

벤토나이트와 시멘트가 매립장 차수층의 투수성과 압축강도에 미치는 영향(I)

김수문 · 염희남* · 임남웅

중앙대학교 건설대학원 환경공학과
*요업기술원

(1999년 9월 13일 접수, 1999년 12월 10일 채택)

Effect of Bentonite and Cement on Permeability and Compressive Strength of the Compacted Soil Liner

Soo-Moon Kim · Hee-Nam Youm* · Nam-Woong Lim

*Dept. of Environmental Engineering, Graduate School of Construction Engineering,
Chung-ang University
Institute of Ceramic Technology

ABSTRACT

This study discussed the optimal use of bentonite and cement for the compacted soil liner of landfill. Techniques employed in this optimization included permeability (by KSF 2322) and compressive strength (by KSF 2314). The optimal amount of these materials to the compacted soil liner was determined in accordance with a regulatory guideline of the government : that is, $k=1 \times 10^{-7}$ cm/sec. The testing soils were CL (Clayey Soil) and SM (Sandy Soil), which were classified according to USCS (Unified Soil Classify System).

The results showed that the optimal amounts of bentonite and cement to mix with the compacted CL soil liner were 5% of bentonite and 5% of cement : namely, $k=9.98 \times 10^{-8}$ cm/sec and $\sigma_{28}=12.75$ kg/cm². For the compacted SM soil liner, the optimal amount of bentonite was 15%, in conjunction with 5% of cement : namely, $k=9.86 \times 10^{-8}$ cm/sec and $\sigma_{28}=18.72$ kg/cm².

It was concluded that the compacted CL or SM soil liner, with containing the optimal amounts of bentonite and cement showed the acceptable permeability and the compressive strength, referring to a regulatory guideline of the government for construction of the landfill.

Key Words : Bentonite, Cement, Compacted Soil Liner, Landfill, Permeability,
Compressive Strength

요 약 문

폐기물 매립지 차수층에 국내 투수계수 기준치($k=1 \times 10^{-7}$ cm/sec)에 만족하는 벤토나이트와 시멘트의 적정첨가량을 알아보았다. 차수층의 모토는 토양 통일 분류법에 따라 CL 토양과 SM 토양을 사용하여 투수(KSF 2322)와 압축강도(KSF 2314)를 시험하였다.

실험결과, 국내 투수계수(k) 기준치에 만족하기 위해서는, CL 토양에는 벤토나이트 5%와 시멘트 5%를 첨가할 때, $k=9.98 \times 10^{-8}$ 이었고 σ_{28} 은 12.25 kg/cm^2 이었다. SM 토양에서는 벤토나이트 15%와 시멘트 5%를 첨가하였을 때, k 값은 9.86×10^{-7} cm/sec이었으며 σ_{28} 은 18.72 kg/cm^2 이었다.

따라서, 폐기물 매립지 차수층 건설에서, 적정량의 벤토나이트와 시멘트를 CL과 SM형 차수층 모토에 혼합할 때 국내 투수 기준치에 만족하였다.

주제어 : 벤토나이트, 시멘트, 차수층, 매립장, 투수계수, 압축강도

1. 서 론

고도 산업사회의 발전에 따라 다양한 형태로 발생하는 생활 및 산업폐기물 처리는 막대한 비용 소모와 사회적 환경 문제로 제기되고 있다. 미국 및 유럽 선진국 등에서는 이미 1960년대부터 지질과 환경특성에 적합한 매립장을 건설하여 폐기물을 안전하게 처리하고 있으나, 국내에서는 1980년대 말 이후부터 차수재를 설치하는 위생 매립 형태를 갖추기는 하였지만 기술적으로 차수재의 종류가 다양하지 못한 편이고 차수재 거의 대부분을 수입에 의존하고 있는 실정이다.

그러나 수입 차수재를 매립지에 사용하더라도 먼저 그 적용성을 검토하여 국내 실정에 맞게 상용하여야 함에도 불구하고 현재로서는 단지 차수재의 두께와 투수계수에 대해서만 규정하고 있고, 그 외의 품질기준이나 시험기준 등 관련 설치 기준이 미흡한 실정이다. 또한 매립지 지반 모토에 대한 지반공학 적 분류에 따른 차수재 두께와 투수계수도 불분명하다. 지반은 경성지반(암반)과 연성지반(흙지반)으로 분류하며, 대체로 물에 용해되지는 않으나 수중에서 연화되어 풀어지는 지반을 연성지반이라고 하고 그렇지 않은 지반을 경성지반이라고 한다.^{1,2)} 지반토양은 입자의 크기와 형상, 구성성분, 소성성 등 토질적 특성에 따라 이른바 토양 통일 분류 방법으로 분류할 수 있다.³⁾ 매립지의 차수제도 이와 같은

지반모토의 분류에 따라 각기 그 특성에 적합하도록 두께와 투수계수가 결정되어야 하나 획일적으로 적용하는데 매립장 차수재에 대하여 꾸준히 문제가 제기되어 왔다.

본 연구에서는 건설하고자 하는 매립장의 지반 모토들을 토양 형태로 나누어서 이들에 대한 토질 특성, 다짐 및 투수특성을 조사한 후 여기에 벤토나이트와 시멘트를 혼합하여 다짐, 투수, 강도 시험 등으로 지반공학 적 특성시험을 하고자 한다. 이들 혼합재의 압축강도가 5 kgf/cm^2 이상, 투수계수값(k)이 1×10^{-7} cm/sec 이하인 배합조건을 전제로 하는 매립장 건설시공회사에 기본적인 자료를 제공하는데 목적을 두고 세 차례에 걸쳐 보고하고자 한다. 즉, Soil 특징에 따라서 시멘트, 벤토나이트를 혼합하는 최적 조건의 차수재를 개발하고자 하는 것이다.

2. 실 험

2.1. 재료

2.1.1. 지반모토

본 실험에서 사용된 모토는 통일분류법으로 토질적 특성에서 가장 대표적인 점토질 토양(CL)과 모래질 토양(SM)을 보령시에서 채취하였다.

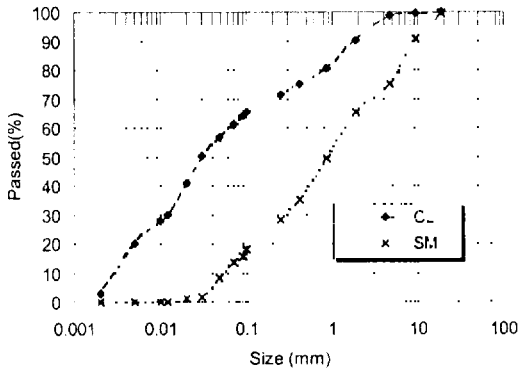


Fig. 1. Particle size distribution of soils.

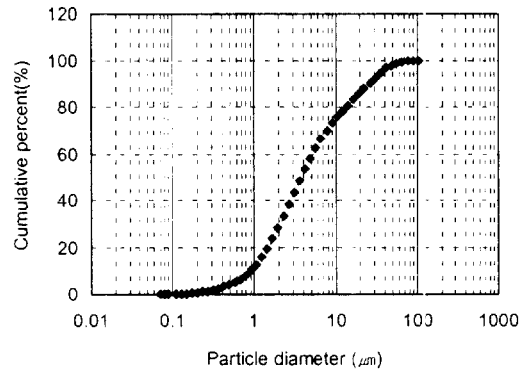


Fig. 2. Particle size distribution of bentonite.

Table 1. Physical properties of soils

USCS	LL (%)	PL (%)	PI (%)	Density (g/cm ³)	200 [#] passed (%)
CL	43.2	25.9	17.3	2.683	66.3
SM	N.P	N.P	N.P	2.641	15.1

(Note) LL : Liquid Limit
 PL : Plastic Limit, PI : Plastic Index

Table 2. Chemical analysis of bentonite

Com-position	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	Na ₂ O	CaO	H ₂ O	others
Content (%)	63.0	21.0	3.25	0.35	2.67	2.57	0.65	5.64	0.7

입도분포에서 CL의 경우 200번체를 통과한 세립토의 양이 66.3%이고, SM은 15.1%이었다. CL의 액성 한계는 43.2%이었고 SM은 N.P(None-Plasticity)로 나타났다. CL의 소성한계는 25.9%, SM은 역시 NP로 나타났다. SM은 전혀 점착력이 없었다. CL 비중은 2.683이었고 SM은 2.641로서 모래질 SM은 비교적 CL에 비하여 낮았다.

2.1.2. 벤토나이트

본 실험에 사용된 벤토나이트는 Na계로서 화학분석(Table 2)과 입도분석(Fig. 2)을 조사하였다.

2.1.3. 시멘트

본 실험에 사용한 시멘트는 S사 제품인 보통 포틀

Table 3. Physical properties of cement

Sp. Gravity	Blaine Fineness (cm ² /g)	Setting (min)		Stability (%)	Compressive Strength(kg/cm ²)		
		Initial	Last		3day	7day	28day
3.15	3.233	191	382	0.09	201	275	364

Table 4. Chemical analysis of cement

Com-position	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	L.O.	Free CaO	Total
Content (%)	61.1	21.2	5.21	2.78	4.02	2.42	1.88	0.60	99.60

랜드 시멘트로서, 이 시멘트의 물리적 성질 및 화학적 성분은 Table 3과 Table 4에 나타내었다.

2.2. 방법

2.2.1. 혼합재 구성비

차수제로서 혼합재(모토+벤토나이트+시멘트)는 3단계로 나누었다. 제1단계에서는 각 모토에 대한 입도 분포, 비중, 다짐 및 투수시험을 하였다. 제2단계에서는 각 모토에 대하여 벤토나이트를 5, 10, 15%씩 첨가시켜 다짐과 투수시험을 실시한 후 투수계수(k값) 규정치(1×10⁻⁷cm/sec 이하)에 만족하는 벤토나이트량을 알아보았다. 동시에 이에 대한 압축강도시험도 조사하였다. 3단계에서는 2단계에서 결정한 최적 벤토나이트량에 시멘트를 5, 10, 15%씩 첨가하여 다짐, 투수 및 압축강도시험을 하

였다. (Table 5 참조)

2.2.2. 토성시험

1) 비중

모토의 비중은 KSF 2308에 따라 시험하였다.

2) 입도 분석

조립토의 경우는 체분석을 실시하였고, 세립토의 경우에는 비중계 분석을 그리고 혼합토는 이 두 가지 방법을 병행하여 입도 분포를 구하였다.

3) 다짐

KSF 2312에 따라 "A" 방법으로 다짐시험을 하였다.

4) 투수계수

KSF 2322에 따라 변수두 투수 방법으로 투수계수(k)를 구하였다. 시료는 다짐시험에서 얻은 최대 건조밀도 95%의 습윤 함수비 상태에서 제작되었다.

5) 압축강도

공시체는 직경과 높이비를 1:2로 제작하여 습도 95%, 온도 23℃에서 7, 28일간 습윤양생시킨 후 KSF 2314에 따라 일축압축강도를 측정하였다.

Table 5. Mix design (unit : wt%)

Stage	NO.	Mix classification	Soils	Bentonite	Cement	
1	1	CL	100	-	-	
	2	CL-A-1	95	5	-	
	2	3	CL-A-2	90	10	-
		4	CL-A-3	85	15	-
3	5	CL-B-1	90	5	5	
	6	CL-B-2	85	5	10	
	7	CL-B-3	80	5	15	
1	8	SM	100	-	-	
	2	9	SM-A-1	95	5	-
		10	SM-A-2	90	10	-
3	11	SM-A-3	85	15	-	
	12	SM-B-1	80	15	5	
	13	SM-B-2	75	15	10	
	14	SM-B-3	70	15	15	

3. 결과 및 고찰

3.1. 모토

3.1.1. 다짐

모토에 대한 투수와 다짐특성은 Table 6과 다짐 곡선(Fig. 3)에 나타났다.

모토 CL의 최대건조밀도와 최적함수비가 각각 1.638(g/cm³)과 19.0(%)이었고 모토 SM은 각각 1.891(g/cm³)과 11.3(%)의 값을 나타냈다.

3.1.2. 투수계수

Table 6에서 각 모토에 대한 k 값을 나타낸 바와 같이 CL은 8.8×10⁻⁷(cm/sec)이었고 SM은 2.2×10⁻⁵(cm/sec)로 점토가 없는 사질성 흙은 그 k값이 매우 낮았다. 즉, 세립토양 (200[#]통과량)의 함량이 k 값에 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

Table 6. Permeability and compaction

	D.M.D (g/cm ³)	O.M.C (%)	Permeability(k) (cm/sec)
CL	1.638	19.0	8.81×10 ⁻⁷
SM	1.891	11.3	2.26×10 ⁻⁵

(Note) D.M.D : Dry Maximum Density
O.M.C : Optimum Moisture Content

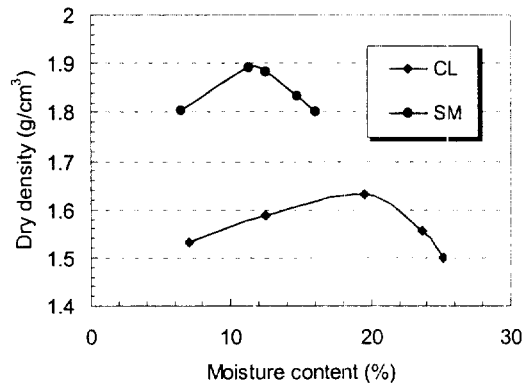


Fig. 3. Moisture-density relation for two soils.

3.2. 흙-벤토나이트 혼합차수재

3.2.1. 다짐

모토에 벤토나이트를 5, 10, 15%씩 첨가한 혼합 차수재의 다짐곡선(Fig. 4, 5)과 k 값은 Table 7에서 읽을 수 있다. 동시에 Fig. 6과 Fig. 7은 이에 대한 최적함수비와 최대건조밀도 변화를 나타내었다.

모토 CL에 벤토나이트를 5% 첨가하였을 경우 원래의 밀도값 1.638(g/cm³)에서 1.630(g/cm³)으로 감소하였고, 10% 첨가시에는 1.608(g/cm³)이었으며, 15% 첨가에서는 1.578(g/cm³)까지 감소하였다. 최적함수비는 모토에 벤토나이트 첨가량이 증가함에 따라 일정한 증가를 보여주고 있다. 따라서, 모토 CL에 벤토나이트를 첨가할수록 밀도 감소와 함수비 증가를 알 수 있다. 모토 SM에 벤토나이트 첨

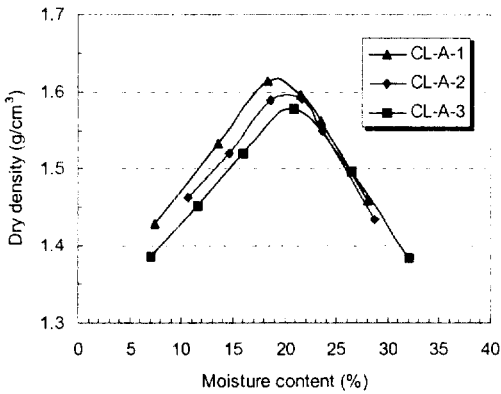


Fig. 4. Moisture-density relation for CL soil.

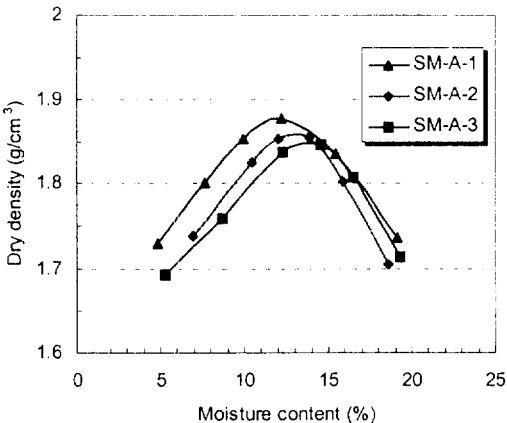


Fig. 5. Moisture-density relation for SM soil.

Table 7. Permeability and compressive strength of soils-bentonite mixtures

NO.	Mix classification	D.M.D (g/cm ³)	O.M.C (%)	k (cm/sec)	C.S (kgf/cm ²)
1	CL	1.638	19.0	7.81×10 ⁻⁷	-
2	CL-A-1	1.630	19.5	9.45×10 ⁻⁸	0.98
3	CL-A-2	1.608	20.4	5.00×10 ⁻⁸	-
4	CL-A-3	1.578	20.8	1.97×10 ⁻⁸	-
8	SM	1.891	11.3	2.26×10 ⁻⁶	-
9	SM-A-1	1.877	12.2	6.15×10 ⁻⁷	-
10	SM-A-2	1.862	12.8	1.46×10 ⁻⁷	-
11	SM-A-3	1.850	13.7	5.73×10 ⁻⁸	1.71

(Note) C.S : Compressive Strength

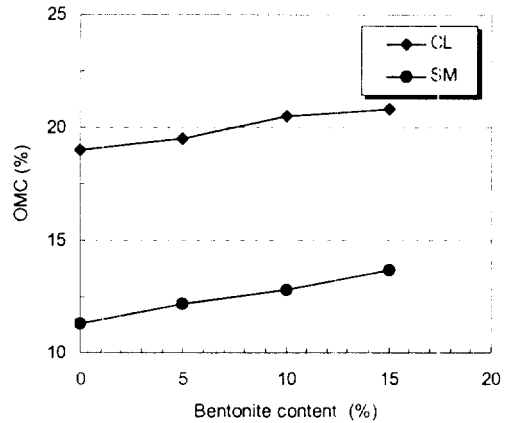


Fig. 6. Relation for O.M.C-bentonite content (added to soils).

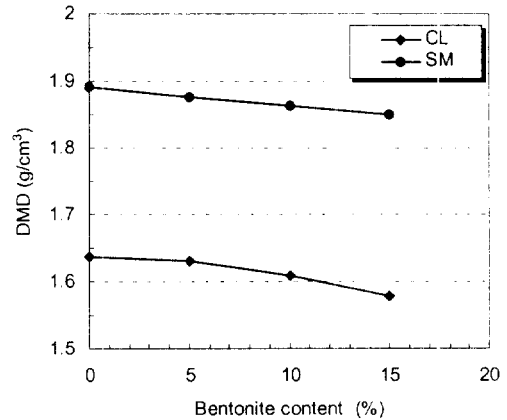


Fig. 7. Relation for D.M.D-bentonite content(added to soils).

가량 증가에 따른 최대건조밀도와 최적함수비의 변화도 모토 CL과 같이 최대건조밀도의 감소와 최적함수비의 증가를 나타냈다.(Table 7 참조).

이상의 결과 모토에 벤토나이트의 첨가량이 5%, 10%, 15%로 증가할수록 최대건조밀도는 감소하였고 최적함수비는 전체적으로 일정한 비율로 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 비중이 작은 벤토나이트의 첨가량 증가에 따른 혼합재의 상대적인 비중감소와 벤토나이트의 부피 팽창으로 인한 밀도감소의 원인으로 사료된다.^{3~5)} 또한 팽창력과 액성 한계가 높아 친수력이 큰 벤토나이트 첨가량의 증가에 따라 보유 되는 물의 양이 많아지기 때문인 것으로 보인다.^{4,5)}

3.2.2. 투수계수

Fig. 8은 모토에 벤토나이트 첨가량에 따른 k값의 변화곡선이다.

일반적으로 각 모토에 5%의 벤토나이트를 첨가하였을 때 모토 CL의 k값은 9.45×10^{-8} (cm/sec), SM은 6.15×10^{-7} (cm/sec)로서 각 모토의 k값보다 크게 감소하였다. 모토 CL의 경우, 초기 모토에 벤토나이트 5%를 첨가하였을 때 모토의 k 값보다 약 10배 정도로 감소하였다. 벤토나이트 10%일 때 5.00×10^{-8} (cm/sec)의 k 값과 첨가량이 15%일 때 k 값이 1.97×10^{-8} (cm/sec)로서 5% 첨가에서보다 약 2~5배 정도 각각 감소를 보여, 벤토나이트 첨가량이 증가될수록 k 값은 일정하게 감소하는 경향을 알 수 있다. 모토 SM(2.26×10^{-6} cm/sec)에 벤토나이트 5% 첨가시 6.15×10^{-7} cm/sec로서 모토에

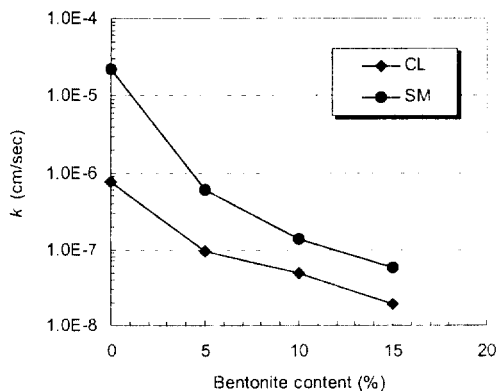


Fig. 8. Relation for k-bentonite content (added to soils).

비해 약 35배 감소되었다. 또한 10%와 15%를 첨가하면 1.46×10^{-7} (cm/sec)와 5.73×10^{-8} (cm/sec)으로 각각 감소하였다. 위와 같이 CL에서는 벤토나이트의 첨가량이 5%일 때 약 10배 가량의 k 값의 감소폭을 가졌지만 SM의 경우, CL에 비하여 그 감소폭이 매우 높았다. 이는 많은 양의 조립토 성분이 함유되어 있어 높은 k 값을 갖게 하였으나 벤토나이트의 미세한 입자의 높은 간극 충전 효과와 팽창성이 투수성을 크게 감소시켰다고 사료된다. 결과적으로 모토-벤토나이트 혼합차수재의 경우, k 값이 1×10^{-7} (cm/sec)를 만족하기 위한 벤토나이트 첨가량은 CL에는 5%, SM에는 15%로 나타났다.

3.2.3. 압축강도

모토-벤토나이트 혼합재 중에서 k 값이 1×10^{-7} cm/sec 이하의 값에 만족하는 차수재의 압축강도는 Table 7에서 볼 수 있다. 모토 CL의 경우, 벤토나이트 5% 첨가에서 압축강도는 0.98 (kgf/cm²)이었고 모토 SM의 경우엔 벤토나이트 15% 첨가하였을 때 1.71 (kgf/cm²)로서 비교적 높은 압축강도를 나타냈다. SM의 압축강도가 높은 이유는 많은 모래질이 함유되어 있고 여기에 벤토나이트가 15% 첨가됨으로서 사질토의 간극을 채우고 이들간의 높은 점착력 제공으로 생각된다. 동시에 모래질 자체도 높은 압축강도성질을 갖고 있기 때문으로 사료된다.

3.3. 흙-벤토나이트-시멘트 혼합차수재

3.3.1. 다짐

투수성과 강도특성을 동시에 만족시키는 혼합차수재 개발을 위하여 벤토나이트와 시멘트를 혼합한 차수재의 k 값과 압축강도를 살펴보았다. k 값이 1×10^{-7} (cm/sec) 이하에도 만족하는 벤토나이트 첨가량을 기준으로 하였고 여기에 시멘트를 5, 10, 15%로 첨가하면서 다짐, 투수 그리고 강도를 조사하였다(Table 8 참조).

각 모토-벤토나이트에 시멘트를 혼합한 차수재에 대한 다짐곡선(Fig. 9, 10), 최적함수비(Fig. 11)와 최대건조밀도(Fig. 12)의 변화를 나타내었다.

모토 CL에 벤토나이트 5%를 첨가하고 여기에 다

시 시멘트를 5% 첨가하였을 때 최대건조밀도는 1.630(g/cm³)에서 1.635(g/cm³)로 증가하였다. 시멘트 15% 첨가시에는 5% 첨가량에서 보다 0.018(g/cm³)이 증가한 1.653(g/cm³) 값을 나타냈다. 최적함수비의 경우, 모토-벤토나이트간의 혼합재는 19.5%이었으나 여기에 시멘트를 5% 첨가하였을 때는 19.4%로서 큰 변화를 보이지 않았다. 그러나 시멘트 15%를 첨가하였을 때는 20.3%로서 시멘트량이 증가하면 최적함수비도 증가함을 알 수 있다. 모토 SM-벤토나이트 혼합재에 시멘트 첨가량의 증가에 따라 최적함수비와 최대건조밀도 값의 증가를 보였는데, 최대건조밀도(1.899 g/cm³)와 최적함수

Table 8. Permeability and compressive strength of soils-bentonite mixtures

NO.	Mix Classification	D.M.D (g/cm ³)	O.M.C (%)	k (cm/sec)	C.S (kgf/cm ²)	
					7days	28days
2	CL-A-1	1.630	19.5	9.45×10 ⁻⁸	0.98	-
5	CL-B-1	1.635	19.4	9.98×10 ⁻⁸	9.52	12.25
6	CL-B-2	1.649	20.2	7.47×10 ⁻⁸	17.32	21.37
7	CL-B-3	1.653	20.3	3.18×10 ⁻⁸	27.74	38.76
11	SM-A-3	1.850	13.7	5.73×10 ⁻⁸	1.71	-
12	SM-B-1	1.877	13.5	9.86×10 ⁻⁸	14.96	18.72
13	SM-B-2	1.886	13.7	7.49×10 ⁻⁸	26.78	30.88
14	SM-B-3	1.899	13.8	5.21×10 ⁻⁸	34.43	42.36

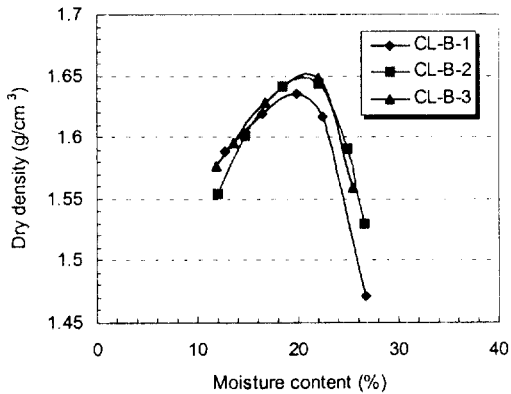


Fig. 9. Moisture content-dry density relation for the mixes of bentonite-cement-CL soil.

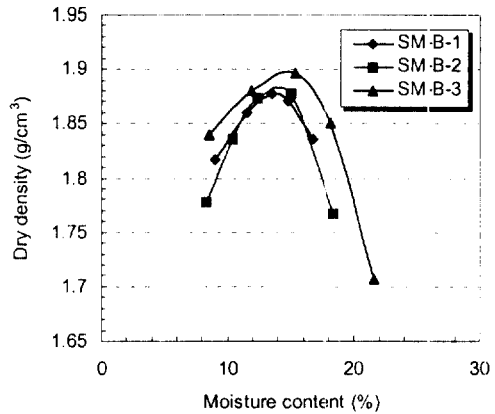


Fig. 10. Moisture content-dry density relation for the mixes of bentonite-cement-SM soil.

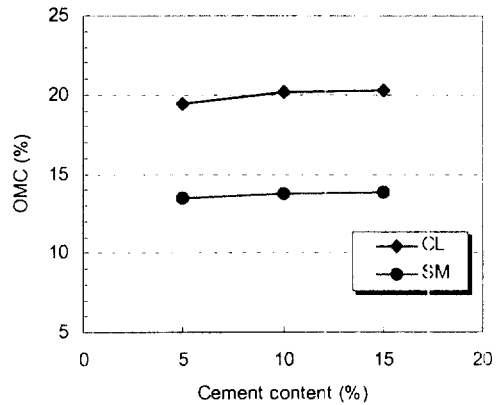


Fig. 11. Relation for O.M.C-cement content (added to mixes of soils and bentonite).

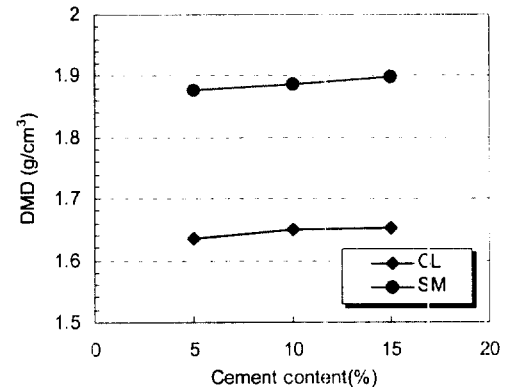


Fig. 12. Relation for D.M.D-cement content (added to the mixes of soils and bentonite).

비(13.8%)는 시멘트 15%를 첨가하였을 때였다. 일반적으로 시멘트 첨가량의 증가에 따라 일정하게 건조밀도와 최적함수비는 증가하는 경향을 보였다.

이는 모토-벤토나이트 혼합재에서와는 달리 상대적으로 비중이 큰 시멘트 입자가 흙 입자의 간극속으로 침투하여 밀도가 커짐으로써 최대건조밀도의 증가가 발생한 것으로 사료된다.^{6,7)}

또한 모토-벤토나이트-시멘트 혼합재의 최적함수비 변화도 모토에 벤토나이트만을 첨가하여 얻은 최적함수비 증가 범위보다 아주 적게 증가하였다. 이러한 결과는 시멘트를 첨가하더라도 그 혼합재의 최적 함수비의 증감에는 크게 영향을 미치지 않고 있음을 알 수 있다. 그러나, 대체적으로 각 모토-벤토나이트 혼합재에 다시 시멘트를 5% 첨가시켰을 때 최적 함수비는 감소하였다. 이는 시멘트의 첨가량이 증가하면 모토의 함유량이 상대적으로 감소되기 때문으로 사료된다.

3.3.2. 투수계수

Fig. 13은 각 모토에 적정량의 벤토나이트를 혼합한 차수재에 다시 시멘트를 혼합한 투수시험 결과이다. CL 모토에 5% 벤토나이트 첨가한 k값은 9.45×10^{-8} (cm/sec)이었다. 여기에 다시 시멘트를 5% 첨가하였을 때 k값은 9.98×10^{-8} (cm/sec)로서 약간의 증가를 보여주고 있다. 그러나 시멘트의 첨가량이 10%, 15%로 증가되면서 각각 7.47×10^{-8}

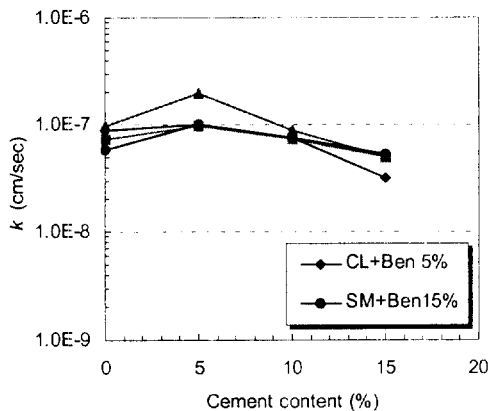


Fig. 13. Relation for k-Cement content(added to the mixes of soils and bentonite).

(cm/sec)과 3.18×10^{-8} (cm/sec)의 k값으로, 그 투수성이 점점 감소하였다. 이와 같은 현상은 시멘트가 벤토나이트의 팽창을 감소시키기 때문이다. 또한, 시멘트의 수화생성물이 흙-시멘트의 내부 조적을 치밀화시키고 미세한 시멘트의 입자들이 내부 간극을 잘 채워주기 때문으로 풀이된다.^{8,9)}

SM에 15% 벤토나이트를 첨가한 혼합재(5.73×10^{-8} cm/sec)에 다시 시멘트 5%를 첨가하였을 때 k값(9.86×10^{-8} cm/sec)은 증가하였다. 그러나, 시멘트 10% 첨가에서는 7.49×10^{-8} (cm/sec)의 k값을 나타냈고 15%첨가량에서는 5.21×10^{-8} (cm/sec)의 k값을 나타내어, 시멘트량이 증가하면 투수성도 감소됨을 알 수 있다.

이상의 모토-벤토나이트-시멘트 혼합재의 k값 변화에서 매립장 기준치인 1×10^{-7} (cm/sec)의 k값 이하에 만족하는 시멘트의 첨가량은 모토 CL에는 시멘트가 5% 이상이었고, 모토 SM에는 시멘트 5% 이상을 혼합하였을 때였다.

3.3.3. 압축강도

Fig. 14와 15는 모토-벤토나이트-시멘트 혼합차수재의 종류에 따른 7일과 28일 재령 압축강도의 결과이다. 또한 재령 기간에 따른 압축강도의 변화는 Fig. 16과 17에서 볼 수 있다. 일반적으로 모토-벤토나이트 혼합차수재에 시멘트를 첨가하면 강도

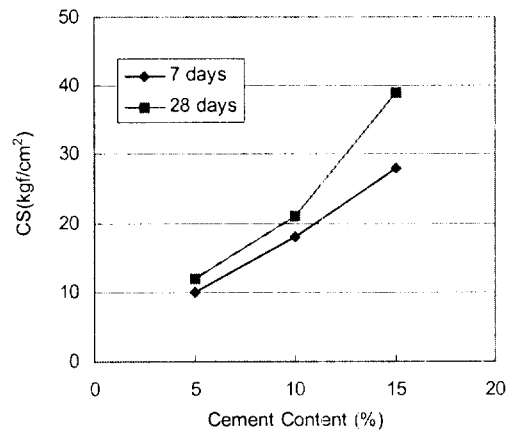


Fig. 14. Relation for C.S-cement content (added to the mixes of CL soil and bentonite).

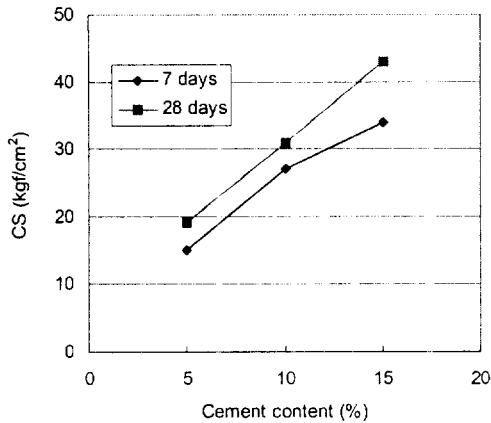


Fig. 15. Relation for C.S-cement content (added to the mixes of SM soil and bentonite).

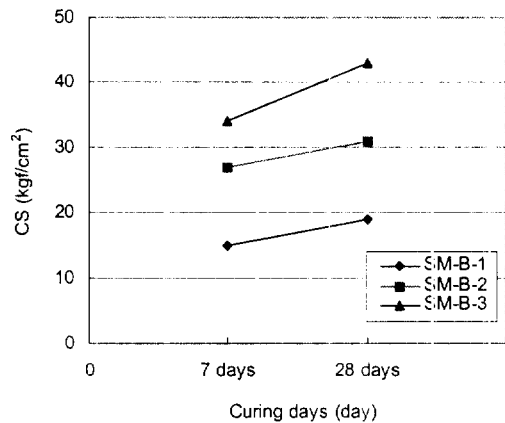


Fig. 17. Relation for C.S-curing days of SM soil-bentonite-cement mixtures.

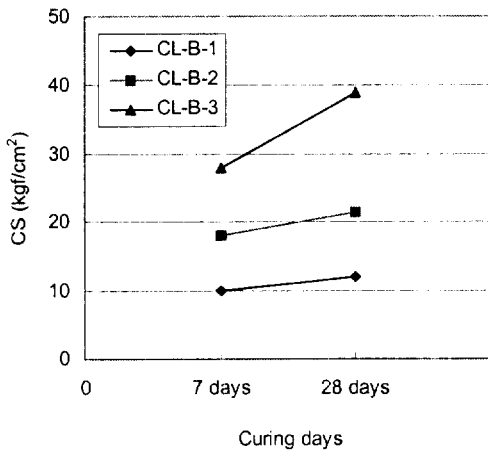


Fig. 16. Relation for C.S-curing days of CL soil-bentonite-cement mixtures.

는 급격히 증가하였다. 동시에 28일 재령기간의 압축강도가 7일 재령의 강도보다 약 1.2~1.3배 가량의 증가를 보여, 재령기간이 길수록 강도는 증가함을 알 수 있다.

모토 CL에 5%의 벤토나이트를 첨가한 압축강도는 0.98(kgf/cm²)이었으나 여기에 시멘트가 5% 첨가되었을 때 재령 7일 압축강도는 9.52(kgf/cm²), 10% 첨가에는 17.32(kgf/cm²), 15% 첨가에는 27.74(kgf/cm²)로서 약 10~27배 정도 증가하였다. 동시에 재령 7일에서 28일 기간동안 5% 첨가에는 9.52~12.25(kgf/cm²), 10% 첨가에서는 17.32~21.37(kgf/cm²), 15% 첨가에서는 27.74~38.76

(kgf/cm²) 범위 증가로 대개 20~50% 증가율을 보였다. 모토 SM에 시멘트를 5% 첨가하였을 때 7일 재령 압축강도는 14.96(kgf/cm²)이었고 28일에는 18.72(kgf/cm²)로서 재령기간 중 압축강도는 증가하였다. 시멘트 10% 첨가에서는 재령 7일과 28일 사이 26.78(kgf/cm²)에서 30.88(kgf/cm²)로 증가하였고 시멘트 15% 첨가에서도 같은 기간동안 34.43(kgf/cm²)에서 42.36(kgf/cm²)으로 증가하였다. SM의 경우 비교적 높은 강도 증가율을 보였다.

위에서와 같이 모토-벤토나이트 혼합재에 시멘트의 첨가는 강도증진에 큰 효과를 가져왔다. 이것은 시멘트가 모토-벤토나이트 혼합재에서 수화생성물(C-B-H 겔)이 생성되어 혼합재의 조직이 치밀화됨에 따라 강도 증진에 기여한 것으로 사료된다.^{8,9)}

4. 결 론

보령 지역 매립장 현장토를 모토로 하였을 때, 모토-벤토나이트와 모토-벤토나이트-시멘트 혼합재를 폐기물 매립장 차수재로서의 가능성 조사에 대한 결론은 다음과 같다.

- 1) 모토 CL의 최대건조밀도는 1.63g/cm³, 최적함수비는 19%이었고 k값은 8.81×10⁻⁷(cm/sec)이다. 또한 모토 SM의 최대건조밀도는 1.891(g/cm³), 최적함수비는 11.3% 이었고 이때 k값은 2.26×10⁻⁵(cm/sec)이었다.

매립장 k값 기준치 1×10^{-7} (cm/sec)의 이하를 만족하는 모토는 없었다.

- 2) 모토-벤토나이트 혼합재에서 벤토나이트의 첨가량이 증가할수록 최대건조밀도는 전체적으로 감소하였으나 최적함수비는 증가하는 경향을 보였다. 모토에 벤토나이트를 5% 첨가하였을 때 k값은 모토만의 k값보다 감소하였다. 매립장 규정치(1×10^{-7} cm/sec) 이하에 만족하는 k값을 갖기 위한 각 모토에 벤토나이트 첨가량은 CL은 5%이었고 SM은 15%이었다. 이때의 CL의 k값은 9.54×10^{-8} (cm/sec)이고, SM은 5.73×10^{-8} (cm/sec)이었다. 이때, 일축압축강도(재령 7일)는 CL에서 0.98(kgf/cm²)이고 SM에서는 1.71(kgf/cm²)이었다.
- 3) 모토-벤토나이트-시멘트 혼합재에 있어서 최대건조밀도와 최적함수비는 CL과 SM 모두 시멘트 15% 첨가일 때였다. 이때 CL의 최대건조밀도는 1.653(g/cm³), 최적함수비는 20.3%이었다. SM은 1.899(g/cm³) 최대건조밀도와 13.8% 최적함수비를 보였다. 매립장 기준치 이하의 k값을 보여주는 시멘트 첨가량은 모든 모토에 5%이며 이때 CL의 k값은 9.98×10^{-8} (cm/sec), SM의 k값은 9.86×10^{-8} (cm/sec)이었다. 시멘트 5% 첨가하였을 때 재령 7일과 28일 사이에서 CL은 9.52~12.25 kgf/cm², SM은 14.96~18.72 kgf/cm²로 각각 증가하였다.
- 4) 본 시험 조건하에서는 매립장 차수재 기준치에 만족하기 위한 혼합차수재(모토-벤토나이트-시멘트) 구성의 적정 비율은, CL형 모토일 때 벤토나이트 5%와 시멘트 5%를 첨가할 때이었다. 또한 SM형 모토일 경우에는 벤토나이트 15%와 시멘트 5%를 첨가할 때이었다.

참고 문헌

1. 장연수, 정하익, 손준익, "폐기물 매립장과 지반공학," 한국지반공학회지, **8**(2), 99~111(1992).
2. 정하익, 장연수, "폐기물 매립장의 차폐재와 침출 화학성분과의 상호작용분석," 한국지반공학회지, **9**(3), 49~60(1993).
3. 이상덕, 토질시험, 도서출판 새론(1997).
4. 류택항, 모래-벤토나이트 혼합물의 지반공학적 특성, 경북대학교 석사학위논문(1996).
5. Damour, A. A. and Salvetet, D., "Reduction in Strength of Montmcrillonite Soil with Increase in Density", *Anr. Chem. Phys., Series 4*, **21**, 376~383(1947).
6. Wagner, A. A., "The Use of the Unified Soil Classification System by the Bureau of Reclamation," *Proc. 4th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, London(1957).
7. Usmen, M. A., Bowders, J. J., and Gidley, J. S., "Low Permeability Liners Incorporation of Fly Ash," *Disposal and Utilization of Electric Utility Waste, ASCE*, **83** SM 4 Paper 1520, May(1988).
8. Ingles, O. G and Metcalf, J. B., Soil Stabilization, Butterworths, Sydney, pp. 119~120(1972).
9. Horzog, A., "The structure of clay-cement, colloquium on mechanisms soil stabilization," Div. of Soil Mechanics, CSIFO, Melbourne, April(1964).