

재하시험을 통한 초고강도 선단확장 PHC말뚝의 적용성 연구

황의성
서울시립대학교 토목공학과

Study on Bearing Capacity of Ultra High Strength End Extended PHC Pile by Loading Test

Ui-Seong Hwang

Department of Civil Engineering, University of Seoul

요약 경제 규모의 확장으로 국가 산업이 점차 발전해 나갈수록 사회 인프라를 구축하기 위한 대형-초고층 구조물의 건설이 증가함에 따라 상부의 큰하중을 하부의 암반지층까지 안전하게 전달할 수 있는 연구가 활발히 이루어지고 있다. 본 연구에서는 우리나라의 단단한 암반층을 활용하여 지지력을 극대화 할 수 있도록 PHC의 콘크리트 압축강도를 기존 80 MPa에서 110 MPa로 높인 초고강도PHC에, 말뚝의 선단을 확장시킨 선단확장PHC를 항타공법과 매입공법으로 시공한 후 재하시험을 통해 지지력의 경향성을 확인해 보았다. 항타공법을 사용하여 선단확장PHC의 지지력을 측정해 본 결과 주변마찰력이 일반 PHC에 비해 작게 나타났으며, Stet-up 효과도 미미하게 나타나 지지력 측면에서 우위를 가질 수 없었다. 그러나 매입공법 적용시 주변마찰력의 발휘 효과는 주변부와 지반의 간격이 넓어 시멘트페이스트가 밀실히 채워질 경우 지지력 증가효과가 기대된다. 또한 초고강도PHC가 일반PHC에 비해 높은 지지력이 나타났으며, 허용항타응력도 60% 이내로 나타나 좀 더 견고한 지반까지 안전한 시공이 가능하였다. 따라서 초고강도PHC의 높아진 강도를 활용하기 위해서는 말뚝의 선단부를 연암의 강도를 지닌 지반에 설계하는 것이 말뚝 본수를 크게 절감 할 수 있으며, 시공비 절감과 공기단축의 효과도 얻을 수 있을 것이다.

Abstract As the national industry is developing gradually due to the expansion of the economic scale, the construction of large and super high-rise structures for building social infrastructure has been increasing, and studies have been conducted actively to transmit the large loads at the upper portion to the lower bedrock. In this study, the PHC was extended to an ultra-high strength PHC, which increased the concrete compressive strength of the PHC from the conventional 80 MPa to 110 MPa, and the PHC, which extended the tip of the pile. After construction with the driving method and injected pile method, the tendency of the bearing capacity was tested through a load test. Measurements of the bearing capacity of the extended PHC using the pile driving method revealed the main surface friction force to be smaller than that of the general PHC, and the stet-up effect was also insignificant. On the other hand, the effect of the friction force on the ground surface when the injected pile method was applied is expected to increase the bearing capacity when the gap between the main surface and the ground is wide and the cement paste is filled tightly. In addition, the ultrahigh strength PHC showed higher bearing capacity than the conventional PHC, and the permissible pile stress was less than 60%. Therefore, it is possible to reduce the number of piles and reduce the construction cost and effect of shortening the length of the pile by designing the tip of the pile on the ground with the intensity of soft rock as a method for utilizing the increased strength of the ultra-high strength PHC.

Keywords : Ultra High Strength PHC, Loading Test, Driving Penetration, 110 MPa, Bearing Capacity

*Corresponding Author : Ui-Seong Hwang(University of Seoul)

Tel: +82-10-3644-9862 email: hos97@naver.com

Received December 31, 2018

Revised January 11, 2019

Accepted March 8, 2019

Published March 31, 2019

1. 서론

대형 초고층 구조물의 건설이 증가함에 따라 상부의 큰 하중을 하부의 지지암반층까지 안전하게 전달하는 공법이 필요하게 되었으며, 이를 위해서 말뚝기초의 성능을 개선하여 큰 연직지지력을 확보하게 할 수 있는 연구가 활발히 진행중에 있다. 국내에서 사용하는 기성말뚝의 종류에는 강관말뚝과 PHC말뚝이 있다. 강관말뚝은 강도가 크며, 시공성도 우수하며, 큰 하중을 지지할 수 있는 장점으로 인해 수평하중과 휨모멘트가 크게 작용하는 토목구조물에 많이 사용되어 왔으나 높은 재료비로 인해 그 사용이 제한되어 왔다. PHC말뚝은 콘크리트 압축강도를 원심성형을 통한 프리스트레스 방식으로 80 MPa까지 발현시킨 것으로써 강관말뚝의 문제점인 높은 가격과 부식문제를 해결할 수 있어서 국내 아파트 현장에 주로 사용되어 왔지만 $\Phi 450\text{mm} \sim \Phi 600\text{mm}$ 의 구경과 약한 강도(80 MPa)로 인해 대형 건축물에 적용하기는 다소 제약이 있었다.

이에 따라 본 연구에서는 일반적인 PHC말뚝의 지지력시험이 아닌 콘크리트 강도를 110 MPa로 높인 PHC말뚝과 말뚝의 선단부분을 50 mm 확장시킨 PHC말뚝을 기존 말뚝과의 재하시험을 통해 신공법의 안정성 및 성능을 평가해서, 실무에 적용함에 있어서 그 활용방안을 제시하고자 한다.

1.1 연구 배경

기성콘크리트말뚝은 19세기 중반에 개발되어 20세기 이후에 보급되었다. 강 나선 철근을 사용한 말뚝이 사용되고, 말뚝 형상으로 관 주위에 드라이 콘크리트와 철망을 기계로 감아 굳힌 말뚝 등의 변형말뚝도 고안되었다. 1915년 오스트리아에서 처음 원심력으로 생산하는 방법이 고안되었으며, 1951년 미국에서 PC말뚝이 사용되기 시작하였다[1].

우리나라에서도 말뚝의 다양성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. FRP(Fiber Reinforced Plastics)복합재를 외부에 노출시켜 콘크리트를 외부환경으로부터 보호함과 동시에 안정성을 확보한 콘크리트 속채움 FRP복합재 말뚝[2]과 내부에는 보강섬유를 외부에는 FRP로 보강하는 복합재 이중 구조로 압축, 전단, 휨에 대하여 뛰어난 성능을 확보할 수 있는 HCFFT (Hybrid Concrete Filled FRP)말뚝이 개발되었다[3]. PHC말뚝 내부에 속채움 콘

크리트와 철근으로 보강된 합성PHC말뚝을 개발해 기성 PHC말뚝의 휨 및 전단강도를 우수하게 증진시켰다[4].

또한 일본에서는 Fig. 1과 같이 강관내부에 콘크리트를 삽입시켜 합성체를 이룬 SC말뚝(Steel Pile & Concrete Pile)을 사용하여 수평력을 극대화 시켰으며, 말뚝에 마디를 만들어 주면마찰력을 극대화 시킨 마디말뚝(Nondular cylinder pile) 등이 이미 상용화되어 지반에 맞춘 최적설계를 통해 다양한 말뚝을 실무에 적용하고 있다.



Fig. 1. Various piles of Japan

(a) SC Pile (b) Nondular cylinder pile

1.2 연구 방법

본 연구는 송도 지역에서 Table 1과 같이 $\Phi 4550$, $\Phi 500$, $\Phi 5055$, $\Phi 600$ 의 4종류, 압축강도 80 MPa과 110 MPa의 2종류의 연구대상 말뚝에 대해서 항타공법과 매입공법으로 시공하였다. 이후 초기동재하시험(E.O.I.D; End of Initial Driving)과 재동재하시험(Restrike)을 통해 일반말뚝과 연구말뚝의 지지력 특성을 비교·검토하고, 항타관입성 분석을 통해 현장 적용성을 검토하였다.

Table 1. Types and amounts of pile load tests

Type	Pile Driving Method		Injected Pile Method	
	80MPa	110MPa	80MPa	110MPa
$\Phi 4550$	-	E : 1 time R : 2 time	-	-
$\Phi 500$	E : 1 time R : 2 time	-	E : 3 time	E : 2 time
$\Phi 5055$	-	-	E : 2 time	E : 3 time
$\Phi 600$	E : 1 time R : 2 time	E : 1 time R : 2 time	-	-

* E : E.O.I.D , R : Restrike

여기서, $\Phi 5055$ 란 Fig. 2에서와 같이 일축압축강도가 110 MPa이며, 말뚝상부(단면 A-A')의 직경이 500 mm 이고, 말뚝하부(단면 B-B')의 직경이 550 mm인 말뚝을 지칭한다.

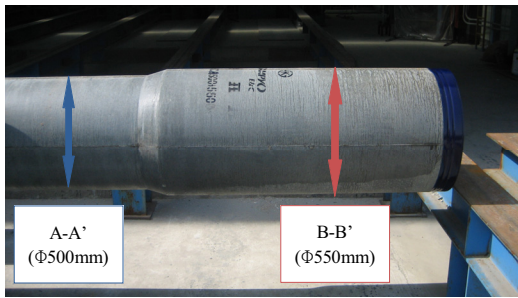


Fig. 2. End expansion pile Foreground

동재하시험은 총 22회로 E.O.I.D (End of Initial Driving) 14회, Restrike 8회를 실시하였으며, 항타관입성 분석은 선단확장말뚝과 일반말뚝을 비교군으로 1회를 실시하였다.

동재하시험은 ASTM D 4945에 따라 수행되었으며, 말뚝에 변형률계와 가속도계를 부착하고 말뚝 머리에 타격력을 가함으로써 발생하는 응력파를 PDA(Pile Driving Analyser)로 분석하여 말뚝의 지지력을 측정하는 기술이다[5]. 이론상의 지지력 산정식은 매입공법과 항타공법에 따라 선단지지력($\alpha \cdot N$: 말뚝의 선단폐쇄면적)과 주변마찰력(β : 말뚝의 주변적)을 구하는 공식이 각 기관마다의 계수(α, β)의 차이가 있으나 동재하시험을 사용하면 현장에서 직접 선단지지력과 주변마찰력을 분리 측정할 수 있음은 물론 주변 마찰력의 분포를 알 수 있기 때문에 유용하다. 또한 단면손상에 대한 건진도 시험방법으로 활용되어 품질 관리 목적에 적합한 시험방법이기도 하다[6].

항타관입성은 동일 낙하고로 해머로 타격한 횟수에 따라 발생하는 파를 측정하여 말뚝에 작용하는 응력의 변화를 분석한다. 항타관입성을 판단하는 기준은 매 타격에 대하여 압축항타응력 및 인장항타응력과 지지력을 측정하면서 설계조건을 만족하는데 충분하다고 판단되는 깊이가 되면 시공을 중지하는 것이다[7].

2. 본론

항타공법과 매입공법을 사용하여 Table 2와 같이 구분하여 시공하였으며, 시공 직후 초기동재하시험(E.O.I.D)을 실시한 후, 각각 1일, 5일 경과 후에 재동재하시험(Restrike)을 실시하여 선단면적이 같을 경우와 강도차이가 있을 경우의 지지력을 비교해 보았다. 연구지역의

시추 심도는 지표下 (-)51m를 굴진하였으며, 기반암을 1.0m 굴진하는 것을 원칙으로 실시하였다. 시추조사 결과 지층분포는 Table 3과 같다.

Table 2. Test pile types by construction method

No.	Construction Method	Comparison group	Purpose of experiment
1	Pile Driving Method	UΦ4550 vs HΦ500	Comparison of bearing capacity when the end area is the same
2		UΦ600 vs HΦ600	
3	Injected Pile Method	UΦ500 vs HΦ500	Comparison of bearing capacity by difference of concrete strength
4		UΦ5055 vs HΦ5055	

* Ultra high strength(110MPa) = U
High strength(80MPa) = H

Table 3. Site investigation results

No.	BH-1		BH-2	
	Depth (m)	N value	Depth (m)	N value
Silty sand	0.0~2.0	4/30	0.0~2.0	4/30
Silt	2.0~12.5	(2~4)/30	2.0~12.0	(2~4)/30
Clay	12.5~23.2	(6~20)/30	12.0~23.5	(4~22)/30
Silt	23.2~26.0	(25~26)/30	23.5~26.0	(25~27)/30
Silty sand	26.0~40.3	29/30~50/16	26.0~40.5	28/30~50/18
Weathering soil	40.3~43.5	50/(15~14)	40.5~41.5	50/15
Wearhered rock	43.5~51.0	50/(10~5)	41.5~46.8	50/(15~7)
Bed rock	-	-	46.8~48.0	-

2.1 항타공법을 통한 지지력 측정 결과

항타공법은 DKH-13T(해머 13 ton)을 사용하여 33.7 m를 시공한 초고강도 선단확장 PHC말뚝(Φ4550)과 일반PHC말뚝(Φ500)말뚝의 동재하시험 결과는 Fig. 3 과 Table 4에서 보여지는 바와 같이 시공 중 주변마찰력은 말뚝의 강도와는 상관없이 선단확장 초고강도PHC말뚝(Φ4550)이 일반PHC말뚝(Φ500)에 비해 작게 나타났으며, Set-up 효과도 미미하게 나타났다.

이는 선단 확장부분의 직경이 본체의 직경보다 커서 항타시 Skin-cut 현상 때문인 것으로 판단된다. 초고강도 선단확장 PHC말뚝의 선단지지력(2,849 kN)도 일반PHC말뚝(3,200 kN)보다 적게 측정되었다. 항타시간을 비교해 보면 일반PHC말뚝(Φ500)말뚝의 경우 최종 8.0 m 관입시 항타시간은 11분이 소요된 반면, 초고강도 PHC말뚝(Φ4550)의 경우 8분이 소요되어 시공 효율은

약 20% 더 뛰어난 것으로 판단되고, 허용항타응력도 여유가 많이 있어 건전도 확보측면에서는 유리하였지만 전반적으로 선단이 확장된 말뚝은 항타공법 적용시 지지력 측면에서 우위를 가질 수 없음을 알 수 있었다.

Table 4. Allowable bearing capacity by dynamic tests [UΦ4550 vs HΦ500]

Pile types	Test method	Test date	Bearing capacity (kN)			
			End	Skin friction	Yield	Allowable
U Φ4550	E.O.I.D	D-day	2,628	104	2,731	1,092
	Restrike	1 day past	2,848	380	3,228	1,291
		5 day past	2,849	486	3,335	1,334
		Bearing capacity	2,849	486	3,335	1,334
	H Φ500	E.O.I.D	D-day	3,200	556	3,756
Restrike	1 day past	2,104	1,256	3,360	1,344	
	5 day past	2,200	1,385	3,548	1,419	
	Bearing capacity	3,200	1,385	4,585	1,834	

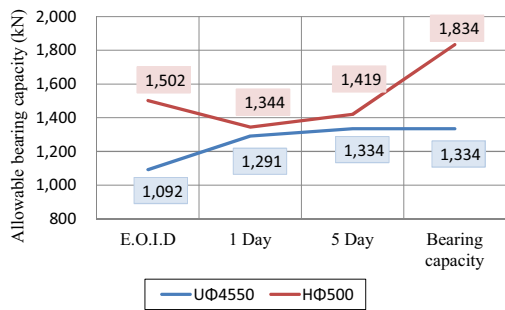


Fig. 3. Graph of bearing capacity change by time [UΦ4550 vs HΦ500]

동일 직경의 초고강도PHC말뚝(Φ600)과 일반PHC말뚝(Φ600)을 33.0 m로 시공하여 항타관입성 및 지지력의 특성을 파악하였고, 동재하시험 결과는 Fig. 4와 Table 5에서와 같이 나타났다.

시공 직후 말뚝머리에서의 항타응력은 초고강도PHC말뚝(Φ600)은 40 MPa, 일반PHC말뚝(Φ600)은 38.7 MPa로 거의 비슷한 수준이나 선단지지력은 각각 5,188 kN, 3,700 kN으로 초고강도PHC말뚝(Φ600)의 선단지지력이 일반PHC말뚝(Φ600) 대비 140%의 지지력을 보이며 측정되었다. 이는 말뚝의 허용항타응력이 각각 66 MPa, 48 MPa로 초고강도PHC말뚝이 우세하여 단단한 지반까지 항타가 가능하며, 항타응력도 말뚝재료의 허용항타응력에 비해 작게 나타나, 항타로 인한 말뚝 본체의 손상이 일반PHC말뚝보다 적은 것으로 판단된다.

Table 5. Allowable bearing capacity by dynamic tests [UΦ600 vs HΦ600]

Pile types	Test method	Test date	Bearing capacity (kN)			
			End	Skin friction	Yield	Allowable
U Φ600	E.O.I.D	D-day	5,188	501	5,689	2,275
	Restrike	1 day past	3,525	1,584	5,109	2,043
		5 day past	3,724	1,692	5,416	2,166
		Bearing capacity	5,188	1,692	6,880	2,752
	H Φ600	E.O.I.D	D-day	3,700	488	4,188
Restrike	1 day past	2,940	1,394	4,334	1,733	
	5 day past	2,850	1,457	4,307	1,722	
	Bearing capacity	3,700	1,457	5,157	2,062	

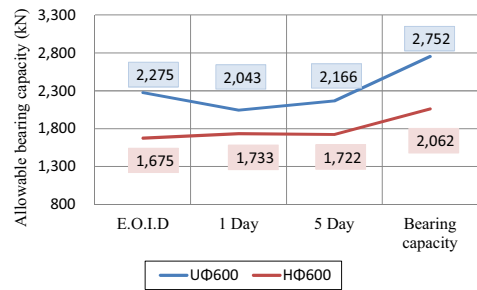


Fig. 4. Graph of bearing capacity change by time [UΦ600 vs HΦ600]

시공 1일 및 5일 경과 후 재항타 시험을 실시하였다. 전체지지력의 증가가 크지 않은 이유는 주변마찰력의 증가로 선단지지력이 충분히 발현되지 못했으며, 초기 항타 보다 재항타시의 응력이 작게 나타난 것은 말뚝의 손상을 고려하여 초기 항타 보다 낙하고를 낮게 하여 항타 하였기 때문으로 사료된다.

주변마찰력의 증가추세는 시공 직후 1일 경과 후가 제일 크게 나타났으며, 5일 이후에는 그 증가 폭이 미미하게 나타났다. 직항타시 송도지반의 Set-up 효과가 하루 정도면 발휘되었다고 판단된다.

시공조건이나 항타여건을 고려할 때 초기항타시의 선단지지력과 재항타시의 주변 마찰력을 합산한 지지력은 본 시험 말뚝의 지지력으로 보는 것이 합당한 것으로 판단되며, 초고강도PHC말뚝(Φ600)의 극한지지력은 초기 항타시 선단지지력 5,188 kN에 재항타 주변 마찰력을 합산하면 6,880 kN으로 허용지지력은 2,752 kN으로 측정되었다.

일반PHC말뚝(Φ600)의 극한지지력은 초기항타시 선

단지지력은 3,700 kN에 재항타 주면마찰력을 합산하면 5,157 kN으로 허용지지력은 2,062 kN으로 측정되었다.

시험결과 초고강도PHC말뚝의 허용지지력은 일반 PHC말뚝 대비 133%의 지지력이 나타났으며, 항타응력도 허용항타 응력의 60% 이내로 일반PHC말뚝의 80%에 비해 안정적인 범위 이내의 값이 나타나 항타시 좀 더 견고한 지반까지 항타가 가능할 것으로 판단된다.

위의 결과를 종합하여 볼 때 초고강도PHC말뚝이 지지력 및 항타 시공성능에서 일반PHC말뚝에 비해 상당히 우수한 것으로 판단된다.

2.2 매입공법을 통한 지지력 측정 결과

매입말뚝은 말뚝의 직경을 고려하여 케이싱을 $\Phi 558$ 과 $\Phi 608$ 2가지로 사용하여 초고강도PHC말뚝($\Phi 500 : 2$ 본)과 일반PHC말뚝($\Phi 500 : 3$ 본)을 시공하였으며, 동일 직경을 가진 PHC말뚝의 일축압축강도 차이에 따른 지지력 양상을 검토해보았다. 동재하시험은 E.O.I.D.로 측정하였으며, 결과는 Table 6에서와 같이 초고강도PHC말뚝($\Phi 500$)과 일반PHC말뚝($\Phi 500$)의 항타응력이 40 MPa로 비슷한 가운데 선단지지력을 살펴보면 북쪽의 극한선단지지력이 3,419 kN, 3,070 kN으로 높게 측정된 반면, 남쪽의 극한선단지지력은 1,775 kN, 1,900 kN으로 낮게 측정이 되었다.

즉, 관입깊이가 같아도더라도 말뚝의 위치(북쪽말뚝과 남쪽말뚝의 거리차는 6 m)에 따라 지지력 차이가 50%이상 크게 발생하였다. 또한 정재하시험의 극한지지력은 2,522 kN으로 중간정도로 측정되었다. 이는 말뚝의 강도나 형상에 따른 차이보다는 시공위치의 지반조건이 동일하지 않고 북쪽이 남쪽보다 풍화암 심도가 깊게 형성되었기 때문인 것으로 판단된다.

Table 6. Allowable bearing capacity by dynamic tests [U $\Phi 500$ vs H $\Phi 500$]

Pile types	Location	Driving stress (MPa)	Allowable driving stress (MPa)	Bearing capacity (kN)			
				End	Skin friction	Yield	Allowable
U $\Phi 500$	North	41.2	66.0	3,419	132	3,551	1,420
	South	36.2		1,775	128	1,903	761
	North	38.4		3,070	102	3,172	1,268
H $\Phi 500$	South	42.8	48.0	1,900	238	2,138	855
	Center	41.3		2,522	202	2,724	1,089

여기서 주목할 점은 서로의 상이한 말뚝의 지지력을 비교할 때는 바로 옆(2.5D)에서 시험하는 것이 상호비교 오차를 줄이는 방안이라 생각되며, 말뚝중심간 거리가 6 m 차이의 근거리임에도 불구하고 지지력차가 크다는 것을 말뚝기술자들은 인지하고 있어야 될 것으로 판단된다.

다음으로 초고강도 선단확장 PHC말뚝($\Phi 5055 : 3$ 본)과 일반PHC말뚝($\Phi 5055 : 2$ 본)을 시공하여 선단확장 PHC말뚝의 재료강도의 차이에 따른 지지력 양상을 검토해보았다. 초기동재하시험으로 지지력을 측정하였으며, 결과는 Table 7에서와 같이 시험 배치상 같은 위치(북쪽), 같은 관입깊이로 시공을 하였지만 항타응력이 각 강도의 허용치에 약 80%인 초고강도 선단확장 PHC말뚝($\Phi 5055$) : 50.8 MPa, 일반PHC말뚝($\Phi 5055$) : 38.8 MPa일때의 극한선단지지력은 3,597 kN, 2,753 kN으로 측정되었다.

동일한 지반에서 동일한 형태의 말뚝으로 동재하시험을 할 경우, 말뚝의 허용압축응력을 크게 하여 시험할 때 지지력은 보다 더 크게 측정된다는 것을 알 수 있어 압축강도가 큰 초고강도 PHC말뚝을 사용시 좀 더 높은 지지력으로 시공할 수 있다.

Table 7. Allowable bearing capacity by dynamic tests [U $\Phi 5055$ vs H $\Phi 5055$]

Pile types	Location	Driving stress (MPa)	Allowable driving stress (MPa)	Bearing capacity (kN)			
				End	Skin friction	Yield	Allowable
U $\Phi 5055$	North	50.8	66.0	3,597	224	3,821	1,528
	South	38.5		1,920	137	2,057	822
	Center	35.0		2,397	93	2,491	996
H $\Phi 5055$	North	38.8	48.0	2,753	128	2,880	1,152
	South	48.1		1,973	111	2,084	833

2.3 항타 관입성 분석

항타공법을 적용하여 시공한 초고강도 선단확장PHC말뚝($\Phi 4550$)의 항타 관입성을 분석하기 위해 비교 시험군으로 일반PHC말뚝($\Phi 500$)에도 Fig. 5와 같이 말뚝 상단부에 가속도계와 변형률계를 부착하고, 동일 낙하고로 13 ton의 해머로 타격한 횟수에 따라 발생하는 파를 측정하여 말뚝에 작용하는 응력의 변화를 분석하였다.

초고강도 선단확장PHC말뚝($\Phi 4550$)의 경우 지표면부터 30 m까지는 항타횟수의 차이는 크게 나타나지 않았으나, 30 m이후 항타 횟수가 확연히 작아 시공시간이 절

감되는 효과를 나타내고 있다. 말뚝 선단부에서의 최대 압축응력(CSB; Maximum Compression Stress on Bottom)은 평균 32.2 MPa로써 허용항타응력(66 MPa) 대비 48.7%의 응력이 발생하여, 일반PHC말뚝(Φ500)의 최대압축응력(CSB) 평균이 29.1 MPa로 허용항타응력(48 MPa) 대비 60.6%로 측정되어 응력 측면에서는 여유치가 있음을 알 수 있었다.

그러나 말뚝의 손상정도를 나타내는 건전도지수(BTA)는 평균 74%가 나타났으며, Fig. 5에서 와 같이 직항타시 선단부가 확장되고 지면과의 공극이 발생되어 13 ton 유압해머로 시공했음에도 불구하고 에너지 전달 및 항타응력에서 많이 부족하고, 말뚝 파손의 우려도 있어 직항타공법에는 부적합한 것으로 판단된다.



Fig. 5. UΦ4550 pile construction foreground

3. 결론

본 연구에서는 PHC말뚝의 선단부분을 확장시키고 콘크리트의 강도를 110 MPa로 증가시킨 초고강도 선단 확장PHC말뚝에 대해서 항타공법과 매입공법으로 시공 후 동재하시험을 실시하여 측정된 일반PHC말뚝과의 지지력과 항타 관입성의 차이를 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 항타공법으로 시공한 선단확장PHC말뚝의 주변마찰력은 486 kN으로 일반PHC말뚝 1,385 kN에 비해 899 kN이나 작게 나타났으며, 5일 동안의 Set-up 효과도 106 kN으로 미미하게 나타났다. 또한, 선단지지력도 2,849 kN으로 일반PHC말뚝

대비 약10% 작게 나타났다. 따라서 선단이 확장된 말뚝은 항타공법 적용시 지지력 측면에서 우위를 가질 수 없음을 알 수 있었다.

- (2) 항타공법으로 시공하여 초기 동재하시험으로 측정한 결과 동일 직경의 초고강도PHC말뚝의 허용 지지력은 일반PHC말뚝 대비 152 kN 높은 지지력을 발현했다. 또한 매입공법으로 시공한 경우도 초고강도 PHC말뚝이 일반PHC말뚝에 비해 376 kN 높은 지지력을 보여 시공법에 상관없이 초고강도PHC말뚝이 지지력측면에서 우위에 있음을 알 수 있었다.
- (3) 초고강도PHC말뚝의 항타응력은 허용항타 응력의 60% 이내로 일반PHC말뚝의 80%에 비해 안정적인 범위 이내의 값이 나타나 좀 더 견고한 지반까지 안전한 시공이 가능할 것으로 판단된다.
- (4) 선단확장말뚝의 항타관입성 분석결과 지면과의 공극이 발생되어 에너지 전달 및 항타응력에서 많이 부족하고, 건전도지수(BTA)가 평균 74%로 나타나 말뚝 파손의 우려도 있어 항타공법에는 부적합한 것으로 판단된다.
- (5) 초고강도PHC말뚝의 높아진 강도를 활용하기 위해서는 말뚝의 선단부를 연암정도의 강도를 지닌 지반에 설계하는 것이 말뚝 분수를 크게 절감할 수 있으며, 이에 따른 시공비 절감과 공기단축의 효과도 얻을 수 있을 것이다.

References

- [1] Korea Professional Construction Association Scaffolding & Construction Dismantling Construction Industry Council, Advanced pile construction method study, pp.9-22, Korea Professional Construction Association, 2005.
- [2] D. J. AN, *Structural characteristics of hybrid FRP-concrete*, Ph.D dissertation, Hongik University, pp.1-3, 2012.
- [3] J. S. Kim, *Study on the behavior characteristics of hybrid concrete filled fiber reinforced plastic piles*, Ph.D dissertation, Hongik University, pp.1-4, 2013.
- [4] J. W. Bang, C. K. Park, S. Y. Yang, Y. Y. Kim,

“Flexural Behavior of Large-Diameter Composite PHC pile Using In-Filled Concrete”, *Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, The Korea Institute For Structural Maintenance and Inspection, Seoul, Korea, Vol.20. No.5 pp.109-115, Sep 2016.

DOI: <https://doi.org/10.11112/jksmi.2016.20.5.109>

- [5] KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY, Load test method and commentary on foundation, pp.137-152, Goomibook, 2010.
- [6] KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY, Explanation of Design Criteria for Structures, p.326, Goomibook, 2009.
- [7] KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY, Design and construction of PHC pile, pp.291-293, 2006.

황 의 성(Ui-Seong Hwang)

[정회원]



- 2002년 2월 : 서울시립대학교 토목공학과 (공학학사)
- 2004년 2월 : 서울시립대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 서울시립대학교 토목공학과 (공학박사수료)

<관심분야>
토목, 건축