

再生粗骨料取代率对再生保温混凝土 360 d 龄期内强度的影响

尚壮壮, 刘元珍, 高宇璇, 王朝旭

(太原理工大学 土木工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 本试验基于 0%、50%、100% 三种再生粗骨料取代率, 研究了取代率对再生保温混凝土 360 d 龄期内强度的影响, 并在现有欧洲 EC2 模型的基础上进行修正, 提出可准确预测再生保温混凝土 360 d 龄期内抗压强度的模型。研究表明: 360 d 龄期时 RATIC-100 的抗压强度是 RATIC-50 的 98%, 是 RATIC-0 的 94%, 与此同时, RATIC-100 的龄期系数是 RATIC-50 的 1.01 倍, 是 RATIC-0 的 1.24 倍。可见再生粗骨料取代率越大, 再生保温混凝土的 360 d 龄期内抗压强度越小, 而其后期强度增长速度越快。基于修正模型所得到的再生保温混凝土强度预测曲线与实测曲线的判定系数均大于 0.9, 表现出较高的拟合度。因此, 再生保温混凝土的 360 d 龄期内抗压强度可以通过本文提出的修正模型得到准确的预测。

关键词: 再生保温混凝土; 再生粗骨料取代率; 360 d 龄期内抗压强度; 360 d 龄期内强度预测模型

中图分类号: TU528.572

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2021)02-0217-06

Study on the effect of recycled coarse aggregate replacement rate on strength of recycled aggregate thermal insulation concrete within 360 days

SHANG Zhuangzhuang, LIU Yuanzhen, GAO Yuxuan, WANG Zhaoxu

(College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In this paper, three kinds of recycled coarse aggregate replacement rates of 0%, 50% and 100% are designed to study the effect of replacement rate on the strength of Recycled Aggregate Thermal Insulation Concrete (RATIC) within 360 days. Based on the existing European EC2 model, a model which can accurately predict the compressive strength of Recycled Aggregate Thermal Insulation Concrete (RATIC) within 360 days is proposed. The research shows that the compressive strength of RATIC-100 is 98% of RATIC-50 and 94% of RATIC-0 at the age of 360 days. At the same time, the age coefficient of RATIC-100 is 1.01 times that of RATIC-50 and 1.24 times that of RATIC-0. It could be observed that the increases of the replacement rate of recycled coarse aggregate caused the compressive strength of Recycled Aggregate decrease, but the higher the replacement rate is, the faster the strength increases in the later period. The determination coefficient of the strength prediction curve of Recycled Aggregate Thermal Insulation Concrete (RATIC) based on the modified model and the measured curve are both greater than 0.9, showing a high degree of fit. In consequence, the compressive strength of RATIC within 360 days can be accurately predicted by the modified model proposed in this paper.

Key words: recycled aggregate thermal insulation concrete; recycled coarse aggregate replacement rate; compressive strength within 360 days; strength prediction model during the 360 days of age

玻化微珠再生保温混凝土作为一种集保温隔热和承重于一体的新型绿色建筑材料对于构建节约型社会有重大意义。近年以来, 为了推广玻化微珠再生保温混凝土的广泛应用, 国内学者对其材料性能、力学性能以及它在装配式建筑中的应用进行了大量的研究^[1-6]。然而关于再生保温混凝土

土长龄期抗压强度的试验研究却相对匮乏。

混凝土长龄期强度是混凝土长期性能的重要组成部分, 相较于标准养护 28 d 的抗压强度, 360 d 龄期内强度更能真实反应混凝土的后期强度, 对结构安全承载更为重要。肖建庄^[7-8]等人对再生混凝土长龄期强度进行了研究, 其结果表明: 再生

收稿日期: 2020-09-17 修改稿日期: 2021-03-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51678384, 51911530238); 山西省重点研发计划(201903D321043); 山西省高等学校科技成果转化培育项目(2020CG023)

第一作者: 尚壮壮(1996—), 男, 硕士生, 研究方向为结构工程; E-mail: 897054438@qq.com

通信作者: 刘元珍(1974—), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为结构工程; E-mail: liuyuanzhen@tyut.edu.cn

混凝土的长龄期立方体抗压强度变化规律与普通混凝土保持一致,但再生混凝土的后期强度增长率远大于普通混凝土.王永贵^[9]等研究表明在再生混凝土中添加适量纤维可以有效促进其早中期抗压强度的提高,但对其 90 d 强度的影响较小.成国耀、陈宗平^[10-11]等人通过试验研究发现:再生混凝土长龄期棱柱体抗压强度比标准龄期实测值平均提高了 16.8%.

再生骨料取代率是影响混凝土长龄期强度的重要因素之一.相关研究表明,再生骨料取代率越高,混凝土 28 d 抗压强度越低,但再生混凝土后期会获得较大的强度增量^[12-14].肖建庄等^[15]基于试验结果提出了基于再生粗骨料取代率的再生混凝土长期强度预测公式.而国内关于再生粗骨料取代率对再生保温混凝土的 360 d 龄期内强度影响规律的研究匮乏,因此本文针对这一问题,展开了一系列研究.

1 试验方案

1.1 试验材料

天然粗骨料:试验采用粒径为 4.74~9.6 mm 和 9.6~20 mm 的天然碎石,并按 1:1 的比例将两种粒径的骨料混合.其物理性质见表 1.

表 1 骨料的物理性质

Tab. 1 Physical properties of aggregates

骨料类型	含泥量/%	压碎指标/%	针片状含量/%	含水率/%	表观密度/kg·m ⁻³	吸水率/%
再生粗骨料	0.21	14.44	1.34	2.51	242.8	5.22
天然粗骨料	0.63	11.76	2.23	0.64	265.9	1.21
砂子	0.11	—	—	1.24	272.2	2.81

表 2 水泥和硅灰的物理性质

Tab. 2 Physical properties of cement and micro-silica

项目	烧失量/%	比表面积/m ² ·kg ⁻¹	SiO ₂ 含量/%	氯离子含量/%	碱含量/%
水泥	1.51	91.2	0.43	0.011	0.43
硅灰	2.29	94.3	0.44	0.002	0.44

表 3 玻化微珠物理性质

Tab. 3 Physical properties of glazed hollow bead

项目	粒度/mm	耐火度/℃	导热系数/W·(m·K) ⁻¹	漂浮率/%	吸水率/%	容重/kg·m ⁻³	表面玻化率/%
性能	0.5~1.6	128.1~136.0	0.039	≥98	31	100	≥95

1.2 配合比设计

本试验采用课题组之前提出的 C35 最优配合比,以再生粗骨料取代率(采用体积取代的方式来计算)为控制参数,分别设置了 0%、50%、100%

再生粗骨料:取自邯郸市某生态公司,由废弃混凝土破碎处理后所得,其级配曲线如图 1 所示.

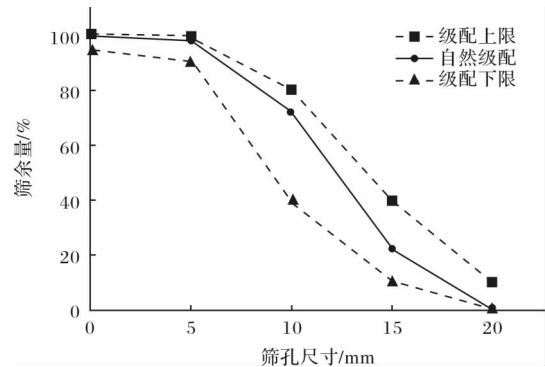


图 1 再生粗骨料级配曲线图

Fig. 1 The grading curve of recycled coarse aggregate

细骨料:本试验采用河砂,通过试验测得细度模数为 2.5,粒径为 0.074~4.74 mm,其他物理性质见表 1.

水泥:标号为 P.O 42.5 普通硅酸盐水泥.其物理性质见表 2.

硅灰:四川某硅灰厂生产的高性能硅灰.相关物理性质见表 2.

保温骨料:选择玻化微珠作为保温骨料.其相关物理性质见表 3.

三种取代率,对应的试件编号分别为:RATIC-0、RATIC-50、RATIC-100,并设置普通混凝土(NC)为试验对照组.

表 4 混凝土配合比

Tab. 4 The mixture ratio of concrete

编号	再生粗骨料 /kg · m ⁻³	天然粗骨料 /kg · m ⁻³	水胶比	水泥 /kg · m ⁻³	砂子 /kg · m ⁻³	玻化微珠 /kg · m ⁻³	硅灰 /kg · m ⁻³
NC	0	936	0.5	283	707	0	22
RATIC-0	0	949	0.5	379	407	130	28
RATIC-50	455	475	0.5	379	407	130	28
RATIC-100	910	0	0.5	379	407	130	28

1.3 试件设计

为了进行 360 d 龄期内抗压强度试验，本试验共制作 156 个试件，分为 4 组。具体试件设计如表 5 所示。

表 5 试件的尺寸和数量

Tab. 5 Size and number of specimens

试验类型	试件尺寸 /mm	每组试 件数量	试验组数
立方体抗压 强度试验	100×100×100	36	4
棱柱体抗压 强度试验	100×100×400	3	4

1.4 试验方法与试验设备

混凝土立方体及棱柱体抗压强度试验均根据《普通混凝土力学性能试验方法》(GB/T500 81)的规定进行，取三块试件所测得的均值作为该配比下再生保温混凝土的抗压强度值。试验所用的设备是 200 0 kN 微机控制电液伺服万能试验机。

2 试验结果及分析

2.1 360 d 龄期内立方体抗压强度结果及分析

本文针对 4 组不同配合比的混凝土试件进行了 360 d 龄期内立方体抗压强度试验。试验结果如图 2 所示。

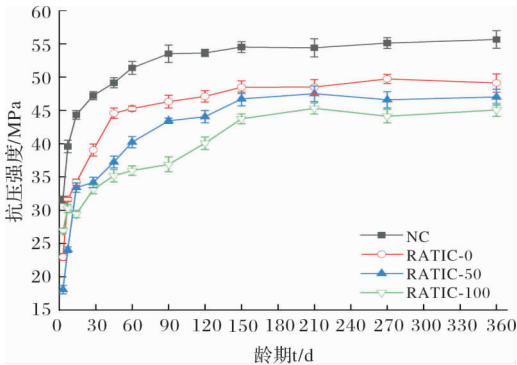


图 2 不同再生粗骨料取代率混凝土立方体抗压强度

Fig. 2 Compressive strength of concrete cubes with different replacement rates of recycled coarse aggregates

由图 2 可知，再生保温混凝土的 360 d 龄期内抗压强度随着再生粗骨料取代率的增大而减小。分析其原因可能是：新旧砂浆界面区域的微裂缝较多，随着荷载增大，界面区的微裂缝扩展延伸，使混凝土破坏；再生粗骨料表面附着有旧水泥砂浆，而新旧水泥砂浆之间的粘结力小于粗骨料与新水泥砂浆之间的粘结力，导致混凝土抗压强度降低；在破碎过程中再生粗骨料内部会产生较多的裂缝和空隙，混凝土内部空隙率增大，导致混凝土抗压强度减小。

在 28 d 龄期时，RATIC-0 的立方体抗压强度值比 RATIC-100 高 17.9%，RATIC-50 比 RATIC-100 高 9.9%；在 120 d 龄期时，RATIC-0 的立方体抗压强度值比 RATIC-100 高 17.5%，RATIC-50 比 RATIC-100 高 9%；在 150 d 龄期时，RATIC-0 的立方体抗压强度值比 RATIC-100 高 10.9%，RATIC-50 比 RATIC-100 高 6.8%；在 360 d 龄期时，RATIC-0 的立方体抗压强度值比 RATIC-100 高 8.9%，RATIC-50 比 RATIC-100 高 4.3%。由此可见，龄期越长，RATIC-100 后期抗压强度增长速度更快，增长速率超过了 RATIC-0 和 RATIC-50，再生粗骨料中附着的未水化水泥颗粒进一步水化反应促进了再生保温混凝土强度的后期增长。

在 28 d、120 d、360 d 三个龄期时，RATIC-100 的立方体抗压强度分别是 NC 的 70.2%、74.7%、81%。可以看出，虽然再生粗骨料的加入降低了混凝土的早期强度，但随着龄期延长，再生保温混凝土的后期强度增长潜力更高。这是因为再生粗骨料表面附着的旧砂浆中仍有未水化的水泥，其在长达 360 d 龄期内进一步发生了水化反应，增加了混凝土粘结性能，从而增大了混凝土强度。

由图 3 可知，随着龄期增长，不同配合比的试件混凝土龄期系数均出现逐渐增长的趋势。在整

个强度增长过程中, RATIC-50 的龄期系数大于 RATIC-0; 90 d 之后, RATIC-100 的龄期系数增长速度迅速提高, 逐渐超过 RATIC-0、RATIC-50. 与 NC 比较发现, RATIC-0、RATIC-50、RATIC-100 的龄期系数均大于 NC, 当龄期为 360 d 时, 它们龄期系数分别比 NC 高 6.78%、16.9%、15.3%. 可以看出, 再生粗骨料越多, 再生保温混凝土后期抗压强度增长速率越快. 这是因为再生粗骨料上附着的未水化的水泥颗粒在 360 d 龄期期间进一步发生水化反应, 从而提高了混凝土抗压强度.

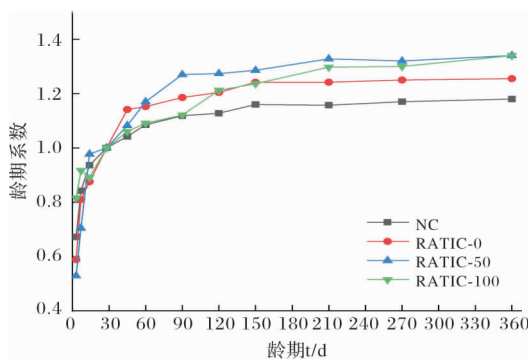


图 3 不同再生粗骨料取代率的混凝土龄期系数

Fig. 3 Concrete age coefficients of different replacement rates of recycled coarse aggregates

2.2 棱柱体抗压强度结果及分析

试验测得的不同再生粗骨料取代率的 28 d 棱柱体抗压强度以及立方体抗压强度结果见图 4.

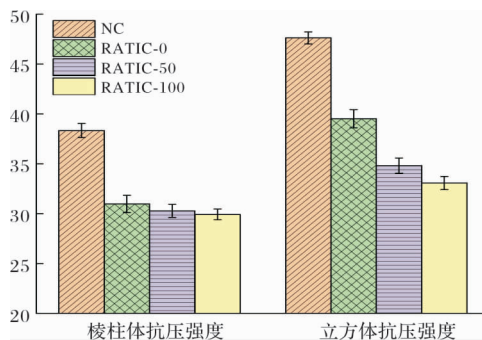


图 4 棱柱体抗压强度与立方体抗压强度

Fig. 4 Compressive strength of concrete prisms and cubes

由图 4 可知, RATIC-0 的棱柱体抗压强度比 NC 低 19%, 比 RATIC-50 高 2%, 比 RATIC-100 高 4%, 由此可见随再生粗骨料掺量的增加, 混凝土的棱柱体抗压强度减小, 这与上文中立方体抗压强度试验所得结论一致. 在同一试验条件下, 再生保温混凝土立方体抗压强度大于棱柱体抗压

强度, 符合混凝土尺寸效应.

2.3 再生保温混凝土 360 d 龄期内强度预测模型

本文将实验数据与根据欧洲 CEB-FIP MODEL CODE 1990 规范^[16]给出的 EC2 模型计算所得结果进行对比, 结果如图 5 所示.

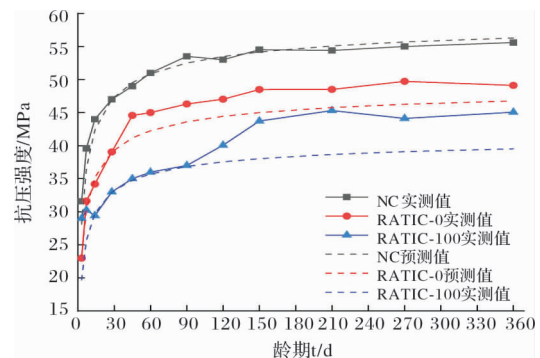


图 5 试验实测值与 EC2 模型预测值

Fig. 5 Test measured values and EC2 model predicted values

通过计算可知, NC 的 360 d 龄期内强度实测曲线与 EC2 模型曲线的线性回归判定系数为 0.955, RATIC-0 的线性回归判定系数为 0.885, RATIC-100 的线性回归判定系数为 0.754, 可见 EC2 模型曲线与普通混凝土 360 d 龄期内强度实测曲线拟合度较高, 而与保温混凝土、再生保温混凝土强度曲线拟合度较低, 哈尔滨工业大学王庆贺^[17]的研究表明 EC2 可以准确预测再生混凝土长龄期抗压强度. 由此可知, EC 模型适用于普通混凝土、再生混凝土 360 d 龄期内强度预测, 而对保温混凝土及再生保温混凝土 360 d 龄期内强度预测精度较低.

图 5 显示, 在 45 d 龄期以前, EC2 模型对再生保温混凝土强度预测精度较高, 45 d 之后再生保温混凝土强度的实测值与 EC2 模型预测值之间的差距显著, 这是因为前期保温骨料吸收了大量水分, 随着龄期增长不断释放水分, 促进水化反应进一步发生从而提高了混凝土强度. 因此, 本文在 EC2 模型的基础上考虑了保温骨料影响系数, 分龄期对 EC2 模型进行修正.

在本试验中, 当龄期 > 45 d 时, 再生保温混凝土强度的实测值与 EC2 模型预测值之间的差距显著, 因此, 本文以 45 d 为界限修正该模型, 修正后的预测公式如公式(4)所示.

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) f_{c,28} \quad (1)$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left[1 - \left(\frac{28}{t/t_1} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} t \leq 45 \text{ d} \quad (2)$$

$$\beta_{cc}(t) = \exp\left\{s\left[1 - \left(\frac{28}{t/t_1}\right)^{\frac{1}{\varphi_a}}\right]\right\} \quad t > 45d \quad (3)$$

$$\varphi_a = 1 + 0.472a^{0.035} \quad (4)$$

上式中: $f_{cm}(t)$ 为加载龄期为 t 时, 混凝土立方体抗压强度平均值; s 为水泥品种对混凝土抗压强度的影响系数, 快硬高强型水泥, $s=0.2$; 普通快硬型水泥, $s=0.25$; 缓慢快硬型水泥, $s=0.38$; $\beta_{cc}(t)$ 为龄期系数; t_1 为常数, $t_1=1d$; $f_{c,28}$ 为 28 d 混凝土立方体抗压强度平均; φ_a 为保温骨料掺量对混凝土 360 d 龄期内强度的影响修正系数, a 为保温骨料掺量

根据修正后的预测公式计算混凝土 360 d 龄期内强度值, 不同配合比的混凝土的实测值与模型预测值的对比曲线如图 6 所示。

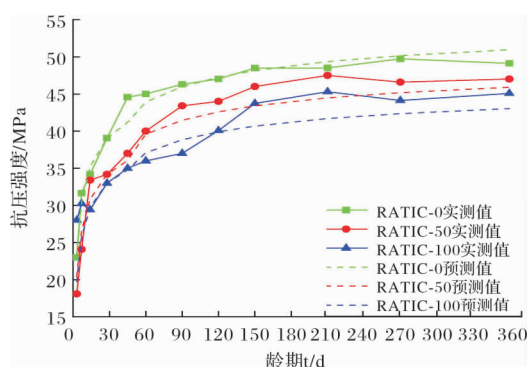


图6 试验实测值与 EC2 修正模型预测值

Fig. 6 Test measured values and modified model predicted values

由图 6 可知, 不同配比的混凝土 360 d 龄期内强度实测值曲线与修正后的模型预测值曲线表现出较高的拟合度。通过计算可知, RATIC-0 的 360 d 龄期内强度实测曲线与修正后模型预测值曲线的线性回归判定系数为 0.975, RATIC-50 的线性回归判定系数为 0.955, RATIC-100 的线性回归判定系数为 0.915, 均大于 0.9, 表现出较强的相关性。由此可见, 再生保温混凝土的 360 d 龄期内抗压强度可以通过本文提出的修正模型准确预测。

3 结论

本文选取不同再生粗骨料取代率的再生保温混凝土作为研究对象, 进行抗压强度试验, 对立方体抗压强度、棱柱体抗压强度以及龄期系数等试验结果进行分析, 提出了适用于再生保温混凝土的 360 d 龄期内强度预测模型。本文主要得出以

下结论:

(1) 再生粗骨料取代率越大, 再生保温混凝土的 360 d 龄期内抗压强度越小, 而其后期强度增长速度越快。在 360 d 龄期时, RATIC-100 的龄期系数是 RATIC-50 的 1.01 倍, 是 RATIC-0 的 1.24 倍, 可见随着龄期的增长, 再生粗骨料有助于再生保温混凝土后期强度的增长。

(2) 再生粗骨料取代率越大, 再生保温混凝土的棱柱体抗压强度越小, 且在同一试验条件下, 棱柱体抗压强度小于立方体抗压强度, 符合混凝土尺寸效应。

(3) 再生保温混凝土的 360 d 龄期内抗压强度可以通过本文基于欧洲 EC2 强度模型提出的修正模型进行准确预测。本试验中, RATIC-0、RATIC-50、RATIC-100 的实测曲线与修正后的预测曲线的判定系数均大于 0.9, 表现出较高的拟合度。可见, 本文提出的修正模型适用于再生保温混凝土的 360 d 龄期内强度预测。

参考文献 References

- [1] ZHAO L, WANG W, LI Z, et al. Microstructure and pore fractal dimensions of recycled thermal insulation concrete[J]. Materialprüfung, 2015, 57(4): 349-359.
- [2] WANG W, LIU Y, JIANG L, et al. Effect of physical properties of recycled coarse aggregate on the mechanical properties of recycled aggregate thermal insulation concrete(RATIC)[J]. Construction & Building Materials, 2018(180): 229-238.
- [3] 白睿奇, 刘元珍, 江卫涛. 玻化微珠再生保温混凝土剪力墙抗震性能试验及模拟分析[J]. 混凝土, 2020(4): 32-35.
- [4] BAI Ruiqi, LIU Ruozhen, JIANG Weita, et al. Seismic performance test and simulation analysis of recycled aggregate thermal insulation glazed hollow bead concrete shear wall[J]. Concrete, 2020(4): 32-35.
- [5] XIAO Jianzhuang, SUN Yuedong, FALKNER H. Seismic performance of frame structures with recycled aggregate concrete[J]. Engineering Structures, 2005, 28(1): 1-8.
- [6] LIU Yuanzhen, WANG Wenjing. Residual stress-strain relationship for thermal insulation concrete with recycled aggregate after high temperature exposure[J]. Construction & Building Materials, 2016, 129: 37-47.

- [6] LIU Y, JI H, ZHANG J, et al. Mechanical Properties of thermal insulation concrete with recycled coarse aggregates after elevated temperature exposure[J]. Materials Testing, 2016, 7-8(58):669-677.
- [7] 肖建庄,兰阳,李佳彬,等. 再生混凝土长期使用性能研究进展[J]. 结构工程师, 2005(3):73-76.
XIAO Jianzhuang, LAN Yang, LI Jiabin, et al. A review on long-term properties of recycled aggregate concrete[J]. Structural Engineers, 2005(3):73-76.
- [8] XIAO Jianzhuang, Li Long, VIVIAN W. Y. Tam, et al. The State of the Art Regarding the Long-term Properties of Recycled Aggregate Concrete[J]. Structural Concrete, 2014, 15 (1):3-12.
- [9] 王永贵,牛海成,范玉辉. 改性再生混凝土抗压性能与微观结构[J]. 中国矿业大学学报, 2019, 48 (5): 1011-1019.
WANG Yonggui, NIU Haicheng, FAN Yuhui. Compressive properties and microstructure of modified recycled concrete[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(5):1011-1019.
- [10] 陈宗平,徐金俊,郑华海,等. 再生混凝土基本力学性能试验及应力—应变本构关系[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(1):24-32.
CHEN Zongping, XU Jinjun, ZHENG Huahai, et al. Basic mechanical properties test and stress-strain constitutive relation of recycled concrete[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(1):24-32.
- [11] 成国耀. 不同再生骨料取代率混凝土的基本性能试验研究[J]. 混凝土, 2005(11):68-71.
CHE Guoyao. Experimental study on the basic performance of recycled aggregate concrete with different displacement ratio[J]. Concrete, 2005(11):68-71.
- [12] 王磊,陈杏,张毅. 再生骨料混凝土长龄期收缩及基本力学性能研究[J]. 混凝土, 2013(7):23-25.
WANG Lei, CHEN Xing, ZHANG Yi. Long-age contraction and basic mechanics performance study of regenerated aggregate concrete[J]. Concrete, 2013 (7):23-25.
- [13] DOMINGO A, LAZARO C, LOPEZ-Gayarre F, et al. Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2015, 100: 262-272.
- [14] 郑居焕,庄金平. 再生粗骨料替代率对各龄期再生混凝土强度影响的试验研究[J]. 福建建筑, 2016, 8: 118-120.
ZHENG Juhuan, ZHUANG Jinping. Experiment research on recycled coarse aggregate replacement rate effects on recycled concrete strength[J]. Fujian Architecture & Construction, 2016, 8:118-120.
- [15] 肖建庄,郑世同,王静. 再生混凝土长龄期强度与收缩徐变性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(1): 21-26.
XIAO Jianzhuang, ZHENG Shitong, WANG Jing. Long-term strength, shrinkage and creep properties of recycled aggregate concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015, 32(1):21-26.
- [16] Euro-International Committee for Concrete. CEB Bulletin 203-205, CEB-FIP Model Code 1990[S]. London: Thomas Telford, 1993.
- [17] 王庆贺. 考虑非均匀收缩影响的钢—再生混凝土组合板长期性能[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.
WANG Qinghe. Time-dependent behavior of composite steel-recycled aggregate concrete slabs considering non-uniform shrinkage effects[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.

(编辑 桂智刚)