매입 말뚝공법의 지지력 특성

Bearing Capacity Characteristics of Auger-Drilled Piling

이명환[1] Lee, Myung-Whan 홍헌성[2] Hong, Hun-Sung 조천환[3] Cho, Chun-Whan 이장덕[4] Yi, Chang-Tok
이원제[5] Lee, Won-Je 전영석[6] Jun, Young-Suk

[1] 파일테크 대표, Principal, PILETECH consulting engineers.(02) 3402-2361
[2] 파일테크 대표, Principal, PILETECH consulting engineers.
[3] 삼성물산(주), (02) 2145-6584
[4] 파일테크 이사, Manager, PILETECH consulting engineers.
[5] 파일테크 차장, Senior researcher, PILETECH consulting engineers.
[6] 파일테크 대리, Researcher, PILETECH consulting engineers.

SYNOPSIS :

The construction method of piling in the domestic construction sites can be classified as driven and auger-drilled pile. Pile driving is an inherently noisy operation which causes severe environmental problems such as noise, ground vibration and air pollution. These environmental restrictions would result in the change of construction methods during piling operation. It, therefore, is necessary to adopt an appropriate piling method to satisfy the bearing capacity of pile and environmental problems at design stage. The economical piling method should be reviewed as well.

In this paper, the principle and methods of the auger-drilled piling used in domestic construction sites are discussed. The bearing capacity of these piling methods are also examined on the basis of the pilot tests and the pile load test results.

1. 서 론

최근들어 국내건설업체가 당면한 여러 가지 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, 우리나라 말뚝건설의 대종을 이루고 있는 항타공법은 소음, 진동, 매연 등의 건설공해로 사용이 제한되어 있고, 이로인한 민원등의 문제가 발생할 경우는 공사중에 매입공법으로 설계변경을 실시해야하는 등 시공상 막대한 지장을 초래하는 경우가 자주있다. 따라서 항타공법은 점차 적용이 감소하고 있으며 대신 각종 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 뿐만아니라 도시외곽지역, 수도권 등으로 확산되고 있으며, 그 변화하는 추세가 매우 급하여 최근에는 지방의 중소도시에서도 직항타공법의 적용이 곤란한 경우가 많이 나타나고 있다.

현재 우리나라에서 매입공법으로써 주로 이용되고 있는 시멘트풀 주입공법들은 첫째, [오가 배토굴착 + 시멘트풀 주입 + 경타공법], 둘째, [강관 케이싱을 이용한 굴착 + 시멘트풀 주입 + 말뚝낙하공법], 셋째, [오가 무배토굴착 + 선단고정액 주입 + 주면고정액 주입공법] 등 3종류가 있다. 이들 공법들은 대부분 저공해 말뚝공법으로서 외국에서 도입되어 개량 혹은 보완 된 것인데 이들의 큰 차이는 굴착방법과 말뚝의 최종 설치 방법에 있으며, 이에 따라 각 공법에서의 시공성 및 지지력 특성도 크게 차이가 나고 있다. 또한 상기공법과는 원리가 다르지만 최근에 도입된 매입식 저진동 공법으로써 팽창말

뚝이 이용될 전망이다.

본 논문에서는 현재 국내에서 이용되고 있거나 이용가능성이 있는 매입공법들에 대한 기술현황과 이들의 원리 및 방법에 대해 논의해 보고 또한 시험시공 및 재하시험을 통한 각종 매입공법들의 시공성 및 지지력 특성에 대해 고찰해 보았다.

2. 매입말뚝공법의 종류 및 현황

국내에서 일반적으로 적용되고 있는 매입말뚝공법은 크게 시멘트풀 주입여부에 따라 선굴착 및 최종항타 공법, 시멘트풀 주입공법으로 구분할 수 있다.[1] 이외에 매입공법으로써 속파기 공법이 있지만 많이 이용되고 있지는 않다. 선굴착 및 최종항타 공법의 경우 선굴착후 기성말뚝을 삽입하고 최종항타 하므로 말뚝지지력은 거의 대부분 선단지지력에 의존하며, 따라서 지지력의 크기가 최종항타에 좌우되므로 근본적으로 저공해 말뚝시공법으로서 한계가 있다. 또한 지지력이 항타말뚝 또는 시멘트풀 주입공법에 비하여 불리하므로 많이 이용되지 않고있다.[1] 시멘트풀 주입공법의 경우는 선굴착 및 최종항타공법들의 단점을 보완하여 사용되고 있는 것이 많으며 현재에 주로 이용되는 것들은 그림에서 설명하는 공법을 기본원리로 한 것으로서, 이들은 크게 3종류로 나누어 진다. 또한 이들과는 기본원리가 다르지만 무진동 공법으로써 이용가능한 팽창말뚝도 사용될 전망이다.

- 〔오거배토굴착 + 시멘트풀 주입 + 경타〕 공법

본 공법(일명 SIP 공법)의 시공은 오거를 사용하여 지반을 굴착하며 이 경우 보통 굴착액은 사용하지 않는데 오가는 연속오거가 일반적으로 사용되어 배토형이 된다. 굴착이 진행되어 오거의 선단부가 말뚝의 선단위치에 도달하게 되면 주면고정액을 주입하면서 오가를 인발한 후 기성말뚝을 삽입하고 최종항타를 실시한다(사진 1참조). 따라서 본 공법은 시공성이 매우 뛰어나며 시공비도 비교적 경제적이다. 이 공법은 선굴착 및 최종항타공법에서와 같이 선단지지력을 보완하기 위해서 최종항타를 실시하므로, 따라서 진동소음 측면에서의 확인과정이 필요하며 또한 기성말뚝(특히 강관말뚝) 선단부에서의 폐색 여부도 불확실하다. 배토형은 관례로 주면지지력에서의 불리한 측면(굴착면의 교란 및 응력이완, 굴착공벽의 함몰 등)이 있어 현재에는 주면고정액의 배합비를 상승시켜 보완하고도 있으나 근본적으로 선굴착 공벽유지 곤란, 최종경타에 따른 공해문제 등은 해결해야 될 문제로 지적되고 있다.

- 〔강관케이싱굴착 + 시멘트풀 주입 + 말뚝낙하〕 공법

자갈층의 존재 또는 지하수의 흐름 등으로 선굴착 공벽의 유지가 불가능할 경우에는 폐합 강관케이싱 외부에 나선형 비트가 부착된 장비를 사용하여 선굴착한 후 시멘트풀을 주입하고 기성말뚝을 설치하는 이 공법(일명 SAIP 공법)의 경우(사진 2참조) 강관케이싱이 지반내에 묻혀있는 상태에서 기성말뚝을 낙하하여 점용접된 선단부를 분리시키면서 말뚝을 매설하기 때문에 케이싱 인발시 불완전한 선단부가 조성될 가능성이 있으며, 말뚝의 수직성에 문제가 있다. 또한 케이싱 인발시 공벽붕괴에 따른 주면지반의 인위적인 조성이 주면지지력에 악영향을 끼칠 수도 있지만 붕괴성 지반의 매입말뚝 시공에는 큰 장점이 있다. 그러나 선단부 용접, 케이싱 관입 및 인발로 인하여 시공속도가 늦고 시공비가 높아지는 문제가 있으며, 강관말뚝은 적용하기가 곤란하다.

- 〔오거무배토굴착 + 선단 및 주면고정액 주입 + 말뚝회전삽입〕 공법

본 공법(일명 COREX 공법)은 교반날개가 달린 오거로 지반을 굴착하는데 이경우 오거에는 연속날개가 아닌 교반용날개가 달려있으므로 무배토 굴착이며 또한 공벽붕괴 및 지반의 이완을 막기위해 굴착액을 주입하면서 굴착을 실시한다. 소정의 위치까지 굴착이 완료되면 선단고정액과 주면고정액을 차례로 주입하면서 오거를 인발한 후 선단금구가 달린 말뚝을 회전하면서 매입하되 굴착면으로부터 2D되는 위치에 말뚝의 선단부를 고정시킨다(그림 1참조). 이론적으로 본 공법은 매입말뚝공법에서 발생할 수 있는 모든 문제를 해결하도록 고안되어 환경적인 측면 및 지지력 측면에서도 상당히 유리하지만 이를 위해서는 철저한 품질관리가 요구되며 이수처리, 시공속도 등 시공성 및 경제성 등이 문제로 지적되고 있다.

- 팽 창 말 뚝 공 법

이 말뚝(일명 SOILEX 공법)은 지반조건 또는 말뚝의 지지력에 따라 말뚝을 타입, 압입 하거나 혹은 기 천공된 공에 말뚝을 삽입한 후 말뚝에 붙은 작은 파이프를 통해 말뚝선단에 접혀있는 팽창체에 시멘트몰탈을 주입하여 팽창체를 팽창시키는 것이다(그림 2참조). 팽창체가 형성되므로써 주변지반을 압축하

게 되어 지지 지반의 역할을 하게되고, 따라서 말뚝을 지지층까지 설치할 필요가 없으므로 비용의 절감이 가능하며 시공속도도 양호한 편이다. 특히 본 공법은 진동 및 소음 측면에서 완벽한 무공해 공법으로 인정되고 있으며 특히 팽창체가 형성될 때 주입량과 주입압을 측정(일종의 Pressuremeter test)하여 이들의 관계로부터 말뚝의 극한 지지력을 구할 수 있어 품질관리 측면에서 대단히 유리하며 또한 언더피닝에 의한 기존구조물의 보강 및 앙카에의 이용도 가능하다. 그러나 경제성 및 말뚝간격 유지에 따른 총지지능력의 한계 등은 해결해야 할 점으로 지적되고 있다.

3. 매입말뚝공법의 지지력특성

3.1 지지력 예측

국내의 경우 선굴착 및 시멘트풀 주입공법으로 시공된 말뚝의 지지력을 지반조건과 연계하여 계산하는 지지력 공식은 없다. 「구조물 기초 설계기준」은 매입공법이 도입되기 이전인 1986년도에 제정되었으므로 이에 관한 지지력 산정식이 소개되지 못했다. 또한 1992년 개정된 건설부 제정 「도로교 표준시방서」에는 속파기 말뚝공법이 포함되었으나 선굴착 및 시멘트풀주입 공법에 대한 내용은 없다. 즉, 국내에서는 현재 이와같은 방법으로 시공된 말뚝의 지지력을 예측하는 공식은 찾아볼 수 없음을 알 수 있다.

일본의 경우 매입말뚝의 지지력 계산은 대부분 표준관입시험결과치 N값을 이용한 공식이 사용되고 있으며, 기관 또는 공법에 따라 상이한 기준이 적용되고 있으며 이를 요약하면 다음 표 1과 같다.

[표 1]에서와 같이 대부분의 매입공법들은 건설성기준(①②)을 토대로 작성되었고, 이 식들은 각 공법의 지지력 특성을 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 공법의 특성상 선단지지력은 $q_b = 30\overline{N}$을 기준하여 $20\overline{N} \sim 30\overline{N}$ 까지 분포시켰음을 볼 수 있는데, 이들의 크기는 선단부 조성 또는 최종항타 여부 및 이들의 확실성에 따라 변하고 있음을 알 수 있다. 즉, 선단부에 타격이 확실히 보장되는 공법(④)의 경우는 최대치를 사용하였고 경타(⑤) 또는 선단부가 조성 되는 공법들(③⑥⑦⑧)은 q_b값을 $25\overline{N}$정도로 적용시키고 있음을 알 수 있다. 또한 주면마찰력의 경우도 시멘트풀 주입여부 및 굴착 방법에 따라 마찰력치가 변화되고 있는데, 특히 주면에 시멘트풀을 주입하지 않거나(⑤⑥) 속파기(⑦) 및 회전 삽입인 경우(⑧)는 마찰력을 작게 인정하고 있음을 알 수 있다.

결국 [표 1]로부터 알 수 있는 것은 지지력 증가는 선단부의 경우 최종항타를 보장하거나 혹은 부배합시멘트에 의한 선단부의 조성을 통해서 얻을 수 있고, 또한 주면부의 경우는 말뚝의 직경보다 큰 구멍에 시멘트풀을 주입함으로써 이루어 질 수 있음을 알 수 있다. 특히 실시공 결과에 따르면 시멘트풀 주입공법의 주면마찰력은 주면고정을 위한 흙-시멘트의 일축압축강도에 비례하는 바, 주변지반이 연약지반이 아닐경우 표준주면고정액(시멘트 $120\ \mathrm{kg}$+물 $450\ \ell$ +벤토나이트 $25\ \mathrm{kg}$/흙-시멘트 m^3)보다 시멘트 함량을 2.5 배 정도 높여 시공하면 상당히 큰 주면마찰력을 얻을 수 있으며, 많은경우 이 주면마찰력만으로도 소정의 지지력을 기대할 수 있는 것으로 보고되고 있다.

팽창말뚝의 경우 매입후 시멘트 몰탈을 주입시켜 말뚝을 팽창시키는 것이므로 지지력 특성이 기존의 매입말뚝과는 다르다. 그러나 그 원리는 정역학 및 경험적 지지력 공식에서 유도 되었으므로 근본적으로는 같다. [표 2]에서 모래층의 경우 q_c와 N의 일반적인 관계 q_c = 40 N을 이용하면 매입말뚝의 선단지지력 공식과 같아지게 된다. 다만 팽창말뚝의 경우 시멘트 몰탈을 주입할 시 측정한 주입압력을 이용하여 지지력을 확인할 수 있는 것이 다를 뿐이다. 이러한 방식을 이용하여 예측한 지지력치에 대한 확인이 모든말뚝에 대해 현장에서 즉시 가능하게 되므로 본 공법은 품질관리에 있어 대단히 유리하다.

〔표 1〕 각종 매입공법의 지지력 산정식[5]

시 공 법	선단지지력 산정법	말뚝선단부의 조건	주면마찰력의 산정식	비고
① 타격공법	$R_p = 30\overline{N}A_p$	$\overline{N}$ 은 말뚝선단부의 평균치 $\overline{N} \leq 60$	$R_F = (\frac{1}{5}\overline{N_s}L_s + \frac{1}{2}\overline{qu}L_c)\phi$ $\overline{N_s} \leq 50$ $\overline{q_u} \leq 20\ (\overline{q_u} = 1.25\ N)$	건설성 고시 기준
② 시멘트풀 주입공법	$R_p = 20\overline{N}A_p$	$\overline{N}$ 은 말뚝선단부근의 평균치 $\overline{N} \leq 50$	$R_F = (\frac{1}{5}\overline{N_s}L_s + \frac{1}{2}\overline{qu}L_c)\phi$ $\overline{N_s} \leq 25$ $\overline{q_u} \leq 10\ (\overline{q_u} \leq 1.25\ N)$	건설성 고시 기준
③ 선굴착 근고공법	$R_p = 20\overline{N}A_p$	$\overline{N}$ 은 말뚝선단부근의 평균치 $\overline{N} \leq 60$	$R_F = (\frac{1}{5}\overline{N_s}L_s + \frac{1}{2}\overline{qu}L_c)\phi$ $\overline{N_s} \leq 25$ $\overline{q_u} \leq 10$	
④ 선굴착 최종타격 공법	$R_p = 30\overline{N}A_p$	$\overline{N}$ 은 1D 4D 평균치 $\overline{N} \leq 60$	$R_F = (\frac{1}{5}\overline{N_s}L_s + \frac{1}{2}\overline{qu}L_c)\phi$ $\overline{N_s} \leq 25$ $\overline{q_u} \leq 10$	건설성 인정 공법
⑤ 선굴착 확대근고 공법	$R_p = 25\overline{N}A_p$	$\overline{N}$ 은 1D 4D 평균치 $\overline{N} \leq 60$	$R_F = (0.9L_c + 2.4L_s)\phi$	건설성 인정 공법
⑥ 선굴착 확대근고 공법	$R_p = 25\overline{N}A_p$	$\overline{N}$ 은 1D 4D 평균치 $\overline{N} \leq 60$	$R_F = (\frac{1}{5}\overline{N_s}L_s + \frac{1}{2}\overline{qu}L_c)\phi$ $\overline{N_s} \leq 25$ $\overline{q_u} \leq 10$ 주면고정액을 사용하지않는 경우	건설성 인정 공법
⑦ 속파기 확대근고 공법	$R_p = 25\overline{N}A_p$	$\overline{N}$ 은 1D 4D 평균치 $\overline{N} \leq 60$	$R_F = 1.5\ L\phi$	건설성 인정 공법
⑧ 회전 근고공법	$R_p = 25\overline{N}A_p$	$\overline{N}$ 은 1D 4D 평균치 $\overline{N} \leq 60$	$R_F = (\frac{1}{5}\overline{N_s}L_s + \frac{1}{2}\overline{qu}L_c)\phi$ $R_F = 1.5\ L\phi$	건설성 인정 공법

〔표 2〕 팽창 말뚝의 지지력 공식[7]

지반 / 방법	모 래 자 갈 층	실 트 층	점 토 층	비 고
관입시험치 이 용 방 법	$P = f \cdot q_c \cdot A_p$ f는 모래자갈층 0.5 실트층 1.0		$P = C_u(9A_p + \alpha A_s)$ $C_u \leq 50$ kpa $:\alpha = 0.8$ $C_u > 50$ kpa $:\alpha = 0.5$	P : 극한지지력 C_U : 비배수전단강도 P_I : 주입압력 A_P : 선단부 면적 A_S : 측면부 면적
주 입 압 이 용 방 법	$P = 3.6A_P \cdot P_I + 50KP_a \cdot A_s$	$P = 1.9A_P \cdot P_I + 50KP_a \cdot A_s$	$P = P_I/5.5 \cdot (9A_p + \alpha A_s)$ $C_u \leq 50$kpa $:\alpha = 0.8$ $C_u > 50$kpa $:\alpha = 0.5$	

3.2 재하시험에 의한 지지력 특성 확인

앞서 언급한 매입말뚝공법으로 시공된 현장말뚝에 대하여 정(靜)재하시험과 동(動)재하시험 방법으로 지지력을 확인한 사례를 소개함으로써 매입말뚝 공법들의 지지력 특성, 시공품질의 지지력 거동의 영향등을 살펴본다.

o 〔오거배토굴착 + 시멘트풀 주입 + 경타〕 공법

사례 1

본건 현장은 고층아파트 신축공사 현장으로서 부지조성시 매립한 상부 매립토층에 전석이 포함되어 있어 직항타공법으로는 시공이 곤란하였기 때문에 상기공법이 적용되었던 예이다.

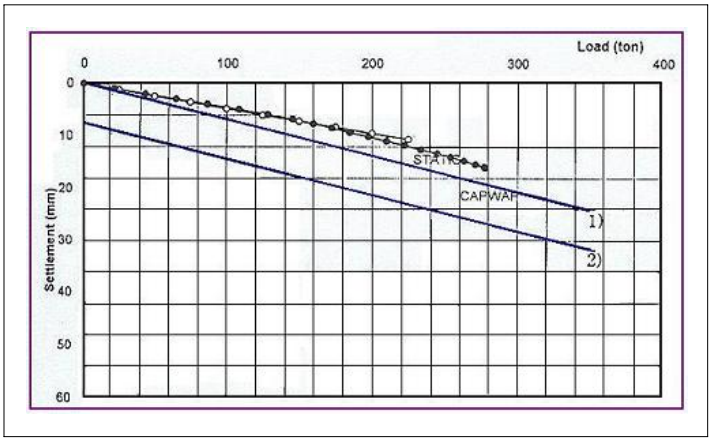
시공말뚝은 ϕ 450 mm PHC말뚝이었으며 설계지지력은 100 ton, 최종관입심도는 21.6 m가 기록되었다. 말뚝선단부는 SPT N값이 50을 상회하는 단단한 지반까지 오가굴착한 후 최종경타로 관입되어 있었다.

본건 시험말뚝에 대해서는 주변의 반력말뚝을 이용한 정재하시험 및 동재하시험이 병행하여 실시되었는데 먼저 동재하시험이 수행되었고 2일 후에 정재하시험이 실시되었다.

먼저 수행된 동재하시험 결과에서 분석된 전체지지력은 278.0 ton(주면지지력 208.0 ton + 선단지지력 70.0 ton)으로서 주면마찰지지 상태가 더 우세하게 나타나는 매우 양호한 지지거동을 보여주고 있는 것으로 판단할 수 있었다.

정재하시험은 설계하중의 225 %인 225 ton까지 재하하였으며 이 때까지의 전체 침하량은 약 10 mm정도가 기록되었고, 말뚝의 항복이나 극한상태가 발생하지 않았다. 따라서 정재하시험의 경우에도 매우 양호한 지지거동을 보여주고 있음을 확인할 수 있었다.

〔그림 3〕 에는 이들 두 시험방법에서 나타난 하중-침하량 관계곡선을 도시하였는데 우선 두 시험결과가 양호하게 부합하고 있음을 볼 수 있으며, 말뚝재료의 탄성침하량 보다도 작은 말뚝머리 침하량이 측정 또는 예측됨으로써 재하하중의 상당부분이 주입된 시멘트풀의 양생에 의한 주면마찰력으로 지지되고 있음을 알 수 있다.



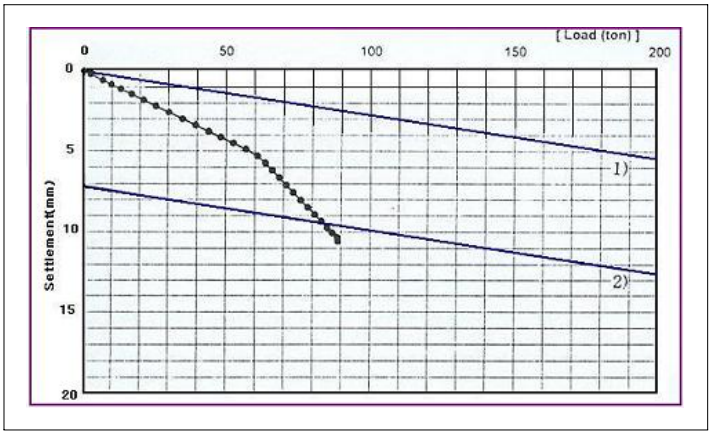
1) Elastic compression line
2) Davisson's offset line
◦. 정재하시험 결과
•. 동재하시험 결과
전체지지력 = 278 ton
주면마찰력 = 208 ton
선단지지력 = 70 ton

[그림 3] 하중-침하량 관계곡선 - 사례 1

사례 2

본건 현장의 경우도 아파트 신축공사 현장으로서 부지 경계선 주변에 민가가 위치해 있기 때문에 소음·진동등 공해가 적게 발생하는 공법적용이 요구되었다.

시공된 말뚝은 ϕ 400 mm PC말뚝으로서 설계지지력은 55 ton, 최종관입깊이는 8.4 m였다.말뚝이 관입된 지반은 전체 깊이에 걸쳐 실토질 모래의 풍화토로 구성되어 있었다. 말뚝선단부는 N값이 약 40 50 정도의 지층에 위치하고 있으며 최종경타는 시공장비에 부착된 무게 2.0 ton의 보조드롭 해머였다. 주입된 시멘트풀의 양은 앞서 언급하였듯이 소위 표준배합비의 약 2.5배 정도인 m당 1포 정도의 시멘트가 사용됨으로써 배합비는 정상적이었던 것으로 판단하였다. 〔그림 4〕에는 동재하시험 결과에서 도출된 하중-침하량 곡선으로서 84 ton의 항복하중이 판정되어 허용지지력은 설계지지력에 미달되는 것으로 나타났다. 분석된 지지력 성분중 주면마찰력은 36.0 ton으로서 이를 단위 면적당 주면마찰력으로 표시할 경우 3.3 ton/m²이며, 선단지지력의 경우는 각각 53.0 ton, 420.6 ton/m²로서 정상적인 크기보다 작게 측정되었음을 알 수 있다. 이 같은 불량한 지지거동의 원인은 주변지반의 이완, 시멘트풀의 유실 등에 따른 주면고정액의 역할 미흡으로 주면마찰력이 작게 발휘되었던 점, 최종항타가 충분하게 실시되지 않았기 때문에 발생한 선단지지력의 불량상태 발생등에 기인한 것으로 판단하였다.



1) Elastic compression line

2) Davisson's offset line

•. 동재하시험 결과

전체지지력 = 89.0 ton

주면마찰력 = 36.0 ton

선단지지력 = 53.0 ton

[그림 4] 하중-침하량 관계곡선 - 사례 2

o 〔강관케이싱굴착 + 시멘트풀 주입 + 말뚝낙하〕공법

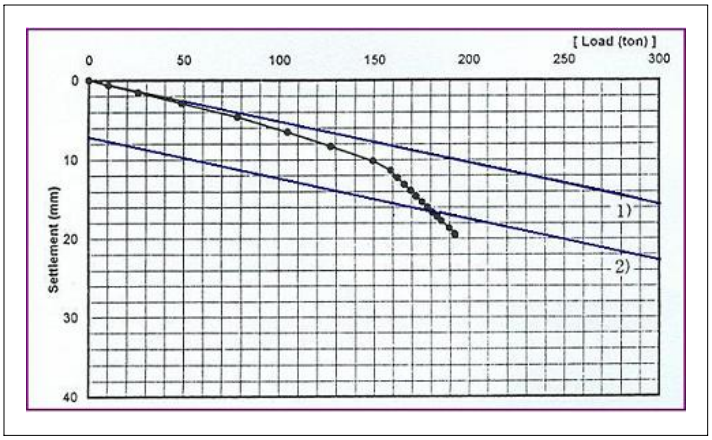
사례 3

본건 현장은 ㅇ극장 신축공사 현장으로서 현장주변에는 아파트촌이 밀집되어 있어서 최종경타에 의한 소음·진동 발생까지도 허용할 수 없는 상황이었다. 이에따라 상기 공법의 적용이 적절하게 수행되었던 예이다.

시공된 말뚝은 ϕ 400 mm PC 말뚝으로서 관입깊이는 15.9 m가 기록되었고 설계하중은 60 ton이었다.

지질주상도를 살펴볼 때 지표하부 약 10 m정도 부터 N값이 50이 넘는 모래자갈층이 약 8.0 m 두께로 분포하고 있다. 시험말뚝은 이 모래자갈층에 관입된 것으로 볼 수 있으며 동재하시험방법으로 실시한 재하시험 결과를 〔그림 5〕의 하중-침하량 관계곡선에서 살펴보면 약 182 ton정도의 항복하중이 판정됨으로써 설계지지력을 충족시키고 있다.

본건 시험말뚝의 경우에서도 주면마찰력에 의존하는 지지거동이 나타나고 있으며 선단지지상태는 다소 불안한 양상을 보임으로써 말뚝의 지지거동이 시공품질에 의해 크게 영향을 받을 수 있음을 시사하고 있다.



1) Elastic compression line

2) Davisson's offset line

•. 동재하시험 결과

전체지지력 = 193.0 ton

주면마찰력 = 135.9 ton

선단지지력 = 57.1 ton

[그림 5] 하중-침하량 관계곡선 - 사례 3

◦ 〔오거 무배토굴착 + 선단 및 주면고정액 주입 + 말뚝회전삽입〕 공법

사례 4

본 건 현장은 교량교각기초현장으로 현장주변에 동물농장이 있는 관계로 기존의 항타공법을 저공해 공법으로 변경하는 과정에서 현장의 시공조건이 최종 경타의 영향도 수용이 곤란하여 상기공법으로 시공하게 된 곳이다.

시공된 말뚝은 ϕ 406 mm 강관말뚝으로 설계지지력은 92.5 ton 최종관입깊이는 21.4 m 이었다. 지층은 매립층 1 m, 점토층 10 m, 모래자갈층 2 m, 이하 풍화토 및 풍화암층으로 구성되었으며 말뚝의 선단부는 풍화암층에 위치하고 있다. 시멘트풀은 선단고정액의 경우 1092 kg/m^3(w/c=0.6), 주면고정액의 경우 19.3 $kg/m^3(w/c=0.7)$로 배합되어 충전되었다. [그림 6]은 시공된 말뚝의 정적 및 동적 재하시험 결과로 매우양호한 하중-침하곡선을 보여주고 있다. 그림에서 동적으로 분석된 지지력(269.4 ton 이상)중 주면마찰력은 152.8 ton, 선단지지력은 116.6 ton(928 ton/m^2)으로 나타났으며 전체 침하량도 말뚝재료의 이론적 탄성 압축량보다 작아 시험재하하중의 상당부분이 주면마찰력에 의해 지지되고 있는 것으로 볼 수 있는바 선단지지력은 재하하중에 따라 더욱 증가할 가능성이 있다. 따라서 본 재하시험 결과를 통해 양질의 선단고정액에 의한 선단구근을 형성하여 말뚝과 일체화 시켜줌으로써 항타말뚝과 유사한 선단지지력 효과도 얻을 후 있음을 알 수 있었으며, 이는 그동안 제기되어온 경타에 의한 공해문제도 해소할 수 있는 대안으로서의 이용 가능성을 시사하고 있다.

1) Elastic compression line

2) Davisson's offset line

◦. 정재하시험 결과

•. 동재하시험 결과

전체지지력 = 269.4 ton

주면마찰력 = 152.8 ton

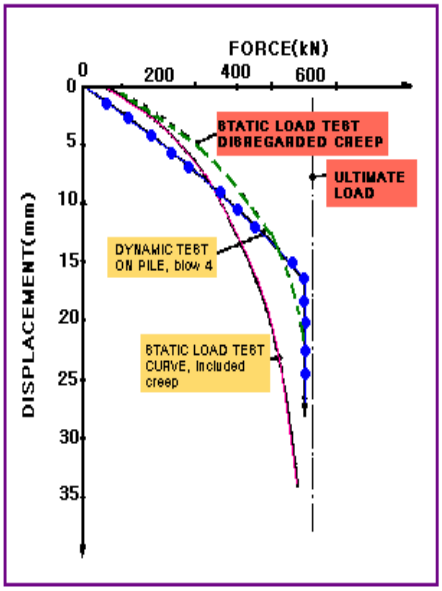
선단지지력 = 116.6 ton

◦ 팽창말뚝 공법

사례 5

본 현장은 스웨덴 웁살라시의 사무 및 상가 5층빌딩 건축현장으로써 주변에 도로 및 주장 그리고 역사적 건물이 위치하고 있어 시공조건이 매우 엄격한 지역으로 되어 본 공법이 채택된 곳이다.

시공현장의 지층은 $2\ \mathrm{m}$정도의 매립층 아래에 $4\sim14\ \mathrm{m}$ 의 점토층($S_u = 0.25\text{-}0.5\ \mathrm{kg/cm^2}$)이 있고 이하 느슨한 모래자갈층이 $40\ \mathrm{m}$의 기반암까지 계속되고 있으며 이층의 N치는 약 7.5 15정도로 나타나고 있다. 시공전에 본 현장에 대해 시험시공을 실시하여 최종적으로 말뚝의 관입깊이는 모래자갈층 내에 $4\ \mathrm{m}$, 말뚝은 EB 8.00(팽창체의 직경은 $0.8\ \mathrm{m}$, 길이는 $2.3\ \mathrm{m}$이고 주면관은 ϕ 170 × 13 mm)으로 결정되었다. 말뚝의 시공은 우선, 뉴매틱 해머로 소정의 깊이까지 밀어넣은 후 시멘트($\mathrm{w/c} = 0.37$)를 주면부의 강관을 통해 주입(유출속도 $14\ \mathrm{min/m^3}$, 주입압 $13\ \mathrm{kg/cm^2}$)함으로써 팽창체를 팽창하므로써 완료된다. [그림 7]은 시험시공 내용중 EB 500(팽창체 직경 0.5 m, 길이 1.2 m이며 주면관은 ϕ 118 × 13 mm, 총말뚝길이 8.7 m)에 대한 정, 동적 재하시험 결과를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 설치심 E의 N치가 매우 작음에도 불구하고 하중 및 침하량 곡선이 비교적 양호하게 나타나고 있음을 알 수 있는데 이는 팽창에 의한 주변지반의 압축 효과에 기인하는 것이며 이러한 예는 기존의 저공해 말뚝공법이 40 m 지지층까지 관입시켜야 하는 상황과 대비되는 좋은 결과를 보여주고 있다.



[그림 7] 하중-침하량 관계곡선 - 사례 5

4. 결 론

말뚝기초공사에도 환경요구를 수용하기 위한 공법의 전환이 오래전부터 이루어져 왔다. 예로 일본의 기성콘크리트 말뚝의 시공법별 구성(1990년 자료)을 보면 직항타공법은 전체의 12.4 %에 불과하며 이중에 방음카바공법 및 저진동·소음 직항타공법이 포함된 것을 감안하면 실제적인 직항타공법의 적용은 극히 일부분임을 알 수 있다. 국내에도 최근 건설 환경에의 관심도가 급증하고 이에 따른 요구 및 규제도 점차 강화되고 있는바 향후 타입공법은 그 사용성이 대단히 제한 될 전망에 있고 실제로도 환경요구에 따른 공법의 전환은 수도권, 대도시를 포함 지방의 중소도시까지 확대되고 있다.

이러한 관점에서 국내에도 여러 가지 매입공법들이 이용되고 있는데 이중 주로 활용되고 있는 공법들의 원리 및 방법과 지지력 특성을 고찰해 본 결과 각공법들이 서로 장점과 단점이 뚜렷하게 들어나는바 공법을 선택함에 있어 환경적응성, 시공성, 경제성, 지지력 확보 등에 대한 보다 면밀한 고찰이 필요한 것으로 보인다. [오가배토굴착 + 시멘트풀주입 + 경타] 공법의 경우 타공법에 비해 시공성 및 경제성이 앞서지만 지지력의 확보를 위해 주면고정액의 효과 증진 및 최종항타의 확신에 대한 개선이 필요한 것으로 나타났고, 또한 최종항타에 따른 환경적응문제는 숙제로 남아있다. [강관케이싱을 이용한 굴착 + 시멘트풀주입 + 말뚝낙하]공법은 공벽 붕괴방지 및 주변지반의 이완감소 등의 장점이 있지만 최종 말뚝낙하시 불완전한 선단부 조성가능성과 시공성 및 경제성 등에서 단점이 있는 것으로 나타났다. [오가 무배토굴착 + 선단 및 주면고정액 주입 + 회전삽입]공법은 주면 및 선단지지력을 보장하고 저공해 공법이라는 측면에서 장점이 있지만 시공성 및 경제성에서 불리한 것으로 보인다. 팽창말뚝의 경우 환경적응, 품질관리의 잇점, 언더피닝 및 앙카에의 적용 등 다수의 잇점에도 불구하고 경제성 및 적용한계 등에서 개선점이 필요한 것으로 나타났다.

국내에는 이들외에도 매입공법으로써 속파기공법, [드릴링 + 말뚝삽입 + 시멘트풀 주입]공법등 여러공법이 시도되고 있지만 아직 증가하는 환경요구 및 향후 건설시장개방에 대한 부응에는 미치지 못하는 것으로 보인다. 이러한 목적을 위한 저진동 저소음 공법의 응용 및 개발은 기존 공법의 보완만으로도 만족하는 경우가 있으므로 현장에서의 연구가 더욱 필요하며 나아가서는 선진외국의 동향파악과 필요한 공법의 도입도 적극적으로 모색할 필요가 있다고 판단된다.

5. 참고문헌

1. 이명환, 말뚝기초, 교량건설과정교재(1995), 서울 지방공무원 교육원, pp 69 95, 1995.
2. (社)コンクリ-ト パイル 建設技術協會, 既製 コンクリ-ト パイル 杭, pp 17 24, 1992.
3. (社)日本道路協會, 道路矯市方書·同解說, pp 276 283, 1990.
4. 건설부, 구조물기초설계기준, pp 187 309, 1986.
5. (社)コンクリ-ト パイル 建設技術協會, 埋入み工法施工便覽, pp 69 76, 1994.
6. K. R. Massarsch, Improvement of Augercast Pile Performance by Expander Body System, Proceedings of 2nd Int. Geot. Seminar of Deep. Found. on Bored and Auger Piles, Belgium, pp 47 428, 1993.
7. Soilex AB, Soilex Pile System, Technical Catalogue, 12 pp.