

순환잔골재 치환율에 따른 모르타르의 염화물이온확산계수 평가

Evaluation on the Chloride Ion Diffusion Coefficient of Mortar Depending on Replacement Ratio of Recycled Fine Aggregate

이 상 윤¹ 유 재 철^{1*} 김 규 용¹ 윤 민 호¹ 남 정 수² 최 형 길³

Lee, Sang-Yun¹ Yoo, Jae-Chul^{1*} Kim, Gyu-Yong¹ Yoon, Min-Ho¹ Nam, Jeong-Soo² Choi, Hyeong-Gil³
Dept. of Architectural Eng., Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea ¹
Institute of Innovative Research, Tokyo Institute of Technology, Yokohama, 226-8503, Japan ²
Dept. of Civil Eng. and Architecture, Muroran Institute of Technology, Muroran, 050-8585, Japan ³

Abstract

This paper presents an experimental study conducted to investigate the effect of recycled fine aggregate (RFA) on the mechanical properties and chloride diffusion behavior of mortar. The test results revealed that the addition of RFA plays an important role in the mechanical properties and pore structures of the investigated mortar specimens as well as chloride diffusion behavior. The mechanical properties such as compressive strength and flexural strength of recycled fine aggregate mortar (RFAM) were gradually decreased as RFA replacement ratio increase. The pore structure of RFAM was examined by permeability tests. The RFAM showed a increment in the permeability according to replacement ratio increase of RFA. But the chloride diffusion coefficient of RFAM was almost same up to 50% replacement ratio of RFA due to a chloride binding phenomenon of RFAM which may compensate the higher permeability of RFAM.

Keywords : recycled fine aggregate, attached mortar, chloride ion binding, chloride attack resistance

1. 서 론

콘크리트는 사회기반시설뿐만 아니라 일반 주택산업에서도 널리 활용되고 있는 건설재료이다[1]. 그러나 콘크리트는 그 사용량이 증가함에 따라 건설폐기물에 대한 처리 및 재활용에 대한 대책 또한 동반되어야 한다[2,3,4]. 2014년 발표된 환경부 보고서 「전국 폐기물 발생 및 처리 현황 (2013년도)」에 따르면 우리나라의 경우 건설폐기물 발생량은 매년

증가하고 있는 추세이다. 특히, 건설폐기물 가운데 콘크리트 폐기물이 차지하는 비율이 가장 높기 때문에[5] 현재까지 많은 연구자들에 의해 콘크리트폐기물의 처리 및 재활용 기술에 관한 연구가 이루어지고 있다.

건설재료 및 시공분야에서는 대부분의 연구들이 콘크리트 폐기물의 파쇄 및 선별과정을 거쳐 콘크리트용 골재로 재생산한 순환골재에 초점을 두고 있다[6,7,8,9,10]. 일반적으로 잘 알려진 순환골재를 사용한 콘크리트의 특징은 천연골재를 사용한 콘크리트에 비해 역학적 특성 및 내구성이 저하한다는 결과가 지배적이며, 콘크리트폐기물의 파쇄시 그 충격으로 인한 순환골재 강성의 저하, 부착모르타르로 인한 공극과 계면전이구역 (Interfacial Transition Zone, ITZ)의 증가가 위와 같은 순환골재를 사용한 콘크리트의 성능저하의 원인으로 보고되고 있다[7,8,9,10].

Received : May 30, 2016

Revision received : July 5, 2016

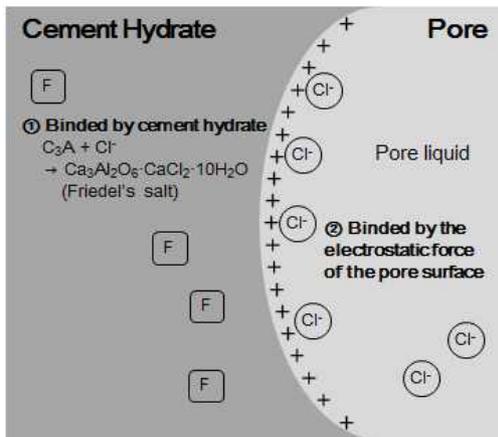
Accepted : October 7, 2016

* Corresponding author : Yoo, Jae-Chul

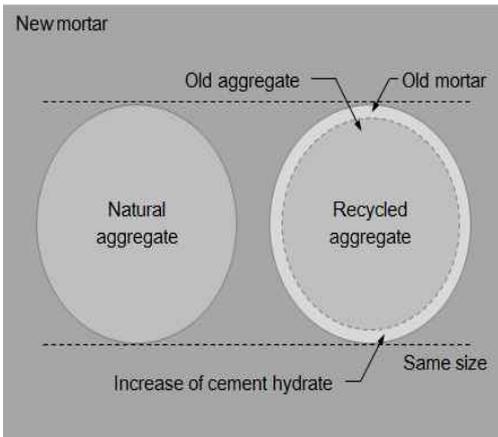
[Tel: 82-42-821-5629, E-mail: 52jc@cnu.ac.kr]

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

한편, 최근 보고된 순환골재 콘크리트의 내구특성에 관한 연구 가운데, 콘크리트의 내염해성에 관한 내용으로 Figure 1에서 나타낸 바와 같이 염화물이온 침투과정에서 순환굵은골재에 잔존하는 부착모르타르가 콘크리트 내부의 염화물고정효과에 기여한다는 결과가 발표되었다[11]. 이 연구결과에 따르면, 순환굵은골재에 잔존하는 부착모르타르양이 많을수록 증가하여 염화물이온이 고정화되는데 유리한 조건이 될 수 있다고 보고하고 있다. 이와 같은 순환굵은골재를 사용한 콘크리트의 염화물이온 고정화 메커니즘을 기반으로 부착모르타르의 양이 순환굵은골재에 비해 많은 순환잔골재를 사용할 경우, 염화물이온 고정화에 더 효율적일 것으로 예측할 수 있으나, 순환잔골재를 치환한 콘크리트 및 모르타르의 염화물이온 고정화 효과에 대한 연구는 보고되지 않은 실정이다.



a) Chloride ion binding mechanism of cement hydration product



b) Mortar increase effect of recycled coarse aggregate

Figure 1. Chloride ion binding mechanism of cement hydration product and recycled coarse aggregate[5]

이에 본 연구에서는 순환잔골재가 염화물이온 고정화 효과에 미치는 영향에 대한 기초적인 검토단계로서, 순환잔골재를 천연잔골재 대비 각각 0, 30, 50 및 100%로 치환한 모르타르를 대상으로 염화물이온확산성상을 검토하는 것을 목적으로 모르타르의 강도특성, 통기율 및 염화물확산계수를 평가하였다.

Table 1. Experimental plan and mortar mixing proportion

ID.	Mortar Mixing Ratio			Fine Aggr. Sub. Ratio (%)		Test Item
	W	C	S	N	R	
N100				100	-	
N70R30	0.5	1	3	70	30	<ul style="list-style-type: none"> • Compressive strength • Flexural Strength • Permeability • Chloride Diffusion Coeff.
N50R50				50	50	
R100				-	100	

* W: Water, C: Cement, S: Fine aggregate, N: Natural, R: Recycled

Table 2. Physical properties of natural and recycled fine aggregate

Mechanical Properties	Measured Value	
	Natural Fine Aggr.	Recycled Fine Aggr.
	Density (g/cm ³)	2.65
Absorption (%)	1.00	5.22
Unit Weight (kg/m ³)	1,665	1,550
Absolute Volume Ratio (%)	63	68
Fineness Modulus	2.93	3.11

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획 및 모르타르 배합

본 연구의 실험계획 및 모르타르 배합을 Table 1에 나타냈다. 순환잔골재 치환율에 따른 모르타르의 강도특성, 통기율 및 염화물확산성상을 평가하기 위해 물시멘트비 0.5, 시멘트와 잔골재의 질량비 1:3의 모르타르 배합을 기준으로 순환잔골재를 0, 30, 50, 100% 치환한 40×40×160mm 및 ø100×200mm 모르타르 시험체를 제작하였으며,

20±2℃의 수중에서 28일간 표준양생한 후 압축강도 및 휨 강도, 통기율, 염화물확산계수를 평가했다.

2.2 사용재료

본 연구에서는 보통 보틀랜드 시멘트를 결합재로 사용했고 천연잔골재로 ISO 표준사, 순환잔골재는 흡수율(5.22%, KS 기준 5.0% 이하)을 제외하고 「KS F 2573 콘크리트용 순환골재」 [12]의 품질기준을 만족하는 것을 사용하였다. 사용된 잔골재의 물리적 특성을 Table 2에 나타냈다.

2.3 실험방법

2.3.1 압축강도 및 휨강도

모르타르 시험체의 압축강도와 휨강도는 「KS L ISO 679 시멘트의 강도시험방법」 [13]에 준해 평가했으며, 각 배합별로 3개의 시험체의 평균값으로 했다.



a) Compressive strength b) Flexural strength
Figure 2. Chloride penetration depth measurement

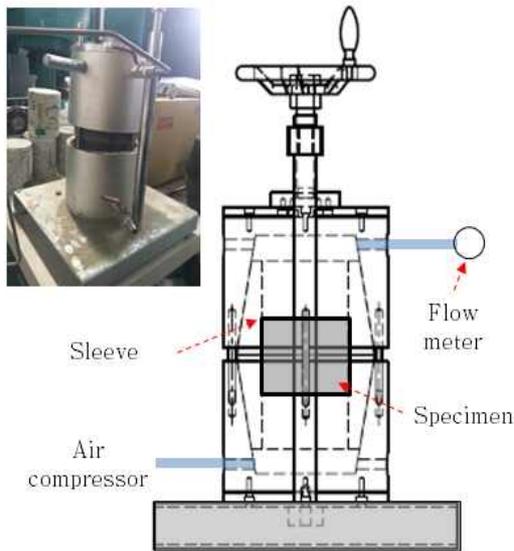


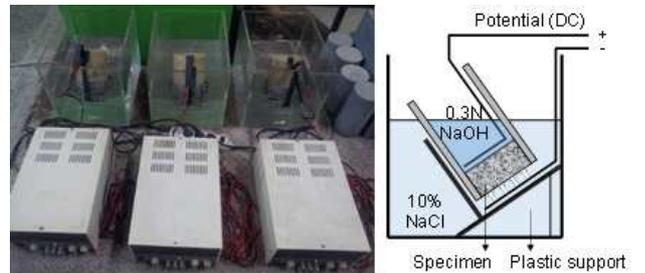
Figure 3. Permeability measurement apparatus

2.3.2 통기율

모르타르 시험체의 통기율은 재령 28일에서 ø100×200mm 원주형 시험체를 시험체 중심으로부터 50mm 크기로 절단한 시험편을 대상으로 「KS L 3317 내화물의 통기율 시험방법」 [14]에 준해 평가했다. 시험시의 온도는 10℃, 점도 17.7Pa·s의 일반공기를 사용하여 400kPa의 압력조건에서 다음 식(1)에 따라 시험편의 통기율을 산정했다. 통기율은 3개 시험체의 평균값으로 했다.

$$\mu = c \times \eta \times \frac{h}{3.14 \left(\frac{d}{2}\right)^2} \times \frac{1}{p_1} \times \left(\frac{2(p_0 + p_1)}{2p_0 + p_1}\right) \times q_v \quad \text{----- (1)}$$

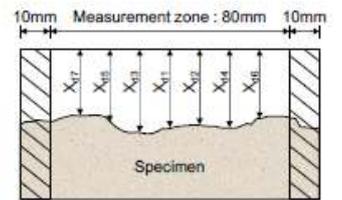
- 여기서, μ : 측정시료의 통기율 (m²)
 c : 보정계수 (1/60×10⁻⁶)
 η : 측정가스의 점도 (Pa·s)
 h : 시험편의 높이 (mm)
 d : 시험편의 지름 (mm)
 p_0 : 대기압 (kPa)
 p_1 : 가스압력 (kPa)
 q_v : 가스유량 (cm³/min)



a) Chloride penetration test after pre-treatment



b) Specimen splitting and AgNO₃ spraying



c) Penetration depth measurement

Figure 4. Chloride penetration depth measurement

2.3.3 염화물확산계수

모르타르 시험체의 염화물확산계수는 「NT Build 492

Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments」 [15]에 준하여 시험을 실시하였다.

28일간 표준양생한 후 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 의 모르타르 시험체를 중앙부로부터 50mm 두께로 절단하여 진공 데시케이터에서 건조와 포화 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 수용액에 침지하는 전처리를 실시했다. 그 후, Figure 4와 같이 시험장치에 거치하고 양극(+)에는 0.3N의 NaOH 수용액, 음극(-)에는 10% NaCl 수용액을 채워 전위차를 가하였다. 초기 전압을 가한 후 측정된 전류값으로 2차 전압을 설정하여 시험시간을 결정했다.

시험 후 시험체를 할렬하여 0.1N의 질산은 용액을 분무하여 염화물 이온의 침투깊이를 측정했다. 염화물 확산계수는 염화물침투깊이 측정결과로부터 다음의 식(2)에 따라 산정했다. 염화물확산계수는 3개 시험체의 평균값으로 했다.

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \times \left(x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)L \times x_d}{U - 2}} \right) \quad \text{--- (2)}$$

여기서, D_{nssm} : 비정상상태 염화물확산계수 ($\times 10^{-12} \text{m}^2/\text{s}$)

- U : 적용전압의 절대값 (V)
- T : 시험시작과 종료시 양극의 평균온도 ($^{\circ}\text{C}$)
- L : 시험편의 두께 (mm)
- x_d : 염화물침투깊이 (mm)
- t : 시험시간 (h)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 압축강도 및 휨강도

Figure 5에 순환잔골재 치환율에 따른 모르타르 시험체의 압축강도 및 휨강도를 나타냈다. 압축강도의 경우 N100, N70R30, N50R50, R100이 각각 44.9, 39.9, 35.7, 30.5MPa의 압축강도를 나타내 순환잔골재의 치환율이 증가할수록 모르타르의 압축강도는 저하하는 경향을 보였으며, R100은 N100에 비해 약 30%정도 작은 압축강도를 나타냈다.

휨강도의 경우에도 압축강도에 비해 저하폭은 작았지만 순환골재 치환율이 증가할수록 강도가 저하하는 경향을 나

타냈다. 이는 기존 연구들[7,8,9,10]에서 보고하고 있는 바와 같이 순환골재의 부착에 부착된 기존 모르타르의 영향으로 부착계면이 증가하고 모르타르 조직의 경도가 약해졌기 때문으로 판단된다.

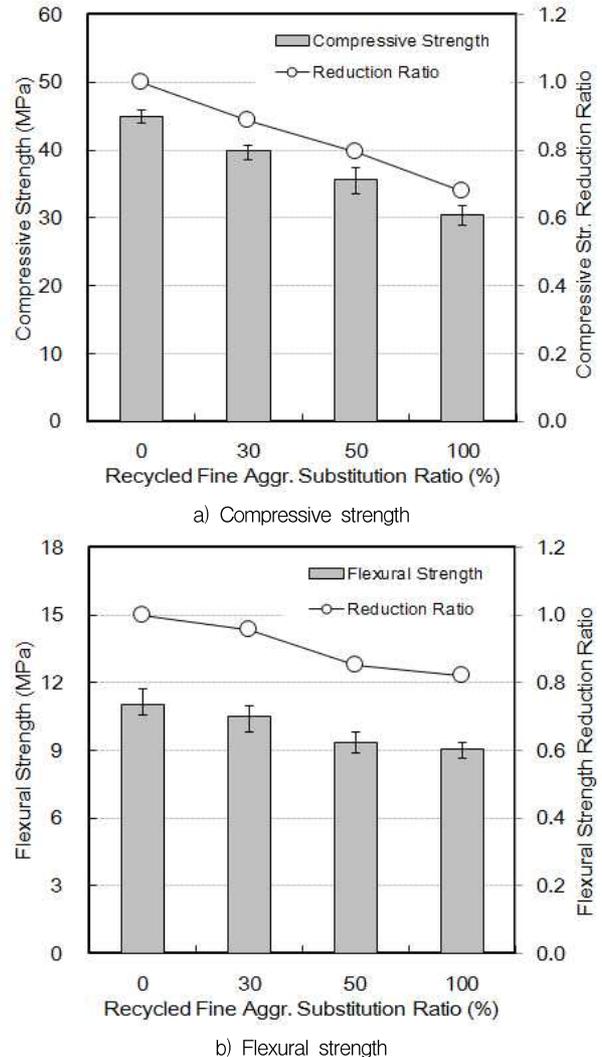


Figure 5. Mechanical properties of mortar according to the recycled fine aggregate substitute ratio

3.2 통기율

Figure 6에 순환잔골재 치환율에 따른 모르타르 시험체의 통기율을 나타냈다. 다음 식(3)에 나타낸 CEB Model [16]과 같이 콘크리트의 압축강도와 통기율의 관계를 평가한 기존 연구들에서는 압축강도가 작을수록 통기율이 커지는 결과를 보고하고 있다.

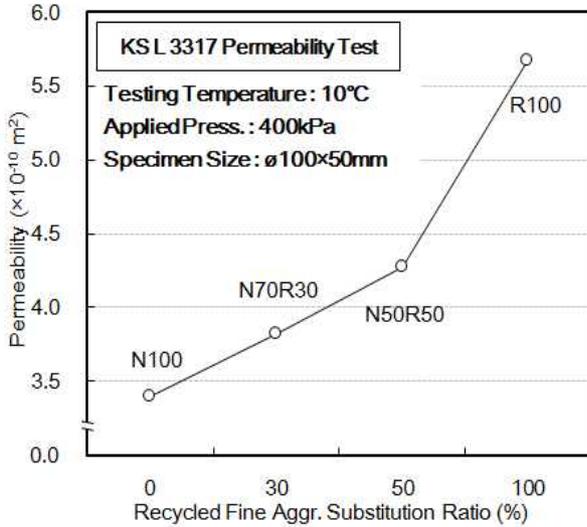


Figure 6. Permeability of mortar according to the recycled fine aggregate substitute ratio

$$K_g = 2 \times 10^{-10} \times \frac{1}{f_{cm}^{4.5}} \quad (3)$$

여기서, K_g : 통기율 (m^2)

f_{cm} : 평균압축강도 (MPa)

본 연구에서는 N100이 $3.4 \times 10^{-10} \text{ m}^2$, N70R30, N50R50, R100은 각각 3.8×10^{-10} , 4.3×10^{-10} , $5.7 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ 의 값을 나타내 기존 연구결과와 유사하게 순환잔골재의 치환율이 증가할수록 모르타르 시험체의 압축강도 저하하고 통기율은 증가하는 경향을 나타냈다.

이는 역학적 특성 평가 결과와 같이 순환잔골재의 치환율이 증가할수록 부착계면이 증가하고 천연잔골재에 비해 상대적으로 물질의 투과가 쉬운 모르타르의 양이 증가하기 때문으로 판단된다.

3.3 염화물확산계수

Figure 7에 앞서 평가한 순환잔골재 치환율에 따른 모르타르의 통기율과 염화물확산계수의 관계를 나타냈다. 순환잔골재 치환율이 증가할수록 커지는 통기율 평가결과와는 달리 염화물확산계수의 경우 R100은 약 $45 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 로 다른 시험체에 비해 상대적으로 큰 염화물확산계수를 나타냈으나 N100, N70R30, N50R50은 약 $35 \sim 38 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 범위의 유사한 염화물확산계수를 나타냈다.

Figure 8에 기존 연구[17]에서 제시하고 있는 압축강도와 염화물확산계수의 상관관계와 본 실험결과를 천연잔골재

를 사용한 시험체의 염화물확산계수 값으로 정규화 (D/D_{N100})하여 나타냈다.

압축강도와 염화물확산계수의 관계를 평가한 기존 연구결과에서는 N100, N70R30, N50R50, R100의 압축강도가 각각 44.9, 39.9, 35.7, 30.5MPa로 작아질수록 염화물확산계수의 비는 1.0, 1.2, 1.3, 1.5로 증가하는 경향을 나타냈다. 그러나 본 실험결과에서는 N100, N70R30, N50R50은 0.9~1.0 범위의 유사한 염화물확산계수비를 나타내는 것을 확인했다.

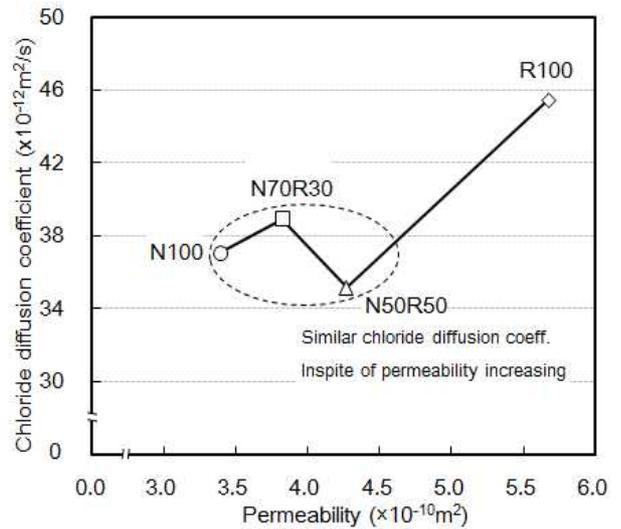


Figure 7. Chloride diffusion coefficient of mortar according to the permeability

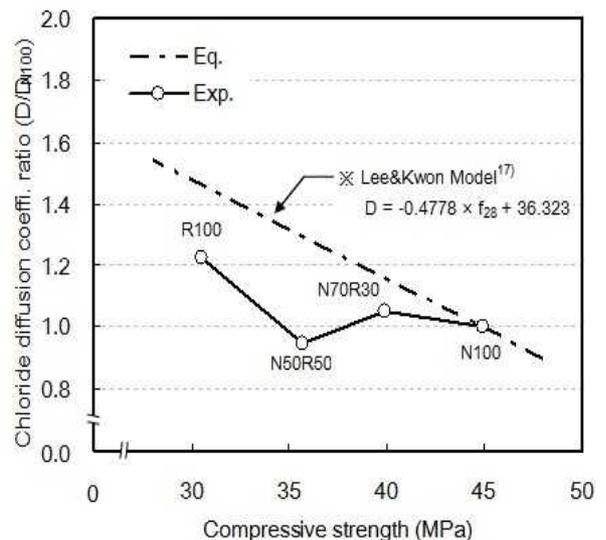


Figure 8. Relationship between compressive strength and chloride diffusion coefficient

일반적으로 시멘트 수화물에 의한 염화물 고정은 C-S-H 상의 층간구조에 의한 물리적 흡착과 C_3A , C_4AF 등과의 화학적 결합에 의해 프리델염(Friedel's Salt)을 형성해 염화물 이온을 고정하는 화학적 고정으로 구분되며 물리적인 흡착보다는 화학적 결합에 의한 고정효과가 더 큰 것으로 보고되고 있다[18].

따라서 본 연구에서 순환잔골재 치환율 50%까지 유사한 염화물확산계수가 나타난 것은 순환잔골재 치환율이 증가할수록 역학적 특성이 저하하고 통기율은 증가하여 외부에서 침투하는 염화물의 양은 증가하지만 순환잔골재에 포함된 모르타르로 인해 염화물 이온을 고정할 수 있는 시멘트 수화물의 양이 증가했기 때문으로 판단된다.

4. 결 론

순환잔골재 치환율에 따른 모르타르의 역학적 특성과 통기율, 염화물확산계수를 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 순환잔골재의 치환율이 증가할수록 모르타르의 역학적 특성은 저하하고 통기율은 증가하는 결과를 나타냈다. 이는 순환잔골재에 포함된 기존 모르타르의 영향으로 새로 생성된 모르타르 조직의 경도가 저하했기 때문으로 판단된다.
- 2) 순환잔골재 치환율이 증가할수록 통기율 또한 증가했지만 염화물확산계수는 50% 치환율까지 유사한 결과를 나타냈다. 따라서 적정범위의 순환잔골재 치환으로 순환잔골재에 포함된 기존 모르타르에 의한 염화물 고정효과를 기대할 수 있다고 판단된다.
- 3) 본 연구에서는 순환잔골재를 사용한 모르타르를 대상으로 염화물확산성상을 평가하여 순환잔골재의 염화물고정 가능성을 확인했다. 그러나 염화물고정효과는 탄산화 등 여러 요인에 의해 영향을 받기 때문에 추후 이러한 요인들을 고려한 복합적인 열화환경에서 염화물고정능력의 평가가 필요할 것으로 판단된다.

요 약

콘크리트용 천연골재의 공급이 어려워지고 건설폐기물은

발생량이 지속적으로 증가하고 있는 추세이다. 따라서 건설 폐기물을 골재로 만든 순환골재 사용의 필요성이 대두되고 있다. 이에 순환골재를 사용한 콘크리트의 특성에 대한 많은 연구가 진행되고 있으나 대부분의 연구들이 부정적인 결과를 나타내고 있다. 하지만 최근 연구들을 중심으로 긍정적인 연구결과들이 보고되고 있으며 그 중 순환굵은골재의 부착 모르타르의 염화물고정효과에 관한 연구도 보고되고 있다. 따라서 본 연구에서는 순환굵은골재에 비해 모르타르 함량이 많아 염화물고정에 유리하다고 예상되는 순환잔골재를 사용한 모르타르의 역학적 특성과 염화물확산을 평가한 결과 순환잔골재의 염화물고정효과를 확인했다.

키워드 : 순환잔골재, 부착모르타르, 염소이온고정, 염해저항성

Acknowledgement

This study was supported by research fund of Chungnam National University in 2014.

References

1. Koo BM, Kim JHJ, Kim SB, Mun SH. Material and structural performance evaluations of Hwangtoh admixtures and recycled PET fiber-added eco-friendly concrete for CO2 emission reduction. *Materials*. 2014;7(8):5959-81.
2. Fenollera M, Miguez JL, Goicoechea I, Lorenzo J. Experimental study on thermal conductivity of self-compacting concrete with recycled aggregate. *Materials*. 2015;8(7):4457-78.
3. Yoshitake I, Ishida T, Fukumoto S. Recyclability of concrete pavement incorporating high volume of fly ash. *Materials*. 2015;8(8):5479-89.
4. Ann KY, Moon HY, Kim YB, Ryou J. Durability of recycled aggregate concrete using pozzolanic materials. *Waste Management*. 2008;28:993-9.
5. Ministry of Environment. *Environmental Statistics Yearbook 2014*. Seoul (Korea): Ministry of Environment; 2014. p. 287-305.
6. Zaharieva R, Buyle-Bodin F, Wirquin E. Frost resistance of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*. 2004 Oct;34(10):1927-32.
7. Pedro D, de Brito J, Evangelista L. Influence of the use of recycled concrete aggregates from different sources on structural concrete. *Construction and Building Materials*. 2014 Nov;71:141-51.

-
8. Pedro D, de Brito J, Evangelista L. Performance of concrete made with aggregates recycled from precasting industry waste: Influence of the crushing process. *Materials and Structures*. 2015 Dec;48(12):3965–78.
 9. Manzi S, Mazzotti C, Bigozzi MC. Short and long-term behavior of structural concrete with recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Composite*. 2013;37:312–8.
 10. Duan ZH, Poon CS. Properties of recycled aggregate concrete made with recycled aggregates with different amounts of old adhered mortars. *Materials & Design*. 2014 Jun;58:19–29.
 11. Enric V, Marilda B, Diego A, Cristian J, Susanna V. Improvement of the durability of concrete with recycled aggregates in chloride exposed environment. *Construction and Building Materials*. 2014 Sep;67:61–7.
 12. KS F 2573, Recycled Aggregate for Concrete, Korean Agency for Technology and Standards, 2011.
 13. KS L ISO 679, Methods of testing cements—Determination of strength, Korean Agency for Technology and Standards, 2006.
 14. KS L 3317, Testing method for permeability to gases of refractory products, Korean Agency for Technology and Standards, 2013.
 15. NT Build 492, Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments, Nordtest, 1999.
 16. Burkart I, Cervenka Jan, Curbach M, Dehn F, Gehlen C, Glavind M, Mechtcherine V, Muller HS, Di Prisco M, Plizzari G, Reinhardt HW, Vandewalle L, Walraven J. Model Code 2010. First complete draft. Lausanne (Switzerland): International Federation for Structural Concrete; 2010. Vol. 1 Part II, Design Input Data; p. 518.
 17. Lee SH, Kwon SJ. Experimental Study on the Relationship between Time-Dependent Chloride Diffusion Coefficient and Compressive Strength. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2012;24(6):715–26.
 18. Yoon IS. Analysis on Adsorption Rate & Mechanism on Chloride Adsorption Behavior with Cement Hydrates. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 2015;27(1):85–92.