

부산 임기광산 광미의 전단속도에 따른 링 전단특성 연구

Shear-Rate Dependent Ring-Shear Characteristics of the Waste Materials of the Imgi Mine in Busan

정 승 원¹ Jeong, Sueng-Won
지 상 우² Ji, Sang-Woo
임 길 재³ Yim, Gil-Jae

Abstract

Abandoned mine deposits are exposed to various physico-chemical geo-environmental hazards and disasters, such as acid mine drainage, water contamination, erosion, and landslides. This paper presents the ring shear characteristics of waste materials. The ring shear box with a rotatable O-ring was used in this study. Three tests were performed: (i) Shear stress-time relationship for given normal stress and shear speed, (ii) shear stress as a function of shear speed, and (iii) shear stress as a function of normal stress. For a given normal stress (50 kPa) and speed (0.1 mm/sec), the materials tested exhibit a strain softening behavior, regardless of drainage condition. The peak and residual shear stresses were determined for each normal stress and shear speed. The shear stress was measured when shear speed is equal to 0.01, 0.1, 1, 10, 50, 100 mm/sec or when normal stress is equal to 20, 40, 60, 80, 100, 150 kPa. From the test results, we found that the shear stress increases with increasing shear speed. The shear stress also increases with increasing normal stress. However, different types of shearing mode were observed in drained and undrained conditions. Under drained condition, particle crushing was observed from the shearing zone to the bottom of lower ring. Under undrained condition, particle crushing was observed only at the shearing zone, which has approximately 1 cm thick. It means that a significant high shear speed under undrained condition can result in increased landslide hazard.

요 지

휴·폐광산지는 산발생, 지하수 오염뿐만 아니라 침식 및 산사태 등 다양한 물리화학적 지질재해에 노출되어 있다. 임기광산 폐석적치장 광미를 대상으로 링 전단시험을 수행하여 전단속도에 따른 전단특성을 조사하고 한다. 본 연구에 있어 마찰저항을 최소화할 목적으로 링 전단상자 오링(O-ring)은 전단동안 회전이 가능하도록 설계되었다. 1차 시험은 일정한 수직응력(50kPa)과 전단속도(0.1mm/sec) 조건에서 전단시간에 따른 전단응력을 조사하였다. 2차 시험은 일정한 수직응력 조건에서 전단속도를 0.01, 0.1, 1, 10, 50, 100mm/sec로 순차적으로 증가시켜 전단속도에 따른 전단응력을 조사하였다. 3차 시험은 일정한 전단속도(0.1mm/sec)하에서 수직응력을 20, 40, 60, 80, 100, 150kPa로 증가시켜 각 경우에 대한 전단응력을 조사하였다. 시험결과에 따르면, 배수조건에 관계없이 임기광산 폐석적치장

1 정희원, 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 지질재해연구실 책임연구원 (Member, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Tel: +82-42-868-3911, Fax: +82-42-868-3414, swjeong@kigam.re.kr, Corresponding author, 교신저자)

2 비희원, 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 환경지질연구실 책임연구원 (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)

3 비희원, 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 환경지질연구실 선임연구원 (Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 1월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

광미시료는 전단연화거동(strain softening behavior)을 보였다. 특히 전단속도가 10mm/sec보다 작은 경우 잔류전단응력은 100~300초 사이에 일정한 값에 도달하는 것으로 나타났다. 2차와 3차 시험결과에 따르면, 배수조건에 관계없이 전단응력은 전단속도와 수직응력의 함수로 나타났다. 하지만, 배수조건에 따라 링 전단상자 전단부에서 상이한 입자파쇄 특성이 관측되었다. 배수조건시 전단상자 전단면에서 하단까지 넓은 전단띠가 형성된 것에 반해, 비배수조건시 전단면에 국부 전단띠가 형성되었다. 이러한 점에 비추어 볼 때, 전단속도에 따른 입자파쇄 특성은 산사태 유동성을 높이는 중요한 인자로 판단된다.

Keywords : Ring-shear test, Landslide, Debris flow, Mine deposits, Waste materials, Shear-rate

1. 서론

최근 집중호우에 따라 크고 작은 사면 붕괴나 토석류가 발생함으로써 산사태 발생 메커니즘 규명과 확산피해 저감기술을 마련하고자 하는 노력이 시도되고 있다(KIGAM, 2012). 특히 2011년 서울 우면산, 강원도 춘천 펜션, 경남 밀양 등지에서 대형 산사태가 발생하였다. 산사태는 자연사면뿐만 아니라 인공사면에서도 빈번하게 발생한다. 광산개발 후 버려진 폐석적치장도 예외는 아니다. 또한 적절한 광해방지사업없이 방치된 휴폐광산 지역에서는 하절기 집중호우로 인해 다량의 중금속을 함유한 산성광산배수(acid mine drainage)가 형성되어 주변 수계와 토양을 오염시키는 것으로 알려져 있다(Youm et al., 2002; Cheong et al., 2004; Ji and Cheong, 2005). 자연적 식생을 도입하여 광산폐석 적치장의 안정성을 고려한 이후에도 집중호우 등에 의한 산사태 위험성은 높은 것으로 나타났다. Fig. 1은 광해방지사업이후 집중호우에 따른 산사태 피해사례이다. Fig. 1(a)는 강원도 삼척시 도계에서 집중호우에 따른 얇은 심도의 사면붕괴 사례이고, (b)는 강원도 삼척시 소재 금속광산 광물찌꺼기 적치장 붕괴사례이며, (c)는 강원도 태백시 소재 석탄광 폐석사면에서 태풍 루사로 인해 발생한 붕괴사례이다. 상기 산사태 재해는 모두 집중호우에 따른 것으로 사면붕괴로 인한 1차적 기반재해가 발생하였으며 금속광산과 석탄광 적치사면의 경우처럼 붕괴 토석은 토석류 형태로 3~30km에까지 흘러감으로써 광산찌꺼기 내 중금속에 따른 2차적 수질오염을 초래하였다. 따라서 극한기후 조건에서 강우는 불안정 사면의 물리화학적 확산의 주된 원인이 된다.

토석류와 같은 토사 대변형과 확산성은 얼마나 많은 양의 토사가 얼마나 빠른 속도로 어디까지 흘러갈지 예측하는 것이 중요하다. 이러한 토석류 유동성 해석에 필

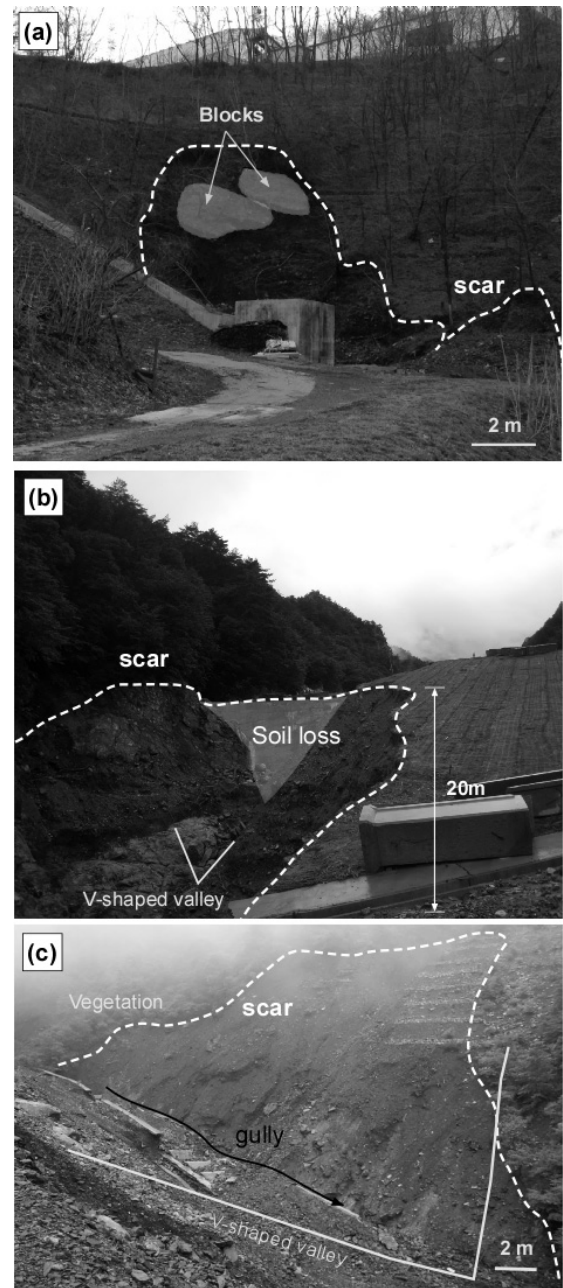


Fig. 1. Rainfall-induced mass movements in vegetating waste dumps: (a) Gangwon Samcheok site 1, (b) Gangwon Samcheok site 2, and (c) Gangwon Taebaek

요한 입력매개변수는 전단강도이다. 현재까지 토석류의 전단강도를 결정하기 위한 다양한 노력이 있어왔으며, 링 전단시험장치가 하나의 대안으로 제시되었다(Sassa et al., 2004). 광산폐석과 같이 빈입도를 가진 모래와 자갈의 혼합재료는 대형 삼축시험장치 또는 대형 직접전단시험장치를 통한 전단특성분석이 필요하다. 하지만 상기 시험장치들은 제한된 속도와 변형에 대한 산사태 해석에 적합하지만 사면붕괴에서 토석류까지 이르는 대 변형 거동을 해석하기에 부적합하다. 이러한 이유로 배수 및 비배수전단강도 측정용 링 전단시험장치의 활용이 확대되고 있다(Sassa, 2000; Sassa et al., 2003, 2004; Jeong et al., 2013). 하지만, 흙의 전단강도 특성은 배수 조건 별 수직응력과 전단속도에 따라 상이한 결과를 나타내므로 이러한 점을 고려한 연구가 필요하다(Wang et al., 2010). 산사태의 유동특성을 이해하기 위해서는 잔류전단강도 특성이 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 광산 개발후 방치된 폐석적치장 광미를 대상으로 한국 지질자원연구원에서 개발된 배수 및 비배수전단강도 측정용 링 전단시험장치를 이용하여 전단속도에 따른 전단응력 특성을 조사하고자 한다. 또한 배수조건에 따른 전단파 형성 과정에 대해 토의하고자 한다.

2. 연구대상지역, 시험시료 및 시험방법

2.1 연구대상지역

임기광산은 혼합형 납석광산으로 부산광역시 기장군 철마면 임기리에 위치하며 1980년대 가행되다 1992년 폐광된 광산지이다(Fig. 2). 채굴된 노천광 형태의 임기광산의 면적은 40,000m²이다. 임기광산 폐석적치장은 상부 복토 및 식생조성이 이루어진 부분과 하부 비복토

부분으로 구분된다. 오늘날까지 적절한 처리없이 방치된 폐석적치장은 낮은 pH와 오염된 산성배수(acid mine drainage)가 유출되어 수질을 변화시키고 주변 수로에 적화현상을 유발하는 등 주변 수영장 수계에 직접적인 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다(Cheong et al., 2004, 2007; Ji and Cheong, 2005). 침출수 발생은 대부분의 경우에 의한 것이다. 또한 이러한 낮은 pH에 의한 광산배수는 적은 양의 중금속을 포함한다 할지라도 광범위한 지역에 오염을 야기시킬 수 있다(Youm et al., 2002). 특히 방치된 폐석적치장은 녹화가 잘 이루어지지 않아 산림복원이 힘들기 때문에 사면 안정화작업을 위해 인공 식재 도입에 따른 적정 복토처리방안이 제안되어야 한다(Cheong et al., 2007). 임기광산은 자연적인 식생도입이 매우 불량하여 많은 침식이 진행되었으며 극한기후 등 경우에 의한 토사재해가 빈번하게 발생하는 지역으로 현재 한국지질자원연구원에서 주요사업으로 사면의 안정성과 확산성에 대한 연구를 진행중이다. 현재 연구 대상지역은 산성배수 발생, 침출수 오염, 주변토양 오염, 광해방지사업 부실 등으로 인한 침식 등 물리화학적 복합지질재해가 발생한 지역으로 간주되고 있다(KIGAM, 2012).

2.2 시험시료

본 연구에서는 임기광산 폐석적치장에서 채취한 광미를 사용하여 전단특성에 대해 연구하였다. 시험시료는 폐석적치장 노상에서 4번째 통과시료(<4.75mm)를 채취하였다. 링 전단시험은 노건조된 시료를 현장건조밀도에 기준하여 전단상자 시료틀에 준비하고 5층 다짐형태로 현장조건에 맞추었다. 노건조 시료를 준비된 시료틀에 넣고 표면을 대략 1.5cm 두께로 고르게 한 후 고무망

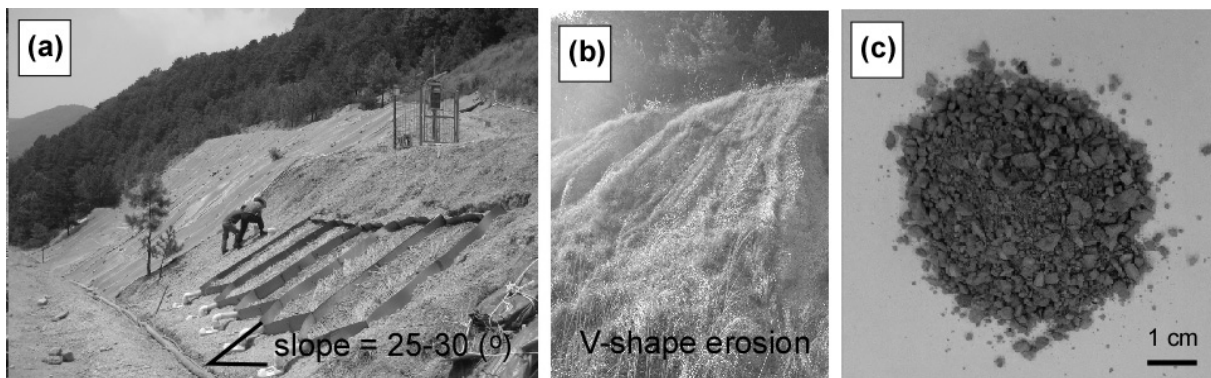


Fig. 2. Imgi waste dumps: (a) monitoring site, (b) erosion, and (c) samples

치를 사용하여 시료를 측면부를 타격하는 방법으로 다짐하였다. 시험에 사용된 시료의 비중은 2.6이고, 투수계수는 2×10^{-4} cm/sec, 현장 함수비는 7%, 액성한계는 25%였다(KIGAM, 2012). 시료의 물성특성은 Table 1과 같다.

2.3 시험방법

산사태의 안정성과 유동화산성 평가방법에는 토질의 전단강도 특성이 요구된다. 이를 위해 현장 베인실험 또는 실내 전단실험 등이 사용된다. 산사태 활동과괴면의 전단특성을 규명할 목적으로 일본 교토대학교 방재연구소 산사태연구팀(Disaster Prevention Research Institute)에서 링 전단시험기를 개발하였다(Sassa, 1997; Sassa et al., 2003, 2004). 개발된 시험기는 지상(강우유발) 및 해저(지진유발) 환경에서 발생한 다양한 산사태 재해원인 규명에 활용되고 있다. 국내에서는 2011년 한국지질자원연구원에서 세립토와 조립토 범용 링 전단시험기(Fig. 3)를 개발하였다. 본 시험기는 배수, 압밀, 전단속도 제어가 가능한 시험기이며 특히 토사 대변형을 재현할 수 있는 흙의 전단강도 측정용 시험기이다(Jeong et al.,

2013). 본 시험기를 사용하여, Park et al.(2013)은 모래와 점토를 대상으로 이질재료 간의 링 전단특성을 연구한 바 있다.

링 전단시험기는 전단상자(ring-shear box), 수직하중 제어장치, 수직변위계, 토크측정장치, 간극수압계측기 등으로 구성된다(Fig. 3(a-d)). 시험방법은 네 단계로 구성된다. 첫 단계로 시료준비 단계이다. 링 전단상자는 외경이 250mm, 내경이 110mm, 높이가 70mm의 크기로 제작된 상부 링과 하부 링을 결합된 형태이다. 전단상자는 흙 시료와 벽면 간 미끄러짐을 방지하기 위해 거친면으로 설계되었으며, 전단동안 인위적 마찰력을 최소화하기 위해 링 사이의 고무링은 회전이 가능하게 설계되었다. 시료 성형은 층다짐을 통해 시험자가 원하는 조건에 맞추며 점토에서 큰 자갈까지 다양한 입자크기(0.002~75mm)를 대상으로 시험이 가능하다. 본 연구에서는 70mm인 공시체에 목표 단위중량에 해당하는 양의 시료를 넣고 다져서 공시체를 제작하였다. Fig. 3(b)에서 보인 것 처럼, 세 개의 피스톤을 통해 상부로부터 수직응력을 제어(normal stress control)하고, 시험하고자 하는 배수조건을 결정한다. 토크를 측정하기 위해 전단

Table 1. Physical properties of the lmg waste materials (from KIGAM, 2012)

G_s	w (%)	γ_t (t/m^3)	γ_d (t/m^3)	D_{10}	c_u	w_L (%)	w_p
2.637	6.9	1.7	1.59	0.0064	406	24.5	-

Note: G_s = specific gravity, w = water content (%), γ_t = total unit weight (t/m^3), γ_d = dry unit weight (t/m^3), D_{10} = effective grain size (mm), c_u = uniformity coefficient, w_L = liquid limit (%), w_p = plastic limit (%)

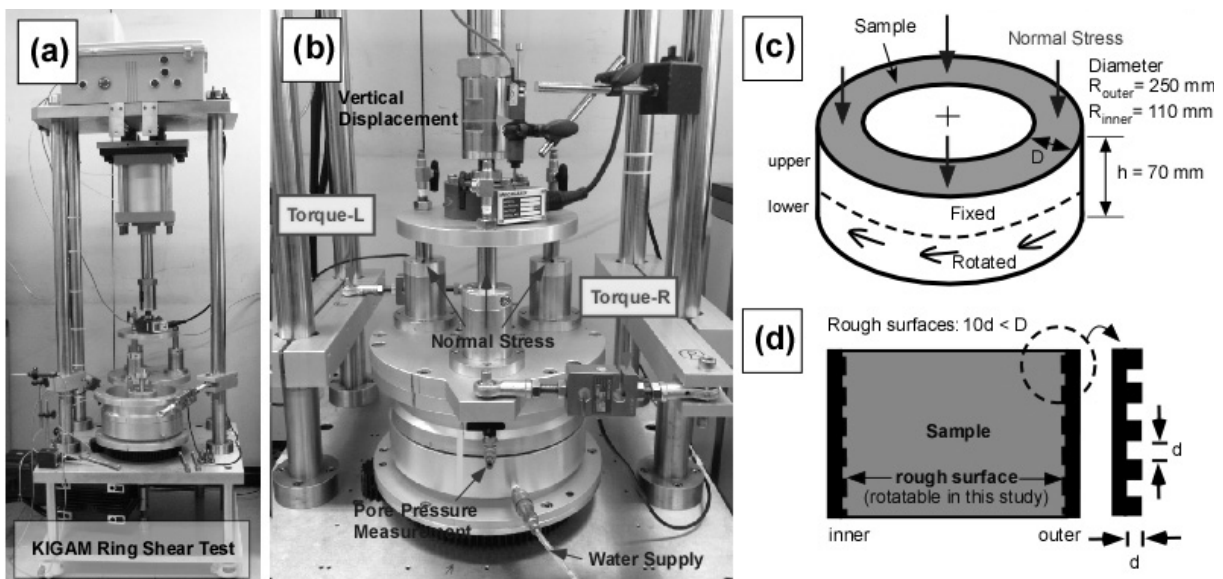


Fig. 3. Ring shear apparatus: (a) ring shear apparatus set up in KIGAM (2011), (b) ring shear system with a measurement of normal stress, pore pressure, torque and displacement, (c) ring shear box, and (d) rough surface used (rotatable in this study to minimize the friction)

상자 상부에 위치한 두 개의 토크측정장치(Torque-L과 Torque-R)를 연결한다. 간극수압계측기와 수직변위계를 설치한다. 두 번째 단계는 포화단계이다. 전단상자에는 다수의 연결밸브가 존재한다. 이 밸브를 통해 외부로부터 물을 주입한다. 일반적으로 하부 링에 위치한 호스 밸브를 통해 물을 유입시키고 상부 링에 위치한 밸브에서 물이 흘러나오게 하여 공기제거작업을 시작한다. 복수개의 밸브를 통해 유입과 유출을 반복 확인한 후 비배수 상태로 최대 1시간에서 최대 24시간까지 포화시킨다. 실험 시작 전 B_D (연직응력 증분/간극수압 증분) 값을 점검함으로써 포화를 최종 확인한다. B_D 값이 0.95보다 클 때 포화가 완전히 된 것으로 간주한다. 일반적으로 포화 시료를 제작하기 위하여 이산화탄소를 주입 후 증류수를 주입을 통해 간극 내 공기를 제거하는 것이 보편적인 방법이다. 본 연구에서는 가스주입대신 장기간 공기압을 가함으로써 시험시료를 포화시켰다. 따라서 시험시료의 포화도가 전단특성에 미치는 영향이 무시할 수 없으므로 본 연구에서 간극수압 특성에 대해서는 다루지 않는 것으로 한다. 시료가 모래 또는 자갈을 다량 함유한 경우 포화단계에 소요되는 시간은 1일 이내이나, 점토의 경우 대략 7일 정도가 소요된다(Jeong et al., 2013). 세 번째 단계는 압밀단계이다. 사용자가 원하는 하중조건을 선택하고 수직하중이 상부 세 개의 피스톤을 통해 링 전단상자 내부의 증공형 시료에 가한다. 갑작스런 수직하중 재하에 따른 시료의 압축이 발생되지 않도록 수직하중이 시료에 도달되는 시간이 조절된다. 예를 들어 본 연구에서는 수직하중 50kPa을 시료에 500sec 동안 일정한 속도로 가하였다. 이것은 아주 얇은 심도(0-25kPa)에서 깊은 심도(100kPa) 사이의 중간심도에 대한 시험 조건이다. 마지막 단계는 전단단계이다. 시료성형, 포화, 압밀 단계가 끝나면 배수조건을 선택하고 시험자가

지정한 일정한 전단속도에 따라 전단상자 하부 링을 무한 회전시킴으로써 전단시험을 수행한다.

링 전단시험은 세 가지 방법으로 분류된다(Table 2). 1차 시험은 전단시간에 따른 전단응력 특성을 조사하기 위해 각각의 공시체에 일정한 수직응력(50kPa)과 전단속도(0.1mm/sec)를 가하고 최대전단응력과 잔류전단응력을 측정하였다. 본 시험기는 다른 전단시험기에 비해 시료성형과 시료포화를 위해 오랜 시간이 소요되므로 동일한 시료를 이용하여 2차 및 3차 시험을 연달아 수행하였다. 1차 시험이 완료되면 2차 시험으로 동일한 공시체에 전단속도를 0.01, 0.1, 1, 10, 100mm/sec로 순차적으로 증가시켜 전단속도에 따른 흙의 전단거동을 관찰하였다. 3차 시험은 일정한 전단속도 조건에서 수직응력을 20, 40, 60, 80, 100, 150kPa로 변화시키면서 각각의 수직응력에 따른 전단응력의 변화를 관찰하였다. 여기서 1차, 2차 시험 종료 후 연속하여 수행된 전단시험은 토질의 최대전단응력 특성보다는 잔류전단응력을 평가하기에 적합한 방법이다. 세 가지 시험이 모두 종료되면 광미시료에 대해 전단에 따른 입자파쇄 특성을 조사하였다. 따라서 본 연구에서는 임기광산 폐석적치장 광미시료를 대상으로 전단시간, 전단속도 및 수직응력에 따른 전단응력 특성과 배수조건별 입자파쇄 특성에 대해 토의하고자 한다.

3. 결과

3.1 전단시간에 따른 전단응력 특성

Fig. 4는 일정한 수직응력(50kPa)과 전단속도(0.1mm/sec) 조건에서 전단시간에 따른 링 전단특성을 나타낸 것이다. 이때 주어진 수직응력은 폐석적치장 붕괴예측 사면

Table 2. Test program

Test I				Test II				Test III			
Condition		Drained/Undrained		Condition		Drained/Undrained		Condition		Drained/Undrained	
NS	V	τ_p	τ_r	NS	V	τ_p	τ_r	NS	V	τ_p	τ_r
50	0.1	τ_p	τ_r	50	0.01	τ_p	τ_r	0.1	τ_p	τ_r	
					0.1						
					1						
					10						
					50						
					100						

Note: NS = normal stress (kPa), V = shear speed (mm/sec), τ_p = peak shear stress (kPa), τ_r = residual shear stress (kPa).

에서 대한 수직응력 값이며 전단속도는 산사태의 평균 이동속도(i.e., 1.8m/hr, IUGS-WGL, 1995; Cruden and Varnes, 1996; Hurlimann et al., 2008)에 해당하는 속도 범위 내에서 임의로 적용하였다. 배수조건시 최대전단응력과 최소전단응력은 각각 15.21과 9.08kPa이고, 비배수조건시 최대전단응력과 최소전단응력은 각각 17.28과 13.51kPa이다. 여기서 잔류전단응력은 전단상자 전단면에 위치한 입자들이 완전 재배열 된 것으로 간주하여 얻어진 값이다. 다만 잔류전단응력은 시험장비에 무리가 가지 않는 시간범위 내에서 결정하는 것을 원칙으로 하였다. 그 결과 본 시험에 있어 전단속도의 최대 지속시간은 300초로 제한하였다. 이때 전단면의 총 회전거리는 대략 30mm였다. 주어진 전단속도(0.1mm/sec)에 대해 전단응력이 측정되는 시간은 대략 40초이며 최대값을 보인 후 잔류상태로 이어지는 전형적인 전단연화 거동(strain softening behavior)을 보인다. 최대전단응력에서 수직변위계의 미소변형이 관측되었으나 이것은 입자-입자간 재배열로 맞물림에 의한 전단상자의 수직변위에 해당하며 최대값 이후 거의 변화가 없었다. 간극수압은 배수조건에 관계없이 거의 변화를 보이지 않는

데, 이것은 비배수조건이라고 할지라도 아주 미소한 전단속도에 대해 수압변화가 작았음을 의미한다. 하지만 포화된 시료에서 변형이 가해지면 간극수압의 변화가 발생하는 것이 일반적인 현상이다. 시험결과에서는 전단변형이 발생된 시점에서는 간극수압의 변화를 뚜렷하지 않다. 이러한 결과가 상대적으로 작은 전단속도에 따른 기계적 오차가 이유인지 아니면 실제 시험시료가 완전 포화상태가 되지 않았거나, 또는 시험에 사용된 시료의 크기효과에 의한 영향인지에 대해 향후 연구에서 자세히 다루어져야 할 것으로 판단된다.

3.2 전단속도에 따른 전단응력 특성

1차 시험이 완료되면, 일정한 수직응력(50kPa) 조건에서 전단속도를 0.01→0.1→1→10→50→100mm/sec로 증가시켜가며 2차 전단을 실시하였다(Table 3). 배수와 비배수조건에서 수행된 링 전단시험 결과는 Fig. 5와 같다. 시험결과에 따르면, 선행 연구결과에서도 찾아볼 수 있듯, 전단속도가 증가하면 전단응력은 증가한다(Fukuoka and Sassa, 1991; Wang et al., 2010). 배수조건시 전단속

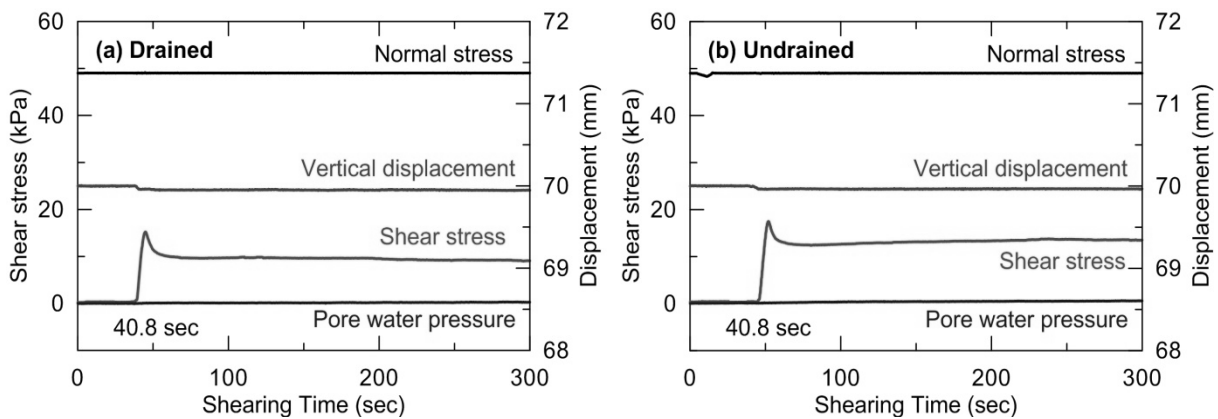


Fig. 4. Shear stress measurements for given normal stress (50 kPa) and shearing time ($V = 0.1 \text{ mm/sec}$): (a) drained and (b) undrained condition

Table 3. Shear stress measurement as a function of shearing speed

NS	V	Drained		Undrained	
		τ_p	τ_r	τ_p	τ_r
50	0.01	9.84	8.47	11.90	10.97
	0.1	15.21	9.08	17.28	13.51
	1	26.65	8.79	31.42	13.44
	10	23.37	11.60	31.29	12.23
	50	28.83	28.44	-	-
	100	-	-	52.62	47.75

Note: The symbols are the same as in Table 2.

도가 0.01→10mm/sec로 증가할 경우, 최대전단응력과 잔류전단응력은 각각 13.53과 3.13kPa이다. 비배수조건시, 최대전단응력과 잔류전단응력은 각각 19.39와 1.26kPa이다. 동일한 전단속도 조건에서 측정된 최대전단응력과 잔류전단응력은 비배수조건에서 측정된 전단응력이 배수조건에서 측정된 전단응력보다 크게 나타났다. 흥미로운 점은 배수조건에 관계없이 상대적으로 낮은 전단속도의 변화(0.01→10mm/sec)에서는 잔류전단응력의 변화는 적은 것으로 나타났다. 이것은 전단면에서 형성되는 전단띠(shear band)의 형성에 따른 것으로 판단되며, 전단속도에 따른 배수조건별 입자파쇄 특성에서 다루고자 한다(3.4 전단에 따른 입자파쇄 특성). 추가하여 배수와 비배수조건에서 적용된 최대 전단속도는 각각 50kPa와 100kPa이며, 전단속도가 증가할수록 전단응력이 증가하는 경향이 뚜렷함을 알 수 있다. Fig. 6은 Fig. 5에서 얻어진 시험결과를 토대로 최대전단응력과 잔류전단응력을 전단속도에 따라 비교한 것이다. 전단속도의 증가(0.01→100mm/sec)에 따른 배수조건별 전단응

력의 변화를 나타낸 것으로 배수조건에 관계없이 상대적으로 낮은 전단속도($\leq 10\text{mm/sec}$) 범위에서는 최대전단응력은 큰 폭의 변화가 보이는 반면 잔류전단응력의 변화는 크지 않은 것으로 나타났다. 결과적으로, 전단응력은 전단속도의 함수이다. 다만, 낮은 전단속도하에서 입자가 재배열되는 과정에서 발생하는 전단응력은 서로 큰 차이를 나지 않는 것으로 나타났다. 상대적으로 높은 전단속도($\geq 10\text{mm/sec}$)가 적용할 경우 최대전단응력과 잔류전단응력 모두 큰 폭의 변화가 나타났다. 하지만 실제 시험에 있어 상대적으로 높은 전단속도($\geq 10\text{mm/sec}$)가 오랜 시간 가해질 경우, 링 전단상자 상부 링과 하부 링을 연결하고 있는 누수방지용 고무링으로 인해 마찰저항이 증가하는 원인이 되기도 한다. 다시 말해 측정하고자 하는 흙 시료의 전단응력에 고무의 마찰저항이 더해진 전단저항 값이 나타나게 된다. 이러한 문제점을 보완하고자 전단속도를 높일 경우, 제한된 시간 내에서 시험을 강제 종료하였다(3.1절에서 설명한 바와 같이 전단시간 300초 내로 시험 강제 종료). 이러

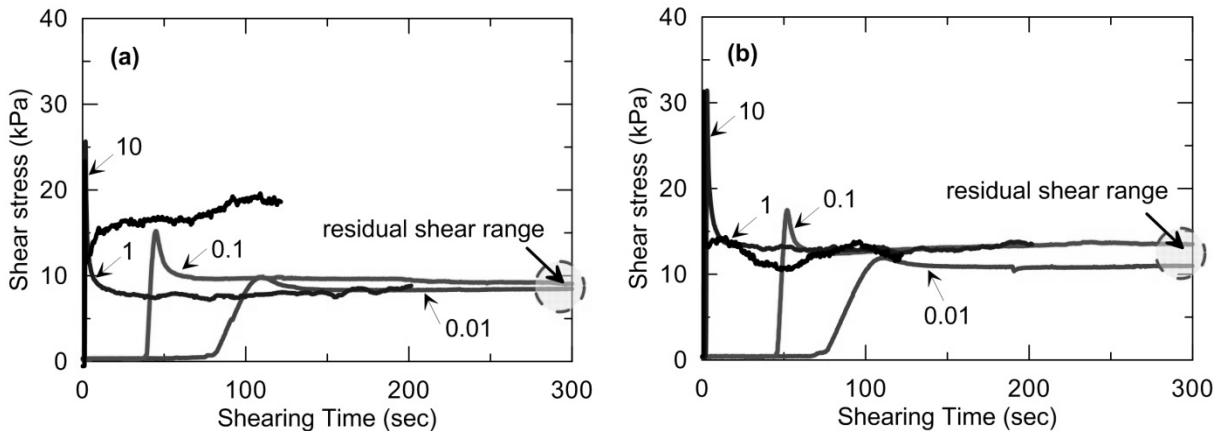


Fig. 5. Shear stress-Shearing time relationship: (a) drained and (b) undrained condition

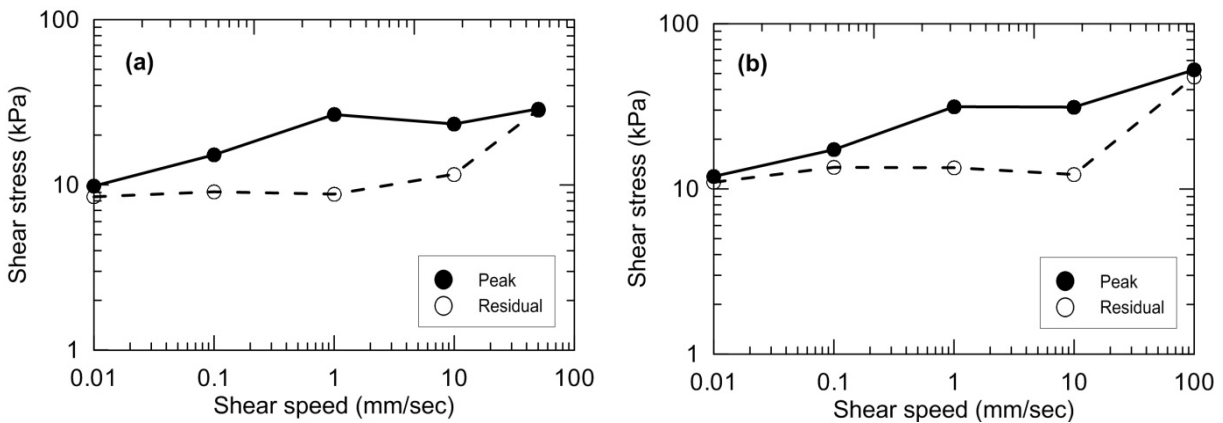


Fig. 6. Shear stress as a function of shearing speed: (a) drained and (b) undrained condition

한 이유로 본 연구에서는 상대적으로 낮은 전단속도에서 반복실험을 수행하였다. 시험결과를 종합해 볼 때, 전단응력은 전단속도의 함수로 표현할 수 있다.

3.3 수직응력에 따른 전단응력 특성

전단응력은 수직응력에 따라 달라진다. 일반적으로 수직응력에 따른 전단응력의 기울기를 파괴포락선(Failure line)이라 명명한다. 본 연구에서는 일정한 전단속도(0.1 mm/sec)에서 수직응력을 20→40→60→80→100→150kPa로 증가시켜 각 경우에 대한 최대전단응력과 잔류전단응력을 측정하였다(Table 4). 따라서 3차 시험은 최초 수직응력(50kPa)을 가한 공시체의 전단응력 특성과 전단속도에 따른 전단특성을 조사한 후 연속적으로 수행된 시험이다. 여기서 최초 수직응력이란 배수조건별 1차 시험에서 처음으로 공시체에 가한 수직응력을 의미한다(Park et al., 2013). 1차 시험과 2차 시험이 완료된 후 마지막 단계에서 수직응력에 대한 전단응력 특성을 살펴보았다. 따라서 최소 6회 이상의 전단 후에 측정된 값으로 전단면에 위치한 시료의 입자들이 완전히 재배

열된 상태에서 얻어진 잔류전단응력에 대한 시험결과에 해당한다. 정확한 파괴선 결정을 위해서는 초기 수직응력 조건하에 대한 전단응력을 얻어야 하지만, 현실적으로 링 전단시험장치를 통해 적용함에 한계가 있다. 따라서 상기 시험결과는 잔류상태의 전단응력에 대해 제한적으로 적용할 수 있다.

Fig. 7은 광미시료에 대해 일정한 전단회전 속도(0.1 mm/sec) 조건에서 수직응력을 달리 적용한 경우 최대전단응력과 잔류전단응력에 대한 결과이다. 결과적으로, 낮은 전단속도에서 얻어진 최대전단응력과 잔류전단응력은 배수조건에 관계없이 거의 일정한 값으로 증가함을 알 수 있다. 여기서 최대전단응력은 잔류상태에서 재시험된 경우에 얻어진 최대값이다. 배수조건에서 마찰각은 최소 9.7°에서 최대 9.9°사이의 값으로 나타났다. 반면 비배수조건시 전체 시험결과에 대해 최소 8.4°에서 최대 9.4°로 나타났다. 여기서 가장 낮은 수직응력(20kPa)에서 얻어진 경우를 제외하면, 마찰각은 9.7°~10.4°의 범위로 나타났다. 따라서 최대전단응력과 잔류전단응력에 대해 얻어진 마찰각은 비슷한 값을 가지며, 배수조건에 관계없이 대략 10°의 마찰각을 보이고 있

Table 4. Shear stress measurement as a function of normal stress

V	NS	Drained		Undrained	
		τ_p	τ_r	τ_p	τ_r
0.1	20	10.32	7.31	16.83	13.78
	40	15.07	7.92	15.75	12.97
	60	16.07	10.50	19.89	15.35
	80	22.41	15.21	22.23	19.31
	100	25.50	19.35	29.18	24.14
	150	32.81	28.21	35.57	31.04

Note: The symbols are the same as in Table 2.

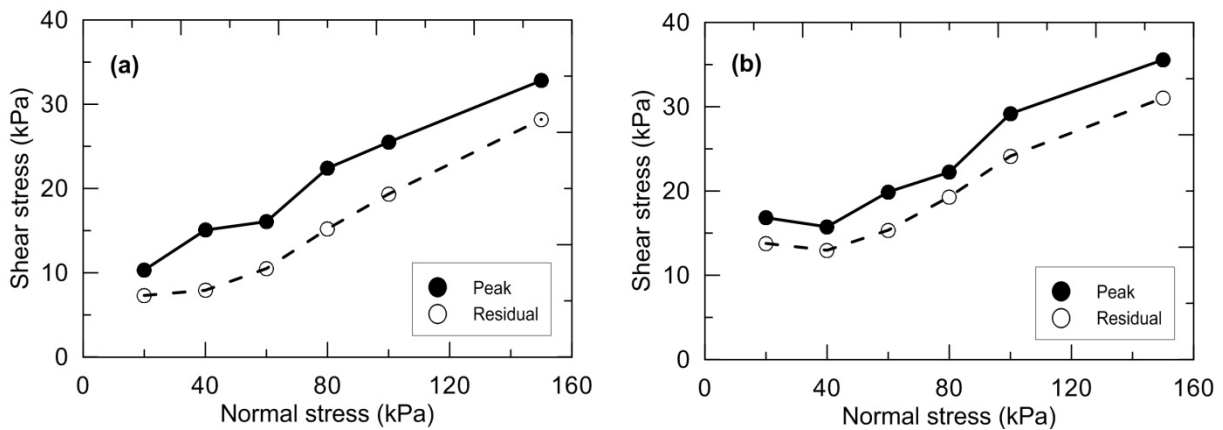


Fig. 7. Shear stress as a function of normal stress: (a) drained and (b) undrained condition

다. 이와 같은 결과는 Wang et al.(2002)이 발표한 1998년 집중호우로 인해 일본의 후쿠시마현에서 발생한 산사태 토사의 전단특성과 유사하다. 하지만, Tika et al. (1996)에 의하면, 링 전단시험기를 통해 얻어진 마찰각은 $19^{\circ} \sim 33^{\circ}$ 범위로 보고된 바 있다. 따라서 본 연구에서 얻어진 시험결과는 여러 번에 걸친 반복시험으로 인해 전단면에서 저항하던 입자들간의 상호작용과 파쇄가 주된 원인으로 생각할 수 있다. 하지만 전단응력과 마찰각은 시험조건에 따라 상이한 결과를 나타내기 때문에 정확한 원인규명을 위해서는 보다 면밀한 조사가 필요하다(Tika and Hutchinson, 1999). 이러한 이유로 본 연구에서는 전단속도 의존성 전단특성과 입자파쇄 특성을 중심으로 토의하고자 한다.

3.4 전단에 따른 입자파쇄 특성

흙 입자의 특성과 배열은 흙의 응력전달, 압축성, 투

수성, 강도에 큰 영향을 미친다(Lambe and Whitman, 1979). 흙의 압축시 입자간 상호작용은 입자가 클수록 중요하며 화학적 입자상호작용에 비해 물리적 입자상호작용이 더 중요하다. 흙의 입자간 상호작용은 접촉면의 변형, 판상입자의 휨거동, 입자간 활동 등으로 구분된다. 모래와 점토에 대한 링 전단시험 결과에 의하면, 시료의 입자가 큰 경우 전단면은 국부 젖음현상(wetting) 또는 입자들 사이의 압축과 변형특성을 보이지만, 입자크기가 작을수록 층과 층이 분리되는 미끄러짐 현상이 나타났다(Park et al., 2013). Fig. 8은 3차 시험 종료 후 링 전단상자 내 잔존시료에 대한 입자파쇄 특성을 배수 조건에 대해 비교분석한 것이다. 임기광산 폐석은 실트질 모래(SM)의 입자크기를 가진 시료로 분류된다. 표준사와 달리 광산폐석은 현장에서 4번체 통과율이 100%였으며, KS 기준적용시 모래가 75%이다. 이러한 이유로 임기광산 시료는 전단동안 입자들 사이의 물리적 압축과 변형을 통한 파쇄특성을 보인다는 점이다. 이것은

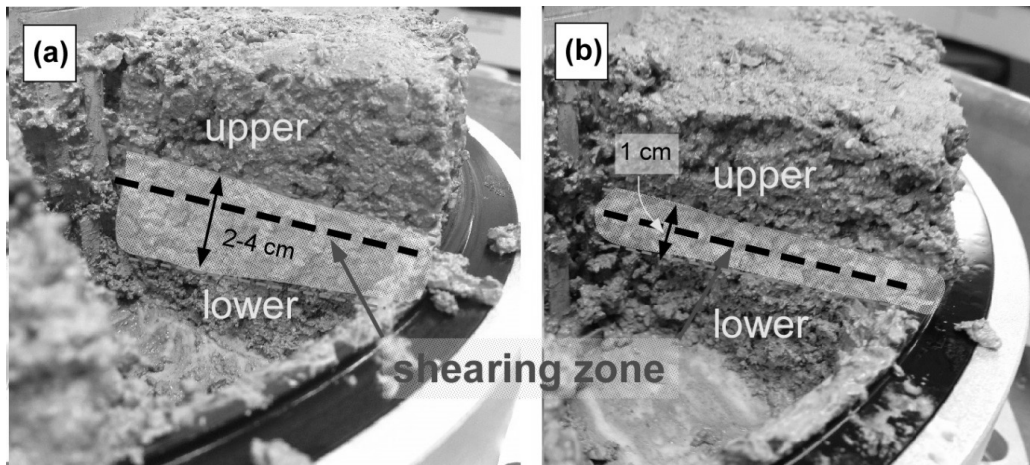


Fig. 8. Grain crushing at shear zone: (a) drained and (b) undrained condition

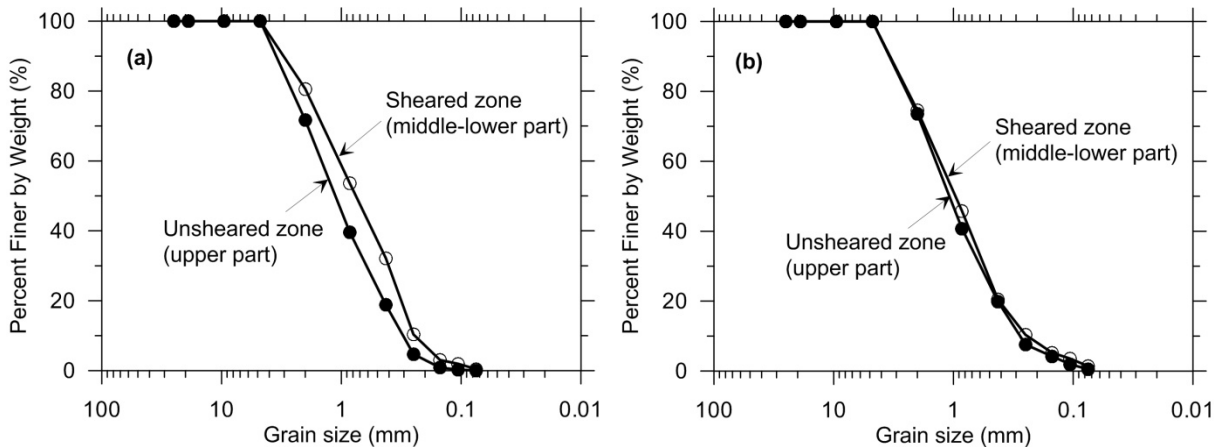


Fig. 9. Grain size distribution for sheared and unsheared zone: (a) drained and (b) undrained condition

세립토 위주의 균질한 입자크기를 가진 토사재료에서 나타나는 입자들 사이의 미끄러짐 또는 국부 젖음현상과 뚜렷이 구별되는 현상이라고 할 수 있다. 반복실험을 통해 확인한 결과, 배수조건시 전단상자 중간부 전단면을 통한 전단은 전단시간이 증가할수록 전단띠(shear banding)의 분포(대략 2-4cm)가 넓어졌으나, 비배수조건시 전단에 따른 입자파쇄범위는 전단면 주변부 1cm 내로 제한된 영역에서 발생하였다. 이러한 결과는 입경가적곡선을 통해 확인할 수 있다. Fig. 9는 시험종료 후 전단부(전단상자 상부)와 비전단부(전단상자 중간에서 하단부까지)에 대한 입경가적곡선을 분석한 것이다. 배수조건일 때 비배수조건에 비해 훨씬 큰 입도분포의 차이를 보이고 있다. 배수조건에서 훨씬 큰 입자파쇄가 진행된 것을 의미한다. 선행 연구에서도 이와 유사한 결과를 찾아볼 수 있다(Mitchell, 1993; Okada et al., 2004; Fukuoka et al., 2006, 2007). 본 연구에서는 완벽하게 간극수압과 입자파쇄간 상관관계를 규명하지는 못하였다. 만약 간극수압과 입자파쇄간 상관관계를 규명한다면, 전단특성을 명확히 함으로써 산사태 고위험군으로 분류된 국내 산지에 대한 산사태 예방사업을 보다 신뢰성 있는 예측연구가 가능할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 링 전단시험기를 이용하여 광산폐석에 대한 전단특성을 조사하였다. 전단시간, 전단속도 및 수직응력에 따른 배수와 비배수 전단특성을 살펴보았으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 회전가능한 오링을 사용하여 일정한 수직응력(50kPa)과 전단속도(0.1mm/sec) 조건에서 전단시간에 따른 전단특성을 조사하였다. 배수조건에 관계없이 전단연화거동이 관측되었으며, 배수조건과 비교하여 비배수조건시 상대적으로 큰 최대전단응력과 잔류전단응력이 측정되었다. 동일한 전단속도가 가해진 경우 최대전단응력에 비해 잔류전단응력의 변화는 작았으며, 특히 비배수조건시 잔류전단응력은 배수조건에 비해 훨씬 작은 값으로 나타났다.
- (2) 일정한 수직응력(50kPa)에 대해 전단속도를 0.01 mm/sec에서 100mm/sec까지 5단계로 증가시켜가며 전단특성을 조사하였다. 전단속도가 10mm/sec 보

다 작을 경우 전단속도에 따른 전단응력의 변화는 크지 않았으나 이 값보다 큰 값이 주어졌을 때 큰 변화를 보였다. 전체결과를 살펴 볼 때, 배수조건에 관계없이 전단속도가 증가할수록 전단응력은 증가하였다. 본 연구는 전단속도의 증가에 대한 제한된 전단시험 결과이다. 따라서 전단속도의 증가와 감소에 따른 응력이력(hysteresis) 특성을 확인할 수 없다. 이러한 점을 고려한 전단속도의 증가와 감소에 따른 전단응력 특성연구가 필요하다.

- (3) 일정한 전단속도(0.1mm/sec) 조건에서 수직응력에 따른 전단특성을 조사하였다. 수직응력은 20kPa에서 150kPa로 6단계로 증가시켰다. 수직응력이 증가할수록 최대전단응력과 잔류전단응력은 일정한 경향을 가지고 증가하였다. 하지만 시험결과는 상대적으로 낮은 전단속도(0.1mm/sec)에 대해 얻어진 값들이다. 토석류처럼 빠르게 움직이는 흐름형태의 거동을 이해하기 위해서는 전단속도가 증가될 경우에 대한 전단특성연구가 요구된다.
- (4) 배수조건에 관계없이 전단에 따른 입자파쇄 현상이 뚜렷이 관측되었다. 배수조건시 링 전단상자 전단면에서 하단에 이르기까지 넓은 분포를 띤 전단띠가 형성되었다. 하지만, 비배수조건시 전단면 주변부 1cm 내에서만 입자파쇄가 발생하였다. 입자파쇄는 산사태가 진행되는 과정에서 이동체적의 증가(sediment entrainment)를 야기하여 큰 충격하중이 사회기반시설에 가해지는 결과를 초래할 수 있기 때문에 보다 정확한 실험적·수치해석적 연구가 수행되어야 할 것이다. 하지만, 본 연구에서는 간극수압에 기인한 입자파쇄 특성을 규명하지 못하였다. 만약 “간극수압-입자파쇄에 따른 산사태 물질의 전단특성”을 평가할 수 있다면, 산사태 발생메커니즘을 보다 정확히 이해할 수 있을 것이다. 또한 이를 통해 향후 토석류 확산방지에 대한 효율적 대책을 수립할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 “광산개발에 따른 지질환경재해 확산제어 기술 개발(14-3212)”과 “실시간 모니터링 기반의 산사태재해 조기탐지 융합시스템 개발(14-3215)” 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

1. Cheong, Y.W., Ji, S.W., and Yim, G.J. (2004), "The acid rock drainage and hydraulic characteristics of the waste rock dump", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.5(4), pp. 13-24. (in Korean)
2. Cheong, Y.W., Jo, Y.D., Lee, H.S., Yim, G.J., Ji, S.W., and Yang, J.E. (2007), "An experimental study with lysimeter for the vegetating on mine waste dump", *Journal of The Korean Society for Geosystem Engineering*, Vol.44(5), pp.411-417. (in Korean)
3. Cruden, D.M. and Varnes, D.J. (1996), "Landslide types and processes", In: *Landslides Investigation and Mitigation*. Turner, A.K. and Schuster, R.L. (eds), Transportation Research Board, National Academy Press, Special Report No. 247, pp.36-75.
4. Fukuoka, H. and Sassa, K. (1991), "High-speed high stress ring shear tests on granular soils and clayey soils", USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-130, pp.33-41.
5. Fukuoka, H., Sassa, K., Wang, G., and Sasaki, R. (2006), "Observation of shear zone development in ring-shear apparatus with a transparent shear box", *Landslides*, Vol.3, pp.239-251.
6. 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.
7. Hurlimann, M., Rickenmann, D., Medina, V., and Bateman, A. (2008), "Evaluation of approaches to calculate debris-flow parameters for hazard assessment", *Engineering Geology*, Vol.102, pp.152-163.
8. 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)
9. Ji, S.W. and Cheong, Y.W. (2005), "Experiment of reactive media selection for the permeable reactive barrier treating groundwater contaminated by acid mine drainage", *Economic and Environmental Geology*, Vol.38(3), pp.237-245. (in Korean)
10. Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources (2012), Development of practical technologies for countermeasures for hazards in steep slope and abandoned mine areas, Ministry of Knowledge Economy, GP2012-022-2012(1), 375p. (in Korean)
11. Lambe, T.W. and Whitman, R.V. (1979), *Soil Mechanics*, SI Version, John Wiley & Sons, 553p.
12. Mitchell, J. K. (1993), *Fundamentals of Soil Behavior*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, 437p.
13. Okada, Y., Sassa, K., and Fukuoka, H. (2004), "Excess pore pressure and grain crushing of sands by means of undrained and naturally drained ring-shear tests", *Engineering Geology*, Vol.75, pp.325-343.
14. Park, S.S., Jeong, S.W., Yoon, J.H., and Chae, B.G. (2013), "Ring shear characteristics of two different soils", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.29(5), pp.39-52.
15. Sassa, K. (1997), "A new intelligent-type dynamic-loading ring-shear apparatus", *Landslide News*, No.10, p.33.
16. Sassa, K. (2000), "Mechanism of flows in granular soils", In: *Proceedings of the International Conference of Geotechnical and Geological Engineering*, GEOENG2000, Vol.1, Melbourne, Australia.
17. Sassa, K., Wang, G., and Fukuoka, H. (2003), "Performing Undrained shear tests on saturated sands in a new intelligent type of ring shear apparatus", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.26(3), pp.1-9.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. 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*, 63, pp. 169-185.
22. Wang, G., Suemine A., and Schulz, W.H. (2010), "Shear-rate-dependent strength control on the dynamics of rainfall-triggered landslides, Tokushima Prefecture, Japan", *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol.35(4), pp.407-416.
23. IUGS-WGL (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(1), pp.75-78.
24. Youm, S.J., Yun, S.T., Kim, J.H., and Park, M.E. (2002), "Neutralization of acid rock drainage from the Dongrae pyrophyllite deposit: A study on behavior of heavy metals", *Korean Society of Soil and Groundwater Environment*, Vol.7(4), pp.68-76. (in Korean)

Received : January 3rd, 2014

Revised : April 14th, 2014

Accepted : July 11th, 2014