

# 동재하시험 결과로부터 말뚝의 허용지지력 결정방법에 대한 연구

## Study on a evaluation of pile bearing capacity using dynamic test

홍헌성<sup>1)</sup> : Hong, Hun Sung,      김성회<sup>2)</sup> : Kim Sung Hoe,

이명환<sup>3)</sup> : Lee, Myung Whan

1) 파일테크 대표, Principal, PILETECH consulting engineers.

2) 파일테크 부장, Senior researcher, PILETECH consulting engineers.

3) 파일테크 대표, Principal, PILETECH consulting engineers.

**SYNOPSIS** : It is not appropriate to simply apply a certain factor of safety to determine the allowable pile bearing capacity from dynamic pile test results. This is because that a pile foundation should carry applied load safely and that the pile settlement should be within the allowable limit. To satisfy the above, one must consider the pile behaviour(load-settlement curve) from the dynamic test as well as the ultimate or yield capacity of piles.

In this paper, the dynamic test results(load-settlement) were compared with the static load test. In consequence of this study, the load-settlement curve from the dynamic tests has turned out to be considerably similar to that from the static tests. Based on test results, we may propose a criterion of evaluating pile bearing capacity using dynamic pile load test.

### 1. 서 론

최근들어 건설공사의 품질관리에 대한 사회적 관심이 고조되고 있으며 기초공사 부분에서도 말뚝기초의 지지력 확인이 거의 모든 공사에서 필수적 과정으로 정착되어 가고 있다. 이에 따라 각종 건설공사 현장에서는 많은 수의 말뚝재하시험이 실시되고 있으며 그 결과 기초공사의 기술수준 향상이 이루어지고 있다.

그간 국내에서는 주로 사하중 재하방법 또는 반력말뚝의 인발저항을 이용한 정재하시험법에 의한 말뚝재하시험이 위주가 되어 말뚝기초의 품질관리가 이루어져 왔다. 정재하시험 결과로부터 말뚝기초의 허용지지력을 결정하는 데에는 아래와 같은 건설부 제정 「구조물 기초 설계기준」의 규정이 적용되어 왔다<sup>(1)</sup>.

◦ 건설부 제정 「구조물 기초 설계기준」에 의한 허용지지력 결정

- ① 말뚝재하시험 결과 극한상태가 규명되었을 때는 극한지지력에 3.0의 안전율을 적용하여 허용지지력을 산출
- ② 말뚝재하시험 결과 극한상태가 규명되지 못하였을 경우에는 아래와 같은 기준에 의거하여 항복하중을 규명하고 여기에 2.0의 안전율을 적용하여 허용지지력을 산출
  - S-log t 분석법
  - log P - log S 분석법(전침하량 분석법)
  - dS/d(log t) - P 분석법
  - log P - log S 분석법(잔류침하량 분석법)

그러나 위와 같은 정재하시험 해석은 가항복하중 규명에 의한 말뚝지지력의 과소평가 가능성<sup>(2)</sup>과 말뚝의 하중-침하량 거동을 무시한 일률적 해석에 의한 신뢰도 저하<sup>(3)</sup> 등의 문제가 상존한다. 이에 새로 제정되는 한국지반공학회 제정 「구조물 기초 설계기준」<sup>(4)</sup>에서는 기존의 허용지지력 평가방법에 순침하량 기준 및 Davisson의 판정기준을 추가하여 지반기술자로 하여금 말뚝의 하중-침하량 관계에 입각하여 보다 포괄적인 평가를 할 수 있도록 개선하였다.

정재하시험 결과로부터 말뚝기초의 허용지지력을 결정하는 경우에는 참고문헌(2) 및 (3)에 나타난 바와 같이 해석방법에 따라 상이한 결과를 얻을 수 있다. 그러나 정재하시험 결과의 해석은 근본적으로 말뚝의 하중-침하량 거동에 입각하는 개념이므로 여러 가지 해석법을 종합적으로 적용하여 전문가적 판단을 실시할 경우, 결정적 오류는 방지할 수 있다.

말뚝항타분석기(PDA, Pile Driving Analyzer)를 사용하여 항타장비의 적합성, 말뚝의 항타시공 관입성, 항타시 말뚝의 건전도와 더불어 시공된 말뚝의 지지력까지 측정할 수 있는 동재하시험법은 우리나라에 1994년 처음 도입된 이래로 아래와 같은 장점이 널리 인식되어 말뚝기초의 품질관리 수단으로 급속도로 적용이 확산되고 있다.

- 시험 소요시간이 매우 짧다.
- 비용이 적게 든다.
- 말뚝관입 도중의 어느 시점에서든 말뚝지지력을 알 수 있다.
- 말뚝과 해머의 성능을 동시에 측정할 수 있으므로 합리적 작업관리를 할 수 있다.
- 말뚝타격시 발생하는 말뚝의 파괴와 위치를 알 수 있다.
- 깊이별 저항력 분포를 알 수 있다.

그러나 동재하시험 결과로부터 말뚝기초의 허용하중을 결정하는 방법에 있어서는 아직까지 분명한 개념정립이 되지 못하고 있는 실정이다. 건설부 제정 「구조물기초 설계기준」에는 동재하시

험에 관한 정성적 설명만이 되어 있으며 구체적인 허용하중 결정방법은 언급되어 있지 못하다. 또한 국내에서 동재하시험과 관련한 연구결과에서도<sup>(5)(6)</sup> 극히 초보적인 허용하중 결정방법이 적용되었을 뿐이다. 즉 동재하시험 결과로 얻어지는 극한지지력에 일정한 값의 안전율을 적용하여 말뚝의 허용하중을 결정하는 방법이 채택되고 있음을 알 수 있다.

본 논문에서는 동재하시험으로부터 얻어지는 극한하중을 분석하여 합리적인 허용하중을 결정할 수 있는 방안을 제시하였다.

## 2. 말뚝기초의 허용하중

말뚝기초의 허용하중은 첫째 파괴에 대하여 충분히 안전하여야 하며 둘째 허용된 범위 이상의 변위가 발생하지 않아야 하는 조건을 만족시켜야 한다.

현행 국내의 허용하중 결정방법은 위의 두가지 조건중 첫 번째인 파괴에 대한 안전개념에 입각한 방법이 채택되고 있다. 말뚝의 극한지지력에 3.0의 안전율 적용은 물론이고 항복지지력에 2.0의 안전율을 적용하는 개념은 근본적으로 동일한 조건이다. 이는  $S - \log t$ ,  $dS/d(\log t) - P$  및  $\log P - \log S$  분석에 의한 항복지지력은 극한지지력의 2/3가 된다는 가정에 입각하였기 때문이다.

그러나 실제로 시공된 말뚝이 구조물 기초로 역할을 다하기 위해서는 파괴가 발생하지 않아야 한다는 조건외에 하중재하로 인한 변위값이 허용된 범위가내가 되어야 하는 조건 또한 만족시켜야 한다.

기초공학에 대한 최근의 국제적인 학문적 조류는 말뚝기초의 역할을 종래의 파괴방지 목적보다는 과대한 침하량을 억제하기 위한 수단으로서의 역할이 강조되고 있다. 여기에서 더 나아가 최근에는 상당한 침하량을 갖도록 설계하는 소위 침하하는 말뚝기초(creep pile)개념<sup>(7)</sup>과 말뚝기초가 상당한 침하를 하도록 인위적으로 설계함으로써 그간 설계에서 고려되지 않던 기초판의 하중지지 능력까지 설계에 활용하는 방안<sup>(8)</sup>까지 제안되고 있다.

그러나 구조물기초를 설계하는 입장에서 보면 위의 두가지 기본개념의 어느 한가지도 무시할 수는 없다. 또한 말뚝의 허용하중결정이 두가지 기본개념중 어느 한가지에 치중되면 축조되는 구조물의 안전이 우려되는 상황 또는 비경제적인 설계가 되는 경우를 피할 수 없다. 따라서 허용하중결정은 이 두가지 기본개념을 적절히 고려한 기초공학의 전문가적 판단에 의하는 것이 바람직하다.

이상의 논의는 하중-침하량 관계가 상이한 두가지 말뚝거동을 대상으로 하여 보다 구체적으로 설명할 수 있다(그림 1). 그림 1에 나타난 두가지 말뚝의 극한지지력 값은 150ton으로 동일하다. 그러나 하중-침하량 거동은 1번 말뚝의 경우 재하하중 113ton까지 말뚝재료의 탄성압축량보다

작은 값의 침하량이 측정되었고 그 이상의 하중에서 급격히 파괴가 발생하였다. 즉 상당히 큰 주면마찰력을 갖고 있는 말뚝인 것으로 판단된다. 반면 2번 말뚝은 하중재하 초기에서부터 말뚝재료의 탄성압축량보다 큰 값의 침하량이 발생하여 주면마찰력이 극히 낮은 말뚝거동을 보여준다.

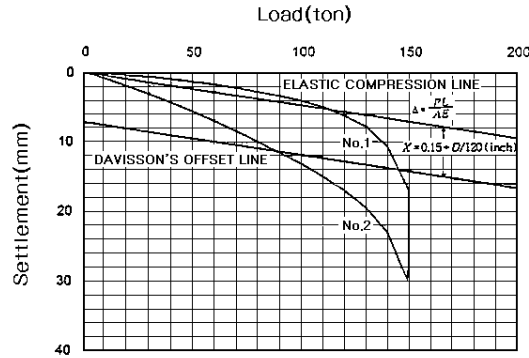


그림 1. 거동이 상이한 두가지 말뚝재하시험결과

그림 1에 나타난 두가지 시험결과로부터 말뚝의 허용하중을 결정할 경우 현행 국내의 설계기준을 적용하면 1번, 2번 말뚝 모두 동일하게 극한하중 150ton에 3.0의 안전율을 적용한 50ton의 허용하중 값을 얻는다. 즉 말뚝거동과 관계없이 1번 2번 말뚝 모두 극한상태에 대하여 동일한 3.0의 안전율을 확보하게 된다.

그러나 침하량 개념에 입각하여 그림 1에 표시한 말뚝재하시험 결과를 해석하면 위의 결과들과는 상이하다. 예를들면 5mm의 허용침하량을 인정하는 경우 1번 말뚝은 110ton의 허용하중을 갖는데 비하여 2번 말뚝은 45ton에 불과하다. 침하량 개념에 의한 말뚝의 허용하중은 기준이 되는 침하량 값에 따라 상이하며, 기준 허용침하량은 상부구조물의 특성에 따라 상이하기 때문에 이를 설계기준에 채택한 예는 극히 한정되어 있다<sup>(9)</sup>.

말뚝에 하중이 재하되었을 때 발생하는 침하량은 탄성침하량과 소성침하량의 합으로 나타난다. 탄성침하량은 말뚝자체의 탄성압축량과 지반침하중 탄성부분의 결과로 발생하며 하중을 제거하면 회복되는 침하량이다. 소성침하량은 주로 지반의 침하결과이며 하중을 제거하더라도 회복되지 않는 잔류침하량을 의미한다. 말뚝의 하중지지능력이 문제시되는 부분은 주로 소성침하량 값의 크기에 좌우된다. 즉 소성침하량이 크게되면 그만큼 극한상태에 근접하다는 의미이며, 따라서 말뚝의 허용하중은 소성침하량을 기준으로 하는 개념이 바람직하다는 인식을 바탕으로 하여 잔류침하량 기준이 제안되었다. 대표적인 잔류침하량 기준은 미국의 COE기준<sup>(10)</sup>과 독일의DIN기준<sup>(11)</sup>을 들 수 있다.

COE기준은 말뚝직경이나 길이와 관계없이 0.25inch의 잔류침하량을 발생시키는 하중을 극한하

중으로 규정하고 있으며 DIN 규정에서는 말뚝직경의 2.5%에 해당되는 잔류침하량 상태를 극한상태로 판정한다. 말뚝의 허용하중은 판정된 극한하중에 2.0의 안전율을 적용하여 산출한다.

잔류침하량 기준에 의한 말뚝의 허용하중 결정은 극한하중 또는 항복하중에 일정한 값의 안전율을 적용하는 현행 국내의 허용하중 결정방법보다 분명하며 침하량 개념을 보완한 합리적 평가방법으로 평가된다. 그러나 이 기준을 적용하기 위해서는 다사이클 반복재하시험이 필수적이다. 반복재하시험은 시험시간이 길다는 문제점외에 반복재하로 인한 지반거동의 변화문제가 함께 고려되어야 한다는 지적도 있다<sup>(12)</sup>.

Davisson의 판정기준<sup>(13)</sup>은 그림 1에 표시한 바와 같이 말뚝재료의 탄성압축량(PL/AE)보다 일정한 값( $0.15+D/120$  inch)의 추가침하를 발생시키는 하중을 기준하중으로 하고 그 값에 2.0의 안전율을 적용하여 허용하중을 결정한다. Davisson의 판정기준은 말뚝길이, 직경 및 말뚝재질 특성을 종합적으로 고려하였으며, 논란이 되는 반복하중 재하과정없이 말뚝의 허용하중을 합리적으로 산정할 수 있는 방안으로 인식되어 COE, NAVFAC<sup>(14)</sup>에서 채택되었으며, 현재까지 가장 합리적인 허용하중 결정방법으로 인식되고 있다<sup>(16)</sup>.

국내의 잔류침하량 기준 및 Davisson의 판정기준에 대한 비교연구 결과에 의하면 Davisson의 판정법이 현행의 각종 기준들보다 합리적 허용하중 결정법인 것으로 보고되고 있다<sup>(3)</sup>. 그러나 Davisson의 판정기준은 참고문헌(3) 및 (17)에 언급된 바와 같이 여러 가지 허용하중 결정법들중 가장 보수적인 결과를 나타내는 점을 고려할 필요가 있다.

### 3. 동재하시험에 의한 극한지지력

이상에서 설명한 바와 같이 말뚝재하시험 결과로부터 말뚝의 허용하중을 결정하는 과정은 극한하중에 3.0, 항복하중에 2.0의 안전율을 적용하여 계산하는 단순계산작업이 될 수 없다. 허용하중 결정은 말뚝의 하중-침하량 거동과 상부 구조물의 특성을 포괄적으로 고려하는 전문가의 판단을 요하는 부분이다. 이는 말뚝재하시험 결과가 직접적인 하중-침하량 거동을 나타내주는 정재하시험 뿐만 아니라 동재하시험 결과의 해석에도 적용된다.

그러나 동재하시험 결과를 해석하는 데에는 국내는 물론 외국에서도 이와 관련한 명확한 기준이 없는 실정이다. 그 결과 국내에서는 동재하시험결과 측정된 극한지지력에 일률적으로 3.0의 안전율을 적용하여 허용하중을 결정하는 사례도 빈발하고 있다.

동재하시험의 원리는 말뚝의 두부를 해머로 타격하여 발생하는 압축파를 말뚝 몸체에 부착한 변형률계(strain transducer)와 가속도계(accelerometer)를 사용하여 측정된 결과를 해석함으로써 말뚝의 극한지지력을 알 수 있는 시험법이다. 말뚝의 극한지지력은 CASE방법 및 CAPWAP해석을 통하여 분석할 수 있으며, 시험법 및 극한지지력 해석은 참고문헌(18)에 상세히 설명하였다.

동재하시험으로 말뚝의 극한하중을 규명하기 위해서는 시험법의 원리상 충분한 변형과 입자가 속도가 발생하여야 한다. 즉 극한하중 상태가 될 수 있는 충분한 타격에너지가 말뚝두부에 가해진 경우 말뚝선단부에서도 극한하중 규명에 필요한 변형이 발생하기 때문이다. 만약 가해진 타격에너지가 말뚝선단부에 충분한 변형을 유발시키지 못하거나 주면마찰력이 큰 경우에는 선단지지력 규명이 불가능하다. 특히 말뚝향타로부터 상당한 시간이 경과한 경우의 재향타시험에서는 분명한 선단지지력 규명이 곤란한 경우가 많이 발생한다. 이때 선단지지력 규명을 위하여 타격에너지를 높여주면 타격응력이 말뚝재료의 허용응력을 초과하여 말뚝파손이 나타나기도 한다.

따라서 동재하시험으로 측정한 극한지지력은 지반조건, 말뚝재질 및 타격에너지에 따라 의미하는 바가 상이하다. 이를 실제 재하시험결과와 연계하여 설명하면 그림 2와 같다.

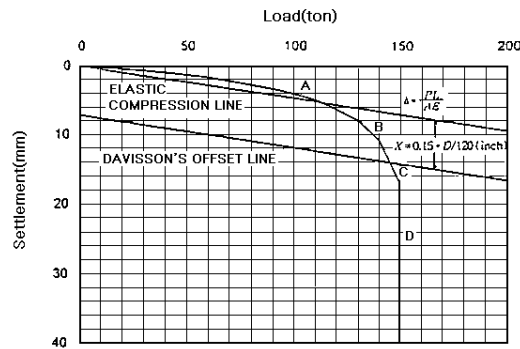


그림 2. 타격에너지 변화에 따른 동재하시험 극한하중변화

먼저 타격에너지가 낮은 수준이거나 말뚝의 주면마찰력이 큰 경우, 동재하시험으로 규명되는 극한하중은 Davisson 판정기준에 의한 항복상태를 유발시키지 못한다. 그림 2의 A 또는 B와 같은 상태까지 동재하시험이 실시되었을 뿐이며 실제 말뚝기초의 극한상태는 물론 항복상태도 규명하지 못하였다. 이와같은 상태로 규명된 극한하중은 항복이전 극한하중(pre-yield ultimate load)이며 따라서 분명한 허용하중 규명은 불가능하다.

반면 충분히 큰 타격에너지로 동재하시험이 실시되면 그때 규명되는 극한하중은 그림 2의 C 또는 D점 상태를 나타내준다. 이와같은 극한하중은 항복이후 극한하중(post-yield ultimate load)이며 적용기준에 따라 분명한 극한하중 또는 항복하중이 규명된다.

본 예에서 설명한 바와 같이 동재하시험에 의한 극한하중은 시험을 위하여 가해진 타격에너지 값에 따라 그 의미하는 바가 상이하다. 그림 2의 예와 같이 동일한 하중-침하량 거동을 갖고 있는 말뚝에 대하여 타격에너지 값의 크기에 따라 상이하게 측정된 동재하시험 결과는 그 극한하중의 의미를 반드시 고려하여 허용하중을 산정하여야 한다.

이를 무시하고 국내의 일부에서 시행하듯이 일률적으로 동일한 3.0의 안전율을 적용하면 허용하중 평가에 중대한 오류가 발생할 수 있다.

#### 4. 동재하시험 결과의 해석사례

표 1에는 최근 실시한 11개소의 동재하시험 결과를 요약하였다. 시험말뚝은 ø 350mm PHC말뚝이며 시공법은 항타공법이였다. 동재하시험은 말뚝의 허용하중을 확인하기 위하여 항타후 일정한 시간이 경과한후 재항타시험을 실시하였다.

그림 3에는 표 1에 표시한 11개소의 동재하시험 결과를 CAPWAP 해석하여 정적인 하중-침하량 거동을 재현하였으며 Davisson의 판정기준도 함께 표시하였다. 본 예의 지반조건은 극히 양호하여 말뚝의 주면마찰력이 상당히 큰 값을 갖고 있어 대부분의 경우 극한하중 판정이 불가능하였다. 이와같은 경우에 동재하시험 결과에 일률적으로 3.0의 안전율을 적용할 경우 허용하중을 과소평가하게 된다.

허용하중의 과소평가는 항복이전 극한상태에서 더욱 심각하며, 항복이후 극한상태까지 동재하시험 결과가 얻어지면 시험번호 9에서와 같이 과소평가 오차를 낮출 수 있다. 표 2에는 ø 350mm PC말뚝 5개소에 대한 동재하시험 결과를 요약하였다. 말뚝은 항타시공 되었으며 T4말뚝만이 항타후 일정시간이 경과한 상태에서의 재항타 시험이며 기타는 항타종료시의 동재하시험 결과이다.

표 1. 동재하시험결과 요약(1)

	번호	CAPWAP해석		Davisson 판정기준		비고 A/B
		극한하중(ton)	허용하중(ton) A	항복하중(ton)	허용하중(ton) B	
항복이전 극한	1	212.5	70.8	212.5↑	106.3↑	0.67
	2	221.8	73.9	221.8↑	110.9↑	0.67
	3	198.5	66.2	198.5↑	99.3↑	0.67
	4	277.2	92.4	277.2↑	138.9↑	0.67
	5	232.0	77.3	232.0↑	116.0↑	0.67
	6	262.0	87.3	262.0↑	131.0↑	0.67
항복이후 극한	7	166.0	55.3	158.0	79.0	0.70
	8	247.0	82.3	234.0	117.0	0.70
	9	251.9	84.0	208.0	104.0	0.81
	10	192.0	64.0	178.0	89.0	0.72
	11	186.9	62.3	186.9	93.5	0.67

- 註) 1. ↑표시는 극한, 항복 또는 허용하중이 규명되지 못하여 표시한 값 이상이 됨을 의미함.  
 2. 허용하중 A는 극한하중에 안전율 3.0을 적용하였음.  
 3. 허용하중 B는 Davisson 판정기준에 2.0의 안전율을 적용하였음.

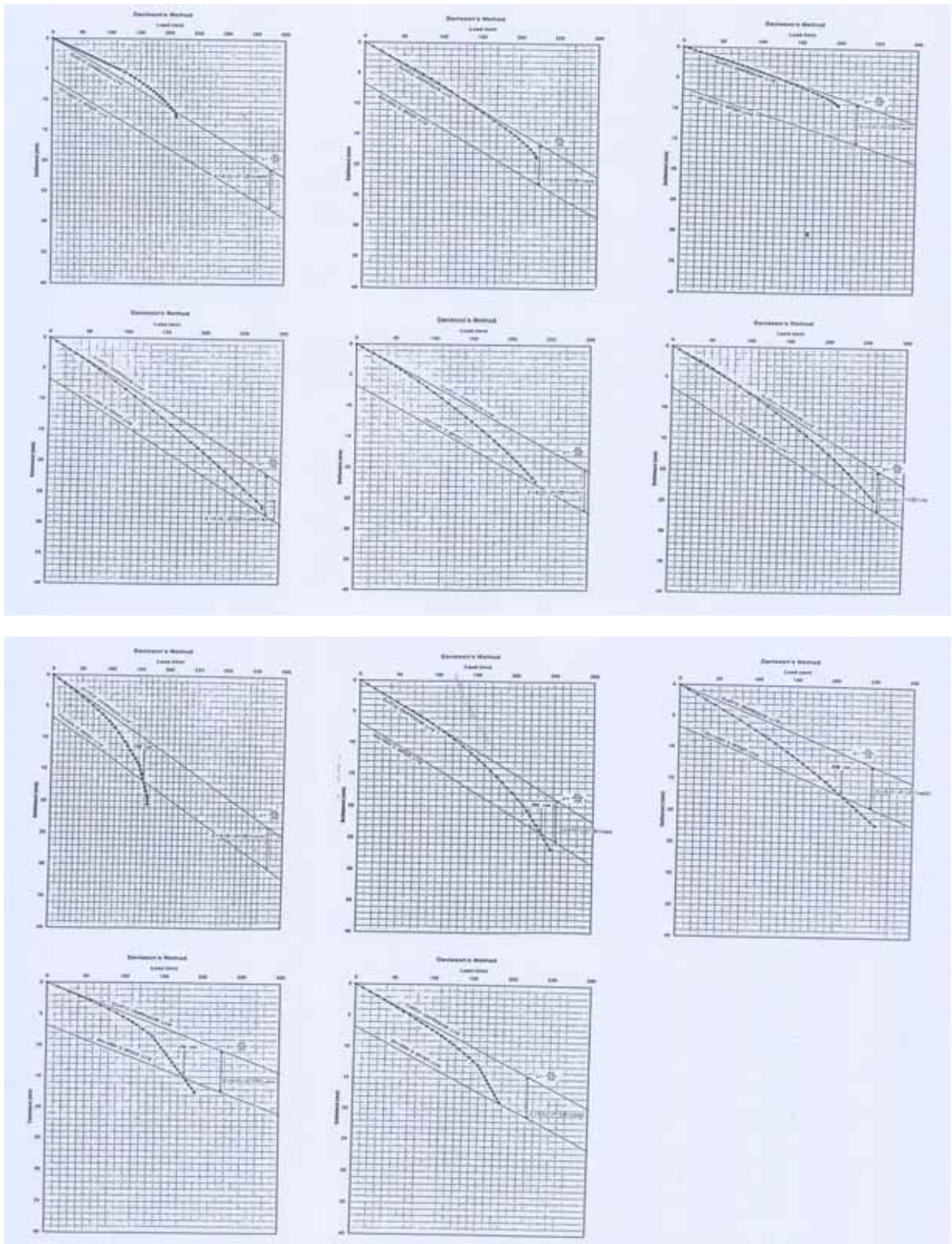


그림 3. 동재하시험결과 요약(1)



표 2. 동재하시험결과 요약(II)

번호	CAPWAP해석		Davisson 판정기준		비고 A/B
	극한하중(ton)	허용하중(ton) A	항복하중(ton)	허용하중(ton) B	
T1	112.0	37.3	112.0↑	56.0↑	0.67
T2	105.0	35.1	91.0	45.5	0.77
T3	117.0	39.0	97.0	48.5	0.80
T4	152.6	50.9	152.6↑	76.3↑	0.67
T5	98.0	32.7	53.0	26.5	1.23

註) 1. ↑표시는 극한, 항복 또는 허용하중이 규명되지 못하여 표시한 값 이상이 됨을 의미함.

2. 허용하중 A는 극한하중에 안전율 3.0을 적용하였음.

3. 허용하중 B는 Davisson 판정기준에 2.0의 안전율을 적용하였음.

표 2의 재하시험 결과는 그림 4에 표시하였다. 앞의 예와는 상이하게 시험을 위한 타격에너지로 3개소에서 항복하중이 규명되었다. 시험시 타격에너지가 충분하지 않으면 동재하시험 결과에 3.0 안전율 적용은 허용하중을 과소평가하는 것은 앞의 예와 같지만 시험말뚝 T5의 경우에는 오히려 허용하중을 과대평가 하는 것으로 나타나고 있다.

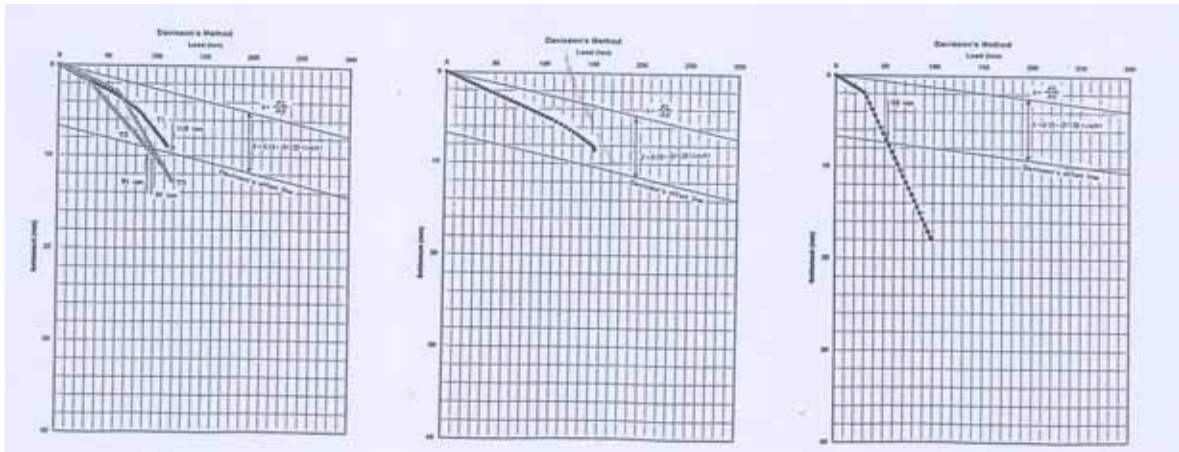


그림 4. 동재하시험결과 요약(III)

앞의 예에서 나타난 바와 같이 동재하시험 결과에 일률적으로 3.0의 안전율을 적용하면 대부분 말뚝의 허용하중을 과소평가하게 된다. 물론 표 2의 T5와 같이 허용하중을 과대평가할 가능성도 배제할 수는 없다. 그러나 이와같은 결과는 동재하시험 결과를 CAPWAP 해석한 경우이며, CAPWAP 해석없이 단순히 CASE 방법만으로 말뚝의 극한지지력을 알 수 있는 장점이 있어 개략적인 말뚝지지력 판정에 많이 사용된다. CASE 방법으로 말뚝의 극한지지력을 측정하기 위해서는 지반의 damping 계수 값에 따라 말뚝의 극한지지력은 상당히 큰 차이를 나타내게 된다. 표 3에

는 표 1에 수록한 시험말뚝들에 대한 CASE 방법에 의한 극한지지력을 요약하고 CAPWAP 지지력과 비교하였다.

표 3. CASE 방법과 CAPWAP 지지력의 비교

번호	CASE 극한지지력(ton)		CAPWAP 극한지지력(ton)	CASE/CAPWAP 오차범위
	RMX (J <sub>c</sub> =0.7)	RSP (J <sub>c</sub> =0.5)		
1	212.0	208.0	212.5	0.98 ~ 1.00
2	223.0	235.0	221.8	1.01 ~ 1.06
3	188.0	159.0	198.5	0.80 ~ 0.95
4	269.0	239.0	277.2	0.86 ~ 0.97
5	251.0	220.0	232.0	0.95 ~ 1.08
6	274.0	252.0	262.0	0.96 ~ 1.05
7	211.0	207.0	166.0	1.24 ~ 1.27
8	259.0	247.0	247.0	1.00 ~ 1.05
9	258.0	256.0	251.9	1.01 ~ 1.02
10	224.0	197.0	192.0	1.03 ~ 1.17
11	205.0	176.0	186.9	0.94 ~ 1.10

표 3에 나타난 바와 같이 현장의 지반조건을 적절히 판단하여 damping 계수를 가정하지 못할 경우 CASE 방법에 의한 극한지지력은 CAPWAP 결과와는 상당한 차이가 있을 수 있다. 여기에 앞에서 설명한 말뚝거동 해석을 고려하지 못함으로 인하여 나타나는 오차요인을 함께 감안하면 발생할 수 있는 오차의 폭은 상당히 크게 됨을 알 수 있다.

그 결과는 설계된 지지력을 만족시키는 경우에도 지지력 미달로 잘못 판정되어 보강작업을 실시하거나, 지지력이 부족한 말뚝기초가 안전한 상태로 평가되는 사태도 충분히 예견될 수 있다.

### 5. 동재하시험 결과로부터 허용하중결정방법

1994년 우리나라에도 동재하시험을 할 수 있는 PDA가 도입되기 시작하여 현재까지 6대의 장비가 실무에서 사용되고 있으며 도입을 계획중인 기관도 있다. 앞에서 설명한 바와 같이 동재하시험 결과의 해석은 말뚝 및 지반의 지지력 특성을 충분히 이해한 상태에서 이루어져야 하며 합리적 해석이 되면 종래에 시행되던 말뚝의 하중-침하량 관계만을 알 수 있는 정재하시험보다 많은

자료를 알 수 있게 해주기 때문에 말뚝기술의 전반적 향상도 기대된다.

그러나 말뚝거동에 대한 고려없이 단순히 동재하시험 결과에 일률적인 안전율을 적용하는 경우, 말뚝기초의 안전이 문제되는 경우도 발생할 수 있다. 따라서 동재하시험 결과로부터 말뚝의 허용 하중을 결정하기 위해서는 아래와 같은 과정을 충실히 이행하여야 한다.

- (1) CASE 방법에 의한 동재하시험 결과는 현장에서 즉시 시험말뚝의 지지력을 개략적으로 파악하는 목적으로만 사용되어야 한다.
- (2) 동재하시험 결과는 반드시 CAPWAP 해석을 하여야 하며, CAPWAP 해석결과로부터 하중-침하량 관계를 도출한 후, 합리적 판단기준을 적용하여 타당한 안전율을 적용하여야 한다.
- (3) 많은 경우 동재하시험을 위한 타격에너지가 부족하여 충분하고 명백한 극한지지력 규명이 곤란하다. 이는 대부분 말뚝항타후 시간경과에 따른 주면마찰력 증가에 기인하며, 따라서 경제적 말뚝설계 또는 부주면마찰력 규명 등을 위하여 분명한 극한지지력을 규명할 필요가 있는 경우에는 반드시 항타종료시 동재하시험과 일정시간이 경과한 후의 재항타시험을 병행하여 선단지지력 및 주면마찰력을 구분한 고려가 요구된다. 시간경과에 따른 말뚝지지력 변화는 본 논문에서는 설명을 생략하였으며 이에 관해서는 참고문헌(19)에 상세히 설명하였다.
- (4) 말뚝거동을 감안한 동재하시험 결과해석을 위해서는 CAPWAP 분석결과로부터 정적 하중-침하량 관계를 재현하여야 한다. 이 과정에서 CAPWAP 해석의 신뢰도가 확실히 검증되어야 할 필요가 있다. CAPWAP 해석은 측정된 변형률 값, 가속도를 바탕으로 하여 지반조건을 접목하여 말뚝의 정적거동을 도출하는 프로그램이다. 따라서 CAPWAP 해석은 말뚝 및 지반 공학에 대한 이해와 경험을 요구한다. 실제로 동재하시험이 일반화되어 있는 미국 및 캐나다에서도 CAPWAP 해석의 신뢰도는 기술자의 능력에 영향을 받는 것으로 보고되고 있다. 그림 5는 동일한 PDA 측정결과를 18명의 기술자가 해석한 결과를 대비한 결과이다.

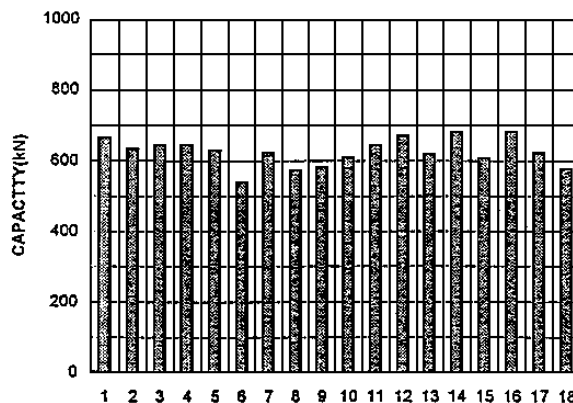


그림 5. 동일한 PDA 측정에 대한 18명의 기술자의 CAPWAP 해석결과 비교

그림 5에 나타난 바와 같이 대부분의 해석은 비교적 작은 오차범위 이내이지만 6번 계산과 같이 상당한 오차가 발생할 수도 있다. 이는 지반조건과 말뚝거동의 특성이해 부족으로 추정되며 따라서 CAPWAP 해석은 반드시 지반공학의 전문가적 판단을 요구한다. 그러나 실제로 실무에서 CAPWAP 해석의 신뢰도를 검증하기는 어려운 실정이다. 이러한 CAPWAP 해석 신뢰도 문제는 많은 경우 동재하시험을 실시하고 동일한 말뚝에 대하여 정재하시험을 실시하는 방법으로 검증된다. 국내에서도 동재하시험 도입이후 이 부분에 대한 논란이 계속되어 전술한 방법으로 검증을 실시하였다. 그림 6은 최근 실시한 동재하시험-정재하시험 신뢰도 검증결과이다.

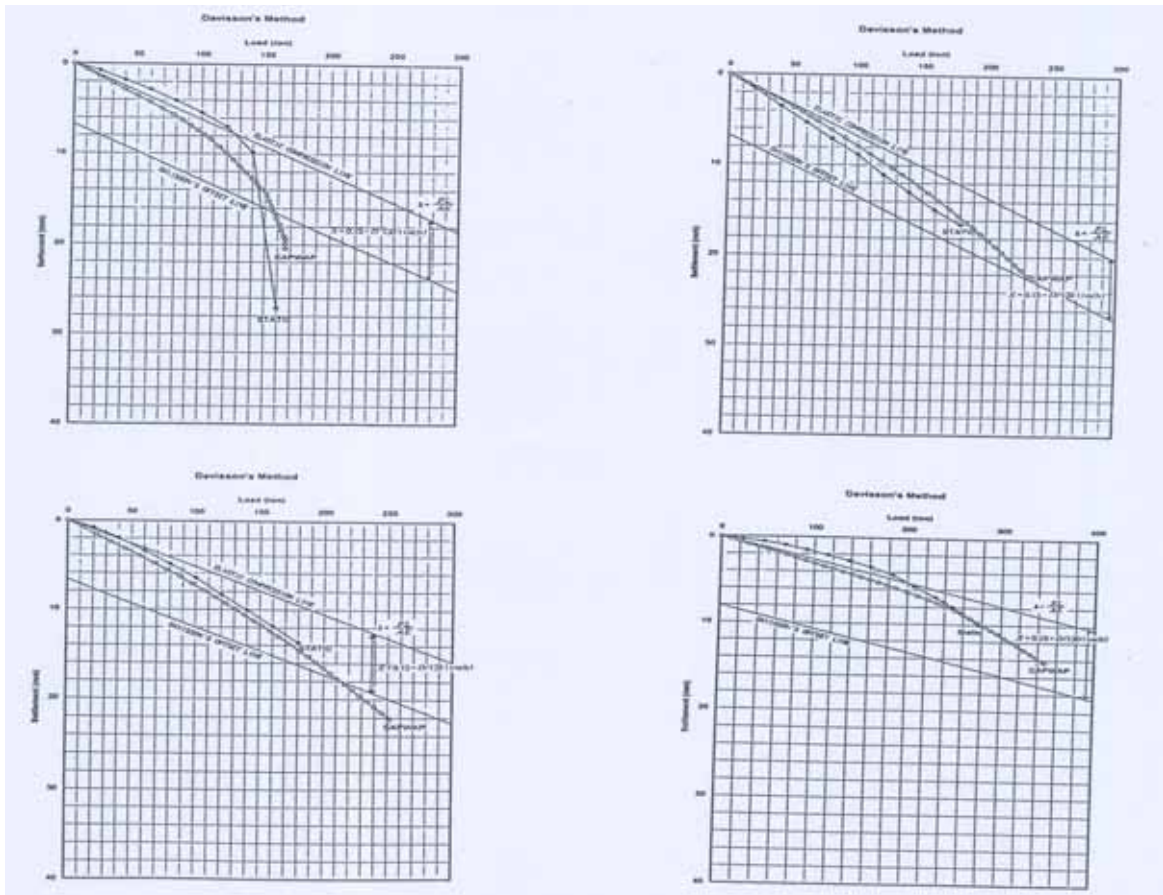


그림 6. 동재하시험-정재하시험 신뢰도 검증

## 6. 결론 및 제언

국내에서도 최근 많은 동재하시험이 실시되고 있다. 그러나 동재하시험 결과로부터 말뚝의 허용하중을 결정하는 방법은 분명하게 규정된 방법이 없는 실정이다. 동재하시험 결과에 일률적인 안전율을 적용이 실무적으로 많이 채택되고 있으나 이는 말뚝의 허용하중 결정상 심각한 오류를 발생시킬 수 있다. 동재하시험 결과로부터 말뚝의 허용하중을 결정하기 위해서는 본 논문에서 제시한 바와 같이 반드시 CAPWAP 분석을 실시하고 말뚝의 하중-침하량 거동까지 고려한 전문가적 판단

이 되어야 한다.

## 참 고 문 헌

1. 건설부(1986) “구조물기초 설계기준”
2. 이명환, 윤성진(1992) “말뚝의 설계하중 결정방법에 대한 비교”, 한국지반공학회 ‘92년도 봄학술발표회 논문집.
3. 이명환, 홍헌성, 이원제(1994) “말뚝기초의 최적설계”, Keynote Lecture, 한국지반공학회 ‘94년도 가을학술발표회 논문집, pp.60-76.
4. 한국지반공학회(1995) “구조물기초 설계기준”, 발간예정.
5. 이영남, 이종섭, 박영호, 나영목(1994) “해양 강관말뚝의 정적 및 동적시험”, 한국지반공학회 말뚝기초위원회 학술세미나, pp.91-108.
6. 이우진, 이인모, 권장혁, 최유중(1994) “항타분석기에 의한 말뚝시공관리 사례”, 한국지반공학회 ‘94년도 가을학술발표회 논문집, pp.79-86.
7. Hansbo. S. (1993) "Interaction problems related to the installation of pile groups", Proceedings of the 2nd International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Ghent, pp.59-66.
8. Randolph, M. F. (1994) "Design methods for pile groups and piled rafts", State-of-the-art report, Proceedings of the 13th ICSMFE, New Delhi, Vol.5, pp.61-82.
9. Broms, B. B., Chang, M. F. and Goh, A. J. C. (1988) "Bored piles in residual soil and weathered rocks in Singapore", Keynote Lecture, Proceedings of the 1st International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, pp.17-34.
10. US Army Corps of Engineers(1991) "Design of pile foundations", Engineer Manual EM 1110-2-2906.
11. DIN 4014(1987) Bohrpfähle. Herstellung, Bemessung and Tragverhalten.
12. Crowther, C. L. (1988) "Load testing of deep foundations", John Wiley & Sons, 233pp.
13. Davisson, M. T. (1992) "High capacity piles", Proceedings, Lecture Series, Innovations in Foundation Constuction, ASCE, Illinois Section, 52pp.
14. Department of the Navy, Naval Facilities Engineering Command(1982) "Foundations and Earth Structures", Design Manual 7.2.
15. Canadian Geotechnical Society(1985) "Foundation Engineering Manual 2n Edition"
16. Fleming, W. G. K., Weltman, A. J., Randolph, M. F. and Elson W. K. (1985) "Piling Engineering", Surrey University Press, 380pp.
17. Fellenius, B. H. (1980) "The analysis of results from routine pile load tests", Ground Engineerin, Vol.13, No.6

18. 파일테크(1994) “동재하시험에 의한 말뚝지지력 산정”, 파일테크 기술자료 1
19. 이원제, 전영석, 홍헌성, 이명환(1995) “시간경과에 따른 항타말뚝의 지지력변화 연구”, 한국지반공학회 '95 한국지반공학회 춘계학술발표회 논문집.