

벤토나이트 · 황토 · 모래를 혼합한 투수벽체의 지반공학적 특성에 관한 연구

A Study on the Characterization of Geotechnical Properties in Permeable Barriers Mixture of Bentonite, Loess, and Sand

천 병 식* · 박 재 우**
Chun, Byung-Sik · Park, Jae-Woo

Abstract

In this study, the geotechnical applicability of permeable barriers that could filter the leachate from a landfill was evaluated. Specimens were cast from sand, loess and bentonite according to the specific weight ratios of them. A series of experiments are performed to determine the unconfined compressive strength and permeability of various mixing ratio of bentonite, loess, and sand. From the laboratory test, optimum mixing ratio that satisfied the regulations of unconfined compressive strength(5kgf/cm²) and coefficient of permeability ($10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/sec) in landfill was found when the weight ratio of sand and loess was 8 : 2 with 2% of bentonite. Using the laboratory test data and in situ test results, the applicability of the wall will be tested for various conditions.

Keywords : Permeable barriers, Optimum mixing ratio, Unconfined compressive strength, Coefficient of permeability

요 지

본 연구에서는 매립장 침출수를 처리하기 위해 물리적인 차수기능만 하고 있는 차수벽체 대신 매립장 안에서 직접 정화 처리 하여 지반으로 유출시킬 수 있는 투수벽체의 시공에 대한 지반공학적 적용성을 평가하였다. 이를 위해 투수성이 높은 모래와 점착력을 가진 황토를 중량비에 따라 배합하고 벤토나이트의 함량을 변화시켜가며 공시체를 성형하여 일축압축강도시험과 투수시험을 실시하였다. 이 실험에서 매립지의 일축압축강도 규정(5kgf/cm²)을 만족하고 투수계수가 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/sec인 최적배합비는 모래와 황토의 배합비율이 8 : 2 이고 벤토나이트의 함량은 2%일 때였다. 그리고 좀 더 나아가 이러한 데이터를 바탕으로, 현장실험을 통하여 다양한 현장에 대한 적용성을 평가할 것이다.

주요어 : 투수벽체, 최적배합비, 일축압축강도, 투수계수

* 정회원 · 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

** 정회원 · 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

1. 서론

급격한 산업발전과 인구의 증가로 인해 각종 자원과 에너지 소비가 증가하고 있으며 그로 인하여 양적, 질적으로 다양한 쓰레기가 발생되고 있다. 매립은 비교적 안전하고 경제적이라는 이점이 있어 우리나라에서는 많은 폐기물을 매립처리하고 있는데, 주변지역에서의 악취, 하천 및 지하수 오염 등 실제로 주변 환경에 대한 오염 잠재력이 높은 점을 고려할 때 많은 문제점을 가지고 있다. 이러한 실정을 볼 때, 매립지에서 발생하는 침출수를 처리하는 방법의 개선, 현장에서 처리할 수 있는 기술 개발의 필요성, 그리고 그 중요성은 자명하다.

현재 매립지의 차수벽체는 침출수를 지반으로 유입되지 않게 하는 차수기능을 담당한다. 그러나 지반에 일정량의 침출수 유입은 계속적으로 이루어질 뿐만 아니라 침출수의 정화는 별도의 정화시설에서 처리되는 실정이다. 이로 인해 침출수 처리를 위해 수백억원의 건설비용과 시설 관리 비용이 필요하다.

본 연구는 침출수 정화 처리 비용의 절감과 시공 및 시설관리의 편리성을 위해 기존의 차수벽체를 정화 처리가 가능한 투수벽체로 전환하는 개발사업의 일부로서 매립지 일축압축강도 규정을 준수하는 투수성 Soil-Bentonite wall의 시공안정성 확보를 위한 최적배합비를 도출하고자 하였다.

2. 이론적 배경

본 연구에서는 원지반을 모래와 황토로 구성하였으며, 투수벽체는 원지반에 벤토나이트를 혼합하여 Soil-Bentonite wall을 구성하였다. 본 과제에서 요구된 투수계수를 가지기 위해서 투수성이 높은 모래를 투수벽체에 혼합하였고, 실험의 일관성을 위해 기준이 되는 주문진 표준사를 사용하였다. 황토는 천연 중금속 제거 기능이 있어 현장에서도 매우 유용하게 쓰일 수 있으며 구득이 쉽다는 장점이 있다. 또한 벤토나이트는 미생물의 흡착 및 차수의 목적으로 사용되었다.

2.1 벤토나이트의 특성

매립지의 침출수로부터의 유해한 오염물질을 고정화시키기 위한 흡착제로 점토 광물이 많이 이용되어져 왔다. 특히 벤토나이트는 독특한 입자형상과 높

은 비표면적, 우수한 양이온 교환기능으로 흡착에 효과적이고 경제성도 갖추어서 상업적으로 많이 이용되고 있다. 벤토나이트의 특성은 다음과 같다.

2.1.1 광물학적 특성

벤토나이트는 몬모릴로나이트를 주 구성광물로 하는 점토광물의 일종으로 광물학적 분류에서 스멕타이트(smectite)그룹에 속하는 광물이며 Si 사면체층과 Al 팔면체층이 2 : 1 형태의 결정구조를 갖는 미세한 집합체이다.

우리나라에서 산출되는 벤토나이트의 대부분은 응회암의 속성 변질에 의해서 생성되었으며, 대부분 Ca-Mg 벤토나이트로 주 구성광물인 몬모릴로나이트의 함량은 45%~95%이다. 국산 벤토나이트의 이용에 있어서 차폐제 및 흡착제의 효과에 대하여 국산 Ca 벤토나이트가 우수한 방사성 폐기물 차폐 효과를 갖는다는 연구결과가 있으며, 국산 벤토나이트의 계면활성제 처리 후, 난용성 유기물의 흡착 효과가 우수하다고 보고된 바 있다.

2.1.2 물리·화학적 특성

(1) 팽윤성(Swelling)

팽윤성은 벤토나이트의 물리·화학적 특성 중 가장 독특한 성질로 물과 같은 용매에 접촉하면 결정 층간에 물 또는 용매가 침입하여 층간 거리가 멀어지게 되고 최종적으로 겔(gel)상을 형성하는 부피 팽창 현상이다. 벤토나이트의 팽윤성은 층간에 존재하는 부(-)전하, 층간 양이온과 부(-)전하와의 전기적 balance, 양이온과 silicate층에 대한 물 분자의 작용에 의한 것으로 Ca 벤토나이트의 경우, Ca이온이 silicate 층에서 물 분자층과 강하게 결합되어 팽윤 특성이 저조하다.

(2) 양이온 교환능(Cation exchange Capacity)

다른 점토광물에 비해 벤토나이트는 양이온교환능이 월등히 높은 특성을 가지고 벤토나이트의 층간에 존재하는 Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} 등은 교환성을 나타내는데 이러한 양이온을 교환성 양이온이라 한다. 벤토나이트는 이러한 특성으로 다른 점토광물과 달리 유기물과의 복합체 형성이 용이하고 이온 흡착처리제

로서 활용이 가능하다. 점토 내에 존재하는 교환 가능한 금속 양이온들을 양이온성 계면활성제로 대체시켜서 점토표면을 친수성에서 소수성으로 변화시킨 유기점토가 개발되었다. 이러한 유기 점토의 개략도는 그림 1과 같다.

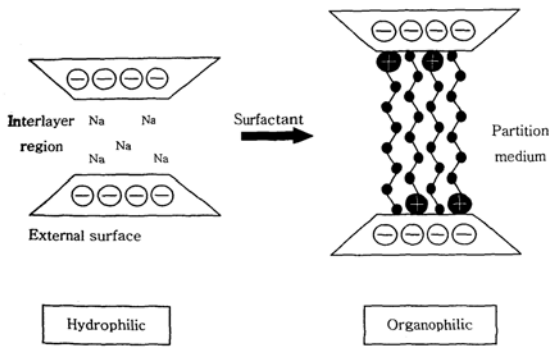


그림 1. 벤토나이트에서 Na⁺에 대한 양이온 계면활성제의 이온교환반응(이현주, 2004)

유기 점토는 천연 점토에 비해 물 속에 존재하는 유기 오염물질을 매우 효과적으로 제거시키는 것으로 연구되었다. 이와 같은 유기 점토의 유기오염물질에 대한 높은 흡수력과 낮은 투수성 때문에 매립지 및 유류저장시설의 누출수로부터 난용성 유기 물질을 제거하고 고정화시키는 차수재의 구성물질로서의 활용 가능성이 제시되고 있다.

(3) 흡착성

벤토나이트의 주 구성 광물인 몬모릴로나이트의 입자는 폭 100~1000nm, 두께는 5~10nm로 폭과 두께의 비율이 1 : 100~1 : 200인 형상 이방성이 큰 박편상 입자로서 매우 큰 비표면적을 갖는다. 벤토나이트는 독특한 입자형상과 크기, 높은 비표면적, 우수한 양이온 교환능으로 각종 유기물과 무기물의 흡착에 효과적이다. 벤토나이트의 흡착재로서의 이용은 입자크기와 결정구조의 변화에 의한 것으로 벤토나이트를 흡착재로 이용하기 위해서는 두 가지의

방법, 즉 벤토나이트의 입자크기를 미세화하는 방법과 몬모릴로나이트의 층간 구조에 변화를 주는 방법이 보고되고 있다.

3. 실내시험

본 연구에서는 먼저 사용되는 모래(주문진 표준사), 황토, 벤토나이트에 대한 기본물성을 파악하기 위하여 입도분석을 실시하였고, 그 외의 물리·역학적 물성시험을 실시하여 각각의 시료에 대한 특성을 분석하였다. 또한 일축압축강도시험을 실시하여 요구되는 강도를 만족하는지를 파악하였으며, 매립지 바닥에 시공됨을 감안하여 현장에 알맞은 투수계수를 산정하기 위해 구속압을 가진 삼축투수시험을 실시하여 투수벽체의 투수계수를 파악하였다.

3.1 입도분석 및 물성치 시험

모래와 황토 그리고 벤토나이트를 혼합하기 위한 각각의 최적함수비를 산정하기 위해 D다짐시험을 실시하여 각각의 재료에 대한 최적함수비를 산정하였다.

3.2 투수벽체의 최적배합비 산정

투수벽체의 최적배합비를 도출하기 위해서는 우선 본 과제에서 요구되는 강도와 투수계수를 만족하여야 한다. 이를 위해서는 다양한 혼합비에 따른 강도와 투수계수의 측정이 필요하므로 모래와 황토의 비율(중량비)을 8 : 2, 7 : 3으로 변화시키고 벤토나이트의 함량을 모래+황토의 중량에 대해 0%에서 4%까지 1%씩 변화시켜가며 투수벽체의 최적배합비를 산정하였다.

3.2.1 시료 배합

시료의 배합순서는 모래의 최적함수비와 황토의 최적함수비에 따라 각 시료별로 혼합한 후, 혼합비별로 먼저 모래와 황토를 혼합하고 그 뒤에 벤토나이트를 혼합하여 시료를 성형할 재료를 만들었다.

3.2.2 최적배합비를 결정하기 위한 공시체 성형



그림 2. 공시체 제작 광경

최적배합비를 선정하기 위해서는 본 과제에서 요구되는 적절한 강도와 투수계수 등이 도출될 수 있는 배합비가 필요하므로 모래와 황토의 비율을 8 : 2, 7 : 3 두가지의 경우로 공시체를 성형하였다. 우선 모래와 황토의 적정 혼합비를 결정하기 위해 벤토나이트의 함량은 4%로 고정시켰다.

한편, 공시체 제작에 있어서의 오차를 줄이기 위해 모래와 황토의 각각의 비율에 따라 공시체 속에 들어갈 수 있는 시료의 양이 다르다는 점을 감안하여, 각 비율에 따라 최대단위중량의 값을 다르게 하여 공시체를 제작하였다. 최대단위중량은 8 : 2 일 때 2.14gf/cm³, 7 : 3 일 때 2.08gf/cm³으로 측정되었고 공시체는 최대단위중량의 100%, 95%, 90%에 따라 28일간 자연건조 되었다.

3.3 일축압축강도시험

투수벽체의 최적배합비를 도출하기 위해서는 다양한 혼합비에 따른 강도와 투수계수의 측정이 필요하므로 모래와 황토의 비율(중량비)을 8 : 2, 7 : 3으로 변화시키고 벤토나이트의 함량을 0%에서 4%까지 1%씩 변화시켜가며 자연 건조 조건에서 양생 기간 1일, 3일, 7일, 14일, 28일에 따른 일축압축강도를 KS F 2314-97의 방법에 의해 측정하였다.

3.4 삼축투수시험

본 연구에서 요구하는 투수벽체의 기능성을 파악하기 위해 표준사와 황토의 배합비는 8 : 2의 비율로 하고 벤토나이트의 함량 0, 1, 2, 3, 4% 각각에 대해 삼축투수시험을 실시하여 투수계수를 산정하였다

(ASTM-D5084, 김상규 2004). 실험 진행 과정은 제작한 공시체를 멤브레인으로 씌운 다음, 고무링으로 상부 및 하부 Cap과 멤브레인을 고정시키고 공시체와 시험기 내벽 사이를 물로 채웠다. 물이 하부에서 상부로 이동할 수 있도록 압력조절 장치에 연결시킨 후 구속압과 주입압을 가하였다. 이 때, 주입압을 가하기 전에 구속압을 먼저 주어야 멤브레인의 팽창을 막을 수가 있다. 포화단계에서 공시체의 포화정도를 알기 위해서 시험장비에 부착되어 있는 간극수압계를 이용하여 과잉간극수압 B계수 값을 구하고 값이 0.95 이상이 되면 완전 포화도로 가정하여 투수계수를 측정하였다. 구속압 보다 주입압을 10% 작게 유지하고 삼축투수시험기에서의 수두차를 없애기 위해서 모든 내부 실린더에 있는 물의 양을 동일하게 한 후 압력수두로 투수계수를 측정하였다. 이때 동수경사는 45로 일정하게 하였다.

투수계수는 다음과 같은 식으로 산정하였다.

$$q = k \cdot i \cdot A \quad (1)$$

$$k = \frac{q}{iA} \quad (2)$$

여기서,

$$\text{동수경사}(i) = \frac{P_1 - P_2}{L}$$

P_1 : 공시체 저면에서의 압력 수두

P_2 : 공시체 윗 부분에서의 압력 수두

L : 시료의 높이(cm)

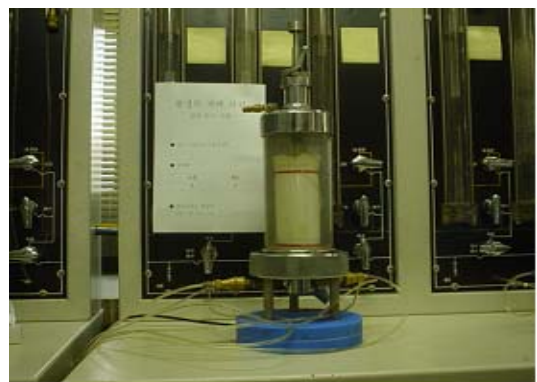


그림 3. 삼축투수시험 광경

또한 구해진 투수계수에 대해서는 온도보정이 필요하므로, 온도 15°C에 대한 투수계수 k_{15} 는 온도 T°C에 대한 물의 점성계수에 따라 보정계수 μ_T/μ_{15}

를 구하고 다음과 같은 식으로 산정하였다.

$$k_{15} = k_T \cdot \frac{\mu_T}{\mu_{15}} \quad (\text{cm/sec}) \quad (3)$$

여기서,

k_{15} : 온도 15°C에 대한 투수계수(cm/sec)

μ : 물의 점성계수(P)

4. 실내실험결과

입도분포시험, 일축압축강도시험, 그리고 삼축투수 시험의 결과는 다음과 같다.

4.1 입도분석 및 물성치 시험

입도분석 결과는 그림 4와 표 1에서 보는 바와 같고, 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.

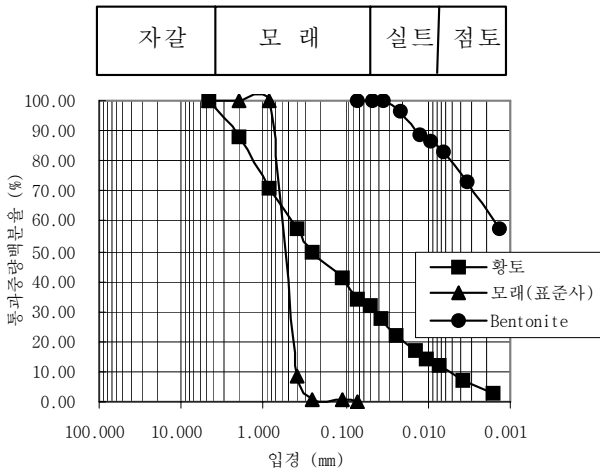


그림 4. 각 시료토의 입도분포곡선

표 1. 황토의 물성치

비중	자연 함수비 (%)	액성 한계 (%)	소성 한계 (%)	최대 건조밀도 (gf/cm ³)	최적 함수비 (%)
2.734	19.43	31.77	27.60	1.994	12.25

또한 다짐시험결과, 황토의 최대건조밀도(γ_{dmax})는 1.994gf/cm³이고 그 때의 최적함수비는 12.25%로 나타났으며, 모래의 최대건조밀도(γ_{dmax})는 1.683gf/cm³이고 그 때 최적함수비는 16.36%로 나타났다(그림 5 와 6).

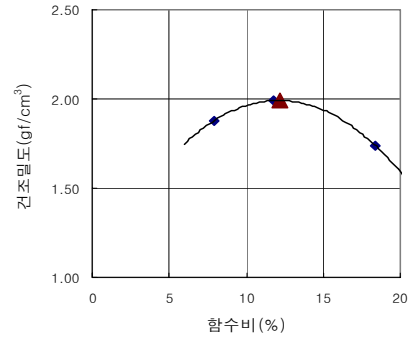


그림 5. 황토의 다짐곡선

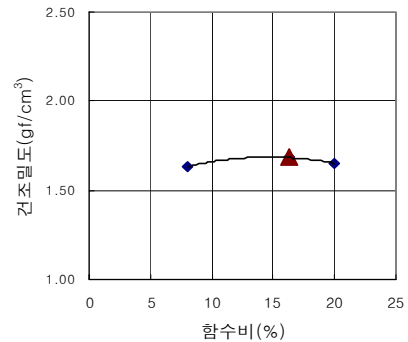


그림 6. 모래의 다짐곡선

4.2 일축압축강도시험

일축압축강도 측정 결과는 표 2에서 보는 바와 같이, 모래와 황토의 비가 8 : 2일 때 최대단위중량의 100%인 경우 가장 큰 일축압축강도를 나타내었으며 최대단위중량의 90%일 때의 평균 일축압축강도는 최대단위중량의 100%일 때에 대비하여 약 0.58배의 값을 나타내었다.

표 2. 모래와 황토의 비율(8 : 2)일 때 일축압축 강도(벤토나이트 함량이 4%인 경우)

시료번호	최대단위중량 (γ_{dmax})		
	모래와 황토의 배합비별(8 : 2) 일축압축강도(σ_{28}) (kgf/cm ²)		
	$\gamma_{dmax}100\%$	$\gamma_{dmax}95\%$	$\gamma_{dmax}90\%$
NO. 1	9.6	6.5	5.3
NO. 2	8.8	7.7	5.2
NO. 3	9.4	7.4	5.7
평균	9.3	7.2	5.4

표 3. 모래와 황토의 비율(7 : 3)일 때 일축압축 강도(벤토나이트 함량이 4%인 경우)

시료번호	최대단위중량 (γ_{dmax})		
	모래와 황토의 배합비별(7 : 3) 일축압축강도(σ_{28}) (kgf/cm ²)		
	$\gamma_{dmax}100\%$	$\gamma_{dmax}95\%$	$\gamma_{dmax}90\%$
NO. 1	9.4	7.2	4.2
NO. 2	8.7	7.0	4.6
NO. 3	9.2	6.8	4.1
평균	9.1	7.0	4.3

한편, 표 3에서 볼 수 있듯이 모래와 황토의 비율이 7 : 3이고 벤토나이트의 비율이 4%, 그리고 최대 단위중량의 100%, 95%일 때 모래와 황토의 비율이 8 : 2이고 벤토나이트의 비율이 4%인 경우와 유사한 일축강도를 보였으며 최대단위중량의 100%일 경우 가장 큰 일축압축강도를 보였다. 그리고 최대단위중량의 90%인 경우의 일축압축강도는 최대단위중량의 100%일 때에 대비하여 0.47배로서 일축압축강도가 크게 감소함을 알 수 있었다.

일축압축강도를 측정한 결과, 모래와 황토를 8 : 2의 비율로 혼합하였을 경우가 7 : 3으로 혼합하였을 경우보다 일축압축강도가 크게 나타났으며, 10 : 0의 비율은 시료를 성형할 수 없었다. 이는 모래와 흙입자간의 간격이 8 : 2 비율에서 가장 조밀하여 내부 마찰각이 커진 것으로 판단된다.

한편, 벤토나이트가 강도에 미치는 영향을 파악하기 위해 함량을 0, 1, 2, 3, 4%로 변화시켜가며 일축압축강도를 측정하였다.

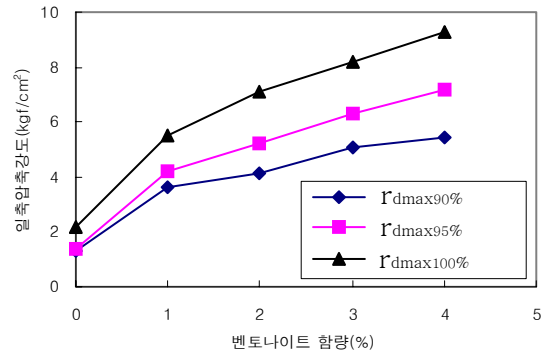
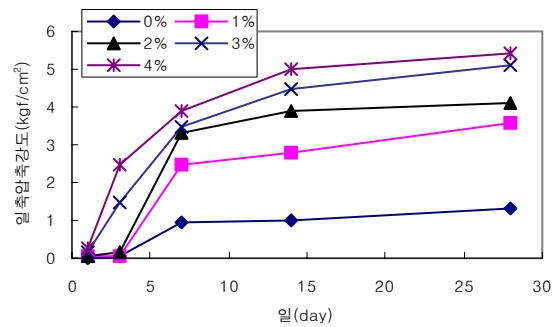
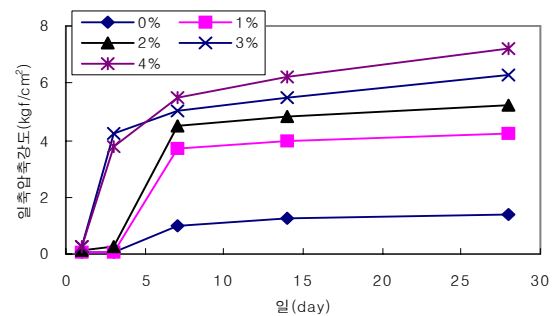


그림 7. 벤토나이트 함량별, 단위중량별 일축압축강도

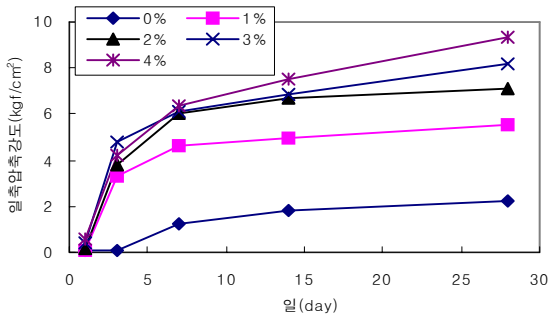
그림 7은 모래와 황토 비율이 8 : 2일 때 최대단위중량의 100%, 95%, 90%에 대한 벤토나이트 함량별 일축압축강도(σ_{28})를 나타낸 것이다.



(a) 최대단위중량의 90%($\gamma_{dmax}90\%$)



(b) 최대단위중량의 95%($\gamma_{dmax}95\%$)



(c) 최대단위중량의 100%(γ_{dmax} 100%)

그림 8. 단위중량별, 벤토나이트 함량별, 재령별 일축압축강도

그림 7과 8에서 볼 수 있듯이, 최대건조단위중량과 벤토나이트 함량이 증가 할수록 일축압축강도가 증가하였고, 시간이 지남에 따라 강도가 점차적으로 증가하였으며, 벤토나이트 함량이 커질수록 강도 발현이 빨라지고 강도 또한 크게 증가하였다. 그리고 벤토나이트 함량이 2%이상일 경우 최대단위중량의 100%, 95%, 90%에 상관없이 28일 일축압축강도가 국내 매립지 시공시 품질관리 관련법의 일축압축강도 규정인 5kgf/cm²을 만족하는 것으로 나타났다.

4.3 삼축투수시험

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

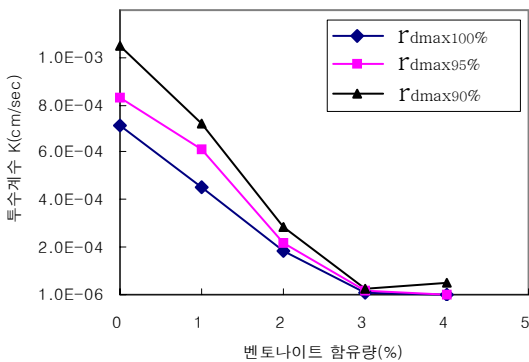


그림 9. 단위중량별, 벤토나이트 함량별 투수계수

그림 9는 모래와 황토의 비율이 8 : 2일 때 최대단위중량별, 벤토나이트 함량별 투수계수를 나타낸 것으로 보는바와 같이 요구된 투수계수 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/sec을 만족하는 벤토나이트의 함량은 2%이하에서였다. 최대단위중량의 90%에서도 벤토나이트 함량이 3%이상이면 투수계수가 10^{-5} cm/sec이하로 나타났으며 다른 여러 연구 논문에서도 벤토나이트의 함량이 많을수록 투수계수가 낮아지는 것을 알 수 있다.

표 4는 최대단위중량의 100%일 때 벤토나이트 함량별 투수계수를 나타낸 것으로 본 과제에서 요구된 투수계수 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ cm/sec을 만족하는 벤토나이트 함량은 2%이하일 때였다.

표 4. 벤토나이트 함량별 투수계수 (최대단위중량의 100%)

벤토나이트 함량 별	0%	1%	2%	3%	4%
투수계수 (cm/sec)	7.17×10^{-4}	4.50×10^{-4}	1.89×10^{-4}	1.05×10^{-5}	2.5×10^{-6}

5. 결론

본 연구에서는 매립장 침출수 처리를 위한 복합반응성 투수벽체의 시공성 및 안정성 확보를 위한 기초 실험을 수행하였고 그 강도 및 투수 특성을 파악한 것으로서, 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 배합비에 따른 일축압축시험결과, 원지반에 대한 최적의 표준배합비는 모래와 황토의 비율이 8 : 2인 경우가 적절한 것으로 판단되며, 최대단위중량별 강도특성은 최대단위중량이 작을수록 강도가 크게 줄어드는 것으로 판단된다.
- (2) 벤토나이트의 함량을 0, 1, 2, 3, 4%로 변화시켜 가며 일축압축시험을 실시하여 분석한 결과, 벤토나이트의 함량이 2%이상에서 매립지 일축압축강도 규정을 만족하였다.
- (3) 삼축투수시험 결과로 미루어 보아, 최대단위중량의 100%일 경우의 값을 기준으로 벤토나이트 함량별로 투수계수를 측정해본 결과, 2%이하에서 요구된 투수계수 값을 만족하였다. 이러한 결과로부터 투수벽체로서의 최적 배합비는 모래와

황토의 비가 8 : 2이고 벤토나이트 함량이 2%일 경우 이었다.

“매립지 침출수 확산차단 및 안정화를 위한 복합 반응성 투수벽체 현장적용 기술 개발”에 관한 일련의 연구결과로 이루어진 것으로 관계자 여러분께 감사드린다.

감사의 글

본 연구는 환경 기술진흥원의 국책연구사업인

(접수일자 : 2005년 5월 11일)

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. 이현주(2004), 침출수 내 오염물질의 효과적인 제거를 위한 반응성 차수재에 관한 연구. 이화여자대학교 대학원 석사학위논문, pp. 13~19.
4. 전진규(1999), 시멘트계 고화재에 의해 혼합처리된 지반의 설계정수에 관한 연구. 한양대학교 대학원 석사학위논문, pp. 25~29.
5. 천병식(2000), 지반공학 -이론과 실제-. 구미서관, pp. 63~72, 80~84.
6. ASTM-D5084(2003), Standard Test Method for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter. pp. 63~70.
7. Braja M. Das(1998), Principles of Geotechnical Engineering. pp. 62~77, 116~121.