

압축재하시험



▲ 사하중을 이용한 압축재하시험

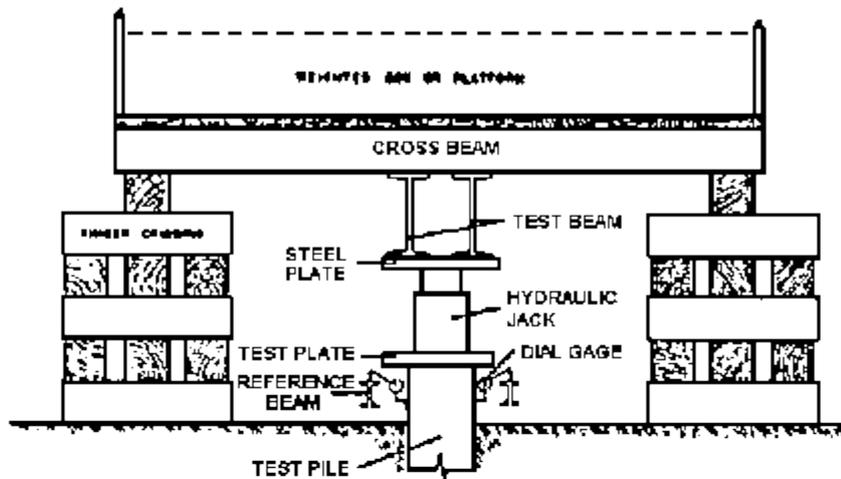


▲ 반력말뚝을 이용한 압축재하시험

재하하중

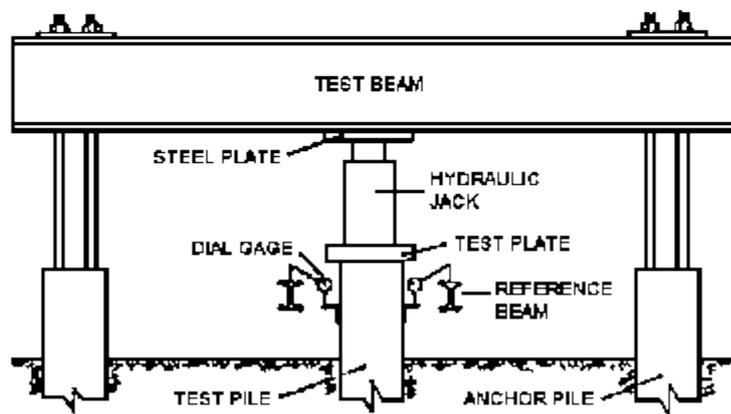
말뚝의 압축재하시험에는 설계하중의 2~3 배에 달하는 재하하중이 필요하다. 하중재하방법에는 사하중(kentledge)을 말뚝머리에 직접 재하하는 방법도 있지만 대부분 유압잭을 통하여 원하는 하중만을 말뚝에 전달시키는 방법이 채택된다.

하중수단으로는 콘크리트 블록 또는 철근 등 사하중을 재하구조물위에 설치하는 방법과 반력말뚝 또는 반력양카의 인발저항력을 이용하는 방법이 있다.([그림 1])



Schematic Set-Up for Applying Loads to Pile Using Hydraulic Jack Acting Against Weighted Box or Platform

(a) 사하중 재하방법



Schematic Set-Up for Applying Loads to Pile Using Hydraulic Jack Acting Against Anchored Reaction Frame

(b) 반력말뚝 사용방법

[그림 1] 압축재하 시험장치

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

재하시험방법

말뚝의 압축재하시험방법에는 다음의 여러가지가 있으며 이들을 개략적으로 살펴보면 다음과 같다.

(A) 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 8 단계 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 2 시간을 넘지 않도록 하여 재하하중을 유지한다.
- 다. 설계하중의 200% 즉 총 시험하중 재하단계에서 하중을 유지하되 시간당 침하량이 0.01inch(=0.25mm) 이하일 경우 12 시간, 그렇지 않을 경우 24 시간동안 유지시킨다.
- 라. 하중 제하는 총 시험하중의 25%씩 각 단계별로 1 시간씩 간격을 두어 제하한다.
- 마. 만약 시험도중 말뚝의 파괴가 발생할 경우, 총 침하량이 말뚝머리의 직경 또는 대각선 길이의 15%에 달할 때까지 재하를 계속한다.

(B) 급속재하시험방법(Quick Maintained-load Test)

표준재하방법은 매우 긴 시간이 소요된다는 것이(보통 30 내지 70 시간) 가장 큰 결점이며 또한 안전침하율(Zero settlement) 기준인 0.01 inch(=0.25 mm)/hr 도 환산하여 보면 2.19 metre/year 가 되어 대단히 잘못 인식되어 있는것을 알 수 있다.

따라서 안전침하율 기준에따라 각 하중재하단계에서 경과시간을 조절하는 것은 별의미가 없으며 실제로 각 하중단계마다 “동일한”시간을 유지토록 하는것이 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 10 내지 15%로 정하고 각 하중단계의 재하간격을 2.5 내지 15 분으로 하여 재하한다.

註) ASTM 에서는 재하간격을 2.5 분으로 규정하고 있으나 그 시간동안 2~4 차례에 걸쳐 gauge 혹은 scale 등을 읽고 기록하기에는 충분치 못한것으로 판단되며 대체로 5 분 간격으로 하는것이 보다 실제적인 것으로 보인다.

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

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

註) 일반적으로는 총 시험하중을 표준재하방법에서와 마찬가지로 설계하중의 200% 혹은 300%까지로 제한하는 것이 권장되고 있다.(Fellenius, Prakash)

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

(C) 하중증가평형시험방법(Incremental Equilibrium Test)

이 방법은 Mohan et al 에 의해 제안된, 표준재하방법을 개선한 방법으로서 표준재하방법에 비해 총 소요시간을 1/3 가량 단축시킬 수 있으며 그 시험결과는 표준재하방법에 의한것과 잘 부합되는 것으로 알려져 있다.

가. 재하하중단계를 설계하중의 15% 내지 25%로 정한다.

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

다. “나”항에서의 평형상태에 도달하면 다음단계의 하중을 재하하는 식으로 같은 방식을 되풀이하여 재하하중이 총 시험하중에 이를때까지 시험을 계속한다.

(D) 일정침하율시험방법(Constant Rate of Penetration Test)

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

가. 말뚝의 침하율이 통상 0.01 inch/min(= 0.5 mm/min) 내지 0.10 inch/min(= 2.50

mm/min)가 되도록 재하하중을 조절하면서 매 2 분마다 하중과 침하량을 기록한다.
註) 침하율을 정하는데 있어 Whitaker 는 마찰말뚝에 대해서는 0.75mm/min, 선단지지말뚝에 대해서는 1.5mm/min 를 채택할 것을 권유하고 있으며, ASTM 에서는 점성토인 경우 0.25~1.25mm/min, 사질토인 경우 0.75~2.50mm/min 를 제시하고 있다.

나. “가”의 방법에 의해 재하하중을 증가시켜 말뚝의 총 침하량이 2~3inch(= 50 ~75mm)에 달할 때까지 또는 총 시험하중에 도달할 때까지 시험을 계속한 후 제하한다.

註) ASTM 에서는 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 gauge 들을 동시에 읽어내야 하므로 시험요원의 적절한 훈련을 필요로 한다.

(E) 일정침하량시험방법(Constant Settlement Increment Test)

이 방법 역시 CRP 시험방법과 마찬가지로 말뚝의 침하량이 일정한 값만큼 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 유지시킨 후 총 재하하중을 네단계로 등분하여 제하하되, 제하단계별로 말뚝의 Rebound 율이 시간당 말뚝머리의 직경이나 대각선 길이의 0.3% 이내에 들어올 때까지 기다린 후 다음단계의 제하를 행하도록 한다.

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

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

가. 재하하중의 하중단계는 표준재하방법에서와 같이 정한다.

나. 재하하중단계가 설계하중의 50%, 100% 및 150%에 도달하였을때 재하하중을 각각 1 시간동안 유지시킨 후 표준재하방법의 제하시와 같은 단계를 거쳐 단계별로 20 분 간격을 두면서 재하한다.

다. 하중을 완전히 제하한 후 설계하중의 50%씩 단계적으로 다시 재하하고 표준시험방법에 따라 다음 단계로 재하한다.

라. 재하하중이 총 시험하중에 도달하게 되면 12 시간 또는 24 시간 동안 하중을 유지시킨 후 제하하되 그 절차는 표준재하방법과 같다.

(G) 스웨덴 반복하중재하방법(Swedish Cyclic Test)

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

가. 초기 재하하중을 말뚝설계하중의 3분의 1 까지로 하여 재하한 다음,

나. 설계하중의 6분의 1 까지 제하하여 같은 과정을 20 차례 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 이를때까지 계속한다.

이 방법은 상당히 오랜시간이 소요되고 하중의 재하-제하가 번번히 반복됨에 따라 말뚝자체도 최초의 말뚝(상태)와는 다른것이 되고만다. 따라서 이 시험방법은 특별한 경우에 한하여 사용할것을 권유하고 있다.

(H) 재하시험 방법의 선택

이상의 여러가지 시험방법들중 어떤 방법을 선택할 것인지는 전적으로 말뚝재하시험 실시 목적에 따라 결정되어야 한다.

말뚝재하시험의 목적은 말뚝설계를 위하여 설계지지력 결정 또는 기시공된 말뚝의 허용안전하중을 확인하는 것이다. 이러한 목적을 달성하기 위해서는 말뚝 설계개념이 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 하는것이 현실이다.

말뚝재하시험 결과의 해석에 대한 각국의 설계기준들도 외견상 극한 또는 항복하중을 기준으로 하는 개념과 침하량 기준개념으로 대별할 수 있지만, 말뚝기초의 허용침하량은 지반의 지지능력이외에 말뚝의 재질, 길이 등에 따라 큰 차이가 있을 수 있어 순수한

침하량 기준으로는 볼 수 없다. 오히려 침하량기준, 예를들면 BS 의 0.1D 전침하량기준 또는 DIN 의 2.5%D 잔류침하량기준, New York 시의 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, 건설부 제정 「구조물 기초 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 여러가지 해석법들이 있으며 다양한 해석법들을 적용하기 위해서는

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

등을 측정하여 종합적으로 판정할 필요가 있다.

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

최대재하하중 : 말뚝의 파괴가 발생하지 않는 조건에서 최대 재하하중은 설계하중의 최소 250%정도가 될 필요가 있다.

재하하중단계 : 재하하중은 설계하중의 25%를 단위로하여 재하한다.

재하과정 : 잔류침하량 기준 적용을 위하여 설계하중의 50% 단위마다 제하하여 잔류침하량을 측정하며, 분명한 항복이 나타났을 경우에는 추가로 제하하여 확인한다.

하중유지시간 : 각종 기준에서 적용하는 0.01 inch/hr 미만이 되면 안전되는 것으로 판단하고 다음단계 하중으로 시험을 계속한다. 설계하중 단계 또는 설계하중의 150% 또는 200%에서 6 시간 또는 12 시간 하중유지는 실제로 각종 해석상 고려되지 않는바, 이를 유지할 필요는 없는 것으로 판단된다.

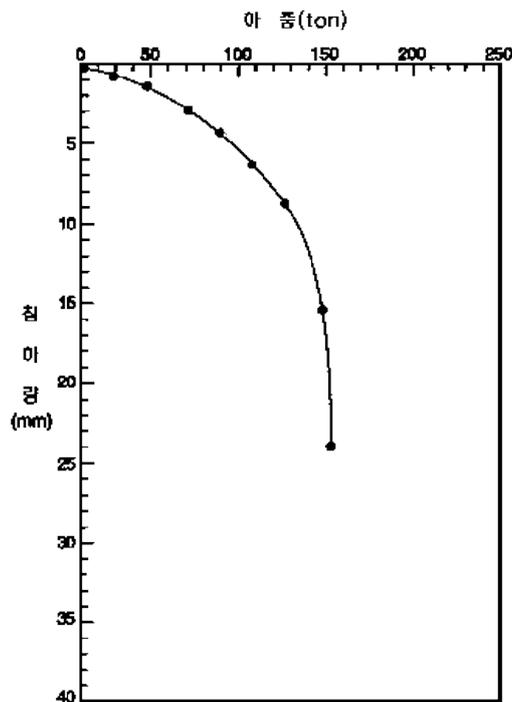
기타 : 재하시험 실시중 전침하량기준, 잔류침하량기준, 하중-시간-침하량기준 등을 종합적으로 판단하여 분명한 항복하중이 규명된 경우에는 그러한 규정에 충분한 단계까지만 재하시험을 계속하여, 무의미한 하중유지시간에 집착하지 않고 시험을

중단하도록 한다. 이때 각종해석법들중 일부 기준만으로 판단하여 시험을 중단하는 것은 종합적 해석이 불가능하므로 다음단계 하중재하 등으로 극한 또는 항복하중 판단의 객관성을 확보하는 과정을 필요로 한다.

재하시험결과의 해석

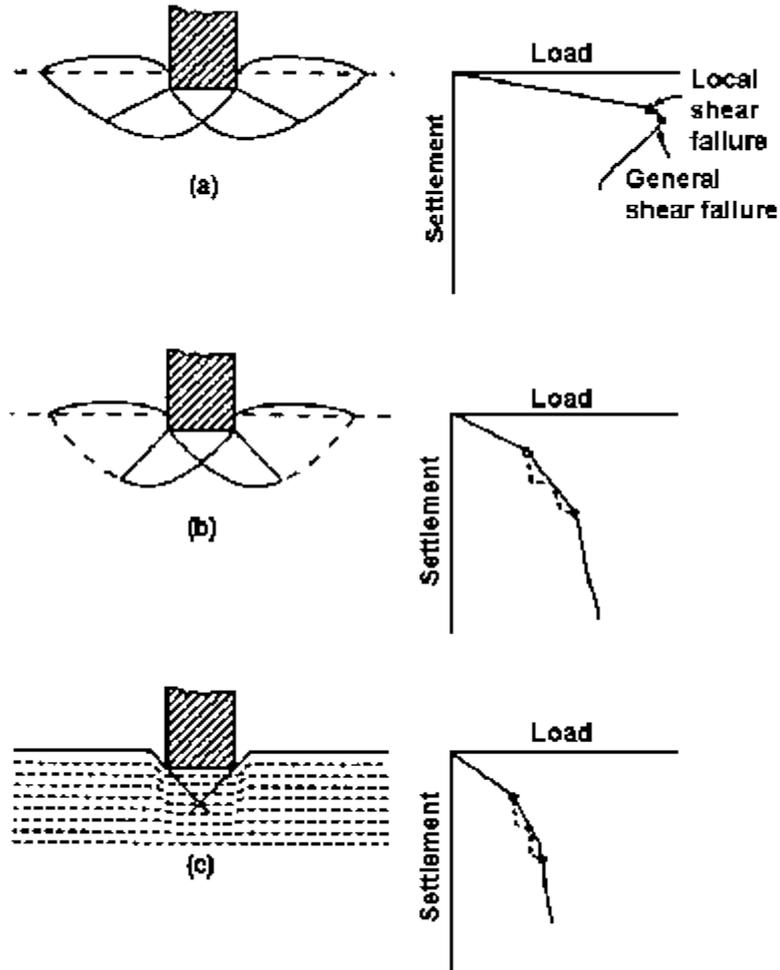
말뚝재하시험 결과로부터 말뚝의 허용하중(working load)을 결정하는 데에는 두가지 기본조건을 만족시켜야 한다. 첫째조건은 어떠한 경우에도 상부구조물의 파괴(failure)가 발생하지 말아야 하며 이를 위해서는 파괴를 유발하는 하중(극한하중, ultimate load)과 비교하여 충분한 안전성이 확보되어야 한다. 둘째, 말뚝기초에 상부구조물의 사하중과 활하중이 재하되었을 때의 침하량이 설계조건에서 가정한 허용범위 이내가 되어야 하는 조건이 만족되어야 한다.

말뚝기초의 극한하중에 일정한 값의 안전율(factor of safety)을 감안하여 허용하중을 결정하기 위해서는 극한하중을 알아야 한다. 극한하중은 말뚝에 어떤 하중이 재하되었을 때, 하중의 증가가 없는 상태에서 침하량은 무한대로 증가하는 상태에 도달하는 때의 하중을 의미한다. 이러한 상태는 [그림 2]와 같은 하중-침하량 관계에서, 세로축과 평행한 직선상태로 정의된다. 그러나 실제로 말뚝재하시험을 실시하였을 경우, [그림 2]와 같이 극한하중이 분명하게 규명되는 경우는 그리 많지 못하다.



[그림 2] 대표적인 하중-침하량 곡선

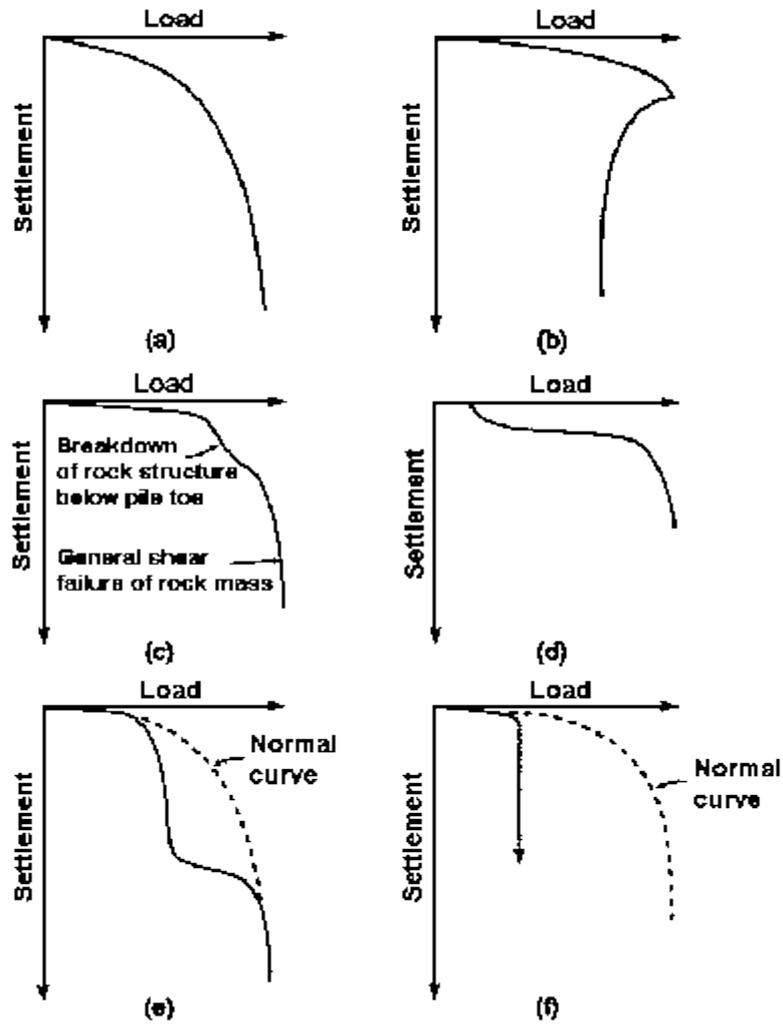
극한상태가 분명하게 나타나지 못하는 이유는 사질토 지반에서 지반의 조밀한 정도 및 지지층내의 근입장에 따라 파괴 양상이 상이하게 (general shear failure, local shear failure, punching shear failure) 나타난다는 Vesic 의 연구결과 [그림 3]으로 설명이 가능하다.



[그림 3] 3 가지 형태의 선단지지력 하중-침하량 관계

Tomlinson 은 말뚝주면부의 지반조건, 선단부 하부 지반조건 등에 따라 여러 가지 형태[그림 4]의 하중-침하량 관계가 나타나는 것으로 분석하였다.

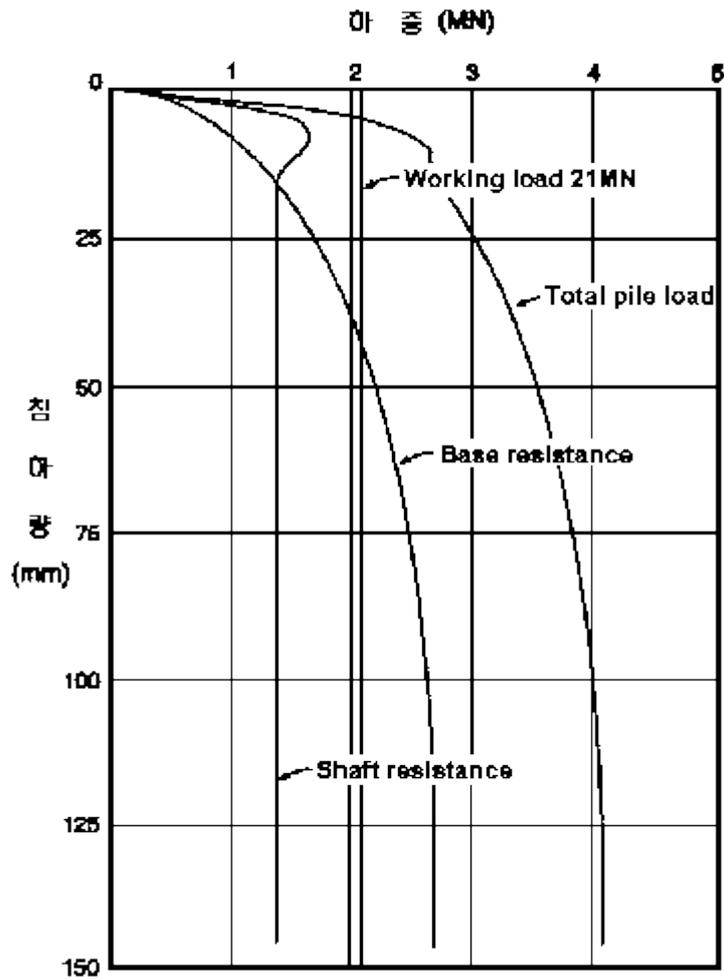
이처럼 말뚝의 하중-침하량 관계가 다양하게 나타나는 원인은 말뚝 지지력을 구성하는 두가지 성분 - 선단지지력과 주면마찰력 - 의 거동특성을 이해함으로써 설명이 가능하다.



[그림 4] 여러 가지 형태의 하중-침하량 곡선

[그림 5]은 선단지지력과 주변마찰력을 분리하여 측정된 말뚝재하시험 결과이다.

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



[그림 5] 선단지지력과 주변마찰 분리측정 결과

선단지지력에 대한 하중-침하량 관계는 이처럼 다양한 형태로 나타나며 따라서 말뚝재하시험 결과로부터 항복하중(yield load) 또는 파괴하중(failure load)을 판정하는데에는 일찍부터 여러 가지 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, 시공조건 등의 다양함을 모두 만족시키는 범용성 있는 해석법은 아직까지 개발되지 못한 실정이다.

이와 같이 하중-침하량 곡선의 해석문제는 말뚝재하시험 결과로부터 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 부등침하에 대한 별도의 고려가 되어야 한다.

반면 말뚝의 주면마찰력에 대한 하중-침하량 특성은 [그림 3(a), (b)] 및 [그림 5]에 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 4~6 mm의 침하량에서 주면마찰 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 주면마찰력 도달시까지의 전침하량이 클 수도 있음) 극한주면마찰력 발생은 상부구조물의 허용 침하량 범위 이내가 되어 설계에 사용할 수 있는 가용지지력은 선단지지력에 비하여 높게 된다.

선단지지력과 주면마찰력을 분리측정한 말뚝 재하시험 결과에 의하면 하중재하후 상당한 침하량이 발생할 때까지(소성 침하가 발생하기 이전), 재하하중의 거의 전량은 주면마찰력에 의하여 저항된다. 주면마찰력의 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 Singapore 지하철 설계기준에서 규정한 설계하중에서 6~9 mm, 설계하중의 1.5 배 하중에서 9~20 mm 와 같은 엄격한 기준에서부터, 일본 토질공학회의 25 mm, 러시아에서 적용되는 40~80 mm 등 광범위한 기준들이 있다.

BS 규정에서는 말뚝직경의 10% 침하량을 기준으로 하며 Terzaghi and Peck 이 제안한 25 mm 의 기준도 많이 채택되고 있다. 인위적인 기준값은 말뚝의 설치방법과도 밀접한 관계에 있어 De Beer 는 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 주면마찰력의 비율이 상이하게 되고, 이에 따라 말뚝의 하중-침하량 거동이 결정되는 점을 감안할 수 없다는 단점이 있다.

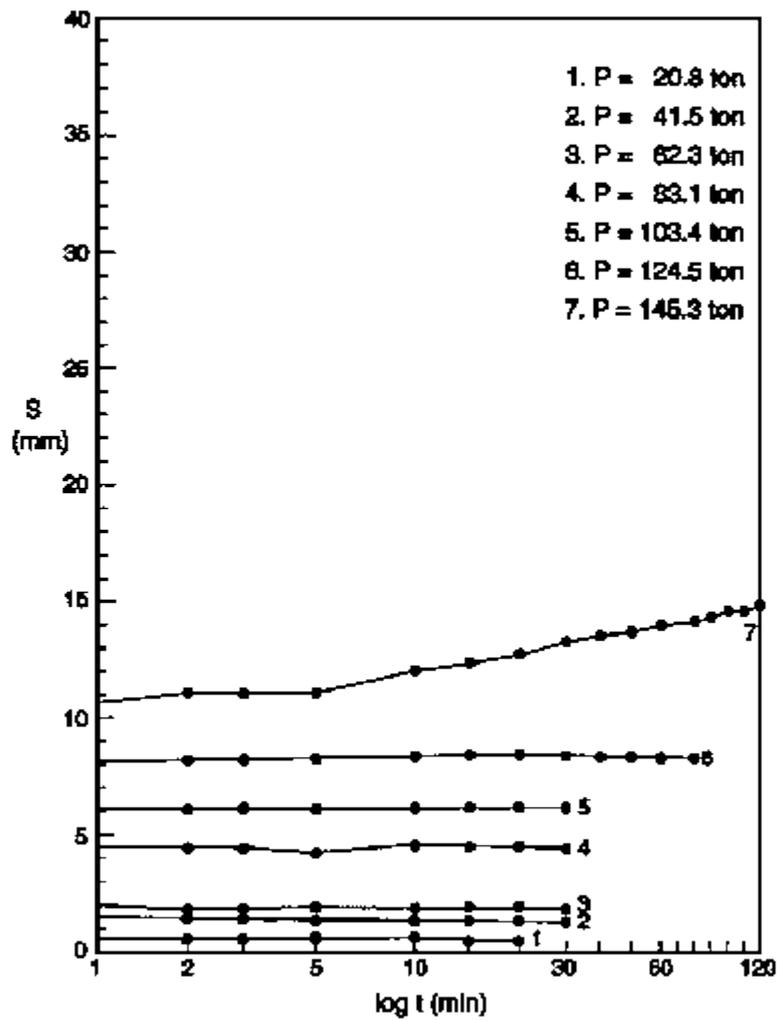
따라서 전침하량 기준에 의한 말뚝의 설계하중 결정은 극히 제한적인 경우에 국한하여 적용할 수 있으며, 반드시 다른 해석결과와 비교하는 과정이 필요하다.

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 S 곡선분석, 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” 그럴지 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 1.5 배를 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

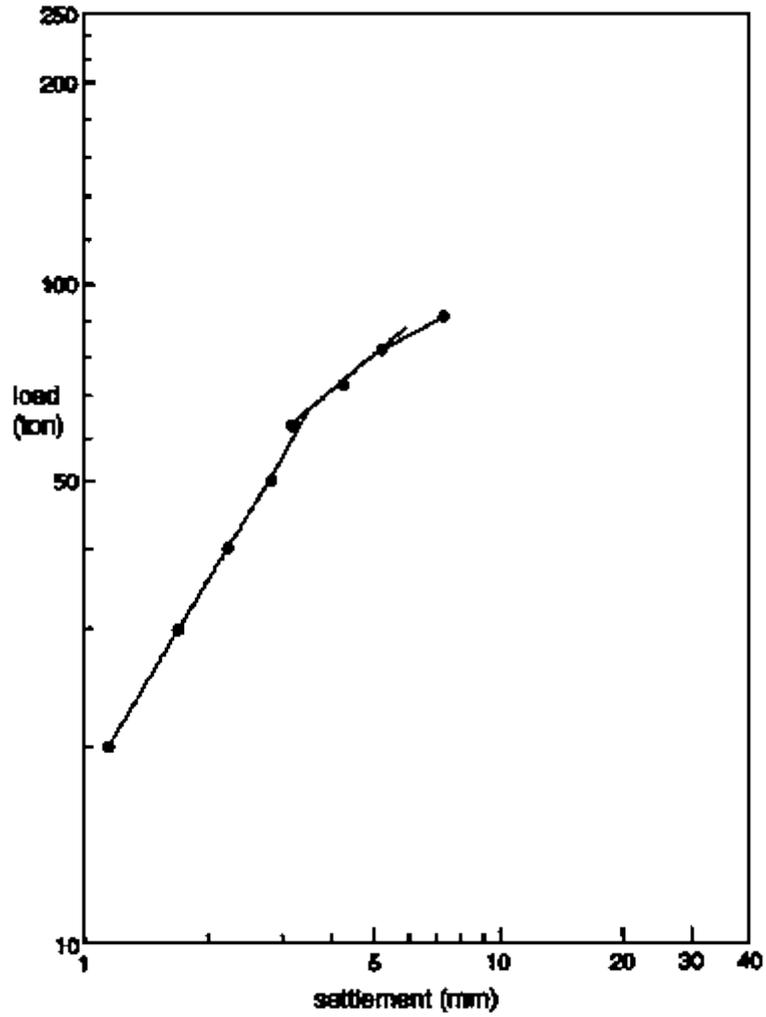
각 재하단계에 대해 경과시간을 대수 눈금에, 말뚝머리의 침하량을 산수눈금에 표시하였을 때 각 하중단계의 관계선이 직선적으로 되지 않는 점의 하중을 항복하중으로 한다.([그림 6] 참조)



[그림 6] S-log t 곡선(예)

· log P-log S 분석법

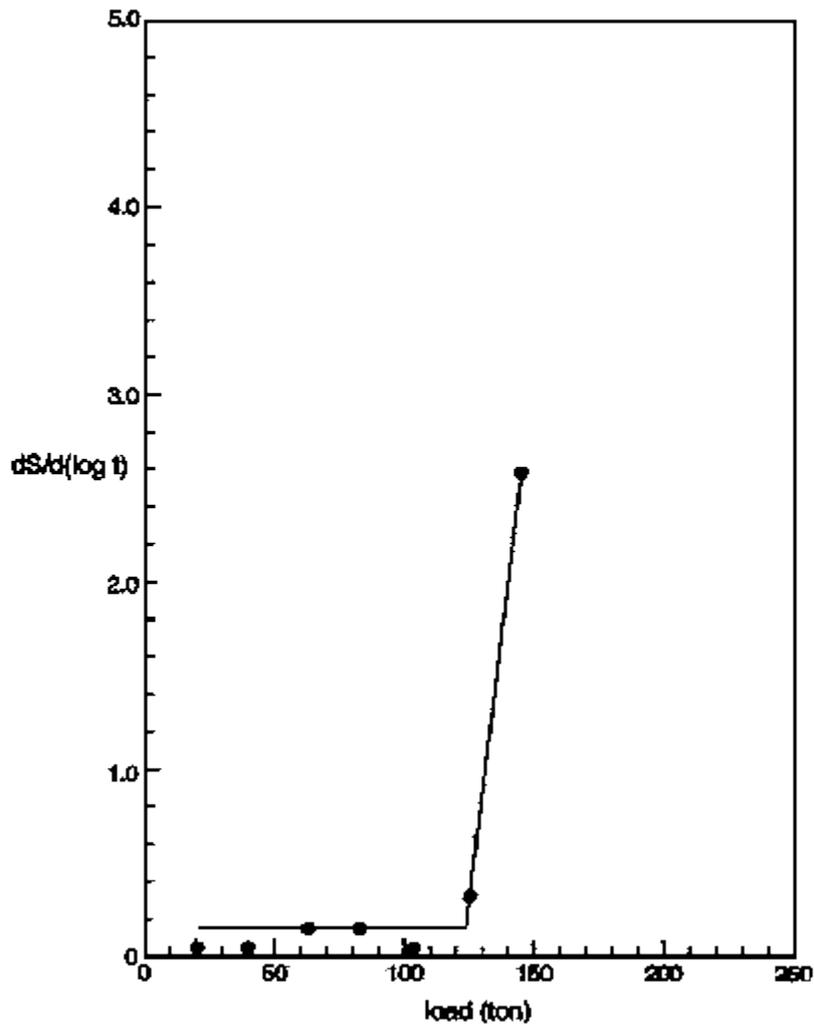
하중 P 와 말뚝머리의 침하량 S 를 양대수 눈금으로 표시하고, 각 점을 연결하여 얻어지는 선이 꺾어지는 점의 하중을 항복하중으로 한다.([그림 7] 참조)



[그림 7] log P-log S 곡선(예)

· $dS/d(\log t)$ -P 분석법

[그림 7]에서 각 하중단계에서 일정시간(10 분 이상)후의 대수침하속도 $dS/d(\log t)$ 즉, $S-\log t$ 곡선의 경사를 구하고, 이것을 하중에 표시하여 연결한다. 이와 같이 하여 구한 선이 급격히 구부러지는 점의 하중을 항복하중으로 한다.([그림 8] 참조)



[그림 8] $dS/d(\log t)$ -P 곡선(예)

항복하중분석에 의한 해석은, 그러나 극한하중을 낮게 평가한다는 지적도 있다. Canada 의 설계기준에서도 도해법에 의한 항복하중의 판정은 semi-elastic 영역과 semi-plastic 영역의 중간에서 결정되는 경우가 많으며 극한지지력을 과소 평가할 수 있음을 지적하고 있다.

항복하중 판정은 전술한 바와 같이 하중(P)-시간(t)-침하량(S) 거동특성으로 부터

이루어진다. 따라서 보다 신뢰도 높은 항복하중 판정을 위해서는 재하에 의한 말뚝의 거동을 합리적으로 분석할 필요가 있다.

말뚝에 하중이 재하되면 하중재하 초기에는 대부분의 하중은 주면마찰로 저항되며 선단부에는 하중이 거의 전달되지 않거나 극히 일부의 하중만이 전달된다. 재하하중이 증가하여 극한 주면마찰력 이상의 재하상태가 되면 말뚝주면부는 극한상태에 도달하게 되어 「재하하중 - 극한 주면마찰력」이 선단부에 전달되게 된다.

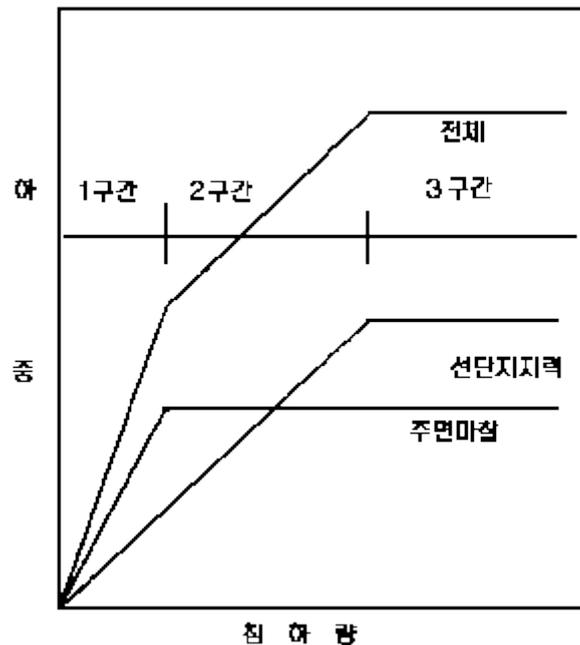
[그림 9]에는 주면마찰력, 선단지지력 및 전체 침하량에 대한 하중-침하량을 나타내었다. 주면마찰력이 작은 경우에는 전체 지지력의 하중-침하량 관계는 선단지지력에 대한 관계와 크게 상이하지 않으나, 주면마찰력 성분이 큰 경우에는 하중-침하량 관계곡선을 아래 3 가지 구간으로 나누어 고려하여야 한다.

제 1 구간 : 하중재하 초기의 단계로 주면마찰 특성이 위주가 된다.

제 2 구간 : 주면마찰의 극한을 초과하여 증가된 하중이 선단지지력으로 저항된다.

그러나 선단지지력의 항복상태까지는 도달하지 않은 하중구간까지 이므로 급격한 침하는 발생하지 않는다.

제 3 구간 : 선단지지력의 항복하중을 초과하여 전체 하중-침하량 곡선은 전형적인 극한상태와 유사한 관계를 나타내어 준다.



[그림 9] 하중-침하량 관계

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

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

실제로 말뚝에 제 1 구간에 해당되는 하중이 재하되면 침하량-시간관계도 주면마찰의 특성이 위주가 된다. 극한 주면마찰력을 초과하는 하중상태인 제 2 구간에서는 선단저항의 침하량-시간관계가 위주가 되어 S-log t 관계가 변화하게 된다. 제 3 구간에서는 선단저항의 침하량-시간 관계만이 나타나게 되며, S-log t 관계가 변하게 된다.

S-log t 분석으로 항복하중을 판정할 때, 주면마찰력의 비율이 높은 경우에는 제 1 구간과 제 2 구간의 경계부와 항복하중의 2 가지 하중에서 요(凹)형상태가 판정되기도 하여 항복하중 판정이 애매해 질 수도 있다.

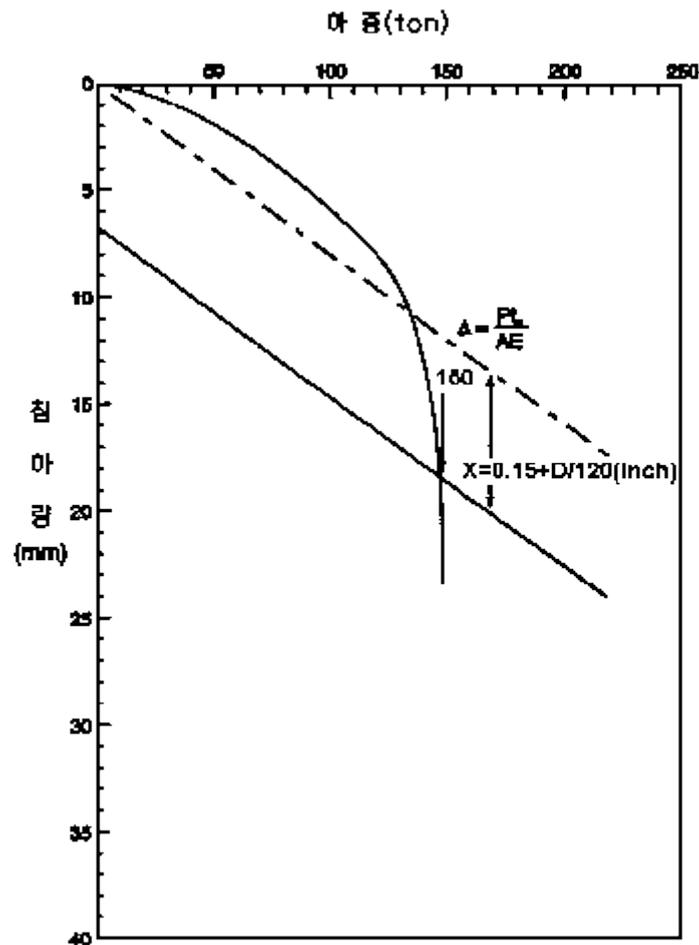
같은 이유에서, 제 3 구간까지 재하를 하지 않고 말뚝재하시험을 중단하면 S-log t 분석은 물론 S-P 분석, log P-log S 분석은 진짜 항복하중이 아닌 주면마찰 특성과 선단지지 특성의 교차점인 가(假)항복하중만을 분석할 가능성도 있다.

Davisson 의 판정법

Davisson 의 판정법은 말뚝의 전침하량과 말뚝직경, 단면적, 탄성계수 및 말뚝길이 등을 고려한 순침하량 판정을 복합적으로 적용한 것으로 최근 서구에서는 가장 합리적인 말뚝 허용하중 판정법으로 인정받고 있다.([그림 10] 참조)

국내에서도 Davisson 판정법에 의한 말뚝지지력 해석을 실시해본 결과 국내의 항복하중기준 설계법과 비교적 잘 일치하고 있는 것으로 나타나고 있다.

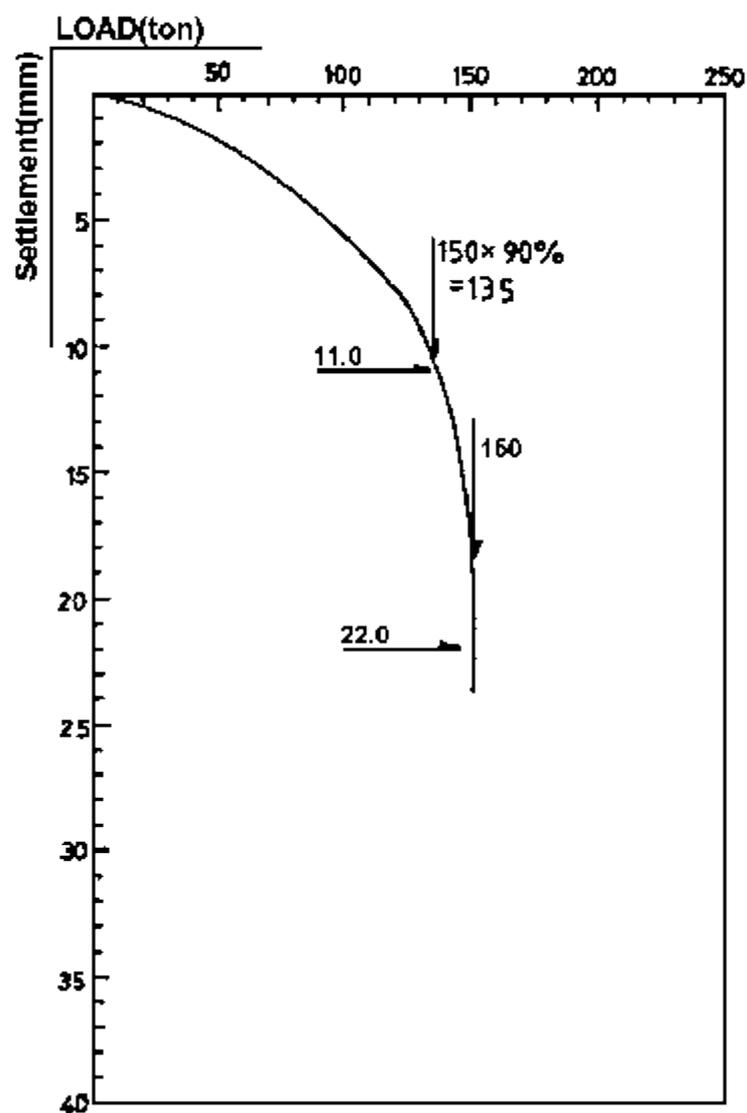
그러나 Davisson 의 판정법은 말뚝길이가 지나치게 짧거나 주면마찰력이 낮은 말뚝의 경우에는 다른 판정기준 보다도 낮은 허용하중을 나타내 준다. 이와 같은 경우 다른 판정기준들과의 비교를 통한 기술자의 판단이 요구된다.



[그림 10] Davisson 의 판정법(예)

B.Hansen의 판정법(90% criterion)

말뚝에 극한하중이 재하되었을 때의 침하량은 극한하중의 90% 하중재하시 침하량의 2 배가된다는 가정에 입각한 판정법이다. 이 방법은 임의의 극한하중을 가정하고 90%에서의 침하량을 비교하는 반복작업을 통하여 극한하중을 결정한다.([그림 11] 참조)



[그림 11] B.Hansen의 판정법(예)