

SRSL(Self Recovering Sustainable Liner)재의 매립지 최종복토층에서 균열 손상 시 치유 능력 검토 Evaluating the recovering capacity of cracked SRSL in the landfill final cover

백현옥¹⁾, Hyunuk Baek, 하민기¹⁾, Minki Ha, 권오정²⁾, Ohjung Kwon, 박준범³⁾, Junboum Park

¹⁾ 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정, Graduate Student, School of Civil, Urban & Geosystem Eng. Dept., Seoul National Univ.

²⁾ 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사수료, Graduate Student, School of Civil, Urban & Geosystem Eng. Dept., Seoul National Univ.

³⁾ 서울대학교 지구환경시스템공학부 부교수, Associate Professor, School of Civil, Urban & Geosystem Eng. Dept., Seoul National Univ.

SYNOPSIS : Preventing the infiltration of rainwater into the landfill site is the main purpose of the final cover in landfill sites. Compacted clay layer or geomembrain have been used as a conventional landfill final cover. But they have several disadvantages when damages might occur due to puncturing, differential settlement and desiccation or freeze and thaw. For this reason, as an alternative method SRSL(Self Recovering Sustainable Liner) has been developed. Adopting the precipitation reaction of two chemical material, by forming precipitates that fill the pores, and lower the overall permeability of the liner. The advantage of this method is that when fracture of the liner occurs the remaining reactants of the two layers form precipitates that fill the fracture and recover the low permeability of the liner. In this study, the recovering ability of the SRSL with a crack due to the seasonal variation or differential settlements was investigated by permeability tests. And in order to estimate the durability of the SRSL after freeze/thaw and desiccation, uniaxial compression strength tests were performed.

Key words : SRSL, hydraulic conductivity, freeze/thaw, dry/wet, crack, landfill final cover, compression strength

1. 서론

매립지 최종 복토층은 우수나 표층수의 침투를 차단하여 침출수의 증가를 억제하고, 매립지 내에서 발생하는 악취 및 가스의 유출을 방지하는 역할을 한다. 이를 위해 최종 복토층의 차수층에 대한 경우 1.0×10^{-6} cm/s 이하의 투수성을 만족해야 하며 현재 우리나라에서 일반적으로 시공되고 있는 매립지 최종 복토층의 차수층으로써 지오멤브레인과 다짐 점토가

사용되고 있다. 그러나 지오멤브레인의 경우 부등 침하나 외부 충격에 의해 찢겨지는 경향이 있으며 다짐점토는 건조한 기후에 노출될 경우 투수성이 급격히 상승하게 된다. 따라서 기존의 지오멤브레인, 다짐점토 등을 대체할 새로운 기술이 요구되며 본 연구에서는 SRSL (Self- Recovering Sustainable Liner) 공법을 도입하고자 한다.

본 논문의 목적은 기후 변화에 대한 손상과 부등 침하, 하중변화 등에 의한 균열을 모사하여 SRSL의 자가 형성 및 치유 효과로 인한 차수성 회복을 검증하고 기후 변화가 SRSL의 내구성에 미치는 영향을 평가하는 것이다.

2. SRSL(Self-Recovering Sustainable Liner)의 정의

SRSL 이란 서로 다른 화학물질을 가진 두 개의 층을 인위적으로 조성해 계면에서의 포졸란 반응을 유도하고 이로 인한 침전물이 공극을 채워짐에 따라 투수성이 저하되고 균열이 발생할 경우에도 다시 반응하여 차수성을 회복할 수 있는 공법이다. 계면에서 발생하는 침전 반응의 화학식은 식(1)과 (2)로 나타낼 수 있다.

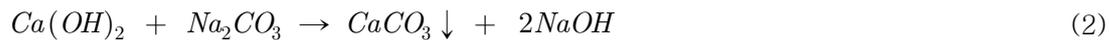


그림 1은 SRSL의 균열 치유 과정을 나타낸 것이다. 반응물질 A층과 반응물질 B층이 접촉하여 AB층과 같은 불투수층이 형성된다. 이 때 부등 침하나 외부 요인에 의해 균열이 발생하여도, 다시 주변의 반응물질 A와 B가 새로운 반응물질 AB로 결합하면서 균열을 치유하고 균열부위에 불투수층을 재형성한다.

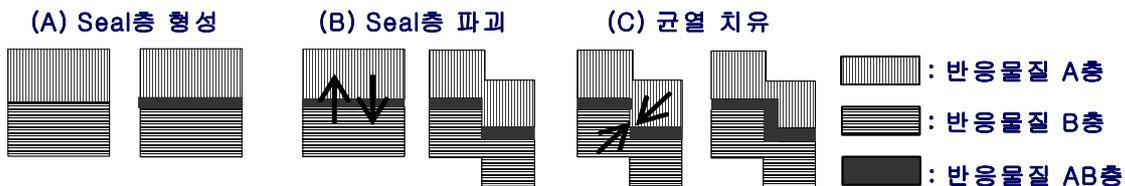


그림 1. SRSL 물질의 형성 및 균열 치유 과정

3. 예비 시험

본 시험에 앞서 SRSL 공시체의 구성 물질과 혼합비를 결정하기 위하여 예비 시험으로써 Batch test와 정수두 투수 시험을 수행하였다.

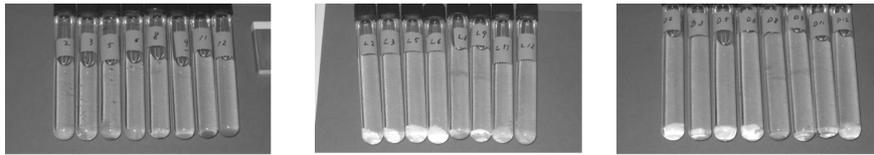
3.1 Batch Test

포졸란 반응을 확인하고 상부와 하부층의 물질 및 반응 촉진제의 혼합비에 따른 침전물의 양을 평가하기 위해 Batch test를 수행하였다(표 1.과 그림 2.참조). 상부층 물질로는 규조

표 1. Jar test에서의 번호

성분	규조토 (SiO ₂)	플라이 애쉬
#325 Ca(OH) ₂	2	3
#200 Ca(OH) ₂	5	6
폐석회	8	9
굴폐각	11	12

토와 플라이 애쉬, 하부층 물질로는 #325, #200 체를 통과한 소석회, 폐석회, 굴패각이 사용되었다. 시험 방법에 있어서는 먼저 상부층 및 하부층 물질을 각각 일정량씩 물과 혼합하고 12~24시간 동안 완속 교반을 수행한 후 용출과정을 통해 동일량의 상등액을 취해 교반, 혼합하여 육안으로 관찰하였다. 시험 결과 반응 촉진제의 혼합비가 증가할수록 더 많은 침전물이 발생하였으며, 상부층에서는 규조토, 하부층에서는 #200 체를 통과한 소석회가 가장 좋은 반응성을 나타내었다.



(a) case 1 (No Sodium) (b) case 2 (light Sodium) (c) case 3 (Dense Sodium)
그림 2. Batch Test 결과 (좌측으로부터 2,3,5,6,8,9,11,12의 순서임)

3.2 정수두 투수 시험

Batech test에서 결정된 SRSL 공시체의 혼합비를 결정하기 위해서 표준사를 이용하여 정수두 투수 시험을 수행하였다. 표 2는 본 시험에서의 상부와 하부층의 혼합비를 나타낸 것이다.

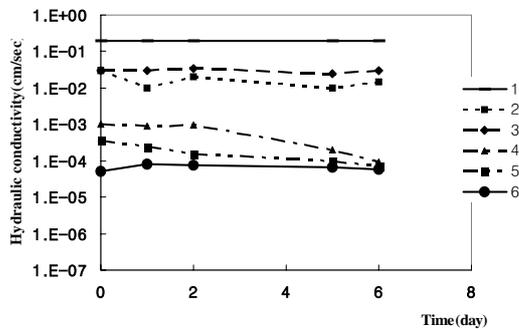


그림 3. 혼합비에 따른 투수계수

표 2. SRSL 공시체의 혼합비

	상부 층	하부 층
1	표준사	표준사 + 소석회
2	표준사 + 규조토 8%	표준사 + 소석회 8%
3	표준사 + 규조토 10%	표준사 + 소석회 10%
4	표준사 + 규조토 8% + Sodium 0.8%	표준사 + 소석회 8%
5	표준사 + 규조토 10% + Sodium 1.0%	표준사 + 소석회 10%
6	표준사 + 규조토 12% + Sodium 1.2%	표준사 + 소석회 12%

시험 결과는 그림 3과 같으며 반응 촉진제가 첨가된 경우 더 낮은 투수 계수를 나타내었다. 반응 촉진제의 양이 많을수록 초기 낮은 투수 계수를 나타내었으나 시간이 지남에 따라 점점 같아지는 경향을 보였다. 따라서 SRSL 공시체의 구성 물질과 혼합비는 규조토 8%와 소석회 12%, 반응 촉진제 0.8%로 결정하였다. 앞으로 SRSL을 반응 촉진제가 0.8% 함유된 SRSL로 간주하여 표기하겠다.

4. 공시체 제작

표 3은 공시체의 혼합비를 나타낸 것이다. SRSL 공시체와 비교하기 위해서 같은 입도 분포

를 가진 단일층의 공시체가 제작되었다. 직경 5cm 길이 10cm의 다짐 몰드에서 제작되었으며 표준 다짐 에너지와 같은 다짐 에너지를 가하기 위하여 다짐시험을 통해 다짐 층수와 타격 회수 및 함수비를 결정하였다. 시험 결과 4층 다짐에 층 당 타격회수는 6회로 하였다. 제작된 공시체에 여러 외부 환경적 요인에 의한 균열을 발생시키기 위하여 다음 2가지 방법이 사용되었다.

4.1 동결/융해, 건조/습윤

기후 변화에 의한 균열을 모사하기 위하여 동결/융해와 건조/습윤의 반복을 수행하였다. 동결 온도는 -40°C 이며 동결 및 융해 지속 시간은 6, 24시간, 반복 회수는 3, 10회로 하였다. 건조/습윤의 경우 상온 70°C 의 건조로에서 24시간 동안 양생하였으며 습윤 시에는 공시체가 흙으로 구성되어 있는 특성상 직접적인 습윤 양생이 어렵기 때문에 습도 90%의 항습조에서 30시간 동안 양생하였다.

4.2 압축 균열, 증공 홀

그림 4, 5는 다음과 같은 인위적인 방법으로 균열을 발생 시킨 이후의 공시체 모습이다. 부등 침하나 외력에 의한 극심한 균열을 발생시키기 위하여 $20\sim 25\text{kgf/cm}^2$ 의 압축력을 이용하여 압축 균열을 발생시켰고, 드릴을 이용하여 공시체 중앙을 관통하는 홀을 만들었다.

표 3. 공시체의 혼합비

	SRSL		단일층	
	A층	B층	A층	B층
풍화토(%)	92	88	90	90
규조토(%)	8	-	10	-
소석회(%)	-	12	-	10
Na_2CO_3 (%)	0.8	-	-	-
물함유량(%)	12	12.5	12	12.5

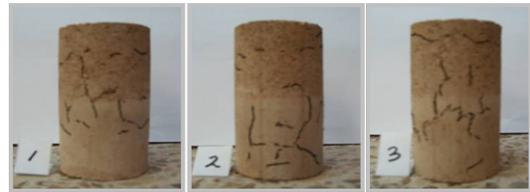


그림 4. 압축 균열이후의 공시체 모습



그림 5. 드릴로 홀을 만든 공시체 모습

5. 시험 방법

5.1 연성벽체 투수시험

균열이 발생할 경우 계면에서의 침전 반응에 의한 SRSL의 차수성 회복 능력을 평가하기 위하여 동결/융해, 건조/습윤과 인위적인 방법에 의해 균열이 가해진 공시체에 대하여 연성 벽체 투수 시험을 수행하였다. 그림 6은 본 연구에서 사용된 연성 벽체 시험기를 나타낸 것이다. 시험기는 ASTM 투수 시험기를 본 연구에 사용되는 공시체의 크기에 맞도록 변형되었으며 가압과 구속압을 조절 할 수 있다. SRSL 공시체의 침전 반응에 의한 투수성 저하를 보기 위하여 포화를 시키지 않은 상태에서 시험을 수행하였다. 공시체가 저투수성의 세립질 입자로 구성되

어 있기 때문에 가압은 5 psi(34.5kpa)로 동수경사를 대략 35로 주었고, 구속압은 10 psi로 하였다.

5.2 일축압축강도시험

균열이 발생할 경우의 SRSL의 내구성 평가를 위해 일축압축강도 시험을 수행하였다. 그림 7은 본 연구에 사용된 일축 압축 강도 시험기를 나타낸 것이며, 파괴 시 응력을 공시체의 일축압축강도로 하였다. 가해진 압력은 전압측정 장치에 의해 기록되고, 식 (3)에 의해 다시 응력 단위로 환산되었다.

$$P(kgf) = 0.1324 \cdot V(mmV) \cdot 1000 + 5.175 \quad (3)$$

일본의 경우 매립지 최종 복토층의 일축압축강도 기준은 0.5kgf/cm^2 이며 본 논문에서는 운반 장비를 고려하여 5kgf/cm^2 로 정하였다.

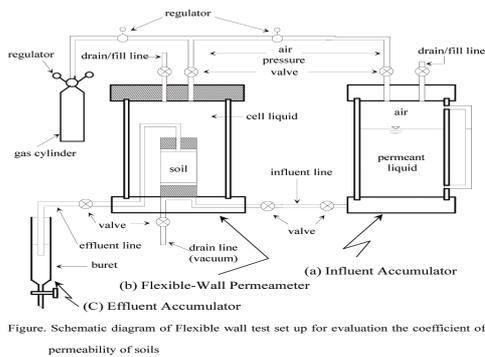


Figure. Schematic diagram of Flexible wall test set up for evaluation the coefficient of permeability of soils



그림 7. 일축압축강도 시험기

그림 6. 일축압축강도 시험기 설계도

6. 시험 결과

6.1 투수 시험

6.1.1 동결/융해와 건조/습윤 후 시료에 대한 시험

기존의 KS 규정에 따른 시험 적용 시 동결/융해에 대한 경향성 파악이 힘들기 때문에 동결 효과를 극대화하기 위하여 실제 현장 조건보다 낮은 온도(-40°C)에서 동결시켰다. 그림 8은 동결온도 -40°C 에서 각각 6, 24시간 동안 3, 10회 반복한 투수시험 결과이다. SRSL 3 cycle에서는 $5.0 \times 10^{-7}\text{cm/s}$ 투수계수를 유지하였으며 10 cycle에서는 5.0×10^{-6} 에서 $1.0 \times 10^{-6}\text{cm/s}$ 로 감소하거나 $1.0 \times 10^{-6}\text{cm/s}$ 의 투수계수를 유지하였다. 이와 같은 시험 결과에서 SRSL의 자가 치유 효과가 명확히 나타나지 않음에 따라 그림 9와 같이 반응 촉진제를 2% 함유한 SRSL 공시체에 대해서 투수 시험을 수행하였으며, 비교분석을 위해 단일층에 대한 투수시험을 병행하였다. 단일층의 경우 동결/융해 이후, 투수성이 증가한 반면 반응 촉진제 2% SRSL 공시체의 경우 초기부터 $1.0 \times 10^{-8}\text{cm/s}$ 의 매우 낮은 투수성을 보였다.

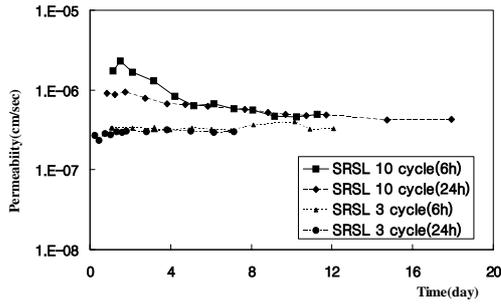


그림 8. 동결/융해 3,10cycle에 대한 투수계수 (-40°C~20°C, 6-24시간)

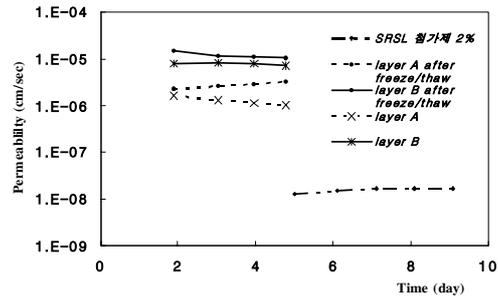


그림 9. 반응 촉진제 2% SRS�에 대한 동결/융해 (-40°C~20°C, 6시간 10cycle)

그림 10~12에서 보는 바와 같이 건조/습윤의 반복 횟수가 증가함에 따라 초기 투수계수가 증가하는 경향을 보였고, 건조/습윤이 5회 반복 되었을 때는 반응 촉진제 2%의 SRS� 공시체를 제외하고 모든 공시체에서 규정 치(1.0×10^{-6} cm/s) 이상의 높은 초기 투수계수를 보였다. 반응 촉진제 0.8%의 SRS� 공시체의 경우 초기 투수계수에서 감소하는 경향이 나타났으나 그 폭은 크지 않았다.

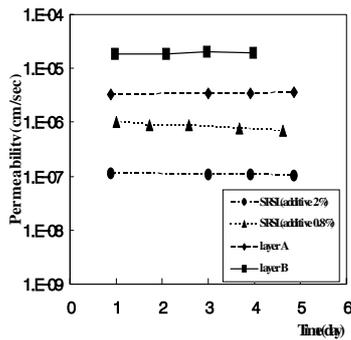


그림 10. 건조/습윤 1cycle

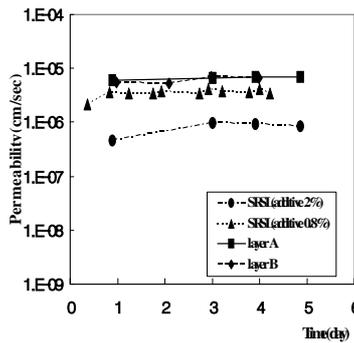


그림 11. 건조/습윤 3cycle

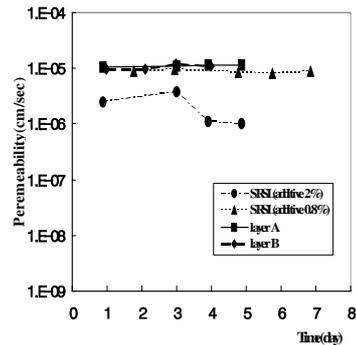


그림 12. 건조/습윤 5cycle

따라서 동결/융해 및 건조/습윤에 있어서 SRS�이 차수성을 회복할 수 있는 가능성을 보였으며, 이를 위해선 반응 촉진제의 양이 매우 중요한 요소임을 알 수 있다.

6.1.2 인위적 crack을 가한 시료에 대한 시험

그림 13은 압축 균열에 대한 투수 시험 결과로써, 반응 촉진제 0.8%의 SRS� 공시체와 단일층 A, B 모두 6×10^{-6} cm/s, 5×10^{-5} cm/s의 높은 초기 투수계수를 나타냈으며, SRS� 공시체의 경우만 감소하는 경향을 보였다. 반응 촉진제 2% SRS� 공시체의 경우에는 초기부터 1×10^{-8} cm/s의 매우 낮은 투수계수를 유지하였다. 표 4는 드릴로 구멍을 뚫은 공시체에 대한 투수시험을 한 결과이다. 단일층에 구멍을 뚫은 경우, 구멍이 뚫리지 않은 것보다 100~1000배의 투수계수 증가가 발생하였다. 반면 SRS� 공시체의 경우 반응 촉진제 0.8%에서는 4.52×10^{-6} cm/s로 구멍이 뚫리지 않은 SRS� 공시체에 비해 10배의 투수계수 증가가 발생하였으나 반응 촉진제 2%에서는 투수계수가 1.0×10^{-8} cm/s로 일정하였다. 이로써 압축 균열, 중공 홀과 같은 큰 균열이 공시체에 발생 할 경우 반응 촉진제의 배합 비에 따라 차이는 있

으나 SRSL 공시체의 침전 반응에 의한 차수성 회복 효과를 확인 할 수 있었다.

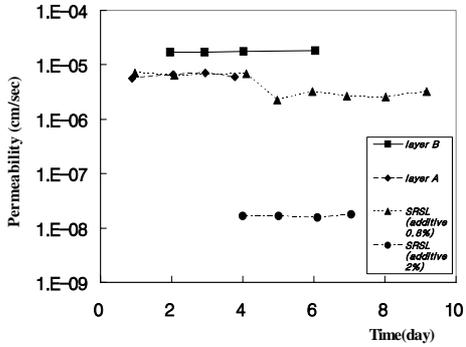


그림 13. 압축 균열에 대한 투수시험

표 4. 중공 홀이 있는 시료에 대한 투수 시험

	중공 홀이 없는 공시체 (cm/s)	중공 홀이 있는 공시체 (cm/s)
SRSL (반응 촉진제 0.8%)	5×10^{-7}	4.52×10^{-6}
SRSL (반응 촉진제 2%)	1×10^{-8}	1×10^{-8}
풍화토 + 규조토 10%	1.3×10^{-6}	1.85×10^{-4}
풍화토 + 소석회 10%	7.82×10^{-6}	4.83×10^{-3}

6.2 강도 시험

6.2.1 동결/융해와 건조/습윤 후 시료에 대한 시험

그림 14와 15는 각각 동결/융해, 건조/습윤에 의한 SRSL 공시체의 내구성 평가를 위해 일축압축강도 시험을 수행한 결과이다. 모든 조건에서 실제 매립지 설계 시 제안하는 목표 강도(5kg/cm^2)보다 높은 강도를 나타냈으며 시간과 반복 횟수에 따른 강도의 변화는 뚜렷한 경향성 없이 일정범위를 유지하였다. 이는 SRSL의 구성 성분이 매우 세립질의 입자들이기 때문에 동결/융해 및 건조/습윤에 대한 영향을 거의 받지 않은 것으로 판단된다.

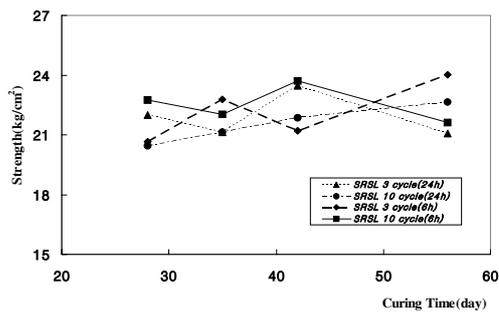


그림 14. 동결/융해 후 일축압축시험, $-40^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ (3,10cycle-6, 24시간)

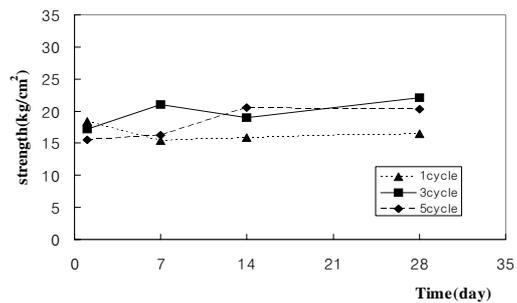


그림 15. SRSL 공시체의 건조/습윤 후 일축압축시험

7. 결론

1. 동결/융해와 건조/습윤 이후의 투수 시험에서 반응촉진제 0.8%의 SRSL 공시체의 경우, 초기 높은 투수성에서 점점 감소하는 경향과 같은 입도분포를 가진 단일층의 투수성과

비교했을 때 기후 변화에 의해 증가된 SRSL 투수성은 침전반응에 의해 회복 될 수 있으며 반응 촉진제 2%의 SRSL 경우 동결/융해에서는 투수성의 변화가 나타나지 않았으며 건조습윤 5회 반복한 경우에도 기준치 이하의 투수성을 보였기 때문에 반응촉진제의 양이 SRSL의 투수성에 미치는 영향이 크며 자가 치유의 충분한 효과를 기대하기 위해선 약 2% 정도의 반응 촉진제가 요구된다.

2. 동결/융해와 건조/습윤의 각 조건이 SRSL의 투수성에 미치는 영향에 있어서는 반복 횟수가 증가함에 따라 공시체의 투수성은 증가한 반면 동결 온도와 시간에 따른 경향성은 뚜렷하게 나타나지 않았기 때문에 동결/융해와 건조/습윤의 반복 정도가 SRSL의 투수성에 가장 큰 영향을 미친다.

3. 인위적인 방법에 있어서는 단일층의 경우 10~10³배의 투수 계수 증가를 보였고 SRSL 공시체의 경우 반응촉진제 0.8%일 때 5~10배, 2%의 경우는 투수성의 변화가 거의 나타나지 않았다. 반응 촉진제 2%의 SRSL 공시체에서 투수성의 변화가 나타나지 않은 이유는 투수 시험 시 물의 침투와 동시에 침전 반응이 일어나기 때문이다. 따라서 부등 침하나 외력에 의한 균열에 있어서도 SRSL은 차수성을 유지할 수 있으며, 이때에도 반응 촉진제의 양은 투수성 저하 능력에 큰 영향을 미친다.

4. 동결/융해나 건조/습윤 후 SRSL 공시체에 일축압축시험을 수행한 결과 모두 규정치보다 높은 강도를 나타내었는데, 이는 SRSL 공시체가 대부분 세립질의 입자들로 구성되어 있고 충분한 다짐 효과로 인하여 동결/융해와 건조/습윤에 의한 균열이 강도에 큰 영향을 미치지 않았던 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 권오정, 서민우, 홍수정, 박준범, 박수영 (2004), "SRSL(Self Recovering Sustainable Liner)제의 매립지 최종복토층에 대한 활용성 검토" 한국지반공학회 봄 학술발표회.
2. 장연수, 문준석 (2002), "매립지 차수재로서 자가치유재의 투수 및 강도특성" 한국지하수 토양환경학회지, pp. 41-51.
3. Côté, P.L. and Van der Sloot, H.A. (1996), "Method for Sealing of a Mass of Waste."US Patent 5,502,268.
4. Cnubben, P.A.J.P. and van Zomeren, A. (2001), Performance testing a self-forming and self-repairing seal, Energy Research Centre of the Netherlands project report
5. EPA (2001), A Citizen's Guide to Capping, EPA 542-F-01-022
6. Gregory M. et al. (2002), "Protective Layer Design in Landfill Covers based on Frost Penetration." Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Sep. 2002. pp.794.