

점토에서 수용성 유기물의 투수특성에 대한 연구

A Study on the Permeability Characteristics of Water-soluble Organic Permeant in Clay

정 중 홍* · 장 병 옥** · 박 영 곤*** · 우 철 웅***
Jung, Jong Hong · Chang, Pyoung Wuck · Park, Young Kon · Woo, Chull Woong

Summary

A series of tests was performed to determine a threshold concentration of water-soluble organic permeant(ethanol) for permeability to be increased in clay and to estimate long-term permeability behaviors, effects of overburden pressure and compaction conditions on permeability in clay. Results of study are as follows ;

1. A threshold concentration of water-soluble organic permeant(ethanol) in clay was about 70~80% and its dielectric constant was 40, and dielectric constant seems to be closely related with absolute permeability. 2. Permeability of long-term tests was more or less larger than that of short-term tests. 3. Overburden pressures applied for a long time elapsed have little effects on the restriction of permeability increase. 4. Since water content has no effects of compaction capability when it is compacted with OMC or wet side of OMC, its permeability is to be estimated as same level of dry side of OMC. 5. Clays matured in the humid chamber are increased in permeability 2 times larger than unmaturred ones. Thixotropy, therefore, should be considered in the design procedures because field conditions of construction would be quite similar to this.

I. 서 론

폐기물 매립장에서 독성이 강한 침출수가 주변환경으로 침투하는 것을 막기 위해 차폐 시설(liner)을 설치하는데 이것은 물과 화학성

분을 포함한 침출수와 장기간 접촉하게 되므로 장기간에 걸쳐 낮은 투수성을 확보하여 침출수를 효과적으로 차단해야 하고 구조적으로 해가 없도록 하여야 한다. 이러한 차폐시설에는 재료의 확보가 용이하고 경제적인 점토가

* 한국도로공사

** 서울대학교 농업생명과학대학

*** 서울대학교 대학원

키워드 : 점토라이너, 유기침출수, 투수계수, 유전상수, 에타놀, 강성벽 투수시험기, Thixotropy, 해성점토

많이 사용되고 있어 다짐점토 차폐시설과 침출수의 상호작용이 차폐시설의 투수특성에 미치는 영향에 대한 연구는 매우 중요하다고 판단된다.

매립장의 침출수나 독성 유기화합물 등을 공극유체(pore fluids)로 하는 경우에는 아직 이들의 물리 화학적 성질과 점토의 투수성과의 관계가 명확히 밝혀지지 않고 있다. 그러나 80년대 이후 여러 연구자들^{5,8,10)}에 의해 매립장에서 발생하는 유기화합물에 의해 점토의 투수계수가 수배에서 수천배까지 증가한다고 하였으며 이들의 연구는 주로 순수한 유기물을 대상으로 한 것이었다. 이러한 연구에 힘입어 외국의 경우 점토와 화학성분과의 반응성과 차폐시설로서의 적합성을 검토하여 설계에 반영¹³⁾할뿐만 아니라 설계와 시공 및 유지관리를 위한 제도적 장치^{13,14)}를 두고 있으나 아직 우리나라에서는 유기화합물이 점토의 투수성에 미치는 영향에 대한 기초 연구조차도 미흡한 실정이다. 더욱이 실제의 매립장의 침출수는 매우 다양한 유기화합물로 이루어져 있고 현장에서는 이들이 서로 혼합되어 있거나 물에 희석되어 있어 있을 뿐만 아니라 여러 인자들이 복잡한 형태로 투수성에 영향을 미치고 있어서^{2,6,7)}, 물이나 순수 유기화합물을 투과물로 하는 투수시험에 구한 투수계수로 현장 상황의 점토의 투수성을 예측하는 것은 거의 불가능한 것으로 판단된다.

따라서, 본 연구에서는 매립장의 차폐시설의 재료로 이용될 수 있는 점토와 앞으로 매립장 건설재료로서의 이용이 활발해 질 것으로 예상되는 해성점토(marine clay)¹⁶⁾를 대상으로 물과 혼합된 유기화합물의 투수성을 평가하고, 물로 희석된 경우 투수계수의 변화를 가져오는 임계농도(threshold concentration)를 밝혀내고자 한다. 또, 상재하중의 효과와 다짐조건이 투수성에 미치는 영향을 평가하며, 장기투수시험(long-term permeability

tests)을 실시하여 단기 투수시험 결과와 비교 검토를 통하여 물-유기화합물 혼합 투과물이 점토의 투수성에 영향을 미치는 주요인자와 그 투수기작을 알아보고자 한다.

II. 재료 및 시험방법

1. 재 료

연구에 사용된 흙시료는 Bagchi(1990)¹¹⁾, Oweis(1990)¹⁸⁾ 등이 제시한 차폐시설의 재료로서 사용될 수 있는 기준에 적합하여 차폐시설의 재료로 사용이 가능한 것으로 판단된 점토와 해성점토(marine clay)이고 Table 1은 물성치를 나타낸 것이다.

투과물은 탄화수소계의 대표적인 수용성 유기물인 에탄올을 사용하였으며 매립장의 침출수에서 흔히 발견되는 중성 비극성의 휘발성이 있는 유기화합물이며^{2,10)} 물과 혼합될 경우 점성이 약 50%의 농도에서 최대로 증가하였다가 다시 감소하는 경향이 있다. 본 연구에서는 에탄올을 물과 혼합하여 부피비 0%, 25%, 50%, 75%, 100%의 5가지 희석물을

Table 1. Physical properties of clays used

Properties	Clay	Marine Clay
Index properties		
Specific gravity	2.64	2.76
Liquid limit(%)	41.16	44.36
Plastic limit(%)	24.82	24.16
Plastic index	16.34	20.20
Activity	0.65	0.51
% of clay	25	40
U.S.C.S	CL	CL
Major mineral composition [†]	Ka	Ka/Vt
Standard Compaction Parameters		
Maximum dry density(g/cm ³)	1.61	1.60
Optimum water content(%)	22.7	24.5

[†] by x-ray refraction test(model : PW 1730 Philips), Ka : kaolinite, Vt : vermiculite

Table 2. Dielectric constant and viscosity of diluted Ethanol

properties	Mixing ratio (%)				
	0	25	50	75	100
Dielectric constant †	80	68	55	41	25
Viscosity ratio(centipoise) ‡	1.00	2.13	2.92	2.71	1.82

† approximate dielectric constant estimated by weighted average method proposed by David Daniel

‡ from Bowders(1987), viscosity ratio : ratio of permeant to water

사용하였으며 Table 2는 에탄올 희석물의 화학적 물성치를 나타낸 것이다.

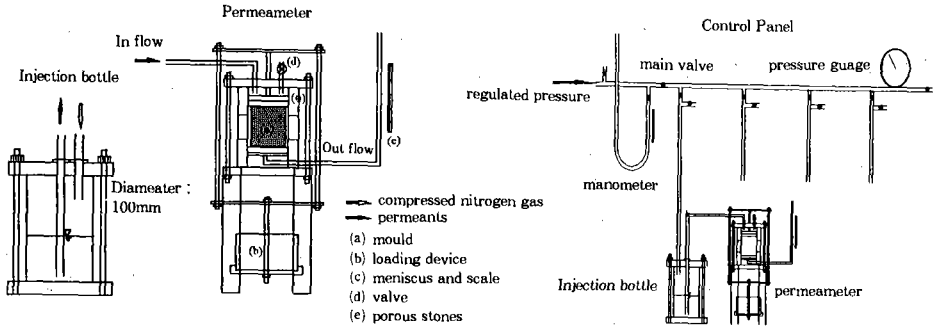


Fig. 1. Schematic views of permeameter and setup

3. 시험방법

시험은 공시체를 제작한 후 습윤실에서 24시간 이상 안정화시킨 후 1.3t/m²의 상재하중을 재하하고 낮은 동수경사로 포화시킨 다음 누출이 확인되면 약 100의 동수경사를 유지하며 투수시험을 실시하는 절차로 수행하였다. 데이터의 연속성과 공시체의 초기조건에서 발생하는 오차를 제거하기 위해 하나의 공시체에 연속적으로 0%에서 100% 농도의 에탄올을 투과시켰다.

장기투수시험에서는 공급유체가 완전히 유기물로 대체된 상태를 재현하기 위해 초기에 에탄올과 점토를 직접 섞어 성형하였으며 다짐함수비의 영향을 검토하기 위해 각각 OMC,

2. 시험장치

기존의 강성벽 시험기의 단점을 보완한 수정 강성벽 투수시험기를 제작하였다. 이 시험기는 동수경사 조절장치와 급기 및 배기 밸브가 부착된 제어판, 투과물의 교환이나 재충전이 용이한 주입장치, 투수몰드의 세 부분으로 이루어져 있다. 또 투수몰드는 시료의 성형이 용이하며 하중 재하장치가 있어 현장의 상재하중을 묘사할 수 있고 정수두를 유지할 수 있는 장점이 있다. Fig. 1은 투수시험장치의 개략도이다.

OMC 건조층, OMC 습윤층의 공시체를 제작하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 수용성 유기물의 투수성의 변화

Fig. 2는 각각 점토와 해성점토에서의 투수시험의 결과이다.

위에서와 같이 희석비가 증가할수록 투수계수는 감소하다가 약 75% 농도에서 증가하기 시작하였으며 100% 농도의 희석물을 투과시켰을 때 점토에서는 물보다 약 5배, 절대투수계수로는 20배의 증가가 있었다. 그러나 해성점토에서는 이와 같은 급격한 증가는 없었다. 이것을 다시 각각의 단계의 최종투수계수를

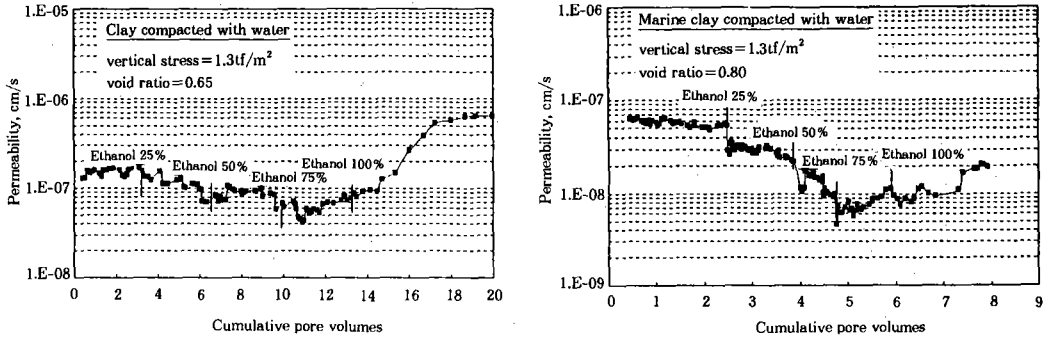


Fig. 2. Results of permeability tests of diluted Ethanol in clay and marine clay

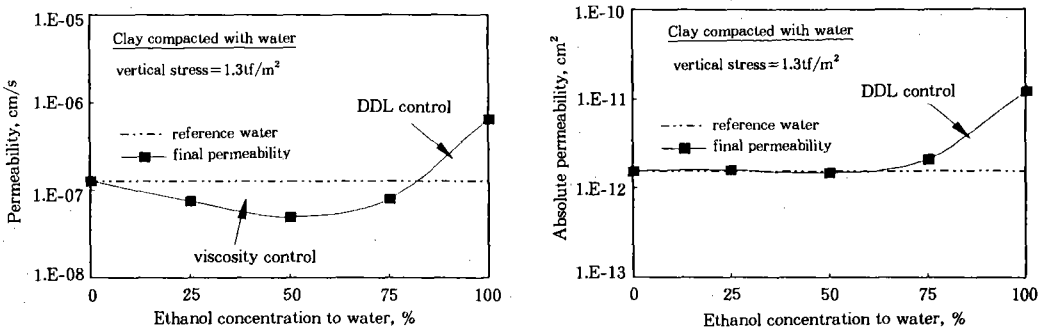


Fig. 3. Change in final permeability and absolute permeability of diluted Ethanol in clay

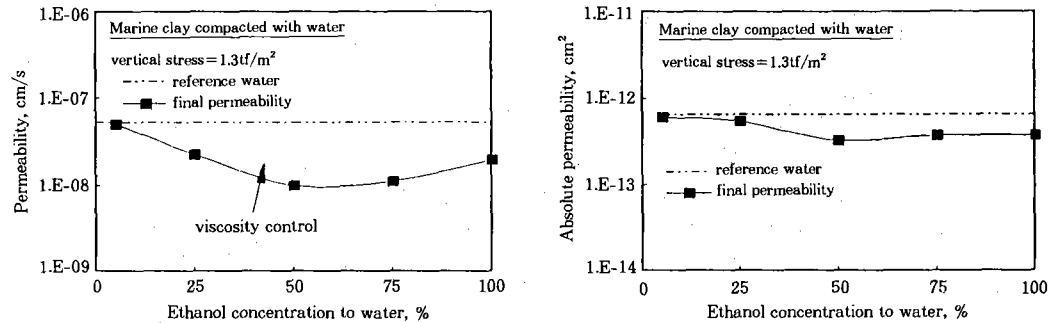


Fig. 4. Change in final permeability and absolute permeability of diluted Ethanol in marine clay

절대투수계수와 함께 도시해보면 Fig. 3과 Fig. 4와 같다.

Fig. 3에서 보는 바와 같이 점토에서는 투수계수는 점성의 영향으로 70%이하의 농도에서는 감소하고 그 이상의 농도에서는 점성의 영향을 극복하고 유전상수의 영향으로 인해

다시 증가하는 것을 알 수 있으며 이것을 절대투수계수로 나타내 보면 약 70% 이하의 농도에서는 본질적으로 일정하며 그 이상의 농도에서만 급격한 증가가 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 수용성 유기물의 임계농도는 약 70%의 농도로 판단되며 그 이상의 농도에서

는 낮은 유전상수에 의한 분산이중층의 수축에 의한 급격한 투수계수의 증가가 예상된다. 또 이때의 추정 유전상수는 약 40인데 이러한 결과는 Bowders(1987)²⁾, Fernandez(1988)⁶⁾, 전(1995)¹⁷⁾의 결과와 부합되는 것으로 유전상수는 절대투수계수와 직접적인 상관성이 있는 것으로 판단된다.

Fig. 4에서와 같이 해성점토에서는 점성의 영향으로 감소된 투수계수는 100%농도의 에탄올을 투과시킨 경우에도 회복되지 않으며 절대투수계수도 모든 회석물에서 물보다 작은 것으로 보아 점토함량이 많고 활성이 큰 광물이 포함되어 있는 해성점토는 점토자체의 투수성에 감소가 있었던 것으로 보인다. 그러나 이 경우에도 점토에서와 같이 약 70%의 농도에서 투수계수가 증가하는 것으로 보아 약 70%의 농도를 투수계수가 증가하는 임계농도로 볼 수 있다.

2. 장기투수시험에 의한 투수성의 변화

장기투수시험은 장기간 유기물에 노출된 점토의 상태를 실험실 조건에서 유기물과 직접 성형하여 재현한 것으로 Fig. 5는 점토와 해성 점토에 대한 장기투수시험의 결과이다.

시험결과에 의하면 장기투수시험에서의 점토와 해성점토의 투수계수는 물로 다짐한 경우와 비교하여 각각 4배, 10배가 컸으며 해성 점토가 점토보다 그 증가폭이 3배 이상 컸다. 이것은 해성점토가 점토함량이 많고 활성이 큰 광물이 포함되어 있어 유전상수에 의한 분산이중층의 수축이 크게 되기 때문으로 보인다.

상재하중의 투수성의 증가 억제 효과를 검토하기 위해 소정의 공극부피만큼 투과물이 투과된 후 약 6.3tf/m²의 상재하중을 걸어 투수계수의 변화를 검토하였는데 점토, 해성점토에서 각각 20~40%의 투수계수 증가 억제 효과가 있는 것으로 나타났다. 그러나 2~3 공극부피가 투과된 후에는 다시 원래 상태의

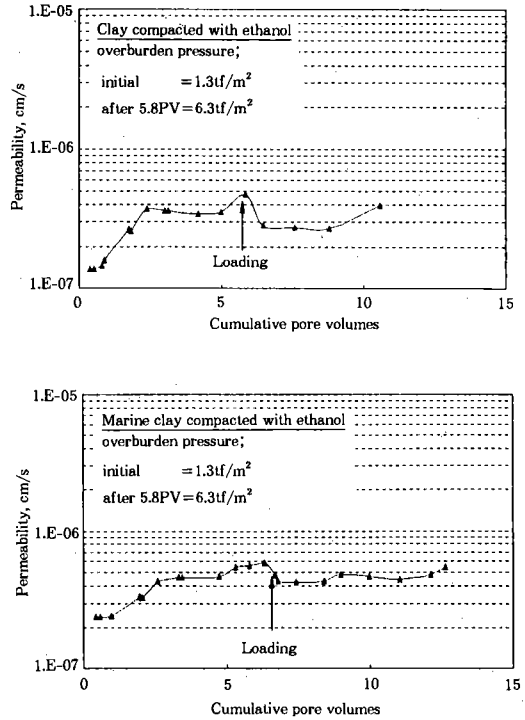


Fig. 5. Variations of permeability of "long-term permeability tests" of clay and marine clay

투수계수로 약간 회복하는 경향이 있었다. 이 결과는 Fernandez(1991)⁷⁾ 등의 연구결과와도 부합하는 것이며, 장기간에 걸쳐 점토와 유기물의 반응이 충분히 진행된 이후에 재하되는 상재하중에 의한 투수계수의 감소효과는 기대하기 어려울 것으로 판단된다.

3. 다짐함수비와 텍스트로피의 영향

Fig. 6은 다짐함수비를 달리한 점토에 대한 에탄올을 투과시킨 투수시험의 결과이다.

결과에 의하면 OMC 부근으로 다진 공시체에서 가장 큰 투수계수의 증가가 있었으며 OMC나 OMC 습윤층으로 다진 경우에도 그 최종 투수계수는 OMC 건조층의 물의 투수계수에 접근하였다. 따라서 유기물의 투수에서는 다짐함수비는 투수계수에 별다른 영향이

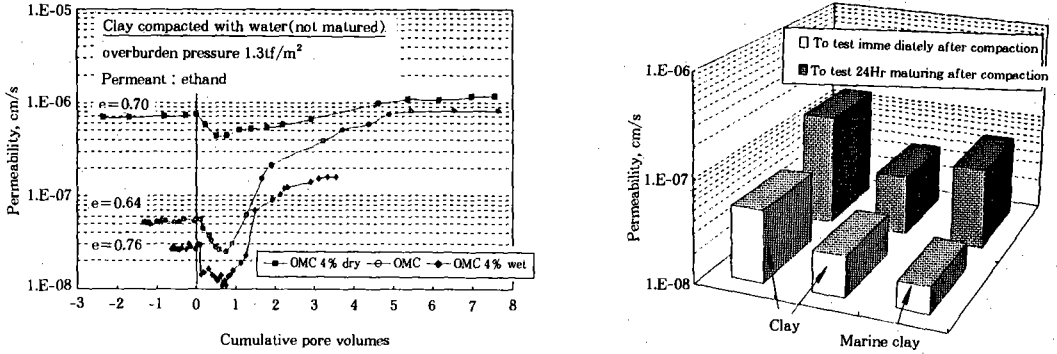


Fig. 6. Changes in permeability of clays with various level of water content in compaction and effect of thixotropy on permeability

없으며 OMC 부근이나 습윤측으로 다진 경우에도 OMC 건조측의 물의 투수계수 정도로 평가하는 것이 바람직한 것으로 나타났다.

시험전에 습윤실에서 안정시킨 점토는 그렇지 않은 경우보다 투수계수가 2배이상 컸으며 해성점토가 점토보다 더 컸다. 이것은 텍스트로피의 영향으로 보이며 현장의 상황은 이에 가까우므로 설계에 있어 반드시 고려해야 할 것으로 판단된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구에서는 점토에서 수용성 유기물의 투수특성을 구명하기 위해 점토와 해성점토를 대상으로 투수시험을 실시하였으며 장기투수 시험의 결과와 비교검토 하였으며 상재하중의 영향과 다짐조건의 영향 등에 대해 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 점토에서는 약 70%이하의 에탄올 농도에서는 점성의 영향으로 투수계수가 감소하였고 그 이상의 농도에서는 급격한 증가를 보였다. 점성과 단위중량의 영향을 배제한 절대투수계수는 약 70% 이하의 농도에서는 일정하였고 그 이상의 농도에서는 급격한 증가를 보였다.

2. 해성점토에서는 약 70% 이하의 농도에서는 투수계수가 감소하였으나 그 이상의 농

도에서는 점토와는 달리 급격한 증가는 없었다. 절대투수계수에서도 급격한 증가는 없었으며 오히려 물의 투수계수보다 작은 값이어서 점토자체의 변화가 있었던 것으로 보인다. 그러나 해성점토에서도 약 70%의 농도에서 투수계수가 점성의 영향을 극복하고 다시 증가하였다.

3. 점토에서 급격한 투수성의 증가를 보이는 수용성 유기물의 입계농도는 약 70%이며 이때의 유전상수는 약 40이었으며 유전상수는 절대투수계수와 더 직접적으로 관련이 있음을 확인할 수 있었으며 이러한 급격한 투수계수의 증가는 낮은 유전상수에 의한 분산이중층의 수축에 의한 것으로 판단된다. 그러나 점토의 종류와 광물조성의 차이에 기인하는 차이는 입증할 수 없었으며 점토의 종류와 시험조건에 따라 그 정도는 크게 달라질 수 있음을 알 수 있었다.

4. 장기투수시험에서는 두 점토 모두에서 단기투수시험의 결과보다 큰 투수계수의 증가를 보였으며, 이것은 현장에서는 실험실 조건의 투수시험에서 얻은 것보다 훨씬 큰 투수성의 증가가 발생할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 점토와 유기물이 충분히 반응한 이후에 재하되는 상재하중은 투수계수 증가 억제효과가 20~40%에 불과하여 상재하중에 의한 투

수계수 증가억제 효과는 기대할 수 없는 것으로 판단된다.

6. 다짐함수비의 영향을 검토한 결과 OMC 부근의 함수비로 다짐할 경우 가장 큰 투수계수의 증가를 보였지만 다짐함수비는 투수계수에 별다른 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 따라서, 비록 OMC 또는 OMC 습윤층의 함수비로 다진 경우도 그 투수성은 OMC 건조층의 결과에 준하여 평가하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

7. 접토는 텍스트로피의 영향으로 24시간 이상 습윤실에서 숙성시킬 경우 그 투수계수가 2배 이상 증가하였으며, 해성접토가 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. Bagchi, A., 1990, "Design, construction, and monitoring of sanitary landfill", John Wiley & Sons.
2. Bowders, J. J., & D. E. Daniel, 1987, "Hydraulic conductivity of compacted clay to dilute organic chemicals", J. of Geotech. Engrg. Div., ASCE, Vol. 113, No.12, pp. 1432-1448.
3. Broderick, G. P. & D. E. Daniel, 1990, "Stabilizing compacted clay against chemical attack", J. of Geotech. Engrg. Div., ASCE, Vol. 116, No.10, pp. 1549-1567.
4. Brunelle, T. M., L. R. Dell & C. J. Meyer, 1987, "Effect of permeameter and leachate on a clay liner", Geotech. practice for waste disposal '87, ASCE Geotechnical special publication No.46, pp. 347-361.
5. Fernandez, F. & R. M. Quigley, 1985, "Hydraulic conductivity of natural clays permeated with simple hydrocarbon", Can. Geotech. J., Vol. 22, pp. 205-214.
6. Fernandez, F. & R. M. Quigley, 1988, "Viscosity and dielectric constant controls on the hydraulic conductivity of clayey soils permeated with water-soluble organics", Can. Geotech. J., Vol. 25, pp. 582-589.
7. Fernandez, F. & R. M. Quigley, 1991, "Controlling the destructive effects of clay-organic liquid interactions by application of effective stresses", Can. Geotech. J., Vol. 28, pp. 388-398.
8. Foreman, D. E. & D. E. Daniel, 1986, "Permeation of compacted clay with organic chemicals", J. of Geotech. Engrg. Div., ASCE, Vol 112, No.7, pp. 669-681.
9. Meegoda, N. J., R. A. Rajapakse, 1993, "Short-term and long-term permeabilities of contaminated clays", J. of Environmental Engrg., Vol.119, No.4, pp. 725-743.
10. Mitchell, J. K. & F. T. Madsen, 1987, "Chemical effects on clay hydraulic conductivity", Geotech. practice for waste disposal '87, ASCE Geotechnical special publication No.46, pp. 87-116.
11. Mitchell, J. K., 1976, "Fundamentals of soil Behaviour", 2nd edition, John Wiley & sons, Inc.
12. Sridharan, A & Venkatappa Rao, 1979, "Mechanisms controlling volume change of saturated clays and the role of effective stress concept", Geotechnique, Vol. 23, pp. 359-382
13. U. S. EPA, 1985, "Minimum Technology Guidance on single Liner Systems for Landfills, Surface Impoundments and

- Waste piles-Design, Construction and Operation”, EPA/530-SW-85-013,
14. U. S. EPA, 1986, “Construction Quality Assurance for Hazard Waste Land Disposal Facilities”, Public comments Draft EPA/530-SW-85-021
 15. 정하익, 장연수, 1993, “폐기물 매립장의 차폐재와 침출 화학성분과의 상호작용 분석”, 韓國地盤工學會誌 제9권 제3호, pp. 49-60.
 16. 전무갑, 이남훈, 1996, “우리나라 폐기물 관리 현황과 폐기물 매립기술 동향”, 농어촌진흥공사, 농공기술 No. 51, pp. 140-153.
 17. 전상옥, 1995, “유기투과물이 자연점토의 투수성에 미치는 영향에 관한 연구”, 서울대학교 농공학과 농업토목전공 석사논문.
 18. 허정, 1993, “유해한 성분을 함유한 침출수가 점토의 투수계수에 미치는 영향”, 건국대학교 산업대학원 환경공학과 석사논문.