

# 흙-벤토나이트 혼합물의 지반공학적 특성

## Geotechnical Properties of Soil-Bentonite Mixtures

채 교 익\* · 권 무 남\*\*  
Chae, Kyo Ik · Kwon, Moo Nam

### Abstract

In order to figure out criteria of bentonite for using as impervious material of waste landfill, laboratory experiments were performed to reveal the geotechnical properties of soil-bentonite mixtures such as compaction test, direct shear test, unconfined compression test, triaxial compression test, consolidation test and permeability test.

The results of the study are summarized as follows:

1. Based on the compaction test, optimum moisture content increased with the increase of bentonite content, but maximum dry density decreased.
2. In unconfined compression test, the maximum strength of the soil-bentonite mixtures appeared at 10% bentonite content. The correlation equation between stress( $\sigma$ ) and strain( $\epsilon$ ) of the soil-bentonite mixtures is given by:

$$\sigma = \frac{a \cdot \epsilon}{\epsilon^n + b}$$

3. In shear test of the mixtures, the shear strength showed an increasing trend with increase of bentonite content and the maximum shear strength appeared at 10% bentonite content.
4. In consolidation test, the coefficient of compressibility ( $a_v$ ), the coefficient volume extension ( $m_v$ ) and compression index ( $C_c$ ) increased with the bentonite content, but the void ratio decreased with of consolidation pressure.

### I. 서 론

최근 폐광산, 유류오염지역 및 폐기물 매립지 등에서 생성 유출되는 오염물질은 직접 지하수를 오염시킬 수 있는 오염원으로 장기적이며 지속적으로 오염물질을 배출하고 있다. 오염물질이 지반

에 확산되면 후에 이를 정화하는데는 많은 시간과 노력 및 비용이 요구된다. 따라서 지난 십 수년간 북미, 유럽, 일본에서는 불량폐기물 매립시설, 저유시설 등으로부터 오염된 지반의 처리방법에 대하여 많은 연구활동이 이루어졌다. 우리 나라에서도 1996년 토양환경보전법의 시행으로 이후 오염

\*상주대학교 토목공학과  
\*\*경북대학교 농과대학

키워드 : 벤토나이트, 최적함수비, 최대건조밀도  
압밀계수, 압축지수

지반의 처리에 대한 관심이 증가하고 있으며 연구 활동도 활발해지고 있다.

일반적으로 차수벽은 지중에 투수성이 매우 낮은 물질을 설치하여 폐기물과 오염된 지하수를 가두어 추가적인 오염확산을 막는 방법으로 재료와 시공법에 따라 흙-벤토나이트 차수벽, 흙-석회 혹은 흙-시멘트계 차수벽, 강널말뚝 차수벽, 심층혼합 차수벽 등 많은 종류가 있으나, 여러 종류의 차수벽 중 단가와 공기 면에서 큰 장점을 가지고 있는 효과적인 흙-벤토나이트 차수벽에 대한 물리, 역학적 특성을 연구하는 것이 필요하다.

쓰레기 매립장과 같은 침출수의 차수를 필요로 하는 토공구조물은 불투수성 확보를 위한 혼합재료로서 벤토나이트가 널리 사용되는데, 그 이유는 벤토나이트가 물과 반응하였을 때 체적 팽창율이 높을 뿐만 아니라 입자의 높은 비표면적과 양이온 치환능력에 의하여 차수효과를 크게 나타내고, 오염물질의 차폐와 이동을 억제하고 일부 물질을 정화하는 효과가 크기 때문이다.<sup>5,6)</sup> 또한 벤토나이트는 천연 점토광물로서 자체 중량의 몇 배의 물을 흡수하는 특유의 분자구조를 가지고 있으며 완전히 수화되었을 때 건조중량의 약 15배까지 팽창하는 특성이 있어서 토립자간의 간극을 수화에 의해 팽창한 벤토나이트가 채워짐으로써 투수성을 크게 감소시키기 때문에 차수재의 혼합재료로 사용된다.<sup>1)</sup>

최근에는 흙-벤토나이트 혼합물을 폐기물 매립장의 바닥 차수공이나 덮개 재료로 사용하여 매립장의 침출수를 차단하므로써 토양의 오염을 방지하는데 큰 영향을 미치고 있다.

그러나 흙-벤토나이트 혼합물은 투수계수가 작지만 압축성이 크고 강도가 작은 결점이 있기 때문에, 흙-벤토나이트 혼합물이 매립장에서 차수재로 사용될 때는 폐기물의 자중 등의 하중에 대한 흙-벤토나이트 혼합물의 역학적특성을 평가하여 사용해야 할 것으로 판단된다. garlanger<sup>13)</sup>은 모래-벤토나이트가 투수계수  $\alpha \times 10^{-8}$ cm/sec의 기준을 만족하기 위해서는 모래에 벤토나이트를 최소 중량기준인 6%를 혼합해야 하며, 현장에 적용하는

경우 시공시 불균질성의 문제로 인하여 모래에 벤토나이트를 7.5% 이상 혼합하도록 제안하였으며, Fernuik<sup>12)</sup>는 4종의 흙-벤토나이트 혼합물에 대하여 삼축압축투수시험과 현장시료의 투수시험을 통하여 실내와 현장시료의 투수성에 대한 상호관계를 규명하였다. 또한 Boosinsuk<sup>7)</sup> 및 Kenney<sup>15)</sup> 등의 학자들이 모래-벤토나이트 혼합물의 지반공학적 특성에 대하여 연구를 수행하였으며, Chan 과 Hsu<sup>9)</sup>는 흙-벤토나이트 차수벽의 투수계수와 벤토나이트의 혼합비, 슬럼프, 함수비의 관계를 분석하여 설계에 이용할 수 있는 컴퓨터 설계 프로그램을 제시하였다.

국내에서도 최근에 환경보전에 대한 관심이 높아짐에 따라 이들 재료에 대한 기초연구가 수행되어 왔으며, 한국건설기술연구원에서 흙-벤토나이트 차수층에 의한 폐기물 매립지의 차수재를 개발한 후 설계·시공기술을 연구하였다.<sup>4)</sup>

본 연구에서는 차수성이 뛰어나고 차수벽 시스템과 폐기물 매립장의 바닥 차수재로 많이 사용되는 벤토나이트를 흙과 혼합하여 바닥 차수 시스템으로 사용할 때 차수 효과를 포함한 지반공학적인 특성을 시험 분석하여 차수재 재료로서의 적합성을 판단하고 성능을 평가하고 설계 시공에 필요한 기초자료를 제시하기 위하여 점토-벤토나이트 혼합물의 다짐특성, 강도특성, 투수특성 등을 구명하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 시험재료

#### 가. 흙 재료

본 연구에 사용된 흙 재료는 경북 D지구 쓰레기 매립장 쓰레기 매립전 바닥에서 채취한 것으로 유기물 함량은 8.3%이고 통일 분류법으로는 CL로 분류되는 흙으로서 기본물성시험 값은 Table 1과 같이 나타났으며, 흙의 입도분포 곡선은 Fig. 1과 같다.

Table 1 Basically physical properties of soil samples

Item	Values	Remark
Specific gravity, $g_s$	2.65	KS F 2308
Water content, $W_n$ (%)	19.64	Nature
Liquid limit, LL (%)	38.00	KS F 2303
Plastic limit, PL (%)	18.30	KS F 2304
Plastic index, PI (%)	19.70	
Optimum moisture content, O.M.C(%)	16.98~22.5	Soil-bentonite
Max. Dry unit weight, $\gamma_{dmax}$	1.49~1.73	Soil-bentonite
Passing through No.200 (%)	64.188	
Organic matter content (%)	8.28	KS F 2104
Soil classification	CL	U.S.C.S

Table 3 Test values of properties of bentonite used for civil engineering works

Classification	Test values
Water content (%)	8~12
Minimum dry density ( $gf/cm^3$ )	0.75~0.85
Passing percent by No. 200seive (%)	Min. 75
pH	8.5~10.5
Concentration ( $kgf/m^3$ )	45
Marsh funnel viscosity (s)	Min. 38 s
gel strength	Min. 3.5
Filterate loss (cc/30min)	Max. 15ml

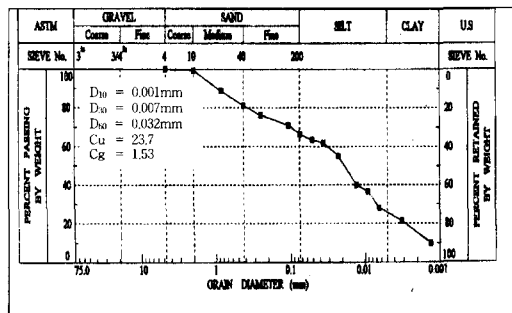


Fig. 1 Grain size distribution curve of field soil

나. 벤토나이트

본 실험에서 선택한 흙의 첨가제인 벤토나이트는 미국 Wyoming주에서 자연적으로 생산되는 Na계-벤토나이트로서 몬모릴로나이트 계통의 점토이며, 물리·화학적 실험결과는 Table 2와 같으며, 그 구조는 전자 현미경으로 6,000배 및 20,000배로 확대 촬영하여 분석한 결과 photo 1과 같이 판상구조인 것으로 판명되었다. Table 3은 벤토나이트 제조회사에서 제시한 토목공사용 벤토나이트의 성질에 대한 시험항목의 기준을 소개한 것이다.



(a) (times 6,000)



(b) (times 20,000)

Photo 1 Electron photomicrographs of structure of bentonite used

Table 2 Physical properties and chemical components of bentonite

Physical properties	Specific gravity	Montmorillonite Content (%)			Swell index (ml/2gf)	Liquid limit (%)		Apparent density ( $gf/cm^3$ )		
	2.30	72.9			14.5	330		0.76		
Chemical components (%)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	Others	Total	pH
	63.70	19.82	2.65	0.24	0.92	1.09	2.11	9.47	100	9.6

다. 흙-벤토나이트 혼합물

본 연구에 사용한 흙 시료는 실험실에서 자연 건조 시킨 후 No. 4 체의 통과분만을 사용하였으며, 흙과 벤토나이트는 노건조상태에서 중량비로 혼합한 후 물을 가하여 제조하였다.

흙-벤토나이트 혼합물은 흙과 벤토나이트를 노건조 상태에서 중량비로 혼합한후 물을 가하여 제조하는 방법과 습윤한 흙에 건조한 벤토나이트를 섞으면서 물을 가하여 제조하는 방법이 있으나, 두 방법 모두 시험결과에는 차이가 없다는 Kenney의 연구결과에 따라 본 실험에서는 첨가하는 수량의 조절을 쉽게 하기 위하여 전자의 방법을 이용하여 중량비로 각각 5, 10, 15, 20, 25의 벤토나이트를 점토에 혼합한 5종류의 시료를 제조하여 실험에 사용하였으며 벤토나이트 혼합비율에 따른 점토와 벤토나이트의 무게는 Table 4로 나타내었다.

Table 4 Weights of clay-bentonite with mixing ratio

Mixing ratio (%)	Clay (gf)	Bentonite (gf)
5	1,900	100
10	1,800	200
15	1,700	300
20	1,600	400
25	1,500	500

2. 시험방법

가. 아터버그한계 시험

흙-벤토나이트 혼합물과 같은 세립토는 함수비에 따라 성질이 크게 변화하며, 그 흙이 물을 많

이 함유하면 두꺼운 수막이 형성되어 유동상태가 되고 건조하면서 응결되므로 흙-벤토나이트 혼합물에 대한 소성상태를 판별하기 위하여 아터버그 한계 시험을 실시하였으며 시험방법은 KS F 2303과 KS F 2304의 표준시험법을 이용하여 액성한계와 소성한계를 측정하고, 소성지수를 계산하였다.

나. 슬럼프 시험

흙-벤토나이트 혼합물은 쓰레기 매립장의 차수층이나, 차수벽을 설치할 때 사용하는 경우 작업의 난이도는 반죽질기에 의하여 결정되고, 반죽질기는 주로 주수량에 의해 좌우되기 때문에 흙-벤토나이트 혼합물을 5%, 10%, 15%, 20%, 25%의 5종의 혼합물에 대하여 반죽의 진 정도를 슬럼프 값으로 판정하였다.

다. 다짐시험

흙-벤토나이트 혼합물의 다짐시험은 벤토나이트 함량별로 KS F 2312의 표준다짐 시험 방법 중에서 A방법으로 다짐을 실시하였고, 시료준비는 건조법 중에서 반복법을 선택하였다.

다짐시험은 건조상태의 동일한 함량의 벤토나이트 혼합물 약 2 kgf의 시료 4~5개를 혼합물의 예상 최적함수비 보다 4~9% 낮은 함수비가 되게 물을 가한 후, 밀봉하고 흡수가 충분히 되도록 한 후 시험을 실시하였다.

라. 일축압축 시험

흙-벤토나이트 혼합물의 일축압축강도 시험은

Table 5 Water amount of optimum moisture content for dried soils

Bentonite content (%)	Wopt (%)	$\gamma_d$ (gf/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_t$ (gf/cm <sup>3</sup> )	Added water quantity(gf)		
				Soil	Bentonite	Total
0	16.98	1.729	2.023	289.8	0.0	289.8
5	18.89	1.646	1.957	304.0	7.4	311.4
10	19.90	1.615	1.936	313.4	18.5	331.9
15	20.62	1.566	1.889	308.2	29.9	338.1
20	21.34	1.547	1.877	301.6	42.7	344.3
25	22.50	1.485	1.819	300.2	59.2	359.4

직경 5cm, 높이 10cm의 시료를 제작하여 KS F 2314의 방법에 의하여 실시하였으며, 흙-벤토나이트 각 혼합물에 대한 최적함수비와 주수량은 Table 5와 같다.

공시체의 제조 방법은 기존의 트리밍으로 공시체를 제작하는 것보다 정확한 공시체를 만들기 위하여 본 실험을 위해 특수 제작된 Photo 2와 같은 몰드를 사용하였으며, 벤토나이트 혼합물의 무게는 Table 6과 같다.

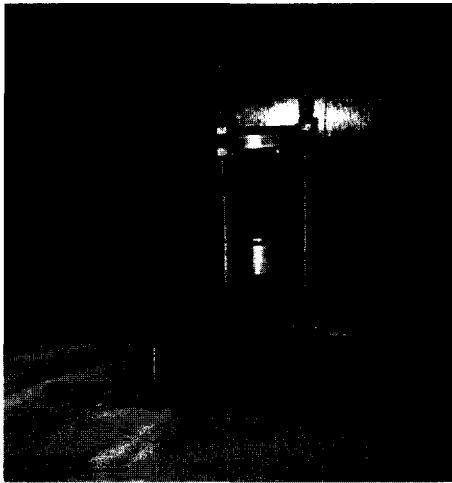


Photo 2 Specimen extractor

마. 삼축압축 시험

다짐시험에서 얻은 최대건조밀도 상태의 점토-

벤토나이트 혼합물에 관한 토질계수를 결정하기 위하여 삼축압축시험기를 사용하였으며, 이때 공시체의 크기는 직경이 3.8cm, 높이 7.6cm를 사용하였다. 벤토나이트 함유율 5, 10, 15, 20, 25%에 대하여 각각 3개의 공시체를 제작하여 비압밀 비배수 방법으로 시험을 하였다.

바. 전단시험

직접전단시험의 공시체 제조는 벤토나이트 혼합물에 다짐시험에서 구한 최적함수비가 되게 주수하고 혼합물 속에 물이 충분히 흡수될 수 있도록 실내에서 24시간 이상 방치 한 후 KS F 2312의 A다짐 방법으로 다짐을 실시한 혼합토에 대하여, 직경이 6.35cm 두께를 2.54cm로 제조하고 전단상자에 압밀링으로 삽입하여 수직하중을 2kgf/cm<sup>2</sup>로 가하고 전단속도를 0.08mm/min로 전단시켰으며, 수직하중을 4kgf/cm<sup>2</sup>, 8kgf/cm<sup>2</sup>로 바꾸고 동일 방법으로 실험을 실시하여 각 수직 응력에 대한 최대 전단강도를 구하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 흙-벤토나이트 혼합물의 물리적 특성

가. 아터버그 한계

흙-벤토나이트 혼합물의 아터버그한계를 규명하기 위하여 벤토나이트 함량에 대한 액성한계와 소

Table 6 Weight of soil-bentonite mixture in each mold

Bentonite content (%)	mold 1		mold 2		mold 3	
	Total weight	Weight of one layer	Total weight	Weight of one layer	Total weight	Weight of one layer
	(gf)		(gf)		(gf)	
0	136.22	45.41	174.37	58.12	397.22	132.41
5	131.18	43.73	168.67	56.23	384.26	128.09
10	130.42	43.47	166.86	55.62	380.13	126.71
15	127.22	42.41	163.67	54.56	370.91	123.64
20	126.42	42.14	161.78	53.93	368.55	122.85
25	122.51	40.84	156.78	52.30	357.16	119.05

성한계, 소성지수를 구한 결과는 Fig. 2와 같다.

흙의 액성한계가 38%이고 벤토나이트의 액성한계가 330%인 흙-벤토나이트 혼합물에서 벤토나이트의 함량을 5%~25%로 시험한 결과는 액성한계가 55%~90.5%로 함량이 커질수록 액성한계값은 5%~10%에서는 순차적으로 증가하였으나, 10%~15%에서는 액성한계값이 1% 정도의 증가를 나타내어 혼합비에 대한 액성한계의 증가는 낮은 값을 나타내었다. 따라서 벤토나이트의 함량이 10% 이상의 경우에 벤토나이트를 첨가한 비율에 대한 액성한계의 효율성이 크게 떨어지는 것으로 나타났다. 이것은 벤토나이트를 15%~25%로 첨가한 경우 벤토나이트를 첨가한 비율에 비해서 차수층의 팽창과 수축이 적게 나타났다.

소성한계는 액성한계와는 달리 벤토나이트의 함량이 5%일 때는 벤토나이트의 첨가에 의해서 소성한계값이 5% 증가한 23.36% 이었으나, 벤토나이트의 함량이 10%~25%에서는 큰 차이를 나타내지 않았다. 소성지수는 벤토나이트의 함량이 5%~25%일 때 차수층이 소성상태로 존재할 수 있는 한계치의 함수비가 31.6~66.9%인 것으로 나타났다.

벤토나이트 함량이 증가함에 따라 액성한계는 증가하는 경향을 보이며 소성한계는 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 이것은 벤토나이트 자체의 액성한계가 330%로 매우 크고 흙의 간극을 세립의 벤토나이트가 채워졌기 때문에 혼합물의 액성한계는 증가되었다고 판단된다.

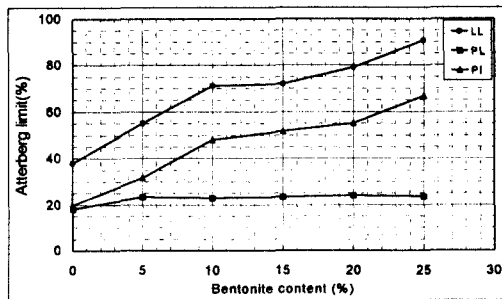


Fig. 2 Atterberg limit of soil-bentonite mixtures

#### 나. 슬럼프 시험

흙-벤토나이트 혼합물을 사용하는 차수층이나 차수벽 시공에서 흙-벤토나이트 슬러리의 워커빌리티를 평가하기 위해 슬럼프 시험을 실시하였다. 흙-벤토나이트를 혼합하여 현장에서 차수재로 사용하고자할 때, 그 시공성은 슬럼프 값과 함수비, 벤토나이트 및 점토세립분의 함량에 따라 달라진다.<sup>8)</sup>

Fig. 3은 벤토나이트 함량에 대한 함수비와 슬럼프값에 대한 시험 결과를 나타내고 있으며 함수비가 증가함에 따라 모든 흙-벤토나이트 혼합물의 슬럼프 값은 증가하는 경향을 보였고, 슬럼프 값은 12~14 cm의 범위로 측정되었으며, 그 중에서 벤토나이트 함량이 5%인 혼합물에서 함수비가 82%일 때 슬럼프 값이 14.4 cm의 최대로 나타났으며, 벤토나이트 함량이 10%인 경우 함수비가 56.8~83.5%, 15%에서 67.0~92.4%, 20%에서 75.0~100.4%, 25%에서 84.7~110.2%의 함수비를 보였으며, 슬럼프값은 13.2 cm, 11.6 cm, 13.5 cm, 11.8 cm로 각각 나타났다.

슬럼프 값이 5 cm일 때 벤토나이트 함량을 5%~25%로 변화시켰을 때 벤토나이트가 5% 증가함에 따라 함수비가 5.5%~15% 증가하였다.

이것은 D'Appolonia<sup>11)</sup>가 이상적인 트랜치 채움 재료인 슬러리의 특성으로 슬럼프값이 5~15 cm, 함수비가 25~30% 정도임을 보고한 결과와 유사함을 보였다. 또한 벤토나이트 함량이 5~25%의 범위에서 벤토나이트가 5% 증가함에 따라 함수비는

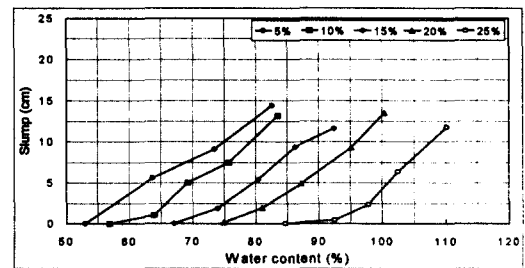


Fig. 3 Relation between water content and slump value of soil-bentonite mixture

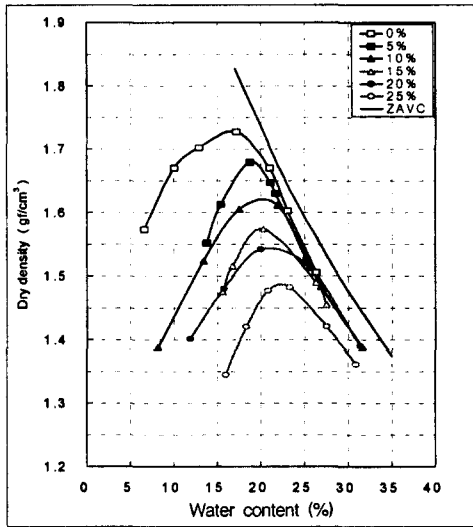


Fig. 4 Compaction curves of soil-bentonite mixtures

평균 9.8%의 증가를 나타내고 있고, Chan<sup>9)</sup>의 8.4%보다 약간 크게 나타났다.

흙-벤토나이트 혼합물의 슬럼프 값은 Fig. 3과 같이 함수비가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였다. 이 결과는 Chan<sup>9)</sup>의 연구와 비슷하였다.

## 2. 흙-벤토나이트 혼합물의 강도특성

### 가. 다짐특성

흙-벤토나이트 혼합물에 대하여 벤토나이트 혼합비에 따른 다짐특성을 구명하기 위하여 다짐시험을 수행하였으며, Fig. 4는 벤토나이트 함량변화에 따른 흙-벤토나이트 혼합물의 건조밀도와 함수비의 변화곡선을 도시한 것으로 벤토나이트 함량이 5~25%로 증가함에 따라 최대건조밀도가 1.646~1.485 gf/cm<sup>3</sup>로 감소하는 경향을 보였으며, 최대건조밀도의 감소율은 4.8~14.1%를 나타내었다. 벤토나이트함량의 변화에 따른 최적함수비는 1.9%~5.5%의 증가율을 보였고, 점토-벤토나이트에서는 최적함수비가 17.0~22.5%일 때 최대건조밀도는 1.729~1.485 gf/cm<sup>3</sup>로 나타났다.

Kenney 등<sup>15)</sup>은 벤토나이트-모래의 혼합물에 대해서 혼합비와 최적함수비 관계는 혼합비가 4~

22%에서 최적함수비는 12~14%를, Sima 등<sup>16)</sup>과 Chapuis 등<sup>10)</sup>은 벤토나이트의 혼합비가 15% 이상에서는 대상혼합물(실트, 점토, 모래)의 종류에 관계없이 함수비가 유사함을 나타낸다고 보고하였다.

정 등<sup>3)</sup>은 모래-벤토나이트를 사용한 경우는 최적함수비가 16.5~27.3%에서 최대가 16.6~19.1%에서 최대건조밀도는 1.775~1.625 gf/cm<sup>3</sup>임을 보고하여 본 연구의 결과와 거의 부합하는 것으로 나타났다.

Fig. 5는 최대건조밀도와 벤토나이트 혼합비의 관계와 최적함수비와 벤토나이트 혼합비의 관계를 나타낸 것으로, 벤토나이트의 함량 1%의 증가함에 따라 최대건조밀도는 -0.009 gf/cm<sup>3</sup>의 감소를 나타내고 있으며, 벤토나이트 함량이 증가함에 따

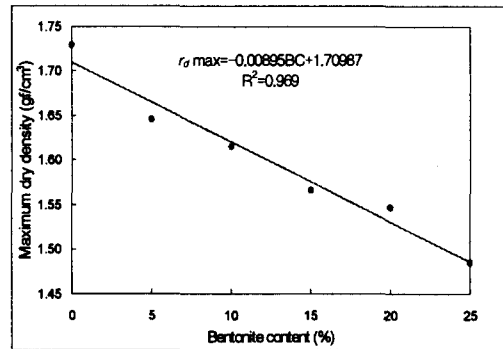


Fig. 5 Relation between maximum dry density and bentonite content

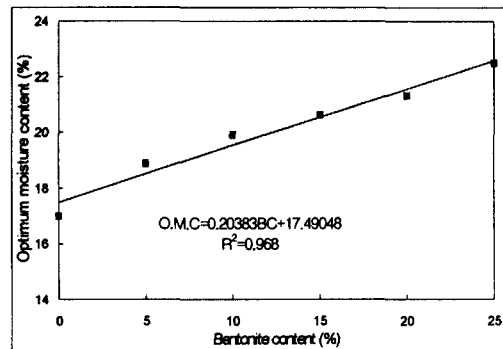


Fig. 6 Relation between optimum moisture content and bentonite content

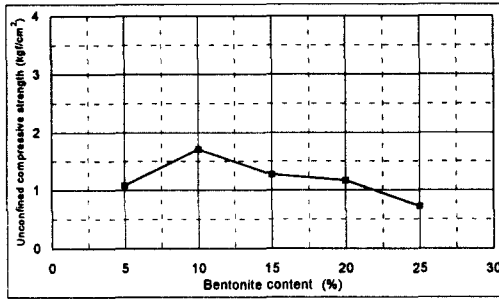


Fig. 7 Variation of unconfined compressive strength of soil-bentonite mixtures

라 최대건조밀도는 감소하는 경향을 나타내고 있다. Fig. 6은 벤토나이트함량이 증가함에 따라 최적함수비는 증가하는 경향을 보이고 있으며 벤토나이트의 함량 1%가 증가함에 따라 최적함수비는 0.2%가 증가되는 것을 알 수 있다. 이것은 비중이 작은 벤토나이트 양이 증가함에 따라 혼합물의 상대적인 비중이 감소되어 벤토나이트의 함량이 최대건조밀도의 감소에 영향을 준 것으로 생각되며, 또한 벤토나이트의 함량이 커질수록 혼합토의 최적함수비가 증가하므로써 최대 건조밀도가 감소하게 된 것으로 판단된다.

#### 나. 일축압축강도

벤토나이트 함량에 따른 흙-벤토나이트 혼합물의 평균 일축압축 강도와 벤토나이트 함량과의 관계는 Fig. 7과 같다.

벤토나이트의 함량이 5~25%일 때 평균일축압축강도는 1.71~0.73 kgf/cm<sup>2</sup>를 나타내었다. 벤토나이트 함량이 5%에서 10%로 증가할 때 평균일축압축강도가 0.62 kgf/cm<sup>2</sup>의 증가를 나타내었으나, 15%이상에서는 5%의 벤토나이트 첨가율을 증가시켰을 때 평균일축압축강도는 0.44 kgf/cm<sup>2</sup> 감소를 나타내었다.

벤토나이트 함량이 증가함에 따라 일축압축강도는 감소하는 경향을 보이고 있으며, 특히 벤토나이트 함량이 10%부근에서 일축압축강도의 최대치가 나타난 것은 벤토나이트의 함량이 10%에서 흙의 입자 사이의 간극에 최적의 조건을 갖게 됨으

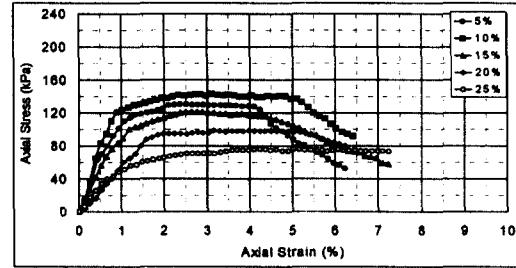


Fig. 8 Relation between axial stress and axial strain of soil-bentonite mixtures (50mm)

로서 최대의 강도를 나타낸 반면, 10% 이상에서는 흙 입자 사이의 간극에 의한 흙의 구조적인 역학적 특성과 벤토나이트의 함수비의 증가와의 복합적인 결과에 의하여 오히려 평균일축압축강도가 감소된 것으로 판단된다. 따라서 흙-벤토나이트 혼합물에서 벤토나이트 함량이 10%까지는 강도가 커지며, 벤토나이트 함량이 10% 이상에서는 일축압축강도가 감소되기 때문에 점토-벤토나이트의 혼합에서는 벤토나이트의 첨가량을 10%정도로 하는 것이 타당한 것으로 추정된다.

#### 다. 일축압축강도와 축변형률

Fig. 8은 벤토나이트 함량에 따른 응력-변형률의 변화곡선으로서 벤토나이트 함량과 관계없이 일축압축강도는 변형률이 1.5~2.5%에서 발생하였다.

공시체가 파괴점에 도달될 때의 변형률은 벤토나이트의 함량이 5%, 10%, 15%, 20%에서는 각각 4.2%, 5.0%, 5.0%, 5.2%에서 파괴가 일어났고, 25%에서의 공시체는 7.3%까지 파괴점에 도달되지 않고 압좌상태로 되었다.

점토에 벤토나이트를 첨가했을 때는 혼합토의 특성이 축응력에 대한 거동이 연약한 상태의 흙의 거동과 유사한 상태가 지속되는 경향을 보였으며, 벤토나이트 함량이 많을수록 변형률이 상당히 크게 나타났다.

벤토나이트 함량의 변화에 대한 응력-변형률에 가장 적합한 model을 선택하고 회귀분석을 통하여 유도한 결과는 Fig. 9 이고, 응력과 변형률의 관계를 나타내는 식은 식(1)과 같다.



$$\sigma = \frac{a \cdot \epsilon}{\epsilon^n + b} \dots\dots\dots (1)$$

여기서,  $\sigma$  : 응력 (kgf/cm<sup>2</sup>),  $\epsilon$  : 변형률 (%), a, b : 상수, n : 지수

n의 값에 따라서 응력과 변형률의 곡선은 연속적으로 최대강도와 극한 강도를 표현할 수 있다. 식(4-1)에 의해서 회귀분석한 결과는 함수식의 설명력을 나타내는 결정계수(R<sup>2</sup>)가 전반적으로 90% 이상의 좋은 결과를 나타내었다.

벤토나이트의 함량이 5~25%일 때의 관계곡선은 다음과 같다.

5%인 경우:  $\sigma = \frac{5.012 \cdot \epsilon}{\epsilon^{1.525} + 2.793}, R^2 = 0.995$

10%인 경우:  $\sigma = \frac{3.295 \cdot \epsilon}{\epsilon^{1.191} + 0.958}, R^2 = 0.965$

15%인 경우:  $\sigma = \frac{4.662 \cdot \epsilon}{\epsilon^{1.621} + 3.254}, R^2 = 0.990$

20%인 경우:  $\sigma = \frac{6.526 \cdot \epsilon}{\epsilon^{1.821} + 7.254}, R^2 = 0.987$

25%인 경우:  $\sigma = \frac{1.510 \cdot \epsilon}{\epsilon^{1.540} + 2.446}, R^2 = 0.992$

Fig. 9에서와 같이 실험치와 위에서 분석된 회

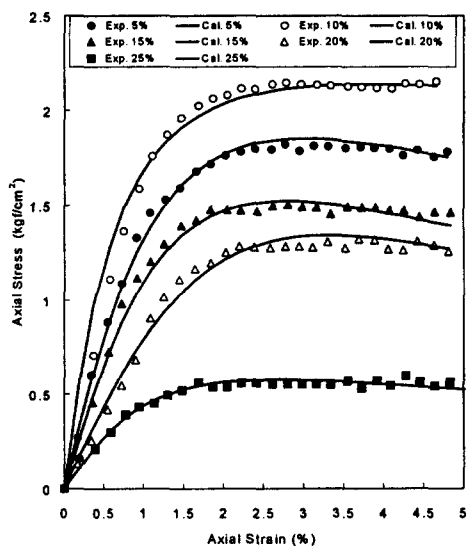


Fig. 9 Relation between axial strain and axial stress of soil-bentonite mixtures

귀식간의 관계가 양호한 상태를 나타내고 있으며, 재료의 성질에 따라 달리 나타날 수 있는 응력-변형률의 관계를 이 함수 식으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

라. 삼축압축강도 특성

벤토나이트 함량에 따라 혼합물의 점착력(c)값은 Fig. 10, 전단 저항각( $\phi$ )은 Fig. 11과 같다.

Fig. 10은 흙-벤토나이트 혼합물에서 벤토나이트 함량이 증가함에 따라 점착력이 감소하는 경향을 보였으며 벤토나이트 함량 5~10%에서 0.1kgf/cm<sup>2</sup>, 10~20%의 범위에서는 0.7kgf/cm<sup>2</sup> 정도로 감소하는 것을 알 수 있다. 이 현상은 사용된 흙의 입도분포가 양호하고 원래 점착력이 큰 벤토나이트의 주성분인 몬모릴로나이트의 영향인 것으로 추정된다.

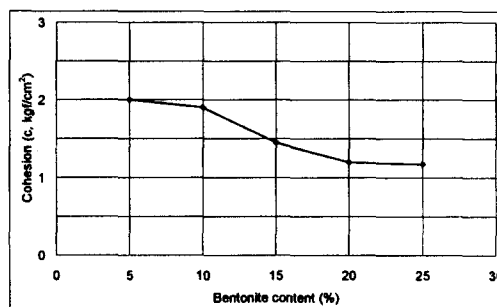


Fig. 10 Relation between bentonite contents and cohesion of soil-bentonite mixtures

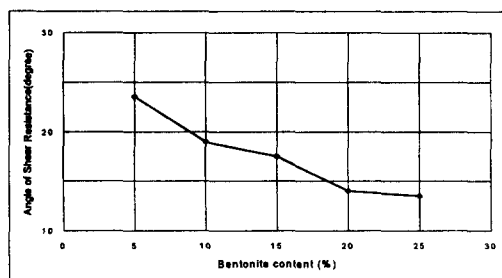


Fig. 11 Relation between bentonite contents and angle of shear resistance of soil-bentonite mixtures

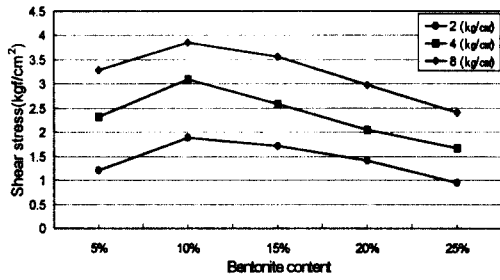


Fig. 12 Relation between shear strength and bentonite content

전단저항각과의 관계는 Fig. 11에서와 같이 점토-벤토나이트 혼합물에서 벤토나이트 함량이 각각 5%, 10%, 15%, 20%, 및 25%으로 하였을 때 전단저항각은 각각 23.5°, 19.0°, 17.5°, 14.0° 및 13.5°를 나타냈고, 벤토나이트 함량이 많을수록 전단 저항각( $\phi$ )은 작게 나타났으며, 5%에 비해서 10%, 15%, 20%, 25%에서 전단저항각이 4.5°, 6°, 9°, 10°의 감소를 나타내었다.

마. 전단강도

흙-벤토나이트 혼합물에 대하여 벤토나이트 함량을 각각 5, 10, 15, 20 및 25%로 하고 수직하중을 각각 2, 4, 및 8 kgf/cm<sup>2</sup>를 가하여 전단시험을 실시하여 측정된 결과는 Fig. 12와 같다.

벤토나이트 함량이 5~10% 범위에서는 점토 입자 속에 가는 벤토나이트 입자가 더해져서 간극을 채워줌으로서 전단강도가 증가하는 것으로 분석할 수 있으며, 10%이상에서는 전단강도가 감소하는 경향을 보이고 있다. 이 현상은 벤토나이트 함량이 10%이상인 혼합물에서는 전단강도의 증가를 기대하기 어렵다는 것을 암시하는 것으로 추정할 수 있다.

수직하중이 증가할수록 전단강도가 증가하는 것은 수직하중을 증가시켰을 경우에 점토와 벤토나이트 혼합물의 간극이 줄어들었기 때문인 것으로 판단된다.

바. 전단변형률

Fig. 13은 연직하중을 8 kgf/cm<sup>2</sup>으로 하였을 때

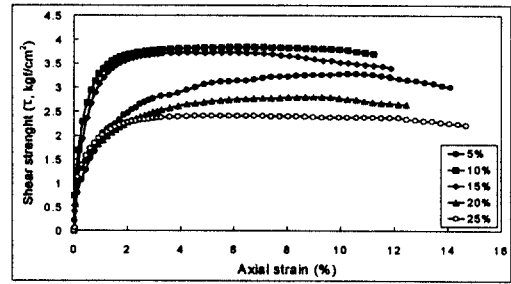


Fig. 13 Relationship between shear strength and axial strain (vertical stress 8kgf/cm<sup>2</sup>)

벤토나이트의 함량에 따른 축변형률과 전단응력과 관계의 관계를 나타낸 것으로 벤토나이트 함량에 관계 없이 축방향 변형을 2~4%의 범위에서 진행성 파괴가 발생하였고 전단응력의 최대치는 약 3 kgf/cm<sup>2</sup>로 측정되었다.

벤토나이트 혼합비에 관계없이 수평방향으로 2~4%의 변형률에서부터 진행성 파괴가 일어났고, 전체 공시체의 파괴점이 분명치 못하다.

벤토나이트의 함량에 따른 최대 전단응력을 나타내는 수평변형률이 다소 차이를 나타내고 있는데, 벤토나이트 함량이 10%, 15%는 수평변형률 2%에서 최대값이 나타났으며, 5%인 경우는 완만한 곡선을 이루다가 변형률 10%정도에서 최대전단응력을 나타내었고, 20%와 25%의 경우는 전단강도가 증가하지 않은 상태에서 변형률만 연속적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 이 현상은 점토와 벤토나이트 입자가 작으며 소성지수가 크고, 액성한계 값의 영향으로 판단된다.

3. 흙-벤토나이트 혼합물의 압밀특성

가. 간극비와 압밀압력

흙-벤토나이트 혼합물에 대한 압밀시험 곡선은 Fig. 14와 같이 도시하였다. 이 결과 압밀하중이 전반적으로 증가함에 따라 간극비/초기간극비의 값은 감소하는 경향을 보였다.

벤토나이트 함량이 많을수록 초기간극비에 대한 간극비의 감소가 크게 나타났으며, 5%의 함량과

25%의 함량의 혼합물을 비교하면 0.5~2.3배의 간극비의 감소를 나타내었고, 이것은 벤토나이트의 특성에 의해 팽창된 벤토나이트가 압밀하중을 받음으로서 간극이 감소된 것으로 판단되며, 벤토나이트 함량이 15%일 때 간극비가 가장 작게 나타난 것은 흙 입자 사이에 벤토나이트 입자가 모두 채워졌기 때문으로 판단된다.

벤토나이트 함량에 따른 흙-벤토나이트 혼합물에 대한 압축계수, 체적변화계수, 압축지수의 압밀하중 0.5, 1, 2, 4 kgf/cm<sup>2</sup>에 대한 평균값은 Table 7과 같다.

압축계수는 벤토나이트 함량이 5~10%에서 증가율이 51%, 10~15%에서는 증가율이 30%, 15~20%에서는 증가율이 17%, 20~25%에서는 증가율이 3%로 나타났고, 체적팽창계수는 벤토나이트 함량이 5, 10, 15, 25%에서는 벤토나이트의 함량이 5% 증가함에 따라 0.015~0.019 cm<sup>2</sup>/kgf 정도가 증가하였으나 20%에서는 벤토나이트의 함량의 5% 증가에 대해서 0.0014 cm<sup>2</sup>/kgf로 체적팽창계수의 증가율이 낮았다. 압축지수도 함량 5~15%에서는 증가율이 크고 20~25%에서는 증가율이 낮았다. 벤토나이트 함량이 증가함에 따라 흙-벤토나이트 혼합물의 압축계수, 체적팽창계수 및 압축지수는 미소하게 증가하는 것으로 분석된다.

여러 가지 점토의 대표적인 압축지수의 값은 일반적으로 0.2~0.9<sup>6)</sup>에 있다고 하는데 본 실험에서의 cc값은 0.16~0.47과 비슷한 결과임을 알 수 있다.

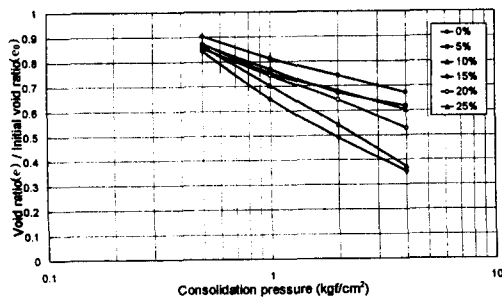


Fig. 14 Consolidation curves for soil-bentonite mixtures

Table 7 Coefficient of compressibility, volume change, and compression index with bentonite content

bentonite content (%)	$a_v$ (cm <sup>2</sup> /kgf)	$m_v$ (cm <sup>2</sup> /kgf)	$c_c$
0	$7.39 \times 10^{-2}$	$4.82 \times 10^{-2}$	$1.578 \times 10^{-1}$
5	$8.88 \times 10^{-2}$	$5.88 \times 10^{-2}$	$1.688 \times 10^{-1}$
10	$1.360 \times 10^{-1}$	$7.77 \times 10^{-2}$	$2.682 \times 10^{-1}$
15	$1.632 \times 10^{-1}$	$9.24 \times 10^{-2}$	$3.807 \times 10^{-1}$
20	$1.788 \times 10^{-1}$	$9.38 \times 10^{-2}$	$4.032 \times 10^{-1}$
25	$1.808 \times 10^{-1}$	$1.096 \times 10^{-1}$	$4.660 \times 10^{-1}$

나. 압밀하중과 압밀계수

벤토나이트 함량과 압밀하중의 크기에 대한 압밀계수의 값을 Table 8로 나타내었으며, 압밀시 시료의 압밀 침하량과 포화된 시료에서 빠져나온 물의 체적감소를 측정된 것을 가지고  $\sqrt{t}$ 방법과  $\log t$ 방법에 의하여 압밀시간  $t_{90}$ ,  $t_{50}$ 에 대하여 각각의 압밀계수를 결정하고 이들 4개의 압밀계수를 평균한 값이다.

Fig. 15에서와 같이 벤토나이트 함량이 5%에서는 압밀계수 값이 하중 0.5 kgf/cm<sup>2</sup>에서 1 kgf/cm<sup>2</sup>까지는 증가하여 1 kgf/cm<sup>2</sup>에서 최대가 되었다가 1~4 kgf/cm<sup>2</sup> 이상에서는 하중이 커짐에 따라 압밀계수가 일정하게 감소하였다.

벤토나이트 함량이 10%, 15%, 20%, 25%에서는 하중이 0.5 kgf/cm<sup>2</sup>에서 최대이고 하중이 증가할수록 계속 감소하였으며, 벤토나이트 함량이 10%, 15%의 경우는 압밀하중이 0.5~1.5 kgf/cm<sup>2</sup>에서는 압밀계수가 일정하게 감소하였으며 2 kgf/cm<sup>2</sup>부터는 압밀계수가  $5 \times 10^{-4}$  cm<sup>2</sup>/s 이하의 값을 나타내었고, 벤토나이트 함량이 20%, 25%의 경우는 압밀하중이 0.5~1 kgf/cm<sup>2</sup>에서 일정한 감소를 보였으며 1 kgf/cm<sup>2</sup>부터는 압밀계수가  $7 \times 10^{-4}$  cm<sup>2</sup>/s 이하의 값을 나타내었다. 이는 벤토나이트의 함량이 증가된 것이 압밀하중을 증가시킨 것과 같은 효과를 나타낸 것으로 판단할 수 있고, 특히 벤토나이트의 함량이 10%를 넘을 경우는 압밀하중이 2 kgf/cm<sup>2</sup>일 때 벤토나이트의 첨가율과 관계없이

Table 8 Consolidation coefficients with bentonite content (Average) (cm<sup>2</sup>/s)

Pressure (kgf/cm <sup>2</sup> )	0%	5%	10%	15%	20%	25%	Average
0.5	0.023677	0.019049	0.019234	0.015938	0.003011	0.006959	0.014645
1	0.035438	0.026088	0.012928	0.006884	0.000728	0.000174	0.013707
2	0.015629	0.01475	0.000514	0.000137	0.000285	0.000069	0.005231
4	0.003593	0.002491	0.000153	0.000067	0.000262	0.000044	0.001102
Average	0.019584	0.015595	0.008207	0.005757	0.001072	0.001812	0.008671

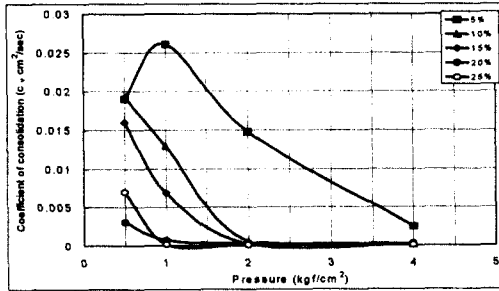


Fig. 15 Curves of consolidation coefficient and pressure with bentonite content

$5 \times 10^{-4}$  cm<sup>2</sup>/s 이하의 압밀계수의 값을 나타내었다. 따라서 벤토나이트의 함량이 10%를 넘을 경우는 압밀하중이 2 kgf/cm<sup>2</sup>일 때 압밀이 거의 끝난 상태와 같이 아주 느린 속도로 진행되는 것으로 판단할 수 있으며, 이 압밀계수의 값은 쓰레기 매립장의 현장에서 매립쓰레기와 복토에 의한 하중이 상재하중으로 작용할 때 흙-벤토나이트 차수층의 침하량과 침하시간을 산정하는데 유용하게 사용될 것으로 생각된다.

#### IV. 결 론

차수벽 재료로 이용되는 벤토나이트를 폐기물 매립장의 바다 차수층 재료로의 사용 가능성을 판단하는 기준을 설정하기 위하여 벤토나이트 함량에 따른 흙-벤토나이트 혼합물의 지반공학적인 특성에 관한 시험을 실시하여 분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 흙-벤토나이트 혼합물의 다짐시험 결과 벤토

나이트의 함량이 증가함에 따라 최적함수비는 증가하고 최대전조밀도는 감소하는 경향을 보였다.

2. 흙-벤토나이트 혼합물의 일축압축강도는 변형률 1.5~2.5%에서 발현되었고, 그 최대치는 벤토나이트의 함량 10% 부근에서 나타났으며, 일축압축강도와 변형률의 관계는 다음과 같은 식으로 표시할 수 있다.

$$\sigma = \frac{a \cdot \epsilon}{\epsilon^n + b}$$

3. 전단시험에서 벤토나이트의 함량 5%에서 10%까지는 전단강도가 증가하였고 10%~25%에서는 전단강도가 감소하였으며 함량 10%에서 전단강도가 최대값을 나타내었다.

4. 압밀시험에서 벤토나이트 함량이 증가함에 따라 압축계수, 체적변화계수 및 압축지수는 증가하는 경향을 보였고, 압밀압력의 증가에 따라 간극비는 감소되는 것으로 나타났다.

5. 흙-벤토나이트 혼합물에서 벤토나이트 함량과 압밀압력이 증가함에 따라 압밀계수는 전반적으로 감소하였으며, 벤토나이트 함량이 10%를 넘을 경우 압밀압력 2 kgf/cm<sup>2</sup>에서  $5 \times 10^{-4}$  cm<sup>2</sup>/s 이하의 압밀계수 값을 나타내었다.

#### 참 고 문 헌

1. 권무남, 유택항, 1997, 모래-벤토나이트 혼합물의 지반공학적인 특성에 관한 기초연구, 한국농공학회지 제39호 제6호 pp. 99~110.
2. 김상규, 1999, 토질역학, 청문각, pp. 82~144.

3. 정하익, 이용수, 정길수, 진현식, 홍승서, 1998, 흙-벤토나이트 혼합차수재의 품질관리 시험, 한국건설기술연구원, pp. 1~39.
4. 정하익, 이용수, 심한인, 전이배, 정문경, 1995, 폐기물 매립지 차수재 개발, 한국건설기술연구원, pp. 137~172.
5. 정문경, 1998, 점토입자의 단립과 분산 메카니즘에 관한 연구, 한국건설기술연구원, pp. 1~34.
6. 정문경, 정하익, 이용수, 최희철, 우제윤, 1998, 폐기물 매립시설의 설계·시공기술에 관한 연구, 한국기술연구원 98-075, 연구보고서.
7. Boonsinsuk P, Pulles B. C, Kjartanson B. H, Dixon D.A., 1991, Prediction of Compactive Effort for a Bentonite-Sand Mixture Canadian geotechnical Society 44th Canadian geotechnical Conference, Vol. 2, No. 64, pp. 1-12.
8. Braja M. Das., 1998, Principles of geotechnical Engineering, Fourth Edition Boston, pp. 1~37.
9. Chan Wah-Tak, Hsu Daniel C., 1994 Design and Construction of Soil-Bentonite Slurry Wall Helen Kramer Superfund Site, First International Congress on Environmented geotechnics, pp. 161~166.
10. Chapuis Robert P., 1990, Sand-Bentonite Liners Predicting permeability for laboratory tests, Canadian geotechnical Journal, Vol. 27, No.1 pp. 47~57.
11. D'Appolonia D. J., 1980, Soil-Bentonite Slurry Trench Cutoffs, Journal of the geotechnical Engineering Division, GT4, pp. 405-410.
12. Ferniuk N. and Haug, M. D., 1989, Comparison of Laboratory and Field Soil Liner Permeabilities, Canadian geotechnical Conference, Winnipeg, Manitoba, October.
13. garlanger John. E. Cheung Francis, K. and Tannous Bishar, S., 1987, Quality Control Testing for a Sand-Bentonite Line, geotechnical Special Publication, vol. 9, no. 13, pp. 488~499.
14. Head K. H., 1986, Soil laboratory testing, ELE International Limited, Vol.3, pp. 1129~1196.
15. Kenney, T. C . Veen, W. A., Swallow, M. A., and Sungaila, M. A., 1991, Hydraulic Conductivity of Compacted Bentonite-Sand, Canadian geotechnical Society 44th Canadian geotechnical conference, Vol. 2, No. 63, pp. 1~10.
16. Sima N. and Harsulescu, A., 1979, The Use of Bentonite for Sealing earth Dams, Bulletin of the International Association of Engineering geology, No. 20, pp. 222-226