

## Soil-Bentonite 혼합토의 투수 특성 연구

### A on Permeability Characteristics of Soil-Bentonite Mixture

임은상<sup>1)</sup>, Eun-Sang Im, 신동훈<sup>2)</sup>, Dong-Hoon Snin, 조성은<sup>1)</sup>, Seong-Eun Cho, 김재홍<sup>1)</sup>, Jea-Hong Kim

<sup>1)</sup> 한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원, P. Researcher, Geotech.&Struct. Research Center, Kwater

<sup>2)</sup> 한국수자원공사 수자원연구원 팀장, Head. Researcher, Geotech.&Struct. Research Center, Kwater

**SYNOPSIS** : Recently the centrifuge test has been used increasingly to clarify a problem of seepage in dam. However, one of the most difficult challenges in the testing is to conform permeability properties of model ground to the prototype. In order to resolve the problem, a few solutions, such as an increase of pore water viscosity and a regulation of water permeability, are suggested. Although the use of prototype materials is principles if a model test is carried out, the materials of similarity gradation is used in the centrifuge model test because of the nature of the model test for dam. Therefore, we choose the latter method for model ground materials.

In this study, the permeability properties of soil-bentonite mixtures are studied through the permeation test using triaxial compaction test apparatus.

**Keywords** : permeability properties, centrifuge test, sand-gravel soils, dam, soil-bentonite mixtures

## 1. 서론

Soil-Bentonite 혼합토는 최근에 들어서 쓰레기 매립장 차수층 재료로서 많은 연구(김학문 2003, 김대만 2005, 김만일 2005 등)가 수행되었을 뿐만 아니라 더 나아가 정수처리기능의 투수벽체의 재료에 대한 연구도 천병식(2005) 등에 의하여 수행되었다. 이 들 연구결과, 비록 흙의 종류와 토질의 특성에 따라서 그 특성이 달라지겠지만 벤토나이트의 혼합량이 적은 범위에서 뛰어난 차수성능의 향상을 보이는 것으로 알려졌다.

반면에 댐·제방과 같이 물과 직접적으로 접촉하고 있는 지반구조물은 구조물의 안전성을 확보하기 위한 강도특성을 파악하는 것이 중요한 항목이라고 하겠지만 그에 못지않게 물을 통과시키지 않고 저류시키는 능력이나 파이핑 등 침투에 대한 안전성 역시 댐·제방 등의 지반구조물 갖고 있어야할 항목이라고 하겠다. 이러한 댐의 안전성을 파악하기 위하여 원심모형시험이 수행되기도 하는데 이 경우에는 침투속도가 원심가속도의 배수만큼 빨라지기 때문에 침투해석 등 지반내의 흐름에 기본이 되는 층류의 흐름 즉 Darcy의 법칙에 벗어날 가능성이 존재하므로 투수성능을 저하시켜 시험을 수행할 필요가 있기 된다. 이러한 투수성 저하 방법에는 간극수의 점성을 증가시키는 방법, 재료의 투수계수를 저하시키는 방법 원심가속도를 층류상대까지만 증가시키는 방법 등이 있으나, 간극수의 점성을 증가시키는 경우에는 불포화투수성인 모세관현상 발생하는 부분의 강도변화 등의 가능성이 있고, 모형재료는 원칙적으로 실물과 동일한 재료를 사용해야 하기 때문에 두 번째의 방법도 적합하지 있고, 원심가속도를 제한하는 방법이 가장 합리적이라고 할 수 있다. 하지만 댐 구조물과 같이 대형구조물에서는 모형 container의 크기에 대한 제한이 있기 때문에 원심가속도를 제한하는 것도 한계가 있다고 하겠다.

그러나 본 연구에서는 댐의 축조재료의 경우에는 최대입도가 상당히 큰 축조재료이기 때문에 이 재료

를 직접 모형시험재료로 사용하지 못하고 상사입도법에 의하여 입도를 상사한 재료를 사용하기 때문에 이러한 상사재료에 극히 소량(1~3%)의 벤토나이트를 혼합하여 흐름특성을 제어하는 상기의 두 번째 방법을 선정하여 강도특성 및 흐름특성을 파악하여 선택한 방법의 적합성을 확인하고자 하였으며, 본 논문에서는 이러한 일련의 연구 중 하나로서 벤토나이트 혼합토의 흐름특성을 비교·검토 하였다.

## 2. 흐름의 상사법칙

### 2.1 포화지반에서의 흐름 및 원심가속도의 영향

포화지반에서의 유체흐름의 상관성에 대하여 많은 실험적 이론적 연구가 수행되었으며 (Khalifa 등, 2000) 주요 관심사는 상사비, 투수계수에 대한 원심 가속도의 영향, Darcy의 법칙이 유효한 성립한계와 임계 원심가속도 (critical centrifuge acceleration)의 결정 등이다.

Butterfield (2000)에 의해 수행된 차원해석에 의하면 완전한 상사성 (모든 흐름 영역에서 동일한 Froud 수와 Raynold 수)을 얻기 위해서는 간극유체를 바꾸거나 입자의 크기를 바꿀 필요가 있는 것으로 나타났다. 이 사항은 어떤 경우에는 불가피하지만 (예로 지진 중의 액상화), 모든 모형실험에서 꼭 필요한 것은 아니다. 대부분의 지반공학 문제에서 작은 동수경사를 갖기 때문에 흐름은 Darcy의 법칙이 성립하는 층류형태이다 (작은 Raynold수).

실험적 법칙인 Darcy의 법칙에 있어서 흐름속도 (flow rate)는 동수경사에 비례한다고 가정하며, Darcy의 법칙이 성립하는 경우의 유속  $v_w (= k \cdot i_w)$ 은 식(1)의 상사성이 성립된다.

$$\frac{(v_w)_m}{(v_w)_p} = \frac{(k_w)_m \cdot (i_w)_m}{(k_w)_p \cdot (i_w)_p} = N \cdot 1 = N \quad (1)$$

그러므로 침투현상에 있어서의 시간  $t (= l/v)$ 는 아래의 식(2)과 같은 상사관계가 성립된다.

$$\frac{t_m}{t_p} = \frac{l_m/(v_w)_m}{l_p/(v_w)_p} = \frac{1}{N} \cdot \frac{1}{N} = \frac{1}{N^2} \quad (2)$$

즉,  $ng$  상태에서 수행되는 축소모형실험에서 흐름속도는 당연히  $n$ 배가 빨라진다는 결과를 얻을 수 있지만 동수구배와 투수계수의 상사비  $i^*$ 와  $k^*$ 에 대해서는 포텐셜 에너지를 단위중량당 에너지로 표현하느냐, 단위부피당 에너지로 표현하느냐에 따라서 두 상반되는 주장이 존재한다:

- A 정식화 :

Darcy의 법칙에 의하면, 동수경사 ( $i = \Delta h/l$ )는 무차원량이며 투수계수는 속도(m/s)로 표현된다. 이들 조건에서  $i_m = i_p$ ,  $i^* = 1$ 이므로  $k^* = n$  (왜냐하면,  $k = i/v$ 이므로) 이다. 작은 원심모형에서의 투수계수  $k$ 는 원심가속도에 따라 달라진다.

- B 정식화 :

한편, 수두손실이 압력  $p$ 의 경사도로 표현되면 (Coussy, 1995), 수두경사는  $i_m = p_m/l_m$ 와  $i_p = p_p/l_p$ 이다. 압력은 원형과 모델에서 동일하기 때문에  $i_m = n i_p$ ,  $i^* = n$ ,  $k^* = 1$ 이다. 흐름율의 동수경사에 대한 비율  $k$ 는 원심가속도와는 독립적인 다공매질의 특성이 된다 (때때로 mobility로 불리며  $m^2/kPa/s$ 로 표현된다).

## 2.2 Darcy의 법칙의 한계와 임계 가속도

대부분의 지반공학문제에서는 흐름속도가 느리기 때문에 Darcy의 법칙이 성립된다고 가정할 수 있지만 원심모형시험의 경우에는 흐름속도가 빨라지기 때문에 꼭 Darcy의 법칙이 성립한다고 보기는 어렵게 된다. 즉, 가속도가 점성마찰력과 비교하여 무시할 수 없을 정도로 커지게 되면 비선형관계를 보이기 때문에 Darcy의 법칙이 성립하지 않게 된다.

Khalifa 등(2000)은 Darcy의 법칙의 유효영역의 한계를 조명하기 위하여 다섯 가지 모래에 대한 실험결과를 Reynolds 수  $Re_p = \rho v d / \mu$ 와 마찰계수  $F_f = i g d / v^2$ 에 입자 특성 대신 간극 특성을 도입하여 그림 1과 같이 하나의 곡선으로 나타낸다는 것을 확인하였다.

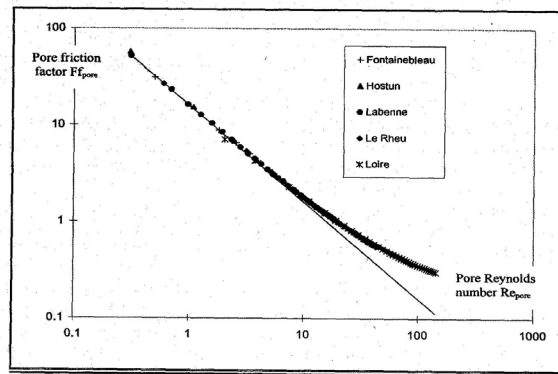


그림 1.  $Re_{pore}$ 와  $Ff_{pore}$ 의 관계(Khalifa 등, 2000)

간극 Reynolds 수 (pore Reynolds number)와 간극 마찰계수 (pore friction factor)는 식(3)과 같이 표현된다.

$$Re_{pore} = \frac{2\rho v d_{eq}}{3\mu(1-n_s)}, \quad Ff_{pore} = \frac{i g n_s^3 d_{eq}}{3v^3 \tau^3 (1-n_s)} \quad (3)$$

여기서,  $n_s$ 는 흙의 간극률이고  $d_{eq}$ 는 흙입자의 등가반경

그림 1은 Darcy의 법칙이 성립하는 영역으로부터의 이탈은 점진적으로 일어남을 나타낸다. 따라서, 법칙의 유효한계를 정의하기 위해 허용 가능한 오차를 선택할 필요가 있다. 예를 들어, 원형에서의 가장 큰 동수경사가  $i_p = 1$ 이면 최대 원심가속도는 <표 1>에 주어진 값을 초과해서는 안 된다 (Darcy의 법칙에 대한 5% 및 10% 허용오차에 대한).

표 1. 동수경사  $i_p = 1$ 인 원형의 흐름을 모사하기 위해 모형에 가할 수 있는 최대 원심가속도 (5%와 10% 허용오차에 대한)

모래 종류	Fontainebleau	Labenne	Hostun	Rheu	Loire
Darcy의 법칙에 대한 허용오차					
5%	78g	36g	21g	12g	2g
10%	155g	72g	43g	23g	5g

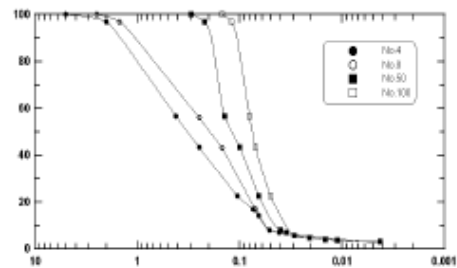
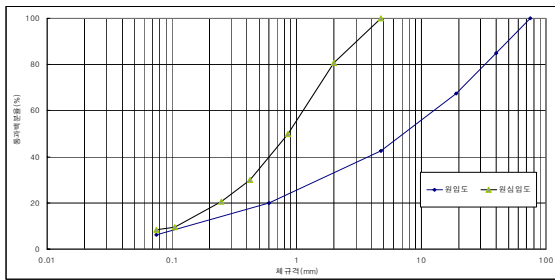
즉, 원심모형실험을 수행하는 경우에는 사용하는 재료에 따라서 Darcy의 법칙이 적용되는 한계 원심가속도가 존재한다고 할 수 있다.

### 3. 실내시험

본 연구에서는 흐름속도를 제어하기 위하여 차수층 생성에 많이 사용되는 벤토나이트를 혼합하였으며, 축조재료의 강도특성에 대한 영향을 배제하기 위하여 벤토나이트의 혼합율을 가능한한 억제하였다.

#### 3.1 입도조성 및 물성치 시험

본 연구에 사용된 시료는 CFGD의 배당준으로 설계된 축조재료로서 원입도의 최대입경은 75mm로서 모형지반을 제작할 수 없고 흐름특성을 유지하기 위하여 원 축조재료에서 4mm이하의 재료만을 선별하여 재형성하였으며, 흙 종류에 대한 영향력을 검토하기 위하여 김대만&김기영(2006)에서 사용한 화강 풍화토 시료에 대한 입도와 기본물성치를 그림 2와 표 2에 나타냈다.



(a) 하상사력재료 (b) 화강풍화토 (김대만&김기영(2006))  
그림 2 하상사력 시료 및 화강풍화토 시료의 입도분포

표 2. 기본 물성 시험 결과

	비중	최대입경 (mm)	200번체 통과량 (%)	최대밀도 (t/m <sup>3</sup> )	균등계수		곡률계수		투수계수 (cm/sec)		비고
					원입도	상사입도	원입도	상사입도	원입도	상사입도	
Zone 2	2.620	4.75	8.3	2.270	85	10	1.37	0.82	1.6×10 <sup>-4</sup>	3.5×10 <sup>-4</sup>	
Kim's A	2.664	4.75	13	1.832	3.3		1.41		5.2×10 <sup>-4</sup>		
Kim's B	2.664	2.36	13.5	1.994	6.7		0.42		3.6×10 <sup>-4</sup>		

#### 3.2 투수시험

본 연구에서는 삼축압축시험기를 이용하여 투수시험을 수행하였으며, 시험절차는 시료에 벤토나이트를 혼합한 후, 포화도가 98%(B value>0.95 이상)이 되도록 포화를 시켰으며 포화가 완료된 공시체에 100kPa의 압력을 가하여 압밀시킨 후 투수시험을 수행하였다. 투수시험 시에는 공시체 양단의 압력차이를 10kPa로 유지하는 정수두 투수시험을 수행하였으며, 투수계수의 산정은 지반중의 흐름이 층류임을 고려하여 시험 중에 유량을 측정 한 후, Darcy의 법칙( $k = q/Ai$ )을 이용하여 산정하였다.

투수시험에 사용된 공시체는 설계기준인 상대밀도 75%인 1.993kg/cm<sup>3</sup>으로 제조되었으며, 벤토나이트

혼합율과 관계없이 동일한 상대밀도에서 시험을 수행하였다.

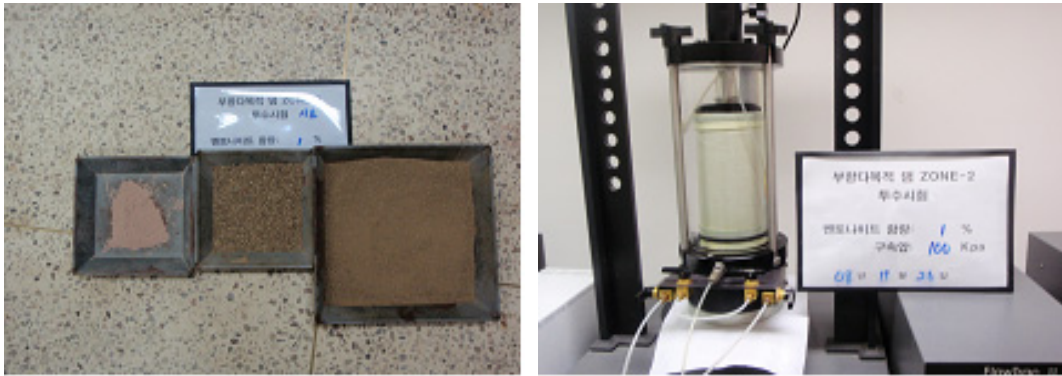


그림 3. 하상사력시료 및 투수시험에 광경

### 3.3 시험 결과 및 분석

삼축압축시험기를 이용하여 하상사력재료에 대하여 투수시험을 수행한 결과와 김대만&김기영(2006)이 수행한 화강토에 대한 투수시험 중 구속압 100kPa에서 수행한 결과 중 본 연구에서 사용한 벤토나이트 혼합율 범위에서의 투수시험 결과를 그림 4에 함께 나타냈다. 이 그림에서 알 수 있듯이 벤토나이트 혼합율과 투수계수의 관계는 혼합율이 4%정도의 낮은 혼합율의 범위에서는 반대수 그래프상의 직선 관계 즉 지수관계를 갖는다는 것을 알 수 있다. 또한, 화강토와 하상사력재료에서의 직선 기울기가 달라진다는 것을 확인할 수 있는데, 이는 표 2에 나타낸 바와 같이 투수특성을 지배한다고 할 수 있는 세립분 즉 200번째의 통과량과 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다. 다시 말하면, 세립분(200번째 통과량)이 적은 하상사력재료에서는 벤토나이트가 세립분 역할을 하여 투수성을 감소가 현저하지만 세립분을 많이 함유하고 있는 풍화토에서는 벤토나이트가 수행하는 세립분의 역할이 상대적으로 적기 때문에 투수계수의 저하가 상대적으로 미미하다고 할 수 있다. 다만 이러한 결론은 추후 보다 많은 시험을 통하여 검토되어야 할 것으로 판단되며, 이러한 벤토나이트 혼합율과 투수계수의 지수적인 관계가 유지되는 혼합율 범위 역시 추후 수행하여야 할 과제라고 할 수 있다.

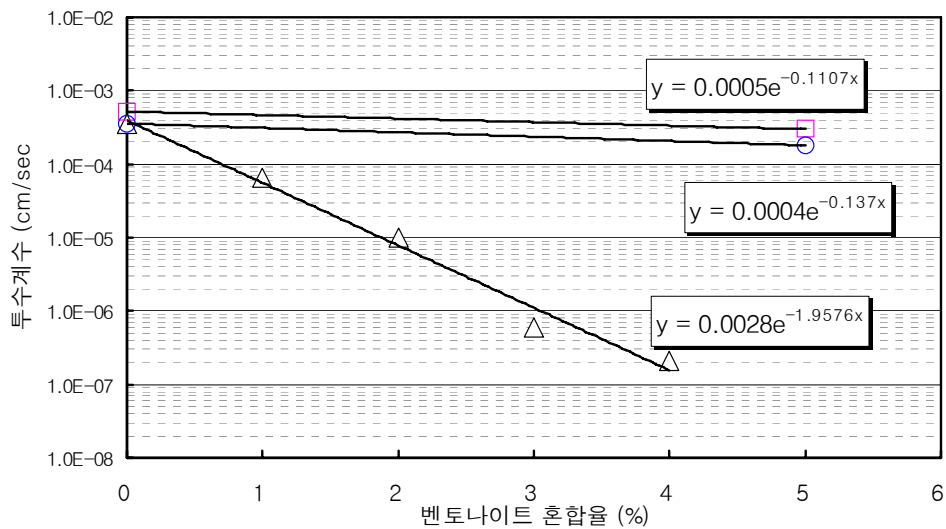


그림 4. 벤토나이트 혼합율에 대한 투수계수 변화

## 4. 결 론

본 연구에서는 벤토나이트 혼합율과 투수계수의 관계가 4%이상의 저혼합율의 범위에서는 지수관계를 갖는다는 것을 알았고, 세립분 즉 200번체의 통과량이 이 지수관계의 기울기 즉 투수계수 저하율과 밀접한 관계가 있다는 것을 알 수 있었다. 다만 이러한 결론은 뒷받침할만한 시험과 벤토나이트 혼합율과 투수계수의 지수적인 관계가 유지되는 혼합율 범위에 대한 검증이 추후 수행하여야 할 것이다.

## 참고문헌

1. 김대만, 김기영(2006), “화강풍화토-벤토나이트 혼합토의 공학적 특성”, 한국지반환경공학회 논문집, Vol. 7, No. 6, pp.45~56.
2. 김만일(2005), “Soil-Bentonite 혼합토의 불포화 투수특성 연구”, 한국지질학회 논문집, Vol. 15, No. 2, pp.123~132.
3. 천병식, 박재우(2005), “벤토나이트 황토 모래를 혼합한 투수벽체의 지반공학적 특성에 관한 연구”, 한국지반환경공학회 논문집, Vol. 6, No. 4, pp.5~12.
4. A. Khalifa, J. Garnier, P. Thomas, G. Rault, “Scaling Laws of Water Flow in Centrifuge Models”, In Proceedings of Int. Symp. on Physical Modeling and Testing in Environmental Geotechnics, pp.207-216, 2000