

文章编号:1671-6833(2021)05-0068-06

再生粗骨料取代率对再生保温混凝土徐变的影响

黄嘉钰, 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:通过在恒定的温度和湿度条件下开展再生保温混凝土的徐变试验,研究了再生粗骨料取代率发生变化时,再生保温混凝土的徐变值、徐变系数以及弹性模量的不同发展变化,并提出了一种基于 ACI-FIP(1990)模型的新修正模型,此模型针对再生粗骨料取代率改变时再生保温混凝土的徐变系数发展状态进行了较为准确的预测。试验结果表明:再生保温混凝土的弹性模量会因再生粗骨料取代率的提高而出现降低现象,徐变值和徐变系数则显著增大,与保温混凝土相比,再生粗骨料取代率为 50%和 100%的再生保温混凝土弹性模量分别降低了 10%和 12%,180 d 时再生粗骨料取代率为 50%和 100%的再生保温混凝土徐变值分别增大了 6%和 17%,徐变系数则分别增大了 12%和 31%;将修正后的徐变模型预测结果与试验结果进行对比,通过线性回归分析发现,再生保温混凝土模型的线性回归系数(R^2)均处于 0.91~0.93,表明该模型有较好的拟合度,可以较好地预测混凝土的徐变系数因再生粗骨料的改变而发生的变化情况。

关键词:再生粗骨料取代率;弹性模量;徐变;徐变系数;修正模型

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2021.05.001

0 引言

徐变是混凝土材料的固有属性,可造成预应力混凝土结构的预应力损失和大跨度混凝土梁的挠度增大,对混凝土结构存在不利影响。混凝土的原材料及配合比、加荷应力、持荷时间、相对湿度等内部和外部因素均会影响混凝土徐变的发展状况,其中混凝土中作为支撑骨架而存在的骨料对混凝土中水泥砂浆的徐变有重要的约束作用,而水泥砂浆的徐变是引起混凝土徐变的主要原因。再生粗骨料是由废弃混凝土破碎加工而成,含有较多的内部缝隙和水泥砂浆,显著削弱了其密实度并降低了弹性模量,因而再生混凝土的强度和对徐变的约束能力均随之降低^[1-2]。罗素蓉等^[3]发现,再生混凝土的徐变在试验前期发展速度较快,试件持续加载 28 d 时其徐变值达到总徐变的 70%;混凝土持续加载 150 d 时,含 50%和 100%的再生粗骨料取代率的再生混凝土总徐变度分别达到普通混凝土的 1.19 倍和 1.53 倍。白国良等^[4]的试验结果表明,再生混凝土的徐变值

在再生粗骨料取代率不断提高的情况下会发生逐渐增大的现象,持续加载 60 d 后,试验中含有 50%和 100%的再生粗骨料取代率的再生混凝土徐变分别为普通混凝土徐变的 1.26 倍和 1.45 倍。Gómez-Soberón 等^[5-6]的试验结果表明,再生粗骨料取代率为 60%和 100%时,再生混凝土的徐变系数分别增长了 33%和 40%。Domingo-Cabo 等^[7]通过试验发现,荷载持续作用 90 d 时,再生粗骨料取代率为 50%和 100%的再生混凝土的徐变分别是普通混凝土徐变值的 1.42 倍和 1.51 倍。范玉辉等^[8]建立了水泥浆与砂浆徐变函数的模型,将模型理论值与再生混凝土徐变试验所得数据进行对比分析,证明了再生混凝土中的旧砂浆是引起徐变的最主要因素。

玻化微珠是一种具有保温性能的轻质骨料,再生保温混凝土将玻化微珠作为部分轻细骨料取代天然细骨料掺入其中,满足了建筑结构保温节能的需求。对再生保温混凝土的研究目前主要集中在其拉压性能、抗冻性能、导热性能、剪力墙抗震性能等方面^[9-12]。目前尚缺乏关于再生保温混

收稿日期:2020-08-28;修订日期:2020-10-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(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)

通信作者:刘元珍(1974—),女,山西霍州人,太原理工大学教授,博士,博士生导师,主要从事结构工程研究,Email:liuyuanzhen@tyut.edu.cn。

万方数据

凝土徐变性能的发展状况因再生粗骨料取代率的改变而发生变化的深入研究。因此本文选取 0%、50%和 100%的再生粗骨料取代率,对比分析在取代率变化的条件下再生保温混凝土的徐变变化规律,以原有 ACI-FIP(1990)模型为基础,建立有关徐变系数发展的修正预测模型,深入研究再生保温混凝土的徐变发展规律。

1 试验设计

1.1 材料

试验采用的玻化微珠的物理性质如表 1 所示。水泥采用标号为 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥。天然粗骨料选用天然碎石,再生粗骨料采用经破

碎工艺处理后的废弃混凝土,粗骨料的具体物理性质和化学成分分别见表 2 和表 3。本试验所用细骨料为河砂,粒径为 0.075~4.75 mm,堆积密度为 1 350 kg/m³,细度模数为 2.6。试验所用硅灰的比表面积为 18 954 kg/m³,SiO₂ 质量分数为 94.2%。

1.2 配合比

本试验的基准混凝土采用 C35 的再生保温混凝土(recycled aggregate thermal insulation concrete, RATIC),再生粗骨料取代率分别为 0%(RATIC-0)、50%(RATIC-50)、100%(RATIC-100),普通混凝土(NC)作为参考对照组。试验所用的混凝土配合比如表 4 所示。

表 1 玻化微珠的物理性质
Table 1 Physical properties of glazed hollow bead

粒度/mm	密度/(kg·m ⁻³)	导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	表面玻化率/%	吸水率/%	耐火度/℃	漂浮率/%
0.5~1.5	100	0.038	≥95	32	1 280~1 360	≥98

表 2 粗骨料的物理性质
Table 2 Physical properties of coarse aggregate

骨料类型	表观密度/(kg·m ⁻³)	压碎指标/%	吸水率/%	含水率/%	含泥量/%	针片状含量/%
再生粗骨料	2 430	14.48	5.28	2.50	0.2	1.35
天然粗骨料	2 660	11.70	1.19	0.63	0.6	2.24

表 3 再生粗骨料的化学成分(质量分数)
Table 3 Chemical compositions of recycled coarse aggregate

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	TiO ₂	MnO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	MgO	烧失量
65.45	5.22	2.42	15.24	0.17	0.05	0.61	0.96	0.11	2.15	7.62

1.3 试件设计与养护

在徐变试验中,每种配合比下的混凝土试件的尺寸及个数如表 5 所示。

本试验试件采用再生保温混凝土,保温骨料的低密度和高吸水性使试件制作与普通混凝土存在差别。制作试件时合理的投料顺序应是先加入细水泥砂浆对试件进行预湿,再加入玻化微珠和占总用水量 50%的水并搅拌 30 s,然后加入胶凝材料和粗、细骨料并重复搅拌 1 min,随后加入剩余的水和高效减水剂并再次搅拌 3 min,最后将其装入模具中振捣。将试件养护在温度和湿度恒定的标准养护环境中至龄期时取出,待混凝土面干时再进行试验。

1.4 试验方案

弹性模量试验中的试件静力加载方法和测量棱柱体试件抗压强度的试验方法均参照《普通混凝土力学性能试验方法标准》^[13]进行。为保证试件均匀受力,测量弹性模量时先确定好 3 个待测

表 4 混凝土配合比

Table 4 Concrete mix proportions

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

表 5 每种配合比下混凝土试件的尺寸及个数

Table 5 The size and number of concrete specimens under each mix ratio

试件尺寸	试件个数	测量用途
100 mm×100 mm×515 mm	3	收缩值
100 mm×100 mm×400 mm	2	徐变变形
100 mm×100 mm×400 mm	3	徐变极限破坏荷载
150 mm×150 mm×300 mm	6	弹性模量

试件的位置,变形测量仪需对称放置在试件两侧

且试件轴心与压力机的承压板中心严格对齐。试件两侧安装有千分表,加载过程中应及时调整试件位置,保证试件两侧千分表所测的变形差值不大于两侧变形平均值的 20%。

收缩和徐变试验均参照《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》^[14] 进行。徐变试验采用 NELD-CS710 型混凝土徐变仪进行加载,使用精度较高的压力传感器测量压力变化。棱柱体试件两侧分别安装有千分表,试件在 28 d 龄期开始持续加载,加载应力应为棱柱体极限破坏荷载的 40%。试件固定后,使用千斤顶加载至试件徐变应力的 20%时,可通过适当放松千斤顶即卸荷不断调整试件位置令其对中,保证千分表两侧的变形值之差小于其平均值的 10%,调整结束后立即加压到徐变应力。松开千斤顶时应保证荷载和试件位置均未发生变化,然后根据试件两侧千分表的示数平均值,确定徐变的初始变形值。在混凝土持续加荷至典型龄期时准确记录下试件变形值。在徐变试验的同时,完成 3 个与徐变试件同批次同环境的参比用试件的收缩试验。

2 结果与讨论

2.1 弹性模量

由于弹性模型对徐变存在一定的影响,为对后续试验提供更为直观可靠的分析以及模型计算的要求,本文对各个配合比下的混凝土试件进行了弹性模量的测量试验,不同配合比下混凝土的弹性模量变化如图 1 所示。短棱柱体试件 NC、RATIC-0、RATIC-50、RATIC-100 的最终弹性模量分别为 3.01×10^4 、 2.63×10^4 、 2.36×10^4 、 2.32×10^4 MPa。NC 的弹性模量是 RATIC-0 的 1.14 倍,而与 RATIC-0 的弹性模量相比, RATIC-50 和 RATIC-100 的弹性模量分别降低了 10% 和 12%。试验发现,普通混凝土的弹性模量在试验所有配合比的混凝土中最高,其值明显高于再生保温混凝土。除此之外,逐渐提高混凝土中所含有的再生粗骨料取代率,会导致再生保温混凝土的弹性模量出现降低现象,但弹性模量的降低幅度会在再生粗骨料取代率较高的状态下相对减小。这是因为再生粗骨料含有弹性模量较低的旧水泥砂浆和经破碎产生的裂缝,由此产生的初始损伤缺陷显著削弱了骨料所具有的强度,因而也限制了再生保温混凝土的弹性模量的提高;同时再生粗骨料具有较高的孔隙率、吸水率以及较大的比表面积,能够吸收水泥砂浆中的水分并传递湿度,在其

他条件相同时再生保温混凝土的水灰比相对较小,这在一定程度上能够促进再生保温混凝土的弹性模量的提高。因此在再生粗骨料取代率逐步提高的同时,这两种相互矛盾的效应均会增强,也因此在高再生粗骨料取代率下,弹性模量反而会出现缓慢降低的现象^[15]。

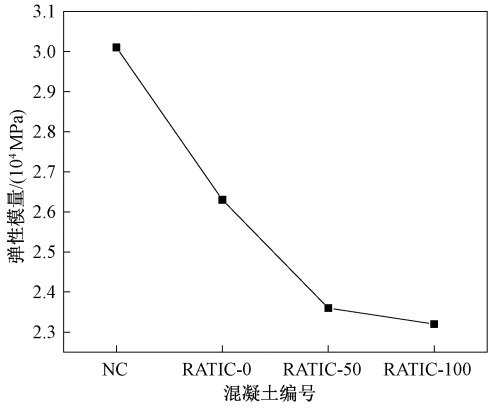


图 1 不同配合比的混凝土弹性模量
Figure 1 Elastic modulus of concretes with different proportions

2.2 徐变值

在恒定的温度和湿度条件下,不同再生粗骨料取代率的混凝土徐变值如图 2 所示。从图 2 中可以看出,再生保温混凝土的徐变值在整体趋势上是随时间不断增长的,徐变值前期增长迅速,后期增长速度缓慢并逐渐趋于稳定状态。但在随时间变化的过程中,不同再生粗骨料取代率下混凝土的徐变有一定幅度的波动,其中 RATIC-0 的徐变波动幅度明显高于 RATIC-50 和 RATIC-100。除此之外,不同试验组的混凝土前期徐变值大小相近,后期徐变差较大,90 d 前 RATIC-0 的徐变值高于 RATIC-50;90 d 后 RATIC-50 的徐变值反超 RATIC-0;180 d 时 RATIC-100 和 RATIC-50 的

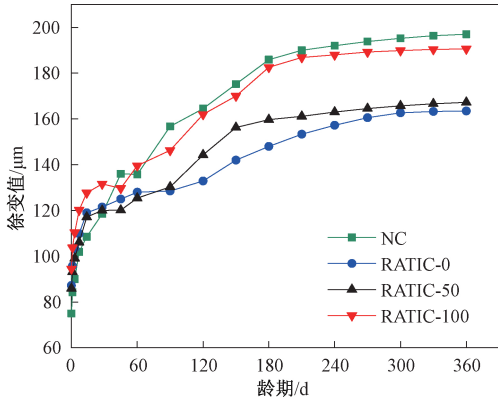


图 2 再生粗骨料取代率变化时的混凝土徐变值
Figure 2 Creep of concrete with variation of recycled coarse aggregate replacement ratios

徐变分别为 182.57 μm 和 164.25 μm ,与 RATIC-0 的徐变值相比,分别增加了 17%和 6%。RATIC-100 的瞬时弹性变形最大,RATIC-50 最小,与 RATIC-0 相比,分别增加了 8%和降低了 3%。对照组 NC 前期徐变较小,后期徐变较大,180 d 时 NC 的徐变值略高于 RATIC-100,是 RATIC-0 徐变值的 1.26 倍。

分析该现象发现,徐变主要是水泥砂浆的变形所引起的,根据黏性流动理论,混凝土中存在惰性骨料和水泥砂浆,在持续的荷载作用下,混凝土中惰性骨料对水泥砂浆的黏性流动起到约束作用,较多的应力由起支撑作用的坚硬骨料承担,而随着时间的推移,由水泥砂浆承担的应力会相应减小,水泥砂浆产生的变形速率随之减缓,因而原本较大的徐变速率也会随时间逐渐变缓。再生粗骨料的孔隙率较高,骨料中的孔隙能吸收水泥浆体的水分,起到传递湿度的作用,温度、相对湿度、持荷时间等因素会对徐变产生一定的影响,徐变对其他影响因素的反应敏感,同时由于试验误差的存在,徐变变化趋势存在波动。再生粗骨料内部破碎裂缝较多,且表面和内部均残留有旧水泥砂浆,因此骨料的弹性模量和抗压强度较小,在相同瞬时荷载的作用下,再生粗骨料取代率较高的混凝土初始徐变值较大。比较图 2 中 NC 与 RATIC-0 的徐变值变化曲线可以发现,玻化微珠的掺入能有效降低混凝土加载后期的徐变值,这是由于预湿后的玻化微珠在毛细管张力下释放出水分,维持了混凝土内部的相对湿度的稳定,降低了水分蒸发对混凝土徐变的影响,同时促进了水泥颗粒的水化进程,水化产物使得混凝土强度得到提高,内部结构因空隙减少而变得更为致密,混凝土的徐变性能得到改善。

将再生粗骨料取代率发生变化时混凝土的不同徐变发展状态进行相互比较,发现在再生粗骨料取代率逐渐提高的同时,再生保温混凝土的徐变会出现不断增加的现象。分析其原因:混凝土的徐变主要是由水泥砂浆徐变引起的,较多低弹性模量的旧水泥砂浆在再生粗骨料表面附着残留,相同持荷状态下旧水泥砂浆会更易出现较大的变形,再生粗骨料的弹性模量也因残留的旧水泥砂浆而受到削弱,混凝土中骨料对水泥砂浆变形所起的刚性骨架约束作用降低;同时骨料与砂浆、旧砂浆与新拌砂浆间的多重界面使结合面间的裂缝随时间逐渐增多,新形成的界面承载能力较为薄弱,因此旧水泥砂浆和裂缝的存在均削弱

了再生保温混凝土的弹性模量和强度,降低了其抵抗变形的能力,徐变变形随之增加。

2.3 徐变系数

在恒定的温度和湿度条件下,不同再生粗骨料取代率的混凝土收缩应变值如图 3 所示,徐变系数如图 4 所示。从图 4 中可以看出,不同再生粗骨料取代率的混凝土徐变系数随时间总体呈现上升趋势,徐变系数在前期增长迅速,后期增长缓慢,变化规律与徐变值相似。由于徐变系数对混凝土理论厚度和相对湿度较为敏感以及试验误差的存在,徐变系数增长过程中会出现较小波动。混凝土的徐变系数前期相差不大,后期 RATIC-100 的徐变系数大于 RATIC-0 和 RATIC-50,与 RATIC-0 相比,180 d 时 RATIC-100 和 RATIC-50 的徐变系数分别增大了 31%和 12%;NC 的后期徐变系数明显高于 3 组试验,与 RATIC-0 相比,180 d 时 NC 的徐变系数增大了 112%。这表明随着再生粗骨料取代率的提高,混凝土的徐变系数增大,同时掺入玻化微珠会在一定程度上改善再生保温混凝土徐变性能。

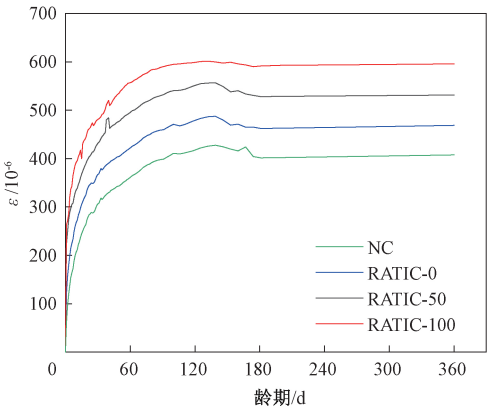


图 3 再生粗骨料取代率变化时的混凝土收缩值
Figure 3 Shrinkage of concretes with variation of recycled coarse aggregate replacement ratios

3 徐变模型

在对混凝土结构进行徐变效应分析时,确定徐变系数是关键问题,但是不可能都通过试验获得,在工程实践中往往直接选用已有的收缩徐变模型,或根据少量的试验数据,对已有的模型进行修正。ACI-FIP(1990)徐变模型是目前常用的徐变预测模型之一,该模型有较高的精度且适用于早龄期混凝土的徐变预测。但 ACI-FIP(1990)徐变模型近似于统计学模型,没有明确徐变机理,由于徐变的影响因素较多,该模型无法很好适应徐变过程中发生的新变化。为更加准确预测再生保

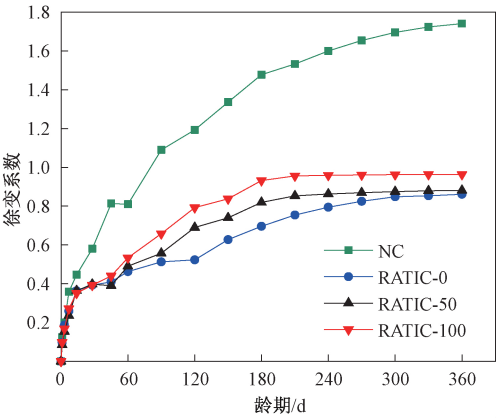


图4 再生粗骨料取代率变化时的混凝土徐变系数
Figure 4 Creep coefficient of concrete with variation of recycled coarse aggregate replacement ratios

温混凝土的徐变变化情况,将再生粗骨料取代率作为影响系数引入原有徐变模型中,在其他影响因素保持不变的前提下,以普通混凝土的徐变系数为基准,通过对试验中所得的数据进行拟合,对原有 ACI-FIP(1990)徐变模型进行修正,得到了再生保温混凝土徐变系数的修正表达式为

$$\varphi_R = 1.0018 e^{0.1137a} \varphi_N \tag{1}$$

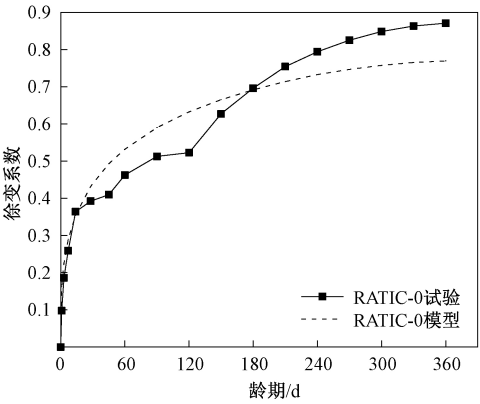
式中: φ_R 为不同再生粗骨料取代率下混凝土的徐变系数; φ_N 为普通混凝土的徐变系数; a 为再生粗骨料取代率。

图5为不同再生粗骨料取代率下混凝土的徐变系数试验值与理论修正模型的徐变系数理论值间的对比。从图5中可以看出,修正后的模型与试验值间差距较小,修正后模型中 RATIC-0、RATIC-50 和 RATIC-100 的线性回归系数(R^2)均处于 0.91~0.93,模型拟合度较好。3组预测模型的徐变系数理论值相比较后发现,修正模型的变化曲线也符合再生粗骨料取代率逐渐提高时,混凝土徐变系数随之增加的变化规律。这表明该修正模型可以较为准确有效地预测不同再生粗骨料取代率下混凝土的徐变系数。

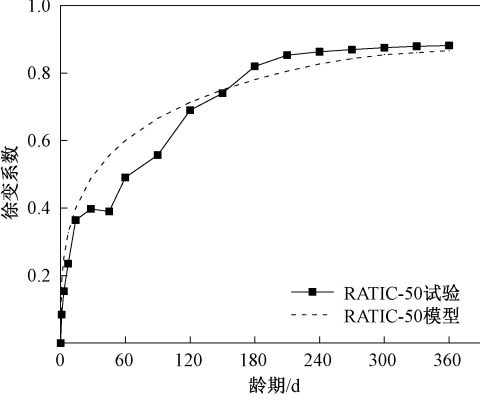
4 结论

本文以再生保温混凝土为研究对象,将变化的再生粗骨料取代率作为主要的研究因素,进行了再生保温混凝土的徐变和弹性模量试验,并提出了一种基于 ACI-FIP(1990)徐变模型的修正模型,以便更为准确地预测再生粗骨料取代率不同时再生保温混凝土徐变系数的变化。本文主要得出以下结论。

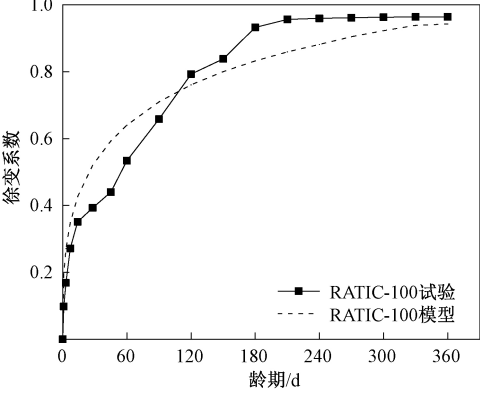
(1)再生保温混凝土的徐变值和徐变系数均在前期增长迅速,后期增长速度趋于缓慢;徐变试



(a) RATIC-0试验值与理论修正模型对比



(b) RATIC-50试验值与理论修正模型对比



(c) RATIC-100试验值与理论修正模型对比

图5 试验值与理论修正模型比较

Figure 5 Comparison of experimental values and theoretical modified models

验中逐步提高再生粗骨料取代率的同时,再生保温混凝土的徐变值和徐变系数出现逐步增大的趋势,与 RATIC-0 相比,180 d 时的 RATIC-50 和 RATIC-100 的徐变值分别增大了 6% 和 17%, RATIC-50 和 RATIC-100 的徐变系数分别增大了 12% 和 31%。

(2)弹性模量试验中逐步提高再生粗骨料取代率,再生保温混凝土的弹性模量会出现明显的降低状态,与 RATIC-0 相比,RATIC-50 的弹性模量降低了 10%, RATIC-100 的弹性模量降低了 12%。

(3)提出了一种基于 ACI-FIP (1990) 模型的徐变系数修正模型,对再生粗骨料取代率不同时再生保温混凝土的徐变系数进行研究预测,通过线性回归分析发现模型中 RATIC-0、RATIC-50 和 RATIC-100 的线性回归系数 (R^2) 均处于 0.91 ~ 0.93,因而该模型有较好的拟合度。

参考文献:

[1] 王占锋,王社良,翁光远.不同粗骨料取代率再生混凝土力学性能试验研究[J].郑州大学学报(工学版),2012,33(4):32-35.

[2] 肖建庄,范玉辉.再生混凝土徐变试验及机理的模型化分析[J].建筑科学与工程学报,2012,29(4):18-24.

[3] 罗素蓉,黄海生,郑建岚.再生骨料混凝土徐变性能试验研究[J].建筑结构学报,2016,37(增刊2):115-120.

[4] 白国良,祁豪,刘超.再生混凝土徐变试验与预测模型研究[J].建筑结构学报,2016,37(增刊2):121-126.

[5] GÓMEZ-SOBERÓN J M. Shrinkage of concrete with replacement of aggregate with recycled concrete aggregate [J]. ACI special publication, 2014,209:475-496.

[6] GÓMEZ-SOBERÓN J M. Creep of concrete with substitution of normal aggregate by recycled concrete aggregate[C]// Innovations in Design with Emphasis on Seismic, Wind, and Environmental Loading Quality Control and Innovations in Materials/Hot-Weather

Concreting. Cancun, Mexico: ACI, 2002:461-474.

[7] DOMINGO-CABO A,LÁZARO C,LÓPEZ-GAYARRE F,et al.Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete[J].Construction and building materials,2009,23(7):2545-2553.

[8] 范玉辉,肖建庄,曹明.再生骨料混凝土徐变特性基础试验[J].东南大学学报(自然科学版),2014,44(3):638-642.

[9] 吴桂昌.高温后再生保温混凝土抗压以及变形性能研究[J].粉煤灰综合利用,2020,34(1):94-97.

[10] 马钢,都思哲,高宇璇,等.再生保温混凝土受拉应力应变全曲线的研究[J].新型建筑材料,2018,45(7):28-32,59.

[11] 郝潞岑.弯曲荷载与氯盐侵蚀作用下再生保温混凝土的抗冻性能研究[D].太原:太原理工大学,2019.

[12] 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.

[13] 中华人民共和国建设部.普通混凝土力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2002[S].北京:中国建筑工业出版社,2003:1.

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部.普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准:GB/T 50082—2009[S].北京:中国建筑工业出版社,2009:1.

[15] 徐金俊,陈宗平,余兴国,等.长龄期再生混凝土弹性模量及泊松比试验研究[J].混凝土,2012(1):15-17,23.

Study on Influence of Recycled Coarse Aggregate Replacement Rate on Creep of Recycled Thermal Insulation Concrete

HUANG Jiayu, LIU Yuanzhen, GAO Yuxuan, WANG Zhaoxu

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

Abstract: Based on the creep test of recycled thermal insulation concrete under constant temperature and humidity, this research studies the different development of creep value, creep coefficient and elastic modulus of recycled thermal insulation concrete when the replacement rate of recycled coarse aggregate changes. Based on the ACI-FIP (1990) model, a new modified model is proposed to predict accurately the development state of creep coefficient of recycled thermal insulation concrete when the replacement rate of recycled coarse aggregate is different. Experiments showed that with the increase of the replacement rate of recycled coarse aggregate, the elastic modulus of recycled thermal insulation concrete decreased, and the creep value and creep coefficient increased significantly. Compared with thermal insulation concrete, the elastic modulus of recycled thermal insulation concrete with recycled coarse aggregate replacement ratios of 50% and 100% decreased by 10% and 12%, respectively. At 180 days, the creep of recycled thermal insulation concrete with recycled coarse aggregate replacement ratios of 50% and 100% increased by 6% and 17%, and the creep coefficient increased by 12% and 31%, respectively. Comparing the predicted results of the modified creep model with the test results, through linear regression analysis, it is found that the linear regression coefficients (R^2) of recycled thermal insulation concrete models are all between 0.91 and 0.93, indicating the model has a good degree of fit and it can better predict the change of concrete creep coefficient with variation of recycled coarse aggregate replacement ratios.

Key words: recycled coarse aggregate replacement rate; elastic modulus; creep; creep coefficient; modified model