

고로슬래그미분말 및 강섬유를 적용한 고유동 흙막이 벽체 재료의 성능 평가

Performance of High-Flowable Retaining Wall Material Using Ground Granulated Blast-Furnace Slag and Steel Fiber

김 동 규¹⁾ · 유 강 민²⁾ · 이 승 태[†]

Donggyou Kim · Kangmin Yu · Seungtae Lee

Received: September 24th, 2022; Revised: September 28th, 2022; Accepted: October 16th, 2022

ABSTRACT : The objective of this study is to evaluate the mechanical properties of high-flowable retaining wall material (RWM) incorporated with ground granulated blast-furnace slag (SG) and steel fiber (SF) based on a comparison with those of ordinary portland cement (OPC). To produce the specimens of RWM, some chemical agents such as superplasticizer (SP), air-entrained agent (AEA) and viscosity modifying agent (VMA) are added in the fresh RWM. The compressive, split tensile and flexural strength measurements were performed on the hardened RWM specimens. Additionally, surface electric resistivity and absorption tests according to ASTM standards were carried out at predetermined periods after water curing. It was found that the mechanical properties of slag cement concrete (SGC) RWM mix are better than those ordinary portland cement concrete (OPC) RWM mix. The effect of SF is remarkable to improve the mechanical properties of RWM mixes. It is noted that the usage of SG shows a beneficial effect to resist water penetration as well as long-term strength development of RWM mixes.

Keywords : Retaining wall material, Ground granulated blast-furnace slag, Steel fiber, Viscosity modifying agent, Mechanical properties

요 지 : 본 연구는 고로슬래그미분말(SG) 및 강섬유(SF)를 적용한 고유동 흙막이 벽체 재료(RWM)의 역학적 성능을 평가하기 위한 것으로서, 흙막이 벽체 재료의 재료분리저항성, 유동성, 연행공기량을 확보하기 위하여 고성능감수제, 공기연행제 및 증점안정화제를 굳지 않은 흙막이 벽체 재료에 적정량을 사용하였다. 흙막이 벽체 재료 경화체의 강도특성을 고찰하기 위하여 압축, 할열 인장 및 휨강도를 소정의 재령에서 측정하였으며, 표면전기저항, 흡수를 실험을 통하여 흙막이 벽체 재료의 역학적 성능을 평가하였다. 실험결과에 따르면 SGC 배합은 OPC 배합에 비하여 대체적으로 우수한 성능을 나타내었으며, SF는 흙막이 벽체 재료의 역학적 성능향상에 효과적인 것으로 조사되었다. 특히, SG의 사용은 흙막이 벽체 재료의 장기강도 발현 뿐만 아니라 차수성능 향상에 기여할 것으로 판단된다.

주요어 : 흙막이 벽체 재료, 고로슬래그미분말, 강섬유, 증점안정화제, 역학적 성능

1. 서 론

전세계적으로 대심도 지반굴착 시 주열식 말뚝 벽체 타입의 시공이 많이 이루어지고 있으나, 케이싱 시공의 경우, 과도한 휨이 발생하여 케이싱 인발이 원활히 이루어지지 않음에 따라 발생하는 벽체 결함, 가이드 월 미설치 시 벽체의 연직도 불량과 이로 인하여 지하수의 누수 및 토사 유출 발생 등의 문제점이 빈번히 발생하고 있다. 또한 주열식 말뚝 벽체 공법은 대심도 굴착 시 말뚝 간 연결성 결함으로 발생하는 차수성능의 저하와 케이싱 용접에 따른 효율성이 떨어지는 문제점을 내포하고 있다. 그리고, RC 콘크리트 시공 시 철근

간격이 조밀하여 콘크리트의 성형성이 저하되어 구조물의 국부 파손이 발생하기도 하며, 높은 단위시멘트량으로 인하여 콘크리트 유동성(슬럼프 플로우)이 저하되어 케이싱 제거 시 벽체 결함 등이 발생하는 사례가 보고되기도 한다.

콘크리트의 낮은 인장강도 및 취성파괴의 단점을 개선하고 건조수축을 방지하기 위하여 국내외 연구자들에 의하여 강섬유, 유리섬유, 합성섬유 등을 적용한 고성능 섬유보강 콘크리트 개발에 대한 연구가 수행되고 있으며, 경제성 및 시공성을 향상시키기 위한 최적 배합설계 및 효율적인 현장 적용 기법에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다(Lee et al., 2019; Xu & Shi, 2009).

1) Research Fellow, Dept. of Geotechnical Engineering Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

2) Master Student, Dept. of Civil Engineering, Kunsan National University

† Professor, Dept. of Civil Engineering, Kunsan National University (Corresponding Author : stlee@kunsan.ac.kr)

또, 콘크리트의 역학적/내구적 성능확보를 위하여 오래 전부터 고로슬래그미분말(ground granulated blast-furnace slag)이 콘크리트 제조를 위하여 널리 사용되고 있으며, 앞으로도 그 사용량이 지속적으로 증가할 것으로 예상된다. 국내의 경우, 1975년도에 고로슬래그시멘트 제품규격이 KS L 5210으로 제정되었으며, 1997년에는 콘크리트용 고로슬래그미분말이 KS L 2563으로 제정되기도 하였다. 고로슬래그미분말이 콘크리트에 혼입되어 경화작용을 나타내기 위해서는 알칼리성 또는 황산염의 자극물을 첨가하여, OH⁻ 및 SO₄²⁻ 이온이 충분히 존재하는 조건이 필요하다. 또, 고로슬래그시멘트의 잠재수경성(latent hydraulic property)은 주로 유리량(glass content)과 염기도(basicity)에 의해 지배되는 것으로 알려져 있다(Lee et al., 2012; Oner, 2000; Gao et al., 2019).

한편, 콘크리트의 보강재로 사용되는 강섬유가 콘크리트 매트릭스에 적절하게 분산되면 팽창 및 미세균열의 발생을 억제시켜, 결국 인장, 휨 및 충격하중에 대한 저항성을 향상시킨다고 보고되고 있다(Li et al., 2022; Ran et al., 2021; Song & Hwang, 2004; Zaki et al., 2021). 또, 강섬유(steel fiber)는 가교효과(bridging effect)에 의하여 콘크리트의 균열발생을 제한하고 콘크리트의 내구성을 향상시킨다는 연구결과도 보고되고 있다. Feo et al.(2020)는 강섬유 체적 0%, 1.25%, 및 2.5%를 적용한 섬유보강 콘크리트의 우수한 부착성능 메커니즘을 규명하였으며, 골재와 시멘트 매트릭스의 향상된 부착성능으로 인하여 내동해성이 증가한다고 주장하였다.

본 연구에서는 대심도 벽체 조성을 위한 고성능 흙막이 벽체 재료 개발을 최종목적으로 하였으며, 이를 위하여 증점안정화제를 이용하여 재료분리 저항성이 개선된 고유동 콘크리트 흙막이 벽체 재료의 최적 배합설계를 수행하였다.

또, 흙막이 벽체 재료의 차수성능 및 인장강도 향상을 위하여 고로슬래그미분말 및 강섬유를 적용한 콘크리트를 제조하였으며, 강도특성, 표면전기저항성, 투수특성 등 여러 가지 역학적 성능을 실험적으로 규명하고자 하였다. 본 연구의 내용은 향후 대심도 지반굴착용 고품질 흙막이 벽체 재료 개발을 위한 기초자료로 활용가능하다고 판단된다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

흙막이 벽체 재료(이하 RWM: retaining wall material)를 제작하기 위하여 본 연구에서 사용한 결합재는 보통포틀랜드 시멘트(이하 OPC: ordinary portland cement) 및 고로슬래그미분말(이하 SG: ground granulated blast-furnace slag)이며, 각 결합재의 화학성분 및 물리적 성질은 Table 1에 정리하였다.

또한 잔골재는 부순모래(S)를 사용하였으며, 굵은 골재는 최대치수 25mm의 부순돌(G)을 사용하였다. 잔골재 및 굵은 골재의 물리적 성질은 Table 2와 같다. 또, RWM의 유동성 및 공기량 확보를 위하여 폴리카르보나트계 고성능감수제(SP; superplasticizer) 및 공기연행제(AEA: air-entrained agent)를 각각 사용하였으며, RWM의 재료분리 저항성 및 충전성을 개선시키기 위하여 증점안정화제(VMA: viscosity modifying agent)를 사용하였다. 또, Fig. 1에 나타났듯이 본 연구에서 사용한 강섬유(이하 SF: steel fiber)는 국내 K사에서 생산된 단후크(single hooked) 타입의 제품으로서 Table 3에 물리적 성질을 나타내었다.

Table 1. Chemical composition and physical properties of binders

Type	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Ig. loss (%)	Density (g/cm ³)	Fineness (cm ² /g)
OPC	19.8	4.8	3.1	61.5	2.9	2.8	2.96	3.15	3,400
SG	31.7	14.5	0.4	41.7	5.4	2.1	2.6	2.92	4,700

Table 2. Physical properties of aggregates

Items	S	G
Gmax (mm)	-	25
Absorption (%)	1.14	0.93
F.M.	2.9	6.8
Density (g/cm ³)	2.53	2.75



Fig. 1 Steel fiber(SF) used in this study

Table 3. Mechanical properties of steel fiber

Density (g/cm ³)	Tensile strength (MPa)	Diameter (mm)	Length (mm)	Aspect ratio
7.5	2,500	0.2	13	65

2.2 배합설계

본 연구에서 사용된 RWM 배합은 결합재로서 100% OPC를 사용한 OPC 배합(Mix 1), OPC에 대하여 SG를 50%를 대체한 SGC 배합(Mix 3)을 사용하였다. 또, OPC 및 SGC 배합에 SF를 결합재량에 대하여 2% 첨가한 배합을 OPC-SF (Mix 2) 및 SFC-SF(Mix 4) 배합으로 각각 명명하였다. 본 연구에 사용된 RWM 배합표는 Table 4와 같다. 또한, RWM의 슬럼프 및 공기량은 각각 190 ± 10 mm 및 $4.5 \pm 1.5\%$ 로 결정하였으며, 증점안정화제는 배합에 관계없이 결합재량의 약 2.5%를 사용하였다. 또, 물-결합재비(w/b) 및 잔골재율(S/a)은 각각 47% 및 48%로 고정하여 배합설계를 실시하였다.

2.3 실험방법

2.3.1 강도특성

RWM의 강도특성은 Fig. 2와 같이 수행되었으며, 압축강도는 $\varnothing 100 \times 200$ mm의 압축강도용 공시체를 소정의 기간 동안 수중양생 하였으며, 재령 3, 7 및 28일에서 KS F 2405 “콘크리트의 압축강도 시험방법”에 준하여 압축강도를 측정하였다. 또, 인장강도 실험은 KS F 2423 “콘크리트의 인장강도 시험방법”에 준하여 실시하였으며, 휨강도 실험은 KS F 2408 “콘크리트의 휨 강도 시험방법”에 준하여 측정하였다.

2.3.2 표면전기저항성

정확한 RWM의 표면전기저항성 측정을 위하여 $\varnothing 100 \times 200$ mm의 공시체를 대상으로 Four-point Wenner Probe 방식의 표면전기저항 측정방법에 준하여 실험을 진행하였다 (Fig. 3). 표면전기저항은 Eq. (1)과 같이 산정하였으며, ASTM C 1760에 근거하여 Table 5와 같이 표면전기저항성의 성능 등급을 분류하였다.

$$\rho(\text{Kohm} \cdot \text{cm}) = \frac{2\pi a V}{I} \quad (1)$$

여기서, a = 전극간격(cm), V = 전압강하량(V), I = 전류량(A)이다.

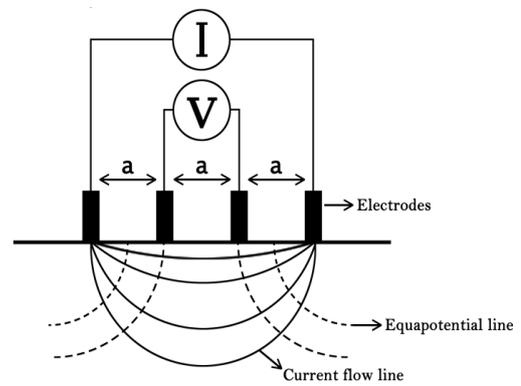


Fig. 3. Schematic representation of surface electric resistivity by Wenner method

Table 4. Mix proportion of RWM (unit : kg/m³)

Symbol	Type	Air (%)	Slump (mm)	W/b (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)					SF*	VMA**
						W	C	SG	S	G		
Mix 1	OPC	4.5±1.5	190±10	47	48	165	350	-	848	954	-	2.5
Mix 2	OPC-SF						350	-	848	954	2.0	2.5
Mix 3	SGC						175	175	839	944	-	2.5
Mix 4	SGC-SF						175	175	839	944	2.0	2.5

* % vol

** % wt. by binder



Compressive strength
(KS F2403)



Split tensile strength
(KS F2423)



Flexural strength
(KS F2408)

Fig. 2 Strength measurements of RWM specimens

Table 5. Performance class of surface electrical resistance

Performance class	Wenner ($K\Omega\text{-cm}$)
Very low	0~5
Low	5~7.5
Moderate	7.5~15
High	Over 15

2.3.3 흡수율 및 초기흡수계수

흡수율 시험은 ASTM C 1585에 준하여 시험을 실시하였으며 시간이 증가함에 따라 물 흡수로부터 공시체의 질량증가를 측정하였으며 시편의 재령 3 및 28일에 대하여 측정하여 흡수율(I)과 초기흡수계수(S; initial absorption coefficient)를 Eq. (2)와 같이 산정하였다.

$$I = S_i \sqrt{t} \quad (2)$$

여기서, I = 질량증가분 / 접촉면적 / 물의밀도(mm), t = 시간(sec)이다.

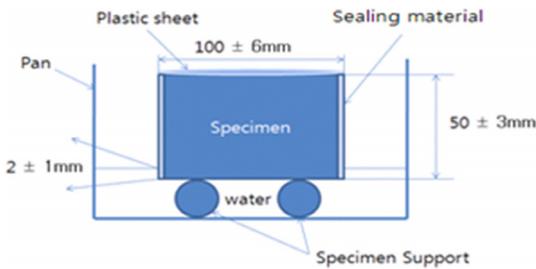


Fig. 4. Absorption measurement according to ASTM C1585

3. 실험결과 및 분석

3.1 고유동 RWM의 혼화제 사용량

Table 4에 나타난 바와 같이 본 연구에 사용된 목표 슬럼프 및 목표 공기량은 RWM의 유동성 개선 및 연행공기량 확보를 위하여 각각 180-200mm 및 4-6%로 선정하였다. Fig. 5



Fig. 5. Slump test for fresh RWM

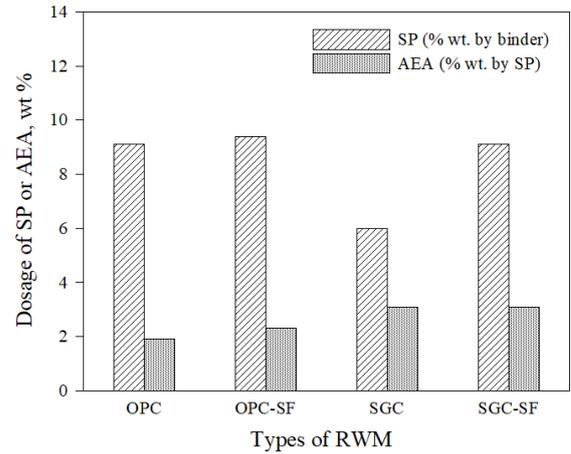


Fig. 6. Dosage of SP and AEA for targeted slump value and air content

는 4종류 RWM 배합의 슬럼프 측정광경을 나타낸 것이며, Fig. 6은 목표 슬럼프 값 및 공기량 확보를 위한 혼화제 사용량을 도시한 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 목표 슬럼프 확보를 위한 SP 사용량은 OPC 배합에서는 SF 첨가와 관계없이 유사하게 나타났으나, SGC 배합에서는 SF 첨가에 따라 다소 증가하는 경향을 보였다. 또, 목표 공기량을 위한 AEA 사용량은 SGC계 배합에서 OPC계 배합보다 다소 많이 사용되는 것으로 조사되었다.

3.2 강도특성

Fig. 7~9는 경화한 RWM의 압축, 인장 및 휨강도 특성을 각각 나타낸 것이다. RWM의 압축강도 특성을 재령별로 도시한 것이 Fig. 7로써, RWM의 배합과 관계없이 재령의 증가와 더불어 압축강도가 증가하는 경향을 나타내었다. 특히, 초기재령(3일)에서는 OPC가 SGC에 비하여 압축강도가 크게 나타나는 경향을 나타내었으나, 재령 28일에서는 SG의 잠재수경성(latent hydraulic property)의 영향으로 인하여 오히려 SGC의 압축강도가 다소 크게 나타나는 것으로 조사되었다(Attari et al., 2016). 한편, SF를 사용한 RWM는 압축강도 증진에 효과적인 것으로 나타났으며, 이러한 경향은 SGC-SF 배합에서 더욱 두드러지게 나타나는 것을 알 수 있다(Song

& Hwang, 2004; Xu & Shi, 2009). 다시 말해서, 재령 3 및 28일에서 SF 첨가에 의한 RWM의 압축강도 증진률은 OPC 배합의 경우 3.0% 및 3.9%, SGC 배합은 7.7% 및 13.3%로 각각 나타났다.

한편, Fig. 8은 4종류 RWM의 쪼갬 인장강도 값을 재령별로 나타낸 것으로서, Fig. 7에 나타난 압축강도 발현 경향과 다소 유사하게 나타남을 알 수 있다. 그러나, SGC 배합은 재령에 관계없이 OPC 배합과 비슷한 쪼갬 인장강도 값이 나타난 반면, SGC-SF 배합은 OPC-SF 배합에 비하여 재령의 증가에 따른 쪼갬 인장강도의 발현이 매우 뚜렷하게 관찰되었다. 예를 들면, 재령 28일에서 OPC, OPC-SF, SGC 및 SGC-SF 배합의 쪼갬 인장강도 값이 각각 3.7, 3.9, 3.7 및 4.4 MPa로 관찰되었다.

4종류 RWM 배합의 재령 28일 휨강도 측정결과를 나타낸 것이 Fig. 9로써, OPC 및 SGC 배합의 휨강도는 각각 6.5 및 7.0MPa로 나타났으며, SF 첨가에 따른 OPC-SF 및 SGC-SF 배합의 휨강도는 각각 7.4 및 8.1MPa로써, 휨강도가 다소

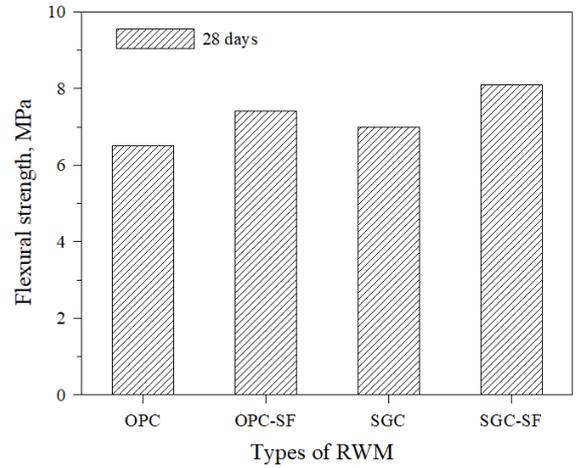


Fig. 9. Flexural strength of RWM

증진되는 경향을 나타내었다. 이러한 경향은 Li et al.(2022)의 연구결과와도 비교적 잘 일치하는 것으로 판단된다.

3.3 표면전기저항

표면전기저항법을 사용하여 시멘트 기반 경화체의 역학적 성능, 공극특성 및 내구성을 평가하기 위한 일련의 연구가 보고되고 있다(Gastaldini et al., 2009; Kim & Moon, 2013). 특히, 4전극을 이용한 Wenner법이 일반적으로 사용되며, 4개의 전극을 동일간격으로 유지하여 외부 2개의 전극에 미소교류전류(I)를 발생시켜 내부 2개의 전극에 발생하는 전위차(V)를 측정함으로써, 표면전기저항값(ρ)을 결정하게 된다. Ramezani-pour et al.(2011)은 표면전기저항값을 이용하여 압축강도 및 내구성능과의 관계를 규명하였으며, 내구성 지표로서 표면저항값의 유효성을 주장하였다.

4종류 RWM 배합의 재령별 표면전기저항값을 나타낸 것이 Fig. 10이다. 각 배합의 표면전기저항값을 상호비교한 결과,

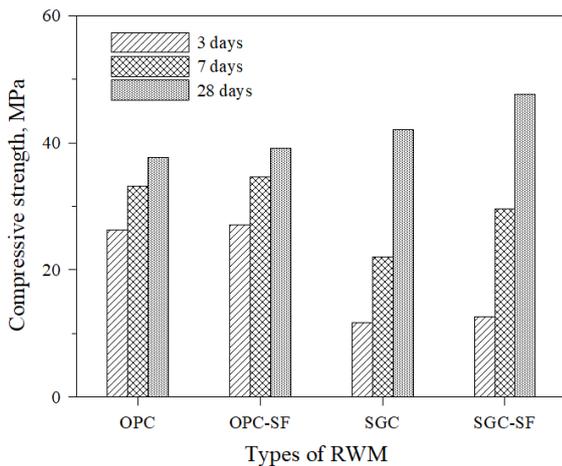


Fig. 7. Compressive strength of RWM

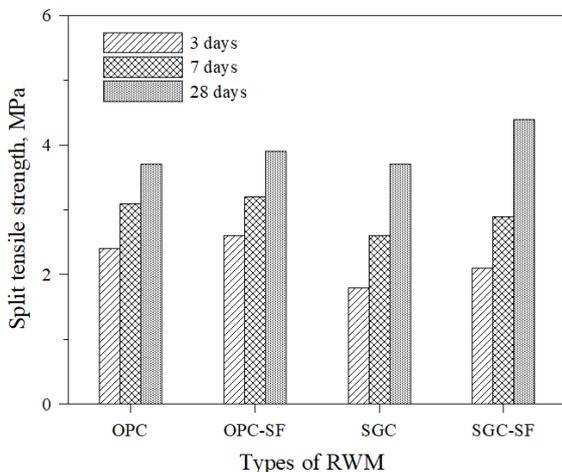


Fig. 8. Split tensile strength of RWM

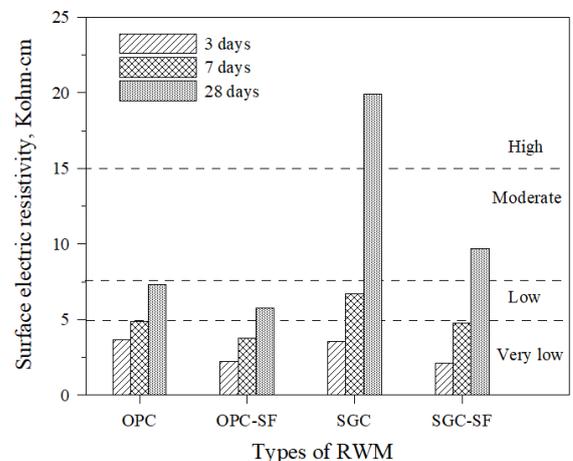


Fig. 10. Surface electric resistivity of RWM

OPC계 배합(OPC 및 OPC-SF)이 SGC계 배합에 비하여 전기저항값이 상대적으로 낮게 나타남을 알 수 있다. 예를 들어, 재령 28일에서 OPC 및 OPC-SF 배합의 경우, ASTM C 1706에 근거한 내구성 평가기준의 ‘Low’ 영역으로 나타난 반면, SGC 및 SGC-SF 배합은 각각 ‘High’ 및 ‘Moderate’ 영역으로 나타나는 것으로 조사되었다. SF 첨가 배합의 표면전기저항값이 상대적으로 낮게 나타나는 이유는 강섬유의 전기전도성이 콘크리트보다 상대적으로 우수하기 때문으로 판단된다.

3.4 흡수율 및 초기흡수계수

시멘트 기반 경화체의 공극특성은 결합재의 종류, 수화물량 및 종류, 배합조건, 양생방법 뿐만 아니라, 시간 함수에 지배적인 영향을 받게 되며, RWM의 투수성에 결정적인 영향을 미치게 된다(Zain et al., 2000). 또, 경화체의 투수성능을 평가하기 위한 신뢰성 있는 실험기법으로써 초기흡수계

수(S_i)를 측정하는 연구가 수행되고 있다(Lee, 2017).

ASTM C 1585에 준하여 4종류 RWM 배합의 흡수율 실험을 수행하였으며, 재령 3 및 28일 실험결과를 Fig. 11에 도시하였다. 측정 결과, 초기재령(3일)에서는 OPC계 배합의 흡수율이 상대적으로 작게 나타났지만, 장기재령(28일)에서는 SGC계 배합의 흡수율이 오히려 작게 나타나는 결과를 나타내었다. 특히, 흡수율 실험결과에 따르면, 재령에 관계없이 SF 첨가는 RWM의 표면 흡수특성에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 조사되었다.

Fig. 11에 제시된 흡수율 실험결과를 바탕으로 Eq. (2)에 의하여 각 배합의 초기흡수계수(S_i)를 계산하였으며, 그 결과를 배합별로 상호 비교하여 나타낸 것이 Fig. 12이다. 이 그림에서 알 수 있듯이, 시간의 경과에 따라 RWM의 조직구조는 경화되어 흡수율이 낮아지는 경향을 보였다. 한편, 배합의 종류에 관계없이 재령 3일의 S_i 값은 서로 유사하게 나타났으나, 재령 28일에서는 크게 상이한 값을 나타내었다. 특히 재령 28일에서는 SGC계 배합의 S_i 가 OPC계 S_i 보다 상대적으로 작게 나타나는 우수한 경향을 보였으며, 이는 RWM 결합재로서 SG의 사용에 기인한 것으로 판단된다. 따라서, 향후 흙막이 벽체 재료로서 SG를 사용한 배합을 적용할 경우, 장기강도 증진 효과뿐만 아니라 차수성능의 향상에도 기여할 것으로 판단된다.

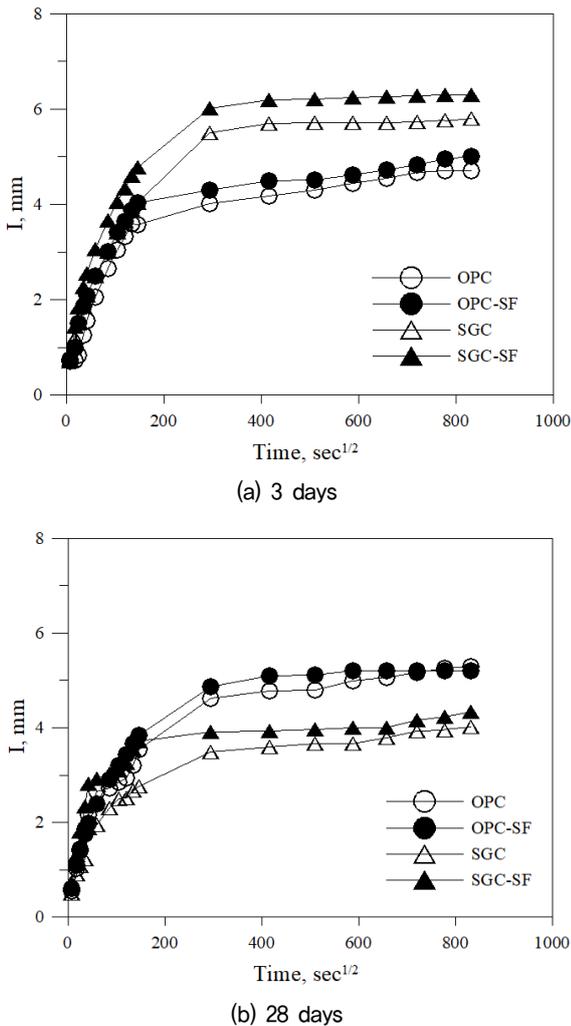


Fig. 11. Results of absorption measurement of RWM ((a) 3 days and (b) 28 days)

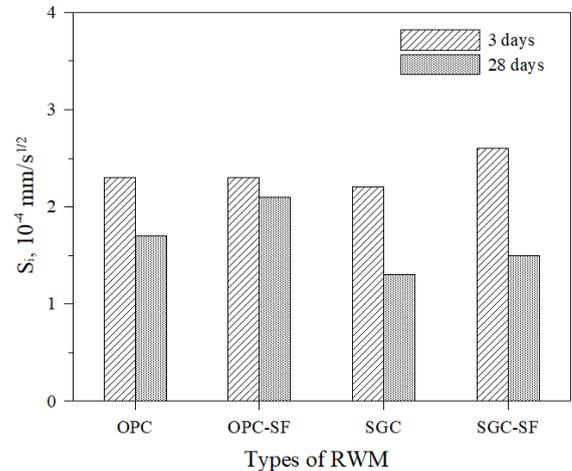


Fig. 12. Initial absorption coefficient (S_i) of RWM

4. 결 론

본 연구는 증점안정화제를 적용한 고유동 흙막이 벽체 재료(RWM)의 역학적 성능에 대한 고로슬래그미분말(SG) 및 강섬유(SF)의 영향을 실험적으로 고찰한 것으로서, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) RWM 배합 중 SGC의 재령 28일 압축강도가 OPC 배합보다 다소 크게 나타났으며, SF를 사용한 SGC-SF배합이 압축강도의 증진에 효과적으로 나타났다. 이러한 경향은 RWM 배합의 조깅 인장강도 및 휨강도 경향과도 유사한 것으로 관찰되었다.
- (2) RWM 배합의 표면전기저항값을 측정한 결과, OPC계 배합(OPC 및 OPC-SF)이 SGC계 배합에 비하여 전기저항값이 상대적으로 낮게 나타났으며, 강섬유의 우수한 전기전도성으로 인하여 SF 첨가 배합(OPC-SF 및 SGC-SF)이 SF 무첨가 배합에 비하여 표면전기저항값이 상대적으로 낮게 나타나는 것으로 조사되었다.
- (3) 4종류 RWM 배합에 대한 흡수율 실험 결과, 재령의 증가와 더불어 흡수율이 작게 나타났으며, SF의 첨가는 RWM의 표면 흡수특성에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 조사되었다. 또, 재령 28일에서 SGC계 배합의 초기흡수계수(S_i)가 OPC계 S_i 보다 상대적으로 작게 나타나는 우수한 경향을 나타내었다.
- (4) 따라서, 흙막이 벽체 재료로써 SG를 사용한 배합을 적용할 경우, 표면전기저항성 등 역학적 성능 향상뿐만 아니라 차수성능도 상대적으로 크게 개선될 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 한국건설기술연구원 주요사업 “인공지능을 활용한 도심도 지하 대공간의 스마트 복합 솔루션 개발” 연구 과제에서 연구비를 지원받아 수행된 결과입니다. 이에 감사드립니다.

References

1. Attari, A., McNally, C. and Richardson, M. G. (2016), “A combined SEM - Calorimetric approach for assessing hydration and porosity development in GGBFS concrete”, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 68, pp. 46~56.
2. Feo, L., Ascione, F., Penna, R., Lau, D. and Lamberti, M. (2020), “An experimental investigation on freezing and thawing durability of high performance fiber reinforced concrete (HPFRC)”, *Composites and Structures*, Vol. 234, 111673.
3. Gao, D., Meng, Y., Yang, J., Tang, J. and Lv, M. (2019),

- “Effect of ground granulated blast furnace slag on the properties of calcium sulfoaluminate cement”, *Construction and Building Materials*, Vol. 227, 116665.
4. Gastaldini, A. L. G., Isaia, G. C., Hoppe, T. F., Missau, F. and Saciloto, A. P. (2009), “Influence of the use of rice husk ash on the electrical resistivity of concrete: A technical and economic feasibility study”, *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 11, pp. 3411~3419.
5. Kim, S. D. and Moon, D. Y. (2013), “Effect of steel fiber distribution on steel fiber-reinforced concrete on surface electrical resistivity”, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 17, No. 1, pp. 106~113 (In Korean).
6. Lee, J. H., Lee, K. I., Yu, N. J. and Kim, Y. S. (2019), “Evaluation of engineering properties of retaining wall material using fiber reinforcement”, *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol. 11, No. 4, pp. 243~252 (In Korean).
7. Lee, S. H., Kim, W. K. and Kang, S. H. (2012), “Hydration mechanism of ground granulated blast furnace slag.” *Journal of Korean Concrete Institute*, Vol. 24, No. 6, pp. 31~34 (In Korean).
8. Lee, S. T. (2017), “Application of nylon fiber for performance improvement of recycled coarse aggregate concrete”, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 18, No. 12, pp. 785~792.
9. Li, L., Wang, H., Wu, J., Du, X., Zhang, X. and Yao, Y. (2022), “Experimental and numerical investigation on impact dynamic performance of steel fiber reinforced concrete beams at elevated temperatures”, *Journal of Building Engineering*, Vol. 47, 103841.
10. Oner, M. (2000), “Study of intergrinding and separate grinding of blast furnace slag cement”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 3, pp. 473~480.
11. Ramezani-pour, A. A., Pilvar, A., Mahdikhani, M. and Moodi, F. (2011), “Practical evaluation of relationship between concrete resistivity, water penetration, rapid chloride penetration and compressive strength”, *Construction and Building Materials*, Vol. 25, No. 5, pp. 2472~2479.
12. Ran, J., Li, T., Chen, D., Shang, L., Li, W. and Zhu, Q. (2021), “Mechanical properties of concrete reinforced with corrugated steel fiber under uniaxial compression and tension”, *Structures*, Vol. 34, pp. 1890~1902.
13. Song, P. S. and Hwang, S. (2004), “Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete”, *Construction and Building Materials*, Vol. 18, No. 9, pp. 669~673.
14. Xu, B.W. and Shi, H. S. (2009), “Correlations among mechanical properties of steel fiber reinforced concrete”, *Construction and Building Materials*, Vol. 23, No. 12, pp. 3468~3474.
15. Zain, M. F. M., Safiuddin, Md. and Mahmud, H. (2000), “Development of high performance concrete using silica fume at relatively high water-binder ratios”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 1501~1505.
16. Zaki, R. A., AbdelAleem, B. H., Hassan, A. A. A. and Colbourne, B. (2021), “Impact resistance of steel fiber reinforced concrete in cold temperatures”, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 122, 104116.