

지반조건에 따른 말뚝의 인발저항 평가를 위한 말뚝-지반 경계면 강도감소계수 고찰

A Study on Strength Reduction Factor of Pile-soil Interface for Evaluation of Pile Pullout Resistance by Soil Condition

유승경¹, 신희수², 이광우³, 박정준⁴, 최충락⁵, 홍기권^{6*}

Seung-Kyong You¹, Heesoo Shin², Kwang-Wu Lee³, Jeong-Jun Park⁴, Choong-Lak Choi⁵, Gigwon Hong^{6*}

¹Member, Professor, Dept. of Civil Engineering, Myongji College, 134 Gajwa-ro, Seodaemun-gu, Seoul 03656, Republic of Korea

²Member, Director, Institute of Technology Research and Development, UCI Tech co. Ltd., 313 Inha-ro, Michuhol-gu, Incheon 22227, Republic of Korea

³Member, Senior researcher, Infra safety Institute, Korea Institute of Civil engineering and building Technology, 283 Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Republic of Korea

⁴Member, Principal Researcher, Incheon Disaster Prevention Research Center, Incheon National University, 119 Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 22012, Republic of Korea

⁵Member, Managing Director, Geotechnical Engineering Department, Pyunghwa Engineering Consultants, Pyunghwa Bldg, 454 Gwanak-daero, Dongan-gu, Anyang-si, Gyeonggi-do 13949, Republic of Korea

⁶Member, Director, Institute of Technology Research and Development, Korea Engineering & Construction, 150 Jojeong-daero, Hanam-si, Gyeonggi-do 12930, Republic of Korea

ABSTRACT

This paper describes the results of finite element analysis (FEA), in order to investigate a characteristics of pile pullout behavior according to the conditions of the relative density and fines content in original ground. In the FEA, a boundary elements and strength reduction factors (R_{inter}) on pile-soil interface were applied to simulate appropriately the shear behavior at the pile-soil interface, and then the reliability of numerical analysis method was verified by comparison of FEA results and previous experimental research(You et al., 2018). In addition, a the deformation characteristics at the pile-soil interface and determination method of R_{inter} value was laid out. The results showed that the FEA, based on the analytical model applied in this study simulates appropriately the characteristics of the pile-soil interface by pullout model test of pile. In order to apply the suggested R_{inter} value, it is necessary to consider the condition of the relative density and the fines content in ground.

요 지

본 연구에서는 원지반의 상대밀도와 세립분 함유율의 조건에 따른 말뚝의 인발거동 특성 규명을 위하여, 유한요소해석을 수행하였다. 수치해석에서는 말뚝과 지반 경계에서의 전단거동을 원활히 모사하기 위해서 경계요소와 경계면 강도감소계수 (R_{inter})를 부여하였으며, 그 결과를 기존의 실험적 연구결과(You et al., 2018)와 비교함으로써 본 수치해석 방법의 신뢰성을 검증하였고, 말뚝-지반 경계면에서의 변형 특성과 함께 경계요소에 대한 R_{inter} 값의 결정방법을 제시하였다. 해석 결과, 본 연구에서 적용된 해석모델을 이용한 수치해석은 말뚝의 인발모형실험에 의한 말뚝과 지반의 경계면 특성을 적절하게 모사하였다. 또한 제시된 R_{inter} 의 적용에 있어서, 반드시 지반의 상대밀도와 세립분 함유율 조건을 고려해야 할 필요가 있음을 확인하였다.

Keywords : Pile pullout resistance, Finite element analysis (FEA), Pile-soil interface, Strength reduction factor, Skin friction

Received 7 Jun. 2019, Revised 19 Jun. 2019, Accepted 22 Jun. 2019

*Corresponding author

Tel: +82-31-699-0604; Fax: +82-31-790-3090

E-mail address: gigwon_hong@kecgroup.kr (G. Hong)

1. 서론

대형화되고 있는 토목건축 구조물의 안정성 확보를 위하여 상부 하중을 하부 지지층까지 효과적으로 전달하기 위해서는 말뚝기초의 적용이 불가피하다. 일반적으로 말뚝기초는 구성재료의 특성에 따라 강관말뚝, PHC말뚝, 현장타설말뚝 및 복합말뚝 등으로 구분되며, 구조물을 지지하는 메커니즘에 따라 선단지지, 마찰지지 및 복합지지 등의 형태로 나눌 수 있다. 이와 같은 말뚝기초는 대부분 상부 구조물로부터 지지층에 전달되는 압축하중에 저항하도록 설계되어 왔다. 그러나 최근에는 부상방지용 기초, 전신탕 기초, 풍력발전 구조물 및 해양플랫폼 기초, 초고층 구조물 기초 등과 같이 부력, 풍력, 파력 및 지진력 등에 의한 인발하중에도 저항해야 하는 추가적인 성능이 요구되는 말뚝기초의 시공사례가 증가하고 있다. 따라서 기존의 압축하중만을 고려한 설계로는 상부 구조물의 안전성을 확보하기 어렵다(Cho and Kim, 2010). 따라서, 상기와 같이 인발하중이 작용하게 되는 말뚝기초의 경우, 말뚝의 인발거동 및 인발저항 성능을 예측하는 것은 매우 중요한 설계요소이며, 특히 말뚝 주면과 지반 경계면의 마찰특성으로 발휘되는 인발저항력에 대한 평가는 구조물의 안정성 확보를 위한 중요한 설계인자라 할 수 있다(Lim and Seo, 2002; You et al., 2018).

인발하중 발생이 예상되는 상부구조물의 안정성을 보다 명확하게 평가하기 위해서 말뚝의 인발저항 평가에 관한 다양한 실험 및 수치해석적 연구가 다수의 연구자들에 의해 수행되고 있다. 먼저, 말뚝과 지반 경계면에서의 마찰특성에 대한 실험적 연구와 관련하여, Lim and Seo (2002)는 인장하중의 작용점을 말뚝의 선단과 두부로 달리 할 경우, 지반에 작용되는 인장하중 전달 메커니즘의 차이에 의해 말뚝의 극한 인발저항력이 다르게 나타남을 실험적으로 평가하였다. Hong et al.(2005)은 현장타설말뚝에 대한 동재하실험과 정재하실험을 실시하여 주면마찰력과 선단지력력이 각 실험방법에 따라 상이하게 평가됨을 확인하였다. Lim et al.(2002)은 토사의 단위중량이 매입 말뚝의 주면마찰력에 미치는 영향을 조사하였으며, Hong et al.(2008)은 매입말뚝의 주면마찰력에 영향을 주는 인자로서 원지반의 N-value, 지반의 종류 및 충전재의 물/시멘트비의 영향을 평가한 바 있다. 그리고 Yoon et al.(2013)은 토사층에 대한 표준관입시험 결과값(N-value)을 이용하는 기존의 제안식으로 말뚝의 단위주면마찰력을 산정하

여 분석한 결과, 재하실험에서 실측된 값에 비하여 과소하게 평가됨을 제시하였다. 한편, 말뚝의 인발저항에 관한 수치해석적 연구 사례로써, Lee and Kim(2006a, 2006b)은 암반에 근입된 현장타설말뚝의 거동에 대한 수치해석을 수행하여, 근입부의 거칠기 특성과 근입부 주변 암반의 강도와 변형 특성, 근입깊이 등이 최대단위주면저항력에 미치는 영향을 평가하였으며, 국내 풍화암 및 연암에 근입되는 현장타설말뚝의 설계차트를 제시하고 이를 검증한 바 있다. Cho and Kim(2010)은 3차원 유한요소해석과 이론식, 현장시험을 통한 말뚝의 극한인발력을 각각 산정하여 비교한 결과, 현장시험의 극한인발력을 기준으로 수치해석 결과는 과소평가되는 반면, 이론식에 의한 결과는 과대평가되는 것으로 분석하였다. 또한 Lee(2013)는 사질토 지반에 설치된 현장타설말뚝의 직경에 따른 주면마찰 특성 평가를 위한 수치해석을 실시하여, 말뚝 직경이 감소함에 따라 극한주면마찰력이 증가하는 효과는 사질토지반의 상대밀도가 증가하고 구속압이 감소할수록 커지는 것으로 분석한 바 있다.

국외의 대표적인 말뚝 인발저항 평가에 관한 연구사례를 살펴보면, Meyerhof(1959, 1976) 및 Meyerhof and Adams(1968)는 말뚝과 지반의 경계면에서 발생하는 주면마찰 성분을 고려한 인발저항력 산정식을 제안한 바 있으며, Das and Seeley(1975)는 모형실험 결과분석을 통하여 Meyerhof 이론에 한계깊이 개념을 추가한 인발저항 산정식을 제시하였다. 또한, Reese and O'Neill(1988)은 인발하중을 받는 현장타설말뚝에 대한 기존의 다양한 연구결과를 총합 분석하여 인발저항 평가에 지반조건과 말뚝표면 형상 등을 고려해야 한다고 제안하였다. 한편, O'Neill and Reese(1999)은 현장타설말뚝의 인발저항 특성을 포함하여 말뚝의 안정성 평가 및 설계 등에 대한 매뉴얼(FHWA)을 보고한 바 있다.

이와 같이 국내외에서 말뚝기초의 인발저항 평가와 관련한 많은 연구가 수행되어 그 영향인자들에 대한 다양한 고찰이 이루어져 왔지만, 보다 합리적인 설계법 확립을 위해서는 말뚝과 지반 경계에서의 전단거동에 기인하는 마찰저항 특성을 다양한 지반조건에 대해서 보다 엄밀히 고찰할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 원지반의 상대밀도와 세립분 함유율의 조건에 따른 말뚝의 인발거동 특성 규명의 일환으로써 일련의 유한요소 수치해석을 수행하였다. 수치해석에서는 말뚝과 지반 경계에서의 전단거동을 원활히 모사하기 위해서 경계요소와 경계면 강도감소계수

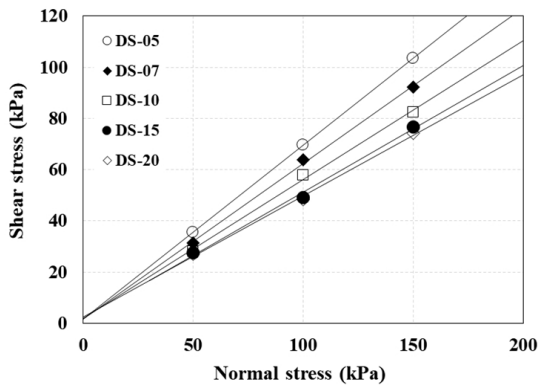
(R_{inter})를 부여하였으며, 그 결과를 말뚝의 인발거동에 대한 기존의 실험적 연구결과(You et al., 2018)와 비교함으로써 본 수치해석 방법의 신뢰성을 검증하였다. 또한, 수치해석 결과를 분석하여 원지반의 상대밀도와 세립분 함유율의 차이에 따른 말뚝-지반 경계면에서의 변형 특성과 함께 경계요소에 대한 R_{inter} 값의 결정방법을 제시하였다.

2. 말뚝의 인발저항 성능평가를 위한 선행연구 고찰

본 연구에서 수행하고자 하는 수치해석의 대상이 되는 지반의 상대밀도와 세립분 함유율에 따른 말뚝 인발모형 실험에 대한 기존 연구결과를 요약설명하였으며, 자세한 실험방법 및 내용은 기존 연구(You et al., 2018)를 통해 참조할 수 있다.

2.1 직접전단시험

전술한 바와 같이, 말뚝의 인발저항은 말뚝과 지반 경계면에서 마찰저항 특성에 따른 영향을 받기 때문에, 지반의 상대밀도와 세립분 함유율 조건에 따른 전단강도를 평가하였으며, 결과를 인용하면 Fig. 1 및 Table 1과 같다.



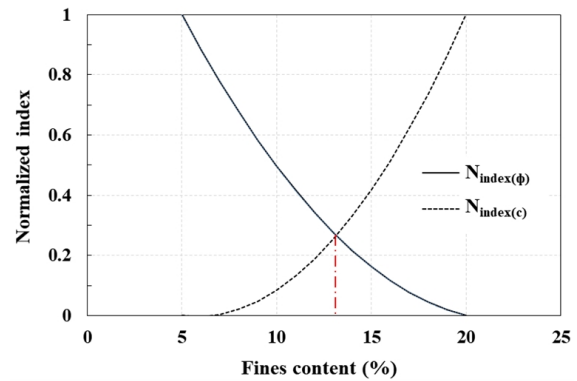
(a) Shear strength curve

실험결과, 세립분 함유율이 증가할수록 내부마찰각이 감소하였으며, 점착력은 증가하는 것으로 나타났다. 이를 바탕으로 내부마찰각과 점착력의 최대값, 최소값 및 각 세립분 함유율에 해당하는 값을 정규화한 결과, 특정 세립분 함유율 조건에서 정규화 곡선이 교차하는 것을 확인한 바 있다.

2.2 말뚝 인발모형실험

You et al.(2018)은 말뚝의 주면마찰에 의한 인발저항 성능 평가를 위하여 상대밀도와 세립분 함유율에 따른 모형지반을 조성하여 모형말뚝에 대한 인발실험을 수행하였다. 이 때, 상대밀도는 40%, 60%, 80%, 세립분 함유율 조건은 5%, 7%, 10%, 15%, 20%로 적용하였다. 인발모형실험을 위한 모형말뚝은 지반 내에서 일정한 마찰저항을 발현시키기 위하여 강봉으로 제작된 모형말뚝에 사포(sandpaper, #40)를 균일하게 부착하였으며, 토조 내 모형지반은 표준사와 세립토(#200 통과율 = 100%)의 중량비를 이용하여 세립분 함유율을 고려하여 조성하였다.

실험을 통해 상대밀도에 따른 세립분 함유율과 인발저항 관계를 분석한 결과, 상대밀도와 세립분 함유율과 관계 없이 최대 인발저항력이 발현된 이후에는 인발저항력이



(b) Regression analysis of internal friction angle and cohesion by fines content

Fig. 1. Results of direct shear test by fines content (You et al., 2018)

Table 1. Summary of strength parameters by direct shear test (You et al., 2018)

Classification	Test cases				
	DS-05	DS-07	DS-10	DS-15	DS-20
Fines content (%)	5	7	10	15	20
Internal friction angle, ϕ (°)	34,2	31,3	28,5	26,3	25,3
Cohesion, c (kPa)	1,58	1,69	1,78	1,89	2,51

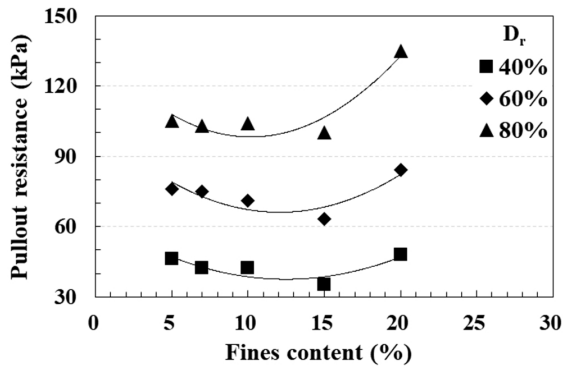


Fig. 2. Pullout test results by fines content and relative density of soils (You et al., 2018)

감소하면서 일정한 잔류강도가 유지되었으며, 세립분 함유율이 증가할수록 최대 인발저항력은 다소 감소하다가 특정한 세립분 함유율 조건에서 크게 증가하였다. 따라서 2.1절에서 언급한 세립분 함유율에 따른 강도정수 관계와 상대밀도 및 세립분 함유율에 따른 인발저항 관계로부터, 말뚝의 인발저항 성능에 요구되는 강도정수에 대한 영향 인자가 다르게 나타나는 것으로 평가하였다. 즉, 말뚝의 인발저항 성능에 영향을 미치는 마찰저항 효과는 지반의 세립분 함유율에 따라 기여하는 전단강도 인자의 기여도가 다르게 나타남을 알 수 있었다(You et al., 2018).

3. 말뚝의 인발저항력 평가를 위한 수치해석

3.1 수치해석 개요

본 연구에서는 다양한 지반조건에 따른 말뚝의 인발거동 특성을 규명하기 위하여, 범용 수치해석 프로그램인 PLAXIS 2D를 활용하여 말뚝과 지반 경계에서의 전단거동을 원활히 모사할 수 있는 일련의 유한요소해석을 수행하였다. 우선, 앞서 언급한 실험적 연구결과(You et al., 2018)를 활용하여 본 연구에서 수행하는 해석방법의 신뢰성을 검증하였으며, 해석 결과로부터 말뚝과 지반 경계면에서의 경계요소 변수에 따른 변형 및 마찰특성을 분석하였다.

일반적으로 본 수치해석 프로그램을 이용한 말뚝의 인발거동 평가는 평면변형률 해석과 축대칭 해석의 방법으로 가능하다. 이때, 평면변형률 해석에서는 탄성재료인 Embedded beam 모델로도 말뚝을 모사할 수 있으며, 해석 결과를 통해 말뚝에서 발생하는 축력 및 주면마찰력의 확인이 용이하지만, 말뚝 본체에 발생한 응력분포를 명확하

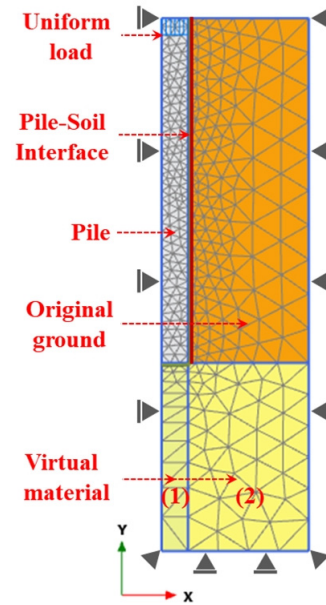


Fig. 3. FEA model in applied axisymmetric analysis

게 확인하기는 어렵다. 또한, 지반조건 차이에 따른 말뚝과 지반 경계면에서의 마찰특성을 모사하기에 한계가 있으므로 말뚝의 인발저항 특성을 엄밀히 규명하는 것은 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 말뚝 본체와 다양한 지반조건에 따른 말뚝-지반 경계면에서의 응력상태를 모사할 수 있도록 축대칭 모델과 더불어 말뚝과 지반의 경계에 경계요소를 부여하여 해석지반을 모델링하였으며, 해석결과로부터 원지반의 상대밀도 및 세립분 함유율과 경계요소의 강도감소계수(R_{inter})값과의 상관관계를 분석하였다.

3.2 해석방법 및 내용

Fig. 3은 본 연구에서 사용한 축대칭 유한요소 수치해석 모델을 나타내고 있다. 말뚝 본체는 선형탄성체로 구성하였으며, 말뚝과 지반 하부에는 말뚝의 인발 거동에 미치는 말뚝 하부 요소의 인발저항을 최소화하기 위해서 변형성이 매우 큰 가상의 탄성재료로 모델링하였다. 이때, 본 해석에 대한 가상재료 적용의 타당성은 선행연구(You et al., 2019)를 통하여 검증한 바 있다. 한편, 말뚝 주위의 지반재료에 대한 역학모델은 흙의 다일러턴시 효과를 포함한 탄소성 거동을 엄밀하게 재현할 수 있도록, 비선형탄성모델을 탄소성 이론으로 확장한 Hardening soil(HS) 모델(Schanz et al., 1999)을 적용하였다. 이는 선행연구(Hong et al., 2019)를 통하여 본 연구 범위에 대한 Mohr-Coulomb 모델과 HS 모델을 이용한 유한요소해석 결과를 비교함으

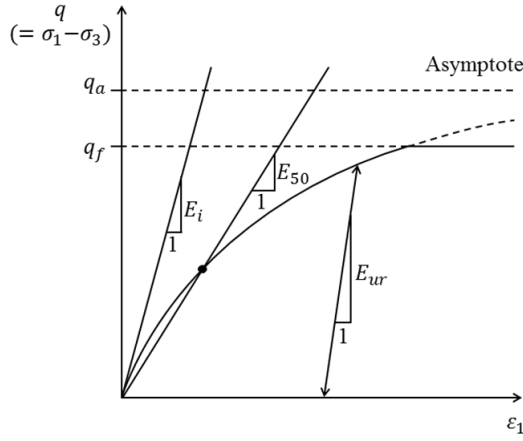


Fig. 4. Relationship of stress-strain in hardening soil model (Schanz et al., 1999)

로써, HS 모델의 적용성을 검토한 결과를 반영한 것이다.

HS 모델에서 축변형률(ϵ_1)과 축차응력(q)의 관계를 나타내면 식 (1)과 같이 표현되며, q_a 는 수렴 축차응력을 의미한다.

$$\epsilon_1 = \frac{q_a}{2E_{50}} \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{q_a - (\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (1)$$

식 (1)을 응력-변형률 관계로 나타내면 Fig. 4와 같으며, 이때, 하중 증가(loading)에 따른 E_{50} 과 재하중(reloading) 또는 제하중(unloading)에 대한 E_{ur} 은 각각 식 (2) 및 식 (3)과 같다.

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{\sigma_3 + c \cot \phi_p}{\sigma^{ref} + c \cot \phi_p} \right)^m \quad (2)$$

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{\sigma_3 + c \cot \phi_p}{\sigma^{ref} + c \cot \phi_p} \right)^m \quad (3)$$

여기서, E_{50}^{ref} 는 하중 증가 시 기준 구속압 σ^{ref} 에 대응하는 기준 탄성계수, m 은 구속압에 대한 계수로서 일반적으로 0.5 적용한다. 그리고 E_{ur}^{ref} 는 재하 또는 제하 시 기준 구속압 σ^{ref} 에 대응하는 기준 탄성계수로서, 일반적으로 $E_{ur}^{ref} \approx 3E_{50}^{ref}$ 값을 적용하기 때문에, 본 연구에서도 동일한 기준을 적용하였다. 또한 본 모델에서는 삼축응력 상태에서 식 (4) 및 식 (5)와 같은 두 가지의 항복함수를 정의하고 있다.

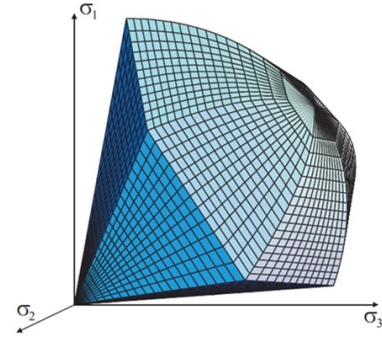


Fig. 5. Total yield contour of principal stress space in Hardening soil model (Benz, 2007)

$$f_{12} = \frac{q_a}{E_{50}} \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{q_a - (\sigma_1 - \sigma_2)} - \frac{2(\sigma_1 - \sigma_2)}{E_{ur}} - \gamma^p \quad (4)$$

$$f_{13} = \frac{q_a}{E_{50}} \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{q_a - (\sigma_1 - \sigma_3)} - \frac{2(\sigma_1 - \sigma_3)}{E_{ur}} - \gamma^p \quad (5)$$

여기서, γ^p 는 소성전단변형률을 나타내며 다음의 식 (6)으로 정의된다.

$$\gamma^p = \epsilon_1^p - \epsilon_2^p - \epsilon_3^p \quad (6)$$

그리고 소성변형률증분은 식 (7)과 식 (8)에 나타난 소성포텐셜함수와 흐름법칙에 의해 결정된다.

$$g_{12} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{2} - \frac{(\sigma_1 + \sigma_2)}{2} \cdot \sin \psi_m \quad (7)$$

$$g_{13} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} - \frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2} \cdot \sin \psi_m \quad (8)$$

여기서, ψ_m 은 다일러턴시 각이다.

한편, 본 모델은 항복 Cap을 적용하고 있는데, 그 항복 곡면은 Fig. 5와 같은 형태이고 식(6)과 같이 표현된다.

$$f = \frac{q^2}{\alpha^2} + p^2 - p_p^2 \quad (6)$$

여기서, p_p 는 선행압밀하중이다.

본 연구에서 수행한 유한요소해석에 적용된 각각의 재료정수는 Table 2와 같다. 이와 같은 재료정수는 말뚝 인발모형실험에 대한 유한요소해석의 적용성을 평가하기 위

Table 2. Parameters in applied FEA (You et al., 2019)

Classification				Parameters						
				E_{50} (kPa)	E_{ur} (kPa)	R_{inter}	Internal friction angle, ϕ (°)	Cohesion, c (kPa)	Unit weight (kN/m ³)	E (kPa)
Soil	Fines content (%)	5	Dr = 40%	1500	4500	0.58	34,2	1,58	14,98	-
			Dr = 60%	1500	4500	0.81				
			Dr = 80%	7000	21000	0.90				
		7	Dr = 40%	320	960	0.55	31,3	1,69	15,20	-
			Dr = 60%	1500	4500	0.80				
			Dr = 80%	7000	21000	0.99				
		10	Dr = 40%	175	525	0.58	28,5	1,78	15,41	-
			Dr = 60%	1300	3900	0.80				
			Dr = 80%	8000	24000	0.99				
	15	Dr = 40%	170	510	0.45	26,3	1,89	16,02	-	
		Dr = 60%	800	2400	0.74					
		Dr = 80%	10000	30000	0.99					
	20	Dr = 40%	160	480	0.53	25,3	2,51	16,45	-	
		Dr = 60%	1200	3600	0.82					
		Dr = 80%	9000	27000	0.98					
Virtual material (1)				-	-	-	-	-	-	0,05
Virtual material (2)				-	-	-	-	-	-	100
Pile				-	-	-	-	-	-	25×10 ⁶

한 선행연구(You et al., 2019)에서 적용된 값을 인용한 것이다. 이 때, 말뚝-지반의 경계면 특성에 영향을 미치는 변수는 E_{50} , E_{ur} 및 R_{inter} 이며, 본 연구에서는 각각의 변수와 상관관계를 고찰하였다.

4. 수치해석 결과 및 고찰

4.1 최대 인발저항력 비교

말뚝의 인발거동 모사를 위한 유한요소해석 결과를 기존의 실험결과와 비교하였으며, Fig. 6 및 Table 3과 같이 상대밀도와 세립분 함유율에 따라 나타내었다. 이때, 수치해석결과의 최대 인발저항력은 인발모형실험을 통해 확인된 최대 인발저항력에 상응하는 변형률을 동일하게 적용하였을 때의 인발저항력으로 결정하였다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이, 말뚝의 인발 거동에 대한 유한요소해석 결과를 기존의 인발모형실험과 비교한 결과, 모든 원지반의 상대밀도 및 세립분 함유율 조건에 대해서 말뚝과 지반의 변형 거동과 최대 인발저항력은 유사한 것으로 확인되었다. 즉, 동일한 상대밀도 조건에서 최

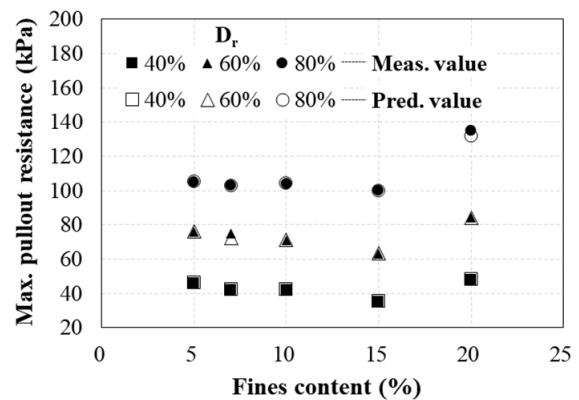


Fig. 6. Comparison of prediction and measurement value

대 인발저항력의 크기는 세립분의 함유율이 증가할수록 유사하거나 다소 감소하는 경향을 보였지만, 세립분 함유율 20% 조건에서는 최대 인발저항력이 증가하였다. 특히, 상대밀도가 증가할수록 세립분 함유율 20% 조건에서의 최대 인발저항력 증가율은 더욱 크게 나타났다. 이를 통해, 본 연구에서 제시한 유한요소해석 모델은 말뚝의 인발 거동을 적절하게 모사하는 것으로 판단되었다.

한편, Table 3에 나타난 바와 같이, 실험 및 해석에서 최대 인발저항력이 발현되었을 때의 변형률 경향을 분석

Table 3. Comparison of maximum pullout resistance by prediction and measurement

Classification			Fines content									
			5%		7%		10%		15%		20%	
			Max, pullout resistance (kPa)	Strain (%)	Max, pullout resistance (kPa)	Strain (%)	Max, pullout resistance (kPa)	Strain (%)	Max, pullout resistance (kPa)	Strain (%)	Max, pullout resistance (kPa)	Strain (%)
Relative density (D_r , %)	40%	Meas.	46,2	1,46	42,2	1,62	42,2	1,64	35,2	2,02	48,2	1,61
		Pred.	46,2		42,2		42,2		35,2		48,2	
	60%	Meas.	76,2	1,38	72,2	1,49	71,2	1,53	63,2	1,91	84,2	1,48
		Pred.	76,2		75,2		71,2		63,6		84,1	
	80%	Meas.	105,1	1,19	103,1	1,12	104,1	1,17	100,1	1,79	135,1	1,37
		Pred.	105,1		103,0		104,1		100,1		132,0	

하였다. 상대밀도와 세립분 함유율에 따른 말뚝의 최대 인발저항력은 변형률이 약 1%~2%일 때 발현되었다. 특히, 동일한 세립분 함유율 조건에서 상대밀도가 증가할수록 변형률은 감소하였으며, 세립분 함유율이 증가할수록 변형률은 증가하였지만, 세립분 함유율이 20%인 상태에서는 크게 감소하는 것을 알 수 있었다.

4.2 원지반 탄성계수와 말뚝-지반 경계의 변형계수

말뚝의 인발저항은 말뚝과 지반 경계면에서의 마찰특성 및 원지반의 변형특성에 의존하기 때문에, 본 절에서는 인발모형실험 및 수치해석을 통해 도출된 인발저항에 관한 응력-변형 관계를 이용하여, 말뚝-지반의 경계면 변형계수(Deformation modulus_(interface), E_{inter})를 평가하였다. 또한 수치해석 결과로부터 얻은 말뚝 주변 원지반의 변형계수(E_{50})와 말뚝-지반 경계면의 변형계수(E_{inter})의 상관 관계를 분석하였다.

먼저, Fig. 7과 같이 실험 및 해석결과에 의한 E_{inter} 관계를 도식화한 결과, 원지반의 상대밀도가 증가할수록 E_{inter} 는 증가하였다. 또한 실험과 해석값의 1:1 관계를(점선)를 바탕으로, 상대밀도가 높은 조건에서 E_{inter} 의 상호 관계는 다소 차이를 보였지만, 그 정도가 크지 않은 것으로 판단하여 원지반의 상대밀도 및 세립분 함유율 조건에 관계없이 E_{inter} 는 유사한 것으로 평가되었다.

Fig. 7에서 나타난 경계면 특성에 대한 경향을 보다 정량적으로 평가하기 위하여, 상대밀도와 세립분 함유율에 따라 실험 및 해석에 의한 E_{inter} 를 Fig. 8과 같이 나타내었다. Fig. 8(a)과 같이, 원지반의 상대밀도별로 세립분 함유율에 따른 E_{inter} 에 대한 해석결과를 인발모형실험과 비교

한 결과, 상대밀도가 40%인 경우, 실험과 해석에 의한 E_{inter} 는 거의 동일하였다. 그러나 상대밀도가 증가할수록 E_{inter} 는 최대 약 10%의 차이가 있는 것으로 확인되었다. 또한 세립분 함유율별로 상대밀도에 따른 E_{inter} 의 분포 경향을 Fig. 8(b)와 같이 나타낸 결과, 상대밀도가 증가할수록 E_{inter} 의 차이로 인하여 분포범위가 다소 증가하는 것을 알 수 있었다. 그러나 Fig. 7의 분석결과와 마찬가지로 지반조건에 따른 E_{inter} 의 차이가 경계면의 변형특성 경향에 미치는 영향이 크지 않은 것으로 판단되었다.

Fig. 7과 Fig. 8의 분석결과를 바탕으로, 본 수치해석을 통하여 인발모형실험에 의한 말뚝과 지반 경계면의 변형특성은 적절하게 모사되었음을 알 수 있었다.

전술한 내용과 같이, 말뚝 주면과 접촉되는 지반의 역학특성은 인발거동에 중요한 영향을 미치기 때문에, 지반조건에 따른 하중 증가(loading) 시의 탄성계수(E_{50}) 및 재하중(reloading) 또는 제하중(unloading) 시의 탄성계수(E_{ur})

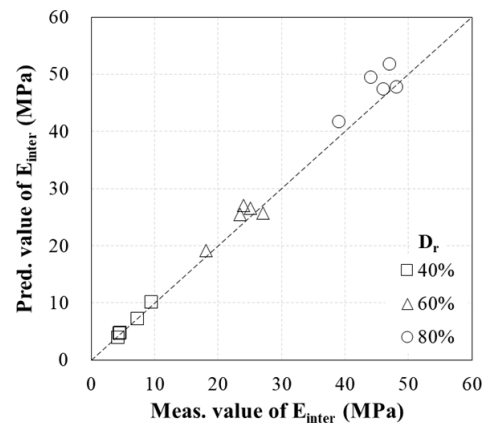
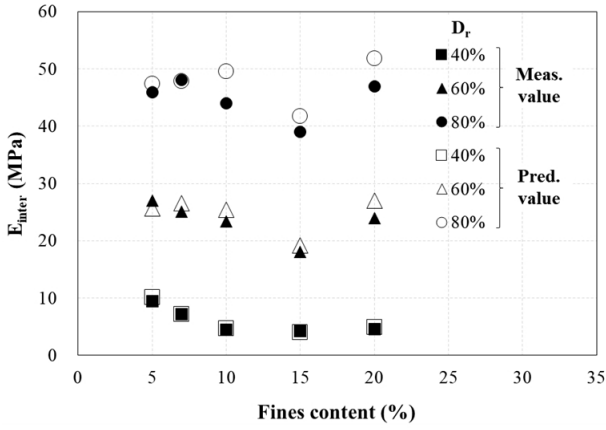
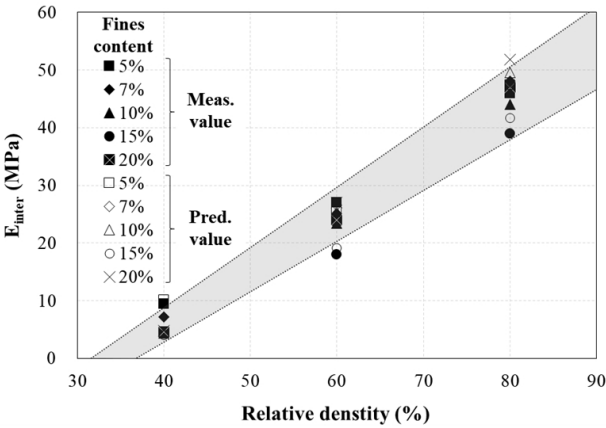


Fig. 7. Relationship of prediction and measurement value on E_{inter} of pile-soil interface



(a) Comparison on E_{inter} by prediction and measurement according to fines content



(b) E_{inter} bounds according to relative density

Fig. 8. Determination of E_{inter} on pile-soil interface

를 분석하여, Fig. 9와 같이 나타내었다. 그 결과, 느슨 ~ 보통 정도의 상대밀도를 갖는 지반에서는 세립분 함유율에 따른 E_{50} 의 범위가 크지 않은 반면에, 상대적으로 조밀한 지반에서는 그 범위가 크게 증가하는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 경향은 E_{50} 의 3배의 값을 적용한 E_{ur} 도 동일하였다. 따라서 말뚝의 인발거동에 있어서 원지반의 탄성계수는 상대밀도가 증가할수록 세립분 함유율의 영향이 큰 것으로 분석되었다.

한편, 수치해석 결과로부터 얻은 말뚝 주변 원지반의 변형계수(E_{50})와 말뚝-지반 경계면의 변형계수(E_{inter})의 상관관계 분석을 위하여, Fig. 10과 같이 도식화하였다. 그 결과, 원지반의 상대밀도가 작고 세립분 함유량이 증가할수록 E_{inter} 는 E_{50} 에 비하여 그 증가 폭이 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 즉, E_{inter} 와 E_{50} 의 1:1 관계(점선)로부터 상대밀도 40%인 조건에서 E_{inter} 가 E_{50} 에 비하여 최대 약 30배 큰 것을 확인하였다. 이러한 사실로부터 원지반이 느슨하고 연약한 상태일수록 말뚝-지반 경계면과 원지반에

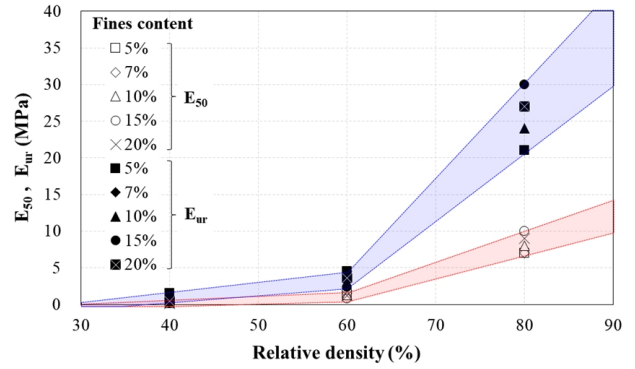


Fig. 9. Determination of E_{50} and E_{inter} value bounds in original ground

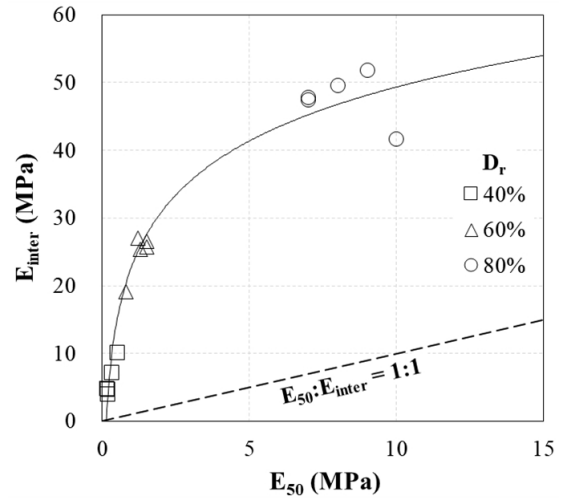


Fig. 10. Relationship of E_{50} and E_{inter} value

서의 역학적특성은 그 차이가 현격해짐을 유추할 수 있었다.

4.3 말뚝-지반의 경계면 강도감소계수(R_{inter}) 결정

본 절에서는 지반의 다양한 상대밀도 및 세립분 함유율에 따른 인발모형실험 결과를 원활하게 모사할 수 있도록, 지반조건에 따른 경계면 강도감소계수(R_{inter}) 관계를 분석하였으며, 그 결과를 바탕으로 다양한 지반조건에 따른 결정범위를 Fig. 11과 같이 제시하였다.

상대밀도가 낮은 조건에서의 경계면 강도감소계수(R_{inter})는 세립분 함유율에 따라 적용값의 범위가 큰 반면에, 상대밀도가 증가할수록 적용값의 차이가 거의 없었다. 즉, 상대밀도가 높은 조밀한 지반 조건에서는 말뚝과 지반 경계면 특성에 따른 인발거동에 세립분 함유율의 영향이 크지 않으며, 경계면 강도감소계수(R_{inter})의 영향도 거의 없는 것으로 분석되었다. 반면에, 상대밀도가 낮아질수록 그 영향범위가 증가하는 경향을 보였다. 즉, 상대밀도가

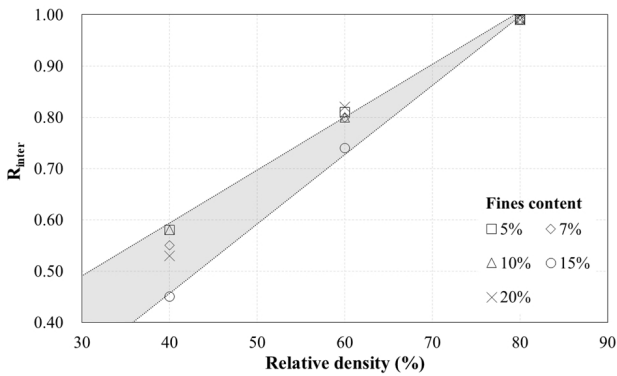


Fig. 11. Determination of R_{inter} on pile-soil interface according to soil condition

낮은 지반조건에서는 세립분 함유율에 따른 경계면 강도 감소계수(R_{inter})의 영향이 큰 것을 알 수 있었다. 이를 통해 말뚝과 지반의 경계면 강도감소계수(R_{inter})의 적용에 있어서, 반드시 지반의 상대밀도와 세립분 함유율 조건을 고려해야 할 필요가 있는 것으로 판단되었다. 따라서 앞서 분석된 내용들을 바탕으로 본 수치해석 방법을 이용하여 말뚝의 인발저항을 평가하기 위해서는 제시된 Fig. 11를 이용하여 지반조건(상대밀도, 세립분 함유율)에 따른 경계면 강도감소계수(R_{inter})의 적용이 가능할 것으로 판단되었다.

5. 결론

본 연구에서는 말뚝 주변 원지반의 상대밀도와 세립분 함유율의 조건에 따른 말뚝의 인발거동 특성을 규명하기 위하여 일련의 유한요소 수치해석을 수행하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 말뚝의 인발 거동에 대한 본 수치해석 결과를 기존의 모형실험과 비교한 결과, 모든 원지반 상대밀도 및 세립분 함유율 조건에 대해서 말뚝과 지반의 변형 거동과 최대 인발저항력이 유사하게 나타났다. 따라서, 본 연구에서 제시한 수치해석 모델은 말뚝의 인발 거동을 적절하게 모사할 수 있다고 판단된다.
- (2) 수치해석과 모형실험에 의한 말뚝-지반 경계면 변형계수(E_{inter})를 산정하여 비교한 결과, 원지반의 상대밀도가 증가할수록 E_{inter} 는 증가하였으며, 상대밀도 및 세립분 함유율 조건에 관계없이 상호 유사한 값을 나타내었다. 따라서, 본 수치해석을 통하여 인발모형

실험에 의한 말뚝과 지반 경계면의 변형특성을 적절히 모사하였음을 알 수 있었다.

- (3) 수치해석 결과로부터 얻은 말뚝 주변 원지반의 변형계수(E_{50})와 말뚝-지반 경계면의 변형계수(E_{inter})의 상관관계를 분석한 결과, 원지반의 상대밀도가 작고 세립분 함유율이 증가할수록 E_{inter} 는 E_{50} 에 비하여 그 증가 폭이 크게 나타났다. 이러한 사실로부터 원지반이 느슨하고 연약한 상태일수록 말뚝-지반 경계면과 원지반에서의 역학특성은 그 차이가 현격해짐을 유추할 수 있다.
- (4) 상대밀도가 높은 지반 조건에서는 말뚝과 지반 경계면 특성에 따른 인발거동에 세립분 함유율의 영향이 크지 않았으며, R_{inter} 의 영향도 거의 없는 것으로 평가되었다. 그러나 상대밀도가 낮은 지반조건에서는 세립분 함유율에 따른 R_{inter} 의 영향이 큰 것을 알 수 있었다. 이를 통해 R_{inter} 의 적용에 있어서, 반드시 지반의 상대밀도와 세립분 함유율 조건을 고려해야 할 필요가 있는 것으로 판단된다.

본 연구에서 제시된 수치해석 방법은 말뚝의 인발거동을 적절하게 모사할 수 있는 것으로 판단되었다. 그러나 말뚝 인발거동에 대한 효율적인 설계인자를 도출하기 위해서는 향후 지하수위 및 구속압 조건과 같은 다양한 지반 상태를 고려한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This research was supported by the Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement under the Ministry of Land, Infrastructure and Transport of the Korean government. (Project Number: 18CTAP-C116826-03)

References

1. Benz, T. (2007), Small-Strain Stiffness of Soils and its Numerical Consequences, Ph.D. Thesis, University of Stuttgart.
2. Cho, S. H. and Kim, H. M. (2010), "Characteristics on Pullout Behavior of Belled Tension Pile in Sandy Soils", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.11, No.9 pp.3599-3609. (in Korean with English summary)

3. Das, B. M. and Seeley, G. R. (1975), "Uplift Capacity of Buried Model Piles in Sand", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol.101, Issue 10, pp.1091-1094.
4. Hong, G., You, S. K., Shin, H., Lee, K. and Choi, C. (2019), "A Study on Numerical Analysis for Pullout Behavior Prediction of Pile", 2019 Spring Geosynthetics Conference, Korea, pp.108-109. (in Korean)
5. Hong, W. P., Yea, G. G. and Lee, J. H. (2005), "Evaluation of skin friction on large drilled shaft", *Journal of the Korean geotechnical society*, Vol.21, No.1, pp.93-103. (in Korean with English summary)
6. Hong, W., Lee, J., and Chai, S. (2008), "Bearing Capacity of SDA Augered Piles in Various Grounds Depending on Water-cement Ratio of Cement Milk", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.24, No.5, pp.37-54. (in Korean with English summary)
7. Lee, H. J. and Kim, H. T. (2006a), "Numerical Analyses for Evaluating Factors which Influence the Behavioral Characteristics of Side of Rock Socketed Drilled Shafts", *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol.26, No.6c, pp.395-406. (in Korean with English summary)
8. Lee, H. J. and Kim, H. T. (2006b), "Numerical Analyses on the Behavioral Characteristics of Side of Drilled Shafts in Rocks and Suggestion of Design Charts", *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol.26, No.6c, pp.407-419. (in Korean with English summary)
9. Lee, S. J. (2013), "Analysis of Diameter Effects on Skin Friction of Drilled Shafts in Sand", *Journal of the Korean geotechnical society*, Vol.29, No.1, pp.161-170. (in Korean with English summary)
10. Lim, H., Park, Y., and Park, J. (2002), "Investigation of Characteristics and Suggestion of Evaluation Formulae for Skin Resistance of SIP", *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol.3, No.2, pp.15-21. (in Korean with English summary)
11. Lim, Y. J. and Seo, S. H. (2002), "Uplift Testing and Load-transfer Characteristics of Model Drilled Shafts in Compacted Weathered Granite Soils", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.18, No.4, pp.105-117. (in Korean with English summary)
12. Meyerhof, G. G. (1959), "Compaction of Sands and Bearing Capacity of Piles", *J. S. Mech. Fdtn. Div, ASCE*, pp.1-29.
13. Meyerhof, G. G. (1976), "Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 102, No.GT-3, pp.197-228.
14. Meyerhof, G. G. and Adams, J. I. (1968), "The Ultimate Uplift Capacity of Foundation", *Canadian Geotechnical. Journal*, Vol.5, No.4, pp.225-244.
15. O'Neill, M. W. and Reese, L. C. (1999), "Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods", Publication No. FHWA-IF-99-025, Federal Highway Administration (FHWA).
16. Reese, L. C. and O'Neill, M. W. (1988), *Drilled Shafts: Construction and Design*, Publication No. HI-88-042, Federal Highway Administration (FHWA).
17. Schanz, T., Vermeer, P. A., and Bonnier, P. G. (1999), "The Hardening Soil Model: Formulation and Verification", *Beyond 2000 in computational geotechnics*, Balkema, Rotterdam, pp.1-16.
18. Yoon, M. S., Lee, C. K. and Kim, M. H. (2013), "Evaluation of Unit Side Resistance of Drilled Shafts by Revised SPT N Value", *Journal of the Korean geotechnical society*, Vol.29, No.12, pp.5-10. (in Korean with English summary)
19. You, S. K., Hong, G., Jeong, M., Shin, H., Lee, K. W. and Ryu, J. (2018), "Effect of Relative Density and Fines Content on Pullout Resistance Performance of Drilled Shafts", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.34, No.4, pp.37-47. (in Korean with English summary)
20. You, S. K., Shin, H., Lee, K. W., Park, J. J., Choi, C. L. and Hong, G. (2019), "Evaluation on applicability of finite element analysis in model test of pile pullout", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.18, No.2, Accepted. (in Korean with English summary)