

석회석 미분말을 혼합한 시멘트 경화체의 내구성능 평가

Evaluation of Durability of Cement Matrix Replaced with Limestone Powder

장우식¹ · 박광필^{2*}

Woo-Sik Jang¹ · Kwang-Pil Park^{2*}

(Received February 14, 2024 / Revised March 5, 2024 / Accepted March 6, 2024)

In order to use limestone powder as a material for concrete, the mechanical and durability characteristics of cement matrices manufactured by varying the substitution rate were evaluated. In general, limestone powder did not contribute to the cement hydration reaction, so as a result of the compressive strength test of cement mortar using it, the compressive strength decreased as the substitution rate increased. However, as a result of evaluating the durability performance of cement mortar using limestone powder, such as chloride ion penetration resistance, carbonation resistance, and chemical attack resistance, small particles of limestone powder showed superior results compared to the unsubstituted control mortar due to the micro-filler effect of filling the fine pores inside the cement matrix. Therefore, limestone powder is expected to be used as an effective method for improving the durability of concrete. In this study, the durability was evaluated by changing the mixing amount of limestone powder to 0 %, 5 %, 10 %, and 15 %, but it is judged that it is necessary to study in more detail the effect on the durability by changing the end and mixing amount of limestone powder to various levels in the future.

키워드 : 석회석미분말, 내구성, 염소이온, 탄산화, 황산염침식

Keywords : Limestone powder, Durability, Chloride ion, Carbonation, Sulfate attack

1. 서론

콘크리트는 현대 건설 분야에서 가장 널리 사용되는 재료 중 하나이다. 그러나 시간이 지남에 따라 콘크리트는 환경 영향과 노후화로 인해 성능저하가 필연적으로 발생하게 된다. 이에 따라 콘크리트의 내구성을 향상시키기 위한 다양한 연구와 개발이 진행되고 있다. 그 중에서 석회석미분말을 사용하여 콘크리트의 내구성 향상을 위한 연구가 많이 진행되고 있다(Wang et al. 2023; Adewumi et al. 2021; Lv et al. 2024). 석회석은 시멘트제조에 중요한 재료이기도 하며, 석회석미분말은 자연적으로 발생하는 미세한 입자로서 콘크리트의 물리적, 화학적 특성을 개선할 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 포틀랜드 시멘트에 석회석을 첨가하면 압축 강도, 단위수량, 작업성, 내구성 및 시멘트 수화의 메커니즘 및 동역학

에 대한 여러 효과와 같은 여러 시멘트 특성이 크게 향상될 수 있다.

최근 부가가치가 높은 고품질의 콘크리트를 제조하기 위한 목적으로 콘크리트의 고유동, 고강도 및 고내구성을 포함한 고성능화에 대한 관심이 크게 증가되면서 각종 광물질혼화제 및 화학혼화제의 개발에 따른 연구 성과들이 발표되고 있다(Lv et al. 2024; Lu et al. 2023). 특히 자원고갈과 환경오염에 대한 사회적 관심이 집중되면서 산업부산물이나 산업폐기물 등을 건설재료로 활용하는 방안이 다각도로 검증되는 가운데 광물질혼화제 중 플라이애시, 고로슬래그 및 실리카흄 등과 같은 산업부산물을 재활용함으로써 콘크리트의 물성 및 내구성의 개선뿐만 아니라 제조 원가에도 크게 기여하는 고품질의 콘크리트를 제조하기 위한 관련 연구가 활발히 진행되고 있다(Choi 2012).

Sawara and Yamamura(2000)에 의하면, 초미립의 석회석미분말 슬러리를 소량 시멘트에 첨가함으로써 콘크리트의 작업성을

* Corresponding author E-mail: pkp78@gei.re.kr

¹조선대학교 토목공학과 교수 (Department of Civill Engineering, Chosun University, Yuseong-Gu, Gwangju, 61452, Korea)

²(재)녹색에너지연구원 전략기획단 팀장 (Department of Strategic Planning Division, Moc-Po si, Jeollanam-do, 58656, korea)

대폭 개선한 고유동 및 고강도콘크리트를 제조한 바 있으며, 석회석미분말은 불활성으로 인하여 경화 시의 수화열을 저감할 수 있으므로 온도 상승량을 억제하는 배합설계가 가능하므로 매스콘크리트의 대상구조물에 적합하다고 발표하였다.

뿐만 아니라 최근 탄소중립선언으로 시멘트 산업에서는 시멘트를 일부 치환하여 사용함으로써 탄소배출량을 감축하는 수단으로 제시하고 있다. 최근 해외에서는 석회석 미분말을 고강도, 고유동 콘크리트 제조에 이용하거나 CO₂ 발생량이 적고 환경친화적인 충전시멘트의 기본적인 재료로 사용하고 있다. 특히, 석회석은 국내에서 자급 가능한 자원으로 이것을 이용하여 새로운 기능을 도출한다는 것은 부존자원의 유효이용이라는 관점에서도 매우 중요하다. 따라서 국내에서 비교적 용이하게 입수할 수 있는 석회석을 미분쇄한 석회석미분말을 콘크리트용 혼화재로 활용하기 위한 연구에 착안하게 되었다. 주지하는 바와 같이 석회석 미분말은 시멘트 페이스트 중에서 거의 화학반응을 일으키지 않는 불활성으로서 강도발현에는 기여하지 않지만 유동성이 향상되며 블리딩 저감 및 수화열억제 등에 우수한 효과를 나타낸 것으로 알려져 있다 (Wang et al. 2018).

본 연구에서는 석회석미분말을 콘크리트용 혼화재로 활용하기 위한 연구의 일환으로 시멘트 중량의 0, 5, 10 및 15%의 4단계로 치환하여 제조한 시멘트 경화체의 압축강도와 염소이온 침투저항성, 탄산화 및 황산염침식 저항성 등에 대한 내구 성능을 비교 평가하였다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

(1) 시멘트 : 국내의 S사에서 생산되는 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 시멘트의 물리적 성질 및 클링커 조성광물은 Table 1에 나타내었다.

(2) 석회석미분말 : 석회석미분말(Limestone powder)은 석회석

Table 1. Physical properties and mineralogical components of ordinary portland cement

Physical properties	
Specific gravity	3.15
Specific surface area (cm ² /g)	3,280
Mineralogical components (%)	
Alite, C ₃ S	54.9
Belite, C ₂ S	16.6
Aluminate, C ₃ A	10.3
Ferrite, C ₄ AF	9.1

을 분쇄하여 얻은 평균입경이 18,62 μm이며, 비중 및 분말도가 각각 2,71 및 1,010 m²/kg인 국내산 W사의 것을 시멘트 중량의 0, 5, 10, 15 % 치환하여 사용하였다. Fig. 1에 사용된 석회석미분말의 입도분포곡선을 나타내었다.

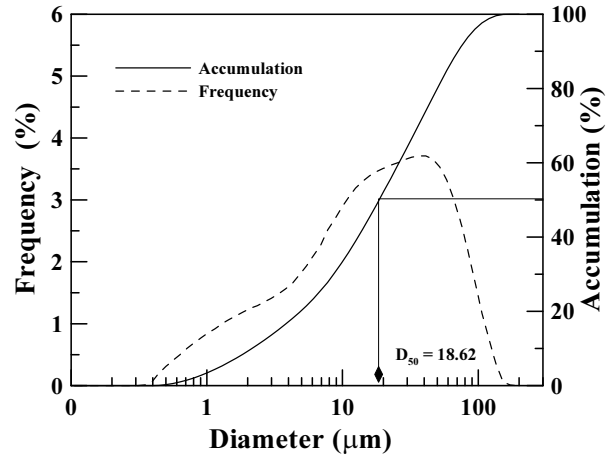


Fig. 1. Particle size distribution of Limestone powder

(3) 골재 : 경북 경산지역에서 생산된 부순골재로서 잔골재와 굵은골재의 비중은 각각 2,60 및 2,65인 것을 사용하였으며, 굵은골재의 최대치수는 20 mm이다. 골재의 물리적 성질을 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Physical properties of aggregates

	Fine	Coarse
G _{max} (mm)	-	20
Specific gravity (g/cm ³)	2.60	2.65
Absorption (%)	1.20	0.80
F.M.	2.80	7.30

(4) 고성능감수제 : 주성분이 폴리카르보산계인 고성능감수제를 결합재 중량에 대하여 0,8 % 사용하였으며 물리적 성질은 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Physical properties of superplasticizer

Main component	Polycarboxylic acid based compound
Appearance	Dark brown liquid
Solid content	18.5 %
Specific gravity	1.05 ± 0.02
pH	2.5 ± 1.0

2.2 실험방법

(1) 염소이온 침투저항성 시험 : 콘크리트의 염소이온 침투저항성을 평가하기 위하여 KS F 2711 ‘전기전도도에 의한 콘크리트의 염소이온투과저항성시험 방법’에 준하여 Fig. 2와 같이 음극셀(Cathode 용액은 0.5M의 NaCl, 양극셀(Anode) 용액은 포화수산화칼슘(sat. Ca(OH)₂)으로 확산셀을 구성하였다. 이때 전위차 DC 60 V로서 6시간 동안 통전시켰으며, 시험편에 흐르는 전류를 30분 간격으로 측정하여 총 통과전하량(Total passed charge)은 식 (1)로 계산하였다.

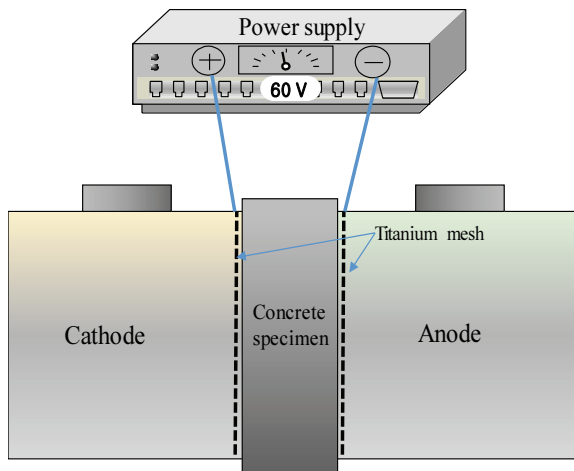


Fig. 2. Diffusion cell

$$Q = 900(I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{330} + I_{360}) \quad (1)$$

여기서,

Q : 총통과전하량 (Coulomb), I_t : t분에서의 전류값 (A)

그리고 통과전하량을 측정한 시험편을 쪼개어 표면에 0.1N의 질산은(AgNO₃)용액을 분무하여 AgCl이 침전되어 은색으로 변화하는 지점까지를 염소이온 침투 깊이로 하였다. 염소이온의 침투 깊이로부터 식 (2)를 이용하여 비정상 상태의 촉진염소이온 확산 계수를 구하였다.

$$D_c = \frac{RTL}{zFU} \cdot \frac{x_d - \alpha \sqrt{x_d}}{t} \quad (2)$$

여기서,

R : 기체 상수(J/mol · K), L : 시편두께(m), F : 패러데이 상수

(J/V · mol), X_d : 비색법에 의한 침투 깊이(m), a : 실험 상수, T : 절대 온도(K), U : 전위차(V), z : 이온 전자가, t : 전위차의 적용 시간(sec)

(2) 촉진탄산화 시험 : 제작된 시멘트 경화체를 20±1 °C의 수중에서 14일간 양생 후, 한 면만을 남기고 경화체의 표면에 콘크리트 보호용 도장재를 코팅하여 탄산화 촉진 시험을 실시하였다. 촉진 실험 조건은 온도 30 °C, 상대습도 60 %, CO₂농도 10 %로 설정하였으며, 중성화 깊이는 촉진개시 후 28일에 측정하였다. 탄산화 깊이는 시험체를 할렬인정하여 할렬면에 1 % 페놀프탈레인 용액(KS M 0015)을 분무한 후 표면에서부터 적자색으로 변색된 부분까지의 깊이를 10곳을 측정하여 평균값을 탄산화 깊이로 하였다.

(3) 황산염침식 시험 : ASTM C 1012에 준하여 담수 및 5 % 황산나트륨 용액에 시멘트 경화체를 침지시켜 담수에 침지한 시편의 압축강도에 대한 황산나트륨 용액에 침지한 모르타르의 압축강도를 측정하여 식 (3)으로 상대강도를 측정하였다. 또한 침지전의 길이와 각 재령에서의 길이를 측정하여 식 (4)와 같이 길이변화를 계산하여 황산염침식에 대한 특성을 평가하였다.

$$S(\%) = \frac{f_s}{f_T} \times 100 \quad (3)$$

여기서,

f_s, f_T : 5 % 황산나트륨 용액(Sulfate solution) 및 담수(Tap water)에 침지한 모르타르의 압축강도(MPa)

$$L(\%) = \frac{L_t - L_o}{L_o} \times 100 \quad (4)$$

여기서,

L_o, L_t : 침지전 및 침지 t재령에서의 모르타르 길이

2.3 배합

석회석미분말의 치환율에 따른 역학적 특성 및 내구성을 평가하기 위하여 물-결합재비를 0.45로 고정시키고, 치환율을 시멘트 중량에 대하여 0, 5, 10 및 15 % 4단계로 변화시켜 제조하였다. 또한 염소이온 침투저항성 및 촉진 탄산화 저항성을 평가하기 위하여 동일한 물-시멘트비와 석회석미분말의 치환율을 적용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 압축강도특성

석회석미분말의 치환율에 따른 시멘트 경화체의 압축강도 발현 특성은 다르게 나타난다. 하지만 일반적으로 석회석미분말은 시멘트와 비교하여 결합력이 약하여 압축강도가 감소하는 것으로 알려져 있다. 시멘트 중의 석회석미분말은 마이크로필러 효과로 인하여 10~15 %까지 치환한 경우 초기 재령에서 모르타르의 강도에 큰 영향을 미치지 않는다고 하며, 특히 높은 수준의 치환율은 상당한 강도 손실을 유발한다고 보고하였다. Koh et al.(2004)의 연구에서도 석회석미분말의 치환율이 증가할수록 단위시멘트량이 줄어들고 또한 석회석 미분말은 시멘트 수화반응에 거의 기여하지 못하므로 압축강도 발현에 영향을 거의 미치지 못한다고 하였다.

Fig. 3은 석회석미분말을 시멘트와 5, 10, 15 % 치환하여 제조한 모르타르의 압축강도를 치환하지 않은 모르타르에 대한 비율을 재령별로 나타낸 것이다. 이 그림에서 석회석미분말의 치환율이 증가할수록 모든 재령에서 모르타르의 압축강도는 감소하는 것을 알 수 있다. 특히 재령 28일에서 치환율이 5, 10, 15 %일 때의 모르타르의 압축강도는 치환하지 않은 것에 비하여 각각 5.6 %, 14.6 %, 및 23.6 % 정도의 감소율을 나타낸 것을 알 수 있다. 따라서 석회석미분말을 콘크리트에 치환할 때는 강도발현을 고려하여 적정 치환율을 설정하는 것이 중요하다.

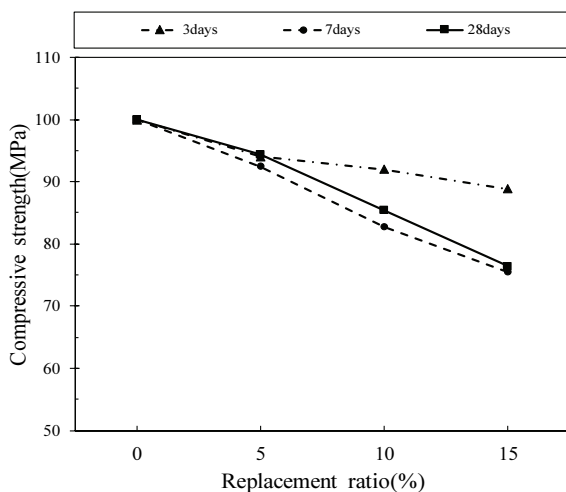


Fig. 3. Compressive strength ratio of cement mortar

3.2 염소이온침투저항성

석회석미분말의 입자는 매우 작기 때문에 콘크리트 내부의 미세한 공극을 채워주어 밀실한 구조를 만들어주기 때문에 염소이온의 이동을 억제할 수 있다고 판단된다. 석회석사용 시멘트 경화체의 연구에 의하면 석회석미분말을 사용할수록 재령과 관계없이 공극량이 낮게 나타나는 것으로 보고하였다. 그러나 염소이온 침투 저항 특성은 다양한 요소에 영향을 받을 수 있으며, 석회석미분말 외에도 콘크리트의 혼합 조성, 시멘트 종류, 혼화재료 등 다른 요소들이 결과에 영향을 미칠 수 있다. 본 연구에서는 석회석미분말을 혼합한 모르타르의 염소이온 침투저항성을 알아보기 위하여 전위차에 의한 촉진 염소이온 침투확산 시험법으로 평가하였다. 이를 이용하여 구한 총 통과전하량과 염소이온 침투깊이를 재령 28일 및 91일에 측정된 후 확산계수를 산정한 결과를 Fig. 4 및 Fig. 5에 정리하여 나타내었다.

Table 4. Chloride ions penetrability according to total passed charge (KS F 2711, ASTM C 1202)

Total passed charge (coulomb)	Chloride ions permeability
> 4000	High
2000~4000	Moderate
1000~2000	Low
100~1000	Very low
< 100	Negligible

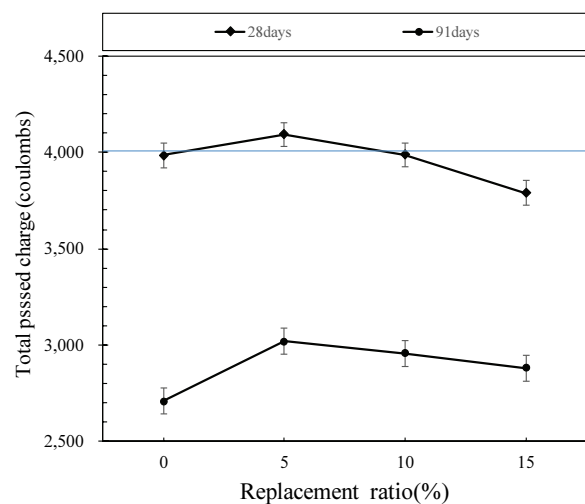


Fig. 4. Total passed charge of cement mortar

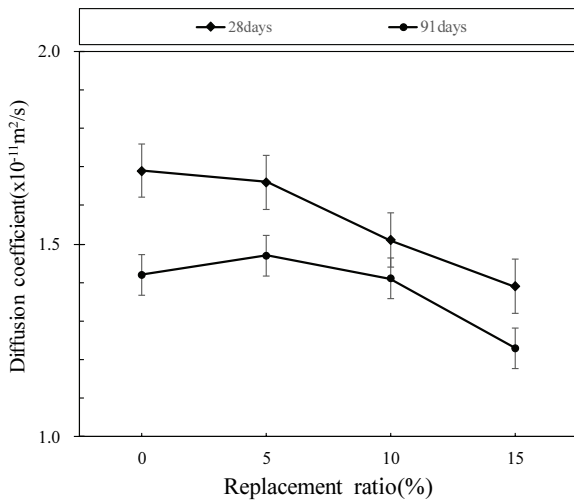


Fig. 5. Diffusion coefficient of cement mortar

Fig. 4에서 나타난 바와 같이 재령 28일에 치환율 5 %의 경우 총통과전하량이 4,092 coulomb으로 Table 4에서 나타난 염소이온 침투성능이 High로 나타났으나 그 이외의 배합에서는 모두 ‘Moderate’ 수준을 나타내었다. 한편, 재령 91일에서는 치환율에 관계없이 모두 2,709~3,020 coulomb으로 ‘Moderate’ 수준을 나타내었다.

그리고 Fig. 5에 석회석미분말을 5, 10 및 15 % 치환하여 제조한 모르타르의 재령 28일 및 91일에서의 염소이온 확산계수를 나타내었다. 이 그림에서와 같이 석회석미분말을 혼합한 모르타르의 경우 재령 28일에 치환율이 증가할수록 염소이온 확산계수가 기준 모르타르에 비하여 낮은 값을 나타내었다. Hornain et al.(1995)의 실험 결과에서도 석회석미분말을 첨가하면 염화물 이온의 확산계수가 감소한다고 보고하였으며, Moon et al.(2001), Koh et al.(2004)의 연구 결과에서도 석회석미분말은 다른 광물질혼화재와는 상이하게 시멘트의 수화생성물과 반응을 일으키지 않는다고 하였다. 이러한 이유는 석회석미분말의 충전효과(micro-filler effect)에 의하여 석회석미분말을 혼합한 시멘트 경화체의 공극구조가 석회석미분말을 치환하지 않은 경화체보다 훨씬 치밀해진 탓으로 생각되며, 최적의 치환율이 존재하고 있음을 알 수 있다 (Nagataki et al. 1995; Hassan et al. 2000).

3.3 탄산화

탄산화는 콘크리트가 대기에 노출될 경우 이산화탄소와 결합하여 수산화칼슘이 탄산칼슘으로 전환되는 현상으로 콘크리트의 강도와 내구성을 저하시키는 주요 원인 중 하나이다.

석회석미분말을 혼합하여 사용한 한 석회석미분말을 혼합한 시멘트 경화체의 탄산화에 대한 특성을 알아보기 위하여 촉진 탄산화 시험 후 촉진 재령 28일 후 페놀프탈레인 용액을 공시체에 분무하여 탄산화 평균깊이를 측정하여 Fig. 6에 나타내었다.

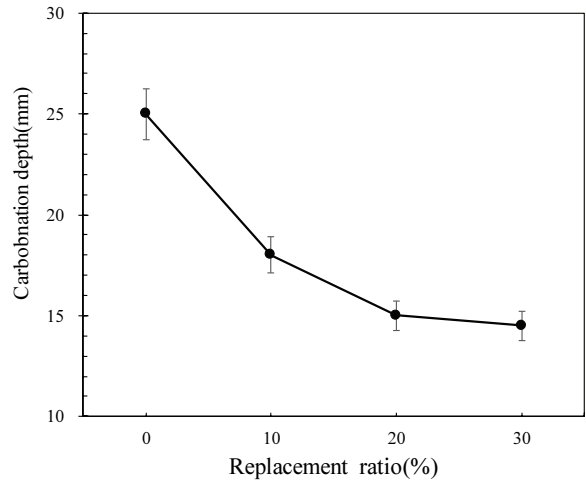


Fig. 6. Carbonation depth of cement concrete

Fig. 6에 나타난 바와 같이, 석회석미분말의 치환율이 증가할수록 석회석미분말을 치환하지 않은 것에 비하여 콘크리트의 탄산화 저항성이 우수하게 나타난 것을 알 수 있다. 이는 염소이온 침투 저항성 결과와 유사하게 석회석미분말의 충전효과로 공극률을 감소시켰을 뿐만 아니라 수산화칼슘 양의 증가와 시멘트 알칼리성 증가 등의 효과로 탄산화 저항성이 향상된 것으로 판단된다(Choi 2012; Kang 2023).

3.4 황산염침식 저항성

석회석미분말을 사용한 시멘트경화체의 화학저항성을 평가하기 위하여 석회석미분말을 보통포틀랜드시멘트와 0, 5, 10 및 15 %로 치환하여 제조한 모르타르를 대상으로 황산나트륨 용액에 재령 1년까지 침지한 후 압축강도와 길이변화를 측정하여 비교 평가하였다.

우선, 5 % 황산나트륨 용액에 침지한 모르타르의 압축강도를 수중양생한 모르타르의 압축강도와 비교하여 강도비로 나타낸 것이 Fig. 7이다. 이 그림에서 알 수 있듯이, 침지재령 초기에 석회석미분말의 치환율에 관계없이 모든 배합에서 담수에서 수중양생한 경우보다 높은 압축강도를 발현하는 것을 알 수 있다. 이는 Irassar and Batic(1989) 및 Al-Amoudi et al.(1994)의 연구결과에서와 마

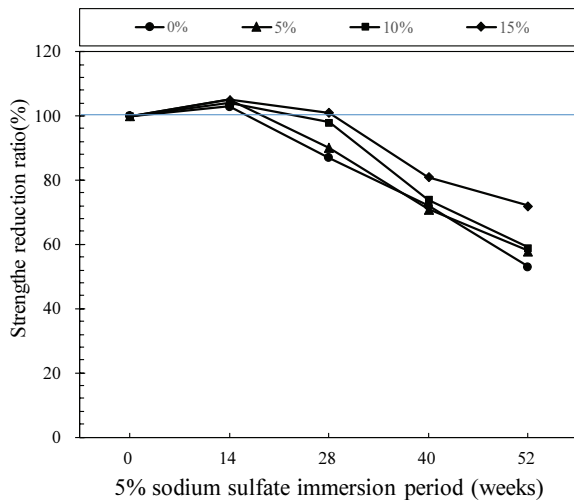


Fig. 7. Strength reduction ratio of cement mortar

찬가지로 황산나트륨 침식에 의하여 형성된 반응 생성물이 모르타르의 공극을 메우는 효과로 인하여, 오히려 담수에 침지한 모르타르에 비하여 더 큰 강도발현에 기인한 탓으로 생각된다. 그러나, 침지재령이 증가함에 따라 모르타르의 상대강도는 감소하기 시작하였고 침지재령 1년이 경과한 경우 치환율에 따라 각각 53 %, 58 %, 59 % 및 72 %로 치환율이 15 %에서 상대강도 결과값이 가장 높게 나타났다.

그리고 5 % 황산나트륨 용액에 침지한 석회석미분말 혼합 모르타르의 재령별 팽창특성을 나타낸 것이 Fig. 8이다. 이 그림에서 알 수 있듯이, 석회석미분말 치환율에 따라 팽창특성이 다르게 나타났다으며, 전반적으로 재령이 증가함에 따라 팽창량도 크게 나타

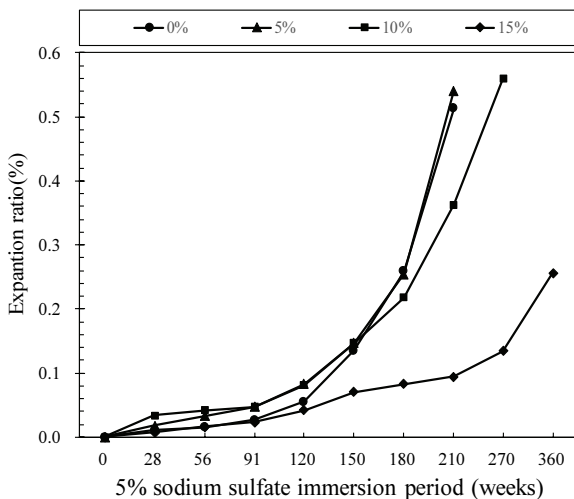


Fig. 8. Expansion ratio of cement mortar

남을 확인할 수 있었으며, 또한 석회석미분말의 혼합율에 관계없이 침지재령 약 91일 이후부터 팽창이 급격하게 일어남을 알 수 있었다. Cohen and Mather(1991)는 시멘트 경화체의 한계 팽창량을 0.4 %로 제안하였는데 석회석미분말을 사용하지 않은 기준 모르타르와 5 %를 치환한 모르타르의 경우 재령 210일 이후에 0.51 및 0.54 %의 값을 나타내었으며, 치환율 10 %인 모르타르는 재령 270일에 0.56 %의 값으로 한계팽창율을 초과하였으며, 이후의 재령에서는 과도한 팽창으로 인하여 시편이 파괴되어 더 이상 측정이 불가능하였다. 이에 비하여 치환율이 15 %인 모르타르의 경우 재령 1년에서도 0.26 %로서 황산나트륨 침에 대한 저항성이 우수한 결과를 나타내었다.

4. 결론

석회석미분말을 콘크리트용 재료로 활용하기 위하여 치환율을 달리하여 제조한 모르타르의 역학적 특성 및 염소이온 침투저항성, 탄산화 및 황산염침투저항성을 시험을 통하여 내구특성을 평가하였다.

1. 석회석미분말은 시멘트 수화반응에 기여하지 못함으로 이를 사용한 모르타르의 압축강도 시험결과 치환율이 증가할수록 압축강도는 감소하였다.
2. 석회석미분말을 사용한 모르타르의 염소이온 침투저항성을 평가한 결과 석회석미분말의 작은 입자가 시멘트 경화체 내부의 미세한 공극을 채워주어 밀실한 구조를 만들어주어 치환하지 않은 기준 모르타르에 비하여 우수한 결과를 나타내었다.
3. 석회석미분말을 혼합하여 사용한 시멘트 콘크리트의 촉진탄산화 시험을 통하여 탄산화 저항성을 평가한 결과 석회석미분말의 충전효과로 탄산화 저항성을 향상된 것으로 나타났다.
4. 석회석미분말을 사용한 시멘트경화체를 제조하여 5 % 황산나트륨 용액에 침지한 모르타르의 압축강도 및 길이변화를 측정하여 화학저항성을 평가한 결과 치환율이 증가할수록 우수한 결과를 나타내었다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 과제(결과물)는 2023년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 결과입니다(과제관리번호: 2021RIS-002).

References

- Adewumi, A.A., Ariffin, M.A.M., Yusuf, M.O., Maslehuddin, M., Ismail, M. (2021). Effect of sodium hydroxide concentration on strength and microstructure of alkali-activated natural pozzolan and limestone powder mortar, *Construction and Building Materials*, **271**, 121530.
- Al-Amoudi, O.S.B., Rasheeduzzafar, Maslehuddin, M., Abduljawwad, S.N. (1994). Influence of chloride ions on sulphate deterioration in plain and blended cements, *Magazine of Concrete Research*, **46(167)**, 113-123.
- Ampadu, K.O., Torii, K., Kawamura, M. (1999). Beneficial effect of fly ash on chloride diffusivity of hardened cement paste, *Cement and Concrete Research*, **29(4)**, 585-590.
- ASTM C 1202 (1997). Standard Method of Test for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride ions Penetration, American Society for Testing and Materials, PA.
- Choi, W.H. (2012) A Study on the Mechanical and Durability Characteristics of Limestone Powder Added Concrete for Environment-Friendly Pavement, Master's Thesis, Kangwon National University [in Korean].
- Cohen, M.D., Mather, B. (1991). Sulfate attack on concrete: research needs, *Materials Journal*, **88(1)**, 62-69.
- Hanehara, S., Yamada, K. (1999). Interaction between cement and chemical admixture from the point of cement hydration, absorption behaviour of admixture, and paste rheology, *Cement and Concrete Research*, **29(8)**, 1159-1165.
- Hartshorn, S.A., Sharp, J.H., Swamy, R.N. (2002). The thaumasite form of sulfate attack in Portland-limestone cement mortars stored in magnesium sulfate solution, *Cement and Concrete Composites*, **24(3-4)**, 351-359.
- Hassan, K.E., Cabrera, J.G., Maliehe, R.S. (2000). The effect of mineral admixtures on the properties of high-performance concrete, *Cement and Concrete Composites*, **22(4)**, 267-271.
- Hornain, H., Marchand, J., Duhot, V., Moranville-Regourd, M. (1995). Diffusion of chloride ions in limestone filler blended cement pastes and mortars, *Cement and Concrete Research*, **25(8)**, 1667-1678.
- Irassar, F., Batic, O. (1989). Effects of low calcium fly ash on sulfate resistance of OPC cement, *Cement and Concrete Research*, **19(2)**, 194-202.
- Kang, I.K. (2023). A Fundamental Study on Hydration Properties of Portland Cement with Limestone Powder for Carbon Neutral, Master's Thesis, Kongju National University [in Korean].
- Koh, K.T., Yoo, W.W., Han, S.M. (2004). A study on strength development and resistance to sulfate attack of mortar incorporating limestone powder, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **16(3)**, 303-310.
- Lu, L., Yang, Z., Li, K., Zhang, K., Yan, X., Marano, G. C., Briseghella, B. (2023). Synergy of inert granite powder and active mineral admixture in manufactured sand mortar: the effect on mechanical properties, chloride permeability and water absorption properties, *Construction and Building Materials*, **408**, 133660.
- Lv, P., Long, G., Xie, Y., Peng, J., Guo, S. (2024). Study on the mitigation of drying shrinkage and crack of limestone powder cement paste and its mechanism, *Construction and Building Materials*, **411**, 134325.
- Moon, H.Y., Lee, S.T., Kim, H.S. (2001). The selection of effective Korean cement for sulfate environments, *Proceeding of the 3rd International Conference on Concrete Under Severe Conditions, CONSEC*, **1**, 349-356 [in Korean].
- Moon, H.Y., Lee, S.T., Kim, J.P. (2004). Experimental approach on sulfate attack mechanism of ordinary Portland cement matrix: part I. sodium sulfate attack, *Journal of the Korea Concrete Institute*, **16(4)**, 557-564 [in Korean].
- Nagataki, S., Otsuki, N., Hisada, M., Mizuno, K. (1995). A study on the characterization of silica fume and the evaluation of properties of concrete containing silica fume, *Doboku Gakkai Ronbunshu*, **1995(520)**, 87-98.
- Naik, T.R., Singh, S.S., Hossain, M.M. (1995). Properties of high performance concrete systems incorporating large amounts of high-lime fly ash, *Construction and Building Materials*, **9(4)**, 195-204.
- Sawara, H., Yamamura, T. (2000). Concrete properties which contain heavy calcium slurry carbonate crushed by wet process, *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, **22(2)**, 37-42.
- Vuk, T., Gabrovšek, R., Kaučič, V. (2002). The influence of mineral admixtures on sulfate resistance of limestone cement pastes aged in cold MgSO₄ solution, *Cement and Concrete Research*, **32(6)**, 943-948.
- Wang, C., Jin, Z., Liu, G., Dong, W., Pang, B., Ding, X. (2023).

Mechanisms of chloride transport in low carbon marine concrete: an alkali-activated slag system with high limestone powder, *Journal of Building Engineering*, **72**, 106539.

Wang, D., Shi, C., Farzadnia, N., Shi, Z., Jia, H., Ou, Z. (2018). A review on use of limestone powder in cement-based materials: mechanism, hydration and microstructures, *Construction and Building Materials*, **181**, 659-672.

Wee, T.H., Suryavanshi, A.K., Wong, S.F., Rahman, A.A. (2000). Sulfate resistance of concrete containing mineral admixtures, *Materials Journal*, **97(5)**, 536-549.

석회석 미분말을 혼합한 시멘트 경화체의 내구성능 평가

석회석미분말을 콘크리트용 재료로 활용하기 위하여 치환율을 달리하여 제조한 시멘트 경화체의 역학적 특성 및 내구특성을 평가하였다. 일반적으로 석회석미분말은 시멘트 수화반응에 기여하지 못함으로 이를 사용한 모르타르의 압축강도 시험결과 치환율이 증가할수록 압축강도는 감소하였다. 그러나 석회석미분말을 사용한 모르타르의 염소이온 침투저항성, 탄산화저항성 및 화학저항성 등 내구성능을 평가한 결과 석회석미분말의 작은 입자가 시멘트 경화체 내부의 미세한 공극을 채워주는 마이크로 필러효과로 인하여 치환하지 않은 기준 모르타르에 비하여 우수한 결과를 나타내었다. 따라서 석회석미분말은 콘크리트의 내구성 향상을 위한 효과적인 방법으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구에서는 석회석미분말의 치환량을 0 %, 5 %, 10 %, 15 %로 변화시켜 내구성능을 평가하였으나 향후 석회석미분말의 종류와 치환량을 다양한 수준으로 변화시켜 내구성능에 미치는 영향을 보다 자세히 연구할 필요가 있을 것으로 판단된다.