

부산 점토의 압밀특성과 연계한 비배수전단강도 평가

Evaluation on Undrained Shear Strength considering Consolidation Characteristics for Busan Clay

김주현^{1*}

Ju-Hyun Kim^{1*}

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

ABSTRACT

In this study, a series of laboratory and in-situ tests such as FVTs and CPTUs were carried out to evaluate undrained shear strength related to quasi overconsolidated characteristics in the near-surface clay at Busan new port. Using unconfined compression and field vane test results, correlation between undrained shear strength and effective overburden pressure, that is, equation of $10+0.262\sigma'_{v0}$ (kPa) was obtained. From oedometer tests, OCR is around 1.9 at depths lower than 7 m and OCR below this depth is very close to unit. As stated by Hanzawa et al. (1983), a natural clay deposit in the near-surface, even in normally consolidated state, is more and less apparently overconsolidated due to aging effects such as chemical bonding. Based on this concept, it can be inferred that intercept of equation is mobilized due to chemical bonding irrespective of effective overburden pressure and strength incremental ratio in normally consolidated state is 0.262. From CPTU results, same trend was confirmed. The further study should be necessary to judge whether upper clay is under overconsolidated state due to chemical bonding or not based on the depositional environment.

요 지

본 연구에서는 부산 신항에서 지표면 근처의 상부 점토의 유사 과압밀 특성과 연계한 비배수전단강도를 평가하기 위하여 현장베인 및 피에조콘관입시험을 실시하였다. 일축압축 및 현장베인시험 결과를 이용하여 비배수전단강도(s_u)와 유효상재압과의 상관관계식 $10+0.262\sigma'_{v0}$ (kPa)이 얻어졌다. 표준압밀시험결과로부터 7m 침도까지 과압밀비(OCR) 1.9 정도이며, 침도가 깊어질수록 정규압밀상태의 과압밀비(OCR) 1.0에 근접한 경향이 얻어졌다. Hanzawa(1983)에 따르면, 정규압밀된 자연퇴적 점토지반에서도 화학적 결합 작용 등에 의한 연대효과로 인해 지표면에 가까운 위치에서 과압밀 경향을 보이는 것으로 제시되었다. 이러한 개념 하에서, 부산점토 지반은 지표면에서부터 화학적 결합작용으로 인해 10kPa의 비배수전단강도가 유효상재압에 관계없이 발휘되며, 정규압밀상태의 강도증가율은 0.262로 추정할 수 있다. 이에 대해 퇴적 환경 변화로 인해 지표면에 가까운 위치에서 화학적 결합 작용에 의한 유사 과압밀 경향이 발생되었는지에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

Keywords : Chemical bonding, Undrained shear strength, Quasi-overconsolidated characteristics, Aging effects

1. 서 론

연약지반개량을 위해 필요한 설계정수는 흙의 변형과

관련된 압밀정수와 성토로 인한 안정성 확보 유무를 판단 하는데 이용되는 강도정수로 구분될 수 있다. 부산점토는 낙동강 하구에 퇴적된 점토로 최대 70m 이상의 두께로 분포하는 곳도 있으므로 연약층 두께가 대략 20m 미만으로 분포하는 서해안 지역에 비해 대심도 지반으로 분류된다. 따라서, 침도가 깊어질수록 튜브 샘플러로 채취된 시료를 이용한 압밀 및 강도정수는 시료 교란 현상으로 인해 과소

Received 4 Sep. 2017, Revised 19 Sep. 2017, Accepted 19 Sep. 2017

*Corresponding author

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

E-mail address: kkhong@wm.cau.ac.kr (K. Hong)

평가되는 것으로 알려져 있으며, 이러한 문제를 개선하기 위한 시료 채취 방법도 제안되었다(Tanaka et al., 2001; Chung et al., 2004; Chung 2005); Chung et al.(2010, 2012)은 부산점토 지반에서 실내시험을 포함한 피에조콘관입시험(CPTU) 및 현장베인시험(FVT)결과를 이용하여 콘계수 및 베인강도를 유효상재압으로 표준화시킨 강도증가율(s_u/σ'_v)을 분석한 결과, 부산점토의 공학적 특성은 퇴적환경 및 지형학적 특성에 따라 달라지는 것으로 제시하였다. 이때, 상부 및 하부 점토층 내의 모래 함유량이 많은 층이 포함되어 이들 층에서 만족할만한 상관관계가 얻어지지 않는 것으로 분석하였다. 따라서, 전체 심도를 평균하여 적용한 시험결과를 적용하게 되면, 데이터의 분산도가 크므로, 퇴적층별로 구분된 경향성을 고려한 간접적인 상관관계를 적용할 것을 추천하였다.

실제, Kim(2017)은 서해안 저소성 지반의 CPTU 데이터를 이용하여 지층 내에 모래함유량이 많은 특성으로 인해 2cm/s의 표준관입속도 하에서 부분배수 현상이 발생할 수 있는 것으로 제시하였으므로, 이러한 층에서 배수 조건하의 콘계수 및 베인강도와와의 상관성은 상당히 떨어질 수 있다.

Tanaka et al.(1989)은 압밀진행 중인 해성점토 지반에서 수행된 CPTU 데이터를 분석한 결과, 유효 콘저항치($q_t - \sigma_{v0}$)와 비배수전단강도(s_u)의 상관관계인 콘계수(N_{kt})는 압밀상태(정규압밀, 과압밀 및 압밀진행 중인 지반)에 따라 변하지 않고 동일한 값을 제공하는 것으로 제시하고 있다. Fukasawa et al.(2004)도 간사이 국제공항 확장공사에서 수행된 CPTU 데이터를 분석하여 이러한 연구결과를 뒷받침하였다.

서해안 지역은 약 7~9m 전후로 조위치가 크며, 하천에 의해 운반되어온 토사의 성분이 계절 또는 해가 바뀔에 따라 매우 크게 달라져 모래 및 실트 함유량이 많은 층이 서로 교호하여 퇴적되는 매우 불규칙한 지층 분포를 보인다(Jeong, 2015). 이에 반해, 부산점토는 퇴적환경 및 지형학적 특성에 따라 공학적 특성이 달라질 수 있지만(Chung et al., 2010, 2012), 서해안 지역에 비해 조위차도 2~4m 전후로 낮으며 입도분포의 변화가 심하지 않은 일정한 지층 특성을 나타낸다.

일반적으로 지반의 압밀 상태 및 지층 특성에 따라 비배수전단강도가 달라지며, 이에 수반하여 피에조콘관입시험에서 얻어지는 콘저항치에도 거의 동일한 경향을 나타내므로, 입도분포 및 소성도를 기준으로 동일한 지반 조건으

로 분류된다면 심도에 따른 콘계수는 일정한 경향을 나타낸다.

실무적인 입장에서도, 퇴적환경에 따라 심도별 콘계수 및 유효응력으로 표준화된 강도증가율(s_u/σ'_v)을 여러 값으로 적용하는 것은 현실적으로 어려운 측면이 있다.

따라서, 본 연구에서는 부산 신항의 CPTU, 현장베인시험(FVT) 및 실내시험결과를 이용하여 지반의 압밀상태와 연계한 강도특성을 분석하고자 한다. 이 때, 일축압축시험에 의한 비배수전단강도($q_u/2$) 및 현장베인강도($s_{u(FVT)}$)를 이용하여 심도에 따른 비배수전단강도 증가비를 결정한 후, CPTU 데이터인 $q_t - \sigma_{v0}$ 와의 상관관계인 콘계수(N_{kt})가 심도에 따라 일정한 경향성이 나타나는지를 분석하였다.

2. 부산점토의 압밀특성에 관한 기존 연구

Fig. 1은 부산 지역에서 채취된 점토의 표준압밀시험에 의한 과압밀비(OCR)를 나타내고 있다. 15m 심도 이상에서 평균 과압밀비(OCR)가 0.5 정도로 정규압밀상태보다 낮은 값을 보이는 것을 알 수 있다. 이러한 현상에 대해 Chung et al.(2002)은 먼저 피압수로 인해 정수압 조건으로 계산된 유효상재압보다 작아진게 원인일 수 있지만, 이러한 가정을 뒷받침할만한 데이터가 한정적이라고 언급하였다. 그 다음으로, 시료 채취 및 준비과정에서의 교란현상으로 인해 원위치 선행압밀압력보다 작아지는 현상이 발생할 수 있다고 하였다. 또한, 빙하기 이후에 해수면 상승기의 퇴적속도가 퇴적층의 압밀이 완료되기에는 너무 빨라서 낮은 선행압밀압력이 얻어지는 것으로 일부 연구자들은 제시하였다.

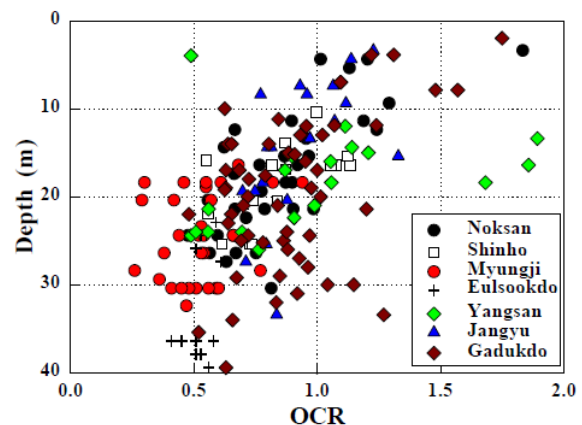


Fig. 1. OCR values for Busan clays (data from Chung et al., 2002)

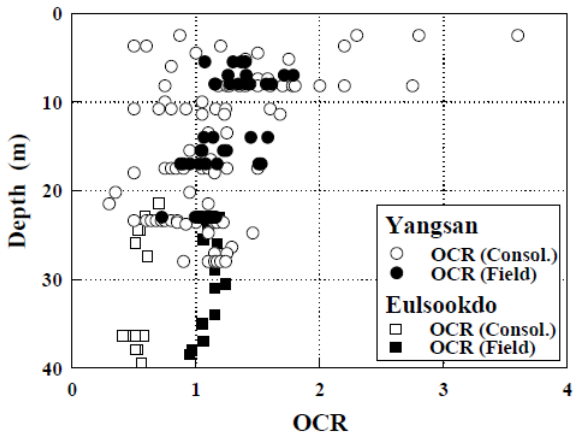


Fig. 2. Comparison between oedometer and field OCR values for Busan clay (data from Chung et al., 2002)

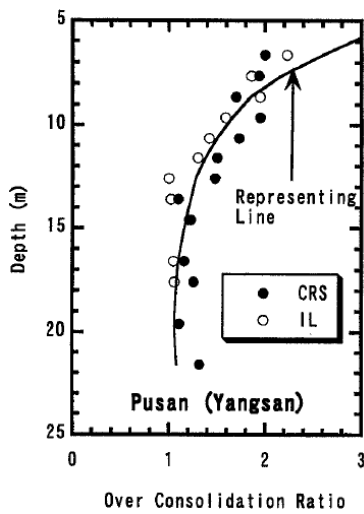


Fig. 3. Preconsolidation pressure measured by CRS and oedometer tests for Yangsan clay (data from Tanaka et al., 2001)

Leroueil(1996)과 Tanaka et al.(1999)은 응력제어방식의 oedometer 시험에 의한 선행압밀압력은 변형률 효과로 인해 일정변형률 압밀시험(CRS)에 의한 값보다 작은 값을 보이는 것으로 언급하였다. Chung et al.(2002)은 부산 신호지역의 압밀시험결과를 분석하여, Leroueil(1996)이 제시한 1.25배보다 다소 큰 1.36배 정도가 얻어진 것으로 제시하였다.

Leroueil et al.(1978), Morin et al.(1983)은 성토 시공과정 동안의 과잉간극수압 관측을 통해서 원위치 선행압밀압력을 평가할 수 있는 방법을 제안하였다. 부산점토에 대해 이러한 접근 방법을 적용하여 선행압밀압력을 평가한 결과를 Fig. 2에 제시하였는데, 원위치 선행압밀압력이 실내시험에서 구한 값보다 크며, 과압밀비 1.0 이상을 나타내는 것을 알 수 있다.

한편, 시료 채취 시 높은 수압을 적용하는 국내 시료채취 방법과 달리 낮은 수압을 적용하며 세밀한 슬라임 제거 과정을 거치는 일본 시료채취 방법을 적용한 압밀시험결과를 Fig. 3에 나타냈는데, 15m 이상의 심도에서도 과압밀비 1.0 정도를 보이는데 이를 통해서, Tanaka et al. (2001)은 심도가 깊어질수록 부산 점토 지반에서 과압밀비가 1.0 이하의 값을 나타내는 주요 원인은 시료 채취과정에서의 교란현상이 주된 원인 것으로 제시하였다.

또한, Chung et al.(2006)은 30m 이상의 심도에서 채취된 부산 점토 시료의 교란도가 good임에도 oedometer 시험결과, 선행압밀압력이 유효상재압보다 작은 상태, 즉, 과압밀비가 1.0 이하로 평가되는 것으로 제시하였다. 그러나, CPTU 데이터로 구한 30m 이상 심도의 선행압밀압력은 다소 과압밀 또는 정규압밀상태로 분석되어 시료의 교란효과를 최소화하기 위해서는 시료채취 기술의 향상과 더불어 피에조콘관입시험을 병행하도록 추천하였다.

3. 부산 점토의 압밀특성과 연계한 비배수전단강도 평가

3.1 실내시험결과 분석

흙의 물리적 특성 및 토질분류를 위해 실시된 액성한계, 소성한계와 입도분석시험은 각각 ASTM 4318(2000), ASTM D422(1990)과 ASTM D2487(2000)에 따라 수행하였으며, 액성한계시험은 Casagrande 방법을 적용하여 수행하였다.

CPTU시험은 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 10cm², 주면면적 150cm²의 ASTM에서 통용되고 있는 표준콘을 적용하였다. 이 때, 간극수압 측정을 위한 필터는 콘선단부 바로 뒤쪽에 위치하였다.

현장베인시험(FVT)은 로드와 지반과의 마찰이 거의 발생하지 않는 이중관식 베인(vane)으로 표준규격은 직경(D) 40mm, 높이 80mm, 두께 1mm이며, ASTM D 2578(2003) 규정에 따라 약 0.1°/sec(6°/min)의 회전속도로 시험을 실시하였다.

함수비, 액성한계, 소성지수의 평균값은 각각 63%, 68%, 41%이며, 점토의 평균 함유율은 35%로 통일분류법

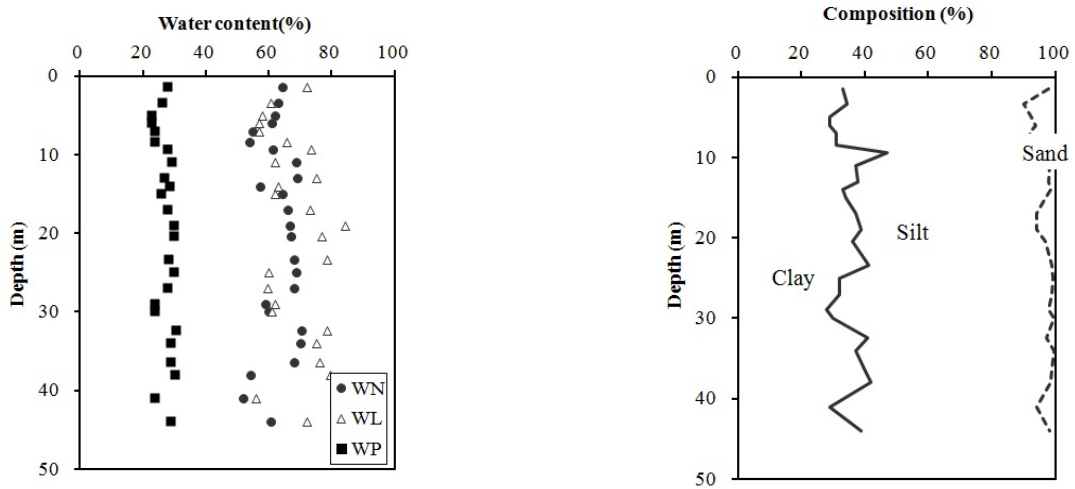


Fig. 4. Soil composition and index properties for Busan clay

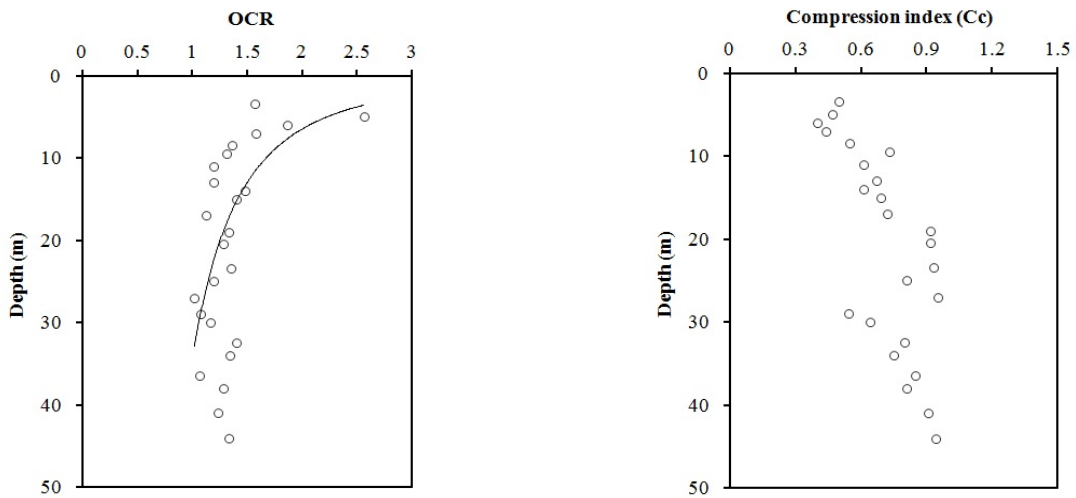


Fig. 5. OCRs and compression index for Busan clay

상 CL 내지는 CH로 분류되었다(Fig. 4 참조).

표준압밀시험결과에 의해 얻어진 과압밀비(OCR)는 약 7m 심도까지 1.9 정도를 나타내다가 심도가 깊어질수록 정규압밀상태인 1.0에 근접한 경향을 나타냈으며, 기존 연구자들에 의해 제시된 심도가 깊어질수록 과압밀비가 1.0 이하로 나타나는 현상은 발생되지 않았다. 또한, 압축지수 (Cc)의 평균은 0.72를 나타냈다(Fig. 5).

일축압축시험에 의한 심도에 따른 비배수전단강도 증가비는 1.5kPa/m 이며, 일축압축시험 중 시료 파괴시 평균 변형률도 5% 미만인 얻어져, 국내 해성 점성토 지반에서 불교란 시료 채취가 적절하게 이루어졌을 때 발생하는 파괴변형률인 4~5%에 해당되는 것으로 분석되었다(Fig. 5~6 참조).

심도가 깊어질수록 과압밀비(OCR)가 1.0 보다 작아지는 현상에 대해 하부층에서 발생하는 피압수로 인해 유효

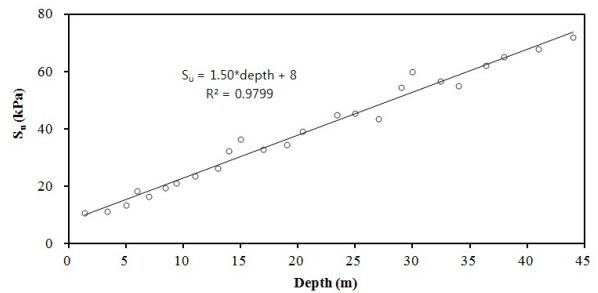


Fig. 6. Undrained shear strengths obtained from UC test for Busan clay

상재압이 감소되는 효과, 빙하기 이후 퇴적속도가 빠른 층이 형성되어 선행압밀압력이 작아지는 원인일 수 있지만, 이것 보다는 심도가 깊어질수록 시료 채취 시 발생하는 교란 현상으로 인해 선행압밀압력이 작아지는 주요 원인으로 언급되었다.

그러나, 금회 시험결과에서는 시료 채취 시 교란효과로

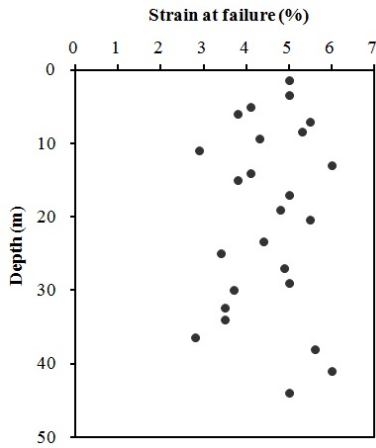


Fig. 7. Strain at failure of unconfined compression test for Busan clay

인해 발생하는 압밀 및 강도 특성이 최소화된 것으로 보이며, Chung et al.(2002)에 의해 제시된 10~30m 심도를 기준으로 상부와 하부 점토층의 물리 및 역학적 특성이 구분되는 현상도 나타나지 않았다.

3.2 CPTU data에 의한 압밀 및 강도 특성분석

Fig. 8의 CPTU 결과에 나타난 바와 같이, 심도에 따라 큰 저항치(q_t), 주변 마찰력(f_s) 및 과잉간극수압(u_a)이 대체로 일정한 기울기로 증가하는 경향을 나타냈으며, 점토층 하부의 배수층이 확인되기 전의 대략 28m 심도에서 종료된 Busan-A의 결과를 제외하고는 30~40m 전후의 심도에서 배수층을 확인한 후 피에조콘관삽시험을 종료하였다.

Bjerrum(1973)은 일반적으로 현장 원위치 점토는 여러 가지 복합적인 연대효과(aging effects)를 경험하게 되며, 이로 인해 유효상재압의 변화를 경험하지 않은 상태에서도 전단강도가 증가되는 현상이 발생하는 것으로 제시하였다.

Hanzawa et al.(1983)은 현장 원위치 점토 지반에서 화학적 결합(chemical bonding) 및 이차압축(secondary compression)의 상호작용으로 인해 발생 가능한 상황은 3가지 형태로 구분할 수 있는 것으로 제시하였다. 화학적 결합은

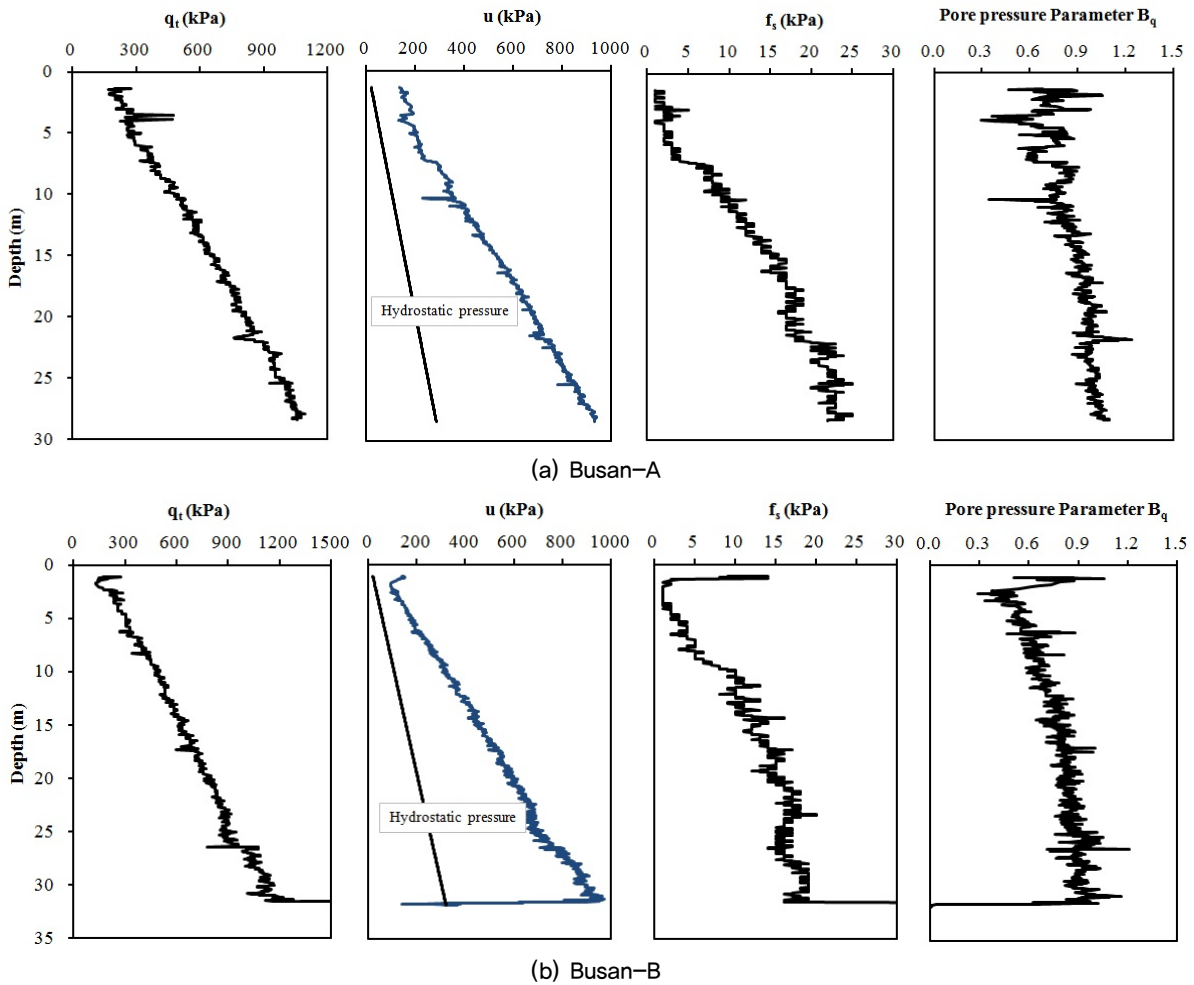
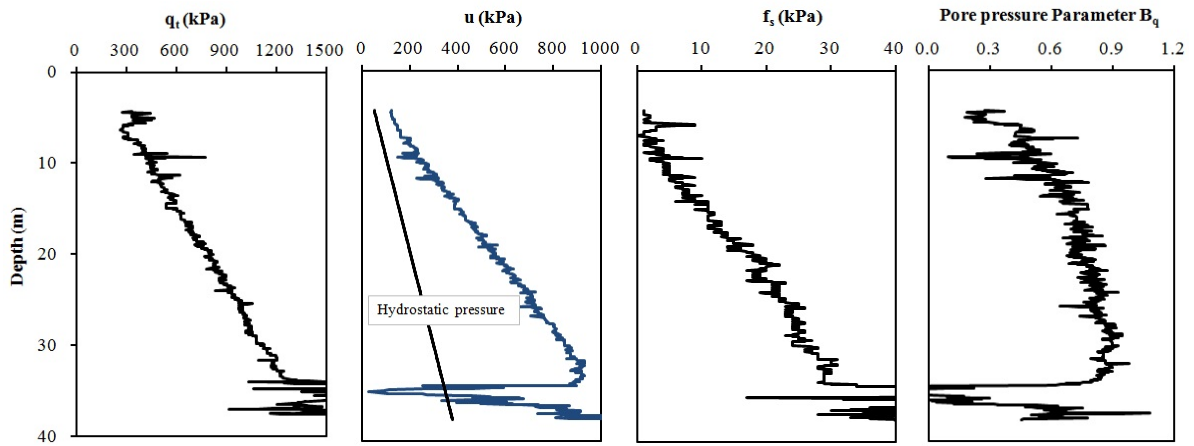
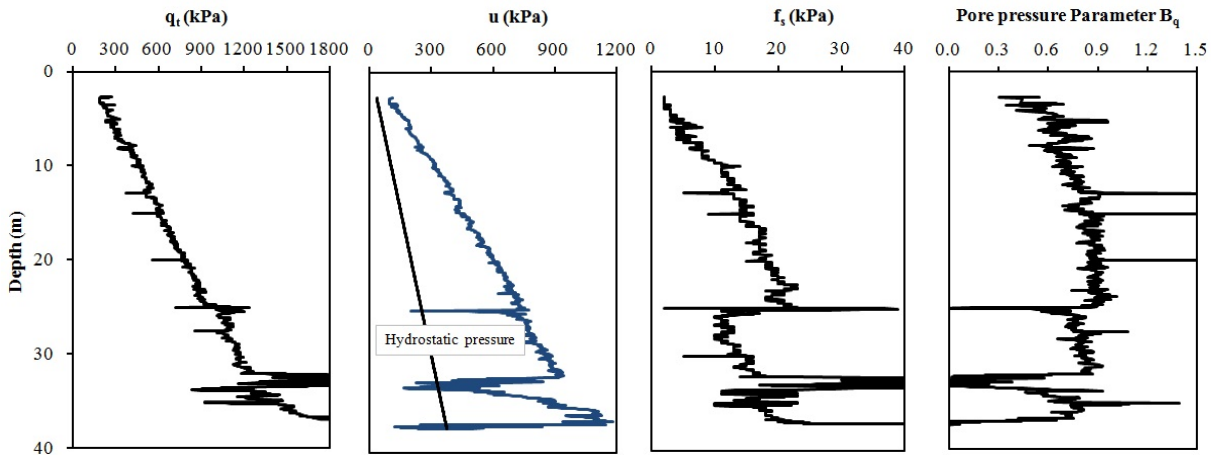


Fig. 8. Test results obtained from CPTU at Busan



(c) Busan-C



(d) Busan-D

Fig. 8. Test results obtained from CPTU at Busan (Continued)

입자들 사이의 광물 접촉점들의 냉간압접(冷間壓接, cold welding), 이온교환(exchange of cations) 및 고결작용(cementation)의 일반화된 용어이며(Bjerrum, 1967), 결합구조는 일정한 간극비(e)와 유효상재압(σ'_{vo})하에서 심도에 따라 달라지지 않는 일정한 값을 나타내게 된다.

1) Case A는 화학적 결합(chemical bonding)이 먼저 발생되고 그 다음에 이차압축(secondary compression)이 발생하는 상황, 2) Case B는 화학적 결합(chemical bonding)과 이차압축(secondary compression)이 동시에 발생하는 상황, 3) Case C는 이차압축(secondary compression)이 먼저 발생되고 화학적 결합(chemical bonding)이 그 다음에 발생하는 상황으로 구분할 수 있다. 화학적 결합(chemical bonding)에 의해 생성된 결합구조(bonding structure)로 인해 Case A에서 이차압축(secondary compression)의 발생이 방해된다. 그러나, 시간경과에 따라 이차압축(secondary compression)이 진행되면, 화학적 결합 작용에 의해 이미 생성된 흙 구조가 손상되는 원인이 될 수 있다. Case B의

발생기구(mechanism)은 근본적으로 Case A와 동일할 수 있는데, 이는 점토의 최종구조(final structure)가 두 인자 중에서 보다 더 강하게 영향을 끼치는 상황에 따라 달라질 수 있기 때문이다. Case C는 화학적 결합(chemical bonding)과 이차압축(secondary compression)의 두 가지 작용이 결합되어 형성된 구조를 의미한다. 그러나, 퇴적과정에서부터 현재에 이르기까지 지속적으로 이차압축(secondary compression)이 발생하는 상황을 고려하면, Case C가 존재할 가능성은 거의 없다. 이러한 내용을 기준으로 Case A, B, C에 대한 심도에 따른 압밀임계응력(σ_c)과 과압밀비(OCR)의 개념적 분포를 Fig. 9에 나타냈다. 이러한 작용을 경험한 점토의 현장 원위치 비배수전단강도(s_{ur})는 다음 식 (1)과 (2)로 표현될 수 있다. 식 (1)은 심도에 따라 선형적으로 비배수전단강도가 증가하는 정규압밀상태의 비배수전단강도(s_{un})외에 화학적 결합작용으로 인해 추가로 생성된 강도가 유효상재압의 크기에 관계없이 일정한 값을 나타내는 것을 의미한다. 식 (2)는 이차압축 현상으로 인해 압

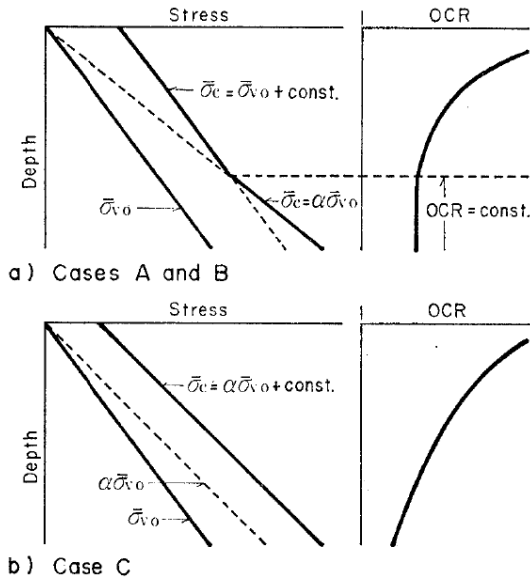


Fig. 9. Conceptual plot showing interaction of chemical bonding and secondary compression (Hanzawa et al., 1983)

밀압력이 증가하여 어느 심도에서 화학적 결합구조가 파괴되면 그 이후에는 유효상재압의 증가에 따라 일정한 비율로 정규압밀상태의 비배수전단강도가 증가하는 것을 의미한다.

$$s_{uf} = s_{un} + k_1 \text{ for chemical bonding} \quad (1)$$

$$s_{uf} = s_{un} \times k_2 \text{ for secondary compression} \quad (2)$$

Fig. 10의 일축압축시험(UCT) 및 현장배인시험(FVT)에 의한 비배수전단강도(s_u)는 $10 + 0.262\sigma'_{v0}$ 의 유효상재압과의 관계식으로 나타났다. 지표면에서 발휘되는 10kPa의 절편을 유지하면서, 유효상재압이 증가할수록 비배수전단강도(s_u)가 $0.26\sigma'_{v0}$ 만큼 증가하는 것으로 분석되었다. Hanzawa et al.(1983)이 제시한 개념을 적용하면, 부산점토 지반은 지표면에서부터 화학적 결합작용으로 인해 10kPa의 비배수전단강도가 유효상재압에 관계없이 발휘되며, 정규압밀상태의 강도증가율은 0.262이 된다. Tanaka et al.(2001)은 부산 점토 지반에서 수행된 일축압축시험 및 현장배인시험으로 얻어진 비배수전단강도와 선행압밀압력과의 상관관계를 이용하여 강도증가율 0.25를 제시하여 금회 결과와 유사한 경향을 나타냈다.

또한, Fig. 5의 표준압밀시험결과에서 7m 심도까지 과압밀비(OCR) 1.9 정도이며, 심도가 깊어질수록 정규압밀상태의 과압밀비(OCR) 1.0에 근접한 경향을 나타내어,

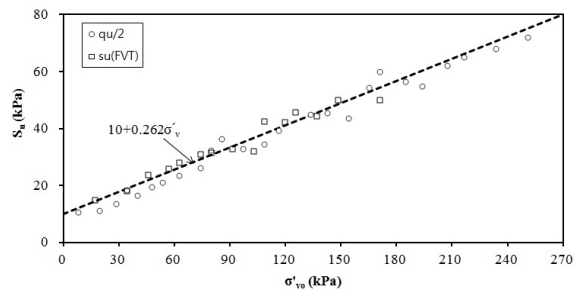


Fig. 10. Relation between undrained shear strength (s_u) and effective overburden pressure (σ'_{v0})

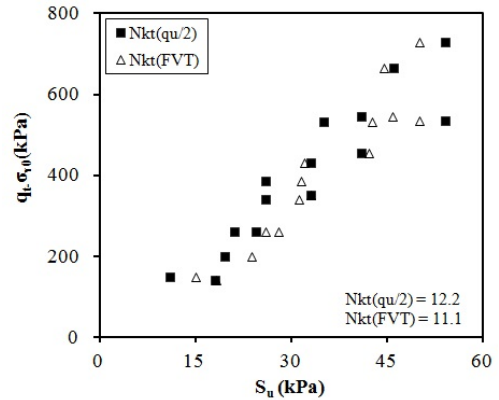


Fig. 11. N_{kt} using $s_{u(qu/2)}$ and $s_{u(FVT)}$ strengths for Busan clay

Hanzawa et al.(1983)이 제시한 바와 같이 압밀상태와 연계한 강도특성을 확인할 수 있었다. 다만, 어느 특정 심도 이상에서 이차압축 현상으로 인한 강도증가 현상은 나타나지 않았다.

Fig. 11은 일축압축시험 및 현장배인시험에 의한 비배수전단강도가 얻어진 심도에서의 유효콘저항치($q_t - \sigma'_{v0}$)와의 상관관계를 이용하여 구한 콘계수(N_{kt})의 변동폭이 크지 않은 것을 알 수 있다. 일축압축시험 및 현장배인시험에 의한 콘계수(N_{kt})는 각각 12.2, 11.1로 분석되어 두 시험방법에 의한 강도 편차가 거의 나타나지 않았다.

한편, Tanaka et al.(2001)은 부산점토 지반에서 수행된 현장배인시험(FVT)결과를 이용한 콘계수(N_{kt}) 10을, Chung et al.(2010)도 동일한 시험으로 구한 콘계수(N_{kt})가 7.13~13.06에서 분포하는 것으로 제시하였다.

Fig. 12는 CPTU 데이터의 유효콘저항치($q_t - \sigma'_{v0}$)를 콘계수(N_{kt})로 나눈 값, 즉, 비배수전단강도(s_u)와 유효상재압(σ'_{v0})과의 관계를 나타내고 있다. 4개소의 CPTU 데이터의 콘계수(N_{kt})는 11.5~13 사이의 값이 얻어졌는데, 이 값은 일축압축시험 및 현장배인시험으로 구한 비배수전단강도 식 $10 + 0.262\sigma'_{v0}$ 와 유사한 경향이 얻어지도록 역계산으로 구한 값이며, 절편값도 8~9kPa이 얻어졌다. 한편, 유효상

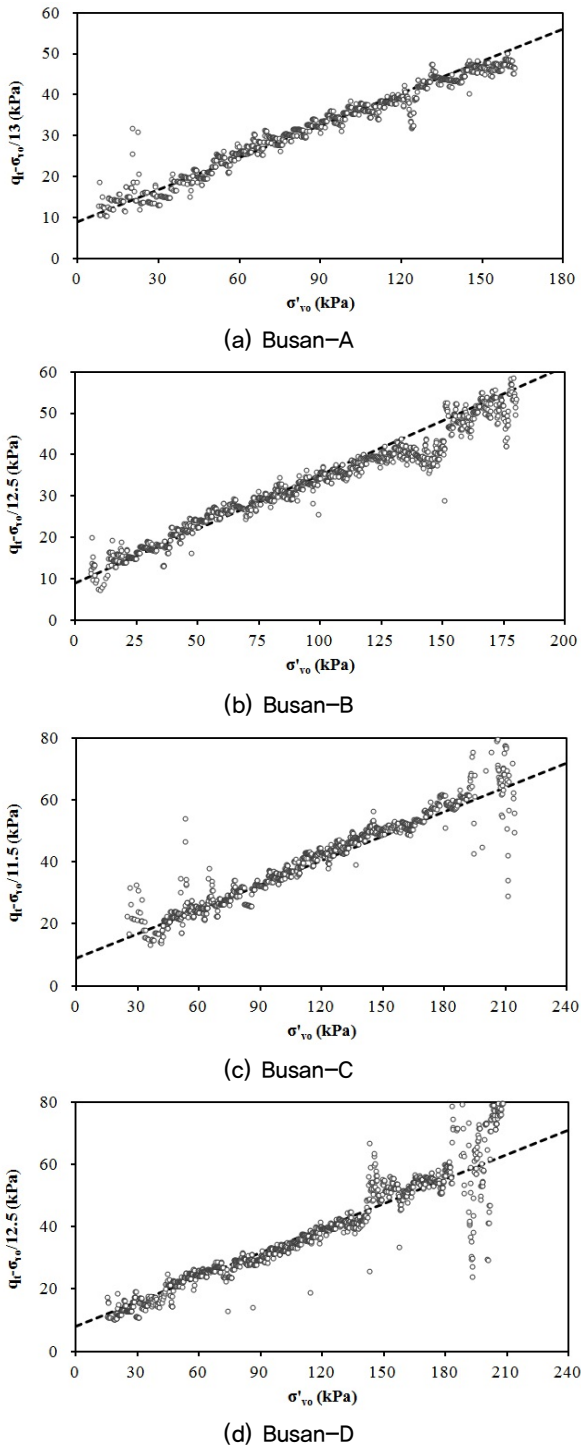


Fig. 12. Net cone resistance $q_c - \sigma'_{v0}$ versus effective vertical stress (σ'_{v0})

재압이 높은 영역에서 점선으로 표시한 비배수전단강도선 상으로부터 벗어난 원인은 관입시험 종료지점 근처에서 사질토층의 출현에 의한 것이며, 해당심도의 과잉간극수압이 정수압이하로 떨어지는 것을 통해서도 확인할 수 있다(Fig. 8 참조).

본 연구의 대상인 부산 신항 점토 지반에서 유효상재압

이 거의 없는 지표면에서 유사 과압밀 경향과 연계한 비배수전단강도가 발휘되는 현상에 대해 심도에 따른 연속적인 데이터를 얻을 수 있는 CPTU 결과를 통해서도 확인할 수 있었다.

한편, Ryu et al.(2011)에 따르면, 낙동강 삼각주 일대에서 제4기 후기 해수면 변동에 따른 퇴적환경 변화가 발생된 것으로 제시되었는데, 이러한 고대 환경 변화로 인해 지표면에 가까운 위치에서 화학적 결합 작용에 의한 유사 과압밀 경향이 발생되었는지에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 부산 신항의 CPTU, 현장베인시험(FVT) 및 실내시험결과를 이용하여 지반의 압밀상태와 연계한 강도특성을 분석하였으며 주요 내용은 다음과 같다.

- (1) 일축압축시험(UCT) 및 현장베인시험(FVT)에 의한 비배수전단강도(s_u)와 유효상재압과의 상관관계식 $10 + 0.262\sigma'_{v0}$ (kPa)이 얻어졌다. 또한, 7m 심도까지 과압밀비(OCR) 1.9 정도이며, 심도가 깊어질수록 정규압밀상태의 과압밀비(OCR) 1.0에 근접한 경향을 나타냈다. 이에 대해, Hanzawa et al.(1983)이 제시한 개념을 적용하면, 부산점토 지반은 지표면에서부터 화학적 결합작용의 연대효과(aging effect)로 인해 10kPa의 비배수전단강도가 유효상재압에 관계없이 발휘되며, 정규압밀상태의 강도증가율은 0.262이 된다.
- (2) 유효상재압이 거의 없는 지표면에서 유사 과압밀 현상과 연계한 비배수전단강도가 발휘되는 현상에 대해 심도에 따른 연속적인 데이터를 얻을 수 있는 피에조콘관입시험을 통해서 보다 신뢰성 있게 확인할 수 있었다. 기존 연구에 따르면 낙동강 삼각주 일대에서 제4기 후기 해수면 변동에 따른 퇴적환경 변화가 발생된 것으로 제시되었는데, 이러한 고대 환경 변화로 인해 지표면에 가까운 위치에서 화학적 결합 작용에 의한 유사 과압밀 경향이 발생되었는지에 대해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

1. ASTM D422 (1990), "Standard test method for particle-size

- analysis of soils”, ASTM International, West Conshohocken, PA.
2. ASTM D2487 (2000), “Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)”, ASTM International, West Conshohocken, PA.
 3. ASTM D4318 (2000), “Standard test methods for liquid limit, plastic limit and plasticity index of soils”, ASTM International, West Conshohocken, PA.
 4. ASTM D2166 (2003), “Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil”, ASTM International, West Conshohocken, PA.
 5. ASTM D2578 (2003), “Standard test method for field vane shear test in cohesive soil”, ASTM International, West Conshohocken, PA.
 6. ASTM D5778 (2003), “Standard test method for electronic friction cone piezocone penetration testing of soils”, ASTM International, West Conshohocken, PA.
 7. Bjerrum, L. (1967), “Engineering geology of Norwegian normally consolidated marine clay as related to settlements of buildings”, 7th Rankine lecture, *Geotechnique*, Vol.17.
 8. Bjerrum, L. (1973), “Problems of soil mechanics and construction on soft clays and structurally unstable soils”, General report, 8th ICSMFE, Vol.3, pp.111-159.
 9. Chung, S. G., Gao, P. H., Kim, G. J. and Leroueil, S. (2002), “Geotechnical properties of Pusan clay”, *Canadian geotechnical journal*, Vol.39, pp.1050-1060.
 10. Chung, S. G., Kwag, J. M., Gao, P. H., Back, S. H. and Prasad, K. N. (2004), “A study of soil disturbance of Pusan clays with reference to drilling, sampling and extruding”, *Geotechnique*, Vol.54, No.1, pp.61-65.
 11. Chung, S. G. (2005), “Sampling techniques and their effects in characterizing of Pusan clay”, *Proceedings of international conference on civil and environmental engineering, ICCEE-2005, Higashi-Hiroshima, Hiroshima University, Japan*.
 12. Chung, S. G., Jang, W. Y., Ninjarav, E. and Ryu, C. K. (2006), “Compressibility characteristics associated with depositional environment of Pusan clay in the Nakdong River Estuary”, *Journal of Korean geotechnical society*, Vol.22, No.12, pp. 57-65.
 13. Chung, S. G., Jang, W. Y. and Lee, J. M. (2010), “Correlations between CPT and FVT results for Busan clay”, *Marine georesources and geotechnology*, Vol.28, No.1, pp.49-63.
 14. Chung, S. G., Ryu, C. K., Min, S. C., Lee, J. M., Hong, Y. P. and Odgerel, E. (2012), “Geotechnical characterization of Busan clay”, *KSCE Journal of civil engineering*, Vol.16, No.3, pp.341-350.
 15. Fukasawa, T., Mizukami, J. and Kusakabe, O. (2004), “Applicability of CPT for construction control of seawall on soft clay improved by sand drain method”, *Soils and Foundations*, Vol.44, No.2, pp.127-138.
 16. Hanzawa, H. and Adachi. K. (1983), “Overconsolidation of alluvial clays”, *Soils and Foundations*, Vol.23, No.4, pp.106-118.
 17. Jeong, S. G. (2015), “Mechanical characteristics of dredged and reclaimed ground with low plasticity from western coastal site”, *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol.14, No.4, pp.97-104.
 18. Kim, J. H. (2017), “Evaluation on partially drained strength of silty soil with low plasticity using CPTU data”, *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol.16, No.2, pp.55-66.
 19. Leroulie, S., Tavenas, F., Mieussens, C. and Peignaud, M. (1978), “Construction pore pressures in clay foundations under embankments, part II: general behavior, *Canadian geotechnical journal*, Vol.15, No.1, pp.66-82.
 20. Leroulie, S. (1996), “Compressibility of clays: fundamental and practical aspects”, *ASCE Journal of geotechnical engineering*, Vol.122, No.7, pp.534-543.
 21. Morin, P., Leroulie, S. and Samson, L. (1983), “Preconsolidation pressure of Champlain clays. part I : In-situ determination”, *Canadian geotechnical journal*, Vol.20, No.4, pp.782-802.
 22. Ryu, C. K., Kang, S. R., Chung, S. G. and Jeon, Y. M. (2011), “Late quaternary depositional environmental change in the northern marginal area of the Nakdong River delta, Korea”, *Journal of the geological society of Korea*, Vol.47, No.3, pp. 213-233.
 23. Tanaka. Y. and Sakagami, T. (1989), “Piezocone testing in underconsolidated clay”, *Canadian geotechnical journal*, Vol.26, pp.563-567.
 24. Tanaka, H. and Tanaka, M. (1999), “Key factors governing sample quality”, *Proc. Int. Symp. on characterization of soft marine clays*, Tsuchida and Nakase(eds), Yokosuka, Balkema, pp.57-82.
 25. Tanaka, H., Mishima, O., Tanaka, M., Park, S. Z., Jeong, G. H. and Locat, J. (2001), “Characterization of Yangsan clay, Pusan, Korea ”, *Soils and Foundations*, Japanese geotechnical society, Vol.42, No.2, pp.89-104.