

## 현장검증시험에 의한 선단변형 PHC말뚝들의 연직하중 지지특성에 관한 연구

### Axial Bearing Characteristics of Tip-transformed PHC Piles through Field Tests

최 용 규<sup>1</sup> Choi, Yongkyu

김 명 학<sup>2</sup> Kim, Myunghak

#### Abstract

PHC piles, extension-plate attached PHC piles, and steel pipe attached PHC piles were installed in field test site. Axial compressive static load tests including load distribution test and Pile Driving Analyzer (after driving) were done on the tip-transformed PHC piles and the grouted tip-transformed PHC piles. Load-displacement curves of three different type of PHC piles, which are PHC pile (TP-1), extension plate attached PHC pile (TP-2) and steel pipe attached PHC pile (TP-3), showed almost the same behavior. Thus bearing capacity increase effect of the tip-transformed PHC piles was negligible. Share ratio of side resistance and end bearing resistance for PHC pile, extension plate attached PHC pile, and steel pipe attached PHC pile were 95.8% vs. 4.2%, 95.6% vs. 4.4%, and 97.8% vs. 2.2% respectively.

#### 요 지

PHC말뚝, 확장판 선단부착 PHC말뚝, 강관 선단부착 PHC말뚝을 현장 시험 부지에서 시험시공하였다. 이들 선단변형 PHC말뚝들에 대하여 하중전이특성이 수반된 연직압축정재하시험을 실시하였으며 시공직후 항타후 동재하시험을 수행하였다. 또한 선단부만 그라우팅한 선단변형PHC말뚝에 대한 연직압축정재하시험도 실시하였다. 3가지 다양한 선단말뚝들 즉, PHC말뚝, 확장판 선단부착 PHC말뚝, 강관 선단부착 PHC말뚝의 하중-침하량 거동은 거의 동일한 양상을 나타내었다. 따라서 말뚝이 선단지지층에 근입된 길이가 동일하고 말뚝 본체의 직경이 동일할 경우 확장판 선단부착 PHC말뚝 및 강관 선단부착 PHC말뚝의 지지력 증대 효과는 거의 없는 것으로 나타났다. 최종재하하중단계에서 PHC말뚝, 확장판 선단부착 PHC말뚝, 강관 선단부착 PHC말뚝의 주면마찰력은 각각 전체 재하하중의 95.8%, 95.6%, 97.8%를 분담하였으며, 선단지지력은 전체 재하하중의 4.2%, 4.4%, 2.2%를 분담하였다.

**Keywords :** PHC pile, Extension-plate attached PHC pile, Steel pipe attached PHC pile, Tip-transformed PHC pile, Load distribution, Axial compressive static pile load test, Side resistance, End bearing resistance

1 정회원, 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 author, 교신저자)

2 정회원, 인제대학교 토목도시공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Urban Engrg., Inje Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2019년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

## 1. 서론

하중전이측정이 수반된 연직압축정재하시험으로 극한지지력을 평가하기 위하여 시험 현장 부지에서 PHC말뚝, 확장판 선단부착 PHC말뚝, 강관 선단부착 PHC말뚝 등 선단변형말뚝에 대하여 각 말뚝종류별로 9개의 말뚝을 시험시공 하였다. 여기서, 가운데 1개 말뚝은 시험말뚝으로, 주변에 설치된 8개 말뚝은 반력말뚝으로 사용하여 연직압축정재하시험을 수행하였으며, 모든 말뚝에 대하여 추가적으로 시공직후 PDA<sub>(EOID)</sub>를 수행하였다. 또한 선단부만 그라우팅한 선단변형 말뚝에 대한 연직압축정재하시험도 실시하였다.

PHC말뚝, 확장판 선단부착 PHC말뚝, 강관 선단부착 PHC말뚝 등 선단변형 PHC말뚝들에 대한 시험 결과를 분석하여 선단변형 말뚝들의 지지력 증가 효과를 분석하였으며 극한지지력도 추정하였다.

## 2. 선단변형 PHC말뚝의 연구 동향

### 2.1 선단확장형 PHC말뚝

Choi et al.(2017) 및 Kim(2018a; 2018b)에서는 선단확장형 PHC말뚝에 관하여 다음과 같이 보고하고 있었다. 일체식 선단확대 PHC 말뚝은 ST(step tapered)말뚝이라는 명칭으로 사용되고 있으며, 일본 산업표준 JIS A 5373에 등록된 표준제품이다. ST말뚝은 일반 PHC말뚝과 강도는 동일하지만, 연직지지력이 지배적인 경우 구조하중을 최대한 말뚝내력까지 활용할 수 있도록 말뚝 선단부를 확장하여 제조한 말뚝으로 일본에서는 이미 1980년대부터 사용하고 있다. 일본의 ST말뚝규격은 설계강도 85, 120MPa, 상부직경( $\Phi_1$ ) 300~900mm, 선단부 확장( $\Phi_2$ ) 350~1000mm, 길이(L)는 5~15m 이다.

국내에서 생산되는 선단확장형 PHC말뚝은 2011년 삼표이엔씨(주)에서 처음 생산되어 현장 적용성 평가를 수행한 바 있으며, “Wide-PHC”말뚝이라는 제품으로 생산되었다(Yonsei Univ., 2009). 그러나, 별도의 특허를 기반으로 한 제품이 아닌 일본의 일체식 선단확대 ST말뚝(JIS A 5373)과 동일한 것으로서, 현장 적용성 평가 결과 타입말뚝 시공에는 적합하지 않고 매입말뚝 시공 시 확장된 말뚝 직경에 따른 지지력 증가 양상이 나타날 수 있음이 보고되었다(KICT, 2012). 삼표이엔씨(주)는 2009년도에 일본의 도요아사노사로부터 설비와 기술을

도입하여  $\Phi 5060$ ,  $\Phi 6070$ (A~C종) 제품을 생산하고 있으며,  $\Phi 5055$ ,  $\Phi 6065$ (A~C종) 제품 생산도 가능하다. 여기서 제품명  $\Phi 5060$ 에서 50은 본체부의 외경 500mm를 의미하며 60은 확장부의 외경 600mm를 의미한다. 확장부 길이는 말뚝직경의 2배로 하되, 선단부 철판보강 등은 기존 PHC말뚝과 동일하다.

### 2.2 확장판 선단부착 PHC말뚝

Cheon et al.(2009)에서는 다음과 같이 보고하고 있었다. 이론식에 의한 분석, 현장재하시험 자료 분석, 현장재하시험 등 다양한 연구를 수행하였다. 이론식에 의한 검토 결과 확장판 선단부착 PHC말뚝 적용 시 순단면적을 고려할 경우 56~77%, 폐색단면적을 고려할 경우에는 17~27%의 선단지지력 증가를 기대할 수 있다. 유한요소해석 결과 직경 400, 500, 600mm 확장판 선단부착 PHC말뚝의 경우 0.35~0.90, 0.50~1.15, 0.60~1.50MN의 항복하중 증가량을 얻을 수 있다.

Jeong et al.(2011)에서는 다음과 같이 보고하고 있었다. 수치해석에 의한 매개변수 연구 결과 EXT말뚝의 선단지지력 증가효과는 20~40%정도로 나타났으며, 이러한 경향은 지지층의 경도와 강도가 작아질수록 다소 증가하며 말뚝 길이가 짧아질수록 또한 증가하는 것으로 보고되었다. 모든 재하시험 결과(PHC500, PHC600, EXT-S, EXT-R)에서 분석된 허용지지력 값이 재료의 허용축하중을 초과하고 있어, 최종 산정된 허용지지력 값(재료의 허용축하중) 만을 가지고 EXT말뚝과 PHC말뚝의 지지거동 차이를 정량적으로 평가하기에는 무리가 있음을 확인하였다. 또한 수치해석 결과 현장재하시험 지반, 토사관통 풍화암 안착지반, 인천 OO 매립 지역에서는 EXT말뚝 본당 지지력 증가율은 각각 45, 151, 104%가 되었다.

상기의 연구들에 근거하여 EXT파일 카탈로그에서는 EXT파일의 경우 선단 단면적이 증가하여 선단지지력이 증가하고 전체 지지력이 30% 이상 증가하므로 말뚝수량을 30%만큼 절감할 수 있어 경제적이라고 설명하고 있었다.

시공법 개발 회사의 브로셔에서는 확장판 선단부착 PHC500mm말뚝의 설계지지력을 150~165톤으로 제시하고 있었는데 이는 PHC500mm말뚝 부재력의 86~95%수준에 이르고 있어 PHC말뚝 본체의 안전을 위협할 수 있는 수준으로 보인다.

그러나 상기의 연구들에서는 PHC말뚝과 확장판 선

단부착 PHC말뚝에 하중전이 측정이 수반된 연직압축 정재하시험을 실시한 결과를 통하여 직접 비교한 자료는 없었으며 수치해석을 통하여 구한 간접적인 결과를 이용하여 분석을 실시하였을 뿐이었다.

### 2.3 강관 선단부착 PHC말뚝

Paik(2013)는 다음과 같이 보고하고 있었다. PHC말뚝 및 강관 선단부착 PHC말뚝과 굴착공벽 사이에 시멘트밀크를 채우지 않고 시공 후 5일 경과한 상태에서 정재하시험을 실시하였으며 그 결과 강관 선단부착 PHC말뚝의 선단지지력이 50% 증가하였다. N치가 50/6, 50/5, 50/4인 풍화암 지반에 근입된 직경 400, 450, 500, 600mm의 강관 선단부착 PHC말뚝에서 허용주면마찰력은 각각 145, 181, 221, 311kN이고 허용선단지지력은 929~1,137, 1,177~1,439, 1,453~1,777, 2,092~2,558kN이 되어 선단지지력이 각각 주면마찰력의 6.4~7.8, 6.5~8.0, 6.6~8.0, 6.7~8.2배가 발휘된다는 설계지지력 가이드를 제시하였다. 선단지지력 계산공식도 제시하였는데 PHC말뚝에 비해 선단지지력이 1.48~1.81배 증가한다고 하였다. 강관 선단부착 PHC말뚝 선단에 위치하는 선단강관은 경타에 의해 천공과정에서 발생하는 굴착공 저면의 슬라임과 그 하부의 이완된 지지층 영역을 관통해서 원지반에 관입되어 매입말뚝의 선단지지력을 큰 폭으로 향상시키는 역할을 하게 된다.

### 2.4 기타 선단변형 PHC말뚝

다이렉트 PHC말뚝, 임플란트 PHC말뚝 등의 공법이 개발되어 있었다(Choi et al., 2017). 각 시공법을 개발한 회사의 홈페이지에서는 다음과 같이 설명하고 있었다. 다이렉트파일은 강관 선단부착 PHC말뚝과 유사한 방식이며 PHC말뚝의 선단에 SPC보강캡을 부착하여 직항타 또는 매입공법으로 시공할 수 있으며 지반 천공 시 하부 슬라임 및 선단부 교란 영역을 관통하여 지지 기반층에 정확하게 직접 안착 시켜 선단지지력을 획기적으로 증대시킬 수 있다. 임플란트 PHC말뚝은 PHC말뚝의 선단에 임플란트를 결합하여 매입공법으로 시공하며 임플란트 강봉이 슬라임층을 관통하여 풍화암층에 정착하게 되고 원지반 지지층에 의해 선단지지력이 증대되는 공법이다.

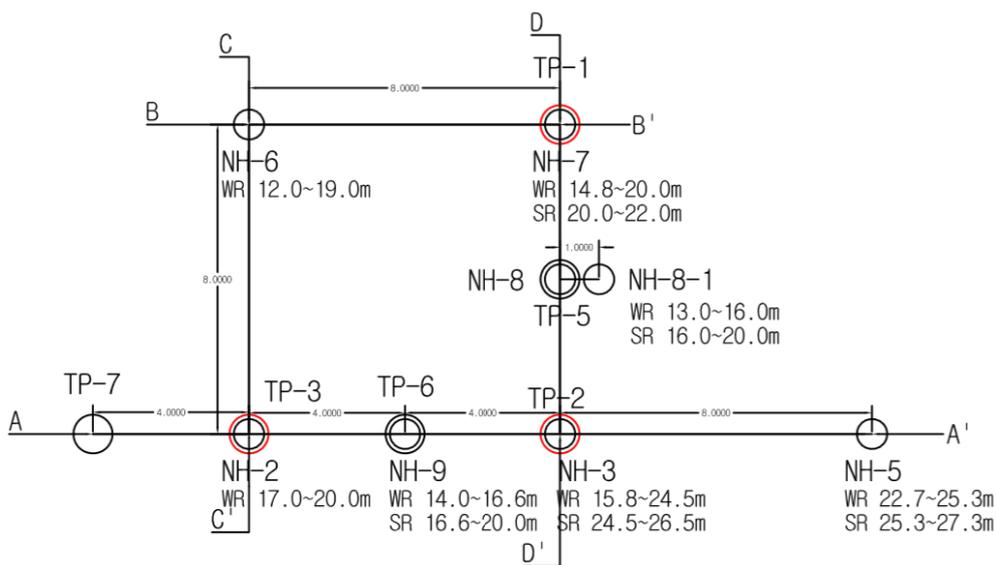
이런 시공법들도 모두 선단지지력을 획기적으로 증가시킬 수 있다고 설명하고 있으나 그 실증적인 증거는 찾아볼 수가 없었다.

## 3. 현장검증시험

### 3.1 현장 지반의 지반특성치 분석

#### (1) 지반조사 개요

지반조사용 시추공 9개소의 위치도를 Fig. 1에 나타내었다. 여기서 NH-1~NH-9, NH-8-1의 10개소는 지반조사용 시추공의 위치이며 이 중 NH-8, NH-8-1은 공내전단



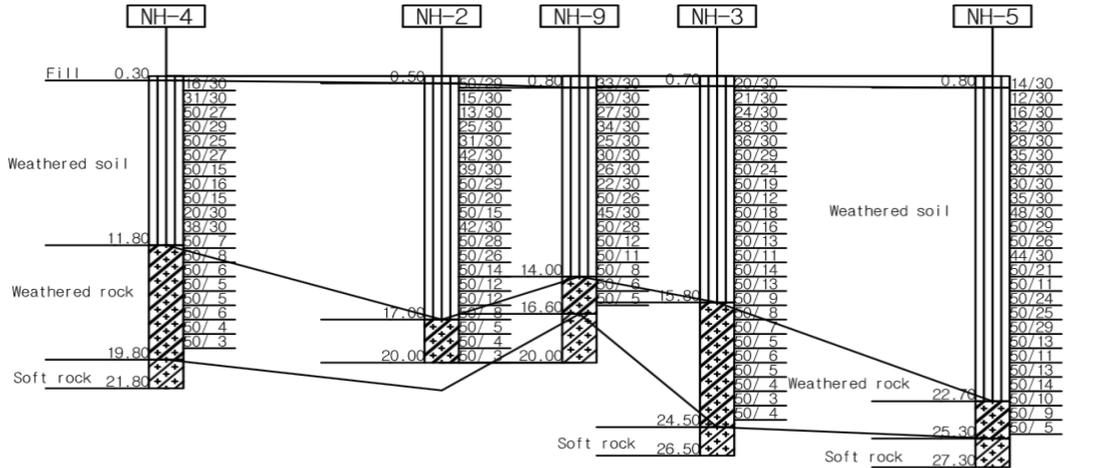
Remarks : NH (Borehole no.), TP (Test pile no.)

Fig. 1. Plan of test piles and boreholes

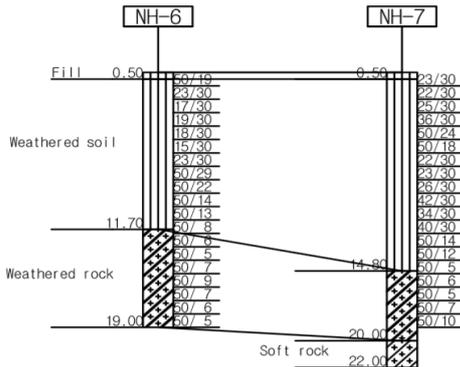
시험(BST)과 공내재하시험(PMT)의 원위치시험용 시추공이었다(Professional Engineer's office Veesang, 2017). 각 시추공에는 풍화암의 출현 위치 및 연암의 출현 위치를 나타내었다. 또한 참고로 시험말뚝의 시공 위치인 TP-1 ~TP-7도 나타내었다.

## (2) 지반특성치 분석

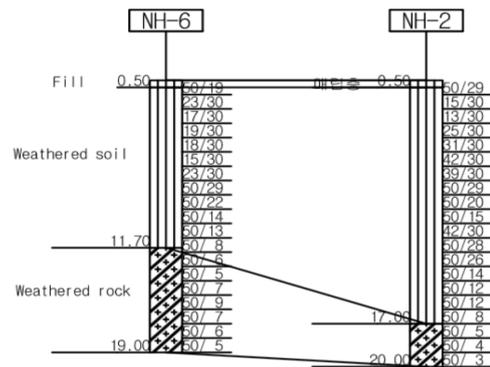
Fig. 1에서 각 단면별 지층 구성도를 Fig. 2에 나타내었으며 각 지층의 출현 심도를 Table 1에 나타내었다. 각 시험말뚝 시공 위치의 깊이에 따른 N치의 변화를 Fig. 3에 나타내었으며 TP-7위치에서는 시추조사를 실시하



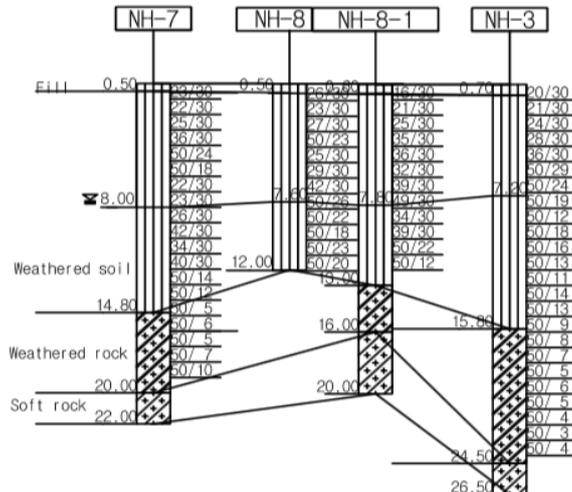
(a) Cross-sectional diagram (A-A')



(b) Cross-sectional diagram (B-B')



(c) Cross-sectional diagram (C-C')



(d) Cross-sectional diagram (D-D')

Fig. 2. Soil profiles

Table 1. Geotechnical profile of the test site

No.	Soil strata	Burried layer (m)	Weathered soil (m)	Weathered rock (m)	Soft rock (m)
NH-1		0.0 ~ 4.6	4.6 ~ 22.0	-	-
NH-2		0.0 ~ 0.5	0.5 ~ 17.0	17.0 ~ 20.0	-
NH-3		0.0 ~ 0.7	0.7 ~ 15.8	15.8 ~ 24.5	24.5 ~
NH-4		0.0 ~ 0.3	0.3 ~ 11.8	11.8 ~ 19.8	19.8 ~
NH-5		0.0 ~ 0.8	0.8 ~ 22.7	22.7 ~ 25.3	25.3 ~
NH-6		0.0 ~ 0.5	0.6 ~ 11.7	11.7 ~ 19.0	-
NH-7		0.0 ~ 0.5	0.5 ~ 14.8	14.8 ~ 20.0	20.0 ~
NH-8		0.0 ~ 0.5	0.5 ~ 12.0	-	-
NH-8-1		0.0 ~ 0.6	0.6 ~ 13.0	13.0 ~ 16.0	16.0 ~
NH-9		0.0 ~ 0.8	0.8 ~ 14.0	14.0 ~ 16.6	16.6 ~

Table 2. Field test results

(a) BST result

No.	Depth (m)	Soil strata	N Value	Cohesion (kPa)	Internal friction (°)
NH-9	6.2	Weathered soil	30/30	19.9	22.8
NH-9	9.3	Weathered soil	50/26	27.3	27.4
NH-9	12.3	Weathered soil	50/12	30.1	30.3
NH-9	15.2	Weathered rock	50/6	32.0	33.7

(b) PMT result

No.	Depth (m)	Soil strata	N Value	Deformation (MPa)	Young's Modulus (MPa)
NH-8-1	3.2	Weathered soil	25/30	48.80	-
NH-8-1	12.3	Weathered soil	50/12	198.36	334.01
NH-9	11.5	Weathered soil	50/28	170.91	277.37
NH-9	15.5	Weathered soil	50/5	297.29	399.17

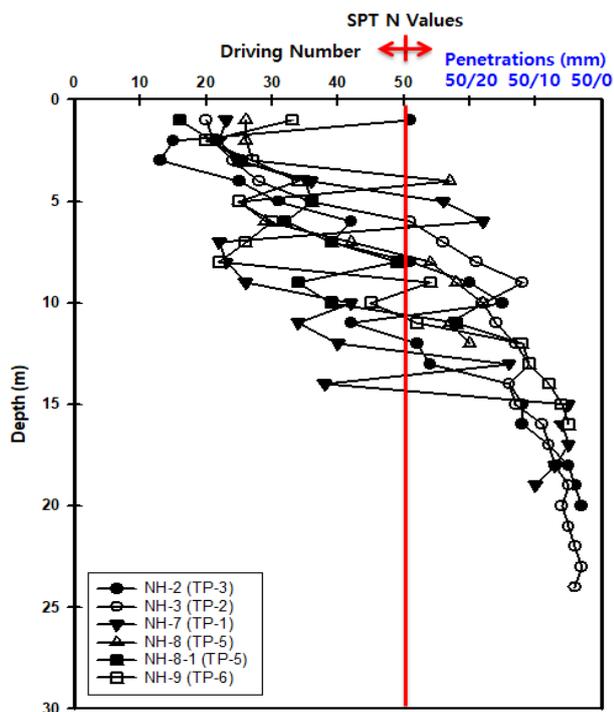


Fig. 3. N value profile

지 않았다. 또한 원위치 시험의 결과를 각각 Table 2에 나타내었다(Choi et al., 2017). 10개 공에 대한 지반조사 자료에 의하면 지층 구성은 동일하였으며 말뚝의 지지층이 되는 풍화암의 출현 심도가 2m 내외로 차이가 있었으므로 동일한 지반 조건으로 볼 수 있었다.

### 3.2 현장검증시험 계획 및 실시

선단변형 PHC말뚝에 대한 현장검증시험 계획을 Table 3에 나타내었다. 시험말뚝은 매입공법에 의해 시공되었으며 외부 케이싱의 직경은 609mm이었다. 각 시험말뚝의 직경은 500mm이었고 말뚝의 선단은 풍화암 지반에 2.0m를 근입 시키도록 계획하였다. 풍화암의 출현 심도에 따라 말뚝의 근입 길이는 변화되었다. TP-1~TP-3은 20.0m 내외이었으며 TP-5~TP-7은 17.0m 내외이었다. TP-1~TP-3는 하중전이측정이 수반된 연직압축재하시험용 PHC말뚝이었으며 TP-5~TP-7은 선단부에만 근 고정액을 주입하였으며 연직압축재하시험용 PHC말뚝

Table 3. Plan of field test for tip-transformed PHC piles

No.	Type	Dimension		Load (MN)	Test method
		d (mm)	L (m)		
TP-1	PHC pile	500	20	5.89	Static load test / Load transfer
TP-2	EXT pile	500	21	5.89	Static load test / Load transfer
TP-3	Smart pile	500	22	5.89	Static load test / Load transfer
TP-5	PHC pile (grouting at the end of pile)	500	17	3.92	Static load test / -
TP-6	EXT pile (grouting at the end of pile)	500	17	3.92	Static load test / -
TP-7	Smart pile (grouting at the end of pile)	500	16	3.92	Static load test / -

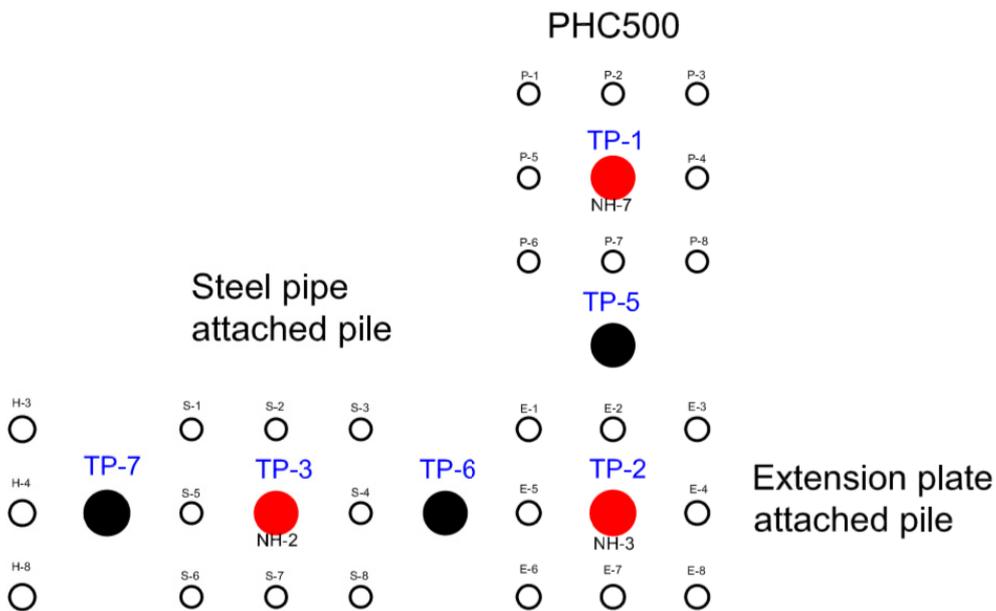


Fig. 4. Plan of test and reaction piles

이었다.

Fig. 4에는 시험말뚝 및 반력말뚝의 배치도를 나타내었으며 각 반력말뚝 8개는 시험말뚝과 동일한 형식으로 시공되었다. 시험말뚝 본체의 직경은 500mm로 동일하였다. PHC말뚝(TP-1), 확장판 선단부착 PHC말뚝(TP-2), 강관 선단부착 PHC말뚝(TP-3)의 3종류를 매입공법으로 시험 시공하였다. 또한 3종류의 선단변형 PHC말뚝들의 선단부 1m내외만 그라우팅하여 시험말뚝(TP-5~TP-7)으로 사용하였다. Fig. 5에는 각 시험말뚝의 상세 제원을 모식도와 함께 나타내었다.

### 3.3 시험말뚝의 시공

이 연구에서는 SDA(DRA)공법을 이용하여 시험말뚝 및 반력말뚝을 시공하였다. SDA공법은 이중오거공법이

라고도 하며, 현장에서는 DRA공법으로 불려진다. SDA공법은 SIP공법에서 굴착 공벽의 붕괴에 따른 문제와 선단지지층의 확인이 곤란한 점을 개선한 공법이다.

SDA공법은 상호 역회전하는 내부 스크류 오거와 외부 케이싱 스크류의 독립된 이중 굴진방식을 채택함으로써 굴진 시 서로의 반동 토크를 이용하여 평행상태로 굴착할 수 있다. 일반적으로 말뚝직경보다 5~10cm 정도 큰 직경의 외부케이싱을 사용하여 시공하는 방법이다. Fig. 6에 SDA공법의 시공순서를 나타내었다.

SDA공법은 원래 최종 경타가 아닌 압입으로 말뚝을 지지층에 안착함으로써 경타로 인한 민원을 줄일 수 있도록 고안되었다. 그러나 현장에서는 굴착능률을 높이기 위해 내부 오거를 사용하며 이 내부 오거가 케이싱 하부 지반을 선행 굴착함으로써 설치될 말뚝의 선단하부가 교란되는 경우가 발생하였고, 또한 경타를 하지 않을 경

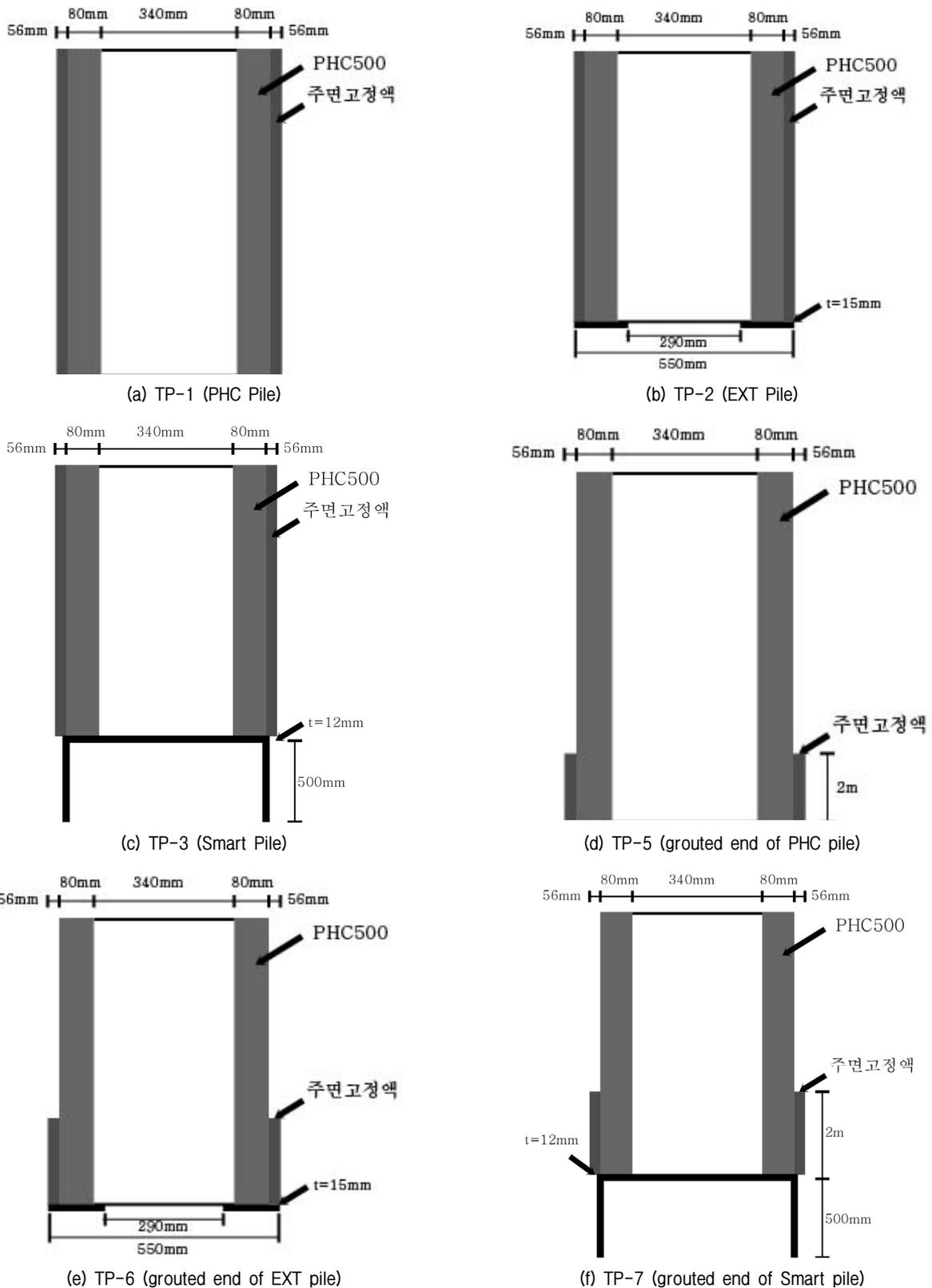


Fig. 5. Dimensions of test piles

우 별도의 품질확인수단이 없어 최종 경타로 마무리하도록 하였다. 이 연구에서는 선단에 발생할 수 있는 슬라임을 굴착 및 교반 후 체크 하였으며, 굴착된 깊이와

말뚝의 근입깊이를 주기적으로 체크하였으며, 모든 말뚝에 PDA 시험을 실시하여 선단지저력을 확인하였다. 시멘트풀 배합비는 일반적인 조건에서 평균배합비

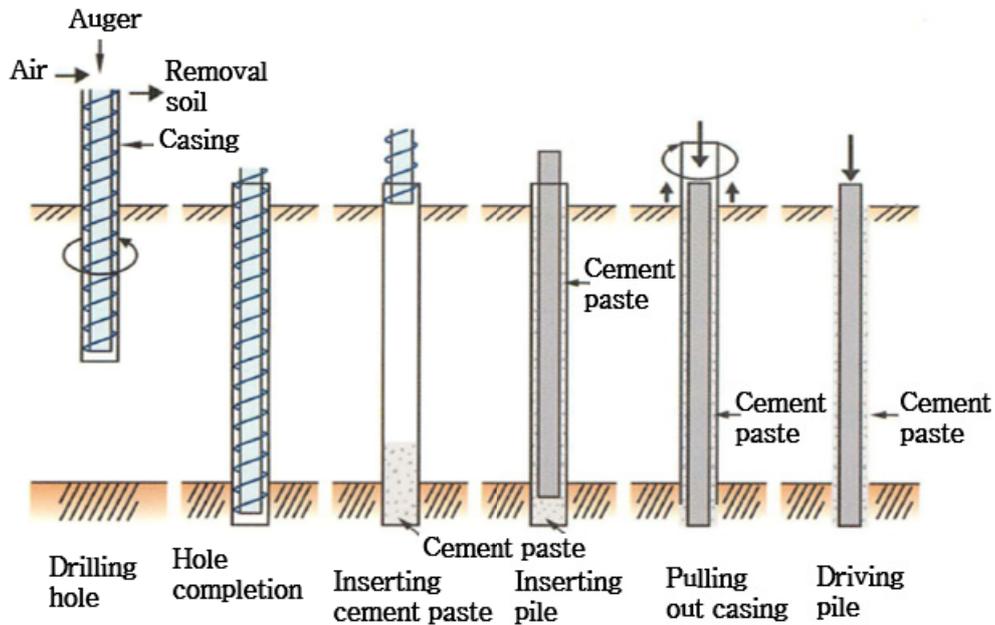


Fig. 6. Construction procedure of SDA method (Jo, 2006)

(W/C)를 0.83~1.00으로 적용한다. 이 연구에서는 시멘트풀의 배합비를 0.83으로 시공하였다.

모든 시험말뚝의 풍화암에 2.0m 만큼 근입시켰으며 강관 선단부착 PHC말뚝의 경우 강관 선단의 길이 500mm 만큼 더 관입되었다. 시험 시공 시방은 LH전문시방서 (2017a; 2017b)를 준수하였다.

### 3.4 하중전이특성이 수반된 연직압축정재하시험

연직압축정재하시험에서는 Fig. 7과 같이 반력 말뚝

방법을 사용하였다. 각 반력말뚝에 0.8MN이상의 인장력이 안정적으로 동원될 수 있도록 PHC말뚝 B종을 시공하였으며 각 PC강선에 균등하게 인장력을 가할 수 있도록 플레이트를 제작하여 플레이트와 반력PHC말뚝을 말뚝 생산과정에서와 동일한 방법으로 볼트와 너트를 이용하여 연결하였다. 또한 플레이트와 인장 강봉을 연결하여 일부 PC강선에 과인장력이 유발되어 PC강선이 끊어지지 않도록 하였으며 Fig. 7에는 반력말뚝의 연결부를 나타내었다.

연직압축정재하시험 시 말뚝부재에 발생하는 축하중



Fig. 7. Splice of reaction pile and tension steel

을 측정하기 위해서 축하중 계측용 센서를 설치하였다. 즉, PHC말뚝 제작 시 PC강봉에 진동현식 변형률계를 소정 위치에서 180° 방향으로 2개를 설치하였으며, 말뚝 선단부에서는 90° 방향으로 4개를 설치하였다. 설치 위치와 수량은 시험말뚝의 길이를 감안하여 변화시켰다(Choi et al., 2017).

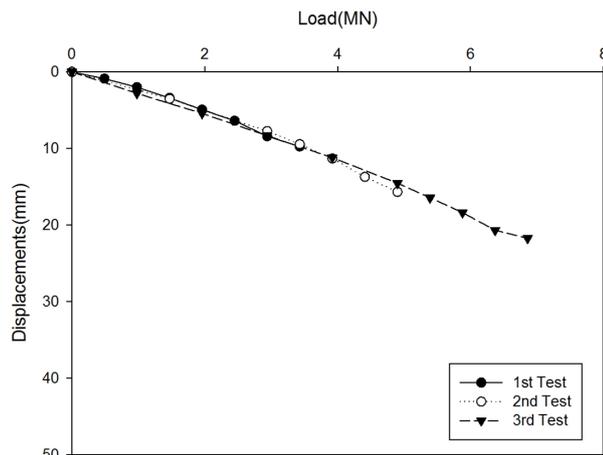
PHC말뚝(TP-1)의 경우 3차례 재하시험을 실시하였다. 1차 재하시험에서는 3.43MN의 연직압축재하하중에서 말뚝 두부가 파괴되었으므로 파괴된 부분을 절단하고, 높이 500mm, 직경 612mm의 강관내부에 고강도 모르타르를 채움하여 상부를 보강하였다. 2차 재하시험에서는 4.90MN의 연직압축재하하중에서 1차 보강부 아래에서 파괴가 발생하였으므로 파괴된 부분을 절단하고, 높이 1500mm, 직경 612mm의 강관, 고강도 모르타르를 활용하여 상부를 보강하였으며 이때, 하부 1m를 굴착하여 기존 PHC500mm말뚝과 보강되는 부분의 접

침을 많게 하였다. 3차 재하 시험에서는 6.86MN의 연직 압축재하하중에서 보강된 아랫부분의 PHC말뚝 부재에서 파괴가 발생하였다. 이때 발생한 침하량은 21.7mm이었다. 3차례의 연직압축정재하시험의 하중-침하량 관계를 Fig. 8(a)에 나타내었다.

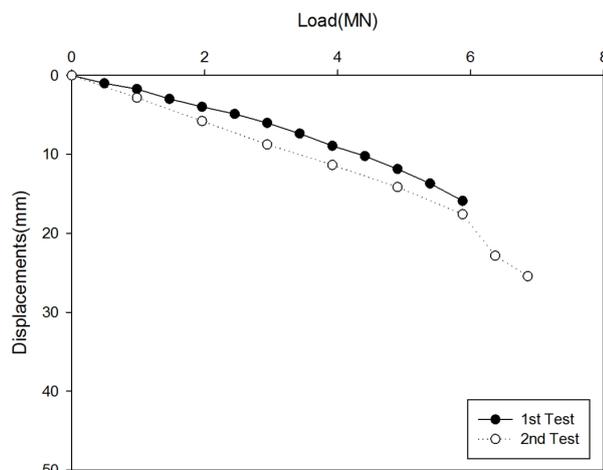
확장판 선단부착 PHC500mm말뚝(TP-2)의 재하시험은 2차례 실시되었다. 1차 재하시험에서는 5.88MN의 재하하중에서 두부 아래에서 부재 파괴가 발생하였으므로 두부를 보강하여 2차 재하시험을 실시하였으며 6.86MN의 재하하중에서 PHC말뚝 부재에서 파괴가 발생하였다. 하중-침하량의 시험결과는 Fig. 8(b)에 나타내었다.

강관 선단부착 PHC말뚝(TP-3)의 경우 1차 재하시험 시 7.35MN의 재하하중에서 말뚝 두부로부터 약 1.8m 하부의 PHC말뚝 부재에서 파괴가 발생되었다.

3가지 말뚝의 연직압축정재하시험에서 말뚝 본체의 파괴하중인 8.0MN 이하에서 시험말뚝이 파괴되었는데 이는 재하시험 시 편심재하 등의 영향인 것으로 판단되었다.



(a) PHC pile



(b) Extension-plate PHC pile

Fig. 8. Load vs. displacement curves of static load test

### 3.5 선단부 그라우팅된 선단변형 PHC말뚝의 연직압축 정재하시험

선단부만 그라우팅된 선단변형 PHC말뚝에서는 주변 마찰력이 발현되지 않는다고 가정하였으며 따라서 축하중 계측용 센서를 설치하지 않았고 선단지지력만을 측정하였다. 연직압축정재하시험에서는 반력말뚝 방식을 사용하였다.

## 4. 선단변형 말뚝의 현장검증시험 결과 및 분석

### 4.1 매입시공된 선단변형 말뚝들

3개의 매입시공된 말뚝에서 실시한 연직압축정재하시험으로부터 구한 하중-침하량 결과를 Fig. 9에 나타내었다. PHC말뚝(TP-1)과 확장판 선단부착 PHC말뚝(TP-2)은 시험 시작부터 6MN까지의 침하량은 거의 비슷하게 나타났으며 6.88MN의 하중에서 PHC말뚝의 부재에서 파괴가 발생하여 지반의 극한지지력을 확인하지 못하였다. 여기서, 확장판 선단부착 PHC말뚝(TP-2)의 경우 6.0MN이후 침하량이 급격하게 증가하였는데 말뚝체의 균열 또는 파괴에 의한 영향인 것으로 추정되었으나 시험말뚝을 뽑아낼 수가 없어 선단부 상태를 확인하지는 못하였다. 그리고 강관 선단부착 PHC말뚝은 (TP-3) 근

입깊이가 20m로 다른 말뚝에 비하여 약 1.0m만큼 깊게 굴착되어 시공되었으며, 다른 PHC말뚝 보다 작은 침하량을 보였다. 이는 강관선단부 0.5m가 더 근입된 영향으로 생각되었다.

3가지 다양한 선단말뚝들 즉, PHC말뚝(TP-1), 확장판 선단부착 PHC말뚝(TP-2), 강관 선단부착 PHC말뚝(TP-3)의 하중 - 침하량 거동은 거의 동일한 양상을 나타내었으며 따라서 말뚝의 근입깊이가 동일하고 선단 지지층에의 근입깊이가 동일하고 말뚝 본체의 직경이 동일할 경우 선단부착 말뚝들의 지지력 증대 효과는 거의 없는 것으로 판단되었다.

선단변형 PHC말뚝의 축하중 분포도를 Fig. 10에 나타내었다. 각 위치에서의 축하중은 축하중계측용 센서에서 측정된 변형률 값에 말뚝의 탄성계수 값과 말뚝 본체의 직경 값을 곱하여 계산하였다. 이때, TP-1, TP-2 말뚝은 최대 하중을 나타내었으며 TP-3는 TP-1, TP-2와

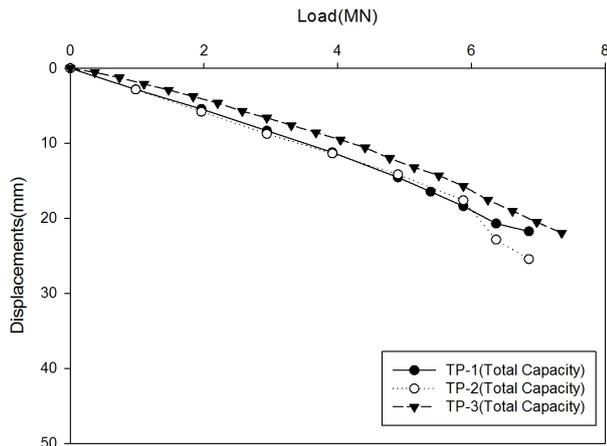


Fig. 9. Load vs. displacement curves of tip-transformed PHC piles

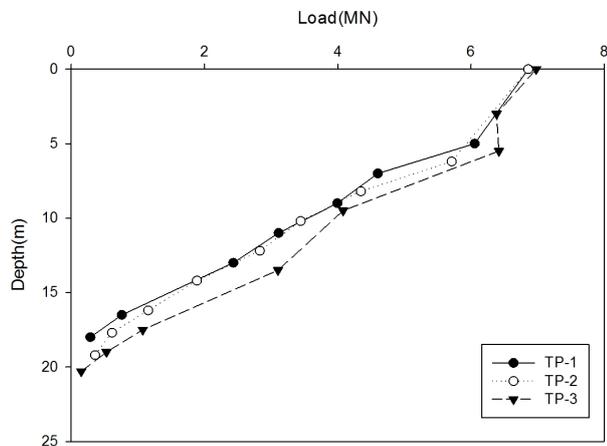


Fig. 10. Axial load distribution of tip-transformed PHC piles

의 비교를 위하여 가장 유사한 단계의 재하하중인 6.98MN에서의 축하중 분포도를 도시하였다. 3가지 선단변형 PHC말뚝들의 축하중 분포도는 비슷한 경향을 나타내었다. 최대재하하중단계에서 말뚝 기초의 지지력 중 주변마찰력이 대부분의 재하 하중을 지지하였으며 PHC 말뚝, 확장판 선단부착 PHC말뚝, 강관 선단부착 PHC말뚝에서 선단지지력은 각각 4.2, 4.4, 2.2%의 재하 하중을 지지하는 것으로 나타났다.

선단변형 PHC말뚝들의 마찰력의 하중분담 정도를 확인하기 위하여 각 재하 단계별로 전체 재하하중, 주변마찰력, 선단지지력의 크기를 Fig. 11에 도시하였다. 근입깊이가 17~18m정도인 TP-1, TP-2, TP-3의 말뚝들은 전체 재하하중의 대부분을 주변마찰력이 지지하였으며, 선단지지력은 극히 미미한 수준으로 나타났다.

#### 4.2 선단부만 그라우팅된 선단변형 PHC말뚝들

선단그라우팅된 3개의 선단변형 PHC말뚝의 하중-침하량 관계를 Fig. 12에 나타내었다. 여기에는 Fig. 11에 나타낸 실제말뚝의 선단지지력 발현 양상을 함께 나타내었다. 25.0mm 침하량을 기준으로 각 말뚝의 비교하였을 때 PHC말뚝(TP-5)은 3.68MN, 확장판 선단부착 PHC말뚝(TP-7)은 4.41MN, 강관 선단부착 PHC말뚝(TP-6)은 3.92MN의 하중을 지지할 것으로 판단되었다. 확장판 선부착말뚝 PHC말뚝이 PHC말뚝보다 미소하게나마 큰 지지력을 가지는 것으로 확인되었으며, 강관 선단부착 PHC말뚝은 PHC500말뚝과 비슷한 양상을 보인다는 것을 알 수 있었다.

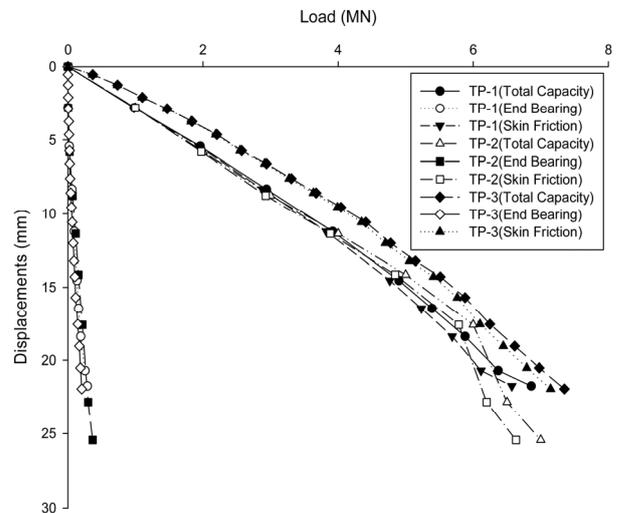


Fig. 11. Comparison of end bearing resistance

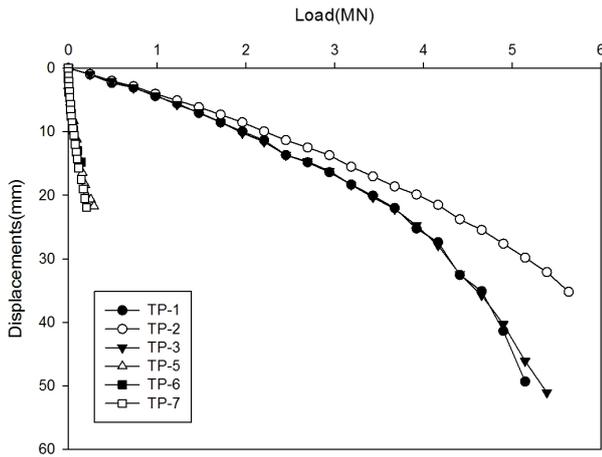


Fig. 12. Load vs. displacement curves of the grouted end piles

선단부만 그라우팅한 선단변형 PHC말뚝들에 대한 연직압축정재하시험은 확대기초의 연직지지력을 평가하기 위한 평판재하시험과 동일한 형식의 시험이었다. 따라서 말뚝의 선단지지력을 평가하기 위한 목적으로 사용하기에는 부적합한 방법이었으므로 이런 유형의 시험 결과를 단독으로 활용할 때에는 극히 유의하여야 한다.

이것은 주변마찰력이 전혀 발현되지 않는다고 가정할 때 가능할 수 있는 가상적인 상황이었으며 실제 말뚝의 경우 즉 실제 현장에 매입시공된 선단변형 말뚝들에서는 주변마찰력이 극한지지력의 80~90% 이상을 담당하게 되었으므로 상기의 선단지지력의 크기를 단순 비교하는 것은 의미가 없는 것으로 판단되었다.

마찰력이 지배적으로 발휘되는 경우에는 선단변형 PHC말뚝공법들이 효용성을 가질 수는 없다. 그러나 상기의 시험 결과에 비추어 볼 때 선단지지력이 우세하게 나타날 수 있는 아주 제한적인 경우 즉 선단지지의 매우 짧은 말뚝의 경우에는 어느 정도의 효용성이 있을 것으로 추정되었다.

## 5. 선단변형 PHC말뚝의 극한지지력 분석

### 5.1 극한지지력 추정 방법 개요

Fig. 9의 하중-침하량 관계를 이용하여 기존 분석 방법으로 극한하중 또는 항복하중을 구할 수가 없었다. 따라서 매입시공된 선단변형 PHC말뚝들의 연직압축정재하시험의 최대재하하중에서 주변마찰력이 극한에 도달하였다고 가정하였다. 그러면 극한선단지지력만 추정할

수 있다면 이 2가지 값을 중첩하여 전체 극한지지력을 추정할 수 있을 것으로 생각되었다.

극한 선단지지력을 추정하는 방안으로는 선단변형 PHC말뚝들의 선단부만 그라우팅한 상태에서 극한지지력을 연직압축정재하시험으로 확인하는 방법, 매입시공된 선단변형 PHC말뚝들에 대하여 시공직후 PDA를 실시하여 극한선단지지력을 추정하는 방법을 활용하였다.

또한, 수치해석에서 연직압축정재하시험의 최대재하하중 이후의 연직압축재하하중을 재하하였으며 여기서 극한지지력을 추정할 수 있었다.

### 5.2 극한지지력 추정

#### (1) 연직압축정재하시험 결과를 활용하는 방안(방안 1)

매입시공된 선단변형 PHC말뚝들의 연직압축정재하시험의 최대재하하중에서 주변마찰력이 극한에 도달하였다고 가정하였으며 선단변형 PHC말뚝들의 선단부만 그라우팅한 상태에서 극한선단지지력을 확인하였다. 이 2가지 값을 중첩하여 전체 극한지지력을 추정할 수 있었다.

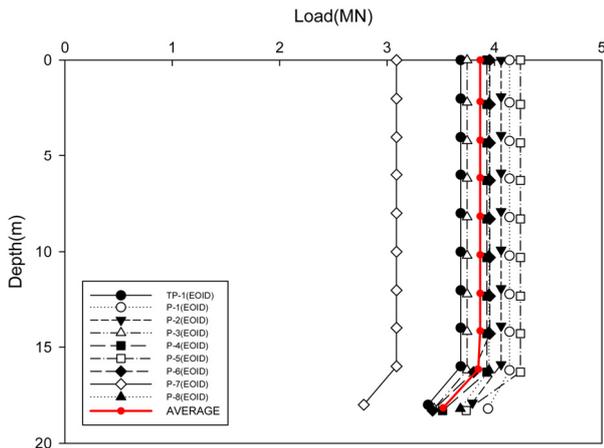
매입시공된 선단변형 PHC말뚝들에 대한 최대재하하중은 PHC말뚝, 확장판 선단부착 PHC말뚝, 강관 선단부착 PHC말뚝의 경우 각각 6.86, 6.86, 7.35MN으로 측정되었다.

선단부만 그라우팅한 선단변형 PHC말뚝들의 극한선단지지력으로 PHC말뚝, 확장판 선단부착 PHC말뚝, 강관 선단부착 PHC말뚝의 경우 각각 3.68, 4.41, 3.92MN으로 측정되었다(Fig. 12 참조). 따라서 전체 극한지지력은 PHC말뚝, 확장판 선단부착 PHC말뚝, 강관 선단부착 PHC말뚝의 경우 각각 10.54, 11.27, 11.27MN으로 추정할 수 있었다.

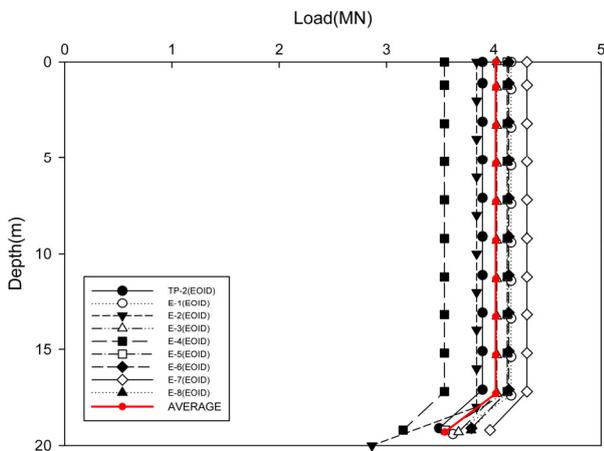
#### (2) 연직압축정재하시험과 PDA(EOID)를 조합한 방안(방안 2)

매입시공된 선단변형 PHC말뚝들의 연직압축정재하시험의 최대재하하중에서 주변마찰력이 극한에 도달하였다고 가정하였으며 PDA(EOID)로 극한선단지지력을 분석하였다. 이 2가지 값을 중첩하여 전체 극한지지력을 추정할 수 있었다.

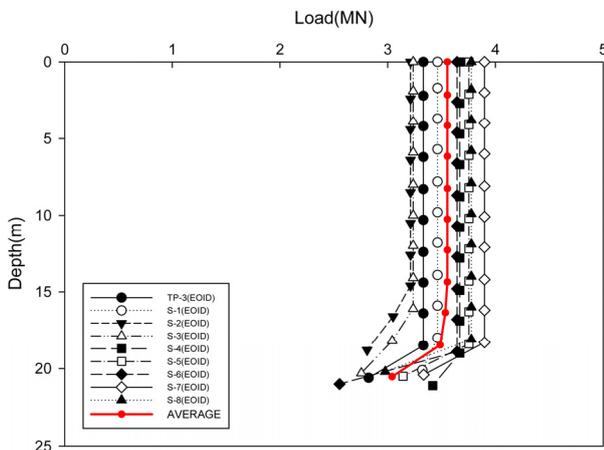
시험말뚝 1개와 반력말뚝 8개에 대한 시공 직후 PDA를 실시하여 9개의 극한 PDA(EOID)를 구할 수 있었으며 (Baikkyung G&C Corp., 2017) 이 평균값으로 극한선단지지력으로 추정하였다(Fig. 13 참조). PHC말뚝, 확장



(a) PHC pile



(b) EXT PHC pile



(c) Smart pile

Fig. 13. Estimation of end bearing resistance using PDA<sub>(E/OID)</sub>

관 선단부착 PHC말뚝, 강관 선단부착 PHC말뚝의 경우 추정된 극한 선단지지력은 각각 3.00, 3.50, 3.00MN으로 추정되었다.

(3) 수치해석에 의한 방안(방안 3)

연직압축정재하시험에서 재하한 최대재하하중 이후의 연직압축하중에 대하여 수치해석으로 모사하였다(Choi et al., 2017). 유한요소해석 결과를 이용하여 선단변형 PH말뚝의 극한 연직지지력을 추정하였다. 하중-침하 곡선을 산정하고 Davisson 파괴기준과 25mm 파괴기준에 따른 선단변형 PHC말뚝의 파괴하중을 산정하였다(Table 4 참조). 여기서 분석된 지지력은 극한지지력으로 볼 수 없었으며 파괴 하중 또는 항복하중으로 볼 수 있었다.

(4) 요약

선단변형 PHC말뚝들의 극한지지력을 3가지 방안으로 추정할 수 있었으며 그 결과를 요약하여 Table 5에 나타내었다.

여기서, 선단변형 PHC말뚝들의 추정된 극한지지력은 PHC말뚝 본체의 부재력을 초과하는 것으로 나타났는데 그 이유는 극한선단지지력이 과도하게 추정되었기 때문인 것으로 판단되었다.

6. 결론 및 제언

이 연구에서는 PHC말뚝, 확장관 선단부착 PHC말뚝, 강관 선단부착 PHC말뚝에 대한 하중전이측정이 수반

Table 4. Estimation of ultimate bearing capacities by numerical analysis

No.	Type	Ultimate bearing capacity (MN)	
		Davisson offset criteria	25 mm offset criteria
TP-1	PHC pile	8.3	7.6
TP-2	EXT pile	8.4	7.5
TP-3	Smart pile	10.7	8.7

Table 5. Estimations of ultimate bearing capacity for the tip-transformed PHC piles

No.	Type	Ultimate bearing capacity (MN)			PHC pile failure load (MN)
		Method 1	Method 2	Method 3	
TP-1	PHC pile	10.5	10.4	7.6	8.0
TP-2	EXT pile	11.3	10.4	7.5	
TP-3	Smart pile	11.3	10.4	8.7	

된 연직압축정재하시험을 수행하였다. 각 시험말뚝 및 반력말뚝에 PDA(EOD)도 실시하였고 시험말뚝에 대한 수치해석 자료를 활용하였다. 이 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) PHC말뚝(TP-1), 확장판 선단부착 PHC말뚝(TP-2), 강관 선단부착 PHC말뚝(TP-3)의 하중-침하량 거동은 거의 동일한 양상을 나타내었다. 따라서 말뚝이 선단지지층에 근입된 길이가 동일하고 말뚝의 직경이 동일할 경우 확장판 선단부착 PHC말뚝 및 강관 선단부착 PHC말뚝의 지지력 증대 효과는 거의 없는 것으로 나타났다.
- (2) PHC말뚝(TP-1), 확장판 선단부착 PHC말뚝(TP-2), 강관 선단부착 PHC말뚝(TP-3)의 최종재하하중단계에서 주면마찰력은 각각 최종재하하중의 95.8, 95.6, 97.8%를 분담하였으며, 선단지지력은 4.2, 4.4, 2.2%를 분담하였다.
- (3) 선단부만 그라우팅한 선단변형 PHC말뚝들에 대한 연직압축정재하시험은 확대기초의 연직지지력을 평가하기 위한 평판재하시험과 동일한 형식의 시험이었다. 따라서 말뚝의 선단지지력을 평가하기 위한 목적으로 사용하기에는 부적합한 방법이었으므로 이런 유형의 시험 결과를 단독으로 활용할 때에는 극히 유의하여야 한다.
- (4) 확장판 선단부착 PHC말뚝에 관한 기존의 연구들은 이론식에 의한 검토, 수치해석에 의한 검토, 기 수행된 동재하시험 및 단순 정재하시험 자료를 이용한 검토들이었으며 PHC말뚝 및 확장판 선단부착 PHC말뚝에 대하여 실시한 하중전이측정이 수반된 연직압축정재하시험 결과를 직접 비교한 연구는 전혀 없었다. 또한 확장판 선단부착 PHC말뚝에서 전체 지지력이 30% 이상 증가한다는 실증적 근거는 찾아볼 수가 없었다. 또한, 강관 선단부착 PHC말뚝에서도 선단지지력이 1.48~1.81배 증가한다는 실증적 근거는 찾아볼 수가 없었다.
- (5) 확장판 선단부착 PHC말뚝(직경 500mm)의 설계지지력을 150~165톤으로 제시하고 있는데 이는 PHC말뚝(직경 500mm)의 부재력의 86~95% 수준에 이르고 있어 PHC말뚝 본체의 안전을 위협할 수 있는 수준으로 보인다.

- (6) 최근 굴착장비의 발달로 매입말뚝을 풍화토 또는 풍화암에 쉽게 지지할 수 있고 이들 지층에서 발휘되는 높은 주면마찰력을 감안한다면, PHC말뚝에 특별한 선단부착구를 부착하지 않더라도 주면마찰력만으로 연직하중을 충분히 지지할 수 있다고 판단되었다.

## 참고문헌 (References)

1. 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).
2. Choi, Y. K. (2017), *Report of static pile load test including load distribution test for the axial load behavior with various end bearing type PHC piles*, KGS, Report No. KGS09-038, 2017. 9., pp.1-51 (in Korean).
3. 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).
4. Cheon, B. S., Yoo, C. S., and Lee, W. J. (2009), *Pile load test for EXT-PHC pile field application*, KGS, Report No. KGS09-038, pp.1-71 (in Korean).
5. Jeong, S. S., Kim, S. I., and Kim, H. T. (2011), *Installation and design guide for EXT-PHC pile (Final report)*, KGS, Report No. KGS09-038, 2011. 1., pp.1-71 (in Korean).
6. Jo, C. H. (2006), *Bored pile method*, ENG Book (in Korean).
7. KICT (2012), *Behavior and application of tip-extension PHC pile* (in Korean).
8. Kim, M. H. (2018a), *Safe installation method project for extension plate PHC piles and bolt spliced PHC piles (Final report)*, Inje IACF, 2018. 9., pp.1-341 (in Korean).
9. Kim, M. H. (2018b), *Safe installation method project for extension plate PHC piles and bolt spliced PHC piles (Final report) Appendix*, Inje IACF, 2018. 9., pp.A-1-1~A-13-48 (in Korean).
10. Korea Land & Housing Corp. (2017a), *LH Special specification 23023 Precast pile foundation (The Bored Pile)*, pp.1-13.
11. Korea Land & Housing Corp. (2017b), *LH Special specification 23021 Precast pile foundation (The Driven Pile)*, pp.1-13.
12. Paek, K. H. (2013), *End bearing capacity increase technology for the bored pile using Smartpile*, Architectural structure, 2013. 9-10, Vol.20, No.5, pp.72-78 (in Korean).
13. Professional Engineer's office Veasang (2017), *Geotechnical investigation report for PHC piles with various end bearing types*, 2017. 3 (in Korean).
14. Yonsei Univ. (2009), *Behavior characteristics of no-welding composite PHC piles through pile load test and numerical analysis*, SampyoENC (in Korean).

Received : November 22<sup>nd</sup>, 2018

Revised : November 28<sup>th</sup>, 2018

Accepted : November 28<sup>th</sup>, 2018