한국지반공학회논문집 제24권 8호 2008년 8월 pp. 61 ~ 79

준설매립지반의 선행압밀하중 산정

Estimating Maximum Past Pressures for Dredged and Reclaimed Ground

백 원 진[1] Baek, Won-Jin
이 송[2] Lee, Song
정 용 은[3] Jeong, Yong-Eun
노 태 길[4] Noh, Tae-Gil
양 태 선[5] Yang, Tae-Seon
김 주 현[6] Kim, Ju-Hyun

Abstract

Consolidation settlements on marine dredged clays are often greatly and potentially damaging to structures. Currently, large-scale projects are in planning or progressing in Korea. These projects have been performed on thick and soft clay layers. So, the evaluation of consolidation characteristics for dredged and reclaimed ground is very important in design and construction. Therefore, in this study, a series of conventional consolidation tests were performed to investigate the consolidation characteristics of marine dredged clays near Gwang-yang Port. Preconsolidation pressures were evaluated by applying previously proposed 8 methods for the conventional tests results in order to evaluate the legitimacy of these methods. In these methods, when estimating maximum past pressures for dredged and reclaimed ground, it was proved that Becker (1987), Silva (1970), Sridharan (1991)'s methods are excellent in legitimacy.

요 지

준설매립지반에서의 압밀침하는 종종 구조물에 큰 피해를 끼친다. 최근 국내에서는 대규모 프로젝트들이 대심도 연약지반 상에 계획 또는 진행 중에 있다. 따라서, 준설매립지반에 대한 압밀특성의 평가는 설계와 시공에 있어서 매우 중요하다고 할 수 있다. 본 연구에서는, 광양항 인근 지역에서 채취한 시료를 이용, 준설매립지반의 압밀특성을 평가하기 위하여 압밀시험을 실시하였으며, 선행압밀하중은 기존에 제안된 8가지 방법들을 이용하여 산정하였다. 이중에서, 준설매립지반의 선행압밀하중 산정시, Becker(1987), Silva(1970), Sridharan(1991) 방법의 적용성이 뛰어난 것으로 평가되었다.

Keywords : Long-term consolidation, Marine dredged clays, Preconsolidation pressure, Pseudo-preconsolidation

1. 서 론

최근 항만, 공항, 택지, 산업기지 등의 수요가 확대됨에 따라 해안 인근 연약지반 상의 건설이 늘어나고 있으며, 이 중에서도 광양 인근 지역에서는 연약한 해성 점토층 위에 대규모 매립작업을 실시한 부지조성공사가 활발하게 진행되고 있다. 이러한 지반의 경우, 압밀특성에 따라 장기간 방치에도 불구하고 압밀이 완료되

1 정회원, 전남대학교 생물산업공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Bio Systems & Agricultural Eng., Chonnam National Univ.)
2 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Eng., The Univ. of Seoul)
3 정회원, 동아건설산업(주) 과장, 공학박사 (Member, Manager, Ph.D., Dong-Ah Construction Industrial Co. Ltd)
4 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Eng., The Univ. of Seoul)
5 정회원, 김포대학 건설정보과 부교수 (Member, Prof., Dept. of Construction Information Eng., Kimpo College)
6 정회원, 서울시립대학교 토목공학과 공학박사 (Member, Ph.D., Dept. of Civil Eng., The Univ. of Seoul, soil1004@hotmail.com, 교신저자)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

기 어려우므로 준설매립이 완료된 지역에 추가 성토에 의한 지반개량을 수행할 경우에는 준설매립지반에 대한 압밀이력을 정확하게 파악하는 것이 지반의 효율적인 개량을 위해서 중요하다고 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 준설매립지반에 대한 신뢰성 있는 설계정수 산정에 의해 대상지반의 압밀침하량을 합리적으로 평가하기 위하여, 다양한 선행압밀하중 평가기법들을 적용하여 준설매립층의 과압밀비를 산정하였다.

2. 문헌연구

2.1 선행압밀하중의 평가

현재까지 선행압밀하중을 산정할 수 있는 많은 방법이 제안되어 왔지만, 산정방법과 개인에 따라 많은 차이를 보인다. 각각의 산정방법들의 선행압밀하중 평가절차를 비교해 보면, 크게 두 가지로 구분할 수 있다. 첫째는, 현재까지 선행압밀하중 평가방법으로 가장 많이 이용되는 Casagrande(1936)방법과 각각의 제안자가 제시한 방법에 대한 비교분석을 실시한 후, Casagrande(1936)방법과 유사한 결과가 산정된다는 결론으로 각각의 제안자가 제시한 방법의 유효성을 설명하는 내용이다. 이러한 관점은 Casagrande(1936)방법이 정확한 결과를 도출한다는 가정에 근거를 두고 있다.

두 번째는, Casagrande(1936)방법에 대한 단점을 집중적으로 부각시킨 후, 각각의 제안자들에 의한 평가방법의 우수성을 설명하는 내용이 주류를 이룬다. 따라서, 본 논문에서는 표준압밀시험을 통하여 얻어진 압밀곡선의 형태에 따라, 각각의 평가방법들의 장단점을 비교분석하였다.

2.1.1 Casagrande 방법

Casagrande(1936)방법은 현재까지 가장 널리 이용되고 있으며, 가장 일반적인 내용이므로 산정방법에 대해서는 설명을 생략하기로 하겠다. 산정방법은 그림 1에 나타낸 바와 같다.

2.1.2 Janbu-1 방법

이 방법은 외력에 대한 흙의 저항개념(resistance concept)을 이용하여 흙의 응력 및 시간 의존적인 거동을 평가하였다. 흙의 응력-변형률 곡선을 이용하여, 그림 2에 나타낸 바와 같이, 각각의 압밀하중 적용시, Constrained Modulus(M)를 산정하여 선행압밀하중 평가방법을 제시하였다. 이 때, 과압밀 영역에서는 압밀압력의 변화에 관계없이 Constrained Modulus(M)가 거의 일정한 상수값을 보이며, 정규압밀영역으로 넘어가는 순간에 최소값을 나타낸다. 그리고, 정규압밀 영역에서는 압밀압력 증가에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 나타낸다. 따라서, 유효압밀압력에 따른 Constrained Modulus(M)의 그래프에서 곡선의 급격한 변화를 나타내는 변곡점을 선행압밀하중으로 산정하며, x축과 y축은 각각 대수좌표 눈금을 이용하여 표시한다.

2.1.3 Janbu-2 방법

이 방법은 앞에서 제시한 Janbu-1 방법과 같이, 흙의 응력 및 시간 의존적인 거동특성을 이용하여, 먼저 그림 3에 나타낸 바와 같이, 시간에 따른 변형특성을 나타내는 Time Resistance, R을 다음과 같이 산정한다.

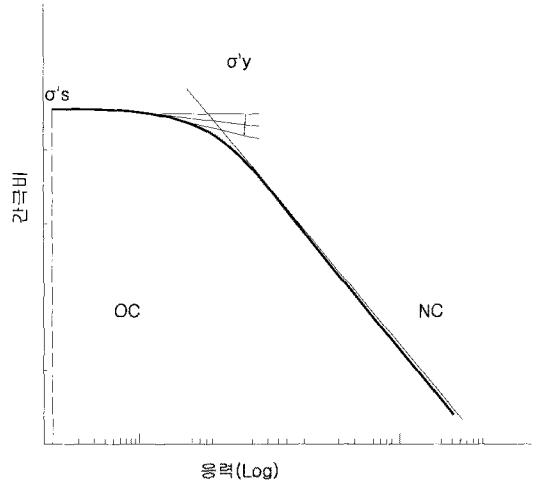


그림 1. Casagrande 방법(1936)

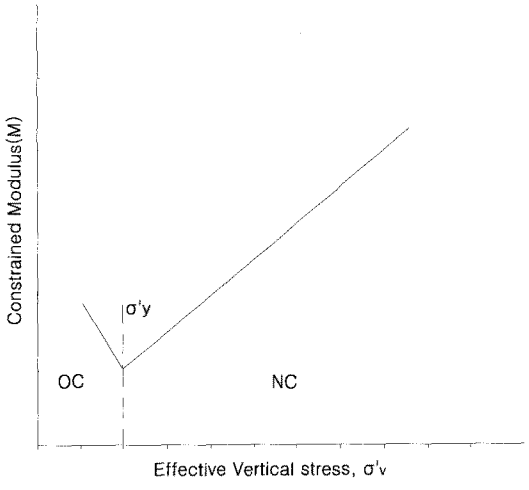


그림 2. Janbu-1 방법(1969)

$$R = \frac{dt}{d\varepsilon} \tag{1}$$

그 다음에 Time Resistance R은 시간과 응력에 따라 값이 달라지므로, 시간에 따른 Long Term Time Resistance number, r를 산정한 후, t≥tp 인 조건에서 선형적인 기울기 r를 다음과 같이 산정한다.

$$r = \frac{dR}{dt} = constant \tag{2}$$

이 때, 각각의 압밀압력별로 산정된 r을 이용하여, X축과 Y축에 각각 대수좌표 눈금으로, 유효압밀압력과 Long-Term Time Resistance number를 나타낸다. 이 때, 선행압밀하중 근처에서 가장 작은 r값이 산정되며, 이점을 선행압밀하중으로 결정한다. 그림 3의 아래에 나타낸 시간에 따른 R의 변화를 나타내는 그래프를 살펴보면, Zone A는 초기 1차 압밀에 대응되는 2차 포물선 형태를, Zone B는 포물선 형태의 Zone A에서 직선형태의 Zone C로 넘어가는 전이영역을 나타낸다. 그리고 Zone C는 과잉간극수압이 완전히 소산된 후에 발생되는 2차 압밀 특성을 보인다. 따라서, 과압밀 구간에서는 시간에 따른 2차 압밀침하가 정규압밀 구간에 비해 작게 발생되므로, Time Resistance, R값이 크게 산정된다. 그리고, Zone C에서 직선구간의 기울기인 시간에 따른 Long Term Time Resistance number, r값이 과압밀 구간에서 정규압밀 구간으로 넘어갈 때 급격히 감소하므로, 이를 기준으로 그림 4와 같이 선행압밀하중을 평가한다.

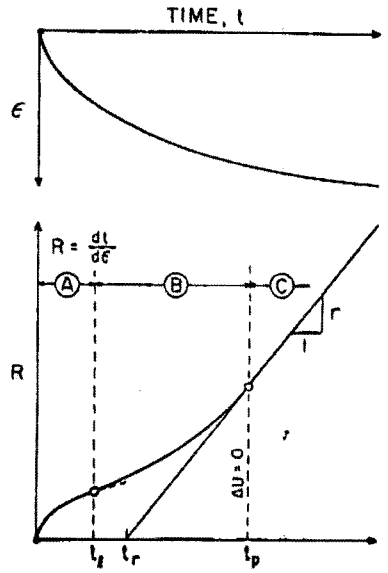


그림 3. 시간의 함수로 표현된 변형률과 Time Resistance

2.1.4 Becker 방법

단위 체적(V)당 한 일(W)을 산정하면, 과압밀영역과 정규압밀영역에서 각각의 직선적인 변화를 산정할 수 있으며, 변형에너지 산정방법은 다음과 같다.

$$\Delta W = \sigma' d\varepsilon = -\frac{de}{1+e_o}\sigma' \tag{3}$$

각각의 유효압밀압력 증가에 따라 한 일에너지(W)의 변화를 산정하면, 그림 5에 나타낸 바와 같이 과압밀 영역과 정규압밀 영역을 기준으로 두개의 직선이 얻어지며, 두 직선의 교점을 선행압밀하중으로 결정한다. Becker(1987) 방법은 Casagrande(1936) 방법으로 선행압밀하중을 평가하기 어려운 조건에서 이 방법을 적용하면 활용도가 높은 것으로 제시하고 있다.

2.1.5 Sällfors 방법

이 방법은 CRS 시험, 즉, 일정변형률 압밀시험을 실시할 때, 선행압밀하중을 산정하는 방법으로 주로 이용

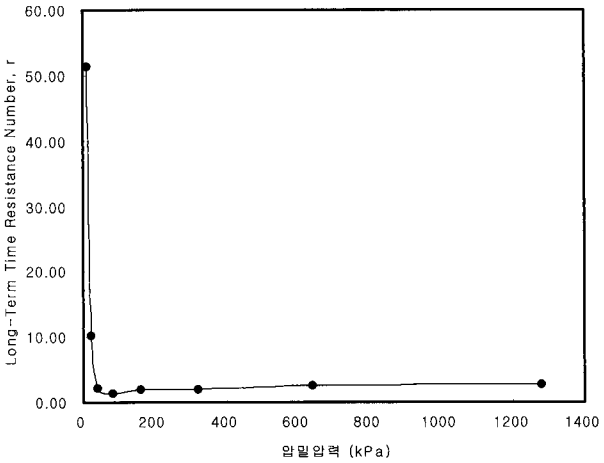


그림 4. Janbu-2 방법(1969)

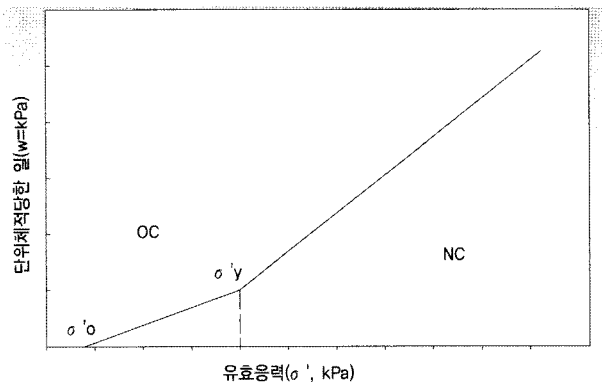


그림 5. Becker 방법(1987)

되며, 그래프상에 e-logP 곡선 대신에 대수좌표 눈금변화를 이용하여 $\varepsilon-\sigma'$ 곡선으로 나타낸다. 이때, X축의 유효응력 10kPa에 해당되는 좌표의 길이와 Y축의 변형률 1%에 해당되는 좌표의 길이가 동일하게 표현되도록 그래프를 그려야하며, 그림 6에 나타낸 바와 같이 두 접선에 의해 산정된 삼각형의 각 변의 길이가 동일한 값이 얻어지도록 두 접선을 그려야 한다. 이 때, 과압밀 영역에서 그은 첫 번째 접선이 압밀압력에서 벗어나는 시점을 선행압밀하중으로 산정한다.

2.1.6 Sridharan 방법

간극비와 유효응력에 대한 축을 모두 log 좌표를 이용하여 log(1+e)-logP 관계로 표시한다. 이때, 간극비의 항에 1+e 의 값으로 표시하여 각각의 압밀압력에 따른 비체적, V로 나타낸다. Sridharan(1991)은 간극비의 항을 그림 9에 나타낸 바와 같이 log 좌표를 이용하므로, 과압밀 영역에서 간극비의 변화가 매우 작게, 정규압밀 영역에서는 간극비의 변화가 상대적으로 크게 표현되므로, 이러한 특성을 이용하여 보다 쉽게 선행압밀하중을 평가할 수 있다. 이 때, 두 직선의 교점을 선행압밀하중으로 산정한다. 그림 7은 일반적으로 표현하는 방법인 e-logP 곡선을 나타내고 있으며, 동일한 시험결과에 대해 loge-logP로 표현한 그림 8과 비교하면 앞에 설명한 내용을 잘 이해할 수 있다. 한편, 이 방법은 초기에는 y

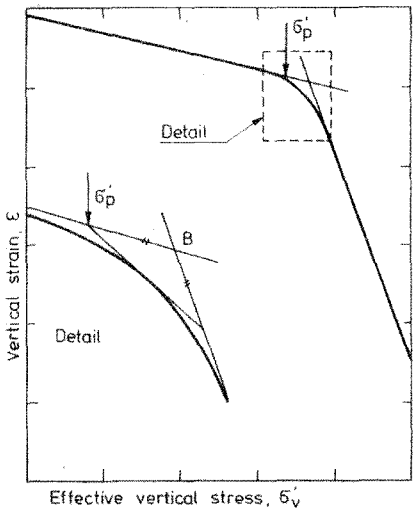


그림 6. Sällfors(1975) 방법

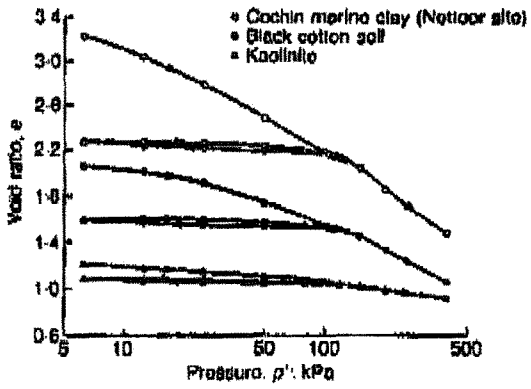


그림 7. e-logP 곡선

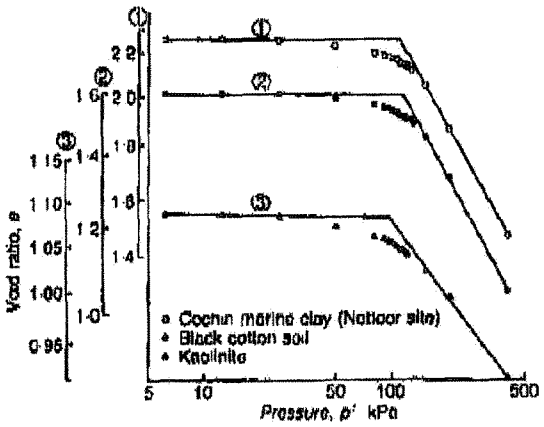


그림 8. loge-logP 곡선

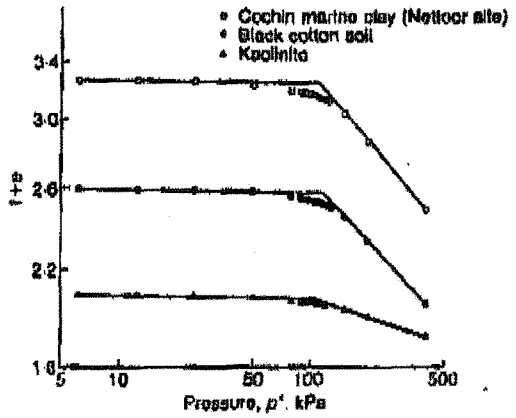


그림 9. log(1+e)-logP 곡선

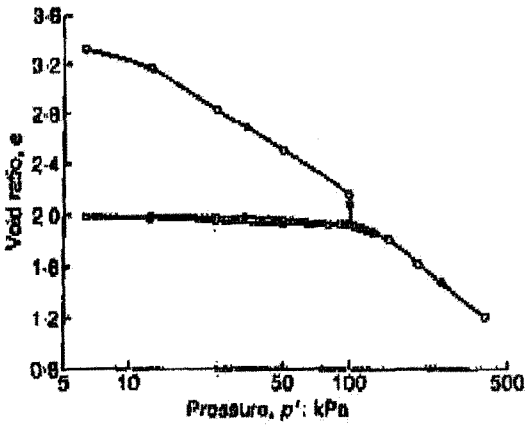


그림 10. 압밀압력 100kPa을 90일 동안 재하

축에 log(1+e)로 표현하는 대신에 그림 8에 나타낸 바와 같이 log(e)를 사용하였으나, log(1+e)를 이용할 경우 두 직선의 교점을 보다 명확하게 산정할 수 있다는 것을 알게 되었다. 따라서, 근본적으로는 log(e)와 log(1+e)는 같은 방법이라고 할 수 있겠다.

특히, 이 방법은 그림 10에 나타낸 바와 같이, 압밀압력 100kPa로 90일 동안 재하한 결과, 압밀압력의 변화 없이도 간극비의 감소가 발생되며, 이러한 원인으로 선행압밀하중이 증가하게 되는 지연압밀 현상을 나타내는 지반조건에서 선행압밀하중(유사 과압밀지반)을 산정하는데 있어서 Casagrande(1936) 방법보다 우수한 것으로 제시하고 있다. 표 1은 지연압밀된 지반에 대해 Casagrande(1936) 방법과 Sridharan(1991) 방법을 이용하여 선행압밀하중을 산정한 결과이며, 대부분 Casagrande (1936) 방법이 Sridharan(1991) 방법에 비해 선행압밀하중을 과대평가하는 것으로 제시되었다. 또한, Sridharan(1991) 방법은 압밀기간에 따라 선행압밀하중이 커지는 일관된 경향을 나타낸 반면에, Casagrande(1936) 방법은 이러한 경향성이 나타나지 않은 것을 알 수 있다.

2.1.7 Silva 방법

그림 11(a)와 같이 간극비 축에서 초기간극비를 기준으로 수평선을 e-logP 곡선상에 표시한 다음, 처녀 압밀곡선을 연장하여 초기간극비에 의해 그려진 수평선과 만나는 점 A를 표시한다. 점 A에서 연직선을 그려 e-logP 곡선과 만나는 점 B를 표시한다. 그 다음, 점 B에서 수평선을 그

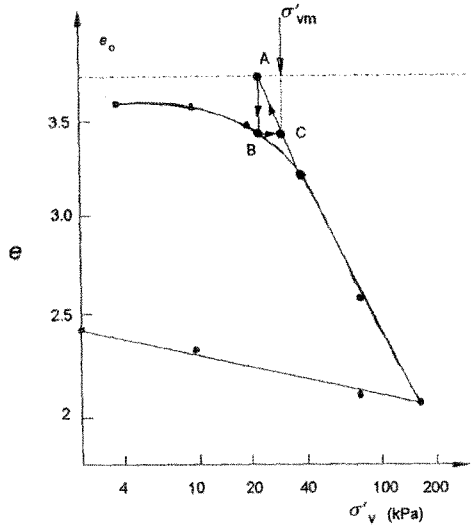
표 1. Casagrande(1936) 방법과 Sridharan(1991)방법으로 산정된 선행압밀하중의 비교

Type of soil	Sustained pressure: kPa	Duration of sustained pressure: days	Value obtained for preconsolidation pressure, p_c: kPa	
			From Casagrande method	From plot of log(1+e) against log p'
Remoulded Cochin marine clay (Nettoor site)	100	2	130	108
	100	7	130	115
	100	15	135	119
	100	90	130	122
Remoulded Cochin marine clay (Nettoor site)	200	15	245	220
Remoulded Cochin marine clay (Nettoor site), constant rate of strain test	100	2	115	108
	100	15	110	118
Cochin marine clay (Parur site)	100	2	125	105
Red earth	100	2	150	120
Black cotton soil	100	2	130	114
	100	15	130	118
Black cotton soil	200	2	255	220
	200	15	255	222
	200	22	240	220
	200	96	265	225
Kaolinite	100	2	125	102
	100	15	130	105
Kaolinite	200	2	190	200
	200	22	220	230
	200	96	280	250
Marine clay treated with 3% lime	100	2	145	120
	100	7	150	128
	100	15	150	135
	100	60	160	160
Marine clay treated with 6% lime	200	15	240	222
Undisturbed Cochin marine clay (Kumbalam site)	–	–	110	105
Undisturbed Cochin marine clay (Elamkulam site)	–	–	66	63
Undisturbed Cochin marine clay (Maradu site)	–	–	84	78

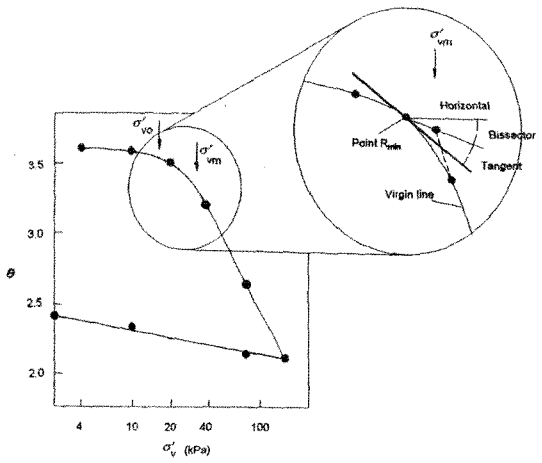
어, 처녀압밀곡선의 연장선과 만나는 교점 C를 선행압밀하중으로 선택한다. 그림 11(a), (b)에 나타낸 바와 같이, Silva(1970) 방법과 Casagrande(1936) 방법으로 산정된 선행압밀하중은 각각 30kPa, 34kPa으로 유사한 경향을 나타내는 것을 근거로, 본 방법의 유효성을 설명하고 있다.

2.1.8 Schmertmann 방법

이 방법은 선행압밀하중을 산정하는데 이용되기 보다는 국내에서는 실내압밀 시험에서 산정된 압축지수를 교란효과가 제거된 상태인 현장상태의 압축지수로 보정하는데 주로 이용되어왔다. Schmertmann(1955)은 그림 12, 13, 14에 나타낸 바와 같이, 여러 종류의 시료를 이용하여 많은 실험을 통해서, 압밀링 내의 시료에 대해 인위적으로 교란영역을 증가시켜서 압밀시험을 실시한 결과, 모든 곡선이 초기간극비의 0.42배에 해당되는 위치에서 만나게 된다는 것을 발견하였다. 따라서, 이를 기준으로 시료채취시 필연적으로 발생되는 교란효과가 제거된 현장 원위치 상태의 압축지수 산정방법을 제시하였다. 또한, 선행압밀하중 산정방법도 제시하였는데, 산정방법은 그림 13에 나타낸 바와 같다. Schmertmann(1955)방법으로 선행압밀하중을 산정할 경우에는, 다른 방법들에 비해 다소 번거로운 점이 있는데, 먼저 대상지층의 유효상재압(P_o)를 결정한 후, 선행압밀하중 이후의 압밀압력 단계에서 제하를 실시하여 재압축지수(C_r)를 산정해야 한다. 그 다음에, Casagrande(1936) 방법으로 선행압밀하중을 산정한 다음, 교란효과가 배제된 현장 원위치의 e-logP 곡선을 얻는다. 그림 13의 아



(a) Silva (1970) 방법으로 산정한 선행압밀하중, 30kPa



(b) Casagrande(1936) 방법으로 산정한 선행압밀하중, 34kPa

그림 11. 선행압밀하중 산정결과에 대한 비교(Casagrande 방법, Silva 방법)

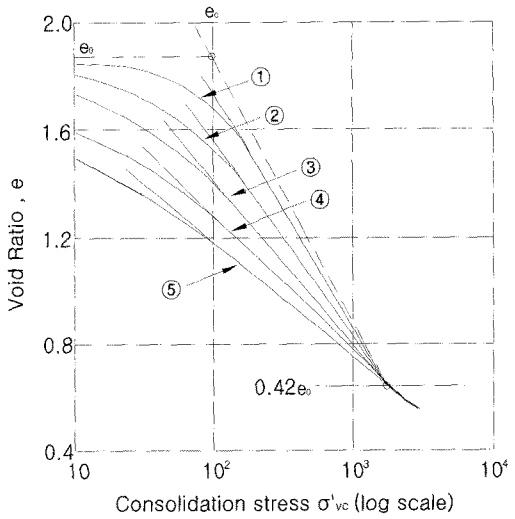


그림 12. 교란정도에 따른 압밀곡선의 변화

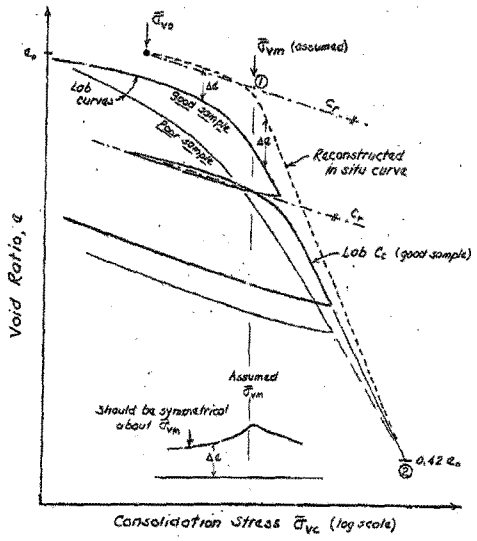


그림 13. Schmertmann(1955) 방법

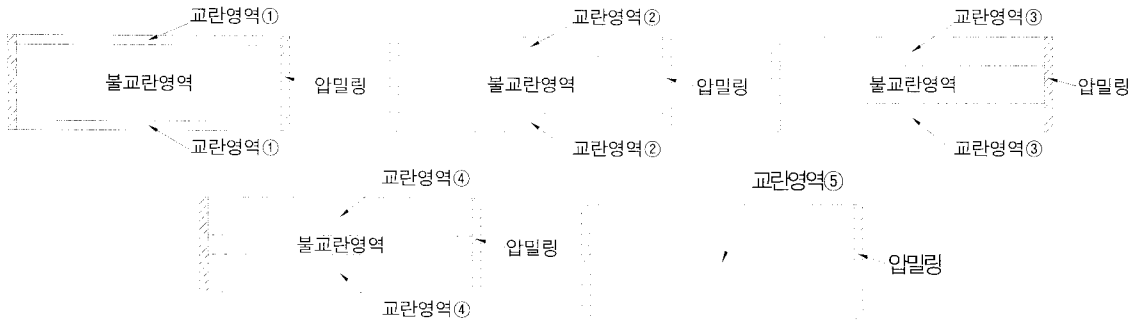


그림 14. 압밀링 내에 인위적으로 조성된 교란영역(Schmertmann, 1955)

래 부분에 나타낸 바와 같이, 실험을 통해 산정한 압밀곡선과 보정곡선을 이용하여 두 곡선의 압밀압력에 따른 간극비 차이를 산정한 후, 두 값의 차이가 곡선 상에서 대칭을 이루는 위치를 선행압밀하중으로 산정하면 된다. 간극비 변화 곡선을 살펴보면, Casagrande(1936) 방법으로 초기에 산정한 선행압밀하중 위치는 곡선 상에서 정확히 대칭을 이루지 않으므로, 대칭점의 위치를 선행압밀하중으로 산정하는 방법이다. 그림 13의 아래 부분의 간극비 차이 곡선을 통해서 볼 때, Casagrande(1936) 방법보다 Schmertmann(1955) 방법으로 산정된 선행압밀하중이 다소 크게 평가되는 것을 알 수 있다.

3. 압밀시험 조건

본 현장은 원지반상에 약 7m 두께의 준설토가 투기된 이후에, 방치기간이 약 10년 정도 경과한 상태이다. 준설매립지반에 대한 압밀이력을 보다 합리적으로 평가하기 위하여 준설매립층에서 3개, 원지반층에서 4개의 샘플을 채취하여, 표준압밀시험을 실시하였다.

본 시험에 사용된 불교란 시료는 광양항 인근지역의 준설매립층과 원지반층에서 각각 직경이 100mm인 피스톤 샘플러로 채취되었다. 압밀시험을 위한 시료 추출시, 시료통 벽면 마찰로 인한 교란을 막기 위해 커팅 방법을 사용하였다. 불교란 시료는 양 끝단을 파라핀으로 봉하여 보관 기간동안 수분 증발을 억제하고, 실험 기간동안 자연상태의 위치를 유지하기 위하여 연직으로 보관하였으며, 매 실험 때마다 시료통을 커팅하여 사용하였다. 실내시험으로 판별된 시료의 물성치는 표 2와 같으며, 압밀시험 시료의 직경과 높이는 각각 6cm와 2cm 이다.

본 연구에서 수행된 시험방법은 표준압밀의 경우, 단계재하(incremental loading) 압밀시험으로, 압밀하중 재하기간은 하중단계별로 24시간을 적용하였다.

표 2. 물리적 특성 시험결과

구분	물성값
자연함수비, w_n (%)	53-93
액성한계, LL (%)	55-85
소성한계, PI (%)	18-37
비중, G_s	2.70-2.75
초기간극비, e_0	1.45-2.68
통일분류법 (USCS)	CH

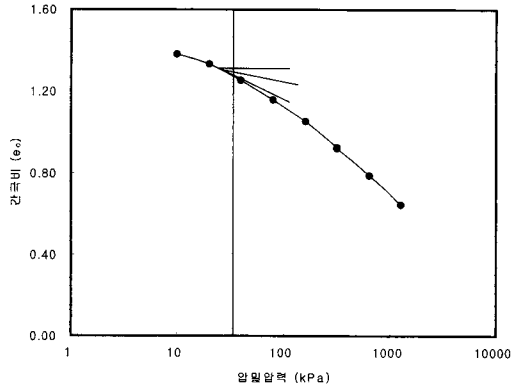
4. 실험결과 및 분석

4.1 선행압밀하중

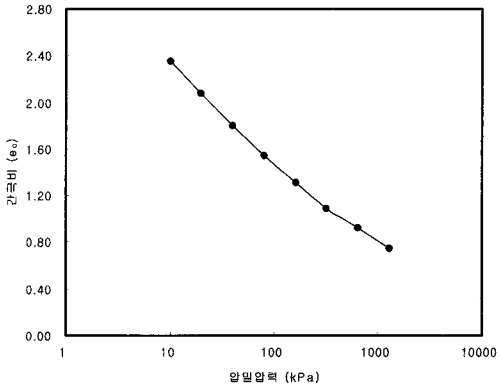
8가지 방법을 이용하여 선행압밀하중을 평가한 결과는 각각 표 3과 그림 15~22에 나타냈다. 본 연구에서는

표 3. 각각의 방법을 이용하여 산정된 선행압밀하중

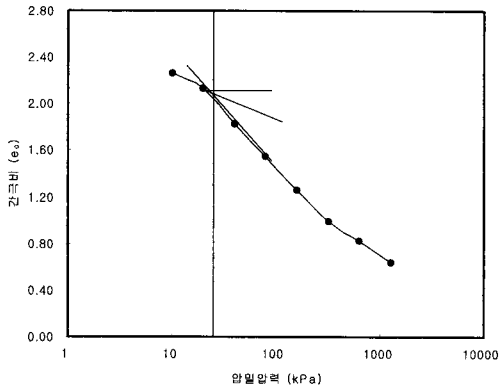
구 분	심 도 (m)	선행압밀하중(Pc, kPa)								
		Casagrande	Janbu1	Janbu2	Becker	Sällfors	Sridharan	Silva	Schmertmann	평 균
A	2.0	34	40	80	42	–	41	33	40	44
B	3.0	–	20	20	–	11	–	–	23	21
C	2.0	25	40	40	40	–	24	19	32	31
A-1	8.0	48	80	80	70	30	35	35	85	58
B-1	8.0	30	40	80	22	–	26	23	47	38
C-1	9.0	90	160	80	64	–	52	60	110	88
D-1	11.0	40	80	–	32	36	37	42	135	57



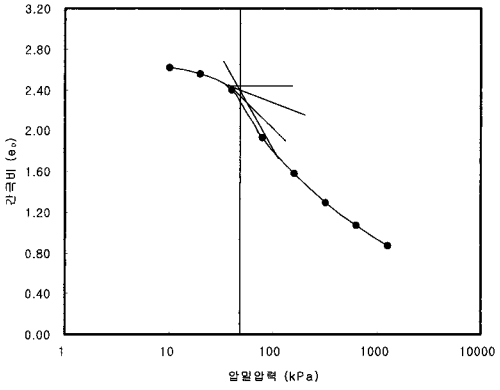
(a) A (심도 2.0m, 준설매립층)



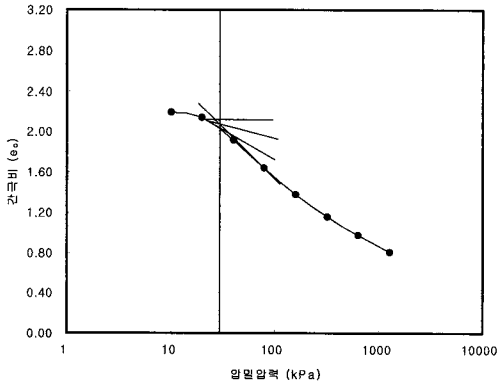
(b) B (심도 3.0m, 준설매립층)



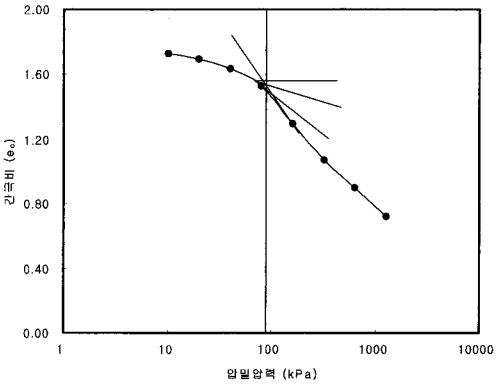
(c) C(심도 2.0m, 준설매립층)



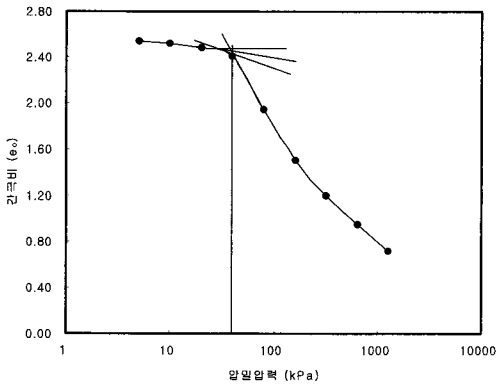
(d) A-1(심도 8.0m, 원지반층)



(e) B-1(심도 8.0m, 원지반층)

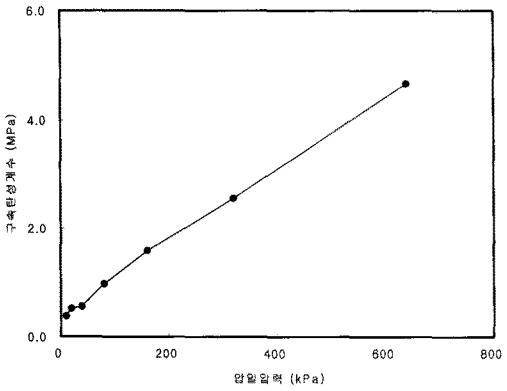


(f) C-1(심도 9.0m, 원지반층)

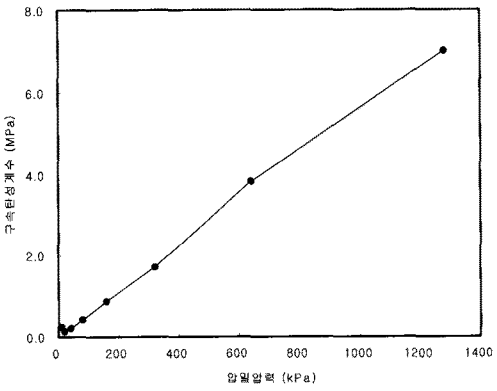


(g) D-1(심도 11.0m, 원지반층)

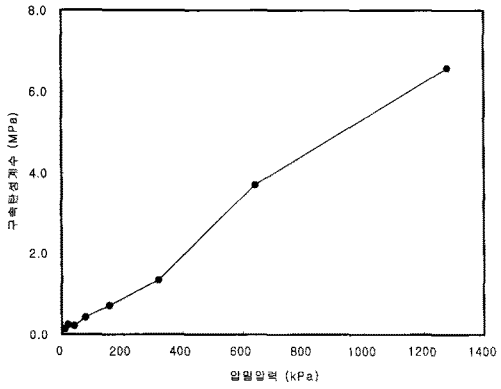
그림 15. Casagrande 방법으로 산정된 선행압밀하중(1936)



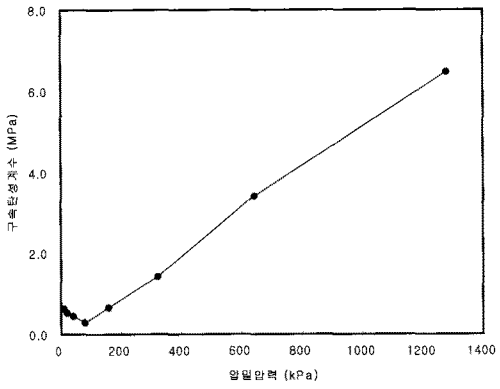
(a) A(심도 2.0m, 준설매립층)



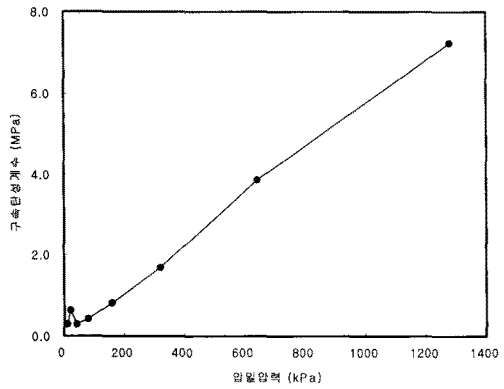
(b) B(심도 3.0m, 준설매립층)



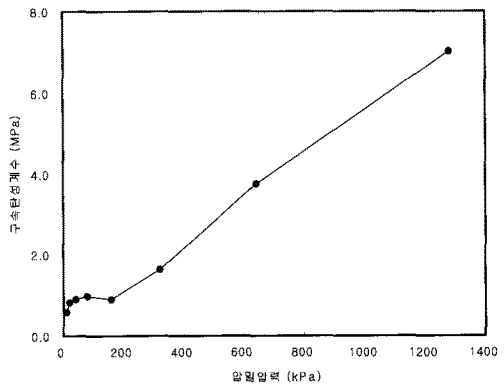
(c) C(심도 2.0m, 준설매립층)



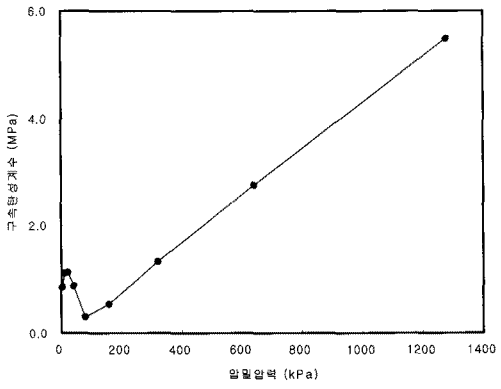
(d) A-1(심도 8.0m, 원지반층)



(e) B-1(심도 8.0m, 원지반층)



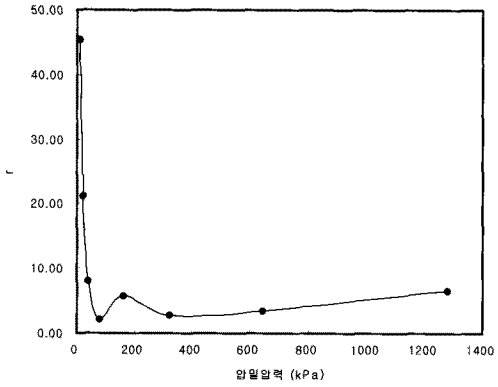
(f) C-1(심도 9.0m, 원지반층)



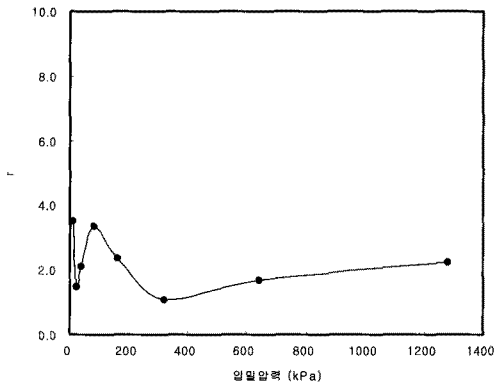
(g) D-1(심도 11.0m, 원지반층)

그림 16. Janbu-1방법으로 산정된 선행압밀하중(1969)

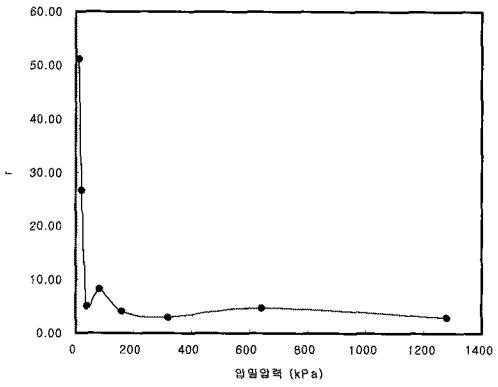
일반적으로 행해지는 재하-제하-재재하 시험 결과를 이용하여, 선행압밀하중을 이미 알고 있는 상태에서, 각각의 제안자들에 의해 제시된 방법을 비교하여, 각각의 방법들에 대한 정밀도를 평가한 것이 아니므로, 각각의 평가방법들의 적용가능성과 장단점에 초점을 맞추어 분석을 실시하였다. 그림 15(b)의 경우, 최소곡률반경을 결정할 수 없으므로, Casagrande(1936) 방법으로는 선행압밀하중을 산정할 수 없었다. 이와 같은 경향은 준설매립층과 같이 유효상재압 보다 작은 압밀압력, 즉, 미압밀 특성의 지반조건에서 나타나는 현상이다. 그림 15(b)의 시험결과를 이용하여 선행압밀하중 산정이 가능한 경우는 Janbu-1, 2, Sällfors, Schmertmann 방법이다. 그러나, e-logP 곡선 상에서 과압밀 및 정규압밀 영역의 구분이 불가능한 시험결과에서는 Casagrande(1936) 이외의 방법을 이용한다 할지라도, 각각의 산정방법들에서 과압밀 및 정규압밀 영역이 명확하게 구분되지 못하므로, 선행압밀하중 산정에 있어서 설계자의 주관적인 판단이 반영될 수밖에 없다. 따라서, Casagrande(1936)



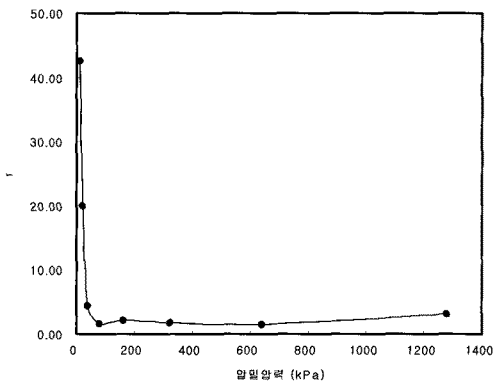
(a) A(심도 2.0m, 준설매립층)



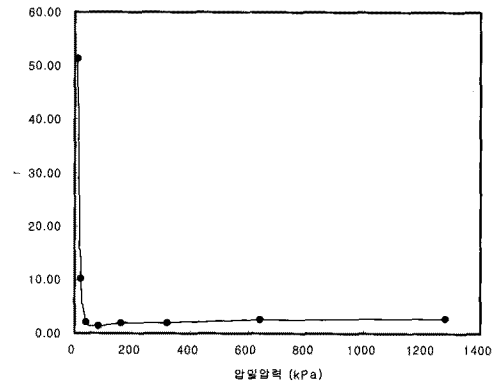
(b) B(심도 3.0m, 준설매립층)



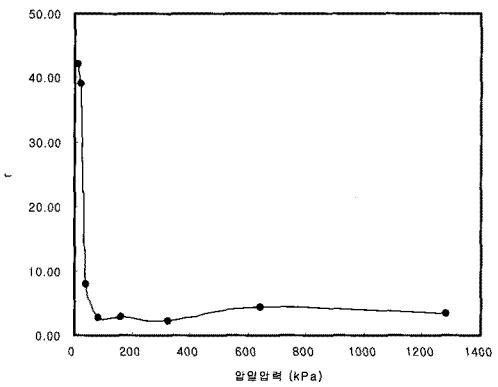
(c) C(심도 2.0m, 준설매립층)



(d) A-1(심도 8.0m, 원지반층)



(e) B-1(심도 8.0m, 원지반층)



(f) C-1(심도 9.0m, 원지반층)

그림 17. Janbu-2 방법으로 산정된 선행압밀하중(1969)

방법 이외에 여러 가지 다른 방법들을 이용한 선행압밀하중 산정은 e-logP 곡선상에서 명확하게 변곡점이 구분되지 않는다고 할지라도 그림 15(a)의 e-logP 곡선과 같이 과압밀 및 정규압밀 영역을 어느 정도 구분할 수 있을 때 가능하다고 판단된다.

한편, 준설매립지반과 같이 대변형이 발생되는 경우에 Casagrande 방법의 문제점을 살펴보면, 정규압밀영역의 비선형적인 곡선에서, 직선부분을 연장하여 선행압밀하중을 산정할 경우, 어느 위치에서 직선부분을 산정할 것인가에 따라 오차가 많이 발생할 수 있다. 또한, 현재까지 가장 많이 지적되어온 최소곡률반경의 위치 산정과 간극비에 해당되는 Y축의 스케일을 어떻게 정하느냐에 따라 선행압밀하중은 크게 달라질 수 있다.

Janbu-1(1969)방법을 적용한 경우, 그림 16(a), (f)에서 Constrained Modulus(M) 산정시 개인에 따른 주관적인 판단의 여지가 많아, 명확하게 선행압밀하중을 평가하기 어려운 것으로 나타났다(Negussey 1995).

한편, Janbu-2(1969) 방법에서는, 그림 17(a), (b), (c)에서 선행압밀하중 부근에서 나타나는 최소 r(Long Term Time Resistance number)을 구하여 선행압밀하중을 평가하기 어려우므로, 준설매립층에서 적용하기에는 한계가 있다고 판단된다. 이 방법은 Time Resistance, R을 구한 다음에, 직선구간의 기울기인 Long Term Time Resistance number, r을 산정해야 하는 번거로운 절차를 거쳐야 한다는 점과 t(시간)-R(Time Resistance) 그래프에서 직선구간이 명확하게 나타나지 않는 경우에는 Long Term Time Resistance number, r을 평가하기 어렵고 설계자에 따른 오차가 발생되는 문제점을 지니고 있다.

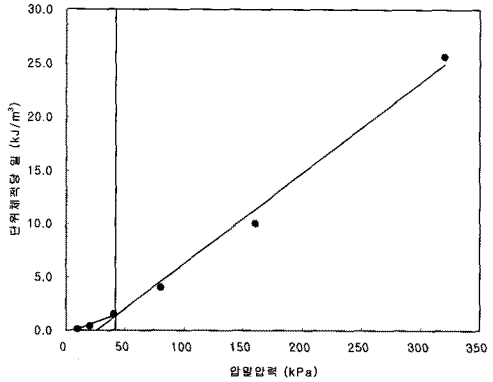
Becker(1987) 방법으로 선행압밀하중을 산정한 그림 18를 살펴보면, 그림18(b)에서는 과압밀영역과 정규압밀영역에서의 교점을 산정할 수 없었다. Becker(1987) 방법은 높은 압밀압력 부분에서, 변형에너지가 크게 산정되어, 정규압밀 영역에서의 직선을 제대로 표현하지 못하는 경우가 발생될 수 있다. 이러한 경우에는, 높은 압밀압력에서 얻어진 값을 제외한 후, 두 교점을 산정하도록 추천하고 있다.

Sällfors(1975) 방법은 주로 CRS 시험을 실시할 경우에 주로 이용되는 선행압밀하중 평가방법이다. 그림 19에 나타낸 바와 같이, 7개의 압밀시험결과 중에서 3곳에서만 선행압밀하중을 산정할 수 있었다. 본 연구에서 실시된 대부분의 압밀시험에서 나타나는 특성인 정규압밀영역에서의 비선형적인 곡선과 과압밀 영역에서 초기직선부분이 명확하게 나타나는 않는 경우에는 Sällfors(1975) 방법을 적용하기 어렵다고 판단된다. 또한, 표준압밀시험의 경우, CRS 시험과 달리 압밀압력별로 얻어지는 변형률의 값을 조밀하게 얻을 수 없으므로, 압밀압력 재하단계를 좀 더 조밀하게 적용할 경우에 적용이 가능할 것이다.

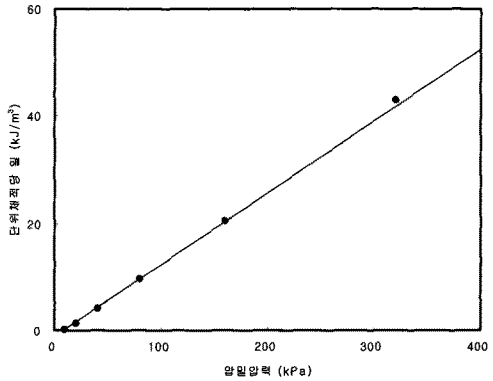
Sridharan(1991) 방법은 앞에서 설명한 바와 같이, 간극비항에 log 좌표를 사용하여, 과압밀 영역에서 간극비의 변화가 매우 작게 표현되므로, 다른 방법들과 비교할 때 선행압밀하중 산정에 있어서 설계자의 임의적 판단을 최소화 할 수 있으며, 비교적 쉽게 선행압밀하중을 산정할 수 있는 방법이다. 그림 20(b)에 나타낸 바와 같이, 압밀압력에 따른 간극비의 변화가 거의 선형적으로 나타나는 경우에는, Casagrande(1936) 방법과 마찬가지로 선행압밀하중을 산정할 수 없었다. 본 방법은 Sridharan(1991)이 표 1에서 제시한 결과와 유사하게, 7개의 압밀시험결과 중 한 개를 제외하고는 Casagrande(1936) 방법이 Sridharan(1991) 방법에 비해 선행압밀하중을 과대평가하는 것으로 나타났다.

Silva(1970) 방법도 Sridharan(1991) 방법과 마찬가지로 선행압밀하중 산정에 있어서 설계자의 임의적 판단을 최소화 할 수 있으며, Casagrande(1936), Sridharan(1991) 방법에서와 같이 동일한 실험결과인 그림 21(b)에서 선행압밀하중을 산정할 수 없었다. 한편, Silva(1970) 방법으로 산정한 선행압밀하중은 Casagrande(1936) 방법을 적용한 경우와 유사한 결과를 나타낸다는 기존연구결과와 비교할 때, 본 연구에서도 일부 시험결과에서 Casagrande(1936) 방법이 다소 크게 산정되었지만 대체로 유사한 선행압밀하중을 산정하는 것으로 검토되었다.

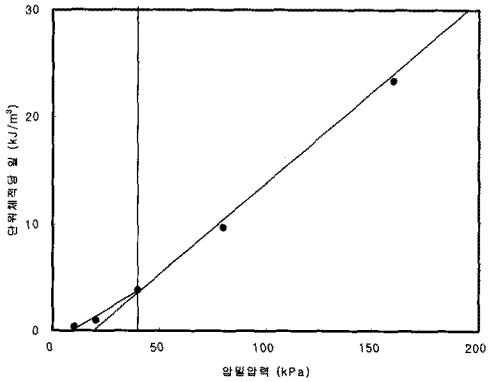
Schmertmann(1955)방법의 경우, 그림 22에 나타낸 바와 같이, 선행압밀하중을 평가하는데 있어서, 다른 방법들에 비해 가장 까다로운 방법이라 할 수 있다. 이 방법을 적용할 경우에는, 정규압밀영역에서 제하시켜서, 재압축지수(C_r)을 산정해야 하는 번거로움이 따른다. 이 때, Schmertmann(1955)은 선행압밀하중보다 높은 압밀압력 단계에서 제하할 경우, 어느 하중단계에서도 동일한 재압축지수가 산정된다는 것을 수많은 압밀시험을 통해서 발견하게 되었다. 또한, Casagrande(1936)방법을 적용하여, 선행압밀하중을 평가한 후, 간극비 변화곡선이 대칭되는 위치에서 선행압밀하중을 다시 산정해야하는 절차가 요구된다. 본 연구에서 실시된 7개의 압밀시험결과에서 모두 Casagrande(1936) 방법보다 Schmertmann(1955)방법을 적



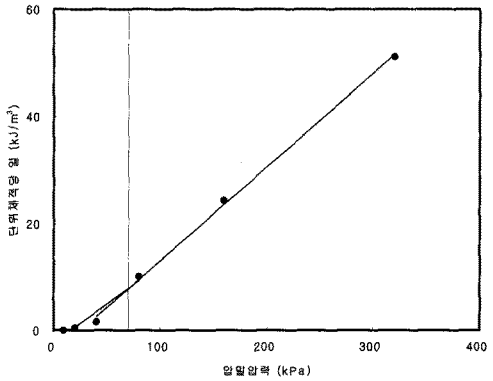
(a) A(심도 2.0m, 준설매립층)



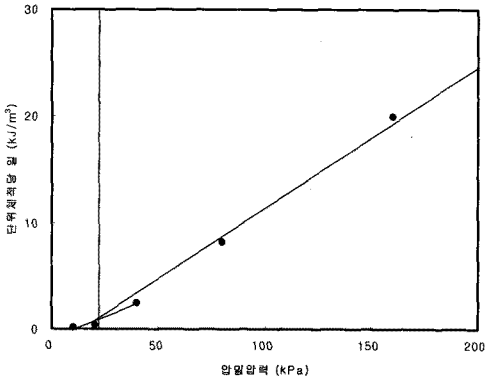
(b) B(심도 3.0m, 준설매립층)



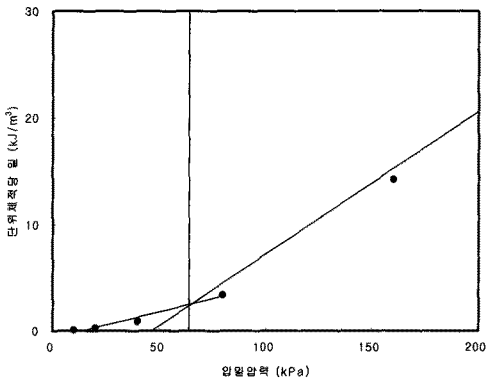
(c) C(심도 2.0m, 준설매립층)



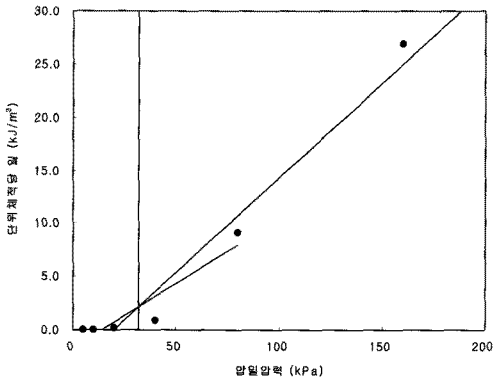
(d) A-1(심도 8.0m, 원지반층)



(e) B-1(심도 8.0m, 원지반층)

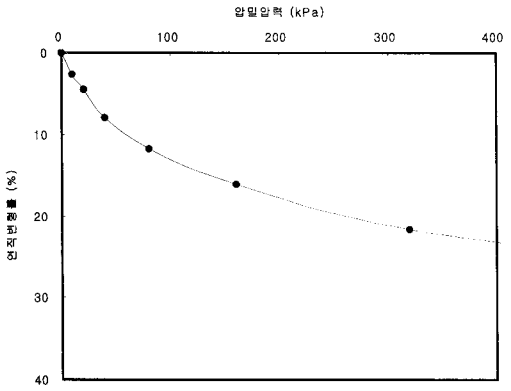


(f) C-1(심도 9.0m, 원지반층)

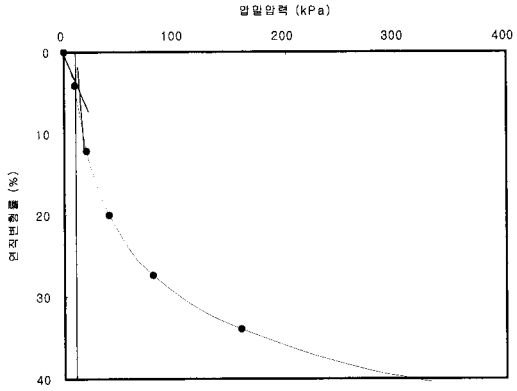


(g) D-1(심도 11.0m, 원지반층)

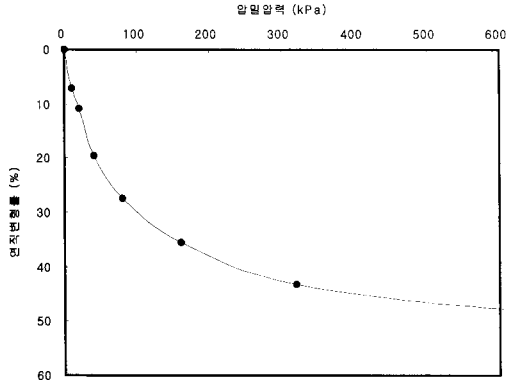
그림 18. Becker 방법으로 산정된 선행압밀하중(1987)



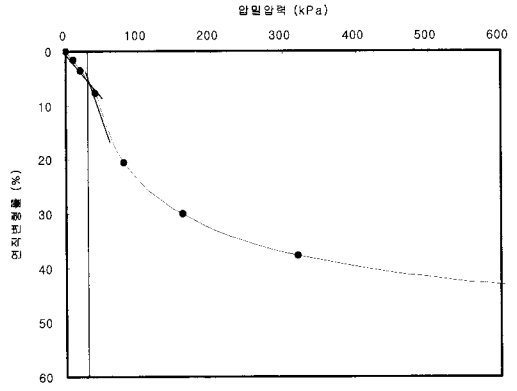
(a) A(심도 2.0m, 준설매립층)



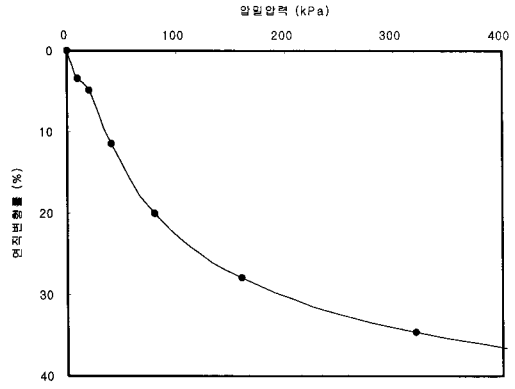
(b) B(심도 3.0m, 준설매립층)



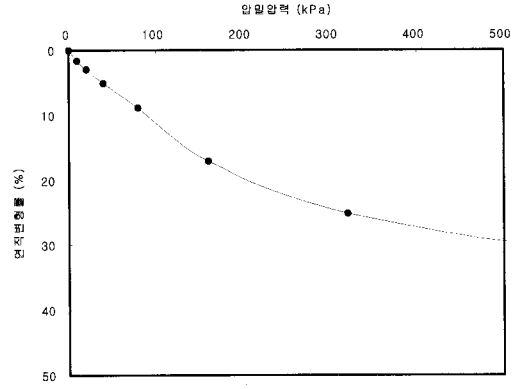
(c) C(심도 2.0m, 준설매립층)



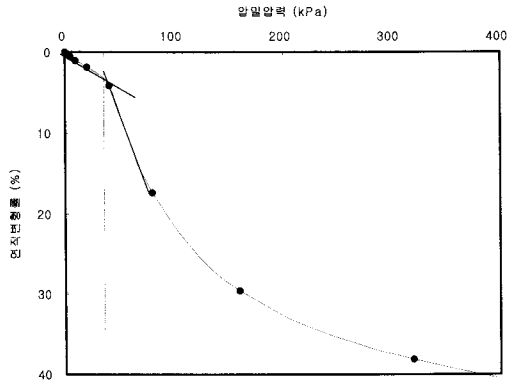
(d) A-1(심도 8.0m, 원지반층)



(e) B-1(심도 8.0m, 원지반층)

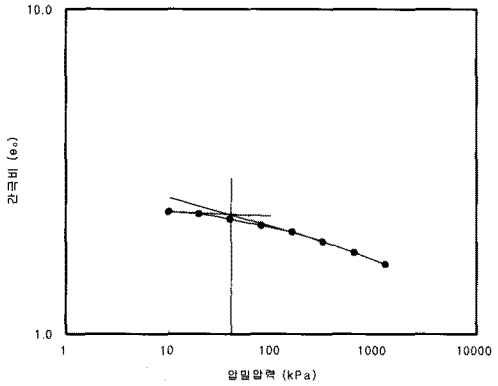


(f) C-1(심도 9.0m, 원지반층)

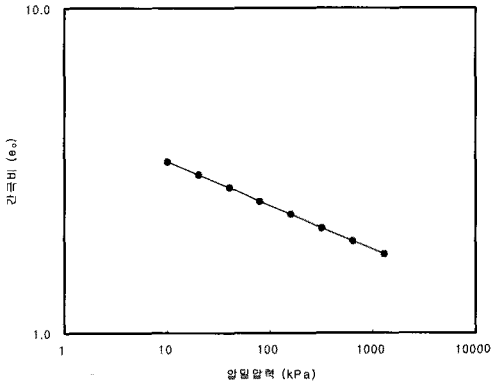


(g) D-1(심도 11.0m, 원지반층)

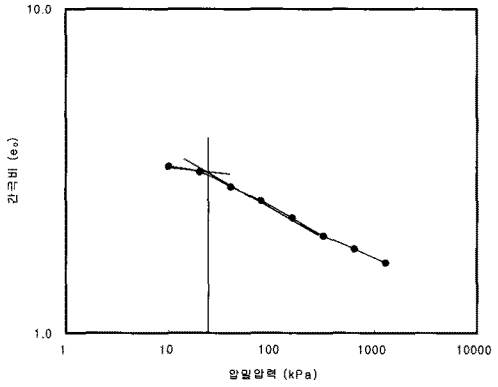
그림 19. Sällfors(1975) 방법으로 산정된 선행압밀하중



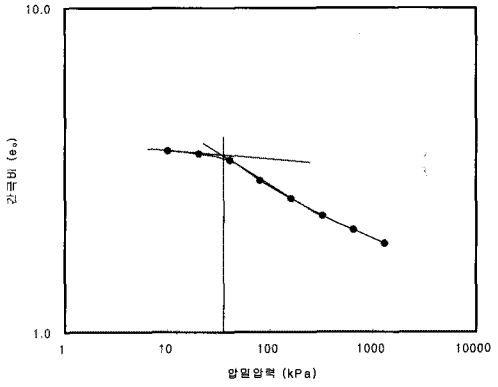
(a) A(심도 2.0m, 준설매립층)



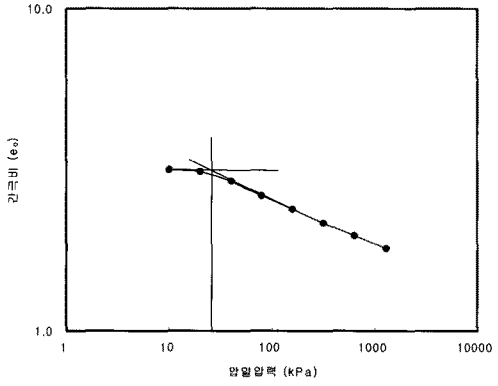
(b) B(심도 3.0m, 준설매립층)



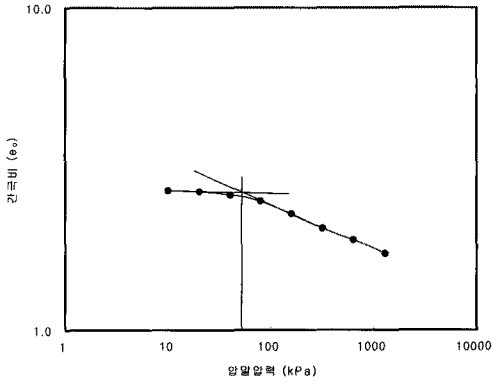
(c) C(심도 2.0m, 준설매립층)



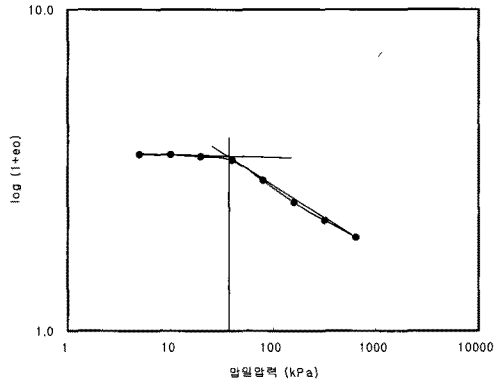
(d) A-1(심도 8.0m, 원지반층)



(e) B-1(심도 8.0m, 원지반층)

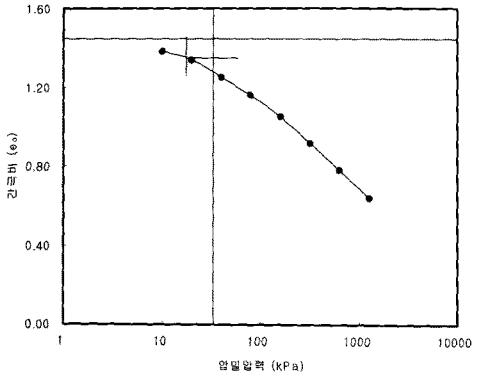


(f) C-1(심도 9.0m, 원지반층)

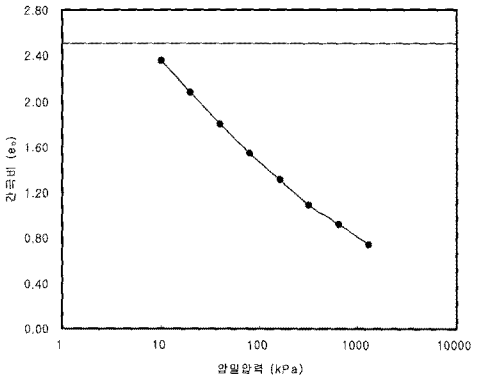


(g) D-1(심도 11.0m, 원지반층)

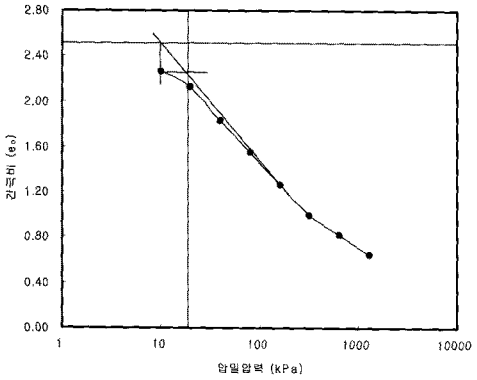
그림 20. Sridharan(1991)방법으로 산정된 선행압밀하중



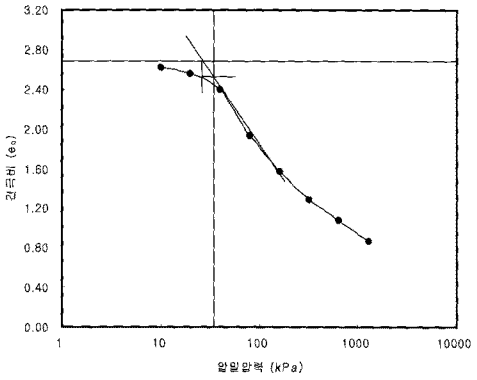
(a) A(심도 2.0m, 준설매립층)



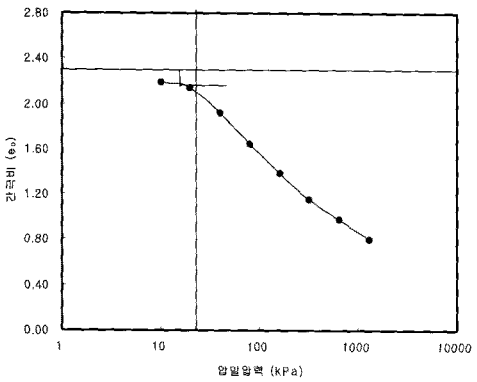
(b) B(심도 3.0m, 준설매립층)



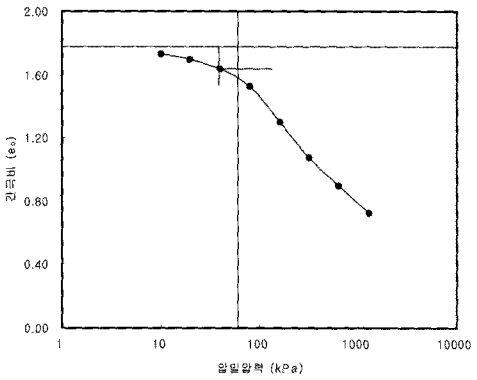
(c) C(심도 2.0m, 준설매립층)



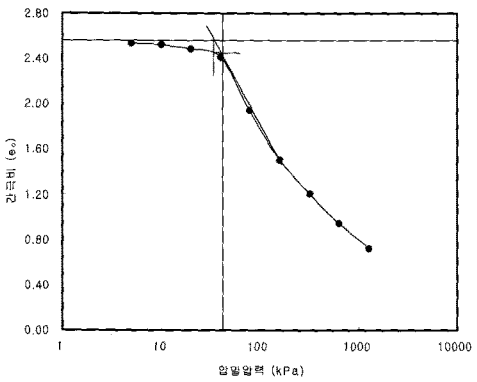
(d) A-1(심도 8.0m, 원지반층)



(e) B-1(심도 8.0m, 원지반층)

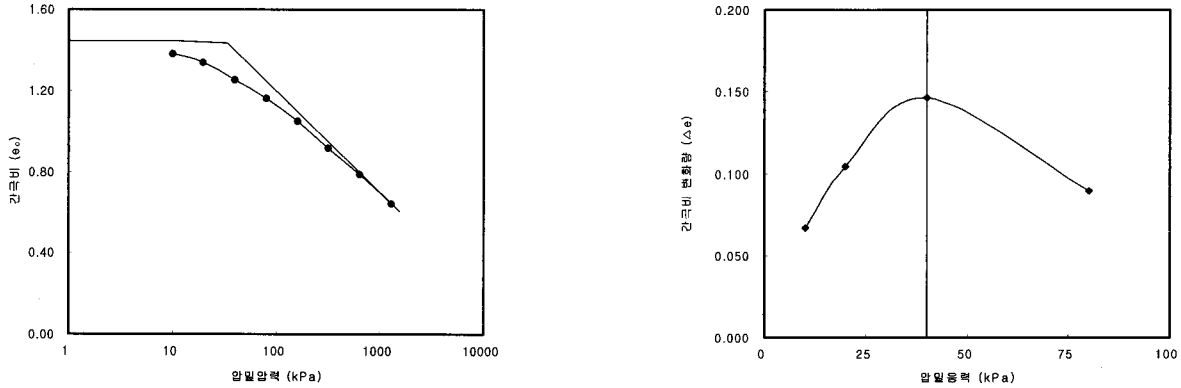


(f) C-1(심도 9.0m, 원지반층)

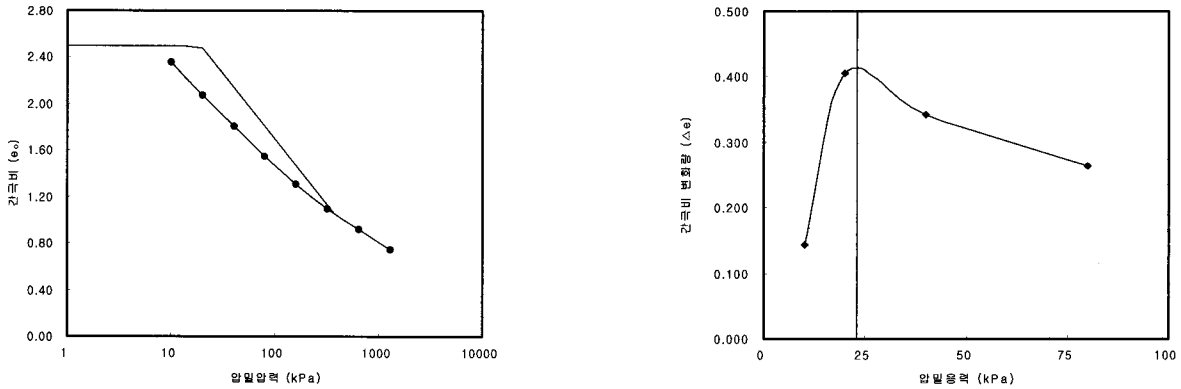


(g) D-1(심도 11.0m, 원지반층)

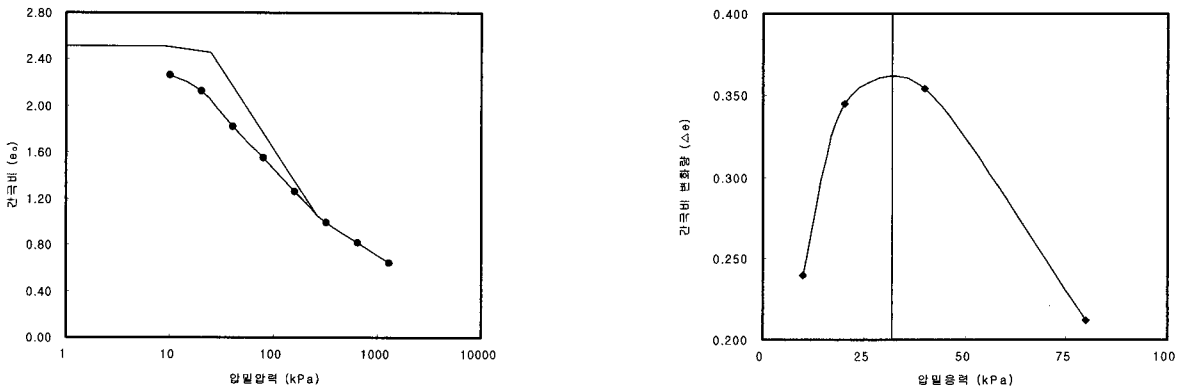
그림 21. Silva(1971) 방법으로 산정된 선행압밀하중



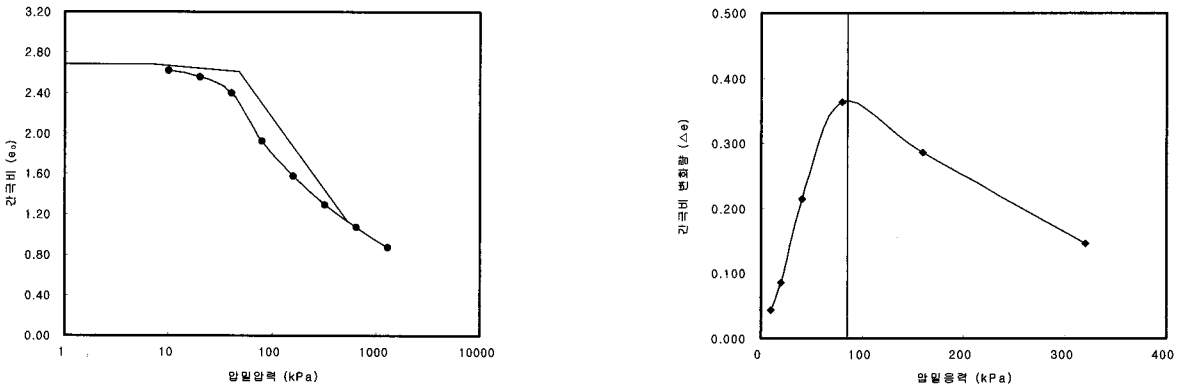
(a) A(심도 2.0m, 준설매립층)



(b) B(심도 3.0m, 준설매립층)



(c) C(심도 2.0m, 준설매립층)

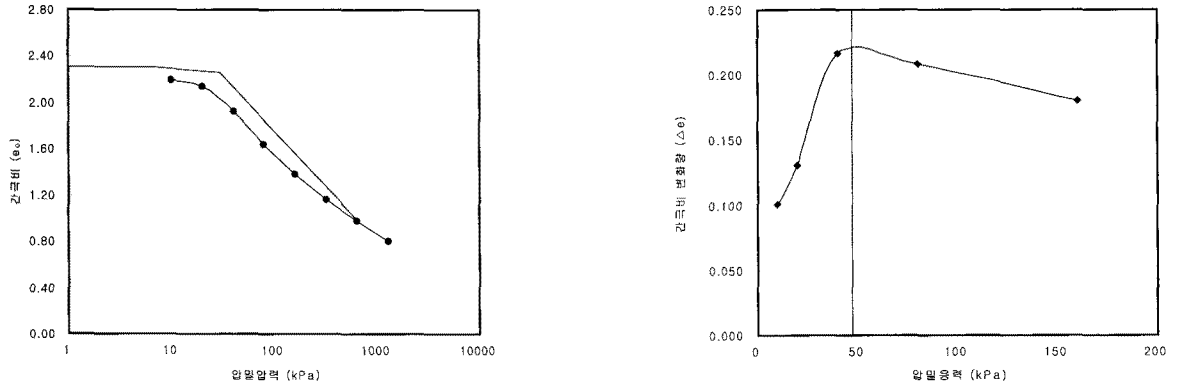


(d) A-1(심도 8.0m, 원지반층)

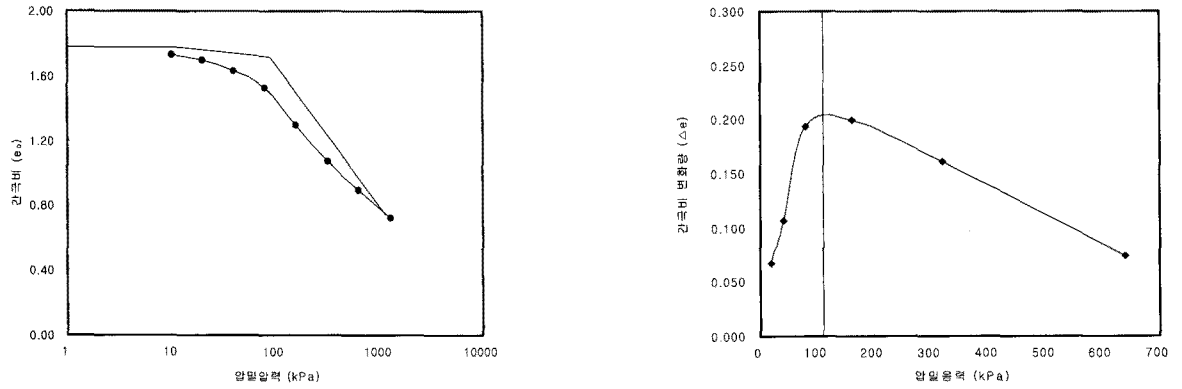
그림 22. Schmertmann 방법으로 산정된 선행압밀하중(1955)

용할 경우, 선행압밀하중이 크게 평가되는 것으로 나타났다.

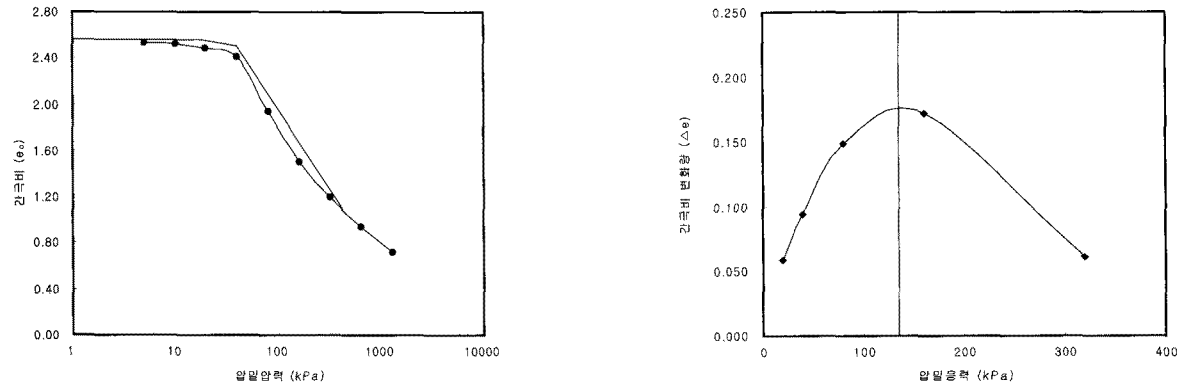
Schmertmann(1955) 방법을 이용하여 산정하는 보정압축지수는 약 50년 전에 만들어진 방법으로서, 압축지수 보정방법이 만들어진 그 당시와 현재의 시료채취 기술은 상당한 차이가 있으므로 이에 대한 재평가가 요구된다. 또한, 기존의 여러 가지 방법들을 이용하여 산정한 선행압밀하중 결과를 나타낸 표 3을 살펴보면, 모든 시료에서 Schmertmann(1955) 방법을 이용할 경우, 6~95kPa 까지 선행압밀하중이 Casagrande(1936) 방법을 이용할 경우보다 크게 산정된 것을 알 수 있다. Casagrande(1936) 방법도 선행압밀하중 산정시 최소곡률 반경 산정에 있어서 개인차가 크게 발생되는 문제점을 지니고 있지만, Schmertmann(1955) 방법의 경우, 모든 시료에 대해 일률적으로 초기간극비의 0.42배에 해당되는 위치에서 반드시 두 곡선이 만나게 된다는 가정조건도 이와 같은 결과에 크게 영향을 끼쳤다고 할 수 있을 것이다. 그리고, 압밀시험시 발생되는 2차 압밀 등의 영향으로 선행



(e) B-1(심도 8.0m, 원지반층)



(f) C-1(심도 9.0m, 원지반층)



(g) D-1(심도 11.0m, 원지반층)

그림 22. Schmertmann 방법으로 산정된 선행압밀하중(1955) (계속)

압밀하중 이후에 압밀곡선이 휘어지는 경향을 나타내는 경우에는, 보정압축지수를 산정하기가 더욱 더 어려워지는 경우도 발생된다.

앞에서 언급한 제한사항이나 문제점들을 개선하기 위해서, 현재의 시료채취 기술을 반영하여 재평가한다면, 시험방법에서 제시한 바와 같이 인위적으로 조성한 교란영역 이외에 불교란 영역에서의 시료채취에 의한 교란효과가 감소될 수 있으므로, 모든 곡선이 $0.42e_o$에서 만나게 되는 가정조건과 달라질 수 있을 것으로 판단된다. 또한, Schmertmann(1955) 보정방법은 시료의 Consistency에 대한 영향이 반영되지 못하였으므로, 앞에서 제시한 내용과 유사하게 소성지수(PI)를 이용한 고소성 점토와 저소성 점토의 보정방법에 대한 구분이 가능할지에 대해 추가적인 실험 및 연구를 통하여 제시되어야 할 것이다.

본 연구에서 준설매립층 3개소, 원지반층 4개소에서 채취한 불교란 시료에 대해 표준압밀시험을 통해 선행압밀하중 산정시 이용한 기존의 8가지 방법들의 적용가능성을 종합적으로 분석하면 다음과 같다.

준설매립층에서 채취한 시료에 대해 압밀시험시 e-logP 곡선상에서 Casagrande 방법을 적용하기 위하여 최소곡률반경을 결정할 경우에 과압밀 및 정규압밀 영역의 구분이 불가능한 시험결과에서는 Casagrande(1936) 이외의 방법을 이용한다 할지라도, 각각의 산정방법들에서도 과압밀 및 정규압밀 영역이 명확하게 구분되지 못하므로, 선행압밀하중 산정에 있어서 설계자의 주관적인 판단이 반영될 수밖에 없다. 따라서, Casagrande(1936) 방법 이외에 여러 가지 다른 방법들을 이용한 선행압밀하중 산정은 e-logP 곡선상에서 명확하게 변곡점이 구분되지 않는다고 할지라도 그림 15(a)의 e-logP 곡선과 같이 과압밀 및 정규압밀 영역을 어느 정도 구분할 수 있을 때 가능하다고 판단된다. 또한, 준설매립지반과 같이 대변형이 발생되는 경우에 Casagrande(1936) 방법 적용시 정규압밀영역의 비선형적인 곡선상에서 직선부분을 연장하여 선행압밀하중을 산정할 경우, 어느 위치에서 직선부분을 산정할 것인가에 따라 오차가 많이 발생할 수 있다. 이와 같은 현상은 Schmertmann(1955) 방법을 이용하여 보정압축지수를 산정할 경우에도 해당되는 문제점이다. 또한, 현재까지 가장 많이 지적되어온 최소곡률반경의 위치산정과 간극비에 해당되는 Y축의 스케일을 어떻게 정하느냐에 따라 선행압밀하중은 크게 달라질 수 있다.

Janbu-1, 2(1969) 방법에 의해 선행압밀하중을 산정하기 위하여 각각 Constrained Modulus(M)와 최소 r(Long Term Time Resistance number) 산정시 개인에 따른 주관적인 판단의 여지가 많아 준설매립층에 대한 적용은 한계가 있다고 판단된다.

Sällfors(1975) 방법도 준설매립층의 압밀시험에서 나타나는 특성인 정규압밀영역에서의 비선형적인 곡선과 과압밀 영역에서 초기직선 부분이 명확하게 나타나지 않는 경우에는 선행압밀하중 산정이 어렵다고 판단된다. 또한, 표준압밀시험의 경우, CRS 시험과 달리 압밀압력별로 얻어지는 변형률의 값을 조밀하게 얻을 수 없으므로, 압밀압력 재하단계를 좀 더 조밀하게 적용할 경우에 적용이 가능할 것이다.

압밀시험에서 대변형 특성을 나타내는 준설매립지반에서 선행압밀하중 산정을 위하여 Schmertmann(1955) 방법의 적용성을 살펴보면, 표 3에 나타낸 바와 같이 산정된 선행압밀하중이 기존의 다른 방법들과 비교할 때 매우 크게 나타난 것을 알 수 있다. 이와 같은 원인은 앞에서 제시한 바와 같이 보정압축지수 산정시 $0.42e_o$를 이용한 점과 정규압밀 영역에서의 비선형 특성을 나타내는 압밀곡선을 이용하여, 간극비 변화곡선에서 대칭점을 산정한 결과라고 판단된다. 따라서, Schmertmann(1955) 방법을 개선하지 않고 그대로 적용한다면, 준설매립지반과 같이 압밀시험시 대변형의 원인으로 압밀곡선의 정규압밀 영역에서 비선형 특성을 나타내는 경우에는 선행압밀하중 산정에 있어서 주의가 요망된다.

기존에 제시된 선행압밀하중 산정방법들 중에서, 선행압밀하중 산정시 개인의 주관적인 판단을 최소화 할 수 있고, 산정절차가 비교적 간략하며, 특히, 준설매립층과 같이 대변형 조건에서 압밀곡선상의 과압밀 및 정규압밀 영역이 확실하게 구분되지 않은 조건에서도 Becker(1987), Silva(1970), Sridharan(1991) 방법을 적용한다면, 다른 방법들과 비교할 때 준설매립지반의 선행압밀하중 산정이 가능하다고 판단된다.

5. 결 론

광양항 인근의 준설매립층과 원지반층에서 채취한 해성점토 시료를 이용, 대상지반의 압밀이력을 보다 정도 높게 평가하기 위하여, 기존에 제시된 다양한 방법을 이용하여 선행압밀하중을 산정하였다. 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 준설매립층에서 채취한 시료에 대해 압밀시험시 e-logP 곡선상에서 Casagrande(1936) 방법을 적용하기 위하여 최소곡률반경을 결정할 경우에 과압밀 및 정규압밀 영역의 구분이 불가능한 시험결과에서는 Casagrande(1936) 이외의 선행압밀하중 산정방법을 이용한다 할지라도, 각각의 산정방법들에서도 과압밀 및 정규압밀 영역이 명확하게 구분되지 못하므로, 선행압밀하중 산정에 있어서 설계자의 주관적인 판단이 반영될 수밖에 없다. 따라서, Casagrande(1936) 방법 이외에 여러 가지 다른 방법들을 이용한 선행압밀하중 산정은 e-logP 곡선 상에서 명확하게 변곡점이 구분되지 않는다고 할지라도 그림 15(a)의 e-logP 곡선과 같이 과압밀 및 정규압밀 영역을 어느 정도 구분할 수 있을 때 적용가능하다고 판단된다.

(2) Schmertmann(1955) 방법을 이용할 경우, 7가지 압밀시험결과에서 6~95kPa 까지 선행압밀하중이 Casagrande (1936) 방법을 이용할 경우보다 크게 산정되었다. 이와 같은 원인은 보정압축지수 산정시 모든 시료에 대해 일률적으로 초기간극비의 0.42배에 해당되는 위치에서 반드시 두 곡선이 만나게 된다는 가정조건과 정규압밀 영역에서의 비선형 특성을 나타내는 압밀곡선을 이용하여, 간극비 변화곡선에서 대칭점을 산정한 결과라고 판단된다. 따라서, Schmertmann(1955) 방법을 개선하지 않고 그대로 적용한다면, 준설매립지반과 같이 압밀시험시 대변형의 원인으로 압밀곡선의 정규압밀 영역에서 비선형 특성을 나타내는 경우에는 선행압밀하중 산정에 있어서 주의가 요망된다.

이와 같은 문제점들을 개선하기 위해서 현재의 시료채취 기술을 반영하여 보정방법을 재평가한다면, 시험방법에서 제시한 바와 같이 인위적으로 조성한 교란영역 이외에 불교란 영역에서의 시료채취에 의한 교란효과가 감소될 수 있으므로, 모든 곡선이 $0.42e_o$에서 만나게 되는 가정조건과 달라질 수 있을 것으로 판단된다. 또한, Schmertmann(1955) 보정방법은 시료의 Consistency에 대한 영향이 반영되지 못하였으므로, 소성지수(PI)를 이용한 고소성 점토와 저소성 점토의 보정방법에 대한 구분이 가능할지에 대해 추가적인 실험 및 연구를 통하여 제시되어야 할 것이다.

(3) 기존에 제시된 선행압밀하중 산정방법들 중에서, 선행압밀하중 산정시 개인의 주관적인 판단을 최소화할 수 있고, 산정절차가 비교적 간략하며, 특히, 준설매립층과 같이 대변형 조건에서 압밀곡선상의 과압밀 및 정규압밀 영역이 확실하게 구분되지 않은 조건에서도 Becker(1987), Silva(1970), Sridharan(1991) 방법을 적용한다면, 다른 방법들과 비교할 때 준설매립지반의 선행압밀하중 산정이 가능하다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. Becker, D. E., Crooks, J. H. A., Been, K., and Jefferies, M. G. (1987), "Work as a Criterion for Determination In-Situ and Yield Stresses in Clays", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.24, No.4, pp.549-564.
2. Casagrande (1936), "The determination of the Preconsolidation load and its practical significance", *Proc. of 1st ICSMFE*, 3, pp.60-64.
3. Janbu, N. (1969), "The Resistance Concept Applied to Deformation of Soils", *Proc. of 6th ICSMFE, Mexico City*, Vol.1, pp.191-196.
4. Jose, B. T., Sridharan, A., Abraham, B. M. (1989), "Log-log method for determination of preconsolidation pressure", *Am. Soc. Test. Mater. Geotech. Test. J.* 12, No.3, pp.230-237.
5. Negussey, D., Vaid, Y. P. (1995), "Estimating maximum past pressures in clay", *International Symposium on Compression and Consolidation of Clayey soils (IS-Hiroshima 95)*, pp.273-279.
6. Sällfors, G. (1975), "*Preconsolidation pressure of soft, high-plastic clays*", Ph.D. Thesis, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden.
7. Schmertmann, J. M. (1955), "The Undisturbed Consolidation of Clay", *Trans. ASCE*, Vol.120, p.1201.
8. Silva, P. F. (1970), "Uma construção gráfica para a determinação da pressáó de pré-adensamento deuma amostra de solo", *COBRAMSEF, Rio de Janeiro*, Vol.2, pp.219-223.
9. Sridharan, A., Abraham, B. M., Jose, B. T. (1991), "Improved technique for estimation of preconsolidation pressure", *Geotechnique 41*, No.2, pp.263-268.

(접수일자 2008. 2. 25, 심사완료일 2008. 7. 25)