

저소성 실트지반의 비배수 전단강도 특성을 고려한 CPTU 콘계수 평가

Evaluation of CPTU Cone Factor of Silty Soil with Low Plasticity Focusing on Undrained Shear Strength Characteristics

김주현^{1*}

Ju-Hyun Kim^{1*}

¹Member, Adjunct Professor, Department of Civil Engineering, Dongshin University, 185, Geonjae-ro, Naju-si, Jeollanam-do, Korea

ABSTRACT

Laboratory and in-situ tests were conducted to evaluate the cone factors for the layers with low plasticity containing a lot of silty and sand soils from the west coast (Incheon, Hwaseong and Gunsan areas) and its applicability was evaluated based on these results. The cone factors were evaluated from 19 to 23 based on unconfined compression strengths (q_u), from 13 to 13.8 based on simple CU strengths and from 11.6 to 13.1 based on field vane strengths, respectively. The unconfined compression strengths of undisturbed silty soil samples with low plasticity were considerably underestimated due to the change of in-situ residual effective stress during sampling. Half of unconfined compression strength ($q_u/2$) based cone factors of silty soils with low plasticity fluctuated and were approximately 1.8 times higher than simple CU based values of these soils. When evaluating cone factors of these soils, it should be judged overall on the physical properties such as the grain size distribution and soil plasticity and on the fluctuation of the corrected cone resistance and the sleeve friction due to the distribution of sandseam in the ground including pore pressure parameter

요 지

(, ,)
(Nkt) 19~23, CU 가 13~13.8, 11.6~13.1 가 .
가 가 CU
(Nkt)가 1.8 CPTU
(Nkt) 가 , sandseam (qt)
(fs) , (Bq) .

Keywords : Silty soil, Low plasticity, CPTU data, Cone factor, Unconfined compression test, Simple CU test

1. 서 론

국내 항만 공사가 이루어지는 대표적인 지역에 대한 지반 특성을 기준으로 구분하면, 남해안에 위치한 부산 및 광양지역과 같이 점토질 성분이 우세한 고소성 점토지반

과 서해안의 인천 및 군산 지역과 같이 실트질 성분이 많은 저소성 지반으로 구분할 수 있다. 이러한 지역에서 항만 공사인 안벽 케이슨 구조물 설치를 위한 하부기초 지반 처리 및 컨테이너 야적장으로 이용되는 배후부지의 지반 개량을 수행하는 과정은 전체 공사비를 좌우하는 가장 중요한 요소가 된다.

연약지반 상에 구조물을 건설할 때, 공학적 문제를 검토하기 위해 수행되는 지반조사는 시추과정에서 채취된 불

Received 20 Feb. 2017, Revised 22 Mar. 2017, Accepted 24 Mar. 2017

*Corresponding author

Tel: +82-61-330-3138; Fax: +82-61-330-3138

E-mail address: soil1004@hotmail.com (J.-H. Kim)

교란 시료로 각종 실내시험을 실시해서 필요한 지반특성을 얻는 방법과 원위치에서 직접적으로 변형 및 응력을 가해서 지반특성을 파악하는 원위치 시험으로 구분할 수 있다.

현재까지 점성토 지반조사법으로 유럽과 미국 등에서는 현장베인시험(FVT)이, 국내 및 일본에서는 불교란시료를 이용한 일축압축시험(UCT)이 주로 수행되어 왔으며, 국내에서는 현장 원위치에서 수행되는 피에조콘관입시험(CPTU) 및 현장베인시험(FVT) 등은 보조적 수단으로 적용되어왔다. 그러나, Euro Code(2007)에 따르면, 일축압축시험(UCT)은 보조적 수단으로 적용되는 index test로 규정되어 있는데, 예를 들어, Bothkennar 지역에서 수행된 지반조사 보고서에는 어떠한 일축압축시험(UCT) 결과도 포함되어 있지 않은 것을 통해서도 이러한 경향을 확인할 수 있다(Hight et al., 1994).

현재까지 일축압축강도의 절반인 $q_u/2$ 가 설계 비배수전단강도로 적용되어온 근거는 시료채취시 발생하는 교란효과로 인한 강도 저평가 현상과 응력이방성 및 변형률 속도 효과로 인해 강도가 과대 평가되는 현상이 균형을 이루어 별도의 보정작업 없이도 실내시험에서 얻어진 값을 그대로 설계 강도로 적용할 수 있다는 데 있다(Matsuo, 1984). 그러나, 일축압축시험(UCT)은 지반의 성질 및 지반조사 기술자의 숙련도를 포함한 지역특성에 크게 좌우되므로, 이에 대한 실무적인 접근은 각 국가 및 지역의 경험에 근거해서 수행되는 경우가 많게 된다.

Kim et al.(2016)은 부산 및 광양지역과 같은 고소성 점토지반에 대해서는 현재까지 별다른 문제 없이 적용되어왔지만, 인천 및 군산과 같이 서해안 지역에 분포하는 모래 및 실트 함유량이 많은 저소성 지반 조건에서는 시료채취 후 잔류유효응력(σ_v')의 감소로 인해 일축압축강도가 현저하게 과소평가되어 적용성이 떨어지므로, 고소성 점토 지반과 동일한 조건에서 전단강도를 평가할 수 있는 간이 CU 시험으로 설계 비배수전단강도를 평가하도록 제시하였다.

한편, 원위치시험으로서 피에조콘관입시험(CPTU)은, UCT 및 FVT와 같이 토질에 따라 측정치가 좌우되는 상황이 적고, 유용한 지반정보가 단시간에 얻어질 수 있으며, 시험방법도 단순한 이점을 지니고 있다. 불교란 시료채취가 반드시 필요한 실내토질시험과 비교할 때, CPTU는 심도 방향의 원위치 지반정보를 연속적으로 신속하게 얻을 수 있는 장점을 지니고 있다.

다만, 기존의 원위치시험법과 동일하게 CPTU의 최대 약점은 응력 및 변형조건 등의 경계조건이 복잡하며, 측정

된 값과 지반정수가 이론적으로 연결되지 않으므로, 시험 결과와 지반정수를 연결시키는 실내시험을 별도로 수행하거나 경험식에 의존해야 하는 부분이다. CPTU 결과에서 얻어지는 값은 콘선단저항력(q_c), 주변마찰력(f_s), 간극수압(u)이며, 이러한 값들의 대표적인 특성에 대한 상관관계 분석을 실시하여 토질분류, 압밀상태 및 비배수전단강도 등을 평가하는데 주로 이용되고 있다.

흙 분류 외에 실무적인 관점에서 가장 적용성이 높은 부분은 비배수전단강도를 평가하는 것이라고 할 수 있으며, 이 때, 주로 이용되는 방법은 실콘선단저항($q_{net}=q_c(q_c)-\sigma_v$)를 비롯하여, 콘선단 바로 뒷면에서 측정된 간극수압을 뺀 유효콘선단저항($q_e=q_c-u$)을 이용하는 방법 및 콘관입시의 과잉간극수압(Δu)을 이용하는 방법이며, 비배수전단강도를 직접적으로 구할 수 없으므로, 각각의 방법들에 대한 콘계수(N_{kt} , N_{ke} , $N_{\Delta u}$)를 이용하여 적용하게 된다.

이 때, 콘계수를 결정하는 방법은 크게 지지력 이론, 공동확장이론, 정상상태변형해석 및 유한요소해석을 이용하여 이론적으로 접근하는 방법과 실내시험(일축압축시험, 삼축압축시험) 및 현장베인시험(FVT)으로 평가된 비배수전단강도와 콘저항치들과의 상관관계를 이용하는 방법으로 구분할 수 있다.

콘관입 메커니즘의 이론적 해석을 위한 해석 모델은 다양하게 제시되어 있으나, 콘관입 중의 주변 지반상태의 변화가 복잡하며 퇴적층서 구조가 불균일성을 나타내는 특수성도 있어서 일반적인 관계식이 확립되지 못한 실정이다. 또한, 전단탄성계수(G)를 비배수전단강도(s_u)로 나눈 값으로 표현되는 강성지수($I_r=G/s_u$)는 콘계수 결정에 있어서 가장 중요한 인자이지만, 전단탄성계수(G)를 산정하는 방법이 여러 가지이며, 비배수전단강도도 시험방법에 따라 매우 달라지므로 직접적으로 적용하기에는 어려움이 따르게 된다.

따라서, CPTU 데이터를 이용하여 비배수전단강도를 결정하는 경우에는 콘저항값과 실내 및 현장시험으로 구한 비배수전단강도와의 직접적인 비교, 즉, 콘관입저항값에 포함된 상재압(σ_v) 효과를 제거한 형태로 나타내는 실콘선단저항($q_{net}=q_c(q_c)-\sigma_v$)을 이용한 콘계수(N_{kt})가 가장 일반적으로 적용되고 있다. 이 때, Aas et al.(1986)의 일부 연구결과를 제외하고는 대부분의 기존 연구결과(La Rochella et al., 1988; Tanaka and Tanaka, 1996)에서는 해당 지역의 토질 특성에 관계없이 콘계수(N_{kt})와 소성지수(I_p) 사이에 특별한 상관관계가 존재하지 않는 것으로 제시되었으

며, 국내에서도 여러 연구자(Jang et al., 2001; Park et al., 2003)들에 의해 실내 및 현장시험결과와의 상관관계를 통해 유사한 결과가 얻어지는 것으로 보고되고 있다.

소성지수(I_p)와 콘계수(N_{kt})의 상관관계에 대해 전 세계적으로 다양한 지역 및 토질 조건에 대한 연구가 수행되어 왔으나, 앞에서 언급한 바와 같이, 모래 및 실트 함유량이 우세한 서해안 저소성 지반 특성, 즉, 일축압축시험에 의한 비배수전단강도의 과소평가 경향을 고려한 피에조콘계수(N_{kt})에 대한 연구는 매우 미흡한 실정이다. 현장에서 피에조콘관입시험(CPTU)을 실시하여 시료채취 및 운반 등의 일련의 과정에서 발생하는 교란 효과를 배제한다고 할지라고, 결국에서는 일축압축강도 등을 이용한 상관관계를 통해서 비배수전단강도를 평가하게 되므로, 지반특성을 고려한 콘계수(N_{kt}) 결정은 아주 중요한 사항이 될 수 있다.

본 연구에서는 모래 및 실트 함유량이 우세한 서해안 저소성 지반(인천, 화성, 군산)에서 실시된 실내 및 현장시험으로부터 얻어진 비배수전단강도를 이용하여 피에조콘계수(N_{kt})를 분석한 후, 이에 대한 적용성을 평가하고자 한다.

2. 피에조콘계수(N_{kt})에 대한 기존연구

피에조콘관입시험(CPTU)에서 얻어진 콘선단저항(q_c)은 콘관입시 내부의 하중계에 의해 측정된 힘(P_m)을 콘 본체의 단면적(A_p)로 나눈값이며, 주면마찰력(f_s)은 마찰 슬리브에 걸리는 하중(P_s)을 주면적(A_s)로 나눈값을 의미하게 된다. 간극수압을 측정하는 다공질 필터가 Fig. 1과 같이 콘선단 바로 뒷면에 위치한 피에조콘을 이용할 경우 간극수압(u)이 작용하기 때문에, 지반 자체의 콘선단저항을 구하기 위해서는 Lunne et al.(1985)은 다공질 필터의 면적을 고려한 q_t 를 이용하여 비배수전단강도(s_u)를 평가하도록 제안하였다.

점성토 지반은 q_c 가 작고, u 가 큰 경향을 나타내므로, 간극수압보정을 실시하지 않고 q_c 를 바로 사용하게 되면, q_t 와의 오차가 크게 발생하게 된다. 특히, 국내 지반과 같이 연안 지역에 퇴적된 점성토의 경우, 이러한 차이가 현저하게 발생되는데, 과거에는 이러한 사항을 고려하지 않고 q_c 를 그대로 적용한 시기도 있었으므로 기존 데이터를 이용할 경우 이에 대한 주의가 필요하다. $q_t(q_c)$ 와 점성토의 비배수전단강도(s_u)와의 관계는 점성토 지반에 대한 Terzaghi의 지지력 공식($\phi=0$)를 원용한 다음 식으로부터 평가할 수 있다.

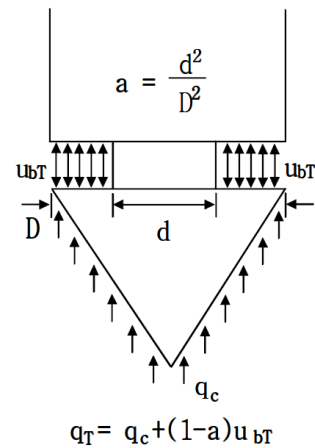


Fig. 1. The unequal area effect on measured parameters (Lunne et al., 1985)

$$q_t(q_c) = N_{kt}(N_k) \cdot s_u + \sigma_{v0} \quad (1)$$

여기서, $q_t(q_c)$ 은 수압보정에 따른 콘선단저항, $N_k(N_{kt})$ 는 콘계수, s_u 는 비배수전단강도, σ_{v0} 는 연직응력 식 (1)로부터 얻어진 $q_t(q_c) - \sigma_{v0}$ 를 실콘선단저항이라고 한다.

Aas 등은 노르웨이와 북해(North Sea) 점토를 이용하여 소성지수(I_p)가 증가할수록 콘계수(N_{kt})도 증가하며, 12~21의 범위에서 분포하는 것으로 제시하였다. La Rochella et al.(1988)은 동캐나다 점토지반에서 실시된 현장베인시험(FVT) 및 피에조콘관입시험(CPTU) 결과를 비교한 후, 콘계수(N_{kt})와 소성지수(I_p) 사이의 상관관계는 존재하지 않으며, 11~18의 범위에서 분포하는 것으로 제시하였다. Tanaka and Tanaka(1996)은 일본 해성점토지반에서 수행된 연구결과를 토대로, 일축압축시험(UCT)과 현장베인시험(FVT)을 이용하여 콘계수를 산정한 결과, 각각 8~16과 9~14의 범위에서 분포하며, 콘계수와 소성지수 사이에 특별한 상관관계가 존재하지 않는 것으로 제시하였다.

한편, Jang et al.(2001)은 국내 해성점토지반 10개소에서 실시된 현장베인시험(FVT)과 삼축압축시험으로부터 얻어진 비배수전단강도와 46회 실시된 CPTU data를 토대로 콘계수(N_{kt})가 8.1~24.9의 범위에서 분포하는 것으로 제시하였다. 특히, 아산($N_{kt}=11.5$)을 제외하고 영종도($N_{kt}=16.3$), 평택($N_{kt}=24.9$), 서천($N_{kt}=16.3$) 등에서 콘계수 및 분산도가 큰 결과가 얻어졌는데, 이는 모래 및 실트 함유량이 우세한 서해안 저소성 지반에서 실시된 시험결과를 토대로 평가되었기 때문으로 판단되는데, 이러한 지반 특성을 고려한 분석방법 등에 대해서는 특별히 언급되어

있지 않다.

Park et al.(2007)은 부산점토 지반에서 수행된 현장베 인시험(FVT), 일축압축시험(UCT) 및 비압밀비배수삼축 시험(UU)결과를 이용하여 콘계수의 평균을 결정한 결과, 각각 $N_{kt(FVT)}=14.5$, $N_{kt(UCT)}=15.3$, $N_{kt(UU)}=20.1$ 로 평가된 것으로 제시하였다. 점성토의 특성은 토립자를 구성하는 점토광물과 퇴적환경에 크게 영향을 받으며, 콘계수는 점성토의 소성지수(I_p), 과압밀비(OCR), 흙 구조 등의 지반 특성 뿐만 아니라 콘 종류 및 비배수전단강도 평가시 이용 되는 불교란시료의 품질에 따라 달라지며, 특히, 저소성 점성토 지반조건에서 이러한 경향이 현저하게 나타나게 된다.

3. 시험방법 및 결과분석

3.1 물리시험결과 및 피에조콘관입시험(CPTU)에 의한 지반특성 분석

본 연구는 서해안 지역의 대표적인 토질특성을 나타낼 수 있는 인천, 화성 및 군산 지역에서 실시된 지반조사 결과를 이용하여 수행되었다. 흙의 물리적 특성 및 토질분류를 위해 실시된 액성한계, 소성한계와 입도분석시험은 각각 ASTM 4318(2000), ASTM D422(1990)과 ASTM D2487 (2000)에 따라 수행하였으며, 액성한계 시험은 Casagrande 방법을 적용하여 수행하였다.

인천 및 군산의 조위차는 7~9m 전후로 부산 및 광양의 조위차 2~4m 전후와 비교할 때 수위 변화가 매우 크게

발생되며, 하천에 의해 운반되어온 토사의 성분이 계절 또는 해가 바뀔에 따라 매우 크게 달라져 모래 및 실트 함유량이 많은 층이 서로 교호하여 퇴적되는 불균질한 지층 분포를 나타낸다.

인천지역의 연약층 층후는 20m 내외로 분포하며, Fig. 2에 나타낸 바와 같이, 함수비, 액성한계, 소성지수의 평균값은 각각 37%, 39%, 17%이며, 심도에 따라 모래 및 실트 함유량이 매우 크게 달라지는 것을 알 수 있다. 입도에 따른 흙분류시 점토와 실트는 0.002mm 입경을 기준으로 구분하였으며, 일부 심도에서 50% 내외의 비교적 많은 모래 함유량을 나타내는 층이 확인되는데, 지층변화가 심하게 나타나는 특성은 CPTU 데이터를 통해서 좀 더 상세하게 파악할 수 있다. 전체적으로 심도에 따른 모래, 실트, 점토의 평균 함유율은 각각 23%, 60%, 17%로 실트질 성분이 우세한 특성을 보이는 것을 알 수 있다.

한편, 화성 지역의 연약층 두께는 8~14m 사이에서 분포하며, Fig. 3에 나타낸 바와 같이, 함수비, 액성한계, 소성지수의 평균값은 각각 35%, 37%, 15%이며, 심도에 따라 모래 및 실트함유량이 매우 크게 변하는 서해안 지역의 전형적인 지층 특성을 나타내고 있다. 전체적으로 심도에 따른 모래, 실트, 점토의 평균 함유율은 각각 14%, 69%, 17%로 인천지역과 유사하게 실트질 성분이 우세한 특성을 보이는 것을 알 수 있다.

군산 지역의 연약층 두께는 10~20m 사이에서 분포하며, Fig. 4에 나타낸 바와 같이, 함수비, 액성한계, 소성지수의 평균값은 각각 38%, 39%, 19%이며, 심도에 따른 모래, 실트, 점토의 평균 함유율은 각각 13%, 68%, 19%로

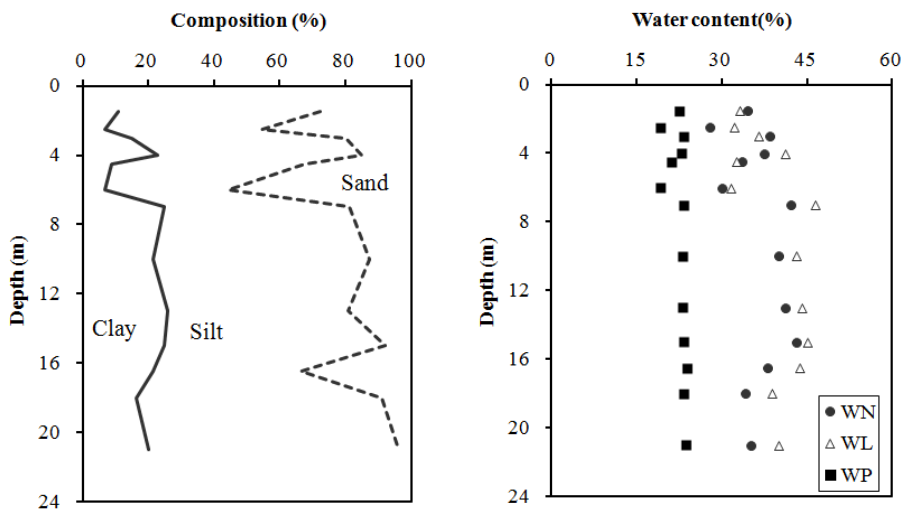


Fig. 2. Soil composition and index properties of Incheon silty soil

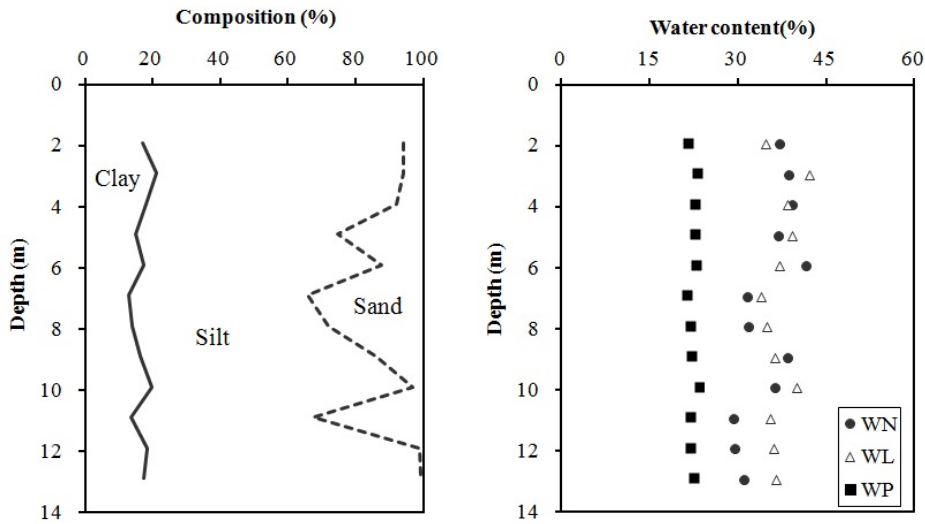


Fig. 3. Soil composition and index properties of Hwaseong silty soil

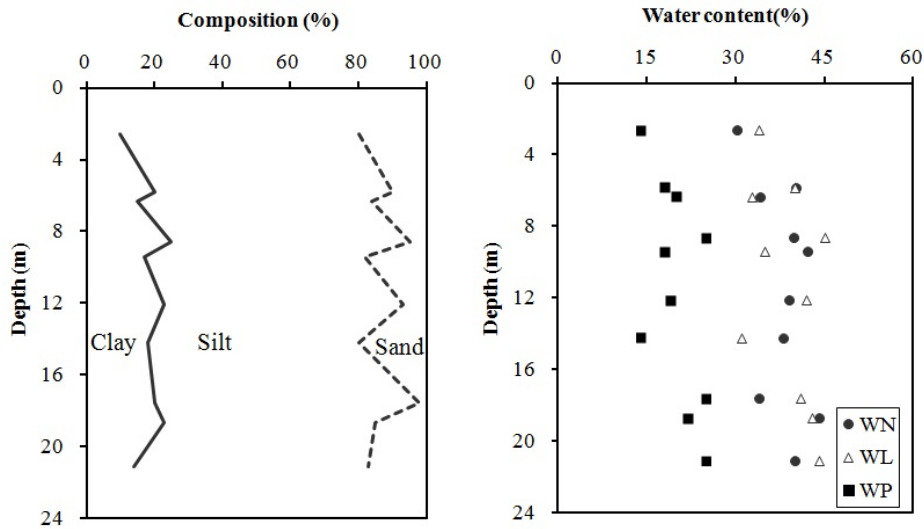


Fig. 4. Soil composition and index properties of Gunsan silty soil

인천 및 화성지역과 유사하게 실트질 성분이 우세한 특성을 보이는 것을 알 수 있다. 따라서, 남해안의 부산 및 광양 지역의 고소성 점토 지반과 다르게 서해안 지역의 토질은 실트 성분이 우세한 저소성 지반 특성을 나타내므로, 소성지수(I_p) 약 30% 이상의 전형적인 점토 지반과 동일한 관점에서 비배수전단강도의 평가가 가능할지에 대해 분석이 요구된다.

CPTU 시험은 ASTM D 5778(2003) 규정에 따라 시험 결과에 영향을 주는 관입속도, 콘의 모양 및 크기, 지반의 응력이력, 압축성, 입자크기 등의 요소를 최소화하기 위해 원추모양의 Cone Probe의 관입속도를 일정한 속도 (2cm/s)로 유지하고, 선단각을 60°, 선단면적 10cm², 주변면적 150cm²의 ASTM에서 통용되고 있는 표준콘을 적용하였

다. 이 때, 간극수압 측정을 위한 필터는 콘선단부 바로 뒤쪽에 위치하였다.

흙의 입도분포 및 액소성 한계 시험결과에서 알 수 있는 바와 같이, 심도에 따라 다량의 모래가 함유된 층이 확인되며, 지층에 따른 토질 특성 변화가 심한 것을 알 수 있다. 그러나, 실내에서 수행된 물리적 특성 시험결과는 시료의 평균 1m 두께에 대한 대푯값으로 표현되므로 1m 두께 내에서의 지층특성 변화가 적절하게 표현되지 못하는 결과를 초래하게 된다.

인천, 화성 및 군산 지역의 CPTU 시험결과를 나타낸 Fig. 5~7에서 알 수 있는 바와 같이, 콘선단저항력(q_t), 과잉간극수압(u_a) 및 주변마찰력(f_s)가 심도에 따라 크게 변하는 경향을 확인할 수 있다. Fig. 5의 인천 CPTU 데이터

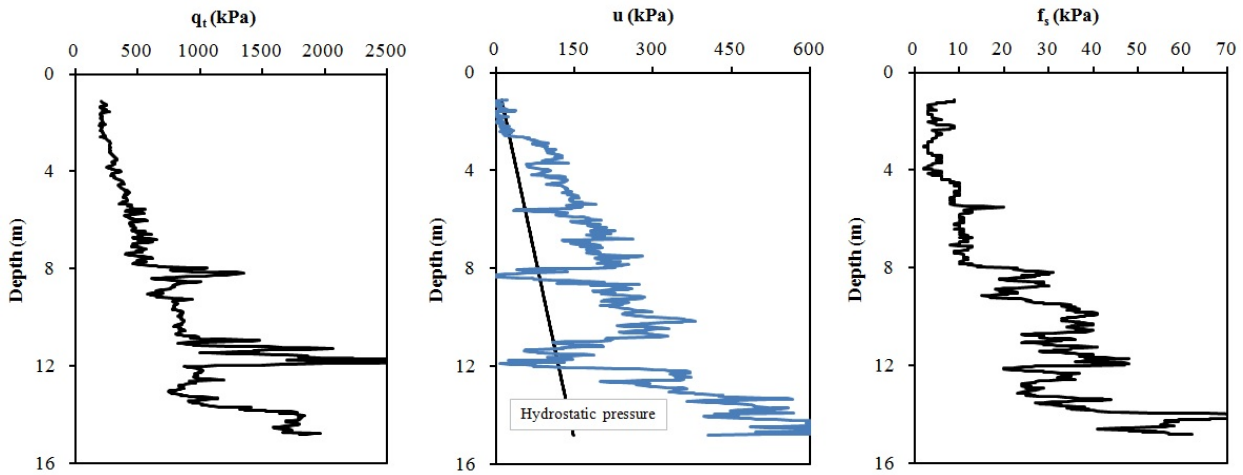


Fig. 5. Test results obtained from CPTU at Incheon site

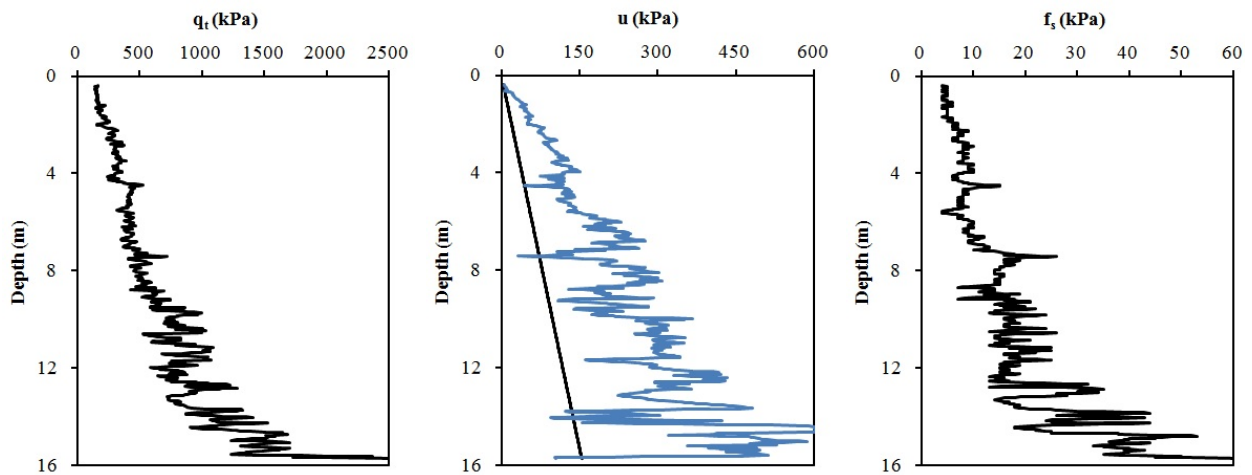


Fig. 6. Test results obtained from CPTU at Hwaseong site

에서는 6m, 8m 및 12m 심도 부근에서 콘선단저항(q_t) 및 주면마찰력(f_s)이 일정한 경향에서 벗어나 급격하게 커지는 것을 확인할 수 있으며, 과잉간극수압(u_a)이 정수압(u_0) 이하로 떨어져, 지층 내에 sandseam이 존재하는 것을 알 수 있다. Fig. 2의 물리적 시험결과에서는 2m, 6m 및 16m 전후의 심도에서 모래함유량이 많은 층이 확인되어, CPTU 데이터와 정확히 일치하지 않는 경향을 나타냈다.

또한, Fig. 6의 화성 CPTU 데이터에서는 5m, 7m 및 14m 심도 부근에서 모래함유량이 많은 층을 확인할 수 있는 반면에, Fig. 3의 물리적 시험결과에서는 5m, 7m 및 11m 전후의 심도에서 모래함유량이 많은 층이 분포하여 인천시험결과와 유사하게 CPTU 데이터가 채취된 시료의 시험결과와 정확히 일치하지 않는 경향을 나타냈다.

마지막으로, Fig. 7의 군산 CPTU 데이터에서는 지표면 상부층 1m 전후에서의 콘선단저항력(q_t) 및 주면마찰력

(f_s)이 전체 심도의 데이터 중에서 가장 큰 값과 정수압(u_0) 이하의 과잉간극수압(u_a)을 나타내어 지표면 상부에 모래층이 분포하는 것을 알 수 있으며, 3m, 5m, 12m 및 14m 심도 부근에서 콘선단저항(q_t) 및 주면마찰력(f_s)이 급변하며 과잉간극수압(u_a)이 정수압(u_0) 이하로 낮아지거나 근접하는 경향을 나타내어 지층 내에 sandseam이 존재하는 것을 알 수 있다. 그러나, Fig. 4의 물리적 시험결과에서는 지층 내의 모래함유량이 급격히 증가되는 경향이 확인되지 않는 것을 알 수 있다.

이러한 원인은 CPTU 데이터는 심도방향으로 연속적인 데이터를 얻을 수 있는 반면에서 입도분포 결과에서는 1m 두께에 대한 대푯값으로 표현되며, 거의 동일한 위치에서 실시된 시험결과라 할지라도 수평 및 수직방향으로 지층 변화가 심한 서해안 지역의 전형적인 특성으로 인해 이러한 결과가 얻어졌으며, 설계시 예상된 압밀속도보다 실제

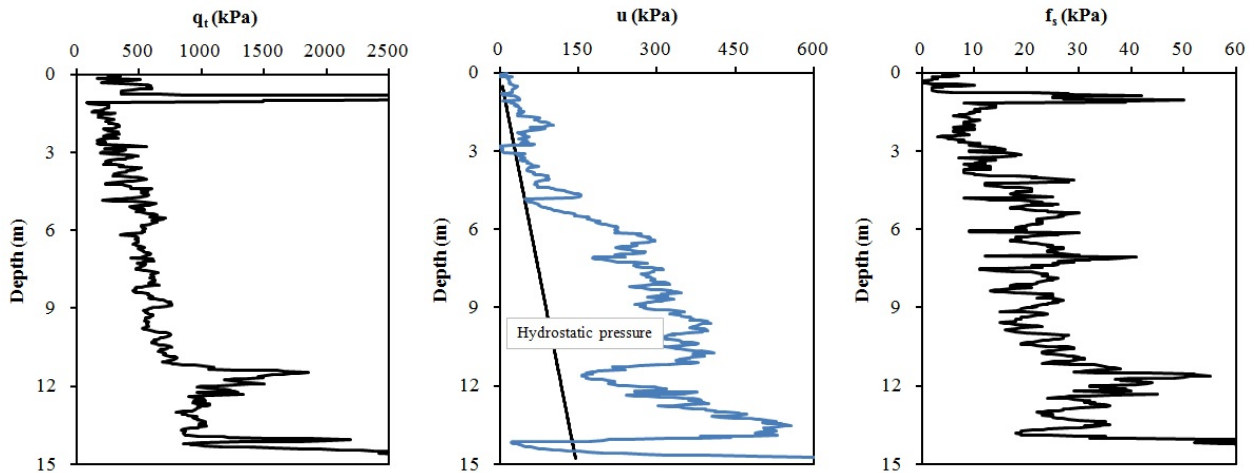


Fig. 7. Test results obtained from CPTU at Gunsan site

시공시 훨씬 더 빠른 경향을 나타내는 원인을 미루어 짐작할 수 있다.

따라서, 서해안 저소성 지반 조건에 대해 항만 구조물 설계 및 시공을 실시할 때, 대상 지반에 대한 3차원적인 지층 분석이 이루어질 수 있도록 일정한 간격으로 피에조 콘관입시험을 실시하게 되면, 서해안 지역의 지층 특성을 훨씬 더 명확하게 파악할 수 있게 된다. 이와 같이 모래 및 실트 함유량이 많은 저소성 지반으로부터 채취된 불교란 시료를 이용하여 일축압축시험을 실시하게 되면, 원지반에서 발휘되는 전단강도를 상당히 과소평가하는 현상이 초래된다.

3.2 콘계수의 비교

유효상재압을 받고 있는 원지반으로부터 thin-walled tube sampler 삽입에 의한 천공, 튜브 sampling, 실내시험 조건에서 튜브로부터의 채취된 시료가 성형 과정에서 자연적으로 대기압에 노출되면, 시료에 작용하던 유효상재압이 완전히 제거된 상태에 놓이더라도 원위치에서 받고 있던 유효상재압의 일부가 부의 간극수압 형태로 존재하게 되며, 일축압축시험시 이러한 압력이 구속압으로 작용하게 되는데, 이를 잔류유효응력(σ_r')이라고 칭한다. 이 때, 해성 점토 지반의 역학시험시, 통상적으로 원위치 유효상재압(σ_0')의 1/5~1/6의 범위에 해당되는 값이 잔류유효응력으로 작용하게 된다.

이에 대해, 일본 Miyagi현 Ishinomaki항 지역에 분포하는 중간토와 노르웨이의 Drammen 지역의 lean clay를 대상으로 수행된 각종 실내시험과 현장시험을 통해, 일축압

축시험에 의한 강도평가는 대상지반의 전단강도를 상당히 과소평가하게 되는 결과가 얻어지는 것으로 보고되고 있다(Tanaka et al, 2001).

서해안 저소성 지반과 같이 모래 및 실트 함유량이 많은 지반 조건에서는 부산 및 광양과 같은 고소성 점토 지반에 비해 상대적으로 투수계수가 크므로 대기압 조건하에서 시료 내부에 부의 간극수압이 유지되지 못하여 잔류유효응력이 현저하게 작아지는 현상이 발생하게 된다. 따라서, Kim et al.(2016)은 서해안 저소성 실트 지반으로부터 채취된 시료에 대해 고소성 점토 지반조건과 동일하게 시료 내부에 유효상재압의 1/5~1/6에 해당하는 잔류유효응력이 보유한 상태에서 전단강도가 평가되도록 원위치 유효상재압으로 재압밀시킨 후 전단시험을 실시하는 간이 CU 시험을 적용하였다(Kim et al, 2016).

앞에서 언급한 이 시험법은 일본 내에 분포하는 여러 지역의 해성점토 지반에서 채취된 시료를 이용하여 다양한 검증시험을 수행한 결과, 원위치 유효구속압의 평균 $(\cdot(1+2K_0))/3$, 정지토압계수인 K_0 를 0.5로 가정하면, 2/3 입)으로 흙의 소성지수에 관계없이 동일하게 2시간 동안 등방압밀시킨 후, 0.1%/min의 전단속도로 비배수 조건에서 압축시험으로 구한 전단강도를 설계 비배수전단강도로 적용하는 방법이다. 이를 간이 CU 시험으로 칭하며, 여기서 구한 최대 축차응력의 절반을 간이 CU강도, $s_u(SCU)$ 로 표현한다.

이와 같은 방법을 적용하게 되면, 시료 채취시 발생된 유효구속압 감소에 대한 영향이 배제되지만, 강도이방성 및 전단 변형률 속도에 대한 영향을 추가로 고려하기 위해 간이 CU강도, $s_u(SCU)$ 에 0.75를 곱한 값을 설계 비배수강도

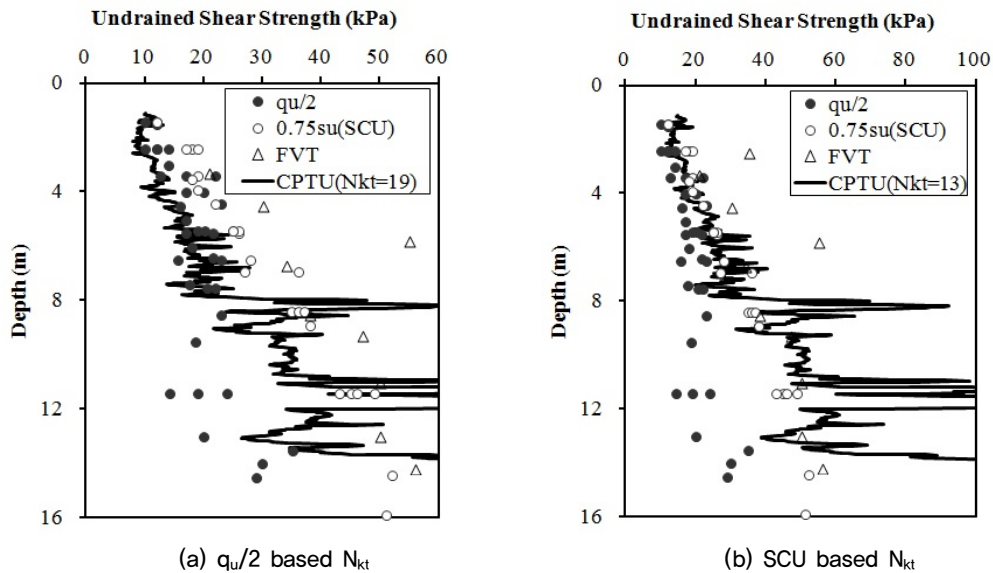


Fig. 8. Comparison of strengths measured laboratory and in-situ tests for Incheon silty soil

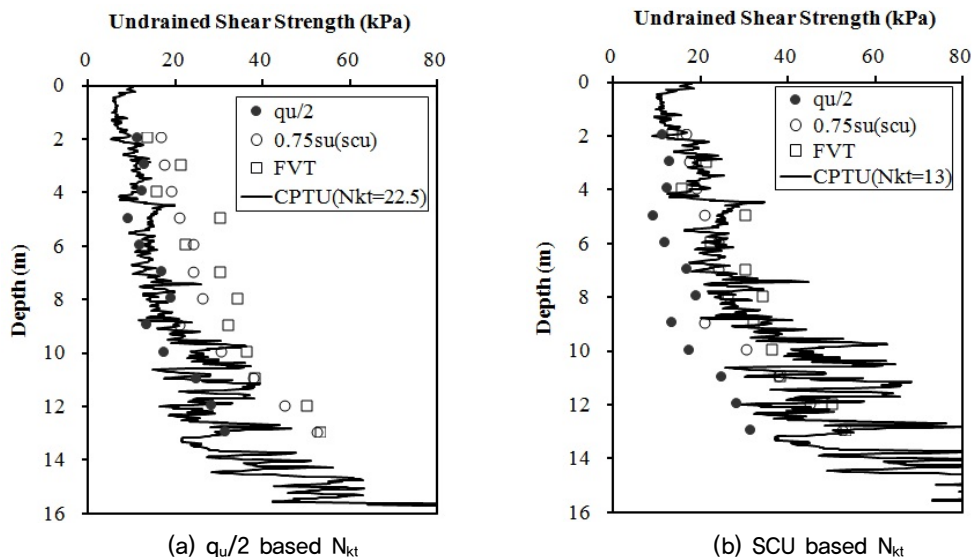


Fig. 9. Comparison of strengths measured laboratory and in-situ tests for Hwaseong silty soil

로 적용하게 된다(Tsuchida and Mizukami, 1991).

일축압축시험은 ASTM D2166(2003)에 따라 수행되었으며, 공시체의 높이와 직경은 각각 100mm, 50mm이며, 전단시험시 변형률 속도는 1%/min이 적용되었다. 또한, 현장베인시험(FVT)은 로드와 지반과의 마찰이 거의 발생하지 않는 이중관식 베인(vane)으로 표준규격은 직경(D) 40mm, 높이 80mm, 두께 1mm 이며, ASTM D 2578(2003) 규정에 따라 약 0.1%/sec(6°/min)의 회전속도로 시험을 실시하였다.

인천, 화성 및 군산 지역에서 실시된 일축압축시험, 간이 CU시험 및 현장베인시험으로 얻어진 비배수전단강도를 Fig. 8~10에 나타냈다. 먼저 인천, 화성 및 군산의 일

축압축시험에 의한 침도에 따른 전단강도 증가비는 각각 1.3kPa/m, 1.7kPa/m 및 1.4kPa/m이며, 이에 대응되는 강도증가율은 0.18 전후로 평가되었다. 간이 CU 시험에 의한 값은 각각 2.8kPa/m, 2.9kPa/m 및 2.7kPa/m가 얻어져 $q_u/2$ 강도에 비해 간이 CU강도($s_{u(scu)}$)가 약 2.0배 전후로 큰 값이 얻어졌으며, 이에 대응되는 강도증가율도 0.31 전후로 평가되었다. 따라서, 일축압축시험에 비해 간이 CU 시험이 국내 해성 점성토의 전형적인 강도증가율 값의 범위인 0.25~0.35 사이에 분포되어, 일본 해성점토 지반조건과 동일한 조건하에서 간이 CU 시험을 적용하여 구한 값을 설계 비배수전단강도로 적용 가능한 것으로 판단된다.

또한, sandseam 분포가 예상되는 침도에서 현장베인강

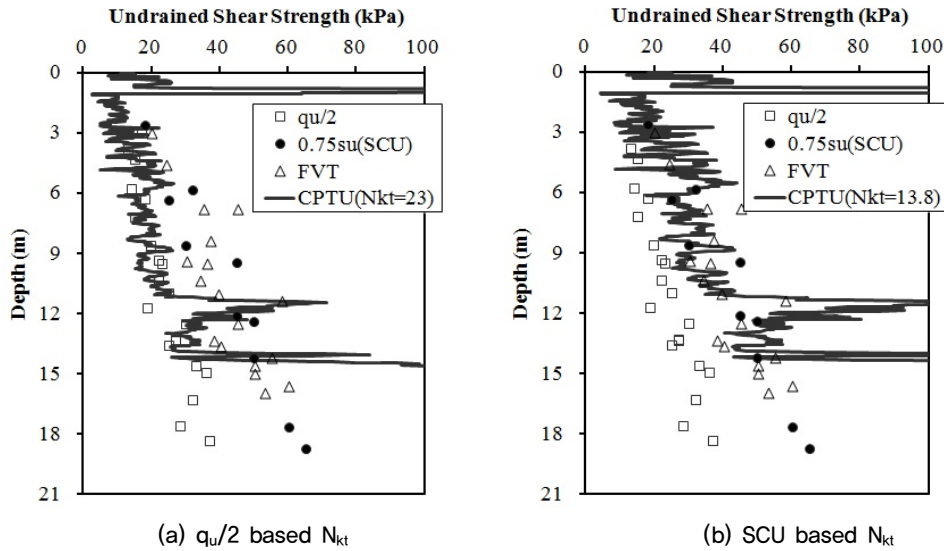


Fig. 10. Comparison of $s_{u(qu/2)}$, $s_{u(scu)}$ and $s_{u(FVT)}$ strengths for Gunsan silty soil

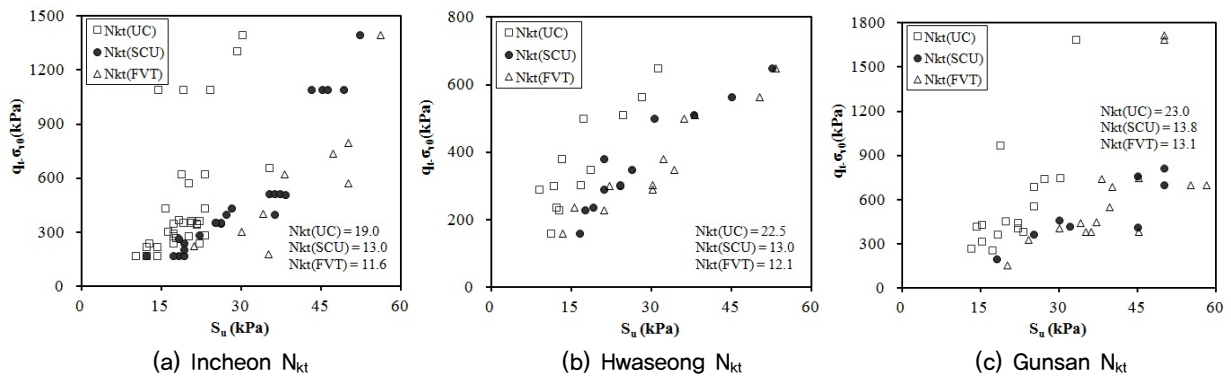


Fig. 11. N_{kt} using $s_{u(qu/2)}$, $s_{u(scu)}$ and $s_{u(FVT)}$ strengths for different three sites

도($s_{u(FVT)}$)가 간이 CU 강도에 비해 큰 값이 얻어진 것을 제외하고는 전반적으로는 유사한 경향을 나타내어 두 시험법 모두 응력 해방에 의한 영향이 배제된 상태의 전단강도라는 관점에서 볼 때 이를 통해서도 간이 CU 강도의 유효성을 간접적으로 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

각각의 시험방법으로 구한 비배수전단강도와 CPTU 데이터의 ($q_t - \sigma_{v0}$)와의 상관관계를 통해서 콘계수(N_{kt})를 평가한 결과를 Fig. 11에 나타냈다. 세 지역에서 구한 일축압축강도에 의한 콘계수(N_{kt})는 19~23, 간이 CU 강도에 의한 값은 13~13.8, 현장배인강도에 의한 값은 11.6~13.1로 평가되었다. 또한, 시료의 교란 효과가 배제된 CPTU 데이터를 이용한다 할지라도 전단강도 평가 방법에 따라 결과값이 달라지는 것을 알 수 있다(Fig. 8~10).

각각의 전단강도 평가방법에 의한 심도에 따른 콘계수(N_{kt}) 분포를 Fig. 12에 나타내었는데, 저소성 실트 지반조건에서 일축압축강도가 과소평가되는 원인으로 인해 간이

CU 강도 적용조건과 비교했을 때 콘계수(N_{kt})가 약 1.8배 전후로 커지며 분산되는 경향을 확인할 수 있다.

현재까지 국내의 연약지반 설계 실무에서 CPTU 데이터를 이용하여 비배수전단강도(s_u)를 평가할 때, 지반조건에 따른 적용 시험방법에 의한 결과값의 차이가 현저하게 발생할 수 있다는 부분에 대한 인식 및 이에 대한 분석이 미미한 실정이다.

한편, Tanaka et al.(1992), Tanaka and Tanaka(1996)은 일본 해성점토 지반(7개소 현장, $I_p=20\sim150$)에서 수행된 일축압축시험과 현장배인시험결과를 이용하여 콘계수(N_{kt})를 구하였으나, 소성지수(I_p)와의 연관성이 확인되지 않는 것으로 제시하였다. 그러나, 실제 저소성 지반조건은 1개 현장에 불과하며 해당 지반 조건도 국내 서해안 지반보다 점토함유율이 높아서 일축압축강도 저평가 현상으로 인해 콘계수(N_{kt})의 증가될 수 있는 부분에 대한 특별한 언급이 이루어지지 않았다.

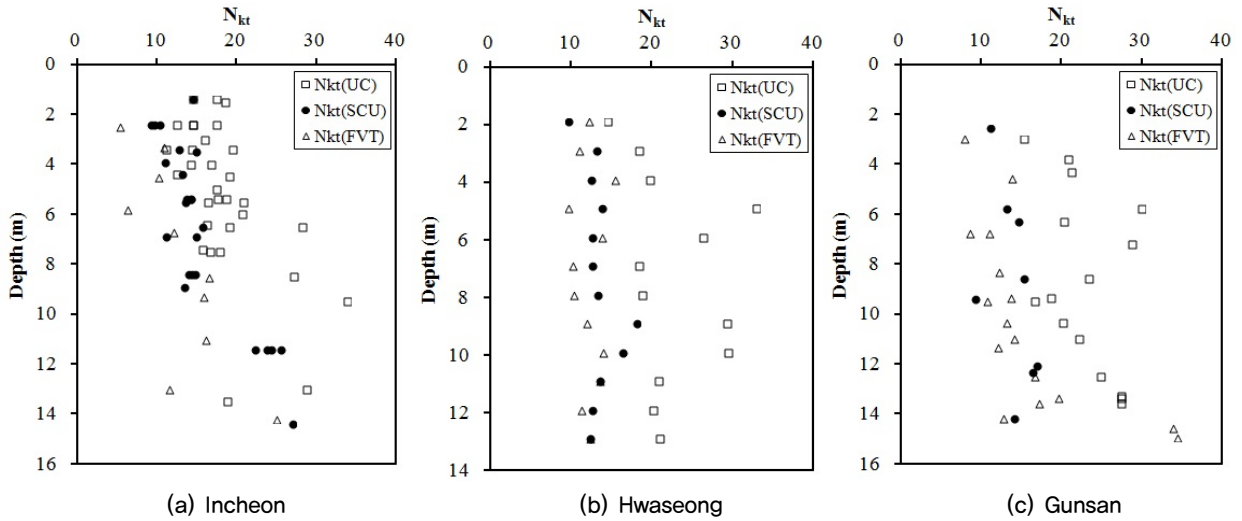


Fig. 12. N_{kt} - depths for different three sites

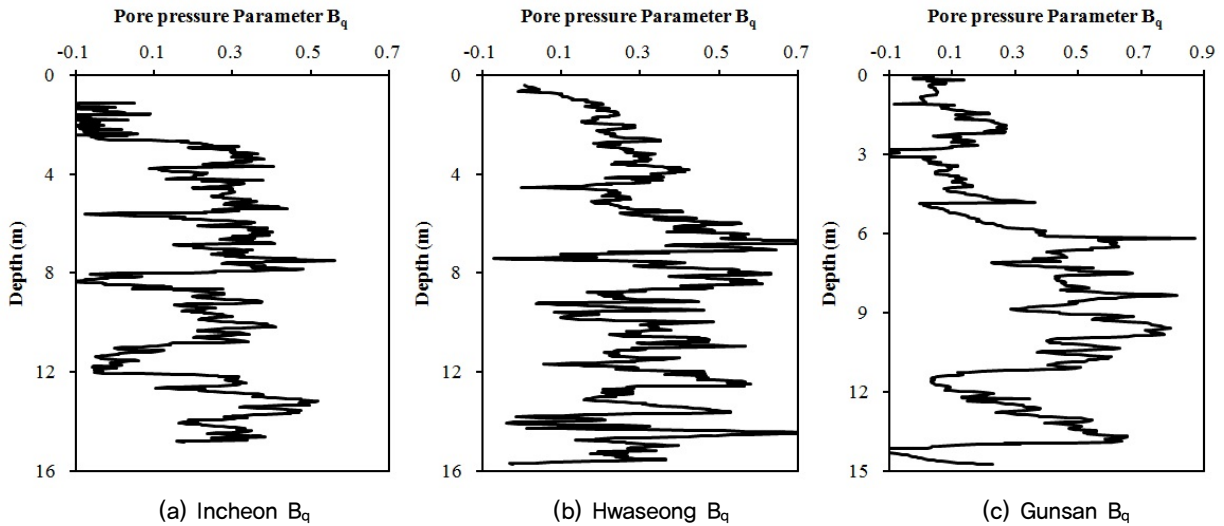


Fig. 13. B_q - depths for different three sites

또한, Tanaka et al.(1992)은 일본 해성점토의 간극수압 계수(B_q)는 0.6~0.8 사이에서 분포하며, Schnaid et al. (2004)는 $B_q > 0.5$ 이면 점토지반으로 완전비배수 상태, 간극수압계수(B_q)가 0.5~0.3이면 실트지반으로 주로 비배수 상태에 가까우며, 0.3 이하이면 부분배수 상태에 놓이기 쉬운 것으로 제시하였다.

Fig. 13의 심도에 따른 간극수압계수(B_q) 분포에서 알 수 있는 바와 같이, CPTU 표준관입속도(2cm/s)하에서, 실트지반으로 분류될 수 있으며 완전비배수와 부분배수의 경계 또는 부분배수 상태에 놓인 것을 알 수 있다. 따라서, CPTU 데이터를 이용하여 콘계수(N_{kt})를 평가할 때에는 지반의 입도분포, 액소성한계 등의 물리적 특성, 지층 내의 sandseam 분포 등으로 인한 콘선단저항(q_t) 및 주면마

찰력(f_s)의 불규칙한 분포, 간극수압계수(B_q)를 종합적으로 분석하여 수행하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 서해안 저소성 지반 특성을 대표할 수 있는 인천, 화성 및 군산 지역에서 수행된 피에조콘관입시험(CPTU) 결과를 이용하여 일축압축강도의 저평가 경향을 반영한 콘계수 결정 방법에 대해 분석하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 인천, 화성 및 군산지역에서 얻어진 일축압축강도에

의한 콘계수(N_{kt})는 19~23, 간이 CU 강도에 의한 값은 13~13.8, 현장배인강도에 의한 값은 11.6~13.1로 평가되었다. 이는 저소성 실트 지반조건에서 일축압축강도가 과소평가되는 원인에 의한 것으로 간이 CU 강도 적용조건과 비교했을 때 콘계수(N_{kt})가 약 1.8배 전후로 커지며 분산되는 경향을 나타냈다.

- (2) 저소성 실트 지반에서 수행된 CPTU 데이터를 이용하여 콘계수(N_{kt})를 평가할 때에는 지반의 입도분포, 액소성한계 등의 물리적 특성, 지층 내의 sandseam 분포 등으로 인한 콘선단저항(q_t) 및 주면마찰력(f_s)의 불규칙한 분포, 간극수압계수(B_q)를 종합적으로 분석하여 수행하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

References

- Aas, G., Lacasse, S., Lunne, T. and Hoeg, K. (1986), "Use of in-situ tests for foundation design on clay", Proc. ASCE specialty conference in-situ 86, Use of in-situ tests in geotechnical engineering, Blacksburg, VA, USA, pp.1-30.
- ASTM D422 (1990), "Standard test method for particle-size analysis of soils", ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D2487 (2000), "Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)", ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D4318 (2000), "Standard test methods for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils", ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D2166 (2003), "Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil", ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D2578 (2003), "Standard test method for field vane shear test in cohesive soil", ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D5778 (2003), "Standard test method for electronic friction cone piezocone penetration testing of soils", ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Eurocode 7.2 (2007), Geotechnical design-ground investigation and testing, BS EN 1997-2, European Committee for standardization.
- Hight, D. W., Boese, R., Butcher, A. P., Clayton, C. R. I. and Smith, P. R. (1992), "Disturbance of the Bothkennar clay prior to laboratory testing", Geotechnique, Vol.42, No.2, pp. 199-217.
- Jang, I. S., Lee, S. J., Chung, C. K. and Kim, M. M. (2001), "Piezocone factors of Korean clayey soils", 17(6), pp. 15-24.
- Kim, S. J., Lee, S. D. and Kim, J. H. (2016), "Evaluation of undrained shear strength for clayey silt with low plasticity from the West coast", Journal of Korean Geotechnical Society, Vol.32, No.8, pp.15-25.
- Kim, S. J., Lee, S. D. and Kim, J. H. (2016), "Partial drainage characteristics of clayey silt with low plasticity from the West coast", Journal of Korean Geotechnical Society, Vol.32, No. 9, pp.17-27.
- La Rochelle, P., Zebdi, M., Leroueil, S., Tavenas, F. and Virely, D. (1988), "Piezocone tests in sensitive clays of Eastern Canada", Proc. first international symposium on penetration testing, Vol.2, pp.831-841.
- Lunne, T., Christoffersen, H. P. and Tjelta, T. I. (1985), "Engineering use of piezocone data in North Sea Clays", Proc. of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Sanfrancisco, Vol.2, pp.907-912.
- Matsuo, M. (1984), "Geotechnical engineering, theory and practice of reliability-based design", Gihodo Syuppan, pp. 28-31.
- Park, Y. W., Gu, N. S. and Lee, S. I. (2003), "Estimation of undrained shear strength using piezocone test", Journal of Korean Geotechnical Society, Vol.19, No.6, pp. 169-179.
- Park, Y. H., Kim, M. K., Kim, C. D. and Lee, J. H. (2007), "Analysis and Evaluation of CPT cone factor for undrained shear strength estimation of Pusan clay", Journal of Korean Geotechnical Society, Vol.23, No.8, pp.77-85.
- Schnaid, F., Lehane, B. M. and Fahey, M. (2004). "Characterisation of unusual geomaterials", Proc. ISC-2 Geotech. Geophys. Site. Charact, Porto, Portugal, pp.49-73.
- Tanaka, H., Sakakibara, M., Goto, K., Suzuki, K. and Fukazawa, T. (1992), "Properties of Japan normally Consolidated marine clays obtained from static piezocone penetration test", Report of the port and harbour research institute, Vol.31, No.4, pp. 61-92.
- Tanaka, H. and Tanaka, M. (1996), "A site investigation method using cone penetration and dilatometer tests", Technical note of the port and harbour research institute ministry of transport, Japan, No.837, pp.4-52.
- Tanaka, H., Tanaka, M. and Shiwakoti, D. R. (2001), "Characteristics of soils with low plasticity: intermediate soil from Ishinomaki, Japan and lean clay from Drammen, Norway", Soils and Foundations, Vol.41, No.1, pp.83-96.
- Tsuchida, T. and Mizukami, J. (1991), "Advanced method for determining strength of clay", Proc. Int. Conf. Geotech. Eng., Coastal Dev. Yokohama, Japan, Vol.1, pp.105-110.