

점토퇴적지반의 투수특성 연구

김 대 규*

Permeability Characteristics of Sedimented Clayey Soils

Dae-Kyu Kim*

요 약 본 연구에서는 점토퇴적지반의 투수특성을 실험적으로 연구하기 위하여 표준압밀시험, 일정변형률압밀시험 등을 수행하였다. 시험결과를 분석하여 비등방성, 투수변화지수, 간극비와의 관계 및 투수계수에 영향을 미치는 다양한 영향요소에 관하여 고찰하였으며, 대표투수계수를 제안하였다.

Abstract The oedometer test and the constant rate of consolidation test were performed using the sedimented clayey soil sample. The characteristics of permeability of the clayey soil such as anisotropy, permeability change index, relation with void ratio, and influencing factors, were investigated from the lab. test results. Analyzing the permeability characteristics, the representative permeability coefficient was proposed.

Kwy Words : Permeability, Permeability change index, Permeability coefficient

1. 서 론

지반의 투수특성은 파괴 및 변형 등 지반공학적 안정에 가장 큰 영향을 미치는 근본적인 공학적 특성이다. 투수계수는 지반의 투수특성을 가장 잘 대변해 주는 공학적 정의로서 연약지반 등의 건설시 그 값이 반드시 정확하게 결정되어야 한다. 이는 토립자의 전기력으로 인하여 확산이중층이 존재하고 이로 인하여 간극의 자유수 흐름이 제한되는 점토퇴적지반의 경우 더욱 강조되어야 한다[1-6].

점토지반의 투수특성을 규명하기 위해서는 표준압밀시험이 가장 일반적으로 활용되고 있다. 그러나 표준압밀시험만으로는 토립자의 구조배열에 기인하여 발생하는 투수계수의 이방성문제 등 투수특성에 영향을 미치는 영향인자들에 대한 파악이 어렵다[3, 5-7].

Samarasinghe 등(1982)은 정규압밀점토의 간극비와 투수계수의 관계를

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

로 표현하였다. 여기서 n 값은 4~5이고, C는 흙의 특성을 나타내주는 기준투수계수(reference permeability)이

다[4]. Taylor(1948)는 $e^{-\log k}$ 의 경험적인 선형관계식

$$\log k = \log k_o \frac{e_o - e}{C_k}$$

을 제안하였으며, 여기서 C_k 는 투수계수지수(permeability change index, $C_k=0.5 e_o$), k_o , e_o 는 in-situ 상태의 투수계수와 간극비이다[5]. 위 식은 단지 투수계수지수와 초기간극비 사이의 경험적인 식이므로, 직접적으로 투수계수지수를 구할 수는 없지만, 이 관계를 이용하여 대략적인 투수계수지수를 예측할 수 있다. Mesri 등(1971)은 변형률이 25%을 초과하는 대변형의 경우에는 간극비와 투수계수의 관계는 $\lg o e - \log k$ 의 관계식으로 표현된다고 하고, $\log k = a \log e + b$ 를 제안하였다. a와 b는 흙의 성질에 따라서 결정되는 상수이다[7].

본 연구에서는 점토퇴적지반 시료를 활용하여 일정 변형률압밀시험(CRS) 및 표준압밀시험(ILCON)을 실시하였다. CRS시험은 시간에 따른 변형률을 일정하게 유지하는 시험으로 표준압밀시험과는 달리 일면 배수조건이며, 시료하부에서 과잉간극수압을 측정한다. 따라서 시험과정 및 경계조건의 차이로 인하여 Terzaghi 압밀론 보다 현실에 근접한 여러 CRS 압밀이론을 활용한다. 시험결과를 분석하여 투수계수의 이방성과 횡방향투수계수 C_{khh} 를 산정하였으며, 투수계수지수, 간극비-투수계수의 대수관계, 다른 투수계수와의 비교 등을 통하여

상명대학교 토목환경공학부 조교수
*교신처: 김대규(daekyu@smu.ac.kr)

깊이에 따른 현장투수계수의 대표값을 제안하였다. 마지막으로 점토의 투수성에 영향을 미치는 요소들에 대하여 살펴보았다.

2. 현장지반 및 시험

본 연구에 활용된 퇴적점토시료는 경상남도 낙동강 하구, A, B 두지점에서 채취되었다. 현장조건은 상부지반은 2 m 내외의 모래 또는 실트질 모래로 구성되어 있으며, 25~30 m의 깊이까지 대체적으로 균질한 점토로 구성되어있다. 이 점토층은 15 m 정도의 심도를 경계로 지반공학적 성질이 상이한 두 층으로 분리된다. 그림 1은 현장퇴적점토의 일반적인 지반공학적 특성을 나타내고 있다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 압밀시험으로 산정한 과압밀비는 10 m 아래 깊이에서는 1 이하인 것을 볼 수 있다. 이것은 압밀해석에 있어서 상당한 논란이 되고 있는 문제이고, 많은 연구자들이 그 원인을 규명하기 위하여 현재까지 지속적으로 연구하고 있다. 그리고 전 심도에 대하여 자연함수비가 액성한계보다 큰 경향을 보이고 있기 때문에 예민비(sensitivity)가 크고, clay fraction(CF, 점토비율)의 경우에는 14~37%정도로 실트 성분이 많이 포함되어 있다. 점토를 구성하고 있는 광물은 Kaolinite, Illite, 그리고 Montmorillonite 등이다.

A, B 두 지점에서의 투수계수 C_k 와 기준투수계수(reference permeability) C, 그리고 n 값을 구하기 위하여 다음 표 1과 같은 시험을 실시하였다. 그리고 CRS 시험으로 구한 현장의 투수계수를 검증하기 위하여 삼축압축 셀을 이용하여 직접적으로 정상류를 발생 시켜서 투수계수를 산정하였다.

표 1. 시험계획

Depth, m	시료 위치	시험 종류		
		CRS	ILCON	Triaxial
4~5	A			
5~6	A	V, H	V	
7~8	A	V		V
9~10	A		V	
12~13	A	V, H		V
13~14	A		V	
14~15	A	V, H		V
15~16	A		V	
17~18	A	V		V
19~20	A	V, H		
9~10	B	V		
15~15.8	B	V	V	
20~20.8	B	V, H	V	
23~24	B	V, H		

*V : Vertical Specimen, H : Horizontal Specimen

3. 결과분석 및 토의

3.1 e-k 관계

CRS시험결과 투수계수와 간극비의 관계는 A, B 두 지역에서 관계뿐만 아니라 의 선형관계로도 표현되는 것으로 나타났으며, 그 결과는 그림 2와 같다. 표준압밀

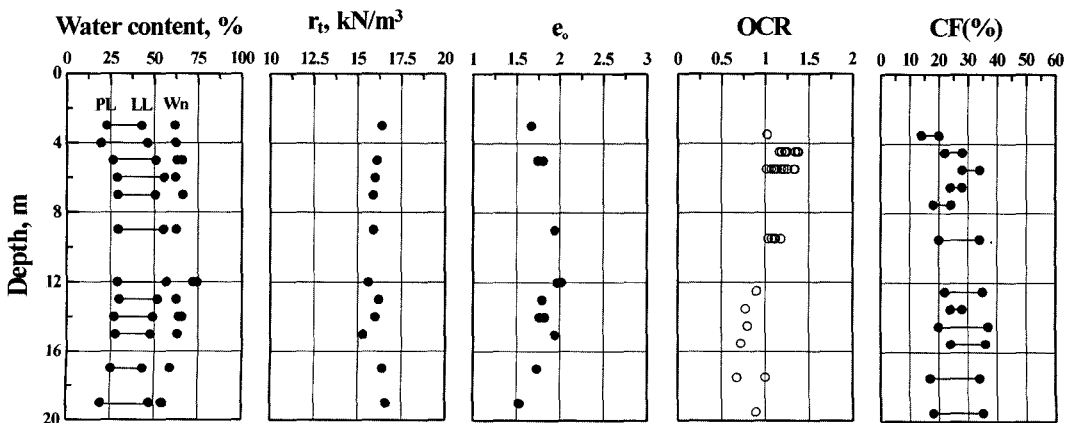


그림 1. 퇴적점토의 지반공학적 특성

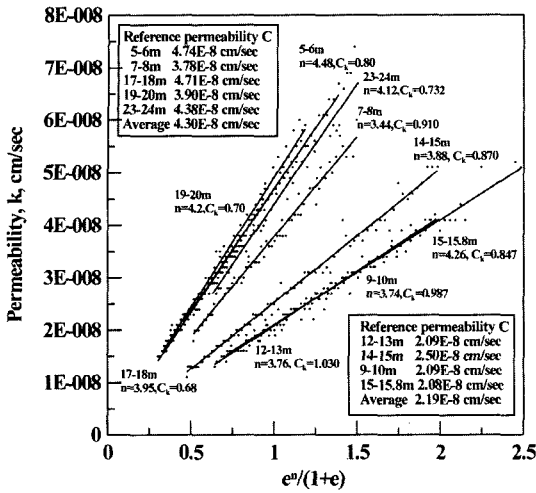


그림 2. e-k 관계

시험으로 구한 기준투수계수 C는 $0.58 \sim 7.56 \times 10^{-8}$ cm/sec의 범위를 보이고 CRS 시험은 $2.09 \sim 4.38 \times 10^{-8}$ cm/sec의 범위를 보이고 있다. CRS 시험결과는 그림 2에서 볼 수 있듯이 두 그룹으로 나눌 수 있다. 즉, 기준투수계수 C의 범위가 $2.08 \sim 2.50 \times 10^{-8}$ cm/sec이고 평균이 2.19×10^{-8} cm/sec인 한 그룹과, C 값의 범위가 $3.78 \sim 4.74 \times 10^{-8}$ cm/sec이고 평균이 4.30×10^{-8} cm/sec인 그룹으로 나눌 수 있다. 따라서 기준투수계수 C 값은 시료 뿐만 아니라 시험방법에 의해서도 상당한 영향을 받는다고 판단된다. 시료와 시험방법에 따라서 상이한 결과를 보이는 기준투수계수와는 다르게 n 값은 표준압밀시험과 CRS 시험 모두 거의 동일한 범위를 보이고 있다. 즉, 표준압밀시험의 경우에는 3.44~4.88의 범위를 보이고 있고, CRS 시험의 경우에는 3.75~4.88의 범위를 보이고 있다. 따라서 n 값은 시료와 시험방법에 따라서 그 값이 크게 변하지 않는다고 판단된다.

3.2 투수계수지수

시험결과 변형률 25%까지는 투수계수와 간극비의 관계가 선형적으로 변화하는 것을 관찰할 수 있었다. 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, 곡선에서의 간극비와 투수계수 관계를 이용하여 A, B 지역점토의 투수계수지수(permeability change index, C_k)와 $C_k=0.5e_0$ 의 경험적인 관계를 살펴보는 것이 가능하다고 판단된다. 한편 진술한 바와 같

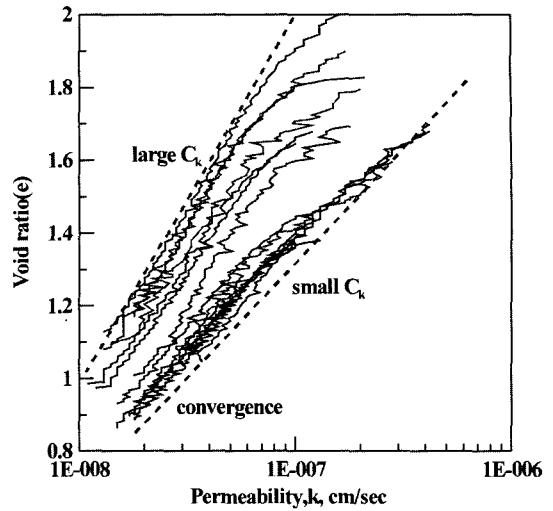


그림 3. CRS 시험에 의한 투수계수지수, 관계

이 일정변형률 압밀시험의 경우, 재압축구간과 선행압밀하중 부근에서는 시험 특성상 투수계수가 실제보다 크게 측정되므로 이 부분은 제외하고 투수계수지수를 산정하였다(그림 3).

그림 3에서 볼 수 있듯이 CRS 시험결과는 A, B 시료 모두 곡선은 투수계수지수가 작은 그룹과 상대적으로 투수계수지수가 큰 그룹으로 나눌 수 있었고, 투수계수지수는 다른 요소보다 간극비에 보다 큰 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 즉, 그림 1에서 볼 수 있듯이 간극비가 상층에 비하여 작은 16 m 이상의 심도에서는 투수계수지수 또한 작은 값이 산정되었다. 그리고 압축이 진행됨에 따라 투수계수지수가 작아지기 때문에 두 개의 그룹이 수렴하는 것을 관찰할 수 있었다. 깊이에 따른 점토시료의 투수계수지수는 표 2와 같다.

표준압밀시험 분석결과 깊이에 따라 CRS시험과 같이 특정한 경향을 관찰할 수는 없었다. 표준압밀시험 결과는 그림 4에서 볼 수 있듯이 CRS시험에 비하여 분산이 크기 때문에 기울기를 구할 때 오차가 발생할 수 있을 뿐만 아니라 선형적인 관계를 얻을 수 없었다. 그러나 표준압밀시험으로 구한 투수계수지수 C_k 의 범위는 0.624~1.037로서 CRS시험결과와 유사한 범위를 나타내고 있음을 알 수 있었다.

표 2. 깊이에 따른 투수계수지수 C_k

Depth (m)	투수계수지수 C_k		평균
	A	B	
4~16	0.880	0.917	0.899
16~24	0.690	0.686	0.688

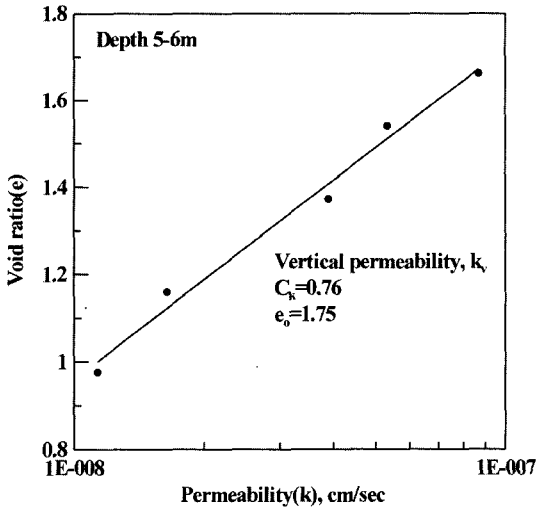


그림 4. 표준압밀시험으로 산정한 투수계수지수

3.3 투수계수의 이방성

수평방향의 투수계수를 산정하기 위하여 시료를 수직방향으로 성형하여 CRS 시험을 실시하였다. 전술한 바와 같이 CRS 시험은 선행압밀하중 부근에서는 투수계수를 과대평가하는 경향을 보인다. 따라서 본 연구에서는 현장의 투수계수를 산정할 경우에 $e-\log k$ 의 곡선의 직선부분의 연장선과 현장의 간극비가 만나는 부분의 투수계수를 현장의 투수계수로 결정하였다. 이 방법의 타당성을 검증하기 위하여 직접적으로 정상류를 발생시켜서 투수계수를 측정하는 방법 중의 하나인 삼축압축셀을 이용하여 구한 투수계수와 CRS 방법으로 구한 투수계수와 비교하여 보았고, 그 결과는 그림 5와 같다.

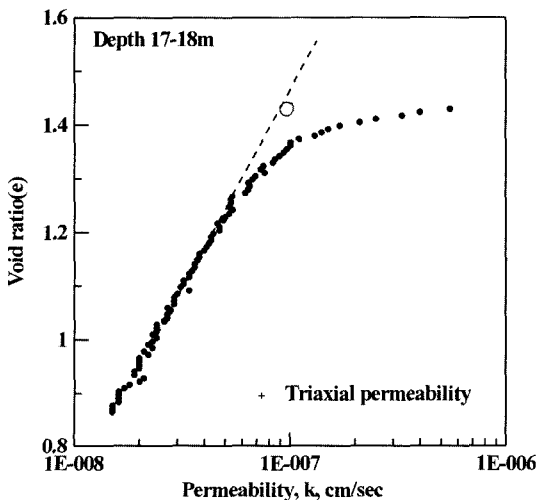


그림 5. 삼축압축 셀을 이용한 투수계수

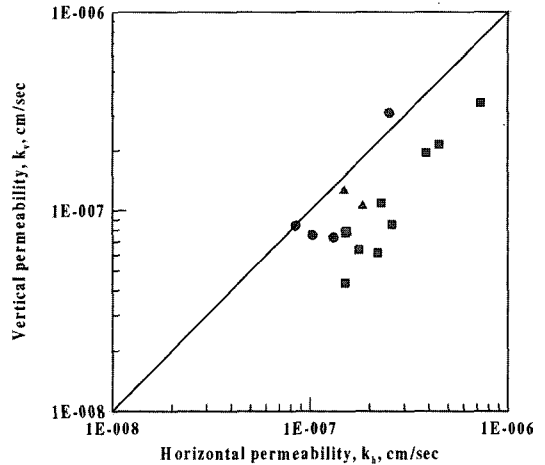


그림 6. 투수계수의 이방성

그림 5에서 볼 수 있듯이 삼축압축 셀을 이용하여 구한 현장의 투수계수는 선행압밀하중 근처에서는 CRS 시험 결과 곡선에 따른 투수계수보다 작을 뿐만 아니라, CRS 시험 결과인 $e-\log k$ 곡선의 직선부분을 연장하여 구한 투수계수와 거의 일치함을 관찰할 수 있었다. 따라서 이 방법을 이용하여 현장의 투수계수를 구하는 것은 타당하다고 판단되며, CRS 시험으로 현장의 투수계수를 구할 경우에 유용하게 이용할 수 있는 방법으로 판단된다. 이와 같은 방법으로 연직투수계수와 수평투수계수를 결정하여 투수계수의 이방성(k_v/k_h)을 평가한 결과는 그림 6과 같다. 그림에서 CRS 시험으로 산정한 투수계수의 이방성은 0.81~1.78의 범위를 보이고 평균 값은 1.32로 평가되었다.

해성점토의 투수계수의 이방성은 최대 2를 넘지 않는 것이 일반적이다. 그러나 CRS 시험으로 산정한 투수계수의 이방성은 횡방향으로 정상류를 유발시키는 Rowe cell 시험으로 구한 값보다는 상대적으로 적은 값으로 평가되었다. 그 이유는 본 논문에서 사용한 압밀셀이 참고자료에서 사용한 Rowe cell보다 직경이 작았고, 횡방향으로 압축을 하여 투수계수를 측정하는 CRS 시험은 연직방향으로 압축이 발생하면서 횡방향으로 투수가 발생하는 실제상황과는 상이한 조건이기 때문인 것으로 판단된다.

3.4 현장투수계수 대표값 결정

현장의 투수계수(in-situ permeability)에 영향을 미치는 요소로는 입도분포, clay fraction(CF), 소성지수, 그리고 간극비 등을 들 수 있다. 따라서 본 연구에서는 위와 같은 요소들과 투수계수와의 관계를 고찰해 보았다. 투수계수에 가장 큰 영향을 미치는 간극비와 투수계수

와의 관계를 보면, 일반적으로는 간극비가 작으면 현장의 투수계수는 작지만, 본 연구지반의 불균질한 특성으로 인하여 그러한 경향을 관찰하기는 어려웠다. 또한 투수계수에 영향을 미치는 요소로 clay fraction(CF, 점토비율)을 들 수 있다. CF이 클수록 2 μm 이하의 점토 성분이 많다는 것이므로 투수계수는 작아지는 경향을 관찰할 수 있었지만 분산정도가 크기 때문에 CF와 투수계수의 관계를 특정한 식으로는 표현하지 않았다.

전술한 바와 같이 어느 특정 요소로는 투수계수의 특성을 정확하게 파악할 수 없었으나 Tavenas(1983b) 등이 제안한 곡선보다는 좌측에 위치하고 있다는 것을 관찰할 수 있었다[7].

Tavenas(1983b) 등이 시험한 점토들은 CF이 대략 55~80% 정도로 비교적 큰 값을 보이고 있는 반면, A점토 경우에는 14~37%, B 시료의 경우에는 최대값이 50% 이하로 비교적 낮은 값을 보이고 있다. 여기서 특이한 것은 전술한 바와 같이 일반적으로는 clay fraction(CF, 점토비율)이 작으면 실트질 성분이 많이 포함되어 있기 때문에 투수계수가 큰 것이 일반적이다. 그렇다면 비교적 CF작은 양산과 가덕도점토의 투수계수가 Tavenas 등(1983b)이 실험한 점토보다 커야 한다. 그러나 A점토와 B점토가 CF 값이 작음에도 불구하고 Tavenas 등(1983b)이 제안한 곡선보다 좌측에 있으므로 투수계수는 더 작다는 것을 알 수 있었다. 그 원인으로는 상이한 점토광물과 퇴적조건 등을 들 수 있지만, 본 연구에서는 자료의 부족으로 확실한 결론을 내릴 수는 없지만 지속적인 연구를 한다면 이러한 경향을 보이는 이유를 밝힐 수 있을 것이다.

앞의 내용에서 보았듯이 투수계수에 영향을 미치는 요소들로는 현장투수계수를 정확하게 산정하기는 어렵다는 것을 알 수 있었다. 따라서 투수계수를 깊이에 대하여 표현하였으며, 그 결과, 12 m 심도에서 투수계수가 급격하게 변하는 것을 관찰할 수 있었다. 즉, 지표면에서 12 m 까지는 평균투수계수가 2.0×10^{-7} cm/sec이고, 그 이하의 심도에서는 약 7.5×10^{-8} cm/sec의 값을 보이고 있다. 이 결과는 A지역은 대략 15 m를 기준으로 지층이 구별된다는 타 연구내용과 일치하는 결과를 보이고 있다.

3.5 다른 점토지반과의 비교

A지역과 B지역의 간극비-투수계수 관계를 외국문헌을 참조로 비교한 결과, 본 연구현장에 퇴적형성된 점토는 비교적 간극비가 작은 편에 속한다는 것을 알 수 있고, 동일한 투수계수의 변화에 대하여 투수계수의 감소가 크다는 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

점토퇴적층에서 채취된 불교란 시료를 이용하여 표준압밀시험(IL_{CON})과 일정변형을 압밀시험(CRS test)을 수행하였다. 시험결과를 분석하여 투수계수의 이방성 등 점토층의 투수특성을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 투수계수의 이방성은 CRS시험의 경우 0.81~1.78의 범위를 보였으며(평균값 1.32), Rowe cell 시험경우 보다 과소평가되었다.

(2) CRS 시험으로 산정한 투수계수지수는 4~16 m 심도에서 평균 0.899, 16~24 m 심도에서 0.688의 값을 보인다. 표준압밀시험으로 산정한 투수계수지수는 깊이에 따라서 특정한 경향을 관찰할 수는 없었지만, 0.624~1.037의 범위로 CRS 시험의 범위와 유사한 결과를 보였다.

(3) n값은 시험의 종류와 시료에 관계없이 3.44~4.88의 범위를 보였다.

(4) CRS 시험으로 산정한 C(reference permeability) 값은 평균이 각각 2.08×10^{-8} cm/sec, 4.30×10^{-8} cm/sec인 두 그룹으로 나눌 수 있었다. 표준압밀시험으로 구한 C는 $0.58 \sim 7.56 \times 10^{-8}$ cm/sec로 CRS 시험에 비하여 큰 범위를 보였다.

(5) 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 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Chan, H. T. and Kenney, T. C. "Laboratory investigation of permeability ratio of New Liskeard varved soil", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 10, No. 3, pp. 453-472, 1973.
- [2] Jamiolkowski, M., Ladd, C. C., Germaine, J. T., and Lancellotta, R. "New Developments in Field and Laboratory Testing of Soils", Proceedings of 11th ICSMFE, San-Francisco, Vol. 1, pp. 57-153, 1985.
- [3] Mesri, G. and Olson, R. E. "Mechanisms controlling the permeability of clays", Clays and Clay Minerals, Vol. 19, pp. 151-158, 1971.
- [4] Samarasinghe, A. M., Huang, Y. H., and Drnevich, V. P. "Permeability and Consolidation of Normally Consolidated soils", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 108, GT6, pp. 835-

850, 1982.

- [5] Taylor, D. W. "Fundamentals of soil mechanics", John Wiley & Sons Inc., New York, pp. 700, 1948.
- [6] Tavenas, F., Jean, P., Leblond, P., and Leroueil, S. "The permeability of natural soft clay. Part I : Method of laboratory measurement" Canadian Geotechnical Journal, Vol. 20, pp. 629-644, 1983a.
- [7] Tavenas, F., Jean, P., Leblond, P., and Leroueil, S. "The permeability of natural soft clay. Part II : Permeability characteristics", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 20, pp. 645-660, 1983b.

김 대 규(Dae-Kyu Kim)

[정회원]



- 1985년 2월 : 고려대학교 토목공학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 고려대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1999년 12월 : Louisiana State Univ. (공학박사)
- 2002년 3월~현재 : 상명대학교 토목공학전공 조교수

<관심분야>

Mechanics, Geotechnical Engineering, Numerical Analysis