

선단확장형 고강도강관 매입말뚝 지지력 분석

Bearing Capacity Analysis of High Strength Steel Pipe Pile with an Extended Head

고준영¹⁾, Jun-Young Ko, 정상섭²⁾, Sang-Seom Jeong, 이성준³⁾, Sung-June Lee, 이진형⁴⁾, Jin-Hyung Lee

¹⁾ 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사과정

²⁾ 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수

³⁾ 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사후과정

⁴⁾ 삼성물산 건설부문 기반기술연구소(지반) 선임연구원

개요(Synopsis) : Recently, because of mega foundations and grand bridges, the foundations require significant bearing capacity. In this study, bearing capacity of high strength steel pipe pile with an extended head (HSP) is calculated on the basis of domestic criteria and Japanese criteria. And bearing capacity of HSP is investigated based on 3 field tests. In comparison with the results of analysis and tests, it is shown that the field test results are bigger than analysis results. Therefore, it is proposed to estimate bearing capacity of HSP.

주요어(Key words) : HSP (High strength steel pipe pile), Extended head, Bearing capacity

1. 서 론

최근 초고층 빌딩, 장대교량 등 건축, 토목 구조물의 대형화, 중량화 추세로 인하여 기초의 큰 지지력이 요구되고 있다. 이로 인해 높은 지지력을 만족할 수 있는 고강도 강관말뚝의 기술 개발이 필요한 실정이다. 강관말뚝은 엄격한 품질관리가 가능한 재료를 사용하여 제조하여 말뚝재료에 대한 신뢰도가 매우 높다. 따라서 말뚝기초의 설계하중을 말뚝재료의 허용하중을 기준으로 고려할 때 비교적 확실한 판단이 가능하다.

국내의 경우 건교부 제정 구조물기초설계기준에서는 SPS400 강재를 사용할 때는 말뚝재료의 부식을 공제한 유효 단면적 당 $1400\text{kg}/\text{cm}^2$, SPS490 강재는 유효단면적당 $1900\text{kg}/\text{cm}^2$ 까지 설계하중을 허용할 수 있게 규정하고 있으나 STKT590에 관한 기준은 아직 없는 실정이다.

국내 지반은 비교적 얇은 깊이에서 암반층이 나타나므로 마찰지지력보다 선단지지력에 의한 말뚝설계가 주를 이루기 때문에 대구경의 강관말뚝이 선단지지형식으로 고려될 경우에는 재료의 강도를 극대화할 수가 있다. 이로 인해 선단확장형 고강도강관 매입말뚝의 개발이 이루어지고 있다.

본 연구에서는 국내와 일본기준의 매입말뚝 지지력 공식을 이용하여 선단확장형 고강도강관 매입말뚝 지지력을 산정하였고 이 계산값을 3분의 현장재하시험 값과 비교하였다. 이 결과를 통하여 고강도강관 매입말뚝에 적합한 지지력 산정방법을 제안하고자 한다.

2. 강관말뚝 허용응력 규정

국외의 경우 말뚝재료의 허용하중에 상당하는 지반조건까지 말뚝을 시공하여 말뚝재료를 최대한 활용하는 최적 설계방법들을 적용하고 있다. 반면, 국내의 경우 과거에는 말뚝이 설치되는 지반의 허용지지력은 말뚝 시공상의 한계 때문에 말뚝재료의 허용하중과 비교하여 낮은 것이 보통이었으며 이에 따라 말뚝의 축방향 허용지지력은 지반의 허용지지력에 의하여 결정되는 경우가 대부분이었다. 따라서 합리적인 설계와 시공방법 정립을 통해 말뚝재료의 허용하중에 상당하는 지반의 허용지지력을 확보하여 말뚝의 설계하중이 말뚝재

료의 허용하중에 의해 결정되는 말뚝설계가 보편화되어야 할 것이다.

표 1은 SM570, SMA570, STKT590 강재의 기계적 성질을 나타낸다. 또한, 구조물 기초설계기준 해설(2009)에서 제안하고 있는 허용압축응력은 표 2와 같다. 이와 같이 STKT590 고강도 강관말뚝의 축방향허용압축응력은 일반 강관말뚝과 유사한 수준인 항복강도의 58~59%에 해당하는 260MPa를 적용할 수 있다고 본다. 그러나 아직 현장에서 충분한 실적과 경험이 있을 때까지는 상기 값의 90%정도인 230MPa로 제한하여 사용하도록 추천한다.

표 1 SM570, SMA570, STKT590 강재의 기계적 성질(도로교설계기준, 2005)

구분	도로교설계기준(2005)			STKT590 강관 기준
강종	SM570 SMA570			STKT590
관두께(mm)	40이하	40초과 75이하	75초과 100이하	20이하
기준항복점 (MPa)	460	440	430	440
인장강도 (MPa)	570~730			590~740

표 2 강관말뚝의 허용압축응력(고강도 타입 강관파일의 현장 적용성 평가연구 보고서, 2010)

재료	허용압축응력 (MPa)	비고
SKK400	140	구조물 기초설계기준 해설(2009)
SKK490	190	
STKT590	230	고강도 타입 강관파일의 현장 적용성 평가연구 보고서(2010)

3. 선단확장형 고강도강관 매입말뚝 재하시험 결과

본 연구에서는 매입형 고강도강관말뚝(HSP Pile - High Strength Steel Pipe Pile, STKT 590)의 성능평가 및 강관말뚝의 선단부 보강형태(Type-1과 Type-2)에 따른 지지력 특성을 파악하고 이를 PHC말뚝과 비교하기 위하여 현장 재하시험을 수행하였다. 그림 1은 시험말뚝 시공 배치도를 나타낸다. 표 3은 말뚝종류와 규격 및 수량을 나타내고 있으며 표 4는 재하시험 종류 및 시험일자를 나타낸다. 또한, 지반조사결과를 요약하여 표 5에 나타내었다. 고강도 강관말뚝의 선단부 보강형태는 표 6에 나타난 바와 같다. 말뚝의 시공방법은 선굴착(강관케이싱 매입) 후 시멘트 풀 주입을 실시하고 최종타입하는 방법이다.

표 3 말뚝종류와 규격 및 수량

말뚝종류 및 규격	등급	수량	말뚝번호	비고
Φ406.4 × 7t 고강도강관말뚝	STKT 590	1	HSP-1	선단보강 Type-1 하중전이시험을 위한 센서부착
		1	HSP-2	선단보강 Type-2 하중전이시험을 위한 센서부착
		1	HSP-3	선단보강 Type-1
Φ500 PHC말뚝	A-Type	1	PHC-1	-

표 4 재하시험 종류 및 시험일자

말뚝번호	말뚝규격	동재하시험			압축재하시험
		E OID	Restrike 1차	Restrike 2차	
HSP-1	Φ406.4 × 7t	09.12.21	09.12.28	09.12.31	10.1.15
HSP-2		09.12.22	09.12.28	09.12.31	10.1.12
HSP-3		09.12.21	09.12.28	09.12.31	-
PHC-1	Φ500	09.12.22	09.12.28	09.12.31	10.2.10

표 5 지반조사결과

구분	BH-1	부철#1	부철#2
지하수위	GL(-) 0.0m	GL(-) 1.0m	GL(-) 1.0m
표토층	0.8m 실트질모래	-	-
매립층	-	1.7m 실트섞인 중세립질모래	1.8m 실트섞인 중세립질모래
붕적토	-	3.3m 잔자갈 소량 혼재된 실트질모래	3.3m 잔자갈 소량 혼재된 실트질모래
풍화토	7.9m 실트섞인 중세립질모래	5.1m 실트섞인 중세립질모래	7.1m 실트섞인 중세립질모래
연암층	11.0m 흑운모편마암	7.8m 흑운모편마암	7.2m 흑운모편마암
경암	-	13.5m 흑운모편마암	12.3m 흑운모편마암

표 6 고강도 강관말뚝의 선단보강형태

type-1	type-2	비고
		보강리브개수 type-1 : 8개 type-2 : 6개

3.1 압축재하시험

3.1.1 동재하시험 결과

본 연구에서는 PDA(Pile Driving Analyzer)를 사용한 동재하시험(ASTM D 4945)을 실행하였다. 여러 분석방법에 의해 판정된 시험말뚝들의 허용지지력을 표 7에 정리하였다. 고강도 강관 시험말뚝 3개소(HSP-1, HSP-2, HSP-3)의 허용지지력은 최종시험시점에서 122ton~166ton으로 분석되었다. 시험말뚝 HSP-2의 경우 말뚝 재료의 허용축하중(163ton)을 고려하면 최종 허용지지력은 163ton이 된다. 또한 시험말뚝 PHC-1의 경우 허용지지력은 최종시험시점에서 105ton으로 분석되었다.

표 7 CAPWAP분석에 의한 허용지지력 요약

시험 말뚝 번호	관입 깊이 (m)	시험 구분	시공후 경과 일수	타격당 관입량 (mm/打)	CAPWAP 분석결과			Davisson 방법에 의한 항복하중 (ton)	허용 지지력 (ton)
					주면 마찰력 (ton)	선단 지지력 (ton)	전체 지지력 (ton)		
HSP-1	5.5	E	-	6.0	18.9	301.1	320.0	152.0	76 ton
		R1	7일	2.0	30.4	297.7	328.1	266.0	133 ton
		R2	10일	2.0	67.1	300.9	368.0	270.0	135 ton
HSP-2	6.6	E	-	5.0	27.7	307.3	335.0	164.0	82 ton
		R1	6일	2.0	61.4	293.6	355.0	308.0	154 ton
		R2	9일	2.0	65.5	294.5	360.0	333.0	166 ton
HSP-3	5.2	E	-	3.0	20.3	304.7	325.0	171.0	85 ton
		R1	7일	3.0	46.8	293.2	340.0	230.0	115 ton
		R2	10일	2.0	54.4	295.6	350.0	245.0	122 ton
PHC-1	6.0	E	-	5.0	46.3	253.7	300.0	152.0	76 ton
		R1	6일	5.0	72.1	246.0	318.0	210.0	105 ton
		R2	9일	5.0	82.7	241.3	324.0	211.0	105 ton

3.1.2 정재하시험 결과

본 연구에서는 반력앵커를 이용한 정적압축재하시험(ASTM D 1143)을 실행하였다. 시험말뚝의 재하시험결과 및 여러 해석방법에 의한 분석결과를 표 8에 정리하였다.

본 시험말뚝들에 대한 허용지지력은 각 시험말뚝의 최대하중을 극한하중으로 생각하여 안전율 3.0을 적용하면 각각 161ton(HSP-1), 166ton(HSP-2), 166ton(PHC)이 된다. 또한, DIN4026의 순침하량 기준(2.5%)과 Davisson방법을 포함한 국내의 항복하중 판정기준(S-log t, log P-log S, dS/d(log t)-P)을 적용한 경우 시험말뚝의 허용지지력은 각각 171ton~209ton(HSP-1), 172ton~229ton(HSP-2), 208ton~250ton(PHC)으로 분석되었다. 따라서 고강도 강관 말뚝의 허용지지력은 극한하중판정법에 근거하여 각각 161ton(HSP-1)과 166ton(HSP-2)으로 결론지을 수 있다. 또한, PHC 말뚝의 허용지지력은 최소 166ton이상으로 볼 수 있으며 지반의 지지력만을 고려하면 고강도 강관 말뚝(HSP-1, HSP-2)보다 양호한 것으로 평가할 수 있다.

표 8 허용지지력 분석결과 (ton)

말뚝 번호	극한 또는 항복하중(허용지지력)						허용 지지력
	극한하중 (Fs=3.0)	DIN4026의 순침하량기준 (2.5%D,Fs=2.0)	S-log t (Fs=2.0)	log P -log S (Fs=2.0)	dS/d(log t)-P (Fs=2.0)	Davisson 방법 (Fs=2.0)	
HSP-1	485.0 (161)	418.0 (209)	416.7 (208)	390.0 (195)	390.0 (195)	342.0 (171)	161
HSP-2	500.0 (166)	436.0 (218)	458.3 (229)	415.0 (207)	415.0 (207)	344.0 (172)	166
PHC-1	재료파괴 500.0 (166)	416.7 이상 (208 이상)	500.0 (250)	417.0 (208)	430.0 (215)	500.0 (250)	166 ↑

3.1.3 압축재하시험 분석결과

고강도 강관말뚝 수직허용지지력을 산정하기 위하여 동재하시험, 정재하시험을 분석하였다. 말뚝 선단부가 위치한 지반은 연암 및 풍화암 상부로, 말뚝의 허용지지력은 지반의 허용지지력보다 고강도 강관말뚝 재료의 허용응력에 지배되는 것으로 나타났다. 따라서 선단보강 형태에 따른 선단 지지력의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다(type I: (HSP-1; 2316.34 t/m²) (HSP-3; 2344.20 t/m²), type II (HSP-2): 2364.34 t/m²). 표 9는 정, 동재하시험으로부터 평가된 지지력을 비교하기 위하여 Davisson방법에 의한 항복하중을 나타낸 것이다. 재하시험 결과 대체로 암에 근입이 되어 있는 경우, 허용하중이 재료허용하중 값보다 크게 나와 허용지지력은 재료허용하중 값으로 산정되는 경우가 많았다. 고강도 강관말뚝이 암이 아닌 토층에 설치된 경우, 일반적인 축방향 지지력 설계기준을 따라 말뚝의 압축지지력을 산정하는 것이 타당하다고 판단되며 본 연구에서 사용한 말뚝의 시공 특성을 고려하여 선단이 확장된 면적을 선단지지력 산정시 사용하여야 하며 매입말뚝의 주변 및 선단 지지력 산정방법을 적용하여야 한다.

표 9 산출된 지지력 비교

시험말뚝번호	관입깊이	시험 구분	Davisson방법에 의한 항복하중(ton)	시험시점
HSP-1	5.5	EOID	152	-
		Restrike 1	266	시공 후 7일
		Restrike 2	270	시공 후 10일
		정재하시험	342	시공 후 25일
HSP-2	6.6	EOID	164	-
		Restrike 1	308	시공 후 6일
		Restrike 2	333	시공 후 9일
		정재하시험	344	시공 후 21일
PHC-1	6.0	EOID	152	-
		Restrike 1	210	시공 후 6일
		Restrike 2	211	시공 후 9일
		정재하시험	500	시공 후 49일

표 10 허용인발지지력 산정(하중전이시험결과)

시험말뚝	전체주면마찰력	극한인발하중 (FRF=0.8)	허용인발지지력 (FS=3.0)
HSP-1	141 ton	112 ton	37 ton
HSP-2	164 ton	131 ton	43 ton

3.2 하중전이시험 결과

본 연구에서는 시험말뚝 HSP-1과 HSP-2에 대하여 정재하시험(압축)을 실시한 후 인발재하시험을 수행하였으며 전술한 바와 같이 시험말뚝 HSP-1과 HSP-2는 정재하시험 과정에서 극한상태에 도달함에 따라 인발재하시험으로부터 만족할 만한 결과를 얻지 못하였다. 이에 따라 인발재하시험에 앞서 실시한 동재하시험과 정재하시험결과(하중전이시험결과)를 토대로 인발지지력을 추정하였다. 동재하시험에 의한 인발지지력은 양생효과가 충분히 반영되지 못한 상태에서 평가된 것으로 나타났다. 따라서 비교적 양생효과가 충분히 반영된 정재하시험(압축)으로부터 인발지지력을 평가하였다. 시험말뚝 HSP-1과 HSP-2의 허용인발지지력은 본 하중전이 분석에 의한 주면마찰력에 하중방향에 따른 마찰력 감소계수 0.8(FRF : Friction Reduction Factor, CAPWAP 매뉴얼 추천)을 적용, 극한 인발지지력을 구한 후, 이에 안전율 3.0을 적용하여 추정하였다. 위의 표 10은 시험말뚝 HSP-1과 HSP-2의 허용인발지지력을 나타낸다.

4. 선단확장형 고강도강관 매입말뚝 지지력 계산

4.1 국내설계기준

국내설계기준 매입말뚝 지지력 산정방법으로 구조물 기초설계기준 해설(한국지반공학회, 2009)을 적용하였다. 매입말뚝의 지지력을 타입말뚝에 대하여 제시한 식을 이용하여 계산할 때에는 선굴착 직경, 주면고정 및 선단부 고정을 위한 시멘트풀 주입여부, 최종 타입의 정도 등에 따라 상이한 계수 m , n 이 사용되고 있다. 타입말뚝 시공이 어려운 지반조건이나 건설공해(지반진동 및 소음)가 우려되는 시공조건에서 주로 적용되는 매입말뚝의 선단지지력과 주면마찰력을 표준관입시험 N 값을 이용하여 산정할 때에는 건축기초구조설계기준(2005) 및 「대한주택공사 말뚝기초설계개선안(2008)」 등에 제시되어 있는 표 11의 범위 내에서 참고하여 산정할 수 있다.

표 11 매입말뚝의 지지력 산정방법

기준	단위면적당 극한선단지지력 q_B (kN/m ²)	단위면적당 극한주면마찰력 f_s (kN/m ²)
건축기초구조설계 기준(2005)	200N ($\leq 12,000$)(사질토) 6 c_u ($\leq 12,000$)(점성토)	2.5N ($N \leq 50$)(사질토) 0.8 c_u ($c_u \leq 125$)(점성토)
주택공사, 말뚝기초 설계개선(안)(2008)	250N ($N \leq 60$)	2.0Ns (사질토) 5.06 q_u (점성토)

4.2 일본설계기준

일본설계기준 매입말뚝 지지력 산정방법으로 지반공학·실무시리즈 17 『말뚝기초의 조사·설계·시공부터 검사까지』(사단법인 일본지반공학회, 2004)을 적용하였다. 이는 매입말뚝의 극한선단지지력 산정식을 건축물 기초일 경우와 도로교 기초일 경우로 구분하여 제시하고 있는데 본 연구에서는 도로교 기초일 경우를 적용하였다. 극한선단지지력 산정식은 표 12와 같고, 극한주면마찰력 산정식은 표 13과 같다.

표 12 매입말뚝의 단위면적당 극한선단지지력 산정식

시공방법		매입말뚝의 단위면적당 극한선단지지력 (kN/m ²)		
		사 질 토		단단한 점성토
매입말뚝	최종타격방식	타입말뚝과 동일		
	시멘트밀크 분출교반방식	모래층	모래자갈층	
		$q_d = 150\bar{N}$ ($\leq 7,500$ kN/m ²)	$q_d = 200\bar{N}$ ($\leq 10,000$ kN/m ²)	
콘크리트 타설방식	N \geq 30인 사질토층인 경우 $q_d = 3,000$ kN/m ²		$q_d = 3 \cdot q_u$	

※ q_u : 점토의 일축압축강도

표 13 매입말뚝의 단위면적당 극한주면마찰력 산정식

시공방법		매입말뚝의 단위면적당 극한주면마찰력 (kN/m ²)	
		사 질 토 (τ_s)	점 성 토 (τ_c)
매입말뚝	최종타격방식	$\tau_s = 1.0N$ (≤ 50 kN/m ²)	$\tau_c = 0.5c$ 또는 $5N$ (≤ 100 kN/m ²)
	시멘트밀크 분출교반방식		
	콘크리트 타설방식		

4.3 선단확장형 고강도강관 매입말뚝 지지력 결과

본 연구에서는 국내와 일본기준의 매입말뚝 지지력 공식을 이용하여 선단확장형 고강도강관 매입말뚝 지지력을 산정하였고 이 계산값을 현장시험 값과 비교하였다. 도로교 기준을 통해 지지력을 산정한 결과 HSP-1, HSP-2 모두 시험 값보다 작게 산정되었다. 주택공사 기준을 통해 지지력을 산정한 결과 HSP-1은 시험 값보다 크게 산정되었고, HSP-2는 시험 값보다 작게 산정되었다. 국내와 일본 기준을 통해 계산된 매입말뚝의 지지력은 시험 값보다 작은 경향을 보이므로 고강도 강관말뚝에 적합한 지지력 산정식이 필요하다. 선단확장형 고강도강관 매입말뚝의 지지력 산정결과는 표 14와 같다.

표 14 선단확장형 고강도강관 매입말뚝의 지지력 산정결과

구분	계산값(kN)			시험값(kN)		시험값을 이용한 분석 방법(kN)				
	일본설계기준	도로교/ 건축기초구조 기준	주택공사, 말뚝기초 설계개선(안)	동재하 시험	정재하 시험 (극한하중 판정시)	S-log t	log P -log S	dS/d(logt)-P 분석법	Davisson 판정법	DIN4026
안전율	3.0	3.0	3.0	2.0	3.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
HSP-1	878(부철1) /851(BH 1)	800(부철 1) /795(BH 1)	1452(부철 1) /915 (BH 1)	1324	1579	2040	1912	1912	1677	2050
HSP-2	878(부철 1) /870(부철 2)	800(부철 1) /812(부철 2)	1452(부철 1) /1101(부철 2)	1628	1628	2246	2030	2030	1687	2138
HSP-3	-			1196	-	-	-	-	-	-
PHC-1	-			1030	1628	2452	2040	2108	2452	2040

5. 결 론

본 연구에서는 국내와 일본기준의 매입말뚝 지지력 공식을 이용하여 선단확장형 고강도강관 매입말뚝 지지력을 산정하였고 이 계산값을 3본의 현장재하시험 값과 비교하였다. 국내와 일본 기준을 통해 계산된 매입말뚝의 지지력은 시험 값보다 작은 경향을 보이므로 고강도 강관말뚝에 적합한 지지력 산정식이 필요하다.

매입말뚝은 경타를 하여 지지층에 안착되므로 재료가 고강도라 하여 선단지지력을 더 크게 발현한다고 판단되지 않는다. 매입말뚝 시공 시 재료강도의 부족으로 경타를 충분히 하지 못하는 경우는 거의 없다. 물론 세계 타입 한다면 재료의 고강도 특성을 살릴 수 있지만 그럴 경우 이미 매입말뚝이 아닌 타입말뚝의 개념이 되어버린다. 따라서 우리나라의 수많은 현장경험과 시공 수준을 고려할 때 표 15의 지지력 산정방법이 적합하다고 판단된다.

표 15 선단확장형 고강도강관 매입말뚝의 지지력 산정방법

구분	지지력 산정방법
단위면적당 극한선단지지력 q_B (kN/m ²)	200N ($\leq 12,000$)(사질토) 6cu ($\leq 12,000$)(점성토) 건축기초구조설계 기준(2005)이 적합하다고 판단됨.
단위면적당 극한주면마찰력 f_s (kN/m ²)	2.0Ns (사질토) 5.06qu (점성토) 주택공사, 말뚝기초 설계개선(안)(2008)이 적절하다고 판단됨.

참고문헌

1. 대한건축학회(2005), 건축기초구조설계기준.
2. 대한주택공사(2008), 말뚝기초설계개선(안).
3. 대한토목학회(2008), 도로교설계기준 해설(하부구조편).
4. 한국지반공학회(2010), 고강도 타입 강관파일의 현장 적용성 평가연구 보고서.
5. 한국지반공학회(2009), 구조물 기초설계기준 해설.
6. American Society of Testing Materials (2000), ASTM D 4945 : Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Piles.
7. 社団法人 地盤工學會(2004), 地盤工學·實務シリーズ 17 杭基礎の調査·設計·施工から検査まで, pp.130~152.