

고성토 암버력 동다짐 지반에 시공된 PHC 말뚝의 거동특성 사례연구 A Case Study of PHC Pile Behavior Characteristics on Dynamic Compacted High Rock Embankment

유남재¹⁾, Nam-jae Yu, 윤동균²⁾, Dong-Kyun Yun, 배경태³⁾, Kyung-Tae Bae, 김형석⁴⁾, Hyung-Suk Kim, 이달호⁵⁾, Dal-Ho, Lee, 박용만⁶⁾, Yong-Man Park

- ¹⁾ 한국건설생활환경시험연구원 책임연구원 Senior Researcher, Korea Conformity Laboratories
²⁾ 한국건설생활환경시험연구원 연구원 Researcher, Korea Conformity Laboratories
³⁾ (주)대우건설 기술연구원 전임연구원, Associate Researcher, Institute of Construction Technology, DAEWOO Engineering & Construction Co. Ltd.
⁴⁾ 한국전력공사 경인건설단 차장 Senior Manager, Kyungin Transmission & Distribution Construction Head Office, Korea Electric Power Corporation
⁴⁾ 한국전력공사 경인건설단 부장 General Manager, Kyungin Transmission & Distribution Construction Head Office, Korea Electric Power Corporation
⁴⁾ 한국전력공사 경인건설단 처장 General Manager, Kyungin Transmission & Distribution Construction Head Office, Korea Electric Power Corporation

SYNOPSIS : The construction site for ○○ transformer substation was located at a mountain valley. In order to prepare the site, the valley was first filled with crushed rock debris up to 63m. Since the main concern of this project is to minimize differential settlement of the foundation of transformer facilities, dynamic compaction was performed every 7m followed by reinforcement with EMP(Ez-Mud Piling). The EMP is one of bored piling methods, in which a hole is bored by means of air percussion and maintain by injecting Ez-Mud. Then a PHC pile (Pretensioned spun High strength Concrete pile) is embedded and finalized with a hammer. In this study, bearing capacities and long term behavior of a pile installed by EMP were investigated. To achieve these objectives, a series of tests such as static and dynamic load tests were conducted. In addition, a construction quality control standard was proposed based on the test results.

Key words : High Rock Embankment, Dynamic Compaction, PHC Pile, Ez-Mud Piling, Pile Load Test, Pile creep test

1. 서 론

국내 ○○변전소 현장은 산간분지에 위치하여 계곡부에 암버력을 7m씩 분할 성토한 후 층별 동다짐을 실시하여 최대 63m의 고성토(高盛土) 부지를 조성한 후 변전기기 기초의 부등침하량을 최소화하기 위하여 선 천공후 고강도 콘크리트말뚝(Pretensioned spun High strength Concrete pile, PHC pile)을 일종의 매입말뚝 공법인 EMP(Ez-Mud Piling)공법을 적용하여 시공하였다. EMP공법은 자갈, 전석 및 암반(풍화암, 연·경암) 지반에서 Air Percussion 천공과 동시에 공내 안정액인 Ez-Mud를 분사하여 일정시간 공벽을 유지시킨 후 파일을 근입하고 유압 햄머로 선단안착을 확인하는 공법으로 당 현장과 같이 전석층 및 암반층에서도 시공성이 양호하고 경제적인 공법이다. 본 연구에서는 고성토 암버력 동다짐 지

반에 EMP 공법으로 시공된 PHC 말뚝에 대하여 각각 동재하시험 및 정재하시험을 실시하여 지지력 특성을 비교, 분석하고 장기하중에 대한 거동특성을 평가하기 위하여 정재하시험 과정에서 장시간 일정한 하중을 유지하면서 침하거동 특성을 고찰하였다. 또한, 암버력에 시공된 PHC 말뚝에 대한 동·정재하시험결과를 비교, 분석하여 말뚝의 시공 품질관리기준을 제시하였다.

2. 현 황

당 현장 부지는 산속 계곡부에 계획되어 있어 마을 등의 주요 지장물이 없으며, 지질조사(건화, 2008) 결과 지층조건은 표 2.1과 같다. 변전기기는 대상 부지 암반의 최적 질/성토 토공량을 기준으로 절취 암버력을 최대 63m까지 성토다짐한 상부로 계획되어 있으며, 변전기기 종류별 당초 기초설계 현황은 표 2.2와 같다.

표 2.1. 지층조건

구 분	지층경계 심도
토 사	0.0m ~ 3.0m
풍 화 암	3.0m ~ 8.5m
연 압	8.5m 이상

표 2.2. 변전기기 종류별 당초 기초설계 현황

구 분	765kV M.Tr기초		800kV GIS기초		362kV GIS기초	345kV Sh.R기초		765kV 송전선로인출 POST기초	345kV 송전선로인출 POST기초	OIL PIT
개 소	2 BANK		2 BAY		6 BAY	2 개소		3 기	5 기	2 개소
말뚝 종류	#1 강관	#2 강관	#1 강관	#2 PHC	PHC	#1 강관	#2 PHC	#1:강관 #2,#3:PHC	PHC	#1:강관 #2:PHC
구조물 하중	1,186.4 ton	1,186.4 ton	6447.1 ton	6,510.3 ton	1,018.1 ton	437.0 ton	437.0 ton	모멘트 지배	모멘트 지배	-
말뚝 본당반력	24.5 ton	42.4 ton	29.5 ton	68.8 ton	39.2 ton	36.4 ton	36.4 ton	-	-	-

3. EMP 공법

당 현장에서는 암버력을 7m씩 분할 성토한 후 층별 동다짐을 실시하여 최대 63m의 고성토(高盛土) 부지를 조성한 후 변전기기 기초의 부등침하량을 최소화하기 위하여 선 천공 후 고강도 콘크리트말뚝(PHC pile)을 일종의 매입말뚝 공법인 EMP(Ez-Mud Piling)공법을 적용하여 시공하였다. EMP공법은 Drilled Hole 상부에 Drive Casing을 설치하여 지표지반의 유실방지 및 초기수직도를 확보하고 햄머 굴진과 함께 Air와 Ez-Mud를 분사하여 천공 시 발생하는 Slime과 Ez-Mud 안정액을 교반시키고 이를 공벽에 흡착시켜 일시적으로 공벽의 붕괴를 방지하여 공벽이 형성되어 있는 동안 말뚝을 관입심도(기초지 지층)까지 삽입한 후 경타하는 공법으로 시공순서는 그림 3.1 및 다음과 같다.

- ① Pile Driver로 천공한 후 상부에 Drive Casing을 설치
- ② Pile Driver 로 천공하며 Ez-Mud 분사
- ③ Hammer 및 Rod 회수
- ④ Pile 삽입
- ⑤ Hydraulic Hammer Pile 향타 및 근입량 확인
- ⑥ 향타 완료

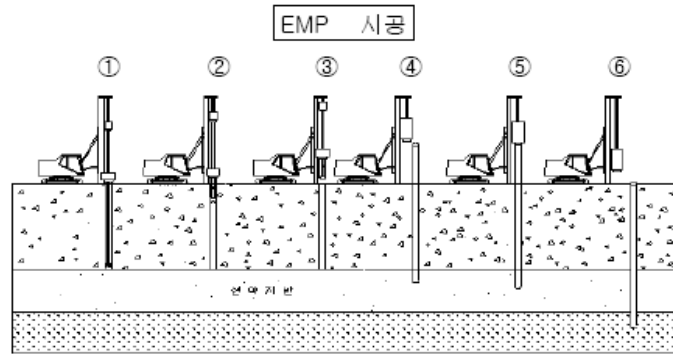


그림 3.1 EMP 공법 시공 순서도

4. 재하시험

본 연구에서는 기초부지 PHC 말뚝 시공에 따른 품질관리를 위해 동재하시험을 실시하여 항타관리기준을 설정하였다. 또한, 동일한 말뚝 3개소에 대하여 정재하시험을 수행하여 지지력을 확인하고 하중-침하 및 creep 거동을 고찰하였다.

4.1 동재하시험

(1) 동재하시험의 기본원리

어떤 질량을 갖는 물체 또는 해머가 말뚝두부를 타격하는 경우(단, 이 말뚝은 어떠한 저항력도 받고 있지 않으며 단면적이 일정한 것으로 가정) 경우 그림 4.1에서 보는 것처럼 말뚝두부는 압축상태에 놓이게 되며 이로 인해 압축변형(ϵ)과 압축력(F)이 발생한다. 이 힘(F)은 다시 말뚝을 따라 아래 방향으로 전달되면서 인접한 말뚝입자를 차례로 압축하게 된다. 말뚝재료가 압축됨에 따라 말뚝입자 압축변위를 일으키며 이러한 말뚝입자의 변위속도를 입자속도(Particle Velocity, V)라고 부른다. 질량 m 을 갖는 말뚝의 한 입자가 Δt 의 시간 동안 어떤 크기의 변위속도 V 를 갖게 되면 이 입자는 가속되어 관성력($V/\Delta t$) $\cdot m$ 을 유발하게 된다. 이 관성력은 압축력과 균형을 이루게 되는데 말뚝의 입자들이 가속화되기까지는 얼마간의 시간이 소요되므로 변형(Strain)은 어떤 속도 C 로 이동하게 되며 이를 파의 속도(Wave Speed)라 부른다. 그림 4.1에서 보는 바와 같이 타격으로 인해 발생한 파가 시간 Δt 동안 ΔL 거리만큼 이동하였다면, ΔL 은 다음 식 (1)로 표현할 수 있다.

$$\Delta L = \Delta t \cdot C \dots \dots \dots (1)$$

이러한 파의 전파에 따른 어떤 점에서의 말뚝입자 A의 변위량을 δ 라 하면 변형률(ϵ)은 식 (2)로부터 구할 수 있다.

$$\epsilon = \frac{\delta}{\Delta L} \dots \dots \dots (2)$$

식 (1)을 식 (2)에 대입하면 식 (2)은 식 (3)이 된다.

$$\epsilon = \frac{\delta}{\Delta t \cdot C} \dots \dots \dots (3)$$

한편, 입자 A는 Δt 의 시간 동안 δ 만큼 이동하였으므로 식(4)로 표현되는 입자속도(Particle Velocity) V 를 갖는다.

$$V = \frac{\delta}{\Delta t} \dots\dots\dots(4)$$

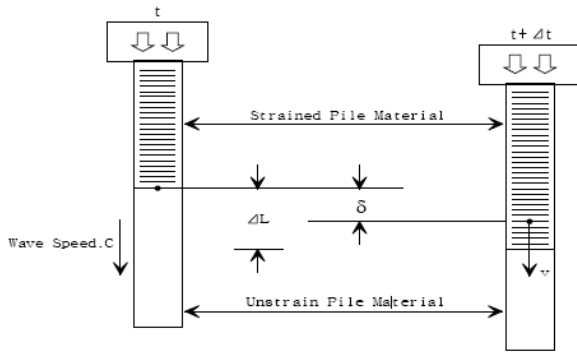


그림 4.1 힘(F)과 속도(V)의 비례관계

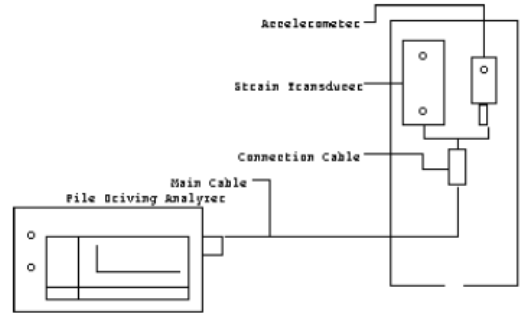


그림 4.2 말뚝에 부착된 변형률계와 가속도계

식 (3)과 식 (4)로부터 식(5)을 얻을 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{V}{C} \dots\dots\dots(5)$$

식 (5)의 양변에 말뚝의 탄성계수(E)와 단면적(A)을 곱하면 식 (6)이 얻어진다.

$$F = \frac{EA}{C} V \dots\dots\dots(6)$$

식(6)은 PDA를 이용한 동적해석의 기본이 되는 식으로, 비례계수 EA/C를 말뚝의 임피던스(Impedance)라고 한다. 위 식으로부터 말뚝 내 임의의 한 점에서 힘은 동일한 점에서의 입자속도에 비례한다는 것을 알 수 있으며 이를 (힘과 속도의) 비례관계(Proportionality)라 규정한다. 그림 4.2에서 보는 바와 같이 PDA는 말뚝두부에서 약 1.5D~2D되는 지점에 부착된 변형률계(Strain Transducer)와 가속도계(Accelerometer)를 이용하여 측정된 변형률과 가속도로부터 각각 독립적으로 F와 V를 얻는다.

(2) 동재하시험 결과

유압햄머 7.0 ton, 낙하고 0.6m에서 동재하시험을 수행하였으며, 시험 결과를 표 4.1에 나타내었다. 말뚝의 관입량은 초기항타 시 ≒2.0~24.0mm/blow, 재항타 시 ≒2.0~22.0mm/blow, 말뚝의 건전도는 100%로 확인되었다. 시험말뚝의 항타응력은 19.2~30.9MPa로 허용항타응력은 48MPa, 효율은 56%~76%로 나타났다. CAPWAP 분석결과 T3-No.30 및 T5-No.24에서 재항타 시 주면마찰력 및 선단지지력에서 지지력의 증가가 확인되었으나 T4-No.2에서는 초기항타 및 재항타에서 지지력의 증가가 없는 것으로 분석되었다. 동재하시험 분석 결과 초기항타에서는 T5-No.24를 제외한 나머지 파일에서는 설계 지지력을 만족하는 결과를 나타냈으나, 재항타 시험결과에는 주면마찰력의 증가로 모두 설계지지력을 만족하는 것으로 나타났다. 한편, 그림 4.3과 같이 허용지지력과 관입량을 이용하여 낙하고 0.6m, 관입량 18mm이내로 관리하면 설계지지력을 만족하게 되며 재항타의 시험에서는 시험항타시 지지력의 18%이상 증가된 결과가 예상된다. 단, 말뚝항타 시 관입량이 18mm 이상 초과되는 경우에 초기 항타일로부터 7~10일 이후에 반드시 동재하시험을 실시하여 지지력을 확인해야 할 것으로 사료된다.

표 4.1 동재하시험 결과

말뚝번호	CASE 분석							CAPWAP 분석 결과				
	항타시기	RMX (ton)	CSX (MPa)	CSB (MPa)	BTA (%)	EMX (ton·m)	관입량 (mm)	주면마찰력 (ton)	선단지지력 (ton)	전체지지력 (ton)	안전율 (S.F)	허용지지력 (ton)
T3 No.30	E.O.I.D	197	23.3	31.7	100	2.95	≒6.0	14.3	156.0	170.3	2.5	62.4
	Restrike	202	22.0	29.2	100	2.91	≒2.0	24.9	160.9	185.9	2.5	74.3
T4 No.2	E.O.I.D	142	19.5	21.6	100	2.37	≒20.0	13.1	123.8	136.9	2.5	49.5
	Restrike	132	22.3	17.5	100	2.88	≒16.0	12.2	117.8	130.0	2.5	52.0
T5 No.24	E.O.I.D	98	19.6	11.9	100	2.55	≒24.0	7.9	75.8	83.7	2.5	30.3
	Restrike	118	19.9	17.4	100	2.58	≒22.0	36.1	82.1	118.1	2.5	47.2
T4-A	E.O.I.D	171	24.1	28.4	100	3.20	≒8.0	14.0	144.3	158.3	2.5	57.7
T1-18	E.O.I.D	219	30.9	36.2	100	2.81	≒2.0	11.7	193.8	205.5	2.5	77.5
T2-26	E.O.I.D	220	27.2	35.4	100	2.58	≒2.0	5.5	196.0	201.5	2.5	78.4
T6-4	E.O.I.D	135	19.2	21.3	100	2.72	≒14.0	14.3	105.0	119.3	2.5	42.0

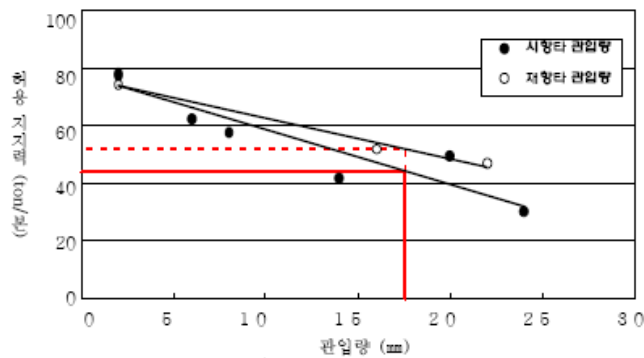


그림 4.3 시공 관리기준

4.2 정재하시험

(1) 정재하시험 방법

말뚝 정재하시험은 반복하중에 따른 하중-침하 관계를 통해 지반의 변형계수와 누적 소성변위의 거동을 확인하고 creep 변형에 대한 거동을 확인하기 위한 목적으로 시행하였다. 따라서 반복하중에 의한 누적 소성변위의 거동과 creep 변형에 대한 거동을 확인하기 위한 목적으로 반복재하패턴과 지속재하패턴을 그림 4.4와 같이 재하하였다. Creep 변형에 대한 종료시점은 0.01mm/10min 이하로 하고 이후 설계 하중 225%까지 재하하여 지반의 지지력을 확인하였다. 총 시험 하중은 설계하중(50.0 ton/분)의 225%를 재하하는 것을 원칙으로 하여, 112.5ton을 기준으로 재하-제하-재재하 방법으로 수행하였으며, 표 4.2~표 4.4에 하중재하에 따른 시간을 나타내었다.

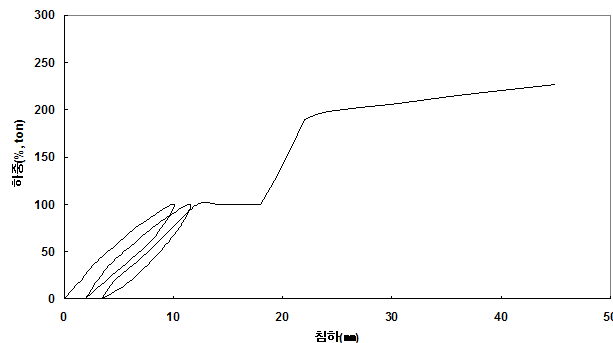


그림 4.4 정재하시험 재하패턴 모식도

표 4.2 재하단계(T-5 No.24)

1Cycle		2Cycle		3Cycle		4Cycle	
설계하중 (%)	시간 (min)	설계하중 (%)	시간 (min)	설계하중 (%)	시간 (min)	설계하중 (%)	시간 (min)
25	30	25	10	25	10	25	10
50	60	50	10	50	10	50	10
25	10	75	30	75	10	75	10
0	15	100	50	100	10	100	10
		75	10	125	30	125	10
		50	10	150	60	150	10
		25	10	125	10	175	40
		0	15	150	10	200	60
				100	10	225	360
				75	10	200	10
				50	10	175	10
				25	10	150	10
				0	10	125	10
						100	10
						75	10
						50	10
						25	10
						0	15
계	115		145		200		615

표 4.3 재하단계(T-4 No.2)

1Cycle		2Cycle	
설계하중 (%)	시간 (min)	설계하중 (%)	시간 (min)
20	30	20	10
40	30	40	10
60	30	60	10
80	30	80	10
100	30	100	10
120	720	120	120
100	10	140	30
80	10	160	30
60	10	180	30
40	10	200	30
20	10	225	120
0	30	200	10
		180	10
		160	10
		140	10
		120	10
		100	10
		80	10
		60	10
		40	10
		20	10
		0	15

표 4.4 재하단계(T-3 No.30)

1Cycle		2Cycle	
설계하중 (%)	시간 (min)	설계하중 (%)	시간 (min)
20	30	20	10
40	30	40	10
60	30	60	10
80	30	80	10
100	30	100	10
120	720	120	10
100	10	140	30
80	10	160	30
60	10	180	30
40	10	200	30
20	10	225	120
0	30	200	10
		180	10
		160	10
		140	10
		120	10
		100	10
		80	10
		60	10
		40	10
		20	10
		0	15

(2) 정재하시험 결과

시험 결과로 부터 허용지지력을 산정하는 방법은 항복 하중의 분석법과 전침하량 및 잔류침하량에 의한 분석법 등의 방법으로 분석하였으며 그 결과는 표 4.5와 같다. 한편, 정재하시험은 동재하시험 재항타 15일 이후 수행하였으며 T3-No.30, T4- No.2 및 T5-No.24 모두 설계지지력을 만족하는 것으로 나타났다.

표 4.5 정재하시험 결과

시험위치		T5-No.24	T4-No.2	T3-No.30	
관입심도	m	24.3	13.1	27.5	
최대하중	tf	112.50	112.50	112.50	
최대하중 재하시 침하량	mm	13.56	12.26	13.74	
시험결과	허용지지력	tf	56.3 이상	56.3 이상	56.3 이상
	침하량	mm	13.56	12.26	13.83
	잔류침하량	mm	3.25	2.09	1.37
	탄성침하량	mm	10.31	10.17	12.46

(3) Creep 시험 결과

암버력으로 조성된 성토지반에서 T4-No.2 및 T3-No.30 시험말뚝에 대한 장기침하에 대한 안정성을 검토하고자 설계하중의 125%에 대하여 12시간 하중을 유지하는 creep 시험을 수행하였다. 그림 4.5와 같이 T4-No.2에서 시험하중 60ton에서 720분까지 측정된 결과 5.31mm에서 5.81mm까지 약 0.5mm가 2nd loop에서는 120분 동안 5.75mm에서 5.91mm 까지 약 0.16mm의 침하가 발생하였으며 그림 4.6과 같이 T3-No.30에서는 시험하중 60ton에서 720분까지 측정된 결과 6.67mm에서 6.97mm까지 약 0.3mm가 2nd loop에서는 10분 동안 6.81mm에서 6.86mm 까지 약 0.05mm의 침하가 발생하였다. 시험 결과 60ton 재하 시 1st loop에서 0.3~0.5mm가 발생하여 설계에서 요구하고 있는 허용침하량 5mm 이내에 있는 것으로 분석되었다.

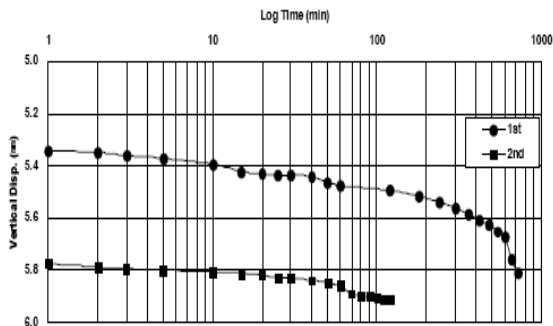


그림 4.5 시간-침하곡선(T4-No.2)

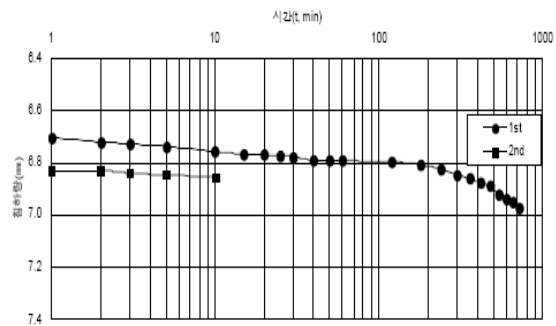


그림 4.6 시간-침하곡선(T3-No.30)

(4) 역해석 결과와 비교분석

동다짐 성토공사 후 piled raft를 적용할 경우 장기 creep 침하까지 고려하여 부등 침하기준을 만족시킬 수 있는 동다짐 지반의 탄성계수는 25,000t/m²으로 산정되었다(배경태 등, 2009). 그림 4.7과 같이 동다짐공사 기초지반의 품질기준인 수치해석 결과와 정재하시험 결과를 비교 분석한 결과 품질기준을 만족하는 것으로 판단되었다.

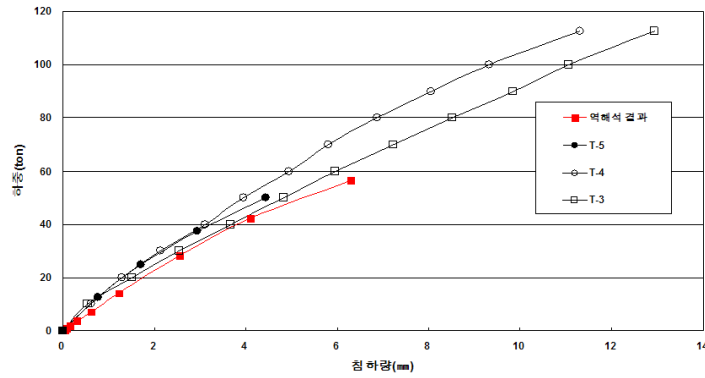


그림 4.7 관리기준(수치해석) vs 정재하시험 결과

5. 결론

고성토 암버력으로 조성된 지반에 EMP 공법을 이용하여 PHC 말뚝에 대한 동·정재하시험 결과를 분석한 결과는 다음과 같다.

- (1) 말뚝의 항타 시공 관리기준은 허용지지력과 관입량을 이용하여 낙하고 0.6m, 관입량 18mm 이내로 관리하면 설계지지력을 만족하게 되며 재항타의 시험에서는 시항타시 지지력의 18% 이상 증가된 결과가 예상된다. 단, 말뚝항타 시 관입량이 18mm 이상 초과되는 경우에 초기 항타일로 부터 7~10일 이후에 반드시 동재하시험을 실시하여 지지력을 확인해야 할 것으로 사료된다.
- (2) 암버력으로 조성된 성토지반에서 말뚝에 대한 장기침하에 대한 안정성을 검토하고자 설계하중의 125%에 대하여 12시간 하중을 유지하는 creep 시험을 수행하였으며, 60ton 재하 시 1st loop에서 0.3~0.5mm가 발생하여 설계에서 요구하고 있는 허용침하량 5mm 이내에 있는 것으로 분석되었다.
- (3) 동다짐 성토공사 후 piled raft를 적용할 경우 장기 creep 침하까지 고려하여 부등 침하기준을 만족시킬 수 있는 동다짐 지반의 탄성계수는 25,000t/m²으로 산정되었다. 동다짐공사 기초지반의 품질 기준인 수치해석 결과와 정재하시험 결과를 비교 분석한 결과 품질기준을 만족하는 것으로 판단되었다.

참고문헌

1. 건화 (2008), 비탈면 안정해석 및 지질조사 보고서, 한국전력공사 경인건설처
2. 배경태, 안상익, 박용만, 김강규, 김형석, 이우진 (2009), “장기침하를 고려한 고성토 암버력 동다짐 지반의 설계사례”, 한국지반공학회 가을 학술발표회 논문집