

고로슬래그 미분말을 혼합한 CB 차수벽의 공학적 특성

Engineering Properties of CB Cut-off Walls Mixed with GGBS

김 태 연¹⁾ · 이 봉 직[†]
Taeyeon Kim · Bongjik Lee

Received: February 16th, 2022; Revised: March 2nd, 2022; Accepted: April 13th, 2022

ABSTRACT : For a slag-cement-bentonite (slag-CB) cut-off wall, GGBS replaces a part of the cement mixed to build a CB cut-off wall, which is used to block the flow and leakage of pollutants or groundwater; prevent seawater infiltration; and repair or reinforcement an aged embankments. Slag-CB cut-off walls are used in various applications in different fields where groundwater control is required due to its excellent characteristics. Such properties include high strength, low permeability, high durability and chemical resistance. However, despite these advantages, slag-CB cut-off walls are not extensively studied in Korea and thus are not applied in many cases. Particularly, GGBS, which replaces cement in a mixture, has different properties depending on its country of production. Consequently, it is necessary to perform various studies on slag-CB cut-off walls that use GGBS produced in Korea in order to increase its usability. This study has evaluated the bleeding rate, setting time, strength, and permeability in relation to the cement replacement rate of GGBS produced in Korea for slag-CB cut-off walls, with the aim to increase its usability. The evaluation found that slag-CB cut-off walls, made of a mixture containing GGBS produced in Korea, have a lower bleeding rate and permeability, and higher strength than CB cut-off walls. It was also analyzed that such improved performance is more effective with a higher cement replacement rate of GGBS.

Keywords : Slurry wall, Slag-CB, GGBS, Replacement ratio, Permeability

요 지 : 오염물질이나 지하수의 흐름 및 유출의 차단, 해수 침투 방지 및 노후화된 제체의 보수·보강 등을 목적으로 활용되는 Cement-Bentonite 차수벽에 혼합되는 시멘트 일부를 GGBS로 치환하여 사용하는 Slag-Cement-Bentonite 차수벽은 높은 강도와 낮은 투수계수, 우수한 내구성 및 내화학적 등의 여러 장점으로 지하수 제어가 필요한 여러분야에서 다양하게 활용되고 있다. 그러나 이와같은 장점에도 불구하고 국내에서는 Slag-CB 차수벽에 대한 다양한 연구가 이루어지지 않아 적용사례가 많지 않으며, 특히, 시멘트를 대체하여 혼합되는 GGBS는 생산되는 국가에 따라 성질이 상이하여 국내 Slag-CB 차수벽의 활용성을 높이기 위해서는 국내에서 생산되는 GGBS를 활용한 Slag-CB 차수벽에 대한 다양한 연구가 필요한 실정이다. 이에 본 연구에서는 Slag-CB 차수벽의 활용성을 향상시키기 위해 국내에서 생산되는 GGBS를 혼합한 Slag-CB 차수벽의 GGBS 치환율에 따른 블리딩율, 응결시간, 강도 및 투수성 등을 평가하였다. 그 결과, 국내에서 생산된 GGBS를 혼합한 Slag-CB 차수벽은 CB 차수벽에 비해 낮은 블리딩율과 우수한 강도 및 투수성을 보였으며, 이러한 성능향상은 GGBS 치환율이 높을수록 더욱 효과적인 것으로 분석되었다.

주요어 : 지중연속벽, Slag-CB, 고로슬래그 미분말, 치환율, 투수성

1. 서 론

지중연속벽의 일종인 Cement-Bentonite(이하 CB) 차수벽은 원지반 굴착함과 동시에 시멘트, 벤토나이트 및 물로 이루어진 CB slurry로 치환하여 시간이 경과함에 따라 소요의 강도를 발휘하는 벽체를 형성하는 공법으로(Kim & Lee, 2021) 혼합되는 시멘트량을 조절함으로써 강도를 조절할 수 있으며 우수한 내화학적성과 내구성을 확보할 수 있다. 또한, 굴착된 구역을 CB slurry로 즉시 치환함으로써 벽체의 균질성이 우수하고 시공이 빠르고 간편하여(Hwang et al., 2016) 지하수 제어가 필요한 여러분야에서 다양하게 활용되고 있다.

그러나, CB 차수벽의 강도발휘를 위해 혼합되는 시멘트는 생산시 많은 에너지를 소비하고 다량의 이산화탄소를 발생시킴으로 여러 환경문제를 유발하고 있다. 이에 시멘트의 활용량을 줄이기 위한 다양한 연구가 진행되어 왔으며, 그 중 대표적으로 혼합되는 시멘트의 일부를 비포틀랜드 재료인 Ground Granulated Blast-furnace Slag(이하 GGBS)로 대체하여 사용하는 Slag-Cement-Bentonite 차수벽(이하 Slag-CB 차수벽)이 있다(Jefferis, 2012).

선철 제조시 발생하는 산업부산물인 GGBS는 대표적인 잠재수경성 재료로 시멘트 대체재로 활용시 수화열 감소, 수밀성, 유동성, 장기강도 및 내화학적 등을 향상시키는 장점이

1) Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Korea National University of Transportation

† Professor, Dept. of Civil Engineering, Korea National University of Transportation (Corresponding Author : bjlee@ut.ac.kr)

있다(Seo & Kim, 2019). 이러한 장점으로 CB 차수벽에 혼합되는 시멘트의 일부를 GGBS로 치환하여 사용하는 Slag-CB 차수벽은 CB 차수벽에 비해 높은 강도와 낮은 투수계수, 우수한 내구성 및 내화성으로 최근 해외에서는 CB 차수벽을 대체하여 Slag-CB 차수벽이 주로 시공되고 있다(Jefferis, 1997; Evans & Dawson, 1999; Opdyke & Evans, 2005).

그러나 이와같은 장점에도 불구하고 국내에서는 Slag-CB 차수벽에 대한 다양한 연구가 이루어지지 않아 적용사례가 많지 않으며, 특히, 시멘트를 대체하여 혼합되는 GGBS는 생산되는 국가에 따라 성질이 상이하여 국내 Slag-CB 차수벽의 활용성을 높이기 위해서는 국내에서 생산되는 GGBS를 활용한 Slag-CB 차수벽에 대한 다양한 연구가 필요한 실정이다.

이에 본 연구에서는 국내에서 생산되어 상용 중인 GGBS를 활용한 Slag-CB 차수벽을 대상으로 GGBS 치환율에 따른 블리딩율, 응결시간, 강도 및 차수성 등을 평가하였다.

2. 실내실험 및 방법

2.1 재료특성

2.1.1 시멘트

실험에 사용된 시멘트는 국내에서 상용되고 있는 H사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 사용된 시멘트의 특성은 Table 1~2와 같다.

Table 1. Physical properties of O.P.C.

Specific gravity	3.14	Curing time	Compressive strength (MPa)
Blaine (cm^2/g)	3780	3 days	32.1
Hydration heat (cal/g)	39	7 days	44.9
Setting time (h : m)	Initial	04 : 40	28 days
	Final	05 : 50	
			55.1

Table 2. Chemical properties of O.P.C.

Chemical components (%)				
SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	Fe_2O_3
22.23	5.21	64.58	2.3	3.38

2.1.2 벤토나이트

벤토나이트는 Montmorillonite를 주성분으로 하는 점토의 일종으로 교환성 층간에 채워진 양이온에 따라 칼슘-벤토나이트와 나트륨-벤토나이트로 분류된다(Sarvaiya et al., 2017). 칼슘-벤토나이트는 물과 접촉시 20\AA (\AA : Angstrom,

$10^{-10}m$)정도 팽윤되나 나트륨-벤토나이트는 150\AA 이상으로 팽윤되기 때문에 차수재로서 주로 사용되고 있다(Fukushima, 1984; Yun et al., 2019). 따라서, 본 연구에서는 Slag-CB 차수벽의 우수한 차수성을 확보하기 위해 나트륨-벤토나이트를 사용하였으며, 실험에 사용된 벤토나이트의 물리·화학적 특성은 Table 3~4와 같다.

Table 3. Chemical properties of bentonite

Chemical components (%)					
SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O
53.8	18.4	3.37	2.62	1.37	3.74

Table 4. Physical properties of bentonite

Property	Value
Moisture content (100°C, 2hr)	11.8%
Particle size (% of passed by 200 mesh)	82.2
Swelling volume (ml / 2g)	25
Specific gravity	2.46
Ph	10.3

2.1.3 GGBS

시멘트를 대체하여 혼합된 GGBS는 국내에서 생산되어 상용화 중인 A사의 콘크리트용 고로슬래그미분말 3종을 사용하였으며, 실험에 사용된 GGBS의 특성은 Table 5와 같다.

Table 5. Physical properties of GGBS

Specific gravity	2.90	Curing time	Activity index (%)
Blaine (cm^2/g)	4530	7 days	65
Loss ignition (%)	1.03		
Chloride ion (%)	0.01	28 days	83
MgO (%)	2.33	91 days	99
SO_2 (%)	1.90		

2.2 실내실험 및 방법

2.2.1 배합조건

GGBS 치환율에 따른 Slag-CB 차수벽의 공학적 특성을 평가하기 위해 현재 국내에서 적용되고 있는 CB 차수벽의 혼합비인 벤토나이트 $60kg/m^3$, 시멘트 $200kg/m^3$ 을 대상으로 Table 6과 같이 혼합되는 시멘트의 일부를 GGBS로 치환하는 GGBS 치환율을 변화시켜가며 Slag-CB 차수벽 시료를 조성하였다.

시료조성은 2단계에 걸쳐 실시하였으며, 1단계에서는 물과 분말상태의 벤토나이트를 교반하여 벤토나이트 Slurry를 조성하였으며, 2단계에서는 조성된 벤토나이트 Slurry에 분말

Table 6. Mixture proportion of Slag-CB

Mixture type	Materials (kg/m^3)				Curing time (days)	Curing method
	Bentonite	Cement	GGBS	Water		
S-0	60	200	0	To volume of $1m^3$	7, 14, 28, 60, 90	Moisture, Underwater
S-1		180	20			
S-2		160	40			
S-3		140	60			
S-4		120	80			
S-5		100	100			
S-6		80	120			
S-7		60	140			
S-8		40	160			
S-9		20	180			

상태의 시멘트와 GGBS 첨가하여 재교반하여 Slag-CB slurry를 조성하였다. 또한, Slurry 조성시 혼합속도에 따른 영향을 배제하기 위해 모든 Slurry의 혼합속도는 550 r.p.m.으로 유지하였다.

2.2.2 블리딩율시험

Slag-CB 차수벽의 재료분리에 의해 발생하는 블리딩과 이로 인한 타설 전·후의 체적변화 등을 파악하기 위해 KS F 2433에 의거하여 블리딩율시험을 실시하였다. 배합조건에 따라 조성된 Slag-CB 차수벽 시료를 지름 50mm, 높이 500mm의 폴리에틸렌 실린더에 200mm 높이까지 채운 후, 시료로 채워진 폴리에틸렌 실린더를 물이 400ml 들어있는 1,000ml의 메스실린더에 넣어 폴리에틸렌 실린더 안 시료의 윗면과 메스실린더의 수면을 일치시킨 후 측정을 실시하였다.

블리딩율은 시험시작 20시간 후 블리딩으로 인해 발생된 물을 피펫으로 추출하여 20ml 메스실린더에 넣어 계산하였다.

2.2.3 응결시험

Slag-CB 차수벽의 연속성, 균질성 및 시공 후 품질 등에 영향을 미치는 주 요인 중 하나인 응결시간을 측정하기 위해 KS L ISO 9597에 의거하여 응결시험을 실시하였다. 배합조건에 따라 조성된 Slag-CB 차수벽 시료를 응결시험용 몰드에 타설 후 습윤양생을 실시하였으며, 응결시간 측정은 예비시험을 통해 응결이 예상되는 시간부터 측정시간의 간격을 짧게하여 정확한 응결시간을 측정할 수 있도록 하였다.

2.2.4 일축압축강도시험

GGBS 치환율과 양생방법에 따른 Slag-CB 차수벽의 강도변화를 파악하기 위해 GGBS 치환율을 변화시켜가며 시료를 조성하였으며, 시료의 양생을 습윤양생과 수중양생으로 구분하여 실시하였다. 일축압축강도시험을 위한 공시체

제작시 공시체의 직경과 높이의 비에 따른 영향을 배제하기 위하여 높이 10cm, 내경 5cm인 불투수성 몰드를 사용하여 제작하였으며, 공시체의 압축은 1분간 공시체 높이의 1%의 압축이 일어나도록 1mm/min의 재하속도를 유지하여 공시체의 파괴가 발생할 때까지 실시하였다.

2.2.5 변수위 투수시험

Slag-CB 차수벽의 주요 평가항목 중 하나인 차수성을 평가하기 위해 KS F 2322에 의거하여 변수위 투수시험을 실시하였다. 변수위 투수시험을 위한 공시체는 각각의 배합조건에 따라 혼합된 시료를 지름 10cm, 높이 12cm의 변수위 투수시험용 몰드에 채워 목표재령일까지 습윤양생을 실시하였으며, 진공펌프를 이용하여 시료를 포화시킨 후 실험을 실시하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 블리딩율시험 결과 및 분석

GGBS 치환율에 따른 Slag-CB 차수벽의 블리딩율 시험 결과, 블리딩율은 4.40~8.09%로 GGBS 치환율이 증가함에 따라 블리딩율은 감소하는 것으로 나타났다.

GGBS로 치환하지 않은 S-0를 기준으로 GGBS 치환율이 증가함에 따라 블리딩율은 0.55~1.01배 감소하였으며, 특히, GGBS 치환율이 30% 이하인 경우 블리딩율 감소비(S-1~S-9의 블리딩율 / S-0의 블리딩율)는 0.96~1.01로 GGBS 치환율 증가에 따른 블리딩율 감소효과는 미미하게 나타났다. 그러나, GGBS 치환율이 40% 이상인 경우 블리딩율 감소비는 0.55~0.90으로 GGBS 치환율이 증가함에 따라 블리딩율 감소효과가 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다. 이러한 블리딩율 감소효과는 GGBS의 물리적 특성에 의한 것으로

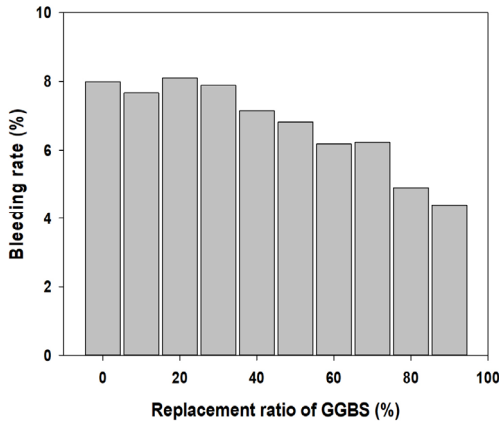


Fig. 1. Results of bleeding tests with regard to replacement ratio of GGBS

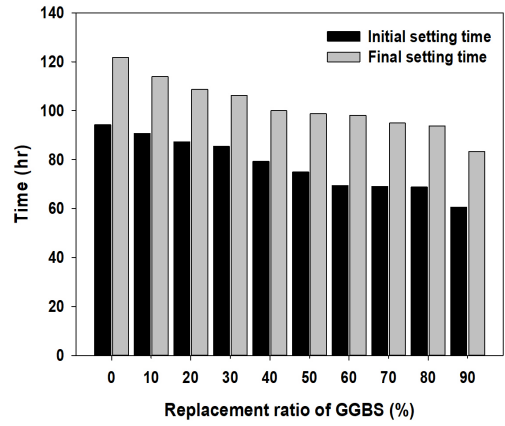


Fig. 3. Setting-time of Slag-CB cut-off walls with regard to replacement ratio of GGBS

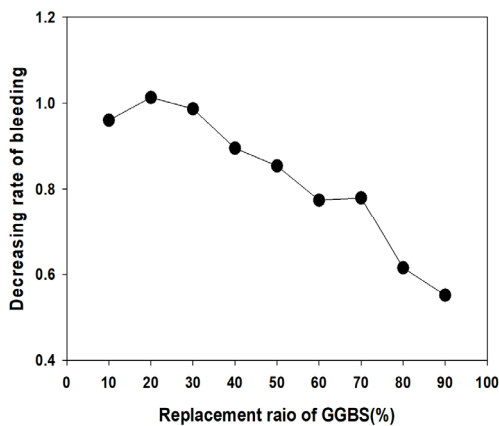


Fig. 2. Decreasing rate of bleeding with regard to replacement ratio of GGBS

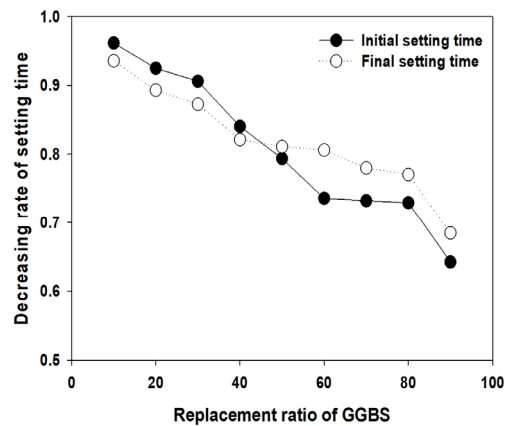


Fig. 4. Decreasing rate of setting-time with regard to replacement ratio of GGBS

시멘트보다 비표면적이 큰 GGBS로 치환함에 따라 혼합되는 물과의 접촉면 증가로 인해 블리딩율이 감소하는 것으로 판단된다.

3.2 응결시험 결과 및 분석

GGBS 치환율에 따른 Slag-CB 차수벽의 응결 시험결과는 Fig. 3과 같이 GGBS 치환율에 따른 초결시간은 60.58~94.33시간, 종결시간은 83.33~121.75시간으로 나타났다.

GGBS 치환율이 증가함에 따라 Slag-CB 차수벽의 응결시간은 단축되는 것으로 나타났으며, 초결시간의 경우 GGBS 치환율이 증가함에 따라 0.64~0.96배, 종결시간의 경우 0.68~0.94배 감소하는 것으로 분석되었다. 또한, GGBS 치환율 증가에 따른 응결시간의 감소효과는 초결시간의 경우 치환율 60%를 기점으로 둔화되었으나, 종결시간의 경우 치환율 40%를 기점으로 둔화되는 것으로 분석되었으며, 초결시간과 종결시간 모두 GGBS 치환율이 90%인 배합조건에서 가장 큰 응결시간 감소효과가 나타났다.

3.3 일축압축강도시험 결과 및 분석

3.3.1 양생기간과 GGBS 치환율에 따른 강도변화 특성

Slag-CB 차수벽의 GGBS 치환율과 양생기간에 따른 일축압축강도시험결과는 Fig. 5와 같이 GGBS 치환율과 양생기간이 증가함에 따라 Slag-CB 차수벽의 강도는 증가하는 것으로 나타났다. 습윤양생과 수중양생 모두 GGBS 치환율이 20% 이하인 경우 GGBS 치환율 증가에 따른 강도증가는 미미하였으나, 치환율 30%를 기점으로 GGBS 치환율 증가에 따른 강도증가가 뚜렷하게 나타났다. 특히 습윤양생의 경우 GGBS 치환율 증가에 따른 강도증가는 비교적 일정한 경향을 보이는 것으로 나타났으나, 수중양생의 경우에는 GGBS 치환율 70%를 기점으로 강도가 크게 증가함을 알 수 있다.

또한, 모든 경우에서 양생기간이 길어짐에 따라 강도는 지속적으로 증가하였으며, 양생기간별 강도증가는 수중양생의 경우 60일을 기점으로 둔해지는 경향으로 나타났으나, 습윤양생의 경우 수중양생보다 짧은 양생일수인 28일을 기점으로 점차 둔화되는 것으로 분석되었다.

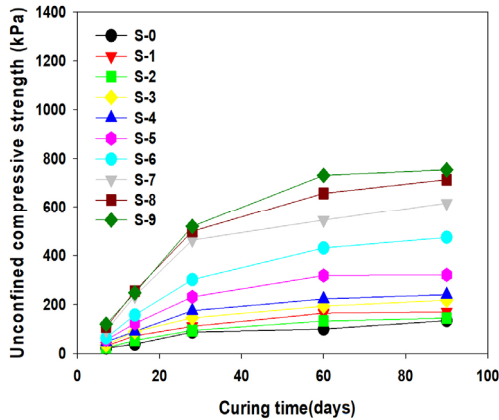
양생기간이 7일에서 90일로 증가함에 따른 배합조건별

Slag-CB 차수벽의 강도증가비(양생 90일 후 압축강도 / 양생 7일 후 압축강도)는 습윤양생의 경우 5.08~7.44, 수중양생의 경우에는 3.90~15.84로 분석되었다. 습윤양생의 경우 GGBS 치환율에 따른 강도증가비의 변화는 미미한 것으로 나타난 반면, 수중양생의 경우 GGBS 치환율 40% 이하에서 습윤양생에 비해 낮은 강도증가비를 보였으나, 치환율 50%를

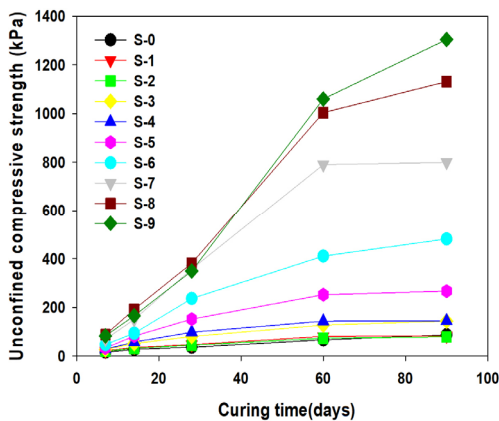
기점으로 강도증가비가 크게 증가하여 습윤양생의 경우보다 높은 강도증가비를 보이는 것으로 분석되었다.

3.3.2 양생방법에 따른 강도변화 특성

양생방법에 따른 Slag-CB 차수벽의 강도변화 특성을 파악하기 위해 시료의 양생을 습윤양생과 수중양생으로 구분하여 실시하였으며, 습윤양생을 실시한 경우와 수중양생을 실시한 경우에 대한 강도비(습윤양생을 실시한 경우의 압축강도 / 수중양생을 실시한 경우의 압축강도)는 Fig. 7과 같다. 양생 28일의 경우 양생방법에 따른 강도비는 1.28~2.74로 모든 GGBS 치환율에서 습윤양생을 실시한 경우가 수중양생을 실시한 경우보다 큰 압축강도를 보이는 것으로 나타났다. 또한, GGBS 치환율이 증가함에 따라 양생방법에 따른 강도비는 감소하는 경향을 보였으나, 치환율이 70% 이상인 경우 양생방법에 따른 강도비가 미소하게 증가하는 것으로 분석되었다.



(a) Moisture curing



(b) Underwater curing

Fig. 5. Unconfined compressive strength of Slag-CB cut-off walls with regard to replacement ratio of GGBS

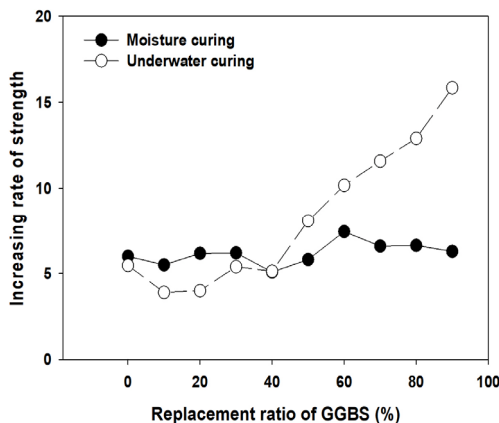


Fig. 6. Increasing rate of strength with regard to replacement ratio of GGBS

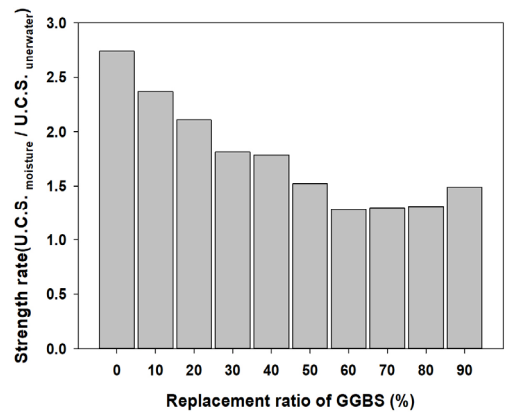


Fig. 7. Strength rate of Slag-CB cut-off walls with regard to the curing method (Samples cured for 28 days)

3.4 투수시험 결과 및 분석

GGBS 치환율이 Slag-CB 차수벽의 주요 성능인 차수성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 배합조건에 따라 제작된 시료를 목표양생일까지 습윤양생 후 변수위 투수시험을 실시하였으며, 그 결과는 Fig. 8과 같다. 배합조건별 Slag-CB 차수벽의 투수계수는 양생 28일의 경우 $9.68 \sim 3.12 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$, 양생 90일의 경우 $9.14 \sim 1.80 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ 로 모든 양생일수에서 GGBS 치환율이 증가함에 따라 투수계수는 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 투수계수의 감소효과는 GGBS 치환율 30%를 기점으로 뚜렷하게 나타났으며, GGBS 치환율이 70% 이상인 배합조건에서 가장 큰 차수성을 보이는 것으로 분석되었다.

또한, 양생기간이 증가함에 따라 Slag-CB 차수벽의 투수계수는 감소하는 것으로 나타났으며, 양생기간 증가에 따른

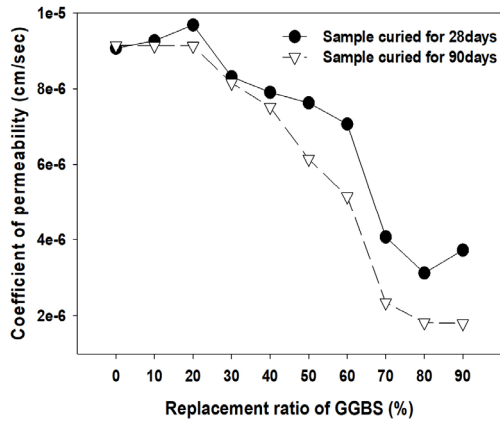


Fig. 8. Hydraulic conductivity of Slag-CB cut-off walls with regard to replacement ratio of GGBS

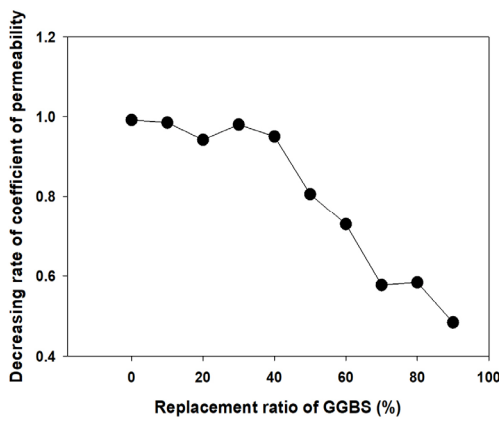


Fig. 9. Decreasing rate of hydraulic conductivity of Slag-CB cut-off walls with regard to replacement ratio of GGBS

Slag-CB 차수벽의 투수계수 감소비(양생 90일 후 투수계수 / 양생 28일 후 투수계수)는 GGBS 치환율에 따라 0.48~0.99로 분석되었다. GGBS 치환율이 40% 이하인 경우 투수계수 감소비는 0.94~0.99로 양생기간 증가에 따른 투수계수 감소효과는 미미하였으나, 치환율이 50% 이상인 경우 감소효과는 0.48~0.80으로 양생기간이 증가함에 따라 투수계수 감소효과가 뚜렷해지는 것으로 분석되었으며, 이러한 감소효과는 GGBS 치환율이 높을수록 더욱 뚜렷하게 나타났다.

4. 결 론

Slag-CB 차수벽의 활용성을 높이기 위해 국내에서 생산되는 GGBS를 활용한 Slag-CB 차수벽을 대상으로 GGBS 치환율에 따른 공학적 특성을 평가하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 배합조건별 Slag-CB 차수벽의 블리딩율은 4.40~8.09%로 나타났으며, GGBS 치환율이 증가함에 따라 블리딩율은 0.55~1.01배 감소함을 알 수 있다.
- (2) GGBS 치환율에 따른 응결특성은 치환율이 증가함에 따라 Slag-CB 차수벽의 초결시간은 0.64~0.96배, 종결시간은 0.68~0.94배 감소하는 것으로 나타났으며, GGBS 치환율이 90%인 배합조건에서 가장 큰 감소효과를 보이는 것으로 나타났다.
- (3) Slag-CB 차수벽의 압축강도 평가결과, GGBS 치환율과 양생기간이 증가함에 따라 강도는 증가하는 것으로 나타났으며, 이러한 강도증가는 GGBS 치환율이 높을수록 더욱 뚜렷해짐을 알 수 있다.
- (4) 양생 28일의 경우 양생방법에 따른 Slag-CB 차수벽의 강도비(습윤양생을 실시한 경우의 압축강도 / 수중양생을 실시한 경우의 압축강도)는 1.28~2.74로 모든 배합조건에서 습윤양생을 실시한 경우가 수중양생을 실시한 경우보다 높은 압축강도를 보이는 것으로 분석되었다.
- (5) GGBS 치환율에 따른 Slag-CB 차수벽의 투수계수는 양생 28일의 경우 $9.68 \sim 3.12 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$, 양생 90일의 경우 $9.14 \sim 1.80 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ 로 나타나 GGBS 치환율과 양생기간이 증가함에 따라 투수계수는 감소하였으며, 이러한 투수계수의 감소현상은 GGBS 치환율 30%를 기점으로 뚜렷하게 나타났다.
- (6) 따라서, CB 차수벽에 혼합되는 시멘트의 일부를 GGBS로 치환한 Slag-CB 차수벽은 CB 차수벽에 비해 낮은 블리딩율과 우수한 강도 및 차수성을 보였으며, 이러한 성능향상은 GGBS 치환율이 높을수록 더욱 효과적임을 알 수 있다.

향후 다양한 첨가제의 활용을 통해 Slag-CB 차수벽의 강도증진과 유연성 확보 및 현장 활용성을 높일 수 있는 방안에 대한 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

References

1. Evans, J. C. and Dawson. A. R. (1999), Slurry walls for control of contaminant migration: A comparison of U.K. and U.S. practices, ASCE Specialty Conference on Geo-Engineering for Underground Facilities, ASCE Geotechnical Special Publication No. 90, Reston, Va., pp. 105~120.
2. Fukushima, Y. (1984), X-ray diffraction study of aqueous montmorillonite emulsions, Clays and Clay Minerals, Vol. 32, No. 4, pp. 320~326.
3. Hwang, J. S., Kim, S. W., Jung, J. G., Lee, S. J., Oh, B. S. and Baek, S. C. (2016), Behavior characteristics of cement

- bentonite impervious walls related to mixing methods and curing time, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 17, No. 12, pp. 45~54 (In Korean).
4. Jefferis, S. A. (1997), The origins of the slurry trench cut-off and a review of cement-bentonite cut-off walls in the UK, International containment technology conference and exhibition, 52~61. United States.
 5. Jefferis, S. A. (2012), Cement-bentonite slurry systems, ASCE, Proceedings of the Fourth International Conference on Grouting and Deep Mixing, pp. 1~24.
 6. Kim, T.Y. and Lee, B. J. (2021), The estimation of appropriate mixing amount of cement-bentonite cutoff walls for repair and reinforcement of reservoir embankments, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society* Vol. 22, No. 6, pp. 27~32 (In Korean).
 7. Opdyke, S. M. and Evans, J. C. (2005), Slag-cement-bentonite slurry walls, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, No. 6, pp. 637~681.
 8. Sarvaiya, J., Agrawal, Y. K. and Bakre, L. (2017), Montmorillonite nanoclay as a multifaceted drug-delivery carrier: A review, *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, Vol. 39, pp. 200~209.
 9. Seo, H. and Kim, D. H. (2019), Development of reinforcement grout materials using reinforcing fiber and blast furnace slag powder, *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol. 18, No. 3, pp. 101~112 (In Korean).
 10. Yun, S. Y., An, H. K., Oh, M. A. and Lee, J. Y. (2019), A study on the evaluation of permeability and structure for calcium bentonite-sand mixtures, *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol. 18, No. 2, pp. 1~10 (In Korean).