

文章编号:1673-9469(2022)01-0060-05

DOI: 10.3969/j.issn.1673-9469.2022.01.009

变形钢筋与再生混凝土粘结性能试验研究

安新正,王李鑫*,蒋毓晋,张翠霞,刘浩楠

(河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038)

摘要: 通过 HRB400E 月牙钢筋-再生混凝土中心粘结试件的拔出试验,研究了再生粗骨料取代率为 100% 的条件下,再生细骨料取代率及钢筋直径的变化对 HRB400E 月牙钢筋与再生混凝土粘结性能的影响规律。研究表明,HRB400E 月牙钢筋-再生混凝土的极限粘结应力和初始粘结刚度均随再生细骨料取代率及钢筋直径的增大而减小,并采用最小二乘法建立了 HRB400E 月牙钢筋与再生混凝土极限粘结应力计算模型。

关键词: HRB400E 月牙钢筋;再生细骨料取代率;再生混凝土;粘结性能;拔出试验

中图分类号: TU317.9

文献标识码: A

Study on Bonding Properties Between Deformed Steel Bars and Recycled Concrete

AN Xinzheng, WANG Lixin*, JIANG Yujin, ZHANG Cuixia, LIU Haonan

(School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

Abstract: Based on the pull-out test of center bonded specimen between the HRB400E crescent steel bar (HRB400E-CSB) and recycled aggregate concrete (RAC), the effect of the replacement rate of recycled fine aggregate and the diameter of the steel bar on the bond-slip performance between the HRB400E-CSB and RAC was studied under the condition that the replacement rate of recycled coarse aggregate was 100%. Results show that the ultimate bond stress and initial bond stiffness between HRB400E-CSB and RAC decrease with the increase of the replacement rate of recycled fine aggregate and the steel bar diameter and the calculation formula of the ultimate bond stress of HRB400E-CSB and RAC is given by the least square method.

Key words: HRB400 crescent ribbed bars; recycled fine aggregate replacement rate; recycled concrete; bonding properties; pullout test

将建筑垃圾制备成再生骨料应用于混凝土结构中,不仅可以缓解土木工程建设对天然河砂及石材资源的依赖,还可以减轻建筑垃圾的堆放对环境污染所造成的影响^[1]。钢筋与再生混凝土间的粘结性能是钢筋再生混凝土结构安全设计的重要因素。目前,尽管众学者对钢筋与再生混凝土之间的性能进行了众多研究,但主要研究多集中在普通混凝土或者由再生粗骨料制备而成的再生混凝土与钢筋之间的粘结性能方面,如曹万林等^[2]通过设计钢筋与混凝土粘结滑移性能试验,指出了再生骨料取代率、混凝土强度、钢筋直径以

及钢筋外形是影响试件粘结滑移性能的重要因素;董宏英等^[3]研究指出,随着再生粗骨料取代率的增加,钢筋与混凝土之间粘结强度减小;杨海峰等^[4]通过进行同强度、不同再生粗骨料取代率的钢筋-混凝土中心拉拔试验,研究了不同再生粗骨料取代率、相对保护层厚度、配箍率等参数对再生混凝土与钢筋黏结强度的影响;国外学者 Pandurangan 等^[5]设计试验并研究对比了不同混凝土与钢筋之间粘结强度。而对以再生细骨料作为细集料的再生混凝土材料的研究大多集中在材料性能方面,谭艺帅等^[6]通过设计不同再生细骨料取

收稿日期:2021-07-22

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(E2015204111);河北省科学技术研究与发展计划资助项目(15273609D)

作者简介:安新正(1963-),男,河南镇平人,博士,副教授,研究方向为结构耐久性理论与设计。

* 通讯作者:王李鑫(1997-),女,山东潍坊人,硕士研究生,主要从事再生混凝土材料及其结构的研究工作。

代率的再生混凝土单轴受压试验,得出结论:随着再生细骨料取代率增大,再生混凝土的抗压强度、弹性模量呈下降趋势,而峰值应变和极限应变增大;赵敏等^[7]研究了再生细骨料取代率及预湿状态对再生保温混凝土抗压强度的影响,指出随着再生细骨料取代率的增加,再生保温混凝土的抗压强度先增后减。而以再生细骨料作为参量的再生混凝土与变形钢筋间粘结性能方面的相关研究较少。

为了研究以再生细骨料作为细集料的再生混凝土材料与变形钢筋间的粘结性能,本文以再生细骨料取代率及 HRB400E 月牙钢筋直径作为试验变量,设计制作了 72 个钢筋-再生混凝土立方体试件(粗骨料为再生粗骨料),并通过钢筋-再生混凝土试件进行中心拔出试验,较为系统地分析研究了再生细骨料取代率及钢筋直径对钢筋与再生混凝土粘结性能的影响规律,可为 HRB400E 月牙钢筋与再生混凝土在工程中应用提供理论参考。

1 试件设计、制作与试验

1.1 试件用原材料

原材料:(1)水泥:太行山牌 P. O42.5 级普通硅酸盐水泥。(2)粗骨料:再生粗骨料,即对某工业建筑物拆除后的废弃混凝土构件(经钻芯取样并制作出 6 个 100 mm × 100 mm × 100 mm 的圆柱体试件,测得其抗压强度平均值为 41.7 MPa)进行破碎、筛分处理后得到的粒径为 5~25 mm 的连续级配再生粗骨料,并依据《混凝土用再生粗骨料》(GB/T 25177—2010)^[8]的相关要求对粗骨料进行清洗、晾晒等处理后备用。经试验测得该再生粗骨料的压碎指标为 13.8%,表观密度为 2 406 kg/m³,堆积密度 1 310 kg/m³,24 h 吸水率为 5.2%。(3)细骨料:天然河砂与再生细骨料。天然河砂的细度模数为 2.2,表观密度为 2 580 kg/m³。再生细骨料与再生粗骨料来源一致,并满足《混凝土和砂浆用再生细骨料》(GB/T 25176—2010)^[9]中 II 类再生细骨料的标准。(4)粉煤灰:邯峰电厂 I 级粉煤灰,掺量为 5%。(5)减水剂:聚羧酸高效减水剂,减水率为 25%。(6)水:自来水。钢筋采用 HRB400E 月牙钢筋,根据《金属材料拉伸试验》(GB/T 228.1—2010)^[10]相关要求及试验方法,对中心拉拔试件试验中的各类钢筋进行材料力学性能试验。试验结果为:Φ12 钢筋的屈服应力 $f_y = 491.6$ MPa,Φ14 钢筋的屈服应力 $f_y = 475.3$ MPa,Φ18 钢筋的屈服应

力 $f_y = 481.8$ MPa。

1.2 中心拔出试件的设计与制作

1.2.1 试件设计

为了研究再生细骨料取代率 β 及钢筋直径 d 对钢筋与再生混凝土粘结性能的影响,本文设置再生细骨料取代率 $\beta = 0\%、30\%、50\%、100\%$ 和钢筋直径 $d = 12、14、18$ mm 作为试验变量,依据《水工混凝土试验规程》(DL/T 5150—2017)^[11]设计了 12 组共 72 个 150 mm × 150 mm × 150 mm 的中心拔出试件。在试件中心埋置 HRB400E 月牙钢筋,有效锚固长度 $5d$,自由端和加载端均设置 a (a 与试验设计锚固长度有关, $a = (150 - 5d)/2$) 长的 PVC 套管,并在管内灌入石蜡防止水泥浆进入。试件详细参数详见图 1 和表 1。

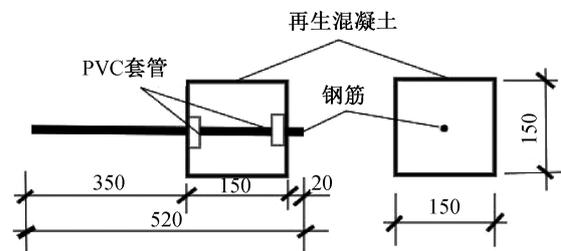


图 1 钢筋-再生混凝土中心拔出试件(单位:mm)

Fig. 1 Center pull-out samples of bond performance between steel bar and recycled concrete

表 1 中心拔出试件的相关设计参数

Tab. 1 The various design parameters of center pull-out samples

中心拔出试件组编号	试件数量/个	RFA 取代率 $\beta/\%$	钢筋直径 d/mm	锚固长度 L_a/mm
RAC0-12	6	0	12	60
RAC30-12	6	30	12	60
RAC50-12	6	50	12	60
RAC100-12	6	100	12	60
RAC0-14	6	0	14	70
RAC30-14	6	30	14	70
RAC50-14	6	50	14	70
RAC100-14	6	100	14	70
RAC0-18	6	0	18	90
RAC30-18	6	30	18	90
RAC50-18	6	50	18	90
RAC100-18	6	100	18	90

以再生细骨料取代率为 0 时的再生混凝土试件作为基准试件,基准组再生混凝土的设计配合比为水泥:水:天然河砂:再生细骨料:再生粗骨料;减水剂;粉煤灰 = 390:170:720:0:1 130:2:21,其他组的再生细骨料用量按照取代率 β 利用质量

表2 再生混凝土配合比
Tab.2 RAC proportioning

中心拔出 试件组编号	$\beta\%$	材料用料/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)								立方体抗压 强度/MPa
		水泥	水	天然河砂	再生细骨料	再生粗骨料	减水剂	煤粉灰	附加水	f_{cu}
RAC-0	0	390	170	720	0	1 130	2	21	96	31.4
RAC-30	30	390	170	504	216	1 130	2	21	102	30.1
RAC-50	50	390	170	360	360	1 130	2	21	105	28
RAC-100	100	390	170	0	720	1 130	2	21	117	25.8

法取代天然河砂,同时因再生骨料有较好的吸水性,配置再生混凝土时还需要考虑附加用水量^[12]。试验所用的配合比详见表2。

1.2.2 试件制作

依据再生混凝土配合比,计算并称量出各种材料用量,然后按照再生粗骨料、水泥、天然河砂、再生细骨料、粉煤灰的入料顺序将材料依次倒入强制搅拌机内干拌1 min,随后加入设计用水(包括附加水)与减水剂后再强制搅拌2 min。将搅拌好的再生混凝土浇筑到已涂抹脱模油并安装好钢筋的试模内,在混凝土振动台上振捣密实后放置到养护室内养护24 h后拆模、编号,然后标准养护28 d后备用。同时每组配合比再预留3个边长100 mm的立方体试件,以备测定再生混凝土的立方体抗压强度。

1.3 拔出试验的加载与量测方案

1.3.1 加载方案

中心拔出试验加载设备采用钢筋拉拔加载试验系统,加载方式分为荷载控制和位移控制,当加载值 $P \leq$ 拔出极限荷载 P_u 的80%时采用荷载控制的方法,加载速率取400 N/s;当加载值 $P >$ 拔出极限荷载 P_u 的80%时采用位移控制的方法,加载速率取0.5 mm/s。当试验过程中出现再生骨料混凝土破裂,或者钢筋与再生骨料混凝土间相对位移较大时应停止加载。

1.3.2 量测方案

试验时,每个中心拔出试件的钢筋自由端及加载端与再生混凝土间的相对位移量采用高速高精度位移量测系统进行实时采集记录。每个中心拔出试件的拔出钢筋与再生混凝土间的平均相对位移值 S 依据式(1)计算得出^[13]。

$$S = \frac{S_j + S_z}{2} \quad (1)$$

式中: S_j 为拔出钢筋加载端相对位移量测值,mm; S_z 为拔出钢筋自由端相对位移量测值,mm。每个

中心拔出试件的钢筋与再生混凝土间的平均粘结应力 τ 依据式(2)计算^[14]。

$$\tau = \frac{P}{\pi d L_a} \quad (2)$$

式中: P 为施加在试件中心拔出钢筋上的拉拔力即时值,kN; d 为试件中心拔出钢筋的公称直径,mm; L_a 为试件中心拔出钢筋的有效粘结长度,mm。

钢筋与再生混凝土间的极限粘结应力 $\tau_{u,m}$ 的取值依据式(3)计算。

$$\tau_{u,m} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{P_{u,i}}{\pi d_i L_{a,i}} \quad (3)$$

式中: $P_{u,i}$ 为第 i 个试件的极限拔出力,kN; d_i 为第 i 个试件中拔出钢筋直径,mm; $L_{a,i}$ 为第 i 个试件中拔出钢筋的有效粘结长度,mm。

2 试验结果与分析

2.1 平均粘结应力-滑移曲线

由各组中心拔出试件的试验成果可以发现,每组试件的平均粘结应力-滑移测试曲线(τ - S 曲线)基本相似,图2为以再生细骨料取代率 β 和钢筋直径 d 作为变量的各组再生混凝土试件的典型 τ - S 曲线图。

由图2可知,RAC0-18和RAC30-18两组中心拔出试件的粘结应力-滑移曲线(τ - S 曲线)仅有上升阶段而无下降阶段,且破坏前几乎没有征兆,这种破坏属脆性破坏。除以上两组中心拔出试件外,其他试件的粘结应力-滑移曲线与普通混凝土相似^[15],钢筋-再生混凝土的 τ - S 曲线可分为5个阶段:(1)线性发展阶段:在此阶段,钢筋与再生混凝土的平均粘结应力 $\leq 25\%$ 的极限粘结应力;(2)粘结微损伤阶段:在此阶段,钢筋与再生混凝土的平均粘结应力均处在25%~70%极限粘结应力之间,相对滑移量随着拔出力 P 的增加而缓慢增大,粘结刚度也逐渐降低;(3)粘结损伤阶段:在此阶段,钢筋与再生混凝土的平均粘结应力基本处于

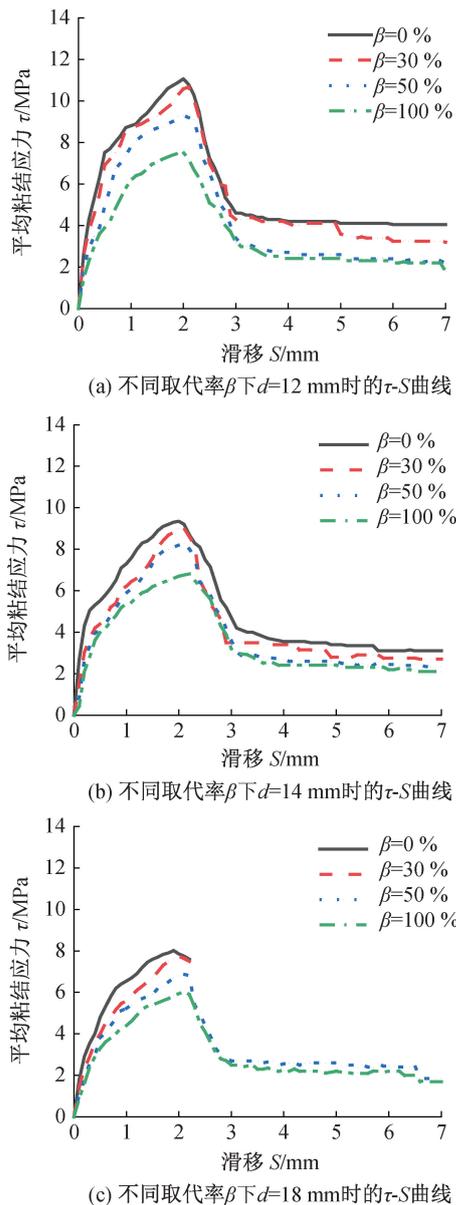


图 2 不同条件下平均粘结应力-滑移曲线(τ - S)

Fig. 2 Bond stress-slip curves under different parameter (τ - S)

70%~100%的极限粘结应力之间,滑移值随着拔出力 P 的增加而增加,粘结刚度显著降低;(4)快速下降阶段:钢筋与再生混凝土的平均粘结应力达到 100%的极限粘结应力之后, τ - S 曲线均呈快速下降趋势;(5)残余应力-滑移阶段:在此阶段, τ - S 曲线均呈平缓发展趋势。当钢筋直径相同时,再生细骨料取代率 β 越大, τ - S 曲线的下降段就显得越缓,相对滑移增长就较快。

2.2 再生细骨料取代率对极限粘结应力的影响

基于该试验成果,依据式(3)计算得到的每组

试件的极限粘结应力 $\tau_{u,m}$ 随再生细骨料取代率 β 的变化规律,详见图 3 所示。

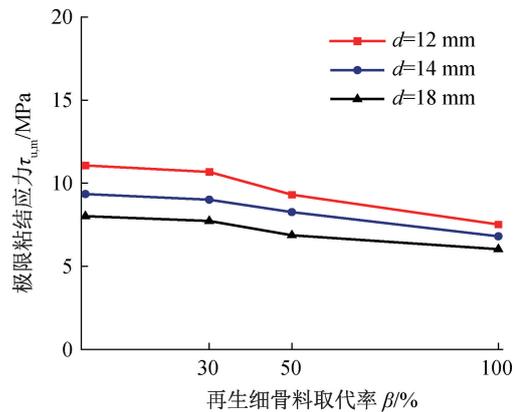


图 3 不同钢筋直径下 τ 随 β 的变化规律

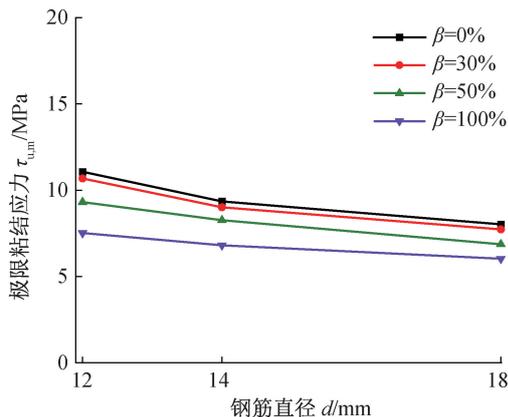
Fig. 3 Regularity for change of τ with β under different steel bar diameters

由图 3 可知,随着再生细骨料取代率 β 的增大,钢筋-再生混凝土的极限粘结应力 $\tau_{u,m}$ 均呈减小趋势。与 $\beta = 0\%$ 相比较, $\beta = 100\%$ 时,直径分别为 12、14、18 mm 钢筋与再生混凝土间的极限粘结应力 $\tau_{u,m}$ 的值分别降低了 32.07%、27.16%和 24.81%。在再生细骨料取代率 β 相同的条件下,小直径钢筋与再生混凝土间的粘结性能要优于大直径钢筋。

2.3 钢筋直径对极限粘结应力的影响

观察各组试件的宏观破坏过程与现象可以发现:钢筋直径 $d = 12、14$ mm 时,钢筋再生混凝土破坏形式均表现为剪切型钢筋拔出破坏,而拉拔钢筋未屈服。钢筋直径 $d = 18$ mm 时,当再生细骨料取代率 $\beta = 0\%$ 、 $\beta = 30\%$ 时,钢筋再生混凝土破坏形式为劈裂破坏,具体破坏过程为裂缝首先出现在加载端附近,随着应力增加并逐渐向自由端延伸,最终形成贯通裂缝,试件破坏;而当再生细骨料取代率 β 在 50%及以上时,其破坏形式为剪切型钢筋拔出破坏,破坏特征为试件表面没有明显裂缝。基于试验结果,对试验数据计算整理后得到的极限粘结应力 $\tau_{u,m}$ 随钢筋直径 d 的变化规律,如图 4 所示。

由图 4 可知,钢筋与再生混凝土间的极限粘结应力 $\tau_{u,m}$ 随着钢筋直径的增加而逐渐降低, $\tau_{u,m}-d$ 关系曲线呈线性变化趋势。而在钢筋直径 d 相同的条件下,极限粘结应力 $\tau_{u,m}$ 随再生细骨料取代率 β 增大而减小,这主要是由于钢筋与再生混凝土间

图4 不同取代率 β 下 τ 随钢筋直径 d 的变化规律Fig. 4 Variation of τ with diameter d of steel bar at different substitution rates β

的极限粘结应力 $\tau_{u,m}$ 主要来自于钢筋与再生混凝土间粘结性能,而在其他条件不变的情况下用再生细骨料取代天然河砂是其咬合强度降低的主要因素,极限粘结应力 $\tau_{u,m}$ 随再生细骨料取代率 β 增大而减小。故再生细骨料取代率 β 对再生混凝土与钢筋间粘结锚固性能的影响较钢筋直径 d 大,并且对于锚固设计长度 L_a 的修正问题也不应被忽视。

不同再生细骨料取代率 β 下再生混凝土抗压强度(f_{cu})实测值如图5所示。相对粘结应力 $\tau_{u,m}/f_{cu}$ 与钢筋直径 d 的相关关系如图6所示。将试验数据通过最小二乘法拟合分析后得到相对粘结应力 $\tau_{u,m}/f_{cu}$ 与钢筋直径 d 的函数关系表达式,见式(4)所示,相关系数为0.91,可以表明计算值与试验值吻合较好。

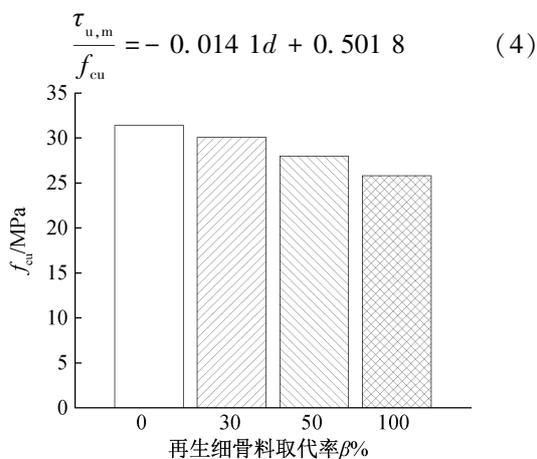
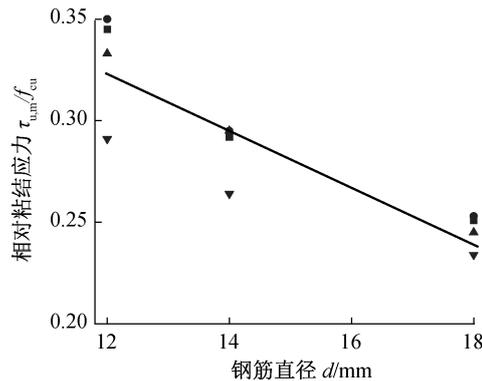
图5 再生细骨料取代率 β 对再生混凝土抗压强度的影响Fig. 5 Effect of RFA replacement rate β on recycled concrete compression strength

图6 相对粘结应力与钢筋直径关系曲线

Fig. 6 The Relation curve of relative bond stress and steel bars diameter

3 结论

1) HRB400E 月牙钢筋与再生混凝土的粘结刚度的变化表现为:与天然河砂细骨料相比较,再生细骨料取代率在30%以内时,极限粘结应力与粘结刚度降低较小;当再生细骨料取代率超过30%时,极限粘结应力与粘结刚度则随再生细骨料取代率的增加而明显降低。

2) 钢筋直径相同时,HRB400E 月牙钢筋与再生混凝土间的极限粘结应力随再生细骨料取代率的增大而降低;再生细骨料取代率相同时,HRB400E 月牙钢筋与再生混凝土间的极限粘结应力随钢筋直径的减小而增大。

3) 基于试验成果及分析,得到了再生混凝土与 HRB400E 月牙钢筋的极限粘结应力计算公式,可为 HRB400E 月牙钢筋再生混凝土的相关研究提供理论参考。

参考文献:

- [1] 陈家珑,方源兴. 我国混凝土骨料的现状与问题[J]. 建筑技术, 2005, 36(1): 23-25.
- [2] 曹万林,林栋朝,乔崎云,等. 钢筋与再生混凝土粘结性能及影响因素研究[J]. 自然灾害学报, 2017, 26(5): 36-44.
- [3] 董宏英,孙文娟,曹万林,等. 钢筋-再生混凝土黏结滑移性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(12): 82-90.
- [4] 杨海峰,陈卫,张天宝,等. 再生混凝土-钢筋黏结锚固可靠度设计[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2019, 50(1): 189-197.
- [5] PANDURANGAN K, DAYANITHY A, OM PRAKASH S. Influence of Treatment Methods on the Bond Strength of Recycled Aggregate Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2016, 120: 212-221.

(下转第 83 页)

- (9):34-39.
- [10]王娟. 基于灰色关联度法的空气质量数据校准研究[J]. 微型电脑应用, 2021, 37(3):44-47.
- [11]蔡挺彬, 冯书兴, 张雪芹, 等. 基于灰色关联分析的雷达外测数据精度评估方法[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(10):4272-4277.
- [12]张丽洁, 沙秀艳, 尹传存, 等. 基于变权优化背景值改进的GM(1,1)灰色预测模型及其应用[J]. 计算机与现代化, 2021, 305(1):1-6+27.
- [13]高文娜. 基于区位熵灰色关联度的关中平原城市群产业协同分析[J]. 当代经济, 2021, 524(8):54-58.
- [14]林英姿, 刘万全, 李冠. 利用灰色模型预测年用水量[J]. 中国资源综合利用, 2014, 32(11):57-59.
- [15]杨华龙, 刘金霞, 郑斌. GM(1,1)灰色预测模型的改进与应用[J]. 数学的实践与认识, 2011, 41(23):39-46.
- [16]王正新, 党耀国, 刘思峰. 基于离散指数函数优化的GM(1,1)模型[J]. 系统工程理论与实践, 2008(02):61-67.
- [17]XIAO Xiping, HU Yichen, GUO Huan. Modeling Mechanism and Extension of GM(1,1)[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2013, 24(03):445-453.
- (责任编辑 王利君)

(上接第64页)

- [6]谭艺帅, 彭有开, 吴徽. 不同再生细骨料取代率下的再生混凝土单轴受压本构关系[J]. 混凝土, 2019(03):65-70.
- [7]赵敏, 刘元珍, 姜鲁, 等. 不同状态再生细骨料对再生保温混凝土抗压强度的影响[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(10):281-285.
- [8]GB/T 25177—2010, 混凝土用再生粗骨料[S].
- [9]GB/T 25176—2010, 混凝土和砂浆用再生细骨料[S].
- [10]GB/T 228.1—2010, 金属材料拉伸试验[S].
- [11]DL/T 5150—2017, 水工混凝土试验规程[S].
- [12]远新. 基于再生骨料品质和取代率的再生混凝土配合比设计方法研究[D]. 青岛:青岛理工大学, 2018.
- [13]赵文兰, 姚志斌, 于秋波, 等. 轻质混凝土与变形钢筋粘结锚固性能试验研究[J]. 建筑结构, 2019, 49(4):70-75.
- [14]郑建岚, 庄金平. 自密实混凝土与钢筋的粘结性能试验研究[J]. 工程力学, 2013, 30(2):112-117.
- [15]仲源, 沙吾列提, 拜开依, 等. 掺沙漠砂混凝土与HRB400钢筋的粘结锚固性能研究[J]. 建筑科学, 2020, 36(3):86-93.
- (责任编辑 王利君)