

## 제하-재제하 시 CRS 압밀 시험의 최적 변형률 속도 Optimal Strain Rate of Unloading-Reloading Cycle in Constant Rate of Strain Consoildation Test

박가현<sup>1)</sup>, Ka-Hyun Park, 윤찬영<sup>2)</sup>, Chan-Young Yune, 정충기<sup>3)</sup>, Choong-Ki Chung

<sup>1)</sup> 서울대학교 건설환경공학부 박사과정, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Seoul National University

<sup>2)</sup> 강릉원주대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Gangneung-Wonju National University

<sup>3)</sup> 서울대학교 건설환경공학부 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Seoul National University

**SYNOPSIS** : The constant rate of strain (CRS) consolidation test has been widely used to evaluate consolidation characteristics of soils instead of the standard Incremental Loading Test. In practical problems, after the ground improvement, the condition of the soil is over-consolidated. Therefore, it is important to determine the recompression indices and the coefficient of consolidation(or the coefficient of swelling) of unloading-reloading cycle to predict the settlement behavior. However, since standard testing procedures or studies related with strain rate are insufficient especially in unloading-reloading cycle, it is difficult to predict the settlement field behavior accurately from the CRS consolidation test results in spite of its lots of strengths. The several CRS consolidation tests were performed changing the unloading strain rate from 0.2%/hr to 20%/hr with vertical drainage condition using the reconstituted kaolinite sample. For the reconstituted kaolinite sample in CRS consolidation test, the recompression indices are insensitive to the strain rate. It is revealed that the coefficient of consolidation of reloading is affected by the developed pore pressure during unloading. Additionally, the test should be conducted in the positive pore pressure ratio range (3~15%) to obtain the reasonable coefficient of consolidation in the whole range(loading, unloading and reloading).

**Key words** : CRS consolidation test, unloading-reloading cycle, strain rate, vertical drainage condition

### 1 서 론

일정변형률 압밀 시험은 흙의 압밀 특성을 규명하는 데 있어서 기존 단계제하 시험법에 비하여 많은 장점(짧은 시험시간, 연속적인 압밀특성 산정 등)을 가지고 있어 최근 단계제하

시험을 대체하여 널리 사용되고 있다. 그럼에도 불구하고 현재까지 일정변형률 압밀 시험과 관련된 연구는 대부분 하중 재하단계 그리고 정규압밀영역에 국한되어 있으며, 그에 따라 과압밀된 지반의 팽창량 및 팽창속도, 재압축량 및 재압축속도와 같이 실제 현장에서 발생하는 지반의 압밀특성을 정확히 예측하기가 어렵다. 특히 실무에서 지반개량 후의 지반은 과압밀 상태이므로, 이후의 성토제거로 인한 제하 및 구조물 시공 등으로 인한 재재하 상태에서 지반의 침하거동을 정확히 예측하고 이를 설계 및 시공에 반영하기 위해서는 재압축지수와 제하 및 재재하 시의 압밀계수 등의 압밀정수 정확히 산정하는 것이 매우 중요하다.

일정변형률 압밀시험에서 시험결과가 변형률 속도에 지배적인 영향을 받는다는 것은 잘 알려진 사실이다. 하지만 일정변형률 압밀시험의 제하 및 재재하 단계에서 적정 변형률 속도를 산정하기 위한 연구는 매우 부족한 실정이다. 본 연구에서는 일정변형률 압밀시험을 수행함에 있어서, 제하 및 재재하 단계에서도 신뢰성있는 압밀특성을 산정하기 위하여 다양한 변형률 속도하에서 시험을 실시하고 침하특성, 압밀계수, 과잉간극수압 거동 등 다양한 측면에서 분석을 수행하였다. 이를 통하여, 일정변형률 압밀 시험 결과로부터 정규압밀영역 뿐만 아니라 과압밀 영역의 침하거동까지 연속적이고 빠르게 파악할 수 있을 뿐만 아니라, 실무에서 지반의 응력상태에 따른 설계가 가능할 것으로 기대된다.

## 2 관련 연구 동향

일정변형률 압밀시험의 재하 구간에 대해서는 여러 학자들에 의하여 속도 기준이 제시된 바 있는데 표 1과 같이 과잉간극수압비(전응력에 대한 간극수압 비)의 범위를 제시하여 합리적인 일정변형률 압밀 시험 결과를 도출할 수 있도록 하였다. 그 이유는 일정변형률 압밀 시험의 결과 및 시료 내부의 간극수압발생이 변형률 속도에 의존적이며, 특히 간극수압이 일정수준 이상으로 증가하면 이론해의 기본가정인 정상상태(steady-state) 조건이 성립하지 않기 때문이다.

이원재(2008)는 다양한 배수조건에서 일정변형률 압밀시험을 실시하였으며, 재성형한 카올리나이트 시료에 대하여 압축지수와 선형압밀압은 변형률 속도(1~50 %/hr의 범위)에 민감하지 않은데 비하여 압밀계수는 변형률속도에 따라 큰 변화를 보인다는 사실을 확인하였다. 이에 따라 합리적인 압밀특성 산정을 위한 간극수압비의 범위는 3~15 %로 제안하였으며, 특히, 연직배수조건에서 재성형 카올리나이트의 최적변형률 속도는 1 %/hr로 제안하였다.

표 1 여러 문헌에 제시된 과잉간극수압비의 범위

참고문헌	추천하는 간극수압비의 범위	OCR	배수조건
Smith & Wahls	0.5	1(정규압밀점토)	연직배수
Wissa et al.	0.05	1	연직배수
Sallfors	0.1-0.15	1	연직배수
Gorman et al.	0.3-0.5	1	연직배수
ASTM(2006)	0.03-0.15	1	연직배수
이원재(2008)	0.03-0.15	1	연직배수/방사배수

하지만 이러한 연구결과는 모두 일정변형률 압밀시험에서 재하 구간에 대한 연구결과이며 제하 및 재재하 구간에서의 속도기준 산정을 위한 연구는 매우 찾기 어렵다. 본 연구에서는 제하 및 재재하 구간에 대하여 속도가 압밀정수에 미치는 영향을 살펴보고 합리적인 압밀정수를 산정할 수 있는 제하-재재하 구간의 속도 기준을 제시하고자 한다. 이를 위해서 제하 및 재재하 구간에서 적용할 수 있는 일정변형률 압밀이론이 필요한데 본 논문에서는

ASTM의 기준으로 채택되어 있는 Wissa 등(1971)이 제안한 정상상태에서의 비선형 해를 이용하여 제하 및 재재하 구간에서도 평균유효연직응력 및 압밀계수를 산정하는 것으로 하였다. 특히 제하속도가 빠른 경우에 시료하부의 과잉간극수압은 양의 값에서 음의 값으로 변화하며 시료내부의 간극수압 분포도 복잡한 분포 형태를 가지게 되지만, 임의의 시간에서 시료 내 간극수압 분포는 Wissa 등(1971)이 가정한 것과 동일한 분포를 갖는다고 가정하였다.

### 3 시험계획

#### 3.1 사용시료 및 연직배수 일정변형률 압밀 시험기

시험 전 분말상태의 카올리나이트를 물과 함께 2~3일간 교반시켜 슬러리 상태로 만든 후, 사하중 재하방식의 시료 성형기를 이용하여 수침상태로 압밀시켜서 시료를 제작하였다. 선행압밀하중은 약 140 *kPa*이며, 사용된 지료의 기본 물성치는 표 2와 같다. 본 연구에서는 재성형한 카올리나이트 시료를 이용하여 윤찬영 등(2006)이 고안한 일정변형률 압밀시험기와 기존의 단계재하 시험기를 사용하여 압밀 시험을 수행하였다.

표 2 사용된 시료의 기본 물성치

시료의 물성치	
액성한계	53%
소성지수	20
비중	2.63
USCS	CH
재성형한 카올리나이트	
초기간극비	1.18
초기함수비	43%

본 연구에서 사용된 일정변형률 압밀시험기는 Head(1986)에 의하여 제시된 시험기를 윤찬영 등(2006)이 개량하여 제작한 것이다. 일정변형률 압밀시험기는 그림 1과 같고, 본 연구에 사용된 연직배수 시 가압판과 압밀링은 그림 2에 개략적으로 나타내었다.

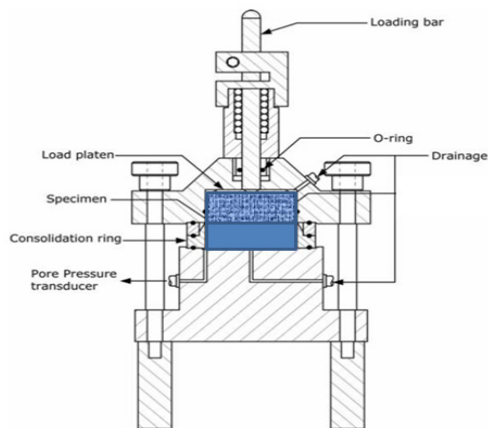


그림 1 일정변형률 압밀시험기

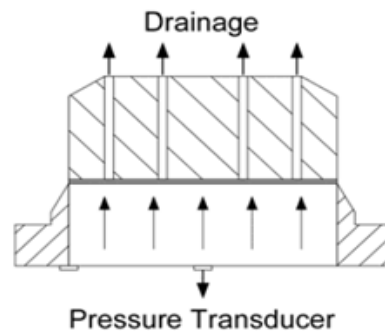


그림 2 연직배수용 가압판과 압밀링

### 3.2 시험방법 및 내용

일정변형률 압밀 시험 제하 및 재재하 구간의 최적 변형률 속도를 결정하기 위한 기준이 되는 단계재하 시험을 2회 실시하였다. 단계재하 시험은 ASTM D 2435-04에 근거하여 수행하였다. 각각의 시험에서 640 *kPa*(첫 번째 제하-재재하 구간)과 1280 *kPa*(두 번째 제하-재재하 구간)에서 두 번의 제하를 시작하였다.

일정변형률 압밀시험은 ASTM D 4186에 제시된 방법을 근거로 수행하였다. 단계재하 시험과 마찬가지로 각각의 시험에서 두 번의 제하-재재하 과정을 실시하였다. 재하 시의 변형률 속도는 이원재 등(2008)이 제안한 간극수압비 3~15 %를 만족하는 1%/hr를 기본으로 하였다. 제하 구간의 최적 변형률 속도를 찾기 위하여 변형률 속도를 0.2 %/hr에서 20 %/hr 까지 변화시키면서 시험하였다. 재재하 시의 변형률 속도는 재하시와 마찬가지로 1%/hr로 하였다. 다음 표 3은 본 연구에서 수행한 단계재하 및 일정변형률 압밀 시험의 제하 시 시험내역을 정리한 것이다.

표 3 실시된 시험내역(단위: %/hr)

시험방법	표기	첫 번째 제하구간의 변형률 속도	첫 번째 재재하구간의 변형률 속도	두 번째 제하구간의 변형률 속도	두 번째 재재하구간의 변형률 속도
단계재하 시험	IL-V1				
	IL-V2				
일정변형률 압밀시험	CRS-V0.25	0.25	1	0.25	1
	CRS-V0.5	0.5	1	0.5	1
	CRS-V2	2	1	2	1
	CRS-V2.5	2.5	1	2.5	1
	CRS-V5	5	1	5	1
	CRS-V20	20	1	20	1

## 4 시험결과 및 분석

### 4.1 시료의 압축 특성

그림 3은 유효응력-간극비 곡선을 나타낸 것이고, 표 4는 선행압밀압, 압축지수 및 재압축지수 결과를 나타낸 것이다. 단계재하 시험과 일정변형률 압밀시험의 압축곡선은 그림3과 같이 잘 일치하는 것으로 나타났다. 다만, 선행압밀압은 성형 시 압밀압인 140 *kPa* 보다 크게 평가하였는데, 이는 Casagrande방법이 시료교란의 효과로 선행압밀하중을 약 15-50% 정도 과대평가한다는 기존의 연구(Jose 등, 1989)와 일치한다. 재압축지수는 제하 및 재재하 구간의 교점을 잇는 방식으로 평가하였다. 우선, 단계재하 시험과 일정변형률 압밀 시험에서 공통적으로 나타난 특성을 살펴보면, 재압축지수의 크기는 1280 *kPa*에서 제하한 경우의 값인  $C_{r2}$ 가 640 *kPa*에서 제하한 경우의 값인  $C_{r1}$ 보다 단계재하 시험의 경우 28%, 일정변형률 압밀시험의 경우 40%정도 큰 값을 보였다. C. Vipulanadadan 등(2008)의 연구와 마찬가지로 단계재하 시험 및 일정변형률 압밀시험 모두에서 재압축지수의 크기는 제하 해당응력의 크기에 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

또한 그림4와 같이 일정변형률 압밀 시험에서 재압축지수와 제하시 속도를 도시한 결과,

재성형한 카올리나이트의 압축지수와 마찬가지로 재압축지수의 크기는 제하 시 속도에 민감하지 않은 것으로 나타났다.

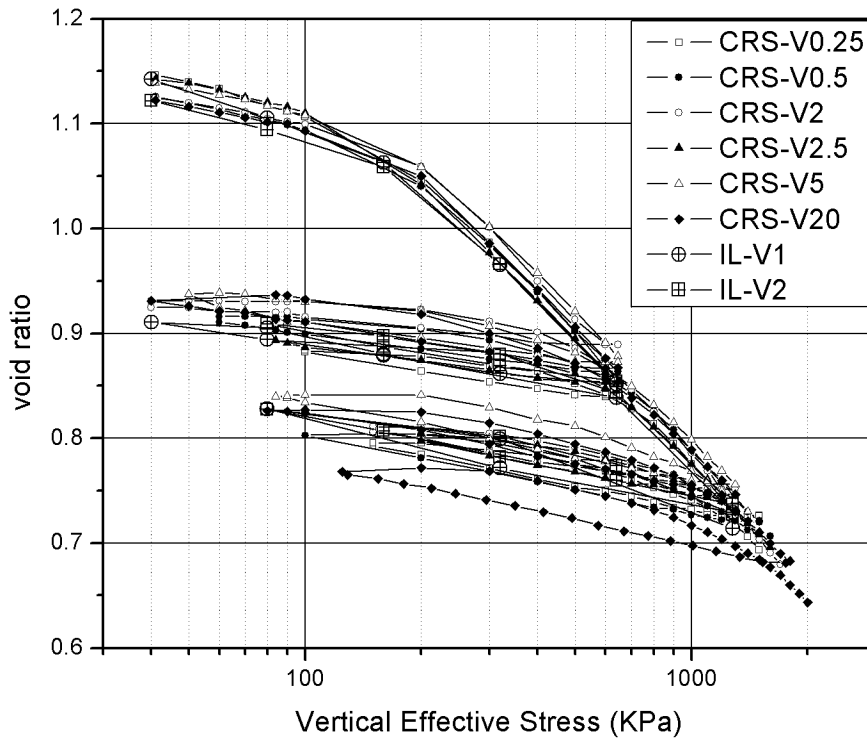


그림 3 유효응력-간극비 곡선

표 4 선형압밀압, 압축지수 및 재압축지수 결과

	$p'_c$ (kPa)	$C_c$	$C_{r1}$	$C_{r2}$
IL-V1	180	0.410	0.054	0.087
IL-V2	185	0.386	0.067	0.079
CRS-V0.25	190	0.420	0.051	0.074
CRS -V0.5	195	0.401	0.050	0.075
CRS -V2	200	0.439	0.044	0.068
CRS -V2.5	170	0.382	0.035	0.057
CRS -V5	190	0.368	0.055	0.072
CRS -V20	200	0.378	0.042	0.061

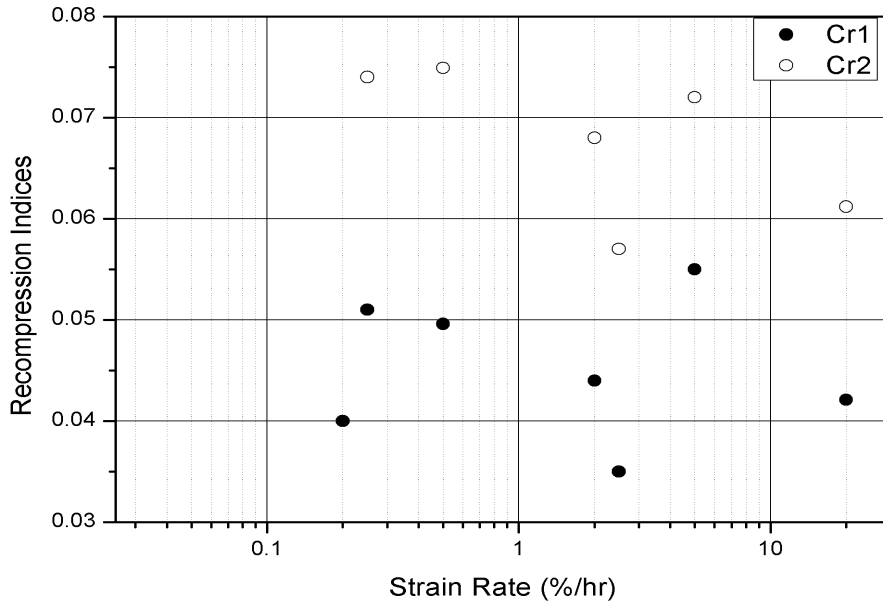


그림 4 일정변형률 압밀 시험의 제하 시 속도와 재압축지수의 관계

## 4.2 압밀계수 및 과잉간극수압비

### 4.2.1 재하 구간 및 재재하 구간

단계재하 시험의 압밀계수는  $\sqrt{t}$  법을 사용하여 산정하였고, 일정변형률 압밀시험의 압밀계수는 ASTM(2006)의 규정에 따라 Wissa 등(1971)의 해를 이용하여 산정하였다. 그림 5, 6 및 7은 재하 및 재재하 구간에 대하여 단계재하 시험과 일정변형률 압밀 시험에서의 압밀계수를 도시한 것이다. 각 시험에서 두 번의 제하-재재하 과정을 반복함에 따라 선행압밀압은 140→640→1280 *kPa*로 증가하는데, 모든 시험에서 압밀계수는 과압밀 영역에서 큰 값을 보이다가 선행압밀압을 지나 정규압밀영역에서는 급격히 줄어들면서 일정한 값으로 수렴하는 경향을 확인할 수 있다. 이 때 압밀계수는 두 번째 재재하 구간에서의 결과를 제외하고는 단계재하 시험결과와 매우 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. 다만 두 번째 재재하 구간에서의 압밀계수는 모두 1%/hr의 동일한 재재하 속도임에도 불구하고 직전 단계의 제하 속도 증가에 따라 압밀계수도 증가하는 경향성을 보여, 이전 단계의 과잉간극수압이 이후 시험결과에 영향을 주는 것으로 나타났다.

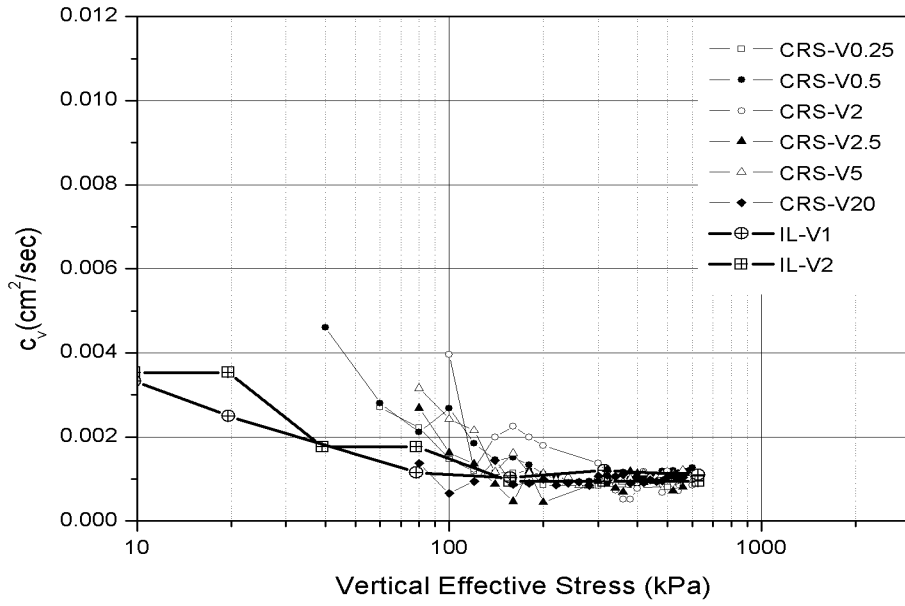


그림 5 재하구간에서의 단계재하 및 일정변형률 시험을 통해 산정한 압밀계수

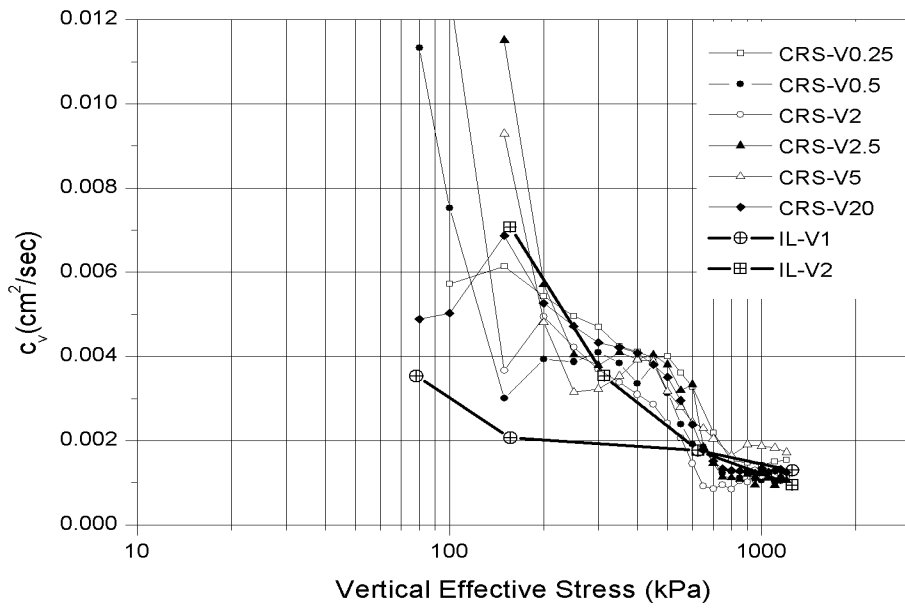


그림 6 첫 번째 재재하 구간에서의 단계재하 및 일정변형률 시험을 통해 산정한 압밀계수

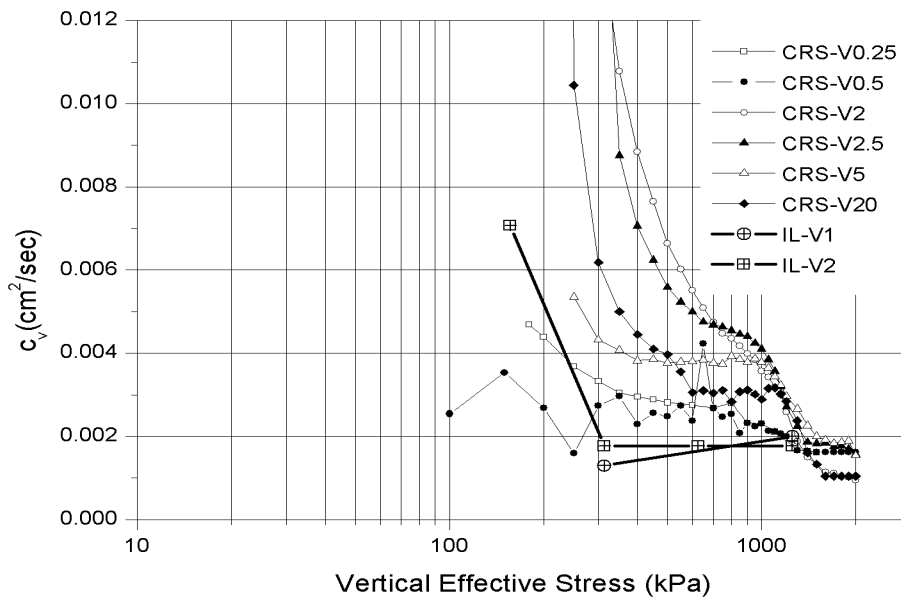


그림 7 두 번째 재재하 구간에서의 단계재하 및 일정변형률 시험을 통해 산정한 압밀계수

#### 4.2.2 제하구간

제하 시 압밀계수는 실제 현장에서 굴착 및 성토 제거 시 지반의 팽창속도 및 팽창시간과 관련되어 있기 때문에 매우 중요하다. 단계재하 시험의 경우, 각 하중 단계에서 과잉간극수압이 완전히 소산된 후에 그 다음 하중단계로 넘어가지만, 연속적으로 하중을 변화시키는 일정변형률 압밀시험에서는 주어진 하중에서 발생하는 과잉간극수압의 비를 적정 수준으로 유지하는 속도 범위 내에서 시험을 진행하게 된다.

연직배수 조건의 일정변형률 압밀시험에서 제하 시 속도가 느리면, 간극수압의 소산이 더디게 된다. 이때, 연직배수조건에서 간극수압계는 배수면(시료 상부)으로부터 가장 먼 시료 하부 중앙부에 설치되기 때문에 간극수압계가 측정하는 과잉간극수 값의 변화가 작게 된다. 한편, 과잉간극수압비는 발생한 과잉간극수압과 전응력의 비이므로, 제하를 수행하면 전응력이 감소하여 제하가 진행될수록 간극수압비는 증가하게 된다. 반대로, 제하 시 속도가 너무 빠르면 음의 과잉간극수압이 지나치게 크게 발생하고, 제하 속도가 시료의 팽창속도보다 빨라 상부 재하판과 시료가 떨어질 수도 있어 응력을 제대로 측정할 수 없게 된다. 이처럼 제하 시의 간극수압 소산은 변형률 속도에 영향을 받고 압밀계수(팽창계수) 산정에 영향을 미친다. 본 연구에서는 단계재하 시험의 압밀계수와와의 비교를 통해, 제하 시 합리적인 압밀 계수를 산정할 수 있는 간극수압비를 제시하고자 하였다.



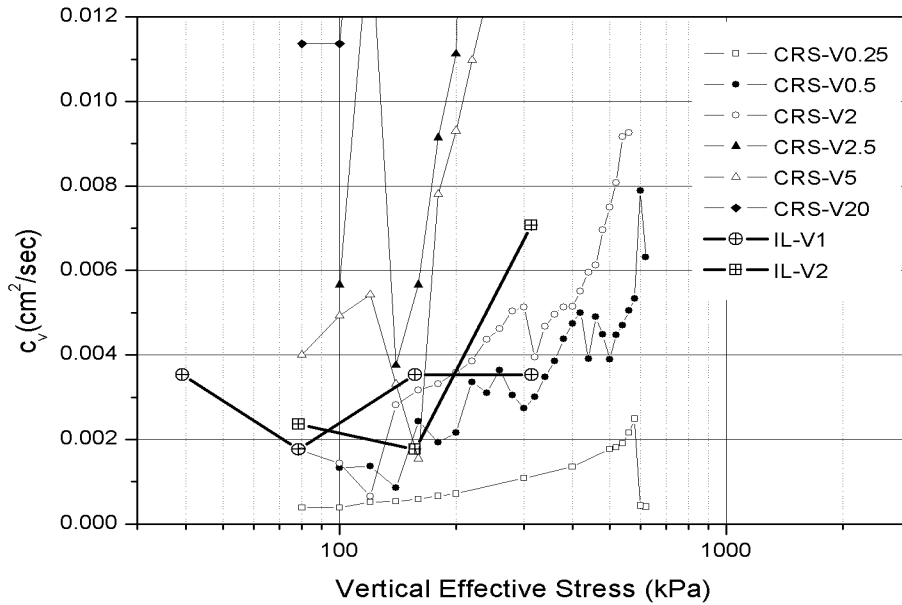


그림 8 첫 번째 제하구간에서의 단계재하 및 일정변형률 시험을 통해 산정한 압밀계수

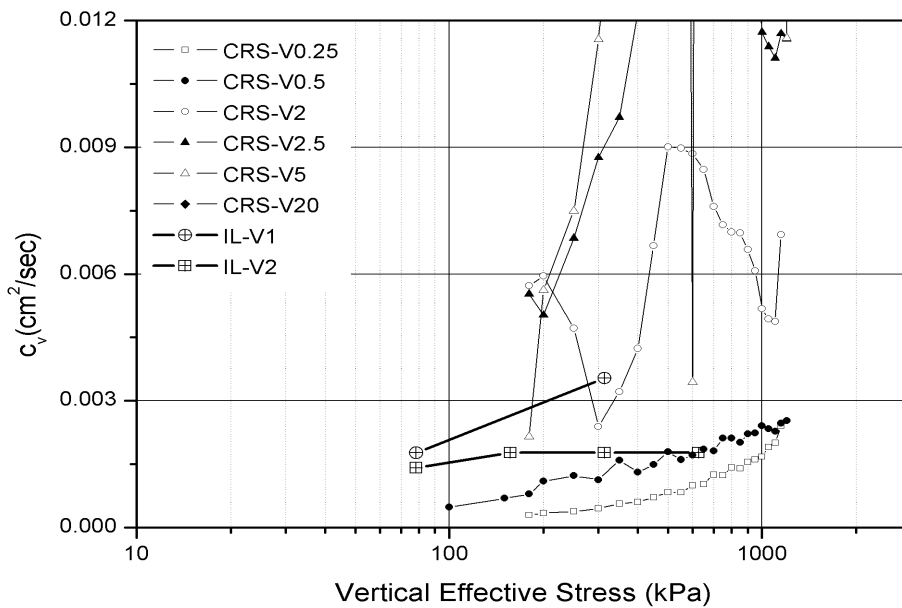


그림 9 두 번째 제하구간에서의 단계재하 및 일정변형률 시험을 통해 산정한 압밀계수

그림 8과 그림 9는 제하 구간에서의 단계재하 및 일정변형률 시험을 통해 산정한 압밀계수를 도시한 것이다. 재재하 구간의 압밀계수와 달리 제하 구간에서의 압밀계수는 각 시험간의 차이가 상대적으로 크게 나타났다.

첫 번째 제하 구간에서는 0.5%/hr 와 2%/hr 의 속도로 제하하였을 때, 단계재하 시험의 압밀계수와 가장 잘 일치하였다. 두 번째 제하 구간에서는 0.5%/hr의 속도로 제하하였을 때, 300kPa 미만의 응력에서는 압밀계수를 다소 과소평가하지만 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있다. 그림 10은 각 시험별 간극수압비를 도시한 것이고, 표 5는 그림 10의 제하-재재하 구간별 간극수압비 범위를 요약한 것이다. 압밀계수와 간극수압비를 함께 비교해 본 결과, 일

정변형률 압밀시험에서 제하시 간극수압비가 3~15% 범위에 있을 때, 단계재하 시험의 압밀계수와 잘 일치함을 확인하였다. 제하시 속도가 2.5% 이상일 때부터 음의 과잉간극수압비를 보이며, 속도가 빨라질수록 간극수압비는 더 큰 음의 값을 가진다. 간극수압비가 3% 미만일 경우에는 압밀계수를 과대평가하는 경향이 있으며, 15% 이상일 경우에는 압밀계수를 과소평가하는 경향이 있다. 또한, 일부 구간에서 간극수압비 3~15%의 범위를 만족하더라도 그 외의 구간의 간극수압비가 3~15%의 범위를 벗어나면, 응력범위 전체에 걸쳐서 제하 시 압밀계수를 산정하기도 어려울 뿐만 아니라, 재재하 구간의 시험 결과에도 영향을 미쳐서 재재하 구간의 합리적인 압밀계수 산정을 어렵게 한다.

본 연구로부터 재성형한 카올리나이트를 이용한 연직배수 일정변형률 압밀시험의 경우, 제하 시 합리적인 압밀계수를 산정할 수 있는 과잉간극수압의 범위를 제하 및 재재하 구간과 마찬가지로 3~15%로 설정할 수 있다. 이러한 간극수압비 범위를 만족시키는 제하 시 최적 변형률 속도는 0.5%/hr이며, 이 때 제하 및 재재하의 모든 구간에서 합리적인 압밀시험 결과를 얻을 수 있었다.

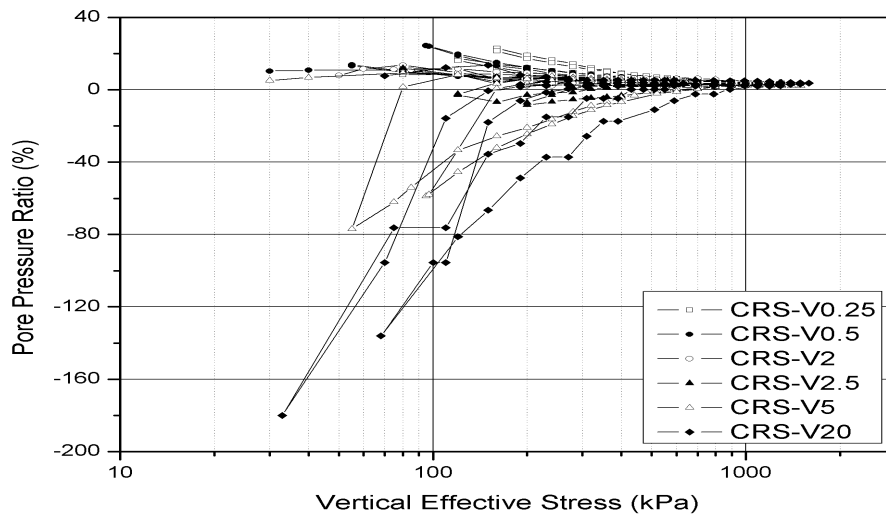


그림 10 각 시험별 간극수압비(간극수압과 전응력의 비)

표 5 제하 및 재재하 구간 간극수압비의 최대값과 최소값

	첫 번째 제하-재재하 구간 간극수압비(%)		두 번째 제하-재재하 구간 간극수압비(%)	
	최대	최소	최대	최소
CRS-V0.25	17.9	2.6	21.5	2.6
CRS-V0.5	14	3.5	24	4
CRS-V2	11	3	3.5	1.25
CRS-V2.5	4.5	-6.8	3.8	-9.3
CRS-V5	7.2	-78	5.2	-68
CRS-V20	3.6	-180	6.1	-130

## 5 결론

본 연구에서는 일정변형률 압밀시험을 수행함에 있어서, 제하 및 재제하 단계에서도 신뢰성 있는 압밀특성을 산정하기 위하여 다양한 변형률 속도하에서 시험을 실시하고 침하특성, 압밀계수, 과잉간극수압 거동 등 다양한 측면에서 분석을 수행하였다. 이로부터 재성형한 카올리나이트에 대하여 합리적인 압밀정수를 산정할 수 있는 제하-재제하 구간의 속도 기준을 제안하였다. 재성형 카올리나이트의 재압축지수는 압축지수와 마찬가지로 변형률 속도에 민감하지 않았다. 재하 및 재제하의 구간의 압밀계수는 본 연구에서 채택된 속도인 1%/hr로 시험할 경우, 단계제하 시험결과와 매우 잘 일치하는 것을 확인하였다. 다만, 두 번째 재제하 구간에서의 압밀계수는 모두 1%/hr의 동일한 재제하 속도임에도 불구하고 직전 단계의 제하 속도 증가에 따라 압밀계수도 증가하는 경향을 보여, 이전 단계의 과잉간극수압이 이후 시험결과에 영향을 주는 것으로 판단된다. 즉, 제하 시 적정 간극수압비를 유지할 수 있는 속도로 시험하여야 함을 알 수 있다. 압밀계수와 간극수압비를 함께 비교해 본 결과, 일정변형률 압밀시험에서 제하시 간극수압비가 3~15% 범위에 있을 때, 단계제하 시험의 압밀계수와 잘 일치함을 확인하였다. 즉, 재하, 제하 및 재제하 모든 구간에서 간극수압비가 3~15%를 만족할 때 합리적인 압밀정수를 산정할 수 있으며, 이러한 간극수압비 범위를 만족시키는 제하 최적 변형률 속도는 0.5%/hr, 재하 및 재제하 최적 변형률 속도는 1%/hr이다.

## 참고문헌

1. 이원재(2008), 일정변형률 압밀시험의 최적 변형률 속도, 석사학위논문, 서울대학교.
2. ASTM(2006), "Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Saturated Cohesive Soils using Controlled-Strain Loading", *ASTM*, D4186-06, pp.515-519
3. ASTM(2004), "Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading", *ASTM*, D2435-04, pp.1-10.
4. Jose, B. T., Sridharan, A., and Abraham, B. M. (1989), "Log-log Method for Determination of Preconsolidation Pressure", *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, Vol. 12, No. 3, pp. 230-237.
5. Lee, K. (1981), "Consolidation with Constant Rate of Deformation", *Geotechnique*, Vol. 31, No. 2, pp. 214-229.
6. Silvestri, V., Yong, R. N., Soulie, M., and Gabriel, E(1986), "Controlled-Strain, Controlled-Gradient, and Standard Consolidation Testing of Sensitive Clays", *Consolidation of Soils: Testing and Evaluation*, ASTM STP 892, Philadelphia, pp. 433-450.
7. Smith, R. E. and Wahls, H. E.(1969), "Consolidation under Constant Rates of Strain," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 95, No. SM2 , pp. 519-539.
8. Umehara, Y. and Zen, K.(1980), " Constant Rate of Strain Consolidation for Very Soft Clayey Soils", *Soils and Foundations*, Vol. 20, No. 2, June, pp. 79-95.
9. Vipulanandan, C. et al.(2008), "Recompression Index (Cr) for Overconsolidated Soft Clay Soils," *Geo-Congress 2008, Proceedings of sessions of Geo-Congress, ASCE*, GEO

Institute, pp.68-75.

10. 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.

11. Yune, C.Y. and Chung, C.K.(2005),“Consolidation Test at Constant Rate of Strain for Radial Drainage”, *Geotechnical Testing Journal, ASTM*, Vol. 28, No.1, pp.71-78.