

# 초고강도 PHC 말뚝의 개발과 적용사례



민기훈

포스코건설  
건축사업본부 부장  
(khmin@poscoenc.com)



박규연

포스코건설  
건축사업본부 부장  
(pk@poscoenc.com)



신준호

포스코건설  
건축사업본부 차장  
(sjh5139@poscoenc.com)



박재현

한국건설기술연구원  
연구위원  
(jaehyeon@kict.re.kr)



황의성

삼표이엔씨  
파일사업본부 과장  
(uiseong@sampyoenc.com)

## 1. 서론

최근 건축 구조물이 초고층화, 대형화 되면서 구조물 기초인 말뚝으로는 대구경 현장 타설 말뚝, 강관 말뚝 등이 적용되는 가운데 PHC 말뚝이 주종을 이루고 있다. PHC 말뚝은 도입된 이래 최근까지 800kg/cm<sup>2</sup> 강도 말뚝이 건설현장에 일률적으로 사용되는 실정이다. 이는 우리나라의 양호한 지지층 지반에서 말뚝 본체 구조지지력 보다 월등하게 높게 발휘되는 지반지지력을 최대한 활용할 수 없어 말뚝의 본체 구조지지력이 말뚝기초의 지지력을 좌우하게 하는 비합리적인 결과를 낳고 있다. 가까운 일본의 사례를 살펴볼 때 기술자들이 각기 다른 현장여건 및 지반조건에 따라 PHC 파일 강도 800~1,050kg/cm<sup>2</sup>,  $\phi$  400~ $\phi$  1,200까지 다양한 강도와 직경의 말뚝을 적용하는 것과는 대조적인 상황이다.

그러나 최근 국내에서도 많은 실험결과를 토대로 초고강도 콘크리트 배합기술을 PHC 파일 제조에 접목하여 강도 1,100kg/cm<sup>2</sup>의 초고강도 PHC 말뚝 (Super Strength PHC Pile, SS PHC 파일)을 개발하였다(그림 1). 개발된 초고강도 PHC 파일은 생산 효율이 기존 제품과 동일하나 가격이 매우 고가인 일본과



그림 1. 개발된 초고강도 PHC 말뚝(110MPa)

달리 생산원가의 증가도 아주 미미한 상태에서, 기존 PHC 파일의 구조내력을 약 40% 끌어올려 파일의 지지력을 30% 이상 증가시킴으로써 지반지지력을 최대한 활용할 수 있게 된데 의미가 크다 하겠다.

현재까지 총 12개 현장에서 기존 PHC 파일 대신 초고강도 PHC 말뚝을 적용하여 원가 및 시공기간을 20~30% 절감시켰으며, 여기에서는 대표적인 2개 현장에 대한 적용사례를 통해 재하시험 자료를 바탕으로 말뚝의 지지력을 분석하고 초고강도 PHC 말뚝의 안정성 및 특성을 설명하고자 한다.

첫째, "익산 OO 아파트 신축공사"는 [선천공 매입말뚝 공법(DRA) : 풍화암지지],  
둘째, "대구 OO 아파트 신축공사"는 [선천공 매입말뚝 공법(DRA) +T4공법 : 연암지지]

## 2.1 익산 OO 아파트 신축공사

### 2.1.1 공사현황 및 지층분포

지하1층~지상 24층 8개동의 규모로, ø 500 초고강도 PHC 말뚝 1,700여 공으로 본당 설계 지지력 1,600kN으로 설계되었으며, 말뚝은 일반 오거와 함께 선천공 매입말뚝 공법인 DRA 공법을 사용하여 풍화암 상단(N값 50/10~50/5)에 지지되었으며 Drop-Hammer를 사용한 경타 공법으로 시공 완료하였다.

본 현장의 지층은 상부로부터 표토층, 풍화토층, 풍화암, 연암의 순서로 분포하고 있으며 이를 요약하면 다음의 표 1과 같다.

### 2.1.2 동재하시험

말뚝 시공시 초기 동재하시험 (E.O.I.D)을 실시하였고, 재동재하 시험(Restrike)은 최소 14일이 경과 후 실시하였다. 초기 동재하시험 (E.O.I.D) 13회 분석결과, 평균 허용지지력은 1,612kN~1,809kN로 나타났으며 이때의 지지층은 N치 50/5 깊이의 풍화암 상부층이었다.

재동재하시험 (Restrike)은 E.O.I.D에서 1,600kN 이하로 측정된 107동에서 실시하였는데 최종 관입량과 시간경과에 따른 침하량 및 지지력 증가현상을 분석한 결과 E.O.I.D - 1,469kN, Restrike - 1,703kN 이 측정, 전체지지력이 16% 증가한 경향을 나타내었으며 설계지지력 또한 만족하였다. CAPWAP 분석결과 선단부에 에너지 전달이 충분했다면 1,703kN 이상의 지지력이 확인되었을 것으로 판단된다.

말뚝의 압축응력은 39.8MPa~46.9MPa으로 초고강도말뚝의 허용항타응력( $f_{ca} = 0.6 \times f_{ck} = 0.6 \times 110.0MPa = 66.0MPa$ ) 이내로 나타났으며, 인장응력은 0.3~4.0으로 초고강도말뚝의 허용인장응력( $0.8 \sqrt{f_{ck}} + f_{pe} = 6.7 MPa$ ) 이내로 측정되었다. 본 말뚝의 건전도(BTA)는 100%로 측정되어 말뚝의 파손, 크랙 등에 안정한 것으로 나타났다. 항타효율은 50%

표 1. 익산 OO 아파트 신축공사 지층 분포

공 번	표토층		풍화토층		풍화암(m)	연암(m)
	심도(m)	N치	심도(m)	N치		
BH-1 (BX)	0.0~2.5 (2.5)	26	2.5~9.6 (7.1)	11~29	9.6~12.4 (2.8)	12.4~
BH-2 (NX)	0.0~3.6 (3.6)	11~20	3.6~9.8 (6.2)	6~18	9.8~13.5 (3.7)	13.5~
BH-3 (BX)	0.0~4.6 (4.6)	7~12	4.6~11.0 (6.4)	10~50 이상	11.0~	-
BH-4 (NX)	0.0~2.5 (2.5)	18	2.5~11.0 (8.5)	10~50 이상	11.0~12.5 (1.5)	12.5~

표 2. 동재하시험 결과

시험 위치	관입 깊이 (m)	Case 분석법 (kN)	CAPWAP분석법 (kN)			안전율 [F.S]	측정 지지력 (kN/본)	설계 지지력 (kN/본)	시험 방법	
			선단	주면	전체					
101동	16(E)	6.0	4,060	3,846	184	4,030	2.5	1,612	1,569	E.O.I.D
	170(E)	9.7	4,292	4,001	204	4,206	2.5	1,682	1,569	E.O.I.D
102동	178(E)	7.3	4,143	3,866	247	4,113	2.5	1,645	1,569	E.O.I.D
	299(E)	7.1	4,656	4,168	355	4,523	2.5	1,809	1,569	E.O.I.D
103동	462(E)	3.5	4,190	3,862	233	4,096	2.5	1,638	1,569	E.O.I.D
	388(E)	6.5	4,126	3,852	233	4,085	2.5	1,634	1,569	E.O.I.D
104동	669(E)	6.5	4,058	3,852	216	4,068	2.5	1,627	1,569	E.O.I.D
	746(E)	9.0	4,332	3,965	306	4,271	2.5	1,708	1,569	E.O.I.D
	860(E)	7.9	4,140	3,775	307	4,082	2.5	1,633	1,569	E.O.I.D
106동	1065(E)	7.7	4,170	4,037	87	4,124	2.5	1,649	1,569	E.O.I.D
	1258(E)	8.0	4,093	3,840	233	4,073	2.5	1,629	1,569	E.O.I.D
107동	0(E)	7.0	3,646	3,444	230	3,674	2.5	1,469	1,569	E.O.I.D
	0(RE)	6.0	4,309	3,015	1243	4,258	2.5	1,703	1,569	Restrike
	1466(E)	7.0	4,575	4,112	315	4,428	2.5	1,771	1,569	E.O.I.D
108동	1688(E)	5	3,991	3,710	274	3,985	2.5	1,594	1,569	E.O.I.D

표 3. 정재하시험 내용 및 현황

시험위치	분석방법		항복하중 (kN/본)	안전율	허용하중 (kN/본)	비고
101동 177-1	항복하중기준	P-S	3,200이상	2	1,600이상	
		logP-logS	3,200이상	2	1,600이상	
		S-Logt	3,200이상	2	1,600이상	
	전침하량기준	20~50.8mm	전침하량	14.37mm		기준이내
	순침하량기준	12.7mm	순침하량	3.63mm		기준이내
최종분석결과허용하중			1,600이상			

내외로 용량이 큰 해머로 높은 타격에너지를 가한다면 아래에서 나타난 지지력을 상회하는 값을 얻을 수 있을 것으로 판단되었다.

### 2.1.3 정재하시험

ø 500말뚝을 관입깊이 11m의 영구 말뚝으로 시험하였으며, 시험하중은 설계하중 1,600kN의 2배인 3,200kN을 재하하여 지지력을 확인하였다. 전체침하

량은 14.37mm으로 전체침하량 기준치인 20~50.8mm의 허용치 이내에 나타났으며, 순침하량은 설계하중 50% 단계인 800kN에서는 0.77mm, 설계하중 100% 단계인 1,600kN에서는 1.45mm, 설계하중 150% 단계인 2,400kN에서는 2.88mm, 설계하중 200% 단계인 3,200kN에서는 3.63mm으로 순침하량기준 12.7mm에 도달하지 않아 본 말뚝의 허용지지력은 안전율(2.0)을 적용하여 1,600kN 이상으로 판정되었다.

## 2.2 대구 OO 아파트 신축공사

### 2.2.1 공사현황 및 지층분포

지하1층~지상 18층 11개동의 규모로서, ø500 초고강도 PHC 말뚝을 적용하여 설계하중 1,600kN으로 설계되었으며, 말뚝의 시공은 T4 오거와 함께 선천공 매입말뚝 공법인 DRA 공법을 사용하여 연암 상단에 지지되었으며 Drop-Hammer를 사용한 경타 공법으로 시공 완료하였다.

본 현장의 지층은 상부로부터 매립층, 점성토, 사질토, 풍화암, 연암의 순서로 분포하고 있으며, 이를 요약하면 다음의 표 4와 같다.

### 2.2.2 동재하시험

초기 동재하시험(E.O.I.D)에서 설계지지력을 상회하여 Restrike는 실시하지 않았으며, 초기 동

재하시험(E.O.I.D) 13회 분석결과 허용지지력 1,625N~1,851kN로 나타났다.

말뚝에 발생하는 경타시의 압축응력은 39.9~48.0 MPa으로 초고강도 말뚝의 허용 항타응력( $f_{ca} = 0.6 \times f_{ck} = 0.6 \times 110.0\text{MPa} = 66.0\text{MPa}$ ) 이내로 나타났으며, 인장응력은 0.1~4.5MPa로 초고강도말뚝의 허용 인장응력( $0.8 \sqrt{f_{ck}} + f_{pe} = 6.7\text{MPa}$ ) 이내로 측정되었다. 본 말뚝의 건전도(BTA)는 100%로 측정되어 말뚝의 파손, 크랙 등에 안정한 것으로 나타났다.

### 2.2.3 정재하시험

ø500말뚝을 관입깊이 6~10m의 사용말뚝으로 시험하였으며, 시험하중은 설계하중 1,600kN의 2배인 3,200kN을 재하하여 지지력을 확인하였다. 잔류침하량은 0.95~3.57mm, 전침하량은 2.84~8.12mm로 허용치 이내에 나타났으며, 항복하중으로 결정하는

표 4. 대구 OO 아파트 신축공사 지층 분포

지층구분	두께(m)	구 성 상 태	공학적 특성
매립층	0.0~8.5(2.4)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 매립층 (점토, 실트, 모래, 자갈)</li> <li>• 전담토 (점토, 실트, 모래)</li> <li>• 점성토 두께(0.5~4.1m, 평균 2.2m)</li> <li>• 사질토 두께(0.5~8.5m, 평균 2.0m)</li> </ul>	• N값 : 0/30~50/2
퇴적층(점성토)	0.0~7.4(3.7)	• 실트질점토, 점토질실트, 자갈질점토	• N값 : 0/30~10/30
퇴적층(사질토)	0.5~7.6(3.9)	• 실트질모래, 모래질자갈	• N값 : 0/30~50/1
풍 화 암	0.0~2.9(0.8)	• 실트질모래 상태 또는 암편상	• N값 : 41/30~50/4
연 암	-	• 세일	• TCR/RQD : 25~100/0~96

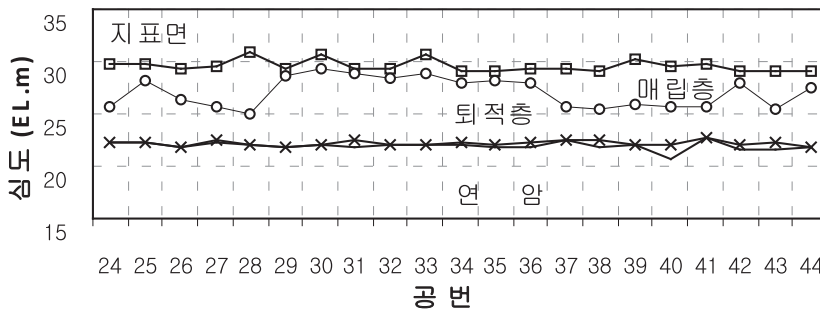


표 5. 동재하시험 결과

시험 위치	관입 깊이 (m)	Case 분석법 (kN)	CAPWAP분석법 (kN)			안전율 [F.S]	측정 지지력 (kN/본)	설계 지지력 (kN/본)	시험 방법
			선단	주면	전체				
106동 #98	5.0	4,080	3,949	114	4,063	2.5	1625.2	1,600	E.O.I.D
104동 #67	4.4	4,220	4,061	141	4,202	2.5	1680.8	1,600	E.O.I.D
102동 #68	4.8	4,280	4,150	129	4,279	2.5	1711.6	1,600	E.O.I.D
103동 #90	4.2	4,460	4,325	123	4,448	2.5	1779.2	1,600	E.O.I.D
107동 #116	4.5	4,290	4,208	56	4,264	2.5	1705.6	1,600	E.O.I.D
108동 #37	4.6	4,300	4,171	85	4,256	2.5	1702.4	1,600	E.O.I.D
109동#66	4.5	4,390	4,271	105	4,376	2.5	1750.4	1,600	E.O.I.D

표 6. 정재하시험 내용 및 현황

구분	잔류 침하량 (mm)	최종 침하량 (mm)	항복하중에 의한 분석방법 (kN/본)	안전율 [F.S]	허용하중 (kN/본)
102동 161	0.95	2.84	3,200이상	2	1,600
101동 070	3.57	8.12	3,200이상	2	1,600
105동 158	2.34	6.15	3,200이상	2	1,600

보수적인 방법으로 분석하여 안전율(FS=2)을 고려한 허용하중은 1,600kN이상으로 판정할 수 있다.

### 3. 결론

초고강도 PHC 말뚝이 적용된 대표적인 2개 현장은 일반 오거를 사용한 선천공 매입말뚝 공법인 DRA 공법과 T4해머를 사용한 선천공 매입말뚝공법인인 DRA로 시공되었으며 지지층은 각각 풍화암과 연암에 지지되었다. 이상의 초고강도 PHC 말뚝 적용사례로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 시공된 파일에 대한 동/정재하시험 결과, 허용 설계지지력(1,600kN)을 만족했으며, 재료의 장기 허용 축방향 하중(Ø500 : 2,980kN)보다 작아 안전함을 알 수 있었다. 압축응력을 분석해 보면 말뚝의 항타시 최대 허용 압축응력인 66MPa보다 작은 응력이 측정되어 항타응력에 충분한 여유가 있음을 알 수 있다.

2) 지금까지 초고강도 PHC 말뚝이 적용된 12여개의 현장 사례로 볼 때, 초고강도 PHC 말뚝은 매입말뚝 공법 아니라 직항타 공법으로 시공할 때에도 시공성, 재료 건전성, 지지력, 공기단축, 경제성 등에서 기존의 PHC 말뚝보다 우수한 성능을 보여주는 것으로 나타났다.

3) 따라서, 초고강도 PHC 말뚝을 활용한다면 기존 PHC 파일 공법 대비 원가와 공기 측면에서 약 20~30%의 절감 효과를 거둘 수 있을 것으로 판단되며, 국가적으로도 자원의 효율적 이용 측면에서 매우 바람직할 것으로 판단된다.