

매립지에서 반응성 투수벽체의 적용성에 관한 연구

A Study on the Application of Permeable Preactive Barriers in Landfill

천병식¹⁾, Byung-Sik Chun, 박재우²⁾, Jae-Woo Park, 도종남³⁾, Jong-Nam Do, 박중섭⁴⁾, Joong-Sub Park, 박찬수⁵⁾, Chan-Su Park

¹⁾ 한양대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University

²⁾ 한양대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University

³⁾ 한양대학교 토목공학과 석박사과정, Graduate Student, M.S.&Dept. of Civil Engineering, Hanyang University

⁴⁾ 한양대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, M.S. of Civil Engineering, Hanyang University

⁵⁾ 한양대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, M.S. of Civil Engineering, Hanyang University

SYNOPSIS : This study is part of the project that develops the permeable preactive barrier to be applied in a landfill. The geotechnical applicability of the permeable preactive barrier that filters the leachate from the landfill was evaluated. Dry specimens were made using a mixture of sand, loess and bentonite. A series of experiments are performed to determine the unconfined compressive strength and permeability of various mixing ratio of bentonite, loess, and sand. The laboratory test indicate that the optimum-mixing ratio that satisfied the regulation of unconfined compressive strength(490kPa) and coefficient of permeability($10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/s) of the landfill was when the ratio of sand and loess was 8:2 with bentonite content of 2%. The permeable preactive barrier is different from an impermeable barrier in that it permits a limited diffusion of the leachate, which will be directly purified biologically and chemically in the landfill.

Key words : Permeable preactive barriers, Optimum mixing ratio, Unconfined compressive strength, Coefficient of permeability

1. 서 론

현재 국내에서 발생되고 있는 다양한 폐기물은 원천적 발생억제, 재활용, 소각 등 여러 가지의 중간처리방법을 거쳐 매립되고 있다. 매립장의 차수벽체는 침출수를 지반으로 유입되지 않게 하는 차수기능을 담당하고 있으나 지반에 일정량의 침출수 유입이 계속적으로 이루어져 악취 및 토양의 오염, 지하수 오염 등 실제로 주변 환경에 대한 오염 잠재력이 높고 침출수 정화 처리비용 또한 비싸다. 이러한 문제점을 없애기 위해 본 연구는 기존에 이루어지고 있는 매립지 차수벽체를 활성탄 또는 제올라이트 등을 포함한 폴리우레탄 벽체를 설치하여 침출수 내의 질소의 화학적 감소를 추구하며, 아울러 이를 충에 호기성, 혐기성상태를 반복 적용하도록 하는 복합 반응성 투수벽체를 구성하고, 비위생 매립지에서 유출되는 침출수 내 질소를 지중 처리하도록 설계하여 침출수 배출기준인 NH₄-N 100 mg/l 이하, NO₃-N 300 mg/l 이하로 유지할 수 있고, 두 충을 분리시켜주며 매립지 일축암축강도 규정을 준수할 수 있는 모래, 황토, 벤토나이트 혼합층의 시공안정성 확보를 위한 최적배합비 산정에 그 목적이 있다.

2. 이론적 배경

2.1 침출수의 특성

침출수의 화학적 조성은 매립지의 경과년수와 시료채취현황에 따라 다양하다. 침출수 시료가 분해의 단계에서 채집되었다면 pH는 낮고, BOD, TOC, COD, 영양물질(인, 질소), 중금속 농도는 높을 것이다. 반면 침출수 시료가 메탄 발효기에 채취되었다면 pH는 6.5~7, BOD, TOC, COD, 영양물질, 중금속의 농도는 매우 낮을 것이다. 침출수의 pH는 산의 농도뿐 아니라, 침출수에 접촉되는 매립가스의 CO₂ 분압에도 영향을 받는다. BOD/COD비율 0.5 이상이 되며, 비율이 0.4~0.6 정도의 것은 침출수내의 유기물이 이미 생물학적으로 분해 가능함을 나타낸다.

2.2 재료의 특성

본 연구의 원자반은 모래와 황토로 구성하였으며, 투수벽체는 원자반에 벤토나이트를 혼합하여 구성하였다. 본 과제에서 요구된 투수계수를 가지기 위해서 투수성이 높은 모래를 투수벽체에 혼합하였다.

황토는 천연 중금속 제거 기능이 있으며 현장에서도 매우 유용하게 쓰이고 있으며 구득이 쉽다는 장점이 있다.

국내에서 산출되는 벤토나이트의 대부분은 Ca-Mg 벤토나이트로 주 구성광물인 몬모렐로나이트의 함량이 45%~95%이다. 차폐제 및 흡착제로서 국산 Ca 벤토나이트가 우수한 방사성 폐기물 차폐 효과를 갖는다는 연구결과가 있으며, 계면활성제 처리 후에는 난용성 유기물의 흡착 효과가 우수하다고 보고된 바 있다. 그리고 충간에 Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ 등과 같은 교환성 양이온을 가진 벤토나이트는 다른 점토광물에 비해 양이온교환능이 월등히 높은 특성을 가지고 있다. 이러한 특성으로 다른 점토광물과 달리 유기물과의 복합체 형성이 용이하고 이온 흡착처리제로서 활용이 가능하다. 점토 내에 존재하는 교환 가능한 금속 양이온들을 양이온성 계면활성제로 대체시켜서 점토표면을 친수성에서 소수성으로 변화시킨 유기점토가 개발 되었으며 이는 천연 점토에 비해 물 속에 존재하는 유기 오염물질을 매우 효과적으로 제거시키는 것으로 연구되어 매립지 및 유류저장시설의 누출수로부터 난용성 유기 물질을 제거하고 고정화시키는 차수재의 구성물질로서의 활용 가능성이 제시되고 있다.

2.3 투수계수

투수계수에 영향을 끼치는 인자는 크게 투수 물질인 물과 투수 매체인 흙이다. 투수계수는 물의 점성에 따라 변화하며 점성계수는 온도와 밀접한 관계를 가지고 있다. 이에 한국공업규격에서는 투수계수 산정을 위한 실내실험의 기준온도를 15°C로 하고 있다.

사질토는 거의 관련이 없지만, 점토는 흡착이온에 따라 투수계수의 값이 현저히 달라지며 입자가 면모구조로 퇴적된 것이 이산구조보다 더 큰 값을 나타낸다. 이는 이산구조를 가진 흙을 통과할 때 면모구조에 비해 유선이 구불구불하게 되어 길어지기 때문이다.

3. 실내시험 및 현장시험

3.1 물성치 시험 및 공시체 제작

본 연구에서는 먼저 사용되는 모래, 황토, 벤토나이트에 대한 기본물성을 파악하기 위하여 비중시험, 체가름 시험, 액·소성한계 시험, D다짐 시험을 통하여 각 시료를 분류하고 특성을 파악하였다. 공시체는 모래의 최적함수비와 황토의 최적함수비에 따라 각 시료별로 혼합한 후, 혼합비별로 먼저 모래와 황토

를 혼합하고 그 뒤에 벤토나이트를 혼합하여 성형하였다.

3.2 일축압축강도시험

투수벽체의 최적배합비를 도출하기 위해서는 혼합비에 따른 강도측정이 필요하므로 벤토나이트의 함량을 4%로 고정한 상태에서 모래와 황토의 비율을 8 : 2, 7 : 3으로 변화시켜 측정하였다. 이에 일축압축강도가 더 큰 값을 가진 비율을 기준으로 벤토나이트의 함량을 0%에서 4%까지 1%씩 변화시켜가며 일축압축강도를 KS F 2314-97의 방법에 의해 측정하였다.

3.3 삼축투수시험

요구하는 투수벽체의 투수계수를 파악하기 위해 모래와 황토의 비율은 일축압축강도시험에서 구하여진 8:2로 고정하고 벤토나이트의 함량을 0, 1, 2, 3, 4%까지 변화 시켜가며 삼축투수시험을 실시하였다 (ASTM-D5084, 김상규 2004). 실험은 동수경사를 45로 일정하게 하여 구속압과 주입압을 가하였다. 간극수압계를 이용하여 과잉간극수압 B계수 값을 구하고 그 값이 0.95이상이 되면 완전 포화토로 가정하여 투수계수를 측정하였다. 단위 시간당 투수계수를 식(1)으로부터 산정하였다.

$$q = k \cdot i \cdot A \quad (\text{Darcy's Law}) \quad (1)$$

여기서, q 는 유량, k 는 투수계수, i 는 동수경사, A 는 침투단면적이다. 또한 구해진 투수계수에 대해서는 물의 점성계수에 따라 보정계수 μ_T/μ_{15} 를 이용하여 보정하였다.

3.4 현장시험

실내 시험에서 구하여진 최적배합비를 이용해 실제 현장 적용성을 파악하기 위하여 현장시험은 그림 1과 같이 가로 2m 세로 1m인 파일럿을 제작하고 그 안에 협기성 폴리우레탄층, 모래·황토·벤토나이트 혼합층, 호기성 폴리우레탄층 순으로 각층을 50cm두께로 설치 한 후 매립지의 침출수를 유입시키고 투수계수 및 침출수의 변화를 관찰하였다.



(a) 협기성 폴리우레탄층



(b) 모래·황토·벤토나이트 혼합층



(c) 호기성 폴리우레탄층

그림 1. 현장시험을 위한 반응성 투수벽체 제작

4. 실험결과

4.1 물성치 시험

기본 물성치 시험을 통하여 모래는 통일분류법상 SP로 분류되었고, 황토는 SM으로 분류되었으며 벤토나이트는 CH로 분류되었다(천병식, 2000). 또한 황토는 비중이 2.73, 소성한계(PL)가 27.6%이며 액성한계(LL)가 31.77%였다. 그리고 모래의 최대건조밀도(γ_{dmax})는 1.683g/cm^3 이고 최적함수비는 16.36%로 나타났으며, 황토의 최대건조밀도(γ_{dmax})는 1.994g/cm^3 이고 최적함수비는 12.25%로 나타났다.

4.2 일축압축강도시험

표 1에서 보는 바와 같이 모래와 황토의 비율이 다른 두 경우 모두 최대단위중량의 100%인 경우 가장 큰 일축압축강도를 나타내었으며 최대단위중량의 90%일 때의 평균 일축압축강도에 대비하여 8:2일 때는 약 1.72배, 7:3일 때는 2배 이상 큰 값을 나타내었다.

표 1. 모래와 황토의 비율에 따른 일축압축강도(벤토나이트 함량이 4%인 경우)

최대단위중량 (r_{dmax})	모래와 황토의 배합비별(8 : 2) 일축압축강도(σ_{28}) (kPa)			모래와 황토의 배합비별(7 : 3) 일축압축강도(σ_{28}) (kPa)		
	$r_{dmax}100\%$	$r_{dmax}95\%$	$r_{dmax}90\%$	$r_{dmax}100\%$	$r_{dmax}95\%$	$r_{dmax}90\%$
NO. 1	9.6	6.5	5.3	9.4	7.2	4.2
NO. 2	8.8	7.7	5.2	8.7	7.0	4.6
NO. 3	9.4	7.4	5.7	9.2	6.8	4.1
평균	9.3	7.2	5.4	9.1	7.0	4.3

이 결과로 모래와 황토를 8:2의 비율로 혼합하였을 경우가 일축압축강도가 크게 나타남을 알 수 있었다. 이는 모래와 흙 입자간의 간격이 8:2 비율에서 더 조밀하여 내부 마찰각이 커진 것으로 판단된다.

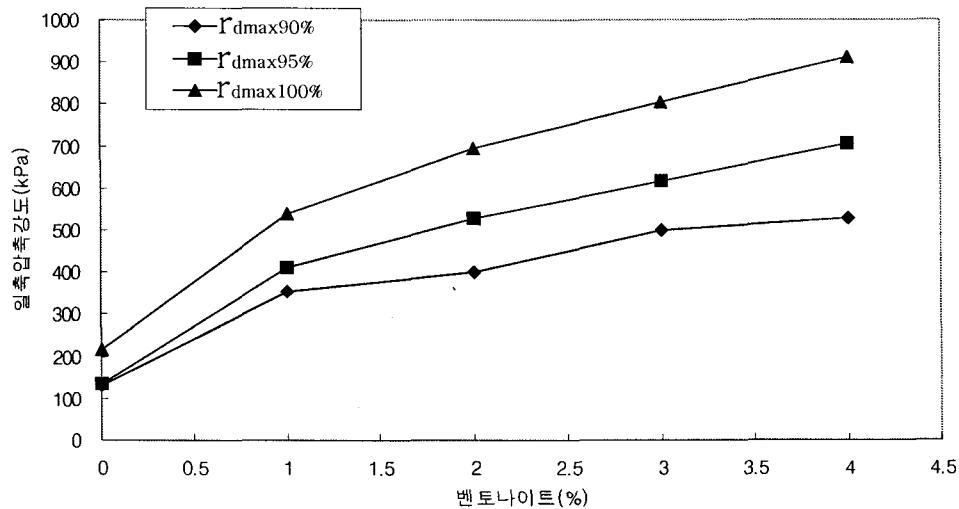


그림 2. 벤토나이트 함량별, 단위중량별 일축압축강도

그림 2는 모래와 황토 비율이 8:2일 때 최대단위중량의 100, 95, 90%에 대한 벤토나이트 함량별 일축압축강도(σ_{28})를 나타낸 것으로 최대건조단위중량이 증가 할수록 일축압축강도가 증가하였고, 벤토나이트 함량이 커질수록 강도 발현이 빨라지고 강도가 크게 증가하였다. 그리고 벤토나이트 함량이 2%이상일 경우 최대단위중량의 100, 95, 90%에 상관없이 28일 일축압축강도가 국내 매립지 시공에 관한 품질관리 관련법의 일축압축강도 규정인 490kPa을 만족하는 것으로 나타났다.

4.3 삼축투수시험

시료의 투수는 벤토나이트의 팽윤성과 최대단위중량에 따른 입자사이의 간극에 큰 영향을 받을 것이라 판단하고 28일 동안 자연 건조된 공시체의 벤토나이트 함량별, 최대단위중량별 투수계수를 구하였다.

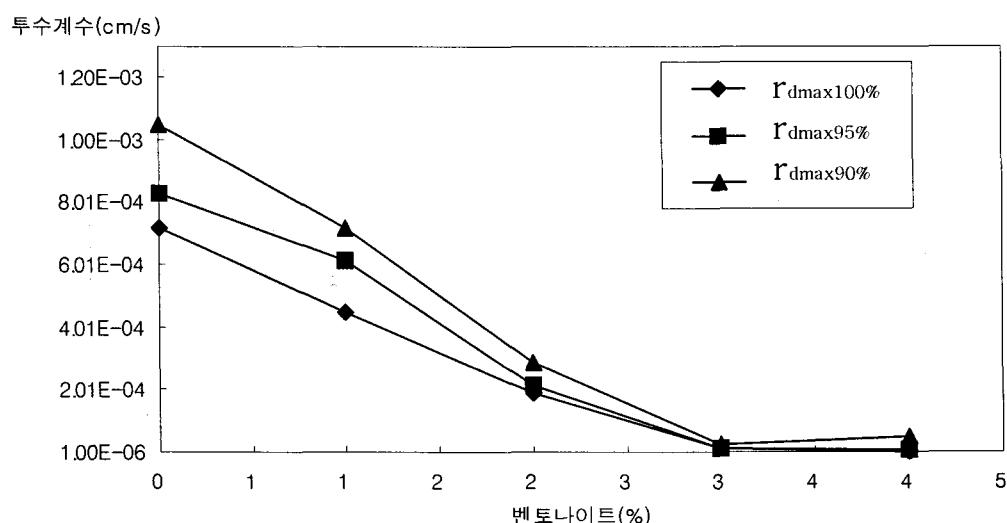


그림 3. 단위중량별, 벤토나이트함량별 투수계수

그림 3은 재령 28일이 지나고 모래와 황토의 비율이 8:2인 시료의 최대단위중량별, 벤토나이트 함량별 투수계수를 나타낸 것으로 보는바와 같이 요구된 투수계수 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/s을 만족하는 벤토나이트의 함량은 2%이하에서였다. 최대단위중량의 90%에서도 벤토나이트 함량이 3%이상이 되면 투수계수가 10^{-5} cm/s이하로 나타났다. 다른 여러 연구 논문에서도 벤토나이트의 함량이 많을수록 투수계수가 낮아지는 것을 알 수 있다.

4.4 현장실험 결과

표 2는 현장실험 시작 후 22일 동안 반응성 투수벽체에 의한 침출수의 변화를 나타낸 것이다.

표 2. 침출수의 중금속 및 오염물질의 농도변화

구분 시간(일)	질 소(mg/l)		인(mg/l)		NH ₄ -N(mg/l)		NO ₃ -N(mg/l)	
	유입수	유출수	유입수	유출수	유입수	유출수	유입수	유출수
1	127.3	56.9	10.6	16	0.21	0.39	123.3	50.3
8	132.2	63.3	13.2	9.5	0.23	0.28	127.5	62.5
15	129.5	61.4	3.78	4.4	0.11	0.22	119.4	54.6
22	120.6	58.4	5.2	3.8	0.2	0.19	118.3	50.2

현장시험 결과, 질소와 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도는 절반이상 감소하였으나, 인과 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 농도는 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 이는 침출수에 인과 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 농도가 변화를 파악하기엔 조금 어려운 미량이 함유되어 있었으며 좀 더 오랜 시간을 두고 지켜봐야 할 것으로 판단된다.

투수계수는 $2.7 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 로 실내 시험보다 더 크게 나타났다. 이는 반응성 투수벽체를 다짐하지 않고 시공하여 입자간의 간극이 커져서 투수가 더 잘 이루어 진 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 매립장 침출수 처리를 위한 복합 반응성 투수벽체에 의한 침출수의 변화와 현장 시공 안정성에 대한 시험을 실시하였으며, 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

일축압축시험과 삼축투수시험 결과, 원지반에 대한 최적의 표준배합비는 모래와 황토의 비율이 8:2인 경우에 입자의 간격이 조밀하여 다른 배합비보다 더 큰 일축압축강도를 나타내며, 최대단위중량이 증가 할수록 강도가 증가하는 것으로 판단된다. 벤토나이트의 함량은 2%이상 일 때 매립지 일축압축강도 규정을 만족하였고 입자의 간극이 가장 조밀한 상태인 최대단위중량의 100%일 경우 벤토나이트 함량이 2%이하에서 요구된 투수계수 값을 만족하였다. 매립지에 적용할 투수벽체의 최적배합비는 모래와 황토의 비가 8:2이고 벤토나이트 함량이 2%일 경우 이었다.

현장시험 결과, 질소와 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도가 절반이상 감소하는 효과를 나타냈으며 투수계수 또한 투수벽체로서 만족한 값을 나타내었다. 하지만, 미량의 인과 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 농도 변화에는 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 나타나서 앞으로 장기적인 실험이 계속 이루어져야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 김상규(2004), *토질역학 -이론과 응용-*, 청문각, pp. 24~36, 86~92.
2. 김용필, 송용선, 이광열, 장용채, 정경환, 김석환(2000), *지반공학 시험법 및 응용*, 세진사, pp. 52~65, 140~169, 338~369.
3. 천병식(2000), *지반공학 -이론과 실제-*, 구미서관, pp. 63~72, 80~84.
4. ASTM-D5084(2003), *Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter*, pp.63~70.