

하중 작용 방향(압축과 인발)과 말뚝의 직경이 말뚝 지지력에 미치는 영향

The Influence of the Direction of Applied Load(Compression and Uplift)
and the Diameter of the Pile on the Pile Bearing Capacity

이 명 환 ^{*1}	김 대 영 ^{*2}
Lee, Myung - Whan	Kim, Dae - Young
윤 성 진 ^{*2}	이 상 현 ^{*3}
Yoon, Sung - Jin	Lee, Sang - Heon

Abstract

The reliable estimation of pile bearing capacity is essential for the improvement of the reliability and the cost-effectiveness of the design. There have been numerous pile bearing capacity prediction methods proposed up to now, however, except for the estimation made from the result of the pile loading test, not one method is appropriate for the reliable prediction. Due to the considerable time and expenses required to carry out the pile loading test, the test has seldom been utilized.

The development of Simple Pile Loading Test(SPLT) which utilizes the pile skin friction as the required reaction force to cause the pile tip settlement, provides a solution to perform more pile loading tests and consequently a more economical pile design is possible. The separate measurement of skin friction and tip resistance during the course of performing SPLT provides a better understanding of the pile behavior than the result of the conventional pile loading test where only the total resistance is measured. On the other hand, there are some points to be clarified in order to apply the test results of SPLT to practical problem.

They are the direction of the applied load to mobilize the skin friction and the use of reduced sized sliding core. In this research, both the SPLT and the conventional pile loading test on 406mm diameter steel pipe pile have been performed. From the result, it would be safe to use the measured SPLT skin friction value directly in the design, since the value is somewhat lower than the value measured in the conventional test. It is further assumed that the tip resistance value of the reduced sized sliding core should properly be analysed by taking the influence of scale effect into consideration.

^{*1} 정회원, 한국과학기술원 강사

^{*2} 정회원, 삼성중합건설(주), 기술연구소

^{*3} 삼성중합건설(주), 기술연구소

요 지

말뚝기초 설계의 신뢰도 및 경제성 향상을 위해서는 말뚝 지지력 예측의 신뢰도 제고가 필수적이다. 현재까지 수많은 말뚝지지력 예측 방법들이 제안되어 왔으나 말뚝재하시험에 의하는 방법외에는 그 신뢰도가 보장되지 못하는 것이 현실이다. 그러나 말뚝재하시험은 상당한 시간과 비용이 소요되어 활성화 되지 못하였다. 말뚝의 주면마찰력을 선단부 재하의 반력으로 이용하는 SPLT의 개발은 이러한 문제점 들을 해소할 수 있는 방안으로 실무에 적용이 확산되고 있다. SPLT에서는 주면마찰력과 선단저항을 분리 측정하여 말뚝지지력 해석의 신뢰도를 높여줄 수 있는 이점이 있는 반면, 주면마찰부에 작용하는 하중의 방향이 기존의 재하시험과 반대로 되는 문제점과 축소된 선단부 사용의 영향이 명확히 규명되지 못한 문제점이 해결되어야 할 과제로 제기되고 있다. 본 연구에서는 이러한 영향을 알아보기 위하여 직경 406mm의 강관말뚝을 사용하여 SPLT의 1단계, 2단계 시험 후 재래식 재하시험을 수행하였다.

연구결과에 의하면 인발시의 주면마찰력은 압축시의 값보다 낮은 것으로 나타나 SPLT결과를 실무에 적용하면 안전율을 높여주는 효과를 주며, 축소된 선단부 사용은 치수효과(scale effect)에 대한 적절한 해석후 적용할 수 있을 것으로 나타난다.

1. 서 론

말뚝기초에 관한 각종 연구결과에 의하면 말뚝의 지지력은 지반의 전단특성, 압축특성, 흙입자의 구성성분, 입자강도, 지반내의 응력조건, 응력수준, 입자 점착(cementation)유무, 흙구조(soil fabric) 등 지반조건과 말뚝의 형상, 크기, 관입깊이, 재질, 설치방법등 말뚝의 특성, 그리고 말뚝 설치후의 시간 경과 등 다양한 요소들의 영향을 받는 것으로 알려져 있다.⁽⁴⁾

이러한 연구 결과들에 비하여 실무에서 활용되는 말뚝지지력 산정 공식에서 고려되는 요소들은 극히 일부분에 불과한 실정이다. 각종 연구 결과들을 실무에 적용하지 못하는 이유로는 영향요소들의 정량적 규명이 되지 못하고 있는 데에도 기인하나, 이들을 고려하기 위해서는 각 요소들에 대한 철저한 지반조사가 전제되어야 하며, 많은 경우 요구되는 지반조사의 범위는 공사의 경제성과 비교할 때 현실적인 수준을 초과하게 되어 한정된 요소들만이 고려될 수 밖에 없다.

따라서 특정한, 여러가지 조건들이 복합적으로 영향을 미치는 말뚝의 지지력을 한정된 요

소들만을 고려한 일반적인 지지력 공식을 이용하여 산정하게 되면 실제와는 차이가 발생하지 않을 수 없다. 특히 국내의 경우 말뚝설계의 대부분이 표준관입시험 결과를 이용한 Meyerhof의 공식⁽¹⁴⁾에 의하는 바, 공식 자체가 갖고있는 신뢰도 문제외에 표준관입시험 결과의 신뢰도⁽²⁾까지 문제되어 말뚝지지력 예측의 신뢰도는 낮을 수 밖에 없을 것으로 사료된다.

말뚝지지력 예측의 불확실성은 우리나라 뿐만 아니라 외국에서도 문제되어 많은 선진국에서는 일정규모 이상의 말뚝시공시 말뚝재하시험의 실시를 의무화하고 있다. 일례를 들면 Canada에서는 말뚝 250본당 1회 이상의 말뚝재하시험이 규정되어 있다.⁽⁵⁾

이러한 말뚝재하시험을 실시하는 목적은, 첫째, 설계시 가정한 지지력을 확인함으로써 축조되는 구조물의 안전을 점검하는 것과, 둘째, 더욱 신뢰도 높은 지지력을 산정함으로써 더 경제적인 설계를 하기 위함이다. 첫번째 목적을 위한 시험에서는 보통 설계하중의 2.25배의 사하중 또는 반력말뚝을 이용하여 재하한 후 말뚝이 항복 또는 파괴되지 않음을 확인한다.

말뚝재하시험을 더욱 적극적으로 활용하기 위한 두번째 목적의 시험에서는 말뚝의 파괴가

지 하중을 재하할 필요가 있다.

말뚝재하시험의 목적과 관계없이 시험을 실시하기 위해서는 재하구조물, 재하하중의 제작, 설치, 해체가 필요하며 여기에 상당한 시간과 비용이 소요되어 재하시험 활성화에 방해가 된다. SPLT에서는 기존의 재하시험에서 시간과 비용이 소요되는 부분을, 말뚝의 주면마찰력을 선단부 재하를 위한 반력으로 사용하여 간략화 하였다.⁽³⁾ 또한 우리 나라와 같이 대부분의 말뚝들이 선단지지로 설계되는 경우 선단지지력 확인을 위하여 축소된 선단부를 사용하여 극한 주면마찰력과 극한선단지지력을 활용할 수 있도록 하였다.

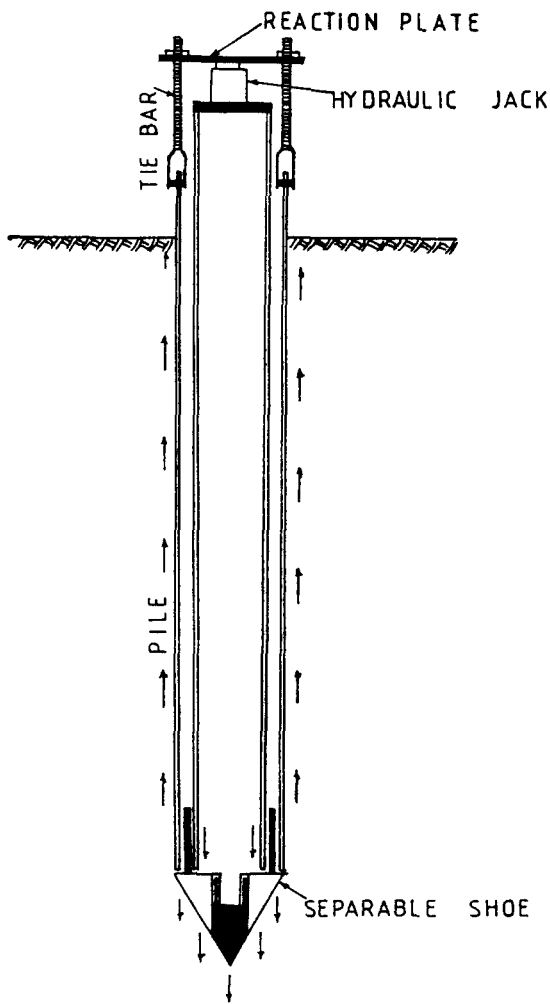


그림 1 SPLT 1단계 시험

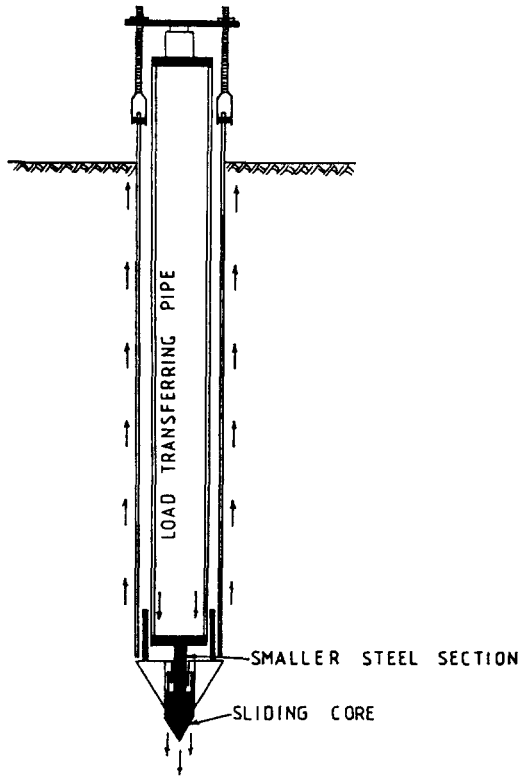


그림 2 SPLT 2단계 시험

SPLT는 시험법이 개발된 이래 전술한 간편성 때문에 여러현장에서 적용되었으며 말뚝의 극한지지력 확인에 효과적이었다. 그러나 대부분의 공사에서 말뚝의 극한지지력을 확인함으로써 더 높은 신뢰도의 설계를 하기 위해서는 SPLT와 재래식 말뚝재하시험의 차이점을 규명하여야 할 필요성이 높아지고 있다.

SPLT가 기존의 방법과 다른 점은, 첫째, SPLT에서는 말뚝의 주면마찰력을 전체선단부 혹은 축소된 선단부 침하를 위한 반력으로 사용하는 바 측정되는 주면마찰력은 말뚝의 인발하중에 대한 저항력이 된다(그림 1). 축방향 압축하중을 받는 대부분의 말뚝에서는 선단부와 말뚝주면부에 모두 압축하중이 작용하게 되며 따라서 압축시의 주면마찰력과 인발시의 값은 다르다.

둘째, 우리나라에서는 거의 대부분의 말뚝기초는 선단지지 조건으로 설계되고 있다. SPLT에

서는 선단부 재하의 반력으로 말뚝의 주변마찰을 이용하며 따라서 극한주면마찰력 이상의 선단부 재하하중은 기대할 수 없는 한계가 있다. 극한선단지지력을 확인하기 위하여 SPLT에서는 축소된 선단부를 사용하여 선단부 일부분적에 대하여 재하시험을 수행하고 있다(그림 2). 따라서 축소된 선단부의 극한선단지지력을 전체선단부에 확대 해석할 수 있는지 여부가 규명되어야 한다.

본 연구에서는 이상의 두가지 문제점을 확인하기 위하여 현장의 실제말뚝에 대하여 SPLT와 재래식 말뚝재하시험을 수행하였다.

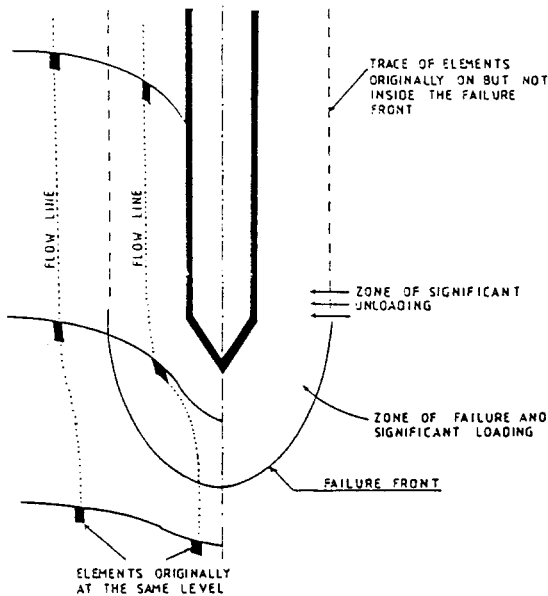


그림 3 말뚝관입으로 발생하는 지반의 변형⁽⁵⁾

2. 압축과 인발 하중 조건에서의 말뚝의 주변마찰력

말뚝이 착공, 압입 또는 항타등의 설치과정을 거치는 동안 말뚝의 주변지반에는 그림 3과 같은 변형이 발생하며 말뚝표면 부근에서는 극심한 교란이 일어나게 된다.⁽¹⁸⁾ 이에 따라 지반의 흠구조에는 상당한 변화가 발생하여 입자의 배열상태, 방향성, 간극비 등이 말뚝설치 이전과

는 상이한 상태가 될 것이다. 축방향 압축하중이 작용하는 대부분의 말뚝기초에서는 말뚝설치 방향과 동일한 방향으로 전단이 일어나게 되며 재래식 말뚝재하시험 과정은 이조건을 만족시킨다.

반면 SPLT에서는 말뚝선단부 재하의 반력으로 주변마찰이 작용하게 되어 말뚝주면부에는 인발하중이 작용하게 되는 조건이 된다. 따라서 말뚝설치과정에서 형성된 흠구조에는 다시 상당한 변화가 있을 것으로 예상된다.

흠구조의 변화는 흠의 전단특성에 상당한 영향을 주는 것으로 보고되고 있으며⁽¹⁶⁾ 이로부터 말뚝표면과 지반간의 마찰력에도 변화가 있을 수 있음을 추측할 수 있게 한다.⁽²⁰⁾ 그러나 이부분에 관해서는 구체적 정량분석이 되지 못하고 있으며 따라서 압축시와 인발시의 주변마찰의 크기를 비교하는데에는 미흡한 실정이다.

단단한 점성토층에 설치된 말뚝에 인발하중이 작용하면 말뚝선단부 하부에 흡인력(suction)이 발생하며 부간극수압이 나타나기 때문에 인발시의 지지력이 증대될 수 있다. 그러나 이러한 현상은 말뚝의 상대관입깊이(l/d)가 5 미만인 극히 얇은 관입인 경우에 해당되며, 그 외의 일반적인 말뚝에서는 그영향을 거의 무시할 수 있다는 연구결과로 미루어 볼 때 SPLT가 적용된 상대적으로 긴 말뚝에의 적용 타당성은 의문시 된다.⁽¹⁵⁾

말뚝의 재질이 상대적으로 유연한(flexible) 경우, 압축시에는 말뚝의 횡방향 팽창변위가 발생하며 이것이 지반의 방사응력(radial stress)을 증가시켜 결과적으로 높은 주변마찰력이 나타나게 된다. 반대로 인장시에는 말뚝의 횡방향 수축과 상대적으로 낮은 주변마찰력이 발생된다. 이러한 영향은 말뚝 인발시의 주변마찰력을 압축시보다 10-20%까지 낮은 값을 갖게 할 수 있다.⁽¹²⁾

그러나 이상의 논의를 입증할 수 있는 현장 시험 결과는 그리 많지 않은 실정이며, 인발시의 주변마찰이 압축시보다 낮은 것으로 보고된 경우에도 압축시험을 한 뒤에 인발시험을 하여 그 결과의 타당성 여부가 의문시 된다.

Dauncey & Woodland는 현장타설 말뚝에 대한 재하시험 결과로부터 말뚝의 주면마찰력 계산을 위한 계수를 도출하여 $f_s = \alpha c_u$ (c_u 는 비배수 점착력) 또는 $f_s = \beta \sigma_v'$ (σ_v' 는 유효수직응력)으로 표시되는 점성토에서의 단위면적당 주면마찰력 산정식을 적용할 때, 압축시에는 $\alpha = 0.44$, $\beta = 1.06$, 인발시에는 $\alpha = 0.31$, $\beta = 0.82$ 로 분석하였으나 시험말뚝의 상이한 콘크리트 타설시점이 원인인 것으로 보아 압축시나 인발시의 차이는 없는 것으로 결론짓고 있다.⁽⁷⁾ Tang 등은 말뚝의 인발시 주면마찰력은 말뚝의 길이에 관계된다고 실험결과를 분석하여 말뚝의 길이가 9m일때는 압축시보다 0.78의 감소계수를, 12m일때는 0.98의 감소계수를 사용할 것을 제안하고 있으나⁽²¹⁾ 동일한 말뚝에서의 재하시험 결과가 아닌바 절대적 비교는 되지 못한다.

Chellis는 마찰 H강 말뚝인 경우 압축시의 75-90%를 제안하고 있으며,⁽⁶⁾ Poulos & Davis도 압축시의 2/3값을 추천하고 있다.⁽¹⁷⁾ 그러나 이와 같은 제안들은 압축과 인발시의 거동에 대한 규명이 되지 못한 상태에서 인발하중 조건에서의 말뚝설계의 안전을 고려한 조치이며 따라서 실제의 값은 말뚝재하 시험으로부터 구하는 것이 바람직하다.

이상의 논의를 종합하여 볼 때 압축하중하에서의 말뚝의 주면마찰력은 인발시보다 큰 것으로 결론지을 수 있으나 이를 입증할 수 있는 연구결과는 극히 희박한 실정이다. 이는 전술한 대부분의 연구결과들이 동일한 말뚝에 대한 비교가 되지 못하거나, 동일말뚝의 경우에는 압축시험이 선행되어 이로 인한 흙구조의 변화가 인발시험시의 주면마찰력이 실제 보다도 낮게 측정될 수 있는 가능성을 배제하지 못하였기 때문이다. 특히 동일한 말뚝에서의 비교에서도 인발시의 주면마찰력이 압축시보다 근소하나 큰 것으로 나타난 결과⁽²³⁾도 보고되어 있어 이러한 문제점들을 해소할 수 있도록 시험계획을 수립하였다.

3. 말뚝직경의 크기가 선단지지력에 미치는 영향

균질한 지반조건하에서 이론적인 말뚝의 선단지지력은 선단부의 상재하중만의 함수로서 단위면적당 극한지지력에 말뚝의 단면적을 곱함으로써 구할 수 있다. 단위면적당 극한선단지지력은 보통 선단부의 유효연직응력과 지지력 계수의 곱으로 계산되며, 균질한 지반조건이므로 지지력 계수는 일정한 값을 갖게되어 결과적으로 유효연직응력에 정비례하게 된다. 말뚝의 관입깊이가 깊어지게 되면 유효연직응력의 값도 직선적으로 증가하게 되고 따라서 단위면적당 극한선단지지력도 직선증가하게 된다.

1950년대말의 Kerisel의 말뚝관입시험 결과는 이론적 말뚝지지력 개념과는 상이하다(그림 4). 첫째 말뚝의 선단지지력은 관입깊이가 어느 정도에 도달할 때까지는 이론해석과 같이 거의 직선적으로 증가하나 일정한 깊이(한계관입 깊이) 이상이 되면 일정한 값(한계값)에 수렴하게 된다. 둘째 말뚝의 직경이 크게됨에 따라 한계값은 직경이 작은 말뚝에 비하여 상대적으로 낮은 값을 갖게 된다. 즉 말뚝의 선단지지력

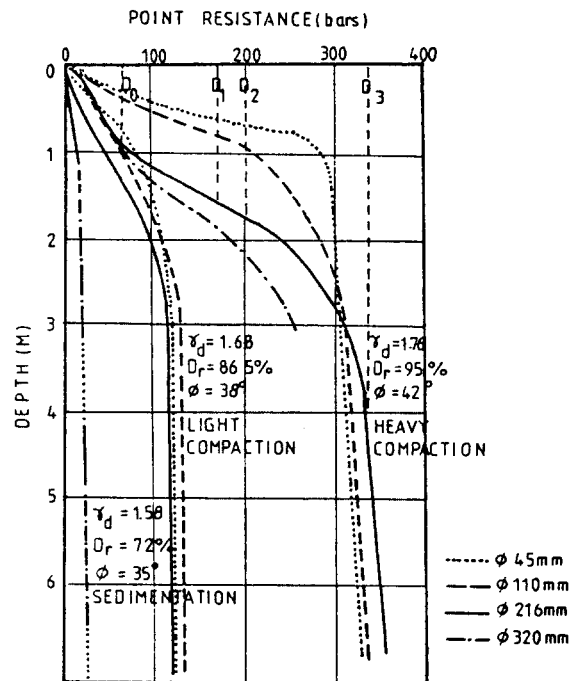


그림 4 관입깊이, 말뚝의 직경, 상대밀도 변화에 따른 말뚝의 선단지지력 변화⁽¹⁴⁾

은 상재하중만의 함수가 아니라 상대관입깊이(관입깊이÷말뚝직경)와 말뚝의 직경에도 영향을 받는다는 견해이다.⁽¹³⁾

한계관입깊이의 존재는 그후 Vesic에 의하여 확인되었으며⁽²²⁾ 1970년대 이후 수행된 수많은 캘리브레이션 챔버(calibration chamber)시험에서도 확인되었으며, Meyerhof의 지지력 공식에도 도입되어 실무설계에까지 적용되고 있다.⁽¹⁴⁾ 한계 관입깊이가 존재하는 이유는 아직까지 분명하게 밝혀지지는 못하였으나 다음과 같은 두가지 해석이 가능하다.

첫째 말뚝이 관입됨에 따라 말뚝주위의 지반 응력이 아칭(arching) 효과때문에 일정한 값 이상으로는 증가하지 못하게 되어 결과적으로 선단지지력이 한계값에 도달하게 된다. 이와는 다른 해석은 말뚝의 관입 또는 축방향 압축하중이 재하되었을때 말뚝선단부 아래쪽 지반내에 발생하는 지반변형형태(mode of deformation)에 의하여 설명할 수 있다. 말뚝기초가 지지층내에 관입되면 관입깊이에 따라 변형형

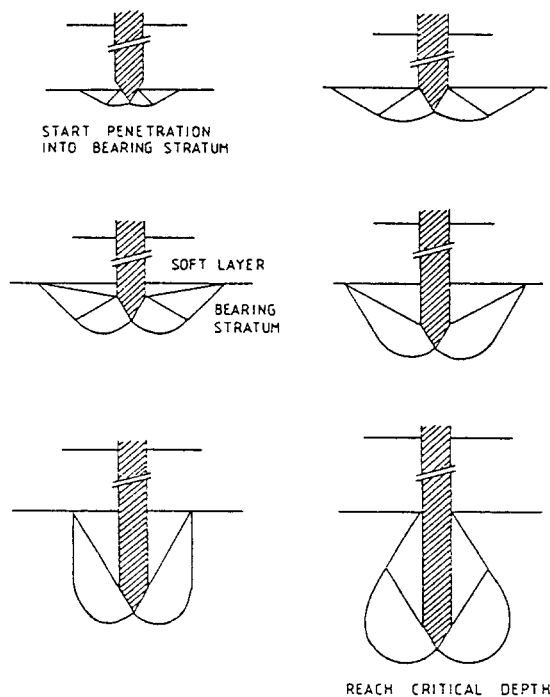


그림 5 지지층내의 관입깊이 증가에 따른 지반변형 형태의 변화⁽⁹⁾

태가 변화하게 되며 한계관입깊이에 도달하면 완전한 변형형태가 형성된다(그림 5). 완전한 변형형태형성이전의 얇은 관입깊이에서는 낮은 선단지지력이 나타나며 완전한 변형형태가 되면 선단지지력이 최대로 발휘된다.⁽⁸⁾

변형형태는 말뚝 직경에 비례하며 한계관입깊이도 말뚝직경과 정비례하는 것으로 알려져 있다. 따라서 직경이 작은 말뚝은 절대관입깊이가 얇은 경우에도 한계선단지지력에 도달하게 되는 반면 직경이 큰 말뚝은 한계선단지지력을 얻기 위해서는 지지층내에서의 깊은 관입이 필요하다.

이상을 실제 시공과 관련하여 보면 말뚝직경에 따라 선단지지력이 상이한, 치수효과현상을 설명할 수 있다. 말뚝의 재질강도, 항타장비 또는 착공장비의 시공능력에 따라 상이하나, 지지층내의 말뚝관입깊이는 제한되는 것이 보통이다. 지지층내의 근입깊이는 말뚝직경에 크게 좌우되지 않으며 따라서 작경이 작은 말뚝이나 원추형 관입체에서는 한계관입깊이 이상의 시공이 가능한 반면 직경이 커질수록 상대관입깊이는 작아지게 된다. 결과적으로 큰 직경의 말뚝에서는 상대관입깊이가 작게되고, 이에 상응하는 변형형태만이 형성되어 낮은 선단지지력을 갖게 된다.⁽¹⁾⁽¹⁰⁾

그림 6은 지경 36mm의 정적관입체와 직경 360mm의 말뚝의 선단지지력이 지지층내의 관입깊이에 따라 변화하는 것을 보여주고 있다. 그림 7에서는 직경 36mm의 정적관입저항과 직경 150mm의 말뚝 선단지지력을 비교하고 있는데, 얇은 지지층에서 정적관입체는 저항이 급격히 증가하는데 비하여 말뚝에서는 이러한 선단지지력 증가가 나타나지 않고 있어 위의 해석을 뒷받침해 준다.⁽¹⁹⁾

여기까지의 논의는 한계관입깊이 현상의 발생과 치수효과에 대한 설명 뿐만 아니라 말뚝 선단지지력 해석방법의 비교에서도 채택되어 네덜란드나 벨기에 같은 나라에서는 그림 5에 나타난 Meyerhof식의 변형형태를 참변형형태(true mode of deformation)로 인정하는 근거로 사용되기도 한다.

그러나 관입깊이와 선단지지력간의 관계는 그림 4 또는 그림 6과 같은 관계외에도 이론해석과 마찬가지로 직선증가 관계⁽⁹⁾ 또는 그림 4와는 정반대로 관입깊이가 커질수록 선단지지력의 증가율이 증가하는 경우⁽¹¹⁾까지도 보고되어 명백한 해석은 사실상 불가능한 것이 현실이다. 다만 위와 같은 현상은 구형공동확장이론을 적용한 말뚝지지력 해석으로도 가능하며, 이경우 지반의 전단특성뿐만 아니라 압축특성, 체적변형특성 까지도 고려되므로 여러가지 형태의 지지력 현상을 설명할 수도 있을 것으로 기대된다.

본연구에서는 변형형태 또는 한계관입깊이 개념의 근본적 규명 보다는 실제 말뚝에서 가시적으로 나타날 수 있는 치수효과의 확인인바

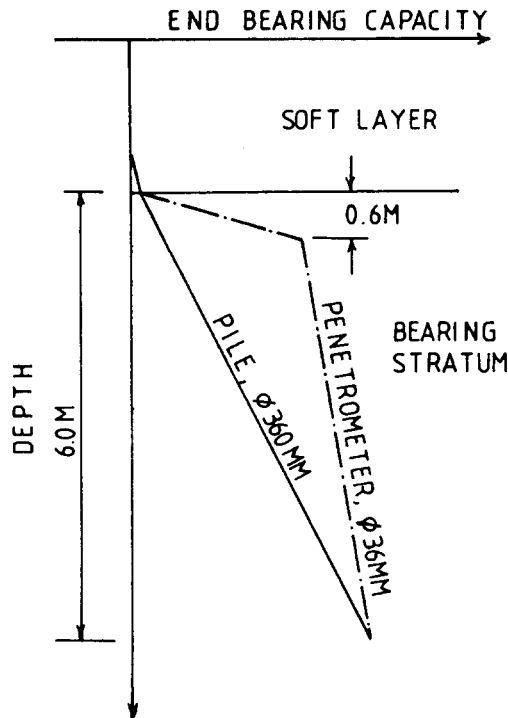


그림 6 직경 36mm의 정적관입체와 직경 360mm의 말뚝의 지지층내 관입깊이 증가에 따른 선단지지력 변화⁽¹⁹⁾

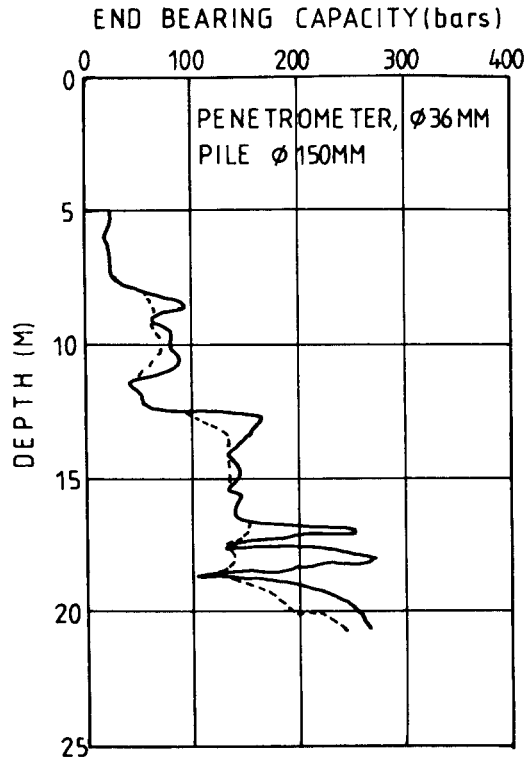


그림 7 직경 36mm의 정적관입체와 직경 150mm의 말뚝의 관입깊이에 따른 선단지지력 변화⁽¹⁹⁾

이 목적에 부합할 수 있는 시험을 수행하였다.

4. 재하시험

이상의 문제점을 실물말뚝에서 확인하기 위하여 SPLT와 재래식 말뚝시험이 계획되었다. 연구가 수행된 곳은 일산 신도시 아파트가 건설되는 현장으로, 지반조건은 그림 8에 보인 것처럼 실트질 모래층 하부에 풍화토, 풍화암이 존재하는 지반을 대상으로 하였다. 깊이에 따른 지반조건 변화는 시험말뚝과 반력용 말뚝의 항타기록을 분석하여 판정하였는데, 실트질 모래 표층에서는 낮은 지반반력으로 함마가 폭발되지 못하는 등 본격적인 항타가 되지 못하여 풍화토층과의 구분에 큰 문제는 없었다.

시험에 사용된 말뚝은 직경 406mm 두께 9mm의 강관말뚝으로, 시험말뚝은 SPLT선단부(core의 직경 = 120mm)를 설치한 폐단말뚝으로 시공되었으며 4개의 반력말뚝은 개단상태로 향타되었다.

시험말뚝 부근의 위치에서 실시한 SPLT에 의하면 말뚝의 주면마찰력은 40ton, 선단지지력은 200ton 이상이 예상되어, 4개의 반력말뚝만으로는 전체선단부를 파괴할 수 없을 것으로 판단, 시험말뚝은 지지층(풍화암층)까지 향타하지 않고 풍화토층 내에서 향타를 중지하기로 하였다. 그림 8의 지층구분에 의하면 시험말뚝은 풍화토층내에 3m관입되어 직경대비 7.5의 상대관입깊이를 갖는다. 이 값은 일반적으로 알려져 있는 한계관입깊이 10보다는 작은값이므로 치수효과의 영향이 나타날 것을 기대된다.

향타가 완료된후 재하시험을 단계별로 설명하면,

제1단계 : SPLT 1단계 시험(전체선단부재하)으로 인발하중에 대한 주면마찰력 측정

제2단계 : SPLT 2단계 시험(축소된 선단부재하)으로 선단지지력 측정

제3단계 : 반력말뚝 두부에 반력빔을 연결한 후 내부강관을 사용하여 하중이 전체 선단부에만 전달되도록 하여 선단지지력 측정(사진 1)

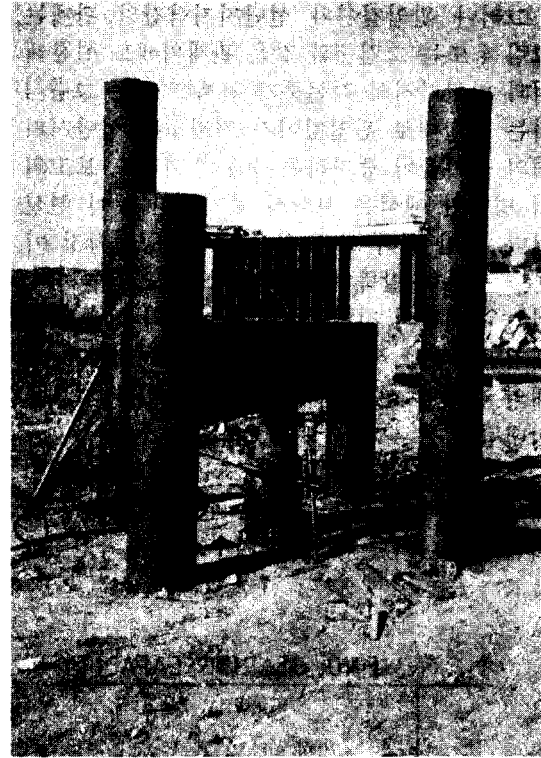


사진 1 재하시험 전경

제4단계 : 제3단계 시험시 선단부를 충분히 침하시키면 말뚝벽면 하부에 공간이 형성되게 된다. 이때 말뚝두부에 반력빔을 통하여 압축하중을 재하하면 주면마찰력을 측정할 수 있게 된다.

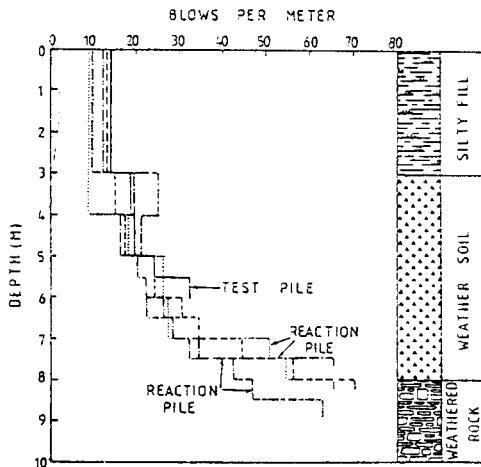


그림 8 지반조건 및 향타기록

5. 시험결과 및 토의

4단계의 시험과정중 제1단계와 제4단계 시험의 결과를 비교하면 인발시와 압축시의 주면마찰력의 크기를 알 수 있다. 그림 9에는 두가지 하중조건에서의 하중-침하량관계를 함께 표시하였다. 인발하중조건(SPLT의 경우)에서의 측정값은 말뚝의 자중을 공제한 결과이며 그림에서 나타난 것과 같이 주면마찰력의 침두치(peak skin friction)가 발생하지 않으며 말뚝직경대비 약 1%의 침하(실제로는 인발)발생이후에는 일정한 값(27.5 ton)에 도달하며 그 이상의 변위가 발생하여도 주면마찰력의 변화는 없

는 것으로 나타난다.

압축하중하에서 말뚝주면마찰력에 대한 하중-침하량 곡선은 비교적 뚜렷한 침두치(37.4 ton)가 나타나며 변위가 증가함에 따라 잔류치(33.2 ton)에 도달한다. 잔류치 도달에 필요한 침하량은 말뚝직경대비 약 1.2%로 나타난다.

비교시험결과로부터 인발하중 조건에서의 말뚝의 주면마찰력은 잔류치를 기준으로하여 압축하중시보다 낮은 0.83 정도의 값을 갖는다. 본 비교시험은 인발시험을 시행한 후 압축시험을 한 결과이므로, 인발시의 주면마찰력이 압축시보다 낮은 이유는 인발시험을 압축시험 이후에 한 이유일 것이라는 기존의 해석과는 상이하여, 인발시 주면마찰력이 압축시보다 낮다는 분명한 증거를 제시해 주고 있다.

본 시험의 결과로 나타난 인발시 주면마찰력과 압축시 주면마찰력의 비율 0.83은 각종 문헌에서 제시하고 있는 범위와 일치하나, 말뚝길이의 영향이나 말뚝의 유연성, 지반의 특성이 상이한 조건에서의 시험결과와 비교하여야 할 필요가 있을 것으로 사료된다. 현재로서는, 본 비교시험결과에서 알 수 있듯이, SPLT로부터 측정된 주면마찰력을 압축하중을 받는 말뚝의 설계에 사용하는 것이 안전측이라는 정도의 실무적인 결론만을 도출할 수 있겠다.

말뚝직경의 크기가 선단지지력에 미치는 영향은 제 2단계 시험과 제 3단계 시험결과를 비교하여 알 수 있다. 제 2단계 시험은 직경 120mm인 축소된 선단부에 대한 SPLT이며 그림 10에 나타난 것과 같이 말뚝직경대비 약 10%의 침하량에서 6.2ton의 극한값을 갖는다. 그림 11은 전체선단부(직경 406mm)에 대한 시험결과이며 말뚝직경대비 약 10%의 침하량에서 51.9ton의 극한값을 갖는 것으로 나타난다. 그림 11에는 제 1단계 시험결과도 함께 도시하였으나, 주면마찰력의 파괴로 시험이 중단되었음을 표시해 주고 있다.

그림 12에는 두 가지 시험결과를 함께 도시하였다. 말뚝직경대비 침하량과 단위면적당의 선단지지력으로 자료를 수정한 결과이며 직경의 크기에 따라 선단지지력이 차이가 나는 것

을 보여주고 있다. 두가지 시험결과를 비교하면 말뚝직경이 406mm일때의 선단지지력은 120mm 직경일때의 73%인 것으로 나타난다.

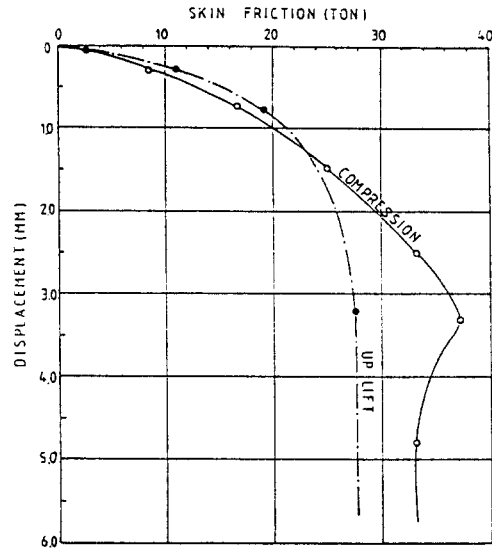


그림 9 인발, 압축 주면마찰 시험결과 비교

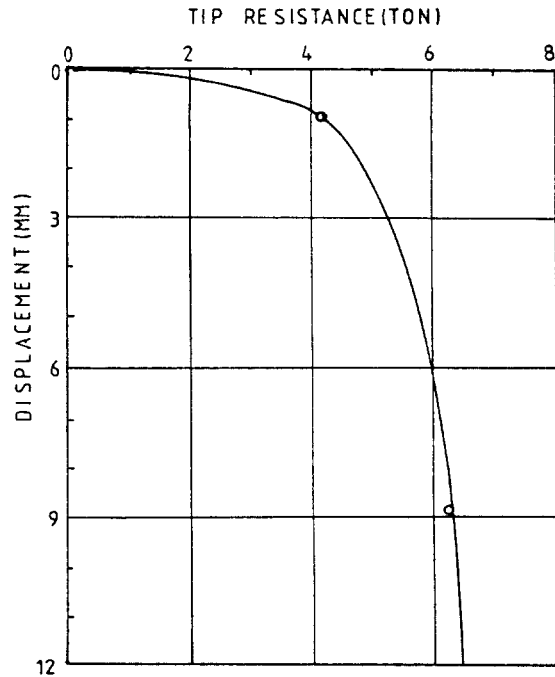


그림 10 축소선단부의 선단저항 시험결과

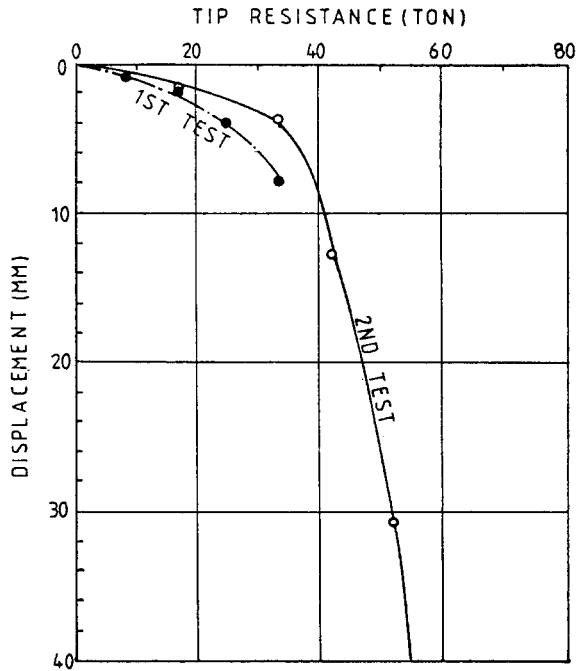


그림 11 전체선단부의 선단저항 시험결과

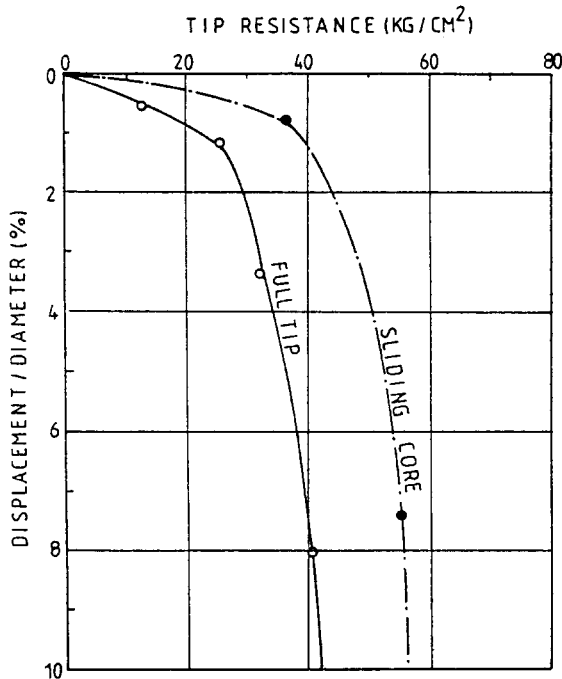


그림 12 전체선단부와 축소선단부의 선단저항 시험 결과 비교

이와 같은 결과는 앞에서 설명한 바와 같이, 축소된 선단부의 경우에는 상대관입깊이가 25로 한계관입깊이를 초과하여 한계지지력에 도달한 반면, 전체선단부의 상대관입깊이는 7.5에 불과하여 한계관입깊이 미만이 된다. 여기서 축소다면 선단지지력을 한계깊이 $L/D = 10$ 에 대하여 보정하면, $\delta/D = 10\%$ 일 때 $56 \times 7.5/10 = 40 \text{ kg/cm}^2$ 이 되어 전다면 선단지지력과 비슷한 결과를 얻는다. 따라서 선단지지력도 한계값보다 낮은 값을 갖게 된 것으로 해석할 수 있다. 본 시험결과로부터 한계관입깊이를 역산하면 약 10.3이 되어 일반적으로 통용되는 10과 근사함을 알 수 있다. 그러므로 SPLT선단부 면적의 치수효과는 관입깊이를 고려하여 한계관입깊이 $L/D = 10$ 에 대하여 보정을 하여 실제선단지지력으로 사용하는 것이 좋을 것이다.

그러나 본시험 결과를 실무에 적용하기 위해서는 말뚝이 지지층내에 관입되었을 때의 치수효과의 영향이 규명되어야 할 것으로 사료된다. 그림 5와 같은 변형형태에 입각한 치수효과 설명은 균질한 토사지반을 대상으로 한 것이며, 일반적으로 실무에서 나타나는 지지층의 특성은 깊이가 증가함에 따라 지반의 물성이 양호해 지는 경우에는 앞서서의 설명과 정반대의 치수효과가 나타날 수 있기 때문이다. 이부분에 대해서는 현재 구체적인 연구계획이 추진되고 있으며, 그러한 연구결과가 얻어지게 되기 이전에는 참고문헌(3)에서 제시한 관계식을 사용하여도 말뚝의 안전에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

6. 결 론

SPLT의 실무적용을 위하여 하중작용 방향의 차이에 따른 주면마찰력과 말뚝직경의 크기 차이에 따른 선단지지력을 실물말뚝재하시험을 통하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 인발하중하에서의 말뚝의 주면마찰력은 압축하중시보다 낮게 나타난다. 따라서 SPLT결과를 압축하중을 받는 말뚝설계에

적용하는 것은 안전측이 된다.

2. 말뚝의 선단지지력은 균질한 지반내에 일정한 깊이 이상의 관입이 되지 못하면 한계값보다 낮은값이 나타나며, 이것이 치수효과로 나타나게 된다. 치수효과를 말뚝지지력에 고려하기 위해서는 항타기록등 지반조건에 따라 일반적으로 통용되는 한계관입깊이 10을 기준으로하여 추정할 수 있다.

참 고 문 헌

1. 백세환, 사상호, 이장덕, 이명환(1990), "사질토 지반에서의 말뚝관입으로 인한 흙의 변형에 관한 연구", 대한토질공학회지 제6권 제3호, pp. 31~40.
2. 이명환(1991), "표준관입시험 결과의 표준화", 대한토질공학회지 제7권 제1호, pp.69~85.
3. 이명환, 이원제, 이장덕, 백세환, 김대영, 윤성진(1990), "간편한 말뚝 재하시험(SPLT)의 개요와 적용", 대한토질공학회지 제6권 제4호, pp.53~64.
4. 이명환, 이장덕(1989), "말뚝기초의 설계 및 시공관리 개선방안", 한국건설기술연구원 보고서 GE-113, pp.277
5. Bermingham, P. and Janes, M.(1989), "An innovative approach to load testing of high capacity piles," Proceedings, International Conference on Piling and Deep Foundation, London, A.A. Balkema, pp.409~41.
6. Chellis, R.D.(1961), "Pile Foundations," Mc Graw Hill Book Co., pp.111.
7. Dauncey, P.C. and Woodland, A.R.(1983), "Bored cast in-situ piled foundations in Keuper Marl for the Birmingham International Arena," Proceedings, Piling and Ground Treatment, ICE, London, pp. 139~146.
8. De Beer, E.E.(1963), "The scale effect in the transposition of the results of deep sounding tests on the ultimate bearing capacity of piles and caisson foundations," Geotechnique Vol.13, No. 1, pp.39~75.
9. De Beer, E.E.(1974), "General discussion," Proceedings, 1st European Symposium on Penetration Testing, Stockholm, Vol.2.1, pp. 119~128.
10. De Beer, E.E., Lousberg, E., De Jonghe, A., Carpentier, R. and Wallays, M.(1979), "Analysis of the results of loading tests performed on displacement piles of different types and sizes penetrating at a relatively small depth into a very dense sand layer," Proceedings, Recent Developments in the Design and Construction of Piles, ICE. London, pp.199~211.
11. Durgunoglu, H.T.(1972), "Static penetration resistance of soils," PhD Thesis, University of California at Berkeley.
12. Fleming, W.G.K., Weltmant, A.J., Randolph, M.F. and Elson, W.K.(1985), "Piling Engineering," John Wiley and Sons, pp.102~103.
13. Kerisel, J.(1958), "La mecanique des sols, recherches et investigations recentes," Rev. Trav., Paries, pp.874~878.
14. Meyerhof, G.G.(1976), "Bearing capacity and Settlement of pile foundations," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 102, GT3, pp.58~74.
15. Meyerhof, G.G.and Adams, J.I. (1968), "The ultimat uplift capacity of foundations," Canadian Geotechnical Journal, Vol.5, No.1, pp.225~244.
16. Miura, S., Toki,S. and Tanizawa, F.(1984), "Cone penetration characteristics and its correlation to static and cyclic deformation-strength behavior of anisotropic sand," Soils and Foundation, Vol.24, No.2, pp. 58~74.
17. Poulos, H.G. and Davis, E.H.(1980), "Pile foundation analysis and design," John Wiley and Sons, pp.45~48.
18. Randolph, M.F.and Wroth, C.P.(1982), "Recent developments in understanding the axial capacity of piles in clay," Ground Engineering, Vol. 15, No.7, pp.17~32.
19. Sanglerat, G.(1972), "The penetrometer and soil exploration," Elsevier, pp.159~175.
20. St John, H.D., Randolph, M.F., McAnoy, R. P. and Gallagher,K.A.(1983), "Design of piles for tethered platforms," Proceedings, Developments in the design and construc-

- tion of offshore structures, ICE, pp.61~72.
21. Tang, N.C., Shen, H.R. and Liu, S.G. (1983), "Static uplift capacity of bored piles," Proceedings, Piling and Ground Treatment, ICE, London, pp.197~202.
22. Vesic, A.S. (1963), "Bearing capacity of deep foundations in sand," Highway Research Record 39, Highway Research Board, National Research Council, Washington D.C., pp.112~153.
23. Vesic, A.S. (1970), "Tests on instrumented piles, Ogeechee River site" Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, Vol, 96, SM2, pp.561~584.

(접수일자 1991. 7. 15)