# SIP 시공말뚝의 지지력 특성

이 명환*, Myung-Whan Lee

* (주)파일테크 연구소장, Principal Researcher, Piletech Consulting Engineers

**요 지**

최근 환경문제에 대한 사회적 관심이 고조됨에 따라 말뚝항타로 인한 지반진동, 소음 등이 각종 건설현장에서 심각한 문제점으로 대두되고 있다. 지반을 굴착하고 cement paste를 주입한후 기성말뚝을 삽입하는 SIP공법은 이러한 건설환경 여건의 변화에 부응하여 그 적용이 급속히 증대되고 있다. 그러나 국내에서 SIP공법으로 시공된 말뚝의 재하시험 결과는 각종 문헌에서 제시하고 있는 지지력 산정공식들과는 상이한 특성을 나타내주고 있다. 또한 말뚝의 품질관리를 위한 시험결과는 상당한 지지력 미달현상이 발생하고 있는 것으로 나타나고 있어 본 공법에 대한 지지력 특성이 규명되어야 할 필요가 있다. 본 논문에서는 국내에서 시공된 사례들을 중심으로 SIP공법의 지지력 특성을 분석하여 보았다.

## 1. 서 론

최근 환경문제가 심각한 사회적 관심사로 대두됨에 따라 건설현장에서의 각종 공해 유발사례에 대한 민원발생도 급증하고 있다. 각종 건설공해 유형중 말뚝의 항타로 인한 지반진동, 소음, 매연 등은 가장 빈번하게 제기되는 문제점들 중의 하나이다.

이제까지 국내에서 가장 보편적으로 적용되어온 디젤해머에 의한 직항타의 경우 전술한 각종 건설공해 측면에서는 최악의 환경을 조성하여 주므로 어느정도 개발이 진행된 곳에서의 적용은 거의 불가능한 실정이다. 이러한 문제점들에도 불구하고 디젤해머 직항타 공법은 가장 경제적이며, 시공관리가 적절하게 이루어질 경우 말뚝의 지지력 측면에서 가장 신뢰도가 높은 장점 때문에 현장여건상 무리한 곳에서도 종종 채택되어 인근 주민들과의 마찰을 초래하고 있다.

유압해머 직항타공법은 디젤해머 직항타공법의 장점을 어느정도 만족시켜 주면서, 지반진동, 소음수준을 공해관리 기준 이하로 낮출 수 있어 최근 그 적용이 급증하고 있다. 그러나 국내의 경우 항타로 인한 지반진동, 소음 등에는 명확한 공해관리 기준이 설정되어 있지 못한 문제점과 진동, 소음 등으로 인간이 불편함을 느끼는 정도는 개인별로 큰 차이가 있어 외국의 공해관리 기준 이하가 되는 시공현장에서도 유압해머 직항타로 인한 시비가 계속되는 경우가 많이 있다. 따라서 유압해머 직항타공법을 완벽한 공해 대책 공법으로 채택할 수 없는 것이 현실이다.

SIP(Soil cement Injected Precast pile)공법은 이와같이 항타공해가 문제시되는 현장에서 가장 빈번하게 대안공법으로 채택되고 있으며 최근에 들어 그 적용이 급증하는 추세에 있다.

SIP공법은 오거에 의한 선굴착(preboring) 및 굴착공내에 cement paste 주입후 말뚝삽입, 최종 경타로 지반진동이나 소음 측면에서는 만족할 만한 결과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 그러나 선굴착의 영향으로 인한 지반교란이 말뚝지지력 측면에서는 불리한 조건으로 작용하며 디젤해머 직항타공법과 대비하여 10배 정도인 시공비 문제는 공사의 경제성을 크게 낮추고 있다.

이처럼 높은 시공비와 낮은 지지력 문제는 공사전체에 심각한 영향을 주고 있음에도 불구하고 본 공법에 대한 연구실적은 극히 부진한 실정이다. 본 논문에서는 SIP공법의 원리를 설명하고, 그간 국내에서 실시한 말뚝 재하시험 결과를 토대로 하여 SIP시공말뚝의 지지력 특성을 분석해 보았다.

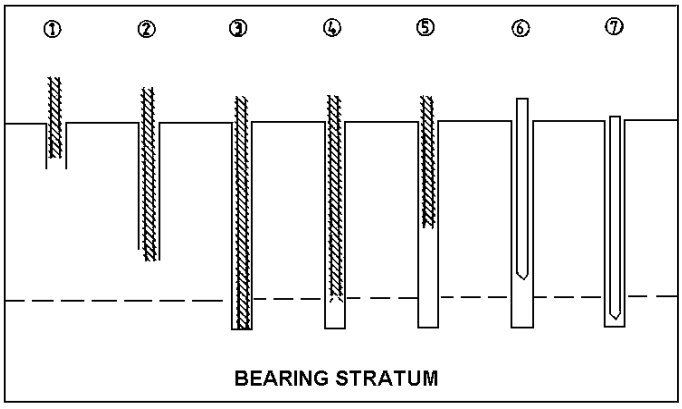
## 2. 공법의 원리 및 시공과정

본 공법에서는 오거를 사용하여 지반 내에 굴착을 실시한다. 오거는 연속오거(continuous flight auger)가 일반적으로 사용되지만 경우에 따라서는 오거날개 대신에 교반용 날개를 부착하기도 한다. 오거의 직경은 말뚝직경보다 50mm 큰 경우에서부터 150  200mm 큰 다양한 규격들이 적용공법에 따라 상이하게 사용되지만 국내의 경우에는 말뚝직경보다 100mm 큰 오거직경이 일반적으로 통용되고 있다.

지반굴착시 오거 롯드 중공부를 통하여 굴착액을 주입하는데 굴착액의 사용목적은 굴착을 용이하게 해주며 동시에 굴착공벽을 보호하기 위함이다. 굴착액의 성분은 물＋시멘트＋벤토나이트로 되어 있으며 soil cement 1$m^3$당 시멘트 120kg, 물 450ℓ, 벤토나이트 25kg의 비율로 혼합하여 펌프로 압송 주입한다.

굴착이 진행되어 오거선단부가 말뚝의 선단지지층에 도달하면 물－시멘트 비가 1/1.2  1/1.4인 선단부 고정액을 주입하면서 선단부 부근의 원지반 토사와 충분히 혼합되도록 한다. 이때 시멘트 사용량은 선단부 지지층의 지반조건에 따라 상이하지만 400  800kg 정도가 혼합되도록 한다.

선단부 고정액의 주입 및 혼합이 완료되면 오거 중공부를 통하여 굴착액을 주입하면서 오거를 인발하여 굴착공내에 cement paste가 충전되도록 한다. 굴착 및 cement paste 주입이 완료된후 굴착공내에 기성말뚝을 삽입하고 드롭해머로 최종 관입되도록 항타함으로써 시공이 완료된다. 그림 1에는 이상에서 설명한 시공과정을 도시해준다.




① 오거굴착 개시
② 오거굴착, 굴착액 주입
③ 오거굴착 완료, 지지층에 근입
④ 오거굴착, 선단부 고정액 주입
⑤ 오거인발, 주면고정액 주입
⑥ 말뚝삽입, 자중에 의한 삽입
⑦ drop hammer에 의한 최종항타

그림 1  SIP시공 순서도

이상과 같은 과정을 거쳐 시공되는 SIP시공말뚝은 시공 각 단계별 시공내용에 따라 말뚝 지지력이 영향을 받는다.

굴착공의 직경은 굴착공벽과 삽입되는 말뚝주위가 soil cement로 충전되어 말뚝의 주면마찰력이 발휘되는 관계로 적절한 직경의 오거 선정이 중요하다. 일본에서 실측한 자료에 의하면 말뚝직경＋100m의 굴착시 형성되는 soil cement 벽 두께는 64  75mm가 되어 굴착공경보다 약간 큰 직경의 soil cement 벽이 조성되었다. 이 부분에 대하여는 굴착공경이 말뚝지지력에 미치는 영향이 규명되지 못한 상태인 바 향후 연구가 요청되는 부분이다. 그러나 일본에서 적용되는 여러 가지 매입(埋込) 말뚝공법을 참고하여 볼 때, 말뚝직경＋100m의 국내 시공수준은 적절한 것으로 볼 수 있다.

굴착방법의 선정도 SIP시공말뚝의 지지력과 밀접한 관계가 있다. 일본에서 적용되는 선굴착 공법중 cement milk공법, neo pile공법 등에서는 연속오거를 사용하지만 RODEX공법, kneading공법 등에서는 굴착장치의 선단부 윗쪽에는 교반날개를 갖는 굴착기를 사용하고 있다. 연속오거를 사용할 경우 지반굴착으로 인한 토사의 대부분이 배토되어 말뚝삽입이 용이한 장점이 있지만 말뚝주위에는 토사함량이 극히 낮은 cement paste만이 남게 되거나, 굴착공 공벽의 함몰로 인해 인위적으로 조성되는 soil cement 층과 극히 느슨한 주변지반이 형성되어 말뚝의 주면마찰력이 낮은 수준이 될 가능성이 높다. 반면 교반날개를 사용할 경우 soil cement 형성은 양호하지만 말뚝삽입이 곤란하여 말뚝의 선단부가 굴착 심도보다 높게 되어 선단지지력이 불리한 조건이 될 수 있다. 이 부분에 관해서도 어느 정도의 배토량을 유지하는 것이 말뚝의 지지력 측면에서 유리한 것인지에 관해서는 뚜렷한 시방이 없는 실정이다. 실제 국내의 시공에서는 현장에 따라 연속오거를 사용하거나 연속오거에 일부 교반날개를 부착한 굴착장치가 사용되고 있으며, 말뚝의 주면마찰력 측면에서는 일부 교반날개를 부착한 형태가 유리할 것으로 판단된다.

cement paste의 역할은 굴착시 공벽보호와 굴착의 용이를 기하기 위함이며 선단부 굴착시에는 부배합의 용액을 사용하여 굴착으로 이완된 지반을 보강하여 선단지지력을 증대시켜 주는 것으로 알려져 있다.

지반의 시추조사시 시추로 인하여 지반이 교란되는 범위는 시추직경의 3배 이상이 되는 것으로 알려져 있다. SIP시공시 빈번하게 발생되는 문제점으로 천공 깊이보다 말뚝삽입후 드롭해머로 최종항타한 후의 말뚝 선단부의 깊이가 높은 경우의 말뚝의 품질문제다. SIP의 시공원리에 의하면 말뚝의 선단부는 부(富)배합된 cement paste와 선단부 지층의 토사가 혼합된 높은 압축강도를 가진 soil cement에 선단지지 됨으로서 선단지지력을 얻게 된다.

따라서 최종항타후 말뚝 선단부는 천공된 깊이보다 약간 높은 곳에 위치하도록 하는 것이 바람직하다. 국내에서 시공시 많은 경우 최종항타후 말뚝 선단부가 천공깊이보다 깊은 천공을 선호하지만, 이러한 시공은 천공으로 인하여 교란된 지반내에 말뚝 선단부가 관입되기 때문에 cement paste 보강효과를 기대하기 곤란하다. 반대로 최종항타후 말뚝 선단부가 천공깊이보다 지나치게 높은 경우에도 선단부 고정을 위한 cement paste 효과를 충분히 활용할 수 없다. 일본에서는 매입 말뚝공법에서 말뚝 선단부가 선단지지층내에 1.0m 이상 관입되어야 하며, 천공깊이와 말뚝 선단부 깊이의 차이는 0.5m 미만이 되는 것을 기준 시공법으로 추천하고 있다. 또한 허용치 0.5m 이상의 관입깊이 차이가 발생할 경우 공벽붕괴 또는 cement paste 배합이 잘못된 경우로 인정하여 시공법을 재고하도록 권장하고 있다.

선단부 고정을 위한 cement paste는 물-시멘트 비가 70% 정도를 사용하며 채취된 코아의 일축 압축강도는 200  300kg/cm$^2$ 이상이 되는 것으로 일본에서의 연구결과는 밝히고 있다. 따라서 SIP공법 시공시 만족할만한 선단지지력을 얻기 위해서는 cement paste 배합비 및 말뚝 선단부 관입깊이를 SIP공법의 원리에 적합하도록 시공관리하는 것이 중요하다. 그러나 국내에서의 실시공의 경우 전술한 선단지지력 확보가 되지 못하는 시공이 많은 형편이다.

오거굴착시 및 인발시 주입하는 말뚝 주면 고정을 위한 cement paste의 역할은 말뚝지지력 측면에서 보면 주면마찰력을 증대시켜 주는 것이다. 말뚝벽면과 soil cement간의 마찰력은 soil cement의 일축압축강도에 비례하는 것으로 알려져 있으며, 앞에서 설명한 배합비의 cement paste를 사용한 경우 soil cement의 일축 압축강도는 5  14kg/cm$^2$이며 지반조건, 시공방법에 따라 상이하다.

## 3. SIP시공말뚝의 지지력 계산 — 기존 설계자료

SIP시공은 공법의 원리에서도 나타난 바와 같이 cement paste의 작용으로 선단지지력 보강과 주면마찰력이 보강될 수 있는 공법이다. 그러나 국내의 경우 본 공법에 대한 연구실적이 극히 부진하여 설계지지력을 계산할 수 있는 설계기준이 없는 실정으로, 대부분의 설계에서 항타말뚝에 대한 지지력 공식이 수정없이 사용되고 있다.

일본의 경우에서 SIP시공과 유사한 매입말뚝의 지지력 계산은 대부분 표준관입시험 결과  N값을 이용한 공식이 사용되며 기관에 따라 상이한 기준이 적용되고 있다.

일본에서 토목공사에 적용되는 「도로교 시방서, 동 해설IV 하부구조편」에서는 아래와 같은 지지력 공식을 사용한다.

$$R_u = q_d + U\sum \ell_i f_i \qquad (1)$$

$q_d$ ⌐ $10\,N\,(\le 400)$ 사질토층(단위 : ton/m$^2$)

└ $15\,N\,(\le 600)$ 모래자갈층

$f_i$ ⌐ $0.1\,\overline{N}_s\,(\le 5)$ 사질토층(단위 : ton/m$^2$)

└ $0.5\,\overline{N}_c\,(\le 10)$ 점성토층

여기서, $R_u$ = 말뚝의 극한지지력

$q_d$ = 단위면적당 극한 선단지지력

$A_p$ = 선단부 단면적

U = 말뚝의 주면장

$\ell_i$ = i층의 두께

$f_i$ = i층의 단위면적당 극한 주면마찰력

N = 말뚝선단부가 위치한 곳의 N값

$\overline{N}_s$ = 사질토의 평균 N값

$\overline{N}_c$ = 점성토층의 평균 N값

일본 건축에서는 이와는 상이한 지지력 공식이 사용되고 있다. 아래 공식은 소화 46년 건설성 고지 제 111호에 의한 것이다.

$$R_u = 20\overline{N}A_p + \left[\frac{1}{5}N_s + 2\overline{N}_c L_c\right]ø \qquad (2)$$

$\overline{N} \leq 60, \quad \overline{N}_s \leq 25, \quad \overline{N}_c \leq 4$

여기서, $L_s$ = 사질토층에 관입된 말뚝길이

$L_c$ = 점성토층에 관입된 말뚝길이

ø = 말뚝의 주면장

위의 지지력 공식들과는 상이한 공식들이 매입말뚝과 관련한 각종 특허공법에서 사용되고 있다. 이들 지지력 공식은 특허 공법의 특성상 선단지지력 부분을 $q_d$ = 25−30N으로 수정하였으며 주면마찰력은 건축에서 적용하는 공식을 수정없이 사용하고 있다. 이와같은 공식사용은 특허된 각 공법과 연관되어 있기 때문에 국내에서 적용되는 SIP공법에 적용하는 것은 적절치 못하다고 판단된다.

일본의 토목 및 건축에서 사용되는 지지력 공식들은 선단지지력에 있어서 공식(2) 적용시 공식(1) 적용 경우보다 33 100% 높은 값을 계산하게 된다. 주면마찰력은 공식(2)의 경우가 공식(1)보다 100 300% 높게 된다. 이러한 공식간의 상이한 예측은 말뚝 재하시험 결과와의 비교시 분명하게 나타난다. 표 1은 일본에서 조사한 연구결과로 선굴착 공법으로 시공된 말뚝의 계산 지지력과 실측값을 비교한 결과이다.

표 1 선굴착 공법으로 시공된 말뚝의 지지력 비교

| 번호 | 말뚝규격 | | 극한지지력(ton) | | | 비 고 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 직경(mm) | 길이(m) | 공식(1) | 공식(2) | 재하시험결과 | |
| 1 | 400 | 12 | 52 | 145 | 105 | PC 말뚝 |
| 2 | 600 | 20 | 311 | 434 | 240 | |
| 3 | 450 | 25.8 | 141 | 311 | 190 | |
| 4 | 500 | 23.5 | 205 | 366 | 270 | |
| 5 | 350 | 8 | 62 | 135 | 223 | |
| 6 | 500 | 35.3 | 164 | 359 | 195 | |
| 7 | 500 | 18.3 | 173 | 282 | 195 | |

표 1에서도 나타나고 있듯이 공식(1) 및 공식(2)의 예측 신뢰도는 극히 불량하다. 7개 재하시험 결과만을 놓고 볼 때 공식(1)은 말뚝의 극한지지력을 과소평가하고 있으며 공식(2)는 과대평가하고 있음을 알 수 있다. 그러나 시험번호(2)와 시험번호(5)의 재하시험 결과는 공식(1)과 (2)의 범위 밖의 결과를 나타내주고 있다. 결론적으로 현재 일본에서 말뚝지지력 계산에 적용되는 지지력 공식들을 국내 현장에 적용할 수는 없을 것으로 판단되며, 국내의 시공여건으로 시공된 말뚝 재하시험 결과로부터 SIP시공법에 대한 지지력 공식이 도출되어야 할 필요가 있다.

## 4. SIP시공 말뚝의 지지력 특성

앞장에서 알아본 것처럼 SIP시공법에 대한 말뚝지지력 예측은 현재까지의 설계기준으로는 적용공식에 따라 큰 차이가 있다. 본 논문에서는 국내에서 시공된 SIP공법의 말뚝재하시험 결과를 분석하고 공식(1) 및 (2)를 적용하여 계산한 예측값과 비교해 보았다.

### 4.1 시공사례 I

본건 공사는 그림 2와 같은 지반조건에서 직경 400mm의 PC말뚝을 직항타하여 고층아파트를 건설하는 현장으로 말뚝은 50ton의 설계지지력을 갖는 것으로 설계되었다. 그러나 공사현장 인근의 주변 여건상 직항타가 불가능하여, PHC말뚝을 사용하여 선굴착후 cement paste주입 및 말뚝삽입, 최종타격을 하는 SIP공법으로 설계변경하였다. 여기에서 말뚝의 선단부는 모래섞인 자갈층을 관통하여 풍화암까지 도달시키는 설계개념으로 계획되었으나 auger 선굴착시 N값 50 이상인 지층은 굴착이 불가능하여 14.0m에서 굴착을 중단하고 SIP 시공하였다.

본건 공사에 공식(1) 및 공식(2)를 적용하여 말뚝의 극한지지력을 계산하면 아래와 같다.

ㅇ. 공식(1) 적용

$q_b = 600\ \mathrm{ton/m^2}$(N값은 50이지만 선단지지력의 상한값 적용)

$\overline{N}_s = 16.9$

$f_s = 0.1 \times N_s = 1.69\ \mathrm{ton/m^2} (f_s \leq 5\ \mathrm{ton/m^2},\ \mathrm{O.K})$

극한선단지지력 $= 600 \times 0.4^2 \pi/4 = 75.4\ \mathrm{ton}$

극한주면마찰력 $= 1.69 \times 0.4\,\pi/4 \times 14.0 = 29.7\ \mathrm{ton}$

말뚝의 극한지지력 $= 75.4 + 29.7 = 105.1\mathrm{ton}$

◦. 공식(2) 적용

$\overline{N}$ = 50,

$\overline{N}_s$ = 16.9

극한선단지지력 $= 20\,\overline{N}\cdot A_p = 20\times 50\times(0.4^2\pi/4) = 125.7\,\text{ton}$

극한주면마찰력 $= \frac{1}{5}\,\overline{N}_s L_s \phi = \frac{1}{5}\times 16.9\times 14.0\times 0.4\,\pi = 59.5\,\text{ton}$

말뚝의 극한지지력 $= 185.2\,\text{ton}$

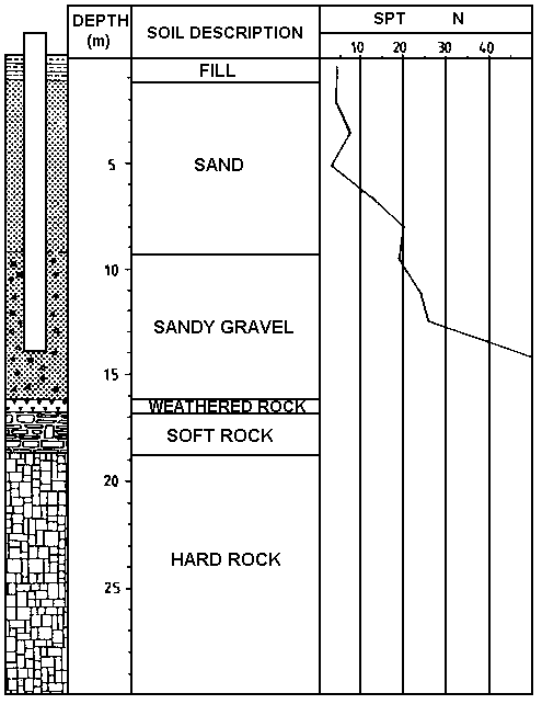



그림 2 지반조건 I

본 말뚝의 재하시험 결과는 그림 3과 같다. 말뚝의 침하량은 하중증가에 따라 거의 직선적으로 증가하고 있으며 최대 203.4ton 재하시 총 침하량은 8.38mm에 불과하였으며, 하중제거시 잔류침하량은 1.99mm였다. 본건 재하시험 결과를 여러 가지 재하시험 결과 해석 방법으로 해석하였으나 최대 시험하중 203.4ton 이상이 되어 식(1)에 의한 결과치 대비 1.94배 이상이 되며 식(2)에 의한 극한지지력의 1.1배 이상이 된다.

이와같이 전체지지력 측면에서 보면 식(2)의 계산결과는 말뚝의 실제 지지력과 비교적 잘 일치하는 것으로 나타나고 있지만 본건 재하시험 결과를 선단지지력 성분과 주면마찰력 성분으로 구분하여 분석하면 그 결과는 상이하다.

주지하다시피 말뚝의 지지력은 선단지지력과 주면마찰력의 두가지 성분으로 구성된다. 그림 4에는 이 두가지 성분을 분리하여 측정한 말뚝 재하시험 결과를 보여주고 있다.

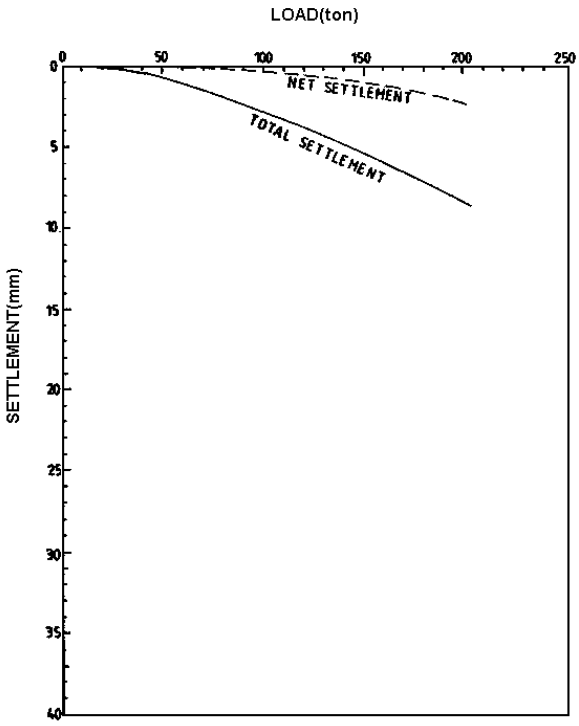



그림 3 말뚝재하시험결과 I

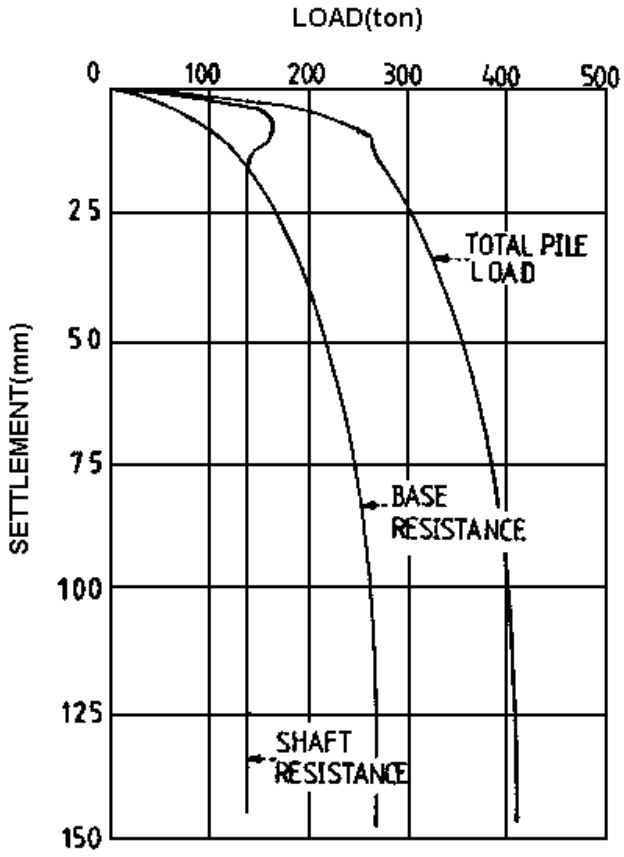



그림 4 현장타설 콘크리트말뚝의 재하시험결과

말뚝의 주면마찰력은 하중이 증가됨에 따라 침하량이 거의 직선적으로 증가하여 최대값에 도달한후 급격한 파괴가 발생한다. 극한 주면마찰력 발생에 필요한 침하량은 대개 4  6mm 정도에 불과하며 이 값은 말뚝의 직경에는 큰 영향을 받지 않는다. 다만, 말뚝길이에 따라 말뚝자체의 탄성압축량이 차이가 있어 장대말뚝의 경우 실제 말뚝두부에서 측정하는 침하량 값은 4  6mm를 초과할 수도 있다. 이러한 말뚝자체의 탄성 변형값을 배제하고 주면마찰력의 극한값 도달 여부를 판정하기 위해서는 총 침하량에서 탄성침하량을 공제한 순침하량을 계산함으로써 분명히 확인할 수 있으며, 말뚝재하시험 수행시 하중제하(unloading)시 측정되는 잔류침하량으로 판단할 수 있다.

반면 말뚝의 선단지지력은 하중증가에 따라 침하량도 점차 증가하는 양상을 보여주는 것이 보통이다. 말뚝지지력은 상당한 침하량이 발생한 후에도 계속 증가하며 극한값 도달에는 상당히 큰 침하량이 발생한다.

따라서 일반구조물 설계에서 허용하는 침하량 범위내에서의 극한 선단지지력 규명은 불분명하며, 실무 설계를 위해서는 여러 가지 가정이 요구된다.

그림 5에는 현장타설 콘크리트 말뚝의 재하시험 결과를 나타내었다. 재하하중은 300ton 단계로 증가시켜가며 최대 2700ton까지 재하하였다. 말뚝몸체에는 말뚝두부로부터 각각 상이한 거리에 10개의 strain gauge를 매설하여 각 위치에서 말뚝몸체에 발생하는 압축력을 측정하였다.

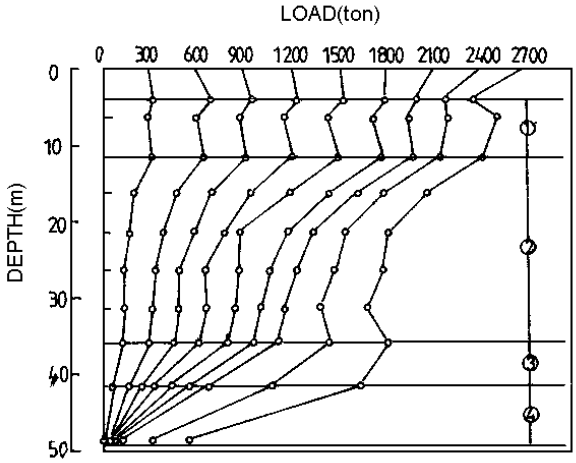



그림 5  현장타설 콘크리트말뚝의 재하시험결과

하중이 2100ton에 도달할 때까지의 과정을 살펴보면 재하하중의 대부분은 말뚝선단부 윗쪽에서 지지되며 선단부에는 재하하중의 극히 일부분만이 전달됨을 알 수 있다. 즉 2100ton까지의 하중은 거의 대부분이 주면마찰력에 의하여 저항되었으며 말뚝의 선단지지력은 거의 발생되지 않고 있다고 판단된다.

2100ton 이상의 하중재하시 말뚝 각 부재에 발생하는 압축력은 2100ton 재하시 압축력 분포곡선을 거의 평행하게 이동한 것으로 해석할 수 있으며, 이는 말뚝의 주면마찰력 항복발생 이후 주면마찰 저항의 증가없이 선단부로 추가하중이 전달되는 것으로 설명할 수 있다.

그림 6에는 위의 재하시험 결과를 ① 하중(P)－전침하량(S), ② 선단부 재하하중(N)－침하량(S), ③ 하중(P)－잔류침하량(ΔS) 관계로 나타내었다. 말뚝 선단부에는 최대 300ton의 하중이 재하되었으며 N－S 관계로 볼 때 선단지지력은 거의 극한값에 근접한 것으로 판단된다. P－ΔS 관계는 2400ton에서 급격한 절곡이 나타나고 있으며, 이로부터 주면마찰력의 극한값 도달을 판정할 수 있다. 이때 주면마찰력 파괴시 순침하량은 4mm 정도가 되어 앞에서의 설명과 잘 일치함을 알 수 있다.

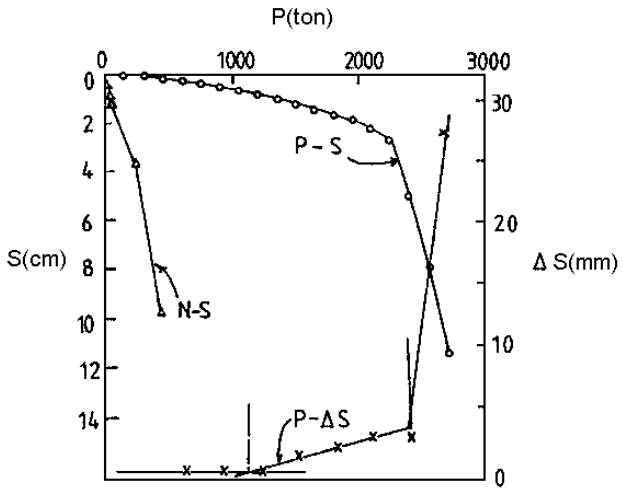



그림 6 P－S, N－S, P－ΔS 관계

이상에서 설명한 말뚝의 선단지지력과 주면마찰력 특성을 적용하여 그림 3의 재하시험결과를 분석해 보면 최대 재하하중 203.4ton까지 주면마찰력의 항복 또는 파괴가 발생하지 않았음을 알 수 있다. 즉, 말뚝의 극한 주면마찰력은 203.4ton 이상이 되는 것을 확인할 수 있으나, 선단지지력은 추정이 불가능하다.

이와같은 분석은 본건 재하시험에서 선단지지력과 주면마찰력을 분리측정하지 못한 상태에서 하중 제하과정을 통하여 유추한 분석이라는 한계가 있다. 말뚝의 주면마찰력만을 알아보기 위하여 같은 조건으로 시공된 강관말뚝 ø406.4mm에 대하여 인발시험을 수행하였다. 그림 7에는 인발시험 결과를 나타내주고 있으며 132.8ton까지 주면마찰력의 항복이 나타나지 않았다.

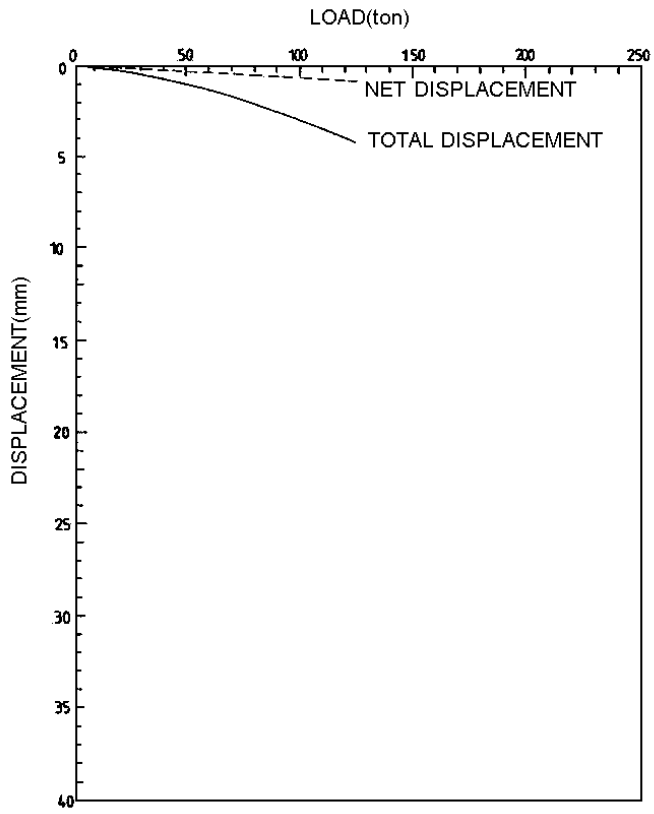



그림 7 말뚝인발시험결과

이들 재하시험 결과로부터 SIP시공 말뚝의 주면마찰력은 공식(1) 또는 공식(2)에서 예측한 값보다 월등히 큰 것을 알 수 있다. 하중제하방식으로 추정한 203.4ton 이상의 주면마찰력을 단위 면적당으로 환산하면 11.6ton/$m^2$ 이상이 된다. 이 값을 평균 N값과 연결하여 분석하면 $f_s = 0.68\,\overline{N}_s$가 되며 이 관계식은 공식(1) 대비 6.8배, 공식(2)와 대비하면 3.4배의 주면마찰력이 계산된다.

본건 현장에서는 5개소의 압축재하시험과 2개소의 인발시험이 실시되었으며 시험결과는 그림 3의 결과와 대동소이하다. 그러나 본건 현장에서는 주면마찰력만을 분석할 수 있었으며 선단지지력에 대해서는 분석이 불가능하였다.

4.2 시공사례 II

본건 공사는 그림 8에 나타난 것과 같은 지반조건에 고층아파트를 신축하는 현장이다. 지반조건은 매립토층 하부에 중간 굳기의 점성토층, 조밀한 모래층이 있고 그 하부에 N값이 50이상인 모래질 자갈층이 15m 정도의 두께로 나타나고 있으며 지표면으로부터 28m 정도에 풍화암층이 나타나고 있다. 본건 현장은 번화한 상업지역에 위치하고 있어 디젤해머 직항타는 불가능하였으며 SIP공법이 채택되었다.

지반굴착은 직경 450mm의 연속 오거를 사용하였고 대부분의 위치에서 지표면으로부터 24m까지 굴착이 가능하였다. 말뚝재료는 ø406.4×9mm thk의 강관말뚝이며 soil cement는 말뚝 선단부로부터 10m 높이까지만 주입하고 최종항타는 2ton drop hammer를 사용하였다. 말뚝의 설계하중은 80ton이며 품질관리를 위하여 총 20개의 말뚝재하시험이 실시되었다.

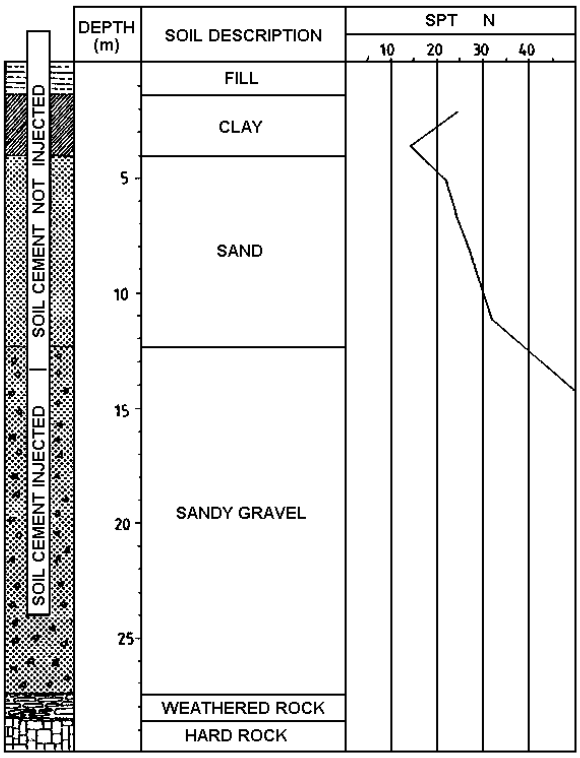



그림 8 지반조건 II

본건 지반조건에서 공식(1) 및 공식(2)를 적용하여 말뚝의 예상 극한지지력을 계산하면 아래와 같다.

◦. 공식(1) 적용

선단지지력 : $q_b = 600\,\mathrm{ton/m^2}$(사력층에 적용되는 상한값 적용)

주면마찰력 계산은 soil cement가 주입된 구간과 soil cement가 주입되지 않은 구간으로 구분하여 계산하였다. soil cement가 주입되지 않은 부분의 주면마찰력은 일본에서 사용되는 $f_s$ = 1.5ton/m$^2$을 적용하였다.

·soil cement 주입구간 : $f_{s1}$ = 5ton/m$^2$

·soil cement가 주입되지 않은 구간 : $f_{s2}$ = 1.5ton/m$^2$

극한선단지지력 = 600 × 0.4064$^2$ π/4 = 77.8ton

극한주면마찰력 = 5 × 0.4064 π × 10 + 1.5 × 0.4064 π × 14 = 90.6ton

말뚝의 극한지지력 = 168.4ton

◦. 공식(2) 적용

극한선단지지력 $= 20\,\overline{N}\cdot A_p = 20\times 50\times 0.4064^2\pi/4 = 129.4\,\mathrm{ton}$

극한주면마찰력 $= 5\times 0.4064\,\pi\times 10 + 1.5\times 0.4064\,\pi\times 14 = 90.6\,\mathrm{ton}$

말뚝의 극한지지력 = 220.3ton

본건 현장에서 실시한 말뚝재하시험들 중에서 최대 시험하중가지 전침하량 및 순침하량에 있어 항복(yiedlding)이 나타나지 않은 시험결과들을 그림 9에 나타내었다. 말뚝의 전침하량은 설계하중 80ton 재하시 3 7mm였으며, 순침하량은 0.5 1.5mm에 불과하였다(그림 10). 최대하중 재하시에도 전침하량 및 순침하량은 거의 직선적 관계를 보여주고 있으며 이 값들은 탄성압축량보다도 낮은 값들이며 따라서 말뚝의 주면마찰력의 항복점에 도달하지 않았다고 판단된다.

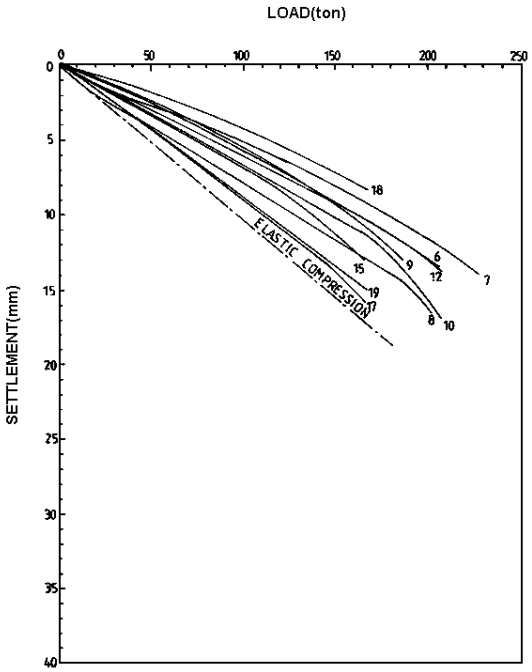



그림 9 말뚝재하시험결과 Ⅱ－1

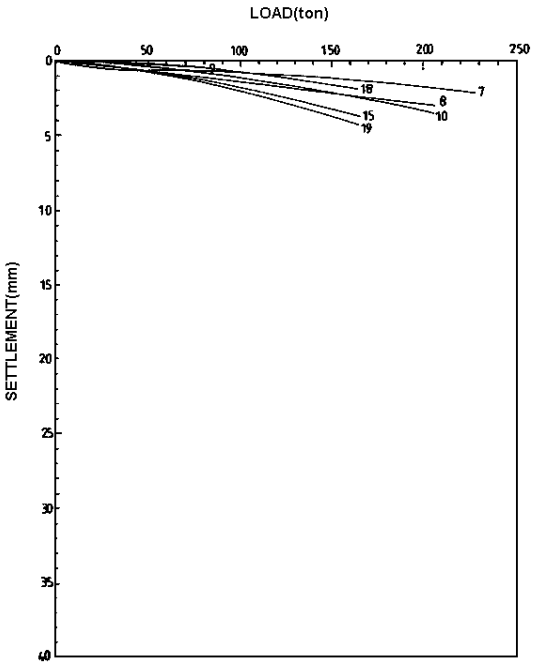



그림 10 하중－순침하량 관계 Ⅱ－1

최대시험하중까지 재하시 항복이 발생하지 않은 10개 재하시험 결과를 역으로 해석해보면 말뚝의 평균 주면마찰력은 14ton/$m^2$ 이상이 된다. 이 값은 공식(1) 및 (2)에서 규정한 단위면적당 주면마찰력의 상한값인 5ton/$m^2$의 2.8배가 되며 굴착으로 인한 지반교란의 영향을 감안하여 N값의 상한값을 25로 제한할 때 $f_s = 0.56\,\overline{N}_s (N \le 25)$의 관계식을 얻을 수 있다. 이 관계식은 시공사례 I 에서 분석한 $f_s = 0.56\,\overline{N}_s$보다는 낮은 값이지만 두가지 경우 모두 항복 또는 극한상태가 확인되지 못한 시험결과의 비교인바 그 절대값을 비교하는 것은 의미가 없다. 그러나 이 값들은 현재 설계에서 사용되는 항타말뚝의 지지력공식 및 일본의 매입말뚝 지지력 공식과는 근본적으로 상이한바 향후 이에 관한 심층연구가 되어야 할 것이다.

그러나 SIP공법 적용시 말뚝의 지지력이 이상에서 알아본 것처럼 양호하게 나타나는 것만은 아니다. 그림 11에는 같은 현장에서 실시한 재하시험 결과중 분명한 파괴가 발생한 것들이다. 이들 결과중 시험결과 1 및 2는 시공시 cement 함량이 굴착토사 1$m^3$당 120kg으로 공법의 원리에 맞추어 시공한 말뚝들이다.

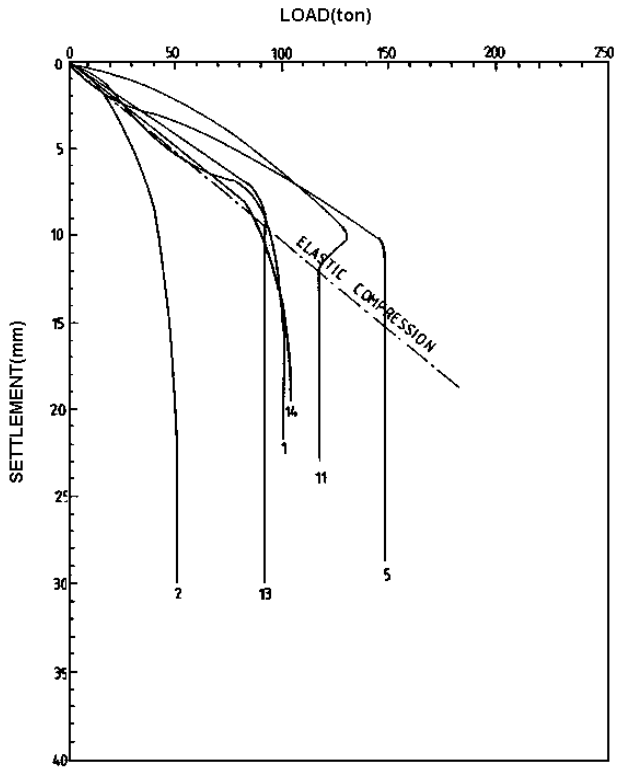



그림 11 말뚝재하시험결과 Ⅱ－2

말뚝의 극한지지력은 50ton 및 100ton에 불과하여 cement 함량을 2.5배인 굴착토사 1$m^3$당 300kg 수준으로 개선하여 이후의 시공이 이루어졌다. cement 배합을 변경한 후에도 그림 11에 나타난 것과 같은 지지력 미달 사태가 발생하였으며 이들 말뚝들의 지지력 미달원인은 규명되지 못한 상태에서 보강공사가 시행되었다.

이들 지지력 미달 말뚝들의 재하시험 결과에서도 공통적으로 나타나는 현상은 말뚝이 극한하중에 도달하기 직전까지의 거동은 시공이 양호한 말뚝들의 거동과 유사하다는 것이다. 그림 11의 시험번호 5의 경우 재하하중 145.4ton까지의 전체침하량은 10.2mm이며, 하중제거시 잔류침하량은 0.6mm에 불과하여(그림 12) 양호한 상태였다. 그러나 재하하중을 증가시키자 149.6ton에서 그림에서 나타나고 있는 것처럼 급격한 파괴가 발생하였다.

이들 지지력 미달 말뚝들의 재하시험 결과들에서도 최대 재하하중까지는 말뚝의 주면마찰력만이 작용하였고 말뚝의 선단지지력은 극히 낮은 것을 알 수 있다. 이와같이 SIP시공된 강관말뚝의 선단지지력이 극히 낮은 이유는 말뚝의 선단부 부근의 지반 및 soil cement의 상태를 유추해 봄으로써 해석할 수 있다.

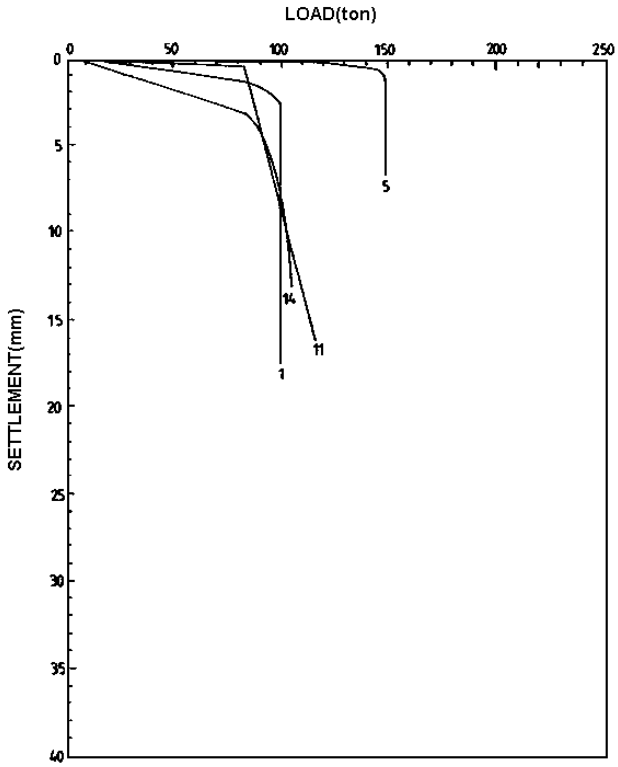



그림 12 하중－순침하량 관계 II－2

선단부가 개관상태인 강관말뚝이 선단지지력을 얻기 위해서는 강관말뚝의 내부가 토사로 채워지고 그 토사로 인한 폐색(plugging) 효과가 충분하여야 한다. 그러나 선굴착으로 인하여 교란된 지반에 강관말뚝이 관입되면 강도가 극히 낮은 soil cement만으로 강관말뚝 내부가 충전되어 강관의 순단면적만이 선단지지 되는 상태가 된다. 강관의 순단면적은 폐색단면적의 10% 미만이 되며 따라서 발휘되는 선단지지력은 거의 무시할 수 있는 수준이 된다.

일본에서는 이와같은 문제점을 해소하기 위하여 선단부 부근에 압축강도가 200kg/cm$^2$ 이상이 되는 soil cement가 형성되도록 부배합의 cement paste를 주입하고 있지만, 국내의 경우 선단부에 주입되는 cement paste의 배합도 굴착액과 동일한 배합이 사용되어 선단지지력을 기대하기 어려운 실정이다.

그림 13에는 지지력이 미달된 말뚝들중 시험번호 2번 말뚝을 K−25 디젤해머로 추가항타한후 실시한 재하시험 결과를 도시하였다. 디젤해머 항타시 약 1.5m의 추가관입이 이루어졌으며 이 과정에서 선단부 폐색이 어느정도 이루어졌을 것으로 판단되었다. 재하시험 결과는 설계하중의 2배까지 거의 직선적인 하중−침하량 관계가 나타나고 있으며 항복현상이 나타나지 않았다. 그러나 본 시험결과는 SIP시공말뚝의 하중−침하량 관계와는 근본적으로 상이하다. 즉 말뚝의 지지력에 선단지지력 성분이 추가되어 침하량이 탄성압축량을 초과하였고 따라서 재하하중의 상당부분이 선단부에 전달되어 선단부 침하가 발생한 것으로 판단할 수 있다.

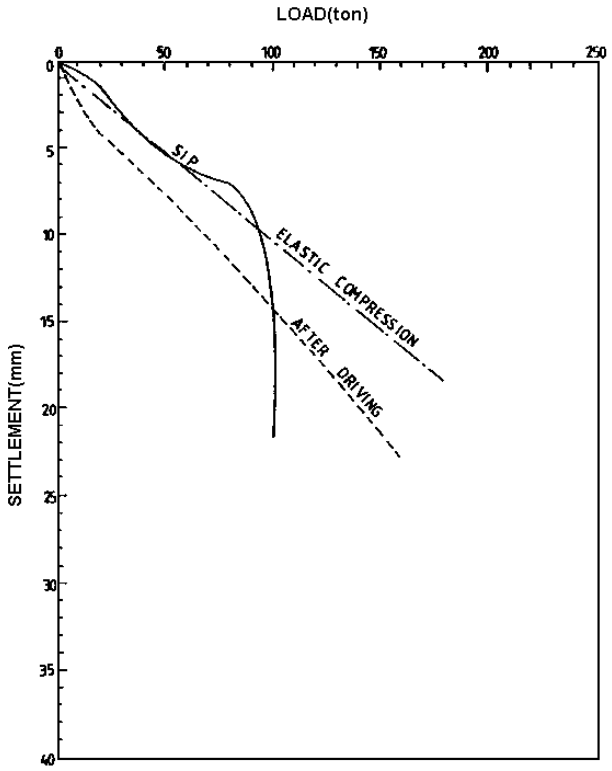



그림 13 보강항타 전후의 말뚝지지력 변화

이상의 시험결과들로부터 SIP시공시 선단부에 주입되는 cement paste의 배합이 공법의 원리에 맞도록 시정되어야 함을 알 수 있다. 그러나 이를 시공에 적용하기 곤란한 것이 우리 국내의 실정인바, SIP시공의 최종 마무리 단계인 최종항타를 선단지지력을 얻을 수 있는 정도로 타격하는 것이 바람직하다. 그러나 최종항타를 선단지지력을 만족시킬 수 있는 정도로 하기 위해서는 소음문제가 발생하며, 이는 공법적용의 취지에 어긋나는 문제점이 제기된다.

4.3 시공사례 III

본건 공사는 그림 14에 표시된 것과 같은 지반조건에 고층아파트를 건설하는 공사이다. 지반조건중 지표면으로부터 7.5m 깊이까지의 매립층에는 전석들이 포함되어 있어 직항타공법의 적용이 불가능하였다. 따라서 전석층을 관통할 수 있는 굴착기를 동원하여 지반굴착후 SIP시공이 이루어졌다. 본건 공사에는 ø400mm PHC말뚝이 설계하중 60ton으로 설계되었으며 말뚝은 풍화토층까지 관입되었고 관입깊이는 9  12m 정도였다.

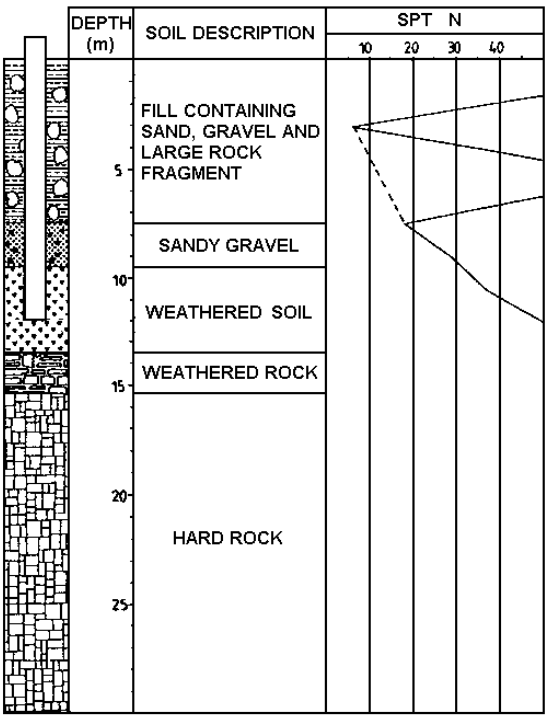



그림 14  지반조건 III

본건 현장의 말뚝지지력을 공식(1) 및 공식(2)를 적용하여 계산하여 보았다. 이때 전석으로 인한 과대한 N값은 신뢰성이 낮은바, 그림 14의 점선과 같은 지반조건을 가정하였다.

. 공식(1) 적용

선단지지력 : $q_b = 600\,\mathrm{ton/m^2}$(사력층에 적용되는 상한값 적용)

주면마찰력 : $\overline{N}_s$ =22.5

$$f_s = 0.1 \times 22.5 = 2.25\,\mathrm{ton/m^2}$$

극한선단지지력 = 600 × $0.4^2$ π/4 = 75.4ton

극한주면마찰력 = 2.25 × 0.4 π/4 × 12 = 33.9ton

말뚝의 극한지지력 = 109.3ton

◦. 공식(2) 적용

극한선단지지력 = 20 × 50 × ($0.4^2$ π/4) = 125.7ton

극한주면마찰력 $= \frac{1}{5} \times 22.5 \times 0.4\,\pi \times 12 = 67.9\,\text{ton}$

말뚝의 극한지지력 = 193.6ton

그림 15에는 본건 현장에서 실시한 10개 말뚝재하시험 결과를 함께 도시하였다. 재하시험결과는 크게 3가지 부류로 구분된다. 첫 번째(8, 9, 10)는 최대 재하하중(설계하중의 2.5배인 150ton)까지 항복이 발생하지 않은 경우이며 두 번재(3, 4, 6, 7)는 항복하중이 규명되었지만 설계하중의 2배 이상되는 경우, 그리고 세 번째(1, 2, 5)는 설계하중의 2배 미만에서 항복이 발생한 경우이다.

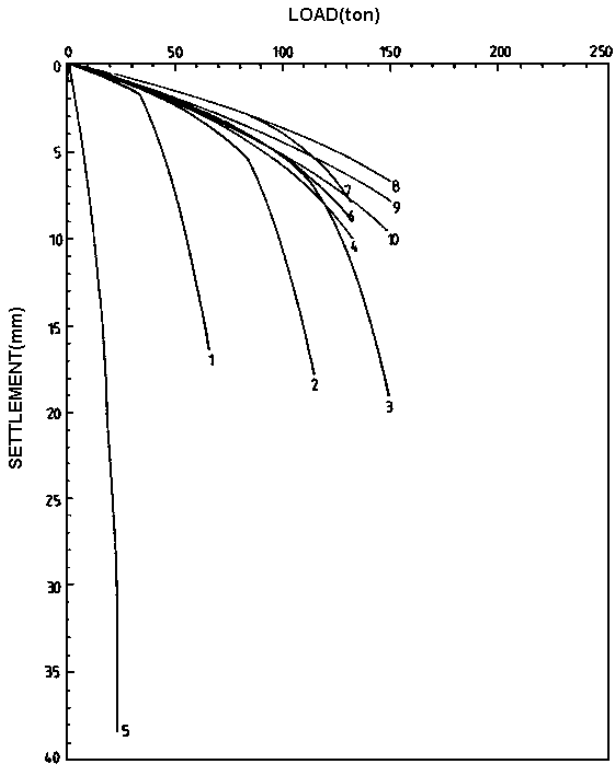



그림 15 말뚝재하시험결과 III

설계하중의 2배 미만에서 항복이 발생한 경우는 대부분 cement함량이 미달된 경우로 밝혀졌으며 보강공사가 실시되었다. 본건 재하시험 결과는 시공사례 II에서 나타난 하중－침하량 관계와 근본적으로 상이한 양상을 보여주고 있다. 항복이 발생하더라도 항복이후 상당한 하중을 증가시킬 수 있는, 즉 급격한 파괴가 나타나지 않는 점이다. 이는 PC말뚝의 경우 선단부가 완전 폐색되어 상당한 선단지지력이 발휘되고 있음을 시사해준다. 따라서 본건 시공사례에서도 선단지지력 확보를 위하여 최종항타의 역할을 확인할 수 있었으며, 소음을 유발하는 최종 항타문제를 해결할 수 있는 방안이 시급히 요청됨을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구를 통하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1. 국내에서 시행되는 SIP공법은 원래 공법과는 상이하게 굴착액과 선단고정을 위한 cement paste가 구분되어 사용되지 못하고 있다. 사용되는 cement paste의 배합은 공법의 원리에서 규정한 것보다 부배합이 사용되고 있어 주면마찰력이 위주가 되는 지지력 특성이 나타나고 있다.

2. SIP시공말뚝의 국내 시공실태를 감안할 때 선단지지력은 극히 낮은 수준으로 나타나고 있다. 따라서 설계시 이를 감안하기는 곤란할 것으로 판단되나 말뚝의 안전을 위하여 최종항타를 철저히 시행하는 것이 바람직하다.

3. 본 연구의 시공사례에서도 나타나는 바와 같이 급속히 사용이 확산되는 SIP시공은 공법의 원리 및 시공법 기준이 정립되지 못한 상태이며, 실시공시 상당한 지지력 미달현상이 발생하고 있다. 따라서 SIP공법 채택시에는 확실한 품질관리가 무엇보다도 중요하며 최소한 말뚝 100본당 1회의 지지력 확인이 요청된다.

## 참고문헌


1. 日本 土質工學會, “杭基礎 の 低騷音, 低振動 施工法 と 支持力”, 現場技術者 の ための土と 基礎シソーズ, 1985.
2. 基礎工, “日本 建築 也ンター評定および” 建設大臣 認定 全基礎工法“, 1989. 5.
3. 日本 土質工學會, “杭基礎 の 設計法 とその 解說”, 1985.