

직접전단상자 시스템에 따른 동결토의 강도 평가에 관한 실험적 연구

An Experimental Study of Strength Evaluation in Frozen Soils according to Direct Shear Box Systems

김 상 엽¹⁾ · 김 영 석²⁾ · 이 장 근²⁾ · 이 종 섭[†]

Sang Yeob Kim · YoungSeok Kim · Janguen Lee · Jong-Sub Lee

Received: November 8th, 2016; Revised: November 16th, 2016; Accepted: February 24th, 2017

ABSTRACT : Experimental study on strength characteristics of frozen soils is necessary for the safety evaluation of design and construction in cold region. The objective of this study is to evaluate the direct shear strength of frozen soils obtained from traditional system (Type-1), system with roller on the upper shear box (Type-2), and system with fixed upper shear box separated from bottom shear box (Type-3). Specimens mixed with sand, silt, and water are frozen to -5°C , and then direct shear tests are conducted under the normal stress of 5, 10, 25, and 50 kPa. Experimental results show that the upper shear box of Type-1 touches the bottom shear box due to the rotation of the upper shear box. The shear strength obtained from Type-2 is overestimated because the preventing rotation force is added to shear force. Type-3 may acquire the only strength of the specimen, and shear strain at peak shear strength is similar to that at the beginning of vertical displacement occurrence. In addition, internal friction angle and cohesion at both peak and residual stresses in Type-3 are smaller than those of Type-2. This study shows that high strength specimens including frozen soils can be effectively evaluated using improved shear box system such as Type-3.

Keywords : Cohesion, Direct shear test, Frozen soils, Internal friction angle, Shear box system, Shear strength

요 지 : 극한지 동결 지반에서 구조물의 설계 및 시공이 진행됨에 따라, 안정성 평가를 위해 동결토의 강도 특성에 대한 실험적 연구가 필수적이다. 본 연구의 목적은 전단 상자 시스템에 따른 동결토의 강도를 평가하는 것으로, 이를 위하여 보편적으로 사용되는 기존 직접전단 시스템(Type-1), 상부 전단 상자 위쪽에 롤러를 설치한 시스템(Type-2), 그리고 상부 전단 상자를 하부 전단 상자 와 분리되도록 기둥으로 고정된 시스템(Type-3)을 제작하였다. 모든 시스템에는 모래, 실트, 그리고 증류수를 동일한 비율로 혼합한 시료를 이용하여 조성하였으며, 냉동 챔버 내에서 -5°C 까지 동결된 후 연직 응력 5, 10, 25 그리고 50kPa을 가하며 직접전단실험을 수행하였다. 실험 결과, Type-1은 전단 이동에 따라 상부 전단 상자가 회전(rotation)하여 하부 전단 상자 와 접촉하는 문제가 발생했다. 상부 전단 상자의 회전을 롤러로 방지한 Type-2의 경우, 회전을 막는 힘이 전단강도에 추가되어 강도가 과대 평가되었다. Type-3의 경우, 동결 시료만의 전단강도가 평가되었으며, 최대전단강도 발현 시점과 수직변위가 증가하기 시작하는 시점이 유사하게 나타났다. 또한, Type-3의 최대전단강도와 잔류전단강도의 내부마찰각과 점착력은 롤러의 영향이 제거되어 Type-2보다 작게 나타났다. 본 연구는 동결토와 같이 강도가 큰 시료의 경우 Type-3과 같이 개선된 전단 상자 시스템을 이용하여 동결토만의 강도를 평가할 수 있음을 보여준다.

주요어 : 점착력, 직접전단실험, 동결토, 내부마찰각, 전단 상자 시스템, 전단강도

1. 서 론

최근 북극, 알래스카, 시베리아와 같이 극한지역의 영구 동토 지반에서 천연 대체에너지가 대량 발견됨에 따라 이를 확보하기 위한 인프라 구축에 국제적인 관심이 증대되고 있다. 이에 따라, 동토 지반에서의 구조물 시공 및 안전성 설계를 위하여 동결토의 강도에 대한 연구가 활발하다(Yasufuku et al., 2003; Christ et al., 2009; Choi & Ko, 2011; Lee & Choi, 2013, Chae et al., 2014). 한편, 현장의 원지반 상태에서 전

단강도를 산정하기 위하여 베인 전단시험(vane shear test)이 주로 사용되지만, 매우 단단한 동토 지반에 적용하기에는 한계가 있다. 전단강도 산정을 위한 실내실험 중 일축압축실험은 원지반을 모사하기 위한 구속조건을 구현할 수 없으며, 삼축압축실험은 시료의 동결 상태를 유지하기 위한 부동액과 특수 장치가 요구되어 동결토에 적용하기 어려운 실정이다. 이에 비해 직접전단실험은 영하 환경에서의 구속조건을 모사하여 동결토에 대한 강도 평가가 용이하여 주로 사용되어 왔다(Ladanyi & Theriault, 1990; Fitzsimons et al., 2001).

1) Ph.D. Candidate, School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea University

2) Research Fellow, Geotechnical Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

† Professor, School of Civil, Environmental, and Architectural Engineering, Korea University (Corresponding Author : jongsu@korea.ac.kr)

직접전단실험은 삼축압축실험과 달리 전단면을 미리 설정하고 파괴를 발생시키는 실험이다(Tejchman & Bauer, 2005; Wang & Gutierrez, 2010). 이에 따라, 상하부 전단 상자에 다른 시료를 조성하고, 강철과 흙 사이 등에 발생하는 전단 강도를 산정하여 현장에 설치된 말뚝과 지반 사이의 전단 거동을 추정할 수 있다(Ling & Dietz, 2005). 또한, 전단면에서는 시료의 국부적인 이동에 따라 부피가 수축 혹은 팽창을 한다(Skempton & Bishop, 1950). 이는 전단 이동 중에 상부 전단 상자에 마찰력을 가하며, 시료가 매우 조밀하여 부피 팽창이 크게 발생하는 경우 힘과 모멘트에 의해 상부 전단 상자가 기울어질 수 있다(Hong et al., 2015). 이와 같은 단점은 전단면이 불규칙하게 생성되어 부피 팽창이 과하게 발생하는 동결토에 적용할 경우 큰 한계가 되며, 이를 보완하고자 상부 전단 상자에 롤러를 설치하여 상자의 회전을

을 방지한 실험 방법이 적용된 바 있다(Lee & Choi, 2012).

전단 시 하부 전단 상자가 수평으로 이동하게 되며 이에 따라 회전 현상이 발생하는 상부 전단 상자의 영향을 최소화하기 위해 Jewell & Wroth(1987)는 상부 전단 상자와 하중 재하판을 일체형으로 설계하였다. 또한, Takada(1993)와 Shibuya et al.(1997)는 상부 전단 상자를 하부 전단 상자와 일정한 간격으로 고정하여 상부 전단 상자의 회전을 방지하고, 전단 상자 간의 베어링(bearing)을 제거하였다. 이처럼 직접전단실험은 시료만의 강도를 산정하기 위해 시스템의 개선이 진행되고 있으나, 여전히 기존의 시스템이 보편적으로 사용되고 있다. 특히, 전단 상자의 회전이 크게 발생하여 지배적인 영향을 받는 동결토에 대하여 개선된 시스템의 적용은 필수적이다. 하지만 동결토에 대하여 전단 상자 시스템에 따른 강도 특성 및 전단 거동에 대한 연구는 미비한 실정이다.

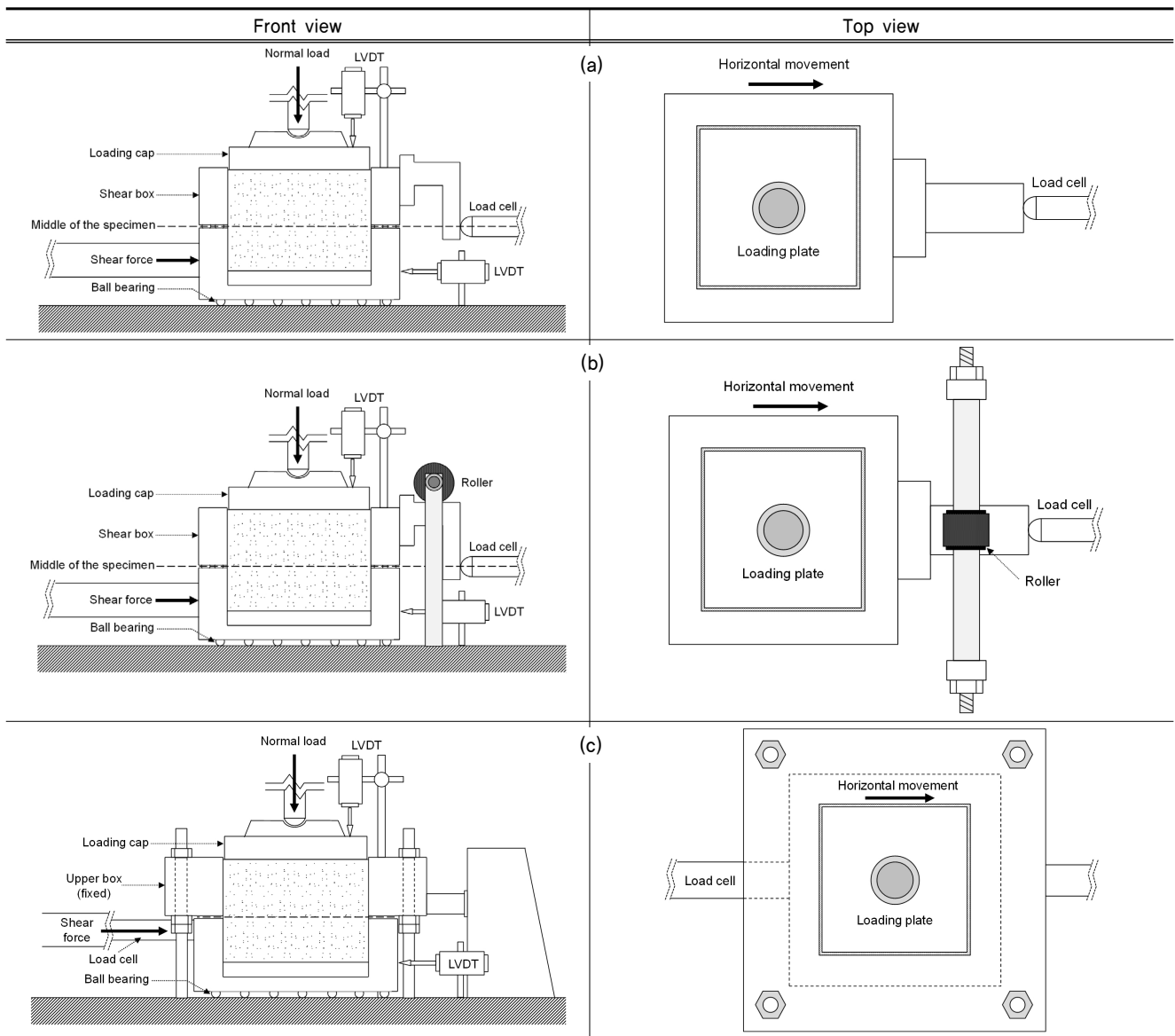


Fig. 1. Direct shear apparatus: (a) Type-1; (b) Type-2; (c) Type-3

본 연구에서는 전단 상자 시스템에 따른 동결 시료의 강도 특성을 비교하기 위하여 동일한 온도, 변형률, 그리고 함수비의 조건에서 직접전단실험을 수행하고 결과를 상호비교하였다. 전단 상자 시스템은 Fig. 1과 같이 보편적으로 사용되는 기존의 경우(Type-1), 상부 전단 상자의 회전을 방지하고자 롤러를 설치한 경우(Type-2), 그리고 상부 전단 상자를 하부 전단 상자과 일정한 간격을 두고 고정한 경우(Type-3) 세 가지를 제작하였다. 시료는 모래, 실트, 그리고 증류수를 혼합하여 준비하였으며, 냉동 챔버 내에 조성하여 일정 시간 동결시키며 시료의 온도를 모니터링 하였다. 또한, 전단 과정에서의 연직 응력을 달리하여 동결토의 전단 강도에 구속 조건이 미치는 영향도 파악하고자 하였다. 본 논문은 실험 진행 시 세 가지의 시스템에 발생하는 현상을 기술하고, 각 경우의 전단 이동에 따른 전단 응력과 수직 변위의 변화를 비교하였다. 또한, 각 경우에 산정된 최대전단강도와 잔류전단강도를 사용하여 내부마찰각과 점착력을 최종적으로 분석하였으며, 원인에 대하여 토의하였다.

2. 전단 상자 시스템

본 연구에서는 전단 상자 시스템에 따른 전단강도 및 거동 특성을 분석하기 위하여 세 가지의 시스템을 설계하였다. 시스템의 종류는 Skempton & Bishop(1950)의 기존 직접전단 시스템(Type-1), 전단 시 상부 전단 상자의 회전을 방지하기 위해 상부 전단 상자 위에 롤러를 설치한 시스템(Type-2), 그리고 Mikasa(1960)이 소개한 상부 전단 상자를 하부 전단 상자과 일정한 간격을 두고 고정한 시스템(Type-3)으로 구성하였다. 각 전단상자시스템의 모식도는 Fig. 1과 같고, Type-2와 Type-3의 실제 사진은 Fig. 2에 나타냈으며, Type-1은 Type-2의 사진에서 꺾쇠 연결부 위의 롤러를 제거한 경우이다.



(a)



(b)

Fig. 2. Pictures of direct shear system: (a) Type-2; (b) Type-3

2.1 Type-1 시스템

가장 보편적으로 사용되고 있는 기존의 직접전단 시스템은 Fig. 1(a)과 같으며, 수평 변위를 발생시키는 모터, 시료를 조성하기 위한 상하부 전단 상자, 연직 응력을 가하는 하중 재하판, 수평 변위와 수직 변위를 측정하기 위한 변위계, 그리고 전단 응력을 측정하는 로드셀(load-cell) 등으로 구성되었다. 전단 상자 규격은 ASTM D 3080-04(2004)에서 규정한 폭과 두께의 비 2:1에 해당하도록 가로와 세로 100mm, 높이 50mm가 되도록 제작하였다. 상부 전단 상자와 하부 전단 상자 사이에는 베어링을 설치하여 상하부 전단 상자 사이의 유격(0.5mm)을 유지하며 전단 시 마찰력의 영향을 최소화하도록 하였다. 사각형의 하중 재하판은 상부 전단 상자의 4개의 윗면과 각각 1mm의 유격을 갖도록 가로와 세로 98mm로 제작하여 연직 응력이 전단 상자에 닿지 않고 시료에 전달되도록 하였다. 연직 응력은 하중 재하판 기둥 상부에 1:10의 비율을 갖는 외팔보를 사용하여 무게 추로 재하하였다. 연직 응력이 재하된 상태에서 전단 이동을 수행하였으며, 전단력은 모터를 하부 전단 상자과 연결하여 일정한 속도로 가하였다. 한편, 로드셀은 상부 전단 상자에 설치된 꺾쇠 모양의 연결부에 맞닿도록 모터의 반대편 시료의 중앙선에 해당하는 위치에 설치되었다. 이에 따라, 전단 응력은 Fig. 1(a)과 같이 하부 전단 상자의 좌측으로부터 밀어주는 힘을 상부 전단 상자의 우측에 설치된 로드셀을 통해 전단 상자의 이동을 막는 힘을 측정하는 방식으로 설계되었다. 로드셀을 통한 전단 응력과 변위계를 통한 수직 및 수평 변위는 인디케이터(indicator)를 통하여 관찰하였고, 매초 측정되었다.

2.2 Type-2 시스템

Fig. 1(b)은 전단 시 발생하는 상부 전단 상자의 회전을 방지하기 위해 상부 전단 상자과 로드셀을 연결하는 꺾쇠

연결부 위에 롤러를 설치한 시스템을 나타내며, 실제 사진은 Fig. 2(a)와 같다. 장비의 구성은 기존의 전단 상자 시스템(Type-1)과 동일하며, 상부 전단 상자의 회전을 방지하기 위한 롤러가 추가적으로 설치되었다. 롤러는 하부판 양쪽에 기둥을 설치하여 볼트 체결을 통해 고정하였으며, 상부 전단 상자와 로드셀을 연결하는 꺾쇠 모양의 연결부 상부에 맞닿도록 설치하였다. 롤러를 관통하는 심봉은 두께 30mm로 제작하여 전단 응력에 의한 변형을 방지하였다. 또한, 롤러는 전단 이동과 동일한 방향으로 회전이 가능하도록 제작되어 전단 이동 중에 롤러의 마찰력으로 인한 영향을 최소화하였다. 연직 응력은 Type-1과 동일하게 외팔보에 무게 추를 가하여 재하하였으며, 하부 전단 상자의 이동을 상부 전단 상자가 막는 힘을 로드셀을 통해 측정하는 방식으로 수행하였다.

2.3 Type-3 시스템

마지막 전단 상자 구성은 Mikasa(1960)이 소개한 개선된 시스템과 같이 상부 전단 상자를 고정한 경우이다. 장비는 수평 변위를 발생시키는 모터와 하부 전단 상자, 하부 전단 상자보다 외경이 큰 상부 전단 상자, 상부 전단 상자의 수직 위치를 고정하기 위한 기둥, 상부 전단 상자의 이동을 방지하기 위한 기둥, 그리고 변위계와 로드셀 등으로 구성되었다. 상부 전단 상자는 Fig. 1(c)과 같이 4개의 기둥과 이중 볼트를 사용하여 고정하였고, 이에 따라 하부 전단 상자 사이의 베어링 없이 0.5mm의 간격을 갖도록 설계되었으며, 실제 사진은 Fig. 2(b)와 같다. 기둥은 하부 전단 상자의 전단 이동을 방해하지 않도록 하부 전단 상자의 직경보다 큰 간격을 두고 설치하였다. 또한, 상부 전단 상자를 고정된 기둥과 연결하여 전단 상자의 이동을 방지하였다. 연직 응력을 재하하는 방식은 Type-1 및 Type-2와 동일하게 외팔보에 무게 추를 가하는 방식으로 설계되었다. 또한, 로드셀을 모터와 하부 전단 상자 사이에 설치하여 전단 이동 과정에서의 미는 힘을 직접적으로 측정하였다.

3. 시료 조성

본 실험의 시료는 모래와 실트를 혼합하여 사용하였다. 모래는 입자 크기의 영향을 최소화하기 위하여 30번 체와 50번 체 사이에 남는 주문진사를 사용하였다. 또한, 동결 시 주문진사에 잔존하는 염분의 영향을 최소화하기 위해 물로 세척한 후 건조하여 준비하였다. 실트는 입자 크기가 0.075mm (200번 체에 해당) 이하인 세립토를 사용하였으며, 모래에 대한 실트의 중량비(실트 중량 / 모래 중량)가 30%가 되도록

혼합하였다. 혼합된 시료의 비중은 2.65, 최대 및 최소 간극비는 0.81과 0.42로 나타났다. 준비된 시료에 대하여 동결을 수행하기 위해 포화도 10%에 해당하는 증류수를 첨가하여 혼합하였으며, 전단 상자에 조성하기 이전에 밀폐 용기에 1시간 동안 보관하여 시료 내에 함수비가 동일하게 분포하도록 하였다.

혼합된 시료는 냉동 챔버 내에 설치된 전단 상자의 내부에 상대밀도 60%가 되도록 평판으로 다져서 조성하였다. 전단 상자 내부의 벽면에는 그리스(grease)를 처리하여 벽면 마찰력의 영향을 최소화하였다. 시료는 다섯 개의 층으로 나누어 동일한 다짐 횟수로 조성 하였으며, 직후에 5kPa의 연직 응력을 재하하며 동결을 시작하였다. 동결 챔버의 온도는 -5°C로 설정하였으며, 시료 내에 열전대(thermocouple)를 설치하여 Fig. 3과 같이 온도를 모니터링 하였다. 상온의 초기 온도에서 온도가 점차적으로 감소하다가 0°C부근에서 물이 얼음으로 상 변화(phase transition)함에 따라 에너지가 소모되면서 온도가 90분 동안 유지되었으며, 상 변화가 완료된 후 다시 -5°C까지 점차적으로 감소하였다. 시료 내의 물이 얼음으로 상 변화(응고 현상)에 따라 열에너지가 방출되어 상 변화 과정에서의 온도가 0°C부근에서 일정 시간 동안 유지되는 것이다(Zumdahl & Zumdahl, 2008). 시료는 0°C부터 -5°C까지 약 4시간 동안 동결시켰으며, 설정된 온도에 도달한 후 전단 시험을 시작하였다.

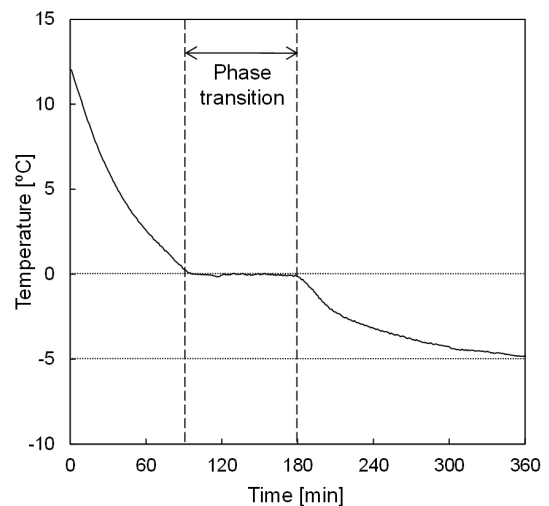


Fig. 3. Temperature variation of specimen during freezing

4. 실험 결과

4.1 Type-1 전단 실험

Type-1 전단 상자 시스템(Fig. 1(a) 참조)을 이용하여 동

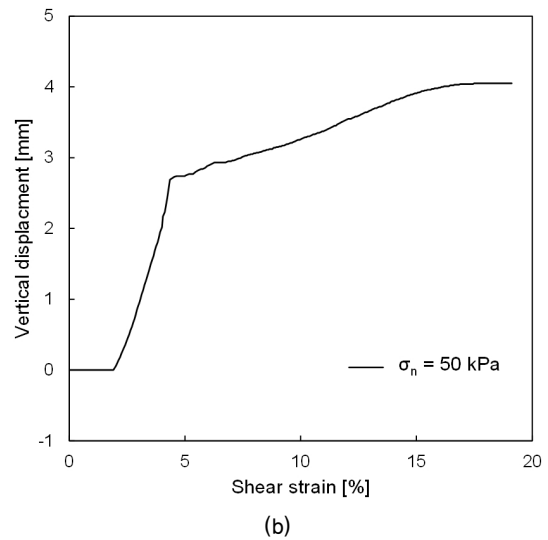
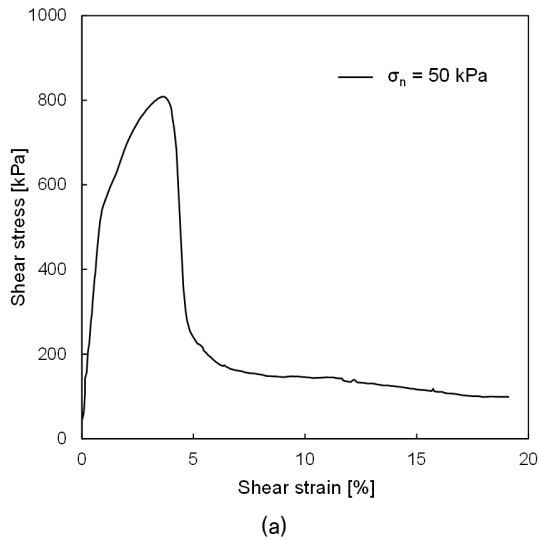


Fig. 4. Direct shear test results of Type-1: (a) shear stress according to shear strain; (b) vertical displacement according to shear strain, σ_n denotes the normal stress during shearing phase

결토에 대한 직접전단실험을 수행하였다. 동결 과정에서 연직 응력 5kPa을 재하하여 동결 중 물의 상 변화에 따른 부피 팽창을 최소화하였다. 동결이 완료된 후 무게 추를 더하여 50kPa의 연직 응력을 재하한 상태에서 전단 과정을 시작하였다. 전단 시 전단 변형률과 전단 응력의 관계 및 전단 변형률과 수직 변위의 관계는 Fig. 4와 같이 나타났다. 전단 응력은 최대전단강도 808.3kPa까지 증가한 후 급격하게 감소하여 잔류전단강도 약 100kPa로 수렴하였다. 수직 변위는 전단 변형률 2% 부근에서 급격하게 증가하다가 5% 부근부터 시료의 팽창만을 측정하며 점진적으로 증가하였다. 또한, 전단 변형률이 20%에서 수직 변위가 약 4mm에 수렴하는 것으로 나타났다.

본 실험의 경우 Fig. 5와 같이 전단력을 하부 전단 상자의 왼편에 가한 결과, 상부 전단 상자의 오른편이 반시계 방향으로 회전하며 수직으로 올라오는 현상이 발생하였다. 상부 전단 상자는 고정되지 않고 로드셀과 맞닿아 있기 때문에 상부 상자의 회전 현상을 방지하기 어렵다. 이에 따라 비교적 높은 강도를 나타내는 동결토와 같은 시료에 대해 적용 시 상부 전단 상자의 회전이 Fig. 5와 같이 나타난다. 실험 결과에 따르면, 전단 이동이 시작한 후 약 2mm까지 상부 전단 상자가 회전하기 시작하며, 이로 인해 하중 재하 판과의 유격이 감소하여 상부 전단 상자의 벽면과 맞닿은 것으로 판단된다. 이와 같은 이유로 2mm 이후 수직 변위는 시료의 부피 팽창 특성과 상부 전단 상자가 위로 이동하는 변위까지 측정된 것으로 판단된다. 수직 변위 5mm 부근에서 상부 전단 상자와 하부 전단 상자가 서로 맞닿으며 상부 전단 상자의 회전이 더 이상 발생하지 않으며, 이에 따라 수직 변위는 상부 전단 상자의 회전에 따른 수직 이동을 제

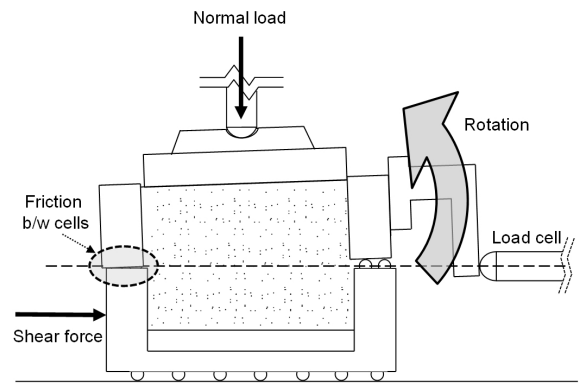


Fig. 5. Schematic drawing of Type-1 shear box system

외한 시료의 부피 팽창만을 측정하기 시작한다. 이와 같은 상부 전단 상자의 회전으로 인하여 높은 강도를 지니는 시료의 전단 거동을 파악하기에 기존 전단 장비는 장비적 한계가 있음을 알 수 있다.

4.2 Type-2 전단 실험

상부 전단 상자의 회전을 방지하고자 Fig. 1(b)과 같이 롤러를 설치하여 기존의 전단 상자 시스템의 한계를 보완하여 전단 실험을 수행하였다. 동결 과정의 연직 응력은 기존과 동일하게 5kPa을 가하였으며, 동결이 완료된 후 5, 10, 25, 그리고 50kPa의 연직 응력을 가하여 전단 과정을 수행하여 Fig. 6과 같은 결과를 얻었다. 최대전단강도는 Fig. 6과 같이 연직 응력의 증가에 따라 최대전단강도가 60.8kPa에서 184.2kPa까지 증가하였으며, 수렴하는 잔류전단강도는 21.4kPa에서 105.3kPa까지 증가하였다. 또한, 전단 변형률 20%에서의 수직 변위는 연직 응력의 증가에 따라 4.7mm에서 2.5mm

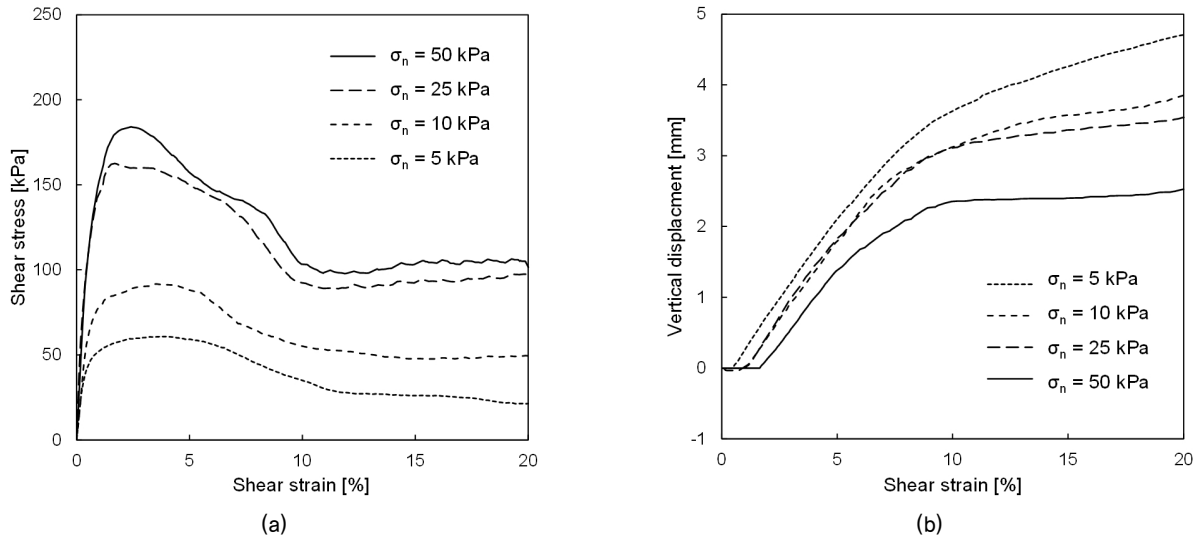


Fig. 6. Direct shear test results of Type-2: (a) shear stress according to shear strain; (b) vertical displacement according to shear strain

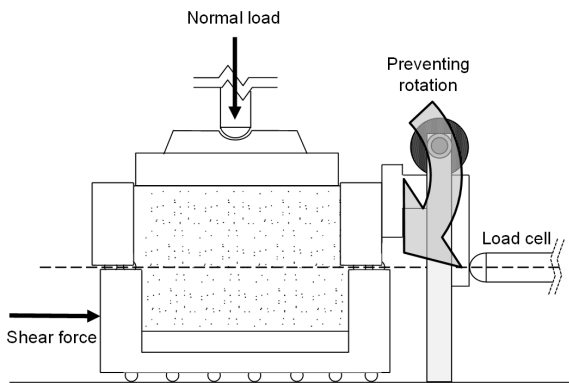


Fig. 7. Schematic drawing of Type-2 shear box system

로 감소하는 것으로 나타났다.

Type-2의 경우, 전단 상자에 설치된 롤러의 보완으로 상부 전단 상자의 회전은 발생하지 않았다. 그러나 Type-1과 비교하여, 전단 응력이 최대전단강도 이후에 감소하여 잔류 전단강도를 나타내기 시작하는 변위가 10mm 이후로 증가하였다. 이는 매우 느슨하거나 습윤한 시료에 나타나는 변형연화(strain softening) 현상으로서, 얼음에 의한 입자 간 결합력(ice bonding)이 존재하여 경화(hardening) 거동을 보여야 하는 동결 시료에 대해 나타나는 것은 정반대의 결과이다(Jenkins, 1991; Kwon & Cho, 2003). 연직 응력이 증가할수록 최대전단강도를 거쳐 잔류전단강도까지 감소하는 구간이 증가하였으며, 특히 연직 응력이 50kPa인 경우 최대전단응력을 거친 후에 전단 응력의 감소가 불안정한 구간이 나타났다. 이는 Fig. 7과 같이 상부 전단 상자와 로드셀의 연결부에 설치된 롤러에 의한 영향이 나타난 것으로 판단된다. 즉, 로드셀은 시료의 전단 응력, 롤러에 의해 상부 전단 상자의 회전을 방지하는 힘, 그리고 전단 상자 사이의 베어

링에 의한 마찰력 등을 종합하여 측정한다(Lings & Dietz, 2004). 이와 같은 이유로 롤러를 설치한 경우의 전단 상자 시스템은 시료만의 전단강도를 산정하기에 한계가 있을 것으로 판단된다.

4.3 Type-3 전단 실험

Type-1과 같은 전단 시스템에 발생하는 상부 전단 상자의 회전을 방지하고, Type-2와 같은 전단 시스템에서 발생하는 롤러에 의한 영향을 최소화하기 위하여 상부 전단 상자를 하부 상자와 간격을 두고 고정하는 방식의 개선된 직접전단 실험을 수행하였다. 또한, 로드셀은 전단 이동을 발생시키는 모터부에 직접적으로 연결하여 다른 영향 요인을 제거하였다. 연직 응력의 조합은 롤러를 설치한 전단 상자 시스템과 동일하게 수행하였으며, 실험 결과는 Fig. 8과 같이 나타났다. 연직 응력의 증가에 따라 최대전단강도는 26.7kPa에서 103.3kPa까지 증가하였고, 잔류전단강도는 14.8kPa에서 74.0kPa까지 증가하였다. 또한, 전단 변형률 20%에서의 수직 변위는 연직 응력의 증가에 따라 2.2mm에서 0.7mm로 감소하였다. 또한, 시료의 부피가 팽창하기 시작하는 전단 변형률의 시점은 1.1mm에서 4.5mm로 증가하였다.

최대전단강도가 발현하는 시점은 부피의 팽창률이 가장 높은 시점과 연관이 있다(Bolton, 1986). 이를 비교하기 위하여 Type-2와 Type-3에서 최대전단강도가 발현하는 전단 변형률과 부피가 팽창하기 시작하는 전단 변형률, 즉 부피의 팽창률이 가장 높은 시점을 Fig. 9에 도시하였다. Fig. 9와 같이 Type-2는 두 시점 간의 관계가 불규칙적으로 나타났으며, Type-3은 두 시점이 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 즉, Type-2는 일관성 있는 전단강도를 평가할 수

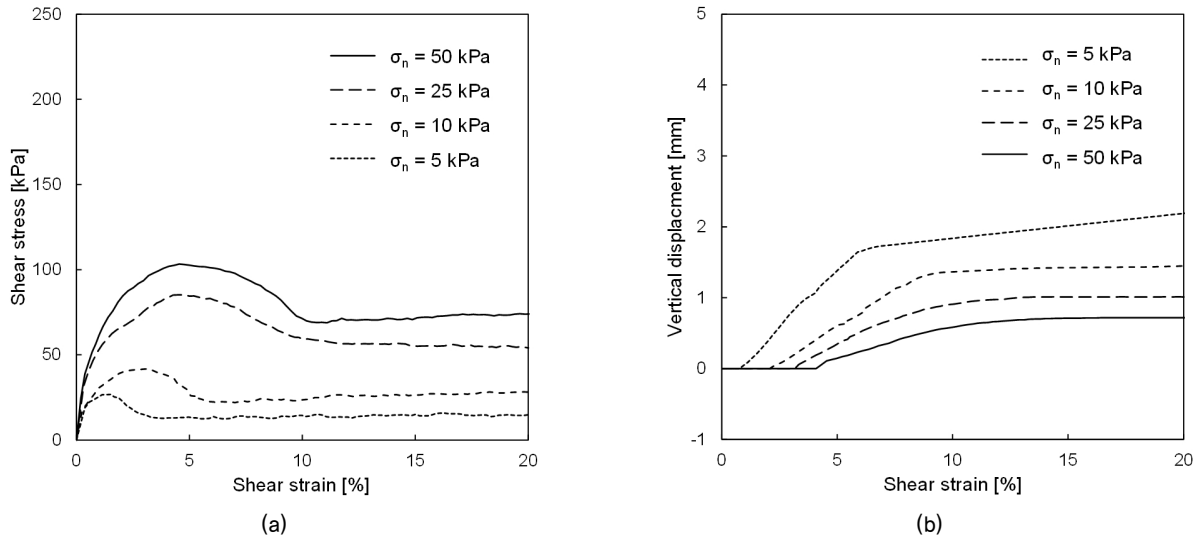


Fig. 8. Direct shear test results of Type-3: (a) shear stress according to shear strain; (b) vertical displacement according to shear strain

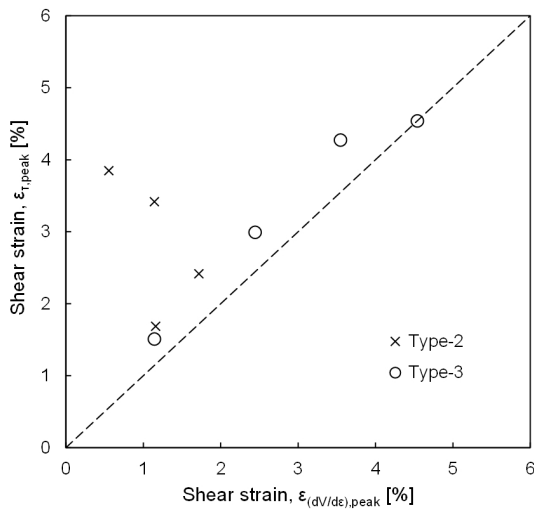


Fig. 9. Shear strain at peak shear strength versus shear strain at peak increasing rate of volume, ϵ , τ , and V denote the shear strain, shear stress and volume of specimen, respectively

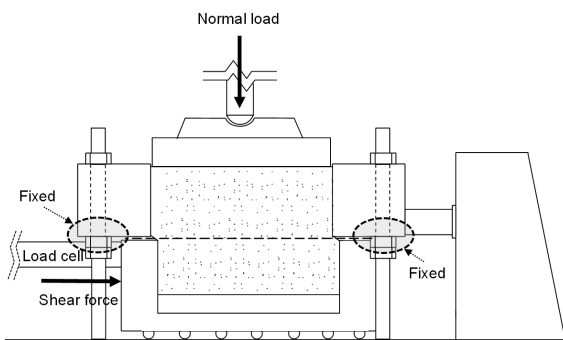


Fig. 10. Schematic drawing of Type-3 shear box system

없는 반면, Type-3은 일관성 있는 전단강도를 평가할 수 있을 것으로 예상된다.

Type-3 전단 장비의 경우 Fig. 10과 같이 상부 전단 상자

의 고정을 통해 하부 전단 상자 사이의 베어링을 제거하고 고정된 기둥과의 연결을 통해 상부 전단 상자의 회전을 방지하여 기존 전단 시스템의 전단강도 측정에 반영된 영향 요소를 제거하였다. 또한, 로드셀을 하부 전단 상자에 직접적으로 연결하여 시료를 통하여 상부 전단 상자로 전달되는 힘 중 불필요한 요소를 최소화하였기 때문에 시료만의 전단 강도가 나타난 것으로 판단된다. 이와 같이 전단 상자의 영향을 최소화한 개선된 전단 상자 시스템은 강도가 높은 시료에 대하여 전단 거동을 파악할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 토 의

기존 전단 상자 시스템(Type-1)의 경우, 다른 두 경우에 비해 최대전단강도가 과도하게 과대 평가되었다. Jewell(1989)는 기존 전단 시스템의 경우 전단 이동이 발생하며 상부 전단 상자가 반시계방향으로 회전하고, 하중 재하판은 시계방향으로 회전됨을 파악하였다. 이와 같이 전단 과정에 상부 전단 상자가 반시계방향으로 회전하고, 상하부 전단 상자가 접촉하며 마찰력이 발생한 것으로 판단된다. 이에 따라 측정된 강도는 시료의 전단강도뿐만 아니라 상하부 전단 상자의 마찰력까지 추가적으로 나타낸 것으로 판단된다. 이와 같은 이유로 기존 전단 상자 시스템은 동결토 강도 평가에 적용하기에 장비적 한계가 있으며, 시스템의 개선이 요구된다. 상부 전단 상자의 회전을 방지하기 위하여 롤러를 설치한 경우(Type-2), 전단강도가 기존 시스템(Type-1)의 최대전단강도에 비해 77.2% 정도 감소하였다. 이는 상부 전단 상자의 회전이 발생하지 않아 상하부 전단 상자의 접촉에 의한 마찰력이 제거되었기 때문으로 판단된다. 그러나

롤러가 상부 전단 상자와 로드셀 연결부에 설치되어 상자의 이동을 억제하였기 때문에 전단 상자가 회전하려는 힘이 추가되어 측정될 수 있다(Lings & Dietz, 2004). 마지막으로, 상부 전단 상자를 고정한 개선된 전단 상자 시스템(Type-3)에 의한 전단강도는 세 가지의 경우 중 가장 작게 나타났다. Type-3의 최대전단강도는 Type-1에 비해 87.2% 감소하였으며, Type-2의 최대전단강도에 비해 43.9% 감소하였다. 상부 전단 상자를 하부 전단 상자와 일정한 간격으로 고정하고 로드셀을 하부 전단 상자와 연결하여 다른 영향 인자들을 제거하였으며, 이로 인해 동결 시료만의 전단강도가 산정되었다(Mikasa, 1960).

세 가지의 전단 상자 시스템에 따른 전단강도를 비교하기 위해 전단 과정의 연직 응력에 따른 최대전단강도와 잔류전단강도를 Fig. 11에 도시하였다. 동결 시료의 최대전단

강도는 Type-2와 Type-3 모두 연직 응력의 증가에 따라 비선형적으로 증가하는 경향을 나타냈다(Ladanyi, 1972). 잔류전단강도의 경우 최대전단강도보다 작게 나타났으며, Type-3의 잔류전단강도는 Type-2에 비해 비교적 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 이는 최대전단강도가 연직 응력에 따라 비선형적으로 증가하고 잔류전단강도가 선형적으로 증가하는 연속체의 특성을 나타내기 때문이다(Brady & Brown, 2013). 이와 같은 이유로, Type-3의 전단 상자 시스템이 동결 시료만의 강도를 측정하는 것으로 판단할 수 있다.

Type-2와 Type-3의 최대전단강도와 잔류전단강도의 강도 정수를 산정하기 위해 Fig. 12와 같이 연직 응력 5, 10, 그리고 25kPa에 해당하는 전단강도를 도시하였고, 선형 관계식을 파악하였다. 선형 관계식은 전단강도를 나타내는 Eq. (1)과의 비교를 통해 내부마찰각과 점착력을 산정하였

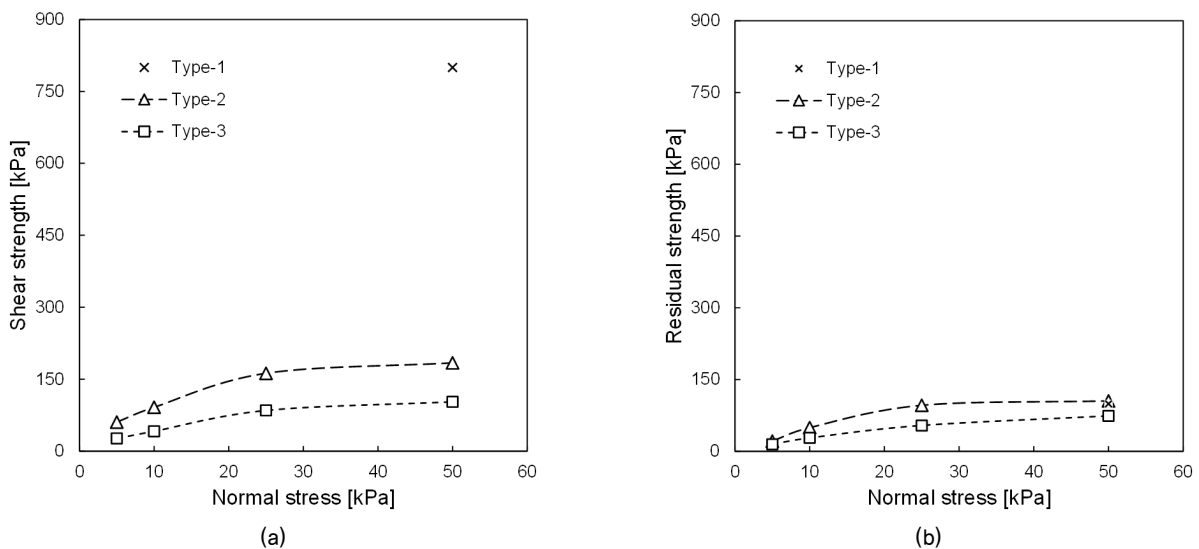


Fig. 11. Strength versus normal stress of each direct shear test: (a) peak shear strength; (b) residual shear strength

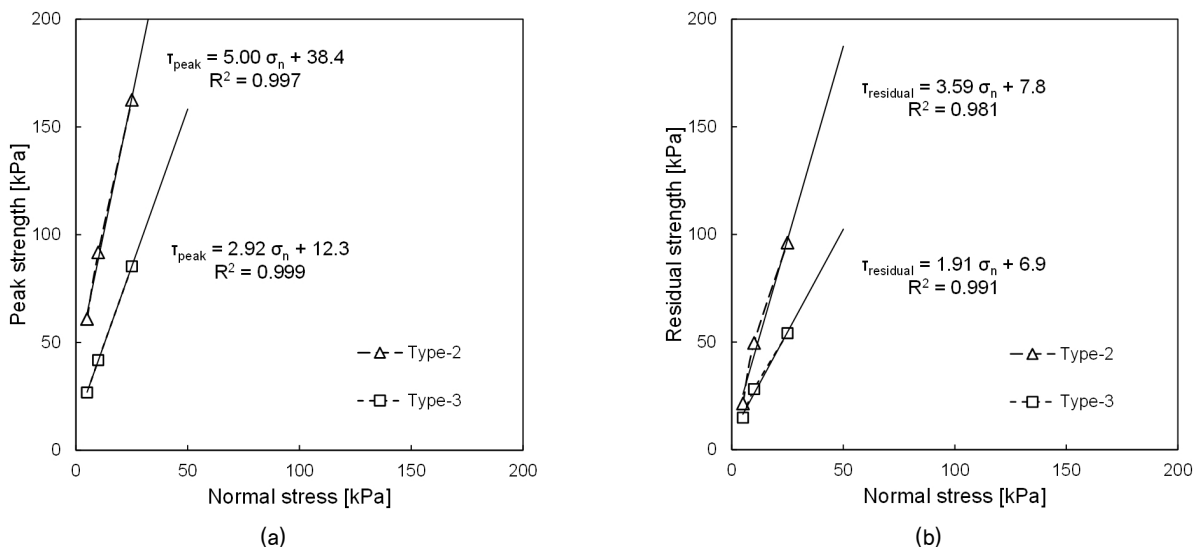


Fig. 12. Linear relation between strength and normal stress of 5, 10, and 25 kPa: (a) peak shear strength; (b) residual shear strength

Table 1. Internal friction angle and cohesion at peak and residual states

Strength parameter Type	Φ_{peak} [°]	c_{peak} [kPa]	Φ_{residual} [°]	c_{residual} [kPa]
Type-2	78.7	38.4	74.5	7.8
Type-3	71.1	12.3	62.4	6.9

고, 강도 정숫값을 Table 1에 나타냈다.

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (1)$$

여기서, τ 는 전단강도이고, σ_n 는 연직 응력이며, c 와 ϕ 는 점착력과 내부마찰각을 의미한다.

최대전단강도의 경우, Type-2의 내부마찰각과 점착력은 78.7°와 38.4kPa로 나타났고, Type-3의 내부마찰각과 점착력은 71.1°와 12.3kPa로 나타났다. Type-2 최대전단강도의 강도 정수가 모두 Type-3보다 크게 나타났으며, 특히 점착력 성분이 큰 차이를 나타냈다. 파괴가 진행되는 과정에서 발현되는 최대전단강도의 경우, 시료가 팽창하려는 힘이 상부 전단 상자를 회전시키려고 하며, 회전하려는 힘이 롤러에 의해 최대전단강도 값에 반영된다. 이에 따라 Fig. 12와 같이 5kPa의 작은 연직 응력에서도 최대전단강도 값이 차이를 나타내며, 점착력 성분이 크게 차이 나는 것과 같이 나타났다. 한편, 잔류전단강도의 경우, Type-2의 내부마찰각과 점착력은 74.5°와 7.8kPa로 나타났고, Type-3의 내부마찰각과 점착력은 62.4°와 6.9kPa로 나타났다. 잔류전단강도 또한 Type-2의 강도 정수가 모두 Type-3보다 크게 나타났으나, 최대전단강도와 다르게 점착력 성분보다 내부마찰각의 차이가 크게 나타났다. 이는 시료가 이미 파괴되어 부피가 팽창하려는 힘이 작아졌고, 이에 따라 5kPa의 연직 응력에서 Type-2와 Type-3의 잔류전단강도가 유사하게 나타나며, 점착력 성분이 유사한 것과 같이 나타난다. 그러나, 연직 응력이 증가함에 따라 Type-2의 상부 전단 상자가 회전하려는 힘이 증가하며, 잔류전단강도 또한 과대평가됨에 따라 내부마찰각은 크게 차이 나는 것으로 나타난다. 이와 같은 이유로 롤러를 설치한 전단 상자 시스템은 동결토의 전단강도를 과대평가할 수 있으며, 이와 같은 이유로 Type-3의 개선된 전단 상자 시스템은 동결토와 같이 강도가 큰 시료의 과대평가를 방지하여 극한지역 구조물 안정성 설계에 적합할 것으로 기대된다.

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 직접전단 상자 시스템에 따른 동결토의

전단강도 특성을 파악하기 위하여 세 가지의 전단 상자 시스템을 제작하여 직접전단실험을 수행하였다. 전단 상자는 보편적으로 사용되는 기존 전단 시스템(Type-1), 상부 전단 상자 상부에 롤러를 설치한 시스템(Type-2), 그리고 상부 전단 상자를 하부 전단 상자와 일정한 간격으로 고정시킨 시스템(Type-3)으로 구성되었다. 시료는 모래, 실트, 그리고 증류수를 혼합한 시료를 동일한 상대밀도로 냉동 챔버 내에 조성한 후, -5°C까지 동결시키고 직접전단실험을 수행하였다. 이에 따라 동결토에 대한 직접전단실험 시 전단 상자 시스템에 따른 최대전단강도 및 잔류전단강도를 파악하였고, 내부마찰각과 점착력을 산정하여 비교하였으며, 다음과 같은 주요한 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 기존 전단 상자 시스템(Type-1)의 경우, 하부 전단 상자의 원편에 전단력을 가한 결과, 상부 전단 상자의 오른편이 반시계방향으로 회전하며, 전단 상자의 원편이 서로 접촉하여 전단강도가 과도하게 과대 평가되었다. 또한, 상부 전단 상자의 이동에 의해 하중 재하판과 접촉하며 일체 거동을 하여 수직 변위 측정에도 영향을 미쳤다. 이와 같은 이유로 기존 전단 상자 시스템은 동결토와 같이 강도가 큰 시료의 전단강도 추정에 장비적 한계가 있는 것으로 나타났다.
- (2) 상부 전단 상자의 회전을 방지하기 위해 상부 전단 상자와 로드셀 연결부에 롤러를 설치한 경우(Type-2), 최대전단강도가 Type-1에 비해 77.2% 감소하였다. 그러나, 전단 상자의 이동을 억제하는 롤러의 힘이 전단 응력에 추가되어, 상부 전단 상자가 고정되어 있어 롤러의 힘이 제외된 Type-3의 최대전단강도보다 크게 나타났다. 이와 같은 이유로, 롤러를 설치한 전단 상자 시스템은 시료만의 전단강도를 평가하기 어려울 것으로 판단된다.
- (3) 상부 전단 상자의 회전 및 롤러에 의한 영향을 최소화하기 위해 상부 전단 상자를 하부 상자와 일정한 유격을 두고 고정한 경우(Type-3), 전단 상자 간의 마찰력과 롤러의 힘이 제거되어 최대전단강도가 Type-1에 비해 87.2%, Type-2에 비해 43.9% 감소하였다. 또한, 연속체에 해당하는 동결 시료의 최대전단강도는 비선형적으로 증가하였으며, 잔류전단강도는 선형적으로 증가하였

다. 이와 같은 이유로 Type-3 전단 상자 시스템은 동결 시료만의 전단강도를 평가한 것으로 판단된다.

- (4) Type-2의 최대전단강도 및 잔류전단강도의 내부마찰각과 점착력은 Type-3보다 크게 나타났다. 최대전단강도의 경우, 시료의 파괴가 진행되며 부피가 팽창하려는 힘에 의해 상부 전단 상자가 회전하려는 힘이 연직 응력이 작은 조건에서도 반영되었다. 이에 따라 5kPa의 연직 응력 조건에서 최대전단강도의 차이가 발생하여 Type-2의 점착력 성분이 Type-3보다 크게 나타났다. 한편, 잔류전단강도의 경우 시료가 이미 파괴되어 부피가 팽창하려는 힘이 작아지며 5kPa의 작은 연직 응력 조건에서 잔류전단강도가 유사하게 나타났다. 그러나, 잔류전단강도에 영향을 미치는 연직 응력이 증가함에 따라 잔류전단강도가 상부 상자를 회전시키려는 힘이 물러에 의해 Type-2에 추가적으로 측정되며, Type-3와의 잔류전단강도 차이가 증가하였다. 이에 따라 잔류전단강도는 Type-2의 내부마찰각이 Type-3보다 크게 나타났다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원 플랜트연구사업의 연구비지원(13IFIP-B06700801)에 의해 수행되었습니다.

References

- ASTM Standard D 3080-04. (2004), Standard test method for direct shear test under consolidated drained condition, Vol. 04.
- Bolton, M. D. (1986), The strength and dilatancy of sands, *Geotechnique*, Vol. 36, No. 1, pp. 65~78.
- Brady, B. H. and Brown, E. T. (2013), "Rock mechanics: for underground mining", Springer Science & Business Media.
- Chae, D., Kim, Y., Lee, J. and Cho, W. (2014), An experimental study on the creep behavior of frozen sand, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 15, No. 2, pp. 27~36 (in Korean).
- Choi, C. and Ko, S. (2011), A study for predicting adfreeze bond strength from shear strength of frozen soil, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 27, No. 10, pp. 13~23 (in Korean).
- Christ, M., Kim, Y. C. and Park, J. B. (2009), Shear strength of frozen sand, 2009 Conference Co-Hosted by KISTEC & KGES, pp. 394~399.
- Fitzsimons, S. J., McManus, K. J., Sirota, P. and Lorrain, R. D. (2001), Direct shear tests of materials from a cold glacier: implications for landform development, *Quaternary international*, Vol. 86, No. 1, pp. 129~137.
- Hong, Y. H., Byun, Y. H., Chae, J. G. and Lee, J. S. (2015), Shear behavior of sands depending on shear box type in direct shear test, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 31, No. 3, pp. 51~62 (in Korean).
- Jenkins, J. T. (1991), Anisotropic elasticity for random arrays of identical spheres, *Modern theory of anisotropic elasticity and applications*, pp. 368~377.
- Jewell, R. A. and Wroth, C. P. (1987), Direct shear tests on reinforced sand, *Geotechnique*, Vol. 37, No. 1, pp. 53~68.
- Jewell, R. A. (1989), Direct shear tests on sand, *Geotechnique*, Vol. 39, No. 2, pp. 309~322.
- Kwon, T. H. and Cho, G. C. (2003), Omnipresence of strain localization in soils, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 19, No. 5, pp. 199~210.
- Ladanyi, B. (1972), An engineering theory of creep of frozen soils, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 9, No. 1, pp. 63~80.
- Ladanyi, B. and Theriault, A. (1990), A study of some factors affecting the adfreeze bond of piles in permafrost, In *Proc. of Geotechnical Engineering Congress GSP*, Vol. 27, pp. 213~224.
- Lee, J. and Choi, C. (2012), A study for shear strength characteristics of frozen soils under various temperature conditions and vertical confining pressures, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 13, No. 11, pp. 51~60 (in Korean).
- Lee, J. and Choi, C. (2013), Shear strength characteristics of weathered granite soil below the freezing point, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 14, No. 7, pp. 19~29 (in Korean).
- Lings, M. L. and Dietz, M. S. (2004), An improved direct shear apparatus for sand, *Geotechnique*, Vol. 54, No. 4, pp. 245~256.
- Lings, M. L. and Dietz, M. S. (2005), The peak strength of sand-steel interfaces and the role of dilation, *Japanese Geotechnical Society*, Vol. 45, No. 6, pp. 1~14.
- Mikasa, M. (1960), New direct shear test apparatus, In *15th Annual Convention Japanese Soc. Civ. Engrs*, Tokyo, pp. 45~48.
- 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.
- Skempton, A. W. and Bishop, A. W. (1950), The measurement of the shear strength of soils, *Geotechnique*, Vol. 2, No. 2, pp. 90~108.
- Takada, N. (1993), Mikasa's direct shear apparatus, test procedures and results, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 16, No. 3, pp. 314~322.
- 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.
- Wang, J. and Gutierrez, M. (2010), Discrete element simulations of direct shear specimen scale effects, *Geotechnique*, Vol. 60, No. 5, pp. 395~409.
- Yasufuku, N., Springman, S. M., Arenson, L. U. and Ramholt, T. (2003), Stress-dilatancy behaviour of frozen sand in direct shear, In *8th International Conference on Permafrost*, Zurich. Balkema, Rotterdam, pp. 1253~1258.
- Zumdahl, S. S. and Zumdahl, S. A. (2008), *Chemistry* (8th edn). Florence, Kentucky: Cengage Learning.