한국지하수토양환경학회지 Vol.7, No.1 41~51, 2002
Journal of KoSSGE Vol.7, No.1 41~51, 2002

原著

매립지 차수재로서 자가치유재의 투수 및 강도특성

장 연 수[1]* · 문 준 석[2]

[1]동국대학교 토목환경공학과, [2](주) 선진 엔지니어링

Permeability and strength characteristics of Self-Sealing and Self-Healing materials as landfill liners

Yeon-Soo Jang[1]* · Jun-Seok Moon[2]

[1]Dept. of Civil & Environmental Engineering, Dong-Guk University
[2]Sun-Jin Engineering & Architecture

ABSTRACT

Recently, domestic waste landfills are constructed sometimes on seashore area to provide large landfill area. In order to strengthen the foundation of landfills and to prevent the infiltration of leachate through the bottom, many cases of constructing cement hardened liners on seashore clays are found. In these cases, it is possible to have cracks in the hardened liners due to settlement with waste load since the stiffness of the hardened liner is greater than that of clay liners.

In this study, the capability of Self-Sealing and Self-Healing (SSSH) liner made with a seashore clay in the metropolitan landfill to prevent the percolation of water and leachate is examined using flexible-wall permeameter test and using uniaxial compression test. Applicability of SSSH to weathered granitic soil is also examined for self-sealing capabilities. The result of flexible permeameter test for SSSH with the seashore clay showed that permeability obtained was lower than permeability criteria of Korean waste management law. The permeability and strength characteristics of SSSH with granitic soil and bentonite showed better results than with

* Corresponding author : ysjang@doungguk.eud
원고접수일 : 2001. 7.13 게재승인일 : 2001.12.20

the seashore clay.

Key Words : Self sealing, Self healing, Clay liners, Metropolitan landfill, Bentonite, permeability characteristic, strength characteristic

요 약 문

최근 국내 폐기물 매립지는 대규모의 부지를 조성할 수 있는 해안의 점토지반 상에 시공되고 있으며 차수층의 강도증진과 차수층 바닥을 통한 침출수의 유출을 방지하기 위해 시멘트 고화 차수재를 많이 사용하고 있다. 그러나 점토 차수층에 비해 큰 강성을 가지고 있는 시멘트 차수층은 매립되는 쓰레기 하중에 따라 침하가 동반되고, 부등침하가 발생할 경우 차수층에 균열이 발생될 수 있다.

본 연구에서는 폐기물 침출수의 유출을 방지하기 위해 ○○매립지 점토를 혼합하여 만든 자가형성(Self-Sealing) 및 자가치유(Self-Healing) 차수층의 적용성을 평가하기 위해 삼축투수시험과 일축압축시험을 실시하였으며, 국내에 폭 넓게 분포하는 화강풍화토를 혼합하여 SSSH 차수층을 시공할 경우, 본 공법이 적용 가능한지를 평가하기 위해 자가형성(Self-Sealing)에 대한 시험을 실시하였다. 그 결과 점토가 혼합된 SSSH 차수재의 투수계수는 폐기물 관리법에서 요구하는 기준치보다 작은 값을 갖고 있었으며 일축압축강도 역시 증가되는 경향을 나타내었고, 화강풍화토와 벤토나이트가 혼합된 SSSH 차수재는 점토만을 사용한 경우보다 좋은 개량효과를 보였다.

주제어 : 자가형성, 자가치유, 점토 차수층, 수도권매립지, 벤토나이트, 투수특성, 강도특성

1. 서 론

국내에서는 1980년대 후반부터 폐기물 매립시 매립지의 차수 및 집수시설에 발생하는 침출수의 누수를 저감시켜 주변환경의 오염을 최소화하는 위생매립 개념을 도입하였다. 이후로 폐기물의 위생매립에 대한 관심이 고조되면서 1997년 7월 개정된 폐기물 관리법에는 매립지 시설에 대한 기술적 지침이 세분화되었고 신규매립지에 대해서는 준공전에 설비검사를 받도록 기술적 감독을 강화하였다.

폐기물 매립지는 대규모의 부지를 비교적 쉽게 확보할 수 있는 해안 점토지반 위에 시공하고, 침출수 집수시설의 설치를 용이하게 하고 지반의 차수효과를 증진시키기 위하여 고화재를 보조차수재로 포설하는 사례가 있다. 내륙지역에 위치한 폐기물 매립지에서는 점토차수재료를 현장과 인접한 곳에서 구하기 어렵기 때문에 시멘트계열의 고화재를 현지토양과 혼합하여 차수재로 사용하는 설계가 많이 적용되고 있다.

현재 폐기물 처리방법은 재활용, 소각, 매립 등 다양한 방법이 있으며 현재까지 국내에서는 매립에 의한 처리를 주로 사용하고 있다. 하지만, 지금까지 설치된 대부분의 매립장은 침출수, 악취 등에 대한 환경오염 저감시설을 갖추지 않은 단순투기 방식의 비위생적인 매립방식으로 매립되고, HDPE Sheet 차수재가 폐기물(폐유리 등)이나 매립장비에 의해 찢어지는 등의 현상으로 인해 침출수가 외부로 유출되어 매립지 주변 토양 및 지하수 등의 환경오염을 유발시키고 있는 실정이다. 따라서 국내에서는 고화토공법과 혼합토공법에 대해 한국건설기술연구소(1992[1], 1994[2]), 건설교통부(1995)[3], 장연수(1999)[4], 정하익(1999)[5] 등에 의해 연구가 진행되었으며, 최근에는 이 차수층의 찢김 또는 균열발생시 침출수 유출문제에 대한 문제점이 제기되고 있는 실정으로 이를 해결하기 위한 방법으로 Van der Sloot(1995)[6], McGregor(1997)[7]에 의한 자가형성/자가치유 차수재에 대한 연구가 국내에 도입되어 연구되고 있다.

본 연구는 국내 대표적 해안 폐기물 매립지에 시공된 자가형성 및 자가치유(Self Sealing and Self Healing, SSSH) 차수재와 동일한 시료를 가지고 Seal층의 형성여부와 투수특성, SSSH 차수층의 강도를 평가하고 침하로 인한 변형이나 시공 후 여러 요인으로 인하여 발생되는 균열이 자가치유 되는지를 평가하였다. Seal층에 발생된 균열을 모사하기 위해 시편에는 인위적 균열을 가한 후 차수능과 강도회복 정도를 평가하였다. 또한 국내에 폭 넓게 분포하고 있는 화강풍화토 지반에 자가치유 차수재를 이용한 매립장을 건설할 경우 화강풍화 원지반토를 혼합 조성한 SSSH차수재의 적용성을 평가하였다.

2. SSSH 차수재의 기본개념

SSSH 차수재는 칼슘과 규소 성분을 함유한 두 개 이상의 수평 또는 수직층 상호간의 미세확산과 화학작용에 의해 형성되는 차수층이다. 수평, 수직층에 차수층을 형성하는데 필요한 각 성분의 배합량보다 많이 혼합하여 차수층 형성 후에도 각 층에 잔류하도록 한다. 차수재가 차수기능을 수행하던 도중 손상이나 파괴가 발생하더라도 각 층에 남아 있는 성분에 의해 2차 포졸란 반응을 유도하여 손상된 seal층을 자가치유한다.

Fig. 1은 자가형성(Self-Sealing) 과정을 나타내는 기본 개념도인데 (a)는 침전-확산반응이 일어나기 전 상하부층에 위치한 차수재(A, B)의 분포를 나타내고 있으며, (b)는 반응초기 상하부층 경계면에서 차수층(AB)이 얇게 형성되는 모습을 나타낸 것이다. (c)의 경우는 확산반응의 촉진으로 차수층 주변에 활발한 침전-확산반응이 일어나고 있는 상황을 (d)는 이러한 결과로 두 차수재의 경계면에 두터운 차수층이 형성된 것을 보여준다.

즉, 두 개 이상의 상이한 화학성분을 갖고 있는 차수재는 층의 경계면에서 침전을 일으키며, 침전반응은 화학물질 농도를 감소시켜 농도경사를 만들고, 농도경사는 경계면에 추가적인 침전을 촉진시킨다. 자가형성 및 자가치유 과정에서 가장 큰 역할을 하는 차수층의 화학물질은 각각 실리카계 무기물과 석회계 무기물이 중심을 이루며 이들의 자가형성 및 자가치유시 반응식은 식 (1)과 같다.

$$C_aO + S_iO_2 + H_2O \rightarrow xC_aO \cdot \varphi S_iO_2 \cdot \phi H_2O \rightarrow C_a \cdot S_iO_3 \cdot H_2O \quad (1)$$

실리카계 무기물층과 석회계 무기물층의 경계면에는

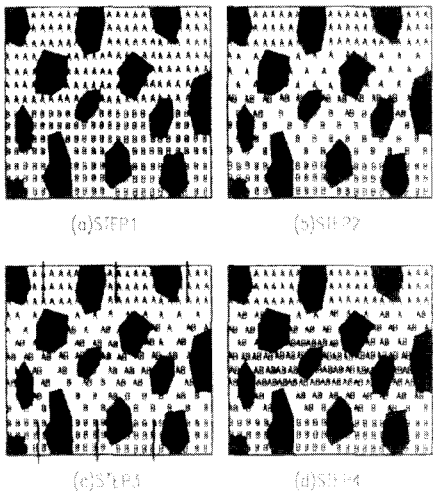


Fig. 1. Microscopic view of self-sealing effect(Van der Sloot[6], 1995).

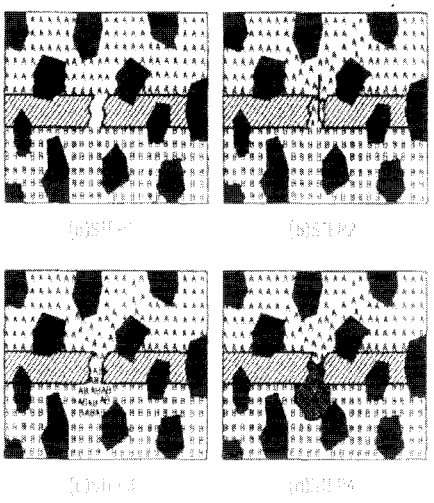


Fig. 2. Microscopic view of self-healing effect(after Van der Sloot[6], 1995).

포졸란 반응이 발생하여 비용해성 광물질인 칼슘-실리케이트-수화물(C-S-H 반응물질)이 생성되고 시간이 흐를수록 실리케이트 수화물이 퇴적되어 불투수성 차수층(Seal)을 형성한다.

폐기물 매립지 차수층이 차수기능을 수행하는 도중 손상이나 파괴에 의해 균열이 발생하면 상하부층에 존재하는 여분의 CaO와 SiO_2가 재반응을 통하여 손상된 Seal층은 Fig. 2와 같이 치유된다.

Fig. 2의 회색부분은 자가형성에 의해 생성된 Seal층이며 (a)는 차수층에 균열이 발생한 단계이고, (b)는 균열 발생 후 차수층 내의 함유한 상이한 두 개의 성분(A, B)이 균열이 발생된 곳에 스며드는 단계이며, (c)는 침전-확산 반응에 의한 손상된 차수층에 자가치유반응이 활성화되는 단계이다. (d)는 활발한 침전-확산 반응에 의해 차수층이 치유되어 원래 상태를 회복한 단계를 나타낸 것이다.

3. 실 험

3.1 장 치

본 연구에 사용되는 시험장치는 ASTM D5084-90[8] 투수시험장치를 수정하여 제작한 것으로 ASTM 시험기에 사용되는 시료보다 큰 시료를 사용하도록 되어 있다. 장치는 3연식으로서 3개의 시료에 대해 동시에 투수시험을 실시할 수 있고, 포화도 측정을 위해 cell 하부에 디지털 간극수압계가 연결되어 있으며, 이것은 다시 컴퓨터와 연결되어 모니터 화면으로 출력된다. 시험장치의 구조도는 Fig. 3과 같다.

시험기에는 시료 내 기포를 신속히 제거하기 위해 진공펌프가 연결되어 있으며, 압력이 가해지는 크기와 투수유량의 변화를 측정하기 위한 압력 게이지와 stand pipe를 설치하였다. stand pipe와 3축 cell 내

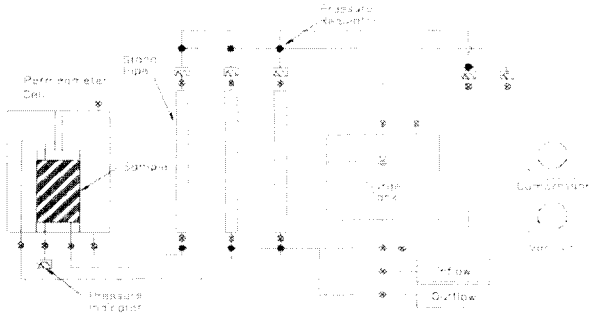


Fig. 3. Schematic diagram of permeameter cell.

에 증류수를 공급하기 위한 저수조는 시험기 하부에 있으며, 압력 게이지의 오차정도를 줄이기 위해 Digital방식의 압력 게이지를 추가적으로 설치하였다.

3.2 시험 재료

3.2.1 반응 차수층의 화학조성

폐기물 매립시설에서 지하수가 위치한 지중으로 침출수가 유입되는 것을 막기 위해 사용되는 고화재 PA와 PB를 한국화학시험연구소에 의뢰하여 얻은 성분분석 결과는 Table 1과 같다. 차수층 상부층에 포설되는 PB는 생석회(CaO) 성분이 84.6%이상 함유되어 있고, 하부층에 포설되는 PA는 산화규소(SiO_2) 성분이 62%로 구성 되어 있다.

3.2.2 점토 재료 특성

SSSH 차수재에 혼합하는 점토는 폐기물 매립지에서 채취한 시료로서 실트성분 63.7%, 점토성분 14.5%, 모래성분 21.8%인 통일분류법상 CL로 분류되었으며 물리적 특성은 Table 2와 같다.

3.2.3 강우침출수의 화학적 특성

Table 1. Chemical components of hardened barrier materials.

Components		K_2O	CaO	SiO_2	MgO	Na_2O	$Al2O_3$	Fe_2O_3	SO_3	organic content	others
Percentage (%)	PA	1.10	12.30	62.00	3.54	13.20	2.82	0.58	3.66	0.30	0.50
	PB	0.48	84.60	4.27	2.48	0.40	1.53	0.47	0.30	4.93	0.54

Table 2. Physical characteristics of seashore clay.

Gs	w (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	γ_{dmax} (t/m³)	w_{opt} (%)	Grain size (%)		
							silt	clay	sand
2.68	35	42	25.46	16.54	1.78	13.5	63	25	12

본 시험에서는 침투수로 증류수뿐 아니라 폐기물 매립지 부근에서 채취한 강우침출수를 사용하여 자가형성 및 자가치유 시험을 실시하였다. 실험에 사용된 강우침출수의 무기물 농도는 선택성 이온 전극(specific ion electroide)과 원자흡광도기를 이용하여 분석한 송현용[9]의 분석결과를 이용하였으며, 분석결과는 Table 3과 같이 나타났다.

Table 3. Chemical properties of rainfall water.

Type	Atomic weight	Rainfall water	
		mg/L	meq/L
Cl^-	35.5	5500	154.9
Na^+	22.9	1452	63.4
K^+	39.1	79.5	2.0
Ca^{2+}	24.3	1800	74.1

3.2.4 화강풍화토 재료 특성

국내지반의 대표적인 흙이라 할 수 있는 화강풍화토는 인천시 구 일대에서 채취한 시료로서 자연상태의 함수비가 17.0%, 최적함수비는 13.5%, 최대 건조단위중량은 1.95t/m³로 나타났으며 입도분석결과 입도분포가 불량한 모래 또는 자갈이 섞인 모래(SP)로 분류되었다. Table 4는 화강풍화토의 물리적 특성을 정리한 것이다.

3.3 시료 성형

점토와 화강풍화토 시료의 포화시간을 단축시키기 위해 직경 10cm, 높이 10cm로 시료를 제작하였으며

Table 4. Physical characteristics of Weathered granitic soil.

Gs	w (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	γ_{dmax} (t/m³)	w_{opt} (%)	USCS
2.68	17	27.1	NP	-	1.89	13.5	SP

Table 5. Ratio of mixed PA, PB and Seashore clay.

Sample		Weight (g)			Mixing ratio
Hardened barrier materials	PA mixed with clay	PA	clay	water	PA : clay = 1: 5
		114.5	572.7	92.8	
	PB mixed with clay	PB	clay	water	PB : clay = 1: 6.67
		89.6	597.6	92.8	

Table 6. Ratio of mixed PA, PB and weathered granitic soil.

Sample		Weight (g)			Mixing ratio
Hardened barrier materials	PA mixed with granitic soil	PA	granitic soil	water	PA : granitic soil = 1: 5
		121.1	605.4	98.1	
	PB mixed with granitic soil	PB	granitic soil	water	PB : granitic soil = 1: 6.67
		94.7	631.7	98.1	

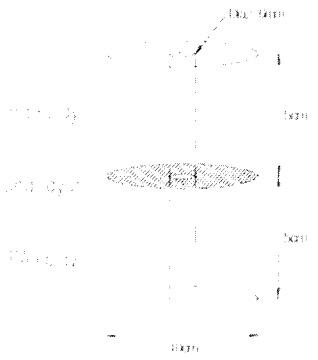


Fig. 4. Schematic diagram of self-healed soil sample.

시료를 구성하는 성분의 혼합중량은 Table 5와 Table 6과 같이 혼합하였다.

자가치유 능력을 평가는 점토시료에 대해서 실시하였으며 인위적 균열을 모사하기 위해 직경 10cm, 높이 10cm로 성형시료 상부 중앙에 직경 6mm 드릴로 구멍을 뚫어 하단부까지 천공하였다. Fig. 4는 자가치유능을 평가하기 위한 시료의 단면도을 나타낸 것이다.

3.4 고화차수재의 차수능 시험

시료포화는 Head[10]의 삼축압축시험에 준하여 실시하였으며 투수는 ASTM D 5084[8]에 따라 실시하였다.

시료를 포화시키기 위해 측방(cell) 압력 stand pipe와 상 · 하부 압력 stand pipe의 내, 외관에 증류수를 공급하고, 3축 cell 내부에도 공기가 잔류하지 않도록 증류수를 가득 채웠다. 간극수압 측정기에 연결된 관 속에 잔류하는 기포를 제거한 후 압력계의 눈금을 영점 수정하였다. 시료를 포화시키기 위해 초기 cell의 구속압력을 0.3kg/㎠으로 조정하고 하부 배압은 0.2kg/㎠를, 상부 배압은 0.09kg/㎠의 진공압을 주어 기포를 제거하였다. 포화도가 95%이상인 경우 시료가 완전 포화된 것으로 간주하고 투수시험을 실시하였다. 시험에 가해지는 동수경사는 ASTM D 5084 규정에 따라 결정하였다.

Table 7. The hydraulic gradients used for various permeability ranges.

Permeability (cm/sec)	Hydraulic Gradient (i)	Pressure difference between upper(P_1) and bottom(P_2)
$1\times10^{-3}\sim1\times10^{-4}$	2	0.020 kg/㎠
$1\times10^{-4}\sim1\times10^{-5}$	5	0.050 kg/㎠
$1\times10^{-5}\sim1\times10^{-6}$	10	0.098 kg/㎠
$1\times10^{-6}\sim1\times10^{-7}$	20	0.196 kg/㎠
$1\times10^{-7}\sim$	30	0.295 kg/㎠

일반적으로 점토와 미세분말상태의 고화제가 혼합된 자가형성용 시료는 점토보다 낮은 투수계수(1×10^{-7}cm/sec이하)를 가지므로 동수경사 30을 주었으며, 인위적 균열을 가한 자가치유용 시료의 투수계수가 점토시료보다 큰 값을 가지므로 동수경사 2를 주었다. 투수시험은 유입량과 유출량이 일정하게 변할 때까지 실시하며 눈금의 변화가 일정해 질 때의 투수유량과 투수 소요시간을 기록하고 식 (2)를 이용하여 투수계수를 산출하였다.

$$K=\frac{q}{60\cdot A\cdot i} \tag{2}$$

여기서, 는 투수유량이고 는 시료의 단면적이며 는 동수경사를 나타낸다.

3.5 고화차수재의 일축압축강도 시험

일축압축강도 시험은 차수능 시험을 끝낸 시료를 대상으로 KS F 2314-91에 준하여 실시하였다. 차수능 시험에 사용된 높이와 직경의 비가 1:1인 시료를 높이와 직경 비가 2:1이 되도록 성형하여 압축강도를 구하였다. 또한 시료 상하부면에 발생되는 부착력을 감소시키기 위해 유제(grease)를 바른 후 시험하였다.

4. 결과 및 고찰

증류수로 포화시킨 시료에 대해 투수시험을 실시하

여 투수계수의 진행상태를 분석하였고, 같은 조건에서 제작된 시료에 직경 6mm 드릴을 이용하여 구멍을 뚫은 다음 투수계수의 진행상태가 어떻게 변하는지 분석하였으며 그 결과를 구멍을 뚫지 않은 상태와 비교하여 자가치유 능력을 평가하였다. 또한 침투수의 종류에 따라 투수계수가 어떤 변화를 하는지 알기 위해 매립지 점토시료를 증류수와 강우침출수로 시험하였고 점토 이외의 다른 지반에서의 적용성을 평가하기 위해 인천시 구 일대의 화강풍화토를 대상으로 자가형성시험을 실시하였다.

4.1 증류수에 의한 점토차수층의 자가형성 및 자가치유

SSSH공법에 의한 실험실 조건인 증류수를 이용한 투수시험을 실시하여 투수계수의 진행상태와 Seal층 형성의 진행을 분석한 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

점토시료의 초기 투수계수는 매립지 차수재에 대한 설계기준치(1×10^{-7}cm/sec)와 근사한 1.49×10^{-7}cm/sec을 나타내었으며, 시간의 흐름에 따라 점차적으로 투수계수가 적어졌다. 측정 4일 후에는 PB층과 PA층 경계면에 약 0.3mm정도 Seal층이 형성되었고, 투수계수가 9.12×10^{-8}cm/sec로 감소하였다.

초기 투수계수의 감소 폭은 10일경의 투수계수 변화

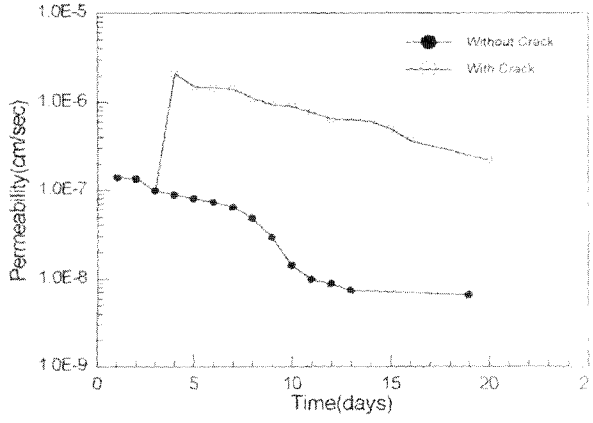
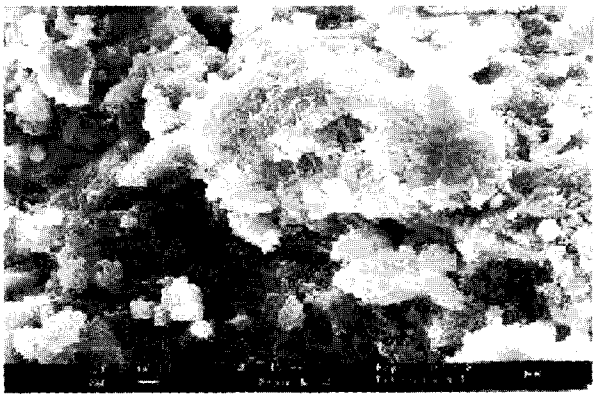
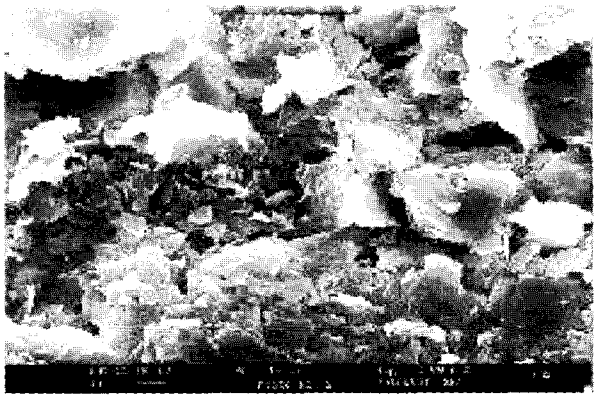


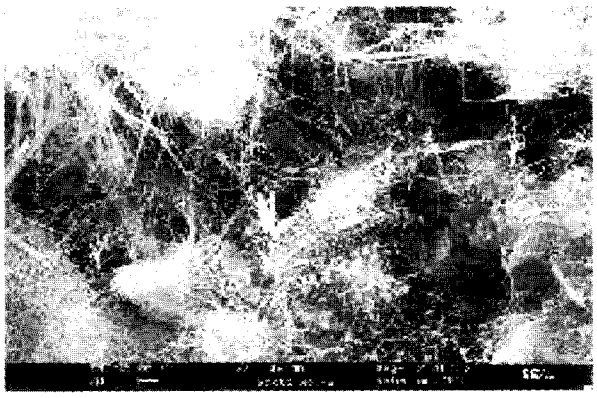
Fig. 5. Changes of permeability due to self-sealing and self-healing effect for clay mixed samples with de aired water.



(a) PA layer



(b) PB layer



(c) Seal layer

Fig. 6. SEM photograph of PA(lower), PB(upper) and seal layer.

폭보다 적은데 이는 시료의 간극을 칼슘 실리케이트 수화물(C-S-H 반응물질)에 의하여 메워짐으로서 투수계수를 감소시키는 데 다소 시간이 걸리며 간극이 수

화물에 의하여 어느 정도 이상을 메우게 되면 투수계수는 더 급하게 감소하는 것으로 나타난다. 대체로 투수계수는 시간에 비례하여 지속적으로 적어져, 투수 13일째에는 8.00×10^{-9}cm/sec까지 감소하였고, 그 이후에는 감소하는 폭이 점점 완만하게 진행되어 수렴상태에 도달하였다. Fig. 6은 실험종료 후 PA층, PB층 및 Seal층을 주사전자현미경으로 확대한 것인데 seal층의 경우 CaO와 SiO_2성분에 의한 포졸란 반응에 의해 형성된 섬유형태의 새로운 물질을 찾아볼 수 있다.

SSSH공법의 자가치유능을 평가하기 위해 시료의 seal층을 인위적으로 파괴하고 투수계수의 회복정도를 분석결과를 Seal층 형성의 진행결과와 함께 Fig. 5에 도시하였다. Seal층이 손상된 시료의 투수계수는 2.16×10^{-6}cm/sec까지 증가되었으나 시료내부에 손상된 seal층이 치유되면서 감소하기 시작하고 투수 20일 후에는 투수계수가 1.98×10^{-7}cm/sec까지 회복되었다. 이것은 균열이 없는 상태의 투수계수와 비교하여 91.1%가량 투수계수가 회복된 상태로서 SSSH공법의 자가치유 능력을 보여주는 결과이다.

4.2 강우침출수에 의한 점토차수층의 자가형성 및 자가치유

시공현장에서 채취한 강우침출수에 의한 점토차수층의 자가형성 및 자가치유 능력을 평가하고자 Seal층을 인위적으로 파괴한 시료와 그렇지 않은 시료의 투수성 변화를 분석하여 Fig. 7에 도시하였다.

6mm드릴을 이용하여 차수층을 인위적으로 파괴한 경우 seal층의 손상으로 인해 초기 투수계수가 5.72×10^{-6}cm/sec까지 증가되었으나 지속적인 자가치유에 의해 투수시작 15일 후에는 1.03×10^{-7}cm/sec까지 차수능이 회복되었는데 차수층 손상이 없는 시료의 차수능에 비교하여 98.3%까지 회복된 것이다. 따라서 SSSH공법은 증류수뿐 아니라 강우 침출수를 사용한 경우에도 자가치유 능력을 가지고 있음을 보여준다.

4.3 침투수 종류에 따른 점토차수재의 자가형성 및 자가치유

차수층에 침투수가 유입되는 경우 침투수의 종류에 따라 SSSH공법이 어떠한 적응성을 갖는지 분석하기 위해 증류수와 매립지 현장의 강우침출수를 사용하여 투수계수 변화를 측정하였다. fig. 8은 침투수의 종류에 따른 차수능의 변화를 나타낸 것이다.

Fig. 8에 나타난 바와 같이 Seal층의 형성은 증류수를 침투수로 사용할 때 보다 강우침출수를 사용하였

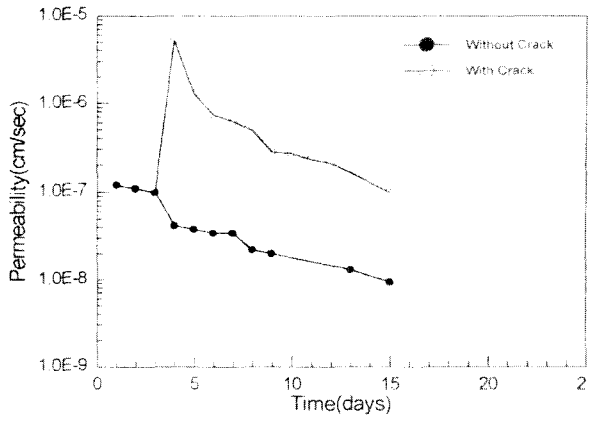


Fig. 7. Changes of permeability due to self-sealing and self-healing effect for clay mixed samples with rainfall water.

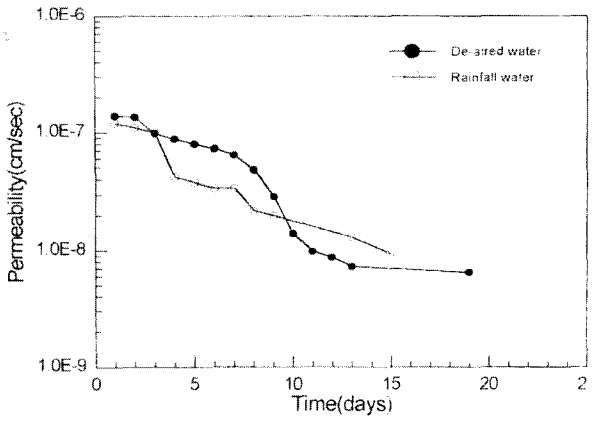


Fig. 8 Changes of permeability due to self-sealing effect for clay mixed samples with various liquids infiltrated

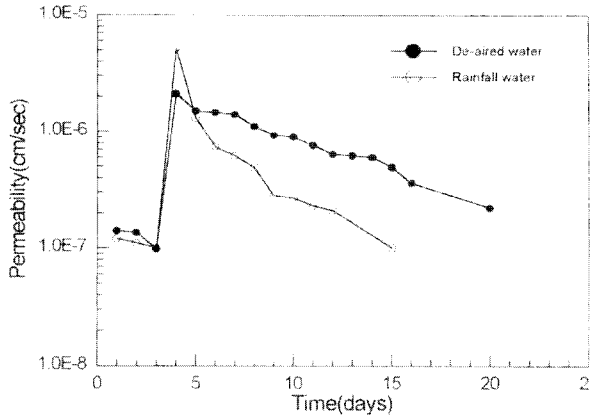


Fig. 9. Changes of permeability due to self-healing effect for clay mixed samples with various liquids infiltrated.

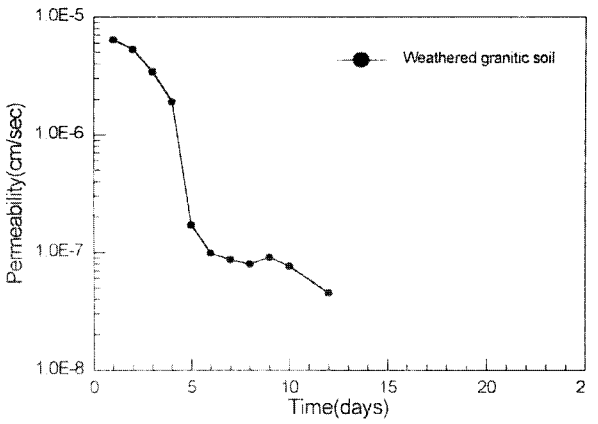


Fig. 10. Changes of permeability due to self-sealing effect for weathered granitic soil with de-aired water.

을 때 seal이 빠르게 형성되었으며, 침투수의 종류에 따라 초기에는 다소 투수계수의 변화가 다르지만 투수 15일 후에는 유사한 투수계수를 갖는 것으로 나타났다. 따라서 SSSH공법의 seal 형성은 침투수의 종류에는 큰 영향을 받지 않는 것으로 평가되었다. 침투수의 종류에 따라 손상된 seal층의 자가치유능을 비교한 결과 Fig. 9와 같은 결과를 얻었다.

Fig. 9에 나타난 바와 같이 손상된 seal층은 침투수의 종류에 따라 자가치유되는 과정이 다소 차이가 있었다. 강우침출수를 침투수로 사용하는 균열이 있는 시료의 초기 투수계수는 5.72×10^{-6}cm/sec이었으며 손상된 Seal층의 자가치유 속도가 증류수를 침투수로 사용한 경우보다 빠르게 진행되는 경향을 보였다.

4.4 증류수에 의한 화강풍화토 SSSH차수재의 자가형성

화강풍화토에 고화재 PA 또는 PB를 혼합한 시료의 투수계수의 변화는 Fig. 10과 같이 나타났다.

그림에 나타난 바와 같이 화강풍화토에 고화차수재를 혼합한 초기의 투수계수는 6.58×10^{-6}cm/sec으로 차수재의 기준치에 못 미치는 투수계수에서 시작되었지만 투수 5일 후에는 Seal층이 형성되어 1.65×10^{-7}cm/sec까지 투수계수가 감소하였고 투수 7일째는 8.32×10^{-8}cm/sec으로 차수재의 기준치를 하회하는 차수능을 보였다. 투수 9일째 투수계수가 소폭 상승하는 현상이 발생하였는데, 이는 얇은 막의 형태를 띄고 있는 seal층 중 다른 부분에 비해 다소 약한 부분이 내부압력에 의해 부분으로 파괴된 영향으로 판단된다. 투수 10일 이후에는 증가되었던 투수계수가 자가치유에 의해 다시 감소하는 경향을 보였다. 따라서 화강풍화토와 고화차수재를 혼합한 차수재의 경우도 폐기물 매립지 차수능 기준에 적합한 seal층을 자가형성하는 것으로 평가되었다.

4.5 고화차수재의 압축강도 시험

고화차수재의 차수능 실험을 마친 시료를 대상으로 강도특성을 파악하기 위해 비구속상태의 일축압축강도(KS F 2314-91)시험을 실시하였으며 그 결과를 바탕으로 침투수의 종류에 따른 강도변화를 비교하고 자가형성된 시료와 인위적 파괴를 가한 시료의 강도변화를 비교 분석하였다. 또한 자가형성 및 자가치유(SSSH)공법을 실시함으로써 얻어지는 원지반 점토의 개량 효과에 대해서도 알아보았다.

침투수의 종류에 따른 강도변화는 Fig. 11과 같으며 Fig. 11에 나타난 바와 같이 증류수를 침투수로 사용할 때의 일축압축강도는 3.71kg/㎠이었으며 강우침

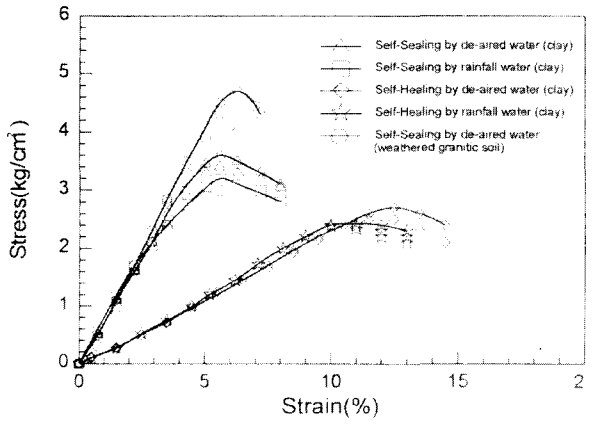


Fig. 11. Strength characteristics of self-sealing and self-healing barrier.

출수를 사용한 경우에는 증류수를 사용한 경우보다 다소 적은 3.34kg/㎠로 나타났지만 큰 차이를 보이지는 않았다. 따라서 증류수와 강우침출수에 의한 응력-변형률 거동 역시 유사한 형태를 갖고 있었다.

인위적 파괴를 가한 시료의 압축강도는 2.65kg/㎠로 파괴를 가하지 않은 시료의 강도인 3.71kg/㎠에 71%정도의 값을 나타내었다. 이는 차수능 시험 특성상 인위적 파괴를 가한 천공 부분의 영향으로 판단되며, 균열면 사이로 흙입자가 유입되는 경우 강도의 회복정도는 커질 것으로 사료된다.

자가치유 및 자가형성(SSSH)공법에 사용된 원지반 점토는 해성퇴적 점토로서 통일분류법상 CL로 분류되며 강도는 N치 10이하인 것으로 평가된 시료이다. 또한 컨시스턴시 분류상 매우 연약~연약점토로 분류된다. 점토의 컨시스턴시와 일축압축강도의 관계를 바탕으로 이 점토의 일축압축강도를 추정하면 0.5kg/㎠이하가 될 것인 바 현장조건과 가장 흡사한 강우침출수에 의해 형성한 SSSH 고화차수재의 일축압축강도와 원지반의 강도를 비교하면 파괴가 발생하기 전의 강도(3.34kg/㎠)에는 약 6.7배 이상의 강도 증가를, 인위적 파괴를 가한 후의 강도(2.38kg/㎠)에는 약 4.8배 이상의 강도 증가를 보였다.

5. 결 론

매립지 지반차폐재로 사용되는 자가형성 및 자가치유((Self-Sealing and Self-Healing) 차수재의 자가형성과 쓰레기 매립하중으로 인한 고화차수층에 균열이 발생된 경우 자가치유능을 평가하기 위해 삼축투수시험과 일축압축강도시험을 실시하였으며 일반적인 매립장 부지로 사용되는 점토지반 또는 화강풍화토 지반에 대해서 SSSH차수재의 적용성을 평가하였다.

침투수를 증류수와 강우침출수로 나누어 실험을 실시하였으며, 점토지반과 화강풍화토 지반에 혼합된 SSSH 차수재의 자가형성 및 자가치유 과정을 살펴본 결과 침투수의 종류에 관계없이 점토지반과 화강풍화토 지반의 차수능은 폐기물 관리법 기준치인 1×10^{-7}cm/sec이하로 감소하였고 SSSH 고화차수재에 의해 형성된 차수층의 자가치유능은 균열을 가한 후 2주 경과 후 1.9×10^{-7}cm/sec까지 회복되었으며 지속적인 투수계수 감소 추세를 보였다.

점토지반 이외의 지역에 대한 SSSH 고화차수재의 적용성 평가를 위해 사용된 화강풍화토의 투수계수는 투수 5일 후에 Seal층이 형성되어 1.65×10^{-7}cm/sec까지 투수계수가 감소하였으며 투수 7일째에는 8.32×10^{-8}cm/sec까지 감소하여 점토가 충분치 않은 지역에서도 원지반토를 이용한 SSSH공법을 적용할 수 있을 것으로 평가되었다. 또한 투수시험을 마친 시료에 대해 일축압축시험을 실시한 결과 자가형성 시료의 압축강도는 6.4kg/㎠, 자가치유 시료의 평균 압축강도는 5.6kg/㎠로 원지반토의 강도보다 10배 이상의 증가된 강도를 나타내었다.

REFERENCES

1) 한국건설기술연구원(1992), 도시폐기물 매립장의 건설부지 활용과 위생매립시스템에 관한 연구, 92-GE-112, 건설기술연구원.
2) 한국건설기술연구원(1994), 오염지반 및 지하수 정화기술에 관한 연구, 94-GE-1101-2, 건설기술연구원.

3) 건설교통부(1995), 폐기물 매립지 차수재 개발, 연구보고서, KICT/95-GE-1202, 한국건설기술연구원, pp295.

4) 장연수(1999), 연약지반위에 시공된 SSSH 차수재의 내구성과 고화재의 변형특성에 관한 연구, 연구보고서, 동국대학교 산업기술연구원.

5) 정학익, 이용수, 홍승서, 정길수, 이회준(1999), "흙-벤토나이트 혼합 차수재의 품질관리사례연구", '99 봄 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp497-504.

6) Van der Sloot, H. A., Pereboom, D., McGregor, R., Stegemamn, J. and Taat, J.(1995), Properties of self-forming and self-repairing seals, *SARDINIA '95*.

7) McGregor R. and Stegemann J. A.(1997), Performance Characteristics of a self-sealing/self-healing barrier, 1997 Int. Containment Technology Conf. and Exhibition, St. Peterburg Florida U.S.A.

8) ASTM(1992), Test method for measurement of hydraulic conductivity of saturated porous materials using a flexible wall permeameter D5084-90.

9) 송현용(1999), 점토와 고화재의 확산에 관한 실험적 연구, 석사학위논문, 동국대학교.

10) Head, K. H.(1981), Triaxial Test, Manual of Soil Laboratory Testing, Second edition, Vol. 3, Pentech press, pp1001-1017.