

정규압밀 점토지반에서 피에조콘관입 결과를 이용한 원위치 응력상태 평가

Estimation of In-situ Stress State for NC Clays Using PCPT Results

조 성 환¹ Cho, Sunghwan

서 경 범² Seo, Kyungbum

장 범 수³ Chang, Buhmsoo

이 준 환⁴ Lee, Junhwan

Abstract

In this study, a method for estimating the in-situ stress state of NC clays using piezocone penetration test (PCPT) results is proposed. The proposed method is based on a correlation between the PCPT results and strength increment ratio. According to proposed method, no additional testing procedure for collecting undisturbed soil sample is required, which can reduce overall testing cost. To verify this method various analytical solutions were adopted and used. Measured result and predicted result are compared with each other. The verification sites consist of a variety of soil conditions. From the comparison, it is seen that predicted value of effective stress using the proposed method match well those from measured results.

요 지

본 연구에서는 정규압밀된 점토지반에서 피에조콘관입시험(PCPT) 결과를 이용하여 원위치 응력상태를 평가할 수 있는 방법을 제안하였다. 이를 위해 다양한 현장시험과 실내시험 결과를 분석하였으며, 현장시험에서 구해진 PCPT 결과값과 실내시험에서 얻어진 결과를 토대로 이론식을 산정하였다. 제안된 방법에서는 기존 방법에 포함되어 있던 불교란 시료 채취과정과 단위중량 결정을 위한 별도의 실험과정이 요구되지 않으며, PCPT 시험결과를 통해 유효응력의 추정이 가능하기 때문에, 조사과정에서의 비용이나 소요시간을 최소화 할 수 있다. 제안된 방법의 적용성 평가를 위하여 국내의 다양한 점성토 지반에서 수행된 피에조콘관입시험 결과를 수집하였으며, 이를 토대로 제안된 방법에 의한 결과와 기존방법의 결과와의 비교분석을 실시하였다. 분석결과, 예측된 결과는 측정된 결과와 유사함을 확인할 수 있었다.

Keywords : Cone penetration test, Cone factor, Effective stress, Site investigation

1. 서 론

유효응력은 흙의 압축성 및 강도특성을 좌우하는 핵

심 상태변수이며, 지반해석과 설계에서 가장 기본적인
고 중요한 물성치로 간주된다. 유효응력이란 흙 입자들
만에 의해 전달되는 순응력을 나타내며 체적변화 특성

1 학생회원, 연세대학교 토목환경공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Eng., Yonsei Univ.)

2 학생회원, 연세대학교 토목환경공학과 박사과정 (Ph. D Candidate, Dept. of Civil and Environmental Eng., Yonsei Univ.)

3 정회원, 한국시설안전관리공단 (Member, Researching Manager, Dept. of Management, Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation)

4 정회원, 연세대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Eng., Yonsei Univ., junlee@yonsei.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

과 강도를 좌우하기 때문에 연약한 점토지반에 시공된 구조물의 횡토압, 지지력과 침하, 그리고 지반의 안정성과 같은 각종 지반공학문제를 해결하기 위해 요구되는 매우 중요한 요소이다. 유효응력은 단위중량($\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$)에 토층의 높이를 곱함으로써 산정되며, Terzaghi(1925, 1936)에 의하여 처음으로 도입되었고, Skempton(1960)은 Terzaghi의 연구를 확장시켰다. 통상적으로 단위중량의 산정은 대상지반에서 불교란 시료를 채취하여 실내시험을 통해 이루어진다. 하지만, 실내시험은 시료채취 및 시험과정에 수반되는 시료 교란이 시험결과의 신뢰성에 큰 영향을 미치게 되며, 대상 심도가 깊을 경우에는 시료교란의 가능성이 증가할 뿐만 아니라 채취 자체가 불가능한 경우도 빈번하다. 따라서 불교란 시료채취와 실내시험에 의한 유효응력 평가과정은 현재 필수적인 지반조사 과정으로 간주되는 동시에, 시료교란, 채취 심도 그리고 비용적인 측면 등에서 개선의 여지가 상당한 것도 사실이다.

피에조콘관입시험(Piezcone penetration test: PCPT)은 콘 관입에 따른 콘지지력, 주변 마찰저항력, 관입 간극수압을 측정하며 그 결과를 바탕으로 다양한 지반 특성치를 평가할 수 있다. 특히, 연약지반 설계시 가장 중요한 고려요소인 압밀특성, 전단강도 특성, 응력분포 특성 등을 단일 관입시험을 통해 얻을 수 있어 매우 효과적인 시험방법으로 간주된다. 시험 방법 및 절차가 간소하고 원위치상에서 실시하게 되므로 지반교란을 최소화할 수 있으며, 깊이에 따라 연속된 지반정수를 산출할 수 있어서 시간적 비용적 측면에서 유리하다.

점토지반에 있어 PCPT와 관련된 연구는 과잉간극수압의 발현, 소산측정에 따른 압밀특성과 비배수 전단강도에 대한 연구가 주를 이루고 있으며, 선행압밀응력(σ'_p)과 과압밀비(OCR) 평가 등을 포함하여 연구가 다양하게 진행되어 왔다(Schmertmann 1978; Konrad and Law 1987; Mayne and Bachus 1988; Mayne and Holtz 1988; Chen and Mayne 1996; Lunne 1997). 실제 지반설계에 있어 가장 기본적이며 중요한 역학적 특성치인 유효응력의 경우, 강도 및 압밀특성 평가를 위한 기지의 입력 변수로 취급되고 있으나, 앞서 언급된 바와 같이 시료채취에 의한 기존 측정방법은 상당한 불확실성이 포함되어 있으며 PCPT 이외에 별도의 시험이 수행되어야 하므로 PCPT 시험의 전반적인 효용성을 저하시키는 결과를 초래한다.

이에 본 연구에서는 PCPT 결과를 이용한 유효응력

평가법에 대한 고찰과 함께, 불교란 시료채취 과정을 배제할 수 있는 보다 실용적인 평가방법을 제안하고자 한다. 또한, 제안된 방법의 적용성을 평가하기 위하여 국내의 다양한 토질특성을 나타내는 지역에서 수행한 콘관입시험 결과를 이용하여 예측값 및 실측값을 비교, 분석하였다.

2. 콘계수

점토지반에서 콘계수는 PCPT 콘지지력과 강도특성의 상관관계를 나타내는 변수이다. 콘계수는 적용 방법에 따라 크게 4가지(N_{kt} , N_{ke} , N_{du} , N_e)로 구분되며, 각 방법은 다음과 같다.

2.1 전체 선단저항치를 이용한 방법

Schmertmann (1978)은 말뚝의 관입이 콘의 관입과 유사하다고 생각하여, 소성이론을 바탕으로 한 지지력이론으로부터 비배수 전단강도(s_u)를 산정하는 방법을 식 (1)과 같이 제안하였다.

$$s_u = \frac{q_c - \sigma_{vo}}{N_k} \quad (1)$$

여기서, q_c = 콘지지력; σ_{vo} = 연직응력; N_k = 콘계수이며 이 값은 보통 10~20사이에 분포하고 있는 것으로 나타났다. Robertson and Campanella (1988)는 N_k 값으로 평균 15를 사용하는 것이 바람직하다고 제안하였다. 그

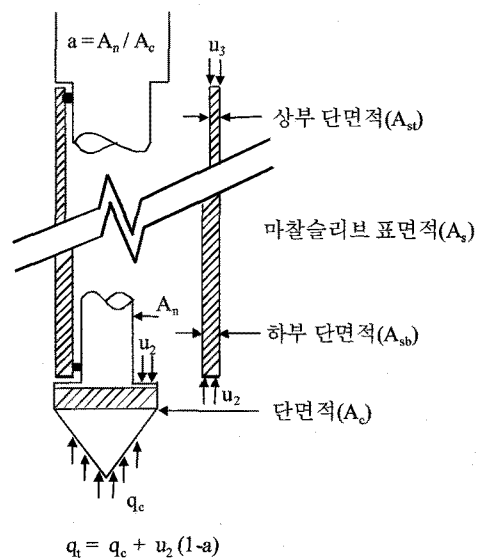


그림 1. PCPT의 부등 단면적비

러나, 간극수압 측정용 필터가 큰 선단부(cone tip) 바로 뒷면에 위치한 피에조콘을 사용할 경우, 간극수압의 영향을 받기 때문에 그림 1과 같이 부등 단면적비를 고려해야 한다. Lunne et al.(1985)은 그림 1에 나타난 바와 같이 부등단면적비를 고려한 q_t 를 이용하여 식 (2)와 같이 비배수 전단강도를 산정할 것을 제안하였다.

$$s_u = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{N_{kt}} \quad (2)$$

여기서, q_t = 부등 단면적 효과를 고려한 콘지지력; N_{kt} = 부등단면적비에 의해 수정된 콘계수 값이다.

2.2 유효 콘지지력을 이용하는 방법

유효 콘지지력은 측정된 콘지지력(q_c)로부터 간극수압을 뺀 값이며, 이 때의 간극수압은 콘 선단부 바로 뒤에서 측정된 값(u_z)이다. 유효 선단저항치로부터 비배수 전단강도를 측정하는 방법은 Seneset et al.(1982)에 의해 처음으로 소개되었으며 Campanella et al.(1982)에 의해 식 (3)과 같이 정의되었다.

$$s_u = \frac{q_c}{N_{ke}} = \frac{(q_t - u_z)}{N_{ke}} \quad (3)$$

Seneset et al.(1982)에 의하면 N_{ke} 값은 대체로 6~12 사이에 있는 것으로 나타났으나, Lunne et al.(1985)에 의하면, N_{ke} 값은 매우 광범위하게 분포하며 간극수압비(B_q)와 관련이 있는 것으로 수정하여 제안하였다.

2.3 과잉간극수압을 이용하는 방법

연약지반에서 측정된 콘지지력은 매우 작아서 측정값에 대한 정확도가 낮은 반면, 연약지반에서 측정된 간극수압은 간극수압계 용량의 80% 이상의 큰 값을 가지며 높은 정확도를 가진다. 따라서 연약지반에서 비배수 전단강도 산정시, 간극수압 데이터를 이용하는 것이 콘의 선단 저항치를 이용하는 것보다 정확하다. 이와 같이 연약점토지반에서 콘관입시험으로 측정된 과잉간극수압(Δu_o)의 신뢰성이 높기 때문에 이를 이용하여 식 (4)와 같이 비배수 전단강도를 산정할 수 있다.

$$s_u = \frac{\Delta u_o}{N_{\Delta u}} \quad (\Delta u_o = u_2 - u_o) \quad (4)$$

여기서, $N_{\Delta u}$ = 과압밀비(OCR), 강성비(G/s_u), 예민비 등에 따라 변화하는 콘계수이며 공동확장이론에 의하면 그 값은 2~20사이에 분포하고 있는 것으로 나타났다.

2.4 유효콘계수를 이용하는 방법

Lee et al.(2010)은 PCPT 유효콘지지력으로부터 비배수전단강도를 평가할 수 있는 방법을 식 (5)와 같은 형태로 제안하였으며, 비배수 전단강도 산정 시 콘지지력(q_t)과 초기간극수압(u_o)만을 이용하였다.

$$s_u = \frac{q_t - u_o}{N_e} \quad (5)$$

제안된 방법은 상재압(σ_{vo})의 산정과정이 필요치 않아 기존 콘계수(N_{kt})값 산정 시 발생할 수 있는 많은 불확실성을 해소할 수 있다. 또한, 콘지지력(q_t)과 초기상태 간극수압(u_o)의 측정치는 PCPT시험만으로 획득이 가능하여 비용이나 시간적 측면에서 유리한 방법이라고 할 수 있다. Lee et al.(2010)에 의하면 N_e 값은 16 ± 3 의 값으로 나타났다.

표 1은 다양한 지반조건에 대하여 선행 연구자들에 의해 제안된 콘계수 값을 나타낸 것이다. 표 1에 나타난 바와 같이 국내외 여러 지역에 따라 다른 값을 가지며, 같은 지역이라도 실험방법에 따라 차이를 나타내고 있다. 이는 시험 지역마다 지반의 특성이 다르고 동일한 지역이라 하더라도 지반이 불균질할 수 있으며, 콘계수의 결정을 위하여 사용된 기준 비배수 전단강도 산정 방법이 서로 다르기 때문이다.

표 1를 통해 알 수 있듯이 콘계수가 일정하지 않고 조금씩 차이를 보이며, 흙의 특성에 따른 콘계수의 경향성도 충분히 연구되지 않았기 때문에 적절한 콘계수 값을 선정하기에는 많은 어려움이 있다. 따라서 PCPT를 이용하여 유효응력 산정하기 위해서는 다양한 지반조건에 대해서 일관된 콘계수값을 사용하는 것이 중요하다.

Lee et al.(2010)에 의하면 유효콘계수 N_e 는 16 ± 3 의 범위를 가지는 것으로 조사되었고, 국내외의 다양한 점토 지반에 적용 가능한 것으로 나타났다. 유효콘계수를 이용한 방법은 다양한 지반조건에 대해서도 비교적 일관된 계수값의 적용이 가능한 것으로 관찰되었으며, 이에 본 연구에서는 유효콘계수(N_e) 값을 이용하여 유효응력을 산정하였다.

표 1. 기존에 제안된 경험적 방법에 의한 콘계수

지역	콘계수	비고
노르웨이	$N_{kt}=13\sim 19$	Lunne et al.(1976)
북해	$N_{kt}=17$	Kjekstad et al.(1978)
영국(런던)	$N_{kt}=17\sim 30$	Marstrand(1974) Marstrand & Powell(1979)
영국(북부)	$N_{kt}=12\sim 20$	Lacasse & Lunne(1982)
노르웨이	$N_{kt}=12\sim 19$	Jamiolkovski et al.(1982)
이탈리아	$N_{kt}=8\sim 16$	Konrad et al.(1985)
	$N_{kt}=8\sim 10$	
캐나다	$N_{kt}=8\sim 10$	Rocha-Filho & Alencar(1985)
브라질	$N_{kt}=13.5\sim 15.5$	Dobie(1988)
싱가폴	$N_{kt}=9\sim 12$	Jones(1995)
호주(뉴캐슬)	$N_{kt}=13.7$	Wong(1995)
말레이시아	$N_{kt}=5\sim 13$	Tanaka(1995)
일본	$N_{kt}=8\sim 16$	Tanaka(1995)
	$N_{kt}=9\sim 14$	
캐나다	$N_{\Delta u}=2\sim 10$	Campanella et al.(1985)
캐나다	$N_{\Delta u}=6.2\sim 7.0$	Konrad et al.(1985)
싱가폴	$N_{\Delta u}=7\sim 8$	Orihara et al.(1993)
대만	$N_{\Delta u}=5\sim 6.8$	Chen & Mayne(1993)
	$N_{\Delta u}=6.0\sim 7.2$	
노르웨이(Leirsund)	$N_{ke}=5.8\sim 10.5$	Karlsrud(1996)
노르웨이(Lierstranda)	$N_{ke}=8\sim 14.5$	Karlsrud(1996)
노르웨이(Onsey)	$N_{ke}=10\sim 14$	Karlsrud(1996)
대한민국	$N_{kt}=9\sim 14$	이선재(1997)
대한민국	$N_e=16\pm 3$	Kim et al.(2009)

3. PCPT 결과를 이용한 유효응력 평가

$$\sigma'_{vo} = (q_t - u_o) \frac{1}{s_F \cdot N_e} \quad (7)$$

3.1 기본모델

비배수 전단강도의 크기는 주어진 점토지반의 유효응력에 의해 좌우되며, 유효응력이 증가함에 따라 비배수 전단강도 또한 증가한다. 아울러 이러한 관계는 과압밀상태와 같은 응력이력에도 영향을 받게되며, 이는 SHANSEP(Ladd et al. 1977) 이론에 의해 나타낼 수 있다. SHANSEP 이론에 의해 정의되는 강도 증가율(s_F)은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있으며, 이를 식 (5)에 적용하면 유효응력과 비배수 전단강도의 관계는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다. 본 연구는 정규압밀 상태의 점성토 지반에 한정하여 제안되었으므로 OCR=1을 적용하였고, 식 (7)은 PCPT 결과를 이용하여 유효응력을 산정하는 최종식이다.

$$s_F = \frac{s_u}{\sigma'_{vo} \cdot OCR^{0.8}} \quad (6)$$

여기서, s_u = 비배수 전단강도; q_t = 부등 단면적비를 사용하여 수정 간극수압을 고려한 콘 지지력; σ'_{vo} = 콘 선단에서의 전 상재압; N_e = 유효콘계수; u_o = 초기간극수압이다.

또한, 식 (2)와 식 (5)의 관계를 통해 콘계수(N_{kt})와 유효콘계수(N_e)의 상관관계를 나타낼 수 있다. 두 식으로부터 콘계수의 상관관계를 도입하면 식 (8)과 같이 표현할 수 있으며, 콘계수(N_{kt})를 유효콘계수(N_e)에 대해 나타내면 식 (9)와 같다.

$$q_t - u_o = (q_t - u_o) \frac{N_{kt}}{N_e} + \sigma'_{vo} \quad (8)$$

$$N_e = N_{kt} \cdot \frac{q_t - u_o}{q_t - u_o - \sigma'_{vo}} \quad (9)$$

식 (9)에서 SHANSEP(Ladd et al. 1977) 이론에 따른

강도증가율(s_F)을 도입하면, 콘계수와 유효콘계수의 상관관계를 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{N_{kt}}{N_e} = 1 - \frac{1}{s_F \cdot N_e} \quad (10)$$

3.2 강도증가율

앞서 제안된 식 (7)에서 알 수 있듯이 PCPT 결과를 이용한 점성토 지반에서의 유효응력 평가는 콘지력(q)과 초기간극수압(u_0), 강도증가율(s_F), 유효콘계수(N_e)값을 통해 이루어 질 수 있다. 콘지력과 초기간극수압의 경우 실제 PCPT 시험성과로부터 얻어지는 측정치이므로, 제안된 방법에 의한 유효응력의 평가결과는 강도증가율과 유효콘계수 값에 의해서 좌우된다. 현재까지 강도증가율(s_F)에 관한 연구는 이론적 접근이나 경험적 접근방법을 통해 오랫동안 진행되어 왔으며, 다양한 방법이 제안되어 왔다(Skempton 1957; Hansbo 1994; Jamiolkowski 1985; Mesri 1989; Wroth 1984). 점토질 흙의 강도증가율은 일반적으로 0.2~0.4정도의 범위를 나타내며, 아래에 열거된 바와 같이 다양한 방법으로 산정 가능하다.

$$s_u / \sigma'_{vo} = 0.11 + 0.0037PI \quad (11)$$

$$s_u / \sigma'_{vo} = 0.45LL \quad (12)$$

$$s_u / \sigma'_{vo} = 0.22 \quad (13)$$

$$s_u / \sigma'_{vo} = \frac{[K + (1-K)A_f] \sin \phi'}{1 + (2A_f - 1) \sin \phi'} \quad (14)$$

$$s_u / \sigma'_{vo} = \frac{M \left(\frac{R}{r} \right)^\Lambda}{2} \approx 0.5783 \frac{3 \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} \quad (15)$$

여기서, PI = 소성지수; LL = 액성한계; ϕ' = 내부마찰각; A_f = 과잉간극수압계수; K = 응력비; $r \approx 1$; $\Lambda \approx 0.8$; $R \approx 1$ (정규압밀); $M = (6 \sin \phi') / (3 - \sin \phi')$ 이다.

본 연구에서는 국내의 대표적인 연약 점토지반인 광양지역을 대상으로 수집된 시험결과(현대건설 2006)를 바탕으로 앞서 기술된 다양한 방법을 통해 강도증가율을 산정하였으며, 그 결과를 제안된 유효응력 평가 모델에 적용할 수 있는 효율적인 강도증가율 산정방법을 선정하고자 하였다.

그림 2는 식 (11)(Skempton 1957), 식 (12)(Hansbo 1994)와 일축압축시험, 삼축시험 등과 같은 실내시험에 의한 강도증가율을 나타내고 있다. 그림 2에서 보는 바와 같이, 일축 또는 삼축시험을 이용하여 산정된 강도증가율은 0~0.6까지 상당히 큰 범위를 나타내며, 불특정한 분포 현상을 나타낸다. 이는 시료 채취과정에서 발생하는 시료교란에 따른 오차발생이 주요한 원인으로 판단된다. 또한, 이 방법은 불교란 시료 채취과정이 요구되므로 본 연구의 취지에는 상반되는 부적합한 방법이라 할 수 있다. Mesri(1989)는 식 (13)에 나타낸 바와 같이 강도증가율이 0.22의 일정한 값을 가진다고 주장하였지

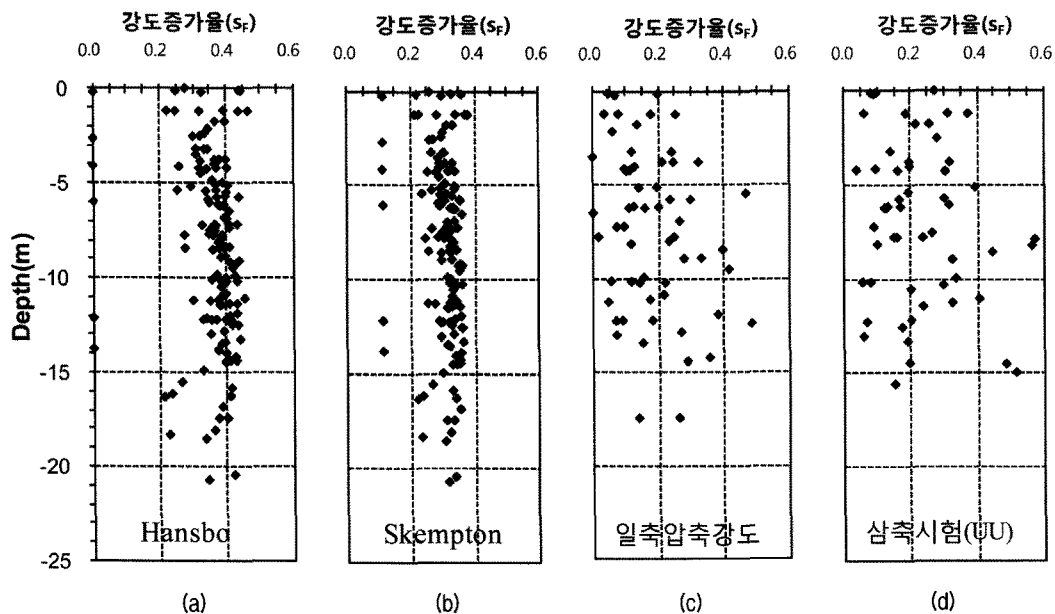


그림 2. 광양지역의 깊이별 강도증가율(s_F) 변화

만, 국내 점토지반을 대상으로 강도증가율을 산정한 선행연구자료를 살펴보면, 송병관(2006)은 광양지역의 강도증가율은 0.28~0.36으로 나타냈으며, 최충락(2006)은 부산지역의 평균 강도증가율 값은 0.25의 값을 가지는 것으로 보고하여, 상당히 다양한 값을 나타낼 수 있다. 따라서, 강도증가율을 일정한 값으로 사용하기에는 무리가 있다고 판단되며, 지반조건에 맞는 적정값이 제안식에 적용되어야 할 것이다.

그림 2(a)와 (b)를 살펴보면 Hansbo와 Skempton이 제안한 방법은 비교적 유사한 결과를 보여주며 특히, Skempton이 제안한 방법은 분산도가 작아 더욱 밀집된 양상을 보여준다. Skempton(1957)이 제안한 식 (11)의 방법은 소성지수(PI)와 강도증가율 사이의 통계적인 관계를 나타낸 방법으로써, 가장 보편적으로 실무에서 사용되고 있으며, 교란 시료로도 시험이 가능하기 때문에 기존방법에 포함되어 있는 불교란 시료를 채취한 후 단위중량을 산정하는 실험과정이 요구되지 않는 합리적인 방법이라 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 식 (11)의 방법을 통해 강도증가율을 산정하여 제안식에 적용하였다.

4. 제안된 방법의 적용성 평가

4.1 대상지반과 시험결과

본 절에서는 국내 점토지반에 대하여 본 연구에서 제안한 PCPT 결과를 이용하여 유효응력을 평가하였으며,

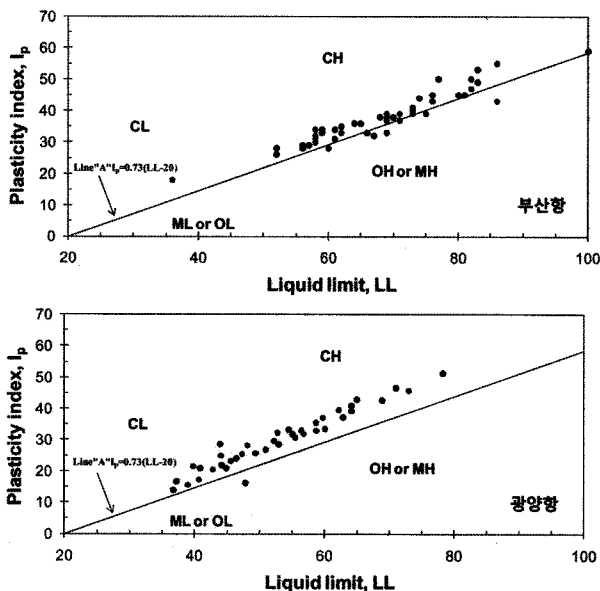


그림 3. 시험 지반의 소성도표

현장 시험을 통해 얻은 결과값을 이용하여 기존의 연구방법과 비교분석을 수행하였다. 본 연구에서는 광양지역과 부산지역에서 수행된 현장 및 실내시험 결과를 활용하였다(현대건설 2006, 부산지방해양수산청 1999).

광양의 현장지반은 최상부에 실트질 점토층이 13.8~18.1m정도까지 위치하고 모래질 자갈층 및 기반암의 풍화대 순으로 구성되어 있다. 최상부의 실트질 점토층은 주로 실트와 점토로 구성되어 있고, 약간의 유기물이 함유되어 있으며, 포화상태는 젖음~포화상태를 보인다.

부산의 현장지반은 두 개의 다른 층으로 나눌 수 있으며, 상부층은 부드러운 해저층으로, 하부층은 단단한 암반층으로 구분된다. 상부층은 약 30m정도까지 분포되어 있으며 퇴적 실트질 점토 지반으로 구성되어 있다. 상부층이 해수면 아래에 존재하고 있으므로 전체 지반은 완전 포화 상태로 간주 될 수 있다.

두 개의 현장 모두 No.200체를 90%이상 통과하고, 통일 분류법에 따라 CH와 CL로 분류되었다. 그림 3은 채취된 시료를 통해 얻어진 애터버그 시험 결과를 나타내고 있다.

그림 4는 각 시험 위치에서 채취된 시료를 통해 얻어진 각종 물성치의 값이 별 분포를 나타내고 있으며, 그림 4에서 볼 수 있듯이, 함수비와 총 단위 중량은 비교적 균일한 값을 보이고 있다. 광양항의 경우 함수비가 60~90%, 단위 중량이 13.5~16.5kN/m³의 범위이고 간극비는 1.8~2.7정도를 나타내고 있다. 또한 부산신항의 경우 함수비는 50~70%, 단위중량은 15.5~16.5kN/m³의 범위임을 알 수 있고, 간극비는 1.3~2.2정도로 압축성이 매우 높은 것으로 나타났다.

4.2 비교분석

제안된 방법의 적용성을 평가하기 위하여 광양항 및 부산신항에서 수행한 PCPT 시험결과를 분석하였다. 앞에서 언급한 것과 같이 콘지지력(q_c)과 간극수압(u_0)은 시험에서 얻은 결과값을 사용하였고, 유효콘계수(N_e)값은 16, 강도증가율 값은 Skempton(1957)이 제안한 소성지수를 이용한 방법을 적용하였다.

광양지역의 소성지수(PI)값은 35~45의 범위를 보였고 이 경우 강도증가율 값은 0.24~0.27의 값을 가지게 되며, 부산지역의 소성지수(PI)값은 25~40의 범위를 보였으며 강도증가율 값은 0.2~0.26의 값을 가진다. 이에 현장시험 지반에 깊이에 따른 적절한 강도 증가율

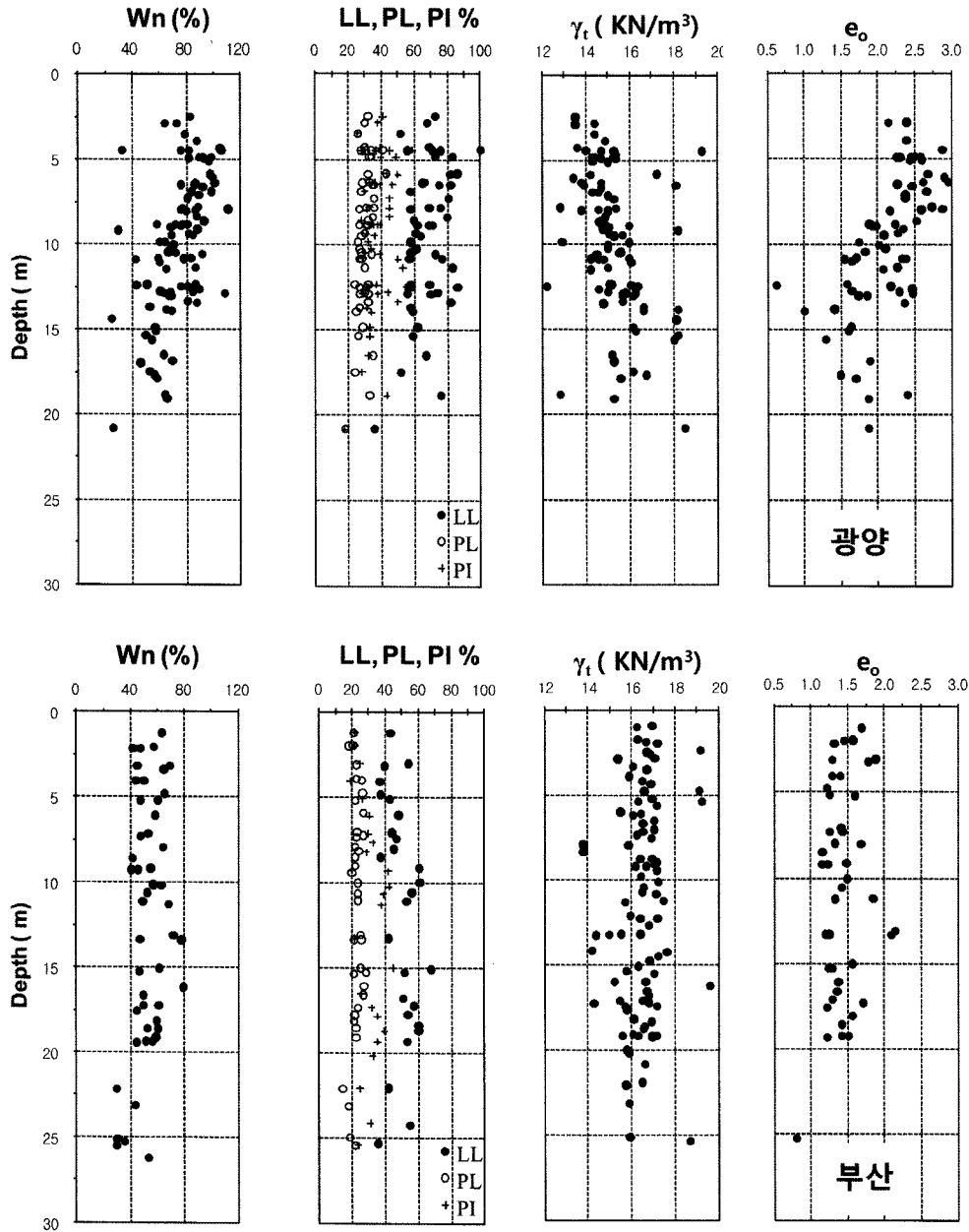


그림 4. 시험 지반의 깊이에 따른 물성치 분포

값을 제안식에 대입하여 유효응력을 산정하였다. 그림 5와 6은 각각 광양지역과 부산지역에서 수행한 PCPT 결과값을 이용하여 적용성 평가를 실시한 결과를 보여 주고 있으며, 각 현장마다 콘지력(q)과 과잉간극수압 (u_2)을 비롯하여 초기 간극수압(u_0)을 함께 도시하였다.

그림 5에 나타난 바와 같이 광양지역은 콘지력이 1MPa 이하인 매우 연약한 점토지반이 균질한 상태로 두껍게 존재하며, 이 점토층에서 단위중량을 이용하여 유효응력을 측정할 값과 PCPT를 이용하여 유효응력을 측정할 값을 비교해 보면 상당히 잘 일치하는 모습을 보여준다. 반면, 광양 'BC-19' 지역의 7~10m 깊이에

분포한 모래지반과 'BC-21' 지역의 상부 10m에 분포한 모래 및 자갈 지반에서는 큰 오차값을 보이는데, 이는 모래 및 자갈지역에서는 콘지력이 5MPa이상으로 크고 불규칙한 값을 나타냈는데 이로 인해 유효응력 값도 크고 불규칙한 값으로 산정된 것으로 판단된다. 이와 같은 오차 발생 원인은 본 연구에서 도출된 제안식이 점토 지반에서 콘계수를 이용하여 비배수전단강도를 산정하는 공식들의 상관관계를 통해 도출되었기 때문에 점토 지반에서만 사용이 가능하기 때문이다. 따라서, PCPT를 이용하여 유효응력을 산정하는 방법은 점토외의 지반에서 사용이 제한된다. 또한, 그림 6을 살펴보면 부산지역

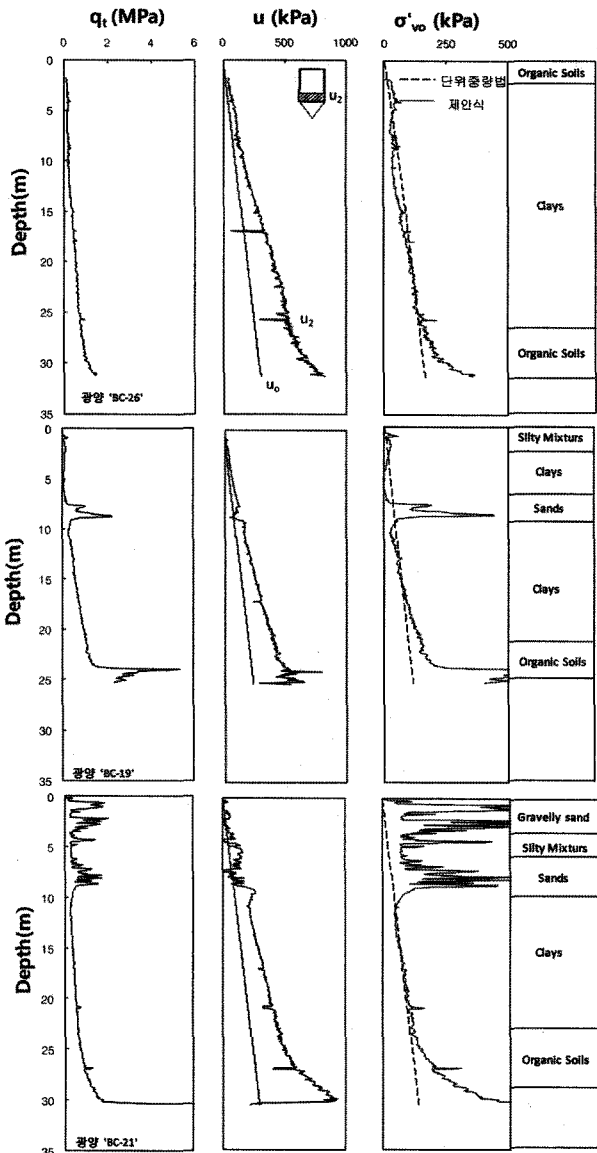


그림 5. 광양지역 PCPT 결과 및 유효응력 적용성 평가

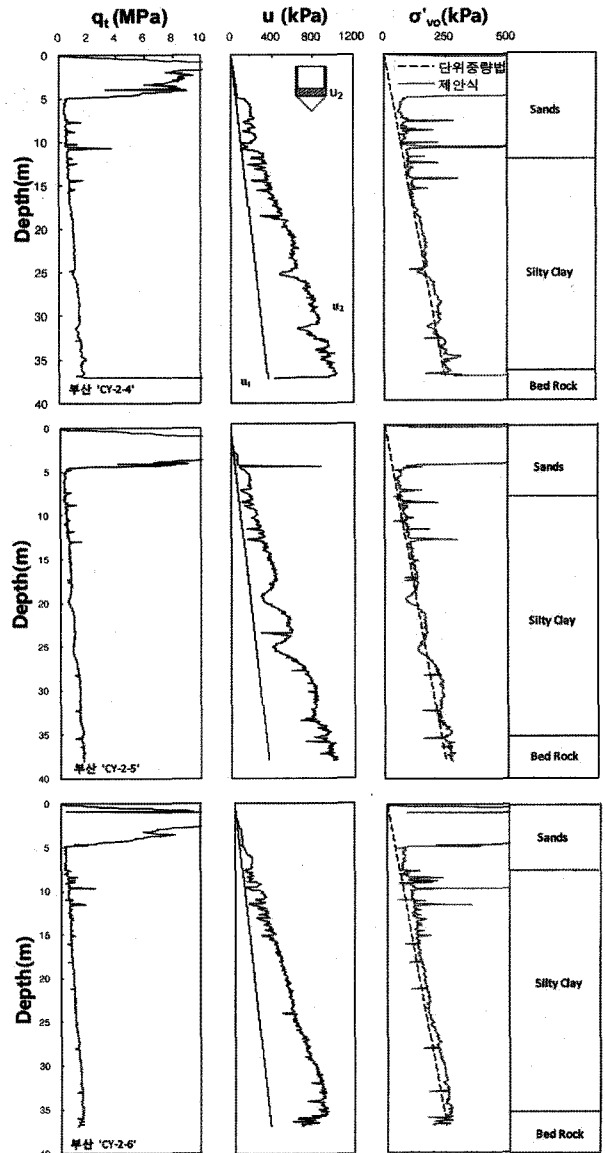


그림 6. 부산지역 PCPT 결과 및 유효응력 적용성 평가

은 약 5m까지 모래층이 존재하며, 그 아래로 실트질 점토층이 균질하게 분포하고 최하층에는 단단한 암반층으로 구성되어 있다. 부산지역의 유효응력 측정값은 상부 5m의 모래층에서 큰 오차를 보이지만, 5~30m 깊이에 분포한 점토층에서는 예측값과 측정값이 상당히 잘 일치하는 모습을 보여준다.

본 연구에서는 제안식의 적용성 평가를 검증대상지역인 광양과 부산지역에 국한되지 않고, 국내의 다양한 점토지역의 자료를 문헌으로부터 추가적으로 획득하여 분석을 실시하였다(장인성 2001, 허건 2007, 김창동 2008, 박영환 2008, 홍성진 2009). 본 지역에서의 PCPT 결과값인 콘지력(q_c)과 정수압(u_0) 값은 문헌자료를 참고하여 적용하였으며, 유효콘계수(N_e) 값은 16을 사용하였

다. 또한 강도증가율 값은 소성지수(PI)를 이용하는 식 (11)을 사용하였으며, 소성지수가 나와있지 않은 문헌에 대해서는 액성한계(LL)를 이용하여 강도증가율을 산정하는 Hansbo (1994)가 제안한 식 (12)를 이용하였다. 표 2는 각 대상지역에서의 물성치와 사용된 강도증가율을 나타내고 있으며, 그림 7은 제안된 방법에 의한 유효응력 평가결과와 단위중량 값에 의해 측정된 결과를 비교하여 나타내고 있다.

그림 7을 살펴보면 화천, 신호, 부산-1, 화전 지역은 상부층에 모래지반이 두껍게 존재하며 아래로 균질한 점토지반이 형성되어 있다. 또한 포항, 부산-2, 광양지역은 15~20m까지 연약한 점토층이 분포하며, 양산과 서천지역에서는 상부층에 과압밀된 지층이 분포한다. 이

표 2. 국내 점성토 지역의 물성치 및 강도증가율

지역	통일 분류	점토층위치 (m)	단위중량 (kN/m ³)	액성한계 (%)	소성한계	강도 증가율	비고
양산	CH, CL	6-27	18.4-22.1	-	8-32	0.19	장인성(2001)
서천	CL	2-12	17.8-19.4	-	11-26	0.17	장인성(2001)
신호	SM, CL	0-27	14.5-18.0	45-70	33-43	0.25	허건(2007)
화천	CH, CL	10-40	15.2-18.3	39-60	25-35	0.21	허건(2007)
포항	CH, OH	5-20	12.5-14.0	100-160	-	0.59	김창동(2008)
화천	CH, CL	10-40	16.0-18.0	40-90	-	0.29	김창동(2008)
광양	CH	0-20	14.5-15.8	75-95	-	0.38	김창동(2008)
부산-1	CH, CL	5-35	16.5-17.5	42-63	23-43	0.23	홍성진(2009)
부산-2	CH, CL	0-27	14.5-17.8	38-63	28-42	0.22	박영환(2008)

와 같이 검증대상지역의 지반특성이 서로 다름에도 불구하고, 실트질 점토와 균질한 점성토지역에서의 유효응력 측정값은 상당히 일치하는 결과를 보여준다.

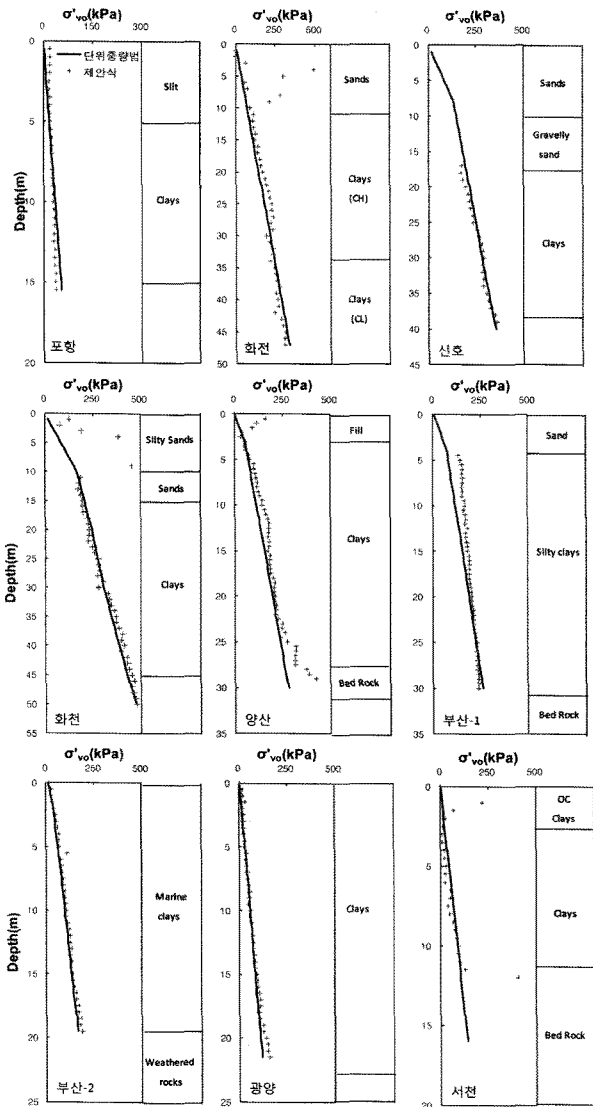
5. 결론

본 연구에서는 PCPT 결과값으로부터 유효응력을 평가할 수 있는 방법을 제안하였으며, 이에 대한 적정성을 분석하였다. 본 연구를 위하여 국내의 대표적인 연약 점토지반이라 할 수 있는 광양지역과 부산지역을 비롯하여 국내 다양한 지역을 대상으로 하였으며, 피에조콘 관입시험과 실내시험 결과를 수집하여 제안된 방법의 적용성 평가에 적용하였다. 분석결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 본 연구에서 제안된 방법은 PCPT 결과값을 이용하는 방법으로 비교란 시료채취를 수행하여 단위중량 산정과정에서 필요치 않아 시료가 교란되어 발생할 수 있는 불확실성을 해소할 수 있으며, 비용이나 시간적 측면에서 매우 효과적인 방법이라 할 수 있다.
- (2) 제안된 방법의 적용성을 평가하기 위하여 국내의 대표적인 연약 점토지반인 광양과 부산지역을 비롯하여 국내 다양한 지역에서 실시한 PCPT 시험을 분석한 결과, 측정된 값과 PCPT 결과값으로부터 산정된 유효응력 값은 잘 일치하는 결과를 보여주었다.
- (3) PCPT 결과를 이용한 원위치 응력상태 평가법은 점토지반에서 콘계수를 이용하여 비배수전단강도를 산정하는 공식들의 상관관계를 통해 도출되었기 때문에, 본 연구의 제안식의 사용을 점토지반에 제한하며, 적용성 평가를 통해 모래 및 자갈 지역에서는 큰 오차값을 가지는 것을 확인하였다.

감사의 글

그림 7. 국내 점성토 지반 유효성 검증



이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2009-0077294).

참 고 문 헌

1. 김창동, 김수일, 이준환 (2008), "유효콘계수를 이용한 포화점토의 비배수전단강도 평가", *한국지반공학회 논문집*, 24권 11호, pp.133-141.
2. 박영환, 김민기, 김창동, 이준환 (2007), "부산지역 점토의 비배수전단강도 평가를 위한 CPT 콘계수 해석 및 평가", *한국지반공학회 논문집*, 23권 8호, pp.77-85.
3. 부산지방해양수산청 (1999), 부산신항투기장 실시설계보고서: 해상지반조사편, 부산지방해양수산청.
4. 송병관 (2006), "광양지역 점토의 지반 공학적 특성", 공학석사 학위논문, 중앙대학교.
5. 이선재 (1997), "피에조콘을 이용한 국내 지반의 공학적 특성 연구", 공학박사 학위논문, 서울대학교.
6. 장인성, 이선재, 정충기, 김명모 (2001), "국내 점성토 지반의 피에조콘 계수", *한국지반공학회 논문집*, 17권 6호, pp.15-24.
7. 최충락 (2006), "서부산지역 연약지반의 공학적 특성 및 토질정수 상관관계", 공학석사 학위논문, 경희대학교.
8. 홍성진, 이문주, 김태준, 이우진 (2009), "간극수압비를 이용한 부산점토의 CPTu 콘계수 추정", *한국지반공학회 논문집*, 25권 1호, pp.77-88.
9. 허진 (2007), "콘 관입시험(CPTu)을 이용한 입도분석 방법에 대한 연구", 공학석사 학위논문, 동아대 산업대학원.
10. 현대건설 (2006) "광양항 3-2차 컨테이너 터미널 축조공사 재하성토 제거 검토보고서".
11. Campanella, R. G., Gillespie, D. G., and Robertson, P. K. (1982), "Pore pressure during cone penetration testing", *Proceedings of 2nd European Symposium on Penetration testing, Amsterdam*, Vol.2, pp.507-512.
12. Campanella, R. G., Robertson, P. K., Gillespie, D. G. and Greig, J. (1985), "Recent developments in in-situ testing of soils", *Proceeding of 11th international conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, Vol.2, pp.849-854.
13. Chen, B. S. T., and Mayne, P. W. (1993), "Piezocone evaluation of undrained shear strength in clays", *Proceeding of 11th Southeast Asian Geotechnical Conference*, Singapore, pp.91-98.
14. Chen, B. S. Y., and Mayne, P.W. (1996), "Statistical relationships between piezocone measurements and stress history of clays", *Canadian Geotechnical Journal*, 33.
15. Dobbie, M. J. (1988), "A study of cone penetration tests in the Singapore marine clay", *Proceedings on 1st International Symposium on Penetration testing*, Orlando, Vol.2, pp.177-190.
16. Hansbo, S. (1994), "Foundation Engineering", *Elsevier Science B.V. Amsterdam, The Netherlands*, pp.89-91.
17. Jamiolkowski, M., Lancellotta, R., Tordella, L. and Battaglio, M. (1982), "Undrained strength from CPT", *Proceedings of 2nd European Symposium on Penetration Testing*, Amsterdam, Vol.2, pp.599-606.
18. Jamiolkowski, M., Ladd, C.C., Germaine, J.T., and Lancellotta, R. (1985), "New Developments in Field and Laboratory Testing of Soils, Theme Lecture", *Proc. 11th Intl. Conf. on Soil Mech. and*

Found. Eng., San Francisco, Vol.1, pp.57-153

19. Jones, S. R. (1995), "Engineering properties of alluvial soils in Newcastle using cone penetration testing", *Engineering Geology of the Newcastle-Gosford Region*, Australia Geomechanics Society.
20. Karlsrud, K., Lunne, T. and Brattlieu, K. (1996), "Improved CPTU correlations based on block samples", *Nordisk Geoteknikermote*, Reykjavik.
21. Kim, C. D., Kim, S. I., and Lee, J. H. (2009), "Estimating clay undrained shear strength using CPTu results", *Geotechnical Engineering, Institution of Civil Engineers (ICE)*, Vol.162. Issue GE2, pp.119-127.
22. Kjesktad, O., Lunne, T. and Clausen, C. J. F. (1978), "Comparison Between In-situ Cone Resistance and Laboratory Strength for Overconsolidated North Sea Clays", *Marine Geotechnology*, Vol.3, No.4.
23. Konrad, J. M., Bozozuk, M. and Law, K. T. (1985), "Study of in-situ test methods in deltaic silt", *Proceedings of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, pp.879-866.
24. Konrad, J. M., and Law, K. (1987), "Preconsolidation pressure from piezocone tests in marine clays", *Geotechnique*, 37(2).
25. Lacasse, S. and Lunne, T. (1982), "Penetration tests in two Norwegian clays", *Proceedings of 2nd European Symposium on penetration Testing*, Amsterdam, Vol.2, pp.661-669.
26. Ladd C.C., Foott R., Ishihara K., Schlosser F. and Poulos H. G. (1977), "Stress-deformation and strength characteristics" *Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Tokyo, 1977, 2, pp.421-494.
27. Lee, J. H., Seo, K. B., Kang, B. J. and Cho, S. H. (2010), "Application of effective cone factor for strength characterization of saturated clays", *Geo Florida 2010*, West palm beach, Florida, USA.
28. Lunne, T., Christofferen, H.P. and Tjelta, T. I. (1985), "Engineering use of Piezocone Data in North Sea Clays", *Proceedings of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Sanfrancisco, Vol.2, pp.907-912.
29. Lunne, T., Eide, O. and De Ruiter, J. (1976), "Correlation between cone resistance and vane shear strength in some Scandinavian soft to medium stiff clays", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.13, pp.430-441.
30. Lunne, T., Robertson, P. K., and Powell, J.J.M. (1997), Cone Penetration Testing. *E&FN SPON, London, UK*.
31. Marsland, A. (1974), "Comparison of the results from static penetration tests and large in-situ plate tests in London clay", *BRE*, CO87/74.
32. Marsland, A. and Powell, J. J. M. (1979), "Evaluating the large scale properties of glacial clays for foundation design", *Proceedings of BOOS*, Vol.1, pp.193-214.
33. Mayne, P. W., and Bachus, R. C. (1988), "Profiling OCR in clays by piezocone", *Proceedings of the 1st International Symposium on Penetration Testing (I.S.O.P.T.)*, Orlando, Edited by J. DeRuiter. Vol.2.
34. Mayne, P. W., and Holtz, R. D. (1988), "Profiling stress history from piezocone soundings", *Soils and Foundations*, 28(1).
35. Mersi, G. (1989), "A re-evaluation of using laboratory shear tests", *Can. Geotech. J.*, Vol.26, No.1, pp.162-164.
36. Orihara, K., Ng, D. Y. and Voon, B. F. S. (1993), "Soil identification and engineering parameters determined from piezocone tests in

- Singapore Recent deposits”, *Proceeding of 11th Southeast Asian Geotechnical Conference*, Singapore, pp.181-186.
37. Robertson, P.K., and R.G. Campanella (1988), “Design Manual for Use of CPT and CPTu”, *Pennsylvania Department of Transportation (PennDot)*, pp.200.
 38. Rocha-filho, P. and Alenca, J. A. (1985), “Piezocone tests in Rio de Janeiro soft clay deposit”, *Proceeding of 11th International conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, pp.859-562.
 39. Schmertmann, J. H. (1978a), “Guidelines for Cone Penetration Test, Performance and design”, *Federal Highway Administration, Report FHWA-TS-78-209*, Washington, pp.145.
 40. Senneset, K., Janbu, N. and Svan, G. (1982), “Strength and Deformation Parameters from Cone Penetrations Tests”, *Proceedings of the European Symposium on Penetration Testing*, ESOPT II, Amsterdam, pp.863-870.
 41. Skempton, A.W. (1957), “Discussion : The Planning and Design of New Hong Kong Airport”, *Proc. Inst. Civil. Eng.*, Vol.7, pp. 305-307.
 42. Skempton, A.W. (1960), “Correspondence,” *Geotechnique*, Vol.10, No.4, pp.186.
 43. Tanaka, H. (1995), “National Report-the current state of CPT in Japan”, *Proceedings of International Symposium on Cone Penetration Testing*, Vol.1, pp.115-124.
 44. Terzaghi, K. (1925), *Erdbaumechanik auf Bodenphysikalischer Grundlage*, Dueticke, Vienna
 45. Terzaghi, K. (1936), “Relation between soil mechanics and foundation engineering: Presidential Address”, *Proceedings, First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Boston, Vol.3, pp.13-18.
 46. Wong, J. T. F. (1995), “Interpretation of in-situ tests in cohesive soils”, *1st Year Progress Report on Graduate Study*, Nanyang Technological University, Singapore.
 47. Wroth, C. P. (1984), “Interpretation of in-situ soil tests”, *Geotechnique*, Vol.34, No.4, Dec., pp.449-489.

(접수일자 2010. 4. 21. 심사완료일 2010. 10. 4)