

말뚝기초(Ⅶ)

이 명 환^{*1}
이 인 모^{*2}

7. 말뚝재하시험

7.1 말뚝재하시험

말뚝기초의 허용지지력을 결정하는 방법에는 ① 토질기초공학의 이론에 입각한 정역학적 방법, ② 항타공식 등 동역학적방법, ③ SPT, CPT 등 원위치 시험결과에 의하는 방법, ④ 과거의 경험식에 의하는 방법과 ⑤ 말뚝재하시험에 의하는 방법 등이 있다.

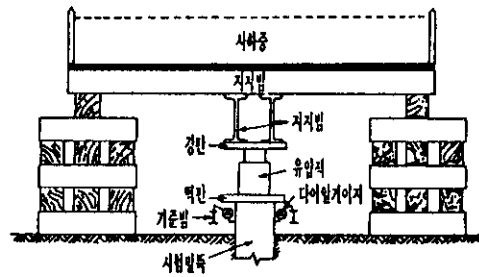
말뚝기초의 지지력에 대한 국내외의 연구결과에 의하면 위의 여러가지 예측방법들의 신뢰도는 극히 낮으며, 이는 말뚝의 설치방법, 지반조건의 가변성 등에 기인하는 바 현재의 기술수준으로는 말뚝재하시험에 의하는 방법 이외에는 대안이 없는 실정이다.⁽¹⁾

최근 국내에서도 기초공사의 안전문제가 심각한 관심사로 대두되고, 말뚝기초공법이 종래의 항타공법에서 지반의 선굴착을 동반한 저공해 말뚝공법으로 전환됨에 따라 말뚝 재하시험을 통한 지지력 확인이 일반화되고 있다.

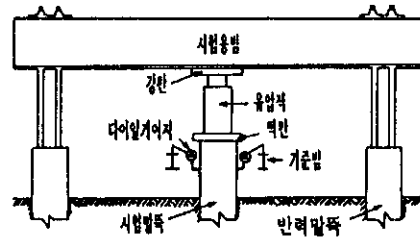
7.2 압축재하 시험

7.2.1 재하하중

말뚝의 압축재하시험에는 설계하중의 2~3



(a) 사하중 재하방법



(b) 반력말뚝 사용방법

그림1 압축재하 시험장치

배에 달하는 재하하중이 필요하다. 하중재하방법에는 사하중(kentledge)을 말뚝머리에 직접

*1 정희원, (주) 고려기초연구소 대표이사

*2 정희원, 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 교수

재하하는 방법도 있지만 대부분 유압잭을 통하여 원하는 하중만을 말뚝에 전달시키는 방법이 채택된다.

하중수단으로는 콘크리트 블럭 또는 철근 등 사하중을 재하구조물위에 설치하는 방법과 반력말뚝 또는 반력앙카의 인발저항력을 이용하는 방법이 있다.(그림1)

말뚝에 실제 하중이 재하되는 조건은 사하중 재하조건과 가장 유사하며 따라서 사하중 재하 방법에 의한 지지력 시험이 가장 바람직하다고 판단된다. 사하중 재하조건과 반력말뚝에 의한 재하시험결과는 차이가 있다는 연구결과도 있지만⁽¹²⁾, 사하중 재하에 소요되는 과대한 시간과 경비등으로 인하여 반력재하시험이 더욱 보편화 되어있다. 반력말뚝 또는 앙카 인발력에 의한 재하시험은 말뚝의 설계지지력이 증대됨에 따라 그 효용성이 더욱 커지게 된다.

7.2.2 재하시험방법

말뚝의 압축재하시험방법에는 다음의 여러 가지가 있으며 이들을 개략적으로 살펴보면 다음과 같다.

(1) 완속재하시험방법(Slow Maintained - load Test)

ASTM 표준재하방법(standard loading procedure)으로 널리 알려진(ASTM D 1143-81) 이 방법에 의한 재하시험 과정은 아래와 같다.

가. 총 시험하중을 8단계 즉, 설계하중의 25%, 50%, 75%, 100%, 125%, 150%, 175% 및 200%로 나누어 재하한다.

나. 각 하중단계에서 말뚝머리의 침하율(rate of settlement)이 시간당 0.01inch (=0.25mm) 이하가 될 때까지, 단 최대 2시간을 넘지 않도록 하여 재하하중을 유지한다.

다. 설계하중의 200% 즉 총 시험하중 재하 단계에서 하중을 유지하되 시간당 침하량이 0.01 inch(=0.25 mm)이하일 경우 12시간, 그렇지 않을 경우 24시간동안 유지시킨다.

라. 총 시험하중을 설계하중의 25%씩 각 단

계별로 1시간씩 간격을 두어 재하한다.

마. 만약 시험도중 말뚝의 파괴가 발생할 경우, 총 침하량이 말뚝머리의 직경 또는 대각선 길이의 15%에 달할 때 까지 재하를 계속한다.

(2) 급속재하시험방법(Quick Maintained - load Test)

표준재하방법은 매우 긴 시간이 소요된다는 것이(보통 30 내지 70시간) 가장 큰 결점이며 또한 안전침하율(zero settlement) 기준인 0.01 inch(=0.25 mm)/hr도 환산하여 보면 2.19metre/year가 되어 대단히 잘못 인식되어 있는 것을 알 수 있다.⁽⁷⁾

따라서 안전침하율 기준에 따라 각 하중재하 단계에서 경과시간을 조절하는 것은 별의미가 없으며 실제로 각 하중단계마다 「동일한」 시간을 유지토록 하는 것이 더 중요하다고 할 수 있다.

이러한 인식하에서 제안된 방법이 「급속재하방법」으로서 New York State Department of Transportation, The Federal Highway Administration 및 ASTM 1143-81(optional)에 의해 권장되고 있으며 그 시험방법은 아래와 같다.

가. 재하하중단계를 설계하중의 10내지 15%로 정하고 각 하중단계의 재하간격을 2.5 내지 15분으로 하여 재하한다.

(註) ASTM에서는 재하간격을 2.5분으로 규정하고 있으나 그 시간동안 2~4차례에 걸쳐 gauge 혹은 scale 등을 읽고 기록하기에는 충분치 못한 것으로 판단되며 대체로 5분 간격으로 하는 것이 보다 실제적인 것으로 보인다.

나. 각 하중단계마다 2~4차례(예 : 재하간격 5분일 경우 0, 2.5, 4.0 및 5분 경과시) 침하량을 읽어 기록한다.

다. 시험은 재하하중을 계속 증가시켜 말뚝의 극한하중에 이를 때까지 또는 재하장치의 재하용량이 허용하는 범위까지 재하한후, 최종하중단계에서 2.5 내지 15분간 하중을 유지시킨후 재하한다.

(註) 일반적으로 총 시험하중을 표준재하방법에서의 마

찬가지로 설계하중의 200% 혹은 300%까지로 제한하는 것이 권장되고 있다.(Fellenius, Prakash)

이 방법을 사용하면 대략 2~5시간 이내에 전 시험과정을 마칠 수 있다.

(3) 하중증가평형시험방법(Incremental Equilibrium Test)

이 방법은 Mohan et al에 의해 제안된 표준재하방법을 개선한 방법으로서 표준재하방법에 비해 총 소요시간을 1/3가량 단축시킬 수 있으며 그 시험결과는 표준재하방법에 의한 것과 잘 부합되는 것으로 알려져 있다.⁽⁹⁾

가. 재하하중단계별 설계하중의 15% 내지 25%로 정한다.

나. 각 재하하중단계에서 재하하중을 일정시간(5~15분)동안 유지시킨후, 하중-침하량이 평형상태에 도달할 때까지 재하하중이 감소하도록 방지한다.

다. 「나」항에서의 평형상태에 도달하면 다음단계의 하중을 재하하는 식으로 같은 방식을 되풀이하여 재하하중이 총 시험하중에 이를 때까지 시험을 계속한다.

(4) 일정침하율시험방법(Constant Rate of Penetration Test)

이 방법은 흔히 CRP Test라고 불리우며 말뚝의 극한하중을 신속히 결정하기 위한 목적으로 Whitaker에 의해 개발된 것으로서⁽¹³⁾ Swedish Pile Commission, New York State Department of Transportation 및 ASTM D 1143-81(Optional)에 의해 권장되고 있는 바 그 시험방법은 다음과 같다.

가. 말뚝의 침하율이 통상 0.01 inch/min (=0.5 mm/min) 내지 0.10 inch/min (=2.50mm/min)가 되도록 재하하중을 조절하면서 매 2분마다 하중과 침하량을 기록한다.

(註) 침하율을 정하는데 있어 Whitaker는 마찰말뚝에 대해서는 0.75mm/min, 선단 지지말뚝에 대해서는 5mm/min를 채택할 것을 권유하고 있으며, ASTM에서는 점성토인 경우 0.25~1.25mm/min, 사질토인 경우 0.75~2.50mm/min를 제시하고 있다.

나. 「가」의 방법에 의해 재하하중을 증가시

켜 말뚝의 총 침하량이 2~3 inch(=50~75mm)에 달할 때까지 또는 총 시험하중에 도달할 때까지 시험을 계속한후 재하한다.

(註) ASTM에서는 총침하량이 말뚝머리의 직경 또는 대각선 길이의 15%에 달할 때까지 시험을 계속할 것을 규정하고 있다.

이 CRP 시험방법은 급속재하방법(Quick Maintained-load Test)에서 보다 더 나은 하중-침하량 곡선을 얻을 수 있다는데 그 장점이 있으며 특히 점성토의 마찰말뚝에 대해 보다 잘 적용된다.

이 방법을 수행하기 위해서는 일정침하율을 유지하기 위해 지속적으로 유압을 가할 수 있는 특수전동펌프의 구비가 필수적이며 또한 하중과 침하량 gauge들을 동시에 읽어내야 하므로 시험요원의 적절한 훈련을 필요로 한다.

(5) 일정침하량시험방법(Constant Settlement Increment Test)

이 방법 역시 CRP 시험방법과 마찬가지로 말뚝의 침하량이 일정한 값 만큼 증가하도록 단계별 재하하중을 조절하는 방법으로서 그 과정은 아래와 같다.

가. 단계별 재하하중을 말뚝의 침하량이 대략 말뚝머리의 직경 또는 대각선길이의 1%에 해당하는 값과 같아지도록 조절하고

나. 「가」항의 소정 침하량을 유지하기 위한 재하하중 변화율이 시간당 각 단계에서의 재하하중의 1%미만에 이르게 되면 다음 하중단계로 옮겨간다.

다. 이러한 과정을 계속하여 말뚝의 총 침하량이 말뚝머리의 직경 또는 대각선 길이의 10%에 달할 때까지(또는 재하장치의 용량한도까지) 시험을 계속한다.

라. 재하하중이 총 시험하중에 도달하면 소정 침하량을 유지하기 위한 하중의 변화율이 시간당 총 시험하중의 1%미만이 될 때까지 재하하중을 유지시킨후 총 재하하중을 네단계로 등분하여 재하하중, 재하단계별로 말뚝의 Rebound율이 시간

당 말뚝 머리의 직경이나 대각선 길이의 0.3%이내에 들어올 때까지 기다린후 다음단계의 재하를 행하도록 한다.

(6) 반복하중재하방법(Cyclic Loading Test) - ASTM D 1143-81(Optional)

ASTM D 1143-81(Optional)에 의한 이 시험방법은 아래와 같다.

- 가. 재하하중의 하중단계는 표준재하방법에 서와 같이 정한다.
- 나. 재하하중단계가 설계하중의 50%, 100% 및 150%에 도달하였을 때 재하하중을 각각 1시간동안 유지시킨후 표준재하방법의 재하시와 같은 단계를 거쳐 단계별로 20분 간격을 두면서 재하한다.
- 다. 하중을 완전히 제하한후 설계하중의 50%씩 단계적으로 다시 재하하고 표준 시험방법에 따라 다음 단계로 재하한다.
- 라. 재하하중이 총 시험하중에 도달하게 되면 12시간 또는 24시간 동안 하중을 유지시킨 후 제하하되 그 절차는 표준재하방법과 같다.

(7) 스웨덴 반복하중재하방법(Swedish Cyclic Test)

이 방법은 Swedish Pile Commission에 의해 권장된 방법으로서 다음의 과정을 통해 행하여 진다.

- 가. 초기 재하하중을 말뚝설계하중의 3분의 1까지로 하여 재하한 다음,
- 나. 설계하중의 6분의 1까지 재하하여 같은 과정을 20차례 반복한다.
- 다. 다음, 재하하중을 「가」항에서 보다 50% 증가시켜 재하하고 「나」에서의 같은 과정을 되풀이 한다.
- 라. 상기 「가」, 「나」, 「다」의 과정을 말뚝이 파괴에 이를 때까지 계속한다.

이 방법은 상당히 오랜 시간이 소요되고 하중의 재하-제하가 번번히 반복됨에 따라 말뚝 자체도 최초의 말뚝(상태)와는 다른 것이 되고 만다. 따라서 이 시험방법은 특별한 경우에 한하여 사용할 것을 권유하고 있다.

(8) 재하시험 방법의 선택

이상의 여러 가지 시험방법들중 어떤 방법을 선택할 것인지는 전적으로 말뚝재하시험실시 목적에 따라 결정되어야 한다.

말뚝재하시험의 목적은 말뚝설계를 위하여 설계지지력 결정 또는 기시공된 말뚝의 허용안전하중을 확인하는 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위해서는 말뚝설계 개념이 분명히 규명되어야 한다.

말뚝기초의 설계개념은 상부구조물이 파괴에 대하여 안전하여야 한다는 극한 또는 항복하중 대비 일정 안전율 감안의 개념과, 허용된 침하량 이상의 침하가 발생하지 말아야 한다는 개념으로 나누어 볼 수 있다. 그러나 대부분의 구조물 설계에서는 이 두가지 설계개념을 모두 만족시켜야 하는 것이 현실이다.

말뚝재하시험 결과의 해석에 대한 각국의 설계기준들도 외견상 극한 또는 항복하중을 기준으로 하는 개념과 침하량 기준개념으로 대별할 수 있지만, 말뚝기초의 허용침하량은 지반의 지지능력 이외에 말뚝의 재질, 길이 등에 따라 큰 차이가 있을 수 있어 순수한 침하량 기준으로는 볼 수 없다. 오히려 침하량기준, 예를 들면 BS의 0.1D 전침하량기준 또는 DIN의 2.5%D 잔류침하량기준, New York시의 0.01 inch/ton 잔류침하량 기준들은 재하시험 결과인 하중-시간-침하량 관계의 불분명한 해석을 인위적인 침하량기준으로 단순화 시켰지만 결국 그 기준침하량에 해당되는 하중을 극한 또는 항복하중으로 간주하여 안전율을 적용하는 해석법의 한 편법으로 보는 것이 타당할 것이다.

이런 의미에서 국내의 기준, 건설부제정 「구조물기초 설계기준」에서 채택하고 있는 극한 또는 항복하중 결정과 여기에 일정한 안전율을 적용하는 해석법은 설계개념에 있어 분명하다는 장점을 갖고 있다. 다만 극한 또는 항복하중 결정방법에 있어 다양한 전침하량 또는 잔류침하량 기준들이 포함되지 않아 상대적으로 보수적인 해석으로 치우칠 수 있는 가능성이 있다는 문제점이 보완될 필요가 있을 것으로 사료된다.

이상의 설명을 종합해보면 말뚝의 압축재하시험 실시목적은 말뚝기초의 극한 또는 항복하중을 결정하는데 있다고 할 수 있다. 말뚝기초의 극한 또는 항복하중 결정에는 여러 가지 해석법들이 있으며 다양한 해석법들을 적용하기 위해서는

- ① 하중-전침하량관계
- ② 하중-잔류침하량관계
- ③ 하중-시간-침하량관계

등을 측정하여 종합적으로 판정할 수 있다.

이러한 목적을 달성하기 위해서는 하중-시간-전침하량-잔류침하량 관계를 해석할 수 있는데 충분한 재하시험 절차가 요구되며, 그간 실시한 재하시험 경험으로부터 아래와 같은 수정된 재하시험 방법이 적합한 것으로 제안할 수 있다.

- 최대재하하중 : 말뚝의 파괴가 발생하지 않는 조건에서 최대 재하하중은 설계하중의 최소 225%정도가 될 필요가 있다.
- 재하하중단계 : 재하하중은 설계하중의 25%를 단위로 하여 재하한다.
- 재하과정 : 잔류침하량 기준 적용을 위하여 설계하중의 50%단위마다 재하하여 잔류침하량을 측정하며, 분명한 항복이 나타났을 경우에는 추가로 재하여 확인한다.
- 하중유지시간 : 각종 기준에서 적용하는 0.01 inch/hr미만이 되면 안전한 것으로 판단하고 다음단계 하중으로 시험을 계속한다. 설계하중 단계 또는 설계하중의 150% 또는 200%에서 6시간 또는 12시간 하중유지는 실제 각 해석상 고려되지 않으나, 이를 유지할 필요는 없는 것으로 판단

된다.

○ 기타 : 재하시험실시중 전침하량기준, 잔류침하량기준, 하중-시간-침하량기준 등을 종합적으로 판단하여 분명한 항복하중이 규명된 경우에는 그러한 규정에 충분한 단계까지만 재하시험을 계속하여, 무의미한 하중유지시간에 집착하지 않고 시험을 중단하도록 한다. 이때 각종해석법들중 일부 기준만으로 판단하여 시험을 중단하는 것은 종합적 해석이 불가능하므로 다음단계 하중재하등으로 극한 또는 항복하중 판단의 객관성을 확보하는 과정을 필요로 한다.

7.2.3 압축재하시험 결과의 해석

말뚝재하시험 결과로부터 말뚝의 허용하중

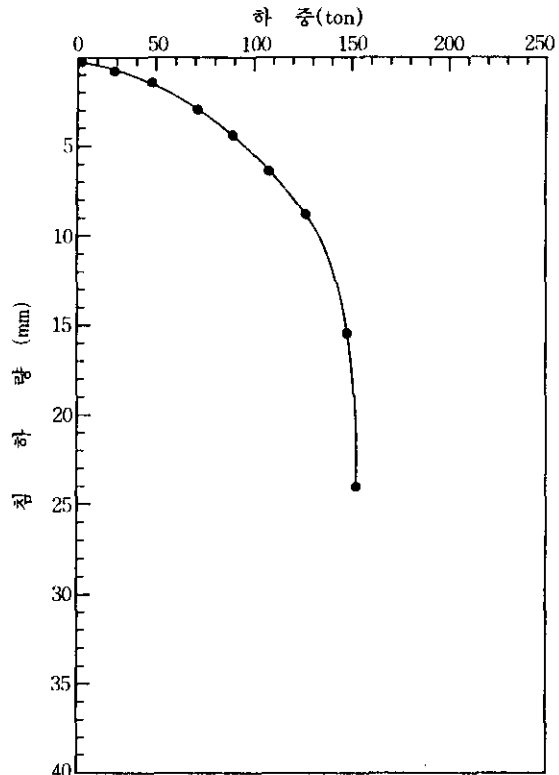


그림2 대표적인 하중-침하량 곡선

(working load)을 결정하는 데에는 두가지 기본조건을 만족시켜야 한다. 첫째조건은 어떠한 경우에도 상부구조물의 파괴(failure)가 발생하지 말아야하며 이를 위해서는 파괴를 유발하는 하중(극한하중, ultimate load)과 비교하여 충분한 안전성이 확보되어야 한다. 둘째, 말뚝기초에 상부구조물의 사하중과 활하중이 재하되었을 때의 침하량이 설계조건에서 가정한 허용범위 이내가 되어야 하는 조건이 만족되어야 한다.

말뚝기초의 극한하중에 일정한 값의 안전율(factor of safety)을 감안하여 허용하중을 결정하기 위해서는 극한하중을 알아야 한다. 극한하중은 말뚝에 어떤 하중이 재하되었을때, 하중의 증가가 없는 상태에서 침하량은 무한대로 증가하는 상태에 도달하는 때의 하중을 의미한다. 이러한 상태는 그림 2와 같은 하중-침하량 관계에서, 세로축과 평행한 직선상태로 정의된다.

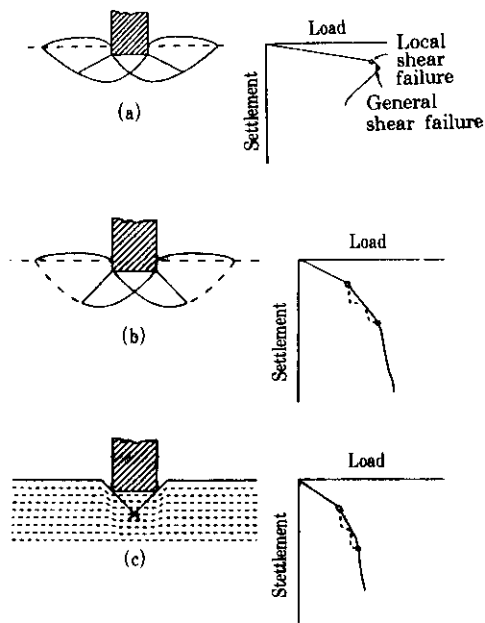


그림3 3가지 형태의 선단지지력 하중-침하량 관계

그러나 실제로 말뚝재하시험을 실시하였을 경우, 그림 2와같이 극한하중이 분명하게 규명되는 경우는 그리 많지 못하다. 극한상태가 분명하게 나타나지 못하는 이유는 사실토 지반에서 지반의 조밀한 정도 및 지지층내의 근입장에 따라 파괴 양상이 상이하게(general shear failure, local shear failure, punching shear failure) 나타난다는 Vesic의 연구결과(그림 3)로 설명이 가능하다⁽¹¹⁾. Tomlinson은 말뚝주면부의 지반조건, 선단부 하부 지반조건 등에 따라 여러 가지 형태(그림 4)의 하중-침하량 관계가 나타나는 것으로 분석하였다.⁽¹⁰⁾

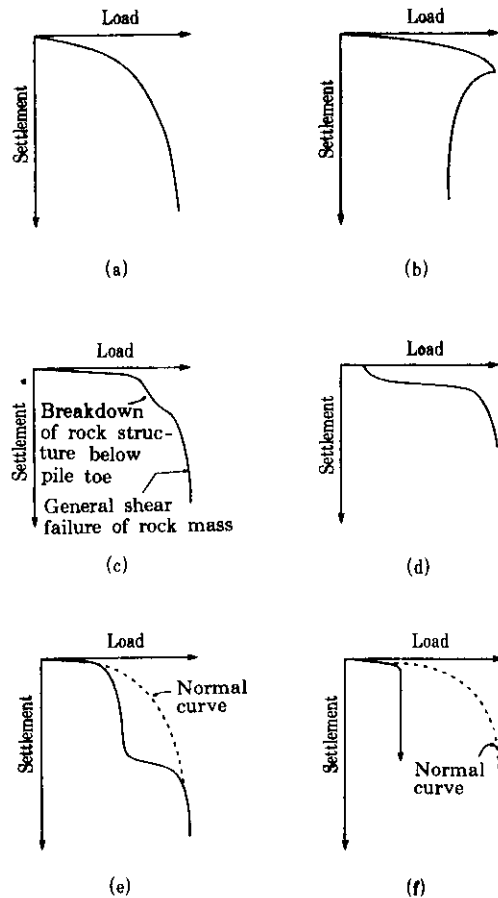


그림4 여러가지 형태의 하중-침하량 곡선

이처럼 말뚝의 하중-침하량 관계가 다양하게 나타나는 원인은 말뚝 지지력을 구성하는 두가지 성분-선단지지력과 주변마찰력의 거동특성을 이해함으로써 설명이 가능하다. 그림 5는 선단지지력과 주변마찰력을 분리하여 측정한 말뚝재하시험 결과이다.

말뚝의 선단지지력에 대한 하중-침하량 관계는 지반조건, 말뚝설치공법에 따라 상이하나 그림 5에 나타난 것과 같이, 하중이 증가함에 따라 초기에는 침하량이 직선적으로 증가하는 구간을 가지며, 점차 침하량이 증대되고 어떤 하중수준을 초과하면 급격한 침하가 발생하는 경우가 가장 대표적이다. Vesic의 주장과 같이 선단부 하부의 지반조건, 지지층내의 근입장 등에 따라 급격한 침하가 발생하는 하중구간이 (실무에서 시행되는 하중수준에서) 나타나지 않는 경우도 많이있으며, 암반까지 관입된 말뚝의 경우 Tomlinson의 설명 (그림 4(c), (d)) 과 같은 형태의 하중-침하량 곡선이 측정되기도 한다.

선단지지력에 대한 하중-침하량 관계는 이

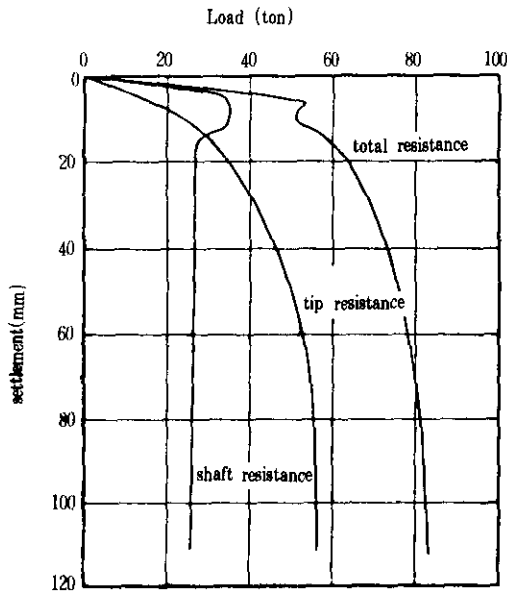


그림5 선단지지력과 주변마찰 분리측정 결과

처럼 다양한 형태로 나타나며 따라서 말뚝재하시험 결과로 부터 항복하중(yield load) 또는 파괴하중(failure load)을 판정하는데에는 일찍부터 여러가지 방법이 제안되어 왔다. 하중-침하량 곡선을 해석하는 데에는 곡선의 특성을 기하학적으로 분석하거나 수학적 변형을 통하여 극한 또는 항복하중을 도출하는 방법, 하중-침하량외에 침하량 발생의 시간경과에 따른 특성을 추가하여 해석하는 방법, 하중재하에 따른 말뚝재료의 탄성변위를 감안하는 방법 등 다양한 해석기법이 제안되어 왔지만, 지반조건, 말뚝조건, 시공조건의 다양함을 모두 만족시키는 범용성 있는 해석법은 아직까지 개발되지 못한 실정이다.

이와 같이 하중-침하량 곡선의 해석문제는 말뚝재하시험 결과로 부터 결정되는 설계하중에 각 해석법간 상당한 차이를 발생시키며, 따라서 상당히 큰 값의 안전율 적용이 불가피한 실정이다. 이러한 해석기준상 불가피한 차이를 해소하는 방안으로 하중재하시 발생하는 침하량만을 기준으로 하여 극한하중 또는 설계하중을 결정하는 방법이 폭넓게 사용되기도 한다.

침하량 기준 판정법에는 전침하량(total settlement)기준과 전침하량에서 탄성침하량(elastic settlement)을 공제한 순침하량(net settlement)기준이 있다. 그러나 침하량기준 판정법은 말뚝의 길이, 지반조건 등이 감안되지 않아 해석 대상 구조물의 성격에 따라 설계개념에 적합하도록 조정하는 것이 필요하다. 특히 말뚝의 관입깊이가 큰 변화를 보이는 지반조건에서는 부동침하에 대한 별도의 고려가 되어야 한다.

반면 말뚝의 주변마찰력에 대한 하중-침하량 특성은 그림 3(a), (b) 및 그림 5에 나타난 것과 같이 분명한 극한하중이 규명되는 경우가 대부분이다. 말뚝에 하중이 재하되면 거의 직선적인 침하량 증가가 발생하며 거의 대부분의 경우에 분명한 극한하중이 판명된다. 극한하중 도달에 필요한 말뚝변위는 말뚝직경에 큰 영향을 받지 않으며 대부분의 경우 4~6mm의 침하량에서 주변마찰 파괴가 발생한다. 따라서

극한하중 개념은 해석방법, 해석자 등에 영향을 받지 않아 객관성이 있다. 또한 거의 모든 경우에(단, 말뚝의 관입깊이가 길어 말뚝재료의 탄성압축 변형량이 클 경우에는 극한 주변마찰력 도달시까지의 전침하량이 클 수도 있음) 극한주변마찰력 발생은 상부구조물의 허용 침하량 범위이내가 되어 설계에 사용할 수 있는 가용지지력은 선단지지력에 비하여 높게 된다.

선단지지력과 주변마찰력을 분리측정한 말뚝 재하시험 결과에 의하면 하중재하후 상당한 침하량이 발생할 때까지(소성 침하가 발생하기 이전), 재하하중의 거의 전량은 주변 마찰력에 의하여 저항된다. 주변마찰력의 극한상태 도달이후 선단부에 하중이 전달되기 시작하여 선단지지력이 발휘되는 것으로 실험결과가 보고되고 있다.

• 전침하량 기준

구조물의 기초를 설계하는 데에는 파괴에 대하여 안전할 것과 허용된 침하범위 이상의 침하가 발생하지 말아야 할 것 등 두가지 기준에 의한다. 파괴에 대하여 안전하도록 하는 지지력(bearing capacity)개념의 설계에서는 파괴를 유발하는 극한지지력(ultimate bearing capacity)을 구하고 비교적 높은 2.0~3.0의 안전율을 적용한다. 지지력 개념의 설계는 따라서 극한 지지력의 확인에 의하는 것이 가장 바람직하며, 이 개념은 우리나라 건설부 제정 「구조물 기초설계 기준」에도 명시되어 있다. 또한 각종 문헌에서도 극한지지력을 기준으로 할 것을 제안하고 있다.

극한상태의 정의는 하중의 증가없이 침하량이 무한대로 증가하는 상태이지만 대부분의 말뚝 재하시험에서는 이와 같은 이론적인 극한지지력은 확인이 되지 않는다. 따라서 인위적인 침하량에 도달하면 그때의 하중을 극한하중으로 인정하는 방법이 보다 폭넓게 적용되고 있다. 전 침하량 기준으로는 Singapore지하철 설계기준에서 규정한 설계하중에서 6~9mm, 설계하중의 1.5배 하중에서 9~20mm와 같은 엄

격한 기준에서부터, 일본 토질공학회의 25mm, 러시아에서 적용되는 40~80mm등 광범위한 기준들이 있다.

BS규정에서는 말뚝직경의 10% 침하량을 기준으로 하며 Terzaghi and Peck이 제안한 25mm의 기준도 많이 채택되고 있다. 인위적인 기준값은 말뚝의 설치방법과도 밀접한 관계에 있어 De Beer는 항타말뚝의 경우에는 말뚝직경의 10%, 현장타설 콘크리트 말뚝에서는 말뚝직경의 30% 침하를 기준 값으로 할 것을 제안하고 있다.

그러나 전침하량의 절대값만으로 말뚝의 설계하중을 결정하는 것은 말뚝의 길이와 재료특성으로부터 결정되는 탄성압축량 값의 영향을 고려할 수 없기 때문에 장대말뚝의 경우 적용이 곤란한 문제가 있다. 또 말뚝의 지지력이 지반조건, 말뚝설치방법에 따라 선단지지력 또는 주변마찰력의 비율이 상이하게 되고, 이에 따라 말뚝의 하중-침하량 거동이 결정되는 점을 감안할 수 없다는 단점이 있다.

따라서 전침하량 기준에 의한 말뚝의 설계하중 결정은 극히 제한적인 경우에 국한하여 적용할 수 있으며, 반드시 다른 해석결과와 비교하는 과정이 필요하다.

• 순침하량 기준

순침하량은 하중제거시의 탄성침하량을 배제한 잔류침하량을 기준으로 하여 지반의 특성을 보다 잘 반영하므로 많은 설계기준에서 채택되고 있다. 대표적인 기준으로는 DIN의 말뚝직경의 2.5% 순침하량 기준, New York City, BOCA, Uniform Building기준에서 채택한 0.01 inch/ton의 순침하량 기준, COE에서 사용하는 0.25 inch 순침하량기준이 있다.

국내에서의 말뚝재하시험 결과를 각종 해석기준에 의거 설계하중을 결정하고 비교해본 결과 국내의 극한하중 해석법 및 항복하중 해석법과 DIN의 말뚝직경의 2.5% 순침하량기준과 COE의 0.25 inch 순침하량은 비교적 잘 일치하고 있는 것으로 분석되었으나 많은 설계기준에서 채택하고 있는 0.01 inch/ton 순침하량기

준은 타 해석기준에 비해 지나치게 높은 허용 하중을 주고 있어 국내에서의 적용은 적합치 않은 것으로 판단된다.

그리고 순침하량 기준은 국내의 극한하중 해석법 및 항복하중 해석법이 갖고 있는 제반문제점 등을 어느 정도 해소해 주고 있기 때문에 국내설계기준을 보완해 줄 수 있으며 따라서 설계하중 결정시 타 설계기준으로 해석한 결과를 이 기준에 의하여 확인하는 것이 바람직하다.

• 항복하중 판정법

지지력 기준과 침하량 기준 외에 말뚝에 하중이 재하되었을 때의 하중(P)-시간(t)-침하량(S) 거동특성에 의하여 소위 항복(yield) 하중을 구하여 판정하는 방법이 있다. 여기에는 P-S 곡선분석, log P-log S곡선분석, S-log t 분석, S-log P 분석, P-log S 분석, $dS/d(\log t)$ -P 분석 등 다양한 방법이 있다. 건설부 제정 「구조물 기초설계 기준」해설편에서는 「극한하중이 확인되면 문제없으나」 그렇지 못할 경우 항복하중에 의하도록 하고 ① S-log t 분석 ② $ds/d(\log t)$ -P 분석 ③ log P-log S 분석과 ④ 잔류침하량 측정에 의한 log P-log S 방법을 권장하고 있다. 아울러 항복하중의 1.5배를 극한하중으로 가정하지만 이 방법에 의한 극한 하중이 실제 극한하중보다 크지 않도록 주석을 두고 있어 항복하중에 의한 분석을 안전하게 하는 장치를 하고 있다.

• S-log t 분석법

각 재하단계에 대해 경과시간을 대수 눈금에, 말뚝머리의 침하량을 산수 눈금에 표시하였을 때 각 하중단계의 관계선이 직선적으로 되지 않는 점의 하중을 항복하중으로 한다(그림 6참조).

• $dS/d(\log t)$ -P 분석법

그림 6에서 각 하중단계에서 일정시간(10분 이상)후의 대수침하속도 $ds/d(\log t)$ 즉, S-log t곡선의 경사를 구하고, 이것을 하중에

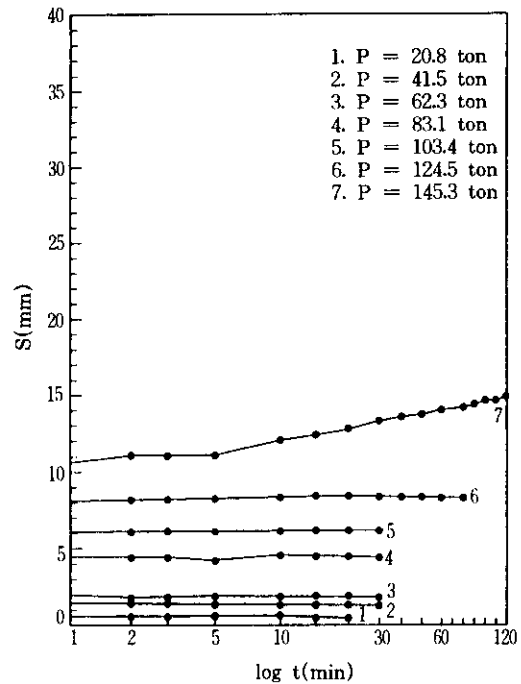


그림6 S-log t 곡선(예)

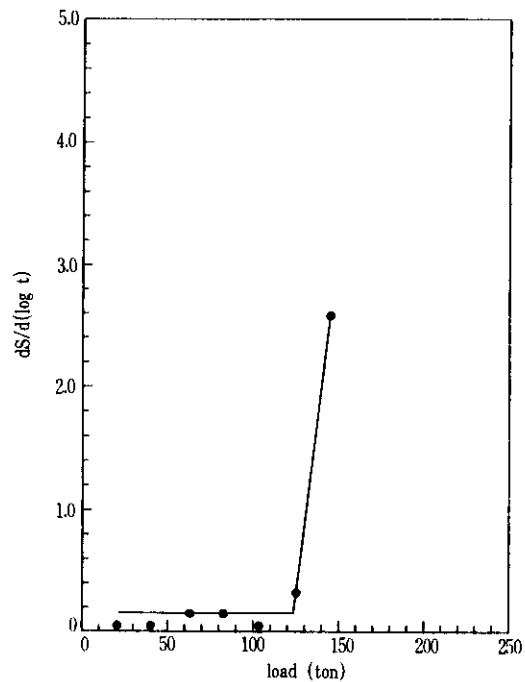


그림7 $ds/d(\log t)$ -P 곡선(예)

표시하여 연결한다. 이와 같이 하여 구한선이 급격히 구부러지는 점의 하중을 항복하중으로 한다(그림 7참조).

• log P-log S 분석법

하중 P와 말뚝머리의 침하량 S를 양대수 눈금으로 표시하고, 각 점을 연결하여 얻어지는 선이 꺾어지는 점의 하중을 항복하중으로 한다(그림 8 참조)⁽⁶⁾

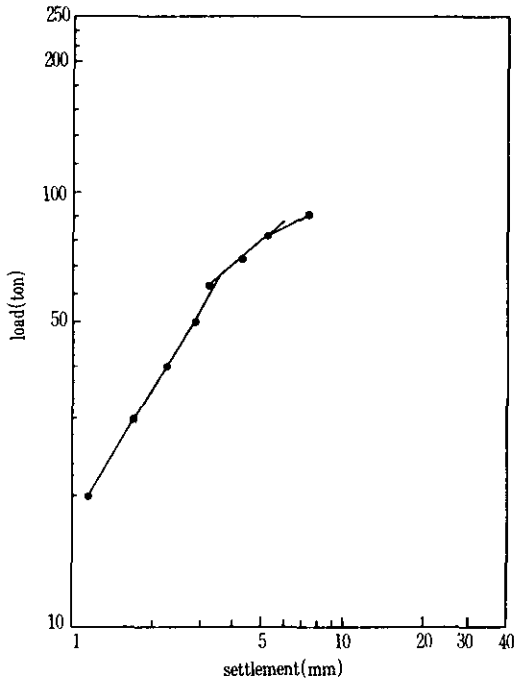


그림8 log P-log S 곡선(예)

• Davisson의 판정법

Davisson의 판정법은 말뚝의 전침하량과 말뚝직경, 단면적, 탄성계수 및 말뚝길이 등을 고려한 순침하량 판정을 복합적으로 적용한 것으로 최근 서구에서는 가장 합리적인 말뚝 허용하중 판정법으로 인정받고 있다(그림9참조)⁽⁵⁾⁽⁸⁾

국내에서도 Davisson판정법에 의한 말뚝지력 해석을 실시해본 결과 국내의 항복하중

기준 설계법과 비교적 잘 일치하고 있는 것으로 나타나고 있다. 또한 DIN의 말뚝직경의 2.5% 순침하량기준 및 COE의 0.25 inch 순침하량기준과도 결과가 비교적 잘 일치하여 이 기준에 의한 판정이 합리적이라고 판단된다.

그러나 Davisson의 판정법은 말뚝길이 지나치게 짧거나 주변마찰력이 낮은 말뚝의 경우에는 다른 판정기준 보다도 낮은 허용하중을

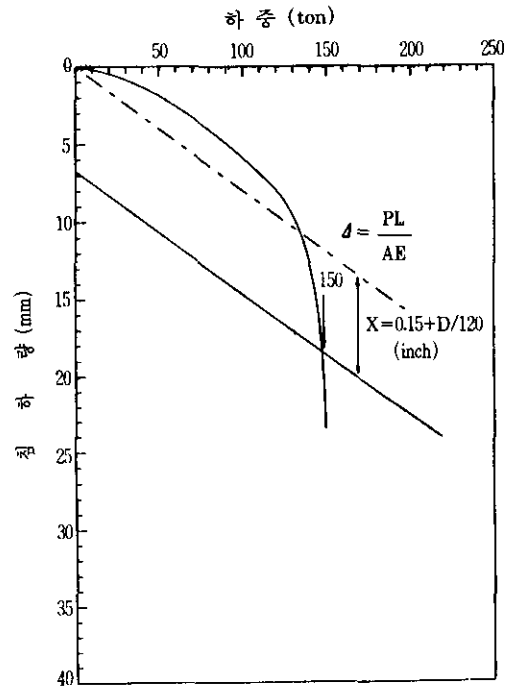


그림9 Davisson의 판정법(예)

나타내 준다. 이와 같은 경우 다른 판정기준들과의 비교를 통하여 기술자의 판단이 요구된다.

• B.Hansen의 판정법(90% criterion)

말뚝에 극한하중이 재하되었을때의 침하량은 극한하중의 90% 하중재하시 침하량의 2배가 된다는 가정에 입각한 판정법이다. 이 방법은 임의의 극한하중을 가정하고 90%에서의 침

하중을 비교하는 반복작업을 통하여 극한하중을 결정한다.(그림 10참조)⁽⁴⁾

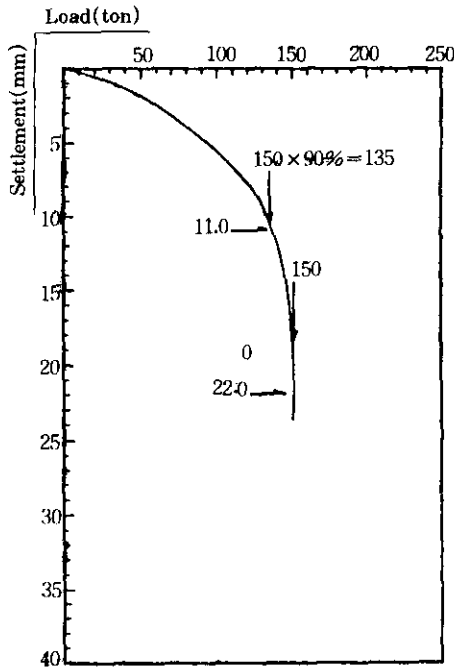


그림 10 B. Hansen의 판정법(예)

항복하중분석에 의한 해석은, 그러나 극한하중을 낮게 평가한다는 지적도 있다. Canada의 설계기준에서도 도해법에 의한 항복하중의 판정은 semi-elastic영역과 semi-plastic영역의 중간에서 결정되는 경우가 많으며 극한지지력을 과소 평가할 수 있음을 지적하고 있다.

항복하중 판정은 전술한 바와 같이 하중(P)-시간(t)-침하량(S) 거동특성으로부터 이루어진다. 따라서 보다 신뢰도 높은 항복하중 판정을 위해서는 재하에 의한 말뚝의 거동을 합리적으로 분석할 필요가 있다.

말뚝에 하중이 재하되면 재하된 하중은 말뚝의 주면마찰력으로 저항되며, 주면마찰의 침하가 된 결과는 선단부에 하중전달 및 선단부 침하를 유발하게 된다. 따라서 하중재하 초기에

는 대부분의 하중은 주면마찰로 저항되며 선단부에는 하중이 거의 전달되지 않거나 극히 일부의 하중만이 전달된다. 재하하중이 증가하여 극한 주면마찰력 이상의 재하상태가 되면 말뚝 주면부는 극한상태에 도달하게 되어(재하하중-극한 주면마찰력)이 선단부에만 전달되게 된다.

그림 11에는 주면마찰력, 선단지지력 및 전체 침하량에 대한 하중-침하량을 나타내었다. 주면마찰력이 작은 경우에는 전체 지지력의 하중-침하량 관계는 선단지지력에 대한 관계와 크게 상이하지 않으나, 주면마찰력 성분이 큰 경우에는 하중-침하량 관계곡선을 아래 3가지 구간으로 나누어 고려하여야 한다.

제1구간: 하중재하 초기의 단계로 주면마찰 특성이 위주가 된다.

제2구간: 주면마찰의 극한을 초과하여 증가된 하중이 선단지지력으로만 저항된다. 그러나 선단지지력의 항복상태까지는 도달하지 않은 하중구간까지이므로 급격한 침하는 발생하지 않는다.

제3구간: 선단지지력의 항복하중을 초과하여 전체 하중-침하량 곡선은 전형적인 극한상태와 유사한 관계를 나타내어 준다.

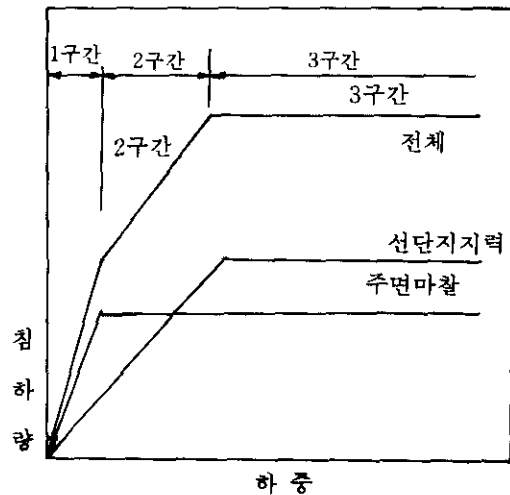


그림 11 하중-침하량 관계

말뚝의 하중(P)-시간(t)-침하량(S) 관계는 주변마찰 성분과 선단지지 성분에 있어 그 특성이 상이하다. 선단지지력과 주변마찰력을 분리하여 측정하는 재하시험 결과에 의하면 주변마찰력은 하중증가에 거의 정비례하는 침하량을 보여주며, 말뚝직경과 관계없이 대부분 4~6mm의 침하량에 도달하면 극한 상태가 된다. 반면 선단지지력은 Vesic의 구분과 같이 general shear failure, local shear failure, punching shear failure의 조건에 따라 하중-침하량 관계가 다양하게 나타난다.

일정한 하중재하 상태에서 시간 경과에 따른 침하량-시간 관계에 있어서도, 주변마찰의 경우 재하후 비교적 짧은 시간에 안정되는 특성과 극한 상태에서는 비교적 급격한 침하량 증가를 나타내어 극한 하중 판단에 어려움이 없다. 반면 선단지지력은 재하하중의 크기가 증대 할수록 침하속도가 안정되는데 많은 시간을 요하는 특성이 있으며, 항복하중에서는 시간경과에 따라 침하속도(semi-log 관계)가 증가하는 관계를 나타내 준다.

실제로 말뚝에 제1구간에 해당되는 하중이 재하되면 침하량-시간관계도 주변마찰의 특성이 위주가 된다. 극한 주변마찰력을 초과하는 하중상태인 제2구간에서는 선단저항의 침하량-시간관계가 위주가 되어 S-log t 관계가 변화하게 된다. 제3구간에서는 선단저항의 침하량-시간 관계만이 나타나게 되며, S-log t 관계가 변하게 된다.

S-log t 분석으로 항복하중을 판정할 때, 주변마찰력의 비율이 높은 경우에는 제1구간과 제2구간의 경계부와 항복하중의 2가지 하중에서 요(凹)형상태가 판정되기도 하여 항복하중 판정이 애매해 질 수도 있다.

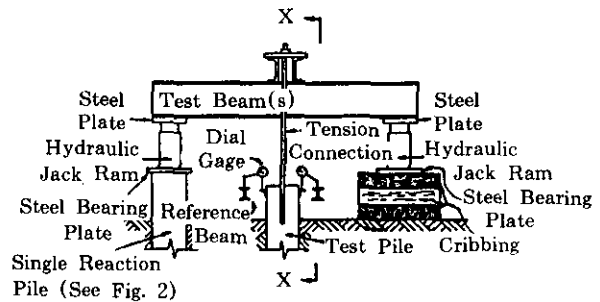
같은 이유에서, 제3구간까지 재하를 하지 않고 말뚝재하시험을 중단하면 S-log 분석은 물론 S-P 분석, log P-log S 분석은 진짜 항복하중이 아닌 주변마찰 특성과 선단지지 특성의 교차점인 가(假)항복하중만을 분석할 가능성도 있다.

7.3 인발시험

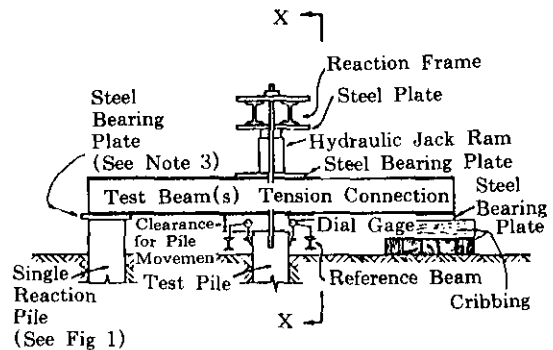
말뚝의 인발시험은 말뚝기초의 2가지 지지력 성분중 주변마찰력에 대한 시험이다. 따라서 선단지지력의 불확실성이 배제되어 시험결과에 있어서도 비교적 분명한 결과를 얻을 수 있으며, 해석방법 또한 간편한 특징이 있다.

재하시험 장치는 그림 12에 나타난 것과 같이 시험말뚝 위로 빔을 설치하고 빔의 양쪽 끝단에 2개의 유압 jack을 설치하든가(그림 12(a)), 아니면 시험말뚝 윗쪽에 1개의 유압 jack을 두어 하중을 가한다. 그림 12

인발하중은 설계하중(인발설계하중이 규정되지 않은 경우는 압축설계하중 적용)의 25%를 단계로 하여 재하하며 50%하중단계마다 재하하여 잔류인발량을 측정한다. 최대시험하중은 인발시험의 목적에 따라 상이하나, 설계하



(a) 2개의 유압 jack 사용방법



(b) 1개의 유압 jack 사용방법

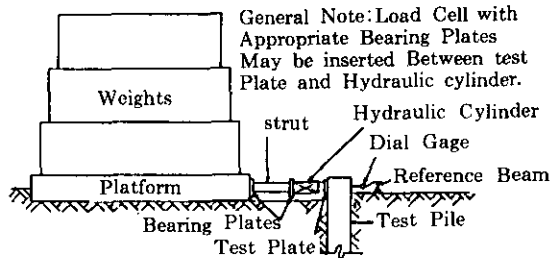
그림 12 인발재하시험장치

중의 150% 또는 200%까지로 한다. 인발시험 결과 해석은 하중-인발량관계, 인발량-시간 관계 등 압축재하시험 결과해석과 대동소이하나, 특히 하중-잔류인발량 관계는 주면마찰력 특성과 연관시켜 고려해 볼 때 효과적인 해석 방법으로 판단된다.

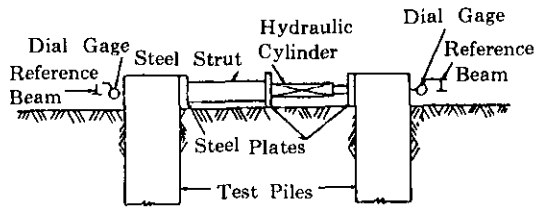
인발시험은 말뚝기초 설계시 풍하중 또는 인발하중에 저항하는 인발저항력 산정을 위해서도 필수적이지만, 압축재하시험 결과의 보완-주면마찰력 크기의 규명-을 위해서도 효과적이다. 또한 최근의 연구결과에 의하면 말뚝의 부주면 마찰력의 예상을 위해서도 인발시험이 활용될 수 있다.

7.4 수평재하시험

말뚝의 수평재하시험은 시험말뚝 부근에 사중 또는 중장비를 반력으로 하여 유압 jack



(a) 사하중을 반력으로 사용



Note: Load Cell with Appropriate Plates May be inserted Between Test Plate and Hydraulic Cylinder

(b) 반력말뚝 사용

그림 13 수평재하시험장치

으로 하중을 가하거나(그림 13(a)), 반력말뚝을 사용하여 2개의 말뚝을 동시에 시험한다.(그림 13(b))

시험하중의 재하계획 및 시험결과 해석은 말뚝두부의 고정조건에 따라 상이하다. 대부분의 말뚝기초는 말뚝두부 고정조건으로 보아 고정두부(fixed head) 조건이지만 말뚝의 수평재하시험은 자유두부(free head)조건으로 시행되는 것이 보통이다.

재하시험 과정 및 해석방법은 압축재하시험과 크게 상이하지 않지만 시험결과 적용시에는 실제 구조물 기초로서의 말뚝 두부 고정조건으로 조건을 변환하여야 한다.

이를 위해서는 말뚝길이 해석조건(short pile, long pile)이 검토되어야 하며 따라서 지반조건에 대한 자료가 필수적으로 요구된다.

7.5 새로운 개념의 압축재하시험 방법

말뚝재하시험은 현재까지의 기술수준에서는 거의 유일한 신뢰성 있는 말뚝지지력 확인수단이다. 말뚝기초의 경제적 설계를 위해서는 지지력 예측의 신뢰도 제고가 필수적이며 따라서 말뚝재하시험의 경제성(시간 및 비용)이 문제점으로 대두된다.

압축재하시험의 경우 재하시험 실시를 위해서는 재하구조물, 재하하중의 준비, 설치 및 해체에 상당한 시간과 비용이 소용된다. 재하시험 실시에 소요되는 시간과 비용은 전체 말뚝기초 건설비와 비교하여 상당한 수준이 되는 경우가 많고 있으며, 전체 구조물의 안전성 제고라는 본연의 목적을 고려하지 않을 경우, 경제성 측면에서는 부담이 되는 과정이라는 인식을 불식시키기 어려운 것이 현실이다. 따라서 경제성 측면만이 중요시되는 많은 공사현장에서 말뚝재하시험은 기피되고 생략되는 편법이 통용되고 있으며, 실제로 중요 구조물의 설계·시공 지방서 상에도 말뚝재하시험 대신에 항타공식에 의한 지지력 확인을 인정하는 규정을 두고 있는 실정이다.

그러나 말뚝재하시험으로 확인과정을 거치지 않은 상태에서 적용하는 항타공식의 신뢰도는 구조물의 안전에 치명적일 수 있다는 점이 조속히 인식되어야 할 것이다.

말뚝재하시험이 실무에서 효율적으로 활용되지 못하는 주된 이유는

- 재하시험 실시에 과도한 시간 및 비용이 소요
- 재하시험을 실시하더라도 결과해석의 불분명한 요소들로 인하여 설계의 경제성(설계 변경으로 인한 원가절감 대비 재하시험 비용)이 확보되지 못하는 경우가 많이 있음
- 재하시험 이외의 지지력 확인수단(주로 항타공식)의 과신
- 현행 설계의 과도한 안전을 적용으로 시공상의 문제점이 상쇄된다는 그릇된 인식 등으로 판단된다.

상기 원인들중 상당부분은 말뚝지지력에 대한 이해도를 증진시킴으로써 개선될 수 있을 것이며, 아울러 최근에는 재하시험에 새로운 개념을 도입하여 재하시험 실시에 소요되는 시간과 비용을 절감하고 재하시험 결과해석의 신뢰도를 높여줄 수 있는 방안들이 세계 여러 나라에서 거의 비슷한 시기에 제안되고 있다.

7.5.1 SPLT의 원리와 시험방법⁽²⁾

종래의 말뚝 재하시험에서는 말뚝에 가해지는

하중조건 재현을 위하여 설계하중의 2.5 내지 3.0배의 사하중을 사용하거나 이에 상응하는 반력말뚝 또는 반력앵커를 설치하여 하중-침하량 관계를 얻는다. 여기에서 하중재하 또는 반력말뚝과의 연결을 위한 재하장치의 준비, 해체에 상당한 비용이 소요되며 많은 시간이 요구된다.

SPLT에서는 시험말뚝의 선단부를 말뚝 몸체로부터 분리할 수 있도록 하여 말뚝내부에 설치된 하중전달 부재를 통하여 선단부에만 하중이 전달되도록 하여 이에 소요되는 반력은 말뚝의 주면마찰력을 이용한다. 따라서 시간과 경비가 소요되는 재하장치와 하중이 불필요하게 되어 재하시험을 간편하게 수행할 수 있다.

그림 14는 SPLT의 기본개념을 도시하여 주고 있다. 그림에서 보는 것과 같은 분리할 수 있는 선단부를 공장에서 제작하여 현장에서 조립할 수 있도록 한다. 현장에서의 간단한 조립과정후 항타가 완료되면 말뚝내부에 하중전달을 위한 강관을 설치한다. 하중전달을 위한 강관의 상부에는 철판, 유압재하장치, load cell 및 반력용 철판을 설치하고 말뚝두부와는 강봉으로 연결하여 말뚝 주면마찰이 선단부 침하의 반력으로 작용하게 한다.

조립이 완료된 후 유압재하장치를 가동하면 하중전달 강관을 통하여 선단부에 하중이 전달

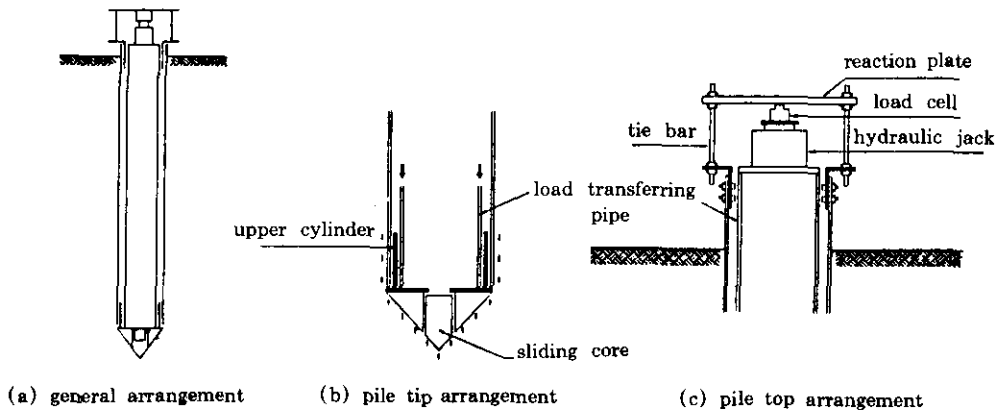


그림 14 간편한 말뚝재하시험의 기본장치

되며 동시에 상부의 반력강관을 경유 강봉을 통하여 같은 양의 하중이 말뚝주면부에 작용하게 된다. 하중재하는 설계하중의 1/5을 단계로 하여 증가시키며 각 하중단계에서의 침하속도가 소정의 기준치 머만이 되면 다음 단계 하중을 재하한다. 이때 선단부에 연결된 강관 및 말뚝주면부에 각각 2개의 다이얼게이지를 부착하여 침하량을 측정, 하중-침하량 관계를 얻을 수 있다.

재하시험 결과는 그림 5에 나타나고 있는 것처럼 선단저항과 주변마찰 각각에 대한 하중-침하량 곡선으로 표시되며 그 결과로부터 전체 지지력에 대한 하중-침하량 관계를 구할 수 있다.

이상은 SPLT의 기본원리이며 실제로 재하시험을 할 경우에는 그림 5에서 보이고 있는 선단저항과 주변마찰 두가지의 결정은 사실상 불가능하다. 우리 나라에서의 대부분의 말뚝기초는 길이가 비교적 길지 않고 또 선단지지 말뚝으로 설계되는 바, 주변마찰에 비하여 상대적으로 선단저항의 값이 큰 것이 보통이다. 이 경우 하중재하로 인하여 주변마찰부의 파괴상태에는 도달할 수 있으나 선단저항은 파괴하중

까지 재하할 수 없게 되어 그 결정이 불가능하다.

선단저항이 주변마찰보다 큰 대부분의 경우에는 분리할 수 있는 선단부 내에 그림 15에 보이는 것과 같은 축소된 선단부를 설치하여 시험을 수행한다. 축소된 선단부의 전체선단부에 대한 면적비율은 말뚝의 길이, 지반조건에 따라 상이하나 1/4 또는 1/9의 규격을 사용할 수 있다.

시험말뚝의 제작, 향타, 조립과정은 기본적인 SPLT와 동일하나 이 경우에는 시험을 2단계로 나누어 수행한다. 시험장치의 조립이 완료된 후 제1단계시험은 기본 시험방법과 동일하다. 유압재하 장치로부터의 하중은 전체 선단부와 주변에 전달되고 선단저항의 값이 크기 때문에 주변마찰 부분의 파괴만이 발생한다. 시험결과는 따라서 이중 주변마찰에 대한 하중-침하량 곡선만을 얻을 수 있다.

그림 5에서 나타나고 있는 것과 같이 극한 및 잔류 주변마찰을 얻은 후, 극한 선단지지력 결정을 위하여 제2단계 시험을 수행한다. 제2단계 시험은 하중전달용 강관의 하단부에 축소된 선단부보다 작은 직경의 강봉을 부착한 후 같은 과정으로 시험한다. 분리할 수 있는 선단부 및 축소된 선단부의 설계는 제2단계 시험시 재하하중이 축소된 선단부에만 가해지도록 되어 있어 전체 주변마찰로부터의 반력은 축소된 선단부에만 전달된다.(그림 16) 시험결과로부터는 극한 선단지지력만을 구할 수 있어 제1단계 시험결과와 함께 해석하여 전체 지지력을 구할 수 있다.

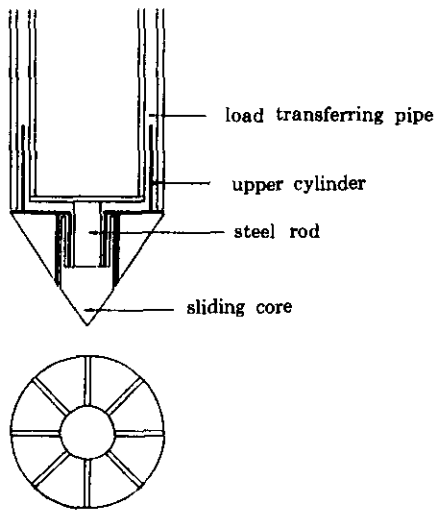


그림 15 축소된 선단부

7.5.2 STATNAMIC TEST의 원리와 시험방법⁽³⁾

Statnamic test란 말뚝의 극한지지력을 시험하는 방법으로 static의 stat와 dynamic의 namic을 조합하여 만든 것이다.

이 시험의 특징은 하중재하시험은 dynamic test와 비슷하여 시험시간이 짧으며, 재하시험 결과는 dynamic test보다 신뢰성이 큰 static test와 비슷한 결과를 얻으므로 static test와

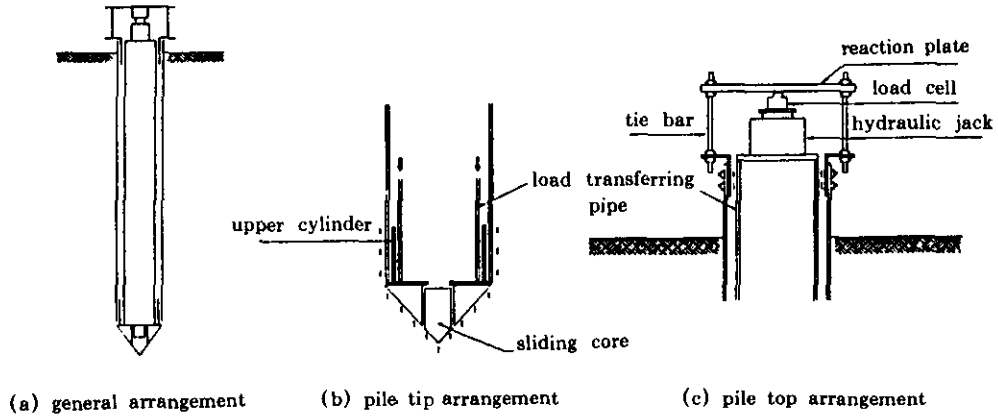


그림 16 2단계 시험시의 시험장치

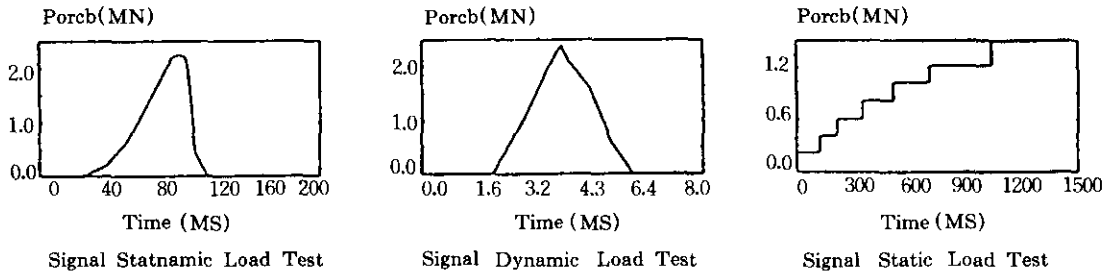


그림 17 하중과 시간과의 관계

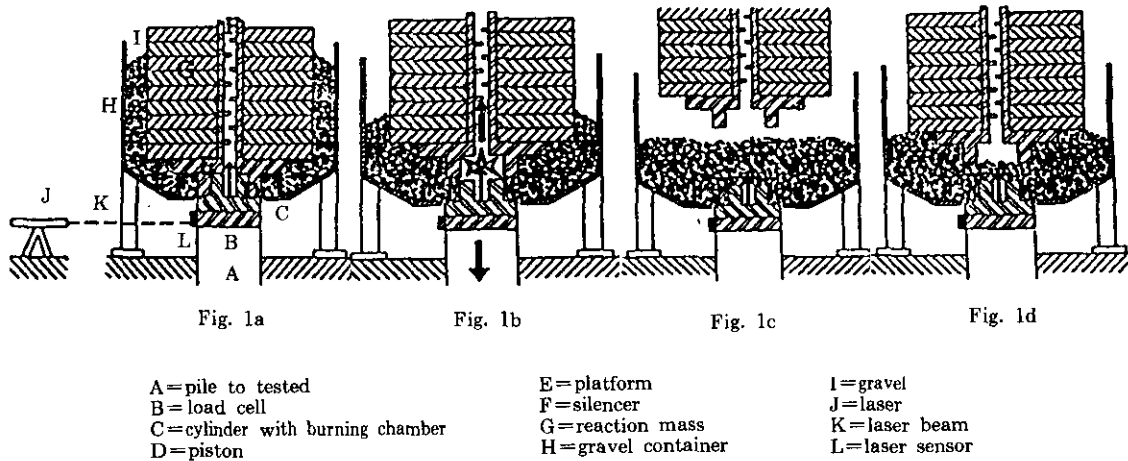


그림 18 Statnamic Test의 시험방법

dynamic test의 장점을 조합한 시험이라 할 수 있다. Dynamic test, statnamic test, 그리고 static test의 하중재하시간과 하중과의 관계는 그림 17과 같다.

그림 17에 나타낸 바와 같이 stanamic test는 dynamic test에 비하여 긴 시간동안 점진적으로 하중이 증가하고 이 하중은 dynamic test시 발생하는 말뚝의 인장력을 유발하지 않고 압축력만 발생시키게 된다. 따라서 인장력으로 인한 말뚝의 손상에 대한 우려가 없으며, 이와 함께 static test와 비슷한 결과를 얻을 수 있게 된다.

그림 18은 statnamic test의 시험과정, 그림 19는 statnamic장비의 내부구조를 나타낸다. 이 시험방법은 그림에서 보는 바와 같이 gas chamber에서의 폭발력을 이용하며, 장약이 폭발하는 순간 reaction mass는 위로 반발하며 말뚝은 하중을 받게 된다.

이 폭발력으로 reaction mass는 약 20g, 말뚝은 약 1g이하의 가속도를 얻게 되고, $F=ma$ 에 의해 reaction mass의 무게는 static test시 요구되는 reaction mass, 즉 재하하중의 1/20 정도만 사용하면 시험이 가능하게 된다. 그리고 시험결과는 그림 18에서 보는 바와 같이 laser를 이용하여 직접 측정된 변위와 다른 장

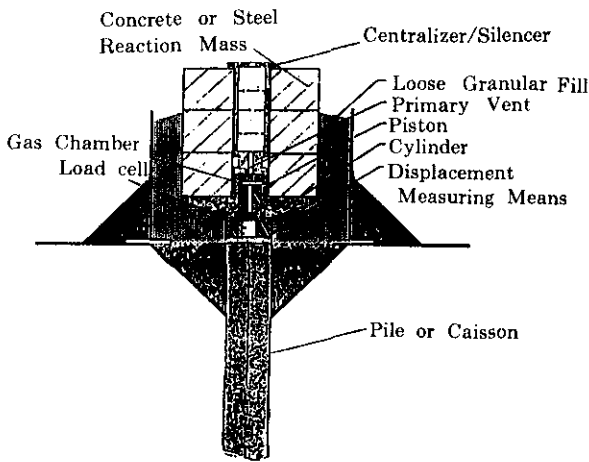


그림 19 Statnamic 장비의 내부구조

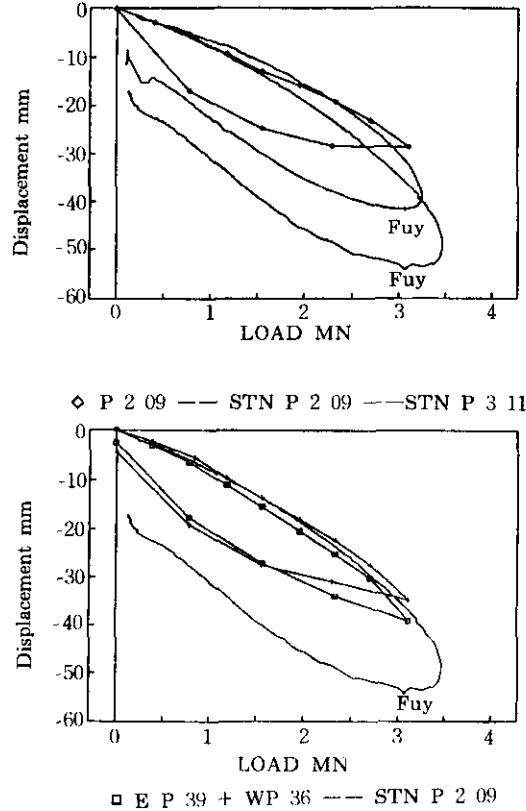


그림 20 Statnamic과 static의 재하시험 결과비교

비들을 통해 측정된 속도, 가속도, 하중 등을 computer로 해석하여 얻게 된다.

그림 20은 statnamic와 static test의 결과를 나타내었는데, 이 경우에는 그림에서 보듯이 두 시험의 결과는 거의 일치하였으나, 항상 일치하는 것은 아니며, 말뚝이 암반에 지지되어 있는 경우에 일치율이 크다고 할 수 있다.

앞에서 언급했듯이, statnamic test는 static test의 긴 시험시간에 비하여 시험시간이 적게 소요되고, dynamic test의 부정확성과 말뚝의 손상에 대한 우려없이 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있으며, 더우기 kentlege load를 시험 소요하중의 1/20정도만 가해주면 된다는 큰 장점이 있다. 그리고 지금까지 시험이 불가능했던 대구경 말뚝의 극한 지지력시험이나, 지

지력이 큰 현장타설 말뚝의 재하시험이 가능한 방법이라 하겠다.

다만, 마찰말뚝의 경우 loading rate 효과로 인하여 stress-strain curve가 정적시험과 다르게 되어 이에 대한 검토가 필요하며, 이 시험 장비가 개발된지 얼마되지 않은 연고로 그 적용예가 많지 않다는 점과 함께, 우리나라에 적용하기 위해서는 이 장비로 많은 실험을 수행하고 여타의 실험과 비교하여 그 타당성을 검토함이 바람직할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. 이명환, 윤성진(1992), "말뚝의 설계하중 결정방법에 대한 비교", 한국지반공학회 춘계학술논문집, pp.76-91.
2. 이명환, 이원계, 이장덕, 백세환, 김대영, 윤성진(1990), "간편한 말뚝재하시험(SPLT)의 개요와 적용", 대한토질공학회지 제6권 제4호, pp.53-64.
3. 이인모(1993), "STATNAMIC TEST", 한국지반공학회 대한건축학회 공동주최 1993년도 말뚝 기초위원회 봄학술발표회, 말뚝기초, pp.75-79.
4. Brinch Hansen, J.(1963), "Discussion, Hyperbolic stress-strain response, Cohesive soils", ASCE, J. SMFE, Vol.89, SM 4, pp.241-242.
5. Davisson, M.T.(1972), "High capacity piles", Proceedings, Lecture Series, Innovations in Foundation, Surrey University Press, pp.380.
6. De Beer, E. E(1967), "Proefondervindelijke bijdrage tot de studie van zand onder funderingen op staal", Tijdschrift der Openbar Werkin van Belgie, Nos. 6-67 and 1-, 4-, 5-, 6-68.
7. Fellenius, B.H.(1980), "The analysis of results from routine pile load tests", Ground Engineering, Vol.13, No.6, pp.19-31.
8. Fleming, W.G.K., Weltman, A.J., Randolph, M. F. and Elson, W.K.(1985), "Piling Engineering", Surrey University Press, 380.pp.
9. Mohan, D., Jain, G.S. and Jain, M.P.(1967), "A new approach to load tests", Geotechnique, Vol.17, pp.274-283.
10. Tomlinson, M.J.(1987), "Pile Design and Construction Practice, 3rd edition", A Viewpoint Publication, 378.pp.
11. Vesic, A.S(1963), "Bearing capacity of deep foundations in sand", Highway Research Board Record, No.39.
12. Weele, A.F.van(1989), "Does a load test on a pile help or mislead a soils engineer?" De Mello Volume, Editoria Edgard Blucher Ltda. Sao Paulo, pp.484-490.
13. Whitaker, T.(1963), "The constant rate of penetration test for the determination of the ultimate bearing capacity of a pile", Proceedings of ICE, Vol.26, London, pp.119-123.