

## 연약지반의 선행압밀하중 산정방법에 관한 연구

### The Estimation Method of Preconsolidation Pressure for Soft Ground

김병일<sup>1)</sup>, Byung-Il Kim, 이동현<sup>2)</sup>, Dong-Hyun Lee, 김성신<sup>3)</sup>, Sung-Shin Kim, 김창동<sup>4)</sup>, Chang-Dong Kim

<sup>1)</sup> (주)이제이텍 기술연구소 연구원, Researcher, Research & Development Center, EJtech

<sup>2)</sup> (주)이제이텍 토목설계부 대리, Engineer, Geotechnical Eng. & Design Dept., EJtech

<sup>3)</sup> (주)이제이텍 토목설계부 차장, Senior Engineer, Geotechnical Eng. & Design Dept., EJtech

<sup>4)</sup> (주)이제이텍 토목설계부 이사, Managing Director, Geotechnical Eng. & Design Dept., EJtech

**Synopsis :** In this study a series of in-situ and laboratory tests such as SPT, CPT, DMT and oedometer test are performed and then the stress history of soft ground is evaluated from the different method for estimating preconsolidation pressure. Casagrande method(1936), which is generally used in the conventional design, overestimates to the known preconsolidation pressure but Becker method(1987) similarly estimates to the known values. Also the results of DMT is similar to that of Becker method, and SPT and CPT overestimates the stress history of investigated ground.

**Key words :** Preconsolidation pressure, Soft ground, Stress history

## 1. 서 론

흙은 완전탄성체가 아니므로 과거에 작용했던 하중에 대해 일종의 기억을 소유하고 있는데, 이 중 과거에 경험한 최대하중을 선행압밀압력(Preconsolidation pressure,  $P_c'$ )이라 한다. 선행압밀하중은 흙의 고유특성인 응력이력(Stress history)의 영향을 반영하고 있는 값으로 이 값을 기준으로 하여 점성토의 압밀 특성이 크게 변화하기 때문에 관용적인 침하해석에서는 중요한 상수로 취급된다.

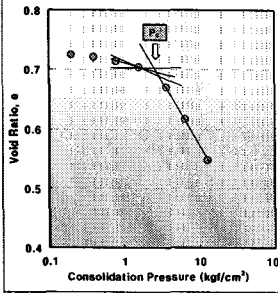
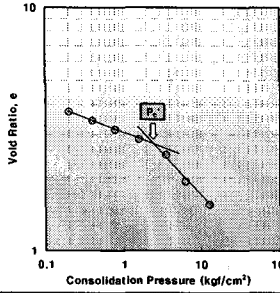
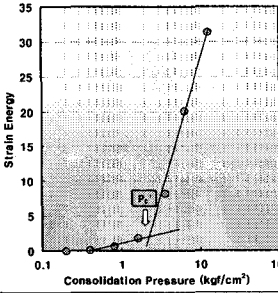
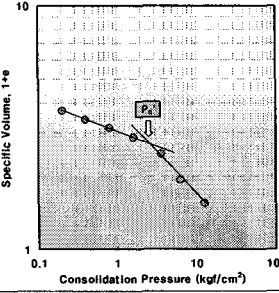
1차원 압밀침하량 산정시 가장 일반적으로 이용되는 점성토의 압밀 파라미터인 압축지수와 선행압밀하중의 측정이 광범위하게 연구된 바 있다. 실제로 가장 일반적으로 사용되는 방법은 표준압밀시험의 결과이다. 시공중 발생하는 간극수압의 해석을 통해 점토의 과압밀비(이하 OCR)이 1.1에서 2.5 사이인 경우 표준압밀시험에서 얻은 선행압밀하중은 실제 현장의 선행압밀하중을 나타낸다고 보고된 바 있다. Morin et al.(1983)과 Crooks et al.(1984)은 OCR값이 1.1보다 큰 점토에 대한 표준압밀시험에서 얻은 선행압밀하중값의 유용성을 입증하였고, 정규압밀된 점토에서는 선행압밀하중값을 과소평가하는 경향이 있다고 제시하였다. 또한, 채취된 시료가 교란되면 선행압밀하중이 과소평가되며, 유효상재압의 평가방법에 따라 과압밀비가 가변적이므로 지반의 전단강도나 물리적 특성 및 주변환경 등을 함께 고려하여 압밀상태를 평가하여야 된다.

현재까지 선행압밀하중을 산정할 수 있는 많은 방법이 제안되어 있지만, 산정방법과 개인에 따라 큰 차이를 보인다. 따라서 설계를 위해서는 설계할 지역의 부지 특성에 가장 적합한 산정방법을 비교, 검토하여 가장 정확한 선행압밀하중을 산정할 수 있는 방법에 해당하는 결과를 설계값으로 결정해야 한다. 이는 실내 시험과 원위치 시험들 간의 상호 검증을 통해서 이루어질 수 있다. 이에 본 연구에서는 인천 OO도로 설계시 적용되었던 실제 사례를 제시 하고자 하였다.

## 2. 선행압밀 산정 방법

현재 설계에서 가장 많이 이용되는 Casagrande(1936) 방법은 간극비의 축을 어느 구간에서 선택하는가에 따라 선행압밀하중이 달라질 수 있으며, 곡률점이 나타나지 않는 경우 산정이 어렵고, 시료의 교란 효과에 대한 고려가 미비하다. 이러한 문제점들은 현재까지 많이 거론되어 왔고 좀더 정확한 선행압밀하중의 선정을 위하여 Schmertman(1955), Akai(1960), Janbu et al.(1981), Becker et al.(1987), Christensen and Janbu(1992) 등 수많은 연구자들에 의하여 다양한 방법들이 제안되어 있다. 표 1은 기존 문헌에서 제시되어 국내 연약지반 설계시 이용 빈도가 높은 방법에 관한 간단한 설명을 제시한 것이다.

표 1. 여러 가지 선행압밀 산정방법

Casagrande(1936)	Ohira(1969)	Becker et al.(1987)	Sridharan et al.(1991)
			
<p>• 변곡점과 수평선의 이동 분점이 압밀곡선의 직선부 연장선과 만나는 점을 선행압밀하중으로 결정</p>	<p>• log e-log p' 평면상에서 OC구간과 NC구간의 직선이 만나는 점을 선행압밀하중으로 결정</p>	<p>• 변형에너지와 유효압밀압력 평면상에서 NC직선과 OC직선이 만나는 교점을 선행압밀하중으로 결정</p>	<p>• log (1+e)-log p' 평면상에서 NC직선과 OC직선이 만나는 교점을 선행압밀하중으로 결정</p>

원위치 시험 결과를 이용한 선행압밀 산정의 경우 각 시험별 OCR 추정식과 유효상재하중을 고려하여 추정하였으며, 이때 이용된 OCR 추정방법은 다음과 같다.

Hare et al.(1972)은 표준관입시험 결과를 이용하여 현장 OCR을 결정하고자 정규화된 표준관입저항치와 실내시험에 의해 측정된 OCR과의 경향을 분석하여 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$OCR_{SPT} = 0.193(N/\sigma_{v0}')^{0.689} \quad (1)$$

여기서, N은 30cm에 대한 타격횟수이고,  $\sigma_{v0}'$ 의 단위는 MPa이다.

Lunne et al.(1997)은 콘관입시험 결과를 이용하여 OCR을 추정할 수 있는 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$OCR_{CPT} = k \cdot \frac{q_t - \sigma_{v0}}{\sigma_{v0}'} \quad (2)$$

여기서,  $k=0.2\sim 0.5$ (Powell et al., 1988),  $q_t$ =보정된 선단저항력(kgf/cm<sup>2</sup>),  $\sigma_{v0}$ =상재하중(kgf/cm<sup>2</sup>),  $\sigma_{v0}'$ =유효상재하중(kgf/cm<sup>2</sup>)

Marchetti(1980)는 수평응력지수,  $K_D$ 와 OCR 분포 간의 상관성을 관찰함으로써 OCR을 추정할 수 있는 식을 다음과 같이 제안하였다.

$$OCR_{DMT} = 0.5K_D^{1.56} \quad (3)$$

이 관계식은  $K_D = 2$ 일 때 OCR값이 1이 된다는 것을(즉,  $K_{D,NC} \approx 2$ ) 내포하고 있으며 Aging, Cementation 및 구조를 이루지 않은 점성토에 대하여도 검증된 바 있다.

### 3. 실험

#### 3.1 실내 실험

본 실험에서는 시료의 교란효과를 없애고, 선행압밀하중을 제어하기 위해 재하-제하-재제하(Loading-Unloading-Reloading)를 반복하면서 일련의 표준압밀시험을 수행하였다. 이때 총 3개의 시료에 대하여 압밀시험을 실시하였으며, 각 시료당 압밀 사이클은 3회로 기지의 선행압밀하중 역시 3개의 값이 되도록 하였다. 사용된 시료의 기본 물성을 표 2에 제시하였다.

표 2. 재압밀시험에 사용된 시료의 특성

Sample No.	Depth (m)	w <sub>n</sub> (%)	G <sub>s</sub> (ND)	LL (%)	PI (%)	γ <sub>t</sub> (tf/m <sup>3</sup> )	≤0.02mm (%)	USCS
S-01	2.5	26.6	2.73	36.4	11.7	1.86	13	ML
S-02	4.5	35.7	2.74	32.1	8.6	1.90	11	ML
S-03	4.5	32.0	2.75	36.3	11.7	1.88	16	ML

#### 3.2 원위치 실험

심도 변화 즉, 유효응력 변화에 따른 각 선행압밀 산정방법별 특성을 살펴보고자 연약점토층을 대상으로 1.0m 간격으로 SPT 시험 및 연속적인 불교란 시료를 채취하는 올 샘플링(All sampling)을 수행하였다. 그림 1은 올 샘플링을 통해 채취된 시료의 심도별 특성을 나타낸 것이다. 일부 심도에서 N>6의 값을 보이지만 대체로 전 심도에 걸쳐 연약지반인 것으로 판단되며, 자연함수비는 약 20~40% 정도로 액성한계 부근에 위치하고 있다. 또한 전 심도에 걸쳐 점토함량은 약 10~20%내에 존재하였다.

불교란 시료 채취로 인하여 동일 위치에서 시험을 수행 할 수 없어 올 샘플링 실시 지점에서 약 50cm 이격하여 콘관입시험(CPT)과 평면팽창계(DMT) 시험을 실시하였다.

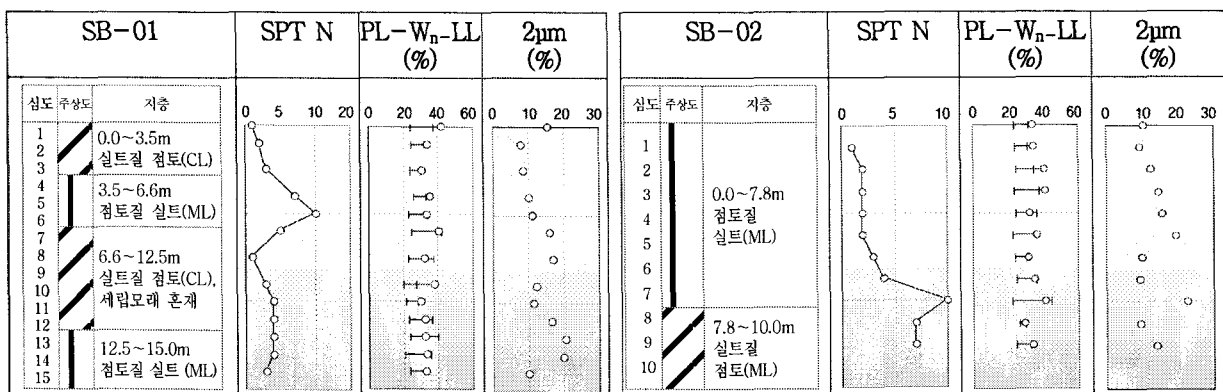


그림 1. 올 샘플링 시료의 특성

#### 4. 실험 결과 및 분석

그림 2에 재하-제하-재재하 시험 결과에 해당되는  $e$ -log  $p$  곡선을 제시하였다. 그림에 표기된 0.8, 1.6, 3.2kgf/cm<sup>2</sup>이 기지의 선행압밀하중값을 의미한다.

그림 3은 기지의 선행압밀하중 0.8, 1.6, 3.2kgf/cm<sup>2</sup>에 따른 각 방법별 산정 결과를 도시한 것이다. 그림에 제시된 바와 같이 모든 방법이 기지의 선행압밀하중을 과대 평가하는 경향을 보였다. 압밀하중 0.8 및 1.6kgf/cm<sup>2</sup>에서는 Becker(1987)법을 제외한 세 방법이 유사한 값을 보였지만, 압밀하중이 높은 편인 3.2kgf/cm<sup>2</sup>에서는 오히려 Casagrande(1936)법이 다소 다른 값을 보였다. 대체로 단위 체적당의 변형에너지(Strain energy)를 이용하는 Becker(1987)법이 기지의 선행압밀하중에 대하여 가장 근접한 값을 산정하였다.

위와 같이 각 산정방법별 서로 다른 선행압밀하중값을 도출하는 바 본 연구에서는 기지의 선행압밀하중과 산정방법별 선행압밀하중의 비로 표현되는 오차를 계산하여 정량적인 비교를 실시하였다. 표 2와 그림 4는 그 결과를 제시한 것이다.

표 2와 그림 2를 살펴보면 Casagrande(1936)법은 기지의 선행압밀하중에 대해 0.0~75.0(평균=33%), Sridharan(1991)법의 경우 6.3~75.0(평균=33%), Ohira(1969)법의 경우 9.4~100.0(평균=42%), Becker(1987)법의 경우 1.7~61.7(평균=13%)의 차이를 보여, Becker(1987)법의 오차가 가장 작은 것으로 나타났다. 또한, 모든 산정방법들이 선행압밀하중이 증가할수록 오차가 감소함을 보였고, 점차적으로 각 방법별 편차가 감소하였다.

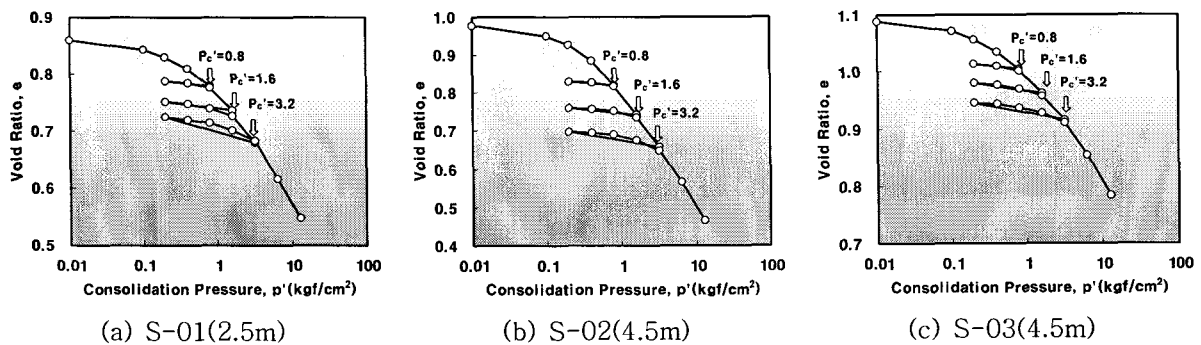


그림 2. 재하-제하-재재하(LUR-Cycle)에 따른 간극비-유효응력 곡선

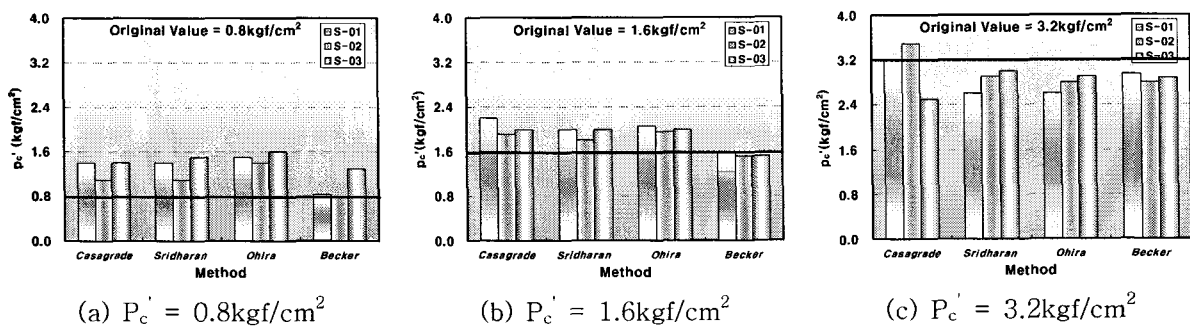


그림 3. 각 선행압밀하중 산정방법에 의한 결과(실내시험 결과)

그림 5는 을 샘플링으로 채취된 시료에 대하여 실시된 표준압밀시험결과를 이용한 선행압밀하중과 을 샘플링 실시 지점에서 약 50cm 이격하여 실시된 원위치 시험(CPT, DMT) 결과에 의한 선행압밀하중을 함께 도시하였다. 그림에 제시된 바와 같이 두 결과 모두 Casagrande(1936)법이 가장 큰 선행압밀하중을 평가하였고, Becker(1987)법이 가장 작은 값을 평가하였다. Ohira(1969)법과 Sridharan(1991)법은 그 중간값을 보였다. 이는 실내 재압밀시험 결과와도 동일한 경향이다. 특히, Becker(1987)법의 경우

심도별 DMT 결과와 유사한 값을 보이는 것으로 나타났다.

표 2. 선행압밀 산정방법별 오차

Sample No.(Depth)	$P_c'$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	Error (%)			
		Casag.	Sridh.	Ohira	Becker
S-01 (2.5m)	0.8	75.0	75.0	87.5	3.6
	1.6	37.5	25.0	28.1	1.7
	3.2	0.0	18.8	18.8	8.1
S-02 (4.5m)	0.8	37.5	37.5	75.0	3.6
	1.6	18.8	12.5	21.9	5.5
	3.2	9.4	9.4	12.5	12.4
S-02 (4.5m)	0.8	75.0	87.5	100.0	61.7
	1.6	25.0	25.0	25.0	5.9
	3.2	21.9	6.3	9.4	10.4

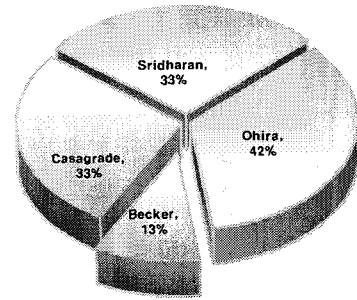


그림 4. 산정방법별 평균 오차

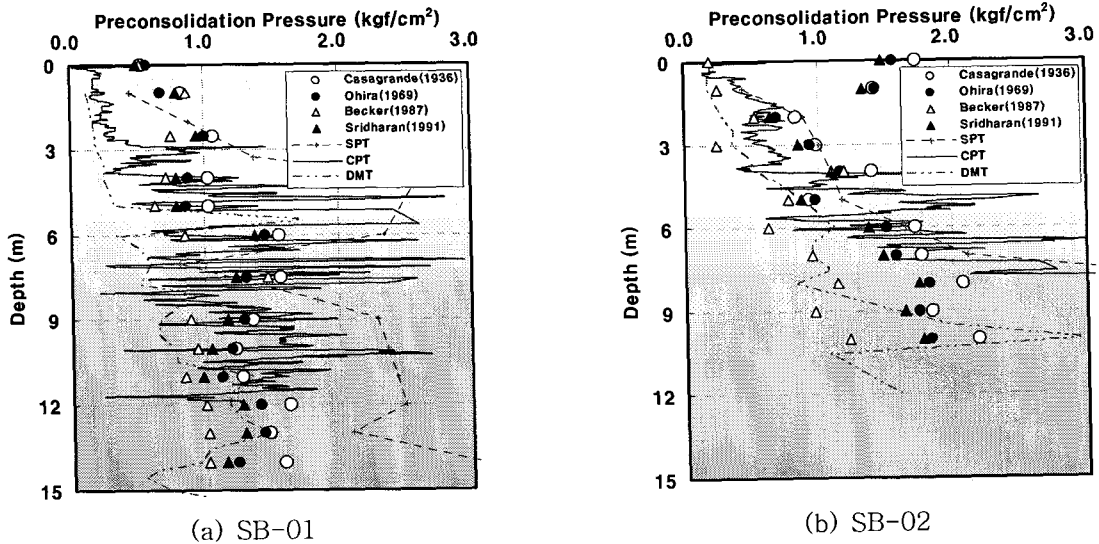


그림 5. 을 샘플링 및 현장시험결과와의 비교 분석

### 5. 결론

합리적인 연약지반 개량공법의 설계를 위해서는 해당 부지 특성에 적합한 선행압밀하중 산정방법으로 도출된 결과를 설계값으로 결정해야 할 필요가 있다. 본 연구에서는 재압밀시험과 원위치시험 결과에 대한 선행압밀하중을 여러 가지 방법으로 산정하여 비교, 검토하였으며, 이로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기지의 선행압밀에 대하여 Casagrande(1936)법은 평균 33%, Sridharan(1991)법의 경우 평균 33%, Ohira(1969)법의 경우 평균 42%, Becker(1987)법의 경우 평균 13%의 오차를 나타내었다.
2. 기존 설계 관행에서 가장 많이 이용되는 Casagrande(1936)법은 대체로 과대평가하는 경향을 보이며, Becker(1987)법은 실제 선행압밀하중에 근접한 값을 평가하는 경향이 있는 것으로 나타났다.
3. 실내 시험으로부터 산정된 선행압밀하중과 현장시험 결과로부터 산정된 선행압밀하중을 비교한 결과 Becker(1987)법과 평명평창계시험 결과가 매우 유사한 값을 보였고, SPT와 CPT는 다소 과대평가하는 경향을 보였다.

## 참 고 문 헌

- Becker et al.(1987), "Work as a criterion for determining in situ and yield stresses in class", CGJ, 24(4), pp. 549~564.
- Casagrande(1936), "The determination of the pre-consolidation load and its practical significance" 1st ICSMFE, 3, pp. 60~64.
- Sallfors, G.(1975), "Preconsolidation pressure of soft, high-plastic clays", Chalmers University of Technology, Goteberg, Sweden.
- Jose et al.(1989), "Log-log method for determination of preconsolidation pressure", ASTM GTJ, 12(3), pp. 230~237.
- Lunne, T., Robertson, P. K., and Powell, J.(1997). Cone penetration testing in geotechnical practice, Blackie Academic and Professional.
- Marchetti, S.(1980), In situ tests by flat dilatometer, ASCE, Vol. 106, No. GT3, pp. 299~321.
- Schmertmann (1955), "The undisturbed consolidation behavior of clay", Trans, ASCE, 120, pp. 1201~1211.
- Sridharan, A. Abraham, B. M. and Jose, B. T.(1991), Improved technique for estimation of preconsolidation pressure, Geotechnique 41, No. 2, pp. 263~268.