

pH 변화에 따른 점토의 투수특성

Permeability Characteristics of Clays with Various pH Values

장 병 욱** · 강 상 욱* · 김 성 필* · 차 경 섭*

Chang, Pyoung Wuck · Kang, Sang Uk · Kim, Seong Pil · Cha, Kyung Seob

Abstract

A series of physical properties and rigid wall permeability tests were performed on two clays to investigate changes in permeability characteristics of clays with various pH values. Results of the study are as follows.

As pH values were increased, coefficients of permeability of S-clay(clay fraction 18%) and J-clay(clay fraction 30%) were decreased in 3 and 4 times, respectively. Variation of coefficient of permeability of J-clay was considerably related to clay fraction. It can be said that coefficient of permeability of clays tested was increased, as pH values were decreased, This was because of increase in effective voids caused by decrease in thickness of diffused double layer, that is, change in soil structures and effective grain sizes.

Keywords : pH, Permeability, Clay

I. 서 론

최근 쓰레기 매립장(landfill)과 독성폐기물 매립장(toxic-waste land fill)의 침출수의 이동과 관련한 연구에 관심이 커지고 있다. 이러한 매립장에 서는 침출수가 주변환경으로 유출되는 것을 방지하기 위하여 자연적 혹은 인공적인 재료를 차단층으로 이용하게 되는데 일반적으로 점토함량이 높고 투수성이 작은 흙이 많이 이용되고 있다. 점토질

흙의 투수성에 영향을 미치는 물리화학적 인자들의 상호작용에 영향을 받는 투수계수와 공극유체의 관계는 명확하게 알려져 있지 않고, 인자들 사이의 상호작용은 투수계수의 예측을 어렵게 하는 요인이다.

Mitchell(1993), Fernandez(1985), Fang(1987) 과 전(1995)는 유기화합물을 투과물로 선정하여 실험적 수준으로 점토를 대상으로 한 투수 시험을 실시하여 투수계수의 변화의 원인이 유전상수(dielectric constant)와 극성(polarity), 이온농도(ion concentration) 등에 관계가 있다고 하였다. 토양의 pH는 광물조성, 유기물량, 비표면적, 간극수의 용존성분 등의 물리화학적 성질과 함께 토양의 공학적 특성을 이해하기 위하여 자주 측정되는 항목에 대한 연구로 Olson(1971) Gilligan(1983)

** 서울대학교 농업생명과학대학 교수
* 서울대학교 대학원
* Corresponding author. Tel.: +82-31-290-2370
fax: +82-31-291-8384
E-mail address: pwchang@snu.ac.kr

과 정(1993) 등이 있다. 하지만 일반적인 측정항목 중의 하나인 pH의 변화에 따른 투수특성 및 기타 공학적 특성에 대한 연구는 Fang(1987), 구(1998) Gipson(1985)과 김(1999)등이 있으나 결과에 대한 확실한 경향을 밝히지 못한 상태이다.

본 연구에서는 pH에 의한 점토의 투수기작 변화를 살펴보기 위해 투과수의 pH를 변화시켜 점토의 투수특성을 연구하고자 한다.

II. 재료 및 시험방법

1. 재 료

본 연구에는 pH의 변화에 따른 투수특성의 변화를 살펴보기 위하여 점도함량이 다른 두 시료를 선정하였다. 경기도 수원지방에서 채취한 흙(S-clay)은 점도함량 18%이며, 전라남도 장흥에서 채취한 흙(J-clay)은 점도함량이 30%인 해성점토이다. 시료의 주요 물리적인 특성은 Table 1과 같다. 시료의 주요광물을 조사하기 위해 X선 회절분석(X-ray refraction test)를 실시한 결과 S-clay는 quartz와 kaolinite가 주성분이며, J-clay는 quartz, feldspar와 kaolinite가 주성분이다.

투과물의 pH를 조정하기 위하여 1N-H₂SO₄ (황산)과 1N-NaOH (수산화나트륨)을 사용하였다. pH는 미국 Orion Research사의 420A 모델 pH-meter를 사용하였다. pH는 실험 전에 측정되었으며 범위는 pH 1, 4, 7, 10, 13±0.1로 조정하였다.

Table 1 Physical properties of soils

Physical properties	S-clay	J-clay
Specific gravity	2.62	2.69
Liquid limit(%)	34.2	29.0
Plasticity index(%)	17.0	10.3
Clay fraction	18%	30%
U.S.C.S.	CL	CL

2. 실험방법

가. 투수시험장치

본 연구에서는 전(1997)과 정(1997)에 의해 사용된 바 있는 수정강성벽 투수시험기(modified rigid wall permeameter)를 수정 및 보완하여 시험에 사용하였다. 본 시험장치(Fig.1)에서 특히 보완된 점은 동수경사 조절장치와 급기 및 배기 밸브가 부착된 제어판(control panel)을 설치하여 시험에서 불필요한 과정을 줄였으며, 투과물의 교체나 재충전이 용이하고 정수두 시험이 가능하도록 주입병(injection bottle)을 제작하여 부착하였다. 투수몰드와 투과물과의 반응성과 공시체의 성형성을 고려하여 재질을 황동(brass)으로 하고 3단으로 분리 가능하도록 하였다. 몰드의 높이는 30 mm, 내경과 외경은 각각 45와 80 mm이다.

나. 입도분석 및 애터버그한계 시험

점토투과수의 pH 변화에 따른 소성의 변화를 알아보기 위하여 pH 1, 4, 7, 10, 13으로 조절된 용액 내에서 약 24시간 교반기로 교반하면서 수화시켰다. 수화된 슬러리를 공기 중에서 건조시킨 후 입도분석과 애터버그한계 시험을 실시하였다.

다. 공시체 제작

슬러리를 만들기 위한 최초의 함수비로 Graham(1985)은 액성한계의 2배, Lade(1978)는 1.64배를 사용하였다. 슬러리의 적당한 수분상태는 흙의 특성에 따라 좌우되나, 일반적으로 액성한계의 1.3 배 혹은 40%의 함수비를 적용하여 실험하므로 본 연구에서는 40%의 함수비를 가지는 슬러리를 만들고 기포제거와 균질화를 위해 12시간 이상 38cmHg(Hambly)의 진공압을 가하여(Graham, 1985) 슬러리를 제작하였다.

Fig. 1의 강성벽 투수시험기 몰드 내부에 실리콘을 도포한 후 슬러리를 넣고 하중재하장치를 이용하여 미리 수행한 압밀 실험에 따라 15, 30, 60, 120 kPa의 하중을 점차적으로 증가하였다. 각 하중

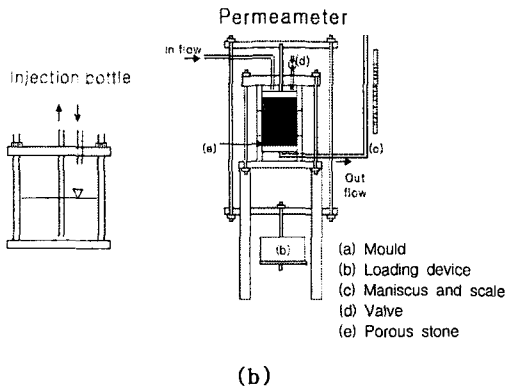
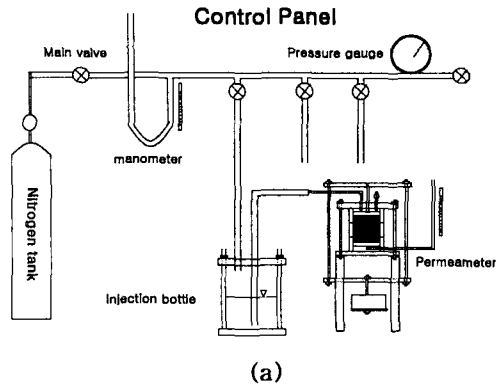


Fig. 1 Schematic view of permeability apparatus

에 대해 24시간 압밀시킨 후 압밀이 완료되면 투수장치를 분해하여 트리밍을 한다. Fig. 1 (a) 제어판(control panel)을 이용하여 공시체를 교체하지 않고 pH 단계별로 각각 압력을 20, 40, 60 kPa까지 순차적으로 증가시켜 60 kPa의 압력을 일정하게 유지시키고 공극부피의 2~3배의 유출을 확인한 후 약 2~4 시간 간격으로 그 유출량을 측정하고 투수계수를 산정하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 기초물성 특성

가. 입도시험

Fig. 2와 Fig. 3은 pH에 따른 입도 곡선을 나타

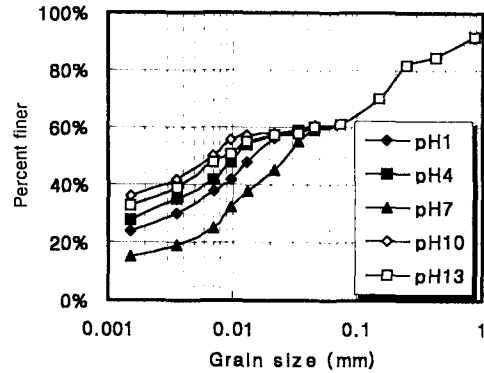


Fig. 2 Particle-size distribution (S-clay)

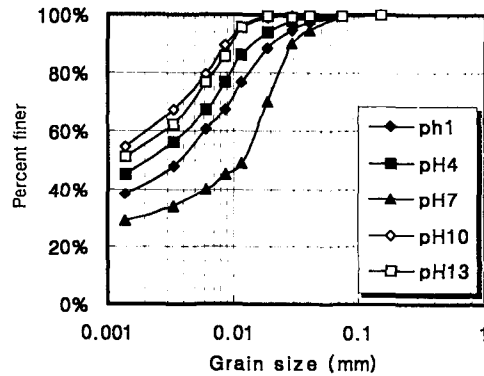


Fig. 3 Particle-size distribution (J-clay)

내었다. 중성영역(pH 7)에서 입경이 크고, 중성영역을 기준으로 pH가 감소, 증가함에 따라 입도분포가 변화되었음을 알 수 있다. 그림에서 보듯이 입경 0.01 mm 이하에서의 중량통과백분율의 변화는 0.01~0.074 mm의 입경에 해당하는 비교적 입경이 큰 실트분의 입경변화 때문이다. 즉, 점토 입자의 Face-to-face 결합(aggregated) 또는 Edge-to-edge 결합(flocculated)에 의해 실트와 같은 입경을 가진 결합들이 pH 변화에 따라 파괴되면서 상대적으로 굵은 입경의 실트분이 줄어들고 0.01 mm 이하의 입경성분이 커진 것으로 판단된다.

두 점토 모두 산성 영역에 비해 알칼리 영역에서 입도의 변화가 다소 크게 나타났다. 산성의 경우 pH 4인 경우가 pH 1인 경우에 비해 입경 감소가

Table 2 Consistency characteristics of clays with pH

Atterberg limit	pH	S-Clay					J-Clay				
		1	4	7	10	13	1	4	7	10	13
Liquid limit (%)		32.4	34.2	35.9	33.8	24.9	28.5	28.8	30.4	28.2	27.8
Plastic limit (%)		21.1	19.1	19.4	16.8	16.0	19.4	16.5	15.8	16.0	17.5
Plasticity index (%)		11.3	15.1	16.6	17.0	8.9	9.1	12.3	14.6	12.2	10.3

다소 큰 것으로 나타났으며 pH 10과 pH 13은 거의 비슷하지만 pH 10의 입경 감소가 약간 크게 나타났다.

나. 애터버그 한계 시험

애터버그 한계는 점토의 종류, 교환 양이온, 간극 유체의 화학적 특성에 따라 변한다. 그리고 점토성분의 증가에 따라 액·소성한계는 증가하며, 점토 광물의 차이에 따른 소성한계의 변화 폭은 액성한계의 변화 폭에 비해서 작고 소성한계는 유기물함량의 증가에 따라 증가하는 경향을 가진다.

애터버그 한계 시험을 시행한 결과를 Table 2에 나타내었다. 두 점토 모두에서 액성한계의 변화는 거의 없는 것으로 나타났으며, 소성한계는 pH에 따른 변화를 보이고 있다. 소성지수의 변화는 소성한계의 변화에 따른 값을 보이고 있다. S-clay에서는 소성한계가 pH의 증가에 따라 조금씩 증가하였으며, J-clay는 pH 7을 경계로 pH의 변화에 따라 조금씩 증가하였다. 이는 앞의 입도시험과 마찬가지로 pH의 변화가 세립화 현상 즉 플록의 파괴와 분산 등에 의한 구조의 변화를 일으킨 것에 연관된 것으로 사료된다. Acar 등(1986), Bowders and Daniel(1987)이 확인한 유기물질에 따른 애터버그 한계의 변화에서와 같이 pH에 따른 애터버그 한계의 변화를 확인할 수 있었다.

2. 투수시험

초기 공극비가 투수계수에 미치는 영향을 최소화

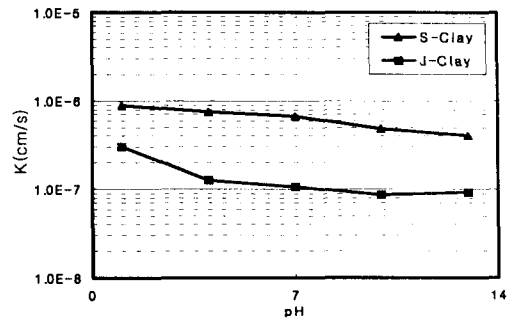
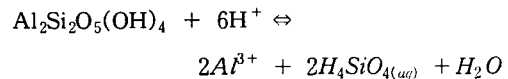


Fig. 4 Results of permeability in permeability test

하기 위해 공시체를 교체하지 않고 pH를 증가시키면서 투수시험을 수행하였다. 그 결과 Fig. 4와 같이 S-clay의 투수계수는 pH가 증가할수록 투수계수가 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 앞서 언급한 소성지수의 변화와 관련하여, Daniel 등(1986)이 실험에서 제시한 투수계수가 증가하면 소성지수도 증가하는 결과와 유사하다. 일반적으로 이점토의 주요성분인 kaolinite는 pH의 변화에 따라 다음과 같은 반응이 일어날 수 있다.



알루미늄 이온은 pH 변화에 따라 알루미늄 착물을 형성하고 시간에 따라 응축과 중합체 형성을 하게 된다. 이러한 pH 변화에 따른 알루미늄 착물의 변화는 입자표면특성을 변화시키게 된다. 즉 pH는 OH의 해리도를 변화시켜, 높은 pH에서 해리를 일으키고 전하량을 증가시켜 이중층을 두껍게 만들고 낮은 pH의 경우에는 그 반대의 경우로 플록의 파괴를 가져오고 분산작용을 가져온다. Yong 등(1993)은 무기물질의 통과에 의하여 점토의 투수성이 변하게 되는 것은 점토광물의 팔면체 시이트에서 알루미늄 이온의 축출과 3가의 추출된 알루미늄 이온(Al³⁺)이 자연적으로 흡착된 저가의 양이온(Na²⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K²⁺)과 이온 교환되어 분산이중층의 두께 감소, 그리고 유효간극 간격의

감소와 굴곡도의 감소로 인한 투수계수의 증가라고 설명했는데 이와 잘 일치한다. J-clay 역시 pH의 값이 증가할 수록 투수계수가 감소하는 경향을 보였으며 특히 pH 1에서 투수계수가 많이 증가함을 알 수 있다. S-clay의 경우와 비교해 보면 전체적으로 J-clay가 pH의 변화에 좀 더 영향을 받는 것을 알 수 있는데 이는 점토 함량이 높기 때문에 투과수와 물리화학적 반응이 좀더 활발했기 때문이다.

3. 동수경사 변화에 따른 투수계수 변화

일반적으로 점토의 경우 동수경사의 증가에 따라 투수계수가 증가하거나 감소한다는 상이한 결과가 점토에 관해서 보고되고 있는데, 투수계수 감소의 경우는 압력을 높임으로써 세립분이 시료내의 공극을 막아 유체가 통과하는 길을 감소시켜 발생하는 것으로 설명하고 있고, 투수계수 증가의 경우는 흡입자내 유로가 압력에 의해 확장되어 유로 단면적이 증가하므로 동일한 시간 내에 유출량이 많아진다는 설명이 있지만 아직 확실하게 정의된 바는 없다.

화학용액에 의한 투수시험에서는 연급한 바와 같이 화학용액과 시료의 상호반응성을 허용하기 위해서 적어도 2~3 공극 부피 이상의 화학용액이 통과되어야 하므로 자연 상태의 동수경사로는 수주 이상의 시간이 소요된다. 따라서 본 연구에서는 높은 동수경사를 사용하고 이에 대한 영향을 알아보았다.

Fig. 5는 동수경사 60일때의 투수계수를 나타내며 동수경사 30과 90일때의 경향도 이와 유사하다. 이를 정리한 Fig. 6과 7은 pH 별로 동수경사의 크기에 따른 투수계수의 변화를 나타내었다. S-clay와 J-clay 모두에서 동수경사가 증가할수록 투수계수는 투과수의 pH와 관계없이 같거나 약간 감소하는 경향을 나타내고 있으나 경향을 정의하기는 힘들다.

본 연구에서 pH 변화와 관계없이 투수계수가 같거나 약간 감소하는 것은 앞에서 설명한 바와 같이

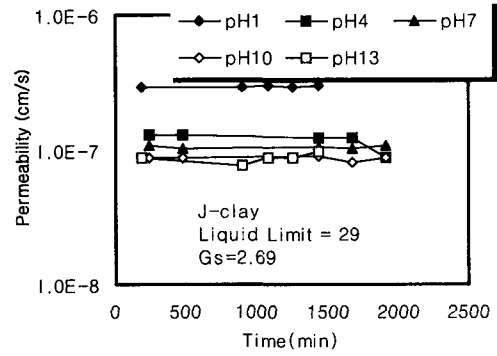
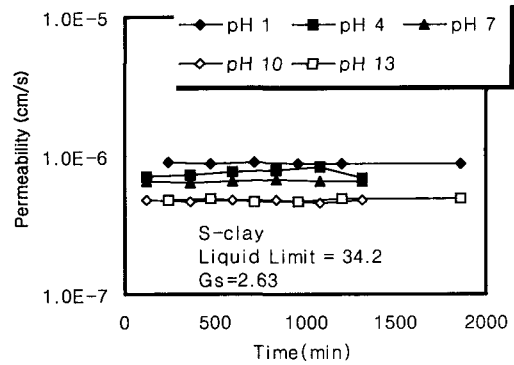


Fig. 5 Coefficient of permeability in S-clay and J-clay at hydraulic gradient, $i = 60$

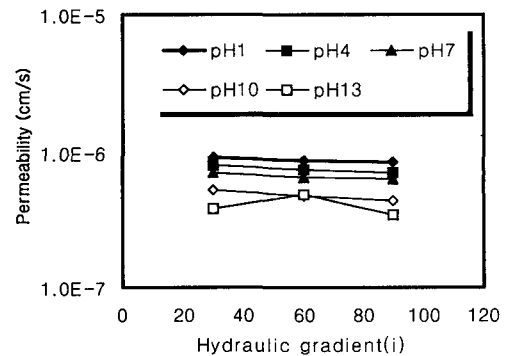


Fig. 6 Variation of the coefficient of permeability in S-clay

침투압의 증가에 따른 침투류의 방향으로 유효응력이 증가하여 미소입자가 간극사이로 이동하는 현상과 침투압에 의한 압밀에 의해서 시료의 체적이 감소함에 따른 것으로 판단된다. 이러한 연구결과는

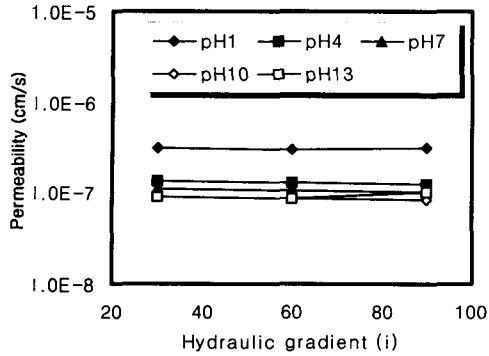


Fig. 7 Variation of the coefficient of permeability in J-clay

Evance 등(1988)과 강 등(1995)의 연구결과와도 유사하다.

4. SEM 분석

pH의 변화에 따른 점토의 구조는 SEM(Scanning Electron Microscope)을 이용해서 관찰해

보았다. 시료를 균질화하고 기포를 제거한 후 pH를 변화시킨 투과수와 반응시킨 후 공기 중에서 건조시켜 SEM 분석을 실시하였다. 입도의 변화 및 투수계수의 변화를 SEM 분석을 통하여 관찰할 수는 없었지만 Fig. 8, 9에서 보듯이 전반적으로 입자의 구조와 모양이 pH의 변화에 따라서 변화되는 현상을 발견할 수 있었다. Fig. 8, 9에서 그림 우·하단의 척도의 크기는 각각 50 μ m와 10 μ m이며, 'pH1, 50 μ m' 등으로 나타내었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 점토에서 투과물의 pH가 변화하였을 때 투수특성 변화를 구명하기 위해 육성점토와 해성점토를 대상으로 증류수에 조절액을 혼합하여 pH를 1, 4, 7, 10, 13으로 변화시켜가면서 투수시험을 실시하고 동수경사에 따른 투수특성의 변화를 살펴보았다. 그리고 pH 변화에 의한 기초물성 시험치의 변화와 투수특성의 변화와도 상호 비

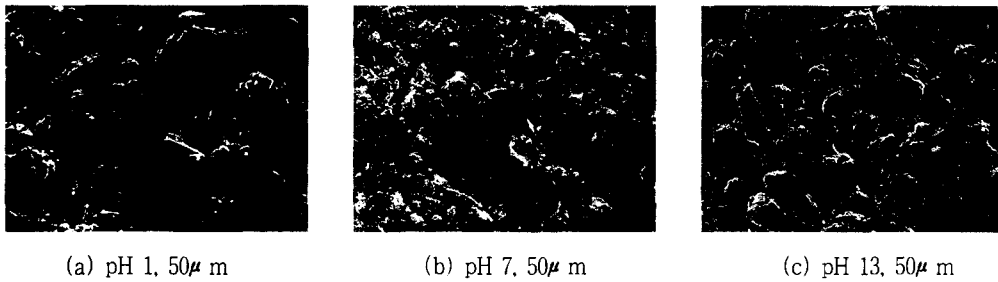


Fig. 8 SEM micrograph for S-clay

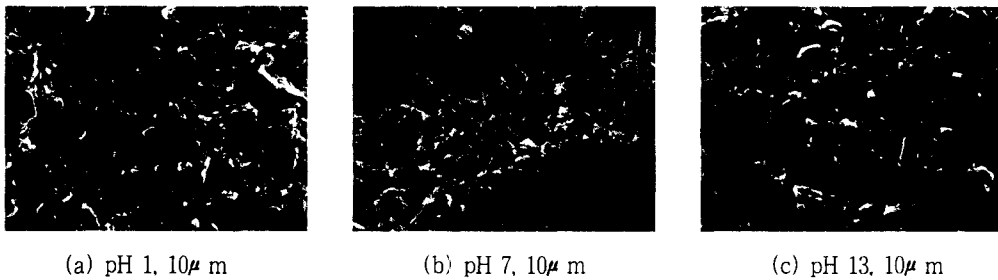


Fig. 9 SEM micrograph for J-clay

교해 보았으며 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 두 가지의 점토에서 중성영역(pH 7)을 기준으로 pH가 감소 또는 증가함에 따라 입경이 감소 되었음을 알 수 있다. pH 변화에 따라 입도 분포가 달라지는 이유는 pH 변화에 따라 플록(floc) 파괴와 입자분산이 이루어지기 때문이라고 사료된다.

2. 중성을 기준으로 pH의 변화에 따라 액성한계는 약간 감소하거나 변화가 없으며 소성한계는 약간 증가하여 결과적으로 소성지수가 중성에서 최대 값을 나타내었다.

3. 육성점토는 pH가 13에서 1로 감소함에 따라 투수계수는 3배 정도 증가하는 경향을 보였다. 이는 이온 교환에 의해 분산이중층의 두께 감소와 흙의 구조의 면모화로 유효간극이 증가하였기 때문이라고 사료된다.

4. 해성점토도 pH의 값이 감소할 수록 투수계수가 4배 정도 증가하는 경향을 보였으며, 육성점토에 비해 투수계수가 크고 pH 변화에 따른 변화도 상대적으로 컸다. 이는 해성점토의 점토분의 함량이 많은 것과 관련 있는 것으로 사료된다.

5. 육성점토와 해성점토 모두에서 동수경사가 증가할수록 투수계수는 투과수의 pH와 관계없이 같거나 약간 감소하는 경향을 나타내고 있다. 그 원인으로서 침투압의 증가에 따른 침투류의 방향으로 유효응력이 증가하여 미소입자가 간극사이로 이동하고 침투압에 의한 압밀에 의해서 시료의 체적이 감소함에 따른 것으로 판단된다.

References

1. Bowders, J. J. Jr., and E. David E. Daniel. 1987. Hydraulic conductivity of compacted clay to dilute organic chemicals. *J. of geotech. Eng. ASCE* 113(12) : 1432-1448.
2. Evans, J. C., and H. Y. Fang. 1988. Triaxial permeability and strength testing of contaminated soils. In *Advanced Triaxial Testing of Soil and Rock ASTM STP977*, 387-404. Philadelphia.
3. Fang, Hsai-yang. 1987. Soil-pollutant interaction effects on the soil behavior and the stability of foundation structures. In *Environmental Geotechnics and Problematic Soils and Rocks*, ed. Balasubramaniam et al., 155-163. Balkema.
4. Fernandez, F., and H. Y. Fang. 1985. Hydraulic conductivity of Hydrocarbons. *Canadian Geotechnical Journal*. 22 : 205-214.
5. Jeon, S. O., P. W. Chang, C. W. Woo, and Y. K. Park. 1997. A study on the effect of organic permeant on permeability of a natural clay. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 39(4) : 98-105. (in Korean)
6. Jung, J. H., P. W. Chang, Y. K. Park, and C. W. Woo. 1997. A study on the permeability characteristics of water-soluble organic permeant in clay. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 39(6) : 80-87. (in Korean)
7. Kang, B. H., and K. S. Jang. 1995. Effect of waste leachate on permeability of marine clay. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 11(3) : 37-42. (in Korean)
8. Mitchell, J. K. 1993. *Fundamentals of soil behavior* (2nd edition). John Wiley & Sons Inc.
9. Yong, R. N., A. M. O. Mohamed, and B. P. Warkentin. 1993. Principle of contaminant transport in soils. In *Developments in Geotechnical Engineering* 73, Elsevier.
10. 1. Bowders, J. J. Jr., and E. David E. Daniel.