

실내실험을 통한 김해점토의 투수특성 평가

Evaluation of Permeability Characteristics of Kimhae Clay by Laboratory Tests.

김동휘¹⁾, Dong-Hee Kim, 임형덕²⁾, Hyung-Duk Lim, 김진원²⁾, Jin-Won Kim, 이우진³⁾, Woo-Jin Lee

¹⁾ 고려대학교 대학원 석사과정, Graduate student, Dept. of Civil Engineering, Korea Univ.

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

³⁾ 고려대학교 토목환경공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea Univ.

SYNOPSIS : During consolidation, the permeability of clay decreases with void ratio because of the reduction in total void space. After Kozeny(1927) and Carman(1956), many researchers have proposed the relations between void ratio and permeability. Most of the relations are expressed in the following forms as ; (1) $\log e - \log k(1+e)$, (2) $e - \log k$, or (3) $\log e - \log k$. These relations have been found valid for a large number of normally consolidated clays. From laboratory test(CRS and IL_{CON}) results, the relation between void ratio and permeability of Kimhae clay was well defined in all of the three forms. Permeability change index, C_k , of Kimhae clay was in the range of 0.64~1.03 and average value of C_k was 0.821. And the test results satisfied the experimental correlation between C_k and e_o , $C_k=0.5e_o$. In $\log e - \log k(1+e)$ relation, constant C was in the range of 1.91~4.74 $\times 10^{-8}$ cm/sec and n was in the range of 3.74~4.60.

Keywords : Consolidation, Permeability, CRS test, Permeability change index, C_k

1. 서론

최근 항만, 공항, 택지, 산업기지 등의 수요가 증대됨에 따라, 해안 인근 연약지반 상의 건설이 늘어나고 있다. 이러한 연약지반의 활용이 증가함에 따라, 이들 지반의 압밀특성을 정확하게 파악하는 것이 지반의 효율적인 개량을 위해서 매우 중요하다. 특히 투수계수(coefficient of permeability)는 연약지반의 압밀해석과 폐기물 처리장 등의 설계에 상당히 중요한 parameter로 사용되고 있으므로, 투수계수 특성을 정확하게 평가하는 것이 중요한 과제가 되고 있다. Terzaghi의 1차원 압밀이론 이후로, 다양한 실내 및 현장시험의 발달로 연약지반의 실제 압밀거동이 Terzaghi의 가정사항과 일치되지 않는 경우가 많이 발견되었으며, 이를 보완한 압밀이론이 개발되어 왔다. Terzaghi 압밀이론에서는 투수계수가 일정하다고 가정하였으나 실제로 압밀이 진행됨에 따라 간극비의 감소로 인하여 투수계수는 감소하게 되며, 최근에는 수치해석을 이용한 압밀해석 시 이를 고려하고 있다.

본 연구에서는 김해지역의 퇴적층에서 채취된 불교란 시료를 이용하여 표준압밀시험(IL test)과 일정 변형률 압밀시험(CRS test)을 수행한 후 각각의 시험결과를 분석하여 간극비에 따른 투수계수의 변화를 살펴보았다. 또한 현재 외국에서 제안된 점토의 투수계수 - 간극비의 관계식의 김해점토에 대한 적용성을 검토하였으며 이를 외국의 연구결과와 비교하였다.

2. 간극비 - 투수계수 관계

흙과 같이 간극을 가지고 있는 매체의 투수계수는 흙 자체의 고유치가 아니며 흙을 구성하고 있는 점토광물에 영향을 받을 뿐만 아니라, 간극의 크기, 모양, 분포 그리고 물의 점성 등에 영향을 받는다. 그 중에서도 간극비가 투수계수에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며 간극비와 투수계수의 관계를 규명하는 연구가 지속되어 왔다. 이러한 간극비와 투수계수와의 관계식은 Kozeny(1927)와 Carman(1956)의 제안 식 이후로 많은 연구가 이루어져 왔으며, Kozeny(1927)와 Carman(1956)이 제안한 식은 사질토에만 적용 가능한 것으로 밝혀져, 점토에 적용시킬 수 있는 다음과 같은 식들이 제안되었다.

Samarasinghe 등(1982)은 정규압밀점토의 간극비와 투수계수의 관계는 다음 식 (1)과 같이 표현될 수 있다고 하였다.

$$k = C \frac{e^n}{1+e} \quad (1)$$

여기서 n 값은 일반적으로 4~5이고, C 는 흙의 특성을 나타내주는 기준투수성(reference permeability)이다. Taylor(1948)는 Kozeny(1927)와 Carman(1956)이 제안한 식은 점토에 적용할 때 문제점이 있다고 지적하면서 다음 식 (2)와 같은 $e - \log k$ 의 경험적인 선형관계식을 제안하였다.

$$\log k = \log k_o - \frac{e_o - e}{C_k} \quad (2)$$

여기서 C_k 는 투수계수지수(permeability change index)이고, k_o , e_o 는 현장지반의 in-situ 상태의 투수계수와 간극비이다. 이 방법은 간극비의 변화에 따른 투수계수의 변화를 표현하는 가장 일반적인 방법으로, Mesri와 Rokhsar(1974)는 지반공학적인 변형을 범위 즉, 현장에서 발생할 수 있는 변형을 범위 내에서 위의 식 (2)의 관계를 적용할 수 있다고 하였다. C_k 값은 간극비에 따른 투수계수의 변화정도를 나타내는 지수이며, 초기간극비(initial void ratio, e_o)와 다음과 같은 경험적인 식으로 표현된다.

$$C_k = 0.5 e_o \quad (3)$$

위의 식 (3)은 단지 투수계수지수와 초기간극비 사이의 경험적인 식이므로 이 식을 이용하여 직접적으로 투수계수지수를 구할 수는 없지만, 이 관계를 이용하여 대략적인 투수계수지수를 예측할 수 있다.

Mesri와 Olson(1971)은 식 (2)는 현장에서 일반적으로 발생할 수 있는 간극비의 범위 내에서는 적용 가능하지만 변형률이 25%를 초과하는 대변형의 경우에는 간극비와 투수계수의 관계는 $\log e - \log k$ 의 관계식으로 표현된다고 하고, 다음 식 (4)를 제안하였다.

$$\log k = A \log e + B \quad (4)$$

여기서 A 와 B 는 흙의 성질에 따라서 결정되는 상수이다.

3. 투수계수 산정을 위한 실내시험

간극비의 변화에 따른 투수계수의 변화를 표준압밀시험(IL_{CON} test)과 일정변형률압밀시험(CRS test)을 통하여 살펴보았다. 표준압밀시험(IL_{CON} test)과 일정변형률압밀시험(CRS test)의 투수계수 산정방법을 살펴보면 다음과 같다.

3.1 표준압밀시험(Incremental Loading Test)

Terzaghi는 압밀이 발생하는 동안에 투수계수(k), 구속탄성계수(M), 그리고 압밀계수(c_v)가 일정하다고 가정하고 다음과 같은 1차원 압밀이론을 유도하였다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (5)$$

여기서, c_v 는 압밀계수이고 다음과 같이 표현된다.

$$c_v = \frac{k(1+e)\sigma'}{0.434 \gamma_w C_c} = \frac{kM}{\gamma_w} \quad (6)$$

압밀계수는 일반적으로 간극수압을 측정하거나 도해법(log t법 또는 root t법)으로 산정되며, 투수계수는 식 (6)에 의해서 결정된다. Terzaghi의 1차원 압밀이론은 압밀계수를 구하기 위하여 여러 가지 가정을 사용하였기 때문에 이 방법을 이용하여 구한 투수계수는 신뢰성이 떨어지므로 다른 실내시험에서 구한 투수계수와 비교하여 사용하는 것이 바람직하다.

3.2 일정변형률시험(Constant Rate of Strain Test)

CRS 압밀시험은 시간에 따른 변형률을 일정하게 유지하는 시험으로 기존의 표준압밀시험과는 달리 일면 배수조건이며, 시료 하부에서 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.

$$c_v \frac{\partial^2 \epsilon}{\partial z^2} = \frac{\partial \epsilon}{\partial t} \quad (7)$$

CRS 압밀이론의 무차원 변형률 식은 정상상태(steady condition)와 비정상상태(transient condition)로 구분되며, 정상상태에서의 선형거동의 경우 시료내의 평균유효응력과 압밀계수는 체적변화계수(m_v)가 일정하다는 가정 하에서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\sigma'_{v_{ave}} = \frac{1}{3} [2\sigma'_v(H, t) + \sigma'_v(0, t)] = \sigma_v - \frac{2}{3} u_b \quad (8)$$

$$c_v = (H_0^2/2u_b)(\Delta\sigma/\Delta t) = \frac{r H^2}{2u_b m_v} \quad (9)$$

또한, 비선형거동의 경우 시료내의 평균유효응력과 압밀계수는 압축지수(C_c)가 일정하다는 가정 하에서 다음과 같이 산정되며,

$$\sigma'_{v_{ave}} = [\sigma_v^3 - 2\sigma_v^2 u_b + \sigma_v u_b^2]^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

$$c_v = \frac{H^2 \log[(\sigma_v + \Delta\sigma_v)/\sigma_v]}{2\Delta t \log[1 - (u_b/\sigma_v)]} = \frac{0.434 r H^2}{2\sigma'_v m_v \log(1 - u_b/\sigma_v)} \quad (11)$$

투수계수는 압밀계수와 체적변화계수를 이용하여 다음과 같이 산정된다.

$$k = c_v m_v \gamma_w \quad (12)$$

4. 시험결과 및 분석

표준압밀시험(IL_{CON} test)과 일정변형률 압밀시험(CRS test)의 결과를 이용하여 간극비의 변화에 따른 투수계수의 변화를 살펴보고, 외국에서 제안된 간극비 - 투수계수 관계식의 김해점토에 대한 적용성을 검토하였으며, 김해점토의 투수계수지수(Permeability change index, C_k)와 C, n 값을 산정하였다.

4.1 간극비의 변화에 따른 투수계수의 변화

표준압밀시험은 하중증가비(LIR)에 따른 단계재하 시험으로 시험데이터가 한정돼 있으나, 일정변형률 압밀시험은 연속적인 시험데이터를 얻을 수 있으므로 간극비의 감소에 따른 투수계수의 변화를 명확하게 볼 수 있다는 장점이 있다. 그림 1은 일정변형률 압밀시험으로 구한 압밀곡선과 간극비 - 투수계수의 관계를 나타내고 있다.

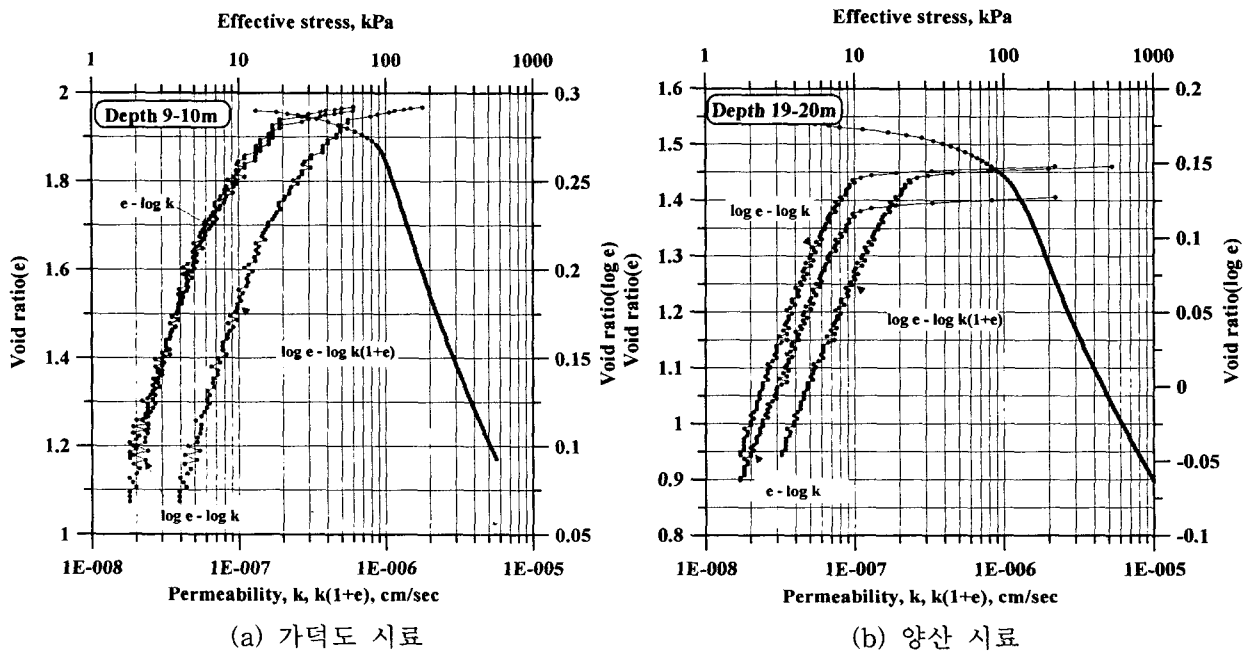


그림 1. CRS 시험을 이용한 김해점토의 간극비와 투수계수 관계

위의 그림 1에서 볼 수 있듯이 가덕도 시료와 양산 시료 모두 압축초기에는 투수계수가 실제보다 크게 측정되는 경향이 있다. 그 이유는 압밀곡선의 재압축 구간에서는 시료의 교란, swelling 현상, 기계 오차, 그리고 작은 압축량 등에 의해서 수압이 제대로 발생되지 않기 때문에 압밀시험으로 산정된 재압축 구간의 압밀정수는 상대적으로 신뢰성이 떨어진다고 할 수 있다. 특히 양산 시료는 초기의 투수계수가 신뢰성이 떨어져 초기 값을 제외하고 그래프에 표시하였기 때문에 $e - \log k$ 곡선과 $e - \log \sigma'_{vo}$ 곡선의 시작점이 다르다. 그러나 정규압밀 구간에서는 양산점토와 가덕도점토 모두 $e - \log k$, $\log e - \log k$, $\log e - \log k(1+e)$ 관계에서 모두 선형적인 관계를 보이는 것으로 나타났다.

4.2 김해점토의 투수계수지수(permeability change index, C_k)

$e - \log k$ 관계의 기울기인 투수계수지수 C_k 를 구하기 위해서는 일정한 변형률 범위 내에서 간극비와 투수계수의 관계가 선형적이어야 하므로, 투수계수지수를 구하기 전에 변형률에 따른 투수계수의 변화, 즉 $e - \log k$ 곡선을 살펴보고 선형적인 관계가 성립하는 부분에서 투수계수지수를 산정해야 한다.

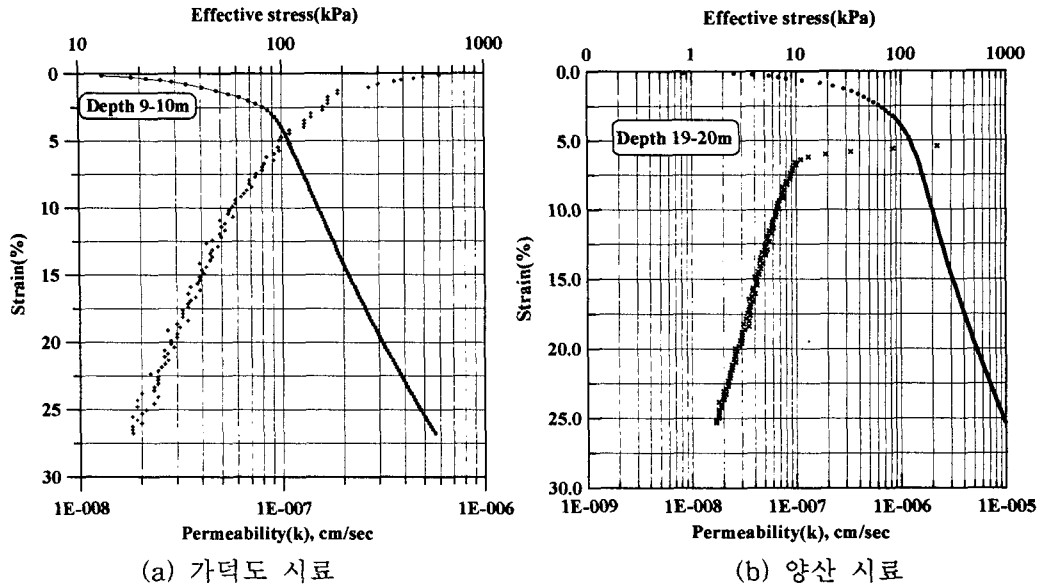


그림 2. 변형률에 따른 투수계수의 변화

위의 그림 2에서 볼 수 있듯이 $\epsilon - \log k$ 곡선에서 변형률 25%까지는 투수계수와 간극비의 관계가 선형적으로 변화하는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 변형률 25%까지의 간극비 - 투수계수의 관계가 선형적으로 변화하는 구간에서의 기울기 즉, 투수계수지수(permeability change index, C_k)를 구할 수 있다. 일반적으로 현장에서 발생할 수 있는 변형률 범위는 25% 이하이므로, $e - \log k$ 곡선에서의 간극비와 투수계수 관계를 이용하여 김해점토의 투수계수지수(permeability change index, C_k)와 $C_k = 0.5e_0$ 의 경험적인 관계를 살펴보는 것이 가능하다고 판단된다. 따라서 표준압밀시험(IL_{CON} test)과 일정변형률 압밀시험(CRS test)을 이용하여 김해점토의 투수계수지수를 산정하였다. 전술한 바와 같이 일정변형률 압밀시험의 경우, 재압축구간과 선형압밀하중 부근에서는 시험 특성상 투수계수가 실제보다 크게 측정되므로 이 부분은 제외하고 투수계수지수를 산정하였다.

그림 3은 표준압밀시험(IL_{CON} test)과 일정변형률 압밀시험(CRS test)의 결과를 이용하여 간극비의 감소에 따른 투수계수의 변화를 나타내고 있고, 그 결과는 표 1에 정리하였다.

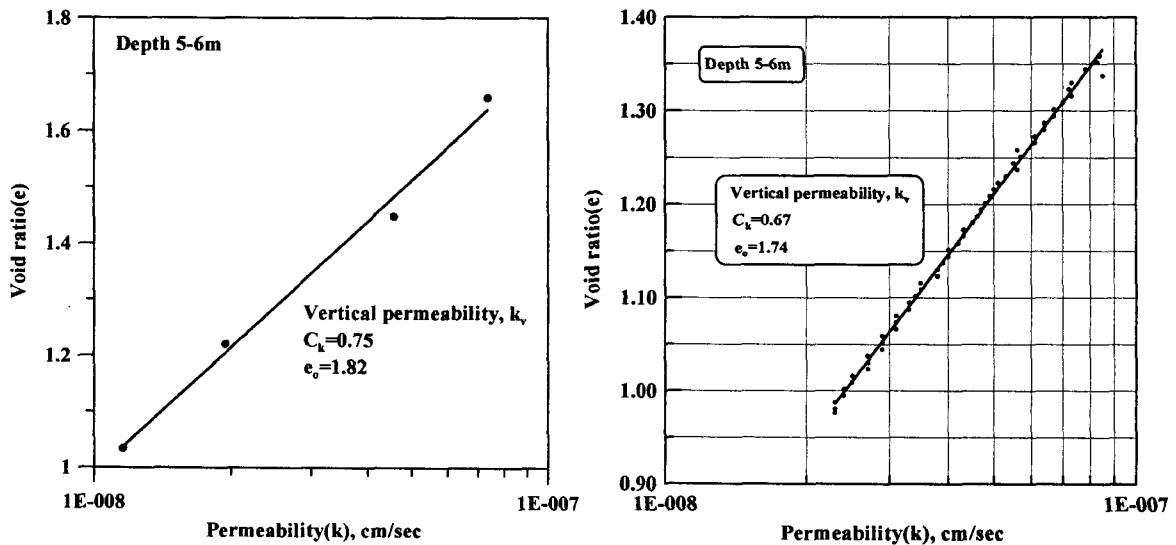


그림 3. 가덕도 시료의 투수계수지수

표 1. 김해점토의 투수계수지수(permeability change index, C_k)

Type of test	Depth, m	C_k	e_o	C_k/e_o	Sample
CRS	4~5	0.836	1.84	0.45	양산
CRS	5~6	0.871	1.87	0.47	양산
IL _{CON}	5~6	0.750	1.82	0.41	양산
IL _{CON}	9~10	0.653	1.81	0.36	양산
CRS	12~13	1.030	1.85	0.56	양산
CRS	14~15	0.870	1.65	0.53	양산
IL _{CON}	15~16	0.813	1.78	0.46	양산
CRS	19~20	0.700	1.40	0.50	양산
IL _{CON}	5~6	0.873	1.54	0.57	가덕도
CRS	9~10	0.987	1.91	0.52	가덕도
IL _{CON}	13~14	0.897	1.82	0.49	가덕도
CRS	15~15.8	0.847	1.79	0.47	가덕도
CRS	20~20.8	0.640	1.40	0.46	가덕도
CRS	23~24	0.732	1.55	0.47	가덕도

위의 표 1에서 볼 수 있듯이 양산점토와 가덕도점토의 투수계수지수의 범위는 유사한 것으로 나타났으며 0.64~1.03의 범위를 보이고 있다. 그리고 그림 4는 두 점토의 투수계수지수와 초기간극비의 경험적인 관계 $C_k=0.5e_o$ 를 나타내고 있으며, 그림에서 알 수 있듯이 투수계수와 초기간극비는 일정한 관계를 보이며 이는 외국의 연구결과와 일치한다.

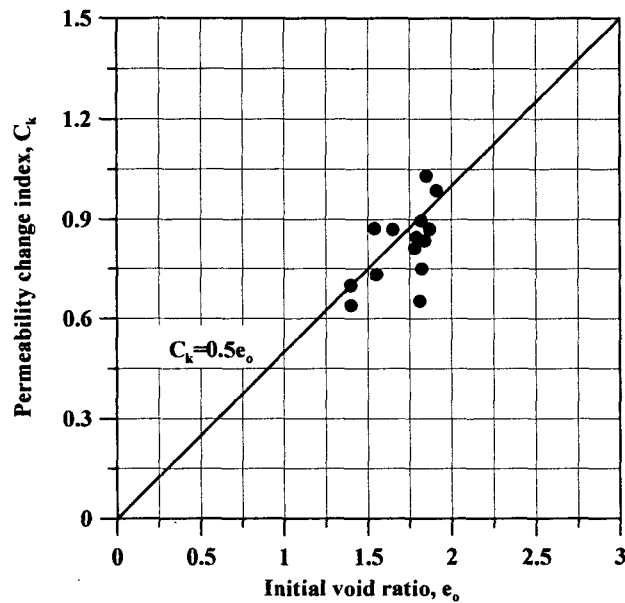
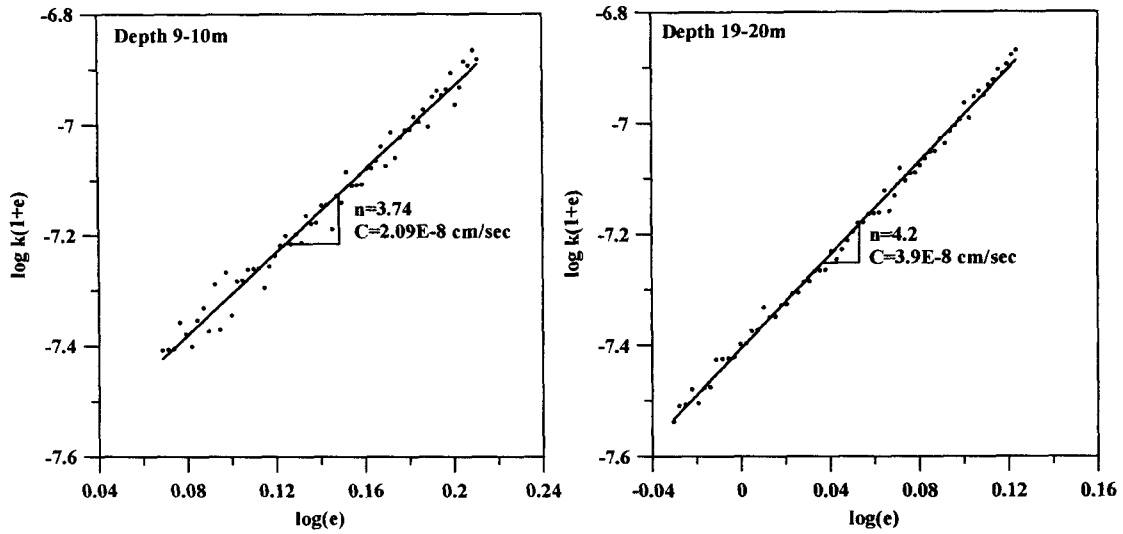


그림 4. 투수계수지수와 초기간극비와의 관계

4.3 log e - log k(1+e) 관계

4.1장에서 전술한 바와 같이 김해점토의 투수계수는 $e - \log k$ 관계뿐만 아니라 $\log e - \log k(1+e)$ 의 관계로도 표현되는 것으로 나타났으며, 그 결과는 그림 5에 나타난 바와 같다. 그림에서 알 수 있듯이

김해점토는 일반적인 변형률 내에서는 $\log e - \log k(1+e)$ 곡선이 선형의 관계를 보이는 것으로 나타났다.



(a) 가덕도점토

(b) 양산점토

그림 5. 김해점토의 $\log e - \log k(1+e)$ 관계

김해점토의 n 값과 C 값을 구한 결과는 표 2에 나타난 바와 같으며, n 값은 3.74~4.60, C 값은 $1.91 \sim 4.74 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$ 의 범위를 보이는 것으로 나타났다.

표 2. 김해점토의 n 과 C 값

Type of test	Depth, m	C ($\times 10^{-8} \text{cm/sec}$)	n	Sample
CRS	5~6	4.74	4.48	양산
IL _{CON}	5~6	1.91	4.60	양산
IL _{CON}	5~6	2.21	4.40	양산
CRS	12~13	2.09	3.76	양산
CRS	14~15	2.50	3.88	양산
CRS	19~20	3.90	4.20	양산
CRS	9~10	2.09	3.74	가덕도
CRS	15~15.8	2.08	4.26	가덕도
CRS	23~24	4.38	4.12	가덕도

5. 결론

김해점토의 퇴적층에서 채취된 불교란 시료를 이용하여 표준압밀시험(IL_{CON})과 일정변형률 압밀시험(CRS test)을 수행하여 김해점토의 간극비와 투수계수와의 관계를 규명하였으며, 이들 실험결과에 근거하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) CRS 시험은 재압축구간과 선행압밀하중 근처에서 투수계수를 과대평가하는 것으로 나타났으나, 연속적인 시험결과를 얻을 수 있기 때문에 상대적으로 표준압밀시험보다 간극비의 감소에 따른 투수계수의 변화특성을 쉽게 관찰 할 수 있는 것으로 나타났다.

(2) 김해점토의 간극비와 투수계수와 관계는 $e - \log k$, $\log e - \log k$, 그리고 $\log e - \log k(1 + e)$ 의 세 관계 모두 일정 변형을 범위 내에서 선형의 관계를 보이는 것으로 나타났으며 따라서 이들 관계식의 국내 연약점토에 대한 적용이 가능한 것으로 판단된다. 그러나 보다 정확한 투수특성을 파악하기 위해서는 지속적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

(3) 김해점토의 투수계수지수(Permeability change index, C_k)는 0.64~1.030의 범위를 보이며 평균값은 0.821인 것으로 나타났으며, 초기간극비와 투수계수지수의 경험적인 관계식($C_k=0.5e_0$)이 유효한 것으로 나타났다.

(4) 김해점토의 $\log e - \log k(1 + e)$ 관계에서 n 값은 3.74 ~ 4.60의 범위를 보이며 평균값은 4.16이고, C (reference permeability) 값은 $1.91 \sim 4.74 \times 10^{-8}$ cm/sec의 분포를 보이며 평균값은 2.88×10^{-8} cm/sec로 산정되었다.

지금까지 열거한 김해점토의 투수계수 - 간극비의 관계는 투수계수를 간접적으로 구하는 압밀시험(CRS 시험과 표준압밀시험)으로 산정된 것이므로 투수계수 산정시 오차가 발생할 수 있다. 따라서 정상류를 유발시켜 직접적으로 투수계수를 측정하는 방법으로 검증된다면 일정변형률시험(CRS test)은 점토의 투수계수 특성을 파악하는데 유용하게 사용될 수 있다고 판단된다.

참고문헌

1. Carman, P. C. (1956), "Flow of gases through porous media", Butterworths, London.
2. Kozeny, J. S. (1927), "Uber Kapillare Leitung des wassers im Boden", Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften in Wien, Abteilung II a, pp. 136.
3. Little, J. A., Muir wood, D., Paul, M. A., and Bouazza, A. (1992), "Some laboratory measurement of permeability of Bothkennar clay in relation to soil fabric", Geotechnique, Vol. 42, No.2, pp. 355-361.
4. Mesri, G., Feng, T. W., Ali, S., and Hayat, T. M. (1994), "Permeability characteristics of soft clays", XIII ICSMFE, Delhi, India. pp. 187-192.
5. Mesri, G., and Olson, R. E.(1971), "Mechanisms controlling the permeability of clays" Clays and Clay Minerals, Vol. 19, pp. 151-158.
6. Mesri, G., and Rokhsar, A.(1974), "Theory of consolidation for clays", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 100, GT8, pp. 889-904.
7. Nash D. F. T, Sills, G. C., and Davison, L. R.(1992), "One-dimensional consolidation testing of clay from Bothkennar", Geotechnique, Vol. 42, No.2, pp. 241-256.
8. Taylor, D. W.(1948), "Fundamentals of soil mechanics", John Wiley & Sons Inc., New York, pp. 700.
9. Samarasinghe, A. M., Huang, Y. H., and Drnevich, V. P.(1982), "Permeability and Consolidation of Normally Consolidated soils", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 108, GT6, pp. 835-850.
10. Tavenas, F., Jean, P., Leblond, P., and Leroueil, S. (1983), "The permeability of natural soft clay. Part I: Method of laboratory measurement", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 20, pp. 629-644.
11. Tavenas, F., Jean, P., Leblond, P., and Leroueil, S. (1983), "The permeability of natural soft clay. Part II: Permeability characteristics", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 20, pp. 645-660.
12. 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 Foundation Division, ASCE, Vol. 97, No. SM10, pp. 1393-1413.