

## 점성토의 2차압축지수에 관한 연구

### The Study of Secondary Compression Index on Soft Clays

윤일형<sup>1)</sup>, Il-Hyung Yoon, 서정석<sup>2)</sup>, Jeong-Seog Seo, 도현영<sup>3)</sup>, Hun-Young Do

<sup>1)</sup>토지공사 건설관리처 팀장, Head of Team. Construction Management Office, KOLAND

<sup>2)</sup>토지공사 건설관리처 과장, Manager. Construction Management Office, KOLAND

<sup>3)</sup>토지공사 건설관리처 대리, Ass Manager. Construction Management Office, KOLAND

**SYNOPSIS** : Deformations of clays continue beyond the end of primary consolidation: this is secondary consolidation. Mesri(1973) have shown that  $C_{\alpha}'$  is related to the natural water content  $W_n$ . For clays,  $C_{\alpha}'$  is approximately equal to  $0.01W_n$ . And the ratio  $C_{ae}/C_c$  is approximately equal to 0.04. In this study, coefficient of secondary compression was analyzed by the consolidation tests datas in the 3 sites. In conclusion, coefficient of secondary compression was similar to Mesri's suggestions.

**Key words** : coefficient of secondary compression, factors influencing coefficient of secondary compression, coefficient of secondary compression for natural soil deposits, relationship between coefficient of secondary compression and compression index

## 1. 서 론

연약한 점토층에 성토 또는 구조물에 의한 하중이 작용하면 압축이 발생하는데 이 압축되는 양은 과잉간극수압이 소산되면서 압축되는 양과 과잉간극수압이 소산되고 난 다음에도 흙을 구성하고 있는 흙입자가 재배열되면서 계속 압축되는 양으로 구분할 수 있다. 전자는 1차압밀(primary consolidation)이라 하고, 후자는 2차압밀(secondary compression)이라고 한다. 2차압밀에 대한 이론은 많은 학자들이 레올로지(rheology)로 설명하고 있으나, 아직도 명확하게 정립된 이론이 없는 실정이다. 이러한 2차압밀은 일반적으로 1차압밀에 비하여 서서히 일어나며 압밀량도 작은 경우가 많다. 2차압밀침하량은 유기질토와 압축성이 큰 무질토인 경우에는 설계시 고려하여야 하나 과압밀된 무기질 점토에서는 2차압축지수가 대단히 작아 설계시 무시하는 경우가 많다. 이러한 2차압축지수는 실내시험 결과를 이용하여 추정할 수 있는데 본 연구에서는 경남 양산, 울산, 전북 군산지역에서 채취된 자연시료를 이용하여 표준압밀시험을 실시하여 국내 점성토의 2차압축지수 분포경향,  $C_{\alpha}' - W_n$ ,  $C_{ae} - \log P$ ,  $C_{ae}/C_c$ 의 관계를 산출하여 Mesri 등 외국학자들이 발표한 값들과 상호 연관성을 비교·분석하고자 한다.

## 2. 2차압밀침하량 산정방법

2차압밀침하량은 일반적으로 실내에서 압밀시험(consolidation test)결과를 이용하여 산정하는데 압밀시험시 각 단계별로 하중을 재하하면 재하하중에 의해 시료내부에 과잉간극수압이 발생하고 이 과잉간극수압은 시간이 경과함에 따라 서서히 소산되고 과잉간극수압이 소산되고 나면 2차압밀이 진행된다. 2차압밀이 진행되는 동안에 시간  $\log t$ 에 대한 변형곡선은 1차압밀과정처럼 선형으로 나타난다. 따라서 2차압밀침하량 계산에 필요한 2차압축지수는 그림 1로부터 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$C_{ae} = \frac{\Delta e}{\log t_2 - \log t_1} = \frac{\Delta e}{\log(t_2/t_1)} \quad (1)$$

여기서  $C_{ae}$  : 2차압축지수

$\Delta e$  : 간극비의 변화량(  $e_1 - e_2$  )

$t_1, t_2$  : 시간

따라서 2차압밀침하량은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$S_s = \frac{C_{ae} H_p}{1 + e_p} \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) = C_a' H_p \log\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (2)$$

여기서  $S_s$  : 2차압밀침하량

$$C_a' = \frac{C_{ae}}{1 + e_p}$$

$e_p$  : 1차압밀 완료시의 간극비

$H_p$  : 1차압밀 완료시의 점토층 두께(cm)

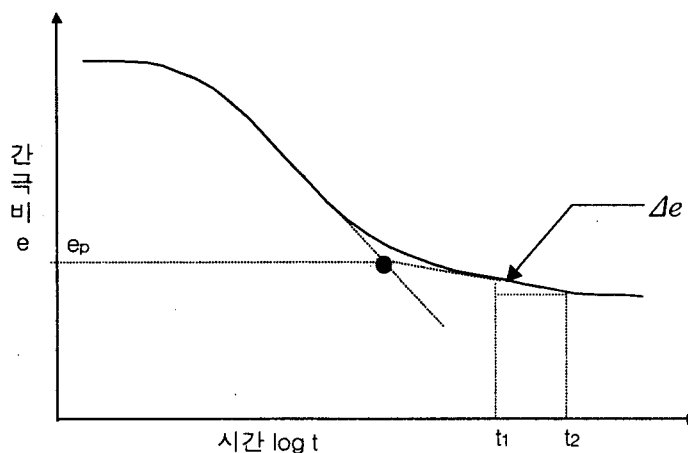


그림 1.  $e - \log t$  곡선

### **3. 2차압축지수에 대한 기존의 연구내용**

#### **3.1 2차압축지수에 영향을 주는 인자**

Mesri(1973)는 Coefficient of Secondary Compression의 논문에서 2차압축지수에 영향을 주는 인자에는 다음과 같은 것들이 있다고 하였다.

##### **3.1.1 압밀응력(Consolidation Pressure)**

정규압밀점도에서 2차압축지수는 압밀응력의 증가에 반비례하여 지속적으로 감소하며 이러한 경향은 대부분의 점토에 해당된다. 그러나 일부 점토에 있어서는 2차압축지수가 압밀응력, 간극비와는 무관하여 일정한 값을 보인다고 하였다.

##### **3.1.2 선행압밀하중(Precompression)**

선행압밀하중(과압밀)은 2차압축을 현저하게 감소시키고, 감소의 정도는 과압밀 정도와 연관된다. 선행압밀하중보다 작은 응력 범위에서 2차압축지수는 응력의 증가에 따라 증가하여 선행압밀하중을 초과할 때 까지 증가한 후 그 후에는 정규압밀점도의 경향을 보인다.

##### **3.1.3 지속하중(Sustained Loading)**

2차압축율은 선행압밀하중의 지속시간에 의해 영향을 받는다.

##### **3.1.4 시간(Time)**

실내시험 및 현장결과에 기초하여 대부분의 연구자들은 2차압축은 log로 나타낸 시간에서 대체적으로 선형이며, 몇개의 불교란 및 재성형한 흙에서의 실내시험에서는 시간에 따라 2차압축이 감소하는 경향을 보였다.

##### **3.1.5 온도(Temperature)**

2차압축율에 있어 온도의 영향은 더 중요하게 고려되어야 한다. 일례로 Simons(1965)은 압축성은 침축점의 결합함강도에 의존하기 때문에 시험온도가 증가하면 압축성은 감소한다고 주장했다.

##### **3.1.6 응력증가율(Rate of Increase in Effective Stress)**

2차압축에서 하중을 적용하는 비율과 방법이 2차압축에 영향을 미치는 문제는 어려운 문제로서 그 이유는 하중을 적용하는 비율 및 방법과 유효응력증가율 사이의 관계가 명확하지 않기 때문이다. 대부분의 연구자들은 2차압축지수가 압력증가나 압력증가비와 무관하다는 의견을 보였다.

### 3.1.7 재성형(Remolding)

재성형은 2차압축율을 일반적으로 감소시키며 2차압축은 교란시료보다 불교란시료에서 더 많이 발생한다. 교란시료에 하중을 재하하면 2차압축지수는 유효응력이 증가하는 만큼 증가하나 어느 하중단계에서 최고값에 도달하고 그 후 부터는 감소하여 종국에는 불교란시료와 근접하게 된다.

### 3.1.8 시료두께(Sample Thickness)

2차압축지수는 시료의 두께와는 무관하다고 여겨진다.

## 3.2 2차압축지수와 자연함수비, 압축지수의 상관관계

Mesri(1973)등은 2차압축지수 ( $C_a'$ )와 자연함수비 ( $W_n$ ) 및 압축지수 ( $C_c$ ) 사이에 그림 2 및 표 1의 상관관계가 있다고 제시하며, 2차압축지수는 자연함수비 및 압축지수가 증가함에 따라 증가한다고 하였다.

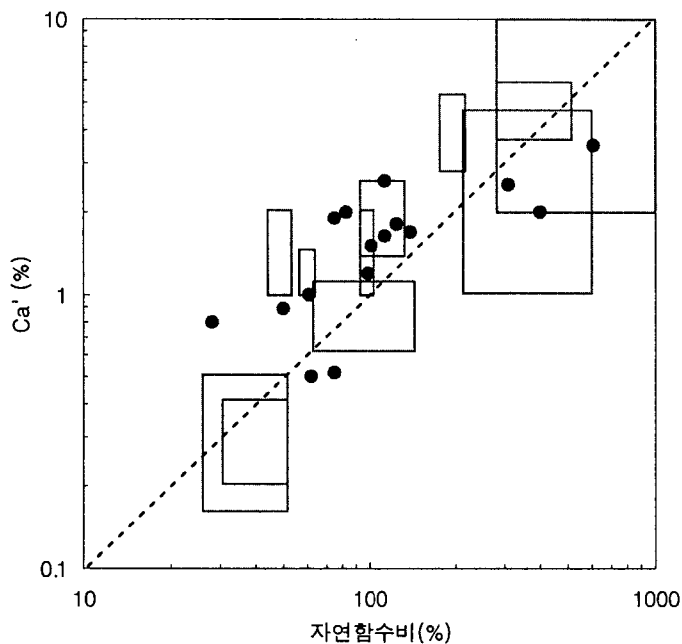


그림 2. 자연퇴적토에 대한  $C_a'$ (Mesri, 1973)

표 1 2차압축지수 ( $C_{ae}$ )와 압축지수 ( $C_c$ )의 관계

Nature and origin of soils	$C_{ae} / C_c$
Clay from Whangamarino(New Zealand)	0.03 - 0.04
Clays from eastern Canada	0.025 - 0.06
Clay from western Canada	0.026
Varved clay from New Liskeard(Canada)	0.03 - 0.06
Mexico City clay	0.03 - 0.035
Organic clay from vasby(Sweden)	0.05 - 0.07
Clays from north east USA	0.025 - 0.06
San Francisco clay (USA)	0.04 - 0.06
Organic silts(USA)	0.035 - 0.06
Bankok clay(Thailand)	0.02 - 0.03

#### 4. 국내 점성토의 2차압축지수

국내 점성토의 2차압축지수 분포경향 및 토질정수와의 상관관계를 파악하고 외국의 연구자들이 발표한 내용과 비교하기 위하여 경남 양산, 울산, 전북 군산지역의 연약지반에 분포하고 있는 무기질점토의 불교란시료를 이용하여 131회의 표준압밀시험을 실시하였으며, 그 시험결과를 분석한 바 다음과 같았다.

##### 4.1.1 2차압축지수와 자연함수비

2차압축지수 ( $C_a'$ )는 그림 3과 같이 0.1~1.35% 사이에 분포하고 있으며 대체적으로 자연함수비 ( $W_n$ )가 증가함에 따라 2차압축지수도 증가하는 것으로 나타나 Mesri가 제시한

$C_a' = 0.01 W_n$ 과 유사한 경향을 보였으나, 정규압밀점토에서는 Mesri가 제시한 값보다 약간 크며 과압밀점토에서는 작았다. 특히 과압밀비가 클수록 2차압축지수는 작은 값을 보여 선행압밀하중이 2차압축지수의 분포범위 결정에 중요한 영향을 주는 것으로 판단된다.

##### 4.1.2 2차압축지수와 압축지수

2차압축지수 ( $C_{ae}$ )/ 압축지수 ( $C_c$ )의 값은 그림 4에서와 같이 0.01~0.055 사이에 분포하고 평균값은 0.031인 것으로 분석되었다.  $C_{ae} / C_c$  값은 과압밀된 상부층을 제외하면 심도에 관계없이 일정하게 분포하고 있어 외국 연구자들이 제시한 표 1과 유사한 경향을 보였다. 또한 그림 5와 같이 압축지수가 증가하면 2차압축지수도 증가하여 상관성을 분석한 결과  $C_{ae} = 0.0334 C_c - 0.001$ 의 관계식이 도출되었다.

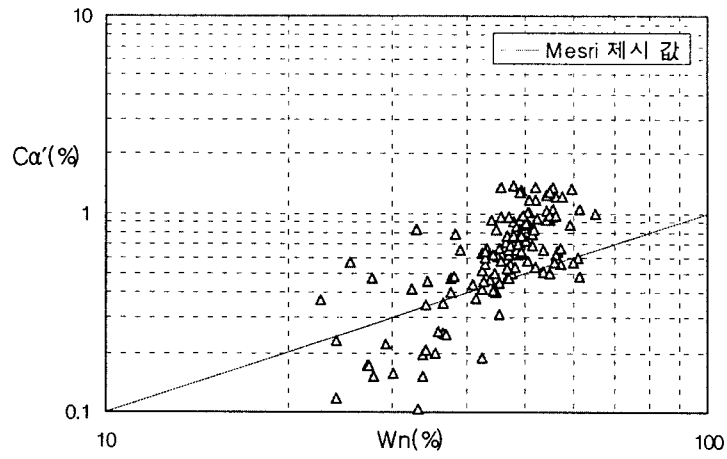


그림 3 자연함수비와  $C_a'$ 의 관계

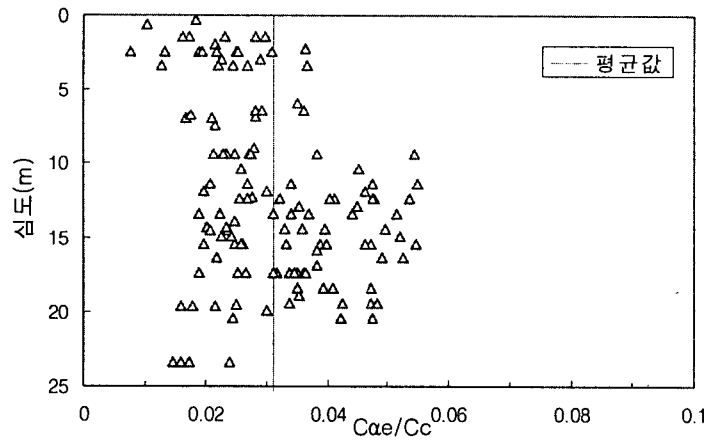


그림 4. 심도 -  $C_{ae}/C_c$  관계

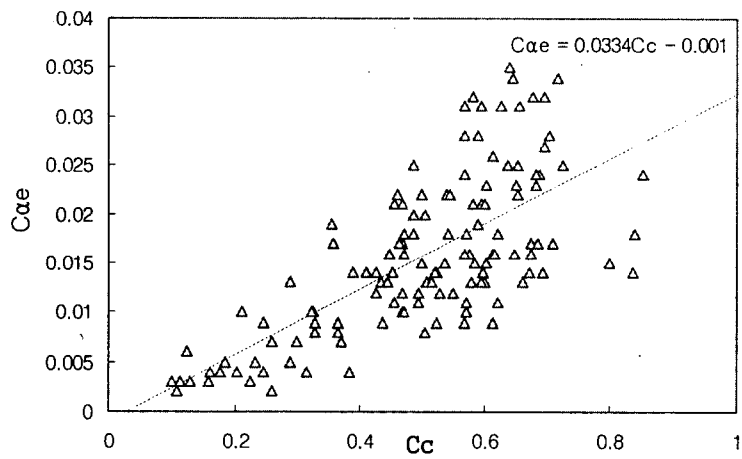


그림 5.  $C_c - C_{ae}$  관계

### 4.1.3 2차압축지수와 압밀응력

압밀응력 증가에 따른 2차압축지수의 변화추세를 분석하기 위하여 동일 보링공에서 채취된 5개의 자연시료에 대한 표준압밀시험을 실시하였으며 그 결과는 그림 6에서와 같이 선행압밀하중보다 작은 단계의 하중에서는 하중이 증가 할수록 2차압축지수도 함께 증가하여 선행압밀하중 근처에서 최고값에 도달한 후에는 하중이 증가하여도 2차압축지수는 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 과압밀영역의 하중단계에서는 선행압밀하중에 의한 선행압축이 2차압축을 감소시키는 것으로 사료된다.

아울러 응력증가율이 2차압축지수에 미치는 영향을 분석하고자 응력증가율과 하중재하 시간을 변화시켜 표준압밀시험과 비교한 바 그림 7에서와 같이 표준압밀시험에서는 2차압축지수가 선행압밀하중 근처까지는 증가한 후 감소하고 있으나, 응력증가율을 2배로 하고 하중재하 시간을 24시간, 48시간으로 변화를 주었을 때에는 2차압축지수는 선행압밀하중보다 큰 하중단계에서도 지속적으로 증가하는 경향을 보였다.

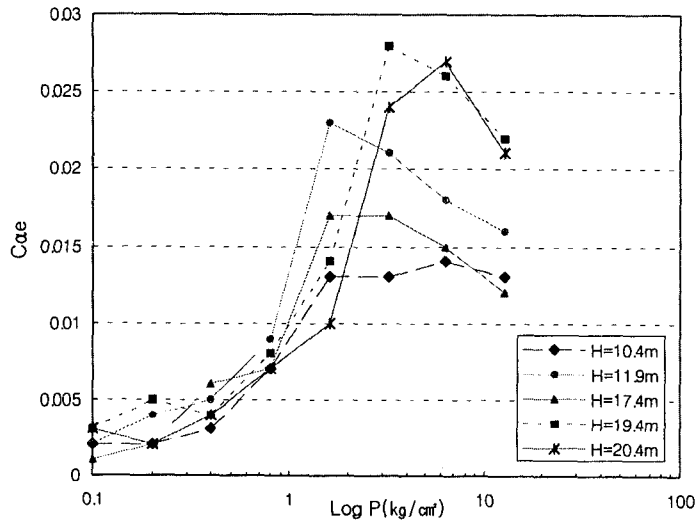


그림 6. Log P -  $C_{ae}$  관계

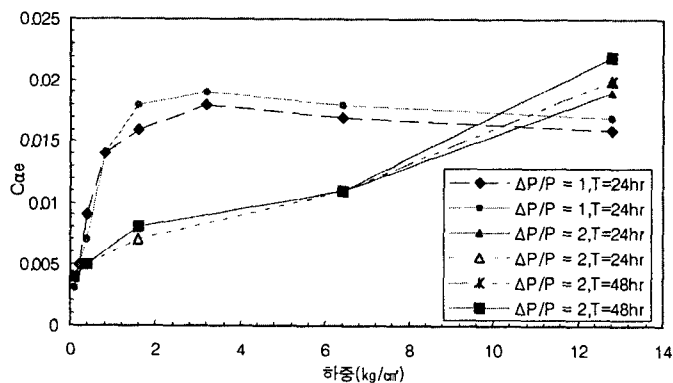


그림 7. 응력증가율과 2차압축지수의 관계

## 5. 결론

본 연구에서는 경남 양산, 울산, 전북 군산지역의 점성토에 대한 실내압밀시험을 통하여 2차압축지수를 산출하여 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 2차압축지수 ( $C_{\alpha}'$ )는 0.1~1.35% 사이에 분포하고, 대체적으로 자연함수비가 증가함에 따라 2차압축지수도 증가하는 것으로 나타났으며 Mesri가 제시한  $C_{\alpha}' = 0.01 W_n$ 과 유사한 경향을 보였으나, 정규압밀점토는 Mesri의 제시 값보다 약간 크게 과압밀점토에서는 작게 분포한다.
- 2) 2차압축지수는 과압밀비(OCR)에 반비례하며 선행압밀하중이 2차압축지수의 분포범위 결정에 중요한 영향을 주는 것으로 사료된다.
- 3)  $C_{ae}/C_c$ 의 값은 0.01~0.055사이에 분포하며 평균은 0.031이었다. 압축지수가 증가하면 2차압축지수도 증가하여 상관성을 분석한 결과  $C_{ae} = 0.0334 C_c - 0.001$ 의 관계식이 도출되었다. 이는 압축성이 큰 점성토가 2차압축도 크다는 것을 의미한다.
- 4) 2차압축지수는 선행압밀하중보다 작은 압밀응력에서는 응력의 증가에 비례하여 점차 증가하다 선행압밀하중 전후에서 최대값에 도달한 뒤에는 응력이 증가하여도 점차 감소하는 경향을 보였다.
- 5) 응력증가율이 2배인 경우 2차압축지수는 선행압밀하중보다 큰 하중단계에서도 감소되지 않고 지속적으로 증가하므로, 현장에서 2차압축침하를 감소시키기 위해서는 하중증가율을 가능한 작게하여 시공하는 것이 바람직 할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

1. Mesri, G.(1973), "Coefficient of Secondary Compression," Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 99, No. SM1, pp122-137.
2. Mesri, G. & Godlewski, R. M.(1977) Time and stress compressibility interrelationship. ASCE, J. of GED, Vol. 103(GT5), pp417-430.
3. Leroueil, Serge.(1990), Embankments on Soft Clays