

간편한 말뚝 재하시험(SPLT)의 개요와 적용

Simple Pile Loading Test(SPLT) Technique, Principle and Application

이 명 환* ¹	이 원 제* ¹
Lee, Myung-Whan	Lee, Won-Je
이 장 덕* ²	백 세 환* ³
Yi, Chang-Tok	Paik, Se-Whan
김 대 영* ⁴	윤 성 진* ⁴
Kim, Dae-Young	Yoon, Sung-Jin

Abstract

There have been numerous methods proposed to predict the pile bearing capacity, but except for the prediction by the pile loading test, not one method is suitable to give a reliable result. Even so, the pile loading test has seldom been performed due to the time and money consuming procedures. In this research, a new way of carrying out the pile loading test, "Simple Pile Loading Test(SPLT)" is introduced. In SPLT technique, the test pile is designed to have a separable shoe with a reduced sized sliding core, so that the skin friction acts as the reaction force to cause the pile tip settlement. Therefore the preparation, installation, loading and unloading of the loading frames and the kentledge can be eliminated.

요 지

말뚝의 지지력을 예측키 위한 수많은 방안들이 제안되어 왔으나, 말뚝 재하시험에 의하는 방법 외에는 신뢰도가 낮은 실정이다. 그럼에도 불구하고 말뚝 재하시험 수행에는 많은 비용과 시간이 소요되어 극히 제한된 경우에만 적용되고 있다. 본 연구에서는 새로운 말뚝재하시험, "간편한 말뚝 재하시험(SPLT)방법"을 소개한다. SPLT에서는 분리할 수 있는 선단부와 축소된 선단부가 시험말뚝에 설계되어, 주변마찰력이 말뚝 선단부의 침하를 야기시키는 반력으로 작용하게 된다. 이에 따라 하중재하장치 또는 하중의 제작, 설치 및 제거 과정이 생략될 수 있다.

*¹ 정희원, 한국건설기술연구원

*² University of Alberta 박사과정

*³ 정희원, 한국 과학기술원 박사과정

*⁴ 삼성종합건설(주) 기술연구소

1. 서 론

말뚝기초를 설계하기 위해서는 적절한 지지력 예측이 필수적으로 요구된다. 말뚝기초의 규격과 소요량은 말뚝 지지력 계산에 의하는 바, 지지력 예측의 신뢰도에 따라 설계의 안전성 및 경제성이 크게 좌우되기 때문이다.

말뚝 지지력의 예측은 지금까지 제안된 수많은 방법들이 있으나 각종 연구 결과들에 의하면 말뚝 재하시험에 의하는 방법외에는 그 신뢰도가 극히 낮은 실정이다.

최근의 토질, 기초 공학 부분의 발전으로 말뚝의 지지력에 대한 이해도가 향상된 것은 사실이다. 특히 실험실내의 정적관입시험 연구는 말뚝 지지력에 영향을 미치는 제반 요소들을 규명하는데 큰 보탬이 되었다.

이들 연구결과들에 의하면 말뚝의 선단지지력은 토사의 전단특성⁽²⁰⁾, 압축특성⁽³¹⁾, 관입깊이⁽¹⁸⁾, 응력조건⁽²⁸⁾, 응력수준⁽⁵⁾, 응력이력⁽⁴⁾, 과압밀비⁽²⁹⁾, 흡입자의 강도⁽²²⁾, 지반의 시멘테이션⁽²⁷⁾, 입자배열상태⁽²³⁾ 등 지반조건과 말뚝의 형상, 크기, 재질, 설치방법 등 말뚝의 특성, 말뚝 설치후 시간경과, 말뚝간 거리 등 다양한 요소들에 영향을 받는 것으로 알려지고 있다. 정적관입시의 국부 주면마찰 측정과 관입으로 인한 토압 변화 측정 결과로 미루어 볼 때 말뚝의 주면마찰력 또한 연직응력과 마찰계수의 단순한 결과라기 보다는 지반의 조건, 마찰 발생위치 등이 복합적으로 작용한 현상이며 따라서 그 예측 또한 불확실한 것이 현실이다.^(2X9X15X24)

각종 연구결과는 종래에 비하여 상대적으로 높은 수준까지 말뚝의 지지력을 이해할 수 있도록 하여준 반면 실무 기술자들에게는 그 불확실성이 상대적으로 높아지게되어 설계수준의 향상은 되지 못하고 있는 실정이다. 이는 현실적으로 이들 다양한 영향요소들을 모두 고려한 말뚝 지지력 해석이 불가능함에도 그 원인을 찾을 수 있겠으나 자연상태에 존재하는 지반의 가변성을 이들 다양한 영향요소들과 연관하여 고려할 수 없는 시간적, 경제적 한계에 큰 원인이 있다 할 수 있다.

여러가지 예측방법에 의한 지지력과 말뚝 재하시험과의 비교연구들에 의하면 네덜란드 및 서유럽에서 적용되는 정적관입시험결과에 의하는 방법⁽¹⁴⁾이 가장 우수한 것으로 보고되고 있으나, 이 경우에도 상당한 오차는 배제할 수 없는 것으로 나타나고 있다.^(6X12) 말뚝 지지력과 관련한 기술수준은 미국 토목학회가 주관한 말뚝 지지력의 예측과 실제 비교연구 결과에서도 잘 알 수 있다.⁽²⁶⁾ 최신의 지반조사 기법을 모두 동원하여 지반자료를 입수하고 그 결과를 사계의 최고 권위 기술자, 학자들이 예측한 결과는 실제와 큰 차이가 나타나고 있어 현재의 기술수준의 한계를 보여주고 있다.

이상에서 알아본 것과 같이 말뚝지지력 예측의 불확실성은 현재의 기술수준으로는 극복할 수 없는 것으로 사료되며 따라서 2.5 내지 3.0의 비교적 높은 값의 안전율 적용이 불가피하다.

결국 말뚝지지력 예측의 신뢰도를 높여 보다 경제적인 설계를 할 수 있게 하기 위해서는 말뚝 재하시험을 활성화하는 방법밖에 없다는 결론을 얻게 된다. 말뚝 재하시험을 수행하면 지지력에 대한 신뢰도를 높일 수 있고 따라서 설계에 적용하는 안전율을 2.0 또는 1.8 정도까지 낮출 수 있게 된다.⁽¹⁰⁾

그러나 말뚝재하시험을 수행하기 위해서는 하중재하장치, 하중의 제작, 설치, 해체 등의 과정이 필요하며 여기에 상당한 시간과 비용이 소요되는 문제가 제기된다. 즉 실무에서 보통 적용되는 2.5 내지 3.0의 안전율을 재하시험 결과에 따라 2.0 또는 1.8로 낮춤으로써 얻을 수 있는 이익에 비하여 재하시험 수행에 필요한 시간과 경비의 지출이 상대적으로 높게되어 활성화를 촉진할 수 없도록 하고 있다.

본 연구에서는 이와같은 종래의 말뚝재하시험의 문제점을 해결할 수 있는 방안을 개발하여 실제 현장에 적용하였다. 간편한 말뚝재하시험(SPLT, Simple Pile Loading Test)에서는 말뚝의 주면마찰을 선단부 재하 하중으로 사용함에 따라 시간과 경비가 소요되는 하중재하장치, 하중의 제작, 설치, 제거 과정을 생략할 수 있다. 또한 선단지지력과 주면마찰력을 분리측정하여 부분안전율(partial factor of safety)개념을

적용할 수 있게 됨에 따라 경제적 설계를 가능케 하여 줄 것으로 기대된다.

2. SPLT의 원리와 시험방법

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 하며 이에 소요되는 반력은 말뚝의 주변마찰을 이용한다. 따라서 시간과 경비가

소요되는 재하장치와 하중이 불필요하게 되어 재하시험을 간편하게 수행할 수 있다.

그림 1은 SPLT의 기본 개념을 도시하여 주고 있다. 그림에서 보는 것과 같은 분리할 수 있는 선단부를 공장에서 제작하여 현장에서 조립할 수 있도록 한다. 현장에서의 간단한 조립과정 후 항타가 완료되면 말뚝내부에 하중전달을 위한 강관을 설치한다. 하중전달을 위한 강관의 상부에는 철판, 유압재하장치, load cell 및 반력용 철판을 설치하고 말뚝두부와는 강봉으로 연결하여 말뚝 주변마찰이 선단부 침하의 반력으로 작용하게 한다.

조립이 완료된 후 유압재하장치를 가동하면 하중전달 강관을 통하여 선단부에 하중이 전달되며 동시에 상부의 반력강관을 경유 강봉을 통하여 같은 양의 하중이 말뚝 주변부에 작용하게 된다. 하중재하는 설계하중의 1/5을 단계로 하여

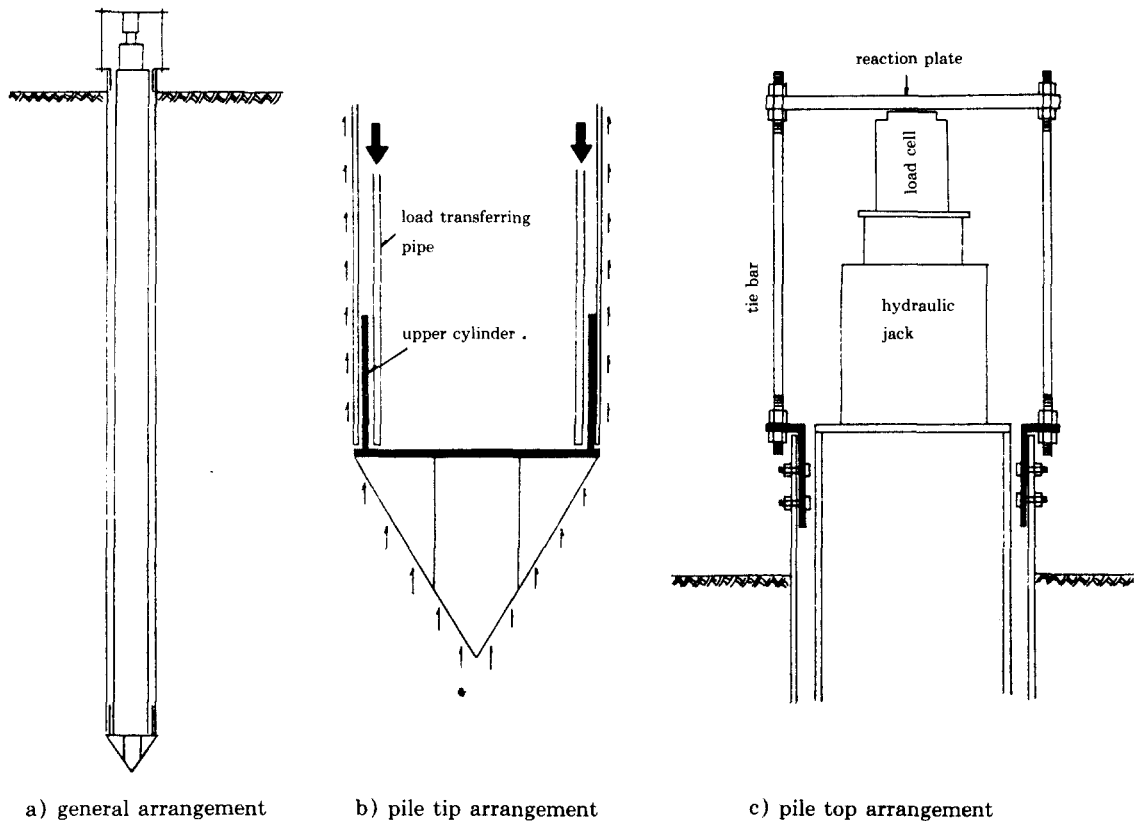


그림 1 SPLT with separable pile shoe

증가시키며 각 하중단계에서의 침하속도가 소정의 기준치 미만이면 다음 단계 하중을 재하한다. 이때 선단부에 연결된 강관 및 말뚝주면부에 각각 2개의 다이얼 게이지를 부착하여 침하량을 측정, 하중-침하량 관계를 얻을 수 있다.

재하시험 결과는 그림 2에 나타나고 있는 것처럼 선단저항과 주면마찰 각각에 대한 하중-침하량 곡선으로 표시되며 그 결과로부터 전체지력에 대한 하중-침하량 관계를 구할 수 있다.

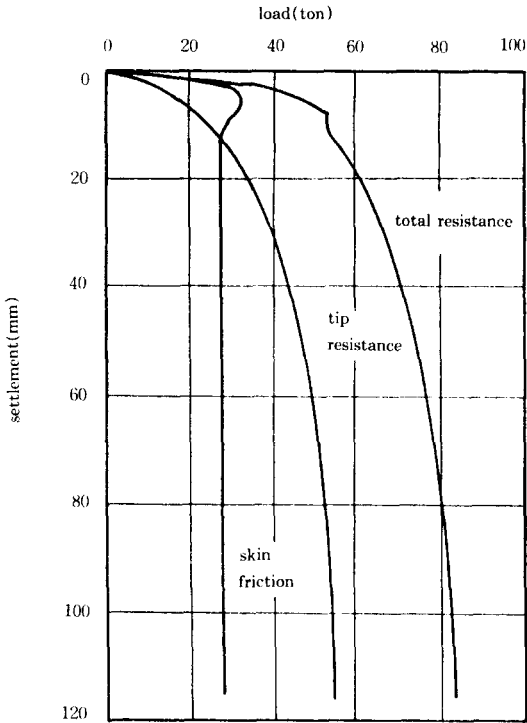


그림 2 Typical results of pile load test

이상은 SPLT의 기본원리이며 실제로 재하시험을 할 경우에는, 그림 2에서 보이고 있는 선단저항과 주면마찰 두가지의 결정은 사실상 불가능하다. 우리나라에서의 대부분의 말뚝기초는 길이가 비교적 길지 않고 또 선단지지 말뚝으로 설계되는바, 주면마찰에 비하여 상대적으로 선단저항의 값이 큰 것이 보통이다. 이 경우 하중재하로 인하여 주면마찰부의 파괴상태에는 도달할 수 있으나 선단저항은 파괴하중까지 재하할 수 없게 되어 그 결정이 불가능하다.

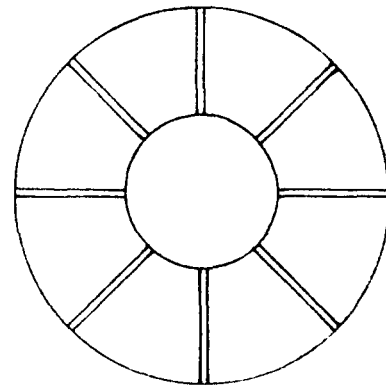
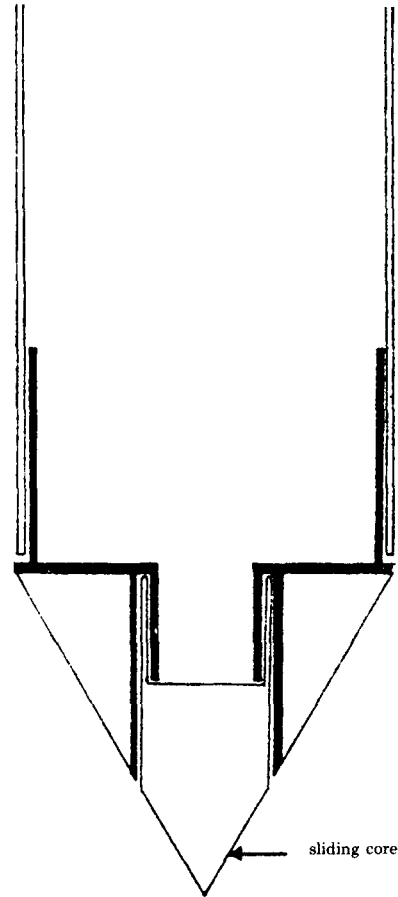


그림 3 Separable pile shoe with reduced sized sliding core

본 논문에서 제안한 방법과 유사한 재하시험 방법을 제안한 Osterberg는 이 문제를 말뚝두부에 건설중장비의 사하중을 추가하거나 인근말뚝에 저항보를 연결함으로써 해결하였다.²⁰⁾ 본 연구에서도 인근 말뚝에 저항보 연결방법을 적용하였으나 이 경우 당초에 의도하였던 재하시험의 간편성이 크게 저하되어 이를 해결할 수 있는 방안이 개발되었다.

선단저항이 주면마찰보다 큰 대부분의 경우에는 분리할 수 있는 선단부 내에 그림 3에 보이는 것과 같은 축소된 선단부를 설치하여 시험을 수행한다. 축소된 선단부의 전체 선단부에 대한 면적비율은 말뚝의 길이, 지반조건에 따라 상이하나 1/4 또는 1/9의 규격을 사용할 수 있다.

시험말뚝의 제작, 항타, 조립과정은 기본적인 SPLT와 동일하나 이 경우에는 시험을 2단계로 나누어 수행한다. 시험장치의 조립이 완료된

후 제1단계시험은 기본 시험방법과 동일하다. 유압재하 장치로부터의 하중은 전체 선단부와 주면에 전달되고 선단저항의 값이 크기 때문에 주면마찰 부분의 파괴만이 발생한다(그림 4). 시험 결과는 따라서 이중 주면마찰에 대한 하중-침하량 곡선만을 얻을 수 있다.

그림 2에서 나타나고 있는 것과 같이 극한 및 잔류 주면마찰을 얻은후, 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 되어있어 전체 주면마찰로부터의 반력은 축소된 선단부에만 전달된다(그림 5). 시험결과로부터는 극한 선단지지력만을 구할 수 있어 제1단계 시험결과

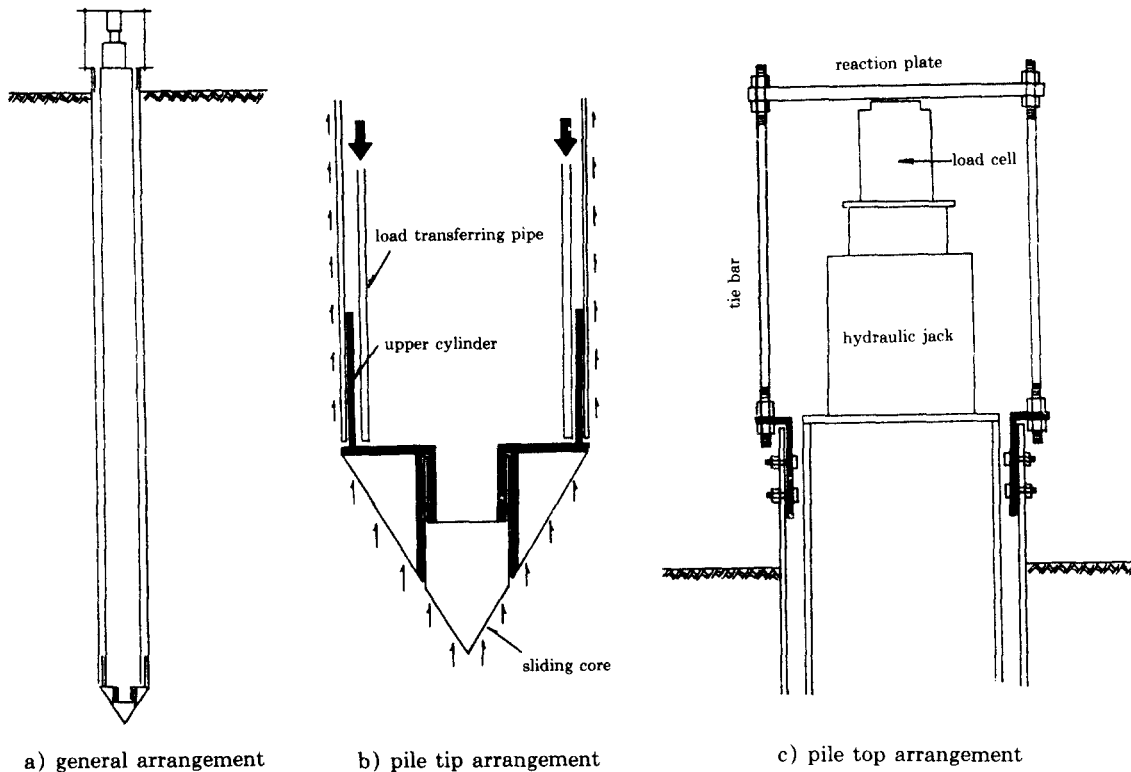


그림 4 First stage test arrangement sliding core tie bar

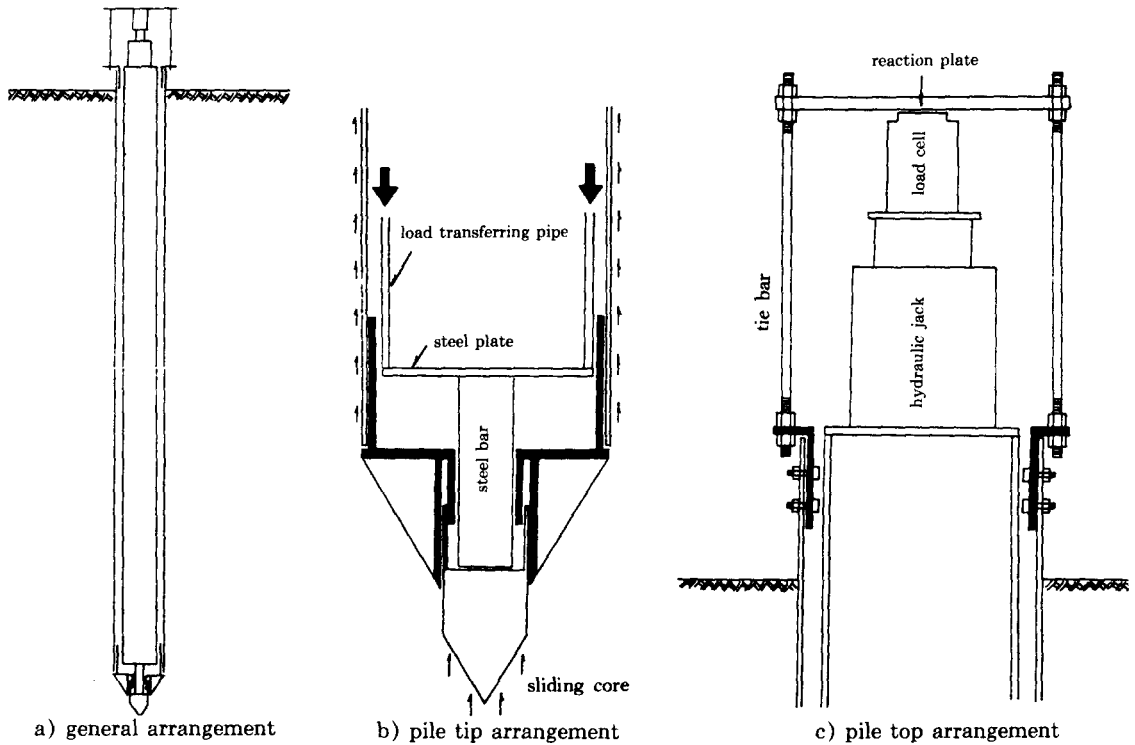


그림 5 Second stage test arrangement

와 함께 해석하여 전체 지지력을 구할 수 있다.

3. SPLT의 활용

간편한 말뚝재하시험은 원래 목적인 말뚝지지력 확인외에 선단지지력과 주변마찰을 분리측정함으로써 부분안전율 적용이 가능하며 말뚝설계의 경제성을 크게 향상시킬 수 있다.

중래의 말뚝재하시험 결과는 주변마찰 측정을 위하여 별도의 계측장치(telltale)를 사용하지 않는 한 그림 2의 전체 지지력에 대한 하중-침하량 관계만을 얻을 수 있다. 주변마찰 측정을 위하여 telltale을 사용할 경우에도 항타도중 파손이 쉽게 발생하여 적용에 어려움이 많은 실정이다. SPLT에서는 별도의 계측장치를 설치하지 않고도 선단저항과 주변마찰을 분리 측정할 수 있다.

부분안전율 적용을 위하여 그림 2의 하중-침하량 관계를 분석하면 전체 지지력에 있어서는 그 관계가 완만하여 극한 지지력 결정에 별도의

가정이 요구된다. 극한 지지력 결정에는 많은 제안식들이 있으며 각 제안식들 간에도 큰 차이가 있어 그 정 의미가 분명치 못하다.⁽¹³⁾⁽¹⁷⁾ 따라서 말뚝의 극한 지지력의 신뢰도는 저하할 수 밖에 없고 결국 높은 안전율 적용이 불가피하다. Canada의 경우 말뚝재하시험을 실시하면 안전율을 2.0 또는 1.8정도까지 낮출 수 있도록 허용하는 것도 이러한 불확실성을 감안한 조치로 사료된다.⁽¹⁰⁾

선단저항과 주변마찰을 분리측정한 경우 각 성분에 대한 하중-침하량 곡선을분석해 보면 선단저항의 경우는 전체지지력의 경우와 크게 다르지 않음을 알 수 있다. 즉 침하가 증가함에 따라 하중의 증가도 점진적이며 명확한 극한값을 정의하는것은 용이하지 않다. 따라서 선단저항부분에는 비교적 높은 값의 안전율이 적용될 수 밖에 없다. 반면 주변마찰에 대한 하중-침하량 곡선의 경우에는 극히 작은 침하량 발생시 주변마찰은 거의 직선적으로 증가한 후 침하가 계속 되면 주변마찰은 감소하여 일정한 잔류치에 도달

하고 이 값은 큰 침하량에서도 변화가 없다.

이처럼 주변 마찰의 경우에는 극한값 또는 잔류값 결정이 분명하고 따라서 매우 낮은 안전율을 적용할 수 있다. Burland and Cooke은 주변마찰에 대하여 1.0의 안전율 적용이 가능함을 제안하였으며⁶⁾, 이 경우 잔류값을 기준으로 하므로 실제로는 1.0보다 큰 안전율이 적용된다.

부분안전율 적용은 말뚝설계의 경제성을 크게 향상시킬 수 있다. 부분안전율을 아파트 건설공사에 모의 적용한 결과 약 33% 이상의 공사비 절감이 가능하였으며⁷⁾ 이 부분에 대하여는 향후 실제 공사비 비교 연구에서 구체적으로 검토할 예정이다.

이처럼 SPLT를 실시할 경우 공사의 경제성을 향상시키는 효과 외에도 본 시험방법은 다양한 경우에 사용될 수 있다. 최근의 건물 고층화에 따라 풍하중에 대한 말뚝기초의 인발저항이 주요 고려사항이 되는 경우 또는 연약지반에서의 건축으로 부주면 마찰이 문제시 될 때, 본시험방법의 적용이 효과적이다. 또한 해상구조물 기초에서도 종래 재하시험의 해상수행으로 인한 시간, 비용상의 문제점을 해소시킬 수 있으며 특별한 장치가 요구되는 사항(batter pile)의 재하시험도 간단히 해결할 수 있다.

4. SPLT의 적용예

SPLT는 시험기법이 개발된 이래 현재까지 3개현장에서 7개의 말뚝에 대하여 적용되었다. 시험목적은 지지력확인, 부주면마찰력의 크기예상, 말뚝의 인발저항 확인 등으로 다양하였으며 목적에 따라 별도의 설계를 적용하였다. 부주면 마찰력 또는 인발저항 확인이 목적인 경우에는 축소된 선단부를 갖지않는 분리할 수 있는 선단부 만을 사용하였다. 본 논문에서는 이들 중 일부 적용사례만을 소개하기로 한다.

(1) 적용예 (I)

그림 6과 같은 지반조건을 갖는 건설현장에서 직경 406mm의 강관말뚝에 대하여 본 시험방법을 적용하였다. 말뚝의 설계 압축하중은 85ton이었으며 말뚝은 표준관입시험 N치가 50이상인

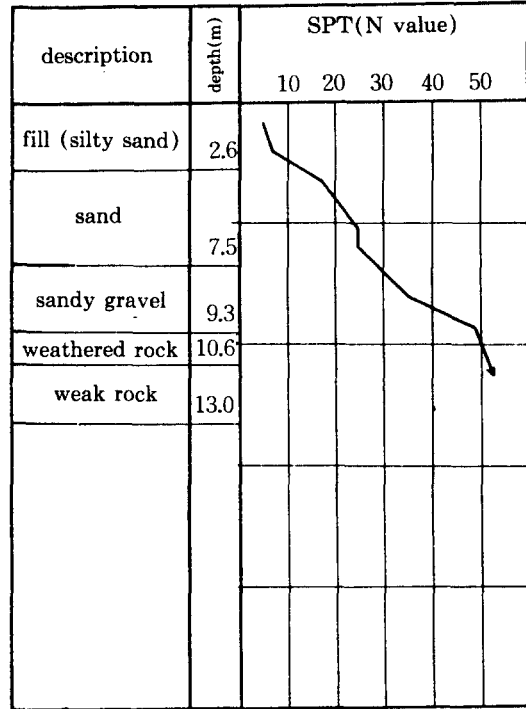


그림 6 Profile of test site

풍화암층까지 향타되었다.

본 공사에서는 말뚝의 극한 하중의 확인보다도 풍하중으로 인한 인발저항 확인이 주목적이었다. 당초 설계에서는 말뚝의 인발저항은 고려치 않고 록앵커를 설계하였다.

사진 1은 분리할 수 있는 선단부이며 사진 2는향타후 시험을 위한 두부재하장치가 조립된 상태이다.

그림 7은 시험결과로 말뚝의 인발저항은 20 ton 이상이 됨을 확인할 수 있었다. 결과적으로 록앵커를 생략하거나 본수를 줄일 수 있었다.

말뚝의 인발저항 확인외에 말뚝의 선단부 극한 지지력을 확인하기 위하여 시험말뚝 부근의 4개의 말뚝을 하중보로 연결하여 시험하였다. 그림 8은 시험결과이며, 여기에서 나타나 듯이 극한 선단지지력 확인은 되지 못하였다. 하중보로 연결된 4개 말뚝의 주면마찰력은 100ton에 불과하여 선단부 파괴까지는 불가능하였다. 결국



사진. 1 The separable pile shoe



사진. 2 Pile top arrangement

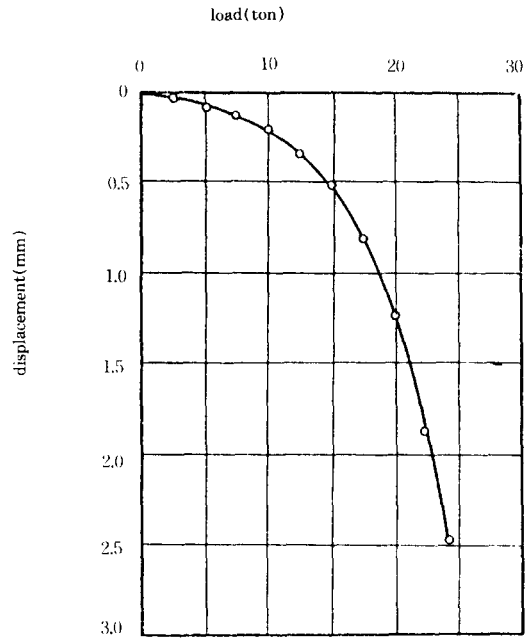


그림 7 Load-displacement curve-skin friction

말뚝의 전체 지지력은 120ton 이상이라는 결론밖에는 도출할 수 없었으며, 이러한 목적에는 축소된 선단부를 갖는 분리할 수 있는 선단부를 사용하거나 보다 많은 말뚝을 연결할 필요가 있다.

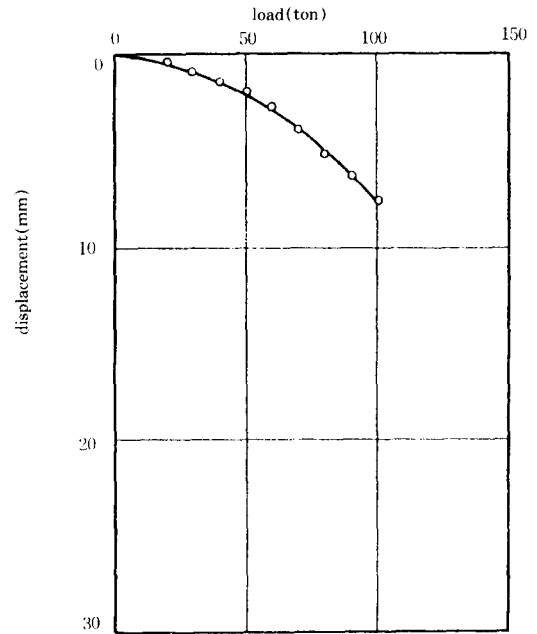


그림 8 Load-displacement curve-end bearing

(2) 적용예 (II)

그림 11에 나타나고 있는 것과 같은 연약점성 토층 위에 성토후 아파트를 건설하는 현장의 경우이다. 여기에서는 연약점성토층의 압밀로 인한 말뚝의 부주면 마찰의 산정이 주요 관심사로서 축소된 선단부를 갖지않는 분리할 수 있는 선단부가 적합한 경우이다. 그러나 본 현장에서는 축소된 선단부를 도입하여 주면마찰뿐 아니라 극한 선단지지력까지를 확인하였다.

description	depth(m)	SPT(N value)				
		10	20	30	40	50
silty clay	2.0					
silt	13.3					
sandy gravel	16.5					
weathered rock	20.0					

그림 9 Profile of test site

말뚝은 N 치가 50 이상인 풍화암층까지 관입되었으며 사진 3은 축소된 선단부를 갖는 분리할 수 있는 선단부이다. 그림 10은 제 1단계 시험결과로 주면마찰을 결정할 수 있었으며 그림 11는 제 2단계 시험결과로 축소된 선단부의 극한지지력을 결정할 수 있었다.

5. 토의 및 향후의 연구계획

간편한 말뚝재하시험은 현장적용결과 기존의

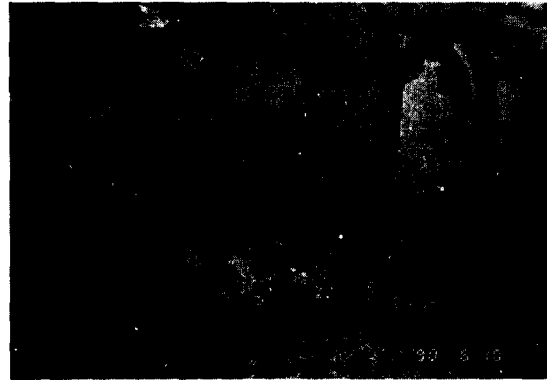


사진 3 The separable pile shoe with reduced sized sliding core

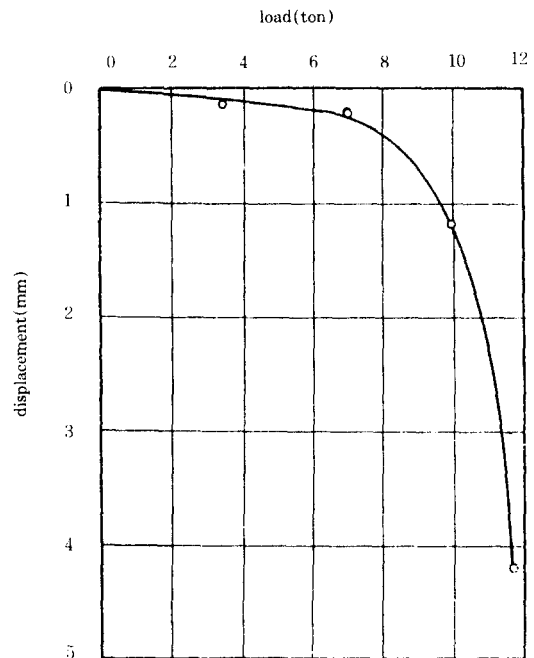


그림 10 Load-displacement curve skin friction

재하시험에 비하여 약 1/5내지 1/10의 비용으로 말뚝재하시험을 수행할 수 있는 것으로 밝혀졌으며 이에 소요되는 시간도 공장에서의 분리할 수 있는 선단부 제작과정을 제외하면 1~2일 정도에 불과하며 현장작업에 지장을 초래하지 않는다. 따라서 재하시험을 보다 용이하게 수행할 수 있어경제적인 설계가 가능하며 향후 적용

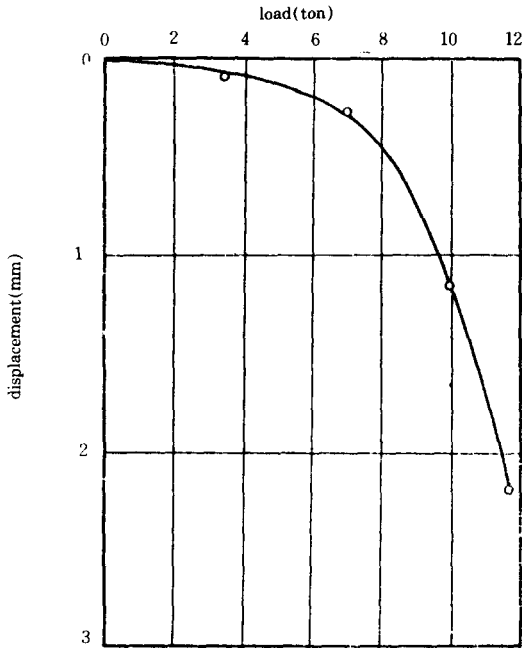


Fig. 11 Load-displacement curve-Sliding core

이 확산될 것으로 기대된다.

그러나 개발된 시험방법은 기존의 방법에 비하여 몇가지 상이한 점이 있어 이부분에 대한 연구가 계획되고 있다.

첫째 주면마찰을 선단부 재하의 반력으로 이용하게 됨에 따라 주면마찰 발생의 방향이 기존의 말뚝 재하시험과 반대로 되는 문제이다. 기존의 연구결과들에 의하면 말뚝의 인발저항은 압축시보다 낮은 것으로 알려지고 있어 말뚝의 안전측면에서 보면 문제가 되지 않으나, 보다 경제성을 높여 주기 위해서는 압축주면마찰과 인장주면마찰의 규명이 필요하다. 하중 작용방향의 차이는 주면마찰뿐만 아니라 말뚝의 선단지지력에도 영향을 줄 수 있을 것이다. Broug의 연구 결과에 의하면 말뚝의 선단지지력과 주면마찰은 별개의 현상이 아니라 상호 영향을 미치는 것으로 해석되어야 하며⁽⁷⁾ 이러한 주장은 말뚝에 하중재하를 할때 발생하는 흙의 변형형태를 고려할 때 충분히 가능한 것으로 사료된다.⁽⁸⁾⁽¹⁹⁾

이상의 문제점은 향후 연구계획에 반영되어 규명할 예정이지만 본 시험방법과 유사한 연구를 수행한 Cernak et al.의 두가지 경우에 대한 비교

결과⁽¹¹⁾ (그림 15)로 볼 때 본 시험방법에 의한 지지력은 재래식 말뚝재하시험 결과보다 약간 낮은 것으로 나타나고 있어, 그 결과를 사용하여도 구조물의 안전에는 문제가 없을 것으로 기대된다.

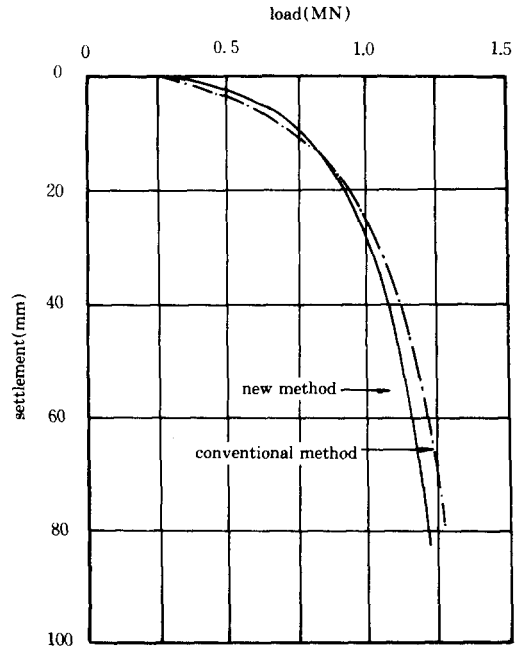


그림 12 Comparison with the result obtained by conventional pile loading test (by Cernak et. al.)

본 시험 방법의 두번째 문제점은 축소된 선단부의 사용영향을 규명하는 것이다. 축소된 선단부는 실제말뚝과 비교할 때 직경대비 1/2 내지 1/3인바 그의 극한 지지력을 전체 지지력과 동일하다고 보기에는 문제가 있다. 즉 말뚝의 치수효과(scale effect)문제가 규명되어야 한다.

이부분 역시 현재 계획하고 있는 제2단계 연구에서 규명할 예정이며 그때 까지는 말뚝의 치수효과에 관한 기존의 연구결과를 적용할 것을 제안한다. 말뚝의 치수효과는 말뚝-흙 상호작용이 근본적으로 차이가 있는 것이 아니고 말뚝의 항타시공성의 결과라는 주장이 타당한 것으로 사료된다.

실험실에서 모형말뚝 관입시험 결과 말뚝의 선단 지지력은 관입깊이가 증가함에 따라 거의 직선적으로 증가하며 어느깊이 이상 관입되면

더 이상 증가하지 않고 일정한 값을 유지한다. 이러한 현상이 나타나는 관입깊이를 한계관입깊이(critical penetration depth)라 하며 그 값은 연구자에 따라 상이하나 말뚝의 직경대비 10배 정도인 것으로 나타난다.⁽⁹⁾⁽²¹⁾

즉 말뚝 선단부가 극한 지지력을 얻기 위해서는 지지층(bearing stratum)내에 한계관입깊이 이상 관입되어야 한다. 따라서 직경이 큰 말뚝의 경우에는 그만큼 절대값에 있어 큰 관입깊이를 필요로 한다. 축소된 선단부의 지지력은 따라서 말뚝직경대비 관입깊이의 값이 크게 되고 결국 높은 지지력을 갖는 것으로 측정된다.

이문제에 대하여서는 상이한 견해를 갖는 연구 결과들도 있어⁽¹⁶⁾⁽³⁰⁾ 심층연구가 되어야 하겠으나 한강모래를 사용한 모형실험 결과로 볼때 한계관입깊이 개념을 적용하기로 제안하였다. 현재 국내에서 가장 많이 적용되는 Meyerhof의 표준 관입시험 결과로부터 말뚝의 지지력을 결정하는 방법⁽²¹⁾에서도 한계관입깊이를 10으로 적용하고 있고 한강모래를 사용한 시험결과⁽³⁾에서는 8.9의 한계관입깊이를 얻은 바 있어 본 시험 결과의 해석시에는 10을 잠정적으로 적용하기로 한다. 따라서 말뚝의 극한선단지지력은 아래의 식으로 구할 수 있다.

$$Q_p = Q_c [A_p / A_c] [L_p / 10]$$

여기에서 Q_p : 말뚝의 극한 선단지지력
 Q_c : 축소된 선단부의 극한지지력
 A_p : 말뚝의 단면적
 A_c : 축소된 선단부의 단면적
 L_p : 말뚝 직경대비 지지층내의 관입깊이

위의 문제점들 외에 강관말뚝의 경우 개단말뚝과 시험말뚝의 폐단효과 문제 또한 규명되어야 할 것이다. 현재 이들 문제점 규명을 위한 연구외에 하중전달을 위한 강관설치로 인한 시험과정의 번거로움을 해소할 수 있는 방안이 수립되어 있으며 콘크리트 말뚝, 현장타설 말뚝에 대한 적용 또한 계획중에 있다.

6. 결 론

기존의 말뚝 재하시험이 갖고 있는 시간, 경비

상의 문제점을 개선한 간편한 말뚝 재하시험 방법을 소개하였다. 실제 현장적용 결과 본 시험 방법을 적용하여 말뚝설계의 경제성을 크게 향상시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 각 공사별로 주요 고려사항이 되는 개념에 따라 분리할 수 있는 선단부 또는 축소된 선단부를 갖는 분리할 수 있는 선단부를 적용할 수 있을 것이다. 본 시험방법을 보다 활성화 하기 위하여 현재 시험 방법의 개선 및 재래식 재하시험 방법의 차이점에 대한 연구가 진행중이며, 그러한 연구결과를 얻기 전에도 충분히 설계수준을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 백세환 · 윤성진 · 이원재 · 이명환(1990), "간단한 말뚝재하시험(SPLT)의 개요," 대한 토목학회 학술발표회 개요집.
2. 이명환(1988), "말뚝의 주면마찰력과 마찰계수의 산정," 대한 토목학회 학술발표회 개요집, pp.428-431.
3. 이명환, 이장덕(1989), "말뚝기초의 설계 및 시공 관리 개선방안," 한국건설기술연구원 보고서, GE-113, pp.277.
4. Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V., Jamiolkowski, M. and Pasqualin, E. (1981), "Cone resistance in dry NC and OC sands," Proceedings, Cone Penetration Testing and Experience, ASCE, pp. 145-177.
5. Baligh, M. M. (1975), "Theory of deep site static cone penetration resistance," Geotechnical Report No. R75-56, Massachusetts Institute of Technology.
6. Beringen, F. L., Windle, D. and Van Hooydonk, W. R. (1979), "Results of loading tests on driven piles in sand," Proceedings, Conference on Recent Developments in the Design and Construction of Piles, ICE, pp. 213-225.
7. Broug, N. W. A. (1982), "The analysis of cone resistance 'q_c' and sleeve friction 'f_s' as interactive stresses, resulting in a new pile bearing capacity design method," Proceedings, 2nd European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam, Vol. 2 pp. 469-478.
8. Burland, J. B. and Cooke, R. W. (1974), "The design of bored piles in stiff clays," Ground Engineering, Vol. 7, No. 4, pp. 28-30, 33-35.
9. Campanella, R. G. and Robertson, P. K. (1981),

- "Applied cone research," Proceedings, Cone Penetration Testing and Experience, Geotechnical Engineering Division, ASCE, pp.343-362.
10. Canadian Foundation Engineering Manual, 2nd edition, Canadian Geotechnical Society, 1985, pp.456.
 11. Cernak, B(1988)., Hlavacek,J. and Klein, K., "A new method of static pile load test system VUIS-P," Proceedings, 1st International Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Ghent, A.A.Balkema, pp.291-302.
 12. Cheeks, J.R(1979)., "Analytical methods to predict pile capacities," Behavior of Deep Foundations, ASTM, STP670, pp.199-208.
 13. Crowther, C.L(1988)., "Load testing of deep foundations," John Wiley and Sons, New York, pp.233.
 14. Heijnen W.J(1974)., "Penetration testing in the Netherlands," Proceedings, 1st European Symposium on Penetration Testing, Stockholm, Vol. 1, pp.79-83.
 15. Huntsman, S.R(1986)., Mitchell, J.K., Klejbuk, L.W. and Shinde, S.B., "Lateral stress measurement during cone penetration," Proceedings, In Situ '86, Specialty Conference sponsored by ASCE, Blacksburg, pp.617-634.
 16. Janbu, N. and Senneset, K(1974)., "Effective stress interpretation of in-situ static penetration tests," Proceedings, 1st European Symposium on Penetration Testing, Stockholm, Vol.2.2, pp. 181-193.
 17. Joshi, R.C. and Sharma, H.D(1987)., "Prediction of ultimate pile capacities from load tests on bored and belled, expanded base compacted and driven piles," Proceedings, International Symposium on Prediction and Performance in Geotechnical Engineering, Calgary, A.A. Balkema, pp.135-144.
 18. Kerisel,J(1961)., "Fondation profondes on Milieu Saleus," Proceedings, 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Paris, Vol.2, pp.455-458.
 19. Koumoto, T. and Kaku, K(1982)., "Three-dimensional analysis of static cone penetration," Proceedings, 2nd European Symposium on Penetration Testing, Amsterdam, Vol.2, pp.635-640.
 20. Meyerhof, G.G(1951)., "The ultimate bearing capacity of foundations," Geotechnique, Vol.2, pp.301-332.
 21. Meyerhof, G.G(1976)., "Bearing capacity and settlement of pile foundations," Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.102, GT3, pp.58-74.
 22. Miura, N(1985)., "Point resistance of piles in sand," Proceedings, 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering San Francisco, Vol.3, pp.1445-1448.
 23. Miura, S(1984)., Toki, S. and Tanizawa, F., "Cone penetration characteristics and its correlation to static and cyclic deformation-strength behavior of anisotropic sand," Soils and Foundations, Vol.24, No.2, pp.58-74.
 24. Nauroy, J.F. and Le Tirant,P(1983)., "Model tests of piles in calcareous sands," Proceedings, Geotechnical Practice In Offshore Engineering, ASCE, Austin, Texas, pp.356-369.
 25. Osterberg, J(1989)., "New device for load testing driven piles and drilled shafts separates friction and end bearing," Proceedings, International Conference on Piling and Deep Foundations, London, A.A.Balkema, pp.421-427.
 26. "Predicted and Observed Axial Behavior of Piles," Proceedings, ASCE Symposium on Results of a Pile Prediction, Geotechnical Special Publication No.23, 1989, pp.358.
 27. Rad, N.S. and Tumay, M.T(1986)., "Effect of cementation on the cone penetration resistance of sand: A model study," Geotechnical Testing Journal, Vol.9, No.3, pp.117-125.
 28. Schmertmann, J.H(1972)., "Effect of in-situ lateral stress on friction cone penetrometer data in sand," Proceedings, Fugro Sondeer Symposium published by Fugro-Cesco, Holland, pp.37-39.
 29. Schmertmann, J.H(1975)., "Measurement of in-situ shear strength," State-of-the-art Report, Proceedings, ASCE Conference on in-situ measurements of soil properties, Raleigh, Vol.2, pp. 57-138.
 30. Treadwell,D(1975)., "Effect of layering on the cone resistance of soils," PhD Thesis, University of California, Berkeley.
 31. Vesic, A.S(1964)., "Investigation of bearing capacity of piles in sand," Proceedings, North American Conference on Deep Foundations, Mexico City.
 32. Vesic, A.S(1967)., "Ultimate loads and settlements of deep foundations in sand," Proceedings, Symposium on Bearing Capacity and Settlement of Foundations, Duke University, Durham, pp. 53-68.

(접수일자 1990. 10. 26)