

개선된 기준으로 시공된 SIP 말뚝의 지지력 평가에 관한 연구

Estimation of Bearing Capacity of SIP Pile Installed by Improved Criteria

박종배* · 김정수** · 임해식***

Park, Jong-Bae · Kim, Jung-Soo · Lim Hae-Sik

Abstract

SIP has been widely used as a low noise and vibration piling method in Korea. But the quality control of SIP was not properly settled down and field workers did not fully understand the principle of SIP method. So not a less troubles were raised at construction site and bearing capacity was not fully mobilized.

To settle these problems, Korea National Housing Corporation amended the construction and load test criteria of SIP in 2002. After load tests on the SIPs installed in field according to the new criteria, we found that the bearing capacity in field vs the design load ratio increased and bearing characteristics was enhanced than that installed by the former criteria.

To consider the enhanced bearing characteristics in the pile design and determine the adequate design criteria, this paper analyzed the accuracy of design criterion which were commonly used in Korea comparing with the load test results. Analysis result shows that Meyerhof criteria(1976) properly simulates the bearing capacity of SIP installed by the new construction and load test criteria.

Keywords : SIP(Soil-Cement Injected Precast) Pile, Bearing Capacity, Load Test, Design Criteria

요 지

SIP 공법이 국내에서 저소음·저진동 말뚝공법으로 널리 사용되고 있지만 품질관리기준이 명확히 정립되지 못하고 실무자들의 공법의 원리에 대한 이해 부족으로 시공시 혼선을 초래하고 있어 공법이 본래 가진 지지력을 충분히 발휘되지 못하고 있다. 이러한 문제점을 개선하기 위하여 2002년에 대한주택공사에서는 SIP 공법의 시공 및 재하시험기준을 개선하였다. 개선된 기준에 의하여 현장에 시공된 SIP 말뚝에 대하여 재하시험을 통하여 지지력을 평가한 결과 이전 방법으로 시공된 말뚝에 비하여 시공하중의 설계만족도 및 지지력 특성이 크게 향상된 것을 확인할 수 있었으며 이를 설계에 반영하면 기초 공사비도 절감할 수 있는 것으로 나타났다.

향상된 지지력 특성을 설계에 반영하기 위하여 재하시험결과를 국내에서 많이 사용하고 있는 말뚝 설계식들과 신뢰성 분석을 실시하여 적합식을 찾고자 하였다. 분석결과 개선된 기준으로 시공된 SIP 말뚝은 Meyerhof(1976)의 타입말뚝 설계식과 유사한 지지거동을 하는 것으로 나타났다.

주요어 : SIP 말뚝, 지지력, 재하시험, 설계기준

* 정회원, 대한주택공사 주택도시연구원 선임연구원

** 정회원, 대한주택공사 주택도시연구원 차장

1. 서론

SIP 공법은 지층을 오거(auger) 등의 굴착기로 천공한 뒤에 시멘트 페이스트(cement-paste)를 주입하고 기성 말뚝을 삽입후 경타하는 것으로 1968년 일본 기초기술연구소에서 개발되었다. 국내에서는 1987년 한강변 아파트현장에 최초로 적용된 이후에 국내의 중소구경(직경 600mm 이내)의 저소음·저진동 말뚝공법으로 널리 사용되고 있다. 본 공법은 선굴착시의 공벽유지, 주면고정액의 배합비에 따른 soil-cement의 강도, 지층의 구성상태, 시공장비 및 작업자의 능력에 따라 지지력이 많은 차이를 나타내어 철저한 시공관리가 필요하다.

SIP 공법은 많은 사용실적에도 불구하고 최근까지도 명확한 시공기준이 없어 시공에 많은 혼선을 초래하였으며 특히 선단부의 경우 시공여건에 의하여 당초 공법을 개발한 일본과 다른 방법으로 시공되고 있는 실정이며 이 선단부의 시공방법에 따라서 지지력의 많은 차이를 나타내고 있는 것으로 보고 되고 있어 시공방법의 정립이 매우 절실하다(대한주택공사, 2001).

최근에는 최종타격시에 동재하시험에 의하여 선단부가 소정의 지지력을 만족하는지를 확인하도록 SIP 공법의 시공방법 및 재하시험방법이 개선되었다. 별도의 선단고정액을 주입하는 일본과 달리 묽은 시멘트 페이스트만을 사용하면서 소요의 선단지지력을 얻기 위해서는 말뚝을 굴착바닥면 이하로 타격관입하여야 하며 이럴 경우 선단부의 설계 지지력도 상향 수정될 필요가 있는 것으로 나타났다. 박 등(2003)은 말뚝의 선단이 굴착면에서 이격정도에 따라서 선단지지력이 $20 \sim 30 \overline{N}_b' A_b$ 로 계산될 수 있으며 총 103본에 대한 SIP 말뚝의 정재하시험결과를 분석한 결과 선단지지력 산정식으로 $20 \overline{N}_b' A_b$ 이 적합하다고 한 바 있다. 이는 분석에 사용된 말뚝들이 시공 및 재하시험방법이 개선되기 이전에 시공된 말뚝들로 선단부가 대부분 굴착면에서 일정 거리 이격되었기 때문이다. 이에 본 연구에서는 개선된 재하시험 및 시공방법으로 시공된 SIP 말뚝 109본에 대한 재하시험결과를 분석하여 새로운 시공여건에 부합하는 말뚝의 선단지지력 산정식을 찾고자 하였다.

또한 SIP 공법의 마찰지지력의 산정식에 대한 검토도 필요한데 국내의 말뚝 설계관행은 주면마찰력의 반영이 선단지지력에 비하여 미미한 수준이다. 홍 등(1998)은 SIP 공법이 천공시 주변지반의 교란으로 주면마찰력이 감소한다

는 일반적인 통념과는 달리 SIP 공법의 지지력은 주면마찰의 형태로 지지되고 있으므로 이에 대한 설계에의 반영이 요구된다고 하였으며, 이 등(1995)은 SIP 공법의 주면마찰력이 극한지지력의 약 74.8%로서 주면마찰 지지력상태가 우수하게 나타난다고 하였다. 그러나 구조물기초설계기준 해설판(2003)에서는 SIP의 마찰지지력을 타입말뚝의 1/2정도에 불과하다고 하였다. 이는 SIP의 지지력 증대에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있으나 실제 현장에서 적용되고 있는 선단 및 주면고정액의 배합비율(대한주택공사의 표준배합비 : 시멘트 880kgf + 물 730ℓ)에 따른 신뢰도 높은 주면마찰력에 대한 설계지지력의 평가가 미흡하였기 때문이다. 이에 본 논문에서는 현장의 SIP 말뚝에 대한 재하시험결과를 선단과 주면마찰지지력으로 분리해석하여 SIP의 마찰지지 특성을 규명하고 현실적인 산정식을 제시하고자 한다.

2. SIP의 시공 및 설계현황

기존의 SIP의 재하시험은 품질확인 목적으로 수행되었기 때문에 시공 중간의 품질관리가 매우 어려웠다. 즉 시멘트 페이스트가 굳고 난 후에 정재하시험을 실시하였는데 품질 상에 문제가 발생하여도 어느 부위에서 어떤 원인으로 문제가 발생하였는지 분석하기가 쉽지 않았다. 특히 선단의 지지층 도달여부, 소요 선단지지력의 확보 여부 및 시멘트 페이스트의 경화에 따른 마찰지지력의 변화등과 같은 SIP 시공에 필수적인 정보들을 얻을 수가 없었다. 이러한 문제점들을 보완하기 위하여 2002년에 대한주택공사는 SIP의 시공방법 및 재하시험기준을 개선하였다(표 1 참조).

표 1. SIP 공법 기준의 주요개선내용(대한주택공사, 2002)

구 분		현행 (아파트 동당)	개선 (아파트 동당)
선굴착 공법	시항타	동재하	4회(초기,재항타 각 2회)
		정재하	0.5회
	본항타	동재하	1회(재항타)

개선된 SIP의 재하시험 및 시공기준은 시멘트 페이스트의 표준배합(물시멘트비 : 83%)등은 변화가 없다. 대신 선단부 취약화의 문제점을 해결하기 위하여 천공시에 초기 동재하시험(E.O.I.D)을 실시하여 소요 선단지지력의 확

보 여부와 지지층의 적합성을 판정하도록 하고 동일 말뚝에 대해 재항타 동재하시험(Restrike) 및 정재하시험을 실시하여 시멘트 페이스트의 경화에 따른 마찰지지력의 획득여부 및 최종지지력을 확인하도록 하였다. 개선된 방법은 선단지지력을 확인하고 시공하기 때문에 과거와 같이 말뚝을 굴착바닥면에서 이격시켜 선단지지력을 약화시키는 문제를 방지할 수 있을 것으로 기대되었다.

이에 기존 방법에 의해 시공된 말뚝과 개선된 방법에 의해 시공된 말뚝의 지지력 특성을 그림 1~2에서 비교하였다. 본 비교에서는 기존의 방법으로 시공된 SIP 말뚝 103본과 개선된 방법으로 시공된 SIP 말뚝 109본에 대하여 말뚝재료하중 대비 현장재하시험결과(=시공하중) 관계를 분석하였다. 분석에 사용된 말뚝들은 선단부가 N 50 이상인 풍화토 또는 풍화암에 근입되었다.

SIP 말뚝의 재료하중(PHC 400 : 110tf) 대비 시공하중 비율을 분석한 결과, 개선된 방법으로 시공된 말뚝의 시공하중/재료하중의 평균이 96.4%를 나타내어 기존 방법으로 시공된 말뚝의 시공하중/재료하중 평균인 69% 보다 27.4% 크게 나타났다. 이는 개선된 방법으로 시공하였을 때 기존방법으로 시공된 말뚝보다 시공품질이 크게 향상된 것을 의미한다.

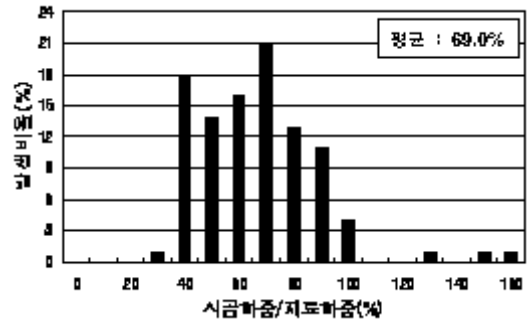


그림 1. 시공하중 대 재료하중(기존시공법)

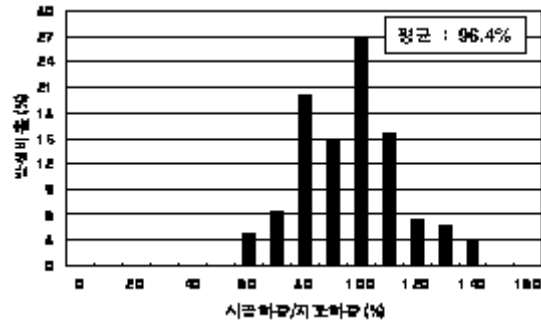


그림 2. 시공하중 대 재료하중(개선된 시공법)

표 2. 매입말뚝의 설계지지력 식(콘크리트 베일 建設技術協會, 1994)

시공법	선단지지력 산정식	말뚝선단부의 조건	주면마찰력의 산정식	비고
시멘트페이스트 주입공법	$R_p = 20 \bar{N} A_p$	\bar{N} 은 말뚝선단부의 평균치 $\bar{N} \leq 50$	$R_F = \left(\frac{1}{5} \bar{N}_s L_s + \frac{1}{2} \bar{q}_u L_c \right) \psi$ $\bar{N}_s \leq 25, \bar{q}_u \leq 10 (\bar{q}_u \leq 1.25N)$	건설성 고시기준
선굴착 근공법	$R_p = 25 \bar{N} A_p$	\bar{N} 은 말뚝선단부의 평균치 $\bar{N} \leq 60$	$R_F = \left(\frac{1}{5} \bar{N}_s L_s + \frac{1}{2} \bar{q}_u L_c \right) \psi$ $\bar{N}_s \leq 25, \bar{q}_u \leq 10$	건설성 인정공법
선굴착 최종타격공법	$R_p = 30 \bar{N} A_p$	\bar{N} 은 1D~4D 평균치 $\bar{N} \leq 60$	$R_F = \left(\frac{1}{5} \bar{N}_s L_s + \frac{1}{2} \bar{q}_u L_c \right) \psi$ $\bar{N}_s \leq 25, \bar{q}_u \leq 10$	건설성 인정공법
선굴착 최종경타공법	$R_p = 25 \bar{N} A_p$	\bar{N} 은 1D~4D 평균치 $\bar{N} \leq 60$	$R_F = (0.9L_c + 2.4L_s) \psi$	건설성 인정공법
※ 기호 설명 : R_p : 선단지지력 (tf), R_F : 주면마찰력 (tf), \bar{q}_u : 평균일축압축강도 \bar{N}, \bar{N}_s : 말뚝 선단부 및 주면의 평균 N값, A_p : 말뚝 선단면적(m ²) L_s, L_c : 사질토층 및 점성토층에서의 말뚝길이, ψ : 말뚝주면장				

구조물기초설계기준 해설판(2003)에 의하면 국내의 말뚝 설계하중은 재료하중의 40~60%에 그치고 있는 반면에 외국에서는 거의 100%에 근접하고 있어 국내보다 경제적인 설계를 하고 있다고 하였다. 이와 같은 설계현실은 그림 1의 분석결과에서와 같이 시공하중이 재료하중에 69% 밖에 미치지 못하기 때문에 설계하중을 선진국 수준으로 올리지 못하며 설계하중을 높이기 위해서는 시공기술의 향상이 필요함을 반증하고 있다.

그림 2의 분석결과를 보면 개선된 시공법에 의하여 시공하중이 재료하중의 96.4%에 달하고 있어 시공기술의 개선효과가 명확하게 나타나고 있으며 SIP의 설계하중을 기존보다 향상시킬 수 있을 것으로 분석되었다.

3. 이론적 지지력 산정

1968년 일본의 기초기술연구소에서 SIP 공법을 개발한 이후로 일본은 Meyerhof(1976)식을 기본으로 하여 표 2에서와 같이 시멘트 페이스트 배합비, 말뚝선단부 조성 또는 최종항타 여부 등에 따라 지지력식을 상이하게 제시하였다(콘크리트 페일 建設技術協會, 1994).

국내에서는 일본과 유사하게 Meyerhof(1976) 식을 근간으로 하고 계수값을 조정하여 사용하였으나 지나치게 안전측이란 지적이 있었으나 시공기술의 개선 및 정립이 선행되지 않은 상태에서는 설계개선에는 많은 위험성을 내포하고 있었다. 그러나 개선된 시공법에 의하여 시공된 SIP 말뚝의 경우 그림 2에서와 같이 지지력 특성이 많이 향상된 것으로 나타났으며 이를 설계에 적절히 반영하는 필요성이 제기되었다. 이러한 향상된 지지력 특성과 부합되는 설계식을 찾기 위하여 국내에서 많이 사용되는 Meyerhof 방법, SPT-CPT 방법 및 DM-7 방법에 대한 검토를 하였다.

3.1 Meyerhof 방법

일본에서는 SIP 말뚝의 설계에 Meyerhof(1976) 방법을 기본으로 하여 시공방법이나 지반조건에 맞게 수정하여 사용하고 있다(표 2 참조). 국내의 경우 구조물기초설계기준(2003)에 선굴착말뚝의 선단지지력은 타입말뚝의 1/3~1/2 정도된다고 하여 매우 보수적인 설계를 유도하고 있다.

일본의 각종 기준에 명시된 주면마찰력은 항타말뚝과 동일하게 계산하며 선단지지력은 선단부의 시공방법에 따라서 계산식이 $20 \sim 30 \overline{N}_b' A_b$ 로 변한다(표 2 참조). 국내는 주로 최종경타공법이 사용되고 있는데 실무에서는 선단지지력 식으로 $20 \overline{N}_b' A_b$ 를 사용하고 있어 일본의 $25 \overline{N}_b' A_b$ 보다 작게 설계하고 있다. 더구나 일본에서는 N값의 한계를 60으로 하고 있고 국내는 N값의 한계를 50으로 하고 있기 때문에 똑같은 지반조건에서도 선단지지력을 일본에 비해 33% 작게 계산하여 매우 보수적인 설계를 하고 있다. 그러나 그림 1 및 2의 분석결과에서와 같이 개선된 기준에 의하여 SIP 공법의 지지력 특성이 많이 향상된 것으로 나타나 SIP 말뚝의 선단지지력식에 대한 재검토가 필요한 것으로 사료된다.

또한 국내의 구조물기초설계기준(2003)에서는 SIP 말뚝의 마찰지지력은 타입말뚝의 1/2이라고 하지만 홍 등(1998) 및 이 등(1995)은 SIP 말뚝이 통념과 달리 우수한 마찰지지력을 발휘한다고 하여 이에 본 연구에서는 개선된 기준에 의한 SIP 공법의 마찰지지력의 적합식을 찾고자 하였다.

3.2 SPT-CPT 간편법

이 방법은 SPT N값을 CPT q_c 값으로 전환하여 지지력을 계산하며 마찰지지력 산정에 있어서 신뢰성이 높은 것으로 알려져 있다(Van Impe, 1991).

N값을 q_c 값으로 전환할 때는 Robertson & Campanella(1983)의 q_c/N 관계를 사용한다(그림 3 참조).

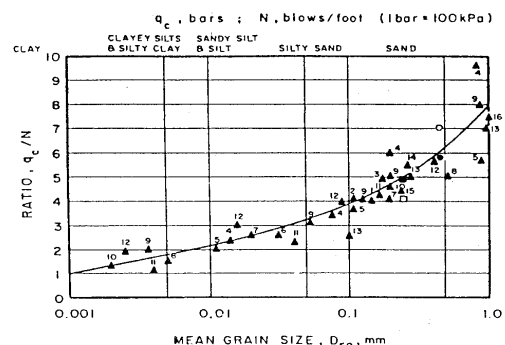


그림 3. q_c/N 관계(Robertson and Campanella, 1983)

극한선단지지력 산정식은 식(1)과 같다.

$$Q_{u, \text{선단}} = (A_{\text{선단}} \times q_c) \quad (1)$$

여기서, $A_{\text{선단}}$: 말뚝선단의 면적

q_c : N치로부터 전환된 선단저항값

극한주면마찰력은 선단저항값(q_c)에 표 3의 마찰계수(η)와 말뚝주변 면적을 곱하여 구한다(식 (2) 참조).

$$Q_{u, \text{주면}} = (P \times \sum q_{\text{주면}} \times L) \quad (2)$$

여기서, P : 말뚝의 둘레($\pi \times D$)

$q_{\text{주면}}$: 마찰지지력 = $q_c \times \eta$

η : 마찰계수, 표 3 참조

L : 지중의 말뚝길이

표 3. 마찰계수(η)의 범위(Van Impe, 1991)

토질의 종류	말뚝의 종류	q_c 의 범위 (kgf/cm ²)	마찰계수 (η)
실트질 점토 및 느슨한 모래	모든 종류의 말뚝	$30 < q_c < 50$	1/30
점토 ($0.3 < \text{액성지수} < 0.6$)	현장타설 말뚝	$20 < q_c < 80$	1/85
	항타	$20 < q_c < 80$	1/60
점토 ($\text{액성지수} \geq 0.8$)	모든 종류의 말뚝	$q_c > 20$	1/80
단단한 실트	모든 종류의 말뚝	$q_c > 50$	1/100
사질토	현장타설 말뚝	$q_c \leq 150$	1/200
	항타말뚝	$100 < q_c \leq 150$	1/100
사질토	현장타설 말뚝	$q_c > 150$	1/300
	항타	$q_c > 150$	1/200

3.3 NAVFAC DM-7

NAVFAC DM-7(1982) 방법은 균질한 사질토 지반과 점성토에서 단말뚝의 극한지지력을 계산하며 “말뚝 선단과 주면의 저항은 연직 유효응력에 비례하여 증가하다가 한계 깊이 이상에서는 더 이상 증가하지 않는다.”는 Vesic(1977)의 이론을 기본가정으로 하고 있다. 이때, 한계깊이는 토질의 상대밀도와 지하수위에 따라 달라지며 말뚝직경의 10배에서 40배 사이이다. NAVFAC DM-7 방법에서는 지지력 계수(N_q)와 토압계수(K_o)를 항타말뚝과 현장타설말뚝에 달리 적용하고 마찰력 계산에 있어서 말뚝의 재질에 따른 마찰특성을 고려하도록 하고 있다.

NAVFAC DM-7 방법은 말뚝의 극한 지지력은 식 3에 의해 구한다.

$$Q_u = p_b N_q A_b + \sum_{L=L_o}^{L=L_o+\Delta L} K_o p_o (s) \tan \delta$$

여기서, p_b : 선단부에서의 유효응력

N_q : 지지력계수

A_b : 선단면적

L : 말뚝길이

K_o : 시공조건에 따른 토압계수

p_o : 말뚝주면에서의 유효응력

δ : 말뚝과 흙사이의 마찰각

s : 단위길이당 말뚝의 표면적

4. 현장 지지력 실측

SIP 공법으로 시공된 말뚝에 대한 압축재하시험으로부터 SIP 말뚝의 지지력 특성을 분석하고 적합한 지지력 식을 평가하기 위하여 대한주택공사 현장에 시공된 72본의 SIP 말뚝에 대한 정재하시험 결과와, 8개 현장에서 초기항타(E.O.I.D)와 재항타(Retrrike)가 병행 시공된 SIP 말뚝에 대한 188회의 동재하시험결과로부터 지지력을 산정하였다.

SIP 말뚝의 지지력 특성을 평가하기 위한 압축재하 시험 방법은 동재하시험의 경우 ASTM D 4945에 근거한 미국 PDI사의 MODEL PAK 항타분석기(PDA, Pile Driving Analyzer)를 사용하였고, 정재하시험은 국내 및 미국 규격인 KS F 2445와 ASTM D 1143에 근거한 표준재하시험 방법을 적용하였다.

SIP 공법에 적용된 말뚝의 재질 및 규격은 고강도 콘크리트 말뚝(PHC, KS F 4306)으로서 직경은 400mm이며, 설계하중은 대부분 50tf 또는 60tf로서 말뚝재료 허용하중의 60% 정도 수준이었다(김, 2003).

4.1 동재하시험 결과분석 및 고찰

동재하시험에서 지지력해석은 타격에너지를 충분히 하여 극한지지력을 획득하는 것을 기본으로 하였으며 타격에너지가 충분치 않아 완전한 극한지지력이 얻어지지 않았을 때에는 Vesic(1972)의 침하기준에 따라 하중-침하곡선에서 말뚝직경의 10%에 해당하는 침하량때의 하중을 극한지지력으로 산정하였다. 주면지지력과 선단지지력의 분리산정은 Restrike 시험시에 구한 극한지지력에서 E.O.I.D 시험의 극한침하량에 대응하는 지지력을 극한선단지지력으로 간주하여 이를 차감하여 극한주면지지력을 산정하였다.

8개 현장에 대한 188회의 동재하시험결과(E.O.I.D 시

험 : 89회, Restrike 시험 : 99회)는 E.O.I.D 시험시 극한단위선단지지력은 평균 1186.0tf/m², Restrike 시험시 극한단위주면지지력은 평균 9.1tf/m²을 나타내었다(그림 4 및 표 4 참조).

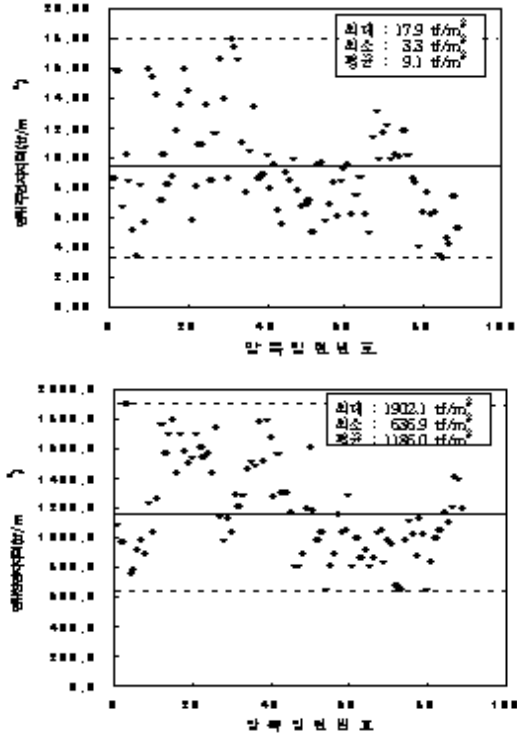


그림 4. E.O.I.D 시험의 극한단위선단지지력 및 Restrike 시험의 극한단위주면지지력

평균 극한단위선단지지력(1186.0tf/m²)은 매입말뚝에 대한 국내 설계기준(구조물기초설계기준, 2003)에서의 최대값인 750tf/m² 보다 약 60% 크게 나타났으나, 일본의 선굴착 최종경타공법에 대한 선단지지력식의 최대값인 1,500 tf/m²(25N, N값 60)에 비해서는 약 20% 정도 작은 것으로 나타났다.

또한 극한단위주면지지력(평균 9.1tf/m²)은 국내의 설계기준에 제시된 최대주면지지력 5.0tf/m²보다 80% 정도 크게 발휘되는 것으로 분석되었으며, Restrike 시험개소 총 99본중 8본만이 5.0tf/m² 미만으로 분석되어 SIP 말뚝의 주면지지력은 대부분 국내 설계기준을 훨씬 상회하는 것으로 나타났다.

그림 9는 지반의 N값과 동재하시험에서 측정된 단위주면지지력과의 관계를 나타낸 것이다. 그림 5의 적합식에서는 단위주면마찰력 = 0.28N + 0.975의 관계가 성립되는 것으로 나타났다.

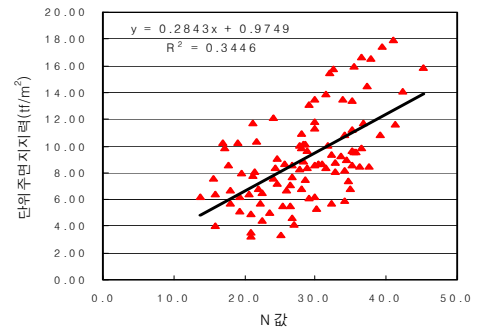


그림 5. 단위주면지지력과 N값과의 관계

표 4. 현장별 동재하시험(E.O.I.D, Restrike)결과 평균치

현장명	관입깊이(m)	EMX(tf·m)	주면지지력		선단지지력		total(tf)	최종관입량(mm)	시험수(회)	
			skin(tf)	unit(tf/m ²)	toe(tf)	unit(tf/m ²)				
E O I D	김포양곡	13.2	3.8	18.7	1.2	134.7	1072.8	153.4	13.8	11
	용인신갈	7.0	3.3	17.3	1.9	201.9	1607.2	219.2	2.1	15
	아산권곡	12.8	4.2	18.2	1.1	133.9	1066.1	152.1	17.5	4
	의정부금오	11.9	4.1	30.0	2.1	157.9	1257.2	187.9	5.0	3
	부산만덕	9.5	2.5	9.3	1.0	195.8	1558.7	205.1	3.3	8
	과주금촌	11.6	3.2	19.8	1.4	127.2	1012.8	147.0	11.7	31
	서울등촌	15.7	3.2	16.3	0.9	115.2	917.6	131.5	10.8	9
	대전용두	13.4	2.7	15.3	1.1	148.9	1185.2	164.2	5.9	8
전체평균	11.8	3.2	17.8	1.3	149.0	1186.0	166.8	9.0	89	
R e s t r i k e	김포양곡	11.3	3.7	106.8	8.3	93.6	745.3	200.4	4.9	8
	용인신갈	8.9	2.7	138.2	12.8	141.2	1123.8	279.3	1.1	4
	아산권곡	13.5	3.8	162.2	9.9	83.2	662.7	245.4	1.9	6
	의정부금오	6.3	3.4	118.6	15.2	89.1	709.0	207.7	4.0	2
	부산만덕	9.3	2.2	132.7	12.3	129.0	1027.1	261.7	0.7	13
	과주금촌	11.7	3.3	126.6	8.8	86.4	687.5	212.9	1.8	45
	서울등촌	15.7	3.3	100.0	5.2	96.7	770.2	196.8	2.9	9
	대전용두	13.3	2.6	121.5	7.5	129.0	1027.1	250.6	0.6	12
전체평균	11.8	3.2	125.2	9.1	100.7	802.0	225.9	1.9	99	

4.2 정재하시험 결과분석 및 고찰

정재하시험결과로부터 극한지지력을 해석하기 위하여 Stability Plot 방법을 사용하였다. Stability Plot 방법은 선단과 주면의 극한지지력을 구분하여 해석할 수 있는 장점이 있다.

말뚝의 극한주면마찰력은 그림 6에서 첫 번째 직선의 기울기의 역수이며 전체 극한지지력은 식 (4)에 의해 구한다.

$$\frac{\Delta}{Q_{ult \cdot total}} = m_2 \cdot \Delta + c_2 \quad (4)$$

여기서, $Q_{ult \cdot total}$: 전체 극한지지력

m_2 : 두 번째 직선의 기울기

Δ : 말뚝직경의 10% 침하량 (10% Δ)

c_2 : 두 번째 직선의 침하량/하중축과의 절편

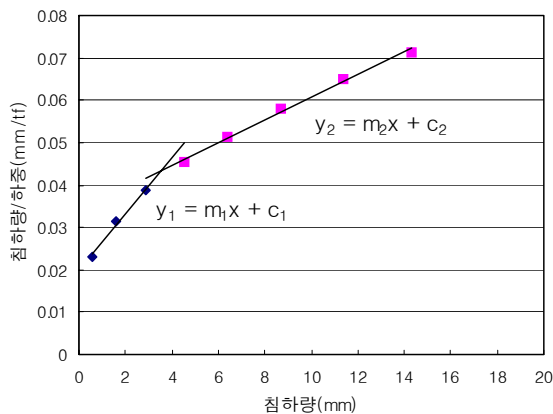


그림 6. Stability Plot 방법

SIP 말뚝의 정재하시험결과를 Stability Plot방법으로 분석한 결과 극한 단위주면마찰력과 극한 단위선단지지력은 그림 7과 같다. 극한단위선단지지력은 738.69~2,043.79t/f/m²이며 평균은 1,331.78t/f/m²인 것으로 나타났다.

박(2003)은 이전의 방법으로 시공된 SIP 말뚝의 정재하시험결과를 동일한 방법으로 해석한 결과 극한단위선단지지력이 216.56~1,503.66t/f/m²이고 평균은 795.06t/f/m²이라고 한다. 이를 볼 때 개선된 시공법에 의해서 SIP 말뚝의 선단지지력이 약 68% 정도 증가한 것으로 분석되었다.

극한단위마찰지지력의 시험값은 최소 5.97t/f/m²~최대 20.03t/f/m²의 값을 나타내었고 평균값도 10.45t/f/m²을

나타내어 최대값 및 평균값이 Meyerhof 이론식 및 국내 설계기준에서 정하고 있는 한계단위지지력(10.0t/f/m²)을 초과하는 것으로 나타났다.

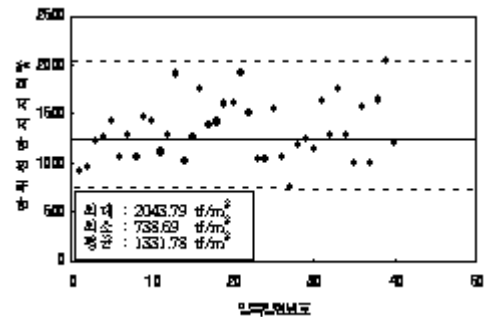
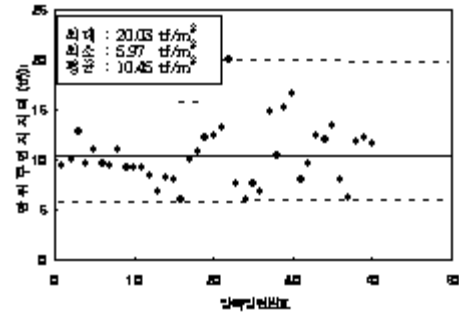


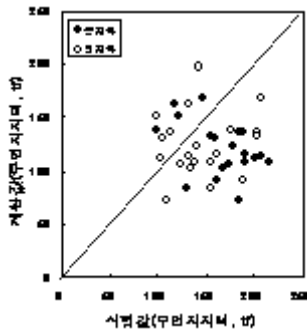
그림 7. 극한 단위선단지지력 및 극한 단위주면지지력(정재하시험결과)

5. 지지력 신뢰성 분석

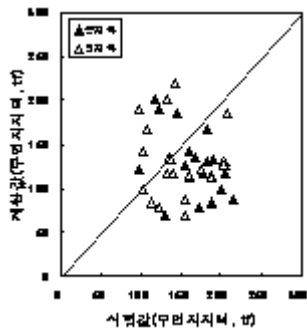
개선된 시공방법으로 시공된 SIP 말뚝중 지반조사 및 재하시험결과가 있는 말뚝에 대하여 각종 이론식으로 구한 설계지지력과 재하시험에서 구한 지지력 간에 신뢰성을 분석하여 적합한 지지력 산정식을 찾고자 하였다. 신뢰성 분석에 사용된 말뚝은 동재하시험 및 정재하시험을 병행 실시한 20본의 말뚝이며 검토한 지지력 산정식은 Meyerhof ($20 \overline{N}_b' A_b$, $30 \overline{N}_b' A_b$)방법, SPT-CPT 전환법 및 DM-7 방법이다.

5.1 주면지지력에 대한 신뢰성 분석

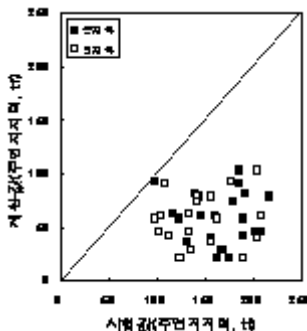
현재의 국내 말뚝설계는 선단지지말뚝 개념으로 하고 있으나 주면지지력을 잘 활용하면 말뚝길이를 줄여 보다 경제적인 말뚝설계를 할 수 있다. 주면마찰력에 대한 신뢰성 분석결과는 그림 8 및 표 5와 같다.



(a) Meyerhof 방법



(b) SPT-CPT 전환법



(c) DM-7 방법

그림 8. 주면지지력에 대한 이론식 방법의 신뢰도 그림

표 5. 주면지지력에 대한 이론식의 신뢰도
(Q_s 는 극한주면지지력)

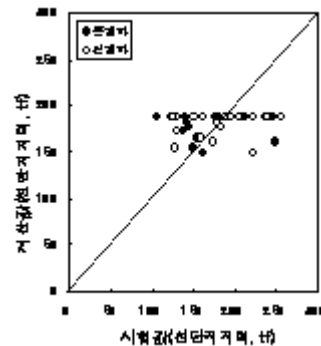
구 분	Meyerhof 방법		SPT-CPT 전환법		DM-7	
	동재하	정재하	동재하	정재하	동재하	정재하
Q_s 계산/ Q_s 시험의 평균	0.800	0.894	0.852	0.959	0.373	0.421
Q_s 계산/ Q_s 시험의 표준편차	0.317	0.288	0.391	0.401	0.186	0.176

신뢰성 분석결과 정재하시험값에 대한 SPT-CPT 전환법의 Q_s 계산/ Q_s 시험값이 0.959로 계산값이 시험값에 가장 가까웠으나 표준편차는 0.401로 가장 크게 나타났다. Meyerhof 방법의 Q_s 계산/ Q_s 시험은 동재하는 0.80, 정재하의 경우는 0.894를 나타내어 비교적 정확하였다. DM-7 방법은 표준편차가 작아 계산의 일관성은 있으나 마찰지지력을 60% 정도 과소하게 평가하는 것으로 나타났다.

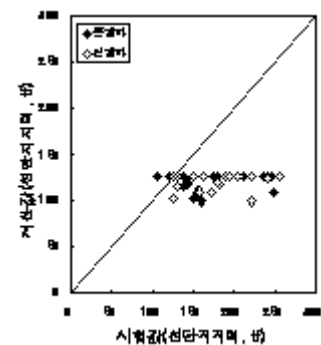
Meyerhof 방법으로 SIP의 주면마찰력을 계산할 때 항타말뚝과 동일하게 계산하여도 계산값이 현장재하시험값보다 10 ~ 20% 작게 나타났다. 이는 이 등(1995) 및 홍 등(1998)이 SIP 공법은 상당히중이 주면마찰에 의해 지지되고 있으며 이를 적절히 설계에 반영해야 한다는 주장과 일치하며 구조물기초설계기준(2003)에서 SIP의 마찰지지력이 항타말뚝에 비하여 1/2이라는 주장과는 상당한 차이를 나타내었다.

5.2 선단지지력에 대한 신뢰성 분석

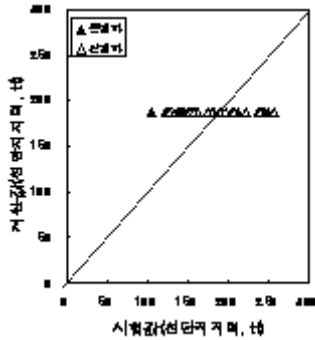
선단지지력에 대한 신뢰성 분석결과는 그림 9 및 표 6과 같다.



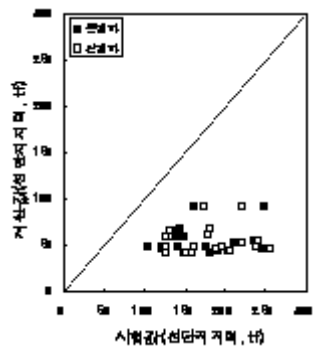
(a) Meyerhof 방법($30 \overline{N}_b' A_b$)



(b) Meyerhof 방법($20 \overline{N}_b' A_b$)



(c) SPT-CPT 전환법



(d) NAVFAC DM-7

그림 9. 선단지력에 대한 이론식 방법의 신뢰도 그림

표 6. 선단지력에 대한 이론식의 신뢰도
(Q_b 는 극한선단지력)

구 분	Meyerhof 방법				SPT-CPT 전환법		DM-7	
	$30 \overline{N}_b' A_b$		$20 \overline{N}_b' A_b$		동재하	정재하	동재하	정재하
	동재하	정재하	동재하	정재하				
Q_b 계산/ Q_b 시험의 평균	1.137	1.047	0.757	0.697	1.186	1.096	0.344	0.319
Q_b 계산/ Q_b 시험의 표준편차	0.284	0.247	0.189	0.165	0.274	0.256	0.106	0.105

선단지력에 대한 이론식의 신뢰성 분석결과는 선단지력을 $30N$ 으로 산정한 Meyerhof 방법과 SPT-CPT 전환법의 Q_b 계산/ Q_b 시험의 평균값이 1에 가까이 나타나 계산값과 시험값이 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 두 방법 모두 계산값이 시험값보다 약간 크게 나타나 안전측의 설계를 위해서는 Meyerhof($20 \overline{N}_b' A_b$)나 DM-7을 사용해야 하지만 계산값과 시험값의 차이가 너무 큰 것으로 나타났다.

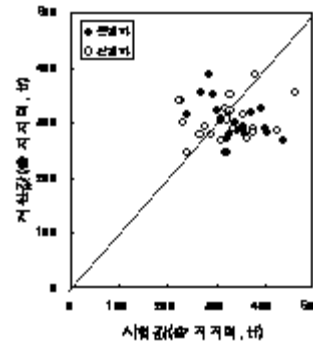
이에 선단지력을 일본건설성의 $25 \overline{N}_b' A_b$ 으로 계산해본

결과 Q_b 계산/ Q_b 시험의 평균값이 동재하의 경우 0.947을, 정재하의 경우에는 0.872를 나타내어 계산값이 시험값에 상당히 근접하는 것으로 분석되었다. 더구나 계산값이 시험값보다 약간 작게 나타났기 때문에 안전측의 설계를 선호하는 설계경향에 부합하는 것으로 나타났다.

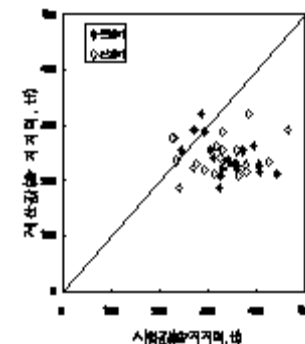
선단부의 시공법이 개선되기 이전의 재하시험결과를 분석한 결과 선단지력과 N 값 사이에 약 $13 \overline{N}_b' A_b$ 의 관계식이 성립되었다(박, 2003). 이는 구조물기초설계기준(2003)에서 SIP 말뚝의 선단지력이 타입말뚝의 약 1/3 ~ 1/2정도라고 한 것과 일치한다. 그러나 개선된 시공법 및 재하시험법으로 시공된 SIP 말뚝에 대한 분석결과 선단지력식이 $25 \overline{N}_b' A_b$ 으로 상향조정될 수 있다고 나타난 것은 굴착당시에 동재하시험을 실시하고 소요선단지력을 확보하기 위하여 최종타격에 의하여 확실하게 지지층에 선단을 근착시키기 때문인 것으로 분석된다.

5.3 총지력에 대한 신뢰성 분석

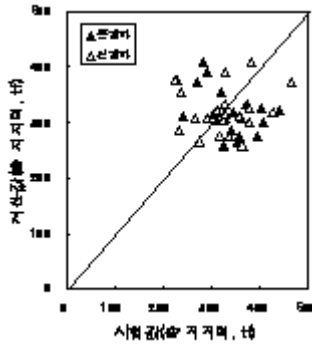
이론식으로 구한 극한지력과 재하시험에서 극한지력을 비교한 결과는 그림 10 및 표 7과 같다.



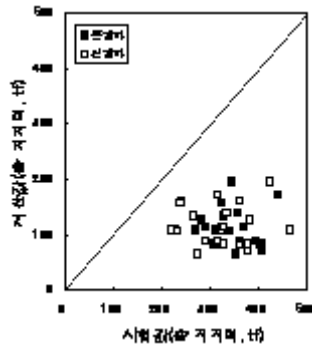
(a) Meyerhof 방법($30 \overline{N}_b' A_b$)



(b) Meyerhof 방법($20 \overline{N}_b' A_b$)



(c) SPT-CPT 전환법



(d) NAVFAC DM-7

그림 10. 총 지지력에 대한 이론식 방법의 신뢰도 그림

표 7. 총 지지력에 대한 이론식의 신뢰도
(Q_t 는 총 극한지지력)

구 분	Meyerhof 방법				SPT-CPT 전환법		DM-7	
	$30 \overline{N}_b' A_b$		$20 \overline{N}_b' A_b$		동재하	정재하	동재하	정재하
	동재하	정재하	동재하	정재하				
$Q_{t, \text{계산}}/Q_{t, \text{시험}}$ 의 평균	0.949	0.960	0.763	0.769	0.998	1.013	0.353	0.359
$Q_{t, \text{계산}}/Q_{t, \text{시험}}$ 의 표준편차	0.246	0.193	0.211	0.159	0.272	0.240	0.128	0.126

총 지지력에 대한 신뢰성 분석에서 전반적으로 SPT-CPT 전환법과 선단지지력을 $30 \overline{N}_b' A_b$ 으로 산정한 Meyerhof 방법이 시험값에 거의 근접하였으며, Meyerhof ($30 \overline{N}_b' A_b$) 방법이 동재하 및 정재하시험값에 비하여 모두 안전측의 결과를 제공하는 것으로 나타났다.

앞서 선단지지력의 신뢰성 분석결과에서는 선단지지력을 $30 \overline{N}_b' A_b$ 으로 산정하면 계산값이 실측값보다 약간 크고 $25 \overline{N}_b' A_b$ 으로 산정할 때 가장 실측값과 가까우면서 안전측의 결과를 제공한다고 한바 있다. 이는 Meyerhof(30

$\overline{N}_b' A_b$) 방법이 선단지지력은 약간 크게($Q_{t, \text{계산}}/Q_{t, \text{정}} \cdot \text{동재하 시험평균} = 1.09$) 해석하지만 주변마찰력은 작게($Q_{s, \text{계산}}/Q_{s, \text{정}} \cdot \text{동재하시험평균} = 0.85$) 해석하여 두 값을 합할 때 서로 상쇄되어 총 지지력이 실측값에 가까우면서 안전측의 결과를 제시하는 것으로 판단된다.

이상의 분석결과들이 유효하기 위해서는 현장의 시공조건 즉 시멘트 페이스트의 표준배합비(물시멘트비 83%) 사용, 선단부 슬라임 제거 및 N값 50 이상인 지반의 굴착 바닥면 이하로의 관입, 효율이 좋은 해머의 사용 등 확실한 시공관리가 뒷받침되어야 할 것이다.

6. 결 론

SIP 말뚝에 대한 188회의 동재하시험(E.O.I.D : 89 회, Restrike : 99회), 72회의 정재하시험으로부터 주변 지지력과 선단지지력을 평가하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 개선된 기준으로 시공한 SIP 말뚝의 시공하중/재료하중의 평균값이 기존 방법으로 시공한 말뚝에 비해 27.4% 증가하였으며(69%~96.4%) 현재 설계하중이 말뚝재료하중의 60% 정도에 머물고 있는 상황에서 시공품질의 향상으로 좀더 경제적인 설계가 가능함을 의미한다.
- (2) SIP 말뚝의 재하시험결과 단위선단지지력(동재하평균 : 1,186.0tf/m², 정재하평균 : 1,331.78tf/m²)과 단위주면지지력(동재하평균 : 9.1tf/m², 정재하평균 10.45tf/m²)이 국내의 SIP 말뚝에 대한 설계기준보다 큰 것으로 나타났다.
- (3) 이론식과 재하시험결과를 비교한 신뢰성 분석결과 주변지지력은 SPT-CPT 방법이 실측치와 가깝게 계산하는 것으로 나타났으며 항타말뚝에 적용하는 Meyerhof 방법도 SIP 말뚝의 마찰지지력을 비교적 안전측으로 계산하는 것으로 나타났다.
- (4) 선단지지력에 대한 신뢰성 분석결과 안전측을 고려할 경우 Meyerhof($25 \overline{N}_b' A_b$) 방법으로 계산한 선단지지력이 실측치와 가까우면서 안전측인 것으로 분석되었다.
- (5) 총지지력에 대한 신뢰성 분석결과는 Meyerhof($30 \overline{N}_b' A_b$)이 적합한 것으로 나타났으며 Meyerhof($20 \overline{N}_b' A_b$) 방법은 실측값 보다 지지력을 약 24% 과소하게 산정하는 것으로 나타났다.

(접수일자 : 2003년 12월 23일)

참 고 문 헌

1. 건설교통부(2003), 구조물 기초설계기준 해설, pp. 283~292.
2. 김정수(2003), 화강풍화대 지반에 매입된 SIP 말뚝의 지지력 평가에 관한 연구, 박사학위논문, 한양대학교, pp. 124~160.
3. 대한주택공사(2002), 주택건설 전문시방서(건축), pp. 64~85.
4. 대한주택공사(2001), SIP 공법의 품질개선방안과 지지력 산정법 제안에 관한 연구, 대한주택공사 주택연구소, pp. 20~78.
5. 박종배, 김정수, 정형식(2003), SIP 공법의 지지력 특성에 관한 연구, 한국지반공학회논문집, 제 19권 제 1호, pp. 51~60.
6. 이명환, 홍현성, 조찬환, 이장덕, 이원제, 전영석(1995), 매입말뚝 공법의 지지력 특성, 한국지반공학회 '95 가을학술발표회 논문집, pp. 1-1~1-10.
7. 홍원표, 윤중만, 한중근(1998), 매입 말뚝의 지지력 특성, 한국지반공학회, pp. 3, 15~17, 46.
8. (社団法人)コンクリート ベイル 建設技術協會(1994), 埋込み工法 施工便覧, pp. 69~74.
9. Meyerhof, G.G.(1976), Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundation, J. Geotech. Eng. Div., ASCE, Vol. 102, No. GT 3, March 1976, pp. 197 ~ 228.
10. NAVFAC(1982), Soil Mechanics Design Manual, Department of the Navy Facilities Engineering Command, pp. 7.2.192 ~ 7.2.196.
11. Neely, W. J.(1991), Bearing Capacity of Auger-Cast Piles in Sand, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.117, No.2, pp. 331 ~ 345.
12. Robertson, P.K., Campanella, R.G.(1983), SPT-CPT correlations, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 109, No. 11, pp. 1449 ~ 1459.
13. Van Impe, W. F.(1991), Developments in pile design, DFI-Conference, Stresa, pp. 1~31.
14. Vesic, A. S.(1977), Design of Pile Foundations, NCHRP No. 42, Transportation Research Board, National Research Council