

일정변위압밀실험에 의한 한강오니토의 압밀특성에 관한 실험적 연구 The Experimental Study on The Consolidation Characteristics of Ooni at Han-River due to Constant Strain Rate of Consolidation Test

채영수¹⁾, Young-Su Chae, 방의석²⁾, Eue-Seok Bang

¹⁾ 수원대학교 공과대학 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, The Univ. of Suwon

²⁾ 쌍용엔지니어링(주) 지반공학부, Geotechnical Engineering Department, Ssangyong Engineering Limits

SYNOPSIS : This paper, using Ooni sampled in Han-River, is obtained consolidation constants through changing stress history, strain rate, and the loading time based on Incremental Load Consolidation Test(ILT) and Constant Rate of Strain Consolidation Test(CRST) suggested by Terzaghi and Wissa, respectively, and studies validity and reasonability of CRST and as comparison and analysis with ILT.

KEYWORDS : Consolidation, Constant rate of strain consolidation test, Strain rate, Loading time.

1. 서 론

한강살리기의 일환으로 현재 잠실수중보 인근에서 준설되고 있는 오니토는 도시배수, 산업배수등이 수역에 유입되어 침전·퇴적된 것으로 미립자가 느슨한 결합상태를 유지하고 있으므로 미세한 충격으로도 쉽게 부유·확산되기 때문에 장기적으로 수질개선측면에서 제거되고 있는 실정이다. 한강오니토의 준설예상량은 약 2,231,000m³(한국종합기술개발공사, 1994)에 이르며 약품투입후 자중압밀을 거쳐 생성된 건조토량은 약 699,300~892,400m³이르며 4대하천을 비롯하여 중·소하천, 항만유역에서 향후 준설될 양은 상당히 많을것으로 예상된다. 가까운 일본에서는 압밀 및 고화처리과정을 통해 성토재, 인공골재, 다양한 매립재로 사용하고 있지만 우리나라는 폐기물로 구분되어 전량매립지에 처분하고 있는 실정이므로 국토의 협소함과 자원의 재활용측면을 고려하여 오니의 공학적 특성을 면밀히 검토하여 재활용방안에 관한 연구를 진행하여야 한다.

본 논문에서는 한강오니토를 이용하여 Terzaghi(1936)가 제안한 단계별하중재하압밀실험(ILT)과 Wissa(1971)가 제안한 일정변위압밀실험(CRST) 및 해석방법을 기초로 응력이력상태, 변위속도, 그리고 하중재하시속시간을 고려하여 오니토의 침하량 및 침하속도를 예측하기 위한 압밀특성을 검토하였다.

2. 이 론

일정변위압밀이론은 투수계수가 시간에 따라 변하여 간극비의 변화가 선형적이고 미소변형으로 가정

한 Smith(1969)압밀이론과 고함수비의 연약점토를 유한변형이론으로 확장해석한 Umehara(1980)압밀이론, 유동경계이론을 유한차분법을 통해 정상상태의 해를 근사적으로 유도한 Lee(1980)의 이론과 가장 많이 이용되는 미소변형이론에 기초로 압밀계수가 일정하고 간극수압을 포물선 분포로 가정하여 전이상태와 정상상태에서 선형 및 비선형으로 구분한 Wissa(1971)의 이론이 있다.

본 논문에서 이용한 Wissa(1971)의 압밀이론은 미소변형이 존재하고 압밀계수(C_v)를 임의의 시간에서 시료의 깊이에 따라 일정하다고 가정한 압밀지배방정식은 식(1)과 같다.

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

연직시료거리와 변위에 대해 배수면에서 수직방향으로 식(2)~(4)와 같은 무차원 변수가 사용되었다.

$$X = \frac{z}{H} \quad : \text{좌표에 관한 무차원변수} \quad (2)$$

$$T_v = C_v \frac{t}{H^2} \quad : \text{시간에 관한 무차원변수} \quad (3)$$

$$V = \frac{v}{H} \quad : \text{무차원 변위변수} \quad (4)$$

무차원변수를 적용하여 압밀지배방정식은 식(5)와 같은 기본방정식으로 변환된다.

$$\frac{\partial^3 V}{\partial X^3} = \frac{\partial^2 V}{\partial X \partial T_v} \quad (5)$$

경계조건과 초기조건을 고려한 변형율을 무차원변수의 함수로 나타내면 식(6)과 같다.

$$\epsilon(X, T_v) = \gamma t [1 + F(X, T_v)] \quad (6)$$

$$\text{여기서, } F(X, T_v) = \frac{1}{6T_v} (2 - 6X + 3X^2) - \frac{2}{\pi^2 T_v} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos n\pi X}{n^2} \exp(-n^2 \pi^2 T_v) \quad (7)$$

식(7)은 전이상태와 정상상태로 분리되며 응력-변형율의 가정조건을 통해 선형 및 비선형으로 구분하여 다음식을 통해 압밀정수를 구할 수 있다. 정상상태에서 시료의 거동을 체적변화계수(m_v)가 일정하다고 가정한 선형조건인 압밀정수는 식(8), (9)와 같다.

$$\begin{aligned} \overline{\sigma}_{vave} &= \frac{1}{3} [2 \overline{\sigma}_v(H, t) + \overline{\sigma}_v(0, t)] \\ &= \sigma_v - \frac{2}{3} u_h \end{aligned} \quad (8)$$

$$C_v = \frac{H^2}{2u_h} \left(\frac{\Delta \sigma_v}{\Delta t} \right) \quad (9)$$

시료의 거동이 비선형적인 경우, 압축지수(C_c)가 일정하다고 가정하고 연직유효응력과 압밀계수는 식 (10), (11)과 같다.

$$\bar{\sigma}_{v \text{ ave}} = (\sigma_v^3 - 2\sigma_v^2 u_h + \sigma_v u_h^2)^{1/3} \quad (10)$$

$$C_v = - \frac{H^2 \log \left(\frac{\sigma_{v2}}{\sigma_{v1}} \right)}{2At \log \left(1 - \frac{u_h}{\sigma_v} \right)} \quad (11)$$

3. 실내시험

3.1 오토토의 기본물성시험

본 실험에 사용된 시료는 잠실수중보 상류 풍납취수장 전면부에서 준설하여 약품처리과정을 걸쳐 양천둔치에서 자중압밀되고 있는 고함수비의 오토토를 채취하여 조립모래성분과 부유물을 제거한 순수 오토토로 물리적시험과 유기물 함유량시험을 실시하였고 그 결과는 표 1과 그림 1과 같다.

표 1. 오토토의 실내시험결과

실 내 시 험	실 험 치
액 성 한 계 (%)	135
소 성 한 계 (%)	51.76
비 중	2.42
No.200체 통과율(%)	79.68
유기물함유량(%)	22.73
흙의 분류(USCS)	OH

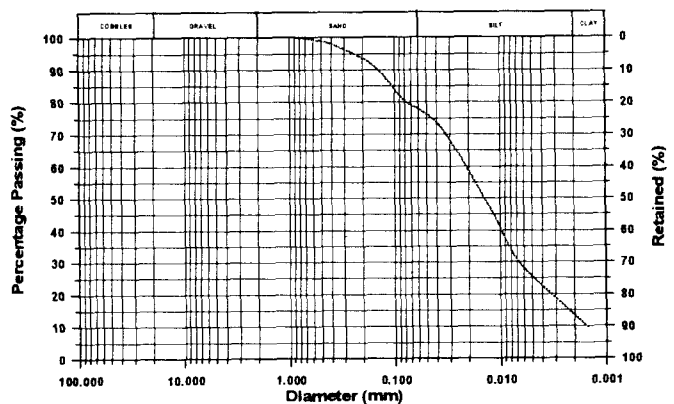


그림 1. 입도분석

3.2 압밀시험

본 실험에서 사용한 시료는 동질성을 유지하기 위하여 slurry 상태로 만든후 모래와 기타부유물을 No.40체를 이용하여 제거한 순수한 오토토만을 사용하였다. slurry상태의 시료는 성형하기 어렵기 때문에 약 100~150%정도의 함수비로 자연건조시킨 후 초기조건을 동일하게 조절하기 위하여 액성한계의 2배인 270%의 함수비로 조절하였다. 과압밀시키는 과정에서 스퀴징(squeezing)현상, 진동에 따른 교란 등에 의해 간극비변화가 크기 때문에 CBR몰드에 넣어 약 10시간 초기압밀한후 0.4, 1.6, 3.2kg/cm²으로 100시간 압밀시킨후 본 압밀시험을 실시하였다.

실험에 사용된 압밀시험기는 미국 HOGENTOGLER & Co. INC에서 제작한 장치로 일정변위시험뿐만 아니라 일정압력비압밀시험(CPR), 단계별하중재하압밀시험(ILT)이 가능한 다기능 압밀시험기와 표준압밀시험기를 사용하였다. 일정변위압밀시험기는 본체, 측정장치, 자료입출력장치(Controller)로 구성되어 있다. 본체는 piston, 압밀링, 공기제거밸브, 압밀상자로 이루어 졌고 측정장치는 간극수압측정장치(Consolidometer Pressure Transducer), 하중측정장치(Load cell)로 구성되며 자료입출력장치는 실험방법

을 선택하고 변위속도, 최대변형율, 초기조건 등을 입력하고 측정장치로부터 간극수압, 변형율, 전응력을 연속적으로 자동저장하고 실험과정중에도 모니터 등의 출력장치를 통해 출력할 수 있는 기능을 갖고 있다. 단계별하중재하압밀실험은 과압밀시킨 시료를 이용하여 재하시간을 12, 24, 36시간으로 변화시켜 실시하였고 일정변위압밀실험은 변위속도가 압밀정수에 미치는 영향을 검토하기 위하여 Sweden에서 표준 변위속도로 사용하고 있는 $2.0 \times 10^{-6}/s$ 를 기준으로 $6.5 \times 10^{-6}/s$ 와 $1.0 \times 10^{-5}/s$ 의 속도를 적용하였다.

3.3 결과 및 고찰

3.3.1 간극수압 - 연직유효응력관계

CRST를 통해 비배수면에서 측정된 간극수압을 이용하여 Gorman(1978)이 제안한 간극수압-연직유효응력관계로부터 간극수압이 급격히 증가하는 변곡점을 통해 선행압밀하중(P_c)를 결정할 수 있다.

그림 2와 같이 과압밀된 시료는 선행압밀하중 이전 하중단계에서 구조적 결합강화현상으로 변위속도의 영향을 받지 않지만 선행압밀하중 이상의 하중영역에서는 변위속도의 영향을 받아 간극수압이 급격히 증가하므로 선행압밀하중을 약 0.4, 1.6kg/cm²로 결정할 수 있었다. 그림 2(c)의 3.2kg/cm²과 같이 과압밀상태가 심화된 경우, 압밀과정에서 미소균열이 발생하여 간극수압이 불규칙적으로 측정되므로 선행압밀하중을 결정하기 어렵기 때문에 과압밀비(OCR)가 작은 점토에 간극수압을 통한 선행압밀하중결정법을 적용하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.

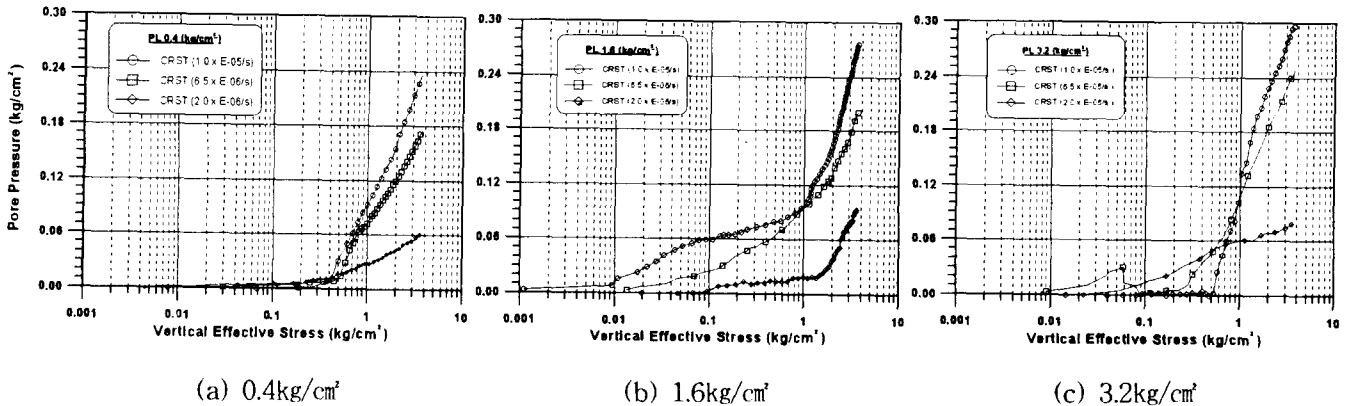


그림 2. 간극수압 - 연직유효응력

3.3.2 간극수압계수 - 연직유효응력관계

본 실험에 적용된 변위속도는 반경험적으로 선정하였으며 실험을 통해 구한 압밀정수들의 오차를 최소화하고 합리적인 해를 얻기 위해 간극수압계수를 검토하였다. 초기하중단계에서 변위속도가 증가할수록 간극수압계수는 18~74%로 불규칙한 형태를 나타내지만 정규압밀영역에서 선행압밀하중과 관계없이 2~8%로 일정한 값을 유지하고 Wissa et al(1971), Gorman(1978), Larsson & Sallfors(1986)등이 제안한 영역에 수렴하므로 적용된 변위속도와 압밀정수가 타당하다고 판단되었다.

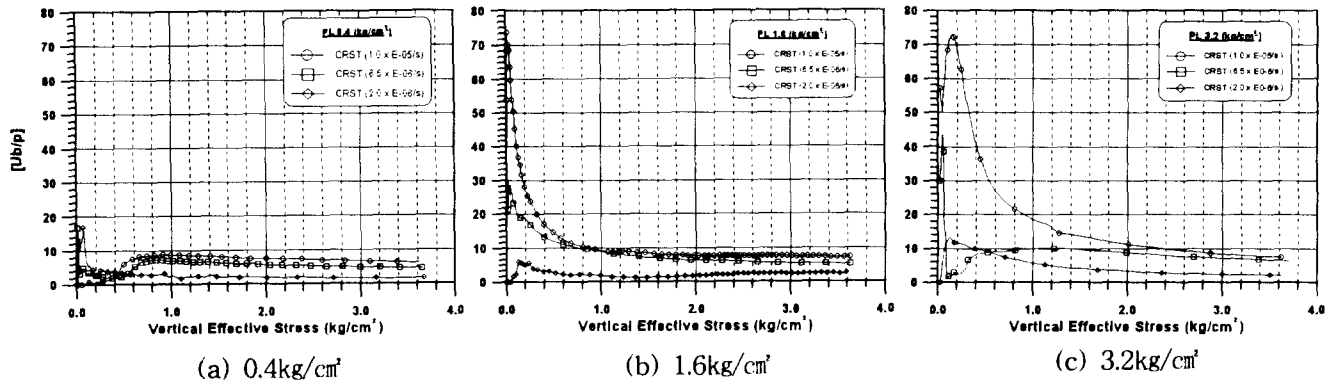


그림 3. 간극수압계수 - 연직유효응력

3.3.3 간극비 - 연직유효응력관계

일정변위압밀실험과 단계별하중재하압밀실험을 통해 간극비와 연직유효응력관계는 그림 4와 같이 압밀곡선이 거의 비슷하게 유지하며 초기하중단계에서는 시료준비과정의 상이함으로 인해 분산된 경향을 나타내지만, 정규압밀영역에서 변위속도가 증가하면 Crawford(1965), Salfors(1975), Vaid et al(1979), Leroueil(1985)등이 제안한 바와 같이 변위속도에 영향을 받는다.

그림 4에서와 같이 CRST에서 변위속도가 증가할수록 Leroueil(1985), Janbu(1985)가 제안한 내용과 동일하게 선행압밀하중이 크게 나타났다. CRST에서 변위속도가 증가할수록 ILT곡선에서 멀어지고, 반대로 변위속도가 감소할수록 ILT곡선에 근접하는 경향을 나타내었다. 간극비-연직유효응력 곡선의 기울기인 압축지수(C_c)는 CRST에서 0.81~0.96으로 나타났고 ILT에서 0.81~1.00으로 거의 유사한 값을 나타내었다.

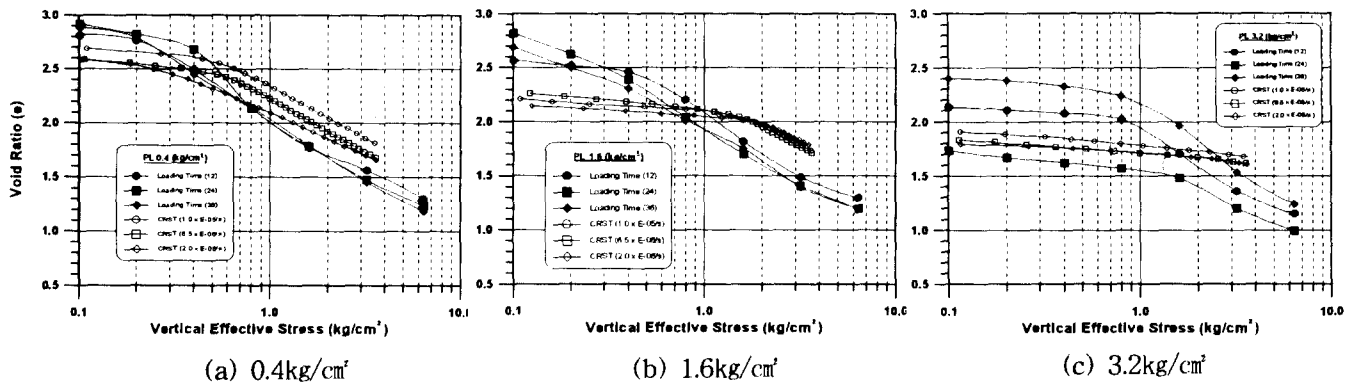


그림 4. 간극비 - 연직유효응력

3.3.4 압밀계수 - 연직유효응력관계

그림 5는 압밀계수와 연직유효응력관계로서 CRST는 과압밀영역에서 정규압밀영역으로 전환되면서 간극수압증가율이 커져 압밀계수(C_v)가 뚜렷이 감소하였다. ILT는 응력-변형률관계와 유사하게 하중재하지속시간이 증가하면 압밀계수가 감소하는 경향을 나타내었다. 초기 압밀계수곡선은 시료의 불균질성과 Gorman(1978)이 제안한 내용과 유사하게 전이상태가 아닌 정상상태로 계산되어 분산되는 경향을 나타지만 하중을 가하기전 상부에 하부보다 큰 배압(Back pressure)를 가하면 정상상태에서 합리적인 압밀계수를 구할 수 있을 것이다. 압밀계수는 CRST의 경우 $4.0 \times 10^{-1} \sim 1.0 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$, ILT는 4.0×10^{-1}

~ $3.0 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{s}$ 로 CRST에 의한 압밀계수가 크게 나타났다. 변위속도의 영향을 살펴보면 작을수록 응력-변형률관계와 마찬가지로 ILT곡선에 근접하지만, 변위속도가 증가할수록 점점 멀어지는 경향을 나타내었다. 매우 느린 변위속도로 CRST를 실시해야 현장압밀상태와 유사한 값을 얻을 수 있지만, 너무 느리면 경제성이 감소하고 간극수압이 발생하지 않아 압밀계수를 계산할 수 없으며, 너무 빠른 변위속도를 적용하면 큰 간극수압이 발생하여 계산된 압밀계수의 유효성이 저하되므로 변위속도 선택에 유의하여야 한다.

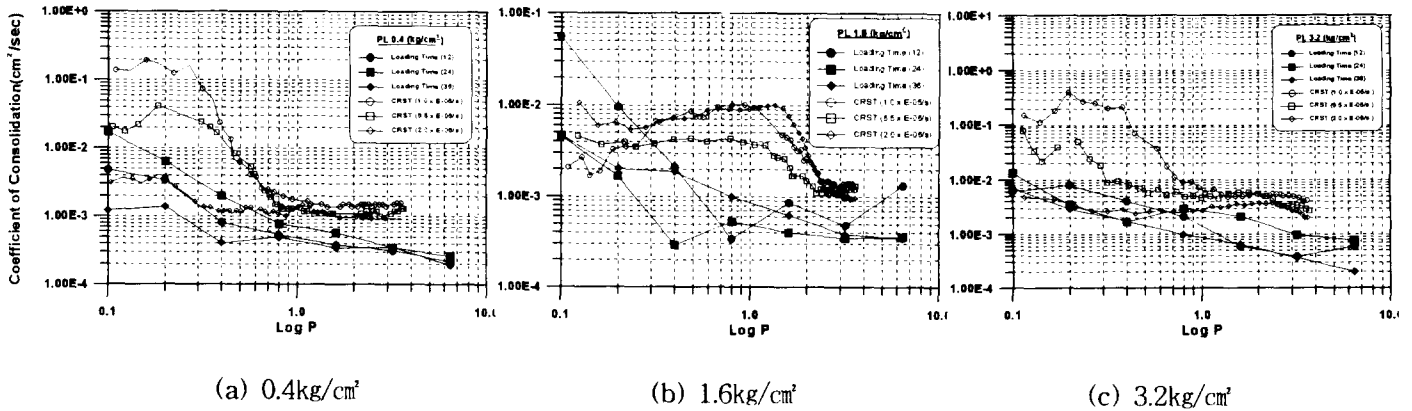


그림 5. 압밀계수 - 연직유효응력

3.3.5 투수계수 - 연직유효응력관계

시료의 투수성은 간극비와 밀접한 관계가 있는데 유기질토의 경우에 함수비가 높더라도 실질적인 간극비는 유기물 입자의 큰 체적과 낮은 밀도로 인하여 상당히 낮다. 또한, 유기물 입자의 형상이 간극수 입자주위에서 장기간 순회를 유발하여 유로가 상당히 길게 됨에 따라 투수성이 저하된다. Pusch(1973)은 유동유기물 Colloide가 간극을 폐쇄하여 유기물 함유량이 증가할수록 투수성이 낮아진다고 하였다. 일반적으로 오토는 층상구조를 형성하고 있으므로 유기물분해, 유기물함유량에 따라 미분해된 유기물은 수평방향으로 입자가 놓여 있으므로 수평방향의 투수계수가 큰 이방성 투수계수를 갖는다. 그림 6에서 투수계수는 CRST의 경우 $2.0 \times 10^{-6} \sim 3.0 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$ 이고 ILT는 $4.0 \times 10^{-6} \sim 5.0 \times 10^{-9} \text{cm}^2/\text{s}$ 로 압밀계수와 동일하게 CRST결과가 변위속도의 영향으로 크게 나타났다. ILT에서 재하지속시간이 길어질수록 입자 재배열이 촉진되고 체적이 감소하여 투수계수도 감소하였다. ILT와 CRST에서 적용되는 변위속도가 각각 $10^{-7}/\text{s}$ 이하, $10^{-5} \sim 10^{-6}/\text{s}$ 로 약 10~100배정도 차이로 투수계수에 영향을 주는 요소임을 알 수 있다.

압밀계수와 마찬가지로 변위속도가 빠를수록 투수계수가 증가하고 ILT곡선에서 멀어지며, 느릴수록 접근하는 경향을 나타내었다.

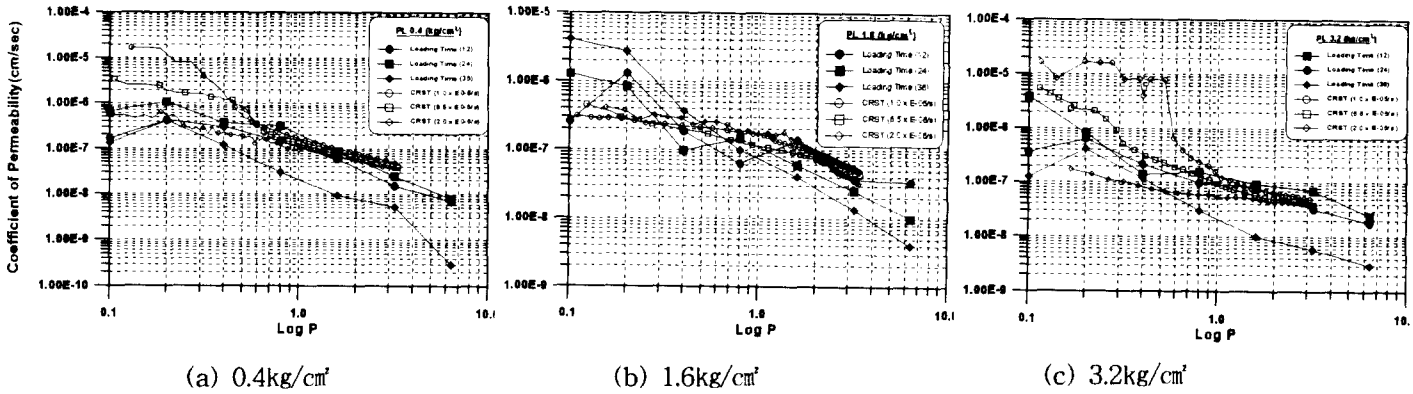


그림 6. 투수계수 - 연직유효응력

4. 결론

매우 높은 함수비와 유기물을 함유하고 있는 한강오니토를 불순물을 제거한후 0.4, 1.6, 3.2kg/cm²로 과압밀한후 재하지속시간을 12, 24, 36 시간 적용한 단계별하중재하압밀실험(ILT)와 변위속도를 $1.0 \times 10^{-5}/s$, $6.5 \times 10^{-6}/s$, $2.0 \times 10^{-6}/s$ 로 적용한 일정변위압밀실험(CRST)을 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. CRST는 비배수면에서 간극수압이 급격히 증가하는 변곡점을 이용하여 선행압밀하중을 결정할 수 있었으며, 간극수압계수가 선행압밀하중보다 작은 하중영역과 선행압밀하중 이상의 영역에서 각각 18~74%, 2~8%이며 변위속도가 압밀정수에 많은 영향을 미치므로 간극수압계수를 이용하여 적용 변위속도의 타당성과 유효성을 검증할 수 있었다.
2. 한강오니토의 압축지수(C_c)는 간극비-연직유효응력관계로부터 실험방법과 변위속도의 영향과 관계없이 0.81~1.00으로 거의 비슷한 값을 나타내었다. CRST에서 변위속도가 빠를수록 ILT곡선에서 멀어지고, 느릴수록 접근하는 경향을 나타내었다.
3. 압밀계수(C_v)는 CRST의 경우 $4.0 \times 10^{-1} \sim 1.0 \times 10^{-3} \text{cm}^2/s$, ILT는 $4.0 \times 10^{-1} \sim 3.0 \times 10^{-4} \text{cm}^2/s$ 로 CRST에 의한 압밀계수가 크게 나타났으며 변위속도가 증가할수록 압밀계수도 증가하였다. 선행압밀하중보다 작은 하중영역에서 압밀계수가 상당히 크고 분산되지만, 정규압밀영역에서는 일정한 영역으로 수렴하였다.
4. 투수계수(k)는 CRST의 경우 $2.0 \times 10^{-6} \sim 3.0 \times 10^{-8} \text{cm/s}$ 이고 ILT는 $4.0 \times 10^{-6} \sim 5.0 \times 10^{-9} \text{cm/s}$ 로 압밀계수와 동일하게 CRST결과가 변위속도의 영향으로 다소 크게 나타났다.

본 논문을 통해 CRST는 ILT에 비해 압밀정수가 다소 차이는 나타나지만 경제성, 사용성, 신속성 등의 장점을 갖고 있으므로 우리나라 지반특성을 고려한 표준화된 변위속도에 관한 연구를 지속·확대함으로써 경제성있는 설계에 도움이 될것으로 판단된다. 또한, 오니토의 공학적특성을 면밀히 검토하여 압밀, 고화점가제 등의 의해 강도를 향상시켜 재활용방안을 적극 개발하여야 할 것이다.

참고문헌

1. 이남기, 이대명, 유갑용, 이남기(1996), “양산·물금지역의 충적점토에 대한 일정변형률 압밀특성”, 96 가을 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 267- 276
2. 한국종합기술개발공사(1994), “한강 오니토 제거 공사 감리보고서”
3. Akagi, H., Komiya, K. (1995), “Constant Rate of Strain Consolidation Properties of Clayey Soil at High Temperature”, Int. Symposium on Compression and Consolidation Clayey Soils,

IS-Hiroshima, Vol. 2, pp. 3-8.

4. Crawford, C. B. (1988), "On Importance of Rate of Strain in the Consolidation Test", *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 11, No. 1, March, pp.60-62
5. Gorman, C. T., Hopkins, T. C. , Deen, R. C. , & Drnevich, V. P. (1978) "Constant-Rate-of-Strain and Controlled-Gradient Consolidation Testing", *Geotechnical Testing Journal*, Vol, No. 1, pp. 3-15.
6. Janbu, N., Tokheim, O., & Senneset, K. (1981), "Consolidation Tests with Continuous Loading", 10th Int. Conf. Soil Mechanics & Foundation Eng. Stockholm, Vol. 1, pp. 645-654.
7. Larsson, R., & Salfors, G. (1986), "Automatic Continuous Consolidation Testing in Sweden", *Consolidation of Soils*, STP 892, ASTM , Philadelphia, pp. 299-328.
8. Leroueil, S., Kabbaj, M., Tavenas, F., & Bouchard, R. (1985), "Stress- Strain-Strain Rate Relation for the Compressibility of Sensitive Natural Clays", *Geotechnique*, Vol. 35, No. 2, pp. 159-180.
9. Wissa, A.E.Z., Christian, J.T., Davis, E.H. and Heiberg,S.(1971), "Consolidation at Constant Rate of Strain", *J.Soil Mech. and Found. Division. ASCE*, Vol.97, SM10, pp. 1393-1413.