

강관말뚝의 제원이 말뚝거동에 미치는 영향에 관한 수치해석 연구

Numerical Study on the Effect of Steel Pipe Specification on Pile Behaviour

박 정 준¹ Park, Jeong-Jun 이 광 우² Lee, Kwang-Wu
유 승 경³ You, Seung-Kyong 홍 기 권⁴ Hong, Gigwon

Abstract

In this study, three dimensional numerical analyses were carried out to predict axial (pullout and compressive) and lateral behavior of rock-socketed steel pipe pile varying diameter, wall thickness, and length. As a result of the pile pullout analyses, it was confirmed that the pullout displacement was inversely proportional to the pile diameter for given pile length, thickness, pullout load. Load-settlement relationship of the compressive pile analyses revealed that the effect of pile thickness on pile resistance was more significant than that of pile diameter. In addition, laterally loaded pile analyses showed that pile lateral resistance is influenced above all else by pile diameter. This study showed that it is necessary to conduct numerical analyses to identify the effects of pile diameter, wall thickness, and pile length on the steel pipe pile behavior as a preliminary pile design under specified loading conditions.

요 지

본 연구에서는 특정 암반에 근입된 강관말뚝의 거동특성을 분석하기 위하여, 강관말뚝의 직경, 두께 및 길이 조건에 따른 인발, 압축 및 수평재하 시의 시험결과 예측을 위한 3차원 수치해석 연구를 수행하였다. 먼저, 인발재하에 대한 거동특성을 분석한 결과, 동일한 말뚝길이 및 두께와 인발하중 크기를 기준으로 말뚝직경에 반비례하는 인발변위가 나타나는 것으로 확인되었다. 또한 압축재하에 따른 하중-침하 관계를 통하여, 말뚝 직경에 비하여 말뚝의 두께가 하중저항에 대한 효과에 더욱 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었으며, 수평하중 재하에 따른 수평변위 관계를 바탕으로 수평하중의 저항효과는 말뚝직경에 의한 영향이 큰 것으로 분석되었다. 따라서 강관말뚝을 이용하여 기초구조물 설계에 따른 재하시험을 위해서는 예비설계 단계에서 말뚝 조건이 거동특성에 미치는 영향을 분석할 필요가 있는 것으로 확인되었다.

Keywords : Steel pipe pile, Pullout, Compressive load, Laterally load, Resistance effect, Numerical analysis

1 정희원, 인천대학교 방재연구센터 책임연구원 (Member, Principal Researcher, Incheon Disaster Prevention Research Center, Incheon Natl. Univ.)
2 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구소 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Geotechnical Engrg. Research Institute, Korea Institute of Civil Engrg. and building Technology)
3 정희원, 명지전문대학 토목과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Myongji College)
4 정희원, (주)대한건설ENG 기술연구소 연구소장 (Member, Director, Institute of Technology Research and Development, Korea Engrg. & Construction, Tel: +82-31-699-0604, Fax: +82-31-790-3090, gigwon_hong@kecgroup.kr, Corresponding author, 교신저자)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 11월 30일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

말뚝기초는 교량, 건축물, 항만 및 플랜트 시설물 등과 같은 다양한 사회기반구조물의 하중을 지지하는 기초 구조물로서, 수직 및 수평하중을 지지하기 위하여 지반이 연약하여 상부 구조물의 하중을 지지할 수 없거나 수위가 매우 높아 직접기초 설치가 곤란한 경우에 고려하는 기초공법이다(Yang et al., 2015). 이와 같은 말뚝기초는 재료적 특성에 따라 크게 강관말뚝, PHC말뚝 및 현장타설말뚝으로 구분될 수 있다.

강관말뚝은 다른 종류의 말뚝에 비하여 시공관리가 용이하고, 재료의 특성상 수평하중에 대한 저항력이 우수한 점을 바탕으로 수평하중에 대하여 요구되는 지지력이 상대적으로 높은 구조물에 주로 적용되고 있다(Yun et al., 2016). 그러나 강관은 다른 말뚝재료에 비하여 재료비가 고가이며 원자재의 대부분을 외국 수입에 의존하는 경향이 있어, 공사비 증가 요인이 되고 있다. 그리고 PHC말뚝(고강도 프리스트레스트 콘크리트 말뚝)은 저렴한 재료비에 큰 장점이 있지만, 수평하중이 크게 작용하는 경우 인장력이 발생하여 말뚝의 구조파괴가 발생할 수 있다. 즉, 강관말뚝은 깊은기초의 재료로서 유용하지만, 고가의 자재로 인식되어 건축물 등과 같은 축하중이 지배적인 구조물에는 상대적으로 경제성이 우수한 PHC말뚝이 적용되고 있다. 마지막으로 현장타설말뚝은 장대교량 기초 또는 대형건축물과 같은 큰 축하중 및 수평하중이 요구되는 구조물의 기초로 적용된다. 특히, 대구경 현장타설말뚝의 경우에는 대형 시공장비 활용에 따른 공사비 증가 및 보강재료로 사용된 철근망의 품질관리 및 시공의 어려움 등이 문제로 지적되고 있다.

한편, 국내의 지반은 비교적 얇은 심도에서 지지암반이 출현하는 선단지형 형태의 말뚝이 시공되기 양호한 조건이며, 특히 제주도와 같은 일부 특정지역에서는 암반 노출심도가 매우 낮은 경우도 있다. 즉, 이와 같은 지지조건에서는 상부 구조물의 종류에 따라 보다 큰 지반지지력을 유도할 수 있어 경제적인 말뚝설계가 가능하여 고강도 강관말뚝을 사용하기에 적합하다(Na et al., 2010).

말뚝기초의 설계는 재료적 특성에 따라 지반조건, 하중조건 및 말뚝형상 등과 같은 매우 다양한 설계요소에 대한 검증이 수행해야 하며, 예비설계, 검증시험 및 예비설계 보완의 절차를 거쳐 수행하는 것이 바람직하다고 연구된 바 있다(Choi, 1999). 이 때, 말뚝의 시공시방 설정, 깊이에 따른 말뚝지지력 평가 및 말뚝길이 산정, 말

뚝의 하중 지지거동 등에 대한 확인이 필요하며, 이는 주로 검증시험 단계에서 수행되게 된다(Kwon, 2015). 즉, 검증시험의 보다 명확한 결과도출을 위해서는 예비설계 단계에서 신뢰성 있는 말뚝 거동예측의 필요성이 강조되고 있으며, 이를 위한 평가방법 중 수치해석적 연구가 주로 이루어지는 경우가 많다. Lee(2013)는 전철주기초의 거동을 파악할 수 있는 3차원 유한요소해석기법의 개발을 통해 기존의 재하시험 결과를 이용하여 유효성을 검증하였으며, 이를 바탕으로 다양한 기초형상에 따른 기초의 모멘트 저항거동을 분석한 바 있다. Lee et al.(2013)은 새롭게 제안된 그룹형 석션파일의 적용가능성을 파악하기 위하여 수치해석을 통하여 대상 기초의 수평방향 지지거동을 평가·분석하였다. Cho et al.(2010)은 말뚝두부구속조건을 고려한 말뚝지지 전면기초의 최적단면 설계를 위하여 수직 및 수평하중을 받는 말뚝기초의 두부구속조건에 따른 3차원 수치해석을 수행함으로써 경제적인 말뚝기초 설계의 가능성을 분석한 바 있다. 또한 Kim and Jeong(2010)은 대구경 말뚝의 수평 하중전이 거동 및 변형 해석을 위해 적용되는 기존 수평하중전이 해석법(p-y 곡선법)의 단점을 보완하기 위하여 지반의 연속성을 고려한 수평 지반저항력 산정법을 고찰하였으며, 3차원 유한요소 해석을 이용하여 수평하중을 받는 말뚝의 연속체 모델링을 수행함으로써, 지반연속성을 고려하면 보다 경제적인 설계를 할 수 있음을 확인한 바 있다.

본 연구에서는 현무암 지층에 근입된 해상풍력기초에 적용할 수 있는 강관말뚝의 거동특성에 대한 검증시험 결과와 비교·분석을 위해 시험결과 예측을 위한 3차원 수치해석 연구를 수행하였다. 즉, 특정지역 내에 일반적으로 분포한 지지암반의 상태를 고려하여 강관말뚝의 직경, 두께 및 길이에 대한 수치해석을 수행하였으며, 이 때, 하중재하는 재하시험에서 적용되는 인발, 압축 및 수평재하 조건으로 적용함으로써, 각각의 하중-변위관계에 대한 분석을 실시하였다.

2. 해석조건 및 방법

2.1 지반조건 및 말뚝제원

동일한 지반조건에서 강관말뚝의 제원 및 재하조건에 따른 거동특성을 검토하기 위하여, Table 1 및 Table 2와 같이 지반정수와 말뚝에 대한 물성치를 적용하였다. 이 때, 지반정수는 지반조사 결과 부재로 현무암이

Table 1. Engineering properties of rock

Layer	Unit weight (γ , kN/m ³)	Cohesion (c, kPa)	Internal friction angle (ϕ , °)	Elastic modulus (E, MPa)	Poisson's ratio (ν)
Basalt rock	23.0	150	38	1,400	0.27

Table 2. Specifications of steel pipe pile, pile inner fill of concrete, grout material

Classification	Unit weight (γ , kN/m ³)	Elastic modulus (E, MPa)	Poisson's ratio (ν)	Dynamic shear modulus (G_d , MPa)	Dynamic poisson's ratio (ν_d)
Steel pipe pile	203.0	2.0×10^5	0.2	-	-
In-filled concrete	23.0	3.0×10^3	0.3	-	-
Grout material	20.0	-	-	125	0.3

분포함 제주지역의 육상 지반에 대하여 대표적인 암반 조건을 고려하였다. 강관말뚝의 제원은 계획된 재하시험과 동일한 재료로서 적용하였으며, 말뚝의 압축/인발/수평 재하시험 시, 말뚝의 파괴 전에 지반의 파괴를 유도하기 위하여 말뚝의 강성을 보수적으로 검토하기 위하여, 직경 및 두께를 모두 고려하였다. 즉, 직경은 150mm 및 300mm, 두께는 강성을 고려하여 9mm~15mm 범위로 적용하였고, 말뚝의 길이는 재하시험 조건을 고려하

여 5m~10m 범위로 한정하였다.

한편, 해석 시, 강관말뚝 내부는 콘크리트로 속채움된 합성단면으로 고려하였으며, 말뚝 주변부는 수중불분리성 그라우트재를 적용하는 것으로 가정하였다. 또한 하중조건은 지반 및 말뚝의 파괴를 확인할 수 있는 범위까지 충분히 재하되도록 고려하였다.

2.2 해석종류 및 모델링

앞서 언급한, 말뚝의 제원 및 재하조건을 고려한 해석종류는 Table 3에서 보는 바와 같으며, 총 36cases에 대한 해석을 수행하였다. 수치해석은 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였으며, Fig. 1과 같이 3차원 모델링을 통한 해석을 수행하였다. 해석에 적용된 지

Table 3. Numerical simulation cases varying pile length and thickness

Inner diameter of steel pipe pile (mm)	Pile length (m)	Pile thickness (mm)
150	5, 6, 7, 8, 9, 10	9, 12, 15
300		

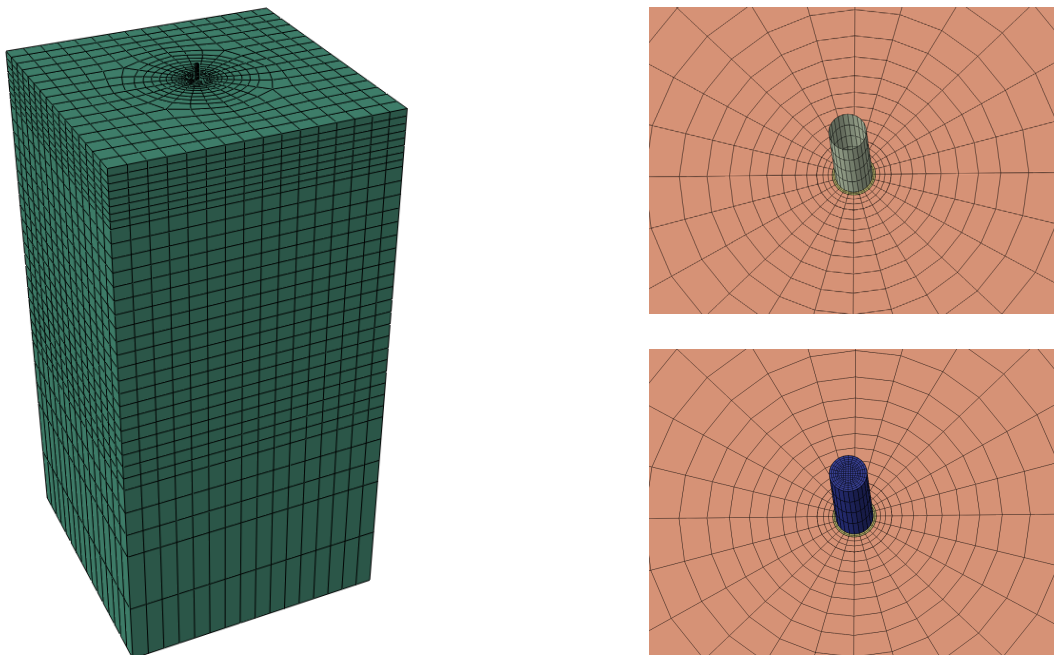


Fig. 1. Pile and ground modeling used in the analysis

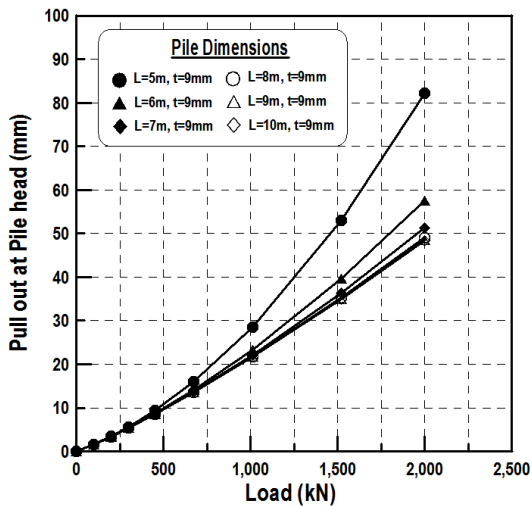
반은 20m×20m×40m(가로×세로×높이)로 설정하여 경계조건이 해석결과에 영향을 미치지 않도록 충분히 크게 고려하였으며, 지반과 속채움 콘크리트 및 그라우팅은 8절점 고체요소, 강관말뚝은 4절점 쉘요소로 모델링하였다. 이 때, 지반은 탄소성 재료로 고려하여 Table 1에서 제시한 지반정수를 적용하였으며, 강관말뚝과 속채움 콘크리트는 탄성재료로 고려하여 Table 1에 제시된 공학적 특성을 반영하였다. 말뚝과 지반사이의 그라우팅부는 말뚝두부에 하중재하 시 지반과의 미끄러짐을 모델링하기 위하여 박요소(thin element)로 모델링하였으며, 해당 부위의 경계면의 적용 물성치는 그라우트재의 물성치를 사용하였다. 또한 하중재하는 압축 및 인

발 재하 시에는 말뚝 상부에 등분포하중을 재하하였으며, 수평재하는 절점하중으로 재하하였다.

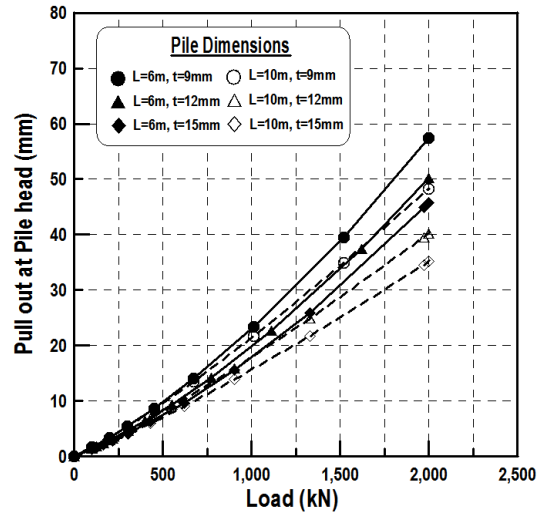
3. 해석결과 및 분석

3.1 말뚝 직경에 따른 인발재하 해석 결과

말뚝 직경에 대한 인발재하에 따른 말뚝 길이 및 두께별 하중-인발변위 관계를 Fig. 2에 나타내었다. 먼저, 말뚝 길이에 따른 인발하중 및 변위 관계에서 말뚝 길이가 5m인 경우, 말뚝 직경에 관계없이 인발하중이 약 900kN에서부터 인발변위가 급증하는 것으로 나타났다. 그리

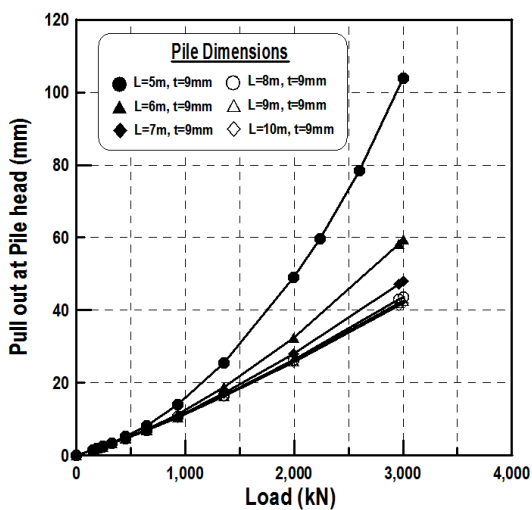


Pullout load and displacement on pile length

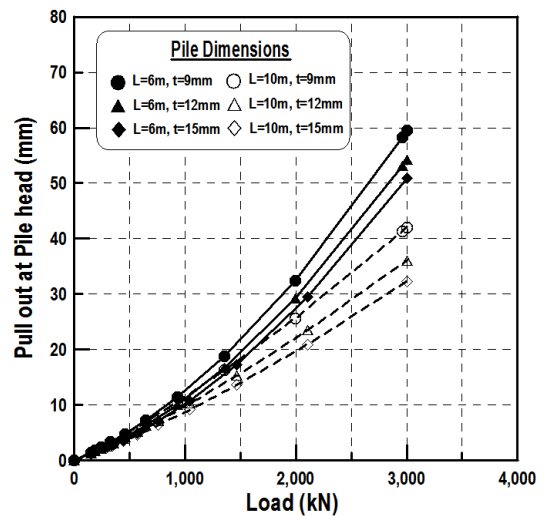


Pullout load and displacement on pile thickness

(a) Pile diameter = 150 mm



Pullout load and displacement on pile length



Pullout load and displacement on pile thickness

(b) Pile diameter = 300 mm

Fig. 2. Analysis results of pile pullout behavior

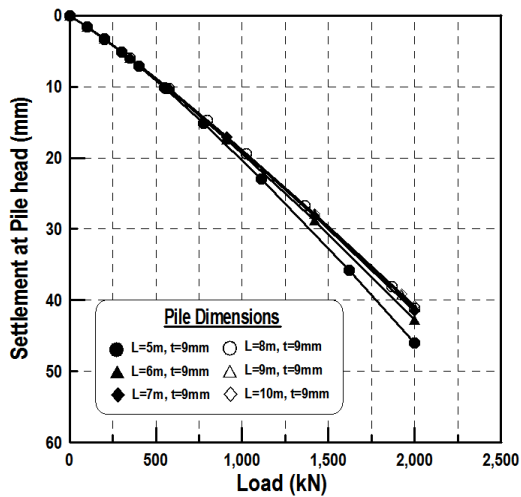
고 인발변위량은 동일한 말뚝길이 및 인발하중 크기를 기준으로 말뚝직경에 반비례(약 1/1.8~1/2)하는 것으로 확인되었다. 즉, 이는 말뚝의 주면면적과 말뚝하중이 인발하중에 저항하는 것으로서, 말뚝 주면면적의 비율에 따른 영향이 반영된 결과라 할 수 있다.

말뚝 길이가 5m인 경우를 제외하고는 유사한 인발변위 증가율을 나타낸 말뚝 길이 6m~10m의 경우에 대하여 말뚝 두께에 따른 하중-인발변위 관계를 분석하였으며, 이 때, 분석 대상은 최소 및 최대길이인 6m와 10m로 국한하였다. 말뚝직경에 관계없이 말뚝 길이 및 두께가 큰 조건에서 인발변위가 작은 것으로 나타났다. 이를 인발하중 조건으로 분석한 결과, 말뚝 직경이 150mm인 경우, 일정 인발하중(2,000kN)을 기준으로 말뚝 길이와

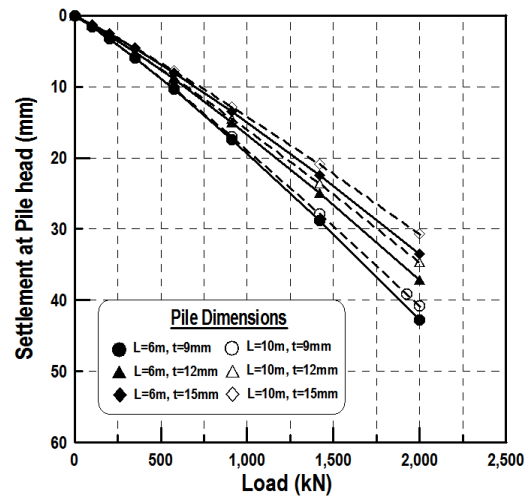
두께가 각각 10m 및 9mm인 경우의 인발변위가 각각 6m 및 12mm인 경우의 인발변위와 유사한 하중-인발변위 관계를 나타내는 것으로 확인되었다. 그러나 말뚝 직경이 300mm인 경우에는 인발하중 2,000kN 이상에서 말뚝 길이에 따른 변위량이 극명하게 구분되는 것으로 확인되었다. 또한 동일한 말뚝길이 및 두께와 인발하중 크기를 기준으로 말뚝직경에 반비례하는 인발변위가 확인되었다. 이는 말뚝 길이에 대한 인발하중 및 변위 관계와 동일한 결과라 할 수 있다.

3.2 말뚝 직경에 따른 압축재하 해석 결과

말뚝 직경에 대한 압축재하에 따른 말뚝 길이 및 두께

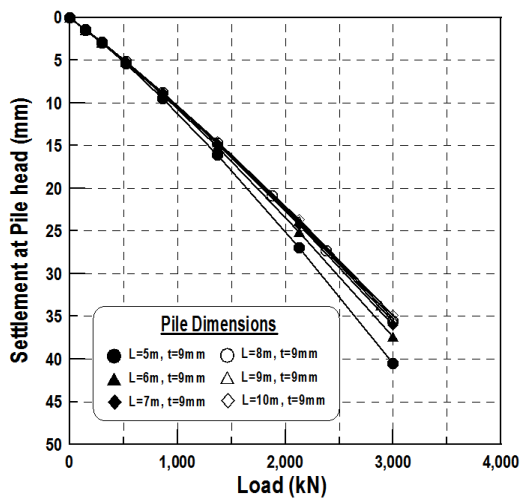


Compressive load and settlement on pile length

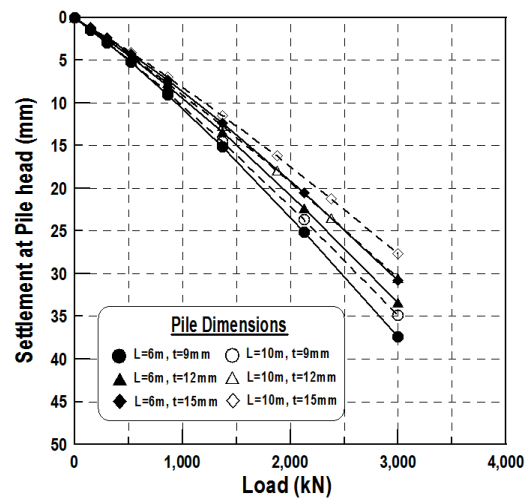


Compressive load and settlement on pile thickness

(a) Pile diameter = 150 mm



Compressive load and settlement on pile length



Compressive load and settlement on pile thickness

(b) Pile diameter = 300 mm

Fig. 3. Analysis results of pile compressive behavior

별 하중-침하 관계를 Fig. 3에 나타내었다. 먼저, 말뚝 길이에 따른 압축하중 및 침하 관계에서 말뚝 길이가 5m인 경우, 말뚝 직경에 관계없이 일정 압축하중(약 900kN)에서부터 침하가 다른 길이에 비해 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 동일한 말뚝길이 및 압축하중 기준에 대한 침하량은 말뚝직경에 반비례(약 1/1.8~1/2)하는 것으로 확인되었다. 이는 말뚝의 선단면적의 크기가 압축하중에 저항 비율에 비례관계에 있는 것으로서, 인발재하 시와 유사한 경향이라 할 수 있다.

침하량이 가장 크게 나타난 말뚝 길이 5m인 경우를 제외하고는 유사한 침하량 증가율을 나타낸 말뚝 길이 6m~10m의 경우에 대하여 말뚝 두께에 따른 하중-침하 관계를 분석하였으며, 이 때, 분석은 앞선 분석대상 조건인 최소 및 최대길이(6m 및 10m)로 국한하였다. 말뚝 직경에 관계없이 말뚝 길이 및 두께가 큰 조건에서 침하량이 작게 나타났으며, 일정 압축하중(2,000kN) 기준으로 말뚝 길이 및 두께에 대한 최대 및 최소 침하량 관계를 분석한 결과, 말뚝 직경이 150mm인 경우가 300mm인 경우에 비하여 침하량 차이가 큰 것으로 확인되었다.

3.3 말뚝 직경에 따른 수평재하 해석 결과

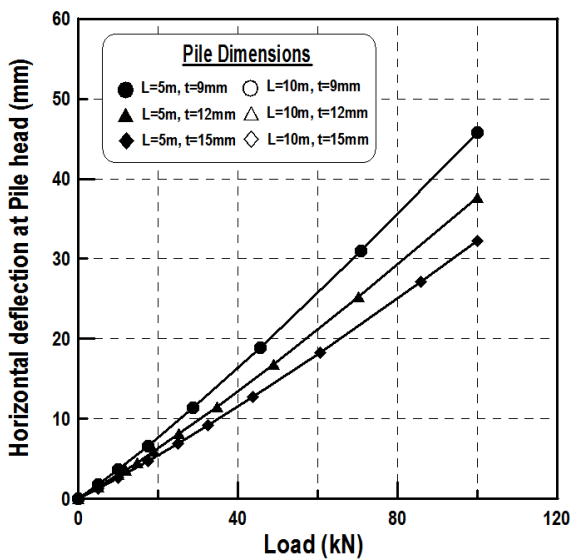
말뚝의 길이 및 두께에 따른 수평하중과 변위관계를 Fig. 4에 나타내었으며, 분석 대상 말뚝의 길이는 해석에 적용된 수평하중에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 최소길이로서, 말뚝 두께에 따라 분석하였다. 먼

저, 100kN 수평하중 조건에서 말뚝 두께가 9mm인 경우, 직경 150mm 및 300mm의 수평변위는 각각 46mm와 10mm, 말뚝 두께가 15mm인 경우에는 각각 32mm와 7.5mm로 나타났다. 즉, 동일한 수평하중 조건에서 강관 말뚝 두께의 증가에 따라 직경 150mm 말뚝의 수평변위는 약 30% 감소하였으며, 직경 300mm인 경우에는 수평변위가 약 25% 감소하였다.

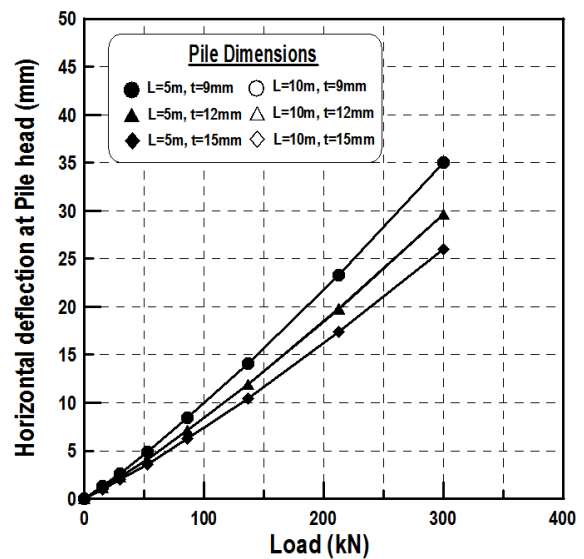
3.4 해석결과 고찰

앞서 나타낸 인발, 압축 및 수평재하 해석결과를 고찰하면 다음과 같다. 이 때, 인발변위 및 침하가 급속하게 증가된 말뚝길이 5m를 제외하고, 하중저항효과가 말뚝 두께의 영향을 받는 점을 고려하여 분석대상 조건을 선정하였다. 즉, 인발 및 압축재하 조건의 경우, 최소 및 최대길이(6m 및 10m)와 최소 및 최대두께(9mm 및 15mm)의 결과를 이용하였다. 수평재하 조건의 경우에는 수평하중에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 판단된 최소길이에 대한 각 두께별 해석결과를 이용하였다(Fig. 6~Fig. 7 참조).

먼저, 인발재하의 경우, 동일한 말뚝길이 조건에서 말뚝두께가 감소할수록 변위량이 크게 감소하였으며, 이와 같은 결과는 전술한 바와 같이, 말뚝의 직경에 관계없이 나타났다. 이 때, 감소율은 말뚝두께에 비하여 말뚝길이에 대한 영향이 더욱 큰 것으로 확인되었다. 또한 압축재하의 경우에는 말뚝길이에 따라 침하량 감소율



(a) Pile diameter = 150 mm



(b) Pile diameter = 300 mm

Fig. 4. Analysis results of pile lateral behavior

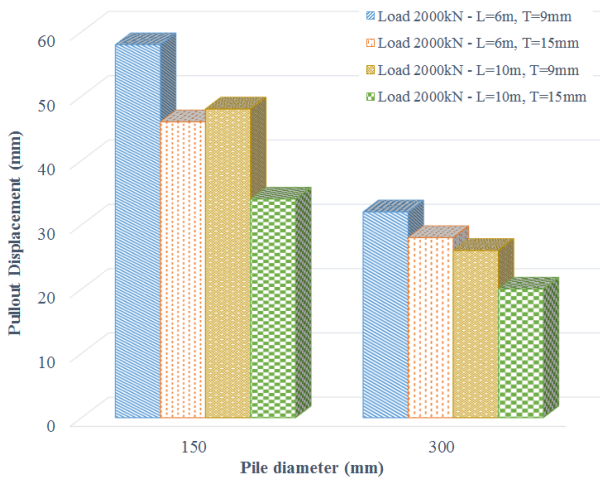


Fig. 5. Load-displacement relationship of the pullout condition

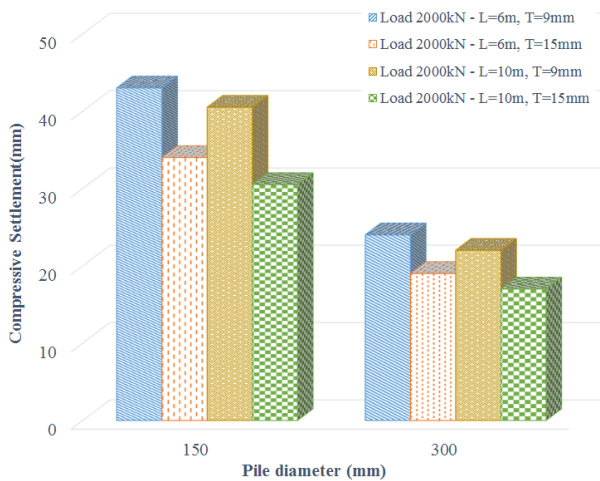


Fig. 6. Load-settlement relationship of the compressive condition

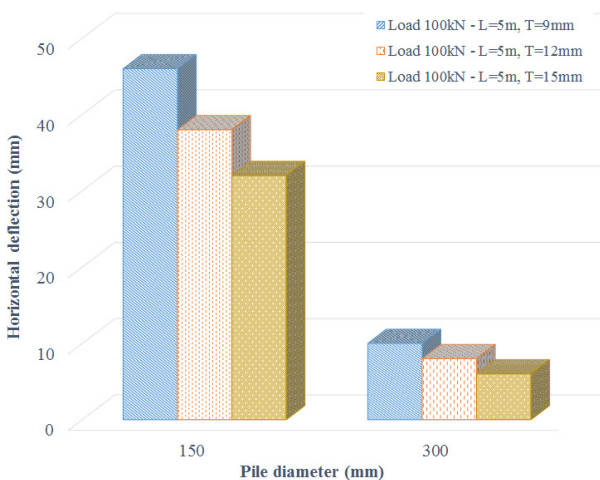


Fig. 7. Load-deflection relationship of the lateral condition

이 말뚝직경에 비해 두께의 영향을 크게 받는 것으로 나타났으며, 이는 말뚝두께의 증가가 하중저항에 더욱 효과적이라 판단되었다. 그리고 수평재하의 경우에는

말뚝두부의 수평변위 감소율이 수평하중 조건에 따라 유사하게 나타났지만, 동일한 수평하중 상태에서의 수평변위 감소율로 미루어, 말뚝두께에 비해 말뚝직경이 저항효과가 큰 것으로 확인되었다.

4. 결론

본 연구에서는 특정 암반에 근입된 강관말뚝의 거동 특성에 대한 검증시험 결과와 비교·분석을 위해 강관말뚝의 직경, 두께 및 길이 조건에 따른 인발, 압축 및 수평재하 시의 시험결과 예측을 위한 3차원 수치해석 연구를 수행하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 인발재하에 대한 거동특성을 분석한 결과, 동일한 말뚝길이 및 두께와 인발하중 크기를 기준으로 말뚝직경에 반비례하는 인발변위가 나타나는 것으로 확인되었으며, 이는 말뚝의 직경에 따른 주면면적의 비율에 따른 영향이라 분석되었다.
- (2) 압축재하에 따른 하중-침하 관계로부터 말뚝 길이 및 두께에 대한 최대 및 최소 침하량 관계를 분석한 결과, 말뚝 직경에 비하여 말뚝의 두께가 하중저항에 대한 효과에 더욱 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.
- (3) 수평하중 재하에 따른 수평변위 관계에서는 말뚝 직경에 대한 강관말뚝 두께별 수평변위 감소율은 직경이 큰 경우가 작은 것으로 나타났다. 즉, 동일한 수평하중 상태에서의 수평변위 감소율의 차이는 말뚝직경에 따른 것으로서 수평하중에 대한 저항효과는 말뚝직경에 의한 영향이 큰 것으로 판단된다.

본 연구에서는 재하시험 결과와 비교를 위하여 제한된 지반조건에서 수치해석 연구를 수행하였으며, 향후, 동일한 조건의 현장에서 수행된 재하시험 결과와 비교·분석을 수행할 예정이다. 또한 추가적인 지반조건과 다른 재료적 특성을 갖는 말뚝(현장타설말뚝 등)과의 지지력 및 거동특성에 대한 비교를 통해 다양한 말뚝의 활용성에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 국토교통기술촉진연구사업(CO₂ 발생량 30% 경감 및 다양

한 기능의 말뚝시공이 가능한 급속시공 현장타설말뚝 공법 및 멀티형 시공장비 개발, 16CTAP-C116826-01) 의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌 (References)

1. Cho, J. Y., Lee, S. J., and Jeong, S. S. (2010), "A Study on the Optimum Design of Piled-raft Foundation Considering Pile Condition", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.26, No.12, pp.31-40 (in Korean).
2. Choi, Y. K. (1999), "Suggestions for Improvement of Domestic Pile Foundation Design Routine - At a Viewpoint of Pile Bearing Capacity", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.19, No.III-3, pp.467-477 (in Korean).
3. Kim, Y. H. and Jeong, S. S. (2010), "Analysis of Soil Resistance on Laterally Loaded Piles Considering Soil Continuity", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.30, No.4C, pp.175-183 (in Korean).
4. Kwon, O. (2015), "Bearing Behavior Characteristics of Pressure Penetrating Steel Pipe Pile Under Compression Load", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.16, No.7, pp.5-13 (in Korean)
5. Lee, J. H., Lee, S. H., and Kim, S. R. (2013), "Horizontal Bearing Behavior of Group Suction Piles by Numerical Analysis", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.11, pp.119-127 (in Korean).
6. Lee, S. H. (2013), "Numerical Analyses on Moment Resisting Behaviors of Electric Pole Foundations According to Their Shapes", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.11, pp. 85-97 (in Korean).
7. Na, S. M., Yeo, G. Y., and An, D. W. (2010), "Present and Future of Technology Development in the Field of Pile Foundation Using High Performance Steel Pipe", *Seminar on design & construction for improved steel pile*, KGS, pp.2-9 (in Korean).
8. Yang, K. H., Huh, J. C., and Park J. J. (2015), "A Study on p-y Curves with Pressuremeter Tests in Jeju Basalt Rock", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.14, No.4, pp.129-137 (in Korean)
9. Yun, J. M., Yea, G. G., Kim, H. Y., Kim, D. M., and Kim, S. L. (2016), "Comparison of Construction Costs for Bridge Foundation with Optimization of Steel and PHC Embedded Piles", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.15, No.4, pp.71-78 (in Korean).

Received : May 17th, 2017

Revised : May 23rd, 2017

Accepted : May 24th, 2017