

应用理论

改性橡胶混凝土的力学性能和抗冻融性能研究

柏旗¹, 苏有文¹, 吕雄飞²

(1. 西南科技大学 土木工程与建筑学院, 四川 绵阳 621000; 2. 上海理工大学, 上海 200082)

摘要:在橡胶混凝土中复掺聚丙烯纤维和粉煤灰, 研究其掺量对橡胶混凝土力学性能和抗冻融性能的影响。结果表明: 橡胶混凝土的抗压强度和抗拉强度均随聚丙烯纤维掺量的增大先增大后减小, 随粉煤灰掺量的增大而呈减小的趋势; 在整个冻融循环进程中, 复掺聚丙烯纤维和粉煤灰橡胶混凝土的相对动弹性模量降幅小于素橡胶混凝土, 抗冻融损伤能力提高; 在本试验聚丙烯纤维和粉煤灰掺量范围内, 聚丙烯纤维掺量为 $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、粉煤灰掺量(以替代水泥的质量百分比计)为14%~16%时, 橡胶混凝土的综合性能最优。

关键词:橡胶混凝土; 聚丙烯纤维; 粉煤灰; 力学性能; 抗冻融性能

中图分类号: TQ333.99; U414.1⁺8

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2023)02-0091-06

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2023.02.0091



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

随着我国交通运输行业的快速发展, 废旧轮胎迅速增加, 而废旧轮胎橡胶难以降解, 给环境带来了恶劣的影响^[1-2]。将废旧轮胎破碎再研磨成橡胶颗粒或者橡胶粉, 可替代传统混凝土中的部分骨料而制备出新型橡胶混凝土。研究^[3-7]表明, 与传统混凝土相比, 橡胶混凝土有更好的抗冲击、抗冻、降噪等性能。但由于橡胶颗粒具有疏水性, 与水泥基材之间附着力较低, 橡胶混凝土出现弹性模量低、变形大且抗压强度降低的现象, 因此橡胶混凝土的推广受到限制。

R. F. ZOLLO^[8]的研究表明, 聚丙烯纤维作为一种性能优异且价格低廉的纤维, 其优异的抗裂性和高强度可以提高混凝土的力学性能。将橡胶颗粒和聚丙烯纤维添加到水泥基质中会吸收水泥基质的部分水分, 降低混合料的流动性。而粉煤灰具有活性^[9], 可有效提高混合料的和易性, 提高混凝土的强度。

国内外学者大多是单独使用聚丙烯纤维或者粉煤灰对混凝土进行改性, 而没有综合两者的优势。在我国北方地区, 混凝土的使用耐久性受气

候变化的影响较明显, 寻找掺入聚丙烯纤维和粉煤灰橡胶混凝土的冻融耐久性规律对其实际应用具有重要作用。

本工作以不同掺量的聚丙烯纤维和粉煤灰复掺的橡胶混凝土为研究对象, 分析聚丙烯纤维和粉煤灰复掺对橡胶混凝土力学性能和抗冻融性能的影响。

1 实验

1.1 原材料

(1) 水泥: 工源牌硅酸盐P. O 42.5R级水泥, 丹东山水工源水泥有限公司产品。

(2) 细骨料: II区中砂。

(3) 粗骨料: 筛分粒径为5~20 mm的石灰岩碎石。

(4) 水: 自来水。

(5) 外加剂: FDN-C型减水剂。

(6) 橡胶颗粒: 粒径 2~4 mm, 细度模数 2.85, 表观密度 $2\,620 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 堆积密度 $1\,610 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 含泥量 1.8%, 含水率 1.2%, 江苏宏

作者简介: 柏旗(1996—), 女, 四川达州人, 西南科技大学在读硕士研究生, 主要从事橡胶混凝土的研究。

E-mail: 3090723348@qq.com

引用本文: 柏旗, 苏有文, 吕雄飞. 改性橡胶混凝土的力学性能和抗冻融性能研究[J]. 橡胶工业, 2023, 70(2): 91-96.

Citation: BAI Qi, SU Youwen, LYU Xiongfei. Study on mechanical properties and freeze-thaw resistance of modified rubber concrete[J]. China Rubber Industry, 2023, 70(2): 91-96.

腾运动场地新材料有限公司产品。

(7)聚丙烯纤维:长度 18 mm,直径 18~48 μm ,弹性模量 3.5 GPa,抗拉强度 >458 MPa,耐低温性好,耐酸碱性极好,河北廊坊环宇砂浆原料厂产品。

(8)粉煤灰:Ⅱ级粉煤灰,主要成分 二氧化硅、三氧化二铝,细度 43 μm ,密度 2.4 $\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$,含水率 0.5%,表观密度 2 300 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$,北川金通建材有限公司产品。

1.2 配合比设计

按照标准^[10]进行基准橡胶混凝土配合比设计,设计强度为C30,各材料用量见表1。在基准素橡胶混凝土(SXJ)配合比的基础上,以10%的橡胶颗粒等质量替代砂,分别以占水泥质量14%,16%,18%和20%的粉煤灰替代水泥,且分别外掺质量为8,10,12和14 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 的聚丙烯纤维(掺量分别对应于水泥掺量的1.80%,2.26%,2.72%和3.18%)。将聚丙烯纤维与粉煤灰组合,制作不同质量比的聚丙烯纤维和粉煤灰复合物,再成型的聚丙烯纤维/粉煤灰橡胶混凝土试件。

1.3 试件制作

搅拌采用干拌和湿拌相结合的方法。先人工干拌砂石等干料,再分批加入纤维搅拌1 min,搅拌

时间可根据纤维用量的增大略微调整。然后将混合料投入搅拌机干拌2 min,再将水和减水剂缓慢加入。当混凝土混合料表现出所需的和易性且纤维分布均匀时,将其倒入模具中并在振动器上振动。试件用塑料片覆盖并在室温下保存24 h后脱模,将试件标准养护至龄期。

1.4 性能测试

按照标准要求进行抗压和抗拉性能测试^[11]以及快速冻融循环试验^[12]。

2 结果与讨论

2.1 力学性能

聚丙烯纤维和粉煤灰掺量对橡胶混凝土力学性能的影响如图1所示。

从图1可以看出,在其他条件不变的情况下,随着聚丙烯纤维掺量的增大,橡胶混凝土的抗压

表1 橡胶混凝土配合比

Tab.1 Mix proportions of rubber concretes $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$

编号	水	水泥	砂	碎石	橡胶颗粒	聚丙烯纤维	粉煤灰 ¹⁾
SXJ	181	441	529	1 194	59	0	0
A1	181	379	529	1 194	59	8	14
A2	181	379	529	1 194	59	10	14
A3	181	379	529	1 194	59	12	14
A4	181	379	529	1 194	59	14	14
B1	181	370	529	1 194	59	8	16
B2	181	370	529	1 194	59	10	16
B3	181	370	529	1 194	59	12	16
B4	181	370	529	1 194	59	14	16
C1	181	362	529	1 194	59	8	18
C2	181	362	529	1 194	59	10	18
C3	181	362	529	1 194	59	12	18
C4	181	362	529	1 194	59	14	18
D1	181	353	529	1 194	59	8	20
D2	181	353	529	1 194	59	10	20
D3	181	353	529	1 194	59	12	20
D4	181	353	529	1 194	59	14	20

注:1)占水泥质量比,%。

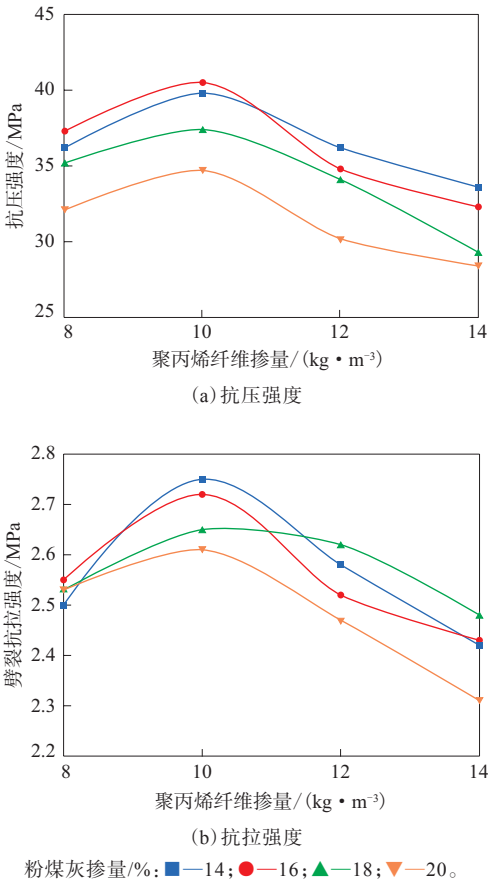


图1 聚丙烯纤维和粉煤灰掺量对橡胶混凝土力学性能的影响

Fig.1 Effect of polypropylene fiber and fly ash contents on mechanical properties of rubber concretes

强度和抗拉强度均呈现先增大后减小的趋势。其中粉煤灰掺量为14%和16%的橡胶混凝土的性能较好,与素橡胶混凝土相比,其最大抗压强度分别提高了15.2%和17.3%,最大抗拉强度分别提高了43.2%和41.7%。造成这些现象的主要原因分析如下。(1)聚丙烯纤维在基体中乱向分布,形成无序三维支撑结构,当橡胶混凝土受到外力时,其抵抗从基体中拉出的能力能够抑制初始裂纹的产生,并通过变形来转移混凝土所承受的外力。基体开裂后,聚丙烯纤维共同承受裂缝之间的应力,对受力体起“微箍”作用^[13],以提高整体性。而纤维过多会使混合料搅拌不均匀,容易产生应力集中,从而降低强度。(2)水泥一次水化生成了氢氧化钙,粉煤灰与其发生二次水化得到水化硅酸钙(CSH)凝胶产物,降低了二者界面上 Ca^{2+} 的浓度,提高了材料间的粘附性;而未水化的粉煤灰牢固填充在材料界面过渡区,提高了过渡区的

紧实度^[14]。但随着粉煤灰掺量的增大,水泥用量明显下降,水化产物不足,这导致橡胶混凝土的强度下降。(3)根据复合材料理论,聚丙烯纤维和粉煤灰与水泥基形成三相复合材料^[15],材料间的协同作用使橡胶混凝土不易断裂和剥离。因此适量的聚丙烯纤维和粉煤灰有利于提高橡胶混凝土的力学性能,纤维掺量为 $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、粉煤灰掺量为14%~16%时,橡胶混凝土的力学性能较好。

2.2 相对动弹性模量

2.2.1 聚丙烯纤维掺量的影响

冻融循环进程中,聚丙烯纤维掺量对橡胶混凝土相对动弹性模量的影响如图2所示。

从图2可以看出:在整个冻融循环进程中,在其他条件不变时,橡胶混凝土的相对动弹性模量不断降低,且素橡胶混凝土的相对动弹性模量降幅比其他橡胶混凝土大;冻融150次时,素橡胶混凝土的相对动弹性模量下降至65%左右,其他橡胶

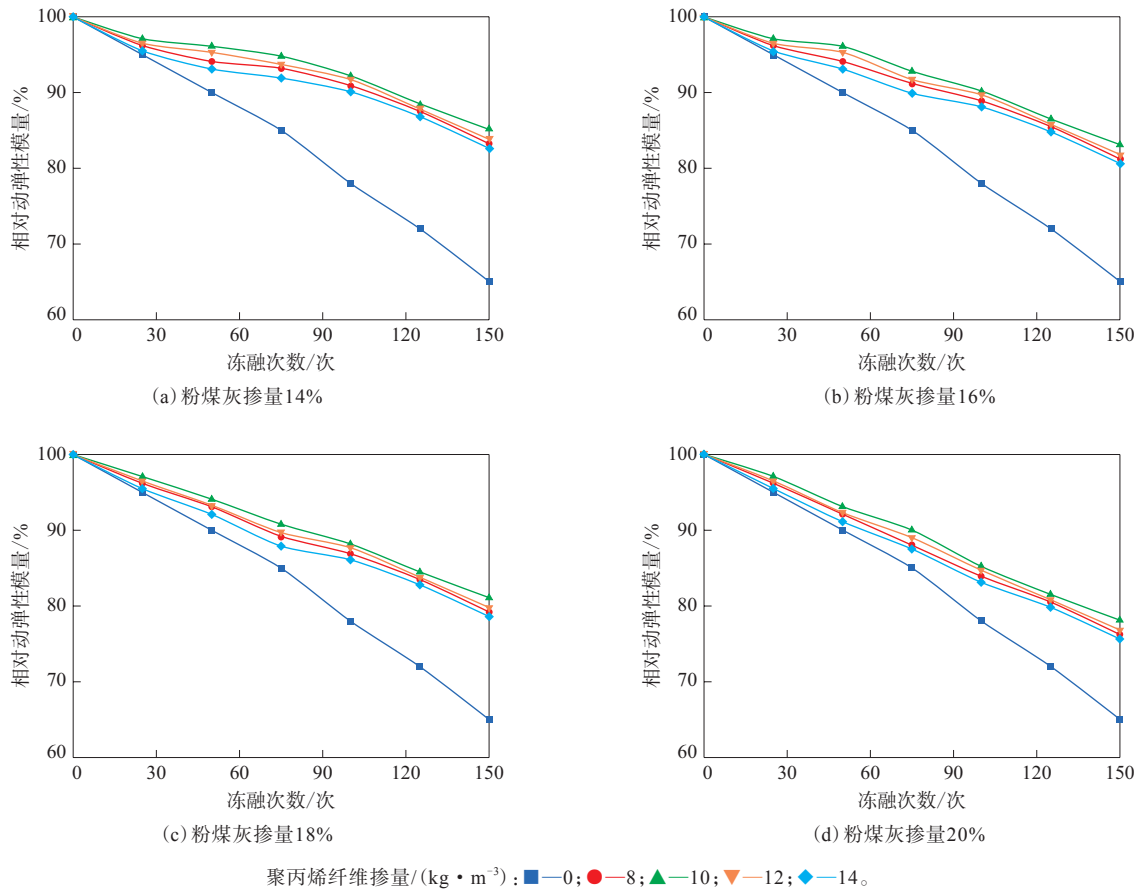


图2 聚丙烯纤维掺量对橡胶混凝土相对动弹性模量的影响

Fig. 2 Effect of polypropylene fiber contents on relative dynamic elastic moduli of rubber concretes

混凝土的相对动弹性模量在75%~85%区间。

聚丙烯纤维能减少橡胶混凝土的冻融损伤,但并非是添加纤维越多,橡胶混凝土的抗冻性越好^[16]。从图2可以还看出,聚丙烯纤维掺量为 $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右时,橡胶混凝土的抗冻性能较优。

2.2.2 粉煤灰掺量的影响

冻融循环进程中,粉煤灰掺量对橡胶混凝土相对动弹性模量的影响如图3所示。

从图3可以看出,在其他条件不变时,橡胶混凝土的冻融次数和相对动弹性模量呈反比,冻融循环次数越多,相对动弹性模量就越低。在相同冻融次数下,粉煤灰掺量较小对橡胶混凝土的抗冻性有益;当粉煤灰掺量逐渐增大时,橡胶混凝土的相对动弹性模量随之降低,下降速率在冻融次数大于75时变大。因此,橡胶混凝土粉煤灰掺量不宜过大。

根据O. KARAHAN等^[17]提出的膨胀压理论可知,与混凝土相比,纤维的热膨胀系数更大,在冻

结温度下纤维的体积收缩率大于混凝土,此时纤维与混凝土的界面会形成微裂纹,这些裂纹能消除水冻结引起的膨胀应力,当冻结的水融化时,纤维的体积膨胀率比混凝土大,基体内部无膨胀应力,使纤维与水泥基界面的粘结更加紧密。粉煤灰含有活性成分,适量的粉煤灰水化产生的CSH凝胶可以填充孔隙,增加结构密实度,减少冻融循环引起的基体内部的“冻胀破坏”。过量的粉煤灰会使水泥与骨料的粘附力降低,引起混凝土内部的孔隙率增大,使混凝土的相对动弹性模量降低。综上所述,通过加入适量粉煤灰和聚丙烯纤维,可以抑制橡胶混凝土的裂纹发展,提高抗冻融损伤能力。

2.3 冻融损伤模型

由损伤力学理论可知,混凝土的冻融损伤程度定义为

$$D = E_N / E_0 \quad (1)$$

式中, D 为冻融损伤程度, E_0 和 E_N 分别为冻融前和

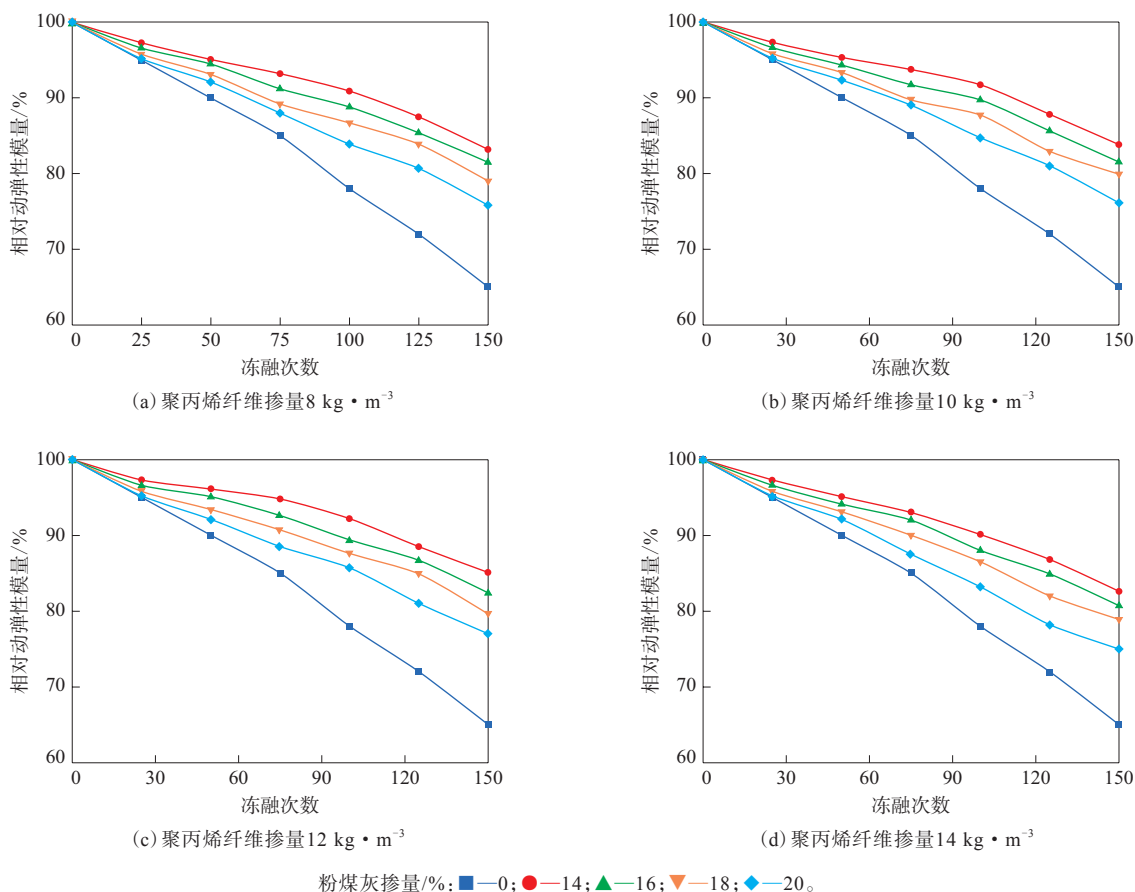


图3 粉煤灰掺量对橡胶混凝土相对动弹性模量的影响

Fig. 3 Effect of fly ash contents on relative dynamic elastic moduli of rubber concretes

冻融后相对动弹性模量。

为了更好地反映橡胶混凝土的冻融损伤程度,参照关宇刚等^[18-20]的混凝土冻融损伤程度方程构建了橡胶混凝土的冻融损伤程度二次函数衰减模型。在本试验聚丙烯纤维和粉煤灰掺量范围内,橡胶混凝土的冻融损伤程度与冻融次数之间的关系可表达为:

$$y=ax^2+bx+c \tag{2}$$

式中,y为冻融损伤程度,x为冻融次数,a和b为材料因数,c为无量纲因数。

将橡胶混凝土的冻融损伤程度数据代入式(2),使用Origin软件对冻融损伤程度数据进行拟合,以A和B型试件为例,得到橡胶混凝土的冻融损伤程度二次函数衰减因数,结果如表2所示。

表2 橡胶混凝土的冻融损伤程度二次函数衰减因数

Tab. 2 Quadratic function attenuation coefficients of freeze-thaw cycle damage degrees of rubber concretes

试件 编号	拟合因数			相关因 数(R ²)
	a×10 ⁶	b×10 ⁴	c	
A1	-2.247 62	-6.771 43	0.990 62	0.96
A2	-3.542 86	-4.085 71	0.993 43	0.98
A3	-3.200 00	-5.142 86	0.991 43	0.97
A4	-0.800 00	-9.171 43	0.989 57	0.96
B1	-1.485 71	-9.628 57	0.994 43	0.99
B2	-2.780 95	-6.942 86	0.997 24	0.99
B3	-2.438 10	-8.000 00	0.995 24	0.99
B4	-0.038 10	-12.000 00	0.993 38	0.98

从表2可以看出,橡胶混凝土的冻融损伤程度二次函数的R²最小为0.96,大部分为0.98以上,表明此冻融损伤模型和试验数据之间的误差很小。

3 结论

(1) 提高橡胶混凝土的抗碾压开裂和抗冻融破坏性能的关键是提高其内部结构的密实度和抗裂性能,聚丙烯纤维具有增韧阻裂的作用,粉煤灰可以提高骨料之间的密实度,加上增强界面粘结性等措施,可以有效提高橡胶混凝土的抗碾压和抗冻融能力。

(2) 掺入聚丙烯纤维能够提高橡胶混凝土的力学性能,但当其掺量大于10 kg·m⁻³时,橡胶混凝土的力学性能反而降低;粉煤灰具有一定活性,可有效改善混合料的和易性,提高橡胶混凝土的强度,但粉煤灰掺量过大则会导致橡胶混凝土的强度下降。

(3) 橡胶混凝土的相对动弹性模量随粉煤灰掺量的增大而降低;聚丙烯纤维在一定程度上能够提高橡胶混凝土的抗冻融损伤性能,但并非其掺量越大,橡胶混凝土的抗冻效果越好。

(4) 结合力学性能和抗冻融性能,聚丙烯纤维掺量为10 kg·m⁻³、粉煤灰掺量为14%~16%时,橡胶混凝土的整体性能最优。

(5) 混凝土的冻融循环损伤程度采用相对动弹性模量定义。本研究构建了在试验聚丙烯纤维和粉煤灰掺量范围内,橡胶混凝土的冻融损伤程度与冻融次数的二次方程。进行数据拟合及误差分析后得出,此冻融模型精度较高。

参考文献:

[1] 巩雨注,王小萍,贾德民. 废旧轮胎粉碎技术及其应用进展[J]. 橡胶工业,2021,68(1):66-72.
GONG Y Z, WANG X P, JIA D M. Crushing technology and application progress of waste tires[J].China Rubber Industry,2021,68(1):66-72.

[2] 曾毅夫,吴志恒,何曦,等.废旧轮胎热解资源化技术进展[J].橡胶工业,2020,67(12):949-953.
ZENG Y F, WU Z H, HE X, et al. Technical progress of pyrolysis and recycling of waste tires[J]. China Rubber Industry,2020,67(12):949-953.

[3] 韩菊红,袁群,冯凌云,等. 橡胶混凝土的抗冲击性能研究[J].人民黄河,2018,40(11):107-109,114.
HAN J H,YUAN Q,FENG L Y,et al. Research on shock resistance of rubber concrete[J].Yellow Rive,2018,40(11):107-109,114.

[4] 袁群,郭旭东,冯凌云,等.改性橡胶混凝土抗冻性能研究[J].人民黄河,2017,39(10):113-116,120.
YUAN Q, GUO X D, FENG L Y, et al. Research on the frost resistance properties of modified rubberized concrete[J].Yellow Rive,2017,39(10):113-116,120.

[5] 白文琦,吕晶.橡胶轻骨料混凝土阻尼性能试验[J].长安大学学报(自然科学版),2018,38(3):26-33,42.
BAI W Q, LYU J. Experimental on damping capacity of rubber lightweight aggregate concrete[J].Journal of Chang'an University (Natural Science Edition),2018,38(3):26-33,42.

[6] 陈爱玖,韩小燕,汪志昊,等.改性橡胶混凝土力学性能试验研究[J].混凝土,2018(5):91-93,97.
CHEN A J, HAN X Y, WANG Z H, et al. Experimental study on mechanical properties of modified rubber concrete[J].Concrete,2018(5):91-93,97.

[7] 陈疏桐,陈建东,薛旭.玄武岩纤维橡胶混凝土力学及冻融性能试验研究[J].混凝土与水泥制品,2020(4):54-58.
CHEN S T,CHEN J D,XUE X. Experimental research on mechanics and freeze-thaw properties of basalt fiber rubber concrete[J].China Concrete and Cement Products,2020(4):54-58.

- [8] ZOLLO R F. Collated fibrillated poly propylene fibres in FRC[J]. Journal of the American Concrete Institute, 1984, 81 (5) : 517-517.
- [9] 姚韦靖, 庞建勇, 韩晓静. 超细粉煤灰混凝土长期力学性能试验研究[J]. 科学技术与工程, 2016, 16 (28) : 282-287.
- YAO W J, PANG J Y, HAN X J. Experimental research on ultra-fine fly ash concrete long time mechanical properties[J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16 (28) : 282-287.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土配合比设计规程: JGJ55—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [11] 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, 2016.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 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.
- [13] 何兆益, 张政国, 王国伟. 路用聚丙烯纤维混凝土的增韧试验及机理研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2008, 27 (2) : 240-243, 282.
- HE Z Y, ZHANG Z G, WANG G W. Research on tenacity experiment and enhanced toughness mechanism of polypropylene fiber concrete as road surface[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2008, 27 (2) : 240-243, 282.
- [14] 何芸, 何真, 孙海燕. 粉煤灰和PVA纤维复掺水泥基材料微观机理分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12 (5) : 205-210.
- HE Y, HE Z, SUN H Y. Micro-mechanism analysis on cement-based materials with fly ash and PVA fiber[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2014, 12 (5) : 205-210.
- [15] 秦鸿根, 孙伟, 崔东霞, 等. 三掺技术对混凝土界限阻裂的作用及机理分析[C]. 第十二届全国纤维混凝土学术会议论文集. 北京: 中国土木工程学会混凝土及预应力混凝土分会纤维混凝土委员会, 2008: 161-165.
- [16] 莫金旭, 曾磊, 郭帆, 等. 橡胶粉对聚丙烯纤维混凝土力学性能和微观结构的影响[J]. 建筑材料学报, 2020, 23 (5) : 1222-1229.
- MO J X, ZENG L, GUO F, et al. Effect of rubber powder on mechanical properties and microstructure of polypropylene fiber reinforced concrete[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23 (5) : 1222-1229.
- [17] KARAHAN O, ATIS C D. The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete[J]. Materials & Design, 2011, 32 (2) : 1044-1049.
- [18] 关宇刚, 孙伟, 缪昌文. 基于可靠度与损伤理论的混凝土寿命预测模型 I: 模型阐述与建立[J]. 硅酸盐学报, 2001, 29 (6) : 530-534.
- GUAN Y G, SUN W, MIU C W. One service-life prediction model for the concrete based on the reliability and damage theories I: Narration and establishment of the model[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2001, 29 (6) : 530-534.
- [19] 关宇刚, 孙伟, 缪昌文. 基于可靠度与损伤理论的混凝土寿命预测模型 II: 模型验证与应用[J]. 硅酸盐学报, 2001, 29 (6) : 535-540.
- GUAN Y G, SUN W, MIU C W. One service-life prediction model for the concrete based on the reliability and damage theories II: Verification and application of the model[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2001, 29 (6) : 535-540.
- [20] 赵小明, 李奥阳, 乔宏霞, 等. 纤维混凝土抗冻性能及损伤劣化模型研究[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39 (10) : 3196-3202.
- ZHAO X M, LI A Y, QIAO H X, et al. Frost resistance and damage deterioration model of fiber reinforced concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2020, 39 (10) : 3196-3202.

收稿日期: 2022-08-16

Study on Mechanical Properties and Freeze-thaw Resistance of Modified Rubber Concrete

BAI Qi¹, SU Youwen¹, LYU Xiongfei²

(1. Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621000, China; 2. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200082, China)

Abstract: Polypropylene fiber and fly ash were mixed with rubber concrete, and the effect of their contents on the mechanical properties and freeze-thaw resistance of rubber concrete was studied. The results showed that the compressive strength and tensile strength of the rubber concrete first increased and then decreased with the increase of polypropylene fiber content, and decreased with the increase of fly ash content. In the whole freeze-thaw cycle, the relative dynamic elastic modulus of the polypropylene fiber and fly ash filled rubber concretes decreased less than that of the unfilled rubber concrete, and the freeze-thaw damage resistance was improved. In this test, the overall performance of the rubber concrete was the best when the polypropylene fiber content was $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ and the fly ash content was 14% ~ 16% (based on the mass percentage of the substituted cement).

Key words: rubber concrete; polypropylene fiber; fly ash; mechanical property; freeze-thaw resistance