

Article

CPTu로부터 구한 시화지구 해성점토의 비배수 전단강도

장인성^{1*} · 김범상²

¹한국해양연구원 연안 · 항만공학연구본부
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29
²SK건설 연구소
(110-300) 서울시 종로구 관훈동 192-18

Undrained Shear Strength of Marine Clays of Shihwa Region
Obtained from CPTuIn-Sung Jang^{1*} and Bum-Sang Kim²

¹Coastal and Harbor Engineering Research Division, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea
²R&D Center, SK Engineering and Construction
Seoul 110-300, Korea

Abstract : Estimation of undrained shear strength (s_u) of clayey soils from piezocone penetration test (CPTu), which has widely been known as one of very promising in situ test methods, requires piezocone factors. Empirical correlations are generally utilized to derive piezocone factors, but previous studies on the empirical piezocone factors are site-specific and in some cases need engineering characteristics, which should be obtained from additional laboratory tests. In this study, empirical cone factors were evaluated by comparing 6 CPTu results at Shihwa region in Korea with reference s_u values obtained from field vane test (FVT). From previous CPTu results of other regions in Korea as well as the results herein, the correlations between piezocone factor, N_{KT} and CPTu results were investigated and three simplified evaluation methods of s_u using only CPTu results were presented. The s_u values estimated by $(q_T - \sigma_v) / \sigma_v'$ method shows better matches with those obtained from laboratory tests for marine clays at Shihwa region.

Key words : 비배수 전단강도(undrained shear strength), 피에조콘 관입시험(Piezocone Penetration Test, CPTu), 피에조콘 계수(piezocone factor), 시화지구(Shihwa region), 해성점토(marine clay)

1. 서 론

최근 들어 국내 해안 연약지반에 택지 조성 및 신공항 등 기간산업시설이 활발하게 계획 또는 시공되고 있는데, 주로 서해안이나 남해안에 집중되어 있다. 이 지역의 해성 점토는 매우 연약하고 지반공학적으로 불안정한 상태에 있기 때문에 경제적이면서도 안정적인 연약지반 처리 공

법을 적용하여야 한다. 이를 위해서는 원지반의 압밀특성 이외에도 비배수 전단강도 등 강도특성을 정확하게 파악하는 것이 필요하다.

우리나라 해성점토의 공학적 특성과 관련한 연구는 여러 학자들에 의해 이루어져 왔는데, 정형식과 안상로(1993), 신은철과 김기한(1995), 김병탁과 윤길림(2002), 이강운 등(2002)은 해성점토의 압밀계수나 과압밀비(Overconsolidation ratio, OCR), 압축지수 등 압밀특성에 대한 연구를 수행한 바 있고, 이인모 등(1997)과 정철호

*Corresponding author. E-mail : isjang@kordi.re.kr

(1998)는 실내실험을 통하여 해성점토의 비배수 전단강도에 대한 연구결과를 발표하였다. 그리고 김주형 등(2000)과 김종국 등(2001)은 CPTu 및 딜레토미터 시험(Dilatometer Test, DMT)을 이용하여 인천지역 해성점토의 강도특성을 연구한 바 있다. 하지만, 해성점토의 공학적 특성 중 CPTu와 관련한 기존의 연구내용은 거의 대부분 실내실험으로부터 얻어진 것으로, 현장에서의 결과값을 직접적으로 산정할 수 있는 현장시험을 통한 분석은 아직까지 부족한 실정이다.

피에조콘 관입시험(Piezocone Penetration Test, CPTu)은 전 세계적으로 그 활용도 및 신뢰도가 널리 알려져 있는 대표적인 현장 지반조사 기법 중의 하나로서, 연속적인 측정으로 인하여 지층 구분을 원활하게 할 수 있을 뿐만 아니라 지반의 다양한 공학적 특성을 비교적 정확하고 일관되게 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. CPTu를 이용하여 지반의 비배수 전단강도를 산정하는 방법에 대한 연구는 20여년 전부터 활발히 이루어져오고 있는데, 콘의 관입시 저항력 또는 발생 과잉간극수압의 크기가 비배수 전단강도와 밀접한 관계가 있다는 근거 하에서 피에조콘 계수를 도입하여 비배수 전단강도를 결정하게 된다. 이 때, 피에조콘 계수는 이론적 또는 경험적인 방법을 통하여 구할 수 있는데, 콘 관입 모사나 해석의 어려움 등으로 인해 일반적으로 기준 비배수 전단강도를 이용한 경험적인 기법이 활용되고 있다. 하지만 지반의 비배수 전단강도는 흙을 구성하고 있는 구성광물이나 응력이력, 간극비, 이방성 등에 따라 달라지고 같은 종류의 흙이라 하더라도 배수조건이나 전단형태, 변형률 속도 등에 큰 영향을 받기 때문에 기존의 특정 지역에서 구한 경험적 방법에 의한 피에조콘 계수를 다른 지역에 직접적으로 적용하는 것은 무리가 따를 수 있다. 또한, 기존에 공학적 특성에 따라 제시된 피에조콘 계수의 경우 그 신뢰도는 상대적으로 높다고 할 수 있지만, 추가적인 실내시험 등이 필수적으로 수행되어야 한다는 문제점을 가지고 있다. 특히, 해성점토의 경우 육상의 점성토와는 성인이 다르고 서해안 해성점토는 조류의 영향을 많이 받기 때문에 본 연구지반인 시화호 인근에서 CPTu를 적용하는데 있어 이 지역에 적합한 피에조콘 계수의 산정기법에 대한 연구가 필요하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 시화지구 6개 위치에서 수행한 피에조콘 관입시험 결과를 이용하여 시화지구 해성 점성토의 경험적인 피에조콘 계수에 대하여 알아보았다. 현장배인시험(Field Vane Test, FVT) 결과를 기준 비배수 전단강도로 두고 구한 피에조콘 계수와 함께 Jang(2001)이 수행한 기존의 국내 현장에 대한 시험결과를 활용하여 CPTu 결과와 피에조콘 계수의 상관성을 분석하고, CPTu 결과만을 이용하여 비배수 전단강도를 간편하게 추정하는 방법에 대한 연구를 수행하였다. 또한, 다양한 종류의 실내시험

결과와의 비교를 통해 본 연구에서 제시한 산정기법의 적용성을 확인하였다.

2. 기존의 피에조콘 계수

CPTu로부터 비배수 전단강도를 산정하기 위해서는 우선 피에조콘 계수라는 변수가 필요한데, 이는 CPTu의 측정값인 원추관입 저항력(q_c) 및 관입간극수압(u_{bt})을 FVT나 실내실험 등 일반적으로 많이 사용되고 있는 시험으로부터 구한 기준 비배수 전단강도(reference undrained shear strength)와의 상관관계로부터 구하게 된다. 피에조콘 계수는 적용 방법에 따라 식 (1)~(3)과 같이 크게 3가지로 정의할 수 있다.

$$s_u = \frac{q_T - \sigma_{vo}}{N_{kT}} \quad (1)$$

$$s_u = \frac{q_T - u_{bt}}{N_{qu}} \quad (2)$$

$$s_u = \frac{u_{bt} - u_0}{N_{\Delta u}} \quad (3)$$

여기서, s_u 는 비배수 전단강도, q_T 는 부등 단면적 효과를

Table 1. Previously proposed empirical piezocone factors (modified from Jang 2001).

지역	기준 s_u 측정방법	Cone factor	Reference
Italy	CK ₀ UC	$N_{kT} = 8 \sim 10$	Jamiolkovski et al. (1982)
Canada (Vancouver)	FVT SBPT	$N_{kT} = 8 \sim 10$	Konrad et al. (1985)
Brazil	FVT CIUC	$N_{kT} = 13.5 \sim 15.5$	Rocha-Filho and Alencar (1985)
Singapore	FVT	$N_{kT} = 9 \sim 12$	Dobie (1988)
Australia	FVT	$N_{kT} = 13.7$	Jones (1995)
Malaysia	FVT	$N_{kT} = 5 \sim 13$	Wong (1995)
Japan	UCT FVT	$N_{kT} = 8 \sim 16$ $N_{kT} = 9 \sim 14$	Tanaka (1995)
Korea (Incheon)	UU FVT	$N_{kT} = 15$ $N_{kT} = 13$	이갑열 (1997)
Korea	UU CIUC CAUC FVT	$N_{kT} = 10 \sim 25$	이선재 (1997)

FVT: Field Vane Test, CIUC: Isotropic Consolidated-Undrained Triaxial Test, PLT: Plate Load Test, CAUC: Anisotropic Consolidated-Undrained Triaxial Test, SBPT: Self-Boring Pressuremeter Test, UCT: Unconfined Compression Test, UU: Unconsolidated-Undrained Test, CK₀UC: K₀ Consolidated-Undrained Triaxial Test.

고려한 원추관입 저항력, σ_{v0} 는 연직 전응력, u_{bT} 는 관입간 극수압, u_0 는 정수압, 그리고 N_{kT} , N_{qu} , $N_{\Delta u}$ 는 각각 전응력 개념의 피에조콘 계수, 유효응력 개념의 피에조콘 계수, 그리고 간극수압 개념의 피에조콘 계수이다. 이러한 3가지 개념의 피에조콘 계수 중에서 N_{qu} , $N_{\Delta u}$ 는 과압밀비가 큰 흩이나 아주 연약한 점토의 경우 신뢰성이 떨어지기 때문에(Lunne *et al.* 1997), 일반적으로 전응력 개념의 피에조콘 계수인 N_{kT} 를 많이 사용하게 된다.

Table 1은 기존의 국내외 여러 연구자들이 다양한 지역에 대한 CPTu 결과로부터 경험적 방법을 이용하여 제안한 전응력 개념의 피에조콘 계수(N_{kT})를 나타낸 것으로, 지역 및 기준 비배수 전단강도 등에 따라 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 지반의 성인이나 불균질성 또는 다양한 공학적 특성에 따라 비배수 전단강도가 달라지고, 기준 비배수 전단강도 또한 시험방법에 따라 차이를 보이기 때문이다. 따라서 특정 지역에 해당되는 피에조콘 계수를 아무런 검증 없이 적용한다는 것은 문제가 따를 수밖에 없다.

한편, 장인성 등(2001)은 국내 10개 지역에서 46회의 CPTu 결과로부터 지반의 공학적 특성이 피에조콘 계수에 미치는 영향에 대하여 알아보았는데, 소성지수는 피에조콘 계수와 큰 상관성이 없는 반면, 과압밀비에 따라서 N_{kT} , N_{qu} 가 증가한다는 사실을 발견하였다. 이러한 사실은 Kjekstad *et al.*(1978) 및 De Ruiter(1982)의 연구 내용과 일치하는 것으로, 장인성 등(2001)은 정규압밀 또는 약간 과압밀된 영역($OCR < 2.5$)에 한정하여 N_{kT} 와 N_{qu} 를 이용하고, 과압밀비에 따라 구분하여 나타낸 Table 2의 값들을

Table 2. Piezocone factors (N_{kT} , N_{qu} , $N_{\Delta u}$) with OCR (장인성 등 2001).

과압밀비	N_{kT}		N_{qu}		$N_{\Delta u}$	
	\bar{X}	r_{70}	\bar{X}	r_{70}	\bar{X}	r_{70}
$OCR < 1.5$	9.7	± 4.2	9.3	± 4.9	4.0	± 2.9
$1.5 \leq OCR < 2.5$	12.9	± 8.2	14.8	± 9.2	3.5	± 3.0
$2.5 \leq OCR < 4$	14.3	± 10.6	19.4	± 14.5	3.2	± 2.9

\bar{X} : mean piezocone factor, r_{70} : errors at 70% reliability of the piezocone factors.

사용할 것을 제안하였다. 하지만, 이러한 피에조콘 계수는 실내압밀시험 등으로부터 과압밀비를 추가적으로 구해야 한다는 문제점을 가지고 있다.

3. 시험 개요 및 연구 수행 지반

본 연구에서 사용한 피에조콘은 선단각이 60° , 원추 저면적이 10 cm^2 , 그리고 다공질 필터가 원추 뒷면에 위치하고 있는 것으로, 시화지구 총 6개 위치에서 2 cm/sec 의 속도로 관입하면서 원추관입 저항력(q_c)과 주면 마찰력(f_s), 그리고 관입 간극수압(u_{bT})을 측정하였다. 피에조콘 관입시험을 수행한 위치에서 현장배인시험을 다양한 심도 별로 수행하였고, 또한 교란 및 불교란시료를 채취하여 기본 물성시험, 일축압축시험, 다양한 종류의 삼축압축시험을 수행하여 지반의 비배수 전단강도를 산정하였다.

본 연구에서 시험을 수행한 대상 지반은 시화호 내 일대로서 선캠브리아기의 편마암류 및 편암류들이 주로 분

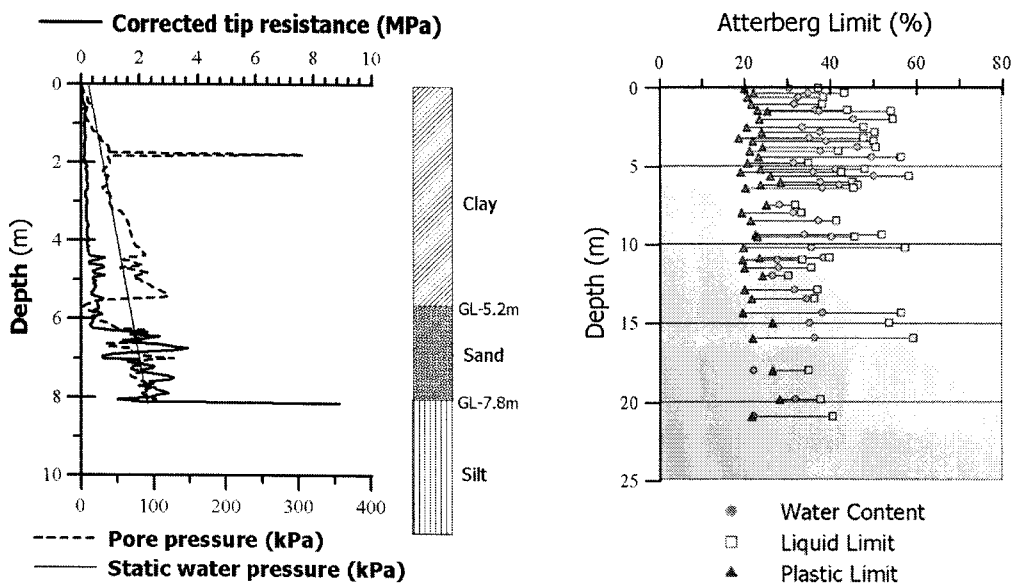


Fig. 1. Typical soil profile and Atterberg limit in Shihwa region.

포하는 지체구조의 분할 상 경기육괴에 해당하는 지역으로 쥬라기의 흑운모화강암과 백악기 경상누층군에 대비되는 역암 및 응회질 퇴적암이 소규모로 분포하고 있으며, 강과 골짜기 주변으로 제 4기 충적층이 부정합으로 피복되어 있다(김낙경 등 2003). 본 연구를 수행한 시화지구의 대표적인 주상도와 아터버그 한계 분포를 나타낸 Fig. 1에서 알 수 있듯이, 상부 해성 퇴적토층은 소성지수(I_p)가 대부분 6~30% 정도인 저소성 점성토로서 통일분류법에 따르면 주로 CL로 분류되며 실트질 성분을 많이 함유하고 있는 것으로 나타났다. 그리고 표준압밀시험으로부터 구한 과압밀비(OCR)는 5.0 미만이고 대부분 3.5 미만으로서 정규압밀 또는 약간 과압밀되어 있는 것으로 나타났다. 그 이후로는 모래층, 실트층, 자갈층, 풍화토, 풍화암, 연암 등이 순서대로 분포하고 있다.

4. 실험 결과 및 분석

개요

앞서 설명한 바와 같이, CPTu로부터 점성토의 비배수 전단강도를 산정하기 위해서는 피에조콘 계수가 필요한데, 이때 경험적인 방법을 많이 사용하고 있다. 여기서 경험적인 방법은 지역이나 다양한 공학적인 특성 등의 영향을 받게 되는데, 기존의 연구들은 거의 대부분 특정 지역에 해당되는 피에조콘 계수를 제시하든지, 혹은 과압밀비나 소성지수 등 추가적인 실험이 필요한 변수와의 상관성에 따른 피에조콘 계수를 제안하고 있다. 따라서 본 연구에서는 별도의 실내시험이나 현장 시험 없이 CPTu 결과만을 이용하여 간편하게 점성토의 비배수 전단강도를 산정하는 방법을 알아보았다. 그리고 실내시험결과와의 비교를 통해 시화지구 해성점토에 대한 해석기법의 적용성을 확인하였다.

CPTu 결과와 피에조콘 계수의 상관관계

피에조콘 관입시험으로부터 피에조콘 계수, N_{kT} 를 직접적으로 산정하는 방법은 장인성 등(2001)이 제시한 Table 2를 이용하는 방법과 CPTu 측정값으로부터 얻을 수 있는 피에조콘 변수인 $(q_T - \sigma_v) / \sigma_v'$ 또는 간극수압계수 B_q 를 이용하는 방법 등 크게 3가지로 구분할 수 있다.

먼저, 피에조콘 계수 N_{kT} 는 장인성 등(2001)이 제시한 Table 2에서 보는 바와 같이 OCR이 커짐에 따라 커지는 것으로 알려져 있다. 하지만 Table 2를 이용하여 피에조콘 계수를 구하기 위해서는 실내표준압밀 시험 등을 추가적으로 수행하여 OCR을 먼저 구해야 하는데, CPTu를 이용하여 시화지구 해성점토의 과압밀비를 산정하는 방법을 제시한 장인성 등(2003)의 연구결과를 이용한다면, CPTu로부터 직접적으로 피에조콘 계수를 얻을 수 있다. 장인성

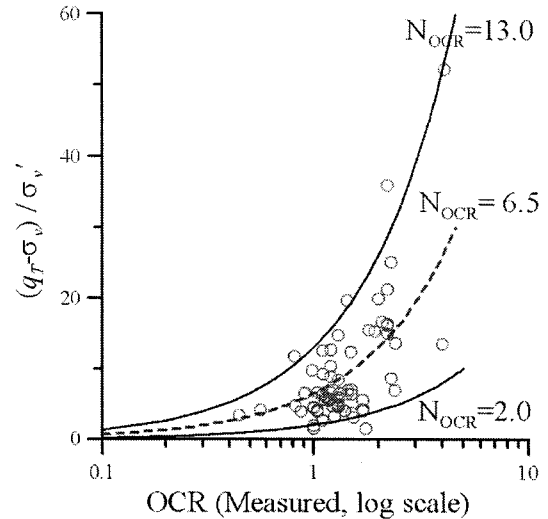


Fig. 2. Correlation between OCR and piezocone parameter $(q_T - \sigma_v) / \sigma_v'$.

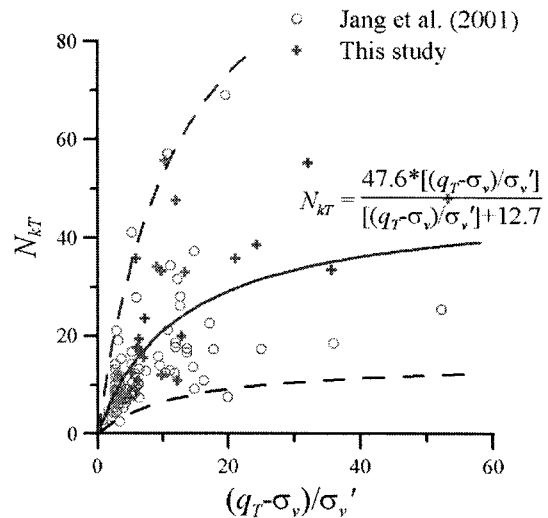


Fig. 3. Correlation between $(q_T - \sigma_v) / \sigma_v'$ and N_{kT} .

등(2003)의 방법에 따르면, 과압밀비는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 CPTu 결과로부터 얻을 수 있는 피에조콘 변수인 $(q_T - \sigma_v) / \sigma_v'$ 와 상관관계가 있고, $(q_T - \sigma_v) / \sigma_v'$ 에 대한 OCR의 비인 $N_{OCR}=6.5$ 를 이용하여 CPTu로부터 점성토의 과압밀비를 구할 수 있게 된다. 따라서 Fig. 2와 Table 2로부터 CPTu 결과에 따른 피에조콘 계수, N_{kT} 를 추정할 수 있다.

CPTu로부터 피에조콘 계수 N_{kT} 를 직접적으로 산정하는 두 번째 방법으로는 CPTu 측정값인 q_T 를 이용하는 방법이다. Fig. 3은 $(q_T - \sigma_v) / \sigma_v'$ 와 N_{kT} 의 상관관계를 나타낸 것으로, 시화지구 해성점토층의 N_{kT} 는 현장배인시험 결과를

기준 비배수 전단강도로 두고 산정한 것이고, 본 연구지반 이외에도 장인성 등(2001)이 수행한 국내 10개 지역 46회의 CPTu 결과를 함께 나타내었다. 일반적으로 CPTu 측정값이 지반 내에 부분적으로 존재하는 조립토층이나 위치 및 심도 등에서의 오차로 인해 크게 다를 수 있기 때문에 Fig. 3에서는 이러한 불균질성의 영향을 최소화하기 위하여 장인성 등(2001)에서 적용한 방법을 사용하여 1 m 심도 변화에서 측정 q_T 값의 편차가 30% 이내인 지반을 균질한 지반으로 설정함으로써 불균질한 지반의 결과는 배제하였다. 그림을 보면, $(q_T - \sigma_v) / \sigma'_v$ 가 커짐에 따라 N_{kT} 도 커지는 비례관계를 보이고 있는데, 이러한 경향성은 $(q_T - \sigma_v) / \sigma'_v$ 과 OCR의 관계 및 OCR과 N_{kT} 의 관계로부터 예측할 수 있는 현상으로, N_{kT} 는 $(q_T - \sigma_v) / \sigma'_v$ 와 아래의 식 (4)와 같은 상관관계를 보이고 있다.

$$N_{kT} = \frac{47.6 \times [(q_T - \sigma_v) / \sigma'_v]}{[(q_T - \sigma_v) / \sigma'_v] + 12.7} \quad (4)$$

마지막 세 번째 방법으로는 식 (5)에 제시된 간극수압계수 B_q 를 이용하는 방법인데, 이 값 또한 CPTu 측정값으로부터 직접적으로 구할 수 있는 값이다.

$$B_q = \frac{(u_{bT} - u_0)}{(q_T - \sigma_v)} \quad (5)$$

Fig. 4는 B_q 와 N_{kT} 와의 상관관계를 나타낸 것으로, 이 또한 본 연구지반의 CPTu 결과뿐만 아니라 장인성 등(2001)의 실험결과도 함께 도시하였고, Fig. 3과 마찬가지로 불균질한 지반에서의 시험결과를 배제하였다. 그림을 보면, B_q 가 커짐에 따라 N_{kT} 가 감소하는 경향을 보이고 있

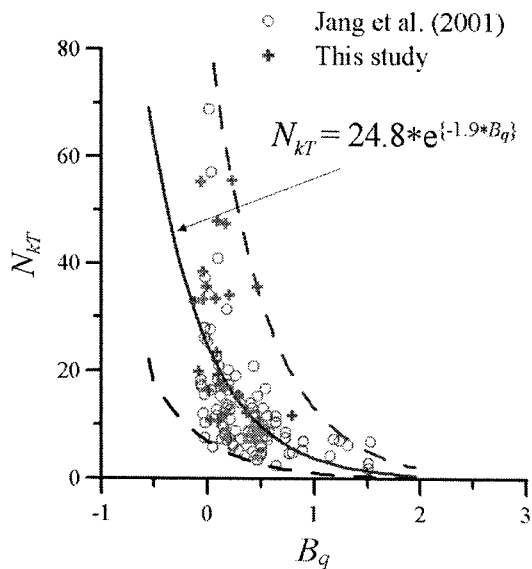


Fig. 4. Correlation between B_q and N_{kT} .

는데, 이는 이선재(1997)가 제시한 것과 같이 B_q 가 커진다는 것은 그만큼 연약한 점성토에 가까게 되고 따라서 상대적으로 작은 원추관입 저항력 q_T 를 보이는 반면, B_q 가 작은 흙은 과압밀비가 크거나 실트질 혹은 모래질 성분을 많이 함유하고 있기 때문에 상대적으로 큰 q_T 를 보이기 때문인 것으로 판단된다. 한편 본 연구지반인 시화지구의 경우 거의 대부분의 위치에서 $B_q < 0.5$ 로 상대적으로 낮은 값을 보이는 것은 앞서 설명한 바와 같이 이 지반이 실트질 성분을 많이 함유하고 있을 뿐만 아니라 시험결과가 집중되어 있는 얇은 지층에서의 높은 과압밀비(장인성 등 2003) 때문인 것으로 판단된다. Fig. 4로부터 N_{kT} 와 B_q 의 상관관계를 나타내면 식 (6)과 같다.

$$N_{kT} = 28 \times e^{-2.8 \times B_q} \quad (6)$$

해석방법에 따른 비배수 전단강도 비교

CPTu로부터 비배수 전단강도를 직접적으로 추정할 수 있는 3가지 방법 중 가장 합리적인 방법을 찾아보기 위하여 시화지구 해성점토층에서 실시한 다양한 시험 중 앞서 기준 비배수 전단강도로 사용한 FVT 결과 이외에도 일축 압축시험 및 삼축압축시험 등의 실내시험 결과를 이용하여 비교를 수행하였다. 여기서는 측정 비배수 전단강도에 대하여 해석방법에 따라 추정된 비배수 전단강도를 상대적으로 비교하기 위하여 Willmott(1981)가 식 (7)과 같이 제안한 일치지수(Index of agreement, I.O.A.)를 도입하였다.

$$I.O.A. = 1 - \frac{\sum_{j=1}^N (P_j - O_j)^2}{\sum_{j=1}^N [\dot{P}_j - \dot{O}_j]^2} \quad (7)$$

$$\dot{P}_j = P_j - \bar{O}, \quad \dot{O}_j = O_j - \bar{O}$$

여기서, P_j 및 O_j 는 각각 예측값과 측정값을 나타내고, \bar{O} 는 측정값의 평균을, N 은 데이터의 총 개수를 나타낸다. Willmott(1981)에 의하면, I.O.A.는 일반적으로 데이터들 간의 상관성을 분석하는데 많이 사용되는 상관계수(r)나 결정계수(r^2)에 비해, 이론적·해석적, 또는 경험적인 방법으로부터 구한 추정값이 실험이나 계측으로 구한 측정값과 얼마나 잘 일치하는가에 대한 직접적인 상호비교를 하는데 있어 훨씬 뛰어난 값이라 할 수 있다.

Fig. 5는 시화지구 해성점토에서 FVT나 실내시험으로부터 구한 비배수 전단강도(측정값)를 CPTu로부터 구한 비배수 전단강도(추정값)와 서로 비교한 것으로, 4.2절의 세가지 해석방법(편의상 첫 번째 방법은 OCR 방법, 두 번째 방법은 식 (4)를 이용한 $(q_T - \sigma_v) / \sigma'_v$ 방법, 세 번째 방법

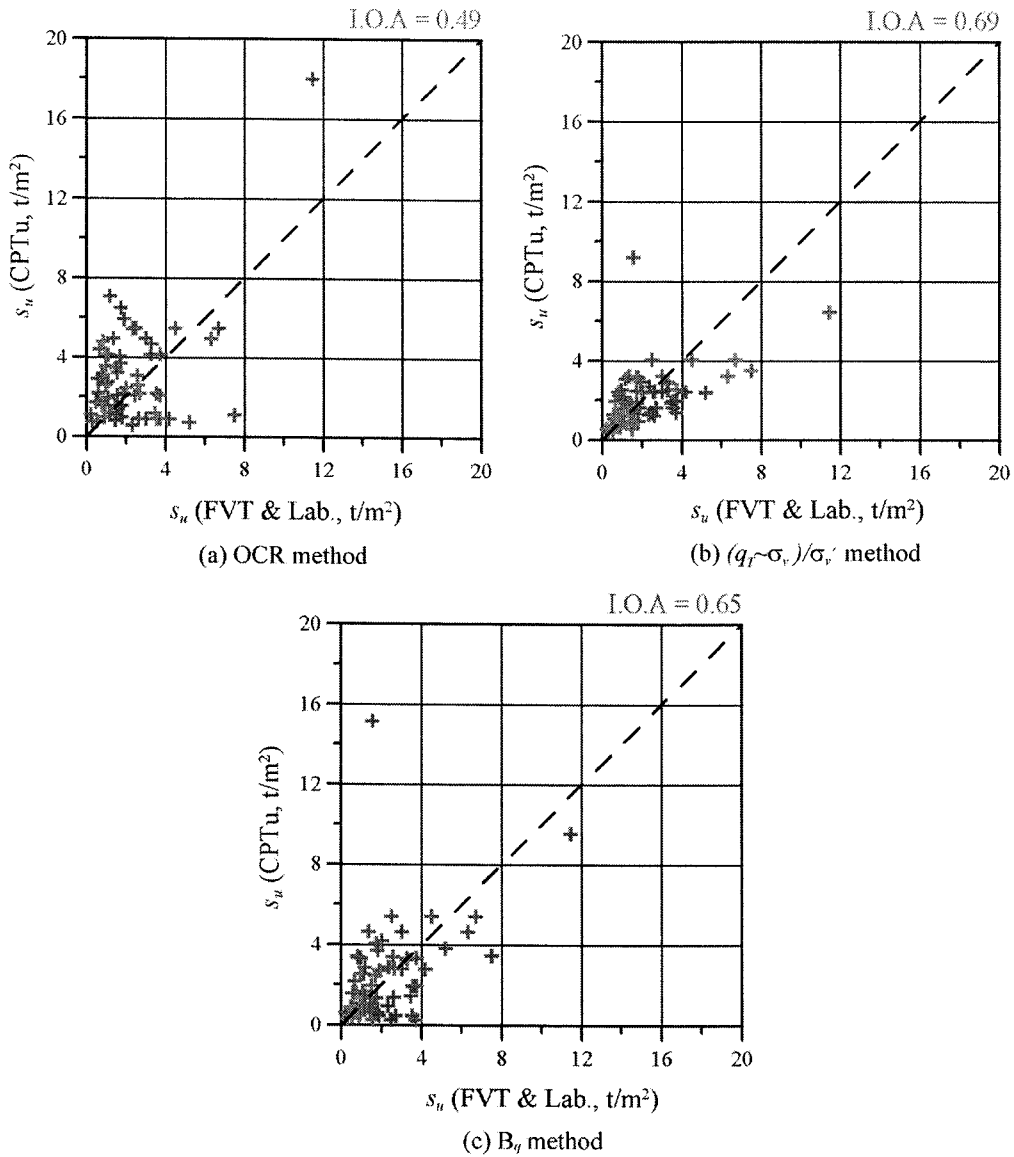


Fig. 5. Comparison between measured and predicted undrained shear strength.

은 식 (6)을 이용한 B_q 방법으로 정의)에 대하여 각각 나타내었다.

그림을 보면, Fig. 2와 Table 2로부터 구한 N_{kT} 를 바탕으로 시화지구 해성점토층의 비배수 전단강도를 추정하는 OCR 방법의 I.O.A.은 0.49로 세가지 방법 중 가장 낮고, CPTu 결과 중 B_q 를 이용한 방법이 0.65, 그리고 $(q_T - \sigma'_v)/\sigma'_v$ 를 이용한 방법의 I.O.A.가 0.69로 가장 높은 값을 보이고 있다. 이로부터 세가지 방법 중 $(q_T - \sigma'_v)/\sigma'_v$ 를 이용하여 비배수 전단강도를 추정하는 방법이 시화지구 해성점토층에의 FVT 및 실내시험 결과값과 가장 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

이러한 경향은 본 연구지반인 시화지구 총 6개 위치에서의 비배수 전단강도를 심도에 따라 비교한 Fig. 6에서도 확인할 수 있는데, 그림에서는 FVT 및 실내시험 결과 이외에도 CPTu 결과값을 이용한 세가지 해석방법으로부터 구한 비배수 전단강도를 같이 도시하였다. 그림을 보면, 시험위치에 따라 비배수 전단강도의 분포가 약간씩 차이가 있지만, 상부 해성점토층의 비배수 전단강도는 위치에 관계없이 거의 대부분 5 t/m^2 이하이고 평균적으로 1.5 t/m^2 정도인 연약한 점토층임을 알 수 있다. 그리고 CPTu 해석방법으로부터 구한 비배수 전단강도의 심도에 따른 분포가 전체적으로 비슷한 경향을 보이고 있다. 즉, 상부

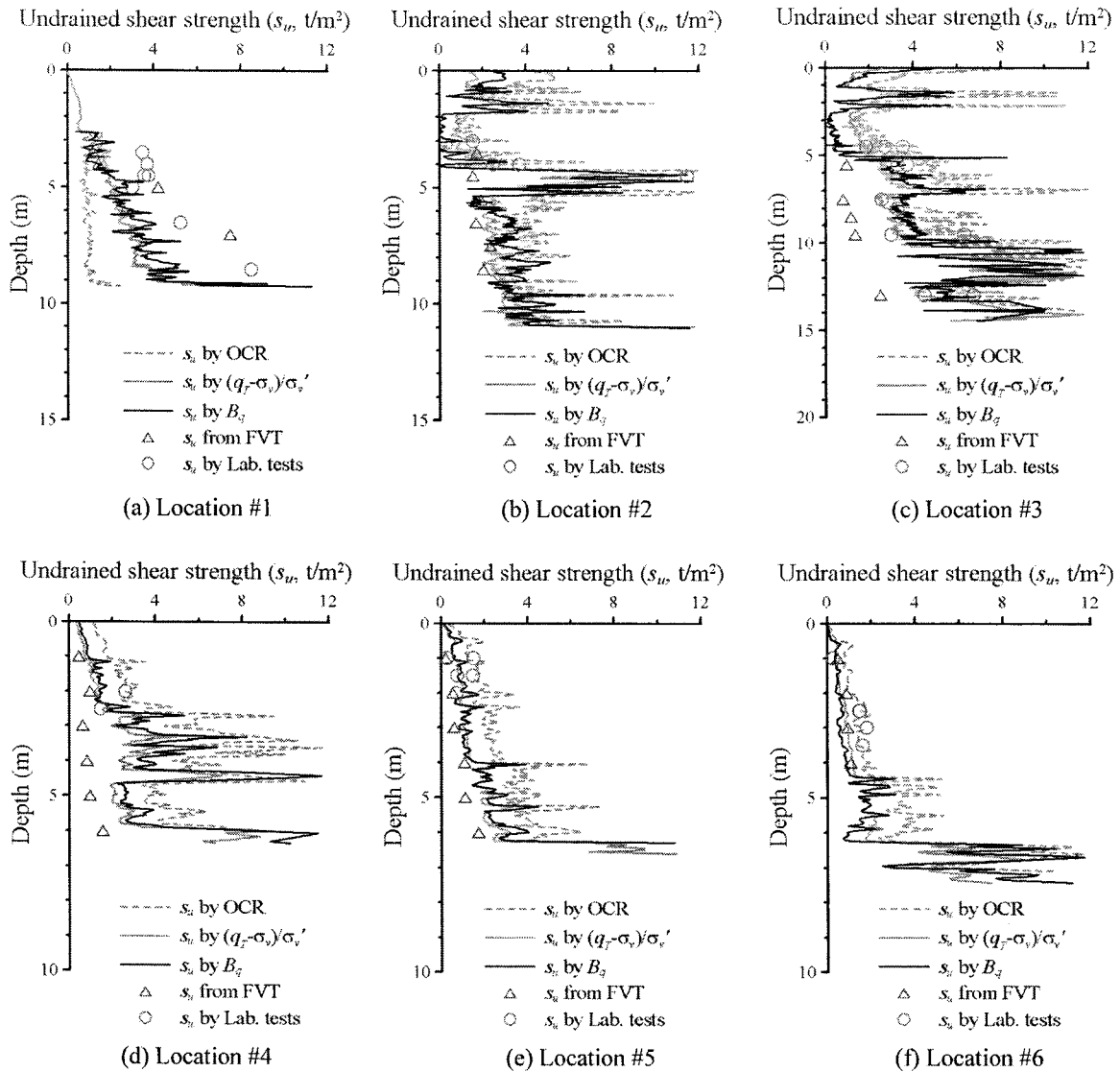


Fig. 6. Comparison of undrained strength with depth for 6 test locations.

해성점토층에서는 5 t/m² 이하의 분포를 보이지만, 하부 실트층이나 모래층으로 갈수록 전단강도 값이 커지는 경향은 세가지 방법 모두 잘 대변하고 있다고 할 수 있다. 한편 CPTu 해석방법에 따른 결과를 전체적으로 비교해보면, 세가지 방법 중 $(q_T - \sigma_v) / \sigma_v'$ 를 이용하는 방법이 현장 배인시험이나 실내시험 결과와 상대적으로 가장 잘 일치하고 있다. 여기서, 본 연구에서 기준 비배수 전단강도로 사용한 FVT 결과 이외에도 실내시험 결과 또한 상당히 잘 일치하고 있다. 따라서 I.O.A.를 이용한 신뢰성 분석과 심도에 따른 시험결과를 모두 비교한 결과, 시화지구 해성점토층의 비배수 전단강도를 CPTu로부터 간편하게 추정하는 방법으로 식 (4)의 $(q_T - \sigma_v) / \sigma_v'$ 를 이용하는 방법이 가

장 적합할 것으로 판단된다.

5. 결 론

시화지구 해성점토층에서 수행한 CPTu 및 FVT, 그리고 실내시험 결과를 비롯하여 기존에 국내에서 수행되었던 CPTu 결과를 이용하여 점성토의 비배수 전단강도를 간편하게 추정하는 방법에 대하여 연구한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 본 연구지반인 시화지구 해성점토층은 소성지수(I_p)가 대부분 6~30% 정도인 저소성 점성토로서 통일분류법에 따르면 주로 CL로 분류되며, 과압밀비(OCR)는 5.0 미

만이고 대부분 3.5 미만으로서 정규압밀 또는 약간 과압 밀되어 있다.

2) 시화지구 해성점토층에서 수행한 CPTu 및 기존의 CPTu 결과를 각 위치에서의 기준 비배수 전단강도로부터 구한 피에조콘 계수 N_{kT} 와 비교한 결과, $(q_T - \sigma_v) / \sigma'_v$ 가 커질수록 N_{kT} 도 커지는 비례관계를 보이는 반면, B_q 가 커짐에 따라 N_{kT} 가 감소하는 경향을 확인할 수 있었다.

3) CPTu로부터 점성토의 비배수 전단강도를 산정하는데 필요한 피에조콘 계수는 일반적으로 기존의 특정지역에 국한되어 제시된 값이거나 추가적인 실내실험이 필요한 값을 사용하게 되는데, 본 연구에서는 CPTu 결과만을 이용하여 점성토의 비배수 전단강도를 간편하게 추정할 수 있는 방법을 CPTu 결과와 과압밀비의 관계를 이용하는 방법, $(q_T - \sigma_v) / \sigma'_v$ 를 이용하는 방법, B_q 를 이용하는 방법 등 세가지로 제시하였다.

4) 시화지구 해성점토층에 대하여 세가지 해석방법의 신뢰성 비교를 목적으로 도입한 일치지수(Index of agreement, I.O.A.)를 분석한 결과, OCR 방법의 I.O.A.은 0.49로 세가지 방법 중 가장 낮고, CPTu 결과 중 B_q 를 이용한 방법이 0.65, 그리고 $(q_T - \sigma_v) / \sigma'_v$ 를 이용한 방법의 I.O.A.가 0.69로 가장 높은 값을 보이고 있다. 이로부터 세가지 방법 중 $(q_T - \sigma_v) / \sigma'_v$ 를 이용하여 비배수 전단강도를 추정하는 방법이 시화지구 해성점토층에서 다른 측정값과 가장 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

5) 시화지구 총 6개 위치에서 FVT 및 실내시험 결과 이외에도 CPTu 결과값을 이용한 세가지 해석방법으로부터 구한 비배수 전단강도를 전체적으로 비교한 결과, 세가지 방법 중 $(q_T - \sigma_v) / \sigma'_v$ 를 이용하는 방법이 심도에 관계없이 현장배인시험이나 실내시험 결과와 상대적으로 가장 잘 일치하고 있다. 따라서 시화지구 해성점토층의 비배수 전단강도를 CPTu로부터 간편하게 추정하는 방법으로 본문의 식 (4)의 $(q_T - \sigma_v) / \sigma'_v$ 를 이용하는 방법이 가장 적합할 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 해양수산부의 “해양콘관입시험기 개발 과제”의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

김낙경, 박종식, 김유신. 2003. 시화지구 연약점토의 광물학적 특성. *한국지반공학학회 2003 봄학술 발표회*, 773-780.
 김병탁, 윤길림. 2002. 인공신경망 기법을 이용한 국내 해성 점토의 압축특성 분석. *대한토목학회 논문집*, 22(2-C),

133-147.

- 김종국, 김영용, 최인걸, 박영목. 2001. CPTu와 DMT를 이용한 인천국제공항 해성점토의 공학적 특성연구. *한국지반공학학회논문집*, 17(2), 41-49.
 김주형, 김영용, 조성민, 김명모. 2000. 인천국제공항 부지 해성 세립토에 대한 CPTu와 DMT 결과 비교. *한국지반공학학회논문집*, 16(6), 23-33.
 신은철, 김기환. 1995. 인천지역에 분포하는 해성점토의 압밀 거동. *대한토목학회 1995년도 학술발표회 논문집*, 463-466.
 이갑열. 1997. 현장시험을 통한 비배수 전단강도의 산정. 서울대학교 공학석사학위논문, 95 p.
 이강운, 윤길림, 채영수. 2002. 피조콘 시험을 이용한 해성점토의 응력이력(OCR, σ'_p)판정. *대한토목학회 2002년 학술발표회*, 321-324.
 이선재. 1997. 피에조콘을 이용한 국내 지반의 공학적 특성 연구, 공학박사 학위논문, 서울대학교.
 이인보, 김우영, 윤여준. 1997. 해성점토의 비배수 전단강도 추정연구. *대한토목학회 1997년도 학술발표회 논문집*, 217-220.
 장인성, 김범상, 권오순, 석정우. 2003. 피에조콘 관입시험을 이용한 시화지구 해성 점성토의 압밀특성 산정. *한국해양해양공학학회 정기학술발표회*. (in print)
 장인성, 이선재, 정충기, 김명모. 2001. 국내 점성토 지반의 피에조콘 계수. *한국지반공학학회논문집*, 17(6), 15-24.
 정철호. 1998. 포항 해성점토의 분포와 공학적 특성. *한국지반공학학회논문집*, 14(5), 77-88.
 정형식, 안상로. 1993. 안산지역 해성점토의 크리프 정수에 관한 연구. *한국지반공학학회논문집*, 9(4), 93-102.
 De Ruiter, J. 1982. The static cone penetration test, State-of-the-Art Report. *Proc. 2nd European Symp. Penetration Testing*, Amsterdam, 2, 389-405.
 Jang, I.S. 2001. Evaluation of strength and consolidation characteristics of clayey soils using CPTu and SBPT. Ph. D thesis, Seoul National Univ., 128 p.
 Kjekstad, O., T. Lunne, and C.J.F. Clausen. 1978. Comparison between in situ cone resistance and laboratory strength for overconsolidated North Sea clays. *Marine Geotechnol.*, 3(1), 23-36.
 Lunne, T., P.K. Robertson, and J.J.M. Powell. 1997. Cone penetration testing in geotechnical practice. Blackie Academic & Professional. 312 p.
 Willmott, C.J. 1981. On the validation of models. *Phys. Geogr.*, 2(2), 184-194.

Received Jul. 14, 2003

Revised Oct. 23, 2003

Accepted Nov. 13, 2003