

文章编号:1673-9469(2023)04-0041-04

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2023.04.006

再生粗骨料最大粒径对再生混凝土强度影响试验研究

安新正,张龙娇*,郭永民,王燕杰

(河北工程大学 土木工程学院,河北 邯郸 056038)

摘要: 为了研究再生粗骨料最大粒径对再生混凝土弯拉强度、抗压强度及折压比的影响程度,采用相同配合比下最大粒径为10、15、25和31 mm的再生粗骨料制备了4组再生混凝土棱柱体试件(100 mm×100 mm×400 mm)和4组立方体试件(100 mm×100 mm×100 mm),并通过试验获得了各组再生混凝土试块的弯拉强度和抗压强度。试验结果表明:相同水胶比下,再生混凝土弯拉强度及折压比均随再生粗骨料最大粒径的增大而减小,而抗压强度随再生粗骨料最大粒径的增大呈现出先增大而后减小的趋势。

关键词: 再生粗骨料最大粒径;再生混凝土;弯拉强度;抗压强度;折压比

中图分类号: TU317+9

文献标识码: A

Experimental Study on Influence of Maximum Particle Size of Recycled Coarse Aggregate on Strength of Recycled Concrete

AN Xinzheng, ZHANG Longjiao*, GUO Yongmin, WANG Yanjie

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

Abstract: In order to study the degree of influence of the maximum size of recycled coarse aggregate on the bending and tensile strength, compressive strength and folding ratio of recycled concrete, four groups of recycled concrete prismatic specimens (100 mm×100 mm×400 mm) and four groups of cubic specimens (100 mm×100 mm×100 mm) were prepared by using different volume combinations of the recycled coarse aggregate with maximum sizes of 10, 15, 25, and 31 mm under the same mixing ratios and the bending and tensile strengths and compressive strengths of the recycled concrete specimens of the various groups were obtained through tests. The results show that under the same water-binder ratio, the flexural strength and flexural-compression ratio of recycled concrete decrease with the increase of the maximum particle size of recycled coarse aggregate, while the compressive strength increases first and then decreases with the increase of the maximum particle size of recycled coarse aggregate.

Key words: maximum particle size of recycled coarse aggregate; recycled concrete; bending strength; compressive strength; compression ratio

近些年来,再生混凝土的出现为解决混凝土工程必须的骨料问题,推动再生骨料的循环和资源化利用,促进土木工程领域的节能减排提供了切实可行的方案^[1-2]。再生粗骨料在再生混凝土中的占比较大,对再生混凝土力学性能有较大的影响。付敏^[3]通过试验研究,认为再生混凝土的韧性系数及延性比与骨料最大粒径之间存在一定

的尺寸效应。孙家瑛等^[4]对再生细骨料粒径分别为5、2.5、1.25、0.63、0.315和0.16 mm的再生混凝土试件进行了快速冻融循环试验研究,认为其抗冻性能随再生细骨料粒径尺寸的减小而逐渐下降。乔京生等^[5]对再生粗骨料最大粒径分别为16、20、25、31.5和40 mm的再生混凝土试件进行了抗压试验研究,认为其抗压强度随再生粗骨料

收稿日期:2022-09-12

基金项目:河北省自然科学基金资助项目(E2021402028);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:张龙娇(1999-),女,山东济宁人,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。

最大粒径的增大呈现出先逐渐增加而后转为逐渐减小的趋势。杜敏等^[6]就粗骨料粒径对混凝土弯拉强度的影响进行了试验研究,认为在粗骨料体积率和水灰比相同条件下混凝土弯拉强度将会随粗骨料粒径的增大而减小。王江波等^[7]的研究成果显示随粗骨料最大粒径的增大,混凝土抗压强度呈先增加而后降低的趋势。Elices等^[8]的研究认为混凝土抗拉强度随粗骨料粒径的增大而呈减小的趋势。王瑞骏等^[9]的研究成果表明再生粗骨料粒径对混凝土抗压强度的影响不容忽视。

综上所述,目前相关粗骨料最大粒径影响的研究主要集中在单一粒径级配对普通混凝土弯拉强度与抗压强度,以及再生混凝土抗压强度方面,而相关再生粗骨料最大粒径在多粒径级配下对再生混凝土弯拉强度、抗压强度影响的研究文献还相对较少,所以很有必要开展再生粗骨料最大粒径在多粒径级配下再生混凝土弯拉强度和抗压强度的研究,为此通过4种最大再生粗骨料粒径在不同再生粗骨料体积组合比例下,再生混凝土试块的弯曲抗拉试验和抗压试验,分析了再生粗骨料最大粒径对再生混凝土弯曲抗拉强度(弯拉强度)、抗压强度的影响程度,为再生混凝土的工程设计提供依据。

1 原材料、试块情况与试验方法

1.1 试验用原材料

(1)水泥:采用河北太行水泥股份有限公司生产的太行山牌P·O 42.5级普通硅酸盐水泥;(2)粗骨料:全部采用再生粗骨料。本文试验采用的再生粗骨料为邯郸市某拆除建筑物的废弃混凝土梁(采用钻芯法测得其混凝土的抗压强度值为40.3 MPa)经破碎机破碎,去除杂物,筛分而获得5~10、10~15、15~25和25~31 mm粒径区间的连续级配再生粗骨料(表1),符合《混凝土用再生粗骨料》(GB/T 25177—2010)^[10]标准;(3)细骨料:采用沙河产天然河砂,其细度模数为1.6;(4)粉煤

灰:采用邯峰电厂产I级粉煤灰,掺量为5%;(5)减水剂:采用减水率为25%的聚羧酸高效减水剂;(6)拌制用水:采用邯郸市用自来水。

表1 再生粗骨料基本物理性能指标

Tab. 1 Basic physical properties of recycled coarse aggregate

序号	最大粗骨料粒径/mm	粗骨料粒径范围/mm	表观密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	24 h吸水率/%	压碎指标/%
1	10	5~10	2 415	5.28	12.7
2	15	10~15	2 428	5.11	13.7
3	25	15~25	2 503	5.06	13.4
4	31	25~31	2 481	4.83	14.1

1.2 试验配合比与试块制作

由于再生粗骨料表面附着有老旧砂浆,其表面粗糙度比天然碎石骨料大,且吸水率高,影响再生混凝土的工作性能。因此,在拌制再生混凝土时依据再生粗骨料用量计算出附加用水量^[11]。再生混凝土设计配合比为:水泥:水:砂:再生粗骨料=1:0.45:1.97:3.27。为了研究再生粗骨料最大粒径对再生混凝土性能的影响,本次试验采用最大粗骨料粒径分别为10、15、25和31 mm的4组再生粗骨料,共设计了4组再生混凝土棱柱体试块(100 mm×100 mm×400 mm)和立方体试块(100 mm×100 mm×100 mm),每组制作6个棱柱体试块和3个立方体试块。各组棱柱体试块和立方体试块的组号和编号,以及再生粗骨料组分的组合比例情况详见表2所示。

1.3 试验方法

将达到28 d标准养护时间的A—D组再生混凝土棱柱体试块及立方体试块从标准养护室内取出,并按照《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[12]的相关要求,在微机控制电液伺服试验机上分别进行再生混凝土棱柱体试块的四点弯曲试验和立方体试块的抗压试验。四点弯曲试验简图如图1所示。

表2 A—D组试块组再生粗骨料的组合比例

Tab. 2 Combination ratio of recycled coarse aggregate in groups A—D

试块组编号	棱柱体试块组编号	立方体试块组编号	粗骨料粒径范围/mm	粗骨料最大粒径 Φ_{\max} /mm	粗骨料体积组合比例/%			
					5~10 mm	10~15 mm	15~25 mm	25~31 mm
A	RCL-10	RAC-10	5~10	10	100	0	0	0
B	RCL-15	RAC-15	5~15	15	40	60	0	0
C	RCL-25	RAC-25	5~25	25	20	20	40	0
D	RCL-31	RAC-31	5~31	31	20	20	20	40

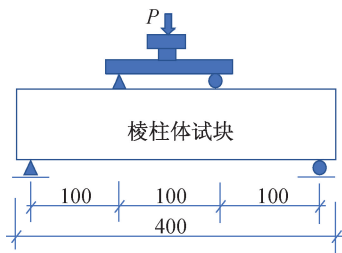


图1 四点弯曲试验示意图(单位:mm)

Fig.1 Schematic diagram of four-point bending tests(unit:mm)

在试验过程中,注意观测并记录A—D组再生混凝土棱柱体试块和立方体试块中每个试块的破坏特征和极限荷载值,并依照文献[12]计算每个棱柱体试块和立方体试块的弯曲抗拉强度值和抗压强度值。各组棱柱体试块的弯拉强度(f_t)和立方体试块的抗压强度(f_{cu})分别取该组内所有试验试块弯拉强度的平均值和试验试块抗压强度的平均值。各组再生混凝土材料的折压比(λ)取该组试块的弯拉强度与抗压强度的比值,即: $\lambda = f_t / f_{cu}$ 。

2 试验结果分析

2.1 试验结果

对标养28d的A—D组试块分别进行了弯曲抗拉试验和抗压试验,弯拉强度采用6个试块的平均值,抗压强度采用3个试块的平均值。本文试验结果详见表3所示。由表3可知,再生骨料粒径越大,再生混凝土试块的不均匀性也越大。

表3 A—D组试块弯拉强度、抗压强度试验结果

Tab.3 Test results of flexural tensile strength and compressive strength of test samples in groups A—D

试块组 编号	弯拉强度 f_t /MPa	标准差 σ /MPa	抗压强度 f_{cu} /MPa	标准差 σ /MPa	折压比 λ
A	4.5	0.15	28.5	2.37	0.157
B	4.2	0.14	30.6	2.62	0.137
C	3.8	0.16	35.2	3.10	0.108
D	2.9	0.19	31.8	3.45	0.091

2.2 再生粗骨料最大粒径对弯拉强度影响

由弯曲抗拉试验时观察到的破坏现象可以发现,A—D组再生混凝土棱柱体试块产生的裂缝均出现在施加荷载接近极限值时刻,且裂缝一旦出现就迅速发生断裂破坏,显示为脆性破坏特征。

图2给出了再生混凝土弯拉强度(f_t)随再生粗骨料最大粒径(Φ_{max})的变化情况。依据图2和

表3可知,当 Φ_{max} 的取值由10mm增加到25mm时, f_t 随 Φ_{max} 的增大而缓慢减小;当 Φ_{max} 的取值由25mm增加到31mm时, f_t 随 Φ_{max} 的增大而大幅度减小。其原因主要是由于 f_t 不仅取决于砂浆自身的胶结强度,还与砂浆和再生粗骨料间胶接界面的胶结强度密切相关。随着 Φ_{max} 的增大,再生粗骨料被旧砂浆包裹的面积也相对增大,同时破碎过程带给再生粗骨料的微裂纹损伤会相对提高,这就直接减小了再生粗骨料与新砂浆及再生粗骨料间界面的粘结性能。当 $\Phi_{max} = 10$ mm时,与 Φ_{max} 的取值15、25和31mm时相比较,其 f_t 分别增加了6.7%、15.5%和35.5%。由此可见,在配合比一定时,再生混凝土弯拉强度的粗骨料粒径效应随 Φ_{max} 的增大而增大。

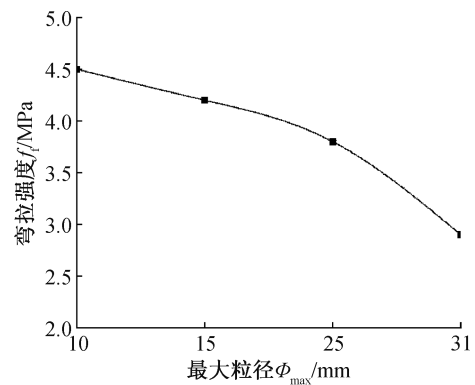


图2 再生粗骨料最大粒径对弯拉强度的影响曲线

Fig.2 Influence curve of maximum particle size of recycled coarse aggregate on flexural strength

2.3 再生粗骨料最大粒径对立方体抗压强度的影响

图3给出了A—D组再生混凝土试块抗压强度(f_{cu})随再生粗骨料最大粒径(Φ_{max})的变化情况。由图3及表3可知, f_{cu} 值随 Φ_{max} 的增大呈现出先增大而后减小的趋势。这主要是由于,当再生粗骨料最大粒径 Φ_{max} 在25mm及以下时,再生粗骨料存在的缺陷较小,自身的强度损伤也较小,使得粗骨料的骨架作用得到了正常发挥;当再生粗骨料最大粒径 Φ_{max} 超过25mm时,再生粗骨料表面附着陈旧砂浆及其内部缺陷存在概率将随 Φ_{max} 的逐渐增大而增加,从而减小了粗骨料的骨架作用。 f_{cu} 值在 $\Phi_{max} = 25$ mm时取得最大值。当 $\Phi_{max} = 25$ mm时,与 Φ_{max} 分别取10、15和31mm时相比较分别增加了19%、13.1%和9.6%。综上所述,在配合比一定时再生混凝土抗压强度的粗骨料粒径效应是比较明显的。

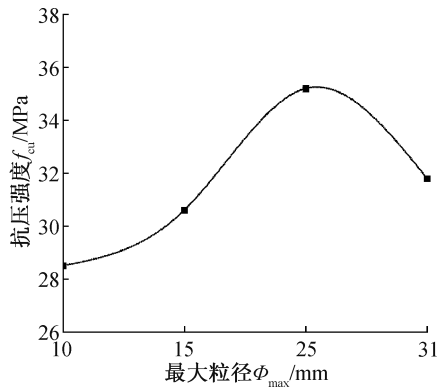


图3 再生粗骨料最大粒径对抗压强度影响曲线

Fig. 3 Influence curve of maximum particle size of recycled coarse aggregate on compressive strength

2.4 再生粗骨料最大粒径对折压比的影响

再生混凝土折压比是反映再生混凝土材料韧性程度的一个重要指标。 λ 越大,则再生混凝土材料的韧性程度就越好,反之则脆性越大。图4为 λ 随 Φ_{max} 变化而变化的直方图。由图4及表3可以看出, Φ_{max} 的取值在10~31 mm范围内变化时, λ 的取值范围在0.091~0.157之间变化,当 Φ_{max} 的取值由10 mm逐渐增加到31 mm时, λ 的值随 Φ_{max} 取值的逐渐增大而呈现出逐渐减小的趋势。 λ 的最大值比最小值高出45.2%,这说明要想得到较优韧性性能的再生混凝土,在相同配合比条件下应优先考虑选取小粒径的再生粗骨料来配制再生混凝土材料。

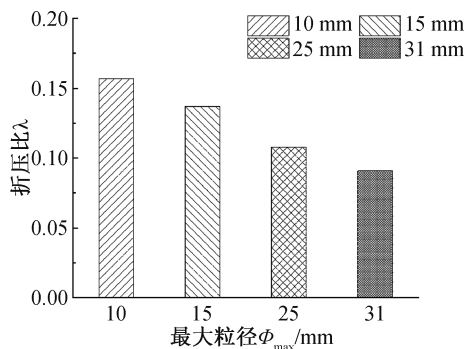


图4 再生粗骨料最大粒径对折压比的影响曲线

Fig. 4 Influence curve of the maximum particle size of recycled coarse aggregate on the compression ratio

2.5 考虑最大粒径影响的弯拉强度与抗压强度关系

由图4可知, Φ_{max} 的取值在10~31 mm范围内变化时, λ 的取值近似于线性变化。考虑 Φ_{max} 对 λ 的影响,假设 λ 随 Φ_{max} 变化符合式(1)计算模型。

$$\lambda = a + b\Phi_{max} \quad (1)$$

式中, a 、 b 为试验常数。

基于试验数据,采用MATLAB软件对式(1)进行最小二乘法回归拟合分析,可得: $a=0.1859$, $b=-0.0031$,并将 a 、 b 的值代入式(1),可得式(2)。

$$\lambda = 0.1859 - 0.0031\Phi_{max} \quad (2)$$

将 $\lambda=f_t/f_{cu}$ 代入式(2),可得式(3)。式(3)即基于再生粗骨料最大粒径取值变化及立方体抗压强度的再生混凝土弯拉强度计算模型。该计算模型的计算值与试验值吻合较好。

$$f_t = (0.1859 - 0.0031\Phi_{max})f_{cu} \quad (3)$$

3 结论

1)再生粗骨料最大粒径在10~31 mm范围内,再生混凝土的弯曲抗拉强度随再生粗骨料最大粒径的增大而减小。

2)再生粗骨料最大粒径在10~31 mm范围内,再生混凝土抗压强度随再生粗骨料最大粒径的增大呈现出先增加,而后减小的趋势,并且最大值介于再生粗骨料最大粒径15~31 mm之间。

3)随再生粗骨料最大粒径的逐渐增大,再生混凝土折压比呈现出逐渐减小的趋势。再生粗骨料最大粒径为31 mm时的折压比仅为最大粒径为10 mm时的45%左右。

4)建立了考虑再生粗骨料最大粒径影响的再生混凝土弯拉强度和立方体抗压强度的关系模型,可为基于抗压强度的再生混凝土弯拉强度的计算提供借鉴。

参考文献:

- [1] XIAO J Z. Recycled Aggregate Concrete Structures[M]. Berlin: Springer, 2018.
- [2] 肖建庄. 大有可为的再生混凝土[J]. 科技视界, 2022(9): 1-4.
- [3] 付敏. 钢纤维与再生粗骨料粒径对再生混凝土冲击性能影响的研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2020.
- [4] 孙家瑛, 耿健. 再生细骨料粒径及掺量对混凝土抗冻性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(3): 382-385.
- [5] 乔京生, 藏朋, 霍文杰. 粗骨料最大粒径对再生混凝土强度影响[J]. 河北联合大学学报(自然科学版), 2016, 38(1): 107-109.
- [6] 杜敏, 金浏, 李冬, 等. 粗骨料粒径对混凝土弯拉强度尺寸效应影响的试验研究[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(6): 912-918.

(下转第51页)

4 结论

1) 预拌流态土的抗剪强度和粘聚力会随着水泥配合比、养护龄期的增加而增加,随着水灰比的增加而减小,其中,当水泥配合比达到 20% 时,抗剪强度增幅较大。

2) 对于预拌流态土的剪应力-剪切位移,提出了 BP 神经网络预测模型,以剪切位移、水泥配合比、水灰比、养护龄期和垂直压力为输入层,隐含层神经元数量设为 5,以剪切应力为输出层,分析得到神经网络模型预测结果的整体 RMSE 和 R^2 分别为 16.733 kPa 和 0.987,具有较高的预测精度。

3) 本文建立的预拌流态土剪应力-剪切位移神经网络预测模型对抗剪强度和粘聚力预测效果较优,预测相对误差控制在 10% 以内,预测效果最优的点预测误差不足 1%。

参考文献:

- [1] 周海成,单宏伟,冯良平,等.基于粉质黏土的流态水泥固化土配合比试验及应用研究[J].公路,2022,67(10):374-378.
- [2] 赵晓冬.流态水泥土工程设计研究[J].交通标准化,2011,252(17):93-95.
- [3] 张亭亭,王平,李江山,等.养护龄期和铅含量对磷酸镁水泥固化/稳定化铅污染土的固稳性能影响规律及微观机制[J].岩土力学,2018,39(06):2115-2123.
- [4] 伍浩良,薄煜琳,杜延军,等.碱激发高炉矿渣固化铅污染土酸缓能力、强度及微观特性研究[J].岩土工程学报,2019,41(S1):137-140.
- [5] 高磊,胡国辉,杨晨,等.玄武岩纤维加筋黏土的剪切强度特性[J].岩土工程学报,2016,38(S1):

231-237.

- [6] 杨爱武,胡垚,杨少坤.城市污泥新型固化技术及其力学特性[J].岩土力学,2019,40(11):4439-4449.
- [7] 胡亚元,余启致,张超杰,等.纤维加筋淤泥固化土的邓肯-张模型[J].浙江大学学报(工学版),2017,51(08):1500-1508.
- [8] 朱彦鹏,王浩,刘东瑞,等.基于正交设计的风化砂岩流态固化土抗剪强度试验研究[J].岩土工程学报,2022,44(S1):46-51.
- [9] 赵卫国.赤泥-偏高岭土流态固化土在填筑工程中的应用研究[D].太原:太原理工大学,2022.
- [10] ZHANG L, SANG G C, CUI X L, et al. Design Optimization of Rural Building in Dry-hot and Dry-cold Area Using a Back Propagation (BP) Neural Network[J]. Energy & Buildings, 2022, 259:11899.
- [11] SUN H C, LI H, GUO Y T, et al. Research on Energy Control System of Office Building Based on the BIM and BP Neural Network Technology[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2044(1): 012196.
- [12] 谢文强,蔡国军,王睿,等.基于 CPTu 数据的黏性土不排水抗剪强度神经网络预测[J].土木工程学报,2019,52(S2):35-41.
- [13] HASANZADE-INALLU A, ZARFAM P, NIKOO M. Modified Imperialist Competitive Algorithm-based Neural Network to Determine Shear Strength of Concrete Beams Reinforced with FRP [J]. Journal of Central South University, 2019, 26(11):3156-3174.
- [14] 肖治宇,陈昌富,彭钊.非饱和残坡积土强度随含水量变化的改进 BP 神经网络预测研究[J].水文地质工程地质,2011,38(02):79-83+101.
- [15] 中国工程建设标准化协会.预拌流态固化土填筑技术标准:T/CECS 1037—2022[S].北京:中国建筑工业出版社,2022:8.

(责任编辑 周雪梅)

(上接第 44 页)

- [7] 王江波,张天星,丁俊升,等.骨料粒径对混凝土力学性能影响研究[J].北京理工大学学报,2021,41(4):1-9.
- [8] ELICES M, ROCCO C G. Effect of Aggregate Size on the Fracture and Mechanical Properties of a Simple Concrete [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75(13): 3839-3851.
- [9] 王瑞骏,蔡彦强,徐帆.不同粒径再生粗骨料二级配混凝土力学性能试验研究[J].水力发电,2018,44(03):

101-105.

- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土用再生粗骨料:GB/T 25177—2010[S].北京:中国标准出版社,2010.
- [11] 张学兵.再生混凝土抗压强度及配合比设计研究[D].南京:南京航空航天大学,2006.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土物理力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.

(责任编辑 周雪梅)