세립토 기반 토석류의 유동학적 물성 영향요인 및 측정방법 분석

Analysis of Factors Affecting the Rheological Properties of Muddy Flow and Their Measurement Method

유재은* · 이창훈** · 정종원***

Ryou, Jae-Eun*, Lee, Changhoon**, and Jung, Jongwon***

Abstract

Abnormal weather phenomena debris damage has recently been increasing worldwide. As primary rheological properties, the yield stress and plastic viscosity of muddy materials affect the flow distance and velocity. Therefore, in this study, direct and indirect measurement test methods for rheological properties and factors affecting the these properties were analyzed. Measurement methods utilize rheometers, shear creep, fall cones, inclined planes, direct shear, and ring shear, with each method having its respective advantages and disadvantages. Factors that affect rheological properties are water content, liquidity index, and the size of soil particles. This study enables determination of the best test and rheological properties suitable for the selected range and selected object.

Key words : Debris Flow, Plastic Viscosity, Yield Stress, Rheological Property

요 지

최근 이상기후 현상의 증가로 토석류 피해는 국내외적으로 급증하고 있다. 항복응력 및 소성점도는 점성토 흐름에 의존적인 토석류의 유동학적 물성으로 이동거리 및 이동속도에 영향을 미친다. 따라서, 본 연구에서는 토석류의 직·간접적 유동학적 물성 측정 시험방법 및 유동학적 물성에 영향을 미치는 요인에 대해 분석하였다. 유동학적 물성 측정방법은 레오미터, 전단 크리프, 낙하 콘, 경사판 및 전단 시험 활용 측정법이 존재하며 각각의 장·단점이 존재하여 연구의 범위 및 목적에 따라 적합한 측정방법 활용이 중요하다. 유동학적 물성에 영향을 미치는 요인은 함수특성, 액성지수, 흙 입자의 크기 등에 영향을 받는다. 본 연구를 통해 연구의 범위 및 목적에 적합한 시험법 및 유동학적 물성 선정이 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 토석류, 소성점도, 항복응력, 유동학적 물성

1. 서 론

현재 전 세계적으로 이상기후 현상의 증가에 따라 다양한 자연재해가 발생하고 있다(Armdt et al., 2010; Leiserowitz et al., 2021). 1998년 태풍 예니, 2002년 태풍 루사, 2003년 태풍 매미 등 산림에서의 피해액은 현재까지도 점진적으로 증가하고 있다(Kim, 2008). 산림 재해 중 가장 큰 비중을

차지하는 산사태는 평균적으로 1980년대 230 ha, 1990년대 350 ha, 2000년대 713 ha로 증가 추세에 있으며 2020년에 1,343 ha로 산사태로 인한 피해액 및 인명 피해가 가장 높게 나타났다. 국내·외에서 지속적으로 증가하는 산사태로 인한 피해 저감을 위해 GIS를 활용한 산사태 취약지도를 작성하여 지역별 위험구역을 선정하였고, 위험지역에는 사방댐 및 산사태 재해 구조물 설치 등 적극적인 사전예방

*정회원, 충북대학교 토목공학과 박사과정(E-mail: jaeunryou@chungbuk.ac.kr)

Member, Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Chungbuk National University

**정회원, 세종대학교 건설환경공학과 교수(E-mail: cleee@sejong.ac.kr)

Member, Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Sejong University

***교신저자, 정회원, 충북대학교 토목공학부 부교수(Tel: +82-43-261-2405, Fax: +82-43-261-2405, E-mail: jjung@chungbuk.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Associate Professor, Department of Civil Engineering, Chungbuk National University

조치를 취하고 있다(Begueria et al., 2009; Wie et al., 2010; Choi and Kwon, 2017; Kim et al., 2019).

산사태의 발생은 호우, 지진, 파랑, 해빙 등 다양한 원인에 의해 발생한다(Fan et al., 2017; Subramanian et al., 2020). 산사태는 호우, 지진 등 외부 역학적 작용으로 인해 간극수압의 변화 및 흙 입자 간 결속력 저하로 경사면 붕괴를 유발한다. 산사태는 운동성에 따라 붕락(Fall), 전도(Topple), 유동(Flow), 활동(Slide), 전파(Lateral spread), 복합(Complex and compound)성 파괴로 구분된다. 붕락은 거석 및 부파가 큰 물질이 사면으로부터 굴러 떨어지는 자유낙하 현상을 의미한다. 전도는 주로 암반이 전도파괴로 인해 입자로 나뉘어 떨어지는 것을 의미한다. 유동은 고점성의 유동성을 갖는 포화된 물질이 암석, 나무 등과 같이 흘러내리는 것을 의미한다. 활동은 지반의 장기간 풍화작용으로 인해 미끄러지는 현상, 전파는 점성을 갖는 흙과 암반이 결합된 흐름 현상, 복합성 파괴는 어느 현상에 분류되지 않는 다양한 특성을 갖는 흐름 현상으로 구분된다(Kim et al., 1998). 또한, 산사태는 물질의 종류에 따라 기반암 및 조립질에서의 흐름을 토석류(Debris flow), 세립질 흙에 지배적인 흐름을 이류(Mud flow) 및 이석류(Earth flow)로 구분된다. 따라서, 산사태의 형태는 운동성, 물질의 종류에 따라 영향을 받으며 다양한 형태의 산사태 흐름을 해석하기 위해서 흙의 전단특성 및 유동학적 물성이 중요하다(Major and Pierson, 1992).

이 중 유변특성은 토석의 변형과 유동에 관한 해석으로 전단 변형, 전단응력의 결과를 바탕으로 해석할 수 있으며 결과값을 바탕으로 Bingham, Herschel-Bulkley, Bilinear, Power law, Modified Bingham 등을 활용하여 항복응력 및 소성점도 등 토석의 유동학적 물성을 파악할 수 있다(Jeong, 2011). 토석류 발생 흙의 유동학적 물성에 관한 연구는 국내·외에서 현재까지 다양하게 수행되었다. O'Brien and Julien (1988)은 점토 함량을 변화하여 전단 변형을 속도에 따른 전단응력의 결과를 Bingham 모델을 활용하여 소성점도 및 항복응력 값을 산정하였고, 흙 조성 및 함수특성에 따른 소성점도 및 항복응력 값을 수식화하여 경험식을 제안하였다. Locat and Demers (1988)은 예민점토를 대상으로 Bingham 모델을 활용하여 소성점도, 항복응력, 재성형 전단강도 및 액성지수와 관계에 대해 서술하였다. 예민점토의 염분 및 액성지수에 따른 항복응력 및 소성점도의 범위를 지정하고 액성지수에 따른 소성점도 및 재성형 비배수 전단강도의 값을 수식화하였다. 이 중 O'Brien and Julien (1988)의 연구 이후로 2차원 유한차분모델(Finite different model)을 활용한 토석류 및 토사 흐름 해석 소프트웨어인 FLO-2D가 개발되었다. FLO-2D는 흙의 유변 특성을 Bingham 소성모델을 수식화한 식을 적용하며 현재까지 미국, 유럽, 대만, 한국 등 다양한 국가에서도 활용되고 있다(Bertolo and Wiczorek, 2005; Mikoš et al., 2006; Lin et al., 2011; Kim et al., 2013). FLO-2D의 활용 범위가 증가함에 따라 O'Brien and Julien

(1988)에서 제시된 수식인 흙의 체적함수비에 따른 유변 특성에 대한 연구가 지속적으로 수행되었다(Kaitna et al., 2007; Santolo et al., 2010). 반면 Locat and Demers (1988)은 흙의 유변 특성을 함수특성 및 연경도(consistency)를 접목하여 해석하였다. Jeong (2010)은 세립질 시료의 거동은 흙 입자의 체적농도 및 흙 입자의 표면 특성에 지배적인 영향을 받는다고 서술하였다. 또한, 흙의 조성에 따라 적합한 유변학적 모델들의 적용은 회귀분석 및 적합도에 따라 판단할 수 있으며 이는 세립질 시료의 광물학적 특성에 의존적이라고 서술하였다(Jeong, 2011).

본 연구에서는 점성토 흐름에 의존적인 토석류를 대상으로 유변 물성치 산정을 위한 다양한 실험방법을 소개하며 실험결과를 토대로 흙 조성 및 함수특성에 따른 유변 물성치 값의 경계를 제시하였다.

2. 토석류 유동특성 역학 모델

점성토 흐름에 의존적인 토석류의 이동성(이동거리 및 속도)은 유동학적 물성이 가장 큰 영향을 미친다. 유동학적 물성을 활용한 역학 모델은 유동 특성에 비중을 둔 Rheological model과 지반의 전단 특성 및 유동특성을 동시에 고려한 Coulomb viscous model이 대표적이다.

2.1 Quadratic Rheological Model

Quadratic rheological model은 토석류를 고밀도의 유체로 해석하며 토석류의 흐름 특성을 나타낸다. 총 전단응력은 점착전단응력, Mohr-Coulomb 전단응력, 점성전단응력, 난류전단응력, 분산전단응력의 합으로 나타내며 Eq. (1)과 같이 표현된다(Julien and Leon, 2000). Eq. (1)에서 토석류의 농도에 따라 연속 방정식을 적용하여 최종적으로 총 전단응력은 Eq. (2)와 같이 표현된다(Julien and Lan, 1991).

$$\tau = \tau_c + \tau_{mc} + \tau_v + \tau_t + \tau_d \quad (1)$$

$$\tau = \tau_y + \mu \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) + C \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \quad (2)$$

Eqs. (1)과 (2)에서 τ_c 는 점착전단응력, τ_{mc} 는 Mohr-Coulomb 전단응력, τ_v 는 점성전단응력, τ_t 는 난류전단응력, τ_d 는 분산전단응력, τ_y 는 항복응력, μ 는 소성점도, C 는 내부전단계수를 나타낸다.

Quadratic rheological model을 활용하는 대표적인 FLO-2D가 존재한다. FLO-2D는 미국 콜로라도 대학에서 개발한 물리적 모델로 구성 방정식은 확산, 운동학 개념을 활용한 운동량 방정식으로 구성된다(O'Brien et al., 1993).

2.2 Coulomb Viscous Model

Coulomb viscous Model은 세립분 함량이 흐름 거동을 지배하는 이류(Mud flow) 또는 거석을 포함한 토석류(Stony debris flow)에 적용된다(Johnson, 1970; Costa, 1984; Takahashi, 1981). Bingham 소성 모델은 항복응력 항이 존재하며 항복응력 이상의 범위에서 전단응력과 전단 변형률 비율이 선형으로 나타나는 모델이다. 토석류를 Bingham 소성 모델로 가정할 때 토석류의 전단응력은 Eq. (3)과 같다. Herschel-Bulkley 모델은 Bingham 소성 모델과 마찬가지로 항복응력 항이 존재하나 항복응력 이상의 범위에서 전단응력의 변화가 전단 변형률과 지수 함수의 형태로 나타나며 Eq. (4)와 같다(Begueria et al., 2009).

$$\tau = \tau_c + (\sigma - u) \tan \phi_b + \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^\beta \quad (3)$$

$$\tau = \tau_c + (\sigma - u) \tan \phi_b + \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (4)$$

Eqs. (3)과 (4)에서 τ_c 는 점착전단응력, σ 는 수직응력, u 는 내부 공극압, ϕ_b 는 기저마찰각, μ 는 소성점도, $\partial v / \partial z$ 는 전단 변형률 속도, β 는 Herschel-Bulkley 모델의 지수 파라미터이며 Bingham model에서는 1을 의미한다.

Quadratic rheological model 및 Coulomb viscous model은 토석류를 하나의 유체로 해석하는 One phase model에 해당된다. One phase model은 흙과 물을 독립적으로 해석하지 못하기 때문에 입자 간 거동 분석이 한계점으로 시사되나 고농축류(Hyperconcentrated flow) 해석에는 단편적으로 해석할 수 있으며 FLO-2D와 같은 토석류 해석 소프트웨어에도 활용되어 유동학적 물성 선정이 중요하다.

3. 유동학적 물성 산정 시험

토석류의 유동학적 물성을 산정하기 위한 실내 시험에는 레오미터, 전단 크리프, 낙하 콘 활용, 경사판 활용, 직접 및 링 전단 시험으로 구분된다. 본 장에서는 각 실험 방법 및 물성 산정 방법에 대해 서술하였다.

3.1 레오미터 측정

레오미터(Rheometer)는 전단변형률 속도에 따른 전단응력, 즉 유동곡선을 산출할 수 있는 장비이다. 레오미터의 전단변형률 및 속도는 회전판의 속도 조절을 통한 전단 변형률 속도를 제어하는 방식이다. 회전판은 베인 타입, 콘 타입, 볼 타입 등으로 나누어진다. Fig. 1은 회전판의 타입에 따른 레오미터를 나타낸다. 콘 및 베인 타입의 레오미터를 활용한 측정 과정은 시료를 일정 용기에 단계적으로 전단 변형률 속도를 변화하여 측정된 토크 값을 활용하여

Fig. 1. Rheometer Types: (a): Cone and Plate, (b): Vane, (c): Moving Ball System

전단응력 및 점도를 측정한다. 볼 타입의 측정 과정은 회전하는 구를 얇은 용기에 고정된 뒤 시료가 존재하는 플레이트에 회전시킨다. 이후 용기의 항력 흐름과 전단 흐름 사이의 관계를 유변학적 데이터로 변환하여 유동 곡선을 산출한다(Muller et al., 1999; Kaitna et al., 2007; Bisantino et al., 2010).

레오미터 측정 시험은 시료의 준비 과정 이후 시험이 간편하여 가장 많이 활용되고 있다(Locat and Demers, 1988; O'Brien et al., 1993; Jeong, 2011; Kang and Kim, 2013a, Kang and Kim, 2013b, Carotenuto et al., 2015; Kim and Kim, 2020). 그러나 조립질 시료의 경우 입자파쇄가 발생할 수 있으며 시료의 전단응력 범위에 따른 스펜들 및 회전판의 적합한 선택이 필요하다.

3.2 전단 크리프 시험 활용 측정법

전단 크리프 시험은 일정한 전단응력을 가한 뒤 시간에 따른 전단 변형률을 분석하는 시험이다. 전단 크리프 시험은 일반적으로 적용된 전단응력과 항복응력의 상대값에 따라 두 가지 유형의 곡선으로 구분된다. 항복응력이 가해진 전단 응력보다 클 경우 전단 변형률-시간 곡선은 기울기가 계속 감소하면서 오목한 상태의 곡선을 지나 경사진 직선에 도달하게 된다. 측정되는 시료가 특정 시간 후에 명백하게 흐름을 멈춘다는 것은 고체 및 점탄성 영역에 해당한다는 것을 의미한다(Coussot, 2005). 반면 가해진 전단응력이 항복응력보다 큰 경우는 특정 시간 후 시료는 유한한 전단 속도(변형률-시간 직선의 기울기)로 꾸준히 흐르는 경향이 있으며, 이는 액체 영역에 도달했음을 의미한다. Fig. 2는 전단 크리프 시험 결과의 예를 나타내며 가해진 전단응력이 항복응력을 기점으로 큰 경우 전단 변형률 속도가 수렴하는 경향을

Fig. 2. Shear Creep Test of Fine Materials

보인다. 따라서, 적용된 시간에 따른 전단 변형률 속도의 개형을 판단하여 한계전단응력(항복응력)을 구할 수 있다.

전단 크리프 시험은 토석류의 고체-액체 상 변이 지점 파악에 목적을 둔 실험으로 한계 전단응력, 즉 항복응력은 명확히 파악할 수 있으나 소성점도는 산정할 수 없다.

3.3 낙하 콘 시험 활용 측정법

낙하 콘 시험을 통한 유동학적 물성 측정은 낙하 콘 시험과 비배수 전단강도와와의 관계를 통해 간접적으로 측정하는 것으로 세립질 시료에 국한되어 활용한다(Wroth and Wood, 1978; Budhu, 1985). Eqs. (5)와 (6)은 Koumoto and Houlby (2001)이 제안한 경험식으로 상기의 관계를 통해 토석류의 소성점도 및 전단 변형률 속도를 추정할 수 있다.

$$\dot{\gamma} = 0.34 \sqrt{\frac{1}{h_f}} \quad (5)$$

$$\mu_p = 2.94KW\sqrt{h_f} \left(\frac{0.67}{h_{eq}} - \frac{1}{h_f} \right)^2 \quad (6)$$

Eqs. (5)와 (6)에서 $\dot{\gamma}$ 는 전단 변형률 속도, h_f 는 최종 관입깊이, K 는 콘 파라미터, W 는 콘 무게, h_{eq} 는 평형 상태에서의 관입깊이를 의미한다.

낙하 콘 활용 측정 방법은 콘이 낙하할 때 총 전단 저항은 정적 전단 저항 및 점성 전단 저항로 나누어진다고 가정하여 해석한다. 또한, 낙하하는 지점에 인접하는 흙은 Bingham 소성 모델을 따르는 흙으로 가정하여 유동학적 물성을 산정하는 간접적인 측정 방법이다(Mahajan and Budhu, 2008). 위 방법은 전단 변형률 속도의 변화에 따른 소성점도 측정이 불가하다는 한계점을 갖는다.

3.4 경사판 활용 측정법

경사판 활용 측정법은 경사판(inclined plane), 수로(flume) 및 전단상자(flow box) 시험 등을 포함한다. 경사판을 활용한

Fig. 3. Flow Traveling Down an Inclined Plane (Vallejo and Scovazzo, 2003)

측정 원리는 토석류가 경사면을 따라 흐를 때의 전단 저항을 측정하여 토석류의 유동학적 물성을 계산한다. Fig. 3은 Vallejo and Scovazzo (2003)의 연구에서 활용된 경사판으로 경사각 및 시료의 조성에 따른 전단 특성을 분석하였다.

또한, 유동학적 물성 산정을 위해 Vallejo and Scovazzo (2003)은 Johnson (1970)의 Bingham 모델을 활용한 토석류 해석 방정식을 바탕으로 비배수 전단강도를 활용하여 소성 점도를 Eqs. (7) 및 (8)과 같이 나타내었다.

$$-\frac{dv}{dy} = \frac{\tau - c_u}{\mu} \quad (7)$$

$$\mu = \frac{\gamma_f h^2 \sin \beta - c_u h}{W(V_t - V_b)} \quad (8)$$

Eqs. (7)과 (8)에서 dv/dy 는 전단 변형률 속도, c_u 는 비배수 전단강도, μ 는 소성점도, W 는 전중량을 의미한다.

경사판 활용 측정법은 토석류의 유동학적 물성보다는 충격력에 초점을 두고 실험을 수행하며 토석류의 전이 단계나 다양한 조건에서의 토석류의 흐름특성을 파악하기에는 어려움을 갖는다.

3.5 전단 시험 활용 측정법

직접 및 링 전단 시험은 시료에 전단 변형률에 따른 전단 응력을 측정할 수 있는 실험이다. 토석류는 높은 함수비를 갖는 흐름으로 흙 입자와 물의 속도 차이로 항복응력이 존재한다고 해석할 수 있다. Fig. 4는 전단 실험을 활용한 유동학적 물성 추정방법을 나타낸다.

직접 및 링 전단 시험을 통한 유동학적 물성 추정은 토석류의 흐름을 Bingham 모델로 가정할 때, 전단응력은 전단 변형이 지속적으로 발생할 때의 전단응력으로 직접 및 링 전단 실험에서의 잔류전단강도와 같다(Jeong et al., 2013; Park et al., 2017). 실험 시 전단변형률 속도와 잔류전단응력을 통해 유동곡선을 산출할 수 있으며 유동곡선의 y절편

Fig. 4. Relationship between Direct Shear Test and Bingham Model (Park et al., 2017)

및 기울기를 통해 유동학적 물성을 추정할 수 있다. 전단 시험은 유동학적 물성 및 토질의 강도 정수인 내부마찰각 및 점착력을 동시에 구할 수 있으나, 높은 전단변형률 속도 범위에서 시험을 구현하지 못하는 한계점이 존재한다.

상기의 측정 실험은 측정 범위, 시료의 물리적 특성, 실험 방법의 한계점 등이 존재하므로 연구의 목적 및 범위에 따라 적합한 측정방법 수행이 필요하다.

4. 지반의 조건에 따른 유동학적 물성 변화

유동학적 물성은 함수비, 액성지수, 흙 입자의 크기 등 지반의 상태에 따라 변화한다. 본 연구에서 레오미터를 활용한 유동학적 물성 측정을 통해 유동학적 물성에 영향을 주는 요인을 분석하였다. 또한, 기존의 소성점도 및 항복응력의 제시된 영역 및 새로운 시험법으로 제시된 영역의 비교를 수행하였다.

4.1 함수비

토석류의 함수 특성은 흐름 거동, 고체/액체 상 변이 등에 영향을 미치는 주요한 요인이다. 토석류의 함수 특성의 파악하기 위해 함수비 및 체적함수비에 따른 유동학적 물성 변화 연구가 다양하게 수행되었다. Figs. 5와 6은 함수비에 따른 항복응력 및 소성점도의 변화를 나타내며 활용된 데이터는 각각의 논문을 인용하였다. Kang et al. (2017) 및 Kim and Kim (2020)은 국내 토석류 재해 지역인 춘천의 마적산, 용인의 문수산, 서울의 우면산, 부산의 황령산 시료에 대해 함수비에 따른 유동학적 물성의 변화를 분석하였다(Kang et al., 2017; Kim and Kim, 2020). Jeong (2010) 및 Boniello et al. (2010)은 각각 캐나다, 이탈리아의 재해지역인 La Valleta, Fella sx 시료에 대해 함수비에 따른 유동학적 물성의 변화를 분석하였다. Fig. 5의 분석결과, 모든 시료는 함수비 증가에 따라 항복응력이 감소한다. 또한, 초기 조건에서 함수비에 따른 항복응력의 변화가 큰 경향을 보인다. 항복응력은 고체 및 반고체 상의 성질로 토석류 중 흙 입자로 인해 존재하며 Bingham의 항복응력보다 낮은 전단응력 범위에서 유동성을 갖지 않는다. 항복응력의 감소는 고체상에

Fig. 5. Critical Shear Stress Changes with Water Content of Soil

Fig. 6. Bingham Viscosity Changes with Water Content of Soil

서 액체상으로 전이가 비교적 쉽게 발생한다. 또한, 각각의 실험 결과는 함수비가 증가할수록 기울기가 감소하는 경향을 보인다.

Fig. 6의 분석결과, 모든 시료는 함수비 증가에 따라 점도가 감소한다. 이는 항복응력과 마찬가지로 함수비가 증가할수록 고체 상에서 액체 상으로 전이되는 것으로 판단된다. 함수특성에 따른 항복응력 및 소성점도의 경향이 유사한 것을 바탕으로 Locat and Demers (1988)은 세립질 시료의 경우, 항복응력과 소성점도의 비가 약 100:1의 관계를 갖는다고 추정하였다(Locat and Demers, 1988). 그러나 Fig. 6의 경우 조립질 시료가 존재하는 시료에 대해서 위와 같은 항복응력과 소성점도의 비의 경향은 나타나지 않았다.

4.2 액성지수

토석류의 함수 특성은 유동학적 물성에 가장 지배적인 영향을 미치는 요소이다. Figs. 5와 6의 분석은 함수 특성에 따른 흙의 유동학적 물성 경향을 나타내며 정량적인 범위 제시의 한계를 보인다. 따라서, 토석류의 유동학적 물성 예측을 위해서는 함수 특성 및 흙의 조성도 고려해야 한다. 액성지수는 자연 상태 흙의 함수비에서 소성한계를 뺀 값을

소성지수로 나눈 것으로, 액성지수가 1에 이르면 액성한계이다. 액성지수는 흙의 함수특성 및 점토의 컨시스턴시도 고려할 수 있으므로 액성지수에 따른 유동학적 물성 변화를 분석하였다. Fig. 7은 본 연구에서 활용된 시료들의 애터버그 한계(Atterberg limit)를 나타낸다. Carrière et al. (2018)은 실제 Earth flow, mud flow와 같은 유체와 비슷한 흐름으로 토석류가 발생한 재해 지역의 시료를 나누어 분석하였다 (Carrière et al., 2018). Widjaja and Lee (2013)은 실제 재해지역 및 카올리나이트 시료를 활용하였고, 본 연구에서 일라이트 시료를 활용하여 액성지수 및 유동학적 물성 범위 선정에 검증으로 실험을 수행하였다.

Fig. 8은 액성지수에 따른 항복응력을 나타내며 Locat (1997)이 제시한 액성지수에 따른 항복응력의 범위 및 전단 크리프 시험을 통한 항복응력 범위를 나타낸다. 모든 시료는 액성지수가 증가할수록 항복응력이 감소하며 순수 점토광물 시료에 비해 실제 재해지역에서의 항복응력이 큰 값을 갖는 경향을 보인다. 전단 크리프 시험으로 수행된 시료의

Fig. 7. Plasticity Chart of Reference Soil

Fig. 8. Shear Stress Changes with Liquidity Index

경우 동일한 액성지수에서 Locat (1997)이 제시한 세립토의 항복응력 범위보다 높게 나타나는 경향을 보인다. Locat (1997)이 제시한 모델의 근간은 레오미터를 활용한 유동곡선의 산정 및 유동학적 물성 결정이며 전단 크리프 시험은 시료의 전단 특성을 직접적으로 측정하는 방법이다. 본 영역의 차이는 Bingham의 소성모델의 경우 고체 상에서 액체 상으로 전이되는 점 이후의 거동을 통해 항복응력을 추정하는 것으로 시료의 직접적인 전단 특성 고려 불가에 의해 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 9는 액성지수에 따른 소성 점도를 나타낸다. 점토 및 실트의 세립토 시료를 대상으로 동일한 액성지수에서 흙 입자의 크기가 증가할수록 소성 점도가 증가하는 경향을 보인다. Locat (1997)이 제시한 영역은 점토 입자 크기를 갖는 시료에는 모두 만족하였으나 실트 입자가 함유된 시료에는 만족하지 않는다.

4.3 흙 입자의 크기

Fig. 10은 세립질 시료 함량에 따른 유동학적 물성의 변화를 나타낸다. 두 시료는 체적 흙 입자의 비가 동일하게 30%이

Fig. 9. Bingham Viscosity Changes with Liquidity Index

Fig. 10. Flow Curve Relationship between Fine-Grained Mixture and Coarse-Grained Mixture

며, 세립질 시료의 함량은 각각 20% 및 30%의 부피를 갖는다 (Pellegrino and Schippa, 2018). 유동곡선을 통한 Bingham 소성 모델 적용 결과 항복응력은 23 Pa, 5 Pa 소성점도는 0.0193 Pa·s, 0.0107 Pa·s로 측정되었다. 세립분 함량이 증가할수록 항복응력 및 소성점도는 증가하는 경향을 보인다.

5. 결 론

본 연구에서는 토석류의 유동성을 결정하는 유동학적 물성인 항복응력 및 소성점도의 측정방법과 영향 인자에 대하여 분석하였다. 본 연구의 요약 및 결론은 다음과 같다.

- (1) 토석류의 유동학적 물성은 시료의 함수특성, 액성지수, 흙 입자의 크기 등이 존재한다. 함수특성은 토석류의 유동 특성에 가장 지배적인 영향을 미친다. 모든 시료는 함수비 증가에 따라 유동학적 물성의 값이 감소하며, 이는 시료의 고체(반고체)-액체 상 전이로 인해 항복응력 및 점도가 감소하는 것으로 판단된다.
- (2) 조립질 시료의 경우 세립질 시료에 비해 낮은 액성한계의 값을 나타내어 함수특성에 따른 유동학적 물성의 변화가 두드러지게 나타난다. 액성지수를 활용한 유동학적 물성 분석은 세립질 시료의 함수특성 및 애틀버그 한계를 고려할 수 있다. 액성지수에 따른 소성점도는 선행 연구에서 밝혀진 토석류 재해 시료의 영역에 모두 만족하였으나, 항복응력의 경우 전단 크리프 시험을 통한 한계 전단응력 측정이 높은 항복응력의 값을 보였다. 전단 크리프 시험의 특성에 따라 고체(반고체)-액체 상이 전이되는 지점 결정이 주요하며 Bingham 소성 모델의 한계점을 시사한다.
- (3) 흙 입자의 크기에 따른 유동학적 물성의 변화는 세립질 시료의 함량이 증가할수록 항복응력 및 소성점도가 증가하는 경향을 보인다. 이는 점토의 입자 간 정전기적 성질로 인한 현상으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원의 지원(21CTAP-C1 64375-01)으로 수행되었습니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- Arndt, D.S., Baringer, M.O., and Johnson, M.R. (2010). State of the Climate in 2009. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 91, No. 7, pp. 1-224.
- Begueria, S., Van Asch, Th.W.J., Malet, J.-P., and Gröndahl, S. (2009). A GIS-based numerical model for simulating the kinematics of mud and debris flows over complex terrain. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 9, pp. 1897-1909.
- Bertolo, P., and Wiecek, G.F. (2005). Calibration of numerical models for small debris flows in Yosemite Valley, California, USA. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 5, pp. 993-1001.
- Bisantino, T., Fischer, P., and Gentile, F. (2010). Rheological characteristics of debris-flow material in South-Gargano watersheds. *Natural Hazards*, Vol. 54, No. 2, pp. 209-223.
- Boniello, M.A., Calligaris, C., Lapasin, R., and Zini, L. (2010). Rheological investigation and simulation of a debris-flow event in the Fella watershed. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 10, pp. 989-997.
- Budhu, M. (1985). The effect of clay content on liquid limit from a fall cone and the British cup device. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 8, No. 2, pp. 91-95.
- Carotenuto, C., Merola, M.C., Álvarez-Romero, M., Coppola, E., and Minale, M. (2015). Rheology of natural slurries involved in a rapid mudflow with different soil organic carbon content. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 466, pp. 57-65.
- Carrière, S., Jongmans, D., Chambon, G., Bièvre, G., Lanson, B., Bertello, L., et al. (2018). Rheological properties of clayey soils originating from flow-like landslides. *Landslides*, Vol. 15, No. 8, pp. 1615-1630.
- Choi, S.-K., and Kwon, T.-H. (2017). Effect of barrier location on debris flow behaviors: A numerical study. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 17, No. 6, pp. 383-388 (in Korean).
- Costa, J.E. (1984). *Physical geomorphology of debris flows*. Developments and Applications of Geomorphology, pp. 268-317.
- Coussot, P. (2005). *Rheometry of pastes, suspensions, and granular materials: Applications in industry and environment*. Wiley and Sons, Newyork.
- Fan, X., Xu, Q., Scaringi, G., Dai, L., Li, W., Dong, X., et al. (2017). Failure mechanism and kinematics of the deadly June 24th 2017 Xinmo landslide, Maoxian, Sichuan, China. *Landslides*, Vol. 14, pp. 2129-2146.
- Jeong, S.-W. (2010). Grain size dependent rheology on the mobility of debris flows. *Geosciences Journal*, Vol. 14, No. 4, pp. 359-369.
- Jeong, S.-W. (2011). Rheological models for describing fine-laden debris flows: Grain-size effect. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 27, No. 6, pp. 49-61 (in Korean).

- 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 the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 1, pp. 181-194 (in Korean).
- Johnson, A.M. (1970). *Physical processes in geology: A method for interpretation of natural phenomena; intrusions in igneous rocks, fractures, and folds, flow of debris and ice*. Freeman, Cooper.
- Julien, P.Y., and Lan, Y. (1991). Rheology of hyperconcentrations. *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 117, No. 3, pp. 346-353.
- Julien, P.Y., and Leon, C. (2000). *Mud floods, mudflows and debris flows. Classification, rheology and structural design*. Jornadas de Investigación JIFI.
- Kaitna, R., Rickenmann, D., and Schatzmann, M. (2007). Experimental study on rheologic behaviour of debris flow material. *Acta Geotechnica*, Vol. 2, pp. 71-85.
- Kang, H.-S., and Kim, Y.-T. (2013a). Rheological characteristics on fine-grained soil with sand content. *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 5, pp. 1897-1905 (in Korean).
- Kang, H.-S., and Kim, Y.-T. (2013b). Yield stress and viscosity characteristics of soils with liquidity index. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 13, No. 1, pp. 169-176 (in Korean).
- Kang, H.-S., Jeong, J.-H., and Kim, Y.-T. (2017). Rheological properties of weathered soil of debris flow disaster area with volumetric concentration of sediment. *Journal of Korean Society and Hazard Mitigation*, Vol. 17, No. 2, pp. 195-206.
- Kim, H.-J., and Kim, Y.-T. (2020). Debris flow behavioral characteristic based on rheological properties: A case study on mt. hwangnyeong and mt. Umyeon. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 20, No. 4, pp. 75-85 (in Korean).
- Kim, K.-S. (2008). Characteristics of basin topography and rainfall triggering debris flow. *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 28, No. 5, pp. 263-271 (in Korean).
- Kim, S., Paik, J., and Kim, K.S. (2013). Run-out modeling of debris flow in Mt. Umyeon using FLO-2D. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 3, pp. 965-974.
- Kim, S.-D., Lee, H.-J., and Chang, H.-J. (2019). The study for analysis of impact force of debris flow according to the location of check dam. *Journal of Korea Academia-Industrial*, Vol. 20, No. 1, pp. 409-418 (in Korean).
- Kim, W.Y., Lee, S.R., Kim, K.S., and Chae, B.G. (1998). Landslide types and susceptibilities related to geomorphic characteristics: Yeonchon-chulwon area. *Journal of Engineering Geology*, Vol. 8, No. 2, pp. 115-130 (in Korean).
- Koumoto, T., and Houlby, G. (2001). Theory and practice of the fall cone test. *Geotechnique*, Vol. 51, No. 8, pp. 701-712.
- Leiserowitz, A., Carman, J., Buttermore, N., Wang, X., Rosenthal, S., Marlon, J., and Mulcahy, K. (2021). *International public opinion on climate change*. New Haven, CT: Yale Program on Climate Change Communication and Facebook Data for Good.
- Lin, P.-S., Lee, J.-H., and Chang, C.W. (2011). An application of the FLO-2D model to debris-flow simulation - A case of SONG-HER district in TAIWAN. *Proceeding of 5th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*, pp. 947-956.
- Locat, J. (1997). Normalized rheological behavior of fine muds and their flow properties in a pseudoplastic regime. *Proceedings of the 1st International conference on Debris-Flow Hazards Mitigation*, San Francisco, ASCE, New York, pp. 260-269.
- Locat, J., and Demers, D. (1988). Viscosity, yield stress, remoulded strength, and liquidity index relationships for sensitive clays. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 25, pp. 799-806.
- Mahajan, S., and Budhu, M. (2008). Shear viscosity of clays to compute viscous resistance. *Proceedings of the 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)*, Goa, India.
- Major, J., and Pierson, T.C. (1992). Debris flow rheology: Experimental analysis of fine-grained slurries. *Water Resources Research*, Vol. 28, No. 3, pp. 841-857.
- Mikoš, M., Fazarinc, R., Majes, B., Rajar, R., Žagar, D., Krzyk, M., et al. (2006). Numerical simulation of debris flows triggered from the strug rock fall source area, W Slovenia. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 6, pp. 261-270.
- Muller, M., Tyrach, J., and Brunn, P.O. (1999). Rheological characterization of machine-applied plasters. *ZKG Int*, Vol. 52, pp. 252-258.
- O'Brien, J.S., and Julien, P.Y. (1988). Laboratory analysis of mudflow properties. *ASCE*, Vol. 114, No. 8, pp.

877-887.

- O'Brien, J.S., Julien, P.Y., and Fullerton, W. (1993). Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of hydraulic engineering*, Vol. 119, No. 2, pp. 244-261.
- Park, G.-W., Hong, W.-T., Hong, Y.-H., Jeong, S.-W., and Lee, J.-S. (2017). Effects of grain size distribution on the shear strength and rheological properties of debris flow using direct shear apparatus. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol. 33, No. 12, pp. 7-20 (in Korean).
- Pellegrino, A.M., and Schippa, L. (2018). A laboratory experience on the effect of grains concentration and coarse sediment on the rheology of natural debris-flows. *Environmental earth sciences*, Vol. 77, No. 22, pp. 1-13.
- Santolo, A., Pellegrino, A.M., and Evangelista, A. (2010). Experimental study on rheological behaviour of debris flow. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 10, pp. 2507-2514.
- Subramanian, S.S., Fan, X., Yunus, A.P., van Asch, T., Scaringi, G., Xu, Q., et al. (2020). A sequentially coupled catchment-scale numerical model for snowmelt-induced soil slope instabilities. *Journal of Geophysical Research*: *Earth Surface*, Vol. 125, No. 5.
- Takahashi, T. (1981). Debris flow. *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 13, No. 1, pp. 57-77.
- Vallejo, L.E., and Scovazzo, V.A. (2003). Determination of the shear strength parameters associated with mudflows. *Soils and foundations*, Vol. 43, No. 2, pp. 129-133.
- Widjaja, B., and Lee, S.H.-H. (2013). Flow box test for viscosity of soil in plastic and viscous liquid states. *Soils and Foundations*, Vol. 53, No. 1, pp. 35-46.
- Wie, G.-J., Lee, Y.-K., Lee, D.-H., and Suh, Y.-C. (2010). Development of GIS-based debris flow simulation program. *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 1, No. 10, pp. 49-55.
- Wroth, C., and Wood, D. (1978). The correlation of index properties with some basic engineering properties of soils. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 15, No. 2, pp. 137-145.

Received	November 2, 2021
Revised	November 3, 2021
Accepted	November 12, 2021