

반응성 배수파일이 타설된 지반의 압밀거동 분석

Analysis on Consolidation Behavior of Soft Ground with Reactive Drain Pile

김 범 준¹⁾ · 오 명 학²⁾ · 윤 찬 영[†]

Beomjun Kim · Myounghak Oh · Chanyoung Yune

Received: August 22nd, 2013; Revised: September 10th, 2013; Accepted: December 10th, 2013

ABSTRACT : Geotechnical evaluation on the reactive drain pile which can achieve simultaneously both the soft ground improvement and the remediation of contaminated pore water in reclamation site was performed. Applicability of steel-making slag used as a inside reactive material was confirmed. To investigate the consolidation characteristics of the soft ground improved by reactive drain pile, testing devices to form and install the reactive drain pile were developed and laboratory tests were performed according to the existence of outside sand drain and the length of impermeable barrier. Test results showed that the consolidation time was decreased as the shortening of impermeable barrier. However, the effect of outside sand drain on consolidation time was dominant compared with the length of impermeable barrier.

Keywords : Reactive drain pile, Ground improvement, Reactive material, Consolidation

요 지 : 본 연구에서는 연약지반의 지반개량과 오염물질정화를 동시에 수행 가능한 반응성 배수파일의 적용에 대한 지반공학적인 특성을 평가하였다. 반응성 배수파일의 내부 반응물질로 사용되는 제강슬래그의 적용성을 확인하였으며, 내부 반응물질을 둘러싸고 있는 원통형 차단막 길이와 차단막 외부의 외부 배수층 설치에 따른 압밀거동을 분석하였다. 이를 위하여 반응성 배수파일이 타설된 지반을 모사할 수 있는 실험장비를 개발하였으며, 외부 배수층 유·무 및 차단막 길이를 변화시켜가며, 실내모형실험을 수행하였다. 실험결과, 차단막의 길이가 짧아질수록 압밀소요시간은 감소하는 것으로 나타났지만, 차단막 길이변화에 따른 압밀소요시간 차이에 비해 외부 배수층 유·무에 따른 압밀소요시간의 차이가 더 큰 것으로 나타났다.

주요어 : 반응성 배수파일, 지반개량, 반응물질, 압밀

1. 서 론

지속적인 경제발전과 더불어 부산 신항만 건설사업 및 일본 간사이국제공항 건설과 같은 연약지반 상의 해안매립을 통한 대규모 사회기반시설 건설이 전 세계적으로 증가하고 있다. 하지만 산업활동으로 인한 폐기물 및 유해화학물질들이 하천, 토양, 연안지역 등 다양한 경로를 통해 해안지역으로 유입되고 있고(Kim et al., 2006) 이는 해안매립을 통하여 연약지반을 개량하는 과정에서 심각한 환경문제를 초래하고 있다. 연약지반을 개량하기 위해서는 지반 내 간극수를 배출시켜 압밀을 촉진하는 연직배수공법(vertical drain method) 등이 사용될 수 있으나, 기존의 연직배수공법은 지반 내 존재하는 지하수나 간극수가 중금속 등으로 오염된 경우 이를 처리하기 위해 별도의 정화공법을 적용해야 하는 문제가 있다. 오염된 지반을 정화하기 위해서는 오

염된 지반의 투수성과 오염물질종류에 따라 생물학적 정화법(Bioremediation), 토양증기추출법(soil vapor extraction), 토양세척법(soil washing), 고형화 및 안정화(soildification/stabilization) 등이 적용될 수 있다. 그러나 오염된 지역의 지반개량을 위해서는 배수공법적용과 별도로 지반정화공정이 적용되어야 하므로 연직배수공법과 동시에 병행할 수 없으며, 이는 공기 지연을 초래하고 별도의 정화 플랜트가 요구되는 경우가 많으므로 큰 비용이 소요될 수 있다. 따라서 별도의 지반정화작업 없이 연약지반개량과 동시에 오염된 간극수를 정화시킬 수 있도록 고안된 반응성 배수공법(reactive drain method)이 제안된 바 있다(Oh et al., 2010).

반응성 배수공법은 연직배수파일 내부 중앙에 컬립형태로 투수성이 좋은 반응성 매질을 충전하여 연직배수파일의 압밀촉진기능을 그대로 유지하면서 내부 반응물질로 지반정화기능을 동시에 수행할 수 있는 공법이다. 또한, 상재하

1) Gangneung-Wonju National University Department of Civil Engineering

2) Korea Institute of Ocean Science & Technology, Coastal Development & Ocean Energy Research Division

† Gangneung-Wonju National University Department of Civil Engineering (Corresponding Author : yune@gwnu.ac.kr)

래그의 pH가 높은 이유는 제강슬래그의 구성 성분 중 CaO, MgO, K₂O의 함유량이 약 35%로 높기 때문으로 판단된다. pH가 증가하면 수소이온과의 경쟁 효과가 줄어들고 반응물질의 표면에 음전하를 띠는 공간이 증가하며, 침전의 효과로 카드뮴 제거량이 증가한다. 제강슬래그에 의한 중금속 제거는 높은 pH의 영향으로 흡착과 침전이 동시에 일어난다고 볼 수 있다. 또한, Weng & Huang(1994)은 SiO₂, Al₂O₃, FeO₃들은 중금속과 친화도가 높다고 보고하였다. 따라서 제강슬래그의 높은 pH와 SiO₂, Al₂O₃, FeO₃의 함량(57%)이 많은 것을 고려할 때 제강슬래그는 중금속에 대한 흡착제의 역할을 할 수 있다. 기존 연구를 살펴보면, 제강슬래그는 중금속과 친화도가 높은 물질로 알려져 있으며, 많은 연구자에 의해 제강슬래그를 이용한 오염물질 제거 메커니즘이 제안되어 왔다. Cha et al.(2006)은 제강슬래그와 모래로 구성된 복층매질을 이용하여 중금속 및 영양염류를 제거하는 연구를 수행하였고, Yongjie et al.(2009)은 인산염의 제거는 제강슬래그의 칼슘이온에 의한 것으로 보고한 바 있으며, Dimitrova & Mehanjiev(2000)와 Park et al.(2008)은 제강슬래그는 강한 알칼리성을 나타내며, 이는 오염제거에 효과적이라고 보고한 바 있다. 또한, Kim et al.(2011)은 제강슬래그의 회분식 실험을 통해 카드뮴의 흡착특성을 분석한 바 있으며, Lee et al.(2011)은 주상실험을 통해 제강슬래그의 중금속 제거능을 평가하여, 제강슬래그가 중금속 제거를 위한 반응성 매질로 활용성이 높다고 제시한 바 있다. 일련의 기존 연구결과를 토대로 제강슬래그는 중금속 및 영양염류 제거에 효과적으로 적용될 수 있는 충분한 반응성을 가지고 있는 것으로 판단된다.

반응성 배수공법에 적용되는 반응성 매질은 반응성뿐만 아니라 배수재로서의 배수성능을 확보해야 한다. 제강슬래그에 대한 투수성을 확인하기 위하여 강성벽체 정수위 투수 실험을 수행하였다. 제강슬래그의 상대밀도를 0%, 20%, 60%, 80%로 각각 달리하여 투수시험을 수행한 결과를 Table 3에 제시하였다. 제강슬래그의 투수계수는 10⁻⁵ m/sec 이상의 값을 나타내어 연직배수공법에 사용되는 모래의 투수계수기준(10⁻⁵ m/sec 이상)을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 제강슬래그를 반응성 배수공법의 내부 반응물질로 적용하더라도 충분한 배수성능을 확보할 수 있을 것으로 생각된다.

Table 3. Permeability of steel-making slag

Relative density (%)	Permeability (m/sec)
0	6.44E-05
20	6.10E-05
60	5.40E-05
80	4.67E-05

산업부산물인 제강슬래그의 사용으로 인한 2차 오염 가능성을 판단하기 위해 폐기물 공정시험법에 따른 용출시험을 수행하였다. 중금속 분석은 유도결합 플라즈마 발광광도기(ICP-730 ES, Varian)를 사용하였고 유기물의 분석은 가스 크로마토 그래프(GC-6890, Hewlett Packard)를 사용하였으며, 시안의 측정에는 분광광도계(Cary 50 UV-vis, Varian)를 통해 분석하였다. 용출시험 결과에 의하면 Table 4와 같이 법적 기준치를 초과하는 오염물질은 나타나지 않았다. 따라서 제강슬래그의 재활용으로 인한 2차 오염의 가능성은 거의 없을 것으로 판단된다.

3. 실험조건 및 계획

3.1 실험장비

본 연구를 위하여 사용된 시험장비의 형태와 구성도는 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 볼 수 있는 것과 같이 압밀챔버는 직경 300 mm의 원통 형태로 구성되어 있으며, 시료 상부의 강성가압판에 공기압을 가하여 시료를 압밀시킬 수 있도록 제작되었다. 시험기의 내부는 크롬도금을 하여 마찰을 줄일 수 있도록 제작하였고 상부가압판의 주변에는 O-ring을 사용하여 가압판 상부에 가해진 압력이 새지 않고 완전히 시료에 가해질 수 있도록 하였다. 시험 전 예비시험을 통하여 O-ring과 챔버 벽면의 마찰을 측정하였고, 그 값이 시료에 가해지는 하중과 비교하였을 때 매우 미소하여 실험결과에는 영향을 주지 않는 것을 확인하였다. 시료에 가해지는 하중은 레귤레이터를 이용하여 공기압을 원하는 수준으로 일정하게 가할 수 있도록 하였으며, 슬러리 상태의 시료를 압밀시켜 원하는 응력 수준의 균질한 시료를 성형할 수 있음을 확인하였다.

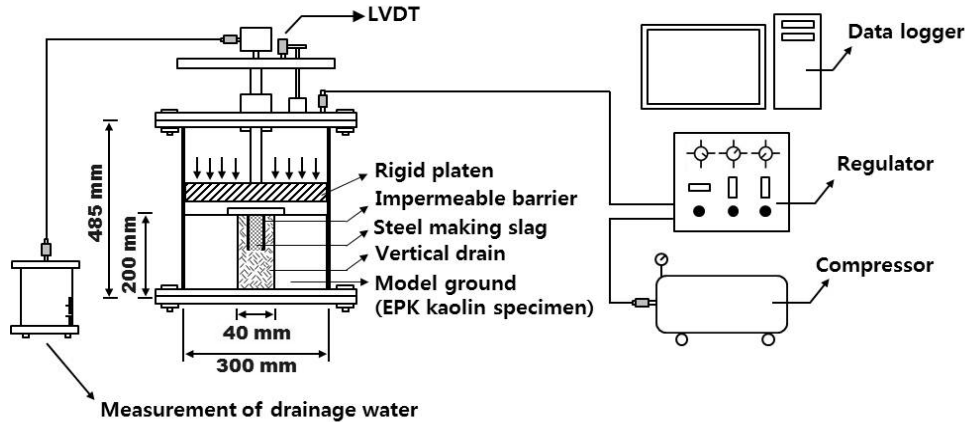
Table 4. Leaching test result of steel-making slag

Component	Regulation Level (mg/L)	Steel-making slag (mg/L)
Pb	3.0	ND*
Cu	3.0	0.01
As	1.5	ND
Hg	0.005	ND
Cd	0.3	ND
Cr6+	1.5	ND
Cn	1.0	ND
P	1.0	ND
TCE	0.1	ND
PCE	0.3	ND
Petroleum	5%	ND

* ND : Not Detected

성형된 시료의 중앙부에는 맨드렐을 관입하여 연직배수재를 설치할 수 있도록 하였다. 반응성 배수공법을 모사하기 위해 제작된 맨드렐은 Fig. 3(a)와 같다. 제작된 맨드렐은 반응성 배수공법에서 외부 배수층의 유·무에 따른 타설공

을 형성하기 위해 직경이 서로 다른 40 mm, 80 mm로 설계하였고, 모사지반의 시료교란을 최소화하기 위해 단부가 열려있는 얇은 원통형 형태로 제작하였다. 차단막(Fig. 3(b))은 상·하단부가 개방된 원통형 형태로 오염물질정화를 위해

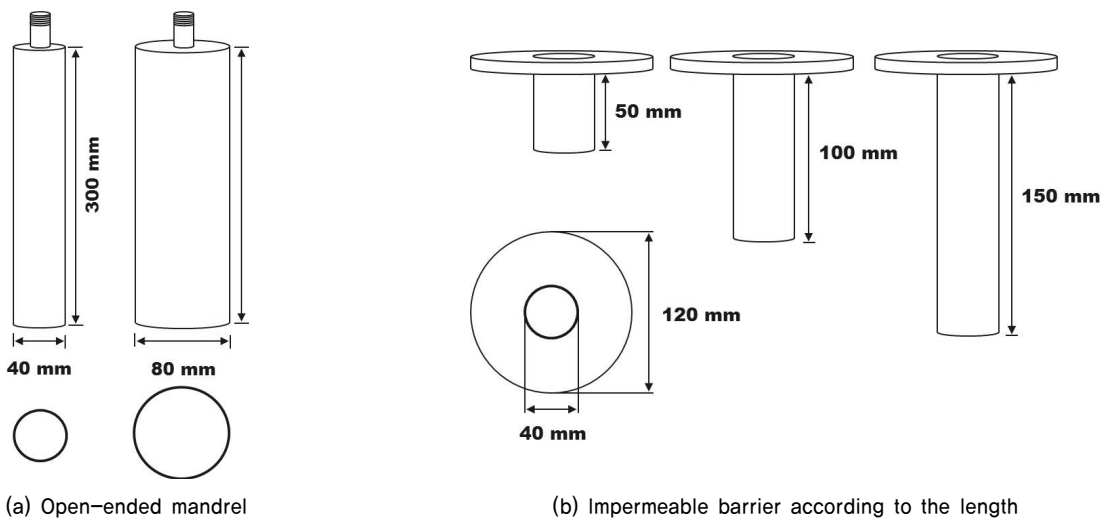


(a) Schematic diagram of test setup



(b) Testing device

Fig. 2. Testing device and setup



(a) Open-ended mandrel

(b) Impermeable barrier according to the length

Fig. 3. Shape of Mandrel and impermeable barrier

Table 5. Index properties of Kaolin

	LL (%)	PL (%)	PI (%)	Gs	Passing ratio (#200, %)	USCS
Kaolin	56.5	31	25.5	2.513	99.46	MH

Table 6. Index properties of Jumunjin standard sand

	D_{10} (mm)	D_{60} (mm)	C_u	C_s	Gs	USCS
Jumunjin sand	0.38	0.50	1.35	0.97	2.65	SP

반응물질(제강슬래그)을 채우기 위한 부분이고 차후 배수과정에서 지반 내 오염된 간극수를 반응물질이 채워진 차단막 중앙부로 유도하기 위한 역할을 하는데 이는 오염된 간극수가 중앙부 반응물질 통과 시, 간극수내 오염물질 제거를 위한 반응물질과의 최소 반응시간을 확보하기 위함이다. 실험 과정에서 반응물질로 채워진 원통형 차단막을 Fig. 1에서 볼 수 있는 것과 같이 배수성이 좋은 외부 배수재가 두께 20 mm로 둘러싸 점토지반에서 원활히 배수가 이루어지도록 하며, 배수된 유량을 차단막 내부의 중앙 반응물질로 유도한다. 차단막 길이의 변화에 따른 압밀특성을 비교하기 위해 길이는 각각 50 mm, 100 mm, 150 mm의 3가지 형태로 제작되었으며, 그 형태 및 규격은 Fig. 3(b)와 같다.

압밀로 인하여 시료에서 배출되는 유출수는 시료 중앙 상부에 연결된 배수라인을 통하여 배수가 이루어지며, 유출수가 모이는 유출용기의 무게를 측정하여 유출 유량을 정확히 측정할 수 있도록 하였다.

3.2 모형지반 조성

점토 지반을 모사하기 위해 분말형태의 Kaolin을 이용하여 시료를 성형하였다. 시료의 함수비는 액성한계의 2배인 110%가 되도록 물을 첨가하여 48시간 동안 교반하였다. 이때 시료를 완전히 포화시키기 위해 교반을 하는 동안 진공압을 가하여 시료 내 공기를 제거함으로써 균질한 상태로 만들었다. 진공상태에서 성형된 시료를 내경 300 mm 대형 압밀챔버에 이동한 후, 연직 양면배수 조건에서 40 kPa의 선형압밀하중으로 약 14일 정도 시료를 압밀시켰다. 사용된 시료의 기본물성은 Table 5와 같다.

3.3 반응성 배수파일

반응성 배수파일은 차단막 내부의 반응물질(제강슬래그)과 연직배수재(톱밥, 표준사)를 각각 동결하여 성형하였다. 동결된 반응성 배수파일의 형태는 Fig. 4와 같으며 표준사의 기본 물리적 성질은 Table 6과 같다. 차단막 외부 배수층으로 사용된 연직배수재는 톱밥과 표준사 혼합비율을 변화

Table 7. Permeability of outside drain

Relative density (%)	Permeability (m/sec)
0	2.89E-04
20	2.66E-04
60	2.49E-04
80	1.91E-04



Fig. 4. Frozen reactive drain pile

시켜가며 표준압밀실험을 수행하였고 압축특성을 분석하여 혼합비율을 1:2.5로 결정하였으며 톱밥은 표준사와의 균질성을 확보하기 위하여 10번체(2 mm 이하)를 통과한 톱밥만을 사용하였다. 반응성 배수파일의 성형은 차단막 내부의 제강슬래그, 차단막 외부의 연직배수재 순서로 성형 및 동결을 하였다. 차단막 내부의 제강슬래그는 차후 압밀과정에서 투수성을 확보하기 위해 물과 함께 느슨하게 넣고 동결시켰으며, 차단막을 둘러싸는 연직배수재는 차단막에 내경 80 mm, 길이 300 mm의 특수 제작된 몰드를 결합하여 배수재를 차단막 주위에 넣고 길이 200 mm로 성형하였다. 이때 연직배수재를 물과 함께 느슨하게 부어 차후 압밀과정에서 배수재의 강성증가 및 침하량 감소의 영향을 최소화할 수 있도록 하였다. 또한, 각 재료별 상대밀도에 따른 투수계수를 확인하기 위해 강성벽체 정수위 투수실험을 수행하였고 상대밀도를 0%, 20%, 60%, 80%로 각각 달리하여 시험을

수행하였다. 실험결과 Table 7과 같이 연직배수재의 투수계수가 10^{-5} m/sec 이상의 값을 나타내어 반응성 배수공법의 외부 배수재로 사용하기에 적합할 것으로 판단되었다.

3.4 실험방법 및 조건

실험은 시료성형, 반응성 연직배수재 타설, 압밀의 3단계에 걸쳐 이루어지도록 하였다. 3.2절의 시험과정에 따라 성형된 시료는 높이 20 mm, 직경 300 mm의 크기를 갖는다. 성형된 모형지반의 중앙부에 반응성 배수파일 타설을 위한 타설공을 형성하며, 이를 위하여 직경 300 mm 대형압밀챔버를 맨드렐 관입시험기 중앙에 위치시키고 외부 배수층 유·무에 따라서 직경이 각각 80 mm, 40 mm인 맨드렐을 관입시험기 상부에 설치한다. 맨드렐은 시료교란의 범위를 최소화하고 장비의 적정범위 내에서 안정적으로 관입시키기 위해 2.14 mm/sec의 저속으로 시료 중앙부에 타설공을 형성하였다. 맨드렐의 관입·인발 후, 미리 성형된 반응성 배수파일을 타설공 형성 때와 동일한 조건으로 정적관입을 시켰다. 동결된 반응성 배수파일의 용해를 위해 300 mm 대형압밀챔버의 상부 가압판을 닫고 약 하루 정도 방치시킨 후, 단계적으로 압밀하중을 재하하였다. 콤프레셔와 레귤레이터를 이용하여 일정한 공기압을 대형압밀챔버에 가하여 50 kPa과 100 kPa의 압밀하중을 단계적으로 재하시키면서 각 하중단계에서의 시간에 따른 침하량과 유출량을 측정하였다. 시간에 따른 침하량과 유출량 측정은 300 mm 대형압밀챔버 상단에 LVDT를 설치하여 침하량을 측정하고 간극수 배출구로부터 유출수 수집용기까지 연결관을 설치하여 압밀하중 재하 시, 중앙부의 배수재를 통하여 배출되는 유량을 측정하였다. 측정된 침하량을 쌍곡선법으로 분석하여 압밀도 95% 이상 되는 것을 확인한 후, 다음 단계의 하중을 재하하였다. 최종 압밀완료 후에는 대형압밀챔버를 해제하고 시료 단면의 위치별 함수비와 전단강도를 측정하였다.

본 연구에서 수행된 실내모형실험 조건은 반응성 배수파일의 외부 배수층 유·무에 따라 실험을 하였으며, 차단막 길이도 변화시켜가며 외부 배수층과 차단막 길이의 영향을

분석하였다. 외부 배수층을 고려한 실험(OD)은 차단막 길이(50 mm, 100 mm, 150 mm)에 따라서 3회, 외부 배수층을 고려하지 않은 실험(ID)은 차단막 길이(50 mm, 150 mm)에 따라서 2회의 실험을 수행하여 총 5회의 실내모형실험을 수행하였다. 총 5회의 실험 중, 차단막 길이 50 mm인 배수파일(ID-50)의 경우는 반응성 배수파일 타설 전, 지반교란에 따른 압밀특성을 분석하기 위해 맨드렐의 관입·인발 과정에서 지반 내 스미어를 인위적으로 발생시켜 실험을 수행하였다. 각 실험에 적용된 실험조건은 Table 8에 정리된 바와 같다.

4. 실험결과 분석

4.1 침하거동

반응성 배수공법의 평가를 위하여 반응성 배수파일을 설치하고 50 kPa과 100 kPa의 압밀하중을 단계적으로 재하하였으며, 대형압밀챔버 상부에 LVDT를 설치하여 시간에 따른 침하량의 변화를 측정하였다. 차단막의 외부 배수층 유·무와 차단막 길이변화에 따른 침하거동은 Fig. 5와 같이 도시하였다. 모든 실험은 압밀도 95% 이상 되었을 때 하중단계를 종료하였으나, ID-50의 경우에는 2달간 하중을 재하하였음에도 불구하고 압밀도 90%에 이르지 못하여 시험 일정상 각 하중단계를 종료하였다. 50 kPa의 하중을 재하한 Fig. 5(a)를 보면, 차단막의 길이가 짧아질수록 최종침하량이 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 차단막 길이 변화에 따른 최종 침하량 차이에 비해 외부 배수층 유·무에 따른 침하량 차이가 더 큰 것으로 나타났다. 반면 정규압밀 영역에서 하중재하가 이루어진 100 kPa 하중재하에서는 각 실험 간의 최종 침하량이 거의 유사한 것으로 나타났다. 이를 정량적으로 분석하기 위하여 각 실험에서의 최종 침하량을 Fig. 6, Table 9와 같이 정리하였다. 50 kPa 하중재하에서 외부 배수층을 고려한 경우에는 차단막 길이가 감소함에 따라서 최종 침하량은 1.15배에서 1.28배까지 점차적으로 증가하였다. 그러

Table 8. Test condition

Length of impermeable barrier (mm)		Mandrel diameter (mm)	Impermeable barrier diameter (mm)	Thickness of outside sand drain (mm)
With outside sand drain	50 (OD-50)	80	40	20
	100 (OD-100)			
	150 (OD-150)			
Without outside sand drain	50 (ID-50)*	40	40	-
	150 (ID-150)			

*ID-50: smear effect was considered

Table 9. Comparison of final settlement according to the length of impermeable barrier

Length of impermeable barrier		Total settlement (mm)	
		50 kPa loading	100 kPa loading
With outside sand drain	50 mm (OD-50)	11.22	11.90
	100 mm (OD-100)	8.94	12.60
	150 mm (OD-150)	8.80	12.61
Without outside sand drain	50 mm (ID-50)	5.50	12.31
	150 mm (ID-150)	4.80	11.21

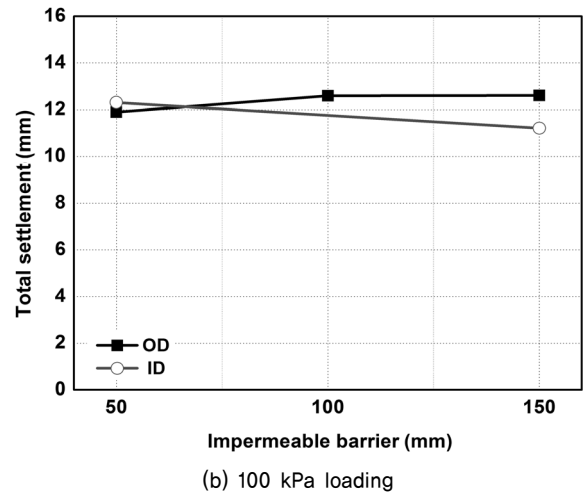
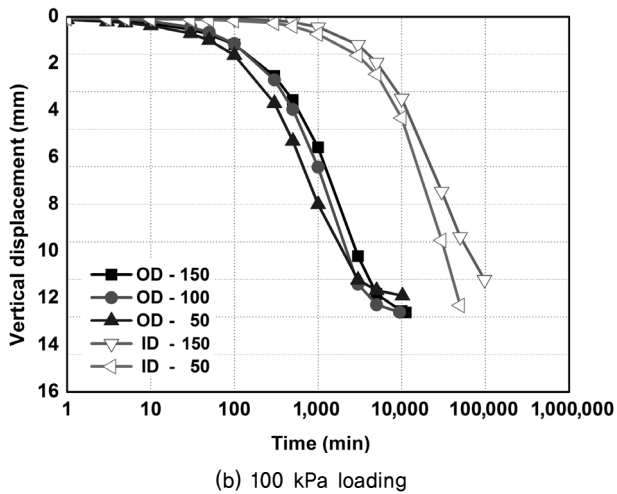
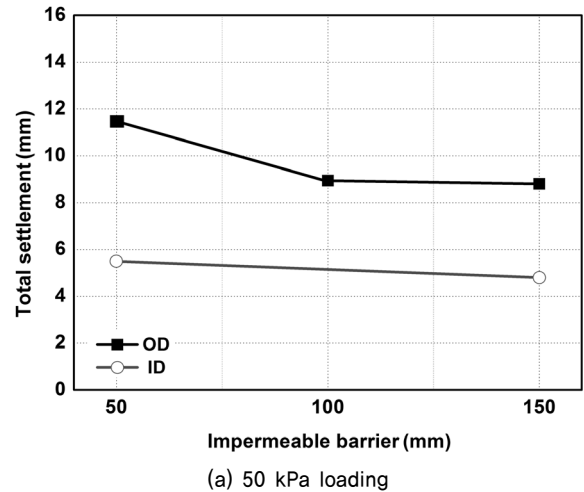
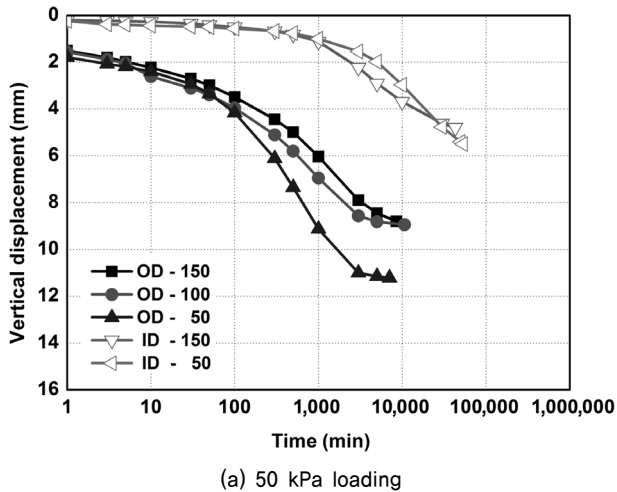


Fig. 5. Consolidation settlement

Fig. 6. Total settlement according to the length of impermeable barrier

나 외부 배수층 설치 유·무에 따른 최종침하량 차이는 평균 1.87배로 차단막 길이보다는 외부 배수층 유·무가 압밀침하량에 미치는 영향이 더 큰 것으로 나타났다. 반면 100 kPa 하중재하에서는 외부 배수층 유·무 및 차단막 길이에 관계 없이 모든 실험에서의 최종 침하량 차이가 5% 내외로 유사한 경향을 보였다.

4.2 압밀속도

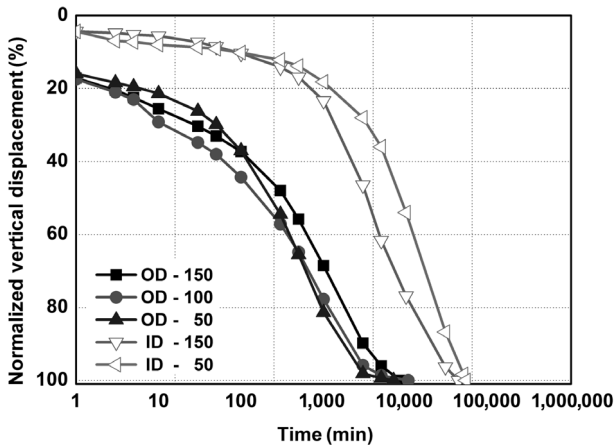
반응성 배수공법 설치에 따른 압밀 효율성을 분석하기

위하여 압밀속도를 비교하였다. Fig. 7에 시간에 따른 연직 변위를 최종침하량으로 나누어 압밀속도를 쉽게 비교할 수 있도록 하였다. 먼저 Fig. 7(a)와 (b)에서 외부 배수층이 있는 경우를 보면 차단막의 길이가 길어짐에 따라 압밀속도도 느려진다는 것을 확인할 수 있지만 그 차이는 크지 않다. 이는 차단막의 길이가 길어짐에 따라 배출 유량의 흐름 경로가 길어지기 때문인 것으로 판단된다. 외부 배수층이 없는 경우에는 ID-50이 차단막의 길이가 짧음에도 불구하고 스미어 영향(Bergardo et al., 1991)으로 인하여 50 kPa 재하단

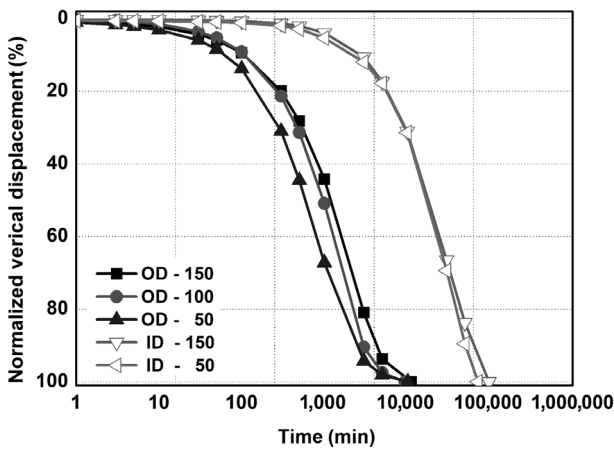
계에서는 압밀속도가 느린 것을 확인할 수 있다. 그러나 정규압밀영역(100 kPa)으로 가면서 스미어의 영향이 감소하고 압밀속도의 차이는 거의 나타나지 않는다. 차단막의 길이와 상관없이 Fig. 7(a)와 (b)에서 모두 외부 배수층이 없는 경우, 외부 배수층이 있는 경우보다 압밀속도가 느린 것으로 나타났으며, 그 차이는 차단막의 길이에 따른 영향보다 훨씬 큰 것으로 나타났다. 따라서 반응성 배수과일을 설치한 경우에 차단막의 길이가 길어짐에 따라 압밀속도는 느려지지만 그 차이는 크지 않고, 외부 배수층의 설치 여부가 압

밀속도에 지배적인 영향을 준다는 결론을 얻을 수 있다.

압밀속도를 보다 정량적으로 비교하기 위해 각 실험결과에 대한 90% 압밀소요시간을 Fig. 8과 같이 도시하였다. Fig. 8에서 압밀소요시간은 시간에 따른 침하량(Fig. 5)에서 log t 법을 이용하여 계산하였고, 이를 차단막 50 mm(OD-50)의 압밀소요시간으로 나누어 시간비율(time ratio)을 Table 10에 나타내었다. 외부 배수층을 고려한 실험에서 차단막 길이가 50 mm(OD-50)인 경우를 제외한 대부분의 실험에서 차단막이 길어질수록 압밀소요시간이 평균 약 1.65배까지

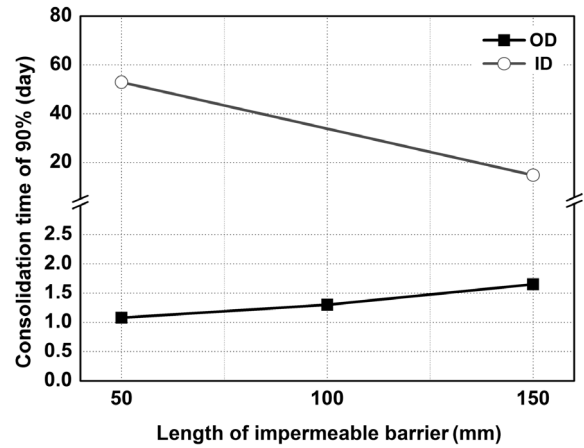


(a) 50 kPa loading

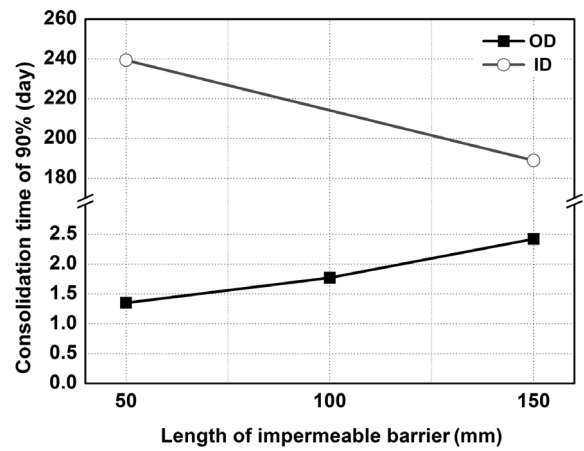


(b) 100 kPa loading

Fig. 7. Comparison of consolidation rate



(a) 50 kPa loading



(b) 100 kPa loading

Fig. 8. Consolidation time according to outside sand drain

Table 10. Comparison of time for 90% of consolidation ratio

Length of impermeable barrier		50 kPa Loading		100 kPa Loading	
		Time (min)	Time ratio*	Time (min)	Time ratio*
With outside sand drain	50 mm (OD-50)	1,562	1.0	1,950	1.0
	100 mm (OD-100)	1,875	1.2	2,250	1.3
	150 mm (OD-150)	2,380	1.5	3,490	1.8
Without outside sand drain	50 mm (ID-50)	76,200	48.8**	344,589	176.7**
	150 mm (ID-150)	21,250	13.6	272,012	139.5**

*Ratio : Time ratio for 90% of consolidation to OD-50

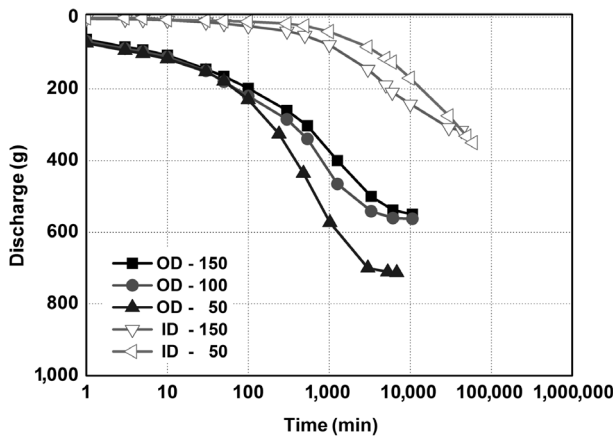
**Evaluated by hyperbolic method because 2 months of consolidation was not enough to 90% of consolidation

증가하는 것으로 나타났으며, 외부 배수층이 고려된 경우에는 그렇지 않은 경우보다 압밀소요시간이 50 kPa에서는 평균 약 25.1배, 100 kPa에서는 평균 약 115.8배로 나타나 외부 배수층을 고려할 경우에 압밀축진효과가 더 큰 것으로 나타났다. 또한, 외부 배수층이 고려되지 않은 실험에서 스미어 영역이 고려된 경우(ID-50)는 고려되지 않은 경우(ID-150)와 비교하며 50 kPa과 100 kPa 재하 시 압밀소요시간이 각각 약 3.58, 1.26배로 나타나, 스미어가 발생하면 차단막의 길이를 감소시키더라도 압밀축진효과는 없고 오히려 압밀소요시간이 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 반응성 배수공법을 적용하는 연약지반 개량설계 시 반응성 물질을

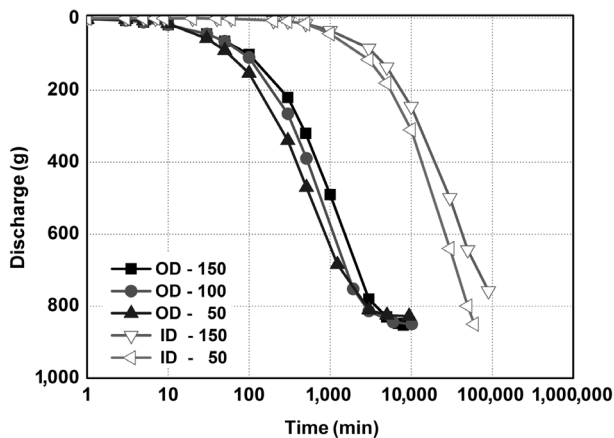
둘러싸는 차단막이 짧아질수록 압밀소요시간도 감소하지만, 그 영향은 외부 배수층에 비하여 크지 않으므로 압밀축진을 위해서는 외부 배수층의 설치가 반드시 필요할 것으로 판단된다.

4.3 배출유량

반응성 배수공법에서 외부 배수층 유·무와 차단막 길이에 따른 배수능을 확인하기 위해 시간에 따른 유량을 Fig. 9와 같이 측정하였다. 간극수의 유출형태는 시간에 따른 침하량 (Fig. 5)과 전반적으로 동일한 경향성을 보였다. 외부 배수층 유·무와 차단막 길이별 간극수의 유출량을 정량적으로 비교하기 위해 각 실험결과를 정리하여 Fig. 10, Table 11과 같이 도시하였다. 실내실험결과, 외부 배수층이 고려된 경우 외부 배수층이 고려되지 않은 경우에 비하여 간극수의 유출량이 더 많은 것으로 나타났다. Table 11에서 정리한 것과 같이 외부 배수층이 존재하는 경우 평균 726.3 g, 외부 배수층이 없는 경우 평균 575.9 g의 유출이 발생하여 외부 배수층이 존재하는 경우가 약 150.4 g 정도로 평균 1.26배 정도 유출이 더 많이 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 외부 배수층 유·무에 따른 차단막 길이별 총 유출량(Fig. 10)을 분석한 결과에서는 차단막의 길이가 짧아질수록 간극수의 유출량이 점차 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는



(a) 50 kPa loading



(b) 100 kPa loading

Fig. 9. Discharge during consolidation

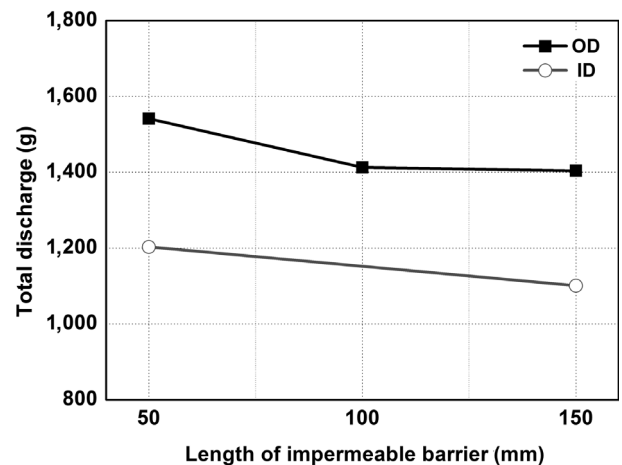


Fig. 10. Total discharge

Table 11. Comparison of discharge

Length of impermeable barrier		Discharge (g)		Total discharge (g)
		50 kPa loading	100 kPa loading	
With outside sand drain	50 mm (OD-50)	712.8	828.2	1541.0
	100 mm (OD-100)	562.5	850.2	1412.7
	150 mm (OD-150)	550.3	853.5	1403.8
Without outside sand drain	50 mm (ID-50)	350.4	852.5	1202.9
	150 mm (ID-150)	315.9	784.8	1100.7

4.2절의 압밀침하량 및 압밀속도에서 볼 수 있듯이 외부 배수층 고려와 차단막 길이가 줄어들에 따라 압밀속도가 빨라지기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 이와같이 지반개량의 효율성만을 고려하여 차단막의 길이를 짧게 할 경우 차단막 내부에 포함된 반응물질의 양이 전반적으로 감소하게 되므로 지반 내 필요한 오염정화효율이 저하될 수 있다. 따라서 지반 내 오염물질 정화를 위해서는 정화에 필요한 최소 반응시간과 정화 유량을 고려하여 차단막 길이를 결정하는 것이 필요하다. 특히 일반적으로 오염물질 정화를 위한 반응에 필요한 시간이 지반의 압밀시간과 비교하여 상대적으로 매우 짧으므로 오염물질 총량을 정화하기에 적당한 반응물질의 양을 산정하고 그 양에 해당하는 최소 길이를 배수파일내에 설치하는 것이 최적의 설계가 될 수 있을 것으로 판단된다.

4.4 위치별 강도 및 함수비 분포

최종 하중단계까지 실험완료 후, 300 mm 대형압밀챔버에서 시료를 꺼내어 위치별 전단강도 및 함수비를 측정하였고 강도 및 함수비 측정위치는 Fig. 11, Fig. 12와 같다. 시료



Fig. 11. Shear strength measuring locations (OD-150)

의 전단강도 측정을 위해 토우베인(torvane)시험기를 이용하였고, 강도 및 함수비 측정결과는 Fig. 13 및 Fig. 14와 같다. 각 실험으로부터 시료의 단면을 잘라 외부 배수층 유·무에 따른 차단막 길이별 전단강도 및 함수비 측정결과, 배수면 근처인 외부 배수층 및 차단막 주변에서 더 큰 강도 및 더 작은 함수비의 분포를 나타내는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 배수면 근처에서 압밀이 빠르게 진행되기 때문에 함수비와 강도 등에서 공간적 차이가 발생하는 현상으로 기존 압밀시험에서도 확인할 수 있는 결과이다.

5. 결 론

본 연구에서는 반응성 배수파일의 설치된 지반의 압밀거동을 확인하고, 외부 배수층 및 차단막 길이변화가 압밀거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 제강슬래그가 충전된 차단막 내부와 이를 포함하는 반응성 배수파일을 적용할 수 있는 실내모형실험 장비를 개발하고 실험을 수행하였다. 이를 통해 반응성 배수공법의 지반개량 효과 및 효율성을 분석하였으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

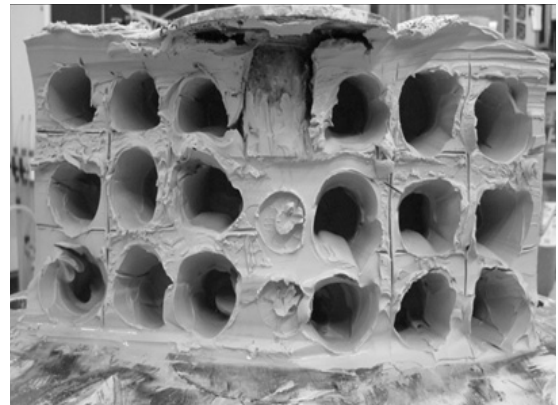


Fig. 12. Water content measuring locations (ID-50)

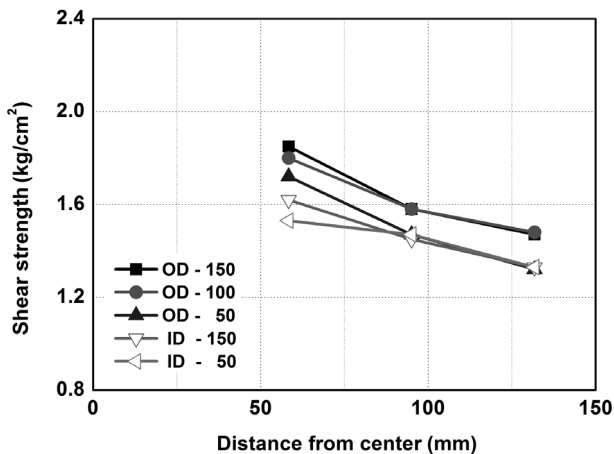


Fig. 13. Shear strength distribution

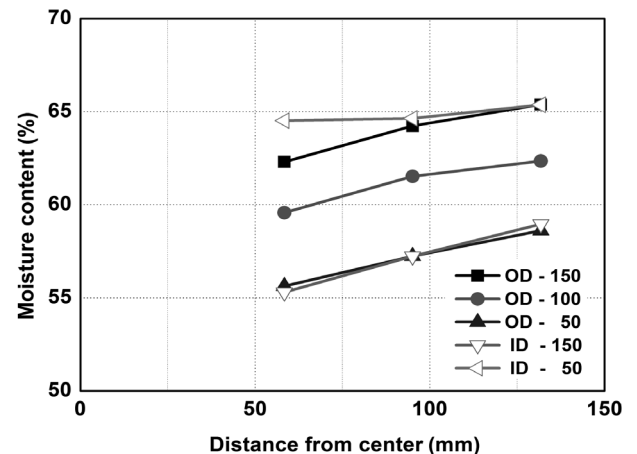


Fig. 14. Water content distribution

- (1) 제강슬래그에 대한 투수시험과 용출시험 결과, 연직배수재에 대한 투수계수 기준(10^{-5} m/sec 이상)을 만족하여 배수재로 사용되기에 충분한 투수성을 가지고 있으며, 제강슬래그로 인한 2차 오염의 가능성은 거의 없는 것으로 나타났으므로 반응성 배수공법의 반응성 매질로 적용 가능한 것으로 나타났다.
- (2) 반응성 배수파일이 설치된 지반의 압밀 침하량을 분석한 결과, 50 kPa 하중재하에서 외부 배수층을 고려한 경우에는 차단막 길이가 짧아짐에 따라서 최종 침하량은 1.15배에서 1.28배까지 점차 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 외부 배수층 유·무에 따른 침하량 차이가 1.87배로 더 큰 것으로 나타나, 차단막 길이보다는 외부 배수층 유·무가 압밀침하량에 미치는 영향이 더 큰 것으로 나타났다.
- (3) 반응성 배수파일이 설치된 지반의 압밀 속도를 분석한 결과, 차단막의 길이가 길어짐에 따라 OD-50 실험을 제외한 대부분의 실험에서 압밀소요시간이 평균 약 1.65배까지 증가한다는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 차단막의 길이와 상관없이 외부 배수층이 없는 경우, 외부 배수층이 있는 경우보다 50 kPa 하중재하에서는 평균 약 25.1배, 100 kPa 하중재하에서는 평균 약 115.8배까지 압밀소요시간이 증가하여 그 영향이 차단막의 길이에 따른 영향보다 훨씬 큰 것으로 나타났다. 따라서 반응성 배수공법 적용 시, 압밀축진을 위해서는 외부 배수층의 설치가 반드시 필요할 것으로 판단된다.
- (4) 간극수 유출량에 대한 분석결과, 압밀침하량과 매우 유사한 경향을 보였다. 즉, 외부 배수층이 고려된 경우 외부 배수층이 고려되지 않은 경우에 비하여 간극수의 유출량이 더 많은 것으로 나타났으며, 차단막의 길이가 짧아질수록 간극수의 유출량이 점차 증가하는 것으로 나타났다.
- (5) 분석결과 반응성 컬럼의 차단막 길이가 짧아지면 압밀 속도가 빨라지지만, 지반개량의 효율성만을 고려하여 차단막의 길이를 짧게 할 경우에는 오염정화능력이 저하될 수 있다. 따라서 지반 내 오염물질 정화를 위해서는 정화 유량과 오염물질 제거를 위한 최소 반응시간을 고려하여 차단막 길이를 결정하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국해양과학기술원의 주요사업 및 정부(교육과학기술부)의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2009-0064196)입니다.

References

1. Bergado, D. T., Asakami, H., Alfaro, M. C. and Balasubramaniam, A. S. (1991), Smear effect of vertical drains on soft Bangkok clay, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 117, No. 10, pp. 1509~1530.
2. Cha, W., Kim, J. and Choi, H. (2006), Evaluation of steel slag for organic and inorganic removals in soil aquifer treatment, *Water Research*, Elsevier, Vol. 40, No. 5, pp. 1034~1042.
3. Dimitrova, S. V. and Mehanjiev, D. R. (2000), Interaction of blast-furnace slag with heavy metal ions in water solutions, *Water Research*, Elsevier, Vol. 34, No. 6, pp. 1957~1961.
4. Kim, E. H., Rhee, S. S., Lee, G. H., Kim, Y. W., Park, J. B. and Oh, M. H. (2011), Assessment of the sorption characteristics of cadmium onto steel-making slag in simulated sea water using batch experiment, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 27, No. 4, pp. 43~50 (in Korean).
5. Kim, S. O., Jung, Y. I. and Cho, H. G. (2006), Evaluation of heavy metal contamination in streams within Samsanjeil and Sambong Cu mining area, *J. Miner. Sco. Korea*, Vol. 19, No. 3, pp. 171~187 (In Korean).
6. Lee, G. H., Kim, E. H., Park, J. B. and Oh, M. H. (2011), Estimation of the removal capacity for cadmium and calculation of minimum reaction time of BOF slag, *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 27, No. 10, pp. 5~12 (in Korean).
7. Oh, M. H., Yune, C. Y., Kang, H. W. and Lee, G. W. (2010), Numerical analysis of drain characteristics in reclamation site according to the configuration of reactive drain pile, *Proceedings of 21st International Offshore and Polar Engineering Conference*, ISOPE, Maui, Hawaii, pp. 673~677.
8. Park, D., Lim, S. Y., Lee, H. W. and Park, J. M. (2008), Mechanism and kinetics of Cr(VI) reduction by waste slag generated from iron making industry, *Hydrometallurgy*, Elsevier, Vol. 93, No. 1, pp. 72~75.
9. Weng, C. H. and Huang, C. P. (1994), Treatment of metal industrial waste water by fly ash and cement fixation, *Journal of Environmental Engrg*, Vol. 120, No. 6, pp. 1470~1487.
10. Yongjie, X., Haobo, H. and Shujing, Z. (2009), Characteristics and mechanism of phosphate adsorption onto basic oxygen furnace slag, *Journal of Hazardous Materials*, Elsevier, Vol. 162, No. 2-3, pp. 973~980.