

최종관입량을 기준으로 한 합리적인 말뚝 시공관리 방안

A new proposal for the appropriate quality control of driven piles by using set values

이 명환¹⁾, Myung-Whan Lee, 홍 현성²⁾, Hun-Sung Hong
김 성희³⁾, Soung-Hoi Kim, 전 영석³⁾, Young-Suk Jun

¹⁾ (주)파일테크 연구소장, Principal Researcher, Piletech Consulting Engineers

²⁾ (주)파일테크 사장, Principal, Piletech Consulting Engineers

³⁾ (주)파일테크 부장, Senior Researcher, Piletech Consulting Engineers

SYNOPSIS : Because of simplicity and easiness, dynamic pile driving formulae have long been used by most of the field engineers for pile quality control purposes. Yet their reliability have been repeatedly reported unsuitable and the results can lead to significant errors. According to the research results by the authors, the two most important sources of unreliability of dynamic pile driving formulae are uncertainty in the estimation of hammer efficiency and time dependent characteristics of pile bearing capacity. Based on this finding a new method is proposed. By using the actual value of hammer efficiency the pile bearing capacity at the time of driving could be reasonably estimated. By performing restrike test sometime after pile installation, time effect coefficient could be determined. The effectiveness of the proposed method was proven in the actual construction project.

Keywords : dynamic pile driving formula, hammer efficiency, time effect, quality control

1. 서 론

우리나라는 전세계적으로 말뚝기초를 가장 많이 사용하고 있는 나라이다. 말뚝기초의 절대적인 사용물량에서는 그렇지 않겠지만 유럽이나 일본의 말뚝기초 사용 실적을 경제력이나 건설 규모와 연관하여 대비해 보면 이러한 경향이 분명히 나타난다.

우리나라가 이처럼 많은 말뚝기초를 사용하는 원인은 여러가지가 있겠지만 우리의 말뚝기초 관련 기술수준이 여타 외국에 비하여 낙후되어 있음을 부인하기는 어렵다. 왜냐하면 각종 문헌에 나타나는 외국의 지반조건과 우리나라의 지반조건을 비교해 보면 우리나라가 외국에 비하여 지반조건이 특히 열악한 것으로는 나타나지 않고 있으나, 동일 규격의 말뚝에 대한 설계하중 규모에서 우리나라의 말뚝기초 설계하중은 지나치게 낮기 때문이다.

우리나라의 말뚝기초 관련 기술수준이 낙후된 원인도 여러가지가 있겠지만 근본적으로는 현장에서 이루어지고 있는 말뚝의 품질관리가 불확실한 데에 기인한다.

그간 우리나라에서도 말뚝기초와 관련하여 많은 연구노력이 있어왔다. 특히 지난 10년간 한국지반 공학회의 봄, 가을 학술발표회 및 말뚝기초 기술위원회의 학술발표회를 통하여 많은 연구 성과들이 발표되어 말뚝기초의 설계기술에는 상당한 발전이 있었던 것도 사실이다. 그 결과 우리나라에서도 선진외국 수준의 말뚝기초 설계가 가능하게 되었으며 일부 공사에서는 실제 설계에 반영하기도 하였다.

그러나 문제는 실제 시공되는 말뚝기초의 품질관리 기술수준은 아직까지도 담보상태에 머물고 있다는 점이다. 지난 수년간 국내에서 시공된 말뚝기초의 재하시험 결과를 종합 분석한 결과에 의하면 국내에서는 말뚝의 최적 설계하중 대비 40~60%의 낮은 설계가 이루어지고 있음에도 불구하고 설계 하중에 미달하는 말뚝이 전체 시험 말뚝의 20~25%에 달하고 있다. 또한 설계하중에 미달하는 말뚝이 발생한 공사의 비율은 전체 공사의 30% 이상이 되는 것으로 조사되었다. 물론 말뚝 재하시험 결과 설계하중을 크게 초과하는 말뚝의 비율도 크게 나타나고 있다. 그러나 이와 같은 설계하중 초과분을 토대로하여 말뚝의 설계하중을 상향 조정하기에는 설계하중에 미달하는 부분 또한 고려하여야 하는 설계의 속성상 불가능하다.

결국 설계기술 수준의 향상은 시공기술의 낙후로 인하여 실익을 얻지 못하고 설계자는 설계하중 미달 가능성을 염두에 두고 보수적인 설계를 할 수 밖에 없으며 따라서 말뚝기초 기술수준의 향상은 이루어지지 않는 악순환이 계속되고 있다.

우리나라에서 적용되는 말뚝기초 공법은 크게 대구경 현장타설 콘크리트말뚝과 기성말뚝 공법으로 나뉘어진다. 대구경 현장타설 콘크리트 말뚝의 설계 및 시공 기술수준도 여타 외국에 비하여 뒤떨어져 있는 것으로 파악되고 있다. 국내에서 가장 적용 빈도가 높은 직경 1500mm의 현장타설 콘크리트말뚝의 설계하중은 600~700ton에 불과하다. 그러나 동남아에서는 직경 900mm의 현장타설 콘크리트말뚝으로 같은 규모의 설계를 하고 있다. 따라서 이 부분에 대해서도 본격적인 연구가 필요한 시점이다.

대구경 현장타설 콘크리트말뚝은 대형 교량 또는 대형 건물의 기초에서 많이 채택되며, 그 밖의 경우에는 아직도 기성말뚝의 적용이 보편적이다. 1990년대 이전까지 대부분의 기성말뚝은 항타공법으로 시공되었으나 1990년대 이후에는 항타로 인한 지반진동 또는 소음 등 건설공해 문제가 대두되어 항타공법은 감소하고 반대로 선굴착 공법이 급속도로 확산되고 있다. 선굴착 말뚝공법의 지지력 원리는 아직까지 만족할 만큼 규명되지 않았으며 따라서 합리적인 품질관리 기준도 정립되지 못한 실정이다. 그러나 현재 국내에서 적용되는 각종 선굴착 공법들(SIP, SAIP, PRD 등)에서 공통적으로 나타나는 현상은 주면마찰력 증진을 위하여 주입하는 시멘트풀만 가지고는 기대하는 지지력을 얻을 수 없는 경우가 대부분이라는 것이다. 따라서 국내에서 선굴착 공법을 시행할 때에는 선단지지력 확보를 위하여 최종항타가 필수적으로 요구된다는 것이다. 이러한 측면에서 보면 국내의 경우 대구경 현장타설 콘크리트말뚝을 제외한 모든 기성말뚝 공법은 넓은 의미에서 항타공법으로 취급될 수 있다고 볼 수 있다.

본 논문에서는 국내 말뚝기초의 대부분을 차지하고 있는 기성말뚝의 품질관리 방안을 제시하였다. 이미 앞에서 언급한 바와 같이 국내에서 시행되는 거의 모든 기성말뚝은 넓은 의미에서 항타공법의

범주에 속하기 때문에 최종항타 과정에서 측정되는 최종관입량 값을 토대로하여 합리적으로 말뚝의 품질관리를 실시할 수 있는 방안을 제시하였다.

2. 항타공식 적용의 타당성에 대한 고찰

지난 세기 동안 많은 기술자들은 기성말뚝을 항타 시공할 때 말뚝의 품질을 확인할 수 있는 방안을 찾기 위하여 노력해 왔다. 가장 일찍부터 기술자들이 고안한 방법은 항타시 최종관입량을 측정하고 그 결과를 항타공식에 대입하여 지지력을 계산하는 방법이었다. 이 방법은 별도의 장비가 필요하지 않으며 시공되는 모든 말뚝에 대하여 적용하더라도 공기에 지장을 초래하지 않는 가장 간단한 방법이기 때문에 건설기술자들에게 친숙하며 오늘날에도 우리나라 뿐만 아니라 전세계적으로 가장 폭넓게 적용되고 있다.

그러나 항타공식의 신뢰도에 관해서는 일찍부터 많은 의문점이 제기되어 왔다. 지금까지 이 주제에 관해서는 수많은 연구가 수행되어 왔으나 그 결과는 모두 항타공식의 신뢰도가 낮으며 실무적용에는 적합하지 않다는 것을 확인한 정도라고 하여도 지나치지 않다(Tavenas & Audy, 1972/ Ramey & Johnson, 1979/ 이명환, 윤성진, 1992/ 홍헌성 등, 1997).

결국 말뚝의 품질확인을 위해서는 시공된 말뚝에 대하여 재하시험을 실시하는 방법을 채택할 수 밖에는 없는 실정이다. 선진외국에서는 일찍부터 이 방법을 채택하여 그간 많은 기술축적이 이루어졌다. 우리나라에서도 지난 수년간 말뚝의 품질관리를 위하여 재하시험을 권장하여 왔으며 각종 중요 시방서에서 말뚝 재하시험의 실시가 의무화되었다.

말뚝 재하시험은 말뚝의 지지력을 확인할 수 있는 가장 확실한 방법이다. 그러나 이의 실시에는 일반적으로 많은 시간과 비용이 소요되기 때문에 시공되는 모든 말뚝에 대하여 실시할 수 없으며 따라서 확보된 정보의 현장 대표성이 문제시된다. 1994년이래 우리나라에도 많이 보급된 PDA를 이용한 동재하시험법은 종래에 적용되던 정재하시험의 시간과 비용 문제를 크게 개선하였다. 이에 선진국의 일부 공사에서는 전체 시공되는 말뚝 물량의 10~20%의 말뚝에 대하여 동재하시험을 실시하여 현장대표성을 크게 개선하기도 하였다. 그러나 이와 같이 많은 물량에 대하여 재하시험을 실시하더라도 시공되는 말뚝 전체의 품질을 확신하기에는 문제가 있다. 더구나 이와 같은 많은 물량의 말뚝 재하시험을 실시하기 위해서는 막대한 비용이 소요되며 공사 진행에 차질을 초래하기 때문에 현실성이 낮다.

이러한 현실적인 제반여건(시간, 비용, 시공성)을 모두 만족시키는 방법은 현재의 기술수준으로는 항타기록을 토대로 한 항타공식 밖에는 없다는 결론에 도달하게 된다. 이에 따라 아직도 많은 기술자들은 항타공식의 신뢰도를 개선할 수 있는 방안에 집착하고 연구 노력이 계속되고 있다.

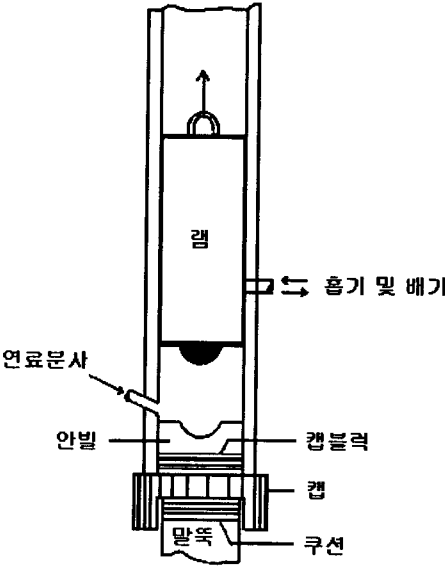
저자들은 이러한 문제점을 해결하기 위하여 이 주제에 대하여 그간 연구를 계속하여 왔다. 우리나라에서의 연구 결과도 항타공식의 신뢰도는 매우 낮은 것으로 나타나고 있어 시공관리에 적용할 수는 없는 것으로 나타나고 있다. 그러나 말뚝 항타에 관한 최근의 연구 결과 항타공식의 신뢰도에 영향을 미치는 중요한 사실들을 규명할 수 있게 되었다. 연구결과 항타공식의 신뢰도는 ① 입력 타

격에너지 값의 신뢰도, ② 시간 경과 효과, ③ 공식자체의 신뢰도 등에 주로 영향을 받는 것으로 나타났다. 최종 관입량을 토대로 한 항타공식의 실무 적용 방안을 도출하기 위해서 이들 요소들에 대하여 논하기로 한다.

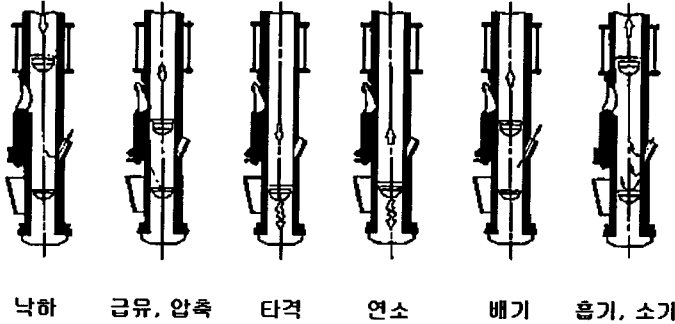
3. 입력 타격에너지 값의 신뢰도

「말뚝을 항타할 때 입력되는 에너지(input energy)는 이 에너지로 한 일(work done)과 같다」는 에너지 보존법칙이 모든 항타공식의 이론적 토대이다. 입력 타격 에너지 값은 램의 이론적 자유 낙하 에너지 $[W_h \times H]$ 에 해머의 효율(e_h)을 곱하여 구한다. 여기서 램중량과 낙하고는 알 수 있는 값인 반면 해머 효율은 항타장비에 따라 결정되는 값이다.

과거 항타공식을 적용할 때 이 해머 효율은 장비의 종류에 따라 일정한 값을 갖는 것으로 가정하였다. 우리나라의 구조물 기초 설계기준을 비롯하여 여러 자료에서도 이러한 개념을 토대로 하여 해머 종류에 따라 일정한 값의 효율을 적용하도록 규정하고 있다. 표 1은 구조물 기초 설계기준에서 추천한 해머 효율 값이다.



(a) 구조



(b) 작동원리

그림 1 디젤해머의 구조 및 작동원리

표 1 해머 효율(구조물 기초 설계기준, 1997)

| 해머 | 효율 |
|-----------|------|
| 낙추식, 원치작동 | 0.8 |
| 방아쇠작동 | 1.0 |
| 디젤해머 | 0.72 |
| 유압해머 | 0.9 |

그러나 실제 말뚝 항타에 사용되는 해머의 효율은 표 1에 나타난 바와 같이 해머 종류에 따라 일정한 값을 갖는 것은 아니다. 해머 효율은 장비 구조에 따른 불가피한 기계적 에너지 손실 및 해머 쿠션, 말뚝 쿠션의 상태에 따라라도 좌우된다. 이밖에 장비에 따라서는 예열(preheating)이 필요하기도 하며 외부의 기후 조건, 장비의 노후 정도 등 다양한 요소에 영향을 받는다.

그림 1은 디젤해머의 구조와 작동원리를 나타내 준다. 원치로 램을 끌어올린 후 자유낙하 시키면 램은 흡기 및 배기구를 막게되고 실린더 내부는 폐쇄된다. 실린더 내부로 디젤 연료가 분사되어 공기와의 혼합물이 실린더 내부를 채우게 된다. 낙하하는 램으로 인하여 실린더 내부 혼합물은 압축하게 되며 램은 저항을 받게된다. 램이 바닥을 타격한 직후에 점화가 이루어지고 폭발됨으로써 램은 다시 위로 올라가게 된다.

이러한 디젤해머의 작동과정에는 다양한 에너지 손실요인이 내재되어 있다. 램이 실린더 내부에서 자유낙하할 때 램 벽면과 실린더 내벽면간에는 마찰저항이 발생하게 된다. 마찰저항을 감소시키기 위하여 램과 실린더 내벽면간 간격을 넓게 하면 마찰저항은 감소하지만 실린더의 압축효율이 낮아지기 때문에 폭발력이 낮아지고 결과적으로 해머효율을 저하시킨다. 연소의 압축효율을 높이고 폭발력을 증대시키기 위해서는 램과 실린더내벽면 간격을 가급적이면 작게 하여야 하며 이를 조절하기 위하여 램의 표면에 밀폐를 위한 피스톤 링을 둔다. 피스톤 링은 교체 초기에는 실린더의 밀폐효과를 높여주고 폭발력을 높여 주지만 램과 실린더 내벽면간 마찰저항은 크게된다. 해머사용이 계속되면 피스톤 링이 마모되며 마모정도에 따라 실린더 밀폐효과 및 폭발력은 낮아지는 반면 마찰저항은 낮아지게 된다. 이에 따라 해머 효율이 변화하게 됨은 물론이다.

디젤해머를 계속하여 작동하면 마찰 및 연소로 인하여 실린더가 가열된다. 연소의 점화시점은 실린더의 가열 정도에 따라 변화하게 되는데 지나치게 실린더가 과열되면 고온으로 인하여 램이 해머 바닥을 타격하기 전에 점화가 발생하는 타격전 점화(preignition)현상이 나타나기도 한다. 타격전 점화현상이 발생하면 연소, 폭발이 램의 자유낙하를 방해하기 때문에 디젤해머의 효율은 크게 낮아진다.

이러한 디젤해머의 구조 및 작동원리로 인하여 실제 디젤해머의 효율은 장비의 상태, 당일 작업시간, 외부온도 등에 따라 상이하게 나타난다. 표 2는 동일현장에서 1대의 K25디젤해머를 사용하여 2일 동안 여러개의 말뚝(S : $\phi 406.4\text{mm}$ 강관말뚝, C : $\phi 400\text{mm}$ PHC말뚝)을 항타하면서 효율을 측정한 결과이다.

표 2 디젤해머의 효율측정 결과(동일현장조건, 2일간 측정, K25디젤해머)

| 번호 | S1 | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 | C10 | S2 | S3 |
|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 실측에너지 (t·m) | 2.02 | 1.54 | 1.98 | 1.92 | 2.02 | 1.91 | 1.98 | 2.25 | 1.95 | 2.16 | 1.72 | 2.35 | 2.04 |
| 효율(%) | 31.5 | 23.7 | 30.5 | 29.5 | 31.1 | 29.4 | 30.5 | 34.6 | 30.0 | 33.2 | 26.5 | 36.2 | 31.3 |

항 타 순 서 →

주 : 1. S는 강관말뚝, C는 PHC말뚝

2. S1은 첫째날 항타, 기타는 둘째날 항타

표 2의 내용을 좀 더 상세하게 설명하기로 한다. 첫째날 시행한 S1 강관말뚝을 항타할 때는 31.5%의 효율을 나타내었다. 둘째날 새벽에 항타한 C1 PHC말뚝에서는 23.7%의 낮은 효율이 나타났다. 이는 아마도 해머가 예열되지 않은 상태이며 외부기온도 낮은 새벽이기 때문으로 판단된다. 항타를 계속하여 해머가 예열된 후에는 C2에서부터 약 30%의 효율이 나타나고 있다. 항타가 계속되어 실린더가 가열되고 외부 기온도 높아지게 됨에 따라 해머의 과열이 발생하여 C10 말뚝을 항타할 때에는 효율이 26.5%까지 저하되었다. 이에 작업을 잠시 중단하고 해머 과열을 어느 정도 해소하고 시공한 S2 말뚝에서는 다시 효율이 높아지는 것을 알 수 있다.

표 2의 사례에서 또 하나 관심있게 살펴볼 부분은 PHC말뚝에서와 강관말뚝의 항타시 해머효율이 상이하게 나타나고 있는 점이다. 해머효율 측정자료는 말뚝재료에 전달된 타격에너지 값이기 때문에 말뚝 쿠션을 사용하지 않는 강관말뚝에서는 말뚝 쿠션을 사용하는 PHC말뚝에 비하여 상대적으로 높은 해머효율이 나타났다.

표 2의 사례에서 나타나고 있듯이 디젤해머의 효율은 다양한 요인으로 변화함을 알 수 있으며 따라서 표 1에서 규정하고 있는 것처럼 특정한 값의 해머효율을 적용하면 입력에너지에 있어 오차가 불가피하며 그를 적용한 항타공식에 의한 지지력을 치명적으로 오도하게 된다.

표 2의 현장 실측 결과에 의하면 이 사례에서 사용한 디젤해머의 평균 효율은 30% 정도가 되는데 이는 그간 국내에서 측정한 수 많은 사례의 평균값과 큰 차이가 없는 값이며 외국의 문헌에 나타난 결과와도 비교적 잘 일치한다. 그러나 그간 우리나라에서의 경험에 의하면 디젤해머의 효율이 60%를 상회하는 경우도 나타나고 있으며, 때에 따라서는 20% 미만의 해머효율이 나타나는 경우도 그리 드물지 않다. 특히 타격전 점화가 발생하는 경우에는 해머효율이 극히 낮게 된다. 이러한 디젤해머 효율의 가변성을 무시하고 표 1에서와 같이 특정한 해머효율을 적용할 경우 말뚝지지력 계산 결과에 있어 500%까지의 오차도 나타날 수 있다. 따라서 항타공식 적용시 해머효율은 표 1에서와 같은 특정의 값을 적용할 수 없으며 반드시 실측 값을 사용하여야 하겠다.

디젤해머 이외의 유압해머나 드롭해머에서도 사정은 대동소이하다. 유압해머의 경우 장비 구조상 디젤해머와 같은 에너지 손실요인은 크지 않지만 장비 제작업체에 따라 해머효율이 크게 상이하게 나타난다. 그림 2는 어느 특정한 현장에서 동일한 장비제작자의 다수의 유압해머 효율을 측정한 결

과이다. 이 사례에서 나타나고 있듯이 같은 제작업체의 장비라 하더라도 각 장비별로 해머효율이 상이하 며 각 장비에 있어서도 사용 시점에 따라 효율이 변화하는 것을 알 수 있다. 따라서 유압해머에 있어서도 해머효율을 표 1에서와 같은 특정한 값을 적용하는 것은 항타공식의 신뢰도를 저해하는 중대한 요인임을 알 수 있다.

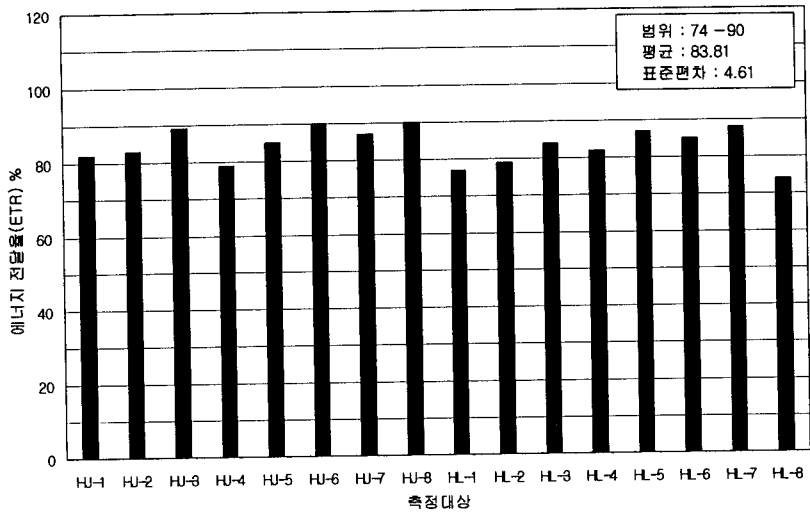


그림 2 유압해머의 효율측정 사례

드롭해머의 경우에는 유압해머 보다는 사정이 열악하다. 국내에서 사용하는 대부분의 드롭해머는 해머 제작업체가 대부분 영세하며, 전문업체가 아닌 곳이다. 따라서 해머의 작동 원리도 각양각색이며 효율도 천차만별이다. 따라서 드롭해머의 효율을 표 1에서와 같이 규정함은 맞지 않는다.

이상에서 설명한 바와 같이 해머의 효율은 장비의 종류, 사용 조건, 사용 시점, 말뚝 종류 등 다양한 요인에 따라 변화하는 가변적인 요소이다. 이를 무시하고 표 1과 같이 특정의 효율을 적용하였기 때문에 항타공식으로 계산된 말뚝 지지력을 수 배까지 과소평가 또는 과대평가하게 되었다. 따라서 항타공식을 적절히 적용하기 위해서는 무엇보다도 해머효율을 실측을 통하여 검증하여야 한다. 물론 앞서서도 설명한 바와 같이 해머효율을 실측하더라도 오차 요인을 완전히 배제할 수는 없다. 그러나 오차 범위를 현재의 수백%에서 실무에서 수용할 수 있는 범위까지 개선하기에는 충분히 가능함을 알 수 있다.

4. 시간경과 효과

항타공식의 신뢰도를 검증하기 위하여 지금까지 수행된 수많은 연구에서는 항타공식 계산 결과와 말뚝 재하시험 결과를 비교하였다. 동재하시험에서는 말뚝을 항타하면서 지지력을 측정할 수 있지만 지금까지 이러한 연구에서의 비교대상은 정재하시험 결과였다. 말뚝의 정재하시험을 실시하기에는 상대적으로 많은 시간이 필요하며 따라서 정재하시험 결과는 말뚝을 항타한 시점으로부터 상당한 시간이 경과한 시점의 말뚝지지력이 된다. 이러한 연구 방법은 말뚝의 지지력이 항타 시점으로부터 경과한 시간에 따라 변화하지 않는 경우에 한하여 성립될 수 있다.

그러나 1990년대 이후 수행된 많은 연구 결과에 의하면 말뚝의 지지력은 항타한 시점으로부터 경과한 시간의 함수라는 것이 밝혀지고 있다. 물론 과거에도 점성토 지반에 말뚝을 항타하면 항타로 인하여 발생한 과잉간극수압이 시간이 경과함에 따라 소산하며 지반내의 유효응력이 증가하여 말뚝의 지지력이 증가한다는 것은 알려져 있던 사실이다. 그러나 1990년대 이후 연구결과에 의하면 사질토 지반에서도 이러한 시간경과효과가 나타나고 있으며 이는 이론적인 토질역학 및 기초공학의 원리를 전면적으로 부인하는 내용이다. 우리나라에서도 1994년 이 주제에 대한 연구결과가 최초로 보고된 이후 많은 공사에서 시간경과 효과가 나타나고 있음은 이미 잘 알려지고 있는 사실이다(이명환, 홍헌성, 이원제, 1994).

지금까지의 연구 결과를 하나의 그림으로 표시하면 그림 3과 같다. 국내에서의 경험에 의하면 사질토 지반을 포함한 많은 지반조건에서 case 1과 같이 항타로부터 시간이 경과함에 따라 말뚝의 지지력은 증가한다. 말뚝 지지력 증가율은 지반에 따라 크게 상이하며 어떤 경우에는 항타 후 1시간만에 지지력이 2배 이상으로 증가하기도 한다. 또 어떤 지반에서는 지지력 증가율이 극히 미미하여 항타 후 2주일이 경과하여도 20~30% 정도에 불과한 경우도 많이 발견되었다.

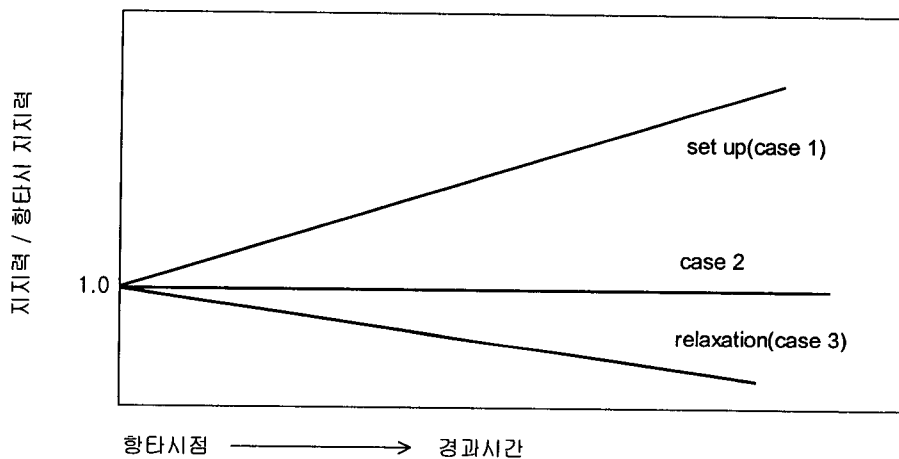


그림 3 시간경과효과

이와 같은 말뚝 지지력의 증가가 과연 어떤 시점까지 계속되는지에 대해서는 아직까지 분명하지 않다. 다만 현재까지 국내에서 가장 장기간 동안 시험한 경우로 항타 후 5주 경과까지 지지력 변화를 측정된 현장에서는 지지력이 계속 증가한 것으로 조사되었다. 그러나 또 다른 현장에서는 항타 후 초기에는 상당히 급격한 지지력 증가가 나타났지만 그 이후에는 증가율이 감소하는 것으로 나타나고 있기도 하다. 그러나 이러한 현상에 대하여 보다 분명한 해석을 하기 위해서는 많은 지반조건에서의 장기적인 연구가 필요하지만 현재 우리나라의 여건에서 연구여건이 뒷받침되지 못하고 있기에 아직까지 어떤 결론을 내릴 수는 없는 것이 현실이다. 따라서 현재로서는 시간 경과에 따른 말뚝 지지력 증가 현상은 각 해당 공사 별로 실험을 통하여 확인하고 그에 따른 개별 대책에 의존할 수밖에 없다.

지금까지 국내에서의 경험에 의하면 시간 경과에 따라 말뚝 지지력이 변화하지 않는 경우도 많이 조사되었다(그림 3의 case 2). 그러나 이러한 현상이 조사된 기간은 대개 항타 후 1~2주 정도이기 때문에 말뚝 지지력이 시간 경과에 따라 극히 점진적으로 증가하는 경우일 가능성도 배제하기 어렵다.

실무 기술자들에게 가장 곤혹스러운 경우는 그림 3의 case 3과 같이 말뚝의 지지력이 항타 후 시간이 경과함에 따라 감소하는 경우일 것이다. 이러한 현상에 대해서는 이미 외국에서도 여러 편의 논문이 발표되었으며 우리나라에서도 연구된 사례가 있기는 하다. 이들 국내외의 논문에서는 이러한 현상이 극히 예외적인 것으로 언급하고 있지만 문제는 이러한 현상이 우리 지반 기술자들이 생각하고 있는 것만큼 희귀한 것은 아니라는 데 있다. 우리나라의 여건 상 이러한 자료가 발표되기에는 많은 제약이 있기에 공식적으로 보고되지는 않지만 저자들이 직접 경험한 경우도 여러 현상이 된다. 문제는 우리나라에서 시간경과에 따라 말뚝 지지력이 감소하는 경우가 포항의 이암층 지반에 국한되지는 않는다는 것이다. 포항이외에도 여러 곳에서 지지력 감소 현상이 발견되었다.

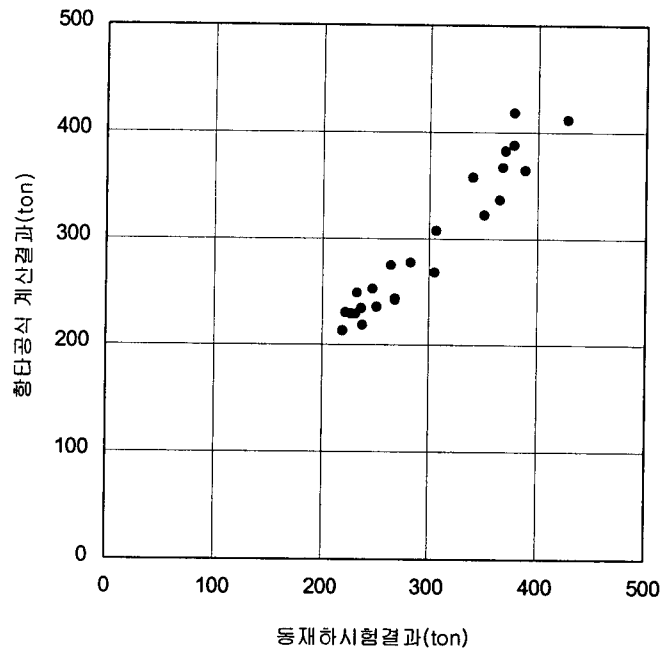
이와 같이 시간 경과에 따라 말뚝 지지력이 변화하는 현상은 항타공식의 신뢰도 평가에 가장 치명적이다. 통상적으로 항타 후 상당한 기간이 경과한 시점에 실시한 정재하시험 결과와 항타시 측정된 지지력 특성을 나타내주는 항타공식에 의한 지지력을 비교하는 것은 아무런 의미도 없다고 단언할 수 있다.

결론적으로 지금까지 이루어진 대부분의 항타공식 신뢰도에 대한 연구 결과는 이와 같은 시간 경과효과를 고려하지 않았기 때문에 그 결과를 신뢰할 수 없게 한다.

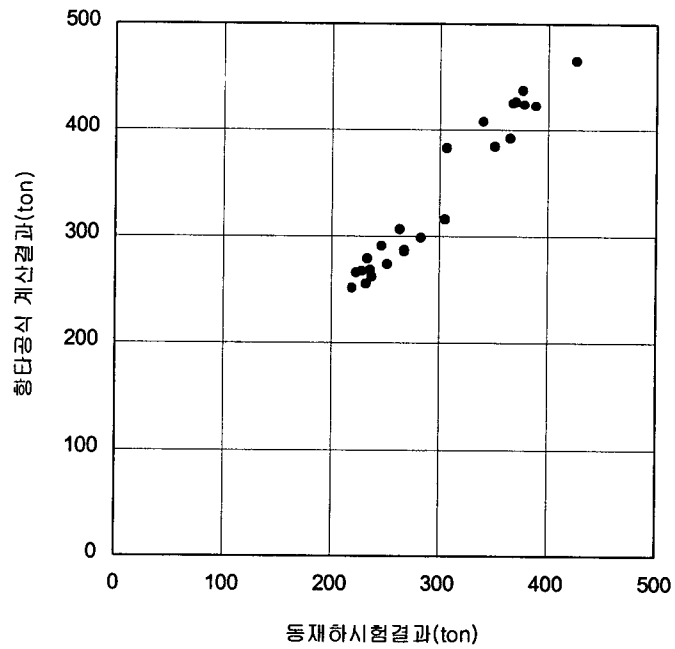
5. 합리적인 시공관리 방안

앞에서 설명한 내용들에서 이미 최종관입량을 토대로 한 합리적인 말뚝 시공관리 방안의 방향은 제시되었다. 즉 항타공식 신뢰도에 절대적인 영향을 주는 두가지 요소, 입력 에너지와 시간 경과 효과(물론 이들 이외의 다른 영향 요소들도 영향을 미치겠지만 현재로서는 이들 두가지 요소에 대하여만 고려하였음)를 합리적으로 고려할 경우, 항타공식의 신뢰도는 크게 향상될 수 있을 것으로 기대된다.

실제로 항타시 PDA를 사용하여 해머효율을 측정하여 그 결과를 항타공식에 대입한 결과 항타공식 계산결과와 동재하 시험에 의한 말뚝 지지력의 상관관계는 상당히 양호하게 나타나고 있다. 그림 4는 대규모 건설공사에서 이러한 개념을 적용한 결과이다.



Hiley 공식 ($e_h = \text{실측값}$)



Danish 공식 ($e_h = \text{실측값}$)

그림 4 개선된 방안에 의한 항타공식의 신뢰도

그림 4는 여러가지의 항타공식들 중에서 신뢰도가 비교적 높은 것으로 나타난 Hiley와 Danish 공식의 신뢰도를 나타낸 것이다. 항타공식의 계산에는 PDA를 사용하여 실측한 타격에너지를 사용하였으며 말뚝의 지지력은 항타시 동재하시험 결과를 Davisson의 기준으로 평가한 값을 사용하였다.

이 방법에 의하여 항타공식을 적용하면 말뚝의 항타시 지지력을 오차범위 10%이내로 추정할 수 있는 것으로 나타났다. 이를 토대로 하여 최종관입량을 기준으로 아래와 같이 합리적인 말뚝 시공 관리기준을 제안할 수 있다.

- 항타공식을 적용하기 위해서는 PDA를 사용하여 해머의 효율을 실측하여 적용한다.
- 항타공식은 여러가지 공식을 대상으로 하여 신뢰도를 검증하는 것이 바람직하다. 그러나 일반적으로는 Hiley 또는 Danish 공식의 적용이 바람직하다.
- 항타공식 계산결과는 항타시 동재하시험(EOID) 결과를 Davisson 판정 기준으로 평가한 지지력과 비교하여 상관 계수를 도출한다.
- 시간 경과에 따른 말뚝 지지력 변화를 확인하기 위하여 일정한 수량(전체 말뚝 물량 대비 적절한 비율)의 말뚝에 대하여 항타시 동재하시험과 일정 시간이 경과한 후의 재항타 동재하 시험을 실시하여 시간경과 계수를 결정한다.
- 시간 경과 계수까지를 감안하여 최종 관입량 기준을 결정한다.
- 해머의 효율은 장비 사용 이력에 따라 변화하므로 일정한 기간(일반적으로 2주 정도)이 경과한 시점 또는 일정한 물량의 말뚝을 항타한 다음에 해머효율 변화를 확인하도록 한다. 이 결과를 대입하여 수정된 항타공식 상관 계수를 도출하도록 한다.
- 일반적으로 말뚝은 무리말뚝으로 시공된다. 무리말뚝의 시공으로 인하여 말뚝의 솟아오름(heaving)이 발생하는지 여부에 대한 확인하는 것이 필요하다.

참 고 문 헌

1. 이명환, 윤성진 (1992), " 말뚝의 설계하중 결정방법에 대한 비교," 깊은 기초의 연구와 실무, 한국지반공학회 '92년도 봄 학술발표회 논문집, pp. 69-102.
2. 이명환, 홍헌성, 이원제 (1994), " 말뚝기초의 최적설계," Keynote Lecture, 한국지반공학회 '94가을 학술발표회 논문집, pp.60-76.
3. 홍헌성, 조천환, 김성희, 엄재경, 이명환 (1997), " 항타공식에 의한 말뚝지지력 산정의 신뢰도 연구," 한국지반공학회 '97 봄 학술발표회 논문집, pp.55-62.
4. Tavenas,F. & Audy,R. (1972), "Limitations of the driving formulas for predicting the bearing capacities in sand," Canadian Geotechnical Journal, Vol.7, No.1, pp.47-62.
5. Ramey,G.E. & Johnson,R.C. (1979), " Relative accuracy and modification of some dynamic pile capacity prediction equations," Ground Engineering, Vol.12, September, pp. 47-52.