

군말뚝 시공으로 인한 말뚝 솟아오름과 H말뚝을 사용한 대책사례 **A case study on the utilization of H piles for the pile heaving troubles**

○여병철¹, 추문식², 조천환³, 전영석⁴

1. 서 론

구조물 기초공사에서 말뚝기초가 군말뚝이면서 말뚝간 간격이 좁게 시공되는 경우 말뚝이 솟아오르는 현상이 발생할 수 있다. 말뚝의 솟아오름은 조밀한 사질토 또는 비압축성(incompressible)의 굳은 점토지반에 주로 발생하게 되는데 말뚝이 타입되면 말뚝 주위의 토사는 말뚝체적만큼 윗쪽과 옆쪽으로 이동하게 된다. 즉 지반의 융기가 발생하게 되며 동시에 기시공된 인접말뚝의 휨 또는 솟아오름을 유발시키게 된다. 이러한 말뚝 솟아오름은 1차적으로 말뚝의 지지력을 저하시키게 되며 지반조건에 따라 재료의 손상을 유발시킬 수 있다(이명환 등, 1998). 이에 대한 상세내용은 본 논문에서 생략하였으며 참고문헌을 소개하는 것으로 대신하였다. 각종 문헌자료에 의하면 말뚝의 솟아오름에 대하여 재항타를 실시하는 것이 일반적인 해결방법으로 제시되어 있으며(Tomlinson, 1994) 이외에 지반을 선굴착하거나 H말뚝을 적용하는 것이 일반적이다. 선굴착공법은 말뚝체적만큼의 토사를 배토시킴으로써 인접말뚝에 영향을 감소시켜 말뚝 솟아오름을 감소시킬 수 있다는 해석이다. H말뚝은 말뚝형상의 특성상 소배토말뚝(small displacement pile)으로서 강관말뚝이나 원심력 콘크리트말뚝에 비해 배토량이 작기 때문에 말뚝 솟아오름에 대해 유리한 것으로 알려져 있다. 본 논문에서는 국내의 특정 현장에서 발생한 말뚝 솟아오름 문제를 해결하기 위해서 상기 세가지 방법을 시도한 결과 최종적으로 H말뚝을 채택한 사례를 제시하였다.

2. 설계조건

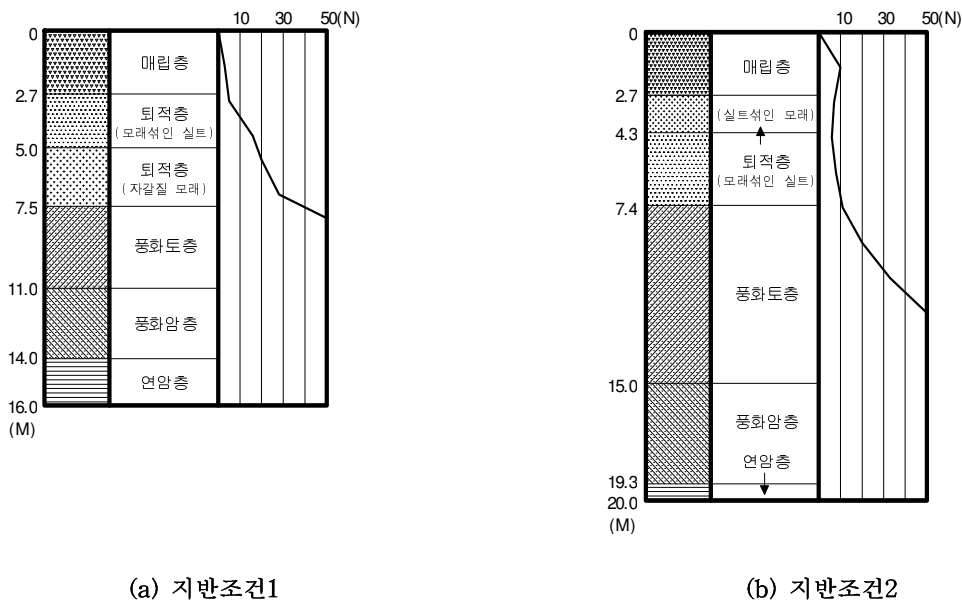
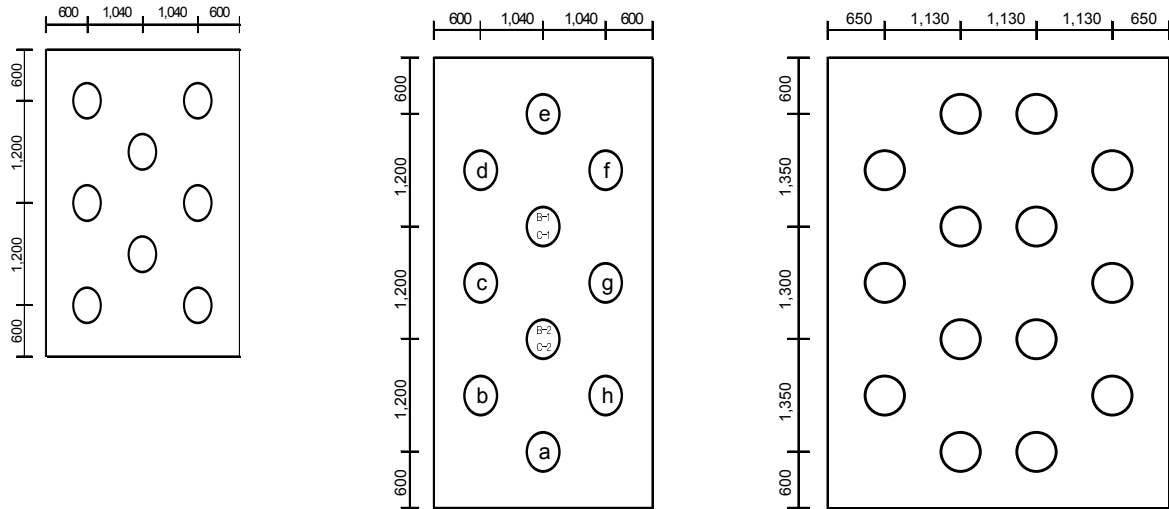


그림 1 대표적인 지반조건

-
1. 강원산업(주), (02) 3980-630
 2. 인천제철(주), (02) 772-2150
 3. 삼성물산(주), (02) 2145-6584
 4. (주)파일테크, (02) 3402-2361

본 연구사례는 대규모 건축구조물을 건설하는 과정에서 발생하였다. 본 현장의 지반조건은 지표면으로부터 -2.7 m까지 실트질 모래의 매립층(N=3~10), 그 하부에 모래질 실트 및 자갈로 구성된 퇴적층(N=7~28)이 분포되어 있다. 아래쪽으로 풍화토, 풍화암, 연암순으로 나타나고 있다(그림 1).

본 현장에서는 ϕ 450 mm와 ϕ 500 mm PHC말뚝을 유압해머(램중량 7 ton)에 의해 직항타하는 공법이 적용되었으며 본당 설계지지력은 각각 100 ton, 127 ton으로 되어 있다. 본건 사례연구의 대상말뚝은 8개, 10개 및 14개의 말뚝군을 형성하고 있으며 말뚝배치 및 간격은 그림 2에 나타내었다.



(a) 8개 말뚝군

(b) 10개 말뚝군

(c) 14개 말뚝군

그림 2 말뚝배치도

3. 시공경과

본건 현장에서는 상기 시공조건에 따라 군말뚝으로 시공하는 과정에서 기시공말뚝들이 솟아오르는 현상이 나타났으며 이에 대해 재항타를 실시하였으나 이 과정에서 2차 heaving이 발생하였다. 이러한 말뚝의 솟아오름 현상은 지지력 감소, 말뚝재료의 손상 등의 치명적인 영향을 미칠 수 있으며 이를 확인하는 목적으로 1차 재항타를 실시한 말뚝들에 대해 2차 재항타를 실시하면서 동재하시험을 실시하였다. 표 1에서 보는 바와 같이 재항타후 heaving량은 3 mm~13 mm로 측정되었으며 시험말뚝 6개소중 4개소가 설계하중(100 ton)에 미달하는 것으로 판정되었다. 또한 선단부에 손상을 입은 말뚝도 4개소에 달했으며 이들중 1개소는 손상정도가 극심하여 말뚝 중공부에 지하수가 유입된 것을 확인할 수 있었다. 이와 같이 말뚝이 솟아오름에 대해 재항타를 실시하였으나 2차 heaving을 발생시켜 여전히 지지력미달 문제를 해결하지 못하였으며 분명한 원인 규명을 할 수 없었으나 시공시 또는 재항타시 발생했을 것으로 추정되는 말뚝 손상문제가 해결과제로 남게 되었다.

표 1 동재하시험 결과 및 heaving 측정값

말뚝번호	관입깊이 (m)	시험시 관입량 (mm/打)	2차 재항타후 heaving량 (mm)	허용지지력 ($F_s = 2.0$)	설계하중	말뚝 건전도
A-1	9.7	7.0	8	94 ton	100 ton	손상
A-2	8.1	4.0	3	144 ton		손상
A-3	7.8	22.0	기록없음	35 ton		파손
A-4	9.8	3.0	4	167 ton	127 ton	손상
A-5	9.4	8.0	6	85 ton	100 ton	양호
A-6	7.5	14.0	13	63 ton		양호

4. 대책

이상 본건 현장의 시공과정에서 나타난 말뚝 솟아오름으로 인한 문제점과 이에 대한 대책을 체계적으로 조사하는 과정에서 오거에 의한 선굴착후 최종항타하는 공법이 제안되었으며 이를 적용하기 위해서 그림 1(a)와 같은 지반조건에 시험시공을 실시하였다. 시험시공은 그림 2(b)와 같이 10개의 말뚝으로 형성되는 2개 군에 대해 직항타공법과 선굴착후 최종항타공법을 각각 적용하였으며 4개소 말뚝에 대해서는 동재하시험을 실시하였다. 표 2에서 보는 바와 같이 군말뚝이 형성되는 과정에서 선시공된 말뚝의 솟아오름현상은 선굴착 여부에 관계없이 크게 나타나고 있으며 시공후 heaving량은 34 mm~55 mm로 측정되었다. 이에 따라 시공 종료시점에서는 80 ton~143 ton의 허용지지력을 가지는 반면 시공후 재항타시험에 의한 허용지지력은 38 ton~43 ton으로서 heaving으로 인한 지지력 감소율이 52%~73%로 나타나고 있다. 재항타시험시 추가 관입 후의 허용지지력은 시공종료 수준으로 다시 회복되었으며 그림 3은 말뚝지지력이 heaving으로 인하여 감소한 상태 및 추가항타에 의해 회복되는 내용을 보여주고 있다. 그러나 주변말뚝의 재항타 완료후에 설계지지력을 확보할 수 있는지의 여부는 주변말뚝의 재항타시 발생하는 2차 솟아오름을 감안할 때 앞서의 말뚝(A-1, A-2, ..., A-6)의 시험결과와 유사할 것으로 예상할 수 있다.

표 2 heaving 측정값과 동재하시험 결과

말뚝 번호	관입 깊이 (m)	주변말뚝 시공완료후의 heaving량(mm)									허용지지력(ton)			시공방법
		주변말뚝 ¹⁾								계	E.O.I.D ²⁾	B.O.R ³⁾	감소율 (%)	
		a	b	c	d	e	f	g	h					
B-1	7.9	2	3	3	7	-	12	6	5	38	143	43	69	NH70 유압 해머에 의한 직항타
B-2	8.0	18	3	4	-	-	-	12	10	55 (B-1 시공시 8 mm)	80	38	52	
C-1	7.5	-	5	3	2	5	5	5	2	34 (C-2 시공시 7 mm)	142	38	73	선굴착후 NH70 유압 해머에 의한 최종항타
C-2	7.3	10	7	8	-	-	2	6	7	40	100	39	61	

註) 1) 주변말뚝 : 주변말뚝 a, b, c, ..., h의 위치는 「그림 2(b) 말뚝배치도」 참조

2) E.O.I.D : End Of Initial Driving

3) B.O.R : Beginning Of Restrike

4) E.O.R : End Of Restrike

이상 기술한 바와 같이 직항타 또는 선굴착후 최종항타공법은 시공후 1차, 2차 재항타를 실시하더라도 말뚝 솟아오름을 완전히 배제할 수 있는 해결방법이 되지 못하였으며, 따라서 보다 적용 가능성이 크다고 판단되었던 H말뚝을 시도하였다.

H말뚝은 22개소를 2개의 말뚝군으로 나누어 지반조건1(말뚝배치도2(c)), 지반조건2(말뚝배치도2(a))의 위치에 각각 시험시공을 실시하였다.

시험시공은 H-300×305×15×15 mm 규격의 고강도 H말뚝(SPS490)과 NH-70 유압해머에 의한 직항타공법을 적용하였으며 22개소 말뚝중 6개소에 대해 항타와 병행하여 동재하시험을 수행하였다. 또한 군말뚝 영향 및 시간경과효과를 고려하기 위하여 3개소에 대해 재항타시험을 실시하였다.

시항타 결과 군말뚝 시공으로 인한 솟아오름 현상은 22개소 말뚝중 3개소에서만 발생하였으나 측정된 heaving량은 1 mm~2 mm에 불과한 것으로 나타났다. 표 3, 그림 4에서 보는 바

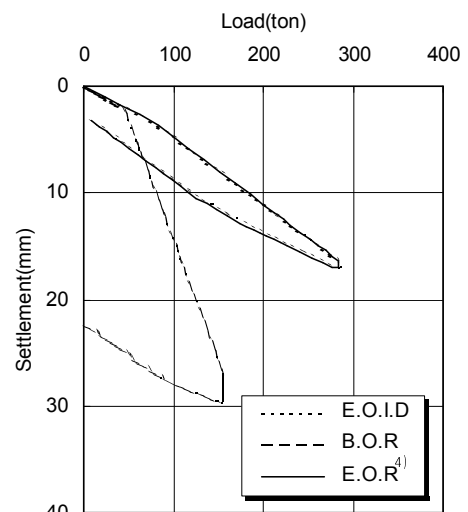


그림 3 시점별 하중-침하량 곡선 추이
(시험말뚝 B-1)

와 같이 heaving으로 인한 지지력 감소현상은 나타나지 않았으며 시간경과에 의한 지반의 set-up 효과로 인하여 지지력이 증가한 것으로 확인되었다.

표 3 H말뚝 재하시험 결과

말뚝 번호	관입 깊이 (m)	시향타후 heaving량	허용지지력(ton)			시공위치
			E.O.I.D	B.O.R	증가율 (%)	
D-1	13.8	1	131	163	24	1군 (지반조건1)
D-2	14.1	0	162	184	13	
D-3	13.9	2	152	-	-	
D-4	14.0	0	166	-	-	
E-1	13.5	0	167	-	-	2군 (지반조건2)
E-2	12.9	2	153	173	13	

註) 상기말뚝을 제외한 16개 말뚝의 heaving량은 0으로 측정되었음

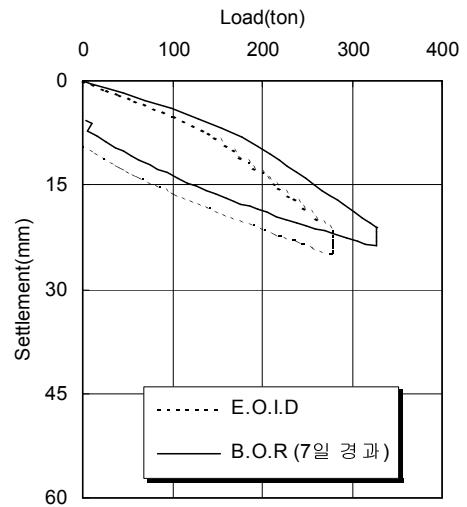


그림 4 시간경과효과
(시험말뚝 D-1)

이상 논의한 내용은 그림 5, 그림 6으로 요약할 수 있다. 즉, 그림 5는 동일지반(지반조건1)에 시공된 대상말뚝별 관입깊이를 비교한 것이며 그림 6은 외말뚝 시공종료시점에서의 허용지지력과 군말뚝 시공후의 지지력비를 나타낸 것이다. PHC말뚝은 군말뚝 시공후 말뚝 솟아오름 현상이 크게 발생하였으며 이를 극복할 수 있는 만큼의 시간경과효과(time effect)가 나타나지 않았기 때문에 지지력이 크게 감소하였다. 반면에 H말뚝은 소배토말뚝으로서 군말뚝 시공으로 인한 말뚝 솟아오름 현상이 거의 발생하지 않았으며 보다 깊은 지층까지 도달함으로써 시간경과에 의한 set-up 효과가 발휘되었기 때문에 지지력이 증가한 것으로 나타났다.

이와 같이 본건 현장에서는 말뚝의 솟아오름과 이에 따른 문제점을 H말뚝으로 완전히 해결할 수 있었으며 기 설계된 PHC말뚝을 H말뚝으로 변경, 본 공사용 말뚝으로 채택하였다.

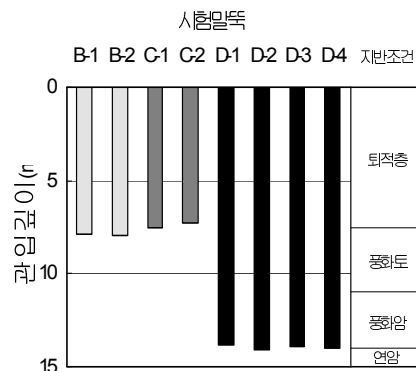


그림 5 시험말뚝별 관입깊이 비교그림

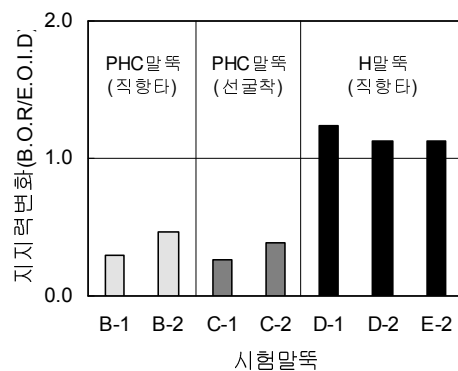


그림 6 시간경과 및 군말뚝 시공에 따른 지지력 변화

5. 참고문헌

1. 이명환, 홍헌성, 조찬환, 김성희, 전영석(1998), "군말뚝 시공으로 인한 말뚝 솟아오름 발생 사례", 한국지반공학회, '98 봄학술발표회 논문집, pp. 173-178.
2. Tomlinson, M.J.(1994), "Pile design and construction practice", E & FN SPON, pp. 411.