

# CRS 압밀시험의 해석과 적용에 관한 실험적 연구

## Experimental Study on Analysis and Application of CRS Test

이용준\* 한상재\*\* 김용수\*\*\* 김수삼\*\*\*\*  
Lee, Yeng-Jun Han, Sang-Jae Kim, Yong-Soo Kim, Soo-Sam

### ABSTRACT

In this study, using the CRS consolidation tests on reconstituted marine clay, the characteristics of  $C_v$ ,  $k$ ,  $e$  and  $\varepsilon$ , the anisotropic characteristics of specimen according to the rate of strain were estimated. Also, the validity of the Wissa et al.(1971) consolidation theory on CRS(Constant Rate of Strain) consolidation tests were reviewed. From that results, it was shown that the value of  $C_v$ ,  $k$  and  $u_b$  was increased as the rate of strain was increased. While the difference of the value( $C_v$ ,  $k$  and  $u_b$ ) between vertically reconstituted specimen and horizontally reconstituted specimen became small as the rate of strain was increased. It is known that  $k$  is different due to the hydraulic gradient( $i$ ) during the CRS consolidation tests. The subject of this study is to distinguish steady state from transient state in CRS consolidation tests. Consequently, the difference of the value( $C_v$  and  $k$ ) is higher in case of vertically reconstituted specimen than horizontally reconstituted specimen.

### 1. 서론

일반적으로 지반의 압밀정수를 산정하기 위해 표준압밀시험이 수행되고 있다. 하지만 표준압밀 시험은 시험소요시간이 약 1~2주 정도로 장시간이며, 각 단계별 하중재하시 균일하지 않은 하중 상태와 일정하지 않은 변위속도로 인해 압밀곡선이 뚜렷하게 정의되지 않아 결과해석시 오차발생의 가능성이 높다. 또한 배압을 가할 수 없어 시료의 완전포화는 어렵다. 이러한 표준압밀시험을 개선하고 대신하기 위해 개발되고 있는 압밀시험법 중에서 CRS 압밀시험에 대해 살펴보면, 일정 변형속도로 시료에 연직변위를 발생시키고, 변위발생에 따른 전응력과 비배수면에서 발생하는 과잉간극수압을 측정하여 연직유효응력과 그에 상응하는 간극비를 산정함으로써 각 압밀정수간의 상관관계를 연속적으로 빠른 시간(5~30시간) 안에 산출할 수 있는 등의 장점을 보유하고 있다. 본 연구에서는 남해안에서 채취한 해성점토에 대한 CRS 압밀시험을 수행하여 첫째, 변형속도에 따른 압밀정수의 변화특성을 파악하고, 둘째 연직시료와 수평시료에 대한 시험을 수행하여 시료의 이방성에 관한 특성을 살펴보았으며, 마지막으로 본 연구에서 CRS 압밀시험결과 해석을 위해 적용한 Wissa et al.(1971)의 해석이론에 대한 적용성을 검토하여 정상상태와 전이상태를 고려해 보고자 하였다.

\* 중앙대학교 석사과정, 비회원  
\*\* 중앙대학교 박사수료, 비회원  
\*\*\* 중앙대학교 박사과정, 비회원  
\*\*\*\* 중앙대학교 건설환경공학과 교수, 정회원

## 2. 이론적 배경

### 2.1 Wissa et al.(1971)

본 이론은 미소변형률이론을 바탕으로 정상상태와 전이상태의 거동을 포함하는 이론적 해를 얻고자 하였으며 흙의 거동을 선형 및 비선형으로 구분하여 수학적인 어려움 없이 표현하였다. 미소변형이 존재하고 압밀계수  $C_v$ 는 임의의 시간에 대해 시료의 깊이에 따라 일정하며 또한 변형과 흐름은 연직방향으로만 발생하고, 유체와 토립자는 비압축성이며, 시료는 완전히 포화되어 있다고 가정하였다.

압밀지배방정식은 식(1)과 같다.

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial z^2} \quad (1)$$

여기서,  $C_v = k/\gamma_w m_v$ ,  $z$  = 임의의 위치,  $m_v$  = 체적압축계수

$k$  = 투수계수,  $\gamma_w$  = 물의 단위중량,  $t$  = 압밀경과시간,  $\epsilon$  = 연직변위

식(2)에서 각각 좌표, 시간, 변위에 관한 무차원 변수가 사용되었다.

$$X = \frac{z}{H} \text{ (좌표)}, \quad T_v = C_v \frac{t}{H^2} \text{ (시간)}, \quad V = \frac{v}{H} \text{ (변위)} \quad (2)$$

식(2)의 세 가지 무차원변수를 식(1)에 적용하면 식(3)과 같은 기본방정식으로 변환된다.

$$\frac{\partial^3 V}{\partial X^3} = \frac{\partial^2 V}{\partial X \partial T_v} \quad (3)$$

경계조건과 초기조건은 각각 식(4)와 같다.

$$V(1, T_v) = V(X, 0) = \frac{\partial^2 V(1, T_v)}{\partial X^2}, \quad T(0, T_v) = T_v \left( \frac{\gamma H^2}{C_v} \right) \quad (4)$$

경계조건과 초기조건을 고려한 변형률을 무차원변수의 함수로 나타내면 식(5)와 같이 된다.

$$\epsilon(X, T_v) = \gamma t [1 + F(X, T_v)] \quad (5)$$

$$\text{여기서, } F(X, T_v) = \frac{1}{6T_v} (2 - 6X + 3X^2) - \frac{2}{\pi^2 T_v} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos nX}{n^2} \exp(-n^2 \pi^2 T_v) \quad (6)$$

식(5)는 전이상태와 정상상태로 분리되며 응력-변형률의 가정조건을 통해 선형 및 비선형으로 구분하여 다음의 식을 이용하여 압밀정수를 산정하게 된다.

먼저 정상상태에서 시료의 거동을 체적변화계수 ( $m_v$ )가 일정하다고 가정할 경우, 선형조건인 압밀정수는 식(7)을 이용하여 산정하게 된다. 또한 정상상태에서 시료의 거동을 압축지수 ( $C_c$ )가 일정하다고 가정할 경우, 비선형조건인 압밀정수는 식(8)을 이용하여 산정하게 된다.

$$\overline{\sigma_{v_{ave}}} = \frac{1}{3} [2\overline{\sigma_v(H, t)} + \overline{\sigma_v(0, t)}] \quad C_v = \frac{H^2}{2u_h} \left( \frac{\Delta \sigma_v}{\Delta t} \right) \quad (7)$$

$$= \sigma_v - \frac{2}{3} u_h$$

$$m_v = \frac{\Delta \epsilon}{\Delta \sigma_v} = \gamma \left( \frac{\Delta t}{\Delta \sigma_v} \right) \quad k = \frac{1}{2} \frac{rH^2 \gamma_w}{u_h}$$

$$\overline{\sigma_{v_{ave}}} = (\sigma_v^3 - 2\sigma_v^2 u_h + \sigma_v u_h^2)^{\frac{1}{3}} \quad C_v = - \frac{H^2 \log \left( \frac{\sigma_{v2}}{\sigma_{v1}} \right)}{2\Delta t \log \left( 1 - \frac{u_h}{\sigma_v} \right)} \quad (8)$$

$$m_v = \frac{0.434 C_\epsilon}{\sigma_v} \quad k = C_v m_v \gamma_w$$

### 3. 시험

#### 3.1 CRS 압밀시험

본 연구에서 수행한 CRS 압밀시험과 사용된 시료의 기본물성은 각각 도표1. 도표2.와 같다.

도표1. CRS 압밀시험 진행도표

CRS 시험종류	변형률속도(%/min)	비고
CRS0.05V	0.05	V:
CRS0.05H		
CRS0.03V	0.03	Vertical
CRS0.03H		
CRS0.01V	0.01	Horizontal
CRS0.01H		

도표2. 본 연구에 사용된 시료의 기본물성

토질분류	CH
#200체 통과량(%)	94.3
액성한계(%)	61
소성한계(%)	25
소성지수	36
비중	2.70
단위중량(t/m <sup>3</sup> )	1.1

#### 3.2 CRS 압밀시험장치

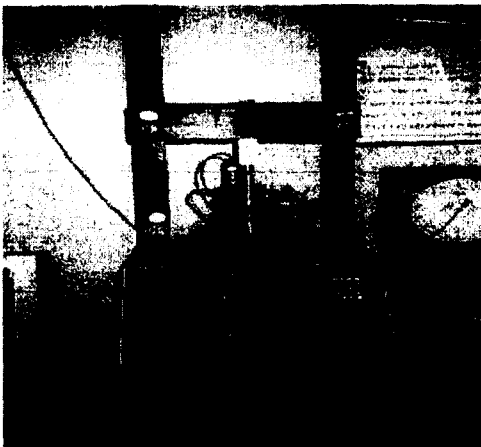


그림1. CRS 압밀시험기의 시험광경

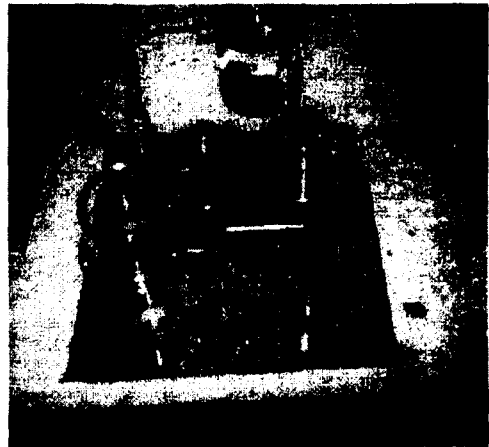


그림2. CRS 압밀시험기의 구성요소

본 시험에서 사용한 장치는 미국 GEOCOMP사에서 제작한 Load Trac II로서 그림1.과 그림2.에 제시되어 있다. 본 시험장치는 Load frame, 압밀셀, Signal Conditional unit, P/C, 가압장치, 측정장치로 구성되어 있으며, CRS 시험단계는 시료성형단계, 압밀링조립단계, 포화단계, 압밀단계, 완료단계로 이루어져 있다.

## 4. 결과분석 및 고찰

### 4.1 변형속도에 따른 CRS 압밀시험 결과

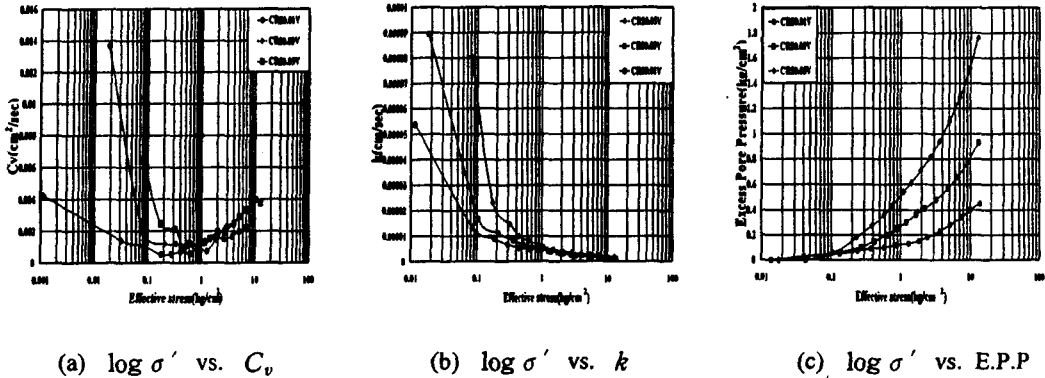


그림3. 연직시료에 대한 CRS 압밀시험 결과

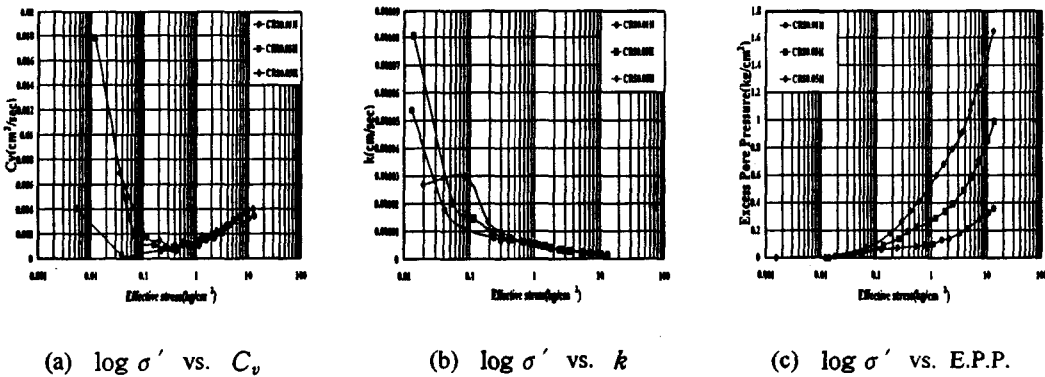


그림4. 수평시료에 대한 CRS 압밀시험 결과

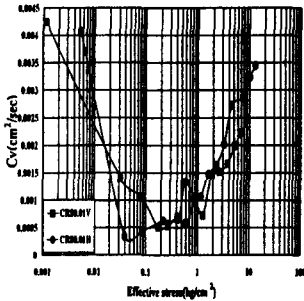
변형속도에 따른 CRS 압밀시험결과 중에서 연직시료에 대한 결과를 그림3.에, 수평시료에 대한 결과를 그림4.에 제시하였다. 그림3.과 그림4.의 결과를 살펴보면, 변형속도가 0.01%/min에서 0.05%/min으로 증가함에 따라 유효응력에 대한 압밀계수, 투수계수, 과잉간극수압 등이 증가되는 경향을 나타내고 있다. 또한 그림3.과 그림4.에 제시된 그래프에서 Wissa et al.(1973)이론을 적용한 결과 시험초기단계에서의 압밀계수, 투수계수값이 시험중반 이후에 산정된 값에 비해 상당히 분산되어 있으며, 또한 상당히 큰 차이가 나타나고 있다.

이러한 결과에 대해 Smith & Wahls(1969)는 CRS 압밀시험에 있어서의 간극수압 측정시스템의 Flexibility때문이라고 하였으며, Gorman(1978)은 CRS 압밀시험시 시험초기상태를 정상상태로 보기

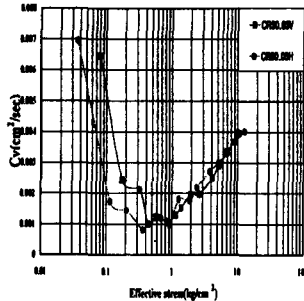
어려움에도 불구하고 시험결과 해석은 정상상태로 해석을 수행하여 결과적으로 압밀계수 등이 상당히 과대하게 평가되어 시험초기상태에 대한 해석결과는 신뢰할 수가 없다고 하였다.

이와 같은 학자들에 견해에 대해 이미 정상상태와 전이상태를 구분하는 식이 제안되어 있지만 그 식은 표준압밀시험을 통해 얻은 계수들을 이용하여 식을 전개해 나간 것으로, 본 연구에서는 CRS 압밀시험을 실시하여 얻은 결과들을 바탕으로 정상상태와 전이상태를 구분하는 기준을 설정하고자 하였다.

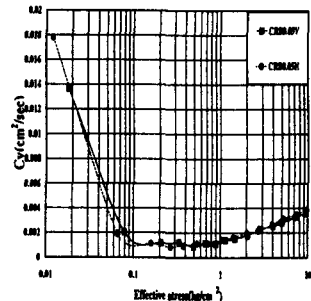
#### 4.2 시료의 이방성에 따른 변형속도의 영향



(a) 0.01 %/min

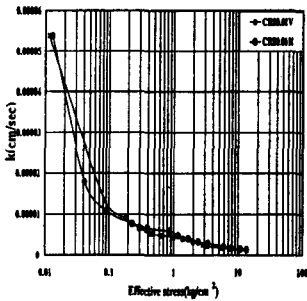


(b) 0.03 %/min

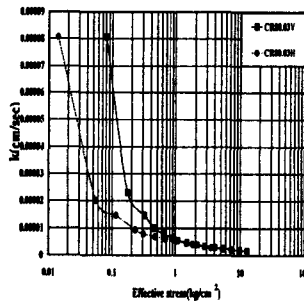


(c) 0.05 %/min

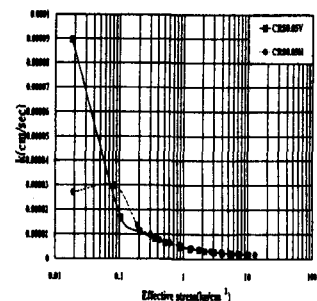
그림 5.  $\log \sigma' \text{ vs. } C_v$



(a) 0.01 %/min



(b) 0.03 %/min



(c) 0.05 %/min

그림 6.  $\log \sigma' \text{ vs. } k$

실내에서 재조성한 시료에 대해 연직시료와 수평시료로 나누어 CRS 압밀시험을 수행한 결과를 그림5.~그림6.에 각각의 항목별로 나누어 제시하였다. 본 그래프를 통해 변형속도에 따른 시료이방성의 특성 중 가장 주목할 점은 첫째, 변형속도 변화에 관계없이 수평시료에 대한 시험결과가 연직시료에 대한 시험결과보다 일반적으로 좀 더 큰 값을 갖는 경향을 보이고 있는데 이것은 점토의 구조적인 특징에 기인한 것이라고 할 수 있을 것이다. 둘째, 변형속도가 증가할수록 연직시료와 수평시료에 대한 시험결과가 점차적으로 차이가 줄어들어 0.01%/min에 비해 0.05%/min에서의 두 값들은 거의 차이를 보이지 않고 있다. 셋째, 그림3.~그림4.의 경우에서와 마찬가지로 시험초기부분에 있어서 시험결과들이 상당히 큰 값을 보이며 분산되어 있는 특징을 나타내고 있다. 그림

5.~그림8.까지 제시한 그래프들을 통해볼 때, 변형속도에 따른 결과들과 시료의 이방성에 따른 결과들은 상당한 일관성을 지니고 있다. 이러한 상관성은 시료재조성시 적용된 압밀용력의 크기 변화와 시료에 적용되는 변형속도의 좀 더 확장된 범위에 대한 검토가 요구되며, 이러한 결과들을 산정하는데 사용된 Wissa et al.(1971) 압밀이론의 시험초기부분에 대한 결과들을 해석함에 있어서 보다 합리적인 기준이 마련되어야 할 것으로 본다.

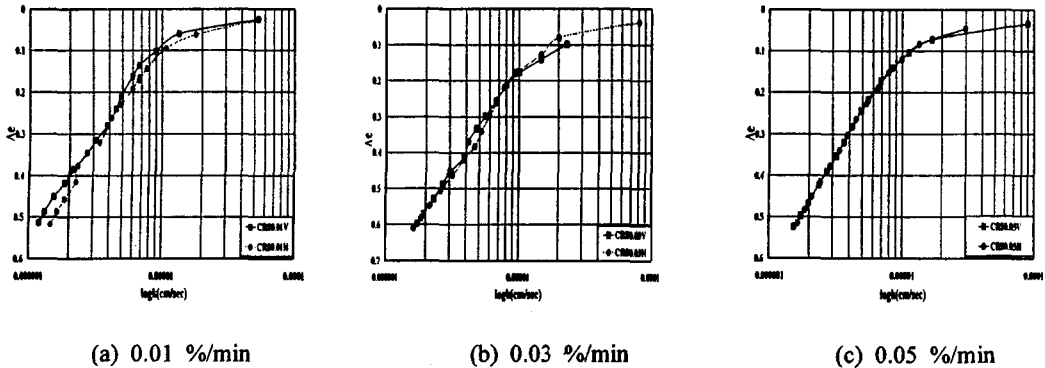


그림7.  $\log k$  vs.  $\Delta e$

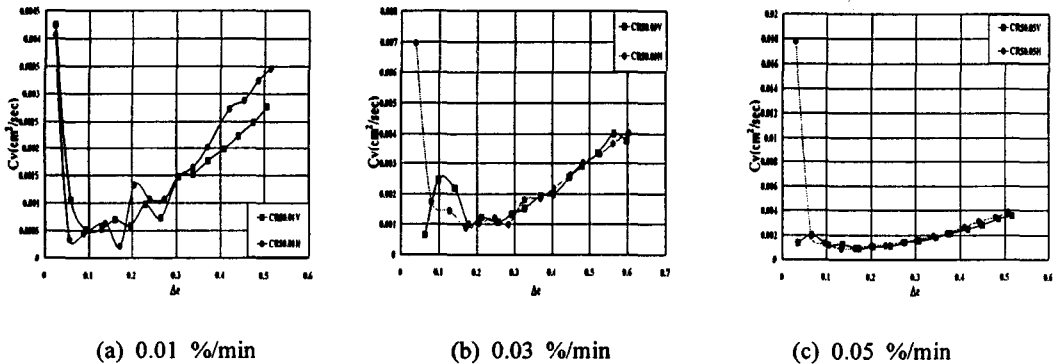


그림8.  $C_v$  vs.  $\Delta e$

### 4.3 Wissa et al.(1971) 압밀이론 적용의 타당성에 대한 검토

현재 CRS 압밀시험결과 해석에 있어서 가장 널리 사용되고 있는 Wissa et al.(1971) 압밀이론이 과대하게 평가되는 부분과 타당하다고 인정되는 부분을 나누는 기준을 설정하는 것이 필요하다고 사료된다. 이 기준은 시험초기상태에 대한 해석결과가 과대하게 산정되는 범위를 설정하여 그 범위에 대해 다른 해석방법을 적용하기 위함이다. 무분별하게 Wissa et al.(1971)의 정상상태에서의 선형해석이론을 적용하여 나타난 결과를 사용함에 있어 시험의 초기부분이 과대하게 산정되었다고만 받아들이는 것은 불합리하다고 판단된다.

CRS 압밀시험 결과 얻은 데이터를 해석함에 있어서 과연 어느 범위에서부터 정상상태로 고려하여야 하는지에 대한 하나의 기준이 마련되어야 한다고 생각하며, 이 기준을 CRS 시험을 통해 얻은 그래프를 이용하여 표현해 보고자 하는 것이다.

또한 정상상태와 전이상태를 구분하는 기준이 마련되었다고 한다면, 그 기준에 따라 전이상태에서 과도하게 산정된 CRS 압밀시험결과를 보다 합리적으로 평가할 수 있는 해석방법이 뒤따라야 할 것이며 이 해석방법에 의한 값과 기존의 해석방법에 의해 산정된 값들간의 상관관계를 규명하는 연구가 이루어져야 할 것이다.

따라서 본 절에서는 우선 CRS 압밀시험에서 얻은 기본 데이터들과 시험결과 얻은 투수계수와 동수경사와의 상관관계를 검토하여 해석이론의 적용성에 대해 검토해 보고자 하였다.

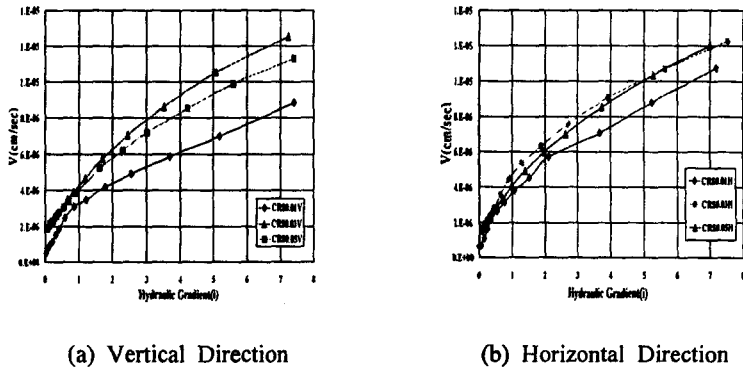


그림9.  $v$  vs. Hydraulic Gradient( $i$ )

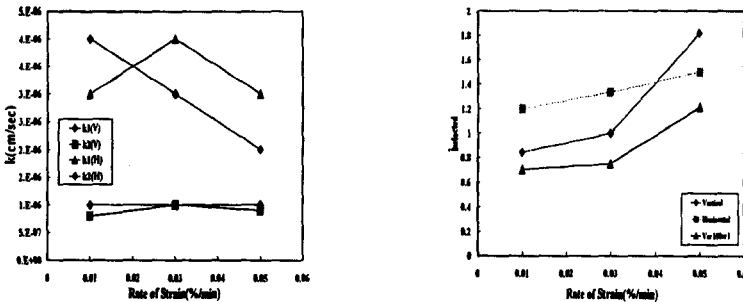
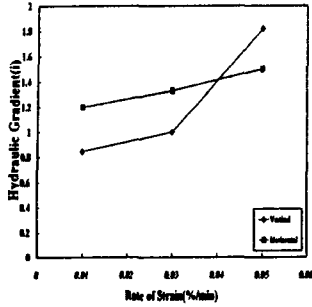


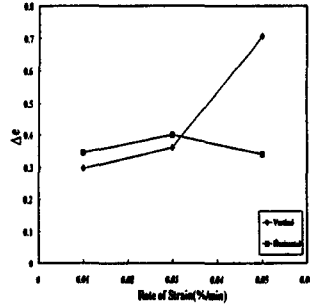
그림10. Rate of Strain vs.  $k$  ( $k_1, k_2$ )      그림11. Rate of Strain vs.  $i_{selected}$

그림9.~그림11.에 대해 살펴보면, 그림9.에는 CRS 압밀시험시 동수경사에 대한 투수속도를 도시하여 기율기인  $k$ 의 변화에 대해 알아보려고 한 것으로 그림9.(a),(b)에는 연직시료와 수평시료에 대한 CRS 압밀시험결과를 나타내었고, 그림10.에는 변형속도에 따른 결과를 나타낸 것으로 낮은 동수경사에서의  $k_1$ 값과 높은 동수경사에서의  $k_2$ 값과의 관계를 보면, 변형속도가 증가함에 따라  $k_1$ 이  $k_2$ 에 비해 변화 폭이 상당히 큰 것으로 나타났다. 이러한  $k$ 가 변하는 변곡점에서의 동수경사값을 그림11.에 제시하였다.

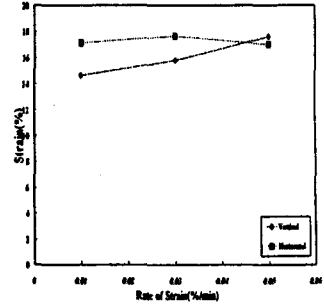
그림12.에는 변형률속도에 대해 앞에서 결정된 연직시료와 수평시료에 대해 결정된 동수경사와 그 동수경사에 해당되는 간극비 변화량, 변형률에 대해 도시하였다. 그래프에 제시된 값들을 비교해 볼 때, 수평시료보다는 연직시료에 대한 CRS 시험결과가 매우 큰 변화를 보이고 있음을 알 수 있다.



(a) Hydraulic Gradient(i)



(b)  $\Delta e$



(c)  $\epsilon$

그림12. Hydraulic Gradient(i),  $\Delta e$ ,  $\epsilon$  vs. Rate of Strain

## 5. 결론

본 연구목적은 변형속도가 연직시료와 수평시료의 압밀정수 산정에 미치는 영향, 연직시료와 수평시료를 상호 비교를 통한 시료의 이방성 규명 그리고 Wissa et al.(1971)의 해석이론의 적용성에 파악 등이다. 이를 위해 CRS 시험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 변형률속도를 변화시켜 CRS 시험을 실시한 결과, 변형속도가 증가할수록 압밀계수, 투수계수, 과잉간극수압 등은 증가하는 경향을 나타내었는데 시험초기단계에 비해 시험중반이후 단계에서는 그 차이가 조금씩 감소하는 경향을 나타내었다.

(2) 시료의 이방성에 대해 시험결과를 검토한 결과, 변형속도가 증가함에 따라 연직시료와 수평시료에 대한 시험결과가 서로 일치되어 가는 것으로 나타났으며, 본 연구에서 적용한 0.05%/min의 변형속도의 경우는 연직시료와 수평시료에 대한 CRS 압밀시험 결과가 거의 일치되어 입의의 대상시료에 대해 변형속도가 특정한 한계변형속도 이상으로 가해지면 시료의 이방성 차이를 구분하기가 곤란하게 되어 시료의 이방성 파악이 어렵게 될 것으로 판단된다.

(3) 본 연구에서는 CRS 압밀시험결과 해석을 위해 Wissa et al.(1971) 압밀이론을 적용함에 있어서 정상상태와 전이상태를 구분하는 기준을 파악하고 하였다. 그 결과 CRS 압밀시험동안 동수경사에 대해 투수속도를 도정한 결과 기울기에 해당되는 투수계수가 일정하지 않음을 알게 되었고 그 변곡점에 해당되는 동수경사에서의 간극비 변화량, 변형률을 시료방향과 변형률속도에 따라 그 그래프로 나타낸 결과 수평시료에 대한 CRS 압밀시험결과에 비해 연직시료에 대한 CRS 시험결과가 더 큰 변화량을 나타내는 것을 알 수 있었다.

## 6. 참고문헌

1. 박순규, "일정변위압밀이론에 의한 연직점토의 압밀특성 산정에 관한 연구", 1993, 강원대학교 석사학위논문.
2. 임형덕, "Comparison of consolidation characteristics of Gaduk-do clay by CRS and conventional tests" 1998, 고려대학교 대학원 석사학위논문.
4. ELE International Limited., "Soil laboratory Testing" Vol.3, 1986, pp.1197~1225.
5. Smith, R.E., Wahls, H.E., "Consolidation under Constant Rates of Strain", ASCE, Vol.95, No.SM2, Proc. paper 6452, March 1969, pp.519-539.