

일정변형률 압밀시험을 이용한 간극비-투수계수의 관계 연구

A Study on the Relationship between Void Ratio and Permeability by Constant Strain Rate Consolidation Test

주종진* · 임형덕** · 이우진*** · 김대규**** · 김낙경***** · 김형주*****

Joo, Jong-Jin · Lim, Hyung-Duk · Lee, Woo-Jin · Kim, Dae-Kyu · Kim, Nak-Kyung · Kim, Hyung-Joo

Abstract

The permeability coefficient is one of the fundamental engineering properties of soft clays. Consolidation process as well as migration of pollutants in soil are affected the permeability coefficient, which generally decreases with the reduction in void ratio during consolidation. After Kozeny(1927) and Carman(1956), many researchers have proposed the relationships between void ratio and permeability in such forms as; (1) $\log e - \log k(1+e)$, (2) $e - \log k$, or (3) $\log e - \log k$. Constant rate of strain (CRS) tests was performed with undisturbed samples obtained at Kunsan and Kimhae deposits, which are representative Korean marine clay. From the results of the tests, the relationships were found valid for Kunsan and Kimhae clays. The experimental correlation $C_k=0.5e_0$ was satisfied with Kimhae clay but not with Kunsan clay.

Keywords : Kunsan clay, Kimhae clay, Permeability, CRS test, C_k

요 지

투수계수는 연약점토의 기본 공학 특성 중 하나로서, 투수계수 값은 점토의 압밀과정뿐만 아니라 토양 내 오염물질의 이동에도 관계된다. 일반적으로 압밀이 진행되는 동안 간극비의 감소로 인해 점토의 투수계수 값은 감소하게 된다. Kozeny와 Carman 이후의 많은 연구자들이 다음의 관계로 간극비와 투수계수의 관계를 제안하였다. (1) $\log e - \log k(1+e)$, (2) $e - \log k$, (3) $\log e - \log k$. 본 연구에서는 대표적 국내 해성점토인 김해점토와 군산점토에 대하여 일정변형률(CRS) 압밀 시험 수행하였다. 시험결과로부터 위의 관계식들은 군산점토와 김해점토에 모두 적용 가능한 것으로 나타났으며, 김해점토의 경우 경험적 관계식인 $C_k=0.5e_0$ 를 잘 만족하고 있으나 군산점토의 경우는 그렇지 않은 것으로 나타났다.

주요어 : 군산점토, 김해점토, 투수계수, CRS 시험, C_k .

* 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 석사과정 수료

** 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 박사과정 수료

*** 정회원 · 고려대학교 공과대학 토목환경공학과 부교수

**** 정회원 · 상명대학교 토목환경공학부 전임강사

***** 성균관대학교 건축 조경 및 토목공학부 조교수

***** 정회원 · 군산대학교 토목공학부 부교수

1. 서론

최근 택지개발 및 산업기반시설의 증가로 인하여 해안 인근 연약지반의 개발 필요성이 증대되고 있으며, 이들 연약지반의 압밀특성을 정확히 파악하는 것이 중요한 관심사가 되고있다. 특히 압밀특성에서 투수계수(coefficient of permeability)는 연약지반의 압밀해석과 폐기물 처리장 등의 설계에 상당히 중요한 요소로 사용되고 있으며, 투수계수 특성을 정확하게 평가함으로써 연약지반의 효율적인 처리가 가능하게 된다. 다양한 실내 및 현장시험의 발달로 연약지반의 압밀거동에 있어서 Terzaghi 1차원 압밀이론의 이상적인 가정을 보다 현실적으로 극복한 다양한 압밀이론이 개발되어 왔다. Terzaghi 압밀이론에서는 투수계수가 일정하다고 가정하였으나 실제로 압밀이 진행됨에 따라 간극비의 감소로 인하여 투수계수는 감소하게 되며, 최근에는 수치해석을 이용한 압밀해석시 이를 고려하고 있다.

본 연구에서는 김해지역과 군산지역의 퇴적층에서 채취된 불교란 시료를 이용하여 일정변형을 압밀시험(CRS test)을 수행한 후 각각의 시험결과를 분석하여 간극비에 따른 투수계수의 변화를 살펴보았다. 또한 기존의 외국 연구결과에서 제안된 점토의 투수계수 - 간극비 관계식의 김해점토와 군산점토에 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 제안식 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, C는 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 현장지반상태(in-situ)의 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 투수계수 지수를 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%을 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 A와 B는 흙의 성질에 따라서 결정되는 상수이다.

3. 일정변형률 압밀시험 (CRS Test)

CRS 압밀시험은 시간에 따른 변형률을 일정하게 유지하는 시험으로 기존의 표준압밀시험과는 달리 일면 배수조건이며, 시료 하부에서 과잉간극수압을 측정한다. 따라서 시험과정 및 경계조건에 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.

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

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 가정하에서 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\sigma'_{v_{ave}} = \frac{1}{3} [2\sigma'_v(H, t) + \sigma'_v(0, t)] = \sigma'_v - \frac{2}{3} u_b \quad (6)$$

$$c_v = (H_0^2 / 2u_b) (\Delta\sigma / \Delta t) = \frac{r H^2}{2u_b m_v} \quad (7)$$

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

$$\sigma'_{v_{ave}} = \left[\sigma'_v{}^3 - 2 \sigma'_v{}^2 u_b + \sigma'_v u_b^2 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

$$c_v = - \frac{H^2 \log[(\sigma'_v + \Delta\sigma) / \sigma'_v]}{2\Delta t \log[1 - (\frac{u_b}{\sigma'_v})]} = - \frac{0.434r H^2}{2\sigma'_v m_v \log(1 - \frac{u_b}{\sigma'_v})} \quad (9)$$

투수계수는 압밀계수와 체적변화계수를 이용하여 다음과 같이 산정된다.

$$k = c_v m_v \gamma_w \quad (10)$$

4. 시험대상지반의 특성 및 시험계획

4.1 연구대상지반

본 연구 대상지반은 최근 개발이 활발히 진행되고 있는 서해안 군산과 남해안 김해의 해성점토지반으로 결정하였으며, 군산지역의 경우 기지반조사 결과를 이용할 수 있는 군산시내 수송 택지개발단지 내 일부 지반을 대상지반으로 선정하였다. 김해지역의 경우 부산과 인접하고 있고 현재 택지개발사업이 진행되고 있는 지반을 대상으로 하였다.

김해지역의 지반조건은 제 4기에 형성된 충적층이 해수면의 수위변화 혹은 하상 퇴적환경에 따라 하부로부터 모래/자갈층, 하부호층(점토, 실트, 모래), 점토층, 그리고 상부 실트/모래층의 순으로 광범위하게 분포하고 있다. 이러한 지층분포는 과거 제 4기 해수면의 변동에 따라 조성된 퇴적환경에 기인한 것으로 판단되나 홀로세(Holocene) 기간 동안 해수면 변동에 대한 의견이 다양하므로 명확히 결론 내리기에는 무리가 있다고 판단되고 있다.

군산지역에 분포하는 암상은 크게 선캄브리아기의 변성암류인 사산층군과 편마암 복합체가 분포하고 있으며 대부분의 지역은 신생대에 퇴적된 제 4기의 충적층이 분포하고 있다. 본 지역의 지층 상태는 대체로 전담토층, 상부 퇴적층, 하부퇴적층, 풍화암층 및 연암층 순으로 분포하고 있으며, 위치별로 지층 상태가 차이가 나는 매우 불균질한 지반이다.

김해점토는 주성분이 SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃로 이루어져 있으며 광물은 석영, 정장석, 알바이트, 일라이트가 주를 이루고 있으나 미량의 몬모릴로나이트가 나타나고 있다. SEM 결과에서는 별집모양의 방산층 연니(radiolarian)가 보이고 해산 규조류로 추정되는 생물체가 존재하는 것으로 나타났다. 연약점토층은 선단저항력(q_c)이 8.0 kg/cm 이하로서 매우 연약한 상태이고, 자연함수비는 55.9~70.5 %, 액성한계는 42.8~58.6 %, 소성지수는 18.1~28.0 %로 나타났으며, 비중은 평균 2.70이고 통일분류법상 흙의 종류는 CL이다. 군산점토의 XRD 실험결과 석영, 일라이트, 녹니석, 몬모릴로나이트가 주를 이루고 있으며, SEM 결과에서는 육각형 결정인 카올리나이트, 클로라이트, 유공층 등이 보이고 있다. 자연함수비는 33.5~41.5 %, 액성한계는 29.2~38.8 %, 소성지수는 6.0~15.6 %로 나타났으며, 비중은 2.67~2.71이고 통일분류법상 흙의 종류는 CL 또는 ML이다. 대상지반의 기본 물리적 특성은 표 1 및 그림 1과 2에 나타난 바와 같다.

표 1. 대상지반의 물리적 특성

물리적 특성	김해	군산
함수비 (w_n)	31.5~78.6 %	33.5~41.5 %
비중 (G_s)	2.61~2.75	2.67~2.71
액성한계 (LL)	28.7~63.8 %	29.2~38.8 %
소성지수 (PI)	9.47~38.2 %	6.0~15.6 %
초기간극비(e_0)	1.40~2.10	0.85~1.28
통일분류법(USCS)	CL	CL or ML

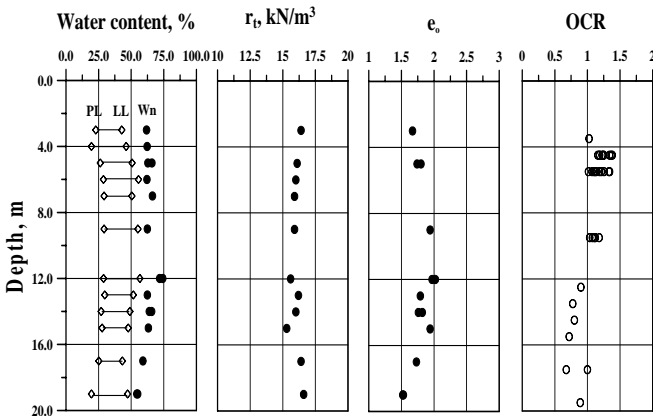


그림 1. 김해 점토의 공학적 기본 특성

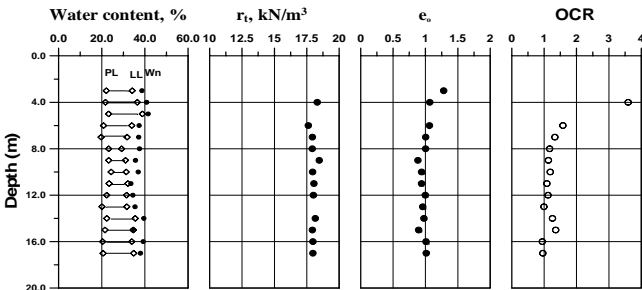


그림 2. 군산점토의 공학적 기본 특성

4.2 시험기기 및 방법

본 연구에서 샘플링 방법은 국내에서 널리 사용되고 있는 피스톤 샘플러를 사용하였다. 피스톤 샘플러의 직경은 76 mm 이며, 1m 간격으로 연속적으로 시료를 채취하였다. 본 연구에서 사용된 압밀시험기는 재하장치, 압밀셀, 압력 조절장치로 구성된 자동화 압밀시험기이다. 재하장치는 Geocomp사에서 제작된 것으로 단계재하, 일정변형률, 일

정동수경사, 일정하중률, 일정압력비 등의 압밀시험을 수행할 수 있는 다기능 시험기이다. 압밀셀은 하중 재하시 바닥면에서 발생하는 간극수압을 측정하기 위해 연속재하시험시 사용되는 밀폐된 압밀셀을 사용하였다. 압력조절장치로는 Trautwein사의 panel을 사용하였다. 사용된 압밀시험의 종류는 일정변형률 시험으로써 시험시에 축변형, 유효연직응력, 그리고 간극수압을 측정하였다. 일정변형률 시험에서 투수계수는 바닥면에서 발생하는 과잉간극수압에 영향을 받기 때문에 정확한 과잉간극수압을 측정하기 위해 포화시 배압(back pressure)을 가하여 포화도가 98% 이상이 됨을 확인한 후 시험을 시작하였으며, 실험에 사용된 물에 녹아 있는 공기를 제거하기 위해 증류수를 Walter-Nold사의 Deairator를 이용하여 시험전 공기를 최대한 제거하였다. 유효응력이 최대 1000kPa의 도달할 때까지 시험을 하였으며, 바닥면에서 연결된 Transducer로부터 발생하는 과잉간극수압을 측정하였다. 본 연구에서 수행된 시험방법은 일정변형률(Constant Strain Rate) 압밀시험으로, 일정변형률은 ASTM D4186-82의 제시된 액성한계에 따른 strain rate 산정 기준을 참고로 하여 $1.10 \sim 4.17E-4$ %/sec를 부과하였다. 각 시료별 시험조건은 표 2와 같다.

표 2. 일정변형률 압밀시험

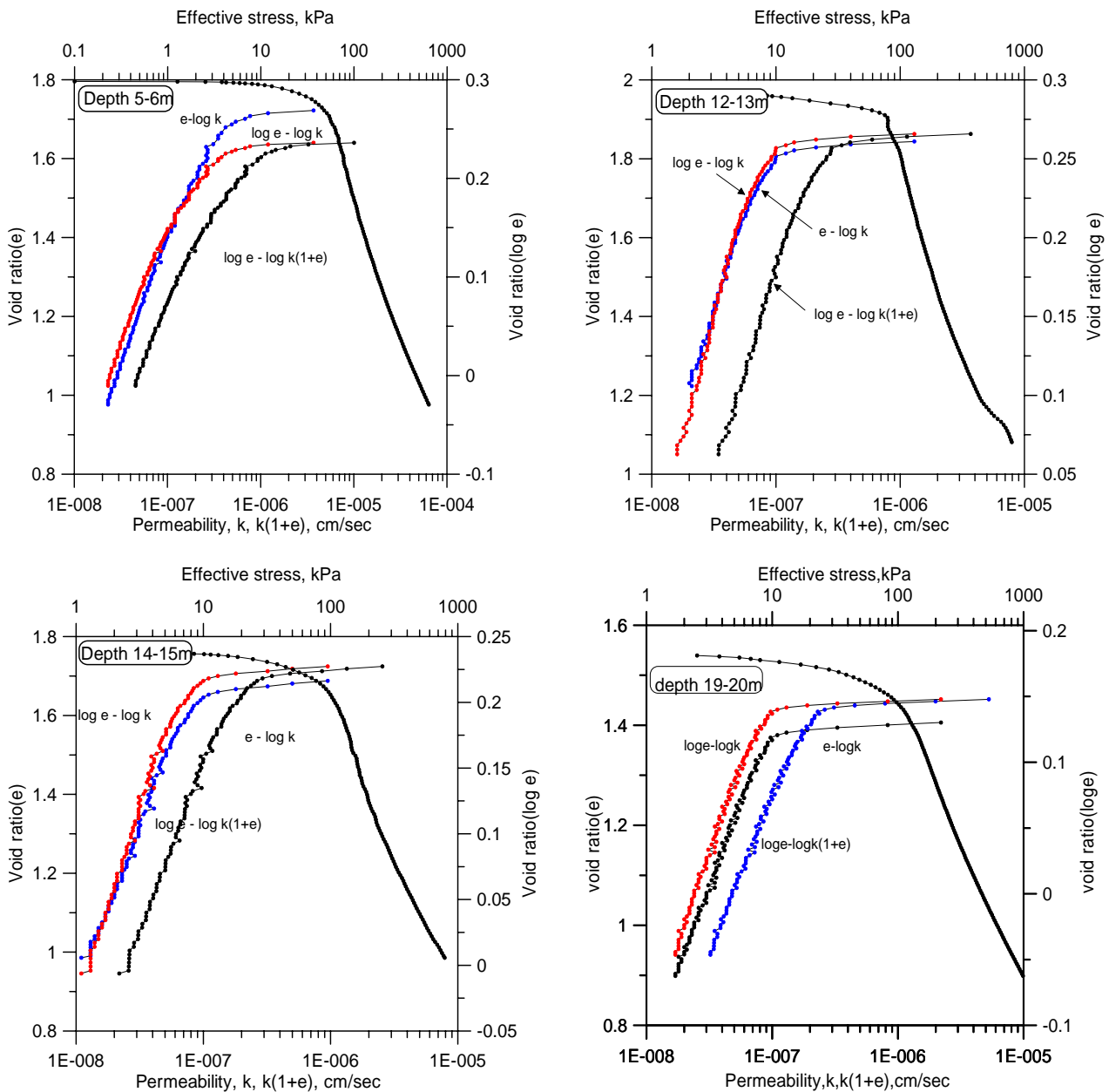
Type of test	Depth, m	e_0	Impose strain rate (%/sec)	Sample
CRS	5~6	1.87	1.67E-4	김해
CRS	7~8	1.80	2.20E-4	김해
CRS	12~13	1.85	2.20E-4	김해
CRS	14~15	1.65	2.20E-4	김해
CRS	17~18	1.10	1.10E-4	김해
CRS	19~20	1.40	2.20E-4	김해
CRS	9~10	1.91	4.17E-4	김해
CRS	15~15.8	1.79	1.67E-4	김해
CRS	23~24	1.55	3.50E-4	김해
CRS	3~4	1.28	3.35E-4	군산
CRS	4~5	1.06	3.35E-4	군산
CRS	6~7	1.03	3.35E-4	군산
CRS	7~8	0.97	3.35E-4	군산
CRS	8~9	0.86	3.35E-4	군산
CRS	9~10	0.91	3.35E-4	군산
CRS	10~11	1.03	3.35E-4	군산
CRS	13~14	0.96	3.35E-4	군산
CRS	14~15	0.99	3.35E-4	군산
CRS	15~16	1.04	3.35E-4	군산

5. 시험결과 및 분석

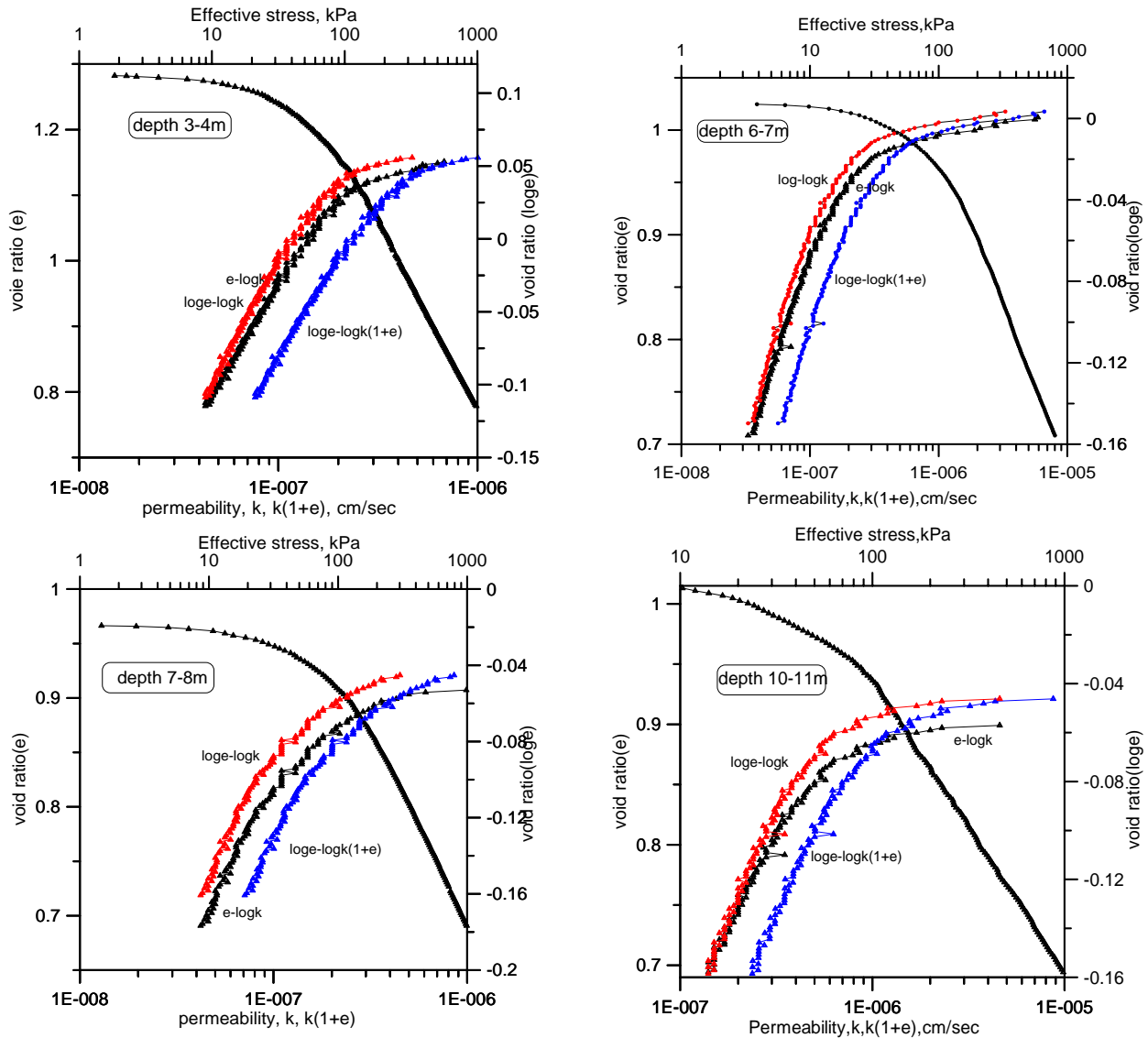
일정변형률 압밀시험(CRS test)의 결과를 이용하여 간극비의 변화에 따른 투수계수의 변화를 살펴보고, 외국에서 제안된 간극비 - 투수계수 관계식을 김해점토와 군산점토에 대하여 적용성을 검토하였으며, 김해점토와 군산점토의 투수계수지수(Permeability change index, C_k)와 C, n 값을 산정하여 비교하였다.

5.1 간극비의 변화에 따른 투수계수의 변화

표준압밀시험은 하중증가비(LIR)에 따른 단계재하시험으로 시험데이터가 한정되어 있으나, 일정변형률 압밀시험(CRS test)은 연속적인 시험데이터를 얻을 수 있으므로 간극비의 감소에 따른 투수계수의 변화를 명확하게 볼 수 있다는 장점이 있다. 그림 3은 일정변형률 압밀시험으로 구한 압밀곡선과 간극비 - 투수계수의 관계를 나타내고 있다.



(a) 김해 시료



(b) 군산 시료

그림 3. 압밀곡선 및 간극비와 투수계수 관계

위의 그림 3에서 볼 수 있듯이 CRS 시험결과와 김해점토와 군산점토 모두 압축초기에는 투수계수가 실제보다 크게 측정되는 경향이 있다. 그 이유는 작은 압축량과 시료의 교란, swelling 현상, 기계오차, 그리고 작은 압축량 등에 의해서 시료 하부에서 수압이 제대로 발생되지 않기 때문에 압밀시험으로 산정된 재압축구간 및 선형압밀하중 부근의 압밀정수는 상대적으로 신뢰성이 떨어진다고 할 수 있기 때문이다. 그러나 선형압밀하중 이후의 구간, 즉 정규압밀구간에서는 김해점토의 경우 모든 시료에서 대체적으로 $e - \log k$, $\log e - \log k$, $\log e - \log k(1+e)$ 관계

에서 모두 선형적인 관계를 보이는 것으로 나타났다. 그러나 군산점토의 경우는 선형압밀하중의 약3배의 하중 이후부터 대체적으로 $e - \log k$, $\log e - \log k$,

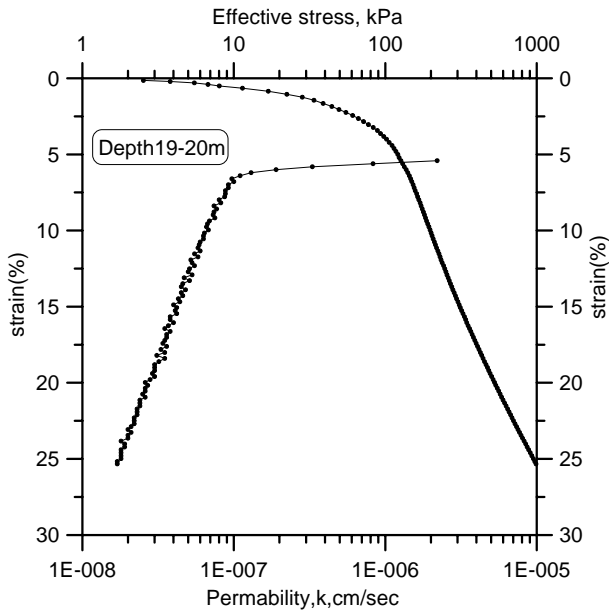
$\log e - \log k$

(1+e)관계가 선형적인 관계를 보이고 있다. 이러한 원인은 김해점토보다 군산점토의 경우가 실트질이 성분이 많기 때문에 과잉간극수압이 제대로 발생되지 않았기 때문이다.

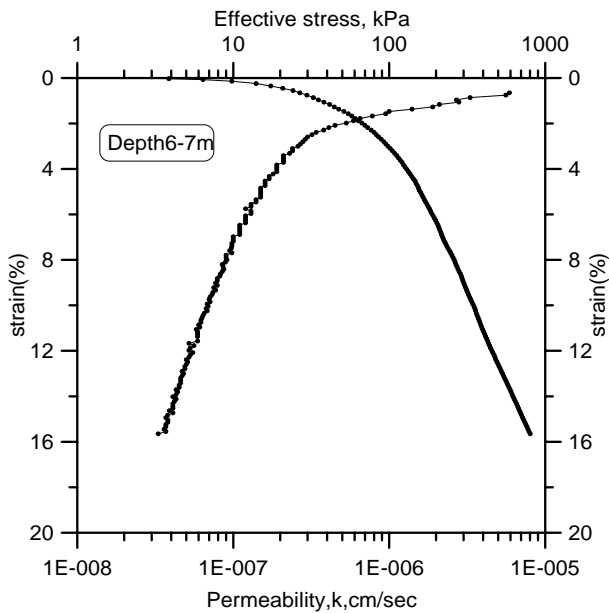
5.2 투수계수지수(Permeability Change index, C_k)

투수계수지수(C_k)를 구하기 위해서는 $e - \log k$ 관계가

일정한 변형률 범위 내에서 선형적이어야 하므로, 투수계수지수를 구하기 전에 변형률에 따른 투수계수의 변화, 즉 $\varepsilon - \log k$ 곡선을 살펴보고 선형적인 관계가 성립하는 부분에서 투수계수지수를 산정해야 한다.



(a) 김해 시료

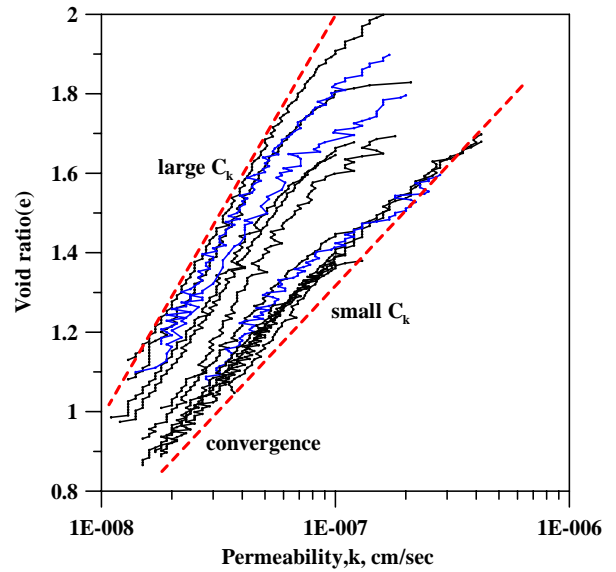


(b) 군산 시료

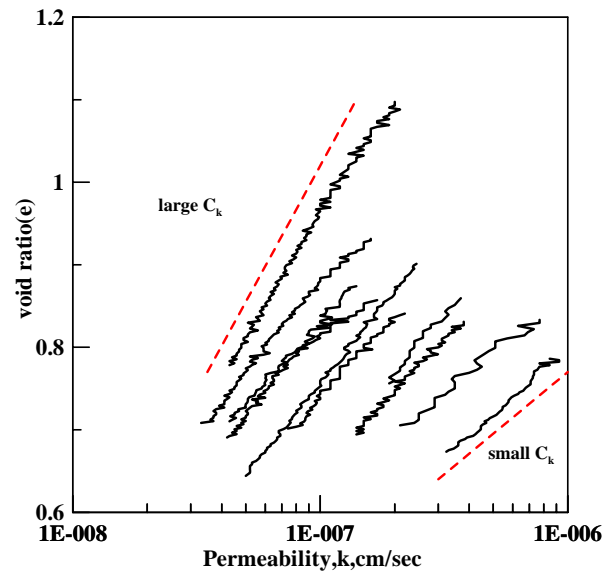
그림 4. 변형률에 따른 투수계수의 변화

그림 4는 간극비를 변형률로 바꾸어 $\varepsilon - \log k$ 나타낸 것이므로 김해점토와 군산점토의 해당되는 하나의 값이에

대하여 그림을 제시하였다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 $\varepsilon - \log k$ 곡선에서 김해점토의 경우 변형률 25%, 군산 점토의 경우에는 16%까지 투수계수와 간극비의 관계가 선형적으로 변화하는 것을 관찰할 수 있다. 그러므로 이러한 변형률까지 간극비와 투수계수의 관계가 선형적으로 변하는 구간에서 투수계수 (C_k)를 구할 수 있다. 일반적으로 현장에서 발생할 수 있는 변형률 범위는 25% 이하이므로, $e - \log k$ 곡선에서의 간극비와 투수계수 관계를 이용하여



(a) 김해



(b) 군산

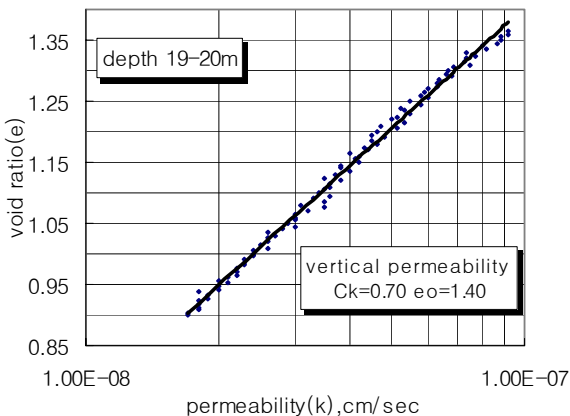
그림 5. CRS 시험으로 구한 $e - \log k$ 관계

김해점토와 군산점토의 투수계수지수(C_k)와 $C_k = 0.5e_o$ 의 경험적인 관계를 살펴볼 수 있다고 판단된다. 전술한 바와 같이 일정변형률 압밀시험의 경우, 재압축구간과 선행압밀하중 부근에서는 시험 특성상 적은 과잉간극수압의 발생으로 인하여 투수계수가 실제보다 크게 측정되므로 이 부분은 제외하고 $e - \log k$ 가 선형적인 구간에서 투수계수지수를 산정하였다.

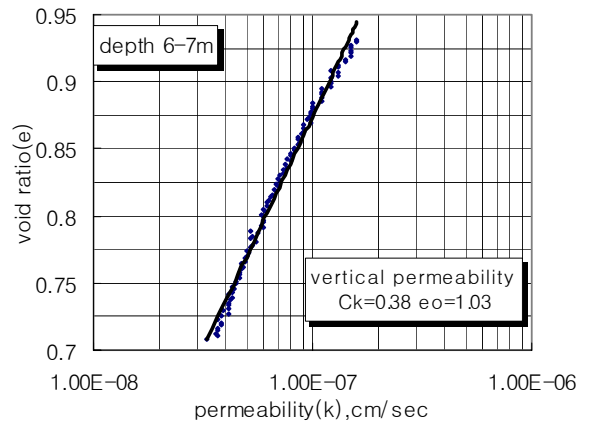
그림 5에서 볼 수 있듯이 김해점토의 CRS 시험결과는 시료 모두에 있어서 투수계수가 작은 그룹과 투수계수가 큰 그룹으로 $e - \log k$ 곡선을 나눌 수 있고, 투수계수지수는 다른 요소보다 간극비에 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있다. 즉, 그림 1에서 볼 수 있듯이 간극비가 상층에 비하여 깊은 16m 이하의 심도에서는 투수계수지수 또한 작은 값이 산정되었다. 그리고 압축이 진행됨에 따라 같은 간극비에서 투수계수지수가 작아지기 때문에 두 개의 그룹이 각각 수렴함을 보여주고 있다.

군산점토의 CRS 시험결과는 투수계수와 간극비에 따라 넓게 분포하고 있는 것을 알 수 있다. 투수계수지수는 군산점토의 경우 투수계수와 간극비에 영향을 많이 받는다는 것을 알 수 있으며, 김해점토의 비하여 간극비는 작고 투수계수는 큰 범위를 보이며 특정한 그룹으로 나눌 수 없었다. 이러한 원인은 군산점토의 경우 불균질하며 시료의 실트질 성분이 다량 포함되어 있기 때문이라 판단된다.

그림 6은 일정변형률 압밀시험(CRS test)의 결과를 이용하여 간극비의 감소에 따른 투수계수의 변화를 김해점토 19m, 군산점토 6m에 대해서 대표적으로 나타낸 것이다. $e - \log k$ 가 선형적인 관계를 가지는 구간만을 나타낸 그림이다. 이러한 관계에 대한 그림에서 김해점토와 군산점토의 모든 깊이에 대하여 정리한 결과가 표 3에 나타난 바와 같다.



(a) 김해시료



(b) 군산시료

그림 6. 간극비에 따른 투수계수

표 3. 투수계수지수(Permeability Change Index, C_k)

Type of test	Depth, m	C_k	e_o	C_k/e_o	Sample
CRS	5~6	0.871	1.87	0.47	김해
CRS	7~8	0.910	1.80	0.51	김해
CRS	12~13	1.030	1.85	0.56	김해
CRS	14~15	0.870	1.65	0.53	김해
CRS	17~18	0.680	1.32	0.52	김해
CRS	19~20	0.700	1.40	0.50	김해
CRS	9~10	0.987	1.91	0.52	김해
CRS	15~15.8	0.847	1.79	0.47	김해
CRS	23~24	0.732	1.55	0.47	김해
CRS	3~4	0.489	1.28	0.38	군산
CRS	4~5	0.323	1.06	0.31	군산
CRS	6~7	0.356	1.025	0.35	군산
CRS	7~8	0.301	0.97	0.31	군산
CRS	8~9	0.284	0.86	0.33	군산
CRS	9~10	0.290	0.91	0.32	군산
CRS	10~11	0.329	1.03	0.32	군산
CRS	13~14	0.349	0.96	0.37	군산
CRS	14~15	0.372	0.99	0.38	군산
CRS	15~16	0.355	1.04	0.34	군산

위의 표 3에서 볼 수 있듯이 김해점토의 투수계수지수는 0.68~1.03의 범위를 보이고 있으며, 군산점토의 투수계수지수는 김해점토보다 적은 0.290~0.489의 범위를 보이고 있다. 그림 7은 투수계수지수(C_k)와 초기간극비

(e_0)와의 관계를 나타내고 있으며, 그림에서 알 수 있듯이 김해점토와 군산점토 모두 일정한 관계를 보이는 것으로 나타났다. 김해점토의 경우 투수계수지수와 초기간극비의 경험적인 관계식 $C_k=0.5e_0$ 직선 상에 분포함을 관찰할 수 있다. 그러나 시험결과가 간극비와 투수계수지수의 경험적인 관계식을 만족한다 하더라도, 이 식을 이용하여 정확한 투수계수를 예측하기에는 다소 무리가 있으므로, 사용시 주의할 기을여야 한다고 판단된다. 군산점토의 경우 $C_k=0.34e_0$ 로 나타나 외국의 연구결과와 일치하지 않았다.

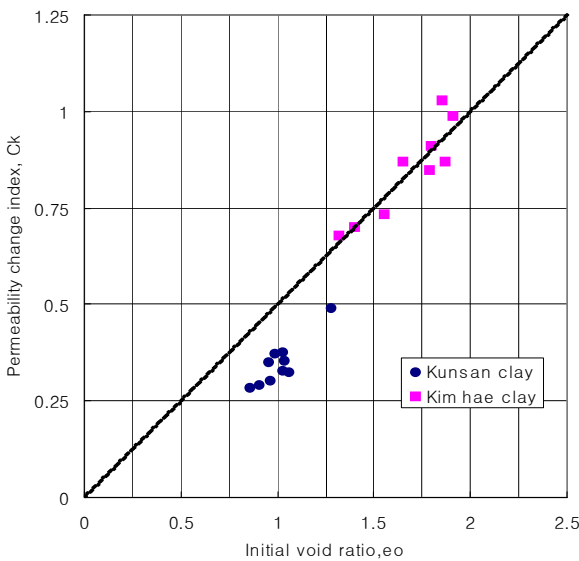
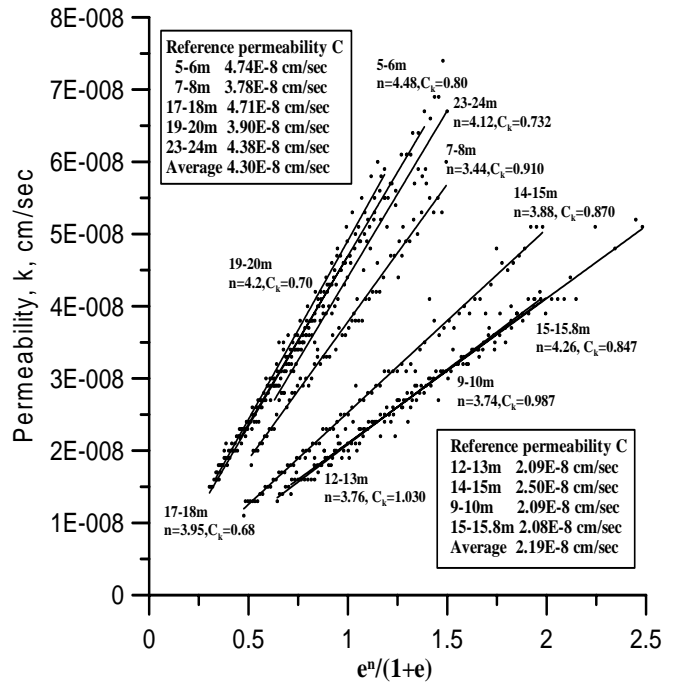


그림 7. 투수계수지수와 초기간극비의 관계

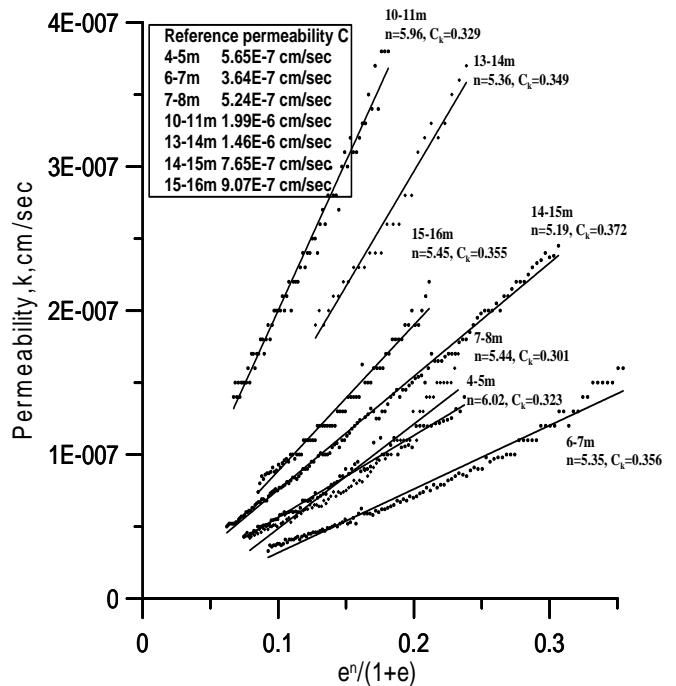
5.3 $\log e - \log k(1+e)$ 관계

5.1장에서 전술한 바와 같이 김해점토와 군산점토의 투수계수는 $e - \log k$ 관계뿐만 아니라 $\log e - \log k(1+e)$ 의 관계로도 표현되는 것으로 나타났으며, 그림 8에 나타나 있듯이 김해점토와 군산점토 모두 일반적인 변형률 내에서는 $\log e - \log k(1+e)$ 곡선이 선형의 관계를 보이는 것으로 나타났다.

분석결과 김해점토는 CRS 시험에서 구한 기준투수계수(reference permeability)는 $2.09 \sim 4.38 \times 10^{-8} \text{ cm/sec}$ 의 범위를 보이고 있다. 그리고 그림 8에서 볼 수 있듯이 두 그룹으로 나눌 수 있다. 즉 기준 투수계수 C의 범위가 $2.0 \sim 2.50 \times 10^{-8} \text{ cm/sec}$ 이고 평균이 $2.19 \times 10^{-8} \text{ cm/sec}$ 인 한 그룹과 C의 범위가 $3.78 \sim 4.74 \times 10^{-8} \text{ cm/sec}$ 이고



(a) 김해시료



(b) 군산시료

그림 8. $\log e - \log k(1+e)$ 관계

평균이 $4.30 \times 10^{-8} \text{ cm/sec}$ 인 그룹으로 나눌 수 있다. 위의 그림 8에서 볼 수 있듯이 7~8m의 경우를 제외하고는 일반적으로 작은 투수계수지수를 보이는 그룹은 큰 기준투수계수를 보

이고, 큰 투수계수지수를 보이는 그룹은 작은 기준투수계수를 갖는 경향이 있는 것으로 나타났다.

군산점토의 CRS 시험에서 구한 기준투수계수는 $0.239 \sim 7.54 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ 범위를 보이고 있다. 그러나 그림 8에서 시료 깊이 3~4m, 8~9m, 9~10m를 제외 시켰다. 그 이유는 시료 깊이 3~4m의 경우는 간극비가 크고 투수계수가 작기 때문이며, 8~9m, 9~10m는 반대로 간극비가 작고 투수계수가 크기 때문에 그림 8에서 나타난 7개의 시료에 대한 범위를 벗어나 제외 시켰다. 이러한 시료들을 제외한 기준투수계수의 범위는 $0.364 \sim 1.99 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ 범위를 보인다.

시료와 시험방법에 따라서 상이한 결과를 보이는 기준투수계수와는 다르게 n값은 모두 거의 비슷한 범위를 보이고 있다. 따라서 n값은 시료에 따라서 그 값이 크게 변하지 않는다고 판단된다. 즉 CRS 시험의 경우에는 김해점토는 3.74~4.48의 범위를 보이고 있으며, 군산점토의 경우에는 김해점토와 비해 n값의 범위는 4.71~6.58의 넓게 분포하고 있다. 3m, 8m, 9m를 제외 시킬 경우의 n값의 범위는 5.19~6.02 이다. 이러한 범위는 원인은 군산점토의 경우 김해점토의 비해 깊이에 따른 시료의 불균질이 더욱 크기 때문이라 판단된다.

김해점토와 군산점토의 n값과 C값을 구한 결과는 표 4에 나타난 바와 같다. 군산점토 n값과 C값이 김해점토보다 크게 나타나고 있다.

표 4. 김해점토와 군산점토의 n과 C 값

Type of test	Depth, m	C ($\times 10^{-8} \text{cm/sec}$)	n	Sample
CRS	5~6	4.74	4.48	김해
CRS	7~8	3.78	3.44	김해
CRS	12~13	2.09	3.76	김해
CRS	14~15	2.50	3.88	김해
CRS	17~18	4.71	3.95	김해
CRS	19~20	3.90	4.20	김해
CRS	9~10	2.09	3.74	김해
CRS	15~15.8	2.08	4.26	김해
CRS	23~24	4.38	4.12	김해
CRS	3~4	23.9	4.71	군산
CRS	4~5	56.5	6.02	군산
CRS	6~7	36.4	5.35	군산
CRS	7~8	52.4	5.44	군산
CRS	8~9	402	6.58	군산
CRS	9~10	754	6.54	군산
CRS	10~11	199	5.96	군산
CRS	13~14	146	5.36	군산
CRS	14~15	76.5	5.19	군산
CRS	15~16	90.7	5.45	군산

6. 결 론

김해지역과 군산지역에서 채취된 불교란 시료를 이용하여 일정변형률 압밀시험(CRS test)을 수행하여 김해점토와 군산점토의 간극비와 투수계수와의 관계를 규명하였으며, 이들 실험결과에 근거하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

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

2. 김해점토와 군산점토의 간극비와 투수계수와의 관계는 $e - \log k$, $\log e - \log k$, 그리고 $\log e - \log k(1 + e)$ 의 세 관계 모두 일정 변형률 범위 내에서 선형의 관계를 보이는 것으로 나타났으며 따라서 이들 관계식의 국내 연약점토에 대한 적용이 가능한 것으로 판단된다.

3. 김해점토와 군산점토의 투수계수지수(Permeability change index, C_k)는 각각 0.68~1.030과 0.290~0.489의 범위를 보이며 평균값은 0.821과 0.345인 것으로 나타났으며, 초기간극비와 투수계수지수의 경험적인 관계식($C_k = 0.5e_0$)은 김해점토에는 유효하나 군산점토의 경우에는 유효하지 않은 것으로 나타났다.

4. 김해점토와 군산점토의 $\log e - \log k(1 + e)$ 관계에서 각각 n값은 3.74~4.48와 4.71~6.58의 범위를 보이며, C(reference permeability)값은 $2.09 \sim 4.74 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$ 와 $2.39 \times 10^{-7} \sim 7.54 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ 의 분포를 보였다. 군산점토의 경우 n값과 C값이 김해점토보다 크게 나타났는데 이러한 원인은 군산점토의 경우 실트질이 김해점토보다 다량함유 되어있기 때문이라고 생각되어진다.

감사의 글

본 연구는 1999년도 한국학술진흥재단에 의하여 지원되었으며(KRF-99-042-E00145), 연구비 지원에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

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 Akadamie der Wissenschaften in Wien, Abteilung IIa, p. 136.
3. Kim, D. H. (2000), Evaluation of permeability characteristics of Kimhae clay by laboratory test, M.S.C.E. Thesis, Korea University.
4. Little, J. A., Muir W. 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.
5. Mesri, G., Feng, T. W., Ali, S., and Hayat, T. M.(1994), Permeability characteristics of soft clays, XIII ICSMFEE, Delhi, India, pp. 187~192.
6. Mesri, G. and Olson, R. E.(1971), Mechanisms controlling the permeability of clays. Clays and Clay Minerals, Vol. 19, pp. 151~158.
7. Mesri, G. and Rokhsar, A. (1974), Theory of consolidation for clays. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 100, No. GT8, pp. 889~903.
8. 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.
9. Taylor, D. W.(1948), Fundamentals of soil mechanics. John Wiley & Sons Inc., New York, p. 700.
10. 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 Engineering, ASCE, Vol. 108, GT6, pp. 835~850.
11. 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.
12. Tavenas, F., Jean, P., Leblnd, P., and Leroueil, S.(1983), The permeability of natural soft clay. Part II : Permeability characteristics. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 20, pp. 645~660.
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 Foundation Division, ASCE, Vol. 97, No. SM10, pp. 1393~1413.