토석류 유동성 평가를 위한 링 전단시험장치 개발 및 활용

정승원* · Hiroshi Fukuoka** · 송영석***

Sueng-Won Jeong*, Hiroshi Fukuoka**, Young-Suk Song***

Ring-shear Apparatus for Estimating the Mobility of Debris Flow and Its Application

ABSTRACT : Landslides are known as gravitational mass movements that can carry the flow materials ranging in size from clay to boulders. The various types of landslides are differentiated by rate and depositional features. Indeed, flow characteristics are observed from very slow-moving landslides (e.g., mud slide and mud flow) to very fast-moving landslides (e.g., debris avalanches and debris flows). From a geomechanical point of view, shear-rate-dependent shear strength should be examined in landslides. This paper presents the design of advanced ring-shear apparatus to measure the undrained shear strength of debris flow materials in Korea. As updated from conventional ring-shear apparatus, this apparatus can evaluate the shear strength under different conditions of saturation, drainage and consolidation. We also briefly discussed on the ring shear apparatus for enforcing sealing and rotation control. For the materials with sands and gravels, an undrained ring-shear test was carried out simulating the undrained loading process that takes place in the pre-existing slip surface. We have observed typical evolution of shear strength that found in the literature. This paper presents the research background and expected results from the ring-shear apparatus. At high shear speed, a temporary liquefaction and grain-crushing occurred in the sliding zone may take an important role in the long-runout landslide motion. Strength in rheology can be also determined in post-failure dynamics using ring-shear apparatus and be utilized in debris flow mobility.

Key words : Landslide, debris flow, ring-shear apparatus, undrained shear strength, rheology

초 록 : 산사태는 토사, 거석, 유목 등 산사태 물질의 중력사면 이동현상이다. 산사태는 수리학적, 지형학적, 지반공학적 요인에 따라 다양한 한 흐름 및 퇴적특성을 보인다. 흐름특성은 아주 느리게 움직이는 산사태(활동, 이류 등)에서 아주 빠르게 움직이는 산사태(토석사태, 토석류 등)까지 다양하다. 이런 점에서 산사태 발생과 확산 메커니즘의 이해를 위해 전단변형률에 따른 전단강도특성에 대한 연구가 필요하다. 본 연구는 한국형 산사태에 적합한 링 전단시험장치의 개발과 활용성에 대한 것이다. 링 전단시험장치는 산사태 유형별 피해 및 영향성 평가에 사용되는 전단강도를 측정할 수 있으며, 전단속도에 따른 산사태의 유동성을 평가하기 위한 장치이다. 비배수 전단강도 측정용 링 전단시험장치는 기존에 개발된 링 전단시험기의 수정보완형으로 ‘포화-압밀-배수-전단’ 순으로 시험조건을 자유롭게 조절할 수 있다. 링 전단상자내 흙 시료의 전단강도의 정확한 측정을 위해 미끄럼 방지, 밀폐성 및 회전성 향상 기능을 갖춘 시험장치이다. 링 전단 시험장치는 모래와 자갈 시료에 대한 예비실험을 수행하였으며 기존 시험결과와 비교하여 신뢰할 만한 결과를 확인하였다. 회전속도 100 mm/sec 로 구속할 때 배수조건에 따른 일시적 액상화 현상으로 인한 강도저하 현상이 관측되며, 전단면에 따른 입자파쇄 현상이 뚜렷하게 나타났다. 마지막으로 토석류 유변학에 기초하여 링 전단시험장치를 이용한 산사태 유동성 평가기법을 제안하였다.

검색어 : 산사태, 토석류, 링 전단시험장치, 비배수 전단강도, 유변학

* 정회원 · 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원 (Corresponding Author · Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources · suengwon@hotmail.com)

** 교토대학교 방재연구소 교수 (fukuoka@scl.kyoto-u.ac.jp)

*** 정회원 · 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원 (yssong@kigam.re.kr)

Received September 6 2012, Revised November 16 2012, Accepted December 6 2012

1. 서론

산사태는 파괴 전, 파괴 및 파괴 후 거동으로 나뉜다(Leroueil, 2001; van Asch 등, 2007). 산사태는 포화, 압밀, 배수 조건과 함께 지반강도 특성에 영향을 받는다. 따라서 산사태 발생과정에 있어 지반강도는 시간과 변형의 함수이며, 현장조건에 따라 다양한 전단강도의 특성을 가진다. 산사태는 지반변형이 시간의 함수로 표현될 때 아주 느리게 움직이는 산사태(slow-moving landslide)에서 아주 빠르게 움직이는 산사태(fast-moving landslide)까지 다양한 유형으로 분류할 수 있다(WP-WLI, 1995). 아주 느리게 움직이는 산사태는 진행성 연화거동과 관련된 파괴 전 거동에 해당하며, 이때 지반변형에 따른 지반의 전단강도는 산사태 예측과 조기경보시스템에 있어 중요한 자료로 활용 가능하다. 또한 불안정사면의 사전 안정성 평가에 반드시 수행해야 할 연구분야이다. 파괴시점은 산사태 안정성 여부를 결정하거나 지반의 최대저항력을 산정하기 위한 것으로 산림보호와 사방시설 개념설계 및 배치에 중요하게 반영된다. 파괴 후 거동은 사면붕괴(활동) 후 발생하는 토석류에 해당하며 직접적인 인명피해와 주거환경 및 사회기반시설의 파괴로 이어진다. 이와 같이 다양한 원인으로 인해 발생하는 크고 작은 산사태는 국민생활 전반에 걸쳐 경제적 손실과 함께 도심지역과 산악지역의 주거생활권을 약화시키고 있다. 이처럼 예상치 못한 산사태의 사전예측 및 파괴 후 발생될 토석류의 흐름을 평가하기 위해서는 지구과학적 기초연구가 필요하다. 공학적 관점에서 본다면, 이러한 산사태 거동을 해석하는데 필요한 것은 사면붕괴 전후 과정에 있어 신뢰성 있는 전단강도의 측정이다.

링 전단시험장치는 임의의 전단면을 통한 토질의 비배수전단강도와 전단변형률 간의 특성을 규명하기 위한 시험장치이다(Fig. 1). 링 전단시험장치는 산사태 발생부 흙 시료에 무제한 전단변형을 가하여 잔류전단강도를 측정할 목적으로 개발되었다(Hvorslev, 1939; Bishop 등, 1971; Stark와 Vettel, 1992;

Fig. 1. Shear stress vs strain: * τ_{peak} = peak shear stress and $\tau_{residual}$ = residual shear stress.

Hungr와 Morgenstern, 1984; Tika, 1996; Sassa 등, 2004; Sadrekarimi와 Olson, 2010). 세계 표준형으로 사용되는 링 전단시험장치는 Bishop 등 (1971)이 개발한 시험기로 링 전단상자(shear box) 내 토질의 전단저항을 측정할 목적으로 고안되었다. 또한 상기 시험장치는 전단변형률속도에 따른 토질역학적 전단강도 거동을 설명할 목적으로 사용되었는데, Tika 등 (1996, 1999)은 전단변형률속도에 따른 전단밴드(shear band)형성과 이에 따른 전단강도 특성연구를 수행한 바 있다. 과거 많은 시험장치가 점토질 시료에 대한 잔류전단강도를 측정하기 위한 목적으로 개발되었다. 산사태 분야에 있어 Sassa 등 (2004)은 “산사태 움직임은 많은 미지 인자들이 산재하며, 과학적 발전은 새로운 기술의 진보에 의해 가능해야 한다”고 주장한다. 이러한 점을 고려하여 일본 교토대 방재연구소 산사태 팀은 1992년 이후로 다양한 링 전단시험장치를 개발하였다(Sassa 등, 1992, 1997, 2004). 이처럼 링 전단시험장치의 사용 목적은 산사태 전반에 걸친 흙의 파괴거동을 정량적으로 평가하기 위한 것으로 정적·동적 재하방법, 간극수압 변화, 진행성 연화, 액상화 거동 등 다양한 지반조건 재현을 통해 변형과정에 따른 흙의 전단강도 측정할 수 있다. 본 연구는 국내 산사태 특성을 분석하기 위해 한국지질자원연구원(2011)이 개발한 비배수 전단강도 측정용 링 전단시험장치에 관한 것으로 시험장치의 소개, 기술적 문제점 해결방안 및 예비 시험 결과로 나누어 토의하고자 한다.

2. 비배수 전단강도 측정용 링 전단시험장치

비배수 전단강도 측정용 링 전단시험장치(Fig. 2)는 시험장치의 제어부분, 포화-압밀-배수 조절기능, 미끄러짐 방지 및 입자

Fig. 2. Ring-shear apparatus to examine the debris flow mobility

이탈 방지기능으로 구성된다. Fig. 2는 토석류의 유동성을 평가하기 위한 링 전단시험장치의 활용성에 관한 것이다. 토석류는 지질학적, 지형학적, 지반공학적, 수리학적, 유변학적 특성 등에 의존한다. 특히 토석류 유동해석은 항복응력과 점도가 기본적인 입력매개변수(rheological parameters)이며, 이들 두 값은 액성 상태에 따라 다르게 나타난다. 링 전단시험장치에서는 포화, 압밀, 배수 조건 등에 따라 전단강도를 측정할 수 있다. 여기서 얻어진 잔류전단강도는 유변학적 특성에 있어 항복응력에 상응한 값이다. 상기 두 값에 대한 실험적 검증은 본 글에서는 다루지 않는다. 결론적으로 링 전단시험장치를 통해 잔류전단강도를 측정할 수 있다면 전단속도 의존성 유변학적 특성들을 결정할 수 있고, 토석류 흐름특성을 결정할 수 있는 매개변수를 결정할 수 있다.

2.1 시험장치의 구성 및 제어부분

2.1.1 장치의 구성 및 특징

링 전단시험장치의 기본 구성과 제어는 아래와 같다.

(가) 링 전단시험장치는 링 전단상자, 연직하중과 토크 측정장치, 연직변위 및 회전력 측정시스템으로 구성되어 있다. 전단은 토크컨트롤 시스템상에서 가능하며 전단속도 제어가 과거 개발된 시험장치와 동일하게 적용된다.

(나) 링 전단상자는 중공 형상의 링 모양이며, 상부 링과 하부 링으로 구성한다. 일정한 연직응력을 가하고, 고정된 상부 링과 맞닿은 하부 링이 시계방향으로 무한회전하며 토크를 측정한다(Fig. 3).

(다) 링 전단상자는 전단상자의 비배수 상태를 유지할 수 있으며 하부 링의 저속회전에서 고속회전까지 수평으로 원활하게 회전한다. 회전력은 공시체의 전단변형을 유발하기 위한 것으로 이때 임의의 연직하중은 일정하게 재하한다. 하부 링이 회전하는 동안 공시체와 전단상자 상부 링과 하부 링 아래면은 미끄러짐 현상을 방지하기 위해 거친면(샌드페이퍼, 톱니모양의 거친 표면 등)을 설치한다.

(라) 시험대상 토질은 세립토와 조립토의 전단강도 측정이 가능하도록 충분한 회전력과 안정성이 보장되도록 제작하였다. 링 전단상자는 탈부착이 용이하며 조립토 전용 전단상자의 최대 크기는 250(외경)×110(내경)×100(높이) mm이다.

(마) 전단변형률 속도는 0.001 ~ 180 mm/sec 범위에서 시험이 가능하다. 재하는 전자식 로드셀로 감지하고, 서보모터 및 모터컨트롤러에 의하여 임의의 지정시험 속도에 따라 일정속도를 유지한다.

(바) 간극수압은 간극수압 게이지를 통해 측정한다. 게이지는 전단상자의 상부 링과 하부 링의 원주 벽면을 따라 설치된 필터와 연결되어있다. 비배수 조건에서 간극수압(≤ 100 kPa)과 전단강도 측정이 가능하다. 연직 재하응력은 0.01 ~ 7.0 kgf/cm² 범위 내에서 변위는 최대 50 mm까지 측정된다. 하부 링의 회전시 재하응력은 최대 10 kN이다. 배압검출 고감도압력 센서는 최대 500 kPa까지 측정한다.

본 시험장치는 일본 교토대학교 방재연구소 산사태 팀의 협조하에 제작된 것이다. Table 1은 시험장비의 개발에 있어 차이점과 독창성이다. Table에서 밝힌 바와 같이, 가장 큰 차이

Fig. 3. Ring shear box

Table 1. Features of DPRI and KIGAM ring shear apparatus

Item	DPRI (Japan)	KIGAM (Korea)
Vertical stress controlled	O	O
Shear stress controlled	O	X
Shear speed controlled	O	O
Range of shear speed	33~300 cm/sec	0.01~18 cm/sec
Friction controlled	O	X
Gap controlled	O	X
Residual state check	O	O
Pore pressure measurement	O (2 sensors, <500kPa)	O (1 sensor, <100kPa)
Vertical displacement	O (automatic)	O (manual)
Drainage (undrained condition)	O	O
Materials	Clay to Gravel (<5mm)	Clay to Gravel (<5mm)
Ring-shear box (size)	inner 270mm, outer 350mm	inner 110mm, outer 250mm
Rough surfaces (sides)	-	O

점은 마찰력 보정과 갭 컨트롤 문제이다. 이것은 본 시험기만의 문제가 아니며 시험장비 개발에 있어 공통적인 사항들로 지속적인 보완이 요구된다. 본 시험장치의 독창성은 미끄러짐 방지기능, 밀폐성 및 회전성 강화기능 등을 들 수 있다. 또한 단계별 전단회전 속도를 증가 또는 감소시킴으로써 전단속도에 따른 전단강도 산정이 가능하다.

2.1.2 포화, 배수 및 압밀 조절기능

산사태의 위험성을 예측하고 사전재해 영향권을 검토하기 위해서는 지반의 토질과 강도특성을 면밀히 살펴야 한다. 산사태는 아주 느리게 움직이는 사면붕괴에서 아주 빠르게 움직이는 토석류까지 다양한 산사태 유형을 가지기 때문에, 산사태 위험영향권 평가 및 해석방법은 발생유형별 포화, 압밀 및 배수 조건에 따른 간극수압 발생과 전단강도 크기에 영향을 받는다. 상기 개발된 비배수 전단강도 측정용 링 전단시험장치에서는 산사태 발생이 가능한 국내 지형과 지질특성에 따라 다음과 같은 네 가지 조건들을 고려한다.

(가) 포화와 불포화 조건

국내에서 발생하는 사면붕괴는 강우에 기인한 지반의 포화도와 밀접한 관련이 있다. 따라서 반복강우와 지속강우에 따른 지반 파괴형상을 알기 위해 포화조건을 다르게 제어할 필요가 있다. 포화는 상하부 링의 다수의 유입부를 통해 물을 유입시키거나 배출시킬 수 있고 시험자가 원하는 임의의 시간 동안 포화가 가능하다. 토질의 부분 포화와 불포화 상태를 재현하고자 할 때, 하부 링을 통한 물의 유입을 통해 일정량의 물만 유입시킨 후 파괴시험을 수행할 수 있다.

(나) 압밀과 비압밀 조건

현장 토질특성을 재현하기 위해 전단상자 내에 위치한 흡사료에 대해 시간에 따른 압밀을 가한다. 전단상자 상부에 위치한 삼축의 가압판(Fig. 3c)을 이용하여 일정시간 동안 공기압을 가하고 전단시험을 수행하게 된다. 포화와 압밀 정도에 따른 전단강도의 변화를 관측할 수 있다. 링 전단상자는 완전히 재성형된 시료에 제한적으로 적용할 수 있는 시험장치이므로, 자연상태의 시료를 채취하고 압밀 조건을 제어할 수 있는 불교란 시료 채취기의 개발이 필요하다. 특히 포화와 압밀 단계를 통한 현장과 동일한 조건을 재현할 필요가 있다. 포화단계는 점토성분이 많은 시료에 대해 상대적으로 긴 포화시간(대략 7일)이 소요된다. 조립토가 많은 현장토의 경우 최대 1일의 포화시간을 가지는 것을 원칙으로 한다. 압밀단계는 10 sec 내외에서 몇 일까지 다양한 하중전달시간을 선택할 수 있다. 포화와 압밀단계가 완료되면 현장 조건에 부합되는 간극수압을 가한다.

(다) 배수와 비배수 조건

상하부 링의 물의 유입과 유출 밸브의 개폐를 통한 전단상자 내 공시체의 배수와 비배수 조건을 재현한다(Fig. 4). 시험에 있어 실제로 가장 어려운 부분은 전단시험 동안 비배수 상태를 유지하는 것이다. 빠르게 회전하는 전단상자 하부링은 원심력으로 인해 상부 링과 하부 링의 자연분리를 유발한다. 상하부 링을 강제로 조이게 되면 링 사이에서 발열과 마찰로 인해 심한 마모가 발생한다. 따라서 일본 시험기에서 사용되는 테프론(Polytetrafluorethylene) 소재의 강한 마모저항, 낮은 마찰저항과 실링재가 요구된다. 실링재의 수밀성과 기밀성은 간극수압 결정에 중요하게 작용하기 때문이다.

Fig. 4. Pore water pressure measurement in a shear box

Fig. 5. Schematic diagram of KIGAM ring shear apparatus

(라) 변형률속도 제어에 따른 전단강도

산사태 발생유형에 대한 이해는 변형률속도의 제어를 통해 가능하다. 아주 느리게 움직이는 사면붕괴에서 아주 빠르게 움직이는 토석류까지 전단변형률에 따른 전단강도를 측정할 수 있으며, 일정한 변형률속도 증분비에 따른 전단강도의 변화(흐름곡선 기울기는 점도)를 조사할 수 있다. 이와 관련하여 링 전단시험장치를 통한 토석류 평가기법 제안(4.2절, Fig. 14 참고)에서 추가 설명하기로 한다.

Fig. 5은 본 시험장치의 계통도이다. 시험장치는 시료준비에서 포화-압밀-배수 조절기능을 갖춘 자동제어 시스템이며, 사용자 친화적인 시스템을 구축하여 자료의 자동저장과 연산을 거쳐 실험결과와 출력과 확인이 동시에 모니터링 가능한 시스템으로 구성되었다. 시험장치는 프로그램에 명령된 값은 서보컨트롤(servomotor)에 전달되고 서보모터(servomotor)와 서보

밸브(servo valve)를 제어하여 수평부의 회전과 수직부의 응력을 제어한다. 또한 센서 읽음 값은 아날로그-디지털변환을 통해 컴퓨터에 저장된다.

2.2 미끄러짐 방지기능을 통한 전단강도 측정

링 전단시험장치는 지반변형과 변형속도에 따른 흙의 전단강도를 측정하고자 할 때 실험오차를 최소화하는 것이 무엇보다 중요하다. 하지만 기존의 링 전단시험장치(Bishop 등, 1971)는 전단상자의 회전부(링)과 공시체 사이에 존재할 측면 미끄러짐 현상을 전혀 고려치 않는다(Fig. 6a). 회전의 크기에 관계없이 흙과 실린더 벽면사이 미끄러짐 현상이 발생할 수 있다. 이것은 곧바로 산사태 특성을 결정할 전단강도 측정에 신뢰성을 떨어뜨리는 이유가 된다. 유변학적 관점에서 이와 유사한 국부 전단현상(shear localization)을 설명한 바 있다(Rodts 등, 2005;

Fig. 6. Ring shear box: prevention of wall-slip and shear banding

Cousot 등, 2009; Ovarlez 등, 2009). 이것은 토석류 모형시험 장치에서 관측된 것처럼, 완전 재성형된 흙의 중력흐름시 전단부(sheared regime)와 비전단부(unsheared regime)가 동시에 관측되는 현상과 같다. 미끄럼 방지기능은 속도에 따른 산사태 거동해석시 중요하다. 특히 아주 느리게 움직이는 산사태의 경우 미소변형에 따른 시간별 위험시기 예측이 중요하며 이때 보다 신뢰성 있는 전단강도의 측정이 필요하다. 이를 위해 배수 조건에 관계없이 링 전단상자 회전시 발생하는 토크의 읽음에 대한 손실부분을 최소화하고, 링 전단상자의 내측과 외측의 벽면에 톱니모양의 거친 표면(라펠라형, V-자 홈 새기형 또는

오목한 요철형 등)을 설치하여 전단시험 동안 전단상자 측면과 상하부 벽면 미끄러짐을 최소화하여야 한다(Fig. 6b, 6c).

중공형 링의 공시체는 외측 실린더와 내측 실린더의 차이로 일정한 간격을 가진다. 이때 거친 표면은 Fig. 6에서처럼 일정한 간격 d (높이와 폭 크기는 모두 동일)를 가지며 간격 d 는 최소 $D/10$ 이하로 간주하여 설치한다. 공시체 크기에 비해 상대적으로 작은 면적을 고려함으로써 계측상에 크기효과는 무시한다. 예를 들어, 전단강도는 공시체가 위치한 실린더내에서 측정되며 이때 포물선 속도분포(velocity profile)는 편의상 직선으로 간주하여 계산된다(Fig. 6d). 전단회전속도가 빨라지면 빨라질

수축 회전부의 가까운 곳에 위치한 벽면과 공시체 사이에서 미끄러짐 현상이 두드러지게 된다. 전단밴드(shear banding) 현상이 발생하는데 일부는 전단되고 또 다른 부분은 부분적으로 전단된다. 이때 d_{a} (외측 실린더의 회전속도에 따른 변형구간)과 d_{rd} (시료의 부분 변형이나 무변형 구간)는 주어진 회전속도와 벽면의 마찰면의 구성에 따라 달라진다. 이러한 이유에서 전단 강도를 측정하고자 할 때 전단상자 내에 발생할 시료의 미끄러짐 현상을 고려해야 한다.

2.3 입자이탈 방지기능을 통한 전단강도 측정

기초적이지만 간과하기 쉬운 문제가 회전이 일어나는 동안 전단상자의 밀폐성과 회전성이다. 과거 링 전단시험장치의 전단상자는 상부 링 또는 하부 링이 회전하면서 흙의 전단강도를 측정하는데 이때 전단상자는 완전 밀폐가 요구된다. 실제 실험

실에서 가장 큰 어려움 중 하나는 바로 빠른 전단속도에 대한 공시체내 존재하는 물이 밖으로 나오지 못하게 막아주는 것이다. 이런 이유 때문에 전단회전시 상부 링과 하부 링이 서로 분리되는 것을 방지하기 위해 두 링을 강제적으로 고정시키게 된다(Fig. 7). 상부 링에 위치한 고정핀(Fig. 7a, 7b)을 하부 링 아래로 고정시킨 후 전단시험을 수행하게 된다. 하지만 상부 링과 하부 링이 서로 맞닿고 회전을 가하면 링과 링 사이에 먼 마찰력(side friction)의 발생으로 인해 전단강도 결정에 영향을 미친다.

일본 교토대학교 방재연구소에서는 전단상자의 상하부 링에 경질 고무판(rubber edge, Fig. 7 참조)을 위치하여 과부하(회전성 향상)와 입자이탈 현상을 최소화(밀폐성 향상)하고자 하였다. 상부 링과 하부 링을 고정하는 힘을 너무 적게 하면 회전속도를 향상시킬 수는 있으나, 링들이 분리되기가 쉽다. 또한 링 전단상자 내부에 위치한 흙 입자들이 회전력 증가에 따라 링 밖으로

Fig. 7. Improvement of sealing and rotational capacity in a ring shear box

이탈하려는 경우가 빈번하다(Fig. 7c). 이러한 경우, 실험을 수행하기도 어렵거나 신뢰성 있는 강도를 얻기도 힘들다. 이러한 이유로 상대적으로 큰 입자를 가진 시료를 제외하고는 오링을 채택하지 않는다. 링을 고정시키는 힘을 너무 강하게 두면 회전속도를 제어할 수 없을뿐더러 시험기의 손상을 초래할 수 있다(Fig. 7d). 특히 이때 입자의 작은 알갱이가 링과 링 사이에 위치한 오링(합성고무, 합성수지 등으로 만들어진 단면이 원형인 링)으로 이동하여 잘게 부서진다. 그리고 저항성이 과대하게 증가(토크의 증가)하는 원인으로 작용한다. 따라서 링 회전시 상하부 링 밖으로 입자의 이탈을 방지하고 오링의 고무 경질에 따른 마모를 최소화하는 장치가 필요하다.

비배수 전단강도 측정시 시료를 담은 링 전단상자 내에 흙 입자가 실린더 밖으로 이탈하는 현상을 최소화하여야 한다. 입자이탈을 효과적으로 방지하고 정확한 전단강도를 측정하기 위해서 실린더 상부 링과 하부 링 사이 맞닿은 면에 추천되는 경질 고무와 3중 오링을 설치하여 기계적 오차를 최소화할 수 있다(Fig. 7e). 상기 언급된 오링을 사용할 경우 발생하는 문제점들을 보완하기 위해 실질적인 실험에서는 Fig. 7c(3)의 디자인을 채택하였다.

3. 시험재료 및 방법

국내 지질 및 지형특성을 고려한 산사태 흐름해석을 수행하기 위해서는 우선적으로 토석류 발생지역에서의 지반강도특성을 분석하고, 이들의 토질·지반공학적 특성 간의 상관관계를 정의하여 토석류 유동성을 대표하는 유동특성모델을 제시하여야 한다. 개발된 시험장치의 신뢰성을 확보하기 위해 본 연구에서는 입자가 균질한 모래와 자갈을 사용하여 일정 전단변형률 제어조건에서 비배수전단강도를 측정하였다.

3.1 시험재료

시험재료는 입자크기가 2 mm 보다 작은 모래와 2 mm 보다 큰 자갈로 구분하였으며, 입자크기효과와 비배수상태에서의 전단강도 특성을 조사하고자 하였다(Fig. 8).

Fig. 8은 전단시험을 위해 사용된 시료의 준비방법이다. 2 mm 보다 조밀한 모래의 경우 상·하부 전단상자 틈으로 입자들이 들어가는 것을 방지하기 위해서 하부 마찰(고정핀 구속력)을 더욱 크게 하였다. 또한 상·하부 전단상자 틈으로 입자(알갱이)들이 들어가는 것을 방지하기 위하여 2 mm 이상의 자갈을 선택하여 시험을 수행하였다. 다시 말해, 전단상자의 상부 링과 하부 링 사이의 틈을 최대한 적게 하여 밀폐성을 높이려 하였으며, 이로 인한 전단저항과 전단회전에 기인한 간극수압의 변화를 관측하고자 하였다. 다만 빠른 토석류 발생조건과 사면활동 면에서 부분적으로 발생할 수 있는 액상화에 기인된 사면붕괴를 재현하기 위해 빠른 전단변형속도를 적용하였다.

3.2 시험방법

링 전단시험은 다음과 같이 단계별로 수행한다.

(가) 시료는 현장습윤토(moist placement)와 건조토(dry deposition)로 구분하여 링 전단상자 내에 위치한다. 일반적으로 건조토에 대한 방법을 선호한다. 자연건조 또는 노건조를 이용하여 건조된 시료를 실린더 내에 층별로 쌓는다. 과압밀된 현장토 조건을 재현하고자 할 때 실린더 내에 층별로 다짐을 가하여 임의로 중량을 조절할 수 있다. 본 연구에서는 모래와 자갈을 실린더 내에 위치하고 물을 유입하는 방법을 사용하였다.

(나) 시료를 전단상자에 위치하고, 원하는 포화와 압밀상태를 선택한다. 포화방법은 전단상자의 밀폐 후 하부 링의 물 유입부를 통해 물을 주입하고(Fig. 3c), 상부 링과 상부 가압판에 설치된 다수의 물 유출부에서 물이 빠져나오는 것을 확인한다.

Fig. 8. Materials used: (a) sands and (b) gravels

포화도는 Sassa 등 (1988, 2004)에서 제안된 방법을 따랐다. 시료의 포화도는 간극수압 매개변수를 사용하여 결정한다. $B_D = \Delta u / \Delta \sigma$ 로 나타내며, Δu 와 $\Delta \sigma$ 은 각각 간극수압과 연직응력의 증분이다. 비배수 상태의 전단시험은 $B_D \geq 0.95$ 조건에서 수행된다.

(다) 과압밀과 조밀한 층을 이룬 토층의 강도특성을 조사하기 위해서는 전단하기 전에 압밀과정을 거친다. 하지만, 본 연구에서는 모래와 자갈에 대해 주어진 사면파괴 활동면의 전단강도를 측정하기 위한 실험을 수행하였다. 상부 링의 가압판을 통해 시험자가 원하는 시간 동안 압밀시간을 조절할 수 있다.

(라) 간극수압계, 변위계, 하중계 등 측정하고자 하는 센서들을 결합부에 연결한다. 컴퓨터 프로그램을 통한 회전제어속도를 선택한다.

4. 결과 및 고찰

4.1 전단시험결과

전단강도 측정은 링 전단상자 상부에 위치한 두 개의 로드셀에 의해 측정된다(Fig. 2와 3). 전단변형을 가할 때 전단강도, 간극수압 및 수직변위를 측정한다. 전단 동안 측정된 상기 시험 조건에 필요한 기계적 사양을 충족할 때 전단강도는 상부 링과 하부 링의 연결부에서 발생하는 면 마찰력을 차감된 값이다. Fig. 9는 실험 전 비어있는 전단상자 상하부에 위치한 고무 링에 회전이 가해질 때 발생하는 전단저항(마찰력)의 측정결과이다. 고정 핀의 마찰저항(rubber-edge fixed)은 50 ~ 200 kPa 범위 내에서 측정하였으며, 회전속도는 100 mm/sec로 동일하게 하였다. Fig. 7c에서 설명한 것과 마찬가지로 고정 핀을 사용하여 상부 링과 맞붙은 하부 링이 회전하는 동안 서로 분리되는 것을 막을 수 있다. 시험시작 전에 전단 동안 발생하는

Fig. 9. Calibration of shear resistance resulting from the friction of the rubber seal at the edges of the shear box

기계적 마찰손실을 확인하여 전단강도 측정에 신뢰성을 높이고 측정하고자 하는 흙 시료의 전단저항 값을 보정하기 위해서 상기 고무 링에 의해 야기된 마찰저항력을 차감해 주어야 한다. 하부 전단상자에 위치한 고무 링은 하부 전단상자에 고정인 경우와 고정되지 않는 경우로 나누어서 시험을 수행하였다. 일본 산사태 방재연구소의 링 전단시험기에서 보정된 것과 마찬가지로 측정된 마찰력은 실험초기 일정하지 않은 값을 가진다. 전단을 시작한 시점으로부터 입자의 파쇄와 재배열로 인해 대략 50 ~ 100 초까지 다양한 측정값을 보이지만, 전단회전시간의 증가에 따라 일정한 전단저항(25 ~ 30 kPa)을 보임을 알 수 있다. 결과적으로 실험적 목적에 따라 마찰력은 일정하게 고려하여 차감된 전단저항을 측정할 수 있다. 또한 고무 링이 닿는 면적이 작으면 작을수록 실험적 오차를 줄일 수 있다. 하지만, 너무 작은 고무 링은 비배수상태를 유지하기 어렵고 전단상자의 분리를 야기하는 시킬 수 있으므로 주의가 필요하다. 강도증가분을 확인하기 위해서는 이상기체에 대한 유변학적 실험법을 적용할 수 있다. 전단상자에 흙 대신 증류수를 유입하고 전단변형률속도에 따른 전단강도를 측정한다. 이상유체 거동에 속하는 증류수는 전단변형률속도에 대해 전단강도가 점진적으로 증가하는 뉴턴거동을 보이고 전단시험을 통한 점도특성을 확인할 수 있기 때문이다.

Fig. 10~13은 모래와 자갈에 대한 링 전단시험 결과이다. 일정한 연직응력(100 kPa)과 전단변형률에서 배수조건에 따른 전단시험을 수행하였다. 입도가 균질한 주문진 표준사와 입자크기가 2 mm인 자갈에 대해 하부 링이 회전하는 동안 간극수압, 수직변위, 연직하중과 전단토크를 측정하였다. 시험장치에 무리가 가지 않는 전단회전속도를 적용하기 위해 모래와 자갈 모두 최대 전단회전속도를 100 mm/sec로 고정하였다. Fig. 10은 모래의 배수(a, b)와 비배수(c, d) 조건에서 수행한 링 전단시험의 결과이다. Fig. 10(b, d)는 10(a, c)에서 관측된 파괴시점에 해당하는 아주 작은 전단변형구간에 대한 실험결과를 자세히 보인 것이다. 배수조건에 관계없이, 모래의 경우 전단회전이 시작되는 초기구간(4초 이내)에서 최대전단강도에 도달함을 알 수 있다. 이것은 링 전단상자의 정해진 회전부의 국부적인 액상화에 기인하여 일시적 강도저하가 발생하는 것으로 판단된다. 흥미로운 점은 빠른 회전속도와 물의 이동이 자유로운 배수 조건에서 링 전단상자내의 흙 입자들은 강도증가를 수반한다. 최대전단속도에 따른 전단상자 내부에 위치한 시료의 높이 변화는 0.5 mm 이내이다. 전단속도가 200 sec에 도달한 시점을 기준으로 잔류전단강도에 도달한 것으로 판단된다. 주어진 배수 조건에서 링 전단회전부(하부 링)를 최대한 빠르게 회전시킴으로써 동일 조건하에서 전단시험을 수행하고자 하였기에 다른 실험결과에서 보인 것과 다소 차이를 보일 수 있다. 예를 들어,

Fig. 10. Drained (a-b) and undrained (c-d) behavior of sands at a shear speed of 100 mm/sec

Fig. 11. Formation of shear zones in sand

Wang 등 (2002)이 실험한 결과는 최소 전단변형률에 해당하는 0.02 mm/sec를 적용하여 배수조건을 충족시키고자 한 반면, 본 연구는 일본의 실험과 비교하여 200배에 해당하는 높은 전단회전속도(100 mm/sec)에 대한 시험결과로써 동일한 시험 조건에서 배수상태와 흙 입자의 크기에 따른 링 전단시험의 결과를 살펴보고자 한 점에서 원천적으로 큰 차이를 가진다. 비배수 조건에서도 체적의 변화없이 초기 전단강도의 발생시 간극수압의 상승이 뚜렷하다. Fig. 11은 실험이 종료된 이후 링 전단상자 내부의 모래 시료의 상태를 살펴본 것이다. 링 전단상자 내에 링 하부, 회전부와 링 상부로 구분되며, 시료의 체적변화는 배수조건에 관계없이 상대적으로 적응을 알 수 있다.

Fig. 12는 2 mm이상의 입자크기를 가진 자갈에 대한 전단실험

험의 결과이며, Fig. 10과 마찬가지로 배수와 비배수 조건에서 동일한 연직하중(100 kPa)과 전단속도(100 mm/sec)에 대한 실험 결과이다. 입자크기가 커질수록 상대적인 토크 읽음에 있어 민감도가 달라짐을 알 수 있다. 모래의 경우와 마찬가지로, 전단강도는 빠른 전단회전 속도에 대해 유사한 변화특성을 보인다. Fig. 12a는 시험초기 전단강도의 변화는 모래에서 관측된 것과 비슷하게 최대전단강도를 보인다. 정점을 지나 빠르게 잔류강도 상태에 도달됨을 확인할 수 있다. 또한 최대 전단강도를 보인 후 변형이 지속됨에 따라 전단상자 내에 위치한 시료의 체적이 확연히 감소함을 알 수 있다. 특이한 점은 전단 회전면에서 입자파쇄 현상이 뚜렷한 것이다. 문헌에 따르면, 비배수 상태에서 전단에 기인한 입자파쇄 현상은 과잉간극수압의 상승과 관련된다(Wang 등, 2002). 또한 입자파쇄 현상은 배수조건

Fig. 12. Drained (a-b) and undrained (c-d) behavior of gravels at a shear speed of 100 mm/sec

Fig. 13. Shear banding and grain crushing: drained condition (a-c) and undrained condition (d-f)

에 따라 링 전단상자 내 체적감소 현상의 원인이 된다. Fig. 13은 실험이 종료된 후에 살펴본 링 전단상자 내부의 모습이다. Fig. 13(a-c)는 배수 시험의 결과이고, Fig. 13(d-f)는 비배수 시험에 대한 결과이다. 배수상태에서 전단시험이 수행되었을 때, 시료의 체적변화는 전단이 가해진 시간(600 sec)에서 최대 15

~20% ($300 \sim 500 \text{ cm}^3$)의 체적 감소가 발생하였다. Fig. 11 (c-d)와 12(d-f)에서도 알 수 있듯, 비배수 상태에서 전단이 시작되는 시점에서는 자갈 입자들간 상호 맞물림이 작용하여 초기 다일러턴시 현상이 발생하지만, 체적의 변화는 보이지 않는다.

상기 시험결과는 시험기의 제작이 완성된 후 단순한 시험 조건에서 수행된 비배수 전단강도 측정결과이다. 앞으로 다양한 산사태 재해 현장의 자연시료에 대한 실험결과를 수행함으로써 보다 신뢰성 있는 전단강도의 측정이 필요하다.

4.2 링 전단시험장치를 이용한 토석류 유동성 평가기법 제안

산사태는 강우, 지진, 해빙 등 다양한 재해요인에 의해 발생하지만, 국내 산사태는 6-8월 사이 국지성 호우에 의한 경우가 대부분이며, 산사태 발생유형은 병진활동(translational slides), 토석사태(debris avalanche) 및 토석류(debris flow) 등이다. 국내의 경우 가장 많은 사면붕괴 형태는 얇은 심도의 붕괴토가 기반암 위에서 미끄러지듯 발생하는 사면파괴(shallow landslides)이다. 산사태의 유동성은 지질학적, 지형학적, 지반공학적, 유변학적 특성들에 의해 결정된다. 산사태는 흙 입자의 재배열로 인한 전단강도 손실의 결과이며, 강도저하는 토질의 비배수 전단강도로 표현된다. 완전한 재성형된 흙은 점진적 함수비 증가로 인해 액체상태로 바뀌며 이때 유체는 ‘항복응력(yield stress)’을 가진다. 따라서 산사태를 평가하기 위해서는 토질특성을 알고 비배수 전단강도(항복응력)를 결정하는 것이 중요하다.

Fig. 14는 링 전단시험을 통해 얻을 수 있는 예상결과이다. Fig. 14(a)와 14(b)는 일반적인 비 뉴턴 유체(non-Newtonian fluids)에서 관측되는 전단응력과 전단변형률속도 간 상관관계이다. 전단응력은 전단변형률속도와 선형관계에 있다. 여기서 전단변형률속도는 유변물성실험장치(rheometer)의 쿠텔(Couette) 시스템에서 $\dot{\gamma} = dv/dy = \text{속도/거리} = (\text{m/s})/\text{m} = 1/\text{s} = \text{s}^{-1}$ 로 정의된다. 최대전단속도를 적용할 경우, 전단변형률속도는 $\dot{\gamma} = v_{\max}/dy$ 로 표현할 수 있다. 동일한 방법으로

링 전단시험장치에서 전단변형률속도를 계산한다. Fig. 14의 SOLID에서처럼, 원지반 불교란시료에 대한 전단응력의 증가비는 전단변형률속도의 로그함수로서 10%이다. 하지만, 유체처럼 거동하는 완전히 재성형된 흙은 Fig. 14의 FLUID처럼 주어진 전단변형률속도에 대해 전단응력의 증분이 크다. 이것은 흙이 SOLID에서 FLUID 상태로 변하는 이행(transition)에 해당하며 ‘전단변형률속도 의존성 전단응력’구간이다. SOLID 구간은 육안으로 확인할 수 없는 아주 느리게 움직이는 진행성 연화의 특성이 강한 산사태의 움직임에 해당하며, 원지반이 빠른 재성형을 통해 액화되는 과정을 나타낸다(Jeong 등, 2010). Fig. 14(b)는 FLUID 구간을 보다 자세히 나타낸 것으로 완전 유체화된 흙의 유동성을 표현하는 방법으로 일반적으로 흐름곡선(flow curve)이라 명명한다. Fig. 10(b)에서 y-절편은 항복응력, 기울기는 소성점도(plastic viscosity)이다. 여기서 얻어진 항복응력은 토석류의 이동거리에, 소성점도는 토석류의 이동속도에 각각 영향을 미친다(Locat와 Demers, 1988; Locat, 1997; Jeong, 2010).

Fig. 14(c)는 링 전단시험장치를 통해 얻을 수 있는 시험결과이다. Fig. 14(c)에서 표기된 일정 전단변형률속도 SR(i)에 대해 일정한 연직하중을 흙에 가하고, 배수조건을 결정한 후 전단강도를 측정할 경우이다. 이때 사면붕괴는 흙의 입자-입자 간 아주 작은 구조적 변화에서 시작하여 파괴활동면 형성에 따른 파괴시점에 가까워 질수록 그 변화의 폭이 커지게 된다. 파괴시점에 도달한 시료는 간극수압이 크게 발생하게 된다. 간극수압의 소산은 붕괴단계에서 흐름단계로 발전을 의미한다. Fig. 14(c)의 D처럼, 이때 전단장치는 한방향으로 무제한 회전하므로 시료의 변형은 일정하게 증가한다. Fig. 14(c)에서 U와 T는 흙이 전단되는 동안 간극수압과 전단저항의 변화에 해당된다. 따라서 전단변형률속도를 점진적으로 크게 적용할 경우

Fig. 14. Estimation method for debris flow mobility: (a) shear stress vs shear rate, (b) flow curve and (c) test results from ring shear apparatus (N = normal stress, U = pore water pressure, T = shear resistance and D = displacement)

Fig. 14(b)에서처럼 SR(ii)와 SR(iii)과 같은 흐름곡선 결과를 얻을 수 있다. 여기서 얻어진 유변학적 특성들은 토석류 흐름특성 평가에 활용할 수 있다.

5. 링 전단시험장치의 활용성 및 한계점

산사태의 예측 및 토석류의 유동성을 평가하기 위한 “비배수 전단강도 측정용 링 전단시험장치”가 개발되었다. 현재 개발된 시험장치는 Bishop 등 (1971)이 개발한 완전 배수형 링 전단시험장치의 보완형으로 과거 시험장치가 일정한 변형률속도에 따른 잔류토의 전단강도를 측정하도록 설계한 반면, 상기 개발된 링 전단시험장치는 산사태와 토석류의 강도특성을 조사하기 위해 현장조건을 충족시켜 전단강도와 변형 간의 특성을 규명할 수 있다. 과거 링 전단시험장치는 시간에 따른 강우침투 효과와 지반의 포화 정도를 고려하기 어려웠다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 (i) 포화와 부분포화, (ii) 압밀과 비압밀, (iii) 배수 및 비배수 등을 고려하고 변형률속도 제어를 통한 전단강도의 측정이 필요하다. 다양한 지구과학적 시도에도 불구하고, 아직 풀어야 할 숙제가 산적하다. 속도의존성 산사태 거동해석, 입자크기에 따른 전단강도의 특성, 반복하중시험을 통한 지진해유발 산사태 거동해석 등이다. 서언에서 살펴본 것처럼, 산사태는 다양한 형태로 존재한다. 산사태 흐름특성을 고려하면, 활동(slide), 토석사태(debris avalanche) 및 토석류(debris flow)로 간략히 구분할 수 있다. 아주 느리게 움직이는 산사태는 이탈리아(Picarelli 등, 2005; Comegna 등, 2007)나 프랑스(Malet 등, 2005; Van Asch 등, 2007; Jongmans 등, 2009) 등에서 자주 발생하는 크리이프(creep)나 이류(mud flow)처럼 점성토 함량이 상대적으로 높은 지역에서 많이 발생한다. 10^{-6} cm/s 이하의 속도에 해당하는 산사태를 말하며 진행성 사면파괴는 육안으로 식별하기 쉽지 않다. 이처럼 상대적으로 아주 느리게 움직이는 산사태를 묘사할 경우, 전단속도의 제어가 중요하며, 이 부분에 높은 신뢰성의 시험장치 개발이 요구된다. 일반적인 중간 정도의 산사태 이동속도는 0.1 cm/s 전후이며, 이보다 빠르게 움직이는 산사태의 거동을 아주 빠르게 움직이는 산사태라고 명명하며 최소 5 cm/s이상의 속도를 가진다. 후자의 경우 산사태는 사질토의 액상화 거동처럼 짧은 시간에 잔류전단강도를 도달하는 경우가 많다. 토석류는 유체처럼 거동하며 속도가 10 m/s보다 높은 경우가 많다. 하지만, 개발된 시험장치는 주어진 최대 전단변형률속도가 180 mm/sec로 일본에서 개발된 전단시험장치에 비해 상대적으로 느린 속도를 가진다. 따라서 아주 빠르게 움직이는 토석류에서 필요한 전단강도는 제한적으로 사용가능하며, 때때로 외삽법(extrapolation)을 통한 강도특

성 분석이 요구될 수 있다.

전단상자 크기제한으로 인해 세립토와 조립토 범용의 시험기에 반해 시료의 준비과정에서 조심스러운 절차가 필요하며 전단강도 측정에 제한적으로 사용된다. 특히 아주 느리게 움직이는 이류와 점성이 강한 흙에 대한 변형률 제어 및 강도특성에 대한 연구가 지속적으로 진행되어야 할 것으로 판단된다. 또한 지진유발 산사태 및 지반붕괴 연구에 활용할 수 있도록 단계별 반복하중 재하가 가능한 시스템 개발이 이루어져야 할 것이다.

6. 결 론

본 연구는 한국형 산사태 재해 발생 메커니즘 규명 및 방재연구를 수행하기 위한 목적으로 개발된 링 전단시험장치의 개발과 예비시험결과에 관한 것이며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 링 전단시험장치는 산사태에 따른 피해 및 영향성 평가를 위해 사용되는 강도함수를 측정하기 위한 장치로서, 포화압밀배수 조절기능을 통한 아주 느리게 진행되는 사면붕괴에서 아주 빠르게 움직이는 토석류까지 다양한 산사태 유형별 방재대책과 재해평가가 가능한 시험장치이다.
- (2) 본 연구에서 사용된 링 전단시험장치는 포화, 배수 및 압밀 조절기능과 미끄러짐 방지기능 개선을 통한 흙의 정확한 전단강도를 측정할 수 있다. 기존의 잔류전단강도 측정용 링 전단시험장치의 문제점을 보완하여 전단상자의 누수현상, 입자이탈현상, 그리고 전단활동면의 마모현상을 최소화할 수 있는 시험장치임을 입증했다.
- (3) 시험기의 신뢰성 확보를 위해 균질한 입자구성을 가진 모래와 자갈에 대한 링 전단시험을 수행하였다. 시험결과에 따르면, 모래와 자갈의 경우 배수조건에 상관없이 빠른 전단변형속도(즉, 100 mm/sec)에 대한 전단강도는 전단면에서의 일시적 액상화 현상을 보인다. 이로 인해 전단이 가해지는 시험초기에 빠른 최대전단강도를 보이며 변형이 진행됨에 따라 잔류전단강도 상태로 이어진다. 그리고 상대적으로 큰 입자를 가진 자갈의 경우 전단면 주변부에서 입자의 파쇄현상이 두드러졌다. 특히 배수상태에서는 전단면을 통한 파쇄현상이 관측되었으며, 최대 15~20%의 체적변화를 보였다. 다만, 본 연구는 토석류 유동성 해석에 필요한 빠른 전단회전속도를 적용함으로써, 차후 다양한 시험조건에서의 추가 시험들로 흙의 구성과 시험조건에 따른 전단거동에 대한 검증이 요구된다.
- (4) 본 연구는 링 전단시험장치를 사용하여 산사태 특성분석에 사용되는 항복응력과 소성점도를 결정하는 방법을 제시하

였다. 전단속도를 제어함으로써 얻어진 상기 값들은 토석류의 이동속도와 이동거리를 평가하는데 활용할 수 있다. 따라서 국내 토석류 발생지역을 대상으로 동일한 지형 및 지질 조건하에서 발생한 토석류를 사전예측하고 사후에 어떠한 방재대책을 수립할 것인가에 대한 공학적 해답을 제시할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 “급경사지 및 휴폐광산지역의 재해예방기술 개발(11-3411)과 광산개발에 따른 지질환경재해 확산제어 기술 개발(12-3212)” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (2011) Development of practical technologies for countermeasures for hazards in steep slope and abandoned mine areas, Ministry of Knowledge Economy, GP2009-020-2011(3), 306p.
- Bishop, A.W., Green, G.E., Garga, V.K., Andersen, A. and Brown, J.D. (1971) A new ring-shear apparatus and its application to the measurement of residual strength, *Geotechnique*, Vol. 21, pp. 273-328.
- Comegna, L., Picarelli, L., Urciuoli, G. (2007) The mechanics of mudslides as a cyclic undrained-drained process, *Landslides*, Vol. 4, pp. 217-232.
- Coussot, P., Tocquer, L., Lanos, C., and Ovale, G. (2009) Macroscopic vs. local rheology of yield stress fluids, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 158, pp. 85-90.
- Hungr, O., and Morgenstern, N.R. (1984) High-velocity ring-shear tests on sand, *Geotechnique*, Vol. 34, No. 3, pp. 415-421.
- Hvorslev, M.J. (1939) Torsion shear tests and their place in the determination of the shearing resistance of soils. *Proc. Am. Soc. Test Mater*, Vol. 39, pp. 999-1022.
- Jongmans, D., Bievre, G., Schwartz, S., Renalier, F., Beaurez, N., Orengo, Y. (2009) Geophysical investigation of a large landslide in glaciolacustrine clays in the Trièves area (French Alps), *Engineering Geology*, Vol. 109, pp. 45-56.
- Jeong, S.W., Locat, J., Leroueil, S. and Malet, J.-P. (2010). Rheological properties of fine-grained sediments: the roles of texture and mineralogy, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 47, pp. 1085-1100.
- Jeong, S.W. (2010) Grain size dependent rheology on the mobility of debris flows, *Geosciences Journal*, Vol. 14, pp. 359-369.
- Leroueil, S. (2001) Natural slopes and cuts: movement and failure mechanisms, *Geotechnique*, Vol. 51, No. 3, pp. 197-243.
- Locat, J. and Demers, D. (1988) Viscosity, yield stress, remoulded strength, and liquidity index relationships for sensitive clays, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 25, pp. 799-806.
- Locat, J. (1997) Normalized rheological behaviour of fine muds and their flow properties in a pseudoplastic regime, *Proc. 1st Int. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation*, San Francisco. ASCE, New York, pp. 260-269.
- Malet, J.-P., Laigle, D., Remaitre, A., Maquaire, O. (2005) Triggering conditions and mobility of debris flows associated to complex earthflows, *Geomorphology*, Vol. 66, pp. 215-235.
- Ovale, G., Rodts, S., Chateau, X., Coussot, P. (2009) Phenomenology and physical origin of shear localization and shear banding in complex fluids, *Rheologica Acta*, Vol. 48, pp. 831-844.
- Picarelli, L., Urciuoli, G., Ramondini, M., Comegna, L. (2005) Main features of mudslides in tectonised highly fissured clay shales, *Landslides*, Vol. 2, pp. 15-30.
- Sadrekarami A., and Olson, S.M. (2010) Particle damage observed in ring shear tests on sands, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 47, pp. 497-515.
- Sassa, K. (1992) Access to the dynamics of landslides during earthquakes by a new cyclic loading high-speed ring-shear apparatus, *Proc. 6th International Symposium on Landslides*, Christchurch, Vol. 3, pp. 1919-1937.
- Sassa, K. (1997) A new intelligent-type dynamic-loading ring-shear apparatus. *Landslide News*, No. 10, p. 33.
- Sassa, K., Fukuoka, H., Wang, G., Ishikawa, N. (2004) Undrained dynamic-loading ring-shear apparatus and its application to landslide dynamics, *Landslides*, Vol. 1, pp. 7-19.
- Stark, T.D., and Vettel, J.J. (1992) Bromhead ring shear test procedure, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol.15, No.1, pp. 24-32.
- Rodts, S., Baudez, J.C., and Coussot, P. (2005) From discrete to continuum flow in foams, *Europhysics Letters*, Vol. 69, No. 4, pp. 636-642.
- Tika, T.E., Vaughan, P.R., and Lemos, L.J. (1996) Fast shearing of pre-existing shear zones in soil, *Geotechnique*, Vol. 46, No. 2, pp. 197-233.
- Tika, T.E. and Hutchinson, J.N. (1999) Ring shear tests on soil from the Vaiont landslide slip surface, *Geotechnique*, Vol. 49, No. 1, pp. 59-74.
- Van Asch, Th.W.J., Malet, J.-P., Van Beek, L.P.H., and Amitrano, D. (2007) Techniques, issues and advances in numerical modeling of landslide hazard, *Bulletin de la Société Géologique de France*, Vol. 178, No. 2, pp. 65-88.
- Van Asch, Th.W.J., Van Beek, L.P.H., and Boggard, T.A. (2007) Problems in predicting the mobility of slow-moving landslides, *Engineering Geology*, Vol. 91, pp. 46-55.
- Wang, F.W., Sassa, K., and Wang, G. (2002) Mechanism of a long-runout landslide triggered by the August 1998 heavy rainfall in Fukushima Prefecture, Japan, *Engineering Geology*, Vol. 63, pp. 169-185.
- WP/WLI. (1995) A suggested method for describing the rate of movement of a landslide. *International Union of Geological Sciences Working Group on Landslides: Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, Vol. 52, No. 1, pp. 75-78.