

석회석 미분말을 사용한 3성분계 콘크리트의 역학적 특성 및 내구성능 연구

Mechanical and Durable Properties of Concrete Containing Slag and Limestone Powder

오 병 환* 박 대 균** 박 재 명*** 이 종 화***
Oh, Byung Hwan Park, Dae Gyun Park, Jae Myung Lee, Jong Hwa

ABSTRACT

Generally, the limestone powder is known to have some advantages in rheology of fresh concrete, resistance of material separation, and enhancement of strength at early ages. Recently, great attention is being paid to limestone blended cements in the manufacture of concrete, especially in the countries of Europe.

The purpose of the present study is to establish the mechanical and durable properties of concrete containing slag and limestone powder. In this paper, the chloride ion penetration test, rapid carbonation test and rapid freezing-thawing test is carried out to study durability of concrete with various content of limestone powder. Futhermore, the strength of concrete is evaluated with various ages.

1. 서론

최근에는 콘크리트의 강도를 높이는 연구 이외에도, 유동성, 내구성 등을 증진시키기 위한 고강도·고성능 콘크리트에 대한 연구가 활발히 이루어지면서, 새로운 미분말의 혼화재를 사용한 콘크리트에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재 우리나라를 비롯한 여러 나라에서는 주로 슬래그와 플라이 애쉬를 혼화재로서 사용하고 있으며, 실리카 흡은 고가이기 때문에 많이 사용되지 못하는 실정이다. 우리나라에서는 특히 분체계 고유동 콘크리트로서 주로 슬래그미분말과 플라이 애쉬를 혼입한 콘크리트를 사용하는데 플라이 애쉬는 재료의 수급이 불안정하고 강열감량에 따른 공기량의 변화 등 콘크리트의 품질안전성의 확보하기가 어렵다. 이에 따라 최근에는 플라이 애쉬를 석회석 미분말로 대체하여 시공하는 사례가 늘고 있다.

* 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수

** 정회원, 서울대학교 토목공학과 박사과정

*** 한라콘크리트 주식회사

국의 여러 나라에서는 석회석 미분말을 다량으로 함유한 복합 포틀랜드 시멘트를 사용하고 있고, 최근 들어 석회석 미분말에 대한 규격을 제정하려는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 일본에서도 「석회석 미분말 품질규격(안)」을 제정하기에 이르렀다. 석회석 미분말에 대한 국제적인 관심과 국내의 필요성을 생각할 때, 우리나라에서도 석회석 미분말에 대한 규격화가 시급한 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 국내외적 필요에 맞춰 석회석 미분말의 분말도, 혼입율에 따른 콘크리트의 역학적 특성의 변화와 내구성에 미치는 영향을 포괄적 실험을 통하여 규명함으로써 석회석 미분말을 사용한 콘크리트의 실용화 토대를 구축하는데 본 연구의 목적이 있다.

2. 실험개요

2.1 사용재료 및 배합

본 연구에서는 결합재로서 시멘트와 슬래그 미분말 그리고, 석회석을 미분말을 사용하였는데, 시멘트, 슬래그 미분말, 석회석 미분말의 비중은 각각 3.15, 2.9, 2.5 이고, 슬래그 미분말과 석회석 미분말의 분말도는 각각 4,500cm²/g과 6,000cm²/g을 사용하였다. 표 1은 본 실험에서 사용된 슬래그 미분말과 석회석 미분말의 화학적조성을 나타낸 것이다. 잔골재는 강사로서 비중은 2.58, 조립물은 2.81이었으며, 굵은 골재의 비중은 2.6이었다. 표 2는 석회석 미분말의 치환율에 따른 배합비를 나타낸 것이다. 여기서, SP는 슬래그 미분말을, LSP는 석회석 미분말을 나타낸다.

표 1 슬래그 미분말과 석회석 미분말의 화학적 조성

성분 [%]	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ig-loss
슬래그 미분말	34.81	16.19	0.47	41.25	8.05	0.16	-0.85
석회석 미분말	0.73	0.25	0.15	54.31	0.64	-	43.39

표 2 석회석 미분말의 치환율에 따른 배합비

치환율 [%]			W/B	단위수량 [kg/m ³]	결합재[kg/m ³]			잔골재 [kg/m ³]	굵은골재 [kg/m ³]
OPC	SP	LSP			OPC	SP	LSP		
100	0	0	0.5	175	350	0	0	793	901
30	50	20			105	175	70	781	888
30	45	25			105	157	88	781	887
30	40	30			105	140	105	780	886

2.2 실험변수 및 실험방법

본 연구에서는 석회석 미분말의 혼입율을 주요변수로 하였다. 시멘트의 혼입율은 30%로 고정하였고, 석회석 미분말의 혼입율을 20, 25, 30%으로, 이에따라 슬래그 미분말의 치환율은 50, 45, 40%로

하였다. 본 연구는 석회석 미분말을 사용한 콘크리트의 압축강도실험과 내구성실험으로 나눌 수 있는데, 압축강도는 KS F 2405에서 제시된 방법에 따라 재령 7, 28, 56, 100일에서 측정하였다. 내구성실험으로서 염소이온 투과시험(ASTM C 1202)과 중성화시험 및 동결융해 저항성시험을 수행하였다.

콘크리트의 촉진중성화시험은 10×10cm의 원주형공시체를 사용하였고, 시편을 28일간 수중양생한 후, 온도 30℃, 상대습도 60%, CO₂ 농도 10%의 환경 하에서 수행하였다. 동결융해 시험은 KS F 2456에 의거 공기 중 급속동결 및 수중 급속융해 시험법으로 하였으며 재령 14일에서 시험을 하였다. 이때 콘크리트의 동탄성계수는 “초음파 속도에 의한 동탄성계수 시험법”에 의해서 전파시간을 측정하여 전파속도를 구하고 이것을 이용하여 동탄성계수를 계산하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 압축강도

그림 1은 재령에 따른 콘크리트의 압축강도를 나타낸 것인데, 시멘트의 비율을 30%로 고정하고 석회석 미분말의 치환율을 20~30%로 변화시켰다. 그림에서 알 수 있듯이 재령 28일 까지는 석회석 미분말을 혼입하지 않은 콘크리트의 압축강도가 석회석 미분말을 혼입한 경우보다 크게 나타나고 있다. 이것은 시멘트의 일부가 수경성이 없는 석회석 미분말로 치환되어 시멘트의 혼입량이 작기 때문인 것으로 판단된다. 그러나, 재령 56일 이후에는 석회석 미분말을 혼입한 콘크리트의 압축강도가 석회석 미분말을 사용하지 않은 콘크리트의 압축강도보다 커지는데, 이것은 석회석 미분말과 함께 사용된 고로슬래그 미분말의 잠재수경성과 석회석 미분말의 공극 충전효과에 의한 것으로 판단된다.

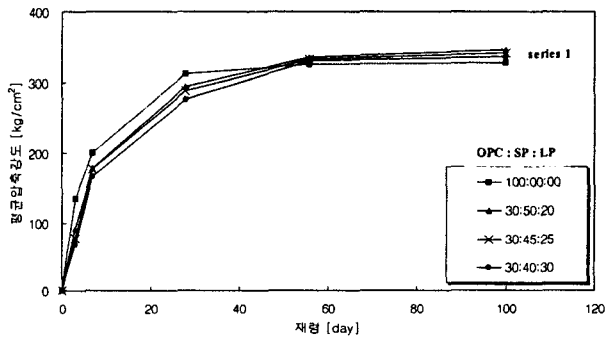


그림 1 재령에 따른 석회석 미분말 콘크리트의 평균압축강도

3.2 염소이온 투과저항성 및 염소이온 확산계수

본 절에서는 석회석 미분말을 사용한 콘크리트의 투수성을 평가하기 위하여 ASTM C 1202에 제시된 방법에 따라 염소이온 투과성 시험을 수행하였다. 그림 2는 석회석 미분말의 혼입율에 따라 통과전하량을 나타낸 것으로서, ASTM에서는 통과전하량이 많을수록 투수성이 높은 것으로 평가하는데, 그림에는 본 실험에서 얻어진 실험결과와 함께 ASTM에서 제시하는 기준도 제시하였다.

그림에서 알 수 있듯이 석회석 미분말을 혼입한

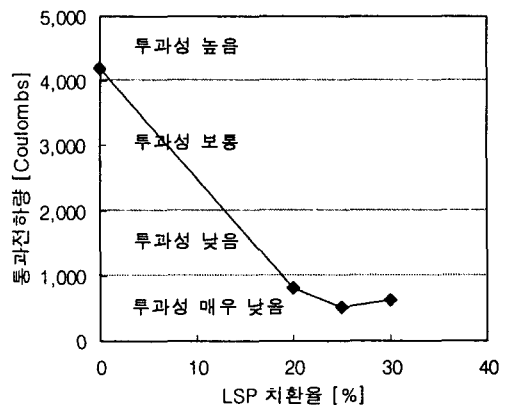


그림 2 LSP의 혼입율에 따른 염소이온 투과성

콘크리트는 통과전하량이 혼입하지 않은 경우의 1/4 가량으로 나타났으며, 투과성은 매우 낮은 것으로 나타났다. 이렇게 석회석 미분말의 혼입에 의해서 콘크리트의 투수성이 감소하는 것은 결합재로서 사용된 고로슬래그 미분말의 잠재수경성과 함께 석회석 미분말의 공극 충전효과에 의한 것으로 판단된다.

3.3 중성화 저항성

본 연구에서는 석회석 미분말의 혼입이 콘크리트의 중성화에 미치는 영향을 규명하기 위하여 촉진 중성화시험을 수행하였고, 그 결과를 분석하였다.

그림 3은 석회석 미분말의 치환율과 촉진 중성화 실험기간에 따른 중성화깊이를 나타낸 것이다. 석회석 미분말을 혼입한 콘크리트는 보통 콘크리트보다 중성화깊이가 증가하는 것을 알 수 있는데, 이것은 기존의 연구결과와도 일치하는 것이다. 특히, 본 실험에서는 혼화재로서 석회석 미분말과 함께 고로슬래그 미분말을 첨가하였는데, 고로슬래그 미분말의 첨가에 의해서도 콘크리트의 중성화가 촉진된다고 알려져 있다. 이것은 시멘트 수화물인 수산화칼슘이 고로슬래그 미분말과 이차적으로 반응하는 과정에서 콘크리트의 알칼리성이 감소하기 때문이다.

시간에 따른 중성화깊이에 대해서는 여러 연구자들에 의해서 수학적인 모델이 제시되어 있는데, L. J. Parrot에 의해 제시된 식이 널리 사용되고 있으며, 이에 따르면, 중성화깊이와 시간의 제곱근은 서로 선형적인 관계를 나타낸다. 따라서, 그림 4에서는 가로축을 시간의 제곱근으로 하여 중성화깊이를 나타내었고, 이로부터 시간의 제곱근과 중성화깊이 사이의 관계를 선형적으로 회귀분석하였다. 그림 4를 살펴보면, 석회석 미분말을 혼입한 콘크리트가 혼입하지 않은 콘크리트보다 중성화 진행이 큰 것으로 나타나고 있으나, 석회석 미분말을 치환한 경우 혼입율에 따라서는 큰 차이를 보이지 않고, 특히 치환율이 25, 30%인 경우에는 거의 같은 결과를 나타내었다.

그림 5에서는 앞의 그림에서 회귀분석을 통하여 구한 직선의 기울기를 중성화지수로서 표시하였고, 석회석 미분말의 치환율에 따라서 콘크리트의 중성화지수를 도시하였다. 중성화지수가 크다는 것은 동일한 시간경과에 대해서 중성화깊이가 크다는 것을 의미하고, 중성화 속도가 크다는 의미가 된다. 그림 5를 살펴보면 석회석 미분말의 혼입에 의해서 콘크리트의 중성화지수가 증가하는 것을 알 수 있다.

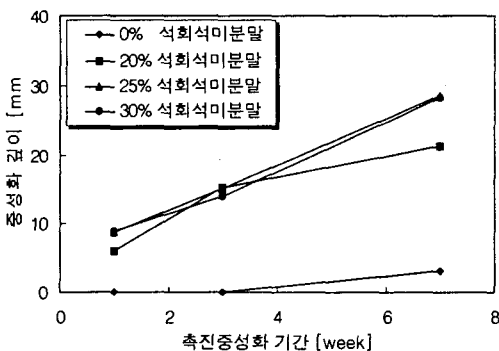


그림 3 중성화 기간에 따른 중성화 깊이

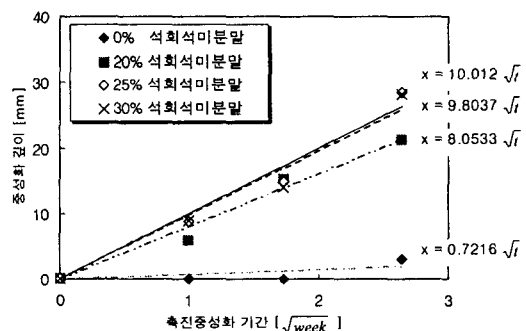


그림 4 중성화기간 \sqrt{t} 에 따른 중성화깊이 회귀분석

중성화에 대한 이와 같은 결과는 배합에 있어서 시멘트량을 줄이고 석회석 미분말을 대체하여 혼입한 경우의 중성화특성이며, 외국의 실험자료를 보면, [그림 6] 시멘트량을 동일하게 하고 추가로 석회석 미분말을 혼입한 경우에는 오히려 중성화 진행정도가 보통 콘크리트보다 낮아지는 것으로 보고하고 있다. 또한, 본 실험 연구에서는 석회석 미분말과 함께 슬래그를 혼입한 경우이기 때문에 중성화 진행이 슬래그에 의해 증진된 것으로 판단된다. 따라서, 석회석 미분말을 혼입한 경우에는 시멘트량을 줄이지 않고 배합한 경우에는 외국자료에서 보여주듯이 중성화 진행의 추가 문제점이 없어지는 것으로 판단된다.

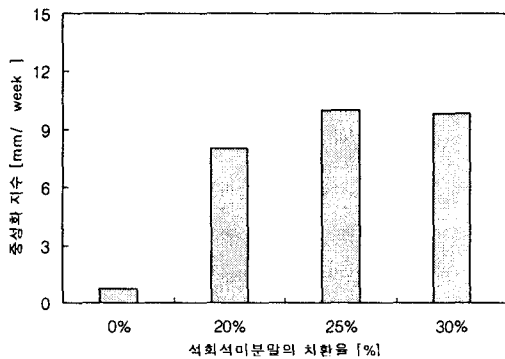


그림 5 석회석미분말의 치환율에 따른 중성화지수

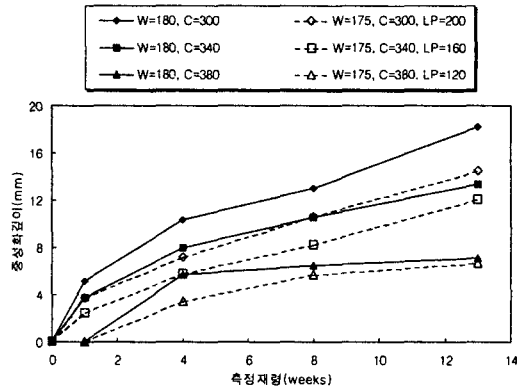


그림 6 석회석 미분말을 이용한 고유동 콘크리트의 중성화 (물-시멘트비 일정)

3.4 동결융해 저항성

본 연구에서는 석회석 미분말의 혼입에 따른 콘크리트의 동결융해에 대한 저항성을 규명하기 위하여, 서로 다른 치환율의 석회석 미분말을 첨가한 콘크리트에 대하여 동결융해실험을 수행하였는데, 석회석 미분말을 혼입한 콘크리트의 동결융해 저항성은 보통 콘크리트의 저항성보다 동등 이상으로 양호하게 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 국내외적 필요에 맞춰 석회석 미분말을 혼입한 콘크리트의 강도특성 및 내구 특성을 규명하고자 하였다. 강도특성 실험으로서 재령에 따른 압축강도를 측정하였고, 내구성 실험으로는 염소이온 투과시험, 중성화실험 그리고 동결융해 저항성 실험 등을 수행하였다.

재령 28일까지는 석회석 미분말을 혼입하지 않은 콘

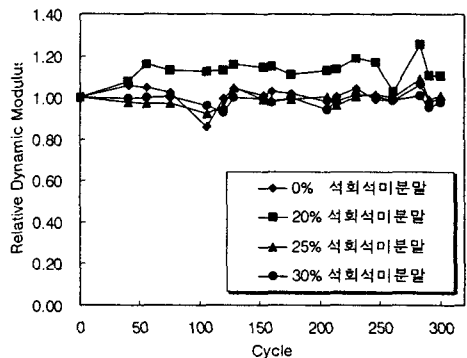


그림 7 동결융해 사이클에 따른 상대 동탄성계수

크리트의 압축강도가 석회석 미분말을 혼입한 경우보다 다소 크게 나타나고 있으나, 재령 56일 이후에는 석회석 미분말을 혼입한 콘크리트의 압축강도가 석회석 미분말을 사용하지 않은 콘크리트의 압축강도보다 커진다.

석회석 미분말을 혼입하지 않은 콘크리트는 물-시멘트비가 50%로서 염소이온의 투과성이 약간 높은 것으로 나타났으나, 석회석 미분말을 혼입한 콘크리트는 투과성이 매우 낮은 것으로 나타났다. 석회석 미분말의 치환을 변화에 따라서는 투수성은 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 석회석 미분말을 혼입한 콘크리트는 보통 콘크리트보다 중성화깊이가 증가하고, 석회석 미분말의 혼입율에 따라서는 중성화깊이는 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나, 외국의 실험자료를 보면 시멘트량을 동일하게 하고 추가로 석회석 미분말을 혼입한 경우에는 오히려 중성화 진행정도가 보통 콘크리트보다 낮아지는 것으로 보고하고 있다. 석회석 미분말을 혼입한 콘크리트의 동결융해 저항성은 보통 콘크리트의 저항성보다 동등 이상으로 양호하게 나타나고 있다.

참고문헌

1. 건설교통부 제정, "콘크리트 표준시방서", 1996
2. 오 병환, 김 중흡, 정 원기, 차 수원, "고품질 시공을 위한 고내구성 콘크리트의 개발 및 실용화 연구", 대한토목학회 학술발표회 논문집 1권, 1996년 11월, pp.298-302.
3. 오 병환, 한 승환, 이 용호, "공기량 및 물-시멘트비에 따른 콘크리트의 동결융해 특성에 관한 실험적 연구", 1993년도 콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, 제 5권 2호, 1993,11,6, pp.91-96.
4. 조중동, 홍상희, 조병영, 장기영, 한천구, "석회석 미분말의 종류 및 함유율 변화에 따른 고유동 콘크리트의 특성", 콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, 1999년 11월, pp. 297-270.
5. 조중동, 전충근, 조병영, 장기영, 한천구, "석회석 미분말의 종류 및 함유율 변화에 따른 고유동 모르타의 특성", 콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 1999년 5월, pp. 605-608.
6. 이민석, 윤철현, 최현국, "슬래그 시멘트의 수화반응에 미치는 석회석 분말의 영향", 콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, 1999년 5월, pp. 85-88.
7. 권영호, 유성열, 전성근, 김무한, "사용재료의 품질변동이 병용계 초유동 콘크리트의 품질특성에 미치는 영향", 한국레미콘 공업협회, 2000년 7월, pp. 16-29
8. ASTM C 666-97, "Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing"
9. M. Heikal, H. El-Didamony, M. S. Morsy, "Limestone-filled pozzolanic cement", cement and concrete research, 2000, 1827-1834
10. Andrade, C., Alonso, M.C., Petterson, K., Somerville, G. and Tuutti, K.(1994), "The Practical Assessment of Damage Due to Corrosion," Proceedings of Int. Conf. Concrete Across Borders 1994, Danish Concrete Association, Odense, pp.337-350.
11. Hausssmann, D.A.(1967), "Steel Corrosion in Concrete," Materials Protection, pp.19-23.