

사질토층을 지나 풍화암에 소켓된 매입 PHC말뚝에서 지반의 허용압축지지력 산정도표 및 산정공식 개발에 관한 연구(III) - 품질 성능 검사 자료 및 성능 제원 표 분석을 통한 PHC말뚝의 장기허용압축하중 성능의 올바른 활용 -

Study(III) on the Development of Charts and Formulae Predicting Allowable Axial Bearing Capacity for Prebored PHC Pile Socketed into Weathered Rock through Sandy Soil Layer - The Proper Use of Long-term Allowable Compressive Load of PHC Piles by Analyzing Quality Test and Product Specifications Data -

김 채 민¹ Kim, Chae Min 윤 대 희² Yun, Dae Hee
이 창 욱³ Lee, Chang Uk 최 용 규⁴ Choi, Yongkyu

Abstract

Long-term allowable compressive Loads of PHC piles were analyzed based on qualification tests results by 17 small and medium PHC pile producing companies and product specifications by 6 major and 17 small and medium PHC pile producing companies. At the present stage, an average long-term allowable compressive load of PHC pile was designed at 70% level from current design data, and safety factor of 4.0 was applied to long-term allowable compressive loads of PHC pile despite of its excellent quality. Most quality standards of PHC pile are specified at KS F 4306. But compressive strength test method of spun concrete is specified at KS F 2454. As a result of analyzing quality test data supplied by each manufacturer, all quality test results showed higher performances than standard values. Therefore, it was considered that the capacity of PHC pile can be used up to the maximum allowable compressive load of PHC pile when PHC pile is designed.

요 지

PHC말뚝을 생산하는 17개 중소기업체의 품질 성능 검사 자료, 17개 중소기업체 및 6개 대기업 산업체의 장기허용압축하중 제원 표를 분석하였다. 현 단계의 국내 설계에서는 PHC말뚝의 장기허용압축하중의 평균 약 70% 수준을 반영하고 있고 품질이 우수함에도 불구하고 PHC말뚝의 장기허용압축하중에는 안전율 4.0을 적용하고 있다. 대부분의 품질 검사 기준은 KS F 4306에 명시되어 있다. 그러나 원심력으로 다져진 콘크리트 압축강도시험 기준은 KS F 2454에 명시되어

1 정희원, 경성대학교 건설환경도시공학부 박사 후 연구원 (Member, Postdoctoral Fellow, Dept. of Civil, Environmental and Urban Engrg., Kyungsoong Univ.)

2 정희원, (주)신성엔지니어링 사원 (Member, Shinsung Engrg., Co. Ltd.)

3 정희원, 경성대학교 대학원 토목공학과 석사과정 학생 (Member, Master's Course Student, Dept. of Civil Engrg. in Graduate School, Kyungsoong Univ.)

4 정희원, 경성대학교 공과대학 건설환경도시공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil, Environmental and Urban Engrg., Kyungsoong Univ., Tel: +82-51-663-4753, Fax: +82-51-621-0729, ykchoi@ks.ac.kr, Corresponding auther, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2020년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2019 by the Korean Geotechnical Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

있다. 각 제조사의 품질 시험 자료를 분석한 결과 모든 항목에서 기준값 보다 높은 성능을 보였다. 따라서 PHC말뚝 설계 시 PHC말뚝의 지지력을 PHC말뚝의 허용연직압축하중의 최대값까지 사용할 수 있을 것으로 판단되었다.

Keywords : PHC pile, Quality standard of PHC pile, KS F 4306, Compressive strength test method of spun concrete, KS F 2454, Higher performances than standard values, Long-term allowable compressive load

1. 서 론

본 논문은 아래에 정리한 바와 같이 사질토층을 지나 풍화암에 소켓된 매입 PHC말뚝에서 지반의 허용압축 지지력 산정도표 및 산정공식을 제안하는 연구에 대한 일련의 연속논문 중 제3편에 해당한다.

사질토층을 지나 풍화암에 소켓된 매입 PHC말뚝에서 지반의 허용압축지지력 산정도표 및 산정공식 개발에 관한 연구(I~VII)

- 제1편 재하시험 자료 분석을 통한 전체지지력에 대한 주면마찰력의 분담율(SRF) 분석 -
- 제2편 설계 사례 분석을 통한 매입 PHC말뚝의 설계 개선 방향 -
- **제3편 품질 성능 검사 자료 및 성능 제원 표 분석을 통한 PHC말뚝의 장기허용압축하중 성능의 올바른 활용 -**
- 제4편 압축정재하시험 및 양방향재하시험 자료 분석을 통한 매입 PHC말뚝의 장기허용압축하중의 실증 성능 검증 -
- 제5편 매개변수 수치해석 자료 분석 -
- 제6편 지반의 허용압축지지력 산정용 표해 및 도해 -
- 제7편 지반의 허용압축지지력 산정공식 -

현 단계의 설계 자료들에서 매입 시공된 PHC말뚝의 설계효율($D_e = P_D/P_{all}$; P_D = 설계하중, P_{all} = PHC말뚝의 허용연직압축하중)은 평균 약 70%로 나타나고 있다. 동일한 지반조건에서 지반의 평균 설계효율($RQP = Q_{all}/P_{all}$) (여기서, Q_{all} = 지반의 허용지지력)은 약 80%로 나타났다. PHC말뚝의 설계하중은 지반의 허용지지력과 비슷한 수준 또는 그보다 약간 낮은 수준으로 파악되었다 (Choi et al., 2019a; Yea et al., 2019).

풍화암에 소켓된 매입 PHC말뚝의 설계 자료에서 설계하중(P_D), PHC말뚝의 허용연직압축하중(P_{all}), 지반의 허용지지력(Q_{all})을 분석한 선행연구(Choi et al., 2019; Yea et al., 2019)에 의하면 설계하중은 PHC말뚝의 허용연직압축하중에 크게 미달되게 설계되는 것을 알 수 있었다. 따라서 설계하중과 PHC말뚝의 장기허용압축하중 사이의 최적화 노력이 필요할 것으로 판단되었다. 이 때 PHC말뚝의 우수한 장기허용압축하중 성능을 충분

하게 활용하기 위하여 지반의 허용지지력은 PHC말뚝의 장기허용압축하중보다 높은 수준으로 산정되어야 할 것으로 판단되었다.

본 연구에서는 PHC말뚝을 생산하는 17개 중소기업체의 품질 성능 검사 자료, 17개 중소기업체 및 6개 대기업 산업체의 장기허용압축하중 제원 표를 분석하였다. 이에 기초하여 PHC말뚝의 장기허용압축하중 성능의 올바른 활용 방안을 제안하였다.

2. PHC말뚝의 품질 성능 시험 자료 분석

2.1 품질 검사 항목 및 방법

KS F 4306(KATS, 1983)의 10항에 나타나 있는 PHC말뚝 생산제품에 대한 품질 검사 시험 항목은 다음과 같다. 검사 항목은 겉모양 및 모양, 치수, 몸체의 휨 강도, 몸체의 축력 휨 강도, 몸체의 전단 강도, 이 음부의 휨 강도, PC 강재 및 철근의 배치이다. 콘크리트 압축강도 품질 검사 방법은 KS F 2454에 나타나 있다. 시험 항목별로 검사 방법을 KS F 4306의 10.2~10.7항에 규정된 내용(KATS, 1983)을 독자들의 이해를 돕기 위하여 원문 그대로 아래에 인용하였다.

- (i) 겉모양 및 모양 : 전수에 대하여 하고 4.1항 및 6.1항의 규정에 적합하여야 한다.
- (ii) 치수 : 1로트의 PHC 말뚝에서 임의로 샘플링한 것에 대하여 하고, 6.2항의 규정에 적합하여야 한다. 이 검사에서 1개라도 적합하지 않을 때는 그 로트는 전수에 대하여 검사하고, 6.2항의 규정에 적합하면 최초의 불합격품을 제외하고 합격으로 한다. 1로트의 PHC말뚝 개수 및 샘플링 개수는 인수·인도 당사자 간의 협의에 따라 정한다.
- (iii) 몸체의 휨 균열 강도 : 1로트의 PHC 말뚝에서 임의로 2개의 PHC말뚝을 샘플링 하여 9.1항의

시험을 하고, 2개 모두 4.2항의 규정에 적합하여야 한다. 2개 모두 적합하지 않으면 그 로트 전부를 불합격으로 한다. 이 검사에서 1개만 합격하지 않을 때는 그 로트에서 다시 4개를 샘플링하여 9.1항의 시험을 하고, 4개 모두 4.2항의 규정에 적합하면 최초의 불합격품을 제외하고, 그 로트 전부를 합격으로 한다. 다만 1개라도 적합하지 않을 때는 그 로트 전부를 불합격으로 한다. 1로트의 개수는 인수·인도 당사자 간의 협의에 따라 정한다.

- (iv) 몸체의 휨 파괴 강도 : 10.4.1항에서 시험한 처음의 2개 중 1개에 대하여 9.1항의 시험을 하고, 4.2항의 규정에 적합하면 그 로트 전부를 합격으로 한다. 이 시험 성적서로 인수·인도 당사자 간의 검사를 대신할 수 있다.
- (v) 이음부의 휨 강도 : 몸체에 준하여 검사를 한다. 이 시험 성적서로 인수·인도 당사자 간의 검사를 대신할 수 있다.
- (vi) 몸체의 축력 휨 강도 : 제조자가 4.3항에 표시한 대표 바깥지름 400mm 및 800mm의 것 또는 부속서의 2.에 규정하는 것에 대하여 유효 프리스트레스의 크기에 따른 종류별로 축력 N_1 , N_2 및 N_3 에 대하여 2개씩의 형식 검사를 하고, 그 시험 성적서를 가지고 있어야 한다. 제품 검사는 대표 바깥지름 400mm 및 800 mm의 것 또는 부속서의 2.에 규정하는 것 중 종류별로 1년간에 1개를 샘플링하고 축력 N_3 에 대하여 9.2항의 시험을 하여 그 결과가 표 2 또는 부속서 표 1의 규정에 적합하여야 한다. 이 시험 성적표로 인수·인도 당사자 간의 검사를 대신할 수 있다. 또한 이음부의 축력 휨 강도에 대해서는 시험을 하지 않는다.
- (vii) 몸체의 전단 강도 : 제조자가 4.4항에 표시한 대표 바깥지름 400mm 및 800mm의 것 또는 부속서의 2.에 규정하는 것에 대하여 유효 프리스트레스의 크기에 따른 종류별로 2개씩의 형식 검사를 하고, 그 시험 성적서를 가지고 있어야 한다. 제품 검사는 대표 바깥지름 400mm 및 800mm의 것 또는 부속서의 2.에 규정하는 것 중 종류별로 1년에 1개를 샘플링 하여 9.3항의 시험을 하고, 그 결과가 표 3 또는 부속서 표 2의 규정에 적합하여야 한다. 이 시험 성적서로 인수·

인도 당사자 간의 검사를 대신할 수 있다. 또한 이음부의 전단 강도에 대해서는 시험을 하지 않는다.

- (viii) PC 강재 및 철근 배치 : 10.4.2항에 따른 파괴 검사를 한 PHC말뚝에 대하여 검사하고, 8.1항의 규정에 적합하면 합격으로 한다. 또 이 때 파괴한 부분에서 PHC 말뚝의 두께에 대하여도 검사한다.

또한 PHC말뚝의 품질에서 가장 중요한 항목인 콘크리트 압축강도시험은 별도의 표준인 KS F 2454 ‘원심력으로 다져진 콘크리트의 압축 강도 시험방법’에 따라 실시하는데 여기에서는 상세한 절차는 설명하지 않았다. PHC말뚝 생산에 사용하는 콘크리트 압축강도는 KS F 4306에서 제시하는 78.5MPa 이상이어야 하며 PHC말뚝의 장기허용압축하중을 만족시킬 수 있는 소요 압축강도 이상이어야 한다. 향후 KS F 4306의 개정 시 콘크리트의 압축 강도 검사에 관련된 내용을 추가하여야 할 것으로 생각되었다.

KS F 4306 해설 ‘2.3.5 이음부의 휨 강도(본체의 4.5) 이음부의 휨 강도는 몸체의 휨 강도와 동등 이상인 것이 원칙이지만, 이음부는 이음 철물 등으로 보강되어 있고 강성도 높고 몸체의 휨 균열 모멘트에 대해서 안전하므로 여기에서는 휨 파괴 모멘트만을 대상으로 하고 있다.’라고 규정하고 있다. 이 규정에서는 KS F 4306 및 KS F 7001에서 표준이음방식으로 정하고 있는 용접이음 PHC말뚝은 휨 모멘트 시험 시 용접이음부에서 균열이 발생하지 않기 때문에 휨 균열 모멘트 시험은 실시하지 않고 휨 파괴 모멘트 시험만 실시하도록 규정하였으며 나아가 용접이음말뚝의 말뚝체의 기본 성능(일체화 거동, 탄성 거동)에 대한 품질 시험도 실시하지 않도록 규정하였다.

그러나 표준방식이 아닌 이음말뚝의 경우 말뚝체의 기본 성능(일체화 거동, 탄성 거동)에 대한 품질 시험을 실시하도록 규정하여야 한다. 따라서 용접이음 이외의 이음말뚝에서는 휨 균열 모멘트 시험, 휨 파괴 모멘트 시험, 말뚝체의 기본 성능(일체화 거동, 탄성 거동) 시험은 반드시 실시되어야 한다. 따라서 향후 KS F 4306의 개정 시 용접이음 이외의 이음말뚝에 대한 품질 시험에 대한 내용을 상세하게 추가하여야 할 것으로 생각되었다.

2.2 PHC말뚝의 품질 성능 시험 항목 및 빈도 설정 자료 분석

PHC말뚝을 생산하는 17개 중소기업체에서는 Table 1(a)의 품질시험 항목 및 빈도 등의 기준을 마련하여 자체시험 및 공인시험기관 의뢰 시험을 실시하고 있다. 또한 LH 전문시방서(Korea land & housing corporation, 2017)에서 정한 기준[Table 1(b)]을 이용하여 인도자와 인수자의 협의에 의하여 시험이 실시되고 있다.

2.3 PHC말뚝의 품질 성능 시험 자료 분석

국가기술표준원에서 제정한 KS F 4306 ‘프리텐션 방식 원심력 고강도 콘크리트 말뚝’에서는 PHC말뚝의 적

용 범위 및 유효프리스트레스에 대하여 기준을 제시하고 있다. 콘크리트 압축강도는 78.5MPa 이상이어야 한다. A종, B종, C종 PHC말뚝에서 A, B, C종의 유효프리스트레스는 각각 3.92MPa, 7.85MPa, 9.81MPa이어야 한다. 유효프리스트레스는 계산에 의해 구하고 그 계산 값은 각각의 값의 $\pm 5\%$ 범위로 한다.

PHC말뚝을 생산하는 17개 중·소기업체에서 제공한 품질 성능 검사 자료 분석 내용을 요약하면 다음과 같다 (Choi et al., 2019). 여기서 PHC말뚝을 생산하는 6개 대기업 산업체의 품질 성능 검사 자료는 제공받지 못하여 분석 대상에서 제외하였다.

(1) 몸체 휨 균열 강도

PHC말뚝 몸체의 휨 균열 강도는 각 직경, 종류별 기준

Table 1. Examples of test items and frequency for PHC piles

(a) One among 17 small and medium PHC pile producing companies

Test item	Contents			
(i) Appearance and shape	Not available			
(ii) Size	Not available			
(iii) Bending crack strength of pile body	Outer diameter (mm)	Lot	Test number	Pile number
(v) Bending strength of pile joint	300~400	1,000	1	2
	450~600	700	1	2
	700~1,200	500	1	2
(iv) Flexural fracture strength of pile body	Outside diameter (mm)	Lot	Test number	Pile number
	300~400	1,000	1	1
	450~600	700	1	1
	700~1,200	500	1	1
(vi) Axial bending strength of pile body	Outside diameter (mm)	Representative diameter	Pile number	
	300~600	400	Once a year/type	
	700~1,200	800	Once a year/type	
(vii) Shear strength of pile body	Outside diameter (mm)	Representative diameter	Pile number	
	300~600	400	Once a year/type	
	700~1,200	800	Once a year/type	
(viii) PC steel bar and rebar placement	Not available			
(ix) Compressive strength of concrete	Once a day			

(b) LH Construction Specification

Pile type	Test item	Test method	Test frequency	Remark
Pretensioned spun high strength concrete piles (KS F 4306)	Appearance and Shape	KS F 4306	1. Once per production company 2. Once per 200	Replaced by confirmation of Test report commissioned by KS certified company to accredited agency
	Size			
	Bending strength of pile joint and body			
	Axial bending strength of pile body			
	Shear Strength of pile body			
	PC steel bar and rebar placement			

값에서 균열 발생 여부를 확인하고 균열이 발생하지 않으면 합격으로 처리하였다. 17개 중·소산업체의 시험 자료에서 균열이 발생하는 경우는 전혀 없는 것으로 분석되었다.

(2) 몸체 휨 파괴 강도

PHC말뚝 몸체의 휨 파괴 강도는 산업체별 제작하는 종류가 최소 200가지 이상이었다. 산업체별로 제작의 범위가 다양하였으므로 제공된 시험 자료를 이용하여 기준 값과 품질 시험 값을 비교하였다. 기준 값에 대한 최소, 최대의 비율을 계산하였으며 Fig. 1과 같이 나타내었다. $\frac{\text{시험값}}{\text{KS 기준값}} \times 100(\%)$ 를 이용하여 Fig. 1의 값을 계산하였으며, 여기서 KS 기준 값은 100%로 나타내어졌다. 몸체 휨 파괴 강도는 최소 104%, 최대 161%로 KS 기준 값을 모두 상회하는 것으로 나타났으며, 대부분의 산업체에서 110% 이상으로 품질관리를 실시하는 것으로 분석되었다.

(3) 몸체의 축력 휨 강도

PHC말뚝 몸체의 축력 휨 강도는 바깥지름 300~600mm에 대해서는 바깥지름 400mm를 대표 직경으로 시험을 실시하고, 바깥지름 700~1200mm에 대해서는 바깥지름 800mm를 대표 직경으로 시험을 실시하도록 명시되어 있었다. 각 산업체 사정에 따라 다른 직경의 말뚝으로 시험을 진행하기도 하였다. 그리고 축력 N_1, N_2, N_3 중 하나의 대표 축력을 적용하여 시험을 실시하였다.

각 산업체별 시험 축력이 상이하여 몸체 휨 파괴 강도 분석과 같은 방법을 이용하여 시험 자료를 분석하였다. 몸체의 축력 휨 강도는 최소 115%, 최대 170%로 나타났으며, 대부분의 산업체에서 최소 120%를 상회하도록 품질관리를 실시하고 있는 것으로 분석되었다(Fig. 2 참조).

(4) 몸체의 전단강도

PHC말뚝 몸체의 전단강도는 몸체의 축력 휨 강도와

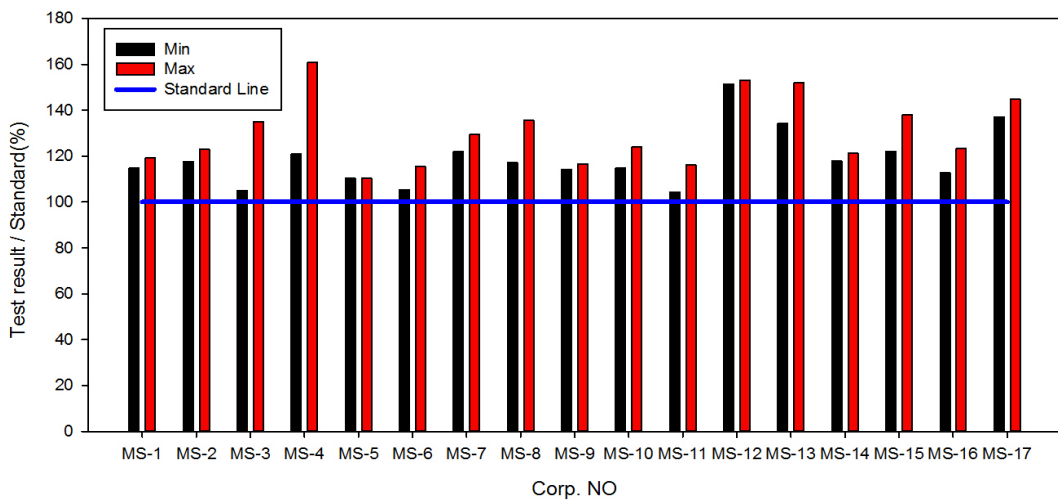


Fig. 1. Flexural fracture strength of pile body

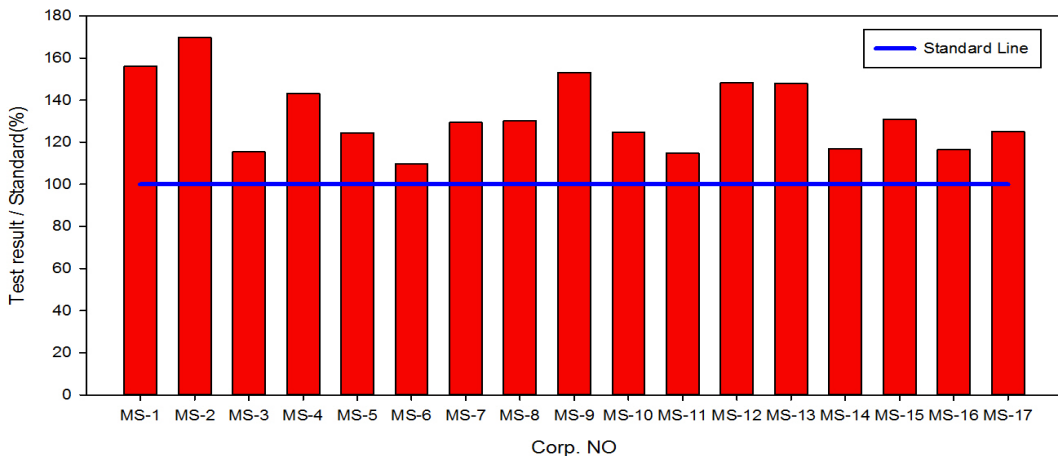


Fig. 2. Axial bending strength of pile body

같이 바깥지름 300~600mm에 대해서는 바깥지름 400mm를 대표 직경으로 시험을 실시하고, 바깥지름 700~1200mm에 대해서는 바깥지름 800mm를 대표 직경으로 시험을 실시하였다. 각 산업체 사정에 따라 다른 직경의 말뚝으로 시험을 진행하기도 하였다.

몸체 휨 파괴 강도 분석과 같은 방법을 이용하여 시험 자료 분석을 실시하였다. 몸체의 전단강도는 최소 111%, 최대 155%로 나타났으며, 대부분의 산업체에서 최소 120%를 상회하도록 품질관리를 실시하고 있는 것으로 분석되었다(Fig. 3 참조).

(5) 콘크리트 압축강도

PHC말뚝의 압축강도는 KS F 2454 ‘원심력으로 다져진 콘크리트의 압축 강도 시험방법’에 따라 시험을 실

시하였다. 압축강도 시험의 빈도는 KS 표준에서 제시하지 않고 있지만 각 제조사에서는 품질관리를 위하여 1회당 3개의 공시체를 사용하여 매일 1회의 빈도로 시험을 실시하였다. 콘크리트의 압축 강도는 KS 표준에서 제시하는 기준 값(78.5MPa)의 107%이상을 나타내었고 최대 116%를 나타내었다(Fig. 4 참조).

(6) 이음부의 휨 강도

PHC말뚝은 5~15m로 제작되는데 현장 용접이음을 통하여 15m 이상 근입시키는 경우가 많이 발생한다. 용접이음을 위하여 생산 산업체에서는 하부말뚝, 중부말뚝, 상부말뚝을 따로 제작하고 있었으며, KS F 4306에서는 용접이음부의 휨 강도 기준 값을 제시하고 있었다. 용접이음부의 휨 강도는 ‘몸체에 준하여 검사를 실시한

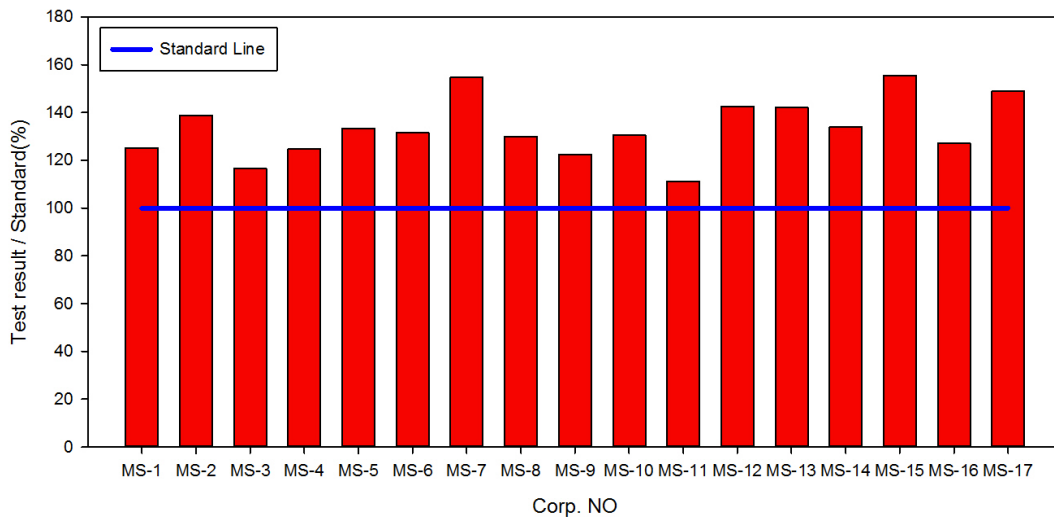


Fig. 3. Shear strength of pile body

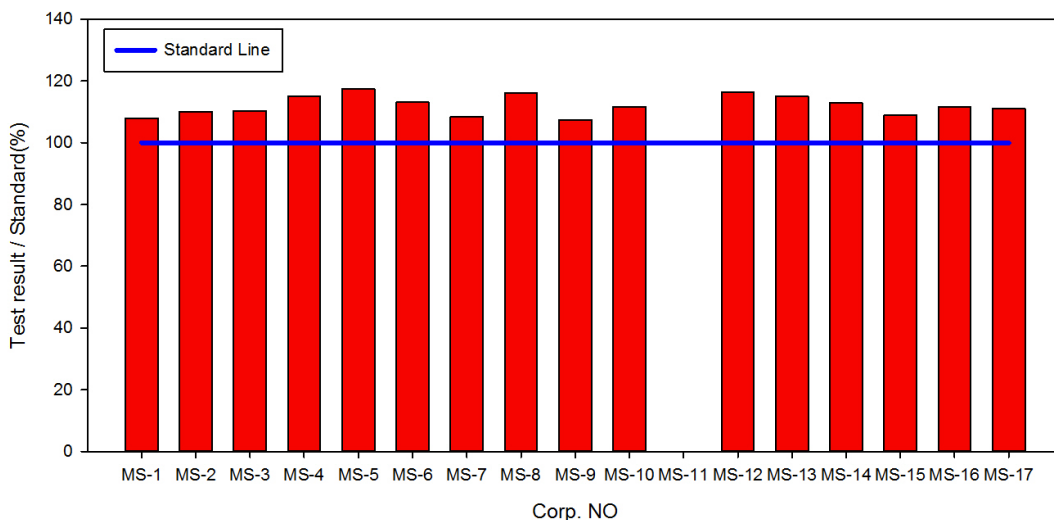


Fig. 4. Compressive strength of concrete

다'고 명시하고 있었다.

용접이음부의 휨강도는 몸체의 휨 파괴 강도 기준의 최소 119%에서 최대 146%를 유지하는 것으로 분석되었다. 각 산업체의 용접이음부의 휨강도 분석 자료를 Fig. 5에 나타내었다.

(7) PC 강재 및 철근의 배치

PC 강재 및 철근의 배치 검사는 KS F 4306 10.7항에 제시되어 있으나, 규정된 방법의 시험으로는 확인을 할

수 없었다. 향후 KS F 4306의 개정을 통하여 개정이 필요할 것으로 판단되었다.

3. PHC말뚝의 장기허용압축하중 제원 표 분석

3.1 17개 중·소 산업체 자료 분석

PHC말뚝을 생산하는 17개 중·소산업체에서 생산하는 대표적인 말뚝 직경은 400, 500, 600mm이었으므로

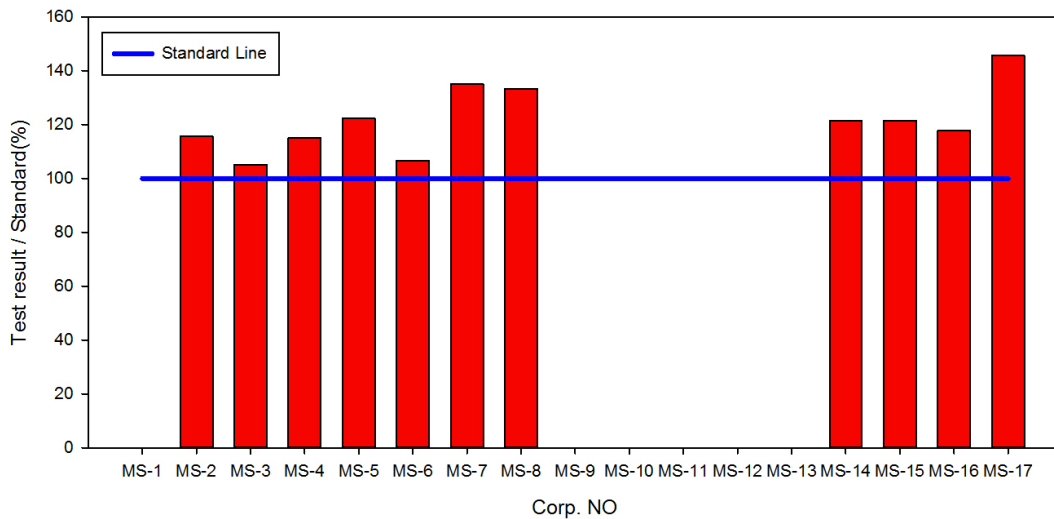


Fig. 5. Bending strength of pile welding joint

Table 2. Long-term Allowable Compressive Loads of PHC piles of 17 Small and Medium PHC pile Producing Companies (in KN)

Pile Diameter and Type Companies	Diameter of 400 mm			Diameter of 500 mm			Diameter of 600 mm		
	A Type	B Type	C Type	A Type	B Type	C Type	A Type	B Type	C Type
MS-1	1,068	804	666	1,656	1,245	1,039	2,264	1,695	1,411
MS-2	1,068	804	666	1,656	1,245	1,039	2,264	1,695	1,411
MS-3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MS-4	1,069	804	667	1,657	1,245	1,039	2,265	1,696	1,412
MS-5	1,122	1,154	1,133	1,731	1,780	1,748	2,365	2,432	2,388
MS-6	1,098	1,127	1,107	1,695	1,744	1,715	2,313	2,381	2,342
MS-7	1,068	804	666	1,656	1,245	1,039	2,264	1,695	1,411
MS-8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MS-9	1,068	804	666	1,656	1,245	1,039	2,264	1,695	1,411
MS-10	1,068	804	666	1,656	1,245	1,039	2,264	1,695	1,411
MS-11	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MS-12	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MS-13	1,098	1,127	1,107	1,695	1,744	1,715	2,313	2,381	2,342
MS-14	1,098	1,127	-	1,695	1,744	-	2,313	2,381	-
MS-15	1,098	1,127	-	1,695	1,744	-	2,313	2,381	-
MS-16	1,098	1,127	1,000	1,695	1,744	1,548	2,313	2,381	2,127
MS-17	1,098	1,127	1,107	1,695	1,744	1,715	2,313	2,381	2,342

이들에 대한 장기허용압축하중을 Table 2에 나타내었다. 국내 단위 표기는 SI 단위(kN)를 사용하지만 현장에서는 종래의 ton 단위를 많이 사용하고 있어 두 가지 단위를 병행하여 사용하는 산업체도 있었으나 많은 산업

체에서 ton 단위를 사용하였다. Table 2에는 ton 단위를 SI 단위로 환산한 값을 나타내었으며 중력가속도 $9.8m/s^2$ 를 곱하여 환산하였다. 4개 산업체에서는 별도로 제안하는 자료가 없었다.

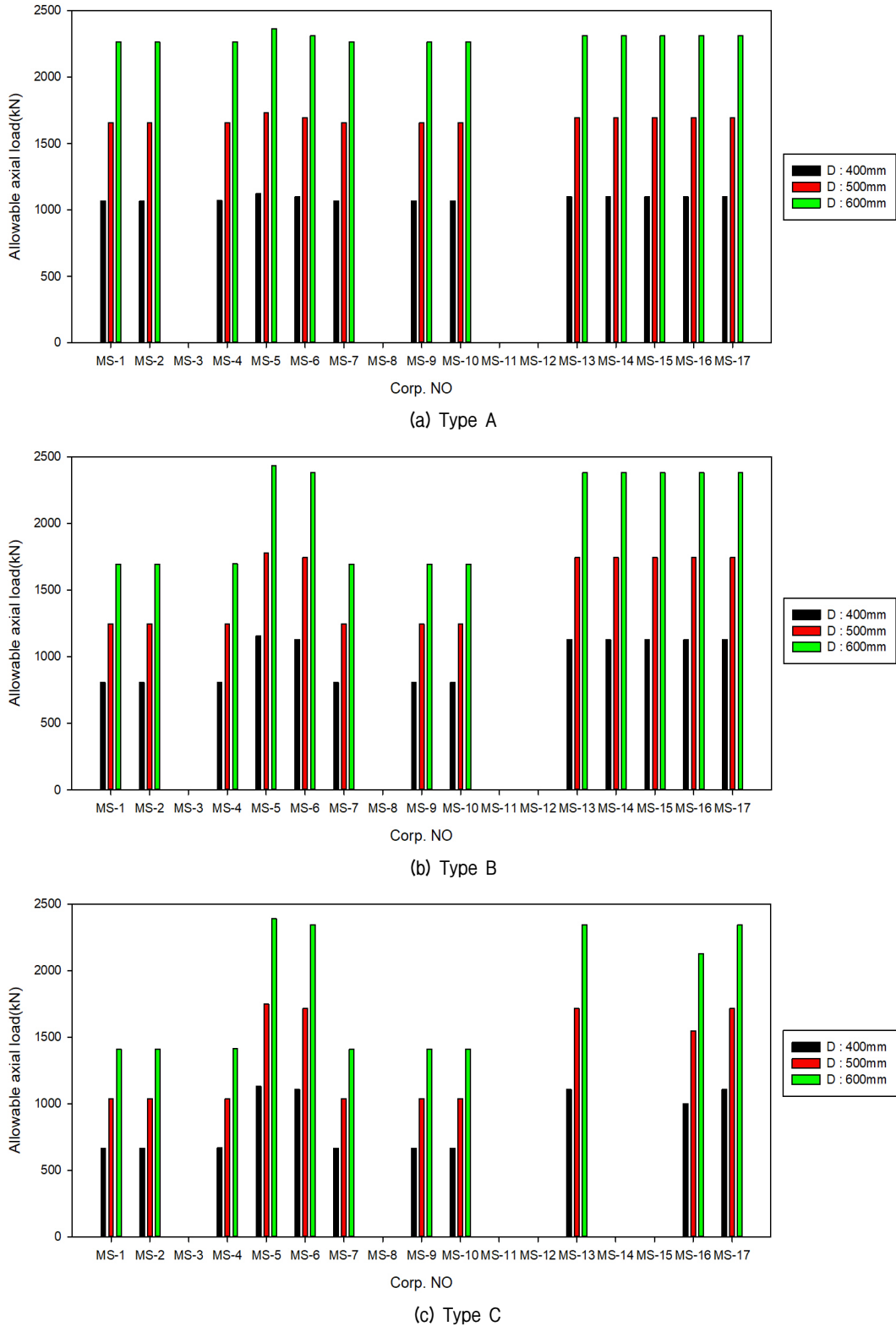


Fig. 6. Summary of long-term allowable compressive loads of PHC piles of 17 small and medium PHC pile producing companies

산업체별 장기허용압축하중을 Fig. 6에 나타내었으며 종별로 다음과 같이 요약할 수 있었다. A종에서 직경 400mm는 1,068~1,122kN, 직경 500mm는 1,656~1,731 kN, 직경 600mm는 2,264~2,365kN으로 나타났으며 모든 산업체에서 유사한 장기허용압축하중을 제시하였다. B종에서 직경 400mm는 804~1,154kN, 직경 500mm는 1,245~1,780kN, 직경 600mm는 1,695~2,432kN으로 나타났다. C종에서 직경 400mm는 666~1,133kN, 직경 500mm는 1,039~1,748kN, 직경 600mm는 1,411~2,388 kN으로 나타났다. 직경별 종별 장기허용압축하중의 평균 값 및 분산 정도를 Table 3에 나타내었다. 여기서 B종 및 C종의 경우 분산 정도가 다소 크게 나타났는데 이는 KS F 4306에서 정하고 있는 기준 값을 하한 값으로 그대로 사용하고 있는 산업체들이 있어서 나타나는 현상으로 분석되었다.

즉 각 산업체가 제시하는 장기허용압축하중은 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 17개 중·소산업체들에서는 대체로 KS F 4306에서 규정하고 있는 방법에 따라 장기허용압축하중을 관리하고 있는 것으로 보였다.

17개 중·소산업체의 브로셔에서는 생산하는 모든 제원의 PHC말뚝 생산 제품에 대한 장기허용압축하중의 분석 내용은 선행연구(Choi et al., 2019)에 제시되었다. 여기에는 현 단계에서 생산되는 모든 제원의 제품에 대한 장기허용압축하중을 찾아볼 수 있었으며 2개 산업체의 초고강도 콘크리트말뚝에 대한 장기허용압축하중을 찾아볼 수 있었다.

3.2 6개 대기업 산업체 자료 분석

PHC말뚝을 생산하고 있는 6개 대기업 산업체에서는 말뚝 직경 400~1,000mm의 제품을 생산하고 있었으며 중·소산업체와의 비교를 위하여 중·소산업체에서 주로 생산하는 직경 400, 500, 600mm의 말뚝을 대상으로 하여 장기허용압축하중을 Table 4에 나타내었다. 단위는 SI 단위(kN)를 주로 사용하였으며 일부 산업체에서는 ton 단위를 병행하여 사용하고 있었다.

산업체별 PHC말뚝의 장기허용압축하중을 Fig. 7에 나타내었으며 종별로 장기허용압축하중을 다음과 같이 요약할 수 있었다. A종에서 직경 400mm는 1,098~1,122 kN, 직경 500mm는 1,695~1,730kN, 직경 600mm는 2,313~2,360kN으로 나타났는데 모든 산업체에서 유사한 장기허용압축하중을 제시하였다. B종에서 직경 400mm는 852~1,150kN, 직경 500mm는 1,309~1,780kN, 직경 600mm는 1,787~2,430kN으로 나타났다. C종에서 직경 400mm는 1,000~1,130kN, 직경 500mm는 1,548~1,750kN, 직경 600mm는 2,127~2,390kN으로 나타났다. B종과 C종에서는 산업체에 따라 장기허용압축하중이 차이가 있는 것으로 나타났다. 직경별 종별 장기허용압축하중의 평균 값 및 분산 정도를 Table 5에 나타내었다. 여기서 대기업 산업체의 경우 중·소산업체보다 분산 정도는 낮은 수준으로 나타났는데 이는 임의 산정공식을 사용하였고 A종, B종, C종 PHC말뚝의 장기허용압축하중의 수준을 유사한 수준으로 관리하기 위하여

Table 3. Analysis of long-term allowable compressive loads of PHC piles of 17 small and medium PHC pile producing companies

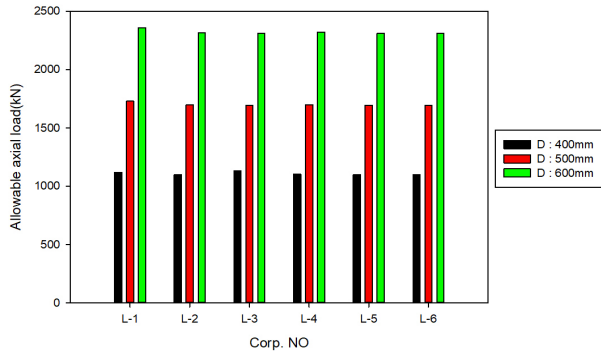
Pile diameter Types	Diameter of 400 mm		Diameter of 500 mm		Diameter of 600 mm	
	Average (kN)	Standard deviation (kN)	Average (kN)	Standard deviation (kN)	Average (kN)	Standard deviation (kN)
A	1,086	17.7	1,680	23.8	2,294	31.1
B	980	163.1	1,516	251.5	2,068	354.8
C	859	213.7	1,334	326.8	1,819	451.0

Table 4. Long-term allowable compressive loads of PHC piles of 6 major PHC pile producing companies (in KN)

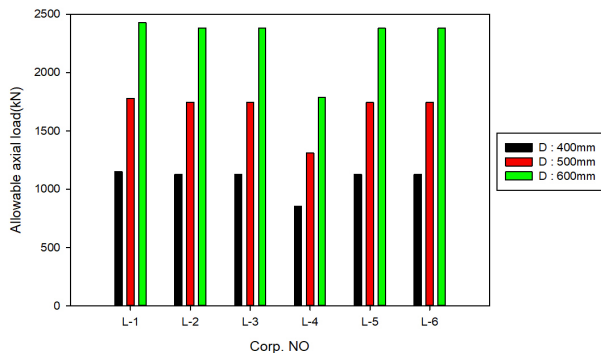
Pile diameter and type Companies	Diameter of 400 mm			Diameter of 500 mm			Diameter of 600 mm		
	A Type	B Type	C Type	A Type	B Type	C Type	A Type	B Type	C Type
B-1	1,120	1,150	1,130	1,730	1,780	1,750	2,360	2,430	2,390
B-2	1,098	1,128	1,108	1,697	1,746	1,716	2,315	2,383	2,344
B-3	1,098	1,127	1,107	1,695	1,744	1,715	2,313	2,381	2,342
B-4	1,104	852	-	1,700	1,309	-	2,322	1,787	-
B-5	1,098	1,127	1,100	1,695	1,744	1,548	2,313	2,381	2,127
B-6	1,098	1,127	1,107	1,695	1,744	1,715	2,313	2,381	2,342

Table 5. Analysis of long-term allowable compressive loads of PHC piles of 6 major PHC pile producing companies

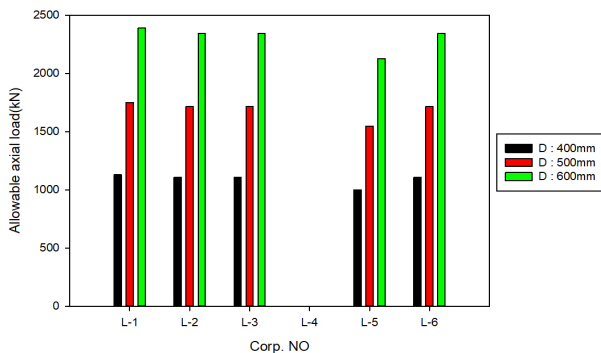
Pile diameter Types	Diameter of 400 mm		Diameter of 500 mm		Diameter of 600 mm	
	Average (kN)	Standard deviation (kN)	Average (kN)	Standard deviation (kN)	Average (kN)	Standard deviation (kN)
A	1,103	8.1	1,702	12.6	2,323	17
B	1,085	104.6	1,678	165.5	2,291	225.9
C	1,110	10.2	1,689	71.7	2,309	92.8



(a) Type A (high strength)



(b) Type B (high strength)



(c) Type C (high strength)

Fig. 7. Comparison of long-term allowable compressive loads of PHC piles of 6 major PHC pile producing companies

콘크리트 압축강도를 다르게 조정하였기 때문으로 분석되었다.

6개 대기업 산업체의 브로셔에서 PHC말뚝 생산 제품에 대한 장기허용압축하중을 분석할 수 있었으며 선

행연구(Choi et al., 2019)에 상세하게 수록하였다. 여기에는 현 단계에서 생산되는 모든 제원의 제품에 대한 장기허용압축하중을 찾아볼 수 있었으며 3개 산업체의 초고강도 콘크리트말뚝에 대한 장기허용압축하중도 찾아볼 수 있었다.

4. PHC말뚝의 장기허용압축하중 성능의 올바른 활용 방안

PHC말뚝을 생산하는 17개 중·소산업체 및 6개 대기업 산업체에서 사용하고 있는 장기허용압축하중의 산정 방법을 Table 6에 요약하여 나타내었다. 크게 2가지로 분류할 수 있었으며 각 산업체에서는 자체적인 시방에 따라 관리되고 있었다. 여기서 PHC말뚝의 설계하중 (P_D)은 어떠한 경우에도 장기허용압축하중(P_a)을 초과하지 않아야 한다.

17개 중·소산업체에서는 KS F 4306에서 정하고 있는 콘크리트 압축강도와 PC강재의 유효프리스트레스를 그대로 사용하였다. 안전율은 콘크리트 압축강도에만 적용하였다. 식 (1)에 의해 PHC말뚝의 장기압축하중을 계산하였다.

$$P_a = (f_{ck}/F.S - \sigma_{ep}) \times A \quad (1)$$

여기서 f_{ck} = 콘크리트 압축강도(78.5MPa)

σ_{ep} = 유효프리스트레스(A종 3.92MPa, B종 7.85MPa, C종 9.81MPa)

A = 콘크리트부 단면적

$F.S$ = 안전율(4.0)

6개 대기업 산업체에서는 PHC말뚝의 장기허용압축하중 계산 공식으로 식 (2)를 활용하였다. 콘크리트 압축강도와 PC강재의 유효프리스트레스에 각각 강도 감소계수를 적용하였으며 안전율은 콘크리트 압축강도와 PC강재의 유효프리스트레스 모두에 적용하였다. 적용

Table 6. Summary of estimation method for long-term allowable compressive loads of PHC piles

No.	Estimation method	σ_{ck} (MPa)	σ_{ep} (MPa)	References	Pile type	Uses
a	$P_a = (\sigma_{ck}/4 - \sigma_{ep}) \times A$	78.5	Type A (3.92), Type B (7.85), Type C (9.81)	KS F 4306	High strength	17 small and medium companies
b	$P_a = (0.85 \times \sigma_{ck} - 0.6 \times \sigma_{ep}) / 4 \times A$	Type A (78.5), Type B/C (83.4)	Type A (3.92), Type B (7.85), Type C (9.81)	-	High strength	2 major companies
c	$P_a = (0.85 \times \sigma_{ck} - 0.6 \times \sigma_{ep}) / 4 \times A$	Type A (80.0), Type B/C (85.0)	Type A (4.00), Type B (8.00), Type C (10.00)	-	High strength	4 major companies
d	$P_a = (0.85 \times \sigma_{ck} - 0.6 \times \sigma_{ep}) / 4 \times A$	110	Type A (4.00), Type B (8.00), Type C (10.00)	-	Ultra high strength	-
e	$P_a = (0.85 \times \sigma_{ck} - 0.6 \times \sigma_{ep}) / 3.5 \times A$	110	Type A (4.00), Type B (8.00), Type C (10.00)	-	Ultra high strength	-
f	$P_a = (\sigma_{ck}/3.5 - \sigma_{ep}) \times A$	110	Type A (3.92), Type B (7.85), Type C (9.81)	KS F 4306	Ultra high strength	2 small and medium companies and 34 major companies

하는 안전율에 따라 식 (2-1) 및 식 (2-2)로 나타낼 수 있으나 안전율 4.0을 적용하는 식 (2-2)를 사용하였다.

$$P_a = \frac{0.85 * f_{ck} - 0.6 * \sigma_{ep} * A}{F.S} \quad (2)$$

여기서, f_{ck} = 콘크리트 압축강도(MPa)(A종 : 78.5MPa, B/C종 : 83.4MPa)

σ_{ep} = 유효프리스트레스(A종 3.92MPa, B종 7.85MPa, C종 9.81MPa)

$$P_{a1} = (0.24f_{ck} - 0.17\sigma_{ep}) * A \text{ (안전율 3.5인 경우) (2-1)}$$

$$P_{a1} = (0.21f_{ck} - 0.15\sigma_{ep}) * A \text{ (안전율 4.0인 경우) (2-2)}$$

여기서 장기허용압축하중 산정 시 PHC말뚝에는 안전율 4.0을 적용하고 초고강도 콘크리트말뚝에는 안전율 3.5를 적용시키는 것은 합리성이 결여될 여지가 있어 보였다. 국내에서도 PHC말뚝은 생산 제품의 신뢰성이 높아 안전율 3.5를 적용시켜도 될 수 있을 것으로 보였으며 초고강도 콘크리트말뚝은 생산 제품의 신뢰성이 아직은 낮은 수준으로 볼 수 있었으므로 오히려 안전율 4.0을 적용시켜야 할 것으로 보였다. 그러나 일본의 참고문헌(Concrete Pile Construction Technical Association, 2009)에서는 최근 생산 제품의 신뢰성이 충분하게 확보되어 초고강도 콘크리트말뚝은 안전율 3.5를 적용하고

있었으며 또한 PHC말뚝 및 이와 유사한 말뚝에서도 안전율 3.5를 적용하도록 규정하고 있다. 그러나 선행 연구(Chae, 2018)에서는 ‘안전율 3.5의 적용성이 입증될 때까지 안전율 4.0을 적용한다’고 명시하였다.

국내의 PHC말뚝 생산 산업체에서 적용하고 있지는 않은 산정방법이지만 FHWA(1983)에서는 PC말뚝(Prestressed concrete pile)에 대한 장기허용압축하중 계산 방법을 아래와 같이 제시하고 있었다. 1971에 발간된 PCA(The Portland Cement Association) 보고서에서는 PC말뚝에 대한 장기극한압축하중은 식 (3)과 같이 근사적으로 제시되었다.

$$P_{ult} = (0.85 f_{ck} - 0.69 * \sigma_{ep}) * A \quad (3)$$

PC말뚝(Prestressed concrete pile)에 대한 장기허용압축하중은 식 (4)와 같이 제시하였다. ψ (+/-factor)는 0.70이었고 ecc (Eccentricity factor)은 0.87이이었으며 LF (Load factor)는 2.0이이었으며 기성콘크리트말뚝(Precast concrete pile)에 적용된 값과 동일하였다. HDF(Hidden Defect Factor)는 이상적인(ideal) 경우 1.0, 정상적인(normal) 경우 0.85, 심각한(severe) 경우 0.70을 사용하도록 하였다. HDF에 따라 PC말뚝에 대한 장기 허용압축하중은 식 (4-1)~식 (4-3)으로 나타낼 수 있었다. 이 결과들은 1971년 개최된 AASHTO-PCI(Prestressed Concrete Institute) 공동위원회(1971)가 제시한 PC말뚝의 장기허용압축하중 산정식과 유사하였다.

$$P_a = (\psi)(ecc)(HDF)(P_{ult})/LF = 0.3045(P_{ult})(HDF) \quad (4)$$

$$P_{a3} = (0.26f_{ck} - 0.21\sigma_{ep}) * A \quad (\text{이상적인 경우}) \quad (4-1)$$

$$P_{a4} = (0.22f_{ck} - 0.18\sigma_{ep}) * A \quad (\text{정상적인 경우}) \quad (4-2)$$

$$P_{a5} = (0.18f_{ck} - 0.15\sigma_{ep}) * A \quad (\text{심각한 경우}) \quad (4-3)$$

상기에서 식 (3)과 식 (4)의 산정공식은 일견 유사한 듯 보일 수 있으나 그 기본적인 개념에서는 관련성이 미미한 것으로 분석되었다. 특히 식 (2-1)과 식 (4-1)로 산정된 PHC말뚝의 장기허용압축하중 값은 유사한 것으로 나타나지만 상관성은 낮은 것으로 분석되었다.

Table 2, Table 4 및 Fig. 6, Fig. 7을 통하여 알 수 있듯이 PHC말뚝의 장기허용압축하중(P_a)에서는 어떤 일관된 기준이 적용되고 있지 못하였으며 생산회사별로 독특한 방식으로 관리되고 있었다. 그러나 어떠한 산업체에서도 KS F 4306에 정한 기준을 위배하고 있지는 않았다.

PC강재의 유효프리스트레스는 문헌별로 약간의 차이는 있었으나(Table 7 참조) PHC말뚝의 장기허용압축하중에 큰 영향을 미치는 정도는 아닌 것으로 판단되었다. 어떠한 경우에도 KS F 4306에서 정한 기준을 위배하지 않았다.

PHC말뚝을 생산하는 17개 중·소산업체 및 6개 대기업 산업체들에서 관리하고 있는 생산 방식들을 요약하면 다음과 같다. 각 산업체에서는 자체 생산 시방에 의하여 PHC말뚝을 생산하고 있었으며 어떠한 경우에도 KS F 4306에서 정하고 있는 기준 값을 상회하고 있었다.

- (i) A, B, C종에서 PHC말뚝의 장기허용압축하중(P_a)은 생산 산업체별로 따로 제시하고 있었다.
- (ii) A, B, C종에서 PC강재의 유효프리스트레스도 생산 산업체별로 따로 정하고 있었으나 KS F 4306에서 정하고 있는 기준은 만족시키고 있었다.
- (iii) A, B, C종에서 콘크리트 압축강도를 동일하게 78.5MPa을 사용하고 있는 산업체도 있었다. B종 및 C종의 장기허용압축하중 값이 A종의 그것과 동등 수준이 될 수 있도록 콘크리트 압축강도를 A종에는 78.5MPa을 사용하고, B, C종에는 동일하게 83.4~85.0MPa을 사용하는 것으로 별도로 표기하는 산업체도 있었다.
- (iv) 각 직경에서 A, B, C종의 장기허용압축하중은 크게 두 가지로 분류되는 것으로 나타났다. 장기허용압축하중을 A종 > B종 > C종의 순서로 제시하고 있는 산업체들도 있었으며, B종 > A종 > C종의 순서로 제시하고 있는 산업체들도 있었다.

PHC말뚝의 장기허용압축하중(P_a)을 안전하게 확보할 수 있는 개선 방안을 다음과 같이 제시할 수 있었다. 각 산업체에서는 자체 생산 시방에 의해 KS F 4306에서 정한 콘크리트 압축강도 및 PC강재의 유효프리스트레스의 기준 값을 효율적으로 관리하고 있었다.

- (i) PHC말뚝의 장기허용압축하중을 A종에서는 비슷한 수준의 값을 가지고, B종 및 C종에서도 A종과 동등 수준의 값을 가질 수 있게 하려면 콘크리트 압축강도를 B종 및 C종에서는 각각 약 99MPa 및 105MPa 이상을 사용하여야 한다. 이

Table 7. Summary of Effective Prestress of PC Steel bar

(a) Effective Prestress Values from References

Types \ References	KS F 4306	Lee (2014)	Cho (2010)
A (in MPa)	3.92	4.00	3.92
B (in MPa)	7.85	8.00	7.85
C (in MPa)	9.81	10.00	9.81

(b) Design Specification and Commentary for Foundation (Yoo et al., 2015)

Pile Diameter (mm) \ Types	350	400	450	500	600	700	800
A (in MPa)	4.20	4.20	4.20	4.20	4.10	4.20	4.20
B (in MPa)	7.80	7.90	8.20	7.80	7.90	8.20	8.20
C (in MPa)	9.90	10.40	10.40	10.00	10.20	10.30	10.40

때 최소 소요 콘크리트 압축강도 ($f_{c,min}$)는 식 (5)로 산정할 수 있다.

$$f_{c,min} = \left(\frac{P_a}{A} + \sigma_{ep}\right) \times 4 \quad (5)$$

여기서 σ_{ep} : PC강재의 유효프리스트레스이며 KS F 4306의 값을 적용함

(ii) A, B, C종에서 PC강재의 유효프리스트레스를 KS F 4306에서 정하고 있는 기준 값을 최소치로 하고 필요 시 생산 산업체별로 $\pm 5\%$ 이내에서 따로 정할 수 있다. 이 경우 증가된 유효프리스트레스에 따라 콘크리트 압축강도를 증가시켜야 하며 이 때 식 (1)을 사용할 수 있다.

생산 산업체별로 자체적인 시방에 의해 PHC 말뚝의 장기허용압축하중을 향상시키려는 노력을 하고 있는 것으로 파악되었다. 특히 B종 및 C종의 경우 유효프리스트레스로 인한 PHC 말뚝의 장기허용압축하중의 감소를 극복하기 위한 자체적인 노력을 하고 있는 것으로 분석되었다.

현 단계의 국내 설계에서는 PHC 말뚝의 장기허용압축하중의 평균 약 70% 수준을 설계하중으로 반영하고 있고 품질이 우수함에도 불구하고 PHC말뚝의 장기허용압축하중에는 안전율 4.0를 적용하고 있다. 따라서 향후 설계에서 PHC말뚝의 장기허용압축하중의 최대값까지 활용하여 PHC 말뚝의 우수한 장기허용압축하중의 성능 효율을 높일 것을 추천한다.

5. 결론 및 제언

PHC말뚝을 생산하는 17개 중·소산업체의 품질 성능 검사 자료, 17개 중·소산업체 및 6개 대기업 산업체의 장기허용압축하중 제원 표를 분석하였다. 이에 기초하여 PHC말뚝의 장기허용압축하중 성능의 올바른 활용 방안을 제안하였다. 이 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 현 단계의 국내 설계에서는 PHC 말뚝의 장기허용압축하중의 평균 약 70% 수준을 설계하중으로 반영하고 있고 품질이 우수함에도 불구하고 PHC말뚝의 장기허용압축하중에는 안전율 4.0을 적용하고 있다. 따라서 설계에서 PHC말뚝의 장기허용압축하

중의 최대값까지 활용하여 PHC말뚝의 우수한 성능 효율을 높일 것을 추천한다.

- (2) PHC말뚝의 품질에 가장 큰 영향을 미치는 콘크리트 압축강도는 기준값의 107% 이상이었다. 2018년도에 생산된 PHC말뚝의 품질을 분석에 의하면 몸체의 경우 휨 균열은 발견되지 않았으며 휨 파괴 강도는 기준값의 104% 이상, 축력 휨 강도는 115% 이상, 전단 강도는 111% 이상이었으며 용접이음부의 휨 강도는 기준값의 119% 이상이었다. 따라서 생산된 PHC말뚝의 품질은 우수한 것으로 판단되었다.
- (3) 생산 산업체별로 자체적인 시방에 의해 PHC말뚝의 장기허용압축하중을 향상시키려는 노력을 하고 있는 것으로 파악되었다. 특히 B종 및 C종의 경우 유효프리스트레스로 인한 장기허용압축하중의 감소를 극복하기 위한 자체적인 노력을 하고 있는 것으로 분석되었다.
- (4) PHC말뚝의 장기허용압축하중이 A종에서는 비슷한 수준의 값을 가지고, B종 및 C종에서도 A종과 동등 수준의 값을 가질 수 있게 하려면 콘크리트 압축강도를 B종 및 C종에서는 각각 약 99MPa 및 105MPa 이상을 사용하여야 한다.
- (5) A, B, C종에서 PC강재의 유효프리스트레스를 KS F 4306에서 정하고 있는 기준 값을 최소치로 하고 필요 시 생산 산업체별로 $\pm 5\%$ 이내에서 따로 정할 수 있다. 이 경우 증가된 유효프리스트레스에 따라 콘크리트 압축강도를 증가시켜야 한다.
- (6) PC 강재 및 철근의 배치 검사는 KS F 4306 10.7항에 제시되어 있으나, 규정된 방법의 시험으로는 확인이 불가능 하였다. 향후 KS F 4306의 개정을 통하여 개정이 필요할 것으로 판단되었다.
- (7) 콘크리트 압축강도 시험 및 용접이음이 아닌 이음 말뚝의 휨 균열 모멘트 검사 및 말뚝체 기본성능(일체화 거동, 탄성 거동) 검사 등에 관한 내용도 KS F 4306에 추가되어야 할 것으로 생각된다.

참고문헌 (References)

1. Chae, S. G. (2018), Standard Design and Construction Practice for PHC Piles, GSENC Corp., p.14, p.173, p.174. (In Korean)
2. Cho, C. H. (2006), *Bored pile method*, ENG Book. (in Korean)
3. Choi, Y. K., Kwon, O. K., Lee, W. J., and Yeo, K. K., Park, M. C. (2019), A Study for Establishing of Behavior, Design and Construction on Prebored and Precast Piles (Development of Capacity

- Prediction Method and Chart for Prebored and precast Piles Considering Soil Types, Pile Penetration Lengths, Pile Diameter), Report No. KGS 2019-083, pp.21-45, 273-300. (In Korean)
4. Concrete Pile Construction Technical Association (2009), Foundation Structure Design Manual (Architecture), p. 8. (In Japanese)
 5. FHWA (1983), Allowable stresses in piles, FHWA/RD-83/059, pp.41-44.
 6. KATS (1983), KS F 4306 Pretensioned Spun High Strength Concrete Piles, 1983. 12. 17, pp.1-51. (In Korean)
 7. Lee, I. M. (2014), Principles of Foundation Engineering, CIR, p. 121. (In Korean)
 8. The Korea Land & Housing Corporation (2017), Appendix 1 Quality Test and Inspection Standards in Construction Specification, V1711, 2017. 8, p. Appendix 1-4. (In Korean)
 9. Yea, G. G., Yun, D. H., Yun, D. K., and Choi, Y. K. (2019b), Study(II) on Development of Charts and formulae Predicting Allowable Axial Bearing Capacity for Prebored PHC Pile Socketed into Weathered Rock through Sandy Soil Layer - Improvement Measures of Current Design Method by Analyzing Current Design Data for Prebored PHC Piles -, JOURNAL OF THE KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY, Vol.35, No.8, August 2019, pp. 31-42. (In Korean)
 10. Yoo, N. J. etc. 20 Authors (2015), Design Specification and Commentary for Foundation Design, Korean Geotechnical Society, p.288. (In Korean)
 11. OOPILE Ltd. (2018), Test frequency and test results for quality control. (In Korean)

Received : June 12th, 2019

Revised : July 19th, 2019

Accepted : July 20th, 2019