

## 고강도 H형강 말뚝의 지지력특성 및 항타관입성에 관한 연구 Bearing Capacity Characteristics and Driveability of High Strength H Pile

박종배<sup>1)</sup>, Jong-Bae Park, 임해식<sup>1)</sup>, Hae-Sick Lim, 조찬환<sup>2)</sup>, Chun-Whan Cho, 박용부<sup>1)</sup>, Yong-Boo Park

<sup>1)</sup> 주택공사 연구소 연구원, Researcher, National Housing Corp. Research Institute

<sup>2)</sup> 파일테크 상무, Managing Director, Piletech Consulting Engineers

**SYNOPSIS** : High strength H pile provides the excellent bearing capacity and driveability. So, it is popular to use H beam as pile foundation worldwide except Korea. This paper presents the test results executed in field on High strength H pile, steel pipe pile and PHC pile so as to clarify the bearing characteristics and driveability of high strength H pile.

**KEYWORDS** : high strength H pile, bearing capacity, time effect

### 1. 서 론

국내에서는 가설벽체 엄지말뚝용으로 많이 사용하는 H형강을 미국, 유럽, 홍콩 등지에서는 말뚝기초로 사용하여 경제적인 말뚝설계를 하고 있다. H 말뚝은 높은 지지력 외에도 뛰어난 강성과 관입에 유리한 형상에 의하여 풍화암 이상의 지반까지 항타시공이 가능하다. 또한 중간조밀층, 전석층등을 관통하여 원하는 지지층에 말뚝의 선단을 시공할 수 있다. H형강 말뚝의 이용이 활발한 홍콩에서는 고강도 H형강( $\sigma_y = 4,600\text{kg/cm}^2$ ) 말뚝을 이용하여 설계지지력을 300ton에 이르게 시공하므로써 말뚝본수를 줄여 경제성을 높이고 있다. Ho(1991)에 의하면 고강도 H 말뚝을 사용하였을 때 일반강도 H 말뚝에 비하여 재료비가 15% 추가되는데 반하여 지지력에서는 25%가 증가하므로써 경제적이라고 하였다.

국내에서도 근래에 고강도 H형강( $\sigma_y = 3,310\text{kg/cm}^2$ )이 본격적으로 생산되므로써 이를 말뚝기초로 활용코자 하는 방안들이 대두되고 있다. 본 연구에서는 고강도 H 말뚝의 항타관입성 및 지지력 특성을 파악하고 경제성 제고방안을 찾기 위하여 점성토 및 사질토 지반에서 시험시공을 실시하였다. 시험시공에서는 3가지 규격의 고강도 H 말뚝의 지지력 및 항타관입성 등을 PHC 말뚝 및 강관말뚝과 비교분석하였다. 또한 시공된 말뚝의 지지력을 최대한 활용하기 위해 시간효과와 폐색효과를 검토하였다. 또한 고강도 H 말뚝의 강축과 약축방향에 대해 수평재하시험을 실시하였고 웨브와 플랜지 사이에 콘크리트를 보강하여 수평저항력 보강효과를 검토하였다.

### 2. 시험시공 개요

시험시공된 고강도 H 말뚝(SWS 490,  $\sigma_y = 3,310\text{kg/cm}^2$ )은  $200 \times 204 \times 12 \times 12$ ,  $244 \times 252 \times 11 \times 11$ ,  $294 \times 302 \times 12 \times 12$ 의 세가지 규격은 이며 PHC( $\phi 400$ ) 및 강관말뚝( $\phi 406.4, t-9$ )의 지지력특성과 항타관입성 등을 비교하였다(표 1 참조). 고강도 H 말뚝의 지지력 특성 및 항타관입성을 파악하기 위하여 점성토 및 사질토지반에 항타시공하여 정재하시험, 동재하시험과 수평재하시험을 실시하였다(표 2 참조).

점성토 지반은 상부로부터 N값 10 정도의 모래질 실트, 실트질 모래, 점토질 실트, 실트질 점토로 이루어진 지층이 지표면에서 4.5m까지 분포하며 이후에 자갈질 모래, 풍화토, 풍화암층으로 이루어져 있다(그림 1 참조). 사질토 지반은 상부에서 매립토, 중립정도의 실트질 모래, 모래질 자갈층, 풍화토층의 순서로 분포하며 N값 50 이상의 풍화암층은 지표로부터 5.5m 이하부터 분포한다(그림 2 참조).

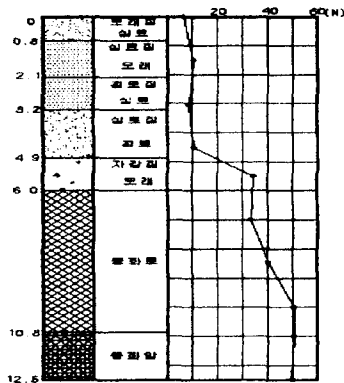


그림 1. 점성토지반 주상도

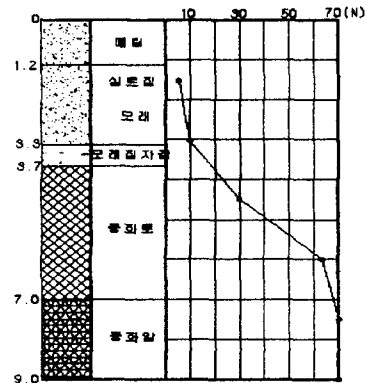


그림 2. 사질토지반 주상도

표 1. 시험말뚝 제원(고강도 H말뚝 : SWS 490)

지반종류	말뚝구분	제원	비 고
점성토	H1~H2	H-200×204×12×12 (mm)	R1~R10말뚝은 정재하시험을 위한 반력말뚝
	R1~R2	H-244×252×11×11 (mm)	
	R3~R10, H3	H-294×302×12×12 (mm)	
	S	φ406.4×9th (mm) 강관(SS400) 말뚝	
사질토	P	φ400×65th (mm) PHC말뚝	
	DH1~DH4	H-294×302×12×12 (mm)	DH3, DH4 말뚝은 plugger 부착, 콘크리트 충전
	PHC1~PHC2	φ400×65th (mm) PHC말뚝	

표 2. 말뚝별 시험내용

지반종류	말뚝번호	동재하시험		정재하시험	수평재하시험	비 고
		E.O.I.D	Restrike			
점성토	R1, R2, R8	●	●			Resrike는 E.O.I.D 후 2일후 1차, 9일후 2차 실시
	H1, H2	●	●			
	H3, S, P	●	● ●	●		
사질토	DH1, PHC1				●	Resrike는 E.O.I.D 후 10일후 실시
	DH2, DH3, PHC2	●	●		●	
	DH4	●			●	

사질토 지반에서는 고강도 H 말뚝의 경우 콘크리트 보강효과와 방향성을 함께 검토하기 위하여 그림 3에서와 같이 시험말뚝 DH3과 DH4의 웨브 공동부에 콘크리트( $\sigma_{ck}=240\text{kg/cm}^2$ )를 충전하고 DH1과 DH3은 약축방향, DH2와 DH4는 강축방향으로 하중을 가였다. 또한, DH3, DH4에는 말뚝의 선단부에서 강제로 폐색효과를 발휘할 수 있도록 그림 4와 같이 plugger를 설치하였다. Plugger는 강판으로 용접하였으며 예상 폐색효과 발생 범위인 선단으로부터 3D(D : H말뚝 한변 길이) 떨어진 지점에 설치하여서 Plugger를 통하여 강제 폐색효과를 발현시켰을 때와 그렇지 않았을 때의 지지력과 항타관입성을 비교하였다.

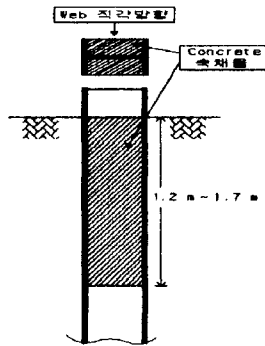


그림 3. 콘크리트 충전

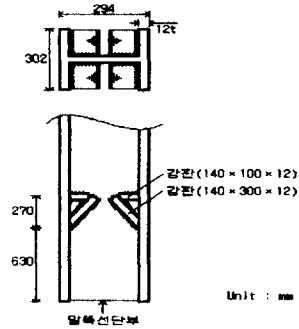


그림 4. 폐색장치(plugger) 개요도

### 3. 고강도 H형강 재료적 특성

#### 3.1 재료 허용하중

고강도(SWS490) H 말뚝의 재료허용응력을  $1,900 \text{ kg/cm}^2$  로, 일반강도(SS400) H 말뚝은  $1,400 \text{ kg/cm}^2$ 로 보았으며 부식대(2mm)를 공제한 단면적을 곱하여 허용하중을 구하고 여기에 말뚝이음에 의한 저감(타입인 경우 1회 5%), 장경비에 의한 저감( $= (L/D-n) \times 100$ )을 고려하여 최종적인 재료의 허용하중으로 결정한다. 기성 콘크리트말뚝의 재료허용하중을 결정하는 데에는 식(1)을 이용하였다.

$$Q_{ma} = A_p [0.25 \sigma_c - \sigma_{ce}] \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_{ce}$  : 유효 prestress, A종 PHC말뚝의  $\sigma_{ce} = 39 \text{ kg/cm}^2$

PHC 말뚝의 길이가 85D 이상이면 식(2)에 의해 세장비에 의한 영향을 고려한다.

$$Q_{ma1} = Q_{ma} [1 - \{(L/D) - 85\} / 100] \quad (2)$$

고강도 H 말뚝과 강관말뚝의 재료허용하중은 표 3과 PHC 말뚝은 표 4와 같다.

표 3. 고강도 H 말뚝 및 강관말뚝의 허용축하중

말뚝종류 및 규격 (mm)	단면적 (cm <sup>2</sup> )	부식대(2mm) 공제한 단면적 (cm <sup>2</sup> )	장기허용 압축응력 (kg/cm <sup>2</sup> )	장기허용 축하중 (ton)
H-200×204×12×12(SWS490)	71.53	47.85	1,900	90.0
H-244×252×11×11(SWS490)	82.06	52.74	1,900	100.0
H-294×302×12×12(SWS490)	107.7	72.42	1,900	137.0
φ 406.4×9 th 강관(SS400)	112.2	86.90	1,400	121.0

표 4. PHC 말뚝의 허용축하중

말뚝규격	단면적	압축강도, $\sigma_c$	유효 prestress	장기허용축하중
φ 400	684cm <sup>2</sup>	800kg/cm <sup>2</sup>	39kg/cm <sup>2</sup>	110ton

#### 3.2 항타시공 관리기준

고강도 H 말뚝과 강관말뚝의 허용항타응력은 항복하중의 90%이며 PHC 말뚝은 콘크리트 압축강도의 60%이다(표 5 참조).

표 5. 항타시공 관리기준

말뚝종류	최대 허용항타응력, $\sigma_a$ (kg)	항타기준		
		항타응력(kg/cm <sup>2</sup> )		타격당 최종관입량
H말뚝(SWS 490)	2,970 (0.9 $\sigma_y$ )	2,673	90% $\sigma_a$	5~10 mm/打
강관말뚝(SS 400)	2,160 (0.9 $\sigma_y$ )	1,944		
PHC말뚝	480 (0.6 $\sigma_u$ )	432		

#### 4. 지지력 시험결과

##### 4.1 연직지지력

고강도 H 말뚝과 PHC 말뚝 및 강관말뚝의 재하시험결과는 표 6 ~ 7과 같다. 시험말뚝의 연직지지력을 분석하기 위하여 정재하 및 동재하시험결과를 Davisson 방법으로 분석하였다.

고강도 H 말뚝(294×302×12×12)에 대한 정재하시험 도중 말뚝상부에서 좌굴이 발생하여 침하량이 과장되어서 재시험을 실시하였으며 그결과 고강도 H말뚝의 연직 설계지지력은 144ton 이상인 것으로, 강관말뚝과 PHC 말뚝의 연직설계지지력은 각각 120ton과 100ton으로 나타났다. 이는 고강도 H 말뚝의 지지력이 비슷한 규격의 강관말뚝과 PHC 말뚝에 비해 각각 20%와 44% 더 크게 발현되었음을 나타낸다.

표 6. 정재하시험결과(점성토지반 - 정재하시험은 점성토지반만 실시)

말뚝 번호	최대시험 하중(ton)	전침하량 (mm)	순침하량 (mm)	항복하중(ton)			Davisson에 의한관정법(ton)	허용지지 력(ton)	비고
				S-logt	logP-logS	dS/d(logt)-P			
H3	289.5	30.865	9.425	249	249	249	254	127	재항타시험직후
		18.720	1.023	289 이상	289 이상	289 이상	289 이상	144 이상	재항타시험후 1일 경과
S	241.2	12.750	1.925	241 이상	241 이상	241 이상	241 이상	120 이상	재항타시험후 2일 경과
P	201.1	14.045	2.378	201 이상	201 이상	201 이상	201 이상	100 이상	재항타시험후 4일 경과

동재하 시험결과 점성토 지반에 시공된 고강도 H 말뚝의 초기항타시 연직허용지지력은 규격별(200×204×12×12, 244×252×11×11, 294×302×12×12)로 각각 78~94ton, 60~86ton 및 81~108ton인 것으로 나타났다. 초기항타후 9일후에 실시된 재항타동재하시험 결과 고강도 H 말뚝의 지반허용지지력은 규격별로 97~137ton, 133~134ton 및 151~172ton 이상으로 재료의 허용축하중을 초과하여 결국 설계지지력은 재료의 허용축하중인 91ton, 100ton 및 138ton인 것으로 해석되었다.

강관말뚝(φ 406.4×9th)과 PHC 말뚝(φ 400×65th)도 초기 항타시에는 각각 71ton과 59ton의 연직허용하중을 나타내다가 9일후의 재항타시험결과는 각각 147ton과 109ton의 지반허용지지력을 나타냈으며 강관말뚝과 PHC 말뚝의 연직 설계지지력도 결국 재료허용하중인 121ton과 109ton인 것으로 해석되었다. 점성토 지반에서의 시험시공 결과 고강도 H 말뚝(294×302×12×12)의 연직설계지지력은 강관말뚝(φ 406.4×9th)과 PHC 말뚝(φ 400×65th) 보다 각각 14%, 27% 크게 나타났다.

사질토 지반에 시공된 고강도 H 말뚝(294×302×12×12) DH2와 DH3(Plugger설치)에 대한 동재하시험결과, 초기 항타시와 항타후 10일후에 각각 65, 52ton과 75, 53ton의 연직허용지지력을 나타내었다. Plugger 설치 말뚝은 그렇지 않은 말뚝에 비해 연직설계지지력이 19% 작게 나타났다. 이는 관입깊이의 차이에 의한 것으로 판단된다. PHC 말뚝(φ 400×65th)은 초기 동재하시험값과 10일후에 실시한 재항타 동재하값이 41ton으로 비교적 낮은 값을 나타내었다. 사질토 지반에서는 점성토 지반에서와 같은 시간효과가 발생하지 않았으며 해석된 지지력이 각 말뚝의 재료 허용축하중에 절반 이하의 값을 나타내었다. 사질토 지반에서는 고강도 H 말뚝의 연직설계지지력이 PHC 말뚝보다 29~56% 크게 나타났다.

표 7. 동재하시험결과

지반종류	말뚝번호	관입깊이 (m)	말뚝종류 및 규격 (mm)	시험구분	항타에너지 (t·m)	타격당 최종관입량 (mm/타)	CAPWAP분석에 의한 항복하중 (ton)	지반의 허용지지력 (ton)	재료의 허용축하중 (ton)	최종 항타용력 (CSX)
점성토	R1	11.5	고강도H말뚝 (H-244×252×11×11)	E.O.I.D	3.18	6	173.0	86	100.0	2,625
				Restrike	5.68	6	266.8	133		
	R2	12.2	고강도H말뚝 (H-244×252×11×11)	E.O.I.D	4.19	9	120.0	60	100.0	2,550
				Restrike	5.69	6	269.8	134		
	R8	11.9	고강도H말뚝 (H-294×302×12×12)	E.O.I.D	5.07	7	217.0	108	138.0	2,696
				Restrike	5.39	3	303.0	151		
	H1	10.7	고강도H말뚝 (H-200×204×12×12)	E.O.I.D	1.89	2	156.7	78	91.0	2,340
				Restrike	5.84	10	194.6	97		
	H2	11.6	고강도H말뚝 (H-200×204×12×12)	E.O.I.D	2.32	2	189.0	94	91.0	2,747
				Restrike	5.09	5	275.0	137		
	H3	12.1	고강도H말뚝 (H-294×302×12×12)	E.O.I.D	4.39	6	162.0	81	138.0	2,291
				Restrike2	5.52	1	344.9↑	172↑		
S	10.8	강관말뚝 (φ 406.4 × 9 th)	E.O.I.D	3.86	8	142.0	71	121.0	1,951	
			Restrike2	3.94	4	295.0	147			
P	9.6	PHC말뚝 (φ 400 × 65 th)	E.O.I.D	4.28	4	118.0	59	110.0	332	
			Restrike2	5.59	2	218.0	109			
사질토	DH2	6.2	고강도H말뚝 (H-294×302×12×12)	E.O.I.D	4.48	4.5	130.0	65	138.0	2,474
				Restrike	5.97	6.0	150.0	75		
	DH3	4.9	고강도H말뚝 (H-294×302×12×12)	E.O.I.D	5.36	4.5	105.0	52	138.0	2,295
				Restrike	6.88	9	106.0	53		
	PHC2	3.4	PHC말뚝 (φ 400×65th)	E.O.I.D	4.77	4	83.0	41	110.0	364
				Restrike	6.21	9	83.0	41		

(1) 시간효과

지지력 시험결과에서 시간효과를 고려하면 고강도 H 말뚝의 경우 지반의 허용지지력이 최고 112% 까지 증가하는 것으로 나타나 시간효과를 적절히 이용하면 경제적인 설계가 가능한 것으로 나타났다. 표 8은 지반별 시험말뚝의 시간경과에 따른 지지력비를 나타낸 것이다. 표에서와 같이 점성토 현장에서 말뚝의 연직지지력은 9일동안 평균 1.77배, 최대 2.25배 증가(PHC말뚝)한 것으로 나타났다. 사질토 현장에서는 평균 1.05배로 시간경과에 따른 지지력 증가는 거의 나타나지 않았다. 시간효과의 차이는 말뚝의 크기에 영향을 받는 것으로 나타났는데 이는 H 말뚝의 폐색성에 의한 것으로 평가된다. 그림 5에서는 시간효과의 주요원인인 주변마찰력의 증가를 도시하였다.

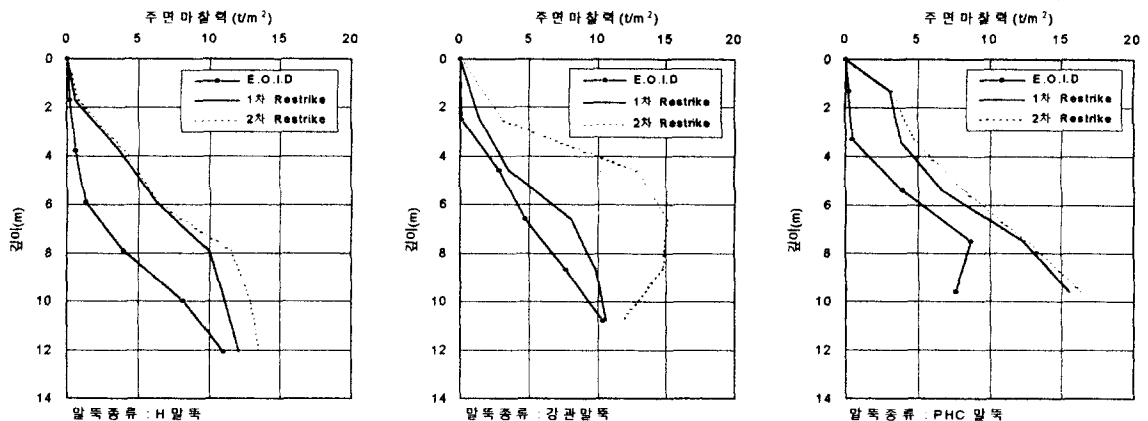


그림 5. 시간경과별 주변마찰력 변화 (H3, S, P)

표 8. 시간경과별 지지력 증가비

지반종류	말뚝번호	말뚝종류	항복하중 증가비		경과일수(日)		비 고 (관입깊이:m)
			1차	2차	1차	2차	
점성토	R1	(H-244×252×11×11)	-	1.54	-	9	11.25
	R2		-	2.25	-	9	12.2
	R8		-	1.40	-	9	11.9
	H1	(H-200×204×12×12)	-	1.24	-	9	10.7
	H2		-	1.27	-	9	11.6
	H3	(H-294×302×12×12)	1.88	2.13	-	9	12.1
	S	강관말뚝(φ 406.4×9th)	1.35	2.08	2	9	10.8
	P	PHC말뚝(φ 400×65th)	1.69	2.25	2	9	9.6
사질토	DH2	고강도H말뚝	1.15		10		6.2
	DH3	(H-294×302×12×12)	1.01		10		4.9
	PHC2	PHC말뚝(φ 400×65th)	1.00		10		3.4

(2) 폐색(Plugging) 효과

동재하시험결과(Davisson의 항복하중)에 의하면 말뚝(DH2)는 6.2m 관입하여 150ton의 항복하중을 나타내었고 Plugger를 설치한 말뚝(DH3)은 4.9m 관입하여 106ton의 항복하중을 나타내었다. 이는 Plugging 장치의 저항에 의하여 좀더 단단한 층에 말뚝이 시공되지 않았기 때문이다. 그림 6, 7은 깊이별로 실시한 동재하시험결과이다. 전체지지력은 DH3가 작게 나타났지만 동일 깊이에서는 Plugging 효과에 의하여 DH3 말뚝의 RMX가 DH2 말뚝보다 54% 크게 나타났다. 본 연구에서 제안한 Plugger를 적절하게 사용하면 말뚝시공길이의 감소로 경제적인 말뚝설계가 이루어질 것이다.

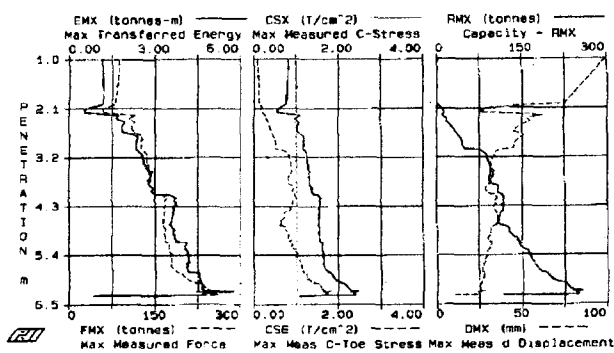


그림 6. PDAPLOT (DH2)

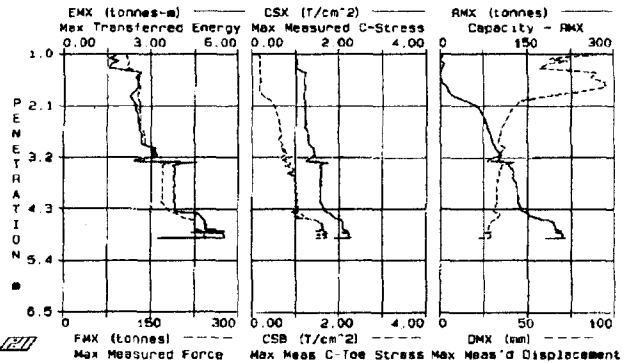


그림 7. PDAPLOT (DH3)

4.2 항타관입성

본건 말뚝들의 시공법은 YBH-7 ton 유압해머에 의한 직항타공법이며 적용된 시공기준은 시간경과 효과(set-up)를 감안하여 표 5의 항타관리 기준에 의하여 실제 타격에너지가 말뚝종류별 최대 허용항타에너지(σ<sub>a</sub>)의 80~90% 내외가 되도록 항타하였다.

(1) 점성토 지반

R1, R2, H1, H3 말뚝의 측정된 최대 항타에너지는 2,300kg/cm<sup>2</sup>~2,600kg/cm<sup>2</sup>으로서 항타에너지기준(2,673 kg/cm<sup>2</sup>) 범위 이내로 유지되었으나 시험말뚝 H2, R8의 경우 최대 항타에너지가 2,800kg/cm<sup>2</sup>~3,100kg/cm<sup>2</sup>으로써 기준보다 초과하는 것으로 나타나고 있다(표 7 참조).

말뚝종류별 관입깊이는 H3, S, P의 말뚝이 각각 12.1m, 10.8m, 9.6m로 나타나 말뚝별 관입성 차이가 명확히 나타나고 있다. 이는 고강도 H 말뚝이 N값 50이상의 풍화암 지반을 1.3m 관통한 것이며 강관말뚝은 정확히 풍화토와 풍화암의 경계선에, PHC 말뚝은 N값 48 정도의 풍화토층에 관입된 것이다.

고강도 H 말뚝의 규격별 관입깊이는 200×204×12×12, 244×252×11×11, 294×302×12×12가 각각 11.1m, 11.8m, 12.1m로 나타나 단면적이 클수록 관입성이 양호한 것으로 나타나고 있다.

(2) 사질토 지반

시험말뚝중 DH3과 DH4는 선단부의 폐색(plugging)효과를 최대화하기 위해 말뚝선단부 근처에 폐색장치(plugger)를 설치하였으며 여타말뚝과 항타관입성을 비교하였다. 표 7에서 시험말뚝 DH2, DH3, DH4의 최대항타응력은 2,295 kg/cm<sup>2</sup>~2,474 kg/cm<sup>2</sup>으로서 항타기준(80%  $\sigma_a$  내외), 즉 최대허용항타응력(2,970 kg/cm<sup>2</sup> = 90%  $\sigma_y$ )의 77%~83%로 유지되었다. 시험말뚝 DH2, DH3, DH4 및 PHC2의 최종관입깊이는 각각 6.2m, 4.9m, 5.9m(항타도중 plugger 파손) 및 3.4m로 나타나 말뚝종류 및 plugger의 유무에 따라 관입깊이, 관입양상, 타격당 관입량 등의 차이가 명확히 나타나고 있음을 알 수 있다.

4.3 수평지지력

수평재하시험은 사질토 지반에서 실시되었으며 말뚝간 반력을 이용하여 고강도 H 말뚝 4개소, PHC 말뚝 2개소에 대하여 실시하였다. 수평지지력 해석에는 변위량 기준 10mm, 15mm(도로교 표준 시방서)와 DM7의 6.35mm 기준을 이용하여 각 말뚝의 허용수평하중을 산정하였다. 고강도 H 말뚝의 약축방향의 허용수평하중은 PHC 말뚝과 비슷하였다. 콘크리트로 보강한 고강도 H 말뚝의 약축은 PHC 말뚝의 평균 허용수평하중 보다 약 18% 큰 것으로 나타났고 보강하지 않은 강축에 비해서는 평균 20% 작게 나타났다. 콘크리트보강 고강도 H 말뚝의 강축방향에 대한 허용수평하중은 그렇지 않은 말뚝보다 8% 크게 나타났다. 시험결과에 의하면 H 말뚝은 방향성에 따라 수평지지력이 매우 상이하게 나타날 수 있지만 제시한 보강을 통해 H 말뚝의 수평력에 대한 약점을 보완할 수 있을 것으로 판단된다. 표 9에는 6개 말뚝의 수평재하시험 결과를 요약하여 나타내었다.

표 9. 수평재하시험 결과

시험말뚝 번호	관입깊이(m)	최대시험 하중(ton)	최대수평 변위량(mm)	잔류변위량 (mm)	기준별 수평하중 (ton)			비고
					6.35mm	10mm	15mm	
DH1	6.7	12	36.640	8.740	4.0	5.4	7.0	약축
DH2	6.2	16	26.400	6.630	6.0	8.2	10.9	강축
DH3	5.0	12	20.330	6.450	4.6	6.8	9.5	약축 콘크리트충전(1.2m)
DH4	5.9	16	22.790	4.050	6.4	8.9	11.9	강축 콘크리트충전(1.5m)
PHC1	4.3	12	35.820	5.390	3.5	5.1	6.9	
PHC2	3.4	12	30.610	6.700	4.7	6.5	8.3	

시험말뚝들의 전체 하중-변위량 곡선은 그림 8에 나타내었다.

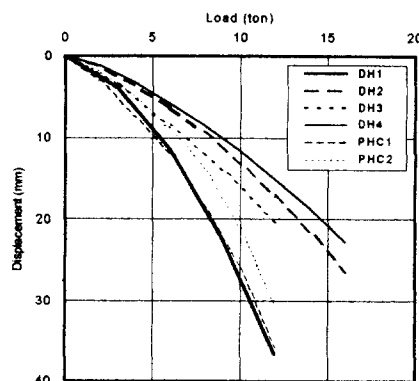


그림 8. 전체 하중-변위량 곡선 비교

## 5. 결 론

점성토 및 사질토지반에 시험시공된 고강도 H 말뚝의 지지력특성 및 항타관입성은 다음과 같다.

- 1) 고강도 H 말뚝을 점성토 지반에 실제 타격응력을 허용타격응력의 90%로 항타시공하였을 때 지반의 허용지지력이 재료의 허용축하중을 초과하여 설계지지력은 규격별(200×204×12×12, 244×252×11×11, 294×302×12×12) 재료의 허용축하중인 91ton, 100ton 및 138ton으로 나타났다. 또한 강관(φ 406.4×9th)과 PHC 말뚝(φ 400×65th)의 설계지지력도 재료의 허용축하중인 121ton과 110ton으로 나타났으며 비슷한 크기의 고강도 H 말뚝(294×302×12×12)의 설계지지력은 이들 말뚝보다 각각 14%, 25% 큰 것으로 나타났다.
- 2) 고강도 H 말뚝(294×302×12×12)을 사질토 지반에 실제 타격응력을 허용타격응력의 80%로 항타시공하였을 때 지반의 허용지지력은 재료의 허용축하중의 절반 정도인 64ton을 나타내었으며 PHC 말뚝(φ 400×65th)의 허용지지력 보다 56% 크게 나타났다.
- 3) 점성토 지반에서는 시간효과에 의하여 고강도 H 말뚝의 지반허용지지력이 최고 2배 가까이 증가하는 것으로 나타났으며 사질토 지반에서는 거의 시간효과가 나타나지 않았다. 지반별로 적절히 시간효과를 고려하면 경제적인 고강도 H 말뚝의 설치가 이루어질 것으로 판단된다.
- 4) 고강도 H 말뚝에서 강제로 폐색효과를 발생시키기 위해 본 연구에서 고안한 Plugger 장치를 말뚝 선단부에서 3D 떨어진 위치에 설치한 결과 동일 심도에서는 설치 아니한 말뚝에 비해 동재하시험결과(RMX)가 54% 크게 나타나서 말뚝길이에 제한이 있을 경우 효과적인 시공법으로 나타났다.
- 5) 수평재하시험결과 고강도 H 말뚝(294×302×12×12)의 약축 방향의 허용수평지지력은 PHC 말뚝(φ 400×65th)과 거의 비슷하게 나타났으며 강축방향은 PHC 말뚝에 비해 20% 크게 나타났다. 고강도 H 말뚝의 웨브와 플랜지 사이의 공동부에 지표에서 1.2~1.7m까지 보강하였을 때 강축과 약축방향의 허용수평지지력은 PHC 말뚝 보다 각각 54%와 18% 크게 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 (주)강원산업과 (주)인천제철이 대한주택공사에 연구의뢰한 “고강도 H형강 말뚝의 지지력 특성 연구”의 일부로 연구부 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 파일테크(1998), “고강도 H형강 말뚝 재하시험보고서”, 서울, pp3~31
2. 박종배, 박태순, 정형식, 이명환(1998), “현장계측을 이용한 비배토 현장타설 콘크리트 말뚝의 하중전이 특성에 관한 연구”, 지반공학회 98봄 학술발표회, pp179-186
3. Coyle, H.M., Castello, R.(1981), “New Design Correlations for piles in Sand”, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 107(7), pp965-986
4. Dennis, N.A., Olson, R.E.(1983), “Axial Capacity of Steel Pipe Piles in Clay”, Geotechnical Practice in Offshore Engineering”, ASCE, Austin, pp370-380
5. Fleming, W. G. K.(1985), “Piling Engineering”, Surrey University Press, pp34-36
6. Tomlinson, M.j.(1986), “Foundation Design and Construction”, 5th ed., Logman Scientific & Technical, pp549-552