

풍화토-그라우트 인터페이스 전단 거동 특성에 대한 실험적 연구

Experimental Study on the Residual Soil-Grout Interface-shearing Behavior

신 규 범 ¹	Shin, Gyu-Beom	정 충 기 ²	Chung, Choong-Ki
김 인 현 ³	Kim, Inhyun	조 범 희 ⁴	Jo, Bum-Hee

Abstract

This research proposes a direct shear test method to evaluate the behavior of the soil-grout interface. The proposed test method was employed to conduct direct shear tests on two types of specimens: residual soil and residual soil-grout. The evaluation of the shear stress-slip curve indicated that the residual shear strength of residual soil-grout was similar to that of residual soil. It was further confirmed that residual soil determines the behavior of the critical state of the residual soil-grout interface. However, a remarkable increase in the maximum shear strength at the residual soil-grout interface was observed. The increase rate of the maximum shear strength was higher in loose soil due to the increased thickness of the interface layer where residual soil particles and grout particles are mixed.

요 지

본 연구에는 지반-그라우트 인터페이스 거동을 평가하기 위한 직접전단시험 장비를 제작하였으며, 제작된 시험 장비를 통해 풍화토, 풍화토-그라우트 두 종류의 시료에 대해 직접전단시험을 수행하였다. 전단응력-슬립 곡선 평가 결과 풍화토-그라우트의 잔류 전단 강도는 단일 풍화토의 잔류 전단 강도와 유사한 값을 나타냈으며, 풍화토-그라우트 인터페이스의 한계 상태 거동은 풍화토에 의해 결정된다는 것을 확인했다. 그러나, 최대 전단 강도의 경우 풍화토-그라우트 인터페이스에서 매우 크게 증가하는 것으로 나타났다. 최대 전단 강도의 증가율은 느슨한 지반에서 더 크게 발생하는 것으로 나타났으며, 이는 풍화토 입자와 그라우트 입자가 섞여 있는 인터페이스 레이어의 두께가 증가했기 때문으로 보인다.

Keywords : Direct shear test, Soil-grout interface, Residual soil, Shear strength

1 정희원, 서울대학교 BK21 인프라스피어 교육연구단 연수연구원 (Member, Researcher, BK21, Education & Research Program for InfraSPHERE, Seoul National Univ.)

2 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engineering, Seoul National Univ.)

3 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (Member, Ph. D Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Seoul National Univ.)

4 정희원, 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (Member, Ph. D Student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Seoul National Univ., Tel: +82-2-880-8733, vaticani@snu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2023년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

구조물과 지반 인터페이스에서 발생하는 전단 거동 특성은 다양한 지반 구조물 설계에 있어 매우 중요한 요인 중 하나이다(Desai and Zaman, 2013). 특히, 그라운드 앵커(ground anchor), 쏘일 네일(soil nail)과 같은 구조물의 경우, 지반-그라우트 인터페이스의 전단 거동 특성에 따라 극한 지지력이 결정된다. 그라운드 앵커의 현행 설계 방법에서는 지반-그라우트 전단 강도가 길이를 따라 균등하게 분포된 상태를 가정하여 지반-그라우트 전단 파괴 하중을 산정하고 있으며, 이를 통해 극한 지지력을 평가하고 있다(British Standards Institution, 2015; Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2021; Sabatini et al., 1999). 이와 같은 현행 설계 방법은 지반-그라우트 인터페이스에서 완전 소성 거동이 나타날 경우 적절하게 적용될 수 있으나, 최대 전단강도 발현 이후 잔류 전단강도가 발현되는 변형을 연화거동(strain softening behavior)이 나타날 경우 지반-그라우트 전단 파괴 하중을 정확히 평가할 수 없다. 실제 그라운드 앵커에 대한 현장 인발시험 결과, 앵커 길이를 따라 최대 전단강도 및 잔류 전단강도가 발현됐으며 재하 하중 증가에 따라 잔류 전단강도 발현 길이가 증가하는 진행성 파괴(progressive failure)가 발생하는 것으로 나타났다(Ostermayer and Scheele, 1978; Barley, 1997; Briaud et al., 1998; Sabatini et al., 1999; Vukotić et al., 2013). 따라서, 그라운드 앵커의 효율적인 설계를 위해서는 지반-그라우트 인터페이스에서 발생하는 전단응력-슬립 관계를 고려한 극한 지지력 평가가 필요하다.

일반적으로, 그라우트와 지반의 전단 거동 특성을 평가하기 위한 방법으로는 인발시험 및 직접전단시험이 활용되고 있다(Zhu et al., 2021). 인발시험은 현장 조건을 고려한 실제 극한 지지력 및 인발 거동을 평가할 수 있다는 이점이 있으나, 지반-그라우트 인터페이스에서 발생하는 전단응력-슬립 관계를 직접 평가하기 제한적이다. 또한, 현장 실험은 시간 및 비용이 많이 소요되므로, 보다 다양한 조건에 대한 실험을 수행하기 어렵다는 한계가 있다. 따라서, 지반-그라우트 전단 거동에 대한 분석을 수행하기 위해 주로 직접전단시험이 이용되고 있으며, 상재 하중(Chu and Yin, 2005; Hossain and Yin, 2014; Toufigh et al., 2017; Moayed et al., 2019), 그라우트 주입압(Hossain and Yin, 2012), 표면 거칠기(Kishida and Uesugi, 1987; Subba Rao et al., 2000), 모관흡수력

(Hossain and Yin, 2015) 등 다양한 영향 인자들에 따른 인터페이스 전단 거동 특성이 분석된 바 있다.

그러나, 현재까지 수행된 지반-그라우트 직접전단시험 관련 연구에서는 지반 상대밀도(D_r)에 따른 영향이 명확히 분석된 바 없다. 지반-그라우트 전단 거동 평가를 위한 대부분의 연구에서 지반의 상대밀도는 모두 동일하게 적용되었으며, 그 외 상재 하중, 그라우트 주입압, 인터페이스 거칠기와 같은 요인들을 변화시켜가며 실험을 수행하였다(Chu and Yin, 2005; Hossain and Yin, 2014; Toufigh et al., 2017). 지반 상대밀도에 따른 지반-그라우트 전단 거동 특성은 Moayed et al.(2019)에 의해 일부 평가된 바 있으나, 모래 지반($D_r = 50, 80\%$)을 대상으로 수행된 시험 결과라는 한계가 있다. 풍화도가 넓게 분포하고 있는 국내 지질 특성을 고려했을 때 국내에서는 풍화토 정착 그라운드 앵커가 설계될 가능성이 높으며(Jeong et al., 2017; Kim et al., 2015; Kim, 2001), 보다 효율적인 설계를 위해서는 다양한 풍화토 지반을 대상으로 풍화토-그라우트 전단 거동 특성을 평가할 필요성이 있다.

본 연구는 지반-그라우트 전단 거동 특성을 고려한 그라운드 앵커의 극한 지지력(지반-그라우트 전단 파괴 하중) 평가 방법을 제시하기 위한 기초 연구로써, 국내에 넓게 분포하고 있는 풍화토를 대상으로 풍화토-그라우트 전단 거동 특성을 분석하였다. 그라운드 앵커와 유사한 지반-그라우트 인터페이스를 모사할 수 있는 직접전단시험 장비를 제작하였으며, 제작된 장비를 활용하여 총 18번의 직접전단시험을 수행하였다. 우선, 상대밀도 50, 70, 90%로 풍화토 시료를 제작하였으며, 구속압을 50, 100, 200kPa로 변화시켜가며 직접전단시험을 수행하였다. 이후, 상대밀도 50, 70, 90% 풍화토 하부에 그라우트가 양생된 풍화토-그라우트 시료를 제작하였으며, 풍화토 시험과 동일하게 구속압을 50, 100, 200kPa로 변화시켜가며 직접전단실험을 수행하였다. 각 실험 조건에 따른 전단응력-슬립 곡선과 연직 변위-슬립 곡선을 평가하였으며, 상대밀도 및 구속압 변화에 따른 인터페이스 전단 거동 특성을 분석하였다.

2. 풍화토-그라우트 직접전단시험

2.1 직접전단시험 장비

본 연구에서는 그라운드 앵커, 쏘일 네일과 같이 지

반 내 그라우팅을 통해 시공되는 구조물의 인터페이스 거동을 평가하기 위한 직접전단시험 용 몰드를 제작하였다. 실제 구조물과 유사한 지반-그라우트 인터페이스를 모사하기 위해서는, 그라우트를 주입하고 양생이 가능해야 하지만 기존 몰드를 적용할 경우 그라우트 주입 시 차수 문제가 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 1(a)와 같이 기존 몰드와 동일한 직경 및 높이를 가지며(ASTM-D3080/D3080M, 2011), 나사선을 통해 상부 몰드와 하부 몰드 사이에서 발생하는 차수를 방지할 수 있도록 몰드를 제작하였다. 상부 및 하부 몰드는 모두 바닥판을 설치 및 분리할 수 있는 구조로 제작되어 지반-그라우트 시료 제작 시 활용됐다. 또한, 상대밀도 이외에도 다양한 영향 인자들에 대한 직접전단시험을 수행할 수 있도록 몰드를 제작하였다. 먼저, 그라우트 주입압에 따른 영향을 고려할 수 있도록 하부 몰드에

구멍을 제작하여 주입압을 적용할 수 있도록 하였으며, 상부 몰드에는 Fig. 1(b)와 같이 측면에 가이드를 설치하여 상하 또는 좌우 움직임을 제어할 수 있도록 하였다. 본 연구에서는 Hossain and Yin(2014) 연구와 동일하게 상부 및 하부 볼드 사이 간격을 따로 적용하지 않았으나, 가이드를 사용하면 향후 몰드 사이 간격에 따른 영향 분석도 가능할 것으로 보인다.

제작된 몰드를 활용하여 지반-그라우트 시료를 제작하는 순서는 다음과 같다. 먼저, Fig. 2(a)와 같이 상부 몰드에 바닥판을 설치한 후 뒤집어 지반을 조성하였으며, 몰드 내경과 동일한 직경을 가지는 다짐봉을 사용하여 목표 상대밀도를 확보할 수 있도록 지반을 조성하였다. 이후, Fig. 2(b)와 같이 하부 몰드를 결합하였으며 그라우트를 주입하였다. 하부 몰드 결합 시 그라우트의 누출을 방지하기 위해 상부 및 하부 몰드를 밀폐시켰으며, 그라

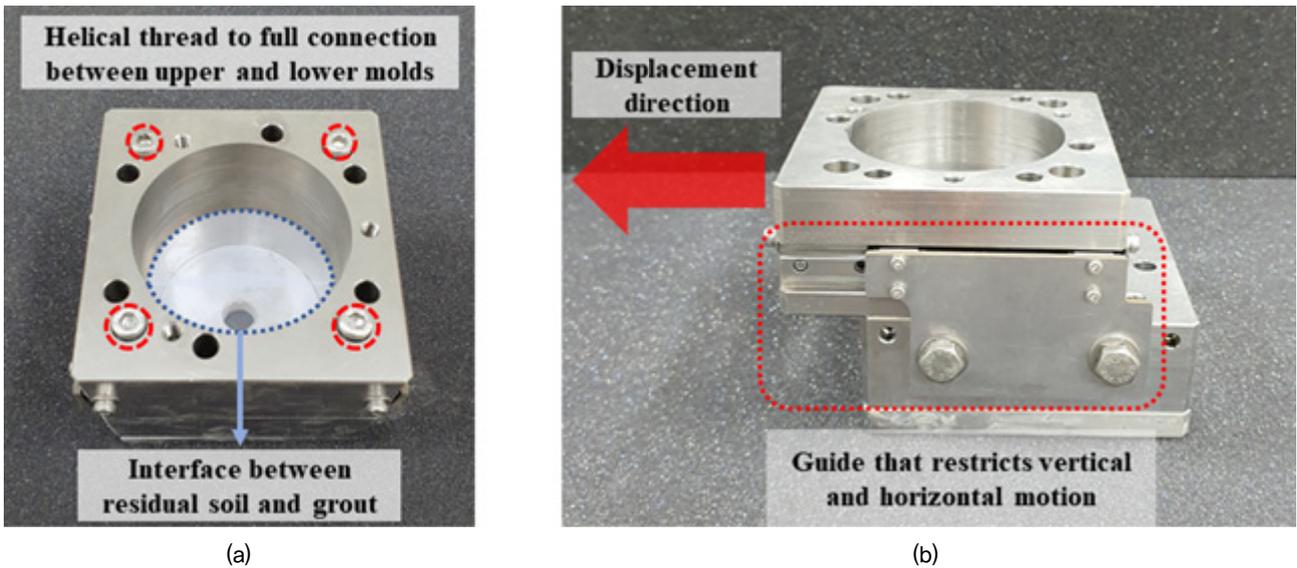


Fig. 1. Mold for direct shear test on soil-grout: (a) top view, and (b) side view

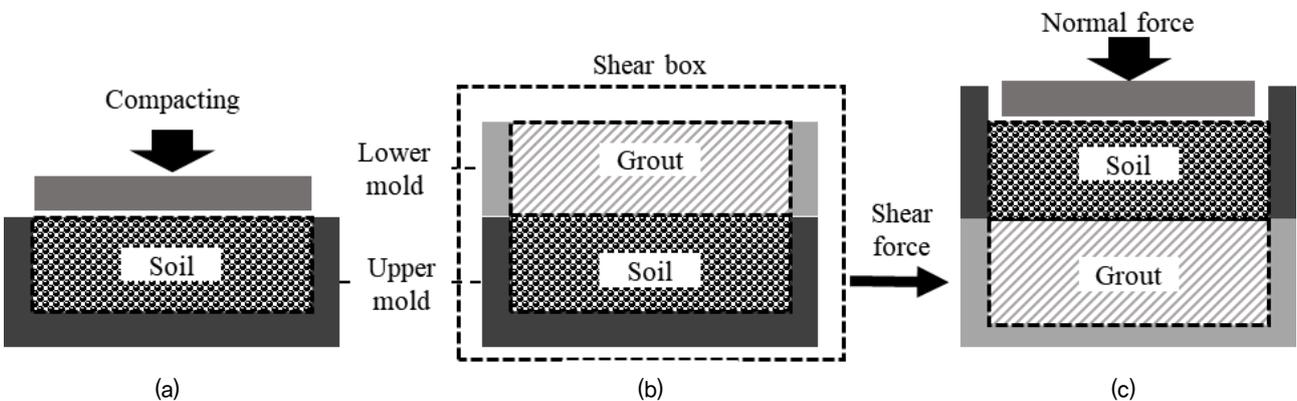


Fig. 2. Method for preparing soil-grout specimens and conducting direct shear tests: (a) soil compaction, (b) grout injection, (c) direct shear test execution

우트 주입 후 하부 몰드의 바닥판을 설치하여 원통형의 지반-그라우트 시료를 제작하였다. 그라운드 앵커와 같이 지반 내 그라우트를 주입하는 구조물의 경우 그라우트는 주변 지반에 의해 구속압을 받게 된다. 따라서, 본 연구에서는 그라우트 양생 후 Fig. 2(c)와 같이 지반(상부 몰드)이 상부에 위치하도록 전단시험기에 시료를 거치시켰으며, 상부 몰드의 바닥판을 분리한 후 지반에 구속압을 가했다. 이후, 0.01mm/sec의 일정한 전단 속도로 직접전단시험을 수행하였으며(ASTM-D3080/D3080M, 2011; Moayed et al., 2019), 로드셀과 LVDT를 통해 전단저항력, 연직 변위 및 수평 변위(슬립)를 정밀 계측하였다.

2.2 풍화토 특성

본 연구에서는 국내에 넓게 분포되어있는 화강 풍화토를 대상으로 지반-그라우트 직접전단시험을 수행하였

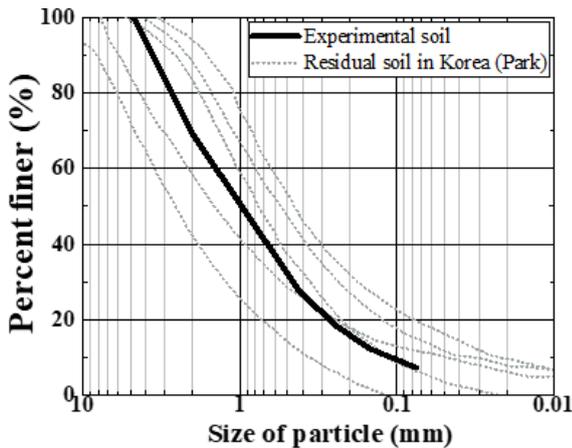


Fig. 3 Particle size distribution of residual soil

다. Fig. 3은 본 연구에 적용된 풍화토의 체분석 결과이다. 200번체 통과량은 7.18%였으며, 통일분류법(USCS)에 따라 실트질 모래(SM)로 분류되었다. 본 연구에 적용된 풍화토는 Park(1995)이 수행한 국내 풍화토 입도분포 곡선과 유사한 입도분포를 나타냈다. 지반-그라우트의 전단 거동이 지반의 입도분포에 따라 크게 달라지는 점을 고려해 보았을 때 본 연구 결과는 국내 풍화토와 그라우트의 인터페이스 거동 특성을 적절히 나타낼 수 있을 것으로 판단된다.

또한, 본 연구에 적용된 풍화토의 기본 물성치는 Table 1과 같다. 본 연구에서는 풍화토 및 풍화토-그라우트 시료 조성 시 최소·최대 건조단위중량을 통해 상대밀도에 따른 건조단위중량을 선정하였으며, 최적함수비를 적용하여 지반을 조성하였다.

2.3 그라우트 특성

시험에 사용된 그라우트는 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 물과 혼합하여 제작하였다. 물/시멘트 비(w/c ratio)는 그라운드 앵커 시공 시 일반적으로 적용되는 0.45를 사용하였다. 본 연구에 적용된 그라우트의 물성치를 평가하기 위해 Fig. 4와 같이 직경 50mm, 높이 100mm의

Table 1. Material properties of residual soil

Properties	Unit	Value
USCS		SM
Optimum moisture content	%	10.50
Maximum dry unit weight	g/cm^3	1.98
Minimum dry unit weight	g/cm^3	1.25
Specific gravity	-	2.60

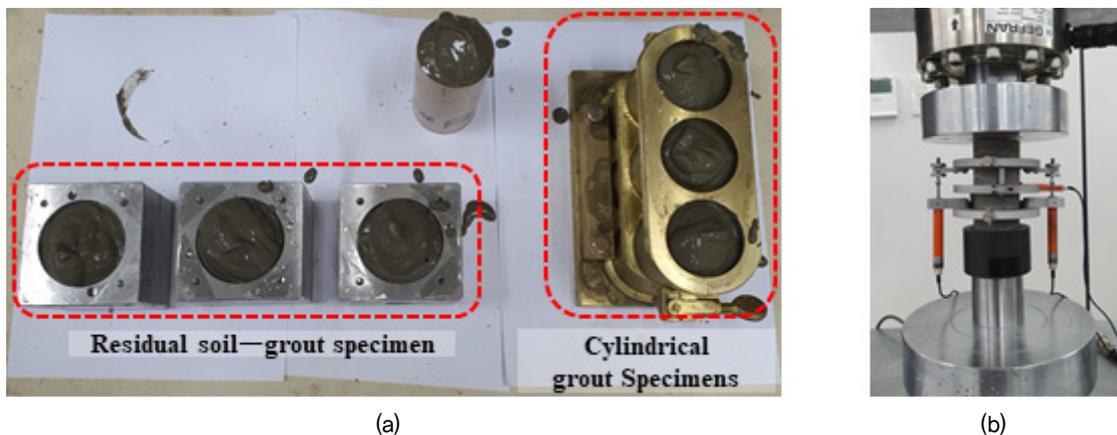


Fig. 4. Preparation of residual soil-grout specimens and Cylindrical grout Specimens: (a) specimens, and (b) unconfined compression test

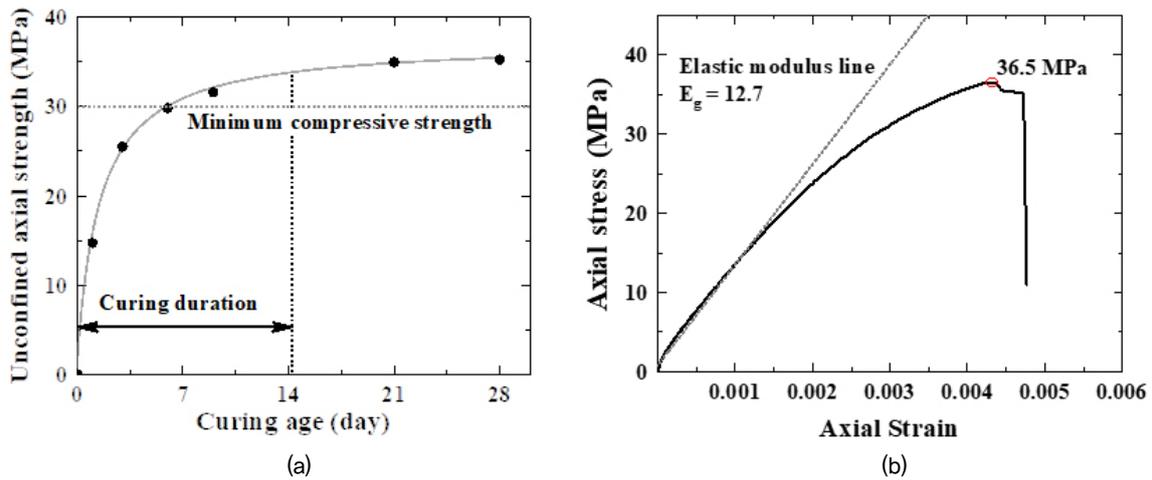


Fig. 5. Unconfined compression test results: (a) axial stress–strain curve, and (b) compressive strength depending on curing age

그라우트 공시체를 별도로 제작하였으며, 일축압축실험을 수행하였다.

양생일에 따른 일축압축시험 결과, Fig. 5(a)와 같이 약 7일 이후에 일축압축강도가 수렴되는 경향이 나타났다. 본 연구에서는 FHWA에 제시된 30MPa 이상의 일축압축강도를 확보할 수 있도록 14일의 양생 기간을 모든 시험 조건에 적용하였다(Sabatini et al., 1999). 14일 양생 그라우트의 일축압축시험 결과는 Fig. 5(b)와 같으며, 일축압축강도, 탄성계수, 포아송 비는 각각 36.5MPa, 12.7GPa, 0.29로 평가됐다.

2.4 시험 조건

본 연구에서는 개발된 몰드를 활용하여 풍화토 및 풍화토-그라우트 시료를 제작하였으며, 상대밀도 및 구속압 조건을 변화시켜가며 총 18번의 직접전단시험을 수행하였다. 본 연구에 적용된 시험 조건은 Table 2와 같으며, 각 실험 조건별 전단응력-슬립 곡선과 연직 변위-슬립 곡선을 평가하여 인터페이스 전단 거동 특성을 분석하였다.

3. 시험 결과 및 분석

3.1 풍화토 시험 결과

본 연구에서 수행한 상대밀도 50, 70, 90% 풍화토의 전단응력-슬립 곡선 및 연직 변위-슬립 곡선은 Fig. 6과 같다. 본 연구에서 제시한 연직 변위-슬립 곡선에서 (+)는 팽창, (-)는 압축을 의미한다. 예상한 바와 같이, 동일 상대밀도 조건에서 전단응력은 구속압이 증가함에 따

Table 2. Experimental program

Test No.	Specimen	Relative density, D_r (%)	Confining pressure (kPa)	
T1	Residual Soil (RS)	50	50	
T2			100	
T3			200	
T4		70	90	50
T5				100
T6				200
T7		90	50	50
T8				100
T9				200
T10	Residual Soil–Grout (RS–G)	50	50	
T11			100	
T12			200	
T13		70	90	50
T14				100
T15				200
T16		90	50	50
T17				100
T18				200

라 증가하는 것으로 나타났다. 상대밀도 50%의 느슨한 지반 조건에서 전단응력-슬립 곡선은 슬립이 발생함에 따라 전단응력이 지속적으로 증가하는 변형률 경화 거동(strain hardening)이 나타났으며, 상대밀도가 증가함에 따라 변형률 연화 거동(strain softening)이 나타나는 것으로 확인됐다. 특히, 상대밀도 90%의 매우 조밀한 지반 조건에서는 최대 전단강도 발현 이후 전단응력이 감소하는 경향이 뚜렷하게 확인됐다.

또한, 풍화토의 연직 변위(부피 변화)는 동일 상대밀도 조건에서 구속압이 증가함에 따라 감소하는 경향이

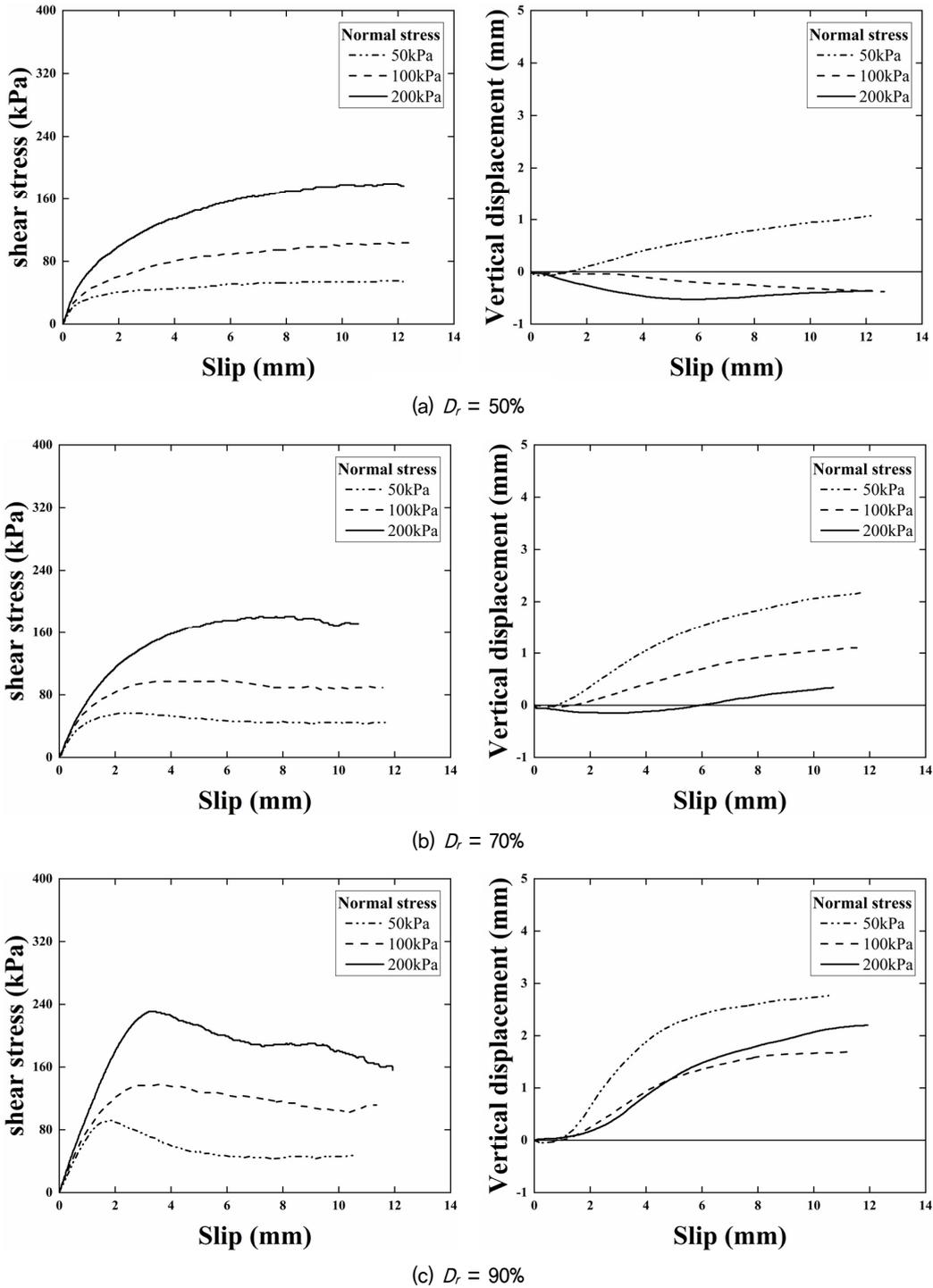


Fig. 6. Shear stress-slip curve and vertical displacement-slip curve of residual soil

나타났다. 뚜렷한 변형률 경화 거동이 나타난 상대밀도 50%에서는 높은 구속압(100, 200kPa) 조건에서 압축 변형이 발생했으며, 낮은 구속압(50kPa) 조건에서는 부피 팽창(dilation)이 발생하였다. 상대밀도 70, 90%에서는 모든 구속압 조건에서 부피 팽창이 발생하였으며, 상대 밀도가 증가함에 따라 더 큰 부피 팽창이 발생하는 것이 확인됐다.

3.2 풍화토-그라우트 시험 결과

상대밀도 및 구속압에 따른 풍화토-그라우트 조건에서 전단응력-슬립 곡선 및 연직 변위-슬립 곡선은 Fig. 7과 같다. 풍화토 직접전단시험과 다르게 모든 시험 조건에서 변형률 연화거동이 나타났다. 초기에서는 슬립이 발생함에 따라 매우 선형적으로 전단응력이 증가하

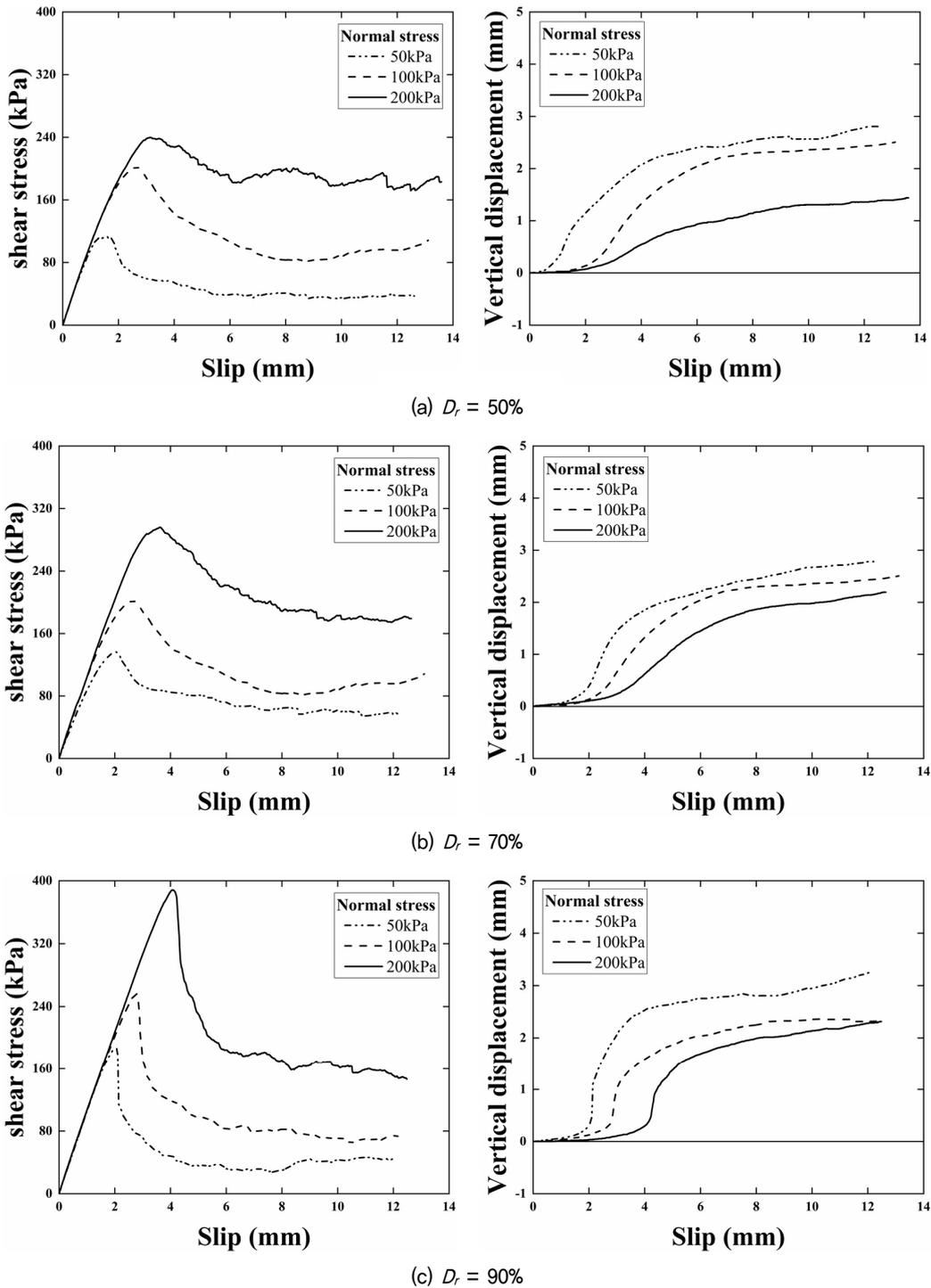


Fig. 7. Shear stress-slip curve and vertical displacement-slip curve of residual soil-grout

였으며, 최대 전단강도 발생 이후 전단응력이 감소하는 경향을 나타냈다. 이와 같은 경향은 상대밀도가 증가함에 따라 더 뚜렷하게 나타났으며, 상대밀도 90%의 단단한 지반 조건에서는 매우 빠르게 전단응력이 감소하는 현상이 나타났다. 동일 상대밀도 조건에서는 구속압이 증가할수록 최대 전단강도가 증가하였으며, 초기 슬립 구간에서 기울기는 구속압에 관계없이 유사한 경향을

나타냈다. 또한, 최대 전단강도를 발생시키는 슬립의 크기는 구속압이 증가할수록 증가하는 현상이 나타났다.

연직 변위-슬립 곡선 또한 풍화토 직접전단시험과 다른 경향을 나타냈다. 느슨한 지반(상대밀도 50%)에서 압축 변형이 발생하는 풍화토 시험 결과와 달리, 모든 시험 조건에서 부피 팽창이 발생했다. 낮은 구속압 조건에서 더 큰 부피 팽창이 발생했으며, 상대밀도에 따라서

는 부피 변화량이 큰 차이를 나타내지 않았다. 또한, 풍화토-그라우트 시험 결과에서 연직 변위는 일정 슬립 이후 급격히 증가하는 경향이 나타났다. 전단응력-슬립 곡선과 비교해 보았을 때, 최대 전단강도 발생 이전에는 연직 변위가 크게 발생하지 않았으며 최대 전단강도 발생 이후 연직 변위가 급격히 증가하는 현상이 발생했다.

3.3 풍화토-그라우트 인터페이스 전단 거동

본 연구에서는 풍화토의 전단 거동과 풍화토-그라우트 인터페이스에서의 전단 거동을 보다 정량적으로 비교하기 위해, 시험 조건별 전단 강도를 분석하였다. 각 시험 조건별 최대 전단 강도를 Fig. 8(a)에 나타냈으며, 잔류 전단 강도를 Fig. 8(b)에 나타냈다. 잔류 전단 강도는 ASTM-D3080/D3080M(2011)에 따라 슬립 10mm에서 발생한 전단응력을 적용하였다. 풍화토 및 풍화토-그라우트 조건 모두 상대밀도 및 구속압이 증가함에 따라 최대 전단 강도가 증가하였으며, 풍화토에 비해 풍화토-그라우트 조건에서 매우 큰 최대 전단 강도가 발현됐다. 그러나, 풍화토-그라우트의 잔류 전단 강도는 풍화토 조건의 잔류 전단 강도와 유사한 값을 나타냈다. 즉, 본 연구에 적용된 풍화토 조건과 유사한 지반에 그라우트 주입 시 풍화토-그라우트 인터페이스에서의 최대 전단강도는 풍화토에 비해 크게 증가하지만, 한계 상태(critical state)에서의 거동은 주변 풍화토와 유사한 거동을 나타낸다고 할 수 있다. 이와 같은 경향은 전단응력-슬립 곡선에서 더욱 뚜렷하게 나타나고 있으며, Fig. 9는 상대밀도 70% 조건에서 풍화토 및 풍화토-그라우트의 전단

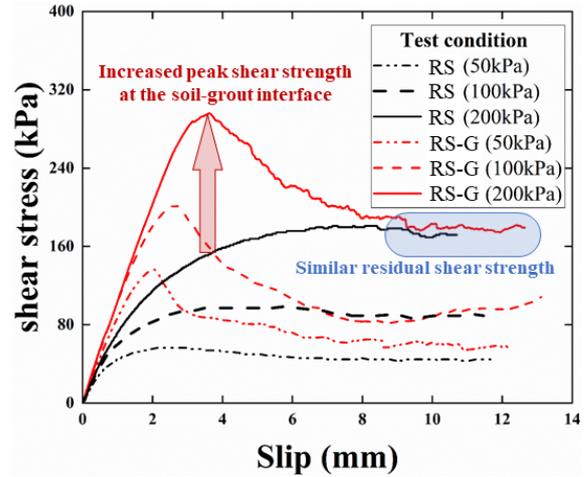


Fig. 9. Shear stress-slip curves of residual soil and residual soil-grout specimens with 70% relative density

응력-슬립 곡선을 대표적으로 나타내고 있다. 전단강도 평가 결과에서 나타난 바와 같이, 풍화토 및 풍화토-그라우트는 동일 구속압 조건에서 유사한 잔류 전단 강도를 나타냈으며, 풍화토-그라우트 조건에서 최대 전단 강도가 크게 증가하는 현상이 나타났다.

4. 상대밀도에 따른 전단강도 정수 변화

본 연구에서는 풍화토-그라우트 인터페이스 전단 거동 시 상대밀도에 따른 영향을 분석하기 위해, 전단강도 정수를 평가하였다. 풍화토-그라우트 인터페이스에서 잔류 전단 강도는 풍화토와 유사하므로 해석 시 적용되지 않았으며, 최대 전단 강도를 통해 점착력 및 마찰계수를 평가하였다(Table 3). 또한, Chu and Yin(2005)이

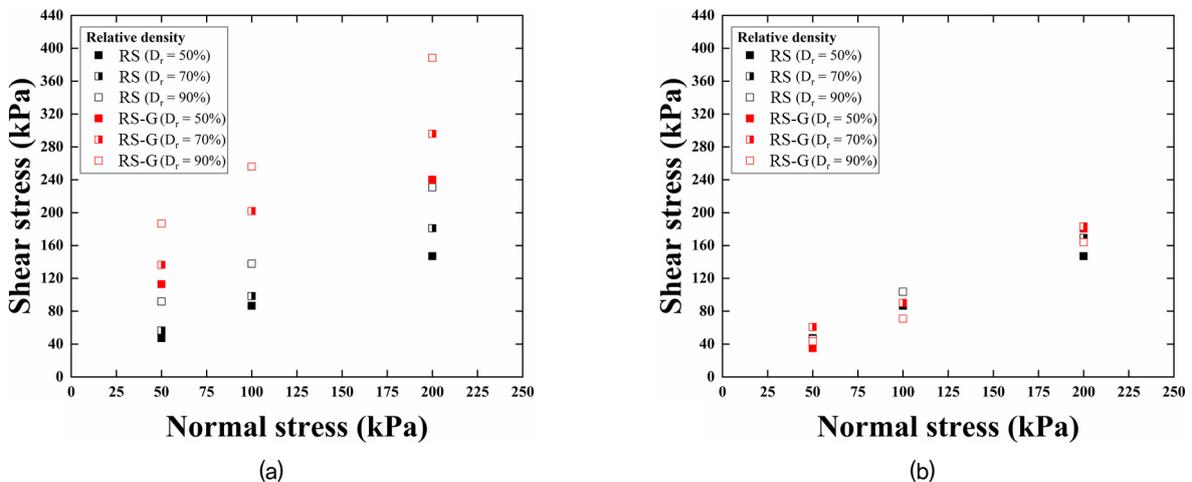


Fig. 8. shear strength of residual soil and residual soil-grout specimens: (a) maximum shear strength, and (b) residual shear strength

Table 3. Shear strength parameters of residual soil and residual soil-grout

D_r (%)	Weathered soil		Weathered soil-grout		f_δ	f_a
	ϕ (°)	c (kPa)	δ (°)	c_a (kPa)		
50	38.2	7.9	38.0	93.8	1.0	11.9
70	39.7	15.1	46.3	89.4	1.2	5.9
90	42.8	45.2	53.3	120.7	1.2	2.7

수행한 연구와 동일하게, 식 (1), (2)와 같이 풍화토-그라우트의 전단강도 정수와 풍화토 전단강도 정수의 비를 평가하였다.

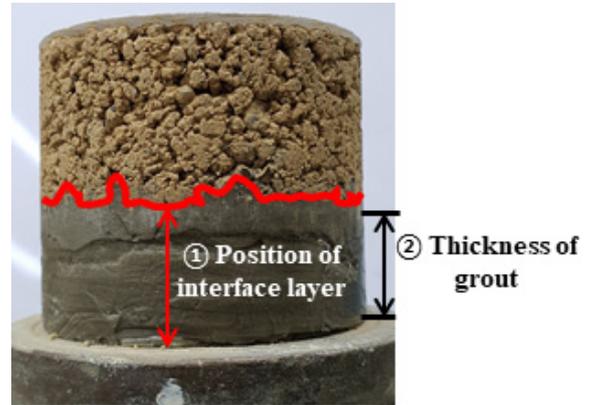
$$f_\delta = \frac{\delta}{\phi} \quad (1)$$

$$f_a = \frac{c_a}{c} \quad (2)$$

여기서, f_a : 점착력 비, c_a : 풍화토-그라우트 점착력, c : 풍화토 점착력, f_δ : 마찰각 비, δ : 풍화토-그라우트 마찰각, ϕ : 풍화토 마찰각.

전단강도 정수 평가 결과, 풍화토 및 풍화토-그라우트의 마찰각은 유사한 값을 나타냈으며 f_δ 은 1.0에서 1.2 사이로 평가됐다. 하지만, 점착력은 풍화토-그라우트 조건에서 매우 크게 증가하는 것으로 나타났다. 상대밀도가 감소함에 따라 점착력이 더 크게 증가(f_a 증가)하는 것으로 나타났으며, 이는 상대밀도가 감소함에 따라 풍화토-그라우트의 인터페이스 레이어(interface layer)의 두께가 증가하기 때문으로 판단된다. Hossain and Yin (2012)에 따르면 그라우트 주입 시 흙 입자 사이로 그라우트가 침투하게 되며, 이로 인해 풍화토와 그라우트 입자가 같이 존재하는 인터페이스 레이어가 형성된다. 본 연구에서는 풍화토-그라우트 인터페이스 레이어의 두께를 평가하기 위해 360도 이미지 해석을 수행했으며, Fig. 10과 같이 풍화토-그라우트 경계면의 위치와 시료 양생 시 적용한 그라우트 두께를 비교하여 인터페이스 레이어의 두께를 평가하였다. 360도 이미지 해석을 통해 평가한 풍화토-그라우트 경계면 위치는 Fig. 11과 같다.

평균 풍화토-그라우트 경계면 위치(Fig. 11에서 점선)와 그라우트 높이(22mm)를 통해 인터페이스 레이어 두께를 평가해본 결과, 상대밀도 50, 70, 90%의 인터페이스 레이어 두께는 2.7, 0.8, 1.0mm 로 나타났다. 즉, 낮은 상대 밀도에서는 큰 간극비로 인해 두꺼운 인터페이스 레이어



$$\text{Interface layer thickness} = \text{①} - \text{②}$$

Fig. 10. Interface layer thickness evaluation method

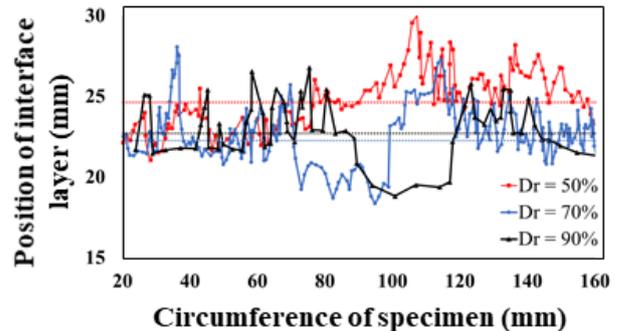


Fig. 11. Interface layer thickness depending on relative density of residual soil

가 형성되며, 풍화토 및 그라우트 입자 사이 맞물림 (interlocking) 현상이 증가했을 것으로 판단된다. 이와 같은 인터페이스 레이어 두께는 상대밀도 뿐만 아니라 물/시멘트 비, 그라우트 주입압, 함수비 등과 같은 다양한 조건의 영향을 받을 것으로 보이며, 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

5. 결론

본 연구에서는 지반-그라우트 인터페이스 전단 거동 특성을 평가하기 위한 직접전단시험 용 몰드를 제작하였으며, 제작된 몰드를 통해 풍화토 및 풍화토-그라우트

시료에 대해 직접전단시험을 수행하였다. 다양한 상대 밀도 및 구속압 조건에서 직접전단시험을 수행하였으며, 각 실험 조건별 전단응력-슬립 곡선과 연직 변위-슬립 곡선을 분석한 결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 풍화토-그라우트의 전단응력-슬립 거동은 풍화토 직접전단 시험 결과와 다르게 모든 시험 조건에서 변형을 연화거동이 나타났다. 초기 슬립이 발생함에 따라 매우 선형적으로 전단응력이 증가하였으며, 최대 전단 강도 이후 전단응력이 급격히 감소하는 경향을 나타냈다. 이와 같은 변형을 연화거동은 조밀한(상대밀도 90%) 지반 조건에서 더 크게 나타나는 것으로 확인됐다. 또한, 초기 슬립에서 연직 변위는 크게 증가하지 않는 것으로 나타났으나, 최대 전단 강도 발현 이후 급격히 증가하는 것으로 확인됐다.
- (2) 각 실험 조건별 전단 강도 평가 결과, 동일 구속압 조건에서 풍화토 및 풍화토-그라우트는 유사한 잔류 전단 강도를 나타냈으며, 최대 전단 강도는 풍화토-그라우트 조건에서 매우 크게 증가하는 것으로 나타났다. 따라서, 그라우트 주입에 따라 형성된 풍화토-그라우트 인터페이스에서는 단일 풍화토보다 큰 최대 전단 강도를 확보할 수 있으며, 한계 상태 거동은 주변 풍화토 거동에 따라 결정된다고 할 수 있다.
- (3) 전단 강도 정수 평가 결과, 풍화토 및 풍화토-그라우트의 마찰각은 유사한 값을 나타냈으며, 점착력은 풍화토-그라우트 조건에서 매우 크게 증가하는 것으로 나타났다. 상대밀도가 감소함에 따라 점착력이 더 크게 증가하는 것으로 나타났으며, 360도 이미지 해석 결과 이는 상대밀도가 감소함에 따라 풍화토-그라우트의 인터페이스 레이어의 두께가 증가하기 때문으로 나타났다.

본 연구에서 수행된 실험 결과에 따르면, 지반-그라우트 전단 거동은 그라우트가 지반 내부로 침투하며 형성된 인터페이스 레이어에 따라 결정되는 것으로 보인다. 추가 연구를 통해 물/시멘트 비, 그라우트 주입압, 함수비 등 다양한 요인들이 인터페이스 레이어에 미치는 영향을 평가할 필요가 있을 것으로 보이며, 이를 바탕으로 지반-그라우트 인터페이스 전단 거동을 보다 명확하게 분석할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 풍화토-

그라우트 인터페이스에 대한 직접전단시험 결과, 변형을 연화 거동이 뚜렷하게 나타났으며, 이와 같은 전단 특성을 고려한 풍화토-그라우트 전단 파괴 하중 선정 방법이 제시될 경우 보다 효율적인 그라운드 앵커 또는 쏘일 네일 설계가 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단(No. 2020R1A2C2010771) 및 서울대학교 공학연구원의 지원을 받아 수행된 연구입니다. 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. ASTM-D3080/D3080M (2011), Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions, Annual Book of ASTM Standards, ASTM, West Conshohocken, PA.
2. Barley, A. D. (1997), The single bore multiple anchor system. In Ground anchorages and anchored structures: Proceedings of the international conference organized by the Institution of Civil Engineers and held in London, UK, on 20-21 March 1997 (pp. 65-75). Thomas Telford Publishing.
3. Briaud, J. L., III, W. F. P., and Weatherby, D. E. (1998), Should Grouted Anchors Have Short Tendon Bond Length?, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, Vol.124, No.2, pp.110-119.
4. British Standards Institution (2015), BS 8081: 2015: Code of practice for grouted anchors.
5. Chu, L. M. and Yin, J. H. (2005), Comparison of Interface Shear Strength of Soil Nails Measured by Both Direct Shear Box Tests and Pullout Tests, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, Vol.131, No.9, pp.1097-1107.
6. Desai, C. S. and Zaman, M. (2013), *Advanced geotechnical engineering: Soil-structure interaction using computer and material models*. CRC Press.
7. Hossain, M. A. and Yin, J. H. (2012), Influence of Grouting Pressure on the behavior of an Unsaturated Soil-cement Interface, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, Vol.138, No.2, pp.193-202.
8. Hossain, M. A. and Yin, J. H. (2014), Behavior of a Pressure-grouted Soil-cement Interface in Direct Shear Tests, *International Journal of Geomechanics*, Vol.14, No.1, pp.101-109.
9. Hossain, M. A. and Yin, J. H. (2015), Dilatancy and Strength of an Unsaturated Soil-cement Interface in Direct Shear Tests, *International journal of Geomechanics*, Vol.15, No.5, 04014081.
10. Jeong, H. S., Han, K. S., and Lee, Y. S. (2017), Numerical Study on the Skin Friction Characteristics of Tension Type Ground Anchors in Weathered Soil, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.33, No.1, pp.39-56.
11. Kim, B. C., Jeong, S. S., and Ko, J. Y. (2015), Proposed Reduction Factor of Cyclic p-y Curves for Drilled Shafts in Weathered Soil, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.31, No.2, pp.47-63.

12. Kim, N. K. (2001), Load Transfer of Tension and Compression Anchors in Weathered Soil, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.17, No.3, pp.59-68.
13. Kishida, H. and Uesugi, M. (1987), Tests of the Interface between Sand and Steel in the Simple Shear Apparatus, *Géotechnique*, Vol.37, No.1, pp.45-52.
14. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2021), Ground Anchor Design-Construction and Maintenance Manual, In Korean.
15. Moayed, R. Z., Hosseinali, M., Shirkorshidi, S. M., and Sheibani, J. (2019), Experimental Investigation and Constitutive Modeling of Grout-sand Interface, *International Journal of Geomechanics*, Vol.19, No.5, 04019024.
16. Ostermayer, H. and Scheele, F. (1978), Research on Ground Anchors in Non-cohesive Soils, *Revue Française de Géotechnique*, (3), pp.92-97.
17. Park C. (1995), Charateristic of weathered residual soil.
18. Sabatini, P. J., Pass, D. G., and Bachus, R. C. (1999), Geotechnical engineering circular no. 4: Ground anchors and anchored systems. (No. FHWA-IF-99-015).
19. Subba Rao, K. S., Allam, M. M., and Robinson, R. G. (2000), Drained Shear Strength of Fine-grained Soil-solid Surface Interfaces, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, Vol.143, No.2, pp.75-81.
20. Toufigh, V., Masoud Shirkorshidi, S., and Hosseinali, M. (2017), Experimental Investigation and Constitutive Modeling of Polymer Concrete and Sand Interface, *International Journal of Geomechanics*, No.17, No.1, 04016043.
21. Vukotić, G., González Galindo, J., and Soriano, A. (2013), The Influence of Bond Stress Distribution on Ground Anchor Fixed Length Design. Field Trial Results and Proposal for Design Methodology. In Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, France (pp.2-6).
22. Zhu, S., Chen, C., Mao, F., and Cai, H. (2021), Application of Disturbed State Concept for Load-transfer Modeling of Recoverable Anchors in Layer Soils, *Computers and Geotechnics*, 137, 104292.

Received : March 14th, 2023

Revised : March 20th, 2023

Accepted : March 21st, 2023