KGS Spring Conference 2006 / March 24 25, 2006 / Seoul / Korea

국내 동재하시험의 문제점에 대한 보고
A report on the problems associated with PDA testing in Korea

이명환[1], Myung-Whan Lee, 홍헌성[2], Hun-Sung Hong,

[1] (주)파일테크 연구소장, Research Fellow, Piletech Consulting Engineers
[2] (주)파일테크 대표이사, President, Piletech Consulting Engineers

SYNOPSIS : Dynamic pile loading test using PDA was introduced in 1994. Because of its economy and relatively easy and simple procedure, the number of PDA application increased quite rapidly. It is assumed that more than 10,000 dynamic pile loading tests are done annually. While the number of testing increases sharply, the quality of the tests does not really improve but the number of serious problems due to improper testing increases. According to the limited experiences of the authors, the common problems found in most of the cases are caused by ignorance of the most basic and fundamental requirements. In this paper some case histories are explained and the proposed solution is introduced.

Key words : dynamic pile loading test, PDA, CAPWAP

1. 서 론

1994년 우리나라에 처음 도입된 동재하시험은 정재하시험에 비해 시행이 간편하며 소요 비용도 저렴하다는 장점으로 그 적용이 급속히 확산되었다. 그리하여 오늘날에는 적어도 50대 이상의 PDA가 국내에서 활용되고 있는 것으로 보인다. 이렇게 PDA 보급률이 높아짐에 따라, 말뚝 재하시험을 실시하는 회수도 급증하고 있다. 여기에 대해서는 통계자료가 없지만, 모 기관 한 군데에서만 연간 6,000회 이상의 재하시험을 실시하는 사실로 볼 때, 우리나라 전체로는 10,000회 이상 실시되는 것으로 보아도 무리가 아닐 것이다.

이렇게 많은 시험이 실시되고 있지만, 그 대부분은 적절하지 못한 동재하시험으로 분류할 수밖에는 없다. 이 추측 역시 저자들이 접할 수 있었던 자료만을 토대로 한 것이기에 정확한 실상은 알 수 없다는 한계가 있다. 그렇지만 이 분야에서 가장 많은 시험을 실시한다고 하는 우리나라의 대표업체들의 실적들이 대부분 포함되어 있기 때문에, 국내에서 시행되는 대부분의 동재하시험이 적절하지 못한 상태에서 시행될 것이라고 하는 추측이 틀릴 가능성은 매우 희박할 것으로 판단한다.

이 논문에서는 지면 관계로 우리나라에서 시행되는 동재하시험들 중, 저자들이 경험한 사례들 중에서 일부분만을 소개하였다. 본 논문에서 소개하는 사례들 이외의 다른 사례에서도 나타나는 공통적인 원인을 보면 가장 원초적인 요구조건들이 제대로 지켜지지 않는 다는 것이다. 이러한 현상이 근절되지 않는 데에는 이를 감독하고 활용하여야 할 책임이 있는 기술자들의 무관심 내지는 무지를 들 수 있었다.

2. 사 례 1

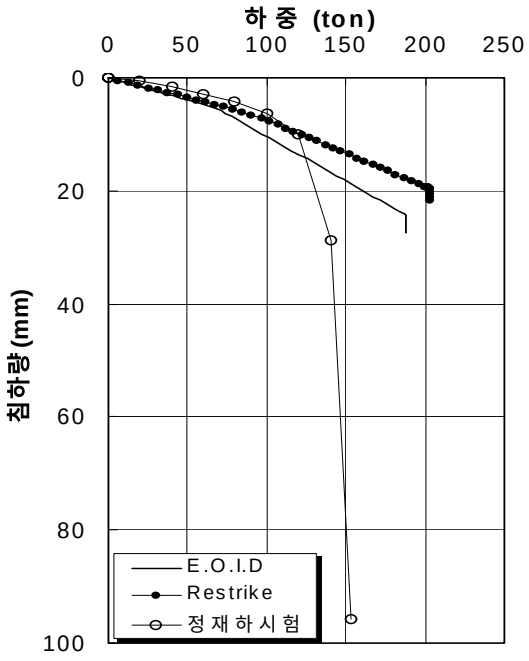
2.1 문제점의 개요

본 사례는 대규모 아파트 기초로 설계된 ø400㎜의 PHC말뚝을 직항타 공법으로, 설계하중은 70.0ton 정도로 예상을 하고 있었던 공사에서 발생한 내용이다. 시험말뚝은 항타시 동재하시험을 실시하였으며, 1일이 경과하여 재항타 동재하시험을 실시하였고, 다시 1일이 경과한 시점에 정재하시험을 실시하였다.

그런데 정재하시험 실시를 위하여 반력말뚝을 시공하는 과정에서 시험말뚝이 8.0㎜ 솟아오른 것을 발견하였으며, 그에 대한 조처로서 시험말뚝을 재항타하여 당초 시공된 깊이보다 22.0㎜를 추가 관입시킨 후 정재하시험을 실시하였다. 제출된 보고서에 의하면 말뚝의 지지력은 항타로부터 1일이 경과하는 동안 선단지지력 및 주면마찰력 모두 약간씩 증가한 것으로 분석되었다. 그러나 말뚝 항타로부터 2일이 경과한 시점에 실시한 정재하시험 결과는 동재하시험과는 크게 상이하게, 말뚝의 지지력이 큰 폭으로 감소한 것으로 나타났다. 이 상황을 요약해 보면 [표 1] 및 [그림 1]과 같다.

[표 1] 재하시험결과의 요약

구분	주면마찰력(t)	선단지지력(t)	단위면적당 선단지지력(t/㎡)	전체지지력(t)	비고
EOID	46.9	141.2	1124	188.2	항타시
Restrike	54.5	148.0	1178	202.5	1일 경과
정재하시험	시험하중 153.0ton에서 극한파괴 발생 전침하량 95.7㎜, 순침하량 85.1㎜				2일 경과



[그림 1] 시간경과에 따른 말뚝 지지력 변화

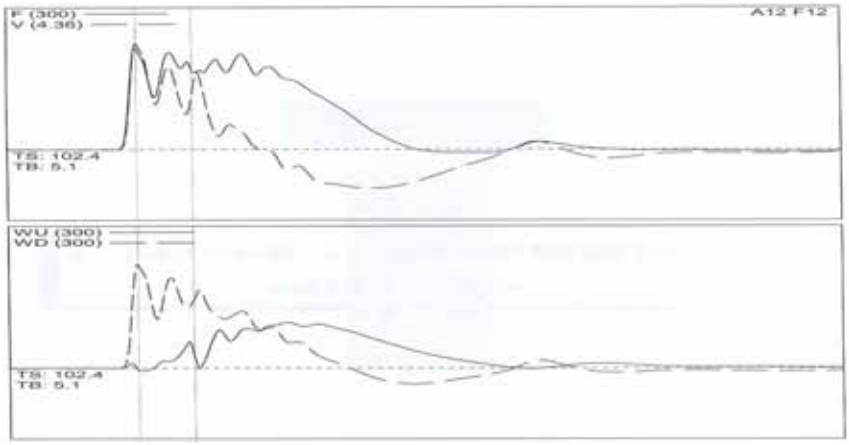
재하시험 실시 업체의 보고서 내용으로 보면 시간경과에 따라 말뚝 지지력이 감소하는 현상(relaxation)이 발생하였다. 여기서는 1일 경과 후 지지력이 증가한 것으로 해석하였으나, 말뚝을 원래 관입깊이보다 22㎜ 깊은 곳까지 추가 관입시킨 다음 측정한 지지력이기 때문에, 지지력 증가(set up)가 일어났다고 보기에는 무리한 분석이다. 또 아직까지의 기술수준으로는 시간경과에 따라 지지력이 감소하는 현상의 원인이 확실하게 규명되어있지 못한 상태이지만 set up이 발생한 말뚝에서 불과 하루 사이

에 말뚝의 지지력이 25% 이상이나 감소하였다는 것은, 이제까지 이 분야의 발표된 사례 중에서도 단연 심각한 정도가 아닐 수 없었으며, 이에 발주자의 의뢰로 이 문제를 검토하게 되었다.

2.2 동재하시험 내용 검토

(1) 시험 기술자의 자질

앞의 [표 1] 내용 CAPWAP분석 결과에 의하면 말뚝의 지지력은 주로 선단지지력에 의하며, 단위면적당 선단지지력은 1100t/㎡ 보다도 큰 값이다. 이런 정도라면 말뚝의 선단부는 매우 견고한 하중 지지층까지 관입된 것으로 보아야 한다. 그렇지만 이러한 내용은 동재하시험 측정 응력파(stress wave)의 형태를 볼 때, 적절하지 못한 분석이라는 것이 바로 드러난다. [그림 2]는 항타시 측정한 응력파인데, 동재하시험에서 측정하는 2가지, 힘(force)과 속도(velocity)파를 살펴보면, 말뚝의 선단부에서 속도파가 급격히 증가하여 힘의 파와 만나고 있고 그 이후 힘의 파의 증가가 없는 것으로 보아, 선단부가 그렇게 견고한 지층까지 관입되지 못하였다는 것을 알 수 있다.

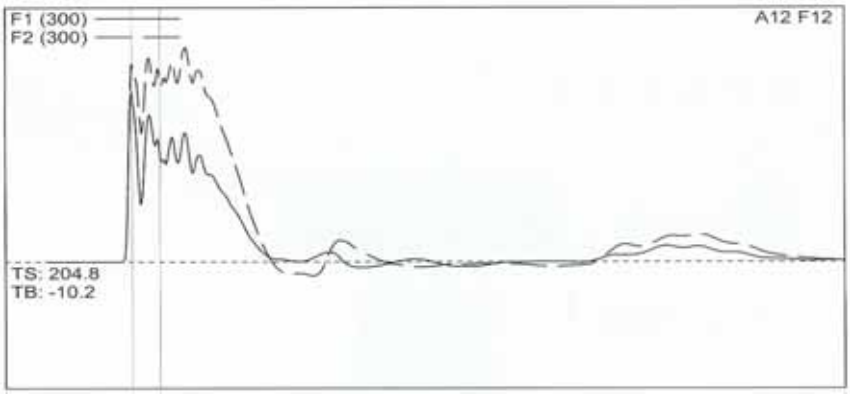


[그림 2] 동재하시험 측정 응력파(EOID)

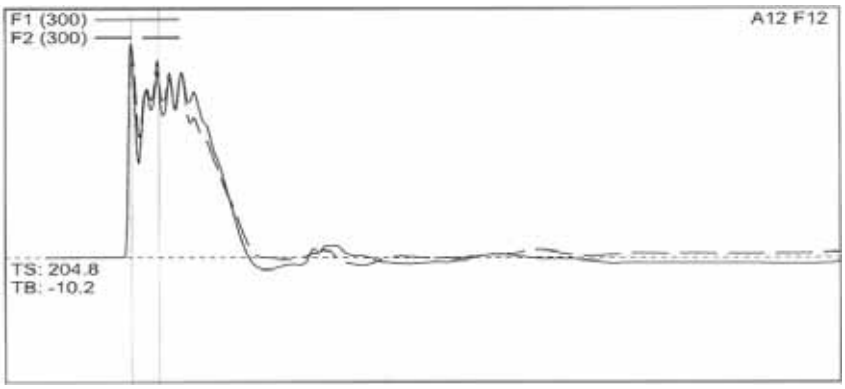
또한 반력말뚝 항타과정에서 발생한 8.0㎜의 솟아오름(heaving)의 의미를 무시할 수는 없다. 실제로 본 공사의 말뚝들은 무리말뚝으로 시공될 예정이기 때문에, 솟아오름이 발생한 그 상태에서의 지지력이 가장 중요한 것이다. 그럼에도 불구하고 이 현상은 무시되었고 제출된 재항타 동재하시험 성과는 시험말뚝을 재항타하여 원래 말뚝을 관입한 깊이보다 추가로 22.0㎜가 관입된 상태에서의 지지력 자료라는 점이다. 재항타시 측정된 응력파의 모양도 항타시 측정 응력파의 형태와 크게 다르지 않았다.

(2) 응력파(stress wave)의 품질

동재하시험에서는 일반적으로 변형률계와 가속도계를 2개씩 부착하여 시험을 수행한다. [그림 2]의 응력파는 2쌍의 게이지 측정값의 평균을 나타내는 것이며 가장 바람직한 상태는, 타격력이 말뚝 단면에 균등하게 가해지는 것이다. 만약 타격력이 균등하게 분포되지 못한, 소위 편타(偏打)가 심한 데이터는 말뚝의 시험하는 목적을 달성하기 어렵게 해 주는 요인이다. [그림 3]은 이 말뚝에 대한 항타시 동재하시험에서 측정한 것으로서 측정파의 형태가 2개 게이지 간에 서로 크게 상이함을 나타내 준다. 반면 같은 말뚝의 재항타시 동재하시험에서 측정한 응력파에서는 이러한 편타 문제가 나타나지 않은 것을 알 수 있다([그림 4]).



[그림 3] 2개 게이지에서 측정된 힘의 응력파(EOID)



[그림 4] 2개 게이지에서 측정된 힘의 응력파(Restrike)

(3) 응력파의 속도

동재하시험의 기본이론은 말뚝의 재질과 단면이 일정하고 지반으로부터의 저항력이 없는 경우 말뚝내의 어느 한 점에서의 힘의 크기는 동일한 점에서의 입자속도(particle velocity)에 비례한다는 것이며, 이를 비례관계(proportionality)라고 한다. 말뚝재료들은 일정한(재료 고유의) 응력파의 속도(stress wave speed)를 갖고 있기 때문에, 이 비례관계가 유용한 것이며, 공장에서 제작되는 기성 콘크리트말뚝은 4000m/s 정도의 표준 값을 갖는다. 그러나 콘크리트 말뚝의 경우 재료의 배합비, 양생정도, 운반과정에서의 크랙 발생 등으로 다소 차이가 있을 수 있으므로 동재하시험시 매 말뚝마다 반드시 응력파의 속도를 측정하여 실제 파의 속도로 정정해 주어야 올바른 말뚝의 지지력 및 건전도를 측정할 수 있다. 이 사례의 경우, 말뚝이 관입된 초기(관입깊이가 6.0m)의 응력파의 속도는 3600m/s, 말뚝 관입이 거의 종료된 시점(관입깊이가 12.4m)에서는 3500m/s로서 표준값에 크게 못 미치고 있으며, 1일이 경과한 시점에 시행한 재항타시 동재하시험 자료에서도 3500m/s를 나타내주고 있다. 응력파의 속도는 동재하시험 결과에 직접적인 영향을 주는 요소이다. 그렇지만 제출된 동재하시험 자료에서는 이 값을 표준값인 4000m/s로 입력하였다. 이에 따라 우선 힘과 속도파 간의 비례관계가 성립하지 않고 있으며, 이는 결국 동재하시험의 신뢰성을 하락시키는 가장 큰 요인이 되는 것이다.

2.3 재분석 내용

제출받은 원래의 시험데이터를 사용하여 본 저자들이 CAPWAP분석을 다시 하였다. 주요 보정 내용은 응력파의 속도 부분이었으며, 작동상태가 불량한 가속도계 입력분은 제외하고 문제가 없는 입력 데이터만을 사용하였다. 수정된 입력자료에 의한 CAPWAP분석 결과는 당초 분석한 결과와는 크게 상이하다

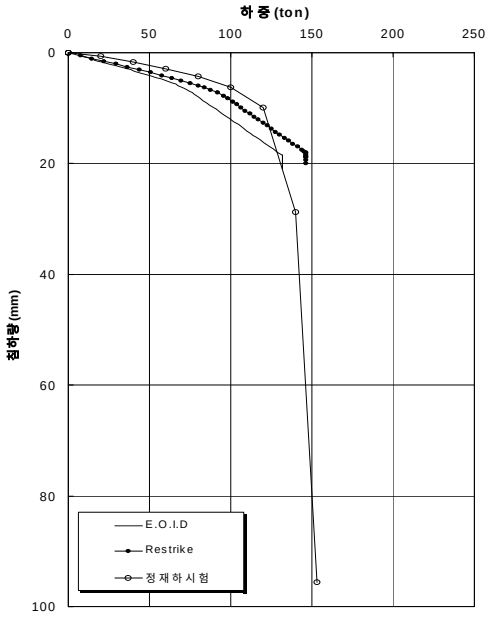
([표 1] 참조). 새로 분석한 결과에 의한 말뚝의 지지력 구성은 [표 2]와 같다.

[표 2] 재분석한 지지력 내용

구분	당초 분석 결과(ton)			재분석 결과(ton)		
	주면마찰력	선단지지력	전체지지력	주면마찰력	선단지지력	전체지지력
EOID	46.9	141.2	188.2	54.0	78.0	132.0
Restrike	54.5	148.0	202.5	77.0	69.0	146.0

당초 분석의 최대 약점은, 이미 설명한 것처럼 동재하시험의 기본(게이지의 교정, 점검, 작동 불량, 시험 기술자의 자질 등)이 갖추어지지 못한 기술자들에 의해 시행되었다는 것이며, 이를 객관적으로 입증한 것이 바로 항타 이틀 후에 실시한 정재하시험 결과이다. 비록 말뚝의 솟아오름이 발생하였다고 할지라도, 원래 항타 관입된 깊이보다 22.0㎜를 더 관입시킨 말뚝이 재항타 하루 만에 지지력이 [표 1]에 나타난 것처럼 25%나 감소하였다는 것은, 어떤 수단과 이론을 동원하더라도 설명할 수 없는 부분이다.

새로 실시한 CAPWAP분석 결과를 보면, 항타 후 1일이 경과한 시점에 선단지지력은 약간 감소하였으며, 주면마찰력은 그보다 상대적으로 큰 폭으로 증가하였다. 여기서 주면마찰력이 증가하였다는 부분은, 현장의 지반조건으로 볼 때, 충분히 나타날 수 있는 현상이다. 즉 이 지반조건에서 set up 현상은 비교적 만족스러울 정도라고 보인다. 반면 선단지지력이 약간 감소하였다는 점은 상당한 우려를 주는 부분이다. 왜냐하면 이제까지 알려진 많은 relaxation의 경우에서도, 재항타를 실시하여 원래 말뚝이 관입된 깊이와 같거나, 더 깊은 곳까지 선단부가 관입되었는데도 불구하고 선단지지력이 감소한 경우는, 검토자가 과문한 탓이지는 몰라도 없었던 현상이기 때문이다. 이 현상에 대해서는 별도의 논문에서 설명하였다(이명환 등, 2006). [그림 5]에는 재분석한 동재하시험 결과와 정재하시험 결과를 함께 도시하였다.



[그림 5] 재분석 결과에 의한 시간경과 효과 비교

재항타 시험으로부터 다시 하루가 경과하였기 때문에, 주면마찰력의 증가가 계속되었을 가능성이 높다. [그림 5]에서 정재하시험의 하중-침하량 관계가 항타시는 물론 재항타시 동재하시험에서 도출한 관계보다도 위쪽에 위치한 것이 바로 그 증거라고 인정할 수 있겠다. 그렇지만 선단지지력의 감소는 심화(深化)되었을 가능성이 크다는 것 또한 이 그림이 시사해 주는 부분이다.

이 사례에서 볼 수 있듯이, 재분석 결과는 일반적인 지반공학 지식의 범위 내에서 이 문제점이 분석되고 그에 따른 해결 대책이 수립될 수 있는 가능성을 보여준다. 그렇지만 잘못된 동재하시험 결과를 가지고는 어떠한 대책도 수립될 수 없는, 매우 난해한 상황으로 문제를 발전시켰을 수 있었던 사례이다.

3. 사 례 2

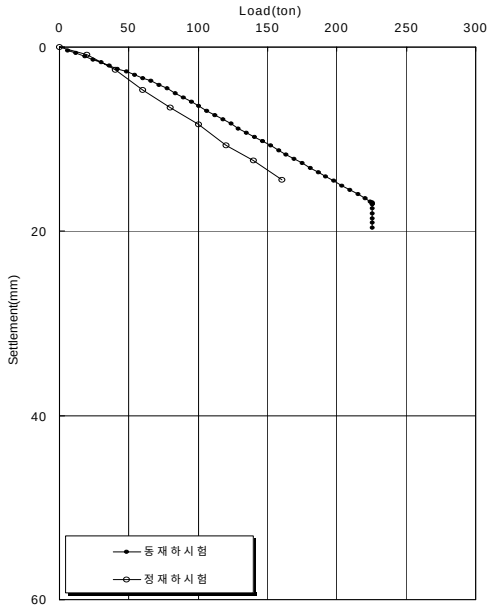
3.1 문제점의 개요

이 사례는 대규모 토목구조물로서 ø600㎜의 PHC말뚝을 직항타 공법으로 시공하였으며 설계하중은 90 110ton 정도였다. 말뚝들은 정방형 바둑판 모양으로 2.5D간격으로 배치된 무리말뚝을 이루고 있었다. 무리말뚝의 시공과정중에 상당한 지반 융기가 발생하였으며, 공사 품질을 우려한 감리자의 요청으로 말뚝 시공 및 재하시험을 평가하게 되었다.

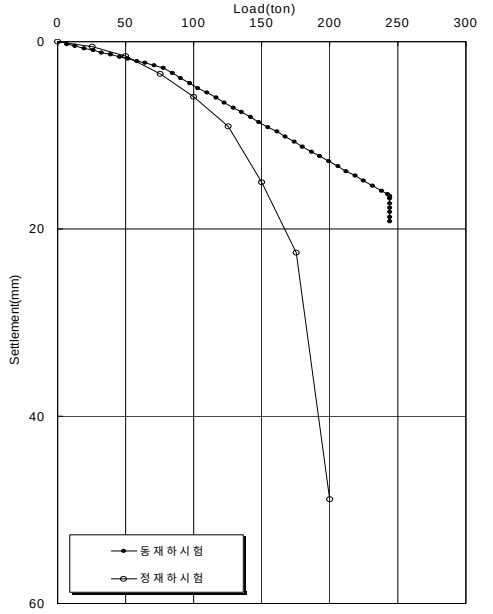
제출된 재하시험보고서(약 30여 개소의 동재하시험과 2개소의 정재하시험)를 검토하였는데, 2개소 말뚝에서는 동재하 및 정재하시험이 모두 시행되었다. 우선 이 말뚝들에 대하여 정밀 검토를 실시하였는데, 2개소 모두에서 시간이 경과함에 따라 말뚝지지력이 감소하는 relaxation현상이 발생한 것을 발견하게 되었다([표 3], [그림 6], [그림 7]).

[표 3] 재하시험 결과 요약

구분	동재하시험 결과 지지력(ton)			정재하시험 결과
	주면마찰력	선단지지력	전체지지력	
A말뚝	29.0	196.3	225.3	최대시험하중 160.0ton에서 14.38㎜의 침하량 기록
B말뚝	45.7	198.7	244.4	최대시험하중 200.0ton에서 48.87㎜의 침하량을 기록하여, 극한상태에 도달한 것으로 판단됨



[그림 6] 동재하-정재하 시험의 비교(A말뚝)



[그림 7] 동재하-정재하 시험의 비교(B말뚝)

3.2 동재하시험 내용 검토

(1) 기술자의 자질

Relaxation이 발생하였다는 것은 말뚝기초로 보면 치명적이다. 그럼에도 불구하고 제출된 보고서에는 relaxation을 인지한 흔적이 없음은 물론, 동재하시험 성과(설계하중에서의 침하량)가 정재하시험 성과와 많은 차이가 나지 않는다고 자화자찬을 하는 식의 내용으로 일관하고 있으며, 발주처나 설계자 감리자 누구도 이를 인지하지 못한 상태에서 공사가 진행되고 있었다. 이 공사에서 재하시험을 실시한 업체 역시 국내에서 많은 물량의 동재하시험을 실시하는 업체이다.

(2) 게이지 문제

동재하시험이 제대로 시행되기 위해서는 시험에 사용하는 변형률계(strain transducer)와 가속도계(accelerometer)가 적절한 상태를 유지하여야 한다. 이들 게이지는 무게를 다는 저울과 같은 역할을 하는 것이며, 만약 이 게이지가 적절한 상태를 벗어났다면, 시험 내용은 사실상 아무 의미가 없는 것이 되기 때문에 적절한 게이지의 상태야말로 가장 원초적 요구조건인 것이다. 항타라는 혹독한 조건하에 말뚝에 부착하여 게이지를 사용하다 보면, 그 게이지가 자체로 변형되거나 파손될 수 있으며 과도한 사용으로 게이지가 변형되면 원래 제조할 때의 상수와는 상이한 거동을 보일 수 있다. 따라서 ASTM에서는 게이지들을 정기적으로(매 2년마다) 검증 받도록 권장하고 있다(ASTM D4945-96). 검증을 받은 게이지에는 교정검사서(Calibration Certificate)가 발부되며, 따라서 동재하시험 자료를 검토할 때, 교정검사서를 확인하는 것은 어떠한 경우에도 생략할 수 없는 필수과정이다.

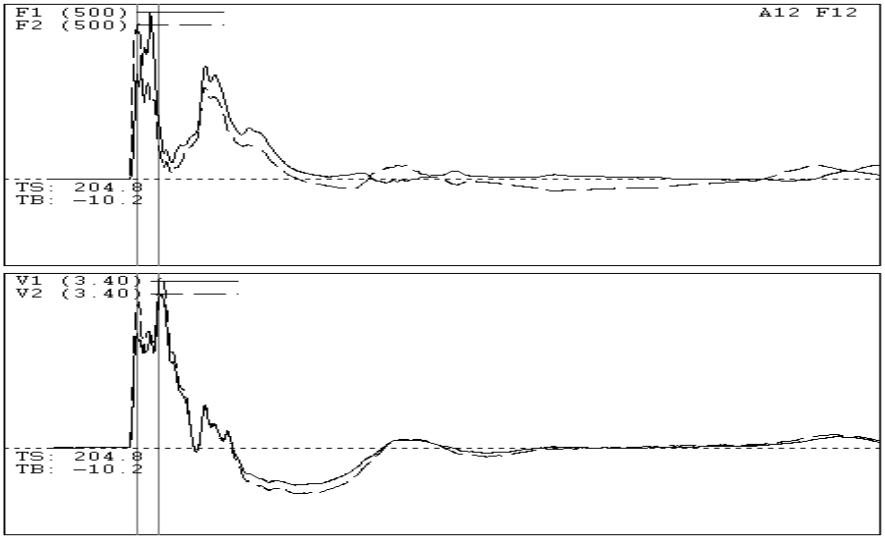
이 사례의 경우 30 여개 동재하시험에 사용한 게이지는 불과 4개로 보고되었으나, 실제 시험에 입력된 게이지 상수(calibration factor)는 보고된 것과는 상이한 것들이 대부분이었다. 교정검사가 유효한 기간 내에 이루어지지 못한 게이지, 교정검사는 유효하다고 할지라도, 지나치게 많은 시험을 수행하는 관계로, 게이지가 오작동하는 경우 등을 발견하였다. 실례를 들자면 [표 3]의 A말뚝 시험시 PDA화면에는 변형률계 상수로 93과 94가, 가속도계 상수로는 1057과 1095가 입력되어 있다. 이 재하시험 보고서에 첨부된 교정검사서상의 변형률계 상수는 93.70과 95.57, 가속도계 상수는 1000과 1070으로 되어있다. B말뚝의 재하시험보고서에는 변형률계 상수로 97과 95가, 가속도계 상수는 2개 게이지 모두 910이 입력되어 있다. 이 보고서에도 첨부된 교정검사서상의 변형률계 상수는 93.70과 95.57, 가속도계 상수는 1000과 1070으로 되어있다.

(3) 게이지의 작동 상태

또 다른 문제점은 게이지들이 정상적인 작동을 하지 못하는 문제였다. 동재하시험에 사용하는 게이지는 변형률계와 가속도계의 두가지 종류이다. 이들 게이지 어느 것이나 말뚝에 타격력이 가해지면 그에 상응하는 변형률(strain) 또는 변위를 나타내어야 하며, 타격력이 가해지지 않을 때에는 원래 상태로 회복되어야 한다. 이는 힘의 파와 속도파를 관찰해 보면 쉽게 확인할 수 있다. 제출된 동재하시험 자료를 보면 게이지들이 0(zero)에 수렴하고 있지 못한 것들이 다수 포함되어 있었다.

(4) 응력파의 품질

이 사례에서도 응력파의 품질이 극히 조잡한 것으로 나타난다. [표 3]의 A말뚝 시험에서 측정된 파의 측정값을 보자면 CSX값 249kg/㎠에 비하여 CSI는 328kg/㎠이다. 이는 변형률계 하나에서는 328kg/㎠가, 다른 하나에서는 170kg/㎠가 측정되었다는 뜻이다([그림 8]). 즉 2개 게이지에 전달된 타격력은 거의 2배 정도 차이가 있음을 나타내 준다. 뿐만 아니라 파의 형태도 2개 게이지 간에 서로 크게 상이함을 나타내 준다. 가속도계의 측정파 역시 불량하다는 것을 알 수 있다. 2개 게이지가 서로 다른 측정값을 나타내 줌은 물론, 타격력이 제거된 후에도 0에 수렴하지 않는 것을 알 수 있다. B말뚝에 대한 측정 데이터 역시, 품질이 불량하기는 마찬가지였다.



[그림 8] A말뚝에 대한 측정 파

(5) 측정파의 품질문제(비례관계)

이 사례 공사에서 시행된 동재하시험들을 보면 대부분 이 비례관계가 맞지 않는 것을 발견하였다. 비례관계에 대해서는 이미 앞에서 설명하였으며, 동재하시험의 가장 기본적인 요구조건이라고 할 수 있는 것이다.

(6) 말뚝재료의 품질문제

앞에서 설명한 응력파의 속도(wave speed)가 이 사례에서도 다시 문제로 등장하고 있다. 원심력 성형 기성콘크리트말뚝에서는 표준 파의 속도가 4,000m/s 정도가 된다. 이는 기성콘크리트말뚝 재료의 표준 탄성계수(400,000kg/㎠)와 비중(2.45)을 대입하여 얻는 값이기도 하다. PDA가 우리나라에 도입된 이래, 지난 10여년간 이런 주제가 거론된 경우가 별로 없었다. 이는 어디까지나 저자들의 경험에 의한 것이기 때문에 객관성이 결여된 얘기인지도 모르겠다. 그런데 근래에 이 주제가 종종 거론된다. 이 공사 사례도 그 중의 하나이다. 다시 얘기하자면, 동재하시험의 파의 속도에 의하면, 말뚝 재료의 품질에 이상이 있는 것으로 나타나는 경우가 종종 발견된다는 것이다. [표 4]는 이 사례에서 제기된 문제점을 규명하기 위해 시행한 시험시공을 실시하였는데, 그 때 조사한 응력파의 속도 측정 결과이다.

[표 4] 파의 속도 측정결과

번호	파의 속도(m/sec)		비고
	EOID	Restrike	
1	3,900	3,800	A회사 제품
2	4,000	3,800	A회사 제품
3	4,000	3,800	A회사 제품
4	3,550	3,400	기타 제품
5	3,800	3,650	기타 제품
6	3,600	3,450	기타 제품

이 주제는 매우 민감한 문제이다. 기성 콘크리트 말뚝의 품질이, 그것도 한국 공업규격(KS)을 획득한 재료들에서 품질 이상을 발견하였다는 것이기 때문에 추가적으로 현장에 반입된 말뚝들에 대하여 파의 속도를 측정해 보았다. 이 측정은 물론 말뚝을 시공하기 전, 자재를 야적해 놓은 말뚝들을 대상으로 한 것이다. 그 결과에서도, 제조업체에 따라 차이가 있지만, 표준 4,000m/s에 크게 미치지 못하는 3,500m/s까지의 측정값을 얻었다.

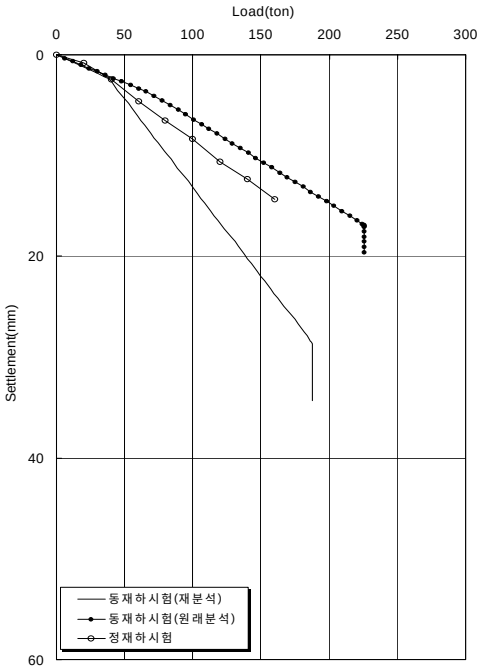
3.3. 재분석 내용

앞에서 설명한 여러 오차 요인들(편타, 게이지 불량, 비례관계, 파의 속도)을 모두 수정하여 말뚝지지력을 재평가해 보았더니, 원래 보고한 내용과는 크게 차이가 나는 결과를 얻게 되었다. 각종 데이터를 수정한 입력값으로 응력파를 수정하고, 그에 대한 CAPWAP분석을 실시하였으며, [표 5]에는 새로운 분석에 의한 지지력을 나타내었다.

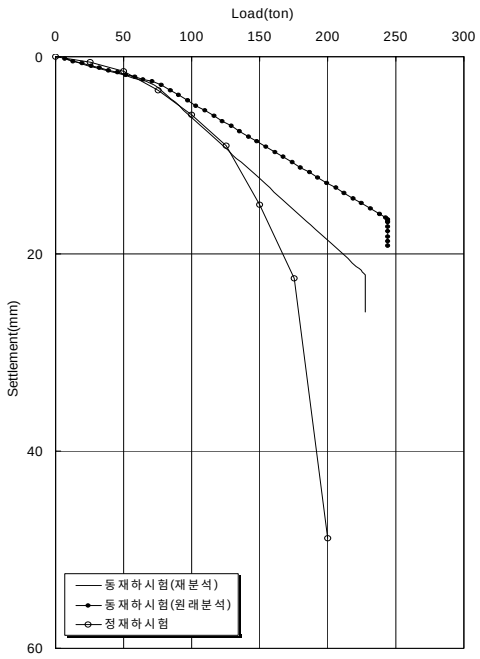
[표 5] 재분석 결과 말뚝 지지력 요약

구분		주면마찰력(t)	선단지지력(t)	전체지지력(t)	전침하량(㎜)
A말뚝	원래 분석	29.0	196.3	225.3	16.6
	재분석	27.6	160.2	187.8	28.7
B말뚝	원래 분석	45.7	198.7	244.4	16.5
	재분석	56.6	171.1	227.6	22.1

재분석 결과내용에 의한 하중-침하량 관계와 정재하시험 결과를 함께 도시하면 [그림 9] 및 [그림 10]과 같다.



[그림 9] 동재하(재분석)-정재하 시험의 비교 (A 말뚝)



[그림 10] 동재하(재분석)-정재하 시험의 비교 (B 말뚝)

이 사례에서 볼 수 있는 것처럼 동재하시험을 제대로 실시하고 분석하지 못한다면, relaxation에 대한 무리 말뚝 시공으로 인한 말뚝 솟아오름과 그로 인한 지지력 감소뿐만 아니라, 원심력 콘크리크 말뚝의 재료상의 문제까지 나타나는 아주 복잡한 경우이지만 말뚝기초에 대한 전문가라면, 이러한 현상에 대해서도 분석할 수 있어야 할 것이다.

4. 맺는 말

국내에서는 현재 연간 10,000회 이상의 동재하시험이 시행되고 있다. 그 시험 내용을 모두 알 수는 없지만, 연간 수 천회의 시험을 실시하는 업체들의 동재하시험 보고서를 분석해 볼 때, 그 품질에 심각

한 문제가 내재하고 있다는 것이 감지되고 있다. 지지력이 부족한 말뚝이 안전한 것으로, 반대의 경우가 보강이 필요한 말뚝으로 구분되기까지 한다.
이보다 더 심각한 문제는 동재하시험을 발주하고 감독하고 공사에 적용하여야 할 설계자, 원청 시공자, 발주자, 감리자 기술자들이 그 내용에 대하여 전혀 무지하다는 것이라 할 수 있겠다.
본 논문에서는 지면 관계로 그 실태를 일일이 설명하지 못하였다. 설혹 이런 기회에 그 실상을 제대로 알린다고 하더라도, 그 효과는 미지수이다.
결론적으로, 건설되는 구조물의 안전과 경제성에 모두 중대한 영향을 미치는 동재하시험에 대하여, 이들 관련 기술자들이 이해의 수준을 높이는 것 외에는 별다른 방안이 없을 것으로 보인다.

참고문헌

1. 이명환, 홍헌성, 김성회, 전영석(2006) “무리말뚝 시공의 영향,” 한국지반공학회 2006 봄할술발표회 논문집.
2. ASTM : D4945-96 : Standard Test Method fo High-Strain Dynamic Testing of Piles."
3. Hannigan, P.J. (1980) "Dynamic monitoring and analysis of pile foundation installations," A Continuing Education Short Course Text, Deep Foundations Institute