

고유동 흙막이 벽체 재료의 역학적 성능 및 내구성에 대한 강섬유 혼입률의 영향

Effect of Steel Fiber Addition on the Mechanical Properties and Durability of High-Flowable Retaining Wall Material

김 동 규¹⁾ · 이 승 태[†]

Donggyu Kim · Seungtae Lee

Received: May 7th, 2023; Revised: May 12th, 2023; Accepted: May 30th, 2023

ABSTRACT : This paper is aimed to evaluate the mechanical properties and durability of high-flowable retaining wall material (RWM) with different levels of steel fiber (SF) content. To produce the specimens of RWM, some chemical agents such as superplasticizer (SP), air-entrained agent (AEA) and viscosity modifying agent (VMA) were added in the fresh RWM. The compressive and split tensile strength measurements were performed on the hardened RWM specimens at the predetermined periods. Additionally, surface electric resistivity and absorption tests according to ASTM standards were carried out to examine mechanical properties of RWM mixes. The durable performances such as chloride ions penetrability and freezing-thawing resistance of RWM mixes were experimentally investigated. As results, it was found that the performance of RWM mix with SF were much better than that without SF, especially at the 2% addition of SF. Thus, it is noted that the proper addition of SF in the RWM mix may have a beneficial effect to improve mechanical properties and durability of RWM mixes.

Keywords : Retaining wall material, Steel fiber, Mechanical properties, Durability, Viscosity modifying agent

요 지 : 본 연구는 강섬유(SF) 혼입률에 따른 고유동 흙막이 벽체 재료(RWM)의 역학적 성능 및 내구성을 평가하기 위한 것으로서, 흙막이 벽체 재료의 재료분리저항성, 유동성, 연행공기량을 확보하기 위하여 적정량의 고성능감수제(SP), 공기연행제(AEA) 및 증점안정화제(VMA)를 사용하였다. 흙막이 벽체 재료 경화체의 압축 및 쪼갬 인장강도를 소정의 재령에서 측정하였으며, 흙막이 벽체 재료의 역학적 성능은 표면전기저항성 및 흡수율 실험을 통하여 고찰하였다. 또, 염소이온 침투저항성 및 동결융해 저항성 실험을 통하여 흙막이 벽체 재료의 내구성능을 고찰하였다. 실험결과에 의하면, 강섬유를 적용한 배합이 강섬유 무혼입 배합에 비하여 우수한 성능을 나타내었으며, 2% 적용 배합이 경제성 및 성능 관점에서 상대적으로 효과적인 것으로 관찰되었다. 따라서, 적절한 SF의 적용은 흙막이 벽체 재료의 성능 향상에 기여할 것으로 판단된다.

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

1. 서 론

최근, 전세계적으로 도심지 빌딩 구조물의 초고층화 및 지하공간 활용도가 증가함에 따라 도심도 지반굴착이 빈번하게 시공되고 있다. 국내에서도 도심도 지반굴착에 따른 안정성 확보를 위하여 주열식 말뚝 벽체의 시공이 다수 수행되고 있으나, 케이싱 시공의 경우, 휨응력이 과도하게 발생하여 불안정한 케이싱 인발에 따른 벽체 손상, 가이드 월 미설치 시에 따른 지하수의 누수 및 토사 유출과 같은 문제점이 다수 발생하는 것으로 보고되고 있다. 뿐만 아니라, 주열식 말뚝 벽체 시공은 도심도 굴착 작업에 적용할 경우, 말뚝 상호간의 연결성이 부족하게 되어 차수기능이 떨어지

게 되고 케이싱 용접에 의하여 발생하는 결합부의 결함도 발생하는 문제점이 발생할 가능성이 존재한다. 또, 지하연속벽과 같이 철근 배근 간격이 조밀한 경우 타설되는 콘크리트의 성형성이 저하되어 구조물의 성능이 떨어지는 현상이 발생하기도 하며, 고강도 발현을 위한 결합재 사용량의 증가로 인하여 콘크리트 유동성이 저하되어 케이싱 제거시 균열, 탈락 등 벽체 결함 등이 발생하기도 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 현장적용

1) Underground Space Safety Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

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

기법에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다(Xu & Shi, 2009).

특히, 콘크리트의 인성 개선을 목적으로 사용되는 강섬유(steel fiber)는 콘크리트 매트릭스에 적절하게 분산되면 팽창 및 미세균열의 발생을 억제시킴으로써 인장, 휨 및 충격 하중에 대한 저항성을 향상시킨다고 보고되고 있다(Ran et al., 2021; Song & Hwang, 2004). 또, Li et al.(2022)의 연구 결과에 의하면, 강섬유는 가교효과(bridging effect)에 의하여 콘크리트의 조직내부에 발생하는 균열을 제어할 수 있으며, 이러한 균열 저감작용으로 인하여 콘크리트의 내구성능을 개선시키는 것으로 보고되고 있다. Feo et al.(2020)는 강섬유 혼입에 따른 섬유보강 콘크리트의 부착성능 메커니즘을 이론 및 실험적으로 규명하고자 하였으며, Zaki et al. (2021)은 강섬유 혼입에 따라 조직구조의 부착성능이 향상되어 내구성이 증가한다고 주장하였다.

본 연구는 대심도 벽체 조성을 위한 흙막이 벽체용 고성능 콘크리트 재료 개발의 일환으로 수행되었다. 배합 시 재료분리 저항성 개선을 위하여 증점안정제를 적용하였으며, 유동성 및 성형성 향상을 위하여 고성능감수제를 혼입하여 흙막이 벽체 재료 개발을 위한 고유동 콘크리트의 최적 배합설계를 수행하였다. 또, 강도 및 내구성능 향상을 위하여 강섬유를 보강한 흙막이 벽체 재료를 제조하였다. 본 연구에서는 강도특성, 표면전기저항성 및 투수특성 등 역학적 성능 뿐만 아니라, 염소이온 침투저항성 및 동결융해 저항성과 같은 내구성 실험을 통하여 고유동 흙막이 벽체 재료의 성능향상을 위한 최적 강섬유 혼입률을 실험적으로 규명하고자 하였다. 본 연구의 내용은 향후 대심도 지반굴착용 고품질 흙막이 벽체 재료의 실용화를 위한 기초자료로써 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

흙막이 벽체 재료(이하 RWM: retaining wall material)용 고유동 콘크리트를 제작하기 위하여 본 연구에서 사용한 결합재는

Table 3. Mix proportion of RWM (unit : kg/m³)

Mixes	Air (%)	Slump (mm)	w/c (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)				SF*	VMA**
					W	C	S	G		
SF-0	4.5±1.5	190±10	47	48	165	350	848	954	0	0.5
SF-1									1.0	0.5
SF-2									2.0	0.5
SF-3									3.0	0.5

* % vol

** % wt. by binder

ASTM C 150의 기준을 만족하는 보통포틀랜드시멘트(이하 OPC: ordinary portland cement)를 사용하였다. 또, 잔골재 및 굵은 골재는 부순모래(S) 및 부순돌(G)을 사용하였으며, 굵은 골재는 최대치수 25mm로 정하였다. Table 1은 잔골재 및 굵은 골재의 물리적 성질을 나타낸 것이다. 또, RWM의 유동성 및 공기량 확보를 위하여 PC계 고성능감수제(SP; superplasticizer) 및 공기연행제(AEA: air-entrained agent)를 적정량 사용하였으며, RWM의 재료분리 저항성 및 충전성을 개선시키기 위하여 증점안정화제(VMA: viscosity modifying agent)를 모든 배합에 적용하였다. 또, 본 연구에서는 국내 K사에서 생산된 단후크(single hooked) 타입의 강섬유(이하 SF: steel fiber, Fig. 1)를 사용하였으며, Table 2에 물리적 성질을 나타내었다.

Table 1. 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 2. 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 결합재로써 100% OPC를 사용한 배합에 대하여 SF를 부피비로써 0, 1, 2 및 3% 혼

입하였으며, SF-0, SF-1, SF-2 및 SF-3으로 각각 명명하였다. 본 연구에 사용된 RWM 배합표는 Table 3과 같다. 또한, 굵지않은 RWM 배합의 슬럼프 및 공기량은 각각 190±10mm 및 4.5±1.5%로 결정하였으며, 증점안정화제는 배합에 관계 없이 OPC 사용량에 대하여 약 0.5%를 사용하였다. 또, 물-시멘트비(w/c)는 47%, 잔골재율(S/a)은 48%로 고정하여 RWM의 배합설계를 실시하였다.

2.3 실험방법

2.3.1 강도특성

RWM의 압축강도는 Ø100×200mm의 압축강도용 공시체를 소정의 기간동안 수중양생 하였으며, 재령 3, 7 및 28일에서 KS F 2405에 준하여 압축강도를 측정하였다. 또, 인장강도 실험은 KS F 2423에 준하여 실시하였다.

2.3.2 표면전기저항성

정확한 RWM의 표면 차수성능을 평가하기 위하여 Ø100×200mm의 공시체를 대상으로 Four-point Wenner Probe 방법에 준하여 표면전기저항성 실험을 수행하였다(Fig. 2). 표면전기저항은 Eq. (1)과 같이 산정하였으며, ASTM C 1760에 근거하여 Table 4와 같이 표면전기저항성의 성능등급을 분류하였다.

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

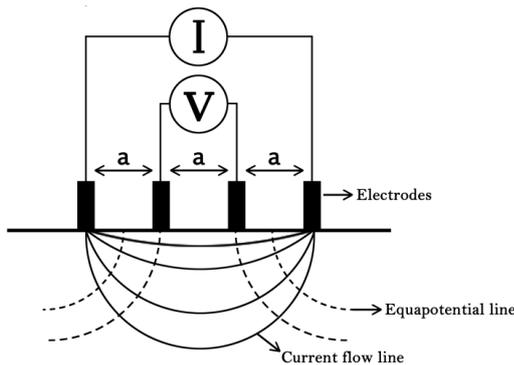


Fig. 2. Schematic representation of surface electric resistivity by Wenner method

Table 4. Performance class of surface electrical resistance

Performance class	Wenner (KΩ-cm)
Very low	0~5
Low	5~7.5
Moderate	7.5~15
High	Over 15

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

2.3.3 흡수율

흡수율 시험은 ASTM C 1585에 준하여 시험을 실시하였고, 시간이 증가함에 따라 물 흡수로부터 공시체의 질량증가를 측정하였으며 시편의 재령 28일에 대하여 측정하였다(Fig. 3).

2.3.4 염소이온 침투저항성

RWM의 염소이온 침투저항성을 평가하기 위한 통과전하량 측정은 ASTM C 1202에 준하여 Ø100×50mm의 시험체를 대상으로 하여 실험을 실시하였다. 시험체 양단에 60V의 직류전압을 6시간 동안 통전시키면서 시험체에 흐르는 전류를 데이터 로거를 이용하여 매 30분마다 측정하였으며, 측정된 전류로부터 시간에 대한 전류의 적분 값을 취하여 총 통과전하량을 Eq. (2)와 같이 산정하였다.

$$Q = 900 \times (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + I_{360}) \quad (2)$$

여기서, Q = 총통과전하량(Coulomb), I_x = x분에서의 전류값(A)이다.

Eq. (2)에 의해 계산된 총통과전하량(Q)은 Table 5에 제시된 기준과 비교하여 콘크리트의 염소이온 침투저항성을 판단할 수 있다.

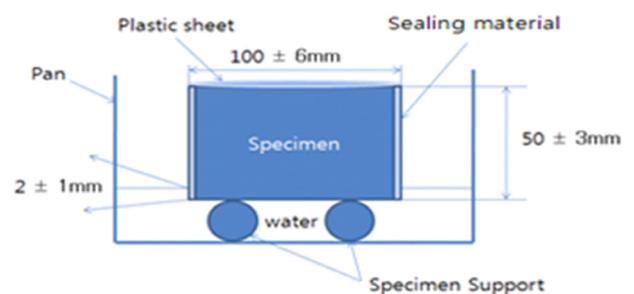


Fig. 3. Absorption measurement according to ASTM C 1585

Table 5. Chloride ion penetrability based on total charge passed recommended in ASTM C 1202

Total charge passed (coulomb)	Chloride ion penetrability
> 4,000	High
2,000 ~ 4,000	Moderate
1,000 ~ 2,000	Low
100 ~ 1,000	Very low
< 100	Negligible

2.3.5 동결융해 저항성

RWM 배합의 동결융해 저항성 실험은 100×100×400mm의 재령 28일 각주형 공시체를 대상으로 ASTM C 666 (A) 법에 준하여 실험을 수행하였다. 또한, 동결융해 저항성을 평가하기 위한 파라미터인 상대동탄성계수(E_d)는 Eq. (3)과 같이 산정하였다.

$$E_d = \left(\frac{n_c}{n_0}\right)^2 \times 100(\%) \quad (3)$$

여기서, E_d : c 사이클 후 RWM의 상대동탄성계수(%)
 n_c : c 사이클 후 RWM의 공명진동수(Hz)
 n_0 : 동결융해 노출 전 RWM의 공명진동수(Hz)

3. 실험결과 및 분석

3.1 고유동 RWM의 혼화제 사용량

본 연구에 사용된 목표 슬럼프 및 목표 공기량은 RWM의 유동성 향상 및 연행공기량 확보를 위하여 각각 180-200mm 및 3-6%로 선정하였다. Fig. 4는 SF 혼입률을 달리한 4종류 RWM 배합의 슬럼프 측정광경을 나타낸 것이며, Fig. 5는 목표 슬럼프 값 및 공기량 확보를 위한 SP 및 AEA의 사용량을 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 목표 슬럼프 확보를 위한 SP 사용량은 SF 혼입률에 비례하여 증가하는 경향임을 알 수 있다. 또, 목표 공기량을 위한 AEA 사용량은 SF를 혼입한 배합이 기준 배합(SF-0)에 비하여 다소 많은 것으로 조사되었다.

3.2 압축 및 쪼갬 인장강도

경화한 RWM의 강도발현 특성을 각각 Fig. 6 및 7에 나타내었다. Fig. 6은 SF 혼입률을 달리한 RWM의 압축강도 특성을 재령별로 도시한 것으로서, RWM의 배합과 관계없이 재령의 증가와 더불어 압축강도가 증가하는 경향을 나타

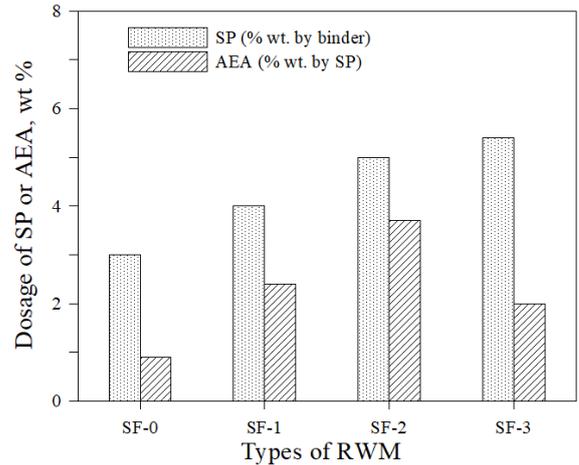


Fig. 5. Dosage of SP and AEA for targeted slump value and air content

내었다. SF를 혼입하지 않은 기준배합(control mix, SF-0)은 재령에 관계없이 SF 혼입 배합에 비하여 압축강도가 다소 작게 나타나는 경향을 나타내었으며, 특히, 초기재령(3일)에서 SF-0 배합의 압축강도는 약 12MPa로 나타나, SF를 1% 혼입한 SF-1 배합의 약 22MPa 대비 약 55% 정도의 압축강도 발현율을 나타내었다. 이는 SF 혼입 배합의 경우, 초기 수화 시 SF의 가교효과(bridging effect)로 인하여 시멘트 경화체 조직구조 중에 생성된 미세균열이 저감됨으로써, 초기 강도 발현이 두드러지게 나타났기 때문으로 판단된다(Wang et al., 2020). 한편, SF-2 및 SF-3 배합의 초기재령 압축강도는 약 28MPa 정도로써 서로 매우 유사하게 나타났다. 한편, 재령 28일에서 SF-0, SF-1, SF-2 및 SF-3 배합의 압축강도는 각각 약 38, 41, 45 및 45MPa로 관찰되었다.

Fig. 7은 SF 혼입률을 달리한 4종류 RWM의 쪼갬 인장강도 값을 재령별로 나타낸 것으로서, Fig. 6에 나타난 압축강도 발현 경향과 매우 유사하게 나타남을 알 수 있다. 다시 말해서, 재령에 관계없이 SF 혼입률이 증가함에 따라 쪼갬 인장강도는 증가하는 경향을 나타내었으며, SF-2 및 SF-3 배합의 인장강도 값은 압축강도와 마찬가지로 재령에 관계없이 매우 유사한 것으로 관찰되었다. 예를 들어 비교하면, 재령 28일에서 SF 혼입률이 0, 1, 2 및 3%인 배합의 쪼갬



Fig. 4. Slump test for fresh RWM

인장강도는 약 2.5, 3.0, 3.5 및 3.4MPa로 각각 측정되었다. 이상과 같이 RWM의 경제성 및 강도특성을 고려한 최적 SF 혼입률은 약 2%인 것으로 판단된다.

한편, SF 혼입 RWM의 압축강도 및 쪼갬 인장강도의 상관

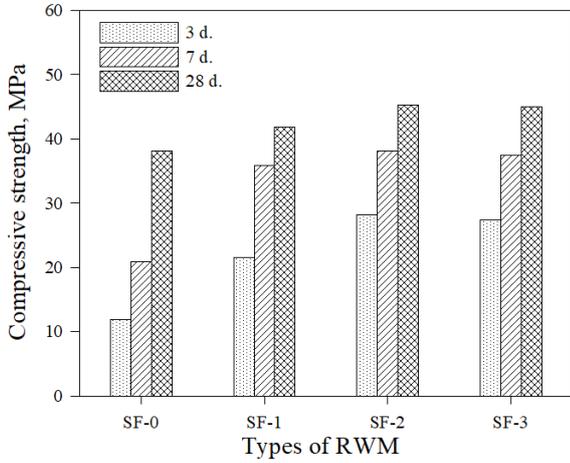


Fig. 6. Compressive strength of RWM

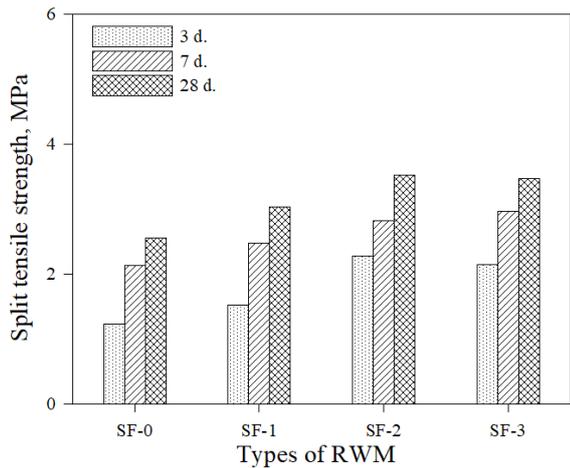


Fig. 7. Split tensile strength of RWM

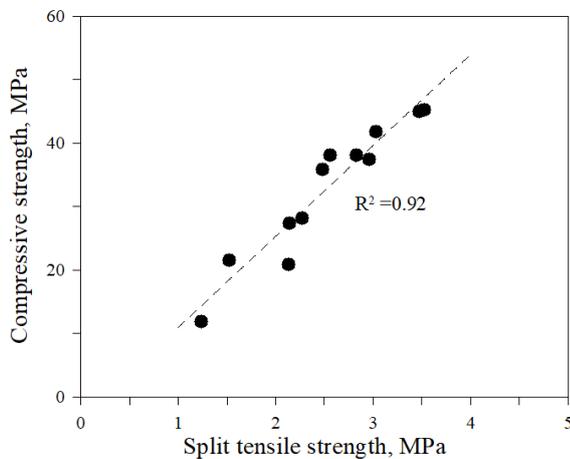


Fig. 8. Relationship between compressive and split tensile strength of RWM

관계를 나타낸 것이 Fig. 8이다. 압축 및 쪼갬 인장강도는 좋은 상관관계($R^2 = 0.92$)를 나타내었으며, 이러한 결과는 Lee & Park(2017)의 연구결과와도 유사한 것으로 판단된다.

3.3 표면전기저항

시멘트 경화체의 표면전기저항을 평가하기 위한 방법으로 4전극을 이용한 Wenner법이 일반적으로 사용되고 있으며, 표면전기저항값(ρ)은 외부 전극에 미소교류전류(I)를 발생시켜 내부 전극에 발생하는 전위차(V)를 측정하므로써 산정된다. 많은 연구자들에 의하여 Wenner법을 이용한 시멘트 경화체의 역학적 성능, 공극특성 및 내구성 평가와 관련한 연구가 보고되고 있다(Kim & Lee, 2021; Gastaldini et al., 2009).

Fig. 9는 SF 혼입률을 0~3%로 각각 달리한 RWM 배합의 표면전기저항값을 재령별로 도시한 것이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 재령 및 SF 혼입률이 증가함에 따라 표면전기저항값이 증가하는 경향을 나타내었다. 특히, 재령 28일에서 SF-0 배합은 ASTM C 1760에 근거한 내구성 평가기준의 ‘Very low’ 영역으로 나타난 반면, SF를 혼입한 RWM 배합(SF-1, SF-2 및 SF-3)은 동일 재령에서 ‘Low’ 영역으로 나타남으로써, SF 혼입 배합이 상대적으로 우수한 표면전기저항성을 나타내는 것으로 확인되었다.

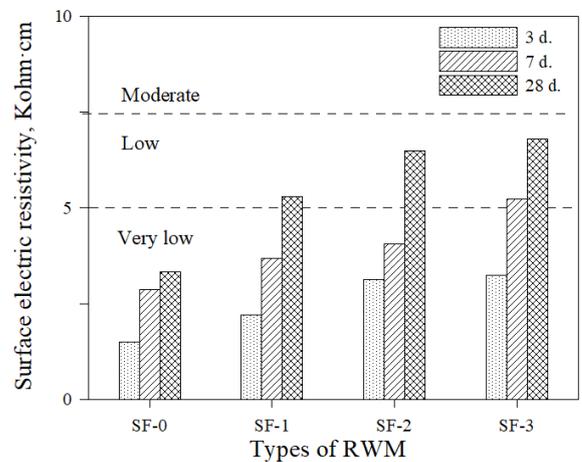


Fig. 9. Surface electric resistivity of RWM

3.4 흡수율

본 연구에서는 ASTM C 1585에 준하여 SF 혼입률이 상이한 4종류 RWM 배합의 흡수율 실험을 수행하였으며, 재령 28일 실험결과를 Fig. 10에 나타내었다. 흡수율 측정 결과, SF를 혼입하지 않은 SF-0 배합의 흡수율이 가장 크게 나타났으며, SF-2 및 SF-3 배합의 흡수율이 상대적으로 우

수한 것으로 관찰되었다. 이러한 경향은 앞서 제시된 RWM의 강도특성값과도 유사한 것으로 판단되며, 향후 흙막이 벽체 재료용 보강재로써 적절한 혼입률을 가진 SF 사용 배합을 적용할 경우, 강도증진 뿐만 아니라 차수성능 향상에도 어느 정도 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

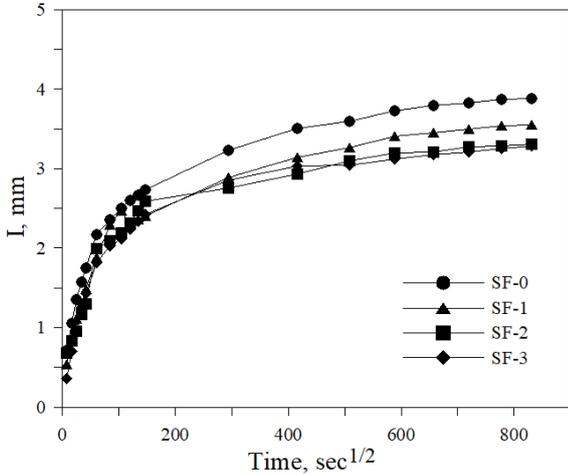


Fig. 10. Results of absorption measurement of RWM

3.5 염소이온 침투저항성

RWM 배합의 재령별 총통과전하량(total charge passed)을 측정하여 염소이온 침투저항성에 대한 SF 혼입률의 영향을 평가한 것이 Fig. 11이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 재령에 관계없이 SF 혼입률이 증가함에 따라 총통과전하량은 감소하는 경향을 나타내었다. 특히, SF-0 배합의 재령 28일 총통과전하량이 약 2,250 coulomb(moderate 영역)으로 나타난 반면, SF-2 및 SF-3 배합의 총통과전하량은 2,000 coulomb 이하(low 영역)의 우수한 염소이온 침투저항성을 나타내었다. 이러한 현상이 나타난 이유는 RWM에 SF를 혼입함에 따라 염소이온이 SF에 물리적으로 흡착됨으로써 RWM 중

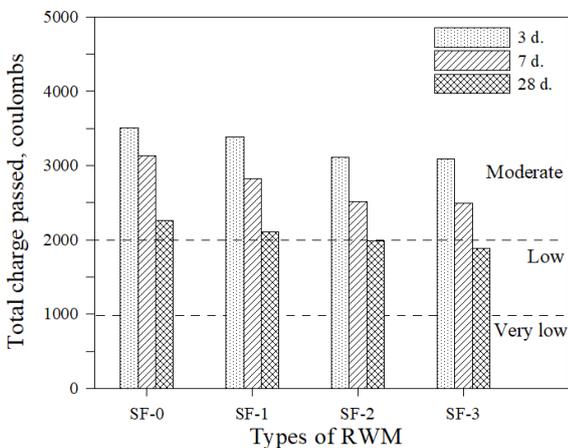


Fig. 11. Total charge passed through RWM

으로 염소이온의 침투가 어려워진 탓으로 판단된다(Frazao et al., 2015). 따라서, 본 연구를 통하여 고찰한 결과, 적절한 혼입률(2-3%)을 가진 RWM 배합은 내염성능 확보가 어느 정도 가능할 것으로 기대된다.

3.6 동결융해 저항성

많은 연구자들에 의하여 시멘트 경화체의 동결융해 저항성에 대한 SF의 정(+) 또는 부(-) 효과에 대한 연구가 수행되었으며, 특히 Huang(2001)는 SF를 적용한 콘크리트의 공극 및 투수성 감소로 인하여 내동해성이 향상된다는 연구결과를 보고하기도 하였다. 반면, Cao et al.(2018)은 SF 혼입률이 증가함에 따라 자기충전 콘크리트의 내동해성이 떨어진다는 실험결과를 보고하기도 하였다. 또, Miao et al.(2002)은 동결수가 상이한 환경에서 시멘트 구조체의 동결융해 저항성에 대한 SF의 효능성에 대하여 실험적으로 규명하기도 하였다.

ASTM C 666에 준하여 SF 혼입률이 상이한 4종류 RWM 배합의 동결융해 저항성을 평가하였으며, 동결융해 작용 후 120, 240 및 300 사이클에서 측정된 상대동탄성계수(E_d)를 Eq. (3)과 같이 계산하여 Fig. 12에 나타내었다. Fig. 12의 결과에서 알 수 있듯이, 동결융해 120 사이클에서는 SF 혼입률에 관계없이 4종류 RWM 배합의 E_d 는 약 90% 이상으로 나타났다. 한편, 240 사이클에서는 SF-0 배합의 E_d 가 약 78%를 나타낸 반면, SF-1, SF-2 및 SF-3 배합의 E_d 는 각각 약 82, 88 및 89%를 나타냄으로써, SF 혼입 배합이 상대적으로 우수한 동결융해 저항성을 나타내는 것으로 조사되었다. 한편, 동결융해 작용 300사이클에서는 SF-2 및 SF-3 배합의 E_d 가 약 84~85% 정도로 유사하게 나타남으로써, 경제성 및 내구성 측면에서 SF 혼입률 2% 배합이 효과적인 것으로 판단할 수 있다.

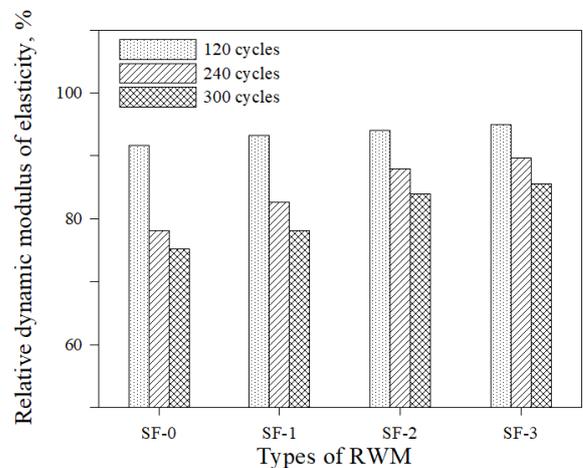


Fig. 12. Freeze-thaw resistance of RWM

한편, 동결융해 작용 300 사이클 후 공시체의 열화정도를 시각적으로 판단하기 위하여 외관 사진을 비교하여 나타낸 것이 Fig. 13이다. 이 그림에서 알 수 있듯이, SF-0 배합은 동결융해 작용으로 인하여 공시체의 모서리에서 다량의 균열, 박리, 탈락 등 표면 열화가 극심하게 나타났으며, 공시체 표면에서 골재노출로 인한 단면손상도 많은 것으로 관찰되었다. 이러한 현상은 SF-1 공시체의 외관조사에서도 유사하게 나타났다. 한편, SF-2 및 SF-3 공시체는 SF-0 배합에 비하여 상대적으로 건전한 외관상태를 나타내었으며, 공시체 표면에서 소량의 골재노출 및 모서리 탈락 현상이 조사되었으나, 심각한 단면 손상 현상은 관찰되지 않았다. 다시 말해서, RWM 배합의 내동해성에 대한 SF의 효과가 시각적으로 확인됨을 알 수 있으며, 이러한 결과는 Park et al.(2022)의 연구내용과도 어느 정도 유사한 것으로 판단된다.

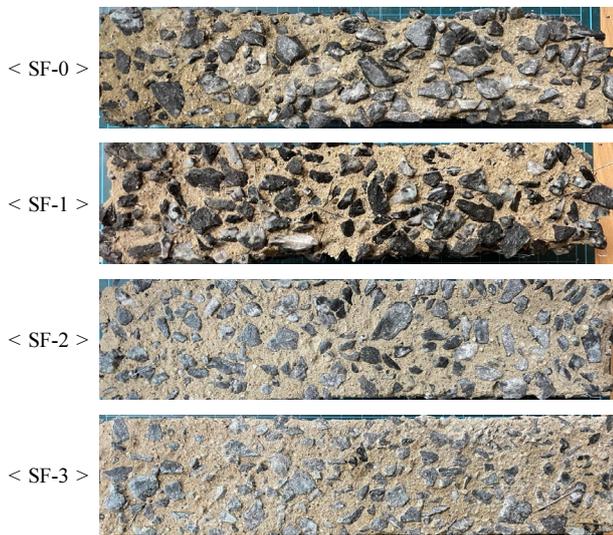


Fig. 13. Visual appearance of RWM after freeze-thaw action of 300 cycles

4. 결 론

본 연구는 고유동 흙막이 벽체 재료(RWM)의 역학적 성능 및 내구성능에 대한 강섬유(SF) 혼입률의 영향을 실험적으로 고찰한 것으로서, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) SF 혼입 배합은 SF의 미세균열 저감효과로 인하여 재령에 관계없이 SF-0 배합에 비하여 압축강도가 크게 나타나는 경향을 나타내었으며, SF-2 및 SF-3 배합은 압축강도가 서로 유사한 상대적으로 높은 압축강도가 발현되었다. 이러한 경향은 RWM 배합의 쪼갬 인장강도 결과에서도 유사하게 관찰되었다.

- (2) RWM 배합의 표면전기저항값을 측정한 결과, SF 혼입률이 증가함에 따라 표면전기저항값이 증가하는 경향을 나타내었다. 또, 흡수율 실험결과에 따르면, SF-0 배합의 흡수율이 가장 크게 나타났으며, SF-2 및 SF-3 배합의 흡수율이 상대적으로 우수한 좋은 결과를 보였다.
- (3) 4종류 RWM 배합의 염소이온 침투저항성을 고찰한 결과, 염소이온이 SF에 물리적으로 흡착함으로써 RWM 중으로 염소이온의 침투가 어려워진 탓으로 인하여 SF-2 및 SF-3 배합의 총통과전하량은 2,000 coulomb 이하(low 영역)의 상대적으로 우수한 결과를 나타내었다.
- (4) SF 혼입률을 달리한 4종류 RWM 배합의 동결융해 저항성을 평가한 결과, 동결융해 작용 300 사이클에서 SF-2 및 SF-3 배합의 상대동탄성계수가 약 84~85% 정도로 나타남으로써, 우수한 내동해성을 확인할 수 있다. 또, 이러한 경향은 동결융해 작용을 받은 공시체의 외관조사에서도 SF의 내구성 향상 효과가 시각적으로 관찰되었다.
- (5) 따라서, 강섬유를 적용한 흙막이 벽체 재료의 경제성, 강도발현 특성, 차수성능, 내구성능 등을 고려해 볼 때, SF 혼입률 2% 적용 배합이 상대적으로 효과적인 것으로 판단된다.

감사의 글

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

References

1. Cao, Q., Gao, Q., Gao, R. and Jia, J. (2018), “Chloride penetration resistance and frost resistance of fiber reinforced expansive self-consolidating concrete”, *Construction and Building Materials*, Vol. 158, pp. 719~727.
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. Frazao, C., Camoes, A., Barros, J. and Goncalves, D. (2015), “Durability of steel fiber reinforced self-compacting concrete”, *Construction and Building Materials*, Vol. 80, pp. 155~166.
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. Huang, W. H. (2001), “Improving the properties of cement-fly ash grout using fiber and superplasticizer”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, No. 3, pp. 395~406.
 6. Kim, D. G. and Lee, S. T. (2021), “Mechanical properties of ternary blended cement concrete incorporating pulverized reject ash”, *International Journal of Highway Engineers*, Vol. 23, No. 6, pp. 43~51.
 7. Lee, S. T. and Park, K. P. (2017), “Mechanical properties and durability of concrete incorporating air-cooled slag”, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 18, No. 3, pp. 356~363. (In Korean)
 8. 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.
 9. Miao, C., Mu, R., Tian, Q. and Sun, W. (2002), “Effect of sulfate solution on the frost resistance of concrete with and without steel fiber reinforcement”, *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, pp. 31~34.
 10. Park, J. S., Ahan, K. H., You, Y. J. and Lee, J. S. (2022), “Evaluating the freeze-thaw damage of concrete with respect to water to cement ratio using surface rebound value”, *Journal of Recycled Construction Resources Institute*, Vol. 10, No. 2, pp. 143~151. (In Korean)
 11. 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.
 12. 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.
 13. Wang, J., Dai, Q., Si, R., Ma, Y. and Guo, S. (2020), “Fresh and mechanical performance and freeze-thaw durability of steel fiber-reinforced rubber self-compacting concrete (SRSCC)”, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 277, 123180.
 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. 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.