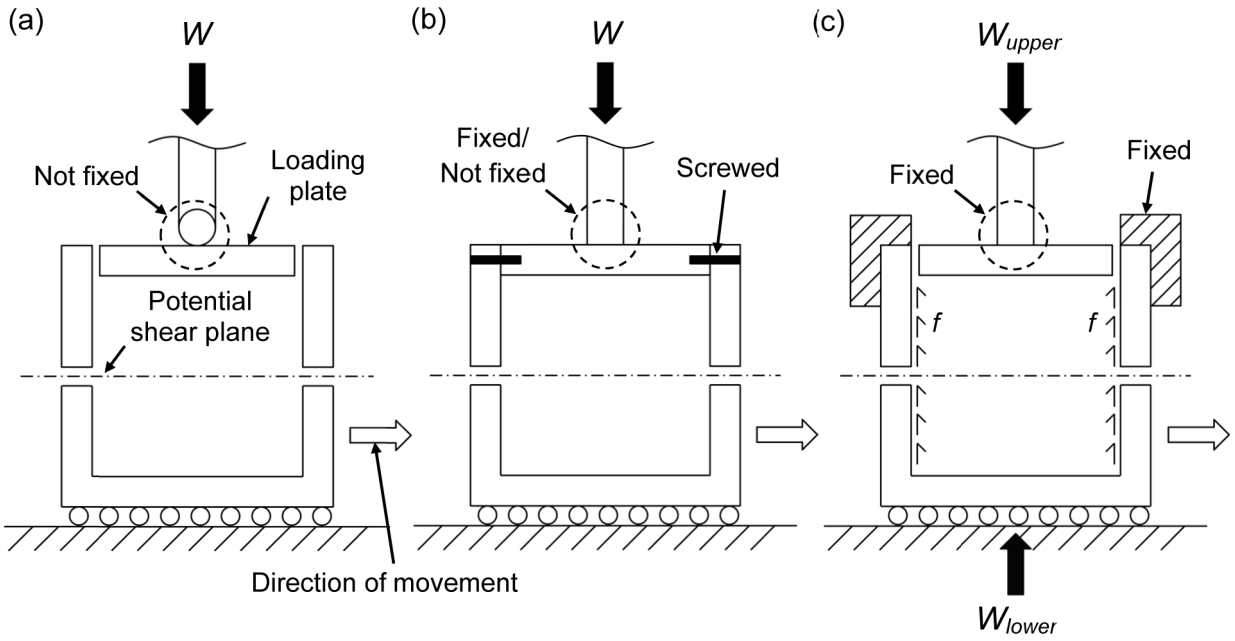


Fig. 1. Type of direct shear apparatus: (a) Type-A; (b) Type-B; (c) Type-C

있다. 이러한 단점을 보완하고자 Jewell and Wroth(1987)은 상부 하중재하판과 상부 전단상자를 서로 고정시켜 이 부분이 같이 이동하고 회전하는 형태인 Fig. 1(b)와 같은 Type-B의 전단상자를 개발하였다. 전단면을 중심으로 시료의 상하부가 대칭이 되게 하여 Type-A의 경우보다 전단면에서의 응력과 변형이 좀 더 균등하게 발생토록 하였다. 그러나 Type-B는 전단중에 상하부 전단상자의 간격을 일정하게 유지시키기 어려운 문제가 있다. Fig. 1(c)와 같은 Type-C는 상부 전단상자를 고정함으로써 상하부 전단상자의 간격을 일정하게 유지할 수 있으며, 상부 하중재하판 역시 고정되어 전단중에 이동이나 회전이 방지된다(Mikasa, 1960; Takada, 1993). 그러나 Fig. 1(c)와 같이 시료의 체적팽창으로부터 전단상자 내부 벽면과 흙 사이에 마찰이 발생하고, 이 마찰로 인해 전단면에 작용하는 응력이 변화하게 된다. 그러므로 마찰의 영향을 최소화하고 실제 전단면에 작용하는 응력을 측정하기 위해서는 Fig. 1(c)에서 상부 가압판쪽의 하중(W_{upper})이 아닌 셀 하부에 작용되는 하중(W_{lower})을 측정해야 한다(Shibuya, 1997; Kim et al., 2005).

2.2 직접전단시험기의 특성

Type-A의 시험을 수행하기 위하여 일반적으로 널리 사용되고 있는 Fig. 2(a)와 같은 직접전단시험기를 사용하였다. Type-A의 직접전단시험기는 상하부 전단상자 간의 마찰을 최소화하고 상하부 전단상자의 간격을 일정하게 유지하기 위하여 상자 사이에 롤러를 설치하였다. 1:10 비율의 외팔보를 이용하여 일정한 무게의 추를 올려놓아 수직방향의 구속하중을 재하하며, 수평축에 설치된 속도조절이 가능한 모터에 의해 전단변형이 발생된다. 각 방향의 변위는 LVDT로 측정되며 전단방향의 하중은 로드셀로 측정된다. 새로 개발된 직접전단시험기는 Fig. 2(b)와 같으며 Shibuya et al.(2005)의 연구결과를 바탕으로 Type-C의 형태로 제작되었다. 수직방향으로 작용되는 하중은 전단상자 하부쪽에서 측정함으로써 전단상자 내부 벽면에서 발생되는 마찰의 영향을 고려하지 않도록 하였다. 수평방향과 수직방향에 설치된 스테핑모터를 통해 각 방향에 하중과 변위가 발생되며, 발생되는 하중은 각 방향에 설치된 로드셀로부터 획득되며, 변위는 모터의 회전수로부터 계산된다. 하중값의 오차와 수직 및 수평방향 변위의 정밀도는 ASTM D 3080-04(2004) 기준을 충족시켰다. 하중값의 오차는 1% 이내로 확보하였고, 수직, 수평방향의 변위를 mm단위로 소수점 4자리까지 나타내도록 시스템을 구성하였다. 모터의 이동으로 발생된 하중을 로드셀로 모니터링하여 다시 모터의 움직임을 제어하는 반복적인 작업과 데이터 획득과정을 LabVIEW 기반 프로그램을 통해 자동화하였다. 개발된 프로그램을 통해 일정수직하중조건(Constant Normal Load, CNL)과 정압조건(Constant Pressure, CP)의 구속조건을 모사할 수 있도록 하였다.

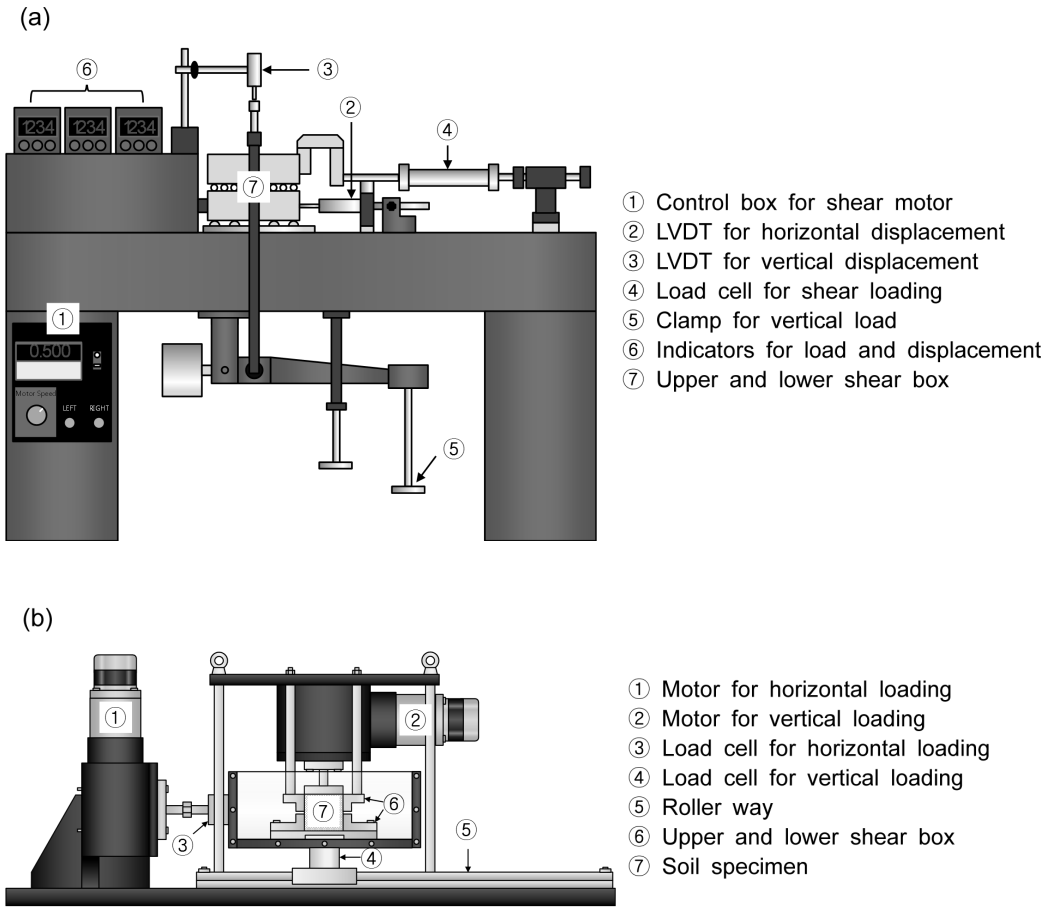


Fig. 2. Schematic drawings of direct shear apparatus: (a) old; (b) new

2.3 전단상자

직접전단시험에 있어 이상적인 시료의 변형상태는 단순전단형태이다. 직접전단시험에서는 시료의 입경대비 전단상자의 크기에 따라 전단영역의 발달이 다르게 나타난다고 알려져 있다. Palmeira and Milligan(1989)은 전단상자 크기 자체는 내부마찰각 결과에 큰 영향을 끼치지 않으며, 발달되는 전단영역의 두께와 시료의 최대 전단강도 이후의 거동은 시료의 입경대비 전단상자의 크기에 영향을 받는다고 보고하였다. ASTM D 3080-04 (2004)에서도 시료입경대비 전단상자 크기의 영향을 고려하여 전단상자의 크기를 50mm 혹은 시료최대입경의 10배로, 폭과 두께의 비를 2:1로 규정하고 있다. 또한 초기시료의 두께는 최소 12mm 혹은 시료 최대유효입경의 6배보다 커야 한다고 언급하고 있다. 기초의 지지력을 산정하는데 있어서도 이러한 스케일의 영향을 고려하여 기초의 폭이 작으면 전단영역이 충분히 발달되지 못해 큰 내부마찰각을, 폭이 큰 기초에서는 작은 내부마찰각이 고려되어야 한다(Scarpelli and Wood, 1982; Vermeer, 1990; Cerato and Lutenegger, 2006). 본 연구에서는 선행연구결과를 만족시키는 범위에서 전단상자의 크기를 결정하였으며, 두 종류의 시험기에서 전단상자는 모두 정사각형 단면으로 제작하여 조립재료의 전단거동을 더 정확히 평가할 수 있도록 하였다(Wu et al., 2008). Type-A의 직접전단시험기에서는 70mm×70mm×67.5mm (가로×세로×높이), Type-C의 직접전단시험기에서는 80mm×80mm×71mm(가로×세로×높이) 크기의 전단상자를 사용하였다.

전단상자 사이의 마찰을 줄이기 위해 보통 전단상자 사이에 롤러를 설치하거나 간격을 설정하여 전단상자 사이에서 발생하는 마찰의 영향을 최소화함과 동시에 전단영역의 발달을 도모할 수 있다. 그러나 상하부 상자의 간격에 따라 전단과정중 전단영역의 발달 저하, 즉 진행성 파괴가 나타나는 문제가 발생하여 흙의 최대 전단강도는 전단상자간의 간격이 클수록 줄어들고 흙의 체적변화 역시 영향을 받게 된다(Kim et al., 2012). 이로 인해 흙의 입도에 따른 적절한 간격을 찾는 연구가 활발히 수행되어 왔으며, 이에 대한 규정 및 권장내용을

Table 1. Recommended opening size between upper and lower shear boxes

Sources	Shear box
ASTM 3080-04 (2009)	Not specified
Head (1982)	0.5 mm
Shibuya et al. (1997)	10~20 times D_{50}
Lings and Dietz (2004)	4 mm or 5 times D_{50}
Simoni et al. (2006)	1.0 mm
Kim et al. (2013)	Threshold Line (TL)

Table 1에 정리하여 나타내었다. 전단영역의 발달을 저해하지 않는 상하부 전단상자의 최소 간격은 평균유효입경의 10～20배로 보통 일컬어진다(Tatsuoka et al., 1990; Shibuya et al., 1997). 그러나 단순전단을 일으키는 전단상자 간격이 삼축시험을 통해 관찰된 전단영역의 두께로부터 산정된 것으로 조립질 재료에 적용되기에는 부적절하다(Simoni and Houlsby, 2006; Kim et al., 2012). 한편 Kim et al.(2012)에서는 시료의 평균입도크기(D_{50})에 따라 시료유출이 발생하지 않는 경계선(Threshold line)을 산정함으로써 전단시 발생하는 시료유출로 인한 강도저하를 방지하고자 하였다. 본 연구에서는 Kim et al. (2012)의 연구결과에 따라 Type-A 시험기와 Type-C 시험기에서 모두 상하부 전단상자의 간격을 1mm로 설정하여 실험을 수행하였다.

3. 실험 구성

3.1 시료의 기본물성

직접전단시험을 이용한 모래시료의 전단거동을 연구하기 위하여 울릉도 지역에서 채취된 조개껍질을 포함한 패각질 모래시료를 사용하였다. 시료의 입도분포곡선을 Fig. 3에 나타내었으며, 기본물성을 Table 2에 정리하였다. 시료의 기본물성중 비중은 2.75, 최대 및 최소 간극비는 각각 1.01와 0.69로 측정되었다. 체분석 결과, 시료의 평균입경(D_{50})은 0.63mm, 균등계수와 곡률계수는 각각 2.14와 1.07로 통일분류법에 의해 SP로 분류되었다.

3.2 실험 조건

시료는 자유낙하방법과 건조 다짐방법을 사용하여 조성되었다. 건조시킨 울릉사를 10cm의 일정한 높이에서 자유낙하시키고, 각 층마다 다짐을 실시하였다. 다짐은

Table 2. Geotechnical index properties of Ulleung sands

Property	Value
Specific gravity	2.75
e_{max}	1.01
e_{min}	0.69
D_{50} [mm]	0.63
C_u	2.14
C_c	1.07
USCS	SP

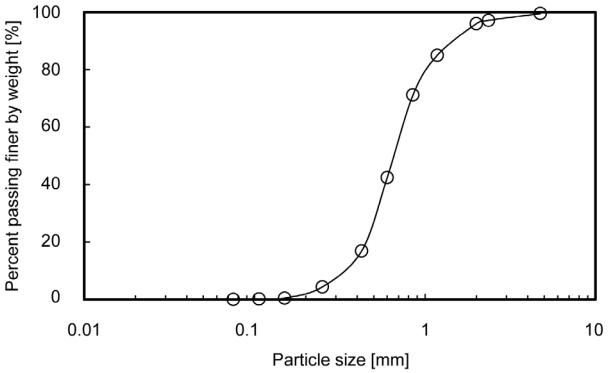


Fig. 3. Particle distribution curve

5개층으로 나누어 실시되었고, 각 실험마다 시료를 균질하게 조성하기 위해 각 층의 두께와 다짐 횟수를 동일하게 하였다. 실험은 60%의 상대밀도(Void ratio, e = 0.82)로 조성된 시료에 대해 다섯가지 초기 구속응력(50, 100, 200, 300, 400kPa)에서 수행되었다. 전단강도에 미치는 전단속도의 영향을 제거하기 위해 모든 실험에서 0.5mm/min의 동일한 전단속도로 20%의 전단변형률이 발생할 때까지 전단실험을 수행하였다(Jung et al., 2009).

Type-A 직접전단시험기를 사용한 실험은 전단상자의 형태와 경계조건에 따라 총 세 가지로 나누어 수행하였다. Type-A의 직접전단시험기에서는 전단시 체적팽창에 의해 상하부 전단상자의 간격이 증가하게 되는데, 전단상자 상부에 상부셀의 부상을 방지하기 위한 롤러를 Fig. 4와 같이 설치하여 이러한 회전 및 모멘트의 발생을 억제하도록 하였으며, 롤러가 설치됨에 따라 실험결과에 미치는 영향을 알아보고자 하였다. Type-A 직접전단시험기를 사용한 실험은 기존의 직접전단상자를 그대로 사용한 것과 전단상자 상부에 롤러를 설치한 것으로 나뉘며, 롤러를 설치한 경우에는 상하부 전단상자가 완벽히 밀착할 수 있도록 완전 고정한 것(Rigid fix)과 약간의 유격을 두어 고정한 것(Soft fix) 두 가지로 나누어 수행되었다. 새로 개발된 직접전단장비에서는 Type-C 형태의 전

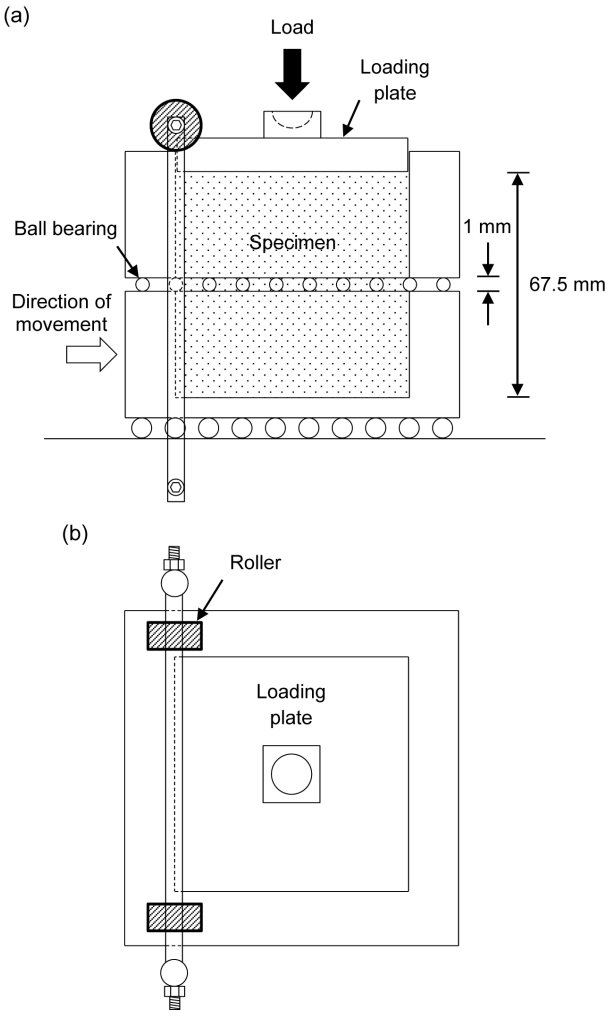


Fig. 4. Schematic drawings of Type-A shear box with roller: (a) front view; (b) top view

단상자를 사용하여 일정수직하중조건(Constant Normal Load, CNL)과 정압조건(Constant Pressure, CP)의 실험을 수행하였다.

4. 직접전단시험결과

4.1 Type-A 직접전단시험기

Type-A 직접전단시험기의 실험결과를 Table 3과 Fig. 5에 나타내었다. 롤러가 설치되지 않은 경우(Without roller), Fig. 5(a)와 같이 초기 구속응력이 증가함에 따라 전단강도가 증가하였고, 첨두전단강도에서의 전단변형이 점차 크게 나타났다. Fig. 5(b)와 같이 수직응력에 대한 전단응력의 비의 최대값 $(\tau_h/\sigma'_v)_{max}$은 다소 불규칙한 양상을 나타내었으나, 전단변형이 크게 발생했을때의 잔류응력비는 비교적 일정한 값을 나타내었다. 시료는 Fig. 5(c)와 같이 전단시작 초기에 약간 수축하다가 급격히 팽창하였으며, 시료의 부피팽창량은 초기 구속응력이 커짐에 따라 점차 감소하였다. 큰 전단변형상태에서의 시료의 부피는 낮은 초기 구속응력 조건일 경우 일정한 값에 수렴하였고, 초기 구속응력이 커짐에 따라 점차 수축하는 경향을 나타내었다. 롤러를 단단히 고정한 경우(With roller - rigid fix), Fig. 5(a)와 같이 화살표로 첨두전단강도를 나타내었으나, 뚜렷한 값을 나타내지 않았다. 또한 첨두강도 이후에도 계속해서 전단응력이 증가하여 Fig.

Table 3. Friction angles determined by old apparatus

Shear box	Items	Initial confining pressure				
		50 kPa	100 kPa	200 kPa	300 kPa	400 kPa
Without roller	$\sigma'_{v\ (at\ peak)}$	50.39	101.46	216.21	333.34	442.78
	$\tau_{h\ (at\ peak)}$	47.08	91.63	173.67	283.99	354.29
	$(\tau_h/\sigma'_v)_{max}$	0.94	0.90	0.80	0.85	0.80
	ϕ'_{peak}	39.4				
	ϕ'_{ls}	30.1				
With roller – rigid fix	$\sigma'_{v\ (at\ peak)}$	53.19	109.62	218.55	337.28	463.23
	$\tau_{h\ (at\ peak)}$	143.23	285.22	363.60	446.55	695.88
	$(\tau_h/\sigma'_v)_{max}$	2.69	2.60	1.66	1.32	1.50
	ϕ'_{peak}	56.5				
	ϕ'_{ls}	undiscerned				
With roller – soft fix	$\sigma'_{v\ (at\ peak)}$	51.14	103.75	217.46	335.87	450.59
	$\tau_{h\ (at\ peak)}$	78.34	135.86	206.73	402.42	481.33
	$(\tau_h/\sigma'_v)_{max}$	0.95	0.89	0.56	0.89	0.89
	ϕ'_{peak}	47.8				
	ϕ'_{ls}	40.2				

The ls indicates the state at the large displacement.

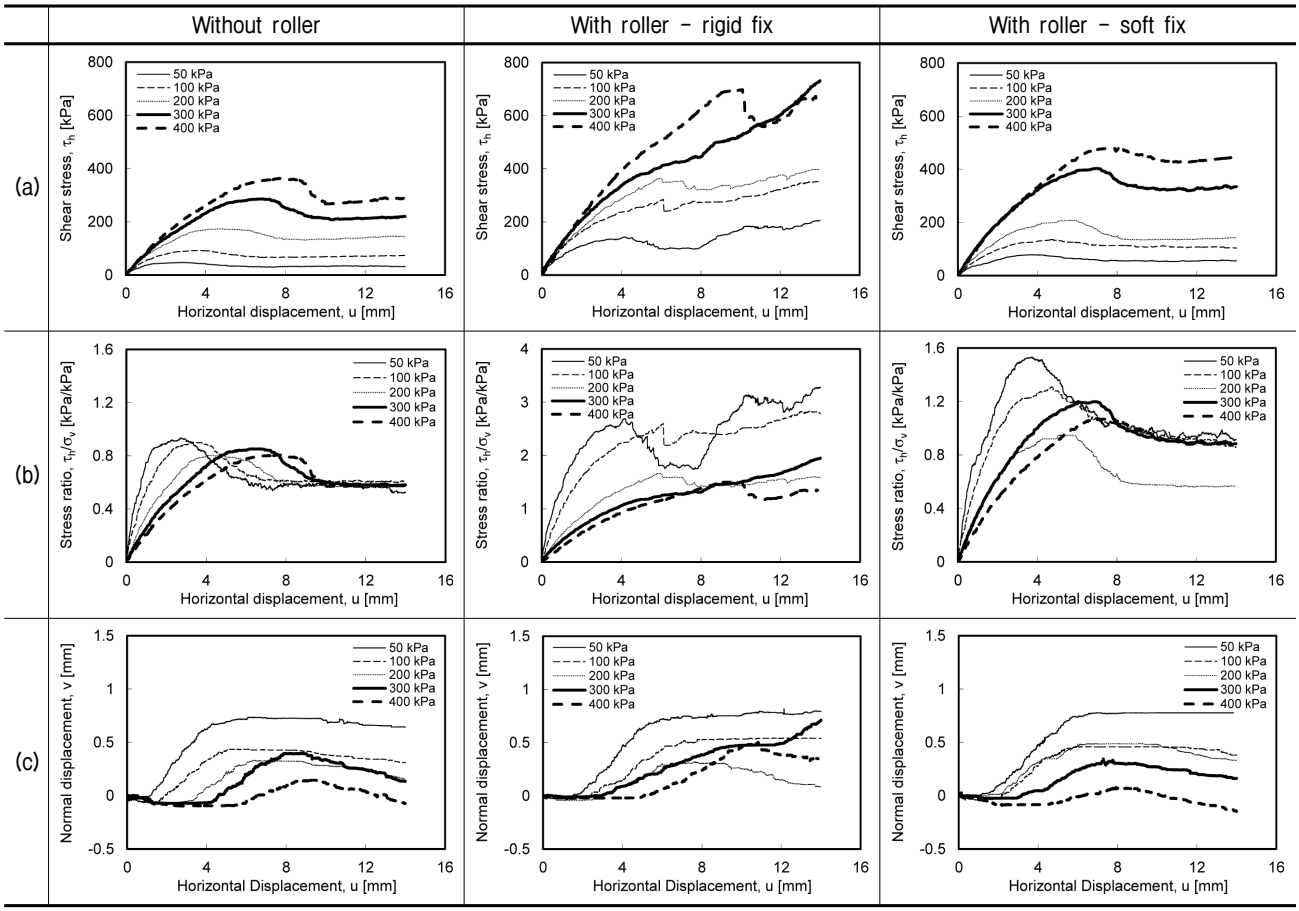


Fig. 5. Results obtained from conventional direct shear testing apparatus (Type-A): (a) shear stress - horizontal displacement; (b) stress ratio - horizontal displacement; (c) normal displacement - horizontal displacement

5(b)와 같이 전단변형이 크게 발생했을때의 잔류응력비가 일정하게 나타나지 않고 오히려 계속해서 증가하는 현상을 보였다. 반면 약간의 유격을 두어 롤러를 설치한 경우(With roller - soft fix), 대체적으로 롤러를 설치하지 않은 경우와 유사한 결과를 보여주었으나, 롤러를 설치하지 않은 경우보다 큰 전단강도를 나타내었다. 수직응력과 전단응력으로부터 각각의 응력경로와 내부마찰각을 Fig. 6에 나타낸 결과, 전단상자 상부에 롤러를 설치하지 않은 경우에는 39.4°, 롤러를 단단히 고정한 경우(With roller - rigid fix)에는 56.5°, 그리고 약간의 유격을 두어 롤러를 설치한 경우(With roller - soft fix)에는 47.8°의 내부마찰각을 나타내었다. 고정용 롤러로 인해 상부 전단상자가 회전하는 것이 억제될수록 첨두전단강도로부터 산정된 내부마찰각은 점점 불규칙적인 결과를 나타내어 결정계수(R^2)가 감소하였다.

Type-A 직접전단시험기를 사용한 실험에서는 두 가지의 문제가 발생하였다. 첫째, Type-A의 직접전단시험기로 수행된 실험에서 모두 Fig. 7(a)와 같이 하중재하판이 회전하는 현상이 발생하였다. 하중재하판이 회전함에 따라 가해준 하중이 전단면에 제대로 전달이 되지 않고 전단중에 측정된 수직방향의 변형, 즉 부피팽창이 제대로 발현되지 않고, 또한 부피팽창량 자체도 정확히 측정이 되지 않았을 것으로 판단된다. 특히 롤러를 단단히 고정한 경우(With roller - rigid fix) 초기 구속응력 100kPa상태의 직접전단실험과 약간의 유격을 둔 경우(With roller - soft fix) 초기 구속응력 50kPa, 100kPa의 직접전단실험시 하중재하판이 기울어져 전단상자 상부에 설치된 롤러와 맞닿아 7~8mm 이상의 전단변형상태에서는 체적변화가 없이 일정한 값을 나타내는 경우도 있었다(Fig. 5(c)). 둘째, 전단상자 상부에 고정용 롤러를 설치하지 않은 경우, 상부 전단상자가 전단중에 시료에 발생되는 모멘트에 의해 Fig. 7(b)와 같이 회전하게 되는 문제가 발생하였다. Jewell(1989)은 Type-A전단상자의 문제를 동일하게 지적한바 있다. 수평방향으로 가해지는 전단힘은 전단상자의 내부벽면을 통해 흙으로 전달되며, 상부전단상자와 흙 시료는 크기는 같고 서로 반

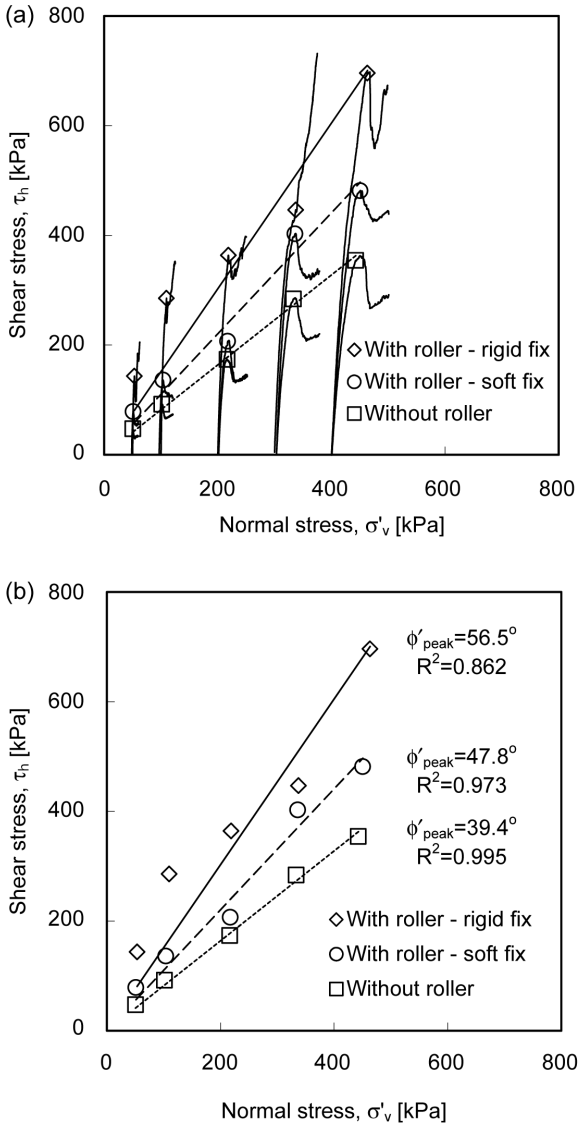


Fig. 6. Stress path and friction angle of old apparatus: (a) stress path; (b) peak friction angle

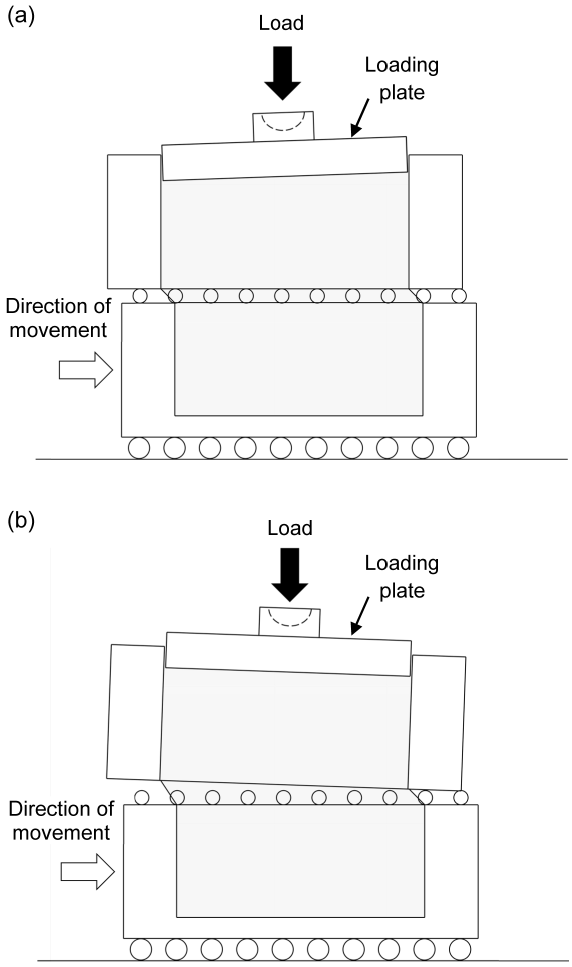


Fig. 7. Problems of old direct shear apparatus: (a) tilting of loading plate; (b) rotating of upper shear box

대방향의 모멘트를 받는다고 언급하였다. 상부 전단상자가 회전함에 따라 초기에 설정한 상하부 전단상자의 간격이 벌어지게 되어 시료유출이 발생하고 전단영역의 발달이 저하되어 전단강도가 과소평가되었을 것으로 판단된다. 시료유출이 발생됨에 따라 시료의 부피팽창량은 전단상자 상부에 롤러를 설치한 경우보다 적게 발생하였다(Fig. 5(c)). 한편 전단상자 상부에 고정용 롤러가 설치됨에 따라 전단상자의 회전이 억제되며, 시료와 전단상자 내부 벽면간의 마찰로 인해 시료의 전단면에 작용되는 수직방향의 유효응력이 상당히 증가하게 된다. 증가된 수직유효응력은 측정되는 전단응력을 증가시키므로 측정된 내부마찰각이 Fig. 6(b)와 같이 과대평가 되었다고 볼 수 있다. 전단상자 상부에 설치된 롤러를 단단히 고정한 경우(With roller - rigid fix), 시료와 전단상자 내부 벽면간의 마찰 외에도, 상하부 전단상자 사이의 마찰 또한 전단강도에 지배적인 영향을 끼쳤을 것으로 판단된다. 이러한 영향으로 뚜렷한 첨두전단강도가 나타나지 않았으며, 첨두전단강도 이후에도 전단응력이 계속 증가하여 잔류강도가 나타나지 않았다.

4.2 새로운 직접전단시험기

새로운 직접전단시험기를 사용하여 일정수직하중조건(CNL)과 정압조건(CP)에서 수행된 실험결과를 Table 4와 Fig. 8에 나타내었다. Type-A 직접전단시험기에서의 결과와 마찬가지로 초기 구속응력이 클수록 첨두전단강도가 나타나는 전단변형이 크게 나타났다(Fig. 8(a)). Fig. 8(b)와 같이 전단변형이 크게 발생했을때의 잔류응력비가 일정한 값에 수렴하였고, 수직응력에 대한 전단응력비의 최대값$(\tau_h/\sigma'_v)_{max}$이 불규칙하게 나타났던 Type-A

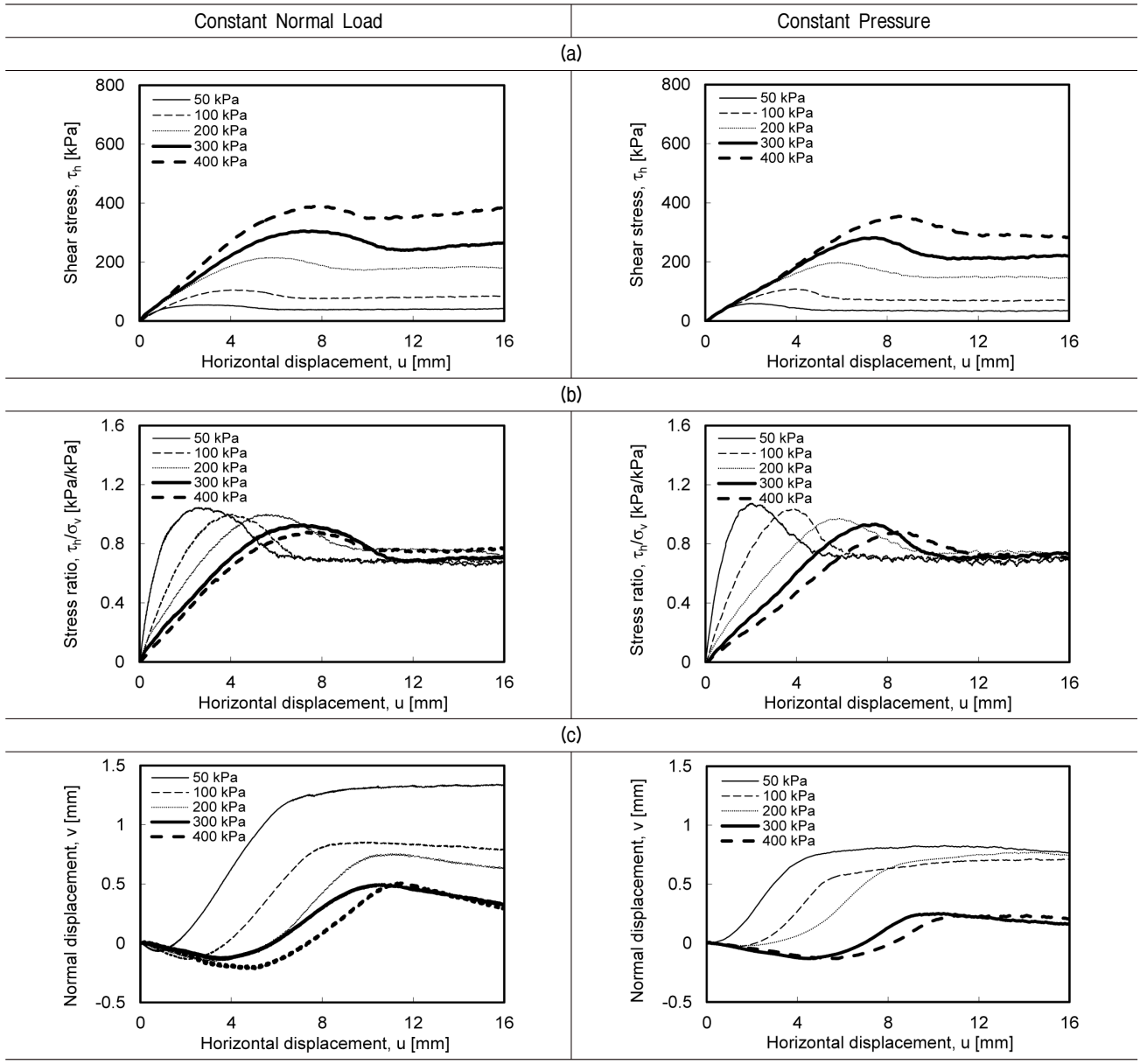


Fig. 8. Direct shear test result by new apparatus: (a) shear stress - horizontal displacement; (b) stress ratio - horizontal displacement; (c) normal displacement - horizontal displacement

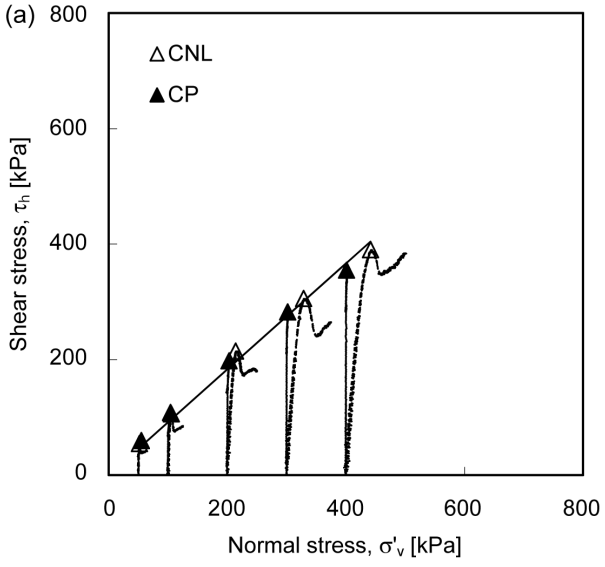
Table 4. Friction angles determined by new apparatus

Constrained condition	Items	Initial confining pressure				
		50 kPa	100 kPa	200 kPa	300 kPa	400 kPa
CNL	$\sigma'_{v\ (at\ peak)}$	51.91	105.50	214.29	328.78	441.86
	$\tau_{h\ (at\ peak)}$	54.27	105.45	214.17	305.22	389.47
	$(\tau_h/\sigma'_v)_{max}$	1.05	1.00	1.00	0.93	0.88
	ϕ'_{peak}	42.5				
	ϕ'_{ls}	36.4				
CP	$\sigma'_{v\ (at\ peak)}$	55.05	104.20	203.04	301.94	401.42
	$\tau_{h\ (at\ peak)}$	59.07	107.81	197.40	281.68	354.11
	$(\tau_h/\sigma'_v)_{max}$	1.07	1.03	0.97	0.93	0.88
	ϕ'_{peak}	42.5				
	ϕ'_{ls}	35.8				

The ls indicates the state at the large displacement.

직접전단시험기와는 달리 초기 구속응력이 커짐에 따라 최대응력비가 점차 감소하는 일관된 경향을 나타내었다(Table 4). Type-A 직접전단시험기에서와 같이 초기 구속응력이 클수록 부피팽창량이 적게 발생하였으며, Type-A 직접전단시험기의 결과보다 일관된 부피변화양상을 보여주었다(Fig. 8(c)).

한편 전단과정에서 나타난 응력경로에 따르면(Fig. 9(a)), 일정수직하중조건(CNL)에서는 구속조건에 의해 단면적이 감소함에 따라 점차 수직방향의 구속응력이 증가하며, 이러한 결과로부터 첨두강도가 발현되는 시점의 수직유효응력은 초기 구속응력 상태보다 증가하였다. 반면 전단중에 수직유효응력이 일정하게 유지되는 정압조건(CP)에서는 수직유효응력이 계속해서 초기 구속응력과 동일한 값을 나타내었다. 첨두전단강도를 함께 나타내어 내부마찰각을 산정한 결과(Fig. 9(b)), 일정수직하중조건과 정압조건에서 모두 42.5°의 동일한 내부마찰각을 나타내었다. 잔류강도 역시 뚜렷하게 관찰되어 일정수직하중조건(CNL)과 정압조건(CP)에서 각각 36.4° 및 35.8°의 값을 나타내었다(Table 4).



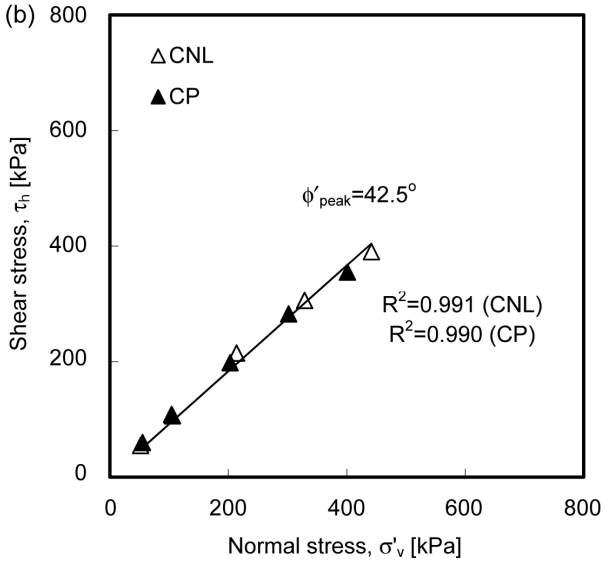


Fig. 9. Stress path and friction angle of new apparatus: (a) stress path; (b) peak friction angle

4.3 결과 비교

Type-A의 직접전단시험기와 새로 개발된 직접전단시험기로부터 획득된 각각의 내부마찰각을 Fig. 10에 나타내었다. Type-A 직접전단시험기로 획득한 내부마찰각은 39.4°(Without roller)와 56.5°(With roller - rigid fix), 그리고 47.8°(With roller - soft fix)로 새로 개발된 직접전단시험기에서 획득된 내부마찰각 값(42.5°)과 비교하여 과대 혹은 과소평가 되었다. 흙의 전단강도를 평가하기 위하여 직접전단시험을 수행할 경우, 전단상자의 종류와 그 경계조건이 실험결과에 매우 큰 영향을 끼치게 된다(Assadi, 1975; Airey, 1987; Palmeira, 1987). 특히 Assadi(1975)는 이러한 경계조건만을 바꿈으로써 내부마찰각이 최대 7°정도 변화되었다고 보고한바 있으며, 본 연구결과에서도 기존연구와 유사한 경향을 나타내었다.

Type-A의 전단상자를 사용한 기존 직접전단시험기와는 달리 새로 개발된 직접전단시험기는 Type-C 조건

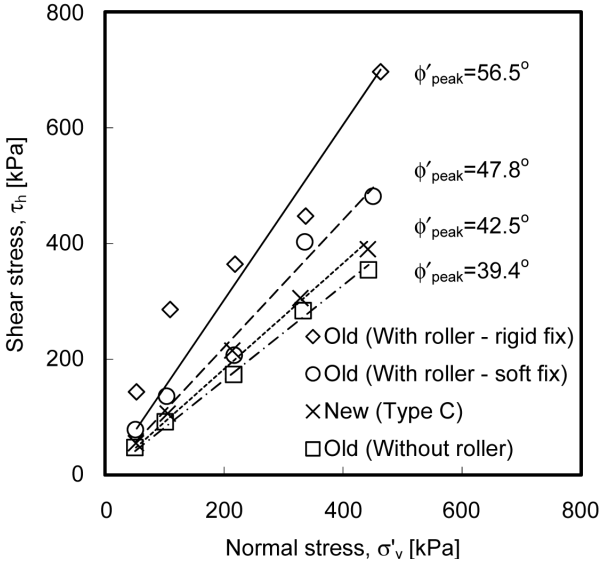


Fig. 10. Comparison of friction angles according to direct shear test methods

의 전단상자를 사용하였다. Type-C의 전단상자는 상부 전단상자의 회전을 억제함으로써 전단중에 상하부 전단상자의 간격을 일정하게 유지하여 시료유출로 인한 전단강도의 저하를 방지할 수 있으며, 하중재하판이 고정됨으로써 부피변화가 오직 수직방향으로만 발생하므로 전단중에 발생하는 부피변화를 정확하게 파악할 수 있다. 또한 부피팽창에 따른 시료와 전단상자 내부 벽면에서 발생하는 마찰의 영향을 무시하고 실제 전단면에 작용되는 응력을 정확히 파악함으로써 Type-A 직접전단시험기를 사용했을때보다 신뢰성 높고 일관성 있는 결과를 보여주었다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 울릉도 지역에서 획득한 균등한 입경분포의 모래시료를 사용하여 직접전단시험을 실시하였다. 일정수직하중 조건에서 수행된 Type-A 직접전단시험기와 Type-C의 형태로 개발된 시험기의 결과를 비교하여 개발된 Type-C 시험기의 신뢰성을 평가하였다. 또한 새로 개발된 시험기를 사용하여 일정수직하중 조건과 정압조건의 두 가지 구속조건에 대한 직접전단시험을 수행하여 그 결과를 비교, 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 기존 직접전단시험기를 사용한 결과, 하중재하판과 상부 전단상자가 회전하여 시료유출 및 전단면에서의 응력과 변형률이 불균등하게 작용하는 문제가 발생하였다.

(2) 기존 직접전단시험기에서 전단상자 상부에 롤러를 설치하지 않은 경우보다 롤러를 설치한 경우에 더 큰 내부마찰각을 나타내었다. 전단상자 상부에 롤러가 설치됨에 따라 전단상자의 회전을 억제할 수 있으나 시료와 전단상자 내부 벽면간의 마찰로 인해 내부마찰각은 과대평가 되었다.

(3) 새로 개발된 직접전단시험기는 Type-C 조건의 전단상자를 사용하여 상부 전단상자의 회전을 억제함으로써 전단중에 상하부 전단상자의 간격을 일정하게 유지하여 시료유출로 인한 전단강도의 저하를 방지하고, 부피팽창에 따른 시료와 전단상자 내부 벽면간의 마찰의 영향을 무시할 수 있었다.

(4) 새로 개발된 직접전단시험기에서 수행된 일정수직하중조건(CNL)과 정압조건(CP)의 실험결과, 구속조건에 의해 응력경로는 차이를 나타내었으나 동일한 내부마찰각을 나타내었다.

(5) 본 연구는 새로 개발된 직접전단시험기를 통해 기존 직접전단시험법의 문제점을 해결하고 반복적이며 신뢰성있는 결과를 도출할 수 있음을 보여준다.

감사의 글

본 연구는 고려대학교 특별연구비 및 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2011-0018110)을 밝히며, 이에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

1. Airey, D. W., Budhu, M., and Wood, D. M. (1984), “Some Aspects of the behaviour of Soils in Simple Shear”, CUED/D-SOILS/TR155, University of Cambridge Department of Engineering, 38p.
2. Airey, D. W. (1987), “Some Observations on the Interpretation of Shearbox Test Results”, CUED/D-SOILS/TR 196, University of Cambridge, 33p.
3. Assadi, A. (1975), “Rupture Layers in Granular Materials”, Ph.D. Thesis, University of London.
4. ASTM Standard D 3080-04. (2004), Standard test method for direct shear test under consolidated drained condition, *Annual Book of ASTM Standard*, Vol. 04.08, ASTM International, West Conshohocken, PA.
5. Budhu, M. (1984), “Nonuniformities Imposed by Simple Shear Apparatus”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.21, No.1, pp.125-137.
6. Cerato, A. B. and Lutenegger, A. J. (2006), “Specimen Size and Scale Effects of Direct Shear Box Tests of Sands”, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.29, No.6, pp.507-516.
7. Dounias, G. T. and Potts, D. M. (1993), “Numerical Analysis of Drained Direct and Simple Shear Tests”, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.119, No.12, pp.1870-1891.
8. Head, K. H. and Epps, R. (1986), *Manual of soil laboratory testing*, London: Pentech Press, 1238p.
9. Jewell, R. A. and Wroth, C. P. (1987), “Direct Shear Tests on Reinforced Sand”, *Geotechnique*, Vol.37, No.1, pp.53-68.
10. Jewell, R. A. (1989), “Direct Shear Tests on Sand”, *Geotechnique*, Vol.39, No.2, pp.309-322.
11. Jung, M. S., Chae, J. G., and Shibuya, S. (2009), “Shear Rate Effect on Undrained Shear behavior of Holocene Clay”, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.25, No.3, pp.5-12.
12. Kim, B. S., Shibuya, S., Park, S. W., and Kato, S. (2012), “Effect of Opening on the Shear behavior of Granular Materials in Direct Shear Test”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.16, No.7, pp. 1132-1142.
13. Kim, J. Y., Yang, T. S., and Akihiko, O. (2005), “A Study on Improvement of Shear Test Apparatus in the Direct Shear Test Under Constant Pressure”, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.21, No.2, pp.137-144.
14. Lings, M. L. and Dietz, M. S. (2004), “An Improved Direct Shear

Apparatus for Sand", *Geotechnique*, Vol.54, No.4, pp.245-256.
15. Mikasa, M. (1960), "New Direct Shear Test Apparatus", *Proceedings of the 15th Annual Convention Japanese Society Civil Engineering,* Tokyo, pp.45-48.
16. Morgenstern, N. R. and Tchalenko, J. S. (1967), "Microscopic Structures in Kaolin Subjected to Direct Shear", *Geotechnique*, Vol.17, No.4, pp.309-328.
17. Palmeira, E. M. (1987), "The Study of Soil-reinforcement Interaction by Means of Large Scale Laboratory Tests", Ph.D. Thesis, University of Oxford, 238p.
18. Palmeira, E. M. and Milligan, G. W. E. (1989), "Scale Effects in Direct Shear Tests on Sand", *Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.1, No.1, pp.739-742.
19. Potts, D. M., Dounias, G. T., and Vaughan, P. R. (1987), "Finite Element Analysis of the Direct Shear Box Test", *Geotechnique*, Vol.37, No.1, pp.11-23.
20. Scarpelli, G. and Wood, D. M. (1982), "Experimental Observations of Shear Band Patterns in Direct Shear Tests", *IUTAM Conference on Deformation and Failure of Granular Materials*.
21. Shibuya, S., Mitachi, T., and Tamate, S. (1997), "Interpretation of Direct Shear Box Testing of Sands as Quasi-simple Shear", *Geotechnique*, Vol.47, No.4, pp.769-790.
22. Shibuya, S., Koseki, J., and Kawaguchi, T. (2005), "Recent Developments in Deformation and Strength Testing of Geomaterials", Deformation characteristics of geomaterials, Di Benedetto et al., Eds., Taylor Francis Group, London, pp.3-26.
23. Simoni, A. and Houlsby, G. T. (2006), "The Direct Shear Strength and Dilatancy of Sand-gravel Mixtures", *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.24, No.3, pp.523-549.
24. Skempton, A. W. and Bishop, A. W. (1950), "The Measurement of the Shear Strength of Soils", *Geotechnique*, Vol.2, No.2, pp. 90-108.
25. Takada, N. (1993), "Mikasa's Direct Shear Apparatus, Test Procedures and Results", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.16, No.3, pp.314-322.
26. Tatsuoka, F., Nakaumura, S., Huang, C.-C., and Tani, K. (1990), "Strength Anisotropy and Shear Band Direction in Plane Strain Tests in Sand", *Soils and Foundations*, Vol.30, No.1, pp.35-54.
27. Tejchman, J. and Bauer, E. (2005), "Fe-simulations of a Direct and a True Simple Shear Test Within a Polar Hypoplasticity", *Computers and Geotechnics*, Vol.32, No.1, pp.1-16.
28. Vermeer, P. A. (1990), "The Orientation of Shear Bands in Biaxial Tests", *Geotechnique*, Vol.40, No.2, pp.223-236.
29. Wang, J. and Gutierrez, M. (2010), "Discrete Element Simulations of Direct Shear Specimen Scale Effects", *Geotechnique*, Vol.60, No.5, pp.395-409.
30. Wu, P. K., Matsushima, K., and Tatsuoka, F. (2008), "Effects of Specimen Size and Some Other Factors on the Strength and Deformation of Granular Soil in Direct Shear Tests", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.31, No.1, pp.45-64.

Received : January 21st, 2015
Revised : February 3rd, 2015
Accepted : February 11th, 2015