

고강도 강관말뚝의 시공사례

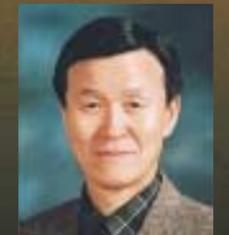
- 부산센텀파크 아파트 강관말뚝 기초공법 -



백만현
(주)우영종합건축사사무소 감리단장



최상춘
(주)포스코건설 토목과장



송해진
기술자문 (토질 및 기초기술사)

1. 개요

말뚝 기초는 상부구조물의 하중을 말뚝을 통하여 깊은 지지층에 전달하여 구조물의 수명동안 안전하게 지지기능을 발휘할 수 있도록 설계 시공되어야 한다. 성공적인 말뚝기초는 기초지반의 전단파괴에 대한 충분한 안전율을 지니고 연직 및 수평방향의 변위량이 허용범위 이내를 유지하며 말뚝 재료에 발생하는 응력이 허용치 이내로서 내구성이 구조물의 수명을 보장할 수 있는 조건을 만족시켜야 한다. 말뚝기초는 그 구성 재료와 시공법에 따라 매우 다양한 종류가 있을 뿐 아니라 같은 재료, 같은 크기라 하더라도 시공법에 따라 그 거동이 다르고 같은 기초(직접 기초, 확대기초 등 none pile 기초)보다 복잡하며 기초의 지지력을 결정하는 문제, 시공법을 선정하는 문제는 전문기술과 경험이 필요하다. 대부분의 건축기초설계 과정은 기초상부의 건축구조 설계가 먼저 진행 결정된 다음에야 기초형식을 결정하게 된다. 이로 인해 기초 설계기간이 촉박하여 충분한 기초지반조사를 하지 못한 상태에서 기초공법이 결정되어 실제 시공시에 현장상황과 부합되지 않는 점이 발생되면 시공계획에 심대한 차질과 부실공사를 야기하게 된다.

아파트 공사는 준공과 입주일이 정해져 있어 계획된 공기를 초과할 수 없으므로 설계 및 시공사의 문제점이 발생되지 않도록 사전에 세밀한 지반조사에 근거한 기초공법의 설계가 절대 필요하다.

본 시공사례는 부산광역시 해운대구 재송동에 건설중인 센텀파크 (Centum Park) 아파트 공사로서 50층 전후의 초고층 아파트 20개동, 3,750세대를 한번에 건립하는 대규모 시공현장이다.

이러한 초고층 아파트의 기초는 단위 면적 당 소요되는 지반 지지력이 크고 또 부지의 지반 지지층이 깊어 깊은 기초인 말뚝 공법을 채택하였는데 말뚝의 소요 지내력이 커서 부득이 고강도 강관 말뚝으로 설계된 건물이다.

현장타설 대구경 말뚝은 시공과정이 복잡하고 품질관리가 어려운 점이 있고 말뚝의 설계 지지력이 매우 커서 그 능력 확인을 위한 재하시험, 시공관리, 품질관리 검증에 기술적인 어려움이 있으며 시공성, 공기, 공사비 측면에서도 유리하지 못하여 고강도 강관 말뚝을 채택하였다.

본 센텀파크 아파트 기초에 사용한 고강도 강관말뚝 ($\phi 609.6 \times 16t$; SPS 490)은 설계 허용 지지력이 $R_a = 292t/\text{본}$ 으로 유압해머로 타입하게 되어 있고 말뚝의 지지력을 높이기 위해 고강도 강재를 사용하고 말뚝배치는 대부분 최소간격(2.5D)인 $1.5m \times 1.5m$ 로 설계되었다.

종래 이 규격($\phi 609.6$)의 일반강관 말뚝(SPS 400)의 허용지지력은 대체로 $180 \sim 240t/\text{본}$ 으로 설계해왔던 점을 감안할 때 안정적인 지지력 확보를 위해 적정 항타 장비 선정과 어느 정도의 타격 에너지로 시공관리를 해야 설계 지지력이 확보될 것인지 걱정되었다. 그래서 말뚝 시향타 단계에서부터 말뚝설계와 시공에 기술과 경험이 많은 전문기술자가 상주하여 설계조건과 시공여건에 부합되도록 기술검토를 하고 성과 분석을 통해 적시에 피드백(Feed Back)을 실시하여 기술적으로 신뢰성 높은 기초 시공과 조정 공기에 차질 없이 시공이 될 수 있었다.

2. 기초지반 조건 및 지형

본 부지는 행정구역상 부산광역시 해운대구 재송동 352-2 번지 일대로서 부지 남북 방향에 설치된 중앙도로 서측(수영강측)을 1단지로 하고 동측(장산측)을 2단지로 하여 먼저 1단지에 아파트 14개동이 착수되었고 1개월 후 2단지에 6개동이 착수되었다. 부지 표층은 말뚝이 자중에 의해 관입되는 유동성이 크고 포화된 점토질 실트층이 부지전체에 분포하고 있으며, 그 하부는 퇴적층으로 모래(또는 점토)가 섞인 자갈층(국부적으로 호박돌, 전석이 혼재)이 수영강 하류측으로 점점 두껍게 분포하며 이어서 기반암층이 발달되어 있다. 국부적으로 풍화토 풍화암층이 그 두께를 달리하여 분포하기도 한다.

본 부지의 지지층은 화산쇄설암(주로 유문암질래필리용결응회암)으로 장산 화산 함몰체(Kaldera 구조로서 그 양상이 가마솥 모양의 경우 Cauldron이라 함) 또는 장산 칼드론의 외곽부에 위치하며, 화산함몰체 구조에 수반되는 환산단층(Ring fault; 수영강이 이에 해당된다고 함)의 주변부에 위치하는 관계로 부분적인 불연속 파쇄대를 수반하고 있는 곳이다. 이 파쇄대의 특징은 균열대만 형성되는 인장 및 신장절리계(tentional joint system and/or extentional system)의 성격이 대부분이어서 파쇄대를 통해 지하수가 유입되는 점을 제외하고는 대단층의 단층점도(fault gauge)나 단층각력대(Breecia)를 수반하는 취약한 지반과는 다른 형태라고 할 수 있다.

시공시 지반조사 과정에서 108동 및 107동의 수영강 측 끝단부와 204동 및 206동 일부에 이러한 파쇄대가 발견되었는데 대단층 파쇄대와 달리 그 양상은 도로 포장용 쇄석과 유사한 상태로 채취되었다. 이러한 파쇄대는 지반전단강도(Shear strength)저하에 큰 영향이 없을 것이라고 한다. 기반암인 유문암질 용결응회암의 강도는 B군에 속하지만 암질이 매우 치밀건고하여 풍화작용에 저항력이 큰 특징이 있다.

이 일대는 「신증 동국여지승람」과 「동래부지(1740)」에 의하면 배가드나들던 재송포구였던 곳으로 추정되며 이곳은 수영강과 온천천이 합류하는 지점으로 토사가 유입되어 육지화된 것으로 생각한다. 본 지역은 과거에는 해안(古海岸)으로 대체적인 기반암의 분포를 보면 철도부지로부터 수영강 하류측과 바닷쪽으로 향하면서 완만한 경사(경사각 약 3.5도)를 이루고 있고 파도에 깎여진 절벽(파식절벽)과 해변(beach)으로 장소에 따라 비정상적으로 현생 퇴적층이 두껍게 분포하기도 하며 곳에 따라 기반암 상단에 두꺼운 자갈층(점토 또는 모래섞인 자갈층)이 분포하기도 한다. 본 지역은 과거에는 해안 주변에 발달하는 오목한 요지(凹地)였을 것으로 추정된다.

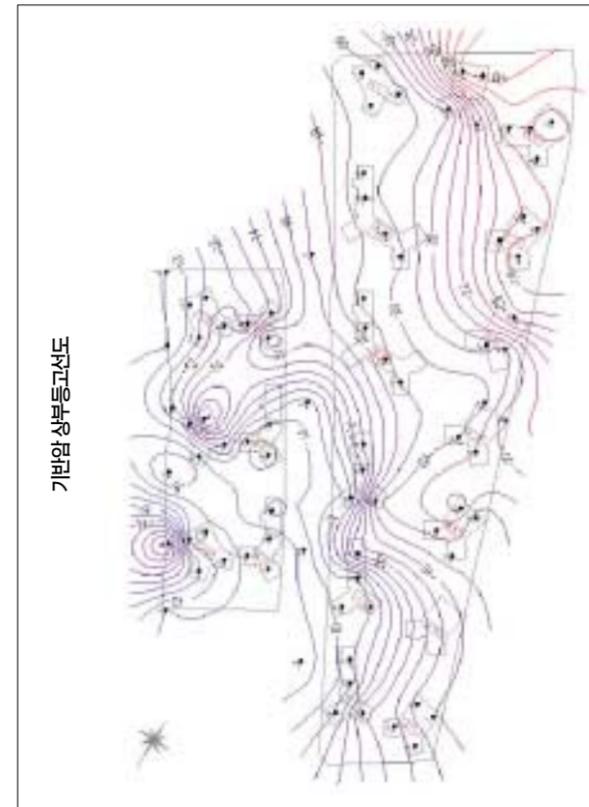
지반조사 자료에서 기반암 분포는 1단지 B공구(105동, 106, 107, 108, 109동)는 층의 변화가 심하고 풍화암층도 그 두께를 부분적으로 달리하여 분포하고 있다. 또한 2단지 206동, 204동, 203동 지역의 기반암 심도는 상당히 불규칙하여 급경사를 이루고, 풍화암층이 국부적으로 두껍게 분포하기도 하며, 층서가 뒤바뀌어 퇴적층 아래 연암이 2~3m 분포하다가 풍화토 풍화암 층이 발달된 곳도 있다.



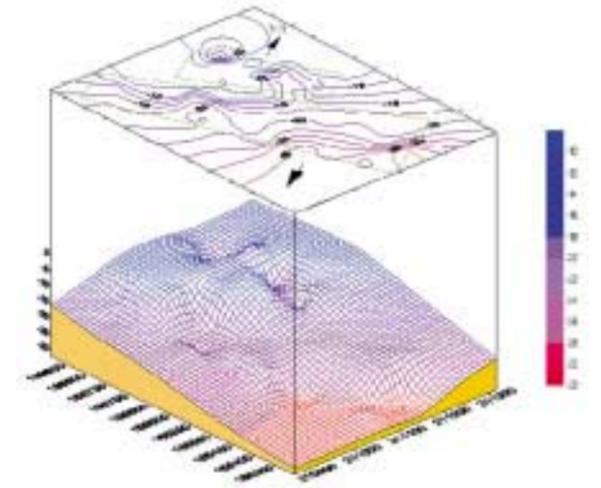
〈그림 1〉 부지 일대의 지질도



〈그림 2〉 장산칼드론 지역의 지질도



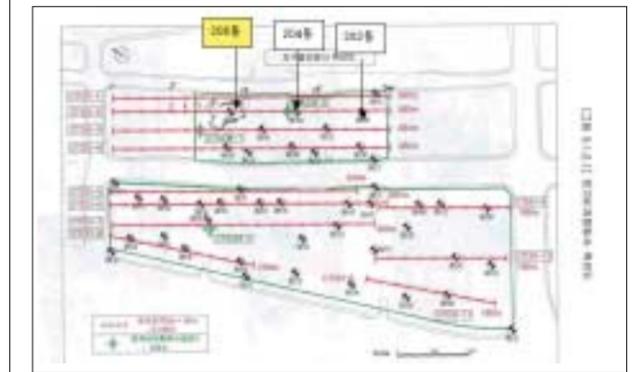
〈그림 3〉 기반암 상부등고선도(전체본)



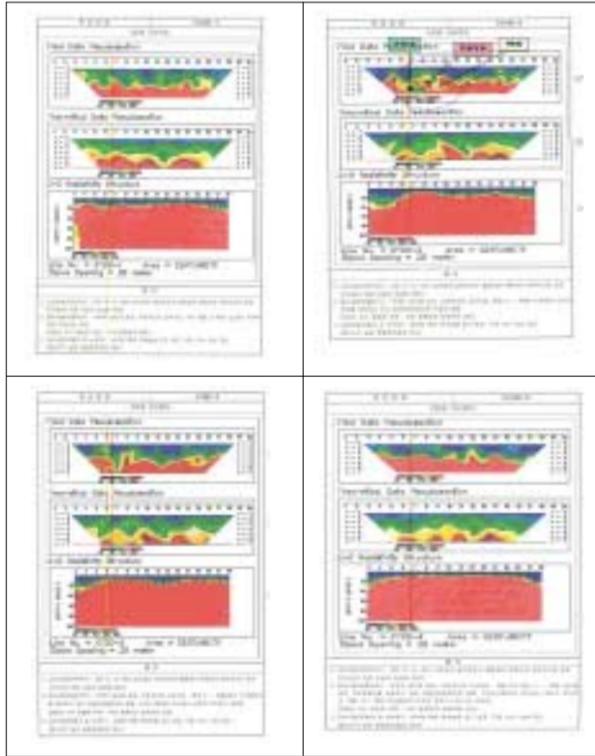
〈그림 4〉 기반암 입체도

구 분	연약지반층수 EL(-)2.10이하	관입저항층두께(연암상단기준)		실관입장 (주성모)cm	비 고		
		구 간	층수			층구성내용	
101	BH+1	5.4	(-)7.5~(-)12.2	4.7	자갈층, 풍화토, 풍화암	10.1	N=50/2~
	BH+2	4.9	(-)7~(-)10.8	3.8	자갈층(호박돌섞인모래질)	8.7	N=50/2~불가
102	BH+3	15.2	연약층~(-)17.3	0	자갈층(호박돌섞인모래질)	15.2	N(10
103	BH+5	5.8	(-)7.9~(-)12.1	4.2	자갈(호박돌섞인모래질)	10	N=50/2~50/3
	BH+6	10.8	(-)12.9~(-)16.9	4	자갈(호박돌섞인모래질)	14.8	N=40/30~50/6
104	BH+4	9.5	(-)11.6~(-)17.3	5.7	모래(자갈섞인실트질)	15.2	N=43/30~50/3
105	BH+7	6.7	(-)8.8~(-)12.3	4	모래(자갈섞인)	10.2	N=6/30~50/7
	BH+8	10.7	(-)12.8~(-)14.4	1.6	자갈층(호박돌섞인)	12.3	N=50/2
106	BH+9	8.2	(-)10.3~(-)13.0	2.7	자갈층(호박돌섞인)	10.9	N=50/2
107	BH+10	13.8	(-)15.9~(-)21.0	5.1	자갈층(호박돌섞인모래질)	18.9	N 측정불가
108	BH+14	12.6	(-)14.7~(-)20.2	5.5	자갈층(모래질자갈)	18.1	N=50/2
109	BH+11	12.9	(-)15.0~(-)18.9	3.9	모래층(자갈섞인)	16.8	N=30/30~50/20
	BH+12	13.3	(-)15.4~(-)17.7	2.3	모래층(자갈섞인)	15.6	N=3/30~50/2
110	BH+13	14.4	(-)16.5~(-)18.7	2.2	모래층(점토질자갈)	16.6	N=50/13~
	BH+18	25	(-)27.1~(-)28.1	1	모래층(자갈섞인)	26.6	N=30/30~50/25
111	BH+15	12	(-)14.1~(-)19.1	5	자갈층(호박돌섞인모래질)	17.6	N=45/30~50/2
	BH+16	13.8	(-)15.9~(-)20.8	4.9	모래층(자갈섞인)	18.7	N=25/30~50/3
112	BH+17	12.2	(-)14.3~(-)21.0	5.7	자갈층(호박돌섞인모래질)	18.9	N=50/30~50/12~불가
	BH+21	13.6	(-)15.7~(-)20.7	5	자갈층(호박돌섞인모래질)	18.6	N=50/7~불가
113	BH+19	18.9	(-)21.0~(-)28.9	7.9	자갈층(호박돌섞인모래질)	26.8	N=불가~50/2
114	BH+20	22.1	(-)24.2~(-)29.2	5	자갈층(호박돌섞인모래질)	27.1	50/3~50/2

〈표 1〉 1단지 말뚝관입 지반 층수 현황



〈그림 5〉 전기비저항탐사 자료



3. 고강도 강관말뚝의 설계 시공관리 내용

3.1 일반사항

말뚝기초의 설계개념은 상부구조물이 파괴에 대하여 안전하여야 한다는 극한하중 또는 항복하중대비 일정안전율을 감안한 개념과 허용된 침하량 이상의 침하가 발생되지 않아야 한다는 개념으로 나눌 수 있다. 그러나 대부분의 구조물 설계에서는 이 두 가지 설계개념을 모두 만족시켜야 하는 것이 현실이다. 즉 강도와 변위가 허용범위 이내에 있어야 한다는 개념이다. 설계과정에서 말뚝의 허용침하량을 특별히 규정하지 않는 경우가 대부분인데 이는 말뚝기초의 특성상 발생하는 부득이한 변형량을 고려하였기 때문일 것이다. 일반적, 국제적으로 통용되는 잔류 침하량이 허용범위 이내일 것을 전제로 하고 있다고 봐야 할 것이다. 특히 아파트 기초를 말뚝기초로 할 경우 기초 Conc. Mat는 말뚝하중의 Punching shear에 대비하여 비교적 두껍게 설계 하는데 이럴 경우 동일기초에서의 대부분 말뚝의 길이는 비슷하여 상부하중에 의한 탄성 변형량이 서로 큰 차이가 없게 되므로 결국 잔류침하량이 허용범위 이내에 있어야 한다.

이러한 잔류침하량의 발생정도는 전혀 예측이 불가능하므로 본 공사에서는 이를 확인하기 위해서 전기저항탐사 결과 파쇄대가 심한 구역을 선정하여 설계과정에서 3개소, 시공초기에 5개소, 모두 8개소의 강관 말뚝을 시험타 하면서 동재하시험(PDA-test)과 정재하 시험을 시행하

였는데 재하하중 규모는 KSF-2445(ASTM D-1143 참조)에서의 설계허용 연직지지력의 2배 이상, 그리고 주택공사 공사시행내규에서의 2.25배 이상인 점을 고려하여 설계 허용 연직지지력의 2.5배인 730ton을 재하 하였다. 잔류침하량의 허용범위는 국제적으로 통용되는 말뚝직경의 2.5% ($\phi 609.6 \times 2.5\% \approx 15\text{mm}$) 기준을 적용하였는데 만족한 시험결과가 도출 되었다. 그리고 말뚝선단지반이 재하 최대 하중에 이를 때까지 극한하중이나 항복점에 이르지 않았으므로 재하하중을 항복하중으로 간주하여 말뚝의 허용 연직지지력은 설계허용지지력을 충분히 만족시키는 $R_a \geq 365t/\text{본}$ 이 되는 것을 확인하였다.

말뚝의 지지력을 극대화 시키는 방법은 말뚝 선단지반의 지지력과 말뚝 자체의 허용강도가 거의 일치하는 곳까지 말뚝을 타입 시키는 경우다. 말뚝자체의 강도를 높여 고강도 말뚝으로 선정하였을 경우 말뚝의 허용강도가 높아진 만큼 말뚝 선단지반의 지지력이 그 만큼 큰 곳까지 타입 시킬 때 비로서 고강도 말뚝을 사용한 이점이 확보 된다고 할 것이다.

(표 2) 고강도 강관 말뚝의 제원

◆ 화학성분 구성 사항

: SPIRAL STEEL PIPE PILE $\phi 609.6 \times 16t$ (SPS 490)

규격	종류의 기호	화학성분 단위 : %					유사규격
		C	Si	Mn	P	S	
KS D3566 (일반구조용 탄소강)	SPS 400	0.25 이하	-	-	0.040 이하	0.040 이하	JIS G3444 (일반구조용 탄소강강판)
	SPS 490	0.18 이하	0.55 이하	9.50 이하			

◆ 기계적 성질 관련 사항

종류의 기호	기계적 성질				편평시험(전기저항용접)	용접부인장강도 N/mm ² (kg/mm ²) _{이코용접}
	인장강도 N/mm ² (kg/mm ²)	항복강도 N/mm ² (kg/mm ²)	연신율			
SPS 400	400(41) 이상	235(24) 이상	11,12호		편평시험 H=2/3D	400(41) 이상
			5호	180이상		
SPS 490	490(50) 이상	315(32) 이상	11,12호		편평시험 H=7/8D	400(50) 이상
			5호	180이상		

◆ 단면 성능 관련 사항

외경	두께	단면적	단위 무게	허용지지력(부식처공제)		선단 지지면적	단면 2차 모멘트	단면 계수	단면 2차 반경	비강도 면적	
				단면적	지지력(t)						
609.6	6	113.8	89.3	66.2	92.7	112.5	2920	518×10 ⁴	170×10	21.3	1.91
	8	151.2	119	103.7	145.1	176.3	2920	518×10 ⁴	224×10	21.3	1.91
	9	169.8	133	122.3	171.2	207.9	2920	518×10 ⁴	251×10	21.2	1.91
	10	188.4	148	140.9	197.3	239.5	2920	518×10 ⁴	278×10	21.2	1.91
	12	225.3	177	177.9	249.1	302.4	2920	518×10 ⁴	330×10	21.1	1.91
	14	262.0	206	214.6	300.4	364.8	2920	518×10 ⁴	381×10	21.1	1.91
	16	298.4	234	251.1	351.5	426.9	2920	518×10 ⁴	432×10	21.0	1.91

말뚝을 타격에 의해 지반에 관입 시키는 방법은 과거부터 가장 일반적으로 사용하던 방법이나 소음과 진동에 의한 민원발생 문제 그리고 말뚝 관입시 손상 등에 의한 지지력 불확실성 때문에 도심공사에서는 사용을 기피하고 있는 실정이다. 그렇지만 직접 타격에 의한 방법이 가장 널리 알려진 공법으로 공사 난이도, 공사비, 공사기간 등에서 아직까지

는 가장 유리한 공법이어서 가능하다면 이를 선택한다. 전술한 바와 같이 말뚝의 허용강도와 말뚝 선단지반의 지지력이 거의 일치하는 곳까지 말뚝을 타격에 의해 관입 시키는 문제는 가장 단순하면서도 결코 쉽지 않은 것이다.

예로서 말뚝을 타격하는 해머의 중량(ton)과 낙하높이(m)를 곱하여 타격에너지(t.m)로 표시되는데, 같은 값의 타격에너지라도 해머 중량을 무겁게 하고 낙하높이를 줄이는 방법과 해머중량을 줄이고 낙하높이를 크게 할 수 있기 때문에 지반특성에 따라 그와 같은 차이가 말뚝타입에 어떤 영향이 있는지 확인하여야 한다. 즉 기초 지반층이 조밀하여 말뚝 주변 마찰력이 우세한 지반인지 아니면 선단지지력에 의존해야 되는 지반인지에 따라 타입방법이 다를 수 있기 때문에 현장 지반 조건을 검토하고 시험타를 시행하여 이러한 항타조건을 결정하여야 한다.

특히 해머 중량을 크게 하는 경우는 타격에너지가 말뚝선단에 집중하게 되므로 말뚝선단부에 관입저항층이 큰 경우에 유리하며 고강도 말뚝에서는 말뚝선단 보강을 충분히 하면 말뚝 관입 깊이를 깊게하여 충분히 지지할 수 있는 지반층(연암층)까지 관입시킬 수 있다. 대체로 말뚝 선단부에 자갈층이나 전석층이 있는 경우 또는 딱딱한 풍화암층이 있는 경우 유리한 방법이 된다. 그러나 말뚝길이 짧고 지지기반층인 연암층의 강도가 크지 않은 경우는 말뚝선단 지지층의 압반을 파쇄시킬 수 있는데 먼저 타입한 말뚝의 선단지반이 파쇄된 상태에서 연이어 박는 말뚝선단지반이 파손되면서 느슨해지는 영향 때문에 먼저 타입한 말뚝을 재향타하면 또 다시 관입되는 경우가 발생된다. 이런 경우 PDA-test를 하면 관입저항치(지지력과는 차이가 있음)가 현저하게 저하될 수 있기 때문에 아주 유의하여야 한다. 즉 유사 Relaxation 현상이 발생되지 않도록 하여야 한다.

Relaxation 현상은 연약지반 층에서 주로 발생하지만, 말뚝선단이 풍화토층이나 풍화암층에 있을 때 지하수가 유입되어 선단지반이 약화되는 경우도 재향타 하면 또다시 관입되는 유사 Relaxation현상이 발생한다.

본 공사 현장은 연약지반층 그리고 모래섞인 자갈층(호박돌 또는 전석 등도 섞여 있음) 또는 점토섞인 자갈층 그리고 응회암의 풍화대를 타격에 의해 관통 시켜야 되는 데 몇 개소는 말뚝선단부가 파쇄대에 위치하는 경우, 또는 초연약지반 바로 아래 연암층이 있는 경우, 기반암층의 분포길이가 과거 해안의 파식작용에 의해 아주 불규칙하고 경사가 급한 경우, 말뚝의 길이가 부지 전체적으로는 보통 6~29m 까지 관입 되는 점 등 아주 다양하여 각각 이에 적절한 타입 공법을, 수정 보완하면서 수행하였다.

이에 대한 타격방법이 결코 쉽지 않을 뿐 아니라 아파트 공사의 경우 정해진 공기 내에 반드시 수행되어야 하는 점 때문에 전문기술자가 현장에서 랜덤하게 발생하는 문제에 대해 신속하고 신뢰성 있는 대응조치를 하여 항타공사를 원만히 수행하였다.

3.2 설계사항

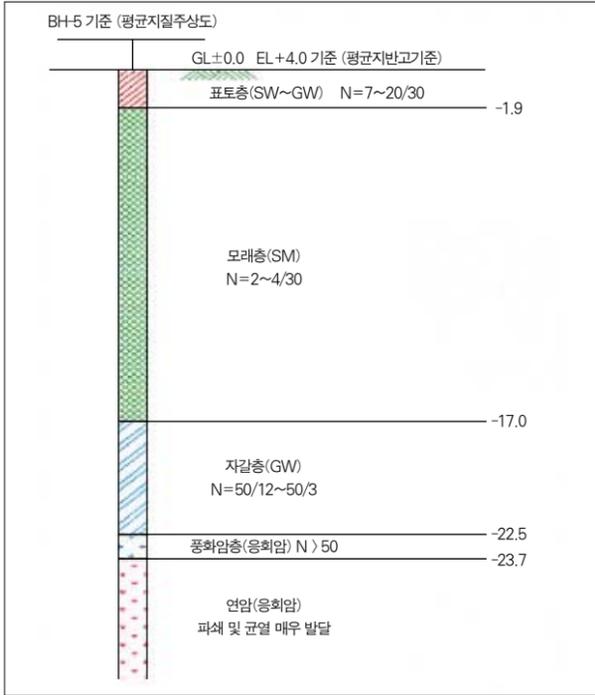
3.2.1 고강도 강관말뚝 선정 검토

1. 개요

본 PROJECT의 기초 검토시 기성말뚝을 직경별로 검토하였으나 소정의 설계 지지력이 확보될 수 있는 기성제품 말뚝이 없어 현장타설 말뚝까지 검토하였다. 그러나 현장타설말뚝은 지지력은 매우 크나 말뚝배치상 설계하중에 의해 필요한 순수한 PILE수에 비해 약 185%~194%정도가 증가하는 문제점이 발생하였다. 따라서 보다 경제적인 기초공사를 위해 말뚝SIZE는 적으나 말뚝당 허용지지력은 일반 기성말뚝에 비하여 매우 큰 고강도 강관말뚝(SPS490)의 적용성에 대하여 검토하였다.

2. 지반조건

- 1) 표토층 : 인위적으로 매립된 모래질 자갈층으로 부분적으로 호박돌을 함유하였으며 보통조밀상태를 보임.
- 2) 모래층 : 쇄설성 퇴적층으로 실트질 모래로 구성되었으며 매우 느슨한 상태를 보임.
- 3) 자갈층 : 쇄설성 퇴적층으로 모래질 자갈로 구성되어 있으며 직경 100~300mm 정도의 호박돌이 존재하는 것으로 조사되며 조밀~매우조밀한 상태를 보임.
- 4) 풍화암층 : 기반암의 풍화대로 차별풍화로 인한 핵석(Core Stone)이 다량 함유됨.
- 5) 연암층 : 파쇄 및 균열이 매우 발달하였으며 암종은 응회암으로 판단됨.



(3) 사용해머 검사 및 효율관리

장비반입단계
<ul style="list-style-type: none"> 정제하, 동재하시험을 통해 장비 및 Hammer 선정 반입시 Hammer cushion 재검사 (해체후 전체 검사) 장비효율 - PDA 결과 이용



쿠션재검사

시험타 단계
<ul style="list-style-type: none"> 동재하시험(파일테크) <ul style="list-style-type: none"> 장비 및 말뚝건전도 E.OID : 초기 지지력 Restrike : 지지력 증감 확인 정재하시험 (백경지앤씨) <ul style="list-style-type: none"> 설계지지력 만족여부 확인 시공관리기준 설정



PDA-test

본항타 단계
<ul style="list-style-type: none"> 지지력 확인시험 <ul style="list-style-type: none"> 동재하시험 시행 장비효율 및 말뚝건전도 중간검사 E.OID : 초기 지지력 Restrike : 지지력 증감 확인 Cushion 재 마모상태 검사 PDA test로 검사 시공관리기준 및 기록관리



쿠션재 교환

(4) 시험타 및 시공관리기준 설정

가. 시험타 및 시공관리기준

구 분	10톤 해머	13톤 해머	비 고
시험타 위치	- 102동, 104동, 105동, 110동, 111동 (장비 3대)	- 105동, 106동, 108동 (장비 2대)	
시험타 일시	6.25~6.28	7.12~7.13	
PDA 결과	최대 항타응력 - 두부 : 2,450~2,860kgf/cm ² - 선단 : 2,310~2,850kgf/cm ²	- 두부 : 2,680~2,930kgf/cm ² - 선단 : 2,160~2,670kgf/cm ²	
	항타에너지 (EMX) - 8.0~8.3ton-m (최대낙하고 1.1m일 때의 평균값)	- 10.3~10.8ton-m (최대낙하고 1.0m일 때의 평균값)	
극한지지력	RMX = 620~770ton	RMX = 710~830ton	
시공관리기준	- Ram 낙하고 : 1.1m(최대) (해머사양에는 최대낙하고가 1.2m였으나 현장에서 실측한 결과 1.1m가 최대치였음) - 항타종료 조건 · Ram 낙하고가 1.1m이상 · 10타 평균관입량이 1.5mm/타 이내	- Ram 낙하고 : 1.0m (해머사양에는 최대낙하고 1.2m였으나 현장에서 PDA 결과 1.0m 낙하고에서도 지지력이 확보됨) - 항타종료 조건 · Ram 낙하고가 1.0m이상 · 10타 평균관입량이 2.0mm/타 이내	
	결과	102동 : 365톤 이상 105동 : 365톤 이상 110동 : 365톤 이상 111동 : 365톤 이상	- 정재하시험 미시행
시간경과	- 분공사 중 시간경과 확인	- 6일 경과후 시간경과 확인	
	구 분 초기항타 재항타 T105-1 370 403 T111 330 361 T113 346 356	구 분 초기항타 재항타 T105-1 370ton 403ton T106 411ton 427ton	

나. 시험타 결과에 대한 기술자문 의견

- 말뚝 정재하시험을 위한 시험항타는 말뚝관입 과정의 관찰 및 수평재하시험을 고려하여 한개소에 3분씩 타입하였는데 유압 Hammer 10ton(DKH-10), 최대 낙하고 1.1m, 최종관입량은 최종 10타 이상의 평균 관입량이 2mm이내 (대체로 1.5mm이내)를 기준하였다.
- 이 과정에서 동재하시험을 시행하였으며 동재하시험 결과로부터 1단지 B공구(105동, 106동, 107동, 108동, 109동), 2단지 203동, 204동, 206동은 해머 용량을 조정하여 유압 13ton Hammer를 적용하기로 하였다.
- 직타에 의한 관입과정을 약술하면 지반층의 상부에 분포되어 있는 모래층과 점토층(대부분 실트가 혼재되어 있으며 완전 포화상태인 연약지반층(N<10)의 관입은 관입저항이 거의 없어 말뚝 자중에 의해 관입(총후 약 10m이상)되는 정도였으며 하부의 모래층 내지 모래 섞인 자갈층에서부터 관입저항이 증가되기 시작하여 최종관입량 검토단계인 말뚝 선단부 지지층인 암반층(풍화암층 하단 또는 연암층 상단으로 추정)에서는 관입저항이 갑자기 증가하는 경향이였다.
- 특히 102동에서는 모래 자갈층이 거의 없는지 몇 번의 타격으로 쉽게 관입되다가 갑자기 관입저항이 커지면서 최종관입량에 이르는 경향인 점을 고려할 때 곧바로 지지층인 연암층 상단에 도달하는 것으로 추정되었으며 말뚝길이가 비교적 큰 110동, 111동에서도 유사한 경향으로 관입되었다.
- 그러나 B공구 105동의 경우는 토질주상도의 연암반층에 약 5m 이상 관입(관입 총 타격회수 800타 이상)된 점을 고려할 때 연암층의 풍화정도가 큰 지반으로 생각된다. 아울러 본 지역의 기초 지반은 말뚝 관입 이후 Set-up 효과가 적으며 최종관입량 기준을 적용하여도 수렴되는 상태에서 종료하지 않으면 유사 Relaxation 현상이 발생될 수도 있음에 유의하여야 한다.



해머검사

시험타 및 PDA-test

(5) 시공초기 정재하시험을 통한 지지력 확인

- 가. 반력장치 : 재하방법은 시험 말뚝 주변에 2.5m 이상의 간격이 확보되도록 이격하여 Ground Anchor 시공 후 Anchor 반력을 이용하여 시험을 실시
- 나. 시험방법 : KSF-2445, ASTM D-1143 규정 기준에 의거
- 다. 재하방법 : 5 Cycle type Stress control method에 따라 반복 재하를 실시
- 라. 최대 재하하중 : 설계하중 Ra=292ton/본의 2.5배로 하여

730ton 재하

- 다. 성과분석방법 : 재하시험 최대 재하중에서도 항복점이 발견되지 않아 이를 항복하중으로 하여
 - 항복하중에 의한 분석법
(하중 - 침하곡선법, Log P-Log S-Log t 곡선법, P-dS/d (Log)곡선법)
 - 침하량에 의한 분석법
(전침하량에 의한 분석, 잔류침하량에 의한 분석법)
 - Davison Method에 의한 분석법으로 시행 함.
- 바. 정재하시험 결과는 아래와 같음

〈표 3〉 강관 말뚝 Ø609.6×16t (SPS 490)에 대한 정재하시험 결과표

구 분	관입깊이 (m)	총 침하량 (mm)	잔류 침하량 (mm)	허용지지력 (ton/본)	설계하중 (ton/본)	말뚝제원
PLT-105동	19.8	23.93	1.40	365.0 이상	292.0	Spiral steel Pipe pile Ø609.6x16t (SPS 490) : 말뚝 재료의 허용지지력 (426.9ton/본)
PLT-102동	18.2	24.81	8.86	365.0 이상		
PLT-111동	22.6	28.27	7.85	365.0 이상		
PLT-110동	29.5	32.67	1.80	365.0 이상		

사. 정재하시험 결과 시험말뚝에 대해 설계 허용지지력 (Ra = 292ton/본)을 상회하는 허용지지력 (Ra=365ton 이상/본)이 나타남

- 아. 정재하시험에 대한 기술자문 의견
105동, 102동, 111동 및 110동에 대한 정재하시험 결과는 잔류 침하량이 말뚝 직경(Ø609.6)의 2.5%(15mm)이내인 1.4mm, 8.86mm, 7.85mm 및 1.80mm로 각각 측정되었으며 시험과정에서 항복점이 발견되지 않았던 점을 고려할 때 시험 최대하중 (730ton)을 항복하중으로 간주하여 말뚝 허용지지력은 365ton 이상/본으로 결론지을 수 있다.



(6) 시공중 지지력 확인

- 가. 동재하시험 빈도
 - A.P.T : 각 동당 2회(총 55회 동재하시험 시행)
- 나. 동재하시험 시행시기
 - 시험타시 : 1회/동당(Hammer효율 검사 및 항타관리기준 설정)
 - 항타중 : 1회/동당(Hammer효율 검사 및 지지력 확인) (Random check → 불합격시 재항타 시행)
- 다. 시행방법 : 검사 전문업체(주파일테크) 현장 방문 후 시험



PDA test시 관입량 check

변형률계 및 가속도계 부착

(7) 용접검사

- 가. 시공중 용접사 기량 Test
 - 일 시 : 2002.7.4 오전 10시~ (항타 공사 착수 10일전)
 - 대 상 : 창조(2명)+광명(6명)+유창(11명) = 총 19명 응시
 - 시험방법 : 강관말뚝(606.6x16t)을 절단 개선후 이음부 용접
 - 용접검사 : 초음파탐상시험 (UT) - 국제비파괴검사(주) 시행
 - 합격자 : 14명 합격(- 용접인증서 교부)



나. 시공중 용접검사

구 분	단 위	강관말뚝	비 고
항타총량	공	7,060	15,920
용접개소	개소	3,380	7,940
검사수량		계획 : 338회 시행 : 345회	공인기관시험 성적서 제출
검사빈도		용접 10개소당 1회	
용접검사방법		초음파탐상(UT) 검사	
비파괴 검사업체		- 국제비파괴검사(주) - 한솔검사엔지니어링(주)	
검사방법		- 용접사 기량시험 합격자에 한하여 용접시험 - 전문 검사업체에서 현장방문 후 용접검사 시행 - 검사방법 : 현장에서 임의로 선정하여 시험 - 판정 : 감리단 및 품질실 임회 후 시험하여 판정	



다. 현장 용접방법 개선

- 강관말뚝 조합이 18m~21m에 대해 연직용접이음 방식 → 수평 용접 이음 시행
- 항타전 제작말뚝에 대해 사전검사를 시행하므로 품질이 양호



수평용접

수평용접 후

(8) 항타진동이 구조물에 미치는 영향 시험

- 가. 목적 : 항타진동으로 인하여 구조물에 미치는 영향검토
진동규제치 : 콘크리트타설 후 0~12시간 이내에서
2.54mm/sec 이하

나. 시행 : 엔에스브이

다. 결과 : 콘크리트타설 지점에서 2.5m이내에서 항타작업 중지

구분	파일위(1.3m)	2.5m	5.0m	7.5m	비고
Acceleration (m/sec ²)	-	0.19	0.10	0.12	
Velocity (mm/sec ²)	0.56	1.73	1.62	1.38	



(9) 두부절단 및 항두보강

가. 절단 : 반자동 절단

나. 항두보강 방법



항두절단

항성형 두부보강

3.4 시공관리 기준

구분	품질관리 항목	품질관리	비고
항타전	기준점 및 수준점관리	기준점 ○ 기준점 및 수준점 관리 - 월 1회 기준점 검측후 성과표 작성	
	위치측량	강관 Pile 위치 측량 (APT.) ○ 말뚝 위치측량 검측 - 검측요청서 : 1회/동당 - 동 위치측량 확인 - 말뚝 위치측량 확인 - 동별 3~4회에 분할 검측(감리단 입회) ○ 정재하시험 : 8개소 - 설계 정재하시험 : 3개소 (102, 113, 204동) - 시공초기 정재하시험 : 5개소 (102, 105, 110, 111, 202동) ○ 동재하시험 : 총 55회 - 설계 동재하시험 : 3회 (102, 113, 204동) - 시공초기 동재하시험 : 9회 - 시공중 : 매 동당 3회 시행 착수시 : 동재하시험을 시행후 시공관리 기준 설정 항타중 : 시공된 말뚝에 대해 지지력 확인 시험	검측요청서 제출
항타중	재하시험	APT.동 (강관말뚝)	보고서 제출 보고서 제출 시공관리기준
	이음부 용접공사	○ 강관말뚝 이음 10개소당 1회 : UT검사(전문기관 의뢰)	시험성적서
	위치오차	○ 15cm 이내	
	수직도	○ 1/100 이내	
	두부절단	○ ±10mm 이내	
항타해머	10톤 해머	○ 1단지 : 101, 102, 103, 104, 110, 111, 112, 113, 114 (9개동) 2단지 : 201, 202동 (2개동)	11개동
	13톤 해머	○ 1단지 : 105, 106, 107, 108, 109 (5개동) 2단지 : 203, 204, 205, 206 (4개동)	9개동
항타 종료조건	1단지 201, 202동·10톤 Hammer 203~206동·13톤 Hammer	<표 4> 항타 최종 관입량 적용 기준 참조	

항타중	말뚝 효율관리	13톤 및 10톤 유압 해머	○ 해머 효율관리 - 초기 시험타: 1회/동당 - 중간 지지력 PDA시험사: 1회/동당	PDA보고서제출 PDA보고서제출
항타중	Hammer Cushion재검사		○ 항타기 초기 투입시 검사 (감리단 및 시험실 입회)	PDA를 통해 검사
	최종관입량 검사 및 시공기록관리		○ 항타기당 1명 기록수 인원 배치 ○ 매 말뚝마다 기록관리 ○ Rebound용지 부착후 최종관입량 기록 ○ 항타 기록지(매 말뚝마다)	항타기록지
항타후	시공기록 보존		○ 용접검사 시험성적서 -Scan후 전자매체 보관	
			○ 재하시험보고서(정재하, 동재하)	
			○ 공사 사진첩	검측요청서 제출
			○ 기타 항타공사 관련서류 일체	

3.5 시공시 문제점 처리

3.5.1 초기항타(처음항타 : EOID)

고강도 강관말뚝의 시공 관리방안은 여러 가지가 있었으나 가장 중요한 사항은 강관말뚝을 어떻게 관입시켜야 소정의 지지력을 확보할 수 있는가에 대한 결정이라 할 수 있다. 이에 대한 일반적인 결정과정은 우선 각종 자료나 문헌을 통해 말뚝 구경(DIA)에 적절한 해머를 선정한다. 그런 다음 지반조사 결과에 따라 말뚝길이 또는 지반특성을 고려하여 공사지역을 구분(zonning)하고 적정 위치에 시험타를 한다. 시험타 과정에서 PDA (Pile Driving Analyzer)를 시행하여 적정 낙하고와 타격 에너지를 결정하는데 이 때 에너지 전달율을 아울러 정한다. 에너지 전달율은 주로 해머 쿠션재의 영향이 크므로 적정 에너지 전달율을 결정하면 이를 충분히 확보할 수 있는 쿠션재를 선택하여 사용할 수밖에 없으므로 쿠션재에 대한 어떤 제한 사항을 규정할 필요는 없다. 본 공사에서는 1단지를 3개 공구로 구분하였는데 A공구 (101, 102, 103, 104동), B공구 (105, 106, 107, 108 및 109동), C공구 (110, 111, 112, 113, 114동) 그리고 2단지 (201, 202, 203, 204, 205, 206동)로 구분하였다. 그리고 상술한 제반사항을 고려하여 제반시험을 시행하여 아래 표와 같이 항타공사 시공관리방안을 정하였다.

<표 4> 항타 최종 관입량 적용기준 (Spiral steel pipe pile Ø609.6×16t-SPS 490 Ra≥292 t/본)

구분	유압 13톤 해머			유압 10톤 해머		비고
	처음항타 (EOID)	재항타 (1st strike)	재항타 (2nd restrike)	처음항타 (EOID)	재항타 (1st restrike)	
낙하고	H=1.0m	좌동	좌동	H=1.1m	좌동	
타격에너지 전달율	75% 내외	좌동	좌동	75% 내외	좌동	
최종관입량 기준	10타이상 평균관입량이 2mm/타 이내로서 수렴되는 경우	좌동	최종 5타이상 평균관입량이 5mm/타 내외	10타이상 평균관입량이 1.5mm/타 이내로 수렴되는 경우	좌동	
적용구간	1단지 B공구 (105, 106, 107, 108, 109, 110동) 2단지 (203, 204, 205, 206동)	2단지 204, 206동		1단지 A공구 (101, 102, 103, 104동) C공구 (111, 112, 113, 114동) 2단지 - 201, 202동		
검사기준	첫타격이 3mm/타 내외 이면서 수렴되는 경우 재항타 필요없음	첫타격이 5mm/타 내외 이면서 수렴되는 경우 재항타 필요없음	첫타격이 3mm/타 내외 이면서 수렴되는 경우 재항타 필요없음	첫타격이 3mm/타 내외 이면서 수렴되는 경우 재항타 필요없음	최종 5타이상 평균관입량이 3mm/타 내외일때 재항타 종료	

(본 표에서 재항타 및 재항타에 대한 자세한 내용은 다음항에 기술한 내용을 요약 정리하여 수록한 것임) 이러한 구분을 정하는 데는 몇 가지 중요사항이 있는데 시험타 및 PDA-test 과정에서 타격에너지와 관입량에 따른 관입 저항치가 소정의 값이 확보되는가의 문제, 최종10타이상 평균 관입량을 체크하는 과정에서 관입 정도를 고려하는 것이 중점 사항이라 할 수 있다.

3.5.2 재항타(1st restrike)

본공사 시험타 과정이나 시공과정을 검토한 결과 본 지역에 타입된 말뚝은 시간 경과(time effect)에 따른 지지력 증가현상(set up)은 대체로 그리 뚜렷하지 않으나 반대로 말뚝 타입 후 지지력이 감소되는 유사 Relaxation 현상이 여러 군데서 발생되었는데 공사초기 108동의 유압 13톤 해머를 사용한 구간에서 처음 발견되었다. 이는 타입된 말뚝이 당초 시공관리방안대로 시공되었는지 검사를 위한 재항타과정에서 발견되었는데 몇 군데 더 재항타를 하여본 결과 유사 Relaxation이 확인되었다. 이에 대한 원인분석 및 대책이 문제로 되었다. 뿐만 아니라 어느 경우에는 최종관입량 규정 이내에 이르지 않으면서 그 값 근방에서 계속 관입되는 경우가 발생 되었다. 이때의 양상은 유압 13톤 해머의 경우 2mm/타 내외를 반복하므로 결국 해머 장비가 견디지 못하고 고장이 자주 발생(주로 쿠션재)되기도 하였다.

이를 해결하기 위한 방법으로 몇 가지 test를 시행하였는데 우선 최종관입량 규정을 강화하여 최종 20타이상 평균 관입량을 2mm/타 이내로 증가시켜 보기도 하고, 5타 이상 평균 관입량을 2mm/타 이내로 바꿔서 재항타를 시행해보았으나, 결과는 똑같이 유사 Relaxation 현상이 발생되었다. 그 다음 방법으로는 최종관입량 규정대로 항타종료후 이어서 300~500타까지 overdrive를 시행하였는데 이도 또한 마찬가지로 결과였다. 그래서 몇 개소를 택하여 말뚝 중앙부와 말뚝 외부를 시추조사한 결과 우선 2가지 사항이 발견되었는데 말뚝 선단부가 딱딱한 풍화토 내지 풍화암층에 있는 경우와 말뚝 선단이 파쇄대에 관입 된 경우였다. 이 문제는 재항타를 시행함으로써 해결되었다. 풍화암층에 말뚝선단이 있는 경우는 최종관입량 규정대로 항타를 종료하면 지하수가 유입되어 말뚝선단이 약화되는 것으로 생각되었으므로 재항타하여 지지기반까지 관입 시킴으로써 해결되었다. 파쇄대의 경우도 재항타를 시행하여 파쇄대에 깊이 박아 넣으면 관입 저항치가 커져서인지 PDA-test 결과가 양호하게 개선되었다.

1단지의 유압 13톤 해머 사용지역(B공구)은 비교적 말뚝길이가 길고 연약지반 아래 모래지갈층이 두꺼우며 풍화암층이 두껍지 않게 분포된 지역으로써 재항타 하므로 모든 문제가 해결되었다. 1단지의 유압10톤 해머사용지역(A공구 및 C공구)도 의심이 가는 경우 재항타를 시행하여 고강도 말뚝이 충분히 지지기반까지 관입 되도록 시공하였다.

3.5.3 재항타(2nd restrike)

그러나 2단지 206동과 204동의 경우는 또 다른 양상이 나타났다. 우선

이 부위는 전술한 바와 같이 지반조사 결과 연암이 일찍 나타났다가 다시 풍화토 내지 풍화암 연암으로 전이되는 곳이 발견되었는데 이는 전기탐사 결과치를 분석한 내용과 잘 부합되는 부분이라고 생각되었다. 뿐만 아니라 지지암반(연암)의 분포가 아주 불규칙하여 매우 급격한 경사를 이루고 있는 지역이기도 하였다. 또한 풍화토 풍화암이 전반적으로 분포되어 있는데 그 두께 또한 아주 불규칙하였다. 시향타 전에 타격에 의해 최종 굴착면에서 깊지 않은 곳에 있는 2~3m 두께의 연암층을 말뚝이 관통할 수 있는지 불확실하여 부득이한 경우 천공 후 말뚝을 타입하는 방법, 천공 후 근고(根固) Grouting을 시행하는 방안이 검토되었으나 고강도 말뚝이므로 우선 시향타하여 결과를 보고 결정하기로 하였다.

결국 고강도 말뚝은 상부에 있는 연암층(2~3m)을 뚫고 관입되었는데 고강도 말뚝은 이상이 없었다. 추정하건대 연암층 아래 풍화토층이 있었기 때문에 파쇄 연암층이 쉽게 관통되었을 것으로 생각되기도 하였다. 또한 이 부위는 말뚝 길이가 최종 굴착면에서 10m 이내이었으므로 단항(이음말뚝이 아님)을 사용하였고 선단부 보강이 충분하였으며 해머중량(유압13톤)이 커서 타격에너지가 말뚝선단부에 집중되어 쉽게 타입된 것으로 생각되었다.

그러나 최종관입량 규정에 따라 항타를 종료하고 다음날 검사과정에서 재항타(1st restrike)를 하니 또다시 관입되는 유사 Relaxation 현상이 발생한 것이다. 따라서 1단지에서 이미 시행 했던대로 전부 재항타를 시행하였는데 또다시 검사를 위한 재재항타(2nd restrike)를 다음날 시행하니 또다시 관입 되었다. 결국 먼저 타입된 말뚝 선단부의 암반파손이 다음에 항타하는 타격의 영향을 받아 암반이 느슨해진다는 결론에 도달하였다.

응회암은 경도는 크나 강도는 약한 B군의 암으로 분류되어 있는 점을 고려할 때 항선단부 암지반의 파쇄(손)가 근접하여 타입되는 말뚝의 영향으로 느슨해져서 유사 Relaxation 현상이 반복되는 것으로 생각되었다. 이에 대한 대처방법으로 재재항타(2nd restrike)는 타격에너지를 낮추어 타입함으로써 더 이상의 암반파손이 발생되지 않으면서 초기항타 (EOID) 및 재항타(1st restrike)에 의해 파손된 암반정도까지만 타입 되도록 시도하였는데 PDA-test 결과 관입저항치가 확보되었다. 이 방법으로 재재항타는 지지력이 확보되는 범위에서 타격에너지를 줄여야 되는 것을 알게 되었다. 타격에너지를 줄여서 시공하는 방법으로 낙하고를 조정하면 쉽게 재재항타를 조정할 것으로 생각하였으나 투입된 유압 13톤 해머의 낙하고 조절이 용이하지 않아 최종관입량을 조정하여 시험시공을 하고 이를 반영하였다. 유압 13t 해머, 낙하고 1.0m, 타격에너지 전달율 75%내외로 할때 5타이상 평균관입량이 5mm/타 내외 또는 유압 10t/해머, 낙하고 1.1m, 타격에너지 전달율 75% 내외일 경우는 5타이상 평균 관입량이 3.0mm/타 내외일 때 항타를 종료함으로써 소요의 지지력이 확보되면서 유사 Relaxation현상이 발생하지 않

도록 하였다.

이로써 본 공사 고강도 강관말뚝의 타입 중 발생한 문제가 거의 해결되었는데 결국 직접 타격에 의한 방법으로 문제점을 해결하고 정리하였다. 만약 이러한 방법으로 해결되지 않고 여타공법으로 해결할 경우 (예 : PRD 공법, CIP 공법 등)공법 변경문제 때문에 공사공기에 막대한 영향이 있었을 것으로 생각된다.

4.0 맺음말

본 공사에서 고강도 강관말뚝을 사용해본 결과 밝혀진 중요한 장점은

- 같은 직경(DIA)의 말뚝이라도 지지력을 크게 높일 수 있다는 점
- 지반조건이 다소 불량하여도 타입이 가능한 점
- (마찰 말뚝보다) 선단지지 말뚝에 보다 적합하다는 점
- 말뚝 관입 깊이를 충분히 깊게 하여 안전한 지지층까지 관입시킬 수 있어 안전성이 높아진다는 점 등이라 요약할 수 있다.

따라서 말뚝 수량을 줄이고도 지지능력을 크게 할 수 있으므로 보다 경제적인 공법으로 향후 적용범위가 증대될 것으로 판단된다.

그러나 본건에 한해서는 시공사례가 거의 없어 부득이 시행착오가 불가피 하였는데, 다시 요약하면 고강도 말뚝의 잇점을 살려 타격에너지를 크게 하면 관입저항이 큰 자갈층이나 풍화대는 관통시킬 수 있지만 말뚝 선단부 암반이 파쇄되어 유사 Relaxation 현상이 발생된다는 점과 국내에서는 그 사례가 드물어 해결이 용이하지 않았다는 점이다. 이에 본 현장에서는 기술자문의 의견에 따라 PDA-test를 적절히 시행하여 향후 발생할 수 있는 우려사항을 제거하였다.

특히 고강도 말뚝 시공의 경우 설계과정에서의 입력자료 즉 지반상태를 보다 완전하게 파악하여야 현장에서 발생하는 시행착오를 줄일 수 있다는 점을 알 수 있었으며 말뚝 기초의 시공이 얼마나 세심한 검토와 주의를 요하는가를 관련자 모두가 공감하였을 것으로 생각된다.

국내에서 사례가 드문 고강도 말뚝 시공이 (주)포스코건설의 적극적인 협조 아래 성공적으로 시행되어 무엇보다 다행스럽게 생각하며 이러한 문제해결의 소중한 경험이 토대가 되어 더욱 국내의 건설기술이 진일보하게 되리라 생각된다.

