

국내 해성점토 지반에 대한 선행압밀압력 평가방법의 적용성

Applicability of Preconsolidation Pressure Interpretations of Korean Marine Clays

정상국^{1*}

Sang-Guk Jeong^{1*}

¹Member, Professor, Department of Civil Engineering, Songwon University, 73 Songam-ro, Nam-gu, Gwangju, 61756, Korea

ABSTRACT

In this study, a subjective weighting factors were awarded based on some indication of the difficulty of assessing the preconsolidation stress using traditional methods (Casagrande, Onitsuka et al., Silva, Becker et al., Janbu and Karlsrud methods) such as those proposed by Casagrande and Janbu using undisturbed sample obtained from Gwangyang dredged clay with high plasticity located in the southern area of Korean peninsular. These numbers only assess the relative ease of finding preconsolidation stress and say nothing regarding the accuracy of the value. The data were compared with measurements of undrained shear strength using strength incremental ratio, checking where or not the values are in the range of 0.25 to 0.35 (typical values of Korean marine clay) and analyzing standard deviation(degree of variability). The measurements of undrained shear strength were obtained from unconfined compression tests (UCT). When determining preconsolidation stress of Korean marine clay, at first, the work method proposed by Becker et al. and the bilogarithmic method proposed by Onitsuka et al. should be used. In addition, preconsolidation pressure should be estimated using the traditional Casagrande method as a basic of comparison.

요 지

본 연구에서는 고소성 점토지반으로 구성된 광양지역의 준설패립층 및 원지반층에서 채취된 자연 시료를 이용하여 기존에 제안된 6가지 방법(Casagrande, Onitsuka, Silva, Becker, Janbu, Karlsrud)으로 선행압밀압력을 산정하는데 있어서 상대적용이성을 기준으로 5등급의 가중치 점수를 부여 하였다. 이 때, 높은 등급이 부여된다는 것이 곧바로 정확한 선행압밀압력의 산정을 의미하는 것은 아니므로, 불교란 시료에 의한 일축압축강도를 구한 후 압밀압력과 상관관계를 나타내는 강도증가율을 평가하였다. 이를 토대로, 각각의 방법으로 평가된 선행압밀압력과 비배수전단강도의 비, 즉, 강도증가율이 국내 해성 점성토 지반의 일반적인 값의 범위인 0.25~0.35 사이의 분포 유무 및 표준편차(강도증가율의 변화폭)를 분석하여 적용성을 평가하였다. 그 결과, Becker 및 Onitsuka 방법의 평균 가중치가 다른 방법들(Casagrande, Janbu, Karlsrud)에 비해 낮고 강도증가율도 국내 해성점토 지반의 일반적인 값의 범위에 있으며, 표준편차도 낮게 평가되어 일관성 있는 평가가 가능한 것으로 분석되었다.

Keywords : Preconsolidation stress, Weighting factor, Strength incremental ratio, Dredged clay

1. 서 론

흙의 응력이력 및 변형특성에 대한 평가는 일반적으로

표준압밀시험결과를 통해서 이루어지며, 각 하중단계별로 재하기간 동안의 응력-변형률 곡선을 분석하여 선행압밀압력(p')을 평가하게 된다. 현재까지 선행압밀압력(p') 산정 시 Casagrande(1936)와 Janbu(1969)방법 등이 가장 많이 적용되어 왔는데, 이러한 방법들은 선행압밀압력(p')에 가까운 응력상태에 도달하게 되면, 흙 시료의 강성 반응(stiffness response)이 크게 변한다는 가정에 기초를 두

Received 10 Nov. 2017, Revised 4 Dec. 2017, Accepted 5 Dec. 2017

*Corresponding author

Tel: +82-62-360-5911; Fax: +82-62-671-5952

E-mail address: jungsg@songwon.ac.kr (S. G.Jeong)

고 있다. 즉, 선행압밀압력(p'_c)보다 낮은 응력이 재하되면 상대적으로 경화 반응(stiff response)을, 선행압밀압력(p'_c)보다 높은 응력이 재하될수록 연화반응(soft response)을 나타내게 된다. 이러한 이유로, 체적변화계수(m_v)의 역수로 표현되는 구속탄성계수(M)는 선행압밀압력(p'_c)근처에서 크게 감소하다가 그 이후에 재하응력이 증가할수록 선형적으로 증가하는 경향을 나타내므로, 이를 통해 선행압밀압력(p'_c)을 산정하게 된다.

그러나, 표준압밀링 내의 시료가 상당히 교란된 경우에는 재하응력이 낮은 경우에도 연화 반응(soft response)을 나타내므로, 선행압밀압력(p'_c) 전후의 구속탄성계수(M)의 급격한 변화가 발생되지 않게 된다. 따라서, 이러한 경우에 흙의 선행압밀압력(p'_c)을 평가하는 것은 매우 어렵게 되며, 흙의 교란 효과로 인해 현장 원위치에서 발휘되는 흙의 강성(soil stiffness)보다 매우 작은 구속탄성계수(M)가 얻어지게 된다. 한편, Casagrande(1936)방법으로 선행압밀압력(p'_c)을 평가할 때에도 먼저 e-logP 곡선상에서 최소곡률반경의 위치를 결정하여야 하지만 채취된 시료의 교란 현상이 크게 발생된 경우에는 명확한 변곡점이 파악되지 못하여 선행압밀압력(p'_c)을 평가하기 어렵게 된다.

고소성 점토지반으로 구성된 원지반으로부터 펌프 준설되는 토사의 함수비는 약 1000% 전후이며(Yano, 1985), 침강 및 자중압밀이 진행된다 하더라도 건조고결(desiccation) 작용을 경험하게 되는 표층부를 제외하고는 100% 전후의 고함수비 상태에 놓이게 된다. 이와 같은 고함수비 상태의 준설매립 점토지반은 매우 연약한 상태인 경우가 대부분이므로 시료 채취시 교란 현상이 발생된다. 이러한 상태에서 표준압밀시험을 수행하게 되면, 시료의 교란 효과로 인해 과압밀 및 정규압밀 영역을 구분할 수 있는 변곡점이 나타나지 않아 선행압밀압력(p'_c)을 결정하기 어려운 상황이 발생되게 된다. 따라서, 일정한 방치기간이 경과된 준설매립 점토지반과 그 하부에 놓인 원지반 점토의 현장 원위치 응력 상태를 합리적으로 파악하기 곤란하게 된다.

본 연구에서는 고소성 점토지반으로 구성된 광양지역의 준설매립층 및 원지반층에서 채취된 자연 시료를 이용하여 각각 38회(총76회) 수행된 표준압밀시험결과를 이용하여 Casagrande(1936)방법 외에 5가지(Onitsuka et al.(1995), Silva(1970), Becker et al.(1987), Janbu(1969), Karlsru(1991) 방법)를 추가하여 총 6가지 방법으로 선행압밀압력을 결정하였다.

이때, Grozic(2003) 등의 연구와 유사하게 평가자의 주

관적인 관점에서 선행압밀압력 결정에 있어서 상대적인 용이성을 기준으로 각각의 평가방법에 대해 1부터 5까지의 등급 부여방식으로 적용성을 평가하였다. 높은 등급이 부여된다는 것이 곧바로 정확한 선행압밀압력(p'_c)의 산정을 의미하는 것은 아니므로, 채취된 자연 시료를 이용하여 일축압축시험(UCT)을 수행하여 비배수전단강도(s_u)를 산정한 후 압밀압력과 상관관계를 나타내는 강도증가율(s_u/p'_c)을 평가하였다. 이를 토대로, 각각의 방법으로 산정된 선행압밀압력(p'_c)과 비배수전단강도(s_u)와의 비인 강도증가율이 국내 해성 점성토 지반의 일반적인 값의 범위인 0.25~0.35 내에 분포하는지를 기준으로 적용성을 평가하였다.

2. 준설매립 점토지반의 선행압밀압력 평가

압밀곡선 상에서 선행압밀압력 결정의 용이성을 기준으로 등급을 부여할 때, 1등급은 압밀곡선상에서 변곡점이 아주 명확한 경우, 2등급은 변곡점이 명확한 경우, 3등급은 변곡점의 파악이 다소 어려운 경우, 4등급은 변곡점의 파악이 어려운 경우 그리고 5등급은 변곡점의 파악이 매우 어려운 경우로 구분하였다.

본 연구는 현장 원위치에서 채취된 자연 시료를 이용해서 수행되었으므로, 재성형 시료를 이용한 재하(load)-제하(unloading)-재재하(reloading)표준압밀시험으로 선행압밀압력을 이미 알고 있는 상태에서, 각각의 방법에 대한 직접적인 비교 분석방법을 적용할 수 없었다.

따라서, 현장 원위치에서 채취된 불교란 자연 시료를 이용해서 비배수 전단강도를 평가한 후, 각각의 방법으로 결정된 선행압밀압력과 상관관계, 즉, 강도 증가율(s_u/p'_c)의 국내 해성 점성토 지반의 일반적인 값인 0.25~0.35 사이의 분포 유무 및 표준편차를 분석하여 간접적인 방법으로 적용성을 평가하였다. 총 76회의 표준압밀시험결과 중 준설매립 점토층 및 원지반층에 대한 전반적인 경향을 파악할 수 있는 시험결과를 이용하여 각각의 방법들에 대한 적용성 분석 내용을 기술하도록 한다(Kim, 2017a, b).

Fig. 1(a)에 나타난 바와 같이, Casagrande 방법으로 선행압밀압력을 구하기 위한 최소곡률반경 위치의 결정이 매우 어려운 것을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 준설매립층과 같이 유효상재압 보다 작은 압밀압력, 즉, 미압밀 특성의 지반조건에서 나타나는 현상이다. 따라서, 과압밀 및 정규압밀 영역을 구분하기 어려워 선행압밀압력 결정에

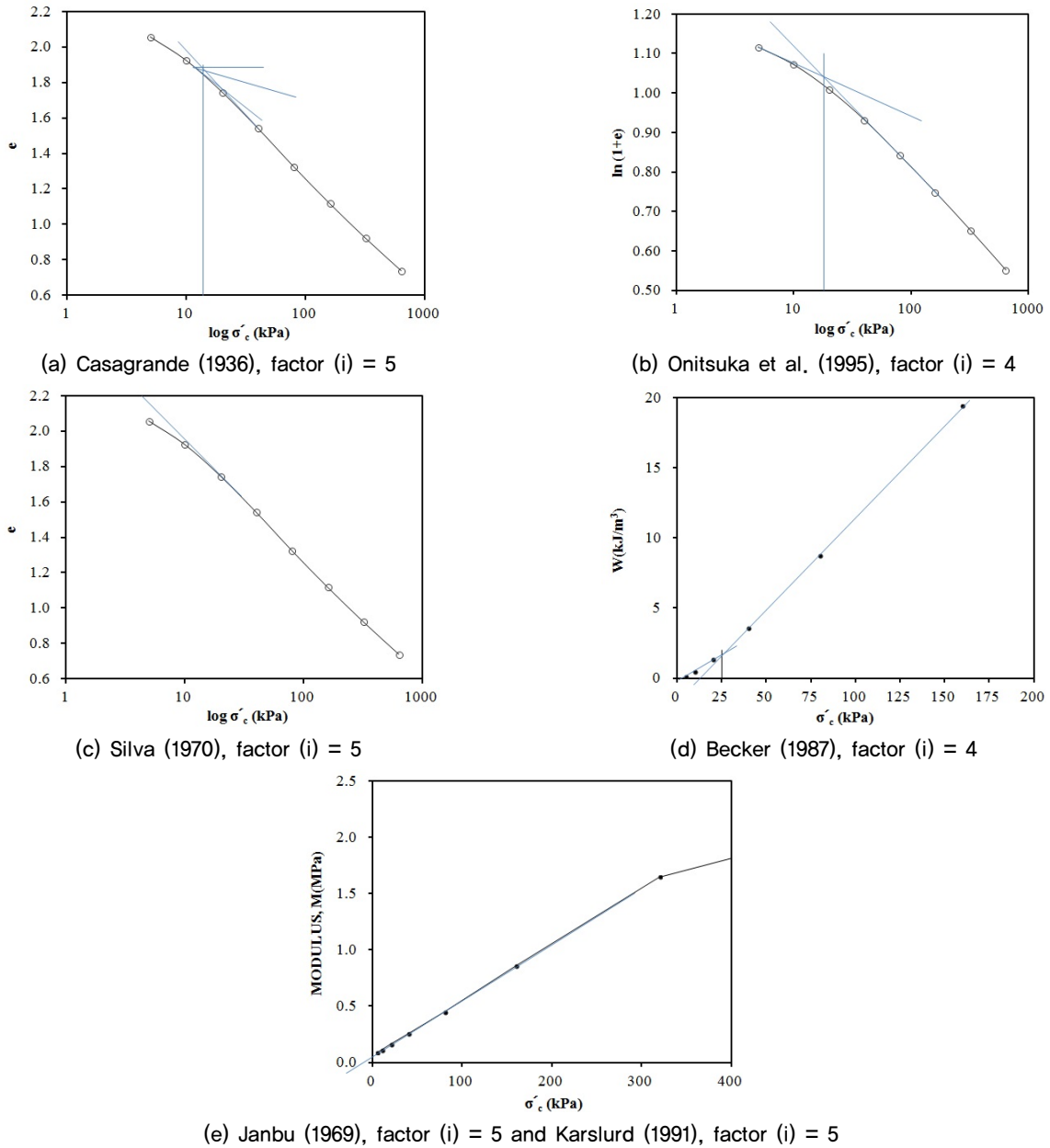


Fig. 1. Interpretation of p'_c , with subjective weighting factor indicating ease of interpretation (dredged clay layer, depth 3.4 m)

있어서 설계자의 주관적인 판단이 반영될 수 밖에 없으며, 가중치 5가 부여되었다. 총 76개소의 표준압밀시험결과 중에서 약 50%의 데이터(34개소)가 가장 낮은 가중치 5가 부여된 결과로 인해 전체 평균 가중치 3.9가 얻어져 선행 압밀압력을 결정하기 가장 어려운 것으로 분석되었다.

한편, 간극비 및 압밀압력의 양축에 로그좌표를 취하는 Onitsuka(1995)방법은 과압밀 영역에서 간극비 변화가 매우 작게 표현되므로, 다른 방법들과 비교할 때 선행압밀하중 산정에 있어서 설계자의 주관적 판단을 최소화 할 수 있으며, 비교적 쉽게 선행압밀하중을 산정할 수 있는 방법

이다. Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이, 압밀곡선상에서 과압밀 및 정규압밀 영역의 직선부분 교점의 파악이 어려워져서 가중치 4가 부여되었지만, Casagrande 방법보다는 적용성이 높은 것을 알 수 있다. 총 76개소의 표준압밀시험결과 중에서 약 15%의 데이터(11개소)가 가장 낮은 가중치 5가 부여되었고, 전체 평균 가중치 3.2가 얻어져 Casagrande 방법보다 쉽게 선행압밀압력을 결정할 수 있는 것을 알 수 있다.

Clementino(2005)의 연구결과에 따르면, 재성형 시료에 의해 재하-제하-재제하의 방법에 의해 얻어진 선행압밀압

Table 1. Summary of average weighting factor, i_{ave} for each method

Ground condition	Casagrande ($p'_{c(C)}, i_{ave}$)	Onitsuka ($p'_{c(O)}, i_{ave}$)	Silva ($p'_{c(S)}, i_{ave}$)	Becker ($p'_{c(B)}, i_{ave}$)	Janbu ($p'_{c(J)}, i_{ave}$)	Karlsrud ($p'_{c(K)}, i_{ave}$)
dredged+original	3.9	3.2	2.9	2.9	3.8	3.4
original	3.3	2.7	2.1	2.4	3.5	3.0

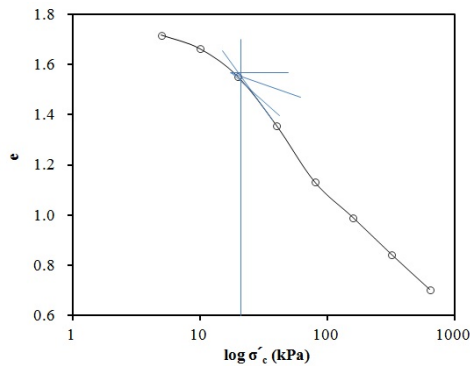
력의 실제값과 Silva(1970)으로 구한 값은 1~3% 이내의 오차를 나타내며, 평가자에 따른 주관적인 판단을 최소화시킬 수 있는 것으로 제시하였다. 이에 반해, Grozic et al. (2005)은 명확한 변곡점이 구분되지 않는 원만한 둥근 형태(more rounded plot)의 압밀곡선을 나타내는 매우 과압밀된 자연 시료를 이용하여 Silva(1970)방법을 적용한 결과, 처녀 압축 곡선에 접하는 선을 긋는 방법에 따라 3~55% 사이의 변동폭이 발생되어 평가자에 따른 주관적 판단이 개입될 여지가 많은 것으로 제시하였다. Silva(1970) 방법은 초기간극비(e_0)로부터 압밀압력축에 평행한 수평선과 처녀압축곡선에 접하는 연장선과의 교점으로부터 압밀곡선상에 수직선을 연결한다. 그리고, 압밀곡선상의 교점으로부터 처녀압축곡선에 접하는 연장선과 만나는 위치를 선행압밀압력으로 결정하게 된다. 그러나, 위의 두 방법과 동일한 시험결과를 이용하여 나타낸 Fig. 1(c)와 같이, 준설매립 점토층으로 채취된 자연시료의 함수비가 120%의 초연약 상태에 놓여 있어서 낮은 압밀압력이 작용된 상태에서도 변형(간극비 변화)이 크게 발생되었다. 이로 인해, 처녀압축곡선의 접선의 연장선과 초기간극비의 수평선과의 교점으로부터 내린 수직선이 압밀곡선과 만나지 않는 현상을 초래하였다. Onitsuka(1995)방법과 동일하게 총 76개소의 표준압밀시험결과 중에서 약 15%의 데이터(11개소)가 가장 낮은 가중치 5가 부여되었고, 전체 평균 가중치 2.9가 얻어져 금회 적용된 6가지 중에서 선행압밀압력 평가에 있어서 가장 쉬운 방법 중의 하나에 해당되는 것으로 분석되었다. 그러나, 앞에서 언급한 원인으로 인해, 약 7%의 데이터(5개소)에서 선행압밀압력을 평가할 수 없었으며, 가중치 4, 5의 시험결과에서는 다른 방법(Casagrande, Onitsuka, Becker)으로 평가한 선행압밀압력보다 약 50% 작게 평가되었다. 이러한 경향은 고함수비 상태의 준설매립 점토층에서 두드러지게 나타났다.

또한, Fig. 2(c)에서와 같이, 압밀압력 80kPa 이후로 오목한(concave)형태의 압밀곡선을 나타내어 어느 위치에서 처녀압축곡선에 접하는 연장선을 표현할 것인지에 따른 주관적인 판단이 개입되므로 가중치 3이 부여되었다.

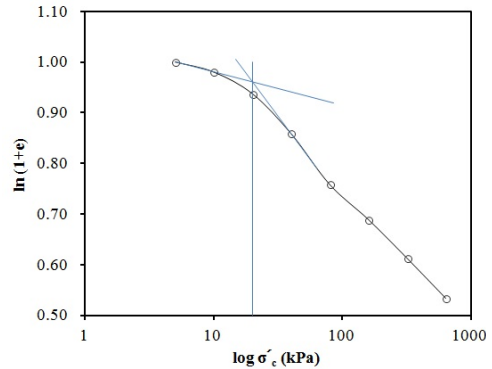
한편, Table 1에 나타낸 바와 같이, 준설매립 점토층을 제외한 원지반 점토층만을 고려해서 각각의 방법에 대한 평균 가중치(i_{ave})를 구한 결과, Silva 방법에서 2.1이 얻어져 가장 쉬운 방법으로 분석되었다. 그러나, 선행압밀압력을 결정하는데 있어서 상대적인 용이함이 실제값에 가까운 결과를 도출한다는 의미는 아니므로 이에 대해 강도증가율과 연계해서 후술하도록 한다.

Fig. 1(d)에 나타낸 바와 같이, Becker(1987)방법을 적용했을 때, 전 항복선(pre-yield line)과 후 항복선(post-yield line)의 교점으로 선행압밀압력의 파악이 어려워 가중치 4가 부여되었다. Onitsuka(1995) 방법과 동일하게 Casagrande(1936)방법보다는 적용성이 높은 것을 알 수 있다. 한편, Becker(1987)는 높은 압밀압력(약 1200kPa 이상)의 재하로 인해 압밀링 밖으로 점토가 분출되는 현상(flow or squeezing out)으로 변형에너지가 크게 산정되어, 정규압밀 영역에서의 직선을 제대로 표현하지 못하는 경우가 발생될 수 있다. 이러한 경우에는, 높은 압밀압력에서 얻어진 값을 제외한 후, 두 교점을 산정하도록 추천하고 있다. 이에 반해, Fig. 2(d)에 나타낸 바와 같이, 압밀압력 160kPa 이후에 변형 에너지의 증가율이 둔화되어 후 항복선(post-yield)에서 벗어나 있는 것을 알 수 있다. 정규압밀 영역의 모든 데이터를 포함해서 후 항복선(post-yield)을 표현할지에 따른 주관적인 판단이 개입되므로 가중치 3이 부여되었다. Onitsuka(1995) 및 Silva(1970)방법과 동일하게 총 76개소의 표준압밀시험결과 중에서 약 15%의 데이터(11개소)가 가장 낮은 가중치 5가 부여되었고, 전체 평균 가중치 2.9가 얻어져 Onitsuka(1995)방법과 동일하게 금회 적용된 6가지 중에서 선행압밀압력 평가에 있어서 가장 쉬운 방법 중의 하나에 해당되는 것으로 분석되었다.

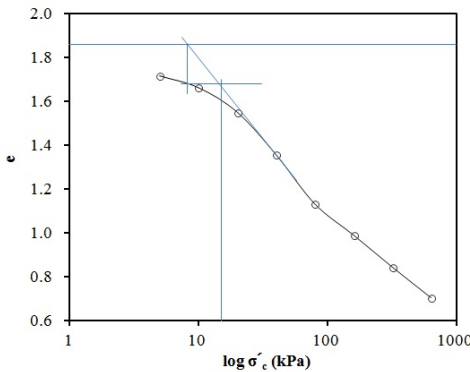
한편, Janbu(1969)방법은 평균 가중치 3.8이 얻어져 Casagrande 방법 (평균 가중치 3.9)과 거의 동일하게 선행압밀압력을 구하기에 가장 어려운 방법 중의 하나로 분석되었다. 총 76개소의 표준압밀시험결과 중에서 약 45%의 데이터(34개소)가 가장 낮은 가중치 5가 부여되어 이러한 상황을 뒷받침하는 것으로 파악되었다. Fig. 1(e)에 나타낸



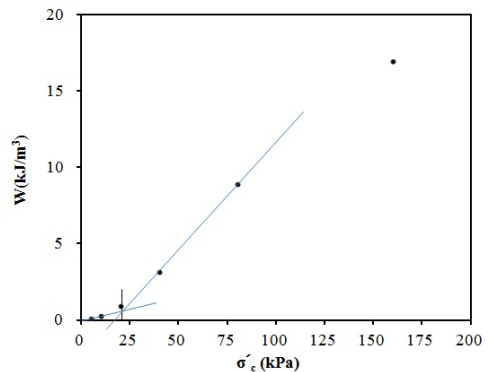
(a) Casagrande (1936), factor (i) = 5



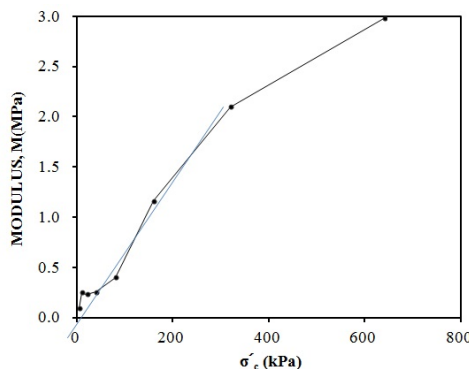
(b) Onitsuka et al. (1995), factor (i) = 4



(c) Silva (1970), factor (i) = 3



(d) Becker (1987), factor (i) = 3



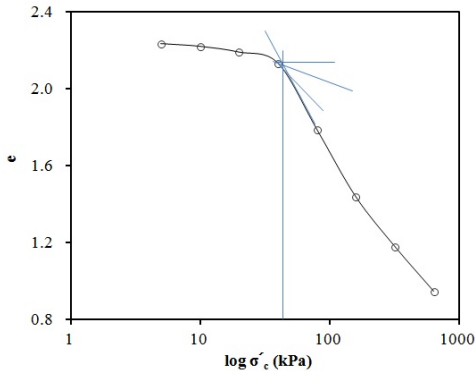
(e) Janbu (1969), factor (i) = 5 and Karlsrud (1991), factor (i) = 4

Fig. 2. Interpretation of p'_c , with subjective weighting factor indicating ease of interpretation (dredged clay layer, depth 3.4 m)

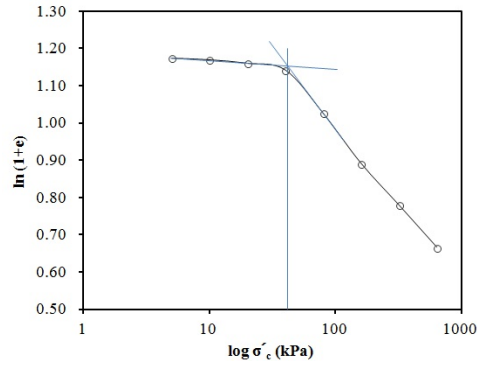
바와 같이, 해당 심도의 평균 함수비는 120% 전후로 매우 연약한 상태에 놓여 있어 시료 채취 시 교란 현상이 발생된 원인으로 인해 과압밀 영역에서의 구속탄성계수가 매우 작은 값을 나타냈다. 이러한 원인으로 인해 선형압밀압력 전후에서의 구속탄성계수의 저점이 발생되지 않고 단순히 압밀압력에 따라 구속탄성계수가 선형적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 이러한 경우가 Janbu 방법을 적용하기 가장 어려운 상황에 해당된다. 또한, Fig. 2(e)의 경우에는 어느 위치에서 구속탄성계수(M)의 저점으로 결정해야 될지에 대해 상당히 모호한 상황이 발생된다.

따라서, 이러한 모호한 점을 개선하기 위해 Karlsrud (1991)는 구속탄성계수가 과압밀영역에서 저점을 지나 정규압밀영역에서 선형적으로 증가되는 지점에서 정규압밀영역의 구속탄성계수선과 만나는 접선을 그어 압밀압력축과 만나는 교점의 응력으로부터 구속탄성계수가 증가하는 지점까지의 압밀압력의 평균값을 선형압밀압력으로 결정하도록 제안하였다.

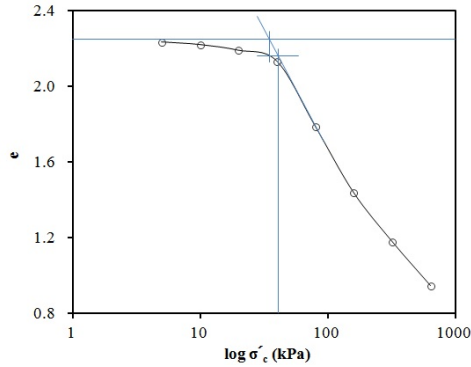
Karlsrud(1991)방법을 적용했을 때, 총 76개소의 표준 압밀시험 데이터 중 16개소의 데이터가 가장 낮은 가중치 5가 부여되어 Janbu(1969)방법에 비해 50% 이하(34 개소)



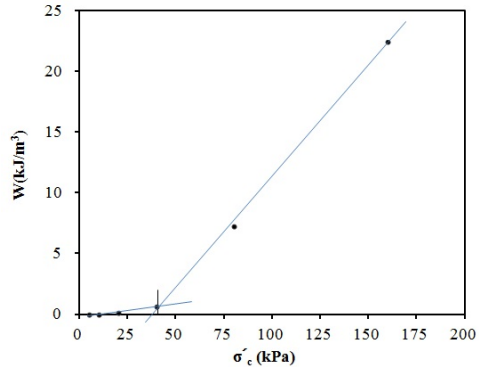
(a) Casagrande (1936), factor (i) = 2 ($p'_c=44$ kPa)



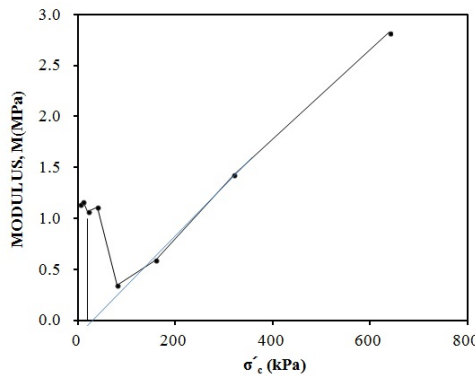
(b) Onitsuka et al. (1995), factor (i) = 1 ($p'_c=42$ kPa)



(c) Silva (1970), factor (i) = 1 ($p'_c=41$ kPa)



(d) Becker (1987), factor (i) = 1 ($p'_c=41$ kPa)



(e) Janbu, factor (i) = 2 ($p'_c=80$ kPa) and Karlsrud, factor (i) = 2 ($p'_c=47$ kPa)

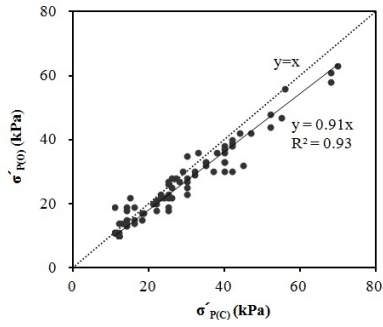
Fig. 3. Interpretation of p'_c , with subjective weighting factor indicating ease of interpretation (original clay layer, depth 10.9 m)

로 감소되었다. 이러한 원인은 Janbu(1969)방법에 비해 평가자의 주관적인 판단이 상당히 줄어든 효과에 있으며, 평균 가중치는 3.4로 분석되어 Karlsrud(1991)방법의 적용성이 보다 높은 것을 알 수 있다.

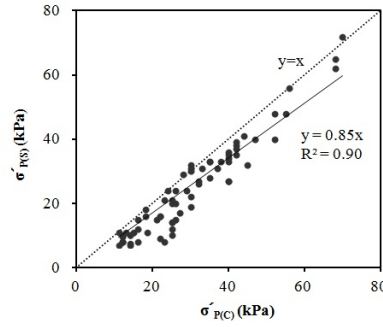
한편, Fig. 3에 나타난 바와 같이, Janbu 방법을 제외하고는 압밀곡선상에서 명확한 변곡점이 확인되는, 즉, 가중치가 1에 가까워질수록 각각의 방법으로 평가한 선행압밀압력이 유사한 결과를 나타내는 것을 알 수 있다. 따라서, 선행압밀압력 평가에 있어서 중요한 부분은 압밀곡선상의 변곡점이 명확하게 나타나지 않는 둥근 형태의 원만한 곡

선(more rounded curve)에 대해서도 평가자의 주관적인 판단이 최소화되면서 일관된 결과를 얻을 수 있는지에 달려있다고 할 수 있다. 이에 대해, Becker(1988) 등은 “선행압밀압력을 평가하는 기법이 정확한지에 대한 문제가 아니라 가장 일관된 결과를 얻을 수 있으면서 평가절차상 애매모호한 부분의 최소화가 가능한지에 있다”고 언급하고 있다.

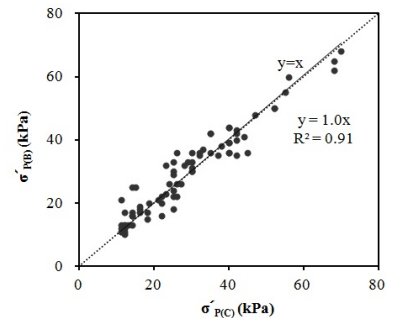
Fig. 4는 동일 시료에 대해 각각의 방법들로 구한 선행압밀압력의 상대적 크기를 종-횡축에 나타낸 결과를 비교한 것을 의미한다. 전체적으로 Casagrande, Onitsuka, Becker



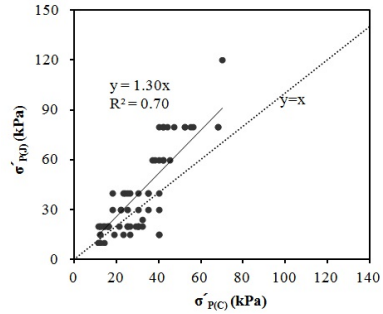
(a) Casagrande's and Onitsuka's methods



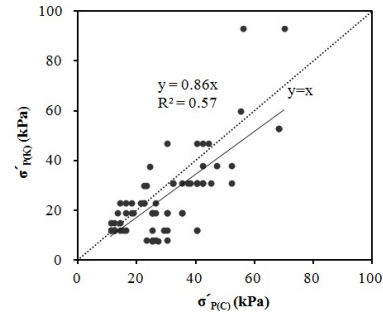
(b) Casagrande's and Silva's methods



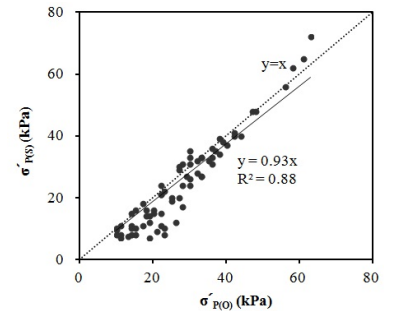
(c) Casagrande's and Becker's methods



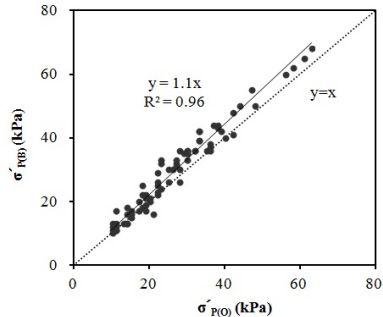
(d) Casagrande's and Janbu's methods



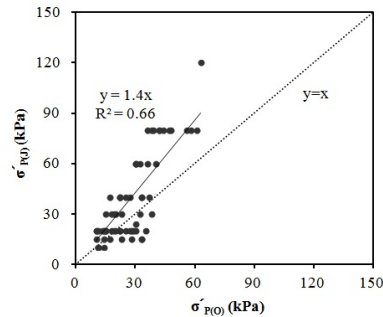
(e) Casagrande's and Karlsrud's methods



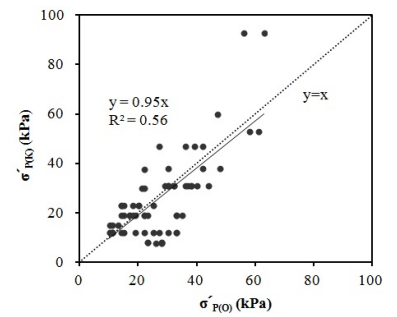
(f) Onitsuka's and Silva's methods



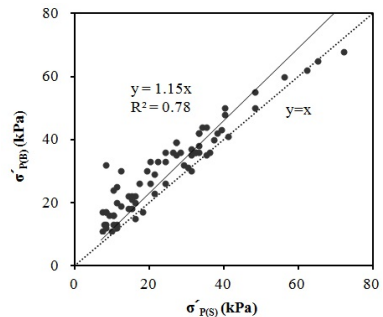
(g) Onitsuka's and Becker's methods



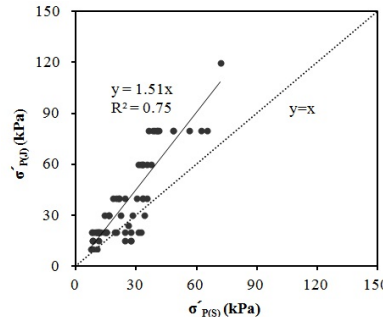
(h) Onitsuka's and Janbu's methods



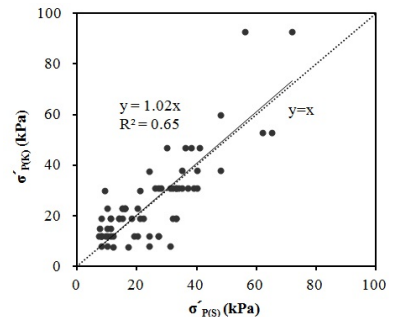
(i) Onitsuka's and Karlsrud's methods



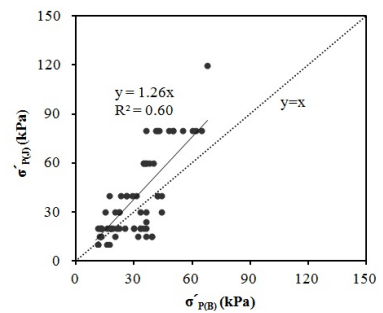
(j) Silva's and Becker's methods



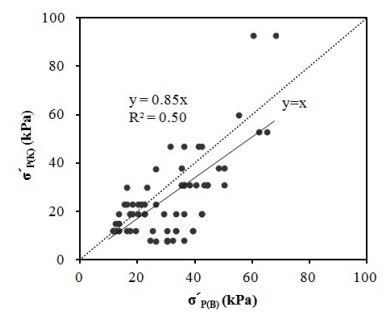
(k) Silva's and Janbu's methods



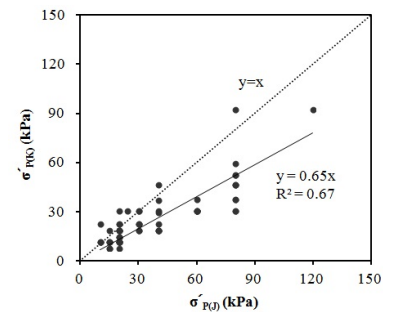
(l) Silva's and Karlsrud's methods



(m) Becker's and Janbu's methods



(n) Becker's and Karlsrud's methods



(o) Janbu's and Karlsrud's methods

Fig. 4. Comparison of preconsolidation pressure obtained by each method

Table 2. Summary of undrained shear strength and preconsolidation pressure ratio comparisons for 76 samples

	$s_u/\sigma'_p(C)$	$s_u/\sigma'_p(O)$	$s_u/\sigma'_p(S)$	$s_u/\sigma'_p(B)$	$s_u/\sigma'_p(J)$	$s_u/\sigma'_p(K)$
Mean	0.324	0.345	0.432	0.310	0.309	0.448
Standard deviation	0.072	0.080	0.160	0.071	0.159	0.268

방법으로 구한 선행압밀압력은 약 10% 범위의 편차 내에서 유사한 경향을 나타냈다. Silva 방법은 가중치 4, 5의 데이터에서 선행압밀압력을 과소평가하는 경향으로 인해 Casagrande, Becker 방법 및 Onitsuka 방법보다 각각 15%, 7% 정도 선행압밀압력이 작게 평가되었다. 따라서, 이러한 데이터를 제외하게 되면, 앞의 3가지 방법과의 유사성은 더욱 높아질 것으로 판단된다.

Janbu 방법은 다른 5가지 방법(Casagrande, Onitsuka, Silva, Becker, Karlsrud)보다 약 30~50% 정도 크게 평가되었으며, 상관성($r^2=0.6\sim0.7$)도 낮은 경향을 나타냈다.

Karlsrud 방법은 금회 평가에 적용된 6가지 방법 중에서 Silva 방법과 함께 가장 작은 선행압밀압력이 얻어진 방법 중의 하나에 해당되었다. Casagrande, Onitsuka, Silva 및 Becker 방법보다는 5~15% 정도 작은 값을 나타내어 비교적 유사한 경향을 나타내었지만, 앞에서 언급한 방법들에 비해 상관성($r^2=0.57$)은 낮은 것으로 분석되었다. 또한, Janbu 방법보다는 35% 정도 작은 값을 나타내었고, 상관성($r^2=0.67$)도 낮은 것으로 분석되었다. Karlsrud 방법은 국내에서는 거의 소개되지 않은 방법이며, Janbu 방법의 단점인 최소구속탄성계수(M)의 위치를 결정하는데 있어서 주관적인 판단을 상당히 줄일 수 있다. 또한, 앞에서 언급한 바와 같이, Janbu 방법에 비해 가중치 5가 부여된 데이터를 약 50% 이하로 줄일 수 있었던 부분을 통해서도 저소성 지반 조건을 포함한 국내 점성토 지반에 대한 추가적인 분석을 통해 적용성이 기대되는 방법이라고 판단된다.

재성형 시료를 이용하여 사전에 계획한 압밀압력까지 재하(load)-unloading(제하)-재재하(reloading) 과정을 거쳐서 선행압밀압력을 사전에 파악한 상태에서 각각의 방법으로 구한 값과의 비교 분석을 통해서 적용성을 평가할 수 있게 된다. 그러나, 자연 시료에 대해서는 이러한 분석이 불가능하므로 비배수 전단강도와 선행압밀압력과의 관계로 표현되는 강도증가율(s_u/p')을 이용해서 적용성을 분석할 수 있게 된다.

준설매립 점토 및 원지반 점토 지반에서 채취된 불교란 시료를 이용하여 수행된 일축압축강도($q_u/2$)를 이용하여

각각의 방법으로 구한 선행압밀압력과의 관계, 즉, 강도증가율을 평가하였다. Table 2에 나타난 바와 같이, Karlsrud 및 Silva 방법에 의한 평균 강도증가율은 다른 방법들에 의한 값보다 상당히 크게 평가되어 적용성이 떨어지는 것을 알 수 있다. 이러한 원인은 앞서도 언급한 바와 같이, 금회 적용된 6가지의 선행압밀압력 평가 방법 중에서 두 방법을 적용하였을 때 가장 낮은 값이 얻어졌기 때문이다. 또한, Janbu 방법으로 구한 평균 강도증가율은 국내 해성점토 지반의 일반적인 값의 범위에 분포되는 결과가 얻어졌지만, Karlsrud, Silva 및 Janbu 방법에 의한 표준편차는 다른 3가지 방법(Casagrande, Onitsuka, Becker)에 비해 2배 이상 큰 값이 얻어져 일관성 있는 경향이 나타나지 않아 적용성이 떨어지는 것을 알 수 있다.

종합적으로 볼 때, Becker 및 Onitsuka 방법의 평균 가중치가 다른 방법들(Casagrande, Janbu, Karlsrud)에 비해 낮고 강도증가율도 국내 해성점토 지반의 일반적인 값의 범위에 있으며, 표준편차도 낮게 평가되어 일관성 있는 평가가 가능한 것으로 분석되었다. 다만, Janbu 방법과 함께 평균 가중치가 5에 가까워 선행압밀압력 결정이 상대적으로 어려운 것으로 분석된 Casagrande 방법의 경우, 평균 강도증가율도 국내 해성점토 지반의 일반적인 값의 범위에 있으며, 표준편차도 Becker 및 Onitsuka 방법과 같이 가장 낮은 값을 나타냈다. 또한, 최근까지도 많은 연구자들에 의해 가장 많은 비판을 받아오면서도 가장 오랜 기간 동안 대표적인 선행압밀압력 평가방법으로 Casagrande 방법이 적용되어 왔다. 따라서, 국내 지반 조건에 대해 선행압밀압력을 평가할 때, 우선적으로 Becker 및 Onitsuka 방법을 적용한 후, 이에 대한 비교 분석의 수단으로 Casagrande 방법을 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

3. 결론

준설매립 점토지반의 현장 원위치 응력상태를 합리적으로 분석하기 위하여 Casagrande(1936)방법 외에 추가적

으로 5가지(Onitsuka(1995) 등, Silva(1970), Becker(1987) 등, Janbu(1969), Karlsru(1991))방법을 적용하여 선행압밀압력을 평가하였다. 이 때, 선행압밀압력 결정에 있어서 평가자의 주관적인 판단에 의한 상대적인 용이성을 기준으로 1부터 5까지의 등급 부여방식으로 적용성을 평가하였다. 그 결과, Becker 및 Onitsuka 방법의 평균 가중치가 다른 방법들(Casagrande, Janbu, Karlsrud)에 비해 낮고 강도증가율도 국내 해성점토 지반의 일반적인 값의 범위에 있으며, 표준편차도 낮게 평가되어 일관성 있는 평가가 가능한 것으로 분석되었다. 따라서, 선행압밀압력을 평가할 때, 우선적으로 Becker 및 Onitsuka 방법을 적용하고, 오랜 기간 동안 대표적인 방법으로 적용되어온 Casagrande 방법을 비교 분석의 보조적 수단으로 적용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

References

1. Becker, D. B., Crooks, J. H. A., Been, K. and Jefferies, M. G. (1987), "Work as a criterion for determining in situ and yield stresses in clays", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 24, pp. 549-564.
2. Becker, D. B., Crooks, J. H. A., Benn, K., and Jefferies, M. G. (1988), "Work as a criterion for determining in situ and yield stresses in clays: Reply", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.25, No.4, pp.848-850.
3. Casagrande, A. (1936), "The determination of the preconsolidation load and its practical significance", In proceedings of the 1st international Soil Mechanics and Foundation Engineering Conference, Cambridge, Mass., pp. 22-26 June 1936. Edited by A. Casagrande. Graduate School of Engineering, Harvard University, Cambridge, Mass. Vol.3, pp.60-64.
4. Clementino, R. V. (2005), "Discussion: An oedometer test study on the preconsolidation stress of glaciomarine clays", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.42, No.3, pp.972-974.
5. Grozic, J. L. H., Lunne, T., and Pande, S. (2003), "An oedometer test study on the preconsolidation stress of glaciomarine clays", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.40, No.5, pp.857-872.
6. Grozic, J. L. H., Lunne, T., and Pande, S. (2005), "Reply to the discussion by Clementino on "An oedometer test study on the preconsolidation stress of glaciomarine clays", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.42, No.30, pp.975-976.
7. Janbu, N. (1969), "The resistance concept applied to deformation of soils", In Proceedings of the 7th International Soil Mechanics and Foundation Engineering Conference, Mexico City, August 1969, A. A. Balkema, Rotterdam, Boston, Vol.1, pp.191-196.
8. Karlsrud, K. (1991). Sammenstilling av noen erfaringer med prøvetaking og effekt av prøveforstyrrelse i norske marine leire. NGI report 521500-6.
9. Onitsuka, K., Hong, Z., Hara, Y., and Yoshitake, S. (1995), "Interpretation of oedometer test data for natural clays", *Soils and Foundations*, 35, pp.61-70.
10. Pacheco Silva, F. (1970), "A new graphical construction for determination of the preconsolidation stress of a soil sample", In Proceedings of the 4th Brazilian Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rio de Janeiro, August 1970, Vol.2, No.1, pp.225-232.
11. Yano. (1985), "Properties of very soft ground reclaimed by dredged marine clay and their prediction", *Journal of JSCE*, Vol.364, No.3-4, pp.1-13.
12. Kim. J. H. (2017a), "Evaluation of CPTU cone factor of silty soil with low plasticity focusing on undrained shear strength characteristics", *Journal of Korean Geosynthetic Society*, Vol.16, No.1, pp.73-83.
13. Kim, J. H. (2017b), "Evaluation of strength incremental ratio of Korean marine clayey soil", *Journal of Korean Geosynthetic Society*, Vol.16, No.3, pp.31-39.