

文章编号:1007-9629(2022)11-1121-07

再生混凝土棱柱体与立方体抗压强度关系模型

高文昌^{1,2}, 张欢^{1,2,*}, 耿悦^{1,2,3}, 杨华^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 哈尔滨工业大学 结构工程灾变与控制教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090; 3. 华南理工大学 广东省现代土木工程重点实验室, 广东 广州 510641)

摘要:再生混凝土棱柱体与立方体抗压强度之间的关系显著异于普通混凝土,而现有模型预测精度较低、离散性较高。为此,搜集并分析了文献中 139 组试验数据,研究了再生骨料取代率、吸水率与二者耦合效应对再生混凝土强度的显著影响,提出了再生混凝土棱柱体与立方体抗压强度关系模型,模型预测结果变异系数仅为 5.4%。为方便使用,基于骨料分类,进一步简化了该模型。模型分析结果表明其不确定性服从正态分布,且与关键参数无关,采用该模型进行结构可靠度分析时可忽略其相关性。

关键词:再生混凝土;再生骨料;棱柱体抗压强度;立方体抗压强度;模型不确定性

中图分类号:TU528.01

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.11.003

Model for the Relationship between Prism and Cube Compressive Strengths of Recycled Aggregate Concrete

GAO Wenchang^{1,2}, ZHANG Huan^{1,2,*}, GENG Yue^{1,2,3}, YANG Hua^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control of the Ministry of Education, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Modern Civil Engineering Technology, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: The relationship between the prism and cube compressive strengths of recycled aggregate concrete is significantly different from that of normal aggregate concrete. However, the prediction accuracy of existing models is relatively low and the discrepancy between predicted results of these models is relatively high. 139 groups of test data in literatures were collected and analyzed, and the significant influences of the replacement ratio, water absorption ratio and the compounding effect between these two parameters were disclosed. A model for the relationship between the prism and cube compressive strengths of recycled aggregate concrete was proposed, with the coefficient of variation being only 5.4%. For the convenience of usage, a simplified calculation model based on the recycled aggregate classification was also proposed. The results of the model analysis show that the model uncertainty follows a normal distribution and is independent of the key parameters. It is suggested that the correlation between the model uncertainty and the key parameters can be ignored when the model is used for reliability analysis.

Key words: recycled aggregate concrete; recycled aggregate; prism compressive strength; cube compressive strength; model uncertainty

随着中国工程建设的不断发展,建筑垃圾产量不断上升,其中废弃混凝土约占 30%~40%^[1],其处

收稿日期:2022-04-27; 修订日期:2022-07-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52108128);广东省现代土木工程重点实验室项目(2021B1212040003)

第一作者:高文昌(1998—),男,山东滨州人,哈尔滨工业大学硕士生。E-mail:20S133188@stu.hit.edu.cn

通讯作者:张欢(1991—),男,河北唐山人,哈尔滨工业大学讲师,硕士生导师,博士。E-mail:zhanghuan916@hit.edu.cn

置问题亟待解决.将废弃混凝土破碎筛分,形成再生骨料,进而制成再生混凝土,是提高建筑垃圾利用率、从根本上解决其处置问题的主要手段^[2-3].现有研究^[4-7]及工程实例^[8]已证明再生混凝土在结构工程中的适用性.

根据GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》,棱柱体抗压强度(f_{cp})是混凝土结构设计的核心参数,由立方体抗压强度(f_{cc})计算得到.因此,混凝土棱柱体与立方体抗压强度关系的准确性是结构安全设计的关键.现有研究^[9-11]表明,再生骨料的掺入会显著改变混凝土棱柱体抗压强度与立方体抗压强度关系:再生骨料取代率(r)为100%时, f_{cp}/f_{cc} 可发生-21%~37%的变化^[12-15].然而,已有再生混凝土棱柱体与立方体抗压强度关系模型^[11-23]预测精度较低,模型间差异可达45%.

因此,基于搜集的13篇参考文献^[9,12,15,18,21-22,24-30]中共计139组普通强度再生混凝土 f_{cp} 与 f_{cc} 试验数据,分析了以往模型离散性较大的原因,确定了再生骨料取代率(r)与吸水率(w_a)这两个关键参数,并发现了二者的耦合效应.考虑上述影响因素,提出了再生混凝土棱柱体与立方体抗压强度关系预测模型;为方便使用,基于再生骨料分类,进一步提出了简化模型;最后系统地研究了模型不确定性的数据特征,为再生混凝土结构的可靠度分析提供了建议.

1 现有模型分析

目前,国内外学者已基于试验结果对再生混凝土 f_{cp} 与 f_{cc} 的关系模型开展了研究^[11-23].马静等^[12]、肖建庄^[13]、姚大立等^[16]、柴园园等^[17]、吴淑海等^[18]、向星赞等^[19]通过试验结果拟合建立了再生混凝土 f_{cp}/f_{cc} 关系模型.上述模型认为 f_{cp}/f_{cc} 是常数,不随 r 等参数变化,其 f_{cp}/f_{cc} 预测结果范围为0.67~0.85.而孟苗超等^[11]、Zhou等^[14]、胡波等^[20]、李旭平等^[21]、Zhang等^[22]考虑 r 的影响建立了 f_{cp}/f_{cc} 关系模型.此外,肖建庄等^[23]在考虑 r 影响的同时,还引入了混凝土密度的影响.

现有再生混凝土棱柱体与立方体抗压强度关系模型预测结果对比见图1.由图1可见,各模型预测结果之间差异较大,甚至趋势相反,最大相差可达45%.例如,在Zhang等^[22]的模型中, f_{cp}/f_{cc} 随 r 增大而降低;而在Zhou等^[14]的模型中, f_{cp}/f_{cc} 随 r 增大而增大.上述显著差异主要由再生骨料物理性质差异^[31]所致.上述模型建立过程中所用再生骨料的吸水率(w_a)范围为2.7%~9.3%.然而,现有模型均是基于单一再生骨料来源提出的,不能反映再生骨料物理性质的影响.为此,有必要基于大量试验数据,分析再生骨料

物理性质对再生混凝土 f_{cp}/f_{cc} 的影响,确定关键影响参数,提出考虑再生骨料物理性质影响的再生混凝土棱柱体与立方体抗压强度关系预测模型.

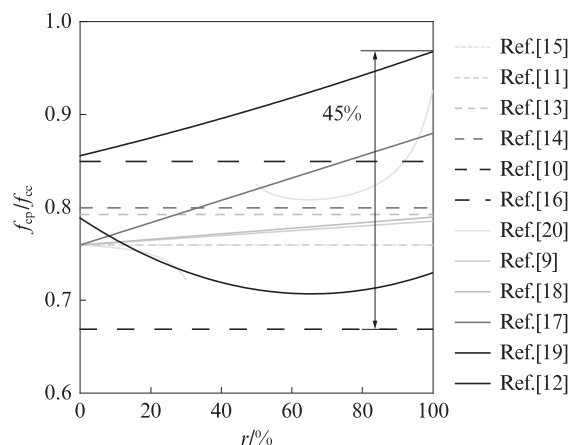


图1 现有再生混凝土棱柱体与立方体抗压强度关系模型预测结果对比

Fig. 1 Comparison of predicted results from different models for the relationship between prism and cube compressive strengths

2 关键参数确定

为确定影响再生混凝土棱柱体与立方体抗压强度关系的关键参数,搜集了13篇参考文献^[9,12,15,18,21-22,24-30]中共139组普通强度再生混凝土 f_{cp} 与 f_{cc} 试验数据.为减小数据离散性,仅采用了无矿物掺和料且再生骨料未经强化处理的试验结果.搜集到的试验参数范围较广:水灰比(m_w/m_c)为0.35~0.57; f_{cc} 为21~54 MPa; f_{cp} 为15~44 MPa; r 为0%~100%; w_a 为2.7%~9.3%.

通过系统分析发现,再生骨料取代率 r 与吸水率 w_a 是影响 f_{cp}/f_{cc} 的关键参数.图2分析了再生骨料取代率 r 与吸水率 w_a 的影响.由图2可见:当 $w_a > 8.0\%$ 时,与 $r=0\%$ 相比, $r=100\%$ 时, f_{cp}/f_{cc} 增大了27.1%;在 $r=100\%$ 的情况下,随着 w_a 由3.0%增大到8.0%, f_{cp}/f_{cc} 增大了55.6%.

由图2还可以看出, r 与 w_a 的影响存在显著的耦合效应,随着 w_a 的增大, r 的影响趋势显著改变,甚至相反,即 r 对 f_{cp}/f_{cc} 的影响由降低作用变为增大作用.例如:相对于 $r=0\%$ 的情况,对于 $w_a < 3.0\%$ 的再生骨料, $r=100\%$ 时 f_{cp}/f_{cc} 降低了19.3%;而对于 $w_a > 8.0\%$ 的再生骨料, $r=100\%$ 时 f_{cp}/f_{cc} 增大了27.1%.本文分析认为,该耦合效应主要是由 r 与 w_a 对混凝土断裂带的相反影响导致的.具体而言,对于相同配合比的混凝土,影响其抗压强度的关键因素为断裂带宽度与长度^[32].混凝土断裂带越狭长,其应力释放区

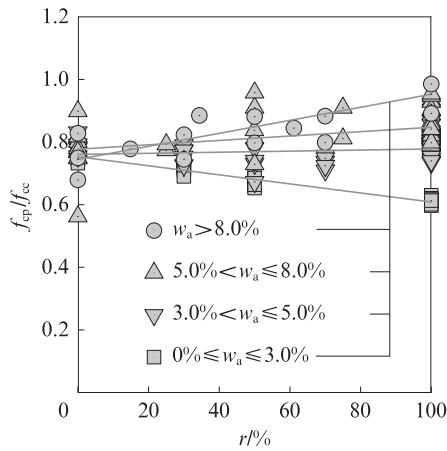


图 2 再生骨料取代率和吸水率的影响
Fig. 2 Influence of recycled aggregate replacement ratio and water absorption ratio

越大、有效承压部分越小, 强度也就越低. 随着混凝土形状由立方体变为棱柱体, 其断裂带宽度未发生改变, 而断裂带长度变大, 从而导致混凝土棱柱体抗压强度低于立方体抗压强度, 即 $f_{cp}/f_{cc} < 1$ ^[33]. 再生骨料的掺入会影响混凝土的断裂带宽度, 进一步改变断裂带长度对强度影响的占比, 从而影响 f_{cp}/f_{cc} . 再生骨料的影响主要表现在 2 个方面: 一方面, 再生骨料

表面附着大量的残余砂浆^[34], r 的增大显著降低了混凝土中天然骨料的平均粒径^[30], 进而降低了断裂带宽度^[33,35], 从而增大了断裂带长度对强度影响的占比, 最终起到降低 f_{cp}/f_{cc} 的作用. 另一方面, 由于再生骨料 w_a 较大, 一般需要引入附加水以保证混凝土的流动性^[9,29,34]. w_a 的增大会显著增大混凝土水灰比, 降低水泥砂浆强度, 增大断裂带宽度, 从而降低断裂带长度对强度影响的占比, 最终起到增大 f_{cp}/f_{cc} 的作用. 因此, 当 w_a 较低时, 主要表现为残余砂浆的影响, 即随着 r 的增大, f_{cp}/f_{cc} 降低; 而当 w_a 较高时, 主要表现为附加水的影响, 即随着 r 的增大, f_{cp}/f_{cc} 增大.

数据分析结果显示, 在参数范围内, f_{cp}/f_{cc} 与混凝土 f_{cc} 无显著关系. 图 3 (a)、(b) 分别给出了 $r=0\%$ 与 $r=100\%$ 情况下混凝土立方体抗压强度的影响^[9,12,15,18,21-22,24-30]. 由图 3 可以看出, 普通、再生混凝土 f_{cp}/f_{cc} 与 f_{cc} 的关系趋势线均接近水平. 该结果与现行规范 GB 50010—2010 一致, 即普通混凝土的 f_{cp}/f_{cc} 为常数. 对比图 3(a)、(b) 可以看出, 再生混凝土 f_{cp}/f_{cc} 的离散性大于普通混凝土. 再生混凝土数据的变异系数 (COV) 为 10.2%, 大于普通混凝土的变异系数 (7.0%). 该差异主要是由再生骨料物理性质的离散性引起的.

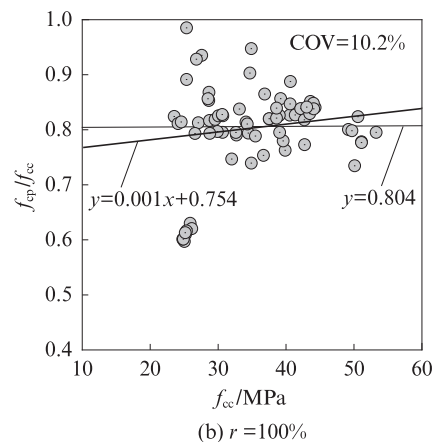
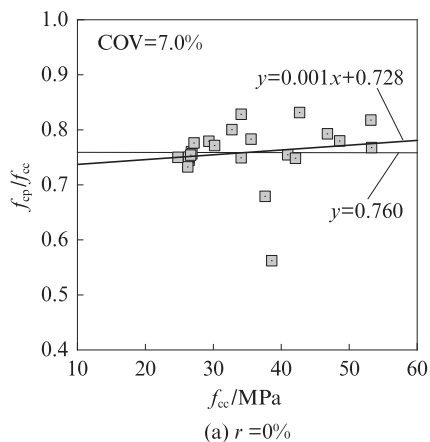


图 3 混凝土立方体抗压强度的影响
Fig. 3 Influence of cube compressive strength

3 模型的建立与验证

为减小普通混凝土数据离散性造成的影响, 通过建立再生混凝土 f_{cp}/f_{cc} 与普通混凝土 f_{cp}/f_{cc} 的关系, 提出再生混凝土棱柱体与立方体抗压强度关系模型:

$$\alpha_{cl}^{RAC} = k_{RAC} \alpha_{cl}^{NAC} \quad (1)$$

式中: α_{cl}^{RAC} 、 α_{cl}^{NAC} 分别代表再生混凝土、普通混凝土的 f_{cp}/f_{cc} ; k_{RAC} 为再生混凝土修正系数.

考虑以下 3 点来确定 k_{RAC} : 当 $r=0\%$ 时, $k_{RAC}=1$,

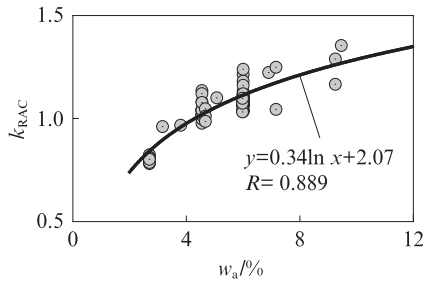
此为边界条件; 相同 w_a 下, f_{cp}/f_{cc} 与 r 呈线性关系 (见图 1); r 与 w_a 存在耦合效应. 由此确定 k_{RAC} 的计算式如下:

$$k_{RAC} = 1 + g(w_a)r \quad (2)$$

式中: $g(w_a)$ 为再生骨料吸水率 w_a 的函数.

为确定 $g(w_a)$ 的形式, 以 $r=100\%$ 的试验结果^[9,12,15,18,21-22,24-30] 为例, 给出了再生骨料吸水率 w_a 对 k_{RAC} 的影响, 见图 4. 由图 4 可见, w_a 与 k_{RAC} 为对数关系, 且拟合效果较好.

基于试验数据, 采用对数形式对 $g(w_a)$ 进行回归

图4 再生骨料吸水率对 k_{RAC} 的影响Fig. 4 Influence of water absorption ratio of recycled aggregate on the factor k_{RAC}

分析:

$$g(w_a) = \frac{1}{6} \ln(50w_a - 1) \quad (3)$$

将式(2)、(3)代入式(1),得到再生混凝土棱柱体与立方体抗压强度关系模型:

$$\alpha_{cl}^{RAC} = \left[1 + \frac{r}{6} \ln(50w_a - 1) \right] \alpha_{cl}^{NAC} \quad (4)$$

采用搜集的13篇参考文献^[9,12,15,18,21-22,24-30]中共139组普通强度再生混凝土棱柱体抗压强度与立方体抗压强度试验数据,对所提模型(式(4))进行验证,结果见图5.图5中, $(f_{cp}/f_{cc})_{exp}$ 为试验结果, $(f_{cp}/f_{cc})_{pre}$ 为模型预测结果.由图5可见,所提模型可较好地预测再生混凝土棱柱体与立方体抗压强度关系 f_{cp}/f_{cc} ,99%的预测误差在 $\pm 15\%$ 以内,预测结果与试验结果之比的平均值 $AVE=1.011$,变异系数 $COV=5.4\%$.

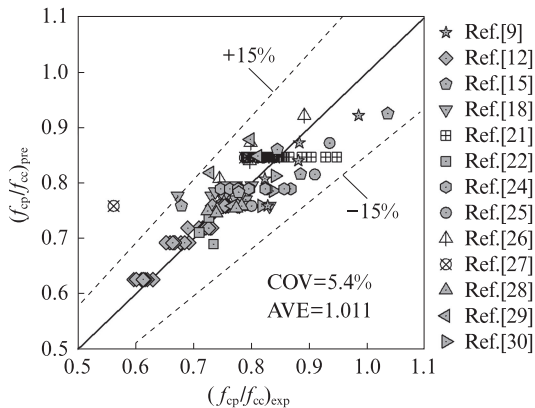


图5 所提模型预测结果与试验结果对比

Fig. 5 Comparison between the predicted results using the proposed model and experimental results

4 模型简化与验证

为方便设计人员使用,将基于再生骨料分类对所提模型(式(4))进行简化.现行规范GB/T 25177—2010《混凝土用再生粗骨料》中,基于再生骨料性质将

再生骨料分为I、II、III类.而考虑到所搜集文献中提供的参数无法严格确定再生骨料分类,且数据分析结果显示 w_a 为关键参数,简化模型采用GB/T 25177—2010标准中基于吸水率的再生骨料分类,即:I类, $0\% \leq w_a \leq 3\%$;II类, $3\% < w_a \leq 5\%$;III类, $5\% < w_a \leq 8\%$; $w_a > 8\%$ 的再生骨料不宜应用.

对于II类与III类再生骨料,简化模型采用平均吸水率(II类 $w_a=4\%$,III类 $w_a=6.5\%$)作为代表值;考虑未经强化处理的再生骨料一般吸水率较高,采用2.5%作为I类再生骨料吸水率代表值.将各类再生骨料的吸水率代表值代入式(4),得到仅有单一变量 r 的简化模型:

$$\alpha_{cl}^{RAC} = (1 + k_{wa}r) \alpha_{cl}^{NAC} \quad (5)$$

式中: k_{wa} 为基于吸水率的再生骨料分类系数,其取值如表1所示.

Aggregate classification	Type I	Type II	Type III
k_{wa}	-0.23	0	0.14

采用搜集的试验数据^[9,12,15,18,21-22,24-30]对简化模型进行验证,结果如图6所示.由图6可见,尽管对所提模型进行了简化,但是其仍具有较好的预测精度,预测结果与试验结果之比的平均值 $AVE=1.008$,变异系数 $COV=5.8\%$,相对原始模型精度而言,降低不显著.

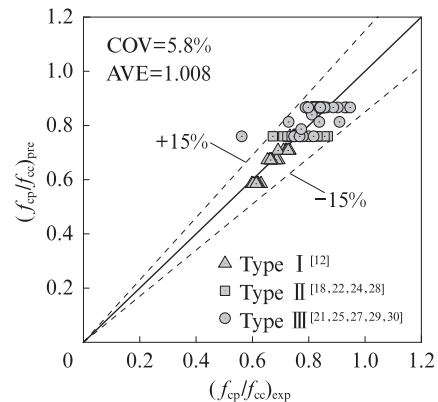


图6 简化模型预测结果与试验结果对比

Fig. 6 Comparison between the predicted results using the simplified model and experimental results

5 模型不确定性的统计分析及其与关键参数的相关性分析

5.1 统计分析

再生骨料来源多样、物理性质离散性高,导致再生混凝土力学性能具有较高的离散性^[31].再生混凝土结构设计时应进行可靠度分析.模型不确定性的分布类型与分布参数的确定是可靠度分析的基础^[36].基

于搜集的试验数据^[9,12,15,18,21-22,24-30],对所提模型开展不确定性的统计分析,以确定其分布类型.

为表征所提模型的不确定性,引入模型预测结果的偏差,作为随机变量 θ .

$$\theta = \frac{(f_{cp}/f_{cc})_{exp}}{(f_{cp}/f_{cc})_{pre}} \quad (6)$$

采用拟合优度检验与极大似然估计法,对随机变量 θ 进行统计分析,结果见图 7.由图 7 可见,随机变量 θ 的经验累积分布函数(ECDF)与拟合累积分布函数(CDF)吻合良好,结果可通过显著性水平为 0.05 的 A-D 和 K-S 检验.这表明所提模型预测结果的不确定性服从正态分布,其平均值 $\mu=1.011$,标准差 $\sigma=0.054$.

5.2 相关性分析

为提高可靠度分析结果的精确性,对随机变量 θ 与关键参数的相关性进行了分析^[37].基于搜集的试验数据^[9,12,15,18,21-22,24-30],采用 Pearson 相关系数(R),分析了随机变量 θ 与 r 、 w_a 、 f_{cc} 之间的相关性,如图 8 所

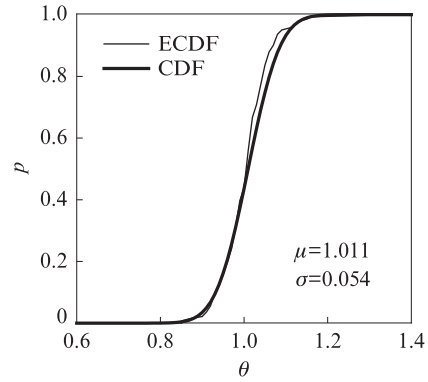


图 7 随机变量 θ 的统计分析结果

Fig. 7 Statistical analysis results of random variable θ

示.由图 8 可见, θ 与各参数无明显关系, R 值在 $-0.013 \sim 0.022$ 之间. Weber 等^[38]指出,当 $|R| < 0.35$ 时可认为各参数间的相关性较弱.该分析结果证明,所提模型已充分考虑了 r 与 w_a 的影响,且证实了 f_{cc} 对 f_{cp}/f_{cc} 无影响的结论.因此,在可靠度分析中可忽略所提模型与上述参数之间的相关性.

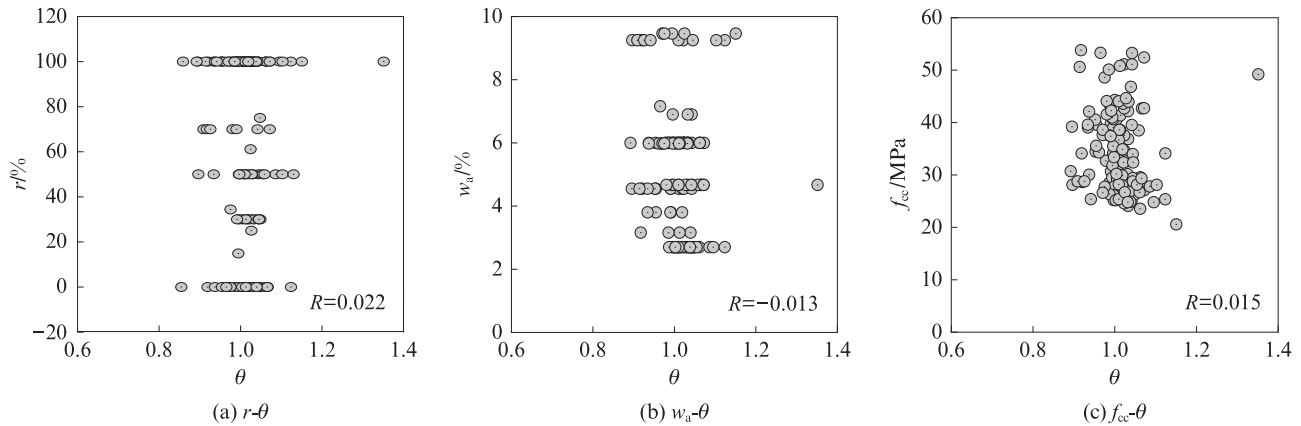


图 8 θ 与关键参数的相关性

Fig. 8 Correlation between θ and the key parameters

6 结论

(1) 基于对文献数据的系统分析,发现再生骨料取代率 r 、吸水率 w_a 是影响再生混凝土棱柱体与立方体抗压强度之比 f_{cp}/f_{cc} 的关键参数,且二者之间存在显著的耦合效应,即不同 w_a 下, r 的影响趋势不同,甚至相反.当 $0\% \leq w_a \leq 3.0\%$ 时, $r=100\%$ 相对于 $r=0\%$, f_{cp}/f_{cc} 降低 19.3%;而当 $w_a > 8.0\%$ 时, $r=100\%$ 相对于 $r=0\%$, f_{cp}/f_{cc} 增大 27.1%.

(2) 基于试验数据,提出了考虑 r 、 w_a 与二者耦合效应的再生混凝土棱柱体与立方体抗压强度关系预测模型.模型精度较高,预测结果与试验结果比值的平均值为 1.011,变异系数为 5.4%.为方便设计人员

使用,基于再生骨料分类,进一步提出了再生混凝土棱柱体与立方体抗压强度关系简化模型.该简化模型形式简单,且精度并未显著降低,简化模型预测结果与试验结果比值的平均值为 1.008,变异系数为 5.8%.

(3) 所提模型预测结果的不确定性服从正态分布,其平均值为 1.011,标准差为 0.054;且所提模型预测结果的不确定性与 r 、 w_a 、 f_{cc} 等参数的相关性较弱,相关系数在 $-0.013 \sim 0.022$ 之间.在可靠度分析中,可忽略上述参数对所提模型不确定性的影响.

(4) 在模型建立过程中,所用试验结果中再生混凝土使用的是未经强化处理的再生骨料.在未来工作中,建议针对不同再生骨料强化处理方式的影响

开展试验与理论研究,以验证和修正所提模型.

参考文献:

- [1] XIAO J Z, POON C S, WANG Y Y, et al. Fundamental behavior of recycled aggregate concrete-Overview I: Strength and deformation[J]. Magazine of Concrete Research, 2022, 74(19): 999-1010.
- [2] 段珍华,江山山,肖建庄,等.再生粗骨料含水状态对混凝土性能的影响[J].建筑材料学报,2021,24(3):545-550.
DUAN Zhenhua, JIANG Shanshan, XIAO Jianzhuang, et al. Effect of moisture condition of recycled coarse aggregate on the properties of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(3):545-550. (in Chinese)
- [3] 刘清,韩风霞,于广明,等.再生粗骨料自密实混凝土基本力学性能[J].建筑材料学报,2020,23(5):1053-1060.
LIU Qing, HAN Fengxia, YU Guangming, et al. Basic mechanical properties of recycled coarse aggregate self-compacting concrete[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(5):1053-1060. (in Chinese)
- [4] KADHIM I T, GUNEYISI E M. Code based assessment of load capacity of steel tubular columns infilled with recycled aggregate concrete under compression [J]. Construction and Building Materials, 2018, 168:715-731.
- [5] VELAY-LIZANCOS M, VAZQUEZ-BURGO P, RESTREPO D, et al. Effect of fine and coarse recycled concrete aggregate on the mechanical behavior of precast reinforced beams: Comparison of FE simulations, theoretical, and experimental results on real scale beams[J]. Construction and Building Materials, 2018, 191: 1109-1119.
- [6] ZHANG J W, CAO W L, DONG H Y. Experimental study on dynamic performance of mid-rise recycled aggregate concrete shear wall on the shaking table [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 256-259:973-978.
- [7] SCHUBERT S, HOFFMANN C, LEEMANN A, et al. Recycled aggregate concrete: Experimental shear resistance of slabs without shear reinforcement[J]. Engineering Structures, 2012, 41:490-497.
- [8] 曹万林,肖建庄,叶涛萍,等.钢筋再生混凝土结构研究进展及其工程应用[J].建筑结构学报,2020,41(12):1-16,27.
CAO Wanlin, XIAO Jianzhuang, YE Taoping, et al. Research progress and engineering application of reinforced recycled aggregate concrete structure[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(12):1-16,27. (in Chinese)
- [9] XIAO J Z, LI J B, ZHANG C. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 35(6):1187-1194.
- [10] 肖建庄,李佳彬.再生混凝土强度指标之间换算关系的研究[J].建筑材料学报,2005,8(2):197-201.
XIAO Jianzhuang, Li Jiabin. Study on relationships between strength indexes of recycled concrete [J]. Journal of Building Materials, 2005, 8(2):197-201. (in Chinese)
- [11] 孟苗超,杜婷,林怀立,等.绿色高性能商品再生混凝土的开发研究[J].新型建筑材料,2006(12):4-6.
MENG Zhuochao, DU Ting, LIN Huaili, et al. Development of green high performance commercial recycled concrete [J]. New Building Material, 2006(12):4-6. (in Chinese)
- [12] 马静,王振波,王健.再生砼抗压强度的试验研究[J].淮阴工学院学报,2010,19(3):54-58.
MA Jing, WANG Zhenbo, WANG Jian. An experimental study on compressive strength of recycled aggregate concrete [J]. Journal of Huaiyin Institute of Technology, 2010, 19(3):54-58. (in Chinese)
- [13] 肖建庄.再生混凝土[M].北京:中国建筑工业出版社,2008:52-76.
XIAO Jianzhuang. Recycled concrete [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008:52-76. (in Chinese)
- [14] ZHOU C H, CHEN Z P. Mechanical properties of recycled concrete made with different types of coarse aggregate [J]. Construction and Building Materials, 2017, 134:497-506.
- [15] ZHANG X G, YANG J H, KUANG X M. Study on conversion relationships of compressive strength indexes for recycled lightweight aggregate concrete [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, 52:012098.
- [16] 姚大立,迟金龙,余芳,等.粉煤灰与再生骨料对自密实再生混凝土的影响[J].沈阳工业大学学报,2020,42(2):236-240.
YAO Dali, CHI Jinlong, YU Fang, et al. Influence of fly ash and recycled aggregate on self-compacting recycled aggregate concrete [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2020, 42(2): 236-240. (in Chinese)
- [17] 柴园园,刘丰,郭水平.再生混凝土基本力学性能指标换算关系的研究[J].建筑技术开发,2012,39(2):41-44.
CHAI Yuanyuan, LIU Feng, GUO Shuiping. Study on conversion relationship of basic mechanical property indexes of recycled concrete [J]. Building Technique Development, 2012, 39(2):41-44. (in Chinese)
- [18] 吴淑海,李晓文,肖慧,等.C30再生混凝土变形性能及应力-应变曲线试验研究[J].混凝土,2009(12):21-25.
WU Shuhai, LI Xiaowen, XIAO Hui, et al. Experimental research on deformation properties and stress-strain curve of C30 recycled concrete [J]. Concrete, 2009(12):21-25. (in Chinese)
- [19] 向星赞,赵人达,李福海,等.自密实再生混凝土的基本力学性能试验研究[J].西南交通大学学报,2019,54(2):359-365.
XIANG Xingyun, ZHAO Renda, LI Fuhai, et al. Experimental investigation of basic mechanical properties of self-compacting recycled aggregate concrete [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(2):359-365. (in Chinese)
- [20] 胡波,柳炳康,王成刚.再生混凝土基本力学性能研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2014,37(1):87-90.
HU Bo, LIU Bingkang, WANG Cenggang. Investigation on basic mechanic properties of recycled aggregate concrete [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2014, 37(1):87-90. (in Chinese)
- [21] 李旭平.再生混凝土基本力学性能研究(I)——单轴受压性能[J].建筑材料学报,2007,10(5):598-603.

- LI Xuping. Study on mechanical properties of recycled aggregate concrete(I)—Behaviour under uniaxial compression[J]. *Journal of Building Materials*, 2007, 10(5):598-603. (in Chinese)
- [22] ZHANG X G, WANG S R, GAO X. Mechanical properties of recycled aggregate concrete subjected to compression test[J]. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 2018, 11(6):20-25.
- [23] 肖建庄, 李佳彬. 再生混凝土强度指标之间换算关系的研究[J]. *建筑材料学报*, 2005, 8(2):197-201.
XIAO Jianzhuang, LI Jiabin. Study on relationships between strength indexes of recycled concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2005, 8(2):197-201. (in Chinese)
- [24] ZHAO S B, GUO Q, LI G X, et al. Basic mechanical properties of concrete with machine-made sand and recycled coarse aggregate [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 357-360: 1102-1105.
- [25] HUANG Y J, HE X J, SUN H S, et al. Effects of coral, recycled and natural coarse aggregates on the mechanical properties of concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 192: 330-347.
- [26] 肖建庄. 再生混凝土单轴受压应力-应变全曲线试验研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(11):1445-1449.
XIAO Jianzhuang. Experimental investigation on complete stress-strain curve of recycled concrete under uniaxial loading[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2007, 35(11): 1445-1449. (in Chinese)
- [27] 叶孝恒. 再生混凝土基本力学性能试验研究[J]. *西部探矿工程*, 2007(7):183-186.
YE Xiaoheng. Experimental study on basic mechanical properties of recycled concrete [J]. *West-China Exploration Engineering*, 2007(7):183-186. (in Chinese)
- [28] QIN Y J, CHEN J J, LI Z X, et al. The mechanical properties of recycled coarse aggregate concrete with lithium slag [J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019:8974625.
- [29] 陈杰. 钢管再生混凝土柱长期经历性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2016.
CHEN Jie. Time-dependent behaviour of recycled aggregate concrete filled steel tubular columns[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016. (in Chinese)
- [30] 赵木子. 圆钢管再生粗细骨料混凝土柱长期性能及其对构件稳定性能的影响[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2021.
ZHAO Muzi. Time-dependent behaviour of coarse/fine recycled aggregate concrete filled steel tubes and its influences on stability [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021. (in Chinese)
- [31] SILVA R V, BRITO J D, DHIR R K. Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 2171-2186.
- [32] BAZANT Z P, OH B H. Crack band theory for fracture of concrete[J]. *Materials and Structures*, 1983, 16(3):155-177.
- [33] BAZANT Z P. Size effect in blunt fracture: Concrete, rock, metal [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1984, 110(4):518-535.
- [34] FATHIFAZL G, RAZAQPUR A G, ISGOR O B, et al. Creep and drying shrinkage characteristics of concrete produced with coarse recycled concrete aggregate [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2011, 33(10):1026-1037.
- [35] SIM J I, YANG K H, KIM H Y, et al. Size and shape effects on compressive strength of lightweight concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2013, 38:854-864.
- [36] 贡金鑫, 仲伟秋, 赵国藩. 工程结构可靠性基本理论的发展与应用(1)[J]. *建筑结构学报*, 2002, 23(4):2-9.
GONG Jinxin, ZHONG Weiqiu, ZHAO Guofan. Developments and applications of reliability theories for engineering structures (1) [J]. *Journal of Building Structures*, 2002, 23(4): 2-9. (in Chinese)
- [37] XI Y P, BAZANT Z P. Sampling analysis of concrete structures for creep and shrinkage with correlated random material parameters [J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 1989, 4(4):174-186.
- [38] WEBER J C, LAMB D R. *Statistics and research in physical education*[M]. Saint Louis: C. V. Mosby Co., 1970:59-64.