

## CRS시험에 의한 2차압밀계수의 결정방법 제안

### A New Proposed Technique for a Secondary Consolidation Coefficient Based on the Constant Rate of Strain Test

김 형 주<sup>1</sup> Kim, Hyeong-Joo

이 민 선<sup>2</sup> Lee, Min-Sun

이 용 주<sup>3</sup> Lee, Young-Joo

김 대 우<sup>4</sup> Kim, Dae-Woo

#### Abstract

The present study is suggested to estimate the degree of secondary consolidation caused by various changes of stress such as loading, unloading and reloading in improving poor subsoil through pre-compression loading construction method and, for this purpose, examined the characteristics of the consolidation of Kunsan clay through incremental loading test (IL) using standard consolidation tester and constant loading rate test (CLR), which were adapted from the constant rate of strain test (CRS). In addition, after CRS test, this study determined the characteristics of secondary consolidation and relationships among void ratio, effective stress and time according to the ratio of effective over-consolidation on reloading at the point of time of random expansion. Kunsan clay had larger expansion and smaller secondary consolidation settlement when the ratio of effective over-consolidation was high. In addition, when loading was applied after the load was removed at once, the secondary consolidation coefficient  $C''_a$  was smaller than that when the load was removed gradually, and when the ratio of effective over-consolidation was over 1.4 a similar value was produced. Based on the entire settlement resulting from reloading, the secondary consolidation coefficient  $C''_a$  increased non-linearly with the lapse of time but the final value was similar to that in the case of rapid removal. The strain velocity of void ratio was in a regular linear relationship with the increase of loading time regardless of the ratio of effective over-consolidation in both tests and it grew smaller with the increase of the ratio of effective over-consolidation.

#### 요 지

본 연구는 사전압밀재하공법에 의해 연약지반을 개량시 재하-제하-재재하와 같은 다양한 응력변화에 의한 2차압밀량을 추정하고자, 일정변형률 압밀시험기(CRS)를 응용한 일정재하시험장치(CLR)와 표준압밀시험기를 이용한 단계재하시험(IL)에 의해 군산점토의 압밀특성을 비교 고찰하였다. 또한 CRS시험 후 임의 팽창시점에서 재재하시 유효과압밀비에 따른 2차압밀특성과 간극비-유효응력-시간관계 등을 파악하였다. 군산점토는 유효과압밀비가 클수록 팽창량은 크고 2차압밀 침하량은 작게 발생하고 있으며, 일시에 하중 제거 후, 재하하는 경우에서 2차압밀계수  $C''_a$ 는 완속제거시 보다 작게 평가되고, 유효과압밀비가 1.4이상인 경우는 유사한 값을 제시하고 있다. 재재하시 발생하는 전체침하량을 기준으로 한 2차압밀계수  $C''_a$ 는 경과시간에 따라 비선형적으로 증가하나 최종값은 급속제거시와 비교하여 유사한 값을 제시하고 있다. 간극비 변형속도는 재하시간이 증가할수록 유효과압밀비에 관계없이 2개의 시험모두 일정한 선형관계이고, 유효과압밀비가 증가할수록 작게 나타나고 있다.

**Keywords :** CLR test, CRS test, IL test, Secondary consolidation coefficient, The ratio of effective over-consolidation

1 정희원, 군산대학교 공과대학 토목환경공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil & Environmental Engrg., Kunsan National Univ., kimhj@kunsan.ac.kr)

2 군산대학교 환경건설연구소 연구원 (Researcher, Research Center for Environments & Constructions, Kunsan National Univ.)

3 정희원, 군산대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. Civil of Engrg., Kunsan National Univ.)

4 정희원, 군산대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. Civil of Engrg., Kunsan National Univ.)

## 1. 서론

일반적으로 연약지반상에 건설되는 구조물 및 성토에 의한 압밀침하를 사전에 예측하기 위하여 이용되는 표준 압밀시험은 장시간이 요구되지만 시험법이 간단하고 실용적으로 가치가 인식되어 널리 사용되고 있다. 그러나 2차압밀에 관련된 압밀계수를 구하기 위해서는 측면마찰과 장시간 재하시간, 응력증가율의 변화 및 간극수압 측정문제 등의 해결되어야 할 사항이 많다. 그러므로 침하해석에 필요한 압밀정수를 간극수압의 변화에 의해 유효하게 구할 수 있도록 일정변형을 압밀시험(Contant Rate of Strain Consolidation Test, 이하 CRS시험)이 Crawford(1964)에 의해 제안된 이래 Wissa 등(1971)에 의해 이론적으로 정립이 되어 왔으며, 또 한편으로 동수구배에 의한 투수성에 의해 직접적으로 압밀정수 등을 구할 수 있도록 Aboshi 등(1970)에 의해서 제안된 일정하중재하압밀시험(Constant Loading Rate Consolidation Test, 이하 CLR시험)과 Lowe 등(1969)에 의해서 동수구배일정시험(Controlled Gradient Consolidation Test)등이 제안되었다. 따라서 최근 국내에서도 CRS에 대한 연구(이송 등, 1998 ; 이유진 등, 1998)가 국내점토를 대상으로 변형속도에 대한 압밀특성 및 표준압밀시험과의 비교 등에 의해 적정 변형속도 및 압밀정수를 검토하였다. 이러한 시험의 공통점은 단기간 실험을 통하여 연속적인 재하에 의한 공시체의 과잉간극수압을 측정하여 유효응력에 의한 압밀현상을 설명하고 있어 그 유효성이 평가되고 있다. 한편 연약지반의 개량을 위해 다양한 개량공법이 적용되고 있는데 특히, 잔류침하량을 저감시키기 위해 국내에서는 고속도로 및 택지개발건설시 주로 선행재하공법(Preloading공법) 및 여성하중공법(Surcharge공법)이 적용되고 있다. 연약지반 사전 설계시 압밀시험에 의해 다양한 응력변화율을 고려하여 2차압밀계수를 구해야 하나 최소 15일 이상의 기간이 소요되어 거의 생략되므로 표준압밀시험 데이터에 의존하고 있는 실정이다. 이러한 2차압밀시험을 장시간 실시하여 설계에 적용하기 위해서는 성토 재하중의 크기 및 기간의 결정법에 대한 실험적 연구(Mesri 등, 1977, 1984)가 수행되어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 2차압밀침하를 보다 신속하고 정확하게 측정하고자 표준압밀시험의 대응으로 국내에서도 최근 이용되고 있는 CRS시험 후 소정의 일정하중이 재재하 될 수 있도록 고안된 일정하중 재하장치에 의해 CLR시험이 가능하도록 하여 단시간에 유효

과압밀비에 따른 점토의 2차압밀계수와 압밀특성을 실험적으로 고찰하여, 잔류침하량을 설계시에 정확하게 예측할 수 있도록 시험과 예측기법을 제시하였다.

## 2. 잔류하중에 의한 2차압밀고찰

일반적으로 도로 및 택지개발시 잔류하중에 의한 2차 압밀 침하량을 저감시키기 위해 여성하중재하공법(Surcharge공법)을 적용하고 있으며 이러한 경우 그림 1과 같이 여성하중크기에 따른 2차압밀침하를 실측에 따라 분석할 수 있는 방법을 제시 한다. 여기서  $t_{pr}$ 은 여성하중 제거 후 리바운드에 의한 최대팽창시간,  $t_r$ 은 재재하시 2차 압축이 시작되는 시간,  $t_s$ 는 재재하에 의해 경과된 시간이다. 여성하중 제거 후  $t_{pr}$ 에 도달하는 1차 팽창과 2차 압밀이 발생하는  $t_r$ 까지 지반은 팽창하게 되며,  $t_r$  이후에 2차압밀은 여성하중이 제거된 후의  $t_r$ 을 시점으로 측정되어지며, 여성하중 제거후, 2차압밀계수  $C'_a$ 는  $t_r$ 이후에 침하가 일정한 기울기로 시작되는 점을 기준으로 구하였으며, 또한  $C'_a$ 는 침하가 시작되는 시점을 기준으로 하여 최종 측정된 값에 대한 기울기이다.

한편 여성하중 제거시에 발생하는 2차압밀특성은 하중재하보다 시간의 영향이 크므로 하중재하에 의한 2차압밀계수  $C'_a$ 는 대수시간에 대한 간극비 또는 체적변형비이며,  $C'_a$ 를 재재하 이전의 2차압밀계수와 관련하여  $C'_a/C_a$ 의 조건으로 규정할 수 있다. 재재하에 의한 2차압밀계수  $C'_a$ 는 또한  $C_c$ 나  $C_a$ 와 같이 초기에는 매우 작은 값을 나타내면서 일정한 값을 거쳐 시간에 따라 감소하는 경향이다. 따라서 이러한 일련의 응력변화에 따른 2차압밀계수와 과압밀비 및 시간관계를 장시간압밀시험을 실시하여 제시되었다(Mesri, 1973 ; Al-Shamrani, 1997 ; 김형주, 1994 ; 김규선, 1999 ; 주종진, 2002). 이러한 시험

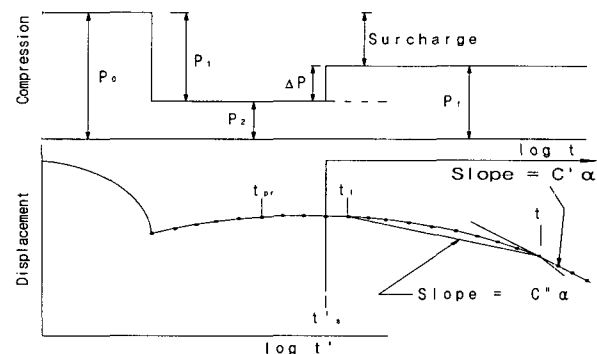


그림 1. 여성하중 제거 - 재하에 의한 침하변화

방법은 필연적으로 표준압밀재하기간이 필요하며 다양한 응력변화 및 간극수압을 측정하는 경우 비효율적이므로 본 연구에서와 같이 CRS시험과 CLR시험을 겸용하는 경우 2차압밀계수를 파악하는데 많은 이점이 있다.

### 3. 실험개요

#### 3.1 일정변형율시험과 일정하중재하시험 장치

본 시험장치는 변위속도를 제어할 수 있는 급속압밀 시험 장치를 이용하여 압밀변형을 발생시키고 소정의 변형상태에 이르면 일정하중재하시험장치에 의해 하중을 재하하면서 장시간 압밀특성을 관찰할 수 있도록 고안된 장치이며, 그림 2와 같이 영국 ELE사에서 제작한 3축 압밀시험기의 재하기구를 이용하여 제작된 압밀셀 장치와 별도의 재하 장치로 일본 후지쿠라사에서 제작한 BF Cylinder를 장착하여 하중재하가 가능하도록 한 것이 특

징이다. 변위, 간극수압, 하중 등은 Dynamic Strain meter를 통하여 측정 하였고 내장된 SDA-7910의 소프트웨어를 사용하여 데이터를 처리하였다. 셀의 구조는 그림 3과 같이 압밀링을 장착하고 시료 하부에서 배압을 가하여 포화시킨 후 시료 상부에서 하중을 가하며 간극수압을 하부에서 측정하도록 되어 있다. 압밀셀은 시료의 상부와 하부에 다공석판이 있고 직경과 높이가 6.35cm, 2.54cm인 압밀링 그리고 샘플링의 움직임을 방지하고 하중이 적절히 제하되도록 하는 샘플 보유링으로 구성되어 있다. 일정하중재하단계에서는 CRS시험 후 연속적으로 하중을 가할 수 있도록 BF Cylinder에 에어 프레셔를 통한 진공압을 제어장치로부터 일정하게 지속하중이 전달될 수 있도록 하여 재하시 하중변화를 장착된 로드셀에서 하중 측정이 가능하도록 하였다. 또한 BF Cylinder 외부에 CRS 시험동안에 하중 전달의 영향을 받지 않도록 BF Cylinder에 보호 케이스를 설치하여 실험을 실시하였다.

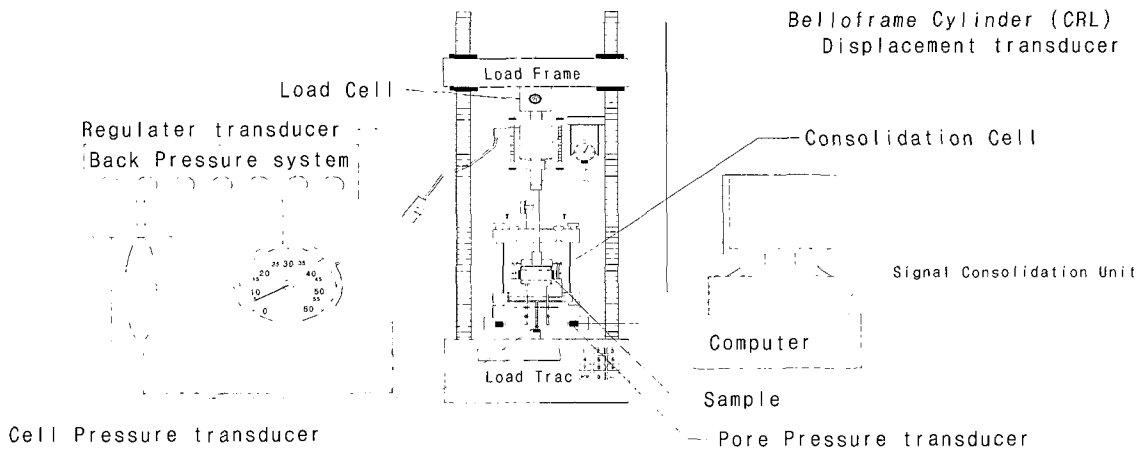


그림 2. 일정변형률 및 일정하중재하 시험장치

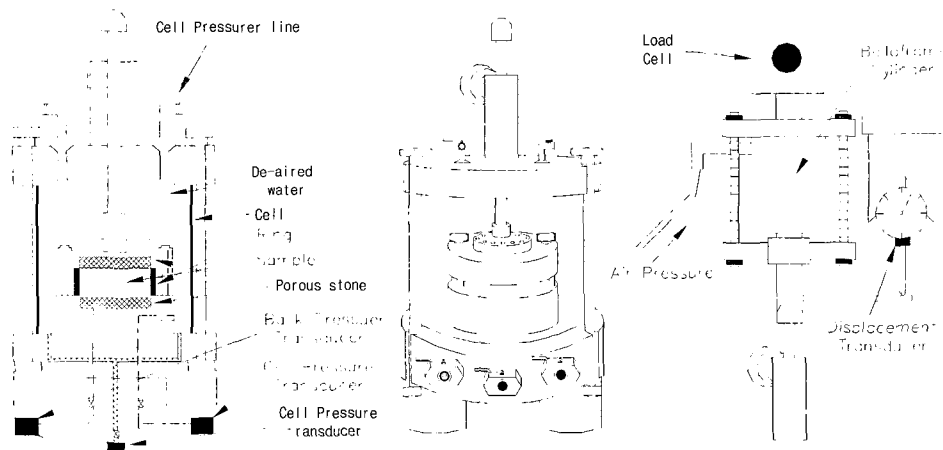


그림 3. 일정변형률 압밀셀, 일정하중재하 실린더 및 가압장치

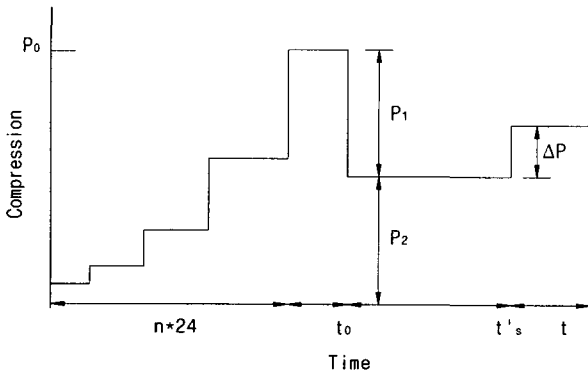
### 3.2 시험시료

본 연구는 군산시 수송동 택지개발 예정지구에서 심도 0m~5.5m에서 불교란 시료를 채취하여 XRD(X-ray Diffraction) 시험과 SEM(Scanning Electron Microscope) 분석을 한 결과 주 구성을 이루는 광물은 석영, 일라이트, 녹니석, 몬모릴로나이트 이며, 함유율은 순서대로 Si, O, Fe, Al, K, Mg, Na의 순이며, 분포도는 일라이트 65.4~78.2%, 녹니석 8~25.6%, 고령석 8~16%, 스�멕타이트 0.5~3.9%, 몬모릴로나이트 0.9~2.2%이다. 또한, 시험시료에 대한 물리적 성질은 표 1과 같다.

시험시 공시체는 지표면하부 3m부근에서 채취된 시료를 운반하여 함수비 90% 정도의 액상상태로 만들어 교반기에 의해 교란시킨 후 균질한 상태에서 No. 200체를 통과시켜 예압밀 시험장치를 통하여 단계적으로 하중을 가하여 제작하였다. 하중은 시료의 분리를 방지하기 위하여 24.5kPa의 하중과 49.0kPa의 하중을 총 67일 동안 단계적으로 가하면서 침하량을 측정하여 S-log t의 반대수 용지에 표시하여 직선기울기를 찾아낸 후 3T<sub>E</sub> 법으로 압밀종료시점을 찾아내어 초기조건이 동일한 공시체를 제작하였다. 또한, 제작된 공시체는 시험이 진행되는 동안 동일한 조건을 유지하기 위하여 공기가 유입되지 않도록 파라핀으로 밀봉하여 포장한 후 항온시료

표 1. 시험에 사용된 시료의 물리적 성질

액성한계 W <sub>L</sub> (%)	34.6
소성한계 W <sub>P</sub> (%)	19.1
소성지수 I <sub>p</sub>	15.5
비중 G <sub>s</sub>	2.654
곡률계수 C <sub>u</sub>	4.1
균지수 G <sub>I</sub>	10
USCS	CL



상자에 보관하여 초기상태를 유지하였다.

### 3.3 시험 방법

일반적으로 표준압밀시험기를 이용한 단계재하시험은 하중 증가비 1.0으로 24시간 재하시간으로 단계적으로 소정의 하중을 증분시킨다. 따라서 본 시험도 비교분석을 위하여 표준압밀시험기에 의해 각 하중단계에서 그림 4와 같이 하중 증가비와 재하시간을 각각 1.0과 24시간으로 하여 시료에 9.8~157kPa까지 압밀이 완료될 때까지 시간경과에 따른 시료의 연직 변위량을 측정하였다. 그 결과를 curve fitting기법에 의하여 역해석을 실시함으로써 지반의 압밀 계수를 산정하고 157kPa의 하중에서 log법으로 1차압밀이 종료시점(157kPa 재하 하고 약 2시간 후)인 지점에서 9.8, 19.6, 39.2, 78.5kPa의 하중을 제거하여 약 13000분간 관찰함으로써 각각의 유효 OCR에 대한 압밀특성을 분석하였다. 또한 일정변형률압밀시험 및 일정하중재하시험의 조건과 시험방법을 표 2와 그림 4와 같이 제시하였다. 시험은 크게 시료준비단계, 시료성형단계, 셀 조립단계, 배압에 의한 시료포화, 재하, 제거, 재재하단계로 하였고 재하속도는 사

표 2. 실험 조건

구 분	단계재하시험	일정변형률 및 일정하중재하시험
샘플링 (cm)	직경	6.0
	높이	2.0
하중재하	9.8kPa부터 단계재하	0.04%/min
하중제거	각 하중 일시제거	0.01%/min
하중제거 시점	157kPa 재하 후 1차압밀 종료시	157kPa 하중 도달시
제거하중 (kPa)	9.8, 19.6, 39.2, 78.5	9.8, 19.6, 39.2, 78.5

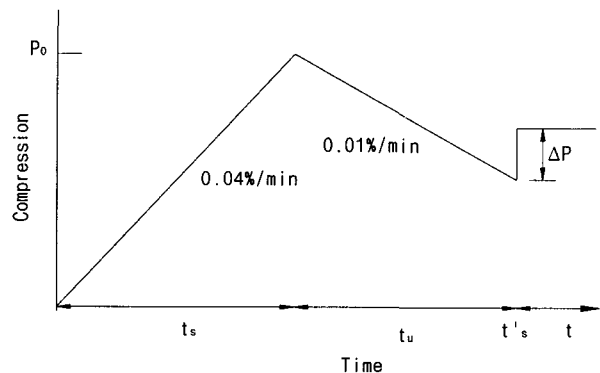


그림 4. 단계재하 시험방법과 일정변형률 및 일정하중재하 시험방법

전예비시험에 의해 0.04%/min의 변형률을 선정하였으며, 이는 ASTM의 액성한계 0~40%의 변형률의 기준에 포함된다. 일정하중을 연속적으로 재하하는 일정변형률 재하시험에서 압밀하중이 157kPa이 되면 0.01%/min으로 제거 후 소정의 OCR의 하중에 도달하면 BF Cylinder에 의해 하중을 일정하게 재하시키면서 장기간 압밀특성을 관찰하였다.

#### 4. 시험결과 및 분석

##### 4.1 압밀특성

그림 5는 단계재하시험과 일정변형률시험에 의한 압밀곡선을 나타낸 것으로서 단계재하시험은 각 하중단계에서 log법으로 구한 1차 압밀 종료시점(IL<sub>EOP</sub>)과 24시간 재하 후(IL<sub>24</sub>) 압밀곡선을 각각 나타내었다. 단계재하시험에서의 압밀곡선을 보면 IL<sub>EOP</sub>, IL<sub>24</sub>는 과압밀 구간에선 편차가 크게 나지 않으나, 선형압밀하중의 전이

영역에서는 상재하중이 증가할수록 편차의 크기가 크게 나타나고 있다. 일정변형률시험에서의 압축곡선은 단계재하시험시보다 변위 증가에 의한 간극수압 소산속도가 증가되어 보편적으로 우측에 위치하고 있으나 정규압밀영역에서는 응력이 증가할수록 IL<sub>24</sub>에 수렴하고 있다. 이러한 영향은 입자의 이동이 전이영역에서는 간극수압의 소산속도에 크게 영향을 미치고 있기 때문이라고 볼 수 있다. 그림 6은 유효응력-변형률 곡선으로 동일한 응력이 작용할 때, 일정변형률시험의 변형률이 더 작게 발생하다가 응력이 크게 작용되면 그림 5의 유효응력-간극비 곡선과 비슷하게 IL<sub>24</sub>에 근접해 가고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 동일 응력이 작용할 때 일정변형률시험의 변형률이 더 작게 발생되고 있는 것은 하중제어가 아닌 변형률 속도에 의하여 급속으로 변위를 발생시키기 때문에 입자의 평면배열이 증가하고, 간극수압의 배수지연에 의한 것이다. 단계재하시험에서 구한 C<sub>c</sub>와 시간에 따른 간극비의 변화량으로 2차압축지수 C<sub>a</sub>를 구한결과 C<sub>c</sub>, C<sub>a</sub>는 서로 비슷한 경향을 보이고 선형적으로 C<sub>a</sub>/C<sub>c</sub>=0.033의 관계로 Mesri와 Castro(1987)가 제안한 비유기질 점토에 대한 C<sub>a</sub>/C<sub>c</sub>=0.040±0.01의 범위와 유사한 경향을 나타내고 있다.

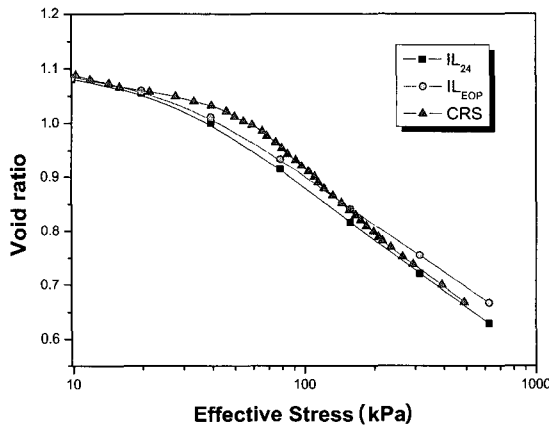


그림 5. 유효응력 - 간극비 관계

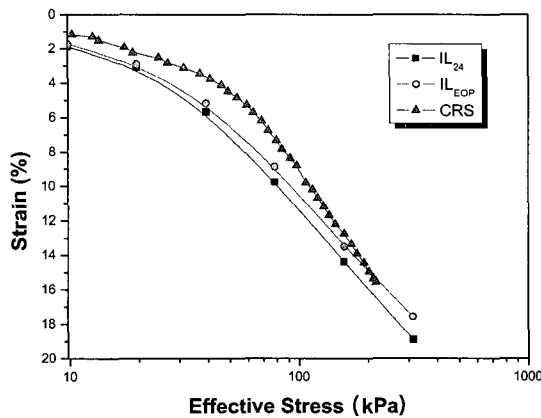


그림 6. 유효응력 - 변형률 관계

##### 4.2 시간에 따른 응력과 간극수압

그림 7은 일정변형률시험 후 임의 팽창시점에서 임의 하중을 재하한 경우 재하시간에 대한 응력분포로 압밀 재하시간이 경과함에 따라 응력이 일정하게 증가되나, 하중제거 후 소정의 팽창과정을 거치면서 과압밀비에 따라 상대적인 크기는 다르나 시간에 관계없이 일정한 유효응력분포를 나타내고 있다. 그림 8은 시간에 따라

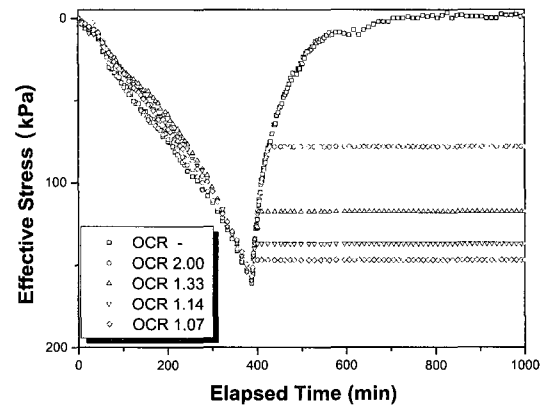


그림 7. 시간 - 유효응력 관계

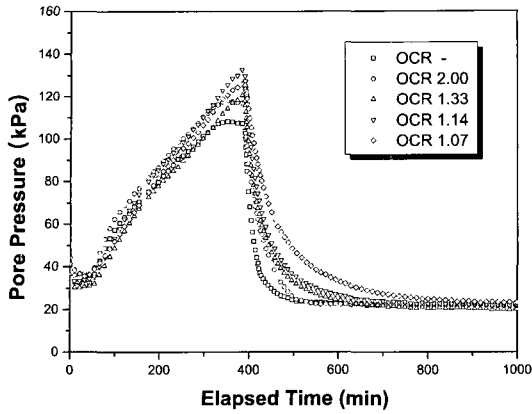


그림 8. 시간 - 간극수압 관계

간극수압이 일정하게 증가되지만, 하중제거시 과압밀영역의 변이점에서 제하속도의 영향을 받아 입자의 배열구조가 불안정하여 유효 과압밀비에 따라 간극수압 소산속도가 변화되지만, 재재하시간이 경과되면서 입자배열이 안정화되어 유효 과압밀비와 관계없이 간극수압은 동일하게 잔류하고 있다.

#### 4.3 재하-제하-재재하 특성

그림 9는 단계재하시험에서 157kPa의 하중 재하 후 1차압밀이 종료되는 시점에서 유효 과압밀비를 9.8~78.5kPa로 변화시켜 하중을 제거한 후 시간에 따른 변위특성을 나타낸 것으로, 전체적으로 하중제거와 동시에 팽창이 이루어지고, 다시 서서히 침하하는 특성이 나타나고 있다. 또한 더욱 구체적으로 팽창과정을 보기 위하여 그림 10에 하중 제거시를 기준으로 변위-시간 특성을 나타내면, 유효 과압밀비가 클수록 팽창량이 크게 나타나고 2차압밀에 의한 침하량은 입자가 이미 평행배

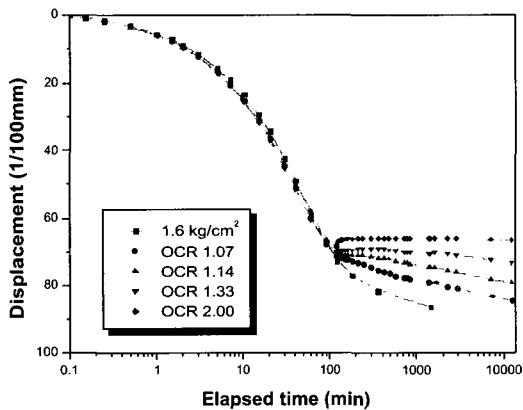


그림 9. 단계재하시험의 팽창-재침하곡선

열로 구조화 되어 작게 발생하고 있다. 그림 11은 157kPa 까지 0.04%/min속도로 일정변형률재하시험 후 현장조건과 유사하게 서서히 제하가 가능하도록 제하속도 0.01%/min으로 제거한 후 유효 과압밀비 1.07~2.00로 재재하 하였다. 유효 과압밀비가 클수록 팽창량이 크게 나타나고 있으나 단계재하시험에는 일시적으로 하중을 제거하기 때문에 배수면에서 일시적인 부의 간극수압 증가가 팽창에 영향을 미치게 되어 재재하시에 2차압밀 계수를 다소 작게 나타나고 있다. 실제 현장에서 선행압밀하중공법 적용시 점진적으로 하중이 제거되는 것을 고려한다면 일정변형률시험이 현장조건에 비교적 정확하게 근접할 수가 있고, 2차압밀계수도 크게 제시되므로 이를 설계에 적용하면 2차압밀량이 크게 평가된다. 따라서 연약지반 도로 성토지역에서 준공 후 잔류침하가 지속적으로 발생하고 있으므로 설계시에 안전치로 2차압밀 침하량을 구할 수 있다. 한편, 그림 12는 하중 제거시를 기준으로 하여 각 유효 과압밀비에 대한 변위곡선을 나타낸 것으로 일정한 속도로 하중을 제거 후 재재하 하는

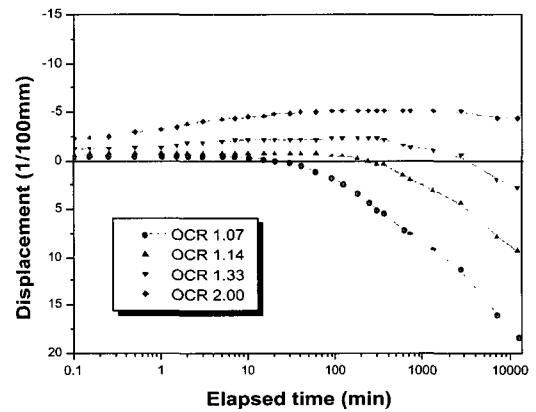


그림 10. 단계재하시험의 팽창-재침하곡선(하중제거기준)

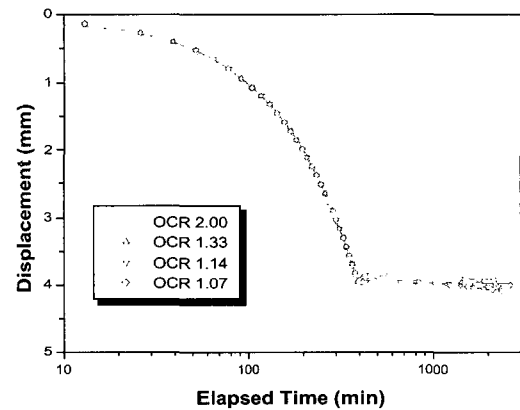


그림 11. CRS 및 일정하중재하시 변위곡선

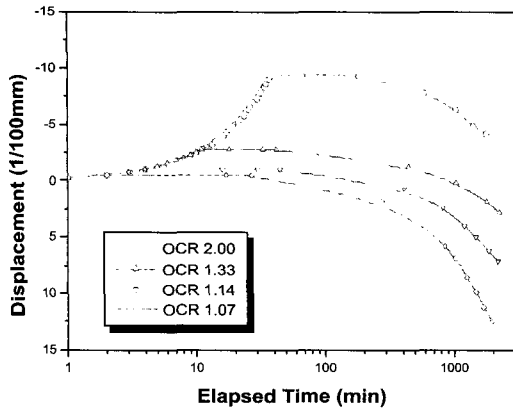


그림 12. CRS 및 일정하중재하시 변위곡선(팽창시기준)

경우 2차압밀 침하량은 유효 과압밀비가 클수록 작게 나타나고 2차압밀 시점도 늦게 나타나고 있다.

#### 4.5 2차 압밀특성

그림 10의 재재하시의 2차압밀계수  $C'_{a2}$ 와 유효 과압밀비 관계를 그림 13, 14에 표시하였다. 그림 13에서와

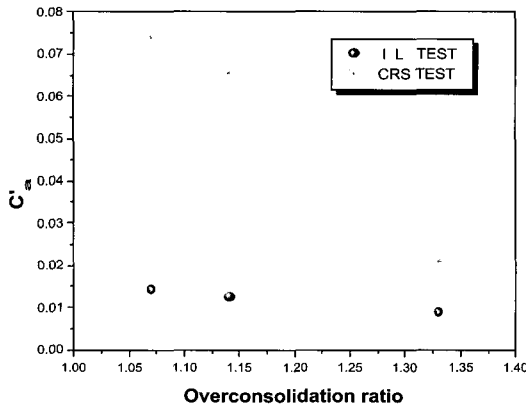


그림 13.  $C'_a$ 와 과압밀비 관계의 비교

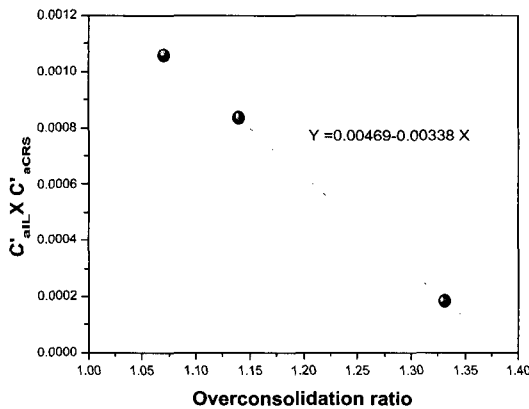


그림 14.  $C'_{aIL} \times C'_{aCRS}$ 와 과압밀비의 관계

같이 단계재하시험과 일정변형률시험의  $C'_a$ 의 편차가 크게 나타나고 있는 것은 처음단계인 일정변형률시험 시 일정속도에 의한 강제 변형으로 인하여 간극수압 소산이 원활하게 이루어지 않고 잔류 간극수압이 다음단계인 팽창과 재재하시에 영향을 미치므로 단계재하시험보다 2차압밀속도가 더욱 커졌기 때문이다. 그러나, 유효 과압밀비가 클수록 제하 팽창시간이 길어져 간극수압 소산이 보다 원활하게 이루어지므로 편차 폭이 줄어들어 단계재하시험과 동일한 경향을 나타나고 있다. 한편 그림 14는 단계재하시험에서 구한  $C'_{aIL}$ 과 일정하중재하시험에서 구한  $C'_{aCRS}$ 의 관계를 회귀분석한 것으로 앞에서 설명한 것처럼 유효 과압밀비가 증가할수록  $C'_{aIL} \times C'_{aCRS}$ 은 일정하게 감소하고 있고 관계식은 다음 식과 같다.

$$C'_{aIL} = (0.0047 - 0.0034 OCR) / C'_{aCRS} \quad (OCR \leq 1.4)$$

그림 15는 단계재하시험과 일정하중재하시험에서 재재하시의 초기침하 값과 측정된 값으로 구한 2차압밀계

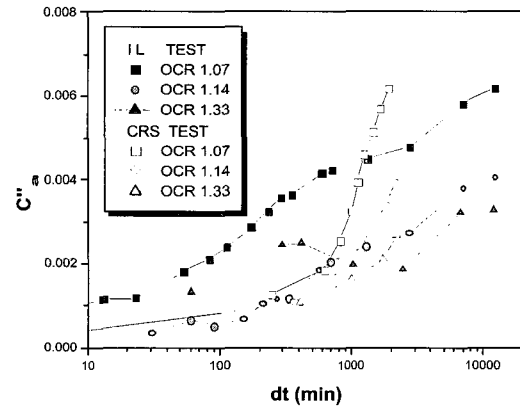


그림 15. 시간에 따른  $C'_a$ 의 비교

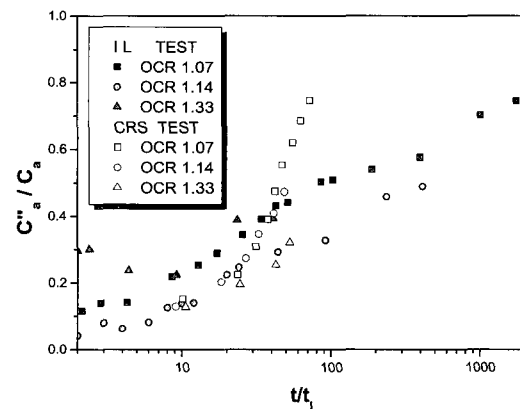


그림 16. 여성하중 제거 후 2차 압축지수 비교

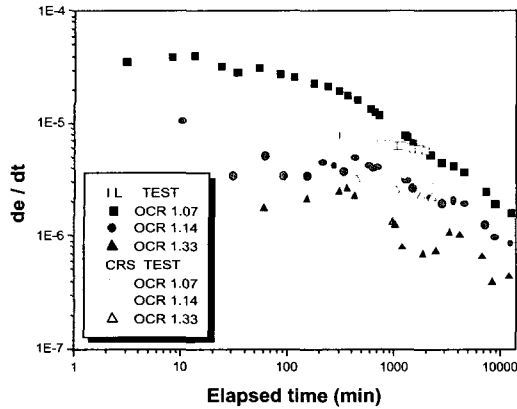


그림 17. 변형속도와 경과시간 관계의 비교

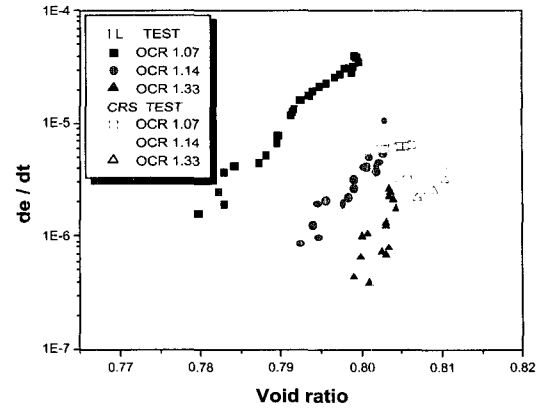


그림 18.  $e-\log(de/dt)$  관계의 비교

수  $C_a$ 의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 나타난 것과 같이 재하초기에는 단계재하시험의  $C_a$ 가 비슷한 경향으로 압밀이 진행되고 임의시간이 경과되면 일정하중재하시험의  $C_a$ 와 단계재하시험의  $C_a$ 는 선형적으로 증가하고 있다. 또한 피크값이 개략적으로 비슷하게 나타나므로 시간에 따라 입자 배열 구조가 유사하게 변화하고 있음을 알 수 있다. 또한, 그림 16에서 재하시 및 재재하시의 무차원 2차압밀계수와 시간계수의 관계, 즉  $C_a/C_{a0}/t/t_0$ 의 관계도 임의의 시간이 경과되면 시간계수에 비례하여 단계재하시와 일정하중재하시 모두 선형 증가를 하고 있다.

#### 4.6 변형속도 고찰

Bjerrum(1967)은 점토의 압축을 즉시압축과 지연압밀로 구분하여 간극비-유효응력-시간관계는 단일함수임을 제시하여, 기준시간에 관계없이 2차 압밀계수에 상당하는 비례계수를 구하여 점토의 특성을 설명하고 있다. 그러므로 본 연구도 이러한 연구결과와 비교하고자 선형재하공법이나 역성토재하공법 적용 시를 가정하여, 간극비에 의한 변형속도와 압밀 경과시간 및 간극비 관계를 검토하였다. 그림 17는 변형속도와 경과시간 관계로 시간이 증가할수록 변형속도는 두 시험모두 일정한 선형관계 있으며, 그 기울기는 -1보다 작다. 또한, 기준시간의 결정방법에 따라 변하지 않는 변형속도와 간극비 관계를 정리하면 그림 18과 같으며, 전반적으로 유효 과압밀비에 따라 변형속도가 다르고 일정재하시험의 경우 간극비 변화폭이 작게 나타나는 것은 서서히 팽창 후 재하 되므로 평행배열구조에 의해 변형속도 변화가 작다.

## 5. 결론

본 연구는 설계시 2차압밀 침하량을 신속하게 추정하기 위한 방법으로 일정변형률압밀시험(CRS)기에 일정하중재하시험(CLR)이 가능하도록 하여, 다양한 응력변화에 따른 재하(loading)-제하(unloading)-재재하(reloading) 시험을 수행하였다. 이러한 일련의 시험은 현장에서 2차압밀침하를 촉진시키기 위해 선형재하공법이나 Surcharge공법을 적용하는 경우 신속하게 설계 2차압밀계수를 추정할 수 있도록 하였으며, 본 시험에 의해 얻어진 군산 점토의 2차압밀특성을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 표준압밀시험기를 이용한 단계재하에 의한 1차 압축지수  $C_c$ 와 2차 압축지수  $C_a$ 는 선형관계가 나타나며  $C_a/C_c=0.033$ 로 제시되어 Mesri와 Castro(1987)의 비유기질 점토의 제안식  $C_a/C_c=0.040 \pm 0.01$ 와 근사하다.
- (2) CRS 재하시 간극수압은 증가하며 재하시는 OCR비에 따라 변화형태가 다르게 감소하지만 재재하시는 OCR비에 관계없이 간극수압이 일정한 값을 나타내고 있다. 이는 2차압밀이 입자의 배열에 의해 체적이 변화되고 있음을 제시하고 있다.
- (3) 단계재하시험과 일정하중재하시험 모두 재하-제하-재재하시 과압밀비가 클수록 팽창량은 크고 2차압밀 침하량은 작게 나타나고 있다. 2차압밀계수  $C_a$ 는 유효 과압밀비가 1.4이하에서는 팽창속도 영향으로 두 시험 모두 차이가 있으나 1.4 이상의 경우는 입자의 구조가 안정되어 유사한 값에 수렴되고 있다. 전체침하를 고려한 2차압밀계수  $C_a$ 는 유효 과압밀비에 관계없이 시간계수에 비례하여 증가하고 있다.



- (4) CRS법에 의한 재하 후, 팽창과정을 거치면서 수행되는 일정하중재하시험은 부의 간극수압발생이 작고 2차압밀계수  $C_c$ 는 다소 크게 발생하므로 과소평가에 의한 잔류침하 영향을 줄일 수 있다.
- (5) 재재하시 간극비의 변형속도와 경과 시간관계는 유효 과압밀비에 관계없이 일정한 선형관계에 있으며 그 기울기는 -1보다 작다. 또한, 간극비의 변형속도와 간극비 관계는 양 시험모두 일정한 기울기로 변화하고 있으며 유효 과압밀비가 증가할수록 재하시 간극비 변형속도는 작다.
- (6) CRS 및 CLR시험에 의해 2차압밀계수를 산정한 결과 단시일에 2차압밀계수를 구할 수 있어 시험기간이 15일 이상 걸리는 기존의 단계재하시험의 방법보다 10일 이상 시간단축을 할 수 있으며, 일반 선행재하공법 적용시 재하-제하-재재하시의 압밀계수를 단시일에 쉽게 구할 수 있어 적용성이 매우 크므로 2차압밀계수 산정을 위한 급속 압밀시험방법으로 제안하였다.

## 참 고 문 헌

1. 김규선, 임형덕, 이우진 (1999), "실내압밀시험에 의한 남해안 해성점토의  $C_a/C_c$ ", *한국지반공학회논문집*, Vol.15, No.6, pp.87-98.
2. 김형주 (1994), "사전압밀된 포화점토의 응력이력과 2차압밀에 관한 연구", *한국지반공학회논문집*, Vol.10, No.4, pp.167-178.
3. 이송, 채점식, 이규환, 조성민 (1998), "CRS 시험에서 변형속도가 압밀정수에 미치는 영향", *대한토목학회 학술발표회 논문집 (II)*, pp.175-178.
4. 이우진, 이원제, 임형덕 (1998), "일정변형률 및 표준압밀시험을 이용한 해성점토의 압밀특성 연구", *한국지반공학회논문집*, Vol.14, No.4, pp.47-59.
5. 주종진, 임형덕, 이우진, 김대규, 김낙경, 김형주 (2002), "군산점토의 2차압밀 감소를 위한 Surcharging 평가", *한국지반공학회 논문집*, Vol.18, No.4, pp.127-135.
6. Aboshi, H, Yoshikuni. H., and Maruyama, S. (1970), "Constant Loading Rate Consolidation Test", *Soil and foundations*, Vol.10, pp.43-56.
7. Al-Shamrani, Mosleh A. (1997), "Application of the  $C_a/C_c$  Concept to Secondary Compression of Sabkha Soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.35, No.1, pp.15-26.
8. Bjerrum, L. (1967), "Engineering Geology of Norwegian Normally-Consolidated Marine Clay as Related to Settlements of Buildings", *Geotechnique*, Vol.91, No.2, pp.83-117.
9. Crawford, C. B. (1964), "Interpretation of the Consolidation Test", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol.90, No.SM5, pp.87-102.
10. Lowe, J. III, Jones, E., and Obrician, V. (1969), "Controlled Gradient Consolidation Test", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol.95, No.SM1, pp.77-97.
11. Mesri, G. (1973), "Coefficient of Secondary Compression", *Journal of the Soil Mechanics and ASCE*. Vol.99, No.SM1, pp.123-137.
12. Mesri, G., Castro, A. (1987), "The  $C_a/C_c$  Concept and  $K_0$  During Secondary Compression", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*. Vol.113, No.GT3, pp.230-247.
13. Mesri, G., Choi, Y. K. (1984), "Time Effects on the Stress-Strain Behavior of Natural Soft Clay", *Discussion Geotechnique* Vol.34, No.3, pp.439-442.
14. Mesri, G., Godlewski, P. M. (1977), "Time and Stress Compressibility Interrelationship", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol.103, No.GT5, pp.417-430.
15. Wissa, A. E. Z., Christian, J. T., Davis, E. H., and Heiberg, S. (1971), "Consolidation at Constant Rate of Strain", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol.97, No.SM10, pp.1393-1413.

(접수일자 2004. 7. 2, 심사완료일 2004. 9. 17)