

## 말뚝기초(XI)

홍 성 원\*1  
이 명 환\*2  
이 원 제\*3

### 11. 저공해 말뚝 시공법

#### 11.1 서 언

최근들어 국내건설업체가 당면한 여러가지 문제점들중 말뚝기초와 관련한 부분을 알아보면 강화된 환경기준과 높아진 국민들의 환경권 요구문제가 가장 두드러진 것으로 나타난다. 환경요구 또는 규제규준의 강화는 주로 소음 및 진동과 관련되어 있으며 말뚝건설의 경우는 공해를 유발하는 가장 대표적인 공정으로 민원의 대상이 된다.

이에 따라 대도시의 경우, 우리나라의 말뚝 건설의 대중을 이루고 있는 항타공법은 점차 적용이 감소하고 있으며 대신 선굴착공법, 속파기공법 등 저진동, 저소음공법으로 전환되어 가는 추세에 있다. 이와같은 공법의 전환은 급격하게 나타난 현상은 아니며 이미 수년전부터 대도시의 도심지 일원에서 제기되어 왔으며 충분히 예견되어 왔다. 그러나 문제는 이러한 요구들이 대도시의 도심부 뿐만 아니라 도시외곽 지역, 수도권 등으로 확산되고 있으며, 그 변화하는 추세가 매우 급하여 최근에는 지방의 중

소도시에서도 직항타공법의 적용이 곤란한 경우가 많이 나타나고 있다.

말뚝기초 시공법의 추세를 알아보기 위하여 일본의 실정을 참고하였다. 그림 1은 1990년도에 일본에서 시공된 콘크리트 말뚝의 시공방법별 구분이다. 순수한 의미의 직항타는 전체의 12.4%에 불과하며, 이 값에는 방음카바 사용실적이 포함되어 있는 바 국내에서 일반적으로 적용하는 디젤해머를 사용한 직항타는 전체 말뚝시공 물량의 극히 일부분임을 알 수 있다.

반면 지반을 굴착한 후 기성 콘크리트말뚝을 삽입하는 착공관입공법은 전체의 60%이상을 차지하고 있으며 여기에 오거검용 직항타 공법까지 포함하면 전체 말뚝공사의 85% 정도가 되는 것을 알 수 있다.

이와같은 변화에 대처하기 위해서는 저진동, 저소음 공법의 개발과 특히 장비의 개선이 무엇보다도 시급하게 요청된다. 그간 업계의 일각에서는 이같은 상황변화에 대비하여 종래의 디젤해머에 비하여 상대적으로 진동소음 발생이 낮은 유압해머를 외국으로 부터 도입 또는 자체개발하는 노력이 없었던 것만은 아니다.

유압해머를 이용한 직항타공법은 국내에서 적용해 본 결과, 디젤해머 항타로 인한 지반진

\*1 정희원, 한국건설기술연구원, 연구위원

\*2 정희원, 파일테크 대표

\*3 정희원, 파일테크 차장

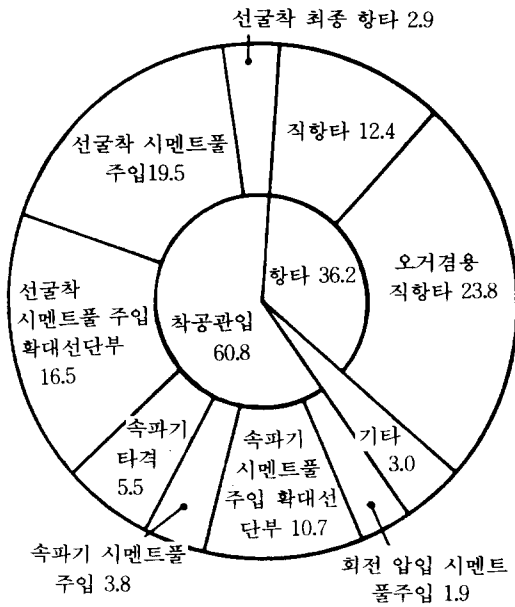
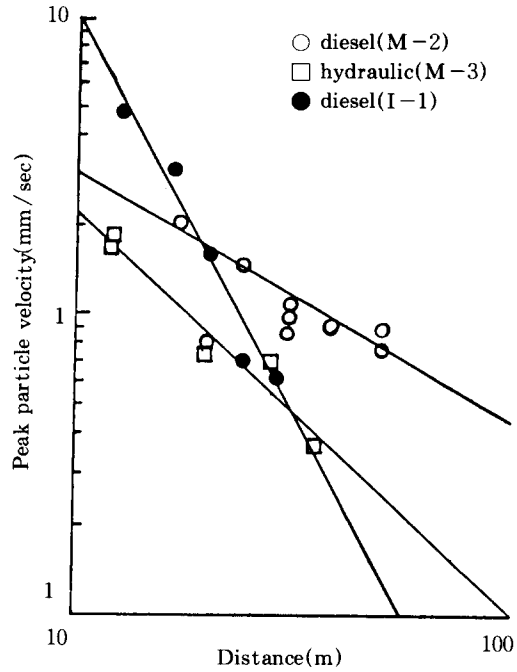


그림 1 일본에서의 기성 콘크리트말뚝의 시공법별 구성비(1990년)

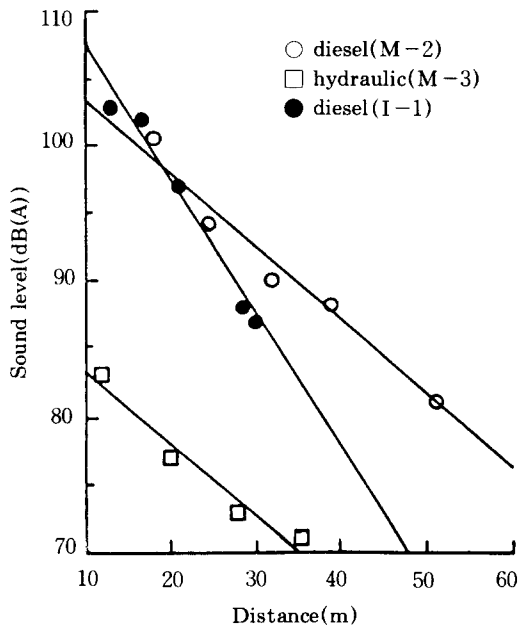


(a) 진동속도

동 및 소음문제를 어느정도 해소할 수 있는 것으로 판단된다. 그림 2는 디젤해머와 유압해머 사용시의 지반진동 및 소음측정결과를 나타내 주고 있다. 소음의 경우 상당한 감소효과가 있는 것으로 나타나고 있으나 지반진동의 감소효과는 그리 크지 않음을 알 수 있다.<sup>(3)</sup>

그럼에도 불구하고 국내 현장조사과정에서 많은 경우 이들 유압해머를 사용함으로써 민원을 해소한 사례가 있음은 환경문제의 상대적 측면을 보여주고 있다. 즉 종래의 디젤해머 항타로 민원이 발생하고 (많은 경우 주민들의 요청으로), 유압해머가 투입되어 공사가 마무리 되는 경우이다. 이때 주민들의 불만은 디젤해머보다는 상대적으로 저소음을 발생하는 유압해머로 변경함으로써 해소될 수 있다. 그러나 최근들어 디젤해머의 투입은 행정지도를 통하여 승인되지 못하는 경우가 많으며, 이때는 유압해머의 실패가 관련 민원해소에 적합한지 여부가 문제시 될 것으로 예상된다.

그리고 지난 1993년 11월 11일 중앙환경분쟁



(b) 소음수준

그림 2 동일해머용량(램 2.5 ton)과 말뚝직경(φ350mm PC말뚝)에 따른 진동속도 및 소음수준

조정위원회는 건설현장에서 발생한 소음, 진동으로 인한 정신적 피해에 대하여도 시공업체에서 배상해야 한다는 분쟁재정 결정을 국내에서는 처음 인정하여 향후 시공법 선정시 종래보다 강화된 환경기준 적용이 불가피하다.

이와같은 여건을 종합해 볼때, 국내의 경우에도 말뚝기초 시공은 상당부분 선굴착 또는 속파기공법으로 전환될 것으로 전망된다.

선굴착 또는 속파기공법을 채택할 경우 대두되는 문제점은 아래와 같다.

첫째, 선굴착 또는 속파기를 시행함으로 인하여 지반조건의 교란과 응력이완 등 말뚝의 지지력 측면에서 불리한 여건이 조성되어 직항타공법으로 시공된 말뚝에 비하여 지지력이 저하된다.

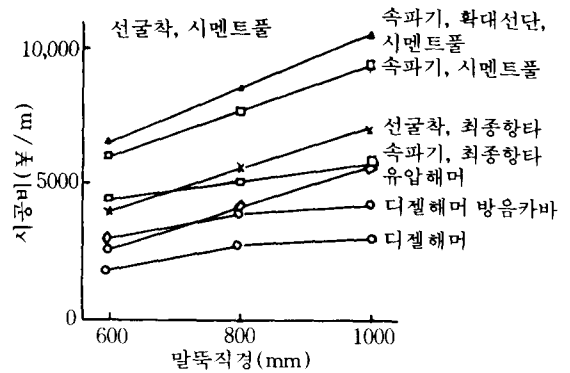
둘째, 직항타공법에 비하여 추가되는 장비 및 인력 그리고 상대적으로 시공속도가 늦어지게 됨에 따라 시공비의 상승이 불가피하다.

그림 3에는 일본에서 조사한 직항타공법과 여러가지 저공해공법들의 시공비를 비교한 결과이다.

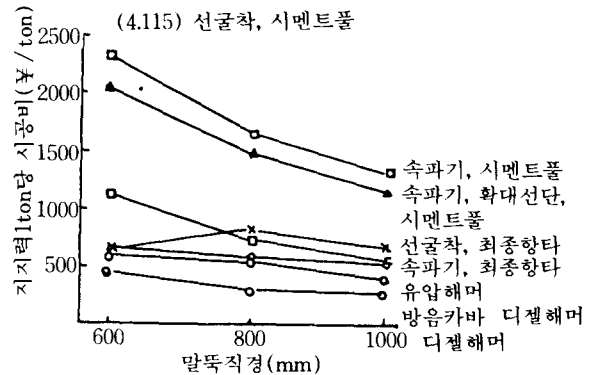
국내의 경우 이와같은 시공비 대비에 대한 실적자료가 미비하지만 전반적인 공사비 추세는 유사할 것으로 사료된다. 국내에서 가장 많이 사용되는 저공해공법은 SIP(Soil-cement Injected Precast pile)공법으로 알려진 시멘트풀 주입 선굴착공법이다. 이 공법을 적용할 경우 시공비는 디젤해머 직항타공법에 비하여 명목상 5배 정도의 공사비 상승이 나타나며(그림 3a), 여기에 지지력 저감효과까지를 감안하면 10배까지의 공사비 상승이 요구되기도 한다(그림 3b).

그러나 저공해공법 채택으로 인한 지지력 저감과 공사비 상승문제 보다 공법의 선정, 설계 또는 시공상의 문제로 지지력이 미달되는 사태가 발생할 가능성이 직항타공법에 비하여 상대적으로 높은 점에 유의하여야 한다.

국내의 경우, 저공해 기초공법에 대한 체계적인 연구실적이 없는 상태에서 급격한 건설환



(a) 말뚝직경과 시공비의 관계



(b) 말뚝직경, 허용지지력 1ton당

그림 3 직항타공법과 저공해공법들의 공사비 비교

경 여건변화가 발생하여 임기응변식의 공법적용이 되고 있는 실정이다. 이에따라 실제 시공시 불필요한 공사비의 낭비 사례가 빈발하고 있으며 지지력 미달의 경우도 발생하고 있다.

본 강좌에서는 국내에서 저공해공법의 주종을 이루고 있는 선굴착 및 최종항타 공법과 시멘트풀 주입공법의 기본개념을 설명하고, 지반 조건에 따른 시공사례와 지지력 미달의 경우 대책공법에 대하여 실제 현장사례를 소개하도록 한다.

## 11.2 선굴착 및 최종항타 공법의 원리 및 지지력 특성

국내의 경우 선굴착공법에서 가장 일반적으로 사용되는 장비는 연속오거(continuous fli-

ght auger)이다. 연속오거는 보통 원통형의 속이 빈 축(hollow stem)주위에 오거날개가 나선형으로 부착되어 있으며 선단부에는 굴착용 비트가 장착된다.

선굴착에 의한 가장 간단한 말뚝시공법은 선굴착후 기성말뚝을 삽입하고 최종항타하는 방법이다. 이와같은 시공을 할 경우 기대할 수 있는 말뚝지지력은 거의 대부분을 선단지지력에 의한다. 이는 지반굴착으로 인하여 말뚝벽면 주위의 지반조건은 극심한 교란을 경험하게 되어 주면마찰력은 거의 기대할 수 없기 때문이다. 선굴착공법에서 주면마찰력을 확보하기 위하여 삽입되는 말뚝보다는 작은 직경의 연속오거를 사용, 지반굴착을 실시하는 경우가 있지만, 그 효과는 미지수이다. 오히려 말뚝삽입과 최종항타과정에서 공벽이 붕괴되고 말뚝의 선단부를 지지력이 높은 지지층까지 관입시키는데 불리한 여건으로 작용할 가능성이 높다.

선굴착 및 최종항타된 말뚝이 만족할 만한 선단지지력을 얻기 위해서는 말뚝의 선단부를 선굴착의 영향이 미치지 않는 충분히 깊은 지지층까지 관입시키는 것이 필요하다. 선굴착으로 인하여 지반에 미치는 영향에 대하여는 연구된 바가 없으나 이를 분석해보면 ①선굴착장비의 기계적 교란효과, ②선굴착된 흙기둥에 해당되는 하중이 제거됨에 따라 지반의 응력이완(stress release), ③선굴착 부분이 공간화함에 따라 지반내의 구속상태와 경계조건(boundary condition)의 변화 등을 들 수 있겠다.

선굴착 및 최종항타 말뚝의 지지력은 말뚝선단부가 선굴착 깊이보다 충분히 깊은 곳까지 항타 관입될 수 있는 지반조건인 경우, 항타말뚝 보다도 양호한 결과도 기대할 수 있다. 이는 말뚝의 항타시공관입성(driveability)상의 말뚝재료의 허용항타응력과 지반조건에 따른 주면마찰 저항 등으로 인하여 말뚝이 실제로 항타 관입될 수 있는 데에는 한계가 있기 때문이다.

국내에서의 기성 콘크리트 말뚝의 항타시공 관입성에 대한 연구결과에 의하면(참고문헌 1 참조), 항타시공의 한계는 아래와 같이 나타나

고 있다.

- 1) 직경 350mm의 PC말뚝을 K25 디젤해머로 항타할 경우, 말뚝은 N값이 30정도인 지층까지 항타가 가능하다.
- 2) 직경 350mm의 PHC말뚝을 합판컷션을 사용한 상태에서 K25 디젤해머로 항타할 경우, 말뚝은 N값이 35정도인 지층까지 항타 가능하다.
- 3) 직경 350mm의 PHC말뚝을 합판컷션을 사용한 상태에서 K35 디젤해머로 항타할 경우, 말뚝은 N값이 48정도인 지층까지 항타 가능하다.

그림 4와 같은 지반조건은 선굴착 및 최종항타 공법에 가장 적합한 것으로 판단되는 지반조건이다. 선단지지층 윗쪽(PC말뚝의 경우  $N < 30$ 인 지층)의 지반조건이 비교적 양호하여 항타시공의 경우 상당히 큰 주면마찰력을 기대할 수 있다. 큰 값의 주면마찰력은 말뚝지지력 측면에서는 유리하지만 말뚝의 항타시공 관입 저항이 크게 되어 선단부를 지지력이 높은 곳까지 관입시키는 데는 불리한 조건이 된다.

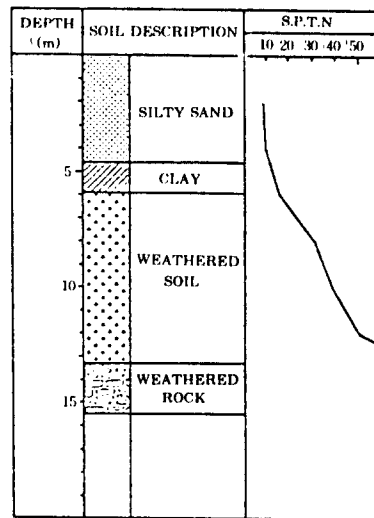


그림 4 지반조건

그림 4와 같은 지반조건에 직경 350mm의 PC말뚝을 K25 디젤해머로 직항타 시공한 말뚝의 재하시험결과를 그림 5에 나타내었다. 파동방정식(wave equation)해석 및 N값을 이용한 지지력 공식으로 해석한 결과 말뚝의 선단부는 N값이 30정도인 곳까지 항타되었음을 알 수 있으며 극한지지력은 110 ton정도가 된다. 따라서 직경 350mm PC말뚝의 설계하중은 원칙적으로 37 ton정도인 것으로 볼 수 있다.

같은 지반조건에서 연속오거를 사용하여 선굴착후 말뚝을 삽입하고 드롭해머로 최종항타한 결과 말뚝의 선단부는 선굴착 깊이보다 상당히 깊은 곳까지 관입시킬 수 있었다. 그리고 연속오거에 의한 선굴착 깊이는 선굴착 말뚝주위에 시공한 항타말뚝의 선단부보다 3m정도 깊게까지 굴착이 가능하였다. 이 결과로 보면 선굴착으로 주변마찰력이 배제된 상태에서 말뚝의 선단부는 N값이 50정도인 지지층까지 관입되었다고 판단할 수 있다.

선굴착 및 최종항타 말뚝의 재하시험결과를 그림 5에 채선으로 표시하였다. 항타시공된 말

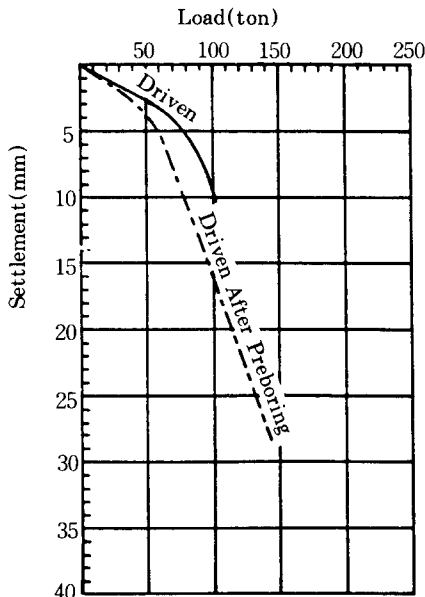


그림 5 말뚝재하시험결과의 비교-항타 말뚝과 선굴착 및 최종항타말뚝

뚝의 경우와는 상이한 거동이 나타나고 있으며 극한지지력은 항타말뚝보다 상당히 큰 것을 알 수 있다. 이처럼 상이한 하중-침하량 거동이 나타나는 것은 선굴착으로 주변마찰력이 거의 나타나지 못하는 때문이며, 선단지지층의 선단 지지력이 항타말뚝보다 크기 때문이다.

그러나 앞의 예와 같이 선굴착 및 최종항타된 말뚝이 항타시공된 말뚝의 지지력보다 높은 경우는 그리 많지 못하다. 대부분의 경우 선굴착의 영향으로 말뚝의 지지력은 항타말뚝보다 낮게된다.

선굴착 및 최종항타 말뚝의 지지력이 낮게되는 이유는 지반교란의 영향과 선굴착후 공벽이 유지되지 못하고 붕괴 또는 함몰되는 이유인 것으로 판단된다.

지반조건중에 자갈 또는 호박돌 등을 함유한 지층이 선굴착 깊이 범위내에 있는 경우, 연속오거의 굴착 및 배토능력만으로는 이런 큰 입径의 자갈 및 호박돌을 완전 배토시킬 수 없다. 따라서 굴착이 완료되고 연속오거를 인발하면 미처 배토되지 못한 자갈이나 호박돌들과 공벽 근처의 자갈들이 붕괴 또는 함몰되어 선굴착된 구멍의 바닥에 쌓이게 된다. 여기에 기성말뚝을 삽입하면 아무리 큰 항타에너지로 최종항타를 하더라도 말뚝선단부 하부의 느슨한 지반조건을 관통하기 어렵고 결국 말뚝선단부는 선굴착 깊이보다 높은곳에 위치하게 되거나, 말뚝재료의 파손만을 초래할 뿐이다.

또 지반조건이 사질토이고 지하수의 흐름이 심한 경우에도 공벽유지가 되지 못하고 선굴착 깊이보다 깊은 곳까지 항타관입시키는 것이 불가능한 경우도 많이 있다. 이처럼 선굴착 깊이보다 높은 곳에 말뚝선단부가 위치할 경우, 말뚝의 지지력은 극단적으로 낮게되며 따라서 선굴착 및 최종항타 공법을 적용할 수 없다.

자갈층의 존재 또는 지하수의 흐름 등으로 선굴착 공벽의 유지가 불가능할 경우에는 오거외부에 강관 케이싱이 부착된 장비를 사용하여 선굴착한 후 기성말뚝을 삽입하고 최종항타하는 공법을 적용할 수 있다. 이러한 공법의 경우

강관 케이싱이 지반내에 묻혀있는 상태에서 기성말뚝을 삽입한 후 강관 케이싱을 인발하기 때문에 주면마찰력은 케이싱을 사용하지 않는 경우보다 더 낮게된다. 따라서 최종항타로 확실히 선굴착 깊이보다 깊은 곳까지 말뚝 선단부를 관입시켜야 한다. 이 공법은 대개의 경우 선단지지력을 확신할 수 있지만 케이싱 관입 및 인발과정으로 인하여 시공속도가 늦고 따라서 시공비가 높아지는 문제가 있다.

선굴착 및 최종항타공법에서는 케이싱 사용 유무와 관계없이 선단부를 견고한 지지층까지 최종항타하는 과정에서 상당히 큰 항타에너지를 필요로 하며 따라서 지반진동이나 소음을 만족할 만한 수준이하로 유지하는 것이 불가능한 경우가 종종 발생한다.

### 11.3 시멘트풀 주입공법의 원리 및 지지력 특성

국내의 말뚝기초 시공현장들을 조사해 본 결과 앞장에서 설명한 선굴착 및 최종항타공법을 적용할 수 있는 지반조건은 그리 많지 않은 것으로 판단된다. 선굴착 및 최종항타공법 적용의 장애요인은 공벽붕괴 및 선단지지력의 저하이며 이와같은 지반조건에서는 굴착공내에 시멘트풀(cement paste)을 주입하여 말뚝기초의 주면마찰력과 선단지지력을 보강하는 공법이 채택된다.<sup>1)</sup>

시멘트풀 주입공법의 말뚝지지력은 주면마찰력과 선단지지력 부분으로 나누어 고려하여야 하며 또 선단지지력은 최종타격에 의하는 방법과 선단부 고정용 시멘트풀 보강에 의한 방법으로 구분된다. 구체적인 시공방법의 선정은 지반조건상 최종타격으로 소정의 선단지지력을 기대할 수 있는지 여부와 현장의 주변여건상 최종타격이 가능한지 여부 그리고 말뚝의

설계하중에 따라 결정되어야 한다.

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

지반굴착시 오거 로트 중공부를 통하여 굴착액을 주입하는데 굴착액의 사용목적은 굴착을 용이하게 해주며 동시에 굴착공벽을 보호하기 위함이다. 굴착액의 성분은 물+시멘트+벤토나이트로 되어 있으며 soil cement 1m<sup>3</sup>당 시멘트 120kg, 물 450l, 벤토나이트 25kg의 비율(표준배합비)로 혼합하여 펌프로 압송 주입한다.

굴착이 진행되어 오거선단부가 말뚝의 선단 지지층에 도달되며 선단지지층 도달여부는 오거모터의 전기저항을 측정하여 판단할 수 있다. 이때 선굴착 구멍의 조건이 최종항타에 적합하며 현장 주변여건상 상당한 최종항타가 가능한 경우 오거를 인발하며 굴착공내에 주면고정액을 주입한다. 주면고정액의 배합비는 굴착액과 같은비율로 하며, 기성말뚝을 삽입하고 최종항타를 실시한다. 최종항타 요령은 선굴착 및 최종항타 공법에 준하여 실시한다.

그러나 지반조건 및 주변여건상 최종항타가 불가능할 경우에는 오거선단부가 지지층에 도달했을 때 오거중공부를 통하여 부배합의 시멘트풀을 선단부 고정 목적으로 주입한다. 선단부 고정액은 물-시멘트비가 1/1.2~1/1.4가 되도록 하며 선단부 부근의 원지반 토사와 충분히 혼합되도록 한다. 이때 시멘트 사용량은 선단부 지지층의 지반조건에 따라 상이하지만 400~800kg정도가 되도록 한다.

선단부 고정액의 주입 및 혼합이 완료되면

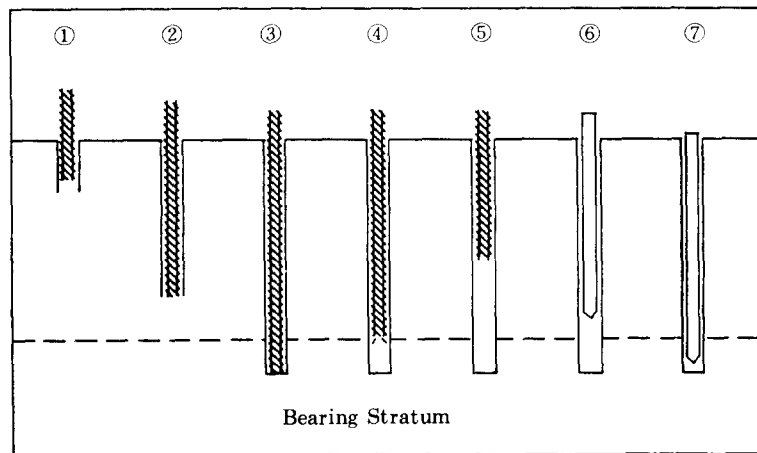
1) 주: 시멘트풀 주입공법은 국내에서 SIP(Soil-cement Injected Precast pile)공법으로 알려져 있으나 소일시멘트가 주입되는 것이 아니고 시멘트풀이 주입되는 바 엄밀한 의미에서 적합치 않은 것으로 판단되어 시멘트풀 주입공법으로 용어를 수정하였다.

오거 중공부를 통하여 주면고정액을 주입하면서 오거를 인발하여 굴착공내에 시멘트풀이 충전되도록 한다. 굴착 및 시멘트풀 주입이 완료된 후 굴착공내에 기성말뚝을 삽입하고 드롭해머로 최종 관입되도록 향타함으로써 시공이 완료된다. 그림 6에는 이상에서 설명한 시공과정을 나타내었다.

이상과 같은 과정을 거쳐 시공되는 시멘트풀 주입말뚝은 시공 각 단계별 시공내용에 따라 말뚝지지력이 영향을 받는다.

굴착공의 직경은 굴착공벽과 삽입되는 말뚝 주위가 soil cement로 충전되어 말뚝의 주면마찰력이 발휘되는 관계로 적절한 직경의 오거 선정이 중요하다. 일본에서 실측한 자료에 의하면 말뚝직경+100mm의 굴착시 형성되는 soil cement벽두께는 64~75mm가 되어 굴착공경보다 약간 큰 직경의 soil cement벽이 조성되었다. 이 부분에 대하여는 굴착공경이 말뚝지지력에 미치는 영향이 규명되지 못한 상태인 바 향후 연구가 요청되는 부분이다.

굴착방법의 선정도 시멘트풀 주입말뚝의 지지력과 밀접한 관계가 있다. 일본에서 적용되는 선굴착 공법중 cement milk공법, neo pile 공법 등에서는 연속오거를 사용하지만 RO-DEX공법, kneading공법 등에서는 굴착장치의 선단부 윗쪽에서 교반날개를 갖는 굴착기를 사용하고 있다. 연속오거를 사용할 경우 지반굴착으로 인한 토사의 대부분이 배토되어 말뚝삽입이 용이한 장점이 있지만 말뚝주위에는 토사함량이 극히 낮은 시멘트풀만이 남게되거나, 굴착공 공벽의 함몰로 인해 인위적으로 조성되는 soil cement층과 극히 느슨한 주변지반이 형성되어 말뚝의 주면마찰력이 낮은 수준이 될 가능성이 높다. 반면 교반날개를 사용할 경우 soil cement형성은 양호하지만 말뚝삽입이 곤란하여 말뚝의 선단부가 굴착 심도보다 높게되어 선단지지력이 불리한 조건이 될 수 있다. 이 부분에 관해서도 어느 정도의 배토량을 유지하는 것이 말뚝의 지지력 측면에서 유리한 것인지에 관해서는 뚜렷한 시방이 없는 실정이다.



- ① 오거굴착 개시
- ② 오거굴착, 굴착액 주입
- ③ 오거굴착완료, 지지층에 근입
- ④ 오거굴착, 선단부고정액 주입
- ⑤ 오거인발, 주면고정액 주입
- ⑥ 말뚝삽입, 자중에 의한 삽입
- ⑦ drop hammer에 의한 최종향타

그림 6 시멘트풀 주입공법의 시공과정

실제 국내의 시공에서는 현장에 따라 연속오거를 사용하거나 연속오거에 일부 교반날개를 부착한 굴착장비가 사용되고 있으며, 말뚝의 주면마찰력 측면에서는 일부 교반날개를 부착한 형태가 유리할 것으로 판단된다.

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

주면고정액의 역할은 말뚝벽면에 soil cement층을 부착시켜 말뚝의 주면마찰력을 증대시켜주는 것이다. soil cement와 말뚝벽면의 마찰력은 연구결과에 의하면 soil cement의 압축강도와 비례하는 것으로 알려져 있다. 앞에서 설명한 표준배합의 soil cement의 일축압축강도는 28일 양생을 기준으로 할때 4.9내지 14.0 kg/cm<sup>2</sup>의 낮은 수준이다. 이로부터 기대할 수 있는 주면마찰력은 대략 0.03 q<sub>u</sub>(여기서 q<sub>u</sub>는 soil cement의 일축압축강도)정도이다.

선단부 고정액의 역할은 말뚝선단부에 부배합된 시멘트풀과 선단부 지층의 토사가 혼합된 높은 압축강도를 갖는 soil cement를 형성함으로써 말뚝의 선단지지력을 얻게해 주는 것이다.

따라서 최종항타후 말뚝선단부는 천공된 깊이보다 약간 높은 곳에 위치하도록 하는것이 바람직하다. 국내에서 시공시 많은 경우 최종항타후 말뚝선단부가 천공깊이보다 깊은 시공을 선호하지만, 이러한 시공은 천공으로 인하여 교란된 지반내에 말뚝선단부가 관입되기 때문에 시멘트풀 보강효과를 기대하기 곤란하다. 반대로 최종항타후 말뚝선단부가 천공깊이보다 지나치게 높은 경우에도 선단부 고정을 위한 시멘트풀 효과를 충분히 활용할 수 없다. 일본에서는 매입 말뚝공법에서 말뚝선단부가 선단지지층내에 1.0m이상 관입되어야 하며, 천공깊이와 말뚝선단부 깊이의 차이는 0.5m미만이 되는 것을 기준시공법으로 추천하고 있다. 또한 허용치 0.5m이상의 관입깊이 차이가 발생한 경우 공벽붕괴 또는 시멘트풀 배합이 잘못

된 경우로 인정하여 시공법을 재고하도록 권장하고 있다.

선단부 고정을 위한 시멘트풀은 물-시멘트비가 70%정도를 사용하며 채취된 코아의 일축압축강도는 200~300kg/cm<sup>2</sup>이상이 되는 것으로 일본에서의 연구결과는 밝히고 있다. 따라서 시멘트풀 주입공법 시공시 만족할 만한 선단지지력을 얻기 위해서는 시멘트풀 배합비 및 말뚝선단부 관입깊이를 공법의 원리에 적합하도록 시공관리하는 것이 중요하다. 국내에서의 실시공의 경우 전술한 선단지지력 확보가 되지 못하는 시공이 많은 형편이다.

국내의 경우 선단지지력이 확보되지 못하는 주된 이유는 앞에서 설명한 바와같이 최종항타로 선굴착 깊이 이상의 선단부 관입이 되지 못하는 지반조건에서도 선단부 고정을 위한 부배합의 시멘트풀을 사용하지 못하는데 있는 것으로 판단된다. 이는 국내의 경우 시멘트풀 주입공법의 원리가 아직 잘 인식되지 못한 관계로 선단부 고정액을 주입할 수 있는 장비가 거의 보급되지 못한 원인으로 사료된다.

선단지지력 확보를 위한 충분한 최종항타가 불가능하고 선단부 고정액을 별도로 주입할 수 있는 장비가 동원되지 못할 경우에는 지반조건에 따라 주면고정액의 시멘트 배합비를 조정하여 시공할 필요가 있다. 주면마찰력은 주면고정을 위한 soil cement의 일축압축 강도에 비례하는 바, 주변지반이 연약지반이 아닐 경우 표준 주면고정액보다 시멘트 함량을 2.5배 정도로 높여 시공하면 상당히 큰 주면마찰력을 얻을수 있고, 이 주면마찰력 만으로도 소정의 지지력을 기대할 수 있다. 조사결과 국내에서 시행되는 대부분의 시멘트풀 주입공법은 이 개념에 의하여 설계 및 시공되고 있는 것으로 나타나고 있다.

#### 11.4 시멘트풀 주입공법의 말뚝지지력

시멘트풀 주입공법은 공법의 원리에서도 나타난 바와같이 시멘트풀의 작용으로 선단지지



력 보강과 주면마찰력이 보강될 수 있는 공법이다. 그러나 국내의 경우 본 공법에 대한 연구 실적이 극히 부진하여 설계지지력을 계산할 수 있는 설계기준이 없는 실정으로 대부분의 설계에서 항타말뚝에 대한 지지력 공식이 수정없이 사용되고 있다.

일본의 경우에는 시멘트풀 주입공법과 유사한 매입말뚝의 지지력 계산은 대부분 표준관입 시험결과  $N$ 값을 이용한 공식이 사용되며 기준에 따라 상이한 기준이 적용되고 있다.

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

$$R_u = q_b \cdot A_p + U \sum l_i f_i \quad (1)$$

$$q_b \begin{cases} 10N (\leq 400) \text{ 사질토층 (단위 : ton/m}^2\text{)} \\ 15N (\leq 600) \text{ 모래자갈층} \end{cases}$$

$$f_i \begin{cases} 0.1\bar{N}_s (\leq 5) \text{ 사질토층 (단위 : ton/m}^2\text{)} \\ 0.5\bar{N} (\leq 15) \text{ 점성토층} \end{cases}$$

여기서,  $R_u$  : 말뚝의 극한지지력

$q_b$  : 단위면적당 극한 선단지지력

$A_p$  : 선단부 단면적

$U$  : 말뚝의 주면장

$l_i$  :  $i$  층의 두께

$f_i$  :  $i$  층의 단위면적당 극한 주면마찰력

$N$  : 말뚝선단부가 위치한 곳의  $N$ 값

$\bar{N}_s$  : 사질토층의 평균  $N$ 값

$\bar{N}$  : 점성토층의 평균  $N$ 값

일본 건축에서는 이와는 상이한 지지력 공식이 사용되고 있다. 아래 공식은 소화 46년 건설성 고지 제111호에 의한 것이다.

$$R_u = 20\bar{N}A_p + \left[ \frac{1}{5}\bar{N}_s L_s + 2\bar{N} L_c \right] \phi \quad (2)$$

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

여기서  $L_s$  : 사질토층에 관입된 말뚝길이

$L_c$  : 점성토층에 관입된 말뚝길이

$\phi$  : 말뚝의 주면장

위의 지지력 공식들과는 상이한 매입말뚝과 관련된 지지력 공식들이 각종 특허공법에서 사용되고 있다. 이들 지지력 공식은 특허 공법의 특성상 선단지지력 부분을  $q_b = (25 \sim 30)N$ 으로 수정하였으며 주면마찰력은 건축에서 적용하는 공식을 수정없이 사용하고 있다. 이와같은 공식사용은 특허된 각 공법과 연관되어 있기 때문에 국내에서 적용되는 시멘트풀 주입공법에 적용하는 것은 적절치 못하다고 판단된다.

일본의 토목 및 건축에서 사용되는 지지력 공식들은 선단지지력에 있어서 공식(2)적용시 공식(1) 적용의 경우보다 33~100% 높은 값이 계산된다. 주면마찰력은 공식(2)의 경우가 공식(1)보다 100~300% 높게된다. 이러한 공식간의 상이한 예측은 말뚝재하시험결과와의 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	말뚝 규격		극한지지력(ton)			비고
	직경(mm)	길이(m)	공식(1)	공식(2)	재하시험결과	
1	400	12.0	52	145	105	PC말뚝
2	600	20.0	311	434	240	-
3	450	25.8	141	311	190	-
4	500	23.5	205	366	270	-
5	350	8.0	62	135	223	-
6	500	35.3	164	359	195	-
7	500	18.3	173	282	195	-

표 1에서도 나타나고 있듯이 공식(1) 및 (2)의 예측 신뢰도는 극히 불량하다. 7개 재하시험 결과만을 놓고 볼때 공식(1)은 말뚝의 극한지지력을 과소평가하고 있으며 공식(2)는 과

대평가하고 있음을 알 수 있다. 그러나 시험번호(2)와 시험번호(5)의 재하시험 결과는 공식(1)과 (2)의 범위밖의 결과를 나타내주고 있다. 결론적으로 현재 일본에서 말뚝지지력 계산에 적용되는 공식들을 국내 현장에 적용할 수는 없을 것으로 판단되며, 국내의 시공여건으로 시공된 말뚝재하시험 결과로부터 시멘트풀 주입공법에 대한 지지력 공식이 도출되어야 할 필요가 있다.

### 11.5 시멘트풀 주입공법의 시공사례

앞장에서 알아본 것처럼 시멘트풀 주입시공법에 대한 말뚝지지력 예측은 현재까지의 설계기준으로는 적용공식에 따라 큰 차이가 있다. 본장에서는 국내에서 시공된 시멘트풀 주입공법의 말뚝재하시험 결과를 분석하고 공식(1) 및 (2)를 적용하여 계산한 예측값과 비교해 보았다.

#### 11.5.1 시공사례 I

본건 공사는 그림 7과 같은 지반조건에서 직경 400mm의 PC말뚝을 직항타하여 고층아파트를 건설하는 현장으로 말뚝은 50 ton의 설계지지력을 갖는 것으로 설계되었다. 그러나 공사현장 인근의 주변 여건상 직항타가 불가능하여, PHC말뚝을 사용하여 선굴착후시멘트풀주입 및 말뚝삽입, 최종타격을 하는 시멘트풀 주입공법으로 설계변경하였다. 여기에서 말뚝의 선단부는 모래섞인 자갈층을 관통하여 풍화암까지 도달시키는 설계개념으로 계획되었으나 오거 선굴착시 N값 50이상인 지층은 굴착이 불가능하여 14.0m에서 굴착을 중단하고 시멘트풀 주입공법으로 시공하였다.

연속오거를 사용하여 14.0m까지 지반굴착이 시행되었으나 기성말뚝을 삽입하고 드롭헤머로 최종항타하여도 말뚝의 선단부는 선굴착 깊이보다 깊은 곳까지 관입시킬 수 없었다. 이는 선단부 근처의 모래, 자갈층의 영향때문인 것으로 판단되었다. 본건 공사를 시공할 당시에

는 선단부 고정액을 별도로 주입할 수 있는 장비가 수배될 수 없는 상황이었고 따라서 표준주면고정액보다 시멘트 함량이 2.5배인 시멘트풀을 주입하였다.

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

#### • 공식(1) 적용

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

$$\bar{N}_s = 16.9$$

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

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

$$\text{극한주면마찰력} = 1.69 \times 0.4\pi \times 14.0 = 29.7 \text{ ton}$$

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

#### • 공식(2) 적용

$$\bar{N} = 50$$

$$\bar{N}_s = 16.9$$

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

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

$$\text{말뚝의 극한지지력} = 185.2 \text{ ton}$$

본 말뚝의 재하시험결과는 그림 8과 같다. 말뚝의 침하량은 하중증가에 따라 거의 직선적으로 증가하고 있으며 최대 203.4ton 재하시험 침하량은 8.38mm에 불과하였으며 하중제거시 잔류침하량은 1.99mm였다. 본건 재하시험 결과를 여러가지 재하시험결과 해석방법으로 해석하였으나 최대시험하중 203.4ton까지 극한 또는 항복이 발생하지 않은 것으로 판단하였으며, 따라서 시험말뚝의 극한지지력은 203.4ton 이상이 되어 식(1)에 의한 결과치 대비 1.94배 이상 되며 식(2)에 의한 극한지지력의 1.1배 이상이 된다.

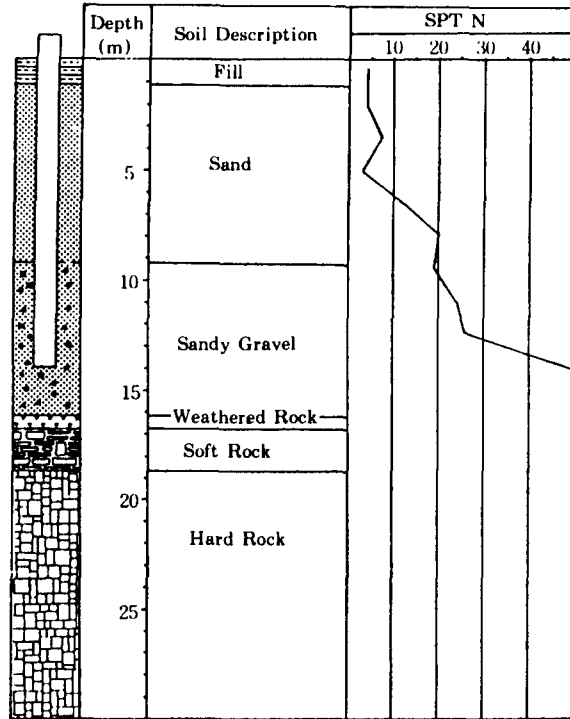


그림 7 지반조건 I

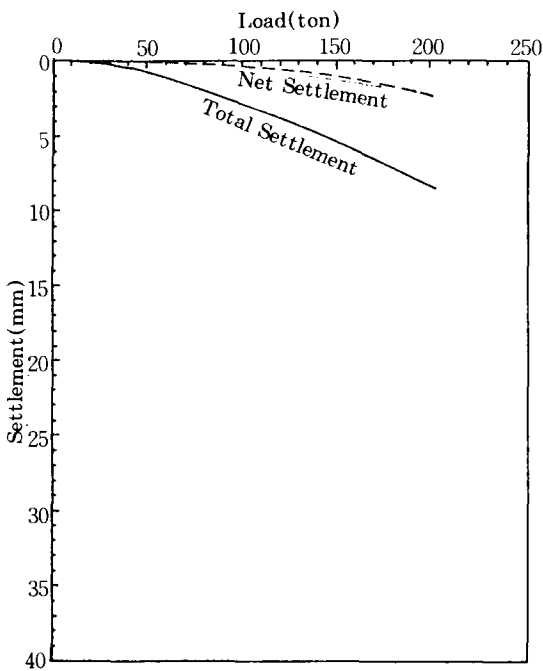


그림 8 말뚝재하시험결과 I

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

주지하다시피 말뚝의 지지력은 선단지지력과 주변마찰력의 두가지 성분으로 구성된다.

그림 9에는 이 두가지 성분을 분리하여 측정 한 말뚝재하시험 결과를 보여주고 있다.

말뚝의 주변마찰력은 하중이 증가됨에 따라 침하량이 거의 직선적으로 증가하여 최대값에 도달한 후 급격한 파괴가 발생한다. 극한 주변마찰력 발생에 필요한 침하량은 대개 4~6mm 정도에 불과하며 이 값은 말뚝의 직경에는 큰 영향을 받지 않는다. 다만, 말뚝길이에 따라 말뚝자체의 탄성압축량에 차이가 있어 장대말뚝의 경우 실제 말뚝두부에서 측정하는 침하량 값은 4~6mm를 초과할 수도 있다. 이러한 말뚝자체의 탄성 변형값을 배제하고 주변마찰력

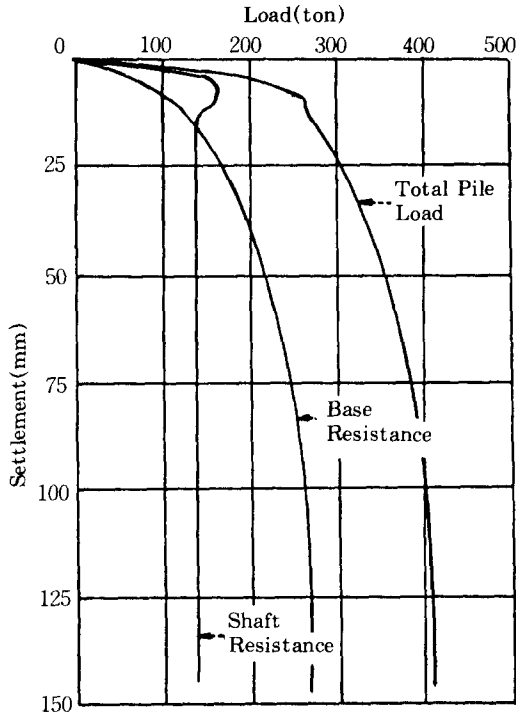


그림 9 선단지지력과 주변마찰력을 분리측정한 말뚝재하시험결과

의 극한값 도달 여부를 판정하기 위해서는 총 침하량에서 탄성침하량을 공제한 순침하량을 계산함으로써 분명히 확인할 수 있으며, 말뚝 재하시험 과정에서 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 증가하여 극한값에 도달하기까지는 상당히 큰 침하량이 필요하다.

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

그림 10에는 현장타설 콘크리트 말뚝의 재하시험 결과를 나타내었다. 재하하중은 300ton단계로 증가시켜가며 최대 2700ton까지 재하하였다. 말뚝몸체에는 말뚝두부로 부터 각각 상이

한 거리에 10개의 strain gauge를 매설하여 각 위치에서 말뚝몸체에 발생하는 압축력을 측정하였다.

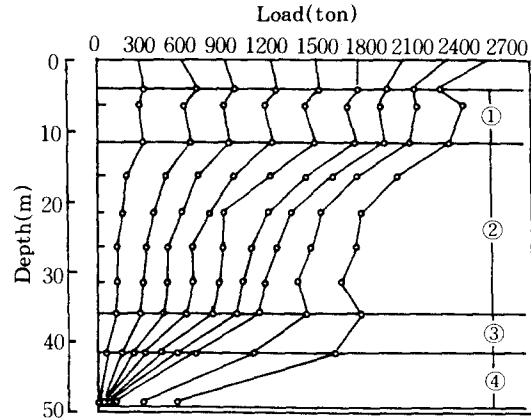


그림 10 현장타설 콘크리트말뚝의 재하시험결과

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

2100ton이상의 하중재하시 말뚝 각 부재에 발생하는 압축력은 2100ton재하시 압축력 분포 곡선을 거의 평행하게 이동한 것으로 해석할 수 있으며, 이는 말뚝의 주변마찰력 항복발생 이후 주변마찰 저항의 증가없이 선단부로 추가하중이 전달되는 것으로 설명할 수 있다.

그림 11에는 위의 재하시험결과를 ①하중(P)-전침하량(S), ②선단부 재하하중(N)-침하량(S), ③ 하중(P)-잔류침하량( $\Delta S$ ) 관계로 나타내었다. 말뚝선단부에는 최대 300ton의 하중이 재하되었으며 N-S관계로 볼때 선단지지력은 거의 극한값에 근접한 것으로 판단된다. P- $\Delta S$ 관계는 2400ton에서 급격한 절곡이 나타나고 있으며, 이로부터 주변마찰력의 극한값 도달을 판정할 수 있다. 이때 주변마찰

력 파괴시 순침하량은 4mm 정도가 되어 앞서서의 설명과 잘 일치함을 알 수 있다.

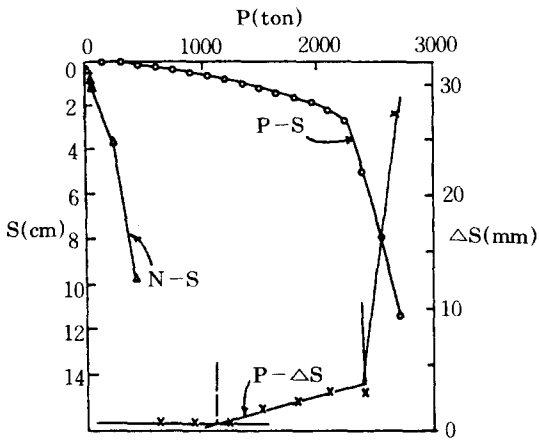


그림11 P-S, N-S, P-ΔS관계

이상에서 설명한 말뚝의 선단지지력과 주면마찰력 특성을 적용하여 그림 8의 재하시험 결과를 분석해 보면 최대재하하중 203.4ton까지 주면마찰력의 항복 또는 파괴가 발생하지 않았음을 알 수 있다. 즉, 말뚝의 극한 주면마찰력은 203.4ton이상이 되는 것으로 확인할 수 있으나, 선단지지력은 추정이 불가능하다.

이와같은 분석은 본건 재하시험에서 선단지지력과 주면마찰력을 분리측정하지 못한 상태에서 하중 재하과정을 통하여 유추한 분석이라는 한계가 있다. 말뚝의 주면마찰력만을 알아보기 위하여 같은 조건으로 시공된 강관말뚝  $\phi$  406.4mm에 대하여 인발시험을 수행하였다. 그림 12에는 인발시험결과를 나타내주고 있으며 132.8 ton까지 주면마찰력의 항복이 나타나지 않았다.

이들 재하시험 결과로부터 시멘트풀 주입말뚝의 주면마찰력은 공식(1) 또는 공식(2)에서 예측한 값보다 월등히 큰 것을 알 수 있다. 하중재하방식으로 추정한 203.4ton이상의 주면마찰력을 단위 면적당으로 환산하면 11.6ton/m<sup>2</sup> 이상이 된다. 이 값을 평균 N값과 연결하여 분

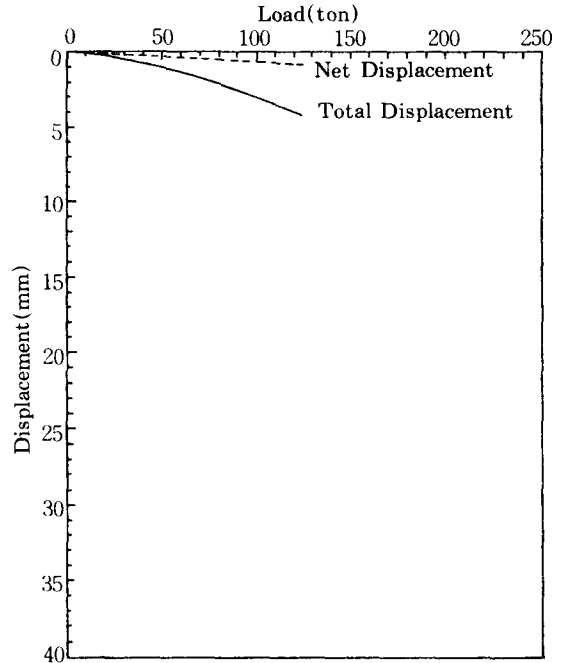


그림12 말뚝인발시험결과

석하면  $f_s = 0.68N_s$ 가 되며 이 관계식은 공식(1) 대비 6.8배, 공식(2)와 대비하면 3.4배의 주면마찰력이 계산된다.

이같은 결과는 지지력 공식(1) 또는(2)는 일본에서 적용되는 표준배합 시멘트풀을 주입한 경우에 대한 공식이며, 본건 시공의 경우에는 시멘트 함량이 2.5배가 되어 soil-cement의 압축강도가 증가하였고 결과적으로 3.4내지 6.8배의 높은 주면마찰력이 발휘된 것으로 판단된다.

본건 현장에서는 5개소의 압축재하시험과 2개소의 인발시험이 실시되었으며 시험결과는 그림 8의 결과와 대동소이하다. 그러나 본건 현장에서는 주면마찰력만을 분석할 수 있었으며 선단지지력에 대해서는 분석이 불가능하였다.

### 11.5.2 시공사례 II

본건 공사는 그림 13에 나타난 것과 같은 지

반조건에 고층아파트를 건축하는 현장이다. 지반조건은 매립토층 하부에 중간 굳기의 점성토층, 조밀한 모래층이 있고 그 하부에 N값이 50 이상인 모래질 자갈층이 15m정도의 두께로 나타나고 있으며 지표면으로 부터 28m정도에 풍화암층이 나타나고 있다. 본건 현장은 변화한 상업지역에 위치하고 있어 디젤해머 직항타는 불가능하였으며 시멘트풀 주입공법이 채택되었다.

지반굴착은 직경 450mm의 연속오거를 사용하였고 대부분의 위치에서 지표면으로 부터 24m까지 굴착이 가능하였다. 말뚝재료는  $\phi 406.4\text{mm} \times 9\text{mm thk}$ 의 강관말뚝이며 시멘트풀은 말뚝선단부로 부터 10m높이까지만 주입하고 최종항타는 진동식 해머를 사용하였다. 말뚝의 설계하중은 80 ton이며 품질관리를 위하여 총 20개의 말뚝재하시험이 실시되었다.

선굴착후 강관말뚝을 삽입하고 진동식 해머로 최종관입을 시도하였으나 대부분의 경우 말뚝의 선단부는 선굴착 깊이보다 깊게 관입될 수 없었다. 본 현장에서도 말뚝관입에 장애가 되는 조건은 선단부 부근의 모래, 자갈층 때문인 것으로 판단된다.

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

• 공식(1)적용

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

주면마찰력 계산은 시멘트풀이 주입된 구간과 시멘트풀이 주입되지 않은 구간으로 구분하여 계산하였다. 시멘트풀이 주입되지 않은 부분의 주면마찰력은 일본에서 사용되는  $f_s = 1.5\text{ton}/\text{m}^2$ 을 적용하였다.

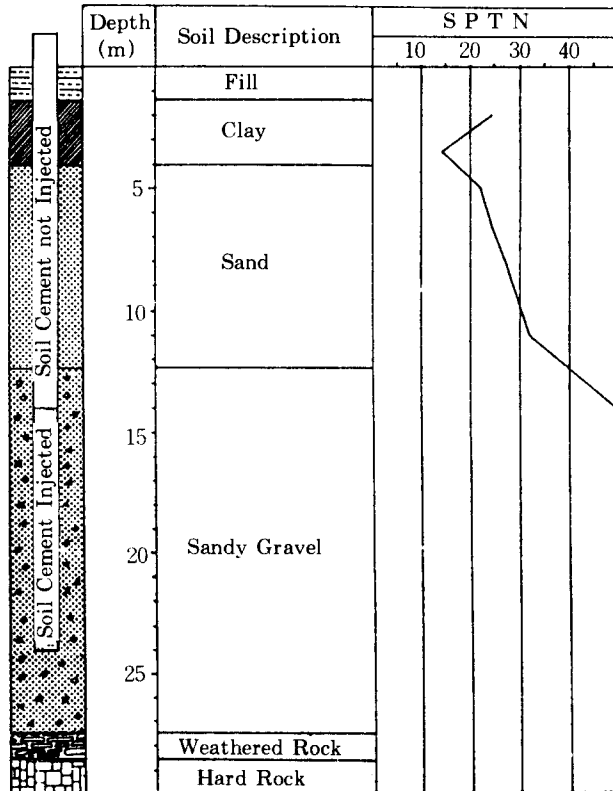


그림 13 지반조건 II

시멘트풀 주입구간 :  $f_{s1} = 5\text{ton}/\text{m}^2$

시멘트풀이 주입되지 않은 구간 :  $f_{s2} = 1.5\text{ton}/\text{m}^2$

극한선단지지력 =  $600 \times 0.4064^2 \pi / 4 = 77.8\text{ton}$

극한주면마찰력 =  $5 \times 0.4064 \pi \times 10 + 1.5 \times 0.406 \pi \times 14 = 29.7\text{ton}$

말뚝의 극한지지력 =  $168.4\text{ton}$

• 공식(2)적용

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

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

말뚝의 극한지지력 =  $220.3\text{ton}$

본건 공사는 초기에는 표준배합의 시멘트풀을 주입 시공하였다. 이들 표준배합 주면고정액을 사용한 말뚝들의 재하시험결과는 그림 14의 시험번호 1과 2호로 표시하였다. 말뚝의 극한지지력은 1번말뚝은 103.8ton이며 2번 말뚝은 48ton에 불과하였다. 이와같이 말뚝의 극한지지력이 낮은 이유는 ①최중항타가 곤란하여 선

단부가 시추공 바닥의 느슨한 모래, 자갈층을 관통하지 못하였고 ②선단부 고정액을 사용하지 않았으며 ③시공된 말뚝이 강관말뚝인 바 선굴착으로 선단지지력 발휘에 필요한 관내토 폐색조건이 만족되지 못하는 등인 것으로 분석되며 따라서 본건 말뚝들은 지지력의 거의 대부분을 주면마찰력에 의하고 있다고 판단된다.

이와같은 결과를 전제로 할 경우 시험말뚝 1번의 103.8ton 극한 지지력은 공식(1), (2)에서 계산한 90.6ton의 극한주면마찰력과 거의 일치하고 있다. 이와같은 가정은 지지력이 미달된 시험말뚝 1번을 K25 디젤해머로 추가항타한 말뚝의 재하시험결과를 살펴봄으로써 보다 확실하게 알 수 있다. K25디젤해머로 추가항타를 실시한 결과 약 1.5m의 선단부 관입이 가능하였다. 따라서 선단부 폐색효과가 이루어졌을 것으로 판단되며 시멘트풀에 의한 주면마찰력은 거의 상실되었을 것으로 판단된다. 그림 15에는 추가항타 전후의 하중-침하량관계를 대비하였다. 추가 항타 이전의 침하량은 말뚝재료

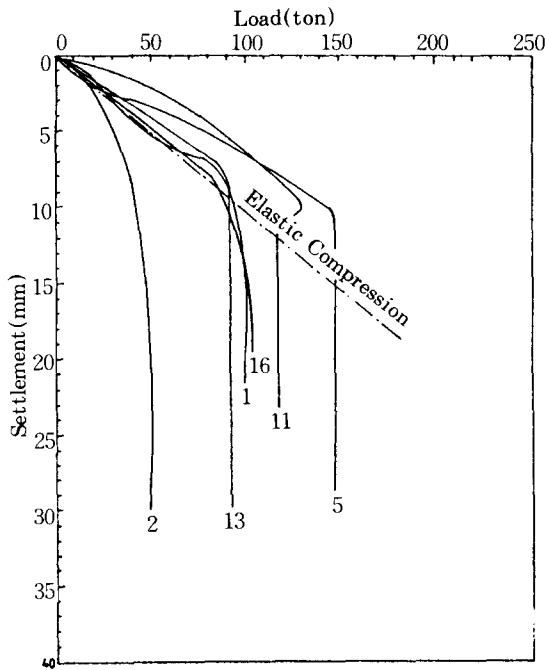


그림 14 말뚝재하시험결과 II-1

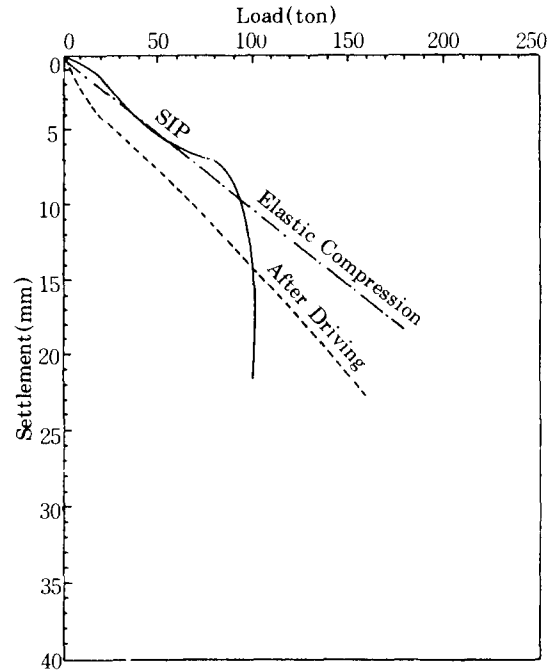


그림 15 추가항타 전후의 말뚝지지력 변화

의 탄성압축량과 거의 같거나 작은 값이되어 지지력의 대부분을 주면마찰력이 부담하고 있음에 반하여 추가하중 이후의 하중-침하량 관계는 탄성압축량을 초과하여 선단지지력에 의함을 알 수 있다.

시험말뚝 1 및 2의 재하시험결과를 참고하여 주면고정액의 시멘트 함량을 표준배합비의 2.5배로 높여서 시공한 결과 그림 16에 표시된 바와같이 대부분의 말뚝들이 80ton이상의 설계 허용지지력을 활용할 수 있었다.

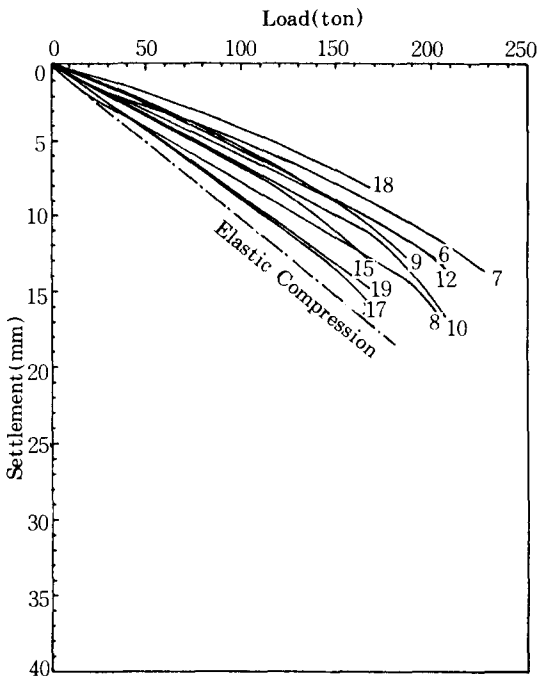


그림 16 말뚝재하시험결과 II-2

최대시험하중까지 재하시 항복이 발생하지 않은 10개 재하시험 결과를 역으로 해석해 보면 말뚝의 평균 주면마찰력은  $14\text{ton}/\text{m}^2$  이상이 된다. 이 값은 공식(1) 및 (2)에서 규정한 단위면적당 주면마찰력의 상한값인  $5\text{ton}/\text{m}^2$ 의 2.8배가 되며 굴착으로 인한 지반교란의 영향을 감안하여 N값의 상한값을 25로 제안할 때  $f_s = 0.56\bar{N}$  ( $N \leq 25$ )의 관계식을 얻을 수 있

다. 이 관계식은 시공사례 I에서 분석한  $f_s = 0.68\bar{N}$ 보다는 낮은 값이지만 두가지 경우 모두 항복 또는 극한상태가 확인되지 못한 시험결과와의 비교인 바 그 절대값을 비교하는 것은 의미가 없다. 그러나 이 값들은 현재 설계에서 사용되는 항타말뚝의 지지력공식 및 일본의 매입말뚝 지지력 공식과는 근본적으로 상이한 바 향후 이에 관한 심층연구가 되어야 할 것이다.

그러나 시멘트풀 주입공법적용시 말뚝의 지지력이 이상에서 알아본 것처럼 양호하게 나타나는 것만은 아니다. 그림 14에는 같은 현장에서 실시한 재하시험 결과중 분명한 파괴가 발생한 것들이다. 이들 결과중 시험결과 1 및 2는 시공시 시멘트 함량이 표준배합비인 굴착토사  $1\text{m}^3$ 당  $120\text{kg}$ 으로 공법의 원리에 맞추어 시공한 말뚝들이지만 기타는 표준배합의 2.5배인 주면고정액을 사용하였다. 이처럼 시멘트 배합을 상향 조정한 경우에도 상당수의 지지력 미달상태가 발생하는 원인은 현재로서는 규명할 수 없으며 향후 보다 정밀한 분석이 요구되는 분야이다.

### 11.5.3 시공사례 III

본건 공사는 그림 17에 표시한 것과 같은 지반조건에서 약 8.0m의 터파기를 실시한 곳에 400mm의 직경의 PC말뚝을 설치하고 말뚝의 설계하중은 70ton으로 계획되었다. 선굴착은 직경 450mm의 연속오거를 사용하였고 굴착은 N값이 50정도인 모래 자갈층까지 실시되었다. 본건 공사에서는 표준배합비 보다 1.4배 정도 높은 시멘트함량의 주면고정용 시멘트풀이 주입되었으며, 모래 자갈층의 영향으로 말뚝 선단부는 선굴착 깊이보다도 얇은 곳까지 관입되었으며 말뚝의 관입깊이는 7.0m 정도였다.

이와같은 경우 주면고정액의 시멘트 함량을 표준배합비의 2.5배 정도로 높여주거나 선단부에 선단부고정액을 주입하여야 하지만 이와같은 조치가 취해지지 못한 상태에서 시공이 완료되었다. 더구나 본건 현장의 부근은 지반진



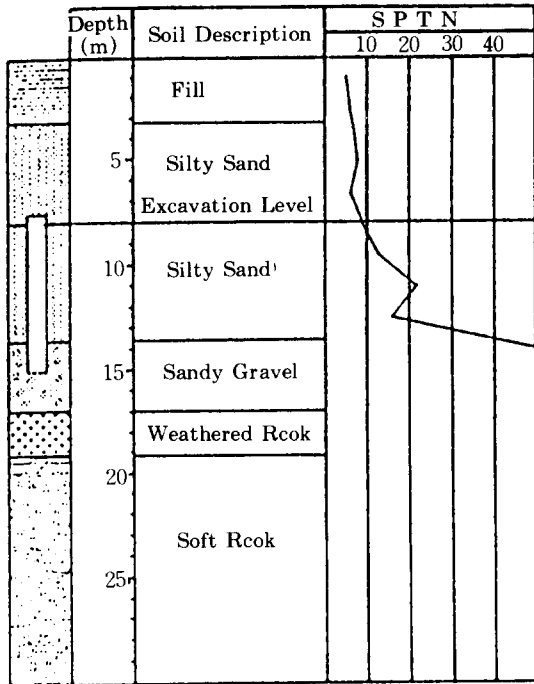


그림 17 지반조건 III

동 및 소음에 예민한 반응이 발생하여 최종항타는 실시하지 못하고 오거중량으로 압입정착시키는 정도로 시공이 마무리 되었다.

본건 말뚝의 경우 시공여건을 보아 말뚝의 선단지지력은 거의 발휘되지 못할 것으로 판단된다. 말뚝의 주변마찰력은 공식(1), (2)를 적용하면 아래와 같이 계산된다.

- 공식(1) 적용

$$\bar{N}_s = 22.0$$

$$f_s = 0.1 \times \bar{N}_s = 2.2 \text{ ton/m}^2 \quad (f_s \leq 5 \text{ ton/m}^2, \text{ O.K.})$$

$$\text{극한주면마찰력} = 2.2 \times 0.4\pi \times 7.0 = 19.4 \text{ ton}$$

- 공식(2) 적용

$$\bar{N}_s = 22.0 \quad (\bar{N}_s \leq 25, \text{ O.K.})$$

$$f_s = 0.2 \times \bar{N}_s = 4.4 \text{ ton/m}^2$$

$$\text{극한주면마찰력} = 4.4 \times 0.4\pi \times 7.0 = 38.7 \text{ ton}$$

본건 현장에서는 2개의 말뚝재하시험이 실시되었으며 그림 18에는 말뚝재하시험 결과를 나타내었다. 시험말뚝의 극한지지력은 시험말

뚝 1번은 66.5ton, 시험말뚝 2번은 51.9ton으로 나타나고 있어 공식(1) 또는 공식(2)에서 예상한 주변마찰력 보다는 높다. 이는 시멘트 함량이 표준배합비의 1.4배인 점을 고려하면 타당한 결과로 판단된다.

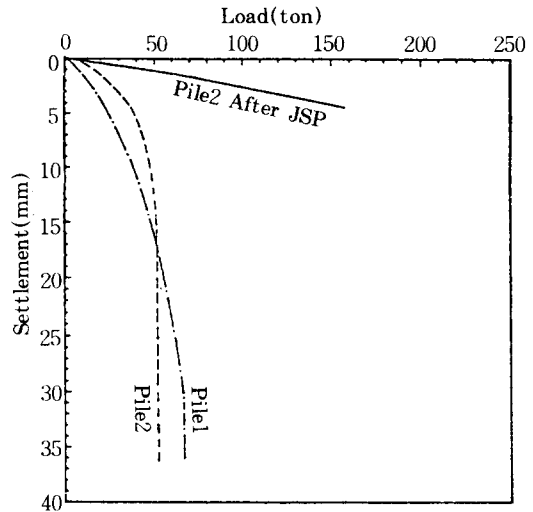


그림 18 말뚝재하시험결과 III

본건 현장에서는 말뚝들의 시공이 완료된 상태에서 지지력 확인이 실시되어 별도의 보강대책이 수립되었다. 보강방법은 시공된 말뚝의 선단부를 중심으로 하여 선단부 위쪽으로 1.6m, 선단부 아래쪽으로 4.1m의 JSP(jumbo special pattern)를 말뚝의 좌우에 각 1개공씩 2개공의 보강을 실시하였다.

JSP보강후의 말뚝지지력을 그림 18과 함께 표시하였다. 본건 재하시험은 시험번호 2번 말뚝에 대하여 실시하였다. 그림에서 나타나고 있는 것처럼 보강이전에 51.9ton의 극한지지력을 갖고 있었으나 JSP보강이후에는 최대시험하중 157.7ton 재하시험까지 극한 또는 항복현상이 발생하지 않아 설계지지력 조건을 만족하였다.

## 6. 결 언

최근들어 말뚝기초 시공법은 종래의 직항타

공법보다는 지반진동, 소음 등의 문제로 선굴착공법으로 전환되는 추세에 있다. 선굴착 시공법의 경우, 말뚝의 지지력이 저하되고 시공비는 상승하는 부담 외에 이 분야에 대한 기술 수준이 낮아 상부구조의 안전이 문제되는 경우도 발생하고 있다.

본고에서는 지반조건별 선굴착 시공법의 원리와 지지력에 대하여 국내의 시공사례를 중심으로 알아 보았다. 지반조건에 따라 선굴착 및 최후항타 또는 시멘트풀 주입 그리고 시멘트 배합비 등이 현장여건에 부합되도록 결정되어야 함을 알 수 있다.

그러나 국내의 경우 이 분야의 시공실적이 그리 많지 않아 상당한 공사비 낭비요인이 발생하고 있으며, 지지력 미달사태도 나타나고

있다. 이러한 상황은 최근 조사발표된 표 2 및 표 3의 내용이 뒷받침하고 있다. 즉 설계지지력을 확인하기 위해 실시된 재하시험 결과 판정된 허용지지력이 설계지지력에 크게 미달되는 경우 또는 크게 초과하는 경우 등 시공품질에 따른 변화폭이 심하게 나타나고 있기 때문이다.

선굴착 말뚝시공법을 채택할 경우에는 반드시 사전에 시공법 선정을 위한 시험시공을 실시하여 설계하중 조건에 부합하는 시공방법을 결정할 필요가 있으며 시공시에는 표 4에 나타난 바와 같은 시공관리사항을 준수하여야 소정의 기초구조물 안전이 확보될 것으로 판단된다.

표 2 극한하중이 나타난 경우 여러가지 허용하중결정법 비교(선굴착 및 시멘트풀주입공법)

번호	말뚝 규격		설계하중 (ton)	허용 하 중 / 설 계 하 중						
	직경(mm)	길이(m)		1	2	3	4	5	6	7
<u>PC말뚝</u>										
163	350	7.0	40.0	0.46	0.66	0.69	-	0.15	0.20	0.31
164	350	10.2	40.0	0.38	0.41	0.21	-	0.34	0.36	0.45
165	350	9.5	44.0	0.67	1.00	0.74	0.88	1.00	1.00	0.84
166	400	8.0	50.0	0.53	0.66	0.50	0.53	0.49	0.56	0.47
167	400	13.5	50.0	0.77	1.00	1.00	0.92	0.88	1.00	0.97
168	400	13.0	50.0	0.67	0.87	0.75	0.87	0.78	0.82	0.89
169	400	13.0	50.0	0.70	0.87	0.85	0.81	0.80	0.84	0.88
170	400	6.5	50.0	0.55	0.85	0.85	0.85	0.28	0.35	0.29
171	400	6.0	60.0	0.71	0.83	0.81	0.83	0.81	0.88	0.76
172	400	6.3	60.0	0.74	0.92	-	-	0.66	0.77	0.64
173	400	7.0	60.0	0.56	0.63	0.61	-	0.55	0.58	0.61
174	500	20.7	100.0	0.58	0.88	0.88	0.75	0.75	0.76	0.78
<u>PHC말뚝</u>										
197	350	4.0	65.0	0.34	0.38	0.38	0.49	0.26	0.29	0.25
198	350	4.0	65.0	0.42	0.50	0.34	-	0.22	0.32	0.13
199	400	12.4	80.0	0.50	0.50	0.48	0.50	0.51	0.56	0.48
200	400	11.2	80.0	0.73	0.50	0.50	0.86	0.60	0.78	0.54
201	400	10.0	80.0	0.67	0.75	0.58	0.71	0.59	0.72	0.55
202	400	13.0	80.0	0.45	0.50	0.38	0.50	0.32	0.39	0.28
집 계(평균)				0.58	0.71	0.62	0.73	0.56	0.62	0.56
항복하중 확인분					18/18	17/18	13/18	18/18	18/18	18/18

주 : 1. 극한하중(말뚝직경의 10% 전침하량 발생하중)

2.  $S - \log t$
3.  $ds/d(\log t) - P$
4.  $\log P - \log S$
5. 0.25 inch 순침하량
6. 0.25D 순침하량
7. Davisson기준

표 3 항복하중이 나타난 경우 여러가지 허용하중결정법 비교(선굴착 및 시멘트풀주입공법)

번호	말뚝 규격		설계하중 (ton)	허용하중/설계하중						
	직경(mm)	길이(m)		1	2	3	4	5	6	7
	<u>PC말뚝</u>									
151	350	14.0	40.0		0.99	0.80	0.90	0.81	0.93	0.76
152	350	14.0	40.0		1.13	0.66	0.75	1.06	1.19	1.06
153	350	8.5	40.0		1.25	1.00	1.00	1.19	(1.25 ↑)	1.21
154	350	14.5	40.0		1.00	0.81	0.88	(1.10 ↑)	(1.10 ↑)	1.04
155	350	8.6	40.0		1.31	0.69	0.88	1.21	(1.31 ↑)	1.14
156	350	13.7	45.0		(1.25 ↑)	(1.25 ↑)	(1.25 ↑)	(1.25 ↑)	(1.25 ↑)	1.15
157	400	6.5	50.0		0.75	(1.00 ↑)	(1.00 ↑)	0.66	0.81	0.66
158	400	7.2	50.0		(1.13 ↑)	(1.13 ↑)	(1.13 ↑)	0.68	0.92	0.61
159	400	9.0	55.0		(1.00 ↑)	0.75	(1.00 ↑)	0.65	0.86	0.69
160	400	5.5	60.0		1.13	0.58	0.83	0.88	1.08	0.88
161	400	9.5	60.0		(1.00 ↑)	(1.00 ↑)	0.88	(1.00 ↑)	(1.00 ↑)	0.98
162	400	19.0	80.0		1.13	1.19	1.19	1.27	1.33	1.40
	<u>PHC말뚝</u>									
187	350	8.2	50.0		1.25	(1.25 ↑)	1.00	(1.25 ↑)	(1.25 ↑)	1.20
188	350	7.5	50.0		1.13	0.74	0.67	0.68	0.87	0.67
189	350	7.5	50.0		(1.25 ↑)	(1.25 ↑)	(1.25 ↑)	(1.25 ↑)	(1.25 ↑)	1.04
190	350	8.6	50.0		1.25	(1.25 ↑)	1.00	(1.25 ↑)	(1.25 ↑)	0.96
191	350	10.0	60.0		(1.14 ↑)	(1.14 ↑)	(1.14 ↑)	(1.14 ↑)	(1.14 ↑)	1.13
192	350	13.0	60.0		1.13	0.42	0.88	1.01	1.10	0.96
193	350	4.0	65.0		1.00	0.50	0.62	0.81	0.94	0.63
194	400	10.2	75.0		0.73	(1.13 ↑)	(1.13 ↑)	0.87	1.13	0.82
195	400	9.0	80.0		(1.16 ↑)	1.03	0.85	0.78	0.91	0.79
196	400	13.9	80.0		(1.05 ↑)	(1.05 ↑)	1.00	(1.05 ↑)	(1.05 ↑)	1.04
집 계(평균)					1.10 ↑	0.94 ↑	0.97 ↑	0.99 ↑	1.09 ↑	0.95
항복하중 확인분					14/22	12/22	15/22	14/22	12/22	20/20

주 : 1. 극한하중(말뚝직경의 10% 전침하량 발생하중)

2.  $S - \log t$
3.  $ds/d(\log t) - P$
4.  $\log P - \log S$
5. 0.25 inch 순침하량
6. 0.25D 순침하량
7. Davisson기준

표 4 선굴착공법의 시공관리

구 분	선굴착 및 최종항타공법	선굴착 및 시멘트풀 주입공법
말뚝의 지지력	선단지지력	주면마찰력+선단지지력
굴착심도	충분한 지지층까지 굴착	충분한 지지층까지 굴착
공벽유지	공벽붕괴 방지 (필요시 시멘트풀+벤토나이트 주입)	공벽붕괴 방지 (필요시 시멘트풀+벤토나이트주입)
말뚝관입심도	최종굴착심도보다 굴착직경 또는 말뚝직경이상 깊은곳까지 말뚝관입 <sup>1)</sup>	말뚝의 선단부가 최종굴착심도보다 50cm 범위 이내의 높은 곳까지만 관입 <sup>2)</sup>
시멘트풀의 품질	해 당 없 음	주면고정액의 시멘트 배합비 유지 <sup>3)</sup> 선단 부고정액의 시멘트 배합비 유지 <sup>4)</sup>

- 주) 1) 선굴착으로 인하여 선단지지층의 교란이 발생하므로 선단지지력을 얻기 위해서는 선굴착 깊이보다 가능한 한 깊은곳까지 최종항타가 필요하다.  
 2) 부배합의 시멘트풀을 선단부 고정용으로 사용할 경우 말뚝의 선단부가 선단부 고정액내에 위치하도록 한다.  
 3) 주면고정액의 표준시멘트 배합비는 물:시멘트:벤토나이트=450ℓ:120kg:25kg  
 4) 선단부고정액은 물-시멘트비가 0.7~0.8정도가 되게 하며 말뚝직경에 따라 시멘트함량을 400~800kg이 되도록 한다.

### 참 고 문 헌

1. 이명환, "말뚝기초", 대한토목학회 계속교육 강좌 교재, 1993.
2. 이명환, 윤성진 "SIP시공말뚝의 지지력 특성", 한국지반공학회, 대한건축학회 공동주최, 1993년도 봄학술 발표회 논문집, pp.91-115, 1993.
3. 이명환, 이원제 등, "항타진동과 말뚝-흙의 상호작용", 한국건설기술연구원 연구보고서, 1991.
4. 이명환, 홍헌성, 이원제, "말뚝기초의 최적설계", 한국지반공학회 창립 10주년기념 및 '94가을학술발표회 논문집, 사단법인 한국지반공학회, 1994. 10., pp.60-76.
5. 日本 土質工學會, "杭基礎の低騒音, 低振動施工法と支持力", 現場技術者のための土と基礎シリーズ, 1985.
6. 山海堂, "鋼管杭の公害対策工法", 1986.