

SRSL 매립지 최종 복토층의 투수 및 강도 특성

Hydraulic Conductivity and Strength Characteristics of Self Recovering Sustainable Liner (SRSL) as a Landfill Final Cover

권 오 정¹ Kwon, Oh-Jung

이 주 형² Lee, Juhyung

조 완 제³ Cho, Wan-Jei

정 영 훈⁴ Jung, Young-Hoon

Abstract

Conventional designs of landfill covers use geosynthetics such as geomembrane and GCL, and clay liners to lower the permeability of final covers of landfill sites. However, differential settlement and the variation of temperature or humidity in landfill sites cause the development of cracks or structural damage inside the final cover. This study examined the application of a Self Recovering Sustainable Liner (SRSL) as an alternative landfill final cover material. SRSL consists of double layers, which have chemicals, can generate precipitates filling the pores of the layers by chemical reaction. The interface material forms an impermeable layer and in case of internal cracks, the reactants of the two layers migrate towards the crack and heal it by forming another liner. In this study the applicability of SRSL material for landfill final cover was examined by performing flexible wall permeameter tests to prove that the hydraulic conductivity is lower than the regulations and unconfined compression tests to judge whether the strength satisfies the restriction for the landfill final cover. Furthermore, the environmental impacts on the permeability and strength were evaluated. The experimental results show that the SRSL has lower hydraulic conductivity and higher strength than the regulations and is little influenced by climatic changes such as wet/dry or freeze/thaw process.

요 지

본 연구는 매립지의 최종복토층으로 사용되는 점토 혹은 지오멤브레인의 부등침하 및 기상조건변화에 의한 균열에 취약한 점을 고려하여 균열 발생시 자가형성된 물질로 인하여 균열치유 작용을 할 수 있는 SRSL(Self Recovering Sustainable Liner)의 매립지 최종복토층으로서의 적용성을 파악하였다. SRSL 기법은 2개의 층을 두어 상, 하부층 사이 계면에 불투수성 물질을 생성하는 동시에, 균열발생 시에도 2가지 성분이 다시 결합하여 불투수성 물질을 재형성하는 역할을 수행한다. SRSL의 최종복토층으로서의 적용성 파악을 위해서 실험실에서 연성벽체 투수시험기를 사용하여 투수 특성을 파악하였고 일축압축시험을 통하여 강도 및 강성 특성을 파악하였다. 또한 최종 복토층의 경우 환경적인 요인에 직접적으로 노출되어 있기 때문에 동결/융해 및 건조/습윤에 따른 SRSL의 투수 및 강도 특성 또한 알아보았다. 시험 결과, SRSL은 낮은 투수계수와 기준보다 높은 강도를 가진 매립지의 복토층 재료로 적합한 물질로 판단되며, 동결/융해 및 건조/습윤의 환경적인 영향에 대해서도 안정한 것으로 판명되었다.

Keywords : Compression strength, Hydraulic conductivity, Landfill final cover, SRSL material

1 삼성물산 건설부문 해양항만본부 마케팅팀 과장 (Manager, Port and Marine Marketing Team, SAMSUNG C&T)

2 한국건설기술연구원 GEO-인프라연구실 수석연구원 (Senior Researcher, Geotechnical Engineering Research Division, KICT)

3 단국대학교 토목환경공학과 조교수 (Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Dankook University)

4 경희대학교 토목공학과 조교수 (Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Kyunghee University, jyounghoon@khu.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

70년대 이후 경제 성장과 급속한 인구의 증가, 산업화 등으로 인하여 생활 및 산업 폐기물이 증가하고, 이를 처리하기 위한 폐기물 처리장의 수요도 증가하는 추세이다. 현재 우리나라의 경우 대부분의 일반쓰레기 및 건설폐자원이 매립에 의존하여 처리하고 있기 때문에 매립지 건설 및 관리의 중요성이 부각되고 있다. 이는 매립지의 계획, 설계, 시공, 운영등 모든 단계에서 이루어져야 하며 특히 적절한 설계와 시공은 운영에서 중요한 부분을 차지하고 있다. 특히, 침출수와 매립지 가스의 효과적 제어를 위한 올바른 복토재와 차수재의 선택은 매립장 설계에서 중요한 부분을 차지하고 있다.

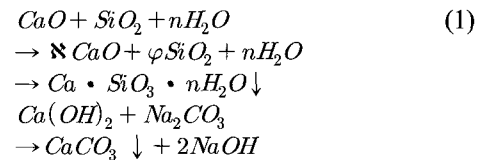
이 중, 최종복토층의 역할은 매립지 안으로 침투하는 우수를 차단해서 침출수의 양을 감소시키고, 침출수와 매립지 가스로 인한 악취를 방지하며, 매립지 식생을 회복하는 것이다. 특히, 우수를 막는 것이 주목적이기 때문에 최종복토층은 투수계수가 10^{-6} cm/s 이하를 만족하는 지오펜브레인, GCL(Geosynthetic Clay Liner) 및 CCL(Compacted Clay Liner)을 주로 사용하고 있다. 그렇지만 지오펜브레인 및 GCL의 경우 찢김 현상 등 외부 충격에 파손될 가능성이 높고, CCL의 경우 매립지에서 발생하는 부등침하 및 기온의 변화로 인해 균열이 발생할 가능성을 배제하기 어려우며, CCL을 만들기 위한 점토 재료 또한 국내에서는 부족한 것이 현실이다. 따라서 기존의 지오펜브레인, GCL 및 CCL을 이용한 차폐층 건설을 국내에서 적용하는 데에는 문제가 있으며, 새로운 대안이 요구되는데 그 중 하나가 SRSL(Self-Recovering Sustainable Liner)을 이용한 매립지 최종차단층 기술이다. 국내에서는 매립지 침하에 대한 대책방안으로 매립지 최종복토층 내 차단층의 저투수성을 유지함과 동시에 부등침하 등으로 인한 균열이 발생하더라도 발생된 균열을 자체적으로 치유할 수 있는 SRSL(Self Recovering Sustainable Liner)에 대한 연구가 수행되어 왔으며, 실내 및 현장시험을 통해 적용성이 입증된 바가 있다(환경부, 2005, 권오정, 2006).

SRSL은 1980년대에 처음 제안된 개념으로서, 폐기물에 시멘트나 수산화칼슘과 같은 고결제를 사용하여, 폐기물을 고결화하여 침출수에 대한 문제를 해결하는 방법으로 제안되었다(Frey et al. 1984). 본 연구에서 다루는 SRSL 물질은 침전물을 생성시켜 폐기물 주변지반의 간극을 막아 침출수의 출입을 막는 방법이다. 본 연구에서

는 연성벽체 시험기를 사용하여 SRSL의 물질의 투수 특성을 파악하고 일축압축시험기를 사용하여 강도·강성 특성을 파악하고자 한다. 이와 더불어 최종 복토층으로서의 환경에 의한 영향 파악을 위하여 동결·융해 및 건조·습윤 현상이 SRSL의 투수 및 강도·강성 특성에 미치는 영향에 대해서도 알아보하고자 한다.

2. SRSL(Self-Recovering Sustainable Liner)

SRSL(Self-Recovering Sustainable Liner)란 다른 재료인 2개의 층으로 구성된 차수층을 의미하며 상부층 물질에는 SiO_2 , CO_3^{2-} , 하부층 물질에는 Ca^{2+} , OH^- 성분이 포함되어 있다. SRSL의 메커니즘은 각층의 반응물질을 이용하여 각층 사이의 공극을 채우는 침전물질을 형성하고 이러한 과정을 통해 매립지 최종복토층의 투수성을 저감시키는 과정이다. SRSL 메커니즘은 식 (1)에 표시되어 있다.



SRSL의 각 성분이 2개의 층으로 나누어져 있기 때문에 균열이 발생하더라도 위, 아래층의 반응물질이 이동하면서 균열을 메운다. SRSL 물질의 메커니즘은 다음과 같다. 그림 1의 (A)와 같이 반응물질 A와 반응물질 B가 접촉하면서 AB층과 같이 새로운 불투수층을 형성한다. 여기서 그림 1의 (B)와 같이 전단파괴로 인한 균열이 발생하여도, 그림 1의 (C)처럼 다시 주변의 반응물질 A와 B가 새로운 반응물질 AB로 결합하면서 균열을 치유하고 균열부위에 불투수층을 재형성한다.

육안관찰을 통하여 이러한 반응을 확인하기 위하여,

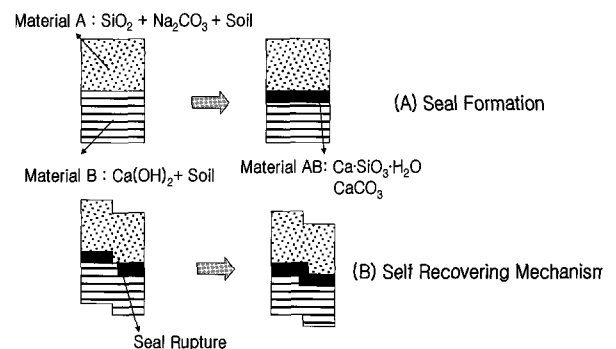
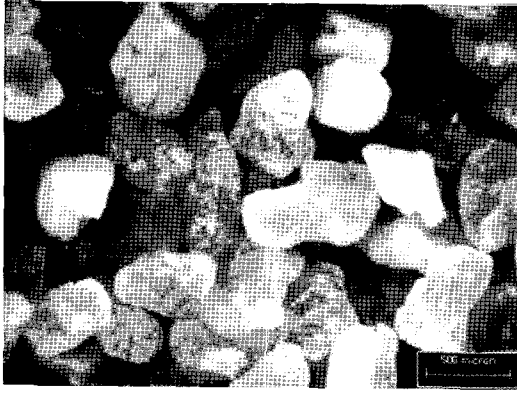
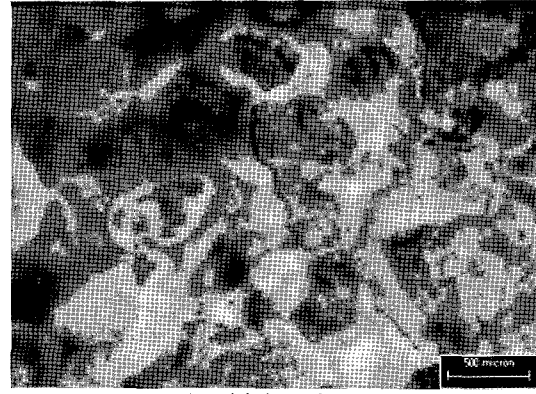


그림 1. 벌크수와 메니스커스수의 개념도



(a) (X500)



(b) (X500)

그림 2. SEM 이미지 (a) 주문진 표준사 (b) 주문진 표준사 와 SRSL의 반응 후(권오정 2006)

표 1. 현장 시료의 기본 물성치

Test	통일분류법	투수계수(k, cm/sec)	비중, G _s	소성지수	D ₅₀	D ₁₀	
Value	SM-SW	1.5 × 10 ⁻⁵	2.66	NP	0.45	0.013	
Test	C _u	C _c	W _n (%)	OMC (%)	g _d (min, t/m ³)	g _d (max, t/m ³)	q _w (kg/cm ²)
Value	34.6	1.2	15.5	13.5	1.20	1.89	4.2

주사 전자 현미경(Scanning Electron Microscopy)를 통한 분광학적 분석을 하였다. 그림 2는 주문진 표준사와 주문진 표준사와 SRSL의 물질들의 반응 후 SEM 사진이다. 그림 2에서 보이듯이 침전물들이 표준사의 간극을 채우고 있는 것을 확인할 수 있었다.

SRSL의 경우, 화학 반응을 통한 침전물에 의해 투수성을 감소시키고 있기 때문에 사용 물질에 의한 2차 오염의 원인이 될 수도 있다. 따라서 용출 시험을 통해 비소(As), 카드뮴(Cd), 납(Pb)에 대한 2차 오염에 대한 안정성을 평가 하였다. 평가 결과 모든 원소에 대해 감지되지 않았으므로 2차 오염의 에 대한 우려는 없는 것으로 판명되었다(권오정 2006).

3. 실험 재료 및 방법

3.1 현장 시료와 SRSL 재료

대부분의 매립장이 산간에 위치한다는 점에 착안하여, 산간지역에서 가장 흔하게 접할 수 있는 화강풍화토를 현장 시료로서 사용하였다. 사용된 시료의 기본 물성치와 입도분포도는 각각 표 1과 그림 1에 나타내었다. 통일분류법에 따른 흙의 종류는 실트질 모래(SM-SW)로 판명되었으며, 200번체를 통과한 점토 입자들이 약 12% 함유되어 있으며 투수계수는 1.5 × 10⁻⁵ cm/sec 이다.

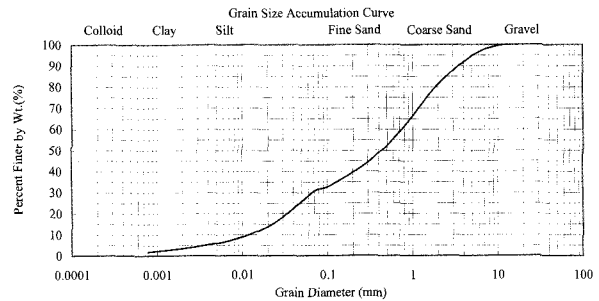


그림 3. 현장 시료의 입도분포곡선

권오정(2006)의 연구 결과에 따르면, SRSL에 첨가되는 상부층과 하부층의 첨가재는 각각 fly ash/소석회와 규조토/소석회의 조합이 차수성이 가장 우수하였으며, 이를 바탕으로 본 연구에서는 SRSL의 두 층 중, 상부층은 현장 흙과 규조토(diatomite)의 혼합물에 탄산나트륨을 촉매로 첨가하였으며, 하부 층의 경우, 현장 흙에 규조토와 반응할 수 있는 소석회를 혼합하였다. 상부층에 규조토 성분이 8%, 하부층에 석회 성분이 12% 이상이 포함되어 있을 경우 낮은 투수 성능을 유지할 수 있다고 한 기존의 연구결과(산업자원부, 2002)를 바탕으로 하여 각 첨가재의 혼합비를 결정하였다. 상부층에는 무게 비 8%의 규조토와 촉매로 작용하는 탄산나트륨을 위한 2%의 sodium ash를 첨가하였고, 하부층에는 12%의 소석회와 혼합하였다.

3.2 투수시험

본 연구에서 사용된 투수시험은 ASTM D2434와 D5084에 따라 그림 4에 모식도로 나타내어진 연성벽체 시험기를 사용하였다. 구조토가 포함된 상부층과 Ca(OH)₂ 성분이 포함된 하부층, 그리고 상부층과 하부층으로 구성된 다층의 시료에 대해서도 시험을 수행하였다. 시험 시료의 규격은 지름 5cm, 높이 10cm이며, 최적함수비로 다져 성형하였다. 구조토가 포함된 상부층의 경우, 최적함수비와 최대건조단위중량은 각각 12.5%와 1815kg/m³ 이었으며, Ca(OH)₂가 포함된 하부층의 경우, 이는 각각 13%와 1825kg/m³으로 나타났다. 혼합비는 표 2에 나타난 성분비에 따른 투수계수 변화(Kwon and Park 2006)에 따라, SRSL의 최종복토층의 차수성능을 유지하기 위하여, 구조토와 Ca(OH)₂의 풍화토와의 혼합비를 각각 8%와 12%(무게 비율)로 하였다. 투수시험은 SRSL의 sealing에 의한 투수계수 변화를 관찰하기 위하여 일주

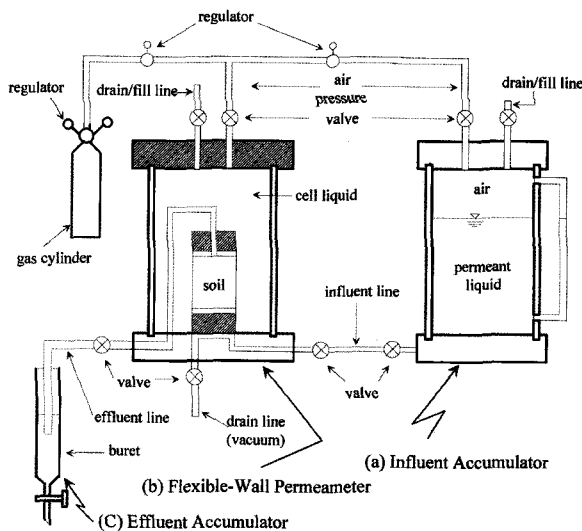


그림 4. 연성벽체 투수 시험기의 모식도

표 2. 복합층(시료 번호 1-3)과 단일층(4-7)의 투수계수 시험 결과

시료	상부층	하부층	k ($\times 10^{-7}$ cm/sec)
1	Diatomite 8%+S.A.*0%	Slake lime 12%	1.73
2	Diatomite 8%+S.A.0.8%	Slake lime 12%	0.95
3	Diatomite 8%+S.A.2%	Slake lime 12%	0.21
4	Diatomite 8% + Sodium ash 0%		6.58
5	Diatomite 8% + Sodium ash 0.8%		2.66
6	Diatomite 8% + Sodium ash 2%		2.21
7	Slake lime 12%		1.63

* S.A.:SodiumAsh

일 동안 측정하였으며, 정상상태(steady state)에서 70kPa의 구속압과 35의 동수경사를 주어 시험하였다. 공시체의 투수계수, k는 Darcy의 법칙을 사용하여 다음의 식 (2)를 이용하여 산정하였다.

$$k = \frac{q}{A \cdot i} \quad (2)$$

여기서, A는 공시체의 단면적(cm²), q는 유출량(cm³/sec) 그리고 i는 동수경사를 나타낸다.

3.3 강도 및 강성 특성 파악을 위한 일축압축시험

일축압축강도시험은 시료를 원통형의 공시체(직경 50mm, 높이 100mm)로 제작하여 구속압을 받지 않은 상태에서 축하중을 가하여 시료의 강도를 결정하는 방법이며, 실제 시공 시 작업차량에 대한 주행성 확보 및 차단층의 안정성에 대한 제반 문제점들을 발생시키지 않도록 하는 중요한 설계 요소가 된다. 또한, 매립지 복토층의 경우 특별한 구속압을 기대할 수 없으므로, 일축압축시험을 통해 얻어진 변형특성을 설계에 반영할 수 있다. 일축압축시험의 재하속도는 Head(1982)가 제안한 시료의 높이에 따른 재하속도를 따라 2mm/min, 즉 2%/min를 사용하여, 파괴까지의 시간은 10분이 넘지 않도록 하였다.

SRSL의 구성 특성상, 상부층과 하부층이 존재하고, 균열 발생시 양 층이 반응하여 새로운 층을 형성하여 복토층의 역할을 수행하게 되므로, SRSL의 상부층과 하부층이 각각 강도 규정을 만족하여야 한다. 또한 상·하 층의 반응전의 다져진 층과 반응 후 형성된 층 또한 강도 규정을 만족하여야 하므로 각각의 시료에 대하여 일축압축시험을 실시하였다. 공시체는 표준다짐시험과 동일한 에너지로 다짐될 수 있도록 다짐봉과 다짐몰드를 제작하여 사용하였으며, 다짐시험에서 구한 최적함수비를 사용하여, 3층 다짐으로 성형하였으며 혼합층에 대하여는 층마다 3층 다짐을 하였다. 간극비와 다짐 에너지를 일정하게 하기 위하여 타격횟수와 함수비, 공시체 부피를 일정하게 하여 강도를 측정하였다. 시료들은 각각의 시험시까지 20℃의 온도, 40%의 습도로 유지된 항온·항습실에서 양생되었다.

3.4 환경적 영향을 고려한 동결/융해 및 건조/습윤 과정

최종 복토층의 경우, 매립지의 가장 표면층으로써 환

경적인 영향을 직접적으로 받기 때문에, 환경적인 영향에 의한 투수 및 강도 특성의 변화 또한 적용성 평가의 중요한 요소이다(Kim and Daniel 1992; Ogata 등 1985; Chamberlain 등 1990; Qi 등 2006). 본 연구에서는 환경적인 영향을 평가하기 위하여 겨울철에 일어나기 쉬운 동결/융해 과정과 여름철에 일어나기 쉬운 건조/습윤 과정을 시료에 적용하여 투수 및 강도 특성을 파악하였다.

3.4.1 동결·융해 과정

동결/융해 과정은 우리나라 겨울철의 특징인 삼한사온 현상을 모사하기 위한 것으로 동결/융해가 일어나 최종차단층에 균열이 발생할 수 있는 가능성에 대해, 최종차단층의 안정성의 변화를 확인하여 설계 및 시공에 적용될 수 있는 자료를 얻고자 실시하였다. 본 시험은 한국표준협회에서 발행한 KS F 시험규정에 의해 실시하였다. 다져진 흙-시멘트 혼합물에 대한 동결융해시험규정(KS F 2332)에서는 동결 24시간(-23℃) 및 융해 24시간(21℃) 총 48시간을 1 cycle로 하였다. 동결·융해의 과정을 거치지 않은 공시체부터 15회까지의 동결·융해 과정을 거친 공시체들을 시험하여 시료가 경험한 동결·융해 과정횟수에 따른 투수계수의 변화를 관찰하였다. 이와 더불어, 동결온도와 동결 시간에 대한 영향을 파악하기 위하여 서로 다른 세 종류의 동결 온도, -40, -30, -20℃와 두 종류의 동결시간을 적용하여 3회와 10회의 동결·융해 과정에 대하여 시험을 수행하였다.

3.4.2 건조·습윤 과정

최종복토층의 경우, 날씨에 따라 건조와 습윤상태가 반복되며 이를 통해 건조균열이 발생하는 경우가 있다. 이에 반복적인 건조·습윤상태를 통하여 발생한 건조균열의 효과를 알아보기 위하여 일반적으로 사용되고 있는 ASTM D559에서 제시한 방법을 수정하여 본 연구에 적용하였다. 공시체를 70℃ 건조로에 24시간 동안 건조시키고, 그 이후 24시간 수침시켜 습윤상태를 유지하였

다. 이 때, 플라스틱 랩으로 시료의 주변부를 감싸 그 형상을 유지할 수 있도록 하였다. 하나의 건조·습윤 사이클은 24시간의 건조상태와 24시간의 습윤상태를 합하여 48시간이 소요되었다. 1, 3, 5 회의 건조·습윤 사이클 후에 SRSL의 투수계수와 강도·강성의 변화를 측정하였다.

4. 시험 결과 및 토의

4.1 SRSL의 투수 특성

SRSL의 상부층과 하부층이 하나의 공시체에 포함된 복층 공시체(시료 1-3)와 상부 및 하부 단층 공시체(시료 4-7)의 투수시험 결과는 표 3에 나타내었다. 흐름 방향에 두께가 같은 서로 다른 층이 있는 경우의 투수계수는 다음 식 (3)에서 나타낸 것과 같이 조화 평균을 사용하여 예측할 수 있다.

$$k_{(eq)} = \frac{H}{\left(\frac{H/2}{k_1}\right) + \left(\frac{H/2}{k_2}\right)} = \frac{2k_1k_2}{k_1 + k_2} \quad (3)$$

이러한 조화평균을 사용하여 예측된 투수계수를 살펴볼 때(표 2 참조), 4번과 7번, 5번과 7번 및 6번과 7번의 조화평균을 이용한 투수계수는 각각 2.61, 2.02 및 1.88×10^{-7} cm/sec로 예측되었다. 그러나 예측된 결과와 비교하여 볼 때, 1번(소다회 함량 0%), 2번(소다회 함량 0.8%) 및 3번(소다회 함량 2%) 시료의 실제 투수계수는 예측된 조화평균에 비해 각각 33.7, 53.0 및 90.5%의 투수계수 감소가 발생하였다. 이는 소다회의 작용으로 인하여 SRSL의 반응기작이 일어난 것으로 판단되며 그 결과 투수계수의 감소를 가져온 것으로 판단되며, 소다회의 함량이 증가할수록 투수계수가 더 감소하는 현상을 통해 SRSL의 반응기작을 확인할 수 있다. 또한 소다회의 함량에 관계없이 모든 경우가 우리나라의 복토층

표 3. SRSL의 일축압축강도 시험 결과

시료 종류	일축압축강도(kg/cm ²)			
	초기	재령일수 7일	재령일수 14일	재령일수 28일
상부층: A	10.37	13.08	19.63	18.22
하부층: B	5.77	7.03	7.67	17.91
상·하부 복층	6.30	8.93	10.63	13.16
상·하부 혼합층	12.47	31.45	44.71	49.55

에 대한 투수계수 기준($<1.0 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$)을 만족하였다.

4.2 환경적 영향에 대한 SRSL의 투수 특성 변화

4.2.1 동결/융해 과정

그림 5(a)는 동결/융해 1~15 cycle 반복 이후의 최종 투수계수 결과를 나타낸다. 동결/융해 반복횟수의 증가 하면서 최종 투수계수가 증가하는 현상을 통해 동결/융해의 반복이 균열을 발생시킴을 확인할 수 있다. 그림 5(b)와 (c)는 다양한 동결/융해 조건 하에서의 투수계수

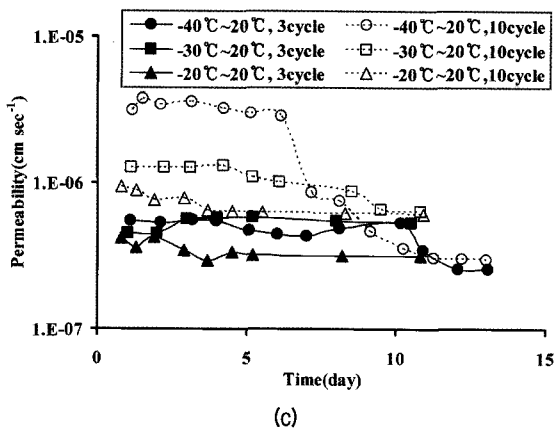
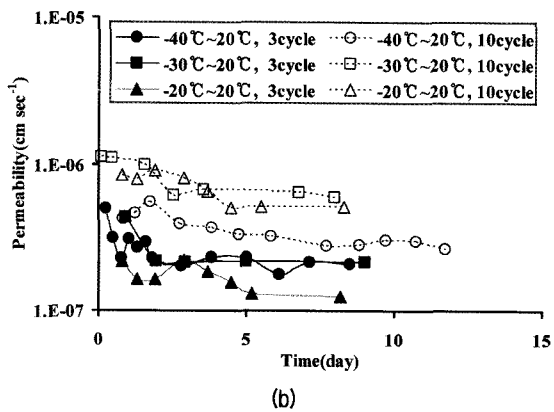
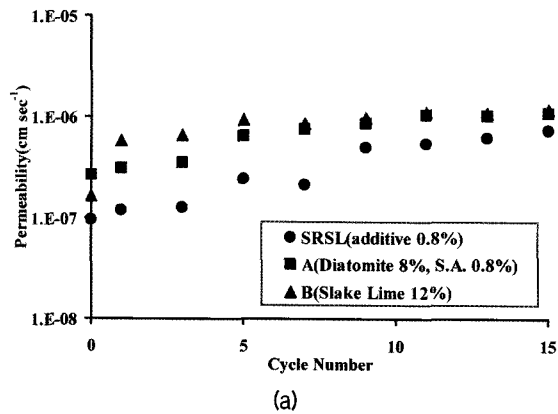


그림 5. 동결/융해 과정 이후의 투수계수 변화 (a) 동결/융해 1~15 cycle 반복이후의 최종 투수계수 (b) 동결/융해 지속시간 : 6 시간 (c) 동결/융해 지속시간 : 24시간

시험 결과를 나타내고 있다. 투수계수 시험 결과를 통해 동결온도가 낮을수록, 동결/융해의 지속시간이 감소할수록, 그리고 동결/융해 반복횟수가 증가할수록 초기 투수계수가 증가하며 이를 통해 위의 조건에서 균열이 보다 활발히 발생함을 알 수 있다. 그러나 각각의 경우 시간이 경과함에 따라 우리나라의 복토층에 대한 기준 ($<1.0 \times 10^{-6} \text{ cm/sec}$) 이하로 투수계수가 감소하며 이를 통해 동결/융해과정에서 균열이 발생하지만, 시간이 경과함에 따라 SRSL의 화학기작을 통해 균열이 치유됨을 확인할 수 있다.

4.2.1 건조/습윤 과정

그림 6은 건조/습윤 과정에 의해 균열이 발생한 시료에 대한 투수시험 결과를 나타낸다. 동결/융해 과정과 마찬가지로 초기 투수계수가 건조/습윤 과정에 의한 균열에 의해 급격히 증가하였음을 알 수 있다. 건조/습윤 cycle이 증가할수록 투수계수의 증가가 크게 나타나지만, 10일 정도의 시간이 흐르면 동결/융해의 경우와 마찬가지로 투수계수가 우리나라의 복토층에 대한 기준 ($<1.0 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{sec}^{-1}$) 이하로 감소하게 된다. 이는 SRSL의 화학적 반응에 의한 것으로, 이를 통해 SRSL의 균열 치유기작을 증명할 수 있다.

4.2 SRSL의 강도 및 강성 특성

SRSL의 상부층, 하부층, 상·하부층의 복층으로 성형된 시료와 상부층과 하부층의 반응이 일어나 혼합된 후의 시료에 대하여 일축압축시험을 실시하였다. 표 3은 시료가 성형된 후의 초기강도부터 7일, 14일 그리고 28일 강도를 나타내고 있다. 상·하부의 복층 시료의 경우 보다 혼합층의 강도가 두 배 가량 크게 나타났으며, 또

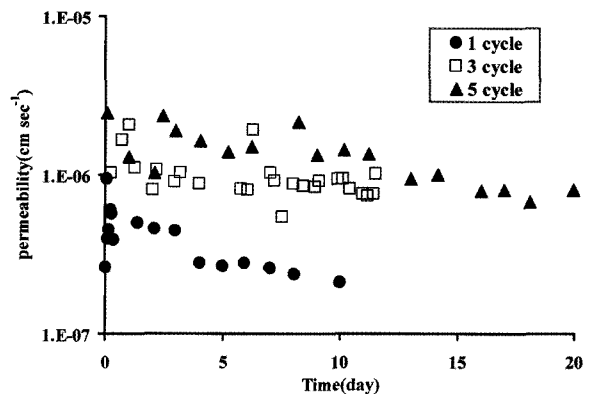


그림 6. 건조/습윤 과정 이후의 투수계수 변화

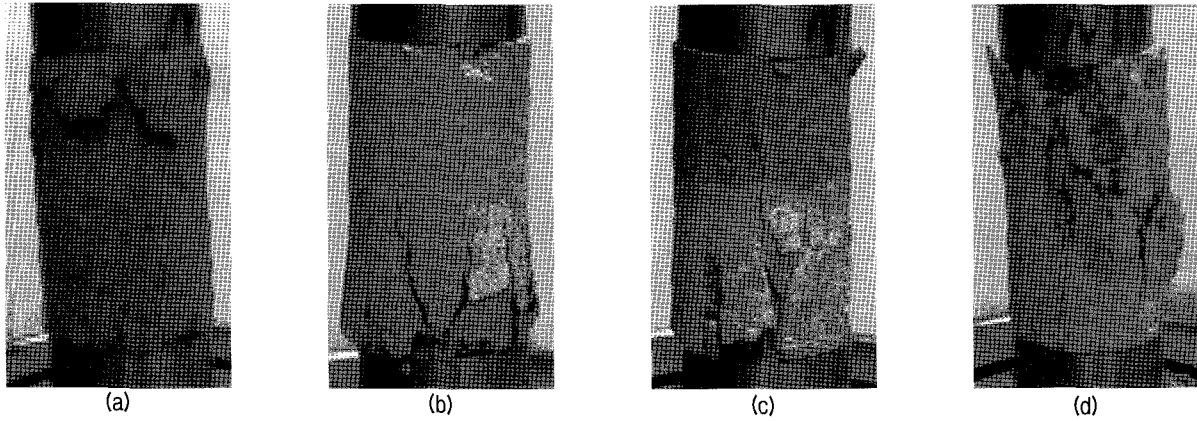


그림 7. 28일 재령이후 일축압축 시험에 의한 파괴 형상: (a) 상부층 (b) 하부층 (c) 상·하부 복층 (d) 상·하부 혼합층

한 각각의 시료들이 모두 재령일수에 따른 강도 증가를 나타내고 있는데, 특히 상·하부 혼합층에서 4배 가량의 증가를 나타내는 것으로 보아 설치된 상·하부 층이 손상이 되어 새로운 혼합층을 형성하게 되면 원상태 복토층의 강도보다 증가한다는 것을 알 수 있었다. 그림 7은 재령일수 28일이 지난 후의 각 시료들의 파괴형상을 나타낸 것으로, 상·하부 각각의 층과 반응전의 층을 모사한 시료들의 경우, 상부와 하부의 균열로 인하여 국부 파괴가 일어난 반면, 반응후의 상·하부 혼합층의 경우, 시료 전반에 파괴면이 뚜렷이 나타남을 볼 수 있었다. 이러한 전체적인 파괴 양상은 반응 후의 혼합시료에서 재령일수 증가에 의한 고결화 작용이 더 두드러졌음을 알 수 있다.

일축압축강도 시험 결과에서 상·하부 층의 개별 시료, 상·하부 복층 시료 및 혼합층 시료에 대하여 재령일수에 따른 강성 변화를 살펴보았다. 복토층의 경우 매립지의 최상부층으로 크지 않은 구속압이 기대됨으로 일축압축강도시험을 통해 얻은 강성을 실제 거동으로 간주할 수 있다. 최대강도가 발현되는 변형률은 거의 모든 시료에서 2%에서 3% 사이의 값을 나타내었다.

SRSL의 강성특성을 파악하기 위하여 일축압축시험을 통하여 얻은 응력·변형률 관계에서 50% 강도 발현시 응력·변형률 곡선의 할선탄성계수, E_{50} 를 산정하여 비교하였다. 그림 8은 각 시료별 E_{50} 값을 재령일수 7일, 14일, 28일에 대하여 나타내고 있다. 상부층만으로 이루어진 시료(A)와 상·하부 복층 시료의 경우, 어느 정도의 재령일수에 따른 강성 증가를 보이고 있으나, 그 증가폭은 하부층 및 상·하부 혼합층의 시료에 비해 크지 않았다. 초기 E_{50} 를 기준으로 재령일수 28일 E_{50} 를 비교하여 보면, 상부층 시료(A)의 경우 29%, 상·하부 복층의 경

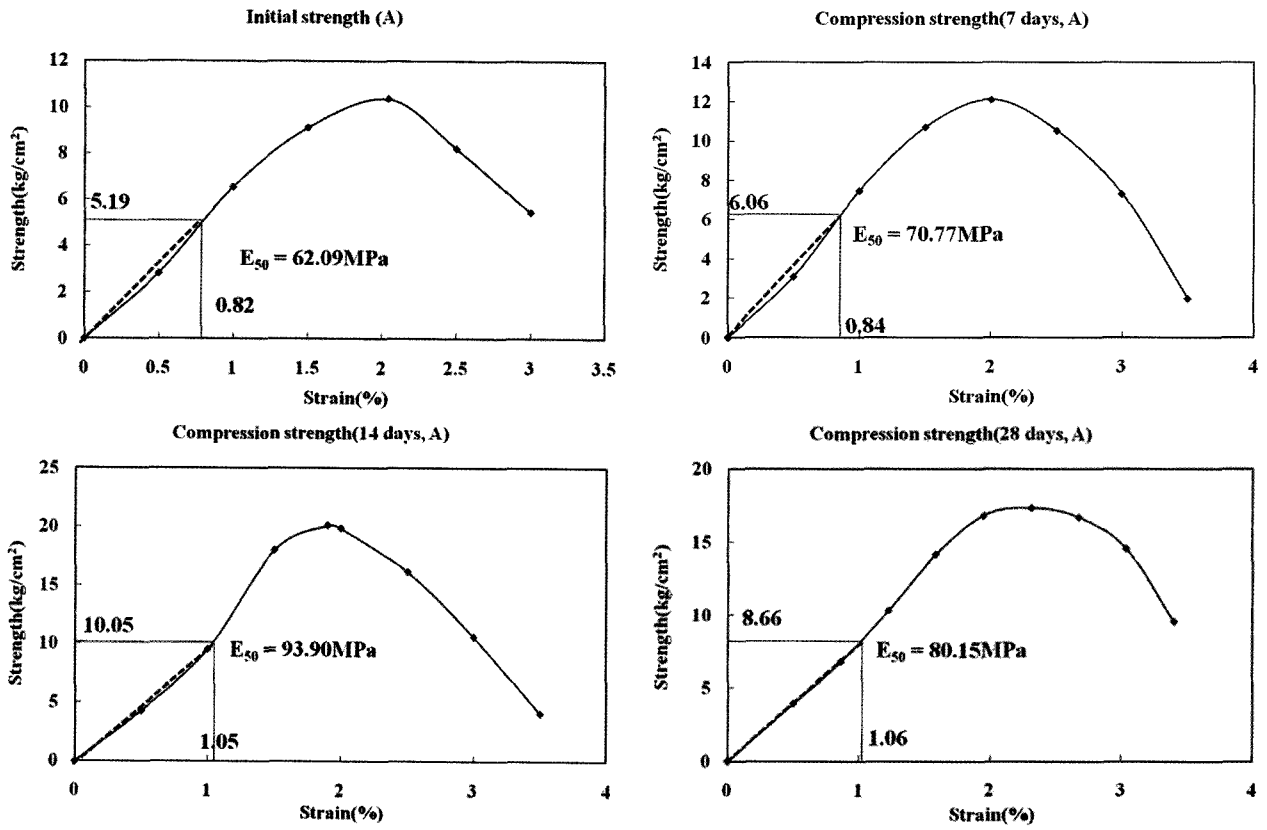
우 45%의 증가를 보였으나, 하부층 시료의 경우 154%, 상·하부 혼합층의 경우 318%의 증가를 보여 큰 차이를 나타내고 있다. 이는 하부층에서의 단순한 재령일수 증가에 의한 에이징(aging)의 효과와 더불어 하부층의 첨가물질인 수산화칼슘과 풍화토의 유리질 실리카의 반응에 의한 효과로 판단되며, 혼합층의 경우, SRSL의 자가형성물질에 의한 간극의 충전효과로 인하여 반응전의 초기 강성에 비해 네 배 이상의 강성을 보이는 것으로 판단된다.

4.3 환경적 영향에 대한 SRSL의 강도 및 강성 특성 변화

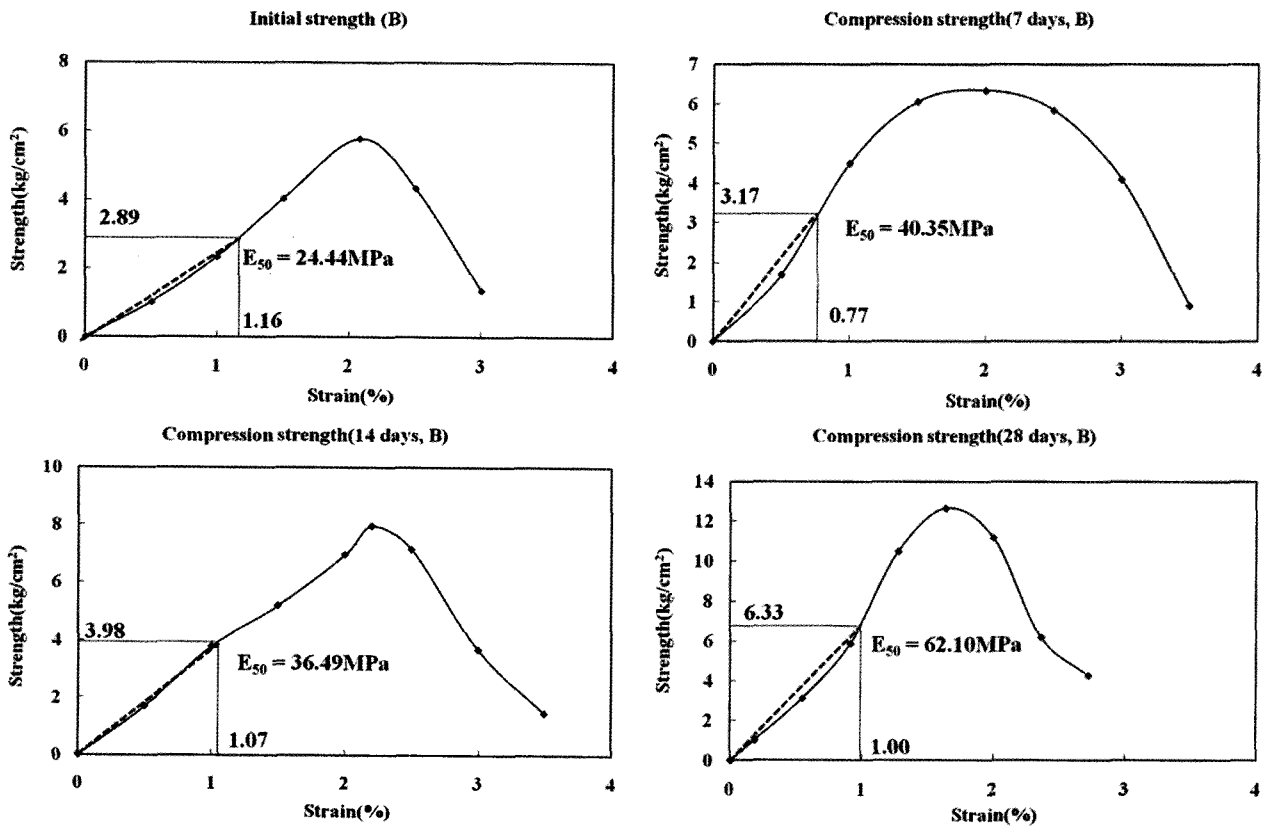
4.3.1 동결/융해 과정

SRSL의 상·하부 복층 시료에 대하여 동결/융해 반복 과정을 적용하여 SRSL의 강도 및 강성 특성 변화를 살펴 보았다. 동결온도 -40°C 에서 동결 6시간, 융해 6시간과 동결 24시간, 융해 24시간의 두 종류의 동결/융해 시간을 적용하여 3회와 10회의 동결/융해 과정에 대하여 일축압축시험을 수행하였다. 그림 9는 서로 다른 조건의 동결/융해 과정 후의 복층 시료의 일축압축강도를 나타낸 것이다. 모든 경우에 동결/융해 과정을 거치지 않은 재령일수 28일의 복층 시료 강도였던 13.16kg/cm^2 (표 3 참조)에 비해 전체적으로 큰 강도를 나타내고 있으며, 동결/융해 과정의 시간이나 횟수에 대한 뚜렷한 경향은 보이고 있지 않다.

투수시험에서 투수계수 증가를 가져왔던 미세구조 균열에 의한 강도 감소는 보이고 있지 않으며 재령 일수에 대하여 일정한 범위의 값을 나타내고 있다. 이는 재령 일수에 의한 뚜렷한 강도 증가가 나타나지 않음을 뜻한다. 이는 동결/융해의 반복으로 인하여 시료의 미세

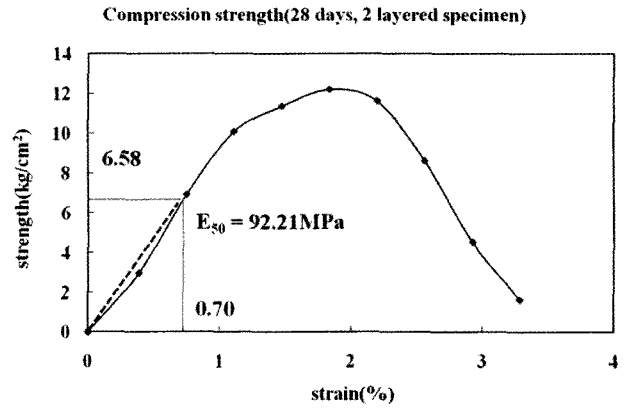
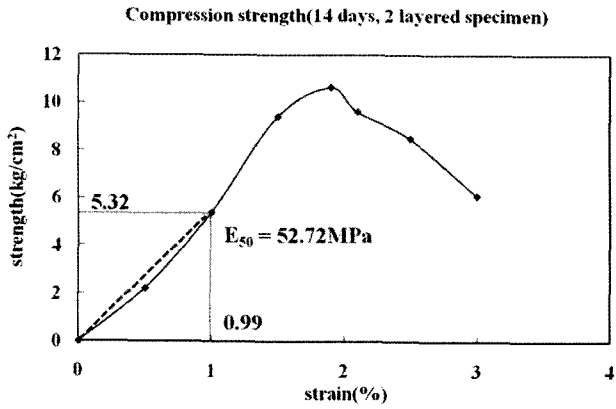
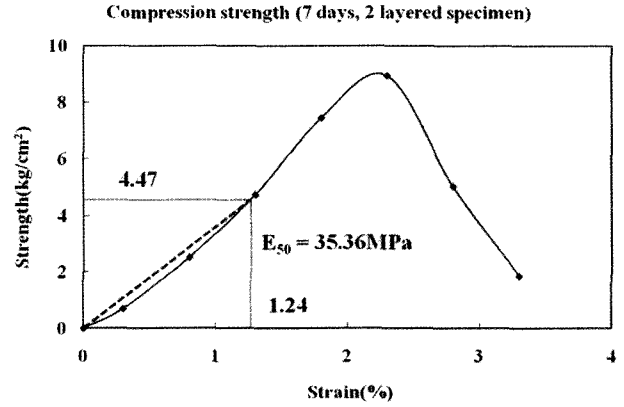
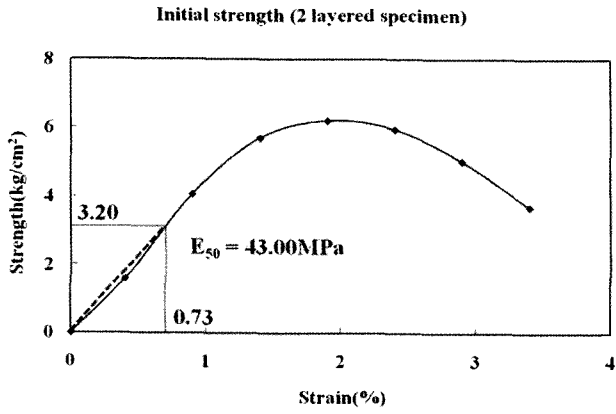


(a) 상부층 시료

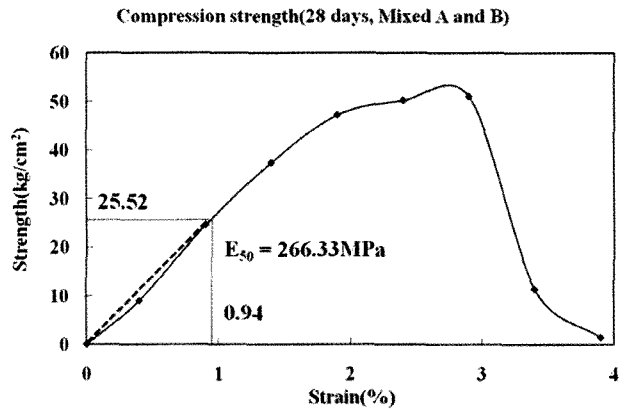
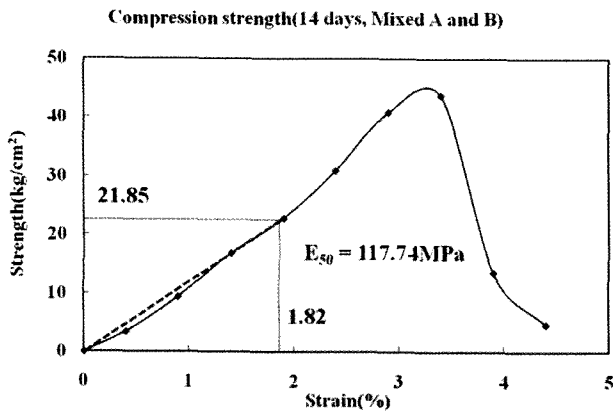
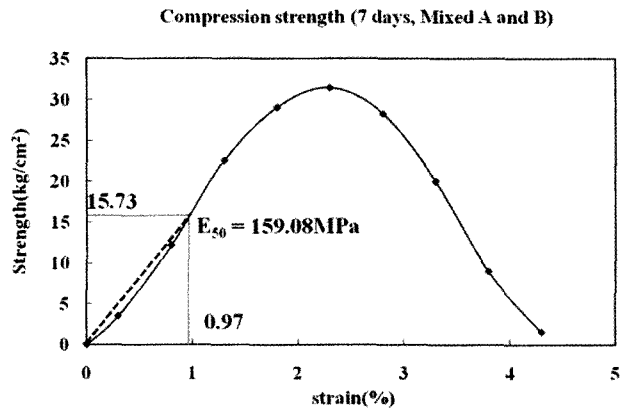
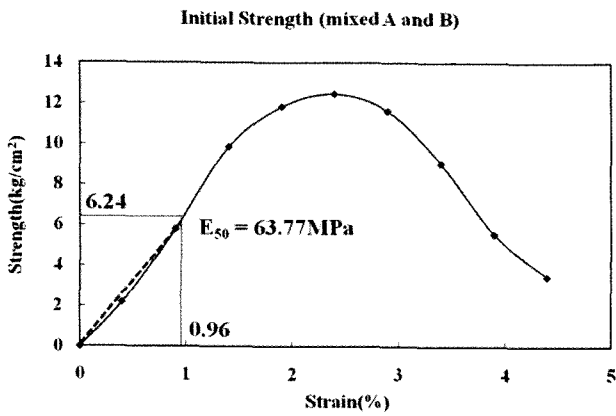


(b) 하부층 시료

그림 8. SRSI 시료들의 활선 탄성계수, E_{50} (a) 상부층 (b) 하부층 (c) 상·하부 복층 (d) 상·하부 혼합층



(c) 상·하부 복층 시료



(d) 상·하부 혼합층

그림 8. SRSL 시료들의 활선 탄성계수, E_{50} (a) 상부층 (b) 하부층 (c) 상·하부 복층 (d) 상·하부 혼합층 -계속

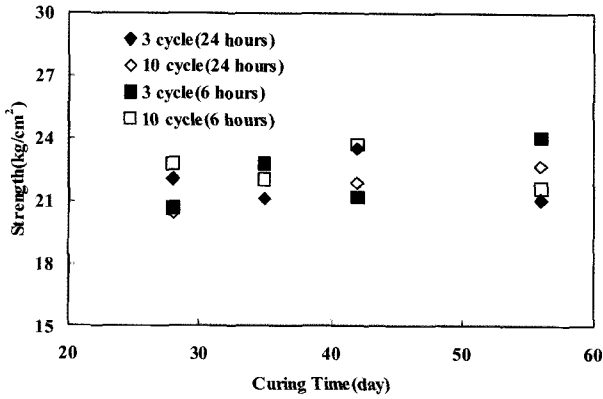


그림 9. 동결/융해 과정후 복층 시료의 일축강도 변화

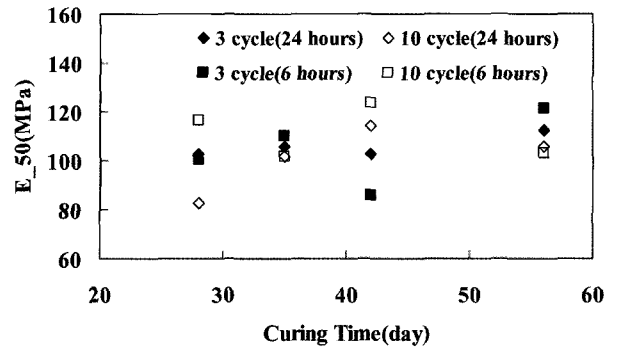


그림 10. 동결/융해 과정후 복층 시료의 E₅₀ 변화

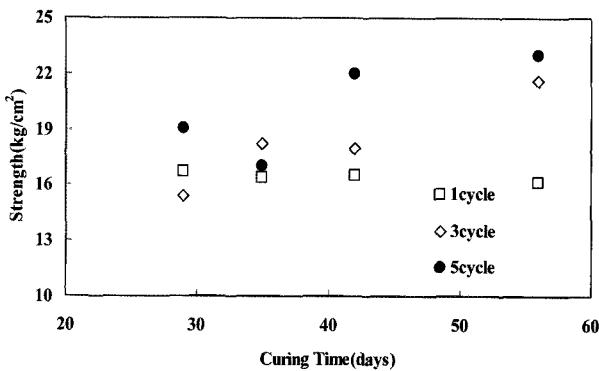


그림 11. 건조/습윤 과정 이후 복층 시료의 일축강도 변화

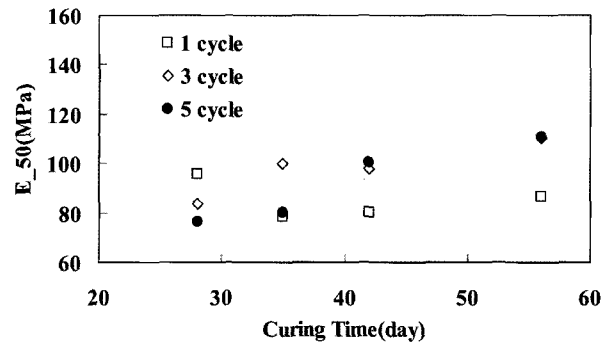


그림 12. 건조/습윤 과정 이후 복층 시료의 E₅₀ 변화

구조에 균열이 발생하였으나, 재령일수의 증가에 따른 강도 증가 효과로 인하여 상쇄된 것으로 판단된다. 모든 경우의 강도가 5kg/cm^2 이상 발현되기 때문에 겨울철의 동결/융해로 인하여 SRSL의 최종 복토층 적용에 있어서 강도에 대한 영향은 없을 것으로 판단된다. 그림 9에서 나타난 활선탄성계수, E_{50} 의 동결/융해 과정에 따른 변화 역시 강도 변화와 마찬가지로 재령일수에 대한 뚜렷한 경향은 보이지 않으며 평균 110MPa 의 일정한 범위의 값을 나타내고 있다.

4.3.2 건조/습윤 과정

SRSL의 상·하부 복층 시료에 대하여 건조/습윤 반복 과정을 적용하여 SRSL의 강도 및 강성 특성 변화를 살펴보았다. 건조·습윤 사이클은 24시간의 건조상태와 24시간의 습윤상태를 합하여 48시간이 소요되었다. 1, 3, 5 회의 건조·습윤 사이클 후에 일축압축시험을 수행하였다. 그림 11은 1, 3, 5회의 건조·습윤 사이클 후, 복층 시료의 일축압축강도를 나타낸 것이다. 동결/융해 과정을 겪은 시료의 일축압축강도의 경향과 마찬가지로 모든 경우에 건조/습윤 과정을 거치지 않은 재령일수 28일

의 복층 시료 강도였던 13.16kg/cm^2 (표 3 참조)에 비해 전체적으로 큰 강도를 나타내고 있다. 아무런 환경적인 영향을 받지 않은 시료에 비하여 재령일수에 대한 뚜렷한 강도 증가 현상은 보이지 않고 있는데, 이러한 경향 또한 건조/습윤 과정에서 발생하였던 미세구조 균열의 강도 감소효과가 재령일수 증가에 대한 강도 증가효과로 인하여 상쇄된 것으로 판단된다. 모든 경우의 강도가 5kg/cm^2 이상 발현되기 때문에 여름철의 건조/습윤으로 인하여 SRSL의 최종 복토층 적용에 있어서 강도에 대한 영향은 없을 것으로 판단된다. 그림 12에서 나타난 활선탄성계수, E_{50} 의 건조/습윤 과정에 따른 변화 역시 강도 변화와 마찬가지로 재령일수에 대한 뚜렷한 경향은 보이지 않으며 일정한 범위의 값을 나타내고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 기존 매립지 최종복토층의 문제는 균열로 인한 매립지 내로의 우수침투라는 점에 착안하여, 이 문제의 해결을 위해 SRSL(Self-Recovering Sustainable Liner) 물질의 사용성을 검토하였다. 이를 위하여 각각의 물질들

의 투수 및 강도·강성 특성을 파악하였으며, 현장상태에서의 적용성 파악을 위하여 동결/융해 및 건조/습윤 과정을 거친 후의 투수 및 강도·강성 변화도 살펴보았으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) SRSL의 상·하부층과 혼합층의 투수계수 결과를 비교하여 SRSL의 화학기작을 확인할 수 있었으며, 각각의 개별층과 복층, 혼합층의 투수계수가 모두 우리나라 매립지 복토층의 투수계수 기준보다 낮음을 확인하였다.
- (2) 동결/융해 및 건조/습윤에 의하여 발생된 미세 균열로 인하여 초기 투수계수의 증가를 보였으나 증가된 투수계수도 매립지 복토층의 투수계수 기준보다 높지 않았으며, 시간이 경과함에 따라 SRSL의 화학기작에 의해 투수계수가 다시 낮아지는 현상을 보였다.
- (3) SRSL의 상부층과 하부층의 시료와 반응 후 시료의 강도는 모두 매립지 최종 복토층 강도기준 ($>5\text{kg/cm}^2$)을 만족하고 있으며 재령일수가 증가함에 따라 강도의 증가를 나타내었다.
- (4) SRSL의 상부층과 하부층의 시료와 반응 후 시료의 강도 발현시 필요한 변형률은 2~3%으로 나타났으며, 응력·변형률 관계에서 50% 강도 발현시 응력·변형률 곡선의 할선탄성계수, E_{50} 는 강도와 마찬가지로 재령일수의 증가에 따라 증가하는 경향을 보였다.
- (5) 환경적인 영향을 고려한 동결/융해 과정 및 건조/습윤 과정이 SRSL의 강도·강성에 미치는 영향은 SRSL의 화학적 기작에 의해 상쇄되어 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

위와 같은 연구 결과들을 통하여, SRSL은 매립지의 복토층 재료로서 낮은 투수계수와 기준보다 높은 강도를 가진 적합한 물질로 판단되며, 동결/융해 및 건조/습

윤의 환경적인 영향에 대해서도 안정한 것으로 판명되었다.

감사의 글

본 연구결과와 정리는 한국건설기술연구원의 주요사업인 ‘비용절감형 석션기초 기술 개발’ 과제의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 권오정 (2006), *Self Recovering Sustainable Liner*를 활용한 매립지 최종복토 차단층에 대한 적용성 평가, 박사학위논문, 서울대학교.
2. 산업자원부 (2002), “폐기물 매립지 침출수 누출방지용 벤토나이트 복합라이너 재료개발 및 시공법에 관한 연구-최종보고서”
3. 환경부 (2005), *불량매립지 복원·관리기술 : 폐기물매립장 최종 차단층 조성기술 개발*.
4. Chamberlain EJ, Iskander I, Hansiker SE (1990), Effect of freeze-thaw on the permeability and microstructure of soils. Proceeding of international symposium of frozen soil impact on agricultural range and forest lands, Spokane, Washington:145-155.
5. Head, K. H. (1982), *Manual of Soil Laboratory Testing*, Pentech Press (ELE international, Ltd.), Devon, England.
6. Kim WH, Daniel DE (1992), Effects of freezing on hydraulic conductivity of compacted clay. J Geotech Eng Vol.118(7):1083-1097.
7. Kwon, O. and Park, J. (2006), “Estimation on the Self Recovery Behavior of Low- conductivity Layer in Landfill Final Cover by Laboratory Conductivity Tests”, *Environmental Technology*, Vol.27, No.11, pp.1233-1240.
8. Frey, R., and Litschke, P. I. (1984), Process for the Storage and Dumping of Waste Material, US Patent 4432666.
9. Ogata N, Kataoka T, Komiya A (1985), Effect of freezing-thawing on the mechanical properties of soil. Proceedings of the 4th international symposium on ground freezing, Sapporo, Japan, 201-207.
10. Qi J, Vermeer PA, Cheng G (2006), A review of the influence of freeze-thaw cycles on soil geotechnical properties. Permafrost and periglacial processes 17(3):245-252.

(접수일자 2011. 4. 5, 심사완료일 2011. 11. 15)