

# 사질토 지반에서의 정적관입저항과 기준응력과의 관계

## The Relationship Between Static Cone Penetration Resistance and the Reference Stress in Sandy Soils

백 세 환\*<sup>1</sup>

Paik, Se-Whan

이 명 환\*<sup>2</sup>

Lee, Myung-Whan

이 원 제\*<sup>2</sup>

Lee, Won-Je

---

### Abstract

In the analysis of the static cone penetration resistance or the point resistance of end bearing piles, the vertical effective stress has been chosen as the reference stress. However many reported experimental results indicate that the cone tip resistance is dependent rather on the in-situ horizontal stress than the vertical effective stress. To clarify this point, published experimental results have been re-evaluated and the laboratory penetration tests have been performed. From the results it is concluded that the cone tip resistance is influenced by both the vertical effective stress and the horizontal effective stress. It is further concluded that the mean normal stress should be used as the reference stress in the analysis.

### 요 지

정적관입저항 또는 선단지지말뚝의 선단지지력을 해석함에 있어서는 유효수직응력이 기준응력으로 사용되어 왔다. 그러나 정적관입저항은 유효수직응력보다 원 위치 유효수평응력에 관계된다는 것이 많은 실험연구결과로부터 보고 되었다. 이와같은 문제점을 규명하기 위하여 기 보고된 실험결과를 다시 분석하였으며 실험실에서의 관입시험이 실시되었다. 연구결과 정적관입저항은 유효수직응력과 유효수평응력 모두에 영향을 받는 것으로 나타나고 있으며 해석시에는 평균주응력이 기준응력으로 사용되어야 함을 결론 지을 수 있었다.

---

\*<sup>1</sup> 정회원, 한국과학기술원 박사과정

\*<sup>2</sup> 정회원, 한국건설기술연구원

## 1. 서 론

사질토 지반에 있어서 말뚝기초의 선단지지력 해석 또는 정적관입저항으로부터 지반의 상대밀도, 내부마찰각 등을 도출함에 있어서 지금까지 제안된 대부분의 관계식들은 말뚝 또는 정적관입체의 선단부 위치에서의 유효수직응력(vertical effective stress)을 기준응력으로 사용하고 있다.

정적관입저항은 유효수직응력만의 함수라는 가정은 해석을 위하여 별도의 횡방향 토압계수 측정을 위한 지반조사의 필요성이 배제되고 간편하게 적용할 수 있다는 장점이 있어 대부분의 관계식에서 채택되고 있으나 지반내의 응력조건을 구성하고 있는 또다른 성분인 원위치 유효수평응력(in-situ horizontal effective stress)이 고려되지 못하여 해석의 신뢰도를 크게 저하시키는 원인이 되고 있다.

적절하지 못한 기준응력의 적용은 과압밀 또는 인근에서의 굴착 등 조건하에서 말뚝의 지지력을 과대 또는 과소 평가하여 구조물의 안전상 문제나 과잉설계를 유발하게 되며 정적관입 저항으로부터 토질정수의 도출에도 상당한 오차를 야기시킨다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 많은 연구가 수행되었으며 일부학자들은 관입저항해석에 유효수평응력을 기준응력으로 사용하여야 한다는 주장을 하였으나 이 경우 유효수직응력의 영향은 무시하게 되어 현실적인 해결책으로 받아들여지지 못하는 실정이다.

Schmertmann은 수평방향 가압장치를 사용한 모형말뚝시험결과 유효수직응력 대신 유효수평응력을 기준값으로 사용할 경우, 보다 일관성 있는 결과를 얻을 수 있다고 하였다.<sup>(14)</sup> calibration chamber를 사용한 Houlsby and Hitchman의 연구<sup>(6)</sup>와 주변의 굴착으로 인한 정적 관입저항의 변화를 측정된 Dahlberg의 연구등<sup>(4)</sup>에서도 선단지지력이 유효수직응력보다는 유효수평응력에 더욱 큰 영향을 받는 것으로 보고되었으나 현장에서의 유효수평응력의 예측이 매우 어려운 관계로 이러한 현상이 말뚝지지력 해석에

도입이 되지 않는 못하였다. 공동확장 이론을 기본으로 한 말뚝 지지력 해석에 있어서는 이론전개를 위하여 평균 주응력(mean normal stress)을 해석의 기준응력으로 사용하고 있으며 이러한 평균 주응력 개념은 보다 합리적인 것으로 인식되어 공동확장이론을 이용한 선단지지력 예측에 관한 많은 연구가 수행되었다.<sup>(1)(2)(7)(10)</sup>

본 연구에서는 공동확장 이론에서 가정하고 있는 평균주응력(mean normal stress) 개념을 기준응력으로 가상하여 현재까지 발표된 몇개의 연구결과를 재해석 하였다. 평균주응력 개념은 유효수직응력과 유효수평응력의 두가지 성분을 모두 다 수용한 해석으로 두가지 주장의 한계를 극복할 수 있어 일부 학자들에 의하여 대안으로 제시되었으나 이를 입증한 연구는 시도되지 못하고 있다.<sup>(1)(17)</sup> 본 연구에서는 이를 입증하기 위하여 응력조건이 상이한 두가지 모형지반에서 정적관입시험을 수행하고 그 결과를 3가지 기준응력 개념으로 해석, 비교하였다. 연구결과 정적관입저항은 유효수직응력, 유효수평응력 두가지에 모두 영향을 받으며 평균주응력을 기준응력으로 사용할 경우 보다 합리적인 해석이 가능하였다.

## 2. 기존연구결과의 재분석

정적관입시험 결과로부터 말뚝의 지지력 예측 또는 토질정수 도출의 신뢰도는 구조물의 안전 및 설계의 경제성에 큰 영향을 미친다. 보다 신뢰도 높은 예측을 위하여 지표면에서 깊은 곳의 응력재현을 할 수 있는 모형가압토조(calibration chamber)실험이 적용되었으며 그 결과는 대부분 유효수직응력으로 해석되고 있다. 정적관입저항과 기준응력의 관계를 알아보기 위하여 비교적 잘 알려진 몇가지 기존 연구결과들을 기준응력 개념을 변화시켜가며 재분석하였다.

그림 1은 Schmertmann의 시험 결과로서 정적관입저항의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 유효수직응력이 일정한 경우 상대밀도와 정적관입저항 사이에는 거의 선형비례 관계가 성립하고 있다. 따라서 응력수준이 일정한 범위 이내일 경우 상대밀도에 따라 정적관입저항을 해석하면 일정한 관계를 얻을 수 있을 것으로

기대된다.<sup>(15)</sup> 따라서 기존의 정적관입시험결과들을 상대밀도에 따라 분류하고 유효수직응력, 유효수평응력, 평균주응력의 개념으로 각각 해석하여 비교하였다.

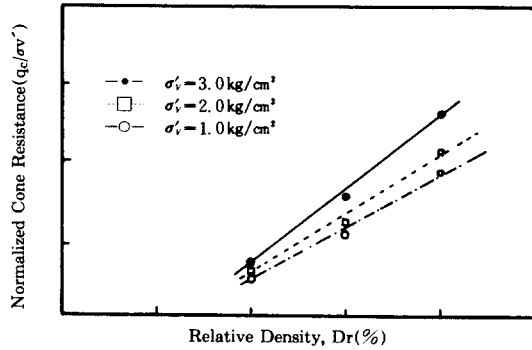


그림 1. Cone resistance as a function of relative density (After Schmertmann, 1972)

Baldi et.al.의 시험결과를 위에서 기술한 방법으로 해석하여 나타낸 것이 그림 2와 3이다.<sup>(2)</sup> 그림 2는 정규압밀 상태의 모래이고 그림 3은 같은 시료를 과압밀 상태로 만들어 실험한 것이다. 두 경우 모두 평균주응력 해석이 가장 일관성 있는 관계를 보여주고 있지만 정규압밀의 경우는 비교적 분산성(deviation)이 심하며 유효수직응력, 유효수평응력 해석과의 차이도 크지 않다. 그러나 과압밀 시료의 경우 정적관입저항이 평균주응력과 보다 일관성 있는 경향이 비교적 뚜렷하게 나타난다. 이와같이 시료의 과압밀이나 응력 경로등이 흙의 압축성에 지대한 영향을 미치는 요소로서 변형형태를 지배한다는 것은 주지의 사실이나 이러한 요소들을 정적관입 저항치와 어떻게 연결시키느냐 하는 문제는 앞으로의 연구 대상이 되어야 하는 부분으로 생각되며 본 논문에서는 생략하기로 한다.

그림 4는 NGI(Norwegian Geotechnical Institute)의 시험결과로써 평균 주응력의 영향이 잘 나타난 예이다.<sup>(13)</sup> 그림 4는 정규압밀 시료와 과압밀 시료의 결과를 함께 나타낸 것이지만 두 시료를 분리하여 고려할 경우 정규압밀 시료

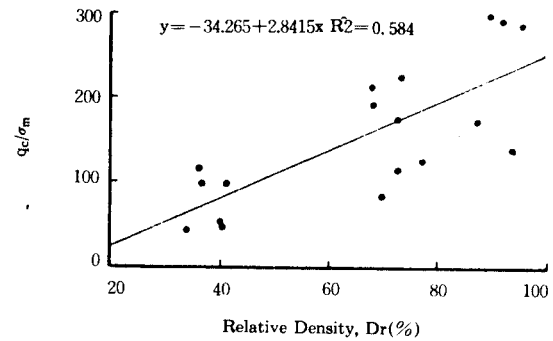
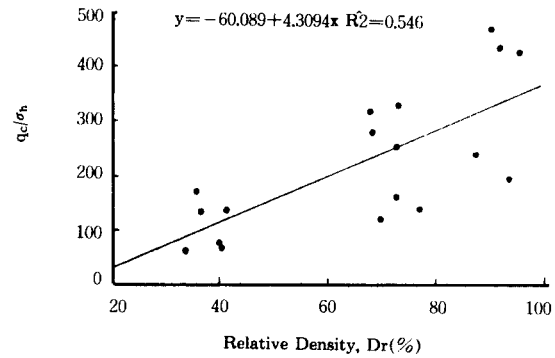
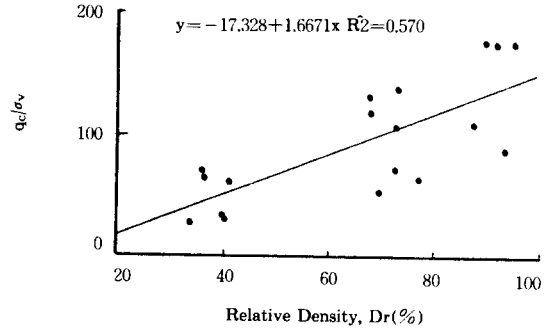


그림 2. Evaluation of test results by Baldi et. al. -NC sand

에서는 유효수평응력해석이 가장 우수한 반면, 과압밀 시료(과압밀비=8.0)의 경우 평균 주응력 해석 결과가 가장 일관성 있는 것으로 확인되었다. 이와같은 현상은 앞에서 언급했던 Baldi et.al.의 결과와 일치하며<sup>(2)</sup> 이 사실로부터 시료의 응력 이력, 즉 과압밀비가 정적관입에 영향을 준다는 사실을 확인할 수 있었다. 이와같이 과압밀비가 커질수록 평균 주응력 해석이 상대적으로 우수한 관계를 나타낸다고 단언하기에는 실험자료의 수가 충분치 못하지만, 이 부분에 대한 계속

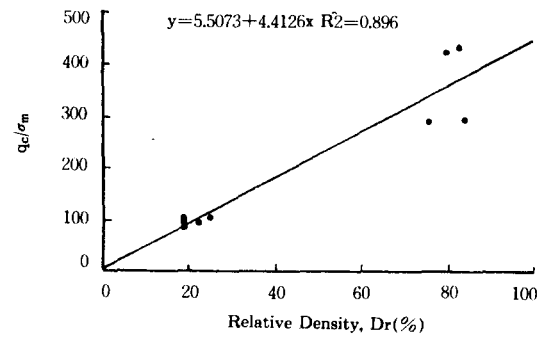
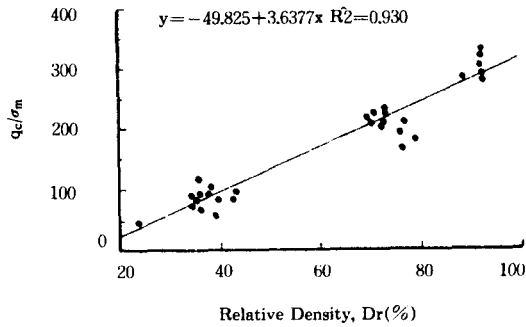
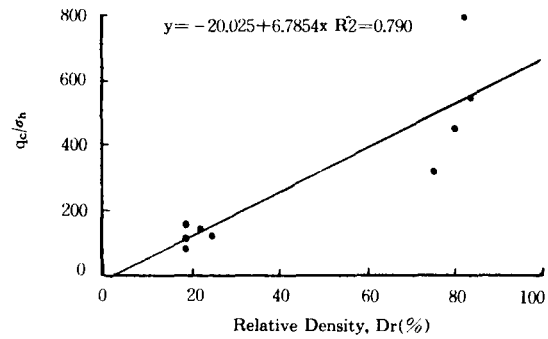
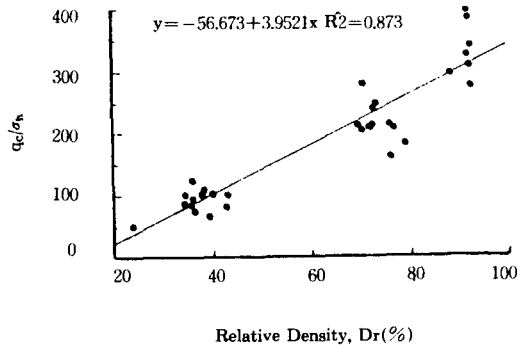
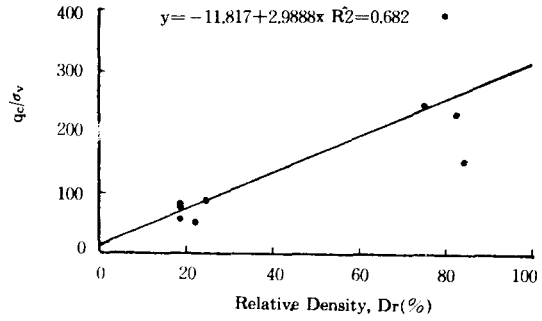
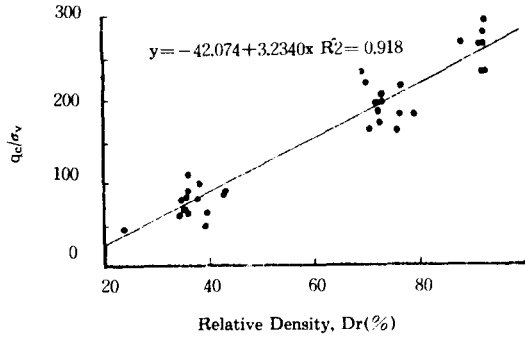


그림 3. Evaluation of test results by Baldi et. al. -OC sand

그림 4. Evaluation of test results by NGI

적인 연구가 수행되면 이러한 사실을 확인할 수 있을 것으로 기대된다.<sup>(6)</sup>

그림 5, 6은 Housby and Hitchman의 Leighton Buzzard Sand를 사용한 모형토조실험 결과이다.<sup>(6)</sup> 이 연구의 결론은 정적관입 저항과 유효수직응력 사이에는 아무 관계도 나타나지 않지만(그림 5), 유효수평응력과는 우수한 관계 곡선이 나타난다는 것이다(그림 6). 이들의 주장은 유효 수평응력의 영향을 정확한 시험 자료로

써 뒷받침했다는데 의미가 있으나 그 해석방법에 있어 중대한 오류는 상대밀도의 차이를 무시하였다는데 있다. 즉 같은 중간밀도의 시료라도 상대밀도가 18%까지의 차이를 보이고 있어 이 부분에 대한 설명이 필요할 것으로 사료된다. 상대밀도를 정적관입저항의 영향 요소로 고려하여 앞서와 같은 방법으로 이 자료를 해석할 경우(그림 7) 역시 평균주응력의 경우가 가장 우수한 관계를 성립시킨다는 사실을 확인할 수 있었다.

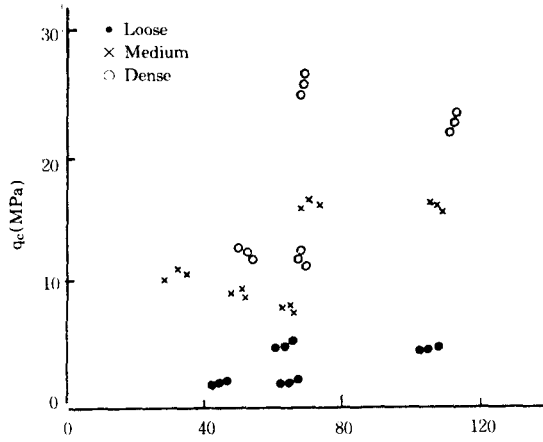


그림 5.  $q_c$  versus  $\sigma_v$  for Leighton Buzzard Sand (Houlsby and Hitchman)

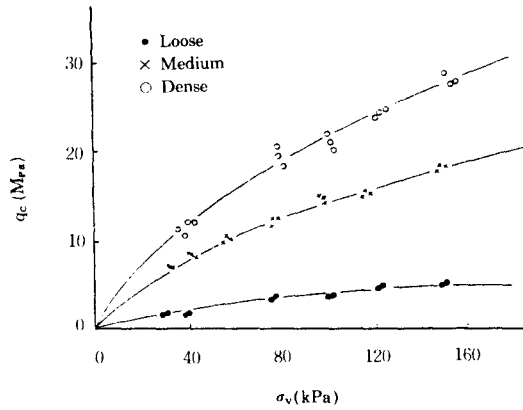


그림 6.  $q_c$  versus  $\sigma_h$  for Leighton Buzzard Sand (Houlsby and Hitchman)

Houlsby는 후에 정적관입저항의 해석은 유효 수직응력이 아니라 유효수평응력 또는 평균주응력의 개념을 따르는 것이 타당하며 양자의 선택은 임의이지만 정적관입저항에 미치는 유효수평응력의 영향 정도를 유효수직응력의 그것과 비교하여 각자의 판단에 따라 선택해야 할 것이라고 하였다.<sup>(5)</sup>

이상에서 살펴본 바와 같이 임의로 추출된 기존의 시험 결과들이 정도의 차이는 있으나 평균주응력 해석에 있어서 가장 우수한 관계를 보여주는 사실로 미루어 유효수평응력의 영향을

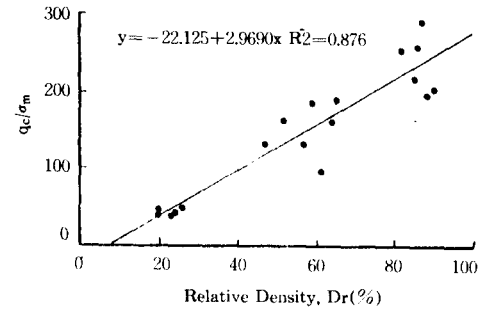
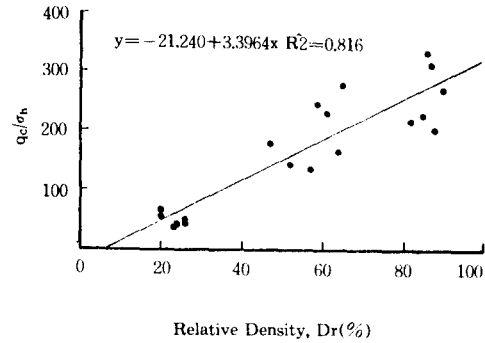
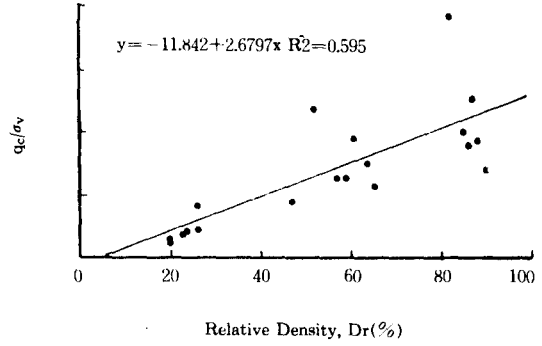


그림 7. Evaluation of test results by Houlsby and Hitchman

무시하는 것은 말뚝의 선단지지력이나 정적관입저항 예측에 있어 중대한 오류를 초래할 것으로 사료된다.

유효수평응력의 영향정도나, 시료의 응력이력 등이 부분에 대해 명확한 결론을 얻기에는 앞으로 많은 연구 노력이 필요하겠으나 평균 주응력 개념의 타당성을 증명하기 위해 Leighton Buzzard Sand를 사용하여 동일한 상대밀도 조건에서 응력 조건만을 변화시켜가며 실내 시험을 수행하였다.

### 3. 실내시험

정적관입저항과 응력조건의 관계를 알아보기 위해서 수평/수직 응력 비율이 상이한 지반조건을 조성하여 관입시험을 수행한 후 그 결과를 유효수직응력, 유효수평응력 그리고 평균주응력을 기준응력으로 하여 분석, 비교하였다.

#### 3.1 시험장치

응력조건이 상이한 지반내의 임의의 깊이의 조건을 재현하기 위하여 수직, 수평응력을 분리하여 가압할 수 있는 모형 가압토조를 사용하였다. 그림 8은 전반적인 시험장치를 보여주며 모형가압토조는 철판을 사용하여 분리할 수 있는 윗판, 아랫판과 원통형 몸체로 구성된다. 분리할 수 있는 윗판에는 모형관입체 관입을 위하여 직경 60mm의 구멍을 두었으며 유효수직응력

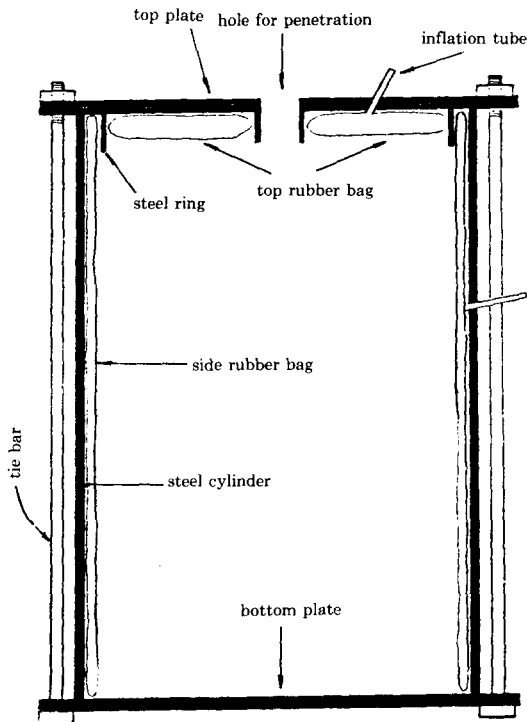


그림 8. Calibration chamber details

가압을 위하여 도넛 모양의 고무제 가압백을 설치하였다.

유효수평응력은 원통형 몸체 내부에 편평한 고무제 가압백을 설치하여 가압하였으며 수직응력이 수평가압백에 전달되지 않도록 윗판 아래쪽에 철판링을 두어 분리하였다. 모형가압토조의 설계에는 시험결과에 영향을 미치는 조건 즉 경계조건과 관입체 대비 토조의 크기를 고려하여야 하는 것으로 알려져 있다.<sup>(7)</sup>

모형가압토조의 경계조건은 그림 9에 나타나고 있는 것과 같이 4가지로 나누어 볼 수 있으며, 이들 경계조건은 각각 무한한 현장조건을 한정된 공간내에 재현하는데 의미가 있으나 일반적으로 이들 중 BC 1과 BC 3의 경계조건이 널리 적용되고 있다. BC 1 조건은 현장상태의 하한상태를 나타내주며 횡방향 변형이 억제된 BC 3 조건은 상한상태를 재현하는 것으로 알려져 있다.

BC 3의 경계조건을 만족시켜주기 위해서는 측방향의 변위를 억제하기 위한 정밀한 장치가 요구되는 반면 시험 결과는 간단한 장치를 사용한 BC 1에서 얻을 수 있는 결과와 크게 상이하지 않기 때문에 본 연구에서 사용한 경계조건은 BC 1을 채택하였다.

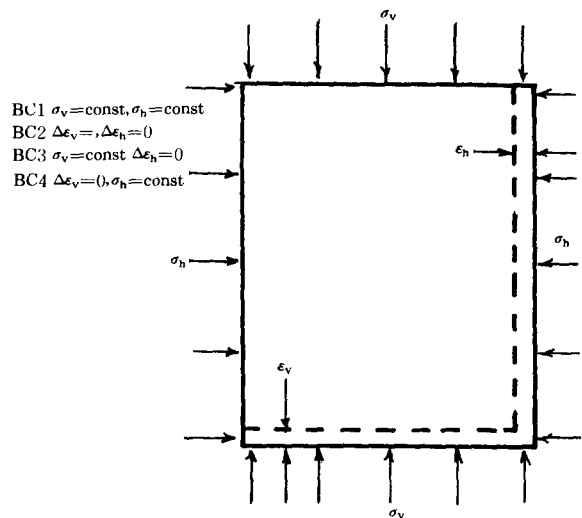


그림 9. Boundary conditions of calibration chamber

모형시험시 시료크기의 영향은 모형가압토조의 경계조건과도 밀접한 관계에 있다. 견고한 벽면을 가진 토조에서의 정적관입시험 연구결과에 의하면 토조의 크기는 정적관입체 직경대비 약 200배 이상이 되어야 하는 것으로 알려져 있다.<sup>(9)(16)</sup> 본 연구에서 사용한 것과 같은 유연한 벽면을 가진 모형토조에서도 이 같은 토조크기의 영향이 문제시 되고 있다. Parkin의 연구에 의하면 느슨한 모래의 경우 관입체 직경대비 20배

정도, 조밀한 모래에서는 50배 이상이 되어야 한다고 한다.<sup>(12)</sup> 여기에 대해서는 상이한 주장들이 보고되고 있으나 아직 그 영향이 명확히 규명되고 있지는 못한 상태이다.<sup>(3)(11)(18)</sup>

본 연구에서는 직경 600mm의 토조를 사용하였으며, 토조크기 영향을 최소화하기 위하여 관입체의 직경을 가능한 한 작게 설계하였다. 이에 따라 직경 12.7mm의 못쇠를 사용하여 관입체를 제작하였으며 선단부 저항을 분리측정할 수 있도록 aluminium load cell을 장치하였다(그림 10).

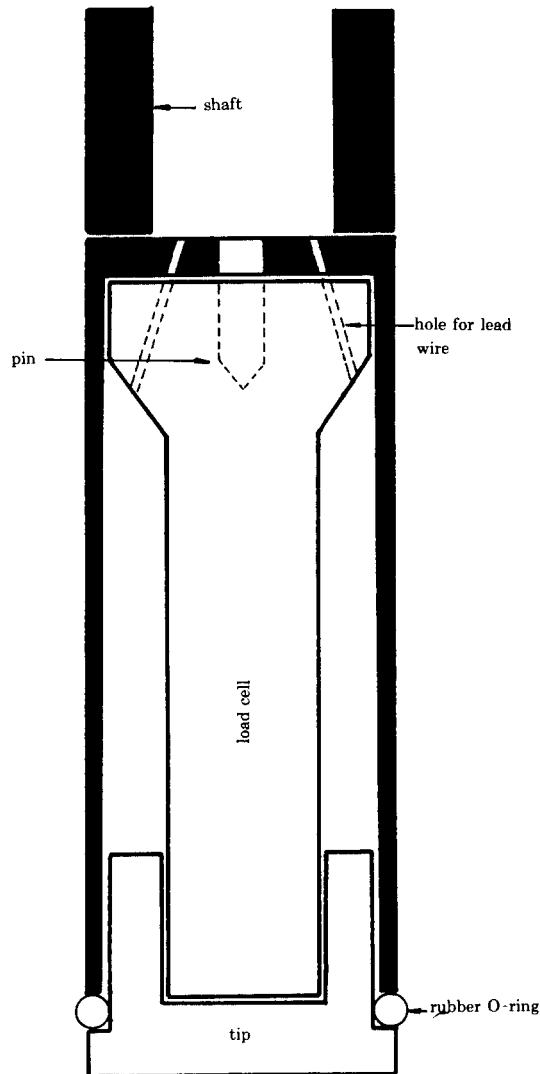


그림 10. Penetrometer detail

### 3.2 사용시료 및 시료성형

본 연구에서는 Leighton Buzzard Sand를 실내 건조한 후 직경 2mm 이상되는 입자들은 체를 사용 제거하였다. 사용된 시료의 비중은 2.65였으며 굵은 입자 제거후의 입도 분포는 그림 11과 같다.

시료성형은 모래뿌리는 장치를 이용하여 성형된 시료기준 약 50mm를 뿌리고 모래뿌리는 장치를 그 높이만큼 높여준 뒤 계속하여 토조의 윗부분까지 성형하였다. 이 방법에 의하면 비교적 균질한 상태의 시료를 성형할 수 있으며, 정적 관입 시험결과도 일정한 것으로 나타나 시료의 균질성을 확인할 수 있었으며 자세한 시료성형 과정은 참고문헌(7)을 참조하기 바란다.

### 3.3 시험과정

시료성형이 완료된 후 윗판과 여기에 부착된 관입장치를 설치한 후 공기압축기를 사용하여 수평, 수직 응력을 가해준다. 본 연구에서는 응력 조건의 영향을 알아보기 위하여  $\sigma_h/\sigma_v=1.0$  및  $\sigma_h/\sigma_v=0.415$ 의 두가지 경우로 구분하여 시험하였다. 각각의 응력비율조건에서 유효수직응력을 50, 100, 150, 200kPa로 변화시켜 가압하였다.

응력가압후 사질토 지반에서의 가압시간 변화의 영향이 규명되지 못하여, 임의의 24시간 압력 가압후 관입시험을 실시하였다. 시험실시 초기의 경험에 의하면 가압후 시간경과에 따라 관입저항

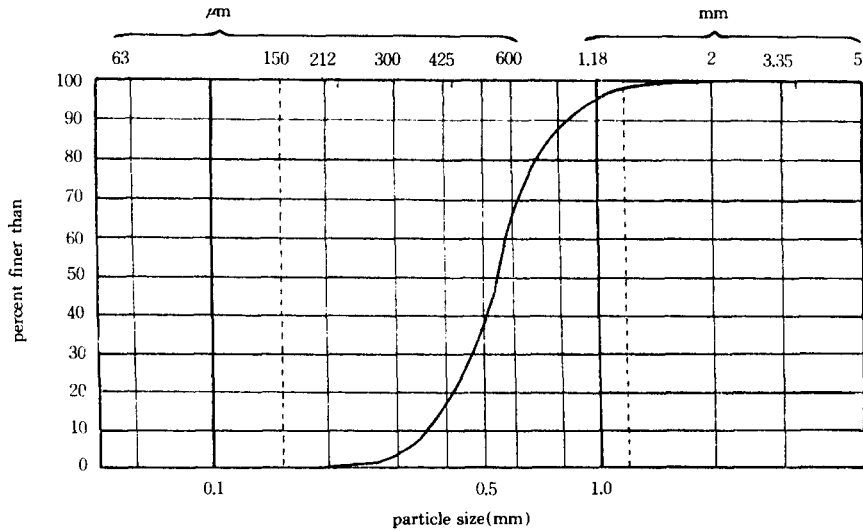


그림 11. Grain size distribution

이 변화되는 것을 발견하였으며, 지반내에 매설한 토압계 측정연구에서도 최소한 20시간 이상의 압력유지가 필요한 것으로 나타나 향후 연구가 되어야 할 부분으로 사료된다.

24시간 가압후 상부 반력보에 부착한 전기모터식 관입장치를 이용하여 4.5mm/min의 속도로 관입하여 선단저항과 전체저항을 측정하였다. 건조한 사질토 지반에서는 간극수의 영향이 없어 관입속도에 따른 저항의 변화가 없을 것으로 예상하여 관입속도의 결정은 큰 문제가 되지 않았으며, Villet and Mitchell의 연구에서도 이 부분이 증명된 바 있다.<sup>(18)</sup>

관입을 계속하며 측정되는 저항치는 data logger를 사용하여 0.5분 간격으로 기록하였으며 결과는 측정된 저항을 응력으로 환산하였다.

### 3.4 시험결과 및 토의

그림 12는 시험결과로서 대부분의 시험에서 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 관입이 계속됨에 따라 어느 일정한 깊이까지는 선단저항이 급격히 증가한 후 일정한 값에 도달한다. 그후에는 관입을 계속하여도 선단저항에는 큰 변화가 없고 일정한 값이 유지되었다.

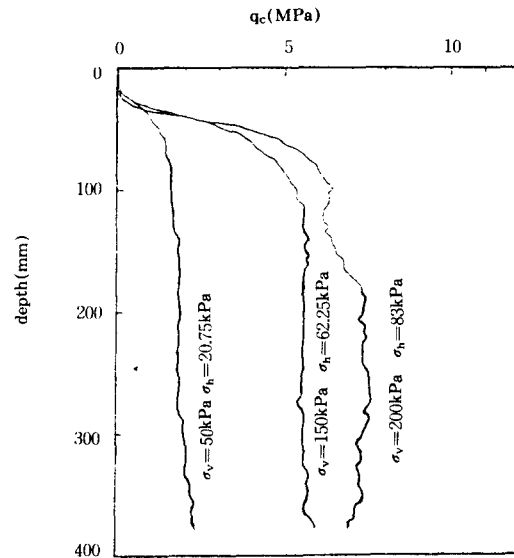


그림 12. Typical test results

정적관입저항 또는 말뚝의 선단지력 해석이 적절히 되기 위해서는 지반조건이 정규압밀이거나 과압밀의 어느 경우에도 일정한 지반조건이 얻어질 수 있어야 할 것이다. 정적관입저항은 보통(기준응력×지지력계수)로 표시할 수 있으



며, 지지력 계수는 무차원 양으로서 토사의 조건만의 함수이다. 물론 응력수준의 상승으로 인한 흙의 내부마찰각 감소문제와도 밀접한 관계에 있지만 본 실험에서 사용한 50~200kPa의 범위에서는 그 영향이 그리 크지 않을 것으로 가정하였다.

유효수직응력을 기준응력으로 사용하는 개념이 적합하다면 정적관입저항은 유효수직응력만의 함수로 표시되어 횡방향 토압조건이 변화하더라도 정적관입저항은 변화할 수 없다. 그리고 본 연구에서 가정한 것처럼 본 실험의 응력범위에서의 흙의 물리적 성질이 큰 차이가 없다면 지지력 계수의 값은 응력수준, 응력조건과 관계없이 같은 값을 갖게 되어야 한다. 이러한 가정은 기준응력을 유효수평응력 또는 평균주응력을 사용할 경우에도 적용되어 각 경우의 지지력계수(정적관입저항÷기준응력)를 비교함으로써 기준응력 개념의 적합성을 알 수 있을 것이다.

그림 13은 유효수직응력을 기준응력으로 사용하여 지지력계수를 계산한 결과이다. 그림에서 보는 것처럼  $\sigma_h = \sigma_v$ 의 경우  $\sigma_h = 0.415\sigma_v$ 의 경우보다 지지력 계수가 크게 나타나고 있어 기준응력 선정이 적절치 못함을 알 수 있다.

그림 14는 같은 시험결과를 유효수평응력을

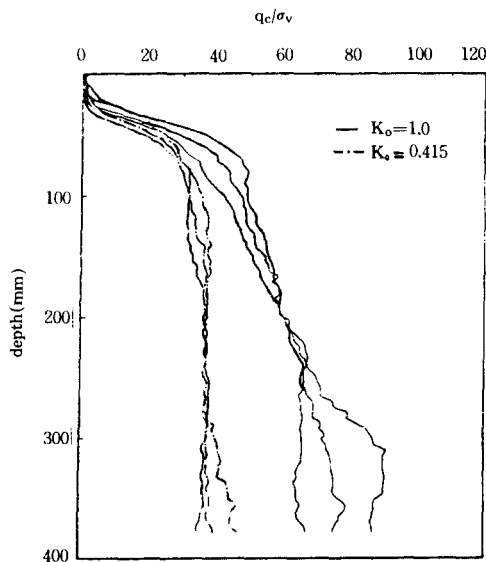


그림 13.  $q_c/\sigma_v$

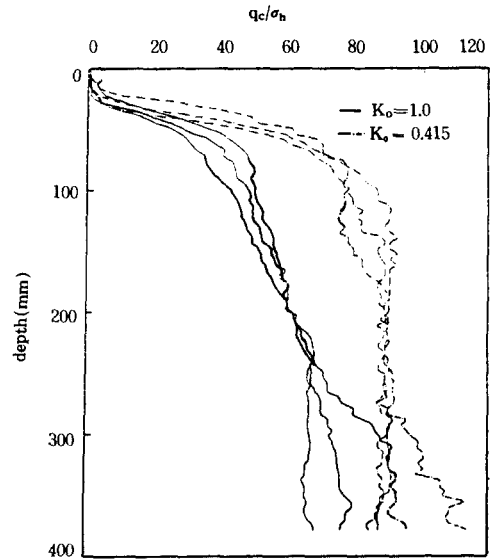


그림 14.  $q_c/\sigma_h$

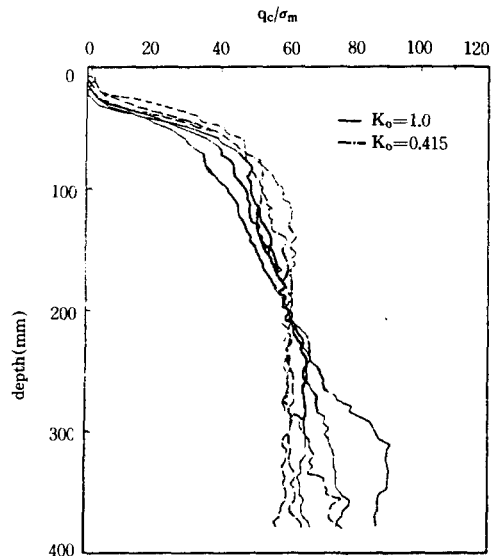


그림 15.  $q_c/\sigma_m$

기준응력으로 사용하여 계산한 결과로서 그림 13의 경우와 반대의 결과를 나타내고 있다. 즉 일부학자들이 주장하는 유효수평응력의 적합치 못함을 증명하고 있다.

그림 15는 같은 시험결과를 평균주응력을 기준응력으로 사용하여 분석한 결과이다. 이 경우

두가지 응력조건하에서 시험한 결과들이 거의 같은 지지력 계수를 나타내고 있다. 즉 평균 주응력 개념을 사용하면 지반의 과압밀로 인한 횡방향 토압계수 증가의 경우 또는 인근의 굴착으로 인한 횡방향 토압계수 감소의 경우 등 모든 조건하에서 동일한 지지력 계수를 적용할 수 있으며 각 경우별로 상이한 경험 수정식을 사용하지 않아도 됨을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 사질토에 있어서 정적관입저항 또는 말뚝의 선단지지력 해석시 적용하여야 할 기준응력에 대하여 검토하였다. 연구결과 정적관입저항은 기존의 대부분의 관계식에서 사용하고 있는 유효수직응력 또는 일부 학자들이 주장하는 유효수평응력만으로는 해석이 불가함을 증명할 수 있었으며 평균주응력 개념이 기준응력이 되어야 함을 알 수 있었다. 본 연구결과는 향후 정적관입저항 해석 및 말뚝의 선단지지력 계산의 기술수준을 향상시킬 수 있을 것으로 기대되며 이를 활용하기 위해서는 현장 원위치 수평응력 측정기술이 뒷받침되어야 할 것이다.

#### 참고문헌

- Al Awkati, A(1975)., "On problems of soil bearing capacity at depth," PhD Thesis, Duke University, Durham.
- Baldi, G., Bellotti, R., Ghionna, V(1981)., Jamiolkowski, M, & Pasqualini, E., "Cone resistance in dry NC and OC sands," Proc. Cone Penetration Testing and Experience, Geotechnical Engineering Division, ASCE, pp. 145-177.
- Bellotti, R(1984)., "Chamber size effects and boundary conditions effects," Proc. Seminar on Cone Penetration Testing in the Laboratory, University of Southampton, pp.26-29.
- Dahlberg, R(1974)., "The effect of overburden pressure on the penetration resistance in a preloaded natural sand deposit," Proc. 1st European Symposium On Penetration Testing, Stockholm, Vol.2 : 2, pp.89-91.
- Houlsby, G.T(1989)., "Discussion on paper 14-19," Penetration Testing in the UK, ICE, Birmingham, pp.180.
- Houlsby, G.T. & Hitchman, R(1988)., "Calibration chamber tests of a cone penetrometer in sand," Geotechnique Vol.38, pp.39-44.
- Lee, M.W(1987)., "End bearing capacity of a pile in cohesionless soils," PhD Thesis, University of Birmingham.
- Meigh, A.C(1989)., "Discussion on paper 14-19," Proc. Penetration Testing in the UK, Birmingham, pp.183.
- Melzer, K.J(1968)., "Sondenuntersuchungen in Sand," Dissertation D82, Technischen Hochschule, Aachen.
- Mitchell, J.K. & Keaveny, J.M(1986)., "Determining sand strength by cone penetrometer," Proc In-situ '86, ASCE Specialty Conference, pp.823-839.
- Nageswaran, S(1984)., "Theoretical study of boundary effect using finite element method," Proc. Seminar on Cone Penetration Testing in the Laboratory, University of Southampton, pp. 30-35.
- Parkin, A.K., & Lunne, T(1982)., "Boundary effects in the laboratory calibration of a cone penetrometer for sand," NGI Publication No. 138, pp.307-312.
- Proceedings, Seminar on Cone Penetration Testing in the Laboratory, Appendix B, NGI tests, 1984.
- Schmertmann, J.H(1972)., "Effect of in-situ lateral stress on friction cone penetrometer data in sand," Proc. Fugro Sondeer Symposium, Fugro-Cesco, Holland, pp.37-39.
- Schmertmann, J.H(1987)., "Cone penetration test. Performance and design," US Department of Transportation, FHWA-TS-78-209.
- Tcheng, Y(1966)., "Fondations profondes en Milieu Pulverulent a Diverses Compacities Annales de l'Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics," Sols et Fondations, 5 4, Nos. 219-220.
- Vesic, A.S(1972)., "Expansion of cavities in infinite soil mass," Proc. ASCE, Vol.98, SM3, pp.265-290.
- Villet, W.C.B. & Mitchell, J.K(1981)., "Cone resistance, relative density and friction angle," Proc. Cone Penetration Testing and Experience, Geotechnical Engineering Division, ASCE, pp. 178-207.

(접수일자 1990. 10. 12)