

링전단시험을 이용한 말뚝 기초-사질지반 간 인터페이스 거동 분석

Nonlinear Analysis of Shear Behavior on Pile-Sand Interface Using Ring Shear Tests

정 상 섬¹ Jeong, Sang-Seom
Andrew Whittle³

정 형 서² Jung, Hyung-Suh
김 도 현⁴ Kim, Do-Hyun

Abstract

In this study, the shear behavior between pile-sandy soil interface was quantified based on series of rigorous ring shear test results. Ring shearing test was carried out to observe the shear behavior prior to failure and behavior at residual state between most commonly used pile materials - steel and concrete - and Jumunjin sand. The test was set to clarify the shear behavior under various confinement conditions and soil densities. The test results were converted in to representative friction angles for various test materials. Additional numerical analysis was executed to validate the accuracy of the test results. Based on the test results and the numerical validation, it was found that due to the dilative and contractive nature of sand, its interface behavior can be categorized in to two different types : soils with higher densities tend to show peak shear stress and moves on to residual state, while on the other hand, soils with lower densities tend to show bilinear load-transfer curves along the interface. However, the relative density and the confining stress was found to affect the friction angle only in the small strain range, and converges as it progresses to large deformation. This study established a large deformation analysis method which can successfully simulate and predict the large deformation behavior such as ring shear tests. Moreover, the friction angle derived from the ring shear test result and verified by numerical analysis can be applied to numerical analysis and actual design of various pile foundations.

요 지

본 연구에서는 링전단시험 결과를 이용하여 말뚝-사질지반 사이의 전단거동을 정량화하였다. 링전단시험은 가장 일반적인 말뚝재료 - 콘크리트와 강 - 와 대표적인 사질토인 주문진표준사를 대상으로 수행하였으며, 두 재료 사이의 전단거동을 항복 이전과 잔류전단거동을 중심으로 확인하고 분석하였다. 시험결과를 통하여 다양한 상재압과 상대밀도의 영향 또한 분석하여, 그에 따른 전단거동을 각 재료 별 대표적인 마찰각으로 정량화하였다. 더 나아가, 추가적인 대변형 수치 해석을 통하여 시험결과를 검증하였다. 링전단시험 및 수치해석을 수행한 결과, 사질토의 전단 중 발생하는 팽창과 수축 특성에 의하여 전단거동을 크게 두 가지로 구분할 수 있었다. 1) 상대밀도가 높은 시료일수록 두 재료 간 전단응력곡선은 첨두전단응력이 관찰된 후 잔류전단응력이 발현되는 개형을 나타내었고, 반면에 2) 상대밀도가 낮은 시료일수록 두

1 정희원, 연세대학교 건설환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Eng., Yonsei Univ.)

2 정희원, (주)건화 사원 (Member, Staff Member, Kunhwa Eng.)

3 비회원, 매사추세츠공과대학교 토목환경공학과 교수 (Prof., Dept. of Civil and Environmental Eng., MIT)

4 정희원, 매사추세츠공과대학교 토목환경공학과 박사 후 연구원 (Member, Post-doctoral Fellow, Dept. of Civil and Environmental Eng., MIT, Tel: +1-617-510-1476, Fax: +82-2-2123-8378, geokim@mit.edu, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2021년 11월 30일까지 그 내용을 확화로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

재료 간 전단응력곡선은 침투전단응력의 발현 없이 바로 잔류전단응력이 발현되는 이중곡선 형태를 보였다. 상재압은 소변형 범위에서는 전단거동 형태와 마찰각에 영향을 주지만, 상대밀도와 마찬가지로 대변형 하에서는 유의미한 영향을 주지 않는 것으로 확인되었다. 본 연구는 리메싱을 통한 대변형 수치해석 기법을 정립하여 링전단시험과 같은 대변형 전단거동을 모사하고 예측할 수 있도록 하였을 뿐 만 아니라, 링전단시험을 통하여 도출되고 대변형 수치해석으로 검증된 말뚝 재료와 사질토 사이의 마찰각은 실제 기초 말뚝의 수치해석과 설계에 적용할 수 있도록 하였다.

Keywords : Confining stress, Finite element analysis, Friction angle, Pile-soil interface, Relative density, Ring shear test, Shear strength

1. 서론

기존 구조물 기초 말뚝 설계 시 지지력은 주로 선단 지지력을 중심으로 산정되었다. 이로 인하여 구조물 기초 말뚝의 주면에서 발생하는 전단응력과 지지력은 고려하지 않는 경우도 있어 비효율적인 설계가 이루어지는 실정이다(Korea Expressway Cooperation Research Institute, 1997; Park et al., 2008). 하지만 최근 그 중요도가 증가하고 있는 연안 구조물과 해상 구조물의 기초 말뚝, 또는 지반 조건이 양호하지 않거나 암반 지지층이 깊은 심도에 나타나는 경우에는 선단지지력만으로는 충분한 지지력을 얻지 못하는 경우가 많다. 이러한 상황에서 적용되는 마찰말뚝, 현장타설말뚝과 도심지 건설에 소음 및 진동 발생이 적어 수요가 증가하고 있는 매입말뚝의 경우, 전체 지지력에서 주면에서 발현되는 전단응력의 비중이 상대적으로 크다(Seol et al., 2009; Jeong et al., 2010; Jung et al., 2017; Kim, 2018; Kim et al., 2020). 이렇듯 기존 구조물 기초 말뚝 설계의 비효율성을 극복하고, 수요가 증가하고 있는 말뚝 공법의 효율적인 설계와 적용을 위하여 말뚝과 지반 사이의 전단응력에 대한 연구는 필수적이다.

링전단시험은 시험 재료 간 전단응력을 측정하기 위한 시험으로, 시험이 진행됨에 따라 접촉면이 감소하는 직접전단시험과는 다르게 재료 간 접촉면이 일정하게 유지되는 상태에서 무한한 전단변형을 가할 수 있는 특징을 가지고 있다. 또한, 제한된 변형률 내에서의 전단응력만을 측정할 수 있는 직접전단시험과는 달리 실제 구조물 기초의 거동에 근접한 대변형 하에서의 전단특성과 응력을 측정할 수 있다는 장점이 있다(Sassa et al., 2004). 본 연구에서는 가장 일반적인 말뚝재료인 콘크리트와 강을 대상으로 주면진표준사를 이용하여 링전단시험 수행하고, 그 결과를 이용하여 말뚝-사질지반 사이의 전단

거동 특성을 확인하고 정량화하였다. 다양한 상재압과 상대밀도의 영향을 분석하여, 그에 따른 전단거동을 반영한 각 재료 별 대표적인 마찰각을 도출하였다. 링전단시험을 통하여 도출된 마찰각과 전단거동 특성은 추가적인 대변형 수치해석을 통하여 그 정확성을 검증하였다.

2. 말뚝-지반 전단거동 연구 및 링전단시험

2.1 말뚝-지반 전단거동 연구

기초 말뚝과 사질지반 사이의 전단거동 특성에 관한 연구는 국내외에서 많은 연구를 통하여 진행되었다. Ucségi 등(1990)은 직접전단시험을 통하여 반복하중 하에서 말뚝과 사질지반 사이의 거동에 대한 연구를 진행하였고, Reddy 등(2000)은 내부마찰각을 기초로 말뚝 주면의 전단응력에 관한 연구를 수행하였다. Lings 등(2005)은 다양한 강도의 표면거칠기를 고려하여 사질토와 전단 시 발생하는 침투전단응력에 관한 연구를 진행하였다. Seol 등(2009)과 Jeong 등(2010)은 지중에 근입된 현장타설말뚝 주면의 전단응력전이 특성을 일정수직강성(Constant normal stiffness, CNS)과 표면거칠기를 이용하여 해석하는 기법을 제안하였다. 최근 Kim 등(2018)과 Kim 등(2020)은 매입말뚝 주면 상에서의 전단거동을 하중침하 곡선 및 전단응력곡선 등 현장시험결과를 통하여 확인하고, 매입말뚝 주면 전단거동의 특성을 제안하였다.

하지만 지금까지의 연구는 주로 소변형 범위 내에서 이루어진 것으로, 대변형 거동 범위에서의 전단거동에 대한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다. Lee(1965)가 Sacramento 사질토를 대상으로 수행한 시험결과에 의하면 사질토의 전단특성은 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 20% 이내의 전단변형률에서는 상재압과 상대밀도에 따라 발생하는 전단응력의 확연한 차이가 관찰되지만, 그

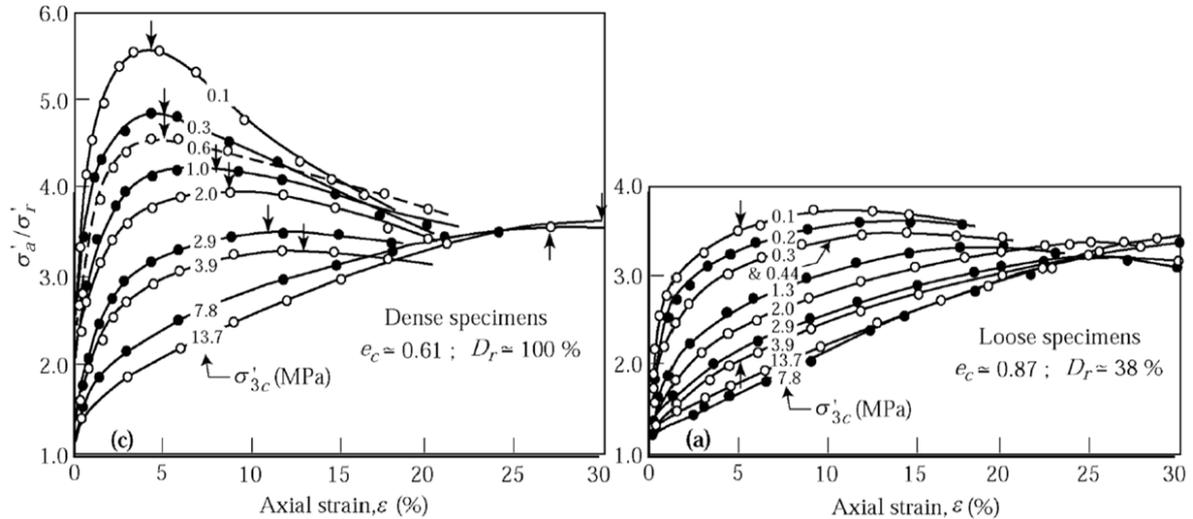


Fig. 1. Shear behavior of sandy soil (Lee, 1965)

이상의 변형률로 넘어가면서 그 차이는 점차 줄어들어 동일한 수준으로 수렴하는 것으로 확인되었다.

2.2 링전단시험

링전단시험은 산사태 및 사면안정 측면에서 다양한 변형률과 무한한 변형 하에서 재료들 사이에 발생하는 전단거동을 측정하기 위하여 개발되었다. 링전단시험의 장·단점은 Table 1에 나타나있다. 링전단시험기와 기초 이론은 Hvorsley(1939)와 Bishop(1971)에 의하여 정립되었다. 그리고 기존 링전단시험의 단점인 시편과 시험기 벽 사이의 마찰력을 최소화할 수 있는 기법을 Timothy 등(1992)이 Bromhead (1979) 링전단시험 과정을 활용하여 제안하면서, Sassa 등(2004)은 강우와 지진에 의해 발생하는 사면붕괴 연구에 널리 활용되었다.

이후 Tika-Vassilikos(1991)는 링전단시험을 통하여 점토와 배토말뚝 사이에 발생하는 전단응력을 측정하였다. Barmopoulos 등(2010)과 Ho 등(2011)은 콘크리트/강과 사질토 사이의 마찰각에 대한 입자 크기의 영향과 거칠기의 영향을 확인하였다. 일반적으로 강관말뚝 설

계 시, 강관말뚝과 자갈 비율이 높은 사질토 사이의 마찰각은 29°라고 제안하고 있지만, 이는 일반적인 거칠기를 가진 강관말뚝을 전제로 하였고, 다양한 상재압이나 상대밀도의 영향을 고려하지 않았다(CUR, 2001; Ho et al., 2011). 앞서 언급한 Lee(1965)의 시험 결과에 의하면 20% 이상의 대변형에서는 상재압이나 상대밀도와 무관하게 전단응력이 일정하다는 결과가 나타났지만, 기초 말뚝의 경우 시공 중이나 사용 중 주면에 따라 발생하는 변형률이 최대 10% 이내라는 것을 고려한다면 상재압과 상대밀도의 영향을 확인하는 연구는 정확한 기초 말뚝 거동 해석과 효율적인 현장 설계를 위해 필수적이다.

3. 링전단시험을 이용한 말뚝-지반 전단거동 특성 연구

본 연구에서는 다양한 상재압과 상대밀도에 따른 말뚝-지반 사이의 전단거동 특성을 확인하기 위하여 링전단시험을 수행하였다. 링전단시험 결과 분석을 통해 말뚝-지반 사이의 전단거동을 해석하고, 현장에 적용할 수 있는 마찰각 도출하고자 하였다.

Table 1. Characteristics of ring shear test

Advantages	Limitations
<ul style="list-style-type: none"> • Wide range of shear velocities can be applied between 0.00001° to 180° per minute. • Area of shearing can be kept constant throughout the test. • Sample can be sheared through uninterrupted displacement of magnitude, which can observe the shear behavior at large deformation and residual state. • Precise loading can be achieved through digital equipment. 	<ul style="list-style-type: none"> • Difficulties in controlling and minimizing wall friction during testing. • Particle crushing phenomenon occurs and affects the shearing behavior at high shearing rate and large shearing strain. • Difference in shearing stress can be observed between the inner and outer diameter due to the curvature of circular mold. • Scarcely test results using ring shear test apparatus.

3.1 시료 및 시험장비

본 연구에서 사용된 장비는 Willie Geotechnik에서 제작한 자동 링전단시험기(LO4203/10, 2015)로 밀폐된 시료 몰드를 사용하여 몰드의 상·하부에 설치한 시료 사이의 전단거동을 높은 정확도로 측정할 수 있다는 특징을 가지고 있다. 링전단시험기의 성능과 용량은 Table 2에 명시되어 있는 것과 같다(Willie Geotechnik, 2015). 링전단시험에서 시료를 거취하고 회전하여 전단시키는 몰드는 Fig. 2와 같다. 상·하부 시료를 회전시키면서 전단응력과 전단변위를 측정할 때 유효반경을 사용하는데, 유효반경 산정식은 식 (1)과 같다.

$$r_{eff} = \frac{(r_o^3 - r_i^3)}{(r_o^2 - r_i^2)} \quad (1)$$

여기서, r_{eff} 는 유효반경, r_o 는 외부 반경, r_i 는 내부 반경이다.

링전단시험에 사용된 주문진표준사의 물성치는 Table 3에 명시되어 있다. 대표적인 말뚝 재료로 시험할 콘크리트와 강은 일반적으로 적용 가능한 안전하면서도 경제적인 마찰각을 산정하기 위하여 표면의 마찰력을 최소화하여 제작하였다. 콘크리트의 물-시멘트비는 100%로 설정하여 제작하였으며, 강은 시험기 몰드 크기에 맞춰 절삭하여 제작하였다.

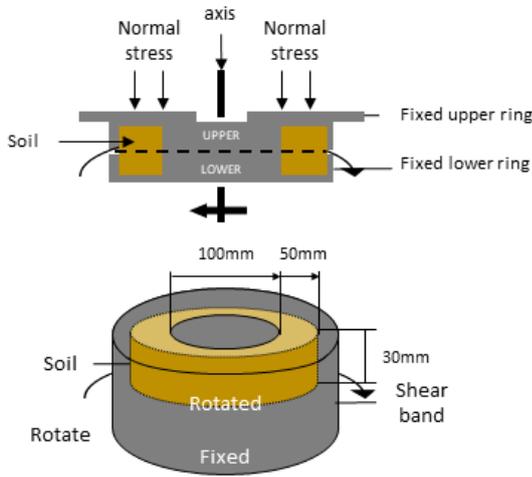


Fig. 2. Schematic of ring shear test mold

Table 2. Specifications of ring shear test apparatus (Willie Geotechnik, 2015)

Type	Specification
Confining stress	1,000 - 2,000 kN/m ²
Shear stress	1,000 - 2,000 kN/m ²
Angle of rotation	Unlimited
Rotation rate	0.00001° - 180° per minute
Accuracy precision	0.1%
Inner diameter	100 mm
Outer diameter	150 mm

Table 3. Characteristics of Jumunjin sand

Type	γ (kN/m ³)	e_0	G_s	Grain size (mm)			C_u^*	C_e^{**}	USCS
				D_{10}	D_{30}	D_{60}			
Minimum	13.6	0.934	2.63	0.45	0.52	0.54	1.20	1.11	SP
Loose	14.9	0.820							
Dense	15.9	0.707							
Maximum	16.2	0.650							

* C_u : Uniformity coefficient, ** C_e Curvature coefficient

3.2 시험방법

본 연구에서 수행한 링전단시험 다음과 같은 전제 하에 수행하였다. 또한, 다양한 상재압과 상대밀도 하에서 시험을 수행하였다.

시험에서는 SP계열 사질토만을 대상으로 시험을 수행하였는데, 이는 배수시험시 pore water pressure equalization을 요구하지 않으며, 기타 점착력 또는 부착력을 고려하지 않고 지반-건설재료 간 최소 마찰각을 도출하는데 가장 적합하기 때문이다. 콘크리트 시료의 경우, 실제 현장에서 사용되는 PHC말뚝의 표면과 가장 유사하게 제작하여 시험에 사용하였다. 본 논문에서는 건설 재료 사이의 전단응력을 최소한으로 도출하여 경제적이면서도 안전한 설계에 적용할 수 있도록 함과 동시에 시험 소요시간을 절감하고자 하였다. 최적전단속도를 설정하기 위하여 전단속도를 0.005mm/min, 0.01mm/min, 0.05mm/min, 0.1mm/min, 0.5mm/min, 500mm/min으로 설정하여 예비해석을 수행하였고 이를 통하여 전단속도 0.05mm/min을 도출하였다. 0.05mm/min은 시험 소요 시간을 절감하면서도 시료 사이의 전단응력의 급격한 증가를 야기 시키지 않는 전단속도였기에 이를 적용

하여 시험을 수행하였다.

시험과정은 Anderson and Hammoud(1988)가 제안한 과정을 기초로 아래와 같은 순서로 진행되었다.

시료 준비는 오븐에서 24시간 이상 완전 건조된 시료를 식 (2)와 (3)을 이용하여 목표 상대밀도에 맞게 준비하였다.

$$r_d = \frac{W}{V} \quad (2)$$

$$D_r = \frac{\gamma_d - \gamma_{dmin}}{\gamma_{dmax} - \gamma_{dmin}} \frac{\gamma_{dmax}}{\gamma_d} \times 100\% \quad (3)$$

여기서, γ_d 는 건조단위중량(kN/m^3), W 는 무게(kN), V 는 몰드의 부피(m^3), γ_{dmax} 는 최대건조단위중량(kN/m^3), 그리고 γ_{dmin} 는 최소건조단위중량(kN/m^3)이다. 여기서 최대/최소건조단위중량은 ASTM D4253-91, D4254-94에서 시험된 결과를 바탕으로 적용하였다.

콘크리트 및 강 시편은 단위중량을 시편의 무게와 몰드의 부피를 이용하여 산정한 후 시험에 적용하였다. 몰드 하부에 콘크리트 또는 강 또는 주문진표준사를 설치하고 그 위에 상대밀도에 맞게 주문진표준사를 설치하였고, 몰드에 설치한 시편 및 사질토를 탈기수를 이용하여 하부에서 상부로 포화시킨다. 완전히 포화시킨 후, 몰드 벽면에 진동을 주어 입자 사이의 공기를 완전히 제거하였다. 시험 준비가 완료된 후, 일정한 전단속도 분당 0.05mm로 최대 20%(72°)로 상하부 시료를 전단시켜 시험을 진행하였다.

3.3 결과 및 분석

본 연구에서 수행한 서로 이질재료 간 링전단시험 결과는 전단 중 발생하는 전단응력(τ)을 상재압(σ_n)으로 나눈 전단응력비(τ/σ_n) 값으로 도출하였다. 또한 수행한 링전단시험 결과를 바탕으로 다양한 재료 간 마찰각을 도출하였다. 말뚝 재료와 사질토 사이의 마찰각은, 표면 거칠기를 최소화한 시편 이용하였고, 현장에서 일반적으로 관찰되는 기타 결합력(부착력 및 점착력)을 배제한 시험결과를 기초로 제안하였다. 또, 전단 초기에 첨두전단응력비가 아닌, 최종적으로 수렴하는 최종 전단응력비를 기준으로 마찰각을 도출하였다. 마찰각은 링전단시험을 통해 확인된 전단응력비(τ/σ_n)를 이용하여 식 (4), (5)를 이용하여 산정하였다.

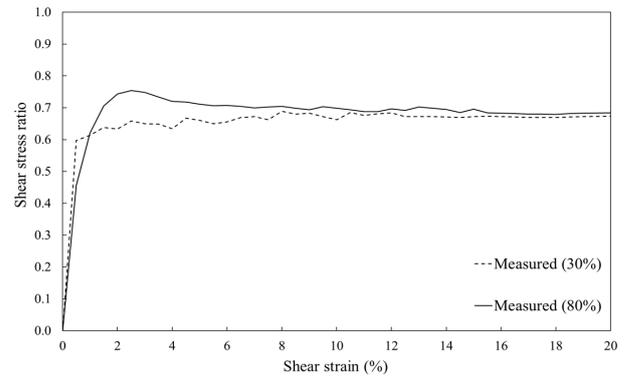
$$\frac{\tau}{\sigma_n} = \tan \delta \quad (4)$$

$$\tan^{-1} \left(\frac{\tau}{\sigma_n} \right) = \delta \quad (5)$$

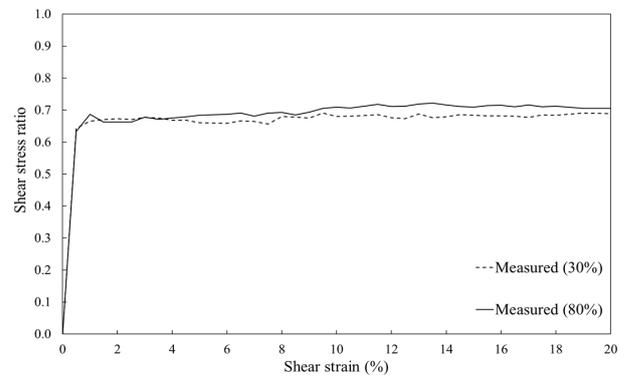
여기서, δ 는 마찰각이다.

3.3.1 사질토-사질토

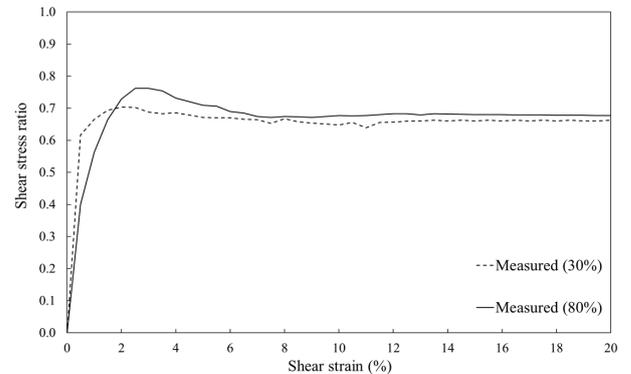
주문진표준사 시료 내의 전단거동을 확인하기 위해 수행한 시험 결과는 Fig. 3과 같다. 전단 초기에는 높은 상재압, 높은 상대밀도에서 더 높은 전단응력비가 확인되



(a) 100 kPa



(b) 200 kPa



(c) 300 kPa

Fig. 3. Test results of Jumunjin sand – Jumunjin sand case

었다. 전단이 진행되고 전단변형이 20%가 되면서 전단 응력비는 대체로 수렴하여 잔류전단응력을 기준으로 사 질토의 경우 0.67/0.64/0.68($D_r = 30\%$)와 0.68/0.71/0.66 ($D_r = 80\%$)로 확인되었다. 이는 변형률이 커짐에 따라 상대밀도, 상재압에 무관하게 전단응력이 수렴하는 기존 Lee(1965)의 시험결과와 일치하는 것을 확인할 수 있다.

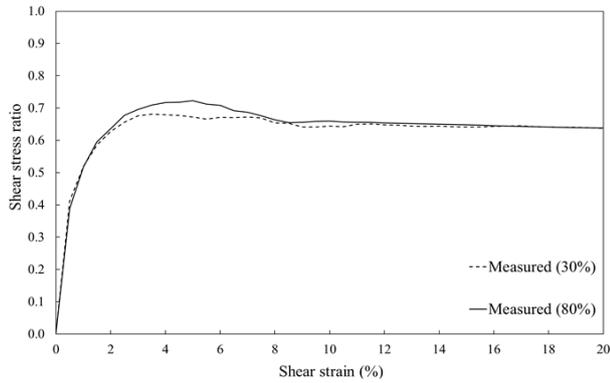
3.3.2 콘크리트-사질토

콘크리트와 사질토가 전단하는 경우의 발생하는 전 단응력비는 Fig. 4와 같다. 사질토와 콘크리트와 전단

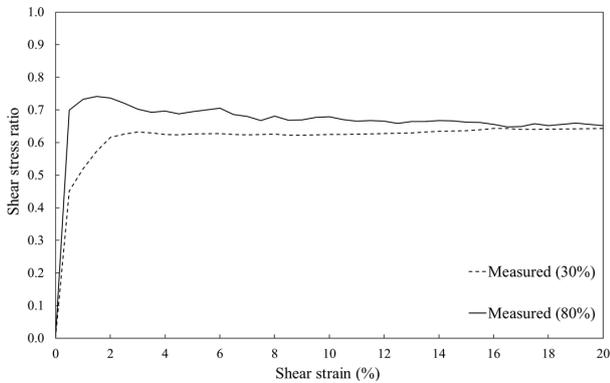
을 시키는 경우에도 전단 초기에는 높은 상대밀도에서 는 상대적으로 높은 전단응력비가 확인되었고 침투전 단응력이 발생하는 경우도 확인되었다. 전단응력비는 잔류전단응력을 기준으로 사질토와 전단시킨 경우 0.63/ 0.62/0.61($D_r = 30\%$)와 0.64/0.65/0.63($D_r = 80\%$)로 확인 되었다. 전체적인 거동은 사질토-사질토 경우와 비슷하며, 전단응력비는 평균적으로 약 5.4% 낮은 것으로 나타났다.

3.3.3 강-사질토

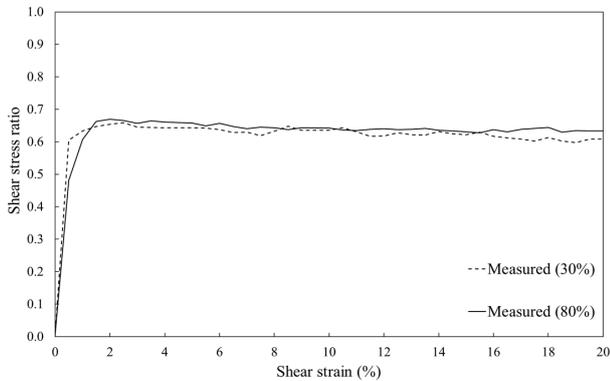
강과 사질토가 전단하는 경우의 발생하는 전단변형



(a) 100 kPa

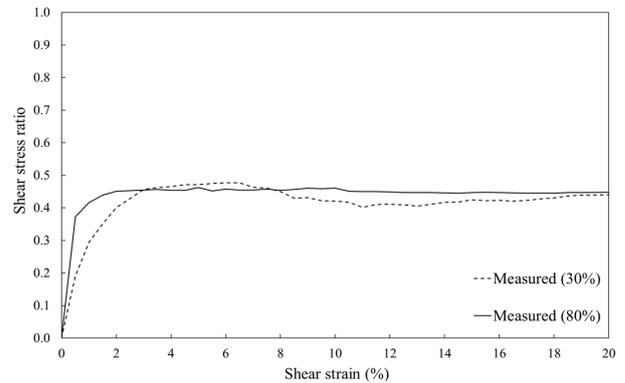


(b) 200 kPa

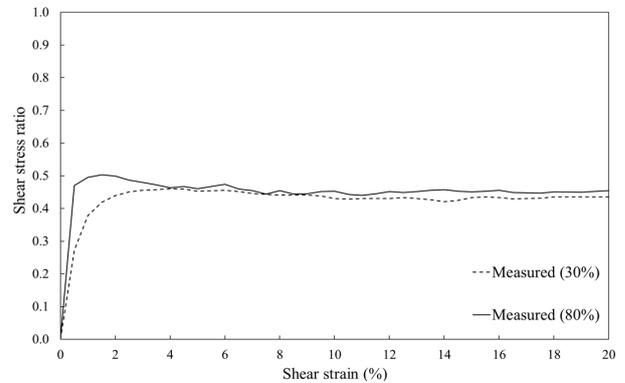


(c) 300 kPa

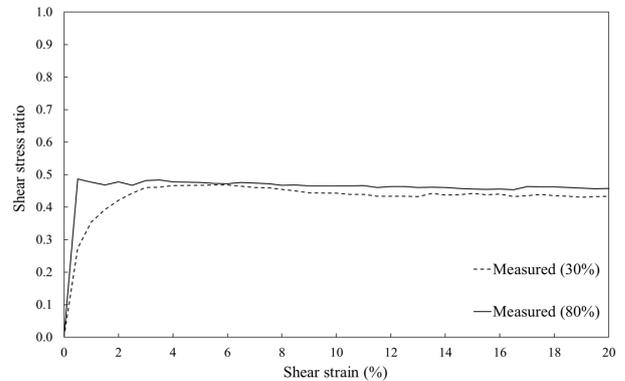
Fig. 4. Test results of concrete – Jumunjin sand case



(a) 100 kPa



(b) 200 kPa



(c) 300 kPa

Fig. 5. Test results of steel – Jumunjin sand case

과 전단응력비의 관계는 Fig. 5와 같다. 사질토와 강을 전단시키는 경우에는 첨두전단응력은 발생하지 않는 것으로 나타났고, 전단응력비는 잔류전단응력을 기준으로 사질토와 전단시킨 경우 0.44/0.44/0.43($D_r = 30\%$)와 0.45/0.45/0.46($D_r = 80\%$)로 확인되었다. 전단응력비는 사질토만을 전단시킨 경우와 비교하여 평균적으로 약 43% 낮고, 콘크리트와 사질토를 전단시킨 경우와 비교해도 평균적으로 약 40% 낮은 것으로 나타났다.

전체적인 시험 결과와 도출된 마찰각은 Table 4에 나타나있다. 산정된 마찰각은 전단응력비와 같은 경향으로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 산정 결과는 Tiwari 등(2010)이 직접전단시험을 통하여 도출된 결과와 비교를 통해 검증을 하였고, 검증 결과 Table 5에 나타난 바와 같이 높은 정확도로 일치하는 것으로 확인되었다.

4. 대변형 수치해석

링전단시험은 전단면을 따라 변형을 무한하게 줘서 대변형 전단거동을 볼 수 있다는 특징이 있다. 따라서, 3장에서 수행한 링전단시험 결과를 검증하기 위하여 3차원 대변형 수치해석을 수행하였다.

4.1 대변형 수치해석 모델링

대변형 수치해석을 위해서는 상용 유한요소 해석 프로그램인 ABAQUS CAE 2017(Dassault systems, 2017)이 사용되었다.

4.1.1 유한요소망과 경계조건

유한요소 프로그램을 통한 링전단시험 모델링은 Fig. 6

Table 4. Summary of test results

Relative density (%)	Test materials	Confining stress (kPa)	Peak shear stress (kPa)	Peak friction angle (kPa)	Residual shear stress (kPa)	Residual friction angle (°)
$D_r = 30$	Sand-Sand	100	70.75	35.3	67.25	33.9
		200	140.18	35.0	128.61	32.7
		300	210.89	35.1	203.14	34.1
	Concrete-Sand	100	68.68	34.5	63.21	32.3
		200	126.46	32.3	123.03	31.6
		300	197.75	33.4	182.43	31.3
	Steel-Sand	100	46.26	24.8	44.00	23.7
		200	93.28	24.9	87.01	23.5
		300	133.60	24.0	130.22	23.5
$D_r = 80\%$	Sand-Sand	100	75.42	37.0	68.31	34.3
		200	153.31	37.5	141.28	35.2
		300	222.51	36.6	198.62	33.5
	Concrete-Sand	100	72.31	35.9	63.77	32.5
		200	148.34	36.6	130.42	33.1
		300	200.77	33.8	189.90	32.3
	Steel-Sand	100	46.23	24.8	44.81	24.1
		200	100.67	26.7	89.31	24.0
		300	146.06	26.0	137.11	24.6

Table 5. Comparison of test results with related study

Relative density (%)	Test materials	Friction angle (°)	Friction angle between construction materials and soil / soil internal friction angle
Tiwari et al. (2010)	Sand-Sand	31.0	1.00
	Concrete-Sand	29.1	0.94
	Steel-Sand	24.4	0.79
This study	Sand-Sand	34.0	1.00
	Concrete-Sand	32.2	0.95
	Steel-Sand	23.9	0.70

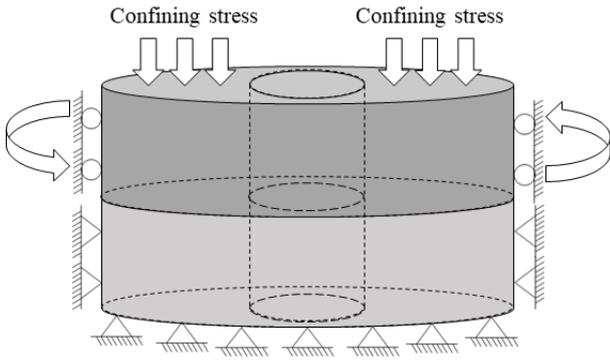


Fig. 6. Schematic of the ring shear test mold and boundary conditions

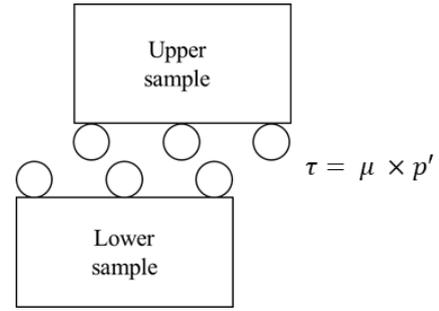
과 같다. 상부시료, 하부시료, 중간의 기둥을 별도로 모델링 한 후 결합(assembly)하여 링전단시험 설치 모습을 모사하였다. 하부시료는 모든 방향으로의 이동과 회전을 모두 구속하는 경계조건을 설정하였으며, 상부시료는 모든 방향으로의 이동은 구속하였지만 회전은 허용하는 경계조건으로 모델링하였다. 시료 중앙을 관통하는 기둥은 모든 방향으로의 이동과 회전을 모두 구속하였고, 변형이 전혀 일어나지 않는 강체로 설정하여 상부시료 회전 시 상·하부 시료의 전단면을 일정하게 유지하도록 하였다.

4.1.2 해석모델 및 물성치

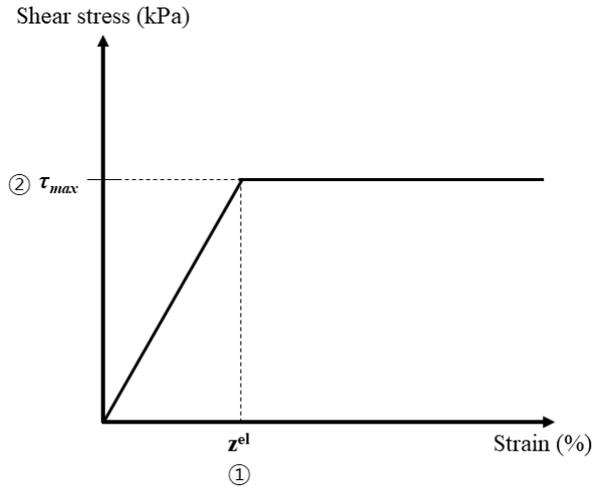
시험에 사용된 콘크리트와 강은 Linear-elastic 모델을 적용하였고, 사질토는 Mohr-Coulomb 모델을 적용하여 모델링하였다. 해석에 사용된 재료의 물성치는 Table 6에 명시되어 있다(Han et al., 2014; Kim et al., 2020).

4.1.3 인터페이스

링전단시험 모사 시 가장 중요한 부분이 인터페이스 모델링이라고 할 수 있다. 시험 결과를 가장 정확히 모



(a) Interface modeling between upper and lower sample



(b) Modeling of elasto-perfectly plastic interface model

Fig. 7. Interface modeling using elasto-perfectly plastic model

사하기 위하여 시료 간, 시료와 중간 기둥 사이의 인터페이스를 각각 다르게 모델링하였다.

링전단시험 결과에 따르면 시료 사이의 전단거동은 대체로 쌍곡선 형태 또는 이중곡선에 가까운 탄성-완전소성 거동을 보이는 것으로 확인되었다. ABAQUS에서 이러한 거동을 모사하기 위해 프로그램에 기본 인터페이스 설정 중 하나인 “PENALTY” 옵션을 이용하여 설정하였다. “PENALTY” 옵션은 Fig. 7에 나타난 바와 같

Table 6. Material properties used in FE analysis (Han et al., 2014; Kim et al., 2020)

Type	Model	E (MPa)		γ (kN/m ³)	ν	c (kPa)	ϕ_r (°)
Sand (D _r = 30%)	M.C*	100 kPa	64	14.4	0.35	0	25.69
		200 kPa	98				
		300 kPa	125				
Sand (D _r = 80%)	M.C*	100 kPa	39	15.7	0.35	0	26.84
		200 kPa	60				
		300 kPa	76				
Concrete	LE**	2,700		20	0.20	–	–
Steel	LE**	200,000		75	0.30	–	–

*M.C : Mohr–Coulomb model, **L.E : Linear elastic model

이 이중곡선 형태의 인터페이스 거동을 설정하기 위한 옵션으로, x축의 재료 사이의 상대 변형률(그림 상 ①)과 y축의 최대전단응력(그림 상 ②)을 설정하여 전단거동을 모사한다. 전단응력은 식 (6), (7), (8)을 통해 산정할 수 있다.

$$\tau_{\max} = \mu \times p' \quad (6)$$

$$\mu = \tan \delta \quad (7)$$

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \phi' \times \cos \phi'}{1 + \sin^2 \phi'} \right) \quad (8)$$

여기서, τ_{\max} 는 최대전단응력, μ 는 마찰계수, p' 는 상재압, 그리고 δ 는 시료 사이의 마찰각, ϕ' 는 주문진표준사와 시험 재료 사이의 마찰각이다(Randolph and Wroth, 1981; Jeong et al., 2004; Kim et al., 2020). 재료 사이의 상대 변형률은 시험결과를 기초로 2%로 설정하여 수치 해석을 수행하였다.

중간 기동과 상·하부 시료 사이의 인터페이스는 또 다른 ABAQUS의 기본 인터페이스 옵션 중 마찰력이 없다고 가정하는 “FRICTIONLESS”로 설정하여 상·하부 시료 사이의 전단거동에 영향을 주지 않도록 모델링하였다.

4.1.4 대변형 해석

링전단시험 시 시료 간 발생하는 변형이 최대 20%까지 발생하기 때문에 과도한 유한요소망(mesh)의 변형이 생길 수 있다. 유한요소망(mesh)의 과도한 변형은 부정확한 결과를 도출할 뿐 만 아니라, 해석 자체를 불가능

하게 할 수도 있기 때문에 대변형 해석 수행 시 이를 방지할 수 있도록 일정한 변형 후 유한요소망 내 모든 변형, 응력 등을 반영하여 새로운 유한요소망을 짜서 다음 해석을 수행하는 리메싱(Remeshing) 기법을 적용하였다. 실제로 본 해석을 대변형 해석 적용 없이 수행한 경우 전단변형률이 5%를 넘어서는 순간 유한요소망의 과도한 변형과 응력 집중으로 인한 오류가 발생함을 확인하였다. 기존 해석을 이용하여 발생한 유한요소망의 변형과 대변형 해석을 수행하여 유한요소망의 형태가 유지된 모습 비교는 Fig. 8에 나타내었다.

리메싱 기법은 Python 언어를 기반으로 작성한 일련의 과정을 ABAQUS 해석에 수행하는 것으로, 1) 1차로 1% 변형 해석을 수행한 후, 2) 1차 해석 결과 도출, 3) 1차 해석 결과를 반영한 새로운 유한요소망 구축, 4) 새로운 유한요소망에서 2% 해석 수행하고, 이러한 일련의 과정을 자동으로 반복하여 최종적으로 20%의 변형까지 해석을 수행하도록 한다(1, 2차만 0.5%씩 해석 수행). 해석 단계 별 변형률은 해석 소요 시간과 유한요소망의 변형이 결과에 영향을 미치지 않는 크기로 설정하였다. 사전 수치해석 결과, 단계 별 변형률이 3% 이상이 되는 경우 그 이하로 설정하여 해석을 수행한 결과와 다른 값이 도출되는 것으로 확인되었다. 각각의 리메싱 단계 완료 후, 다음 유한요소모형을 구축하기 위해 다음과 같은 명령어를 Python 프로그램을 이용하여 적용시킨다.

```

mdb.Model(name=newmodel, objectTo-
Copy=mdb.models[oldmodel])

```

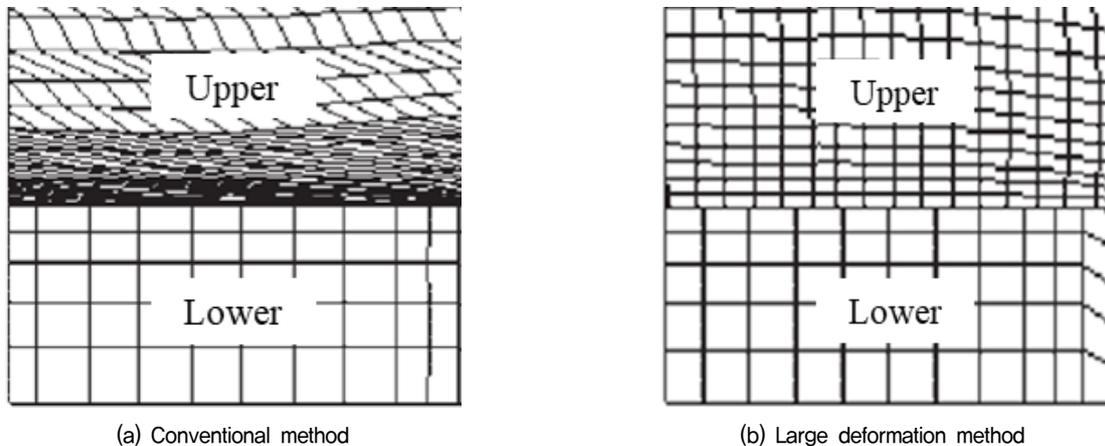


Fig. 8. Comparison of mesh distortion in conventional and large deformation analysis

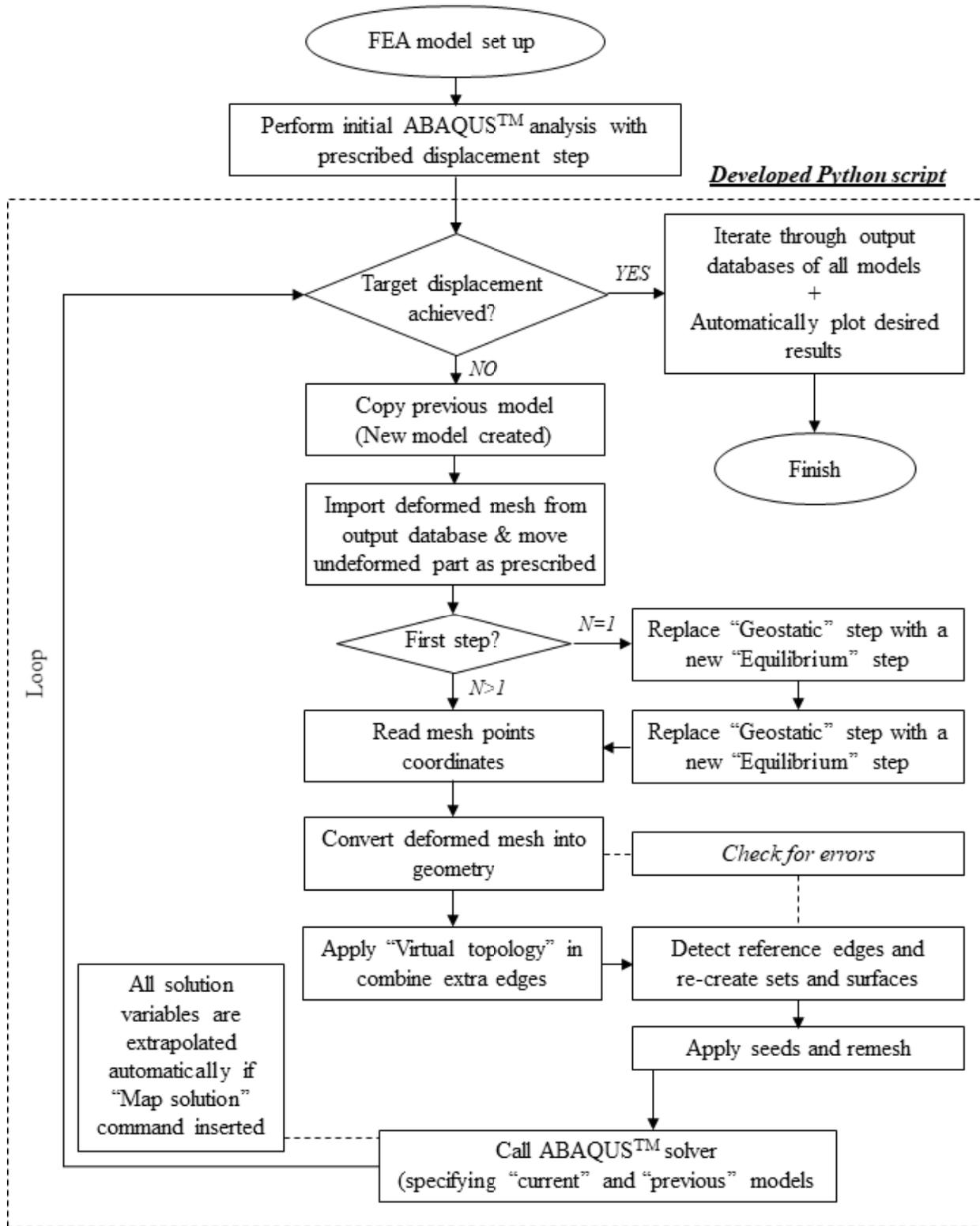


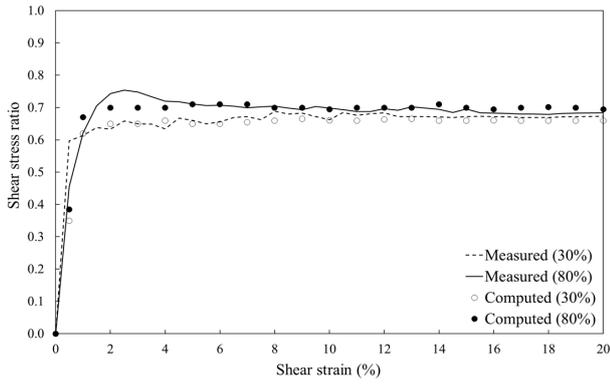
Fig. 9. Flow chart of the large deformation analysis using remeshing technique

Fig. 9는 리메싱 해석 과정을 순서도로 나타낸 것이다 (Orazalin and Whittle, 2018).

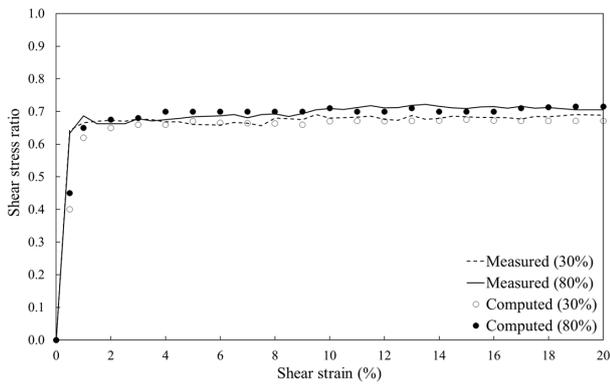
4.2 대변형 수치해석

4.2.1 사질토-사질토

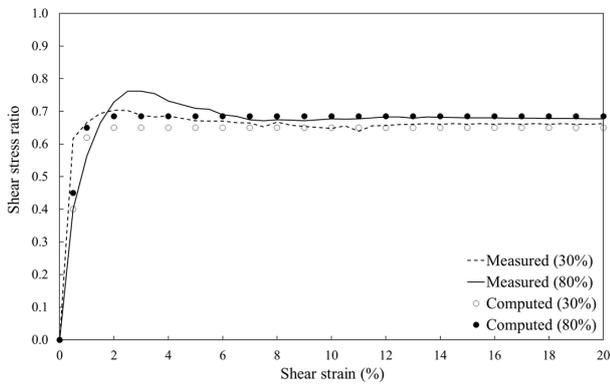
링전단시험을 통해 도출된 전단거동과 수치해석을 비



(a) 100 kPa



(b) 200 kPa



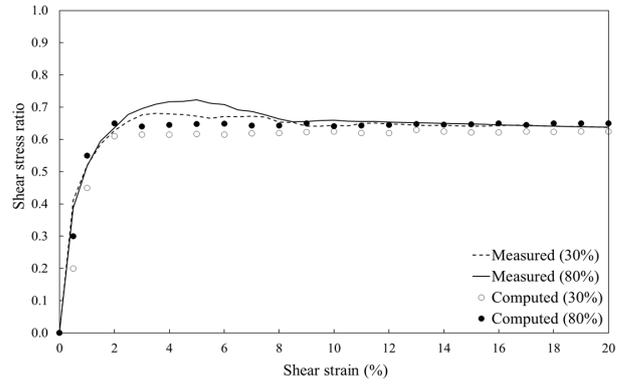
(c) 300 kPa

Fig. 10. Analysis results of Jumunjin sand–Jumunjin sand case

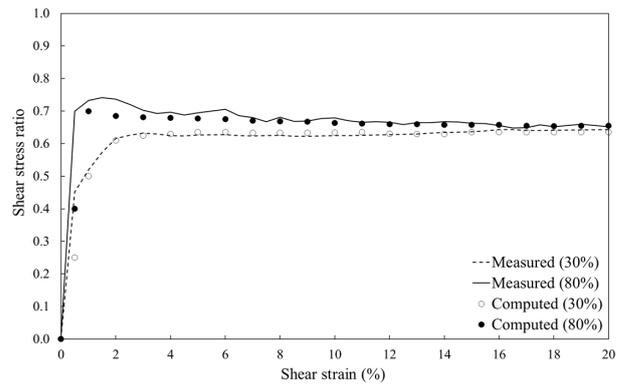
교한 결과 Fig. 10과 같이 상재압에 무관하게 높은 정확도로 비슷한 것으로 확인되었다. 수치해석으로 도출된 마찰각은 최종 전단응력비를 기준으로 33° - 36°로, 링전단시험으로 도출된 마찰각인 33°와 비슷한 것으로 확인할 수 있었다.

4.2.2 콘크리트-사질토

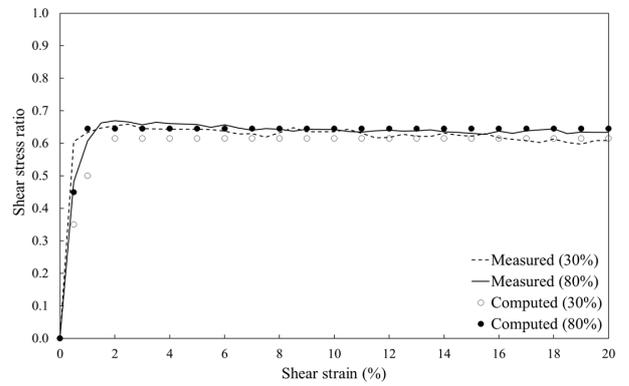
Fig. 11은 콘크리트-사질토 사이의 시험을 통해 도출된 전단거동과 해석을 통해 도출된 결과를 나타내었다.



(a) 100 kPa



(b) 200 kPa



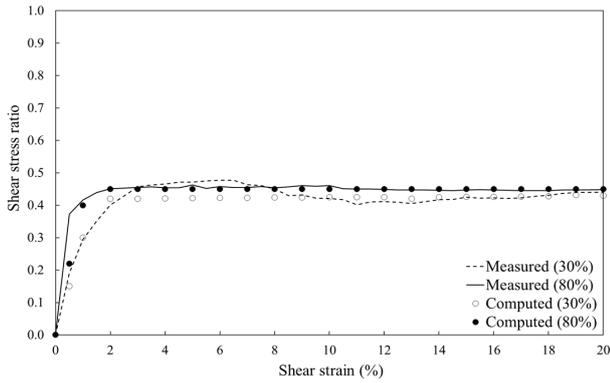
(c) 300 kPa

Fig. 11. Analysis results of concrete–Jumunjin sand case

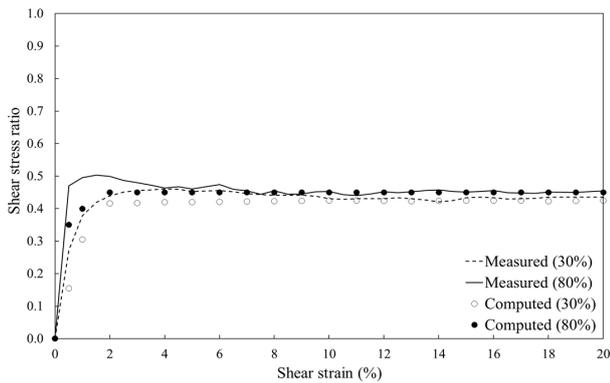
수치해석의 최종 전단응력비를 기초로 마찰각을 산정한 결과 마찰각은 31° - 33°로 나타났다. 이는 링전단시험 결과를 바탕으로 산정된 마찰각 31°와 일치하는 것으로 확인되었다.

4.2.3 강-사질토

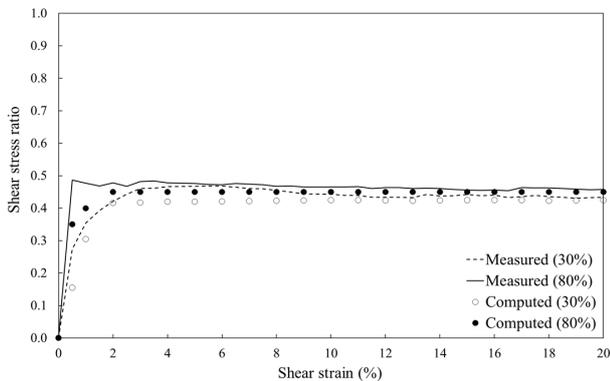
Fig. 12에 나타난 바와 같이 강-사질토 사이의 전단거동 또한 링전단시험과 수치해석 사이에 차이가 없는 것으로 확인되었다. 수치해석으로부터 산정된 강과 사질



(a) 100 kPa



(b) 200 kPa



(c) 300 kPa

Fig. 12. Analysis results of steel-Jumunjin sand case

토 사이의 마찰각은 최종 전단응력비를 적용하였을 시 23° - 25°의 범위 내에 있으며, 이는 링전단시험을 바탕으로 도출된 23°와 일치하였다.

5. 결론 및 요약

본 연구에서는 대변형 하에서 말뚝과 사질토 사이의 전단거동을 확인하기 위하여 무한한 변형을 가하면서 전단응력을 측정할 수 있는 링전단시험을 수행하였다.

링전단시험 결과를 토대로 다양한 상재압, 상대밀도 조건에서 말뚝재료와 사질토 사이의 전단거동 특성을 확인하고, 말뚝 주변마찰력 설계 시 적용할 수 있는 마찰각을 제안하고자 하였다. 다양한 시험적, 해석적 접근을 기존 이론과의 비교를 통하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- (1) 다양한 상재압과 상대밀도 조건을 적용하여 링전단 시험을 수행한 결과, 측정된 전단응력을 적용된 상재압으로 나눈 전단응력비는 상재압과 상대밀도에 상관없이 일정한 값으로 수렴하는 경향을 확인할 수 있었다.
- (2) 링전단시험으로 도출된 말뚝재료와 사질토 사이의 마찰각은, 표면 거칠기를 최적으로 조정하여 제작된 시편을 이용하였고, 현장에서 일반적으로 관찰 가능한 말뚝과 지반 사이의 기타 결합력(부착력 또는 점착력)을 배제하고 도출된, 현장에 적용할 수 있는 최저 마찰력을 기준으로 제안하였다. 산정 결과, 주문진표준사 사이의 마찰각은 약 32°, 콘크리트-주문진표준사 사이의 마찰각은 31°, 그리고 강-주문진표준사 사이의 마찰각은 25°로 확인되었다.
- (3) 제안된 마찰각 사이의 비율을 분석한 결과, 사질토-사질토 : 콘크리트-사질토 : 강-사질토의 비율은 1:0.95:0.70로, 기존 연구 결과인 1:0.94:0.79와 높은 정확도로 일치하는 것으로 검증되었다.
- (4) 리메싱(remeshing) 대변형 수치해석 기법을 적용하여 시험결과를 검증한 결과, 이론적으로 산정한 말뚝 재료-지반 사이의 마찰각을 적용한 해석을 통하여 도출된 최종 전단응력비 기준 주문진표준사와의 마찰각은 32° - 34°(주문진표준사), 31° - 33°(콘크리트), 24° - 25°(강)로 확인되었다. 이는 링전단시험으로 도출된 마찰각 32°(주문진표준사), 31°(콘크리트), 25°(강)과 일치하는 것으로 나타났다.
- (5) 본 연구는 리메싱을 통한 대변형 수치해석 기법을 정립하여 링전단시험과 같은 대변형 전단거동을 모사하고 예측할 수 있도록 하였다. 뿐만 아니라, 수행한 링전단시험을 통하여 도출되고 대변형 수치해석으로 검증된 말뚝 재료와 사질토 사이의 마찰각은 실제 기초 말뚝의 수치해석과 효율적인 설계에 간편하게 적용할 수 있도록 하였다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원을 통하여 지원된 건설기술연구사업 ‘케이블 교량 글로벌 경쟁력 강화를 위한 전주기 엔지니어링 가설공법 개발(20SCIP-B119947-05)’과 정부(교육부) 재원, 한국연구재단의 기초연구사업(2018R1A6A1A08025348, 2020R1A6A3A03039747)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

1. Barmopoulos, I. H., Ho, T. Y. K., Jardine, R. J., and Minh, A. N. (2009), “The Large Displacement Shear Characteristics of Granular Media Against Concrete and Steel Interfaces”, *Proceedings of the Research Symposium on Characterization and Behavior of Interfaces*, Atlanta, GA, pp.16-23.
2. Bishop, A., Green, G., Garga, V., Anderssen, A., and Brown, J. (1971), “A New Ring Shear Apparatus and its Application to the Measurement of Residual Strength”, *Geotechnique*, Vol.21, No.4, pp.273-328.
3. Bromhead, E. (1979), “A Simple Ring Shear Apparatus”, *Ground Engineering*, Vol.12, No.5, pp.40-44.
4. CUR (2001), Bearing capacity of steel pipe piles, Report 2001-8. Gouda, The Netherlands : Centre for Civil Engineering Research and Codes.
5. Dassault Systems (2017), “ABAQUS CAE 2017 Manual”.
6. Han, Y. C., Lim, H. S., and Jeong, S. S. (2014), “The Strength and Deformation Characteristics of Jumunjin Sand under Low Confining Stresses”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.30, No.2, pp.33-42.
7. Hvorslev, M. (1939), “Torsion Ring Shear Tests and Their Place in the Determination of the Shearing Resistance of Soils”, *Proceedings, ASTM Symposium of Shear Testing of Soils*, Vol.39, pp.999-1022.
8. Ho, T., Jardine, R., and Anh-Minh, N. (2011), “Large-deformation Interface between Steel and Granular Media”, *Geotechnique*, Vol.61, No.3, pp.221-234.
9. Jeong, S., Ahn, S., and Seol, H. (2010), “Shear Load Transfer Characteristics of Drilled Shafts in Rocks”, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol.43, No.1, pp.41-54.
10. Jeong, S., Lee, J., and Lee, C. (2004), “Slip Effect of the Pile-soil Interface on Dragload”, *Computers and Geotechnics*, Vol.31, pp. 115-126.
11. Jung, G. J., Kim, D. H., Lee, C. J., and Jeong, S. S. (2017), “Analysis of Skin Friction behavior in Prebored and Precast Pile based on Field Loading Test”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.33, No.1, pp.31-38.
12. Kim, D. H. (2018), “Proposed Shaft Resistance of Prebored Precast Pile Using Field Loading Test”, Doctoral dissertation, Yonsei University, Seoul, Korea.
13. Kim, D. H., Park, J. J., Chang, Y. C., and Jeong, S. S. (2018), “Proposed Shear Load-transfer Curves for Prebored and Precast Piles”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.34, No.12, pp.43-58.
14. Kim, D., Jeong, S., and Park, J. (2020), “Analysis on Shaft Resistance of the Steel Pipe Prebored and Precast Piles based on Field Load-transfer Curves and Finite Element Method”, *Soils and Foundations*, Vol.60, pp.478-495.
15. Korea Expressway Cooperation Research Institute (1997), Evaluation of bearing capacity of rock socketed piers (III)”, Research report.
16. Lee, K. L. (1965), “Triaxial compressive strength of saturated sand under seismic loading conditions”, Ph.D. thesis, University of California, Berkeley, CA.
17. Lings, M. and Dietz, M. (2005), “The Peak Strength of Sand-steel Interfaces and the Role of Dilatation”, *Soils and foundations*, Vol. 45, No.6, pp.1-14.
18. Orzalin, Z. and Whittle, A. (2018), “Realistic numerical simulations of cone penetration with advanced soil models”, Cone Penetration Testing 2018, Delft University of Technology, The Netherlands, pp.483-489.
19. Park, Y., Park, S., and Kim, N. (2008), “Drilled Shafts Design Method Designed by the Limit State Design Method”, Yooshin Technical Report, Vol.13, pp.129-143.
20. Randolph, M. and Worth, C. (1981), “Application of the Failure State in Undrained Simple Shear to the Shaft Capacity of Driven Piles”, *Geotechnique*, Vol.31, No.1, pp.143-157.
21. Reddy, E., Chapman, D., and Sastry, V. (2000), “Direct Shear Interface Test for Shaft Capacity of Piles in Sand”, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.23, No.2, pp.199-205.
22. 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.
23. Seol, H., Jeong, S., and Cho, S. (2009), “Analytical Method for Load-transfer Characteristics of Rock-socketed Drilled Shafts”, *ASCE’s Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.135, No.6, pp.778-789.
24. Tika-Vassilikos, T. (1991), “Clay-on-Steel Ring Shear Tests and Their Implications for Displacement Piles”, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.14, No.4, pp.457-463.
25. Timothy, D. and Vettel, J. (1992), “Bromhead Ring Shear Test Procedure”, *Geotechnical Testing Journal*, Vol.15, No.1, pp.24-32.
26. Tiwari, B., Ajmera, B., and Kaya, G. (2010), “Shear Strength Reduction at Soil Structure Interface”, *GeoFlorida 2010 Advances in Analysis, Modeling and Design*, pp.1747-1756.
27. Uesugi, M., Kishida, H., and Uchikawa, Y. (1990), “Friction between Dry Sand and Concrete under Monotonic and Repeated Loading”, *Soils and Foundations*, Vol.30, No.1, pp.115-128.
28. Willie Geotechnik (2015), “Dynamic Ring shear testing Device”.

Received : November 20th, 2020

Revised : April 6th, 2021

Accepted : April 6th, 2021