건축구조물 말뚝기초의 지지력 미달 원인 및 보강

The cause of pile capacity shortage and their remedial works.

조천환[1] : Cho, Chun Whan　이명환[2] : Lee, Myung Whan　홍헌성[3] : Hong, Hun Sung
이장덕[4] : Yi, Chang Tok　이원제[5] : Lee, Won Jae　엄재경[6] : Eum, Jae Kyung
1) 삼성물산(주), (02) 2145-6584
2) 파일테크 대표, Principal, PILETECH consulting engineers.
3) 파일테크 대표, Principal, PILETECH consulting engineers.
4) 파일테크 이사, Head Manager, PILETECH consulting engineers.
5) 파일테크 부장, Manager, PILETECH consulting engineers.
6) 파일테크 기사, Engineer, PILETECH consulting engineers.

SYNOPSIS : From the investigation of previous pile loading test results of 300 sites, it was found out that shortage of pile capacity occured in 60 sites. In this paper the cause of pile capacity shortage was analysed and several case histories were explained including the chosen method of remedy.

1. 서　론

구조물 기초로서 말뚝기초의 사용물량은 주거지 및 사회간접투자의 확대와 더불어 점차 증대되고 있으며 일반적으로 이들은 과거에 비하여 더욱 열악한 건설환경 및 지반조건에 건설되고 있다. 특히 건축구조물에 있어서는 최근의 강화된 사회의 환경의식으로 인하여 말뚝기초의 시공방법도 종래의 항타공법 위주에서 매입공법 등의 저공해 공법으로 전환되고 있는 실정이며 이러한 경향은 계속 가속화될 전망이다. 그러나 현재 적용되는 매입공법은 소수의 공법에 의존도가 커서 최근 다양해지고 악화되고 있는 건설조건을 만족시키기에는 역부족인 상황이다.

국내의 건축구조물에 대한 말뚝재하시험 결과의 분석[(1)]에 의하면 57.9 %가 시험 최대 하중까지 항복하중이 규명되지 않은 것 등으로 보아 말뚝기초의 설계·시공은 전반적으로 지나치게 안전한 사례가 주류를 이루고 있다고 볼 수 있다. 그러나 설계지지력을 미달하는 경우도 21.3%에 달하는 것으로 나타났다. 이러한 문제점 발생시 본 시공법의 개선으로 문제를 해결할 수도 있지만 적절한 보수 및 보강공법이 수행되어야만 하는 경우도 자주 발생하고 있어 최근에는 말뚝기초의 보수 및 보강공에 대한 효과판정 및 경제성이 주요한 관심의 대상이 되고 있다. 또한 국내의 경우 지지력이 미달된 말뚝이 발견되었을 경우 보수 및 보강공법에 대한 선택의 여지가 매우 작아 향후 경제적이고 효과적인 공법의 도입 및 개발이 절실하다. 그러나 근본적으로는 문제가 발생하기 이전에 이들을 예측하고 조치를 취하는 일이 무엇보다도 중요하며 이를 위해서는 과거의 문제가 있었던 말뚝들에 대한 원인을 조사·분석해 보는 것은 매우 의미있는 일이라고 볼 수 있다.

이러한 관점에서 본 논문에서는 건축구조물 말뚝기초의 지지력 미달원인을 파악하기 위해 건축구조물 기초로서 말뚝

기초공의 실사례를 적용, 공법별로 분류(항타공법 및 매입공법)한 후 이들의 재하시험결과를 기준으로 허용지지력이 설계지지력에 미달되는 경우에 대해서 분석을 실시하였다. 또한 미달된 사례중 원인분석을 실시하고 이러한 내용을 바탕으로 적절한 보수 및 보강공법을 적용한 후 보수 및 보강효과에 대한 평가를 실시한 몇 가지 사례에 대하여 논의하였다.

2. 지지력 미달 원인 분석

[표 1]은 국내에서 항타 및 매입공법으로 시공된 콘크리트 말뚝의 시공법(항타 및 매입공법)의 202개소 정재하시험결과[(1)]를 분석하여 말뚝종류와 지지력 판정기준별로 분류한 것이다. 여기에서 제시한 시공 사례들이 반드시 우리나라 전체 현황을 대표한다고 볼 수는 없지만 이들 결과를 토대로 국내의 말뚝의 설계 및 시공 현황을 살펴보면 다음과 같다.

- o. 설계하중 결정시 말뚝종류별로 특정한 하중을 적용하는 현상이 뚜렷하게 나타나고 있고 PHC말뚝의 경우에는 PC말뚝보다 상대적으로 다양하고 높은 설계하중을 적용하고 있음을 알 수 있다. 또한 미달된 말뚝의 72 % 정도가 PC말뚝에서 나타나고 있어 PC말뚝의 시공관리가 더욱 문제가 되고 있음을 알 수가 있다. 또한 전체적으로 보아 콘크리트 말뚝은 재료허용하중의 66 % 정도로 설계되는 것으로 나타났다.
- o. 설계하중이 미달된 것은 전체의 21.3 %로 이는 모두 극한 하중이 확인된 것에서만 나타나고 있다. 이러한 내용은 전체적으로 보아 말뚝의 지지력이 과잉 아니면 과소라는 양단의 상황을 극명하게 보여주는 것이며, 결국 이의 원인은 설계시 관례적인 하중 적용에 의한 과잉설계 그리고 그럼에도 불구하고 적절치 못한 시공에 의한 지지력 미달이라는 현상에 의한 것으로 유추해 볼 수가 있다.
- o. 관용적으로 적용하는 설계하중은 매입말뚝 쪽에서 더 크게 적용하고 있는데, 이는 시공되는 말뚝의 일반적인 지지력 발현내용과는 상반되는 것으로 보아 매입말뚝 분야에서의 상대적인 과잉 설계 그리고 항타말뚝 분야에서 상대적인 시공불량이라는 현상을 반영하고 있다고도 볼 수 있다. 또한 시험개소수에 대한 지지력이 미달된 말뚝의 구성비(항타 : 26.3 %, 매입 : 16.8 %)를 보면 오히려 시공문제가 복잡한 매입말뚝쪽에서 미달건수가 작은 것으로 보아 항타분야에서의 기술수준에 더욱 문제가 있다고 생각된다.

[표 2]는 말뚝의 지지력의 미달 원인을 분석하기 위해 최근에 말뚝공사 현장에서 실시한 재하시험결과중 말뚝의 허용지지력이 설계지지력에 미달된 현상이 일어난 현장에서 대표적인 말뚝의 시공특성에 대하여 통계를 낸 결과이다. [표 2]에서 이용된 자료는 [표 1]과는 원자료의 취득시기가 달라 중복되지 않으며 또한 특정의 말뚝재료와 시공법에 국한하지 않고 최근 1년 반 동안 300개소 현장의 시험자료에서 추출한 것이다.

[표 2]에 제시된 지지력 미달이 발생한 말뚝은 전체 시험 개소수의 20%를 차지하며 전체에 대한 말뚝 재료별 구성비는 PC말뚝이 48.3%, PHC말뚝이 40%, 강관말뚝이 11.7%를 점유하고 있다. 이러한 재료별 구성비는 [표 1]의 분석자료와는

[1] (1992. 5.~ 994. 5.)

말뚝 종류	말뚝 직경 (mm)	설계 하중 (ton)	시험 결과 (개 소) 시험 개소	극한 또는 항복 확인불능	항복하중 확인	극한하중 확인	구성비 (%)
PC 말뚝	350	40	39(20)	18(12)	8(5)	13(3)	19.3(9.9)
		50	2(4)	1(3)	1(1)		1.0(2.0)
	400	50	8(30)	2(23)	2(2)	4(5)	4.0(14.9)
		60	3(11)	-(4)	1(4)	2(3)	1.5(5.5)
	450	70	-(6)	-(6)	-	-	-(3.0)
	500	100	-(8)	-(7)	-	-(1)	-(3.9)
	소 계		52(71)	21(55)	12(12)	19(12)	25.7(35.1)
PHC 말뚝	350	40	10(-)	9(-)	1(-)	-(-)	5.0(-)
		50	9(5)	6(1)	2(4)	1(-)	4.5(2.5)
		60	1(6)	1(1)	-(3)	-(2)	0.5(3.0)
	400	50	6(2)	4(2)	1(-)	1(-)	3.0(1.0)
		70	6(-)	4(-)	2(-)	-(4)	3.0(-)
		80	7(14)	3(7)	-(3)	4(-)	3.5(6.9)
	450	90	1(-)	1(-)	-	-	0.5(-)
		95	1(-)	1(-)	-	-	0.5(-)
	500	80	-(1)	-(1)	-	-	- (0.5)
		100	2(-)	-	2(-)	-	1.0(-)
	소 계		43(28)	29(12)	8(10)		21.3(13.9)
합 계			95(107)	50(67)	20(22)	25(18)	47.3(53.1)
구 성 비 (%)	구분		100(100)	52.6(62.6)	21.0(20.6)	26.3(16.8)	
	전체		100	57.9	20.8	21.3	

(주) 시험결과 개소수는 항타공법(매입공법)의 숫자임.

[2] (1994. 9.~ 996. 2.)

말뚝 종류	말 뚝 직 경 (mm)	설계 하중	시험 결과 (개) 시험 개소 (개)	타입말뚝 K25	K35	K45	H5	H7	D2	매입말뚝 SIP	SAIP	선굴착+드롭	구성비
PC 말뚝	350	40	9	4			1	1		3			
		50	7	3			2	1		1			
	400	50	7	3						4			
		60	3	1						1	1		
	450	70	2	1			1						
	500	50	1					1					
	소 계		29	12			4	3		9	1		
PHC 말뚝	350	50	2		1			1					
		60	2							2			
		70	1						1				
	400	50	2	1					1				
		70	6					1		5			
		80	4				1	1		2			
	450	60	1					1					
		80	1					1					
		100	1					1					
	500	80	3					2			1		
		100	1								1		
	소 계		24	1	1		1	8	2	9	2		
강관 말뚝	406×9t	70	2	2									
	508×12t	90	2		1							1	
	609×12t	130	3		2	1							
	소 계		7	2	3	1						1	
합 계			60	15	4	1	5	11	2	18	3	1	
			60 (100)	38 (63.3)						22 (36.7)			

주) K : 디젤해머, H : 유압해머, D : 드롭해머

다른 경향을 보여주고 있다. 즉 [표 2]에서는 미달된 말뚝의 72%가 PC말뚝이었는데 반해 [표 2]에서는 여전히 PC가 큰 점유율을 보여주고 있지만 PC와 PHC의 구성비가 거의 근접하게 나타나고 있는 것을 알 수가 있다. 이는 두가지 분석 자료원의 취득시기에 기인하는 것으로 보이며, 최근의 PHC 이용이 증가한 내용을 시사한다고 판단된다.

[표 2]의 내용을 [표 1]의 조사내용과 비교할 때 적용되는 공법의 종류는 타입말뚝 쪽이 많이 다양해졌고 매입말뚝은 전과 같이 거의 한가지 공법(SIP공법)에 의존하고 있음을 알 수 있어 상대적으로 항타공법에 많은 관심이 주어졌음을 유추해 볼 수 있다.

그러나 [표 2]에서 미달된 말뚝을 공법별로 구분해보면 타입말뚝이 63.3%, 매입말뚝이 36.7%로 과거와 유사한 경향을 보여주고 있다. 또한 최근 매입말뚝의 시공이 크게 증가한 것을 고려해 볼 때 상대적으로 타입말뚝 분야의 기술성 향상은 거의 없었다고도 볼 수 있다.

타입말뚝 분류에서 지지력 미달건수가 가장 많은 해머의 종류를 살펴보면 디젤해머 K-25와 유압해머 7 ton이 각각 39.4%와 28.9%를 차지하고 있고, 또한 이들 해머가 속한 말뚝종류를 보면 K-25가 PC말뚝의 소구경, 유압해머 7 ton

이 PHC말뚝의 대구경에 포함되고 있어 항타공법의 문제는 해머 선정보다는 시공관리에 더욱 문제가 있음을 짐작할 수가 있다.

[표 3]은 [표 2]의 지지력 미달건들에 대해 미달 원인을 분석한 후 가장 주요한 원인이라고 생각되는 내용을 말뚝의 종류별로 집계한 것이다. 일반적으로 지지력 미달은 단순히 한가지의 원인에 의해 발생하는 경우가 드물지만, 본 연구에서는 미달의 원인을 시공측의 관점에서 재하 시험자의 의견을 들어 분류하여 분석하였다. 따라서 분석자료의 대표성과 객관성에는 의문이 따를 수가 있다.

[3] 지지력미달 원인분석

시 공 법	미 달 원 인	PC말뚝, 건수(구성비%)	PHC말뚝, 건수(구성비%)	강관말뚝 건수(구성비%)	총 계 건수(구성비%)
타입말뚝	지반조사 미흡	1	2		3(5.0)
	해머선정	3	1	4	8(13.3)
	지중 장애물	1			1(1.7)
	말뚝체강도 부족	4			4(6.7)
	시공관리 부적	10	10	2	22(36.7)
	소 계(구성비)	19(31.7)	13(21.7)	6(10)	38(63.3)
매입말뚝	시공기계 선정				
	지중 장애물				
	주면부처리 미흡	4	4		8(13.3)
	지지층조사		1		1(1.7)
	건입 불량		2		2(3.3)
	근고부 불량	1			1(1.7)
	최종항타 부족	4	5	1	10(16.7)
	소 계(구성비)	9(15)	12(20)	1(1.7)	22(36.7)
총 계 (구성비%)		28(46.7)	25(41.7)	7(11.7)	60(100)

[표 3]에 의하면 항타말뚝의 경우 [표 2]에서와 같이 지지력 미달현상은 PC말뚝, PHC말뚝, 강관말뚝에서 각각 31.7%, 21.7% 10%로 나타나 주로 콘크리트 말뚝(특히 PC말뚝)에서 많은 문제점이 나타나고 있음을 알 수가 있다. 지지력 미달의 원인별 구성비를 보면 부적절한 시공관리(36.7%), 부적합한 해머선정(13.3%), 말뚝체의 강도부족(6.7%) 순서로 나타나고 있는데, 주요한 특징으로는 말뚝체의 강도부족은 PC말뚝에서, 부적절한 해머선정은 강관말뚝에서 나타나고 있음을 알 수가 있다. 여기서 시공관리 항목에는 최종관입량 부족, 쿠숀부족, 편타 등이 해당된다.

매입말뚝의 경우 지지력 미달 현상은 항타말뚝에서와 같이 주로 콘크리트말뚝에서 많이 일어나고 있지만 PHC말뚝이 PC말뚝보다 구성비가 큰 것이 특징적이어 [표 1]의 자료와 비교할 때 높아진 재료의 강도만큼 시공기술에 의한 지지력 향상이 이루어지지 못하고 있음을 반영하고 있다. 지지력 미달의 원인별 구성비를 보면 최종항타부족(16.7%), 주면부처리 미흡(13.3%)의 두가지 원인이 뚜렷하게 나타나고 있다. 이는 매입공법이 단일공법에 의존하고 있는 것이 반영되었기 때문이라 사료되며, 이러한 두가지 요인은 사실 SIP공법의 주요 시공관리 항목임을 고려할 때 역시 SIP의 공법의 경우도 시공관리가 주요 문제임을 알 수가 있다.

3. 보강대책 및 효과확인 사례

본 절에서는 [표 2]에서 분석한 자료중 대표적인 현장 4개소(타입공법 2, 매입공법 2)를 선정하여 지지력의 미달원인을 분석한후 보강대책을 실시하고 이의 효과확인을 실시한 사례에 대해 논의한다.

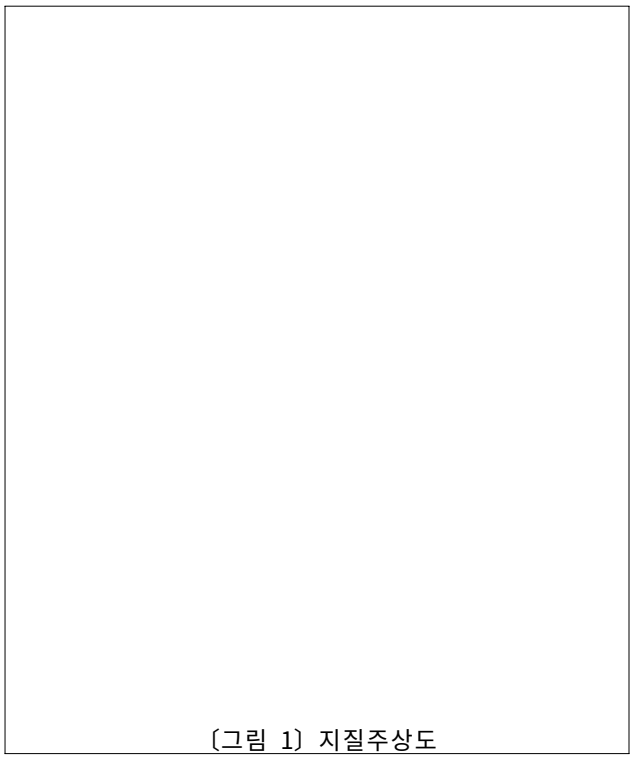
3.1 타입공법

3.1.1 사 례 I

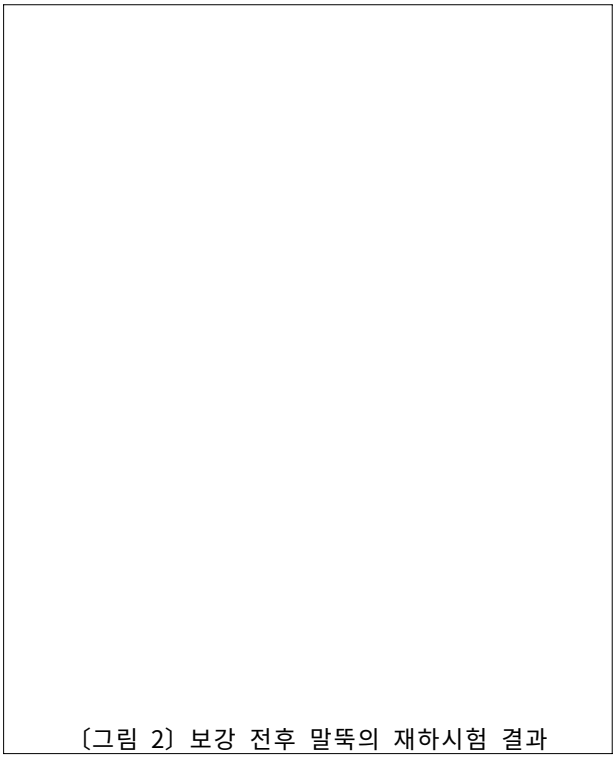
o. 현황 및 지반조건

본건 현장은 건축물의 말뚝기초로 PC 400 mm말뚝을 K-25해머로 시공하도록 계획되었다. 총 3376개의 계획말뚝중 1445개의 말뚝이 항타 완료된 시점에서 재하시험 결과에 의거 지지력 미달 말뚝이 발견됨에 따라 이의 원인을 분석하고 보강을 실시한 후 보강후의 효과확인을 실시하였다. 총 7개의 정재하 및 동재하시험이 수행되었으며 7개 말뚝 모두 설계하중 54 ton에 미달하는 것으로 나타났다. 보강대책의 검토시점에서 상부구조물이 완성된 곳도 있어 상부 구조물이 축조된 기초와 시공중인 기초로 나누어 보강대책을 검토하였다.

지지력 분석의 해당말뚝에 가장 가까운 곳의 시추조사결과는 [그림 1]과 같다. 그림에서와 같이 지반조건은 지표면으



〔그림 1〕 지질주상도



〔그림 2〕 보강 전후 말뚝의 재하시험 결과

로부터 논흙이 얇게 나타나며 그 하부에 표준관입시험 N값이 13인 중간정도의 견고한 점토층이 -5.1 m까지 나타나고, 그 아랫쪽으로 -7.8 m까지 N값이 6 21인 모래자갈층이 존재한다. 모래자갈층 하부에는 화강암을 모암으로 하는 풍화암이 나타나고 있는데, 이 지층의 N값은 모래자갈층 하부로부터 급격히 증가하여 -9.0 m에서는 50/12이상의 매우 조밀한 상태를 나타내고 있다.

o. 원인분석

본건 현장의 원인 분석을 위해 수정된 Meyerhof공식[(2)]에 의해 말뚝의 지지력을 계산해 보았다. 그러나 본건 현장과 같은 지반조건에서 ϕ 400 mm의 PC말뚝을 항타시공할 경우 기대할 수 있는 말뚝의 지지력은 말뚝의 선단부가 N값이 얼마인 지반까지 항타 관입될 수 있는가 하는 항타시공 관입성에 크게 좌우된다. 따라서, 앞의 계산식을 적용하여 말뚝의 항타시공 관입성을 변화시킬 경우 예상되는 말뚝의 극한지지력을 선단부의 N_b값에 따라 계산해 보면 [표 4]와 같이 요약할 수 있다.

[표 4]에서도 나타난 바와 같이 말뚝의 지지력은 말뚝의 선단부가 관입될 수 있는 지반조건에 따라 상이함을 알 수 있다. 또 [표 4]에서 계산한 값은 계산식이 실측한 선단지지력과 주면마찰력의 평균값을 기준으로 한 것이기 때문에 실제 지지력과는 큰 차이를 나타낼 수도 있다는 점이다. 결국 이와 같은 불확실성을 근본적으로 배제하기 위해서는 반드

[4] 말뚝의 항타시공 관입성 변화에 따른 말뚝의 예상극한지지력

항타시공성	말뚝관입깊이 (m)	주면마찰력 (ton)	선단지지력 (ton)	전체지지력 (ton)
N=20까지 관입	7.2	23.9	75.4	99.3
N=25까지 관입	7.5	25.6	94.2	119.8
N=30까지 관입	7.8	30.3	113.0	143.3
N=35까지 관입	8.1	34.3	131.9	166.2
N=40까지 관입	8.4	38.8	150.7	189.5
N=45까지 관입	8.7	43.9	170.0	213.9
N=50까지 관입	9.0	49.7	188.4	238.1

시 시항타를 실시하여 말뚝의 항타시공 관입성을 확인함과 동시에 지지력 공식의 적용성을 검증하여야 한다.

[5] WEAP 해석결과

No.	Ultimate Capacity (KN)	Max C. Stress (MPa)	Max T. Stress (MPa)	Blow Count (BPM)	Stroke (m)	Energy (KN-m)	비 고
1	900.0	23.866	.477	79.4	1.71	21.09	해머 : K-25
2	1000.0	25,100	.741	92.3	1.76	20.50	말뚝 : PC400
3	1100.0	26.840	.565	102.9	1.83	20.44	
4	1200.0	28.025	.482	116.4	1.86	19.87	
5	1300.0	28.990	.467	131.7	1.87	19.27	
6	1400.0	30.241	.508	146.6	1.93	19.11	
7	1500.0	31.449	.649	165.6	1.96	18.68	
8	1600.0	32.634	.905	188.9	1.98	18.23	
9	1700.0	33.796	.878	212.2	2.04	18.21	
10	1800.0	34.807	.731	242.1	2.07	17.96	

따라서 항타시공성 분석을 위해 WEAP프로그램에 의한 말뚝의 동적해석을 실시하였다([표 5]참조). 말뚝의 최대허용 항타응력(콘크리트말뚝 압축강도의 60%, 300 kg/cm^2)기준에 의거 WEAP해석결과를 분석해 보면 말뚝재료가 파손되지 않고 항타관입될 수 있는 깊이는 지표면으로부터 -7.9 m까지 가능한 것으로 나타난다. 이때의 항타응력은 296 kg/cm^2이며 말뚝의 극한지지력은 133 ton으로 분석된다. 이 결과는 [표 4]에서 계산된 말뚝지지력 보다 약간 낮은 값이지만 대체로 일치하는 것으로 볼 수 있다. 결국 본건 현장에서는 N값이 30인 지층까지 말뚝이 항타관입될 수 있다고 판단된다.

말뚝의 항타시공성 분석결과에 의하면 본건 현장의 경우에는 정상적인 시공을 하더라도 말뚝의 기대할 수 있는 허용지지력은 44 ton에 불과하다. 즉 이러한 항타시공성 분석이 생략되어 말뚝 1본당 설계지지력이 최대 54 ton까지 계획되었는 바, 말뚝재료의 선정에 가장 큰 문제가 있었다고 사료된다. 이외에 지반조사 및 시공계획의 불충분, 쿠숀재 부족 등 시공관리에도 문제점이 있는 것으로 나타났다.

o. 보강대책 및 효과확인

본건 현장과 관련해서 보강공법은 아직 상부구조물이 시공되지 않고 말뚝만 항타되어 있는 상황이므로 지지력과 침하에 대한 군말뚝 해석을 실시한 후 기존 말뚝사이에 말뚝을 보강항타하는 것으로 하였다. 보강말뚝은 원인분석·내용을 참고로 하여 보강말뚝의 재료는 PHC 400으로 하고 쿠숀도 증가시켜 항타를 완료하여 소기의 목적을 달성하였다. [그림 2]는 보강전과 보강후 말뚝의 재하시험 결과를 보여주고 있다. 또한 상부구조물이 완료된 구조물에 대해서는 기초 슬래브 하단부에 JSP기둥을 만들어 보강하였는데 JSP보강에 대한 사례는 다음 절에서 논의한다.

3.1.2 사 례 II

o. 현황 및 지반조건

본건은 건축물의 말뚝기초(PC 400 mm, K-25 직항타)의 지지력 부족에 대한 원인을 규명하고 대책공법을 제시한 후 이에 대한 효과를 확인하는 것이다. 검토 당시 본 현장은 총 7301개의 말뚝중 4631개의 말뚝이 항타된 상태에서 기초검토를 실시하였으며 총 25개의 재하시험중 13개가 설계하중 50 ton에 미달되는 것으로 나타났다.

본 지층의 지반조건은 지표로부터 층적층, 풍화토층, 풍화암층, 연암층으로 구성되어 있으며 층적층의 경우 입도분포가 위치에 따라 매우 다양하게 나타난다. 분석말뚝에 가장 근접한 시추조사 결과는 [그림 3]과 같은데 충적층의 경우 실트질 점토로 되어있고 모암은 편마암이다.

o. 원인분석

본건 현장에서 말뚝의 지지력이 미달된 2개의 구조물에서 시공된 말뚝의 지지력을 수정 Meyerhof공식에 의해 구해보면 [표 6]과 같다. 표에서와 같이 계산된 허용지지력은 설계하중 50 ton에 미달되는 것으로 나타났으며 이의 현상은 관입길이가 부족한 것임을 쉽게 알 수가 있다. 허용지지력은 지반의 N치를 고려해 볼때 더 단단한 지반까지 관입이 가능할 수 있었으나 말뚝이 지지층까지 관입되기 전에 항타로 인해 말뚝두부가 깨지는 등의 손상을 입어 지지층까지 관입할 수 없었던 것에 기인하는 것으로 판단된다. 결론적으로 본건 현장과 관련한 지지력 부족의 근본 원인은 말뚝체의 강도 부족에 의한 것으로 볼 수 있다.

따라서 말뚝재료, 항타장비, 지반조건을 고려한 항타시공성 분석을 위하여 WEAP프로그램을 사용하여 말뚝의 동적해석을 실시하였다([표 7] 참조). 표에서와 같이 설계하중 50 ton을 얻기 위해서는 말뚝은 300 kg/cm^2이상의 항타응력을 받게되므로 전술한 바와 같이 말뚝은 과대응력이 걸려 두부가 파손되었고 따라서 말뚝길이가 짧아져 지지력 미달이 발생했던 것으로 판정되었다.

[6] 지지력이 미달된 말뚝의 계산결과 및 재하시험결과

위 치	말뚝번호	설계관입깊이(m)	선단 (N_b)	주면평균 ($\overline{N}$)	수정공식에 의한 극한지지력	허용하중(FS=3)	CAPWAP해석결과(ton)			
							주면마찰력	선단지지력	전체지지력	허용하중
A	K202	6.7	28	17	148.4	49.5	22.0	76.1	98.2	38.0
	K218	6.1	28	17	144.6	48.2	42.5	44.3	86.8	39.5
B	K685	5.8	25	17	131.4	43.8	13.7	73.1	86.8	34.5
	K817	5.6	25	17	130.1	43.4	16.0	85.0	101.0	36.5
	K849	5.4	23	17	121.3	40.4	31.4	65.8	97.2	37.5

[7] WEAP 해석결과

No.	Ultimate Capacity (KN)	Max C. Stress (MPa)	Max T. Stress (MPa)	Blow Count (BPM)	Stroke (m)	Energy (KN-m)	비 고
1	1000.0	24.30	-1.95	83.8	1.75	22.3	해머 : K-25
2	1200.0	27.15	-2.16	106.8	1.83	21.6	말뚝 : PC 400
3	1400.0	30.24	-3.02	133.7	1.94	21.5	
4	1600.0	32.97	-4.12	173.3	2.00	20.9	
5	1800.0	35.41	-4.56	215.8	2.09	21.2	
6	2000.0	37.35	-4.85	274.7	2.14	21.4	
7	2200.0	39.31	-5.18	361.7	2.16	21.6	
8	2400.0	41.26	-6.35	455.9	2.24	22.2	
9	2600.0	42.55	-7.35	609.6	2.28	22.5	
10	2800,0	43.44	-8.33	870.7	2.30	22.6	

o. 보강대책 및 효과확인

보강대책은 재하시험과 원인분석결과에 따라 지지력 부족분에 대해 추가 항타하는 것으로 하되 보강타 및 잔여말뚝은 재질강도가 높은 PHC말뚝으로 시공하도록 제안하였다. 단, PC말뚝을 사용할 경우는 쿠숀의 두께를 늘리고 (12 mm합판, 7매이상) 유압해머를 사용하도록 하였다. [그림 4]는 보강전 지지력이 미달된 말뚝의 정재하 및 동재하 시험결과와 보강대책의 제안 내용에 따라 이 말뚝의 옆에 유압해머(DKH 5)로 보강타한 말뚝(PC 400)의 지지력을 도시한 것으로, 보강말뚝은 보강전과는 달리 말뚝이 충분히 관입되었고 이에 따라 지지력도 충분히 발휘된 것으로 나타났다.

〔그림 3〕 지질주상도

〔그림 4〕 보강전후 말뚝의 재하시험 결과

3.2 매입공법

3.2.1 사 례 III

o. 현황 및 지반조건

본건은 건축물 3개동의 말뚝기초(PHC 400 mm)의 지지력 미달에 따른 원인분석과 대책수립을 위한 검토로, 시공된 말뚝은 SIP공법에 의해 풍화잔류토층에 설치되었다. 재하시험은 총 9개의 정재하 및 동재하시험이 수행되었으며 이중 8개말뚝의 평균지지력은 30.7 ton정도로 설계하중 70 ton에 미달되는 것으로 나타났다.

지반조건은 지표로부터 매립토, 붕적토, 풍화토, 연암의 순서로 구성되어 있으며, 층서가 비교적 균일하게 분포되어 있고 지하수위는 지표하 10.6 m정도에서 나타나고 있다([그림 5] 참조). 토층에서 기초공사에 가장 큰 영향을 줄 수 있는 층은 붕적토층이며, 이는 약 9 m두께로 N치는 평균 46정도를 보여주고 있다. 본 층은 자갈 및 전석이 혼합되어 있고 이들 사이의 흙은 매우 느슨한 상태를 보여주는 전형적인 붕적토층 상태를 보여 주고 있다. 따라서 본 층에 있어 주상도 상의 N치는 흙의 경도가 아닌 자갈 및 호박돌에 영향을 받는 것으로 일반적인 토층의 N값과는 구분되어야 한다. 당초 이러한 지질조사 결과로 부터 기초공법의 신중한 선택이 필요한 지반조건으로 고려되어야 하는 상황이었다. 더욱이 붕적층 이하에는 느슨한 풍화토층이 존재하고 있어 관입깊이 및 최종경타시 철저한 시공관리가 필요한 조건이다.

o. 원인분석

〔그림 5〕 지질주상도

〔그림 6〕 보강 전후 말뚝의 재하시험 결과

재하시험 결과를 보면 주면 및 선단지지력의 크기 비율이 유사함을 알 수 있고 단위면적당 평균지지력은 주면지지력의 경우 2.4 t/m^2, 선단지지력의 경우 327 t/m^2으로, 모두 일

반적인 지지력의 값에 비해 매우 작게 나타나고 있음을 알 수 있다. 본 시험말뚝들은 지지력 발휘 형상에 있어 주면마찰 말뚝형태를 보여주고 있으며 단위면적당 주면마찰력 및 선단지지력의 절대 크기도 일반 SIP공법에 비해 아주 작게 나타나고 있다. 따라서 재하시험 결과만으로 판단해 볼 때 본건 말뚝들은 주면부 및 선단부 모두에 있어 지지력 부족 문제가 생긴 것으로 볼 수 있다.

현재 국내의 경우 선굴착 및 시멘트풀 주입공법으로 시공된 말뚝의 지지력을 지반조건과 연계하여 계산하는 지지력 공식은 없다. 따라서 국외에서 제안된 각종 지지력공식[3]중 현장조건을 반영할 수 있는 가장 적절한 공식을 이용하여 지지력을 계산해 보면 [표 8]과 같다.

[표 8]의 결과를 분석해 보면, 우선 선단지지력의 경우는 계산치(예측치)와 재하시험 결과가 일치한다고 볼 수 있다. 그러나 주면마찰력의 경우는 계산치와 재하시험결과가 크게 다름을 알 수 있는데 이에 대한 이유로는 전술한 바와 같이 주면부의 평균 N치(붕적층의 N치)의 불확실성을 들 수 있다. 따라서 $R_F = \frac{1}{5}\overline{N_s}L_s$에서 이미 알고 있는 L_s와 R_F값을 대입하고 $\overline{N_s}$값을 역산하면 A동과 B동의 $\overline{N_s}$값은 14.9, 14.4를 계산할 수가 있다. 이는 붕적층에서의 평균 N치는 14정도라는 것을 의미하는 것이다. 즉 N=14는 매우 느슨한 모래자갈층에서 볼 수 있는 값이며, 이는 시추에 의해 구해진 N치와는 다른 값이므로 결국 주면부에서는 시멘트풀의 역할이 거의 없었다고 볼 수 있다.

주면부에서 시멘트풀의 역할이 없는 이유로는 말뚝주면의 상당부분이 붕적층에 걸쳐 있으므로 붕적층의 공극을 통해서 시멘트풀이 유실되었다고 볼 수 있다. 선단지지력이 작게 나타나는 이유는 계산치 및 재하시험 결과에서와 같이 관입심도 부족이라고 볼 수 있다([그림 5] 참조).

o. 대책 및 보강효과

대책은 현장여건상 JSP공법이 채택되었으며 구체적으로는 건축물 동별로 시공상태에 따라 결정하였다. 즉 기초공사만 완료된 경우는 PHC말뚝 하부를 보강하는 것으로 하였고, 상부구조물이 시공된 경우는 바닥슬래부 하부를 JSP기둥으로 보강하도록 하되, 전자의 경우는 말뚝의 중공부를 통하여 JSP를 1공 보강하는 방안과 말뚝의 외부에 2공을 보강하는 방안에 대해 검토하였다([그림 7]참조).

[표 8] 예측 및 실측지지력 값의 비교

이들에 대해 시험시공을 하고 재하시험을 한 결과 말뚝의 중공부를 통해 보강하는 경우는 침하에 문제가 있는 것으로 판정되어 최종적으로 말뚝의 외부에 2공을 보강하는 것으로 제안하였다. [그림 7]에서와 같이 제안된 결과에 따라 보강된 말뚝의 허용지지력은 설계지지력을 만족시켜 보강공사를 완료하였다.

3.2.2 사 례 IV

o. 현황 및 지반조건

본건은 건축물 말뚝기초의 지지력 미달에 대한 원인분석 및 보강대책의 수립을 위한 것으로, PC 400의 말뚝이 SIP공법으로 시공되었으며 설계하중 70 ton으로 계획되었다. 특기사항은 주변 민가의 민원으로 인해 SIP시공 과정에서 최종 항타 과정이 생략되었으며 이에 대한 특별한 대책이 없이 시공된 점이다. 현장에서 총 3개의 정재하시험이 수행되었으며 이들의 평균허용지지력은 22.0 ton정도로 설계하중에 크게 미달되었으며 하중-침하곡선은 [그림 9]에서와 같이 마찰말뚝의 형태를 띄고 있다.

현장의 지반조건은 [그림 8]에서와 같이 상부로부터 매립층, 퇴적층, 풍화암, 연암 등의 순서로 구성되었고 퇴적층은 다시 느슨한 실트질 모래층과 조밀한 모래자갈층으로 되어 있어 SIP공법시공시 특별한 시공관리가 요구되는 지반조건이

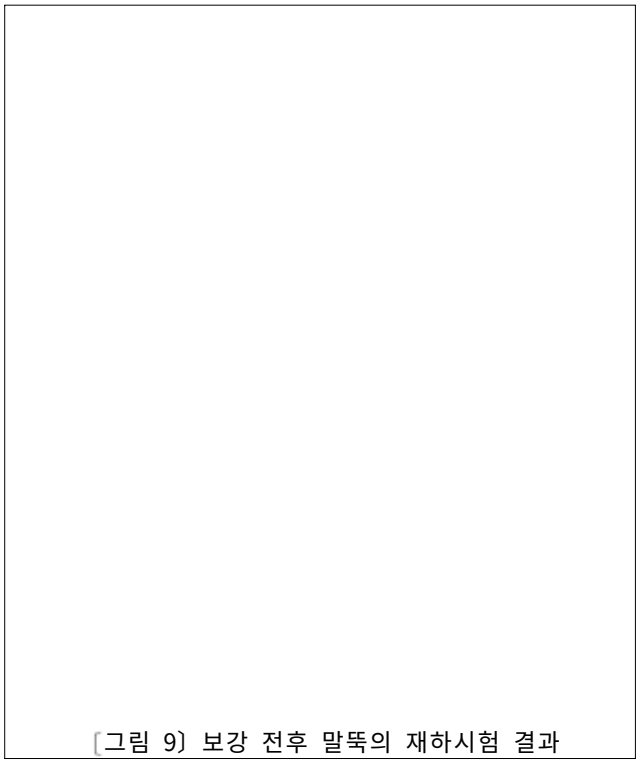
라 할 수 있다.

	A 동 (톤)		B 동 (톤)	
적 용	$R_u = 20\overline{N}A_p + \frac{1}{5}\overline{N_s} \cdot L_s$	재하시험결과	$R_u = 20\overline{N}A_p + \frac{1}{5}\overline{N_s} \cdot L_s$	재하시험결과
선단지지력 (R_p)	37.7	-	37.7	34.8
주면마찰력 (R_F)	111.4	-	118.3	41.1
전체지지력 (R_u)	149.1	53.5	156.0	75.9
허용지지력 (R_a)	49.7	26.5	52.0	35.6
비 고	$\overline{N}=15$ $A_p=0.1256(m^2)$ $\overline{N_s}=40.3$ $L_s=13.820(m^2)$	4개 정재하시험 결과의 평균치	$\overline{N}=15$ $A_p=0.1256(m^2)$ $\overline{N_s}=40.3$ $L_s=13.820(m^2)$	4개 동재하시험결과의 평균치

(a) 선단부 1공 보강 (b) 선단부 2공 보강 (c) JSP기둥형 보강

〔그림 7〕 보강 방안

〔그림 8〕 지질주상도



〔그림 9〕 보강 전후 말뚝의 재하시험 결과

o. 원인분석

본건 현장에서 말뚝은 주상도상의 심도를 기준으로 할때 -8 m에서 -15 m까지 7 m관입되었다. 즉, 주면부는 실트질 모래 퇴적층에 선단부는 모래자갈 퇴적층에 매입되도록 계획되었다. 3.2.1절에서와 같은 지지력 공식으로 지지력을 계산해 보면 $R_u = 20\overline{N_t}A_p + \frac{1}{5}\overline{N_s} \cdot L_s = 125.6 + 23.2 = 148.8(ton)$이며, 재하시험에 의한 극한지지력은 51.9 ton으로 산출되어 선단지지력에 특별히 문제가 있음을 알 수가 있다.

본건 현장에서는 선단지지력을 확보하기 위한 조치 즉, 확실한 최종항타, 선단근고액의 주입 등이 전혀없었고 또한, 주면부의 토성으로 보아 공벽붕괴가 일어날 수 있음에도 이에 대한 조치(벤토나이트 첨가, 주면고정액의 W/C비 조정 등)가 없었으므로 붕괴된 모래질 흙이 선단부에 침강된 상태에서 말뚝만 삽입하여 시공을 완료하였던 것으로 볼 수 있다. 따라서 말뚝의 하중-침하거동은 재하시험 결과에서와 같이 선단부의 역할이 전혀 없었던 결과를 주고 있다.

o. 대책 및 보강효과

현장여건에 따라 대책공법은 말뚝의 선단부를 JSP공법으로 보강하도록 계획되었다. JSP의 주입기법은 말뚝의 외측면부 양쪽에서 천공하여 기존말뚝의 선단하부 4 m에서 선단 상부 1 m까지 보강하였다. [그림 8]은 본 현장의 대표적인 말뚝에 대한 보강 전과 후의 하중-침하곡선을 보여주고 있다. 그림에서와 같이 보강된 말뚝의 하중-침하곡선은 말뚝재료의 탄성변위 이내에 들어오는 아주 양호한 상태를 보여주고 있다.

4. 결 론

본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

o. 말뚝의 지지력은 주로 안전측으로 설계·시공되고 있지만 말뚝기초공사 현장중 지지력 미달의 문제가 발생한 현장은 전체의 20%를 상회하는 것으로 나타났으며, 전체적으로 보아 말뚝의 시공은 과잉 또는 과소라는 극단적인 양단의 상황을 극명하게 보여주고 있다. 이러한 현상은 설계시 관례적인 하중적용(콘크리트말뚝의 경우 재료허용하중의 66%정도)에 의한 과잉설계, 그럼에도 불구하고 적절치 못한 시공에 의해 지지력 미달이 발생하는 것으로 사료된다.

o. 타입말뚝의 경우 지지력 미달의 원인은 부적절한 시공관리, 부적합한 해머선정, 말뚝체의 강도부족 순으로 나타나고 있는 바 시공계획시 WEAP해석에 의한 항타시공성 분석과 이에 따른 철저한 시험시공 등이 절실히 필요한 것으로 나타났다.

o. 매입말뚝의 경우, 지지력 미달현상은 최종항타부족, 주면부 처리 미흡 등 단일공법에 의한 문제가 주로 나타나고 있는 바 적절한 시공관리 기준의 강구와 이에 따른 시험시공을 실시, 보다 철저한 시공관리, 그리고 향후 다양한 지반조건에 적용이 가능한 저공해 매입공법의 도입 및 개발이 필요한 것으로 나타났다.

o. 지지력이 미달된 말뚝기초공에 있어서 많은 경우 문제점 발생시 본 시공법의 개선으로 해결 할 수도 있지만, 이미 항타가 완료되었거나 바닥기초가 축조된 경우 보강방법의 선정은 매우 제한되어 있고 대책의 강구도 쉽지가 않다. 따라서 이러한 문제를 미연에 방지하기 위해서는 앞서 제안한 문제의 원인을 극복하기 위한 과정이 반드시 필요하며 또한 효과적이고 경제적인 보강법의 개발도 필요하다고 생각된다.

참고문헌

1. 이명환 외(1994), “말뚝기초의 최적설계”, '94 가을 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp60 76.

2. 이명환 외(1992) “ 말뚝의 설계하중 결정방법에 대한 비교”, ‘92년도 봄 학술 발표회 논문집,한국지반공학회,pp.69 102.

3. 이명환 외(1995), “매입말뚝공법의 지지력 특성”, '95 가을 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp Ⅰ-1 Ⅰ-16.