

재하시험을 통한 매입말뚝의 주면마찰력 거동 분석

Analysis of Skin Friction Behavior in Prebored and Precast Piles Based on Field Loading Test

정 경 자¹ Jung, Gyoung-Ja 김 도 현² Kim, Do-Hyun
이 철 주³ Lee, Chul-Ju 정 상 섭⁴ Jeong, Sang-Seom

Abstract

Skin friction of prebored and precast pile may be one of the most critical factors affecting the bearing capacity and settlement. Special attention was given to the interface behavior of pile-cement milk-surrounding soil when the load is acting on the prebored and precast pile. The cases of single pile were analyzed through a three-dimensional finite element approach and pile loading tests. A series of numerical analyses of the interface of pile-cement milk-soil was conducted with the proposed t-z curve and field measurements. It is shown that the use of cement milk around the pile increases the skin friction and reduces the pile settlement. It is also known that the suggested t-z curve between the cement milk and the soil, enhances the accuracy of the numerical analysis results.

요 지

본 연구에서는 매입말뚝의 지지력과 침하에 큰 영향을 미치는 시멘트풀과 지반 사이의 주면 인터페이스 및 영향인자에 따른 거동을 분석하였다. 시멘트풀과 지반 사이의 인터페이스를 고려하기 위한 User-defined 모델을 적용하였고, 현장 시험 결과와의 검증용 바탕으로 매입말뚝 거동을 고려한 새로운 t-z 곡선을 제안하였다. 또한, 매입말뚝의 거동에 영향을 주는 인자 중 시멘트풀의 유무 그리고 시멘트풀-지반 사이의 인터페이스 모델에 대한 분석을 수행하였다. 해석결과, 시멘트풀이 있는 경우 주면마찰력이 급격히 증가하는 것이 확인되었고, 침하량은 감소하는 것으로 확인되었고, 본 연구에서 제안한 t-z 곡선이 매입말뚝 거동을 더 정확히 예측할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

Keywords : Prebored and precast pile, Finite element method, Interface modeling, Load-settlement curve, t-z curve

1. 서 론

최근 시공 중 발생하는 소음, 분진 및 진동 등의 공해

로 인한 사회 문제가 증가하고 있다. 이로 인해, 기존 구조물 및 인구가 많은 지역에서의 구조물 시공 시 항타 말뚝 등의 기존 공법 적용은 많은 제약이 따른다. 이를

1 정희원, 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원 (Member, Deputy Principal Researcher, Korea Expressway Corporation Research Institute)

2 정희원, 연세대학교 토목환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environment Engrg., Yonsei Univ.)

3 정희원, 강원대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Kangwon Univ.)

4 정희원, 연세대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environment Engrg., Yonsei Univ., Tel: +82-2-2123-2807, Fax: +82-2-2123-8378, soj9081@yonsei.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

극복하기 위한 대안으로 최근 매입말뚝 공법을 적용한 도심지 시공 및 도로 시공 현장이 증가하고 있다.

매입말뚝 공법은 말뚝을 시공하고자 하는 지반에 천공을 한 후, PHC 또는 강관 기성 말뚝을 매입하고 말뚝 주변에 시멘트풀을 타설하는 과정을 통해 시공이 이루어지는 공법으로, 항타말뚝에 비해 시공 중 소음과 진동의 발생이 현저히 감소하며, 현장타설말뚝에 비해 경제적이란 장점이 있다. 반면에, 항타말뚝에 비해 복잡한 시공과정으로 인해 시공 기술자들의 숙련도에 영향을 많이 받고, 매입말뚝의 큰 특징 중 하나인 강관말뚝 주변을 둘러싼 시멘트풀 등의 변수가 많아 지지력 및 하중-침하 곡선 예측이 어렵다는 점이 있다.

매입말뚝의 지지력과 침하량은 말뚝 선단의 지지력 뿐만 아니라, 말뚝 둘레에 주입된 시멘트풀과 지반 사이의 주면 마찰력에 의해 영향을 많이 받는다. Uesugi 등(1986, 1989, 1990)은 실험을 통해 반복하중에 의한 강관말뚝의 침하량을 측정하였고, 이를 바탕으로 강관과 건조토 사이의 최대마찰력은 표면 거칠기 및 모래의 입경에 의해 결정된다는 것을 확인하였다. O'Neill 등(1996)은 현장타설말뚝과 같이 천공을 한 후 말뚝을 설치하는 경우, 주변이 톱니와 같이 형성되어, 항타말뚝의 주면과 상이한 거동을 보이는 것으로 분석하였고, 이를 토대로 암반에 근입된 현장타설말뚝의 주면에 대한 t-z 곡선을 제안하였다. Lim 등(2002)은 매입말뚝의 주면마찰력에 영향을 미치는 주요 영향인자가 모래의 단위중량이라는 것을 확인하였다. Park(2004)는 매입말뚝의 시멘트풀 강도 및 마찰거동에 관한 연구에서, 시멘트풀이 경화하면서 단위 주면마찰력이 약 700%, 전체 지지력에서 주면마찰력의 비중이 약 400%까지 증가하는 것으로 나타났다. Hong 등(2008)은 매입말뚝의 주면마찰력에 영향을 주는 인자로 N치, 지반의 종류 및 시멘트풀의 물/시멘트비고, 그 중에서 시멘트풀이 가장 큰 영향을 주는 것으로 확인하였다.

본 연구에서는 3차원 유한요소해석을 통해 매입말뚝의 특성을 고려한 주면마찰력 및 시멘트풀에 의한 거동 특성을 분석한다. 주면마찰력의 거동을 상세히 분석하기 위해 강관 매입말뚝 주변 및 내부의 시멘트풀을 모델링하여 이를 바탕으로, 시멘트풀-지반 내 시멘트풀 침투에 의한 효과를 고려한 매입말뚝 주면의 t-z 곡선을 제안하였다. 이에 대한 검증은 00지역 매입말뚝 시공 현장에서 시행된 재하시험 결과와의 비교분석을 토대로 수행하였다.

2. 유한요소 해석 모델

2.1 유한요소망 및 경계조건

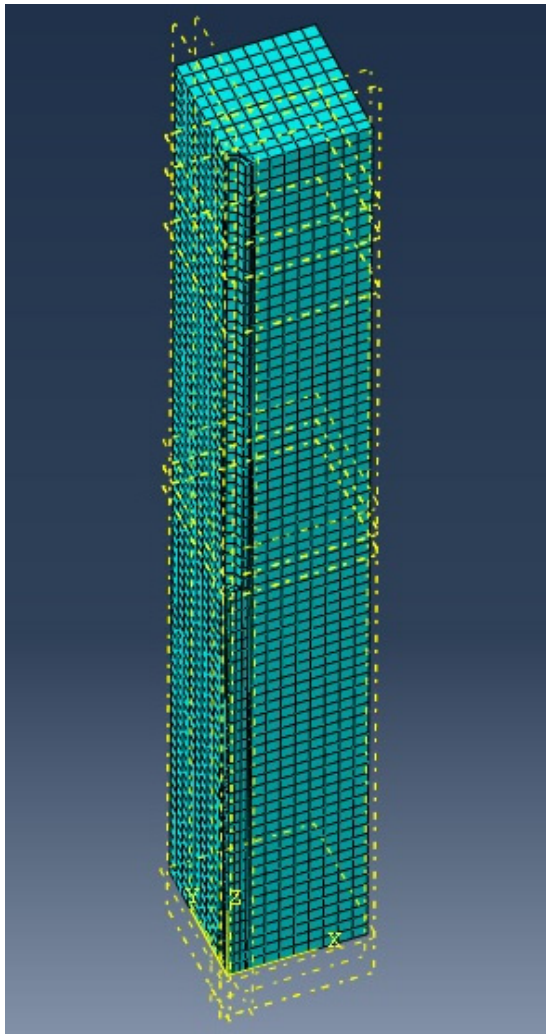
본 수치해석은 범용 프로그램인 ABAQUS CAE 6.13 (2013)을 이용하여 실제 매입말뚝 모델링을 수행하였다. Fig. 1과 Fig. 2는 3차원 유한요소망 그리고 강관말뚝-시멘트풀 모식도를 나타낸 것이다. 말뚝 및 지반의 모델링은 해석시간 단축을 위해 축대칭 조건 하에서 4분의 1 단면만 수행하였고, 정확도를 높이기 위하여 말뚝 주변에 더 조밀한 유한요소망을 모델링하였다. 말뚝과 지반은 2차 27-node를 기반으로 모델링되었고, 시멘트풀과 지반 사이의 인터페이스는 현장 시험으로 얻은 t-z 곡선을 적용하기 위해 ABAQUS User-Subroutine FRIC을 통하여 구현되었다. ABAQUS User-Subroutine 옵션 FRIC은, ABAQUS에 기본적으로 내재되어 있는 마찰거동 이외에 다양한 마찰거동을 구현할 수 있게 해주는 옵션으로 본 연구에서 슬립이 허용되는 매입말뚝의 주면마찰력을 구현하기에 가장 적합한 것으로 판단되었다.

2.2 인터페이스 모델링 및 해석과정

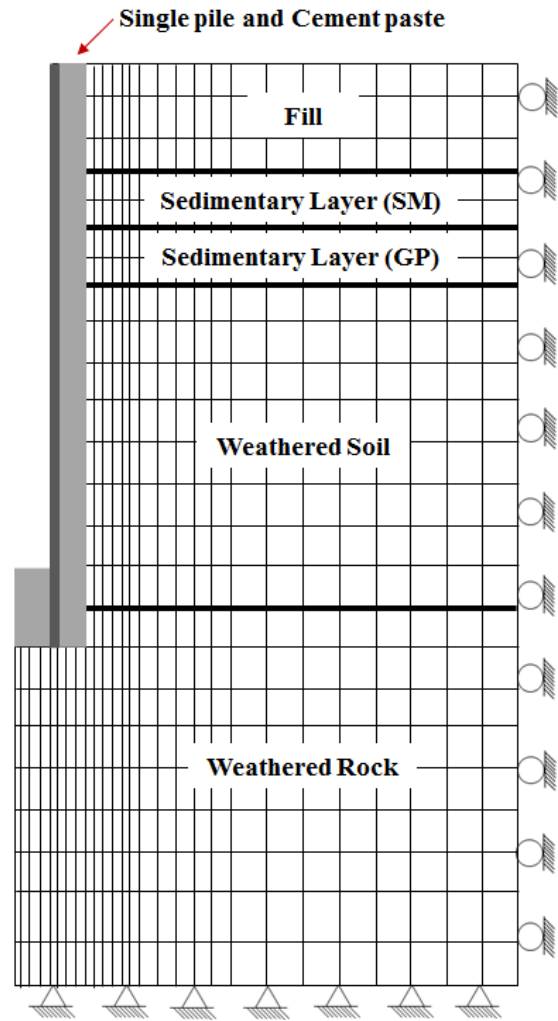
본 연구는 유한요소 해석을 통해 매입말뚝과 지반 사이의 인터페이스 거동과 이에 따른 말뚝의 지지력 및 침하량 분석을 한다. 수치해석 과정에서 매입말뚝의 시공 조건을 최대한 현장 조건과 동일하게 모사하고자 하였다. 지반에 설치되어 있는 강관말뚝 주변의 시멘트풀 및 강관 내부 하단에 강관말뚝 설치 전 주입한 시멘트풀을 고속도로공사 전문시방서(Korea Expressway Corporation, 2012)에 따라 (4D+1m)의 높이로 모델링하였다. 특히 강관말뚝, 시멘트풀, 지반 사이에 인터페이스 모델링을 통해 매입말뚝의 상세한 거동분석을 위하여 ABAQUS User-Subroutine 옵션 중 FRIC을 적용하였고, 말뚝-내부 시멘트풀, 말뚝-주변 시멘트풀, 시멘트풀-지반을 다음과 같이 모델링하였다.

① 말뚝-시멘트풀 간 인터페이스

매입말뚝은 시공 과정에서 시추공에 기성말뚝을 설치한 후 주변에 시멘트를 주입하므로 항타말뚝과 현장타설말뚝과 비교하여 매우 다른 주면마찰력이 발현된다. 이에 본 연구에서는 이러한 매입말뚝의 주면 거동을 고려하고자 Fig. 3과 같이 말뚝과 시멘트풀 사이를 완전



(a) 3D finite element mesh



(b) Boundary condition

Fig. 1. Mesh modelling

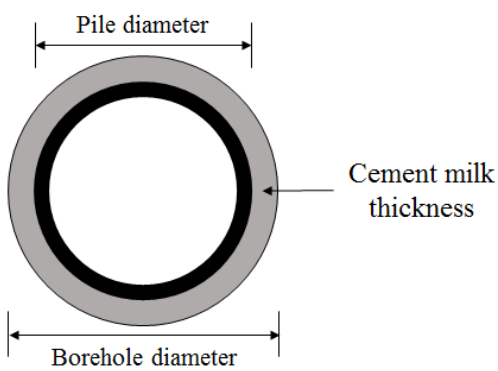


Fig. 2. Pile and cement milk thickness

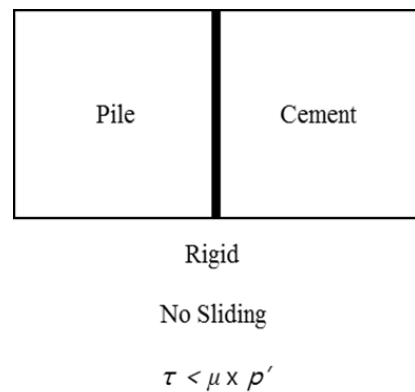


Fig. 3. Interface between pile and cement milk

접촉된 것으로 가정하여 해석을 수행하였다. 이는 본 연구에서 매입말뚝의 주변마찰력 거동을 상세히 관찰하기 위하여 수행한 축소모형시험 결과, 시멘트풀-지반 사이의 파괴형상을 반영한 것으로, 매입말뚝의 상대적 변

형은 시멘트풀과 지반 사이에서 발생하고, 말뚝과 시멘트풀 사이에서는 완전 접촉된 모습을 보이는 것으로 확인되었다.

② 시멘트풀-지반 간 인터페이스

O'Neill 등(1994)은 암반에 근입된 현장타설말뚝 시공 시, 토사 지반과 암반 지반의 시추공 주변의 거칠기 정도와 양상이 다른 것을 관찰하였고, 이에 따라 현장타설말뚝 주변마찰력이 시추장비와 지층에 따라 상이하게 나타나는 것을 확인하였다. 특히, 암반에 근입된 현장타설말뚝의 주변에서는 취성파괴의 모습을 보이는 거동을 보이는 것으로 제안하였다. Jeong(2004) 또한 말뚝의 축방향 거동을 해석하는 데에 있어서, 말뚝과 지반 사이에 발생하는 응력이 두 재료 사이의 응력보다 크게 설정하여 상대변형(slip)을 허용하는 인터페이스 모델을 Fig. 4와 같이 제안하여 말뚝의 실제 거동과 일치하는 해석을 수행하였다.

이에 본 연구에서는 위 문헌연구를 바탕으로, 말뚝-시멘트풀, 시멘트풀-지반 사이의 인터페이스를 모사하였다. 일반적으로 말뚝과 지반 사이에 발생하는 주변마찰력을 나타내는 단일 직선 형태의 t-z 곡선(Fig. 5(a))과 달리, 매입말뚝과 주입한 시멘트풀의 지반으로의 침투를 고려하고, 시멘트풀과 지반 사이에서는 현장에서 측정된 t-z 곡선의 마찰력을 고려할 수 있는 t-z 곡선을 제안하였다(Fig. 5(b)). 말뚝에 부착된 시멘트풀과 주입된 시멘트풀이 지반에 침투한 구간 사이에서는, O'Neill 등이 제안한 암반에서의 현장타설말뚝 t-z 곡선과 항타말뚝의 중간단계(intermediate stage)로 현장타설말뚝보다 강성은 작지만, 일반적으로 시멘트풀과 지반 사이보다 강한 부착력을 구현할 수 있도록 제안하였다. 이는 축소 모형실험 결과 나타난 시멘트풀-지반 사이의 파괴형상도 반영한 것으로, 실제로 축소모형실험에서 항복은 Fig. 6과 같이 시멘트풀-지반 사이에서 파괴가 발생하며, 그 표면에서 일부 시멘트풀이 지반으로 침투한 모습 또한 확인할 수 있었다.

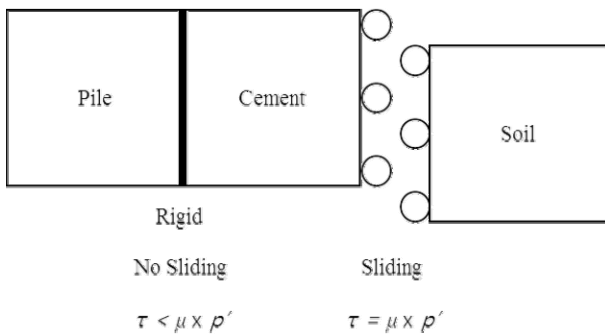
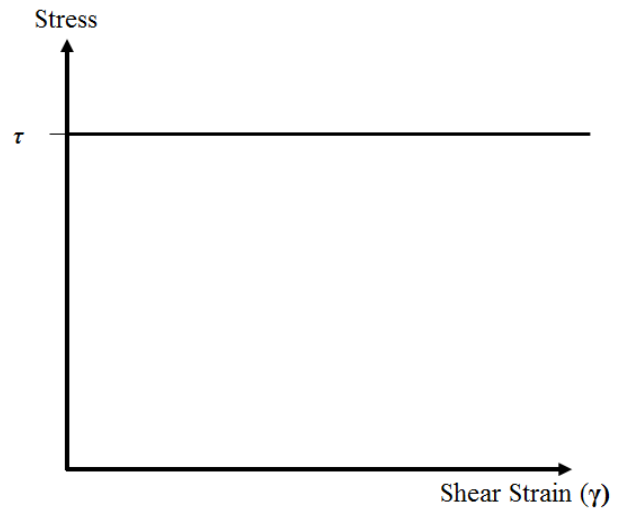
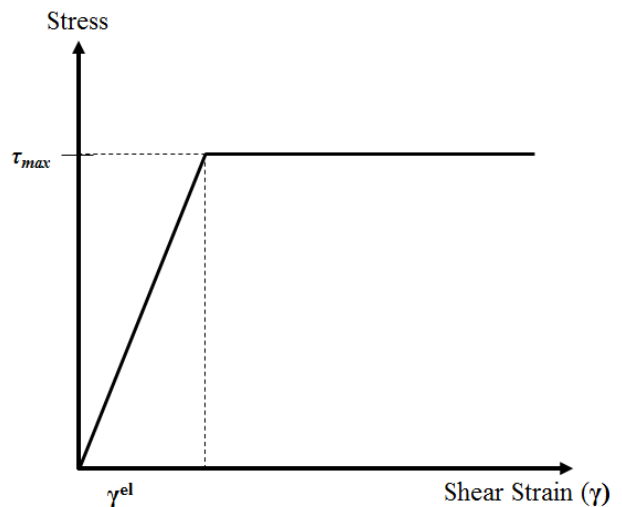


Fig. 4. Interaction modeling between pile-cement and cement-soil

재하 초기에는 시멘트풀과 지반 사이의 부착력이 탄성거동을 보이며 증가하며, 매입말뚝 시공 과정(Korean Geotechnical Society, 2006)에 따라 약 말뚝직경의 2배 이내의 경타가 수행되며 이로 인해 재하에 의한 선단의 움직임이 거의 없는 것으로 확인되었다. 이를 반영하여, 말뚝-시멘트풀 사이에서는 슬립이 없는 부착되어 있는 것으로 모델링한 것과 달리, 토사의 경우 약 3-5mm(Jeong et al., 2004) 사이의 탄성 슬립을 허용하며, 암반의 경우 탄성 슬립(Elastic slip)을 거의 허용하지 않고 강성(Rigid)한 거동(O'Neill et al., 1996)을 보이도록 하여 각 지층의 인터페이스를 각각 Fig. 7과 같이 모델링하였다. 탄성 슬립 구간이 지나면, 시멘트풀과 지반 사이에 최대마찰력, τ_{max} 가 작용하도록 모델링하였다. τ_{max} 값은 그 지



(a) Ideal friction t-z curve without relative displacement



(b) Modified t-z curve considering relative displacement and cementation

Fig. 5. Modified interface modeling



Fig. 6. Failure surface between small scale steel pile and soil

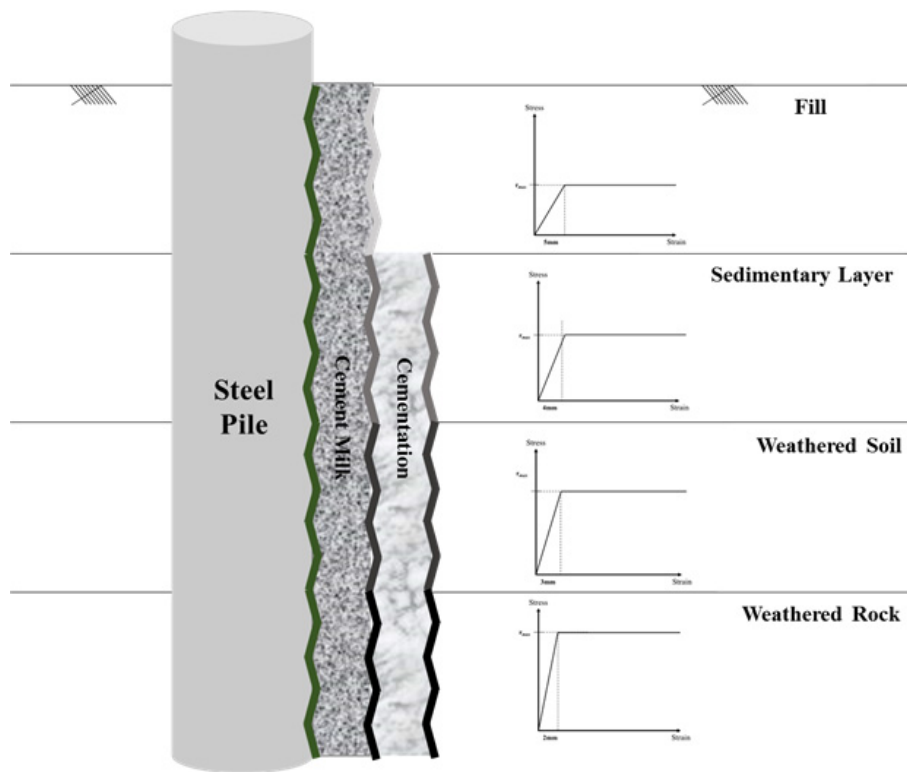


Fig. 7. Schematic of interface modeling for each soil profile

점에서의 토압(p')과 마찰계수(μ)를 곱한 값으로 식 (1)과 같으며, 마찰계수(μ)는 아래 식 (2)와 (3)을 이용하여 산정하였다.

$$\tau_{\max} = \mu \times p' \quad (1)$$

$$\mu = \tan \delta \quad (2)$$

$$\delta = \tan^{-1} \left(\frac{\sin \phi \times \cos \phi}{1 + \sin^2 \phi} \right) \quad (3)$$

2.3 재하시험 및 수치해석 결과 비교

본 연구에서 제안한 인터페이스 해석 모델을 검증하기 위해, 수치해석을 통해 도출된 결과를 ○○지역 매입말뚝 시공현장에서 수행한 재하시험 결과 값과 비교 분석하였다. 해석결과, 시멘트풀을 실제 매입말뚝 시공 현장과 같이 말뚝 주변에 주입된 시멘트풀을 모델링하고, 본 연구에서 제안한 시멘트풀과 지반 사이의 인터페이스 모델을 적용하게 되면 현장시험 결과를 정확히 예측하고 구현하는 것으로 분석되었다.

3. 재하시험

본 연구에서는 매입말뚝의 거동을 분석하고자 ○○지역 매입말뚝 시공현장에서 재하시험을 수행하였고, 그

결과를 바탕으로 제안한 t-z 곡선에 대한 검증을 수행하였다. 지반 조건은 매립층, 퇴적층, 풍화토 그리고 풍화암으로 이루어진 지반으로, 국내 전반에 걸쳐 분포하는 전형적인 지반 조건을 반영하고 있다. 재하시험에서 사용된 말뚝은 강관말뚝이며, 직경은 0.508m(D), 두께는 0.012m이다. Fig. 8 및 Table 1은 수치해석에 사용된 현장 조건, 말뚝 및 지반 물성치를 나타낸 것이다.

3.1 재하시험 방법

○○지역 매입말뚝 시공현장에서 수행한 재하시험은 표준 정재하시험으로, 지반조사가 선행되었고, 조사 후 선단을 목표한 N치에 맞게(Case #1 : 50/20, Case #2 : 50/10) 강관말뚝을 시공하였다. 정재하시험은 ASTM D1143-81 (1994)에서 규정하고 있는 완속 표준재하시험방법과 반

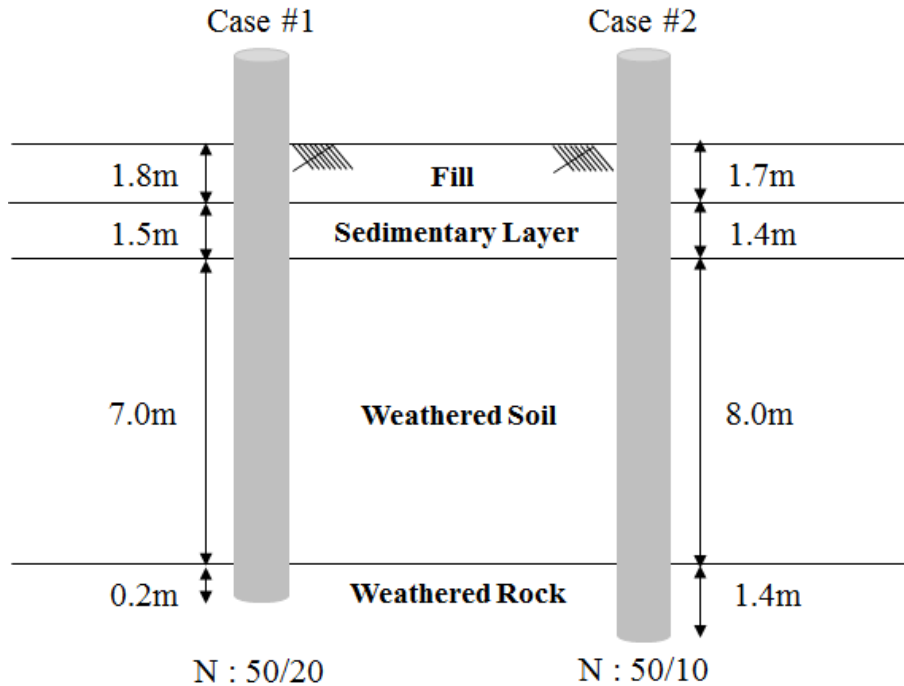


Fig. 8. Soil profile of test cases

Table 1. Material properties used in analysis

| Physical properties | Model | N (SPT) | γ (kN/m ³) | E (MPa) | ν | c (kPa) | ϕ (°) | μ | γ^{el} (mm) |
|------------------------|----------------|-------------|-------------------------------|---------|-------|---------|------------|-------|--------------------|
| Pile | Linear elastic | — | 75 | 200,000 | 0.2 | — | — | — | — |
| Cement milk | Linear elastic | — | 20 | 5,000 | 0.25 | — | — | — | — |
| Fill | Mohr Coulomb | 5/30–19/30 | 17 | 10 | 0.30 | 0 | 29 | 0.343 | 5 |
| Sedimentary layer (SM) | Mohr Coulomb | 19/30–31/30 | 19 | 20 | 0.30 | 3 | 28 | 0.340 | 4 |
| Sedimentary layer (GP) | Mohr Coulomb | 31/30–50/20 | 20 | 40 | 0.30 | 5 | 29 | 0.343 | 3.5 |
| Weathered soil | Mohr Coulomb | 50/20–50/10 | 20 | 127.24 | 0.30 | 22 | 39 | 0.343 | 3 |
| Weathered rock | Mohr Coulomb | 50/10– | 21.5 | 185.18 | 0.30 | 35 | 32 | 0.351 | 1 |

복재하방법을 혼합한 형태로 실시하며, 하중재하주기는 총시험하중을 25%, 50%, 75%, 100% 4단계로 나누어 시험을 실시하며 재하말뚝머리 침하율이 시간당 0.25mm (최대2시간) 이하가 될 때 까지 하중을 유지시키고, 하중이 완전히 재하되면 50%씩 단계 제하하되 20분씩 유지하도록 하였다. 재하시험 중 하중에 의해 말뚝에 급격한 침하가 발생하여 더 이상 말뚝에 하중이 작용하지 않는 경우 말뚝이 항복했다고 판단하고 시험을 종료하는 과정을 통하여 수행하였다.

3.2 재하시험 결과 분석

본 연구에서는 현장재하시험을 바탕으로 매입말뚝 시공 시 가장 큰 특징인 시멘트풀의 영향 및 주변의 거동을 모사하는 해석 모델에 대한 분석을 수행하였다. Fig. 9는 매입말뚝과 항타말뚝 시공에서 가장 큰 차이점인 말뚝 주변 시멘트풀의 영향에 대한 수치해석 결과를 나타낸 것이다. 시멘트풀이 없는 경우는 강관-지반 사이의 시멘트 풀을 모델링하지 않고, 강관-지반 접촉면에서의 마찰력만을 고려하여 말뚝 해석을 수행하였다. 해석결

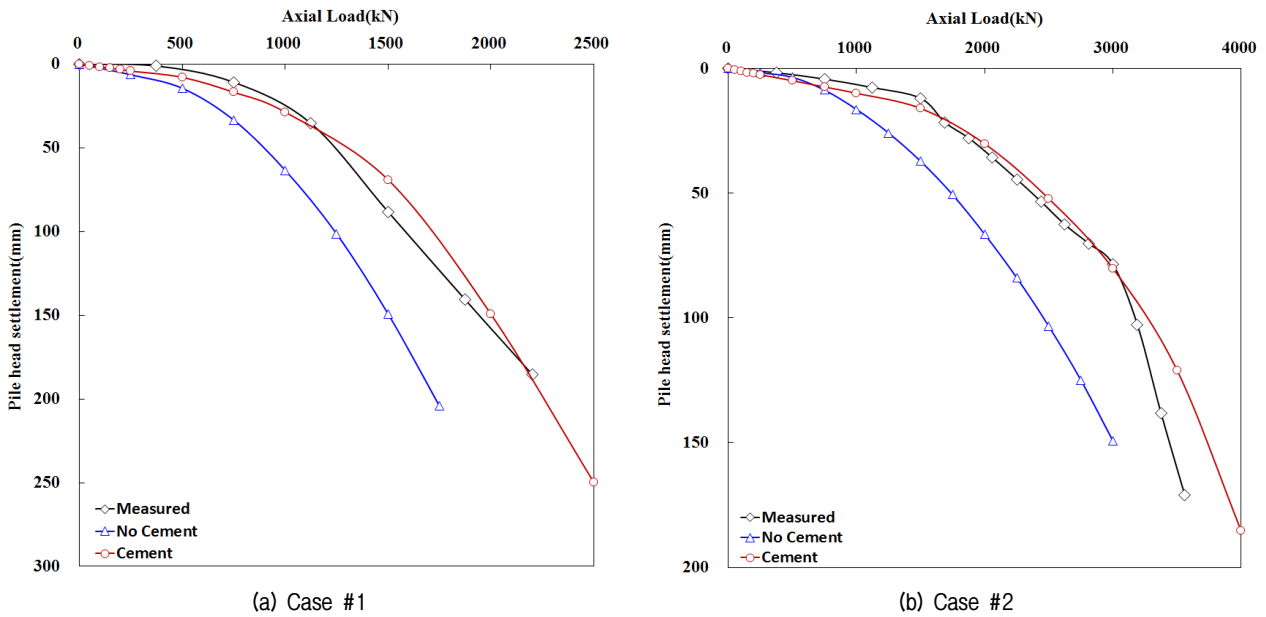


Fig. 9. The effect of cement milk around the pile

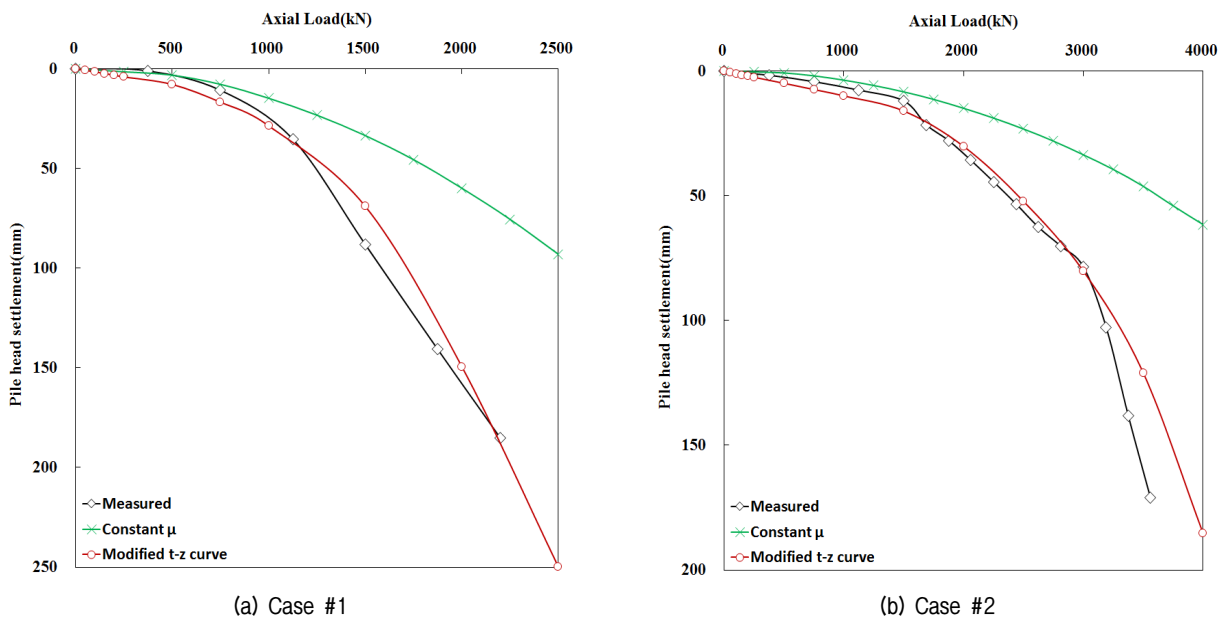


Fig. 10. The effect of interface considering cementation

과, 시멘트풀이 모델링된 매입말뚝의 경우 시멘트풀이 없는 경우와 비교해 지지력에서 주변마찰력이 차지하는 비율이 약 400% 증가하는 것으로 확인되었다. 이로 인해 말뚝의 극한지지력은 약 68% 증가하고, 침하량은 약 71% 감소하였고, 실제 현장 계측치와 동일한 거동을 보이는 것으로 확인되었다.

Fig. 10은 시멘트풀과 지반 사이의 인터페이스 모델 차이에 의한 영향을 나타낸 것이다. 일반적으로 1) 두 요소 사이의 마찰력을 하나의 상수($R_{lim} = 0.7$)로 설정한 경우, 2) 시멘트풀과 지반 사이의 시멘트풀 침투를 고려한 t-z 곡선을 적용하여 수치해석을 수행하였다. 해석결과, 마찰력을 하나의 상수로 설정한 경우 매입말뚝이 하중에 대해 더 강성한 거동을 보이는 것으로 나타났다. 반면에 제안된 t-z 곡선을 적용한 경우 풍화토(N=50/20)에 근입된 첫 번째 시험 말뚝의 완만한 하중-침하 곡선과 풍화암(N=50/10)에 근입되어 있는 두 시험 말뚝의 거동을 모두 잘 모사하는 것을 확인할 수 있었다.

4. 결론 및 요약

본 연구에서는 매입말뚝 주변마찰력의 주요인자인 시멘트풀을 강관말뚝 내부 및 강관말뚝과 지반 사이에 모델링하고, 말뚝의 상대변위를 고려할 수 있는 t-z 곡선을 적용하여 매입말뚝의 극한지지력과 하중에 의한 침하량에 대한 영향을 확인 후 분석하였다.

- (1) 강관말뚝-시멘트풀 사이의 인터페이스와는 다르게, 시멘트풀-지반 사이에는 일정 슬립을 허용하는 인터페이스 모델을 설정하여 실제 거동과 동일하게 모델링하였으며, 매입말뚝의 거동을 모사하고 예측할 수 있는 해석 모델 및 t-z 곡선을 제안하였다.
- (2) 해석결과, 시멘트풀을 모델링한 경우, 시멘트풀이 없는 경우와 비교하여 지지력에서 주변마찰력이 차지하는 비율이 약 400% 증가하고, 이로 인해 말뚝의 극한지지력은 약 68% 증가, 침하량은 약 71% 감소하는 것으로 분석되었다. 이러한 영향으로 시멘트풀이 있는 해석모델이 매입말뚝의 거동을 더 정확히 모사하는 것으로 확인되었다.
- (3) 시멘트풀 주입에 의한 시멘트풀-지반 사이에 강한 부착력이 발현되는 것으로 분석되었고, 본 연구에서는 이를 바탕으로 시멘트풀과 지반 사이에 상대변위의 고려가 가능한 t-z 곡선을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 해석결과, 제안된 t-z 곡선을 이용하여

모델링한 해석모델에 의한 매입말뚝 거동 모사가 다른 모델과 비교하여 더 정확한 것으로 확인되었다.

감사의 글

본 연구는 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단(No. 2011-0030842), 2016년 국토교통부 건설기술연구사업의 일환으로 ‘케이블교량 글로벌 경쟁력 강화를 위한 전주기 엔지니어링 및 가설 공법 개발’과 한국도로공사 도로교통연구원의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

1. Dassault Systems. (2013), “ABAQUS CAE 6.13 Manual”
2. Korea Expressway Corporation. (2012), “Expressway construction guide specification”
3. O'Neill, M. and Hassan, K. (1994), “Drilled Shaft : Effects of Construction on Performance and Design Criteria”, *Proceedings of the International Conference on Design and Construction of Deep Foundations*, Federal Highways Administration, Washington D.C., Vol.1, pp.137-187.
4. O'Neill, M., Townsend, F., Hassan, K., Buller, A., and Chan, P. (1996), “Load Transfer for Drilled Shafts in Intermediate Geomaterials”, Federal Highways Administration.
5. 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.
6. 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.
7. Park, J. (2004), “Strength and Friction behavior of Cement Paste Poured in the Bored Pile”, *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol.5, No.3, pp.31-39.
8. 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.
9. Reddy, K. and Saxena, S. (1993), “Effects of Cementation on Stress-strain and Strength Characteristics of Sands”, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.4, pp.121-134.
10. Uesugi, M. and Kishida, H. (1986), “Influential Factors of Friction between Steel and Dry Sands”, *Soils and Foundations*, Vol.26, No. 2, pp.33-46.
11. Uesugi, M., Kishida, H., and Tsubakihara, Y. (1989), “Friction between Sand and Steel under Repeated Loading”, *Soils and Foundations*, Vol.29, No.3, pp.127-137.
12. 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.

Received : October 6th, 2016

Revised : November 30th, 2016

Accepted : December 17th, 2016