

양생조건에 따른 섬유보강 시멘트계 복합재료(FRCC)의 균열 자기치유 특성

Self-Healing Properties of Fiber-Reinforced Cement Composite (FRCC) Depending on Various Curing Conditions

최 희 섭¹

최 형 길^{2*}

Choi, Heesup¹

Choi, Hyeonggil^{2*}

Department of Civil Engineering, Kitami Institute of Technology, Hokkaido, 090-8507, Japan ¹

Graduate School of Engineering, Muroran Institute of Technology, Hokkaido, 050-8585, Japan ²

Abstract

In this study, the self-healing effect of a fiber-reinforced cement composite (FRCC) was examined using a drying-wetting test and an outdoor exposure test. The influence of various curing conditions on the self-healing effect of the FRCC was also investigated. The effect of self-healing was evaluated using a permeability coefficient and by investigating the cracks using an optical microscope. The results confirmed that the FRCC was capable of self-healing under a long wetting time and a low drying temperature. In addition, watertight performance by self-healing was shown to have a significant influence on wetting time. Meanwhile, this self-healing effect was enhanced by hydration as a result of rainfall when the FRCC was put under actual environmental conditions. Moreover, it was determined that cracking self-healing can be improved by using the appropriate admixture materials.

Keywords : cracking, self-healing, FRCC, outdoor exposure test, permeability test

1. 서 론

콘크리트 구조물에 발생하는 균열은 콘크리트 내부의 이온 확산성, 투수성을 크게 증가시키며, 또한 균열로부터 외부의 물이나 산소, 염화물이온 및 이산화탄소 등의 열화인자가 반복적으로 침투하게 되어 콘크리트의 열화가 가속화되게 된다. 즉, Figure 1과 같이 콘크리트의 균열은 구조물의 안전성, 사용성, 내구성이나 미관에 영향을 미치기 때문에 콘크리트에 있어서 유해한 미세균열을 방지하는 것은 콘크리트 구조물의 장수명화나 고성능화의 관점에서 중요하다.

또한, 일본의 경우, 허용 균열 폭 이하의 미세균열은 구조적 내구성 측면에서 큰 문제가 되지 않는 것으로 평가[1]되고 있지만, 이러한 미세균열은 콘크리트 구조물에 있어서 열화의 시발점이 되기 때문에 보다 근본적인 단계에서의 미세균열 발생에 대한 예방이 중요하다고 생각할 수 있다.

한편, 수분 공급을 받는 환경 하에서, 콘크리트의 균열의 일부 중, 특히 균열 폭이 작을 경우, 시멘트 입자의 재수화 및 CaCO₃의 석출로 인해 균열부의 일부가 충전되는 자기치유의 현상이 확인되고 있다[2]. 자기치유 생성물은 균열면에서 새롭게 생성되는 탄산칼슘과 더불어 C-S-H수화물과 에트링가이트 및 수산화칼슘 등의 수화물과 밀접한 관련이 있다[3, 4, 5]. 콘크리트의 자기치유 메커니즘은 콘크리트 중의 Ca²⁺가 물에 녹아있는 CO₃²⁻과 반응함에 의해 물에 잘 용해되지 않는 탄산 화합물인 CaCO₃가 생성되어, 이러한 현상으로 인해 균열부분을 수복하게 된다. 이하의 식(1)~(3)에 칼사이트의 결정 반응식을 나타낸다.

Received : February 29, 2016

Revision received : April 28, 2016

Accepted : June 1, 2016

* Corresponding author : Choi, Hyeonggil

[Tel: 81-143-46-5214, E-mail:chg810@mmm.muroran-it.ac.jp]

©2016 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

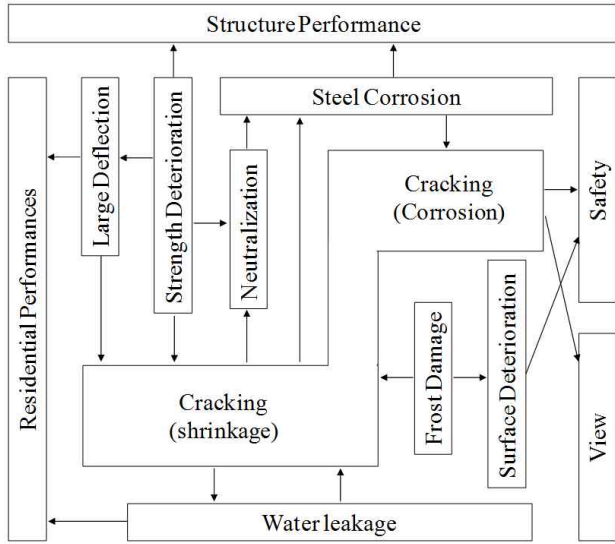
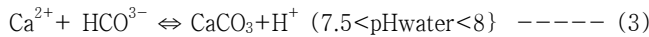
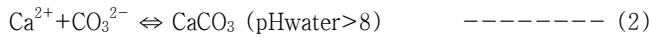


Figure 1. Correlation of degradation and cracking



이러한 자기치유 현상에 의해, 콘크리트의 균열을 감소시켜 염소이온 (Cl⁻)의 침투를 지연할 수 있으며, 균열로 인하여 크게 증가된 투수성을 일부 회복하여 투수계수를 감소시킬 수 있다[6, 7]. 또한, 동결융해로 열화가 발생한 콘크리트의 동탄성계수를 거의 회복시키며, 열화된 콘크리트의 강도 역시 일정부분 회복 시킬 수 있다[8]. 따라서, 콘크리트에 발생된 균열이 자기치유에 의해 복원된다면, 균열 발생 초기 단계에서 균열의 진전에 대해 효과적으로 대처할 수 있어 콘크리트 구조물의 안전성능 저하의 억제로 이어질 수 있다.

기존의 연구[9, 10, 11]에 있어서 자기치유 효과는 일반적인 콘크리트의 경우 균열의 폭이 100 μ m 정도가 한계이지만, 취성파괴와 균열 폭의 진전을 억제할 수 있는 섬유보강 시멘트계 복합재료 (Fiber Reinforced Cementitious Composites, FRCC)의 경우, 자기치유로 인해 100 μ m 정도의 균열이 수복되는 것으로 보고되고 있다[12, 13, 14, 15]. 또한, 폴리비닐 알코올(PVA), 폴리 에틸렌(PE), 폴리 프로필렌(PP) 등과 같은 합성섬유를 혼입한 콘크리트를 이용해 균열을 효과적으로 분산시키고, 이로 인해 발생균열의 폭을 대폭 감소시켜, 더욱 효율적으로 자기치유 기능을 촉진하는 방법이 제안되었다[16, 17]. 특히, 극성기인 OH기를 가진

폴리비닐 알코올계 섬유(PVA)를 이용하여 효과적인 균열의 분산효과와 함께, CO₂가스 및 염소이온의 침투가 우려되는, 100 μ m 이상의 균열에 대해서도 더욱 양호한 자기치유가 가능한 것을 확인할 수 있다[11]. 한편, 플라이애쉬 등의 포졸란 재료를 혼입하여 미세균열의 발생 시에 균열 표면에 잔존하는 플라이애쉬 입자의 포졸란 반응을 유발시켜 자기치유 효과를 증대시킬 수 있다는 연구가 보고되고 있다[18]. 그러나, 상기의 자기치유에 대한 결과는 모두 수분이 공급되는 환경 하에서의 평가로서, 상시 수분이 공급되지 않는 실환경을 고려한 다양한 양생조건 하에서의 균열의 자기치유 성능평가에 대한 연구는 부족한 것이 현실이다.

따라서, 본 연구에서는 콘크리트의 내구성능 저하에 심각한 영향을 미치는 100 μ m 이상의 미세 균열에 대해, 다양한 양생조건하에서의 합성섬유 및 포졸란 재료를 혼입한 시멘트계 재료에 대해 복합적 자기치유 성능을 파악하는 것을 목적으로 한다. 즉, 합성섬유와 포졸란 재료의 혼입 유무에 따른 시멘트 복합재료를 사용하여 시험체를 제작한 후, 인장재하에 의해 미세 균열을 시험체에 도입했다. 이후, 이를 대상으로 해, 견습 반복 시험 및 옥의 폭로 시험을 실시하여, 각 시험체에 대해 투수계수, 마이크로 스코프 및 라만분석을 통해 시간경과에 따른 수밀성, 균열성상의 변화 및 자기치유 생성물질의 파악 등에 대한 평가를 실시했다. 이를 토대로 다양한 양생조건 하에서 포졸란 재료를 혼입한 FRCC의 자기치유 효과를 검토하여, 최적의 자기치유 조건을 제시하고자 하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 사용재료 및 배합

Table 1 및 Table 2에 사용재료 및 배합을 나타낸다. 시멘트는 조강포틀랜드 시멘트, 골재는 섬유와의 가교효과를 유효하게 하기 위해 미립골재인 5호 규사를 사용했다. 결합재로 포졸란 반응에 의한 반응생성물이 마이크로 크랙의 충전효과[19]를 기대하기 위해 실리카흙을 혼입한 시리즈 I 과 플라이애쉬와 보강섬유로서 PVA 섬유와 별도로 PVA' 섬유를 타설시 배합수에 혼입하여 이용한 시리즈 II 로 했다.

Table 1. Materials used

	Type
Cement	High early-strength portland cement, Density: 3.14g/cm ³ , Specific surface area: 4450cm ² /g
Fine aggregate	Silica sand #5, Density: 2.61g/cm ³ , Average Grain Diameter: 180μm
Silica fume	Density: 2.20g/cm ³ , Average diameter: 0.15μm
Fly ash	Fly ash #2, Density: 2.33g/cm ³
PVA	Diameter: 34μm, Length: 6mm, Density: 1.30g/cm ³ , Saponification value : 99%
Fiber	
PVA	Diameter: 13μm, Length: 6mm, Density: 1.30g/cm ³ , Saponification value : 96%
Admixture	Superplasticizer (Polycarboxylate Ether)

※ PVA: Polyvinyl alcohol, SF: Silica fume, FA: Fly ash

Table 2. Mix design

Level	B			W/B (Wt.%)	S/B (Wt.%)	SP/B (Wt.%)	PVA (Vol.%)	PVA' (Wt.%)
	C	SF	FA					
Series I	85	15	0	45	45	0.9	2	0
Series II	70	0	30					1.5

※ B: Binder, C: Cement, SF: Silica fume, FA: Fly ash, S: Sand

Table 3. Experiment levels

Level	Conditions
①	Wetting (20°C)
②	24h Wetting after 24h Drying (20°C)
③	24h Wetting after 24h Drying (40°C)
④	6h Wetting after 42h Drying (20°C)
⑤	6h Wetting after 42h Drying (40°C)

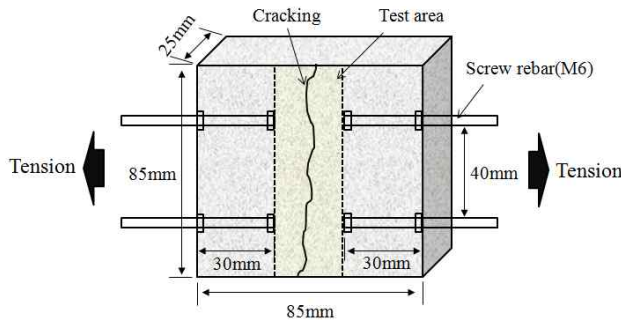


Figure 2. Overview of specimen

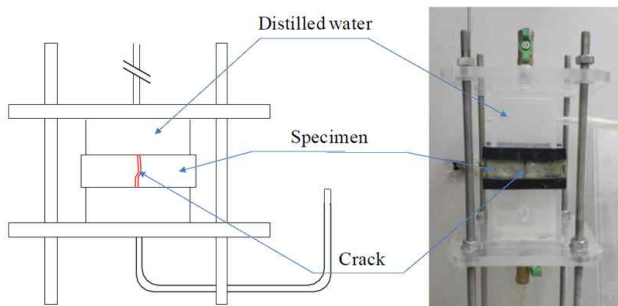


Figure 3. Water permeability tests

2.2 실험계획 및 방법

다양한 열화환경 하에서의 자기치유 성능을 평가하기 위해 건습 반복 시험을 실시했다. Table 3에 실험 계획을 나타낸다. 습윤시간 및 건조온도의 변화에 따른 다양한 양생조건하에서 실험을 실시하기 위해, 수준 1의 상시 침지 조건과 함께 수준 2, 3 및 수준 4, 5의 경우, 기존연구[20]를 바탕으로 실제 환경을 고려하여 건조조건을 20°C 및 40°C로 설정하여 습윤시의 조건은 20°C 의 수중 침지로 했다. 모든 수준에 있어 습윤 및 건조에 따른 건습 반복 시험은 48시간을 1사이클로 실험을 실시했다.

실험에 이용한 시험체의 형상을 Figure 2에 나타낸다. 시험체 치수를 85×85×25mm하여 시험체 내부에 4개의 나사철근(M6)을 매설했다. 타설 후 7일간 20°C 수중양생을 실시한 후, 만능 시험기를 이용해 인장 재하를 실시해 시험체에 균열을 도입했다. 기존연구[20]로부터 합성섬유를 이용한 FRCC의 경우 300μm 정도까지 자기치유의 효과가 있다고 보고되고 있어, 여기에서도 재하속도의 조정과 함께 크랙스케일에 의한 균열 폭을 측정하면서 300μm 정도의 균열을 도입했다. 그 후 시험체의 양측을 금속 플레이트로 고정하여 균열 폭을 유지했다.

한편, 자기치유에 따른 수밀성의 회복을 평가하기 위해서 투수계수 실험을 실시했다. 투수계수 실험은 Figure 3과 같이 소형 투수계수 시험기를 이용해 상부 피펫에서 계측되는 단위 수량의 손실시간부터 투수계수를 산출했다.

또한, 자기치유의 진전을 시각적으로 확인하기 위해서 마이크로스코프를 이용해 시험체의 표면을 관찰했다. 투수계수 및 마이크로스코프에 의한 관찰은 균열도입 직후에 실시한 후 2, 7 및 14 사이클 종료시에 실시했다. 또한, 라만분석(Raman spectroscopy)을 실시하여, 시리즈 II의 수준 1을 대상으로 해, 균열 표층부의 자기 치유에 의한 반응물의 종류를 파악했다. 더욱이, 실제의 환경하의 옥외 폭로 시험체를 이용해 재령 0, 3, 9, 14, 21 및 28일에 있어서의 투수계수 시험 및 재령 0, 28일에 있어서의 마이크로스코프에 의한 표면관찰을 실시했다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 투수계수비 및 질량변화를

Figure 4 및 5에 건습 반복 시험에 의한 시리즈 I, II의 투수계수 실험 결과를 나타낸다. 균열 도입 직후 (0 사이클)

의 투수계수를 1로 하여 각각의 사이클에 있어서의 투수계수비를 산출했다. 전체적으로 상시 수분을 공급받는 조건인 수준 1에서는 투수계수가 지속적으로 감소하는데 반해, 건습 반복 환경하의 수준 2~5의 조건에서는 7 사이클 경과 후부터 투수계수의 감소가 완만하게 되는 경향이였다.

수준 1, 2, 4로부터 침지시간에 따른 투수계수비의 변화는 시리즈 I, II의 모두 침지 시간이 6 h, 24 h, 48 h의 순서로 큰 값을 나타내, 침지시간이 길어질수록 수밀성은 점차 회복하는 경향을 확인할 수 있었다. 또한, 수준 2, 3 및 수준 4, 5로부터 건조온도의 차이에 따른 투수계수비는 건조온도 20℃의 경우가 40℃에 비해 투수계수비는 작게 되어 건조온도가 낮은 경우가 보다 수밀성의 회복에 효과가 있는 것을 알 수 있었다.

한편, 시리즈 I에 비해 시리즈 II의 경우가 투수계수비가 작으며, 이로 인해 수밀성의 회복율이 소폭 증가하고 있는 경향을 확인할 수 있었다. 이것은 플라이애쉬 혼입에 따른 포졸란 반응의 효과와 더불어 PVA 섬유와 별도로

PVA 섬유를 타설시 배합수에 혼입하여 이용한 것에 의해서 자기치유 물질의 석출이 촉진되었던 것이 원인으로 생각할 수 있다[10].

Figure 6 및 7에 시리즈 I, II의 질량변화율의 결과를 나타낸다. 시리즈 I, II 모두 14 사이클 종료시에 있어 상시 침지 조건인 수준 1의 경우는 질량변화율이 증가하고 있는 것에 반해, 건습 반복 환경하의 수준 2~5의 조건에서는 질량변화율이 감소하는 것을 알 수 있다. 이것은 상시 수분이 공급되는 조건에 있어서, 자기치유의 촉진효과 의해 자기치유 물질의 석출이 가장 활발하게 일어난 수준 1의 경우보다, 수준 2~5의 조건에서는 건습 반복에 의해 자기치유에 필수 조건인 수분함유의 저감으로 인해 질량 변화율이 감소한 것으로 판단된다. 또한, 건조온도 20℃에 비해 40℃의 경우의 질량 감소율은 크게 나타났으며, 이것은 건조온도가 높을수록 시험체 표면의 수분손실 및 증발에 따른 미세한 건조수축균열이 발생했기 때문으로 생각할 수 있다.

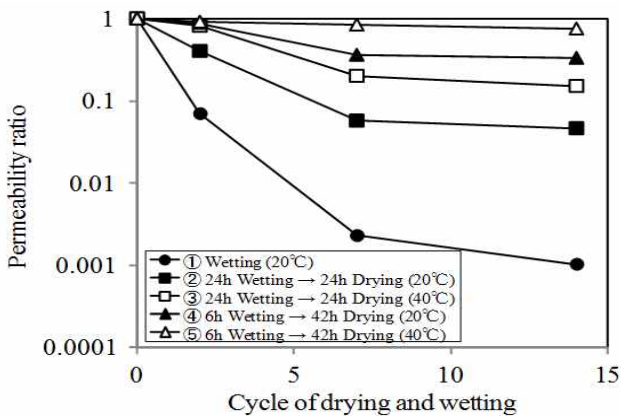


Figure 4. Permeability ratio (series I)

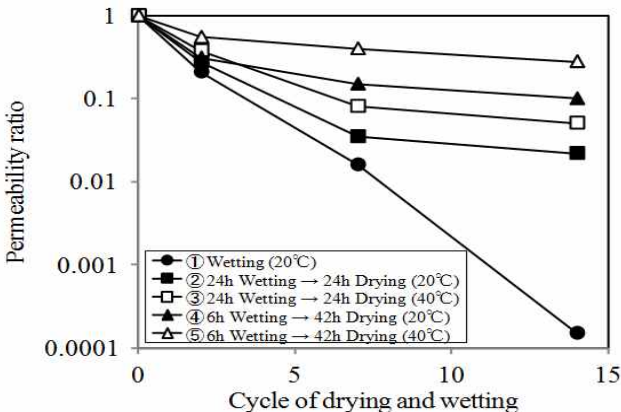


Figure 5. Permeability ratio (series II)

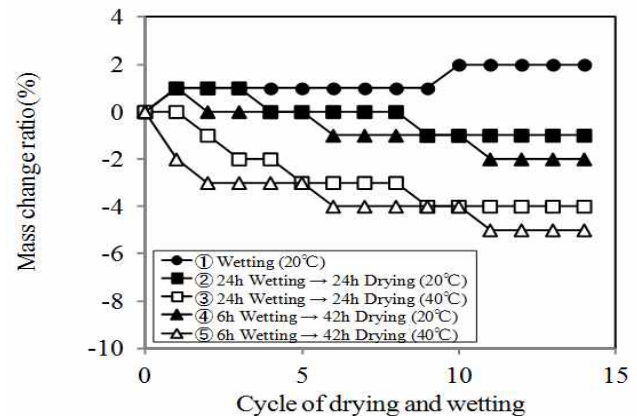


Figure 6. Mass change ratio (series I)

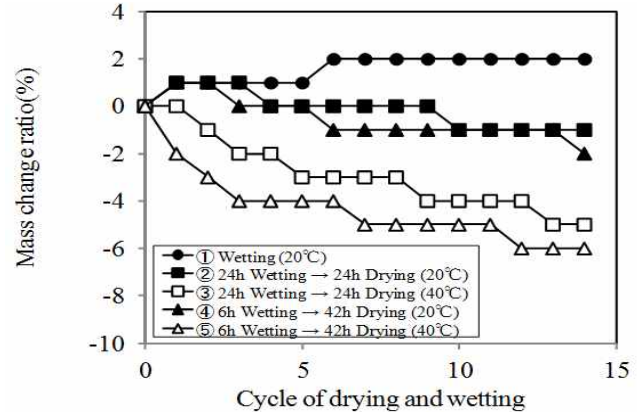


Figure 7. Mass change ratio (series II)

3.2 마이크로 스코프에 의한 균열관찰

마이크로스코프에 의한 균열도입 직후 (0사이클) 및 14 사이클 종료 후의 시험체 균열부분의 관찰결과를 Table 4에 나타낸다. 14 사이클 종료 후, 상시 수분을 공급받는 조건인 수준 1에서는 최대 500 μm 이상의 균열의 자기치유 효과를 확인할 수 있었다.

또한, 건습 반복 환경하에서도 균열부에 자기치유 물질의 부착을 관찰할 수 있었으며, 전체적으로 침지시간이 길고, 건조온도가 낮은 경우 균열의 자기치유 효과는 큰 것을 확인할 수 있었다. 특히 침지시간이 짧은 수준 4, 5의 경우 균열의 치유가 되지 않고 그대로 남아 있는 부분도 있어, 균열의 자기치유 효과는 온도의 영향보다는, 습윤시간에 크게 영향을 받는다고 생각할 수 있다.

한편, 시리즈 I에 비해 PVA' 섬유를 타설시 배합수에 혼입하여 이용한 시리즈 II의 경우가 균열의 자기치유 효과가 컸으며, 약 100 μm 정도의 균열의 자기치유 효과를 확인할 수 있었다.

3.3 라만 분석에 의한 자기치유 반응물질 추정

Table 4의 마이크로 스코프에 의한 균열표면부 관찰결과, 각 조건에 의해 자기치유의 진행 정도는 다소 차이가 있었지만, 시리즈 I, II의 모든 시험체에서 흰색 반응물질을 확인할 수 있었다. Figure 8에 자기치유에 의한 반응물의 결정체 성분을 확인하기 위한 라만분석 (Raman spectroscopy)의 실험결과를 나타낸다. 이때, 라만 분석용 시험체는 흰색 반응물이 가장 많이 부착되어 있는 시리즈

Table 4. Image of specimen surface by microscopic observation

		Before (0Cycle)	After (14cycle)	Before (0Cycle)	After (14cycle)
Series I	① Wetting (20 $^{\circ}\text{C}$)				
	② 24h Wetting after 24h Drying (20 $^{\circ}\text{C}$)				
	③ 24h Wetting after 24h Drying (40 $^{\circ}\text{C}$)				
	④ 6h Wetting after 42h Drying (20 $^{\circ}\text{C}$)				
	⑤ 6h Wetting after 42h Drying (40 $^{\circ}\text{C}$)				

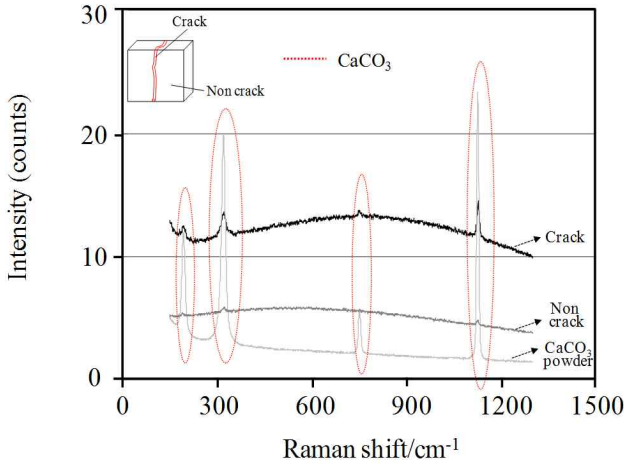


Figure 8. Results of raman spectroscopy test

II의 수준 1에 대해, 흰색 반응물이 부착되어 있는 균열부 (Crack)와 균열이 없는 건전부 (Non crack)에 레이저에 의한 파장 피크의 발생위치를 비교하였다. 실험결과, CaCO₃ 분말의 파장 피크를 비교대상으로 하여, 건전부의 파장에는 CaCO₃ 분말과 일치하는 피크가 거의 나타나지 않았다. 하지만, 균열부의 파장에서는 CaCO₃ 분말의 파장 피크와 정확히 일치하는 것을 확인할 수 있다. 자기치유 후에 생성된 흰색 반응물질은 거의 대부분이 CaCO₃인 것으로 판단된다.

3.4 옥외 폭로 시험

Figure 9 및 Table 5에 옥외 폭로 시험체에 대한 투수계수 실험결과 및 마이크로스코프에 의한 시험체 균열부의 관찰결과를 나타낸다. 한편, Figure 9에는 강우량의 변화도 더불어 나타낸다. 옥외 폭로시험 개시 후 투수계수비는 저하 하고 있어, 균열의 자기치유에 따른 수밀성이 회복되고 있는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 재령 3일부터의 강우에 의한 영향으로 시험체에 수분이 공급됨에 따라 자기치유 효과가 촉진되어, 재령 28일의 시점에서 약 50~100 μ m 정도의 균열 폭의 감소를 확인할 수 있었다.

이번 폭로 실험은 재령 28일까지의 단기간 폭로 실험의 결과이지만, 실환경 조건하에 있어서도 균열의 자기치유 효과를 확인할 수 있었으며, 특히 강우의 영향에 의해 균열의 자기치유 효과가 촉진되었다고 판단된다. 한편, 시리즈 I 과 비교하여 PVA' 섬유를 혼입한 시리즈 II의 경우가 투수계수비가 약간 작은 경향으로 이것은 혼화재료의 영향으로 생각할 수 있다[21].

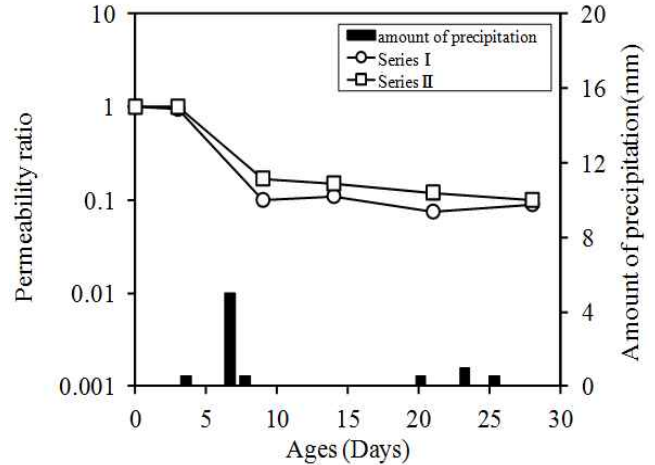


Figure 9. Permeability ratio and amount of precipitation by outdoor exposure test

Table 5. Image of specimen surface by microscopic observation

Level	Before (0Cycle)	After (28cycle)
Series I		
Series II		

4. 결 론

양생조건 변화에 따른 섬유보강 시멘트계 복합재료 (FRCC)의 자기치유 특성을 평가한 결과, 본 연구의 범위 내에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 상시 수분을 공급받는 조건에서는 균열의 자기치유에 따른 수밀성의 회복이 가장 크며, 실환경을 고려한 건습반복 조건하에서도 침지시간이 길고, 건조온도가 낮은 경우 균열의 자기치유 효과는 큰 것을 확인할 수 있었다.
- 2) 균열의 자기치유에 있어서의 수밀 성능은 온도의 영향

뿐만 아니라 습윤시간에 큰 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 시멘트계 복합재료와 극성을 가진 합성 섬유와의 복합적 자기 치유는, 미세 균열의 표면부에 석출물을 발생시키며, 이는 거의 대부분이 CaCO_3 임을 확인했다.

- 3) 콘크리트 외부로부터 내부로의 열화 인자의 침투가 크게 예상되는 $100\mu\text{m}$ 이상의 미세 균열에 대해, 실제 환경조건하에 있어서도 균열의 자기치유 효과를 확인할 수 있었다. 특히 강우의 등의 영향에 의한 수분공급은 균열의 자기치유를 촉진할 수 있다고 판단된다.
- 4) 극성기를 가진 PVA섬유는 플라이애쉬의 포졸란반응과 함께 사용함으로써 수밀성 회복 및 자기치유 물질의 다량석출이 가능하며 이로 인해 더욱 효과적인 자기치유의 성능 발휘가 가능하다고 판단된다.

요 약

양생조건의 차이가 섬유보강 시멘트계 복합재료(FRCC)의 자기치유에 미치는 영향을 검토하기 위해, 건습 반복 시험 및 옥외 폭로시험을 실시하여 FRCC의 자기치유 효과에 대해 검토했다. 투수계수 및 마이크로스코프에 의한 균열조사에 의해 FRCC의 자기치유 효과에 대해 평가한 결과, 수중에의 침지시간이 길고, 건조온도가 낮은 경우 균열의 자기치유 효과는 큰 것을 확인할 수 있었다. 또한, 자기치유에 있어서의 수밀성능은 습윤 시간에 크게 영향을 받는 것을 확인했다. 한편, 실환경 조건에 있어서 강우에 의한 수분 공급에 의해 자기치유는 진전하는 것을 확인했으며, 혼화재료를 적절히 병용하여 사용하는 것으로 균열의 자기치유 성능을 향상할 수 있다고 판단된다.

키워드 : 균열, 자기치유, FRCC, 옥외 폭로 시험, 투수계수

Acknowledgement

A series of experiments were performed in the Tohoku University (Building Materials laboratory) in Japan. And have received assistance from Dr. Nishiwaki Tomoya.

References

1. Japan Concrete Institute, Repair and Strengthening of Cracked Concrete Structure, Tokyo: Japan Concrete Institute (JCI); 2009, 479 p.
2. Neville AM, Properties of Concrete, 4th rev. London: John Wiley & Sons; 1995, 844 p.
3. Romildo D, Filho T. Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibers. Cement Concrete Composite. 2005 May;27(5):537-46.
4. Sanjun MA, Effectiveness of crack control at early age on the corrosion of steel bars in low modulus sisal and coconut fiber-reinforced mortars. Cement Concrete Research. 1998 Apr;28(4):555-65.
5. Jacobsen S, SEM observations of the microstructure of frost deteriorated and self-healed concrete. Cement Concrete Research. 1995 Dec;25(8):1781-90.
6. Jacobson S, Effect of cracking and healing on chloride transport in OPC concrete. Cement Concrete Research. 1996 Jun;26(6):869-81.
7. Reinhardt HW, Jooss M, Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width. Cement Concrete Research. 2003 Jul;33(7):981-5.
8. Jacobsen S, Self-healing of high strength concrete after deterioration by freeze/thaw. Cement Concrete Research. 1996 Jan;26(1):55-62.
9. Koda M, Mihashi H, Nishiwaki T, Kikuta T. Experimental study on self-healing capability of FRCC using synthetic fiber. Proceedings of the Japan concrete institute; 2011 July 12-14; Osaka, Japan, Osaka (Japan): Japan concrete institute; 2011, p. 1547-52.
10. Nishiwaki T, Sukmin K, Homma D, Yamada M, Mihashi H, Self-Healing Capability of Fiber-Reinforced Cementitious Composites for Recovery of Watertightness and Mechanical Properties. Journal of Materials. 2014 Mar;7(3):2141-54.
11. Homma D, Mihashi H, Nishiwaki T, Self-Healing Capability of Fibre Reinforced Cementitious Composites. Journal of Advanced Concrete Technology. 2009 May;7(2):217-28.
12. Li VC, Engineered Cementitious Composites (ECC)—Material, Structural, and Durability Performance. Ann Arbor: University of Michigan; 2007, 78 p.
13. Li VC, Wang S, Wu C. Tensile strain-hardening behavior of polyvinyl alcohol engineered cementitious composites (PVA-ECC). American Concrete Institute Materials Journal. 2001 Nov;98(6):483-92.

14. Yang Y, Lepech MD, Yang EH, Li VC. Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet-dry cycles. *Cement Concrete Research*. 2009 May;39(5):382-90.
15. Snoeck D, Van Tittelboom K, Steuperaert S, Dubruel P, de Belie N. Self-healing cementitious materials by the combination of microfibres and superabsorbent polymers. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2014 Jan;25(1):13-24.
16. Hirofumi Y. Experimental study on effect of smeared crack of SFRC. *Proceedings of the Japan concrete institute*; 2012 July 4-6; Hiroshima, Japan, Hiroshima (Japan): Japan concrete institute; 2012, p. 1225-30.
17. Nishiwaki T, Koda M, Yamada M, Mihashi H, Kikuta T. Experimental study on self-healing capability of FRCC using synthetic fiber. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2012 Apr;10(6):195-206.
18. Edvardsen C. Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete. *American Concrete Institute Materials Journal*. 1999 Jul;96(56):448-54.
19. Fujiwara Y, Hama Y, Yamashiro Y, Saito T. Effect of Self-healing of Mortar using Fly Ash. *Proceedings of the Japan concrete institute*; 2007 Jul 11-13; Sendai, Japan, Sendai (Japan): Japan concrete institute; 2007, p. 303-8.
20. Koda M, Mihashi H, Nishiwaki T, Kikuta T. Experimental study on self-healing capability of FRCC using synthetic fiber. *Proceedings of the Japan concrete institute*; 2011 Jul 12-14; Osaka, Japan, Osaka (Japan): Japan concrete institute; 2011, p. 1457-62.
21. Yamada M, Mihashi H, Nishiwaki T, Kikuta T. A Study on the Effect of PVA admixture and fly ash on crack self-healing phenomenon of FRCC. *Proceedings of the Japan concrete institute*; 2013 Jul 9-11; Nagoya, Japan, Nagoya (Japan): Japan concrete institute; 2013, p. 1381-6.