한국지반환경공학회 논문집 제1권 제1호 2000년 12월 pp. 65~70

폐기물매립지 침출수 누출방지용 벤토나이트 복합라이너 개발

Development of Bentonite Composite Liners for Waste Landfill Sites

최우진* · 진성기** · 하현중***
Choi, Woo-Zin · Jin, Sung-Ki · Ha, Hun-Jung

Abstract

Recently, soil-bentonite mixtures are frequently used as impervious liners for waste disposal sites. In the present work, bentonite composite liner systems have been developed by utilizing Korean zeolitic bentonites. The geomechanical properties of the liner systems, such as strength hydraulic conductivity, etc. have also been studied. The laboratory and field test results showed that uniaxial strengths of the system were improved by addition of bentonite and CaO-based additive to the upper and lower layer of the liner systems, respectively. Hydraulic conductivity values measured on field liner systems showed less than 1×10^{-7}cm/s, which is considered to be minimum regulation requirement for waste disposal sites.

Keywords : Soil, Bentonite, Composite liner, Permeability, Landfill

요 지

최근 폐기물 매립지에서 침출수의 누출방지를 위하여 벤토나이트를 함유하는 복합라이너시스템을 많이 활용하고 있다. 본 연구에서는 국내에 부존하고 있는 제올라이트성 벤토나이트를 이용하여 복합라이너시스템을 개발하였으며, 본 시스템에 대한 강도, 투수율 등 지반공학적특성을 조사하였다. 라이너시스템의 강도 특성을 파악하기 위하여 실내제작 및 현장 코아에 대한 일축압축강도 시험을 수행한 결과 하부층 첨가제에 의한 일축압축강도가 현저히 개선됨을 확인하였다. 또한, 현장투수 실험결과 폐기물 매립지 차수층 설치기준인 1×10^{-7}cm/s 이하의 법적 투수계수기준을 만족하는 것으로 나타났다.

주요어 : 벤토나이트, 복합라이너, 매립지, 투수계수

1. 서론

폐기물 매립은 폐기물 처리에 있어 가장 단순하고 경제적인 방법으로서 우리나라에서는 발생 폐기물의 대부분을 매립방법으로 처리하고 있으나 1980년대를 기준으로 국내 폐기물 매립지는 서울 난지도 매립지, 부산 화명동 매립지, 경기도 광주 매립지 등과 같이 차수층, 침출수 처리장 등이 설치되지 않은 불량 매립지가 대부분으로서 지하수 오염 및 지반환경오염등의 심각한 문제를 제기해 왔다. 그러나 최근 경제발전과 생활환경에 대한 인식이 높아짐에 따라 폐기물 매립 및 처리에 관한 규정은 점차 강화되어 개정된 폐기물 관리법에 따라 차수층 및 침출수 처리시설 등이 설치된 위생매립장이 조성되고 있다. 일반적으로

* 정회원, 수원대학교 환경공학과 부교수
** 비회원, 동아건설산업(주) 기술연구소
*** 비회원, 동아건설산업(주) 기술연구소

폐기물 매립지에서 발생할 수 있는 오염물로서는 침출수와 함께 매립가스 등이 있으며 이중 침출수는 주변토양과 지하수를 오염시키는 주원인으로서 이의 효율적인 제거와 처리를 위하여 차수층시설 및 배수시설이 필요하다.

종래의 경우, 고밀도 폴리에틸렌(HDPE)공법, 또는 흙-벤토나이트 공법, 고화처리 공법 등을 차수공법으로 사용하여 폐기물 매립장을 조성하였으나, 상기와 같은 종래 차수공법에 의해 시공된 폐기물 매립장의 경우, 시공이나 품질관리 면에서 여러 가지 문제점을 내포하고 있었다. 고밀도 폴리에틸렌(HDPE)공법은 고밀도 폴리에틸렌의 이음부로 유해 침출수가 누출되는 문제가 있었고, 단순한 흙-벤토나이트 공법은 현장에서 시공함수비의 조절이 잘 이루어지지 못하여 시공관리가 어려웠으며, 고화처리 공법은 고화처리층 자체가 장기간 대기에 노출되므로서 열화현상에 의해 그 품질이 저하되며, 또한 매립이 진행되고 있는 상태나 매립이 완료된 후 안정화 과정에서 차수층에 결함이 발생하여도 근본적인 보수나 보강이 불가능한 단점이 있었다.

본 연구에서는 국내에 부존하고 있는 저품위 벤토나이트를 이용하여 내구성 및 내투수성이 뛰어난 벤토나이트 복합라이너(Bentonite Composite Liner, BCL)공법을 개발하였으며 또한, 현장 적용가능성을 검토하였다. 따라서, 본 논문에서는 BCL이 구비하여야 할 강도, 투수성 등을 비롯한 지반공학적 특성을 실내 및 현장시험시공을 통하여 측정하였다.

2. 벤토나이트 복합라이너공법

2.1 BCL 공법의 개요

벤토나이트 복합라이너 (BCL)공법은 팽윤도는 다소 떨어지지만 중금속 흡착능이 뛰어난 국내산 "Zeolitic Bentonite" 및 국내산 천연 광물질을 활용하여 현장토와 혼합, 다짐하여 침출수의 이동 및 누출을 효과적으로 차단할 수 있는 차수층을 조성하는데 목적이 있으며, 지반여건에 따라서 특히, 연약지반의 경우 BCL 단독 또는 그 하부를 고화처리 후 조성할 수 있다.

그림 1에서 알 수 있듯이, BCL 상부층은 벤토나이트가 함유된 상부층에 첨가제 CT (Top Material of Composite Liner)를 원지반토와 일정비율로 혼합 후 전압함으로서 조성할 수 있으며, 하부층은 CT와 반응성이 뛰어난 하부층 첨가제 CB(Bottom Material of Composite Liner)를 혼합 · 전압함으로써 전체 BCL이 조성된다. 특히 폐기물 매립지내에서 발생하는 침출수가 BCL에 도달할 경우 1차적으로 CT에 포함된 Bentonite의 팽창으로 인하여 차수층내 간극이 충진되어 투수성을 저하시키며, BCL에 균열(Crack)이 발생시 침출수의 이동경로를 따라 이동하는 상부층 첨가제 CT에서 해리된 이온과 하부층 첨가제 CB가 침출수중의 수분을 매체로 하여 상호 화학반응으로 불용해성 침전물층인 칼사이트(Calcite)와 Quartz ($SiO_2 \cdot nH_2O$)류의 조성층이 형성된다. 따라서, 침출수 누출로 인한 주변환경 오염에 대해 보다 적극적으로 대처할 수 있는 안전하고 경제적인 차수층공법이다.

또한, 연약지반의 경우는 현장토와 시멘트를 혼합하여 고화처리층을 배수층위에 조성하므로서 지반의 부등침하로 인한 침출수 누출에 효과적으로 대처할 수 있다. 그림 2는 본 공법의 실증시공을 위해 김포매립지에 조성한 복합라이너시스템의 평면도를 보여주고 있다. 현장시험을 위해 조성된 라이너시스템의 크기는 30×10m이며 연약지반용 및 일반폐기물 매립장의 BCL층의 두께는 각각 30cm 및 100cm로 조성하였다.

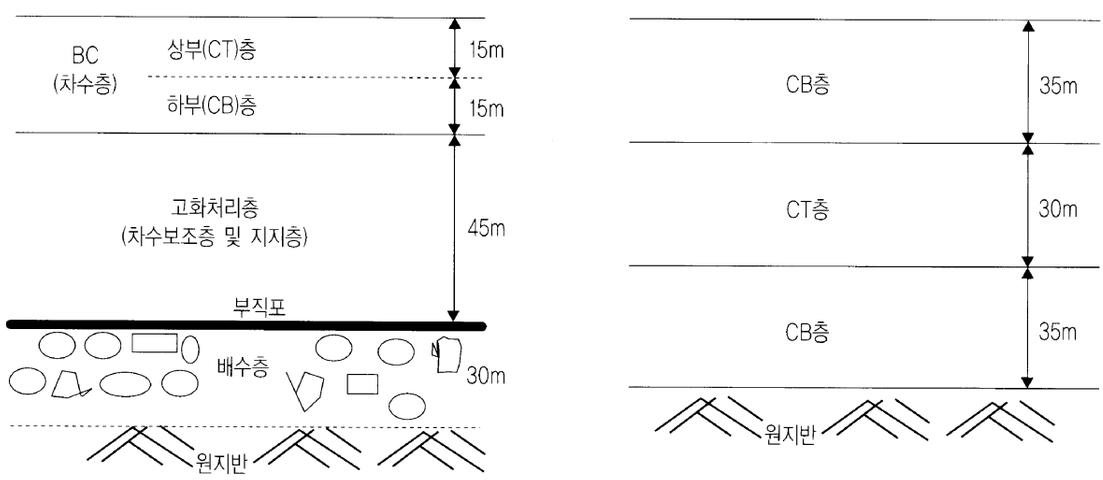

그림 1. Cross sectional view of bentonite composite liner systems.

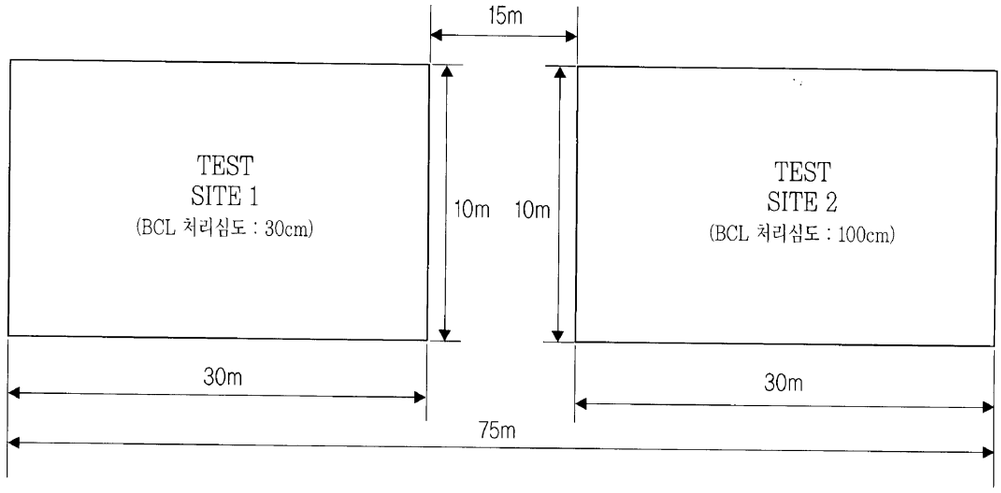

그림 2. Plane view of bentonite composite liner systems for field test.

표 1. Physical and chemical properties of bentonite used present study.

구 분	Moisture (%)	Sp. Gravity (g/cm^3)	pH	Particle Size	Uniaxial Strength (kg/cm^2)	Mont. Amount (cc/mg)	Viscosity (sec/mg)
YB-1	10	0.75 ~ 0.90	8 ~ 9	90%/250mesh	0.65	35/500	50/500
	성분 분석표						
	SiO_2	Al_2O_3(%)	Fe_2O_3(%)	CaO(%)	MgO(%)	Na_2O(%)	CEC (meq/100g)
	65.9	15.1	2.11	1.92	1.62	1.43	135.1

2.2 벤토나이트복합라이너 재료

본 연구의 실내 및 현장실험에 사용된 벤토나이트는 양남지역에 소재한 광산으로부터 채취한 국산 Ca형 스멕타이트(Smectite)로 구성된 벤토나이트로서 팽윤도를 높이기 위해 소다회(Soda Ash) 처리하여 Na형으로 치환한 동해화학백토(YB-1)를 사용하였고, 사용된 시료의 물리 · 화학적 특성은 표 1과 같다. Table 1에 나타난 바와 같이 시험용 벤토나이트는 일반 벤토나이트의 CEC(Cation Exchange Capacity, 양이온 치환능력) 약 30~60meq/100g에 비해 약 2배~4배 정도의 탁월한 이온교환 능력 즉 흡착능을 나타내는 "Zeolitic Bentonite"이다.

상부층에 첨가하는 첨가제 CT는 크게 벤토나이트와 하부첨가재료와 반응하여 침전 및 응집작용이 가능한 재료(K)이며, 이때 K는 하부재료와의 반응성을 고려하여 주로 비정질 실리카로 구성된 천연 퇴적광물로서 실험을 수행하였으며 그 화학성분은 표 2와 같다.

표 2. Chemical composition of additive for upper layer in BCL system.

Content	%	Amount	Test Method
SiO_2	%	69.9	KSE 3806 93
Al_2O_3	%	9.41	KSE 3806 93
Fe_2O_3	%	2.65	〃
CaO	%	0.19	〃
MgO	%	0.44	〃
K_2O	%	1.31	〃
Na_2O	%	6.34	〃
SO_3	%	0.53	〃
LOI	%	8.78	〃

본 실험에서 사용한 하부층 첨가제(CB)에 대한 화학적 성분은 CaO 66.1%, MgO 1.55% 및 SiO_2 2.97%로서 토목공사용으로 활용하기 위해 가장 품질등급이 낮은 제품을 사용하였다.

3. BCL의 강도특성

본 연구에서는 BCL 상부 및 하부층의 강도특성을 파악하기 위하여 실내제작 및 현장코아(Core) 공시체에 대한 일축압축강도 시험을 수행하였다.

일축압축시험은 시료를 원통 공시체로 만들어 측압을 받지않는 상태에서 축하중을 가하여 전단파괴시켜 시료의 전단강도를 결정하는 방법이며 KS F 2314로 규정되어 있다. 일축압축강도 시험을 위한 공시체는 직경 D=5cm, 높이=10cm 규격의 원통형 공시체로서, 다짐시험에서 구한 배합비 및 최적함수비를 기준으로 KS F 2312 A 다짐에너지로 환산한 다짐에너지($5.625kg \cdot cm/cm^3$)로 다져서 제작하였으며 재령일수별(7, 14 및 28일) 일축압축강도시험을 실시하였다.

3.1 상부층 첨가제(CT)에 의한 일축압축강도

표 3은 CT의 첨가에 의한 일축압축강도를 측정한 결과를 요약한 표이다. 점성토의 경우 재령 28일 일축압축강도는 첨가제의 양에 따라 1.1~2.2kg/cm², 사질토의 경우 2.2~4.3kg/cm²의 일축압축강도를 보여주었으나, 이는 첨가제에 의한 강도발현 효과보다는 흙자체의 다짐효과에 의한 것으로 사료된다.

3.2. 하부층 첨가제(CB)에 의한 일축압축강도

표 3. Result of uniaxial strength test (Soil + CT)

Addition Amount (t/m^2)		σ_7 (t/m^2)	σ_{14} (t/m^2)	σ_{28} (t/m^2)
Clayey Soil	CB 6%	1.12	1.45	1.64
	CB 9%	1.45	1.56	2.05
	CB 12%	1.38	1.62	2.24
Sandy Soil	CB 6%	2.18	2.45	3.26
	CB 9%	3.11	3.42	2.79
	CB 12%	3.26	3.58	4.29

표 4. Result of uniaxial strength test (Soil + CB)

Addition Amount (t/m^2)		σ_7 (t/m^2)	σ_{14} (t/m^2)	σ_{28} (t/m^2)
Clayey Soil	CB 6%	3.55	4.80	7.82
	CB 9%	3.60	7.77	10.09
	CB 12%	4.50	8.90	13.50
	CB 15%	5.20	9.50	15.52
Sandy Soil	CB 6%	14.80	19.15	21.40
	CB 9%	16.90	22.42	23.13
	CB 12%	18.44	25.62	26.68
	CB 15%	19.18	26.63	33.74

CB첨가에 의한 일축압축강도 시험결과에 의하면 점성토의 경우 재령 28일 일축압축강도는 첨가제의 양에 따라 3.9~15.5kg/cm², 사질토의 경우 15~40.7kg/cm²의 일축압축강도를 나타내었으며 시험결과는 표 4 및 그림 3과 그림 4와 같다. 결과에서 알 수 있듯이, CB첨가제에 의한 일축압축강도의 개선효과는 CT첨가에 의한 개선효과보다 훨씬 크게 나타났다.

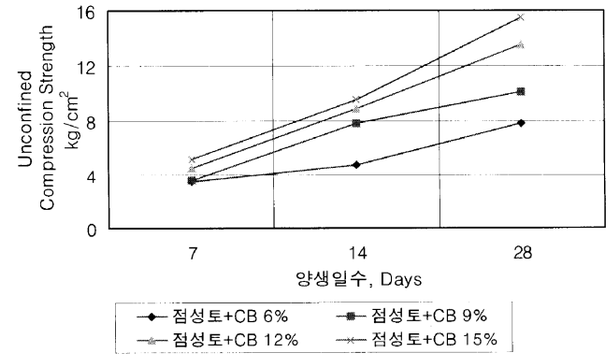

그림 3. Result of uniaxial strength test (Clayey soil + CB)

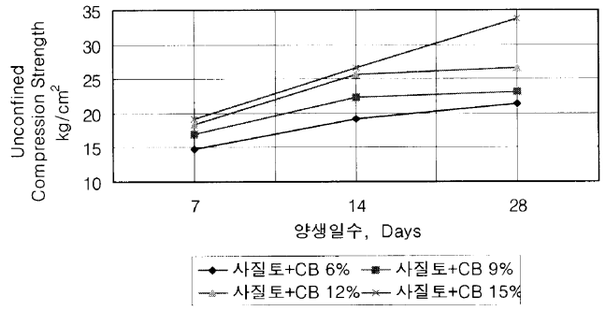

그림 4. Result of Uniaxial strength test (Sandy soil + CB)

BCL의 CB층은 상재하중을 효과적으로 하부지반에 분산시킬 수 있는 지지력을 확보하는 동시에 균열발생시 상부층에서 이온상태로 분리이동한 상부층 첨가제 CT와 화학반응이 용이하며 균열부위를 보수함으로써 효과적으로 침출수의 지반오염을 차단시킬 수 있는 층으로서, 시험결과에 의하면 사질토 공시체가 점성토 공시체보다 CB에 의한 강도증진 효과가 큰 것으로 나타났으며 이는 시료의 입자크기에 따른 영향으로 판단되었고, 전체적으로 CB의 첨가량이 증가하고, 재령일수가 경과할수록 실내 공시체의 일축압축강도가 증가하는 경향을 나타났다.

CT와 CB의 화학반응성과 소정의 강도확보를 고려한 CB의 적정첨가량은 현장사용토의 최대건조단위중량(γ_{dmax})에 대하여 점성토 시료의 경우 10~12% 및 사질토 시료의 경우 8~12% 정도가 적당한 것으로 판단되었다.

4. BCL의 투수특성

4.1 변수위투수 및 자동삼축투수시험

폐기물 매립장 차수층 조성에 있어 저투수성을 확보하는 일은 매우 중요한 사항으로서 본 시험은 상기 일축압축강도에서 구한 적정배합비(상부층: 점성토 + CT 8%, 하부층: 점성토 + CB 9%)에 의해 상·하 두층의 BCL공시체를 제작하여 실험을 실시하였다. 실내에서 투수계수를 측정하는 시험은 정수위 투수시험과 변수위 투수시험 등이 있으며 일반적으로 정수위 투수시험은 투수성이 비교적 큰 조립토에 적당하며, 변수위 투수시험은 투수성이 낮은 세립토에 적당하다.

본 투수시험에서는 변수위투수시험기 및 자동삼축투수시험기를 사용하여 각각의 투수계수를 구하였으며 이들 시험 결과를 비교하여 공시체의 정확한 투수계수를 구하고자 하였다. 상부층 첨가제(CT)에 의한 투수계수 저감효과를 측정한 결과, 실내제작 BCL공시체의 재령 28일차 투수계수(K28)는 점성토 공시체의 경우 변수위투수 및 자동삼축투수는 각각 1.98×10^{-8} cm/s 및 6.07×10^{-8} cm/s 로 나타났으며, 사질토 공시체의 경우는 각각 9.32×10^{-8} cm/s 및 6.99×10^{-8} cm/s 로 감소하였다.

위의 결과에 의하면 상·하 두층으로 구성된 BCL 공시체의 경우 폐기물 매립지 차수층 시설기준인 1×10^{-7} cm/s 의 투수성을 만족하였다.

4.2 현장투수시험

일반적으로 현장에서 직접투수계수를 구하는 방법은 SSRI(Sealed Single Ring Infiltrometer), Bat Permeater를 이용하는 방법과 SDRI(Sealed Double Ring Infiltrometer)등이 있으나 본 시험에서는 SDRI를 이용하여 현장의 투수계수를 측정하였다.

본 시험방법은 ASTM D 5093-90(Field Measurement of Infiltration Rate Using a Double Ring Infiltrometer with a Sealed Inner Ring)에 명기된 방법으로서 개략적인 측정시스템은 그림 5와 같다.

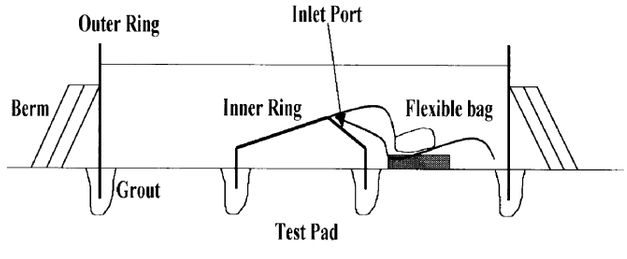

그림 5. Schematic diagram of SDRI.

본 시험기기 중 Sealed Inner Ring은 실제의 침투량을 측정하고 증발산에 의한 수분의 손실방지를 주목적으로 하며 Outer Ring은 Inner Ring하부로의 일차원(One-dementional) 수직흐름을 유도한다. 투수율(Flow Rate)은 중량을 알고 있는 물로 채워진 Flexible Bag을 Inner Ring의 Port에 연결시킴으로써 측정하였고, 이때 Inner Ring으로부터 물이 지반속으로 침투함에 따라 동일한 양의 물이 Flexible Bag으로부터 Inner Ring으로 유입되므로 일정시간이 경과한 후 Flexible Bag의 무게를 측정함으로써 손실수량을 BCL차수층 침투수량으로 환산하였다.

현장에서 측정한 SDRI시험결과는 그림 6과 같다. 일반 매립장 모델의 경우, 최초 시험 후 약 6일간은 침투유량이 과다하여 1×10^{-5}cm/s 의 투수성을 나타냈으나 이는 시험기 설치 중 발생된 지반의 미세 간극을 통한 초기누수 및 시험기 측면에 충진한 벤토나이트의 팽윤 및 수분흡수에 의해 실제 BCL을 통한 침투량보다 과다한 수량이 소모된 것으로 판단되며, 이후 28일까지 침투율이 일정한 속도로 감소하여 1×10^{-6}cm/s, 시험 32일부터 48일까지 약 1×10^{-7}cm/s, 시험종료전 약 8일간은 약 1×10^{-7}cm/s이하로 나타났다.

연약지반 모델의 경우, 최초 시험 후 약 4일간은 일반 매립장 모델에서와 마찬가지로 침투되는 유량이 많아 1×10^{-5}cm/s의 투수성을 나타냈으나 이는 일반매립장 모델과 동일한 원인에 기인된 것으로 사료되었으며, 이후 6일부터 18일까지 침투율이 일정한 속도로 감소하여 1×10^{-6}cm/s, 시험 20일부터 36일까지 약 1×10^{-7}cm/s순으로 감소되었고 시험종료 전 약 20일간은 1×10^{-7}cm/s이하로 나타났다.

상기의 결과에 의하면 연약지반용 모델의 침투율이 보다 빠른 속도로 약 1×10^{-7}cm/s대의 침투율을 나타냈으며, 이는 연약지반 매립장 모델의 최상부층이 제오라이트형 벤토나이트를 함유하고 있어 초기부터 자체팽윤에 의하여 낮은 투수성을 가진 것으로 사료되었다.

CB, CT, CB층 순으로 조성되는 일반매립장 모델의 경우 침투율이 52일이 지난 후 1×10^{-7}cm/s이하의 투수성을 나타낸 이유는 강도가 약한 CT층의 보강을 위하여 CT층위에 설치한 CB층의 상대적으로 높은 투수성에 의한 것으로 사료되었으나 장기적인 측면을 고려할 때 폐기물 매립장의 바람직한 모델이 될 것으로 판단되었다.

현장투수계수(k)는 상기 침투율(I)을 동수경사(i)로 나눔으로

서 산정되고, 동수경사(i)는 Irrometer에 의한 물의 침투깊이(d)의 실측을 통해 산정이 가능하나 본 시험에서는 물의 침투깊이(d)를 측정하기 위한 Irrometer의 적용이 용이하게 이루어지지 못하였다.

본래 Irrometer의 적용은 천공이 쉽게 이루어지고 물의 침투가 상대적으로 빠르게 일어나는 전답용으로 주로 활용되고 있으므로, 소정의 강도를 보유한 BCL CB층의 경우 천공시 균열이 발생하기가 쉽고 투수성이 매우 작아 물의 침투깊이(d) 측정이 매우 어렵고, 장시간의 측정시간이 요구되는 등의 문제점이 발생하므로 추후 적정한 시험방법의 보완을 통하여 보다 정확한 시험결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다

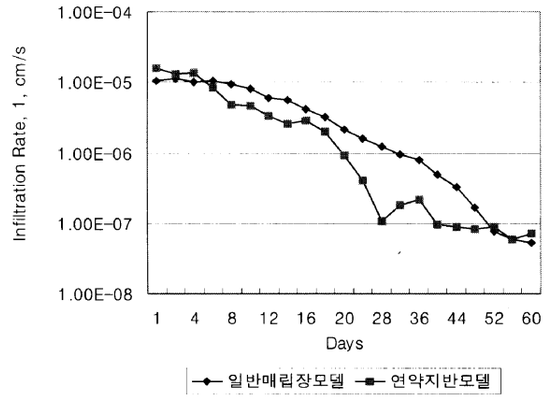

그림 6. Results of infiltration rate on BCL system by using a Sealed Double Ring Infiltrometer (SDRI).

5. 결론

본 연구에서는 국내에 부존되어 있는 저급 벤토나이트를 이용하여 내투수성 뿐만 아니라 내구성이 우수한 벤토나이트 복합라이너시스템을 개발하였으며, 또한 개발된 시스템에 대한 강도 및 투수특성을 조사하므로서 현장 적용가능성을 검토하였다. 본 연구에서 제시한 복합라이너시스템은 BCL 상부층에 벤토나이트와 비정질실리카로 구성된 첨가제를 원지반토와 일정비율로 혼합한 후 전압하므로서 조성하였으며, 하부층은 상부층에 첨가한 재료와 반응성이 우수한 소석회 주성분의 첨가제를 첨가하여 전체 BCL층을 조성하였다. 또한, 연약지반의 경우는 현장토와 시멘트를 혼합하여 고화처리층을 배수층위에 조성하므로서 지반의 부등침하로 인한 침출수 누출에 효과적으로 대처할 수 있다.

본 연구에서는 BCL 상부 및 하부층의 강도특성을 파악하기 위하여 실내제작 및 현장코아(Core)공시체에 대한 일축압축강도 실험을 수행하였다. 실험결과에 의하면 특히, 하부층 첨가제에 의한 일축압축강도의 개선효과가 크게 높았으며 매립장 여건에 따라 강도조절이 가능할 것으로 조사되었다. 또한, 본 연구에서는 SDRI (Sealed Double Ring Infiltrometer)를 이용한 현장 투수실험을 수행하였으며, 복합라이너시스템을 조성한 후 60일이 경과한 다음 측정한 투수실험결과에 의하면 투수성이 크게 향상됨을 확인하였으며, 매립지 조성기준치인 1×10^{-7}cm/s이하에 적합한 것으로 판명되었다.

참 고 문 헌

1. 김부경 외(1999), "폐기물 매립장 침출수에 팽윤성을 갖는 벤토나이트차수재의 개발", 최종보고서, 케이씨엔지니어링.
2. 손준익 외(1992), "도시폐기물 매립장의 건설부지활용과 위생매립시스템에 관한 연구", 건설기술연구원, pp.82~130.
3. 이재영(1997), "폐기물 매립시설의 차수시설 설치 및 최종복토" 폐기물매립시설 설치 · 운영관련 공무원 연찬회, 환경부.
4. 최우진 외(1999), "매립지 차수재 개발을 위한 국내 벤토나이트의 팽윤성 향상에 관한 연구", 한국자원공학회 춘계 학술발표회 논문집, 충남대, 4월 16일~17일.
5. 최우진 외(1999), "폐기물 매립지 침출수 누출방지용 벤토나이트 복합라이너 개발" 한국토양환경학회 추계발표회, 제주대, 10월 29일.
6. 홍원표 (1996), "초연약지반 표층고화처리공법의 실용화 연구(Ⅱ)", 중앙대학교, pp.176~191.
7. CH2M HILL-KOREA(1996), "수도권매립지 1공구 안정화 기본설계 종합보고서(지반분야)", 동아건설산업(주), 서울, pp.88~92, 155~208.
8. Grim, R. E. and Guven, N., Bentonite(1978), "Geology, Mineralogy, Properties and Uses", Elsevier Scientific Publishing Co..
9. Noh, J.H., Kim, S.J., and Choi, J-H.(1983), "Mineralogical and chemical characterization of bentonite from Tertiary tuffaceous sediments in the Donghae Bentonite Mine". Jour. Geol. Soc. Korea, 19, 39~48.
10. Sharma, H. D. and Lewis, S. P.(1994), "Waste Containment Systems, Waste Stabilization and Landfills", John Wiley & Sons, Inc,. pp.158~192.
11. van der Sloot, H. A.(1997), "The Self-forming and Self-repairing Method", ECN-RX-97-037 Report, September.