

# 벤토나이트-흙/모래 혼합토의 압축 및 투수 특성 연구

## Compressibility and Permeability Characteristics of Bentonite-Soil/Sand Mixes

송 창 섭\* · 윤 병 옥\*\* · 반 창 현\*\*  
Song, Chang Seob · Yoon, Byoung Ok · Ban, Chang Heoyn

### Summary

Compressibility and permeability properties are the most important input parameters necessary to assess the suitability of core materials in seepage control system construction. To achieve this objective, an experimental investigation was conducted in the laboratory. For the bentonite-soil/sand mixes, consolidation and permeability tests were carried out in the conventional consolidation cell, 60mm in diameter and 20mm in height, was modified to perform a falling head type permeability test.

From the results, the normalized relationship with respect to void ratio at liquid-limit state ( $e_L$ ), and the changes of compressibility and permeability for various bentonite-soil/sand mixes were presented.

This approach will be helpful in proportioning mixes and predicting corresponding changes in engineering behavior. And it is possible to proportion a mix to arrive at the required compressibility without affecting the permeability.

### I. 서 론

벤토나이트(bentonite)는 토질공학적인 측면에서 여러 곳에 사용되고 있으며, 날로 적용 예가 증가되고 있다. 특히, 지하수의 차단이나 누수 방지벽, 사질토층에 굴착한 보링구멍의 붕괴방지, 슬러리 월(slurry wall)공사에는 필수적으로 사용되고 있다. 또한, 최근 환경지반공학의 출현으로 환경오염 특히, 지하수나 토양의 오염을 방지한다는 측면에서 그 활용성이 날로 증대하고 있다. 농공학적인 측면에서 보면 농업용 저수지

는 소규모이며 유지관리의 소홀, 노후화로 인하여 체체, 여수도 및 통관부위에 누수가 발생하여 막대한 수자원의 손실 뿐만아니라 원활한 수자원의 공급에도 차질을 보이며, 최근에 대두하는 쓰레기 매립장의 침출수는 심각한 지하수의 오염과 토양의 오염을 초래하고 있는 실정이다. 이러한 침출수나 누수를 방지하기 위하여 벤토나이트 등과 같은 점토를 사용하여 지수나 차수벽을 설치하는 슬러리월 공법은 사질토층에 0.75~0.9m 정도의 좁은 도랑을 파고 도랑의 붕괴를 방지하기 위하여 벤토나이트 슬러리를 바로 채우고, 뒤

\* 충북대학교 농과대학

\*\* 충북대학교 대학원(석사과정)

키워드 : 벤토나이트, 침윤관리체계, 차수벽, 투수특성



**Table 1. Physical and mechanical properties of samples used**

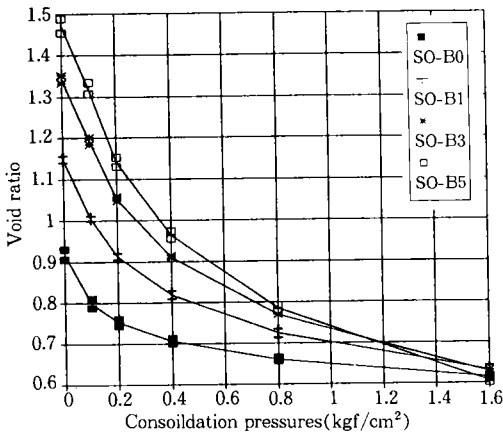
Samples		% of bentonite	Specific gravity	Liquid limit (%)	$e_L^*$	Compaction		$q_u$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	Remark
						$\gamma_{dmax}$ (tf/m <sup>3</sup> )	OMC(%)		
Sioil	SO-B 0	0.0	2.669	34.5	0.92	1.63	20.2	0.99	ML
	SO-B 1	1.0	2.667	38.2	1.15	1.62	20.9	1.29	
	SO-B 3	3.0	2.663	42.2	1.34	1.61	22.0	1.16	
	SO-B 5	5.0	2.659	49.9	1.47	1.60	22.7	0.95	
Sand	SA-B 0	0.0	2.68	N.P.	—	—	—	—	SP
	SA-B10	10.0	2.66	57.5	1.54	1.63	16.8	1.56	
	SA-B20	20.0	2.64	95.3	2.66	1.64	17.5	2.30	
	SA-B30	30.0	2.62	132.7	3.60	1.66	18.4	2.39	
	SA-B40	40.0	2.60	162.9	4.24	1.62	19.4	2.13	

\*액성한계 상태에서의 공극비 (void ratio at liquid-limit state)

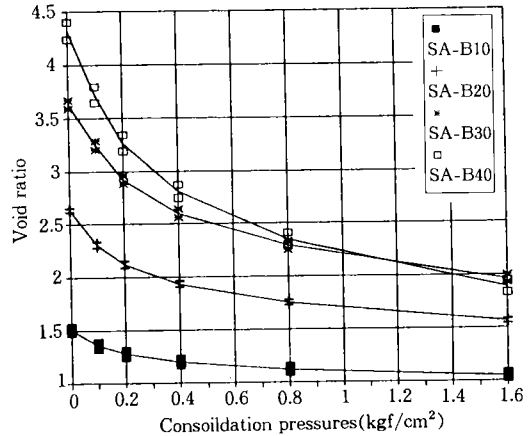
**Table 2. Physical and mechanical properties of bentonite used**

Specific gravity	Swell index (ml/g)	Liquid limit (%)	Water absorption (%)	PH	Bulk density (g/l)	Water content (%)
2.477	22.0	317	490*	9.5~10.5	0.75~0.85	8~12

\*after drying at 105°C (after 24 hours)



(a) Soil mixes



(b) Sand mixes

**Fig. 2. Void ratio-consolidation pressure relationship for various bentonite-soil/sand mixes**

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 하중에 따른 공극비 및 투수계수의 변화

각 시료에 대한 압밀시험의 결과를 분석하여, 하중 및 혼합비율에 따른 공극비를 도시하면 Fig. 2(a) 및 (b)와 같다. 하중의 증가에 따라 공극비의 감소는 비슷한 경향을 보이고 있으며,

벤토나이트의 혼합비율이 증가할수록 초기 공극비가 큰 것을 알 수 있는데, 이는 혼합된 벤토나이트가 물과의 친수성이 크기 때문에 혼합량이 증가할수록 공극도 증가했기 때문으로 사료된다. 또한, 공극비의 감소비율이 혼합량이 증가할수록 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

하중 및 혼합비율에 따른 투수계수의 변화상태

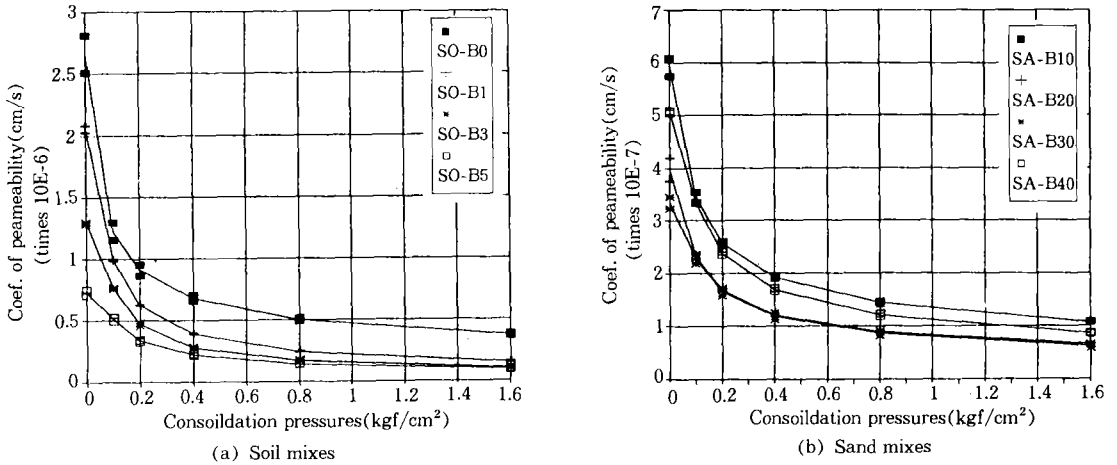


Fig. 3. Void ratio-coefficient of permeability relationship for various bentonite-soil/sand mixes

를 도시하면 Fig. 3(a) 및 (b)와 같다. 하중의 증가에 따라 투수계수의 변화는 비슷한 경향을 보이고 있으며, 동일한 하중 하에서 벤토나이트의 혼합비율이 증가할수록 투수계수도 감소함을 알 수 있다. 이는 혼합토 벤토나이트의 팽창과 하중에 의하여 공극이 감소되어 time lag 현상이 크게 작용하기 때문으로 판단된다. 또한, 하중증가에 따른 투수계수의 변화량은 혼합량이 증가할수록 감소하는 것을 알 수 있다.

## 2. 혼합토의 압축특성 분석

Pandian et al<sup>3)</sup>의 연구에 의하면 각 하중에서의 공극비( $e$ )는 액성한계 상태에서의 공극비( $e_L$ )로 정규화하면 하중과 대수관계가 있다고 제시하였다. 따라서, 본 연구의 결과를 액성한계 상태의 공극비로 정규화하여 도시하면 Fig. 4와 같다. (a)는 벤토나이트-흙 혼합토, (b)는 벤토나이트-모래 혼합토에 대한 관계를 도시한 것이다. 또, 이들의 관계를 나타내면 식 (1) 및 식 (2)

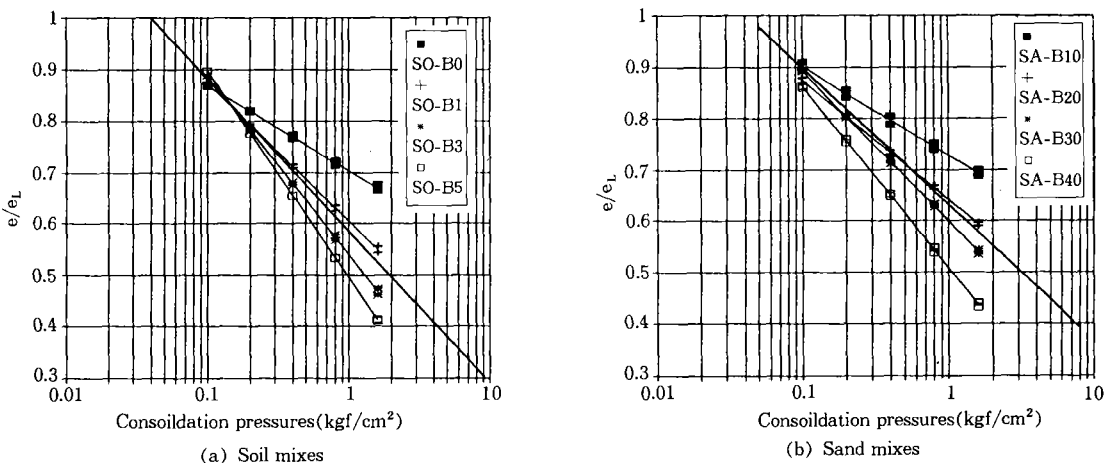


Fig. 4. Generalized state parameter-consolidation pressure relationship for various bentonite-soil/sand mixes

와 같으며, 그림에서 굵은 실선으로 도시하였다.

$$(e/e_L)_{soil} = 0.585 - 0.297 \cdot \log P \dots\dots\dots (1)$$

$$(e/e_L)_{sand} = 0.633 - 0.266 \cdot \log P \dots\dots\dots (2)$$

여기서,  $e$  : 공극비

$e_L$  : 액성한계상태의 공극비

$P$  : 압밀하중(kgf/cm<sup>2</sup>)

그런데, Fig. 4에서 알 수 있듯이 같은 시료인 경우에는 Pandian 등의 결과에서 나타난 것과 같이 선형관계를 보이고 있으나, 혼합량이 증가할수록 기울기가 변하는 것을 알 수 있다.

따라서, 식 (1) 및 식 (2)의 계수를 각각  $\alpha$  및  $\beta$ 라 하고, 각 시료에 대하여 정리하면 Table 3과 같다. 이들의 변화상태를 분석하여 혼합비율과의 관계로 나타내면 식 (3)~식 (6)과 같다. 즉, 흙에 벤토나이트를 혼합한 경우에는 혼합비의 약 0.5승에, 모래에 벤토나이트를 혼합한 경우에는 혼합비의 약 1.0승에 따라 기울기(압축성)가 변하는 것을 알 수 있다.

$$\alpha_{soil} = 0.703 - 0.098 \cdot (\text{혼합비율})^{0.47} \dots\dots (3)$$

$$\beta_{soil} = -0.165 - 0.105 \cdot (\text{혼합비율})^{0.51} \dots\dots (4)$$

$$\alpha_{sand} = 0.792 - 0.006 \cdot (\text{혼합비율})^{1.02} \dots\dots (5)$$

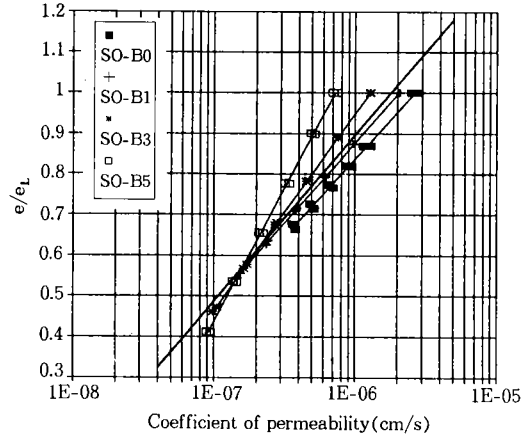
$$\beta_{sand} = -0.113 - 0.006 \cdot (\text{혼합비율})^{1.00} \dots\dots\dots (6)$$

### 3. 혼합토의 투수특성 분석

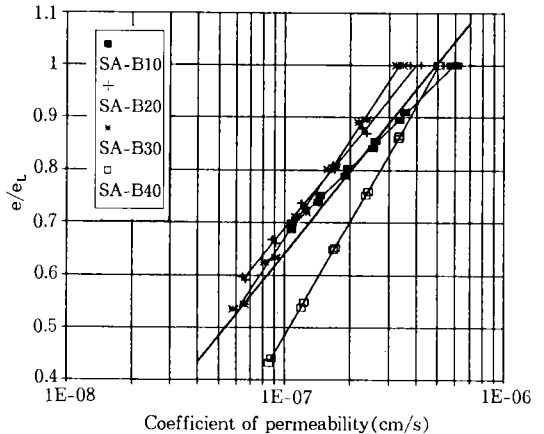
Pandian et al<sup>3)</sup>는 각 하중에서의 공극비( $e$ )는 액성한계 상태에서의 공극비( $e_L$ )로 정규화하면 투수계수와도 대수관계가 있다고 제시하였다. 따라서, 본 연구의 결과를 액성한계 상태의 공극비로 정규화하여 도시하면 Fig. 5(a) 및 (b)와 같다. 또, 이들의 관계는 식 (7) 및 식 (8)과 같으며, 그림에서 굵은 실선으로 도시하였다.

$$(e/e_L)_{soil} = 3.345 + 0.408 \cdot \log k \dots\dots\dots (7)$$

$$(e/e_L)_{sand} = 4.285 + 0.521 \cdot \log k \dots\dots\dots (8)$$



(a) Soil mixes



(b) Sand mixes

**Fig. 5. Generalized state parameter-coefficient of permeability relationship for various bentonite-soil/sand mixes.**

투수성에서도 압축성 분석에서 나타난 것과 같이, Fig. 5에서 같은 시료인 경우에는 Pandian 등의 결과에서 나타난 것과 같이 선형관계를 보이고 있으나, 혼합량이 증가할수록 기울기(투수성)가 변화하는 것을 알 수 있다.

따라서, 식 (7) 및 식 (8)의 계수를 각각 A 및 B라 하고, 각 시료에 대하여 정리하면 Table 3과 같다. 이들의 변화상태를 분석하여 혼합비율과의 관계로 나타내면 식 (9)~식 (12)와 같다. 즉, 흙에 벤토나이트를 혼합한 경우에는 혼

합비의 약 2.0승에, 모래에 벤토나이트를 혼합한 경우에는 혼합비의 약 1.0승에 따라 기율기가 변하는 것을 알 수 있다.

$$A_{soil} = 3.159 + 0.083 \cdot (\text{혼합비율})^{1.93} \dots\dots (9)$$

$$B_{soil} = 0.386 + 0.011 \cdot (\text{혼합비율})^{2.0} \dots\dots (10)$$

$$A_{sand} = 2.352 + 0.237 \cdot (\text{혼합비율})^{0.71} \dots\dots (11)$$

$$B_{sand} = 0.308 + 0.011 \cdot (\text{혼합비율})^{1.0} \dots\dots (12)$$

4. 하중변화에 따른 투수계수의 추정

식 (1)과 식 (2) 및 식 (7)와 식 (8)의 결과로부터, 하중변화에 따른 투수계수를 추정할 수

있는 관계를 유도하면 다음과 같다.

$$\log k = C_1 + C_2 \cdot \log P \dots\dots\dots (13)$$

여기서,  $k$ 는 투수계수(cm/s),  $C_1$  및  $C_2$ 는 혼합토의 상태를 나타내는 계수로서 Table 3에 나타나 있다.

따라서, 흙 또는 모래와 벤토나이트 혼합토의 투수계수는 하중이나 혼합비율이 주어지면 그에 따른 투수계수를 추정할 수 있게 된다.

Fig. 6은 이들의 관계를 바탕으로 추정된 투수계수와 측정된 투수계수를 비교한 것이다. 그림에서 보듯이, 추정된 결과는 측정된 결과와 잘 부합되는 것을 알 수 있으므로, 이들 관계를 사

Table 3. Parameters for various bentonite-soil/sand mixes

	samples	$\alpha$	$\beta$	A	B	$C_1$	$C_2$
SOIL	SO-B0	0.704	-0.166	3.148	0.385	-6.343	-0.430
	SO-B1	0.605	-0.270	3.254	0.396	-6.684	-0.680
	SO-B3	0.539	-0.350	3.847	0.483	-6.843	-0.725
	SO-B5	0.495	-0.403	5.013	0.654	-6.911	-0.617
SAND	SO-B10	0.728	-0.173	3.578	0.414	-6.883	-0.420
	SO-B20	0.642	-0.233	4.302	0.516	-7.093	-0.455
	SO-B30	0.600	-0.292	5.053	0.626	-7.112	-0.469
	SO-B40	0.509	-0.353	5.587	0.729	-6.965	-0.489

\*각 계수는 평균치를 의미함

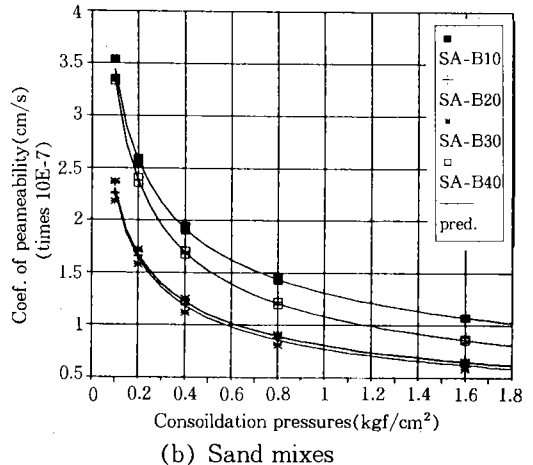
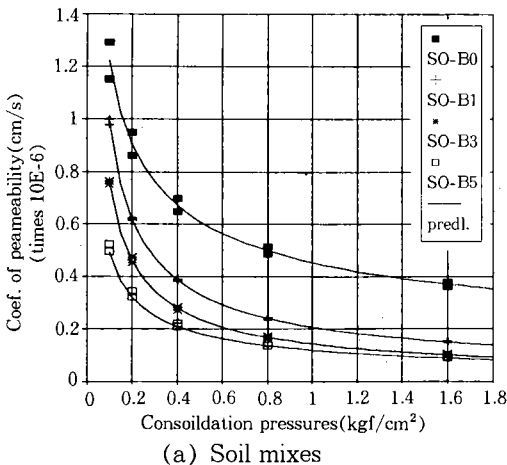


Fig. 6. Comparison between tested and predicted results(k) for bentonite-soil/sand mixes

용하면, 차수나 지수를 목적으로 하는 경우, 혼합토의 투수계수를 사용목적에 맞게 조절할 수 있는 혼합비율을 구할 수 있을 것으로 판단된다.

#### IV. 결 론

청주 근처의 농업용 저수지 축조용 흙 및 무심천 모래를 사용하여 벤토나이트와 혼합하여 혼합토의 혼합비율에 따른 압축특성 및 투수특성을 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 자연상태의 흙이나 모래에 벤토나이트를 혼합하면 물리적 특성이 변화하게 되는데, 비중 및 다짐시의 건조단위중량은 감소하고 액성한계 및 최적함수비는 증가하였다.

2. 혼합토의 다짐후의 건조단위 중량은 흙 혼합토의 경우는 혼합비 1% 근처에서, 모래 혼합토는 30% 근처에서 최대치를 보였다.

3. 하중의 증가에 따른 공극비와 투수계수의 변화는 비슷한 경향을 보이고 있으나, 벤토나이트의 혼합비율이 증가할수록 초기 공극비는 증가하고 투수계수는 감소하는 경향을 보였다.

4. 혼합토의 공극비를 액성한계 상태에서의 공극비로 정규화하면, 압밀하중과 투수계수와 대수관계를 나타내며, 이들은  $e/e_L = \alpha + \beta \cdot \log P$  또는  $e/e_L = A + B \cdot \log k$ 으로 나타낼 수 있다.

5. 혼합토의 압축성은 혼합비율에 따라 달라지게 되는데, 정규화된 상태에서 압축지수가 흙 혼합토의 경우는 혼합비율의 약 0.5승에, 모래 혼합토의 경우는 혼합비율의 약 1.0승에 따라 변화하였다.

6. 혼합토의 투수성도 혼합비율에 따라 달라지게 되는데, 정규화된 상태에서 흙 혼합토의 경우는 혼합비율의 약 2.0승에, 모래 혼합토의 경우는 혼합비율의 약 1.0승에 따라 변화하였다.

7. 혼합토의 압축성과 투수성을 바탕으로 각각의 하중단계에 따른 투수계수를 추정할 수 있는 관계식( $\log k = C_1 + C_2 \cdot \log P$ )을 제시하고, 측정치와 예측치와 비교·검토하여 적용성을 입증하였다.

이 논문은 1996년 충북대학교 발전기금재단 연구비에 의하여 수행된 것으로 재단에 깊은 감사를 드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. Chapuis, R. P., 1990, Sand-Bentonite Liners : Predicting Permeability from laboratory Tests, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 27, No.1, pp.47-57.
2. Pandian, N. S. and T. S. Nagaraj, 1990, Critical Reappraisal of Colloidal Activity of Clays. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.116, No.GT2, pp.285-296.
3. Pandian, N. S., T. S. Nagaraj. and P. S. R. N. Raju, 1995, Permeability and Compressibility Behavior of Bentonite-Sand /Soil Mixes, Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol.18, No.1, pp.86-93.
4. Tallard, G., 1984, Slurry Trenches for Containing Hazardous Wastes, Civil Engineering, ASCE, Vol.114, No.4, pp.601-613.
5. 문석기, 1995, 모래-벤토나이트 혼합물의 투수특성, 경북대학교 대학원 석사학위 논문.
6. 윤병옥, 송창섭, 1997, 벤토나이트-흙 혼합토의 압축 및 투수특성, 한국농공학회 학술발표회 논문집. pp.277-283.