

Cone Pressuremeter를 이용한 점성토의 전단 강도 산정

Determination of Undrained Shear Strength in Clay from Cone Pressuremeter Test

이 장 덕¹ Yi, Chang-Tok

Abstract

The cone pressuremeter test (CPM) is a new in-situ test which combines a standard cone penetration test with a pressuremeter. The cone pressuremeter tests in clay are presented and analyzed. An analytical solution of CPM incorporated non-linear soil behavior with no volume change is presented, and curve fitting technique is proposed to make use of both the loading and unloading portions of the pressuremeter test. The proposed method is accomplished by putting greater emphasis on the unloading portion. Twenty CPM tests are analyzed using the proposed method, and the derived undrained shear strength of soil is compared with other tests such as field vane tests and laboratory tests. The interpreted soil parameters had reasonable values when compared to other in-situ and laboratory test results. The cone pressuremeter has provided reliable measures of undrained shear strength using curve fitting method.

요 지

콘프레셔미터는 피에조콘 시험과 프레셔미터 시험을 동시에 수행할 수 있는 현장시험기로서 본 연구에서는 국내 점토지반에서 수행한 시험결과를 해석적으로 분석하였다. 콘프레셔미터 결과에 대한 이론적인 해는 흙이 비선형 거동을 하는 경우와 전단변형 중 체적변화가 발생하지 않는 경우에 대하여 해석적인 해가 존재한다. 이러한 해석적인 해로부터 콘프레셔미터의 결과중 하중 재하구간과 제하구간에 대해 Curve Fitting 방법을 사용한 콘프레셔미터 결과의 해석 방법을 제안하였다. 20개소의 현장에서 수행한 콘프레셔미터 결과 중 지반교란의 영향을 적게 받는 제하구간에 대하여 Curve Fitting 방법을 적용하여 점성토의 비배수 전단특성을 구하였다. 이렇게 구한 지반의 비배수 전단강도와 현장 Vane, 일축압축, 삼축압축 시험결과로부터 구한 지반의 비배수 전단강도를 서로 비교하여 콘프레셔미터 시험 결과로부터 Curve Fitting 방법을 통한 점성토 지반의 전단강도 특성파악의 적정성에 대해 평가하였다.

Keywords : CPM, Curve fitting, Undrained shear strength, Unloading portion

1. 서 론

Cone Pressuremeter(CPM)은 Dalton(1986)에 의해 처음으로 제안된 시험장치로 콘과 Pressuremeter를 결합시킨 현장 시험 장치이다. 즉, 콘시험 장치 뒤에 콘의 직경보다 약간 큰 Pressuremeter를 연결하여 콘시험과 Pressuremeter 시험을 동시에 할 수 있는 장점이 있다. 일

반적으로 Pressuremeter는 지층의 강성(Stiffness)과 강도(Strength)를 측정할 수 있는 이론적 해가 존재하는 현장 시험 방법인데 Pressuremeter 시험결과와 신뢰도는 시험 장비 설치시 발생하는 지반의 교란과 직접적인 관계가 있는 것으로 알려져 있다. 1956년 Menard에 의하여 개발된 Pressuremeter 시험기는 선굴착(Pre-bord, PMT)방법과 자가 굴착(Self-bord, SBPT)방법으로 구분할 수 있

¹ 정회원, 두우건설엔지니어링, 연구소장 (Member, Chief, DooWoo Construction Engrg. Co. Ltd., ctyii@hanmail.net)

는데, SBPT는 설치시 지반교란을 최소화 할 수 있는 장점이 있고 비교적 연약한 지층에 적용이 가능하다. 반면 CPM은 일반적인 Pressuremeter 시험기와는 달리 시험중 지표면에서 밀어 관입하는 Push in Pressuremeter (PIP)와 같은 형식의 시험 방법으로 지표면에서 콘을 관입시킬 때 말뚝 관입과 같이 콘주위의 흙들이 밀려나면서 시험 hole을 형성하게 되므로 Full-displacement Device라 부른다. 이렇게 Pressuremeter로부터 구한 지반 물성치는 수평력이 작용하는 말뚝거동 해석에 필요한 p-y곡선을 구하는데 효과적일 뿐 아니라, 말뚝의 관입 과정과 비슷하여 동공확장이론(Cavity Expansion Theory)을 이용한 말뚝의 선단지력 평가가 뿐 아니라 지반의 공학적 특성을 신뢰성 있게 평가할 수 있는 것으로 알려져 있다(Houlsby & Withers, 1988).

Pressuremeter 설치시 지반교란은 Pressure-Cavity Strain으로 표시되는 시험결과에 중대한 영향을 미친다. 지반교란을 최소화 할 수 있는 SBPT조차도 설치시 어느 정도 지반교란이 발생하고(Clough et al.,1990) 이러한 지반교란은 Pressure-Cavity Strain의 초기 곡선 형태에 영향을 미치게되므로 이 곡선의 기울기로 정의되는 Pressuremeter Modulus(E_m)는 지반교란에 매우 민감한 것으로 알려져 있다. 그러나 변위가 크게 발생하면서 정의되는 Limit Pressure(PI) 값은 PMT 나 SBPT 모두 신뢰성이 있는 것으로 알려져 있다. 적은 변위에서 발생하는 Pressure-Cavity Strain은 교란에 영향을 크게 받는 반면 큰 변위가 발생한 것을 기준으로 구하는 Limit Pressure는 지반교란의 영향을 적게 받는 것으로 알려져 있다. Gibson and Anderson (1961)이 지반을 탄성이라 가정하고 비배수 상태에 대한

공내재하 시험의 해석적 해를 Cavity Expansion Theory를 근거로 유도한 이래 비선형 거동까지 포함하는 해석적 해가 제안되고 있다(Jefferies, 1988; Hughes and Robertson, 1985; Schnaid and Houlsby, 1990). 이러한 해석적 해에 의하면 Pressuremeter 시험의 제하(Unloading) 단계가 지반교란에 영향을 받지 않는 것으로 알려져 있으나 이러한 해석적 해는 미소변형을 근거로 유도되어 시험기 직경이 PMT, SBPT 보다 작은 CPM의 경우 적은 체적에서도 변위가 많이 발생하므로 미소변형을 이용한 기존의 제안된 식을 이용하는데 한계가 있는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 국내에 도입된 CPM 장비를 이용하여 국내 서해안 연약지반에서 수행한 20회의 시험 성과를 분석하였다. 대변형을 이론에 적용할 수 있는 이론해(Houlsby and Withers, 1988)를 이용하여 지반교란의 영향이 없는 제하 영역으로부터 지반의 비배수 전단강도를 구할 수 있는 방법을 제시하였다. 또한 이 방법으로 구한 비배수 전단강도와 동일 심도에서 수행된 현장 Vane 시험 및 동일 심도에서의 불교란 시료로부터 구한 일축압축, 삼축 압축 시험으로부터 구한 비배수 전단강도를 비교 분석하여 본 연구에서 제시한 해석 방법의 적용성을 평가하고자 한다.

2. 현장시험

2.1 CPM시험 장치

본 연구에 사용한 CPM의 제원은 그림 1에서 보는 바와 같이 외경이 43.7mm인 콘 뒤편에 약 400mm 길이의

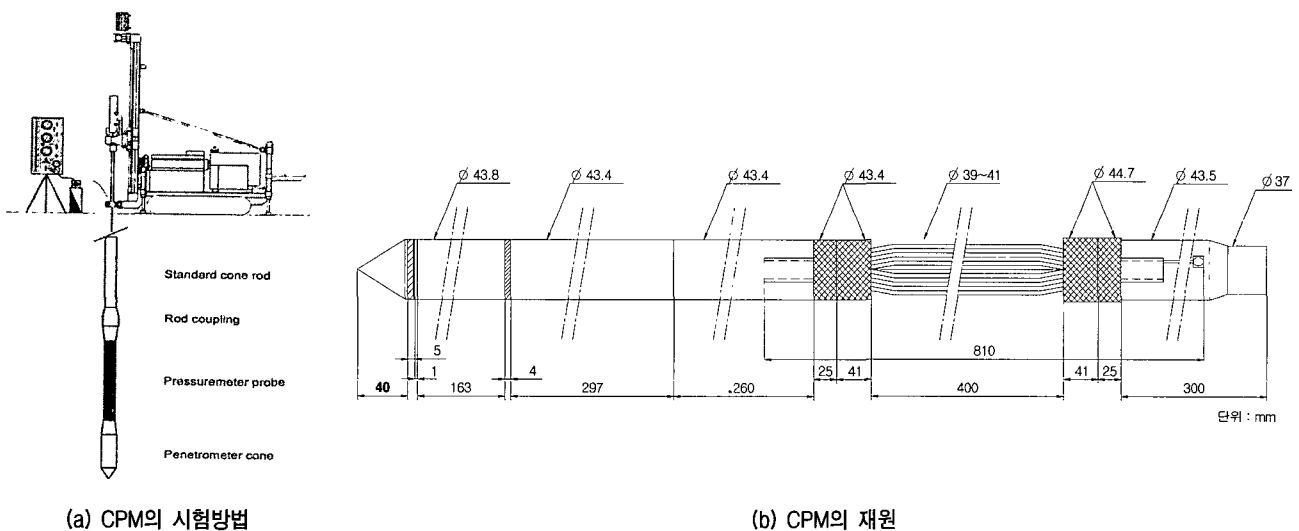


그림 1. CPM의 재원과 시험방법

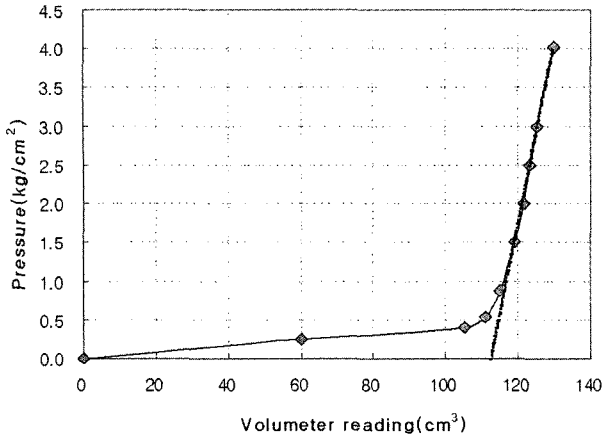


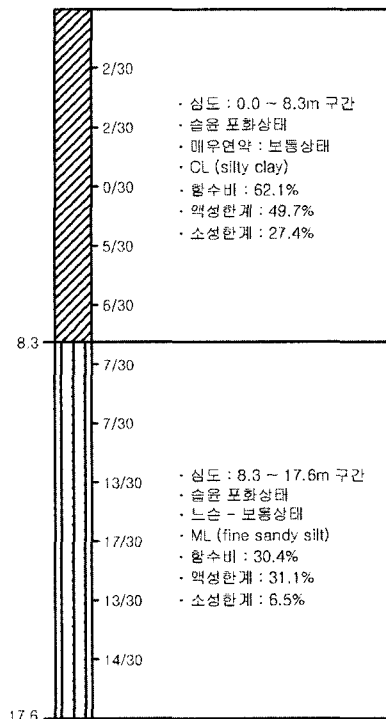
그림 2. PMT의 Pressure Loss의 보정곡선

Pressuremeter의 Membrane이 연결되어 있다. 고무 Membrane의 직경은 39~41mm로 Membrane의 강성에 따라 약간의 두께차이가 있다. Membrane을 양쪽에 고정시켜 주는 Coupling의 직경은 44.7mm로 콘의 직경보다 1mm 정도 큰 것으로 되어 있다. 고무로 되어 있는 Membrane은 질소 가스압에 의해 주입되는 물에 의해 팽창되고 팽창된 체적은 주입된 물의 양으로 측정되며 Volumetric Strain ($\frac{\Delta V}{V}$)이나 Cavity Strain ($\frac{\Delta R}{R}$)로 환산할 수 있다. Membrane은 Mono-cell 형식으로 Coupling 끝단에서부터 팽창하게 되어 있으며 시험 대상 지반에 따라 강성이

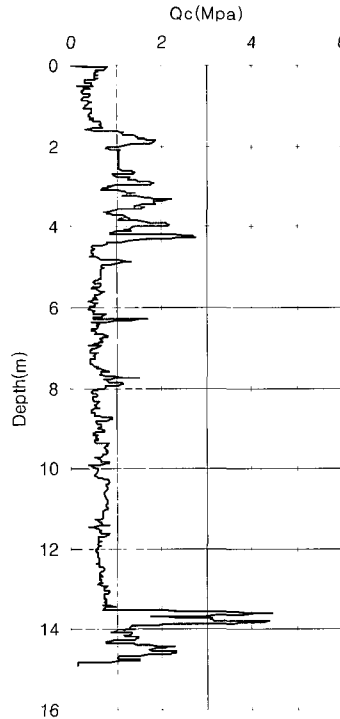
다른 Membrane을 사용하고 시험중 손상을 방지하기 위하여 알루미늄 커튼 등으로 보호하게 되어 있는 Membrane을 사용하기도 한다. 그러므로 시험전 사용하고자하는 Membrane에 대한 보정이 반드시 필요하다. CPM 보정은 Volume Loss와 Pressure Loss로 구분할 수 있는데, Volume Loss는 물이나 장비 내부에 부분적으로 포함되어 있는 공기 등이 시험중 가해지는 압력에 의해 물 속으로 용해되어 발생하는 체적 변화를 보정하는 것으로, 주로 고압이 필요한 암반시험 등에서 필요한 보정이므로 본 시험에서는 Pressure Loss에 대한 보정만을 수행하였다. Pressure Loss의 보정은 직경이 45mm인 철재 Casing에 CPM Probe를 넣은 후 가압하면서 압력과 체적 변화관계를 나타낸 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 압력이 어느 정도 가해지면 Membrane이 어느 정도 팽창하게 되어 철재 Casing에 완전 밀착하게 되어 더 이상 체적변화는 없고 압력만 증가하는 양상을 보인다. 이러한 관계로부터 Membrane 자체가 팽창에 필요한 압력을 파악함으로써 시험시 PMT의 압력이 실제 지반에 작용하는 압력이 되도록 하기 위한 보정이 Pressure Loss 보정이다.

2.2 지반 조건

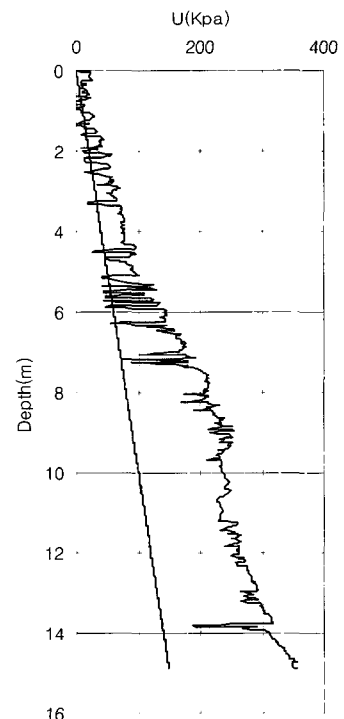
CPM이 수행된 지반은 서해안의 대표적인 연약지반



(a) 지반조건



(b) CPT 시험결과(콘 저항력)



(c) CPT 시험결과(간극수압)

그림 3. CPM 시험이 수행된 지반조건 및 CPT 시험결과

의 형태를 보이는 곳으로 주로 세립질의 실트질이 우세한 점토지반이며 통일 분류법에 의하면 CL, ML층으로 분류되고 조류의 영향에 의해 형성된 해성 퇴적으로 부분적으로 불균질한 지층형상을 보이기도 하지만 전반적으로 넓은 지역에 비슷한 지층형태를 가지는 것으로 조사되었다. 이러한 현장 지층상태를 보인 것이 그림 3이다. 그림에서 보는 바와 같이 상부 퇴적토층은 N치가 0~2정도의 매우 연약한 연경도를 보이는 실트질 점토가 심도 6.0m까지 분포하고 있고, 그 하부지층은 N치 5~6정도의 비교적 중간정도의 연경도를 보이는 실트질 점토가 분포하며 실트질 점토하부에는 N치 7이상인 실트질 모래가 존재하는 지층으로 구성되어 있다. 이러한 지층에서 CPT 시험을 수행한 결과로 qc 값의 심도에 따른 변화를 보이고 있는데, 상부층에서는 qc 값의 변화가 심한 반면 심도 6.0m 이상에서는 변화가 크지 않을 뿐 아니라 콘시험시 발생하는 과잉간극 수압도 정수압보다 크게 발생하여 연약한 점토층이 약 11.0~12.0m까지 분포하는 것으로 조사되었다. 이러한 점성토 지반에서 CPT와 현장 Vane 시험 그리고 불교란 시료채취 후 실내시험을 통하여 점토의 비배수 전단 강도를 평가하였다.

2.3 CPM 시험과 이론적 해

CPM 시험은 콘 관입시험과 동시에 수행되었으며 지표면으로부터 5.0~10.0m 하부의 점토층에 10개소의 위치에서 개소 당 2회씩 심도를 달리하면서 총 20회의 시험을 수행하였다. 점토의 비배수 전단강도는 시험시간과 직접적인 관계가 있는 것으로 시험시간이 길어지면 점토지반의 체적변화가 발생하므로 비배수 전단강도가 크게 평가될 수 있는데, 본 현장 지층과 같이 세립질의 실트가 우세한 지층에서는 시험소요시간이 점토의 비배수 전단강도 평가에 오류를 발생시킬 수도 있다. 본 현장에서 CPM 시험에 소요한 시간은 약 20~25분 정도로 지반의 투수계수가 10^{-6} cm/sec 정도인 것을 고려하면 비배수 조건으로 판단되어 해석상에 오류는 없을 것으로 판단된다. 그림 4는 심도 7.5m와 9.0m에서 수행한 CPM 시험의 결과를 압력-체적의 관계와 압력-Cavity Strain의 관계로 표시한 것이다.

Teh(1987)는 콘 관입시 콘 선단에서 발생하는 응력분포가 Cylindrical Cavity Expansion Theory에 의해 발생하는 응력분포와 유사한 것을 규명하였다. 즉 CPM은

콘에 의해 지반에 동공이 만들어지고 이 동공이 압력에 의해서 팽창하는 Cylindrical Cavity Expansion Theory로 해석할 수 있다. Cylindrical 이론을 적용하는데, CPM의 Probe 길이와 직경비가 무한하여야 평면 변형률 원리를 적용시킬 수 있으나 L/D가 10 정도 되면 이론해 적용에 문제가 없는 것으로 알려져 있다(Houlsby & Withers, 1988). NX직경의 시추공에 적용하기 위한 기존 PMT의 Probe의 직경이 73mm 보다 훨씬 작은 44mm이므로 외부에서 CPM의 Probe로 주입되는 물의 양이 많지 않아도 주입된 물의 체적으로부터 Cavity Strain을 환산하면 그림 4에서 보는 바와 같이 35~40%까지 변형이 발생하는 것을 볼 때 이론적 해를 구함에 있어 소변형률 이론보다는 대변형률 이론을 적용하는 것이 보다 합리적일 것으로 판단된다. 또한 점토지반에 전단 발생시 체적변화가 없는 것으로 가정하였을 뿐 아니라, 응력변형률 관계를 탄소성으로 가정하여 Tresca 모델을 적용하였다. 일반적으로 소변형률 이론의 접근 방법은 탄성변형만 고려하여 탄성이론으로 구할 수 있는 반면(Gibson & Anderson, 1961) 대변형률 이론의 접근 방법은 소성변형까지 고려하여 소성이론으로 해석적 해를 유도해야 한다. 즉, Cylindrical Cavity Expansion Theory에 소성거동을 고려하여 해석적 해를 유도할 수 있다.

Timoshenko와 Goodier(1934)는 축대칭(cylindrical)인 경우 다음과 같은 평형방정식을 유도 하였다. 그림 5는 축대칭(cylindrical)의 경우 효요소에 작용하는 응력을 표시한 것이다.

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (1)$$

여기서 σ_r : radial stress, σ_θ : hoop stress

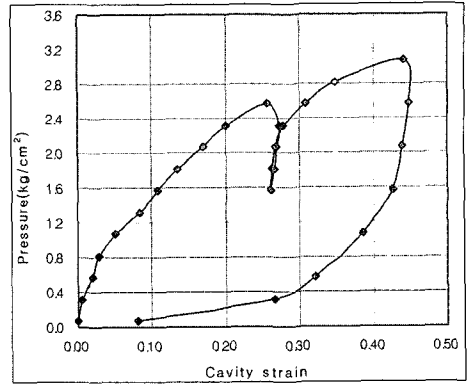
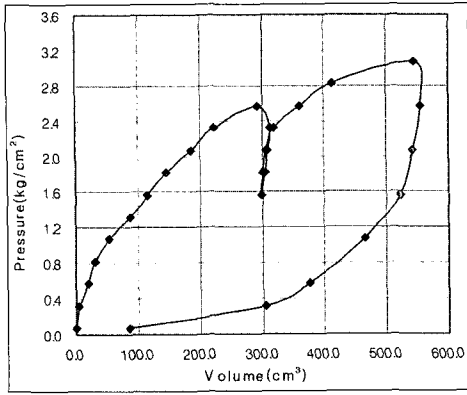
직경을 r, 직경 방향으로 발생하는 변위를 y라고 하면 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\epsilon_r = -\frac{dy}{dr} \quad (2)$$

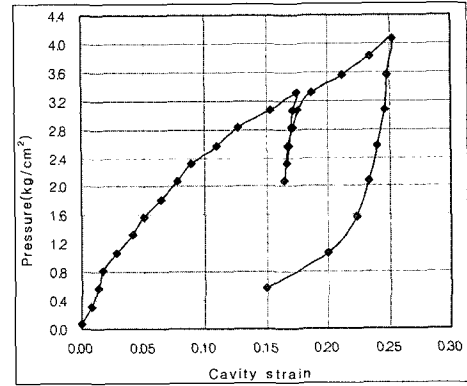
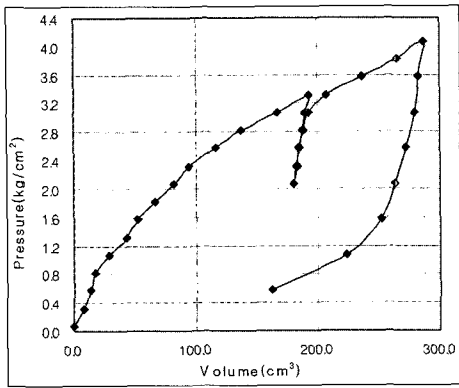
$$\epsilon_\theta = -\frac{y}{r} \quad (3)$$

여기서 ϵ_r : radial strain, ϵ_θ : hoop strain

탄성론의 평면 변형률원리를 적용하고 식 (2), (3)을 식 (1)에 대입하여 y에 대한 미분방정식을 유도하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.



(a) 심도 7.5m 압력-체적, 압력-Cavity Strain의 관계곡선



(b) 심도 9.0m 압력-체적, 압력-Cavity Strain의 관계곡선

그림 4. CPM 시험의 시험결과

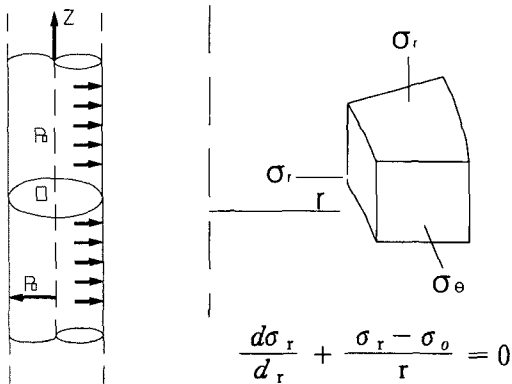


그림 5. Cylindrical Cavity에 작용하는 응력

$$\frac{d^2 y}{dr^2} + \frac{dy}{dr} - \frac{y}{r} = 0 \quad (4)$$

위 식 (4)의 미분방정식의 해는 식 (5)로 나타낼 수 있으며 여기서 A, B는 적분상수이다.

$$y = Ar + \frac{B}{r} \quad (5)$$

식 (5)에 경계조건을 적용시키면 $r=\infty$ 인 경우 발생

하는 변위 y 는 0이 되어야하므로 $A=0$ 이 된다. 그러므로 (5)의 해를 이용하면 $\epsilon_\theta = -\frac{B}{r^2}$, $\sigma_\theta = 2G\epsilon_\theta$, $\sigma_r = -2G\epsilon_\theta$ 등의 응력-변형률관계를 구할 수 있다. 이러한 탄성론에 의한 해는 Gibson과 Anderson(1961)에 의해 이미 발표되었다. 만약 점토의 파괴기준으로 Tresca 모델을 적용하면 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma_r - \sigma_\theta = 2S_u \quad (6)$$

여기서 G : 전단탄성계수, S_u : 비배수 전단강도

식 (6)을 식 (1)에 대입하여 소성상태를 고려한 평형 방정식을 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2S_u}{r} = 0 \quad (7)$$

식 (7)의 미분방정식을 풀면 다음 식 (8)과 같다.

$$\sigma_r + 2S_u \ln(r) = A \quad (8)$$

식 (8)의 초기 조건을 고려하여 정리하면 다음과 같이

쓸 수 있다.

$$P = \sigma_{r1} + 2S_u \ln\left(\frac{r}{R_e}\right) \quad (9)$$

여기서 P는 PMT의 팽창압력이고 R_e 은 CPM Probe의 초기반경이다.

파괴시 체적 변화가 없으므로 적합조건(Compatibility Condition)을 적용하면 다음 식 (10)이 성립한다.

$$r_{eo}^2 = r_{ee}^2 - R_e^2 \quad (10)$$

여기서 r_{eo} 은 Probe가 최대 팽창하였을 때 탄성-소성경계까지의 반경이고 r_{ee} 는 Hoop Strain $\epsilon_{\theta e}$ 을 나타내는 탄소성 영역까지의 반경이다. 식 (10)을 다시 쓰면 식 (11)과 같으며 소변형률 이론에서는 Cauchy Strain을 사용하지만 대변형률 이론인 경우 Hencky Strain ($\ln(\frac{R}{R_i})$)을 사용하여 Hoop Strain $\epsilon_{\theta e}$ 을 나타내면 식(12)로 나타낼 수 있다.

$$\left[\frac{R_e}{r_{ee}}\right]^2 = 1 - \left[\frac{r_{eo}}{r_{ee}}\right]^2 \quad (11)$$

$$\epsilon_{\theta e} = \ln(r_{eo}/r_{ee}) \quad (12)$$

Vesic(1963)의 강성지수(Ir)를 이용하여 Hoop Strain ($\epsilon_{\theta e}$)을 다시 쓰면 다음과 같이 표현된다.

$$\left[\frac{R_e}{r_{ee}}\right]^2 = -2\epsilon_{\theta e} = \frac{1}{I_r} \quad (13)$$

반경이 r_{ee} 일 때 $\sigma_{r1} = \sigma_{ho} + S_u$ 와 같이 쓸 수 있으므로 식 (9)를 다시 정리하면 다음과 같다.

$$P_e = \sigma_{ho} + S_u [1 + \ln(I_r)] \quad (14)$$

식 (14)는 CPM의 재하(loading)시에 적용하는 공식이며 PMT 제하(unloading)시 적용하는 이론 식을 정리하면(Houlsby & Withers, 1986) 다음과 같다.

$$P = P_e - 2S_u \left[1 + \frac{1}{I_r} - (\epsilon_e - \epsilon)\right] + \ln\left(\frac{\exp(2 \times (\epsilon_e - \epsilon)) - 1}{\exp(2/I_r) - 1}\right) \quad (15)$$

위와 같이 흙의 소성변형과 대변형률 이론을 고려한 재하 및 제하시 Pressure - Cavity Strain관계를 식 (14), (15)로 나타낼 수 있다.

3. 이론 식을 이용한 점토의 비배수 강도 산정

점토의 비배수 전단강도를 측정하기 위한 직접전단 시험이나 현장 Vane 시험은 흙의 파괴시 주응력 방향의 변화로 인하여 강도의 크기에 차이를 보이게 되므로 흙의 비배수 전단강도는 그 지반의 유일한 값이 아니다. 일반적으로 PMT 시험으로부터 구하는 점토의 비배수 전단강도는 P-ln($\Delta V/V$) 곡선을 이용하는 방법과 Pl(Limit Pressure)에 의해 구하는 방법으로 구분할 수 있다. P-ln($\Delta V/V$) 곡선을 이용하는 방법은 압력(P)과 체적변화($\Delta V/V$)의 관계를 무한정 연장하여 직선부분의 기울기로부터 점토의 비배수 전단강도를 구할 수 있다. 이 경우 PMT 주변의 흙은 어느 정도 변위에 완전한 소성체로 거동하게 되는데 이 때의 강도를 점토의 비배수 전단강도라 정의한다. Cylindrical Cavity Expansion Theory에서 Pressure-Strain의 관계는 변형률(Strain Rate)이 흙의 거동에 영향을 미치지 않은 것으로 되어 있으나 실제로 모든 흙에서 변형률이 10배 증가함에 따라 흙의 강도와 강성이 약 10%증가하는 것으로 알려져 있다. 또한 PMT 시험시 Probe 주위의 흙의 변형률은 Probe 직경의 제곱에 반비례하는 것으로 알려져 있어 CPM 시험시 시험 소요 시간이 20~25분에 도달하면 Cavity Strain은 25~30%에 도달하여 약 1%/min의 변형률의 범위에서 시험이 수행되는 것을 알 수 있다. Pl(Limit Pressure)을 이용하여 구하는 비배수 전단강도 값은 흙을 완전한 탄소성이라 가정하였을 경우의 Cylindrical Cavity Expansion Theory에서 다음 식으로 유도할 수 있다. 먼저 PI은 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$PI = \sigma_{h0} + c_u [1 + \ln(G/c_u)] \quad (16)$$

이론적으로 $\Delta V/V=1$ 인 경우를 PI값으로 정의한다. 여기서 $c_u = (P_c - \sigma_{h0})/[1 + \ln(G/c_u)]$ 으로 CPT 시험에서 비배수 전단강도를 구하는 것처럼 $c_u = (P_c - \sigma_{h0})/N_p$ 형식으로 나타낼 수 있다. Canadian Foundation Manual에서는 N_p 값으로 5.5의 사용을 제시하고 있다. 하지만 G값은 Strain의 함수로써 G값의 함수인 N_p 값이 일정하다고 볼 수 없다. 실제 PMT 시험결과로부터 점토의 비배수 전단강도를 구하기 위해서 적용되는 위의 두 가지 방법은 P-($\Delta V/V$)의 관계가 직선적으로 변화할 때까지 압력과 체적변화가 발생해야 하나 CPM의 경우 기존의 PMT Probe보다 직경이 훨씬 작아 $\Delta V/V=1$ 인 상태 즉 Pl(Limit Pressure)에서도 P와 ln($\Delta V/V$)의 관계가 그림 6

과 같이 직선의 경향을 완전하게 보이지 않으므로 CPM 시험으로부터 점토지반의 비배수 전단강도를 구하는 것은 신뢰성에 문제가 될 수 있다.

그러므로 본 연구에서는 현장에서 수행된 CPM 시험 결과로부터 이론 식의 비배수 전단강도를 구하기 위하여 Curve Fitting Technique을 이용하였다. 사용한 프로그램은 Kaleidagraph™(Version 2.1)로 Macintosh Micro

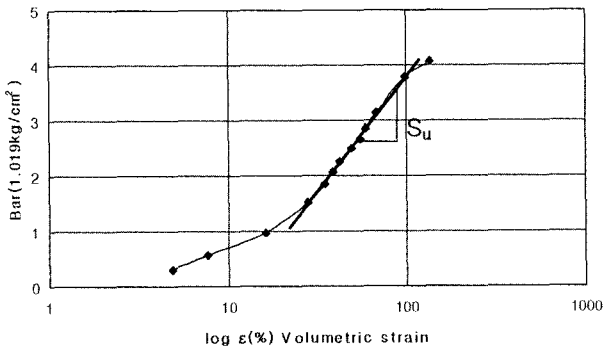


그림 6. 압력(P)과 $\ln(\Delta V/V)$ 의 관계

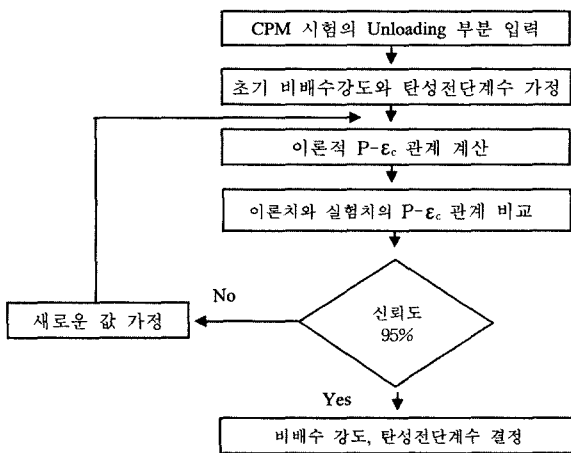
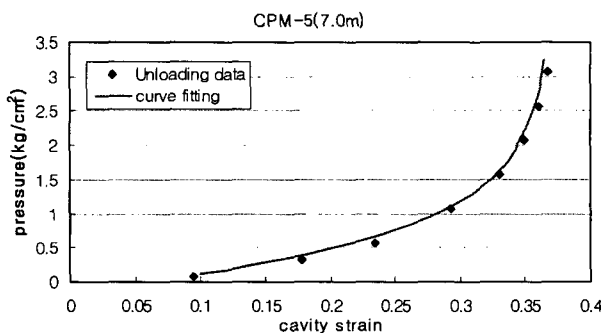


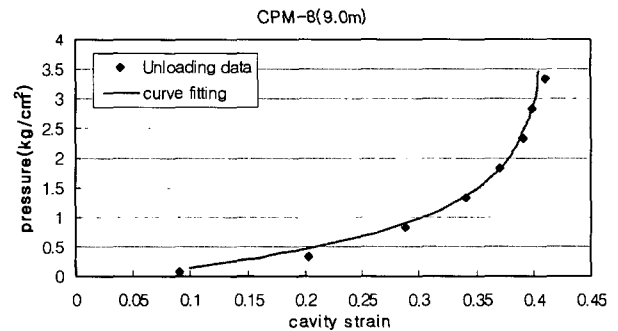
그림 7. Curve Fitting에 의한 비배수 전단강도와 전단탄성계수를 결정하는 순서도



(a) 심도 7.0m에서 압력-Cavity Strain의 관계

Computer-용이며, 계산과 그래프 및 Curve Fitting을 할 수 있는 장점이 있다. 현장시험 데이터들을 Membrane의 강성을 보정한 후 Kaleidagraph의 worksheet에 Curve Fitting 작업이 가능하도록 입력하였다. 입력후 재하(Loading)와 제하(Unloading)의 두 부분으로 구분하여 제하부분에 대해 Pressure Cavity Strain으로 표시한다. 이론식 중 제하구간에 해당하는 식 (15)를 Curve Fitting 할 수 있는 기본식으로 입력하고 비배수 전단강도와 강성지수(Rigidity Index)를 변수로 하여 시험데이터를 최적으로 연결하는 비배수 전단강도와 강성지수를 찾는다. 이론식은 자동으로 그래프 형식으로 모니터에 표시되며 시험데이터 역시 동시에 이론식으로 그래프와 함께 표시되므로 Curve Fitting의 정확도를 직접 눈으로 확인할 수 있는 장점이 있다. 또한 Curve Fitting의 정확도를 신뢰도(R)로 표시할 수 있다. Curve Fitting에 의한 비배수 전단강도와 전단탄성계수를 결정하는 순서도는 그림 7과 같다.

실제 CPM의 시험은 재하와 제하부분으로 구성되어 있으며, 재하부분은 시료의 교란, Creep등으로 인해 시험의 신뢰도에 영향을 받는 것으로 알려져 있어 이러한 영향을 적게 받는 제하부분을 중심으로 분석하였다. 이러한 분석의 예를 보인 것이 그림 8이다. 그림에서 보는 바와 같이 하중제하 부분에 대하여만 분석을 수행하였으며 점토의 비배수 전단강도와 강성지수(Rigidity Index)를 구하였다. 또한 Curve Fitting의 신뢰도(R)는 최소 95% 이상으로 Curve Fitting의 신뢰성을 확보하도록 하였다. Curve Fitting을 통해 지반의 강성지수(Rigidity Index)도 구할 수 있지만 강성지수로부터 구한 지반의 전단변형계수(G)값은 변형률에 따라 그 값에 차이가 있으므로 삼축시험이나 일축시험의 결과와 서로 비교하는 것은 CPM시험의 신뢰성의 평가를 위한 본 논문의 취지와 다



(b) 심도 9.0m에서 압력-Cavity Strain의 관계

그림 8. 제하(unloading)부분에 대한 Curve Fitting 결과

르므로 일축, 삼축압축시험 그리고 현장 Vane 시험으로 구한 흙의 비배수 전단강도와 비교하여 CPM 시험의 그 적용성을 평가하였다.

4. CPM 시험에 의한 비배수 전단강도

CPM 시험의 신뢰성을 평가하기 위하여 현장시험인 Vane과 일축, 삼축압축시험과 비교하였다. 일축, 삼축압축시험은 CPM 시험의 PMT 시험이 수행된 동일한 위치의 심도에서 수행하였으며 현장 Vane 시험 또한 동일한 위치에서 깊이에 따라 수행하였고 소성지수(Plasticity Index)로 보정하여 깊이에 따른 지반의 전단강도를 나타내었다. 이러한 시험이 수행된 지반은 하부점토층이 비슷한 형상을 보이는 것으로 조사되었다.

일반적으로 실내시험의 일축압축시험과 삼축압축시험의 경우 시료교란의 영향이 없으면 일축압축시험과 삼축압축시험에 의한 비배수 전단강도는 비슷한 값을 보인다. 하지만 시료가 교란된 경우 일축압축시험은 수분내에 시료가 파괴상태에 도달하게 되어 삼축압축시험의 경우보다 훨씬 빠른 변형률(Strain Rate)를 가지며 이 경우 일축압축시험에 의한 점토의 비배수 전단강도는 삼축압축시험에 의한 비배수 전단강도보다도 5~15%정도 크게 평가된다. OCR이 크거나 시료에 약한 부분이 있는 점토의 경우에도 삼축압축시험의 구속압의 영향으로 점토의 비배수 전단강도를 증가시킬 수 있는데 이 경우에도 비배수 전단강도는 일축압축시험에 비해 5%이상 크지 않는 것으로 알려져 있다. 그러므로 일축압축시험과 삼축압축시험으로 수행한 점토의 비배수 전단강도는 교란과 Strain Rate에 대한 영향을 감안할 때 비슷한 경향을 보이는 것으로 알려져 있다. 점토의 비배수 전단강도는 파괴에 이르는 속도가 빠르면 빠를수록 강도는 증가하는 것으로 알려져 있다. 또한 현장 Vane 시험의 결과는 Vane 관입시 지반교란에 직접적인 영향을 미치는 Vane의 크기, 관입후 시험을 위한 대기 시간, 회전시 Strain Rate등이 Vane 시험의 결과에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. Arman등(1975)은 점토의 비배수 전단강도를 서로 다른 현장 Vane, 실내 Vane, 일축압축강도시험 그리고 삼축압축시험 결과와 비교 분석하였는데 서로 성질이 다른 점토에서도 수행하였다. 점토의 비배수 전단강도를 깊이에 따라 비교한 결과 현장 Vane 시험이 일반적인 실내시험결과 보다 크게 평가된 것으로 분석되었다. 그런데도 실내에서 수행했던

Vane 시험은 일축이나 삼축압축시험의 결과와 비슷한 양상을 보이는 것으로 분석되어 실내시험과 현장 Vane 시험에 의한 비배수 전단강도의 차이는 시료채취시, 운반등 시료의 취급과정 중에서 발생하는 시료 교란의 영향이 상당히 큰 것으로 평가하였으며 시험조건 등도 영향이 있는 것으로 분석되었다.

그림 9는 본 현장지역에서 수행한 일축, 삼축압축시험 그리고 현장 Vane 시험의 결과를 깊이에 따라 보인 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 일축압축시험의 강도가 가장 작게 평가되었으며 현장 Vane 시험이 다른 시험인 삼축압축시험과 CPM 시험의 결과보다도 약간 크게 평가된 것으로 보인다. 일반적으로 삼축압축시험 결과와 일축압축시험에 의한 비배수 전단강도는 비슷한 양상으로 평가되는 것이 보통이나 그림에서 보는 바와 같이 삼축압축시험과 일축압축시험 사이에 차이를 보이는 것은 점토의 퇴적으로 인한 생성시 Cementation이나 Premature Failure 그리고 시료의 교란 등의 영향으로 평가된다. 하지만 CPM 시험에 의한 비배수 전단강도는 전반적으로 삼축압축시험 결과와 비슷한 양상을 보이며 현장 Vane 시험보다는 작게 평가되는 것으로 분석되었다.

시추공 BH-11과 BH-17에서 동일한 깊이에서 수행한 시험결과를 보인 것이 그림 10이다. 그림에서 보는 바와 같이 삼축압축시험과 CPM에 의한 흙의 비배수 전단강도는 비슷한 분포를 보이는 것으로 평가되었으며 일축압축시험에 의한 비배수 전단강도보다 큰 것으로 평가

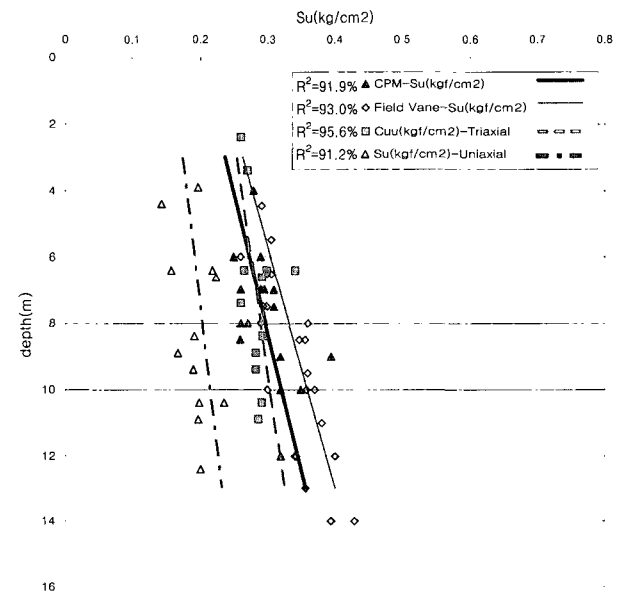
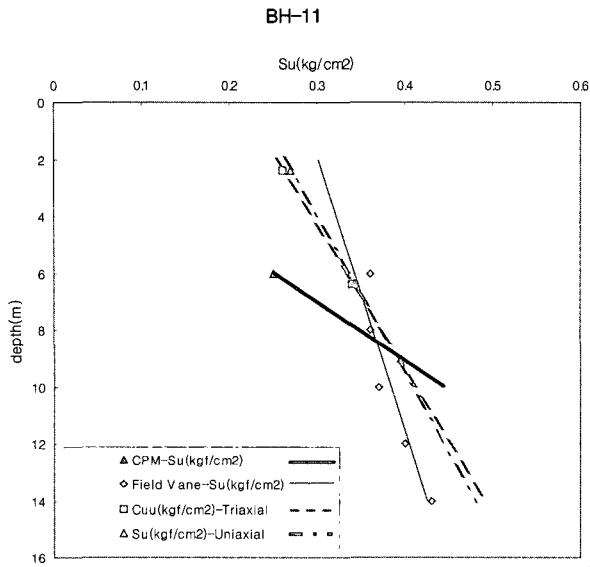
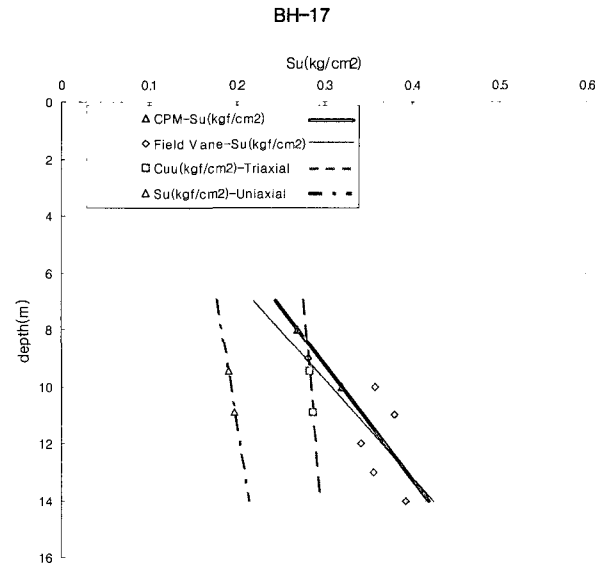


그림 9. 전체 시추공에서 시행한 각 시험별 비배수 전단강도 비교



(a) BH-11에서 수행한 비배수 전단강도



(b) BH-17에서 수행한 비배수 전단강도

그림 10. 각 시추공별 비배수 전단강도 비교

되었고, 현장 Vane 시험보다는 전반적으로 작게 평가되었다. Wroth(1984)에 의하면 PMT에 의해 평가한 점토지반의 비배수 전단강도가 종종 크게 평가되는 것으로 관찰되었다 하였으며 간혹 현장 Vane 시험보다도 크게 평가되어 이러한 이유로 두 시험간의 서로 다른 응력경로 때문인 것으로 분석하고 있다. 또한 PMT 시험시 발생하는 배수, Creep 효과 등이 실트질 점토에서 PMT에 의한 비배수 전단강도를 크게 평가하게 하는 요인인 것으로 알려져 있다(Anderson and Pyrah, 1986; Williams, 1986).

본 연구에서 CPM의 Large Strain을 포함하는 Cylindrical Cavity Expansion Theory를 근거로 한 제하(Unloading) 부분에 대한 비배수 전단강도를 Curve Fitting 방법으로 평가한 결과 그 분포가 삼축압축시험과 현장 Vane 시험으로 평가한 값 사이에 존재하는 것으로 분석되어 CPM 시험결과를 Curve Fitting 방법을 이용하여 지반의 비배수 전단강도를 평가할 경우 지반물성치 산정에 문제가 없는 것으로 평가되었다.

5. 결론

국내 서해안 지역에서 수행한 CPM 시험과 현장 Vane 시험, 불교란 시료채취 후 수행한 일축, 삼축압축시험을 통해 국내에서 처음 적용되는 CPM 시험의 현장적용성을 평가하였다. 점토의 공학적 특성 중에서 비배수 전단강도를 각 시험의 결과와 비교분석 하였다. CPM 시험

은 Cylindrical Cavity Expansion Theory라는 이론적인 해가 존재하며 Large Strain과 지반을 탄소성으로 가정한 이론식을 이용한 Curve Fitting 방법을 제안하여 비배수 전단강도를 구하여 CPM의 현장적용성을 평가하였으며 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) CPM 시험이 20~25분 소요된 것을 감안하여 점토지반을 비배수 상태로 고려하고 대변형률을 적용한 이론해로부터 Curve Fitting 방법으로 CPM 시험에 의한 점토의 비배수 전단강도를 구한 결과 삼축압축시험에 의한 비배수 전단강도와 비슷한 분포를 보이는 것으로 평가되었고 일축압축시험에 의한 비배수 전단강도보다 큰 것으로 평가되었으며 현장 Vane 시험보다 전반적으로 작게 평가되어 CPM 시험과 Curve Fitting 방법을 이용하여 지반물성치를 산정하는데 문제가 없는 것으로 평가되었다.
- (2) CPM 시험중 하중 재하>Loading)단계와 제하(Unloading)단계 중 지반교란의 영향이 최소화 되는 것으로 알려져 있는 제하(Unloading)단계의 이론식으로부터 Curve Fitting 방법을 적용한 결과 이론식에 의한 값과 실험값 사이에 95%이상의 신뢰도를 보이는 것으로 분석되었다.
- (3) 추후의 CPM 시험을 통한 전단변형계수, 초기 지반응력 등 합리적인 지반의 물성과악에 많은 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Anderson, W. F., and Pyrah, I. C. (1986), "Undrained strength and deformation parameters from pressuremeter test results", *The Pressuremeter and Its Marine Applications*. Second International Symposium, pp.324-338.
2. Arman, A., Poplin, J. K. and Ahmad. (1975), "Study of Vane Shear", Proc. Conf. In-Situ measure. Soil Prop., ASCE, Vol.1, pp.93-120.
3. Clough, G. W., Briaud, J. L, and Hughes, J. M. O. (1990), "The development of pressuremeter testing", *Proceedings of the Third International Symposium on Pressruemeter*, Oxford, pp.25-45.
4. Ferreira, R. S., and Robertson, P. K. (1991), "Interpretation of Undrained self-boring pressuremeter test results incorporating unloading", *Canadian Geotechnical Journal*, October.
5. Gibson, R. E., and Anderson, W. F. (1961), "In situ measurement of soil properties with the pressuremeter", *Civil Engineering and Public Works Review*, 56, pp.615-618.
6. Houlby, G. T., and Withers, N. J. (1988), "Analysis of the cone pressuremeter test in clay", *Geotechnique*, 38, No.4, pp.575-587.
7. Hughes, J. M. O., and Robertson, P. K. (1985), "Full displacement pressuremeter testing in sands", *Canadian Geotechnical Journal*, 22, No.3, pp.298-307.
8. Jefferies, M. G. (1988), "Determination of horizontal geostatic stress in clay with self-bored pressuremeter", *Canadian Geotechnical Journal*, 25, pp.559-573.
9. Schnaid, F., and Houlby, G. T. (1990), "Calibration chamber tests of the cone pressuremeter in sand", *Proceedings of the Third International Symposium on Pressruemeter*, Oxford, pp.263-272.
10. Teh, C. I. (1987), *An analytical study of the cone penetration test*, Ph.D thesis, University of Oxford.
11. Timoshenko, S. P., and Goodier, J. N. (1934), *Theory of Elasticity*, New York, McGraw-Hill.
12. Vesic, A. S. (1963), "Bearing Capacity of deep foundations on sand", *Stresses in soils and layered systems*, Canadian Highway Research Board, Report 39.
13. Williams, D. J. (1986), "Evaluation of different soil tests for determining design parameters", *Interpretation of Field Testing for Design Parameters*, Adelaide, pp.174-179.
14. Withers, N. J., Schaap, L. H. J., and Dalton, J. C. P. (1986), "The development of the full displacement pressuremeter", Proc. 2nd Int. Symp. *The Pressuremeter and Its Marine Applications*. ASTM Special Technical Publication 950, pp.38-56.
15. Wroth, C. P. (1984), "The interpretation of in situ soil tests", *Geotechnique*, 34, pp.449-489.

(접수일자 2004. 4. 2, 심사완료일 2004. 9. 15)