

일정변형률(CRS) 시험에서의 압밀특성

이달원^{1*} · 김시중¹

Consolidation Characteristics at the Constant Rate of Strain(CRS) Test

Dal Won Lee^{1*} · Si Jung Kim¹

ABSTRACT

This study was carried out to investigate the consolidation characteristics of the remolded clay by the oedometer and the constant rate of strain(CRS) consolidation tests. As the rate of strain increases, the settlement rapidly decreased. As the ratio of the sand in the specimen increases, its effect on the rate of strain to the settlement was reduced. As the effective stress increased, the void ratio decreased, while the rate of strain increased, it did not show a clear variation. The reduction of the void ratio was shown to be less than the oedometer test. The coefficient of vertical consolidation with effective stress showed very large variation around preconsolidation stress, but the rate of strain did not provide significant effects. The rate of strain with effective stress gradually decreased at all tests and mixed ratio of sand. The rate of strain at the constant rate of strain tests showed smaller than in the oedometer test. The coefficient of consolidation at the constant rate of strain tests showed much more increase than in the oedometer test. The ratio of the vertical coefficient of consolidation by the oedometer and the constant rate of strain tests showed a large difference according to various tests method and mixing ratio. Therefore, it is recommended that careful attention should be paid to designing the soft ground improvement.

Key words: Coefficient of consolidation, Settlement, Constant rate of strain, Oedometer

1. 서론

연약지반을 구성하고 있는 점토광물은 매우 복잡한 구조로 이루어져 있어 매립에 의한 단지조성과 연약지반상에 축조되는 구조물의 설계시 최종침하량과 압밀속도의 추정 은 매우 중요하다.

연약지반을 구성하고 있는 점토광물은 판상구조로 이루어져 있어 수평방향의 압밀계수는 연직방향의 압밀계수보다 큰 것으로 보고 있다. 일반적으로 연약지반의 압밀특성을 산정하기 위해서는 Terzaghi (1943)의 1차원 압밀이론에 의한 표준압밀시험이 가장 널리 사용되고 있으나 압밀정수를 얻기 위해서는 비교적 긴 시간이 소요되며, Casagrande (1936)의 도해법을 이용하므로 개인적인 오차가 발생할 수 있다.

Terzaghi의 1차원 압밀이론은 점토의 성질에 대하여 많은 가정 하에 성립하고 또한 문제의 적용범위도 상당히 제한되어 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해 오랫동안 표준 압밀시험을 개선하고 대신할 여러 가지 압밀시험법이 발전

되어 왔다. 그 대표적인 시험으로는 Smith 등(1969), Wissa 등(1971), Sheahan 등(1997)의 일정변형률 압밀시험 (CRS), Rowe 등(1966)의 Rowe cell 시험 등이 있다.

최근에는 교란 및 불교란 시료에 대한 표준압밀 시험과 CRS 시험과의 변형속도 및 압밀특성 등의 상호관계를 비교분석하고 적용성 등을 평가한 연구와, Rowe cell 시험과도 압밀계수 등을 비교분석한 연구가 진행되고 있다 (Kim 등, 1999; Youn 등, 2002; Kim 등, 2004; Lee 등, 2010).

일정변형률 압밀시험은 표준압밀시험보다 빠른 시간 내에 압밀정수를 얻을 수 있고, 세밀한 e-log p 곡선과 연속적인 압밀계수-유효응력 곡선을 구할 수 있는 장점을 가지고 있다. 일정변형률 압밀시험으로 점성토의 압밀특성을 추정하는 경우 적절한 변형률속도를 산정하는 것은 매우 중요하다. 변형률 속도에 따라 과잉공극수압이 다른 값을 나타내기 때문에 실험도중에 발생하는 적절한 간극수압 내에서 변형률 속도를 결정해야 한다. 변형률 속도가 너무 작으면 시료하단에서 과잉공극수압이 발생되지 않아 연직유효응력 계산과정에 영향을 미치지 않지만 압밀정수를 산정할 수 없으며, 너무 빠르면 상대적으로 큰 과잉공극수압이 발생되어 시료 양단의 응력차이 증가로 계산 과정시 오차를 유발할 수 있다. 따라서 합리적인 변형률 속도는 연직유효응력과 압밀계수를 동시에 고려하고 시료의 물리적 특성에 따라 간극수압 허용범위 내에서 합리적으로 결정해야 한다.

연약지반에서 침하속도는 압밀계수의 크기에 따라 달라

¹ 충남대학교 지역환경토목학과(Dept. of Agricultural & Rural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea)

* Corresponding author: 이달원(Dal Won Lee)

Tel.: +82-42-821-5793 Fax: +82-42-821-8877

E-mail: dwlee@cnu.ac.kr

2010년 10월 1일 투고

2010년 10월 27일 심사완료

2010년 12월 13일 게재확정

지므로 압밀계수의 이방성은 압밀 속도에 대단히 중요한 영향을 미치고, 연약지반개량 현장에서도 압밀계수의 중요성을 인식하고 있다 (Asaoka, 1978; Duncan, 1993; Rowe 등, 2001). 그러나 지반정수와의 상관관계, 교란영향, 시험 결과에 대한 신뢰성 여부 등으로 인하여 현장에 적용하기에는 아직 많은 문제점이 발생되고 있다. 따라서 본 연구 결과는 일반도로, 농업용 저수지 및 소규모 방조제 등의 압밀완료시점을 정확히 파악하여 합리적인 연약지반 설계 기법을 개선과 동시에 공사기간 단축 및 공사비 절감 등의 경제적인 효과도 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 연약지반에서 채취한 점토와 모래를 혼합하여 일정변형률(CRS) 시험을 실시하고 변형률 속도가 압밀정수에 미치는 영향과 표준압밀시험과 일정변형률(CRS) 시험으로 구한 연직압밀계수와 상관관계를 비교분석하고자 한다.

II. 일정변형률 압밀이론

Wissa 등(1971)은 일정변형률 압밀시험 (CRS)을 정상상태와 전이 상태로 나누어 평균유효응력과 압밀계수 등을 구하였는데, 정상상태에서는 또 다시 흙의 변위와 하중이 선형인 경우와 비선형인 경우로 나누어 계산을 하였다.

정상상태에서 흙이 선형적인 거동을 할 때의 압밀계수는 다음식과 같다

$$C_v = \frac{H^2}{2u_b} \left(\frac{\Delta\sigma_v}{\Delta t} \right) \quad (1)$$

여기서, u_b : 시료하부에서의 과잉공극수압 ($=\Delta\sigma_v$),
 $\Delta\sigma_v$: 시간증가 Δt 에서의 전응력 차이

이 식은 Smith and Wahls (1969)의 식과 같은 형태이고 선형적인 거동에서 평균유효응력은 다음 식과 같다.

$$\overline{\sigma_{v_{ave}}} = \frac{1}{3} [2\overline{\sigma_v}(H,t) + \overline{\sigma_v}(0,t)] = \sigma_v - \frac{2}{3}u_b \quad (2)$$

흙이 비선형적인 거동을 할 때의 연직압밀계수와 평균유효응력은 다음 식과 같다.

$$C_v = - \frac{H^2 \log\left(\frac{\sigma_{v2}}{\sigma_{v1}}\right)}{2\Delta t \log\left(1 - \frac{u_b}{\sigma_v}\right)} \quad (3)$$

$$\overline{\sigma_{v_{ave}}} = (\sigma_v^3 - 2\sigma_v^2 u_b + \sigma_v u_b^2)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

여기서 σ_{v1} : 시간 t_1 일 때 연직전응력,
 σ_{v2} : 시간 t_2 일 때 연직전응력,
 H : 시료의 높이, $\Delta\overline{\sigma_{v_{ave}}}$: 평균유효응력,
 Δt : $t_2 - t_1$, σ_v : 임의시간 t 일 때 연직전응력

III. 재료 및 방법

1. 사용시료

본 실험에서 사용한 시료는 농업용저수지 현장의 연약지반에서 채취하였으며, 통일분류법상 실트질 점토 (CL)로 분류된다. 현장 성토시공 단면과 현장계측 자료는 00지구 농업용 저수지 현장 자료를 이용하여 분석하였다 (Min과 Lee, 2008). 또한 시험조건은 재성형 점토, 점토와 모래를 각각 1:1, 2:1로 혼합한 시료를 가지고 표준압밀시험 및 일정변형률 (CRS) 압밀시험을 실시하였다. 시료의 물리적 성질 및 입도분포곡선은 Table 1 및 Fig. 1과 같다.

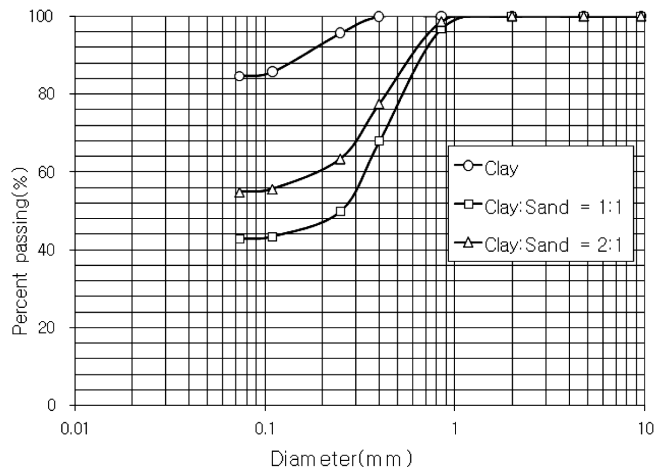


Fig. 1. Particle size distribution curve.

Table 1. Geotechnical properties of used soils.

Sample	Wn (%)	Gs	Atterberg Limits			Consolidation test			U.S.C.S
			LL (%)	PI (%)	Pc (kPa)	Cc	eo	c_v (cm ² /s)	
Undisturbed (clay)	37.0	2.72	26.0	11	101	0.43	1.286	1.072E-3	CL
Disturbed (clay)	45.9	2.76	26.4	8.6	20	0.206	0.980	1.21E-3	CL
Clay: sand=1:1	25.7	2.75	16.6	4.2	28	0.093	0.701	1.75E-2	ML-CL
Clay: sand=2:1	36.7	2.73	18.8	5.5	37	0.138	0.896	1.36E-2	ML-CL

2. 표준압밀시험

표준압밀시험 시료는 점토, 점토와 모래를 각각 1:1, 2:1로 혼합하고, 하중재하는 $\Delta P/P = 1$ 이 되도록 하여 10, 20, 40, 80, 160, 320, 640, 1280 kPa의 총 8단계로 재하하고, 연직압밀계수 (C_v)를 구하기 위하여 \sqrt{t} 법을 사용하였다.

3. 일정변형률(CRS) 압밀 시험

표준압밀시험이 압밀과정에서 투수성과 압축성이 변화되어 압밀계수가 일정하지 않고, 압축지수, 압밀계수 등을 구하는데 장시간을 요하며, 각 하중단계에서 하중재하 후 수 시간 내에 일차압밀이 완료되는 문제점이 있다. 따라서 이러한 단점을 보완한 일정변형률 시험은 하중재하시 발생하는 과잉공극수압이 시료의 압밀에 영향을 주지 않는 범위 내에서 하중재하속도를 일정수준까지 높여서 빠른 시간 내에 압밀시험을 완료시킬 수 있다.

재성형된 시료는 낮은 점성을 주기 위하여 증류수로 액성한계의 약 2배의 함수비를 가진 slurry상태로 만든 후 완전포화가 되도록 하고, 시료의 포화를 위해 압력셀의 압력과 같은 크기의 백프레셔를 24시간 가한 후 시료저면에서 공극수압을 측정하여 공극수압계수 (B)가 0.97 이상인 경우에 시험을 실시하였다. 시험시료는 표준압밀시험과 동일한 조건에서 재성형 점토, 점토와 모래를 각각 1:1, 2:1로 변화시켰다.

변형률 속도의 산정은 시료의 투수와 압축성에 따라 다르지만 최저공극수압비(u_b/σ_v)가 제한치를 초과하지 않는 범위에서 보수적인 방법이지만 ASTM에서 제시한 액성한계와 변형률 관계를 참고하여 (0.04 %/min 범위 내) 0.04 %/min, 0.22 %/min, 0.4 %/min의 3단계로 변화시켰다. 시

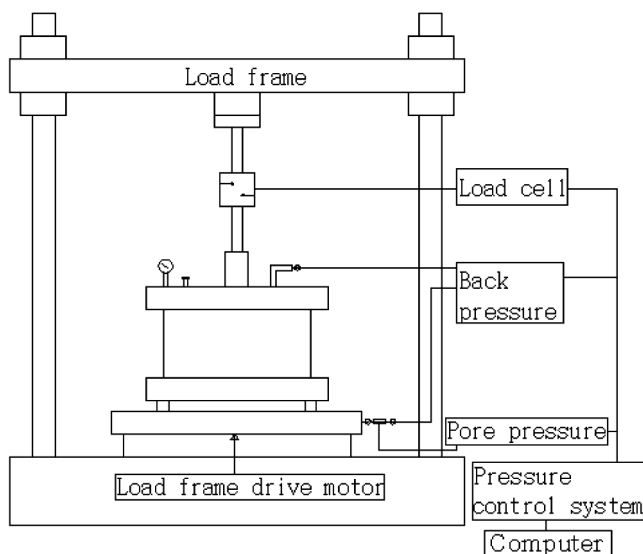


Fig. 2. Apparatus of CRS test.

료저면에서 측정된 과잉공극수압과 시료에 가해진 전응력비 ($u_b/\Delta\sigma$)가 30%를 넘지 않는 범위에서 시험하였다. 일정변형률 압밀시험은 Fig. 2와 같이 압축시험장치, 변위장치, 하중 로드셀, 공극수압 측정 장치, pressure system, back pressure system으로 구성되어 있고, 모든 측정자료는 컴퓨터로 자동 저장 되도록 하였다.

4. 분석방법

표준압밀시험에서는 연직압밀계수(C_v)를 구하기 위하여 \sqrt{t} 법을 사용하였고, 전 하중 단계에서는 압밀하중과 간극비와의 관계에서 압축지수(C_c) 및 선행압밀하중(p_c), 투수계수(k)를 구하였다. 일정변형률 압밀시험(CRS)에서 침하량을 공극비로 변화시켜 e-log p 곡선을 구하였고, 유효응력은 시료하부에서 측정된 과잉공극수압을 이용하여 비선형 평균유효응력을 구하였다.

연직압밀계수(C_v)의 경우는 시료저면에서의 간극수압비, 연직응력, 평균시료높이, 시간 등을 고려하여 비선형 상태에서의 압밀계수를 이용하였다. 시험을 통해 변형률 속도와 재성형 점토, 혼합시료에 따른 침하량, 유효응력에 따른 공극비(e), 연직압밀계수(C_v), 공극수압의 변화를 비교-분석하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 시간에 따른 침하량의 변화

Fig. 3은 일정변형률 압밀시험에서 변형률 속도를 변화시키면서 재성형 점토, 점토와 실트질 모래를 1:1, 2:1로 성형한 시료의 시간에 따른 침하량을 나타낸 것이다.

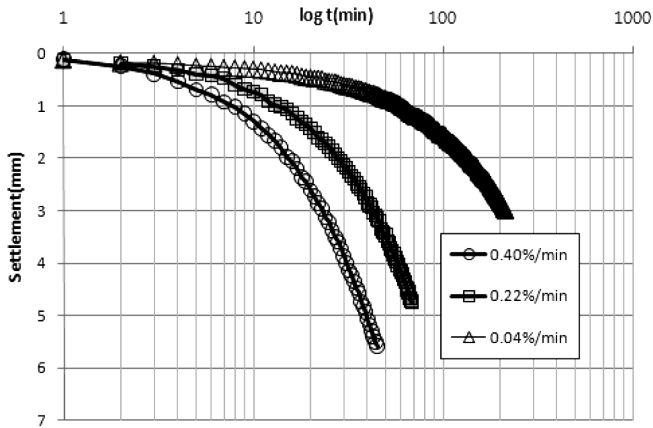
재성형 점토의 변화는 시간에 증가함에 따라 급격하게 감소하였고, 변형률 속도가 0.04%/min 일때는 느린 침하현상을 나타냈고, 0.4%/min에서는 매우 빠른 침하현상을 나타냈다. 1:1과 2:1인 경우에도 초기에는 침하량이 완만하게 감소하다가 점차로 급격하게 감소하였다.

전체적으로 침하량은 변형률속도가 증가함에 따라 급격하게 감소하며 뚜렷한 경향을 나타냈고, 모래의 비율이 많아질수록 약간씩 감소하는 경향을 나타냈다.

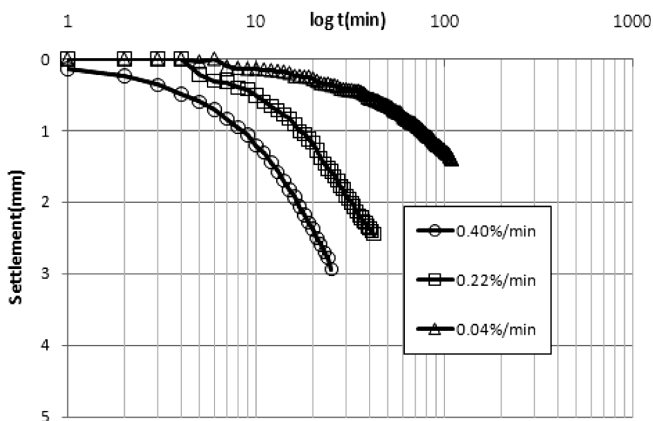
2. 유효응력에 따른 공극비의 변화

Fig. 4는 일정변형률(CRS)압밀시험과 표준압밀시험(Oedometer)에서 변형률 속도를 변화시켰을 경우 유효응력에 따른 공극비의 변화를 나타낸 것이다.

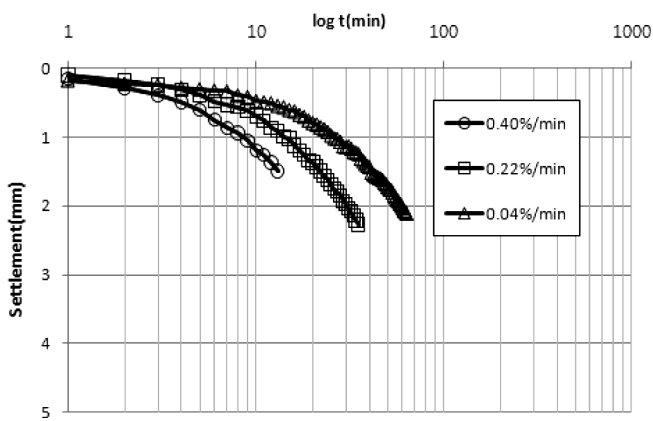
두 시험방법 모두 유효응력의 증가에 따라 공극비는 점차로 감소하는 일반적인 경향을 나타내지만, 일정변형률(CRS)압밀시험에서는 변형률속도 변화에 따라서 뚜렷한 차이를 나타내고 있었고, 공극비의 감소량도 표준압밀시험



(a) clay



(b) clay : sand=1:1

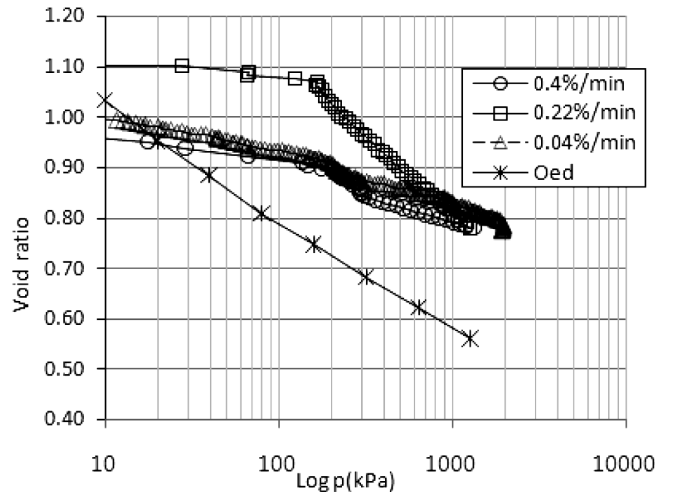


(c) clay : sand=2:1

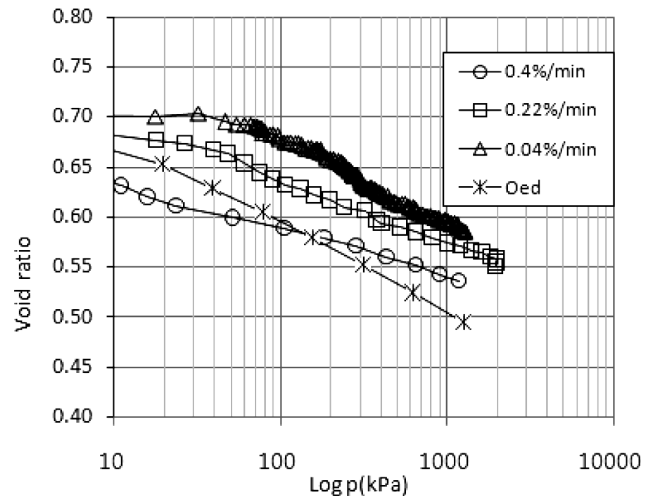
Fig. 3. Comparison of settlements with rate of strain.

보다는 작게 나타났다. 표준압밀시험에서는 점토(a), 점토와 모래를 각각 2:1(c)로 혼합한 시료에 대해서 유효응력에 따른 공극비는 매우 크게 감소하였다.

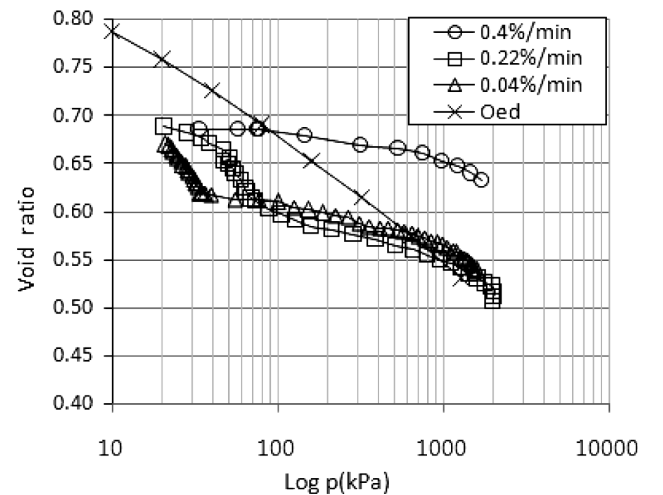
일정변형률 압밀시험에서는 변형률 속도 증가에 의한 공극수압 소산속도가 증가되어 일반적으로 표준압밀시험보다 약간 큰 기울기 값을 나타낸다. 따라서 이때의 압축지수 값을 사용하면 표준압밀시험에서 구한 침하량보다 더 커지는 결과를 나타내지만, 본 실험에서는 이와는 반대로 매



(a) clay



(b) clay: sand=1:1



(c) clay: sand=2:1

Fig. 4. Comparison of the void ratio and effective stress by the CRS and oedometer tests.

우 작은 공극비의 변화를 나타냈다. 이러한 원인은 교란된

시료는 압밀중 전이영역에서는 입자의 이동이 공극수압 소산속도에 크게 영향을 미치고 있기 때문이라고 판단된다.

3. 유효응력에 따른 연직압밀계수의 변화

연직배수조건하에서 일정변형률 압밀이론은 Smith와 Wahls (1969), Wissa 등(1971)을 비롯해 많은 학자들에 의해 연구되었는데 그 중에 정상상태에서의 비선형(C_v -log p) 관계의 해가 ASTM에 표준시험 해석방법으로 채택되어 현재 가장 널리 사용되고 있기 때문에 본 연구에서도 비선형 거동에 의한 압밀계수를 구하였다. 일정변형률 압밀시험은 표준압밀시험에서 발생하는 기계적 오차 및 개인적 오차를 최소화하여 연속적인 곡선을 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한, 표준압밀시험과 Rowe cell 시험보다 빠른 시간 내에 시험을 완료할 수 있고 측정시간의 조절에 따라 비교적 세밀한 변형률을 구할 수 있는 장점을 가지고 있다.

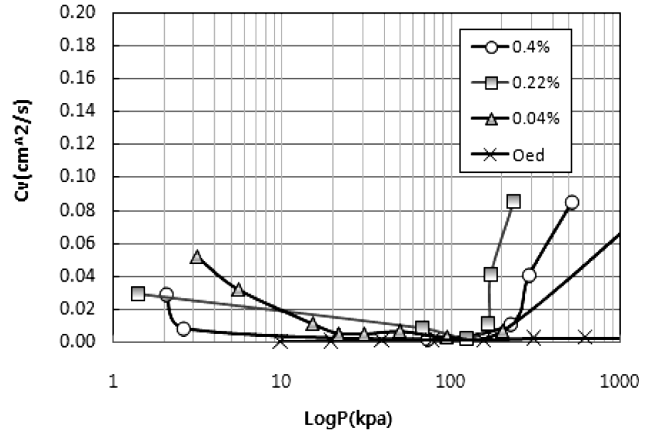
Fig. 5는 일정변형률(CRS)압밀시험과 표준압밀시험에서 변형률 속도를 변화시켰을 경우 유효응력에 따른 연직압밀계수의 변화를 나타낸 것이다.

일정변형률 시험에서 점토인 경우(a), 변형률 속도에 따라서 압밀계수는 작고 뚜렷한 차이를 나타내지 않았고, 압밀 곡선은 선행압밀응력 부근에서 급격하게 증가 하였다. 점토와 모래를 각각 1:1(b)과 2:1(c)로 혼합한 시료에 대해서도 유효응력에 따른 연직압밀계수는 선행압밀응력 부근에서 급격하게 증가하고 큰 변화량을 나타냈지만 변형속도에 따라서는 일률적인 경향을 나타내지 않았다. 표준압밀시험에서 연직압밀계수는 매우 작고, 모래 혼합비율이 증가할 수록 더 크게 나타났다.

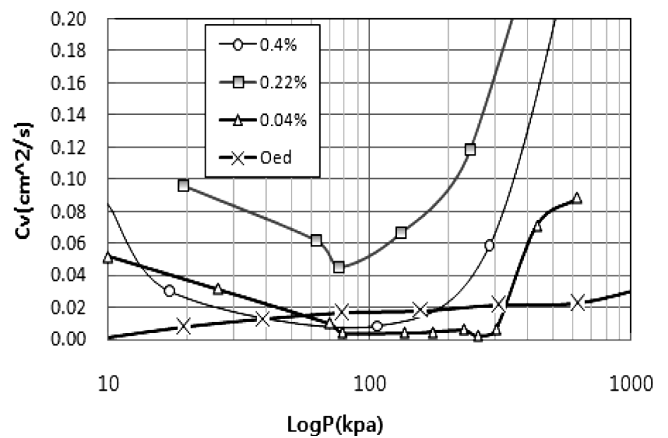
일반적으로 불교란 시료의 경우에는 유효상재하중 이하에서 압밀정수가 불규칙한 변화를 나타내다가 선행압밀응력 이후에는 일정한 값을 유지하지만, 재성형 시료에서는 선행압밀응력 이후에도 계속해서 증가하는 경향을 나타냈다.

변형률에 따른 압밀계수는 뚜렷한 경향을 나타내지 않는 데, 이는 하중 재하속도에 따른 영향으로 그 속도가 증가하게 되면 시료 내의 과잉공극수압을 증가시켜, 주어진 전응력 범위 내에서 증가된 과잉공극수압만큼 압밀이 적게 발생되기 때문으로 판단된다. 이때 만일 과잉공극수압 증가량이 전응력 증가량과 같아지면 압밀이 발생되지 않는다.

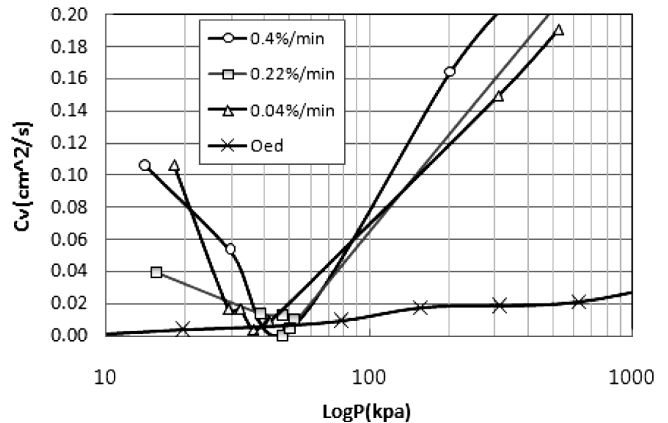
전체적으로 유효응력이 증가할수록 연직압밀계수는 감소하다가 선행압밀응력부근에서 다시 증가하는 경향을 나타냈고, 모래의 혼합비율이 증가함에 따라 연직압밀계수 값이 커짐을 알 수 있다. 이와 같은 원인은 투수성이 증가할수록 압밀시간이 단축되어 압밀계수의 변화를 가져오기 때문이고, 이런 결과를 나타내는 편차의 큰 요인은 시료의 불균질성, 성형시의 시료 교란, 각 실험 방법 적용시 발생 가능한 편차와 압밀계수 평가방법의 한계 등으로 판단된다.



(a) clay



(b) clay : sand=1:1



(c) clay : sand=2:1

Fig. 5. Comparison of the effective stress and coefficient of consolidation by the CRS and oedometer tests.

4. 시간에 따른 과잉공극수압의 변화

일정변형률 압밀시험에서 과잉공극수압은 변형률 속도와 밀접한 관계를 가지고 있다. ASTM(1996)에서는 공극수압비가 30%이내가 되도록 변형률 속도를 제한하고 있다.

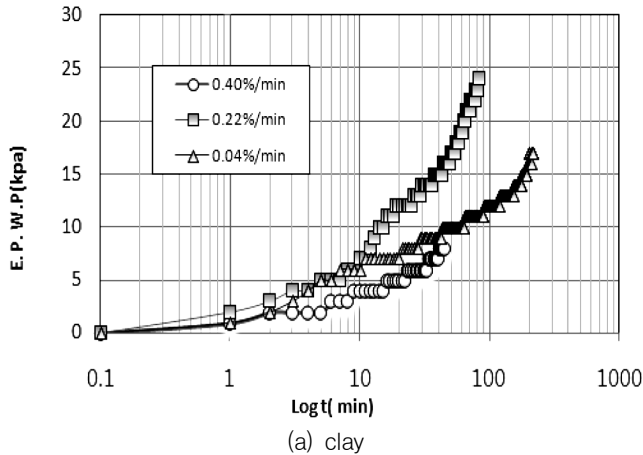
Fig. 6은 일정변형률(CRS)압밀시험에서 변형률 속도를 변

화시켰을 경우 시간에 따른 과잉공극수압의 변화를 나타낸 것이다.

과잉공극수압은 초기시간에 매우 빠르게 증가하고, 변형률이 0.4%/min를 제외하고는 변형 속도가 빠를수록 과잉공극수압은 빠르게 증가하는 것으로 나타났다. 불교란시험에서는 변형률 속도가 빠를수록 과잉공극수압이 크게 발생

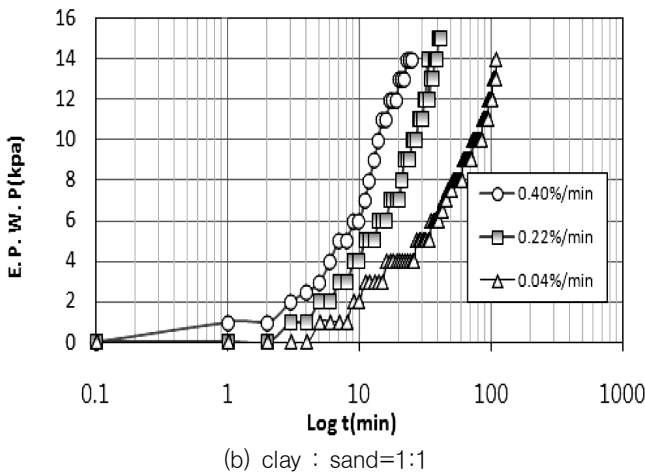
되고, 재성형시험에서는 속도가 비슷한 경우를 비교하면 불교란 시험에 비하여 매우 크게 나타난다. 이와 같은 현상은 재성형시험 점토 면모구조가 파괴로 인해 투수계수가 감소하므로 배수가 늦고, 과잉공극수압 소산속도가 감소하여 과잉공극수압이 크게 나타나는 것으로 판단된다.

일반적으로 시간에 따른 과잉공극수압 변화는 압밀응력이 선행압밀응력에 근접하기 전까지는 초기공극비의 영향으로 과잉공극수압이 증가하며, 선행압밀응력을 초과하게 되면 점토입자가 파괴가 시작되고, 입자구조가 일정하게 되면 공극수압은 증가하다가 일정한 값으로 수렴하게 된다. 이는 과잉공극수압이 크게 발생되면 동수구배가 증가하여 배수속도도 커지고 동시에 시료두께 감소로 배수거리가 단축되기 때문이다. 그러나 본 연구에서는 선행압밀응력에 도달된 후에도 변형률에 관계없이 계속해서 과잉공극수압이 증가하는 현상을 나타내는데 이는 재성형시험 점토 면모구조가 파괴로 인해 투수계수가 감소하므로 과잉공극수압 소산속도가 감소하기 때문으로 판단된다.

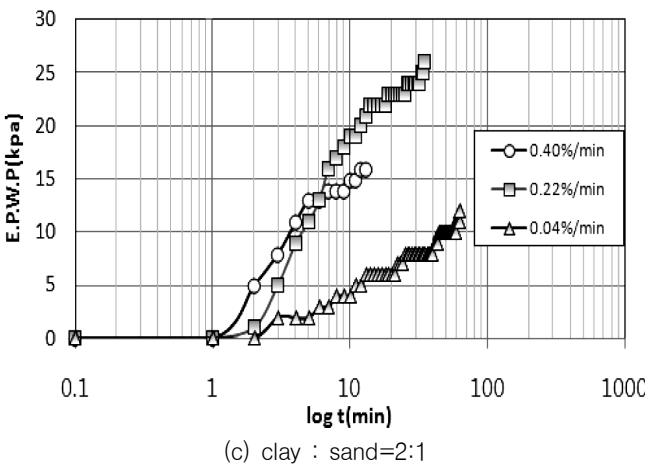


5. 유효응력에 따른 변형률의 변화

Fig. 7은 표준압밀시험, 일정변형률(CRS)압밀시험에서 점토, 점토와 모래를 각각 1:1, 2:1로 혼합한 시료의 변형률을 나타낸 것이다. 표준압밀시험은 10~1200kPa까지 하중을 재하하였고, 일정변형률(CRS)압밀시험은 40~640kPa 하중을 재하하여 변형률-유효응력과의 관계를 나타내었다. 변형률로 표시한 이유는 재성형 점토를 시험한 결과 슬러리 상태에서는 간극비의 편차가 크기 때문에 비교분석을 위하여 변형률을 사용하였다.



점토의 경우(a)는 모든 시험방법에서 유효응력이 증가함에 따라 변형률은 직선적으로 감소하였고, 표준압밀시험은 변형률이 크지만 일정변형률압밀시험에서는 변형률이 작고 두 시험은 큰 차이를 나타내었다. 모래 혼합비율이 1:1인 경우(b)는 유효응력이 증가함에 따라 변형률의 감소폭이 유사하게 나타났다. 모래 혼합비율이 2:1인 경우(c)는 표준압밀시험은 크지만, CRS 시험에서는 변형률이 작고 큰 차이를 나타냈고, 1:1의 경우보다 변형률의 감소폭은 크나 점토에 비해서는 작게 나타났다.



전체적으로 유효응력이 증가함에 따라 변형률은 직선적으로 감소하였고, 표준압밀시험은 크게 나타났지만, 일정변형률 압밀시험에서는 작게 나타났다. 변형률이 큰 요인은 슬러리 상태에서 시료교란, 성형조건, 불균질성 등으로 판단되며, 모래 함유량이 높아질수록 점차적으로 기울기 값이 작게 나타나는데 이는 결국 압축지수가 작아져 압밀침하량이 작게 나타나는 결과를 초래한다.

6. 압밀계수의 비교

표준압밀시험은 연직하중 10~1280kPa까지 하중증분비

Fig. 6. Comparison of the excess pore water pressure with the rate of strain.

($\Delta\sigma/\sigma = 1$)로 하여 압밀시험을 실시하여 연직압밀계수를 산정하였고, 일정변형률 압밀시험(CRS)에서 유효응력은 시료하부에서 측정된 과잉공극수압을 고려하여 비선형 평균 유효응력을 구하였다. 연직압밀계수(C_v)의 경우는 시료저면에서의 간극수압비, 연직응력, 평균시료높이, 시간 등을 고

려하여 비선형 상태에서의 압밀계수를 이용하였다.

Fig. 8은 표준압밀시험 및 일정변형률시험에서 점토, 점토와 모래를 각각 1:1, 2:1로 혼합한 시료의 연직압밀계수를 나타낸 것이다.

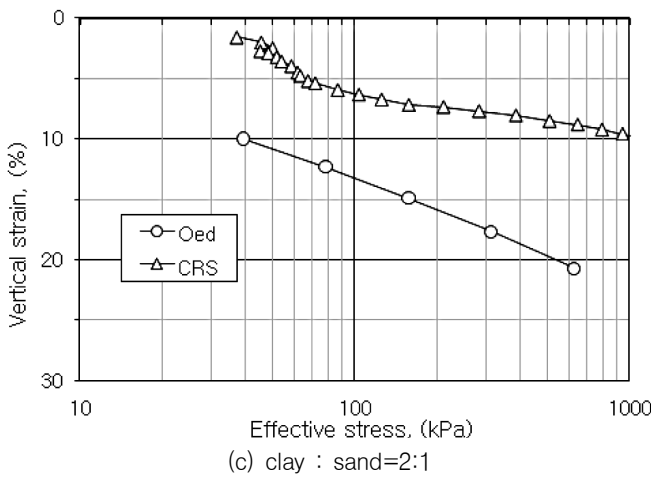
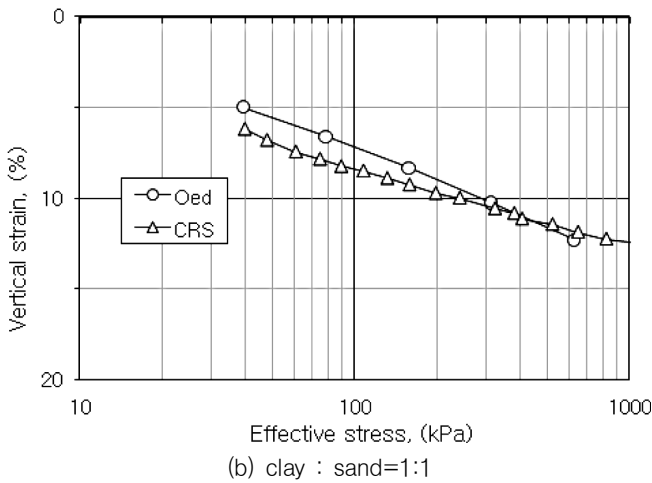
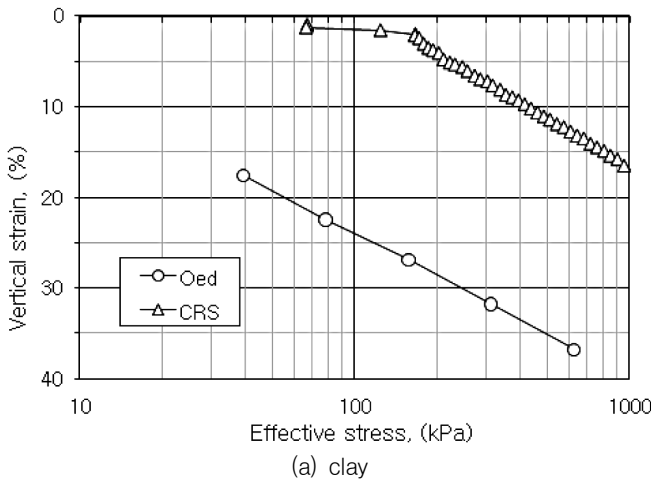


Fig. 7. Comparison of the vertical strain and effective stress.

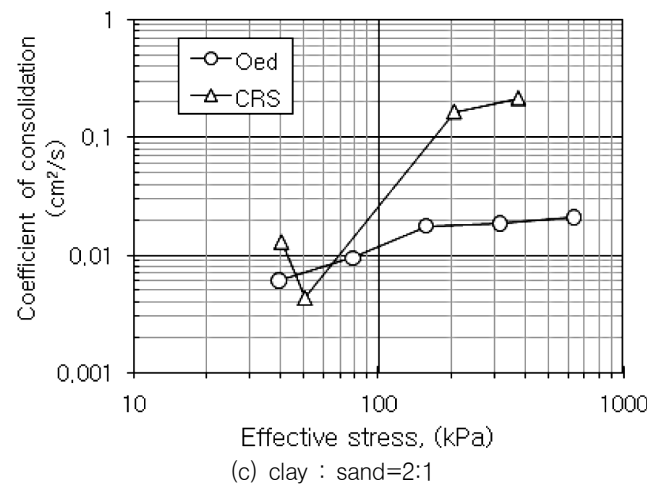
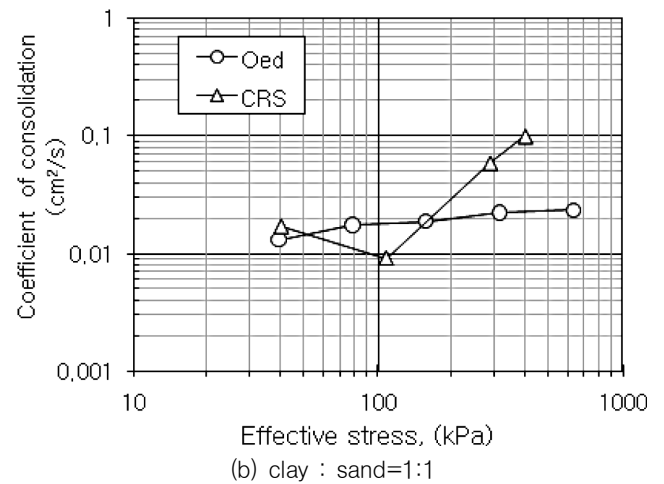
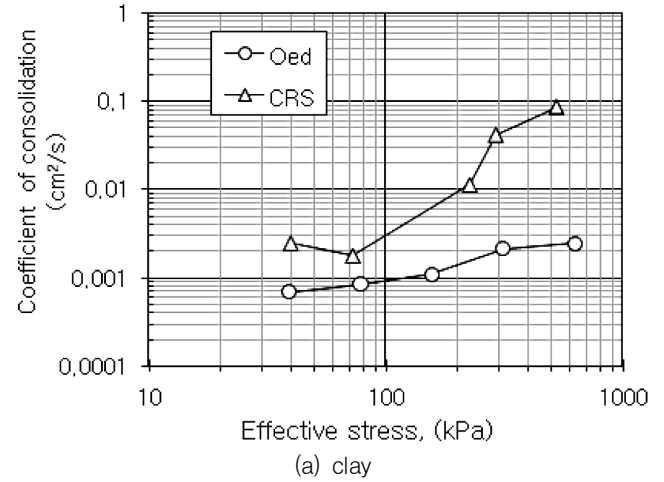


Fig. 8. Comparison of coefficient of consolidation measured by the oedometer and CRS tests.

점토시료(a)의 경우, 표준압밀시험에서 구한 연직압밀계수(C_{vo})의 평균치는 $6.94 \times 10^{-4} \sim 2.44 \times 10^{-3} cm^2/s$ 의 범위이고, 일정변형률 압밀시험에서 구한 연직압밀계수(C_{vc})의 평균치는 $1.80 \times 10^{-3} \sim 8.52 \times 10^{-2} cm^2/s$ 의 범위로 유효응력 증가에 따라 일정한 증가현상을 나타냈다. 두 시험의 압밀계수비(C_{vc}/C_{vo})는 약 2.9~27.3배 정도로 큰 차이를 나타냈다.

점토와 모래를 1:1로 혼합한 시료(b)에서 표준압밀시험에서 구한 연직압밀계수(C_{vo})값의 평균치는 $1.30 \times 10^{-2} \sim 2.33 \times 10^{-2} cm^2/s$ 의 범위이고, 일정변형률 압밀시험에서 구한 연직압밀계수(C_{vc})값의 평균치는 $9.13 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-1} cm^2/s$ 의 범위로 약간 급격한 증가현상을 나타내었다. 두 시험의 압밀계수비(C_{vc}/C_{vo})는 약 0.5~4.5배 정도의 차이를 나타냈다.

2:1로 혼합한 시료(c)에서 표준압밀시험에서 구한 연직압밀계수(C_{vo})값의 평균치는 $6.09 \times 10^{-3} \sim 2.10 \times 10^{-2} cm^2/s$ 의 범위이고, 일정변형률 압밀시험에서 구한 연직압밀계수(C_{vc})값의 평균치는 $4.37 \times 10^{-3} \sim 2.15 \times 10^{-1} cm^2/s$ 의 범위로 급격한 증가현상을 나타내었다. 압밀계수비(C_{vc}/C_{vo})는 약 0.6~10.8배 정도로 큰 차이를 나타냈다.

일반적으로 불교란 시료에서의 압밀계수는 유효응력이 증가하면서 압밀계수가 감소하다가 선행압밀응력 이후에서는 거의 일정한 값을 나타낸다. 그러나 재성형 시료에서는 선행압밀응력에 도달한 이후에도 계속해서 증가하는 현상을 나타냈다.

전체적으로 압밀계수는 일정변형률 압밀시험에서는 유효응력의 증가함에 따라 표준압밀시험보다는 급격한 증가현상을 나타냈고, 압밀계수의 범위도 큰 차이를 나타내었다.

이와 같은 원인은 재성형에 따른 표준압밀시험과 일정변형률시험에서 연직압밀계수(C_v)가 큰 차이가 나타났고, 이로 인해 재성형 시료를 액성한계이상으로 성형함으로써 강도가 저하되고 이에 따라 압밀계수 값이 증가한 것으로 보인다. 또한 투수성이 증가할수록 압밀시간이 단축되어 압밀계수의 변화를 가져오기 때문이고, 이런 결과를 나타내는 편차의 큰 요인은 시료의 불균질성, 각 실험 방법 적용 시 발생 가능한 편차와 압밀계수 평가방법의 한계 등으로 판단된다. 그리고 표준압밀시험 및 일정변형률 압밀시험에서 구한 연직압밀계수비는 큰 차이를 나타내어 압밀소요시간이 다르게 계산되기 때문에 연약지반개량공법 설계시 신중하게 고려해서 선정하여야 할 것으로 판단된다.

V. 결론

본 연구에서는 연약지반에서 채취한 점토와 모래를 혼합하여 일정변형률(CRS) 압밀시험을 실시하고 변형률 속도

가 압밀정수에 미치는 영향과 표준압밀시험과 일정변형률 시험으로 구한 연직압밀계수를 비교 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 침하량은 변형률 속도가 빠를수록 침하속도도 빠르고 급격한 침하량을 나타냈고, 모래의 혼합비율이 증가할수록 변형률 속도에 대한 영향은 약간씩 감소하였다.
2. 공극비는 유효응력의 증가에 따라 감소하는 경향을 나타내지만, 일정변형률(CRS)압밀시험에서는 변형률 속도에 따라서 뚜렷한 차이를 나타내지 않았고, 공극비의 감소폭도 표준압밀시험에 비하여 작게 나타났다.
3. 유효응력에 따른 연직압밀계수는 선행압밀응력 부근에서 급격하게 증가하였고, 변형률 속도에 따라서는 뚜렷한 경향을 나타내지 않았으며, 모래의 혼합비율이 증가함에 따라 연직압밀계수는 더 크게 나타났다.
4. 시간에 따른 과잉공극수압은 변형 속도가 빠를수록 빠르게 증가하고, 선행압밀응력에 도달된 후에도 변형률 속도에 관계없이 계속해서 과잉공극수압이 증가하였다.
5. 유효응력이 증가함에 따라 변형률은 모든 혼합비율에서 일정하게 감소하였고, 표준압밀시험은 크고 일정변형률 시험에서는 작게 나타났다.
6. 일정변형률 압밀시험에서의 압밀계수는 표준압밀시험보다 급격한 증가현상을 나타냈고, 연직 압밀계수비는 매우 큰 차이를 나타내어 연약지반개량공법 설계시 신중하게 선정하여야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Asaoka, A. 1978. Observational procedure of settlement prediction. *Soils and Foundations* 18(4): 87-101.
2. Duncan, J.M. 1993. Limitations of conventional analysis of consolidation settlement. *Journal of Geotechnical Engineering* 119(9): 1331-1359.
3. Kim, K.T., K.S. Lee, Y.S. Paik. 2000. A study on the application of the constant rate of strain test method using undisturbed clay. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 16(5): 93-105 (in Korean).
4. Kim, H.J., M.S. Lee., Y.J. Lee, D.W. Kim. 2004. A new proposed technique for a secondary consolidation coefficient based on the constant rate of strain test. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 20(8): 113-121 (in Korean).
5. Lee, D.W., E.H. Kim, 2010. Comparison of coefficient of consolidation and prediction of excess pore water pressure of agricultural reservoir under embankment on soft ground. *Journal of Korean Society of Agricultural Engineers* 52(2): 1-9 (in Korean).
6. Min, H.G., D.W. Lee. 2008. Prediction of excess pore water pressure of reservoir embankment on soft ground.

- J. of Korean Society of Agricultural Engineers 50(2): 37-44 (in Korean).
7. Rowe, P.W., L. Barden. 1966. A new consolidation cell. *Geotechnique* 16(2): 162-170.
 8. Rowe, R.K., C.T. Gnanendran., A.J. Valsangkar, A.O. Landva. 2001. Performance of a test embankment constructed on an organic clayey silt deposit. *Canadian Geotechnical Journal* 38(6): 1283-1296.
 9. Sheahan, T.C., J.W. Patrick. 1997. Experimental verification of CRS consolidation theory. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 123(5): 430-437.
 10. Smith, R.E., H.E. Wahls. 1969. Consolidation under Constant Rates of Strain. *Jornal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 95(2): 519-539.
 11. Terzaghi, K. 1943. *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley and Sons, Inc. New York.
 12. Youn, C.Y., I.S. Jang, C.G. Jung. 2002. Consolidation at constant strain rate for radial drainage. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 18(4): 147-157 (in Korean).
 13. Wissa, A.E.Z., J.T. Christian., E.G. Davis, S. Heiberg. 1971. Consolidation at constant rate of strain. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 97(10): 1393-1413.