

대한주택공사의 매입말뚝 공법의 설계와 재하시험 기준

Design and Load Test Criteria of SIP at Korea National Housing Corporation

박종배¹⁾, Jong-Bae Park, 임해식²⁾, Hae-Sik Lim, 박용부¹⁾, Yong-Boo Park

¹⁾ 대한주택공사 주택도시연구원 수석연구원, Senior Researcher, Housing & Urban Research Institute, KNHC

²⁾ 대한주택공사 분양사업처 차장, Deputy Manager, Korea National Housing Corporation

1. 서 론

건설환경 기준이 엄격한 유럽과 미국 등지에서는 말뚝공사 중 발생하는 소음과 진동을 줄이고자 1970년대부터 현장타설 말뚝을 매우 활발하게 사용하여 왔다. 일본의 영향을 받은 우리나라는 품질관리가 어려운 현장타설 말뚝 대신에 구경 600mm 이하의 말뚝의 소음, 진동 문제를 해결하기 위하여 매입 말뚝 공법을 사용하여 왔다.

매입말뚝의 대표공법인 SIP(Soil-Cement Injected Precast Pile)는 현장타설 말뚝의 품질관리의 어려움을 극복하고자 일본 기초기술연구소가 1968년에 개발하였고 국내에서는 1987년에 한강변 아파트 현장에 최초로 적용된 이후 최근에 도심 재건축·재개발 사업의 증가로 적용량이 급격히 증가하고 있다.

매입말뚝 공법은 일본에서 들여왔지만 일본과 국내의 현장 및 작업조건 등 여러 가지 조건이 다른 상황에서 국내 조건에 맞게 변형되어 시공되고 있다. 이 과정에서 초기에는 매입말뚝 공법의 원리와 개념을 잘 파악하지 못하여 시행오차도 있었지만 지금은 대한주택공사와 한국도로공사 등의 기관들이 중심이 되어 설계 및 시공방법에 대한 꾸준한 연구와 개선을 하여서 국내 요건에 맞는 저소음, 저진동 공법으로 자리를 잡았다.

본 논문에서는 대한주택공사에서 매입말뚝의 설계와 시공방법의 변천과 연구결과들을 소개하고자 한다.

2. 매입말뚝 공법의 설계

시공기술이 뛰어난 선진외국에서는 말뚝재료하중의 거의 100%를 설계에 활용하므로써 경제성을 높이고 있지만 매입말뚝의 경우 국내는 설계하중이 재료하중의 55~75% 수준에 머물고 있어 선진국에 비해 과다한 설계가 이루어지고 있다. 대한주택공사도 90년대에는 기성말뚝의 재료하중의 PHC 400의 지지력을 40tonf으로 설계하여 말뚝재료강도의 36%만 설계에 반영하기도 하였다. 이는 시공품질에 대한 자신이 없었기 때문이다.

결국 말뚝의 설계를 향상시키기 위해서는 시공품질을 향상시키는 것이 선결과제이다. 말뚝의 시공품질을 향상시키기 위해서 뒷장의 시공파트에서 소개하겠지만 시멘트 페이스트의 최적 배합기준을 설정하고 시멘트 페이스트 굳기 전후에 동재하시험을 도입하는 등의 노력을 하였다.

그 결과 그림 1 및 그림 2에서 보듯이 재료하중 대비 시공하중이 69% 정도 이던 것이 96.4%까지 향상되었다.

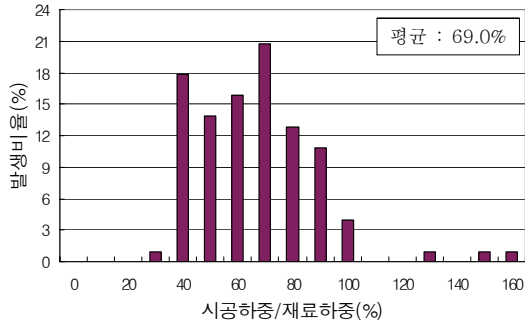


그림 1. 시공하중 대 재료하중(기준시공법)

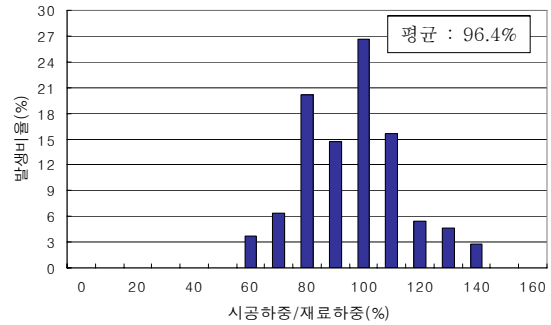


그림 2. 시공하중 대 재료하중(개선된 시공법)

시공품질의 향상과 설계에 대한 지속적인 노력으로 지금은 말뚝 재료하중의 75%(PHC 400 : 설계지 지력 80tonf) 정도를 설계지 지력으로 하고 있으며 계속해서 설계지 지력을 올리는 작업을 하고 있다.

목표설계지 지력을 확보하기 위하여 지반 물성치를 설계식에 입력하여 적정한 시공심도를 결정하게 된다. 설계식으로는 Meyerhof(1976)식을 사용하였다. Meyerhof 식은 항타말뚝의 설계에 사용하기 위하여 개발되었지만 매입말뚝의 뚜렷한 설계방법이 없었기 때문에 선단과 주변부의 계수값을 조정하여 매입말뚝의 설계에도 사용하고 있다.

표 1. 매입말뚝의 설계지 지력 식(콘크리트 펄 建設技術協會, 1994)

시공법	선단지 지력 산정식	말뚝선단부의 조건	주면마찰력의 산정식	비고
시멘트풀 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 근고공법	$R_p = 25\bar{N}A_p$	\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 : 선단지 지력(tf), R_f : 주면마찰력(tf), \bar{q}_u : 평균일축압축강도
 \bar{N}, \bar{N}_s : 말뚝 선단부 및 주면의 평균 N값, A_p : 말뚝 선단면적(m²)
 L_s, L_c : 사질토층 및 점성토층에서의 말뚝길이, ψ : 말뚝주면장

2.1 선단지 지력에 대한 고찰

일본의 건설성기준에 의하면 선단부의 시공방법에 따라서 선단지 지력 계산식이 $20 \sim 30 \bar{N}'_b A_b$ 로 변한다. 즉 최종타격공법일 경우에는 $30 \bar{N}'_b A_b$, 최종경타공법은 $25 \bar{N}'_b A_b$ 이며 시멘트풀 주입공법인 경우에는 $20 \bar{N}'_b A_b$ 이다. 국내는 주로 최종경타공법이 사용되고 있는데도 선단지 지력식으로는 $20 \bar{N}'_b A_b$ 를 사용하고 있어 일본의 $25 \bar{N}'_b A_b$ 보다 작게 설계하였다. 또한, 일본에서는 N값의 한계를 60으로 하고 있고 국내는 N값의 한계를 50으로 하고 있기 때문에 실제로는 최종경타공법의 선단지 지력을 $30 \bar{N}'_b A_b$ 으로 계산해야 일본 건설성식인 $25 \bar{N}'_b A_b$ 로 계산한 값과 같아지게 된다. 그런데도 국내에서는 $20 \bar{N}'_b A_b$ 으로 계산하였기 때문에 일본에 비해 똑같은 지반조건에서도 선단지 지력을 50% 작게 계산하고 있는 셈이다.

국내 조건에 맞는 선단지 지력 식을 찾기 위하여 대한주택공사 현장에 시공된 72본의 매입말뚝에 대한 정재하시험 결과와, 8개 현장에서 초기항타(E.O.I.D)와 재항타(Retriker)가 병행 시공된 매입말뚝에

대한 188회의 동재하시험결과로부터 지지력을 산정하였다. 그림 3에서 8개 현장에 대한 188회의 동재하시험(E.O.I.D 시험 : 89회, Restrike 시험 : 99회) 극한단위선단지지력은 평균 1186.0tf/m^2 인 것으로 나타났다. 그림 4의 정재하시험결과에서는 극한단위선단지지력은 평균 1331.79tf/m^2 을 나타내었다. 참고로 정재하시험결과에서 극한선단지지력은 Stability Plot 방법으로 산정하였다.

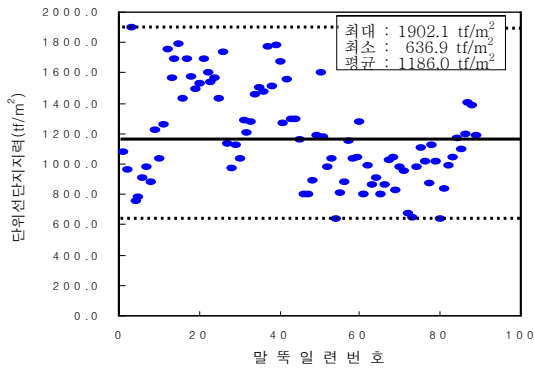


그림 3. 동재하시험결과

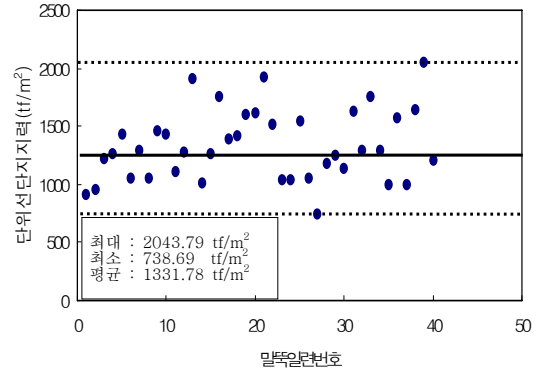


그림 4. 정재하시험결과

시험에서 나타난 평균 극한단위선단지지력(1186.0tf/m^2 및 1331.79tf/m^2)은 매입말뚝에 대한 국내 설계기준(구조물기초설계기준, 2003)에서의 최대값인 750tf/m^2 보다 약 60% 크게 나타났다.

선단지지력에 대한 N값과 Meyerhof 식의 적합한 계수값을 찾기 위해 통계분석을 실시한 결과 그림 5에서와 같이 최종타격공법의 식인 $30 \overline{N}_b' A_b$ 이 적합한 지지력 식인 것으로 나타났으나 안전측을 고려하여 최종경타공법의 식인 $25 \overline{N}_b' A_b$ 을 대한주택공사에서 시공하는 매립말뚝의 선단지지력식으로 하였다.

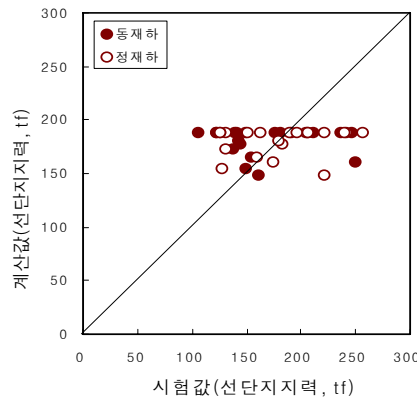


그림 5. Meyerhof 방법($30 \overline{N}_b' A_b$)

$$\text{선단지지력} = \frac{1}{3} \overline{N}_b' A_b \quad \text{식 (1)}$$

여기서, \overline{N}_b' = 말뚝 선단부의 평균 N 값

A_b = 말뚝 선단부 면적

최근인 08년에는 보다 최근의 데이터 분석을 통하여 선단지지력 산정식 N값의 한계값을 50에서 60으로 상향조정하여 보다 경제적인 설계가 가능하도록 기준을 개정하였다. 이로써 주택공사는 매입말뚝의 사용초기에 비해서 50%의 선단지지력을 상향 시켰다. 이는 동재하시험을 대폭적으로 적용한 재하시험기준의 개선과 품질관리의 노력으로 인해 전반적으로 매입말뚝의 품질이 좋아졌고 현장에서 실제 말뚝의 지지력 확보기술도 향상되었기 때문인 것으로 판단된다.

2.2 주변마찰지지력에 대한 고찰

과거에는 구조물기초설계기준 등을 포함하여 국내의 매입말뚝 마찰지지력식은 항타말뚝과 일본의 매입말뚝 식에 비해 50% 작게 설계하였다. 이는 도입초기에 매입말뚝의 시멘트풀 배합비에 대한 정립이 되지 않았고 이로인해 시공품질에 대한 확신이 없었기 때문이었다. 일본의 경우 선단근고액은 물시멘트비 70%를 주변고정액은 150%로 이원화하였으나 국내와 일본의 시공여건이 틀리고 현실적으로 시멘트풀을 이원화하는 것이 어렵기 때문에 대한주택공사는 시멘트 페이스트를 물시멘트비 83%로 일원화하여 주변에서 높은 마찰지지력을 얻을 수 있었다. 따라서 항타말뚝과 같은 설계식의 사용이 가능하였고 72본의 정재하시험과 188회의 동재하시험결과로부터 매입말뚝의 적정한 마찰지지력 식을 찾고자 하였다.

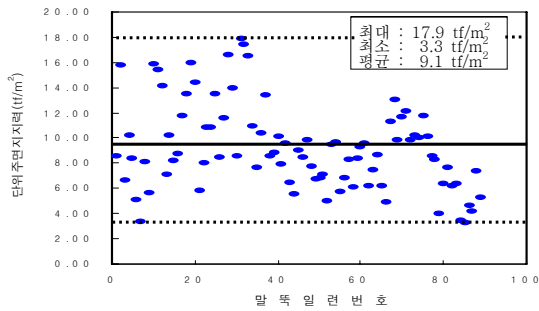


그림 6. 동재하시험결과

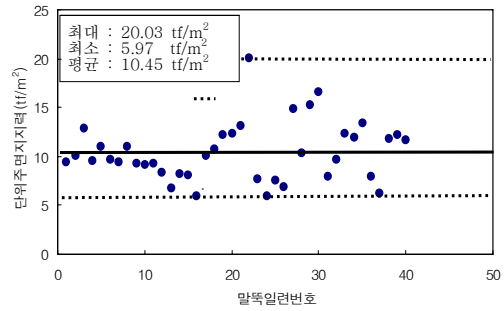


그림 7. 정재하시험결과

그림 6과 그림 7에서 동재하 및 정재하시험에서 구한 극한단위주면지지력은 평균 9.1tf/m²과 10.45tf/m²이다. 이는 국내의 설계기준에 제시된 최대주면지지력 5.0tf/m²의 2배에 해당하는 것으로 항타말뚝의 설계기준값과 유사하였다. 설계식의 제안을 위해서는 N값과 마찰지지력의 관계식이 필요하기 때문에 그림 8과 같이 정재하 및 동재하시험결과를 정리하였다. 그 결과 N값과 극한단위지지력 사이에는 $0.28N + 0.975$ 의 관계가 성립되는 것으로 나타났다. 이는 항타말뚝의 지지력식 $0.2N$ 보다도 큰 값이지만 안전성을 고려하여 $0.2N$ 으로 주변지지력을 계산하는 것이 타당한 것으로 판단되었다.

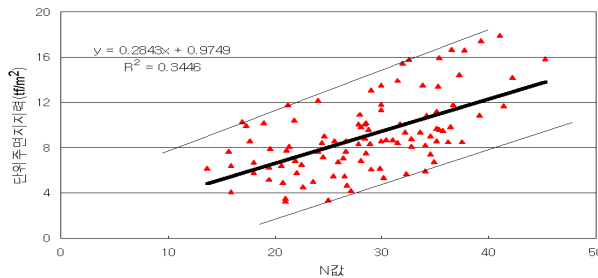


그림 8. N값과 극한단위주면지지력과의 관계

$$\text{주면마찰지지력} = 0.2\bar{N} \cdot L \cdot P \quad \text{식(2)}$$

여기서, \bar{N} : 말뚝 주면부의 평균 N값

L : 말뚝길이

P : 말뚝의 윤변길이

3. 매입말뚝 공법의 시공 및 품질관리

3.1 매입말뚝의 재하시험기준개선에서 시공품질 향상

그림 1에서와 보듯이 과거 매입말뚝의 시공하중은 재료하중의 69% 정도에 머무는 등의 낮은 수준이었다. 이는 일본과 같이 선단근고액을 쓰지 않으면서도 일본과 같이 말뚝 선단을 굴착바닥면에서 말뚝 직경의 0.5배 이내로 띄워서 소일시멘트를 형성시킬려고 했던 것이 원인이었다. 일본과 같이 물시멘트비 70%의 선단근고액을 사용하면 200kgf/cm²의 소일시멘트 강도가 얻어 지는데 이는 지지층인 풍화암의 강도 보다 크기 때문에 충분한 지지를 할 수 있다. 그러나 국내와 같이 물시멘트비 83 ~ 375%를 사용하면 슬라임과 혼합되어 충분한 강도를 얻을 수 없다는 점을 파악하지 못하고 맹목적으로 일본시방을 따라하다가 지지력을 확보하지 못한 경우가 많았다.

이러한 문제점과 국내 여건에 맞는 시공방법의 정립을 위해 대한주택공사에서 굴착바닥면에 기성말뚝의 타입시키는 것을 원칙으로 하는 것으로 시방을 개정하였다. 그리고 굴착바닥면에서 원하는 선단지지력이 확보되는지 알기 위하여 EOID 동재하시험을 실시하는 것으로 2002년에 재하시험기준을 개선하였다. 또한 시멘트풀의 경화후 주면지지력이 확보되는지를 확인하기 위해 Restrike 동재하시험을 추가로 실시하는 것으로 하였다. 대한주택공사의 개선된 재하시험기준은 표 2와 같다.

표 2. 매입말뚝 공법 재하시험기준의 주요개선내용(대한주택공사, 2002)

구분		기준(아파트 동당)	개선(아파트 동당)
선굴착 공법	시향타	동재하	4회(초기, 재향타 각 2회)
		정재하	0.5회
	본향타	동재하	1회(재향타)

EOID 동재하시험의 실시로 인해 의문이 많았던 지지층 확인이 용이해졌으며 적절한 타격으로 인해 그림 2와 같이 시공하중이 재료하중의 69%에서 96.4%로 27.4% 증가하여 매입말뚝의 품질이 비약적으로 개선되었다.

개선된 기준에 의해서는 아파트 동당 2분의 말뚝에 대해 시멘트풀 경화전과 경화 후에 동재하시험을 실시하기 때문에 시멘트풀 경화전후의 말뚝지지력 변화를 알 수 있다.

현장에 시공된 총 60분의 매입말뚝에 대하여 시멘트풀 경화전과 경화후에 동일말뚝에 실시한 총 188회의 동재하시험에 의해 나타난 마찰지지력의 변화는 그림 10 및 그림 11과 같다. 시멘트풀 경화전에 실시한 초기 동재하시험에서 극한주면마찰력은 평균 17.8tf를 극한단위마찰력은 평균 1.3tf/m²인 것으로 산정되었다. 구조물기초설계기준(2003)에 의하면 매입말뚝에 시멘트풀을 주입하지 않은 경우에는 지반조건에 상관없이 극한단위마찰력은 1.0tf/m² 정도라고 하였는데 이 값은 경화전 동재하시험에서 구한 극한단위마찰력과 거의 일치하였다. 말뚝경화 후에 동일말뚝에 실시한 동재하시험결과는 극한주면마찰력이 평균 125.2tf으로 증가하였고 극한단위주면마찰력은 평균 9.1tf/m²까지 증가하는 것으로 나타났다. 시험결과 매입말뚝의 주면마찰력은 경화전에 비하여 경화후에 약 7배 증가하는 것으로 나타났다.

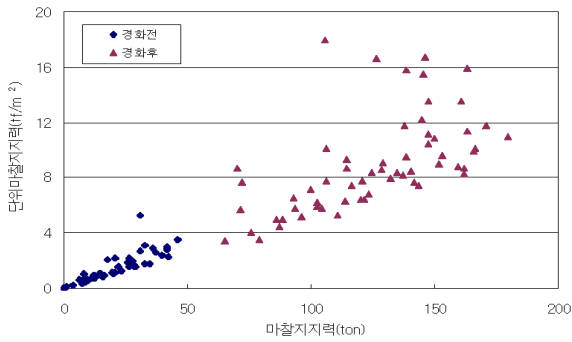


그림 9. 시멘트풀 경화에 따른 마찰지지력의 변화

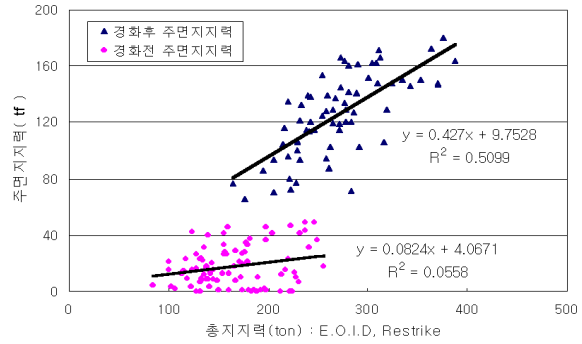


그림 10. 시멘트풀 경화에 따른 총지지력과 주면지지력의 관계

그림 10 및 표 3에서 경화 전에 총지지력에서 마찰지지력이 차지하는 비율은 평균 10.7%였으며 경화후에는 이 비율이 평균 46.3%로 증가하였다. 또한 주면지지력과 전체지지력 간의 상관성은 경화전에는 매우 적은 것으로 나타났으나 경화후에는 주면마찰력이 전체 매입말뚝에서 상당한 지지역할을 하는 것을 알 수 있다.

표 3. 시멘트풀 경화에 따른 마찰/전체지지력의 변화

구 분	마찰지지력 (tf)	전체지지력 (tf)	마찰/전체지지력 비 (%)
경화전	17.8	166.8	10.7
경화후	125.2	270.7	46.3

3.2 매입말뚝의 시멘트풀의 시공품질 향상을 위한 고찰

시멘트풀의 시공품질 향상을 위하여 시멘트풀의 물시멘트비별 강도시험과 시멘트풀과 슬라임이 섞이는 것을 모사해 시멘트풀과 토사의 섞임 비율별로 강도시험을 실시하였다. 사용된 토사는 SM 계열과 SC 계열의 화강풍화토를 사용하였다.

표준배합비(w/c=83%)에서 물시멘트비를 50%까지 변화시킨 시멘트풀의 일축압축강도와 물-시멘트비는 표준배합비로 고정하고 흙-시멘트풀의 혼합비를 달리한 소일시멘트 공시체에 대한 일축압축강도 시험결과는 그림 11 ~ 그림 13과 같다.

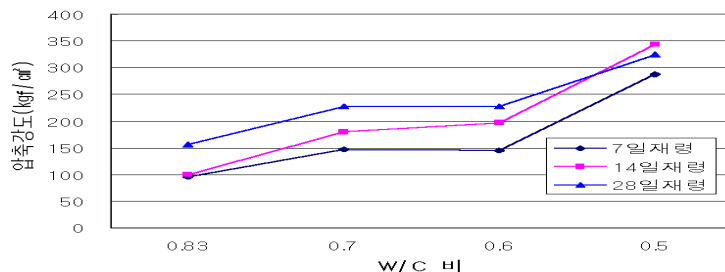


그림 11. 시멘트풀의 재령별/물시멘트비 별 강도시험결과

시멘트풀의 압축강도는 표준배합(0.83)에서 재령별로 94.4 ~ 156.0kgf/cm² 정도이며 배합비를 변화시켜 시멘트양을 증가시킬수록 강도가 비례적으로 증가하였다. w/c를 0.5로 했을때는 일축압축강도가 재

량별로 288.3 ~ 323.6kgf/cm²를 나타내어 물시멘트비가 감소할수록 일축압축강도가 증가하는 뚜렷한 경향을 나타내었다(그림 11 참조).

SM과 SC계열의 화강풍화토와 시멘트풀을 중량비로 섞은 소일시멘트에 대한 압축강도시험결과 흙의 중량비가 10% 일 때는 흙이 섞이지 않은 시멘트풀과 비슷한 강도를 보였으나 이후 흙의 혼합비율이 커짐에 따라 일축압축강도가 거의 비례적으로 감소하였다. 그리고 SM계열의 소일시멘트 강도가 SC계열의 소일시멘트 강도보다 약간 크게 나타났다(그림 12 및 13 참조).

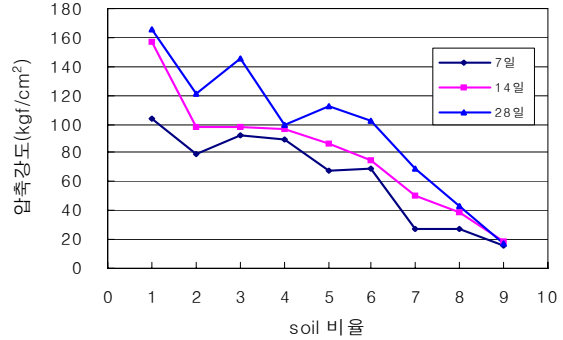
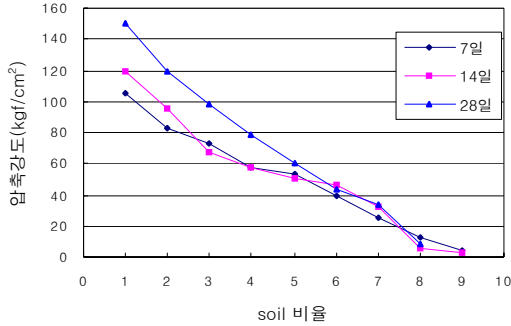


그림 12. SC계열 소일시멘트의 일축압축강도 변화 그림 13. SM계열 소일시멘트의 일축압축강도 변화

일반적으로 국내에서 매입말뚝 시공시 적용하는 시멘트풀의 시멘트 함량은 굴착되는 흙 1 m³당 120kg 정도이며 이 정도의 시멘트 함량으로 형성되는 소일시멘트로부터 기대할 수 있는 일축압축강도는 50kgf/cm² 미만이고(이명환, 2003) 흙의 비율은 65%정도가 된다고 하였다. 본 연구에서 실시한 SM 및 SC계열의 소일시멘트에 대한 일축압축 시험결과에 의하면 재령 14일을 기준으로 소일시멘트의 압축강도가 50kgf/cm² 이상이 될려면 SM계열의 흙혼입 비율은 76%이하, SC계열의 흙혼입 비율은 55%이하가 되어야 하는 것으로 나타났다.

이상의 시험결과에서 물시멘트비 83%로 슬라임과 토사의 혼입이 많지 않을 경우 충분히 소일시멘트의 기준강도를 얻을 수 있는 것으로 나타났으며 이를 반영하여 과도한 슬라임과 토사의 유입이 발생하지 않도록 주의해서 시공하고 있다.

4. 매입말뚝 구경의 다양화

이때까지 대한주택공사의 매입말뚝 직경의 대부분 PHC 400 이었다. 그러나 층고가 높아져 말뚝에 가해지는 하중이 증가하게 되어 보다 합리적 설계를 위해 2008년 8월에 기준을 개선하였다. 개선된 기준에서는 PHC 450이 기본이고 층고에 따라서 PHC 600도 향타 및 매입말뚝에 사용하게 되었다(표 4 참조).

표 4. 대한주택공사 층고별 말뚝 설계 직경

지반 종류	25층 이하		26층 이상 35층 이하		35층 초과	
	규격	설계지지력(kN/분)	규격	설계지지력(kN/분)	규격	설계지지력(kN/분)
Sc	φ450	1,000	φ500	1,200	φ600	1,600
SD~E	지구여건에 따라 설계지지력 감 적용 가능					

5. 결 론

1. 대한주택공사에서 2002년 매입말뚝에 대한 재하시험기준을 개선하여 시공품질을 비약적으로 향상시켰으며 그 결과를 설계에 반영하고 있다.
2. 대한주택공사에서는 매입말뚝의 선단지지력식으로 연구결과를 반영하여 $25 \overline{N}_b' A_b$ 를 사용하고 있으며 최근에 N값의 한계값을 50에서 60으로 상향하여 경제적인 설계가 되도록 하고 있다.
3. 실험결과 매입말뚝의 주변마찰력도 항타말뚝 이상으로 나타나 항타말뚝과 동일한 마찰지지력 산정식을 사용하고 있다.
4. 최근에 아파트 고층화로 인한 건물하중의 증가로 층고별로 매입 기성말뚝의 직경을 상향조정하였다.

참고문헌

1. 김명학, “저소음 저진동 말뚝기초의 지지력 산정법”, 한국지반공학회 2001 기초기술위원회 워크샵, pp2~6, (서울, 한국지반공학회, 2001)
2. 김정수, “화강풍화대 지반에 매입된 SIP 말뚝의 지지력 평가에 관한 연구”, 박사학위논문, 한양대학교, pp.124~160, 2003
3. 대한주택공사, “SIP 공법의 품질개선방안과 지지력 산정식 제안에 관한 연구”, (서울, 대한주택공사, 2001.9)
4. 박종배, “개선된 기준으로 시공된 SIP 말뚝의 지지력 평가에 관한 연구”, 한국지반환경공학회 논문집, pp.5~15, 2004.9
5. 박종배, “매입말뚝의 시멘트풀 강도 및 마찰거동에 관한 연구”, 한국지반환경공학회 논문집, pp.31~39, 2004.9
6. 이명환, “저공해 말뚝공법의 지지력 특성 및 시공관리”, 토지개발기술 봄호, pp34~45, (서울, 한국토지개발공사, 1994)
7. 한국지반공학회, “구조물 기초설계기준”, p292, p342~345, (서울, 건설교통부, 2003)
8. Neely, W. J.(1991), “Bearing Capacity of Auger-Cast Piles in Sand”, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.117, No.2, pp.331-345
9. Roscoe. G. H.(1984), “The behaviour of flight auger bored piles in sand”, Piling and ground improvement, pp.241-250