

매입말뚝의 시멘트풀 강도 및 마찰거동에 관한 연구

Strength and Friction Behavior of Cement paste poured in the Bored Pile

박종배*

Park, Jong-Bae

Abstract

The bored pile is widely used as a low noise and vibration piling method in Korea. However, there is design tendency to minimize the friction capacity of the bored pile because of uncertainty and the quality control specification is not set up. This research analysed the strength characteristics of cement paste after the uniaxial compression test with various condition. Test results show that the compressive strength of cement paste with w/c=0.83 was up to 156.0 kgf/cm², and the lower w/c ratio and the longer age, the strength of cement paste increased. Also the higher soil mixing ratio, the strength of soil cement decreased, and too high soil mixing ratio caused the malfunction of soil cement. Also this research analysed the 188 dynamic pile test results which were performed before and after hardening of cement paste. Analysis result showed that the average ultimate unit friction capacity was 9.1tf/m² and this result surpassed the common design criteria of the bored pile.

Keywords : Bored Pile, Bearing Capacity, Cement Paste, Quality control, Design Criteria

요 지

국내에서는 저소음, 저진동 말뚝공법으로 매입말뚝공법이 매우 활발하게 사용되고 있으나 설계시 마찰지지력을 과소하게 산정하는 경향이 있으며 시멘트풀의 배합비 및 품질관리에 대한 기준이 정립되지 않은 문제점이 있다. 본 연구에서는 시멘트풀에 대해 다양한 조건별로 시험을 실시하여 강도특성을 분석하였다. 시험결과 표준배합비(w/c=83%)의 시멘트풀의 압축강도는 최고 156.0kgf/cm²를 나타내었고 w/c가 낮을수록, 재령이 길수록 압축강도가 커지는 경향을 나타내었고 토사의 혼입률이 높을수록 강도가 감소하여 일정량 이상이 혼입되면 제역할을 하지 못하는 것으로 나타났다. 또한 매입말뚝의 마찰특성을 분석하고 적합한 설계방안을 도출하기 위하여 시멘트풀의 경화 전후에 188회 동재하시험 결과를 분석하였다. 분석결과 극한단위 마찰력은 평균 9.1kgf/cm²을 나타내어 매입말뚝의 통상적인 설계기준을 상회하는 것으로 나타났다.

주요어 : 매입말뚝, 지지력, 시멘트풀, 재하시험, 품질관리, 설계기준

* 정희원 · 대한주택공사 주택도시연구원 선임연구원

1. 서론

현재 국내에서는 도심지 및 가옥 밀집지에서의 말뚝시공 시 소음과 진동에 의한 민원을 줄이고자 SIP와 같은 매입 말뚝공법을 활발히 사용하고 있으며 지지력특성과 경제성이 우수한 항타말뚝은 도심지 공사에서 거의 사라지고 있다. 이러한 영향으로 대한주택공사의 경우 전체 말뚝 시공 본수(약 18만본) 중에서 2001년에는 매입말뚝의 비율이 31%이던 것이 2002년에는 44%로 증가하였으며 계속 증가추세에 있다.

매입말뚝공법은 저소음·저진동 말뚝공법으로 개발된 것으로 지반을 소정의 심도까지 선굴착하고 시멘트풀을 주입한 뒤에 말뚝을 삽입하며, 말뚝을 지반에 고정시키기 위한 마무리 방법에 따라 최종경타공법과 최종항타공법으로 나뉜다. 또한 지반천공시 천공장비의 종류 및 케이싱의 사용여부에 따라 SIP(Soil-cement Injected Precast Pile), SAIP(Special Auger & Soil-cement Injected Precast Pile), SDA(Separated Doughnut Auger), T4 및 PRD(Percussion Rotary Drill) 공법 등으로 다양하게 나뉜다.

국내에서는 최종경타공법의 일종인 SIP 공법이 주로 사용되고 있으며 주변마찰력의 산정시 항타말뚝의 절반 정도로 설계하고 있다(구조물기초설계기준 2003). 그러나 최근 국내의 연구발표에 의하면 홍 등(1998)은 SIP 공법이 천공시 주변지반의 교란으로 주변마찰력이 감소한다는 일반적인 통념과는 달리 SIP 공법의 지지력은 주변마찰의 형태로 지지되고 있으므로 이에 대한 설계에의 반영이 요구되어 진다고 하였으며, 특히 이 등(1995)은 SIP 공법의 주변마찰력이 극한지지력의 약 74.8%로서 주변마찰 지지력상태가 우수하게 나타난다고 하였고, 금호건설 등(1998)에서의 연구결과에 따르면 SIP 공법의 지지력은 주변마찰력 위주로서 주변마찰력이 극한지지력의 약 40~90%를 차지하며 평균 60.8%를 나타내고 있다고 하였다. 또한 최근에 SIP 말뚝에 대해서도 많이 실시하고 있는 동재하시험 결과에서도 SIP 말뚝의 마찰거동이 항타말뚝과 유사한 것으로 확인되고 있다(김정수, 2003). 이와 같은 연구결과들을 통해 볼 때 SIP 말뚝의 마찰지지력에 대한 보다 현실적인 지지거동이 밝혀지고 이를 설계에 반영한다면 말뚝공사비를 상당히 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

이에 본 연구에서는 합리적인 매입말뚝의 주변마찰력 설

계방안을 도출하기 위하여 실제 현장에 시공된 SIP 말뚝에 대해 시멘트풀 경화 전후에 동재하시험을 실시하여 시멘트풀 경화에 따른 마찰지지력의 변화특성을 분석하였다.

또한 매입말뚝의 주변마찰력은 시멘트풀과 흙입자 사이의 부착력과 마찰력으로 발휘되며 시멘트풀의 강도에 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있으나 강도변화에 따른 신뢰도 높은 주변마찰력에 대한 설계지지력 평가는 미흡한 실정이다. 이에 본 연구에서는 시멘트풀에 대해 배합비와 흙의 혼입비율을 달리하여 강도시험을 실시하여 주변마찰력에 대한 설계조건을 만족하기 위한 시멘트풀의 강도조건에 대해서도 검토하였다.

2. 매입말뚝의 시멘트풀에 대한 고찰

통상적으로 매입말뚝공법은 삽입하는 기성말뚝의 직경보다 100mm 더 크게 지반을 천공하고 시멘트풀을 주입하며 굴착공내의 흙과 혼합되어 소일시멘트를 형성한다. 소일시멘트는 굴착공벽의 안정화를 돕고 말뚝에 가해진 하중을 주변지반으로 전달시키는 매개체 역할을 한다. 매입말뚝의 마찰지지력은 지반강도와 소일시멘트의 강도에 비례하는 것으로 알려져 있으므로 적당한 강도를 유지해야 한다.

이외에 구미의 경우 매입말뚝에 대한 직접적인 연구보다 이와 유사한 시멘트풀 주입 말뚝의 선단지지력과 주변마찰력에 대한 연구가 이루어지고 있는 실정인데, Neely(1991)는 모래지반에서의 압축, 인장시험을 토대로 하여 말뚝의 천공기술과 그라우팅기술이 지지력 발현에 중요한 역할을 한다고 하였으며, Lee and Poulos(1990)는 시멘트풀 주입 말뚝의 하중전이현상에 근거한 주변마찰력의 특성을 연구하여 주변마찰력의 감소가 말뚝의 직경과 관련이 있다는 연구결과를 발표하였다.

매입말뚝의 주변마찰력의 주요 인자인 시멘트풀의 강도는 주로 배합비에 의해 결정되나 국내에서는 뚜렷한 기준이 없어 사용하는 기관마다 조금씩의 차이를 나타내고 있다. 건설부제정 구조물기초설계기준(2003)에서는 선단부와 주변부를 구분하지 않고 같은 혼합비의 시멘트풀을 사용할 경우 대략 물시멘트 비가 186% 내지 125%를 사용하도록 하고 있다. 대한주택공사의 경우 일반토사지반에서는 표준배합비 $w/c=83\%$ (표 1 참조)를 사용하며 연약한 점토층이나 느슨한 지반에서는 부배합을 적용하고 있다. 부배합은 시멘트량을 50%이상 할증한 것으로 w/c 의 최소한계는 압송주입이 가능한 한계인 50%이상으로 하고 있

다. 도로공사는 $w/c=70\sim60\%$ 를 적용하고 있다. 공법을 개발한 일본에서는 시멘트풀을 선단근고액과 주면주입액으로 이원화하여 선단부에는 선단근고액(일축압축강도 : $200\sim300\text{kgf/cm}^2$), 주면부에는 주면고정액(일축압축강도 : $5\sim14\text{kgf/cm}^2$)을 주입하고 있는데 주면고정액의 일축압축강도는 국내의 통상적인 배합비로 시공된 시멘트풀의 강도보다 훨씬 작은 것으로 알려지고 있다.

표 1. 매입말뚝 공법의 시멘트풀 표준배합비(m^3)(대한주택공사)

| 구 분 | 물 | 시멘트 | w/c |
|------------|-------|-------|-----|
| 주면 및 선단고정액 | 730kg | 880kg | 83% |

플랜트에서 소정의 비율로 배합된 시멘트풀이 천공홀에 주입되면 지반 천공중에 발생된 슬라임과 지하수가 혼합되면서 소일시멘트가 형성되고 슬라임의 혼합량에 따라서 강도가 다양하게 변하게 된다. 시공에서는 가급적 슬라임을 줄이고 또한 부득이 발생한 슬라임은 시멘트풀과 교반이 잘되게 하여 부분적인 강도 취약화가 발생하지 않도록 하고 있다. 일본에서는 배합비와 소일시멘트의 강도의 관계를 알기 위하여 지중의 소일시멘트 코어를 채취하려는 시도도 하였지만 지반별로 천공시 어느 정도의 슬라임이 발생하는지 측정하는 것은 사실상 불가능하고 따라서 슬라임 발생량 및 소일시멘트의 강도변화에 대한 예측도 매우 어렵다.

본 연구에서는 배합에 따른 시멘트풀의 강도특성을 살펴보기 위하여 시험실에서 각각 다른 w/c로 배합된 시멘트풀 공시체를 제작하여 재령별 강도시험을 실시하였다. 또한 표준배합비(w/c=83%)의 시멘트풀이 주입되었을 때 슬라임의 혼입량이 소일시멘트의 강도에 미치는 영향을 알기 위하여 국내 매입말뚝의 시공시 가장 흔히 접할 수 있는 화강풍화토를 표준배합비의 시멘트풀과 일정량을 섞어 가면서 재령별 강도시험을 실시하였다. 본 시험을 통하여 매입말뚝의 시공시 주입된 시멘트풀의 배합비별, 재령별 및 슬라임 혼입량에 따른 강도변화에 대한 이해를 돕고자 하였다.

3. 강도시험

본 시험에서는 시멘트풀이 실제 지반에 주입된 후에 강도발현 특성을 알기 위하여 표준배합비(w/c=83%)로 제작된 시멘트풀의 재령일에 따른 강도변화와 시멘트풀 주입시 슬라임이 혼합되어 형성된 소일시멘트의 강도변화를 알

아보기 위해 재령일 및 흙과 시멘트풀의 배합비를 달리하여 일축압축강도시험을 실시하였다. 각각 91회, 187회 총 271회의 시험을 실시하였고 시험내용은 표 2와 같다.

표 2. 일축압축강도시험 내용

| 구 분 | 내 용 | 비 고 |
|-----------|--|--------------------------|
| 시험 종류 | · 시멘트풀 일축압축강도시험 · 소일시멘트 일축압축 | |
| 몰드 종류 | · 단면적 25cm^2 큐빅몰드 | |
| W/C | · 0.83, 0.7, 0.6, 0.5 | |
| 소일시멘트 배합비 | · 흙 : 시멘트풀 = 1:9~9:1(중량비) · 시멘트풀의 w/c는 0.83로 고정 | · 사용흙시료 : 화강풍화토 (SM, SC) |
| 재령일 | · 7일, 14일, 28일 | · 양생방법 : 수중양생 |
| 시험 횟수 | · 시멘트풀(91회) · 소일시멘트 - SM 토질 : 87회 - SC 토질 : 93회 | · 분석값은 3회 1set 평균값 사용 |

3.1 공시체 제작

(1) 시멘트풀 공시체

배합비 및 재령별 강도특성을 알기위해 시멘트풀의 w/c를 83, 70, 60, 50%로 배합하여 단면적 25cm^2 인 큐빅 공시체를 제작하였다. 그림 1은 제작된 시멘트풀 공시체 모습이다.



그림 1. 시멘트풀 공시체

(2) 소일시멘트 공시체

굴착공내에 시멘트풀과 슬라임의 혼합에 의해 형성되는 소일시멘트의 강도를 추정하기 위해 공시체를 제작하여 일축압축강도시험을 하였다. 시멘트풀은 w/c=83%로 고정하였고 흙시료와 시멘트풀의 배합비는 중량비로 1:9에서 9:1까지 9단계로 배합하였다(표 3 참조).

표 3. 소일시멘트 중량 배합비

| 배합비 (페이스트 : soil) | 9 : 1 | 8 : 2 | 7 : 3 | 6 : 4 | 5 : 5 | 4 : 6 | 3 : 7 | 2 : 7 | 1 : 9 |
|----------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 페이스트 | cement(g) | 393 | 350 | 306 | 262 | 219 | 175 | 131 | 87 |
| | 물(g) | 327 | 290 | 254 | 218 | 181 | 145 | 109 | 73 |
| soil(g) | 80 | 160 | 240 | 320 | 400 | 480 | 560 | 640 | 720 |

소일시멘트 제작에 사용된 흙시료는 국내에서 광범위하게 분포되어 있는 화강풍화토로 하였으며 시험에 사용된 흙의 주요 물성치는 표 4와 같다. 체가름 분석을 통한 입도 분포곡선은 그림 2와 그림 3에 나타내었다.

표 4. 시료의 물성치

| 토질구분 | 자연함수비 | 비중 | 액성한계 | 소성한계 |
|-------|-------|------|---------|---------|
| SM 시료 | 16 % | 2.70 | NP | NP |
| SC 시료 | 27 % | 2.69 | 38.13 % | 20.06 % |

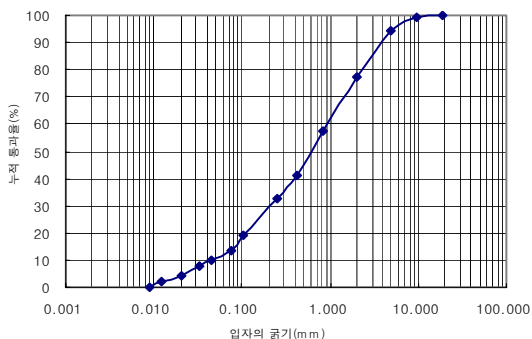


그림 2. SM토질의 입도분포곡선

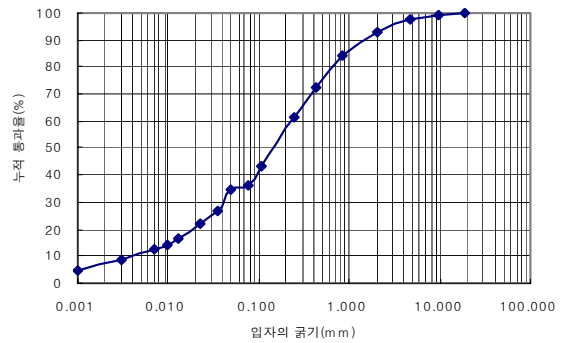


그림 3. SC토질의 입도분포곡선

3.2 일축압축시험

일축압축시험은 재하속도 1mm/분, 최대허용변위 5mm, 최대하중 10tf, 제어방식은 파괴감소하중을 최대하중의 80%까지 설정하여 변형제어(최대허용변위 5mm)와 하중 제어를 동시에 사용하였다.

3.3 강도시험 결과

시험결과에서는 재령일에 따라 시멘트풀과 소일시멘트의 일축압축강도 및 변형계수(E)를 구하였다.

(1) 압축강도

표준배합비(w/c=83%)에서 물시멘트비를 50%까지 변화시킨 시멘트풀의 일축압축강도와 물-시멘트비는 표준배합비로 고정하고 흙-시멘트풀의 혼합비를 달리한 소일시멘트 공시체에 대한 일축압축강도는 그림 4~그림 6과 같다.

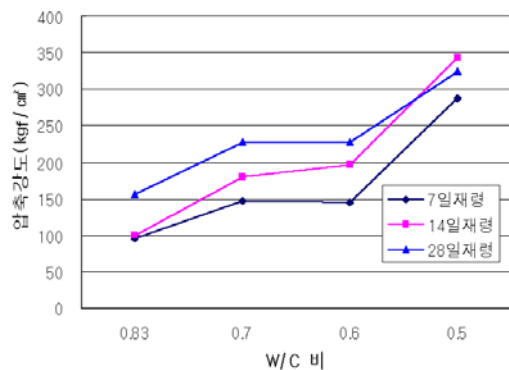


그림 4. 시멘트풀의 강도시험결과

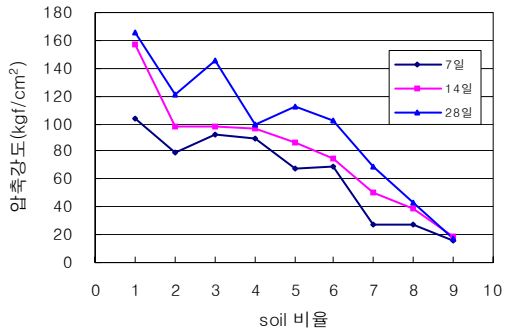


그림 5. SM계열 소일시멘트의 일축압축강도 변화

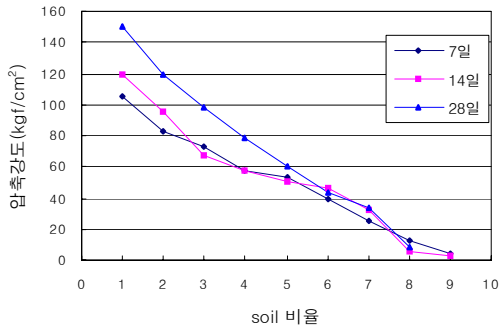


그림 6. SC계열 소일시멘트의 일축압축강도 변화

시멘트풀의 압축강도는 표준배합(w/c=83%)에서 재령별로 94.4~156.0kgf/cm² 정도이며 배합비를 변화시켜 시멘트양을 증가시킬수록 강도가 비례적으로 증가하였다. w/c를 50%로 했을때는 일축압축강도가 재령별로 288.3~323.6kgf/cm²를 나타내어 물시멘트비가 감소할수록 일축압축강도가 증가하는 뚜렷한 경향을 나타내었다(그림 4 참조).

SM과 SC계열의 화강풍화토와 시멘트풀을 중량비로 섞은 소일시멘트에 대한 압축강도시험결과 흙의 중량비가 10%일때는 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 5 및 6 참조).

일반적으로 국내에서 매입말뚝 시공시 적용하는 시멘트풀의 시멘트 함량은 굴착되는 흙 1m³당 120kg 정도이며 이 정도의 시멘트 함량으로 형성되는 소일시멘트로부터 기대할 수 있는 일축압축강도는 50kgf/cm² 미만이고(이명환, 2003) 흙의 비율은 65%정도가 된다고 하였다. 본 연

구에서 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.

(2) 변형계수

응력-변형률 곡선의 선형구간에서 직선의 기울기로 구한 각 공시체의 변형계수는 그림 7~그림 9와 같다.

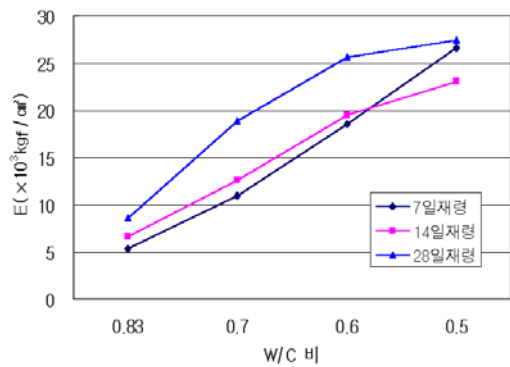


그림 7. 시멘트풀 변형계수

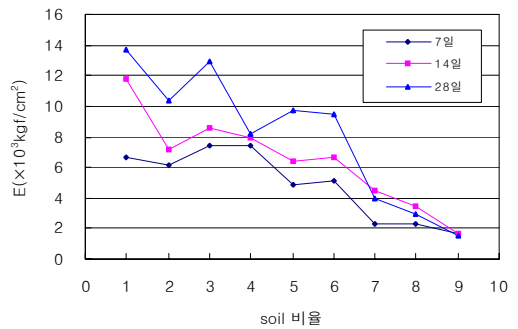


그림 8. SM계열 소일시멘트 변형계수

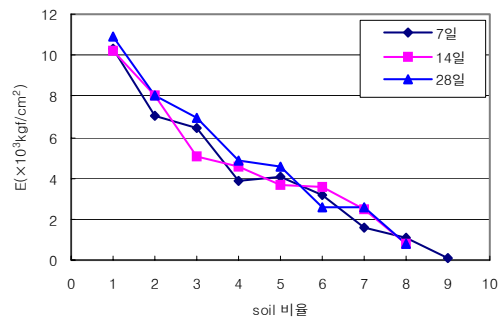


그림 9. SC계열 소일시멘트 변형계수

토사가 혼입되지 아니한 시멘트풀의 배합비별 변형계수는 그림 7과 같다. 그림 7에서 시멘트풀은 표준배합비(w/c=83%)에서 변형계수가 최고 $8.6 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$, w/c=50%에서는 최고 $27.6 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 을 나타내었다.

SM 및 SC계열의 화강풍화토가 혼입된 소일시멘트의 변형계수 시험결과는 그림 8 및 그림 9와 같으며 SM계열의 소일시멘트의 변형계수가 흙:시멘트풀=1:9일 때 $6.6 \sim 13.7 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 를, 9:1일 때 $1.6 \sim 1.7 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 를 나타내었다(그림 8 참조).

그림 9에서 SC계열의 소일시멘트는 변형계수가 흙:시멘트풀비율이 1:9일 때 $10.3 \sim 10.9 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 를, 9:1일 때 $0.14 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 를 나타내어 모두 흙의 혼합비율이 커질수록 변형계수가 감소하는 경향을 나타내었다.

매입말뚝에서 소일시멘트가 말뚝과 지반을 고정시켜 말뚝에 전달된 힘이 지반에 전달되기 위해서는 소일시멘트의 강도가 지반보다 강하여야 한다. 즉 통상적으로 매입말뚝이 시공된 지반조건에서는 풍화암의 강도가 가장 강하므로 소일시멘트가 풍화암 이상의 강도를 나타내어야 한다. 그런데 현장상태에서의 풍화암의 강도를 알기 어렵기 때문에 변형계수값으로 풍화암과 소일시멘트의 상대강도를 간접 비교하였다. 비교기준으로 삼은 풍화암의 변형계수는 표 5와 같다.

표 5. 서울지역의 지반별 지반정수의 적용범위

| 지반명 | 단위중량 γ_s (tf/m ³) | 점착력 c (tf/m ³) | 내부마찰각 ϕ (°) | 변형계수 E($\times 10^3 \text{kgf/cm}^2$) | 포어송비 ν |
|-----|---|-------------------------------|---------------------|--|---------------|
| 풍화토 | 1.7~2.0 | 0~10 | 25~30 | 0.2~0.4 | 0.5 |
| 풍화암 | 2.0~2.2 | 10~30 | 30~35 | 1~2 | 0.3~0.4 |
| 연암 | 2.3~2.5 | 30~60 | 30~40 | 2~4 | 0.25~0.3 |
| 보통암 | 2.4~2.6 | 60~150 | 35~40 | 4~10 | 0.25 |
| 경암 | 2.5~2.7 | 150~200 | 35~45 | 10~40 | 0.2 |
| 극경암 | 2.6~2.7 | 200~500 | 40~45 | 40~80 | 0.2 |

그림 7에서 표준배합비의 시멘트풀의 변형계수는 재령별로 $5.4 \sim 8.6 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 을 나타내어 표 5에서 나타난 풍화암의 변형계수인 $2.0 \times 10^3 \text{kgf/cm}^2$ 을 능가하였다. 그림 8과 그림 9에서 SM계열의 소일시멘트는 재령 14일을 기준으로 흙의 혼합비가 88% 이상일 때, SC계열의 소일시멘트는 흙의 혼합비가 73% 이상일 때 소일시멘트의 변

형계수가 풍화암의 변형계수보다 작은 값을 나타내었다. 이럴 경우 매입말뚝이 지지력이 우수한 지반에 설치되었다 할지라도 상대적인 강도 열세에 의하여 소일시멘트 내에서 파괴가 발생하며 말뚝에 가해진 하중을 지반에 전달하는 역할을 감당하지 못할 것으로 판단된다.

소일시멘트의 일축압축강도와 변형계수 시험은 흙의 혼합비가 높을수록 감소하는 경향을 나타내었다. 특히, 토질의 성분에 따라서 차이가 있긴 했지만 흙의 혼합비가 일정 비율 이상일 때에는 기성말뚝과 지반을 고정시켜주는 역할을 수행하지 못하는 것으로 나타나 시멘트풀에 과다한 토사나 슬라임의 혼입은 매입말뚝의 지지력 발현에 불리한 것으로 실험결과 나타났다.

4. 현장 마찰지지력 실측

4.1 현장시험 개요

시멘트풀의 경화에 따른 매입말뚝의 주변마찰지지력의 변화를 파악하기 위하여 대한주택공사 10개 현장에서 초기항타(E.O.I.D : End of Initial Driving test)와 재항타(Restrike)가 병행 시행된 매입말뚝에 대한 188회의 동재하시험 결과로부터 지지력을 산정하였다. 시험을 실시한 10개 현장은 국내에서 가장 일반적으로 분포되어 있는 화강풍화토로 이루어져 있으며 말뚝의 선단부는 풍화암에 근입되어 있다. 재항타 동재하시험은 초기 동재하시험을 실시한 동일 말뚝에 대하여 시공후 7일 후에 실시하여 다양한 국내 지반조건에 시공된 매입말뚝 주변부의 소일시멘트의 강도변화에 따른 마찰지지력의 변화를 살펴보고자 하였다.

매입말뚝의 지지력 특성을 평가하기 위한 동재하시험의 경우 ASTM D 4945에 근거한 미국 PDI사의 MODEL PAK 항타분석기(PDA, Pile Driving Analyzer)를 사용하였고 매입공법에 적용된 말뚝의 재질 및 규격은 고강도 콘크리트 말뚝(PHC, KS F 4306)으로서 직경은 400mm이며, 주입시멘트풀의 w/c는 83%이며, 설계하중은 대부분 50tf 또는 60tf로서 말뚝재료 허용하중의 60% 정도 수준이었다(김, 2003).

4.2 동재하시험 결과분석 및 고찰

현장에 시공된 총 60본의 SIP 말뚝에 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 나타내었으며 경화전 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. 말뚝경화후에 동일말뚝에 실시한 동재하시험결과는 극한주면마찰력이 평균 125.2tf으로 증가하였고 극한단위주면마찰력은 평균 9.1tf/m²까지 증가하는 것으로 나타났다. 시험결과 SIP 말뚝의 주면마찰력은 경화전에 비하여 경화후에 약 7배 증가하는 것으로 나타났다.

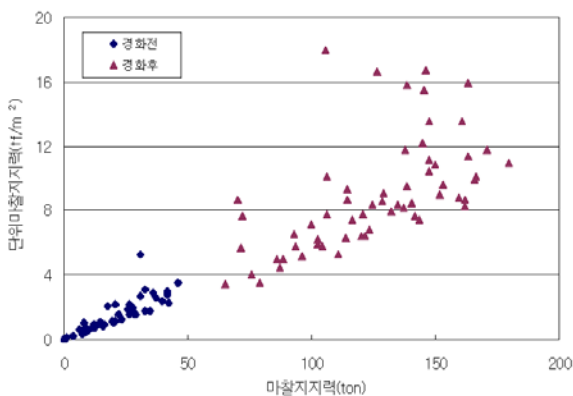


그림 10. 마찰지지력의 변화

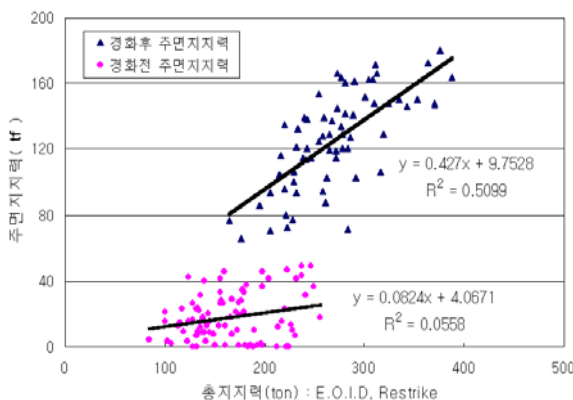


그림 11. 총지지력과 주면지지력의 관계

그림 11 및 표 6에서 경화전에 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 나타났다으나 경화후에는 주면지지력/전체지지력 비의 평균값과 비슷한 정도로 상관성이 있는 것으로 나타났다.

표 6. 시멘트페이스트 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 |

표 7에는 매입말뚝에 대한 국내와 일본의 마찰지지력 산정식을 나타내었다. 구조물기초설계식에는 매입말뚝의 마찰지지력식을 항타말뚝의 절반값으로 하고 있으며 일본 건설성 식은 N값이 25이하의 지층에서는 항타말뚝과 같은 식을 적용하며 이보다 강한 지층에서는 항타말뚝의 절반값을 취하도록 하고 있다. 그러나 동재하시험결과 그림 12에서 시멘트풀이 경화하고 난 후에 극한단위주면마찰력은 3.3~17.8tf/m²의 분포를 나타내었고 평균값은 9.1tf/m²을 나타내어 구조물기초설계기준과 일본의 건설성 식의 최대 극한단위마찰력인 5.0tf/m² 보다 80% 정도 크게 발휘된 것으로 분석되었으며, 재항타 시험개소 총 99본중 8본만이 5.0tf/m² 미만으로 분석되어 SIP 말뚝의 주면지지력은 대부분 국내 설계기준을 훨씬 상회하는 것으로 나타났다.

또한 매입말뚝의 보다 합리적인 주면지지력 산정식을 찾기 위하여 그림 13에서는 동재하시험에서 구한 극한단위마찰력과 N값과의 상관관계를 분석하였으며 그결과 q_s (극한단위마찰력 : tf/m²)=0.28N+0.975의 관계가 성립되는 것으로 나타났으며 극한단위마찰력과 N값과의 관계중 상한치(tf/m²)는 0.35N+0.42, 하한치(tf/m²)는 0.29N-0.4인 것으로 분석되었다.

표 7. 국내의 매입말뚝의 주면마찰력 산정식

| 구 분 | 국내 구조물기초설계기준 | 일본 건설성 식 |
|-----------|--|--------------------|
| 주면마찰력 산정식 | $q_s = 0.1\bar{N}$ | $q_s = 0.2\bar{N}$ |
| 비 고 | $q_s \leq 5\text{tf/m}^2$ \bar{N} : 수정평균 N값 | |

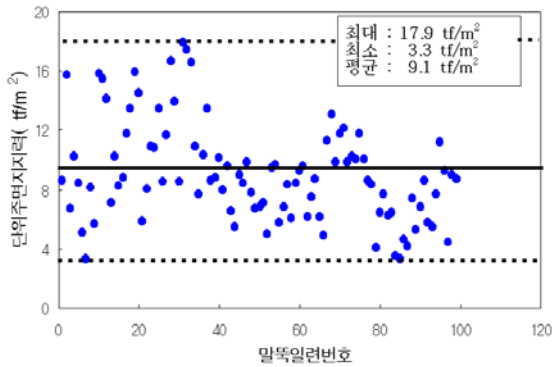


그림 12. 시멘트풀 경화후 극한단위마찰력의 분포

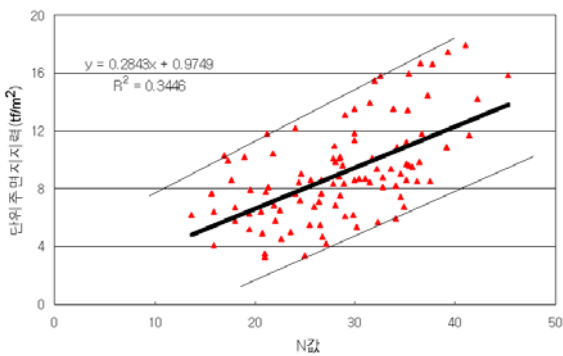


그림 13. N값과 극한단위마찰력 관계

5. 결 론

(1) 시멘트풀에 대한 강도시험결과 w/c가 낮을수록, 재령일이 길수록 일축압축강도가 커지는 경향을 나타내었고 표준배합비(w/c=83%)의 강도는 최고 156.0kg/cm²이며 w/c를 50%로 했을때는 최고 323.6kg/cm²의 강도를 나타내었다.

- (2) 소일시멘트의 강도시험결과 흙의 중량비가 10%까지는 시멘트풀과 비슷한 강도를 보였으나 흙의 혼합비율이 커짐에 따라 강도가 비례적으로 감소하였으며 소일시멘트의 압축강도가 50kg/cm² 이상이 되기 위해서는 SM계열의 흙혼입 비율은 76%이하, SC계열은 55% 이하가 되어야 하는 것으로 나타났다
- (3) 소일시멘트의 변형계수 측정값도 흙의 혼입비율이 높을수록 감소하는 경향을 나타내었고 SM계열의 소일시멘트는 흙의 혼입비율이 88% 이상일때, SC계열은 73% 이상일때 국내 풍화암의 변형계수보다 낮은 값을 나타내었다.
- (4) 시멘트풀이 경화전 SIP 말뚝의 극한단위마찰력은 평균 1.3tf/m²이었고 경화후에는 평균 9.1tf/m²으로 나타났으며 경화전에 마찰지지력/전체지지력 비율이 10.7%이던 것이 경화후에는 46.3%로 증가하였다.
- (5) 시멘트풀 경화후 Restrike 시험에서 극한단위마찰력은 3.3~17.8tf/m²(평균 9.1tf/m²) 나타내어 매입말뚝의 설계한계값(5.0tf/m²)보다 80% 정도 크게 발휘된 것으로 분석되었으며, 총 99본의 시험말뚝중 8본만이 5.0tf/m² 미만으로 분석되어 SIP 말뚝의 주변지지력은 대부분 국내 설계기준을 상회하는 것으로 나타났다.
- (6) Restrike 시험에서 구한 극한단위마찰력(q_s)과 N값과의 상관관계를 분석한 결과 q_s(tf/m²) = 0.28N + 0.975의 관계가 성립되는 것으로 나타났으며 q_s와 N값과의 관계중 상한치는 0.35N+0.42, 하한치는 0.29N-0.4인 것으로 분석되었다.

(접수일자 : 2004년 6월 4일)

참 고 문 헌

1. 금호기술연구소(1995), SIP 시공 말뚝의 주변마찰력 증대에 관한 연구, pp. 31~38.
2. 김정수(2003), 화강풍화대 지반에 매입된 SIP 말뚝의 지지력 평가에 관한 연구, 박사학위논문, 한양대학교, pp. 124~160.
3. 대한주택공사(2001), SIP 공법의 품질개선방안과 지지력 산정법 제안에 관한 연구, pp. 16~19.
4. 사단법인 대한토목학회(1996), 건설교통부 제정 도로교표준시방서 -설계/시공 및 유지관리편-, pp. 680 ~ 734.
5. (사)한국지반공학학회(2003), 구조물 기초설계기준 해설, pp. 291~292.
6. 이명환, 홍헌성, 조찬환, 이장덕, 이원제, 전영석(1995), 매입말뚝 공법의 지지력 특성, 한국지반공학회 '95 가을학술발표회 논문집, pp. 1-1~1-10.
7. 이명환(2003), 우리나라 말뚝기초의 설계와 시공상의 문제점과 대책, 한국지반공학회 기초기술위원회 워크샵 교재, pp. 19~29.

8. 홍원표, 윤중만, 한중근(1998), 매입말뚝의 지지력 특성, 한국지반공학회, pp. 3~46.
9. Lee, C. Y., and Poulos, H. G.(1990), Test on Instrumented Grouted Piles in Offshore Calcareous Soil, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 107, No. 20, pp. 1738~1753.
10. 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.
11. Neely, W. J.(1991), Bearing Capacity of Auger-Cast Piles in Sand, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.117, No.2, pp. 331~34.