

강화벤토나이트 차수벽체의 배합방법 및 양생일에 따른 거동 특성

Behavior Characteristics of Cement Bentonite Impervious Walls Related to Mixing Methods and Curing Time

황 정 순¹⁾ · 김 승 욱²⁾ · 정 준 기¹⁾ · 이 승 주¹⁾ · 오 병 삼¹⁾ · 백 승 철[†]

Jungsoon Hwang · Seungwook Kim · Jungi Jung · Seungjoo Lee · Byeungsam Oh · Seungcheol Baek

Received: September 5th, 2016; Revised: October 10th, 2016; Accepted: November 7th, 2016

ABSTRACT : In this study, the construction method of new underground continuous impervious wall that the bentonite slurry keeps the stability of excavated trench and the mixture of cement and bentonite plays a role as a constituent of impervious wall in the trench. The merit of homogeneity of the method so called as a cement-bentonite slurry wall enables to accurately make an estimation of hydraulic conductivity of the walls compared with that by other general grouting methods and to verify their waterproof efficiency without difficulty at the design stage. The use of cement-bentonite slurry walls for the containment of groundwater flow has also proven a cost-effective impervious wall technology by employing the simple combination of construction equipments and easy and fast construction procedures. The engineering characteristics of cement-bentonite impervious wall obtained by carrying out the laboratory experiments under various conditions. This study reveals the effect of variation of constituent materials and their mixing methods (Water-Cement-Bentonite) on the engineering characteristics of a composition. Also, this study makes some recommendations on the optimum mixing ratio and mixing sequence for the best quality at the site. That is the most important factors to estimate the construction cost and design of the technique. The comparison is lastly made to evaluate the effect of ordinary Portland and blast furnace slag cement as a bonding material on the behavior of impervious walls.

Keywords : Ordinary portland cement, Blast furnace slag cement, Bentonite, Impervious wall, Hydraulic conductivity

요 지 : 본 연구에서는 벤토나이트로 굴착 트렌치의 안정성을 유지하면서 시멘트와 벤토나이트 혼합물을 불투수벽체의 재료로 사용하여 지중차수벽체를 구성하는 새로운 시공방법에 대해 고찰하였다. 강화벤토나이트 차수벽체공법은 굴착된 구역을 균질하게 차수재료로 치환하므로 일반적인 그라우팅공법에 비해 차수효과의 예측과 시공성과의 검증이 보다 용이한 장점을 지닌다. 또한 강화벤토나이트 차수벽체공법은 시공 장비가 단순하고 시공 순서가 간단하므로 경제적인 측면에서도 큰 장점을 가지고 있다. 본 연구에서는 다양한 실내실험을 통해 배합재료와 배합방법의 변화에 따른 강화벤토나이트 차수벽체의 공학적 특성을 고찰하였으며, 본 공법의 실무 적용 시 시공비용 결정과 벽체의 설계를 위해 가장 중요한 표준 배합비와 배합방법을 제시하였다. 마지막으로 차수벽체를 구성하는 재료들의 결합재로 사용되는 일반포틀랜드 시멘트와 고로슬래그 시멘트의 효과를 비교하였다.

주요어 : 보통포틀랜드시멘트, 고로슬래그시멘트, 벤토나이트, 차수벽, 투수계수

1. 개 요

강화벤토나이트 벽체는 시멘트, 벤토나이트 및 물로 배합된 슬러리를 굴착 트렌치 안에 채워 넣어 시공되는 지중연직벽체의 일종이다. 강화벤토나이트 벽체는 지중에 투수성이 매우 작은 일종의 차수벽체를 구성하여 지하수의 유출을 방지하거나 때로는 적절한 강성을 지니는 벽체로 저수지 제체나 제방의 안정성을 증가시키기 위한 목적이나, 쓰레기 매립장 등의 오염물질 차단, 지하수위 저하방지, 제체 내부의 지하수 흐름 차단 등을 위해 적용한다. 강화벤토나이트

벽체는 일반적으로 벽체를 구성할 위치에 트렌치를 굴착한 후에 뒤채움을 시행하는 방식으로 시공되며, 굴착과 뒤채움 시공 사이에 굴착면의 붕괴 방지를 위해 트렌치에 안정액을 채워 넣는다. 이러한 방식은 강화벤토나이트 벽체뿐만 아니라 통상적인 지중연속 벽체(structure diaphragm wall)나 소일-벤토나이트 벽체의 시공 시에도 적용된다. 강화벤토나이트 벽체 시공을 위한 굴착 시 미리 계획된 굴착구역을 따라 한 쪽 끝에서 굴착방비 등을 이용하여 굴착을 진행하는 동안 다른 쪽에서는 시멘트, 벤토나이트 및 물로 구성된 강화벤토나이트 슬러리로 트렌치에 뒤채움을 시행하여 벽체를 구

1) Doosan Engineering & Construction

2) Daejin SCB, Research Institute

† Department of Civil Engineering, Andong National University (Corresponding Author : civilb@anu.ac.kr)

성한다. 이와 같은 강화벤토나이트 공법의 장점은 첫째 벽체의 시공이 매우 간단하고 빠르며, 둘째 벽체의 시공비용이 매우 저렴하고 마지막으로 굴착구역을 강화벤토나이트 슬러리로 완전히 채워서 차수벽체의 균질성을 확보하므로 성능이 우수하다. 강화벤토나이트 벽체의 상기와 같은 장점에도 불구하고 국내의 경우 적용사례가 전무한 실정이다. 특히 국내의 경우 산악지형의 특성상 농업용수의 확보를 위해 수많은 소류지와 중소규모 농업용 댐이 전국적으로 산재하고 있으며 많은 수의 수리용 댐들이 노후화되어 기능수행에 지장을 초래하고 있다. 국내에 존재하는 댐을 시공연도 별로 나누어 살펴보면 2011년 기준으로 총 17,505개소가 존재하며, 1945년 이전에 준공된 저수지가 9,082개소로서 전체의 51.9%를 차지하고 있다(KRCA, 2011). 또한 공용연수가 오래 경과된 저수지들은 공통적으로 제체의 노후화로 인한 누수가 허용기준 이상으로 발생하고 있는 실정이나 현재까지 저수지 제체의 차수 및 안정성 확보를 위한 보강공법은 일반적으로 차수 그라우팅 공법이 보편적으로 적용되고 있는 실정이다. 차수 그라우팅 공법은 공용 중인 저수지 제체에 천공 후 약액 등을 주입하므로, 제체 자체에 가해지는 손상이 미소하기 때문에 효율적인 방법의 하나이나 공법의 내구성 문제와 지반의 공극을 통해 충전되는 그라우팅 공법의 특성상 차수영역의 균질성 및 차수범위의 정확한 파악이 어렵다는 한계를 지니고 있다. 본 연구에서는 노후제방 등의 차수성능 개선을 위한 적극적인 방법으로 지반 굴착 후 시멘트와 벤토나이트 혼합재료로 즉시 치환하는 지중차수벽체 조성방법에 대한 기초연구를 수행하였다.

2. 연구 연혁 및 기본 방향

2.1 연구 연혁

본 연구에서 제안된 강화벤토나이트 연속벽체와 관련된 연구동향을 정리하면 다음과 같다. Sharma & Lewis(1994)은 1980년대 이후 슬러리월은 일반적인 시공방법을 통해 차수벽 기능뿐만 아니라 오염원의 차단벽으로도 널리 사용되어지고 있으며, 차단벽체 시스템의 지하수위 저하와 오염물 제어의 장점을 보고한 바 있다. Jefferys(1981)는 슬러리월의 설계는 벽체의 기능에 의존하게 되며, 구조재료로서의 벽체는 응력-변형 거동과 강도 및 압밀특성 등이 고려되어야 하고, 오염방지를 위한 차단 기능을 위해서는 투수특성이 추가적으로 고려되어야 함을 연구한 바 있다. Fratolocchi & Pasqualini(1998)는 시멘트-벤토나이트(CB) 슬러리월은 벽체를 구성하는 재료들이 시간 경과에 따라 물리적, 화학적 특성이 변화하며, 일반적으로 설계에 적용되는 투수특성은 재

령 28일을 기준으로 적용하고, 투수계수는 수개월 내지 1년 이상 감소를 기대할 수 있다는 결과를 발표하였다. 한편 시공사례에 대한 연구로는 시멘트-벤토나이트 지중차수벽을 이용한 Watkins Dam(earth fill dam) 보수공사(Demars et al., 2009) 사례와 Palm Beach 골재채석장을 저수지로 개조하기 위한 지중연속벽 공사 사례 등이 있으며, 차수재료에 대한 실내실험을 수행하여 보고한 사례로는 L-31N 제방차수벽 공사와 Ryan(1985)이 오염원의 차단을 위한 연직차수벽 시공 이전에 수행한 재료실험의 결과 등을 보고한 바 있다. 또한 Evans et al.(1995)은 강화벤토나이트 차수벽 공법의 최신경향에 대해 소개하였으며, Kim et al.(2014)은 벤토나이트 차수벽의 시공방법과 효율성에 대해 소개한 바 있다.

2.2 연구 기본 방향

본 연구 제안공법은 일반 굴착장비로 지반을 굴착함과 동시에 물, 시멘트 및 벤토나이트(이하 CB or 강화벤토나이트)의 혼합재료로 이루어진 차수재료로서 굴착부위를 치환하여 지중연속벽을 조성하는 방법이며, 점토광물인 몬모릴로나이트계의 벤토나이트에 결합력 증진을 위한 소량의 시멘트를 첨가한 혼합물로 구성된다. 일반적으로 강화벤토나이트 벽체의 구성원리는 벤토나이트의 점토광물 특성인 저투수성과 시멘트의 결합특성을 이용한 혼합물을 지상에서 배합한 후 지중 굴착구역의 투입을 통해 적당한 강성을 지니는 불투수성 지중연속벽체를 구성하게 된다. 본 연구에서는 강화벤토나이트를 구성하는 물, 벤토나이트 및 시멘트의 배합방법이 강화벤토나이트 벽체의 강도와 차수성에 어떤 영향을 미치는지에 대해 혼합재료의 양생일별로 고찰하였으며, 보통포틀랜드 시멘트를 첨가재로 사용한 경우와 고로슬래그 시멘트를 첨가재로 사용한 경우에 대한 비교·분석을 통해 첨가제별 강도 및 투수특성을 평가하여 최적의 배합재료를 제안하였다. 한편 본 연구에서는 제안된 공법을 현장에 적용하기에 앞서 제안된 기법의 설계와 공사비 산정에 가장 중요한 요인이 되는 사용재료의 공학적 특성과 이질재료(물-시멘트-벤토나이트)의 배합비를 결정했으며, 현장에 적용 품질관리를 위해 배합순서 및 배합비 등을 기준으로 제시하였다.

3. 시멘트-벤토나이트 차수벽체 재료의 특성시험

3.1 재료특성시험 개요

강화벤토나이트 차수벽체를 시공하기 위해서는 물-시멘

트-벤토나이트 및 대체재로 구성된 혼합물에 대한 적절한 배합비, 배합방법 및 혼합재료에 따른 강도 및 투수 특성 등을 사전에 파악하여야만 한다. 여기서는 재료의 역학적 특성 규명을 위해 물, 시멘트 및 벤토나이트의 배합조건을 변화시켜가며 실험을 수행하였으며, 시멘트는 보통포틀랜드 시멘트와 고로슬래그 시멘트 두 가지로 종류 변화시켜 결합재 종류에 따른 차수벽체의 공학적 특성을 평가하였다. 또한 시멘트가 결합재로 사용되는 특성을 고려하여 양생시간 경과에 따른 배합체의 일축압축강도와 투수계수 특성을 평가하였으며, 그 결과를 통해 향후 현장에서 적용이 가능한 배합방법을 도출하였다.

3.2 시험에 적용된 벤토나이트 및 시멘트 특성

벤토나이트는 점토광물의 일종인 몬모릴로나이트(montmorillonite)를 주성분으로 한다. 따라서 벤토나이트의 거동 특성은 몬모릴로나이트의 광물학적 특성에 기초한다. 몬모릴로나이트는 나노단위의 콜로이드에서부터 수 마이크로에 이르는 미립의 크기를 가지는 층상 규산염광물로서 이온교환성, 현탁성, 흡착성, 팽윤성 등의 많은 물리화학적 특성을 가지고 있다. Table 1은 본 연구에 적용된 벤토나이트의 특성값이다.

일반적으로 벤토나이트가 물과 혼합되어 현탁액으로 변화하면 점도가 증가하며, 현탁액의 유동속도에 따라 점도도 변하여 낮은 유동속도에서는 높은 점도를, 높은 유동속도에서는 낮은 점도를 나타내는 성질이 있다. 이러한 현상을 틱

Table 1. Properties of sodium bentonite

Property		Value
Moisture content		7.0%
Density		0.40 g / cm ³
Swelling index		17.5 ml / 2g
Degree of swelling		6.0 g / g
pH		10.5
Size	< 53 μm	98.5%
	< 5 μm	75.0%
	< 2 μm (clay)	65.0%
	< 1 μm	53.0%

Table 2. Chemical and physical characteristics of cement

Composition/Property	OPC	BSC	Composition/Property	OPC	BSC
Silicon dioxide (SiO ₂ =S)	22%	26%	C ₃ Sa	47.2%	-
Aluminum trioxide (Al ₂ O ₃ =A)	5.5%	8.4%	C ₂ Sa	27.5%	-
Ferric trioxide (Fe ₂ O ₃ =F)	3%	2.1%	C ₃ Aa	9.5%	-
Calcium oxide (CaO=C)	64.2%	54.8%	C ₄ AFa	9.1%	-
Magnesium oxide (MgO)	1.5%	3.2%	Density (g/cm ³)	3.15	3.04
Sulfur trioxide (SO ₃)	2%	1.7%	Specific surface (cm ² /g)	3300	3800
Chloride (Cl)	0.007%	0.006%	Water content (%)	27.5	28.9

소트로피(thixotropy)라고 한다. 이 현상은 유동이 없는 안정된 상태에서는 겔(gel)상태가 되고, 급격한 이동이 일어날 때는 액상의 졸(sol) 상태로 변하게 되는 것으로 몬모릴로나이트 현탁액은 이 현상의 상태 변화가 특히 예민하다. 본 연구에서는 강화벤토나이트 벽체의 혼합재료 변경에 따른 강도 및 투수특성 변화를 고찰하고자 정해진 배합비에 따라 고화재료를 보통포틀랜드 시멘트(Ordinary Portland Cement, OPC)와 고로슬래그 시멘트(Blast Furnace Slag Cement, BSC)로 바꾸어가며 강화벤토나이트 혼합물의 재료변화와 재령일수에 따른 강도특성 및 투수특성의 변화를 고찰해보았다. Table 2는 본 연구에 사용된 보통포틀랜드 시멘트와 고로슬래그 시멘트의 화학구성 및 재료 특성값이다. 고로슬래그 시멘트는 58%의 보통포틀랜드 시멘트에 42%의 고로슬래그를 혼합하여 제작되었으며, 이로 인하여 보통포틀랜드 시멘트와 비교하여 CaO의 함유량은 감소되나 SiO₂와 Al₂O₃의 함유량은 증가한다.

3.3 시료배합 방법 및 시험의 종류

본 연구에서는 벤토나이트 혼합물의 배합조건 및 배합비에 따른 거동특성 평가를 위해 다양한 조건에 대해 일축압축강도 및 투수실험을 수행하였다. 일반적으로 시멘트-벤토나이트 혼합물은 먼저 물과 벤토나이트를 혼합하여 일정시간 벤토나이트가 물을 흡수하여 팽창하는 것을 허용한 후, 시멘트를 첨가하여 시멘트-벤토나이트 혼합물의 경화를 유도한다. 이때 시멘트-벤토나이트 혼합물은 일반적으로 시간의 경과에 따라 양생(curing)이 이루어지며, 양생의 진행에 따라 혼합물 강도는 증가하고 투수계수는 점차 감소하고 양생은 수년간에 걸쳐 진행되기도 한다. 시멘트-벤토나이트 혼합물의 배합과정을 단계별로 정리하면 다음과 같다.

- step 1. 배합비의 결정
- step 2. 물과 벤토나이트의 혼합
- step 3. 벤토나이트 양생(일반적으로 12~24시간)
- step 4. 양생된 벤토나이트에 시멘트(수용액) 투입
- step 5. 물-벤토나이트-시멘트 혼합물의 양생

벤토나이트 혼합물의 거동특성과 관련된 연구에서 배합비 변화에 따른 재료특성 변화와 관련해서는 미약하나마 일부 성과가 축적되어 있는 실정이나, 물-벤토나이트 혼합물의 양생시간에 대한 연구 성과나 고로슬래그 시멘트 첨가에 따른 혼합물의 강도와 투수계수의 변화 거동에 대한 연구성과는 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 일반적으로 현장에 적용되는 표준배합비를 적용하여 배합방법의 변화에 따른 혼합물의 공학적 특성 변화에 대해 실험적으로 고찰하였다.

먼저 실험에 적용된 혼합물의 표준배합비는 일반적인 값으로 Table 3과 같이 결정하였다. 본 연구에서는 추가적으로 물과 벤토나이트가 혼합된 후 시멘트가 투입되기 이전 벤토나이트의 수화시간에 따른 강화벤토나이트 공시체의 강도 및 투수특성을 평가하였다. 벤토나이트의 수화시간은 물과 벤토나이트가 혼합된 후 시멘트가 투입되기까지의 대기시간을 의미하며, 일반적으로 시간이 길수록 혼합물의 공학적 특성은 양호해지는 것으로 알려져 있다. 그러나 양생시간이 길어지면 물-벤토나이트 혼합물을 저류하기 위한 후방 플랜트의 규모가 커져 경제성이 악화되므로 적절한 양생시간의 결정은 강화벤토나이트 차수벽체의 성능 및 경제성을 확보하기 위해 매우 중요하다. 본 연구에서는 물과 벤토나이트의 양생시간이 4시간인 경우와 24시간인 경우로 결정하였다. 배합조건 변화에 따른 실험방법을 정리하면 Table 4와 같다.

Table 3. Mixing ratios of CB walls (unit : kg)

Case	Water	Bentonite	OPC	BSC
Case 1	1,000	70	160	-
Case 2	1,000	70	-	160

* OPC : Ordinary Portland Cement

* BSC : Blast furnace Slag Cement

Table 4. Mixing procedures of CB walls

Case	Mixing procedure
Case 1 (04,24)	1st : Mixing water and bentonite, then hydration 2nd : After 4h(04) and 24h(24) hydration, adding OPC
Case 2 (04,24)	1st : Mixing water and bentonite, then hydration 2nd : After 4h(04) and 24h(24) hydration, adding BSC

Table 5. Mixing ratio, mixing procedure and the number of material property tests

Test cases	1st mix (kg)		Bentonite hydration (hr)	2nd mix (kg)			Uniaxial Strength test (ea)				Permeability test (ea)	Comment
	W	B		W	OPC	BSC	7days	14days	21days	28days		
Case01-04	840	70	4.0	160	160	-	3	3	3	3	1	OPC & 4hr hydration
Case01-24			24.0				3	3	3	3		1
Case02-04	840	70	4.0	160	-	160	3	3	3	3	1	BSC & 4hr hydration
Case02-24			24.0				3	3	3	3		1

특성 평가를 위한 배합은 시멘트를 분말형태로 배합하지 않고 수용액형태로 배합하였다. 즉 경우 정해진 물의 양에 일부를 벤토나이트와 혼합하고 일정시간이 경과한 후에 잔량의 물과 시멘트를 혼합한 수용액을 수화된 벤토나이트 혼합물과 혼합하여 실험 시료를 제작하였다. Table 5는 실험시 실제로 적용된 case 별 배합비 및 배합 조건별 특성시험 항목들이다. Table 5에서 case 1은 보통포틀랜드 시멘트 배합을 의미하며, case 2는 고로슬래그 시멘트 배합을 의미한다. 또한 구분에 표기된 04 및 24는 1단계 배합에서 물과 벤토나이트를 혼합한 후 시멘트의 투입 이전까지의 대기시간(벤토나이트 양생시간)을 의미한다. Table 5에 기술된 바와 같이 배합조건 변화는 총 4가지 set이며 각 set 별로 혼합물의 일축압축 강도와 투수계수를 측정하였다. 일축압축강도 시험은 각 배합조건별로 물-시멘트-벤토나이트 혼합물의 양생 7일, 14일, 21일 및 28일 이후에 실험을 수행하였으며, 투수계수 시험은 각 case 별로 연속적으로 측정을 시행하였다. 시험을 위해 제작된 시료는 강도시험을 위해서는 총 48개 시료가 필요하나 각 case의 양생일별로 여유시료 2개씩을 추가하여 총 80개의 시료를 준비하였으며, 투수시험은 각 case 별로 1개씩 총 4개의 시료를 제작하여 시험을 수행하였다.

3.4 일축압축강도 및 투수계수 시험 공시체 제작

일축압축시험은 시료에 수직압력만 가하여 파괴 시의 변위와 강도를 구하고 이를 통해 일축압축강도를 구하는 실험이다. 일축압축시험은 내부마찰각이 작거나 0인 점성토에 주로 적용되는 실험으로써 측압이 가해지지 않기 때문에 $\sigma_3 = 0$ 인 조건에 해당된다. 일축압축시험 방법에는 변형률을 제어하는 방법과 응력을 제어하는 방법이 있으며, 일반적으로 변형률을 제어하는 방법을 주로 사용한다. 본 논문에서는 KS F 2314의 규정에 따라 공시체의 직경과 높이를 1:2로 맞추어 성형된 시료를 양생하였다. 여기서는 일축압축강도를 파악하기 위해 사용한 장비는 최대 재하하중 300kg인 재료시험기로 하중을 제어하는 본체와 데이터를 수집하는 컴퓨터로 구성되어 있으며, 실험 시 재하속도는 0.5mm/min 이하의 조건으로 실시하였다. 강화벤토나이트 재료의 투수

특성을 파악하기 위한 방법으로 투수계수가 작은 시료에 적절한 방법인 변수위 투수시험을 시행하였다. 투수시험의 목적은 시멘트-벤토나이트의 배합조건에 따라 투수계수 특성을 파악한 후 일반적인 차수재의 품질관리 기준인 1×10^{-5} cm/sec 이하를 만족하는지 여부를 판단하기 위하는 데 있다. 강화벤토나이트 혼합재료의 시료는 일축압축강도 실험 시와 동일한 방법으로 제작하였으며, 몰드에 투기된 시료의 포화를 위해 24시간 이상 수침을 실시하였다. 특히 투수시험의 오차를 최소화하기 위해 실험실 내의 온도를 일정하게 유지하고 몰드의 내측면에 유재를 도포하여 측벽과 시료의 틈에서 발생할 수 있는 누수를 차단하였으며, 실험시기에 따른 오차를 최소화하기 위해 시험이 필요한 4개의 몰드에 대해 동시에 측정이 가능하도록 변수위투수시험용 스텐드파이프 4개 조를 제작하여 시험을 시행하였다.

4. 강화벤토나이트 재료의 강도특성 시험결과

4.1 강도특성 분석 개요

일반적으로 차수를 목적으로 하는 지중연속벽체 구성시 강도에 의한 제약은 없는 실정이다. 그러나 저수지 제체나 하천 제방 등 일정한 안정성이 요구되는 구조물에 차수를 목적으로 강화벤토나이트 벽체가 적용되는 경우 점착력의 증가에 의해 보강구조물의 안정성 증가 효과가 유발되므로 혼합뒤채움재료의 강도특성 파악은 중요하다. 또한 제체나 제방의 공용중에 발생할 수 있는 다양한 문제점을 최소화하기 위해서는 보강재료와 원지반의 이질거동이 최소화되고 기존 토구조물과 일체화되어 거동을 하여야 한다. 따라서 본 절에서는 재료의 하중-변형 특성이 제체를 구성하고 있는 흙재료의 거동과 유사한 형태로 나타나는지 여부와 더불어 배합방법 및 투입재료의 특성에 따른 강도특성 등을 분석하였다.

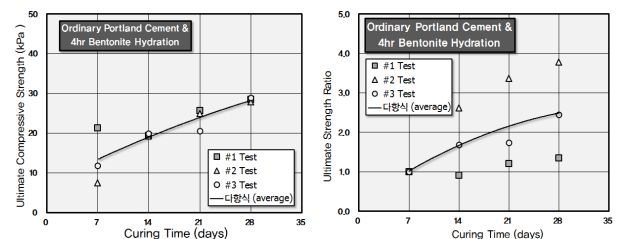
4.2 일반포틀랜드시멘트 배합물의 강도특성

Fig. 1과 Fig. 2는 물-벤토나이트 혼합물을 4시간 및 24시간 수화한 후 일반포틀랜드 시멘트를 혼합한 강화벤토나이트 벽체의 양생기간에 따른 강도특성 변화이다. 그림에 도시된바 같이 벤토나이트의 수화시간이 짧은 경우 배합물의 강도는 저하되며 시험자료의 편차도 매우 큰 것으로 나타났으나, 수화시간 증가 시 강도는 증가하며 시험자료의 편차는 감소하였다.

Fig. 1(b)와 Fig. 2(b)의 강도증가비는 7일 차 시험자료들 기준으로 분석한 결과이다. 본 분석을 통해 벤토나이트 혼

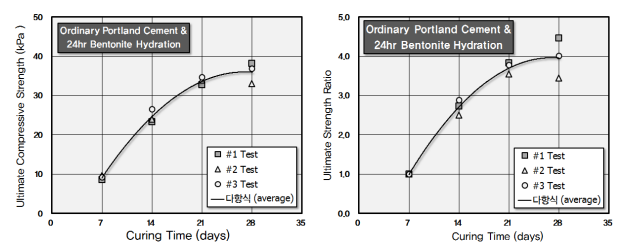
합물에 시멘트가 첨가되기 이전에 충분한 수화가 이루어지지 않는 경우(Fig. 1), 재료의 균질성 및 품질확보가 용이하지 않을 것으로 분석된다. 그러나 Fig. 1(b)와 Table 6의 분석결과 양생일에 따른 평균 강도비의 변화 곡선이 지속적으로 증가하는 경향을 보이는 것을 고려할 때 향후에도 상대적으로 느린 속도이지만 지속적으로 강도는 증가될 것으로 예측된다.

Fig. 2는 물-벤토나이트 혼합물을 24시간 수화한 후 보통 포틀랜드 시멘트를 혼합한 강화벤토나이트 벽체의 양생기간에 따른 강도특성 변화이다. Fig. 2에 도시된바 같이 벤토나이트의 수화시간을 충분히 부여한 경우 4시간 수화시키는 경우에 비해 상대적으로 배합체의 강도는 증가하며 시험자료의 편차도 감소되는 것으로 나타났다. Fig. 1과 Fig. 2를 비교하면 벤토나이트 수화시간을 충분히 확보(24시간)한 시료가 수화시간이 부족한 경우(4시간)에 비해 강도와 강도증가비 모두 더 큰 것을 확인할 수 있었다. 또한 24시간 수화시킨 시료들의 강도 값의 편차도 작아 전체 혼합체가 상대적으로 보다 균질한 상태에 있는 것으로 추정되었다. Table



(a) Variation of strength (b) Variation of strength ratio

Fig. 1. Curing time vs Ultimate strength with OPC (4hr)



(a) Variation of strength (b) Variation of strength ratio

Fig. 2. Curing time vs Ultimate strength with OPC (24hr)

Table 6. Strength of 4hr bentonite hydration samples (OPC)

Curing time	#1 Sample	#2 Sample	#3 Sample	Increasing ratio (average)
7 days	21.24	7.38	11.79	1.00
14 days	19.43	19.30	19.82	1.74
21 days	25.65	24.87	20.47	2.10
28 days	28.50	27.85	28.88	2.52
Unit	kPa	kPa	kPa	-

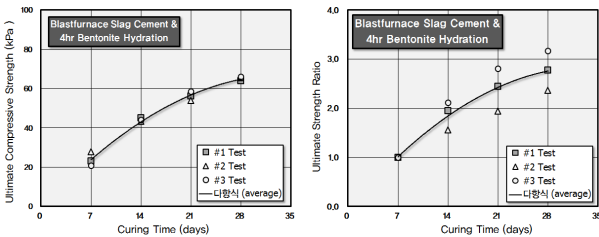
Table 7. Strength of 24hr bentonite hydration samples (OPC)

Curing time	#1 Sample	#2 Sample	#3 Sample	Increasing ratio (average)
7 days	8.55	9.58	9.20	1.00
14 days	23.31	23.96	26.55	2.70
21 days	32.77	33.94	34.71	3.71
28 days	38.08	33.03	36.92	3.95
Unit	kPa	kPa	kPa	-

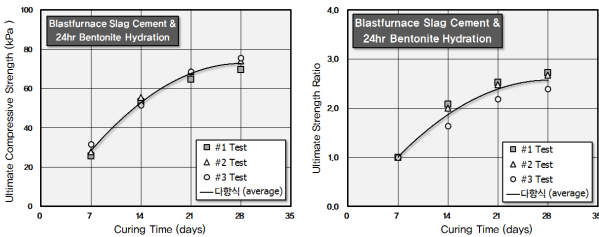
7에 의하면 물과 벤토나이트 혼합체를 24시간 이상 수화시킨 후 보통포틀랜드 시멘트를 첨가한 경우는 7일 강도에 비해 평균적으로 395%가량 강도가 증가하고 있음을 확인하였다.

4.3 고로슬래그시멘트 배합물의 강도특성

Fig. 3은 물-벤토나이트 혼합물을 4시간 수화한 후 고로슬래그 시멘트를 혼합한 강화벤토나이트 벽체의 양생기간에 따른 강도특성 변화이다. Fig. 3에 도시된바 같이 고로슬래그 시멘트를 첨가한 경우는 수화시간을 4시간으로 하여 배합한 시료에서도 일반포틀랜드 시멘트를 첨가한 경우(Fig. 1)와는 다르게 시험자료의 편차가 상대적으로 작은 결과를 보였다. 또한 응력비의 분산도 역시 24시간 양생 후 일반시멘트를 첨가한 경우(Fig. 4(b))와 유사한 분산도를 보여, 고로슬래그의 사용이 강화벤토나이트 혼합물의 균질성 확보 및 벤토나이트의 수화를 포함한 벽체의 기능 증진에 미치는 영향이 더 큰 것을 확인하였다. Fig. 3(b)와 Table 8의 강도



(a) Variation of strength (b) Variation of strength ratio
Fig. 3. Curing time vs Ultimate strength with BSC (4hr)



(a) Variation of strength (b) Variation of strength ratio
Fig. 4. Curing time vs Ultimate strength with BSC (24hr)

증가비는 7일 차 시험자료를 기준으로 분석한 결과이다. 또한 Fig. 3에 도시된 양생 기간별 강도 및 평균 강도비 변화 곡선이 지속적으로 증가하는 경향을 보이는 것을 고려할 때 향후에도 지속적으로 강도는 증가될 것으로 예측된다.

Fig. 4는 물-벤토나이트 혼합물을 24시간 수화한 후 고로슬래그 시멘트를 혼합한 강화벤토나이트 벽체의 양생기간에 따른 강도특성 변화이다. Fig. 4에 도시된바 같이 벤토나이트의 수화시간을 충분히 부여한 경우 배합체의 강도는 증가되며, 시험자료의 편차도 감소되어 시험 case 중 가장 균질한 결과를 보였다. 벤토나이트 수화시간을 충분히 확보(24시간)한 후 고로슬래그 시멘트를 첨가한 Fig. 4와 보통포틀랜드 시멘트를 첨가한 Fig. 2를 비교하면 강도 차이가 전 기간에 걸쳐 200% 이상 발생하는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 4(b)와 Table 9의 강도 증가비는 7일 차 시험자료를 기준으로 분석한 결과이다. Table 9에 의하면 물과 벤토나이트 혼합체를 24시간 이상 수화시킨 후 고로슬래그 시멘트를 첨가한 경우는 28일 강도가 7일 강도에 비해 평균적으로 258%가량 강도가 증가하고 있음을 확인하였으며, 양생 기간별 강도 및 평균 강도비 변화 곡선이 지속적으로 증가하는 경향을 보이는 것을 고려할 때 향후에도 지속적으로 강도는 증가될 것으로 예측된다.

4.4 결합재 변화에 따른 강도특성 비교

벤토나이트 혼합체의 강도는 고로슬래그를 첨가한 강화벤토나이트 벽체의 강도가 양생기간이나 배합방법에 무관하게 더 우수한 것으로 분석되었다. Table 8과 같이 4시간 수화 후 고로슬래그 시멘트를 배합한 경우 충분한 양생기간

Table 8. Strength of 4hr bentonite hydration samples (BSC)

Curing time	#1 Sample	#2 Sample	#3 Sample	Increasing ratio (average)
7 days	23.06	27.72	20.85	1.00
14 days	44.95	43.13	44.04	1.87
21 days	56.21	53.75	58.42	2.39
28 days	63.99	65.41	66.06	2.77
Unit	kPa	kPa	kPa	-

Table 9. Strength of 24hr bentonite hydration samples (BSC)

Curing time	#1 Sample	#2 Sample	#3 Sample	Increasing ratio (average)
7 days	25.65	27.72	31.48	1.00
14 days	53.37	55.31	51.55	1.89
21 days	64.76	68.65	68.65	2.38
28 days	69.69	74.09	75.38	2.58
Unit	kPa	kPa	kPa	-

이 주어지지 않았음에도 보통포틀랜드 시멘트를 첨가하고 4시간 수화시킨 혼합체의 28일 강도(Table 6) 대비 229% 증가함을 확인하였으며, 24시간 수화시킨 혼합체의 28일 강도(Table 7)와 비교하여도 180% 이상 큰 것으로 분석되었다. 물-벤토나이트 혼합체를 24시간 수화시킨 후 고로슬래그 시멘트를 배합한 경우(Table 8)는 그 차이가 더 증가하여 보통포틀랜드 시멘트를 첨가하고 4시간 수화시킨 혼합체의 28일 강도(Table 6) 대비 257% 증가함을 확인하였으며, 24시간 수화시킨 혼합체의 28일 강도(Table 7) 대비 203% 이상 큰 것으로 분석되었다. 이를 통해 강화벤토나이트 벽체의 강성에는 고로슬래그 시멘트의 적용이 더 우수함을 확인하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 강도시험 시료들의 파괴형상 비교이다.

Fig. 5는 물과 벤토나이트 배합액을 4시간 수화시킨 후 시멘트를 첨가시킨 시료의 28일 양생 후 파괴형태이며, Fig. 6은 물과 벤토나이트 배합액을 24시간 충분히 수화시킨 후 시멘트를 첨가시킨 시료의 28일 양생 후 파괴형태이다. 비교결과 일반포틀랜드 첨가의 경우에 비해 고로슬래그를 첨가한 시료의 전단 파괴면의 형태가 보다 뚜렷이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 일반포틀랜드를 첨가한 시료에 대한 시험결과인 Fig. 5(a)는 시료하단부에서 압축파괴가 먼저 진행되는 것을 확인할 수 있었으며, 벤토나이트 혼합액을 24시간 충분히 수화시킨 Fig. 6(a)에서는 시료의 상부가 일부 팽창(bulging)하며 팽창파괴와 전단파괴가 동시에 진행되는 것으로 분석되었다. 이에 반해 고로슬래그를 첨가한 경우에는 Fig. 5(b)에 도시된 바와 같이 벤토나이트 혼합액을 4시간만 수화시킨 경우에도 뚜렷한 전단 파괴면을 보였으며, 24시간 양생시킨 Fig. 6(b) 역시 뚜렷한 전단파괴면을 확인할 수 있었다. 또한 시험 시 시험시료의 육안관측결과 일반포틀랜드 혼합시료에 비해 고로슬래그 혼합시료의 표면의 경도와 양생상태가 크게 개선됨을 확인할 수 있었다. 이를 통해 강화벤토나이트 차수벽체의 결합재로 고로슬래그

시멘트를 사용하는 경우 벽체의 성능개선 및 현장 시공 시 공기와 관련하여 보다 원활한 대응이 가능한 것으로 판단된다.

5. 강화벤토나이트 재료의 투수특성 시험결과

5.1 투수특성 분석 개요

댐의 제체, 하천제방 및 폐기물 매립지에는 누수로부터 구조물이나 배후구역을 보호하거나 다양한 종류의 오염물질이 주변 환경으로 유출하는 것을 방지하기 위해 차수시설 등을 설치한다. 차수시설의 가장 중요한 기능은 침투수로부터 주변 지반환경을 보호하거나 오염물질의 유출을 방지하는 것이다. 차수층을 통과하는 지하수는 이동물질의 압력, 화학적 성질, 특성 등의 영향을 받으나, 무엇보다도 유량에 가장 큰 영향을 받는다. 따라서 차수층의 경우 가장 중요한 인자는 투수계수이고 국내의 제방 차수층이나 폐기물관리법의 차수층에 투수계수 기준은 10^{-5} m/sec로 정하고 있다. 일반적으로 차수를 목적으로 하는 지중연속벽체를 구성하는 경우 차수재의 투수계수는 주요 시공관리 항목 중의 하나이며, 본 연구에서 제안한 강화벤토나이트 혼합물의 차수 성능 검토를 위해 변수위 투수시험을 시행하였다. 투수시험은 실험실 온도 변화에 따른 오차발생 최소화를 위해 실내에서 수행하였다.

5.2 보통포틀랜드시멘트 배합물의 투수특성

본 절에서는 보통포틀랜드 시멘트로 배합된 강화벤토나이트 차수재의 투수계수를 평가하기 위해 변수위 투수시험을 수행하였다. 투수계수시험은 물과 벤토나이트를 배합한 후 수화시간 4시간과 24시간의 차이를 두고 보통포틀랜드 시멘트가 배합된 경우에 대해 수행하였으며, 벤토나이트 수화시간이 각각 다른 두개의 투수몰드를 설치하여 30일간

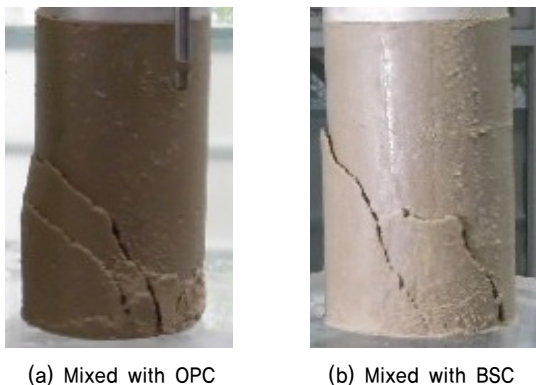


Fig. 5. Failure shapes of 4hr hydration & 28 days curing samples

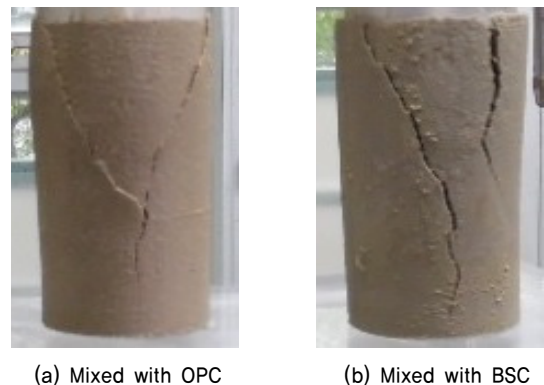


Fig. 6. Failure shapes of 24hr hydration & 28 days curing samples

연속적으로 투수계수를 측정하였다. 보통포틀랜드 시멘트가 배합된 경우에 대한 투수시험 case는 Table 10과 같다.

투수시험 결과는 Table 11 및 Fig. 7과 같다. Table 11에 기술된 바와 같이 벤토나이트 수화시간과 무관하게 시료의 양생시간이 12일을 경과할 경우 일반적인 차수재의 투수계수 품질기준인 1×10^{-5} cm/sec 이하의 결과를 보였다. Fig. 7은 보통포틀랜드 시멘트로 배합한 시료의 양생기간에 따른 투수계수 변화이다. Fig. 7에 도시된 바와 같이 강화벤토나이트 배합물의 양생이 진행 중인 초기에는 벤토나이트 수화시간을 4시간만 부여한 case 01-04의 투수계수가 수화시간 24시간을 부여한 case 01-24보다 더 작은 투수계수 값을 보였으나 시험시료의 양생에 따라 7일을 경과하며 유사해지고 30일 이후에는 24시간 수화시료의 투수계수가 더 작은 것으로 평가되었다. 30일 양생 후 시료별 투수계수는 case 01-04의 경우 7.5×10^{-6} cm/sec이며, case 01-24의 경우 5.9×10^{-6} cm/sec으로 평가되었다.

Table 10. Permeability test cases mixed with OPC

Test case	Tested specimen conditions
Case01-04	4 hr Bentonite hydration, then mixed with OPC
Case01-24	24 hr Bentonite hydration, then mixed with OPC

Table 11. Permeability of reinforced bentonite walls with OPC

Test case	Curing period (day) and permeability ($\times 10^{-5}$ cm/sec)					
	5	7	12	15	22	30
Case01-04	2.26	1.34	0.96	0.86	0.78	0.75
Case01-24	3.12	1.50	0.78	0.73	0.60	0.59

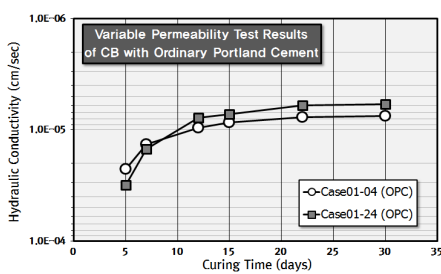


Fig. 7. OPC curing time vs Hydraulic conductivity

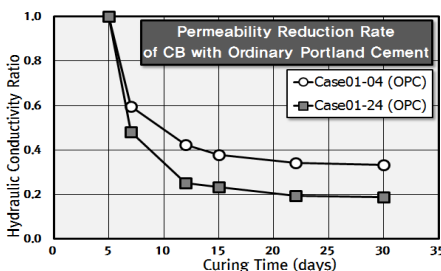


Fig. 8. Reduced rate of OPC

Fig. 8은 보통포틀랜드 시멘트로 배합한 시료의 양생기간에 따른 투수계수의 감소율이다. Fig. 8에 도시된 바와 같이 양생 후 2주간은 투수계수의 급격한 변화를 보였으나 이후에는 변화율이 다소 둔화되는 것으로 파악되었으나, 투수계수 10^{-5} cm/sec 이하의 저투수성 범위에서는 미소변화로도 그 효과가 매우 크므로 지속적인 평가가 필요한 사항으로 분석된다.

5.3 고로슬래그시멘트 배합물의 투수특성

여기서는 고로슬래그 시멘트로 배합된 강화벤토나이트 차수재의 투수계수를 평가하기 위해 변수위 투수시험을 수행하였다. 투수계수시험은 물과 벤토나이트를 배합한 후 수화시간 4시간과 24시간의 차이를 두고 고로슬래그 시멘트가 배합된 경우에 대해 수행하였으며, 벤토나이트 수화시간이 각각 다른 두 개의 투수모드를 설치하여 30일간 연속적으로 투수계수를 측정하였다. 고로슬래그 시멘트가 배합된 경우에 대한 투수시험 case는 Table 12와 같다.

투수시험 결과는 Table 13 및 Fig. 9와 같다. Table 13과 같이 고로슬래그 시멘트를 적용한 경우 벤토나이트를 24시간 수화시킨 경우에는 양생 7일 경과 시에 차수재의 투수계수 품질기준인 1×10^{-5} cm/sec 이하를 만족하였으나, 벤토나이트를 4시간 수화시킨 경우에는 양생 12일 경과 후에야 차수재의 품질기준을 만족시키는 것으로 파악되었다. 이를 통해 고로슬래그를 적용한 강화벤토나이트 벽체의 투수계수는 물과 벤토나이트 혼합 시 충분한 수화시간을 주는 것이 품질의 향상을 위해 유리한 것으로 분석되었다. Fig. 9는 고로슬래그 시멘트로 배합한 시료의 양생기간에 따른 투수계수 변화이다. Fig. 9에 도시된 바와 같이 벤토나이트 수화시간을 4시간만 부여한 case02-04 경우보다 수화시간 24시간을 부여한 case02-24의 경우가 전체 양생기간에 대해서 더 작은 투수계수 값을 보였다. 30일 양생 후 시료별 투수계수는 case02-04의 경우 5.6×10^{-6} cm/sec이고 case02-24의 경우 3.6×10^{-6} cm/sec으로 평가되어 24시간 수화를 적용한 경우의

Table 12. Permeability test cases mixed with BSC

Test case	Tested specimen conditions
Case02-04	4 hr Bentonite hydration, then mixed with BSC
Case02-24	24 hr Bentonite hydration, then mixed with BSC

Table 13. Permeability of reinforced bentonite walls with BSC

Test case	Curing period (day) and permeability ($\times 10^{-5}$ cm/sec)					
	5	7	12	15	22	30
Case02-04	2.04	1.33	0.79	0.68	0.58	0.56
Case02-24	1.71	0.90	0.49	0.44	0.33	0.32

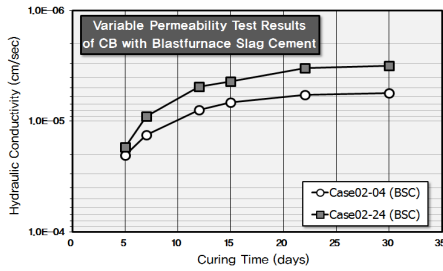


Fig. 9. BSC curing time vs Hydraulic conductivity

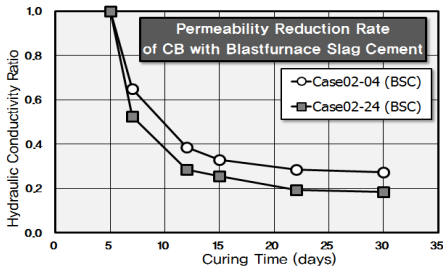


Fig. 10. Reduced rate of BSC

투수계수가 더 작은 것으로 측정되었다. Fig. 10은 고로슬래그 시멘트로 배합한 시료의 양생기간에 따른 투수계수 감소율 분석이다. Fig. 10에 도시된 바와 같이 양생 후 2주간은 투수계수의 급격한 변화를 보였으나 이후에는 변화율이 다소 둔화되는 것으로 파악되었다. 그러나 감소곡선의 기울기가 지속적으로 하락하는 추세를 보여 양생 30일 이후에도 강화벤토나이트 배합물의 투수계수는 감소할 것으로 예측된다.

투수계수 분석결과 역시 강도특성시험결과와 동일하게 보통포틀랜드 시멘트를 결합재료로 사용한 경우보다 고로슬래그 시멘트를 결합재료로 사용한 경우의 투수계수가 더 작아 차수재로서의 성능이 더 우수한 것으로 평가되었다.

6. 결 론

본 연구에서는 기존의 다양한 차수공법들의 공법적 한계를 극복하고 보다 합리적이며 예측 가능하고 경제적인 새로운 차수공법을 제안하고, 현장 적용 시 품질관리를 위한 배합방법 및 절차를 실내실험을 통해 제시하였다. 또한 벤토나이트 수화 기간이 강화벤토나이트 벽체의 품질에 미치는 영향과 시멘트를 첨가한 경우와 고로슬래그 첨가한 경우의 강화벤토나이트 슬러리의 비교를 통해 최적의 배합재료를 찾기 위한 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 시멘트, 벤토나이트 혼합재료에 대한 배합방법 및 시멘트의 성질에 따른 거동특성을 실험적으로 평가한 내용

은 다음과 같다.

- ① 시멘트 투입 이전에 배합되는 물-벤토나이트 슬러리의 수화시간 변화에 따른 압축강도 실험으로부터 벤토나이트의 수화시간을 충분히 확보하는 경우의 강도가 더 큰 것을 확인하였다.
 - ② 양생시간 증가에 따라 강화벤토나이트의 강도는 증가하는 것으로 확인되었다. 강도의 증가 정도는 보통포틀랜드 시멘트를 사용한 경우 4시간 수화 시료의 28일 강도가 7일 강도 대비 211% 증가하였으며 24시간 수화 시료는 395% 증가하였다. 또한 고로슬래그를 사용한 시료의 경우 양생기간 증가에 따라 4시간 수화 시료는 273%, 24시간 수화시료는 258%의 강도 증가가 발생하는 것으로 평가되었다.
 - ③ 결합재인 시멘트 종류에 따른 강도특성은 고로슬래그 시멘트를 첨가한 경우가 보통포틀랜드 시멘트를 첨가한 경우 대비 180%~257%가량 더 큰 것으로 평가되어, 벽체의 강성에는 고로슬래그 시멘트의 적용이 더 우수함을 확인하였다.
 - ④ 이상의 강도특성 시험결과를 요약하면 일반시멘트보다는 고로슬래그 시멘트를 사용하고 시멘트 배합 이전에 벤토나이트의 수화시간을 충분히 확보하는 것이 강도 측면에서 유리하며, 양생시간의 증가에 따라 벽체의 강도는 증가하므로 이를 고려한 설계가 수행되어야 할 것이다.
- (2) 시멘트, 벤토나이트 혼합재료에 대한 배합방법 및 시멘트의 성질에 따른 거동특성을 실험적으로 평가한 내용은 다음과 같다.
- ① 투수특성의 경우 보통포틀랜드 시멘트로 배합한 경우보다 고로슬래그 시멘트로 배합한 경우의 투수계수가 더 작았으며, 양생기간 증가에 따라 투수계수는 감소하는 것을 확인하였다.
 - ② 보통포틀랜드 시멘트를 사용하는 경우, 30일간 양생한 시료의 투수계수는 5일 양생시료에 비해 33~19% 수준으로 감소하고, 고로슬래그 시멘트를 사용하는 경우는 27~18% 수준으로 감소되는 것을 확인하였다.
 - ③ 실험에 적용된 전 경우에서 벤토나이트 수화시간 확보와 무관하게 12일이 경과하는 시점에서 일반적인 차수재 품질기준인 $1.0 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ 를 만족하여 차수재로서 충분한 적용성을 지니는 것으로 평가되었다.
 - ④ 투수계수 분석결과 역시 강도특성시험결과와 동일하게 보통포틀랜드 시멘트를 결합재료로 사용한 경우보다 고로슬래그 시멘트를 결합재료로 사용한 경우의 투수계수가 더 작아 차수재로서의 성능이 더 우수한 것으로 평가되었다.

(3) 실내실험 결과 강화벤토나이트 재료의 배합조건에 따른 장기강도 및 차수성 측면에서는 사전에 물과 벤토나이트의 수화반응 시간을 최소한 4시간 이상 확보할 경우 품질 기준의 만족에는 이상이 없음을 확인할 수 있었다. 이를 통해 지중연속벽의 시공 시 급속시공을 요하거나 조기강도가 발휘되어야 하는 경우 물과 벤토나이트의 수화반응을 최소한 4시간 이상을 확보한 후 벤토나이트 슬러리와 시멘트의 현장배합이 이루어질 수 있도록 유도해야 할 것으로 판단되며, 고품질의 유지와 투입재료의 균질성 확보를 위해서는 가급적 24시간 이상 수화시간 확보를 권장한다.

감사의 글

이 논문은 2016학년도 안동대학교 연구비에 의해 연구되었습니다.

References

1. Kim, S. W., Park, H. G., Woo, J. K. and Kim, H. T. (2014),

SCB (Soil-Cement-Bentonite) slurry cutoff wall method for the waterproof and reinforcement of dam body, Publication of Korean Geotechnical Society, Vol. 30, No. 5, pp. 8~14 (in Korean).

2. Korea Rural Community & Agriculture Corporation (2011), Statistical yearbook of land and water development for agriculture, Ministry of Agriculture Food and Rural Affairs.
3. Demars, B., Pledger, C. and Barrett, B. (2009), A. V. Watkins dam modification : cement bentonite slurry cutoff wall, 29th Annual USSD Conference, Nashville, Tennessee, pp. 1073~1084.
4. Evans, J. C., Costa M. J. and Cooley, B. (1995), The state-of-stress in soil-bentonite slurry trench cutoff walls, ASCE Geotechnical Special Publication No. 46, New Orleans, Louisiana, pp. 1173~1191.
5. Fratolochi, E. and Pasqualini, E. (1998), Permeability over time of cement-bentonite slurry walls, Environmental Geotechnics, P.S. Secoe Pinto, ed., pp. 509~514.
6. Jefferis, S. A. (1981), Bentonite-cement slurries for hydraulic cut-offs, Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, June, Vol. 1, pp. 435~440.
7. Ryan, C. R. (1985), Slurry cutoff walls: applications in the control of hazardous wastes, Hydraulic Barriers in Soil and Rock, ASTM STP 874, A. I. Johnsojhn, R. K. Frobel, N. J. Cavalli, and C. B. Pettersson, eds., ASTM, Philadelphia, pp. 9~23.
8. Sharma, H. D. and Lewis, S. P. (1994), Chapter 7. Vertical barriers : slurry walls, waste containment systems, waste stabilization, and landfills, John Wiley and Sons, Inc., New York, p. 608.