

직접전단장비를 이용한 토석류의 전단강도 및 유변학적 특성에 대한 입도분포의 영향 연구

Effects of Grain Size Distribution on the Shear Strength and Rheological Properties of Debris Flow Using Direct Shear Apparatus

박 근 우 ¹	Park, Geun-Woo	홍 원 택 ²	Hong, Won-Tack
홍 영 호 ²	Hong, Young-Ho	정 승 원 ³	Jeong, Sueng-Won
이 종 섭 ⁴	Lee, Jong-Sub		

Abstract

In this study, effects of grain size distribution on the shear strength and rheological properties are investigated for coarse- and fine-grained soils by using direct shear apparatus. Shear strengths are estimated for fine-grained soils with the maximum particle size of 0.075 mm and coarse-grained soils with the maximum particle size of 0.425 mm and fine contents of 17% prepared at dry and liquid limit states. The direct shear tests are conducted under the relatively slow shear velocity, which corresponds to the reactivated landslide or debris flow after collapse according to the landslide classification. In addition, for the evaluation of rheological properties, residual shear strengths for both fine- and coarse-grained soils prepared under liquid limit states are obtained by multiple reversal shear tests under three shear velocities. From the relationship between residual shear strengths and shear rates, Bingham plastic viscosity and yield stress are estimated. The direct shear tests show that cohesions of fine-grained soil are greater than those of coarse-grained soil at both dry and liquid limit states. However, internal friction angles of fine-grained soil are smaller than those of coarse-grained soil. In case of rheological parameters, the plastic viscosity and yield stress of fine-grained soils are greater than those of coarse-grained soils. This study may be effectively used for the prediction of the reactivated landslide or debris flow after collapse.

요 지

본 연구에서는 전단특성 및 유변학적 정수를 모두 산정할 수 있는 직접전단실험 장비를 이용하여 조립토와 세립토에 대하여 전단강도 및 유변학적 특성에 대한 입도분포의 영향을 조사하고자 하였다. 최대입경 0.075mm의 세립토와 최대입경이 0.425mm이고, 세립분 함량이 17%인 조립토를 건조상태와 액성한계상태로 조성하여, 산사태 분류기준에 따라 재활성 산사태(reactivated landslide) 혹은 붕괴직후 토석류 속도에 해당하는 전단속도에 대하여 전단강도를 산정

1 정희원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정 (Member, Ph.D. Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

2 정희원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사수료 (Member, Ph.D. Candidate, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

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

4 정희원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ., Jongsub@korea.ac.kr, Tel: +82-2-3290-3325, Fax: +82-2-3290-5999, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2018년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

하였다. 또한, 유변학적 특성 평가를 위해 액성한계상태로 조성된 조립토와 세립토에 대하여 서로 다른 세 가지의 전단변형률속도로 반복적으로 전단하며 잔류전단강도를 측정하였다. 측정된 잔류전단강도와 전단변형률속도와의 관계를 통해 빙행모델의 소성 점도와 항복응력을 산정하였다. 건조 및 액성한계상태에서 조성된 시료에 대하여 침투전단강도에서 산정한 점착력의 경우, 세립토에서 조립토보다 더 크게 산정되었으며, 내부마찰각은 조립토에서 더 크게 산정되었다. 유변학 정수의 경우, 소성 점도와 항복응력이 조립토보다 세립토에서 더 큰 것으로 나타났다. 본 연구는 재활성 산사태 혹은 붕괴직후 토석류의 거동예측에 효과적으로 활용될 것으로 기대된다.

Keywords : Cohesion, Direct shear apparatus, Internal friction angle, Residual shear strength, Plastic viscosity, Yield stress

1. 서론

토석류 발생의 주된 원인은 집중호우이기 때문에 건기와 우기가 뚜렷한 우리나라의 경우 토석류가 빈번히 발생하며, 특히, 도심지 내에 경사가 급한 산지가 주변에 많이 분포해 있으므로 토석류 발생 규모 대비 큰 피해를 야기한다. 이와 같은 이유로 우리나라에서는 1998년도부터 2014년도까지 피해복구로 총 1조1662억원이라는 천문학적인 비용이 소모되었으며, Lee(2005)에 따르면 토사재해로 인한 사상자수는 평균적으로 매년 100명 이상 발생하는 것으로 보고되고 있다. 토석류가 막대한 경제적인 피해와 인명피해를 발생시키기 때문에(Ramesh et al., 2017), 과거 토사재해가 발생한 이력이 있는 지역에서는 토사재해 재발로 인한 피해를 저감하고자 발생이 예측되는 곳에 사방댐을 설치하고 있으며, 효과적인 사방댐의 설치를 위하여, 토석류 거동에 대한 정확한 예측이 매우 중요하다.

최근 국내의 연구자들은 다양한 해석기법을 이용하여 토석류의 거동을 예측할 수 있는 시뮬레이션기법 연구를 수행하고 있다(Shin, 2014, 2015; Lee et al., 2015). 토석류는 퇴적물과 집중호우로 인한 대량의 물이 슬러리 형태로 혼합되어 사면을 따라 이동하는 흐름으로, 퇴적물을 구성하고 있는 입자의 크기에 따라 서로 다른 거동특성을 보인다(Tran et al., 2011). 이러한 거동특성을 고려하기 위하여, 시뮬레이션에 적용하는 공학정수들에 대한 연구가 필요한 실정이다.

거동예측 시뮬레이션에 입력하는 공학정수는 토석류의 전단강도 특성과 유변학적 특성에 기인한 것으로, 전단강도 특성을 나타내는 공학정수로는 내부마찰각 및 점착력이 있으며, 유변학적 특성을 나타내는 정수는 소성점도와 항복응력이 대표적이다. 이와 같은 공학정수

들은 토석류를 구성하고 있는 흙 입자의 크기, 형상 그리고 분포와 같은 특성에 따라 다르게 나타나며(Byun et al., 2012), 특히 입자크기에 매우 큰 영향을 받는다(O'Brien and Julien, 1988). 기존 연구에서는 실트 및 점토와 같은 세립토가 다량으로 포함된 토석류의 거동에 대한 연구가 주로 진행되었으며, 세립분 함유량이 증가할수록 점성이 증가하는 거동을 보인다(Julien and Leon, 2000). 그러나 조립토가 포함이 되어 있는 토석류의 거동은 제한적으로 수행되어 있는 실정이다(Mih, 1999). 조립토가 다량으로 포함된 토석류의 거동은 세립토가 지배적인 영향을 미치는 토석류의 거동과는 상이한 특성을 보이지만(Contreras and Davies, 2000), 토석류에서 조립토가 미치는 영향에 대한 연구는 여전히 부족한 실정이다.

기존의 연구에서는 전단강도 및 유변학적 정수를 서로 다른 기법을 이용하여 산정하였으며, 각각의 독립된 실험기법 및 실험환경은 토석류 시뮬레이션 결과에 불확실성을 야기할 수 있다. 이와 같은 이유로 입자크기의 영향 및 토석류 거동 예측에 있어 전단강도 및 유변학적 정수의 일관성있는 산정을 위한 기법 연구가 필요한 실정이다. 전단강도 특성과 유변학적 특성에 대한 일관성 있는 평가를 하고자 본 연구에서는 직접전단장비를 사용하였다. Duttine et al.(2008)은 직접전단장비를 이용하여, 여러 조립토 시료들에 대하여 점성 거동을 평가했으며, Park et al.(2017)은 산사태가 발생하였던 화천 지역 시료의 세립토를 대상으로, 직접전단장비를 이용하여 전단강도와 유변학적 특성을 평가하였으며, 기존 연구에서 사용한 장비들로 측정된 세립분의 점성값과 비교하여 유사한 결과를 얻은 바 있다.

본 연구에서는 입도가 서로 다른 흙에 대하여 전단강도와 유변학적 정수를 산정하기 위하여, 강원 인제 지역

에서 채취한 흙을 체가름하여 조립토와 세립토로 시료를 분류하였다. 분류된 두 시료에 대하여 건조상태와 액성한계상태로 시료를 조성하였다. 조성된 시료를 직접 전단장비를 이용하여 전단강도 및 유변학적 정수를 산정하는 실험을 수행하였고, 산정된 정수들을 입자크기 및 건조상태, 액성한계상태 여부에 따라 정수값을 산정하여 이들을 비교분석하였다. 본 논문은 흙 입도분포 특성에 따른 토석류의 전단강도 및 유변학적 특성 변화를 보여준다.

2. 토석류 매커니즘 및 영향요소

높은 강도의 강우량으로 인하여 발생하는 토석류는 산악지반에서 붕괴되어 발생한 토사가 물을 동반하여 사면을 따라 흘러가는 현상으로, 붕괴토사가 액성한계상태 혹은 액성한계상태에 가까운 상태로 거동한다(Choi, 2007). 다량의 함수를 포함한 토사는 사면을 따라 흘러 내려가며, 그 속도에 따라 종류 및 상태가 나누어진다.

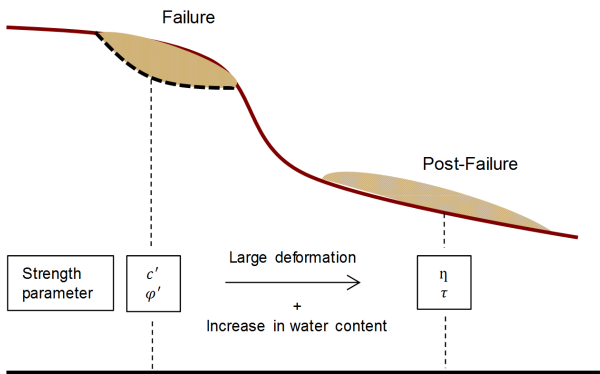


Fig. 1. Landslide stages and influencing factors

속도가 상대적으로 느린 토석류의 경우, 산사태 분류기준법에 따라 재활성 산사태로 분류되거나, 발생직후의 토석류로 간주되며, 사면을 타고 내려갈수록 그 속도와 함수비가 증가하게 된다(IUGS/WGL, 1995).

토석류는 거동시 흐름에 저항하는 전단력에 영향을 받으므로, 전단강도 정수인 내부마찰각과 점착력에 따라 상이한 특성을 보인다. 내부마찰각과 점착력은 입자크기, 입도분포 및 단위중량 등과 같은 흙의 기본특성에 영향을 받으므로, 이와 같은 흙의 기본특성에 따라 토석류는 다르게 거동한다. 액성 상태로 거동하는 토석류는 유변학적 성을 띄며, 그 특성은 흙 특성에 따라 상이하게 나타나는 소성 점도와 항복응력에 영향을 받는다. 유변학적 정수인 소성 점도와 항복응력에 의해 토석류의 속도와 도달거리가 달라질 수 있다(Imran et al., 2001). 토석류는 Fig. 1과 같이 파괴시 및 파괴 후 단계에서 흙의 특성에 의존하는 전단강도 및 유변학적 특성에 따라 그 거동이 결정되므로, 전단강도 및 유변학적 특성의 산정은 토석류의 거동을 예측하기 위하여 필수적으로 수행되어야 한다.

2.1 토석류의 전단강도 특성

흙에 수평방향으로 전단력이 작용하면, 전단면 사이의 마찰력으로 인하여 전단저항력이 발생한다. 단위면적 당 힘의 개념으로 나타내면 전단변위에 따른 전단응력의 변화를 Fig. 2(a)와 같이 나타낼 수 있다. 일정 전단변형에서 최대로 나타나는 전단응력은 첨두전단강도(peak shear strength)로써 산정할 수 있으며, 이후 변형이 더 가해져 수렴하는 전단응력 값은 잔류전단강도(residual

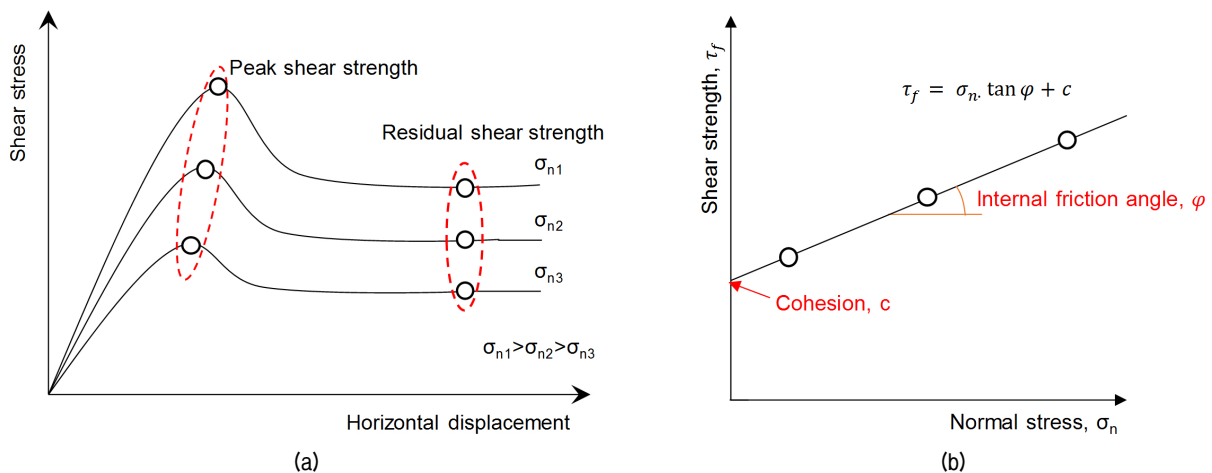


Fig. 2. Shear strength properties: (a) Horizontal displacement vs. shear stress; (b) Failure envelope

shear strength)로써 산정한다. Fig. 2(b)에서 볼 수 있듯이 두 전단강도는 흙에 연직방향으로 가해지는 응력과 비례하며, 비례정수는 흙의 내부마찰각(internal friction angle)으로 나타낼 수 있다. 또한, 연직응력이 가해지지 않는 경우라도 흙 입자간의 물리화학적 결합력으로 인한 저항력이 발생하는데, 이를 점착력(cohesion)이라 한다. Mohr-Coloumb 법칙에 근거하여 전단응력과 전단강도의 상관관계를 식 (1)과 같이 점착력과 내부마찰각으로 나타낼 수 있다.

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

여기서, τ_f [Pa]는 전단강도, σ_n 는 연직응력이며, c [Pa]와 ϕ [°]는 각각 전단강도 정수인 점착력과 내부마찰각을 의미한다.

연직응력에 따른 전단강도를 측정하면, 그 관계식을 통하여 점착력과 내부마찰각을 산정할 수 있다(Tran et al., 2011; Ilori et al., 2017). 산정된 두 정수는 토석류의 전단저항력을 나타내며, 흙의 특성과 상태에 따라 변화한다(Choi et al., 2015; Omar and Sadrekarimi, 2015). 특히 내부마찰각의 경우 액성 상태에서는 매우 작은 값을 나타내기 때문에(Park et al., 2017), 집중호우로 인한 토석류 발생의 직접적인 원인 중 하나라고 할 수 있다.

2.2 토석류의 유변학적 특성

토석류는 높은 함수비 상태의 흐름으로, 그 거동은 유체모델로 해석할 수 있다. 이러한 흐름은 토석류에 포함된 흙입자와 물의 속도차이로 인하여, 항복응력이 없는 뉴턴유체가 아닌, 항복응력을 갖는 비뉴턴유체의 거동을 보인다. 비뉴턴유체의 거동은 식 (2)와 같이 전단응력(τ)에 대한 전단변형률속도($\dot{\gamma}$)의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\tau = f(\dot{\gamma}) \quad (2)$$

여기서, τ [Pa]는 전단응력을 나타내며, $\dot{\gamma}$ [s⁻¹]는 전단변형률속도(Shear rate)를 의미한다.

비뉴턴유체 거동을 규명하기 위하여 Bingham, Casson, Herschel-Bulkley, Power law 등의 여러 모델들이 제시되었으며, 그 중 토석류 거동예측 시뮬레이션에서는 Bingham 모델이 가장 많이 사용되고 있다(Jeong, 2013). Bingham 모델은 전단변형률속도와 전단응력의 관계를 선형적으로 나타내는 모델로, 소성 점도(η)와 항복응력(τ_y)을 이용하여 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다(Nguyen and Boger, 1992).

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} + \tau_y \quad (3)$$

여기서 $\dot{\gamma}$ [s⁻¹]는 전단변형률속도, τ [Pa]는 전단응력을 나타내며, η [Pa·s]과 τ_y [Pa]는 유변학적 정수로써 각각 소성 점도와 항복응력을 나타낸다.

전단변형률(γ)은 전단 변형이 일어나는 물체에 대하여 미소변형에서 ‘변위(L)/높이(H)’로 Fig. 3(a)와 같이 표현할 수 있으며, 전단변형률속도($\dot{\gamma}$)는 전단변형률을 시간에 대하여 미분한 개념으로써 식 (4)와 같이 전단속도(V)/높이(H)로 나타낼 수 있다(Ovarlez et al., 2013).

$$\dot{\gamma} = \frac{d}{dt} \gamma = \frac{dL}{dt} \frac{1}{H} = \frac{V}{H} \quad (4)$$

여기서, 높이(H)는 변형이 발생하는 범위의 높이를 나타내며, 직접전단실험의 경우 일반적으로 Fig. 3(b)에 나타난 것과 같이 시료 높이의 절반(H/2)이 변형범위인 것으로 알려져 있다(Head, 2011). 따라서 직접전단실험에서의 전단변형률속도는 식 (5)와 같이 계산될 수 있다.

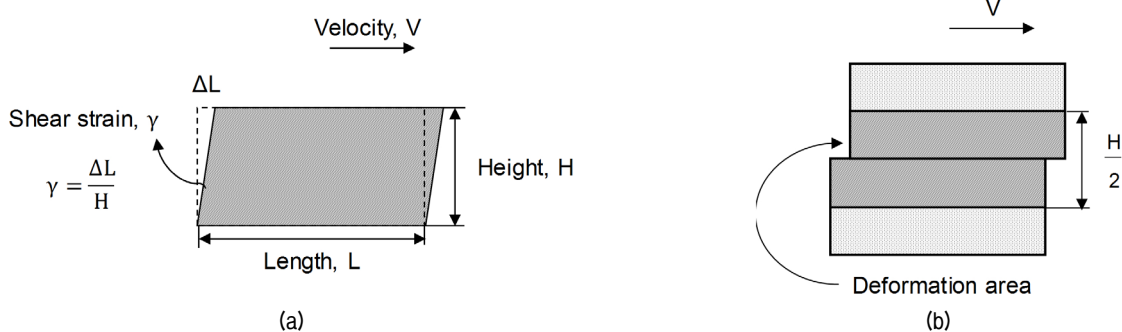


Fig. 3. Shearing deformation: (a) Shear strain for small strain; (b) Strain range in direct shear test

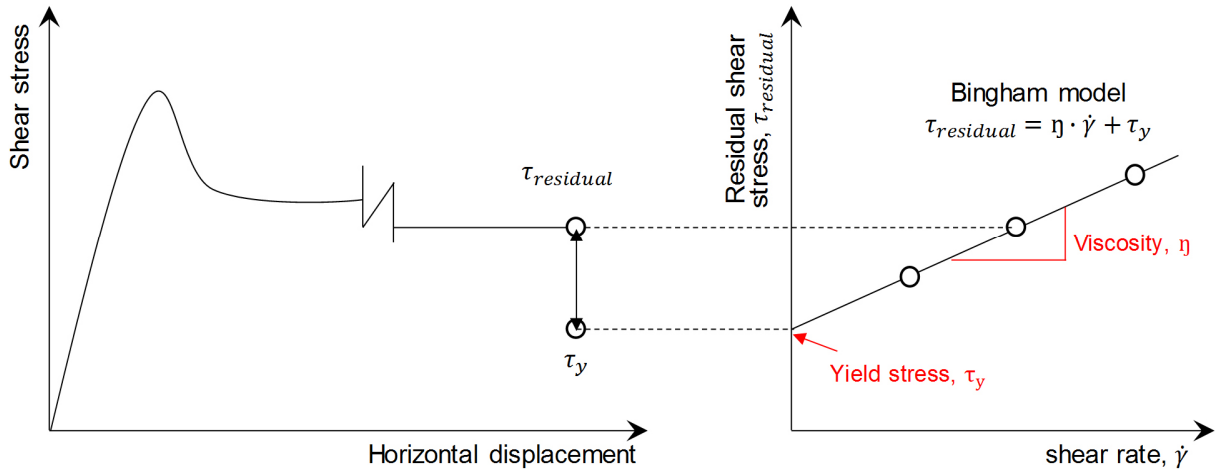


Fig. 4. Relationship between shear strength and shear rate in residual state

$$\dot{\gamma} = \frac{2V}{H} \text{ (For direct shear test)} \quad (5)$$

Bingham모델에서의 전단응력(τ)은 일정한 전단변형률속도에서 지속적으로 전단변위가 발생할 때 항복상태에서 나타나는 전단강도이다. 일반적으로 직접전단시험에서 발생시킬 수 있는 전단변위가 한정적이기 때문에 전단을 반복하는 과정을 통하여 큰 전단변형을 발생시켜 Bingham 모델의 전단응력을 발현할 수 있다. Mesri and Cepeda-Diaz(1986)에 따르면 반복적으로 전단을 수행할 시 누적전단변위 50mm 이상에서 이와 같은 전단강도가 나타나는 것으로 알려져 있다. 식 (3)에 전단응력 대신 잔류전단강도를 대입하면, 식 (6)으로 다시 나타낼 수 있다.

$$\tau_{residual} = \eta \cdot \dot{\gamma} + \tau_y \quad (6)$$

여기서 $\tau_{residual}$ 는 잔류전단강도이다. 전단강도와 전단변형률속도 관계는 Fig. 4와 같이 전단강도는 전단변형률속도에 의존하며, 전단변형률속도($\dot{\gamma}$)와의 관계식에서 기울기는 소성 점도(η), y절편의 값은 항복응력(τ_y)을 의미한다.

3. 정수산정을 위한 시료 및 실험구성

3.1 시료 특성

본 연구에서는 국내의 산지 중 실제로 토사재해가 발생하였던 강원 인제지역에서 시료를 채취하였다. Fig. 5



Fig. 5. Sampling location in Inje, Gangwon

는 시료를 채취한 현장사진이며, 토사재해가 발생했을 것으로 예상되는 급경사의 하부를 시료채취 구역으로 선정하였다. 구역내에서 지표로부터 약 30cm 심도에 위치한 시료를 채취하였다.

채취된 시료를 노건조한 후, 40번체(0.425mm)와 200번체(0.075mm)를 이용하여 조립토와 세립토로 분류하였다. 분류된 두 시료에 대하여 기본물성시험으로, 체분석 및 비중계 시험을 통하여 입도분석을 수행하였고(ASTM D422, 2007), Fig. 6과 같은 결과를 획득하였다. Fig. 6으

Table 1. Index properties of specimens

Property	Coarse-grained soil	Fine-grained soil
Coefficient of curvature, C_c [-]	4.4	8
Uniformity coefficient, C_u [-]	1.78	9.67
Maximum void ratio, e_{max} [-]	0.93	0.84
Minimum void ratio, e_{min} [-]	0.65	0.62
Specific gravity, G_s [-]	2.71	2.73
Liquid limit, LL [%]	38.52	45.20
Plastic limit, PL [%]	29.15	37.72
Plasticity index, PI [%]	9.37	7.48
USCS	SM-SC	ML

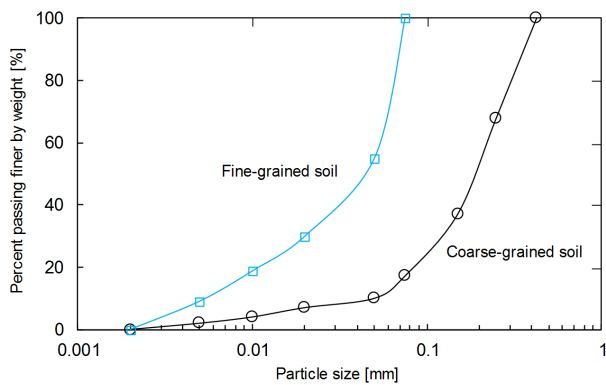
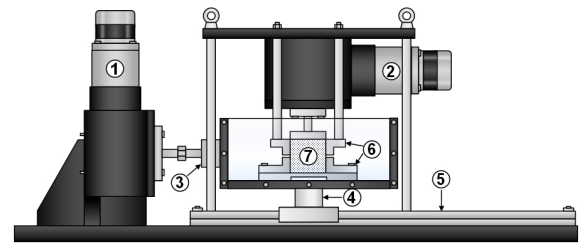


Fig. 6. Grain size distribution of two soil specimens

로 부터 10%, 30%, 그리고 60% 통과율에 해당하는 입경을 산정하였으며, 곡률계수와 균등계수를 산정하여 Table 1에 정리하였다. 조립토의 곡률계수와 균등계수는 각각 4.4와 1.78로 산정되었으며, 세립토의 곡률계수와 균등계수는 각각 2.94와 9.67인 것으로 나타나, 세립토가 조립토보다 더 균등하다는 것을 알 수 있다. 조립토의 경우 최대 및 최소 간극비는 각각 0.93과 0.65로 산정되었으며, 세립토의 경우 최대 및 최소간극비는 각각 0.84와 0.62로 나타났으며(ASTM D4253, 2006; ASTM D4254, 2006), 조립토와 세립토의 비중은 각각 2.71과 2.73 인 것으로 나타났다(ASTM D854, 2009). ASTM D4318 (2005)에 의거하여 액·소성한계 실험을 수행하였으며, 그 결과 조립토의 액성한계와 소성한계는 각각 38.52%와 29.15%로 나타났으며, 세립토에서는 45.20%와 37.72%로 나타났다. 조립토와 세립토의 소성지수는 각각 9.37%와 7.48%로 산정되었다. 통일분류법에 따라 조립토는 실트질 모래와 점토질 모래가 혼합되어(SM-SC) 있는 것으로 나타났으며, 세립토는 무기질 실트(ML)로 분류되었다.



- ① Motor for horizontal loading
- ② Motor for vertical loading
- ③ Loadcell for horizontal loading
- ④ Loadcell for vertical loading
- ⑤ Roller way
- ⑥ Upper and lower shear box
- ⑦ Soil specimen

Fig. 7. Schematic drawing of direct shear apparatus

3.2 직접전단시스템

본 실험에서 사용한 직접전단장비를 도식화하여 Fig. 7에 나타내었다. 전단상자에 대하여 연직방향과 수평방향에 각각 로드셀을 설치하여 각 방향에서 하중을 측정하였다. 설치된 두 로드셀의 최대 측정가능한 하중은 각각 3kN과 0.5kN으로, 연직하중에 비해 전단하중에 대하여 더 예민하게 반응할 수 있도록 하였다. 두 로드셀은 인디케이터와 RS232로 연결하여 데이터를 수집하였으며, 스텝핑 모터(steping motor)를 연직방향과 수평방향에 설치하여 모터 컨트롤러를 통하여 제어하도록 구성하였다. 전단 시 연직응력을 일정하게 유지시키기 위하여, 수평변위에 따라 감소하는 전단면을 계산하여 자동으로 하중을 감소시키도록 시스템을 구축하였다.

전단상자의 밑면은 한번의 길이가 8cm인 정사각형이며, 높이는 7cm이다. 전단상자는 상부전단상자와 하부전단상자로 나누어져 있으며, 상부전단상자는 4개의 봉

으로 직접전단장비의 상판에 고정된 상태이다. 본 장비에서 수평방향으로 설치된 모터와 하부전단상자가 볼트로 체결되어 있으며, 모터 컨트롤러를 이용하여 모터와 연결되어 있는 하부전단상자를 수평방향으로 이동시켜 전단을 발생시키는 방식이다. 상부전단상자와 하부전단상자의 간격은 스테인리스 스틸 재질의 간격재를 이용하여 0.05mm 이하로 유지시켰으며, 0.001mm단위까지 측정이 가능한 다이얼게이지로 그 간격을 확인하였다.

Hong et al.(2015)은 본 직접전단장비와 기존 직접전단장비를 비교하여 본 장비의 정밀성을 실험한 바 있다. 기존 장비를 사용하여 직접전단시험을 할 경우, 설정된 전단면에서 불균등한 응력과 변형률이 발생하여 진행성 파괴가 일어나거나(Wang and Gutierrez, 2010), 전단이 실제로 평행하게 일어나지 않는 등의 이유로 결과의 신뢰성이 떨어졌다(Shibuya et al., 1997). 본 장비는 하중재하판이 고정되었으며, 상부전단상자가 고정된 상태로 오직 수직방향으로 부피변화가 발생하여 변화량을 정확히 측정할 수 있으며, 전단상자의 간격을 일정하게 유지하여 시료유출로 인한 전단강도의 감소를 방지하여 기존 장비보다 높은 신뢰성의 결과를 얻을 수 있다(Kim et al., 2012).

3.3 직접전단시험 수행 절차

입도 및 함수특성에 대한 전단강도 변화를 평가하기 위하여, 조립토와 세립토를 건조상태와 액성한계상태로 각각 조성하여 직접전단시험을 수행하였다. 실험 수행 시 다른 조건의 영향을 배제하기 위하여, 동일한 건조단위중량(13.75kN/m³)으로 시료를 조성하였다. 시료에 가해지는 연직응력은 5.1kPa, 10.3kPa, 15.1kPa 그리고 25.6kPa

로 설정하였으며, 각각에 대하여 수평변위에 따른 전단응력을 측정하였다. 각 연직응력에 대하여 최대 측정되는 전단응력을 침투전단강도, 최대수평변위 11mm(전단변형률 16%에 해당) 에서 수렴하는 전단응력을 잔류전단강도로 간주하였다.

입자크기에 따른 유변학적 특성을 평가하기 위하여 조립토와 세립토를 액성한계 상태에서 반복적으로 직접전단시험을 수행하였다. 전단변형률속도에 따른 전단강도를 획득하기 위하여 전단변형률속도를 0.000476 s⁻¹, 0.000952 s⁻¹ 그리고 0.001429 s⁻¹(전단속도: 1mm/min, 2mm/min 그리고 3mm/min)로 변화시켜 실험을 수행하였으며, 연직응력은 반복 전단시 침투전단강도의 변화를 명확하게 관찰할 수 있도록 전단강도 정수 산정 시 설정했던 연직응력 중 가장 큰 25.6kPa로 설정하였다.

시료의 전단강도 정수 산정 시 전단변위 11mm에서 잔류전단강도를 산정했던 것과는 달리 유변학적 정수 산정에서는 정방향으로 전단변위를 50mm 이상 발생시키기 위하여, 정방향으로 전단 후 역방향으로 전단하는 방식으로 총 9회(정방향 5회, 역방향 4회) 전단하였다. 모든 전단에서는 설정한 전단변형률속도와 연직응력을 유지시키며 진행하였다. 정방향 전단에 대해서만 수평변위에 따른 전단응력을 측정하였으며, 각 전단변형률속도에 대하여 마지막 정방향 전단에서 수렴하는 전단응력을 잔류전단강도로 산정하였다. 반복전단 수행 시 잔류전단강도 산정방법에 대한 내용을 Fig. 8에 나타내었다.

4. 정수 산정 실험 결과 및 토의

4.1 전단강도 특성

각 시료에 대하여 직접전단시험을 수행하여 획득한

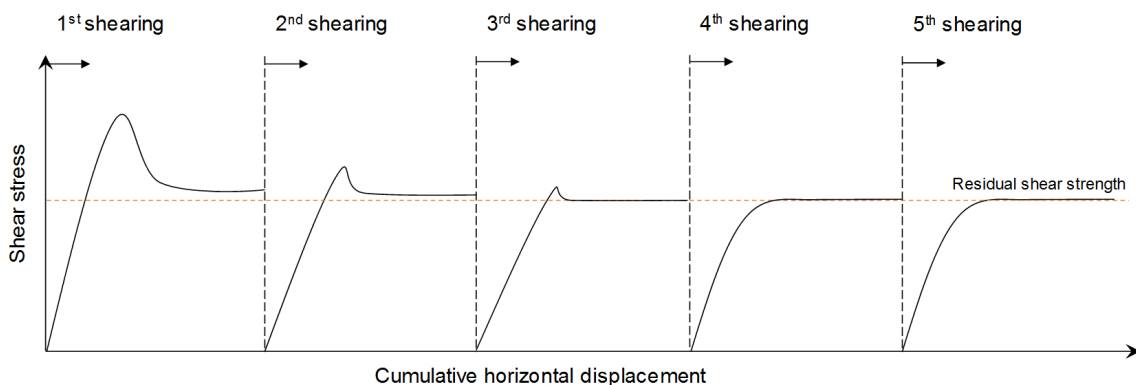


Fig. 8. Evaluation of residual shear strength by using multiple reversal shear tests

결과는 Fig. 9와 같다. Fig. 9(a)는 조립토의 건조상태와 액성한계상태에서 각 연직응력에 대한 전단응력이다. 건조상태 및 액성한계상태 모두 전단변위 약 1mm에서 첨두전단강도가 발생하였으며, 2mm 이후에서는 전단응력이 수렴하는 것으로 나타났다. 수렴하는 전단응력에 대하여 잔류전단강도로 산정하였다. 건조상태에서는 연직응력 5.1kPa, 10.3kPa, 15.1kPa 그리고 25.6kPa에 대하여 첨두전단강도가 각각 2.91kPa, 5.22kPa, 8.66kPa 그리고 13.74kPa로 나타났으며, 잔류전단강도는 각각 1.98kPa, 4.24kPa, 6.05kPa 그리고 10.15kPa로 산정되었다. 액성한계상태에서는 연직응력 5.1kPa, 10.3kPa, 15.1kPa 그리고 25.6kPa에 대하여 첨두전단강도가 각각 354Pa, 511Pa, 687Pa 그리고 945Pa로 산정되었으며, 잔류전단강도는 273Pa, 385Pa, 503Pa 그리고 723Pa로 산정되어, 건조상태에서 보다 작은 전단강도를 나타내었다.

건조상태와 액성한계상태로 조성한 세립토에 대한 직

접전단실험결과를 Fig. 9(b)에 나타내었다. Fig. 9(a)와 마찬가지로 전단변위 약 1mm에서 첨두전단강도가 발생하였으며, 2mm 이후에서는 전단응력이 수렴하는 것으로 나타났다. 연직응력 5.1kPa, 10.3kPa, 15.1kPa 그리고 25.6kPa에 대한 첨두전단강도는 건조상태에서 각각 2.47kPa, 4.89kPa, 7.30kPa 그리고 12.07kPa로 나타났으며, 액성한계상태에서는 각각 349Pa, 469Pa, 681Pa 그리고 871Pa로 나타났다. 잔류전단강도는 건조상태에서 1.85kPa, 3.43kPa, 5.22kPa 그리고 8.85kPa, 액성한계상태에서는 239Pa, 329Pa, 411Pa 그리고 601Pa로 산정되었다.

Fig. 9로부터 산정된 전단강도와 연직응력의 관계를 Fig. 10에 나타내었으며, 파괴포락선에 근거하여 각각의 전단강도에 대해 점착력과 내부마찰각을 산정하여 Table 2에 정리하였다. Fig. 10에서와 같이 조립토와 세립토 모두 연직응력과 전단강도의 관계가 선형적으로

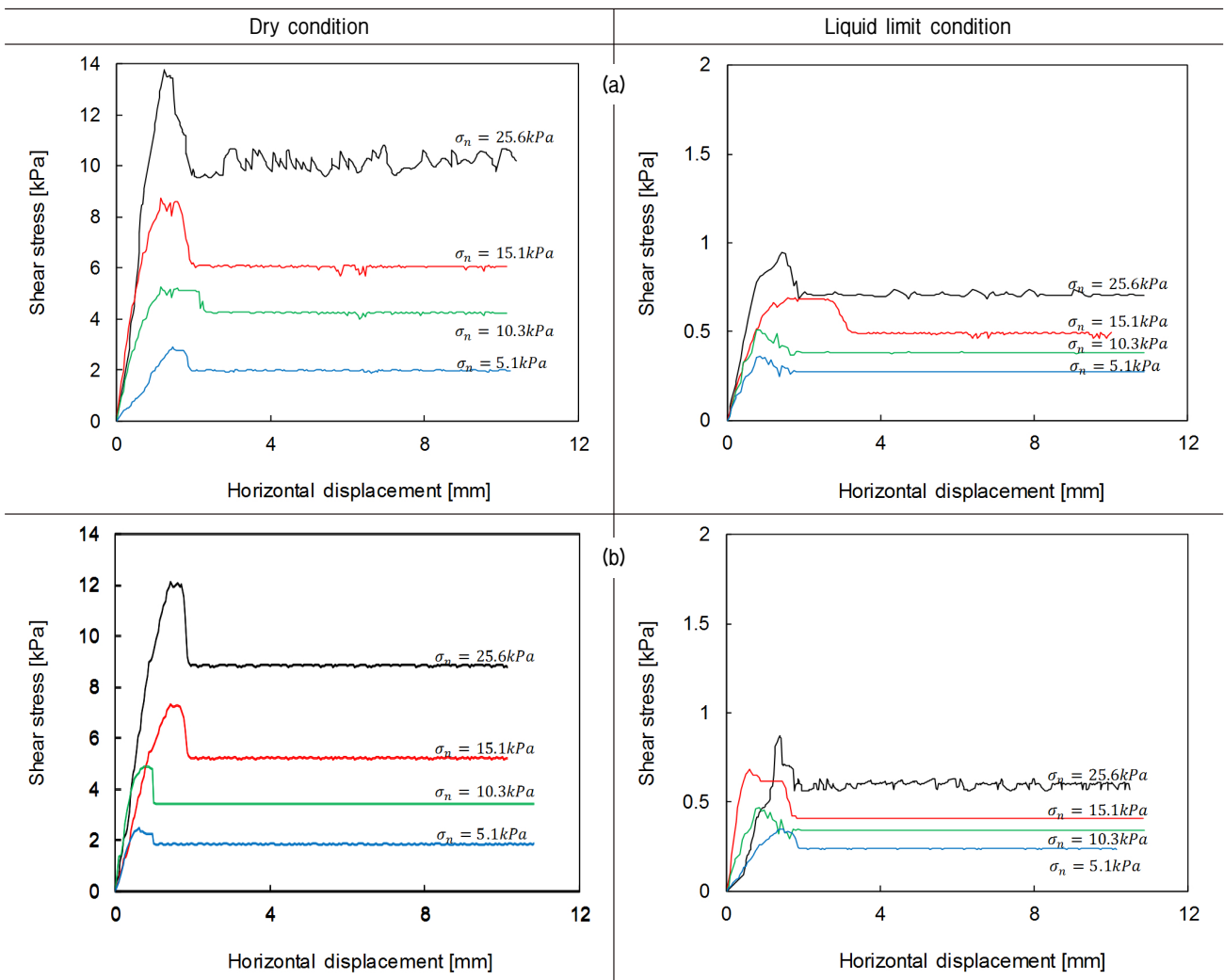


Fig. 9. Results of direct shear tests for specimens at dry and liquid limit states: (a) Coarse-grained soil; (b) Fine-grained soil

나타났다. 건조상태의 조립토에서 각 연직응력에 대한 전단강도로 산정된 점착력은 97Pa(첨두)와 61Pa(잔류)이며, 내부마찰각은 28.25°(첨두)와 21.58°(잔류)인 것으로 나타났다. 액성한계상태 조립토의 점착력은 218Pa(첨두)과 162Pa(잔류)이며, 내부마찰각은 1.66°(첨두)와

1.26°(잔류)로 나타났다. 액성한계상태 조립토의 내부마찰각은 건조상태 조립토의 내부마찰각보다 각각 1/17 정도로 감소(28.25°→1.66°; 21.58°→1.26°)하였지만, 점착력은 약 2.5배 증가(97→218Pa; 61→162Pa)하는 것으로 나타났다. 세립토에서 점착력은 건조상태에서 100Pa

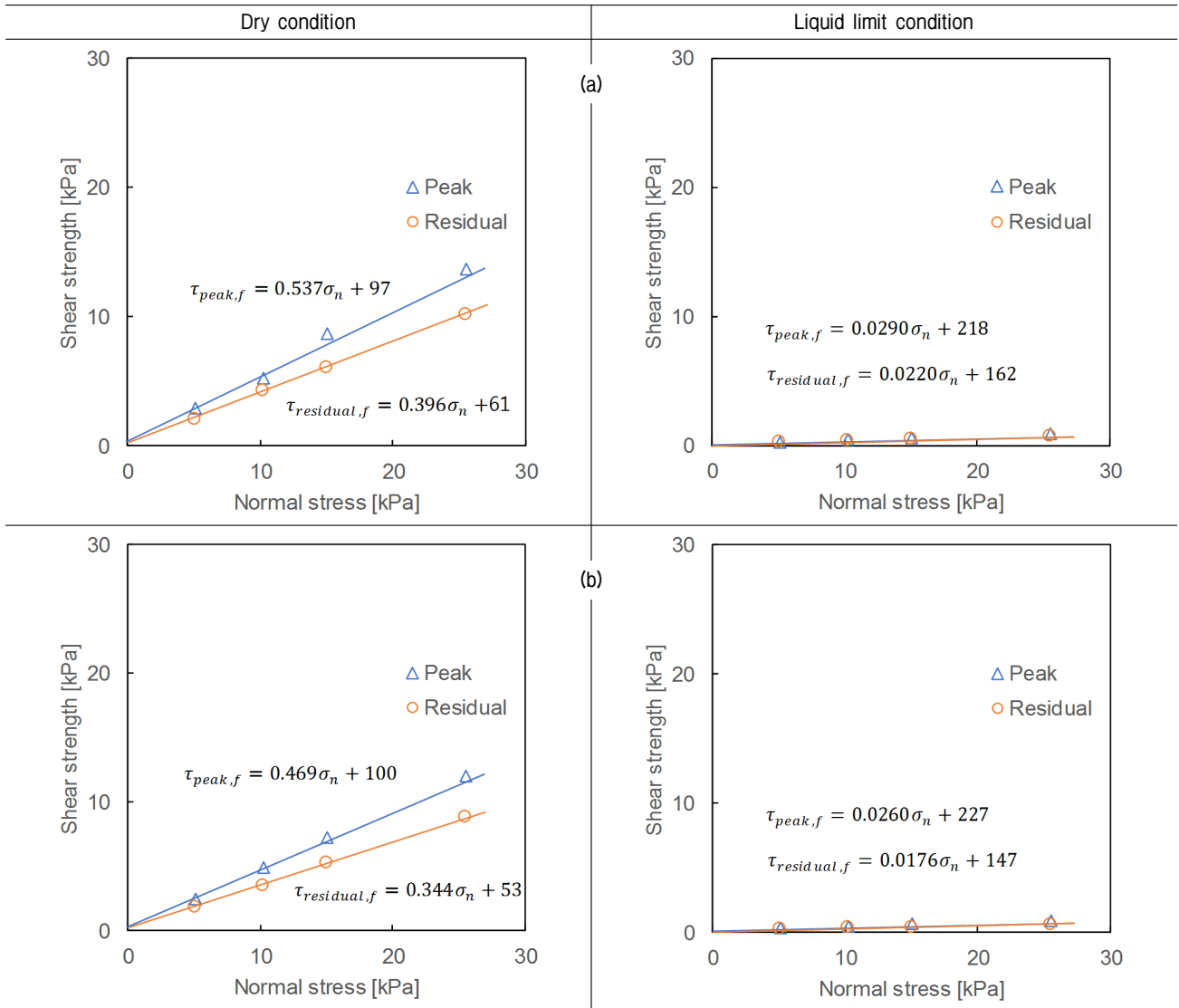


Fig. 10. Cohesion and internal friction angle of specimens at dry and liquid limit states: (a) Coarse-grained soil; (b) Fine-grained soil

Table 2. Strength properties of coarse- and fine-grained soils at dry and liquid limit states

		Internal friction angle [°]		Cohesion [Pa]
Coarse-grained soil	Peak	Dry condition	28.25	97
		Liquid limit state	1.66	218
	Residual	Dry condition	21.58	61
		Liquid limit state	1.26	162
Fine-grained soil	Peak	Dry condition	25.15	100
		Liquid limit state	1.49	227
	Residual	Dry condition	19.00	53
		Liquid limit state	1.01	147

(첨두)와 53Pa(잔류)로 액성한계상태에서는 227Pa(첨두)와 147Pa(잔류)인 것으로 나타나 조립토에서와 같이 액성한계상태에서 점착력이 약 2~3배 정도 크게 나타났으며, 내부마찰각은 건조상태에서 25.15°(첨두)와 19.00°(잔류), 액성한계상태에서는 1.49°(첨두)와 1.01°(잔류)로 산정되어 조립토와 마찬가지로 액성한계상태에서 건조상태보다 약 1/17 만큼 작은 내부마찰각을 갖는 것으로 나타났다.

조립토와 세립토의 전단강도 정수 산정 결과를 비교해보면, 건조상태에서 내부마찰각은 세립토에서 조립토보다 약 3.10~3.58° 작은 것으로 나타났으며, 액성한계

상태에서도 약 0.17~0.25° 작게 나타났다. 반면 점착력의 경우, 건조상태 및 액성한계상태에서 첨두전단강도로 점착력 산정시, 세립토가 조립토보다 더 큰 점착력(97Pa→100Pa; 218Pa→227Pa)을 갖는 것으로 나타났다. 반면, 잔류전단강도로 산정할 경우 건조상태와 액성한계상태 모두 세립토가 더 작은 점착력(61Pa→53Pa; 162Pa→147Pa)이 산정되었다.

4.2 유변학 특성

액성한계상태의 함수비로 조성된 시료에 대하여, 설정

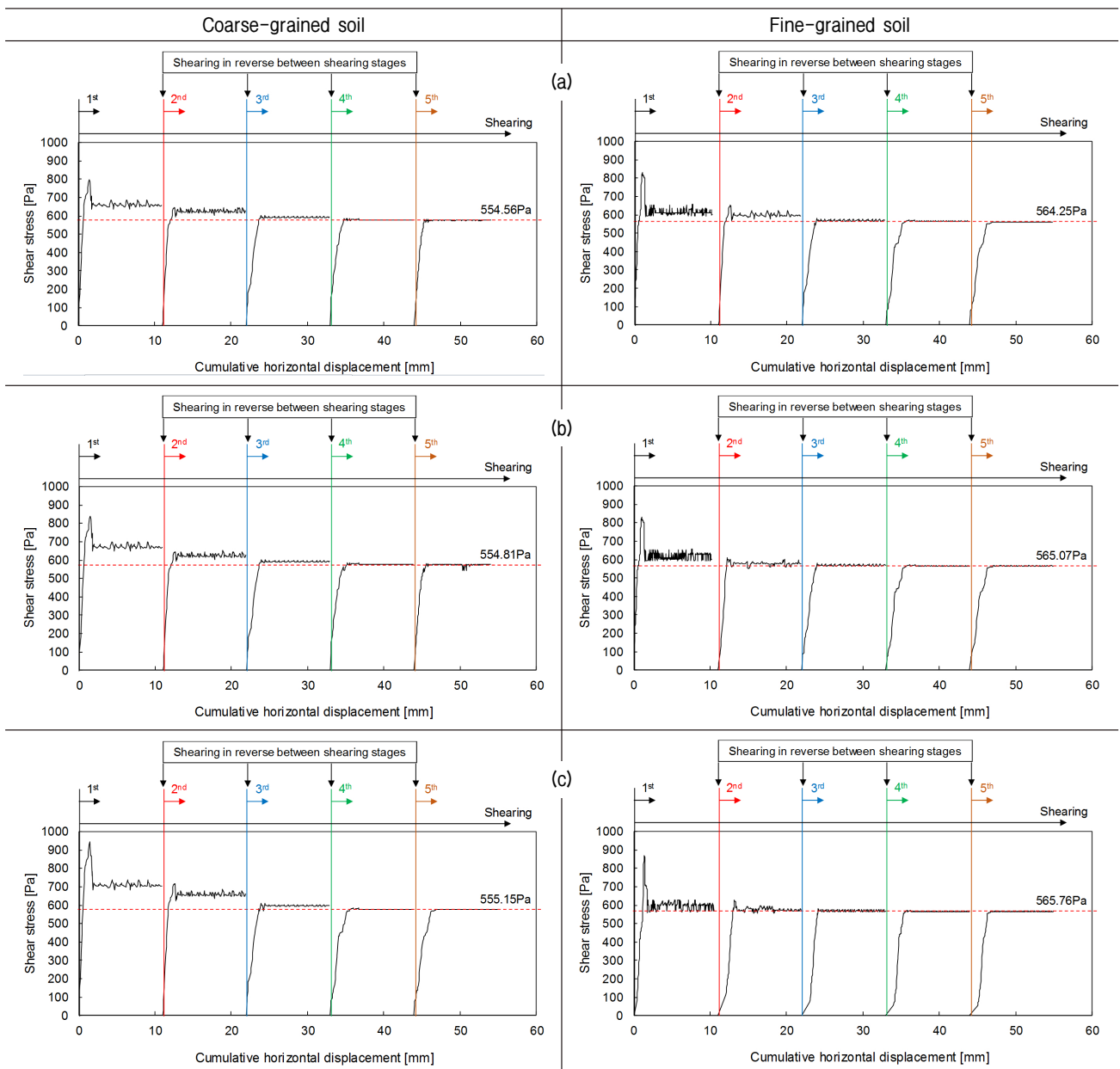


Fig. 11. Results of reversal shear tests for specimens under liquid limit state with different shear rate: (a) shear rate = 0.000476 s⁻¹; (b) shear rate = 0.000952 s⁻¹; (c) shear rate = 0.001429 s⁻¹

한 세 전단변형률속도(0.000476 s^{-1} , 0.000952 s^{-1} , 0.001429 s^{-1})로 반복전단실험을 수행하였으며 누적전단변위에 따라 측정된 전단응력을 토대로 잔류전단강도를 산정하였다. 각각의 전단변형률속도로 정방향 전단을 총 5회 수행하였으며, 수행한 결과는 Fig. 11에 나타내었다. 모든 시료에서 반복적으로 전단수행시 잔류전단응력이 감소하는 경향을 보였으며, 3~5번째 전단에서는 잔류전단응력의 값이 수렴함을 알 수 있다. 마지막 전단인 5번째 전단에서의 잔류전단응력을 잔류전단강도로 산정하였다. 조립토에서는 전단변형률속도 0.000476 s^{-1} (1mm/min)에 대하여 잔류전단강도가 554.56Pa로 측정되었으며, 전단변형률속도 0.00952 s^{-1} (2mm/min)와 0.001429 s^{-1} (3mm/min)에서는 각각 554.81Pa, 555.15Pa로 측정되었다. 세립토의 잔류전단강도는 세 전단변형률속도에 대하여 각각 564.25Pa, 565.07Pa, 565.76Pa인 것으로 나타났다.

반복전단실험 결과에서 측정된 잔류전단강도와 설정한 전단변형률속도의 상관관계를 Fig. 12에 나타내었으며, 빙햄모델에 근거하여 산정한 점성과 항복응력을 Table 3에 요약하였다. Fig. 12에 나타낸 것과 같이 조립토의 점성과 항복응력은 각각 $620.9 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, 554.25 Pa 로 나타났으며, 세립토의 점성과 항복응력은 각각 $1580.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$, 563.52 Pa 로 나타났다. 조립토의 점성과 항복응력 모두 세립토의 점성과 항복응력보다 작은 것으로 나타났다.

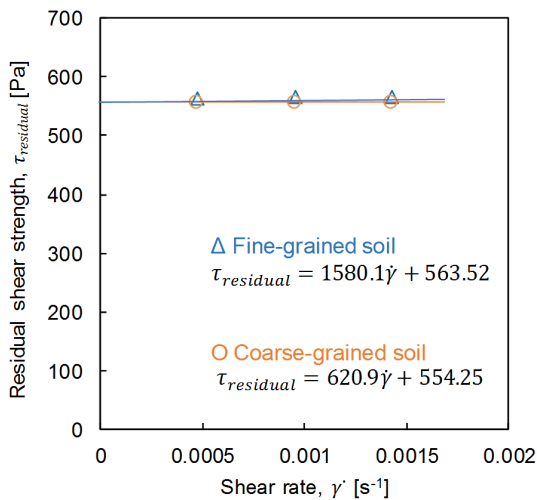


Fig. 12. Relationship between the shear rate and residual shear strength for specimens based on the reversal shear tests

Table 3. Viscosity of coarse- and fine-grained soils at liquid limit state

Specimen	Viscosity [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]	Yield stress [Pa]
Coarse-grained soil	620.9	554.25
Fine-grained soil	1580.1	563.52

4.3 결과 토의

4.3.1 전단강도 특성

본 실험에서 산정된 시료들의 전단강도 정수들을 비교하여, 전단강도에 대한 흙 입자 크기의 영향에 대하여 토의하고자 한다. 먼저, Table 2와 같이, 침두전단강도에서는 세립토의 점착력(건조: 100Pa; 액성한계: 227Pa)이 조립토의 점착력(건조: 97Pa; 액성한계: 218Pa)보다 더 큰 값을 나타냈지만, 잔류전단강도로 산정할 경우 반대로 세립토의 점착력(건조: 53Pa; 액성한계: 147Pa)이 조립토의 점착력(건조: 61Pa; 액성한계: 162Pa)보다 더 작게 산정되었다. 점착력은 흙 입자중 크기가 작은 미립자간의 물리화학적 결합에 의해 작용하는 힘으로, 흙의 입자크기가 작은 세립분은 조립분보다 물리화학적 힘이 더 크게 작용한다(Hwang and Jo, 2002). 입자크기가 큰 조립분은 세립분의 결합력을 와해하는 작용을 하기 때문에(Karim and Alam, 2017), 조립분을 포함하고 있는 조립토는 세립분으로만 구성된 세립토에 비해 더 작은 점착력을 나타낸 것으로 판단된다. 이러한 이유로 침두전단강도로 점착력을 산정하였을 때 세립토의 점착력이 더 크게 나타났다. 하지만, 잔류전단강도로 점착력을 산정하였을 때는 세립토의 점착력이 조립토의 점착력보다 더 작은 것으로 나타났다. 본 실험에서는 액성한계상태에서 잔류전단강도로 점착력 산정시 147~162Pa 범위의 값으로 측정되며, 건조토는 53~61Pa로써 침두값에 비해 상대적으로 작은 점착력 값을 보인다.

침두전단강도로 산정한 세립토의 내부마찰각(건조: 25.15° ; 액성한계: 1.49°)은 조립토의 내부마찰각(건조: 28.25° ; 액성한계: 1.66°) 보다 더 작게 나타났으며, 세립토와 조립토의 침두 내부마찰각의 차이는 건조상태일 때는 3.1° , 액성한계상태에서는 0.17° 로 나타났다. 그리고, 잔류전단강도로 산정한 경우에도 세립토의 내부마찰각(건조: 19.00° ; 액성한계: 1.01°)이 조립토의 내부마찰각(건조: 21.58° ; 액성한계상태: 1.26°) 보다 작게 나타났으며, 세립토와 조립토의 잔류 내부마찰각의 차이는 건조상태에서 2.58° , 액성한계상태에서는 0.25° 로 나타났다. 내부마찰각은 흙의 특성 중 균등계수와 전단면 흙 입자

크기에 영향을 받는 것으로 알려져 있으며, 균등계수가 더 작은 흙은 맞물림 효과(interlocking effect)로 인하여 균등계수가 높은 흙보다 내부마찰각이 더 크게 나타나는 것으로 알려져 있다(Bareither et al., 2008). Maranzano and Wagner(2001)에 따르면 전단면에 분포한 흙 입자의 크기는 전단강도 특성에 영향을 주며 내부마찰각은 흙 입자크기에 비례한 것으로 알려져 있다. 균등계수가 더 작은 조립토에서 맞물림 효과가 더 클 것으로 예상되며, 조립토의 입자크기가 세립토보다 더 크기 때문에 조립토의 내부마찰각이 세립토에서 보다 더 크게 산정된 것으로 판단된다.

4.3.2 유변학적 특성

유변학적 정수인 소성 점도와 항복응력의 경우, Table 3에 정리된 것과 같이 세립토에서 더 크게 나타나는 경향을 보였다. 소성 점도와 항복응력은 점착력과 마찬가지로, 세립분 간의 물리화학적 결합력으로 발생하는 힘으로 점착력과 동일한 이유로 입자크기가 작은 세립토에서 더 큰 값을 갖는 것으로 판단된다. Suetsugu and White(1983)에 따르면 세립토 함량이 증가할수록 점성과 항복응력이 증가하는 것으로 나타났으며, 세립분 함량과 소성 점도 및 항복응력은 지수함수 관계를 보인다(O'Brien and Julien, 1988). 본 논문에서 사용한 인제 시료는 세립분 함량이 100%일 때와, 17%일 때의 시료로써, 세립분 함량이 많은 세립토의 소성 점도(1580.1Pa·s)가 세립분 함량이 적은 조립토의 소성 점도(620.9Pa·s)보다 2.5배 크게 산정되었다. 또한, 세립토의 항복응력(563.52Pa)이 조립토의 항복응력(554.25Pa)보다 9.27Pa 더 크게 산정되었다.

항복응력의 경우, 직접전단시험에서는 시료에 가해지는 연직응력으로 인하여 객관적인 비교가 힘들기 때문에 다른 시험방법으로 측정된 소성 점도와 본 논문에서 측정된 소성 점도를 비교하였다. 기존 연구에서는 액성한계상태에서의 소성 점도를 측정하기 위하여 Transparent plexiglas channel(Vallejo and Scovacco, 2003)과 Fall

cone(Mahajan and Budhu, 2006, 2008)등을 이용하였으며, 주로 세립토의 소성 점도를 평가한 바 있다. Table 4는 본 논문의 결과와 Transparent plexiglas channel 과 Fall cone을 비교한 것이다. 본 연구에서 측정한 소성 점도와 다른 기법으로 측정한 소성 점도 값을 비교하면, 본 연구에서 산정한 소성 점도는 기존 연구에서 측정된 범위에 대하여 중간 범위의 소성 점도 값을 나타내었다.

4.3.3 전단속도 및 세립분 함량에 따른 연구결과 활용범위

본 실험에서 적용한 전단속도의 경우 산사태 분류법에 따라 상대적으로 느린속도범위에 속한다. 이는 직접전단실험에서 도출한 결과는 상대적으로 느린 속도로 거동하는 재활성 산사태(reactivated landslide) 혹은 붕괴직후의 토석류에 적용할 수 있으며, 상대적으로 빠른 속도에 해당하는 산사태의 거동에 적용하기에는 적합하지 않은 속도이다. 즉, 직접전단실험 장비는 전단속도 및 전단변형에 한계가 있으며, 그 한계로 인하여 재활성 산사태 및 붕괴 직후의 토석류를 규명하는 것에 적합하지만, 빠른 속도로 거동하는 토석류의 특성 파악에는 한계가 있다. 도출된 실험결과를 보면, 재활성 산사태 혹은 붕괴직후의 토석류는 조립토를 다량 포함할 경우(80% 내외), 세립분만을 포함하는 토사에 비해 점착력, 소성 점도 및 항복응력이 감소하고, 내부마찰각은 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 이와 같은 결과는, 조립분의 함유량이 상대적으로 적은 토사에 대하여 강도특성 및 유변학적 특성을 유추하기에는 부족한 자료이며, 이에 따른 추가적인 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 인제지역에서 채취한 시료를 조립토와 세립토로 분류하여 전단강도 및 유변학적 특성을 평가하는 연구를 수행하였다. 조립토는 40번체 통과시료로써 200번체 통과량이 17%정도 포함된 시료이며, 세

Table 4. Viscosity for soil of liquid limit state in other researches

Test method	Specimen	Viscosity [Pa·s]	Remarks
Transparent plexiglas channel	Kaolinite	$4.5 \cdot 10^5$	Vallejo and Scovacco (2003)
Fall cone	Kaolinite	735.3	Mahajan and Budhu (2006)
Fall cone	Kaolinite	196.7	Mahajan and Budhu (2008)
Reverse shear test	Fine-grained soil	1580.1	This study
Reverse shear test	Coarse-grained soil	620.9	This study

립토는 200번체 통과시료만을 포함한 것이다. 시료를 건조상태와 액성한계상태로 조성하여 전단강도 특성을 나타내는 정수인 점착력과 내부마찰각을 산정하였으며, 액성한계상태로 조성된 시료에 대하여 유변학적 정수인 소성 점도, 항복응력을 각각 산정하였다. 직접전단시험 장비의 한계로 상대적으로 느린 재활성 산사태 및 붕괴직후의 토석류에 대한 실험결과를 도출하였으며, 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 흙 입자 중 미립자 간의 물리화학적 결합에 의해 작용하는 힘이 점착력이며, 세립분의 물리화학적 결합을 조립분이 약화시키므로, 점착력을 침투전단강도에서 산정하였을 때 건조 및 액성한계상태에서 모두, 세립토의 점착력이 조립토의 점착력보다 더 큰 것으로 나타났다.
- (2) 내부마찰각의 경우, 균등계수가 더 작은 조립토에서 입자 간의 맞물림 효과가 더 크며, 조립토의 입자크기가 세립토보다 더 크기 때문에 조립토에서 세립토보다 더 큰 값을 보였다.
- (3) 세 가지 전단변형률속도에서 전단변형을 50mm 이상 발생시켜 산정한 잔류전단강도를 이용하여, 유변학적 특성인 소성 점도와 항복응력을 산정하였다. 유변학적 특성인 소성 점도와 항복응력은 점착력과 마찬가지로 세립분 간의 물리화학적 결합력에 의해 결정되기 때문에, 소성 점도와 항복응력이 조립토보다 세립토에서 더 크게 산정되었다.
- (4) 본 논문의 결과는 전단속도가 느린 재활성 산사태 및 붕괴직후 토석류 거동에 활용 가능하며, 세립분 함유량이 17%인 조립토와 세립분의 함유량이 100%인 세립토에 해당하는 결과로써, 전단속도가 빠른 경우와 세립분의 함유량이 더 많은 경우의 토석류에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업(13SCIPS04)의 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

1. ASTM D422 (2007), "Standard Test Method for Particle-size Analysis

of Soils", The American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, United States.

2. ASTM D854 (2009), "Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer", The American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, United States.

3. ASTM D4318 (2005), "Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils", The American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, United States.

4. ASTM D4253 (2006), "Standard Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table", The American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, United States.

5. ASTM D4254 (2006), "Standard Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density", The American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, United States.

6. Bareither, C. A., Edil, T. B., Benson, C. H., and Mickelson, D. M. (2008), "Geological and Physical Factors Affecting the Friction Angle of Compacted Sands", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.134, No.10, pp.1476-1489.

7. Byun, Y. H., Tran, M. K., Yun, T. S., and Lee, J. S. (2012), "Strength and Stiffness Characteristics of Unsaturated Hydrophobic Granular Media", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.35, No.1, pp. 199-200.

8. Choi, H. G. (2007), *Ground disaster engineering*, Wongisul, Seoul, 253p.

9. Chok, Y. H., Jaksa, M. B., Kaggwa, W. S., and Griffiths, D. V. (2015), "Assessing the Influence of Root Reinforcement on Slope Stability by Finite Elements", *International Journal of Geo-Engineering*, Vol.6, Paper No.12 (DOI 10.1186/s40703-015-0012-5).

10. Contreras, S. M. and Davies, T. R. (2000), "Coarse-grained Debris-flows: Hysteresis and Time-dependent Rheology", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.126, No.12, pp.938-941.

11. Duttine, A., Tatsuoka, F., Kongkitkul, W., and Hirakawa, D. (2008), "Viscous behaviour of Unbound Granular Materials in Direct Shear", *Soils and Foundations*, Vol.48, No.3, pp.297-318.

12. Head, K. H. (2011), *Manual of Soil Laboratory Testing: Volume Two: Permeability, Shear Strength and Compressibility Tests*, John Wiley and Sons, New York-Toronto, 440p.

13. 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.

14. Hwang, G. N. and Jo, Y. S. (2002), "Settling Characteristics of Saemankeum Fine-Cohesiv Sediments: Effects of Physico-Chemical Properties", *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol.35, No.5, pp.475-484.

15. Ilori, A. O., Udoh, N. E., and Umengi, J. I. (2017), "Determination of Soil Shear Properties on a Soil to Concrete Interface Using a Direct Shear Box Apparatus", *International Journal of Geo-Engineering*, Vol.8, Paper No.17 (DOI 10.1186/s40703-017-0055-x).

16. Imran, J., Harff, P., and Parker, G. (2001), "A Numerical Model of Submarine Debris Flow with Graphical User Interface", *Computers & geosciences*, Vol.27, No.6, pp.717-729.

17. IUGS/WGL. (1995), International Union of Geological Science Working Group on Landslides, 1995, A suggested method for describing the rate of movement of a landslide. IAEG Bulletin,

- 52, pp.75-78.
18. Jeong, S. W. (2013), "Debris Flow Mobility: A Comparison of Weathered Soils and Clay-rich Soils", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.1, pp.23-27.
 19. Julien, P. Y. and Leon, C. (2000), "Mud Floods, Mudflows and Debris Flows. Classification, Rheology and Structural Design", Proc., Int. Workshop on the Debris Flow Disaster of December 1999 in Venezuela, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela.
 20. Karim, M. E. and Alam, M. J. (2017), "Effect of Nonplastic Silt Content on Undrained Shear Strength of Sand-silt Mixtures", *International Journal of Geo-Engineering*, Vol.8, Paper No.14 (DOI 10.1186/s40703-017-0051-1).
 21. Kim, B. S., Shibuya, S., Park, S. W., and Kato, S. (2012), "Effect of Opening on the Shear behavior of Granular Materials in Direct Shear Test", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.16, No.7, pp.1132-1142.
 22. Lee, C. W. (2005), "Trends of Deaths and Missings Caused by Natural and Sediment Disasters in Korea", *Journal of Korean Forest Society*, Vol.94, No.4, pp.252-257.
 23. Lee, J. S., Song, C. G., Kim, H. T., and Lee, S. O. (2015), "Risk Analysis Considering the Topography Characteristics of Debris Flow Occurrence Area", *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.15, No.3, pp.75-82.
 24. Mahajan, S. P. and Budhu, M. (2006), "Viscous Effects on Penetrating Shafts in Clays", *Acta Geotechnica*, No.1(3), pp.157-165.
 25. Mahajan, S. P. and Budhu, M. (2008), "Shear Viscosity of Clays to Compute Viscous Resistance", In Proceedings of the 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), Goa, India.
 26. Maranzano, B. J. and Wagner, N. J. (2001), "The Effects of Particle Size on Reversible Shear Thickening of Concentrated Colloidal Dispersions", *The Journal of Chemical Physics*, Vol.114, No.23, pp.10514-10527.
 27. Mesri, G. and Cepeda-Diaz, A. F. (1986), "Residual Shear Strength of Clays and Shales", *Geotechnique*, Vol.36, No.2, pp.269-274.
 28. Mih, W. C. (1999), "High Concentration Granular Shear Flow", *Journal of Hydraulic Research*, Vol.37, No.2, pp.229-248.
 29. Nguyen, Q. D. and Boger, D. V. (1992), "Measuring the Flow Properties of Yield Stress Fluids", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol.24, No.1, pp.47-88.
 30. O'Brien, J. S. and Julien, P. Y. (1988), "Laboratory Analysis of Mudflow Properties. Journal of Hydraulic Engineering", Vol.114, No.8, pp.877-887.
 31. Omar, T. and Sadrekarimi, A. (2015), "Effect of Triaxial Specimen Size on Engineering Design and Analysis", *International Journal of Geo-Engineering*, Vol.6, Paper No.5 (DOI 10.1186/s40703-015-0006-3).
 32. Ovarlez, G., Cohen-Addad, S., Krishan, K., Goyon, J., and Coussot, P. (2013), "On the Existence of a Simple Yield Stress Fluid behavior", *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 193, pp.68-79.
 33. Park, G. W., Hong, W. T., and Lee, J. S. (2017), "Estimation of Shear Strength and Rheological Parameters of Fine-Grained Soil Using Direct Shear Test", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.18, No.2, pp.29-37.
 34. Ramesh, V., Mani, S., Baskar, M., Kavitha, G., and Anbazhagan, S. (2017), "Landslide Hazard Zonation Mapping and Cut Slope Stability Analyses Along Yercaud Ghat Road (Kuppanur-Yercaud) Section, Tamil Nadu, India", *International Journal of Geo-Engineering*, Vol.8, Paper No.2 (DOI 10.1186/s40703-017-0039-x).
 35. 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.
 36. Shin, H. (2014), "FEM Numerical Formulation for Debris Flow", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.30, No.10, pp.55-65.
 37. Shin, H. (2015), "Evaluation of Debris Properties Using Numerical Analysis for USGS Debris Flume Tests", *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol.15, No.3, pp.215-221.
 38. Suetsugu, Y. and White, J. L. (1983), "The Influence of Particle Size and Surface Coating of Calcium Carbonate on the Rheological Properties of its Suspensions in Molten Polystyrene", *Journal of Applied Polymer Science*, Vol.28, No.4, pp.1481-1501.
 39. Tran, M. K., Byun, Y. H., Shin, H., and Lee, J. S. (2011) "Behaviors of Soluble Granular Media during Particle Dissolution", *International Journal of Geo-Engineering*, Vol.3, No.2, pp.39-49.
 40. Tran, M. K., Shin, H., Byun, Y. H., and Lee, J. S. (2012), "Mineral Dissolution Effects on Mechanical Strength", *Engineering Geology*, 125, pp.26-34.
 41. Vallejo, L. E. and Scovazzo, V. A. (2003), "Determination of the Shear Strength Parameters Associated with Mudflows", *The Japanese Geotechnical Society*, Vol.43, No.2, pp.129-133.
 42. Wang, J. and Gutierrez, M. (2010), "Discrete Element Simulations of Direct Shear Specimen Scale Effects", *Geotechnique*, Vol.60, No.5, pp.395-409.

Received : August 8th, 2017

Revised : October 27th, 2017

Accepted : November 27th, 2017