

벤토나이트 혼합토의 투수성에 관한 연구

Study of Permeability of Bentonite Mixed Soil

김성환¹⁾, Sung-Hwan Kim, 오영인²⁾, Young-In Oh

¹⁾ 인천대학교 토목환경공학과 박사과정, Ph.D. Student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, University of Incheon

²⁾ 한국농어촌공사 농어촌연구원 선임연구원, Senior Research, Rural Research Institute, KRC

SYNOPSIS : Permeation water resulting in the reclaimed land of waste can possibly cause the second pollution, such as the underground water and environmental pollution. Accordingly, Liner layer has been installed in the reclaimed land of waste to block and purify permeation water and prevent this second pollution. The material used as Liner layer is the one for water resistance and that of less than permeability coefficient 1×10^{-7} cm/sec is widely used. As it is very difficult to secure in bulk this natural clay with low permeability around the field, the suitable way to secure low permeable material is that we use blend with good watertightness by mixing it with natural soil which is spread in the site. While this mixed soil which can resist water is commonly used in the site, bentonite mixed soil which is widely used as Liner layer in the reclaimed land of waste is recognized in Liner and durability. In this study, the engineering characteristics of soil-bentonite mixed liner are investigated using the laboratory hydraulic conductivity and uni-axial strength tests. The soil used for the liner is the clay soil located near the site. Mixing ratio of the bentonite which satisfies the requirement of hydraulic conductivity is determined and the optimum mixing ratio of bentonite is recommended for the landfill. After the mixed liner is constructed using the optimum mixing ratio of bentonite, the block samples of the constructed liner are obtained and the strength tests were performed. The hydraulic and strength properties of the liner for construction of the waste landfill were both satisfactory.

Keywords : Bentonite, Permeability, Optimum mixing ratio, polluted water

1. 서론

현행 폐기물관리법에서는 폐기물 매립시설에서 발생하는 침출수가 외부로 유출되는 것을 방지하기 위하여 점토 또는 벤토나이트 등의 점토류와 고밀도폴리에틸렌(HDPE)의 재질인 지오멤브레인, 점토류 및 고밀도폴리에틸렌과 동등한 차수효과를 갖는 재료를 설치하도록 정하고 있다. 『폐기물관리법시행규칙, 별표 9 폐기물 처리 시설의 설치기준 (개정 2008.8)』에 의하면, 매립시설 바닥과 측면에 투수계수가 1×10^{-7} cm/sec이하가 되도록 점토·벤토나이트 등의 점토류, 차수층의 두께를 50cm 이상 (지정폐기물 1.0m 이상) 포설하고, 상부에 두께 2.0mm 이상(지정폐기물 2.5mm 이상)의 지오멤브레인(geomembrane)을 1겹 이상 포설하여야 한다. 폐기물 매립시설에서 차수층을 설치하는 목적은 첫째, 유해물질이 주변 환경으로 이동하는 것을 차수층의 두께와 투수속도로 예측되는 기간 동안 지연시키며 동시에 유출된 유해물질을 인위적으로 처리함으로써 주변 환경에 미치는 영향을 최소화하고, 둘째 차수층 재료가 갖는 유해 금속 및 유기물질의 이동 억제능을 이용하여 2차 방어 효과를 발현하는 것이다(한국건설기술연구원, 1998).

이 연구에서는 매립장 조성공사에서 점토차수재의 선정을 위한 흙-벤토나이트 다짐혼합차수층에 대한

적정 차수기능을 확보하기 위하여 현장 주변에서 확보가능한 점성토에 벤토나이트를 혼합하여 폐기물 관리법에서 정한 투수계수 $1 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$ 이하가 되도록 흙-벤토나이트 다짐혼합차수층의 다짐특성과 투수특성을 분석 파악하기 위하여 대상재료(현장토, 벤토나이트)의 기본물성 시험과 시험을 수행하였다. 이러한 일련의 과정을 통하여 흙-벤토나이트 다짐혼합차수층의 다짐 및 투수특성을 분석하였으며, 최적 혼합비 조건에서의 강도특성 평가를 하였다.

2. 차수재의 문헌고찰

2.1 소일-벤토나이트의 혼합차수재

혼합 차수재는 차수재가 저 투수성을 만족하지 못하는 경우 첨가제를 혼합하여 소정의 기준을 만족하도록 하는 차수재로서 흙-벤토나이트, 흙-시멘트, 플라이애쉬-벤토나이트, 흙-석회 등이 있으나 흙-벤토나이트 혼합차수재가 가장 많이 사용되고 있다. 벤토나이트는 매우 높은 소성성과 팽창성을 갖고 있는 점토로서 분재로서의 미분말성 및 수용액의 팽윤성, 콜로이드의 분산성, 점성, 양이온 교환능력, 흡착력, 현탁성 등의 성질을 이용하여 차수재, 방수재 등으로 사용하고 있다. 벤토나이트는 칼슘계 몬모릴로나이트나 나트륨계 몬모릴로나이트로 구성되어 있으며, 입자의 크기는 대부분 $2\mu\text{m}$ 이하이고 Swelling과 분산성에 의해 흙의 투수계수를 감소시키는 특성을 가지고 있다. 나트륨계 벤토나이트는 칼슘계 벤토나이트에 비해 오염물질 및 침출수 자체에 요구되는 저 투수성에 필요한 팽창성과 투수계수 측면에서는 우수하고, 화학물질에 대한 저항성과 내구성에서는 동등한 성능을 지니고 있고 전단강도는 작은 특성을 보인다. 흙-벤토나이트 차수재는 원지반토의 투수계수가 매립지 차수기준 10^{-7} cm/sec 보다 클 경우 투수저감을 위하여 원지반토에 벤토나이트를 첨가하는 것으로 칼슘계 벤토나이트보다는 나트륨계 벤토나이트가 물에 의한 팽창성이 크고 점성도 크기 때문에 차수시설, 천공 보수시스템에 많이 사용된다. 흙-벤토나이트 혼합비는 흙의 종류 및 강도, 투수특성, 다짐특성 등 토질특성에 따라 달라진다. 실제 차수층을 시공하는 동안에도 자연토의 입도와 소성지수를 산정하기 위해 주기적인 품질관리시험을 수행하여야 하며, 현장투수시험을 실시하여 시험결과치의 표준편차가 크면 차수층에 대한 의구심을 갖고 매립지 투수계수 기준치가 나오도록 재시공하여야 한다. 표 1은 각종 시료에 대한 투수능 결과를 정리한 것으로 화강풍화토, 사질토, 실리카 샌드 등 사질지반에 대해 여러 가지 시험기를 사용하여 시험한 경과, 사질토에 벤토나이트를 혼합할 경우, 투수계수가 벤토나이트량이 증가할수록 감소하였으며 차수기준치를 만족하는 범위는 흙의 종류와 사용된 시험기의 정밀성에 따라 다소 차이가 있다.

표 1. 벤토나이트 혼합에 따른 자갈, 사질토 및 화강풍화토의 투수능

실험자	대상토	벤토나이트 혼합비(%)	투수계수 (cm/sec)	시험장치
한국건설 기술연구원(1994)	화강풍화토	0	6.6×10^{-5}	변수위 투수시험
		5	6.8×10^{-7}	
		10	8.6×10^{-8}	
		15	6.9×10^{-8}	
Hitoshi et al (1995)	silica sand	10	3.5×10^{-6}	정수위 투수시험
	silica sand(50%)/부순연암(50%)		2.0×10^{-7}	
	부순연암		5.0×10^{-7}	
	silica sand(50%)/자갈(50%)		6.0×10^{-6}	
Pandian et al (1995)	rown soil	10	4.1×10^{-8}	압밀 투수시험
	lack cotton soil		4.5×10^{-8}	

3. 시험재료 및 방법

3.1 시험재료

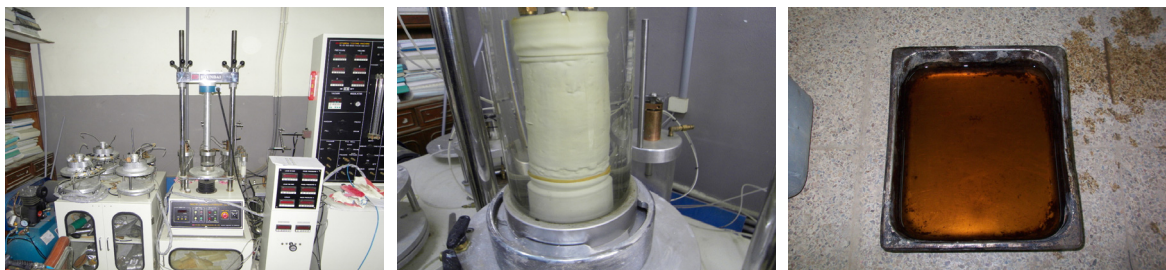
이 논문에서는 대상시료에 대하여 우선 기본적인 물리적 성질을 파악하기 위한 토성실험을 실시하였고, 다짐시험을 실시하여 최대건조단위중량과 최적함수비가 벤토나이트 혼합비에 따라 각각의 다짐특성 변화를 알아보았다. 실험에 사용한 벤토나이트는 일반적으로 사용되는 나트륨계 벤토나이트이다. 투수시험은 벤토나이트의 혼합비율을 달리하여 최적함수비의 습윤층에서 3%추가하여 공시체를 제작 후 일반수(현장지하수)와 침출수에 대하여 삼축압축시험기에 의한 투수계수를 산정하였다. 또한, 실험에 사용한 재료는 차수재로 사용하기에 적합할 것으로 예상되는 현장에서 채취된 점성토를 사용하였다. 점성토의 특성은 다음 표 2와 같다. 점성토 1은 No. 200체 통과량은 92.2%이며, 액성한계는 63.75%, 소성지수는 34.25%으로 고소성을 가진 점토이며 통일분류법으로 CH이고, 다짐특성은 최대건조단위중량은 $1.303 t/m^3$, 최적함수비는 24.88%이다. 점성토 2는 No. 200체 통과량은 55.8%이며, 액성한계는 26.0%, 소성지수는 7.9%인 점토이며 통일분류법으로 CL이고, 다짐특성은 최대건조단위중량은 $1.859 t/m^3$, 최적함수비는 19.78%이다.

표 2. 점성토 물리적 특성

		점성토 1	점성토 2
비중, G_s		2.65	2.66
흙의 분류		CH	CL
No.200체 통과량 (%)		92.2	55.8
액성한계, LL (%)		63.75	26.0
소성지수, PI (%)		34.25	7.9
다짐특성	최대건조단위중량, $\gamma_{d,max}(t/m^3)$	1.303	1.859
	최적함수비, $\omega_{opt}(\%)$	24.88	19.78

3.2 시험방법

본 연구에서 수행한 시험은 기본적인 물성시험으로 체분석, 다짐시험, 투수시험, 일축압축강도시험을 수행하였다. 본 연구에서는 삼축압축시험기를 사용하여 투수시험을 실시하였다. 투수시험용 시편은 다짐시험의 결과로부터 도출한 최대 건조단위중량의 90%값을 사용하였고, 함수비는 최적함수비에서 습윤층으로 3%를 추가하여 제작하였다. 사용된 용수는 일반수와 침출수를 사용하였다. 침출수는 일반 생활폐기물 매립장에서 나오는 침출수를 사용하였다.



(a) 삼축압축시험장비

(b) 투수시험

(c) 투수시험에 사용한 침출수

그림 1. 삼축압축시험기를 이용한 투수시험

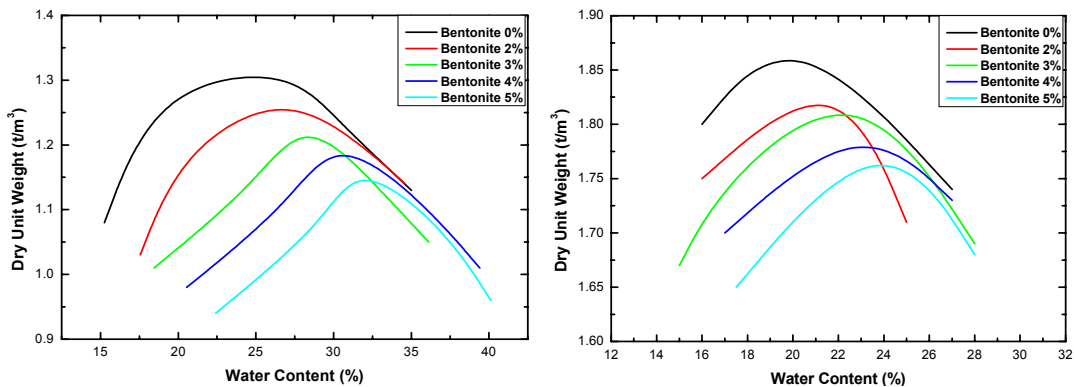
4. 시험결과

4.1 다짐시험결과

점성토 1과 점성토 2에 벤토나이트를 혼합한 시료에 대하여 다짐시험을 실시한 결과는 표 3과 그림 2와 같다. 점성토 1의 벤토나이트 혼합비 0%, 2%, 3%, 4%, 5%에 따른 최대 건조단위중량은 1.145~1.303t/m³로 나타났고, 최적함수비는 24.88~31.95%로 나타났다. 점성토 2의 벤토나이트 혼합비에 따른 최대 건조단위중량은 1.761~1.859t/m³로 나타났고, 최적함수비는 19.78~24.02%로 나타났다. 벤토나이트 혼합비가 증가할수록 최대건조단위중량은 감소하고 최적함수비는 증가하였다. 이는 비중이 작은 벤토나이트가 증가함에 따라 혼합재의 상대적인 비중감소로 인한 단위중량감소와 벤토나이트의 침수에 따른 부피팽창이 최대건조단위중량의 감소에 영향을 미치며, 벤토나이트의 혼합량이 증가함에 따라 최적함수비가 증가하는 것은 벤토나이트가 물을 흡수하는 친수력이 크기 때문에 벤토나이트의 함량이 증가함에 따라 보유되는 물의 양도 많아지기 때문이다.

표 3. 벤토나이트 혼합비에 따른 다짐시험결과

시료	벤토나이트 혼합비	0%	2%	3%	4%	5%	비고
점성토 1 (CH)	최대건조단위중량, $\gamma_{d,max}$ (t/m ³)	1.303	1.254	1.210	1.185	1.145	A다짐
	최적함수비, ω_{opt} (%)	24.88	26.56	28.25	30.61	31.95	
점성토 2 (CL)	최대건조단위중량, $\gamma_{d,max}$ (t/m ³)	1.859	1.818	1.808	1.780	1.761	
	최적함수비, ω_{opt} (%)	19.78	21.21	22.46	23.23	24.02	



(a) 점성토 1(CH) 다짐곡선

(b) 점성토 2(CL) 다짐곡선

그림 2. 벤토나이트 혼합비에 따른 다짐시험결과

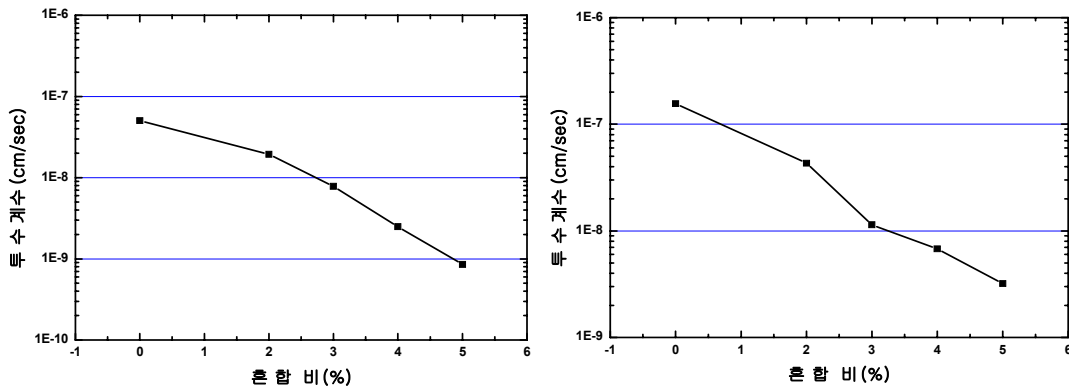
4.2 투수시험결과

첫 번째로 투수시험시 현장의 지하수를 통과시켜 투수계수를 측정하였다. 점성토 1과 점성토 2에 벤토나이트를 혼합한 시료에 대한 투수계수 측정결과는 표 4와 같다. 본 연구에서는 투수계수 기준값(1.0×10^{-7} cm/sec)이하가 되는 최적 벤토나이트 혼합비를 검토하였다. 시험결과에 의하면, 점성토 1에 벤토나이트를 0%, 2%, 3%, 4%, 5% 혼합한 경우에 대한 투수계수를 살펴보면 벤토나이트를 혼합하지 않은 점성토 자체만의 경우 투수계수는 5.04×10^{-8} cm/sec, 2%인 경우 1.94×10^{-8} cm/sec, 3%인 경우 7.82×10^{-9} cm/sec, 4%는 2.49×10^{-9} cm/sec, 5%는 8.54×10^{-10} cm/sec로 나타났다. 점성토 2에 벤토나이트를 혼합한 경우 투수계수를 살펴보면 점성토 2 자체만의 투수계수는 1.56×10^{-7} cm/sec, 2%인 경우 4.31×10^{-8} cm/sec, 3%인 경우 1.14×10^{-8} cm/sec, 4%는 6.79×10^{-9} cm/sec, 5%는 3.2×10^{-9} cm/sec로 나타났다. 점성토 2의 경우

점성토 자체만의 투수계수는 기준값을 만족하지 못한 것으로 나타났으며 2%의 벤토나이트를 혼합하여 투수계수 기준값을 만족하는 것으로 분석되었다. 벤토나이트 혼합비가 증가할수록 투수계수가 감소하였다.

표 4. 벤토나이트 혼합비에 따른 투수계수 (지하수 사용)

벤토나이트 혼합비	0%	2%	3%	4%	5%
점성토 1(CH) 투수계수(cm/sec)	5.04×10^{-8}	1.94×10^{-8}	7.82×10^{-9}	2.49×10^{-9}	8.54×10^{-10}
점성토 2(CL) 투수계수(cm/sec)	1.56×10^{-7}	4.31×10^{-8}	1.14×10^{-8}	6.79×10^{-9}	3.2×10^{-9}



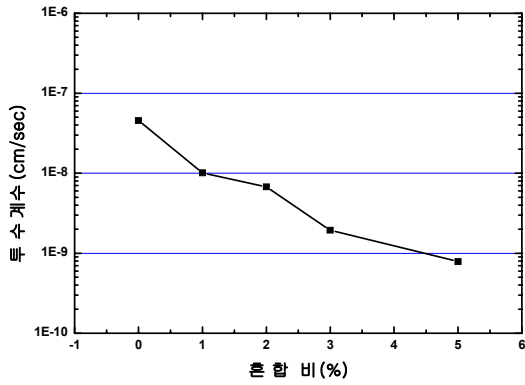
(a) 점성토 1(CH)의 투수계수 산정 결과 (b) 점성토 2(CL)의 투수계수 산정 결과

그림 3. 벤토나이트 혼합비에 따른 투수계수 (지하수 사용)

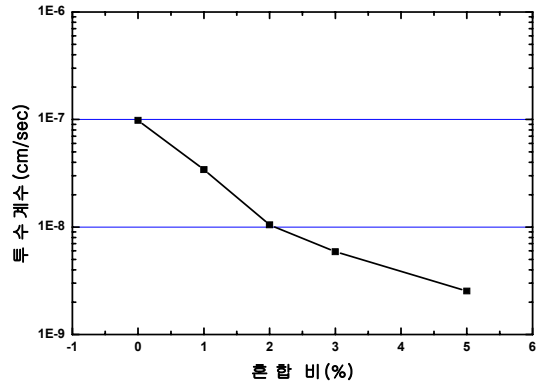
두 번째로 투수시험시 매립장에서 차수재의 파손에 의하여 침출수가 누수된 경우를 가정하여 침출수를 통과시켜 투수계수를 측정하였다. 점성토와 벤토나이트를 혼합한 시료에 대한 투수계수 측정결과는 표 5와 같다. 본 과업에서는 투수계수 기준값(1.0×10^{-7} cm/sec)이하가 되는 최적 벤토나이트 혼합비를 검토하였다. 시험결과에 의하면, 점성토 1의 경우 벤토나이트 혼합비 0%, 2%, 3%, 4%, 5%에 따른 혼합토에 대한 투수계수를 살펴보면 벤토나이트를 혼합하지 않은 점성토 1 자체만의 경우 투수계수는 4.55×10^{-8} cm/sec, 2%인 경우 1.01×10^{-8} cm/sec, 3%인 경우 6.75×10^{-9} cm/sec, 4%는 1.94×10^{-9} cm/sec, 5%는 7.87×10^{-10} cm/sec로 나타났다. 점성토 2의 경우 벤토나이트 혼합비에 따른 투수계수를 살펴보면 벤토나이트를 혼합하지 않은 점성토 2 자체만의 경우 투수계수는 9.8×10^{-8} cm/sec, 2%인 경우 3.42×10^{-8} cm/sec, 3%인 경우 1.05×10^{-9} cm/sec, 4%는 5.89×10^{-9} cm/sec, 5%는 2.54×10^{-9} cm/sec로 나타났다. 이는 일반적으로 측정된 투수계수보다 작은 것으로 분석되었다. 벤토나이트를 혼합하지 않은 점성토 1의 경우 차수재 투수계수 기준을 만족하였으나, 점성토 2의 경우 혼합비 2%일 때 투수계수 기준을 만족한 것으로 분석되어 점성토 1과 점성토 2의 경우 현장의 불확실성을 고려할 때 벤토나이트 2%를 혼합한 경우를 최적 혼합비로 결정하였다.

표 5. 벤토나이트 혼합비에 따른 투수계수 (침출수 사용)

벤토나이트 혼합비	0%	2%	3%	4%	5%
점성토 1(CH) 투수계수(cm/sec)	4.55×10^{-8}	1.01×10^{-8}	6.75×10^{-9}	1.94×10^{-9}	7.87×10^{-10}
점성토 2(CL) 투수계수(cm/sec)	9.8×10^{-8}	3.42×10^{-8}	1.05×10^{-8}	5.89×10^{-9}	2.54×10^{-9}

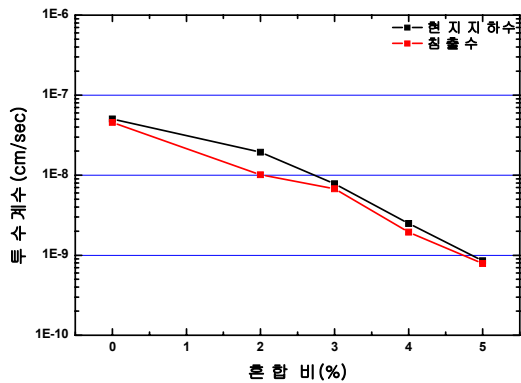


(a) 점성토 1(CH)의 투수계수 산정 결과

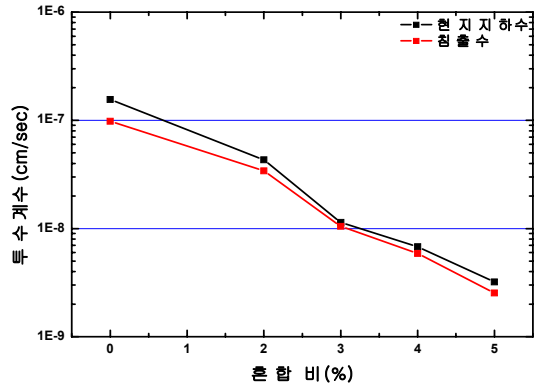


(b) 점성토 2(CL)의 투수계수 산정 결과

그림 4. 벤토나이트 혼합비에 따른 투수계수 (침출수 사용)



(a) 사용수에 따른 점성토 1의 투수계수 변화

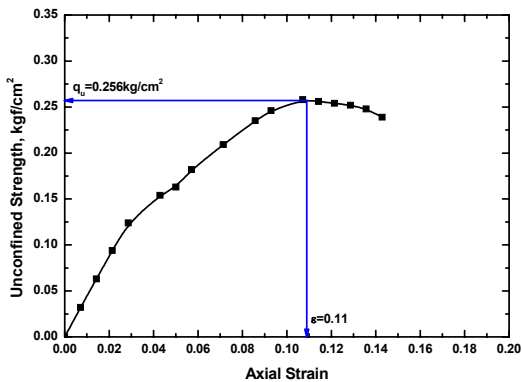


(b) 사용수에 따른 점성토 2의 투수계수 변화

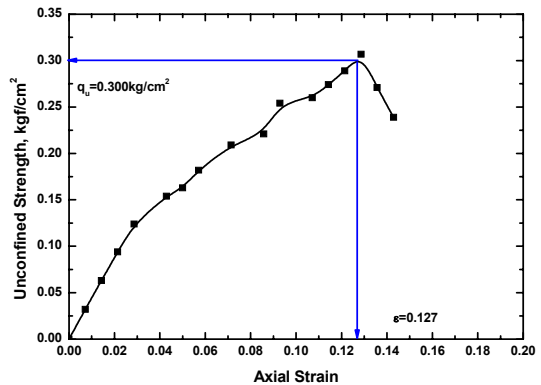
그림 5. 사용수에 따른 투수계수 변화

4.3 일축압축강도 시험결과

일축압축강도 시험은 최적혼합비 조건인 벤토나이트 2%혼합된 시료를 성형하여 시험을 실시하였다. 시료의 직경은 3.5cm, 높이는 7cm로 시료를 성형하였다. 시험결과 점성토 1의 경우 변형률이 11%일 때 최대 일축압축강도는 0.256kg/cm²으로 나타났으며, 점성토 2의 경우 변형률이 12.7%일 때 최대 일축압축강도는 0.300kg/cm²으로 나타났다. 그림 6은 일축압축강도 시험결과를 도시한 것이다.



(a) 점성토 1(CH)의 일축압축강도



(b) 점성토 2(CL)의 일축압축강도

그림 6. 최적 혼합비일 때 혼합토의 일축압축강도 (최적혼합비 2%)

5. 결론

본 연구에서는 점토와 벤토나이트를 혼합한 혼합토의 투수특성과 강도특성을 검토하였다. 벤토나이트 혼합비에 따른 다짐특성 투수계수 시험을 통하여 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 벤토나이트 혼합비 0%, 2%, 3%, 4%, 5%에 따른 점성토 1의 최대 건조단위중량은 $1.145\sim 1.303t/m^3$ 이며, 최적함수비는 24.88~31.95%로 나타났다. 점성토 2의 최대건조단위중량은 $1.761\sim 1.859t/m^3$ 이며, 최적함수비는 19.78~24.02%로 나타났다. 벤토나이트 혼합비가 증가할수록 최대건조단위중량은 감소하고 최적함수비는 증가하였다.
2. 지하수를 사용한 경우 벤토나이트 혼합비 0%, 2%, 3%, 4%, 5%에 따른 점성토 1과 벤토나이트 혼합토에 대한 투수계수는 벤토나이트를 혼합하지 않은 점성토 자체만의 경우 투수계수는 $5.04\times 10^{-8}cm/sec$, 2%인 경우 $1.94\times 10^{-8}cm/sec$, 3%인 경우 $7.82\times 10^{-9}cm/sec$, 4%는 $2.49\times 10^{-9}cm/sec$, 5%는 $8.54\times 10^{-10}cm/sec$ 로 나타났다. 벤토나이트 혼합비가 증가할수록 투수계수가 감소하였다. 점성토 2에 벤토나이트를 혼합한 경우 투수계수를 살펴보면 점성토 2 자체만의 투수계수는 $1.56\times 10^{-7}cm/sec$, 2%인 경우 $4.31\times 10^{-8}cm/sec$, 3%인 경우 $1.14\times 10^{-8}cm/sec$, 4%는 $6.79\times 10^{-9}cm/sec$, 5%는 $3.2\times 10^{-9}cm/sec$ 로 나타났다. 벤토나이트를 혼합하지 않은 경우에도 점성토 1의 경우 차수재 투수계수 기준을 만족하였으나, 현장의 불확실성을 고려할 때 점성토 1과 점성토 2의 경우 벤토나이트 2%를 혼합한 경우를 최적 혼합비로 결정하였다.
3. 침출수를 사용한 경우 벤토나이트 혼합비 0%, 2%, 3%, 4%, 5%에 따른 점성토와 벤토나이트 혼합토에 대한 투수계수를 살펴보면 벤토나이트를 혼합하지 않은 점성토 자체만의 경우 투수계수는 $4.55\times 10^{-8}cm/sec$, 2%인 경우 $1.01\times 10^{-8}cm/sec$, 3%인 경우 $6.75\times 10^{-9}cm/sec$, 4%는 $1.94\times 10^{-9}cm/sec$, 5%는 $7.87\times 10^{-10}cm/sec$ 로 나타났다. 점성토 2의 경우 벤토나이트 혼합비에 따른 투수계수를 살펴보면 벤토나이트를 혼합하지 않은 점성토 2 자체만의 경우 투수계수는 $9.8\times 10^{-8}cm/sec$, 2%인 경우 $3.42\times 10^{-8}cm/sec$, 3%인 경우 $1.05\times 10^{-9}cm/sec$, 4%는 $5.89\times 10^{-9}cm/sec$, 5%는 $2.54\times 10^{-9}cm/sec$ 로 나타났다. 이는 일반적으로 측정된 투수계수보다 작은 것으로 분석되었다. 이것은 침출수의 잔존물질과 벤토나이트와 침출수간의 화학반응 때문인 것으로 판단된다. 벤토나이트를 혼합하지 않은 점성토 1의 경우 차수재 투수계수 기준을 만족하였으나, 점성토 2의 경우 혼합비 2%일 때 투수계수 기준을 만족한 것으로 분석되어 점성토 1과 점성토 2의 경우 현장의 불확실성을 고려할 때 벤토나이트 2%를 혼합한 경우를 최적 혼합비로 결정하였다.
4. 일축압축강도 시험은 최적혼합비 조건인 벤토나이트 2%혼합된 시료를 성형하여 시험을 실시하였다. 시료의 직경은 3.5cm, 높이는 7cm로 시료를 성형하였다. 시험결과 점성토 1의 경우 변형률이 11%일 때 최대 일축압축강도는 $0.256kg/cm^2$ 으로 나타났으며, 점성토 2의 경우 변형률이 12.7%일 때 최대 일축압축강도는 $0.300kg/cm^2$ 으로 나타났다.
5. 향후 소일 벤토나이트 혼합토가 침출수의 화학적 안정성에 어떠한 영향이 있는지에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 주재우, 서계원, 신은철(2001), 불투수층을 만들기 위한 벤토나이트 혼합비, *대한토목학회2001년도학술 발표회 논문집*.
2. G. Mersi,(1969), Engineering properties of montmorillonite, Ph.D.Thesis, Illinois Univ, U.S.A.
3. T.William Lambe, Robert V.Whiteman, *Soil Mechanics, SI Version*, pp. 283~292.
4. Braja M. DAS, *Principles of geotechnical engineering*, PWS Engineering.
5. James K. Mitchel(1993), *Fundamentals of Soil Behavior*, Second edition, John Wiley & Sons, inc. :pp. 30~32.
6. Pandian, N. S., Nagaraj, T. S., and Raju, P.S.R.N.(1995), Permeability and Compressibility Behavior of Bentonite-Sand/Soil Mixes. *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 18, No 1, pp. : 86~93.
7. Zeyad S. Abu-Hassanein, Craig H. Benson, Xiaodong Wang, and Lisa R. Blotz, 1996, Determining Bentonite Content in Soil-Bentonite Mixture Using Electrical Conductivity, *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 19, No 1, pp. 86~93.
8. 김명균(1998), 국내산 벤토나이트의 차수재로서의 공학적 특성, *한국자원공학회지*, Vol 35, 제4호, pp 301~306.
9. 류권, 채교익(2000), *Rowcell 실험에 의한 점토 벤토나이트 차수재의 투수계수의 측정*, 대한토목학회 2000년도 학술발표회논문집, pp 277~280.
10. 이광열(2001), Soil-Bentonite 혼합토의 물성 및 투수성 연구, *대한토목학회논문집*, 21권, 6-C호, pp 689~96
11. 정문경, 정하익, 이용수, 최희철, 우제윤(1998), *폐기물 매립시설의설계·시공 기술에 관한 연구*, 한국 건설기술연구원.
12. 장병욱(1997), *유기침출수가 라이너의 투수성에 미치는 영향*, 한국과학재단.