

흙-벤토나이트 혼합물의 투수특성

Permeability of Soil-Bentonite Mixtures

채 교 익* · 권 무 남** · 이 상 호** · 남 효 석***

Chae, Kyo Ik · Kwon, Moo Nam · Lee, Sang Ho · Nam, Hyo Sock

Abstract

Leachate generated from landfill material flows through soil gravitationally downward and, continues to flow until it encounters groundwater, posing the thread of pollution. So selection of liner material having a low permeability and testing method are required.

The study was performed to find bentonite content of soil-bentonite mixtures for using as liner and cover of waste landfills. This paper includes results of consolidation tests and permeability tests and evaluates suitability and properties of soil-bentonite mixtures as impervious materials.

Keywords : Bentonite, Soil-bentonite, Permeability, Consolidation

I. 서 론

쓰레기 매립장 라이너와 같이 침출수의 차수를 필요로 하는 토공구조물의 불투수성 확보를 위한 혼합재료로서 벤토나이트가 널리 사용되는데, 그 이유는 벤토나이트가 물과 반응하였을 때 체적 팽창율이 높을 뿐만 아니라 입자의 높은 비표면적과 양이온 치환능력(CEC : Cation Exchange Capacity)에 의하여 차수효과를 크게 나타내고, 오염물질의

차폐와 이동을 억제하고 일부 물질을 정화하는 효과가 크기 때문이다.^{11),12)}

1940년대 초 미국에서 흙-벤토나이트 혼합물이 뒤채움재(soil-bentonite backfill), 그라우팅 지수벽, 널말뚝 지수벽, 흙-벤토나이트와 Slurry-trench 시스템의 지수벽(cutoff walls)으로 사용되었고, 1960년 중반에는 굴착공사에서 침투수의 조절과 오염 물질로부터 유출되는 침출수(Leachate)를 차단하기 위하여 흙-벤토나이트 차수시스템의 사용이 급속히 증가하였다.

특히 최근에는 흙-벤토나이트 혼합물(soil-bentonite mixtures)을 폐기물 매립장의 바닥 차수재나 덮개 재료로 사용하여 매립장의 침출수를 차단하므로써 토양의 오염을 방지하는데 큰 영향을 미치고 있다.

* 상주대학교 토목공학과
** 경북대학교 농업토목공학과
*** 경북대학교 대학원 농업토목공학과
* Corresponding author. Tel.: +82-54-530-5251
fax: +82-54-530-5137
E-mail address: kichae@sangju.ac.kr

Garlanger(1987)은 모래-벤토나이트가 투수계수 $\alpha \times 10^{-8}$ cm/s의 기준을 만족하기 위해서는 모래에 벤토나이트를 최소한 6%를 혼합해야 하며, 현장에 적용하는 경우 시공시 불균질성 문제가 있기 때문에 최소한 모래에 벤토나이트를 7.5% 이상 혼합하도록 제안하였다. Fernuik(1989)은 4종의 흙-벤토나이트 혼합물에 대하여 삼축압축투수시험과 현장시료의 투수시험을 통하여 실내와 현장시료의 투수성에 대한 상호관계를 규명하였다.

Boosinsuk(1991) 및 Kenney(1991) 등의 학자들이 모래-벤토나이트 혼합물의 지반공학적 특성에 대하여 연구를 수행하였으며, Chan과 Hsu(1994)은 흙-벤토나이트 차수벽의 투수계수와 벤토나이트의 혼합비, 슬럼프, 함수비의 관계를 분석하였으며 실내시험 결과를 이용하여 설계에 이용할 수 있는 컴퓨터 설계 프로그램을 제시하였다.

국내에서 최근에 환경보전에 대한 관심이 높아짐에 따라 이들 재료에 대한 기초연구가 수행되어 왔으며, 한국건설기술연구원에서 1995년 흙-벤토나이트 차수층에 의한 폐기물 매립지의 차수재를 개발하였고, 1998년 흙-벤토나이트 차수층에 대한 폐기물 매립시설의 설계·시공기술을 연구하였다.^{12),13)}

그러나 국내 쓰레기 매립장 침출수의 차단을 위해 차수층을 시공할 때 부적절한 시공으로 차수층에 균열이 일어남으로서 침출수가 지하로 유출되는 경우가 발생하고 있기 때문에 충분한 차수 효과를 나타내는 재료의 선정과 이에 대한 기초적인 연구가 요구되고 있다.

본 연구에서는 차수성이 뛰어나고 폐기물 매립장의 바닥 차수재로 많이 사용되는 벤토나이트를 흙과 혼합하여 바닥 차수 시스템으로 사용할 때 차수재 재료로서의 적합성 및 성능을 평가하고 설계 시공에 필요한 기초자료를 제시하기 위하여 점토-벤토나이트 혼합물의 Rowe cell에 의한 투수특성 등을 규명하였다.

II. 재료 및 방법

1. 시험재료

가. 흙 시료

본 연구에 사용된 흙은 통일 분류법으로는 CL로 분류되는 흙으로 물리적 성질은 Table 1과 같고 입도분포 곡선은 Fig. 1과 같다.

Table 1 Physical properties of soil

G _s	LL (%)	PL (%)	OMC (%)	γ_{dmax} (gf/cm ³)	#200 passing (%)	USCS	Organic content (%)
2.65	38.0	18.3	16.98	1.729	64.2	CL	8.3

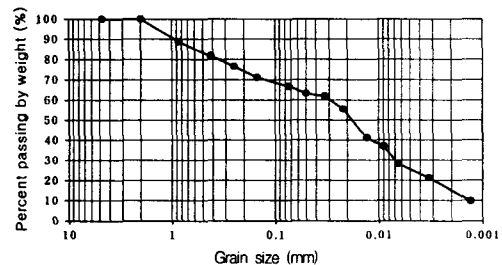


Fig. 1 Grain size distribution curve of soil used

나. 벤토나이트

본 연구에 사용한 벤토나이트는 미국 Wyoming 주에서 생산된 나트륨계 벤토나이트를 사용하였다. 실험에 사용한 벤토나이트의 물리적 성질과 화학적 성분은 Table 2, Table 3과 같다.

Table 2 Physical properties of bentonite

Physical properties	Specific gravity	Montmorillonite content (%)	Swell index (ml/2gf)	Liquid limit (%)	Apparent density (gf/cm ³)
	2.30	72.9	14.5	330	0.76

Table 3 Chemical components of bentonite

Chemical components (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	Na ₂ O	Others
	63.70	19.82	2.65	0.24	0.92	1.09	2.11	9.47

다. 흙-벤토나이트 혼합공시체

현장에서 채취한 점토시료를 실험실에서 자연건조시킨 후 고무망치로 분리하여 No. 4체를 통과한 흙을 사용하였다. 흙-벤토나이트 혼합물 전체중량에 대한 벤토나이트의 건조중량비를 5%, 10%, 15%, 20%, 25%로 하여 채 등(2001)에서 제시된 바와 같은 다짐시험에서 구한 최적함수비로 흙-벤토나이트 혼합공시체를 만들어 실험에 사용하였다.

라. 현장시료

점토-벤토나이트 혼합토를 사용한 경북 D지구 매립장 차수층 3곳에서 직경 100 mm, 길이 700 mm의 시료를 채취기구로 채취하여 실내실험을 통하여 투수계수를 산정하였다.

2. 시험방법

가. Rowe cell 투수시험

본 연구에서의 투수시험은 흙-벤토나이트 혼합물을 표준다짐 A방법으로 다짐하여 지름 7.55 cm, 높이 3 cm인 cutting ring으로 공시체를 제조하여 실시하였다.

공시체를 2 kgf/cm² 압력으로 압밀한 후 시료의

상·하면의 압력차가 1.5 kgf/cm²에서 정수위 투수시험을 하였으며, 변수위 투수시험의 경우 초기 압력차를 1.9 kgf/cm²으로 하여 변수위 투수시험을 실시하였다.

Fig. 2는 Rowe cell 일방향 연직투수시험의 개략도를 나타내고 있다. Rowe cell 투수시험은 물이 연직방향으로 흐르도록 시료의 상·하면에 압력차를 주고 투수계수를 측정하는 시험으로서, 압밀하중은 Fig. 2의 밸브 C를 통해 다이아프램 압력을 시료에 가압하고 시료의 상·하면에 대한 수두차는 P₁과 P₂사이의 압력차이와 같다.

Rowe cell에서의 투수시험은 Rowe cell에 일정한 압력을 가하여 연직 혹은 수평(방사)방향과 각 방향에 대한 등변형이나 자유변형 조건으로 투수계수를 측정할 수 있다.

본 실험에서는 압밀이 끝난 시료를 등변형 조건으로 연직방향의 투수계수를 산정하였다.

나. 정수위 투수시험

Rowe cell에 의한 정수위 투수시험은 압밀실험을 완료한 시료를 Fig. 2와 같이 정상류가 발생하도록 시료의 상·하면에 압력차를 주고, 유입-유출 유량이 일정해 질 때까지 압력차를 0.1 kgf/cm²씩

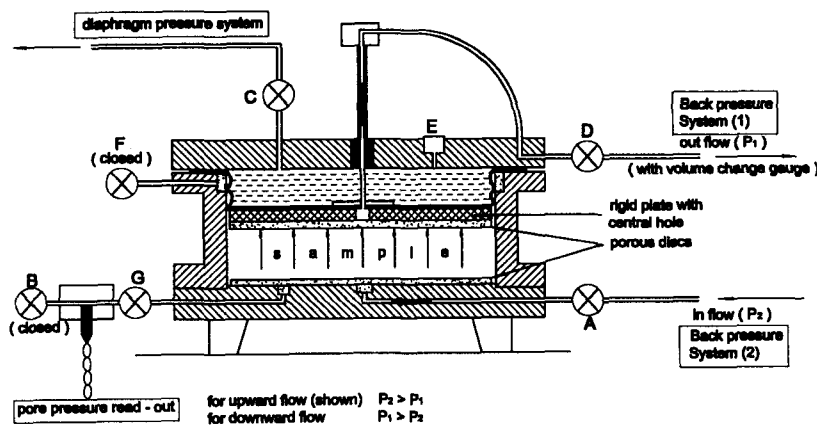


Fig. 2 Arrangement of Rowe cell for permeability test with flow (upwards) (Head, 1986)

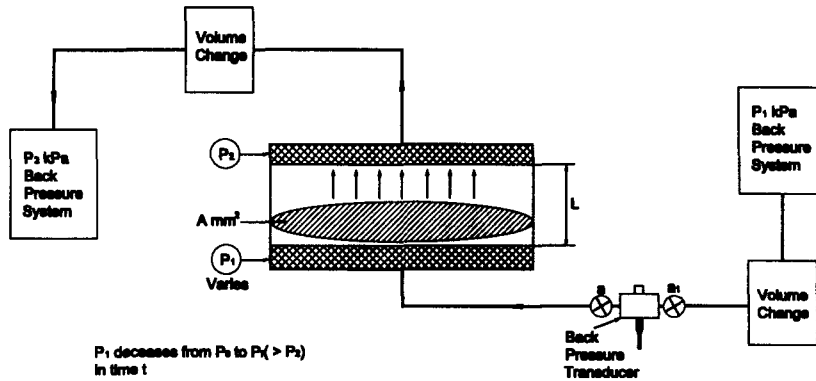


Fig. 3 Outline of apparatus for measurement of very small permeability using a pressure transducer (Head, 1986)

증가시켜 최대 구속응력을 넘지 않도록 하여 일정한 흐름을 유발시키는 수두가 유지될 때 투수시험을 시행하였다.

정수위 투수시험의 연직 방향의 투수계수는 Head(1986)가 제안한 식을 사용하였다.

다. 변수위 투수시험

기존의 변수위 투수시험(KS F 2322-95)에 의해서 점토에 대한 투수계수를 측정할 때 변수위 투수시험에 의해서 시료에서 흘러나오는 수량이 미소하여 투수계수가 작을 경우 투수계수를 측정하기가 매우 어렵고, 수두는 관의 길이의 의해 제한을 받는 단점이 있다. 즉 투수계수가 아주 적을 때는 가는 관으로 측정이 가능하지만 측정시간이 장기간 소요되고, 관의 길이가 짧을 경우 재현할 수 있는 수두에 한계가 있으며, 투수계수 측정에 사용하는 관의 길이를 길게 하였을 때는 실험하는데 불편한 점이 있다. 또한 점토의 정수위나 변수위 투수시험은 장시간 소요되므로 물의 증발을 방지하고 일정한 온도를 유지시켜야 하는 문제점이 있다.

이와 같은 단점을 보완하기 위하여 Fig. 3과 같이 가는 관 대신에 압력 변환기(pressure transducer)를 사용한 변수위 투수시험을 Remy의 변수위 투수시험이라 한다(Remy, 1973).

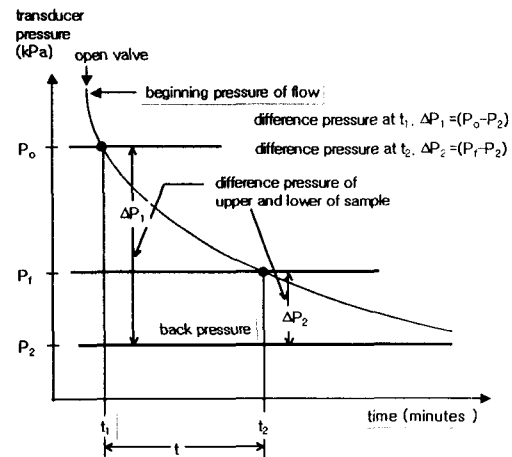


Fig. 4 Graphical plot of base pore pressure against time for determination of very small permeability (Head, 1986)

Remy의 변수위 투수시험은 시료를 포화와 압밀을 시킨 다음에 시료 상·하면의 압력차를 1 kg/cm²(100kPa) 이상 주고 Fig. 3의 밸브 a₁을 닫은 후 경과시간에 대한 압력(P₁)의 변화를 압력 변환기로 측정한다.

Fig. 4에서와 같이 t분 동안 시료 하부의 배압 P₁은 P₀에서 P₁로 감소하며, 시료로 유입되어 강아 되는 물의 부피를 αmm³/kPa 표시하는 압력 변환기의 변형값으로 측정하여 투수계수를 산정할 수

Table 4 Void ratio and coefficients of permeability by Rowe cell two-way consolidation test

Consolidation Pressure (kgf/cm ²)		Bentonite content (%)					
		0	5	10	15	20	25
0.5	k	3.257×10^{-6}	1.463×10^{-6}	2.968×10^{-6}	4.629×10^{-7}	4.088×10^{-7}	3.435×10^{-7}
	e	0.47	0.53	0.78	0.59	0.72	0.74
1	k	1.497×10^{-6}	2.263×10^{-6}	2.479×10^{-6}	1.102×10^{-7}	2.210×10^{-8}	2.556×10^{-8}
	e	0.42	0.46	0.68	0.46	0.63	0.60
2	k	7.159×10^{-7}	1.665×10^{-7}	2.319×10^{-8}	7.463×10^{-9}	5.768×10^{-9}	6.683×10^{-9}
	e	0.37	0.41	0.61	0.34	0.54	0.47
4	k	1.259×10^{-7}	3.327×10^{-8}	3.731×10^{-8}	3.013×10^{-9}	3.469×10^{-9}	2.641×10^{-9}
	e	0.33	0.37	0.54	0.25	0.44	0.32

있다. 변수위 투수계수는 Head(1986)가 제안한 식을 사용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 흙-벤토나이트 혼합물의 투수특성

가. Rowe cell 투수시험

Table 4는 양방향 압밀시험에서 구한 간극비와 평균투수계수의 값을 나타내고 있다(Chae et al, 2001). 압밀 시험에서 시료의 압밀침하량과 포화 시료에서 배출된 배출수량에 의한 시료의 체적감소량을 측정하여, 시료의 압밀침하량과 배출수량에 의한 체적감소량으로부터 log t 방법에 의해 압밀계수와, 체적변화계수를 구하여 투수계수 값을 산출하였으며 이들 방법에 의해 구한 투수계수의 평균 값을 나타내고 있다.

Fig. 5와 Table 5는 벤토나이트 혼합비에 대한 투수시험에서 구한 투수계수와 압밀시험에서 2 kgf/cm² 압밀 후 산정한 투수계수를 비교한 결과를 나타내고 있다.

Fig. 5에 나타난 바와 같이 정수위 투수시험, 변수위 투수시험, 압밀시험에서 산정한 투수계수는 벤토나이트의 혼합비가 10% 이상일 때 투수계수는 $4.54 \times 10^{-9} \sim 2.32 \times 10^{-8}$ cm/s 정도였다. 4가지

Table 5 Coefficients of permeability of Rowe cell consolidation test and permeability test with bentonite contents (cm/s)

Bentonite content (%)	Permeability test		Consolidation test	
	Constant head	Falling head	One-way	Two-way
0	1.07×10^{-6}	1.56×10^{-7}	1.03×10^{-6}	7.16×10^{-7}
5	1.41×10^{-8}	1.14×10^{-8}	7.20×10^{-8}	1.67×10^{-7}
10	4.50×10^{-9}	6.31×10^{-9}	1.05×10^{-8}	2.32×10^{-8}
15	3.40×10^{-9}	3.20×10^{-9}	4.91×10^{-9}	7.46×10^{-9}
20	1.58×10^{-8}	6.37×10^{-9}	1.89×10^{-8}	5.77×10^{-9}
25	4.10×10^{-9}	4.79×10^{-9}	2.53×10^{-9}	6.68×10^{-9}

*Consolidation pressure : 2 kgf/cm²

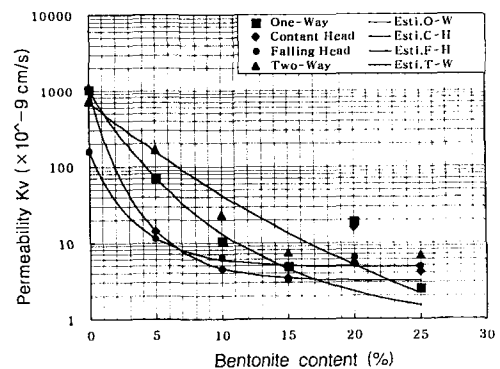


Fig. 5 Coefficients of permeability of Rowe cell consolidation test and permeability test with bentonite contents

모두 벤토나이트 혼합비가 증가할수록 투수계수는 감소하는 경향을 나타내었고 각 실험방법에 따른 투수계수는 압밀시험에서 산정한 투수계수보다 투수시험에서 측정한 투수계수가 더 작게 나타났다. 벤토나이트-흙(No. 200 통과율 60% 기준)의 혼합물을 이용한 D'Appolonia(1980)에 의한 투수계수 시험결과는 $1.0 \times 10^{-8} \sim 1.0 \times 10^{-9}$ cm/s 정도로 본 시험결과와 유사함을 보였다.

Fig. 5에서 투수계수의 차수재 기준값 1×10^{-7} cm/s가 되는 벤토나이트의 혼합비는 정수위 투수 시험에서 2%, 변수위 투수시험에서 0.5%, 일방향 압밀단계에서 계산에 의한 간접적으로 산정한 투수계수에서는 4.3%, 양방향 압밀단계에서 계산에 의한 간접적으로 산정한 투수계수에서는 6.8%로 나타났다.

본 시험의 결과로 매립시설의 바닥과 측면의 투수계수가 1.0×10^{-7} cm/s 이하로 되어 있는 폐기물관리법의 기준에 적합한 벤토나이트의 함량은 5%정도인 것으로 판단된다.

나. 현장차수재의 투수시험

경북 D지구 쓰레기 매립장의 차수층은 현장토인 점토에 벤토나이트를 9% 첨가하여 전륜은 강륜이고, 후륜은 두 개의 타이어로 된 중량 10 ton의 장비로 두께 70 cm로 시공되어있다. 바닥 차수층 3 개소에서 직경 100 mm, 길이 700 mm의 시료를 현장에서 채취하여 실내에서 Rowe cell에 의해 투수시험을 한 결과는 Table 6과 같다.

Fig. 6에서와 같이 현장차수재의 투수계수는 압밀압력이 0.5~4 kgf/cm²에서 평균 투수계수가 $6.4 \times 10^{-8} \sim 2.0 \times 10^{-9}$ cm/s로서 모든 압력에 대하여 쓰레기 매립장에 대한 차수층의 기준값 1×10^{-7} cm/s 이하로 나타났다. 현장차수재의 투수계수는 실내시험에서 공시체로 구한 투수계수와 비슷한 결과를 나타내었다.

Table 6 Coefficients of permeability of field soil (bentonite content 9%)

Consolidation pressure (kgf/cm ²)	Coefficients of permeability (cm/s)			
	A	B	C	mean
0.5	1.230×10^{-7}	5.931×10^{-8}	1.108×10^{-8}	6.446×10^{-8}
1	1.812×10^{-8}	1.572×10^{-8}	7.873×10^{-9}	1.391×10^{-8}
2	4.311×10^{-9}	3.395×10^{-9}	2.941×10^{-9}	3.549×10^{-9}
4	3.373×10^{-9}	1.870×10^{-9}	8.940×10^{-10}	2.046×10^{-9}

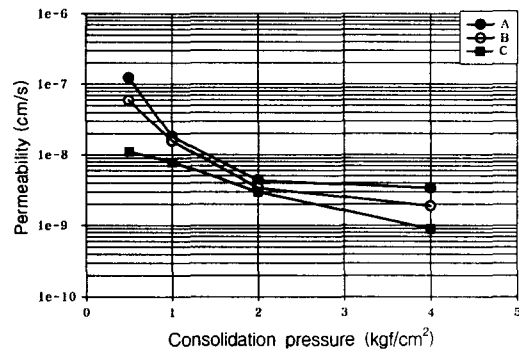


Fig. 6 Coefficients of permeability of field sample with consolidation pressure

다. 흙-벤토나이트 혼합물별 투수계수 비교

흙-벤토나이트 혼합물은 흙이 주재료이고 벤토나이트가 첨가제로 구분되며, 주재료인 모래(Jung et al, 1995), 화강풍화토(Jung et al, 1995), 입도분포가 나쁜모래(SP)(Jang et al, 1992)에 벤토나이트를 혼합한 혼합물과 본 연구에서 실시한 점토-벤토나이트 혼합물의 투수계수를 비교한 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

비교 문헌에서 차수층의 기준 투수계수 1×10^{-7} cm/s 이하인 값을 나타낸 벤토나이트의 함량은 모래-벤토나이트 혼합물인 경우 정 등(1995)은 20%이고, 화강풍화토-벤토나이트 혼합물인 경우 정 등(1995)은 10%이며, SP-벤토나이트 혼합물인 경우 장 등(1992)은 11%라 하였다.

본 연구에서 실시한 점토-벤토나이트 혼합물에서 1×10^{-7} cm/s 이하의 투수계수가 나타난 벤

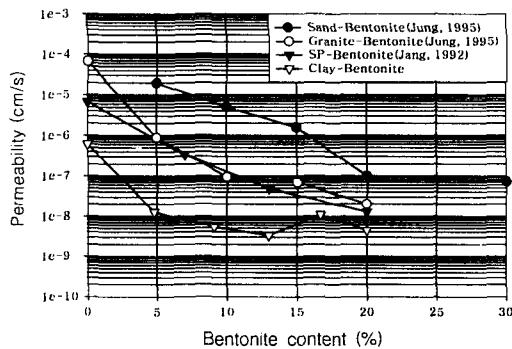


Fig. 7 Coefficient of permeability of different bentonite mixtures with bentonite contents

토나이트 함량은 5%로 모래-벤토나이트 혼합물, 화강풍화토-벤토나이트 혼합물, SP-벤토나이트 혼합물에 비해서 낮은 혼합비를 나타내었다.

점토-벤토나이트 함량이 5%일 때 투수계수는 $1.67 \times 10^{-7} \sim 1.14 \times 10^{-8}$ cm/s으로서 점토-벤토나이트의 혼합물로 차수층을 시공할 경우에 5%의 혼합비로서 충분한 차수효과를 나타낼 것으로 판단된다.

V. 결 론

차수벽 재료로 이용되는 벤토나이트를 폐기물 매립장의 바닥 차수층 재료로의 사용 가능성을 판단하는 기준을 설정하기 위하여 벤토나이트 함량에 따른 흙-벤토나이트 혼합물의 투수 특성에 관한 시험을 실시하여 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 본 연구에서 사용한 흙-벤토나이트 혼합물을 Rowe cell에 의해 투수시험 한 결과, 벤토나이트의 함량이 증가할수록 투수계수는 감소하였다.
2. 압밀시험에서 산정한 투수계수보다 투수시험에서 측정된 투수계수가 더 작게 나타났다.
3. 차수재의 투수계수 기준값인 1×10^{-7} cm/s 이하가 되기 위해서 투수시험의 결과와 압밀시험에서 계산에 의한 간접적으로 산정한 결과 벤토나이트

트 혼합비는 5% 정도로 나타났다.

4. 경북 D지구 매립장의 차수층을 채취하여 실내 투수시험한 결과 평균 투수계수가 차수재의 투수계수 기준치인 1×10^{-7} cm/s 이하인 $6.4 \times 10^{-8} \sim 2.0 \times 10^{-9}$ cm/s로서 충분한 차수효과를 나타낼 것으로 판단된다.

References

1. Boonsinsuk P., B. C. Pulles, B. H. Kjartanson and D. A. Dixon. 1991. Prediction of compactive effort for a bentonite-sand mixture. *Canadian Geotechnical Society 44th Canadian Geotechnical Conference*. 2(64) : 1-12.
2. Chan W. T. and D. C. Hsu. 1994. Design and construction of soil-bentonite slurry wall Helen Kramer Superfund Site. *First International Congress on Environmented Geotechnics*. : 161-166.
3. Chae, K. I. and M. N. Kwon. 2001. Geotechnical properties of soil-bentonite mixtures. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering*. 43(5) : 132-144. (in Korea)
4. Chapuis, R. P. 1990. Sand-Bentonite Liners: Predicting permeability for laboratory tests. *Canadian Geotechnical Journal*. 27(1). : 47-57.
5. D'Appolonia, D. J. 1980. Soil-Bentonite Slurry Trench Cutoffs. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. GT4. : 405-410.
6. Ferniuk N. and M. D. Haug. 1989. Comparison of laboratory and field soil liner Permeabilities. *Canadian Geotechnical Conference*. Winnipeg, Manitoba, October.
7. Garlanger J. E., F. K. Cheung and B. S. Tannous. 1987. Quality control testing for a sand-bentonite line. *Geotechnical Special Publication*. 9(13) : 488-499.
8. Head, K. H. 1986. *Soil laboratory testing*. ELE International Limited. Vol. 13 : 1129-1196.

9. Jang, Y. S., H. I. Jung, and J. I. Son. 1992. Waste landfill and geotechnical engineering. *Journal of the Korean Geotechnical Society*. 8(2) : 99~111. (in Korea)
10. Jung, M. K. 1998. A study on the single grain and dispersion mechanism of clays. 1~34. Koyang, Gyeonggi. : Korea Institute of Construction Technology. (in Korea)
11. Jung, M. K., H. I. Jung, Y. S. Lee., H. C. Choi, and J. Y. Woo. 1998, A study on the design and construction of landfills. 98-075. Koyang, Gyeonggi. : Korea Institute of Construction Technology. (in Korea)
12. Jung, H. I., Y. S. Lee., H. I. Sim., I. B. Jun., and M. K. Jung. 1995. The development of waste landfill liners. 137~172. Koyang, Gyeonggi. : Korea Institute of Construction Technology. (in Korea)
13. Jung, H. I., Y. S. Lee., K. S. Jung., H. S. J., and S. S. H. 1998. Quality control test of Soil-bentonite mixture liners. 98-062 : 1~39. Koyang, Gyeonggi. : Korea Institute of Construction Technology. (in Korea)
14. Kenney, T. C., Veen, W. A., Swallow, M. A. and Sungaila, M. A. 1991. Hydraulic Conductivity of Compacted Bentonite-Sand. *Canadian Geotechnical Society 44th Canadian Geotechnical Conference*. 2(63) : 1~10.
15. Kim, S. K. 1999. *Soil Mechanics*. Seoul. Chengmoongak. : 82~144. (in Korea)
16. Kwon, M. N. and T. H. Yoo. 1997. Fundamental study on geotechnical properties of sand-bentonite mixtures. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineering*. 39(6) : 99~110. (in Korea)
17. Mitchell, J. K. and Rumer, R. R. 1997. Waste Contaminant Barriers : Evaluation of the Technology. *Geotechnical Special Publication No. 71*. ASCE. : 1~25.
18. Remy, J. P. 1973. The measurement of small permeabilities in the laboratory. *Geotechnique*. 23(3) : 454~458
19. Sima, N. and Harsulescu, A. 1979. The Use of Bentonite for Sealing earth Dams. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*. No.20. : 222~226.
20. Sridaran, A., Prakash, K. and Asha, S. 1995. Consolidation Behavior of Soils. *Geotechnical Testing Journal*. 18(1) : 58~68.