

말뚝의 정·동적 재하시험

박정환*, 노영보**

1. 서론

말뚝의 정·동적 재하시험(Statnamic load test) 방식은 1989년 캐나다 버밍햄머사(Birmingham Hammer Corp.td.)와 네덜란드 왕실 연구소인 TNO-IBBC가 공동으로, 정적 재하시험의 경제성, 효율성, 적용성(경사말뚝, 군말뚝 등)의 문제와 동적 재하시험의 반사율과 영향, 항타시 말뚝손상 우려 및 시험결과 분석에 따른 객관성 문제 등의 단점을 보완하는 목적으로 개발되었다. 특히, 본 시험은 정재하시험이 곤란한 대구경 해상 경사말뚝시험이 용이하며, 정재하시험과 같이 말뚝 두부의 침하량을 레이저로 직접 측정하여 얻어진 하중-침하 곡선에 의해 말뚝의 지지력을 산정하는 방식으로, 동재하시험과 같은 말뚝의 진동신호를 분석하여 간접적으로 지지력을 추정하는 PDA 방식과는 근본적으로 다르다. 현재 30MN(약 3000ton)까지 재하시험이 가능한 장비가 개발되어 유럽, 미국, 일본 등지에서 주로 적용하고 있으며, 국내업체에서도 본 장비를 보유하고 있다.

2. 기본개념

정·동 재하시험기는 말뚝 상부에 직접 설치되며, 피스톤의 압력실내에 있는 고체연료를 연소시킴으로써 압력을 발생시킨다. 이때 발생된 압력은 상재 반

력하중을 상향으로 운동시키게 되고, 이와 동시에 크기가 동일하고 방향이 반대인 힘이 말뚝에 가해지게 된다. 이와 같은 원리를 이용하여 말뚝에 하중을 가하는 방법이 정·동적 재하시험이다(그림 1참조).

고체 연료의 연소시 발생된 압력은 상재하중(Reaction mass weight : m_r)을 약 20g의 가속도로 상향 운동시키며, 작용·반작용의 원리에 따라 말뚝 머리에는 $F = m_r a$ 의 힘이 말뚝에 가해지게 되고 말뚝은 약 1g의 가속도로 운동하게 되어 $20m_r$ 에 해당하는 하중이 말뚝에 가해지는 결과를 나타내게 된

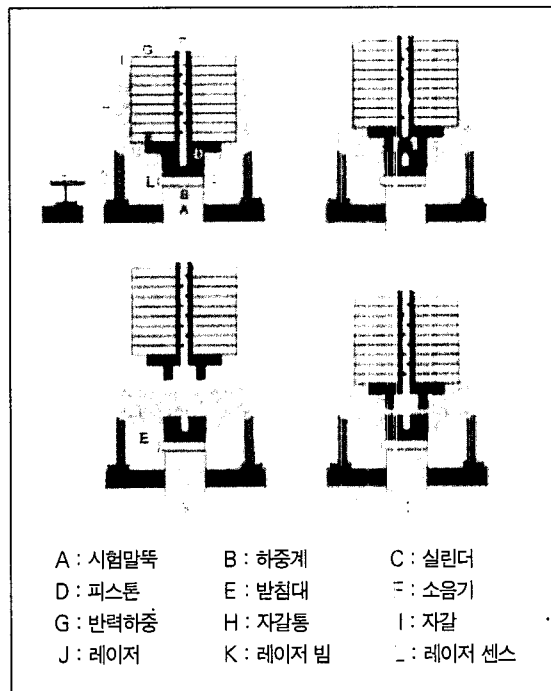


그림 1. 정·동 재하시험 기본 개념도

*1 정회원, 삼보지질(주) 전문이사

** 정회원, 삼보지질(주) 과장

다. 그러므로 소요 반력하중은 정적 재하시험시 하중의 약 5% 정도만이 필요하게 된다. 압력실에서는 꽃불 제조(Pyrotechnics) 기법을 이용해 연료가 연소되어 약 120ms의 하중 지속시간을 보이며, 이는 동적 재하시험의 경우에 비해 약 30배 ~ 40배 정도 하중지속시간이 길다. 본 시험의 기본이론은 뉴턴법칙을 이용한 아래 식 (1), 식 (2), 식 (3)과 같다.

■ 제 1법칙(관성의 법칙)

$$\Sigma F = 0 \tag{1}$$

■ 제 2법칙(가속도의 법칙)
 정·동 재하시험 : $F = (M/20) \times 20g = Mg \tag{2}$
 · $M/20$: 반력하중
 · $20g$: 반력하중의 가속도

■ 제 3법칙(작용 및 반작용의 법칙)

$$F_{12} = -F_{21} \tag{3}$$

3. 정·동적 재하시험 결과의 해석법

정·동재하시험시 말뚝의 정적 거동 특성으로부터 말뚝에 작용하는 힘은 그림 2와 같이 간단하게 모델링할 수 있다.

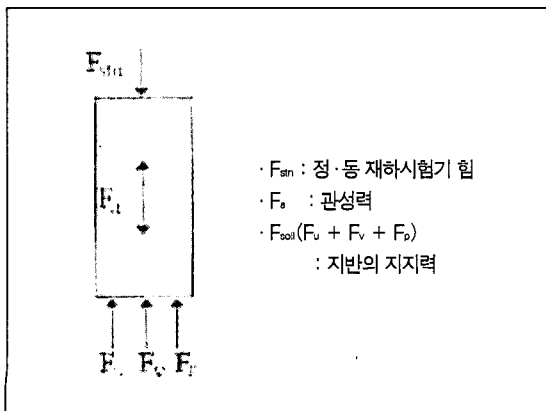


그림 2. 정·동재하시 말뚝에 작용되는 힘

재하시험기로부터 연료가 연소될 때 발생하는 정·동 재하시험기 힘(F_{stm})은 말뚝 몸체의 관성력(F_a)과 지반의 지지력(F_{soil})의 합으로 나타낼 수 있으며, 이때 지반의 지지력은 정적 지지력(F_u), 간극수압에 의한 지지력(F_v), 감쇠력(F_p)의 합이다. 따라서 정·동 재하시험시 작용하는 힘의 평형방정식은 다음 식 (4), (5)와 같다.

$$F_{stm}(t) = F_{soil}(t) + F_a(t) \tag{4}$$

$$F_{soil}(t) = F_u(t) + F_v(t) + F_p(t) \tag{5}$$

위 식 (4), (5)에서 알 수 있는바와 같이, 지반의 정적 지지력은 정·동 재하시험기 힘에서 가속력과 감쇠력, 간극수압에 의한 지지력을 제거함으로써 구할 수 있다. 정·동 재하시험은 하중 재하시험이 동재하시험에 비하여 길지만, 정재하시험에 비해 상대적으로 짧다. 따라서 말뚝 거동 특성이 정적 거동에 가까우나, 투수성이 낮은 점성토에 근입된 주변마찰력의 경우에 동적 효과를 완전히 배제하기는 곤란하다. 그러므로 재하시험시 발생하는 동적인 효과(감쇠력을 제거하여 정적인 지지력을 산정하는 방법으로는 이완점(unloading point)방법이 있으며, 이를 통하여 정·동 재하시험 결과인 하중-변위 곡선으로부터 정적인 하중-변위 곡선을 구할 수 있다.

이완점을 이용한 방법은 그림 3과 같이 정·동 재하시험으로부터 구해진 하중-변위 곡선을 몇 개의 구간으로 나누고, 말뚝의 속도가 0이 되는 지점, 즉 하중이 제하(unloading)되는 지점에서 감쇠력이 0이 되는 점을 이용하여 감쇠력을 산정하고, 이를 제거해 줌으로서 정적 하중-변위곡선을 결정하는 방법이다. 그림 3에서 변위 최대점(F_{umax} 위치)은 말뚝의 속도가 0이 되는 지점으로, 선형 감쇠 모델($F=C_v$)을 고려할 경우, 이 지점에서의 감쇠력은 0이 된다. 즉,

$$v = 0 \text{ 이므로 } F_v = 0 \text{ (} F_v = C \cdot v \text{)} \tag{6}$$

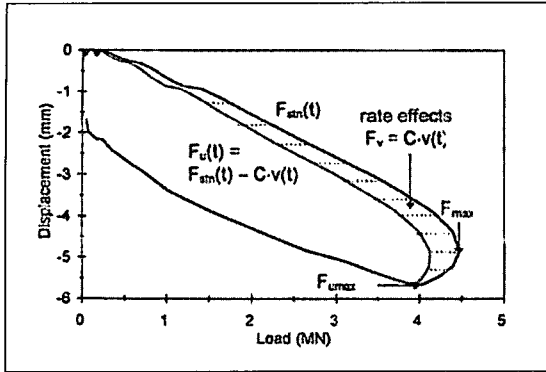


그림 3. 해석을 위한 하중-변위 곡선의 분할

$$F_u = F_{stn} - F_a \quad (7)$$

위 식에서 F_a 의 영향력 또한 전체 저항력에 비해 미세하므로 무시하면 F_{stn} 는 곧 F_u 가 된다. F_{stn} 이 최대점을 지나가는 부분에서는 이미 지반이 파괴 상태에 이르렀다고 보고 이때의 F_u 는 일정하다고 가정하면, 이 구간(F_{max} 에서 F_{umax} 사이의 영역)에서의 감쇠계수 C 값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$C = (F_{stn} - F_u)/v \quad (8)$$

그러므로 이 구간에 대한 감쇠계수 C 값의 평균치 (C_{mean})를 구하고, 식 (8)을 변형하면 다음식이 얻어지며, 지반의 정적 지지력이 산정된다.

$$F_u = F_{stn} - C_{mean} \cdot v \quad (9)$$

위와 같은 방법을 통해 시간에 따른 정·동 재하시험시의 하중-변위 곡선으로부터 동적 효과(감쇠력)를 배제한 하중-변위곡선을 구함으로써 정적인 상태의 하중-변위 거동을 유추할 수 있게 된다.

5MN의 시험 결과의 일 예로 “하중 대 변위 곡선”, “하중과 변위 대 시간 곡선”, “속도 대 시간 곡선”, “가속도 대 시간곡선”의 시험결과를 그림 4와 같이 나타냈다.

위 측정 결과 최대변위는 98ms에서 5.7mm이고, 최대하중은 90ms에서 4.48MN을 나타낸다. 최종침하량은 1.77mm로 측정되었으며, 이완점은 최대변위와 최소속도(속도 = 0)에서 발생된다.

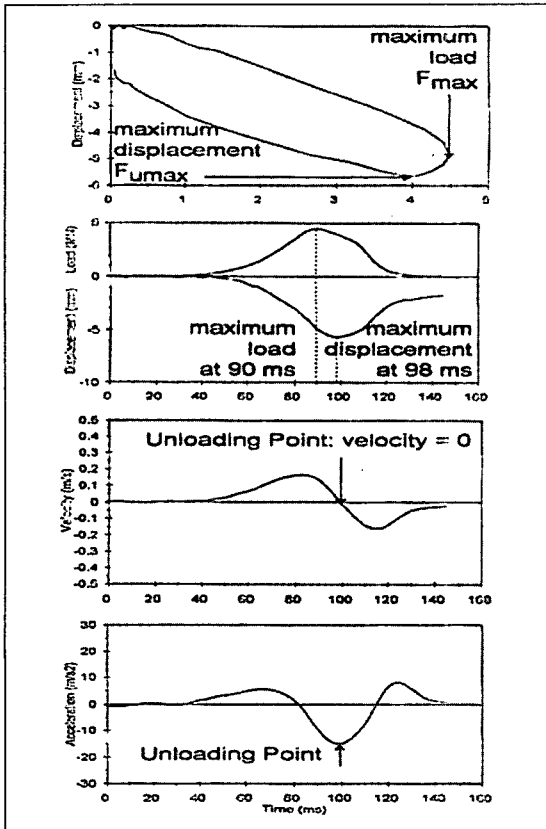


그림 4. 정·동 재하시험 결과

또한, 간극수압 저항력(F_p)은 경미하여, 일반적으로 무시하거나 감쇠 저항력의 일부로 간주한다. 따라서 (4), (5)에서 다음 (7)식이 얻어진다.

4. 각종 정·동 재하시험 수행사례

정·동 재하시험기는 시험말뚝의 시험목적 및 주변환경에 따라 그 상황에 맞게 개조하여 사용되며, 말뚝의 수직 재하는 물론 수평 및 경사말뚝에 대한 재하시험도 가능하다.



사진 1. 미국 뉴욕(4MN)

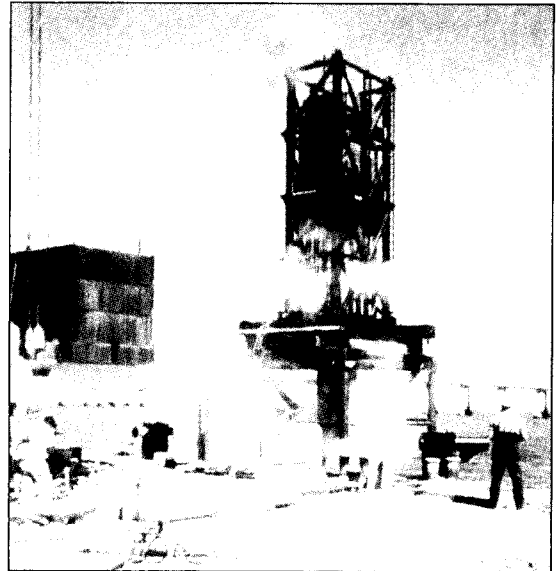


사진 2. 미국 플로리다(16MN)

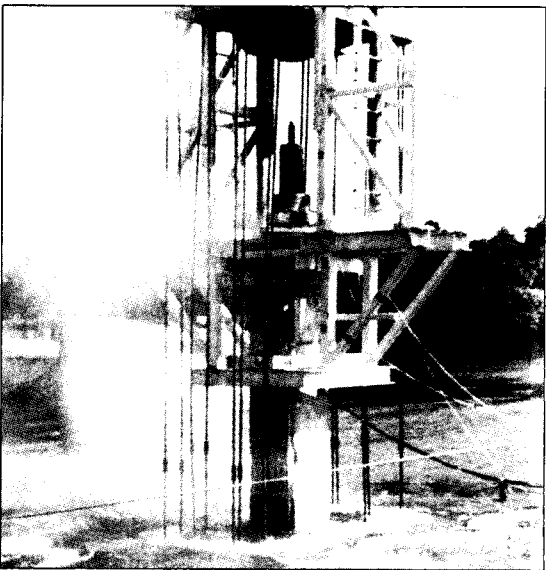


사진 3. 미국 플로리다(16MN)

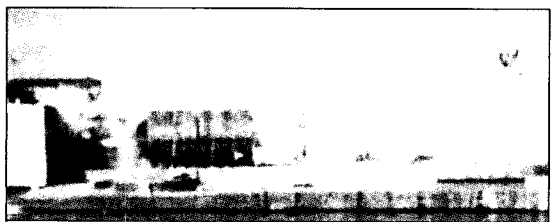


사진 4. 미국 미시시피(14MN)

1) 수직재하시험

수직재하시험에는 반력장치를 유압장비를 이용하여 재하하는 사진 1과 같은 육상구간 시험과 사진 2와 같은 해상구간 시험이 있으며, 사진 3은 미국 플

로리다주 탐과교 건설공사 중 해상말뚝 수직재하시험으로 반력장치를 물을 이용함으로써 기존의 정동적재하시험 방법보다 시간 및 경비를 절감할 수 있었다.

2) 수평재하시험

수평재하시험은 말뚝 상단부에 말뚝보호용 콘크리트 블록을 설치하고, 설치된 블록 측벽에 피스톤을 장착하여, 피스톤 내부의 고체연료의 점화로 발생하는 압력에 의해 말뚝에 소정의 측압을 가해 줌으로서 수평지지력을 측정하는 방법이며, 사진 4는 미국 미시시피강의 해상 강관말뚝에 대한 수평재하시험(1997년)이다.

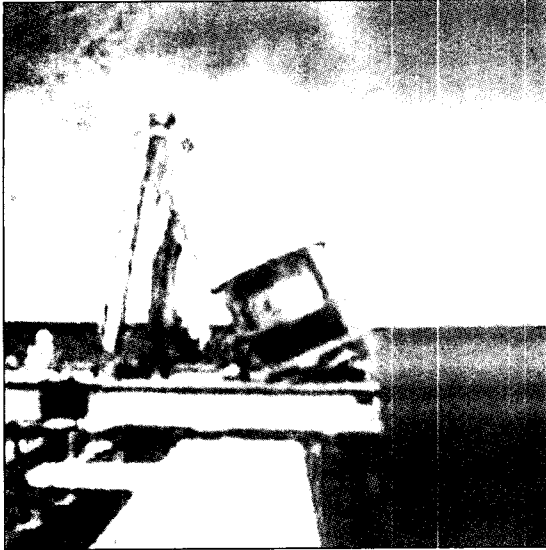


사진 5. 캐나다 온타리오(1.0MN)

3) 경사재하시험

해상 경사말뚝에 대한 지지력 확인은 기존의 정재하시험의 경우 반력장치의 문제 등으로 수행이 곤란하였으나, 정동재하시험 장비의 개발로 이를 간단하게 해결할 수 있었다. 사진 5는 캐나다 남부 온타리오주에 위치한 빌링턴 방파제 보수공사 중 강관(직경 355mm, 길이 22m) 경사(5H:12V)말뚝에 대한 정동재하시험 수행과정으로 재하대 설치 및 시험까지 총 3일이 소요되었으며, 80ton 크레인이 동원되었다.

5. 결론

기초말뚝을 시공하여 재하시험에 의해 실제 지지력을 확인하면, 당초 설계시 예상지지력과 상당한 차이를 보이는 경우를 흔히 볼 수 있으며, 대부분 이와 같은 결과를 설계상의 한계로 당연하게 받아들이고 있는 실정이다. 따라서 기초말뚝 시공시 재하시험은 필연적으로 수행되어야 하며, 시공상의 문제, 다양한 지층변화 등으로 그 시험 횟수도 가능한 많이 시행되어야 한다. 그러나 정재하시험시 소요되는 과도한 비용과 시간 등의 문제로 현실적으로 곤란하다. 또한 PDA(항타분석기)에 의한 동적 재하시험의 경우, 위의 정재하시험의 단점인 비용과 시간의 문제는 해결할 수 있지만, 진동신호를 분석하여 간접적으로 지지력을 유추함으로써 재하시험의 근본 목적인 시험결과의 객관성, 신뢰성 등에 문제가 제기되고 있다. 그러므로 이와 같은 비용과 시간 및 시험결과의 신뢰성 등을 해결하는 대안으로 정·동적 재하시험(Statnamic load test)이 개발되었으며, 유럽이나 미국, 일본 등지에서 그 효율성 및 신뢰성을 인정받고 있다. 현재 30MN(약 3000ton)까지 시험할 수 있는 장비가 개발되어, 국내업체도 큰 장비를 보유하고 있으며, 미국현장에서 1998년부터 현재까지 재하시험에 적용하고 있다. 따라서 우리나라에서도 기초말뚝의 설계 및 시공기술 발전을 위해, 본 장비의 적극적인 활용이 요망된다.