

침출수로 오염된 퇴적점토의 역학적 특성변화

The Change in Geotechnical Properties of the Deposited Clay Contaminated by Leachate from Waste Disposals

하광현* · 이상은**

Ha, Kwang-Hyun · Lee, Sang-Eun

Abstract

In this paper, the uniaxial, triaxial compression tests and consolidation tests on the clay sample substituted initial pore water for pollutant were performed to evaluate the change in geotechnical properties of the contaminated clay. The contaminant transport analysis on embankment type landfill using the MT3D model was also performed to evaluate the extent of transport and diffusion. There was tendency that strength, compressibility and permeability has increased with the increase in the concentration of NaCl solution. The increase in the strength and compressibility of sample saturated with leachate was higher than samples saturated with NaCl solution, but in the permeability coefficient was lower. As the result of contaminant transport analysis, the predicted concentration was in high with the increase in the initial concentration of Cl⁻ ion and increased in a non-linear form. The transportation distance calculated with use of regression equation between the distance from contaminant source and the concentration of Cl⁻ ion was increased with the increase in the initial concentration.

Keywords : NaCl solution, Leachate, Diffuse double layer, Flocculent structure, Contaminant transport analysis

요 지

채취된 초기 간극수를 오염물질로 치환시킨 점토시료를 대상으로 일축압축시험, 삼축압축시험, 압밀시험을 수행하여 오염물질 성상에 따른 오염점토의 역학적 특성변화를 분석하였으며, MT3D 해석모델을 이용하여 매립지 성토제방의 점토 차수층을 통한 오염물질의 거동 특성을 파악하였다. NaCl 수용액으로 치환된 시료의 경우, 농도가 증가할수록 강도, 압축성, 투수성이 증가되었다. 침출수로 포화시킨 시료의 경우, NaCl 수용액으로 포화시킨 시료에 비해 강도, 압축성의 증가현상이 크게 나타난 반면 면모화 정도가 큼에도 불구하고 투수계수는 오히려 작게 나타났다. 오염물질 이동 해석결과, 초기 염소이온 농도가 클수록 측정농도도 커지며, 시간경과에 따라 농도는 비선형적으로 증가되었다. 농도감쇄 관계식을 유도하여 이동거리를 예측한 결과, 초기 농도가 클수록 이동거리도 크게 나타났다.

주요어 : NaCl 수용액, 침출수, 확산이중층, 면모구조, 오염물질 이동해석

* 정회원 · (주)삼보기술단 지반사업부 전문

** 정회원 · (주)삼보기술단 지반사업부 이사

1. 서론

근래에는 환경에 대한 인식변화와 관심증대로 인해 오염점토와 관련된 지반환경공학적 문제가 주목을 받고 있다. 예를 들어 간척사업이나 방조제 건설시 생활하수와 산업폐수로 인한 퇴적점토의 오염문제, 염분을 함유한 해성점토가 사용된 토목 구조물의 안정성 문제 그리고, 매립지 침출수 누출방지를 위한 각종 점토 차수시스템의 안정성 문제 등이 있다.

토목공사에서 건설재료로 다양하게 사용되고 있는 점성토는 물과 같은 유체와 접촉하게 되면 다른 종류의 흙과는 판이하게 차별화되는 거동을 보이며, 실제 지반에서는 지표수 및 지하수가 공존하므로 물이 없는 경우는 거의 없기 때문에 간극유체와 점토입자간 상호작용에 따른 역학적 거동에 대한 이해가 필수적이다. 이러한 배경으로 토립자-수계면에서 발생하는 상호작용을 규명하기 위한 연구들이 지속적으로 진행되고 있다. 특히, 확산이중층 이론은 점토입자의 표면에 인접한 이온의 분포형태를 정량적으로 묘사할 수 있는 가장 대표적인 이론이며, 확산이중층(diffuse double layer, DDL)과 밀접한 상관성을 가지는 점토의 흙 구조에 따른 역학적 특성변화를 이해하는데 기초가 되고 있다.

염수 및 침출수와 같은 오염물질이 흙과 접촉하게 되면 토립자-수계면의 계면화학적 성질에 의해 점토입자와 오염물질과의 상호작용이 발생하고 이로 인해 투수성, 응력-변형 거동과 같은 역학적 특성변화를 초래한다는 사실은 이미 많은 연구를 통해 확인되었다. 그러나 대부분의 연구는 매립지 점토 차수체의 투수특성에 편중되어 있으며 응력-변형 거동에 관한 연구는 거의 극소수인 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 화학물질로 오염된 점성토의 역학적 특성을 실험적으로 분석하기 위해 채취된 점토시료에 대해 기본물성시험을 수행하고 주사전자현미경(scanning electron microscope, SEM), 에너지분산분광법(energy dispersive x-ray spectrometer, EDX)을 이용하여 점토시료의 입자구조와 화학적인 특성을 분석한 후, 3가지 종류(증류수, NaCl 수용액, 침출수)의 간극유체로 치환시킨 시료에 대해 일축 및 삼축압축시험, 압밀시험을 수행하여 강도, 압축성, 투수성 측면에서 영향성을 분석하였다.

또한, MT3D 모델을 이용하여 매립지 성토제방의 점토 차수층에 대한 3차원 오염물질 거동해석을 수행하여 실제 현장에서 발생하는 오염물질 이동특성을 분석하였다.

2. 배경 이론

2.1 토립자-수계면의 이온분포 및 확산이중층

점토 입자가 물에 분산되어 있는 상태에서 음으로 하전된 토립자 표면은 전기적 중성을 유지하므로 물 중에 전이되어 있는 반대의 이온을 끌어당기게 되어 표면 가까이에는 양이온 농도가 높게 되고 음이온은 바깥쪽으로 반발되어 음이온 농도는 낮게 분포된다. 그림1-(a)에서 보는 바와 같이, 토립자 표면 부근의 수중에는 이온의 이동이 일어나고 마치 반대부호로 대전된 2개의 면이 근접하여 결합된 구조가 되기 때문에 이러한 모델을 고정 전기이중층이라고 부르며 Helmholtz 모델이라 한다.

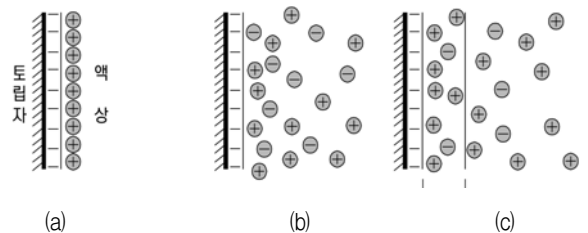


그림 1. 토립자-수계면의 이온분포와 전기이중층 모델

수중이온은 열역학적 운동에 의하여 농도분포가 균일하게 되려고 하는 경향성을 가져 이온농도의 불균형은 입자표면으로부터 일정 거리까지 영향을 미치게 된다. 따라서 실제 수중이온은 평형배열이 되지 않고 그림1-(b)와 같이 확산된 이온분포를 보인다. 이처럼 이온의 확산분포를 고려한 확산이중층 모델을 Gouy-Chapman 모델이라 하며, 확산이중층 이론은 면모화 및 이산화 과정을 이해하는데 상당히 유용하다. 그러나, Gouy-Chapman 모델에서 계산된 확산이중층의 전기용량과 실측정치간에 큰 차이가 있는 것으로 확인되었다. 이와 같은 모순을 해결하기 위해 Gouy-Chapman 이중층 모델을 수정하여 그림1-(c)처럼 표면 부근에는 이온의 고정층(Stern

층)이 존재하고 그 외측에 확산층(Gouy층)이 분포하는 Stern 모델이 제안되었다.

2.2 오염물질 거동 기본 이론

2.2.1 오염물질 거동의 지배작용

오염장 내에서 오염물질 이동은 이류과정과 확산과정으로 나눌 수 있다, 이류는 물 흐름에 따라 오염물질 자체가 움직이는 현상이며, 확산은 농도가 높은 곳에서 낮은 곳으로 오염물질이 이동한다는 Fickian 확산모형으로 설명될 수 있다. 오염물질은 확산 및 이류과정 외에도 비보존성 오염물질의 반응에 의한 감소, 오염물의 흡착 및 탈착 등의 복잡한 과정을 거치며 이동하게 된다. 과거 수리지질학에서 다루었던 지하수의 거동은 전적으로 지하수의 동수구배에 의한 이동, 즉 이류에 기초를 두고 있다. 실제 지하수계로 유입된 각종 용질은 농도구배나 온도구배에 의해서도 움직일 수 있다. 이와 같이 지하수 환경 내에 유입된 오염물질은 이류에 의한 지하수 동수구배를 따라 흐를 것이라고 예상되는 이동 경로로부터 이탈하여 분산 및 확산되는 경향이 있다. 이를 수리분산이라 한다. 지하수의 동수구배에 의한 이류와 수리분산 작용 때문에 오염물질은 이동하면서 농도가 점차 변하게 되는데 이와 같이 지하수 내의 용질이 이동하면서 희석되어 농도가 낮아지는 현상을 분산이라고 한다. 포화 다공질 매체 내에서 용질의 일반적인 수리분산은 역학적인 분산과 용질의 열역학적인 에너지에 의해 발생하는 분자확산으로 나눌 수 있다.

2.2.2 이류-분산 방정식

오염물질 이동의 기본 메커니즘인 이류와 분산은 각각 식(1)과 식(2)로 나타낼 수 있으며, v 는 평균흐름속도, θ 는 체적함수비, C 는 농도, U 는 단위유량, D 는 수리분산계수를 나타낸다.

$$Advection = v\theta C = UC \quad (1)$$

$$Dispersion = -\theta D \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2)$$

본 연구에서 매립지 성토제방을 통한 오염물질 거동을 모사하기 위해 사용한 MT3D 모델의 지배방정식인 이류-분산방정식은 식(3)과 같다.

$$\left(\theta + \rho_d \frac{\partial S}{\partial C} \right) \frac{\partial C}{\partial t} = \theta D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - U \frac{\partial C}{\partial x} - \lambda \theta C - \lambda S \rho_d \quad (3)$$

여기서, ρ_d 는 흙의 건조밀도, S 는 흡착도, λ 는 붕괴계수를 나타낸다.

3. 오염된 점토의 역학적 특성변화

3.1 시험방법

3.1.1 시료채취 및 기본물성시험

본 연구에서는 시화호 유역(시화1공구)의 8개소에서 Thin Wall Tube Sample를 이용하여 GL(-)2~3m의 동일 심도에서 불교란 점토시료를 채취하였으며 현장 채취된 점토시료에 대해서는 비중, 입도분석, 함수비, 에터버그한계 시험 등의 기본적인 물성시험을 실시하였다.

3.1.2 입자구조 관찰 및 화학성분 분석

본 연구에서는 기초과학지원연구원 춘천분소의 도움을 받아 점토시료의 표면사진 촬영을 통해 입자구조를 관찰하였으며 동 분소가 보유한 Hitachi Science Systems사의 주사전자현미경(SEM)을 사용하였다. 또한, 주사전자현미경에 부착된 X-선 스펙트럼 검출기를 이용하여 화학성분 조성을 정량적으로 분석하였다.

3.1.3 역학적 특성시험

오염물질이 역학적 특성변화에 미치는 영향을 파악하기 위해 채취된 점토시료를 대상으로 1개의 증류수와 농도를 달리한 3개의 NaCl 수용액 및 4개소의 쓰레기 매립장에서 채취한 침출수를 이용하여 시료의 초기 간극수를 치환하여 시험시료를 조성하였다. 각 시료에 대해 일축압축시험, 삼축압축시험 및 압밀시험을 수행하였다.

3.1.4 간극수 치환

점토시료의 초기 간극수를 계획된 간극유체로 치환하기 위해 일련의 과정을 수행하였다. 그림 2와 같이 정수위 투수시험과 유사한 방식으로 점토시료가 채워져 있는 샘플러를 투수원통으로 사용하여 증류수, NaCl 수용액(5%, 10%, 20%) 과 4개 매립장에서 채취한 침출수를 상부에서 지속적으로 공급하여 간극수를 치환하였다.

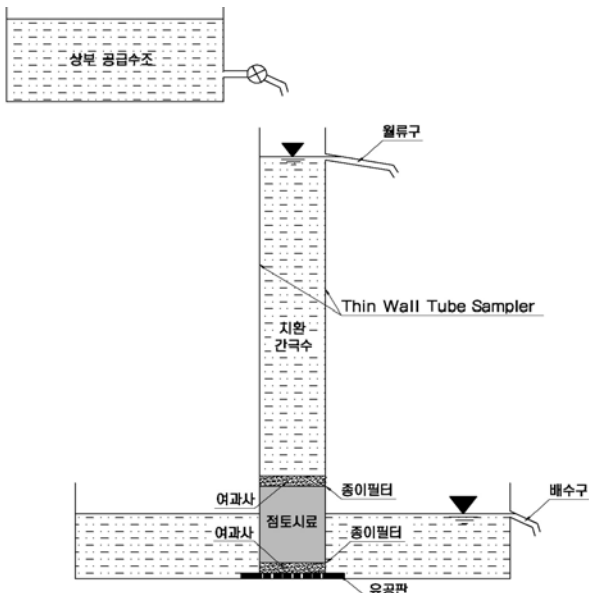


그림 2. 시료 간극수 치환장치 모식도

치환 소요시간에 대한 예비시험이나 치환 완료 후 치환 상태를 확인하기 위한 시험은 수행하지 않았으나 Darcy 법칙을 이용, 치환 소요시간에 대한 개략적인 검토를 수행하여 이를 바탕으로 13개월의 치환기간을 적용하였다. 본 연구에서 시료별로 적용한 치환 간극유체의 조성현황은 표 1과 같다.

표 1. 시료별 적용 간극유체

시료 No	적용 간극수	시료 No	적용 간극수
SH-01	증류수	SH-05	당진 매립장 침출수
SH-02	5% NaCl 수용액	SH-06	금산 매립장 침출수
SH-03	10% NaCl 수용액	SH-07	금고 매립장 침출수
SH-04	20% NaCl 수용액	SH-08	신대 매립장 침출수

3.2 시험결과 및 분석

3.2.1 점토시료의 물리적 특성

점토시료에 대한 기본 물성시험 결과는 표 2와 같다. #200체 통과량은 평균 93.6%, 자연상태 함수비는 평균 59.9%, 비중은 2.73, 액성한계 및 소성한계는 각각 81.9%, 30.6%로 8개소에서 채취한 점토시료는 거의 유사한 물리적 특성을 보였다.

표 2. 시료의 기본 물성

시료 No	#200체 통과량 (%)	비중 Gs	액터버그 한계			함수비 w _n (%)
			LL (%)	PL (%)	PI (%)	
SH-01	94.5	2.73	85.0	32.0	53.7	59.0
SH-02	95.9	2.73	83.5	31.3	52.2	61.7
SH-03	95.6	2.73	82.1	31.2	50.9	60.7
SH-04	93.5	2.73	79.5	30.0	49.5	61.2
SH-05	92.6	2.73	81.2	30.7	50.5	59.4
SH-06	93.9	2.73	85.1	31.2	53.9	58.9
SH-07	92.0	2.73	80.0	28.9	51.5	59.6
SH-08	90.5	2.73	78.9	29.3	49.6	58.5

3.2.2 점토시료의 입자구조

그림 3은 점토시료에 대해 주사전자현미경으로 촬영한 표면사진을 대표적으로 나타낸 것이다. 입자구조 관찰결과, 판상 및 침상의 모양으로 이루어져 있으며, 석영과 장석의 조암광물 결정들을 관찰할 수 있었다. 또한 8개의 시료는 유사한 입자구조를 보이는 것을 알 수 있었다.

3.2.3 점토시료의 화학적 특성

그림 4는 에너지분산분석 결과인 시료별 원소 구성비율을 나타낸 것으로, O, C, Si, Al, Fe원소의 평균 구성비율(%)은 각각 44.5%, 28.9%, 13.8%, 6.1%, 2.5%로 전체의 96%를, 기타 미량의 원소가 4.1%를 차지하고 있다. 점토시료에 대한 화학성분 분석결과, 그림 5와 같이

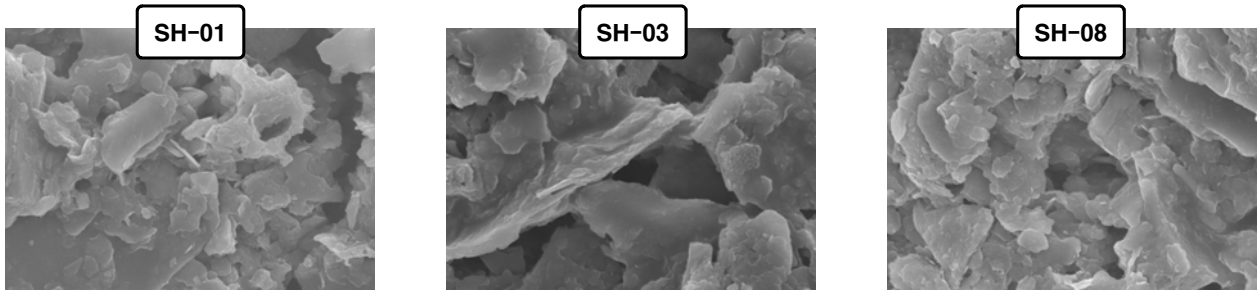


그림 3. 시료의 입자구조

원소 구성비율은 시료별로 약간의 차이는 있지만 O, C, Si, Al, Fe 순서의 동일한 구성원소 분포를 보였다. 한편, 일반적으로 유기탄소 비율이 식물플랑크톤 비율과 비슷하다는 것을 감안하면 시료 채취지역의 C원소 비율이 높게 나타난 것은 방조제 축조로 식물플랑크톤 증식이 활발해져 유기물이 다량 생성·퇴적되었기 때문임을 유추할 수 있다.

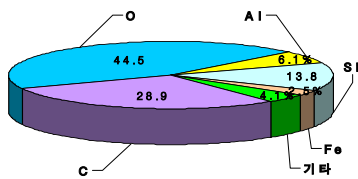


그림 4. 구성원소 평균 비율

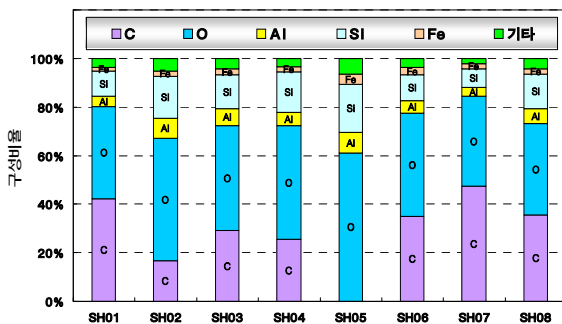


그림 5. 시료별 구성원소 비율

이상에서 점토시료의 물리·화학적 특성은 거의 동일하며, 시험 시료는 치환 간극수를 제외하고는 동일조건을 가지는 것으로 판단 가능하다.

3.2.4 침출수 성상 분석결과

채취한 매립지 침출수에 대해 성상분석을 수행하였으며 결과는 표 3과 같다. 표에서 SAR

(sodium adsorption ratio)은 투수성과 폭기 정도를 나타내는 지수로 식 4와 같이 Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} 이온 농도에 따라 결정된다.

$$SAR(mg/L) = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Mg^{2+} + Ca^{2+}}{2}}} \quad (4)$$

표 3. 쓰레기 매립장 침출수 성상 분석결과

매립장 조성	충남당진	충남금산	대전금고	대전신대
Ca^{2+} (mg/L)	136.8	81.9	110.6	47.3
Mg^{2+} (mg/L)	151.6	198.9	133.8	166.1
K^+ (mg/L)	1,251	918	892	256
Na^+ (mg/L)	1,518	1,320	1,186	332
Cl ⁻ (mg/L)	4,403	3,348	2,945	1,704
Fe(mg/L)	2.8	17.1	39.8	28.3
SAR(mg/L)	126.4	111.4	107.3	32.1

3.2.5 역학적 특성 변화

3.2.5.1 강도특성 변화

간극유체를 치환시킨 시료에 대한 일축압축시험과 삼축압축시험 결과는 표 4와 같다.

NaCl 수용액으로 치환된 시료에 대한 일축압축시험과 삼축압축시험 결과, 표 4에서 제시된 바와 같이 농도가 증가할수록 점토시료의 강도도 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 이러한 현상의 원인은 확산이중층 모델을 이용하여 설명할 수 있다. 즉, 전해질 농도가 증가하면 확산이중층의 두께는 줄어들게 된다. 이에 따라 입자간 반발력이 감소되고 외부하중에 대한 저항이 큰 면모구조로 바뀌기 때문인 것으로 보인다.

표 4. 일축 및 삼축압축시험 결과

시료 No	일축 압축 시험	삼축압축시험					치환 간극유체
		UU	CU				
			전응력		유효응력		
q_u (kPa)	C_{uu} (kPa)	C_{cu} (kPa)	α_{cu} (°)	C' (kPa)	ϕ' (°)		
SH-01	81.95	42.02	7.85	18.2	5.88	20.3	증류수
SH-02	85.81	44.17	8.83	18.6	7.85	20.8	5% NaCl 수용액
SH-03	88.56	46.38	9.81	18.7	7.85	21.1	10% NaCl 수용액
SH-04	98.33	51.33	11.77	19.7	9.81	21.9	20% NaCl 수용액
SH-05	109.7	56.98	11.77	20.2	9.81	22.3	침출수(충남당진)
SH-06	129.0	66.81	13.73	21.3	11.77	23.6	침출수(충남금산)
SH-07	133.1	68.32	13.73	22.1	11.77	24.9	침출수(대전금교)
SH-08	125.3	65.07	12.75	20.9	10.79	23.7	침출수(대전신대)

그림 6과 그림 7에서 보는 바와 같이 NaCl 수용액의 농도 증가에 따라 일축압축강도, 점착력, 전단저항각은 지수 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 전단저항각의 경우, 농도 증가에 따라 약간 증가하는 경향을 보이지만 점착력과 같이 현저한 증가는 나타나지 않았다. 이는 마찰성분은

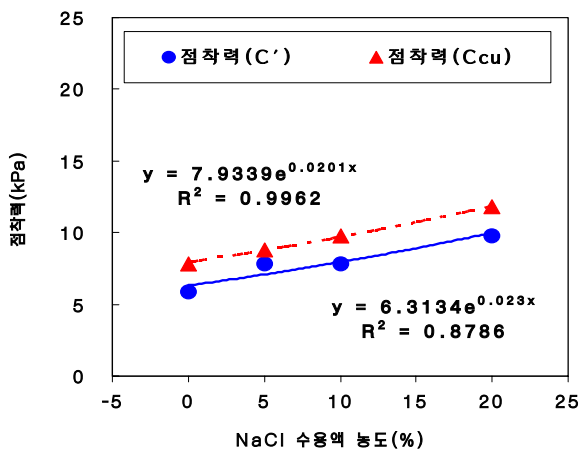


그림 6. NaCl 농도에 따른 점착력 변화

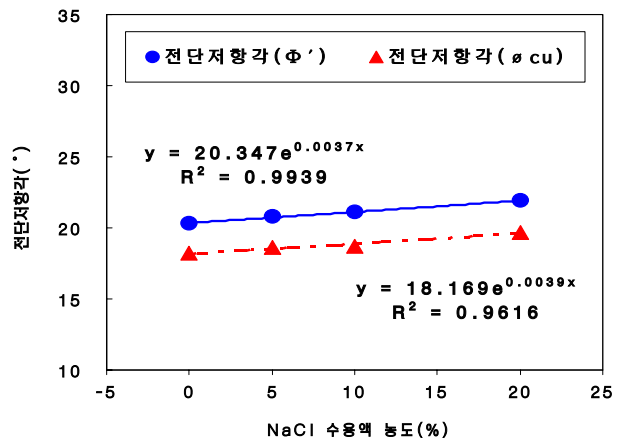


그림 7. NaCl 농도에 따른 전단저항각 변화

입도, 점토표면 성질 등에 의한 물리적 현상과 밀접한 관계를 가지는 반면, 점착력 성분은 입자간의 상호작용력에 기인하는 물리·화학적 현상과 밀접하기 때문인 것으로 보인다.

침출수로 포화시킨 시료의 경우, 표 4에서 보는 바와 같이 침출수 성상에 따라 정도의 차이는 있지만, NaCl 수용액으로 포화시킨 시료보다도 강도증가 현상이 크게 나타났다. 이는 확산이 중층 두께와 전해질 용액 내의 이온가수간의 상관관계에서 원인을 찾을 수 있다. 침출수는 표 4에 나타난 바와 같이 1가 양이온 이외에도 2가 양이온이 전해질 속에 다량 전이되어 있어 1가 양이온만이 전이되어 있는 NaCl 수용액보다 이온가수가 크기 때문에 확산이중층 두께가 감소하는 정도가 커진다. 결국, 침출수로 포화된 시료가 NaCl 수용액으로 포화된 시료에 비해서 면모화 정도가 크기 때문에 상기와 같은 시험결과가 나타나게 된 것으로 판단된다.

3.2.5.2. 변형특성 변화

표 5는 시료별 압밀시험결과로 산정된 선형압밀하중(P_c)과 압축지수(C_c)를 나타낸 것이다.

표 5에 제시된 바와 같이 NaCl 수용액의 농도가 증가함에 따라 압축지수는 증가하는 경향을 보였으며 압밀곡선에서 도해적으로 결정되는 선형압밀하중도 압축지수 증가에 따라 커지게 된다. 이러한 압축성 증가는 전해질 용액의 농도

표 5. 압밀시험 결과

시료 No.	C _c	P _c (kPa)	치환 간극유체
SH-01	0.452	80.0	증류수
SH-02	0.495	90.0	5% NaCl 수용액
SH-03	0.608	96.0	10% NaCl 수용액
SH-04	0.608	115.0	20% NaCl 수용액
SH-05	0.548	125.0	침출수(충남당진)
SH-06	0.585	160.0	침출수(충남금산)
SH-07	0.616	170.0	침출수(대전금고)
SH-08	0.565	150.0	침출수(대전신대)

가 증가함에 따라 흙의 구조가 간극비와 압축성이 큰 면모구조로 변하기 때문인 것으로 판단된다. 한편, NaCl 수용액 농도와 지수증가 관계를 보이는 강도특성과 달리 압축지수 상에서는 일정한 증가 패턴을 발견할 수 없었으며, 수용액의 농도가 커질수록 압축성 증가 현상은 미미해지는 것으로 나타났다. 침출수로 포화된 시료의 압축지수는 증류수로 포화된 시료에 비해 모두 증가하였는데, 이 또한 간극유체의 화학적 특성에 따른 흙 구조의 변화에 기인한 것으로 보인다.

3.2.5.3 투수특성 변화

표 6은 압밀시험을 통해 산출된 투수계수 변화를 나타낸 것으로, NaCl 수용액의 농도가 증가할수록 투수계수도 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. 이는 강도 및 압밀특성 변화와 동일하게 확산이중층 모델로써 설명이 가능하다. NaCl 수용액 농도가 증가함에 따라 간극유체의 전해질 농도가 증가하게 되고 유전체 상수는 크게 감소된다. 이로 인해 확산이중층 두께가 감소되고 점토 입자간 반발력이 감소하게 되며, 결국 점토구조의 집합체간 간극이 커지고 집합체간 결합이 파괴되어 투수계수가 커지게 된다. 또한, 점토시료의 압축지수 변화와 마찬가지로 수용액 농도 증가에 따른 투수계수 증가 패턴은 나타나지 않았으며, 농도가 작은 구간에서는 투수계수의 확연한 증가가 나타나지만 농도 증가시 이러한 변화는 미미해지는 것으로 나타났다.

침출수로 포화된 시료의 투수계수가 증류수로 포화된 시료에 비해 크게 나타났는데 이는 전해질 농도 증가와 침출수 내의 유기물과 무기염류

표 6. 투수계수(cm/sec) 변화

시료 No	재 하 하 중			치환 간극유체
	9.81kPa	156.91kPa	1,255kPa	
SH-01	3.25×10 ⁻⁶	2.71×10 ⁻⁷	3.34×10 ⁻⁸	증류수
SH-02	4.32×10 ⁻⁶	3.61×10 ⁻⁷	3.46×10 ⁻⁸	5% NaCl 수용액
SH-03	5.48×10 ⁻⁶	3.77×10 ⁻⁷	5.34×10 ⁻⁸	10% NaCl 수용액
SH-04	5.26×10 ⁻⁶	3.69×10 ⁻⁷	4.89×10 ⁻⁸	20% NaCl 수용액
SH-05	3.61×10 ⁻⁶	2.84×10 ⁻⁷	5.02×10 ⁻⁸	침출수(충남당진)
SH-06	3.75×10 ⁻⁶	2.81×10 ⁻⁷	5.05×10 ⁻⁸	침출수(충남금산)
SH-07	4.02×10 ⁻⁶	3.03×10 ⁻⁷	4.73×10 ⁻⁸	침출수(대전금고)
SH-08	3.61×10 ⁻⁶	2.74×10 ⁻⁷	4.91×10 ⁻⁸	침출수(대전신대)

의 영향으로 인해 유전율이 감소됨에 따른 확산이중층의 두께 변화에 기인한 것으로 보인다. 또한 실험결과, NaCl 수용액으로 포화된 시료에 비해 면모화 정도가 크에도 불구하고 투수계수가 작게 나타났는데, 이러한 현상은 침출수 중에 포함되어 있는 고형 부유물질과 미생물 성장 등으로 인한 영향인 것으로 판단된다.

4. 매립지 오염물질의 거동 예측

4.1 해석 개요

본 연구에서는 오염물의 지중 침투 및 수원 유입에 따른 문제를 직면하는 매립장을 대상으로 점토 차수층을 통한 오염물질 거동을 모사하여 침출수 성상에 따른 오염물질의 농도변화를 분석하여 거동양상을 파악하였다. 오염물질의 이동방향은 지하수 흐름과 일치할 것으로 판단하여 현재 상태의 수리지질학적 조건을 재현하는 정류 모사를 수행하고 이를 바탕으로 오염물질 이동을 모의하는 부정류 모사를 수행하였다.

4.2 해석 조건

4.2.1 해석 단면

매립지 단면은 매립면적 62,500m²(250m×250m) 규모로 선정하였으며, 저류구조물은 그림 8에서 보는 바와 같이 균일형(점토질) 성토제방으로 제방 높이가 20m, 상단폭 5m, 하단폭 94m로 모델링하였다. 매립지 바닥과 제방사면에 표면차수막을 설치하고 제방 안정성을 고려하여 외측사면은

1:2.5, 내측사면은 1:1.5의 경사를 가지는 것으로 해석단면을 설정하였다.

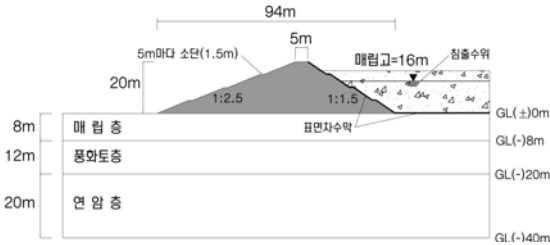


그림 8. 매립지 제원 및 해석단면

해석결과가 모델경계의 영향을 받지 않도록 해석영역은 매립지 주변지역을 포함한 500m×500m로 결정하였다. 매립지역은 3개 층으로 나누고 층마다 50×50개의 셀을 사용하여 표 7과 그림 9에서 보는 바와 같이 격자망을 구성하였다. 해석영역의 하부 경계면은 불투수 경계면으로, 좌·우측면 경계는 일정수두 경계를 적용하였으며, 표면차수막 파손으로 오염물질이 10년간 지속적으로 유출된다는 조건을 가정하여 차수재 물성을 부여하지는 않았다.

한편, 그림 9에서 보는 바와 같이 7개의 관측정(COW-1~COW-7)을 선정하여 성토제방과 하부지반을 통한 오염물질 이동의 양상을 관찰하였으며, 경과기간 1년, 5년, 10년, 20년을 관찰 주기로 하여 농도변화를 분석하였다. 관측정은 오염물질의 이동 방향을 고려하여 해석모델의 좌측에 분포시키고 관측정 모두 매립층 내부의 동일 심도에 위치시켰다.

표 7. 해석 격자망 구성

매립 면적	전체 면적	셀의 수	셀의 크기
250m×250m	500m×500m	50(R)×50(C)	10m×10m

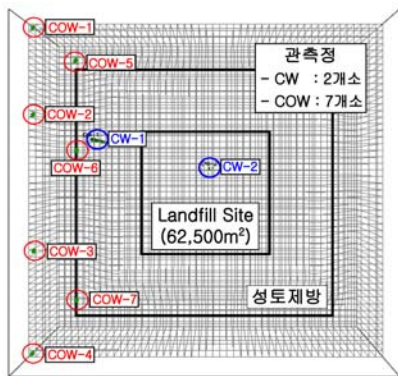


그림 9. 해석 격자망

4.2.2 지반조건 및 입력 파라미터

매립지 하부지반은 매립층, 풍화토층과 연암층의 3개 층으로 구성하였으며, 각 층별 두께는 그림 8과 같이 각각 8m, 12m, 20m로 모델링하고 매립지 내부의 쓰레기 매립고는 16m로 가정하였다. 오염물질 이동 해석시 필요한 파라미터는 각종 시험결과에서 얻은 자료를 기준으로 하여 결정하는 것이 원칙이나 본 연구의 해석대상은 가상의 매립지이므로 일반적인 매립지 해석시 사용되는 수치를 참고하였다. 평면 수리 등방성으로 가정하고 수직 수리전도도는 평면 수리전도도의 0.1배, 횡분산지수와 수직분산지수는 종분산지수의 0.1배를 적용하였으며, 성토제방의 수리전도도는 효율적인 해석 수행과 오염물질 접촉시 투수성 증가현상을 고려하여 점토 차수층의 일반적인 수리전도도(1×10^{-7} cm/sec)보다 상향 조정하여 해석을 수행하였다. 본 연구에서 적용한 수리 파라미터는 표 8과 같으며, 층별 수리전도도는 표 9에서 보는 바와 같다.

표 8. 매립지 차수층 및 기초지반 수리 특성치

구분	분류	비산출율 (S_v)	공극률 (%)	종분산지수 (m, α)
layer-1	성토제방	0.2	0.3	0.1
	쓰레기층	0.2	0.3	0.1
	매립층	0.2	0.3	0.1
layer-2	풍화토층	0.001	0.2	-
layer-3	연암층	0.0005	0.1	-

표 9. 매립지 차수층 및 기초지반 수리전도도

구분	분류	$k_x=k_y$ (cm/sec)	k_z (cm/sec)
layer-1	성토제방	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-6}
	쓰레기층	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-4}
	매립층	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-4}
layer-2	풍화토층	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-6}
layer-3	연암층	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-7}

함양량과 증발산량은 강수량 관측자료로부터 추정하였다. 한국지하수총람(농업진흥청)의 수자원이용현황과 수자원장기종합계획(건설교통부) 통계자료를 기준하여 해석대상 지역의 연평균 강수량을 1,300mm/yr로 가정하고 함양량은 강수량의 18%를 적용하여 234mm/yr로, 증발산량은

27%를 적용하여 351mm/yr로 추정하였다.

4.2.3 해석 CASE별 오염원 조건

본 연구에서는 매립지 침출수를 MT3D 모델의 오염원으로 적용하여 오염물 거동을 모사하였으며, 해석 CASE별 오염원 조건은 표 10과 같다.

표 10. 해석 CASE별 오염원 조건

해석 CASE	오염물질	관측 오염원	오염원 농도 (mg/ℓ)
CASE-1	당진 매립장 침출수	Cl ⁻ 이온	4,403
CASE-2	금산 매립장 침출수	Cl ⁻ 이온	3,348
CASE-3	금고 매립장 침출수	Cl ⁻ 이온	2,945
CASE-4	신대 매립장 침출수	Cl ⁻ 이온	1,704

표 10에서 보는 바와 같이 침출수 내의 염소이온을 관측오염원으로 적용하였다. 염소이온은 비반응성 물질로써 점토입자와 흡착반응을 일으키는 대부분의 유해물질에 비해 빨리 이동하여 오염물 이동에 대한 안전측의 기준이 되므로 차

수층 설계시 기준물질로 많이 쓰여지고 있다. 장연수 등(2001)의 연구에 따르면 Cl⁻의 유효확산계수는 Na⁺, K⁺, Ca²⁺보다 2~6배 정도 크게 나타났으며, 장연수 등(1994), 오석영 등(1996), 강동희 등(2001), 홍경택 등(2002)의 연구와 같이 매립지 주변환경 오염특성에 관한 대부분의 국내 연구에서도 염소이온을 기준물질로 사용하였다. 본 연구에서도 이와 같은 점을 고려하여 침출수 정상 중에서 상당 비중을 차지하며, 화학적 반응으로 인한 지연이 없는 비활성 염소이온을 관측오염원으로 결정하여 오염물질 이동 및 확산범위가 가장 최대인 상태에 대해서 해석을 수행하였다.

4.3 해석결과 및 분석

4.3.1 오염물질 이동 해석결과

해석 CASE별 시뮬레이션 결과, 관측정별로 측정된 염소이온 농도는 표 11에서 보는 바와 같다. 모든 CASE별 해석결과에서 공통적으로 관측정

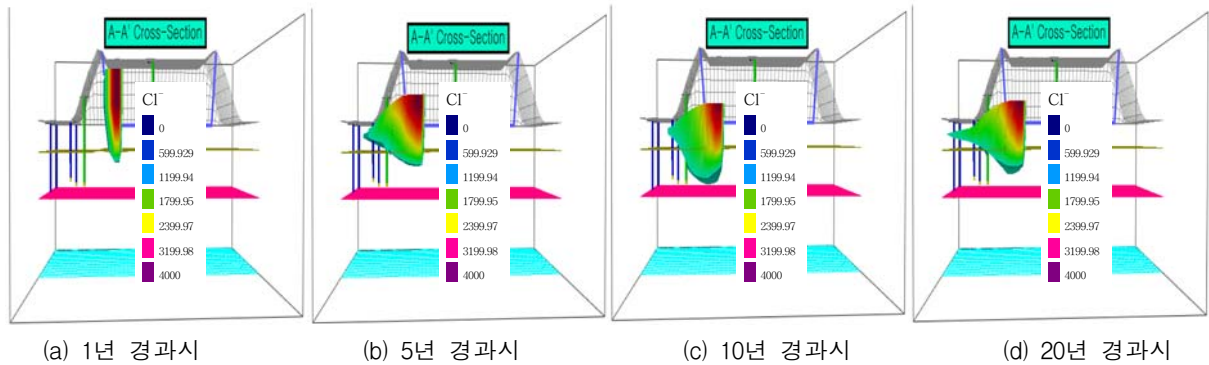


그림 10. 시간경과에 따른 농도분포도(CASE-1)

표 11. 시간경과에 따른 관측정별 농도(mg/ℓ)

관측정	이격거리 (m)	CASE-1				CASE-2				CASE-3				CASE-4			
		1년	5년	10년	20년	1년	5년	10년	20년	1년	5년	10년	20년	1년	5년	10년	20년
COW-1	164.6	0.00	12.81	24.57	14.10	0.00	9.74	18.69	10.72	0.00	8.57	0.00	0.00	0.00	4.96	9.51	5.46
COW-2	136.3	0.05	112.4	106.5	75.06	0.04	85.48	81.01	57.08	0.03	75.19	71.26	50.21	0.02	43.51	41.23	29.05
COW-3	136.5	0.02	90.13	111.2	79.19	0.01	68.53	84.57	60.21	0.01	60.29	74.39	52.97	0.01	34.88	43.04	30.65
COW-4	184.3	0.00	1.77	4.78	1.98	0.00	1.34	3.63	1.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.68	1.85	0.97
COW-5	96.3	0.00	0.73	31.24	156.6	0.00	0.55	23.75	119.1	0.00	0.49	20.89	104.8	0.00	0.28	12.1	60.6
COW-6	76.7	0.00	6.57	100.8	566.0	0.00	5.00	76.63	430.4	0.00	4.39	67.41	378.7	0.00	2.54	39.0	219.1
COW-7	94.8	0.00	1.45	39.52	178.2	0.00	1.10	35.05	135.5	0.00	0.97	26.43	119.2	0.00	0.56	15.3	69.0

COW-3과 COW-6에서 측정된 염소이온의 농도가 상대적으로 높게 나타나 매립지 중앙부에서 가장 많은 오염물질이 유출되어 이동성이 큰 것을 확인할 수 있었다. 또한, 내부 관측정에서는 시간경과에 따라 염소이온 농도가 비선형으로 증가하는 것으로 나타나 제방 차수층을 통해 오염물질이 지속적으로 유출되고 있음을 알 수 있다.

그림 10은 CASE-1에 대한 염소이온 농도 분포도(횡단면기준)를 나타낸 것으로 오염물질 성상에 상관없이 거동 초기 1년 동안에는 오염물질이 하향 이동을 하고 시간이 경과함에 따라 수평방향으로의 이동이 현저해지지만 5년 이후에는 수직방향으로의 이동이 우세해지면서 농도가 희석되는 경향을 보였다.

그림 11과 그림 12는 침투농도가 관측되는 관측정 COW-3과 COW-6에서의 염소이온 농도변화를 도식한 것이다. 그림 11에서 보는 바와 같이, COW-3 관측정의 농도는 시간경과에 따라 증가하다가 일정시간(6년)이 경과하면 감소하는 결과를 보이는데 이러한 현상은 이동 초기에는 확산에 의한 오염물질 이동으로 어느 정도까지는 농도가 증가하지만 시간경과에 따라 이동거리가 멀어지면서 희석으로 인한 지연작용이 활발해져 농도가 감소되기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 염소이온 농도 분포도에서 보는 바와 같이 경과시간 5년까지는 수평방향 이동이 현저하지만 이후부터는 수직방향으로의 확산이 우세하게 나타나는 현상에 기인한 것으로도 볼 수 있다. 반면, 오염원과 가장 가까운 COW-6 관측정에서는 그림 12에서 보는 바와 같이 초기에는 시간경과에 따라 완만하게 농도가 증가하다가 지속적인 오염원 공급으로 인해 6년을 경계로 농도가 급격히 증가하는 것으로 나타났다.

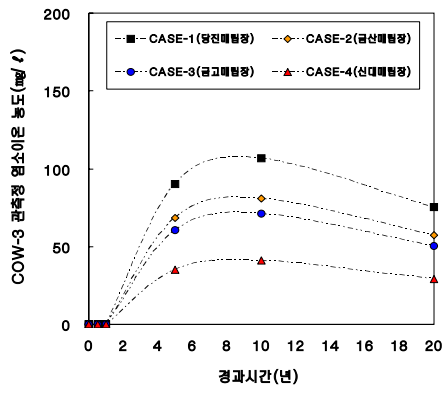


그림 11. 해석 CASE별 COW-3 관측정 농도변화

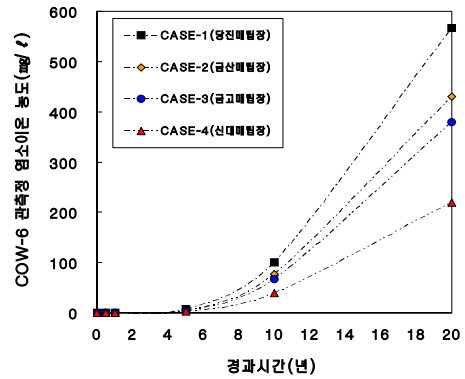


그림 12. 해석 CASE별 COW-6 관측정 농도변화

4.3.2 오염물질 이동거리 예측

그림 13은 오염물질 이동영역을 분석하기 위해 염소이온의 농도분포를 이격거리에 따라 도식한 것으로 이격거리 증가에 따라 염소이온의 농도는 지수 감소하는 것으로 나타났다.

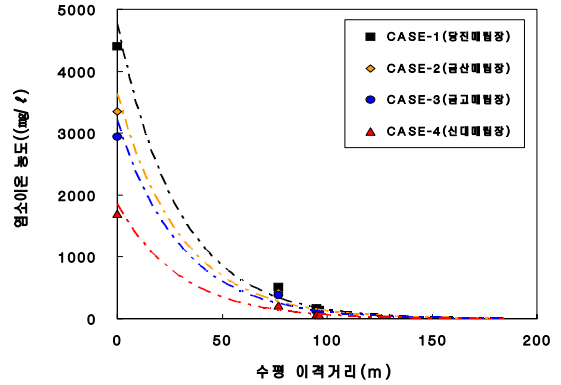


그림 13. 이격거리별 염소이온 농도변화

오염원으로부터의 이격거리 90m 정도인 구간에서는 농도가 급격하게 감소되고 이후부터 감소폭이 점차 줄어들다가 150m 이상에서는 농도가 거의 대부분 희석된 상태로 되는 것을 모든 해석 CASE에서 공통적으로 확인할 수 있었으며, 염소이온의 초기농도가 클수록 이격거리 증가에 따른 농도 감소폭이 커지는 것으로 나타났다. 한편, 이격거리별 농도변화 그래프를 이용하여 염소이온 농도감쇄 관계식을 유도하였고, 이로부터 각 해석 CASE별로 이동거리를 예측하였으며 결과는 표 12에서 보는 바

와 같다.

표 12에서 보는 바와 같이 염소이온의 초기농도가 클수록 이동거리도 커지는 경향을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과는 그림 13에서 나타난 바와 같이 초기농도가 클수록 이격거리에 따른 농도변화가 크고 그 만큼 농도구배에 의한 확산현상이 활발해졌기 때문인 것으로 판단된다. 일반적으로 분산에 의한 이동이 확산에 의한 이동에 비해 큰 비중을 차지하지만 매립지 제방의 점토층과 같이 간극유속이 매우 작은 경우에는 역학적 분산보다는 농도구배에 따른 확산현상이 거동을 지배하는 주요 요인이 되기 때문이다.

표 12. 수평 이격거리별 염소이온 농도감쇄 관계식

구분	염소이온 농도	상관관계식	R ²	이동거리 (m)
CASE-1	4,403mg/ℓ	4775.7×EXP(-0.0344d)	0.97	417
CASE-2	3,348mg/ℓ	3641.3×EXP(-0.0333d)	0.97	406
CASE-3	2,945mg/ℓ	3203×EXP(-0.0333d)	0.97	402
CASE-4	1,704mg/ℓ	1853.2×EXP(-0.0333d)	0.97	286

5. 결 론

본 연구에서는 시화호 유역에서 채취한 점토시료에 대해 기본 물성시험과 화학 성분분석을 실시하였으며, 오염물질이 흙의 역학적 특성변화에 미치는 영향을 파악하기 위해 초기 간극수를 NaCl 수용액과 침출수로 치환시킨 시료에 대해 일축압축시험, 삼축압축시험, 압밀시험을 수행하였다. 또한, 오염물질 이동 해석모델을 이용하여 실제 매립지 점토 차수층에서 발생하는 오염물질의 농도변화를 파악하여 오염물질 성상에 따른 이동경로와 확산정도를 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 점토시료에 대한 물성시험과 주사전자현미경 관찰결과, 8개소에서 채취된 시료는 거의 유사한 물

리적 특성과 입자구조를 가지는 것으로 나타났다.

(2) NaCl 수용액으로 포화된 시료는 농도 증가에 따라 강도, 압축성, 투수성이 증가하였다. 이는 농도가 증가할수록 DDL 두께가 감소되어 흙구조가 면모화되기 때문인 것으로 판단된다.

(3) 침출수로 포화된 시료는 NaCl 수용액으로 포화된 시료에 비해 강도, 압축성의 증가현상이 크게 나타난 반면 침출수의 고형 부유물질과 미생물 생장에 따른 영향으로 면모화 정도가 큼에도 불구하고 NaCl 수용액으로 포화된 시료에 비해 작게 나타났다.

(4) 오염물질 이동 해석결과, 초기 염소이온 농도가 클수록 측정농도가 커지며, 시간경과에 따라 농도는 비선형으로 증가되었다.

(5) 해석결과에서 유도한 농도 감쇄 관계식으로부터 이동거리를 예측한 결과, 초기 농도가 클수록 이동거리도 지수적으로 증가하였으며, 이는 초기 농도가 클수록 농도변화가 크고 그 만큼 농도구배에 의한 확산현상이 활발해졌기 때문인 것으로 판단된다.

(6) 이상의 연구성과로부터, 점토의 역학적 특성은 토립자의 구조와 간극유체의 성질에 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있었다. 한편, 본 연구에서 제안한 농도 감쇄 관계식은 매립지 제방에서 장기간의 침출수 누출시 점토 차수층의 역학적 특성변화로 인해 예상되는 사면 안정성 문제와 이에 요구되는 대책공법, 적용영역 결정 등에 있어 중요한 기초자료로 활용할 수 있으므로 이를 실제 적용하는 방안에 대한 향후 진전된 연구추진이 추천된다.

(접수일 : 2005. 11. 24. 심사완료일 : 2006. 4. 18.)

참 고 문 헌

1. 박준범, 명동일, 이성수(2005), 점성토의 확산이중층 변화에 따른 지반환경공학적 특성 고찰. 한국지반환경공학회지 제6권, 제2호, pp. 61~67.
2. 안태봉(1997), 염분이 모래와 벤토나이트 혼합토의 응력변형에 미치는 영향. 한국지반공학회지 제13권, 제2호, pp. 17~27.

3. 오석영, 전효택(1996), 폐기물 매립지 주변의 지하수 오염과 오염물질의 지연 특성. 지하수환경학회지 제3권, 제1호, pp. 37~49.
4. 장연수, 이광열(1994), 난지도 매립장 지반을 통한 오염이동 특성과 제어. 지하수환경학회지, 제1권, 제1호, pp. 1~5.
5. 장연수, 홍경택(2001), 해안 점성토의 무기화합물에 대한 확산특성. 대한토목학회 논문집 제21권, 제4-C호, pp. 339~348.
6. 홍경택, 장연수(2002), 점성토층에서의 오염물 이동 특성. 대한토목학회 학술발표회 논문집, 제2권, pp. 313~316.
7. Gleason, M. H, Daniel, D. E. and Eykholt.(1997), Calcium and Bentonite for Hydraulic Contaminant Applications, Jnl. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 123, No.3, pp. 438~445.
8. Kenney, T. C., Van Veen, W. A., Swallow, M. A. and Sungaila M. A.(1992), Hydraulic Conductivity of Compacted Bentonite-Sand Mixtures. Canadian Geotechnical Journal, June, Vol. 29, No. 3, June, pp. 364~374.
9. Madsen, F. T. and Mitchell, J. K.(1987), Chemical Effects on Clay Hydraulic Conductivity and Their Determination. Geotechnical Practice for Waste Disposal, ASCE, Geotechnical Special Publication, pp. 70.
10. Tuncan, M., Khan, L. L. and Pamukcu, S.(1988), The Effect of Leachate on Geotechnical Properties of Clay Liner. Proceedings of the Twentieth Mid-Atlantic Industrial Waste Conference, Silver Spring, pp. 133~145.