

## 벤토나이트 혼합토의 혼합비에 따른 투수성 연구

### A Study for Permeability as Mixing Ratio at Bentonite-mixed Soil

주 재 우<sup>1</sup> Ju, Jae-Woo  
서 계 원<sup>2</sup> Suh, Kyeh-Won  
박 중 범<sup>3</sup> Park, Jong-Beom

#### Abstract

A theoretical equation, from which we can get a suitable ratio of bentonite at bentonite-mixed soil, was derived for design of the impermeable condition. Bentonite is a soil with great expansion property and it has the permeability lower than  $1 \times 10^{-7}$  cm/sec in spite of its maximum expansion state. Accordingly if the void of soil is filled with the liquid of bentonite, water will flow only through the void of bentonite liquid. And the permeability of bentonite-mixed soil will always satisfy the condition as impermeable zone. However, because it is very difficult to mix uniformly bentonite with soil, it is thought that the actual mixing ratio for the impermeable zone will be greater than that by theoretical equation. Permeability tests were performed to check the equation and a modified equation was suggested from the experimental results.

#### 요 지

흙차수층을 설계할 때 혼합되는 벤토나이트의 적정량을 구하는 식을 유도하였다. 벤토나이트는 포화될 경우 팽창성이 큰 흙이며 또한 최대로 팽창한 경우에도 투수계수는  $1 \times 10^{-7}$  cm/sec 이하를 유지한다. 이러한 벤토나이트의 성질을 이용하여 벤토나이트를 일반 흙과 혼합할 때 불투수층의 조건을 만족시키는 혼합율을 구하는 이론식을 구하였다. 그 개념은 포화된 벤토나이트가 흙 속의 간극을 채우면, 물은 벤토나이트로만 흐르게 되고, 벤토나이트는 불투수층으로서의 조건을 만족시키므로 그 결과 벤토나이트 혼합토 역시 차수층으로서의 조건을 만족시킨다는 것이다. 본 이론을 입증하기 위한 실험을 실시하였으며, 실험결과로부터 차수층을 얻기 위한 적정 혼합율을 구하는 방법을 제안하였다.

**Keywords :** Bentonite, Permeability coefficient, Mixing ratio

#### 1. 서 론

폐기물을 매립하는 매립장에서는 오염물질의 유출을 방지하기 위해 차수층의 투수계수를  $10^{-7}$  cm/sec 이하로 규정(폐기물 관리법시행규칙, 2005)하고 있다. 하지만 일반 흙만으로는 이러한 조건을 충족시키기 어렵기

때문에 현장 근처에서 쉽게 구할 수 있는 일반 흙에 벤토나이트를 혼합해서 투수성을 저하시키는 공법이 사용되고 있다. 이 공법을 이용하기 위해서는 적정량의 벤토나이트 혼합율을 실험을 통해서 구하게 된다. 즉 현장토로 선정된 흙에 여러 가지 비율의 벤토나이트를 혼합하여 현장 시공시 필요한 다짐도에 맞추어 시료

1 정희원, 순천대학교 토목환경공학부 교수 (Member, Ph.D. Prof, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Suncheon Univ., woo3318@hanmail.net)

2 순천대학교 토목공학과 박사과정 (Ph.D. Course, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Suncheon Univ.)

3 순천대학교 공업기술연구소 연구원 (Ph.D, Research Center of Industrial Technology, Suncheon Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

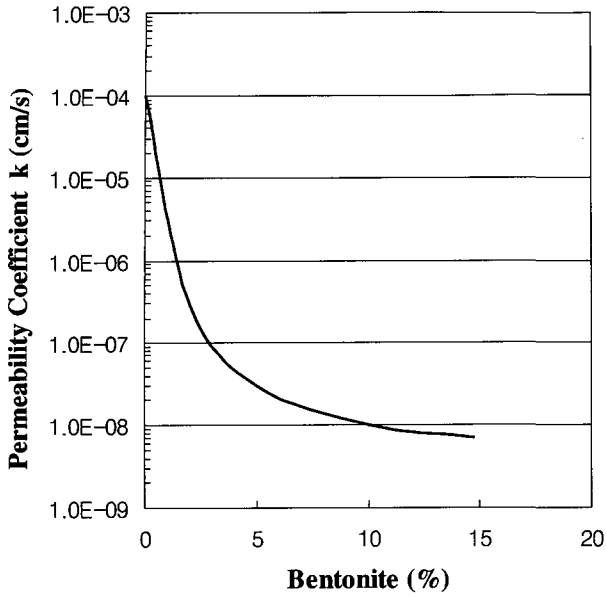


그림 1. Bentonite가 실트질 모래의 투수계수에 미치는 효과(미국환경청, 1989)

를 만든 다음 투수시험을 수행하여 차수층의 조건 즉  $10^{-7} \text{cm/sec}$  이하의 투수계수를 만족시키는 혼합율을 찾는다.

그림 1은 미국 환경청에서 발표한 것으로 벤토나이트 혼합율에 따라 투수계수가 저감 되고 있음을 보여주고 있다. 이러한 방법은 실험을 통해 이루어지며, 사실상 불투수층인 투수계수가  $10^{-7} \text{cm/sec}$  이하인 값은 혼합율이 약 3%일 경우 나타났다. 그러나 그림에서 얻어진 값은 사용되는 흙 재료나 벤토나이트의 종류가 달라진다면 그 값은 크게 변할 것이다.

따라서, 매년 수차례의 실험을 통하여 얻을 수밖에 없다. 하지만 벤토나이트가 혼합된 흙의 투수시험을 수행하는 것은 오랜 실험시간을 필요로 할 뿐 아니라 투수계수 또한 정확히 측정한다는 것이 결코 쉽지 않은 일이다.

Pandian 등(1995)은 혼합토에 대한 압밀 시험을 통하여 투수계수를 예측하는 방법을 제안하였으나, 본 연구에서는 벤토나이트가 갖는 고유한 특성을 이용하여, 이론적으로 적정량의 혼합율을 쉽게 구할 수 있는 방법을 개발하고자 하였다.

## 2. 이론식의 기본개념

### 2.1 차수재의 가정 사항

폐기물 매립장에서는 침출수의 유출을 방지하기 위

하여 차수층을 설치한다. 이때 가장 중요한 것은 벤토나이트가 일반 흙과 균질한 분포를 갖도록 잘 혼합하는 것이다. 벤토나이트 함량이 크다 하더라도 균질하게 혼합되지 않으면 차수층으로서의 역할을 할 수가 없다. 그리고 시공시 최적함수비상태에서 습윤층 다짐을 하여 가능한한 투수성을 줄이도록 하는 것이며 이와 같은 조건으로 충분히 혼합이 되는 것을 전제로 한다.

또한, 벤토나이트의 팽창과 차수특성은 몬모릴로나이트의 종류와 성분, 가공방법 및 간극수의 이온농도에 의하여 민감하게 변하며 차수재의 투수성은 침출수의 성분과 농도 및 침투압에 따라서도 달라진다. 또한 벤토나이트의 투수성과 혼합율의 관계는 물리적인 특성뿐 아니라 화학적인 특성이 중요한 요인으로 작용한다. 하지만 본 연구에서는 흙의 삼상관계만을 이용하여 벤토나이트의 최적혼합비를 구하는 식을 유도하고자 하며 이는 물리적인 특성만이 고려된 것임을 주지할 필요가 있다.

### 2.2 벤토나이트의 투수성

벤토나이트는 주로 sodium계통의 것이 차수층의 혼합재료로 사용되는데, sodium 계통의 벤토나이트는 흡수 팽창성이 매우 크며, 젤과 같이 유동적인 상태를 유지하는 성질이 강하다. 그림 2는 이러한 벤토나이트의 투수계수와 간극비와의 관계를 나타낸 것으로 간극비

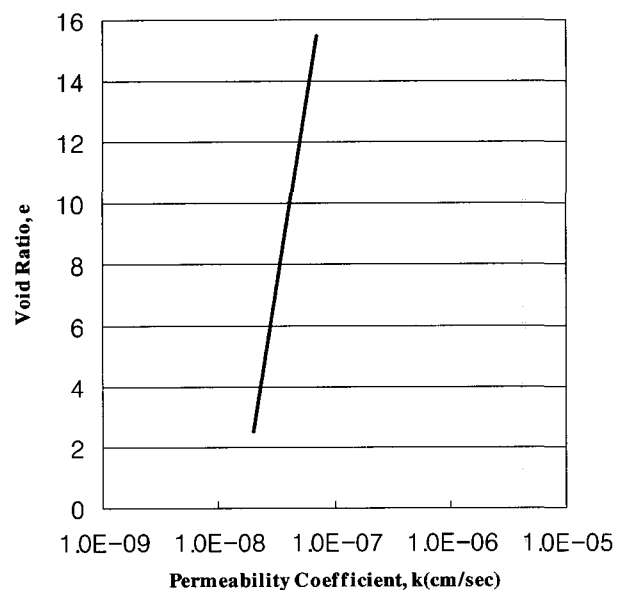


그림 2. Sodium bentonite의 간극비에 따른 투수계수(Cornell Univ, 1951)

가 15까지 증가했지만 여전히 투수계수는  $10^{-7} \text{cm/sec}$ 보다 작음을 알 수가 있다. 즉,

$$(k_b)_{sat} < 1 \times 10^{-7} \text{cm/sec} \quad (1)$$

여기서,  $(k_b)_{sat}$ 는 포화된 벤토나이트의 투수계수이다.

### 2.3 이론식 유도를 위한 기본 개념

차수층을 만들기 위해 벤토나이트를 혼합하게 된다. 만일 일반 흙의 간극 속에 충분히 포화된 벤토나이트액이 차 있다면, 물은 단지 벤토나이트액을 통해서만 흐를 것이다. 그렇다면 포화된 벤토나이트의 투수계수가 언제나  $10^{-7} \text{cm/sec}$  미만이기 때문에 벤토나이트 혼합토는 언제나 차수조건을 만족하게 된다. 즉 다음 조건을 만족한다고 가정할 수 있다.

$$k_{B.S} < 1 \times 10^{-7} \text{cm/sec} \quad (2)$$

여기서,  $k_{B.S}$ 란 벤토나이트가 혼합된 혼합토의 투수계수를 의미한다.

따라서, 흙지반의 간극비가 크다면 벤토나이트액이 많이 필요할 것이고, 간극비가 작다면 그만큼 벤토나이트액이 적게 필요할 것이다.

혼합비에 영향을 미치는 인자로서 벤토 나이트가 최대 팽창했을 때의 간극비와 설계상 요구되는 다짐상태에서의 흙 지반의 간극비를 고려하였으며 다음 식과 같이 표현할 수가 있다.

$$M = f [(e_B)_{ME}, (e_S)_{RC}] \quad (3)$$

여기서,  $M$ 은 벤토나이트의 혼합율이며,  $(e_B)_{ME}$ 는 벤토나이트가 최대 팽창했을 때의 간극비,  $(e_S)_{RC}$ 는 불투수층을 만들기 위해 설계상 요구되는 간극비를 말한다. 위와 같은 기본가정에 근거하여 다음과 같이 이론식을 유도하였다.

### 3. 이론식의 유도

벤토나이트액과 흙과의 차이를 명확히 하기 위해서, 최대로 포화 팽창된 벤토나이트 요소 그림 3과 일반 흙 요소를 그림 4와 같이 비교하여 나타내었다. 그림 3은 벤토나이트가 물을 흡수하여 최대로 팽창하였으므로 간극비가 아주 증가해 있는 상태를 보여준다. 따라서 흙

입자의 체적에 비해 간극비가 아주 크다.

그림 4는 필요한 다짐에너지로 다져서 밀도가 증가된 상태의 흙의 구성관계를 보여준 것으로 공기와 물이 섞여 있는 상태이다.

흙 입자만의 체적을 1이라 했을 때 간극의 체적은 벤토나이트의 경우  $(e_B)_{ME}$ 이며, 흙의 경우  $(e_S)_{RC}$ 가 된다. 그리고 벤토나이트 요소에서 벤토나이트 입자만의 무게는  $G_B \cdot \gamma_w$ 이며 간극속의 물의 총무게는  $(e_B)_{ME} \cdot \gamma_w$ 가 될 것이다. 한편, 흙 요소에서 흙 입자만의 무게는  $G_S \cdot \gamma_w$ 이며 간극속의 무게는 물과 공기가 함유된 상태에서 포화도에 의존한다.

벤토나이트가 최대로 팽창이 된 벤토나이트액의 단위중량은 다음 식 (4)와 같다.

$$(\gamma_B)_{ME} = \frac{G_B + (e_B)_{ME} \gamma_w}{1 + (e_B)_{ME}} \gamma_w \quad (4)$$

여기서,  $G_B$  = 벤토나이트의 비중

$(e_B)_{ME}$  = 벤토나이트가 최대로 팽창된 상태에서의 간극비

$\gamma_w$  = 물의 단위중량

이 벤토나이트액은 간극비는 아주 크지만 역시 투수

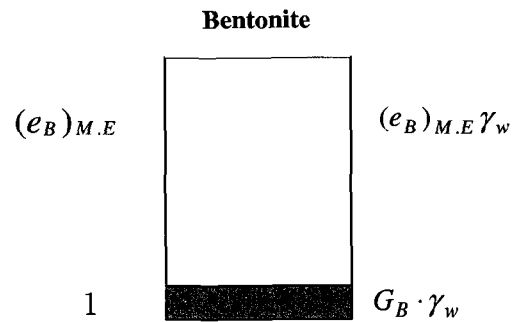


그림 3. 포화된 벤토나이트의 3상 관계

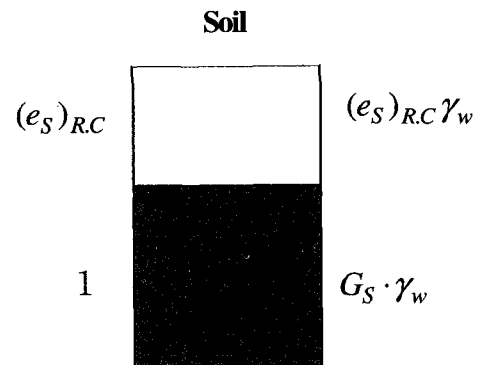


그림 4. 다져진 흙의 3상 관계

계수는 차수층의 조건을 만족하고 있음을 상기할 필요가 있다. 다음으로 이 벤토나이트액을 가지고 흙의 간극을 채운다고 가정한다. 흙의 간극을 전부 벤토나이트액으로 채웠을 때 소요되는 벤토나이트액의 중량은 다음 식과 같다.

$$(W_{B,E}) = (\gamma_B)_{ME} \cdot (e_s)_{RC} = \frac{G_B + (e_B)_{ME}}{1 + (e_B)_{ME}} \gamma_w (e_s)_{RC} \quad (5)$$

즉 흙 요소의 간극의 부피에다 벤토나이트 액의 단위 중량을 곱하면 소요되는 벤토나이트액의 중량을 구할 수 있게 된다.

그림 5는 이렇게 혼합된 요소를 나타낸 것이다. 벤토나이트액을 건조시키면 그 무게는 아주 작아질 것이다. 실제 혼합율을 계산할 때 벤토나이트의 건조중량을 사용하므로 소요 벤토나이트액의 무게를 소요 건조벤토나이트 무게로 환산한다. 건조벤토나이트 중량을 구하면 다음 식 (6)과 같다.

$$W_{B,DRY} = \frac{W_{B,E}}{1 + \frac{(e_B)_{ME}}{G_B}} \quad (6)$$

흙과 건조벤토나이트의 무게를 가지고 건조벤토나이트 무게를 나누면 혼합율이 되는데, 차수층 설계를 위한 적절한 혼합율이라 말할 수 있으며 그 관계는 아래 식 (7)과 같다.

$$M = \frac{(W_B)_{DRY}}{W_S + (W_B)_{DRY}} \times 100 = \frac{1}{\frac{G_S \cdot (1 + (e_B)_{ME})}{G_B \cdot (e_s)_{RC}} + 1} \times 100 (\%) \quad (7)$$

설계에 사용될 수 있는 벤토나이트의 종류는 많다. 벤토나이트 제품종류에 따라서 팽창성이 다르며, 팽창성이 다르면 포화상태에서의 간극비 또한 달라진다.

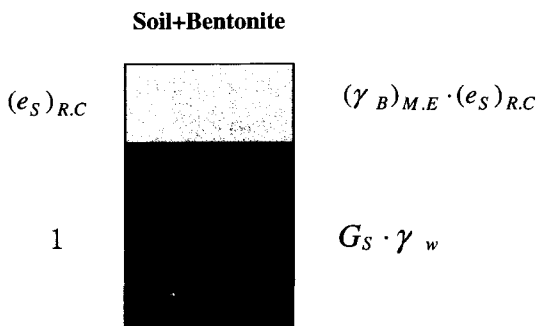


그림 5. 벤토나이트 혼합토의 3상 관계

그림 6은 식 (7)을 도식화한 것으로 벤토나이트가 최대 팽창했을 때의 간극비를 X축에 나타내었고 흙의 간극비의 크기에 따라 변하는 차수층을 얻기 위한 혼합율을 Y축에 표시한 것이다.

그림 7은 식 (7)의 설계시 요구되는 흙의 다짐도에서의 간극비를 X축에 나타내었을 때 사용되는 벤토나이트의 최대 팽창시 간극비에 따른 혼합율을 나타낸 것이다.

#### 4. 재료의 특성 및 시험 방법

벤토나이트 혼합토가 이론적으로 구해진 혼합율 만을 혼합함으로써 원하는 차수층을 만든다는 것은 쉬운

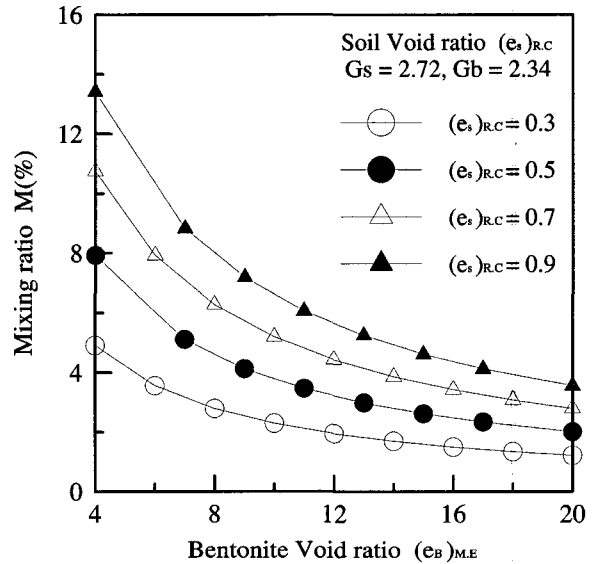


그림 6.  $M - (e_B)_{ME}$

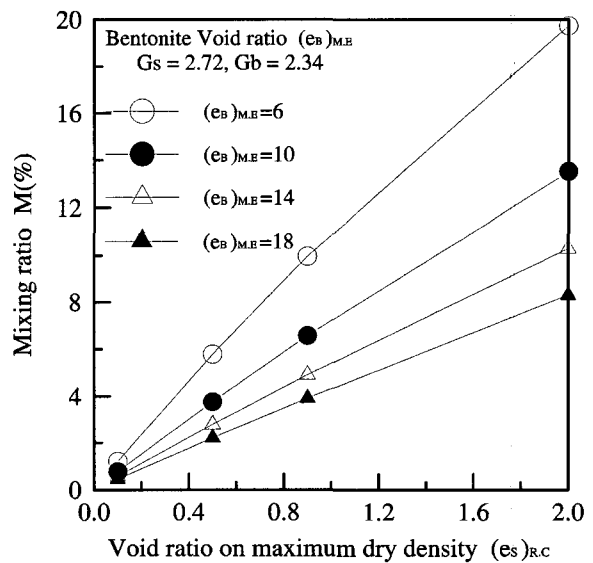


그림 7.  $M - (e_s)_{RC}$

일이 아니다. 그 가장 큰 이유로서 벤토나이트가 물과 신속히 반응하는 성질 때문에 흙과 벤토나이트를 골고루 혼합한다는 것이 매우 어렵기 때문이다. 따라서 본 연구에서 제시한 혼합율을 구하는 방법은 이상적인 최소 혼합율이라고 말할 수 있다. 본 연구결과를 검토하기 위하여 다음과 같은 실험을 실시하였다.

#### 4.1 재료의 물성 및 팽윤도시험

##### 4.1.1 흙

자연토를 사용하였으며, 균일한 시료를 얻기 위하여 시료를 건조시킨 후 #10체를 통과한 시료만을 사용하였다. 흙 시료에 대한 기본 물성 시험결과는 표 1에 나타내었다. 표준다짐시험결과 최대건조밀도를 갖는 최적함수비는 20.8%였다.

##### 4.1.2 벤토나이트(Bentonite)

Sodium 벤토나이트를 사용하였으며, 기본물성시험과 팽윤도 시험을 실시하였다.

벤토나이트의 기본 물성시험결과는 표 2에 나타내었으며 액성한계시험 결과 액성한계는 321%였으며 이때의 간극비는 7.51이었다.

##### 4.1.3 팽윤도 시험(Swelling Test)

시료의 종류와 목적에 따라 여러 가지 방법이 제안되어 있으며 벤토나이트에 대한 팽윤도 시험은 다음과 같이 실시하였다.

- 1) 분말 벤토나이트를 노건조시킨 후 데시게이터에 넣고 상온에서 방치하여 식힌다.
- 2) 정확히 2g을 칭량한 후, 마개가 달린 100ml 메스 실린더에 증류수 100ml를 채운다.
- 3) 장시간에 걸쳐 아주 조금씩 완전 침강시킨 뒤 메

표 1. 자연토의 물리적 특성

Gs	LL(%)	PL(%)	PI
2.72	38.0	26.57	11.43
No.200체 통과량		Cu	Cg
7.14%		8	1.82
USCS			
SW-SM			

표 2. 벤토나이트의 물리적 특성

Gs	LL(%)	PI(%)	Swelling Raio(ml/2g)
2.34	321.0	270.28	21

스실린더의 눈금을 읽어 2g에 대한 부피 팽창비 ml/2g로 나타낸다.

시험결과 팽창율은 21ml/2g이었으며 이때의 함수비는 1151%였다. 따라서 이때의 간극비는 약 27이 됨을 알 수가 있다.

#### 4.2 투수시험 장치

투수계수가 낮은 벤토나이트를 이용하여 시험하기 때문에 변수위 투수시험을 채택하여 실험하였으나, 일반적인 투수시험 몰드는 크기가 크므로 시료를 포화시키는 데 많은 시간이 소요되며 많은 양의 시료를 사용하기 때문에 새로운 이론 입증을 위한 정확한 혼합시료 조제가 힘들게 된다. 그래서 작은 투수시험 몰드를 제작하여 사용하였다.

그림 8과 사진 1은 제작한 투수시험 몰드의 상세도 및 사진이다. 시료내부의 포화상태를 관찰하기 위하여 몰드의 본체는 아크릴로 제작하였고 내부직경은 63mm이며 시료의 높이는 25mm이다. 몰드의 상, 하부면에는 벤토나이트 시료의 유실을 막기 위하여 눈의 크기가 8 $\mu$ m 이하인 여과지를 설치하였으며 시료의 다짐 전에는 측면을 그리스(Greese)로 처리하여 측면누수를 방지하였다. 몰드의 상부에는 O-ring을 설치함과 동시에 볼트를 장착하여 누수를 완전 차단하였다.

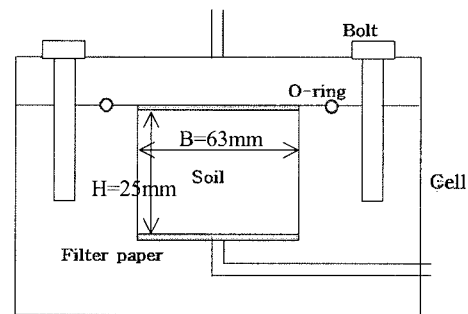


그림 8. 소형 투수시험 몰드 상세도

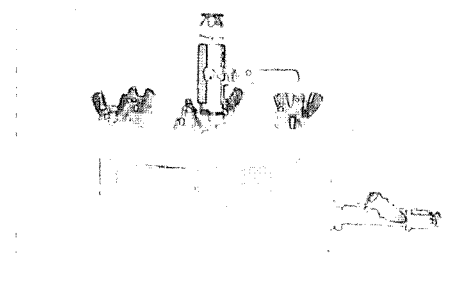


사진 1. 소형 투수시험 몰드

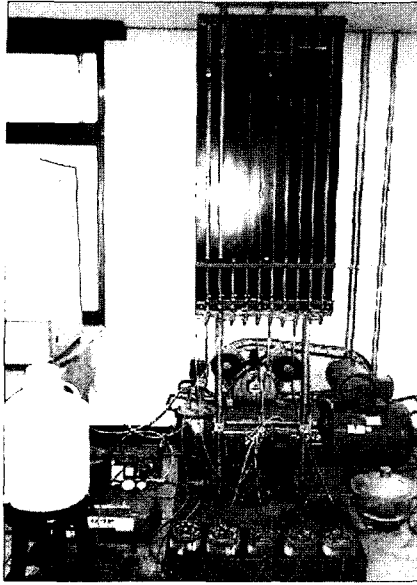


사진 2. 변수위 투수시험 장치

이론식을 증명하기 위한 시험시료는 벤토나이트의 혼합비율을 변화시켜 가면서 배합하였으며 투수시험 몰드에 소형다짐봉으로 직접 다져 최대건조밀도를 재현하였다.

본 연구에서는 투수시험의 오차를 최대한 줄이기 위해 실험실 내의 온도를 일정하게 유지하였고 2mm 이하의 시료만을 사용하여 최적함수비의 습윤상태에서 표준다짐과 동일한 에너지로 다진 다음 투수시험을 하는 방법을 사용하였으며 혼합비가 다른 시료 5개를 동시에 제작한 후 시험하였다.

## 5. 시험결과 및 고찰

### 5.1 벤토나이트 혼합토의 투수계수

이론식을 입증하기 위한 투수시험으로 벤토나이트 혼합율을 달리하여 다음과 같이 시험을 실시하였다. 표 3은 투수시험결과를 나타낸 것이다.

투수시험결과 혼합율이 증가함에 따라 투수계수는 감소하는 일반적인 경향을 뚜렷하게 확인할 수 있다. 그러나 혼합율이 14% 이상이 되면 투수계수는 더 이상 감소하지 않았다는 것을 알 수 있다. 그것은 불투수층을 만들

표 3. 혼합토의 투수시험 결과

M (%)	0	5.20	9.88	14.13	17.99
K (cm/sec)	2.96 $\times 10^{-05}$	2.15 $\times 10^{-06}$	9.23 $\times 10^{-08}$	2.51 $\times 10^{-08}$	2.48 $\times 10^{-08}$

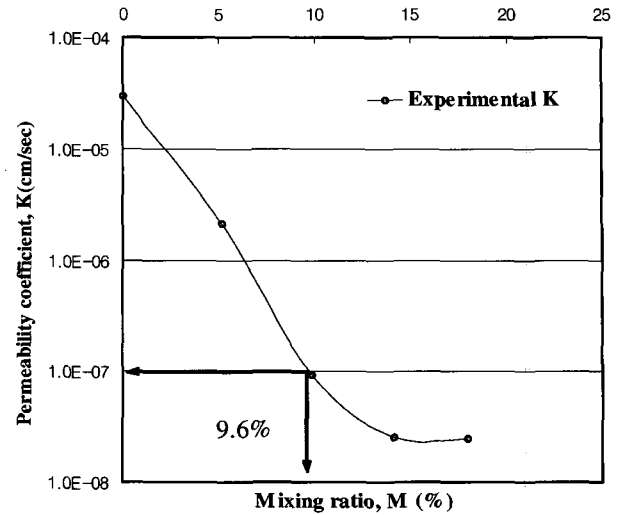


그림 9. 혼합율과 투수계수의 관계

수 있는 적절한 혼합율이 분명히 존재한다는 것이다. 실험결과를 도식화한 그림 9로부터  $10^{-7} \text{cm/sec}$  이하의 투수조건을 만족시키는 혼합율은 9.6%로 나타났다.

### 5.2 이론식과의 비교

식 (7)을 이용하여 구한 이론적인 벤토나이트의 혼합율은 실제 실험에 의하여 구한 9.6%보다 훨씬 적은 3%이다. 따라서 이론식 유도과정에서 어떤 중요한 요인을 고려하지 못했었다는 것을 생각할 수 있었다.

이론적으로 구한 혼합율과 실험결과 구한 혼합율이 일치하지 않는 중요한 요인은 다음과 같다.

첫째, 벤토나이트가 가지는 고유한 특성에 관한 원인이다. 벤토나이트는 물과 만나면 재빨리 반응하여 입자끼리 서로 뭉쳐지는 현상이 나타난다. 따라서 흙과 벤토나이트를 혼합할 경우 완전한 혼합이 어렵다.

두 번째는 혼합토의 일부분은 흙 입자 사이의 간극이 충분하지 못해서 벤토나이트가 최대 팽윤상태에 이르지 못한다는 것이다. 즉 다짐토의 간극이 벤토나이트의 팽윤도 시험 결과 측정된 부피에 비하여 상대적으로 부족하기 때문이다.

마지막으로 벤토나이트의 과포화상태이다. 벤토나이트는 그 자체의 팽윤성과 콜로이드성으로 인하여 간극비가 20이 넘을 때까지 팽창할 수 있다. 흙 입자 사이에 간극이 조금이나마 확보된 상태에서 물이 계속 유입된다면 벤토나이트는 계속 물을 흡수하여 팽창한 뒤 자체의 콜로이드성으로 인하여 투수시험장치의 여과지를 통과할 수 있다는 것이다. 실제로 본 연구에서도 투수시

험 중 벤토나이트가 여과지를 통과하여 조금씩 유출되는 것을 확인할 수 있었다.

### 5.3 이론식의 수정

벤토나이트가 계속 물을 흡수하여 팽창한 뒤 자체의 콜로이드성으로 인하여 간극사이를 빠져나가는 것을 이론적으로 구한 혼합율과 실험결과 구한 혼합율이 일치하지 않는 중요한 원인으로 가정하여 식 (7)을 식 (8)과 같이 수정하였다. 식 (8)은 벤토나이트가 최대 팽창했을 때의 간극비라고 가정하였던  $(e_B)_{ME}$ 의 항을 벤토나이트가 액성한계일 때의 간극비  $(e_B)_{LL}$ 로 수정한 것이다.

$$M_{mod} = \frac{1}{\frac{G_s \cdot (1 + (e_B)_{LL})}{G_B \cdot (e_S)_{RC}} + 1} \times 100(\%) \quad (8)$$

기존의 이론식에 의하여 구한 혼합율과 수정된 이론식 (8)에 의한 혼합율을 실험결과와 비교하여 표 4에 나타내었다.

표 4에서  $M_{THEO}$ 는 식 (7)에서 제안하였던 이론식이다. 이론식의 계산결과 벤토나이트 혼합도가 불투수층이라 여길 수 있는  $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 를 만족시키는 혼합율은 3%였으며 이는 실제 실험에서 구한 9.6%에 훨씬 못 미치는 값이었다.

$M_{mod}$ 는 식 (7)의 포화된 벤토나이트의 간극비  $(e_B)_{ME}$ 항 대신에 벤토나이트의 액성한계상태에서의 간극비  $(e_B)_{LL}$ 를 대입한 수정된 이론식 (8)에 의하여 구한 혼합

표 4. 이론값과 실험값의 비교

Test No	$G_s$	$G_B$	$(e_S)_{RC}$	$(e_B)_{ME}$	$(e_B)_{LL}$	$M_{THEO}$ Equation (7)	$M_{mod}$ Equation (8)	$M_{TEST}$
1	2.72	2.34	1.01	27	7.51	3.0 %	9.3 %	9.6 %

표 5. 흙 시료의 물리적 특성

Soil	$G_s$	LL(%)	PI	Cu	$C_g$	USCS	$(e_S)_{RC}$	OMC(%)
Y	2.72	38.0	11.43	8	1.82	SW-SM	1.01	20.8
M	2.66	33.4	7.34	9.2	1.51	SW-SM	0.7	18.58

표 6. 벤토나이트 시료의 물리적 특성

Bentonite	$G_s$	LL(%)	PI	Swelling Ratio (ml/2g)	$(e_B)_{LL}$
A	2.34	321	270.28	21	7.51
B	1.97	194	155.51	19	3.82

율이 9.3%로 나타났다. 그것은 실제 투수시험으로부터 얻은 혼합율 9.6%에 거의 근사하였다.

### 5.4 수정된 이론식의 검증 시험

수정된 이론식의 검증을 위한 시험을 각각 두 종류의 흙과 벤토나이트를 혼합하여 앞 절에 기술한 것과 동일하게 실시하였다. 흙과 벤토나이트의 기본물성시험결과는 표 5와 표 6에 각각 나타내었다.

혼합율을 0, 5, 10, 15, 20%로 달리하여 혼합시료의 Y+B, M+A, M+B 3종류의 시료에 대하여 추가로 실험을 실시하였다. 표 7과 그림 10은 각각의 혼합율에 따른 투수시험을 한 결과를 나타낸 것으로 벤토나이트의 혼합율이 커짐에 따라서 투수계수는 작아지는 일반적 경

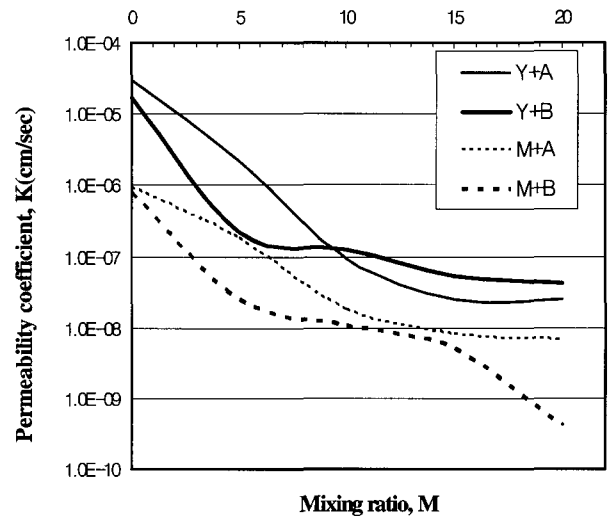


그림 10. 혼합비에 따른 투수계수

표 7. 벤토나이트 혼합토의 투수시험 결과

Soil+Bentonite		M (%)					Theoretical M (%)	Test result M (%)
		0	5	10	15	20		
K (cm/sec)	Y+A	2.96 E-5	2.15 E-6	9.23 E-8	2.51 E-8	2.48 E-8	9.26	9.6
	Y+B	1.70 E-5	2.12 E-7	1.24 E-7	5.39 E-8	4.16 E-8	13.18	11.3
	M+A	9.15 E-7	1.79 E-7	1.80 E-8	8.28 E-9	6.66 E-9	6.74	6.4
	M+B	7.51 E-7	2.48 E-8	1.08 E-8	5.13 E-9	4.00 E-10	9.72	2.8

향을 잘 나타내고 있다. Y+A, Y+B, M+A, M+B시료 순으로 투수계수는 작아지는 경향을 보인다. 이는 사용된 벤토나이트와 흙의 특성에 기인하는 것으로 생각할 수 있다. 혼합율과 투수계수의 관계에서 불투수층을 만드는 데 필요한 혼합율을 구하여 표 7의 우측에 나타내었다.

### 5.5 수정된 식과의 비교

그림 11은 이론적으로 구한 혼합율과 실험결과 얻어진 혼합율을 나타낸 것이다. 경사선은 이론적인 혼합율과 실험에 의한 혼합율이 일치하는 선이다. 즉 경사선에 근접할수록 이론식에 의한 혼합율과 실제 실험결과가 일치하는 것을 의미한다.

4종류의 혼합토에 대한 실험결과로부터 3종의 실험 결과는 이론적인 혼합율과 어느 정도 잘 일치함을 알 수가 있다. 그러나, M+B혼합토의 경우 이론적 혼합비보다 훨씬 작은 값이 실험결과 도출되었으며 반복실험을 통해서도 유사한 결과가 나타났다. 이는 화학적 특성을 배제하고 식을 유도한 결과라 판단되며, 이론식을 실

제 설계에 적용할 때 한계가 있음을 말해주는 것이다. 따라서, 본 이론식을 사용할 경우에는 도출된 혼합율에 대한 검증시험이 반드시 필요한 것으로 판단된다.

## 6. 결론

- (1) 흙의 삼상관계를 이용하여 흙과 벤토나이트 혼합 차수재의 혼합율을 구할 수 있는 식을 다음과 같이 유도하였다.

$$M = \frac{1}{\frac{G_s \cdot (1 + (e_B)_{LL})}{G_B \cdot (e_s)_{RC}} + 1} \times 100 (\%)$$

- (2) 실험결과 이론식에 의한 혼합율은 실제 투수시험 결과로부터 얻은 혼합율과 어느 정도 일치하였다.
- (3) 제안된 식은 매립장 차수재의 개략적인 혼합율을 구하는 데 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 선정된 혼합율에 대한 검증시험은 반드시 필요하다고 판단된다.

## 참 고 문 헌

1. 폐기물관리법시행규칙 (2005), 별표7, 폐기물처리시설의 설치기준.
2. Environmental Protection Agency (1989), *Requirements for Hazardous Waste Landfill Design, Construction, and Closure*, Publ No. EPA-625/4-89-022, Cincinnati, Ohio.
3. Pandian, N. S. and Nagaraj, T. S. (1995), Permeability and Compressibility Behavior of Bentonite-Sand/Soil Mixes. *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol.18, No.1, pp.86-93.
4. Cornell University (1951), *Final Report on Soil Solidification Research*, Ithaca, N.Y.
5. T. William Lambe and Robert V. Whitman (1979), *Soil Mechanics*, SI Version, Wiley, pp.283-292.
6. Braja M. Das (1990), *Principles of geotechnical engineering*, PWS Engineering.
7. G. Mersi (1969), *Engineering properties of montmorillonite*, Ph.D. Thesis, Illinois Univ, U.S.A.

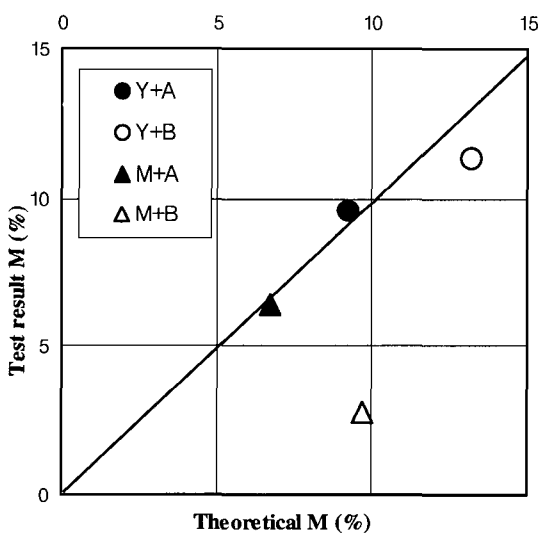


그림 11. 수정된 식과 실험결과 비교

(접수일자 2005. 7. 7, 심사완료일 2006. 1. 24)