The Journal of Engineering Geology
pISSN : 1226-5268 eISSN : 2287-7169

Vol. 33, No. 4, December, 2023, pp. 717-724
https://doi.org/10.9720/kseg.2023.4.717

TECHNICAL NOTE

거칠기 효과를 고려한 주문진 표준사의 잔류전단강도 특성 분석

정승원*

한국지질자원연구원 지질재해연구본부 책임연구원

Roughness Effect on the Residual Shear Characteristics of Jumunjin Sands

Sueng-Won Jeong*

Principal Researcher, Geologic Hazards Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

Abstract

Residual shear strength is an important parameter in landslide dynamics and may be considered the critical factor in landslide triggering. Tests were undertaken using Jumunjin sands to examine the effects of smooth and rough surfaces on ring-shear characteristics. Under dense and drained conditions, shear velocities were recorded as 0.01, 0.1, 1, 10, 50, 100 mm s^{-1}, with shear strength increasing with velocity and producing increasingly fine content. Particle fragmentation may thus increase landslide mobilization when the landslide body is mixed with ambient water in channelized flows.

Keywords: residual shear strength, ring shear test, roughness effect, Jumunjin sand, particle fragmentation

초 록

잔류전단강도(residual shear strength)는 산사태와 토석류 해석시 사용되는 중요한 인자이다. 잔류전단강도는 흙이 전단될 때 발현되는 최소 전단응력으로 산사태 발생시점에서의 전단강도이다. 본 연구는 링전단시험장치를 사용하여 주문진 모래에 대한 잔류전단강도를 측정하였다. 거칠기 효과를 검증하기 위하여 링전단상자를 거친면(rough surface)과 매끈면(smooth surface)으로 달리 제작하여 흙 시료가 전단될 때 거칠기(roughness)에 따른 전단특성을 조사하고자 하였다. 시험은 조립상태, 배수조건에서 전단속도를 0.01, 0.1, 1, 10, 50, 100 mm/s로 달리 적용하여 각 전단속도에 따른 전단응력을 측정하고, 각 시험단계별 잔류전단강도를 측정하였다. 실험결과에 따르면, 일반적으로 전단강도는 전단속도가 증가하면 증가한다. 또한 전단시간이 길어질수록, 전단속도가 증가할수록, 링전단상자 하부링에서 더 많은 미립분이 쌓인다는 것을 확인하였다. 이러한 결과로 입자 파쇄량이 증가할수록 산사태 발생이후 토석류 확산시에 유동성을 증가시키는 원인으로 판단할 수 있다.

주요어: 잔류전단강도, 링전단시험, 거칠기 효과, 주문진 표준사, 입자 파쇄

OPEN ACCESS

***Corresponding author:** Sueng-Won Jeong
E-mail: swjeong@kigam.re.kr

Received: 20 October, 2023
Accepted: 6 November, 2023

Ⓒ 2023 The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

산사태 안정성과 토석류의 유동성을 평가하고자 할 때 중요한 입력변수로 전단강도가 요구된다. 산사태에서는 토양의 전단강도(shear strength)이고, 토석류에서는 토양의 항복강도(yield strength)로 명명되며, 둘은 모두 전단변형에 대한 시료의 전단저항(soil resistance)에 속한다. 기존 산사태 연구에서 토질의 역학특성을 얻고자 할 때 직접전단시험과 삼축압축시험을 통하여 전단강도를 얻었다. 두 시험으로 얻어지는 점착력(cohesion)과 내부마찰각(internal friction angle)을 지반강도정수(soil strength parameters)로 명명하며, 이 값들은 사면의 안전율을 계산할 때 반드시 요구되는 항들로 사면의 안정성 여부만을 판단한다. 사면안정성 평가단계에서 전단강도는 사면을 따라 형성될 전단밴드(shear band)의 크기와 전단면을 따라 생성될 전단저항과 관련된다. 따라서 사면이 붕괴된 후 토사대변형(large soil deformation)과 같은 대규모 토사이동에 대한 재해 평가는 수행하기 어렵다. 토사대변형의 경우, 전단면을 따라 흙 입자들이 완전히 재배열된 상태에서 나타나는 전단강도가 요구된다. 기존의 두 시험장치는 제한된 전단변형에 대한 전단시험으로 잔류상태(residual state)에서 전단응력을 측정하기에 부적합하였다. 이러한 단점을 보완할 수 있는 시험장치로 링전단시험장치(ring shear apparatus)가 개발되었으며 일방향 무한 회전(infinite rotation)을 통한 잔류전단강도를 측정하는데 사용되고 있다(Bishop et al., 1971; Bromhead, 1979). 특히 잔류전단강도(residual shear strength)는 산사태와 토석류 해석시 사용되는 중요한 인자이다. 잔류전단강도는 흙이 전단될 때 발현되는 최소 전단응력으로 산사태 발생시점에서의 전단강도이다. 링전단시험장치는 잔류전단강도를 얻기 위해 사용되는 가장 오래된 시험장치 중 하나이며 최근 토석류 연구에서 활용된 사례가 다수 있다(Wang et al., 2002; Sassa et al., 2004; Fukuoka et al., 2006, 2007; Li et al., 2013). 고전적으로 세립토 위주의 입도분포를 가진 흙 시료에 대한 시험장치로 사용되었으며, 최근에서는 조립토를 포함한 다양한 흙 시료에 적용하고 있다(Jeong et al., 2018; Jeong and Park, 2019; Yao et al., 2020). 시험장치로부터 얻고자 하는 가장 중요한 값인 전단강도는 시험장치 내 전단부의 구조적 특성에 영향을 받는다. 일반적인 기존 시험장치는 링전단상자(ring shear box)에 위치한 전단면(shear plane)에서 흙 시료와 전단상자의 내경의 거칠기(roughness) 효과를 고려하지 않음으로써 전단시험동안 흙 시료와 전단상자 간의 미끄러짐 현상(slippage)이 발생한다는 점을 고려하지 않았다. 미끄러짐 현상을 고려하지 않음으로써 측정되는 전단응력은 실제 값 보다 과소평가될 수 있다. 이러한 점에 착안하여 동일한 규격을 가진 거친면(rough surface)과 매끈면(smooth surface) 링전단상자를 제작하고 시험결과를 비교분석하고자 한다.

연구방법

링전단시험장치 및 실험방법

본 연구에서 사용된 링전단시험장치는 한국지질자원연구원에서 토석류 유동성 평가를 목적으로 개발된 시험장치로 연직응력, 전단속도, 배수조건을 제어한 시험장치이다(Jeong et al., 2013). 여기서 전단속도를 제어한다는 것은 토석류 유동변형학적 또는 유변학적 개념(rheological concept)을 적용할 수 있다는 것을 의미한다. 시험장치는 전단회전부의 전단상자, 연직응력 제어부, 수직변위계, 간극수압계, 토크측정계로 구성되어 있다(Fig. 1). 링전단상자(Fig. 1b)는 상부링과 하부링의 결합 형태로 존재하며 상부링을 고정한 상태에서 하부링이 무한 회전하는 방식으로 시료에 전단을 가하고(Fig. 1c), 이때 시료의 전단저항을 측정한다. 연직응력은 링전단상자 상부판과 결합된 세 개의 피스톤을 통하여 시료에 직접적으로 원하는 하중을 가한다. 연직하중은 산사태 현장조건에 따라 적용을 달리하며, 전단동안 일정한 값을 유지하는 것을 원칙으로 한다. 산사태 현장조건을 고려하여 배수조건을 설정하고, 전단속도에 따른 전단응력을 측정한다. 전단속도는 0.01~100 mm/s의 범위로 한다. 일방향으로 하부링이 회전하면, 링전단상자와 결합된 전단응력 측정용 토크게이지를 통

하여 값을 출력한다. 전단동안 연직변위를 측정하여 시료의 체적변화를 출력한다. 공시체 시료는 산사태 발생지역의 전단면이 위치한 곳을 대상으로 한다. 공시체 시료의 제작은 재구성시료 제작을 원칙으로 하며, 실험의 목적에 따라 재성형조건 또는 액성한계상태에서 실험을 수행한다.

링전단상자는 내경 110 mm, 외경 250 mm, 높이 최대 75 mm로 하여 공시체를 제작할 수 있다. 공시체는 다짐시험을 통하여 얻어진 시험결과를 바탕으로 적정량의 시료를 링전단상자 내 3~5층 다짐으로 제작한다. 공시체 제작이 완료되면 링전단상자 상부와 하부에 위치한 다수의 밸브를 통하여 물을 링전단상자 내부로 유입시킨다. 상부링과 하부링으로부터 물의 유입과 유출을 반복적으로 전단상자 내 잔여 공기를 제어하고, 공시체를 24 hr 동안 포화시킨다. 즉 공시체가 완전 포화에 도달한 것으로 간주하여 시험한다. 주로 조립토의 경우, 1시간 이내 완전 포화에 도달하며, 세립토의 경우 최대 1주일의 시간이 소요되기도 하기에 연구 대상재료에 따라 포화단계의 시간은 달라진다. 또한 연직응력과 간극수압 간 비례식으로 포화정도를 판단할 수 있다.

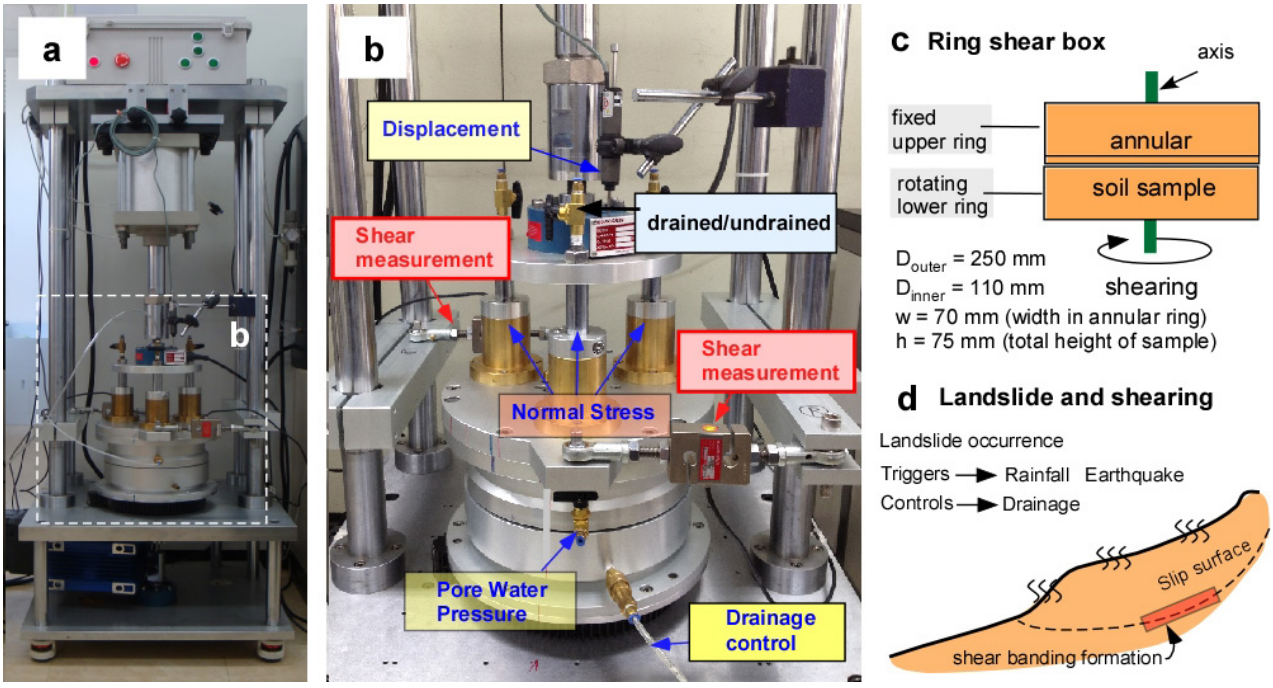

Fig. 1. Ring shear apparatus and landslide occurrence. a = ring shear apparatus, b = ring shear box with measuring system, c = ring shear box with upper and lower ring with geometry, and d = ring shear test and landslide occurrence.

링전단상자는 원환형이며, 동일 규격의 링전단상자(Fig. 1c)를 대상으로 실린더 내외부를 거친면(rough surface)과 매끈면(smooth surface)으로 다르게 제작하였다(Fig. 2). 링전단상자 상부링와 하부링은 다공질판을 설치하여 물의 유입은 자유롭게 하고 흙 입자의 이동은 방지할 수 있도록 하였다. 상부링과 하부링의 다공질판에 미끄러짐 방지용 날(serrated blades)을 두었다. 매끈면은 상부링과 하부링의 내외측 모두 돌기가 없는 것이고, 거친면은 내외측 실린더에 톱니모양의 날(saw-like blade)을 제작하여 조립토 이상의 입자들이 전단시에 미끄러짐 효과를 최소화하고자 하였다. 외측 톱니모양 날의 크기는 5 mm × 3 mm × 26 mm로 하여 총 36개를 두고, 내측 톱니모양 날의 크기는 5 mm × 3 mm × 22 mm로 총 72개를 두었다.

링전단시험장치는 조립토의 입자 파쇄 특성 연구에 활용되고 있다(Feda, 2002; Torabi et al., 2007; Toyota et al., 2009).

입자 파쇄의 강도는 응력수준, 입자 강성도 및 시간 등을 포함한 응력경로에 의존하는 것으로 알려져 있다(Feda, 2002). 또한 낮은 연직응력 조건에서는 전단연화거동(strain softening)을 보이고, 높은 연직응력에서는 전단경과(strain hardening) 특성을 나타낸다. 조립토의 경우, 배수조건에 관계없이, 연직응력과 전단응력 증가에 따른 입자 파쇄 결과를 피할 수 없다. 특히 입자 파쇄와 미립분 함량 증가는 흙의 수축과 특히 비배수 조건에서는 액상화 가능성을 높일 수 있는 것으로 알려져 있다(Sadrekarimi and Olson, 2010). 전단 밴드층에 형성되는 미분립 함량은 수리전도도를 감소시키고 간극수압 소산을 지연하는 역할로 작용할 수 있다(Fig. 1d).

본 연구에서는 상업용 주문진 표준사를 사용하여 배수조건 하에서 링전단시험을 수행하였다. 주문진 표준사는 입도분포곡선 상에서 전형적인 빈입도(poor-grading) 특성을 가지고 있다. 공시체는 4,100 g의 시료를 5층으로 나누어 다짐하여 제작하였다. 시험에 사용된 시료의 건조단위중량은 1,533 kg/m^{3}이며 상대밀도는 80%에 해당한다.

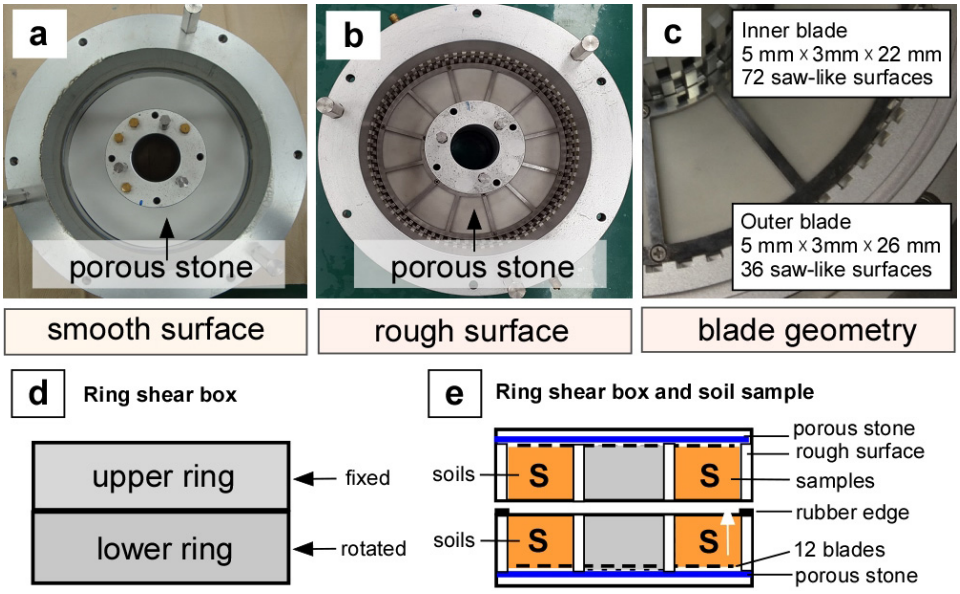

Fig. 2. Shear shear box with smooth and rough surface. Design of inner and outer blades in ring shear box.

결과 및 분석

전단응력과 잔류전단강도 결정방법

링전단시험을 통하여 전단속도별 전단시간에 따른 전단응력을 측정하였다(Fig. 3). 본 연구에서는 전단속도 0.01, 1, 100 mm/s에 대한 시험결과로 거친면과 매끈면을 차이를 면밀히 살펴보고자 하였다. 전단특성은 전단응력-전단시간 곡선, 연직변위-전단시간 곡선, 연진응력-전단시간 곡선 순으로 도시하였다. 주어진 전단시간에 대하여 발현되는 전단응력의 경우, 낮은 전단속도(예, 0.01 mm/s)를 제외하면 대체로 비슷한 시간범위 내에서 응력이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 전단속도 변화에 무관하게, 거친면을 사용한 경우, 매끈면 전단상자에 비교하여, 대체로 동일 전단속도에 있어 전단응력의 증가가 확인되었다. 전단속도 0.01 mm/s의 경우, 전단응력-전단시간 곡선은 점진적으로 증가하는 곡선형태를 가지며, 대략 600 s 이후에 일정한 전단응력에 도달하는 것으로 나타났다. 여기서 일정한 전단응력은 잔류전단강도를 의미한다. 전단응력이 최대값과 최소값을 가질 경우, 최소 전단응력을 잔류전단응력으로 한다. 본 시험장치는 잔류전

단강도를 결정하기 위한 시험장치이므로 최대값에 대한 분석은 논외로 한다. 전단시험동안, 연직변위는 대체로 일정한 높이에서 유지됨을 알 수 있다. 혹은 짧은 침하를 나타나는 경우가 존재하지만, 실질적으로는 0.2 mm보다 작은 값에 해당함으로 무시할 수 있다. 또한 연직응력도 지반내 전단면이 형성될 수 있는 대략 50 kPa를 고려하였으며, 전단 초기에 미세한 전단저항을 가질 뿐, 대체로 전단시험동안 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 유사한 시험결과를 전단속도 1 mm/s와 100 mm/s에서도 확인할 수 있다. 시험결과는 Table 1과 같다. 결론적으로 잔류전단강도는 전단속도의 함수로 표현할 수 있다(Fig. 4).

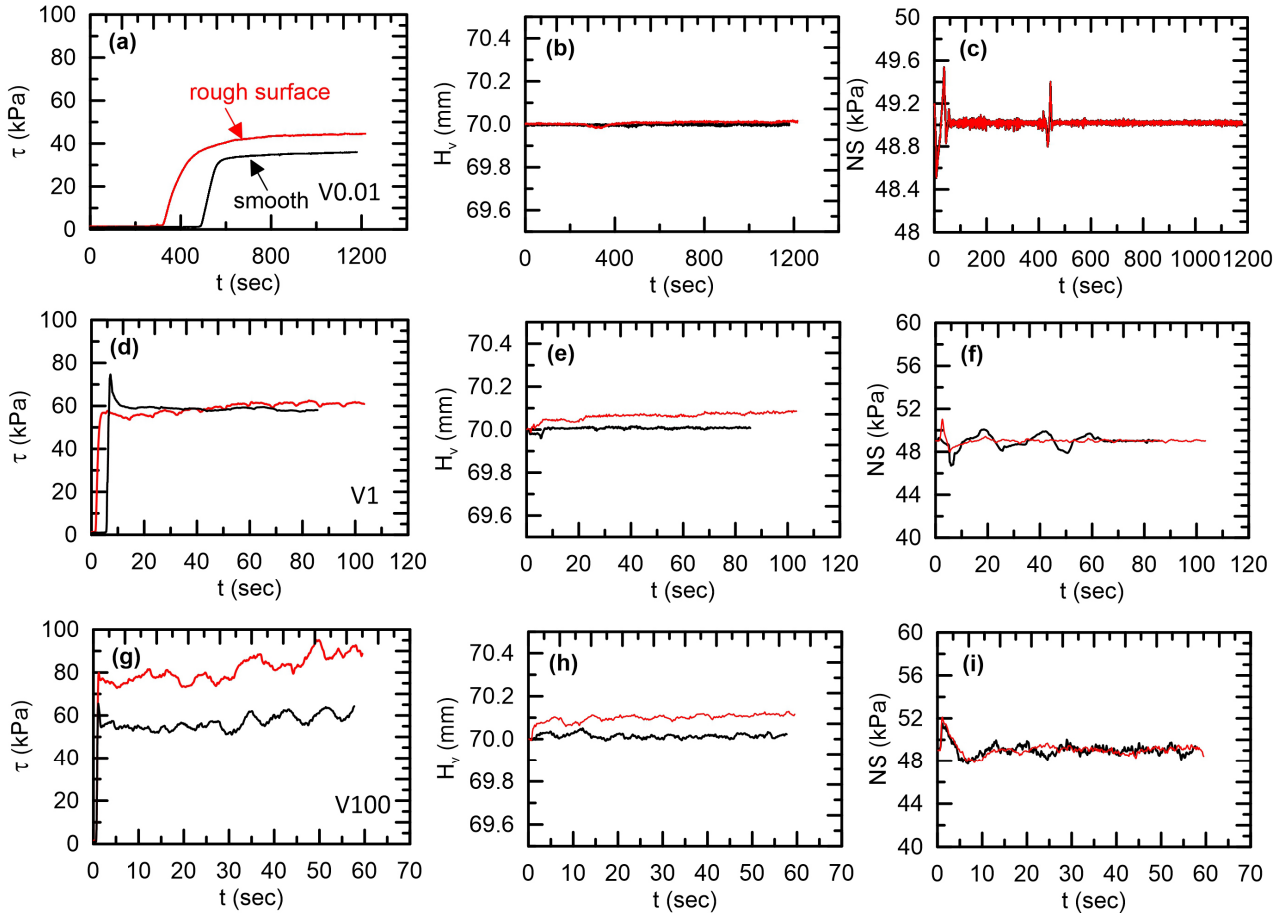

Fig. 3. Test results with different shear velocity of 0.01, 1 and 100 mm/s.

Table 1. Test results

V_s	τ_r (smooth surface)	τ_r (rough surface)	τ_p (smooth surface)	τ_p (rough surface)
0.01	35.2	44.5	-	-
0.1	47.2	53.4	-	56.5
1	58.2	60	72.9	-
10	53.4	62.7	-	78.9
50	55.8	72.0	-	-
100	55.0	79.0	-	-

Note: V_s = shear velocity (mm/s), τ_p = peak shear strength (kPa), and τ_r = residual shear strength (kPa).

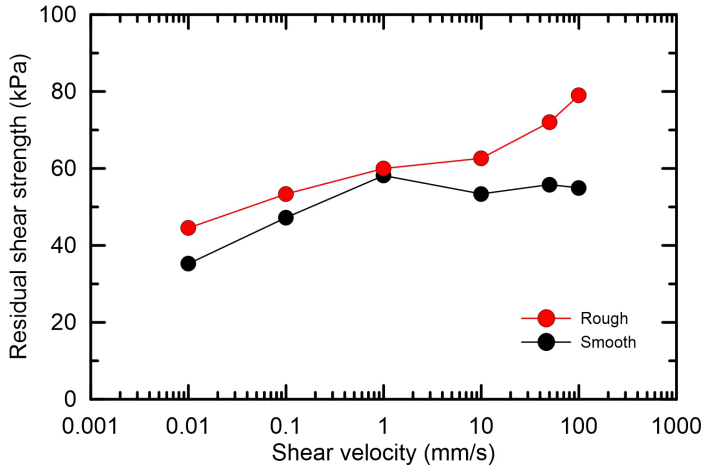

Fig. 4. Residual shear strength with shear velocity.

전단특성: 입자 파쇄와 산사태 유동성

거칠기 효과를 고려한 잔류전단강도-전단속도 곡선에 따르면, 높은 전단속도에서 얻어진 값의 차이가 뚜렷하다는 점을 알 수 있다(Fig. 4). 토양의 전단응력-전단변형률 상관관계식을 고려할 때 전단속도가 증가할 경우 전단응력-전단변형률 곡선의 크기가 증가하는 것과 동일한 결과이다(Wang et al., 2010). 거친면 링전단상자를 사용할 때 전단시험 전후로 입자 파쇄(particle fragmentation)가 증가한다는 것을 확인하였다(Fig. 5). 특히 다량의 모래와 자갈을 함유한 조립토에 대한 링전단시험에서 유사한 시험결과를 찾아 볼 수 있다(Okada et al., 2004; Sassa et al., 2004; Fukuoka et al., 2006). 본 연구에서는 입자 파쇄 특성을 확인하기 위하여 전단시단 종료 후 링전단상자의 상부, 중부, 하부에서 시료를 채집하여 체분석 시험을 수행하였으며 시험결과를 통하여 전단 전후로 입경이 0.5 mm 보다 작은 미립분 함량이 증가한다는 것을 확인하였다(Fig. 5). 사용된 주문진 표준사가 거의 동일한 입경(<1 mm)을 가지므로 전단시험 후에 입자파쇄 효과는 아주 작은 중량만이 확인되었다. 여기서 얻어진 시험결과에서 중요한 점이 두 가지 있다. 하나는 링전단상자 상부와 중부에 비하여 하부에 미립분이 더 많이 적치된다는 점이고, 다른 하나는 전단시간이 길어질수록, 전단속도가 높아질수록 미립분 함량이 증가한다는 점이다. 언뜻 전단속도가 증가할수록, 전단응력이 증가한다는 것은 산사태 발생시점에서 전단저항이 증가하는 것으로 오인할 수 있다. 하지만 실제 산사태 현장에서는 극한강우로 인한 강우의 지반 내 침투가 이루어지고, 주변 유체의

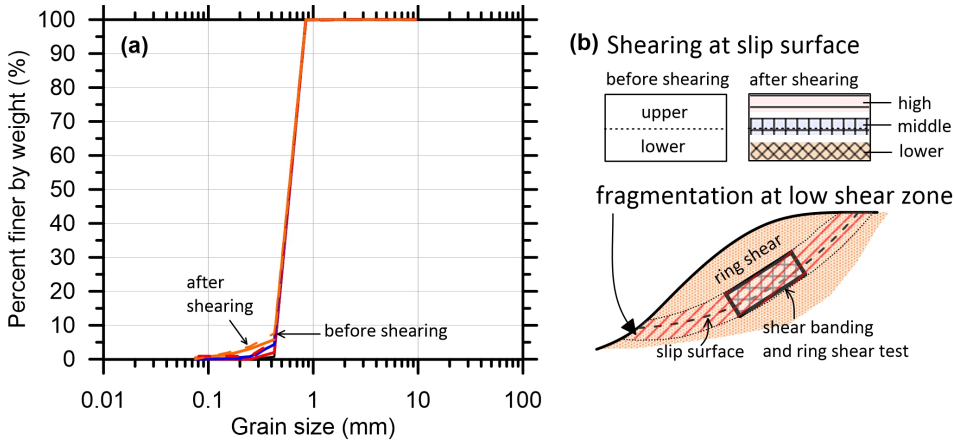

Fig. 5. Grain size distribution before and after ring shear tests.

지속적인 토양 내 유입으로 인하여 전단면에서 생성될 전단저항이 감소할 수 있다. 또한 입자 파쇄 현상으로 인해 전단면 하부를 따라 생성된 미립분 함량은 간극수압 증가와 유효응력 감소의 주요 요인으로 작용될 것이다. 또한 산사태를 사면을 따라 발생하는 중력이동현상으로 정의할 때 산사태의 유동성을 증가시키는 주요 요인으로 간주될 수 있다.

본 연구에서는 제한된 시험조건 하에서 수행된 시험결과로, 시료의 다짐도와 배수 조건 등 산사태 발생 현장의 실제 조건을 고려하지 않았다. 또한 한국의 산사태와 토석류 발생지역의 대표적인 화강암 풍화토, 편마암 풍화토, 이암풍화토 지반을 대상으로 하지 않았다. 추가하여 후속연구에서는 포항지역과 같은 팽윤성 점토 광물의 함유정도에 따른 전단저항에 대한 연구도 필요할 것으로 판단된다. 하지만 본 연구에서는 조립토에 해당하는 주문진 표준사를 사용함으로써 대표적인 링전단특성을 살펴보았고, 전단특성과 지질재해 영향성 평가를 수행하고 할 경우 거칠기 효과는 무시할 수 없는 인자임을 확인하였다. 이를 통하여 향후 산사태 현장의 포화-압밀-배수 조건을 고려하여 전단강도-전단속도 간 특성을 분석할 수 있을 것이다.

결 론

국내 산사태 발생지역의 토양은 대체로 세립토 함량에 비해 조립토의 함량이 높은 것이 특징이다. 따라서 산사태 발생 시점의 관점에서 조립토의 전단특성을 이해하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 동일 규격을 가진 거친면과 매끈면 링전단상자를 제작하여 공학적 특성이 잘 알려진 주문진 표준사에 대한 링전단시험을 수행하였다. 링전단시험을 통해 얻고자 하는 것은 무한 전단 변형 조건에서 흙 시료가 가지는 잔류전단강도로 이 값은 일반적으로 산사태가 발생하는 시점에서의 전단강도를 의미한다. 거친면 링전단상자를 사용할 경우, 매끈면 링전단상자에 비해, 훨씬 큰 값의 전단응력이 나타났다. 또한 주어진 시험조건 하에서 전단속도가 증가할수록 잔류전단강도가 증가하였다. 특히 전단시간이 길어질수록, 전단속도가 증가할수록 전단상자 내 미립분 함량이 증가하는 것을 확인하였다. 이러한 특성은 전단과 입자 파쇄 간 상관관계가 존재한다는 것을 방증한다. 결론적으로 산사태 전단면을 따라 발생되는 입자 재배열과 입자 파쇄 특성은 산사태가 토석류로 전이(slide to flow transition)되는 중요한 특성 중 하나로 고유동성(high mobilization)의 유발요인으로 판단된다.

사 사

한국지질자원연구원 기본사업인 “실시간 도시지역 산사태 조기경보기술 및 지질환경 오염물질 위험관리기술 개발(23-3412-1)”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

Bishop, A.W., Green, G.E., Garga, V.K., Andersen, A., Brown, J.D., 1971, A new ring shear apparatus and its application to the measurement of residual strength, Geotechnique, 21(1), 273-328.

Bromhead, E.N., 1979, A simple ring shear apparatus, Ground Engineering, 12(5), 40-44.

Feda, J., 2002, Notes on the effect of grain crushing on the granular soil behaviour, Engineering Geology, 63, 93-98.

Fukuoka, H., Saasa, K., Wang, G., Sasaki, R., 2006, Observation of shear zone development in ring-shear apparatus with a transparent shear box, Landslides, 3, 239-251.

Fukuoka, H., Sassa, K., Wang, G., 2007, Influence of shear speed and normal stress on the shear behavior and shear zone

structure of granular materials in naturally drained ring shear tests, Landslides, 4, 63-74.

Jeong, S.W., Fukuoka, H., Song, Y.S., 2013, Ring-shear apparatus for estimating the mobility of debris flow and its application, Journal of the Korean Society of Civil Engineers, 33(1), 1-14 (in Korean with English abstract).

Jeong, S.W., Park, S.S., 2019, Effect of the surface roughness on the shear strength of granular materials in ring shear tests, Applied Sciences, 9, 2977.

Jeong, S.W., Park, S.S., Fukuoka, H., 2018, Shear and viscous characteristics of gravels in ring shear tests, Geosciences Journal, 22(1), 11-17.

Li, Y.R., Wen, B.P., Aydin, A., Ju, N.P., 2013, Ring shear tests on slip zone soils of three giant landslides in the Three Gorges Project area, Engineering Geology, 154, 106-115.

Okada, Y., Sassa, K., Fukuoka, H., 2004, Excess pore pressure and grain crushing of sands by means of undrained and naturally drained ring-shear tests, Engineering Geology, 75, 325-343.

Sadrekarimi, A., Olson, S.M., 2010, Particle damage observed in ring shear tests on sands, Canadian Geotechnical Journal, 47, 497-515.

Sassa, K., Fukuoka, H., Wang, G., Ishikawa, N., 2004, Undrained dynamic-loading ring-shear apparatus and its application to landslide dynamics, Landslides, 1, 7-19.

Torabi, A., Braathen, A., Cuisiat, F., Fossen, H., 2007, Shear zones in porous sand: Insights from ring-shear experiments and naturally deformed sandstones, Tectonophysics, 437, 37-50.

Toyota, H., Nakamura, K., Sugimoto, M., Sakai, N., 2009, Ring shear tests to evaluate strength parameters in various remolded soils, Geotechnique, 59, 649-659.

Wang, F.W., Sassa, K., Wang, G., 2002, Mechanism of a long-runout landslide triggered by the August 1998 heavy rainfall in Fukushima Prefecture, Japan, Engineering Geology, 63, 169-185.

Wang, G., Suemine, A., Schulz, W.H., 2010, Shear-rate-dependent strength control on the dynamics of rainfall-triggered landslides, Tokushima Prefecture, Japan, Earth Surface Processes and Landforms, 35(4), 407-416.

Yao, C., Chen, P., Ma, T., Xia, X., Wei, C., 2020, Physicochemical effect on shear strength characteristics of clayey soils based on ring-shear experiment, Canadian Geotechnical Journal, 57, 1820-1831.