

기계적 클램프 연결부가 적용된 강관파일의 요구성능 및 구조적 성능 평가

권태윤¹ · 하민균² · 조광일³ · 문홍득⁴ · 안진희^{5*}

¹석사과정, 경상국립대학교, 건설시스템공학과, ²박사과정, 경상국립대학교, 건설시스템공학과, ³연구개발팀, (주)택한,
⁴교수, 경상국립대학교, 건설시스템공학과, ⁵부교수, 경상국립대학교, 건설시스템공학과

Evaluation of Required Performance and Structural Performance for Steel Pile with Mechanical Clamp Connection

Kwon, Tae-Yun¹, Ha, Min-Gyun², Cho, Kwang-Il³, Moon, Hong-duk⁴, Ahn, Jin-Hee^{5*}

¹Graduate student (Master course), Dept. of Civil and Infrastructure Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, 52725, Korea

²Graduate student (Ph.D course), Dept. of Civil and Infrastructure Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, 52725, Korea

³Ph.D, R&D Team, Tekhan Inc., Uiwang, 16006, Korea

⁴Professor, Dept. of Civil and Infrastructure Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, 52725, Korea

⁵Associate Professor, Dept. of Civil and Infrastructure Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, 52725, Korea

Abstract - In this study, the required performance of the mechanical connections was examined to improve a welding method for the steel pile connecting, and the structural performance of the steel piles connected with clamp type pile connection was evaluated depending on the sectional conditions of the connecting clamp. The load-resistant capacity was evaluated to examine the required performance considering the applied load on a steel pile and structural limit state. In addition, the structural analyses were conducted to evaluate the structural performance of the connected steel piles considering the shapes of connecting clamps. From the structural analysis results, the structural performances of the clamp connections were evaluated and compared with the required performance of the mechanical connection of steel piles determined in this study. It was confirmed that its load-resistant capacity and ductility were affected by the shapes of connecting clamps.

Keywords - Steel pile, Structural performance, Mechanical connection, Required performance, Structural analysis

1. 서론

강관은 국내 건설분야에서 구조물 기초 및 발전구조물의 플랜트, 골조용 부재 등에 적용되고 있으며, 구조물 기초에 적용되는 파일의 경우 일반적으로 PHC파일, 강관파일 등이 많이 사용되고 있다^[1]. 국내에서 발생한 포항지진, 경주지진 등으로 인하여 구조물 안전성에 관한 관심이 증가하고 있으며, 구조물의 대형화 등에 따라 구조물 기초에 적용되는 파일에는 충분한 지지력이 필수적으로 요구되고 있

다. 15 m 이상 깊이에 타입되는 강관파일은 파일간 연결이 필수적으로 요구되며, 국내에서 활용되고 있는 강관파일간 연결기술의 경우 상부파일과 하부파일을 용접하여 연결하는 방법만을 활용하고 있다^{[2],[3]}. 용접연결 방법은 기술자의 숙련도에 따라 파일의 연결성능이 좌우될 수 있으며, 용접부지·현장조건·기후조건 등 다양한 제약조건이 발생할 수 있다. 또한, 용접을 위하여 다양한 장비와 설비가 요구되고 전문적인 용접공이 직접 용접을 진행해야 하므로 시공비가 높으며, 오랜 시공시간이 소요될 수 있다. 따라서, 용접연결 방법의 제약조건과 시공성 등을 개선하기 위해서 강관파일의 기계적 연결방법이 고려되어야 한다.

국내의 강관파일에 관련된 연구의 경우 확장장비를 강관파일 내부에 삽입한 확장형 강관파일을 개발하는 연구와 실험적으로 확장형 강관파일의 성능을 평가하는 연구가 진행되었다^{[4],[5]}. 또한, 파일간 연결기술의 경우 PHC파일은 용접연결 방법을 개선하기 위하여 볼트 및 수직이음으로

Note.-Discussion open until February 28, 2023. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on May 31, 2022; revised on July 08, 2022; approved on July 11, 2022.

Copyright © 2022 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-55-772-3293 Fax. +82-55-772-3209

E-mail. jahn@gnu.ac.kr

PHC파일을 연결하여 시공성과 시공시간을 절약할 수 있는 공법들을 제안하고 적용성과 건전성 등을 평가하는 연구들이 진행되었다^{[6]-[8]}. 국외의 강관파일 기계적 연결부에 관한 연구의 경우 강관파일에 홈을 가공하여 연결부와 체결하는 방식의 연결기술과 공장에서 미리 용접된 파일간 연결부를 현장에서 기계적 연결하는 방식의 연결기술 등이 개발되어 사용되고 있다^{[9],[10]}. 하지만, 국내의 강관파일 기계적 연결 방법에 관련된 기술개발은 부족한 상황이며, 강관파일 기계적 연결부 개발에 관련된 연구 또한 진행되지 않고 있다. 따라서, 용접연결 방법을 대체할 수 있는 강관파일의 기계적 연결부에 관한 연구가 필요하며, 기계적 연결부의 요구성능 및 하중저항 성능 등이 검토되어야 한다.

따라서, 본 연구에서는 강관파일의 기계적 연결부의 요구성능을 제안하고, 강관파일의 용접연결을 개선하기 위한 강관파일의 기계적 연결부로 클램프형 연결부를 검토하였다. 또한, 클램프형 강관파일 연결부가 적용된 강관파일의 구조적 성능을 평가하기 위하여 클램프 단면형상 변화에 따른 강관파일의 구조적 성능 변화를 구조해석을 통하여 분석하고 본 연구로부터 제안된 강관파일 연결부의 요구성능 수준과 비교평가하였다.

2. 강관파일 연결부 요구성능 결정

강관파일의 기계적 연결부의 구조적 성능을 평가하기 위해서는 강관파일 연결부에 대한 요구성능 수준을 사전에 검토할 필요가 있다. 강관파일은 사용 특성에 따라 실제 적용을 위한 검토 과정에서 압축·인장·휨 하중 등을 검토할 필요가 있으며, 이에 대한 요구성능을 결정하여야 한다. 따라서, 강관파일 기계적 연결부의 요구성능을 결정하기 위하여 강관파일의 구조적 한계상태에 대한 설계기준으로 구조적 한계상태 수준을 검토하였다. 또한, 국외의 강관파일의 적용 사례와 제시된 요구성능 수준을 분석하여 기계적 강관파일 연결부의 요구성능을 제시하였다.

2.1 구조적 한계상태를 고려한 강관파일의 하중저항수준

2.1.1 강관파일의 압축저항력

강관파일 연결부는 15 m 이상 길이의 강관파일 연결시 적용되며, 일반적으로 구조물의 하부구조로 적용되는 강관파일의 경우 강구조부재설계기준(KDS 14 31 10: 2017)과

강교설계기준(KDS 24 14 31: 2016)에 따라 압축저항력을 산정할 수 있다^{[11],[12]}. 일반적으로 강관파일은 항타하중에 의한 압축력이 가장 크게 발생할 수 있으므로, 최대 허용항타하중에 대한 극한한계상태 하중저항계수(1.0)를 고려하여 식 (1)과 같이 압축저항력을 산정한다.

$$F_C = 0.9 \times \phi_C \times A_g \times F_y \quad (1)$$

여기서, F_C 는 항복 압축강도(kN), ϕ_C 는 강관파일 항타시의 저항계수(1.0), A_g 는 파일 총 단면적(mm²), F_y 는 강제 항복강도(MPa)를 의미한다.

2.1.2 강관파일의 인장저항력

강관파일의 인장저항력은 강구조부재설계기준(KDS 14 31 10: 2017)의 강관 부재 총 단면 항복에 대한 식과 강교설계기준(KDS 24 14 31: 2016)의 저항계수를 고려하여 식 (2)를 활용하여 구할 수 있다^{[11],[12]}.

$$F_T = 0.9 \times \phi_T \times A_g \times F_y \quad (2)$$

여기서, F_T 는 항복 인장강도(kN), ϕ_T 는 총단면 항복에 대한 극한한계상태 저항계수(0.95), A_g 는 파일 총 단면적(mm²), F_y 는 강제 항복강도(MPa)를 의미한다.

2.1.3 강관파일의 휨 강도

강관파일의 휨 강도는 강관파일에 작용하는 휨 모멘트를 기준으로 산정되며, 강구조부재설계기준(KDS 14 31 10: 2017)에서는 식 (3)과 같이 공칭 휨 강도 산정식을 제시하고 있다^[12]. 강교설계기준(KDS 24 14 31: 2016)의 수평저항력에 대한 하중저항계수를 고려하여 계산되며, 강관파일의 소성 상태까지 고려하기 위하여 소성단면계수와 항복 휨 모멘트를 활용하여 휨 강도를 산정한다^[11]. 휨에 대한 극한한계상태 저항계수를 1.0을 적용하고 있다.

$$M_B = \phi_B \times Z \times F_y \quad (3)$$

여기서, M_B 는 항복 휨 모멘트(소성 모멘트; kN·m), ϕ_B 는 휨에 대한 극한한계상태 저항계수(1.0), Z 는 소성단면계수(m³), F_y 는 강제 항복강도(MPa)를 의미한다.

2.2 기계적 연결부로 연결된 강관파일의 요구성능 결정

기계적 연결부로 연결된 강관파일의 요구성능은 강관

파일 설계기준을 이용하여 계산된 하중저항수준에 기계적 연결부에 관한 계수를 적용함으로써 결정할 수 있을 것이다. 강관파일 기계적 연결부를 개발하여 사용되고 있는 일본의 기계적 연결부 기술자료에서는 연결부가 적용된 직경 406.4 mm, 두께 9.5 mm - 22 mm 강관파일의 요구성능을 강관파일의 항복하중을 기준으로 압축은 77.1 % - 90.4 %, 인장은 52.8 % - 70.4 %, 휨은 84.5 % - 84.6 % 수준으로 적용하여 결정하고 있다^[13].

따라서, 본 연구에선 강관파일 기계적 연결부의 요구성능을 강관파일의 구조적 한계상태와 일본에서 사용되고 있는 강관파일 기계적 연결부의 요구성능을 고려하여 결정하였다. 강관파일 기계적 연결부의 압축하중 저항계수를 0.90, 인장하중 저항계수를 0.55, 휨 강도 저항계수를 0.85로 제안하였으며, 기계적 연결부가 적용된 강관파일의 압축하중에 대한 요구성능을 식(4), 인장하중에 대한 요구성능을 식(5), 휨 강도에 대한 요구성능을 식(6)과 같이 제안하였다.

$$F_{C_c} = \phi_{C_c} \times F_c (= 0.9 \times \phi_C \times A_g \times F_y) \quad (4)$$

$$F_{T_c} = \phi_{C_T} \times F_T (= 0.9 \times \phi_T \times A_g \times F_y) \quad (5)$$

$$M_{B_c} = \phi_{C_B} \times M_B (= \phi_B \times Z \times F_y) \quad (6)$$

여기서, F_y 는 강재 항복강도(MPa), ϕ_{C_c} 는 기계적 연결부의 압축 저항계수, A_g 는 파일 총 단면적(mm²), ϕ_{C_T} 는 기계적 연결부의 인장 저항계수, M_{B_c} 는 항복 휨 모멘트(소성 모멘트; kN·m), ϕ_{C_B} 는 기계적 연결 강관파일 휨 저항계수, Z 는 소성 단면계수(m³)를 의미한다.

2.3 강관파일의 지지력 산정

본 연구에서 제시한 강관파일 기계적 연결부에 대한 요구성능의 적절성과 적용성 등을 고려하기 위하여 실제 강관파일의 지지력 수준과 비교하여 검토할 필요가 있다. 강관파일에는 압축·인장·휨 하중 등이 발생할 수 있으며, 압축하중은 연직지지력, 인장하중은 인장저항력, 휨하중은 수평지지력에 대한 지지력 산정식을 활용하여 하중 수준을 계산할 수 있다. 지지력 산정식을 활용하여 지반에 적용된 강관파일의 지지력 수준을 평가하였으며, 본 연구에서 제시한 강관파일 기계적 연결부에 대한 요구성능과 실제 강관파일에 작용할 수 있는 하중 수준을 비교하였다.

2.3.1 연직지지력

강관파일의 연직지지력을 산정하기 위하여 교량하부구

조설계기준(KDS 24 14 51: 2021)의 타입식 파일 지지력 산정식을 활용하였다^[14]. 사질토에 설치된 파일의 선단지지력은 식(7), 점성토에 설치된 파일의 선단지지력은 식(8)을 활용하여 산정할 수 있다. 표준관입시험의 N 치를 이용하여 사질토와 비소성실트에 대한 지지력을 계산하는 N 치 보정식 식(9)와 주면마찰력 산정식 식(10)을 활용하여 연직지지력을 산정할 수 있다. 또한, 파일의 최종지지력은 식(11)과 같이 파일의 타입말뚝에 대한 주면마찰력과 파일의 한계 선단지지력을 합산하여 계산할 수 있다. 대상 강관파일의 직경을 고려하여 강관파일의 연직지지력 수준을 검토하였으며, 산정식을 활용하여 계산된 지지력 수준을 사질토와 점성토를 비교하여 Fig. 1에 나타냈다.

$$q_p = \frac{0.038N_{corr}D_b}{D} \leq q_l \text{ (cohesionless soil)} \quad (7)$$

$$q_p = 9S_u \text{ (cohesive soil)} \quad (8)$$

$$N_{corr} = \left[0.77 \log_{10} \left(\frac{1.92}{\sigma'_v} \right) \right] N \quad (9)$$

$$q_s = 0.00096\bar{N} \quad (10)$$

$$q_{ult} = q_s + q_l \quad (11)$$

여기서, q_p 는 한계 선단지지력(kN), N_{corr} 는 상재응력 σ'_v 에 대하여 수정한 파일 선단 근처의 대표적인 N 값(타/300 mm), N 은 표준관입시험(SPT) 타격횟수(타/300 mm), D 는 파일의 폭 또는 직경(mm), D_b 는 지지층에 관입된 파일길이(mm), q_l 은 한계 단위 선단지지력으로 사질토인 경우 $0.4N_{corr}$, 비소성실트인 경우 $0.3N_{corr}$ (MPa), q_s 는 파일의 단위 주면마찰력(MPa), \bar{N} 은 파일 주면의 보정하지 않은 평균 N 값(타/300 mm), q_{ult} 는 단위 극한지지력(MPa)을 의미한다.

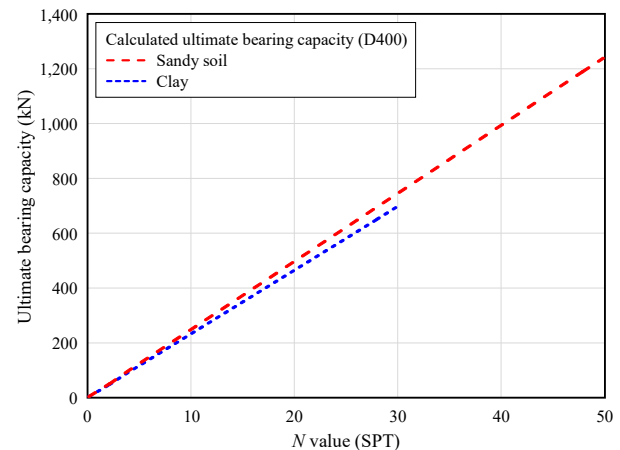


Fig. 1. Ultimate bearing capacity of steel pile according to N value

2.3.2 인장저항력

강관파일의 인장저항력을 산정하기 위해 교량하부구조 설계기준(KDS 24 14 51: 2021)의 β 계수 산정식을 활용하였다^[14]. 식 (12)와 같이 유효응력계수 β 와 평균 유효 연직 응력을 활용한 산정식으로 강관파일 부마찰력을 산정하였으며, 유효응력계수가 변화함에 따라 나타나는 부마찰력을 평균 유효 연직응력별로 비교하여 Fig. 2에 나타냈다. Fig. 2에 나타낸 것과 같이 강관파일에 작용하는 평균 유효 연직 응력을 0.05 MPa - 0.15 MPa로 가정하였으며, 평균 유효 연직 응력이 증가함에 따라 부마찰력이 최대 약 500 kN까지 나타나는 것을 확인하였다.

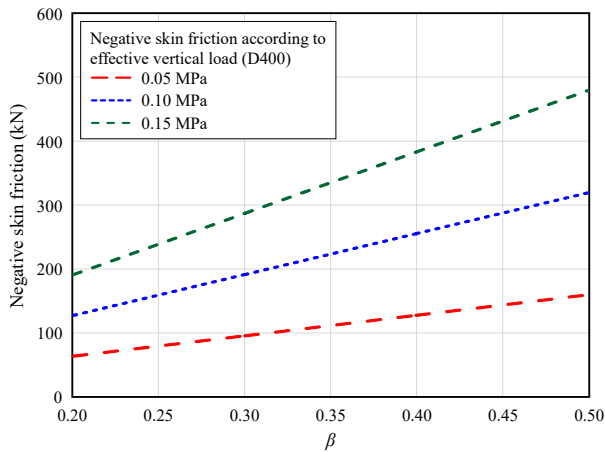


Fig. 2. Negative friction of steel pile by β factor method

$$Q_{ns} = f_n \cdot A_s = \sigma'_v \cdot \beta \cdot A_s \tag{12}$$

여기서, f_n 은 단위 부마찰력(kN/m²), β 는 유효응력계수($\beta =$

$K_h \tan \delta$), σ'_v 는 평균 유효 연직응력(kN/m²), δ 는 흙과 파일의 마찰각, A_s 는 파일의 주면면적(m²)를 의미한다.

2.3.3 수평지지력

일반적인 타입 파일에 대한 수평지지력의 경우 구조물 기초설계기준 해설의 방법에 준하여 산정한다. 파일머리의 수평 변위량이 상부 구조물로부터 결정되는 허용 수평 변위량을 초과하지 않고, 파일에 발생하는 최대 휨모멘트가 허용 휨 모멘트를 초과하지 않도록 설계하고 있다. 수평 지지력을 산정하는 방법에는 극한평형법, 지반반력법, p - y 곡선 해석법 등이 있다. 강관파일 기계적 연결부의 경우 긴 파일에 해당되는 강관파일에 적용되므로, 지반반력법 중 Chang의 제안식을 활용한 지지력 산정 방법으로 강관파일의 수평지지력을 산정하였다^[15]. 파일 길이가 긴 파일 조건인 경우 파일의 경계조건을 고정, 힌지, 자유 등의 선단조건이 변화하여도 모멘트 및 변위는 무한길이 조건과 일치하여, 긴 파일에 대한 Chang의 제안식을 사용하여 지지력을 산정할 수 있다. 수평력이 작용하는 긴 파일에 대한 지지력은 Table 1과 같이 계산할 수 있다.

Chang의 제안식을 활용하여 계산된 강관파일의 수평지지력 수준을 파일머리의 경계조건에 따라 비교하여 Fig. 3에 나타냈다. 강관파일의 수평지지력은 항복모멘트가 아닌 파일머리의 허용수평변위에 의하여 지배되므로, 통상적으로 파일의 수평지지력 설계에서 적용되는 15 mm로 허용수평변위를 가정하였다. Fig. 3과 같이 지반반력계수(K_h)가 변화함에 따라 강관파일에 수평 방향으로 작용하는 휨 모멘트는 약 120 kN·m 수준으로 나타나는 것을 확인하였다.

Table 1. Horizontal force by Chang's method^[15]

Pile head condition	$\beta = \sqrt[4]{k_h D / 4EI}$	Bending moment of pile head M_0	Maximum bending moment of underground part M_{max}	Horizontal displacement of pile head y_0	Depth at maximum bending moment of underground part L_m	Depth of first steady point L_0
Free on pile head		0	$0.3224 \frac{H}{\beta}$	$\frac{H}{2EI\beta^3} = \frac{2H\beta}{k_h D}$	$\frac{\pi}{4\beta} = \frac{0.785}{\beta}$	$\frac{\pi}{2\beta} = \frac{1.571}{\beta}$
Fixed on pile head		$\frac{H}{2\beta}$	$0.2079 \frac{H}{\beta}$	$\frac{H}{4EI\beta^3} = \frac{H\beta}{k_h D}$	$\frac{\pi}{2\beta} = \frac{1.571}{\beta}$	$\frac{3\pi}{4\beta} = \frac{2.356}{\beta}$

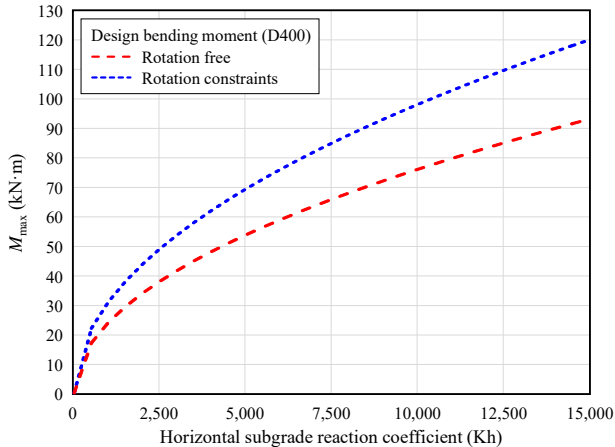


Fig. 3. Horizontal bending moment of steel pile using Chang's method

2.4 강관파일의 지지력 산정과 요구성능 비교

Figs. 1-3와 같이 제안식을 활용한 설계 하중의 경우 실제 지반에 적용된 강관파일에 발생할 수 있는 하중의 수준을 계산하여 설계에 요구되는 성능을 산정한 것이다. 지반 조건이 고려된 지지력 값과 지반의 안전율 등을 고려한다면 기계적 연결부가 적용된 강관파일의 성능은 강관파일 본체의 구조적 성능을 초과할 필요가 없다. 또한, 강관파일의 설계 과정에서 요구되는 성능을 구조적 한계상태까지 고려된 성능 수준과 동등하게 평가한다면 기계적 연결부가 적용된 강관파일은 과다하게 설계될 수 있다. 따라서, 지반에 적용된 강관파일의 구조적 거동을 고려할 경우 지반에서 발생하는 지지력 수준과 강관파일의 구조적 한계상태까지 고려된 하중저항성능 수준 사이에서 적절한 요구성능을 제시하는 것이 합리적인 것이다.

본 연구에서 결정된 요구성능과 앞서 검토된 Figs. 1-3의 강관파일의 지지력을 D400(직경 406.4 mm, 두께 12 mm) 강관에 대해 분석한 결과를 Fig. 4에 나타냈다. Fig. 4에 나

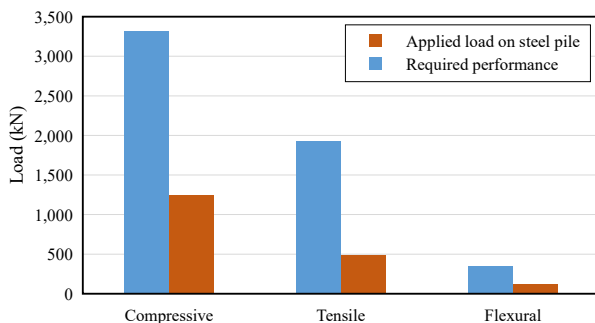


Fig. 4. Comparison of required performance and applied load on steel piles

타낸 것과 같이 본 연구에서 검토된 강관파일의 요구성능은 산정된 강관파일의 지지력과 비교하여 압축하중은 약 2,000 kN, 인장하중은 약 1,400 kN, 휨하중은 약 200 kN 이상 여유가 있음을 알 수 있다. 강관파일의 직경, 두께, 재료 등에 따라 지지력과 구조적 요구성능 수준의 차이가 발생할 것으로 판단되나, 실제 강관파일의 지지력은 구조적 요구성능 수준에 비하여 상대적으로 낮을 것으로 판단된다.

3. 클램프형 연결부가 적용된 강관파일 구조해석

강관파일의 기계적 연결부는 다양한 형태와 형상으로 적용될 수 있으며, 본 연구에서는 클램프 형태로 강관파일을 연결하는 기계적 연결부를 검토하였다^[6]. 본 연구에서 검토된 클램프형 연결부는 강관파일 연결을 위한 내측 연결부와 외측 클램프형 연결부, 체결용 볼트로 구성되어 있으며, 클램프형 강관파일 연결부의 개요를 Fig. 5에 나타냈다.

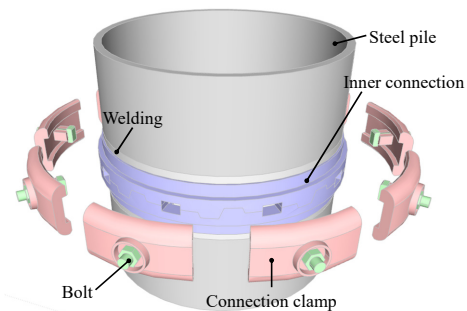


Fig. 5. Concept of clamp connection for steel pile

내측 연결부는 상·하부 강관파일을 연결할 수 있도록 Fig. 5와 같이 제작 공장에서 가공하고, 강관파일에 적용하기 위해서는 강관파일과 용접하여 연결되어야 한다^[6]. 강관파일 시공현장에서 연결부의 연결작업을 최소화하기 위해 강관파일 단부에 내측 연결부를 공장용접하여 강관파일 시공현장에서는 외측 클램프형 연결부와 볼트를 체결하여 현장조립만으로 강관파일을 연결할 수 있도록 하였다. 시공현장에서는 강관파일과 외측 클램프형 연결부의 체결작업만을 진행하므로, 기존의 현장에서 용접하여 연결하는 강관파일 연결 방법과 비교하여 상대적으로 작업 제약 조건이나 용접을 위한 장비와 인력이 불필요할 것으로 판단된다. 따라서, 강관파일 시공에서의 시간단축 및 용접에 관련된 비용 절감 등의 효과가 있을 것이며, 용접 연결이 용접 기술자의 숙련도나 작업환경에 따라 품질이 달라질 수 있

는 것과 비교하여 클램프 연결의 경우 볼트만을 활용하여 강관파일과 클램프를 체결하므로, 상대적으로 일정하게 연결부의 연결성능 수준을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

3.1 클램프형 연결부가 적용된 강관파일 구조해석 조건

클램프형 연결부로 연결된 강관파일의 구조적 성능은 강관파일 외부에 적용되는 클램프의 연결성능이나 하중저항성능에 따라 구조적 성능이 좌우될 수 있다. 따라서, 클램프 형태로 적용되는 기계적 연결부의 적용성을 검토하기 위하여 클램프형 연결부의 단면을 적절하게 고려할 필요가 있다. 클램프 단면 변화에 따라 나타나는 클램프형 연결부의 성능 변화를 평가하기 위해 구조해석을 실시하여 단면 변화에 따른 하중저항성능을 검토하였다. 클램프형 연결부의 길이, 두께, 강관파일과의 접촉길이 등의 단면을 변화시켜 구조해석을 진행하였으며, 어떤 단면이 구조적 성능에 가장 많은 영향을 미치는지 해석적으로 평가하였다. 실제로는 다양한 직경의 강관파일이 지반이나 구조물의 기초에 적용되고 있으나, 본 연구에서는 D400(직경 406.4 mm, 두께 12 mm)의 강관파일을 대상으로 구조해석을 진행하였다.

클램프형 연결부를 통하여 연결된 강관파일 구조해석모델의 경우 각각 압축·인장·휨 하중에 대한 하중저항 성능을 확인하기 위하여 범용 유한요소해석 프로그램 ABAQUS를 이용하여 3차원 구조해석모델을 구현하였다^[17].

내측 연결부의 경우 강관파일에 용접을 통하여 일체화되므로 Fig. 6와 같이 강관파일과 일체화된 모형으로 적용하였다.

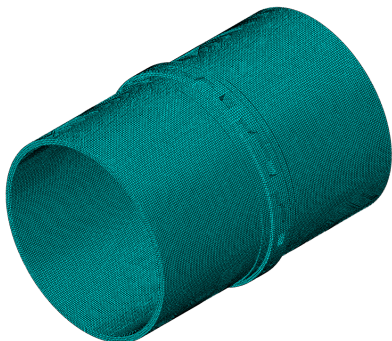


Fig. 6. FEA model of steel pile

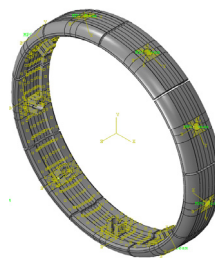
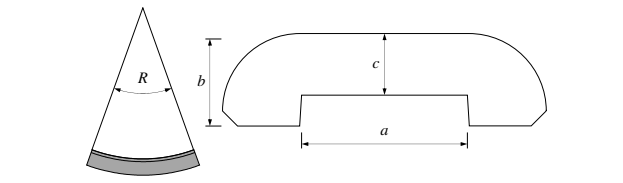
체결용 볼트의 경우 실제 강관파일에서는 클램프와 강관파일의 체결만을 위하여 적용되지만, 기존에 수행된 다양한 볼트 연결부와 관련된 구조해석 등에서는 볼트의 형상이나 구조물의 거동과 경계조건을 고려하여 볼트에 대한

하중작용 및 하중전달이 발생하도록 모형화하였다^{[18],[19]}. 따라서 본 연구에서도 클램프형 연결부 볼트의 체결효과와 구조해석 조건 등을 고려하여 Fig. 7(a)와 같이 Beam 요소를 이용하였다.

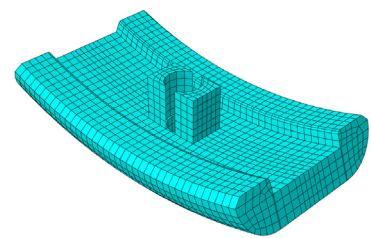
클램프형 연결부 모형의 경우, 최초 설계 시 고려되었던 클램프형 연결부의 단면과 실제 제작된 클램프형 연결부의 단면에는 상대적으로 차이가 발생할 수 있으므로, 클램프형 연결부 간의 간격, 상부와 하부 강관파일과 접촉면 사이의 길이, 강관파일과의 간격, 클램프형 연결부의 두께를 Table 2와 같이 변화시켜 Fig. 7(b)와 같이 모형화하였다.

Table 2. Section parameters of clamp connection

Clamp shape	R (°)	a (mm)	b (mm)	c (mm)
A	40	43	24	16
B	39	43	24	16
C	39	44	24	16
D	39	43	23	16
E	39	43	23	15
F	39	44	22	15



(a) Connecting bolt



(b) Clamp

Fig. 7. FEA model of connecting bolt and clamp

압축 및 인장 해석모형의 경우 총 길이를 500 mm로 모형화하였으며, 강관파일 단부에 element를 RP(reference point)에 구속시켜 RP에 부여된 조건을 동일하게 적용할 수 있는 MPC(multi point constraints)를 활용하여 경계조건 및 하중조건을 Fig. 8과 같이 적용하였다. 경계조건의 경우 편측에 고정조건을 적용하고 반대측에 압축 및 인장을 고려한 변위 제어를 통하여 하중을 부여하였다.

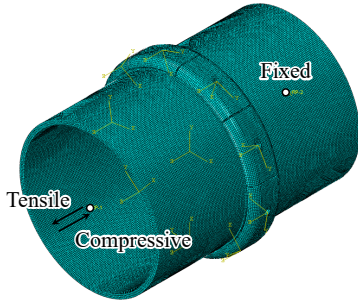


Fig. 8. FEA model of compressive & tensile analysis

휨 해석모형의 경우 Fig. 9와 같이 강관파일 단부에 MPC 조건을 통하여 Beam 요소로 구현된 강관파일과 연결하였으며, Beam 요소까지 총 길이를 10,000 mm으로 모형화하였고, Beam 요소에 힌지, 롤러의 경계조건과 강관파일에 대하여 축 직각방향으로 변위 제어를 통한 하중조건을 적용하였다. 또한, 각 부재간 면의 접촉조건을 부여할 수 있는 surface to surface 기능을 활용하여 부재간 결합 효과를 적용하였으며, 볼트를 이용한 내측 연결부와 외측 클램프형 연결부의 체결효과를 고려하여 Coupling 조건을 사용하여 볼트의 축방향에 대한 구속효과만을 적용하였다.

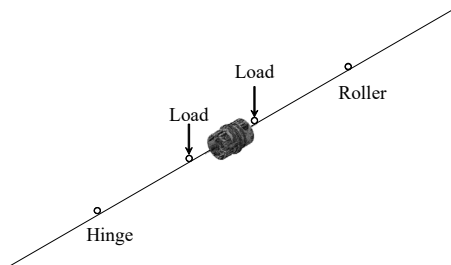


Fig. 9. FEA model of flexural analysis

구조해석에 고려된 재료 특성의 경우 재료의 비선형성을 Fig. 10과 같이 고려하였다. 구조해석에서의 각 부재 재료 물성치의 경우 실제 강관파일 및 연결부 주물을 제작하는 재료특성을 반영하여 적용하였다. 강관파일의 경우 일반적으로 강관파일 제작에 활용되는 강종인 STP275의 재료특성을 고려하여 탄성계수 210,000 MPa, 항복강도 275 MPa, 인장강도 410 MPa을 적용하였다. 내측연결부는 용접 구조용 주강품인 SCW620 강종의 재료특성을 고려하여 탄성계수 210,000 MPa, 항복강도 430 MPa, 인장강도 620 MPa을 적용하였으며, 클램프형 연결부의 경우 주물 제작에 활용되는 주강인 GCD450 강종의 재료특성을 고려하여 탄성계수 172,000 MPa, 항복강도 280 MPa, 인장강도 450 MPa을 적용하였다.

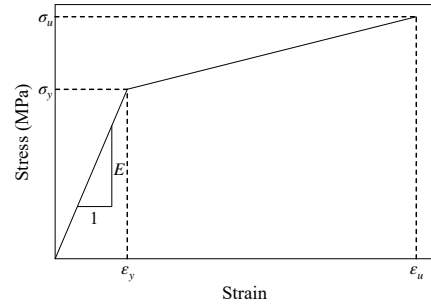


Fig. 10. Stress-strain relationship of steel materials

3.2 클램프형 연결부가 적용된 강관파일 구조해석결과

3.2.1 압축해석결과

클램프형 연결부가 적용된 강관파일의 압축하중에 대한 구조해석 결과, 최대 하중 상태에서 Fig. 11과 같은 응력분포도가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 압축하중에 대하여 클램프형 연결부가 저항하는 것이 아니라 강관파일 항복에 의한 거동이 지배적이므로, 강관파일에 국부적인 좌굴이 나타나는 것을 알 수 있다. 클램프형 연결부는 압축방향에 대하여 하중이 전달되는 부재가 아니므로 클램프형 연결부의 단면이 변화함에 따라 모두 유사한 수준의 압축하중이 Fig. 12와 같이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 최대 압축하중은 Fig. 13에 나타낸 것과 같이 클램프형 연결부의 단면에 따라 앞서 검토된 압축에 대한 요구성능에 비하여 약 113% 수준으로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한, 클램프형 연결부에는 압축하중이 작용하지 않고, 강관파일과 연결부의 지압으로 인한 거동이 나타나므로 클램프형 연결부의 단면 변화와 관계없이 압축에 대한 하중저항 수준은 유사하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

3.2.2 인장해석결과

클램프형 연결부가 적용된 강관파일의 인장하중에 대한 구조해석 결과, 최대 하중 상태에서 Fig. 14과 같은 응력분포도가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 클램프형 연결부가 적용된 강관파일에 인장하중이 작용하는 경우 외부에 적용된 클램프형 연결부의 단면 특성에 따라 강관파일과 클램프형 연결부가 접촉되는 부위에 모멘트가 발생하므로, 작용 모멘트의 위치에 따라 하중이 Fig. 15과 같이 나타나는 것을 알 수 있다. 단면에 따른 최대 인장하중은 Fig. 16과 같이 클램프간의 거리나 강관파일과의 접촉면 길이가 감소함에 따라 인장하중은 유사하게 나타나는 것을 알 수 있다. 하지만, 클램프형 연결부의 두께가 감소함에 따라 인

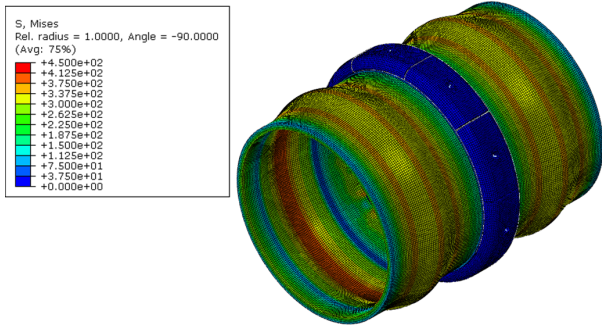


Fig. 11. Stress contour of steel pile on compressive load

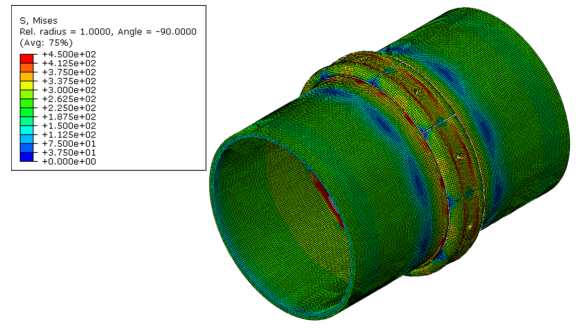


Fig. 14. Stress contour of steel pile on tensile load

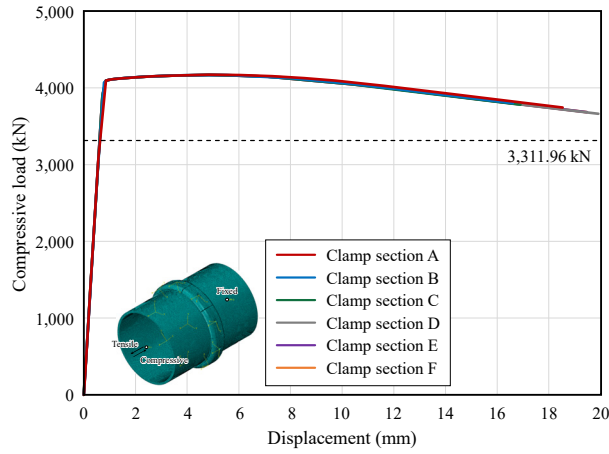


Fig. 12. Load-displacement curve for compressive load

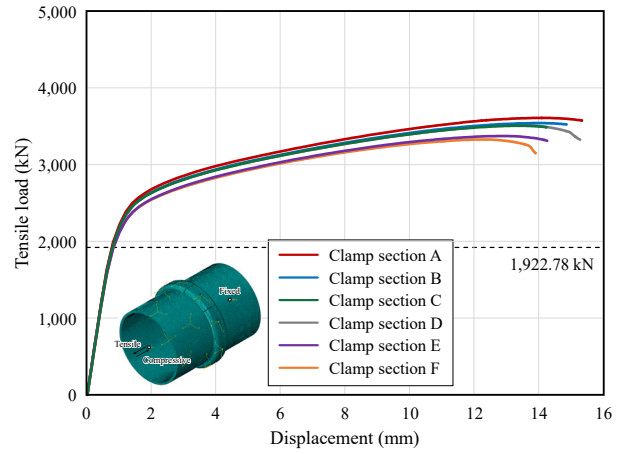


Fig. 15. Load-displacement curve for tensile load

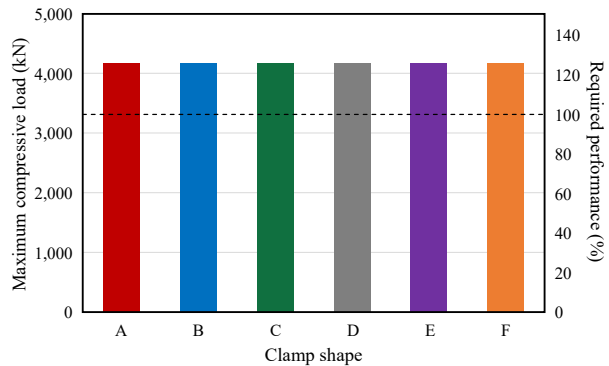


Fig. 13. Maximum compressive load according to clamp section

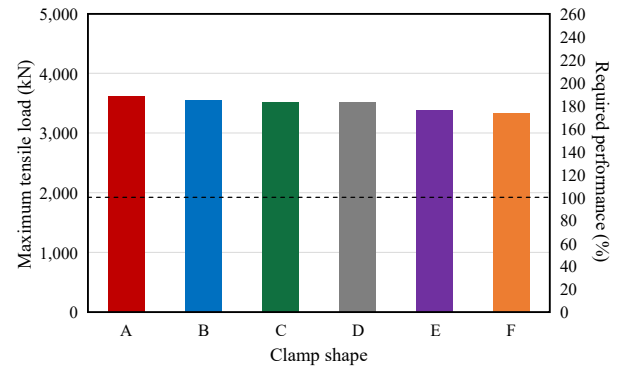


Fig. 16. Maximum tensile load according to clamp section

장하중에 관한 하중저항수준은 상대적으로 15%까지 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

3.2.3 휨해석결과

클램프형 연결부가 적용된 강관파일의 휨하중에 대한 구조해석 결과, 최대 하중 상태에서 클램프형 연결부의 경우 Fig. 17, 강관파일의 경우 Fig. 18과 같은 응력분포도가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 강관파일 외부에 적용되는

클램프형 연결부의 단면 특성에 따라 연결부에 작용하는 휨하중의 위치에 의하여 연결부와 강관파일이 맞물리는 위치에 모멘트가 발생하여 최대 응력이 발생하는 것을 알 수 있다. 또한, 휨하중에 대하여 클램프형 연결부가 저항하므로, 강관파일이 먼저 항복하는 것이 아닌 클램프형 연결부가 먼저 항복하는 것을 확인할 수 있다.

클램프형 연결부에 압축하중과 인장하중이 작용하는 경우 클램프 단면에 따라 최대 하중만이 차이가 나타났으나,

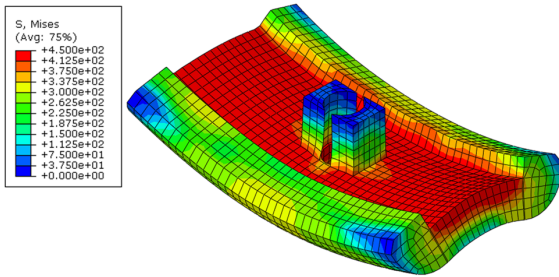


Fig. 17. Stress contour of connecting clamp on flexural load

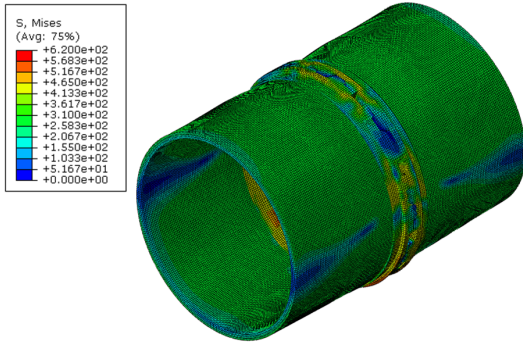


Fig. 18. Stress contour of steel pile on flexural load

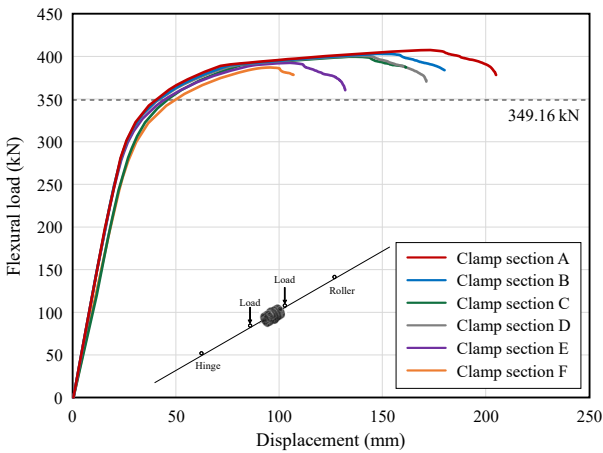


Fig. 19. Load-displacement curve for flexural load

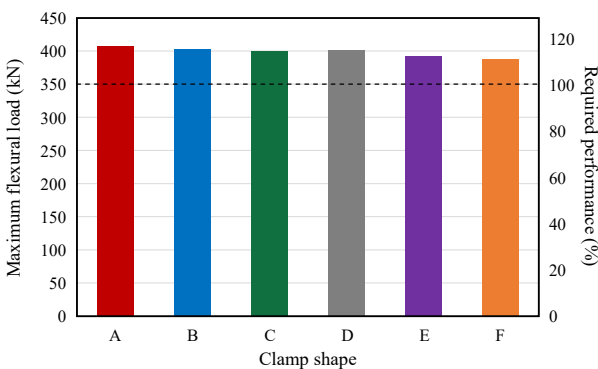


Fig. 20. Maximum flexural load according to clamp section

Fig. 19과 같이 휨하중이 작용하는 경우 클램프의 단면 특성에 따라 하중뿐만 아니라 변위에도 영향이 나타나는 것을 알 수 있다. 최대 하중에서의 변위 또한 클램프형 연결부 단면 두께가 감소함에 따라 F 단면에 비하여 A 단면의 변위는 181% 수준으로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한, 클램프형 연결부에 휨하중이 작용하는 경우 Fig. 20에 나타낸 것과 같이 최대 휨하중은 인장해석결과와 유사하게 연결부의 두께 감소에 따라 요구성능에 비해 상대적으로 6%까지 차이가 나타나는 것을 알 수 있다.

구조해석결과로부터 클램프형 연결부의 단면이 강관파일과의 간격, 상하부 강관파일 접촉면 사이의 길이 등이 변화함에 따라 하중저항 성능이 변화하는 것을 확인하였으며, 검토된 단면 변화 중 연결부의 두께가 구조적 성능에 가장 많은 영향을 미치는 것을 확인하였다. 또한, 클램프형 연결부의 두께는 하중저항성능 뿐만 아니라 연성에도 영향을 줄 수 있으므로, 클램프형 연결부 단면을 결정할 때에 최대 하중이나 변위 등을 적절히 고려된 단면의 클램프형 기계적 연결부를 적용해야 할 것으로 판단된다.

본 연구에서 검토된 압축·인장·휨 하중에 대한 구조해석 결과를 고려하였을 경우 연결부의 두께가 하중저항성능에 미치는 영향이 가장 크므로, A 단면은 하중저항성능은 검토된 단면 중 가장 높은 수준이지만 제작 특성을 고려할 때 실제 적용이 어려울 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에서 검토된 클램프형 연결부의 단면은 모두 유사한 형태이지만 두께가 얇은 E, F 단면은 검토된 단면 중 상대적으로 연성과 하중저항성능이 떨어질 수 있음을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서 검토된 기계적 클램프형 연결부의 적용을 위하여 클램프의 두께, 길이, 강관파일과의 접촉면적 등을 적절하게 고려하여 클램프형 연결부를 제작하는 것이 합리적일 것으로 판단된다. 이에 따라 클램프형 연결부의 제작과정에서 나타날 수 있는 제작오차와 실제 단면 치수, 실제 시공과정에서 나타나는 연결부의 시공오차 등을 고려하고, 클램프의 하중저항성능을 요구성능과 비교하여 가장 경제적이고 합리적인 연결부의 단면을 결정하여 기계적 클램프형 연결부를 적용하여야 할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 강관파일의 용접연결 개선을 위한 강관파일 기계적 연결부의 구조적 성능을 평가하기 위하여 지

지력과 구조적 한계상태를 고려한 강관파일의 기계적 연결부에 대한 요구성능을 검토하였다. 또한, 클램프 형태의 강관파일 기계적 연결부를 이용한 강관파일 연결부에 대한 구조적 성능 변화를 클램프형 연결부의 단면 형상변화에 따른 구조해석을 실시하여 해석적으로 평가하였다.

강관파일의 지지력은 구조적 한계상태와 비교하여 상대적으로 차이가 날 수 있으므로, 압축·인장·휨 하중에 대한 저항계수를 각각 적용하여 기계적 연결부의 요구성능을 평가하였다. 강관파일의 구조적 한계상태와 국외의 강관파일 기계적 연결부의 요구성능 수준을 분석하여 압축저항계수로 0.90, 인장저항계수로 0.55, 휨저항계수로 0.85를 제안하고 강관파일 기계적 연결부의 요구성능 수준을 제안하였다. 또한, 실제 강관파일의 지지력 수준을 평가하여 제안된 강관파일 연결부의 요구성능과 비교한 결과 강관파일의 제원 및 재료특성 등이 변화하더라도 본 연구에서 제안한 기계적 연결부의 요구성능 수준이 실제 강관파일의 지지력을 충분히 만족할 수 있을 것으로 평가되었다.

클램프 형태의 강관파일 기계적 연결부를 이용한 강관파일 연결부의 구조해석 결과, 클램프형 강관 연결부를 적용한 강관파일의 압축저항성능은 클램프형 연결부에 하중이 작용하지 않으므로, 클램프의 단면 변화에 따라 모두 유사한 수준의 성능 수준이 나타났다. 인장하중에 대한 클램프형 강관 연결부의 하중저항성능은 클램프의 단면특성에 따라 클램프형 연결부에 작용하는 휨하중이 가장 크게 나타날 수 있는 단면의 최대하중 수준이 가장 낮은 것으로 확인되었으며, 작용 모멘트의 위치가 유사하더라도 클램프형 연결부의 두께가 얇을수록 최대 하중이 낮은 것을 확인하였다. 휨하중에 대한 클램프형 강관 연결부의 하중저항성능은 강관파일간 연결에 사용되는 클램프형 연결부의 단면 두께에 가장 크게 영향을 받고 있으며, 최대 휨하중 및 휨변형에도 가장 큰 영향을 주는 것으로 나타났다. 따라서 강관파일의 기계적 연결부의 요구성능 수준과 클램프형 연결부가 적용된 강관파일의 하중저항성능을 고려하여 본 연구에서 검토된 클램프형 연결부의 단면이 결정될 필요가 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 D400(직경 406.4 mm, 두께 12 mm)의 강관파일을 대상으로 제안된 강관파일의 요구성능 수준과 클램프형 강관파일 연결부를 적용한 강관파일의 구조성능을 평가하였으나, 실제 강관파일은 다양한 직경 및 두께로 제작되므로, 이에 따른 구조적 성능과 클램프형 연결부의 단면 영향 등이 고려하여야 할 것이다. 또한, 본 연구에서

는 구조해석을 통하여 해석적으로 클램프형 강관파일 연결부의 성능을 평가하였으므로 향후 항타 실험 및 하중재하 실험 등을 통하여 검토된 클램프형 강관파일 연결부의 성능 평가가 필요할 것으로 판단된다. 또한, 다양한 지반조건에 따라 강관파일에 작용하는 하중수준이 변화할 수 있으므로 다양한 지반조건에 대한 실험 및 분석 등이 진행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업(과제번호: 22CTAP-C163960-02)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌(References)

- [1] Kim, S.H., Choi, Y.H., and Choi, S.M. (2012) Experimental Study on the Behavior of Circular Steel Tube Columns Using HSB600 Steel, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.6, pp.743-751 (in Korean).
- [2] Song, W., Liu, X., Berto, F., Wang, P., Xu, J., and Fang, H. (2017) Strain Energy Density Based Fatigue Cracking Assessment of Load-Carrying Cruciform Welded Joints, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Elsevier, Vol.90, pp.142-153.
- [3] Yoon, W.-S., Bang, E.-S., Ju, W.-Y., Kim, S.-K., and Chae, Y.-S. (2015) A Study on the Characteristics of PHC Pile Connected Using Numerical Analysis, *Proceedings of Annual Spring Conference of Korean Geosynthetic Society*, KGSS, Korea, pp.111-114 (in Korean).
- [4] Kim, U., Kim, J., Kim, J., Min, B., and Choi, H. (2021) Development of Expandable Steel Pipe Piles to Improve Bearing Capacity, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, KGES, Vol.22, No.12, pp.5-13 (in Korean).
- [5] Kim, J., Kim, U., Kim, J., Kang, M., and Choi, H. (2022) An Experimental Study on the Performance of Expandable Steel Pipe Pile, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, KGES, Vol.23, No.1, pp.39-49 (in Korean).
- [6] Choi, W.Y., Kim, D.K., Lee, H.G., Song, B.E.,

- Shim, N.H., and Park, Y.S. (2010) An Experimental Study on Vertical Bolt Joint Method of PHC Piles, *Magazine and Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.22, No.6, pp.46-51 (in Korean).
- [7] Kim, S.E., and Kim, S.B. (2018) Safety Evaluation of Horizontal and Vertical Bolted Connection Between PHC Piles Using Finite Element Analysis, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.30, No.2, pp.97-104 (in Korean).
- [8] Ahn, J.-H., Moon, H.-D., Ha, M.-G., and Cho, K.-I. (2019) Connection Resistance of Mechanical Joint Using Connection plate for Improvement of Connectivity Between PHC piles, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, Vol.23, No.7, pp.25-32 (in Korean).
- [9] Uotinen, V.-M., and Rantala, J. (2013) Applications and Development of Modern Steel Pile Technology, *Procedia Engineering*, Elsevier, Vol.57, pp.1173-1182.
- [10] Kitahama, M., Ishihama, Y., Matsumiya, H., Fujii, Y., Sakamoto, T., Taenaka, S., Mochizuki, T., and Tanaka, H. (2016) Development of the Mechanical “Gachicam Joint™” for Steel Pipe Piles and Steel Pipe Sheet Piles, *Nippon Steel & Sumitomo Metal Technical Report*, Nippon Steel, No.113, pp.34-41.
- [11] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2017) *Design Standard of Steel Structural Members* (KDS 14 31 10: 2017), Korea (in Korean).
- [12] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2018) *Design Standard of Steel Bridge (Limit State Design)* (KDS 24 14 31: 2016), Korea (in Korean).
- [13] Technical Committee on MJ Construction Method (2019) *MJ Construction Method: Mechanical Connection Method for Steel Pipe Pile*, GBRC Performance Verification 19-07, Sansei, Inc., Japan (in Japanese).
- [14] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2021) *Design Standards of Bridge Substructure (Limit State Design)* (KDS 24 14 51: 2021), Korea (in Korean).
- [15] Jeon, K.-S., and Kim, N.-Y. (2012) Design Method for Lateral Bearing Capacity of Piles, *Geotechnical Engineering*, Korean Geotechnical Society, Vol.28, No.3, pp.23-29 (in Korean).
- [16] Ha, M.-G., Cho, K.-I., Moon, J., and Ahn, J.-H. (2022) Steel Pile Technology for Improved Constructability and Economic Feasibility, *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.34, No.1, pp.73-78 (in Korean).
- [17] Dassault Systèmes Simulia Corp. (2014) *Abaqus/CAE User's Guide*, DSS, USA.
- [18] Hong, J.H., and Kim, T.S. (2020) Numerical Analysis on Structural Behaviors of Single Shear Two-Bolted Connection with Lean Duplex Stainless Steel, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.32, No.2, pp.75-84 (in Korean).
- [19] Lee, S.S. (2021) Finite Element Modeling of Bolted Inter-Module Connections in Modular Steel Buildings, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.33, No.6, pp.347-354 (in Korean).

요 약: 본 연구에서는 강관파일의 용접연결 방법을 개선하기 위하여 강관파일의 기계적 연결부에 대한 요구성능을 검토하고, 클램프형 기계적 연결부를 적용한 강관파일의 구조적 성능을 클램프형 상 변화에 따라 검토하였다. 클램프형 연결부의 요구성능을 검토하기 위하여 강관파일의 지지력과 구조적 한계상태를 고려하여 클램프형 기계적 연결부의 요구성능을 평가하였다. 또한, 클램프 기계적 연결부의 단면변화에 따른 강관파일의 구조적 성능을 평가하기 위하여 다양한 클램프형 연결부의 형상을 고려하여 구조해석을 실시하였다. 구조해석결과로부터 평가된 클램프형 연결부의 구조적 성능을 본 연구에서 결정된 요구성능과 비교하여 평가하였으며, 클램프형 연결부의 형상에 따라 하중저항성능과 연성 등이 변화하는 것을 확인하였다.

핵심용어: 강관파일, 구조적 성능, 기계적 연결부, 요구성능, 구조해석
