

사질토의 전단거동에 실트 함량이 미치는 영향

Effect of Silty Soil Content on Shear Behavior of Sandy Soil

유 정 석¹⁾ · 안 광 국[†] · 강 흥 식²⁾
Jeongseok Yu · Kwangkuk Ahn · Hongsig Kang

Received: October 3rd, 2020; Revised: October 20th, 2020; Accepted: October 28th, 2020

ABSTRACT : Natural soil is composed of particles of various sizes, and the shear behavior which is a kind of mechanical behavior of the soil is affected by the particle size distribution. In addition, since the natural soil contains a large mixture of coarse and fine grained soil, it is difficult to clearly understand the shear behavior of the soil. Therefore, a ring shear test was conducted on sandy soils that has various particle size distribution in order to identify the effect of the distribution on shear characteristics of soils. At this time, sand and silt were used for coarse and fine grained soils, respectively, to make sandy soils by changing the silt content. Also the water was supplied during the test to confirm shear characteristics of sandy soils with various particle size distributions. The result shows that the shear strength increases as the silt content increases, and the strength decreases as the silt content increases over the sand. Besides, residual shear strength gradually decreases because of the silt content when the water is supplied.

Keywords : Sandy soil, Slit, Ring shear test, Shear strength

요 지 : 자연상태의 흙은 다양한 크기의 입자로 구성되어 있으며, 이 흙의 역학적 거동 중 전단거동은 입도 분포에 크게 영향을 받는다. 그리고 자연상태의 흙은 조립토와 세립토가 다양하게 혼합되어 존재하기 때문에 그 역학적 성질인 전단특성을 명확히 파악하기 어렵다. 이에 본 연구에서는 흙의 입도 분포가 흙의 전단특성에 미치는 영향을 확인하기 위한 목적으로 조립토는 모래를 세립토는 실트를 이용해 모래에 대한 실트의 함유량을 변화시켜 입도 분포가 다른 사질토를 조성한 후 링 전단시험을 수행하였다. 그리고 물 공급 시 입도 분포가 다른 사질토의 전단특성 변화를 확인하기 위해 링 전단시험 중 물을 공급하여 실험을 수행하였다. 그 결과 실트 함유량이 증가할수록 전단강도는 점차 증가하다 실트 함유량이 모래보다 많아지면 전단강도는 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 수분 공급 시 실트 함유량에 따라 잔류전단강도는 완만한 경사를 나타내며 감소하는 것으로 나타났다.

주요어 : 사질토, 실트, 링 전단시험, 전단강도

1. 서 론

최근 국내의 경우 계절성 국지성 호우로 인해 크고 작은 산사태나 토석류가 도심지 인근 및 산악지역 주거 생활 공간에서 빈번하게 발생하고 있다. 이러한 산사태 및 토석류는 직접 또는 간접적인 인명피해와 사회적, 경제적 손실을 야기시키고 있어, 이를 예측하고 방지하기 위한 공학적 연구가 요구되고 있다. 산사태 및 토석류는 사면붕괴의 형태로 지반변형을 시간의 함수로 표현될 때 진행성 연화 거동과 관련된 파괴 전 거동, 파괴 시 거동 및 파괴 후 거동은 산사태로 나타낼 수 있으며(Leroueil, 2001; Van Asch et al., 2007; WP-WLI, 1995), 집중호우로 인해 지반의 함수비가 과도하게 증가하여 발생하는 산사태 후 파괴 거동인 파괴 후 거동으로 토석류를 나타낼 수 있다(Lee & Widjaja, 2013). 이러한 사면붕괴는 포화, 압밀, 배수조건과 함께 전단거동

특성에 영향을 받으며, 전단거동 특성은 시간과 변형의 함수로 사면붕괴 거동을 해석하는데 중요한 인자로 사용되고 있다. 따라서 사면붕괴 전반에 걸친 흙의 파괴 거동을 정량적으로 평가하기 위하여 신뢰성 있는 전단거동 측정이 필요하며, 이를 위해 링 전단시험장치가 흙의 파괴거동을 평가하기 위해 활용되고 있다. 링 전단시험장치는 정·동적 재하 방법, 간극수압 변화, 진행성 연화, 액상화 거동 등 다양한 지반조건 재현을 통해 흙의 변화과정에 따른 전단강도를 측정할 수 있다(Bishop et al., 1971; Tika et al., 1996; Tika & Hutchinson, 1999; Sadrekarimi & Olson, 2010).

사면을 구성하는 자연상태의 흙은 다양한 크기의 입자로 구성되어 있으며, 이 흙의 역학적 거동인 전단거동은 입도 분포에 크게 영향을 받는다(Vallejo, 2001; Vallejo & Mawby, 2000). 이러한 흙은 지배하는 입자 크기를 기반으로 크게 조립토와 세립토로 분류하고 있으며, 흙 입자 간에 미치는 힘

1) Graduate Student, School of Civil Engineering, Chungbuk National University

† Professor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University (Corresponding Author : akk@cbnu.ac.kr)

2) Director of Research, Byeokdong Construction Co. Ltd.

은 조립토와 세립토에 따라 각기 다르기 때문에 해당 지반 특성에 따라 설계와 시공방법이 다르게 적용되고 있다. 그러나 실제 지반을 구성하는 흙은 조립토와 세립토가 다양하게 혼합되어 존재하기 때문에 단순히 흙의 분류만으로 그 역학적 성질인 전단특성을 명확히 파악하기 어려운 경우가 많다. 이에 직접전단시험장치 및 링 전단시험장치를 이용하여 흙에 대한 전단특성을 정확히 평가하기 위한 연구가 다양하게 수행되었다(Lee, 2007; Liu et al., 2005; Coussot et al., 2002; Tiwari & Marui, 2004; Park et al., 2017). 그러나 링 전단시험은 실제 사면붕괴 거동을 파악하거나 전단변형률속도에 따른 흙의 전단특성이 확인되었을 뿐 흙의 입도 분포가 흙의 전단특성에 미치는 영향에 관한 연구는 미비한 실정이다(Sassa et al., 2004; Jeong & Song, 2013; Jeong et al., 2014; Park et al., 2013; Kang & Kim, 2013).

이에 본 연구에서는 흙의 입도 분포가 흙의 전단특성에 미치는 영향을 확인하기 위한 목적으로 모래를 세립토는 실트를 이용해 모래에 대한 실트의 함유량을 변화시켜 입도 분포가 다른 사질토를 조성한 후 링 전단시험을 수행하였다. 그리고 입도 분포가 다른 사질토에 물 공급 시 전단 특성의 변화를 분석하기 위해 링 전단시험 중 물을 공급하여 실험을 수행하였다.

2. 실험내용

2.1 링 전단시험장치

흙의 입도 분포에 따른 흙의 전단특성을 확인하기 위해 본 연구에 사용된 링 전단시험장치는 Fig. 1과 같이 전단상자, 수직하중 제어장치, 토크 측정장치, 수직변위 측정장치, 간극수압 측정장치 등으로 구성되어 있다. 그리고 전단시험 중 전단상자 내 물의 공급 및 배수가 가능하도록 전단상자 상부에 세 개의 벨브가 설치되어 있으며, 하부에는 두 개의 벨브가 설치되어 있다. 전단상자는 외경 200mm, 내경 120mm, 높이 124mm의 크기로 시험 대상 재료가 점토부터 큰 자갈까지 다양한 입자 크기로 구성된 시료에 대한 실험이 가능하다. 시험 방법은 시료성형, 포화, 압밀, 배수, 전단 순서로

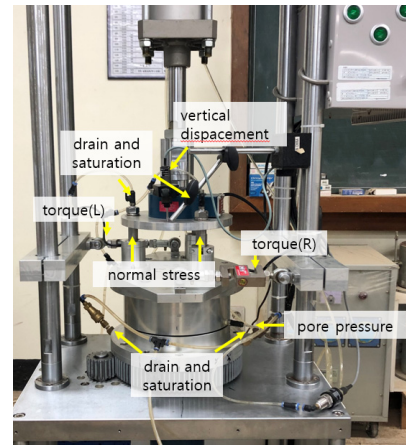


Fig. 1. Photo of ring shear experimental equipment

실험조건에 맞게 수정하여 적용할 수 있으며, 전단 시 전단 속도는 0.01~180mm/sec의 범위로 적용할 수 있다. 본 연구에서 흙의 입도 분포에 따른 전단특성을 확인하기 위한 실험 순서는 시료성형, 압밀, 전단, 물 공급 순으로 수행하였다.

2.2 실험 시료

흙의 입도를 구성하는 조립토와 세립토의 혼합 정도로 입도 분포가 다른 사질토를 조성하기 위해 조립토의 경우는 모래인 주문진 표준사를 사용하였으며, 세립토의 경우는 실트질 흙인 풍화토를 사용하였다. 실험에 사용된 주문진 표준사와 실트질 흙인 풍화토의 물리적 특성은 Table 1과 같다.

입도 분포가 다른 사질토를 조성하기에 앞서 흙의 입도 구성 시 조립토와 세립토를 명확하게 구분하여 사용하기 위해 #60체(0.250mm)를 기준으로 조립토인 주문진 표준사는 #60체에 잔류하는 시료를 실험에 사용하였으며, 세립토인 풍화토는 #60체에 통과하는 시료를 실험에 사용하였다. 이를 기반으로 Table 2와 같이 2.7kg의 동일한 중량을 갖도록 조립토인 모래에 대하여 세립토인 실트의 함유량을 0%, 25%, 37.5%, 50%, 62.5%, 75%로 변화시켜 입도 분포가 다른 사질토를 조성해 실험에 적용하였다. Fig. 2는 모래에 대하여 실트의 함유량을 변화시켜 조성한 사질토의 입도분포 곡선이다.

Table 1. Property of test soil

Classification	Property	
	Jumoonjin sand	Weathered granite soil
Specific gravity (G_s)	2.60	2.64
Uniformity coefficient (C_u)	1.65	5.34
Coefficient of curvature (C_g)	1.43	0.27
USCS	SP	ML

Table 2. Composition of test soil

Total weight (kg)	Composition (kg)		Silt content (%)
	Jumoonjin sand (kg)	Weathered granite soil (kg)	
2.7	2.7	0	0
	2.025	0.675	25.0
	1.6875	1.0125	37.5
	1.35	1.35	50.0
	1.6875	1.0125	62.5
	2.025	1.0675	75.0

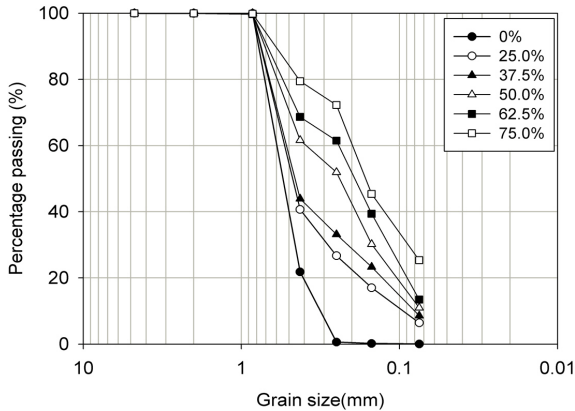


Fig. 2. Particle size distribution curve by silt content

2.3 실험조건 및 방법

모래에 대한 실트의 함유량을 변화시켜 조성한 입도 분포가 다른 사질토의 전단특성을 확인하기 위한 링 전단시험은 Table 3과 같은 실험조건으로 수행하였다. 링 전단시험에 적용되는 입도 분포가 다른 사질토는 모래에 대하여 실트의 함유량을 0%, 25%, 37.5%, 50%, 62.5%, 75%로 변화시켜 조성하였으며, 각각의 사질토에 대하여 동일한 조건으로 시료를 조성하기 위해 초기함수비는 10%, 단위중량은 14.62kN/m^3 을 갖도록 하였다. 입도 분포가 다른 사질토에 대하여 링 전단시험 시 구속응력은 25kPa의 수직하중을 모든 실험에 적용하였으며, 전단속도는 1mm/sec로 설정해 실험을 진행하였다. 그리고 링 전단시험 중 물 공급에 의한 전단특성 변화를 확인하기 위해 실시간으로 측정되는 결과

에서 잔류전단강도가 나타나는 때에 전단상자 상부에 물 공급장치를 이용해 전단상자 내에 물을 공급하며 실험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 실트 함유량에 따른 사질토의 전단거동

모래에 대하여 실트의 함유량을 변화시켜 입도분포가 다른 사질토의 링 전단실험을 수행한 결과 실트 함유량에 따른 사질토의 전단거동은 Fig. 3과 같이 나타났다.

Fig. 3과 같이 실트의 함유량이 0%인 사질토(case1)의 전단거동은 느슨한 모래의 경우와 유사하게 최대전단강도가

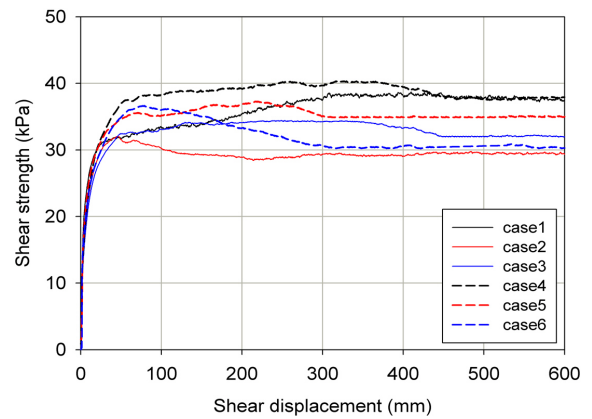


Fig. 3. Shear behavior by silt content

Table 3. Condition of test

Test ID	Unit weight (kN/m^3)	Shear velocity (mm/sec)	Confining pressure (kPa)	Initial water content (%)	Mixing ratio (%)	
					Silt	Sand
Case1	14.62	1	25	10	0	100
Case2					25.0	75.0
Case3					37.5	62.5
Case4					50.0	50.0
Case5					62.5	37.5
Case6					75.0	25.0

발생한 후 전단변위가 수렴하는 경화거동의 형태로 나타났으며, 실트 함유량이 25%, 75%인 사질토(case2, case6)의 경우는 실트 함유량이 0%인 경우와 다르게 조밀한 모래의 전단거동과 유사하게 최대전단강도가 발생한 후 전단변위에 따라 감소하는 연과거동의 형태로 나타났다. 그리고 실트 함유량이 37.5%, 50%, 62.5%인 사질토(case3, case4, case5)의 경우 전단거동은 초기에는 경화거동의 형태로 나타나다 소요 전단변형이 발생한 후 연화거동의 형태로 나타났으며, 경화거동에서 연화거동으로 변화하는 소요 전단변형은 실트 함유량이 증가할수록 5%~56% 전단변형이 감소하는 것으로 나타났다.

3.2 실트 함유량에 따른 사질토의 전단강도

실트 함유량에 따라 입도 분포가 다른 사질토의 전단강도를 비교하기 위해 Fig. 3에서 최대전단강도 및 잔류전단강도를 실트 함유량에 따라 Table 4와 같이 정리하였으며, Fig. 4와 같이 비교하였다.

Table 4 및 Fig. 4와 같이 실트 함유량에 따라 최대 및 잔류전단강도가 변화는 유사하게 나타났으며, 실트 함유량이 50%인 경우 최대 및 잔류전단강도가 가장 크게 나타났다. 그리고 실트 함유량이 25% 이상 50% 미만인 경우 최대 및 잔류전단강도는 실트 함유량이 50%인 경우에 비해 8~22% 작게 나타났으며, 실트 함유량이 50% 초과인 경우는 8~19% 작게

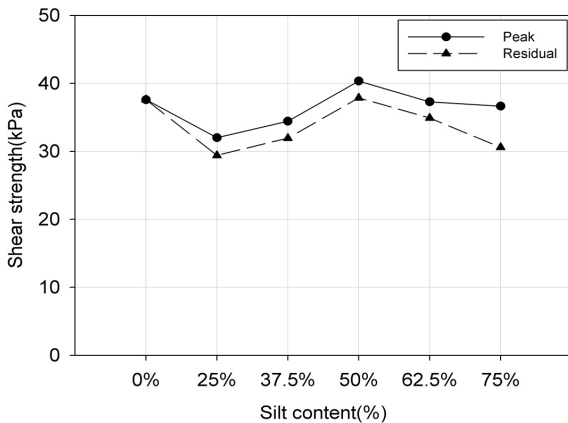


Fig. 4. Comparison of shear strength varying with silt content

나타났다. 실트 함유량이 0%인 경우 최대 및 잔류전단강도는 실트 함유량이 50%인 경우에 비해 1~7% 작게 작게 나타났으나 실트 함유량이 25%인 경우에 비해 17~28% 크게 나타났다.

3.3 물 공급에 따른 잔류전단강도 변화

물 공급 시 실트 함유량에 따라 입도 분포가 다른 사질토의 전단특성 변화를 확인하기 위해 Fig. 5와 같이 링 전단 실험 중 잔류전단강도가 나타난 이후 전단변형이 550mm 지점에서 일정하게 물을 공급함에 따라 변화하는 잔류전단거동을 분석하였다.

Fig. 5와 같이 잔류전단거동의 변화는 물을 공급함에 따라 잔류전단강도는 감소하는 것으로 나타났으며, 물을 공급한 시점에서 실트 함유량이 증가할수록 전단변형에 따른 잔류전단강도의 감소 기울기는 완만하게 나타났다. 그리고 물을 공급 후 잔류전단강도 크기의 변화는 실트 함유량에 따라 다르게 나타났으나 잔류전단강도가 수렴하는데 소요되는 전단변형은 실트 함유량이 증가할수록 크게 나타났다.

물 공급 시 실트 함유량에 따라 입도 분포가 다른 사질토의 잔류전단강도 변화를 비교하기 위해 Fig. 5에서 물 공급 전·후의 잔류전단강도를 실트 함유량에 따라 Table 5와 같이 정리하고 Fig. 6과 같이 비교하였다.

Table 5 및 Fig. 6과 같이 물 공급에 따른 잔류전단강도

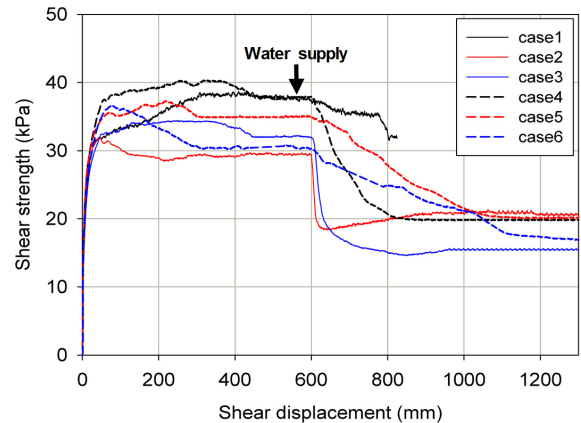


Fig. 5. Shear behavior by water supply

Table 4. Peak and residual shear strength

Test ID	Silt content (%)	Peak shear strength (kPa)	Residual shear strength (kPa)
Case1	0	37.60	37.60
Case2	25.0	32.02	29.41
Case3	37.5	34.45	31.94
Case4	50.0	40.33	37.87
Case5	62.5	37.29	34.90
Case6	75.0	36.65	30.59

Table 5. Residual shear strength of before and after water supply

Test ID	Silt content (%)	Residual shear strength (kPa)	
		Before water supply	After water supply
Case1	0	37.60	34.83
Case2	25.0	29.41	18.66
Case3	37.5	31.94	14.92
Case4	50.0	37.87	19.87
Case5	62.5	34.90	20.08
Case6	75.0	30.59	17.42

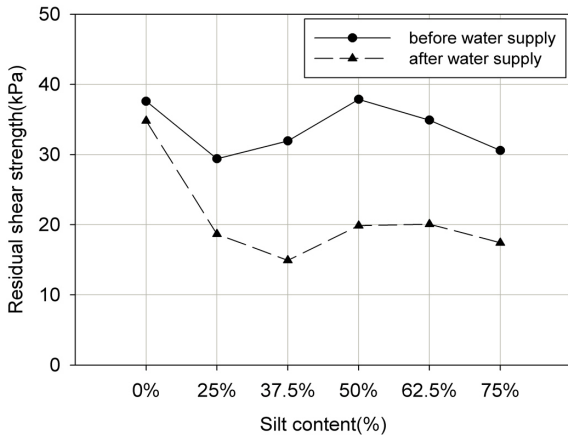


Fig. 6. Comparison of residual shear strength varying with silt content

의 변화는 실트 함유량이 0%인 경우 물 공급 전에 비해 7% 감소하는 것으로 나타났으나, 실트 함유량이 25%~75%인 경우는 물 공급 전에 비해 37~53% 크게 감소하는 것으로 나타났다. 물 공급 후 잔류전단강도는 실트 함유량이 증가할수록 실트 함유량이 0%인 경우에 비해 87~133% 감소하다 실트 함유량이 37.5%를 기점으로 실트 함유량이 37.5%인 경우에 비해 17~35% 증가하는 것으로 나타났다.

4. 결 론

흙의 입도 분포가 전단특성에 미치는 영향을 확인하기 위해 모래에 대하여 실트의 함유량을 변화시켜 입도 분포를 다르게 조성한 사질토의 전단특성 및 물 공급에 따른 전단특성의 변화를 확인하기 위해 링 전단실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실트 함유량에 따른 사질토의 전단거동은 실트 함유량에 따라 경화거동 및 연화거동이 나타났으며, 특히 실트 함유량이 37.5%~62.5%인 경우는 경화거동과 연화거동이 복합적으로 나타났다. 그리고 물 공급에 따라

잔류전단거동은 실트 함유량에 따라 완만한 기울기로 잔류전단강도가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 사질토의 전단거동에 실트에 영향이 크기 때문인 것으로 보인다.

- (2) 최대 및 잔류전단강도는 실트 함유량이 50%인 경우가 가장 크게 나타났으며, 실트 함유량이 25% 이상 50% 미만이거나 50% 초과인 경우는 실트 함유량이 50%인 경우에 비해 최대 및 잔류전단강도가 작게 나타났다. 그리고 실트 함유량이 0%인 경우가 25%인 경우 비해 최대 및 잔류전단강도가 크게 나타났다. 이는 모래와 실트의 혼합 정도에 따라 입도 분포가 양호한 경우 모래와 실트의 상호작용으로 인해 전단강도를 증가시키게 한 것으로 보이나, 입도 분포가 불량한 경우는 모래와 실트의 재료분리 현상으로 인해 전단강도가 감소한 것으로 보인다.
- (3) 물 공급에 의한 실트 함유량이 다른 사질토의 잔류전단강도 변화는 실트 함유량에 따라 물 공급 전에 비해 25%~75% 감소하는 것으로 나타났으며, 물 공급 후 실트 함유량이 증가할수록 실트 함유량이 37.5%까지는 잔류전단강도가 87~133%로 감소하다 37.5% 이후는 17~35% 증가하는 것으로 나타났다. 이는 물 공급에 따라 모래와 실트의 재료분리 현상이 크게 나타났기 때문이며, 물 공급 후에는 실트 함유량이 작은 경우 겔보기 점착력이 작게 나타나 재료분리에 영향을 미치지 않으나 실트 함유량이 큰 경우는 겔보기 점착력이 크게 나타나 재료분리에 영향을 미쳤기 때문인 것으로 보인다.

References

1. Bishop, A. W., Green, G. E., Garga, V. K., Andersen, A. and Brown, J. D. (1971), A new ring-shear apparatus and its application to the measurement of residual strength, *Geotechnique*, Vol. 21, pp. 273~328.
2. Coussot, P., Nguyen, Q. D., Huynh, H. T. and Bonn, D. (2002), Viscosity bifurcation in thixotropic, yielding fluids,

- Journal of Rheology (1978-present), No. 46(3), pp. 573~589.
3. Jeong, S. W. 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 (Korean).
 4. Jeong, S. W., Ji, S. W. and Yim, G. J. (2014), Shear-rate dependent ring-shear characteristics of the waste materials of the Imgi mine in Busan, Journal of the Korean Geotechnical Society, No. 30(7), pp. 5~15 (Korean).
 5. Kang, H. S. and Kim, Y. T. (2013), Yield stress and viscosity characteristics of soils with liquidity index, Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, No. 13(1), pp. 169~175 (Korean).
 6. Lee, S. H. H. and Widjaja, B. (2013), Phase concept for mudflow based on the influence of viscosity, Soils and Foundations, No. 53(1), pp. 77~90 (Korean).
 7. Lee, G. C. (2007), Study on rheological properties of suspension by shear box test, Journal of the Architectural Institute of Korea, No. 23(8), pp. 149~156 (Korean).
 8. Leroueil, S. (2001), Natural slopes and cuts: movement and failure mechanisms, Geotechnique, Vol. 51, No. 3, pp. 197~243.
 9. Liu, S. H., Sun, D. A. and Matsuoka, H. (2005), On the interface friction in direct shear test, Computers and Geotechnics, No. 32(5), pp. 317~325.
 10. 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, No. 5, pp. 39~52 (Korean).
 11. 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 geo-environmental society, Vol. 18, No. 2, pp. 29~37 (Korean).
 12. Sadrekarimi, A. and Olson, S. M. (2010), Particle damage observed in ring shear tests on sands, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 47, pp. 497~515.
 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. Tiwari, B. and Marui, H. (2004), Objective oriented multistage ring shear test for shear strength of landslide soil, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, No. 130(2), pp. 217~222.
 17. Van Asch, Th. W. J., Van Beek, L. P. H. and Boggard, T. A. (2007), Problems in predicting the mobility of slow-moving landslides, Engineering Geology, Vol. 91, pp. 46~55.
 18. Vallejo, L. E. (2001), Interpretation of the limits in shear strength in binary granular mixtures, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 38, pp. 1097~1104.
 19. Vallejo, L. E. and Mawby, R. (2000), Porosity influence on the shear strength of granular material-clay mixtures, Engineering Geology, 58, pp. 15~136
 20. WP/WLI. (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, No. 1, pp. 75~78.