

폐기물 매립시설 점토 차수층의 실내시험과 적용성에 관한 연구

A Study on the Hydraulic Conductivity of the Bentonite-Clay Mixtures and Their Application to Waste Containment System Clay Liners

황광모¹⁾, Kwang-Mo Hwang, 민덕기²⁾, Tuk-Ki Min

¹⁾ 울산대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, University of Ulsan

²⁾ 울산대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, University of Ulsan

SYNOPSIS : This study focuses on the hydraulic conductivity behaviour of the bentonite and clay mixtures which have been used as waste containment system clay liners.

In the numerous laboratory experiments, the main factors affecting the hydraulic conductivity were bentonite-clay content, compaction water content, and permeant liquids. Permeability tests were performed on the bentonite-clay samples and the freshwater was used as the permeant liquid. Then, the laboratory results were applied to the field work. The compacted clay density by the sand cone method was used as a suitability for a field application. For permeability tests the laboratory permeability and the standard consolidation tests of UD samples were performed.

Adsorption capacity tests for heavy metals were performed and applied to various adsorption isotherm equations.

KEYWORDS : hydraulic conductivity, bentonite, clay liners, adsorption, isotherm equation

1. 서론

근래 국외는 물론 국내에서도 지반환경에 대한 인식이 커지고, 그에 상응하는 법규가 강화되고 있는 실정이다. 그러나 산업이 발전할수록 폐기물량은 늘어나고, 폐기물 처리에 보다 많은 재원과 인력의 확충 및 연구가 활발치 못한 것이 사실이다. 외국의 경우 매립장의 설계 및 관리에 있어서 상당부분의 연구성과와 기술의 발전을 가져오고 있으며, 최근 국내에도 관리기준이 강화되어 적용되는 실정이다. 그러나 아직까지 설계에서 시공 및 시공관리단계에서 매립장 시스템 중 가장 중요한 부분의 하나인 차수층에 대한 근접관리가 되지 않아 설계와 시공에 따른 토질공학 및 환경공학 측면에서 확인된 사항이 많지 않은 실정이다. 본 연구에서는 차수재로 사용된 점토에 대하여 실내시험을 통한 기초연구를 수행하고 현장적용을 통한 확인을 실시하였으며, 지반·환경공학측면에서 투수시험(hydraulic conductivity test) 및 흡착(adsorption)시험을 실시하여 실제 현장에서의 적용성 여부를 살펴보았다.

2. 매립지 차수층의 설치기준 및 차수재에 관한 연구

선진외국의 경우 차수재가 점토(clay liner), 고분자 합성막(geomembrane, GCL 등), 혼합재(soil + bentonite)등 지반조건과 폐기물 종류에 따라 다양하게 채택하고 있다. 차수재는 어느 한가지만으로 이

루어지지 않고 복합적으로 이루어진 차수시스템이므로 국내에 적용하기 위해서는 보다 자세한 연구를 수행해야 할 것이다.

토질역학적인 측면에서 투수계수 산정은 불교란 시료를 채취하여 실시하는 실내시험과 원위치 현장시험을 들 수 있다. 실내시험에는 다짐시험 몰드를 이용하는 변수두 투수시험과 표준 압밀시험(rigid wall), 삼축시험(flexible wall)이 이용되는데, 실내에서 구한 투수계수가 현장의 투수계수보다 3~10,000 배나 더 작은 경우도 발생하기도 한다(Daniel, D.E 등). 따라서 실내시험에 의한 투수계수와 현장의 투수계수를 비교 분석할 필요가 있다. 본 연구에서는 현장에서 불교란 시료를 채취 실내에서 변수두 투수시험 및 표준 압밀시험을 실시하여 투수계수를 상호 비교하였다. 또한 bentonite의 함유량이 증가할수록 투수계수와 강도가 감소하므로 이에 따른 혼합 차수재의 투수계수 및 강도시험을 실시하였다.

점토, bentonite 혼합차수재의 경우 중금속을 흡착하는 성질을 가지고 있으므로 bentonite의 첨가에 따른 흡착능 시험을 실시하였으며, 투과수를 $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}(0.5\text{M})$ 을 사용하여 투수시험을 실시하고 투과수에 대한 영향을 검토하였다.

3. Properties

3.1 점토

본 연구에 사용된 시료는 울산광역시 울주군 두서면 일대에 분포하고 있는 육성점토로 표 1에 나타난 바와 같이 흙의 비중은 2.67~2.7의 범위에 있고, 액성한계는 50%이상 소성지수는 20%이상이다.

입도분포시험의 결과로 볼 때 시료는 점토광물 중 kaolinite를 많이 함유하고 있는 안정적인 점토이며, 2μ 이하의 시료가 25~55%의 범위에 있어 ASTM의 분류에서는 세립토, KSF 2301 분류에서는 실트 크기의 입자를 포함한 점토질 흙이다.

3.2 Bentonite

Ca-bentonite를 Na계로 활성화시킨 bentonite는 높은 팽윤성과 유착력이 있어 쓰레기 매립장, 환경사업장 등의 방수 및 차수를 요구하는 곳에서 적용되어 왔으며, 그 범위는 차수시설 천공 보수시스템에 이르기까지 점차 확대되고 있다. 본 연구에 사용된 bentonite는 몬모릴로나이트를 70%이상 포함하고 있으며, 팽윤성이 높다.

표 1. Properties of clay, bentonite

구 분	Clay 1	Clay 2	Clay 3	Bentonite
비 중 Gs	2.67	2.67	2.70	1.70
액성한계 ω_L (%)	55.30	54.36	50.59	-
소성지수 I_P (%)	28.45	26.61	21.84	-
#200체 통과율(%)	72.52	75.12	90.47	97.84
균등계수 Cu	12.84	20.77	-	
곡률계수 Cc	0.71	1.37	-	
USCS 분류	CH	CH	MH	
팽윤도 ml/2g				20.5

4. Laboratory test

느슨한 흙을 다짐 때 여러 요소들에 영향을 받게 되는데, 그 중 가장 중요한 것은 다짐 에너지의 종류와 크기, 입도분포, 존재하는 점토광물의 양과 종류 등이다. 일반적으로 다짐 에너지를 크게 할수록

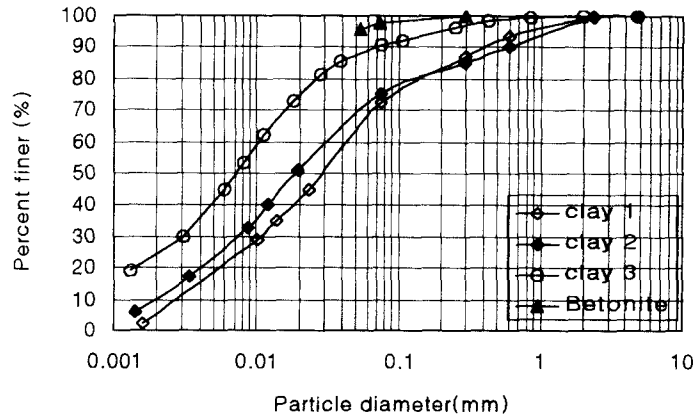


그림 1. 입도분포 곡선 (Particle size distribution curve)

건조단위중량(γ_{dmax})은 증가하고 최적 함수비(OMC)는 작아지며, 입도분포가 좋은 흙일수록 다짐도가 좋다. 실내 다짐시험 후 현장에서 동일한 다짐 에너지로 다짐을 할 경우, 강도가 목적일 때는 최적 함수비의 건조측 다짐을 하고, 차수가 목적일 경우 최적 함수비의 습윤측에서 투수계수가 작아진다. 따라서 차수가 목적인 매립지 차수층 및 복토층에서는 분산구조에 가까운 최적 함수비의 습윤측 2~3%에서 다짐을 실시함이 옳을 것이다.

실내에서 투수계수를 구할 수 있는 방법은 다짐 몰드를 이용한 변수두 투수시험과 압밀에 의한 하중 단계별 투수계수 산정, 삼축 압축시험에 의한 방법이 있다. 본 연구에서는 실내에서 다짐 몰드에 의한 변수두 투수시험과 표준 압밀시험을 실시하고 투수계수를 비교하였다. 또한 bentonite 첨가와 함수비의 변화에 따른 투수계수 및 일축압축강도를 비교하였다.

4.1 실내투수시험

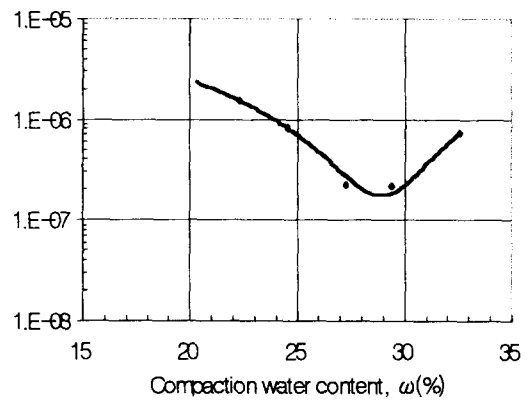
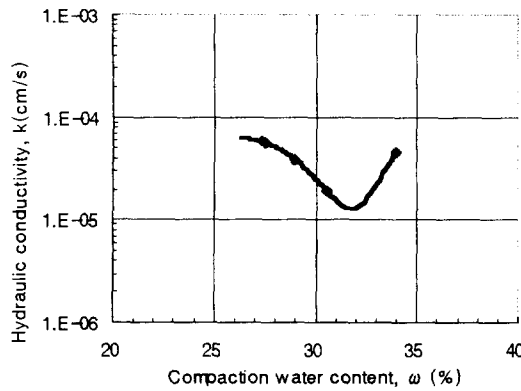
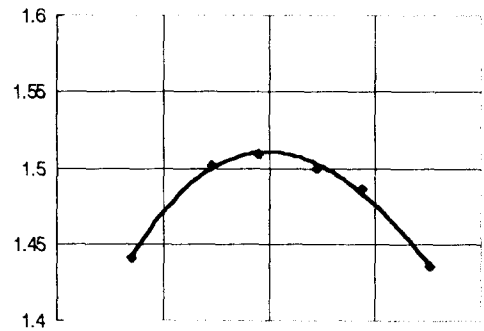
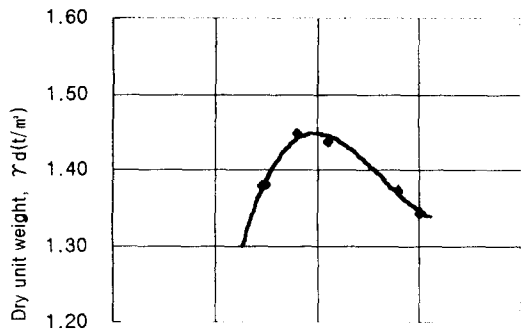
실내투수시험의 오차원인과 투수계수에 영향을 미치는 각종 연구결과 시료의 준비단계에서 투수계수가 10배까지 변할 수 있으므로 함수비를 주의 깊게 조절하였다. 시료 내에 공기가 존재할 경우 투수계수가 낮게 측정될 수 있으므로 수침 기포제거법(KSF 2322)으로 기포를 제거하였다. 이때 진공펌프의 진공도는 0.8kgf/cm^2 로 유지하였다

점토에 대한 투수시험의 결과 $2.0 \times 10^{-5} \text{ cm/sec}$ 로 폐기물 매립지 차수층 규정을 만족하지 못하였다. 따라서 투수계수를 낮추기 위하여 점토와 bentonite를 중량 배합하여 투수시험을 실시하였다. 다짐 및 투수시험의 결과는 표 2, 그림 2에 나타내었다. bentonite 첨가량이 증가할수록 최적함수비는 증가하고, 최대 건조단위중량은 커짐을 알 수 있었다.

실내시험의 결과 그림 4에서 볼 수 있는 바와 같이 bentonite 함유량이 12%이상일 경우 매립지 차수층의 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

표 2. Bentonite 함량의 증가와 함수비의 변화에 따른 최대 건조단위중량 및 투수계수

B/S 비율 \ 구분	최적 함수비, ω (%)	최대 건조단위중량, γ_{dmax} (t/m ³)	투수 계수, k (cm/sec)
Bentonite/Soil			
5/95	25.0	1.56	9.00×10^{-7}
10/90	25.34	1.50	1.61×10^{-7}
15/85	26.1	1.51	6.80×10^{-8}



(a)

(b)

그림 2. 다짐 함수비에 따른 건조단위중량 및 투수계수의 관계 (a) B/S=0/100, (b) B/S=10/90

5. 시험결과 및 비교

5.1 현장밀도시험

실내시험의 결과 B/S=12/88 이상 실내에서 구한 최적 함수비의 2~3% 습윤측 다짐 함수비로 현장에 적용하였다. 시공에 사용된 다짐 장비는 점토 덩어리를 파쇄하는 효과가 우수한 양쪽롤러와 진동롤러이다. 점토 차수층의 두께는 총 80cm이고 현장 다짐은 25cm, 25cm, 30cm의 3층으로 나누어 다짐을 실시토록 하였다. 다짐층에 대한 현장 밀도시험은 각 다짐 층 당 2개소씩 다짐 정도가 취약한 가장자리에서 실시하였다. 다짐에 대한 현장 관리치에서 현장건조밀도는 실내 다짐밀도의 90%이상, 수정다짐의 경우 95% 이상이어야 한다. 시험의 결과는 실내최대건조밀도의 95~105%로 잘 다져진 상태였다. 실내다짐

시험과 현장밀도 시험의 결과는 그림 3에 나타내었다.

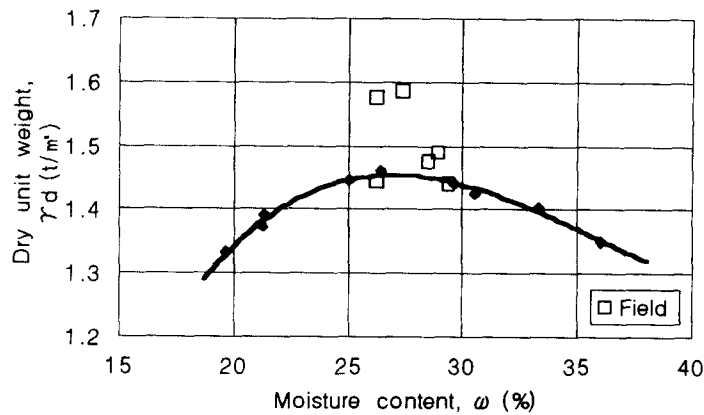


그림 3. 현장밀도 시험 (모래 치환법)

5.2 투수시험 및 표준압밀시험

현장에서 채취한 시료에 대하여 변수두 투수시험과 표준 압밀시험을 실시하고, 투수계수를 비교, 확인 하였다(그림 4, 그림 5). 압밀시험으로 투수계수를 산정하기 위한 시료는 세립토에서 좋은 결과를 얻을 수 있다.

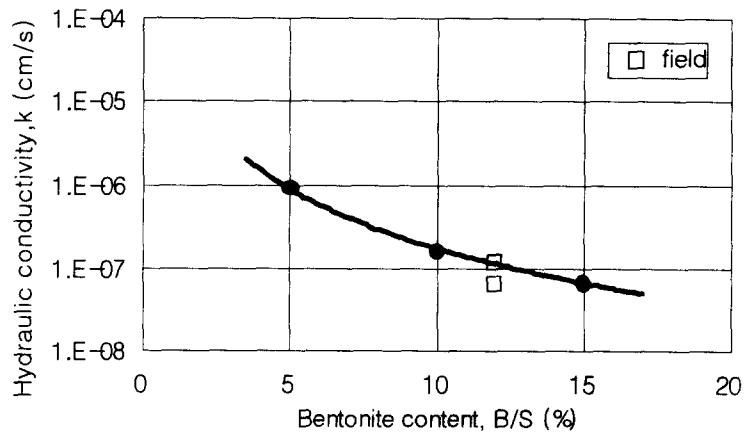


그림 4. Bentonite 첨가에 따른 투수계수와 현장시료 투수계수

표준 압밀시험의 결과 간극비-하중(log scale) 곡선은 정규 압밀 점토의 거동을 보였으며, 압축지수 값이 거의 일정하였다. 그림 6에 나타나 있듯이 간극비-투수계수 관계는 모든 시료에 대하여 선형관계가 있는 것으로 나타났다.

변수두 투수시험에 의한 투수계수와 표준 압밀시험에 의한 투수계수는 5~10배 차이를 보였는데, 이는 표준 압밀시험에서 구한 값이 투수계수 이외의 다른 항목들을 많이 포함하기 때문인 것으로 생각된다. 본 연구에서는 현장시료에 대한 변수두 투수시험의 투수계수가 표준 압밀시험으로부터 계산한 투수계수보다 실내투수시험의 투수계수에 잘 일치하는 것으로 나타났다.

차수층을 시공할 때 가장 중요한 부분은 토취장에서 옮겨진 점토를 고르게 분쇄하고, bentonite를 고르게 혼합하는데 있다. 현장에서 사용되는 믹서의 경우 매 순간마다 함수비와 bentonite분말의 배합량을 결정하기가 쉽지 않은 실정이다. 이는 현장에서 채취한 시료에 대한 투수시험 및 표준 압밀시험의 결과에서 잘 나타난다. 투수시험의 결과 각 층에서 투수계수 값이 약 4배까지 차이를 보이고, 표준 압밀시험

에서는 6배까지 차이를 나타내었다. 또한 bentonite의 함량이 증가할수록, 다짐 함수비가 증가할수록 강도가 작아짐을 알 수 있었다. 따라서 연약지반에서 차수층을 시공할 경우 지반강도를 증가시킬 수 있는 최적의 bentonite의 혼합 및 적절한 개량이 필요하다.

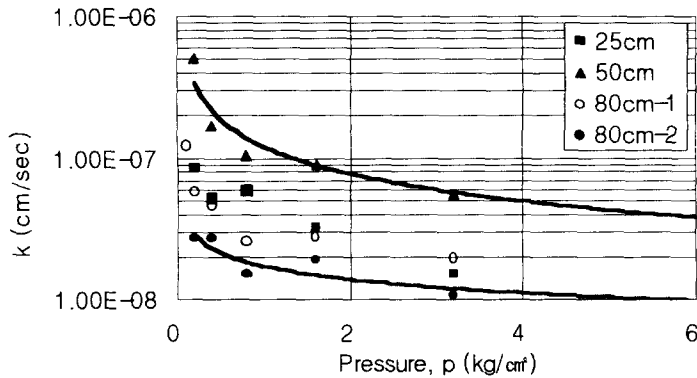


그림 5. 표준 압밀시험에 의한 하중 - 투수계수의 관계

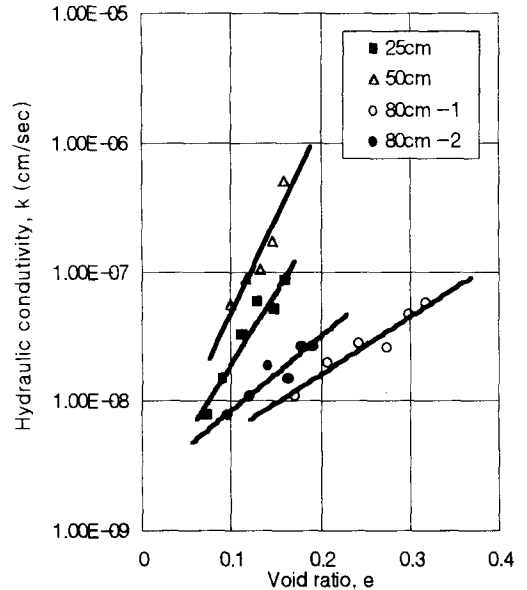


그림 6. 투수계수 - 간극비

6. 흡착현상

흡착은 액체-고체, 기체-고체와 같은 두 상(phase)의 경계면에서 발생하는 물리적 또는 화학적 공정으로 표면 혹은 내면에서 일어나는 상 사이의 물질적 축적 및 농축으로 볼 수 있다. 표면에 흡착 또는 흡수되는 물질을 피흡착제(adsorbate)라 하고, 축적이 일어나는 고체 상을 흡착제(adsorption)라 한다. 흡착현상은 피흡착제가 수처리 활성탄에 흡착되는 과정을 연구하는데 주로 사용되어 왔으며, 회분식(batch), 칼럼식(고정상 역류이동) 등의 형식이 있다. 본 연구에서는 혼합 차수재의 중금속 흡착현상을 알아보기 위한 과정으로 회분식을 이용하였다.

6.1 흡착능

흡착능에 영향을 미치는 것으로는 비표면적, 공극의 크기와 분포 등 흡착제의 물리·화학적 특성이 중요하며, 피흡착제의 분자량, 극성, 화학적 조성 그리고 용액의 pH, 온도, 농도등이 있다. 일정한 온도에서 흡착량과 평형농도 사이의 관계를 식으로 표현하는 등온 흡착식(adsorption isotherm equation)은 Freundlich형과 Langmuir형 등이 있다.

Freundlich형의 등온식은 경험식으로, 수처리 활성탄 흡착을 이용할 때 가장 널리 이용되고 있다.

$$q = kC^{1/n} \quad (1)$$

여기서, k, n=상수이다.

Langmuir형의 등온식은 단분자 흡착층에서 흡착분자의 응축과 증발사이의 평형에 기초한 것으로서 식은 다음과 같다.

$$a = \frac{abC}{1+bC} \quad (2)$$

여기서, a=최대 흡착량에 대한 상수, b=흡착에너지 상수이다.

6.2 흡착능 시험(Adsorption capacity test)

흡착속도를 알아보기 그림 7과 같이 행한 시험결과, 사용된 점토 및 점토-bentonite의 흡착속도가 10시간으로 나타났다. 즉, 흡착이 완전한 평형상태를 유지하는데 소요되는 시간이다. 따라서 10시간의 진탕으로 B/S=0/100, 5/95, 10/90, 15/85에 대한 Cu+Pb에 대한 흡착능 시험을 실시하고, 그 결과를 표 3에 나타내었다. 또한 회분식(batch, slurry type)을 이용하여 중금속 중 Cu, Pb에 대한 흡착능 시험을 실시하고 가장 많이 사용되는 Freundlich형과 Langmuir형 등은 흡착식으로 흡착능을 비교하였다.

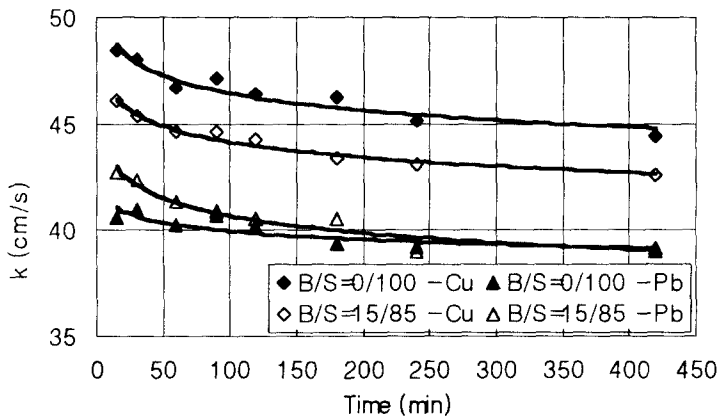


그림 7. 흡착속도를 구하기 위한 흡착시험

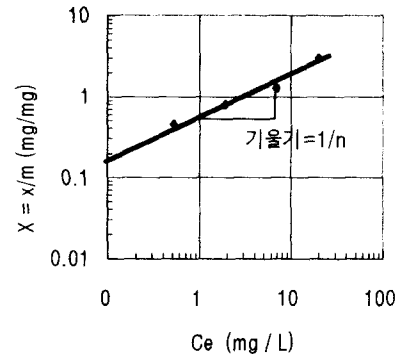


그림 8. Freundlich 등은 상수 산출 그래프

6.2.1 흡착능 시험 결과

초기농도 : 5, 10, 20, 50ppm

입자크기 : 0.149mm (#100체 통과시료)

초기 pH : 7.0 (초기 중성상태 유지)

흡 무게 : 1g / 100mL

표 3. Adsorption capacity - Freundlich형, Langmuir형 등은식으로 구한 결과

금속	Bentonite+Clay	k	1/n	최대흡착량 (mg/L)	a	b
Cu	0/100	0.998	0.691	3.787	1.1693	8.541
	5/95	0.590	0.501	2.643	0.508	7.565
	10/90	1.008	0.800	3.810	0.986	21.041
	15/85	1.109	0.805	4.951	1.273	7.694
Pb	0/100	44.36	0.608	44.093	12.690	0.585
	5/95	20.52	0.298	37.214	8.078	0.562
	10/90	23.64	0.575	51.626	6.101	0.937
	15/85	16.43	0.568	39.922	1.917	4.447

점토와 bentonite 혼합재의 경우 Freundlich형 등온식과 Langmuir형 등온식의 두 방법으로 분석해 본 결과 Freundlich 등온식이 잘 맞는 것으로 나타났으며, 추후 흡착능 시험에서 Freundlich 등온식을 사용하여 흡착량을 구하는 것이 보다 정확한 값을 구할 수 있을 것으로 사료된다. 또한 소량의 시료를 사용하여 시험을 실시하였으므로 Pb에 대해서는 뚜렷한 흡착능의 경향은 보이지 않았지만 Cu의 경우 bentonite의 양이 증가할수록 흡착능이 증가하는 경향을 보였다.

7. 염화칼슘(2수화물)을 투과수로 이용하였을 경우의 투수계수

현장에서 실제 투과되는 침출수는 증류수나 수돗물보다 비중이 크며, 화학적 반응을 하므로 투과성은 극단적인 경우 100배의 크기를 갖는 것으로 보고되고 있다. 따라서 가능하면 현장 침출수와 같은 화학적 특성을 지닌 투과수를 사용함이 바람직하다. 본 연구에서는 0.5M 염화칼슘(2수화물)을 투과수로 하여 투수시험을 실시하여 수돗물과의 관계를 비교하였다. 투과수의 조제법은 0.5 mol/L $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ 염화칼슘(2수화물) - 7.35g → 100ml.이다.

일반적으로 염화칼슘 수용액은 수돗물보다 비중이 크므로 투수계수가 증가하는데, 투수시험의 결과 $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ (0.5M)로 실시한 투수시험에서 투수계수가 3.58×10^{-7} cm/sec로 수돗물에 의한 투수계수보다 약 2배 크게 나타났다.

8. 결론

실내에서 bentonite+clay에 대한 다짐시험 및 투수시험을 실시하여 차수재의 기준을 만족하는 bentonite 혼합비(B/S=12/88)를 산정하였다. 이 결과를 현장에 적용하여 다짐층을 3층으로 나누어 각 다짐 단계에서 현장밀도 시험을 실시하고, 시료를 채취하여 실내에서 투수시험 및 표준 압밀시험을 실시하였다. 현장에서 채취한 시료의 투수계수는 투수시험과 압밀시험에서 각각 $1.66 \times 10^{-7} \sim 6.40 \times 10^{-8}$ cm/sec와 $4.77 \times 10^{-8} \sim 7.8 \times 10^{-9}$ cm/sec($p=6.4 \text{ kg/cm}^2$)로 비교적 매립장 차수층의 기준을 만족하였으며, 변수두 투수시험으로 구한 투수계수가 실내다짐 시료의 투수계수에 보다 잘 일치하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 중금속에 대한 흡착능 시험 결과, 순수점토에 비해서 혼합차수재의 초기 흡착능이 Cu에서 높게 나타났으며, Freundlich형 등온식이 혼합차수재의 흡착량을 구하는데 보다 정확한 값을 구할 수 있는 것으로 나타났다. 또한 투과수를 수돗물로 사용한 경우 보다 염화칼슘 수용액을 사용한 경우가 투수계수 값이 크게 나타났다.

참고문헌

1. 건설교통부(1995), "폐기물 매립지 차수재 개발" 한국건설기술연구원.
2. T. C. Kenney et al(1992), "Hydraulic Conductivity of Compacted Bentonite-Sand Mixtures", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 29, No. 2~3, pp364~374.
3. T.W.Lambe & R.V.Whitman(1969), " Soil Mechanics". John Wiley & Sons, Inc., New York.
4. Hari D. Sharma., Sangeeta P. Lewis(1994), "Waste Containment System, Waste Stabilization, and Landfills : Design and Evaluation", John Wiley & Sons, Inc., New York, pp158~218.
5. James K. Mitchell., Makram Jaberl(1990), "Factors Controlling the Long-term Properties of Clay Liners", ASCE, Geotechnical Special Publication No. 26, pp84~105.
6. R. Kerry Rowe et al(1995), "Clayey Barrier Systems for Waste Disposal Facilites", Champman & Hall, London, pp101~108.
7. R. T. Stern and C. D. Shackelford(1998), "Permeation of Sand-Processed Clay Mixtures with Calcium Chloride Solutions", Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Eng March, pp231~240.