

폐기물 매립장 침출수 방지용 차수벽 설치공법

Construction Method of Landfill liner for Leachate Preventing from Waste Sites

도덕현* 윤춘경** 공길용***

Abstract

The applicability of marine clay and banking material as landfill liner and supporting layer was examined, where additives (cement, lime, MgO, bentonite and ESCA) were mixed with these soils. The mixtures were tested for the unconfined compressive strength, bending strength, permeability, and better results than existing solidifying agents were obtained. The freezing-thawing test is under way.

I. 서론

최근 각종 폐기물 매립장에서는 침출수가 누출되어 주변의 환경을 오염시키는 문제가 크게 대두되고 있다.

폐기물의 침출수 방지를 위한 최근의 공법으로는 투수계수가 $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 이하의 점토를 필요한 두께로 다지거나 투수계수가 이보다 클 경우는 벤토나이트를 혼합하여 다짐하고 그 위에 차수막(PE 폴리에틸렌막)을 피복하는 방법으로 사용하여 왔다. 그러나 시공중에 차수벽이 파열되어 침출수가 누출되는 경우가 있는가 하면 쓰레기 매립후 차수용 점성토 지반의 지지력이나 수평저력이 부족하여 균열이 발생하고 그 틈은 누출경로를 이루는 등의 문제가 제기되어

* 건국대학교 농공학과 교수

** 건국대학교 농공학과 조교수

*** 건국대학교 농공학과 박사과정

왔다.

따라서 본 연구는 첫째 연약지반상에 쓰레기 매립장을 건설하기 위하여 그림 1 a) 와 같이 시멘트, 석회, 플라이애쉬 또는 폐주물사, 벤토나이트, 산화마그네슘, 석고 및 고화제(ESCA)를 적량 혼합(이하 차수 및 증강제라 칭함)한 혼합토로 차수막을 시공하여 투수계수가 허용범위내에 들도록 하고 필요한 지지력을 확보하는 공법에 대하여 검토하고자 한다.

표층 (차수막)의 기능 → 동결방지, 충격방지, 산성 및 유해물질로 부터 표층손상 억제

A 층	30cm 차수막층 $q_u=30kg/cm^2$ $k=1 \times 10^{-7}cm/sec$ 이하 굵어서 일체화 시공
B 층	50cm 차수막 보강층 $q_u=8kg/cm^2$ $k=1 \times 10^{-7}cm/sec$ 이하 또는 휨강도 $1kg/cm^2$ B층은 2 층으로 시공

굵어서 본바닥층과 일체화 시공

기 초 지 반

a) 연약지반

50 cm	$q_u=30kg/cm^2$ $k=1 \times 10^{-7}cm/sec$ 이하
2층으로 시공	원지반과 일체화 시킴

기 초 지 반

b) 보통지반

그 립 1 구상한 쓰레기 매립용 차수벽의 두께

이 때 연약지반의 심도가 깊고 지지력이 약하여 건설된 쓰레기 매립장을 지지할 수 없을 때는 토목적으로 원지반(연약지반)을 처리한 후에 시공하여야 한다.

본 공법의 특징은 폐주물사나 플라이애쉬 등 산업부산물을 재이용한다는 장점이 있다.

II. 사용재료 및 시험방법

1. 실내시험 배합

- 1) 적량의 고화제와 관련 재료의 배합에 따른 일축압축강도, 휨강도, 동결융해, 투수계수 시험을 위한 배합비는 표 1과 같다.

표 1. 고회제의 배합비

시험종류	혼화제종류	흙 시료 (x)	혼화제 (x)		시멘트 (kg/m ³)	벤토나 이트 (kg/m ³)	MgO (kg/m ³)	석 고 (kg/m ³)	생석회 (kg/m ³)	고회제 (kg/m ³)	비 고
			페주 들사	플라이 애쉬							
산토	○ CASE 1	100	0	0	120	40	1	0.5	0	1	
	○ CASE 2	100	0	0	70	0	0	0	30	1	
	CASE 3	50	50	0	120	40	1	0.5	0	1	차수막A
	CASE 4	50	50	0	70	0	0	0	30	1	차수막B 보강층
	CASE 5	50	0	50	120	40	1	0.5	0	1	차수막A
	CASE 6	50	0	50	70	0	0	0	30	1	차수막B 보강층
해성 토	○ CASE 7	100	0	0	120	40	1	0.5	0	1	
	○ CASE 8	100	0	0	70	0	0	0	30	1	
	CASE 9	50	50	0	120	40	1	0.5	0	1	차수막A
	CASE 10	50	50	0	70	0	0	0	30	1	차수막B 보강층
	CASE 11	50	0	50	120	40	1	0.5	0	1	차수막A
	CASE 12	50	0	50	70	0	0	0	30	1	차수막B 보강층

(주) 100 : 시료 100% 120, 70: 시멘트 120 kg 및 70kg

○ 표시는 비교목적으로 시험한 것이며 시공에 이용되는 것이 아님.

2. 사용재료

가. 시료토의 특성

시료토는 연약점토와 산토를 사용하였으며 이의 물리적 성질은 다음과 같고 입도분포곡선은 그림 2와 같다.

시료명 :

	NATURE	MC (%)	LL	PI	Gs	USCS	
산토	Clayey Sand	19.7	32.9	10.2	2.65	SC	
해성토	Organic	51.5	45	22.2	2.63	OL	
	노건조후의액성한계 / 자연상태액성한계		32.8	9.6		32.8/45	0.72 < 0.75

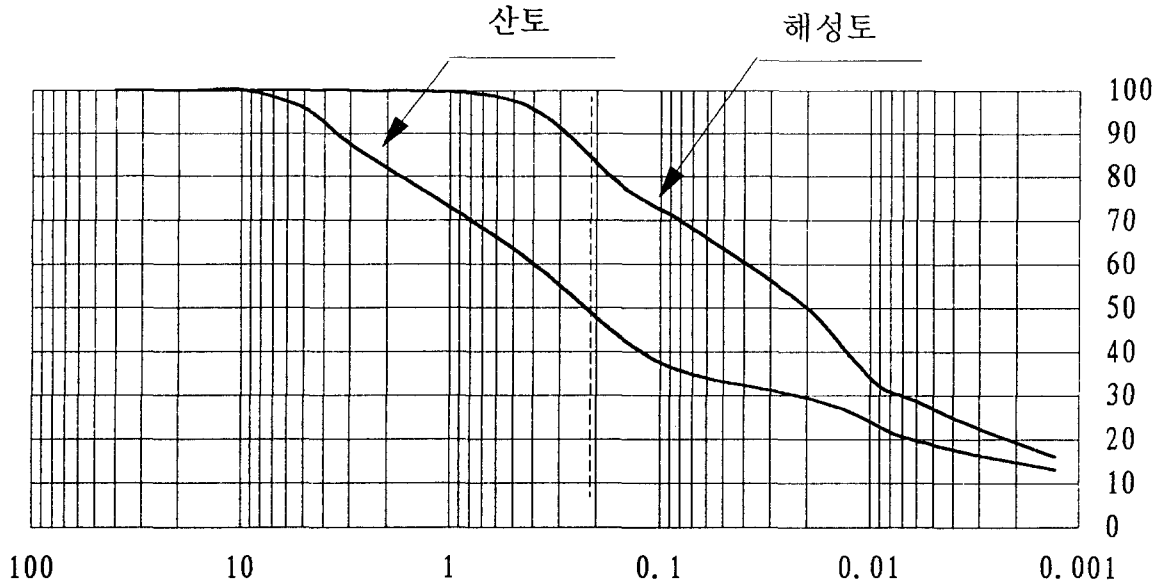


그림 2 사용시료의 입도분포곡선

나. 고화제의 특성

고화제는 특허로 보장되어 성분이 정확히 알려져 있지는 않으나 대략 알려진 사항은 표 2와 같다.

표 2 ESCA(고화제)의 화학성분

탄소족	질소족	호우탄소족 (Boron 탄소족)	철족	기타
27%	25%	21%	17%	10%

3. 시험방법

가. 일축압축강도 및 휨강도시험

일축압축강도시험은 KS F 2328에 준하지 않고, 해성토의 경우는 표 1의 배합비로 시료를 조제하여 직경 3.8cm, 높이 7.6cm의 공시체를 제작하였으며 이때의 $\gamma_t = 1.70t/m^3$ 내외, 흙의 함수비 70%로 조정하여 시험하였다. 산토의 경우는 $\gamma_t = 1.80t/m^3$ 내외, 폐주물사의 경우 흙의 함수비 30%내외로 조정하였으며(실제 시공시에는 다짐을 하므로 $\gamma_d = 1.70t/m^3$ 이상 됨), 이상의 공시체를 표준양생(23℃, 상대습도 95% 이상)하여 재령 7, 14, 28일에 일축압축강도 및 휨강도시험을 하였다.

시료의 혼합방법은 흙시료에 폐주물사 또는 플라이애쉬, 시멘트, 벤토나이트, MgO, 석고, 석회 등을 먼저 혼합한 후 필요 고화제(ESCA) 수용액으로 전체 시료의 함수비를 시공성에 맞도록 조정하여 충분히 혼합한 후 필요량의 공시체를 제작하였다. 단 산토와 해성토 모두 공시체 제작시에 다짐은 하지 않았다. 휨강도는 KS F 2325에 준하여 5×5×25cm의 시편을 3등분점(지점간

격 7cm)에 의한 방법으로 시험하였다.

플라이애쉬 혼합 및 산토만으로 공시체를 제작한 경우는 흙의 자연함수비는 30%내외로 하였다.

나. 투수성시험

투수시험 공시체의 배합비는 표 1과 같으며 재령 14일 후부터 차수막과 차수막보강층 그리고 이들 두종의 비율(3:5)로 축소된 시편에 대하여 삼축압축시험기를 이용하여 투수시험을 하였다. 이 때 시험방법은 축압을 유효응력보다 낮게하였으며 시험 전에 시편의 완전포화를 위하여 7일 이상 수침시켰다.

투수시험은 삼축시험기를 이용하여 Remy(1973)가 제안한 방법으로 실시하였다. 즉 물의 흐름이 너무나 작아서 일반적인 방법으로는 만족스러운 측정이 안될때 이 방법을 사용하고 있다. 압력변환기의 특성을 이용하거나, 수은주 측정기를 이용하여 측정할수 있다. 본 실험에서는 압력변환기의 특성을 이용하는 방법을 이용하였다.

① 기계장치

시료 밑부분에 간극수압변환기가 연결된 시료를 삼축셀안에 설치한다(그림 3). 간극압계는 공기가 완전히 소산하고 밸브, 연결부, 튜브가 새는 곳이 있는지 반드시 확인한다. 압력을 가하고 밸브를 잠근후 몇시간 지난뒤에도 압력변환기의 값이 변해서는 안된다.

② 측정방법

- a. 삼축압축실험을 할때처럼 포화를 시킨다. 대상시편은 ESCA로 고화처리된 것으로, 포화를 시키기 위하여 7일간 수침시켰기 때문에 이 과정은 생략했다.
- b. 아랫부분의 압력이 가한 백압(일반적으로 100kPa)에 가까이 올 때까지 백압을 가한다.
- c. 평형이 이루어 지면 아랫부분의 압력을 투수성에 따라 압력을 증가시킨다. 그리고 그림 3에서 밸브 a_1 을 잠그고, 간극수압변화를 적당한 시간간격을 두고 측정한다. 압력변화와 시간관계의 그래프는 그림 4에 나타나있다.

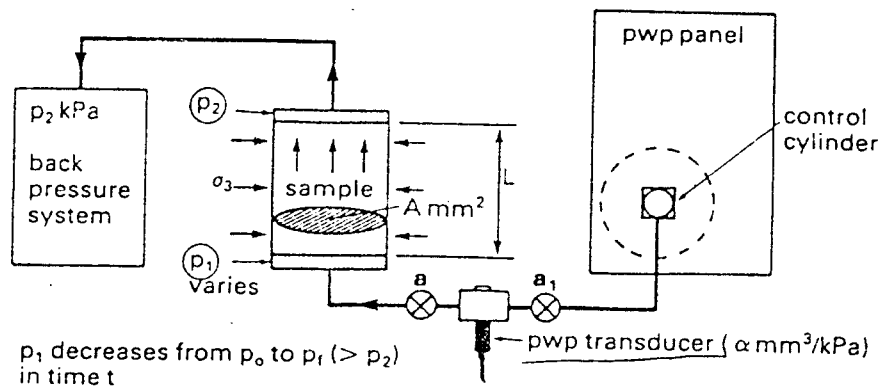


그림 3 압력변환을 이용한 매우 낮은 투수계수 측정

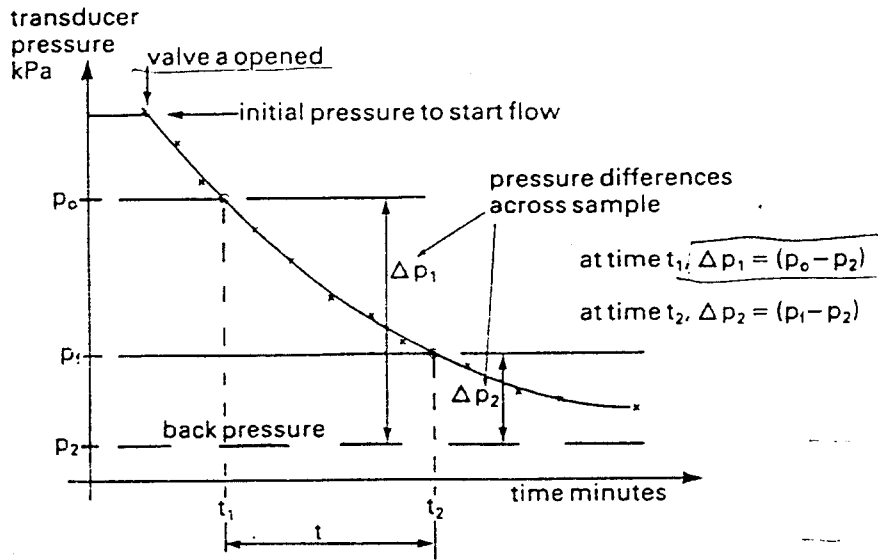


그림 4 시간에 대한 간극압 변화 그래프

③ 투수계수산정

t (min)시간동안 압력은 p_0 에서 p_f (kPa)로 떨어진다. 시료속으로 흐른 유량의 체적은 압력변환기의 변형특성을 계산할 수 있다. 이것은 kPa 당 mm^3 ($\alpha \text{ mm}^3/\text{kPa}$)으로 나타낼 수 있다. 이것은 단면적 a^2 을 갖는 변수두에 있는 유리관과 같은 것이다. 여기서 $a = \alpha/102 \text{ mm}^2$ 이다. 시료의 투수계수는 다음과 같이 산정한다.

$$k = \left[3.84 \cdot \frac{\alpha \cdot L}{A \cdot t} \log_{10} \left(\frac{p_0 - p_2}{p_f - p_2} \right) \right] \times 10^{-5} \text{ (m/s)} \quad (1)$$

여기에 $a = \alpha/102 \text{ mm}^3$ 을 적용하면,

$$k = \left[3.84 \cdot \frac{\alpha \cdot L}{102 \cdot A \cdot t} \log_{10} \left(\frac{p_0 - p_2}{p_f - p_2} \right) \right] \times 10^{-5} \text{ (m/s)} \quad (2)$$

여기서 α (본 실험실의 변환기)값이 10^{-2} 이고, 상수를 계산하면 다음과 같다.

$$k = \left[3.8 \cdot \frac{L}{A \cdot t} \log_{10} \left(\frac{p_0 - p_2}{p_f - p_2} \right) \right] \times 10^{-9} \text{ (m/s)} \quad (3)$$

여기서, k : 투수계수 (m/sec)

L : 시편의 길이 (mm)

A : 시편의단면적(mm^2)

t : 경과시간(min)

P_0 : 시간을 체크한 때의 압력 (kPa)

P_f : t 시간 경과후의 압력(kPa)

P_2 : 백압력(kPa)

다. 동결융해 시험

동결융해시험은 일축압축강도 30 kg/cm^2 이상이면 일반적으로 안전하므로 동결에 의한 내구성 자체에 대한 시험은 생략하고 동결을 받은 후의 공시체의 상태, 즉, 균열 팽창성 등의 발생 여부를 판단하기 위하여 KS F 2332에 준하지 않고 다음 시험방법으로 하였다. 단, 동결융해시험 공시체의 제작은 해성토, 산토 모두 표 1에 나타낸 배합비로 하였으며 필요하다고 판단되는 고화도에 대해서 재령 28일 부터 내구성 시험을 하였다.

① 시험 및 측정

차수막층의 동결융해 작용에 의한 성능저하 및 내구성을 측정하기 위한 시험은 고화도 시편에 간극수의 빙점이하의 온도, 빙점이상의 온도를 주기적으로 가하는 실험으로 KS F 3456(급속 동결융해에 대한 콘크리트의 저항 시험법) 및 ASTM C666 (Resistance of concrete to rapid freezing and thawing)에 표준시험 방법으로 하였다. 구체적인 시험은 두가지 과정으로 수행할 수 있는데 시험방법 A는 수중급속 동결융해시험, 시험방법 B는 공기중에서 급속 동결하여 수중에서 융해하는 방법이며 본 시험에서는 전자의 시험방법을 택하였다. 두방법 모두 특별히 규정된 시험절차에 의해 차수막층의 동결융해 저항성을 결정하는데 그 목적이 있다. 일반적으로 수중급속 동결융해 시험법이 공기중 급속 동결융해 시험법보다 더 큰 성능저하를 유발하는 것으로 알려져 있다. 본 실험의 경우 수중 급속 동결융해 실험규준은 고화도 차수층 시편이 충분히 포화되어 있지 않고(즉 임계포화도보다 낮은 포화도를 동결융해손상을 받지 않을 정도), 동결융해에 대한 충분한 저항성을 가진 골재가 사용되어 있을 경우, 심각한 동결융해에 의한 손상이 일어나지 않는다는 가정이 내포되어 있다.

실험에 필요한 장치 및 기구로서는 우선시편이 규정된 동결융해 주기, 즉 냉각과 가열을 받을 수 있는 장치가 부착된 실험조가 있어야 하는데, 이는 동결과 융해가 자동조절 반복되어야 한다. 시험방법 A가 사용될 경우, 시편은 항상 1mm이상 3 mm이하 두께의 물에 덮혀 있어야 한다. 그리고, 온도측정장치(thermocouple)와 동탄성계수 측정장치가 있어야 한다.

KS, ASTM, JIS, BS의 각 규준에서 제안된 시험법의 최저, 최고 온도는 KS, ASTM의 경우 각각 $-17.8\pm 1.7\text{ }^\circ\text{C}$, $4.4\pm 1.7\text{ }^\circ\text{C}$ 이고 BS경우에는 $-15\pm 3\text{ }^\circ\text{C}$, $16.6\pm 6\text{ }^\circ\text{C}$ 이고, JIS는 $-18\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$, $5\pm 2\text{ }^\circ\text{C}$ 이고, 공시체의 크기는 KS F 567, ASTM에서는 76~127mm의 높이와 폭에 356~406mm의 길이를 갖는 각주형, BS에서는 45mm의 높이와 폭에 225~305mm의 길이를 갖는 각주형, JIS에서는 100mm의 정방형 각주를 사용하여 굵은 골재치수의 3배 이상을 요구하고 있다. 본 실

험의 동결융해시험은 KS F와 ASTM의 규정을 기준으로 행하였으며 시편의 길이는 KS F 규정의 1/4로 하였다.

동결융해시험 이후의 손상을 일정한 주기로 동탄성 계수를 측정하여 판단하는데 동탄성계수는 초음파속도법, 공명진동수측정법으로 판정하고, 본 실험에서는 초음파속도법에 의하여 동탄성계수를 산정하였다.

시험은 300주기를 원칙으로 수행하나 상대동탄성계수가 60%이하인 경우 시험을 종료한다.

초음파 속도법에 의한 동탄성계수 측정은 KS F, ASTM 597에 의하여 구하고, 동탄성계수와 압축강도와의 관계식을 이용하여 압축강도(σ_p)를 추정할 수 있다.

그림 5는 초음파속도 측정장치의 블록 다이어그램을 나타낸 것이다.

초음파 측정방법은 다음과 같은 순서에 의하여 행한다.

- 1) 먼저 교정용(calibration) 기준기를 이용하여 측정장치의 교정을 한다.
- 2) 발진자를 그리이스 등으로 차수층 시편 표면에 밀착시켜 초음파의 펄스를 공시체에 발사하고 이것을 상대면에 밀착시킨 수신자에 의해 수신한다.
- 3) 초음파 펄스의 발신시와 수신시의 시간적 차이를 측정하여 전파거리를 전파시간으로 나누어 차수막층 중의 파속을 구한다. 발진자 및 수신자에는 일반적으로 탄탄산바륨, 수정, 로센염 등이 이용되고, 차수층 시편의 경우는 진동수 20~200kHz 정도의 것이 잘 이용된다.

초음파 속도와 동탄성계수는 다음식과 같다.

$$V_t = \frac{l}{t} \quad (4)$$

$$E_p = \frac{V_t^2 \cdot \rho \cdot (1+v_D) \cdot (1-2v_D)}{g \cdot (1-v_D)} \quad (5)$$

V_t : 초음파의 전달속도(cm/sec)
 l : 전파길이(cm)
 t : 전파시간(cm)
 E_p : 동탄성 계수(kgf/cm²)
 ρ : 차수막층시편의 밀도(kg/cm³)
 g : 중력가속도(cm/sec²)
 v_D : 동 포아송비(통상0.2)

② 내구성 평가

동결융해 주기에 노출된 차수막층 시편을 일정한 주기간격으로(통상 초기를 10주기, 이후 20~30주기)동탄성계수를 측정하여 성능저하를 판단한다. 측정주기마다 초음파속도법에 따라 동탄성계수를 측정하고 다음식에 의해 내구성 지수를 산정하고 아울러 내구성지수가 60%이하일 때의 질량감소율을 측정한다.

$$\text{내구성지수} : DF = \frac{P \times N}{M} \quad (6)$$

$$\text{질량감소율} : W_n = \frac{W_b - W_a}{W_0} \times 100 \quad (7)$$

여기서, P_a, P : 동결응해 n 또는 N 회 반복에서 상대동탄성계수(%)

W_0, W_n : 동결응해 개시직전 또는 n 회 반복후의 공시체의 질량(%)

N : 상대동탄성계수가 60%가 되는 반복회수 또는 300회중 적은것

M : 원칙적으로 300회

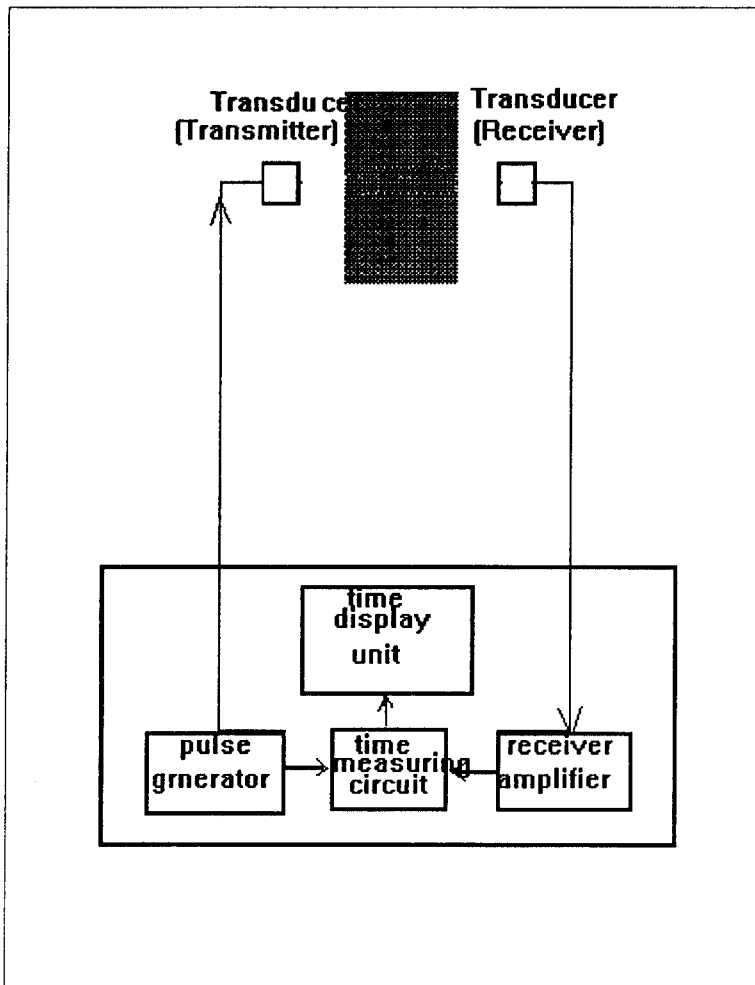


그림 5 초음파 속도 측정장치의 블록 다이어그램

이상은 PUNDIT에 의한 평가방법이며 ERUDITE에 의하여 측정된 경우(그림 6)는 다음 식으로 동탄성계수를 구하였다.

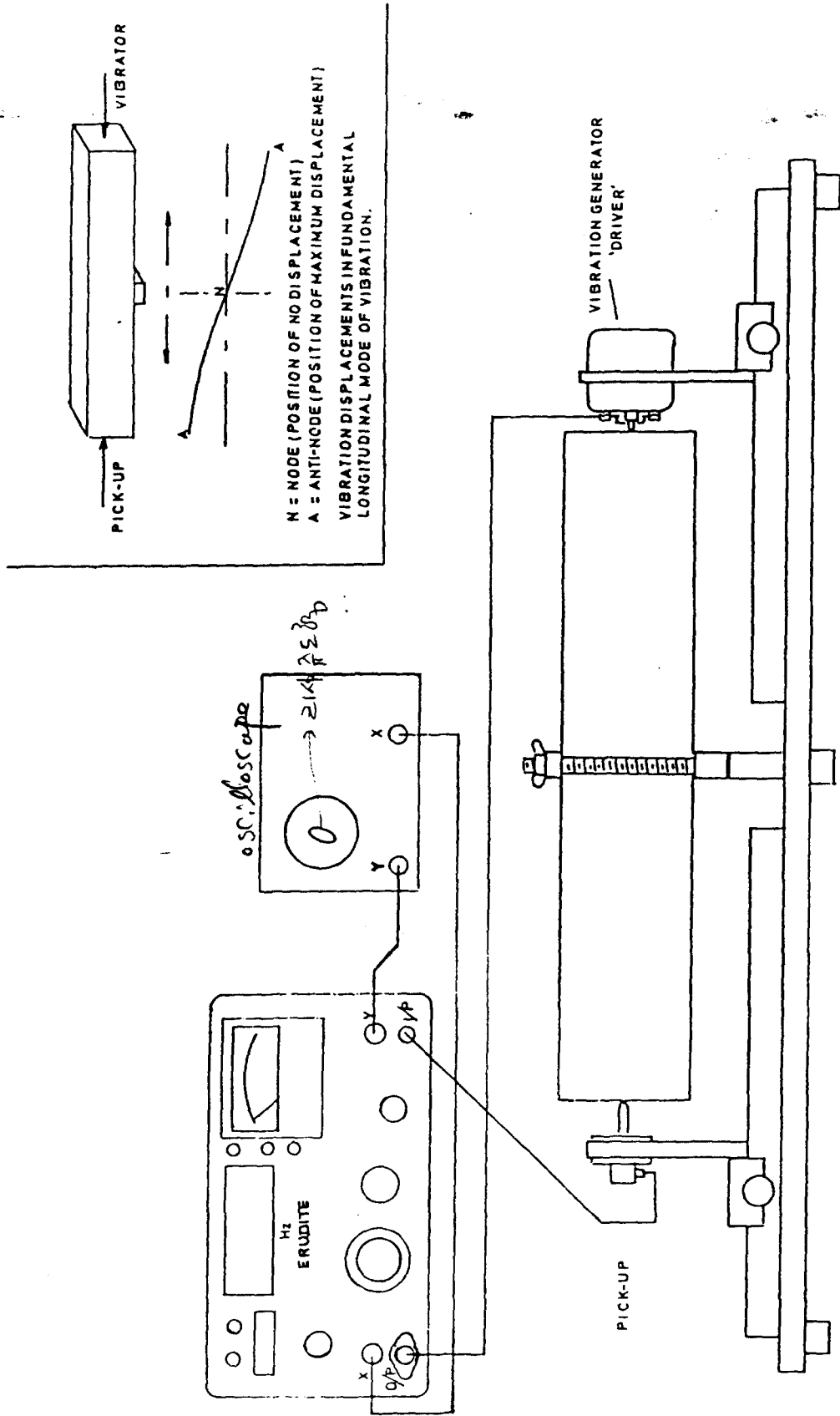


그림 6. 'ERUDITE' SHOWN WITH ELECTRO-DYNAMIC TEST BENCH WITH CONTACT TYPE VIBRATION GENERATOR AND PIEZO-ELECTRIC ACCELEROMETER CONTACT PICK-UP. ARRANGED FOR LONGITUDINAL RESONANCE TEST OF A 500 x 100 x 100 mm CONCRETE PRISM.

$$E_D = 4n^2 I^2 \rho 10^{-12} \text{ MN/m}^2 \quad (8)$$

여기서 I : 시편의 길이(mm)

n : 연직진동고유주파수(Hz)

ρ : 밀도(kg/m^3)

III. 시험결과

1. 일축압축강도, 휨강도, 투수계수

이상의 일축압축강도, 휨강도 및 투수계수를 시험결과를 요약하면 표 3과 같으며, 그림 7은 양생기간과 일축압축강도와의 관계를 나타낸 것이다.

다만 동결융해 시험결과치는 현재 급속 내구성시험(동결 융해)중이므로 추후 첨부예정으로서 있다.

표 3 각종 시험결과

Case	함목	배합시 함수비 (%)	강도 측정시 함수비	단위중량 (t/m^3)	건조 단위 중량	일축압축강도			휨강도	투수계수 (cm/sec)	비고
						7일	14일	28일			
①		31.98	31.98	1.833	1.388	14.74	18.29	23.02	8.23	1.47×10^{-11}	○표시는 폐주물사 와 flyash를 혼합하지 않은 것임
②		35.09	33.90	1.886	1.409	6.62	6.92	8.20	2.13	4.84×10^{-10}	
3		32.12	31.68	1.769	1.343	13.55	14.59	16.98	6.80	1.71×10^{-10}	
4		31.65	31.33	1.801	1.372	9.26	10.53	11.59	2.40	-	
5		29.90	28.87	1.738	1.368	13.85	21.67	22.85	10.80	1.91×10^{-11}	
6		34.78	33.05	1.743	1.310	8.87	10.07	9.65	3.41	7.53×10^{-11}	
⑦		56.90	53.72	1.654	1.081	5.49	7.60	9.84	4.20	2.08×10^{-11}	
⑧		62.29	60.72	1.627	1.012	1.31	1.92	2.48	1.06	8.82×10^{-11}	
9		42.99	37.66	1.717	1.248	12.17	19.15	22.36	6.12	1.32×10^{-11}	
10		39.57	37.12	1.785	1.304	6.14	7.59	9.13	2.57	3.59×10^{-10}	
11		38.70	37.84	1.711	1.241	21.25	42.02	50.61	12.46	2.36×10^{-11}	
12		43.14	41.76	1.659	1.170	5.45	7.78	9.95	3.86	1×10^{-10}	

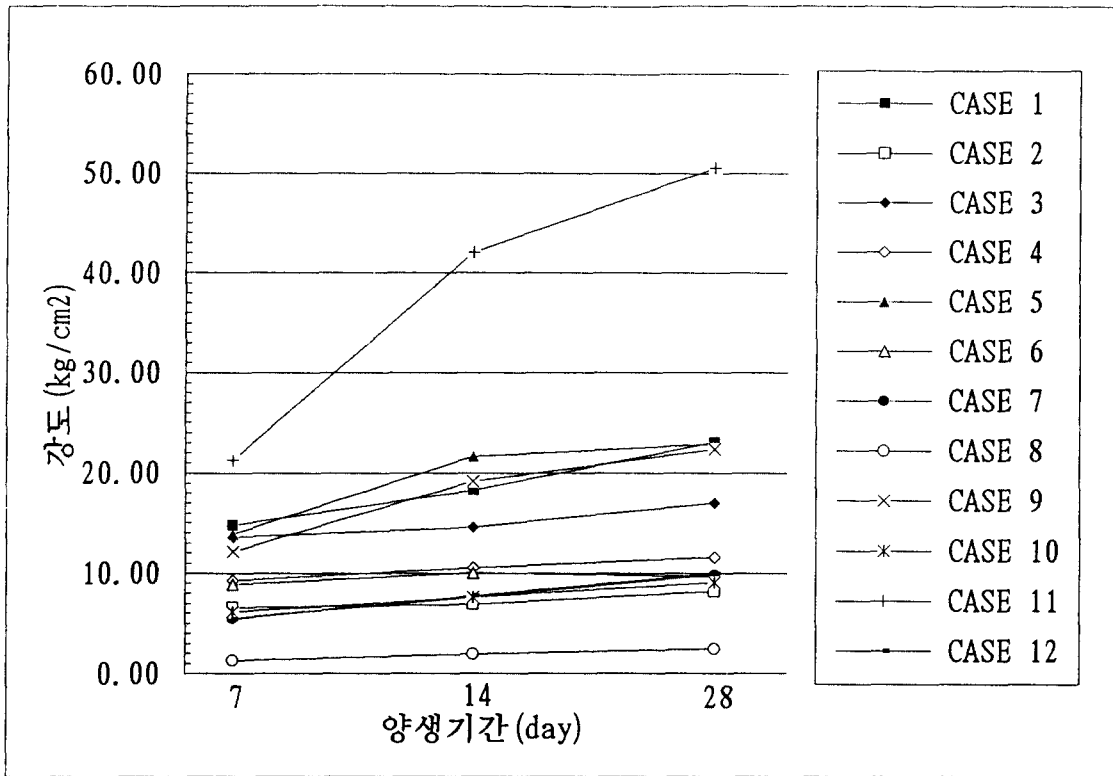


그림 7 양생시간과 일축압축강도와의 관계

이상의 결과를 종합하면 안전측과 안전율을 고려하여 다짐을 하지 않고 시험하였으며, 이때 해성토의 γ_d 는 $1.00 \sim 1.30 \text{ g/cm}^3$ 이고, 산토는 $1.30 \sim 1.40 \text{ g/cm}^3$ 로서 실제 시공시 보다 0.4 g/cm^3 정도 낮게 공시체를 제작하여 시험하였다. 따라서 일반적으로 압축강도가 $20 \sim 50 \text{ kg/cm}^2$ 로 나타났으며, 일축압축강도는 γ_d 와 어느 한계까지는 거의 선형적인 관계가 있으므로 현지에서 실제 시공시에는 적절한 함수비의 조절에 의하여 γ_d 를 1.70 g/cm^3 이상 높게 시공하며, 외국에서 쓰레기 매립장의 폐기물 차수막으로 사용하고 있는 30 kg/cm^2 이상의 강도로 사용하는 것이 가능 하다고 판단된다.

2. 동결융해시험

동결융해에 대한 내구성지수는 사진에서 보는 바와 같이 ERUDITE와 PUNDIT로 시험하였으며 수중급속 동결융해시험을 하였다. 수중급속 동결융해시험 결과 아래 표와 같이 $20 \sim 50 \text{ kg/cm}^2$ 강도배합의 경우 10사이클에서 상대동탄성계수가 80%내외, 내구성지수는 1%이하로 떨어졌다.

ERUDITE 측정치의 상대 동탄성계수는 다음 식으로 구하였다.

$$E_D = 4n^2 I^2 \rho 10^{-12} \text{ MN/m}^2 \quad (9)$$

여기서 I : 시편의 길이(mm)

n : 연직진동고유주파수(Hz)

ρ : 밀도(kg/m^3)

표 4 동결융해시험결과

배합강도 (kg/cm^2)	상대동탄성계수 (%)	내구성지수 (%)
20~50	89.8	1 이하

다만 본 동결융해시험편은 해성토와 산토에 “차수 및 증강재”를 혼합하여 20년 내구목표강도로 제작한 것이나 동결융해 후의 상태만을 검토하기 위하여 60년 이상의 내구성을 평가하는 일축 압축강도 200 kg/cm^2 이상에 적용되는 콘크리트의 내구성을 평가하는 시험기를 사용하였을 뿐만 아니라, 편의상 일반내구성시험 시편 길이의 1/4로 축소하여 시험하였으므로 차수벽의 내구성을 판정하는 기준으로 삼기는 불가하나 강도가 높을 수록 내구성지수가 높다는 결론을 얻을 수 있었다. 일반적으로 시험사례에서 보는 바와 같이 약 100사이클 이내에서 상대동탄성계수가 60% 이하로 떨어지는 경향을 보이고 있으며, 내구성지수도 13~18% 정도의 값을 나타내고 있음을 알 수 있다. 쓰레기 매립장의 차수벽 공법임을 고려하여 동결에 대한 내구정보다는 동결융해 사이클 반복 후의 시료의 균열상태, 팽창상태 기타 객관적인 안정성을 판단하기 위하여 시험한 것으로써 그 모습은 사진 1~3과 같다.

따라서 기존 공법인 점토+벤토나이트+PE공법 대신 점토지반의 강도를 증가시켜 지반의 변위와 부등침하를 억제하기 위한 공법이므로 본 연구에서 동상에 저항하는 재료의 구성비와 시험 후 공시체의 유지형태로 볼때 시편에 서릿발이 서지 않을 정도인 $\sigma_{28} = 30 \text{ kg/m}^2$ 이상의 강도를 유지하면 동상문제는 제기되지 않을 것으로 기대된다.

3. 타기관에서의 시험결과

고화제의 성능에 대하여 1993년 부터 타기관에서 시험한 결과를 수집하여 본 연구결과와 비교 검토 하여 최적 강도정수와 투수계수를 결정코자 시도하였다.

수집된 자료는 부산시 건설시험소, 부산대 토목공학과, 경원대 토목공학과 등에서 시험한 것이다. 이들 시험결과에 의하면 공시체의 제작방법(충격, 진동을 가함)과 함수비 및 건조단위중량이 다르나 일축압축강도는 $17 \sim 72 \text{ kg/cm}^2$ 로 나타났으며, 투수계수는 $7 \times 10^{-8} \text{ cm/sec}$ 이하로 나타났다. 또한 지반오염도(유해물질 또는 그 화합물, pH검토, 고화토의 용출시험, X-ray 회절분

사진 1. PUNDIT 시험 모습

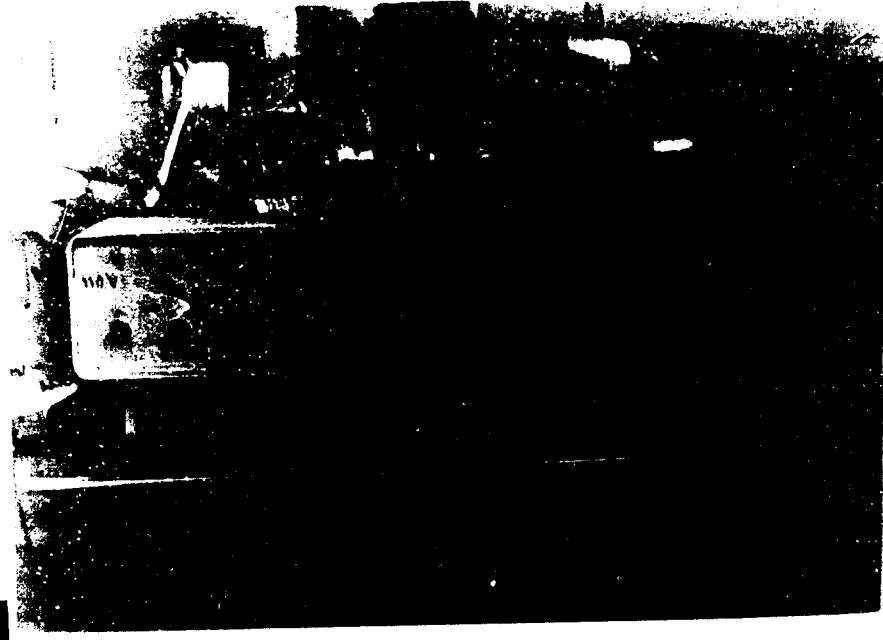


사진 2. ERUDITE 시험 모습

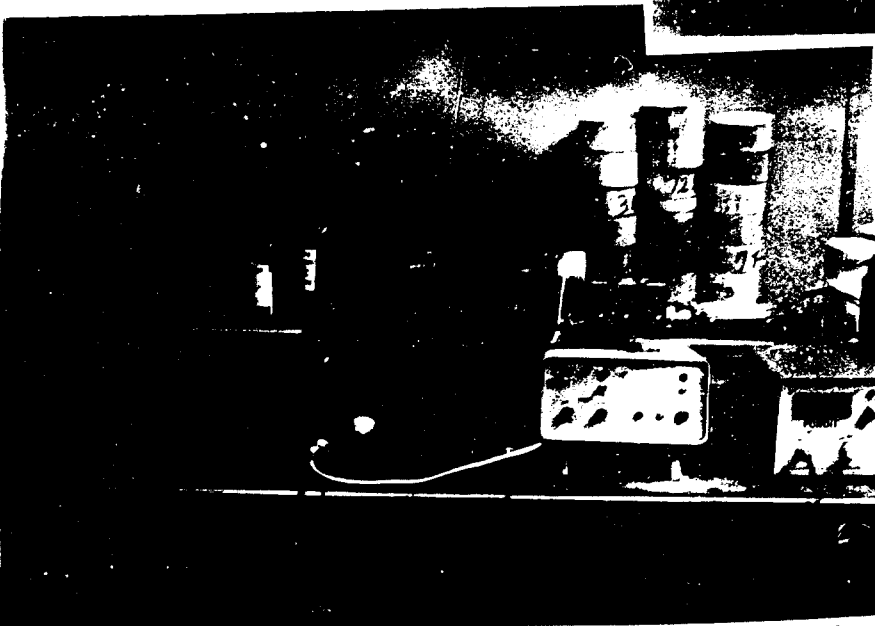
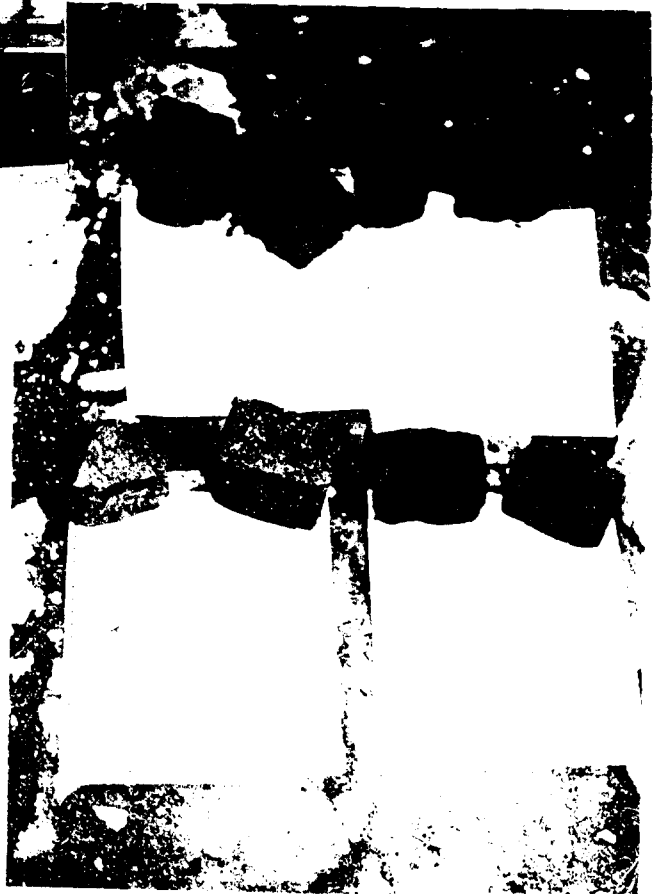


사진 3. 10 cycle 후의 공시체의 모습



석 등)시험을 하였으나 특별한 문제점이 발견되지 않는 것으로 나타났다.

4. 본 시험 결과와의 비교

가. 일축압축강도

본 연구에서의 시험조건과 타기관에서의 시험조건은 약간 차이가 있다. 일반적으로 일축압축강도에 있어 해성토의 경우는 시료의 채취장소가 다르므로, 시료의 특성이 다를뿐 시험조건이 (다짐을 하지 않음) 유사하므로 시험강도는 비슷한 결과를 보였으며, 산토의 경우는 다짐방법 (충격 및 진동)이 다르므로 압축강도의 차이는 본 연구결과치 보다 비교적 큰 값을 보였다. 본 연구에서 다짐을 하지 않은 이유는 실내시험과 현장조건의 차이에 따른 변동계수 즉, 할증율을 고려하여 최악조건의 강도를 확인하기 위하여 다짐을 하지 않는 조건을 택한 것이다.

그러나 이상의 타기관 자료와 본 연구에서의 시험결과치를 종합하여 차수막(시멘트 $120\text{kg}/\text{m}^3$)의 경우 일축압축강도는 해성토에 있어서는 $22.36\text{ kg}/\text{cm}^2$ (폐주물사 혼합) 및 $50\text{ kg}/\text{cm}^2$ 내외(플라이애쉬 혼합)로 나타났다.

여기서 폐주물사 혼합재의 강도가 플라이애쉬 혼합재의 값보다 낮은 이유는 플라이애쉬가 폐주물사 보다 점토광물과의 반응(예 : 이온반응)이 활발하기 때문으로 판단된다. 따라서 해성토의 경우는 flyash혼합토가 더 효과적인 것으로 나타났다.

차수막 보강층의 경우(시멘트 $70\text{kg}/\text{m}^3$) 폐주물사 혼합시료가 $9.0\text{ kg}/\text{cm}^2$ 내외(이하 σ_{28} 강도), 플라이애쉬 혼합토는 $10.0\text{ kg}/\text{cm}^2$ 내외로 나타났다. 한편 본 연구에서 산토의 경우는 폐주물사 혼합토(시멘트 $120\text{kg}/\text{m}^3$)에 있어서는 $16.98\text{ kg}/\text{cm}^2$, 플라이애쉬 혼합토는(시멘트 $120\text{kg}/\text{m}^3$)는 $22.25\text{ kg}/\text{cm}^2$ 로 나타났으나 현장시공과정에서 최악조건을 고려하여 건조단위중량을 $1.30\sim 1.40\text{ t}/\text{m}^3$ 상태로 낮게 제작하여 시험을 하였고 시료의 종류(본 연구의 시료는 실티 샌드(SC))에 따라서도 큰 차이가 발생하였기 때문에 타 기관의 시험 결과치보다는 일축압축강도가 월등히 낮게 나타났다.(예 부산대학교 시험에서 차수막 보강층(시멘트 $70\text{kg}/\text{m}^3$), 폐주물사의 경우 $28.6\sim 72.3\text{ kg}/\text{cm}^2$ 범위, 플라이애쉬는 $20\sim 78.5\text{ kg}/\text{cm}^2$ 범위, 차수막층(시멘트 $120\text{kg}/\text{m}^3$)의 경우 $70\text{ kg}/\text{cm}^2$ 내외로 나타났다. 경원대학교의 경우 차수막층(시멘트 $120\text{kg}/\text{m}^3$)은 $58\sim 72\text{ kg}/\text{cm}^2$ 범위였다.)

따라서 건조단위중량을 최대한으로 높이기 위한 다짐을 충분히 할 경우 $50\sim 60\text{ kg}/\text{cm}^2$ 의 일축압축강도는 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 이와 같은 강도는 차수막층과 차수막 보강층으로서 충분한 강도임이 입증되었다. 즉 문제는 현장시공시 균질혼합의 정도와 다짐이 최대의 관건이며 성실히 시공한다는 조건에서는 $50\text{ kg}/\text{cm}^2$ 이상의 강도가 발현될 것으로 판단된다.

이와 같이 느슨한 해성토나 산토에서 일축압축강도가 크게 나타나는 이유는 시멘트의 수화작용 석회, 석고, MgO의 개량효과, 그밖에 성분이 밝혀지지 않은 고화제(ESCA)의 효과 때문이라고 판단된다.

플라이애쉬를 사용할 경우에는 σ_{28} 압축강도 30 kg/cm^2 이상으로 나타나, 바닥 차수막 사용에 적합하다고 판단되며, 폐주물사를 사용할 경우는 30 kg/cm^2 에 미치지 못하나 산토의 경우는 γ_d 가 $1.30 \sim 1.40 \text{ t/m}^3$ 의 범위로서 느슨한 상태의 압축 및 휨강도이므로 현지시공시 다짐 조건이 우수하여 γ_d 가 1.70 t/m^3 이상 될 경우는 압축강도(σ_{28})가 30 kg/cm^2 이상이 될 것으로 기대되며 σ_{28} 이후에도 강도는 계속 증가되므로 바닥차수막층으로 사용이 가능할 것으로 판단된다.

나. 휨강도

타 기관에서는 휨강도의 시험을 실시하지 않았다. 대규모의 강성지반을 조성할 경우는 휨강도(인장강도는 불필요)에 저항 하는지의 여부 검토가 필요하다. 따라서 필요한 혼합재에 대하여 휨강도시험을 한 결과는 σ_{14} 의 경우는 $2.7 \sim 6.4 \text{ kg/cm}^2$, σ_{28} 의 경우는 10 kg/cm^2 내외로서 KÖgler 이론식으로 평가한 결과 휨강도 지지력과 소성변형에 안전한 강도임이 판명되었다.

다. 투수계수

타 기관에서 시험한 투수계수는 모두 차수막층이나 차수막 보호층의 경우 $1 \times 10^{-8} \sim 10^{-9} \text{ cm/sec}$ 로 나타났다. 그러나 본 연구에서 투수시험을 한 결과는 대부분 $1 \times 10^{-10} \sim 10^{-11} \text{ cm/sec}$ 로 더 낮은 값을 나타내었으며 결과적으로 불투수성으로 판단되며 이는 벤토나이트가 혼합되어 팽창작용 석회, 석고, 폐주물사 또는 플라이애쉬의 혼입으로 흡수에 의한 팽창효과와 세립재가 토립자 사이의 공극을 채움으로서 투수계수의 저하효과가 더욱 컸다고 판단된다.

라. 동결융해

차수 및 증강제에는 동결에 저항하는 시멘트, 석고, 석회, 고화제(ESCA)등이 함유되어 동결에 대한 저항성이 있을 것으로 추정되나 이는 콘크리트 시편이 아니고 soil-cement와 유사한 시편임을 유의하기 바란다. 그리고 시험결과에 의하면 추가적으로 균열 팽창 등은 일어나지 않는 것으로 나타났다.

다만 동결융해 내구성을 더욱 높이기 위하여는 공기연행이 가능한 AE제 등을 혼입하여 공기량을 확보하는 것이 동결융해 저항을 강화시킬 수 있으므로 필요한 대책을 세우면 동상에 대한 문제는 대비할 수 있을 것으로 판단된다.

IV. 기타 필요사항 검토 및 고찰

1. 차수막 및 차수막보강층의 소요강도

가. 차수막층 부재검토

1) 해석이론

차수막과 같은 얽은층개량지반의 설계모델은 기초지반을 2가지의 모델로 상사화시킬 수 있다. 그 하나는 Winkler의 가정을 토대로 미개량지반의 지반반력계수 k 를 Spring 집합체(Bed of spring)로 환산시키는 것이다. 여기서, 지반반력계수 k 는 지반에 작용하는 응력 p 와 지반의 침하량 y 와의 비 $k = p/y$ 로 결정된다. 또 이 방법은 개량지반과 미개량지반으로 구성되는 다층계 탄성 model로 생각하여 포장구조의 해석에 사용되기도 한다. Winkler's foundation은 그림 8과 같이 외력이 작용한 부분만 지반이 침하한다는 가정으로 Spring k 의 탄성으로 지지되는 보의 변형방정식을 사용할 수 있다.

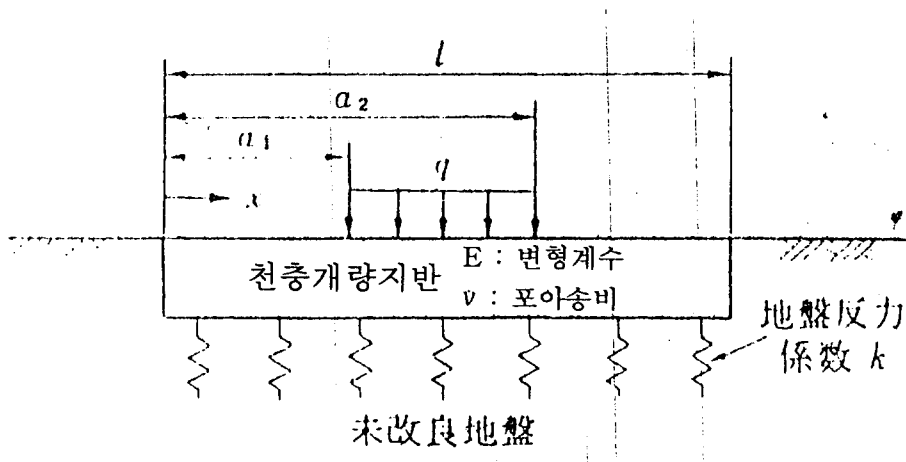


그림 8 천층개량지반의 모델링

$$w''''(x) + 4a^4w(x) = f(x)/D \quad (10)$$

여기서, $a = \sqrt[4]{bk/4D}$

$f(x)$: 등분포하중일 때는 $f(x) = q$

E : 보의 탄성계수 = 얽은층개량지반의 변형계수 (t/m^2)

b : 보의 폭 = 얽은층개량지반의 폭 (m)

v : 포아송비

D : 변형강성 = $EI/(1-v^2)$

식(1)의 일반해는 다음과 같다.

$$w(x) = A_1 Y_1(x) + A_2 Y_2(x) + A_3 Y_3(x) + A_4 Y_4(x) \quad (11)$$

여기서, A_1, A_2, A_3, A_4 는 경계조건에서 결정되는 상수이며, $Y_1(x), Y_2(x), Y_3(x), Y_4(x)$ 는 다음과 같다.

$$Y_1(x) = \cos \alpha x \cdot \cosh \alpha x \quad (12)$$

$$Y_2(x) = \frac{1}{2} (\sin \alpha x \cdot \cosh \alpha x + \cos \alpha x \cdot \sinh \alpha x) \quad (13)$$

$$Y_3(x) = \frac{1}{2} \sin \alpha x \cdot \sinh \alpha x \quad (14)$$

$$Y_4(x) = \frac{1}{4} (\sin \alpha x \cdot \cosh \alpha x - \cos \alpha x \cdot \sinh \alpha x) \quad (15)$$

$x=0, x=1$ 일때의 모멘트와 전단응력이 0이라는 경계조건을 대입하여 (11)식에서 침하량 $w(x)$, 휨모멘트 $M(x)$, 전단응력 $Q(x)$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$w(x) = w(0) \cdot Y_1(x) + \frac{1}{\alpha} \cdot \delta(0) \cdot Y_2(x) + \frac{q}{kb} \cdot \{ 1 - Y_1(x - \alpha_1) \} \quad (16)$$

$$M(x) = 4\alpha D \{ \alpha \cdot w(0) \cdot Y_3(x) + \delta(0) \cdot Y_4(x) \} - \frac{4\alpha^2 q D}{kb} \cdot Y_3(x - \alpha_1) \quad (17)$$

$$Q(x) = 4\alpha^{2D} \{ \alpha \cdot w(0) \cdot Y_2(x) + \delta(0) \cdot Y_3(x) \} - \frac{4\alpha^3 q D}{kb} \cdot Y_2(x - \alpha_1) \quad (18)$$

단,

$$w(0) = \frac{-q}{kb} \quad (19)$$

$$\frac{Y_3(l) \{ Y_3(l - \alpha_2) - Y_3(l - \alpha_1) \} - Y_4(l) \{ Y_2(l - \alpha_2) - Y_2(l - \alpha_1) \}}{\{ Y_3(l) \}^2 - Y_2(l) \cdot Y_4(l)}$$

$$\delta(0) = \frac{-qa}{kb} \quad (20)$$

$$\frac{Y_3(l) \{ Y_2(l-a_2) - Y_2(l-a_1) \} - Y_2(l) \{ Y_3(l-a_2) - Y_3(l-a_1) \}}{\{ Y_3(l) \}^2 - Y_2(l) \cdot Y_4(l)}$$

이 방법으로 얇은층개량지반에 발생하는 침하량, 전단응력, 휨인장응력, 지반반력을 구할 수 있지만, 계산과정이 복잡하다. 따라서 이 개념을 범용구조해석 프로그램인 SAP90을 사용하여 구하였다. 한편, 이 계산에 사용하는 지반반력계수 k 는 미개량토의 전단강도에서 추정하여야 하는데 일본의 吉田은 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$k = 5 \cdot S^{0.88} \quad (21)$$

여기서, k : 지반반력계수 (g/cm^3)

S : 흙의 전단강도 (g/cm^2)

본 계산에서는 차수막 보강층 이하 기초지반을 연약지반($N < 4$, $K = 500t/m^3$ 으로 가정), 보통조밀지반($N = 10 \sim 20$, $k = 1000t/m^3$ 으로 가정) 및 조밀지반($N = 20 \sim 30$, $K = 2000t/m^3$ 으로 가정) 3가지 경우로 가정하여 부재에 대한 단면적을 산정하였다. 표 5는 일반적으로 적용되는 지반계수의 값을 제시한 것이다.

표 5 Range of values of modulus of subgrade reaction k_s

Use values as guide and for comparison when using approximate equations

Soil	k_s , kcf	k_s , t/m^3
Loose sand	30-100	480-1600
Medium dense sand	60-500	960-8000
Dense sand	400-800	6400-12800
Clayey medium dense sand	200-500	3200-8000
Silty medium dense sand	150-300	2400-4800
Clayey soil :		
$< q_u \leq 200kPa(4+ksf)$ $2kg/cm^2$	75-150	1200-2400
$200 < q_u \leq 400kPa$	150-300	2400-4800
$> q_u > 800kPa$	> 300	> 4800

② 해석단면

본 처리층이 작용하는 하중은 쓰레기의 단위중량 $1.03t/m^3$, 복토재료의 단위중량은 $1.70t/m^3$ 을 적용하였고 작업을 위한 32ton 불도자 2대의 하중도 적용하였다.

$$\begin{aligned} q &= 10m \times 1.03t/m^3(\text{쓰레기}) + 10m \times 1.70t/m^3(\text{복토재}) \\ &\quad + 2.5t/m^2 \times 2\text{대}(\text{작업하중}) + 2.4 \times 0.3m(\text{차단층}) \\ &= 33.02t/m^2 \end{aligned}$$

③ 해석결과

이상의 지반상수를 기초로 해석한 자료는 그림 9와 같다.

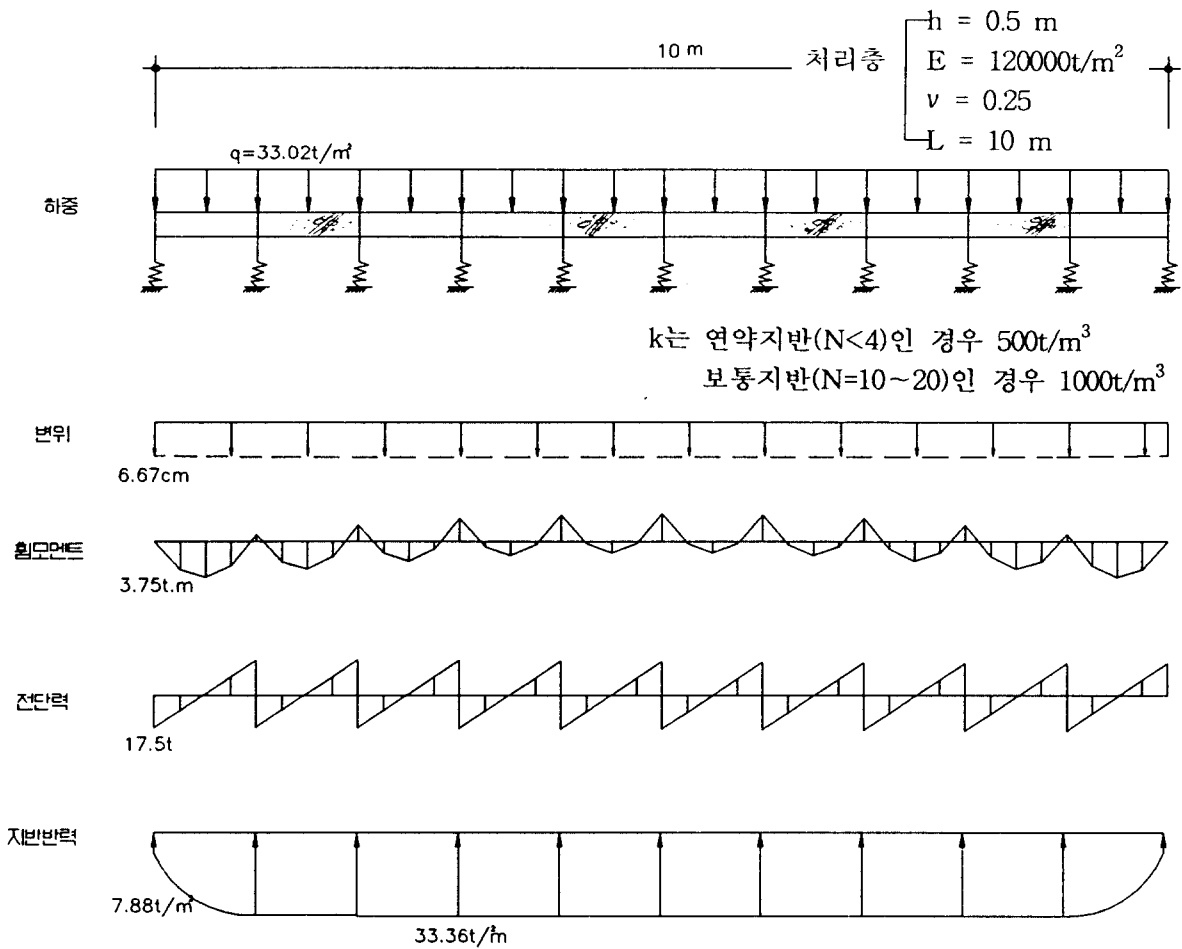


그림 9 해석결과

차수막 보강층이 연속된 기초폭 100,150,200m로 설치된다고 하더라도 기초지반을 탄성체 Model로 가정할 경우(본 해석에서는 기초단위폭 m당 Spring을 설치하였음) 작용하중이 등분포 하중($q = 33.02 \text{ t/m}^2$)으로 재하되어 별차이가 없으므로 계산편의상 기초폭 10m에 대해 검토한다.

$$\text{휨응력} : \sigma = \frac{M_{\max}}{I} \cdot \frac{h}{2} = \frac{3.75}{0.01042} \times \frac{0.5}{2} = 89.97 \text{ t/m}^2 < \sigma_{ba} \quad (22)$$

$$\text{전단응력} : I = \frac{3}{2} \times \frac{Q_{\max}}{bh} = \frac{3}{2} \times \frac{17.5}{1.0 \times 0.5} = 52.5 \text{ t/m}^2 < \tau_a \quad (23)$$

즉, 휨강도 9 kg/cm^2 , 전단강도 5.5 kg/cm^2 이상이면 만족하며, 이는 다음 두 그림(그림 10, 11)에서 일축압축강도와 휨강도 및 윤하중에 의한 전단강도의 관계로 부터 추정이 가능하다.

단, 해성토의 경우는 건조단위중량을 $1.10 \sim 1.30 \text{ g/cm}^3$, 산토의 경우는 건조단위 중량을 $1.30 \sim 1.40 \text{ g/cm}^3$ 으로 낮게 시험하였으며 현지에서 다짐함수비를 적절히 조절하면 산토의 경우 1.70

g/cm³ 이상 높일 수 있으므로 안전율은 이에 포함시켰으므로 고려치 않았다.

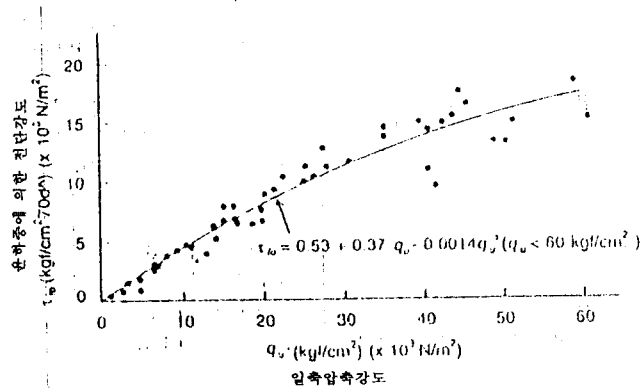
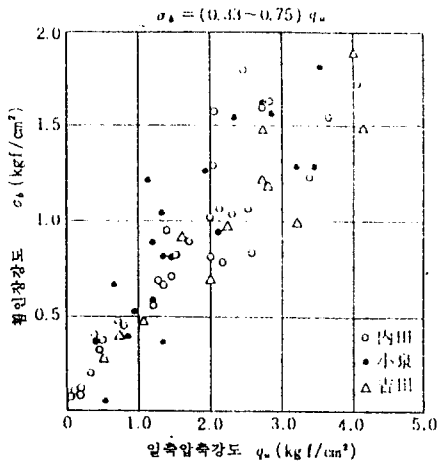


그림 10 휨인장강도와 일축압축강도 그림 11 윤하중에 의한 전단강도와 일축압축강도와의 관계

차수막 보강층의 강성을 일정하다고 가정하고 지반반력계수를 변환시켜 해석한 결과, 지반의 강성에 비해 차수막보강층의 강성이 상대적으로 크므로 일반적인 강성기초의 침하거동을 보이며, 접지압은 양단에서 약간 작고 거의 균등한 등분포 접지압형태를 보인다.

기초지반의 강성을 느슨하거나 연약한 경우, 보통인 경우 및 조밀한 경우 등으로 해석한 결과, 차수막 보강층 부재의 단면력에는 별 큰 차이가 없었지만 침하량은 각각 6cm, 3cm, 1cm로 기초지반이 단단할수록 침하가 덜 일어남을 알 수 있다.

따라서 수정보완 사항 6항 및 13항에서 검토한바 쓰레기의 분해 강산성물을 집수하면서 내구적인 차수막층의 최소 일축압축강도는 30 kg/cm² 이상, 두께 30cm가 바람직하며, 차수막 보강층은 휨강도 9 kg/cm², 두께 50cm로 하는 것이 바람직하다. 또한 차수벽은 기울기를 1:1로 가정하면 cos45° 가 되므로 휨강도는 6.36 kg/cm²가 요구된다.

나. 기초지반의 인한 최대전단응력의 추정

윤하중으로 인한 지반내 발생하는 최대전단응력과 원지반의 전단강도를 비교·검토하는데 있어서 이 최대전단응력은 Boussinesq의 윤하중에 의한 원형등분포하중의 중심하 깊이 Z에 대해 다음 식과 같이 표시할 수 있다.

$$\tau_{\max} = 3p/4 \left[\frac{(z/a)}{\{1+(z/a)^2\}^{1/2}} - \frac{(z/a)^3}{\{1+(z/a)^2\}^{3/2}} \right] \quad (24)$$

여기서, τ_{\max} : 중심축상의 점에 작용하는 최대전단응력(kg/cm²)

p : 등분포하중(kg/cm²)

a : 재하면의 반경(cm)

$$a = 12 + P$$

P : 윤택중(ton)

표 6 τ_{max} 의 계산표

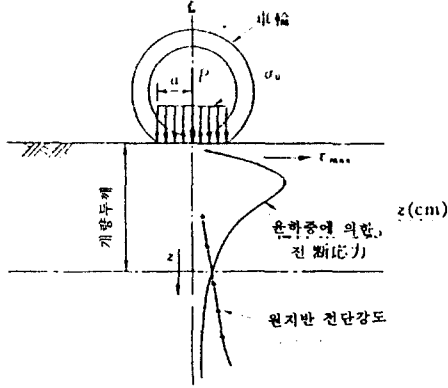


그림 12 개랑후 산출방법의 설명도

(P : 輪荷重, a : 接地半徑, σ_0 : 荷重強度, z : 深さ)

	P(t)	5	6	7	8
a(cm)		17	18	19	20
σ_0 (kg/cm ²)		5.51	5.90	6.17	6.37
10		1.556	1.641	1.688	1.708
20		1.320	1.471	1.592	1.688
30		0.873	1.003	1.120	1.222
40		0.582	0.679	0.770	0.854
50		0.405	0.477	0.546	0.611
60		0.295	0.350	0.402	0.453
70		0.224	0.266	0.307	0.346
80		0.175	0.208	0.240	0.272
90		0.140	0.167	0.193	0.219
100		0.114	0.137	0.158	0.180
110		0.095	0.114	0.132	0.150
120		0.080	0.096	0.112	0.127
130		0.069	0.082	0.095	0.109
140		0.060	0.071	0.083	0.095
150		0.052	0.062	0.073	0.083
160		0.046	0.055	0.064	0.073
170		0.041	0.049	0.057	0.065
180		0.036	0.044	0.051	0.058
190		0.033	0.039	0.046	0.052
200		0.030	0.035	0.041	0.047

표 6에서 보는 바와 같이 윤택중이 걸리는 노면에서 50cm 깊이에서 발생하는 전단응력은 노면 접지압(σ_0)의 10% 이내임을 알 수 있다.

기 설계차수막층 합계 두께는 80cm이며 DB-18 하중은 7.2ton일 경우 접지반경 $a = 12 + 7.2 = 19.2\text{cm}$ 이고, 접지압 $\sigma_0 = 6.22 \text{ kg/cm}^2$ 이다.

이때 발생하는 지반내 최대전단응력 τ_{max} 은 접지압 σ_0 의 10%라고 가정할 때 0.62 kg/cm^2 이므로 하부 기초지반의 전단강도가 작업하중으로 발휘될 수 있는 최대전단응력 이상이 되도록 차수막 보강층 아래 위치할 두께 1m정도는 95% 다짐, 그 이하의 층은 90% 다짐도가 되도록 다짐후 시공함이 차수막 보강층의 내구성 확보측면에서 좋을 것으로 판단된다.

2. 폐기물의 부식에 의한 차수막의 저항성

가. 매립된 폐기물의 분해

매립장에 쌓여있는 고형폐기물에는 생물학적, 화학적, 물리적인 작용등이 일어난다. 생물학적인 작용에 의해서 주로 고형폐기물의 유기물질들이 액체와 기체상태로 분해되며, 이 분해는 폐기물이 매립된 직후에 호기성 박테리아에 의해서 이루어지고 산소가 남아있는 동안 지속된다. 산소가 없어진 상태에서는 유기물질들이 혐기성 박테리아에 의해서 분해되며 이때에 메탄(Methane) 가스가 발생된다. 화학적인 작용으로는 산화/환원, 흡착, 증발등이 있는데 주로 생물학적인 작용에 의해 분해된 물질들이 물에 용해되어 일어나는 작용들이다. 물리적인 작용으로는 매립지에서 발생한 가스의 확산이나 침출수의 유출, 그리고 매립물질의 압밀이나 분해에 의한 침하등이다. 고형폐기물이 분해되어가는 과정은 대략 다음과 같이 요약해 볼 수있다.

(1) 초기 적응기: 폐기물이 매립장에 버려진 직후에 아직 폐기물사이에 산소가 남아 있어서 주로 호기성 박테리아에 의해 유기물질이 분해되며 부분적으로는 혐기성 박테리아에 의한 분해도 일어난다. 이 과정에서 CO₂ 가스가 발생한다.

(2) 과도기: 폐기물사이에 남아있던 산소가 모두 사용된 후에는 혐기상태가 시작되면서 산화/환원 작용 보다는 혐기성 박테리아에 의해서 복합유기물질들의 유기산등으로 분해되며 이 과정에서 CO₂와 Methane (CH₄)가 발생한다. 침출수가 생기면 유기산과 CO₂의 영향으로 산성화되어 pH가 낮아진다.

(3) 산성기: 혐기성 박테리아에 의해 분해가 계속되는데 고분자물질들이 미생물에 의해 분해되기 쉬운 물질로 바뀐다음 초산(CH₃COOH)과 같은 저분자물질로 다시 바뀌고, 주로 발생하는 가스는 CO₂이며 침출수가 생기면 이들의 영향으로 pH가 5 이하의 산성으로 내려간다. 이 과정에서 대부분의 유기물질들이 분해된다.

(4) Methane 생성기: 또다른 미생물군에 의해서 산성기에 생성된 초산과 H₂를 Methane 가스와 CO₂로 변화시킨다. 이 과정은 보다 철저한 혐기성작용인데 유기산도 일부 생성되나 Methane 가스의 생성율이 훨씬 높아서 pH가 다시 약 7 ~ 8 정도로 올라간다.

(5) 완숙기: 미생물에 의한 분해가 쉽지않아서 그 분해속도가 느린 물질들이 추가로 서서히 분해되는 과정으로써 오랜시간 동안 지속된다. 이 과정동안 생성되는 물질들은 미약하며 가스 생성율도 현격히 낮다.

본 과제에서는 매립지에서 생성되는 Methane 가스와 침출수의 배출에 대한 설계및 이들에 의한 불투수층의 내식성을 검토하고자 한다.

나. Methane 가스 배기

Methane 가스는 이에 의한 압력이 증가하면서 매립지 불투수층에 균열을 일으켜서 이를 통해 유출되기도 하며, 이 유출된 가스는 그 자체가 인체에 해로우 뿐 아니라 이들이 건물지하등에 밀집하면 화재나 폭발의 위험성도 있다. 또한 이들의 대기를 통한 악취확산방지, 지하를 통한 이동방지, 또는 에너지로의 사용가능성 때문에 적절한 관리가 필요한데, 배기방법은 크게 소극적 배기방법과 적극적 배기방법으로 구분해 볼 수 있다. 소극적배기는 매립지 내에서 생성되는 Methane 가스 자체적인 압력에 의해 설치된 환기구를 통해서 배출 시키며, 적극적인 배기에는

인공적인 흡입장치에 의해서 배출시킨다. 일반적으로 환기구를 일정간격으로 설치하여 발생한 Methane 가스를 자체적으로 배출시키는 소극적 배기가 선호되고 있으며 이 방법은 Methane 가스 생성이 활발한 시기에 적합하다. 이 시기가 지나서 Methane 가스 생성율이 저조 할 때에는 이 방법이 비효과적이거나 실제로 이때에는 이들의 배출이 별로 중요하지 않다. 본 과제처럼 불투수층이 매립지의 바닥과 측면에 잘 형성된 경우에는 그림 13과 같은 환기구의 설치가 바람직하다. 이와 같은 환기구를 매립이 끝난 후에 약 30 ~ 50 m 간격으로 설치하며, 배기관은 지상으로부터 전체 매립깊이의 80% 이상까지 내려가야 한다. 배출되는 Methane 가스의 농도가 충분할 때에는 이들 각각 배기관들을 연결하여 일정 장소로 모이게 한 후에 가스버너를 이용해서 소각시키는데 대부분의 경우 Methane 가스의 농도나 순도가 낮아서 추가로 연료가스를 혼합사용하며 소각한다.

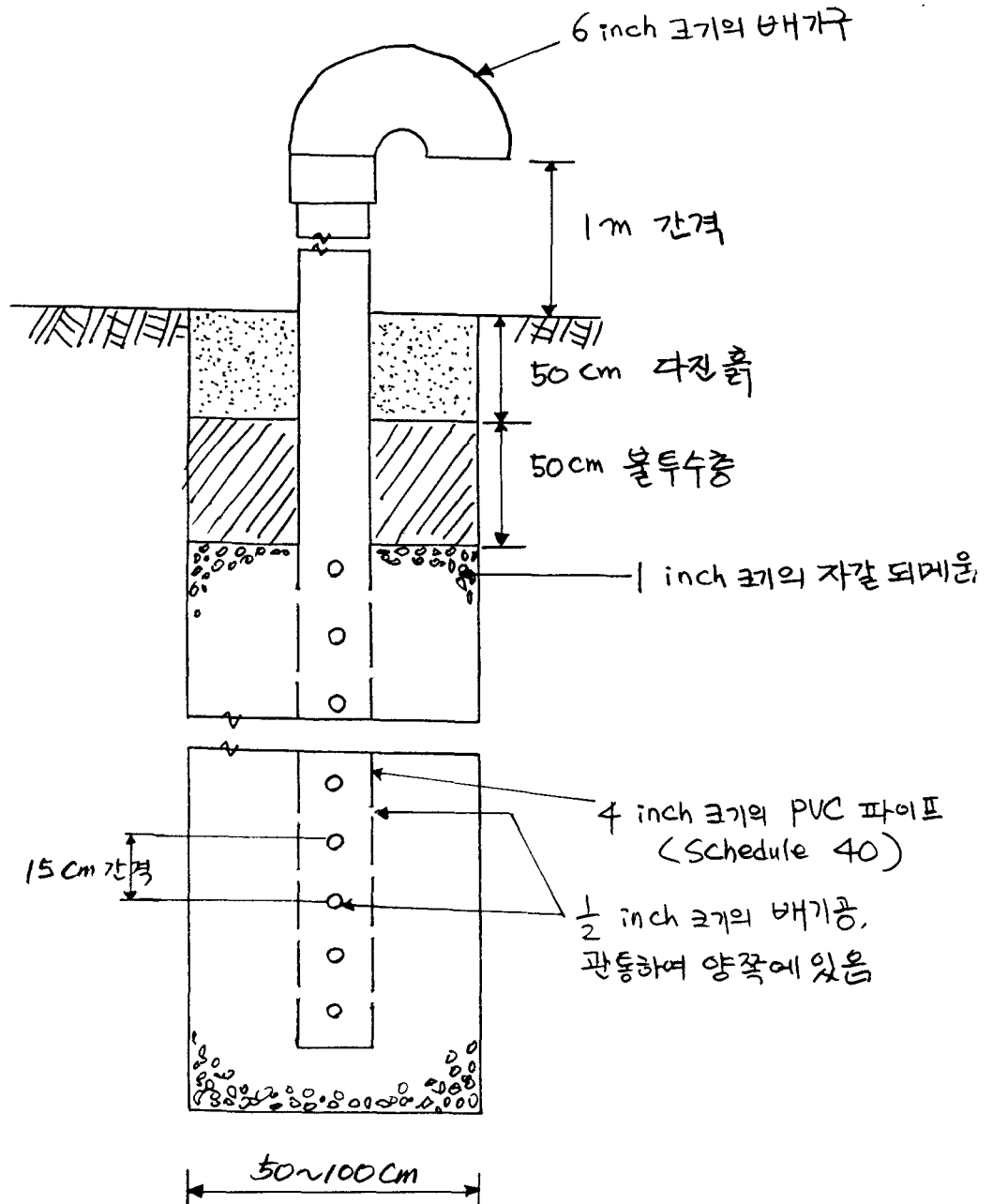


그림 13 메탄 가스 배기 시스템

다. 침출수 배출

침출수는 강우에 의한 지표면으로부터의 배수, 지하수등의 침투, 또는 폐기물의 분해과정에서 생성되는 액체들이 고형폐기물 사이를 통과해 내려오면서 오염물질들을 용해시키거나 또는 부유상태로 포함하고 있어서 오염의 농도가 상당히 높다. 이들의 오염성분은 매립된 폐기물의 성분, 매립기간 그리고 분해과정에 따라 크게 다르나 일반 생활오폐수에 비해서 BOD (Biochemical Oxygen Demand, 생물학적 산소요구량)와 COD (Chemical Oxygen Demand, 화학적 산소요구량)등의 농도가 월등히 높으며 (보통 10 ~ 100배), pH는 매립지의 초기단계에는 (2년 미만) 4.5 ~ 7.5로서 약간 산성이었다가, 10년이 넘으면 6.5 ~ 7.5 정도로 다시 중성에 가까워지는데 pH의 변화는 유기산 외에도 CO₂ 가스의 압력등이 영향을 미친다. 침출수에는 생활오폐수와는 달리 여러가지 유독성 오염물질이 포함되어 있어서 이들이 지하수와 지표수등 수자원이나 토양을 오염시킬 때는 그 피해가 극심함으로 이를 사전에 철저히 방지해야 하는데, 우선은 확실한 불투수층으로 지하로 침투되는 것을 막고 매립지 바닥에 모여있는 침출수를 수거하여 처리하는 방법등이 많이 사용 되고 있다. 침출수를 수거하는 방법은 여러가지가 있으나 본 과제의 매립지의 규모와 성격상 매립지 바닥의 경사를 1 ~ 2% 정도로하여 한곳으로 모이게 한 후에 HDPE (High-Density Polyethylene) Pipe를 이용하여 수거한다. 이와 같이 매립지 바닥에서 침출수를 수거해내는 것 외에도, 매립해가는 과정에서 매립지내에 강우시 발생하는 지표수도 이와 유사한 방법으로 배출시켜야 한다. 수거한 침출수는 그 성분을 파악한 후에 적절히 처리해야 한다.

라. 불투수층의 내식성

본 매립장 불투수층의 주요 구성물질들과 그 성분중에 대부분을 이루고 있는 Quartz (SiO₂)와 Aluminum Oxide (Al₂O₃)의 함유량은 표 7과 같다.

표 7 각 물질의 SiO₂, Al₂O₃ 함유량

구성물질	함유량 (%)	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃
흙	39	36
폐주물사	85	-
Bentonite	60 ~ 70	14 ~ 20
Cement	45	25

구성성분 중에서 가장 많은 비율을 차지하는 SiO₂는 물에 잘 용해되지 않으나 산성물질을 중화시키는 성질을 가지고 있으며, Al₂O₃는 물에 용해되면 강한 알칼리성이 되어서 역시 산성을 중화시킨다. 이들은 이외에도 산성성분과 만나면 Gel같은 물질을 만드는 성질이 있다. 이처럼 불투수층의 대부분을 이루고 있는 성분들이 산성과 만나면 이들을 중화시키고 Gel같은 물질을 만들어서, 매립장 불투수층이 침출수와 접촉했을 때 불투수층의 주요 구성성분인 이들이 침출수 중의 유기산등 산성 성분을 중화시켜서 표면에 Gel 물질의 피복이 형성된다. 이렇게 형성된 피

복은 유기산등 기타 부식물질들이 불투수층과 직접적으로 접촉하는 것을 방지해서, 침출수에 의한 불투수층의 내식가능성은 특별히 불투수층을 부식시키는 화학물질이 폐기물 중에 포함되어 있지 않는 한 낮을 것으로 판단된다.

이 부분은 어디까지나 측정치이며 X-ray 회절분석 결과로도 장기적인 내구성은 추정에 불과하므로 그 결과치는 큰 의미를 갖지 않을 것으로 판단된다.

3. 동결융해 저항성에 대한 고찰

동결의 조건은 노출된 차수막층 내의 흡수상태와 관계되며 바닥차수막층은 1.2% 경사를 두며 시공하고 유공관을 매설하여 집수하며 그 위에 쓰레기를 매립하여 덮이는 상태이다. 한편 벽면 차수벽은 1:1내외의 경사를 두고 시공하나 불투수재이므로 중력수는 동결에 영향을 주지 않을 것으로 사료되며 다만 모관수와 흡착수가 동상과 관계가 될 것으로 판단된다.

그러나 혼합재료 중에 동결에 저항하는 시멘트, 석회, 석고, MgO, 고화제 등이 함유되어 있어 동상억제에 효과가 있으므로 우리나라의 동절 기후조건으로는 동상에 따른 문제는 크게 우려하지 않아도 될 것으로 판단된다.

동결융해시험은 soil-cement와 유사한 재료이므로 KS F 2332에 준하여 시험해야 하나. 동결 후의 상태를 면밀히 판단하기 위하여 KS F 567, ASTM 666에 준하여 10사이클 후의 공시체 형태를 살펴 본 바에 의하면 추가적인 균열이나 팽창이 발생된 흔적은 없었다.

내구성을 증진이 필요한 경우는 공기연행제(AE제)를 사용하면 일축압축강도는 약간 저하되나 본 연구에서는 차수막층의 설계기준 일축압축강도를 30 kg/cm^2 이상으로 하였으므로 4% 내외의 AE공기를 연행시킨다 하여도 일축압축강도의 감소가 크게 문제가 되지 않을 것으로 판단된다.(타 기관에서 충격, 진동에 의한 시험결과에 의하면 고화토의 최대압축강도는 70 kg/cm^2 내외임) 따라서 만약 동결융해시험에서 동상의 문제가 제기된다 하여도 필요한 대책을 세움으로써 대처할 수 있다고 판단된다.

V. 을숙도 시공사례

1. 을숙도의 현장조건과 매립장의 구조

매립장의 토질 특징은 매우 연약한 지반조건으로서 고함수비(40~60%), 고유기질(40%) 미세한 입자의 실트층으로 구성되어 있어 초연약지반으로 분류되는 토질이다.

연약지반 중에 이질의 구조물을 투입하면 개량토의 역학특성이나 변형특성이 원지반하고는 크게 다르다. 개량토의 전단강도나 변형계수를 미개량토와 비교하면 10~100배의 수치로 크게 된다. 요컨대 개량지반과 원지반에서는 구조적으로 불연속이 되기 때문에 개량층은 될 수 있으며 원지반의 공학적 특성에 가까운 토구조로 된다. 따라서 개량토의 강도를 너무 크게하지 않고

부산시 을숙도 쓰레기 매립장 평면도

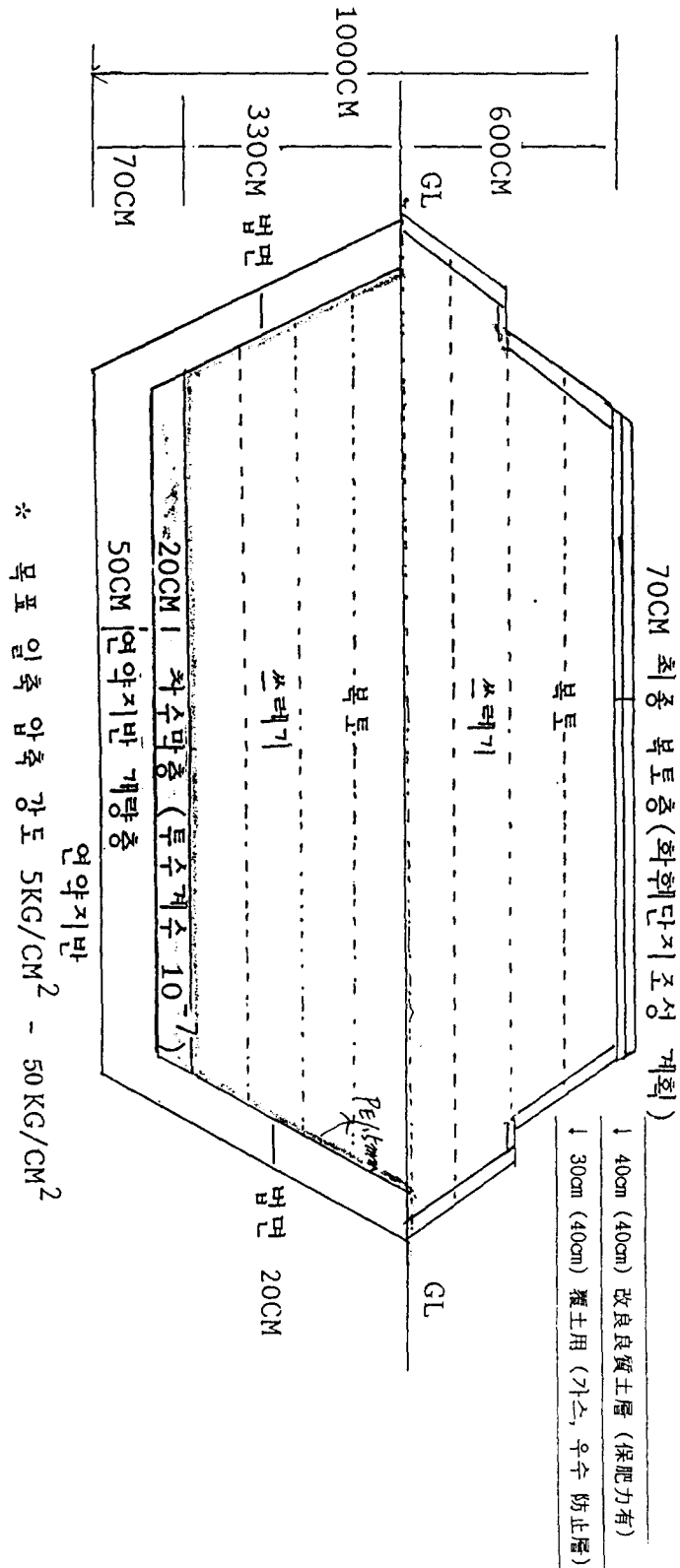


그림 14 부산시 을숙도 쓰레기 매립장 평면도

개량토의 변형 정도를 미개량의 것에 가깝게 하여 개량토에서 미개량토에 될 수 있는 대로 연속된 구조형식으로 하였다. 부산시 을숙도 쓰레기 매립장의 표준단면도는 그림 14와 같다.

VII. 결론

해성토와 산토를 고화시켜 쓰레기 매립장의 차수막, 차수막 보강층 및 차수벽의 시공 가능성을 검토한 바 다음과 같다.

1. 차수 및 증강제(시멘트, 석회, 석고, MgO, 벤토나이트, 고화제(ESCA))를 해성토와 산토에 적량 혼합하여 일축압축, 휨강도, 투수시험, 동결융해시험을 실시한 결과 기존 사용되어 온 고화제 보다 성능이 우수한 것으로 나타났으며, 이를 폐기물 매립장의 침출수 방지용 차수벽으로 이용할 경우 효과적인 공법으로 판단된다.

2. 해성토와 산토는 공시체의 제작이 간편한 함수비로 제작하였고, 또한 해성토의 경우 건조단위중량은 $1.00\sim 1.30 t/m^3$ 이며, 산토의 경우 건조단위중량 $1.30\sim 1.40 t/m^3$ 으로 낮은 단위중량의 공시체를 제작하였기 때문에 일축압축강도가 타 기관에서 시험한 값보다 낮게 나타났다.

3. 건조단위중량이 증가하면 일축압축강도는 어느 한계까지는 거의 선형적으로 증가하므로, 필요강도인 차수막층의 일축압축강도 $30 kg/cm^2$ 와 차수막보강층의 휨강도 $9 kg/cm^2$, 기초지반의 전단강도 $0.62 kg/cm^2$ 에 도달하지 못할 경우는 토목적으로 지반조리를 해야 할 것이다.

4. 동결융해시험결과 “차수 및 증강제”를 적량 혼합하여, 일축압축강도 $30 kg/cm^2$ 이상을 유지시킬 경우 동상을 받은 후에도 팽창 균열 등의 특이한 사항을 발견할 수 없었다.

참 고 문 헌

- 1) Attewell, P.B., Taylor, R. K., "Ground Movement effects on structures" surrey univ. Press. 10984, pp. 29 ~38
- 2) EPA, "Suide to techincal resourses for the Design of Land Disposal Facilites", EPA/625-6-68/018, 1988, pp. 7
- 3) Bishop, A.W., Blight, G. E.(1963),"Some Aspects of Effective Stress in Saturated and Partly Saturated Soils", Geotechnique, vol.13, no 3, pp.177.
- 4) Fredlund, D.G.,Morgenstern, N.R.,"Constitutive Relations for Volume Change in Unsaturate d Soils", Can. Geotech. j., vol. 13, 1976, pp. 261~267
- 5) Remy,J,P,(1973), "The measurement of small permabilites in the laboratory." Techincal Note, Geotechnique, 23:4:454.
- 6) Thomas, S. D., "The Consolidation Behaviour of gassy soil", Oxford Univ. 1987.

7) TRIAXIAL TEST(ELE)

- 8) 유창민,(1992) “벤토나이트 혼합토의 실링효과에 관한 연구”, 건국대학교 대학원 석사논문
- 9) 임진규,(1984)“약액처리에 의한 연약지반토의 고결효과” ,건국대학교 대학원 석사논문
- 10) 도덕현,(1979) “첨가제에 의한 soil-Cement의 성질 개량” 한국농공학회지, vol.21, No. 1, pp. 63-77
- 11) 정성모 (1985), “석고플라스터 혼합토의 공학적 특성”, 한국농공학회지, Vol. 27, No. 4, pp.53-60
- 12) 농업진흥공사 (1986), “ 농어촌도로 포장공법연구 보고서”, pp. 1-220
- 13) 건설부 국립건설 연구소 (1978), “시멘트 및 석회에 의한 도로기층 안정처리공법에 관한 연구”, 건설연구소 자료 No.376, pp.1-48
- 14) 부산시 을숙도 쓰레기 매립장 조성공법(1994), (주) 한미
- 15) 폐기물 매립장 조성공사(1994), (주) 한미
- 16) 폐주물사와 플라이애쉬를 사용한 비스타 혼합토의 차수 및 토질개량효과와 지반오염도에 관한 연구용역 보고서(1994), 부산대학교 토목공학과 , pp.1-37
- 17) 技寶堂, Cement 系 固化劑お 利用する 地盤改良 manual (1990)
- 18) Bowles (1988), “Foundation analysis and design”, 4th ed, McGraw-Hill