

현장타설말뚝의 하중전이 특성에 대한 실험 및 해석적 연구

An Experimental Study and Numerical Analysis on Load Transfer Characteristics of Drilled Shafts

박 언 상[†] · 박 승 도¹⁾

Eonsang Park · Seungdo Park

Received: March 7th, 2022; Revised: March 8th, 2022; Accepted: March 31st, 2022

ABSTRACT : In this study, the load transfer characteristics of the base and skin of drilled shafts were analyzed and the load sharing ratio was calculated by performing a load transfer large-scale model test and three-dimensional numerical analysis considering the similarity of drilled shafts, which is the design target. From the linear behavior of drilled shafts shown in the large-scale model test and 3D numerical analysis results, the skin load transition curve for the design conditions of this study was proposed by Baquelin et al., and the base load transition curve was proposed by Baquelin et al. For the horizontal load transition curve, the formula proposed by Reese et al. was confirmed to be appropriate. The test value was slightly larger than the numerical analysis value for the axial load at the rock socketing, but the load sharing ratio at the rock socketing increased, on average, about 27.8% as the vertical load increased. The analysis value of the vertical settlement of the pile head under the vertical load was evaluated to be slightly smaller than the test value, and the maximum vertical settlement of the pile head in the model test and analysis maximum vertical load was 10.6 mm in the test value and 10.0 mm in the analysis value, and the maximum vertical settlement value at the base of the pile was found to be a test value of 2.0 mm and an analysis value of 1.9 mm. The horizontal displacement at the head of the column (ground surface) and the head of the pile during the horizontal load was found to agree relatively well with the test value and the analysis value. As a result of the model soil test, the horizontal load measured at the maximum horizontal displacement of 38.0 mm was evaluated to be 24,713 kN, and the horizontal load in the numerical analysis was evaluated to be 26,073 kN.

Keywords : Drilled shaft, Load transfer, Load sharing ratio, Large-scale model test

요 지 : 본 연구에서는 설계 대상인 현장타설말뚝기초에 대하여 상사율을 고려한 하중전이 대형토조 모형시험과 3차원 수치해석을 수행함으로써 현장타설말뚝 선단부와 주변부의 하중전이 특성을 분석하고 하중분담율을 산정하였다. 대형토조 모형시험 및 3차원 수치해석 결과에서 나타난 현장타설말뚝의 선형적 거동으로부터, 본 연구의 설계 조건에 대한 주변하중전이곡선은 Baquelin 등의 제안식, 선단하중전이곡선은 Baquelin 등의 제안식, 수평하중전이곡선은 Reese 등의 제안식이 적절한 것으로 확인되었다. 암반근입부에서 축하중은 시험값이 수치해석값보다 약간 크게 측정되었지만 암반 근입부에서 하중분담율은 연직하중이 증가함에 따라 평균적으로 약 27.8%의 분담율을 나타내었다. 연직재하 시에 말뚝두부의 침하량은 해석값이 시험값보다 약간 작게 평가되었으며, 모형 시험 및 해석 최대 연직하중에서 말뚝두부의 최대 침하량은 시험치 10.6mm, 해석치 10.0mm 이고, 말뚝선단에서 최대 침하량은 시험치 2.0mm, 해석치 1.9mm로 나타났다. 수평재하 시에 기둥 두부(지표)와 말뚝 두부에서 수평변위는 시험값과 해석값이 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났고, 모형토조시험 결과 최대 수평변위 38.0mm에서 측정된 수평하중은 24,713kN, 수치해석에서의 수평하중은 26,073kN으로 평가되었다.

주요어 : 현장타설말뚝, 하중전이, 하중분담율, 대형토조 모형시험

1. 서 론

현장타설말뚝의 지지력에 영향을 미치는 요소로는 말뚝의 길이 및 형상, 주변부 거칠기, 지반 및 말뚝의 탄성계수, 지반의 강도, 구속응력 등이 있다. 그러나 기존의 국내외 설계기준에서는 이들을 모두 고려한 설계방법이 제시되어 있지 않으므로 설계 시 고려하지 못한 사항을 감안하여 현장에서 말뚝을 타설한

후 말뚝재하시험을 통해서 말뚝의 안정성을 파악하여야 한다.

말뚝의 지지력이란 말뚝체에 작용하는 하중이 주변지반으로 전이되는 능력을 말하며 이는 말뚝-지반의 상호작용, 말뚝이 근입된 토층의 특성 등에 따라 달라진다. 말뚝은 상부 하중으로 인해 주변지반에 대해 상대적 침하가 일어나며, 이와 같은 말뚝의 하향 거동은 말뚝선단에서의 선단지지력과 말뚝주면에서의 주변마찰력으로 나타난다. 현장타설말뚝

[†] Assistant Prof., Department of Construction System Engineering, Korea Soongsil Cyber University (Corresponding Author : pes6971@naver.com)

1) President, HanYoung Construction and Technology

은 사용하중 이내의 재하 시에는 대부분의 재하하중이 주변 저항력에 의해 지지되며, 하중이 점차 증가될수록 선단으로의 하중전이가 이루어지는 것으로 알려져 있다.

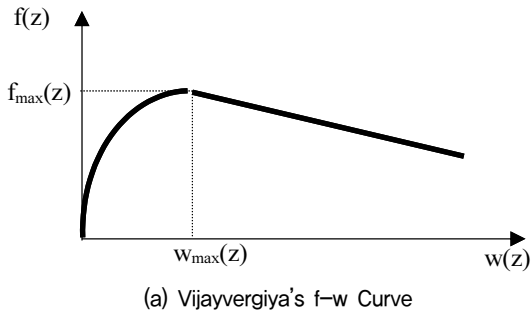
말뚝의 하중전이함수는 임의 깊이에서의 말뚝의 변위와 말뚝의 단위주면마찰력과 관계를 나타내는 주변하중 전이함수($f-w$ curve)와 말뚝선단의 변위와 단위선단저항력과 관계를 나타내는 선단하중전이함수($q-w$ curve), 수평하중전이함수($p-y$ curve)로 나뉘어진다. 이들 하중전이함수는 하중전이함수법을 이용한 말뚝의 하중-침하 거동 해석 시 가장 핵심적인 해석조건식으로 이용되며, 말뚝의 시공조건 및 지반조건에 모두 적합하도록 어떠한 하중전이함수를 적용하는가에 따라 해석의 정확도가 결정된다.

이에 본 연구에서는 ○○현장의 설계 대상인 현장타설말뚝기초에 대하여 상사율을 고려한 하중전이 대형토조 모형 시험을 실시한 후 하중조건별 시험결과를 비교 분석하여 설계 대상 말뚝의 하중전이 특성을 검증하였다. 실제 시공순서에 따라 모형 구조물을 설치한 후 연직하중과 수평하중을 재하하여 하중재하에 의한 현장타설말뚝 선단부와 주변부의 하중전이 특성을 분석하여 하중분담율을 산정하였다. 또한, 3차원 수치해석을 통해 말뚝의 응력-변형 특성과 하중전이 특성을 평가하고, 대형토조 모형시험과의 비교 분석을 통해 시험의 신뢰도를 확인하였다.

2. 이 론

2.1 주변하중전이함수($f-w$ curve)

말뚝의 주변저항력과 변위량과의 관계를 나타내는 주변하중전이함수($f-w$ curve)는 지금까지 많은 연구자들에 의해 현장재하시험을 이용한 경험적인 방법과 반이론적인 방법을 통하여 여러 가지 형태로 제안되었다. 이러한 하중전이함수는 크게 흙의 연화를 고려한 형태와 쌍곡선식으로 표현되는 형태 및 흙의 거동을 완전탄성-완전소성으로 규정하여 이중 직선식으로 표현한 형태로 분류할 수 있다.



2.1.1 Vijayvergiya의 제안식

1977년에 Vijayvergiya는 점성토와 사질토에 모두 적용 가능한 주변하중전이곡선을 제안하였는데 이 모델은 주변전이하중 $f(z)$ 가 $f_{max(z)}$ 에 도달한 후에는 직선적인 연화거동 (Softening behavior)을 하는 형태이다(Fig. 1(a)).

Vijayvergiya는 많은 말뚝재하시험의 결과로부터 $w_{max(z)}$ 의 값을 지반의 종류에 관계없이 5mm로 사용하도록 제안하였다. 이 하중전이함수는 사용이 간단하나, 탄성범위에서의 하중전이특성을 $w_{max(z)}$ 만의 함수로 표현하여 지반의 강성에 따른 하중전이거동의 차이를 적절히 묘사하지 못하는 단점이 있다.

2.1.2 Baquelin 등의 제안식

1982년에 Baquelin 등은 공내재하시험과 유한요소해석을 통하여 Fig. 1(b)와 같은 주변하중전이곡선을 제안하였다. 이 모델은 주변의 하중전이거동을 완전탄성-완전소성으로 규정하여 이중직선(bi-linear)의 형태로 표현한 것으로서, 말뚝의 변위량의 한계변위량 $w_{max(z)}$ 보다 작은 범위에서는 선형탄성 거동을 하여 $w_{max(z)}$ 보다 큰 변위에서는 완전소성 거동을 한다고 규정한 방법이다. 이 외에도 Castelli의 제안식(1992), O'Neill과 Hassan의 제안식(1994) 등이 있다.

2.2 선단하중전이함수($q-w$ curve)

선단하중전이함수($q-w$ curve)는 선단지반의 저항력과 말뚝선단의 변위량과의 관계를 나타내는 함수로서, 지금까지 많은 연구자들에 의해 경험적 또는 이론적인 방법을 통하여 여러 가지 형태로 제안되었다.

선단하중전이함수는 크게 완전탄성-완전소성의 형태 및 쌍곡선 형태로 구분되는데, 완전탄성-완전소성 모델의 경우 대부분이 반무한 탄성지반상의 분포하중에 의해 발생하는 지반 변위에 대한 1951년 Timoshenko와 Goodier의 탄성해를 기본으로 하여 개발되었다. 또한, 쌍곡선 모델의 경우에도 곡선의 형태를 결정하는 주요 인자의 하나인 초기기울기의 산정식은 대부분 Timoshenko와 Goodier의 탄성해를 기초로 하여 제안되었다.

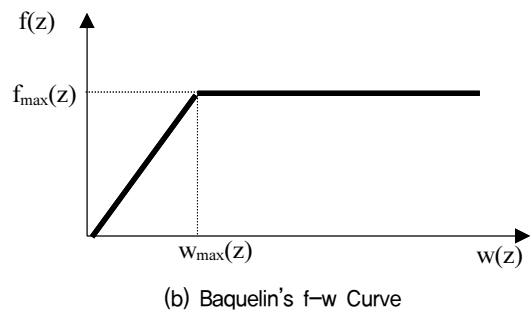


Fig. 1. $f-w$ Curve on pile shaft

2.2.1 Vijavergiya의 제안식

1977년에 Vijayvergiya는 점성토와 사질토에 모두 적용 가능한 선단하중전이곡선을 Fig. 2(a)와 같이 제안하였다. 이 모델은 선단전이하중 q 가 극한 단위선단저항력 q_{max} 에 도달하기까지는 비선형의 탄소성거동을 하며, q 가 q_{max} 에 도달한 후에는 완전소성 거동을 하는 형태이다.

2.2.2 Baquelin 등의 제안식

1982년 Baquelin 등은 Timoshenko와 Goodier의 탄성해를 기초로 하여 선단에 대한 하중전이곡선을 Fig. 2(b)와 같이 제안하였다. 이 모델은 말뚝 선단의 하중전이거동을 완전탄성-완전소성으로 규정하여 이중직선(bi-linear)의 형태로 표현한 것으로서, 말뚝 선단의 변위량이 한계변위 w_{bmax} 보다 작은 변위에서는 선형 탄성거동을 하며, w_{bmax} 보다 큰 범위에서는 완전소성 거동을 하는 것으로 규정한 방법이다.

2.3 수평하중전이함수(p-y curve)

말뚝의 변위가 커지면 지반반력이 항복치에 도달하게 되므로 이러한 지반에서의 말뚝변위와 지반반력사이의 일반적인 관계는 비선형성을 보이게 된다. 말뚝과 지반의 하중전이 관계는 p-y곡선을 통해 나타낼 수 있다.

수평하중 전이곡선(p-y 곡선)의 개념은 1956년 McClelland-Focht에 의해 도입되었다. McClelland 등은 멕시코만 미시시피강 하구부근의 해저에 설치된 석유시추장비를 이용해서 강관말뚝을 타입하고 여러 종류의 수평재하시험을 실시하였다.

이 시험결과와 실내시험의 결과를 검토하여 수평하중을 받는 말뚝의 지반반력과 점토의 압밀비배수 삼축압축시험에 의한 응력-변형률관계를 비교하였다. 1960년 Matlock과 Reese는 그 연구를 확장해서 비선형 지반반력-변위관계(p-y 곡선)를 말뚝의 수평지지력 계산에 적용하는 방법을 제안하였다.

2.3.1 Goh의 제안식

1997년 Goh, Teh 그리고 Wong은 FEM 해석을 이용하여 성토하중에 의한 말뚝주변 지반변위와 말뚝간의 상호작용을 통하여 수동말뚝의 p-y 곡선을 제안하였다. 이 p-y 곡선은 1963년 Kondner에 의해 제안된 쌍곡선 함수를 이용하여 나타내었다(Fig. 3(a)).

2.3.2 Reese와 Nyman의 제안식

수평하중이 가해질 경우 암반에 설치된 말뚝의 지반반력 거동에 대한 연구결과는 매우 부족한 실정이지만, 1978년 Reese와 Nyman은 Florida Keys지역의 석회암반에 천공말뚝을 설치하여 수평하중 재하시험을 수행하여 p-y곡선을 도출한 연구를 보고하였다. 제시한 p-y곡선은 2중선형 관계로 변형계수가 각각 $E_s = 1000q_u$, $E_s = 50q_u$ 로 일축압축강도에 의하여 결정된다. 그리고 극한값 P_u 이후에는 취성파괴가 일어나는 것으로 간주하였다. 또한 Reese(1997)는 그동안의 암반에 대한 여러 학자들의 연구결과들을 이용하여 2개의 직선구간과 1개의 곡선구간으로 이루어진 Fig. 3(b)와 같은 p-y 곡선을 제안하였다.

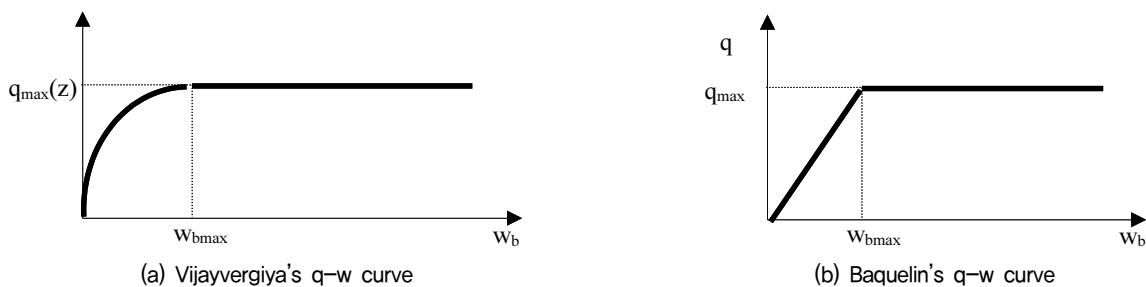


Fig. 2. q-w Curve on pile base

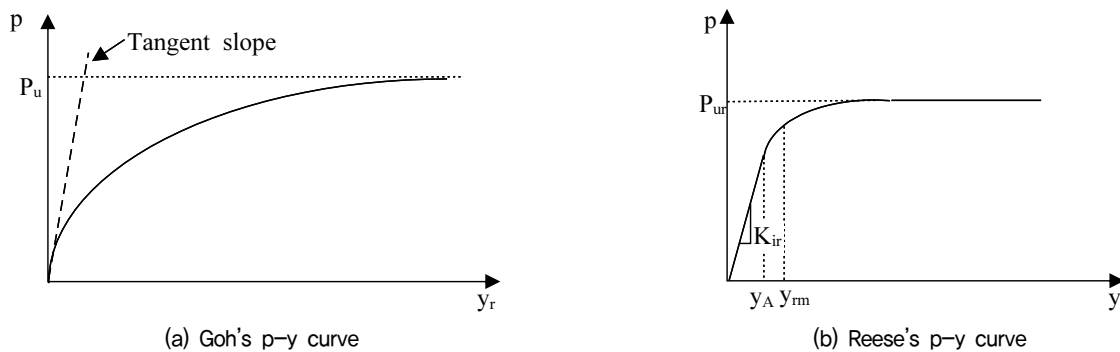


Fig. 3. Load-displacement curve for horizontal loading

3. 대형토조 모형시험

3.1 시험장치

본 연구에서는 대형토조 모형시험을 통해 실제 원지반과 구조물에 대하여 상사율(1/100)을 적용하여 말뚝의 배치에 따른 기반암층과 풍화대층 및 모래층을 모델링함으로써 상재하중에 따른 말뚝의 변위와 하중전이특성을 분석하였다. 상재하중 재하에 따른 변위특성과 하중을 측정하기 위하여 변위계와 하중계를 설치하였고, 축하중을 측정하기 위하여 변형율계를 말뚝에 부착했으며, 계측센서로부터 취득한 측정결과를 분석함으로써 말뚝과 지반의 상호거동에 따른 안정성 평가를 수행하였다(Fig. 4).

연직변위와 수평변위를 측정하기 위하여 LVDT를 연직 변위의 경우 푸팅 상단(지표), 수평변위의 경우 기둥상단 푸팅의 측면에 설치하였다. 또한, 말뚝선단에서의 하중을 측정하기 위하여 로드셀을 말뚝선단에 설치하였고, 말뚝의 축하중을 측정하기 위하여 변형율계(strain gauge)를 말뚝에

부착하였다.

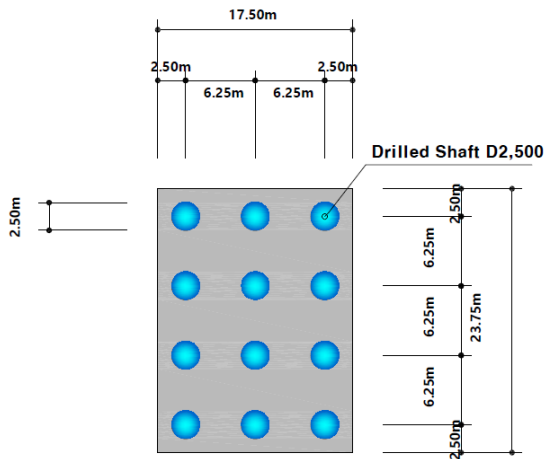
대형토조 모형시험에서 연직재하는 하중 제어시험(stress control)을 위하여 상사율을 적용한 재하추를 사용하였다. 재하하중은 말뚝 1본당 3,694kN, 11,082kN, 18,471kN, 25,859kN, 40,635kN, 55,412kN, 70,188kN, 99,741kN의 하중단계로 재하(설계하중의 300% 이상 재하)하였다(Fig. 5(a)).

수평재하는 변형을 제어시험(strain control)을 위하여 로드셀을 장착한 수평재하장치를 말뚝 두부 상단(푸팅) 측면에 설치하여 사용하였다. 일정변위 제어방식으로 푸팅 측면에 최대 38mm까지 변위를 가하면서 수평하중과 변위의 변화를 측정하였다(Fig. 5(b)).

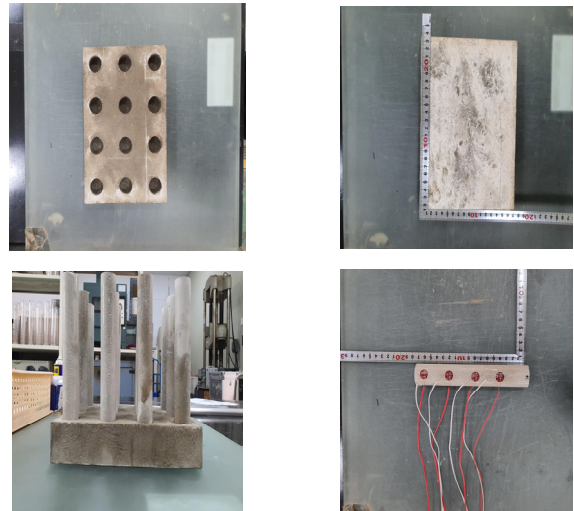
3.2 시험방법

대형토조 모형시험의 시험과정 및 방법은 다음과 같다.

- ① 토조모형 규모 산정 : 모형 상사율 결정, 모형 제원 결정
- ② 기초지반 조성 : 토층별 지반 포설, 현장타설말뚝 설치
- ③ 계측기 설치 : 말뚝 계측기 설치, 하중계 및 변위계 설치

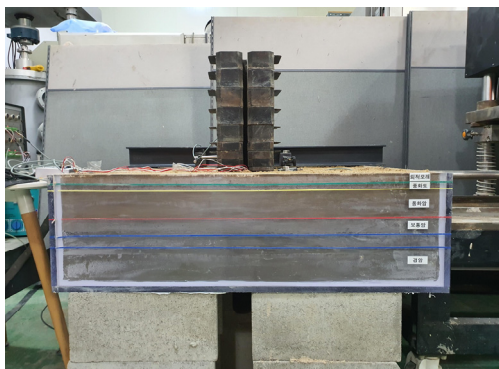


(a) Plan of Footing

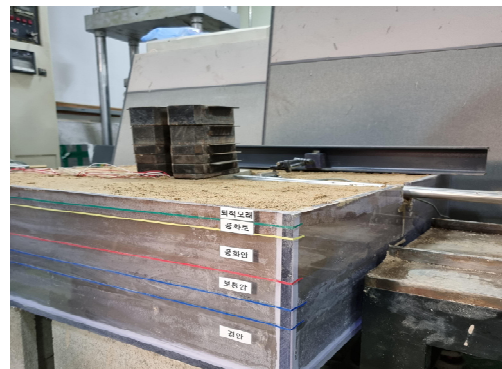


(b) Photograph of pile foundation

Fig. 4. Large scale tests



(a) Vertical loading test



(b) Horizontal loading test

Fig. 5. Loading tests

④ 말뚝재하시험 : 연직재하시험, 수평재하시험

이와 같이 대형토조 모형시험에서는 하부 기반암(말뚝 선단 하부 지지층)을 포설한 후 말뚝을 설치하고, 기반암, 풍화대층과 모래층을 포설하였다. 대형토조에 모든 지반을 조성한 후, 관련 계측기와 수평재하 장치를 설치하였다.

3.3 시험결과

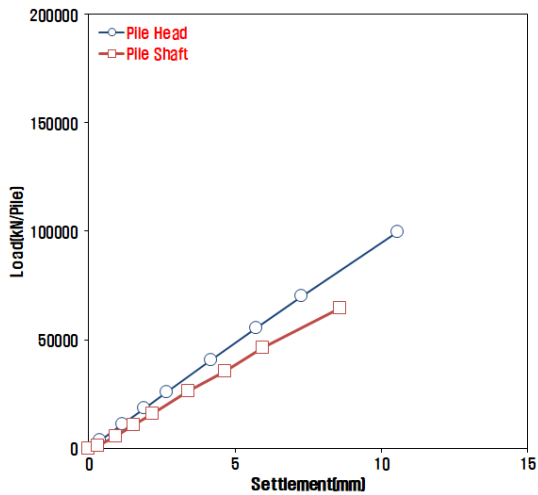
대형토조 모형시험에 대한 일련의 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 말뚝 두부, 주면, 말뚝 선단부에 작용하는 하중-침하 및 수평하중-수평변위 시험결과는 선형적인 거동을 나타내고 있다. 본 연구에서는 대형토조 모형시험의 신뢰도를 확보하고자 시험과 동일한 조건으로 3차원 수치해석을 수행하였다. 따라서 Fig. 6에 도시한 일련의 대형

토조 모형시험 결과는 후술하는 수치해석 결과와 함께 비교 분석하였다.

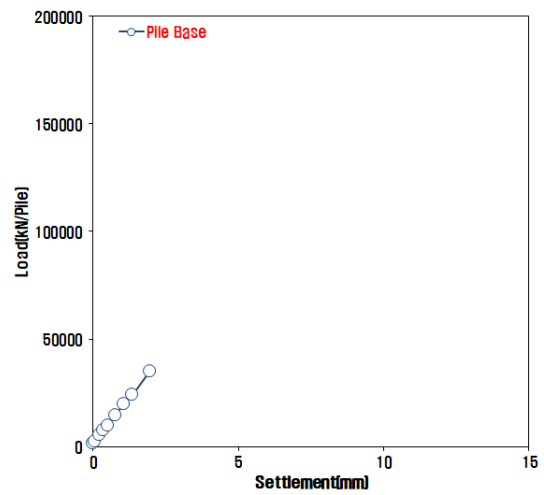
4. 수치해석

4.1 해석개요

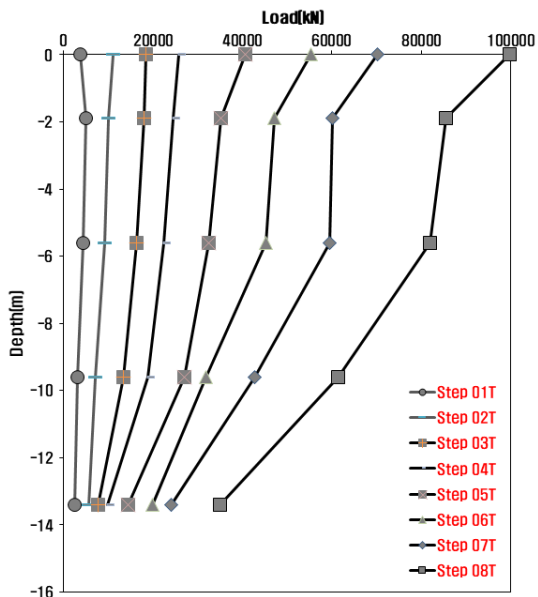
본 연구에서는 총 12본의 말뚝이 타설된 현장타설말뚝에 대한 대형토조 모형시험을 대상으로 3차원 수치해석을 수행하였다. 연직하중에 따른 해석은 모형시험에서와 같이 중심부 1본의 현장타설말뚝에 대하여 하중전이 특성을 분석하고, 재하하중에 대한 말뚝의 두부와 선단에서의 하중-변위 관계를 파악하였다. 수평하중에 따른 해석은 모형시험과



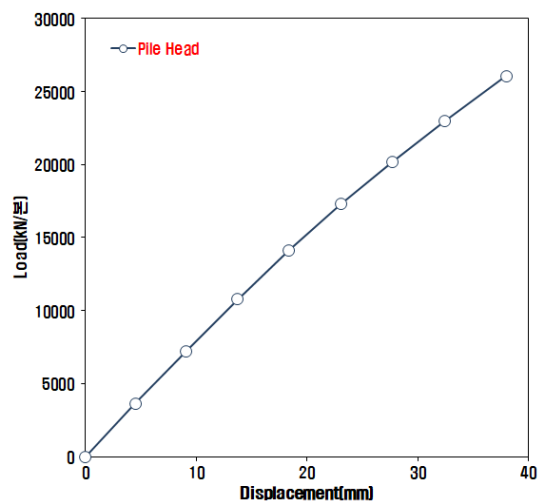
(a) Load-Settlement curve on pile head and shaft



(b) Load-Settlement curve on pile base



(c) Load transfer curve on ground surface and pile head (Vertical loading)



(d) Load-Displacement curve on pile head (Horizontal loading)

Fig. 6. Test results

동일한 수평하중에 따른 변위를 파악하였다.

수치해석은 말뚝의 안정성을 파악하기 위하여 수행된 대형토조 모형시험의 조건과 동일한 하중단계에 따라 연직하중과 수평하중의 경우에 대하여 수행하였다. 현장타설 말뚝의 안정성을 평가하기 위해 3차원 유한요소해석을 실시하였으며, 해석에는 국내외에서 활용도가 가장 높은 지반 범용 상용 유한요소해석 프로그램인 Plaxis 3D를 사용하였다.

수치해석에 사용된 지층은 지반조사 결과를 토대로 기반암층, 풍화대층, 모래층으로 구분하였다. 수치해석을 위해

입력한 지반 및 암반의 물성은 지반조사 결과를 토대로 산정된 설계 지반정수를 적용하였다(Table 1).

4.2 해석결과

3차원 수치해석을 통해 연직하중 재하 시 현장타설말뚝의 심도별 축하중 및 연직변위를 예측한 결과는 Fig. 8과 같다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 말뚝 선단으로 갈수록 축하중 및 침하량은 작아지는 것으로 평가되었다. 즉, 축하중은 재하단계별로 심도가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보인다.

Fig. 9는 연직하중 재하에 따른 말뚝의 두부와 선단에서



Fig. 7. 3D FEM analysis for large scale test

Table 1. Geotechnical parameters used for numerical analysis

Item	Unit weight (γ , kN/m ³)	Cohesion (c, kN/m ²)	Friction angle (ϕ , °)	Modulus of deformation (E, MPa)	Poisson's ratio (ν , -)
Sedimentary sand	18.0	0	27	13	0.35
Weathered soil	19.0	23	30	60	0.31
Weathered rock	20.0	31	32	270	0.30
Moderate rock	24.0	950	39	6,400	0.25
Hard rock	25.0	1,500	43	12,000	0.23

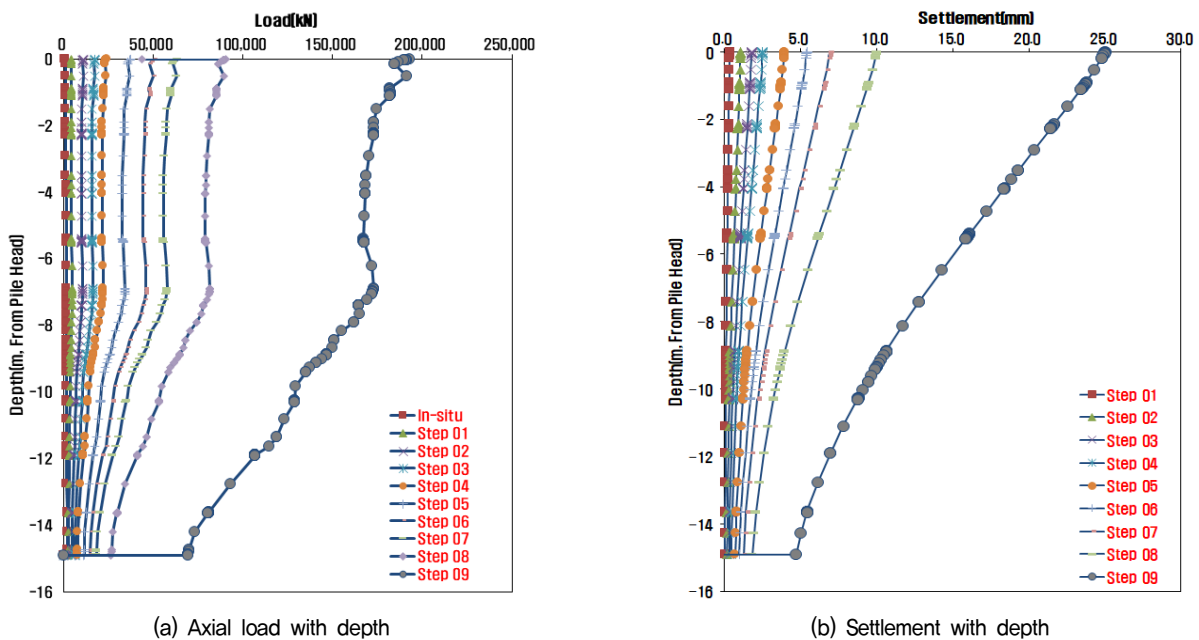


Fig. 8. Axial load and settlement with depth under vertical load

의 침하량 예측 결과를 도시한 것이다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 연직하중 재하단계별 말뚝 두부, 선단부의 변위는 선형적인 증가를 보이고 있다. 즉, 심도별 침하량은 심도가 깊어짐에 따라 지속적으로 감소한다. 또한 설계하중의 3배 이상까지 하중이 재하되더라도 말뚝의 하중-침하는 선형탄성 거동을 할 것으로 예측되었다.

수평하중 재하 시 심도에 따른 수평하중 및 수평변위 해석

결과는 Fig. 10~Fig. 11과 같다. Fig. 10에서 보는 바와 같이 수평하중 재하 시 말뚝 선단으로 갈수록 축하중의 절대값 및 침하량은 작아지는 것으로 평가되었다. 또한 수평하중 재하 시 푸팅부에서 최대 수평변위를 보이고, 말뚝 선단부로 갈수록 크게 감소한다(Fig. 11).

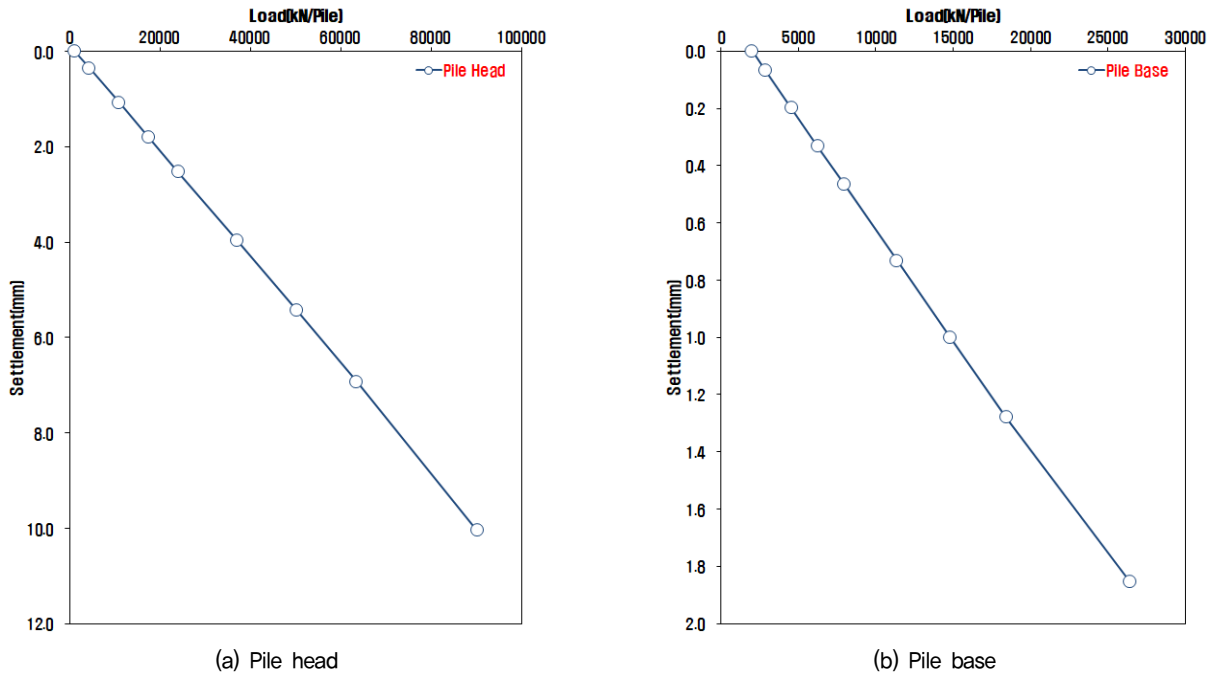


Fig. 9. Pile settlement under vertical load

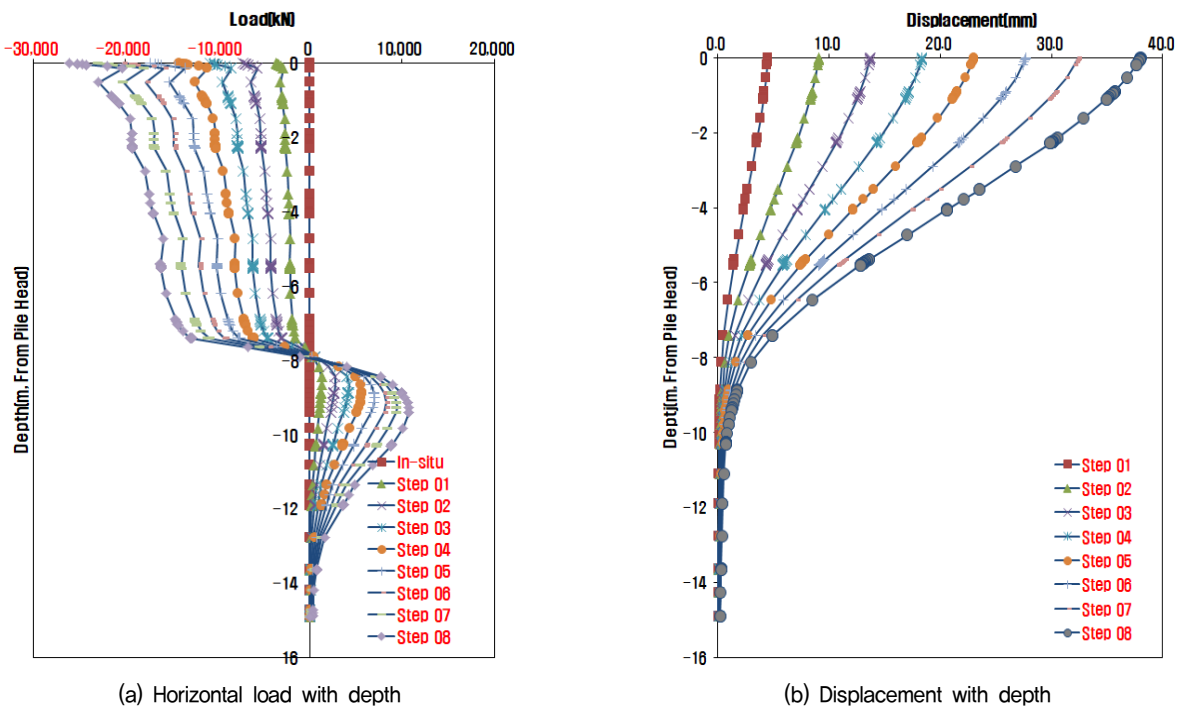
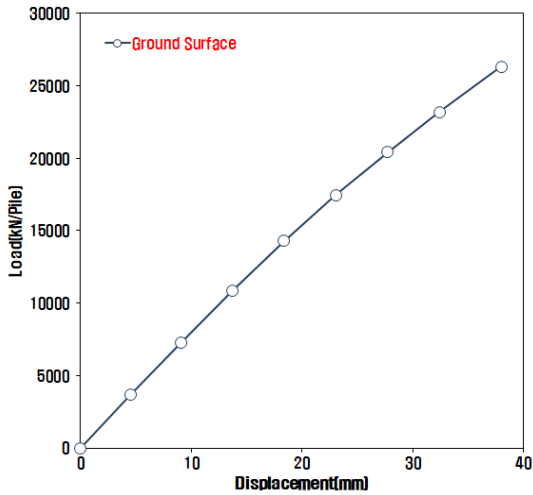
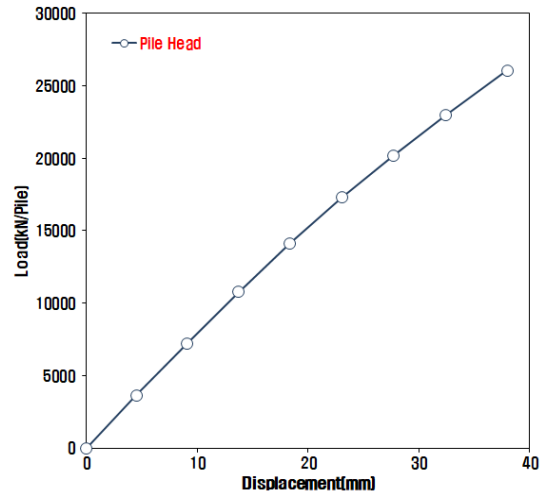


Fig. 10. Horizontal load and displacement with depth under horizontal load



(a) Load-Displacement under horizontal load (1)



(a) Load-Displacement under horizontal load (2)

Fig. 11. Pile displacement under horizontal load

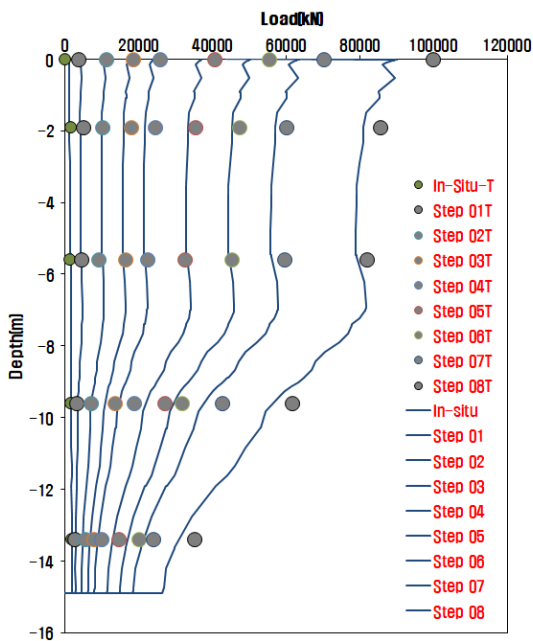
5. 결과분석

5.1 하중전이 특성분석

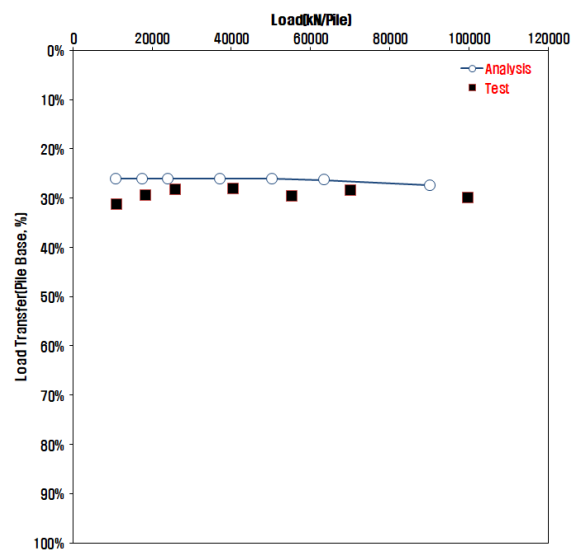
대형토조 모형 실험결과와 수치해석 결과로부터 평가된 대상 말뚝의 하중전이 특성은 Fig. 12와 같다. Fig. 12(a)에서 보는 바와 같이 축하중은 재하단계에서 심도별로 주변마찰력의 발휘로 인해 지속적으로 감소하는 경향을 보인다. Fig. 12(b)에서 보는 바와 같이 암반 근입부에서 하중분담율은 모형시험 결과와 수치해석 결과 모두 하중 증가에 따라 큰 변화가 없는 것으로 나타났고, 선단 하중분담율은 시험

29%, 해석 26%, 평균 약 27.8%로 평가되었다. 선단 하중분담율은 재하단계별 상재하중과 상재하중으로 인해 말뚝 선단에 전달되는 하중의 비율을 말하며, 대형토조 모형시험에서는 말뚝 선단에 설치된 하중계를 통해 측정되었다.

말뚝은 상부 하중으로 인해 주변지반에 대해 상대적 침하가 일어나며, 이와 같은 말뚝의 하향 거동은 말뚝선단에서의 선단지지력과 말뚝주면에서의 주변마찰력으로 나타난다. 현장타설말뚝은 사용하중 이내의 재하 시에는 대부분의 재하하중이 주변저항력에 의해 지지되며, 하중이 점차 증가될수록 선단으로의 하중전이가 이루어지는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서 대형토조 모형시험과 3차원 수치



(a) Axial load with depth



(b) Load transfer

Fig. 12. Comparison between axial load and transfer

해석을 통해 도출한 정량적인 선단 하중분담율은 향후 말뚝 설계에 있어 의미있는 결과가 될 것으로 판단된다.

5.2 말뚝의 변위 특성분석

5.2.1 연직재하시험 결과분석

모형 실험결과와 3차원 해석결과에 따른 연직하중 재하시 말뚝 1본당 말뚝 두부와 선단부에서의 최대 침하량은 Table 2와 같다. 연직재하시 말뚝두부의 침하량은 해석값이 시험값보다 약간 작게 평가되었으며, 실험 및 해석 최대 연직

Table 2. Comparison of maximum settlement at the pile head and base

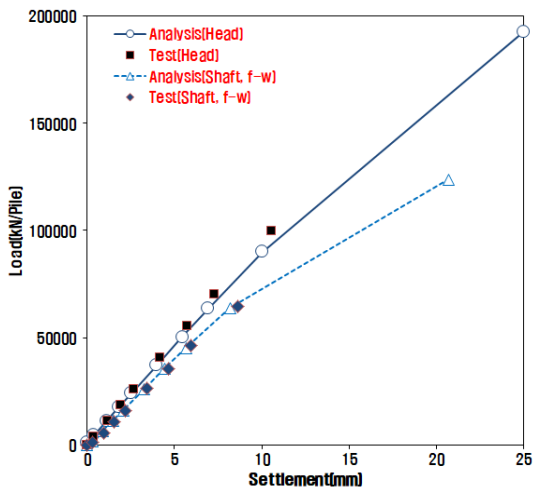
Item	Pile head	Pile base	Remarks
Axial load	99,741 kN	35,000 kN	-
Test results	10.6 mm	2.0 mm	-
Analysis results	10.0 mm	1.9 mm	-

하중에서 말뚝두부의 최대 침하량은 시험치 10.6mm, 해석치 10.0mm이고, 말뚝선단에서 최대 침하량은 시험치 2.0mm, 해석치 1.9mm로 나타났다.

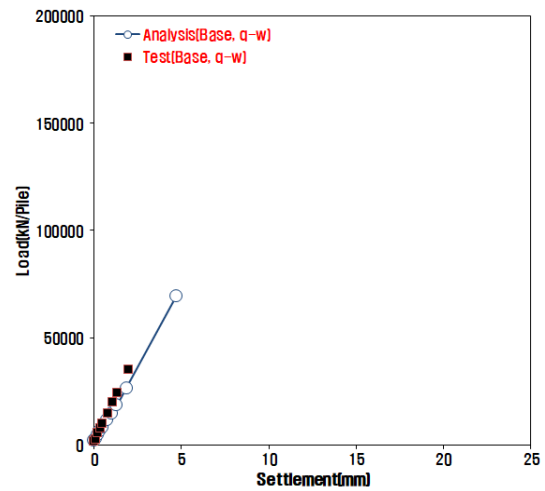
모형 실험결과와 3차원 해석결과에 따른 연직하중 재하시 말뚝 두부와 선단부에서의 하중-침하 특성은 Fig. 13과 같다. Fig. 13에서 보는 바와 같이 하중-침하 특성은 말뚝 두부와 선단부에서 모두 선형 거동을 하며, 3차원 해석 결과 대비 모형 실험에서의 침하량이 약간 큰 것으로 나타났다. 이와 같은 선형적 거동으로 볼 때 주변하중전이곡선(f-w curve)과 선단하중전이곡선(q-w curve)은 앞서 기술한 다양한 방법 중 Baquelin 등의 제안식이 적정한 것으로 판단된다.

5.2.2 수평재하시험 결과분석

모형 실험결과와 3차원 해석결과에 따른 수평하중 재하시 말뚝 1본당 말뚝 두부와 선단부에서의 수평변위 변화는

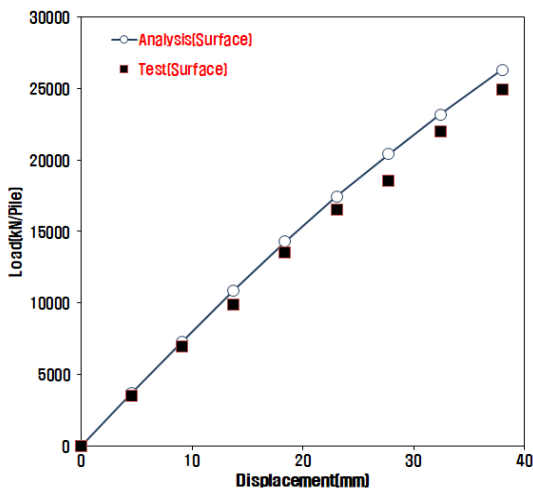


(a) f-w curve of pile head and shaft

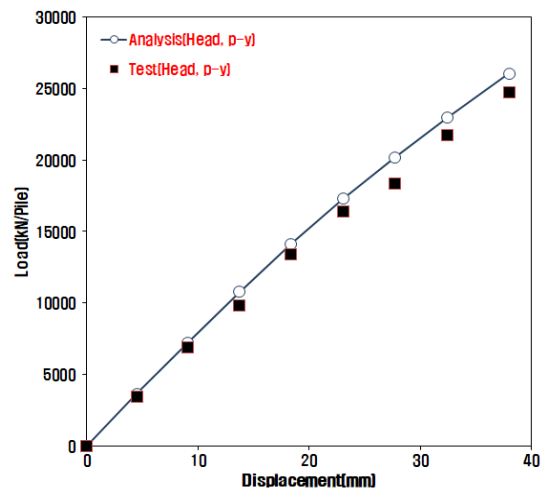


(b) q-w curve of pile base

Fig. 13. Load transfer curve of pile under vertical load



(a) Load-Displacement on ground surface



(b) p-y curve of pile head

Fig. 14. Load transfer curve of pile under horizontal load

Fig. 14와 같다. 수평하중 재하 시 기둥 두부(지표)의 수평변위와 말뚝 두부에서 수평변위는 유사한 경향을 나타낸다. 즉, 모형시험 결과 말뚝두부에서 최대 수평변위 38.0mm일 때 측정된 수평하중은 24,713kN이고, 수치해석 상의 최대 수평변위 38.0mm일 때 수평하중은 26,073kN으로 매우 유사하게 평가되었다.

또한 Fig. 14에서 보는 바와 같이 수평하중 재하 시 말뚝 두부에서의 하중-변위 특성은 모형시험 및 수치해석 결과 모두 선형 거동을 하는 것으로 나타났다. 이와 같은 선형적 거동으로 볼 때 수평하중전이곡선(p-y curve)은 앞서 기술한 다양한 방법 중 Reese 등의 제안식(1978)이 적절한 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 ○○현장의 설계 대상인 현장타설말뚝기초에 대하여 상사율을 고려한 하중전이 대형토조 모형시험과 3차원 수치해석을 수행함으로써 현장타설말뚝 선단부와 주변부의 하중전이 특성을 분석하고 하중분담율을 산정하였다. 본 연구에 대한 결론은 다음과 같다.

- (1) 대형토조 모형시험 결과 말뚝 두부, 말뚝 주변, 말뚝 선단부에 작용하는 하중-침하 및 수평하중-수평변위 시험 결과는 선형에 유사한 거동을 나타내었다. 본 연구에서 대형토조 모형시험의 신뢰도를 확보하고자 시험과 동일한 조건으로 3차원 수치해석을 수행한 결과에서도 이와 유사한 선형 거동을 보였다.
- (2) 대형토조 모형시험 및 3차원 수치해석 결과에서 나타난 현장타설말뚝의 선형에 가까운 거동으로부터, 본 연구의 설계 조건에 대한 주변하중전이곡선은 Baquelin 등의 제안식, 선단하중전이곡선은 Baquelin 등의 제안식, 수평하중전이곡선은 Reese 등의 제안식이 적절한 것으로 확인되었다.
- (3) 대형토조 모형시험 및 3차원 수치해석 결과, 암반근입부에서 측하중은 시험값이 수치해석값보다 약간 크게 측정되었지만 암반 근입부에서 하중분담율은 연직하중이 증가함에 따라 평균적으로 약 27.8%의 분담율을 나타내었다.

- (4) 연직재하 시에 말뚝두부의 침하량은 해석값이 시험값보다 약간 작게 평가되었으며, 모형시험 및 해석 최대 연직하중에서 말뚝두부의 최대 침하량은 시험치 10.6mm, 해석치 10.0mm이고, 말뚝선단에서 최대 침하량은 시험치 2.0mm, 해석치 1.9mm로 나타났다.
- (5) 수평재하 시에 기둥 두부(지표)와 말뚝 두부에서 수평변위는 시험값과 해석값이 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 모형토조시험 결과 최대 수평변위 38.0mm에서 측정된 수평하중은 24,713kN, 수치해석에서의 수평하중은 26,073kN으로 평가되었다.

References

1. Baquelin, F. R. and Jezequel, J. F. (1982), Parameters for friction piles in marine soils, 2nd International Conference in Numerical Methods for Offshore Piling, Austin, April, pp. 46~58.
2. Castelli, F., Maugeri, M. and Motta, E. (1992), Analisi non lineare del cedimento di un Palo Singolo, Rivista Italiana di Geotecnica, Vol. 26, No. 2, pp. 115~135.
3. Goh, A. T., Teh, C. I. and Wong, K. S. (1997), Analysis of piles subjected to embankment induced lateral soil movements, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 123, No. 9, pp. 75~91.
4. Kondner, R. L. (1963), Hyperbolic stress-strain response; cohesive soils, Journal SMFD, ASCE, Vol. 89, No. SM1, pp. 115~143.
5. Matlock, H. and Reese, L. C. (1960), Generalized solutions for laterally loaded piles, American Society of Civil Engineers 86, No. SM5, pp. 63~91.
6. McClelland, B. and Focht J. A. (1958), Soil modulus for laterally loaded piles, American Society of Civil Engineers 123, pp. 1049~1063.
7. O'Neill, M. W. and Hassan, K. M. (1994), Drilled shafts: Effects of construction on performance and design criteria, Proceedings of International Conference on Design and Construction of Deep Foundations, Vol. 1, FHWA, Orlando, pp. 137~187.
8. Reese, L. C. (1997), Analysis of laterally loaded piles in weak rock, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 123, No. 11, pp. 1010~1017.
9. Reese, L. C. and Nyman, K. J. (1978), Field load test of instrumented drilled shafts at Islamorada, Florida. A report to Girdler Foundation and Exploration Corporation, Clearwater, Florida, pp. 95.
10. Timoshenko, S. and Goodier, J. N. (1951), Theory of elasticity, McGraw-Hill, NY, pp. 83~102.
11. Vijayvergiya, V. N. (1977), Load-movement characteristics of piles. Ports '77: 4th Annual Symposium of the Waterway, Port, Coastal, and Ocean Division, ASCE, Los Angeles, pp. 269~284.