

폐기물매립지의 흙-벤토나이트 혼합차수층 특성에 관한 연구 A Study on Soil-Bentonite Mixed Liner Properties for Waste Landfill

홍성길¹⁾, Sung-Gil Hong, 한봉수¹⁾, Bong-Soo Han, 장연수²⁾, Yeon-Soo Jang

¹⁾동국대학교 토목환경공학과 석사과정, Graduate student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Dongguk University.

²⁾동국대학교 토목환경공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Dongguk University.

SYNOPSIS : In this study, the engineering characteristics of soil-bentonite mixed liner are investigated using the laboratory hydraulic conductivity and strength tests. The soil used for the liner is clayey silt in the site and the weathered granitic soil located near the waste landfill studied. 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, the block samples of the constructed liner are obtained and the properties of interest satisfy the requirements of the liner of the landfill.

Key words : soil-bentonite mixed liner, hydraulic conductivity, strength, waste landfill

1. 서론

매립지가 입지하게 되는 지역의 지하수 및 환경오염 가능성에 관한 문제는 매립지 주변 거주자들에게 관심의 대상이다. 따라서 폐기물 관리법에는 폐기물 매립으로 인한 주변 토양 및 지하수오염을 방지하기 위하여 다짐점토라이너나 차수쉬트 등을 이용하여 차수층을 구축하도록 규정하고 있다. 매립지의 차수층에 사용할 수 있는 종류는 이외에도 혼합차수재, GCL, Geocomposite 등 여러 종류가 있는데 그중 현장 원지반토의 다짐만으로 폐기물 관리법의 투수계수 규정을 만족하기 어려울 때 국내에서 비교적 많이 적용되는 방법이 벤토나이트를 원지반토와 혼합시켜 포설하는 흙-벤토나이트 혼합차수공법이다. 자연토에 팽창성과 점성이 큰 나트륨계 벤토나이트를 혼합하여 차수층을 이루는 이 방법은 혼합층 자체로 침출수의 누출을 방지하게되는 데 혼합토의 성질과 벤토나이트 혼합률이 차수성능을 좌우하는 중요요소이다.

본 연구에서는 혼합차수재 공법이 적용된 OO지역의 지정폐기물 매립지를 대상으로 현장에서 채취한 원지반토와 인근의 황토를 혼합대상토로 하여 투수계수 규정을 만족시킬 수 있는 벤토나이트 혼합비를 결정하였다. 이 혼합비에 의거하여 시공된 현장차수재의 불교란 시료를 채취하여 이들의 투수계수 및 압축강도와 실험실의 값과 차이를 비교 분석하였다. 혼합률에 따른 각각의 다짐된 샘플에 대한 투수계수 측정은 D5084-90의 연성벽 투수시험(Flexible Wall Permeameter Test)(ASTM, 1992)을 실시하였다.

2. 매립지 시설

본 연구대상인 OO지정폐기물 매립지는 4개의 매립지를 단계적으로 건설하며 본 연구는 2단계공사이다. 매립지는 지봉을 설치하여 우수에 의한 침출수 발생을 차단하고 악취 및 먼지의 외부누출을 방지하는 친환경적 시설이다. 본 매립지는 해안 준설투기매립을 통하여 조성된 부지로서 차수층 침하가 발생할 가능성이 있는 것으로 판단되어 안정성확보를 위한 하부100cm의 잠석층을 설치한 것과 옹벽을 설치하여 폐기물 매립고와 사면안전성을 확보한 것이 특징이라 할 수 있다. 또한 바다와 인접한 시설이기 때문에 해수침투 및 양압력을 차단하기 위한 SHEET PILE을 설치하였다. 그림 1은 대상 매립지의 평면도와 비교란 시료의 채취위치이다. 그림 2, 3은 폐기물관리법(환경부, 1999)에서 권하는 합성수지-점토 복합차수층과 본 연구의 OO지정폐기물 매립지(환경관리공단, 2000)에 설치된 차수층의 단면을 나타내었다.

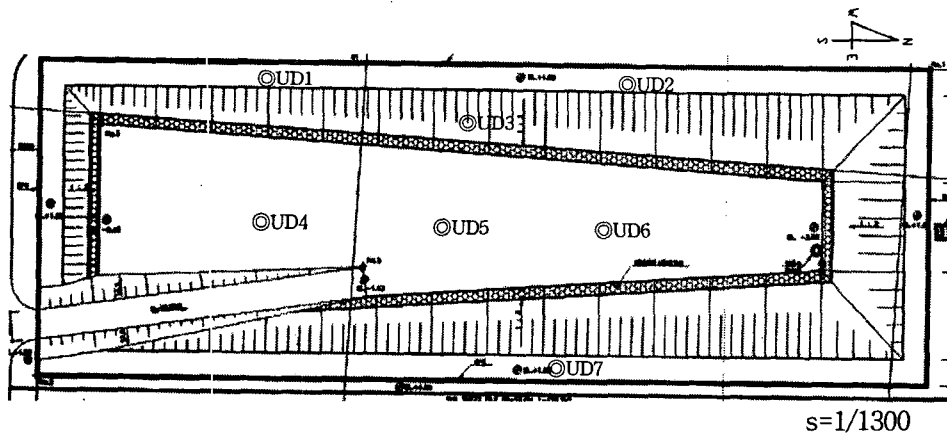


그림 1. 대상매립지 평면도 및 비교란 시료의 채취위치

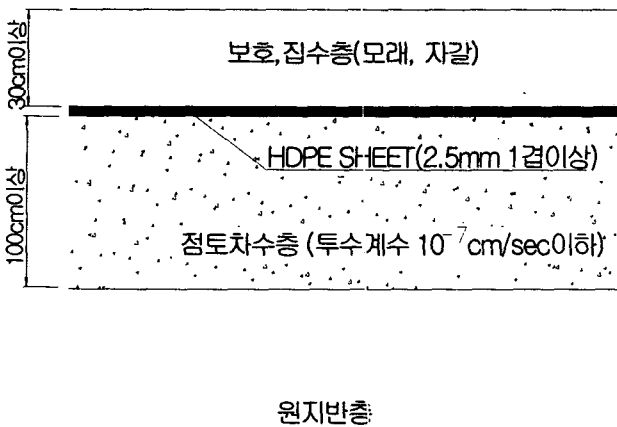


그림 2. 폐기물관리법 기준의 차수층(지정폐기물)

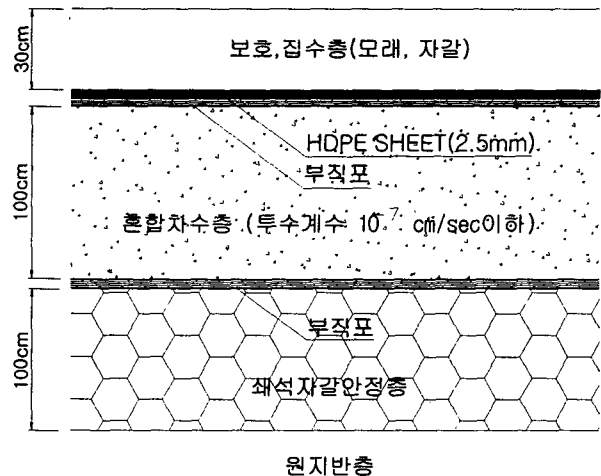


그림 3. OO지정폐기물 매립지에 적용한 차수층

3. 시험

시험은 원지반토와 인근지역의 황토를 이용하여 공학적 특성을 분석한 후 혼합률을 결정하였다. 흙-벤토나이트 혼합차수층의 품질과 경제성을 고려하여 혼합토를 결정하게 되며 혼합토에 대한 벤토나이트 혼합률은 삼축투수시험과 강도시험을 수행하여 가장 적절한 벤토나이트 혼합률을 찾아내었다.

3.1 대상시료의 공학적 특성

3.1.1 물리적성질

혼합토의 물리적성질은 원지반토와 황토에 대하여 비중, 액·소성, 입도분석 등을 분석하였다(표1). 그 결과 인근지역에서 채취한 황토는 원지반토에 비하여 입도분포 면에서 양입도로 나타났으며 원지반토는 NP로 나타나 빈입도임을 알 수 있다. 특히 벤토나이트를 혼합하는 경우 크게 좌우되는 세립토의 경우 원지반토는 점토질이 없는 것으로 나타나 필요한 벤토나이트 혼합률이 황토보다 큼을 예상할 수 있다.

표 1. 대상시료의 물리적 성질

구분	비중	함수비 (%)	소성한계 (%)	액성한계 (%)	균등계수	곡률계수	SAND(%) (#10-#200)	CLAY(%) (<0.005)
원지반토	2.64	11	NP	NP	4.03	1.45	78	0
황토	2.68	28.1	15	43.1	11.35	1.18	47	7

흙재료의 간극을 메우기 위해 사용되는 벤토나이트의 공학적 특성은 0.063mm 체 통과량은 85%로 나타났으며 벤토나이트의 품질을 결정하는 팽윤도는 20.5mg/g이었다(표 2 참조).

표 2. 벤토나이트의 공학적 특성

구분	밀도 (g/cm ³)	함수비 (%)	흡수율 24시간후 (%)	0.0063mm 체 통과량(%)	몬모릴로나이트 함유량(%)	팽윤도 (mg/g)
물성치	0.88	7.8	499	85	75.1	20.5

3.1.2 다짐특성

흙-벤토나이트 혼합토의 다짐시험을 벤토나이트 혼합률의 변화에 따른 단위중량의 변화를 점검하고 투수계수 시험시 다짐시방의 기준을 확정하기 위하여 실시하였다. 다짐시험은 높이10cm, 직경10cm의 표준A다짐(KS F2312-91)으로 하였으며 그결과를 그림 4-5에 나타내었다. 실험결과에서 알 수 있는 바와 같이 원지반토의 경우 벤토나이트의 혼합률이 증가함에 따라 단위중량이 증가하였으며 혼합율이 12%이상 되면 단위중량이 증가가 이루어지지 않음을 알 수 있었다. 이는 벤토나이트가 12%까지는 원지반토의 공극을 메워 혼합토의 밀도를 증가시킨 반면 일정한 양에 도달하면 비중이 유사한 원지반토와 벤토나이트의 혼합은 밀도에 변화를 일으키지 않음을 알 수 있다. 반면 황토의 경우 벤토나이트 혼합률 9%까지는 혼합토의 밀도 증가를 가져왔으나 이상의 혼합률에서는 오히려 단위중량이 감소함을 보여주고 있다.

각각의 혼합률에 따른 다짐결과 원지반 혼합토의 경우 $\gamma_{d \max}$ 는 1.71~1.748t/m³, 황토 혼합토의 경우 $\gamma_{d \max}$ 는 1.48~1.501t/m³로 원지반 혼합토의 $\gamma_{d \max}$ 가 황토 혼합토에 비하여 높은 것으로 나타났다. 최적함수비는 원지반토가 13.7~16.7%, 황토가 23~27.01%로 황토의 최적함수비가 원지반토에 비하여 큰 것으로 나타났다.

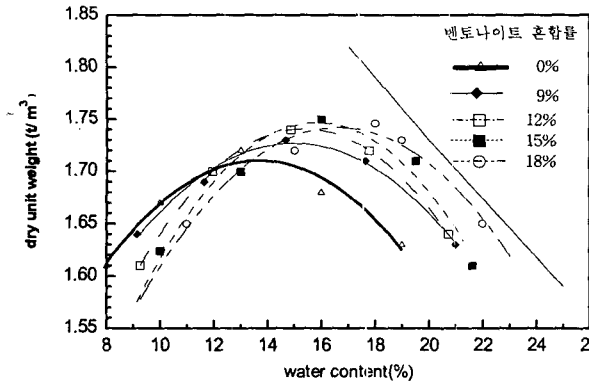


그림 4. 혼합물에 따른 원지반토의 다짐곡선

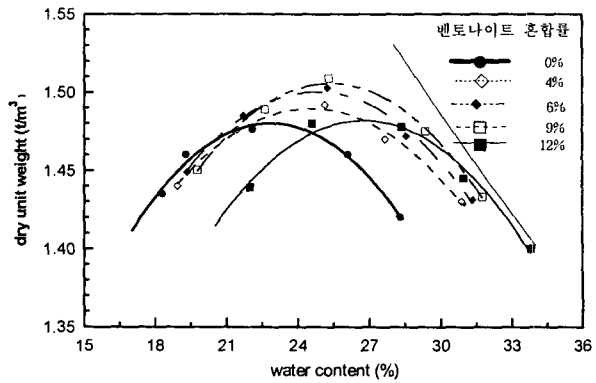


그림 5. 혼합물에 따른 황토의 다짐곡선

3.2 실험방법

3.2.1 시험장치

본 연구에 사용된 연성벽 삼축투수 시험장치는 3연식으로 시료는 직경 10cm, 높이 10cm인 것을 사용하였다. 삼축투수시험(ASTM, 1992)을 통해 얻어진 결과에 대한 분석은 각 측정치의 시간에 따른 누적 유량을 계산하여 Q-t(min) 그래프를 도시하고, 시간에 따른 유량과 동수경사 그리고 시료의 단면적을 이용하여 투수계수 $K = \frac{q}{60 \cdot A \cdot i}$ 로 구할 수 있다. 여기서 q 는 dQ/dt 이고, i 는 $10,193 \times (P_1 - P_2)/L$ 로서 상·하부의 배압차를 이용하여 구하며 A는 시료의 단면적을 나타낸다.

투수시험을 마친 시료를 대상으로 시료의 높이와 직경의 비를 2:1이 되도록 성형한 후 삼축압축시험과 일축압축시험을 실시하여 강도를 측정하였다.

3.2.2 투수시험을 위한 시료 제작

투수시험은 다짐시험의 결과를 이용하여 시방조건에서 요구하는 최대건조단위중량의 97%에서 각각의 혼합비에 대한 시편을 제작하였다. 원지반토의 최대건조단위중량이 벤토나이트 혼합물 15%에서 최대값을 보여서 9%~18%의 혼합물 내에서 시편을 제작하였고 황토의 최대 건조단위중량은 원지반토보다 낮은 9%에서 최대값이 측정되어 혼합물 4%~12% 내에서 시편을 제작하였다. 시편을 제작할 때 최적함수비 조건이 투수계수에 영향을 미치는 요소로서 문헌(Daniel 1990, Olsen 1962)을 참고하여 각 혼합비에서의 최적함수비(OMC)와 OMC+습윤층 3%에서 한 개씩 선택하여 흙-벤토나이트를 혼합하였다. 표 3과 4에는 벤토나이트 혼합물에 따른 97% γ_d max 와 이를 만족하는 최적함수비(OMC) 그리고 습윤층 3%(OMC+습윤층 3%) 값을 도시하였다.

현장 시공된 샘플은 불교란 상태를 유지하기 위하여 블록샘플을 채취하였고 트립기에서 직경 10cm, 높이 10cm의 시편을 성형하였다. 불교란 시료의 경우 다짐을 수행하여 제작하는 것이 아니기 때문에 트리밍 과정 중 표면의 공극이 발생한다. 이러한 공극으로 인한 투수계수 증가의 문제를 방지하기 위하여 표면에 그리스를 두껍게 발라주어 측면흐름을 방지하였다.

삼축투수시험의 특성은 지반응력 상태를 고려 할 수 있는 삼축투수시험의 측면구속압은 현장의 쓰레기가 매립되었을 때를 가정한 상태에서 혼합차수재가 받을 수 있는 응력-변형관계를 수치해석에 의하여 계산하여 수평방향력 (σ_3) 0.9 kg/cm^2 을 적용하여 실험을 수행하였다.

표 3. 원지반토의 투수시험에 사용된 단위중량 및 함수비

벤토나이트 혼합비율(%)		9	12	15	18
$\gamma_d \text{ max } 97\%(t/m^3)$		1.67	1.69	1.70	1.69
함수비 (%)	(OMC)	15.0	15.4	15.8	16.7
	(OMC+습윤층3%)	18.0	18.4	18.5	19.7

표 4. 원지반토의 투수시험에 사용된 단위중량 및 함수비

벤토나이트 혼합비율(%)		4	6	9	12
$\gamma_d \text{ max } 97\%(t/m^3)$		1.45	1.46	1.46	1.44
함수비 (%)	(OMC)	24.7	25.1	25.6	27.0
	(OMC+습윤층3%)	27.7	28.1	28.6	31.0

4. 시험결과

수행된 투수시험의 결과는 두 가지 측면에서 분석하였다. 첫째는 서로 다른 혼합토의 선정과 각각의 벤토나이트 혼합비에 따른 투수계수의 변화를 측정하여 폐기물 관리법기준의 투수계수 범위 내에서 경제성과 안정성을 고려한 혼합치수재의 벤토나이트 혼합비를 분석하였고 둘째는 적정 혼합비를 분석에서 얻어진 결과를 이용하여 시공된 차수층이 얼마만큼의 차수능을 발휘하는지를 점검하였다.

4.1 시공 전 실내성형시료

실내 성형시료에 대한 실내 투수시험결과를 그림 6에 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 원지반 혼합토의 경우 폐기물 관리법의 투수계수기준은 혼합물 12%이하가 되면 만족되는 것으로 나타나고 있다. 이 경우 혼합물 12%로 조성한 시료의 투수계수는 폐기물 관리법의 투수계수기준치에 근접한 관계로 현장시공 후 차수층은 투수계수기준을 초과할 가능성이 많을 것으로 보여지며 혼합물 15%와 18% 구간에서의 혼합물 증가에 따른 투수계수 감소효과가 크지 않은 것으로 나타나 폐기물관리법의 기준을 만족하는 차수층의 혼합물은 13~15%사이에서 선택되어야 할 것으로 판단되었다. 현장에 실제 적용된 혼합차수층의 벤토나이트 혼합물은 폐기물 관리법 투수계수기준에 대한 안전율을 고려하여 벤토나이트 혼합물은 14%이었으며 현장차수층 시공시의 혼합토 건조단위중량은 $1.745t/m^3$ 이상, 함수비의 범위는 15.7%(OMC) ~ 18.7%(OMC+3%)에서 수행하도록 추천하였다.

그림 7에 나타난 황토의 경우 벤토나이트 혼합물 4%이하가 되면 폐기물관리법의 투수계수 기준을 만족하는 것으로 나타나고 있다. 원지반 혼합토의 경우와 마찬가지로 혼합물 4%는 투수계수가 폐기물관리법의 기준치에 근접해 있는 관계로 이를 제외하고 혼합비 9%와 12%의 시료는 투수계수 저감이 크지 않아 혼합차수층 시공의 경제성을 고려한 황토의 경우 벤토나이트 혼합물은 6%와 9%사이에서 결정되어야 하는 것으로 판단되었다. 황토를 혼합토로 하여 현장에 시공할 경우 벤토나이트 혼합비는 8%로 이때의 건조단위중량은 $1.5t/m^3$ 이상, 시공함수비의 범위는 25.6%(OMC) ~ 28.6%(OMC+3%) 범위에서 시공하도록 추천하였다.

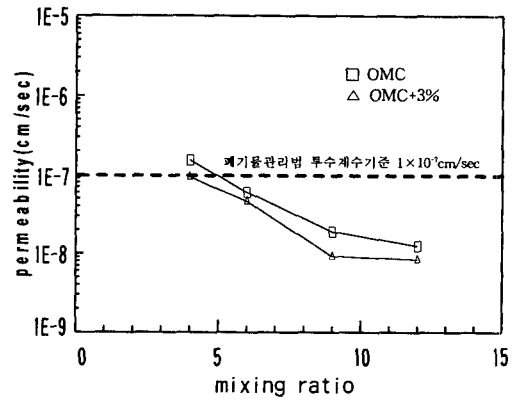
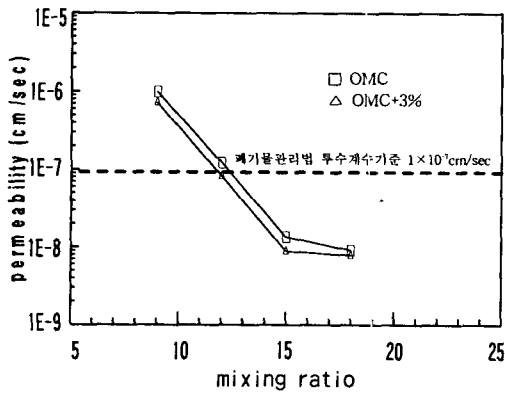
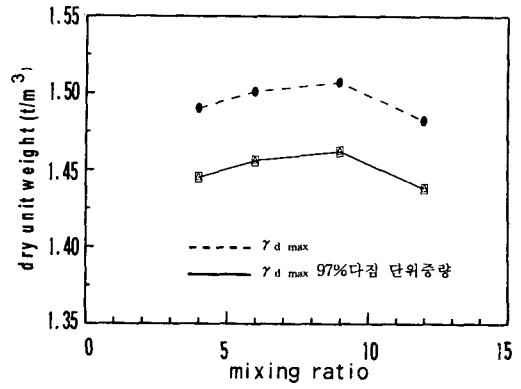
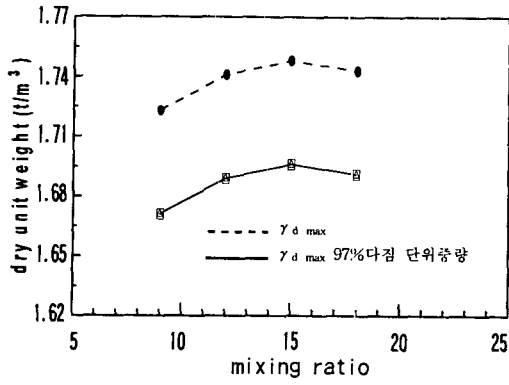


그림 6. 혼합물에 따른 원지반트의 투수계수

그림 7. 혼합물에 따른 황토의 투수계수

혼합차수층이 폐기물하중에 노출되었을 경우의 파괴가능성을 검토하기 위하여 일축 및 삼축 압축시험을 실시하였다. 일축압축시험의 경우 투수시험이 끝난 시료를 이용하였고 삼축압축시험의 경우 단기 안정해석에 이용하는 비압밀 비배수시험을 실시하였다.

실험결과 혼합물이 증가함에 따라 일축 및 삼축압축강도는 증가하는 경향을 보이고 있으나 그 비율은 크지 않았으며 측면구속압(=0.9kg/cm²)을 적용한 삼축압축강도(1.72kg/cm²~2.05kg/cm²)가 일축압축강도(1.04 kg/cm²~1.16kg/cm²)에 비교하여 크게 나타났다. 혼합차수층 시료의 일축압축시험 값은 현장차수층 작용하중(=1.4kg/cm²)에 미치지 못하고 있으나 실제 현장에서의 측면 토압(=0.9kg/cm²)이 작용하고 있는 차수층은 삼축압축시험에 의한 강도가 현장 실제 차수재의 강도를 대표할 수 있을 것으로 판단하였다 (표 5).

표 5. 대상시료의 압축강도시험 결과

단위: kg/cm²

구 분	혼 합 물 (%)	삼축압축시험		일축압축시험	
		OMC	OMC+습윤층3%	OMC	OMC+습윤층3%
원지반토	9	1.75	1.72	1.04	1.04
	12	1.78	1.75	1.10	1.06
	15	1.90	1.89	1.16	1.15
	18	1.89	1.87	1.13	1.12
황 토	4	1.95	1.92	1.05	1.04
	6	1.97	1.95	1.08	1.06
	9	2.05	2.03	1.13	1.10
	12	2.04	2.03	1.10	1.09

4.2 시공 후 현장 불교란시료

현장에서의 황토운반거리와 벤토나이트 혼합물 사이의 경제성을 분석한 결과 원지반토를 혼합토로 사용하는 것이 유리하며 시공기준 벤토나이트 혼합물은 14%로 결정하였다. 혼합물 분석결과에 따라 폐기물 매립지의 혼합차수층을 시공한 후 시공된 차수층의 불교란시료를 채취하여 투수계수와 강도를 점검하였다. 불교란시료는 매립지바닥에서 3곳(UD4~6) 제체상단에서 3곳(UD1, 2, 7)을 채취하고 사면의 경우 사면교란의 문제를 고려하여 1곳(UD3)을 채취하였다. 그 결과 각 시추된 지역별 투수계수의 범위는 $5.7 \times 10^{-8} \sim 8.8 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$ 로 나타났으며 이 값은 최초 혼합물 분석에서 측정된 투수계수 2.8×10^{-8} (OMC 측), 1.9×10^{-8} (OMC+3%측)에 비하여 증가된 값이나 현장에 시공된 차수층은 폐기물관리법에서 요구하는 투수계수기준을 만족하는 것으로 나타났다. 강도는 실내시험 시편을 이용하여 측정할 경우에 비교하여 뚜렷한 감소는 나타나지 않았다(표 6).

표 6. 불교란 시료의 시험결과

구 분	UD1	UD2	UD3	UD4	UD5	UD6	UD7
투수계수 cm/sec	5.7×10^{-8}	7.5×10^{-8}	5.9×10^{-8}	6.5×10^{-8}	8.8×10^{-8}	7.8×10^{-8}	6.4×10^{-8}
삼축압축강도 kg/cm ²	-	-	1.79	-	1.83	-	1.83

4. 결론

실험을 통하여 두 혼합토의 적합성을 판정한 후 벤토나이트 혼합물의 변화에 따른 투수계수를 살펴본 것으로, 혼합물 분석결과를 이용하여 현장 시공된 차수층의 불교란 샘플을 채취하여 실내시험에서 결정되었던 투수계수, 강도 등의 변화를 살펴본 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

- 1) 폐기물관리법에서 규정하는 투수계수 기준인 $1.0 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 와 비교하여 혼합물을 분석한 결과 원지반토의 적정 벤토나이트 혼합물은 14%정도 인 것으로 판단되었고 혼합물14%에서의 혼합차수재의 시공에 필요한 건조단위중량은 1.75t/m^3 이상이며 함수비는 15.8%(OMC)~18.8%(OMC+3%)의 범위에서 시공되어야 할 것으로 판단되었다. 또한 황토의 투수계수 기준을 만족하는 적정 벤토나이트 혼합물은 8% 정도이며 이혼합물에서의 혼합차수재의 시공에 필요한 건조단위중량은 1.51t/m^3 이상이며 시공함수비 범위는 25.6%(OMC)~28.6%(OMC+3%)인 것으로 나타났다.
- 2) 경제성과 안정성을 고려하여 선택한 원지반토에 벤토나이트 14%를 첨가하고 함수비15.8%(OMC)~18.8%(OMC+3%)와 최대 건조단위중량 1.75t/m^3 이상으로 시공한 차수층의 불교란 샘플을 채취 투수 시험과 강도시험을 실시한 결과 불교란 시료의 측정값들은 최초 혼합물 분석에서 결정되었던 값보다 투수계수는 4.7~8.7%가 증가하여 $5.7 \times 10^{-8} \sim 8.8 \times 10^{-8} \text{cm/sec}$ 로 나타났으며 압축강도는 0.8~2.9% 감소하여 1.83~1.79kg/cm²로 측정되었다.
- 3) 폐기물하중에 의한 차수층의 파괴검토는 수치해석결과에서 얻어진 최대 작용응력인 1.4kg/cm^2 의 값을 이용하여 검토하였다. 그 결과 비구속상태인 일축압축시험은 파괴에 대한 위험성이 있는 것으로 나타나고 있으나 현장의 지반 수평구속상태를 고려한 구속압($\sigma_3=0.9 \text{kg/cm}^2$)에서의 삼축비압밀 비배수 강도는 $1.75 \sim 2.05 \text{kg/cm}^2$ 의 범위로 원지반토와 황토 혼합차수재 모두 차수재에 작용하는 최대하중에 대하여 안정한 것으로 검토되었다.

감사의 글

본 연구는 환경관리공단과 골든포우(주)의 지원으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사를 포함합니다.

참고문헌

1. 환경관리공단(2000), OO지정폐기물 공공 처리장(2단계) 시설공사 실시설계 보고서.
2. 환경부(1999), 환경관계법규, 폐기물편.
3. ASTM(1992), "Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter" D5084-90, Vol. 04.08, pp. 1161-1168.
4. Daniel, D.E. and Bowers, J.I., Jr.(1990), "Waste Content-density Criteria for Compacted Soil Liners," *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 116, No. 12, December, pp. 1811~1830.
5. Olson, H.W.(1962), "Hydraulic Flow Through Saturated Clay," *Proceeding of the Ninth National Conference on Clay and Clay Minerals*, pp. 131~161.