

# 사질토층을 지나 풍화암에 소켓된 매입 PHC말뚝에서 지반의 허용압축지지력 산정도표 및 산정공식 개발에 관한 연구(IV) - 압축정재하시험 및 양방향재하시험 자료 분석을 통한 매입 PHC말뚝의 장기허용압축하중의 실증 성능 검증 -

## Study(IV) on the Development of Charts and Formulae Predicting Allowable Axial Bearing Capacity for Prebored PHC Pile Socketed into Weathered Rock through Sandy Soil Layer - Field Verification of Long-term Allowable Compressive Load of PHC Piles by Analyzing Pile Load Test Results -

이 원 제 <sup>1</sup>	Lee, Wonje	김 채 민 <sup>2</sup>	Kim, Chae Min
윤 도 균 <sup>3</sup>	Yun, Do Kyun	최 용 규 <sup>4</sup>	Choi, Yongkyu

### Abstract

Axial compressive failure loads ( $P_n$ ) of diameter 500 mm and diameter 600 mm A type PHC pile were calculated as 7.7 MN and 10.6 MN, respectively. In the static pile load tests, the maximum axial compressive loads of the above 2 kinds of A type pile were measured as 6.9 MN and 8.8 MN respectively, therefore these measured maximum loads were at the level of 90% and 83% of  $P_n$ , respectively. Long-term allowable axial compressive loads ( $P_a$ ) of the above 2 kinds of A type pile were 1.7 MN and 2.3 MN respectively. From the bi-directional pile load test data on the prebored PHC piles, it was confirmed that the allowable axial compressive bearing resistance was estimated as 131% of the long-term allowable compressive load of the PHC pile and showed higher than the allowable bearing capacity calculated by the current design method. Therefore, it has been verified that the PHC pile can be used up to the maximum long-term allowable compressive load, and it is suggested that the ultimate pile capacity formula used in the current design for prebored PHC piles should be improved to accommodate the actual capacity.

### 요 지

직경 500mm 및 직경 600mm PHC말뚝 A종의 파괴 압축하중( $P_n$ )은 각각 7.7MN 및 10.6MN으로 계산할 수 있었다. 직경 500mm 및 직경 600mm 매입 PHC말뚝 A종에 대한 압축정재하시험 시 말뚝 두부에 재하된 최대 압축하중은 6.9MN 및 8.8MN으로 측정할 수 있었으며 따라서 이 측정하중은 각각  $P_n$ 의 90% 및 83% 수준이었다. 직경 500mm 및 직경 600mm PHC말뚝 A종의 장기허용압축하중( $P_a$ )은 각각 1.7MN 및 2.3MN이었다. 모든 사례 매입 PHC말뚝의

1 정회원, ㈜유니콘기연 부사장 (Member, Vice President, Unicorn Technical Institute)

2 정회원, 경성대학교 건설환경도시공학부 박사 후 연구원 (Member, Postdoctoral Fellow, Dept. of Civil, Environmental and Urban Engr., Kyungsoong Univ.)

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

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

양방향재하시험 자료로부터 계산된 지반의 허용지지력은 국내 현행 설계에서 사용하고 있는 극한지지력 산정공식으로 계산한 지반의 허용지지력보다 높은 수준으로 계산되었다. 따라서 매입 PHC말뚝의 설계에서 사용하는 극한지지력 산정공식은 매입 PHC말뚝의 실제 지지력 거동을 모사할 수 있도록 개선하여야 할 것으로 판단되었다.

**Keywords :** A type PHC pile, Static pile load tests, Bi-directional load test data, Long-term allowable compressive load of the PHC pile, Current design method, The ultimate pile capacity formula

## 1. 서론

본 논문은 아래에 정리한 바와 같이 사질토층을 지나 풍화암에 소켓된 매입 PHC말뚝에서 지반의 허용압축지지력 산정도표 및 산정공식을 제안하는 연구에 대한 일련의 연속논문 중 제4편에 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 부담율(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 -

PHC말뚝을 생산하는 17개 중소기업체의 품질 성능 검사 자료, 17개 중소기업체 및 6개 대기업 산업체의 장기허용압축하중 제원 표를 분석한 기존 연구(Kim et al., 2019)에 의하면 PHC말뚝의 허용지지력은 PHC말뚝의 장기허용압축하중의 최댓값까지 사용할 수 있을 것으로 판단되었다. 또한, 생산 산업체별로 자체적인 시방에 의해 PHC말뚝의 장기허용압축하중을 상향시키려는 노력을 하고 있는 것으로 파악되었다. 특히 B종 및 C종

의 경우 유효프리스트레스로 인한 PHC말뚝의 장기허용압축하중의 감소를 극복하기 위한 자체적인 노력을 하고 있는 것으로 분석되었다. 또한, 현 단계의 국내 설계에서는 PHC말뚝의 장기허용압축하중의 평균 약 70% 수준을 설계하중으로 반영하고 있고 품질이 우수함에도 불구하고 PHC말뚝의 장기허용압축하중에는 안전율 4.0을 적용하고 있다. 따라서 설계에서 PHC말뚝의 장기허용압축하중의 최댓값까지 활용하여 PHC 말뚝의 우수한 성능 효율을 높일 것을 추천하였다.

본 연구에서는 실제 시공된 매입 PHC말뚝 A종에 대한 압축정재하시험 사례 및 양방향재하시험 사례들을 분석하였다. 이를 통하여 PHC말뚝 A종의 장기허용압축하중 성능을 실증적으로 검증하였다.

## 2. 매입 PHC말뚝의 압축정재하시험 사례 분석

### 2.1 극한지지력 추정 방법 개요

풍화토를 지나 풍화암에 소켓된 직경 500mm 및 직경 600mm 매입 PHC말뚝 A종에 대한 압축정재하시험 사례를 활용하였다(Table 1 참조). 시험 현장의 지반 특성치, 정재하시험 계획, 정재하시험 절차 및 방법 등에 관한 상세한 내용은 선행 연구(Choi et al., 2017)에 자세하게 나타나 있다.

2개 매입 PHC말뚝 A종의 압축정재하시험에서는 지반파괴가 유발되기 전에 말뚝 부재 파괴가 발생되었으

Table 1. Summary of static pile load tests

Pile no.	Pile type	Dimension	Penetration depth (m)	Load test types	Load transfer
TP-1	PHC 500 mm Pile	Diameter : 500 mm / Length : 20 m	18.0	Static Pile Load Test & PDA	○
TP-4	PHC 600 mm Pile	Diameter : 600 mm / Length : 17 m	15.5	Static Pile Load Test & PDA	○
TP-5	PHC 500 mm Pile with Socket Grouting	Diameter : 500 mm / Length : 17 m	15.5	Static Pile Load Test & PDA	-

므로 하중-침하량 관계를 이용하여 기존 분석 방법으로 극한하중 또는 항복하중을 구할 수가 없었다. 여기서 2개 매입 PHC말뚝 A종의 압축정재하시험의 최대재하하중에서 말뚝머리 침하량이 20mm 이상 발생되었으므로 주면마찰력이 극한상태에 근접하였다고 가정하였다. 그러면 극한선단지지력만 추정할 수 있다면 이 2가지 값을 중첩하여 전체 극한지지력을 추정할 수 있을 것으로 판단되었다.

2개의 매입 PHC말뚝 A종이 시공된 지반의 극한지지력을 추정하는 방법으로는 아래와 같은 3가지 방법을 활용하였다(Choi and Kim, 2018).

- (i) 압축정재하시험 결과를 활용한 방법(방법 1) : 매입 시공된 PHC말뚝 A종의 압축정재하시험의 최대재하하중에서 주면마찰력이 극한에 근접하였다고 가정하였다. 극한선단지지력은 선단부만 그라우팅한 PHC말뚝 A종의 압축정재하시험의 하중-침하량 관계로부터 추정하였다. 이 2가지 값을 중첩하여 전체 극한지지력을 추정할 수 있었다.
- (ii) 압축정재하시험과  $PDA_{(EOID)}$ 를 조합한 방법(방법 2) : 매입 시공된 PHC말뚝 A종의 압축정재하시험의 최대재하하중에서 주면마찰력이 극한에 근접하였다고 가정하였다. 극한선단지지력은  $PDA_{(EOID)}$ 로 추정하였다. 이 2가지 값을 중첩하여 전체 극한지지력을 추정할 수 있었다.
- (iii) 수치해석에 의한 방법(방법 3) : 압축정재하시험에서 재하한 최대재하하중 이후의 하중에 대한 하중-침하량 관계를 수치해석으로 모사하였다(Choi et al., 2017). 유한요소해석 자료의 말뚝머리 하중-침하량 관계를 이용하여 매입 PHC말뚝 A종의 극한지지력을 추정해보았으나 전술한 방법 1 및 방법 2에서와는 달리 극한지지력을 추정할 수는 없었고, Davisson 판정기준과 25mm 판정기준에 따른 파괴하중(항복하중)이 산정되었다.

## 2.2 직경 500mm의 매입 PHC말뚝 A종의 지반의 극한 압축지지력 추정

매입 시공된 직경 500mm PHC말뚝 A종에 대한 최대재하하중은 6.86MN으로 측정되었다(Fig. 1~Fig. 2 참조). 선단부만 그라우팅한 직경 500mm PHC말뚝 A종

의 극한선단지지력은 3.92MN으로 측정되었다(Fig. 3 참조). 여기서 말뚝 선단부의 외주면 및 내주면에 그라우팅된 부분의 마찰력은 따로 측정하지 못하였으므로 제외하지 못하였다. 따라서 직경 500mm PHC말뚝 A종의

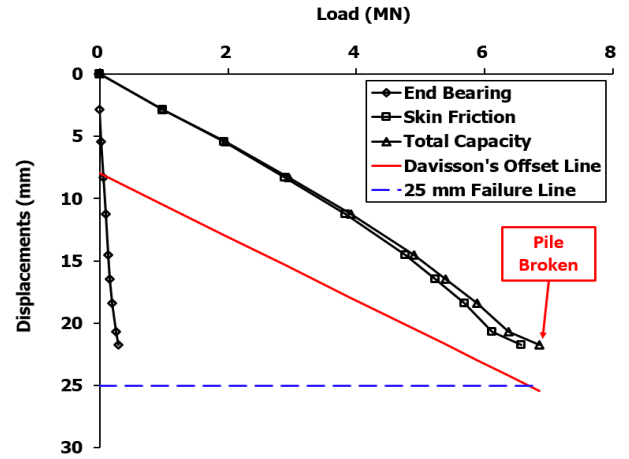


Fig. 1. Applied load at pile head and settlement curve for TP-1 (Diameter of 500 mm PHC piles)

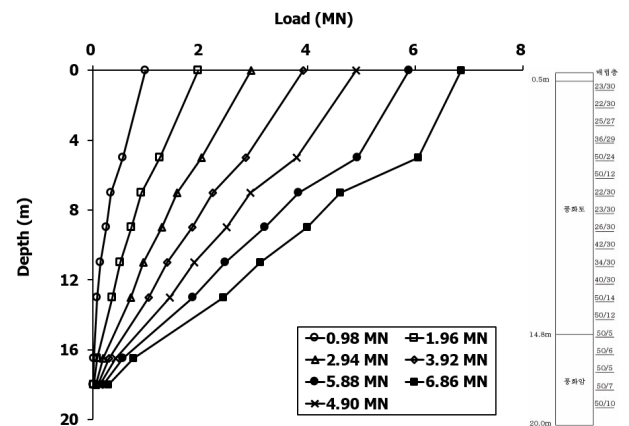


Fig. 2. Axial load transfer curve for TP-1 (Diameter of 500 mm PHC piles)

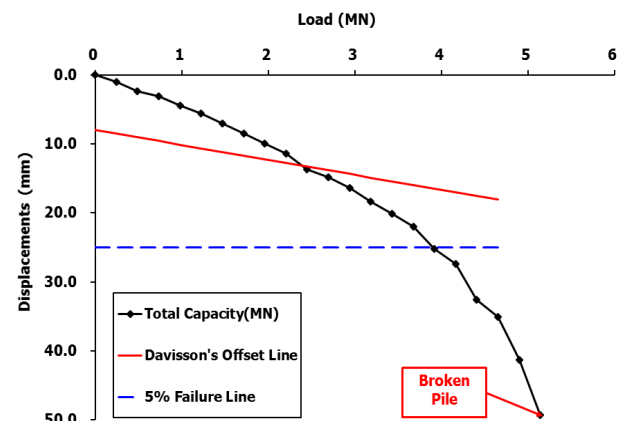


Fig. 3. Pile load test results for PHC test with socket grouting (TP-5)

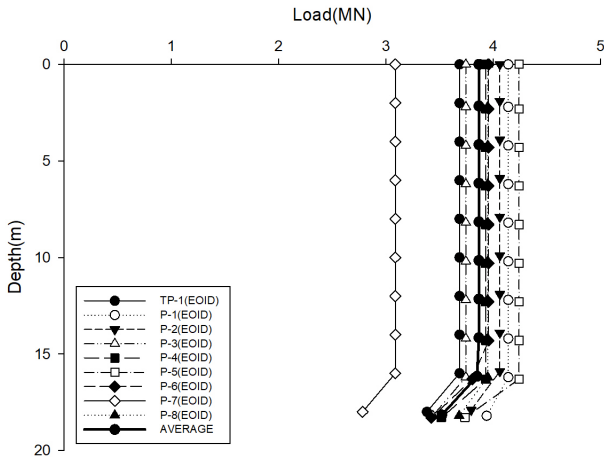


Fig. 4. Estimation of end bearing by PDA(EOID) (PHC 500 mm pile)

전체 극한지지력은 최대 10.78MN으로 추정할 수 있었다(방법 1). 직경 500mm PHC말뚝 A종의 시험말뚝 1개와 반력말뚝 8개에 대한 시공 직후 PDA를 실시하여(Baekkyung G&C, 2017) 9개의 극한 PDA(EOID)를 구할 수 있었으며(Fig. 4 참조) 이 평균값으로 극한선단지지력을 추정하였다. 직경 500mm PHC말뚝 A종의 극한 선단지지력은 각각 3.50MN으로 추정되었다. 따라서 직경 500mm PHC말뚝 A종의 전체 극한지지력은 10.36MN으로 추정할 수 있었다(방법 2). 수치해석으로 추정된 전체 파괴하중은 7.60MN이었다(방법 3).

### 2.3 직경 600mm PHC말뚝 A종의 지반의 극한압축지지력 분석

매입 시공된 직경 600mm PHC말뚝 A종의 최대재하

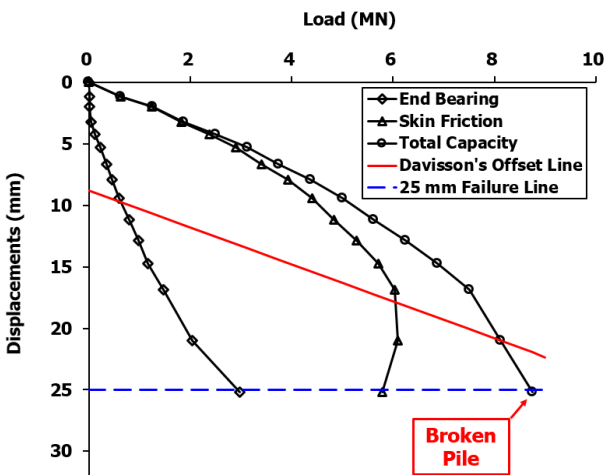


Fig. 5. Applied load at pile head and settlement curve for TP-4 (Diameter of 600 mm PHC piles)

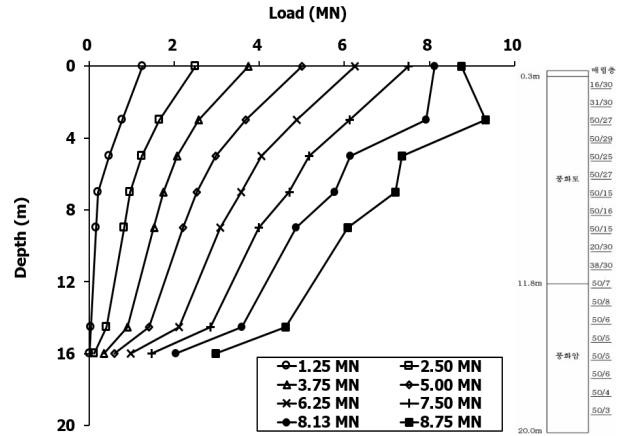


Fig. 6. Axial load transfer curve for TP-4 (Diameter of 600 mm PHC piles)

하중은 8.75MN으로 측정되었다(Fig. 5~Fig. 6 참조). 직경 600mm PHC말뚝 A종의 경우, 선단부만 그라우팅한 말뚝에 대한 압축정재하시험을 실시하지 않았는데 선단 단면적의 크기 효과를 고려하면 선단부만 그라우팅한 직경 500mm PHC말뚝 A종의 정재하시험에서 선단지지력으로 추정된 3.92MN보다는 클 것으로 추정되었다. 그러나 선단부만 그라우팅한 직경 500mm PHC말뚝 A종의 정재하시험에서 선단지지력으로 추정된 3.92MN을 직경 600mm PHC말뚝 A종에도 동일하게 적용하면, 전체 극한지지력은 12.67MN으로 추정할 수 있다(방법 1). 직경 600mm PHC말뚝 A종의 시험말뚝 1개와 반력말뚝 8개에 대한 시공 직후 PDA를 실시하여(Baekkyung G&C, 2017) 9개의 극한 PDA(EOID)를 구할 수 있었으며 이 평균값으로 극한선단지지력으로 추정하였다(Fig. 7 참조). 직경 600mm PHC말뚝 A종의 극한 선단지지력은 3.70MN으로 추정되었다. 따라서 직경 600mm PHC

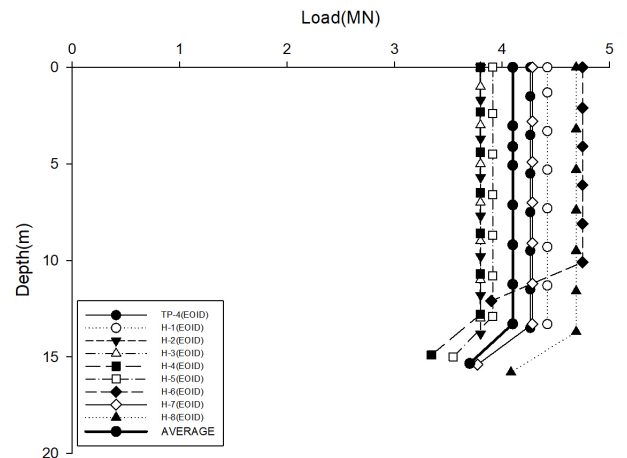


Fig. 7. Estimation of end bearing by PDA(EOID) (PHC 600 mm pile)

말뚝 A종의 전체 극한지지력은 12.45MN으로 추정할 수 있었다(방법 2). 수치해석으로 추정된 전체 파괴하중은 9.10MN이었다(방법 3).

## 2.4 분석 결과의 정리

압축정재하시험에서 측정한 PHC말뚝 A종의 파괴압축하중의 측정값, 3가지 방법으로 추정된 PHC말뚝 A종의 지반의 극한압축지지력의 추정값을 Table 2에 나타내었다. 여기서, PHC말뚝 A종의 장기허용압축하중 및 파괴압축하중의 계산값을 함께 나타내었다. 직경 500mm 및 직경 600mm의 매입 PHC말뚝 A종의 극한압축지지력의 최소값은 압축정재하시험에서 측정한 PHC말뚝 A종의 파괴압축하중의 측정값으로 정할 수 있었으며 각각 6.9MN, 8.8MN으로 나타났다.

## 3. 매입 PHC말뚝 A종의 양방향재하시험 사례 분석

### 3.1 개요

양방향재하시험 자료(Choi et al., 2019)를 토대로 PHC말뚝 A종의 지반의 허용지지력을 PHC말뚝 A종의 장기허용압축하중의 최댓값 수준으로 상향 적용시킬 수 있는지의 여부를 분석하였다. Table 3에 정리한 6개소 양방향재하시험 자료와 Table 4의 매입말뚝의 극한지지력 산정식을 토대로 지반의 설계 효율( $RQP = Q_{all,i}/P_a$ ) 및 PHC말뚝 A종의 설계효율( $D_e = P_D/P_a$ )을 분석하였다. 여기서  $P_a$ 는 PHC말뚝의 허용압축하중인데 장기허용압축하중( $P_a$ )에 이음과 장경비에 의한 감소율을 고려하여 계산되는 값이며  $P_{all}$ 과  $P_a$ 의 값의 차이는 극히 미미하다.

일반적으로 말뚝기초 설계 시 말뚝기초의 허용 지지

Table 2. Summary of prebored PHC piles in diameter of 500 mm and 600 mm

Pile no.	Pile type	$P_a$ (MN)	Compressive fracture load of PHC pile (MN)		Estimated ultimate pile capacity (MN)		
			Calculated values	Measured values	Method 1	Method 2	Method 3
TP-1	PHC 500 mm	1.7	7.1	6.9	10.8	10.4	7.6
TP-4	PHC 600 mm	2.3	9.7	8.8	12.7	12.5	9.1

Note : 1. In Method 3, the estimated ultimate pile capacity is a failure load or a yield load  
2.  $P_a$  : Calculated long-term allowable compressive load of PHC piles

Table 3. Pile capacity efficiency and design efficiency of PHC piles

Penetration depth m	① $P_D$ design load MN	② Ultimate skin friction MN	③ Ultimate end bearing MN	④ Total Capacity MN	⑤ $Q_{all,1}$ MN	⑥ $Q_{all,2}$ MN	⑦ $P_a$ MN	$Q_{all,i}/P_a$		$P_D/P_a$
								⑤/⑦ %	⑥/⑦ %	①/⑦ %
7.0	1.6	1.65	4.24	5.89	1.96	3.26	2.36	83.2	138.1	67.8
7.8	1.6	1.86	4.24	6.08	2.03	3.06	2.36	85.9	129.7	67.8
7.8	1.6	1.86	4.24	6.08	2.03	2.45	2.36	85.9	103.8	67.8
12.7	1.6	2.99	4.24	7.23	2.41	4.05	2.36	102.2	171.6	67.8
13.1	1.6	3.09	4.24	7.33	2.44	2.65	2.36	103.5	112.3	67.8

Note :  $Q_{all,1}$  : Allowable capacity calculated by empirical formula,  $Q_{all,2}$  : Estimated allowable capacity from bi-direction pile load tests,  $P_a$  : Long-term allowable compressive load of PHC piles

Table 4. Calculation method for capacities of prebored precast piles

Ultimate unit end bearing $q_B$ ( $kN/m^2$ )	Ultimate unit skin friction $f_s$ ( $kN/m^2$ )	Remarks
Sand : $200N$ ( $\leq 12,000$ ) Clay : $6c_u$ ( $\leq 12,000$ )	Sand : $2.5N$ ( $N \leq 50$ ) Clay : $0.8c_u$ ( $c_u \leq 125$ )	Korea Bridge Design and Engineering Research Center (2008) and Architectural Institute of Korea (2005)
$250N$ ( $N \leq 60$ )	Sand : $2.0N_s$ Clay : $5.0q_u$	Korea Housing Corporation (2008)

력( $Q_u$ )는 지지력 산정공식으로 계산하는 지반의 허용지지력( $Q_{all}$ )과 KS F 4306에서 정하는 PHC말뚝 몸체의 허용압축하중( $P_{all}$ ) 중에서 작은 값으로 정한다. 그러나 매입 PHC말뚝 기초의 설계에서는 PHC말뚝 몸체의 우수한 연직하중지지능력을 최대한 활용하기 위하여 지반의 허용지지력( $Q_{all}$ )이 PHC말뚝 몸체의 허용압축하중( $P_{all}$ )보다 상회하도록 정하는 것이 바람직하다. PHC말뚝 몸체의 허용압축하중( $P_{all}$ )은 PHC말뚝 몸체의 장기허용압축하중( $P_a$ )에 용접이음 및 장경비에 의한 감소율을 적용한 값인데 용접에 의한 감소율( $\mu_1$ )은 이음 개소당 2.5%를 적용하며 장경비에 의한 감소율( $\mu_2$ )은  $(L/D-n)\%$ 를 사용하며  $n$ 은 장경비를 고려하지 않아도 되는 상대근입 길이인데 PHC말뚝의 경우 85를 사용하고  $L/D$ 가 110보다 긴 말뚝은 설계하지 않도록 정하고 있다(Yoo et al., 2015). 일반적으로 매입 PHC 말뚝의 상대근입길이가 85를 초과하는 경우가 흔하지 않은 점을 감안하면 감소율은 이음 3~4개소에 의한 감소율만을 고려하면  $P_{all}$ 은 안전측으로  $0.9P_a$ 를 사용할 수 있다. 다만 PHC말뚝의 사용 길이가 더 길어지는 경우 감소율을 구체적으로 계산하여  $P_{all}$ 을 계산한다.

그러나 매입 PHC말뚝의 실제 설계에서는 지반의 허용지지력( $Q_{all}$ )이 PHC말뚝 몸체의 설계허용압축하중( $P_{D,all}$ )을 만족시키지 못하거나 크게 초과할 경우에도 PHC말뚝 몸체의 설계허용압축하중( $P_{D,all}$ )의 110% 수준으로 최적화하는 절차를 진행하여야 한다.  $P_{D,all}$ 은 실제 설계에서 설정하는 매입 PHC말뚝 몸체의 목표 설계하중이며  $(0.7P_a \sim P_{all})$ 의 범위에서 설계기술자의 공학적 판단에 따라 결정할 수 있다.

### 3.2 매입 PHC말뚝 A종의 양방향재하시험 자료 분석

PHC말뚝의 우수한 재료 성능의 활용 정도를 분석하기 위하여 PHC말뚝의 설계 효율은 식 (1)과 같이 정의하였다. PHC말뚝의 설계 효율은 어떠한 경우에도 100%를 넘지 않아야 하며 100%를 초과하는 경우에는 설계 원칙을 위배하게 된다.

$$PHC말뚝의 설계효율 (D_e)(\%) = \frac{PHC말뚝의 설계하중 (P_D)}{PHC말뚝의 허용압축하중 (P_{all})} \times 100 \quad (1)$$

지반의 압축하중 지지 능력을 분석하기 위하여 지반의 허용지지력(allowable bearing capacity of soil;  $Q_{all}$ )과 PHC말뚝의 허용압축하중( $P_{all}$ )의 비를  $RQP$ 로 정의하였으며 식 (2)로 나타낼 수 있었다. 여기서, 지반의 허용지지력이 PHC말뚝의 허용압축하중보다 작은 값으로 산정될 경우(즉  $RQP < 1$ ) PHC말뚝의 우수한 압축하중의 지지 성능을 충분하게 활용할 수 없는 상황이 된다.

$$\begin{aligned} & \text{지반의 설계효율 } RQP(\%) \\ &= \frac{\text{지반의 허용지지력 } (Q_{all})}{PHC말뚝의 허용압축하중 (P_{all})} \times 100 \quad (2) \end{aligned}$$

본 연구에서 분석한 매입 PHC말뚝 A종은 국내에서 적용하는 대표적인 시공방법으로 시공되었다. 설계에서는 현행 국내에서 사용하고 있는 대표적인 극한지지력 산정공식(Table 4 참조)을 이용하였다. 양방향말뚝재하시험에서는 작용된 최대 재하 하중 범위 이내에서 파괴하중을 산정하였다.

지반의 허용지지력 산정과 관련한 내용을 PHC말뚝 A종의 성능, 적용된 시공법, 지반 지지력 산정공식 및 안전율 등에 관한 내용을 포함하여 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

- (i) 직경 600mm의 PHC말뚝 A종을 사용하였다. PHC말뚝 A종에서는 콘크리트 압축강도는 80MPa을, PHC말뚝 A종의 장기허용압축하중은 2.3MN을 그리고 설계하중은 1.6MN을 사용하였다.
- (ii) 시공 시 상호 반대로 작동하는 이중 오거방식을 적용하여 천공 후(일명 SDA공법) 천공홀의 하단 및 말뚝의 주변부에 시멘트풀을 완전하게 충전하였다.
- (iii) 극한단위주면마찰력으로는 Table 4에서 제시하는 최댓값인 125kPa을 사용하여 말뚝 전체 길이에 일괄 적용하였고 SPT N값의 최댓값은 50으로 적용하였다.
- (iv) 극한단위선단지지력으로는 Table 4에서 제시하는 최댓값인 15,000kPa을 사용하였으며 최대 N값은 60으로 적용하였다.
- (v) 경험식의 허용지지력은 안전율 3.0을 적용하였으며 양방향재하시험 결과에 의한 허용지지력은 Davisson 방법에 의한 파괴하중에 안전율 2.0을 적용하였다.

양방향 말뚝재하시험의 대상이 된 시험말뚝들의 시공 근입깊이에 기초하여 매입 PHC말뚝 A종이 극한 상태에 도달하여 최댓값이 발현된다고 가정하였으며 이때 설계에서 사용하고 있는 극한지지력 산정공식(Table 4 참조)을 적용하여 지반의 허용지지력( $Q_{all,1}$ )을 산정한 후 주어진 PHC말뚝 A종의 허용압축하중( $P_a$ )과 비교하여 최대지지력 발현조건에서 설계 가능한  $RQP_1$ 을 계산하였다. 아울러 동일 매입 PHC말뚝 A종의 양방향재하시험을 통해 판정된 지반의 허용지지력( $Q_{all,2}$ )을  $P_a$ 와 비교하여 설계 가능한  $RQP_2$ 를 계산하였다. 또한 설계에서 사용한 PHC말뚝 A종의 설계하중을 이용하여 설계효율( $D_e$ )도 계산하였으며 이들 값을 Table 3에 함께 나타내었다.

Table 3에서 다음을 분석할 수 있었다. 극한지지력 산정공식에 의해 산정한 지반의 허용지지력으로 계산한  $RQP_1$ 은 83~104% 범위로 나타났으며 평균적으로 86%를 나타내었으며 이는  $P_a$ 보다 낮은 수준으로 나타났다. 양방향재하시험에서 측정된 파괴지지력으로 계산한  $RQP_2$ 는 103~138%로 나타나 모든 사례에서 100%를 상회하였고 평균적으로 131%를 나타내었으며 이는  $P_a$ 을 크게 초과하는 수준으로 나타났다. 설계 시 사용한 설계하중으로 계산한 설계효율( $D_e$ )은 67.8%로 나타났으며 이는  $P_a$ 을 크게 하회하는 수준으로 나타났다.

따라서 현행 설계에서 사용하고 있는 설계하중은 PHC말뚝 A종의 우수한  $P_a$ 를 제대로 활용하고 있지 못하는 것을 알 수 있었다. 현행 설계에서 사용하고 있는 극한지지력 산정공식은 지반의 실제 허용지지력을 매우 낮은 수준으로 평가하고 있었으며 양방향재하시험으로 확인된 지반의 실제 허용지지력에 대하여 평균적으로 52% 수준을 나타내었다.

#### 4. 매입 PHC말뚝 A종의 장기허용압축하중의 실증 성능 검증

##### 4.1 압축정재하시험 시 최대 재하하중을 통한 매입 PHC말뚝 A종의 장기허용압축하중의 실증 성능 검증

직경 500mm 및 직경 600mm PHC말뚝 A종의 파괴압축하중( $P_n$ )은 각각 7.7MN 및 10.6MN으로 계산할 수 있었다. 직경 500mm 및 직경 600mm 매입 PHC말뚝 A종에 대한 압축정재하시험 시 말뚝 두부에 재하된 최대 압축하중인 6.9MN 및 8.8MN으로 측정할 수 있었으며

따라서 이 측정하중은 각각  $P_n$ 의 90% 및 83% 수준이었다. 압축정재하시험에서는 통상적으로 말뚝 두부에 약간의 편심하중이 작용할 수 있는 점을 감안하면 이러한 측정하중 수준은 PHC말뚝 A종의 장기허용압축하중( $P_a$ ) 성능을 실증적으로 검증하였다고 판단하였다. 직경 500mm 및 직경 600mm PHC말뚝 A종의 장기허용압축하중( $P_a$ )은 각각 1.7MN 및 2.3MN이었다.

##### 4.2 설계효율 분석을 통한 매입 PHC말뚝 A종의 장기허용압축하중의 실증 성능 검증

한정된 자료를 통한 평가이지만 시공관리가 면밀하게 시행될 경우 실제 지반의 허용지지력은 PHC말뚝 A종의 장기허용압축하중을 상회하는 수준으로 측정되었다. 따라서 지반의 허용지지력을 PHC말뚝 A종의 장기허용압축하중과 같거나 근접하는 범위까지 적용 가능함을 확인할 수 있었다.

설계에서는 PHC말뚝 A종의 설계하중을 PHC말뚝 A종의 장기허용압축하중의 약 68% 수준으로 사용하고 있는 것을 알 수 있었다. 이는 설계기술자들이 PHC말뚝의 장기허용압축하중의 우수한 성능을 신뢰하지 못하기 때문으로 판단되었다. 양방향 재하시험 자료로부터 PHC말뚝의 장기허용압축하중의 우수한 성능은 실증적으로 검증되었다.

모든 분석 대상 매입 PHC말뚝 A종의 양방향재하시험 자료로부터 계산된 지반의 허용지지력은 국내 설계에서 사용하고 있는 극한지지력 산정공식으로 계산한 지반의 허용지지력보다 크게 평가되었다. 이와 같은 설계에서 지반의 허용지지력이 낮은 수준으로 산정되는 주요인은 국내 매입 PHC말뚝 A종에 대한 극한단위주면마찰력 및 극한단위선단지지력의 최댓값으로 크게 과소평가되는 제한 값을 사용하기 때문으로 추정되었다. 따라서 지지력 산정공식이 매입 PHC말뚝 A종의 실제 지지력 거동을 제대로 모사할 수 있도록 개선하여야 하며 이렇게 할 경우 PHC말뚝 A종의 장기허용압축하중을 최댓값까지 활용할 수 있을 것으로 판단되었다.

어떠한 경우에도 정밀한 지반조사와 철저한 시공 및 품질관리가 전제되어야 할 것이며, 말뚝재하시험의 재하용량을 충분하게 설정하여 최소한 항복하중, Davisson 방법의 파괴하중(failure load), 기타 정의에 의한 항복하중의 판정이 가능할 수 있어야 신뢰성을 뒷받침할 수 있을 것으로 판단되었다.

## 5. 결론 및 제언

본 연구에서는 실제 시공된 매입 PHC말뚝의 압축정재하시험 자료 및 양방향재하시험 자료를 분석하였으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 직경 500mm 및 직경 600mm PHC말뚝 A종의 파괴 압축하중( $P_n$ )은 각각 7.7MN 및 10.6MN으로 계산할 수 있었다. 직경 500mm 및 직경 600mm 매입 PHC말뚝 A종에 대한 압축정재하시험 시 말뚝 두부에 재하된 최대 압축하중인 6.9MN 및 8.8MN으로 측정할 수 있었으며 따라서 이 측정하중은 각각  $P_n$ 의 90% 및 83% 수준이었다. 압축정재하시험에서는 통상적으로 말뚝 두부에 약간의 편심하중이 작용할 수 있는 점을 감안하면 이러한 측정하중 수준은 PHC말뚝 A종의 장기허용압축하중( $P_a$ ) 성능을 실증적으로 검증하였다고 볼 수 있었다. 직경 500mm 및 직경 600mm PHC말뚝 A종의 장기허용압축하중( $P_a$ )은 각각 1.7MN 및 2.3MN이었다.
- (2) 양방향재하시험 자료로부터 극한지지력 산정공식에 의해 산정한 지반의 허용지지력으로 계산한  $RQP_1$ 은 83~104% 범위로 나타났으며 평균적으로 86%를 나타내었다. 양방향재하시험에서 측정된 파괴지지력으로 계산한  $RQP_2$ 는 103~138%로 나타나 모든 사례에서 100%를 상회하였고 평균적으로 131%를 나타내었다. 설계에서 사용하고 있는 극한지지력 산정공식은 지반의 실제 허용지지력을 매우 낮은 수준으로 평가하고 있었으며 양방향재하시험으로 확인된 지반의 실제 허용지지력에 대하여 평균적으로 52% 수준을 나타내었다.
- (3) 모든 분석 대상 매입 PHC말뚝 A종의 양방향재하시험 자료로부터 계산된 지반의 허용지지력은 국내 설계에서 사용하고 있는 극한지지력 산정공식으로 계산한 지반의 허용지지력보다 크게 평가되었다. 이와 같은 설계에서 지반의 허용지지력이 낮은 수준으로 산정되는 주 요인은 국내 매입 PHC말뚝 A종에 대한 극한단위주면마찰력 및 극한단위선단지지력의 최댓값으로 크게 과소평가되는 상한 값을 사용하기 때문으로 추정되었다. 따라서 지지력 산정공식을 말뚝의 실제 지지력 거동을 모사할 수 있도록

개선하여야 할 것으로 판단되었다.

- (4) 매입 PHC말뚝의 실제 설계에서는 지반의 허용지지력( $Q_{all}$ )이 PHC말뚝 몸체의 설계허용압축하중( $P_{D,all}$ )을 만족시키지 못하거나 크게 초과할 경우에는 PHC말뚝 몸체의 설계허용압축하중( $P_{D,all}$ )의 110% 수준으로 최적화하는 절차를 진행하는 것이 좋다.  $P_{D,all}$ 은 ( $0.7P_a \sim P_{all}$ )의 범위에서 설계기술자의 공학적 판단에 따라 결정할 수 있다. 여기서  $P_a$ 는 PHC말뚝 몸체의 장기허용압축하중이고  $P_{all}$ 는 PHC말뚝 몸체의 허용압축하중이다.

## 참고문헌 (References)

1. Architectural Institute of Korea (2005), Architectural Foundation Structural Design Standard, p.175. (in Korean)
2. Baekkyung G&C Corp. (2017), *Report of PHC piles for various end bearing types and splices, Dynamic test report*, FR-PDA-BK20170623-A02, 2017. 08., pp.1-697. (in Korean)
3. Choi, Y. K. and Kim, M. H. (2018), Axial bearing characteristics of tip-transformed PHC piles through field tests, *Journal of KGS*, Vol.34, No.11, Nov. 2018, pp.107-119. (in Korean)
4. Choi, Y. K., Kwon, O. K., Lee, W. J., and Yeo, K. K. (2017), *Report for axial compressive load behavior of PHC piles with various end bearing types*, KGS, Report No. KGS09-038, 2017. 9., pp. 1-160. (in Korean)
5. Choi, Y. K., Kwon, O. K., Lee, W. J., Yeo, K. K., and Park, M. C. (2019), Study on Establishing Design and Construction Method for Prebored PHC Piles - Development of Capacity Prediction Method and Chart Considering Soil Type, Pile Length and Diameter -, Report no. KGS 2019-083, pp.21-45, 273-300. (in Korean)
6. Kim, C. M., Yun, D. H., Lee, C. U., and Choi, Y. K. (2019), "Study(III) on 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 Compressive Load of PHC Piles by Analyzing Quality Test and Product Specifications Data -", *Journal of KGS*, Vol.35, No.9, September 2019, pp.15-28. (in Korean)
7. Korean Institute of Bridge and Structural Engineers and Korea Bridge Design and Engineering Research Center (2008), "Commentary of Korean Highway Bridge Design Code." (in Korean)
8. The Korea Housing Corporation (2008), Improvement of Pile foundation design. (in Korean)
9. Yoo, N. J. besides 20 persons (2015), Design Specification and Commentary for Foundation Design, Korean Geotechnical Society, p.309. (In Korean)

Received : June 12<sup>th</sup>, 2019

Revised : July 19<sup>th</sup>, 2019

Accepted : July 20<sup>th</sup>, 2019