

결정성장형 무기재료 활용 고상 캡슐을 혼합한 자기치유 모르타르의 역학적 치유 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Mechanical Healing Properties of Self-Healing Mortar with Solid Capsules Using Crystal Growth Type Inorganic Materials

최연왕¹ · 남은준^{2*} · 오성록³ · 이광명⁴

Yun-Wang Choi¹ · Eun-Joon Nam^{2*} · Sung-Rok Oh³ · Kwang-Myong Lee⁴

(Received November 20, 2020 / Revised December 5, 2020 / Accepted December 6, 2020)

In this paper, a solid capsule was prepared using a crystal growth type inorganic material capable of hydration reaction, the quality and mechanical healing properties of self-healing mortar with solid capsules were evaluated. Solid capsules were mixed 5% by mass of cement. Reloading test results of compressive load, it was found to improve about 20% on average for the natural healing effect of Plain, in the case of the elastic range, the healing rate was about 79% at the 7 days of healing age and 98% at the 28 days of healing age. Reload test results of flexural load, in the case of the elastic range, the healing rate was about 79% at the 7 days of healing age and 98% at the 28 days of healing age. Through these results, it is judged that the healing performance of solid capsules has also an effect on mechanical healing properties such as strength in addition to the durability properties obtained by the permeability test. Since the strength tends to decrease as the solid capsules are mixed, it is considered necessary to compensate.

키워드 : 결정성장형, 역학적 치유, 무기재료, 고상캡슐, 자기치유 모르타르

Keywords : Crystal growth type, Mechanical healing, Inorganic materials, Solid capsules, Self-healing mortar

1. 서론

자기치유 기술이 부여된 구조물은 균열 발생 즉시 균열치유가 진행되며, 균열 발생 초기에 균열 클로징 효과로 인하여 균열의 진전 및 확장을 저감 및 방지할 수 있어 일반적인 구조물의 유지보수 시간, 노력 및 비용을 크게 절감할 수 있는 기대효과가 있다. 특히, 인력이 쉽게 접근하기 어려운 구조물의 경우에도 효과적으로 보수를 수행할 수 있기 때문에(An and Shin 2014), 구조물의 보수효과뿐만 아니라 작업인력의 안전성도 확보가 가능하여 종합적인 기대효과는 더욱 클 것으로 예상되고 있다. 구조물에 적용가

능한 자기치유 기술은 매커니즘에 따라 다양한 개념이 존재하고 있으며(Oh 2017), 적용 환경 및 구조물에 따라 적합한 기술을 사회 환경적 측면과 경제성 측면을 고려하여 적용할 수 있다. 본 연구에서는 다양한 자기치유 기술 중 자기치유 소재를 캡슐화하여 사용하는 기술을 대상으로 배합에 직접 혼합 가능한 자기치유 캡슐을 제조하였다. 캡슐을 활용한 자기치유 기술은 직접적인 자기치유 소재를 다량 포함할 수 있기 때문에(Hunger et al. 2009) 다양한 구조물에 적용할 수 있으며, 파괴되지 않은 캡슐은 자기치유 소재의 성능이 지속적으로 유효하다(Oh et al. 2020).

캡슐을 활용한 자기치유 기술의 동향을 살펴보면 자기치유 소

* Corresponding author E-mail: eunjoon.nam@gmail.com

¹세명대학교 토목공학과 교수 (Department of Civil Engineering, Semyung University, Jecheon-si, 27136, Korea)

^{2*}세명대학교 토목공학과 박사과정 (Department of Civil Engineering, Semyung University, Jecheon-si, 27136, Korea)

³㈜뉴저스트 기술연구소 책임연구원 (Responsibility Researcher, Institute of Technology, Newjust Co., Ltd, Gyeonggi-do, 15588, Korea)

⁴성균관대학교 토목환경공학과 교수 (Department of Civil and Environmental Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon-si, 16419, Korea)

재를 마이크로 사이즈로 캡슐화하여 적용한 바 있다(Kim et al, 2003). 그러나 자기치유 소재를 반응시키기 위해서는 반응 촉매제(Trigger)가 별도로 요구되기 때문에 반응 촉매제 또한 별도로 마이크로 캡슐화하여 함께 사용해야 된다는 문제점이 있으며, 캡슐이 파괴되어 자기치유 소재가 균열면으로 유출되더라도 반응 촉매제를 만나지 못하면 반응시킬 수 없다는 문제점이 있다. 국내의 경우 이러한 문제점이 보완되어 별도의 촉매제 없이 태양광 또는 수분으로 반응할 수 있는 자기치유 마이크로 캡슐을 제조하여 건설 분야 기술에 적용한 사례가 있다(Song et al, 2013). 그러나 공통적으로 자기치유 캡슐의 적용대상이 구조물 모체가 아니라 모체 표면을 대상으로 하고 있기 때문에(Wang et al, 2003; Blaiszika et al, 2007). 캡슐량이 매우 제한적이며, 균열 폭 또는 균열 깊이에 대하여 대응하기 어렵다(Oh et al, 2020). 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로는 캡슐을 배합에 직접 혼합하여 모체 자체에 캡슐이 분산되도록 하여야 한다. 반응 촉매제로써 수분에 의하여 반응할 수 있도록 할 경우 적용할 대상에 대응하여 두께를 자유롭게 조절할 수 있으며, 균열면에 위치하는 캡슐량 증대 및 수화반응에 의하여 균열을 치유하므로 종래의 경우보다 치유효율을 증가시킬 수 있다. 또한 수분은 우천, 지하수 및 습기 등에 의하여 대부분의 구조물에 노출되어 있어 균열면의 파괴된 캡슐과 반응하기 용이하다(Oh et al, 2019). 이와 관련된 국내 선행연구를 살펴보면 치유성능은 주로 정수위투수시험에 의한 워터플로우 시험을 실시하여 투수량의 감소수준을 평가하고 있다. 이러한 이유는 균열의 치유는 균열폭 감소로 인한 내구적 성능 증가로 평가되고 있기 때문에 역학적 치유성능은 그 효과가 크지 않아 고려되지 않고 있는 것으로 판단된다. 그러나 국외 선행연구의 경우 일부 연구기관에서는 역학적 치유성능에 대하여 고려되고 있다(Qureshi et al, 2018; Feiteira et al, 2016; Huang et al, 2018; Li et al, 2017) 따라서 본 연구에서는 수화반응이 가능한 결정성장형 무기재료를 사용하여 고상 캡슐을 제조하였으며, 고상 캡슐을 혼합한 자기치유 모르타르를 제조하였다. 본 연구에서는 고상 캡슐을 혼합한 자기치유 모르타르의 역학적 치유 특성에 대하여 평가를 실시하였으며, 향후 내구적 치유 특성을 고려하여 자기치유 모르타르 기술의 진보화를 위한 기반자료로써 활용하고자 한다.

2. 실험개요

2.1 결정성장형 무기재료 활용 고상 캡슐 제조

2.1.1 결정성장형 무기재료

결정성장형 무기재료는 수화반응에 의해 에트링가이트(Ettringite)

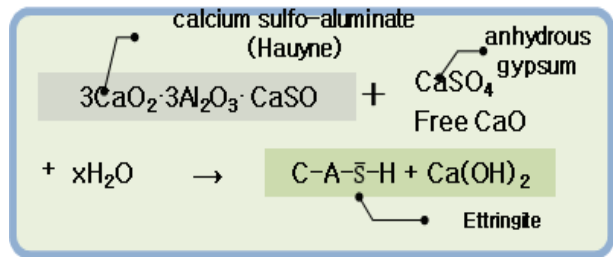


Fig. 1. Self-healing reaction mechanism

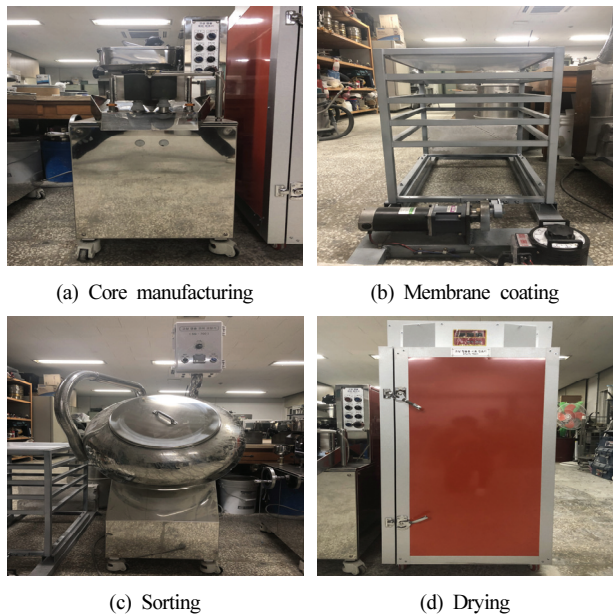


Fig. 2. Equipment of solid capsules

또는 수산화칼슘 등을 생성하여 팽창시키는 작용이 있는 아원계 팽창제(Calcium Sulfoaluminate, 이하 CSA로 약함)와 결정성장 촉진 및 육각판상의 결정물을 발생하는 무수석고(CaSO₄, 이하 AG로 약함)를 선행연구(Oh et al, 2020)를 통하여 얻어진 적합한 비율에 따라 혼합하여 사용하였다. 이들의 반응 매커니즘은 AG의 결정을 통하여 균열 영역의 공간충전 효과가 있으며, CSA의 결정을 통하여 빠기효과에 따른 결정물과 반응 생성물의 안정화 효과이다.

Fig. 1은 코어재료인 결정성장형 무기재료의 반응 매커니즘을 나타낸 것이며, Fig. 2는 고상 캡슐의 제조 장비를 나타낸 것이다(Oh 2017; Oh et al, 2019; Choi et al, 2017).

고상 캡슐의 제조는 분체상의 결정성장형 무기재료를 일정 크기로 입자화하기 위한 코어재료 제조 단계와 막 재료의 코팅 단계 및 건조를 통하여 제조된다. 코어재료 제조 단계에서는 응집제가 요구되며, 입자화 과정에서 사전반응을 방지하기위하여 수분함량

Table 1. Chemical components and physical properties of cement

Types	Items	CaO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SO ₃ (%)	L.O.I (%)	Surface area (cm ² /g)	Density (g/cm ³)
C		61.40	21.60	3.40	2.50	3.10	2.50	0.03	3,540	3.15

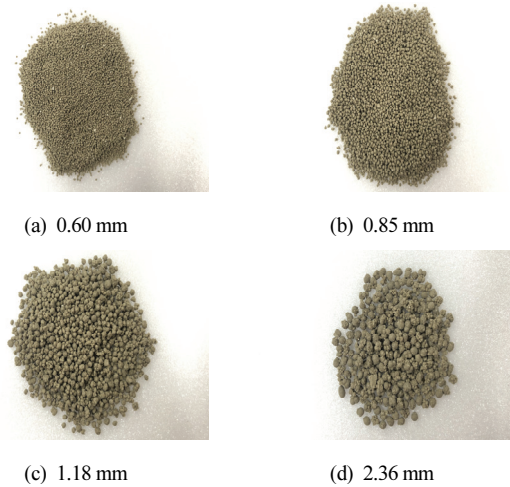


Fig. 3. Size type of solid capsules

이 최소화 된 응집제를 적용하였다. 응집제를 통하여 입자화된 코어 재료는 배합에 혼합시 배합수와의 반응을 방지하기 위하여 막 재료로써 액상고무를 사용하였다.

2.1.2 고상 캡슐의 제조

결정성장형 무기재료는 응집제와 혼합하여 적당한 질기를 가지는 상태로 만든 다음 Fig. 2(a)의 장비를 통하여 코어 재료를 제조한다. 제조된 코어는 Fig. 2(b)의 장비를 통하여 크기를 분류하며, Fig. 2(c)의 장비를 통하여 막 코팅을 실시한다. 최종적으로 Fig. 2(d)의 장비를 통하여 건조하여 제조된다. Fig. 3은 고상 캡슐의 형태를 나타낸 것으로 고상 캡슐의 크기는 650~2,400µm로 제조되었다. 본 연구에서는 선행연구(Oh 2017; Oh et al. 2019)를 통하여 적정 크기를 선정하였으며, 850~1,000µm 내의 크기만을 선별하여 사용하였다.

2.2 모르타르 제조

2.2.1 사용재료

모르타르에 사용된 시멘트는 밀도 3.15g/cm³ 및 분말도 3,540 cm²/g의 보통포틀랜드시멘트(Ordinary Portland Cement, 이하 C로 약함)를 사용하였다. Table 1은 시멘트의 화학 및 물리적 특성

Table 2. Physical properties of fine aggregate

Type	G-max (mm)	Density (g/cm ³)	Absorption (%)	F.M.	Unit mass (kg/m ³)
S	-	2.58	2.32	2.78	1,619

Table 3. Physical properties of chemical admixtures

Type	Phase	Color	Density (g/cm ³)	Total solids (%)
ad	Liquid	Lemon yellow	1.04 ± 0.01	34

Table 4. Mix ratio of mortar

No.	W	C	S	Mixing ratio of SC(C×%)	Mixing ratio of ad(C×%)
Plain	0.4	1	2	0	0.005
SC5				5	0.006

을 나타낸 것이다. 모르타르에 사용된 잔골재는 강모래(River Sand, 이하 RS로 약함)를 사용하였으며, Table 2는 잔골재의 물리적 특성을 나타낸 것이다. 또한 화학 혼화제(Chemical admixture, 이하 ad로 약함)는 고상 캡슐의 분산을 원활하게 하기 위하여 국내 H사의 폴리칼본산계 고성능 감수제를 사용하였다. Table 3은 화학 혼화제의 물리적 성질을 나타낸 것이다.

2.2.2 배합

배합은 “KS L ISO 679 시멘트의 강도 시험 방법”에 준하여 모르타르를 제조하여 각 실험에 적합한 형태로 시편을 제작하였다. 고상 캡슐(Solid Capsules, 이하 SC로 약함)의 혼합량은 C 질량의 5%를 혼합하였다. Table 4는 배합비를 나타낸 것이다.

2.3 평가방법

2.3.1 품질특성

(1) 압축강도

압축강도는 “KS L ISO 679 시멘트의 강도 시험 방법”에 준하여 40×40×160mm의 공시체 시험편을 성형하여 수중 양생을 실시하였다. 이후 재령에 따라 만능시험기(Universal Testing Machine,

UTM)를 사용하여 압축강도를 측정하였다.

(2) 휨강도

휨강도는 “KS L ISO 679 시멘트의 강도 시험 방법”에 준하여 40×40×160mm의 공시체 시험편을 성형하여 수중 양생을 실시하였다. 이후 만능시험기(Universal Testing Machine, UTM)를 사용하여 휨강도를 측정하였다.

2.3.2 역학적 치유 특성

역학적 치유 특성은 사전하중을 받은 시험편에 대하여 치유 재령 후 하중을 재부하하여 치유 수준을 평가하였다. 하중 재부하 시험을 위한 시험편은 “KS L ISO 679 시멘트의 강도 시험 방법”에 준하여 40×40×160 mm의 시험편을 성형하여 수중 양생을 실시하였으며, 재령 28일 강도를 기준으로 사전하중 4수준(0%, 30%, 60% 및 80%)을 각 시험편에 가하였다. 사전하중을 받은 시험편은 수중에서 치유양생을 실시하였으며, 치유 재령 7일 및 28일에 각 재하중을 주어 강도발현 수준을 측정하였다. 역학적 치유 특성은 압축하중 및 휨하중 재부하 시험을 실시하였다. Fig. 4 및 Fig. 5는 압축 및 휨의 사전하중을 받은 시험편의 하중 재부하 시험 전경을 나타낸 것이다.



Fig. 4. Reloading test of specimen with pre-compressive load

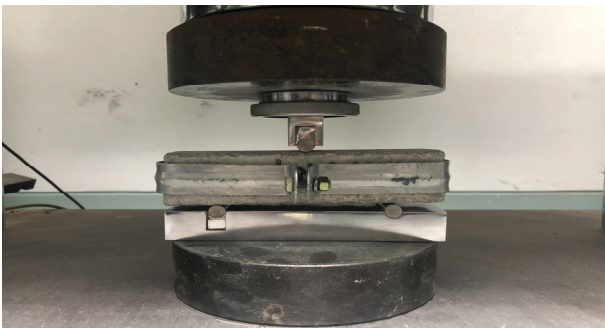


Fig. 5. Reloading test of specimen with pre-flexural load

3. 실험결과 및 고찰

3.1 자기치유 모르타르의 품질 특성

3.1.1 압축강도

Fig. 6은 자기치유 모르타르의 재령 7일 및 28일 압축강도 평가 결과를 나타낸 것이다. Fig. 6의 결과 SC가 혼합된 SC5는 SC가 혼합되지 않은 Plain의 압축강도와 비교하여 감소하는 경향이 있는 것으로 나타났으며, 재령 28일 기준 약 8.8% 감소하는 결과가 나타났다. 이러한 결과는 SC가 파괴되기 전에는 반응하지 못하는 입자이기 때문에 SC의 혼합에 따라 페이스트 부피가 감소하게 되므로 압축강도가 감소하는 것으로 판단된다. 이러한 결과를 통하여 SC의 혼합은 자기치유 모르타르의 강도를 감소시키는 영향이 있기 때문에 이를 고려하여 목표 압축강도를 만족하기 위해서는 감수제 사용에 의한 단위수량의 감소 또는 결합재의 조절 등의 배합비 보완이 요구될 것으로 판단된다.

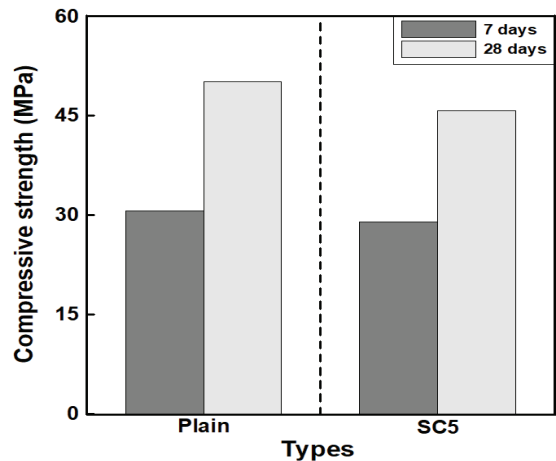


Fig. 6. Test result of compressive strength according to age

3.1.2 휨강도

Fig. 7은 자기치유 모르타르의 재령 7일 및 28일 휨강도 평가 결과를 나타낸 것이다. Fig. 7의 결과 SC가 혼합된 SC5는 SC가 혼합되지 않은 Plain의 휨강도와 비교하여 압축강도 분석결과와 동일하게 감소하는 경향이 나타났으며, 재령 28일 기준 약 30% 감소하는 결과가 나타났다. 이러한 원인은 압축강도 감소 원인과 동일한 원인에 기인한 것으로 판단되며, SC는 미반응성 입자이기 때문에 모르타르 내부에 입자 계면영역이 상대적으로 증가하여 휨강도가 감소한 것으로 판단된다.

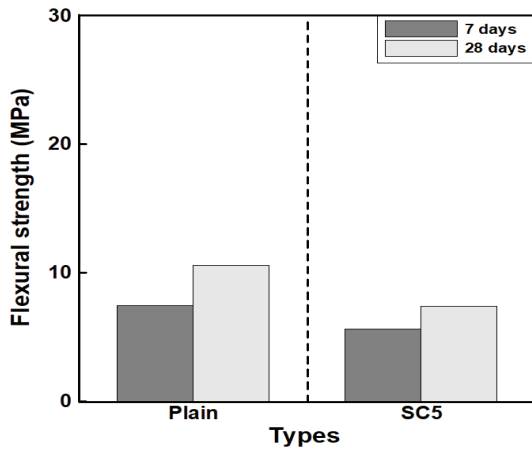


Fig. 7. Test result of flexural strength according to age

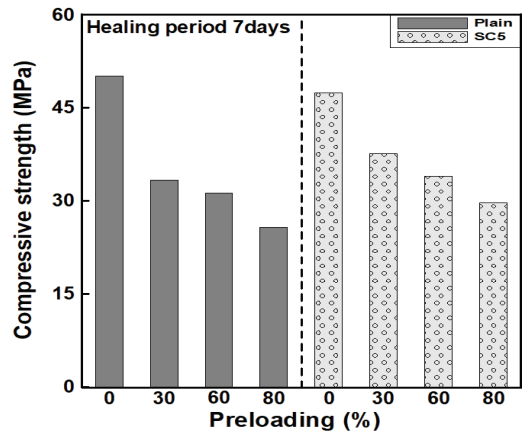


Fig. 8. Reloading test result of compressive load at 7 days of healing period

3.2 자기치유 모르타르의 역학적 치유 특성

3.2.1 압축하중 재부하 시험

Fig. 8은 사전 압축하중을 0, 30, 60 및 80% 받은 Plain 및 SC5의 치유재령 7일 하중 재부하 실험결과를 나타낸 것이다. Fig. 8의 결과 치유재령 7일에는 사전하중을 받지않은 Plain 0%의 경우 약 50 MPa이 나타났지만 사전하중을 받은 30%, 60% 및 80%의 경우 0%와 비교하여 약 73%, 62% 및 51% 치유된 것으로 나타났다. 또한 SC5-0%의 경우 약 47 MPa이 나타났지만 사전하중을 받은 30%, 60% 및 80%의 경우 0%와 비교하여 약 79%, 72% 및 63% 치유된 것으로 나타났다.

Fig. 9는 치유재령 28일 하중 재부하 실험결과를 나타낸 것이다. Fig. 9의 결과 치유재령 28일에는 Plain의 경우 사전하중을 받은 30%, 60% 및 80%은 0%와 비교하여 약 87%, 77% 및 55% 치유된 것으로 나타났으며, SC5의 경우 약 98%, 95% 및 86% 치유된 것으로 나타났다.

Fig. 10은 Plain 및 SC5의 사전하중을 받지 않은 0%를 기준으로 치유율을 나타낸 것이다. 치유재령 7일을 기준으로 고상 캡슐 혼합에 따른 치유효과는 Plain의 자연 치유성능에 대하여 30%의 사전하중을 받은 경우 약 6%, 60%의 사전하중을 받은 경우 약 10% 및 80%의 사전하중을 받은 경우 약 12% 강도를 회복시키는 결과가 나타났으며, 치유재령 28일을 기준으로 SC 혼합에 따른 치유효과는 Plain의 자연 치유성능에 대하여 30%의 사전하중을 받은 경우 약 11%, 60%의 사전하중을 받은 경우 약 18% 및 80%의 사전하중을 받은 경우 약 31% 강도를 회복시키는 결과가 나타났다.

Fig. 11은 Plain 및 SC5의 치유재령에 따른 치유율을 나타낸 것이다. Fig. 11의 결과 탄성범위 이내의 하중을 받은 Plain-30%의

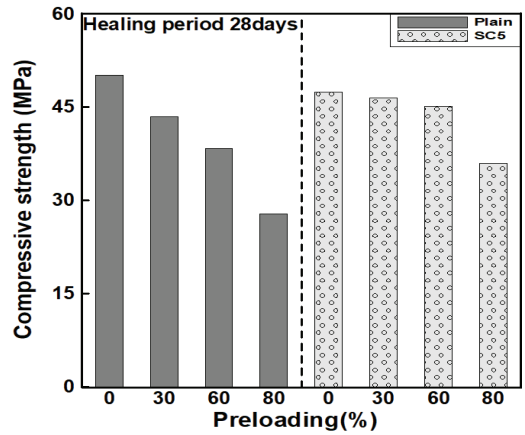


Fig. 9. Reloading test result of compressive load at 28 days of healing period

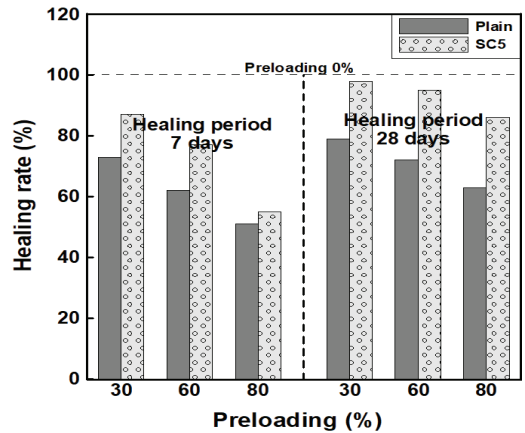


Fig. 10. Healing rate according to preload

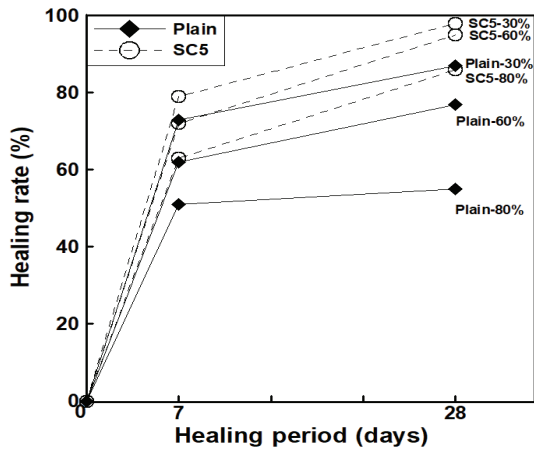


Fig. 11. Healing rate according to healing period

경우 치유재령 7일에 약 73%의 치유율이 나타났으며, 치유재령 28일 후 약 87%의 치유율이 나타나 약 14% 강도가 회복하는 경향이 나타났다. 그러나 SC5-30%의 경우 치유재령 7일에 약 79%의 치유율이 나타났으며, 치유재령 28일 후 약 98%의 치유율이 나타나 약 19% 강도가 회복하는 경향이 나타났다. 또한 파괴영역에 속하는 Plain-80%의 치유율은 치유재령 7일의 치유율이 약 51%에서 치유재령 28일 후 약 55%로 약 4% 강도가 회복하는 결과가 나타났지만 SC5-80%의 치유율은 치유재령 7일의 치유율이 약 63%에서 치유재령 28일 후 약 86%로 나타남에 따라 약 23%로 강도가 회복하는 경향이 나타났다. 이러한 결과를 통하여 고상 캡슐의 치유효과는 Plain의 자연 치유 효과에 대하여 평균적으로 약 20% 수준을 향상시킬 수 있는 것으로 판단된다.

3.2.2 힘하중 재부하 시험

Fig. 12는 사전 힘하중을 0, 30, 60 및 80% 받은 Plain 및 SC5의 치유재령 7일 하중 재부하 실험결과를 나타낸 것이다. Fig. 12의 결과 치유재령 7일에는 사전하중을 받지않은 Plain 0%의 경우 약 11 MPa이 나타났지만 사전하중을 받은 30% 및 60%의 경우 0%와 비교하여 약 50% 및 48% 치유되는 것으로 나타났다. 그러나 사전하중을 80% 받은 시험편은 측정 불가능한 것으로 나타났다. 또한 SC5-0%의 경우 약 8 MPa이 나타났지만 사전하중을 받은 30%, 60% 및 80%의 경우 0%와 비교하여 약 79%, 73% 및 30% 치유되는 것으로 나타났다.

Fig. 13은 치유재령 28일 하중 재부하 실험결과를 나타낸 것이다. Fig. 13의 결과 치유재령 28일에는 Plain의 경우 사전하중을 받은 30% 및 60%는 0%와 비교하여 약 69% 및 66% 치유되는 것으로 나타났지만 80% 받은 시험편은 치유재령 7일의 결과와

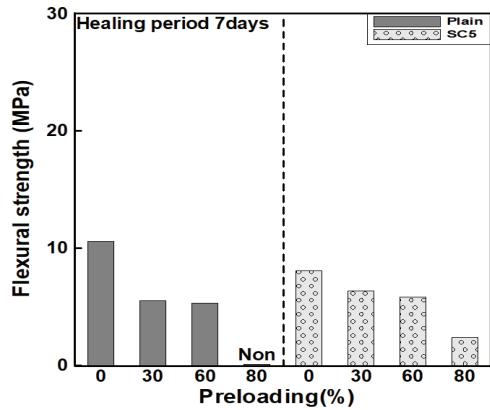


Fig. 12. Reloading test result of flexural load at 7 days of healing period

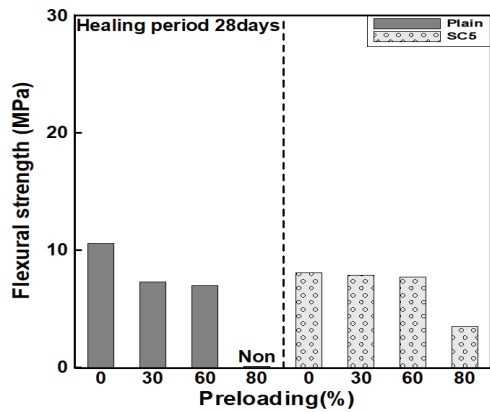


Fig. 13. Reloading test result of flexural load at 28 days of healing period

동일하게 측정 불가능한 것으로 나타났다. 그러나 SC5의 경우 약 98%, 95% 및 50% 치유된 것으로 나타났다.

Fig. 14는 Plain 및 SC5의 사전하중을 받지 않은 0%를 기준으로 치유율을 나타낸 것이다. 치유재령 7일을 기준으로 고상 캡슐 혼합에 따른 치유효과는 Plain의 자연 치유성능에 대하여 30%의 사전하중을 받은 경우 약 29%, 60%의 사전하중을 받은 경우 약 25% 및 80%의 사전하중을 받은 경우 약 30% 강도를 회복시키는 결과가 나타났으며, 치유재령 28일을 기준으로 SC 혼합에 따른 치유효과는 Plain의 자연 치유성능에 대하여 30%의 사전하중을 받은 경우 약 29%, 60%의 사전하중을 받은 경우 약 29% 및 80%의 사전하중을 받은 경우 약 50% 강도를 회복시키는 결과가 나타났다.

Fig. 15는 Plain 및 SC5의 치유재령에 따른 치유율을 나타낸 것이다. Fig. 15의 결과 탄성범위 이내의 하중을 받은 Plain-30%의 경우 치유재령 7일에 약 50%의 치유율이 나타났으며, 치유재령

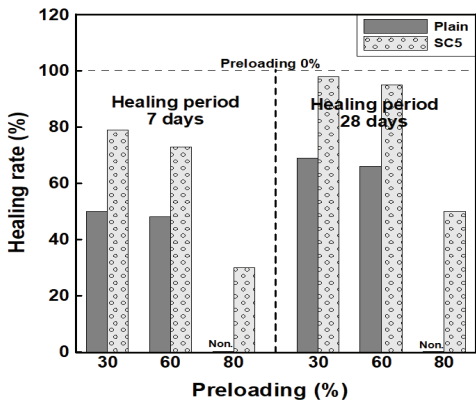


Fig. 14. Healing rate according to preload

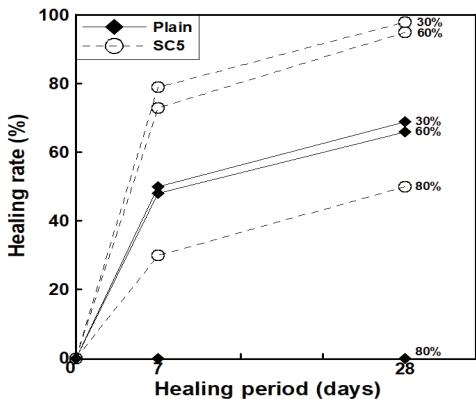


Fig. 15. Healing rate according to healing period

28일 후 약 79%의 치유율이 나타나 약 29% 강도가 회복하는 경향이 나타났다. 그러나 SC5-30%의 경우 치유재령 7일에 약 69%의 치유율이 나타났으며, 치유재령 28일 후 약 98%의 치유율이 나타나 약 29% 강도가 회복하는 경향이 나타났다. 또한 파괴영역에 속하는 Plain-80%의 치유율은 치유재령 7일 및 28일 후 치유율이 동등하게 0%로 측정이 불가능한 것으로 나타났지만 SC5-80%의 치유율은 치유재령 7일의 치유율이 30%에서 치유재령 28일 후 약 50%로 나타남에 따라 약 20%로 강도가 회복하는 경향이 나타났다. 이러한 결과를 통하여 고상 캡슐의 치유효과는 압축강도의 결과보다 상대적으로 큰 영향이 있는 것으로 판단되며, 특히 파괴영역에 해당하는 80%의 경우에도 30% 이상 향상시킬 수 있는 것으로 판단된다.

이러한 결과를 통하여 고상 캡슐의 혼합은 종래에 주로 평가되고 있는 투수시험을 통한 치유 특성 평가 외에도 하중 재부하시험 결과를 통하여 내구적 치유성능뿐만 아니라 역학적 치유성능도 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 논문에서는 수화반응이 가능한 결정성장형 무기재료를 사용하여 고상 캡슐을 제조하였으며, 고상 캡슐 혼합에 따른 자기치유 모르타르의 품질 및 역학적 치유 특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 고상 캡슐을 혼합한 자기치유 모르타르의 품질 특성을 평가한 결과, 압축강도는 고상 캡슐의 혼합에 따라 약 8.8% 감소하는 경향이 나타났으며, 휨강도의 경우 약 30% 감소하는 경향이 나타남에 따라 목표 강도를 만족하기 위해서는 감소제 사용에 의한 단위수량의 감소 또는 결합재의 조절 등의 배합비 보완이 요구될 것으로 판단된다.
2. 고상 캡슐을 혼합한 자기치유 모르타르의 역학적 치유 특성을 평가하기 위하여 압축하중 재부하 실험 결과, Plain의 자연 치유 효과에 대하여 평균적으로 약 20% 수준을 향상시키는 것으로 나타났으며, 탄성범위의 경우 치유재령 7일에 약 79% 및 치유재령 28일에 98%의 치유율이 나타났다.
3. 고상 캡슐을 혼합한 자기치유 모르타르의 휨하중 재부하 실험 결과, Plain의 자연 치유 효과에 대하여 압축하중 재부하 실험 결과와 동일하게 약 20% 수준을 향상시키는 것으로 나타났으며, 탄성범위의 경우 치유재령 7일에 약 79% 및 치유재령 28일에 98%의 치유율이 나타났다.

이러한 결과를 통하여 고상 캡슐의 치유성능은 투수시험에 의한 내구적 특성 외에도 강도와 같은 역학적 치유 특성에도 영향이 있는 것으로 판단되며, 고상 캡슐의 혼합에 따라 강도가 감소하는 경향이 있으므로 이를 보완한다면 고상 캡슐의 치유효과에 의하여 내구년한 증대에 기여할 것으로 판단된다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 2020년도 국토교통과학기술진흥원 국토교통기술연구개발사업(20SCIP-C159062-01) 지원사업으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

References

- An, E.J., Shin, M.S. (2014). Healing mechanisms and assessment techniques of self-healing concrete, *Proceeding of Korea Concrete Institute*, **26(2)**, 477–479 [in Korean].
- Blaiszika, B.J., Sottos, N.R., White, S.R. (2007). Nanocapsules for self-healing materials, *Journal of Composites Science and Technology*, **68(3)**, 978–986.
- Choi, S.W., Bae, W.H., Lee, K.M., Shin, K.J. (2017). Correlation between crack width and water flow of cracked mortar specimens measured by constant water head permeability test, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **29(3)**, 264–273.
- Choi, Y.W., Oh, S.R., Choi, B.K. (2017). A study on the manufacturing properties of crack self-healing capsules using cement powder for addition to cement composites, *Journal of Advances in Materials Science and Engineering*, 1–8.
- Choi, Y.W., Oh, S.R., Kim, C.G., Im, H.S. (2018). Preparation characteristics of self-healing microcapsules for mixing cement composites utilizing liquid inorganic materials, **6(4)**, 236–243 [in Korean].
- Feiteira, J., Gruyaert, E., De Belie, N. (2016). Self-healing of moving cracks in concrete by means of encapsulated polymer precursors, *Journal of Construction and Building Materials*, **102**, 671–678.
- Huang, Y., Guan, Y., Wang, L., Zhou, J., Ge, Z., Hou, Y. (2018). Characterization of mortar fracture based on three point bending test and XFEM, *International Journal of Pavement Research and Technology*, **11**, 339–344.
- Hunger, M., Entrop, A.G., Mandilaras, I., Brouwers, H.J.H., Founti, M. (2009). The behavior of self-compacting concrete containing micro-encapsulated phase change materials, *Journal of Cement and Concrete Composites*, **31(10)**, 731–743.
- Kim, C.G. (2017). A Study on the Crack Self Healing Properties of Cement Mortar Utilizing Micro Capsules with Liquid-type Inorganic materials, Master's Thesis, Semyung University [in Korean].
- Kim, P.S., Jo, C.K., Ju, T.H., Choi, Y.C., Lee, J.K. (2003). Preparation and thermal characteristics of microencapsulated PCM for none supercooling phenomenon, *Proceeding of The Korean Society for Energy*, 225–228 [in Korean].
- Li, W., Jiang, Z., Yang, Z. (2017). Acoustic characterization of damage and healing of microencapsulation-based self-healing cement matrices, *Journal of Cement and Concrete Composites*, **84**, 48–61.
- Memon, S.A., Cui, H.Z., Zhang, H., Xing, F. (2014). Utilization of macro encapsulated phase change materials for the development of thermal energy storage and structural lightweight aggregate concrete, *Journal of Applied Energy*, **139**, 43–55.
- Nam, E.J. (2020). A Study on the Self-Healing Properties of Cement Composites Using Solid Capsules with Crystal Growth Type Inorganic Materials, Master's Thesis, Semyung University [in Korean].
- Nesterova, T., Johansena, K.D., Pedersen, L.T., Kill, S. (2012). Microcapsule-based self-healing anticorrosive coatings: capsule size, coating formulation, and exposure testing, *Journal of Organic Coatings*, **75(4)**, 309–318.
- Oh, S.R. (2017). A Study on the Development and Properties of Cementitious Composite Materials Utilizing Capsules for Crack Self-Healing, Ph.D Thesis, Semyung University [in Korean].
- Oh, S.R., Choi, Y.W., Kim, Y.J. (2019). Effect of cement powder based self-healing solid capsule on the quality of mortar, *Journal of Construction and Building Materials*, **214**, 574–580.
- Oh, S.R., Kim, C.G., Nam, E.J., Choi, Y.W. (2020). An experimental study on the quality and crack healing properties of self-healing mortar containing solid capsules using crystal growth type inorganic materials, *Journal of Korean Recycled Construction Resources Institute*, **8(1)**, 120–128.
- Qureshi, T., Kanellopoulos, A., Al-Tabbaa, A. (2018). Autogenous self-healing of cement with expansive minerals-I: impact in early age crack healing, *Journal of Construction and Building Materials*, **192**, 768–784.
- Reinhardt, H.W., Jooss, M. (2003). Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width, *Journal of Cement and Concrete Research*, **33(7)**, 981–985.
- Schlangen, E., Sangadji, S. (2013). Addressing infrastructure durability and sustainability by self healing mechanisms – recent advances in self healing concrete and asphalt, *Journal of Procedia Engineering, The 2nd International Conference*, **54**, 39–57.
- Song, Y.K., Jo, Y.H., Lim, Y.J., Cho, S.Y., Yu, H.C., Ryu, B.C., Lee, S.I., Chung, C.M. (2013). Sunlight-induced self-healing of a microcapsule-type protective coating, *Journal of ACS Applied Materials and Interfaces*, **5(4)**, 1378–1384.
- Wang, X., Xing, F., Zhang, M., Han, N., Qian, Z. (2003). Experimental study on cementitious composites embedded with organic microcapsules, *Journal of Materials*, **6(9)**, 4064–4081.

결정성장형 무기재료 활용 고상 캡슐을 혼합한 자기치유 모르타르의 역학적 치유 특성에 관한 실험적 연구

본 논문에서는 수화반응이 가능한 결정성장형 무기재료를 사용하여 고상 캡슐을 제조하였으며, 고상 캡슐 혼합에 따른 자기치유 모르타르의 품질 및 역학적 치유 특성을 평가하였다. 고상 캡슐은 시멘트 질량에 대하여 5% 혼합하였다. 압축하중 재부하 실험결과 Plain의 자연 치유 효과에 대하여 평균적으로 약 20% 수준을 향상시키는 것으로 나타났으며, 탄성범위의 경우 치유재령 7일에 약 79% 및 치유재령 28일에 98%의 치유율이 나타났다. 휨하중 재부하 실험결과, 탄성범위의 경우 치유재령 7일에 약 79% 및 치유재령 28일에 98%의 치유율이 나타났다. 이러한 결과를 통하여, 고상 캡슐의 치유성능은 투수시험에 의한 내구적 특성 외에도 강도와 같은 역학적 치유 특성에도 영향이 있는 것으로 판단되며, 고상 캡슐의 혼합에 따라 강도가 감소하는 경향이 있으므로 이에 대한 보완이 필요하다고 판단된다.