경계면 물성치에 따른 말뚝 거동 분석 - 근거리 사진계측을 이용한 모형시험과 수치해석 비교

Investigation of Pile Behaviour according to Interface Properties - Comparison between Pile Model Test Using Close Range Photogrammetry and Numerical Analysis

이 정 민¹ Lee, Jung-Min

이 용 주² Lee, Yong-Joo

Abstract

In this study, model pile-load test with numerical analysis was carried out to compare and analyze pile behaviour according to interface properties. In the model test, Close Range Photogrammetry (CRP) was chosen to measure the ground deformation. In addition, model steel and concrete piles were used. Based on the model pile test, interface elements around the model pile were used to simulate the slip effect. Interface properties were adopted as interface reduction factor R_{inter} . Interface reduction factor, R_{inter} plays a key role in the interface properties. Through this study, it was found that the model ground behaviour measured by CRP corresponded well to the one predicted by the numerical analysis. And, the interface strength reduction factor, R_{inter} value of the steel pile was higher than that of the concrete pile.

요 지

본 연구는 지반과 말뚝 사이의 경계면 물성치에 따른 말뚝의 거동을 파악하기 위하여, 말뚝 모형시험 결과와 유한요소해석 결과를 이용하여 비교·분석하였다. 모형시험은 말뚝이 침하함에 따른 주변 지반의 거동을 파악하기 위하여 근거리 사진계측 기법을 적용하였으며, 강재와 콘크리트로 제작 된 각각의 말뚝으로 시험을 수행하였다. 수치해석은 모형시험을 근거로 모델링 하였으며, 지반과 말뚝 사이의 미끄러짐을 모사하기 위하여 경계면 요소를 이용하였다. 또한 경계면 강도감소계수 R_{inter} 를 이용하여 경계면 요소의 물성치를 나타내었으며, 이 값을 바꿔가며 모형시험 결과와 비교하였다. 본 연구를 통해 근거리 사진계측 기법과 수치해석 결과가 어느 정도 잘 일치하는 것을 확인 할 수 있었다. 또한, 말뚝의 재료에 따른 경계면 강도감소계수 R_{inter} 값이 말뚝 거동에 영향을 주는 것을 확인하였다.

Keywords : Interface properties, Model Pile-Load test, Pile numerical analysis, Interface strength reduction factor R_{inter} , Close range photogrammetry

1 정회원, 서울과학기술대학교 건설시스템공학부 (Member, Dept. of Civil Engrg., Seoul National Univ. of Science & Technology)

2 정회원, 서울과학기술대학교 건설시스템공학부 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Seoul National Univ. of Science & Technology, Tel: +82-2-970-6523, Fax: +82-2-948-0044, ucesyjl@seoultech.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

말뚝은 오래 전부터 사용 되어 온 토목 기술 중 하나이지만, 말뚝의 지지력은 말뚝이 설치 될 때마다 달라 지지력이 부족한 말뚝이 존재 할 가능성이 있다. 이러한 말뚝은 상부하중에 의해 말뚝 머리가 손상 되어 큰 문제가 발생 할 수 있고, 이러한 상황을 방지하고 말뚝의 지지력을 측정하기 위해 말뚝재하시험을 실시한다. 말뚝 재하시험을 실시하기 전에 말뚝의 지지력을 합리적으로 예측하기 위하여 수치해석을 수행한다. 수치해석은 입력하는 물성치에 따라 결과 값의 신뢰도가 좌우되므로 지반과 말뚝, 지반과 말뚝 사이의 경계면 물성치를 정확하게 입력하는 것이 매우 중요하다. 또한 경계면 물성치를 정확히 입력하지 않을 경우, 말뚝의 미끄러짐 현상을 제대로 모사할 수 없으며 말뚝의 지지력 또한 정확하게 예측하기 어렵다.

경계면 요소와 경계면 물성치에 관한 연구는 많은 연구자들에 의하여 지금까지 활발하게 이루어져 왔다. 특히 경계면 물성치에 대하여, 지반과 말뚝 사이의 경계면 점착력, 경계면 마찰각 등이 말뚝의 미끄러짐 현상을 나타내는데 중요한 역할을 하는 것으로 나타났다(Lee, 2004; Said. I. et al, 2009). 또한 직접전단 시험을 이용하여 건설 재료에 따른 마찰 특성에 대한 연구도 진행되었는데(Potyondy, 1961; Shin, 1990; Kim and Kim, 2009), 강재, 콘크리트, 나무 등 건설 재료의 표면 거칠기에 따라 지반과의 접촉면에서 발생하는 전단에 영향을 미치

는 것으로 알려져 있다.

기존 문헌에도 나타나 있듯이, 경계면 물성치는 주변 지반의 조건, 말뚝 재료, 지반과 말뚝 사이의 복잡한 상호작용 등으로 인해 그 값을 결정하기가 쉽지 않다. 또한 경계면 점착력, 경계면 마찰각 등 경계면 물성치를 따로 입력하는 것은 말뚝 수치해석을 수행할 때 많은 불편함을 가져온다. 따라서 본 연구에서는 모래지반에 타입 된 강 말뚝과 콘크리트 말뚝의 거동에 대하여 사진 계측을 이용한 모형시험을 수행 하였다. 또한 모형시험 결과를 근거로 경계면 요소와 경계면 물성치인 경계면 강도감소계수 R_{inter} 를 적용하여 수치해석을 수행하고, 모형시험 결과와 수치해석 결과를 비교·분석 하였다.

2. 말뚝 모형시험

2.1 모형시험 장비 및 모형 지반

말뚝 모형시험에서 사용한 모형 토조는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 평면변형률 조건을 만족하도록 제작 하였다 (Lee, 2004; White and Bolton, 2004). 철제 프레임으로 제작 된 토조의 크기는 폭 1500mm, 높이 1000mm 이며, 토조의 앞면과 뒷면에는 아크릴을 사용하여 말뚝이 침하함에 따라 모형 지반의 거동을 확인 할 수 있도록 하였다. 말뚝에 가해지는 하중은 하중프레임과 연결 된 스크루 잭을 이용하여 말뚝 머리에 변위를 주어 하중을 제어하는 DCM(Displacement control method)을 채택하

Fig. 1. Model Pile-Load test apparatus

Fig. 2. Model pile

Table 1. Black sand material properties

Property	Values
Specific gravity, G_s	2.63
Effective size, D_{10} (mm)	0.89
Uniformity coefficient, C_u	1.69
Coefficient of gradation, C_c	0.91
Maximum dry unit weight, γ_{dmax} (kN/m^3)	15.98
Water content, w (%)	14.3
Cohesion, c (kPa)	7
Shear resistance angle, Φ ($^\circ$)	31
Dilatancy angle, Ψ ($^\circ$)	11

였다.

모형시험에 사용 한 모형말뚝은 각각의 크기가 폭 50mm, 높이 50mm의 로드 셀 세그먼트와 연결 세그먼트로 제작하였다. 이 둘은 서로 조립이 가능하며, 전체를 조립했을 경우 Fig. 2와 같이 총 길이 500mm로 이루어지게 된다. 또한 모형 말뚝 안쪽으로 흙이 유입 되는 것을 방지하고 말뚝 머리에 하중을 정확하게 가하기 위하여, 위부분과 아랫부분에 각각의 세그먼트를 배치하였다.

본 연구에서는 모래지반에 타입 된 말뚝이 침하함에 따른 주변 지반의 거동을 파악하기 위하여, 표준 모래에 검은 잉크를 섞워 제작 된 검은 모래를 사용하였다. 실험에 사용한 모래의 물리적 특성은 토질실험을 통해 얻었으며, 아래 Table 1에 나타내었다. 모래지반을 모사하

기 위하여 사용 한 검은 모래는 말뚝 침하에 따른 주변 지반의 거동을 파악하기 위하여 사용하는 근거리 사진계측에서 Target point의 위치를 정확하게 파악하기 위함이다. Target point에 대해서는 다음 절의 사진계측에서 자세히 설명한다.

2.2 근거리 사진계측 기법(Close range photogrammetric technique)

본 모형시험에서는 말뚝이 침하함에 따른 주변 지반의 거동을 측정하기 위하여 검은 모래 안에 Target point로 사용되는 알루미늄 봉을 삽입하였고, 말뚝이 침하함에 따라 알루미늄 봉이 움직이는 정도를 영국 UCL 대학에서 개발 한 사진계측 기법을 이용하여 주변 지반의 거동을 측정하였다(Lee, 2004). 사진계측에서 사용한 카메라는 Canon 5D Mark II를 사용하였으며, 사진 한 장의 픽셀이 1541×2038 이다. 또한 한 픽셀 안에 측정되는 크기는 약 0.04mm 정도로, 사진계측을 통하여 말뚝 침하에 따른 지반의 거동을 매우 정밀하게 표현할 수 있다.

사진계측은 총 3가지 단계로 진행되는데(Fig. 3 참조), Close Range Photogrammetry, Image processing, Result 단계로 이루어진다. 근거리 사진계측에 해당하는 세부 절차는 아래와 같다.

- (1) 지름이 6mm 정도의 알루미늄 봉을 준비한다.
- (2) 준비된 알루미늄 봉에 은색이며 빛을 반사할 수 있는 반사지를 한쪽 면에 붙인다.
- (3) 모형시험 장비를 설치한다. 이 때 계획된 위치에 (2)에서 준비한 알루미늄 봉을 삽입한다. 이 때 삽입한 알루미늄 봉은 주변 지반의 거동을 측정할 Target point 포인트가 된다.
- (4) 모형말뚝에 하중이 적용되지 않은 초기단계에서 디지털 카메라를 이용하여 4장의 이미지를 얻는다.

- (5) 모형말뚝에 단계적으로 하중을 가한다. 이 때 각 하중 단계에 해당되는 4장의 이미지를 (4)와 같은 방법으로 얻고 실험을 종료한다.

Close Range Photogrammetry 단계가 끝나면 말뚝이 침하함에 따른 주변 지반의 거동을 측정하기 위하여 Image processing을 수행한다. Image processing은 실험 초기 단계부터 각각 하중 단계별 Target point에 대한 좌표 값을 Fig. 4와 같이 VMS program을 이용하여 측정한다. 다음으로 VMS Program에서 얻는 좌표 값을 사용하

Fig. 3. Procedures of close range photogrammetric

Fig. 4. Measurement of target point number using VMS program

Fig. 5. Generation of triangular meshes using the EngVis program

Table 2. Input parameters in pile numerical analysis

Parameters	Black sand	Steel pile	Concrete pile
Young's modulus, E (MPa)	0.2	2.1×10^7	23,500
Cohesion, c (kPa)	0.1	—	—
Poisson's ratio, ν	0.35	0.2	0.2
Angle of shearing resistance, Φ^i (°)	31	—	—
Dilation angle, Ψ (°)	11	—	—
Unit weight of soil, γ (kN/m ³)	15	78.5	24

여 Fig. 5와 같이 각각의 하중 단계별로 삼각망 요소를 측정한다.

3. 경계면 물성치에 따른 수치해석

3.1 개요

지반과 말뚝 사이의 경계면 물성치를 산정하기 위하여 수치해석을 수행하였다. 본 논문에서 사용한 해석 프로그램은 2차원 지반공학 해석 프로그램인 PLAXIS V8(PLAXIS V8, 2006)이다. 모형시험을 근거로 한 모델링 개요도는 Fig. 6과 같다. 해석 조건은 2차원 평면 변형률 조건을 적용하였다. 지반 모델링은 폭 1500mm, 높이 1000mm로 모형시험 장비의 크기와 같도록 설정했으며, 말뚝 모델링 또한 모형말뚝과 같은 크기인 폭 50mm, 길이 500mm로 하였다. 해석에 사용한 모델은 지반은 Mohr-Coulomb 모델을, 말뚝은 Linear-Elastic 모델을 적용하였다. 말뚝에 가해지는 하중은 변위로 하중을 제어하는 DCM(Displacement Control Method)을 사

Fig. 6. Geometric condition of pile numerical analysis

용하였다.

수치해석에 사용한 요소는 15-noded triangle elements를 사용하였으며, 지반과 말뚝 사이의 미끄러짐을 표현하기 위하여 경계면 요소를 배치하였다(Lee and Lee, 2012). 참고로 본 논문에서 사용한 경계면 요소에 대해서는 다음 절에서 설명한다.

지반 및 말뚝의 물성치는 Table 2와 같다. 모형 지반의 물성치는 모형시험에 사용된 검은 모래를 이용하여 토질실험을 수행하여 얻어낸 값을 적용하였다. 강 말뚝

과 콘크리트 말뚝의 물성치는 일반적으로 적용 되는 값을 사용하였다.

지반과 말뚝 사이의 미끄러짐 현상을 정확하게 표현 하기 위하여, 수치해석에서는 지반과 말뚝 사이에 경계면 요소를 배치하였고, 경계면 요소의 물성치로 경계면

강도감소계수 R_{inter} 를 사용하였다. 모형시험 결과와 가장 비슷한 경향을 보이는 경계면 물성치를 산정을 위하여 Fig. 7과 같은 순서로 수치해석을 수행하였다. 이 때 경계면 물성치를 나타내는 경계면 강도감소계수 R_{inter} 값을 1.0부터 점차 줄여가면서 수치해석을 수행하였으며, 수치해석 결과와 말뚝 모형시험 결과를 비교하여 서로 비슷한 경향을 보일 때까지 시행착오법을 통하여 해석을 진행하였다. 여기서 사용 한 경계면 강도감소계수 R_{inter} 는 경계면 요소와 마찬가지로 다음 절에서 상세히 설명할 것이다.

3.2 경계면 요소 및 물성치

본 논문에서 사용한 지반 해석프로그램인 PLAXIS V8 의 경계면 요소(Interface element)는 Fig. 8에서 볼 수 있듯이 해석 요소를 6-noded Triangle elements와 15-noded Triangle elements 중 어느 걸 선택하느냐에 따라 경계면 요소의 node와 stress point의 개수가 달라진다. 본 연구에서 적용 한 지반 요소는 15-noded Triangle elements 이며, 그에 따라 경계면 요소의 node는 10개, stress point 는 5개로 구성되었다.

지반과 말뚝 사이의 경계면 요소는 두께가 0 인 Zero Thickness 요소를 사용하였다(Potts and Zdravković, 1999). 그러나 수치해석에서는 해석을 위해 경계면 요소에 가상 두께를 적용하였는데, 가상 두께는 가상두께인자 (Virtual thickness factor) 의해 크기가 결정된다. 가상두께인자는 기본 값인 0.1을 사용하였다.

지반과 말뚝 사이에 경계면 요소를 적용 할 경계면 물성치는 경계면 강도감소계수 R_{inter} 를 사용하였다. 지반과

Fig. 7. Determination procedure for R_{inter} in FE analysis

Case 1. 6-Node

Case 2. 15-Node

Fig. 8. Interface element : (a) 6-Noded element, (b) 15-Noded element

말뚝사이의 경계면 전단강도는 지반의 강도보다 약하므로, 경계면 전단강도는 경계면 강도감소계수 R_{inter} 를 지반의 전단강도 정수에 곱하여 나타낸다.

본 연구에서 말뚝 수치해석을 수행할 때, 지반의 구성 모델은 Mohr-Coulomb 모델을 선택하였다. Mohr-Coulomb 모델의 전단강도는 식 (1)과 같다.

$$\tau = c' + \sigma_n \tan \Phi' \quad (1)$$

식 (1)의 전단강도 정수인 점착력, 전단저항각, 수직 응력에 경계면 강도감소계수 R_{inter} 를 곱하여 경계면 전단강도 정수를 식 (2), (3), (4)로 나타낸다. 식 (2), (3), (4)에서 구한 경계면 전단강도 정수를 식 (1)에 대입하면 경계면 요소에 대한 전단강도 식 (5)를 구할 수 있다.

$$c'_i = R_{inter} c'_{soil} \quad (2)$$

$$\tan \Phi'_i = R_{inter} \tan \Phi'_{soil} < \tan \Phi'_{soil} \quad (3)$$

$$\sigma_{n,i} = R_{inter} \sigma_{n,soil} \quad (4)$$

$$\tau_i = c'_i + \sigma_{n,i} \tan \Phi'_i \quad (5)$$

또한 본 연구에서는 말뚝 재료에 따라 각각 강 말뚝과 콘크리트 말뚝으로 나누어 수치해석을 실시하였다.

Table 3. Interface reduction factor R_{inter} according to pile material

	Steel pile	Concrete pile
Interface reduction factor R_{inter}	0.5~0.6	0.3~0.4

(a) Model test

시행착오법을 통하여 모형시험 결과와 가장 비슷한 결과를 갖는 경계면 강도감소계수 R_{inter} 값을 구한 결과 아래(Table 3 참조), 강 말뚝은 경계면 강도감소계수 $R_{inter} = 0.5 \sim 0.6$, 콘크리트 말뚝은 경계면 강도감소계수 $R_{inter} = 0.3 \sim 0.4$ 의 범위 안에 존재하는 것으로 나타났다.

4. 모형시험과 수치해석 비교

4.1 강 말뚝

강 말뚝 수치해석 결과, Fig. 9에서 볼 수 있듯이 경계면 강도감소계수 $R_{inter} = 0.57$ 을 적용하였을 때 모형시험의 하중-변위 곡선 결과와 가장 잘 일치 하였다. 또한 대략 5~10mm 사이의 변위에서 나타나는 하중이 모형시험 값과 수치해석 값이 조금 다른데, 이는 수치해석을 수행할 때 채택한 Mohr-Coulomb 모델의 한계로 보인다

Fig. 9. Comparison of P-S curve between pile numerical analysis and the model test (Steel pile)

(b) Numerical analysis

Fig. 10. Displacement vector of steel pile (s = 20 mm)

다. 이를 보완하기 위하여 수치해석을 수행 할 때 비선형 모델을 채택하면 좀 더 모형시험 결과 값과 비슷하게 나타날 것으로 판단된다.

말뚝 침하량 $s = 20\text{mm}$ 일 때 지반의 변위 벡터를 확인해보면(Fig. 10 참조), 말뚝 선단부 부근에서 말뚝이 침하함에 따라 흙이 양쪽 옆 주변 지반으로 밀리는 현상이 모형시험과 수치해석에서 비슷한 형태로 나타났다. 또한 말뚝 주변부도 말뚝이 침하함에 따라 같이 아래로 끌려 내려오는 경향과 흙이 옆으로 밀리는 현상을 동시에 볼 수 있다.

말뚝 침하량 $s = 20\text{mm}$ 일 때 지반의 최대수평변위는 모형실험은 4.21mm , 수치해석은 3.89mm 로 나타났다. 또한 Fig. 15에서 볼 수 있듯이, 모형시험과 수치해석 모두 말뚝 선단부에서 가장 많이 수평변위가 발생하였다. 수직변위 또한 말뚝 선단부에서 가장 많이 일어났으며(Fig. 12 참조), 말뚝이 침하함에 따라 주변부에서도 지반이 침하하는 것을 볼 수 있다.

참고로 모형시험은 Target point 포인트를 이용하여 사진계측을 통하여 지반 거동을 측정된 것이고, 수치해석은 연속체 요소에 의하여 지반을 해석한 결과이다. 모형시험을 수행할 때 말뚝 선단부와 완전히 맞닿도록 Target point를 설치하기 어려워, 조금 떨어진 곳에 설치하였다. 이로 인하여 모형시험을 통하여 측정된 말뚝 선단부 수평변위, 수직변위 모두 모형 말뚝과 조금 떨어진 곳에서 발생하는 것으로 나타났으며, 이로 인하여 수치해석 결과와 약간의 차이를 보이는 것으로 판단된다.

4.2 콘크리트 말뚝

콘크리트 말뚝 수치해석 결과, Fig. 13에서 볼 수 있듯이 경계면 강도감소계수 $R_{\text{inter}} = 0.35$ 을 적용하였을 때 모형시험의 하중-변위 곡선 결과와 가장 잘 일치하였다. 콘크리트 말뚝 또한 강 말뚝과 비슷하게 대략 $5 \sim 10\text{mm}$ 사이의 변위에서 나타나는 하중이 모형시험 값과

Fig. 11. Horizontal displacement of steel pile ($s = 20\text{ mm}$)

Fig. 12. Vertical displacement of steel pile ($s = 20\text{ mm}$)

Fig. 13. Comparison of P-S curve between pile numerical analysis and the model test (Concrete pile)

수치해석 값이 조금 다른데, 이는 수치해석에서 채택한 Mohr-Coulomb 모델의 한계로 보인다.

말뚝 침하량 $s = 40\text{mm}$ 일 때 지반의 변위 벡터를 확인해보면(Fig. 14 참조), 콘크리트 말뚝 또한 강 말뚝과 마찬가지로 말뚝 선단부 부근에서 말뚝이 침하함에 따라 흙이 양쪽 옆 주변 지반으로 밀리는 현상이 모형시험과 수치해석에서 비슷한 형태로 나타났다. 또한 말뚝 주변부도 강 말뚝과 마찬가지로 콘크리트 말뚝이 침하함에 따라 같이 아래로 끌려 내려오는 경향과 흙이 옆으로 밀리는 현상을 동시에 볼 수 있다.

말뚝 침하량 $s = 40\text{mm}$ 일 때 지반의 최대수평변위는

(a) Model test

(M.F=1.0)

(b) Numerical analysis

Fig. 14. Displacement vector of concrete pile ($s = 40\text{ mm}$)

(a) Model test

(b) Numerical analysis

Fig. 15. Horizontal displacement of concrete pile ($s = 40\text{ mm}$)

모형실험은 5.08mm, 수치해석은 5.07mm로 나타났다. 또한 Fig. 15에서 볼 수 있듯이, 모형시험과 수치해석 모두 말뚝 선단부에서 가장 많이 수평변위가 발생하였다. 수직변위 또한 말뚝 선단부에서 가장 많이 일어났으며(Fig. 16 참조), 말뚝이 침하함에 따라 주변부에서도 지반이 침하하는 것을 볼 수 있다. 콘크리트 말뚝도 강 말뚝과 마찬가지로 변위 벡터, 수평변위와 수직변위 모두 수치해석 결과와 약간의 차이를 보이고 있는데, 이는 모형시험을 수행 할 때 사용한 근거리 사진계측을 위하여 설치한 Target point의 위치에 영향을 받은 것으로 판단된다.

4.3 강 말뚝과 콘크리트 말뚝 비교

본 연구에서 강 말뚝과 콘크리트 말뚝 수치해석 결과, 강 말뚝의 경계면 강도감소계수 $R_{inter} = 0.57$, 콘크리트 말뚝의 경계면 강도감소계수 $R_{inter} = 0.35$ 로 나타났으며 (Table 4 참조), 콘크리트 말뚝의 경계면 강도감소계수 R_{inter} 값이 강 말뚝의 경계면 강도감소계수 R_{inter} 값보다

작은 것으로 나타났다. 이는 강 말뚝과 콘크리트 말뚝의 선단부와 주변부 표면 거칠기가 서로 다르기 때문에 경계면 강도감소계수 R_{inter} 값에 차이가 있는 것으로 판단된다.

또한 변위가 5mm, 10mm, 15mm, 20mm가 발생 했을 때 나타나는 하중 값을 강 말뚝의 모형시험과 수치해석 값과 콘크리트 말뚝의 모형시험과 수치해석 값을 비교한 결과, 콘크리트 말뚝의 하중이 강 말뚝의 하중보다 작게 나타났다(Table 5 참조). 또한 강 말뚝과 콘크리트 말뚝의 선단부에서 발생한 최대 지반수평변위도 비교하였다. 최대 지반수평변위도 마찬가지로 콘크리트 말뚝이 강 말뚝보다 작게 나타났다(Table 6 참조). 이는 말뚝의 재료로 사용한 강재와 콘크리트의 표면 마찰 특성이 달라서 발생하는 것으로 판단된다.

Table 4. Comparison of interface reduction factor R_{inter} between steel pile and concrete pile

	Steel pile	Concrete pile
Interface reduction factor R_{inter}	0.57	0.35

(a) Model test

(b) Numerical analysis

Fig. 16. Vertical displacement of concrete pile ($s = 40$ mm)

Table 5. Comparison of Load-Settlement values between steel pile and concrete pile

Displacement (mm)	Load (kN)			
	Steel pile		Concrete pile	
	Model test	Numerical analysis ($R_{inter} = 0.57$)	Model test	Numerical analysis ($R_{inter} = 0.35$)
5	0.88	1.1	0.68	0.75
10	1.36	1.42	0.99	1.06
15	1.69	1.69	1.25	1.28
20	1.89	1.9	1.47	1.49

Table 6. Comparison of maximum horizontal displacement between steel pile and concrete pile (s = 20 mm)

	Steel pile	Concrete pile
Maximum horizontal displacement (mm)	3.89	3.44

5. 결 론

본 연구는 지반과 말뚝 사이의 경계면 요소를 수치해석을 통해 산정하기 위한 연구로 모래지반에 근입된 말뚝 모형시험과 수치해석 결과를 비교·분석 하였으며, 이를 통하여 정리한 결론은 아래와 같다.

- (1) 수치해석을 이용하여 말뚝 침하에 따른 주변 지반의 거동을 나타낼 때, 본 연구에서는 사용할 경계면 물성치로 경계면 강도감소계수 R_{inter} 을 도입하였다. 또한 경계면 강도감소계수 R_{inter} 하나만으로 모형시험과 유사한 거동을 나타낼 수 있어 매우 유용하였다.
- (2) 강 말뚝은 경계면 강도감소계수 $R_{inter} = 0.57$, 콘크리트 말뚝은 경계면 강도감소계수 $R_{inter} = 0.35$ 일 때 모형시험의 하중-변위 곡선 결과와 가장 잘 일치하였다. 또한 강 말뚝의 R_{inter} 값이 콘크리트 말뚝의 R_{inter} 보다 더 크게 나타났는데, 이는 두 재료의 표면 거칠기가 달라서 생기는 차이로 보인다.
- (3) 강 말뚝과 콘크리트 말뚝의 하중-변위곡선과 최대 수평변위를 비교한 결과, 강 말뚝에 비하여 콘크리트 말뚝의 값이 전체적으로 작게 나타나는 것을 확인하였다. 이는 말뚝에 사용한 강재와 콘크리트의 재료적 표면 마찰 특성이 달라서 생기는 차이로 보인다.
- (4) 사진계측으로 측정한 지반 거동과 수치해석으로 예측한 지반 거동을 비교했을 때, 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 두 결과가 약간의 차이를 보이는데, 이는 수치해석은 연속체 요소에 의하여 해석을 진행하였고 모형시험은 Target point에 의하여 측정한 것이다. 따라서 모형시험에서 Target point를 설치 한 위치를 통해 주변지반의 거동을 측정하므로, Target point의 위치에 의해 이러한 차이

를 보인 것으로 판단된다.

- (5) 본 논문의 범위는 말뚝 모형시험 결과와 경계면 물성치에 따른 수치해석 결과를 비교한 것이다. 따라서 본 연구를 기본으로 다양한 지반조건과 말뚝 재료에 적용 할 수 있도록 보다 많은 수치해석을 수행하여 경계면 강도감소계수 R_{inter} 값에 대한 함수식 연구가 필요하다고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단 기초연구사업 중 일반연구 자지원사업인 “신진연구-연구비지원(2011-0014166)”의 지원으로 이루어진 것이므로, 이에 대한 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. Kim, Y.S. and Kim, D.M. (2009), “Characteristics of Friction Angles between the Nak-dong River Sand and Construction Materials by Direct Shear Test”, Journal of KGS, Korea Geotechnical Society, April 2009, Volume 25, No.4, pp.105-112.
2. Lee, Y.J. (2004), “Tunnelling adjacent to a row of loaded piles”, PhD thesis, University College London, London, pp.102-106.
3. Lee, Y.J. and Lee, J.M. (2012), “Investigation of Strain Behaviour around the Tip of Model Pile - Comparison between Laboratory Model Test and Numerical analysis -”, Journal of KSCE, Korea Society Civil Engineering, July 2012, Volume 32, No.4C, pp. 159-167.
4. PLAXIS V8 (2006). Reference manual.
5. Potts, D.M. and Zdravković, L. (1999), “Finite element analysis on geotechnical engineering - Theory”, Thomas Telford Publishing, Thomas Telford Ltd, 1 Heron Quay, London.
6. Potyondy, J. G. (1961), “Skin Friction Between Various Soils and Construction Materials”, Geotechnique, Vol.11, No.4, pp.339-353.
7. Said, I., Gennaro, V. De and Frank R. (2009), “Axisymmetric finite element analysis of pile loading test”, Computers and Geotechnics 36, pp.6-19.
8. Shin, K.H. (1990), “A study on the friction behavior between granular soil and construction materials”, CE-Theses_Master, KAIST.
9. White, D. J. and Bolton, M. D. (2004), “Displacement and strain paths during plane strain model pile installation in sand”, Geotechnique 54, No.6, pp.375-398.

Received : July 11th, 2014

Revised : September 16th, 2014

Accepted : September 17th, 2014