이질 재료 간의 링 전단특성 연구

Ring Shear Characteristics of Two Different Soils

박 성 식¹ Park, Sung-Sik정 승 원² Jeong, Sueng-Won윤 준 한³ Yoon, Jun-Han채 병 곤⁴ Chae, Byung-Gon

Abstract

The shear stress characteristics of landslide materials can be affected by various factors. We examined the shear stress characteristics of two different soils using ring-shear apparatus, in which saturation-consolidation-shearing speed can be easily controlled. This paper presents (i) shear stress-time characteristics, (ii) shear stress depending on normal stress and shear speed and (iii) shear stress as a function of shearing speed. Materials used in this paper were the Nakdong River sand and muds taken from Jinhae coastal area in Korea. Samples were prepared in three types: Sand (upper)-Sand (lower), Clay (upper)-Clay (lower) and Sand (upper)-Clay (lower). The upper and lower indicate the samples placed in upper and lower ring shear boxes, respectively. For given normal stresses (50 and 100 kPa) and shearing speed (0.1 mm/sec), we performed ring shear tests. Then the failure lines were determined in the second test. Last, we determined the shear stress characteristics depending on different shearing speeds, such as 0.01, 0.1, 1, 10, 100 mm/sec. As a result, we found that shear stress characteristics are strongly dependent on above three factors. The shear stress of Sand (upper)-Clay (lower) is smaller than that of Sand (upper)-Sand (lower), but slightly larger than that of Clay (upper)-Clay (lower). The shear stress is also characterized by grain crushing and wetting process at slip surface.

요 지

본 연구는 포화-압밀-전단 제어형 링전단시험장치를 이용하여 (i) 전단시간에 따른 전단응력 특성, (ii) 구속압과 전단속도에 따른 전단특성 및 (iii) 전단속도에 따른 전단응력 특성에 대한 연구를 수행하였다. 이질 재료간의 전단특성을 살펴보고자 낙동강 모래와 해안 점토를 사용하였다. 본 연구에서는 모래와 모래, 점토와 점토, 모래와 점토끼리의 전단특성을 살펴보고자 비배수 조건에서 특정 구속압(50과 100kPa)에 대한 실험을 1차적으로 수행하였다. 모든 실험은 특정 구속압에 대해 300sec 동안 자동 압밀조건을 거친 후 전단실험을 수행하였다. 2차 실험으로 세 시료에 대한 수직응력 변화에 따른 전단응력 특성을 살펴보고자 수직응력을 20~150kPa까지 단계별로 높여가며 실험을 수행하였다. 마지막으로 특정 구속압에 대해 전단속도를 0.01, 0.1, 1, 10, 100mm/sec까지 5 단계로 나누어 실험을 수행하였다. 이질재료 간의 전단응력은 특정 구속압 하에서 모래-점토의 전단응력(최대전단응력과 잔류전단응력)은 모래-모래보다는 작고, 점토-점토보다는 약간 큰 것으로 나타났다. 전단응력은 구속압과 전단속도에 의해 전단면에서 발생하는 입자파쇄와 젖음현상에 의존하는 것으로 나타났다.

Keywords : Ring-shear apparatus, Different soil layers, Friction angle, Sand, Clay

1 정희원, 경북대학교 공과대학 건축토목공학부 토목공학전공 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Eng., Kyungpook National Univ.)

2 정희원, 한국지질자원연구원 지질재해연구실 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Tel: +82-42-868-3911, Fax: +82-42-868-3414, swjeong@kigam.re.kr, 교신저자)

3 비희원, 경북대학교 공과대학 건축토목공학부 토목공학전공 석사과정 (Graduate student, Dept. of Civil Eng., Kyungpook National Univ.)

4 정희원, 한국지질자원연구원 지질재해연구실 책임연구원 (Member, Principal Researcher, Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 국내에서는 국지성 호우로 인해 전국 각지에서 크고 작은 산사태나 토석류가 발생하고 있다(KIGAM, 2009). 특히 2011년 서울 우면산, 강원도 춘천시, 경남 밀양 등지에서 대형 산사태가 발생하였다. 이와 같은 산사태나 토석류 발생 사례를 보면 상부의 붕적층이나 풍화토층으로 유입되는 지하수로 지반이 포화되면서 기반암층 사이에 물의 흐름이 발생하여 붕괴되는 경우가 많으며, 잔류한 토층에는 크고 작은 자갈이나 돌과 같은 조립질 흙이 많이 존재한다. Fig. 1은 우면산 산사태가 발생한 지역으로 기존 토사가 붕괴되면서 흘러간 주변을 관찰하면 상부 붕적층이나 풍화토층 내 크고 작은 자갈이 많이 포함되어 있는 것을 알 수 있다. 이러한 현상학적 문제에 대한 공학적 해답을 찾기 위해 토사변형이 작을 경우 삼축시험을 이용하여 크기가 서로 다른 입자와 입자끼리의 거동을 비교 분석하는 것이 중요하다. Vallejo(2001), Vallejo and Lobo-Guerrero(2005), Vallejo and Mawby(2000), Park et al.(2010), Park and Kim(2011)은 이와 같이 점토나 모래 사이에 소수 포함된 자갈이

Fig. 1. Debris flow occurrence in Seoul (KGS Report, 2012)

전체 흙의 공학적 거동에 미치는 영향에 대하여 다양한 연구를 수행한 바 있다. 한편 서로 다른 건설재료 간의 마찰력에 대한 연구로 직접전단시험을 이용하여 콘크리트와 모래, 모래와 목재 등에 대하여 연구한 사례는 있다(Brumund and Leonards, 1973; Potyondy, 1961; Uesugi et al., 1990; Kim and Kim, 2009). 하지만, 토석류와 같이 일단 토사의 흐름이 발생하면 이 때부터는 면과 면 사이의 거동이 더욱 중요하게 된다.

기존의 산사태 발생지역에서 유실된 점토, 자갈층 또는 토사층 간의 마찰저항이 어느 정도인지를 파악할 필요가 있다. 산사태나 토석류와 같은 토사 변형과정은 파괴에 도달하기까지는 느린 속도로 움직이지만 일단 파괴가 발생하면 빠른 속도로 변형이 발생한다. 하지만 삼축시험이나 직접전단시험은 이러한 토사의 전단속도를 조절하기 어려울 뿐 아니라 산사태에서 발생하는 상부 퇴적층(풍화층, 붕적층)과 기반암층 사이의 대변형 거동을 실현하기 어려운 시험장치이다. 따라서 본 연구에서는 산사태나 토석류와 같이 토사 대변형 현상과 전단속도 변화에 따른 전단강도를 측정할 수 있는 링전단시험장치를 이용하여 공학적 성질이 서로 다른 흙 사이의 전단특성을 연구하였다. 대표적인 흙인 모래와 점토 사이의 마찰력과 전단속도에 따른 이들 상호간의 전단거동에 대하여 비교 분석하였다.

2. 링전단시험

2.1 링전단시험장치

일본 교토대학교 방재연구소 산사태연구팀(Research Center on Landslides)에서는 다양한 링전단시험기를 개발하였으며(Sassa et al., 1992, 1997, 2004), 강우나 지진으로 인한 산사태 연구 분야에 활용되고 있다. 본 연구에서 사용한 링전단시험장치(Fig. 2)는 한국지질자원연구원에서 2011년 국내 처음으로 구축한 비배수전단강도 측정용 시험장비이다(Jeong 등, 2013). 링전단시험장치는 전단상자, 수직하중 제어장치, 수직변위계, 토크측정장치, 간극수압측정장치 등으로 구성된다(Fig. 2). 링전단상자내 시험하고자 하는 대상시료를 위치하고, 세개의 피스톤을 통해 상부로부터 수직응력을 제어하고, 시험하고자 하는 배수조건을 결정한 다음 사용자의 의해 지정된 전단속도(0.01~180mm/sec)에 따라 전단상자 상부에 위치한 두 개의 토크측정장치(Torque-L과

Fig. 2. Ring-shear box

Torque-R)를 통해 토크를 측정한다. 링전단상자 상부가압판에 위치된 다수의 밸브를 통해 간극수압 게이지를 연결하고 전단시 발생하는 전단면에서의 간극수압을 측정한다. 전단상자는 외경이 250mm, 내경이 110mm, 높이가 70mm의 크기로 시험대상재료를 점토에서 큰 자갈까지 다양한 입자크기에 대한 실험이 가능하다. 시험방법은 시료성형, 포화, 압밀, 배수, 전단 순으로 이루어진다. 시료 성형은 현장조건을 맞추기 위해 충다짐을 통한 성형을 우선적으로 고려한다. 링전단상자 상하부에 위치한 다수의 물 유입구를 통해 시료를 완전 포화시킨다. 이때 복수개의 밸브를 개폐시켜 육안으로 공기제거 작업을 거친 후 가압을 통한 포화단계(B value check)를 수행한다. 포화단계에서 점토의 경우 대략 1~7일 간의 상대적으로 긴 포화기간이 필요하며, 자갈처럼 입자가 큰 시료에 대해서는 상대적으로 짧은 1일 이내의 포화시간이 요구된다. 압밀단계에서는 사용자가 실험하고자 하는 하중조건을 선택하고 연직하중이 상부 세 개의 피스톤을 통해 중공형 시료에 가해지도록 설정한다. 하중은 일정시간 동안 하중이 도달되도록 시간을 조절해야 하며, 상대적으로 느린 속도(예를 들어, 50kPa의 경우 하중도달시간을 300~500sec로 선택)로 하중이 시료에 가해진 후 최종 하중을 임의의 시간까지 일정하게 유지한다. 시료성형, 포화, 압밀 단계가 끝나면 배수조건을 선택하고 전단속도에 따라 하부 링 전단상자를 무제한

Fig. 3. SEM image of Nakdong River sand

회전시킴으로써 실험을 수행한다. 본 연구에서는 전단속도를 0.01~100mm/sec로 저속에서 고속까지 조정하여 실험을 수행하였다.

2.2 실험재료

본 연구에서는 공학적 성질이 확연히 다른 모래와 점토를 사용하여 이들 간의 마찰저항에 대해 연구하였다. 모래는 낙동강 모래를 0.075~0.25mm 사이로 체분석하여 사용하였다. 모래의 기본 특성은 Table 1과 같으며, SEM 사진은 Fig. 3과 같다. 점토는 진해 인근 해안에서

Table 1. Material properties of Nakdong River sand

Specific gravity G_s	D_{10} (mm)	D_{50} (mm)	C_u	C_c	e_{max}	e_{min}	USCS
2.637	0.19	0.24	1.32	1.04	1.181	0.849	SP

Fig. 4. Sample preparation for clay

Table 2. Shear stress-time characteristics at given shear speed and normal stress

Test ID	Specimen type	Shear speed (mm/sec)	Normal stress (kPa)
SS1-50	Sand (upper layer)	0.1	50
SS1-100	Sand (lower layer)		100
SC1-50	Sand (upper layer)		50
SC1-100	Clay (lower layer)		100
CC1-50	Clay (upper layer)		50
CC1-100	Clay (lower layer)		100

채취하였으며 비중은 2.6이고, 액성한계와 소성한계는 각각 50%과 20%이다.

2.3 시료 성형방법 및 공시체 종류

본 연구에서는 링전단시험장치를 이용하여 공학적 성질이 서로 다른 재료 간의 마찰저항을 연구하기 위하여 높이 70mm인 공시체의 상부와 하부를 각기 다른 재료로 성형한 다음 아래와 같은 실험을 수행하였다. 링전단시험장치 공시체의 두께(높이)는 상하부 각각 35mm로 모래의 경우 목표 단위중량에 해당하는 양의 모래를 넣고 다져서 공시체를 제작하였다. 점토의 경우에는 Fig. 4와 같이 블록형태로 자른 점토를 바깥쪽과 안쪽으로 나누어 붙여 넣는 방식으로 완성하였다. Fig. 4는 하부 층이 점토인 경우와 상부 층이 모래인 경우의 시료를 성형하는 모습을 보여 주고 있다.

본 연구에 사용한 공시체는 Table 2와 같이 상하부가 모두 모래인 경우(모래-모래), 점토인 경우(점토-점토), 상부가 모래이고 하부가 점토인 경우(모래-점토) 세 종류로 각각의 공시체에 수직응력을 50kPa와 100kPa 두 종류를 가한 다음 전단속도 0.1mm/sec에 대해 전단실험을 실시하였다. 그리고 최초 전단시험이 완료되면 동일한 공시체에 전단속도(0.1mm/sec)에서 수직응력을 20, 40, 80, 100, 150kPa로 변화시켜 각각의 수직응력에 따른 전단응력을 관찰하였다. 이를 통해 전단속도와 수직응력에 따른 파괴선(Failure line)을 결정하였다. 세 번째 전단시험은 각각의 공시체에 전단속도를 0.01, 0.1, 1, 10, 100mm/sec로 증가시키면서 전단거동을 관찰함으로써 전단속도에 따른 흙의 전단거동을 관찰하였다. 따라서 본 연구에서는 각기 다른 이질재료 간의 전단응력-전단시간 특성, 파괴선 및 전단속도 의존특성에 관한 연구로 나누어 살펴보고자 한다.

3. 링전단시험 결과

본 연구에서는 Table 2에 나와 있는 여섯 종류의 공시체에 대하여 세 가지 실험을 수행하였다. 먼저, 각기 다른 수직응력을 가한 두 종류의 공시체로부터 최대 전단응력을 측정하여 이질 재료 간의 전단응력-시간 특성을 관찰하였다. 그리고, 동일한 공시체에 여러 수직응력을 가한 다음 각각에 대한 전단응력을 측정하여 마찰각을 구하고자 하였다. 파괴선(Failure line)을 결정하는 방법으로 시험장치에 무리가 가지 않는 범위내에서 수직응력과 전단속도를 순차적으로 올려가며 최대전단응력과 잔류전단응력을 측정하였다. 이것은 상대적으로 아주 큰 전단속도에서부터 실험을 수행하게 될 때 공시체의 전단파괴면을 통한 입자의 완전 재배열을 최소화하기 위함이다. 마지막으로 여섯 종류의 공시체에 전단속도를 변화시키면서 최대전단응력과 잔류전단응력을 측정하였다. 두 번째 및 세 번째 실험을 수행한 이유는 물론 매번 새로운 시료를 사용하는 것이 바람직하지만 시료 성형에 오랜 시간이 걸리므로 동일한 시료를 이용하여 다양한 종류의 실험을 수행하여 이로부터 합리적인 결과를 얻을 수 있는지 검토하기 위함이다.

3.1 이질 재료 간의 전단응력 특성

링전단시험의 상하부를 동질 재료뿐만 아니라 서로 다른 재료를 사용하여 전단응력을 비교하였다. 즉, 모래와 모래, 점토와 점토, 모래와 점토끼리의 전단응력을 구하였다. Fig. 5는 전단회전속도를 0.1mm/sec에 대한 실험결과로 모래-모래, 점토-점토 및 모래-점토에 대해 수직응력이 50과 100kPa일 때 최대전단응력과 잔류전단응력에 대해 각각 구하였다. 최대전단응력은 초기 곡선부 최대값을 보이는 구간에서 얻었고, 잔류전단응력은 시험장비에 무리가 가지 않는 조건에서 최소 전단응력 값을 선택하였다. 모래-모래의 경우 수직응력이 50kPa에 대해 최대(잔류)전단응력은 51.89(51.38)kPa이고, 100kPa일 때 최대(잔류)전단응력은 74.74(73.68)kPa이었다. 점토-점토의 경우 수직응력이 50kPa일 때 최대(잔류)전단응력은 19.18(15.08)kPa이고, 100kPa일 때 최대(잔류)전단응력은 30.87(24.34)kPa이었다. 모래-점토의 경우 수직응력이 50kPa일 때 최대(잔류)전단응력은 27.15(17.21)kPa이고, 100kPa일 때 최대(잔류)전단응력은 28.89(19.05)kPa이었다.

모래-모래의 경우, 수직응력 50kPa에 대해 대략 50sec 내에 상대적으로 작은 응력변화를 보이며, 50sec에서 최대전단응력이 관측되었다. 수직응력 100kPa로 증가함에 따라 전단응력은 커졌으나 수직응력 50kPa에서 보인 결과와 유사한 결과를 얻었다. 전단시간이 대략 50sec에서 전단응력 65.36kPa이 관측되었으나, 실제 최대전단응력은 71sec 일 때 74.74kPa, 90sec 일 때 최소값인 73.68kPa을 보였으며 이후 다시금 증가하였다. 최대전단응력과 잔류전단응력의 차이는 수직응력 50과 100kPa에 대해 0.5kPa보다 작았다. 이와 같이 아주 작은 전단응력 변화가 관측된 것은 전단속도 0.1mm/sec가 적용될

Fig. 5. Shear stress-time relationship: (a) Sand-Sand, (b) Sand-Clay, and (c) Clay-Clay

경우 전단회전속도에 따른 전단응력이 잔류상태에 도달하지 못하였거나 또는 수직응력에 따른 회전시 링전단상자 회전부 마찰증가로 인해 전단저항이 일시적으로 높게 발생하기 때문일 것이다. 따라서 최대 및 잔류상태의 전단응력에 대한 비교분석은 전단속도를 높여가며 추가적인 실험을 수행해야 할 필요가 있다. 점토-점토, 모래-점토의 경우, 최대전단응력과 잔류전단응력 영역이 뚜렷이 관측된다. 점토-점토의 경우, 모래-모래의 경우에 비해 최대전단응력과 잔류전단응력 사이의 변화가 크지 않다. 다시 말해, 입자크기가 작을수록 두 값의 차이가 크지 않음을 알 수 있으며, 이것은 전단응력이 전단속도와 입자크기의 함수이기 때문이다(Tika et al., 1996; Tika and Hutchinson, 1999; Jeong, 2010). 모래-점토의 경우, 특정 수직응력에 관계없이 최대전단응력과 잔류전단응력을 보였고 전단거동 역시 거의 일치하는 것으로 나타났다. 이러한 특성은 전단속도에 따른 입자파쇄 및 입자재배열 특성에 기인하는 것으로 전단속도에 따른 입자파쇄 특성에서 다루기로 한다.

Fig. 5의 결과를 각각의 수직응력에 대한 최대전단응력으로 표시할 수 있다. 다시말해, x축은 수직응력이며 그 값은 50kPa와 100kPa로 y축은 각각 공시체에서 얻은 최대 전단응력으로 표현하면 기울기(마찰각)와 절편(겉보기 점착력)을 구할 수 있다. 상기 결과는 전단속도 0.1mm/sec일 때 수직응력 50과 100kPa에 대한 제한된 실험결과이다. 따라서 연구대상재료인 이질재료에 대해 전단속도와 수직응력의 변화를 고려하여 전단응력 특성을 살펴보고자 한다.

3.2 수직응력 변화에 따른 전단응력 특성

1차 실험이 완료되면 Table 3과 같이 일정 전단속도 (0.1mm/sec)에서 여섯 종류의 공시체에 대해 수직응력을 20, 40, 60, 80, 100, 150kPa로 높이면서 전단시험을

실시하였다. 이때 모래-모래, 점토-점토 및 모래-점토에 대해 각각의 최초 수직응력(50kPa와 100kPa)을 가한 공시체의 최대전단응력과 잔류전단응력을 비교분석함으로써 파괴선을 얻을 수 있었다. 여기서 최초 수직응력이란 1차 실험(Table 2)에서 처음으로 공시체에 가한 수직응력을 의미한다. 정확한 파괴선 결정을 위해서는 다양한 수직응력 조건하에서 전단응력을 얻어야 한다. 본 연구에서는 수직응력 20→40→60→80→100→150kPa로 단계별로 높여가며 전단특성을 살펴보고자 하였다. Fig. 6은 모래-모래, 점토-점토 및 모래-점토에 대해 일정한 전단회전 속도($V=0.1\text{mm/sec}$) 조건하에서 전단시간은 최대 300sec 이내로 제한하였으며, 수직응력을 달리 적용하여 최대전단응력과 잔류전단응력으로 나누어 살펴보았다. Fig. 6(a-b)에서 보이듯, 실험결과는 최대전단응력과 잔류전단응력은 모두 유사한 전단응력-시간 특성을 보였다. 최초 수직응력을 가한 실험(1차 실험, Table 2) 이후 수행된 연속 실험결과이기 때문에 공시체에 선행 수직응력 50과 100kPa로 나누어 살펴보고자 한다.

모래-모래에 대한 실험결과는 수직응력 50과 100kPa에 대해 실험한 결과와 거의 일치한다. 하지만, 수직응력을 100kPa로 재하할 때, 최대전단응력은 잔류전단응력에 비해 다소 크게 나타난다. 이러한 전단응력 특성은 전단응력 값을 최초 변곡점 부분에서 결정하였기 때문이고, 또한 전단속도가 상대적으로 낮은 경우에 속한 것에 기인한다. 점토-점토에 대한 실험결과는 수직응력 50과 100kPa에 대해 거의 일정한 기울기를 가짐을 알 수 있다. 하지만, 높은 수직응력(100kPa)이 가해진 경우, 낮은 수직응력(50kPa)이 가해진 경우에 비해 상대적으로 높은 전단응력이 얻어졌다. 모래-점토에 대한 실험결과는 점토-점토와 마찬가지로 일정한 낮은 기울기를 보이며, 최대전단응력과 잔류전단응력은 거의 나란하게 평행을 이루고 있다. Fig. 7은 상기 실험결과를 통합적으로 살펴보고자 모래-모래, 점토-점토 및 모래-점토에 대

Table 3. Shear stress as a function of normal stress

Test ID	Specimen type	Shearing speed (mm/sec)	Initial normal stress (kPa)	Normal stress (kPa)
SS2-50	Sand (upper layer)	0.1	50	20, 40, 60, 80, 100, 150
SS2-100	Sand (lower layer)		100	20, 40, 60, 80, 100, 150
SC2-50	Sand (upper layer)		50	20, 40, 60, 80, 100, 150
SC2-100	Clay (lower layer)		100	20, 40, 60, 80, 100, 150
CC2-50	Clay (upper layer)		50	20, 40, 60, 80, 100, 150
CC2-100	Clay (lower layer)		100	20, 40, 60, 80, 100, 150

해 모든 실험을 도기한 결과이다. 모래-모래의 경우, 전단응력은 수직응력의 크기에 관계없이 일정한 거동을 보인다. 점토-점토의 경우, 1차 수직응력의 크기(즉, 압밀의 영향)로 인해 상이한 전단응력을 나타냈고, 최대전단응력과 잔류전단응력에서 다소 차이를 보였다. 다만, 마찰력은 거의 동일한 것을 알 수 있다. 마지막으로, 모래-점토의 경우 가해진 1차 수직응력의 크기에 관계없이 거의 유사한 응력특성을 보이지만, 최대전단응력과

잔류전단응력의 차이가 확연히 나타났다. 이러한 점들을 종합적으로 살펴볼 때, 전단응력은 특정 구속압과 입자크기에 따라 달라짐을 알 수 있다. 모래-점토의 전단응력은 모래-모래보다는 작고, 점토-점토보다는 약간 크게 나타났다. 따라서, 특정 구속압에 대해 이질 재료 간의 최대전단응력과 잔류전단응력의 차이는 점토의 존재여부와 밀접한 관련이 있음을 알 수 있다.

Fig. 6. Failure lines for a given shearing speed ($V=0.1$ mm/sec): (a-b) Sand-Sand, (c-d) Sand-Clay and (e-f) Clay-Clay

Fig. 7. Failure lines for a given shearing speed ($V=0.1$ mm/sec): (a) Sand-Sand, (b) Sand-Clay and (c) Clay-Clay

3.3 전단속도에 따른 전단응력 특성

세 종류의 시료에 대하여 두 종류의 수직응력을 가한 다음 전단속도를 0.01, 0.1, 1, 10, 100mm/sec로 하여 전단을 실시하였으며 전단속도에 따른 전단응력의 변화를 관찰하였다. Fig. 8은 상부와 하부 시료가 각기 다른 공시체에 구속압이 50과 100kPa로 각기 다른 경우에 대한 실험 결과이다. 결론적으로 입자크기에 관계없이 전단속도가 커질수록 전단응력이 크게 나타났다. 그림에

서 보이듯, 본 연구결과는 전단속도를 300sec내로 제한하였다. 따라서 전단속도가 낮을수록 상대적으로 긴 시간 전단이 필요하고, 전단속도가 높아질수록 상대적으로 짧은 전단시간이 요구된다. 이것은 기술적인 측면에서 정확한 전단응력의 측정이 링전단상자의 기밀성과 밀폐성과 관련되기 때문이다. 전과정에서 전단속도 0.01mm/sec를 제외하면 전반적인 응력특성을 이해하는데 별 어려움이 없었다. 전단속도 0.01mm/sec의 경우 아주 느리게 하부 링이 회전하면서 실질적인 공시체내 입자간 마찰저항이 발생하지 못하는 구간, 즉, 응력측정이 지연되는 구간이 존재하며 이와 같은 결과는 과거 비슷한 실험에서도 찾아볼 수 있다(Fukuoka et al., 2007). 본 연구에서는 모래-모래의 경우, 전단속도 0.01mm/sec에 대해 주어진 전단시간 내에서 큰 전단응력의 변화가 관측되지 않았다. 수직응력 50kPa를 적용하였을 때, 전단시간 300sec까지 대략 0.2kPa를 보였으며, 300sec 이후 최대 53.6kPa의 전단응력을 보였다(하지만, 300sec 이상 전단을 가할 경우, 흙 시료에 의한 마찰저항이 아닌, 고무링에 의한 마찰저항이 고려되므로 본 실험결과에서는 생략하기로 한다). 또한 전단속도를 높일수록, 최초 전단응력이 발휘되는 구간이 점차 짧아지고, 전단속도가 1mm/sec이상일 경우, 전단과 동시에 최대전단응력을 보이는 경향이 관측되었다.

모래-모래의 경우, 상대적으로 낮은 전단속도(i.e., 0.1 mm/sec) 조건을 제외하면 전단과정에서 변형이 증가할수록 전단응력이 감소하는 특성을 보였다. 전단속도 0.1 mm/sec의 경우, 구속조건에 따라 전단거동이 달라진다. 예를 들어, 구속압을 50kPa로 하였을 경우, 60sec에서 일시적 최대전단응력을 보이다 시간에 따라 지속적인 응력증가를 보였다. 이러한 실험결과는 전단속도에 따라 달라진다. 예를 들어, 사용된 링전단시험장치에서 하부 링이 완전한 1회전을 하기 위해서는 7850sec가 소요된다. 이것은 미소변형에 따른 모래 입자들간의 초기 입자재배열과 맞물림에 따른 응력상태 변화와 관련되며 상대적으로 낮은 전단속도와 구속압 조건에서 공시체내 주어진 임의의 전단면을 통해 시료가 파괴상태에 완전히 도달하지 못하였음을 의미한다. 구속압을 100kPa로 재하할 경우, 구속압 50kPa에 비해 10sec 빠른 전단시간 50sec에서 최대전단응력을 보였으며 거의 유사한 응력수준(stress level)에 도달되었다. 흥미롭게도 구속압이 50kPa인 경우, 전단이 시작된 이후 일시적 응력발휘 구간(45-65sec)에 도달하기까지 전단지연시간(0-45sec)

Fig. 8. Shear stress as a function of shearing speed: (a-b) Sand-Sand, (c-d) Sand-Clay and (e-f) Clay-Clay

이 존재한다. 수직응력이 100kPa일 때 이보다 짧은 전단지연시간이 나타났다. 전단지연시간은 연구대상시료에 관계없이 전단속도와 구속압이 증가할수록 확연히 감소한다. 모래-모래의 경우, 전단속도를 높일수록(i.e., $V > 1\text{mm/sec}$), 최대전단응력이 발휘되는 시간이 줄어들고, 최대전단응력과 잔류전단응력은 구속압을 높일수록 커짐을 알 수 있다. 점토-점토와 모래-점토에 대한 실험결과에 따르면, 모래-모래의 결과에 비해 응력크기는 다르지만 비슷한 전단응력 특성이 관찰되었다.

세 시료에 대해 전단속도에 따른 전단응력을 최대값(최대)과 최소값(잔류)으로 나누어 살펴보았다(Fig. 9). 앞서 분석한 동일한 방법으로 세 시료에 대해 각각 구속압을 50과 100kPa로 나누고 각 시료에 대한 최대전단응력과 잔류전단응력의 변화를 그림으로 도시하였다. 예상했던 것과 같이, 전단속도가 점진적으로 증가함에 있어 세 시료 모두 전단응력이 증가함을 알 수 있었다. 또한 주어진 전단속도에 대해 세 시료 모두 최대전단응력과 잔류전단응력은 각각 비슷한 결과값을 얻었다. 하지만,

Fig. 9. Shear stress as a function of shearing speed: (a-b) Sand-Sand, (c-d) Sand-Clay and (e-f) Clay-Clay

모래-모래의 경우(Fig. 9a-b) 0.01mm/sec에서 최대전단응력이 잔류전단응력보다 다소 크게 나타났는데, 이것은 Fig. 8에서 보였듯, 낮은 전단속도($< 0.1\text{mm/sec}$)에서 완전한 응력특성을 얻을 수 없었기 때문이다. 구속압 조건에 관계없이 주어진 전단속도(e.g., $\leq 100\text{sec}$)에 대해 잔류전단응력은 전단속도를 증가시킬수록 전단응력이 커짐을 보이지만, 아주 낮은 전단속도로 구속할 경우 입자가 완전히 재배열되는 완전 잔류상태에 도달되었는지 여부는 여전히 불분명하다. 이러한 불확실성을 해결하기 위해서는 상대적으로 오랜 시간의 전단회전이 필요하기

에 추가적인 실험적 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

점토-점토의 경우(Fig. 9c-d) 모래-모래에 비해 비교적 작은 응력변화를 보이지만, 전단속도와 구속압을 높일수록 최대전단응력과 잔류전단응력은 증가하였다. 잔류전단응력의 경우 전단속도를 10mm/sec 일 때를 제외하면 조사된 전단시간 범위에서 최대전단응력뿐만 아니라 잔류전단응력 역시 전단속도의 함수임을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 Tika et al.(1996)의 속도의존성 전단응력 연구에서도 찾아 볼 수 있다.

모래-모래와 점토-점토의 경우와 마찬가지로, 모래-점토에 대한 실험결과(Fig. 9e-f) 역시 전단속도를 증가시킬수록 전단응력은 커진다. 하지만 모래-모래에 대한 실험결과와 비교하여 동일한 전단속도에 대해 최대전단응력과 잔류전단응력은 상대적으로 작음을 알 수 있다. 무한변형이 가해지는 상부 링의 모래와 하부 링의

점토 간 혼합층의 전단거동은 점토보다는 크고 모래보다는 작은 전단강도 특성을 보였다.

4. 전단에 따른 이질재료의 입자파쇄 특성

전단에 따른 이질재료의 전단응력 변화는 전단면에

Fig. 10. Reduction in shear resistance due to wetting at shear zone: (a-b) Sand-Sand, (c-d) Sand-Clay and (e-f) Clay-Clay

Table 4. Shear stress dependency on shear rate

Test ID	Specimen type	Initial normal stress (kPa)	Shearing rate (mm/sec)
SS3-50	Sand (upper layer)	50	0.01, 0.1, 1, 10, 100
SS3-100	Sand (lower layer)	100	0.01, 0.1, 1, 10, 100
SC3-50	Sand (upper layer)	50	0.01, 0.1, 1, 10, 100
SC3-100	Clay (lower layer)	100	0.01, 0.1, 1, 10, 100
CC3-50	Clay (upper layer)	50	0.01, 0.1, 1, 10, 100
CC3-100	Clay (lower layer)	100	0.01, 0.1, 1, 10, 100

서의 입자간 마찰력과 파쇄특성에 의존한다. 주어진 구속압과 전단속도에 따른 전단응력의 변화는 자갈처럼 입자크기가 큰 경우 입자파쇄현상이 주요한 원인이 된다. 하지만, 입자크기가 작을수록 입자파쇄현상보다는 미끄러짐과 젖음현상(wetting process)에 의해 응력이 감소한다. 이러한 현상은 비배수 조건일 경우 더욱 두드러지며 세 시료에 대해 전단시험 종료후 링전단상자 전단면 특성을 확인하였다. Fig. 10에서 보인 바와 같이, 모든 시료에 대해서 육안으로 뚜렷한 전단면이 형성됨을 알 수 있다. 모래-모래의 경우, 상부층과 하부층 사이에 대략 1cm의 전단면이 존재하였다. 점토-점토의 경우, 전단면을 통한 시료가 상하부로 완전 분리되어 파괴단계에 도달하였음을 육안으로 확인할 수 있었다. 이때 전단회전에 따른 전단응력의 변화는 전단면을 통해 미끄러짐과 마찰저항에 기인한다. 점토-점토의 경우, 수직응력 50kPa일 때 함수비는 상부 및 하부 링의 상대적으로 교란의 영향을 적게 받은 시료에 대해 44.72%와 41.37%로 나타났으며, 전단면에 있어 함수비는 44.23%였다. 수직응력 100kPa로 증가하였을 경우, 상부 링과 하부 링에 측정된 함수비는 각각 39.97%와 39.72%였으며, 전단면의 함수비는 40.92%로 나타났다. 함수비의 변화가 상대적으로 크지 않은 것은 실험 종료 후 공시체내 잔존하는 간극수를 공기압을 통해 제거한 후 측정된 값이기 때문이다. 모래-점토의 경우, 수직응력 50kPa일 때 전단면은 대략 1cm의 모래와 점토의 교착(mixing)되는 구간이 존재하였다. 이 교착부분은 전단이 진행되는 동안 서로 다른 이질층의 입자들이 재배열되어 모래-모래보다는 작고 점토-점토보다는 상대적으로 큰 전단응력을 보인 이유로 판단된다. 이때의 함수비는 상부 및 하부 링의 교란의 영향을 상대적으로 적게 받은 시료에 대해 20.04%(모래)와 40.55%(점토)로 나타났으며, 전단면에 있어서는 수직응력 50kPa일 때 24.50%, 수직응력 100kPa일 때 32.44%로 상대적으로 큰 함수비의 변화를

보였다. 즉, 전단에 따른 입자들의 재배열은 전단응력의 변화와 관련된다.

5. 결 론

본 연구에서는 링전단시험장치를 이용하여 이질재료 간의 전단응력 특성에 대한 연구를 수행하였다. 모래와 모래, 점토와 점토, 모래와 점토끼리의 전단특성을 (i) 전단시간에 따른 전단응력 특성, (ii) 수직응력에 따른 전단특성, (iii) 전단속도에 따른 전단특성 및 (iv) 전단면의 특성 등으로 나누어 살펴보았으며, 그 결과는 아래와 같다.

- (1) 세 시료에 대해 동일한 전단속도(0.1mm/sec)에서 수직응력을 50과 100kPa로 나누어 구속하였을 경우, 전단응력의 변화를 관찰하였다. 모래-모래의 경우를 제외하면, 최대전단응력과 잔류전단응력이 뚜렷이 나타났다. 모래-모래의 경우, 전단속도가 <0.1 mm/sec가 적용될 경우 전단회전속도에 따른 전단응력이 잔류상태에 도달하지 못하였다. 점토-점토의 경우, 모래-모래의 경우에 비해 최대전단응력과 잔류전단응력 사이의 차이가 크지 않다. 다시 말해, 입자크기가 작을수록 두 값의 차이가 크지 않았다. 모래-점토의 경우, 최대전단응력과 잔류전단응력은 특정 수직응력의 변화에 대한 영향이 적은 것으로 나타났다.
- (2) 세 시료에 대해 동일한 전단속도(0.1mm/sec)에서 수직응력을 20→40→60→80→100→150kPa로 단계별로 높여가며 전단특성을 관찰하였다. 모래-모래의 경우 구속압과 수직응력 재하크기에 관계없이 일정한 파괴선을 얻었다. 점토-점토의 경우 1차 수직응력의 크기(300sec동안의 압밀 적용)에 따라 최대전단응력과 잔류전단응력은 다소 차이를 보였으

나 마찰각은 거의 동일하게 나타났다. 모래-점토의 경우 1차 수직응력의 재하크기에 관계없이 유사한 응력거동을 보였으나, 최대전단응력과 잔류전단응력의 차이가 확연히 나타났다. 결과적으로 특정 구속압에 대해 모래-점토의 전단응력은 모래-모래보다는 작고, 점토-점토 보다는 약간 큰 것을 알 수 있다.

- (3) 세 시료에 대해 특정 구속압 조건하에서 0.01, 0.1, 1, 10, 100mm/sec로 각기 다른 전단속도를 적용하여 전단을 실시하여 전단속도에 따른 전단응력의 변화를 관찰하였다. 그 결과 연구대상재료의 입자크기와 특정 구속압에 관계없이 전단속도가 커질수록 전단응력은 커지는 것으로 나타났다. 상기 실험결과는 전단속도를 300sec까지 제한적으로 적용한 결과이며, 전단속도가 낮을수록 상대적으로 긴 시간 동안 전단이 필요하고, 전단속도가 높아질수록 상대적으로 짧은 전단이 필요함으로 이에 대한 추가적인 연구가 수행되어야 할 것이다.
- (4) 이질재료에 대한 전단특성은 전단면의 입자간 마찰력과 파쇄특성과 관련된다. 특정 구속압과 전단속도에 따른 전단응력의 변화는 입자크기에 따라 상이한 특성을 보이는데, 모래-모래보다 큰 입자크기를 가진 재료에 대해서는 입자파쇄가 주된 원인이 될 것이다. 하지만 입자크기가 작을수록 입자파쇄 현상보다는 전단면 파괴와 미끄러짐에 의해 응력감소가 발생한다. 실험종료 후 전단면 분석결과, 입자크기에 관계없이 뚜렷한 전단면이 형성되었음을 육안으로 확인할 수 있다. 모래-모래의 경우, 상부층과 하부층 사이에 대략 1cm의 전단면이 존재하였고, 점토-점토의 경우, 상부와 하부가 완전 분리되었으며, 모래-점토의 경우, 1cm 정도의 모래와 점토의 혼합구간이 존재하며 전단응력의 감소를 야기시켰다.
- (5) 실제 산사태 현장에서 쉽게 찾아볼 수 있는 토사의 입자크기는 다양하다. 따라서 본 연구를 바탕으로 향후 점토~자갈까지 다양한 입자크기에 대한 이질재료간 전단강도 특성연구가 수행되어야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 일부 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재

원으로 한국연구재단의 공공복지안전기술개발사업 지원을 받아 수행되었으며(No. 2012M3A2A1050982) 이에 감사드립니다. 또한 본 연구는 교육과학기술부 ‘공공복지안전기술개발사업’의 일환으로 수행한 ‘극한강우 산사태 입체 모니터링을 위한 산사태 예·경보 기술 연구(2012M3A2A1050983)’의 지원으로 수행되었습니다. 또한 본 연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 “광산개발에 따른 지질환경재해 확산제어 기술 개발(13-3212)” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. Brumund, W. F. and Leonards, G. A. (1973), Experimental study of static and dynamics friction between sand and typical construction materials, *Journal of Testing and Evaluation*, Vol.1(2), pp.162-165.
2. Fukuoka, H., Sassa, K., and 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*, Vol.4, pp.63-74.
3. Jeong, S.W., Fukuoka, H., and Song, Y.S. (2013), “Ring-shear apparatus for estimating the mobility of debris flow and its application”, *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, Vol.33(1), pp.181-194. (Korean)
4. Jeong, S.W. (2010), “Grain size dependent rheology on the mobility of debris flows”, *Geosciences Journal*, Vol.14(4), pp.359-369.
5. Kim, Y.S. and Kim, D.M. (2009), “Characteristics of Friction Angles between the Nakdong River Sand and Construction Materials by Direct Shear Test”, *Journal of the Korean geotechnical society*, Vol.25(4), pp.105-112. (Korean)
6. Korean Geotechnical Society (2011), Final report on Landslides at Umyeonsan, KGS, KGS11-250.
7. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (2009), Development of practical technologies for countermeasures for hazards in steep slope and abandoned mine areas, Ministry of Knowledge Economy, GP2009-020-2009(1), 315p. (Korean)
8. Park, S.S. and Y.S. Kim (2011), “Effect of Gravel Size on Shear Behavior of Sand with Dispersed Gravels”, *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, 31(1C), pp.31-51. (Korean)
9. Park, S.S., Kim, Y.S., and Sung, H.Y. (2010), “Undrained Shear Behavior of Sand with Dispersed Gravels”, *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, 30(5C), pp.209-218. (Korean)
10. Potyondy, J.G. (1961), Skin friction between various soils and construction materials, *Geotechnique*, Vol.11(4), pp.339-353.
11. 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.
12. Sassa, K. (1997), A new intelligent-type dynamic-loading ring-shear apparatus. *Landslide News*, No.10, p.33.
13. Sassa, K., Fukuoka, H., Wang, G., and Ishikawa, N. (2004), Undrained dynamic-loading ring-shear apparatus and its application to landslide dynamics, *Landslides*, Vol.1, pp.7-19.
14. 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.
15. 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.
 16. Uesugi, M., Kishida, H., and Uchikawa, Y. (1990), Friction between dry sand and concrete under monotonic and repeated loading, *Soils and Foundations*, Vol.30(1), pp.115-128.
 17. Vallejo, L.E. (2001), Interpretation of the limits in shear strength in binary granular mixtures. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 38, pp.1097-1104.
 18. Vallejo, L.E. and Lobo-Guerrero, S. (2005), The elastic moduli of clays with dispersed oversized particles. *Engineering Geology*, Vol.78, pp.163-171.
 19. Vallejo, L.E. and Mawby, R. (2000), Porosity influence on the shear strength of granular material-clay mixtures. *Engineering Geology*, 58, pp.125-136.
- (접수일자 2013. 3. 14, 심사완료일 2013. 4. 18)