말뚝의 최적설계 사례 연구

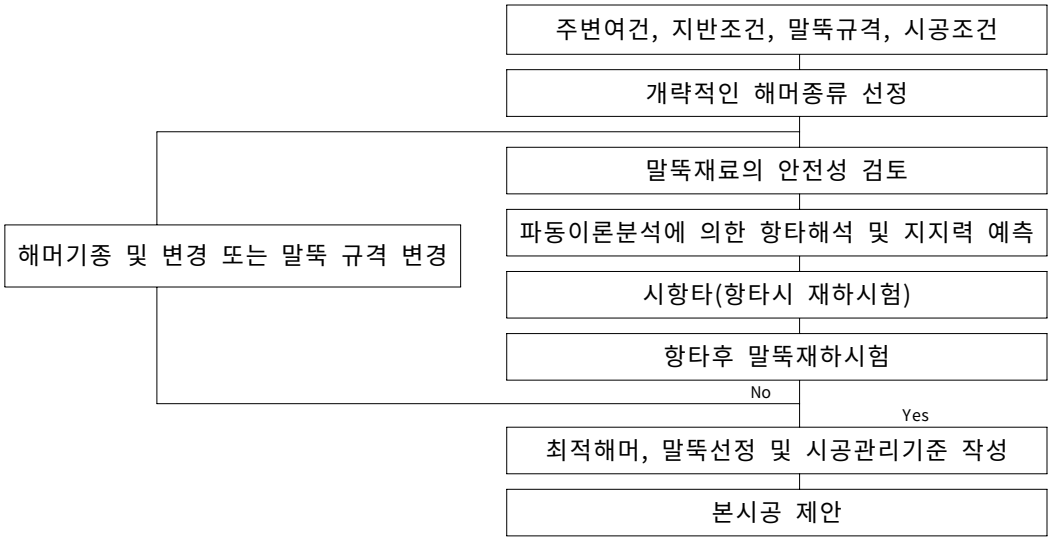
A case study on the optimum design of piles.

(주)파일테크 전 영 석

1. 서론

본 논문에서는 국내의 해안지역 위치에 신축예정인 아파트 말뚝기초의 최적설계에 대한 내용으로써 지반, 말뚝재료 및 해머 등의 조건을 고려하여 기초의 시공방법 및 설계하중에 대한 검토와 아울러 시험시공을 실시함으로써 신축아파트의 기초의 대한 안전성 및 경제성을 고려한 최적의 공법을 선정하는 과정을 설명하였다. 이러한 검토는 우선 기 수행된 지반조사 보고서와 기본계획자료의 분석 그리고 현지답사를 통해 적용 가능하고 안전한 기초형식을 고려하고 이를 바탕으로 WEAP 분석을 실시한 후 시험시공을 통해 설계 가능한 허용지지력을 검토하여 최종적으로 경제성있는 기초공법을 선정하는 과정을 기본으로 하였다.

이러한 최적설계의 절차를 나타내면 〔그림 1〕과 같다.



〔그림 1〕 말뚝의 최적설계를 위한 최적관리방법의 흐름도

2. 지반조건

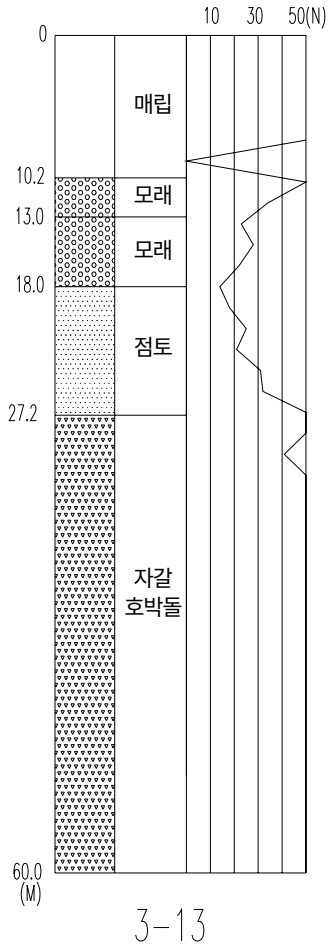
대상 현장의 전체적인 지반조건은 크게 매립층 및 퇴적층으로 구성되어 있으며 매립층은 지표로부터 약 10.2 m 두께로 분포한다. 매립층은 점토 및 모래에 자갈, 호박돌, 전석이 불규칙하게 혼재되어 있으며 따라서 N값도 0 50으로 불규칙하게 변화하고 있다.

퇴적토층의 경우 상부 퇴적토층은 위로부터 N값이 14 34 정도의 모래층이 나타나고 이어서 점토층이 27.2 m 깊이까지 분포되어 있으며 이의 N값은 18 32 정도이다.

하부 퇴적토층은 조사지역 전역에 걸쳐 매우 깊은 깊이까지 형성되어 있는 데 이는 점토, 자갈, 호박돌로 이루어져 있으며, N값이 거의 50 이상으로 나타났다.

일반적으로 이러한 조건에서 말뚝을 시공할 경우 나타날 수 있는 문제점은 ⅰ) 매립토층에서 호박돌, 전석의 혼재에 따른 말뚝의 관입성 여부 ⅱ) 하부 퇴적층 상부에 존재하는 호박돌, 전석, 암괴로 인해 말뚝의 최종 관입시 건전도 문제 ⅲ) 기반암층이 상당한 깊이까지 존재하지 않으므로 시공의 경제성 문제 등이 있다.

따라서 본건 현장에서의 개략적인 시공방법은 상부매립층을 T4로 굴착한 후, 이하 지지층(하부퇴적층)까지는 항타를 실시하여 안착시키되 최종 셋팅시 말뚝의 건전도를 유지하기 위하여 낙하고 조절이 용이한 유압해머를 사용하는 것을 원칙으로 하였다.



〔그림 2〕 지질주상도

3. 지지력 예측 및 말뚝종류 선정

2장에서 설명한 지반조건에서 말뚝 및 해머종류별 항타시공성 및 지지력을 예측할 수 있는 WEAP(Wave Equation Analysis for Piles)을 이용하여 극한지지력을 예측하였다. 대상 말뚝은 콘크리트말뚝(PHC ϕ 400 및 PHC ϕ 450), 강관말뚝(ϕ 406.4 × 9 t) 및 H-말뚝(350×350×12×19), 시공해머는 유압해머(5 ton 및 7 ton)에 대해서 적용하였다. 시공조건은 호박돌 전석이 혼재해 있는 매립층을 T4로 굴착후 직항타하는 방법으로 해석하였다. 극한지지력 산정시에는 항타응력 및 BPM(Blows per Meter) 값을 고려하였으며 이에 대한 기준 및 해석결과를 요약하면 〔표 1〕과 같다.

〔표 1〕 WEAP 해석결과

말 뚝 종 류	해머 종류	최대 압축응력 (kg/cm^2)	허용항타 압축응력 (kg/cm^2)	BPM (Blow/m)	극한 지지력 (ton)	예상* 설계지지력 (ton)
PHC 400	유압 5	276	$0.6\sigma_u$	200	158	63
	유압 7	324			196	78
PHC 450	유압 5	258			173	69
	유압 7	292			207	83
φ 406 × 9 t 강관	유압 5	1745	$0.9\sigma_y$	1000	220	88
	유압 7	2060			223	89
350×350×12×19 H-말뚝	유압 5	1549		500	234	94
	유압 7	1667			275	110

* 註 : 예상 설계지지력은 그간 국내에서 실시한 WEAP 해석결과와 현장 시공결과의 비교로부터 극한지지력에 2.5의 안전율을 적용하여 계산하였음. 단, 시간경과 효과는 고려하지 못한 결과임.

4. 시험시공 개요

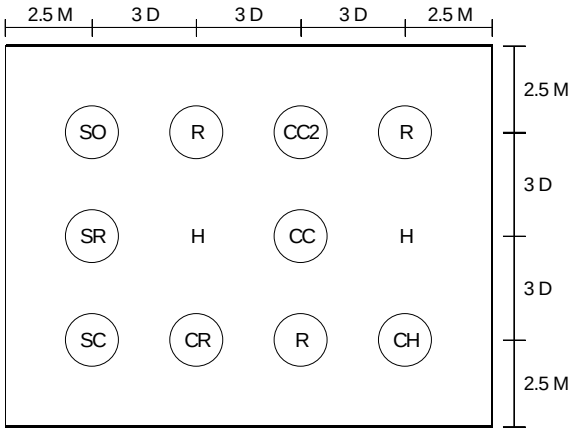
이상 WEAP 해석 결과로부터 PHC φ 400과 PHC φ 450의 지지력은 큰 차이가 없는 것으로 나타났으며 전체적인 시공성 및 재료의 안전성을 감안하여 시항타 말뚝은 PHC 450, 강관말뚝, H-말뚝으로 선정하였고 항타장비는 상대적으로 효용성이 큰 유압 7 ton 해머로 결정하였다. 또한 강관말뚝 및 PHC 말뚝의 경우 말뚝의 항타 관입성 및 지지력 비교를 위해 선단 형상을 일반 및 록슈, 폐단강판, H형강슈를 부착하였다(〔표 2〕, 〔그림 3〕).

〔표 2〕 시항타 말뚝

말뚝번호	말뚝종류 및 규격	선단슈 형태	시공방법	시험방법
1(SO)	φ 406 × 9 t (mm) 강관말뚝	일반시공(개단)	T4 선굴착 (16 m) + DKH-7 ton 유압해머에 의한 打入	EOID & Restrike
2(SR)		록슈		EOID & Restrike
3(SC)		폐단강판		Restrike
4(CC)	φ 450 mm PHC 말뚝	일반시공(폐단)		EOID & Restrike 정재하시험
5(CC2)				Restrike
6(CH)		H형강슈		Restrike
7(CR)		록슈		Restrike
8(H)	350×350×12×19 mm H-말뚝	일반		EOID & Restrike
9(H2)				EOID & Restrike

註) 정재하시험 - ASTM D1143-81
동재하시험 - ASTM D4945-85

- E.O.I.D(End of Initial Driving) : 말뚝항타중 혹은 항타직후 수행하는 시험이며 주로 말뚝의 선단지지력을 측정함으로써 말뚝의 시공관리 목적에 사용된다.
- RESTRIKE : 재항타 시험을 뜻하며, 말뚝시공 후 일정한 시간이 경과한 후 실시하는 시험으로서 시간경과에 따른 지반의 set-up효과의 확인과 함께 말뚝의 허용지지력 산정을 목적으로 함.



〔그림 3〕 시험말뚝 배치도

5. 시험시공결과 및 고찰

5.1 재하시험 결과

본건 현장의 지반조건은 최소 27.2 m부터 지지층이 존재하는 것으로 나타나고 있는 바, 〔표 2〕에서 보는 바와 같이, 관입깊이가 28.0 m 이상인 말뚝 즉 SO, CC, CR, H, H2의 허용지지력은 117.0 ton 166.5 ton으로서 WEAP 해석에 의한 예상 설계지지력을 충족하고 있다.

반면, 강관말뚝의 선단슈 형태를 록슈 및 폐단강판을 부착한 SR, SC는 앞서의 일반 시공한 SO(개단말뚝)에 비해 시공성 및 관입성이 매우 떨어져 최종 관입깊이가 각각 24.7 m, 26.3 m로서 예상 지지층(최소 27.2 m 이상)까지 도달하지 못하였으며 허용지지력이 각각 48.0 ton, 67.5 ton으로서 매우 작게 나타났다.

PHC말뚝(CC2, CH)의 경우 선단형상은 각각 일반적인 폐단형태 및 H형강슈 부착을 하여 관입성 및 재료 보호효과를 비교한 것인데 이에 따른 시공성 및 지지력은 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이들 말뚝들 중 지지층까지 도달하지 못한 말뚝에서는 허용지지력이 각각 26.5 ton, 48.0 ton으로 나타났으며 지지층까지 도달한 말뚝의 경우에는 상당히 큰 지지력을 얻을 수 있었다.

〔표 3〕 허용지지력 판정결과

말뚝 번호	관입깊이 (m)	시험 구분	CAPWAP 분석결과(ton)				비 고
			주면 마찰력	선단 지지력	전체 지지력	Davisson판정법에 의한 허용지지력(안전율 2.0)	
SO	28.8	E.O.I.D	28.6	95.8	124.3	28.0	
		Restrike	132.7	147.3	280.0	140.0 이상	10일 경과
SR	24.7	E.O.I.D	24.5	120.7	145.2	25.0	
		Restrike	67.8	81.8	149.7	48.0	10일 경과
SC	26.3	Restrike	90.0	76.9	166.9	67.5	
CC	29.0	E.O.I.D	64.3	132.9	197.1	80.0	
		Restrike	139.1	131.7	270.8	139.0 이상	9일 경과
		STATIC	-	-	-	90.0 이상	7일 경과
CC2	22.8	Restrike	49.9	15.0	64.9	26.5	9일 경과
CH	26.0	Restrike	83.1	32.0	115.1	48.0	9일 경과
CR	28.0	Restrike	68.0	166.0	234.0	117.0 이상	9일 경과
H	29.0	E.O.I.D	121.3	163.5	284.7	125.0	
		Restrike	186.0	147.0	333.0	166.5 이상	9일 경과
H2	30.0	E.O.I.D	84.8	160.8	245.6	122.5	
		Restrike	155.2	124.8	280.0	140.0 이상	1일 경과

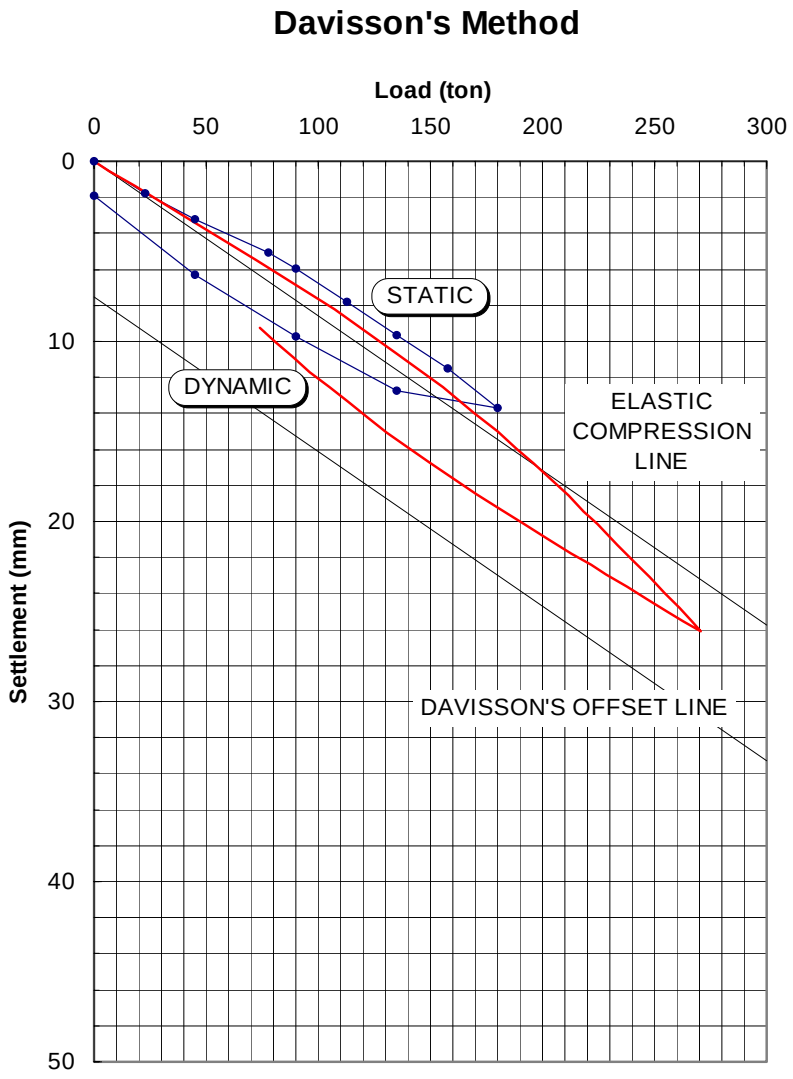
5.2 정·동재하시험 결과비교

본건 현장에서는 동재하시험 결과의 신뢰도를 검증하기 위하여 시험말뚝 1개소(CC)에 대해 정재하시험을 병행하였다.

〔그림 4〕 에서와 같이 정재하시험의 최대시험하중까지 정·동 시험결과는 유사한 하중-침하량 관계곡선을 보여주고 있으며 극한 및 항복의 징후는 나타나지 않고 있다.

정재하시험 결과에 의한 침하량 거동이 동재하시험의 침하량 거동보다 다소 양호하게 나타난것은 동재하시험과 정재하시험의 수행 시간의 불일치, 즉 재항타시험 이후 7日 경과한 상태에서 정재하시험을 실시하였는 바, 7日이 경과하는 동안 지반의 set up효과로 인하여 지지력이 증가한 것으로 판단된다. 또한, 동재하시험(Restrike) 및 정재하시험으로 부터 측정/분석된 지지력이 각각 139.0 ton 이상, 90 ton 이상으로서 다르게 나타나고 있는 데, 이것은 정재하시험의 경우 최대시험하중의 크기를 180 ton으로 제한하였으나 동재하시험의 경우는 말뚝재료의 파괴를 방지하는 범위내에서 최대의 타격력(시험하중)을 가하였기 때문이다.

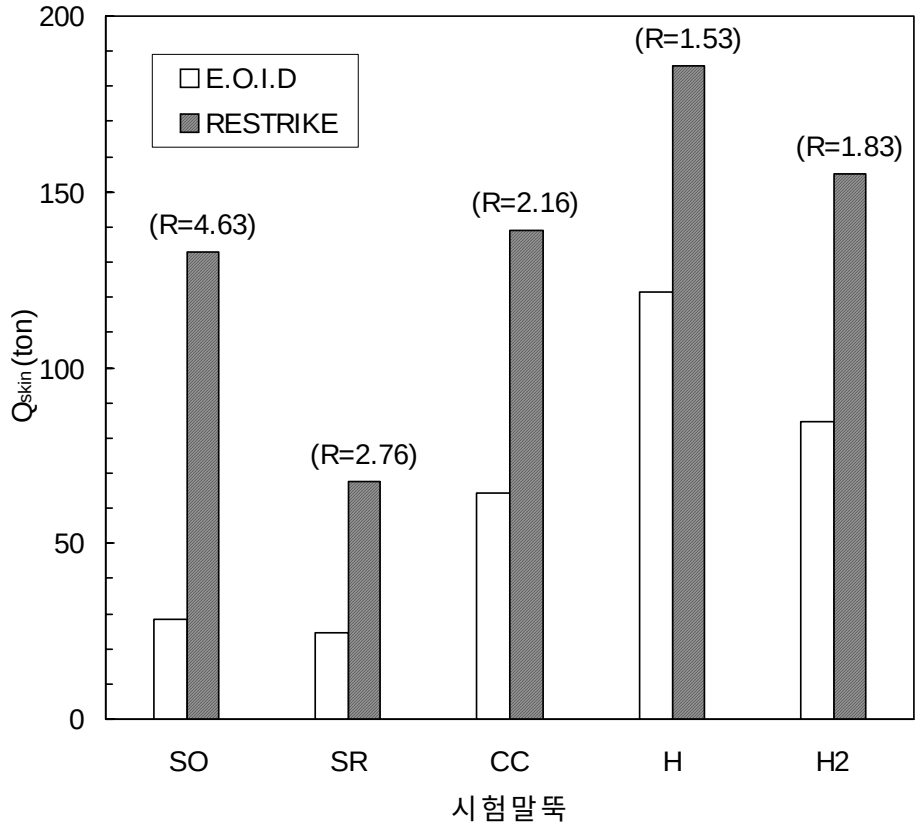
이러한 결과로부터 동재하시험의 신뢰도는 만족스러운 것으로 평가되었다.



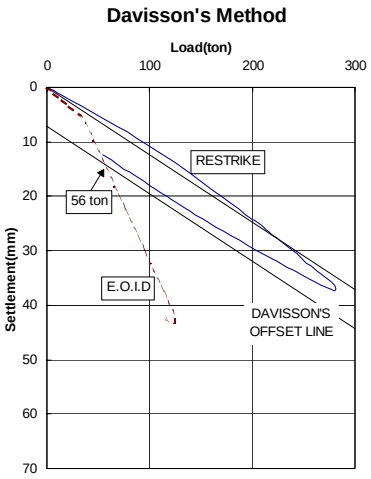
〔그림 4〕 정·동재하시험 비교

5.3 지지력의 시간경과 효과

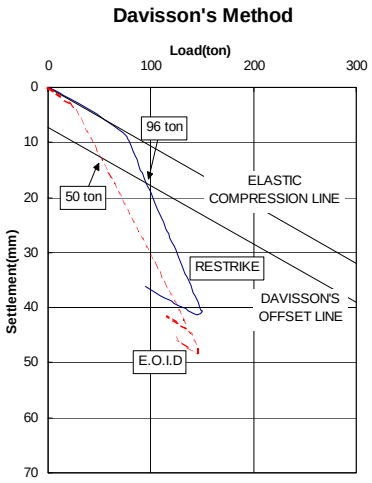
본건 현장의 시간경과에 따라 말뚝의 지지력은 대체로 증가하는 것으로 나타나고 있다. 특히 말뚝 SO의 경우 시공후 10日 경과후 Restrike 시험결과 주면마찰력 성분이 132.7 ton으로서 E.O.I.D 결과(28.6 ton)와 비교할 때 다른 종류의 말뚝에 비해 현저히 증가한 것으로 나타나고 있는 데 이는 개단 강관말뚝은 다른 폐단말뚝보다 깊은 곳까지 관입되었기 때문으로 판단된다. E.O.I.D 및 Restrike 시험을 병행한 말뚝의 지지력 성분 중 주면마찰력 성분을 비교한 결과 H-말뚝(H, H2)이 10일간의 시간 경과에 따라 약 1.5 1.8배 이상, 여타말뚝(SO, SR, CC)의 경우 2.2 4.6배 이상 지지력이 증가한 것으로 나타났다(〔그림 5〕). 이러한 사실들은 재하시험결과로부터 얻은 하중-침하량 곡선을 비교함으로써 명백하게 알 수 있다(〔그림 6〕).



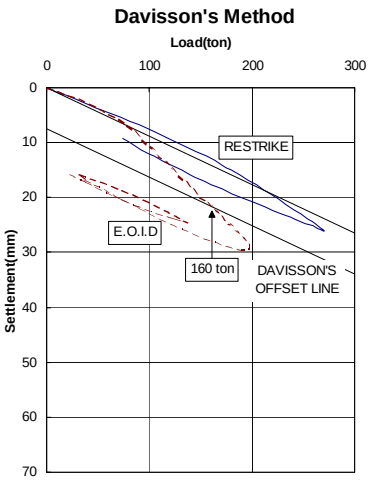
〔그림 5〕 시간경과에 따른 말뚝의 지지력 증가 - A
(R=Qs(Restrike)/Qs(E.O.I.D))



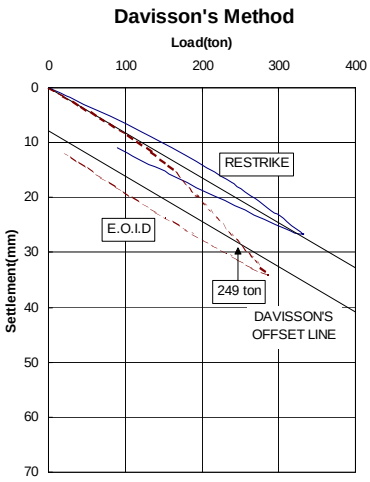
<SO>



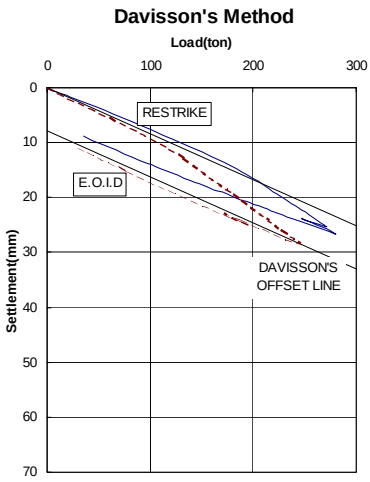
<SR>



<CC>



<H>



<H2>

〔그림 6〕 시간경과에 따른 말뚝의 지지력 증가-B

5.4 말뚝의 항타관입성 비교

본건 현장에서는 시공 및 시험시 항타장비로서 DKH-7 ton 유압해머를 사용하였으며 모든 말뚝들에 대해 낙하고를 초기에 0.4 m, 지지층(약 27 m : 지질주상도 기준)에 근접하여 0.6 m로 조정하였다. 〔표 4〕에서 보는 바와 같이, 최대 압축응력이 PHC말뚝의 경우 251 300 kg/cm2 강관 및 H-말뚝의 경우 1408 1723 kg/cm2로서 각각의 허용타격응력 480 kg/cm2 및 2160 kg/cm2에는 여유가 있는 것으로 나타났다.

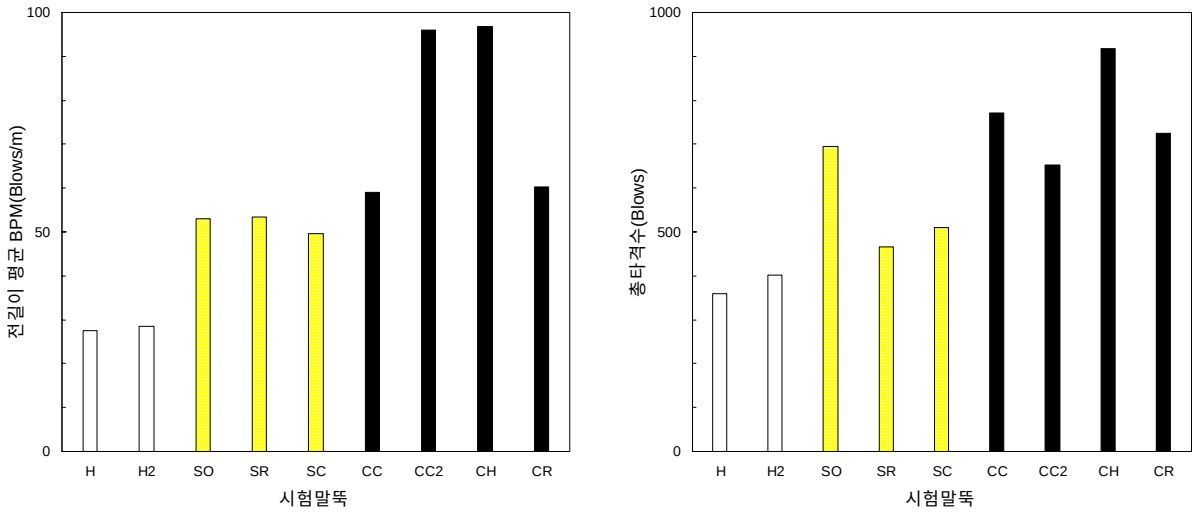
말뚝종류별 항타관입성을 살펴보면 우선 타격수를 비교해 볼 때 〔표 4〕, 〔그림 7〕에서와 같이 H-말뚝의 전길이 평균 BPM(총 타격수/항타 관입깊이=Blows/m)이 27 28 Blows/m, 강관말뚝이 49

53 Blows/m, PHC말뚝의 경우 59 96 Blows/m로서 H-말뚝의 항타관입성이 가장 우수하며 다음으로 강관말뚝, PHC말뚝순으로 나타났다. 또한 〔그림 8〕에서와 같이 지지층 깊이 대비 관입깊이를 비교하더라도 H-말뚝이 가장 높은 관입성을 보여주고 있으며 다음으로 강관말뚝과 PHC말뚝이 비슷한 수준을 나타내고 있다.

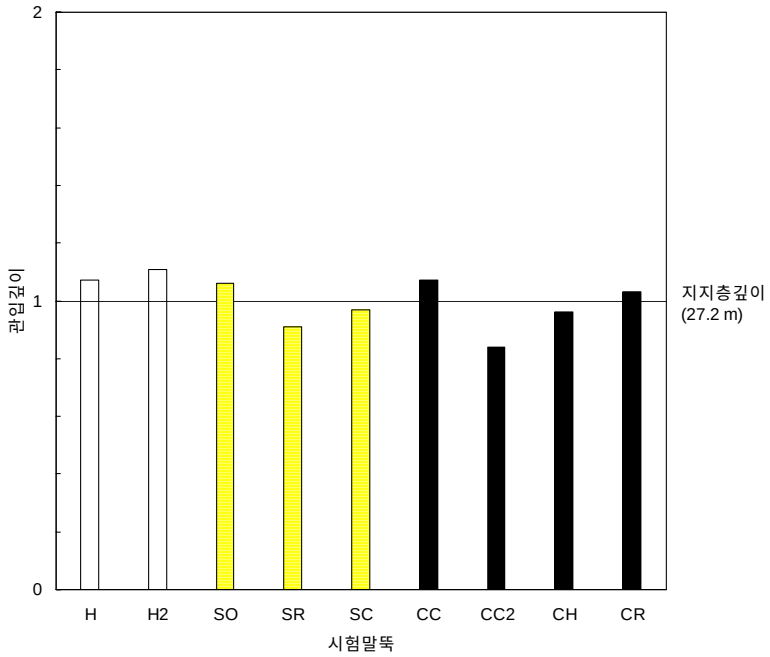
한편, 항타시공성이 낮아 지지층까지 도달하지 못한 말뚝은 강관말뚝의 선단부에 특수슈(록슈 및 강판)를 부착하여 폐단시킨것으로서 지지층에 도달하지 못한 상태에서 타격시 리바운드량이 커서 관입시키기에 매우 어려운 항타시공성을 보여주었으며 PHC말뚝의 경우 4개소 중 2개소말뚝이 항타중 말뚝두부가 파손되어 지지층까지 도달하지 못하였다. 이상으로부터 말뚝 선단슈의 효과는 관입성에 영향을 주지 못하였고 폐단말뚝(SR, SC, PHC말뚝)은 항타시 리바운드량이 커서 지지층까지의 안착이 곤란하고 특히 PHC 말뚝은 시공시 말뚝의 수직도, 쿠션 등의 영향을 크게 받아 지지층에 도달하기 전에 말뚝 재료파괴의 가능성이 커서 시공성이 낮은 것으로 결론지을 수 있다.

〔표 4〕 항타응력 및 항타관입성

말뚝번호	관입깊이 (m)	최대 압축응력 (kg/cm^2)	총 타격수 (Blow)	전체 BPM (Blow/m)	타격당 최종 관입량 (mm/blow)
SO	28.8	1408	694	53.0	5.0
SR	24.7	1440	466	53.5	0.0
SC	26.3	1723	511	49.6	2.0
CC	29.0	279	771	59.0	5.0
CC2	22.8	280	653	96.0	4.5
CH	26.0	251	968	96.8	5.0
CR	28.0	300	724	60.3	8.0
H	29.0	1670	359	27.6	4.0
H2	30.0	1563	401	28.6	10.0



〔그림 7〕 시험말뚝별 타격수 비교



〔그림 8〕 시험말뚝별 관입깊이 비교

6. 결론

⑴ 시험시공에 적용한 시공방법 즉 매립층을 T4로 굴착하고 유압해머(램중량 7 ton)를 이용하여 하부 퇴적 지지층까지 안착시키는 공법은 본 현장인 경우 적절한 것으로 판단되어 이를 제안하였다.
⑵ 시험시공결과 PHC 말뚝은 말뚝의 항타시공 관입성 및 파손 가능성 문제가 있어 적합하지 않은 것으로 판단되었다. 강관말뚝의 경우는 개단 강관말뚝의 지지력은 양호한 것으로 나타났으나 시공관입성에 있어 문제가 있으며 경제성에 있어 가장 고가이다. 이에 본건 지반조건의 경우에는 H-말뚝이 가장 적합한 것으로 판단되어 본 공사용 말뚝으로 선정하였다.
⑶ 정·동재하시험을 비교한 결과 동재하시험에 대한 신뢰도는 만족스러운 것으로 나타났다.
⑷ 말뚝종류별 시간경과 효과는 폐색효과가 발휘된 개단말뚝이 폐단말뚝 및 H-말뚝에 비해 크게 나타났다.
⑸ 강관 및 PHC 말뚝의 선단형태에 따른 지지력 및 항타시공성 차이는 나타나지 않았으며 개단말뚝이 폐단말뚝에 비해 항타시공성이 우수한 것으로 나타났다.
⑹ 전체적으로 말뚝종류별 시공성 및 경제성을 평가한 결과 본 지반조건인 경우 H-말뚝이 가장 우수한 것으로 판정되어 이를 제안하였다.

이상의 시공사례연구를 통하여 국내의 각종 현장에서 H-말뚝의 적용가능성이 큰 것으로 판단되며 H-말뚝의 실무적용을 위한 단계적인 연구가 요구되어 진다.

참고문헌

1. 건교부, 1996, 도로교 표준시방서
2. 건설부, 1986, 구조물 기초 설계기준
3. 파일테크, 말뚝기초연구소, 1996, 부산 영도 화신아파트 기초검토 최종보고서
4. 이명환, 1994, “강관말뚝의 시공”, 강관말뚝의 설계와 시공에 관한 세미나, pp. 63 88
5. 이명환, 홍헌성, 이원제, 1995, “개단강관말뚝의 지지력 특성”, 강관말뚝의 현장거동에 관한 세미나,

대한토목학회, pp. 3 17
6. 이명환, 홍헌성, 조천환, 1996, “강관말뚝의 압축하중 지지능력”, 강관말뚝 기초공법 세미나, pp. 3 47
7. 이인모, 1994, “강관말뚝의 동적해석”, 강관말뚝의 설계와 시공에 관한 세미나, pp. 15 36
8. 홍헌성, 조천환, 이장덕, 이원제, 이명환, 1996, “동재하시험의 신뢰도”, 한국지반공학회, '95 가을 학술발표회 논문집, pp. 26 30
9. 이원제, 전영석, 홍헌성, 이명환, 1995, “시간경과에 따른 항타말뚝의 지지력 변화연구”, 한국지반공학회, '95 봄 학술발표회 논문집, pp. 69 89
10. POSCO, 1994, 강관말뚝 설계와 시공