

실내실험에 의한 부산점토의 투수특성

Permeability Characteristics of Pusan Clay from Laboratory Tests

정 성 교¹ Chung, Sung-Gyo
E. Ninjarav³

장 우 영² Jang, Woo-Young
김 성 렬⁴ Kim, Sung-Ryul

Abstract

Pusan clay, which is distributed in the Nakdong River estuary, is unusually soft and thick compared with other clays in the world. Because the consolidation settlement of the clay was significantly underestimated in several recent reclamation projects, it has been emphasized particularly on the need of studying the permeability characteristics. This study carries out vertical and horizontal permeability tests on undisturbed and consolidated samples from two sites of the area. The results of the study show the peculiar permeability anisotropy and the relationships with other indexes on Pusan clay and also comparison with those of other world clays.

요 지

낙동강 하구지역에는 세계적으로 드물게 연약한 부산점토가 두껍게 분포하고 있다. 최근의 지반개량공사에서 압밀 침하에 대한 과소평가 문제가 발생하여 이 점토의 투수특성에 대한 연구가 절실히 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 그 점토의 투수특성을 규명하기 위한 목적으로 낙동강 하구의 두 지역을 연구대상현장으로 선정하여 불교란 시료 채취를 실시하고 이 시료에 대하여 자연점토는 물론 연직 및 수평배수 압밀실험 중에 실내 변수두 투수실험에 의하여 연직 및 수평 투수계수를 측정하였다. 이 결과로부터 자연상태 및 압밀상태 하에서의 투수계수, 투수 이방성 및 그들의 상관관계 규명은 물론 해외의 다른 점토들에 대한 투수특성과의 비교를 수행하였다.

Keywords : Anisotropy, Correlation, Laboratory test, Permeability, Pusan clay

1. 서 론

낙동강 하구지역에서는 세계적으로 희귀하게 연약한 점성토가 두껍게 분포하고 있다. 1990년대 초부터 이 지역에서는 부산신항, 주거 및 공업단지조성을 위하여 지반개량을 통한 대단위 조성공사가 이루어졌으며, 이를 위하여 수많은 지반조사가 실시되었고 현재에도 활발히 실시되고 있는 실정이다. 그러나, 이 지역에서는 연약점성토가 아주 두껍고 그 특성의 변화가 커서 이

지역을 대표할 수 있는 토질특성을 아직까지 명쾌히 규명하지 못하고 있는 실정이다. 이와 같은 이유들로 인하여 매립공사와 부지조성공사 시에 예상보다 매우 큰 침하가 발생하였으며, 또한 침하시간도 예측시간보다 상당히 오래 소요되었다(Chung, 1999). 이 결과, 조성된 부지에 사용자의 입주시기가 훨씬 늦어지게 되어 큰 사회적인 문제가 되기도 하였다. 따라서 부산점토에 대한 침하시간 예측을 효과적으로 수행하기 위하여 압밀시간을 지배하는 주된 영향인자인 투수성에 대

1 정희원, 동아대학교 토목공학부 교수 (Member, Prof., Dong-A Univ., School of Civil Engrg.)

2 정희원, 동아대학교 건설기술연구소 특별연구원 (Member, Researcher, Institute of Construction Technology and Urban Planning, Dong-A Univ., jwy1357@hanmail.net, 교신저자)

3 전 동아대학교 토목공학부 박사과정생, 몽골 울람바트 공과대학 토목공학과 조교수 (Associate Prof., Mongolian Univ. of Science and Technology)

4 정희원, 동아대학교 토목공학부 전임강사 (Member, Full-time lecturer, Dong-A Univ., School of Civil Engrg.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

한 체계적인 연구가 절실히 요구되고 있다.

점성토지반에서 간극수 흐름에 대한 공학적인 문제를 해석하기 위하여 일반적으로 투수성에 대한 두 종류의 정보, 즉 점성토의 구조가 보존된 자연상태에서의 투수계수(k)와 그의 이방성 그리고 압밀진행에 따른 k 의 변화 경향을 파악하는 것이 필요하다. 이들을 위하여 해외 연구사례(Jacobson, 1955; Raymond and Azzouz, 1969; Casagrande and Poulos, 1969; Abelev, 1973; Amar and Duput, 1973; Chan and Kenny, 1973; Mesri and Rokhsar, 1974; Goodall and Quigley, 1977)가 상당히 존재하고 있지만, 국내의 점성토에 대해서는 그러한 연구는 물론 그들과의 비교연구 성과도 많지 않다.

따라서 본 연구에서는 부산점토의 투수특성을 규명하기 위하여 낙동강 하구에 위치하는 부산신항만(BNP)과 화전(HJ) 지역을 연구대상 현장으로 선정하였다. 현장 투수성 및 압밀에 따른 투수성의 변화를 규명하기 위하여 정교한 시료채취기술에 의하여 불교란 시료를 채취하여 각종 실내 투수시험을 수행하였다. 이 결과들에 대한 분석을 통하여 대상현장에서의 부산점토에 대한 투수특성을 규명하였으며, 아울러 해외의 다른 점토들의 투수특성과의 비교연구가 이루어졌다.

2. 연구대상 현장

본 연구에서 선정한 연구대상 현장은 낙동강 하구역의 서측 연변에 위치하고 있는 부산신항만 건설공사가 수행중인 부산신항(BNP)지역과 화전산업단지(HJ) 조성부지이며, 두 현장의 시추공 번호 N-1과 BH-9에서 각각 불교란 시료채취가 이루어졌다.

실내실험을 위한 불교란 시료채취는 동아 코어튜브(Chung, 2005)에 의하여 채취하였으며, 대상시료에 대한 시료 교란도는 기존의 연구결과(정성교 등, 2006)에서

양호한 시료임이 밝혀졌다. 연구대상 현장의 위치를 그림 1에 나타내었다. 대상현장의 물리적 특성은 상·하부점토층으로 구분하여 표 1에 요약하였다.

3. 실험 장치 및 방법

낙동강 하구의 BNP 및 HJ지역에서 채취된 시료에 대하여 실내 변수투 투수시험을 압밀실험 중에 실시하였다. 압밀실험은 연직 및 수평배수에 의하여 각각 수행되었으며, 하중증가비가 1.0이고 각 하중단계에서 24시간 동안에 재하되었다. 그림 2와 3은 연직 및 수평배수 압밀시험 중에 변수투 투수시험을 실시할 수 있는 장치의 개요를 나타낸 것이다. 여기서 사용된 압밀실험장치는 윤찬영 등(2002)에 의하여 개발된 것이다. 각 재하 하중마다 압밀이 종료된 시점(24시간 후)에서 변수투 투수시험을 수행하였다. 사용된 뷰렛의 직경은 5mm이며, 초기 수두는 100cm를 유지하였다. 투수시험 중에는 뷰렛

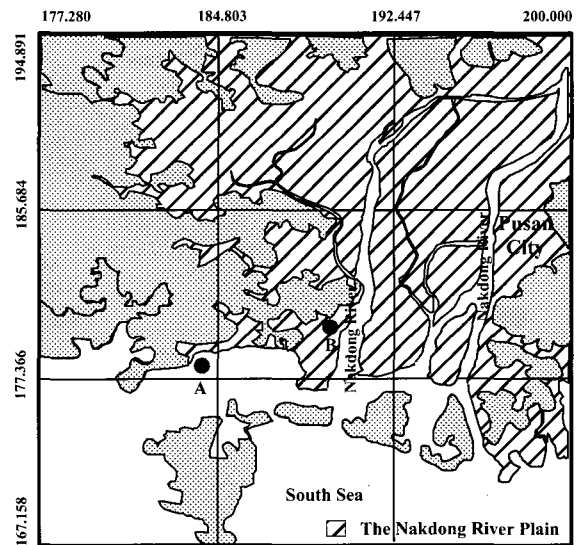


그림 1. 연구 대상현장의 위치

표 1. 연구대상 현장의 물리적 특성

토질특성	BNP(N-1)		HJ(BH-9)	
	상부점토층 (upper 30m)	하부점토층 (below 30m)	상부점토층 (upper 30m)	하부점토층 (below 30m)
함수비(%)	30~77	21.4~38.8	48.53~73.49	37.44~45.17
비중	2.72~2.78	2.65~2.77	2.61~2.69	2.61~2.70
단위중량(kPa)	15.4~17.7	18.3~20.7	15.5~17.7	17.6~18.3
간극비	0.97~2.14	0.52~1.03	1.23~1.93	0.96~1.16
액성한계(%)	36.86~72.9	30.94~48.1	45.36~63.14	41.68~50.82
소성한계(%)	19.33~40.35	14.68~23.56	22.71~35.75	19.91~29.81

속의 물이 증발되는 것을 방지하기 위하여 약간의 기름을 떨어뜨렸다. 실험에 의한 연직 및 수평 투수계수, k_v 와 k_h 는 다음의 식으로부터 얻어진다(Giampaolo and Paolo, 2001).

$$k_v = \frac{aL}{A} \frac{1}{t_2 - t_1} \ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right) \quad (1)$$

$$k_h = \frac{aL}{2\pi L(t_2 - t_1)} \ln\left(\frac{R_e}{R_i}\right) \ln\left(\frac{h_0}{h_1}\right) \quad (2)$$

여기서, L =배수 거리; a =뷰렛의 단면적; A =시료의 단면적; R_i =시료의 내부직경; R_e =시료의 외부직경; h_0 와 h_1 은 t_1 과 t_2 시간에서 각각의 수두.

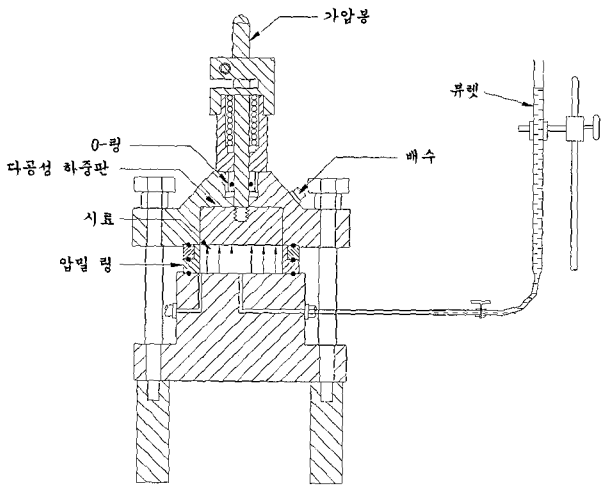


그림 2. 연직배수 압밀시험 및 투수시험 장치

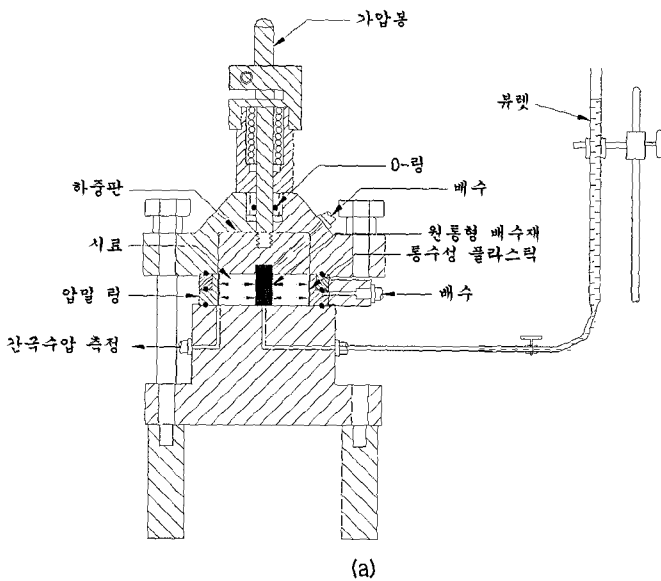


그림 3. 수평배수 압밀시험 및 투수시험 장치: (a) 압밀-투수시험 장치도 (b) 압밀링의 상세도

4. 현장상태의 투수성

4.1 연직 및 수평투수계수

실내투수시험으로부터 얻어진 BNP지역의 시추공 N-1과 HJ지역의 BH-9에서의 초기 연직 및 수평투수계수 (k_{v0} 와 k_{h0})를 초기간극비(e_0) 및 피에조콘 관입 저항치 (q_c)와 함께 심도에 따라 나타내면 그림 4와 같다. BNP지역(N-1)의 k_{v0} 는 깊이에 따라 거의 일정한 분포를 보이고 있으며, 그 범위는 $2.11 \times 10^{-9} \sim 1.39 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 로 나타났다. k_{h0} 는 30m이전의 상부점토층에서는 일정한 분포를 보이고 있으나 30m 이후에서는 증가하는 경향을 보이고 있다. BNP지역(N-1)의 k_{h0} 의 분포범위는 $2.47 \times 10^{-8} \sim 1.01 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 의 특징을 보였다. HJ지역(BH-9)의 k_{v0} 와 k_{h0} 는 깊이에 따라 약간 증가하고 있으며, $k_{v0} = 8.63 \times 10^{-10} \sim 8.12 \times 10^{-8} \text{ m/s}$, $k_{h0} = 1.92 \times 10^{-9} \sim 9.38 \times 10^{-9} \text{ m/s}$ 의 범위로 얻어졌다.

Kozeny(1927)와 Carman(1956)는 흙의 투수성에 미치는 하나의 주된 요소가 간극비라는 것을 처음으로 보고하였다. Tavenas 등(1983)는 Louisville점토에 대한 $\log k_{v0} - e_0$ 관계에서 e_0 가 감소함에 따라 k_{v0} 도 감소한다고 하였다. 그림 5에서는 연구 대상지반의 점성토에 대하여 k_{v0} 와 e_0 의 상관관계를 세계의 다른 점토들(Tavenas 등, 1983; Tanaka 등, 2003)과 비교하여 나타내었다. 그림에서 보면, 대상지반(BNP와 HJ)의 k_{v0} 는 e_0 의 크기와 관계 없이 거의 일정하게 나타나는 특징을 보여주고 있는데, 이

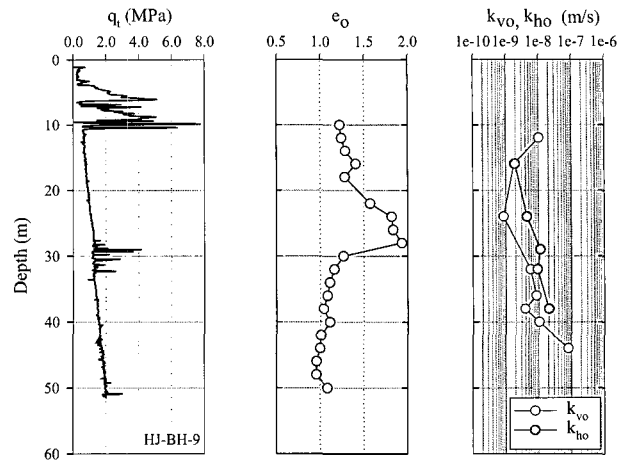
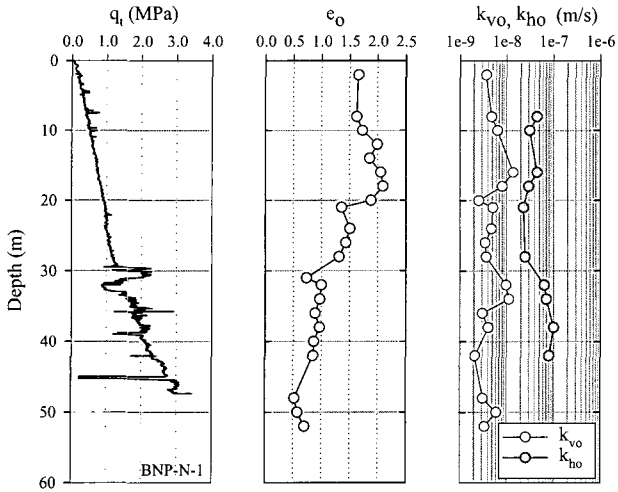


그림 4. 초기 투수계수의 분포: (a) BNP지역(N-1); (b) HJ지역(BH-9)

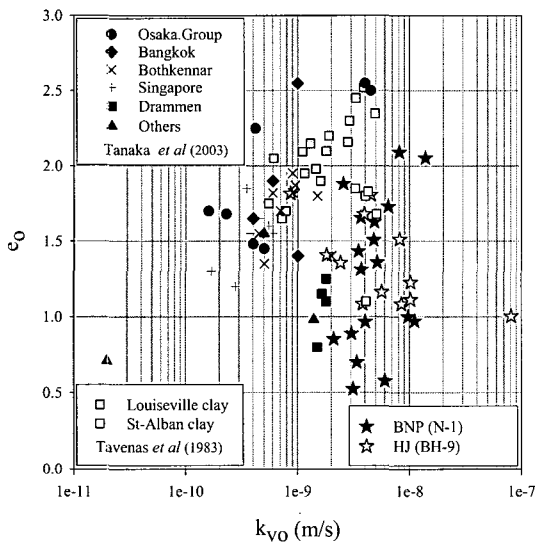


그림 5. k_{vo} 와 e_0 관계

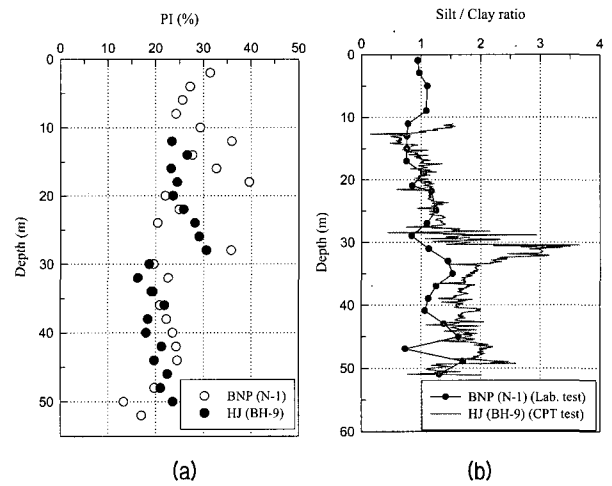


그림 6. 심도에 따른 소성지수 및 입도 분포 (a) 소성지수 분포 (b) 실트/점토 분포

는 일반적인 경향과 매우 상이한 결과이다. 이와 유사한 경향은 Drammen, St-Alban, Singapore 그리고 Bothkennar 점토 등에서 볼 수 있듯이 지반조건과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다(Tavenas 등, 1983). 그림 6에서 보면, BNP지역(N-1)과 HJ지역(BH-9)에서는 깊이가 증가 할수록 점토함유량이 감소하거나 소성지수(PI)가 감소하여 점차 실트 함유량이 증가하고 있다. 그 결과, 간극의 모양 또는 형상의 변화로 인하여 간극비의 감소가 투수성에 미치는 영향이 상대적으로 작아져서 k_{vo} 가 깊이 또는 간극비에 무관하게 일정하게 나타난 것으로 판단된다. 따라서, 균질한 지층이 아닐 경우 일반적으로 k_{vo} 와 e_0 의 관계는 상관성이 크게 없을 것으로 예측된다.

4.2 투수 이방성

자연 퇴적점토는 근본적으로 투수 이방성을 가지게 된다. 그림 7에서는 연구대상지반에 대한 투수 이방성비 ($r_{ko}=k_{ho}/k_{vo}$)을 깊이에 따라 나타내었다. BNP지역(N-1)의 r_{ko} 분포는 상부점토층(30m이전)에서 3.25~9.32로 나타났으며, 하부점토층(30m이후)에서는 5.51~37.91로 상부점토층보다 상대적으로 크게 나타났다. HJ지역(BH-9)에서는 하부점토층에 대한 실험 수량이 적어서 상·하부 점토층의 투수이방성을 직접적으로 비교하기에 다소 어려움은 있으나 하부점토층에서 r_{ko} 가 약간 크게 나타나는 경향을 볼 수 있다. HJ지역(BH-9)에 대한 r_{ko} 는 전반적으로 1.65~5.28의 범위로 나타나며, BNP(N-1)의 경우

에 비하여 전 깊이에 걸쳐 다소 작았다. 즉, BNP지역과 HJ지역은 위치상 서로 인접하고 있으나, 그림 7에서 볼 수 있는 바와 같이 두 점토의 투수이방성은 서로 상이함을 나타내고 있다.

BNP지역의 투수이방성이 특히 하부점토층(30m이후)에서 상당히 크게 나타나고 있다는 것이 흥미롭다. Lerouiel & Hight(2001)는 일반적으로 과압밀점토가 연약한 해성점토보다 큰 투수이방성을 나타내며, 그 이유

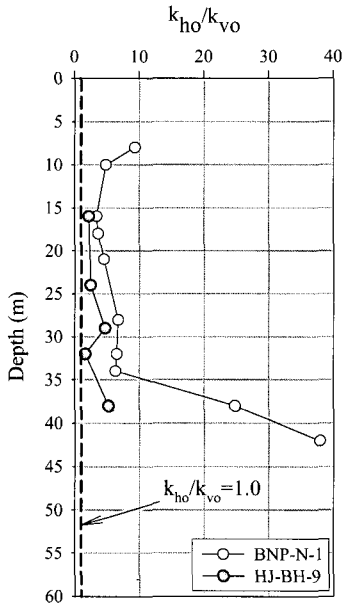


그림 7. 심도에 따른 투수 이방성의 분포

는 유효응력의 증가함에 따라 점토입자들이 수평방향으로 배열되기 때문이라고 설명하였다. BNP지역의 상부점토가 높은 해수면 하에서 퇴적됨에 따라 높은 염분도와 함께 흙 입자의 구조가 잘 발달되어 상대적으로 면모구조를 가지는 반면에, 하부점토는 담수의 영향을 크게 받아 퇴적되었으며 과압밀된 것을 감안하면 점토구조가 분산구조일 것으로 추정할 수 있다. 그러나 하부점토에서 투수이방성이 6.0보다 크게 나타나는 원인은 위에서 기술된 퇴적환경이라기 보다는 점토층 내에 포함된 sand seams의 영향으로 기인된 것으로 판단된다.

연구 대상지반의 투수 이방성을 다른 나라의 점토들과 비교하여 그림 8에 나타내었다. 그림에서 보면, BNP 지역 및 HJ지역의 투수 이방성은 다른 나라의 해성점토보다 약간 큰 값을 가지고 있으며 호상(varved)점토와 유사한 특징을 보이고 있다. 즉, 호상점토를 제외한 세계의 다른 점토들은 이방성이 아주 낮은 반면에 부산점토와 호상점토는 큰 이방성을 보여주고 있다.

5. 압밀과정 중의 투수성

5.1 간극비 변화에 따른 투수계수의 변화

Kozeny(1927)와 Carman(1956)는 이론적인 접근에 의하여 다공질체의 투수성이 간극의 크기, 모양 그리고 분

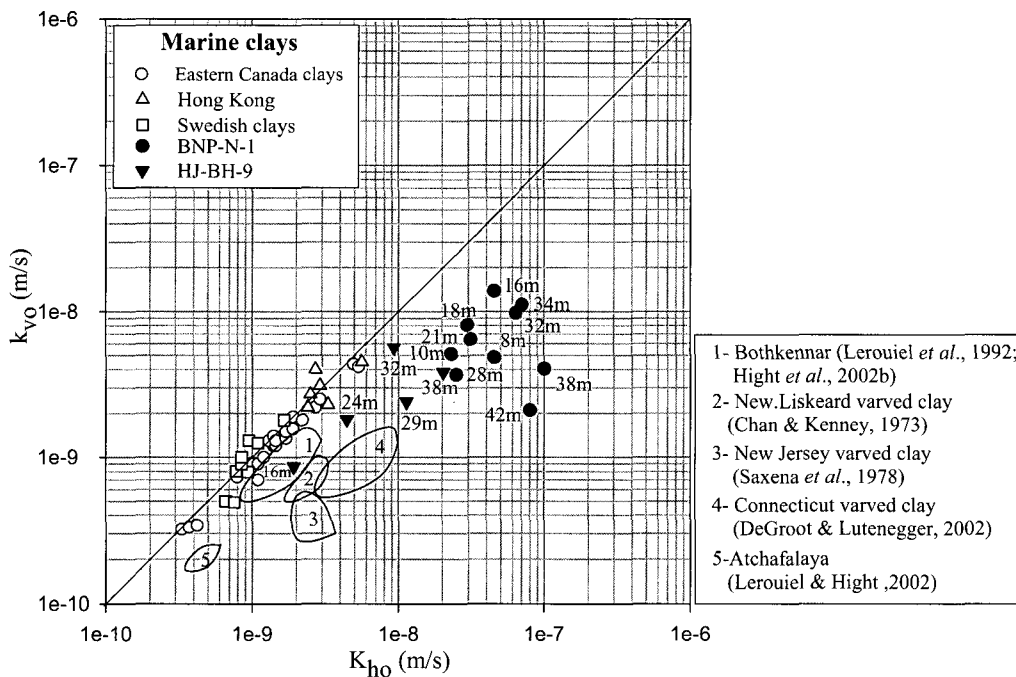


그림 8. 여러 점토들의 투수이방성의 비교

포와 밀접한 관계가 있다는 것을 식 (3)과 같이 나타내었다.

$$k = \frac{1}{K_o T^2 S_o^2} \frac{\gamma}{\mu} \frac{n^3}{(1-n)^2} \quad (3)$$

여기서, k =투수성, K_o =간극의 형상계수, T =배수경로의 변형, S_o =흡 입자의 비표면, n =흡의 간극률, γ =침투유체의 밀도, 그리고 μ =침투유체의 점성.

그러나 Taylor(1948)는 식 (3)이 모래에 대해서만 적용될 수 있으며, 점토지반에는 적용할 수 없음을 규명하였다. 이를 극복하기 위하여 Taylor(1948)는 $\log k$ 와 간극비(e) 사이의 경험적인 직선관계를 식 (4)와 같이 제안하였다.

$$\log k = \log k_o - \frac{e - e_o}{C_k} \quad (4)$$

여기서, C_k 는 투수계수 변화지수이며, k_o 와 e_o 는 현상상태의 값이다. 식 (4)는 점토지반에 대한 간극비에 따른 투수계수의 변화 관계를 나타내는 가장 일반적인 형태이다. 그리고 Mesri and Rokhsar(1974)는 실제에서 흔히 볼 수 있는 간극비의 변화 범위에 대해서는 위의 식이 적합하다고 지적하였다.

한편, Mesri and Oslon(1971)은 매우 넓은 범위로 간극비가 변화할 때에는 식 (4)가 적합하지 않을 것으로 판단하여 식 (5)와 같이 $\log k$ 와 $\log e$ 사이의 선형적인 관계를 제안하기도 하였다.

$$\log k = A \log e + B \quad (5)$$

식 (3)~(5)는 주로 재구성 시료를 이용한 실험으로부터 얻어졌으며, Tanvenas 등(1983)은 자연시료에 대한 많은 연구를 수행하여 위와 유사한 결과를 얻었다.

그림 9에서는 낙동강 하구지역의 부산점토에 대한 간극비에 따른 투수계수의 변화에 대한 상관성을 분석하기 위하여 BNP지역의 점토(21m)에 대하여 압밀 중에 얻어진 간극비와 투수계수의 변화를 $e-\log k$ 와 $\log e-\log k$ 의 관계로 각각 나타낸 대표적인 결과를 보여주고 있다. 그림에서 나타난 바와 같이, 점토가 압축되어 간극비가 감소할 때, $e-\log k$ 관계곡선의 경우에는 투수계수가 직선적으로 감소하고 있는 반면, $\log e-\log k$ 관계곡선의 경우에는 완만한 곡선의 형태를 보이고 있다. 이러한 경향을 확인하기 위하여 그림 10과 11에서는 두 현장의 전

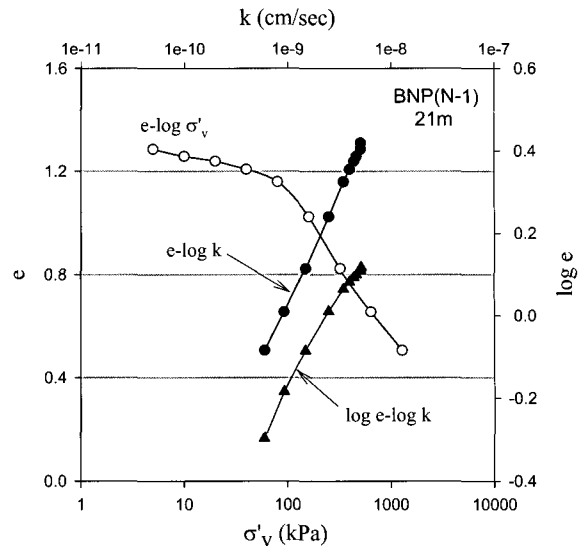


그림 9. 간극비 감소에 따른 투수계수의 변화

깊이의 시료에 대하여 간극비에 따른 연직 및 수평투수계수의 변화를 나타낸 것이다. 이 그림에서 보면, 두 지역 모두 대부분의 결과들이 $e-\log k$ 관계곡선에서는 거의 직선적인 관계를 볼 수 있지만, $\log e-\log k$ 관계는 전자에 비하여 완만한 곡선의 형태를 나타낸다는 것을 확인할 수 있다.

따라서 본 연구의 대상지반에 대한 간극비 - 투수계수의 상관식은 $e-\log k$ 관계를 근거로 한 식 (4)를 사용하는 것이 타당한 것으로 판단된다. 무엇보다 식 (4)는 투수계수의 변화를 초기조건(e_o, k_o)으로 표현할 수 있으며, 투수계수변화지수 C_k 는 실험에 의해서 비교적 용이하게 얻을 수 있다. 또한 $e-\log k$ 의 관계는 대부분의 연약 점토 지반에서 20%이내의 변형률 범위에 대한 투수계수의 변화 거동을 매우 잘 표현한다고 보고되었다(Mesri and Rokhsar, 1974; Mesri and Tavenase, 1983). 여기서 변형률 20%는 실제 지반공학적 문제에서 발생하는 대부분의 범위이며, 그림 8과 9의 실험결과는 모두 변형률이 20%보다 작다.

5.2 투수계수변화지수(C_k)

투수계수변화지수 C_k 는 $e-\log k$ 관계에서 기울기로 정의된다. 기존의 연구에 의하면 C_k 와 e_o 는 좋은 상관성이 있는 것으로 알려지고 있다(Tavenas 등, 1983). 그림 12에서는 낙동강 하구의 부산점토에 대한 C_k 와 e_o 의 관계를 기존의 연구결과와 비교하여 나타내었다. C_k 와 e_o 의 관계는 그림에서와 같이 분산된 결과를 포함하고 있으

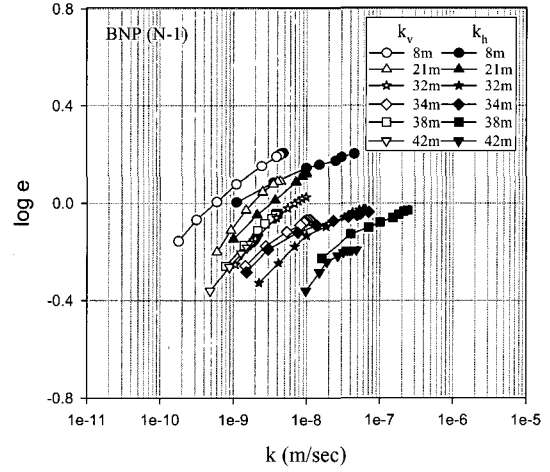
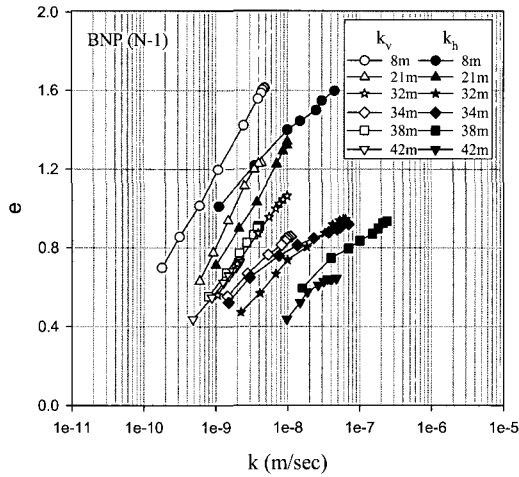


그림 10. BNP지역에 대한 간극비 - 투수계수의 관계

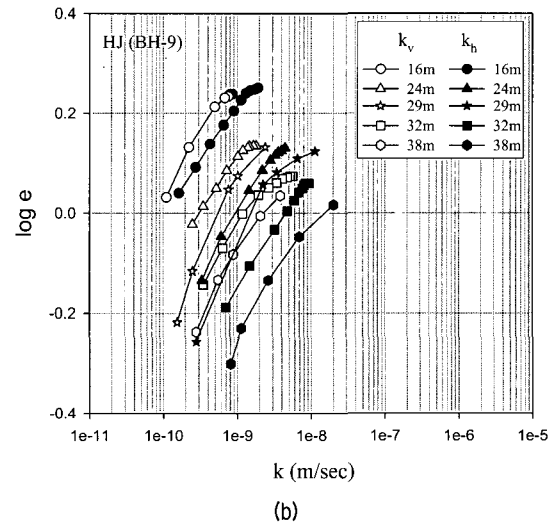
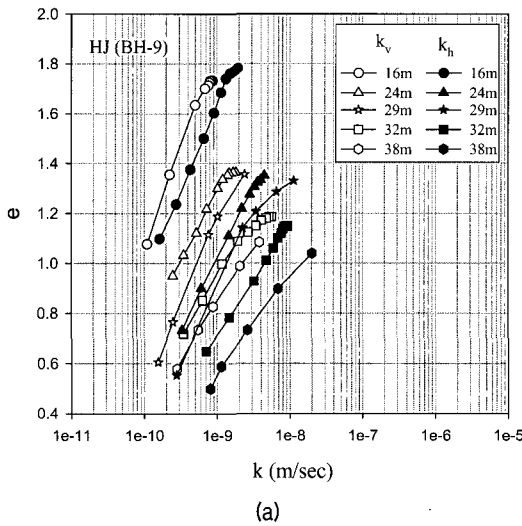


그림 11. HJ지역에 대한 간극비 - 투수계수의 관계

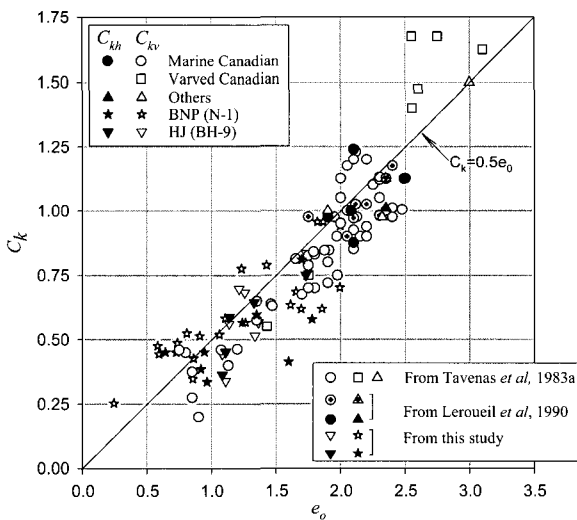


그림 12. C_k 와 e_o 의 관계

나, 전체적으로 $C_k = 0.5e_o$ 을 만족하는 직선적인 관계가 있음을 확인할 수 있다. 이러한 결과로부터, Taylor(1948)가 경험적으로 제안한 식 (4)에 의해 식 (6)과 같이 부산점토에 대한 간극비와 투수계수의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\log k = \log k_o - 2\left(\frac{e}{e_o} - 1\right) \quad (6)$$

5.3 압밀과정 중의 투수이방성

앞 절에서는 연구대상지반에 대한 현장상태의 투수성은 명확하게 투수 이방성을 가지는 것을 확인하였으며, 특히 30m이하의 하부점토층에서 큰 이방성을 보였다. 여기서는 부산점토에 대한 C_k 의 이방성을 평가하였다.

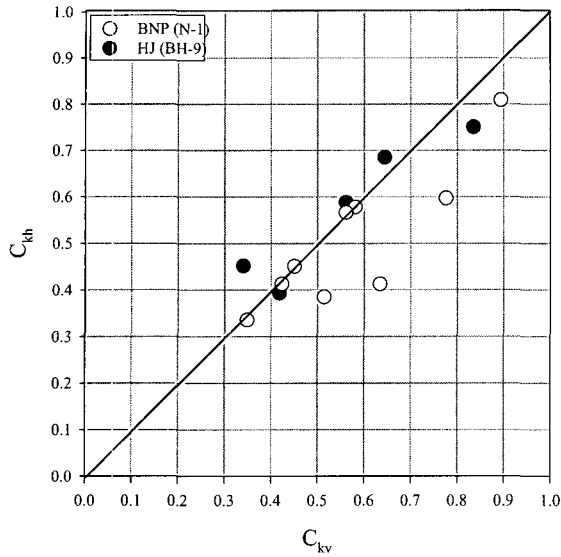


그림 13. C_{kh} 와 C_{kv} 의 비교

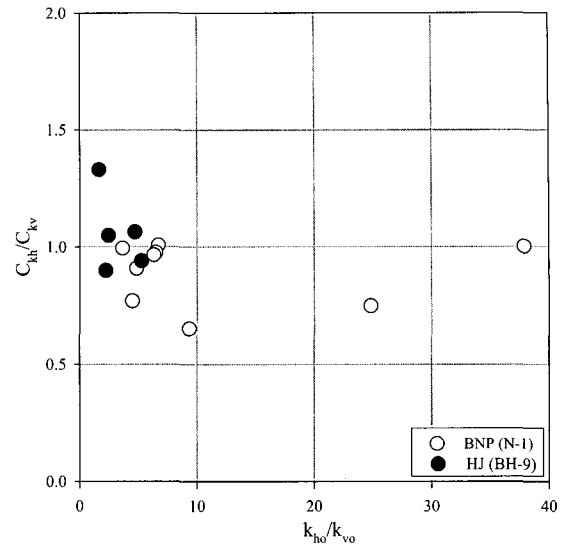


그림 15. C_{kh}/C_{kv} 와 k_{ho}/k_{vo} 의 비교

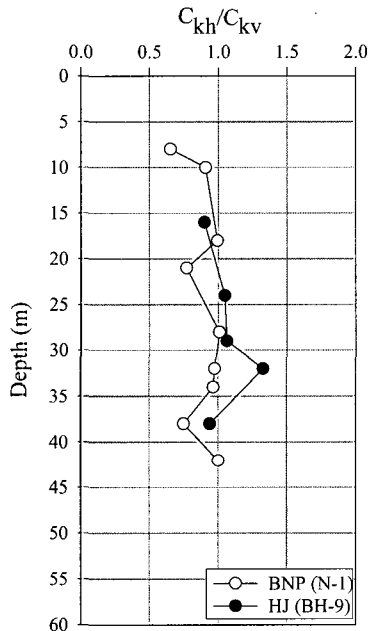


그림 14. 깊이에 C_{kh}/C_{kv} 따른 의 분포

즉, 압밀 중에 투수 이방성의 변화를 조사하였다. 그림 13은 대상지반의 C_{kv} 와 C_{kh} 를 비교한 것이다. 그림에서 보면, C_{kv} 가 약간 크게 나타난 것도 있으나, 전반적으로 C_{kv} 와 C_{kh} 가 거의 유사하게 나타났다. 이와 같은 결과는, 부산점토의 초기투수계수 k_{vo} 와 k_{ho} 는 명확하게 이방성을 가지고 있을지라도, 간극비 감소에 따른 투수계수의 변화는 연직과 수평방향의 서로 유사한 기울기로 변화한다는 것을 의미한다.

BNP지역(N-1)과 HJ지역(BH-9)에 대하여 깊이에 따른 C_{kh}/C_{kv} 를 그림 14에 나타내었다. 그림 13에서 이미 알 수 있었던 바와 같이, 일부 심도를 제외하고는 두 지역 모두 대부분의 C_{kh}/C_{kv} 가 심도에 무관하게 거의 일정하게 분포하고 있다. 그림 15은 대상지반의 C_{kh}/C_{kv} 와 k_{ho}/k_{vo} 를 비교한 것이다. C_{kh}/C_{kv} 는 k_{ho}/k_{vo} 의 크기와 무관하게 평균 0.94의 값을 가졌다. 이러한 결과로부터, 압밀에 의해서 연직 및 수평투수계수의 변화가 서로

표 2. BNP지역(N-1)과 HJ지역(BH-9)에 대한 C_{kh}/C_{kv} 및 k_{ho}/k_{vo}

BNP(N-1)			HJ(BH-9)		
심도(m)	k_{ho}/k_{vo}	C_{kh}/C_{kv}	심도(m)	k_{ho}/k_{vo}	C_{kh}/C_{kv}
8	9.32	0.65	16	2.22	0.90
10	4.84	0.91	24	2.45	1.05
18	3.66	0.99	29	4.71	1.06
21	4.41	0.77	32	1.65	1.33
28	6.71	1.01	38	5.28	0.94
32	6.51	0.98			
34	6.33	0.97			
38	24.80	0.75			
42	37.91	1.00			

유사한 기울기로 감소하기 때문에 간극비가 감소하여도 투수계수의 이방성은 여전히 초기와 유사한 이방성을 가진다는 사실을 확인할 수 있다. Saint-Esprit 해성점토에 대한 연구에서도 이와 유사하게 유효연직응력에 따라 투수이방성이 변화하지 않는 사실이 보고된 바 있다(Leroueil 등, 1990). BNP지역(N-1)과 HJ지역(BH-9)에 대한 C_{kh} / C_{kv} 및 k_{ho} / k_{vo} 는 표 2에 비교하여 나타내었다.

5. 결론

낙동강 하구지역의 부산신항만(BNP) 및 화전지역(HJ)의 부산점토에 대한 투수특성을 규명하기 위하여 자연상태의 점토를 대상으로 연직 및 수평방향에 대한 실내 투수시험을 수행하였으며, 또한 연직 및 수평배수 압밀 진행 중에 동일한 투수시험을 실시하였다. 그 결과는 다른 나라의 점토들과 비교되었다. 이 분석결과로부터 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- (1) BNP지역(N-1)의 자연상태의 연직투수계수 k_{vo} 는 깊이 따라 거의 일정한 분포를 보였으며, 그 범위는 $2.11 \times 10^{-9} \sim 1.39 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 로 나타났다. 수평투수계수 k_{ho} 는 30m위에서는 일정한 분포를 보였으나 30m아래에서 증가하는 경향을 나타내었으며, 그의 크기는 $2.47 \times 10^{-8} \sim 1.01 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 로 얻어졌다. HJ지역(BH-9)의 k_{vo} 와 k_{ho} 는 깊이에 따라 약간 증가하였으며, $k_{vo} = 8.63 \times 10^{-10} \sim 8.12 \times 10^{-8} \text{m/s}$, $k_{ho} = 1.92 \times 10^{-9} \sim 9.38 \times 10^{-9} \text{m/s}$ 의 범위로 나타났다. 두 지역의 k_{vo} 는 e_o 에 무관하게 거의 일정하게 나타났는데, 이러한 원인은 깊이에 따라 실트함량이 변하기 때문이었다. 또한 부산점토의 k_{vo} 는 세계의 다른 점토에 비하여 크게 나타나고 있다.
- (2) BNP와 HJ지역은 인접하고 있으나 자연점토의 투수계수 및 투수이방성은 상이하였다. 흙의 퇴적환경에서 비롯되는 구조 및 구성물질의 차이로 인하여 BNP지역(N-1)의 투수이방성은 30m아래의 하부점토층에서 상대적으로 크게 나타났다. 두 지역의 투수이방성 r_{ko} 는 BNP지역(N-1)에서 3.25~37.91, HJ지역(BH-9)에서 1.65~5.28의 범위 내에서 깊이에 따라 변하였다. 그리고 부산점토의 투수이방성 r_{ko} 은 다른 나라의 해성점토보다 약간 크게 나타났으며, 호상(varved)점토와 유사한 특징을 보였다.
- (3) 압밀 중에 간극비에 따른 투수계수의 변화는 $\log e$

- $\log k$ 관계가 곡선으로 나타나는 반면에 $e - \log k$ 관계는 좋은 직선성을 보였다. 이 직선의 기울기로 정의되는 투수계수변화지수 C_k 와 e_o 의 관계는 다소 분산된 결과를 포함하고 있으나 대체로 $C_k = 0.5e_o$ 을 만족하였다. 따라서 부산점토에 대하여 다음의 관계식을 적용할 수 있었다.

$$\log k = \log k_o - 2\left(\frac{e}{e_o} - 1\right)$$

- (4) 압밀진행 중에 투수 이방성의 변화는 압밀배수 형태에 무관하게 서로 유사한 기울기로 감소하였다. 즉, 간극비가 감소하여도 투수계수의 이방성은 여전히 초기(k_{ho} / k_{vo})와 유사한 이방성을 가졌다. 그리고 투수계수변화지수의 이방성 C_{kh} / C_{kv} 은 두 지역 모두에서 심도 및 k_{ho} / k_{vo} 의 크기와 무관하게 거의 일정하게 약 0.94의 값으로 나타났다.

실내시험에 의한 투수성의 평가에 대한 결과는 시료 교란의 영향이 배제 될 수 없으며, 시료의 크기가 상대적으로 너무 작기 때문에 실제 지반의 투수특성을 완전히 재현하기에는 어느정도 오차를 포함하고 있는 것으로 판단된다. 따라서 향후 현장 투수특성을 보다 합리적으로 규명하기 위해서는 원위치 시험과 병용하여 연구되는 것이 바람직할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원(건설핵심기술연구개발사업) 및 한국과학재단연구비(No.R01-2003-000-10375-0)의 지원 하에 수행되었음을 밝히며, 이에 감사함을 표한다.

참고 문헌

1. 정성교, 장우영, E. Ninjarav, 류춘길 (2006), “낙동강 하구지역의 부산점토의 퇴적환경에 따른 압축특성”, 한국지반공학회 논문집 (제22권 12호 게재예정).
2. 윤찬영, 장인성, 정충기 (2002), “일정변형률 압밀시험을 이용한 방사배수 조건하에서의 압밀해석”, 한국지반공학회 논문집, 제 18권, 4호, pp.147-157.
3. Abelev, M. Y. (1973), “Construction D'ouvrages Sur les Soils Argileux Mous Satures”, Translated from Russian by J. P. Magnan, *Technique et Documentation, Paris*, 372p.
4. Amar, S. and Dupuy, H. (1973), “Etude de la Permeabilite des Sols Fins Mesuree en Laboratoire”, *Research Report No.23, Laboratoire Central des ponts et Chaussees, Paris*, p.34.

5. Carman, P. C. (1956), Flow of Gases through Porous Media, Butterworths, London.
6. Casagrande, L. and Polous, L. (1969), "On the Effectiveness of Sand Drains", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.6, No.3, pp.287-326.
7. Chan, H. T., and Kenney, T. C. (1973), "Laboratory Investigation of Permeability Ratio of New Liskeard varved soil", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.10, No.3, pp.453-472.
8. Chung, S.G. (1999), "Engineering Properties and Consolidation Characteristics of Kimhae Estuarine Clayey Soil", *Thick Deltaic Deposits, ATC-7 Workshop, Special Publication at the 11th ARC on SMGE*, Seoul, pp.93-108.
9. Chung, S.G. (2005), "Sampling Techniques and Their Effects in Characterizing of Pusan Clay", Keynote Lecture: *Current Geotechnical Issues of Thick Clay Deposits ATC-7 and KGS, Busan Korea, Sept*, pp.3-36.
10. Giampaolo, C. and Paolo, S. (2001), "Permeability Evaluation and its Implications for Consolidation Analysis of an Italian Soft Clay Deposit", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.38, No.6, pp.1166-1176.
11. Goodall, D.C. and Quigley, R.M. (1977), "Pollutant Migration from two sanitary landfill sites near Sarnia, Ontario", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.14, No.2, pp.223-236.
12. Jacobson, B. (1955), "Isotropy of Clay", *Geotechnique*, Vol.5, No.1, pp.23-28.
13. Kozeny, J. S. (1927), *Über Kapillare Leitung des Wassers im Boden, Sitzungsberichte der Akademie der Wissenschaften in Wien, Abteilung Iia*, p.136.
14. Leroueil, S., Magnan, J. P. and Tavenas, F. (1990), "Embankment of Soft Clays", Ellis Horwood.
15. Leroueil, S. and Hight, D. W. (2003), Behaviour and Properties of Natural Soils and Soft Rocks, *Charaterisation and Engineering Properties of Natural Soils*, 2003 Swets & Zeitlinger, Lisse.
16. Mesri, G. and Oslon, R. E. (1971), "Mechanisms Controlling the Permeability of Clays", *Clays and Clay Minerals*, Vol.19, pp.151-158.
17. Mesri, G. and Rokhsar, A. (1974), "Theory of Consolidation for Clays", *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol.100, GT8, pp.889-904.
18. Mesri, G. and Tavenas, F. (1983), "Discussion on Permeability and Consolidation of Normally consolidated Soils by Samarasinghe et al.", *ASCE Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol.109, GT6, pp.873-878.
19. Raymond, G. P. and Azzouz, M. M. (1969), "Permeability Determination for Predicting Rates of Consolidation", *Proceedings, Conference on In Situ Investigations of Soils and Rocks*, British Geotechnical Society, London, pp.195-203.
20. Tanaka, H., Dinesh, R., and Tanaka, M. (2003), "Pore Size Distribution of Clayey Soils Measured by Mercury Intrusion Porosimetry and its Relation to Hydraulic Conductivity", *Soils and Foundations* Vol.43, No.6, pp.63-73.
21. Tavenas, F., Jean, P., Leblond, P. and Leroueil, S. (1983), "The Permeability of Natural Soft Clays, Part II: Permeability Characteristics", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.20, No.4, pp.645-660.

(접수일자 2006. 8. 18, 심사완료일 2006. 11. 14)