

## 서해안 저소성 점토질 실트 지반의 부분배수 특성

### Partial Drainage Characteristics of Clayey Silt with Low Plasticity from the West Coast

김 석 조<sup>1</sup> Kim, Seok-Jo  
이 상 덕<sup>2</sup> Lee, Sang-Duk  
김 주 현<sup>3</sup> Kim, Ju-Hyun

#### Abstract

Parial drainage characteristics of clayey silt with low plasticity from the west coast (Incheon and Hwaseong) was analyzed using CPTU based existing correlation equations and compulsory replacement method. Generally, the estimated OCRs =  $\kappa \cdot ((q_t - \sigma_{vo}) / \sigma'_{vo})$  using Powell and Quartman(1988) were higher than those obtained by the oedometer tests. These trends were noticeable for the layers containing a lot of silty and sand soils. The assessment of partial drainage conditions was performed through Schnaid et al. (2004)'s equation; it is based on plotting the normalized cone resistance,  $Q_t$  versus the pore pressure parameter,  $B_q$  in combination with the strength incremental ratio,  $s_u / \sigma'_{vo}$  to the CPTU data. It is evident that more than half of the data fall in the range where  $B_q < 0.3$ , corresponding to the domain in which the partial drainage prevails when testing normally consolidated soils at a standard rate of penetration (2 cm/s). To estimate the replacement depth of clayey silt with low plasticity, back analysis was carried out to evaluate the internal friction angle based on where the design depths are equal to the checked depths using bearing capacity equation. The internal friction angels obtained from the back analysis tended to increase as the plasticity index decreases, which is ranged approximately from  $\phi'=2^\circ$  to  $\phi'=7^\circ$ .

#### 요 지

서해안의 인천 및 화성지역에 분포하는 모래 및 실트 함유량이 많은 저소성 지반에 대해 피에조콘관입시험(CPTU) 데이터 및 강제치환 공법을 이용하여 부분배수 특성을 분석하였다. Powell과 Quarterman(1988)에 의한 과압밀비  $OCR=\kappa((q_t - \sigma_{vo}) / \sigma'_{vo})$  경험식은 모래함유량이 많은 서해안 저소성 실트 지반에서는 상대적으로 투수성이 커서 표준관 입속도(2cm/s)하에서 콘관입저항력( $q_t$ )이 크게 평가되어 과압밀비가 크게 산정되는 경향을 나타냈다. Schnaid et al. (2004)는 간극수압계수( $B_q$ )-강도증가율( $s_u / \sigma'_{vo}$ )-정규화된 콘저항( $Q_t = (q_t - \sigma_{vo}) / \sigma'_{vo}$ )을 함께 도시하여, 부분배수 유무를 판단하도록 제시하였는데, 인천 및 화성 지역의 CPTU 데이터의 50% 이상이 부분배수 상태를 나타내는  $B_q < 0.3$ 에 분포하였다. 또한, 강제치환 시공과정 중 부분배수 현상으로 인해 원지반의 강도증가 현상이 발생되어 설계 예상

1 정희원, 아주대학교 건설시스템공학과 박사과정 (Member, Ph. D. Student, Dept. of Civil and Transportation Eng., Ajou Univ.)

2 정희원, 아주대학교 건설시스템공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Transportation Eng., Ajou Univ.)

3 정희원, 동신대학교 토목공학과 겸임교수 (Member, Affiliated Prof., Dept. of Civil Eng., Dongshin Univ., Tel: +82-61-330-3138, Fax: +82-61-330-3138, soil1004@hotmail.com, Corresponding author, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2017년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

치환깊이보다 훨씬 작은 실측값이 얻어진다는 관점에서 실측 치환깊이와 동일한 값이 얻어지도록 원지반의 지지력에 대한 역해석을 수행하였다. 그 결과, 소성지수가 감소할수록 내부마찰각이 커지는 경향을 나타내며, 내부마찰각( $\phi$ )이 2~7°의 범위에서 분포하는 것으로 분석되었다.

**Keywords :** Clayey silt with low plasticity, Partial drainage characteristics, Pore pressure parameter

## 1. 서론

일반적으로 해상에서 사석경사제와 같은 호안구조물 축조시, 별도의 기초처리 없이 원지반 점성토의 지지력이 확보되는 깊이까지 성토재로 치환시키는 강제치환 공법이 폭넓게 적용되어 왔는데, 이러한 이유는 모래다짐말뚝, 심층혼합처리공법 등에 비해 비교적 시공속도가 빠르며 경제적인 시공을 도모할 수 있기 때문이다 (Fig. 1). 이 때, 치환된 성토재의 체적만큼 원지반 점성토가 옆으로 밀려나게 되고, 그 위에 다시 성토재인 사석을 투하하게 되면, 치환된 부분만큼 원지반이 옆으로 밀려나는 반복적인 형태로 시공이 이루어지게 된다. 강제치환 설계시 가장 중요한 부분은 치환깊이를 합리적으로 결정하는 것이며, Fig. 2에 나타낸 바와 같이, 성토하중과 원지반의 지지력이 동일한 값이 얻어지는 심도까지 성토재로 치환되는 것으로 검토하게 된다. 원지반이 점성토 지반으로 구성된 경우에는 내부마찰각은 0이 되며, 식 (1)에서 비배수전단강도( $s_u$ )가 발휘되는 지지력의 주된 인자가 된다.

$$q_{ult} = \alpha cN_c + \beta B\gamma_1 N_r + \gamma_2 D_f N_q, \text{ If } \phi = 0, q_{ult} = cN_c \quad (1)$$

현재까지 국내의 항만구조물 설계시, 점토지반의 비배수전단강도( $s_u$ ) 평가는 대부분 원지반에서 채취된 불교

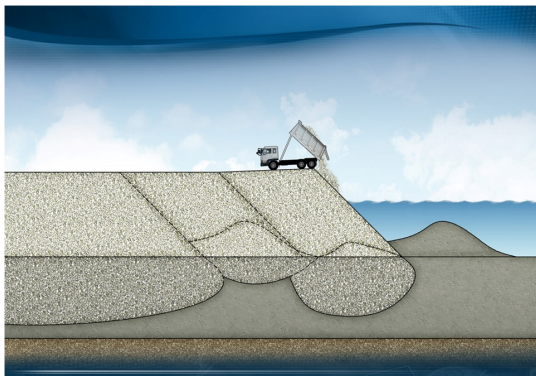
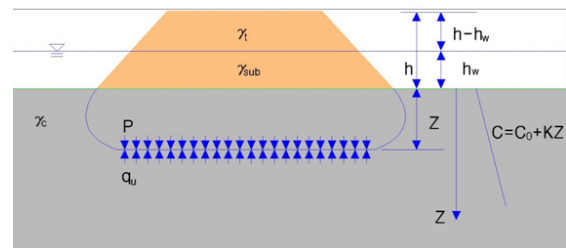


Fig. 1. Construction sequence for compulsory replacement method

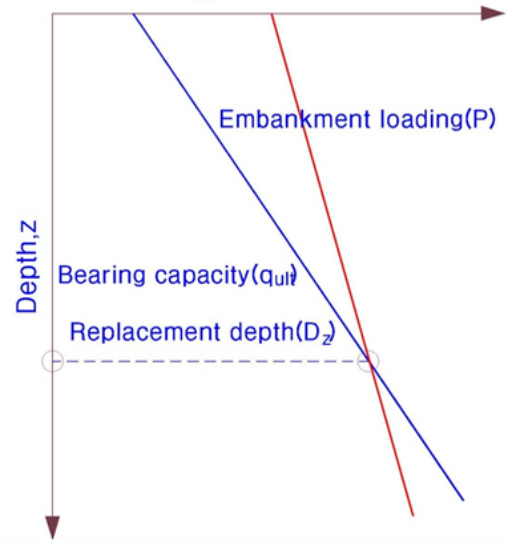
란 시료를 이용한 일축압축시험(일반적으로  $q_u$  방법이라 칭함)을 통해서 이루어져왔으며, 현장 원위치에서 수행되는 피에조콘관입시험(CPTU) 및 현장베인시험(FVT) 등은 보조적 수단으로 적용되어 왔다. 현재까지 일축압축강도의 절반인  $q_u/2$ 가 비배수전단강도( $s_u$ )로 적용되어 온 근거는 시료채취시 발생하는 교란효과로 인한 강도저평가 현상과 응력이방성 및 변형률 속도 효과로 인해 강도가 과대 평가되는 현상이 균형을 이루어 별도의 보정작업 없이도 실내시험에서 얻어진 값을 그대로 설계강도로 적용할 수 있다는 데 있다(Matsuo, 1984).

이러한 개념은 부산 및 광양 지역과 같이 고소성 점



(a) Conceptual diagram of compulsory replacement method

Bearing capacity( $q_{ult}$ ), Embankment loading(P)



(b) Determination of replacement depth

Fig. 2. Determination of replacement depth for compulsory replacement method

토 지반에서는 설계시 예상된 강제치환 깊이와 호환축조 완료후 원위치에서의 확인 보링을 통해서 실측된 치환 깊이가 유사한 경향을 나타내어 본 공법의 적용성이 어느 정도 검증된 반면에, 서해안의 저소성 실트 지반조건인 인천 및 군산 지역에서는 설계시 예상된 치환깊이의 절반에도 미치지 못하는 실측 치환 깊이가 얻어진 사례가 비일비재한 것으로 보고되고 있다(Kim et al., 2010). Kim et al.(2016)은 이러한 원인으로 모래 및 실트 함유량이 많은 지반조건에서의 시료 채취시 잔류유효응력의 현저한 감소로 인한 일축압축강도의 저평가 현상에 기인한 것으로 제시하였으며, 부산 및 광양 지역과 같이 고소성 점토 지반과 동일한 조건에서 비배수 전단강도를 평가할 수 있는 간이 CU 시험을 적용하도록 추천하였다.

앞에서 언급한 실측 치환깊이가 작게 평가되는 원인에 대해 서해안 저소성 실트 지반의 일축압축강도 저평가 현상 외에 부산 및 광양지역의 고소성 점토지반에 비해 서해안 저소성 실트 지반의 투수계수가 상대적으로 크므로, 호안 축조 등의 시공과정에서의 부분배수 즉, 과잉간극수압의 소산으로 인한 전단강도의 증가현상을 추정할 수 있다. 현재까지 사질토 지반은 배수조건, 점성토 지반은 비배수 조건을 각각 고려하여 전단강도를 평가하여 왔으나, 모래 및 실트 함유량이 많은 서해안 저소성 지반과 같이 비교적 투수성이 큰 지반 조건에 대해서도 둘 중 한쪽의 배수조건(배수 또는 비배수)을 적용하는 것에 대한 적절성을 분석한 사례는 미미한 수준이다.

따라서, 본 논문에서는 서해안의 인천 및 화성 지역의 저소성 실트 지반에 대한 물리·역학적 특성 및 CPTU

데이터를 이용한 부분배수 유무 및 강제치환 실측깊이와 동일한 깊이 얻어지도록 역해석을 실시하여 부분배수 조건하에서의 전단강도를 분석하였다.

## 2. 저소성 실트 지반의 부분배수 특성

항만시설의 기술상 기준·동해설(일본항만협회, 2007)에 따르면, 모래함유율이 80% 이상인 흙은 사질토 지반으로 분류하여 대부분 표준관입시험에서 얻어진 N값으로부터 내부마찰각( $\varphi_d$ )를 추정하는 방법이 이용되고 있다(대부분의 경우에  $c_d=0$ 로 함). 모래함유율이 50% 미만의 흙은 점성토 지반으로서 주로 일축압축시험(UC)을 통해 설계 비배수전단강도( $S_u(mob)$ )를 구하게 된다. 지반을 사질토 지반과 점성토 지반으로 구분하여 고려하는 배경에는, 상시조건에서 사질토 지반은 지반 내에 과잉간극수압이 거의 발생되지 않는 배수조건에서 강도가 발휘되는 반면에, 점성토 지반은 투수계수가 작은 원인으로 인해 시공 중의 배수 현상을 거의 기대하기 어려운 비배수 상태에 놓이기 때문이다. 한편, 사질토 지반과 점성토 지반으로 명확하기 구분되기 어려운 중간적 성질을 갖는 지반에 대해 모래함유율이 50~80%의 범위에서 분포할 경우에 중간토로 분류한 후, 투수계수( $k$ )가  $10^{-4}cm/s$  이상의 지반조건에 대해서는 사질토 지반에 해당되는 설계방법을 따르며, 투수계수( $k$ )가  $10^{-4}cm/s$  보다 작을 때에는 점성토 지반으로 고려하여 설계를 수행하도록 하고 있다. 이와 같은 분류가 이루어진 배경을 살펴보면, Kamei(1992)는 Fig. 3의 압밀계수( $c_v$ )와 모래

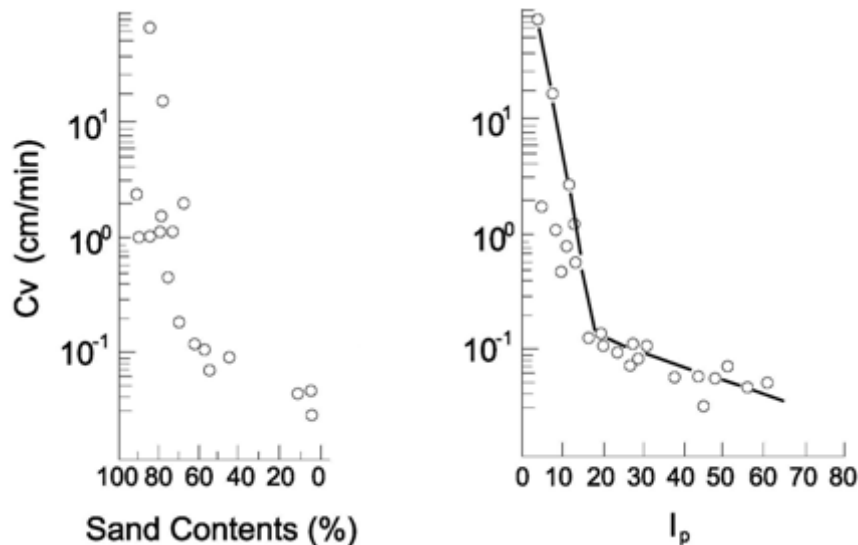


Fig. 3. The relations between sand contents, plasticity index and consolidation coefficient (Kamei, 1992)

함유율 및 소성지수(PI)의 관계를 통해서, 모래함유율 60%, 소성지수(PI) 20% 전후를 경계로 압밀계수( $c_v$ )가 크게 변하는 것을 제시하였다. 더욱이 압밀계수( $c_v$ )가  $10\text{cm}^2/\text{min}$  이상인 지반조건을 비압밀층(압밀을 고려할 필요가 없는 층)으로 가정해서, 비압밀층의 조건은 소성지수(PI) 5 이하 또는 모래함유율 80% 이상으로 제시하였다.

한편, Asaoka et al.(1989)은 원지반 상에 성토구조물을 축조시, Fig. 4(a)에 나타난 바와 같이, 원지반의 투수계수를 변화시켜가면서 성토시의 침하와 지지력의 해석을 수행하였다. Fig. 4(b)는 성토완료후의 침하량과 성토하중, 투수계수의 관계를 나타내고 있는데, 어느 하중 조건하에서도 투수계수가  $10^{-7}\sim 10^{-4}\text{cm/s}$ 의 범위에서 침하량이 급변하며, 성토하중이 커질수록 이에 대한 경향이 현저하게 나타나는 것으로 제시하였다. 이를 토대로, Fig. 4(b)의 투수계수가  $10^{-7}\text{cm/s}$  이하의 영역과  $10^{-4}\text{cm/s}$  이상의 영역은 각각 완전비배수 및 완전배수상태이며, 배수 및 비배수상태, 즉, 어느 한쪽으로 판단하기 어려운 중간적 또는 부분배수상태에 놓이는 경우가 존재하는 것으로 제시하였다. 완전비배수 또는 완전배수조건 하에서의 설계 전단강도는 통상적으로 각각 하나의 상수값으로 결정될 수 있지만, 부분배수조건하에서는 동

일한 흙이라도 부분배수의 정도(압밀도)에 따라 설계 전단강도가 달라지게 된다. 따라서, 중간토의 전단강도를 평가할 때에는 압밀 및 투수특성을 충분히 고려할 필요가 있다.

앞에서 언급한 내용을 토대로 해서, 흙의 입도분포 기준 외에 지오테크 노트 시리즈, No. 2(Japanese Geotechnical Society, 1992)에 따르면, 흙의 소성지수(PI)가 비소성(NP)  $\sim 25\%$ , 투수계수( $k$ )가  $10^{-7}\sim 10^{-4}\text{cm/s}$ , 압밀계수( $c_v$ )가  $144\sim 14400\text{cm}^2/\text{day}$ 의 범위에 분포할 경우에 중간토로 분류하며, 사질토 지반(배수 조건)과 점성토 지반(비배수 조건)으로 명확하기 구분되기 어려운 중간적 성질로 인해 부분배수 상태에 놓이기 쉬운 지반조건으로 설명하고 있다. 다만, 중간토로 분류된 지반에 대해 최종적으로 투수계수를 기준으로 각각 사질토 및 점성토의 관점에서 전단강도를 평가하게 되므로 엄밀한 의미에서 부분배수조건하에서의 전단강도 평가방법은 제시되지 못한 상황이라고 할 수 있다.

한편, 국제표준시험방법(IRTP, 1999) 및 ASTM D 5778에 따르면, CPTU 시험시 표준관입속도를  $2\text{cm/s}$ 로 적용하여, 점토 지반과 균질한 모래 지반은 각각 비배수 및 배수 조건 하에서 시험이 이루어지는 것으로 고려하였다. 표준관입속도  $2\text{cm/s}$  하에서, 실트질 및 점토질 모래, 모래질 실트 등과 같은 중간토는 흙의 투수계수 및 압밀 특성에 따라 비배수 상태부터 부분배수 또는 완전 배수 상태에 이르기까지 다양하게 달라질 수 있다. 그러나, CPTU 시험시 관입속도가 이러한 흙의 관입저항력( $q_c$ ), 주변마찰력( $f_s$ ), 과잉간극수압( $u_a$ )에 직접적인 영향을 끼친다는 사실은 CPTU 시험방법에 대한 표준화가 이루어질 당시에는 고려되지 못하였다(Kim et al., 2006). 그러므로, 단순히 모래-배수거동, 점토-비배수거동의 관점에서 만들어진 CPTU 기반의 물리·역학적 특성에 대한 분석방법을 그대로 저소성 실트 지반에 적용하는 것은 적절치 않을 수 있다. CPTU 시험시 관입속도를 충분히 느리게 적용하면, 관입중에 콘 선단보다 선행하여 위치하는 흙의 압밀현상이 발생되어 비배수 상태에서의 콘 관입저항력( $q_c$ )에 비해 큰 값이 얻어지게 된다. 따라서, 관입 중에 배수 상태에 가까울수록 콘 관입저항력( $q_c$ )이 커지게 된다. 이와는 상반되는 개념으로, 완전 비배수 조건 하에서 점토 지반 내의 배수현상이 발생되지 못할 정도로 콘 관입속도가 충분히 빠르다면, 콘 관입저항력( $q_c$ )이 커지게 되어 표준관입속도( $2\text{cm/s}$ ) 하에서 보다 비배수 전단강도가 크게 평가되는 특성을 나타낸다.

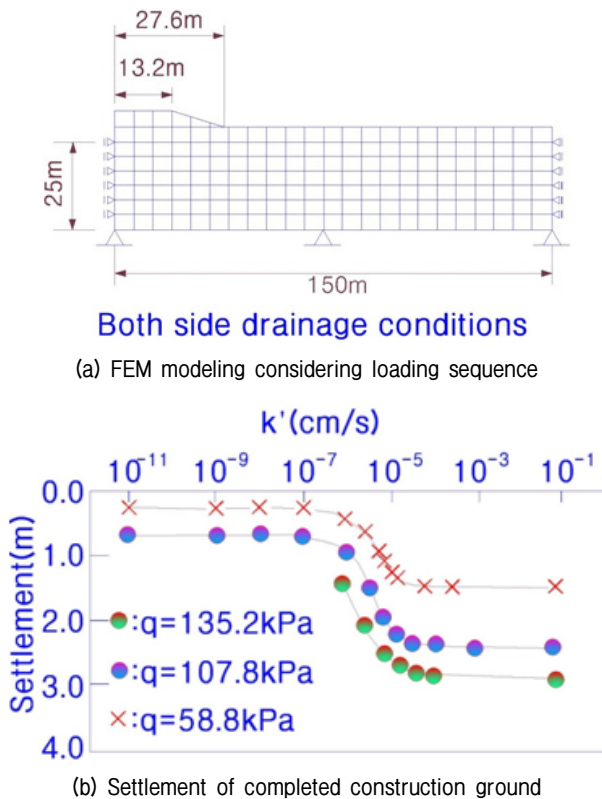


Fig. 4. Effect on the changed permeability of clayey ground concerning partially drained behavior (Asaoka et al., 1989)

### 3. 시험방법 및 결과분석

#### 3.1 물리시험결과 및 피에조콘 시험(CPTU)에 의한 토질특성

본 연구는 서해안에 위치한 인천신항 인근지역 및 화성 송산지구의 지반조사 결과를 토대로 이루어졌다. 흙분류를 위해 실시하는 액성한계, 소성한계와 입도분석 시험은 각각 ASTM 4318(2000), ASTM D422(1990)과 ASTM D2487(2000)에 따라 수행하였으며, 액성한계 시험은 Casagrande 방법을 적용하여 수행하였다. 인천지역 지반조사 위치의 평균 수심은 약 6m이며, 연약층 두께는 약 20m 내외로 분포하고 있다. Fig. 5에 나타난 바와 같이, 함수비, 액성한계, 소성지수의 평균값은 각각 37%, 39%, 17%이며, 심도에 따라 모래 및 실트함유량

이 매우 크게 변하는 특성을 나타내는데, 이는 하천에 의해 운반되어온 토사의 성분이 계절 또는 해가 바뀔에 따라 매우 크게 달라져 입도성분이 서로 다른 층이 퇴적되었기 때문인 것으로 판단된다. 모래함유량이 상대적으로 많은 층에서는 작은 함수비를 보이는 반면에 세립분 함유량이 많은 층에서는 보다 높은 함수비를 갖는 것을 알 수 있다. 입도에 따른 흙분류시 점토와 실트는 0.002mm 입경을 기준으로 구분하였으며, 일부 심도에서 50% 내외의 비교적 많은 모래함유량을 나타내는 층이 존재하지만, 전체적으로 심도에 따른 모래, 실트, 점토의 평균 함유율은 각각 23%, 60%, 17%로 실트질 성분이 우세한 특성을 보이는 것을 알 수 있다.

한편, 화성 지역 지반조사 위치의 연약층 두께는 8~14m 사이에서 분포하며, Fig. 6에 나타난 바와 같이, 함

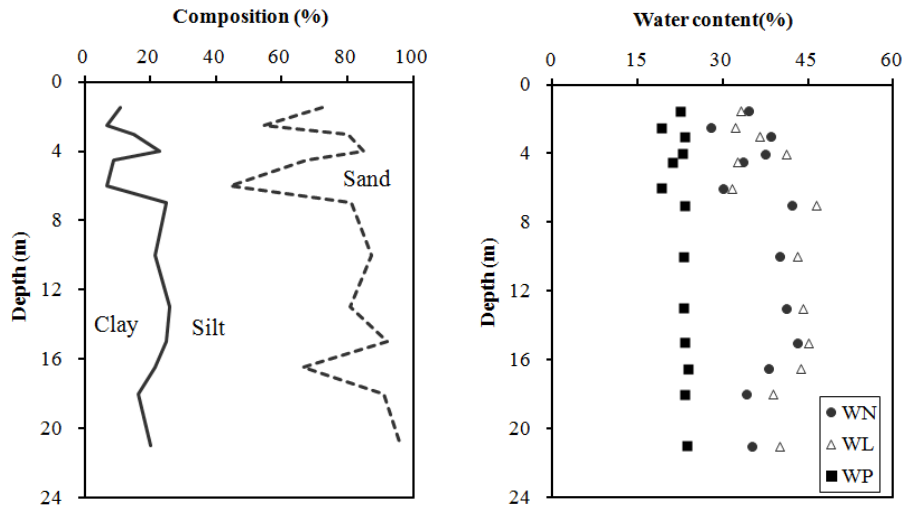


Fig. 5. Soil composition and index properties of Incheon clayey silt

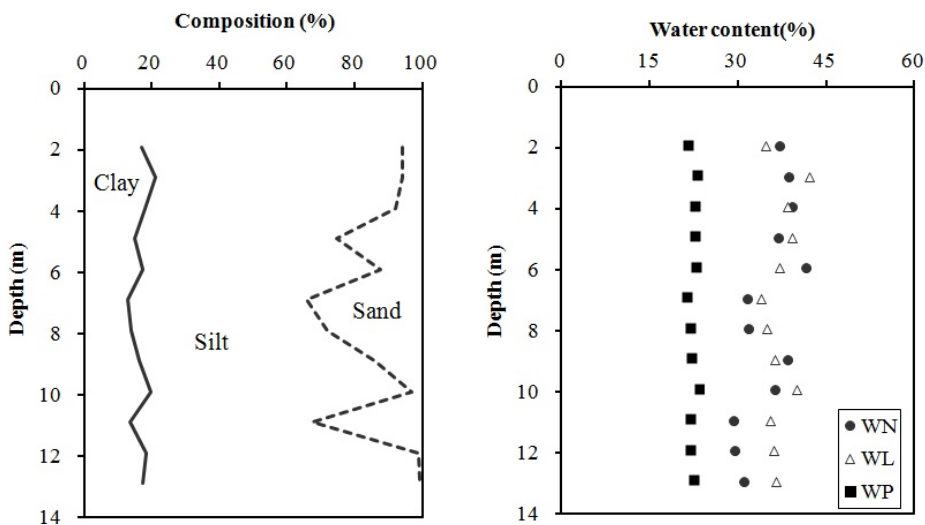


Fig. 6. Soil composition and index properties of Hwaseong clayey silt

수비, 액성한계, 소성지수의 평균값은 각각 35%, 37%, 15%이며, 인천지역과 유사하게 심도에 따라 모래 및 실트함유량이 매우 크게 변하는 특성을 나타내고 있다. 또한, 일부 심도에서 30% 내외의 비교적 많은 모래함유량을 나타내는 층이 존재하지만, 전체적으로 심도에 따른 모래, 실트, 점토의 평균 함유율은 각각 14%, 69%, 17%로 실트질 성분이 우세한 특성을 보이는 것을 알 수 있다.

CPTU 시험은 ASTM D 5778(2003) 규정에 따라 시험결과에 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 10cm<sup>2</sup>, 주면면적 150cm<sup>2</sup>의 ASTM에서 통용되고 있는 표준콘을 적용하였다. 이 때, 간극수압 측정을 위한 필터는 콘 선단부 바로 뒤쪽에 위치하였다.

서해안 지역의 수평 및 연직 방향의 물리적 특성은

미시적으로 볼 때 상당히 불균일한 특성을 나타내는데, 인천 및 화성 지역의 CPTU 시험 결과를 각각 나타낸 Fig. 7, 8에서 알 수 있는 바와 같이, 콘관입저항력( $q_t$ ), 과잉간극수압( $u_a$ ), 주면 마찰력( $f_s$ )이 심도에 따라 급변하는 경향을 확인할 수 있다. 예를 들어, 인천지역의 8m와 12m 심도 부근에서의 콘관입저항력( $q_t$ )은 다른 심도에 비해 매우 큰 값이 얻어졌으며, 과잉간극수압( $u_a$ )이 정수압( $u_0$ ) 이하의 값이 얻어진 것을 알 수 있는데, 이는 지층 내에 sandseam이 존재하기 때문이며, 물리적 특성 시험결과와 비교할 때 훨씬 더 불균일한 지층 상태를 파악할 수 있다. 또한, 화성지역의 5m, 7m 및 14m 심도 부근에서도 인천지역의 CPTU 데이터와 유사하게 지층 내의 다수의 sandseam이 존재하는 것을 알 수 있는데, 이와 같은 저소성 실트 지반의 경우 설계시 예상된 압밀 속도보다 실제 시공시 훨씬 빠른 경향을 나타낼 수 있다.

특히, 흙의 물리적 특성을 분석하기 위해 실시되는

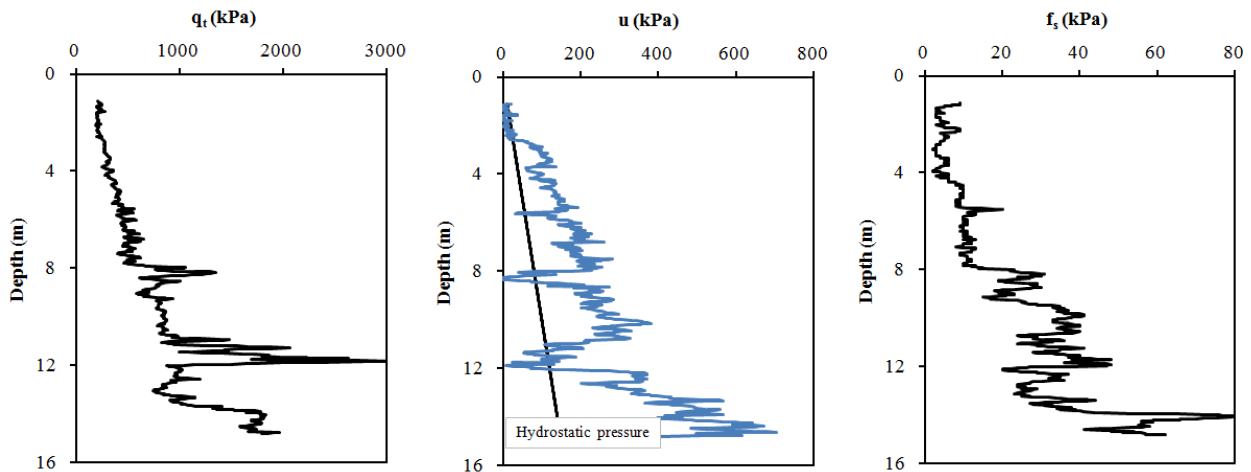


Fig. 7. Test results obtained from CPTU at Incheon site

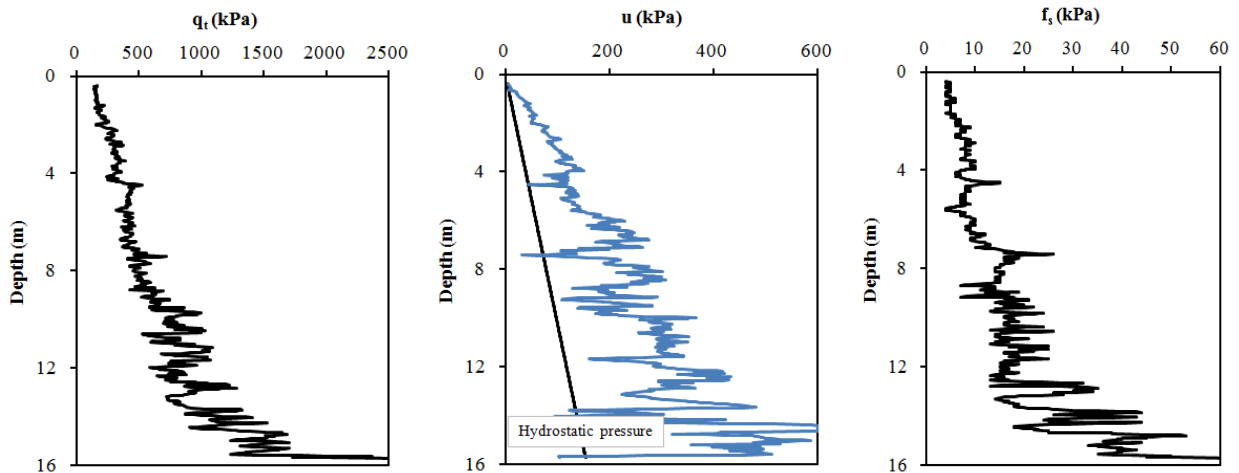


Fig. 8. Test results obtained from CPTU at Hwaseong site

액·소성 한계와 입도분포 시험은 각각의 1m 심도에 대한 대푯값을 나타낸 반면에, CPTU 시험에서 얻어진 각각의 데이터는 콘 선단의 극히 일부분의 지반에 대해 연속적으로 얻어진 값이므로, 실트 및 모래함유량이 많은 서해안 지역의 지층 특성을 훨씬 더 명확하게 파악할 수 있는 장점이 있다.

### 3.2 서해안 저소성 실트 지반의 부분배수 특성

#### 3.2.1 CPTU 데이터를 이용한 부분배수 특성분석

Powell과 Quarterman(1988)은 다음 식 (2)에 나타낸 바와 같이 콘관입저항력( $q_t$ )을 이용한 과압밀비(OCR) 평가방법을 제시하였는데,  $\kappa$ 값은 0.2~0.5 사이에서 분포하며, 통상적으로 평균값인 0.3을 적용한다. 연대효과를 경험한 매우 과압밀된 점토(aged heavily overconsolidated clay)의 경우 평균값보다 큰  $\kappa$ 값을 적용하게 되며, 이 값에 따라 예측된 과압밀비가 달라지는 경향을 나타낸다.

$$OCR = \kappa \cdot \left( \frac{q_t - \sigma_{vo}}{\sigma_{vo}} \right) \quad (2)$$

각각 불교란 시료에 의한 표준압밀시험 및 식 (2)를 이용해서 산정한 과압밀비(OCR)를 Fig. 9에 나타내었는데, 인천 및 화성지역에 대해 예측된 과압밀비는 표준압밀시험에 의한 값보다 크게 평가되었으며, 이러한 경향은 sandseam이 분포된 층에서 더욱더 두드러진 것을 알 수 있다. 특히, 화성지역 보다 상대적으로 모래함유량이 많은 위치에서 CPTU 시험이 이루어져 콘관입저

항력( $q_t$ )이 크게 발휘되어 인천지역에서 예측된 과압밀비(OCR)와 표준압밀시험에 의한 값의 편차가 큰 경향을 나타냈다. 한편, 평균 소성지수(PI) 40% 내외의 고소성 점토 지반인 부산 지역의 CPTU 데이터를 이용한 과압밀비(OCR)와 표준압밀시험에 의한 값이 유사한 경향을 나타내어 적용성이 상당히 높은 것을 알 수 있다. 급회 CPTU 시험이 수행된 서해안 지역은 저소성 실트질 지반으로 고소성 점토로 구성된 부산지역과 비교할 때 상대적으로 투수성이 크므로 표준관입속도(2cm/s)하에서 부분배수 현상이 발생되어 경험식을 이용한 파라미터가 과대평가되는 경향을 나타낼 수 있다.

투수계수( $k$ )가  $10^{-7} \sim 10^{-6}$  cm/s 이하인 실트질 지반의 경우, 표준관입속도(2cm/s)하에서 CPTU 데이터는 비배수 상태의 값을 나타내며, 동일한 조건에 대해 실트질 지반에서 투수계수( $k$ )가  $10^{-4} \sim 10^{-3}$  cm/s 이상일 때, CPTU 데이터는 거의 배수상태의 값을 나타낸다. 이러한 투수계수 값들의 사이에 분포하는 실트질 지반은 부분배수 상태에서 콘저항값( $q_c$ )은 직접적으로 투수계수( $k$ )의 함수로 거동하게 된다(McNeilan and Bugno, 1984). 또한, Campanella와 Robertson(1988), Asaoka et al.(1989)는 흙의 투수계수( $k$ )가  $10^{-7}$  cm/s 이하인 경우 비배수 상태에서 거동하며, 부분배수 거동은 흙의 투수계수( $k$ )가  $10^{-7} \sim 10^{-4}$  cm/s 사이에서 분포할 때 나타나는 것으로 제시하였다. 한편, 인천 및 화성지역의 표준압밀시험에 의한 투수계수( $k$ )는 각각  $9.5 \times 10^{-6}$  cm/s 및  $5.3 \times 10^{-6}$  cm/s가 얻어져 재하성토 과정에서 부분배수 상태에 놓이기 쉬운 것으로 분석되었다.

수축성 지반(contractive soil)에서 CPTU 시험시 관입

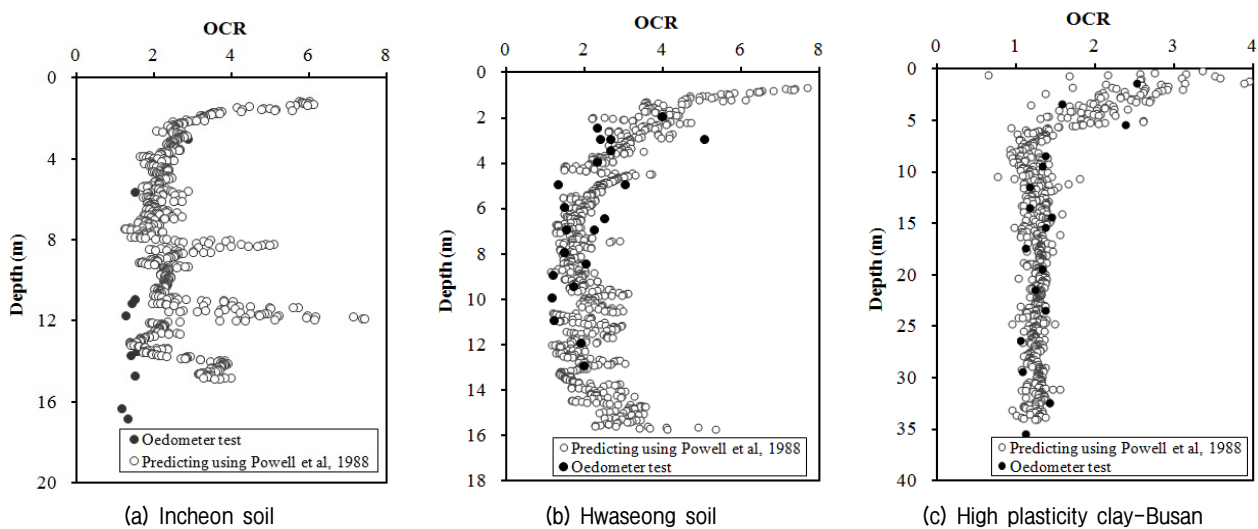


Fig. 9. Comparison of OCRs between the oedometer tests and the CPTUs using Powell's formula

속도를 상대적으로 빠르게 적용하면, 일반적으로 콘관입저항력( $q_t$ )과 과잉간극수압( $u$ )이 동시에 증가하는 경향을 나타내므로, 비배수 조건하의 점토지반에서 두 값의 조합으로 이루어진 간극수압계수( $B_q$ )는 콘관입속도의 영향을 크게 받지 않게 된다(Randolph and Hope, 2004). 그러므로, 간극수압계수( $B_q$ )는 수축성 점토지반의 비배수 거동을 분석하는데 이용된다. Hight et al.(1994)에 따르면, 간극수압계수( $B_q$ )가 0.5보다 큰 값이 얻어지면, CPTU 데이터는 비배수 상태의 값으로 고려하도록 제시하였다. Schnaid et al.(2004)은 간극수압계수( $B_q$ )가 0.3~0.5 사이에서 분포하는 정규압밀 실트지반은 주로 비배수에 가까운 상태에서 CPTU 데이터가 얻어지며, 간극수압계수( $B_q$ )가 0~0.3 사이에서 분포할 경우에 CPTU 데이터가 부분배수 상태에 놓이는 것으로 제시하였다. Fig. 10에 나타낸 바와 같이, 피에조콘관입시험에 의한 비배수전단강도 평가를 위해 필요한 콘계수( $N_{kt}$ )는 간이 CU 강도와 순콘관입저항력( $q_t - \sigma_{v0} = q_{net}$ )과의 관계를 이용하여  $N_{kt}=12$ 로 평가되었다.

Schnaid et al.(2004)는 간극수압계수( $B_q$ )-강도증가율( $s_u/\sigma'_{v0}$ )-정규화된 콘저항( $Q_t = (q_t - \sigma_{v0})/\sigma'_{v0}$ )을 함께 도시하여 부분배수 유무를 판단하도록 제시하였다. Fig. 11(a), (b)에 나타낸 바와 같이, 50% 이상의 데이터가 부분배수 상태를 나타내는  $B_q < 0.3$ 에 분포하며, 강도증가율도 국내 해성점성토의 일반적인 값( $s_u/\sigma'_{v0} = 0.25 \sim 0.35$ )과 비교할 때 매우 큰 값을 나타내며, 상당히 분산되는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 이러한 원인은 표준관입속도(2cm/s)하에서 CPTU 수행시 부분배수 현상

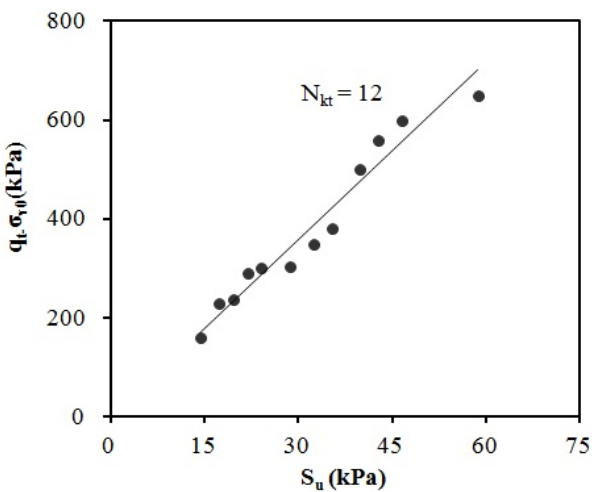
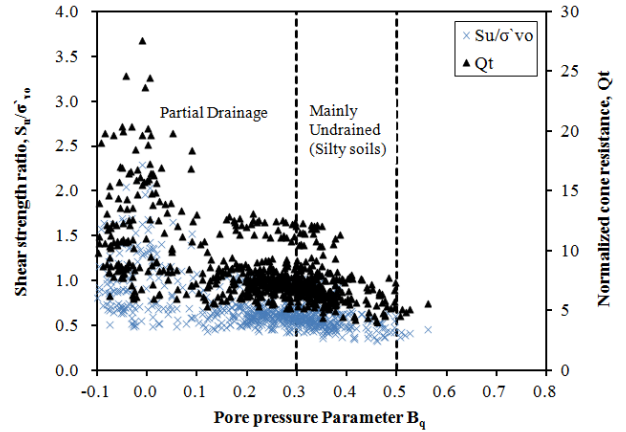
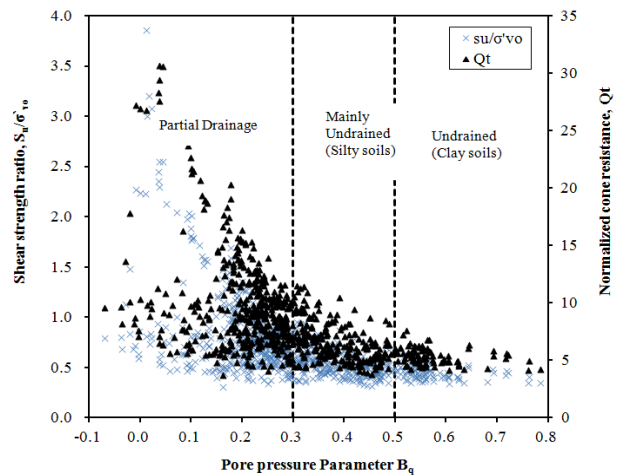


Fig. 10. The relations between  $q_t - \sigma_{v0}$  and  $s_u$  for estimation of  $N_{kt}$  (Hwaseong site)

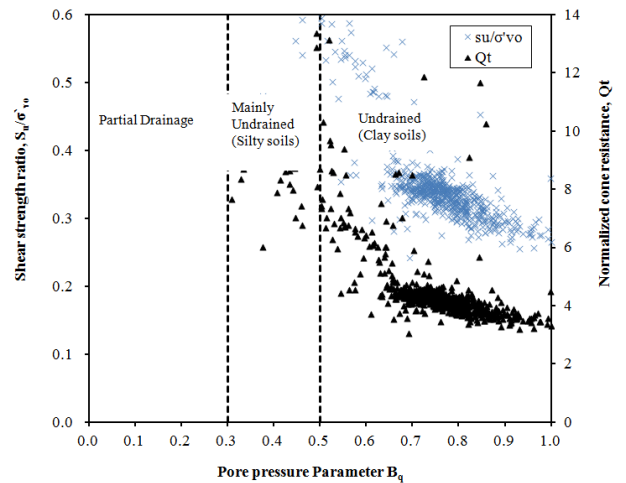
이 탁월하게 발생되어 콘관입저항력( $q_t$ )이 완전비배수 상태와 비교할 때 크게 평가되었기 때문인 것으로 판단된다. 한편, Fig. 11(c)의 고소성 부산 점토의 경우, 대부분의 데이터가  $B_q > 0.5$ 에 분포하여 표준관입속도(2cm/s)



(a) Incheon soil



(b) Hwaseong soil



(c) Busan soil

Fig. 11. Judgment of the drainage conditions at a standard penetration rate,  $v=2$  cm/s based on the CPTU results



하에서 완전비배수 상태에 놓인 것을 알 수 있다. 또한, 강도증가율도 일반적인 값의 범위에서 분포하여 고소성 점토지반의 경우 CPTU 데이터를 이용한 설계 정수 평가에 대한 적용성이 우수한 것을 알 수 있다. Schnaid et al.(2004)는 부분배수 영역을 나타내는 간극수압계수( $B_q$ )의 범위를 0~0.3으로 제시하였으나, 본 연구의 대상 지역인 인천 및 화성지역과 같이 aging 효과 및 2차 압밀(secondary consolidation)과 같은 연대효과로 인한 과압밀 특성을 나타내는 지반의 경우, 부의 간극수압이 발현될 수 있으므로 부분배수를 나타내는 간극수압계수( $B_q$ )의 하한계를 제거하였다.

한편, Schnaid et al.(2004) 및 House et al.(2001)은 무차원 속도( $V=vD/c_v$  여기서,  $v$ =콘관입속도,  $D$ =콘직경,  $c_v$ =압밀계수)를 이용하여 부분배수 유무를 판단하도록 제시하였는데, 이 중에서 압밀계수가 가장 중요한 인자가 된다. Sandseam이 많이 포함된 층에서 튜브 샘플러를 이용한 불교란 시료 채취과정에서 교란 현상이 발생되기 쉬우며, 때때로, 채취된 시료 내에서 될 수 있으면 sandseam이 포함되지 않은 위치에서의 시료를 이용하여 표준압밀시험을 수행하게 된다. 따라서, 저소성 실트 및 모래함유량이 많은 지층 특성을 나타내는 경우에 압밀계수를 과소평가하는 경향을 나타내게 된다. 피에조콘소산시험에 의한 압밀계수 산정시 이용되는 Teh and Houlsby(1991)방법은 완전 비배수 상태와 관련된 이론적 초기간극수압 분포를 기준으로 압밀계수를 산정하게 되므로 엄밀한 의미에서 이 값을 이용하여 부분배수 유무를 평가하는 것은 적절하지 않을 수 있다. 따라서, 저소성 실트 지반에 대해 무차원 속도를 기준으로 배수 상태를 평가할 때에는 압밀계수의 산정에 있어서 상당한 주의를 요하게 된다.

### 3.2.2 강제치환공법에 의한 부분배수 특성분석

연약 점성토 지반상에 강제치환공법에 의한 호안구조물 설계시 가장 중요한 부분은 치환깊이 산정이며, 통상적으로 성토하중과 원지반의 지지력이 동일한 값이 얻어지는 침도까지 성토재로 치환되는 것으로 검토하게 된다. 이 때, 원지반의 지지력은 Terzaghi 또는 Meyerhof 식 등을 이용하여 평가하게 되며, 점성토 지반은 비배수 상태에서 내부마찰각이 0이므로 원지반의 비배수 전단강도( $s_u$ )가 발휘되는 지지력의 주요 인자가 된다. 서두에서 언급한 바와 같이, 설계 치환깊이와 확인조사에 의한 실측값이 유사한 경향을 나타내는 고소성 점토 지반

조건인 부산 및 광양지역과 비교할 때, Fig. 12에 나타난 바와 같이 저소성 실트 지반 조건인 서해안 지역에서는 설계 예상 치환깊이의 절반에도 못미치는 결과가 대부분을 차지하는 것으로 보고되고 있다(Kim et al., 2010). 일반적으로 점성토 지반상에 호안구조물을 축조할 때에는 시공완료시까지 원지반 내의 배수현상, 즉, 과잉간극수압의 소산이 발생되지 않는 비배수 관점에서 안정성을 평가하게 되지만, 고소성 점토지반에 비해 서해안 저소성 실트 지반은 상대적으로 투수계수가 크며 지층 내에 배수층의 역할을 하는 sandseam이 다수 출현하므로, 강제치환 시공과정 중 부분배수 현상으로 인해 원지반의 강도증가 현상이 발생되어 설계 예상 치환깊이보다 훨씬 작은 실측값이 얻어진 것으로 고려할 수 있다. 이러한 관점에서 실측 치환깊이와 동일한 값이 얻어지도록 원지반의 지지력에 대한 역해석 수행시, 성토하중에 의한 응력 분포는 Boussinesq(1885) 방법으로, 원지반의 지지력은 Meyerhof식을 적용하여 평가하였다. 이 때, 부분배수 조건에서의 원지반의 지지력 산정 과정을 개략적으로 살펴보면, Fig. 9(a)에 나타난 바와 같이, 인천지역은 지표로부터 약 4m 침도까지 과압밀비 3 정도의 값을 나타내는 과압밀 상태인 것을 알 수 있으며, 이로 인해 지표면에서도 전단강도가 발현되며,  $s_u(\text{kPa})=2.8 \times \text{depth}(\text{m})+11$ 의 비배수 전단강도식으로 표현되었다. 또한, 완전 배수 조건의 정규압밀상태에서의 원지반 내부마찰각은 35°이며, 지표로부터 4m 침도까지는 과압밀 상태로 인해 절편 약 11kPa을 유지한 상태에서 4m 침도 이후의 정규

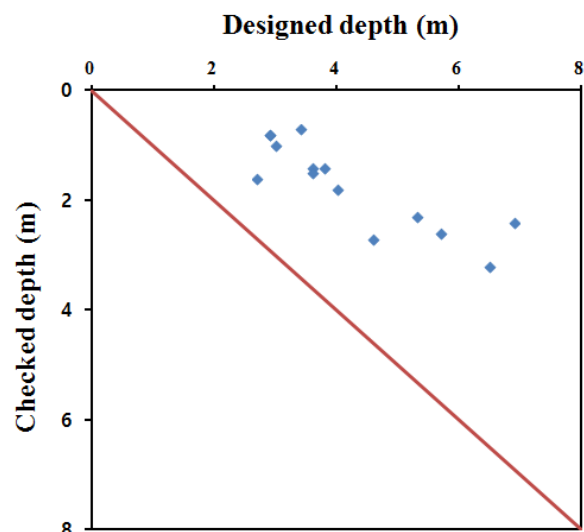


Fig. 12. Relationship of the estimated replacement depths in design phase versus the checked depths at completed construction sites with clayey silt

압밀 상태의 내부마찰각 35°의 파괴포락선과 만나게 되므로 이를 통해서 과압밀 영역의 완전배수 내부마찰각 23°를 도해적으로 산정하였다. 예를 들어, 과압밀 상태의 원지반의 부분배수 내부마찰각 5°가 발휘될 때에 대한 지지력을 산정하게 되면, 두 내부마찰각의 비례관계를 이용하여 압밀도 21%가 얻어지게 된다. 원지반이 비배수 상태에서 배수상태에 가까워질수록 압밀도에 따라 점착력은 줄어드는 반면, 내부마찰각은 커지게 되므로, 과압밀 영역의 전단강도 절편 11kPa는 정규압밀 영역에 도달될 때까지 유지된다. 따라서, 점착력은  $c=(2.8 \times \text{depth(m)}) \times 0.79 + 11\text{kPa}$ 로 표현되며, 내부마찰각 5°에 해당되는 지지력계수( $N_c, N_r, N_q$ )를 이용하여 원지반의 지지력을 평가하게 된다. 이와 같은 방법으로 역해석을 수행한 결과, Fig. 13에 나타난 바와 같이, 소성지수가 감소할수록 내부마찰각이 커지는 경향을 나타내며, 내부마찰각( $\phi$ )이 2~7°의 범위에서 분포하는 것으로 분석되었다.

기존 연구사례들을 통해서 알 수 있는 바와 같이, 단순히 점성토지반은 비배수 상태, 사질토는 배수상태로 구분하여 안정성을 분석해왔으나, 점토 또는 모래로 분류하기 애매한 중간적 성질을 갖는 저소성 실트 지반에 대해 중간토(intermediate soil)로 분류하여 부분배수 특성을 나타내는 것으로 제시되었다. 그러나, 현재까지 부분배수 조건하에서의 전단강도 평가방법에 대한 연구는 미미한 수준인데, 이는 각각의 배수정도(압밀도)에 따라 달라지는 원지반의 유효응력 및 이에 대응되는 내부마찰각을 실내 및 현장시험을 통해서 구현하기 어려

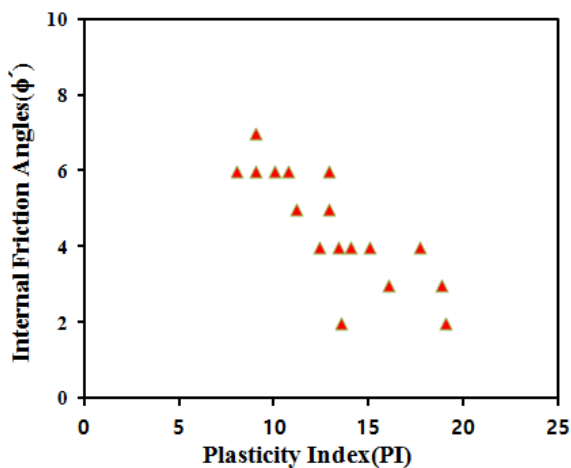


Fig. 13. Internal friction angles obtained from back analysis when applying compulsory replacement method versus plasticity index (PI)

운 측면이 있기 때문이라고 판단된다. 금회 실측치환 깊이를 기준으로 역해석을 통해서 제시된 내부마찰각은 원지반의 배수 정도, 즉, 과잉간극수압의 소산정도에 대한 분석을 통해서 제시된 값이 아니므로 추후 현장 원위치 시험 및 해석적 방법에 의한 추가적인 연구가 이루어져야 할 것이다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 서해안의 인천 및 화성지역에 분포하는 모래 및 실트 함유량이 많은 저소성 지반에 대해 피에조콘관입시험(CPTU) 데이터 및 강제치환공법을 이용하여 부분배수 특성을 분석하였으며, 주된 내용은 다음과 같다.

- (1) CPTU 데이터를 이용한 Powell과 Quarterman(1988)에 의한 과압밀비  $OCR=(q_t - \sigma_{vo})/\sigma'_{vo}$  경험식은 평균 소성지수(PI) 40% 내외의 고소성 점토 지반인 부산 지역에서는 적용성이 상당히 높은 반면에 인천 및 화성 지역과 같이 모래함유량이 많은 서해안 저소성 실트 지반에서는 상대적으로 투수성이 커서 표준관입속도(2 cm/s)하에서 콘관입저항력( $q_t$ )이 크게 평가되어 과압밀비가 크게 산정되는 경향을 나타냈다.
- (2) Schnaid et al.(2004)는 간극수압계수( $B_q$ )-강도증가율( $s_u/\sigma'_{vo}$ )-정규화된 콘저항( $Q_t=(q_t - \sigma_{vo})/\sigma'_{vo}$ )을 함께 도시하여, 부분배수 유무를 판단하도록 제시하였는데, 인천 및 화성 지역의 CPTU 데이터의 50% 이상이 부분배수 상태를 나타내는  $B_q < 0.3$ 에 분포하였고, 강도증가율도 국내 해성점성토의 일반적인 값( $s_u/\sigma'_{vo}=0.25 \sim 0.35$ )과 비교할 때 매우 큰 값을 나타내며, 상당히 분산되는 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 이러한 원인은 표준관입속도(2cm/s)하에서 CPTU 수행시 부분배수 현상이 탁월하게 발생되어 콘관입저항력( $q_t$ )이 완전비배수 상태와 비교할 때 크게 평가되었기 때문인 것으로 판단된다.
- (3) 고소성 점토지반에 비해 서해안 저소성 실트 지반은 상대적으로 투수계수가 크며 지층 내에 배수층의 역할을 하는 sandseam이 다수 출현하므로, 강제치환 시공과정 중 부분배수 현상으로 인해 원지반의 강도증가 현상이 발생되어 설계 예상 치환깊이 보다 훨씬 작은 실측값이 얻어진다는 관점에서 실

측 치환깊이와 동일한 값이 얻어지도록 원지반의 지지력에 대한 역해석을 수행하였다. 그 결과, 소성 지수가 감소할수록 내부마찰각이 커지는 경향을 나타내며, 내부마찰각( $\phi$ )이 2~7°의 범위에서 분포하는 것으로 분석되었다. 금회 실측치환 깊이를 기준으로 역해석을 통해서 제시된 내부마찰각은 원지반의 배수 정도, 즉, 과잉간극수압의 소산정도에 대한 분석을 통해서 제시된 값이 아니므로 추후 현장 원위치 시험 및 해석적 방법에 의한 추가적인 연구가 이루어져야 할 것이다.

### 참고문헌 (References)

- Asaoka, A., Ihara, S., and Matsuo, M. (1989), "Partial Drainage behavior of Clayey Ground Focusing on Permeability", 24<sup>th</sup> annual meeting, *Japanese Geotechnical Society*, pp.1121-1122.
- 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 D5778 (2003), Standard test method for electronic friction cone piezocone penetration testing of soils, *ASTM International, West Conshohocken, PA*.
- Campanella, R. G. and Robertson, P. K. (1988), "Current Status of the Piezocone Tests", *Proc. 1<sup>st</sup> Int. Symp. Penetration Test, Orlando, FL, USA, ISOPT-1*, pp.93-116.
- Hight, D. W., Georgiannou, V. N., and Ford, C. J. (1994). "Characterization of Clayey Sands", *Proc. International conference on behavior of offshore structures, BOSS, 94, Boston*, pp.321-340.
- House, A. R., Oliveira, J. R. M. S., and Randolph, M. F. (2001). "Evaluating the Coefficient of Consolidation Using Penetration tests", *Physical modeling in geotech.*, Vol.1, No.3, pp.17-25.
- IRTP (1999), "International Reference Test Procedure for the Cone Penetration Test (CPT) and the Cone Penetration Test, Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure: Theory and Practice, Planning and Design, Construction and Maintenance", *Twelfth European conference on soil mechanics and geotechnical engineering, Proc.*, Amsterdam, Netherlands.
- Japanese Geotechnical Society (1992), "Intermediate Soil-sand or Clay", *Geotech Note Series, 2* (in Japanese).
- Japanese Port Association (2007), "Technical Standards for Port and Harbour Facilities in Japan", (in Japanese).
- Kamei, K. (1992), "Mechanical Properties of Intermediate Soil", *Geotech Note Series, 2, Japanese Geotechnical Society*, pp.7-54. (in Japanese).
- Kim, J. H., Baek, W. J., Ishikura, R., and Matsuda, H. (2010), "Undrained Shear Strength Characteristics of Intermediate Soils and Their Application to Rapid Banking Method", *Proc. the 9th national symposium on ground improvement, The Society of material science, Japan*, pp.209-304 (in Japanese).
- Kim, K. K., Prezzi, M., and Salgado, R. (2006), "Interpretation of Cone Penetration Tests in Cohesive Soils", *Final report, FHWA/IN/JTRP-2006/22*, Joint Transportation Research Program.
- 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* (in Korean, accepted).
- Matsuo, M. (1984), "Geotechnical Engineering, Theory and Practice of Reliability-based Design", *Gihodo Syuppan*, pp.28-31 (in Japanese).
- McNeilan, T. W. and Bugno, W. T. (1984), "Cone Penetration Test Results in Offshore California Silts", *Strength testing of marine sediments: Laboratory and In-situ test measurements, ASTM Committee D-18 on soil and rock, ASTM*, pp.55-71.
- Powell, J. J. M. and Quarterman, R. S. T. (1988), "The Interpretation of Cone Penetration Tests in Clays with Particular Reference to Rate Effects", *Proc. International symposium on penetration testing, ISPT-1, Orlando*, pp.903-910.
- Randolph, M. F. and Hope, S. (2004), "Effect of Cone Velocity on Cone Resistance and Excess Pore Pressures", *Proc. Int. Symp. Eng. Practices Perform Soft Deposits, Osaka, Japan*, p. 147-152.
- 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.
- Teh, C. I. and Houlsby, G. T. (1991), "An Analytical Study of the Cone Penetration Test in Clay", *Geotechnique*, Vol.41, No.1, pp.17-34.

Received : May 20<sup>th</sup>, 2016

Revised : July 22<sup>nd</sup>, 2016

Accepted : September 1<sup>st</sup>, 2016