

가덕도 연약점토의 일정변형률 압밀특성에 관한 연구

A Study on the Constant Rate of Strain Consolidation Characteristics of Gaduk-do Clay

이우진¹⁾, Woo-Jin Lee, 임형덕²⁾, Hyung-Duk Lim, 이원제³⁾, Won-Je Lee

¹⁾ 고려대학교 토목환경공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea Univ.

²⁾ 고려대학교 대학원 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Korea Univ.

³⁾ 고려대학교 대학원 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Korea Univ.

SYNOPSIS : The Constant Rate of Strain (CRS) consolidation test has been introduced in recent years to overcome some of the problems, long testing duration, associated with the conventional test. The purpose of this study is to investigate the consolidation characteristics of Gaduk-do soft marine clay by CRS tests and conventional tests. It was found that the consolidation curve and preconsolidation pressure are a function of rates of strain. Fundamental consolidation properties from CRS test were generally within the ranges proposed by previous researchers. The preconsolidation ratio ($\alpha_2 = p'_{CRS}/p'_{CONV.}$) of Gaduk-do clay appears proportional to the logarithm of strain rates. The OCR of Gaduk-do clay decreases as depth increases and shows the trend of underconsolidation below 20m as similar to recent investigation. From this study, it was concluded that the CRS test is an efficient, simple and rapid method for evaluating the consolidation characteristics of natural clay.

Key words : Constant rate of strain consolidation, Conventional test, Rates of strain

1. 서론

최근 국내에서 영종도 신공항, 서해안 고속도로, 남해안 항만건설등 연약지반의 활용이 증가함에 따라 이들 대상지반의 압밀특성을 정확하게 파악하는 것이 경제적이고 효율적인 개량에 있어서 매우 중요하다. Terzaghi의 1차원 압밀이론에 근거한 표준압밀시험(conventional test)은 현재까지 연약점토의 압밀정수의 산정에 널리 이용되고 있으나, 일주일 이상의 시험기간이 요구되며 경우에 따라 선행압밀하중과 압밀계수의 산정에 문제점이 있다. 위와 같은 단점을 지닌 표준압밀시험의 대체 방법으로 여러 형태의 급속압밀시험이 제안되었으며, 그 중에서 변형률 속도(strain rate)의 영향을 파악할 수 있는 일정변형률 압밀시험(Constant Rate of Strain consolidation, CRS)이 널리 이용되고 있으며, ASTM(D4186-82)에 압밀시험으로서 등재되었다. CRS 시험은 처음으로 Hamilton과 Crawford(1959)에 의해 수행되었으며, Smith와 Wahls(1969)에 의해 개략적인 이론해가 제안되었다. Wissa 등(1971)은 미소 변형이론에 근거한 이론해를 발표하였으며, 그 이후로 여러 이론해들이 제안되었다.

본 연구에서는 가덕도 인근의 상부 해성퇴적층에서 채취된 불교란 시료를 이용하여 기존의 표준압밀 시험과 변형률 속도를 달리한 CRS 시험을 실시하여 각각의 결과를 비교, 분석하여 본 지역의 압밀특성과 변형률 속도의 영향 등을 파악하였다. 또한, 시료를 수직방향과 수평방향으로 성형하여 표준압밀시험과 CRS 시험을 실시하여 가덕도 연약점토의 이방성 압밀특성에 대해 검토하였다.

2. 해석이론

CRS 압밀시험은 시간에 따른 변형률을 일정하게 유지하는 시험으로 기존의 표준압밀시험과는 달리 일면 배수조건이며, 시료 하단부에서 과잉간극수압을 측정한다. 따라서 시험과정 및 경계조건의 차이로 인하여 Terzaghi의 압밀이론 대신에 여러 학자들에 의해 CRS 압밀이론이 제안되었다. Wissa 등(1971)은 미소변형 이론에 근거하여 압밀계수는 일정하고 시료내의 간극수압의 분포를 포물선으로 가정하여 다음과 같은 기본방정식을 제안하였다.

$$c_v \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial z^2} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (1)$$

시간과 시료의 높이에 대한 무차원 변수를 사용하여 무차원 변형률을 식(2)와 같이 산정하였다.

$$\varepsilon(X, T_v) = rt [1 + F(X, T_v)] \quad (2)$$

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

$X = z/H$, $T_v = c_v t / H^2$, r 과 H 는 각각 일정변형률 속도와 시료의 높이이다.

식 (2)는 정상상태(steady condition)와 비정상상태(transient condition)로 구분되며, 정상상태에서 선형 거동의 경우 시료내의 평균유효응력과 압밀계수는 체적변화계수(m_v)가 일정하다는 가정하에서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\sigma'_{v_{ave}} = \frac{1}{3} [2\sigma'_v(H, t) + \sigma'_v(0, t)] = \sigma_v - \frac{2}{3} u_b \quad (3)$$

$$c_v = (H_0^2 / 2u_b) (\Delta\sigma / \Delta t) = \frac{r H^2}{2u_b m_v} \quad (4)$$

또한, 비선형거동의 경우 시료내의 평균유효응력과 압밀계수는 압축지수(C_c)가 일정하다는 가정하에서 다음과 같이 산정된다.

$$\sigma'_{v_{ave}} = [\sigma_v^3 - 2\sigma_v^2 u_b + \sigma_v u_b^2]^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

$$c_v = -\frac{H^2 \log[(\sigma_v + \Delta\sigma_v) / \sigma_v]}{2\Delta t \log[1 - (\frac{u_b}{\sigma_v})]} = -\frac{0.434 r H^2}{2\sigma'_v m_v \log(1 - \frac{u_b}{\sigma_v})} \quad (6)$$

3. 실험시료 및 방법

본 연구에 사용된 시료는 부산 광역시 강서구에 위치한 가덕도 인근 지역의 신항만 건설 예정부지에 분포하고 있는 상부 해성퇴적층으로 대부분 실트질 점토로 분류되며, 위치에 따라서는 모래 또는 실트로 구성된 박층(seam)이 존재하지만 연속성은 없는 것으로 나타났다. 실내압밀시험결과 과압밀비(OCR)는 해수면에 근접한 부분을 제외하면 대체로 0.8~0.9 사이에 분포하고 있으며 따라서 정규압밀 상태이거나 압밀진행 중인 것으로 판단된다(도화지질, 1997). 피스톤 샘플러(NX size)를 이용하여 불교란 시료

를 채취하였으며, 실내시험결과는 표 1에 나타나 있다. 표준압밀시험 및 CRS 시험시료의 직경과 높이는 각각 6.0cm, 2.0cm와 6.35cm, 2.54cm 이다.

표 1. 실내시험결과

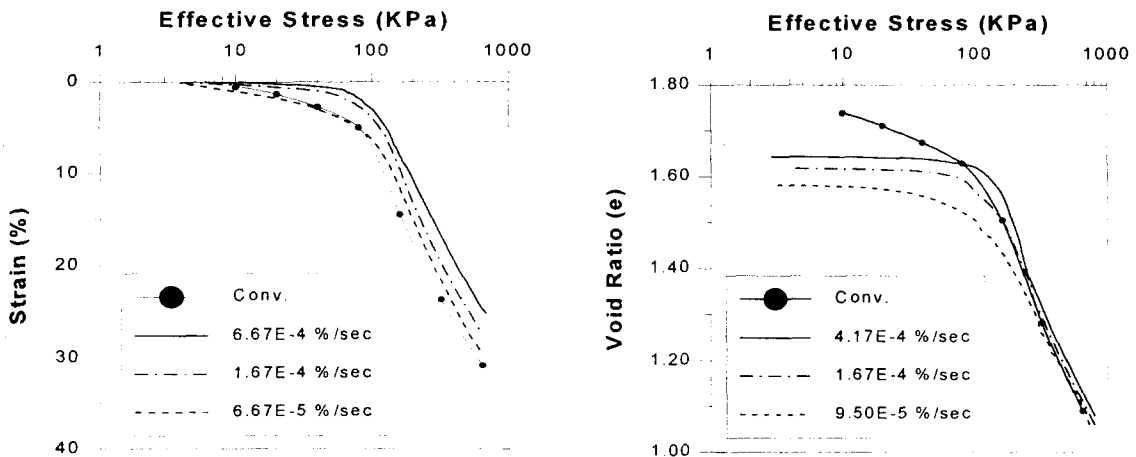
물성치	실험결과
w_n (%)	53.9 ~ 85.4
LL (%)	37.4 ~ 61.4
PI (%)	15.1 ~ 35.4
Gs	2.70 ~ 2.75
e_0	1.48 ~ 2.12
흙의 종류	CL/CH, MH

본 실험에서는 동일한 샘플러에서 채취한 시료로 표준압밀시험과 변형률 속도를 달리한 CRS 시험을 수행하여 이들 결과를 비교, 분석하였다. 표준압밀시험은 재하시간을 24시간 기준으로 실시하였으며, CRS 시험시 변형률 속도의 산정은 Gorman 등(1978)이 액성한계를 기준으로 제안한 방법을 근거로 $6.67 \times 10^{-4} \%$ /sec ~ $6.67 \times 10^{-5} \%$ /sec의 범위 내에서 적용하였다. 그리고 표준압밀시험은 24시간 동안 시료를 침수시킨 후 하중을 재하하였으며, CRS 시험은 100 KPa의 배압을 가하여 시료를 완전히 포화($S > 98\%$) 시킨 후 하중을 가하였다. 또한, 가덕도 연약점토의 이방성 압밀특성을 파악하기 위하여 시료를 수평방향과 수직방향으로 성형하여 표준압밀시험 및 CRS 시험을 수행하였다.

4. 실험결과

4.1 압밀곡선

표준압밀시험과는 달리 CRS 시험은 변형률 속도를 조정할 수 있기 때문에, 변형률 속도가 압밀곡선의 분포 및 선행압밀하중에 미치는 영향을 파악할 수 있다. 그림 1은 표준압밀시험과 변형률 속도를 달리한 CRS 시험에 의해 산정된 변형률-압밀하중 또는 간극비-압밀하중의 관계를 나타내고 있다. 그림 1에서 알 수 있듯이 변형률 속도가 증가할수록 동일한 압밀하중에서의 변형률은 감소하는 것으로 나타났다. 또한 압축지수(C_c)는 표준압밀시험 및 CRS 시험에서 변형률 속도에 관계없이 일정한 값을 갖는 것으로 나타났다.



(a) 압밀하중-변형률 관계

(b) 압밀하중-간극비 관계

그림 1. 변형률 속도의 영향 (압밀곡선)

CRS 시험시 변형률 속도의 영향을 정확하게 파악하기 위해서는 초기간극비와 함수비등 초기조건이 같은 연속된 시료를 얻는 것이 무엇보다 중요하다. 일반적으로 자연시료를 사용하여 CRS 시험을 하는 경우 그림 1(b)에서 알 수 있듯이 뚜렷한 경향성을 보이지 않는데 이는 시료의 불균질성과 불규칙적으로 산재한 어패류 등으로 인하여 초기간극비가 차이가 나기 때문인 것으로 판단된다.

CRS 시험기기의 정밀성을 검토하기 위하여 하중재하 기간 실제 변형률 속도를 측정하여 이를 실험전에 선택한 변형률 속도와 비교하였다. 그림 2에 나타나 있듯이 실제 변형률 속도는 하중재하 기간 동안 거의 일정한 값을 보이며, 압밀하중이 적은 재압축구간에서는 실제 변형률 속도의 변동폭이 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 또한 변형률 속도가 증가할수록 변동폭도 증가하는 것으로 나타났다.

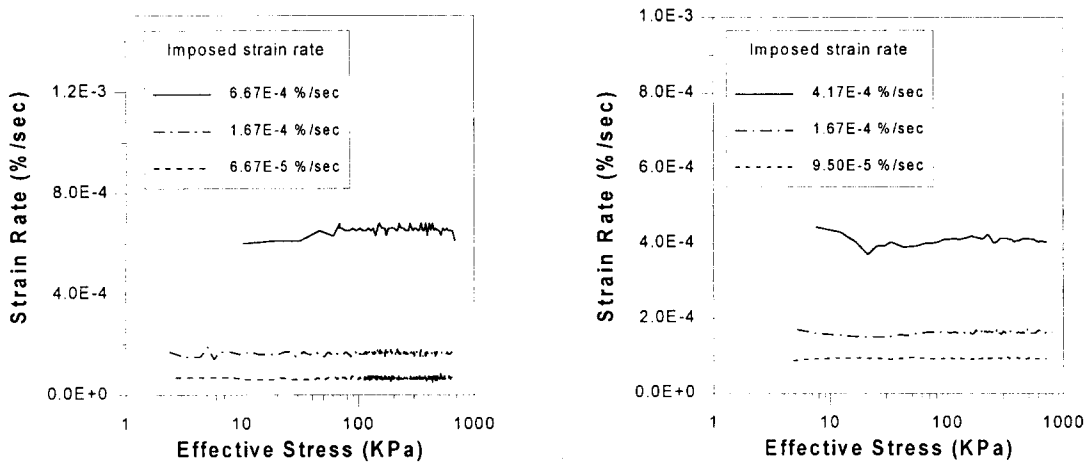


그림 2. 실제 변형률 속도의 측정

4.2 간극수압

CRS 시험은 표준압밀시험과는 달리 일면배수 조건이며, 하중재하 기간 동안 시료의 하단부에서 과잉 간극수압을 측정한다. 이때 과잉간극수압의 크기가 너무 적으면 압밀정수를 산정할 수 없으며, 반대로 너무 크면 시료 상·하단의 유효응력 또는 변형률의 차이의 증가로 인하여 상대적으로 실험결과의 신뢰도가 떨어진다. 압밀하중과 간극수압 또는 간극수압비의 관계는 그림 3에 나타나 있다. 과잉간극수압은 선행압밀하중 근처에서 급격히 증가하며, 변형률 속도가 클수록 간극수압의 크기도 증가하는 것을 알 수 있다. 간극수압비(u_b/σ_v)는 변형률 속도와 압밀하중의 크기에 영향을 받는 것을 알 수 있으며, 선행압밀하중 근처에서 급격히 증가한 후 거의 일정한 값을 나타내는 것으로 나타났다.

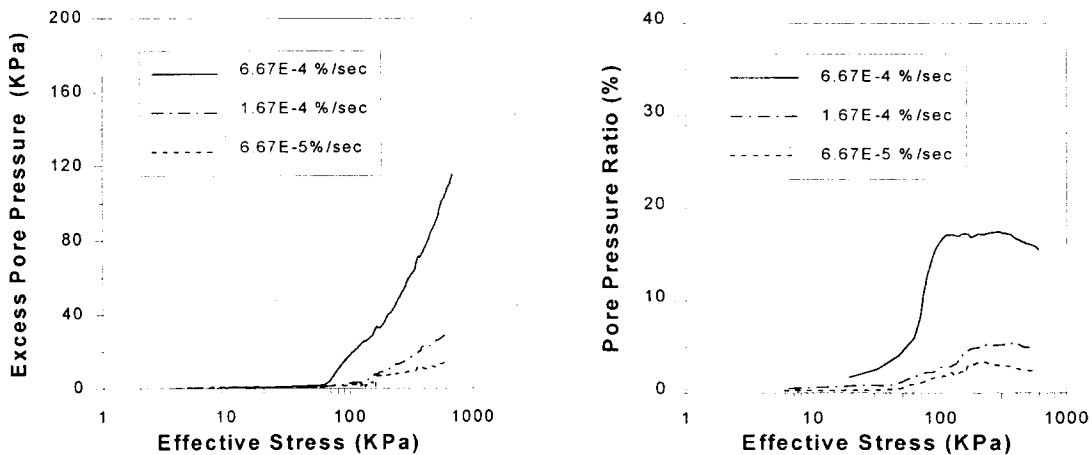


그림 3. 과잉간극수압 및 간극수압비

CRS 시험시 적절한 변형률 속도의 산정은 정확한 압밀정수의 산정에 있어서 매우 중요하다. 여러 학자들에 의해 변형률 속도를 산정하는 방법이 제안되었는데 일반적으로 실내시험과 표준압밀시험을 실시하여 대상지반의 물리적 특성 및 투수성, 압축성 등을 미리 파악한 후, CRS 시험을 실시하여 최대 간극수압비가 특정치를 초과하지 않는 범위 내에서 산정한다.

4.3 압밀정수

표준압밀시험 및 CRS 시험에서 산정된 구속탄성계수(M), 투수계수(k)와 압밀계수(c_v)는 그림 4에 나타나 있다. 그림에서 알 수 있듯이 대체적으로 처녀압축구간에서는 CRS 시험과 표준압밀시험과의 결과가 비슷한 것으로 나타났으며, CRS 시험에 의해 산정된 압밀정수가 약간 큰 값을 보였다. 또한 투수계수 및 압밀계수는 변형률 속도가 증가할수록 그 크기도 약간 증가하는 것으로 나타났다. 본 실험에서 산정된 압밀계수와 투수계수는 정규압밀구간에서 각각 $0.56 \times 10^{-3} \sim 3.0 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 와 $2.0 \times 10^{-8} \sim 7.0 \times 10^{-7} \text{ cm}/\text{sec}$ 의 분포를 보였다.

재압축구간에서는 각각의 압밀정수 모두 특정한 경향성이 없이 불규칙적으로 분포하고 있는데 이는 시료교란 및 불균질성, 하중장치와의 불완전한 접촉, 압밀기계의 오차와 미소변위의 발생 때문인 것으로 판단된다.

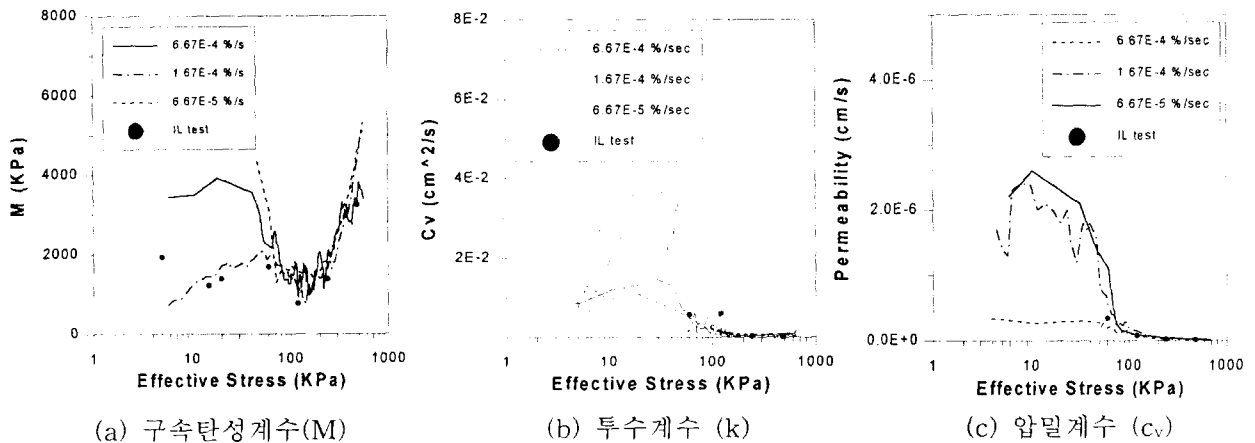


그림 4. 압밀정수

4.4 이방성 압밀특성

실내압밀시험으로부터 산정된 압밀계수는 현장의 압밀계수보다는 작은 것이 일반적이며, 이는 수평방향의 투수계수가 연직방향의 투수계수보다 크기 때문이고 실내시험에 사용되는 시료는 현장에 협재하는 배수층을 고려할 수 없기 때문이다. 이러한 점토의 이방성은 점토구조의 이방성, 지반의 생성과정과 모래 또는 실트층과 같은 배수층이 존재하기 때문인 것으로 알려져있다. 본 연구에서는 가덕도 해성점토의 이방성 압밀특성을 분석하기 위하여 동일한 샘플러에서 시료를 수평방향과 연직방향으로 성형하여 표준압밀시험 및 CRS 시험을 실시하였다. 이방성 시험에 의한 압밀곡선 및 구속탄성계수는 그림 5에 나타나 있다. 그림에서 알 수 있듯이 수평시료(H)는 수직시료(V)에 비해 압축성이 크며, 상대적으로 완만한 압밀곡선을 나타낸다. 표준압밀시험 및 CRS 시험에서 수직시료는 structure breakdown 현상, 즉 선행압밀하중 이전에 구속탄성계수가 증가한 후 다시 감소하는 경향을 볼 수 있으나 수평시료에서는 이러한 현상을 볼 수 없었다.

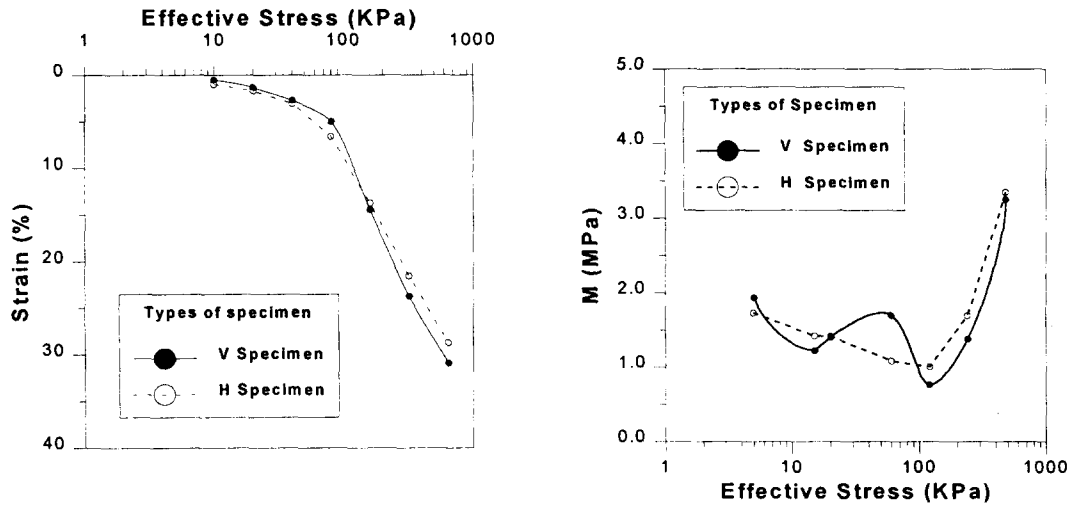


그림 5. 이방성 압밀시험 결과

그림 6은 이방성 압밀시험에 의한 수평시료와 수직시료의 투수계수와 압밀계수를 각각 나타내고 있다. 일반적으로 균질한 해성점토의 경우 투수의 이방성비(k_{H0}/k_{V0})는 1.5를 초과하지 않으며, 대부분 1.0에 가까운 값을 나타내는 것으로 알려져있다(Leroueil 등, 1990). 이방성 실험결과 가덕도 시료의 이방성비는 1.0에서 1.5사이에 분포하고 있으며 평균 1.2정도인 것으로 나타났다.

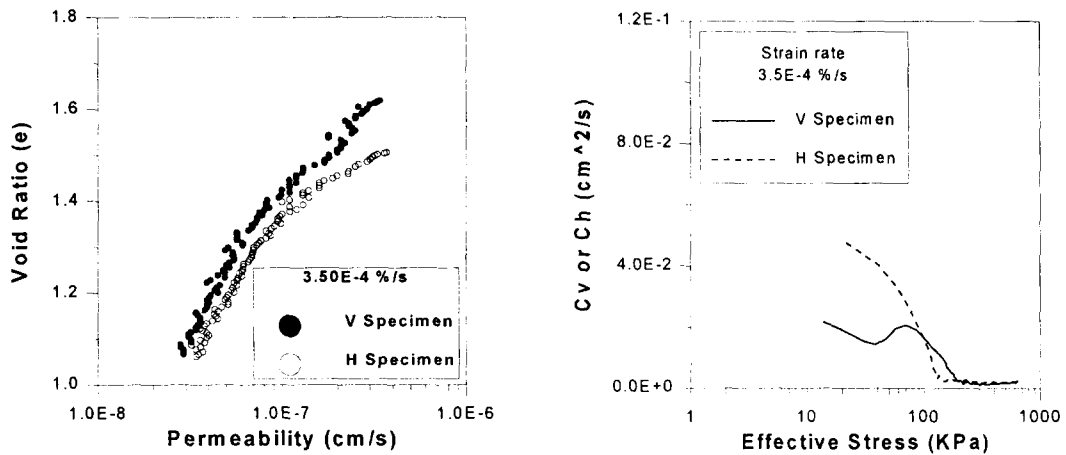


그림 6. 이방성 압밀시험에 의한 투수계수와 압밀계수의 비교

4.5 선행압밀하중

선행압밀하중은 대상지반이 과거에 받았던 최대하중으로 표현되지만, cement 및 aging 효과 등으로 인하여 최근에는 변형률이 급격히 증가할 때의 하중 또는 항복점(yield point)으로도 표현된다. 일반적으로 CRS 시험시 변형률 속도는 압밀곡선의 분포뿐만 아니라 선행압밀하중의 크기도 영향을 미치는 것으로 알려져있다. 따라서 CRS 시험으로 산정한 선행압밀하중은 표준압밀시험에 의한 값보다 큰 것이 일반적이며, 따라서 현장의 선행압밀하중을 추정하기 위해서는 변형률 속도에 대한 보정이 필요하다. Morin 등(1983)은 표준압밀시험과 CRS 시험으로 산정한 선행압밀하중의 비($\alpha_2 = p'_{CRS}/p'_{Conv.}$)를 사용하여 현장의 선행압밀하중을 추정하는 방법을 제안하였다. 그림 7은 가덕도 점토의 α_2 값을 나타내고 있으며, 선행압밀하중비는 변형률 속도의 대수축적에 비례하여 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 $1.0 \times 10^{-4} \sim 4.0 \times 10^{-4} \%$ 의 변형률 속도에서 α_2 값은 평균적으로 1.11 ~ 1.30의 분포를 보였다.

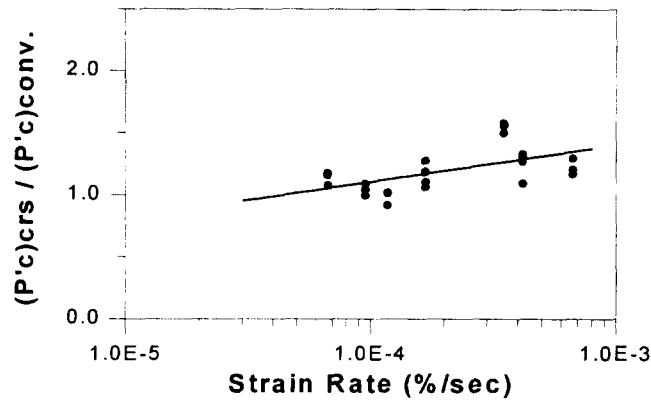


그림 7. 가덕도 점토의 선행압밀하중비 ($a_2=p'_{CRS}/p'_{Conv.}$)

그림 8은 가덕도 점토의 깊이에 따른 선행압밀하중과 과압밀비(OCR)의 분포를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 과압밀비는 대체적으로 깊이가 증가할수록 감소하며 특히 하부에서는 미압밀의 특성을 나타내는 곳도 있었다. 이러한 경향은 최근의 연구결과(김상규 등, 1997)와 일치하지만, 실내압밀시험의 특성상 여러 가지 오차의 요인이 있으므로 본 지역의 미압밀특성은 차후에 정밀한 연구가 필요하다고 판단된다.

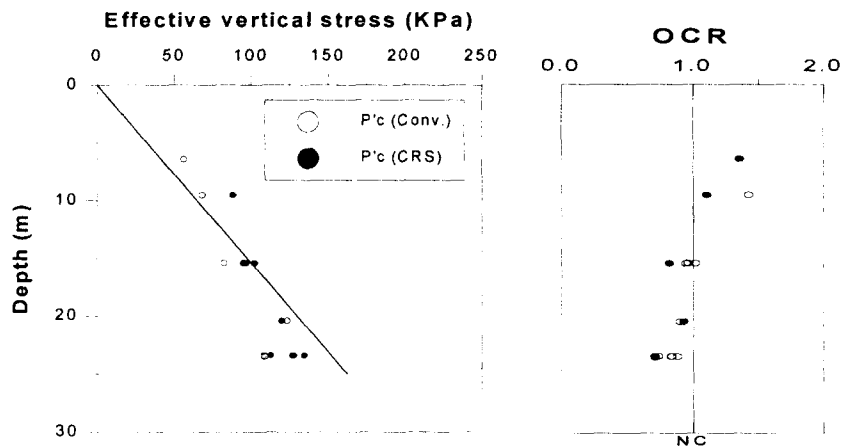


그림 8. 선행압밀하중과 OCR의 분포

5. 결론

가덕도 인근에서 채취한 상부해성퇴적층에 대하여 표준압밀시험 및 변형률을 달리한 CRS 시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 변형률 속도는 압밀곡선의 분포에 영향을 미치며, 변형률 속도가 증가할수록 선행압밀하중의 크기도 증가하는 것으로 나타났다. CRS 시험에 의해 산정된 투수계수 및 압밀계수는 표준압밀시험보다 약간 크게 나타났으며, 변형률 속도가 증가할수록 그 크기도 증가하는 것으로 나타났다.
- 2) CRS 시험으로 압밀특성을 파악하는 경우 적절한 변형률 속도를 산정하는 것이 매우 중요하며, 대상 지반의 압축성 및 투수성을 고려해야 하며, 또한 최대간극수압비가 제한치를 초과하지 않는 범위 내에서 산정해야 한다.

- 3) 표준압밀시험과 CRS 시험의 선행압밀하중비(α_2)는 변형률 속도의 대수축척에 비례하여 증가하는 것으로 나타났으며, 가덕도 인근 해성점토층의 과압밀비는 깊이가 증가할수록 감소하며 하부에서는 미압밀의 경향을 보였다.
- 4) 이방성 압밀실험결과 수평시료에서는 수직시료와 달리 구속탄성계수가 선행압밀하중이전에 증가하였다가 감소하는 현상, 즉 structure breakdown 현상을 보이지 않았다. 또한 가덕도 점토의 투수의 이방성비(k_{H0}/k_{V0})는 전반적으로 1.0~1.5 사이에 분포하며 평균 1.2값을 보였다.

참고문헌

1. 김상규, 고성일(1997), “낙동강 하구 및 인접해안 퇴적층의 미압밀 특성”, '97 가을 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 3~18
2. (주)도화지질(1997), 부산신항만개발 민자사업 1단계 구간 지반조사보고서, 부산신항만 주식회사
3. 채영수, 방의석(1997), “일정변위압밀시험에 의한 한강오니토의 압밀특성에 관한 실험적 연구”, '97 가을 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 123~130
4. ASTM Designation: D4186-82, Standard Test Method for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Controlled-Strain Loading
5. Gorman, C. T., Hopkins, T. C., Deen, R. D., and Drnevich, V. P.(1978), “Constant Rate of Strain and Controlled Gradient Consolidation Testing”, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 1, No. 1, pp. 3~15
6. Hamilton, J. J. and Crawford, C. B.(1959), “Improved Determination of Preconsolidation Pressure of a Sensitive Clay”, *STP 254, ASTM*, pp. 254~271
7. Leroueil, S., Bouclin, G., Tavenas, F., Bergeron, L., and Rochelle, P. L. (1990), “Permeability Anisotropy of Natural Clays as a Function of Strain”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 27, pp. 568-579
8. Leroueil, S., Kabbaj, M., Tavenas, F., and Bouchard, R.(1985), “Stress-Strain-Strain Rate Relation for the Compressibility of Sensitive Natural Clays”, *Geotechnique*, Vol. 35, No. 2, pp. 159~180
9. Leroueil, S., Tavenas, F., Samson, L., and Morin, P.(1983), “Preconsolidation Pressure of Champlain Clays. Part II. Laboratory Determination”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 20, pp. 803~816
10. Lim, H. D.(1997), “Comparison of Consolidation Characteristics of Gaduk-do Clay by CRS and Conventional Tests”, M.S.C.E. Thesis, Korea University
11. Morin, P., Leroueil, S., and Samson, L.(1983), “Preconsolidation Pressure of Champlain Clays. Part I. In-situ Determination”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 20, pp. 782~802
12. 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, SM2, pp. 519~539
13. 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, SM10, pp. 1393~1413