

순환골재를 100% 사용한 철근콘크리트 구조물의 압축강도 및 탄산화 진행 모니터링

Monitoring on Compressive Strength and Carbonation of Reinforced Concrete Structure with 100% Recycled Aggregate

이 상 윤¹ 김 규 용^{2*} 윤 민 호³ 나 철 성⁴ 이 상 규¹ 신 성 교⁵ 남 정 수²

Lee, Sang-Yun¹ Kim, Gyu-Yong^{2*} Yoon, Min-Ho³ Na, Chul-Sung⁴ Lee, Sang-Kyu¹ Shin Sung-Gyo⁵ Nam, Jeong-Soo²

Ph.D. course, Dept. of Architectural Eng., Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea¹

Professor, Dept. of Architectural Eng., Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea²

Research manager, Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, Anyang, 34134, Korea³

Manager, Korea Construction Resources Association, Seoul, 06752, Korea⁴

Director, Downon Engineering & Architects, Daejeon, 35270, Korea⁵

Abstract

The supply of natural aggregate for concrete has been difficult, and the amount of construction waste has been continuously increasing. Therefore, the necessity of using recycled aggregate made of construction waste as aggregate is rising. Therefore, many studies on the characteristics of concrete using recycled aggregate have been made and positive studies have been reported mainly in recent studies. A study on the chlorides binding effect of the mortar with recycled coarse aggregate has been reported. However, due to the user's perception of waste, most of the recycled aggregate currently produced is used only for low value-added products. In order to improve the recognition of recycled aggregate and the user's perception of recycled aggregate concrete, long-term monitoring of the structure with 100% recycled aggregate was conducted to confirm the applicability of the recycled aggregate concrete.

Keywords : recycled aggregate, monitoring, mechanical properties, carbonation

1. 서 론

국토교통부에서 발표한 제5차 골재수급기본계획에서는 5년간(2014~2018) 총 골재수요는 10억 25백만m³로 계획기간동안 평균 1.2% 증가하는 것으로 전망하였다[1]. 하지만 콘크리트용으로 적합한 천연골재의 경우 부존량 감소와 환경규제의 강화, 골재 채취시의 소음 등에 대한 민원으로 공급이 어려워지고 있는 실정이다.

또한 재건축·재개발 사업 등 건설공사의 증가로 건설폐기물 발생량은 지속적으로 증가하는 추세이며, 전체 폐기물 발생량의 50% 이상을 차지해 매립지 수명단축의 주된 요인으로 작용하고 있다[2].

이에 많은 연구자들이 폐콘크리트를 콘크리트용 골재로써 사용하기 위한 연구를 진행하여 순환골재 품질향상의 측면에서는 우수한 성과를 보이고 있다. 그럼에도 불구하고 실질적으로 순환골재를 사용한 콘크리트의 특성에 관하여 수행된 연구들을 보게 되면 일반적으로 순환골재를 사용한 콘크리트는 파쇄시의 충격으로 인한 골재 강성의 저하, 부착모르타르로 인한 공극과 계면의 증가 등의 이유로 천연골재를 사용한 콘크리트에 비해 역학적 특성과 내구성이 저하된다고 보고되고 있다[3-6].

Received : August 3, 2019

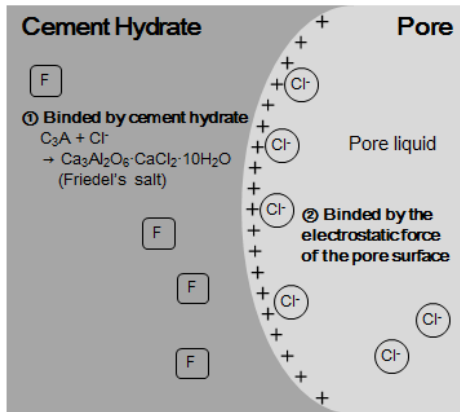
Revision received : October 10, 2019

Accepted : October 11, 2019

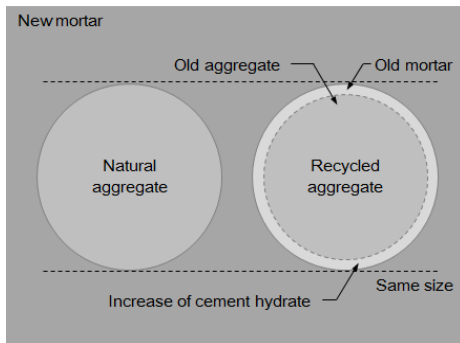
* Corresponding author : Kim, Gyu-Yong

[Tel: 82-42-821-5623, E-mail: gyuyongkim@cnu.ac.kr]

©2019 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.



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

Table 1. Monitoring building overview

Building overview		Appearance
Location	Cheonan, Korea	
Use	Toilet of highway rest area	
Completion	January 2013	

Table 2. Experimental plan

Evaluation items	Evaluation object	Number of Evaluations
Compressive strength	Standard curing specimen Mock-up wall core specimen	3 times/year
Ultrasonic pulse velocity	Mock-up wall core specimen	
Carbonation depth	Mock-up wall core specimen	6 times/year
Crack propagation	Building	

Table 3. Experimental plan

F _{ck} (MPa)	W/B	S/a	Unit weight (kg/m ³)					
			W	C	GGBS ¹⁾	S	G	AD ²⁾
24	0.42	0.49	163	274	117	729	868	2.74

1) GGBS : ground granulated blast furnace slag

2) AD : superplasticizer

Table 4. Properties of recycled aggregate

Property	Fine aggregate	Coarse aggregate	
Density (g/cm ³)	Surface drying	2.41	2.60
	Absolute drying	2.28	2.54
Water absorption ratio (%)	5.22	2.26	
Fineness modulus	3.11	7.19	
Appearance			

그러나 최근 발표되고 있는 연구들을 중심으로 순환 골재를 사용한 콘크리트의 역학적 특성과 내구성에 대한 긍정적인 연구결과가 보고되고 있으며 그 중에서는 Figure 1에 나타낸 바와 같이 순환골재에 부착된 모르타르의 양이 많을수록 콘크리트 내부의 염화물 이온 고정화에 효율적일 수 있으며, 이러한 염화물고정효과에 주목하여 염해저항성을 높일 수 있다는 연구도 보고되고 있다[7-10].

한편, 공학적인 측면과 더불어 정책적인 측면에서도 정부의 주도로 순환골재의 품질 기준과 법률제정 등 순환골재 사용의 활성화를 위한 다각적인 노력을 하고 있지만 폐기물이라는 사용자의 인식 때문에 현재 생산되는 순환골재의 대부분이 성·복토용 등 저부가가치용으로만 사용되고 있는 실정이다.

이에 순환골재에 대한 홍보와 순환골재 콘크리트에 대한 사용자의 인식 및 신뢰성을 개선하기 위해 순환골재를 100% 적용한 구조물의 장기 모니터링을 실시하여 순환골재 콘크리트의 구조체 적용성에 대한 과학적 근거를 마련하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

Table 1~3과 같이 콘크리트 구조물에 대한 순환골재의 적용성을 평가하기 위해 2013년 9월부터 2016년 8월 까지 총 3년간, 구조체 표면의 균열을 육안으로 관찰하여 진행정도를 평가하고 표준양생 공시체와 모의부재에서 채취한 코어 공시체를 통해 압축강도와 초음파속도, 탄산화 진행을 측정해서 실제 외기환경에서 열화 진행정도를 평가했다.

2.2 사용재료

시멘트는 밀도 3.15g/cm^3 , 분말도 $3,630\text{cm}^2/\text{g}$ 의 1종 보통포틀랜드시멘트, 혼화재는 밀도 2.90g/cm^3 , 분말도 $4,530\text{cm}^2/\text{g}$ 의 고로슬래그를 사용했다. 순환골재는 「KS F 2573 콘크리트용 순환골재」의 품질기준을 만족하는 것을 사용하였다[11]. 사용된 순환골재의 물리적 특성은 Table 4에 나타냈다.

2.3 실험방법

2.3.1 구조체 표면 균열진행

균열진행의 평가는 Figure 2와 같이 진행하였으며 측정자에 따른 측정오차를 최소로 하기 위하여 화상을 통해 자동으로 균열폭을 측정할 수 있는 균열화상분석기(FCV-30)를 사용하여 완공 후 1년이 경과한 2013년 12월부터 총 16회 측정하였다. 측정개소는 구조체 전면 기둥부 2개소, 구조체 전면 개구부의 5개소를 측정했다.

2.3.2 압축강도 및 초음파속도

압축강도 평가용 공시체는 Figure 3과 같은 코어공시체와 실험실에서 제작한 표준 공시체를 사용하였다. 표준 공시체는 KS F 2403 『콘크리트의 강도시험용 시험체 제작 방법』에 준하여 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 의 원주형 시험체를 제작하였으며, 약 24시간 후 탈형하여 재령 1년까지는 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 수중에서 양생하였으며 재령 1년 이후에는 $20 \pm 2^\circ\text{C}$, R.H. $50 \pm 5\%$ 의 항온항습실에서 양생을 실시하였고 압축강도 측정 전 측정면을 콘크리트용 연마기를 사용하여 평활하게 마감하였다[12].

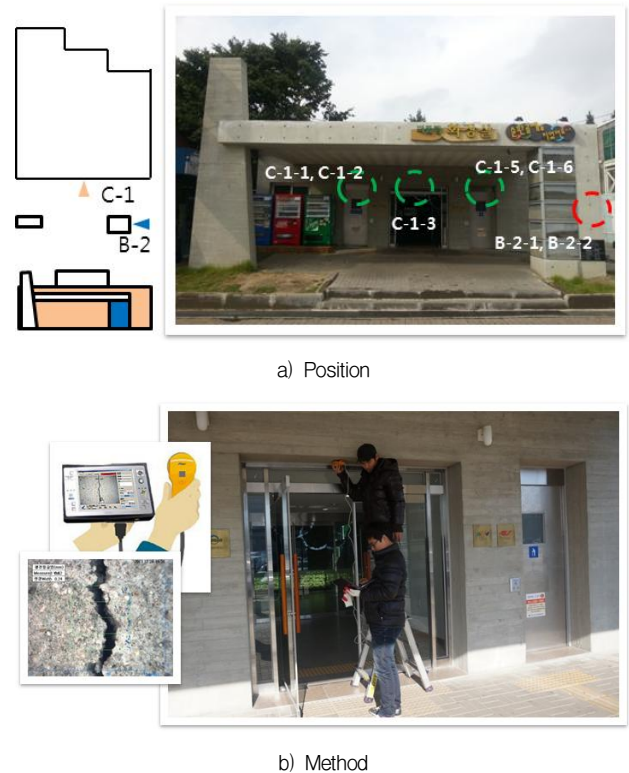


Figure 2. Crack measurement of building surface



Figure 3. Core sampling of mock-up wall

또한 본 연구에서는 KS F 2418 『콘크리트의 펄스 속도 시험 방법』에 준해 PUNDIT(Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester)를 사용하여 초음파 속도를 측정했다[13].

압축강도와 초음파속도는 완공 후 1년이 경과한 2013년 12월부터 4개월에 1번씩 연 3회 측정하였다.

2.3.3 탄산화진행

본 연구에서도 채취한 코어공시체를 이용하여 KS F 2596:2004 『콘크리트의 탄산화 깊이 측정 방법』에 준해 탄산화 깊이를 측정한 후 순환골재를 100% 사용한 콘크리트의 탄산화 저항성능에 대해 평가했다. 탄산화 진행 평가는 완공 후 1년이 경과한 2013년 12월부터 4개월에 1번씩 연 3회 측정하였다[14].

3. 실험결과 및 고찰

3.1 구조체 표면 균열진행

Figure 4와 같이 완공 후 1년이 경과한 2013년 12월부터 구조체의 균열진행을 평가한 결과, 송판무늬 노출콘크리트 마감인 B-2 벽면의 경우 재령이 경과함에 따라 눈에 띄는 균열폭의 증가는 없었으나, 구조물 전면의 C-1 벽면의 개구부에서 발생한 C군의 균열은 재령의 경과에 따라 균열폭이 다소 증가하는 경향으로, 측정 초기부터 약 3년의

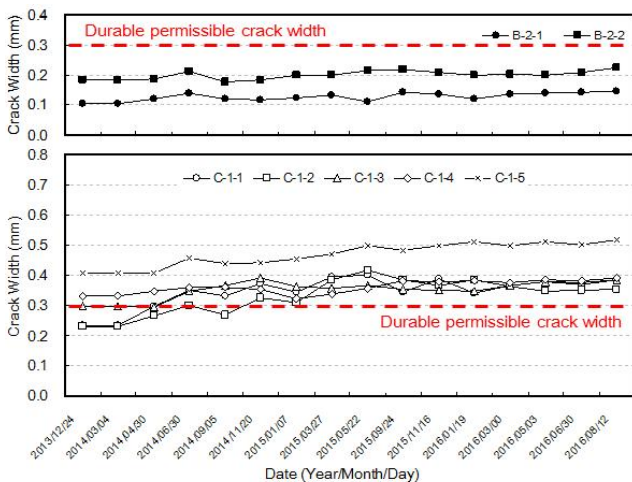


Figure 4. Change in crack width over time

Table 5. Durable permissible crack width

Types	Drying	Wet	Corrosion	Extreme corrosion
R C	Building	0.4mm	0.3mm	
	etc.	0.006C	0.005C	0.004C 0.0035C
PSC	0.005C	0.004C	-	-

※ C : Distance between the outermost concrete surface and the reinforcing surface

재령 경과에 따라 0.1~0.2mm 정도의 균열폭 증가를 나타냈다.

따라서 Table 5와 같은 철근콘크리트 구조설계기준에서 정하고 있는 일반 옥외환경의 허용균열폭인 0.3mm를 초과하는 C군의 균열에 대해서는 주의를 갖고 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 판단된다.

3.2 압축강도 및 초음파속도

Figure 5에 완공 후 1년이 경과한 2013년 12월부터 측정한 표준양생 공시체와 코어공시체의 압축강도를 나타냈다. 외기환경에서 양생된 코어공시체의 경우도 재령 1년에서 설계압축강도를 초과하여 약 39MPa의 압축강도를 나타냈으며 이후 압축강도가 소폭 증가하여 약 45MPa에 수렴하는 경향을 나타냈다[15].

또한 재령 2년 이후에서는 표준양생 공시체의 경우 약 50MPa, 현장 코어 공시체의 경우 약 44MPa의 압축강도를 나타내 일반적으로 천연골재를 사용한 콘크리트의 재령에 따른 압축강도 발현 예측에 사용되는 CEB Code의 예측값인 약 43MPa과 유사하거나 더 큰 강도를 나타냈다.

Figure 6과 Figure 7에 완공 후 1년이 경과한 2013년 12월부터 측정한 표준양생 공시체와 코어공시체의 초음파속도를 나타냈다. 표준양생 공시체의 경우 약 4.3km/s의 초음파 속도를 나타냈고 외기환경에서 양생된 코어공시체는 그보다 약간 낮은 4.0~4.2km/s의 속도를 나타냈다.

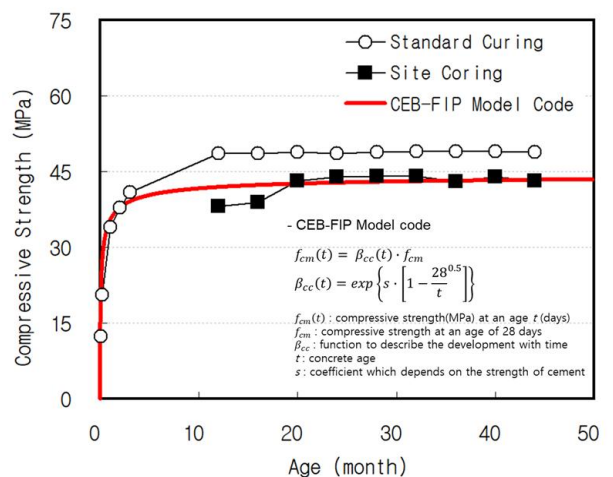


Figure 5. Compressive strength of recycle aggregate concrete

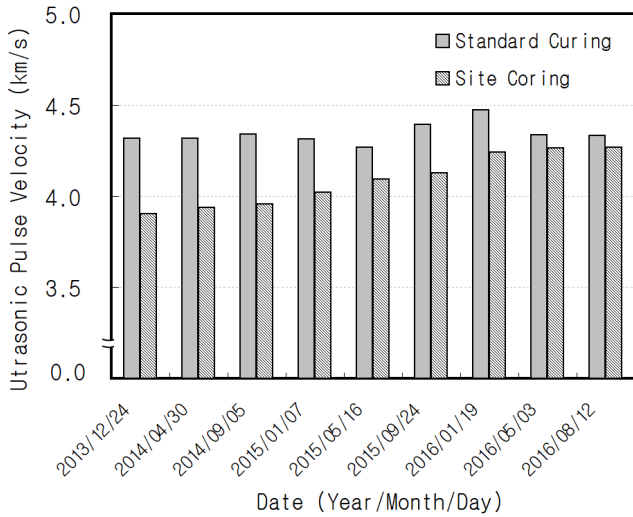


Figure 6. Ultrasonic pulse velocity of recycle aggregate concrete

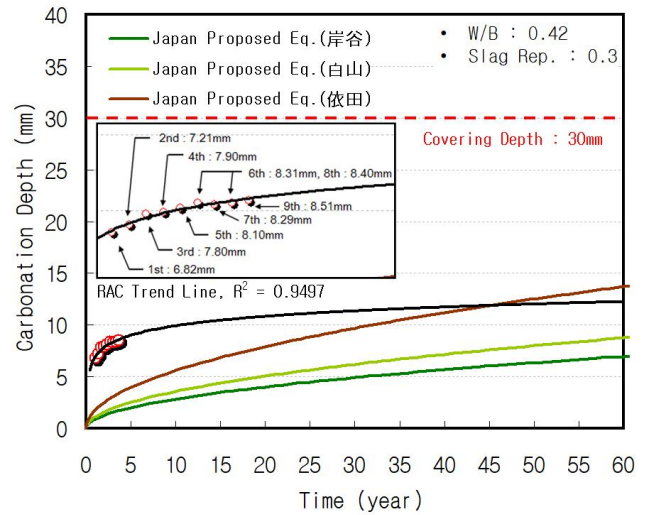


Figure 8. Carbonation depth of recycled aggregate concrete over time

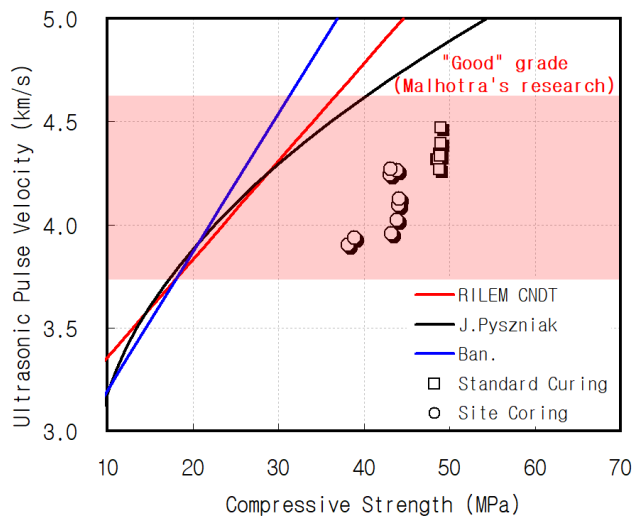


Figure 7. Relation between compressive strength and ultrasonic pulse velocity

시험체 종류에 따라 약간의 차이는 있었지만 두 시험체 모두 3.7km/s 이상의 전달속도를 나타내 ASTM 기준상에서 “양호” 등급으로 나타났다[16].

또한 기존 연구에서 제시하고 있는 천연골재 콘크리트의 초음파속도와 유사한 결과를 나타내고 있어 압축강도와 마찬가지로 순환골재를 100% 콘크리트에 적용해도 역학적 성능이 크게 저하하지 않음을 확인했다.

3.3 탄산화 진행

Figure 8에 완공 후 1년이 경과한 2013년 12월부터 측정된 콘크리트 코어공시체의 탄산화 깊이를 기존 연구와

비교한 결과를 나타냈다. 순환골재 콘크리트가 천연골재를 사용한 콘크리트와 유사하거나 더 작은 탄산화 깊이를 나타낸다는 기존의 연구결과 및 기존 예측식(岸谷식 1, 식2), 白山(식 3), 依田(식 4)과는 달리 측정 초기에는 약 7mm 정도의 큰 탄산화 진행 깊이를 나타냈으나 재령이 증가할수록 탄산화 진행 속도가 저하하여 기존 연구결과에서 제시하는 탄산화 속도와 유사한 경향으로 나타났다[17].

기존의 연구 경향과는 상이한 이러한 결과는 건전한 상태로 평가된 초음파 속도로 미루어볼 때 순환골재 사용에 의한 것이 아니라 해당 코어공시체를 채취하기 위한 구조물이 경기도에서 가장 많은 이산화탄소 배출(3,700 tCO₂, 2014)을 하는 것으로 추정되는 안성지역 부근에 있으며 특히 차량의 통행이 많은 고속도로에 위치하고 있기 때문인 것으로 판단된다[18].

$$t = \frac{0.3(1.15 + 3x)}{R^2(x - 0.25)^2} C^2 \quad (\text{물 시멘트비 } x \geq 0.6) \quad \text{--- (1)}$$

$$t = \frac{7.2}{R^2(4.6x - 1.76)^2} C^2 \quad (\text{물 시멘트비 } x \leq 0.6) \quad \text{--- (2)}$$

t : C 까지 중성화하는 시간(년)

x : 물시멘트비(%)

C : 중성화 깊이(cm)

R : 골재 · 혼화제에 의한 계수

$$t = \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \delta \cdot \epsilon \cdot \frac{5000C^2}{(x-38)^2} \quad \text{----- (3)}$$

t : C 까지 중성화하는 기간(년)

x : 물시멘트비(%)

C : 중성화 깊이(cm)

α : 골재·혼화제에 의한 계수

β : 시멘트에 의한 계수

γ : 시공정도에 의한 계수

δ : 마감재에 의한 계수

ϵ : 실내·외 등에 의한 계수

$$t = \alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot \frac{Q}{(R \cdot x - p)} \cdot C^2 \quad \text{----- (4)}$$

t : 기간(년)

C : 중성화 깊이(cm)

x : 물시멘트비

α : 콘크리트의 품질계수

β : 마감재의 중성화지연(억제) 효과계수

γ : 환경조건(일반지역의 경우 1.0)

4. 결 론

잔골재 및 굵은골재로 100% 순환골재를 사용한 콘크리트 구조물의 안정성과 내구성을 모니터링하기 위하여 사용재료의 물성 및 구조체 시공, 완공 후 균열진행, 재령별 압축강도 및 탄산화 진행을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 외관관찰을 통한 구조체의 균열진행을 평가한 결과, 구조적 안정성을 저해하는 균열은 없는 것으로 판단되며 일부 콘크리트 표준시방서의 내구성 허용한계(0.3mm)를 초과하는 균열에 대해서는 우수 등에 직접 접하는 부위가 아니지만 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 판단된다.
- 2) 완공 후 실내·외 오염상태를 평가한 결과, 천연골재를 사용한 일반 노출콘크리트와 유사한 정도의 오염이 발생한 것으로 파악되었다. 따라서 순환골재 사용이 실내·외 오염에 미치는 영향은 적은 것으로 판단된다.
- 3) 압축강도 측정결과, 모든 배합에서 설계압축강도(24MPa)와 한중시공조건 등을 고려한 배합강도(37MPa)를 만족하는 결과를 나타냈다. 또한 1년 이후의 장기재령에서도 압축강도가 일정하게 유지되었

으며 실내 표준양생 공시체와 현장 코어공시체의 압축강도 차이는 5MPa 정도로 나타났지만 설계압축강도를 만족하여 압축강도의 측면에서 순환골재의 사용에 따른 유의할만한 문제는 없는 것으로 판단된다.

- 3) 현장조건에서의 탄산화 깊이를 측정한 결과, 측정 초기에는 기존연구결과보다 큰 탄산화 진행 깊이를 나타냈으나 이후 진행속도가 저하하여 기존 연구결과와 유사한 수준의 탄산화속도를 나타내어 내구수명이 충분히 확보되는 것으로 판단된다.

요 약

콘크리트용 천연골재의 공급이 어려워지고 건설폐기물은 발생량이 지속적으로 증가하고 있는 추세이다. 따라서 건설폐기물을 골재로 만든 순환골재 사용의 필요성이 대두되고 있다. 이에 순환골재를 사용한 콘크리트의 특성에 대한 많은 연구가 진행되고 있으며 최근 연구들을 중심으로 긍정적인 연구결과들이 보고되고 있다. 그 중 순환굵은골재의 부착모르타르의 염화물고정효과에 관한 연구도 보고되고 있다. 그러나 폐기물이라는 사용자의 인식 때문에 현재 생산되는 순환골재의 대부분이 성·복토용 등 저부가가치용으로만 사용되고 있는 실정이다. 이에 순환골재에 대한 홍보와 순환골재 콘크리트에 대한 사용자의 인식을 개선하기 위해 순환골재를 100% 적용한 구조물의 장기 모니터링을 실시하여 순환골재 콘크리트의 구조체 적용 가능성을 확인했다.

키워드 : 순환골재, 모니터링, 역학적 특성, 탄산화

Acknowledgement

This research was supported by a grant (No. 2015R1A5A1037548) from Technology Advancement Research Program funded by Ministry of Science and ICT(MSIT)

ORCID

Sang-Yun Lee, <http://orcid/0000-0002-7099-3592>

Gyu-Yong Kim, <http://orcid/0000-0002-8662-8899>
Min-Ho Yoon, <http://orcid/0000-0002-4247-3821>
Chul-Sung Na, <http://orcid/0000-0002-4595-4639>
Sang-Kyu Lee, <http://orcid/0000-0003-2318-3949>
Sung-Gyo Shin, <http://orcid/0000-0001-6181-5658>
Jeong-Soo Nam, <http://orcid/0000-0002-9723-5994>

References

1. Ministry of Land, Infrastructure and Transport. Basic plan of aggregate supply and demand(5th). Korea: Ministry of Land, Infrastructure and Transport; 2013 Dec. 25p.
2. Ministry of Environment. Environmental Statistics Yearbook 2014. Seoul (Korea): Ministry of Environment; 2014. p. 287–305.
3. 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.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.08.030>
4. 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.
<https://doi.org/10.1617/s11527-014-0456-7>
5. Manzi S, Mazzotti C, Bignozzi MC. Short and long-term behavior of structural concrete with recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Composite*. 2013 Mar;37:312–8.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.01.003>
6. 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.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.01.044>
7. Vázquez E, Barra M, Aponte D, Jiménez C, Valls S. Improvement of the durability of concrete with recycled aggregates in chloride exposed environment. *Construction and Building Materials*. 2014 Sep;67:61–7.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.028>
8. Fenollera M, Miguez JL, Goicoechea I, Lorenzo J. Experimental study on thermal conductivity of self-compacting concrete with recycled aggregate. *Materials*. 2015 Jul;8(7):4457–78.
<https://doi.org/10.3390/ma8074457>
9. Ann KY, Moon HY, Kim YB, Ryou J. Durability of recycled aggregate concrete using pozzolanic materials. *Waste Management*. 2008 Jun;28:993–9.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.03.003>
10. Lee SY, Yoo JC, Kim GY, Yoon MH, Nam JS, Choi HG. Evaluation on the chloride ion diffusion coefficient of mortar depending on replacement ratio of recycled fine aggregate. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*. 2016 Dec;16(6):479–85.
11. KS F 2573, Recycled Aggregate for Concrete, Korean Agency for Technology and Standards, 2011.
12. KS F 2403, Standard test method for making and curing concrete specimens, Korean Agency for Technology and Standards, 2014
13. KS F 2418, Standard test method for pulse velocity of concrete specimens, Korean Agency for Technology and Standards, 2014
14. KS F 2596, Standard test method for carbonation depth of concrete specimens, Korean Agency for Technology and Standards, 2014.
15. Model code 2010 first complete draft, CEB-FIP.
16. C-597-83, Standard test method for pulse velocity through concrete, annual book of ASTM.
17. Kang YC. Study on a Derivation of Correction Parameter for Carbonation Prediction Considering Environmental Conditions [master's thesis]. [Anseong (Korea)]: Hankyong National University; 2008. 15–9 p.
18. Kim TG, Hong KM, Baek BR, Woo WH, Hong YS, Cho JR. A Methodology for CO₂ Emissions Estimation with Through-Traffic. *Journal of Korean Society of Transportation*. 2014 Aug;32(4):303–14.