

반개방 선단슈를 이용한 강관말뚝 선단처리방법

오성남¹⁾, 임일빈²⁾, 홍경선³⁾, 이재훈⁴⁾

¹⁾ (주)스마트엔지니어링 부사장

²⁾ (주)스마트엔지니어링 차장

³⁾ 대림산업(주) 부장

⁴⁾ (주)동일기술공사 부사장

1. 서론

기성말뚝은 시공방법에 따라 타입말뚝과 매입말뚝으로 구분되는데, 국내에서는 시공방법에 관계없이 최종적으로 항타 또는 경타를 하여 지지력을 확보한다. 강관말뚝은 PHC말뚝과 달리 관입 도중에 말뚝 내부로 흙이 밀려 들어와 내압이 커져도 파괴되지 않기 때문에 선단부를 막지 않고 시공하는 것이 일반적이다. 이러한 개단강관말뚝의 선단지지력은 폐색정도에 따라 크게 달라진다.

일본 건설성 기준에 따르면, 같은 외경을 갖는 강관과 PHC 말뚝을 선단이 개방된 상태로 항타 관입하는 경우, 동일한 선단지지력을 발휘하는데 강관이 PHC말뚝보다 4D(D는 말뚝직경) 정도 더 지지층에 근입되어야 하는 것으로 보고 있다. 이러한 차이가 발생하는 이유는 PHC말뚝의 중공부가 강관말뚝보다 상대적으로 작아 폐색이 빨리 진행되고, 접지면적이 커서 폐색정도에 덜 영향을 받기 때문일 것이다.

따라서, 본 논문에서는 PHC말뚝의 두께 정도의 단면적을 갖는 반개방 선단슈를 강관말뚝의 선단부에 부착하여 선단을 처리하는 방법을 개발하고, 타입말뚝 1개 현장과 매입말뚝 3개 현장에 적용하여 기존 방법으로 선단처리한 것과의 시공성과 지지력 특성을 분석하였다.

2. 반개방 선단슈를 이용한 강관말뚝의 선단처리방법

타입말뚝에서는 PHC말뚝과 강관말뚝 각각에 대하여 폐색정도를 고려하여 선단지지력을 구하도록 규정하고 있다. 일본 건설성 규정(건축)과 동정도에 대한 건축기초설계의 처리(안)(1985)에 따르면 지지층에 근입된 길이가

기술기사

개단 PHC 말뚝은 1D(D는 말뚝직경)이상 그리고 개단 강관말뚝은 5D 이상 되어야 선단지지력을 발휘하는 유효단면적이 동일한 것으로 간주한다. 즉, 동일한 직경의 강관말뚝과 PHC말뚝이 동일한 선단지지력을 발휘하는데 필요한 지지층에 근입깊이는 4D 정도 차이가 생긴다고 보고 있다.

개단 PHC 말뚝의 유효단면적 :

$$1 \leq \frac{L}{D} \text{ 이면, } A_e = 0.8 \times A_t \quad (1)$$

개단 강관말뚝의 유효단면적 :

$$5 \leq \frac{L}{D} \text{ 이면, } A_e = 0.8 \times A_t \quad (2)$$

여기서, L : 지지층에 근입깊이, D : 말뚝의 직경

A_e : 유효단면적, A_t : 말뚝의 전체단면적($\frac{\pi D^2}{4}$)

이러한 원인은 PHC말뚝의 중공부 면적이 강관말뚝보다 상대적으로 작아 폐색이 빨리 진행되고, 접지면적이 커 폐색정도에 덜 영향을 받기 때문이다.

한편, 매입말뚝의 경우에는 소요 지지층까지 선굴착 후, 항타 또는 경타를 하고, 시멘트밀크를 충전하므로, 양생 후의 폐색정도는 시멘트밀크의 강도, 충전깊이 등에도 관련된다. 그러나 양생 전에는 타입말뚝에서와 같이 강관말뚝이 PHC말뚝보다 지지층에 더 근입되어야 폐색이 되며, 폐색여부에 따른 선단지지력의 차이는 PHC말뚝보다는 강관말뚝이 더 크다. 따라서 강관말뚝의 선단부 일부분을 PHC말뚝과 같은 정도의 두께로 하여 타입하게 되면, 강관말뚝보다 지지층에 근입해야 할 길이를 줄일 수 있게 되고, 지지층에 무리하게 관입시키지 않아도 될 것이다.

이에 근거하여 강관말뚝의 선단부에 PHC 말뚝 정도의 두께를 갖는 슈(반개방선단슈)를 부착하여 강관말뚝의 단부를 보강하여 타입말뚝에 이용하거나, 매입말뚝에 이용하는 방법인 반개방 선단슈를 이용한 강관말뚝의 선단처

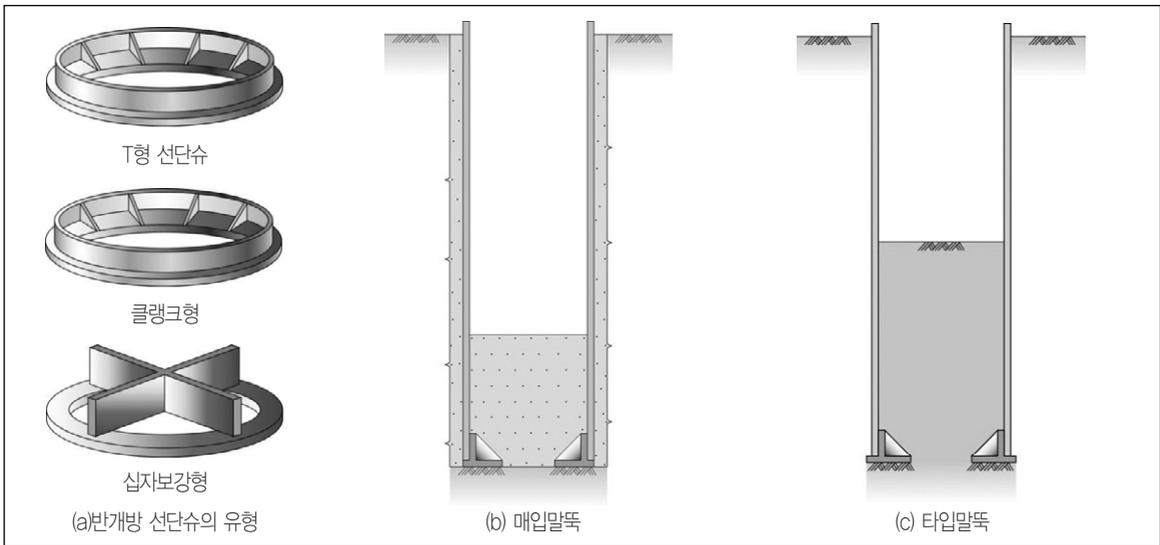


그림 1. 반개방 선단슈를 이용한 강관말뚝

리방법을 개발하였다.

반개방 선단슈를 이용한 강관말뚝은 강관말뚝이 지층 내에 무리하게 관입되는 것을 방지하여 말뚝 본체의 좌굴을 막고, 말뚝 재료의 사용량을 줄여 경제성을 높일 수 있다. 또한, 상대적으로 충전된 시멘트밀크로 전달되는 하중이 작아 시멘트밀크의 강도 저하 등으로 인해 말뚝 선단부가 관입과괴되는 것을 방지할 수 있다. 따라서 매입말뚝의 경우, 선단 고정액을 별도로 주입하지 않아도 되며, 선단 고정액 주입에 따른 시공상의 번거로움과 품질관리의 어려움을 해소할 수 있다.

3. 선단처리방법에 따른 거동특성

3.1 매입강관말뚝

3.1.1 무안지역의 재하시험 결과

반개방 선단슈를 부착한 매입말뚝과 기존 매입말뚝에 대한 시공성과 소요 지지력 확보 여부를 판단하기 위하여 전라남도 무안군 망운면 피서리에서 반개방슈 부착형 9개

와 기존 밴드 보강형 8개에 대하여 시멘트밀크 양생전 동재하시험(EOID)을 실시하였다.

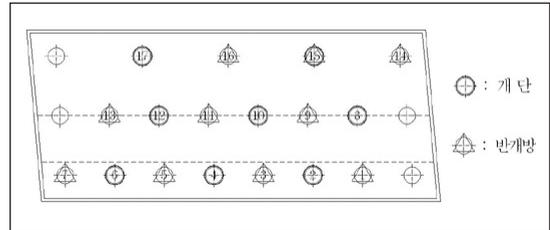


그림 2. 시험말뚝 배치도

오거로 말뚝보다 100mm 큰 600mm 직경으로 풍화암선(N=50/8)을 기준으로 0.4m 아래인 GL(-) 9.5m 까지 천공하였다. 그리고 시멘트밀크는 선단과 주면고정액을 구분하지 않고, 일정 높이까지 주입하였다. 그 후 직경 508mm, 두께 12mm인 강관말뚝을 삽입한 후, 2.5톤 드롭햄머로 2.5m 높이에서 향타하여, 최종관입량이 3mm 이내가 되게 하였다. 반개방 선단슈(T형)를 부착한 강관말뚝의 경우, 향타 후 말뚝 선단의 최종위치는 평균 GL(-) 9.66m로 향타로 인하여 16cm 근입되었다. 이때 말뚝 선단 위치의 N치는 50/8 정도로 풍화암선에서 약



(a) 반개방형 선단슈



(b) 기존 방법

그림 3. 강관말뚝의 선단부 형상

기술기사

0.56m 아래에 위치한다. 기존의 개단 강관말뚝의 경우, 향타 후 말뚝 선단의 최종위치는 평균 GL(-) 10.28m로 향타로 인하여 78cm 근입되었다. 이때 말뚝 선단 위치의 N치는 50/6 정도이며, 풍화암선 아래 1.27m에 위치한다. 표 3에 제시된 바와 같이 반개방 선단수를 부착한 말뚝이 기존 개단말뚝보다 약 62cm 덜 근입되었다.

고정액이 양생되기 전에 반개방 선단수 부착 강관말뚝과 기존 개단 강관말뚝의 소요 지지력 확보여부를 파악하기 위하여, 말뚝을 타입한 즉시 동재하시험을 실시하였다. 표 1에 시험말뚝에 대한 CAPWAP 분석결과 및 허용지지력을 제시하였다. 표 2에 제시한 바와 같이 반개방 선단수 부착말뚝은 개단말뚝보다 지지층에 근입된 깊이가

평균 62cm(1.2D, D=말뚝직경) 작았으나, 허용지지력은 오히려 1.56톤(2%) 정도 증가하였다.

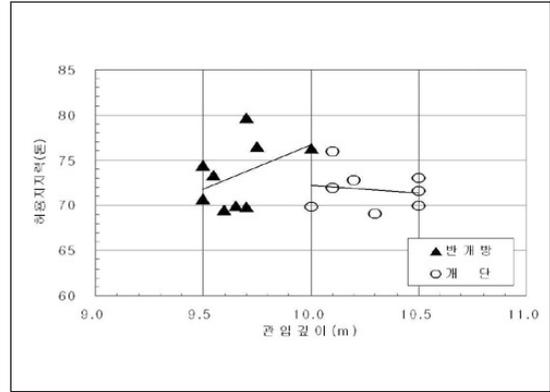


그림 4. 동재하시험 결과, 관입깊이와 허용지지력 비교

표 1. 선단 형태에 따른 관입깊이 및 지지력

구분	형태	천공깊이 (m)	Set Value (mm)	최종관입깊이 (m)	CAPWAP 분석			허용지지력 (톤)
					주면마찰력(톤)	선단지지력(톤)	전체지지력(톤)	
1	반개방	9.4	2.0	9.5	54.2	122.6	176.8	70.72
2	개 단	9.5	1.7	10.3	71.7	100.9	172.6	69.04
3	반개방	9.5	2.0	9.65	47.3	127.4	174.7	69.88
4	개 단	9.5	3.5	10.1	58.2	121.5	179.7	71.88
5	반개방	9.5	1.5	9.55	62.4	120.9	183.3	73.32
6	개 단	9.5	2.7	10.2	47.2	134.8	182.0	72.80
7	반개방	9.5	1.9	9.7	52.4	146.6	199.0	79.60
8	개 단	9.5	2.2	10.5	77.5	104.9	182.4	72.96
9	반개방	9.5	2.0	9.6	55.0	118.7	173.7	69.48
10	개 단	9.5	1.8	10.5	82.4	96.5	178.9	71.56
11	반개방	9.5	3.0	10.0	67.8	123.0	190.7	76.28
12	개 단	9.5	1.6	10.5	67.7	107.2	174.8	69.92
13	반개방	9.5	2.0	9.75	66.2	125.1	191.3	76.52
14	반개방	9.3	1.8	9.5	62.5	123.4	186.0	74.40
15	개 단	9.5	2.1	10.1	87.8	102.2	189.9	75.96
16	반개방	9.5	1.8	9.7	70.8	116.3	187.1	74.84
17	개 단	9.5	2.1	10.0	68.1	106.5	174.5	69.80

주) 허용지지력은 CAPWAP 분석에 따른 지지력에 대하여 안전율 2.5 적용.

표 2. 선단 형태에 따른 관입깊이 및 허용지지력 (평균값)

선단형태	최종관입깊이(m)	Set Value(mm)	허용지지력(톤)	비 고
반개방	9.66	2.0	73.30	관입깊이 62cm 감소 허용지지력 2% 증가
기 존	10.28	2.2	71.74	

3.1.2 수원지역의 재하시험 결과

수원역 우회도로 현장에서 반개방슈 부착형 5개와 기존 밴드 보강형 6개에 대하여 시멘트밀크 양생전 동재하시험(EOID)을 실시하였다. 본 현장은 말뚝 1본당 설계하중은 65톤으로 현장관리 기준에 따라 풍화암선(N=50/10)을 기준으로 2.0m 까지 천공하였다. 그리고 시멘트밀크를 선단과 주면고정액을 구분하지 않고, 일정 높이까지 주입하였다. 그 후 직경 508mm, 두께 12mm인 강관말뚝을 삽입한 후, 2.5톤 드롭햄머로 2.0m 높이에서 향타하여, 최종관입량이 3mm 이내가 되게 하였다. 반개방 선단슈를 부착한 강관말뚝의 경우, 10~15회 향타하여 평균 0.5cm 관입되었으며, 최종관입량은 1.5mm 였다. 그리고 기존의 개단 강관말뚝의 경우, 10~20회 향타하여 평균 1.2cm 관입되었으며, 최종관입량은 3.1mm 였다. 일반적으로 천공깊이를 풍화암선 아래 1m를 기준으로 하는데, 본 현장의 관리기준에 따라 2m로 시공한 결과, 선단 부의 위치가 너무 단단한 지반 위에 위치하게 되어, 두 타

입 모두 관입이 거의 되지 않는 상태로 되었다.

고정액이 양생되기 전, 말뚝을 타입한 즉시 동재하시험을 실시하였다. 표 3에 시험말뚝에 대한 CAPWAP 분석결과 및 허용지지력을 제시하였다. 표 3에서 알 수 있듯이 두 방법 모두 설계하중인 65톤 이상의 허용지지력을 발휘하고 있으나, 두 방법의 지지력 차이는 매우 작았다. 따라서, 풍화암선(N=50/10)을 기준으로 약 2m 또는 말뚝 직경의 4배 정도 천공한 후, 말뚝을 향타하면, 반개방 선단슈의 효과는 없는 것으로 판단된다.

3.1.3 당진지역의 재하시험 결과

반개방 선단슈 부착 강관말뚝과 기존 개단 강관말뚝에 충전된 시멘트밀크가 양생된 후 지지력 특성을 분석하기 위하여, 충청남도 당진군 면천면 원동리에서 반개방슈 부착형 1개와 기존 밴드 보강형 1개에 대하여 정재하시험을 실시하였다.

오거로 말뚝보다 10cm 큰 600mm 직경으로 풍화암선

표 3. 시험말뚝 현황 및 관입깊이

구분	형태	천공깊이 (m)	Set Value (mm)	최종관입깊이 (m)	CAPWAP 분석			허용지지력 (톤)
					주면마찰력(톤)	선단지지력(톤)	전체지지력(톤)	
1	반개방	8.1	1.2	8.109	12.6	166	178.6	71.2
2	반개방	8.0	1.2	8.008	21.9	192	213.9	85.6
3	개 단	8.1	5.0	8.108	15.1	150	165.1	66.0
4	개 단	8.1	3.0	8.120	17.2	230	247.2	98.9
5	개 단	8.2	2.0	8.208	20.0	193	213.0	85.2
6	반개방	8.0	2.0	8.003	11.4	160	171.4	68.6
7	반개방	8.0	1.5	8.003	17.0	267	284.0	113.6
8	반개방	8.0	1.5	8.003	17.5	187	204.5	81.8
9	개 단	8.1	2.0	8.110	16.7	255.8	272.5	109.0
10	개 단	8.1	3.5	8.115	18.3	142.7	161.0	64.4
11	개 단	7.9	3.0	7.910	17.0	226	243.0	97.2

표 4. 선단 형태에 따른 관입깊이 및 허용지지력 (평균값)

선단형태	최종관입깊이(m)	Set Value(mm)	허용지지력(톤)	비 고
반개방	8.02	1.5	84.2	관입깊이 6cm 감소 허용지지력 2.6% 감소
기 존	8.08	3.1	86.8	

기술기사

(N=50/10)을 기준으로 0.1m 아래인 GL(-) 13.0m 까지 천공하였다. 그리고 시멘트밀크를 선단과 주면고정액을 구분하지 않고 일정 높이까지 주입하였다. 그 후 직경 508mm, 두께 12mm인 강관말뚝을 삽입한 후, 3.0톤 드롭햄머로 2.5m 높이에서 향타하였다.

반개방 선단슈를 부착한 강관말뚝의 경우, 최종 타격당 관입량(set value)이 3mm 일 때, 말뚝 선단의 위치는 GL(-) 13.3m 로 향타로 인하여 30cm 근입되었다. 이때 말뚝 선단 위치의 N치는 50/8 정도로 풍화암선에서 약 0.4m 아래에 위치한다. 기존의 개단강관말뚝의 경우, 최종 타격당 관입량(set value)이 7mm 일 때, 말뚝 선단의 위치는 GL(-) 14.3m 로 향타로 인하여 약 1.3m 근입되었

고, 이때 선단의 N치는 50/7 정도이며, 풍화암선 아래 1.4m에 위치한다. 표 5에 제시된 바와 같이 반개방 선단슈를 부착한 말뚝이 기존 개단말뚝보다 약 1.0m 덜 근입되었다.

반개방 선단슈 부착 강관말뚝과 기존 개단 강관말뚝에 충전된 시멘트밀크가 양생된 후 지지력 특성을 분석하기 위하여, 정재하시험을 실시하였다. 정재하시험은 시멘트밀크가 양생된 후인 21일 이후에 행하였다. 정재하시험 결과를 정리하면 표 6과 같다. 표 6에서 알 수 있듯이 반개방형 선단슈를 부착한 매입강관말뚝의 항복하중은 기존방법보다 약 10% 증가하였으며, 잔류침하량도 약 50% 감소하였고, 관입깊이도 1.0m(2D, D=강관직경) 감소하

표 5. 시험시공 결과

선단형태	천공 깊이(m)	Set Value(mm)	최종 관입깊이(m)	시멘트밀크주입깊이(m)	비 고
반개방 선단슈 부착말뚝	13.0	3.0	13.3	5.4	관입깊이 1.0m 감소
기존 개단말뚝	13.0	7.0	14.3	6.9	

표 6. 정재하시험 결과

선단형태	최대 하중(톤)	항복하중(톤)	허용지지력(톤)	잔류침하량(mm)	비 고
반개방 선단슈 부착말뚝	308	276	138	3.40	허용지지력 10% 증가
기존 개단말뚝	308	250	125	6.73	

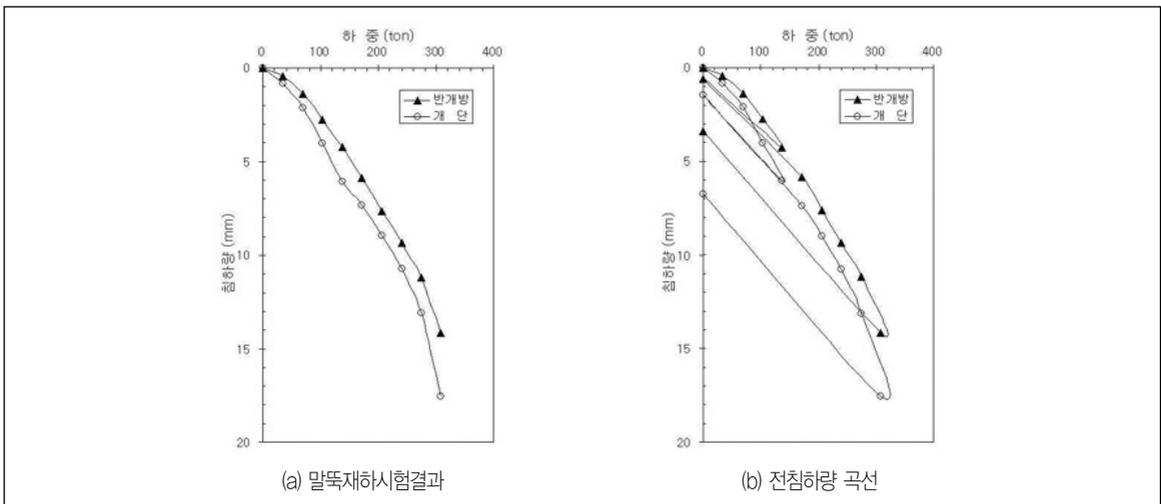


그림 5. 동재하시험결과

는 효과를 보였다.

정재하시험 결과로부터 항복하중을 판정하기 위하여 Davisson방법과 log P-log S 곡선을 이용하였으나, 이방법으로는 항복하중을 추정할 수 없었다. 단지 $ds/d(\log t)$ -P 곡선을 이용하여 항복하중을 추정할 수 있었는데, 기존 방법은 약 250톤에서, 반개방 선단슈를 부착한 말뚝은 약 276톤에서 항복한 것으로 추정된다. 그리고 기존 방법은 약 6.7mm, 반개방 선단슈를 부착한 말뚝은 약 3.4mm의 잔류침하량이 발생하였다.

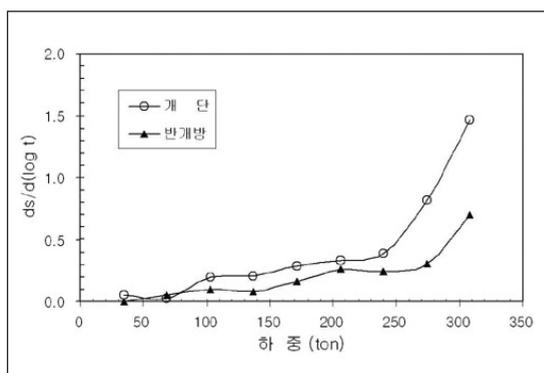


그림 6. $ds/d(\log t)$ -P 곡선

3.2 타입강관말뚝

반개방형 선단슈를 부착한 타입강관말뚝과 기존의 타입강관말뚝의 지지력 특성과 시공성의 차이를 파악하기 위하여 경기도 화성군 팔탄면 가재리에서 반개방슈 부착형 2개와 기존 밴드 보강형 5개를 시공하고 반개방슈 부착형 2개와 기존 밴드 보강형 1개에 대해 동재하시험을 실시하였다.

시험시공 위치의 지층 구성상태를 살펴보면 표토층, 퇴

적층, 풍화토층, 풍화암층의 순서로 분포하고 있으며, 지하수위는 지표 아래 1.5m에 분포하고 있다. 표토층은 지표면에서부터 1.1m 깊이로 분포하는데, 모래가 섞인 실트로 구성되어 있다. 퇴적층은 2.6m 두께로 세립질 모래와 조립질 모래가 섞인 자갈로 구성되어 있으며, N값은 13 정도이다. 풍화토층은 12.8m 두께로 완전 풍화된 상태로, 실트가 섞인 모래로 구성되어 있으며, N값은 19~50/10 정도로 보통 조밀에서 매우 조밀한 상대밀도를 보인다. 풍화암층은 표준관입시험치가 50타당 관입량 10cm 이하인 경우를 기준으로 하였다. 암층은 흑운모편마암으로 완전풍화 내지 심한 풍화상태에 있으며, 강도는 매우 약함 내지는 약한 정도이다. 한편, 시험시공시 지반 레벨은 그림 13의 시추주상도를 기준으로 3.3m를 풍화토로 더 성토한 후에 행했다.

7톤 유압햄머(DKH-7ton)를 사용하여 낙하고 1.2m로 강관말뚝을 직타하였고, 최종 타격당 관입량(set value)이 2mm가 될 때까지 향타한 후, 동재하시험을 실시하였다. 반개방형 선단슈(선단 클랭크형 및 1D 클랭크형)를 부착한 강관말뚝의 경우, 향타후 말뚝 선단의 최종 위치는 GL(-) 19.7m 이었으며, 이 위치의 N치는 50/5 이었다. 그리고 기존의 강관말뚝은 말뚝 선단의 최종 위치가 GL(-) 22.0m이고, 이 위치의 N치는 50/3 이었다. 따라서 반개방 선단슈를 부착한 강관말뚝이 기존 방법으로 선단보강한 것 보다 1.8m~2.1m 정도 덜 근입되었으며, 이를 강관직경(D)으로 환산하면 약 3.5~3.6D 정도이다.

선단슈에 따른 시공성을 파악하기 위하여 총 향타소요 시간을 측정된 결과, 반개방 선단슈를 부착하여도 기존

표 7. 타입말뚝의 시공결과

구 분	반개방 선단슈	기존말뚝
총 관입길이	23.5m (3.5D 감소)	25.3m (기준)
최종 관입량 관리	2mm	2mm
총 향타 소요시간	27분	27분

기술기사

방법과 거의 동일한 결과를 보였다. 따라서 반개방 선단 슈로 인한 항타 관입 성능에는 변함이 없는 것으로 판단 된다.

반개방형 선단슈를 부착한 타입강관말뚝과 기존의 타입강관말뚝의 지지력 특성과 시공성의 차이를 파악하기 위하여 동재하시험을 실시하였다. CAPWAP 방법을 이용하여 동재하시험 결과를 정리하면 표 8과 같다. 표 8에서 알 수 있듯이 극한지지력은 반개방 선단슈를 부착하여도 기존 방법과 큰 차이는 없으나, 반개방 선단슈를 부착한 말뚝이 기존말뚝보다 근입깊이가 감소하였다.

동재하시험 결과로부터 항복하중을 판정하기 위하여 Davisson방법과 log P-log S 곡선을 이용하였으나, Davisson방법으로는 항복하중을 구할 수 없었다. 단지 log P-log S 곡선을 이용하여 기존 방법의 강관말뚝 만을 항복하중을 추정할 수 있었는데, 그 값은 약 210톤 정도였

으며, 반개방 선단슈를 부착한 강관말뚝은 최대시험하중 인 422.2톤에서도 항복하지 않았다. 반개방 선단슈를 부착한 강관말뚝에서는 잔류침하량이 거의 발생하지 않았으며, 기존 방법의 강관말뚝은 약 2.5mm 였다.

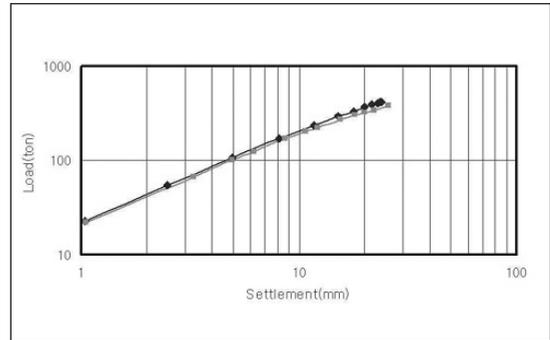


그림 8. log P-log S 곡선

표 8. 타입말뚝의 동재하시험 결과

구 분	CAPWAP 방법 (톤)			관입깊이 (m)	최종 타격당 관입량(mm)	항타응력 (kgf/cm ²)
	극한지지력	선단지지력	주면마찰력			
반개방 선단슈	422.2(10%증가)	124.2(10%감소)	298.0(28%증가)	23.5(1.8m감소)	2.0	2103
기존 강관말뚝	383.5(기준)	150.1(기준)	233.4(기준)	25.3(기준)	2.0	2057

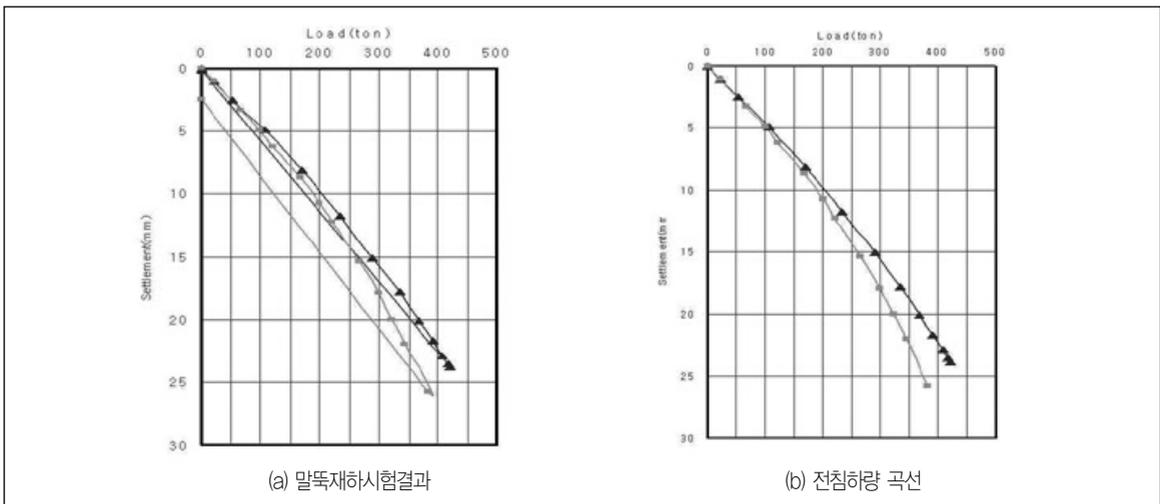


그림 7. 동재하시험결과

4. 결론

PHC말뚝의 두께 정도의 단면적을 갖는 반개방 선단슈를 강관말뚝의 선단부에 부착하여 선단을 처리하는 방법을 개발하고, 타입말뚝 1개 현장과 매입말뚝 3개 현장에 적용하여 기존 방법으로 선단처리한 것과의 시공성과 지지력 특성을 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 매입말뚝의 경우, 선굴착 깊이를 풍화암선을 기준으로 0.2~1D 정도로 한 2개 현장에서는 반개방 선단슈로 선단처리한 것이 기존 개단 강관말뚝보다 평균근입깊이는 약 1.2~2.0D 정도 작았으나, 말뚝의 허용지지력은 기존 개단말뚝보다 약간 큰 것으로 나타났다.

2. 선굴착 깊이를 풍화암선을 기준으로 4D 정도로 한 1개 현장에서는 두 방법 간의 평균근입깊이와 허용지지력의 차이는 매우 작았다.

3. 타입말뚝의 경우, 반개방 선단슈로 선단처리한 것이 평균근입깊이는 약 3~3.5D 정도 작았으나, 관입시간은 거의 동일하고, 말뚝의 허용지지력은 기존 개단말뚝보다 약간 큰 것으로 나타났다.

4. 따라서 반개방 선단슈를 이용하여 강관말뚝을 선단처리하는 방법은 강관말뚝의 재료비 및 시공비를 절감하는 유용한 방법이 될 것으로 기대한다.



(주) 세원지오텍

SEOWONGEOTECH CO., LTD

서울시 강남구 도곡동 424 청암빌딩 4층
 TEL : 02 - 574 - 3285
 FAX : 02 - 574 - 3289
 E-mail : sewon3285@empal.com

- ▶지반조사 및 물리탐사
- ▶흙막이 및 터널보강 설계
- ▶기타 토질 및 기초분야 설계

- ▶연약지반 개량 및 보강설계
- ▶사면안정 검토 및 보강설계
- ▶재하시험 및 계측관리