

文章编号:1007-9629(2022)11-1136-07

再生混凝土冲击磨耗性能与调控方法

段珍华¹, 邓琪¹, 肖建庄^{1,*}, 刘春^{2,3}

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 广东省公路建设有限公司, 广东广州 510623;
3. 广深新塘立交改造项目管理处, 广东广州 510765)

摘要:评估了再生粗集料(RCA)取代率对再生混凝土(RAC)力学性能和冲击磨耗性能的影响规律,建立了RAC的冲击磨耗时变模型,并在此基础上开展了基于纤维和再生橡胶颗粒复掺的RAC冲击磨耗性能调控方法研究.结果表明:RAC的冲击磨耗性能随RCA取代率增大呈下降趋势,并与其各项力学性能指标之间具有较高的相关性;纤维和再生橡胶颗粒的掺入能够改善RAC的冲击磨耗性能.

关键词:再生混凝土;冲击磨耗性能;橡胶颗粒;纤维;时变特征

中图分类号:TU528.59

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.11.005

Abrasion Resistance of Recycled Aggregate Concrete and Its Control Method

DUAN Zhenhua¹, DENG Qi¹, XIAO Jianzhuang^{1,*}, LIU Chun^{2,3}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Guangdong Highway Construction Co., Ltd., Guangzhou 510623, China; 3. Guangshen Xintang Interchange Reconstruction Project Management Office, Guangzhou 510765, China)

Abstract: Influence of the replacement rate of recycled coarse aggregate (RCA) on the mechanical properties and abrasion resistance of recycled aggregate concrete (RAC) was investigated, and the corresponding time-varying model of abrasion rate was established. On this basis, the research on the adjustment and control method of the abrasion resistance of RAC based on the combination of fiber and recycled rubber particles was carried out. The results show that the abrasion resistance of RAC reduces with the increase of RCA replacement ratio, and has a high correlation with its corresponding mechanical properties. The addition of the fiber and RCA can improve the abrasion resistance of RAC.

Key words: recycled aggregate concrete; abrasion resistance; rubber particle; fiber; time-varying characteristic

中国每年的废混凝土排放量已近 20 亿 t^[1], 对环境和生态影响巨大. 利用再生集料科学制备再生混凝土(RAC), 是解决废弃混凝土问题的最有效措施, 符合中国建筑业可持续发展战略的要求, 是未来混凝土发展的必然趋势. 在道路与桥梁工程领域, 为满足城市负载容量的需求, 近年来涌现出了一系列改扩建工程, 带来了大量拆除废弃混凝土处置难题. 相对于一般的建筑固废, 桥梁拆除废弃混凝土具有母

材强度高、杂物含量低的特点, 原位填埋处置会造成严重的资源浪费, 而运至固废资源厂会产生大量的运输成本和能耗, 与当前的国家碳减排政策相悖. 因此, 开展拆除废弃混凝土在新(扩)建工程中的原位协同高附加值再生利用成为了其资源化的有效途径.

道路与桥梁工程用混凝土材料表面易受磨损和侵蚀, 耐磨性能指标是关系到其使用寿命的重要因素, 受水灰比、力学性能以及所采用集料基本属性的

收稿日期:2022-04-26; 修订日期:2022-07-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178244, 52078358)

第一作者:段珍华(1985—), 男, 河南商丘人, 同济大学副教授, 博士生导师, 博士. E-mail: zhduan@tongji.edu.cn

通讯作者:肖建庄(1968—), 男, 山东沂南人, 同济大学教授, 博士生导师, 博士. E-mail: jzx@tongji.edu.cn

影响较大^[2-4]。当前针对混凝土耐磨性能的研究多集中于以下2种磨损侵蚀情景:(1)路面结构中移动交通荷载和混凝土表面的相对运动引起的摩擦^[5];(2)水工结构中水流携带砂石等固体颗粒对混凝土表面的作用^[6]。考虑到混凝土路面、防撞墙、墩柱等应用场景中固体冲击荷载的磨耗侵蚀作用同样常见,为了实现改拆建协同处置场景中再生粗集料(RCA)的高附加值应用,有必要研究RAC在冲击磨耗下的耐久性及其冲击磨耗行为的时变特征。

本文旨在考察RCA取代率对RAC力学性能和冲击磨耗性能的影响,并对比分析纤维种类和再生橡胶颗粒粒度对RAC冲击磨耗性能的作用机制。

1 试验

1.1 原材料

水泥为P·O 42.5普通硅酸盐水泥;细集料(FA)为细度模数2.71的机制砂;粗集料(CA)包括天然碎石(NCA)和废混凝土破碎加工得到的RCA。废混凝土来自广州市一座旧桥改扩建的构件拆除工程,其原始抗压强度为40~60 MPa。集料的基本性能见表1,其级配曲线见图1(图中级配上下限值参照JTG/T F30—2014《公路水泥混凝土路面施工技术细则》)。高性能减水剂(减水率¹⁾≥25%)被用于调控混凝土的工作性能;由废弃橡胶轮胎破碎加工而成的2种粒度

表1 集料的基本性能
Table 1 Basic properties of aggregates

| Aggregate | Apparent density/(kg·m ⁻³) | Water absorption (by mass)/% | Crushing index (by mass)/% |
|-----------|--|------------------------------|----------------------------|
| NCA | 2 651 | 0.76 | 7.8 |
| RCA | 2 631 | 4.18 | 12.3 |
| FA | 2 565 | 1.43 | |

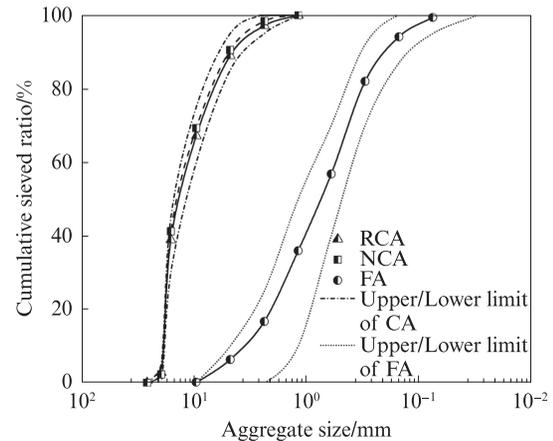


图1 集料的级配曲线

Fig. 1 Gradation curves of aggregates

再生橡胶颗粒(1 700~4 000、380~830 μm),炭黑含量为25.1%,表观密度为1 050 kg/cm³,拉伸强度为11 MPa;聚乙烯(PE)纤维、聚乙烯醇(PVA)纤维分别被用于改善混凝土的耐磨性能,其物理性能见表2。

表2 纤维的物理性能

Table 2 Physical properties of fibers

| Fiber | Length/mm | Diameter/μm | Tensile strength/MPa | Elastic modulus/GPa | Density/(kg·m ⁻³) |
|-------|-----------|-------------|----------------------|---------------------|-------------------------------|
| PE | 6 | 27 | 2 500 | 117 | 970 |
| PVA | 6 | 15 | 1 830 | 40 | 1 290 |

1.2 配合比设计

基准组(RC0)全部采用NCA,不采用任何外加料,水灰比、集灰比分别为0.43、2.58。为考察RCA取代率S对RAC性能的影响,采用RCA等体积取代NCA,设定S=0%、25%、50%、75%、100%,并记为RC0、RC25、RC50、RC75、RC100;集料按其饱和面干表观密度计算,考虑RCA的高吸水率特性,根据其实际含水率添加相应的附加水,以确保其有效水灰比保持不变。在RC50中分别加入占水泥用量3%的PE、PVA纤维,并分别记为FRC1、FRC2;在RC50中分别加入33 kg/m³的1 700~4 000、380~830 μm的橡胶颗粒,并分别记为RRC1、RRC2。RAC的配合比见表3。试件的制备过程为:将RCA和相应的附加水置于混凝土搅拌机中静置10 min,进行预湿水,降

低因RCA快速吸水引起的有效水灰比显著变化;将NCA、细集料和水泥等其他原材料加入并搅拌30 s;将水与减水剂一起加入并搅拌150 s;在30 s内将纤维分股添加到混合物中,并持续搅拌5 min。

1.3 试验方法

试件拆模后置于(20±2)℃、相对湿度RH≥95%的标准养护室养护28 d后,根据JTG E30—2005《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》,进行混凝土抗压强度、抗折强度、弹性模量的测试,其相应的试件尺寸分别为100 mm×100 mm×100 mm、100 mm×100 mm×400 mm、100 mm×100 mm×300 mm。抗压强度和抗折强度试验的加载速率分别为0.60、0.06 MPa/s。

根据ASTM C131《Standard test method for resistance to degradation of small-size coarse aggregate

1) 文中涉及的减水率、掺量、比值等除特殊说明外均为质量分数或质量比。

表3 RAC的配合比
Table 3 Mix proportions of RAC

| Specimen | Cement | Water | Sand | NCA | RCA | Additional water |
|----------|--------|-------|-------|---------|---------|------------------|
| RC0 | 394.0 | 170.0 | 798.0 | 1 016.0 | 0 | 0 |
| RC25 | 394.0 | 170.0 | 798.0 | 762.0 | 252.0 | 10.6 |
| RC50 | 394.0 | 170.0 | 798.0 | 508.0 | 504.0 | 21.1 |
| RC75 | 394.0 | 170.0 | 798.0 | 254.0 | 756.0 | 31.7 |
| RC100 | 394.0 | 170.0 | 798.0 | 0 | 1 008.0 | 42.2 |

by abrasion and impact in the Los Angeles machine》,采用洛杉矶磨耗机测试混凝土试件的冲击磨耗性能.该方法用于评估粗集料的耐磨性能,其磨损机制是由摩擦、冲击和研磨等作用的组合^[7].钢筒旋转速率为30 r/min;当钢筒旋转次数 t 分别达到50、100、200、300、500、700、1 000转时,记录试件的磨耗率(质量损失率) M ,并将其作为冲击磨耗性能指标. M 越小,冲击磨耗性能越好; M 越大,冲击磨耗性能越差.应当注意的是,当混凝土承受动态载荷时,孔隙中的游离水会产生阻止裂缝扩展的力,这被称为Stefan效应^[8].为了减弱该效应对试验结果的潜在影响,所有试件在试验前应烘干至恒重.

2 结果与讨论

2.1 再生混凝土的力学性能

2.1.1 RCA取代率的影响

RCA取代率对RAC力学性能的影响见图2(图中纵坐标为RAC力学性能与基准组RC0力学性能的比值).由图2可见:当RCA取代率为25%时,RAC抗压强度、抗折强度、弹性模量均无明显劣化,较基准组仅分别下降了3.8%、3.1%、1.4%,说明低取代率RCA与NCA级配的相容性较好;随着RCA取代率的不断增加,RAC的抗压强度、抗折强度和弹性模量均呈下降趋势,且当RCA取代率为100%时,其下降幅度分别达到了27.3%、17.9%、19.4%.这主要是因为RCA表面附着疏松多孔的老砂浆,导致RAC基体中存在大量薄弱的界面过渡区^[9-10],对混凝土的力学性能存在不利影响.Silva等^[11]的统计结果显示,当RCA取代率为100%时,RAC弹性模量的降幅在40%以内,且RAC的弹性模量与抗压强度具有相关性^[12],而本文RC100的弹性模量相对抗压强度的降幅较低,可能是因为本文使用的RCA品质较高,其表观密度大、吸水率低和压碎值较低.

2.1.2 纤维种类的影响

纤维种类对RAC力学性能的影响见图3(图中纵坐标为RAC力学性能与RC50力学性能的比值).

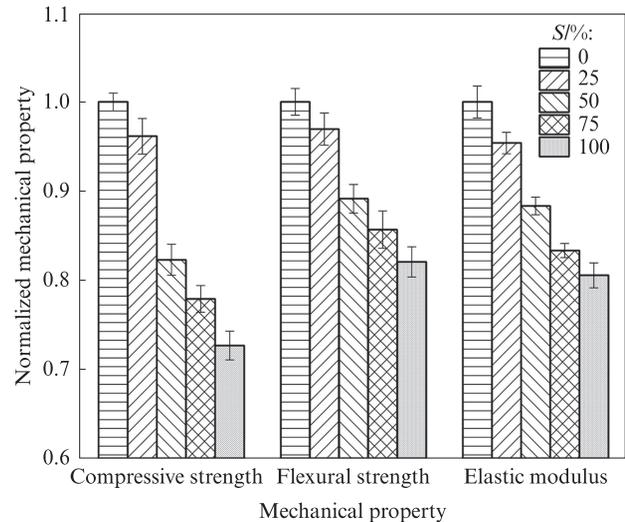


图2 RCA取代率对RAC力学性能的影响

Fig. 2 Effect of R of RCA on mechanical properties of RAC

由图3可见:与RC50相比,PE和PVA纤维的掺入对RAC的抗压强度影响不大,但其抗折强度分别提高了8.76%、2.60%,弹性模量分别提高了5.80%、3.20%.一般来说,纤维对RAC力学性能的增强作用可归因于纤维与微裂纹之间的相互作用,当微裂纹在纤维附近发展时,由于促使微裂纹发展的拉应力方向与其潜在的发展路径垂直,纤维的桥接作用导致裂纹尖端发展变缓和发展路径变化.相较于PVA纤维,掺入PE纤维的FRC1具有较高的拉伸强度和弹性模量,但由于PE纤维的疏水性使FRC1界面黏结强度较低,在裂纹扩展过程中PE纤维倾向于被拔出而非断裂,PE纤维的这些特性有利于纤维桥接能力的互补,从而增强砂浆基体的韧性^[13-14].PVA纤维具有较强的界面附着力,在界面剥离后很快被拔出,增强效果较弱.另外,2种纤维对RAC抗压强度的提升效果不明显,可归因于其降低了混凝土试件的密实程度,这与前期的一些研究结论相似^[15-16].

2.1.3 再生橡胶颗粒粒径的影响

再生橡胶颗粒粒径对RAC力学性能的影响见图4(图中纵坐标为RAC力学性能与RC50力学性能的比值).由图4可见:RRC1、RRC2的抗压强度、抗折强

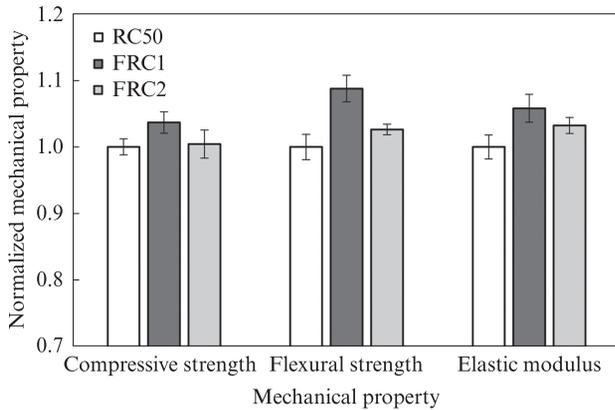


图 3 纤维种类对 RAC 力学性能的影响

Fig. 3 Effect of fiber type on mechanical properties of RAC

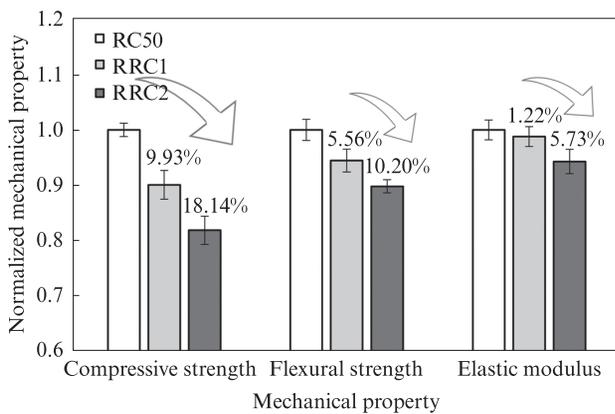


图 4 再生橡胶颗粒粒径对 RAC 力学性能的影响

Fig. 4 Effect of recycled rubber particles size on mechanical properties of RAC

度和弹性模量均低于 RC50; RRC2 的抗压强度、抗折强度及弹性模量降低幅度较大. 橡胶颗粒和砂浆基体的弹性模量差异显著, 其界面过渡区是导致橡胶混凝

土试件破坏的原因之一^[17]. 相同掺量下粒度较细的再生橡胶颗粒比表面积更大, 界面过渡区的薄弱区域较多, 这可能是 RRC2 力学性能劣化更为明显的原因.

2.2 RAC 的冲击磨耗性能

2.2.1 破坏形貌

经历不同旋转次数后 RAC 的破坏形貌见图 5. 由图 5 可见: 经历 100 转的冲击载荷作用后, 圆柱形试件的棱边逐渐剥落, 但形状的轮廓仍较为清晰; 随着旋转次数的增加, 磨耗继续发生, 试件的轮廓逐渐发生变化, 当 $t=500$ 转时, 圆柱体试件的棱边基本消失, 侧表面开始出现孔洞形的磨耗; $t=500 \sim 1\,000$ 转过程中, 磨耗进一步加剧, 除砂浆碎块外, 粗集料 (以 RCA 为主) 的剥离逐渐出现在试件边缘的磨耗中.

2.2.2 RCA 取代率的影响及冲击磨耗时变模型

RCA 取代率对 RAC 冲击磨耗时变曲线的影响见图 6. 由图 6 可见, 在前 200 转冲击载荷作用后, 以 RC50 为代表的试件冲击磨耗时变曲线波动较大, 这表明早期冲击磨耗具有较大的随机性. 在洛杉矶冲击磨耗的早期阶段, 磨耗表现为新砂浆或附着在 RCA 上旧砂浆的剥离. 由于粗集料分布的随机性, 试件边缘砂浆层的厚度分布具有差异性, 经历相同旋转次数冲击载荷作用后, 具有较厚砂浆保护层的试件往往表现出较高的磨耗率. 经过 500 转冲击载荷作用后, 试件逐渐呈现为椭球形, 试件磨耗的增速略有下降. 在 1 000 转冲击载荷作用后, RAC 磨耗率随着 RCA 取代率的增加而降低. 这是因为随着 RCA 取代率的增加, 一方面, 粗集料与新砂浆的薄弱界面过渡区增大, 导致在冲击载荷作用下 RCA 附近的新砂浆相比 NCA 附近的更易剥落; 另一方面, 附着在 RCA 上疏松多孔的老砂浆也是磨耗区的重要组成部分.

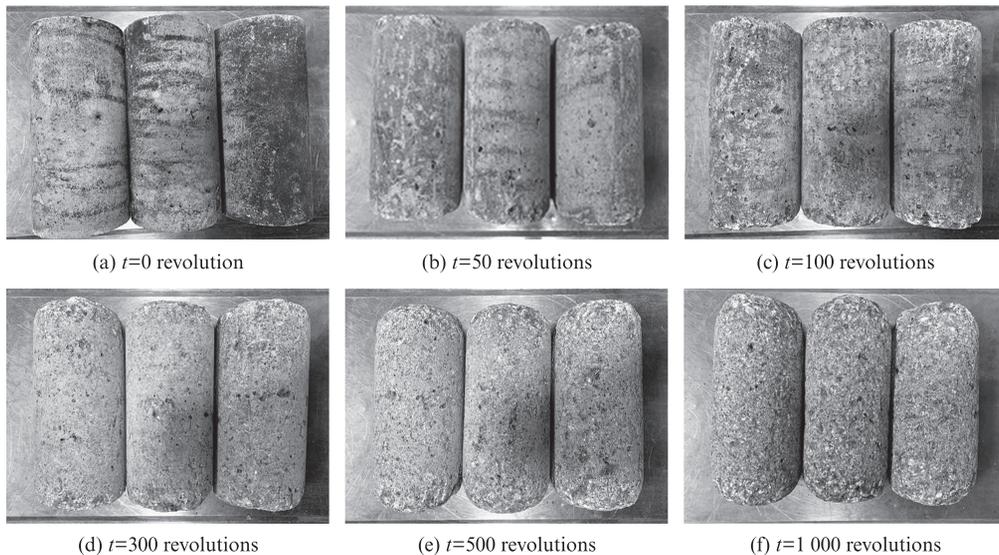


图 5 经历不同旋转次数后 RAC 的破坏形貌

Fig. 5 Failure morphologies of RAC at different revolutions

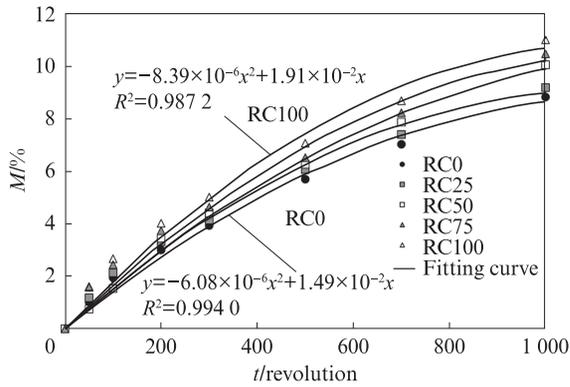


图 6 RCA 取代率对 RAC 冲击磨耗时变曲线的影响
Fig. 6 Effect of R of RCA on abrasion resistance time-varying curves of RAC

随着磨耗的不断累积, RAC 试件边缘逐渐变得平滑, 磨耗速率逐渐减小. 图 6 的拟合结果显示, RAC 的冲击磨耗时变曲线服从二次函数:

$$M = At^2 + Bt \quad (1)$$

式中: A、B 为待定系数.

RAC 冲击磨耗时变拟合曲线参数见表 4. 由表 4 可见: 各拟合曲线相关系数 R^2 均高于 0.980 0, 尤其当 RCA 取代率在 50% 以上时, 拟合效果最为理想; 随着 RCA 取代率的增加, 系数 A、B 分别呈递增、递减趋势, 可将其表示为关于 RCA 取代率 S 的函数:

$$M = A(S)t^2 + B(S)t \quad (2)$$

系数 A、B 的函数表达式 A(S) 和 B(S) 可简单认为服从一次函数关系, 即系数 A、B 随 RCA 取代率 S 的增加呈线性变化. 采用 Pearson 函数进行模型验证, 结果也列于表 4. 由表 4 还可见, 基于 Pearson 函数的相关系数 R^2 均在 0.990 0 以上, 可见将系数 A、B 表示为 RCA 取代率的一次函数有较好的拟合效果. 因此, 在无需进行冲击磨耗试验的前提下, 本文提出的冲击磨耗时变模型表达式可有效预测 RAC 冲击磨耗性能随 RCA 取代率和磨耗次数的演化规律.

表 4 RAC 冲击磨耗时变拟合曲线的参数

Table 4 Parameters of abrasion resistance time-varying fitting curves of RAC

| Specimen | $A \times 10^6$ | $B \times 10^2$ | R^2 by equation (1) | R^2 by Pearson function |
|----------|-----------------|-----------------|-----------------------|---------------------------|
| RC0 | -8.39 | 1.91 | 0.987 2 | 0.997 2 |
| RC25 | -7.35 | 1.76 | 0.987 3 | 0.996 6 |
| RC50 | -7.11 | 1.61 | 0.995 3 | 0.996 7 |
| RC75 | -6.23 | 1.60 | 0.992 1 | 0.993 0 |
| RC100 | -6.08 | 1.49 | 0.994 0 | 0.993 6 |

2.2.3 冲击磨耗性能与力学性能的相关性

RAC 的磨耗率与力学性能的相关性见图 7. 在比较了线性、多项式和指数 3 种拟合曲线的效果后, 多

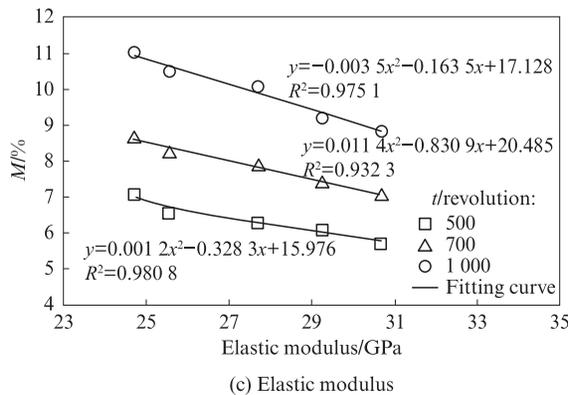
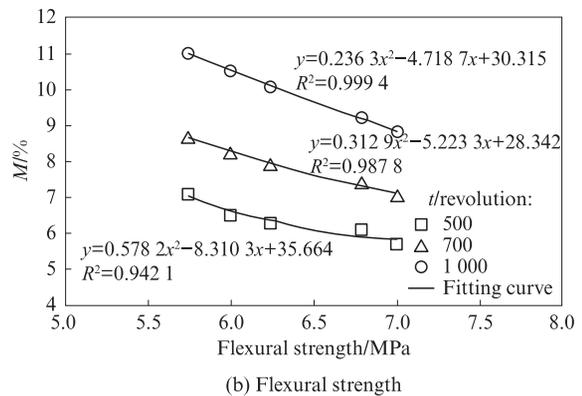
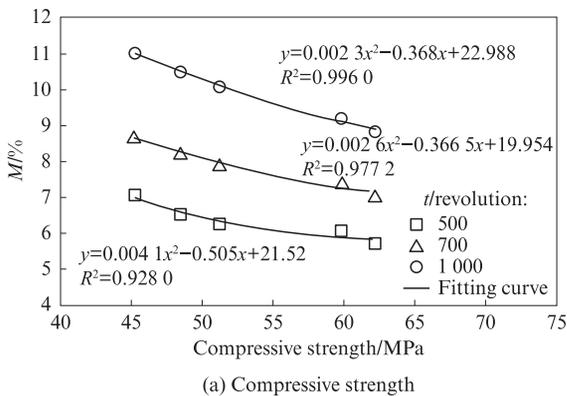


图 7 RAC 磨耗率与力学性能的相关性
Fig. 7 Correlation between abrasion rate and mechanical properties of RAC

项式函数用于 RAC 冲击磨耗性能与力学性能相关性的描述最优.由图 7 可见: $t=500、700、1\ 000$ 转后的磨耗率与抗压强度、抗折强度、弹性模量拟合曲线的相关系数 R^2 分别为 $0.928\ 0\sim 0.996\ 0、0.942\ 1\sim 0.999\ 4、0.932\ 3\sim 0.980\ 8$,可见抗折强度最适合作为预测 RAC 冲击磨耗性能的参数,其次为抗压强度,弹性模量的相关性最差.在洛杉矶冲击磨耗过程中,圆柱形 RAC 试件随着钢筒旋转反复滚动、落体和撞击,其磨耗机制是受压、受弯、受剪及冲击作用的综合结果.相较于抗折强度,RAC 的抗压强度和弹性模量 2 项指标并不能反映除受压外其他荷载的作用,因此与冲击磨耗性能的相关性较小.总体来看,3 项力学性能与磨耗率相关系数 R^2 均高于 $0.900\ 0$,且 $1\ 000$ 转下 RAC 的力学性能与磨耗率的相关系数 R^2 均高于 $0.980\ 0$,表明抗压强度、抗折强度和弹性模量均能够有效预测 RAC 的冲击磨耗性能.

2.3 RAC 冲击磨耗性能调控方法

2.3.1 纤维种类的影响

纤维种类对 RAC 冲击磨耗时变曲线的影响见图 8.由图 8 可见:纤维的掺入对 RAC 在 $500、700、1\ 000$ 转冲击载荷下的磨耗率具有显著的改善效果;在前 100 转内,纤维的增强作用不明显,这归结于早期冲击磨耗的随机性;与 RC50 相比,FRC1 和 FRC2 在 $1\ 000$ 转冲击载荷作用时的磨耗率分别降低了 $31.19\%、16.92\%$,这表明 RAC 的磨耗率在 500 转冲击载荷作用后随旋转次数的增加呈近似线性增加,纤维的增强作用趋于稳定.

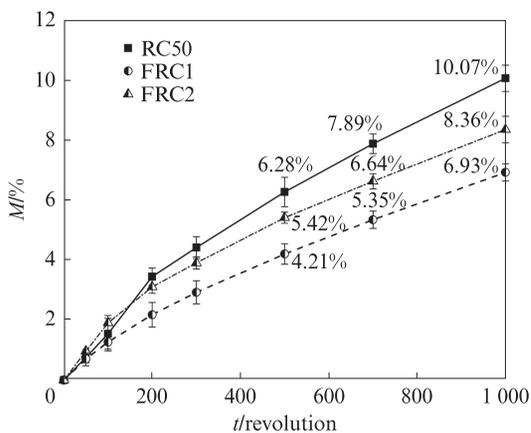


图 8 纤维种类对 RAC 磨耗时变曲线的影响

Fig. 8 Effect of fiber type on time-varying abrasion curve of RAC

2.3.2 再生橡胶颗粒粒径的影响

再生橡胶颗粒粒径对 RAC 冲击磨耗性能的影响见图 9(纵坐标降低率以 RC50 为基准).由图 9 可见:由于 RAC 冲击磨耗性能与力学性能具有高度相关

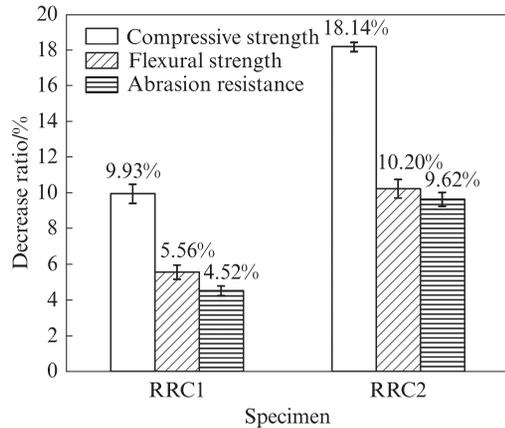


图 9 再生橡胶颗粒粒径对 RAC 冲击磨耗性能的影响

Fig. 9 Effect of recycled rubber particle size on abrasion resistance of RAC

性,再生橡胶颗粒的掺入将会同时降低 RAC 的力学性能和冲击磨耗性能;与 RC50 相比,RRC1、RRC2 的冲击磨耗性能分别降低了 $4.52\%、9.62\%$,粒径较大的橡胶颗粒对冲击磨耗性能的不利影响较小;再生橡胶颗粒使得 RAC 抗压强度降低幅度均高于冲击磨耗性能的降幅,这是因为橡胶颗粒和砂浆基体弹性模量差异较大,橡胶颗粒取代集料可改善混凝土在冲击载荷作用下的吸能能力^[18-19].

3 结论

(1)再生混凝土(RAC)的力学性能随再生粗集料(RCA)取代率增加均呈下降趋势;纤维掺入可有效提高 RAC 的抗折强度和弹性模量,但对抗压强度的增强效果不显著;掺加粒径较小再生橡胶颗粒的 RAC 力学性能劣化明显.

(2)随着 RCA 取代率的增加,RAC 冲击磨耗性能呈下降趋势;聚乙烯(PE)、聚乙烯醇(PVA)纤维的掺入使 RAC 冲击磨耗性能分别提升了 31.19% 和 16.92% ;再生橡胶颗粒掺入后,RAC 的冲击磨耗性能降幅相较于抗压强度和抗折强度略低.

(3)RAC 的冲击磨耗性能与力学性能指标均具有较好的相关性,其中与抗折强度相关性最高;提出了基于 RCA 取代率的 RAC 冲击磨耗时变模型,可有效预测 RAC 冲击磨耗性能随 RCA 取代率和磨耗次数的演化规律.

参考文献:

[1] WANG J Y, WU H Y, TAM V W Y, et al. Considering life-cycle environmental impacts and society's willingness for optimizing construction and demolition waste management fee: An empirical study of China[J]. Journal of Cleaner Production,

- 2019, 206:1004-1014.
- [2] ABID S R, HILO A N, AYOUB N S, et al. Underwater abrasion of steel fiber-reinforced self-compacting concrete [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2019, 11:e00299.
- [3] 王彩辉, 禹华伟, 彭建, 等. 混凝土在耐磨性方面的研究进展 [J]. *混凝土*, 2016 (7):17-23.
WANG Caihui, YU Huawei, PENG Jian, et al. Development of concrete in abrasion resistance ceramics [J]. *Concrete*, 2016 (7):17-23. (in Chinese)
- [4] 杨宁, 王崇革, 赵美霞. 再生混凝土耐磨性影响因素研究 [J]. *公路*, 2011 (6):171-174.
YANG Ning, WANG Chongge, ZHAO Meixia. Research on influence factors of abrasion resistance for recycled aggregate concrete [J]. *Highway*, 2011 (6):171-174. (in Chinese)
- [5] 李北星, 柯国炬, 赵尚传, 等. 机制砂混凝土路用性能的研究 [J]. *建筑材料学报*, 2010, 13(4):529-534.
LI Beixing, KE Guoju, ZHAO Shangchuan, et al. Research on pavement performance of manufactured sand concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2010, 13(4):529-534. (in Chinese)
- [6] 亢景付, 范昆. 橡胶混凝土抗冲磨性能 [J]. *天津大学学报*, 2011, 44(8):727-731.
KANG Jingfu, FAN Kun. Abrasion resistance of rubberized concrete [J]. *Journal of Tianjin University*, 2011, 44(8):727-731. (in Chinese)
- [7] 陈守开, 张政男, 郑永杰, 等. 再生骨料透水混凝土耐撞磨性试验研究 [J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(7):153-159.
CHEN Shoukai, ZHANG Zhengnan, ZHENG Yongjie, et al. Experimental study on impact-abrasion resistance of recycled aggregate pervious concrete [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, 37(7):153-159. (in Chinese)
- [8] XIAO J Z, LI L, SHEN L M, et al. Compressive behaviour of recycled aggregate concrete under impact loading [J]. *Cement and Concrete Research*, 2015, 71:46-55.
- [9] XIAO J Z, LI W G, CORR D J, et al. Effects of interfacial transition zones on the stress-strain behavior of modeled recycled aggregate concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2013, 52:82-99.
- [10] LIU Q, XIAO J Z, SUN Z H. Experimental study on the failure mechanism of recycled concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2011, 41(10):1050-1057.
- [11] SILVA R V, BRITO J, 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.
- [12] XIAO J Z, LI J B, ZHANG C. On relationships between the mechanical properties of recycled aggregate concrete: An overview [J]. *Materials and Structures*, 2006, 39(6):655-664.
- [13] WANG Y C, LIU F C, YU J T, et al. Effect of polyethylene fiber content on physical and mechanical properties of engineered cementitious composites [J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 251:118917.
- [14] DIMAGGIO R, FRANCHINI M, GUERRINI G, et al. Fibre-matrix adhesion in fibre reinforced CAC-MDF composites [J]. *Cement and Concrete Composites*, 1997, 19(2):139-147.
- [15] 王龙, 池寅, 徐礼华, 等. 混杂纤维超高性能混凝土力学性能尺寸效应 [J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(8):781-788.
WANG Long, CHI Yin, XU Lihua, et al. Size effect of mechanical properties of hybrid fiber ultra-high performance concrete [J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(8):781-788. (in Chinese)
- [16] 张玉武, 晏麓晖, 梁乔恒, 等. 超高分子量聚乙烯纤维混凝土静态力学性能研究 [J]. *工程科学与技术*, 2017, 49(增刊2):257-262.
ZHANG Yuwu, YAN Lihui, LIANG Qiaoheng, et al. Research on the static mechanical properties of ultra-high molecular weight polyethylene fiber reinforced concrete [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2017, 49(Suppl 2):257-262. (in Chinese)
- [17] 屠艳平, 程子扬, 程书凯, 等. 橡胶粒径和掺量对再生混凝土性能的影响 [J]. *功能材料*, 2021, 52(12):12072-12078.
TU Yanping, CHENG Ziyang, CHENG Shukai, et al. Effect of rubber particle size and content on properties of recycled concrete [J]. *Journal of Functional Materials*, 2021, 52(12):12072-12078. (in Chinese)
- [18] 丁庆军, 李进辉, 耿雪飞, 等. 橡胶颗粒掺杂提高超高性能混凝土的抗冲磨性能及其机理 [J]. *硅酸盐学报*, 2020, 48(10):1636-1643.
DING Qingjun, LI Jinhui, GENG Xuefei, et al. Mechanism of enhancing anti-abrasion performance of ultrahigh-performance concrete via rubber particles [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2020, 48(10):1636-1643. (in Chinese)
- [19] 艾思平, 唐鹏. 考虑地震量级作用下橡胶纤维混凝土的受压动力性能 [J]. *建筑材料学报*, 2021, 24(5):1002-1010.
AI Siping, TANG Peng. Compression dynamic behavior of rubber fiber reinforced concrete under action of earthquake magnitude [J]. *Journal of Building Materials*, 2021, 24(5):1002-1010. (in Chinese)