

PHC 파일의 장대말뚝으로 적용한 시공공법 사례



허갑수
극동건설(주) 선임연구원

백계문 : 태안특수건설(주) 이사
서규석 : 우창건설(주) 대표이사
이용한 : 극동건설(주) 주임연구원
허갑수 : 극동건설(주) 선임연구원
김맹두 : 극동건설(주) 기술연구소장
백은학 : 극동건설(주) 상무

1. 개요

최근 국토의 효율적인 이용 측면에서 해안 매립을 통한 부지개발이 두드러지게 이루어지고 있으나, 서해안 및 남해안의 지층은 두꺼운 육성(하성) 내지 해성 점토가 대부분 연약 내지 초연약 상태로 분포하고 있어 건축 및 토목 구조물 시공에 있어서 연약지반 처리 문제로 시공성, 경제성 등에서 어려움을 겪고 있다.

지금까지 대부분의 대심도 연약지반에서 건축 및 토목 구조물 기초 시공 시에는 경제성보다는 안정성이 우선되어 압축 및 휨 강도에서 유리한 강관 말뚝이 주를 이루었으며, 최근에는 현장타설 말뚝 시공도 설계법의 변경 및 굴착장비의 발전으로 점차 증가 추세에 있다. 그러나 상기의 말뚝종류는 말뚝심도가 깊어짐에 따라 비경제적일 수밖에 없으므로, 다음 소개되는 현장에서는 상기의 말뚝종류보다 상대적으로 저가인 PHC 말뚝에 대하여 시험시공을 통한 건축구조물 기초로 채택하여 시공하였으며, 그에 따른 시공 방법 및 품질 관리를 소개하고자 한다.

2. 현장 현황

2.1 현장 개요

공사명	부산명지 극동 스타클래스 아파트 신축공사
위치	부산시 강서구 명지동 3233번지 명지주거단지내 B2블록
시공회사	극동건설주식회사

설계회사	(주)동일건축	
감리회사	(주)동일건축	
공사기간	계약일 : 2005. 6. 29 준공일 : 2008. 11. 30(착공신고일 : 2006. 2. 21)	
공사 범위	대지면적	67,160.10m ² (20,315.83평)
	연면적	187,292.33m ² (56,655.67평) / 건폐율 : 18.52% / 용적율 : 219.34%
	건축면적	12,440.44m ² (3,763.21평)
	공사규모	지하1층, 지상13~15층 아파트 21동, 주차장, 주민공동시설 등 기타 부대시설 11동

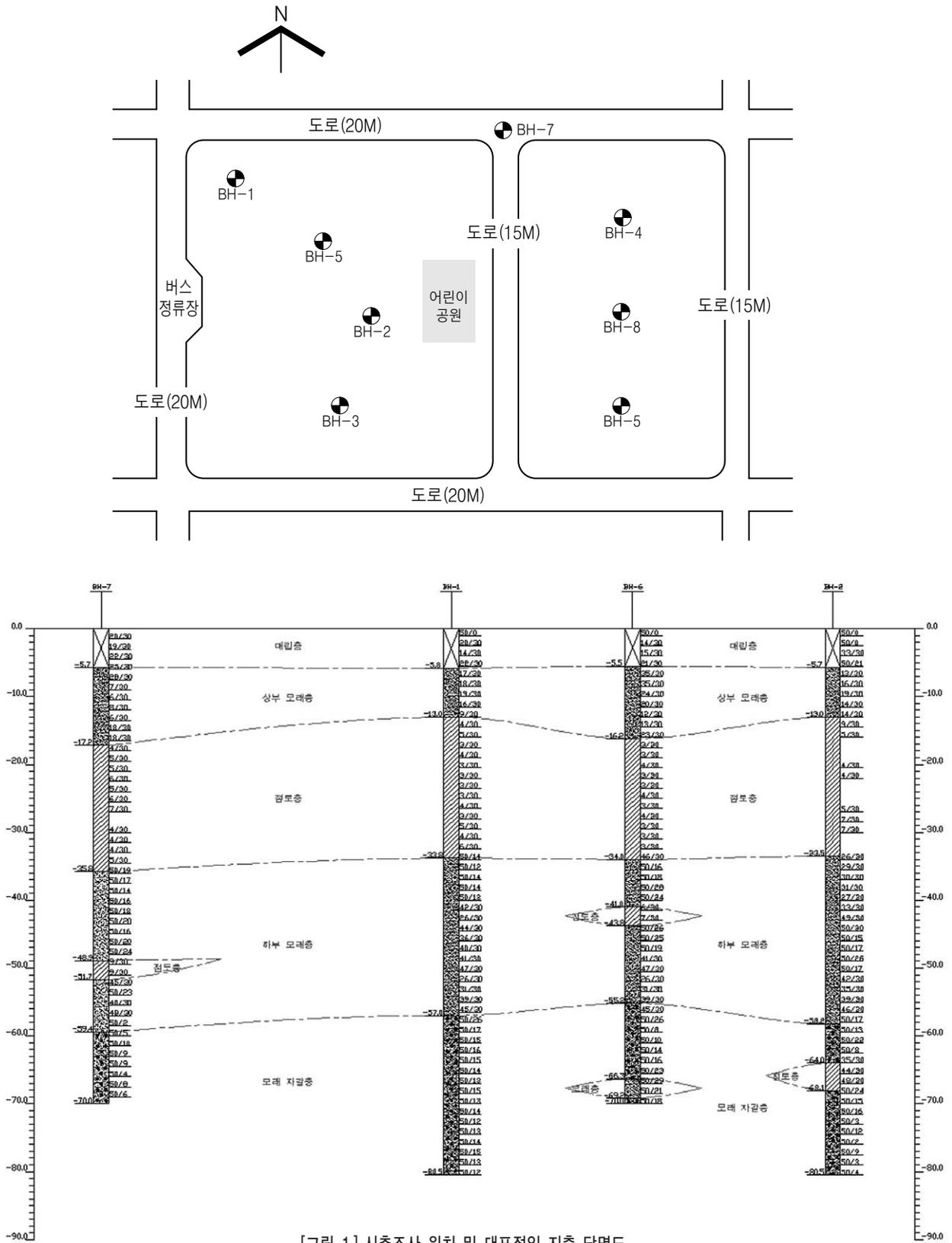
2.2 현장 조사

건축물 부지에 대한 지층 분포특성을 파악하기 위하여 시추조사를 실시하였으며, 점토층의 압밀 및 강도 특성을 파악하기 위하여 현장 시험 및 실내시험을 실시하였다.

1) 시추조사 결과

시추조사 결과, 상부로는 단지 조성 시 매립한 점토, 모래, 자갈의 혼합층이 분포하고 있으며 그 하부로 상부 모래층, 점토층, 하부 모래층, 모래자갈층의 순으로 분포하고 있다. 대표적인 지층 단면은 그림 1과 같다.

각 지층은 그림 1에서와 같이 상부 매립층에서는 층후 5.5~5.8m, N=14/30~50/21 blows/cm로 중간~매우 조밀(Medium~Very dense)한 상대밀도(Relative density), 상부 모래



[그림 1] 시추조사 위치 및 대표적인 지층 단면도

층에서는 층후 7.2~11.5m, N=6/30~35/30blows/cm로 느슨~조밀(Loose~Dense)한 상대밀도, 점토층에서는 층후

17.8~20.8m, N=3/30~9/30blows/cm로 연약~견고 (Soft~Stiff)한 연경도(Consistency), 하부 모래층에서는 층

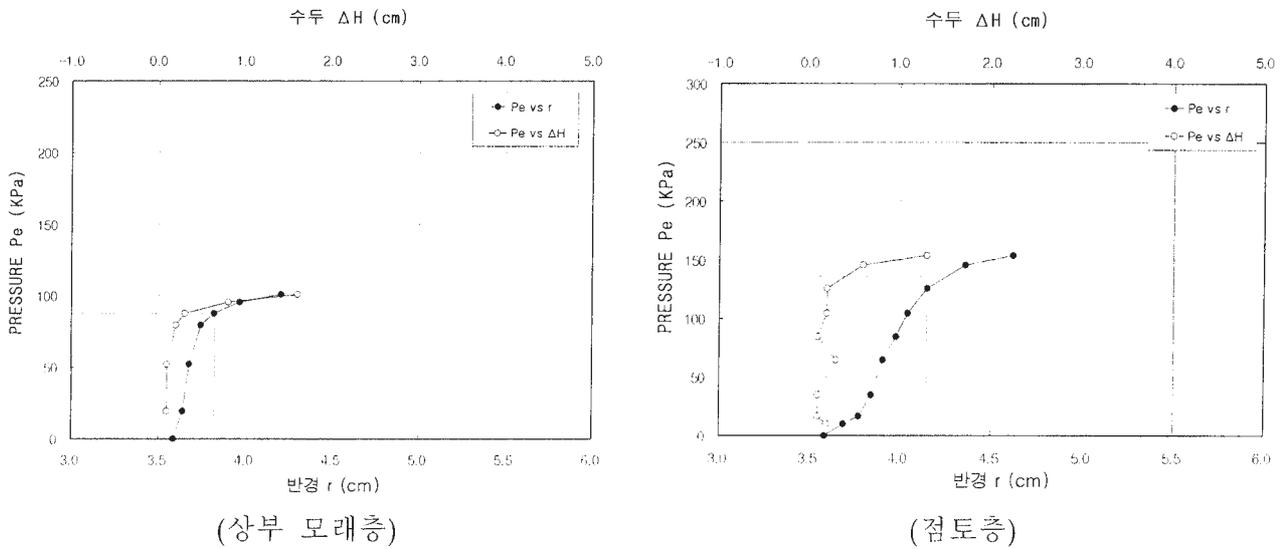
후 20.8~24.7m, N=26/30~50/2blows/cm로 보통~매우 조밀한 상대밀도, 모래 자갈층에서는 층후 10.6~23.5m, N=44/30~50/2blows/cm로 조밀~매우 조밀한 상대밀도를 보이고 있으며, 하부 모래층 사이에 N=6/30~9/30blows/cm

로 보통~견고(Medium~stiff)한 연경도를 보이는 점토층이 2.8m, 모래 자갈층 사이에 N=35/30~48/30blows/cm로 고결(Hard)된 연경도를 보이는 점토층이 4.1m의 층후로 각각 협재되어 있다.

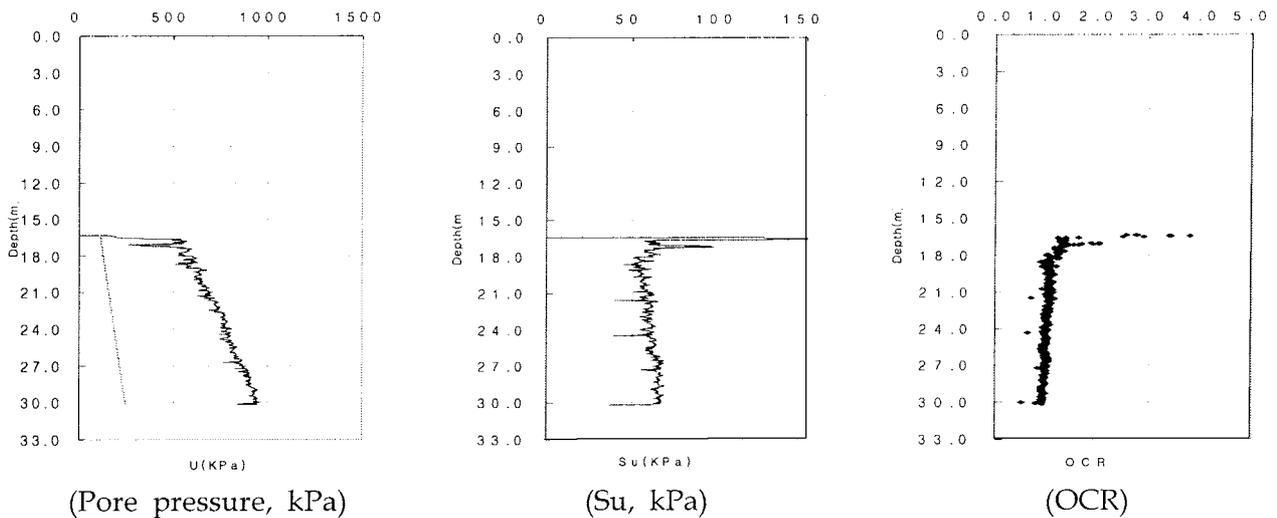
[표 1] 간극수압 소산시험 결과

공번	심도 (GL.-m)	지하수위 (GL(-))	초기간극 수압(kPa)	최종간극 수압(kPa)	정수압 (kPa)	잔류간극 수압(kPa)	수평방향 압밀계수 ($\times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$)
BH-2	18.03	5.0	586	325	119	206	1.72
	27.08	5.0	778	434	202	232	1.70

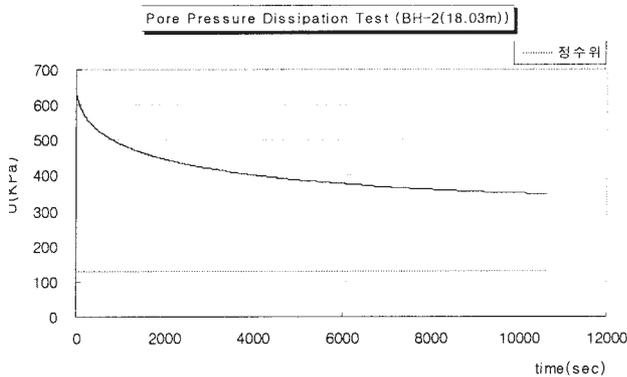
[그림 2] 공내재하시험 결과 예(BH-2)



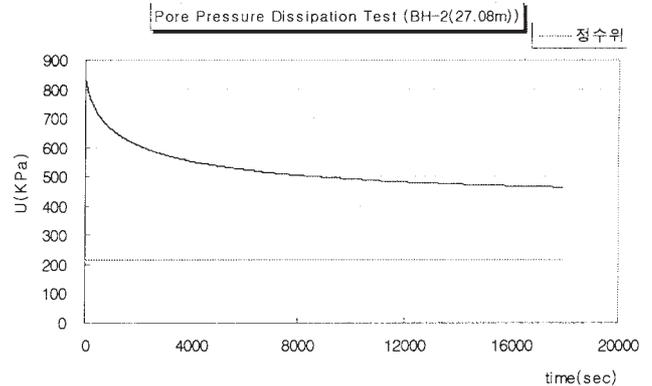
[그림 3] 피에조콘 관입시험 결과 예(BH-2)



[그림 4] 간극수압 소산시험 결과 예(BH-2)



(시험심도 ; GL-18.03m)



(시험심도 ; GL-27.08m)

2) 현장시험 및 실내시험 결과

지반변형계수를 측정하기 위해 실시한 공내재하시험 결과, 상부 모래층에서 1,514.1~1,823kPa, 점토층에서 978.7~1,390.6kPa으로 나타났으며(그림 2 참조), 피에조콘 관입시험(CPT) 결과 측정된 과잉간극수압(Pore pressure)은 점토층 시점구간부터 정수압에 비해 2~3배의 큰 과잉간극수압 상태를 보이고 있는데 이는 상부 매립에 의해 발생한 과잉간극수압이 현재까지도 완전히 소산되지 않음을 나타내고 있으며 하부 모래층에서도 과잉간극수압의 소산이 원활히 이루어지지 않는 것을 나타내고 있다. 비배수전단강도(Su)는 39.2~78.5kPa정도, 점토의 이력을 판단할 수 있는 과압밀비(OCR)는 1.0 이하로 정규압밀 상태 및 미압밀 상태(압밀 진행중)임을 알 수 있다(그림 3 참조)

현장 압밀특성을 파악하기 위하여 간극수압 소산시험을 실시하였다. 소산시험 결과는 Asaoka방법에 의해 평형간극수압을 추정하여 압밀도를 구한 후 압밀도 50% 일때의 수평방향 압밀계수(Ch)를 구하였으며, 잔류간극수압은 144~232kPa의 범위로 심도에 따라 증가하는 경향을 보이며 수평방향 압밀계수는 $1.70 \sim 2.47 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 의 범위로 나타났다.

베인시험에 의한 비배수전단강도는 24.5~68.6KPa 범위이며, 예민비는 1.5~4.0 범위로 보통 정도로 나타났다.

현장조사 결과, 상부에 위치하는 매립층 및 연약한 점토층이 비교적 두껍게 분포한 관계로 깊은 기초인 말뚝기초의 검토가 불가피하였다. 말뚝기초로 검토 시에는 대심도에 따른 연약한 점토층의 부주면마찰력 저감대책 및 허용 항타우력에 대한 검토가 필요하였으며, 말뚝의 지지층의 경우 정(正)주면마찰력의 크기 및 말뚝길이에 따른 세장비를 고려하여 하부 모래층의 하단부로 결정하였다.

3. 말뚝기초의 설계 및 시험시공

3.1 말뚝기초의 설계

말뚝재료는 서론에서도 언급한 바와 같이 강관말뚝 보다는 경제성에서 매우 유리한 PHC 말뚝을 선정하였다. 말뚝기초의 설계는 말뚝재료의 허용압축하중, 지반의 지지력 및 침하량, 부주면마찰력 등을 고려하여 검토하였으며, 시험시공을 통하여 다음과 같이 결정하였다.

말뚝 재료	PHC $\phi 500\text{mm}(t=80\text{mm})$, A종
작용 하중	$P_n(\text{수직력}) \approx 896.7 \sim 996.4\text{kN} / P_n(\text{수평력}) \approx 33.3\text{kN}$
중립점	BL. -23.0m(현장시험 및 실내시험 결과로 산정)
부주면마찰력	1,020.3kN

3.2 말뚝기초의 시험시공

3.2.1 공법 선정 및 시공

1) 시공장비

부지내에 분포하는 지층의 여건 즉, 두꺼운 점토층(부주면마찰력 저감대책) 및 예상되는 지지층 상부로 분포하는 하부 모래층의 강도(타입 불가능) 등을 감안 시 천공심도는 약 45.0m로 예상되었으며, 상기의 조건을 만족하는 대형 천공장비로 일본차량(日本車輛)제의 DH808-170M 모델(Model)을 사용하였다. DH808-170M 모델의 사양은 다음 표 2 및 표 3과 같다.

[표 2] Working capacity(DH 808-170M, M110D)

해머(Hammer)			어스오거(Earth auger)				리더(Leader)		말뚝(Pile)		연직 주행안정성 (말뚝 포함)		전체주행 무게(kN)	평균 접지압 (kPa)
분류	무게(kN)	Cap 무게(kN)	Auger drive		스크류(Screw)		길이 (m)	무게 (kN)	길이 (m)	무게 (kN)	전/후	측		
			분류	무게(kN)	길이(m)	무게(kN)								
NH-150B	333.7	44.8	-	-	-	-	30	244.1	20	99.6	5.1	12.0	1629.1	158.8
			MAC-240-3	119.5	32	194.2	36	276.9	-	-	7.1	11.9	1665.9	159.8
			D-240HP SMW	156.4	28	191.3	33	261.0	26	99.6	5.6	12.2	1649.0	160.8
			SMD-240HP	155.4	21	155.4	27	229.1	18	99.6	5.6	14.6	1687.9	164.7
NH-100	224.1	34.8	D-150HP	156.4	21	120.5	27	229.1	17	99.6	5.1	11.1	1782.5	174.5

- 주의 : ① 상기 표는 NIPPON SHARYO 표준사양을 나타낸 것이며, 특수공법의 경우에는 상담이 필요하다.
 ② 후론트 잭(front jacks)을 사용 시에는 리더(leader)자립은 리더의 길이가 24m까지 가능하며, 이러한 상황에서 리더의 길이의 경우에는 크레인(crane)이 보조를 하여야 한다.
 ③ 말뚝 폭의 로프(ropes)는 $\phi 20$ 의 1본수당 49.8kN, 2본수에 99.6kN까지 말뚝 폭 이상 가능하다(단, 기타 로프의 직경을 사용 시에는 3, 4본에 대해서는 상담을 하여야 한다).
 ④ 오거(auger)의 폭 로프는 안전율 6 이상이 되도록 한다(예 : $\phi 20$ 로프-WRC 6×Fi(29)C종-의 12본수에는 해머, 오거에서 597.8kN이 최대이다).
 ⑤ 리더의 가이드 파이프(guide pipe)는 $\phi 101.6 \times 600$ mm 피치(pitch)이다.
 ⑥ SMD 공법의 작업조건은 스크류관의 상단은 스크류를, 또한 하단은 게이지 링크(gage link)를 표시한다.
 ⑦ 허용주행 총중량은 최대 1,793.5kN 이다.
 ⑧ 허용오거 인발하중은 오거 단독작업 시 최대 747.3kN(단, 리더 길이 30m, 오거 굴착중심에서 가이드 파이프 중심까지 100mm에 오거와 관계된 전면기계부 속중량, 토사, 인발저항 등을 포함)이다. 단, 리더 길이는 30m를 초과할 경우와 오거 굴착 중심에서 가이드 파이프 중심까지 1000mm를 초과할 경우, 해머와 오거 병행작업의 경우에는 허용인발하중이 작아야 한다. 또한 오거인발하중이 597.8kN을 초과할 경우에는 기계보협이 필요하며, 필히 후론트 잭의 제어하에 사용한다.

[표 3] DH 808-170M의 사양(Specifications)

주요 치수	전장(운송시 최대)		3 3 0 0 mm	작업 속도	주권, 보권	저속	34m/min	
	Crawler 폭		4 9 6 0 mm		Third drum 권상속도	고속	67m/min	
	Crawler 중심거리		4 0 0 0 mm		주권, 보권	저속	34m/min	
	Crawler shoe 폭		9 6 0 mm		Third drum 권하속도	고속	34m/min	
	Crawler 전장		6 3 1 5 mm		Fourth drum 권상, 권하속도		41m/min	
	Tumblers 중심거리		5 2 4 5 mm		Leader drum 권상, 권하속도		53m/min	
	최저 지상높이		4 6 0 mm		선회속도		2.0rpm	
	Cab 폭		3 2 6 1 mm		주행속도		0.64/1.1km/Hr	
	Cab 높이		3 5 4 1 mm	등판능력(Gradeability)		30%		
	Gantry 높이		작업시	8 6 9 6 mm	중량	기체중량		612.7kN
			운송시	3 1 6 6 mm		Counter 중량		215.7kN
	후단 회전반경		Gantry 수송상태			전장비중량(주행한계)		1,765.1kN
작업시			접지면적		107894cm ²			
후단 지상높이		1 3 0 0 mm		기 관	기관명칭		日野EP100T형(디젤)	
Boom foot pin 거리		1 3 5 0 mm			정격출력		200PS/2000rpm	
Boom foot pin 지상높이		2 2 2 0 mm		연료탱크		250l		

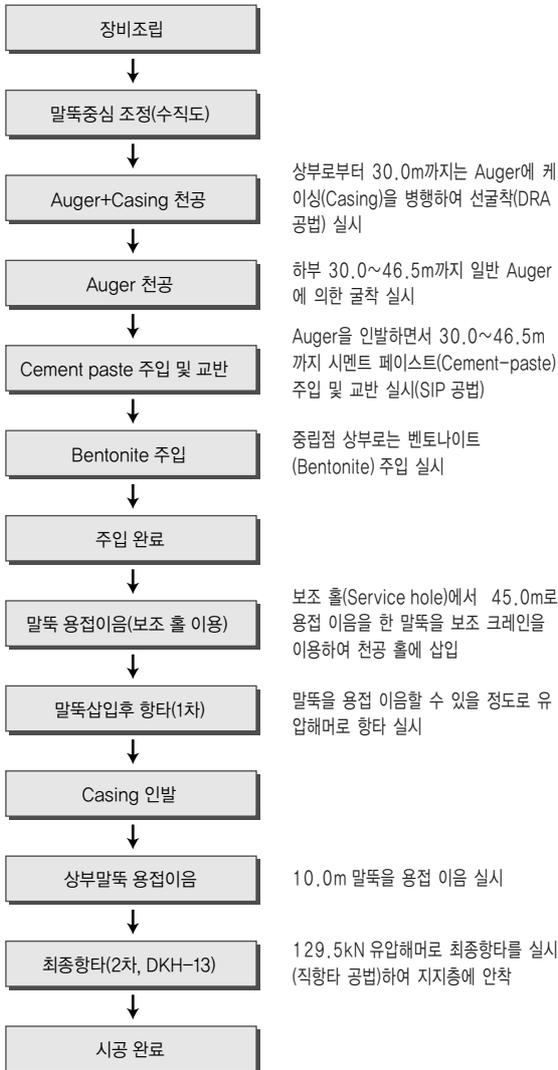
2) 시공방법

말뚝기초의 공법 선정은 부지 내에 분포하는 연약한 점토층의 부주면마찰력 저감대책, 주변환경의 영향 및 대심도에 따른 용접이음, 말

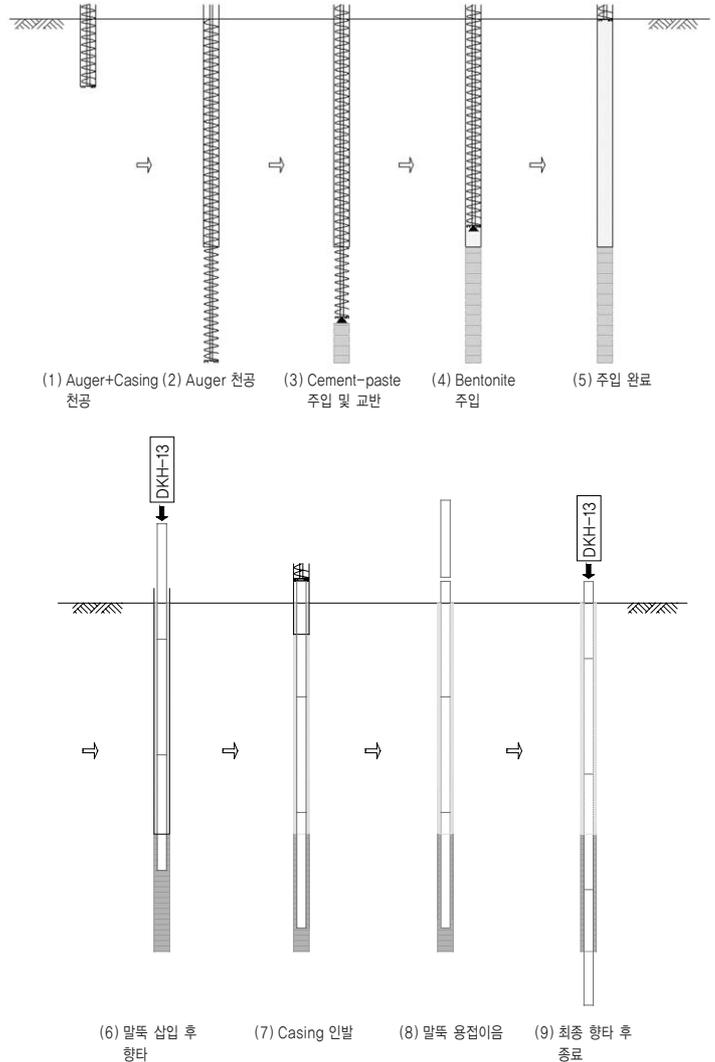
뚝삽입, 최종항타 등을 고려하여 3가지 공법을 조합한 DRA 공법 + SIP 공법 + 직항타 공법으로 선정하였다.

말뚝기초 공법의 순서는 그림 5(그림 6~7 참조)와 같다.

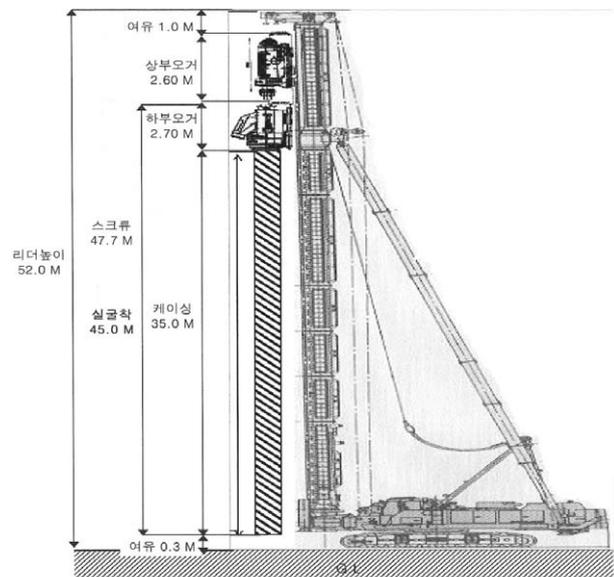
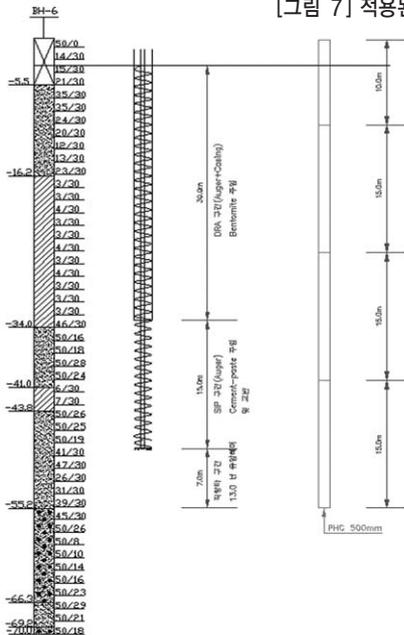
[그림 5] 말뚝기초 공법의 순서(시공 흐름도)



[그림 6] DRA 공법+SIP 공법+직항타 공법의 순서도



[그림 7] 적용된 공법 및 사용장비(DH-808)



3) 벤토나이트 및 시멘트 배합비

부주면마찰력 구간의 물-벤토나이트 배합비는 1m³당 물 1000l에 벤토나이트는 50kg으로 1:0.05의 배합비로 실시하였으며, 정주면마찰력 구간의 물-시멘트 배합비는 1m³당 물 730l에 시멘트는 880kg으로 1:1.2의 배합비(W/C=83.0%)로 실시하였다.

[그림 8] DH-808 말뚝시공 전경



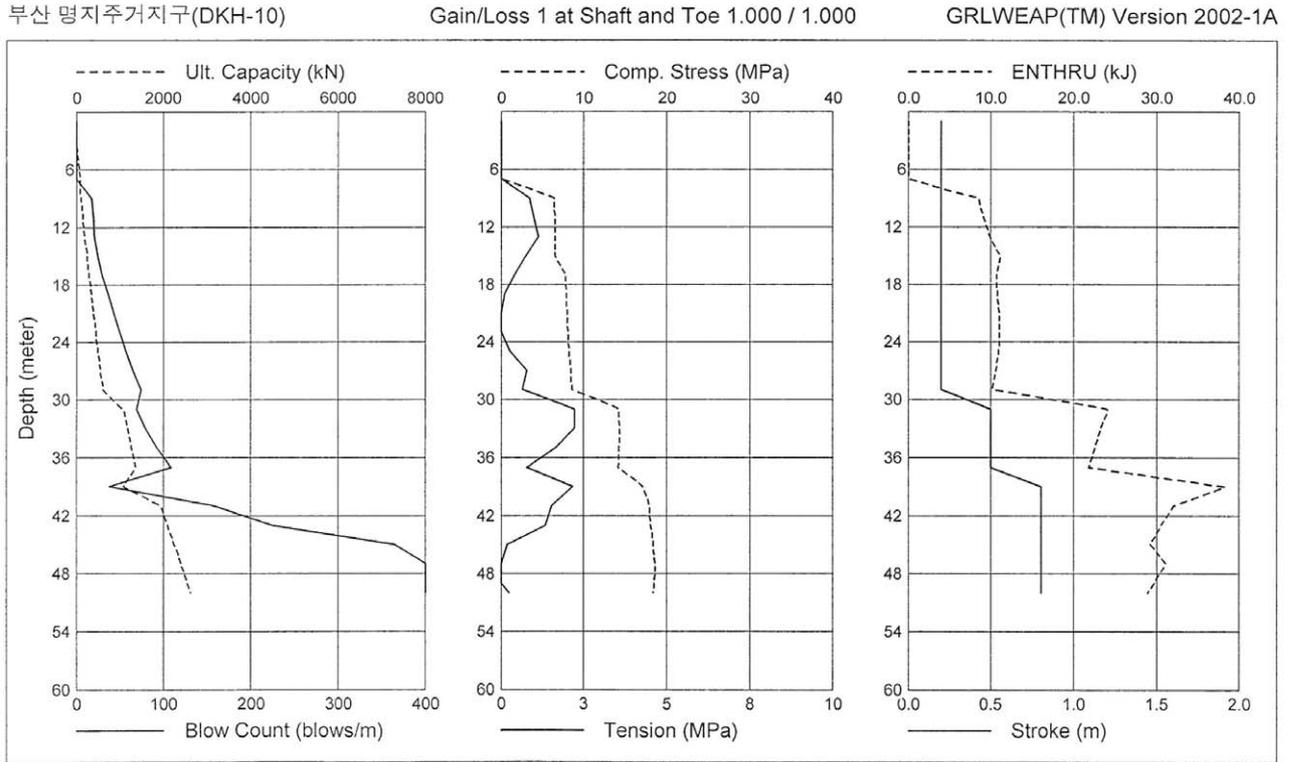
4) 해머의 선정

최종항타에 사용되는 해머의 선정은 말뚝의 총 중량이 말뚝길이 최대 55.0m 기준 시에 150.15kN/본(단위중량 : 2.73kN/m)으로 장대말뚝이므로 시공 관입성 및 항타 응력(압축응력, 인장응력) 등을 고려하여 램(Ram) 중량이 99.6kN 및 129.5kN(동광중공업, DKH)을 시공 전에 GRLWEAP 분석, 시험시공 시에는 동재하시험기(Pile Driving Analyzer)를 이용하여 항타시공 관입성을 비교 분석하였다.

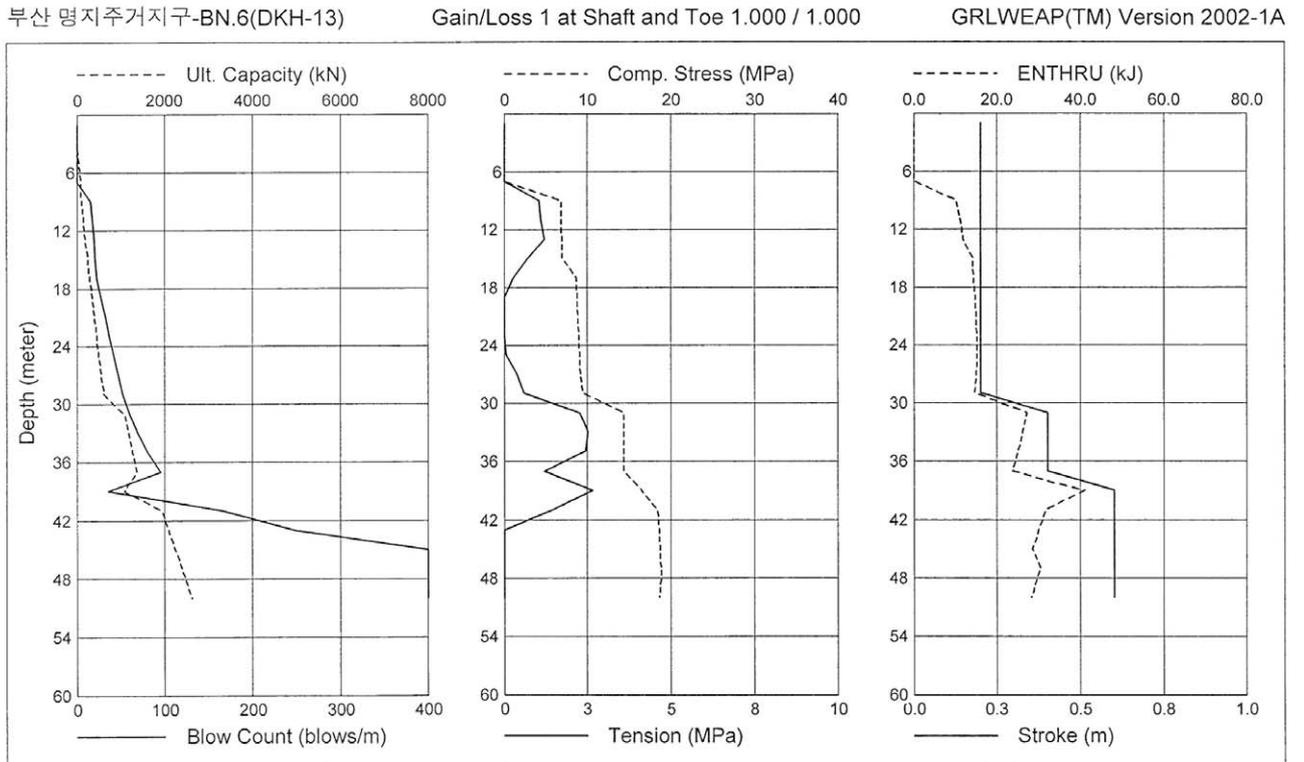
[표 5] 유압해머의 제원

Ram 중량(kN)	Hammer		Stroke(mm)		Drive Cap		제조사
	길이(mm)	중량(kN)	Max	Min	직경(mm)	중량(kN)	
99.6(DKH-10)	5860	152.4	1200	200	840	13	동광중공업
129.5(DKH-13)	6320	199.2	1200	200	840	13	

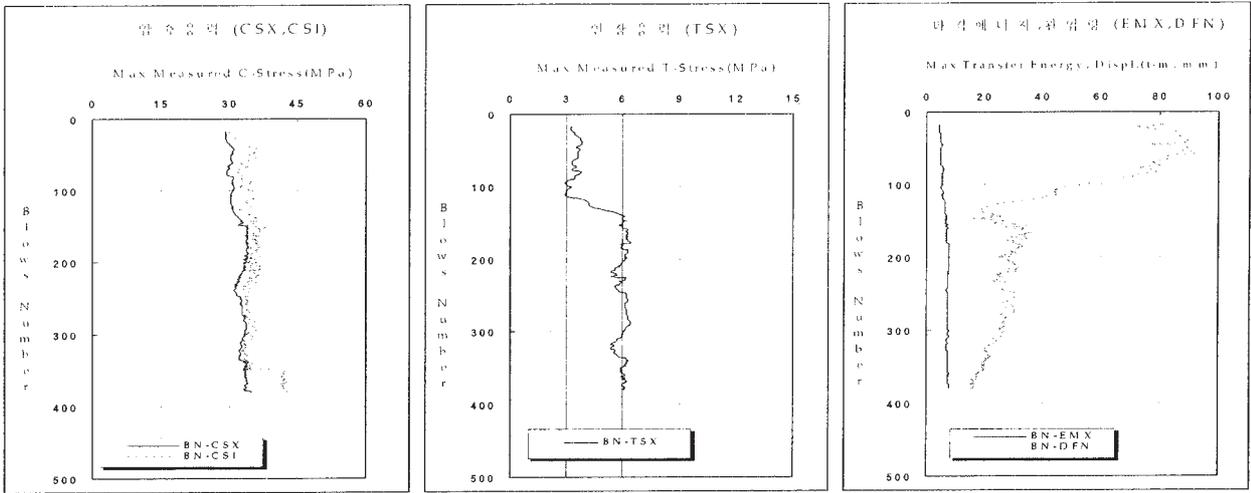
[그림 9-1] GRLWEAP 분석결과(Driveability, DKH-10)



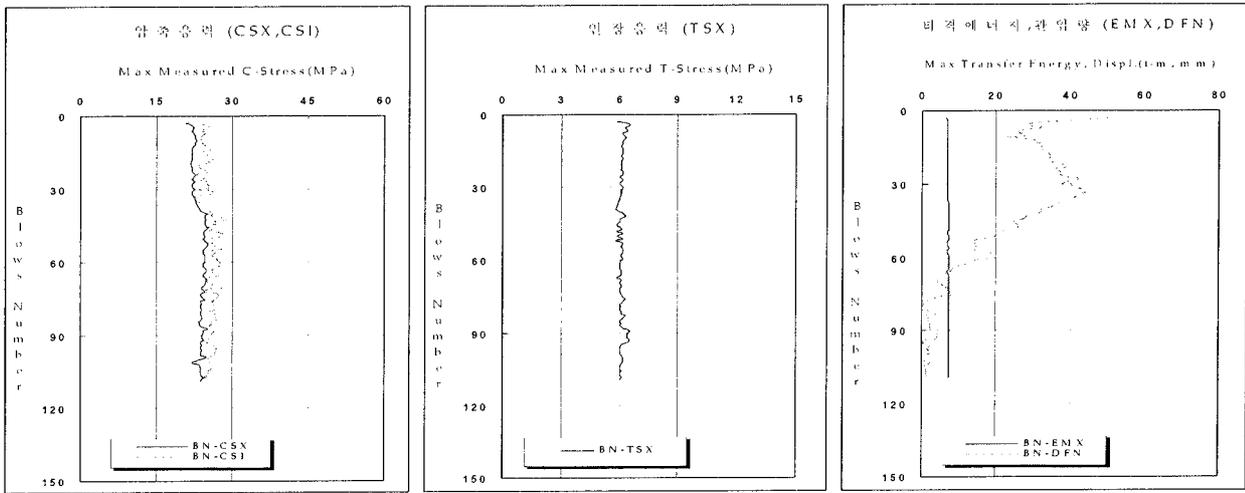
[그림 9-2] GRLWEAP 분석결과(Driveability, DKH-13)



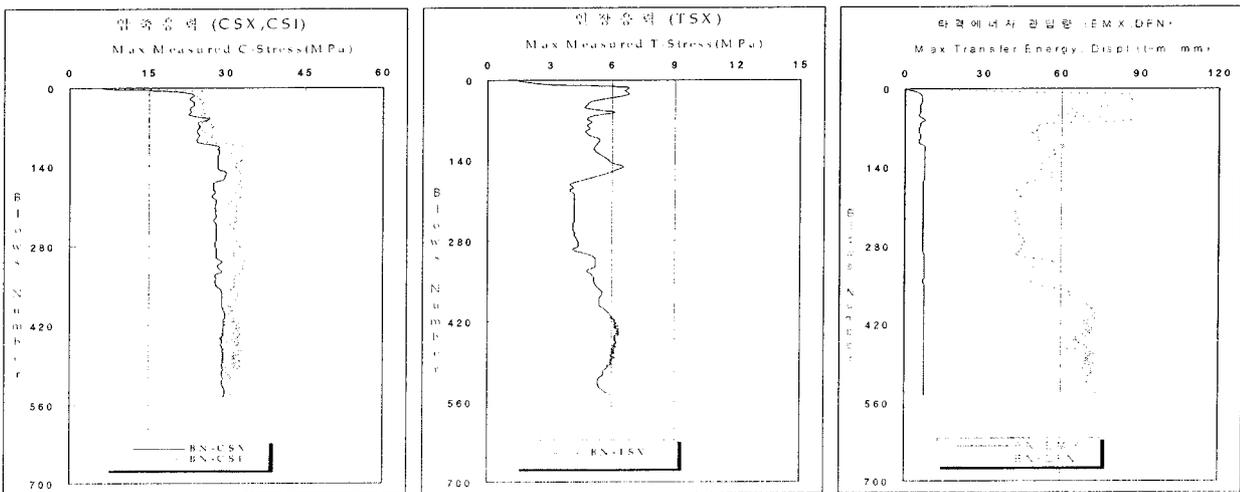
[그림 10] 동재하시험 분석결과(Pdplot, No.1, DKH-10)



[그림 11] 동재하시험 분석결과(Pdplot, No.2, DKH-10)



[그림 12] 동재하시험 분석결과(Pdplot, No.3, DKH-13)



[그림 13] 동재하시험 분석결과(Pdplot, No.4, DKH-13)

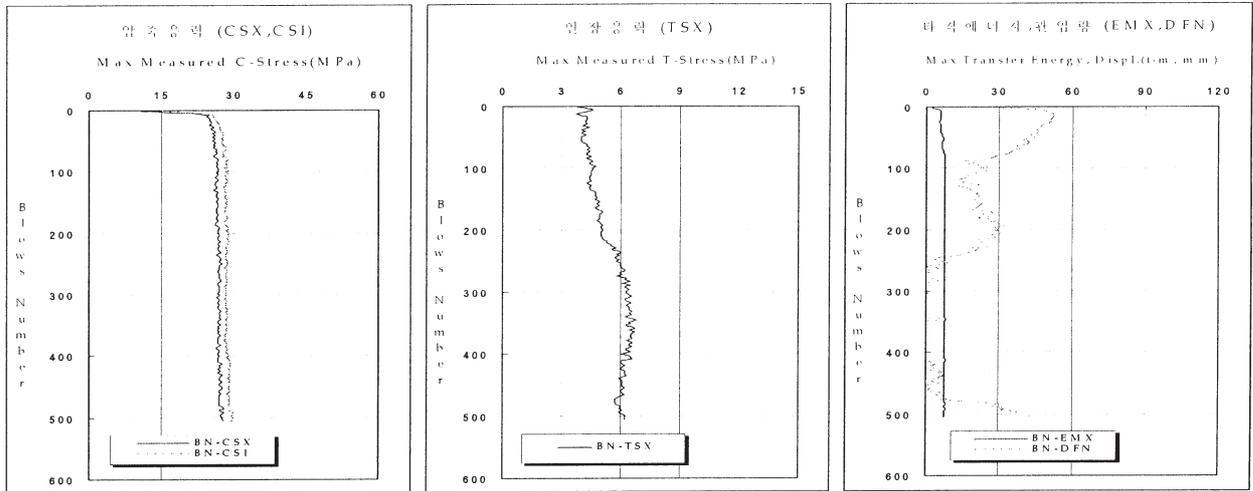


그림 9~13에서와 같이 타격에너지가 거의 동일한 조건 즉, 99.6kN × 0.8m = 79.7kN-m (해머효율=92.5%) 및 129.5tonf × 0.6m = 77.7kN-m (해머효율=95%)에서 비교하였다.

GRLWEAP 분석결과(Driveability)에서는 모두 허용 항타응력 이내에 만족하고 있으나, 타당 관입성에서는 램 중량 99.6kN 인장응력에서는 램 중량 129.5kN이 유리한 것으로 나타났다.

시험시공 시 실시한 동재하시험 결과(Pdplot)에서는 램 중량 99.6kN의 경우 낙하고 0.8m에서 평균 인장응력은 6.02~6.10MPa 평균 해머효율은 89.9~91.9%로 나타난 반면에 램 중량 127.5kN의 경우 낙하고 0.6m에서 평균 인장응력은 5.57~5.65MPa 평균 해머효율은 97.6~98.7%로 나타났다.

말뚝내 발생되는 항타응력 중에서 대심도 말뚝에 문제되는 인장응력은 램 중량 129.5kN이 매우 유리한 것으로 나타났다. 이는 항타응력의 공식 즉, $\sigma = \frac{E}{C} \times V = \frac{E}{C} \times \sqrt{(2 \times g \times h)}$ 에서 항타응력은 중량(W)과는 무관하며 탄성계수(E), 파 속도(C), 낙하고(h)의 함수와 관계되므로 동일한 타격에너지의 조건에서는 무거운 램 중량으로 낙하고를 낮게 하는 것이 항타응력에 유리하다.

상기와 같이 항타시공 관입성을 비교분석하여 최종항타시 사용되는 주(主)해머의 램 중량은 129.5kN으로 결정하였다.

3.2.2 재하시험

시험시공 시 동재하시험은 초기항타시험(EOID; End Of Initial Driving)과 재항타시험(Restrike)으로 구분하여 실시하였다. 초기항타시험의 목적은 낙하고와 항타응력(압축응력, 인장응

력의 관리 및 선단지지력 확인 측면에서 실시하였으며, 재항타시험은 시간경과에 따른 지지력의 변화(Set-up 및 Relaxation), 즉 부주면마찰력 구간(중립점 상부) 및 정주면마찰력 구간(중립점 하부)에서의 마찰저항의 증가 정도를 파악하기 위하여 최소 7일 이상 경과한 후에 실시하였다.

초기항타시험시 쿠션(Cushion)재는 30.0mm 두께의 합판 3장을 겹쳐서 사용(90.0mm)하여 허용압축응력(FHWA, $\sigma_{ck} \times 0.6 = 47.07\text{MPa}$) 및 허용인장응력(FHWA, $3\sqrt{f_{ck}} + f_{pe} = 6.13\text{MPa}$)을 초과하지 않는 낙하고는 0.6m이며, 이때의 최종관입량은 6.5~8.0mm로 나타났다. CAPWAP 분석에 사용된 타격번호에서의 항타응력은 TSX(말뚝에 작용하는 최대인장응력) 4.71MPa, CSX(센서 위치에서의 최대압축응력) 27.16~28.73MPa이며, EMX(센서 위치에서의 최대항타에너지)는 66.7~67.5kN-m (해머효율=85.8~86.8%)로 나타났다.

동재하시험을 실시한 결과는 다음 표 6과 같다.

초기항타시험을 실시한 결과 중립점 상부로 작용하는 부(負)주면마찰력 구간에서는 선천공 및 벤토나이트(Bentonite) 충전에 의한 영향으로 인하여 1.0~31.8kN으로 거의 없는 것으로 나타났으나, 시공 후 약 7~8일 경과한 시점에서 실시한 재항타시험에서는 213.2~256.0kN으로 초기항타시험에 비해 약 181.3~255.0kN의 크기로 증가량의 폭은 작은 것으로 나타났다. 말뚝설계시 부주면마찰력 구간을 미처리 조건으로 산정($Q_{ns} = f_n \times A_s$)한 외말뚝의 부주면마찰력은 1,550kN이었으나 부주면마찰력 구간을 선천공 및 벤토나이트로 충전하여 시공 후 약 7~8일 경과시점에서 측정된 부주면마찰력 구간의 마찰저항은 설계 산정치의 약 13.8~16.5%에 해

[표 6] 동재하시험 결과(CAPWAP 분석)

시험 번호	시험 시기	관입 심도(m)	항타응력(Mpa)		EMX (t-m)	주면마찰력(kN)		선단지지력 (kN)	전체지지력 (kN)	허용지지력 (kN)	비고
			CSX	TSX		부(負)	정(正)				
No. 3	Eoid	48.5	28.7	4.7	67.5	3,200	52,700	195,400	244,900	156,700	
	R-7일		40.0	12.5	106.3	21,400	215,800	197,400	391,800		
No. 4	Eoid	48.8	27.2	6.0	66.7	100	92,900	177,300	270,100	160,700	
	R-8일		32.0	10.2	106.6	25,700	250,300	120,500	401,900		

주 1) Eoid(End Of Initial Driving) 시험은 시공종료 직후 또는 말뚝시공중 항타응력, 타격에너지, 말뚝의 건전도, 말뚝의 지지력 등을 측정하여 항타시공 관입 성 분석을 함으로써 말뚝의 시공관리 목적으로 시행하는 시험이며, R(Restrike) 시험은 시공종료후 일정기간이 경과한 시점에서 시간경과에 따른 지지력의 변화(set-up or relaxation) 확인을 목적으로 시행하는 시험(R-경과일수).

주2) CSX ; 센서 위치에서의 최대압축응력, TSX ; 말뚝에 작용하는 최대인장응력, EMX ; 센서 위치에서의 최대항타에너지.

주3) CAPWAP ; CAsE Pile Wave Analysis Program.

주4) 허용지지력(Qa) ; $Qa=(Qb+Qps-Qns)/F.S., F.S.=2.5$ 로 적용(Qb ; 선단지지력, Qps ; 정주면마찰력, Qns ; 부주면마찰력).

당되며, 약 83.5~86.2%로 감소효과가 있는 것으로 나타났다.

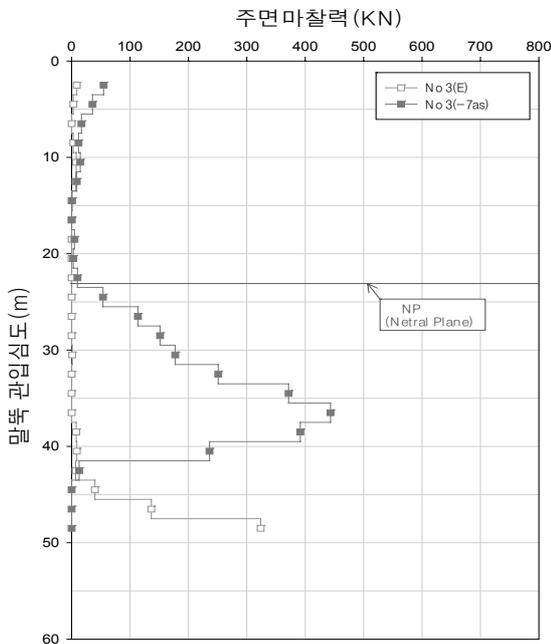
중립점 하부로 작용하는 정(正)주면마찰력 구간에서는 초기항타시험 시 525.1~925.6kN 으로 나타났으나, 시공 후 약 7~8일 경과한 시점에서 실시한 재항타시험에서는 2,150.2~2,493.9kN 으로 초기항타시험에 비해 약 1,568.3~1,625.1kN의 크기로 증가량의 폭이 매우 큰 것으로 나타났다.

선단지지력은 초기항타시험 시 1,766.6~1,946.9kN으로 나타났으며, 시간경과에 따른 선단지지력의 변화는 No.3의 경우 거의 변화가 없으나, No.4의 경우 감소하는 것으로 나타났다. 재항타시험의 선단

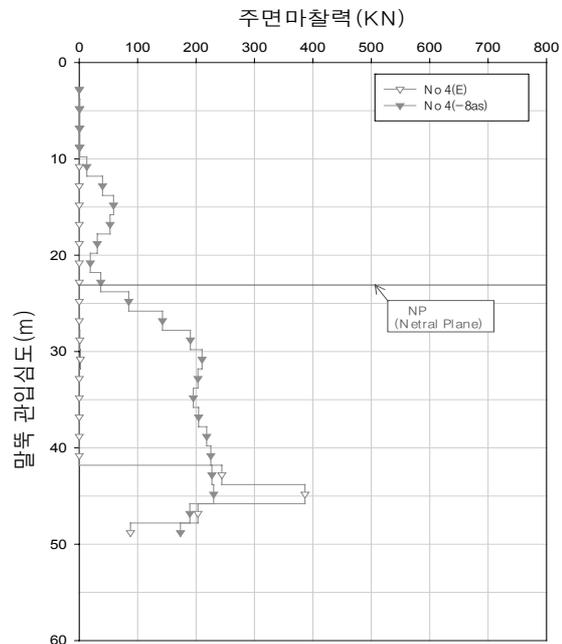
지지력 감소는 선단지반의 약화된 원인이 아니라 시험 시 말뚝재료의 항타응력에 따른 타격에너지 한계로 말뚝 선단부에 타격에너지를 충분히 전달되지 못한 결과이므로 말뚝의 허용지지력 판정 시 선단지지력은 초기항타시험 결과로 판정하며 정주면마찰력은 재항타시험 결과로 판정하여 합성(홍현성 등, 1995)함이 타당할 것으로 판단된다.

그림 14~15에서와 같이 말뚝 심도별 주면마찰력 분포는 초기항타시험에서는 선천공에 따른 지반의 교란으로 천공심도인 40.0~45.0m 구간까지는 주면마찰력이 거의 없으나, 최종 타격구간에서는 급격히 증가하는 것으로 나타났다. 재항타시험에서는 벤토나이트 층

[그림 14] 심도별 주면마찰력 분포 (No. 3)



[그림 15] 심도별 주면마찰력분포 (No. 4)



[그림 16] 말뚝동재하시험 전경



진 구간에서는 주변마찰력의 증가량은 크지 않으나 시공정도에 따라 구간별로 증가량의 차이가 있으며, Cement-paste 충전 구간에서는 주변마찰력이 점진적으로 증가하지만 최종 타격구간에서의 주변마찰력 증가량은 모두 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 이는 시간경과에 의한 주변마찰력의 감소가 아니라 재항타시험 시의 타격에너지의 부족에 의한 것으로 시험말뚝의 실제 주변마찰력을 과소평가한 것으로 판단할 수 있다.

재하시험 결과를 통한 말뚝기초의 최종항타 시 시공관리는 유압해머(Ram=129.5kN)를 이용하여 낙하고 0.6m에 최종관입량은 평균 4.0~8.0mm로 관리하며, 시공 시 인장응력에 의한 말뚝의 파손을 방지하기 위하여 큐션(Cushion)재는 30.0mm 두께의 합판 3장을 겹쳐 사용하되 수시로 교환하였으며, 초반항타의 경우에는 낙하고를 낮추어 1타당 관입량이 100mm 이내가 되도록 세심한 관리가 요구되었다.

4. 결 언

대심도 연약지반 구조물 기초시공 시 거의 대부분 사용된 강관말뚝 또는 현장타설말뚝을 대신하여 상대적으로 저가인 PHC 말뚝을 사용하여 기초시공을 수행하고 그에 따른 시공방법 및 품질관리를 소개하였다.

당 현장에서의 말뚝기초 공법 선정은 부지 내에 분포하는 연약한 점토층의 부주면마찰력 저감대책, 주변환경의 영향 및 대심도에 따른 용접이음, 말뚝삽입, 최종항타 등을 고려하여 3가지의 공법을 조합한 DRA 공법+SIP 공법+직항타 공법으로 선정하였으며, 부주면마찰력 구간(DRA 공법 구간)에서는 마찰저항을 감소시키기 위해서 벤토나이트를 충전하였으며, 물-벤토나이트 배합비는 1m³당 물 1000l에 벤토나이트는 50kg으로 1:0.05의 배합비로 실시하였다. 정

주면마찰력 구간(SIP 공법 구간)에서는 물-시멘트 배합비는 1m³당 물 730l에 시멘트는 880kg으로 1:1.2의 배합비(W/C=83.0%)로 실시하였다. 최종항타 시 사용되는 해머는 대심도 구간의 장대말뚝인 점을 감안하여 램 중량이 99.6kN 및 129.5kN을 시공 전에 GRLWEAP 분석, 시험시공 시에 동재하시험기(Pile Driving Analyzer)를 이용하여 항타시공 관입성을 비교분석한 결과, 장대말뚝 항타 시 가장 문제되는 인장응력에서 램 중량 99.6kN보다는 129.5kN이 유리한 것으로 나타나 129.5kN 해머를 주(主)해머로 선정 후 시공하였으며, 결과는 다음과 같다.

- 말뚝설계 시 부주면마찰력 구간을 미처리 조건으로 산정한 외말뚝의 부주면마찰력은 1,550.4kN이었으나 부주면마찰력 구간을 선천공 및 벤토나이트로 충전하여 시공 후 약 7~8일 경과시점에서 측정된 부주면마찰력 구간의 마찰저항은 설계 산정치의 약 13.8~16.5%에 해당되며, 약 83.5~86.2%로 감소효과가 있는 것으로 나타났다.

- 말뚝기초의 최종항타 시 시공관리는 유압해머(Ram=129.5kN)를 이용하여 낙하고 0.6m에 최종관입량은 평균 4.0~8.0mm로 관리하며, 시공 시 인장응력에 의한 말뚝의 파손을 방지하기 위하여 큐션(Cushion)재는 30.0mm 두께의 합판 3장을 겹쳐 사용하되 수시로 교환하였으며, 초반항타의 경우에는 낙하고를 낮추어 1타당 관입량이 100mm 이내가 되도록 세심한 관리가 요구되었다.

PHC 말뚝이 재료비(공사비) 측면에서 경제성이 있음에도 불구하고, 대심도 구간의 전무한 시공실적과 시공 시 여러 문제점(천공심도의 제한, 항타 시 인장응력의 한계 등)으로 인하여 설계 적용의 어려운 점이 있었으나, 본 시공사례와 같이 최신의 장비 도입과 시공관리 방법의 개선으로 성공적인 시공을 수행할 수 있었다.

따라서 본 사례와 같이 지반조건이 유사한 대심도 구간에서 PHC 말뚝이 장대말뚝으로서의 적용이 가능할 것으로 판단된다.