

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022031624021970

文章编号: 1674-599X(2024)01-0009-07

引用格式: 李明顺, 邓唯. 钢纤维对细再生混凝土力学性能的影响研究[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(1): 9-15.

Citation: LI Mingshun, DENG Wei. Study the effect of steel fiber on mechanical properties of fine recycled concrete [J]. J. Transp. Sci. Eng., 2024, 40(1): 9-15.

钢纤维对细再生混凝土力学性能的影响研究

李明顺, 邓唯

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 为研究细再生集料(FRAP)替代天然细集料(NFA)的可能性。配置1%钢纤维掺量下不同FRAP含量(0%、25%、50%、75%、100%)的水泥混凝土,并测定成型后试件的抗压强度、拉伸特性、应力-应变特性和耐久性能。研究表明:以FRAP替代NFA会导致细再生集料水泥混凝土的力学强度降低;加入1%钢纤维,可以显著提高细再生集料水泥混凝土劈裂抗拉强度和抗弯强度,峰值应力增加约15%,峰值应变增加50%,韧性及延展性提高约5倍;以FRAP替代NFA的最佳含量为50%左右。

关键词: 细再生集料;水泥混凝土;钢纤维;应力-应变特性;拉伸特性

中图分类号: U452

文献标志码: A

Study the effect of steel fiber on mechanical properties of fine recycled concrete

LI Mingshun, DENG Wei

(School of Traffic & Transportation Engineering, Changsha University of technology,
Changsha 410114, China)

Abstract: To investigate the possibility of replacing natural fine aggregate (NFA) with fine recycled aggregate (FRA), cement concrete with different FRA contents (0%, 25%, 50%, 75%, 100%) at 1% steel fiber admixture was configured and the compressive strength, tensile properties, stress-strain properties and durability performance of the formed specimens were determined. The results show that: replacing NFA with FRA leads to a decrease in the mechanical strength of fine recycled aggregate cement concrete; the addition of 1% steel fiber significantly enhances the splitting tensile strength and flexural strength of fine recycled aggregate cement concrete, increases the peak stress by about 15%, increases the peak strain by 50%, and increases the toughness and ductility by about 5 times; the optimum content for replacing NFA with FRA can be maintained at approximately 50%.

Key words: fine recycled aggregates; cement concrete; steel fibers; stress-strain properties; tensile properties

混凝土在建筑领域中应用广泛,但由于混凝土 原材料的生产会破坏生态环境,因此研究可持续建

收稿日期: 2022-03-16

基金项目: 湖南省交通科技项目(201840)

作者简介: 李明顺(1970—),男,长沙理工大学副教授,硕士生导师。E-mail: 793441298@qq.com

设原材料的替代方案尤为重要^[1-2]。每年修公路都会生产大量的废弃旧路面材料,可将其加工为再生骨料。其中,集料粒径大于等于4.75 mm的部分称为粗再生集料,小于4.75 mm的部分称为细再生集料^[3-4]。根据以往研究^[5-6]发现,用再生集料代替天然集料时,混凝土的力学特性会较低。这是因为沥青-水泥砂浆之间的黏结性较低,以及再生集料级配设计不合理。为了保持合理的再生集料级配,本研究采用的集料粒径为0.15~2.36 mm。

在水泥混凝土中加入钢纤维形成结构体系,控制和延缓混凝土的拉伸裂缝,并将混凝土的脆性破坏变为延性破坏。同时,钢纤维也能有效减少裂缝,提高水泥混凝土路面的抗冲击性能和抗疲劳性能^[7]。赵健等^[8]分析钢纤维混凝土力学性能时发现,随着钢纤维含量的增加,抗压强度略有提升,而抗弯拉强度大幅度提高,吸收断裂能力增强,阻裂能力也随之增强。钟晨等^[9]在分析钢纤维对混凝土基体影响时发现,当钢纤维含量为0.75%的钢纤维混凝土且应变率为 10^{-4} s^{-1} 时,其峰值应力提高了23%。钢纤维混凝土具有高韧性、温缩性和抗冻性良好等优越性能^[10]。因此,在再生骨料加入钢纤维,可提高再生集料混凝土的耐久性。通过配制绿色钢纤维再生混凝土,研究不含钢纤维和含钢纤维的细再生集料水泥混凝土的力学强度和吸水率。这样不仅可以通过普通制备技术配制良好工作性能、耐久性、力学性能的新型绿色混凝土材料,而且也符合绿色交通理念,有助于更好地将其推广到工程应用。

1 试验方案

1.1 材料

试验原材料包括普通硅酸盐水泥(P·O 42.5)、碎花岗岩、密度为2.68 g/cm的天然砂及本地旧路面材料。这些材料经人工碾压处理后,除去尘埃微粒,获取再生集料。其中,将集料粒径为0.15~2.36 mm、密度为2.45 g/cm的再生集料部分视为细再生集料(如图1所示),并将其替换天然砂。



图1 细再生集料

Fig. 1 Fine recycled aggregate

天然集料和细再生集料物理力学性质见表1,将直径和长度分别为0.5 mm和25.0 mm的卷曲钢纤维作为该试验的钢纤维材料。

表1 再生细集料和天然集料的物理性质

Table 1 Physical properties of fine recycled aggregates and natural aggregates

替代率	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	吸水率/ %	细度模数
天然集料	2.63	1.03	2.72
25% 细再生集料	2.57	0.98	2.78
50% 细再生集料	2.53	0.93	2.85
75% 细再生集料	2.48	0.88	2.93
100% 细再生集料	2.44	0.84	2.98

1.2 再生细集料替代率及钢纤维掺量

本研究采用不同含量的细再生集料替代天然砂,通过浇筑养护形成不同替代率的细再生集料混凝土,以及含钢纤维细再生集料混凝土,并测试混凝土试件力学性能。试验变量包括细再生集料含量(0%~100%)以及钢纤维含量(分别为0%和1%)。设计强度为40 MPa的细再生集料水泥混凝土的配合比,具体见表2。不同替代率的钢纤维细再生集料水泥混凝土的掺量见表3。

表2 再生细集料水泥混凝土配合比设计

Table 2 Mix proportion design for fine recycled aggregate cement concrete

水泥/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	水/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	粗集料/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	细集料/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
430	155	1 078	850

表3 不同替代率钢纤维细再生集料水泥混凝土的掺量

Table 3 Content of cement concrete with steel fiber fine recycled aggregate at different substitution rates

试样	再生细集料含量/ %	钢纤维含量/ %
FRAP0	0	0
FRAP25	25	0
FRAP50	50	0
FRAP75	75	0
FRAP100	100	0
FRAP0-F1	0	1
FRAP25-F1	25	1
FRAP50-F1	50	1
FRAP75-F1	75	1
FRAP100-F1	100	1

1.3 试验过程

采用 1 000 kN 的伺服控制试验,评估不同替代率钢纤维细再生集料水泥混凝土的力学特性。细再生集料混凝土试件的吸水率和吸附性以吸附系数 S 来评估,即混凝土试件单位截面面积的吸水量与时间的平方根之比^[11-12]。在伺服控制试验中,测试了 24 个细再生集料混凝土试件,其具体情况见表 4。

表4 不同试验所需试件尺寸大小

Table 4 Sizes of specimens required for different tests

试件类型	尺寸大小/ mm	测试类型	试件数量/ 个
立方体	100×100×100	抗压强度	4
圆柱体	Φ100×200	劈裂强度	4
长方体	100×100×500	抗弯拉强度	4
圆柱体	Φ100×200	应力-应变	4
立方体	100×100×100	吸水率	4
立方体	100×100×100	吸附性	4

2 试验结果分析

2.1 细再生集料混凝土力学性能

采用不同掺量的细再生集料代替天然砂,配制细再生集料水泥混凝土试件,测定试件在不同的养护龄期(7 d、28 d)的不含钢纤维和含钢纤维细再生集料水泥混凝土的抗压强度、拉伸特性和应力-应变特性。

2.1.1 抗压强度

不同替代率的细再生集料水泥混凝土抗压强度变化规律如图 2 所示。从图 2 中可以看出,随着细再生集料掺量的增加,两种混凝土的抗压强度逐渐降低。在养护龄期分别为 7 d 和 28 d 的情况下,细再生集料掺量小于 50% 时,细再生集料水泥混凝土的抗压强度略有下降。随着细再生集料掺量的增加,细再生集料水泥混凝土的抗压强度降低幅度显著,且抗压强度下降超过 20%。对于掺量为 50% 的细再生集料,养护龄期为 28 d 的混凝土抗压强度超过 40 MPa,符合《纤维混凝土结构技术规程》中 3.3.2 条。细再生集料水泥混凝土抗压强度降低,主要因为再生集料和水泥砂浆之间的黏结力较弱。在加入钢纤维后,随着再生集料掺量的增加,水泥混凝土抗压强度也随之减小。与不含钢纤维的细再生集料水泥混凝土相比,其抗压强度提高了约 7%~12%。即使细再生集料的掺量为 75%,仍然能够满足《纤维混凝土结构技术规程》中 3.3.2 条。

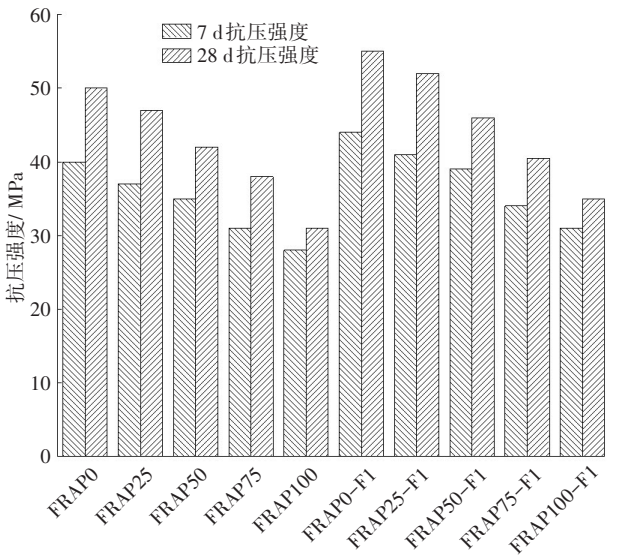


图2 不同替代率的细再生集料水泥混凝土抗压强度变化
Fig. 2 Variation of compressive strength of fine recycled aggregate cement concrete with different substitution rates

2.1.2 拉伸特性

不含钢纤维和含钢纤维的细再生集料水泥混凝土的劈裂抗拉强度和抗弯强度的变化规律如图3~4所示。

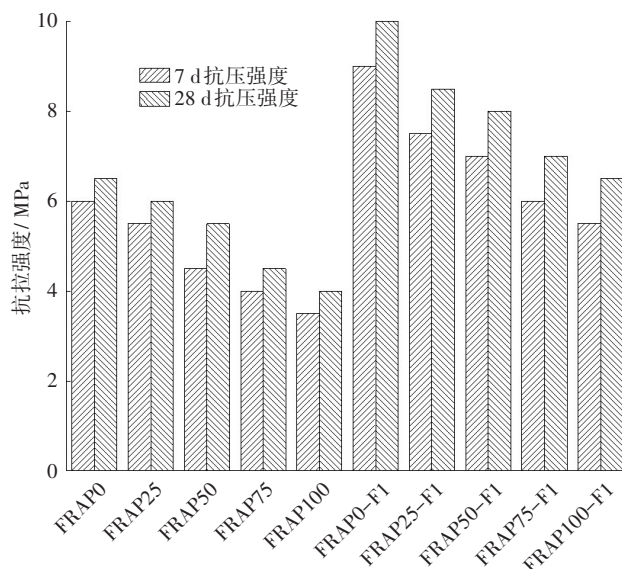


图3 不同含量的细再生集料水泥混凝土的劈裂抗拉强度变化

Fig. 3 Variation of splitting tensile strength of fine recycled aggregate cement concrete with different contents

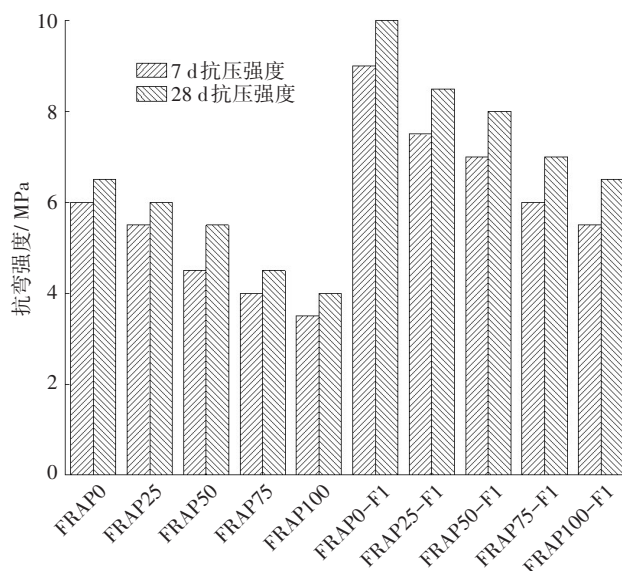


图4 不同替代率的细再生集料水泥混凝土的抗弯强度变化

Fig. 4 Variation of bending strength of fine recycled aggregate cement concrete with different substitution rates

从图3可以看出,随着细再生集料掺量的增加,两种混凝土的劈裂抗拉强度逐渐减小。加入钢纤维后,对细再生集料混凝土抗压强度的影响并不

大,但细再生集料水泥混凝土的劈裂抗拉强度却提高了40%~50%。这表明钢纤维能提高细再生集料混凝土的延展性,改善了刚性水泥混凝土抗拉强度弱的特性,从而延长了水泥混凝土路面使用寿命。

从图4可以看出,当细再生集料掺量为25%~75%时,细再生集料混凝土的抗弯强度均大于4 MPa,完全满足《普通混凝土配合比设计规程》第3.0.3条。钢纤维在细再生集料水泥混凝土中离散分布,阻碍了微裂缝的产生,使得抗弯强度大幅度提高,从而改善了细再生集料水泥混凝土的抗弯性能。

2.1.3 细再生集料水泥混凝土应力-应变特性

为了研究细再生集料水泥混凝土的应力-应变特性,使用有应力-应变测量装置的1 000 kN伺服控制仪,对细再生水泥混凝土圆柱体试件($\phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$)进行了单轴压缩试验^[13-14]。不同替代率的细再生集料水泥混凝土的应力-应变关系如图5所示。从图5中可以看出,不含钢纤维的细再生集料水泥混凝土发生了较为明显的脆性破坏。当应变为0.002时,应力达到峰值后,突变降低,韧性也随之降低。这表明不含钢纤维的细再生集料水泥混凝土试件发生了脆性破坏。若在细再生集料混凝土中加入钢纤维,可以发现混凝土的延展性明显提高,且应力峰值后的韧性也得到改善。当应变为0.003时,应力开始逐渐降低。总而言之,含有钢纤维的细再生集料混凝土的峰值应力和峰值应变均有明显改善。

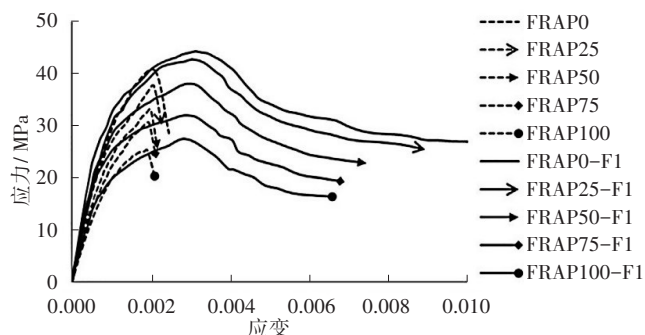


图5 不同替代率的细再生集料水泥混凝土的应力-应变关系

Fig. 5 Stress-strain relationship of fine recycled aggregate cement concrete with different substitution rates

由表5可知,加入钢纤维的细再生集料水泥混凝土与不含钢纤维细再生集料水泥混凝土相比,其峰值应力增加了约15%,含钢纤维细再生集料水泥混凝土的峰值应变提高了约50%;含钢纤维细再生

集料水泥混凝土吸收的能量提高了将近 5 倍,混凝土的韧性提高了 3.6~4.9 倍。这表明钢纤维对细再生集料水泥混凝土的韧性、延展性等都有明显的改善作用,提高了水泥混凝土力学性能及耐久性。

表 5 应力比、应变比和韧性的变化

Table 5 Variations of stress ratio, strain ratio and toughness index

试件	峰值应力/ MPa	峰值应变/ 10 ⁻³	应力比	应变比	峰值前能量/ (kJ·m ⁻³)	总能量/ (kJ·m ⁻³)	韧性指数
FRAP0	40.4	2.120			57.30	68.92	
FRAP25	37.5	2.080			50.46	57.24	
FRAP50	33.2	1.998			42.64	47.63	
FRAP75	30.5	1.961			38.32	42.73	
FRAP100	25.3	1.913			32.30	36.45	
FRAP0-F1	44.3	3.122	1.10	1.47	104.57	342.93	4.98
FRAP25-F1	42.7	3.067	1.14	1.47	96.98	279.47	4.88
FRAP50-F1	38.1	2.970	1.15	1.49	84.03	210.20	4.41
FRAP75-F1	32.2	2.908	1.05	1.48	71.93	165.93	3.88
FRAP100-F1	27.6	2.842	1.09	1.49	56.70	133.04	3.65

2.2 细再生集料水泥混凝土的吸水率

为了研究细再生集料水泥混凝土的吸水性及孔隙率的变化情况^[15],本研究对不含钢纤维和含钢纤维的细再生集料水泥混凝土进行吸水率和孔隙率的试验,结果见表 6。经过水浸泡和煮沸水浸泡后的混凝土试件,随着细再生集料掺量的增加,不含钢纤维和含钢纤维细再生集料水泥混凝土的吸水率也相应增加,但含钢纤维试件的吸水率小于不含钢纤维试件的吸水率。这表明含钢纤维细再生集料水泥混凝土在吸水方面表现较好,试件经煮沸浸泡后吸水率较大;不含钢纤维再生集料水泥混凝土可渗透孔隙表观体积(pore apparent volume, PAV)也随孔隙率的增加而增加,但钢纤维的加入,使细再生集料水泥混凝土的可渗透孔隙表观体积有所降低。

钢纤维细再生集料水泥混凝土毛细管吸水的变化情况如图 6 所示,其斜率为吸附系数 S。表 7 列出了图 6 中所得吸附系数结果。由表 7 可知,不含钢纤维和含钢纤维细再生集料的水泥混凝土的吸附性略有提高。然而,随着钢纤维的加入,与不含钢纤维细再生集料混凝土相比,含钢纤维细再生集料混凝土的吸附性却有所下降。这是因为钢纤维

填充了细再生集料混凝土空隙,导致试件孔隙降低,吸附性下降。

表 6 不同替代率钢纤维细再生集料水泥混凝土吸水率和空隙率的变化

Table 6 Variations of water absorption and voidage of steel fiber fine recycled aggregate cement concrete with different substitution rates

试件	浸泡后 吸水率/ %	煮沸浸泡后 吸水率/ %	可渗透孔隙的表观 体积/ (kg·m ⁻³)
FRAP0	5.15	5.36	12.5
FRAP25	5.69	5.89	13.5
FRAP50	6.16	6.30	15.0
FRAP75	6.85	7.18	16.0
FRAP100	7.12	7.47	16.5
FRAP0-F1	5.00	5.00	12.0
FRAP25-F1	5.36	5.45	13.5
FRAP50-F1	5.86	6.42	14.0
FRAP75-F1	6.52	6.75	15.5
FRAP100-F1	6.82	7.28	16.0

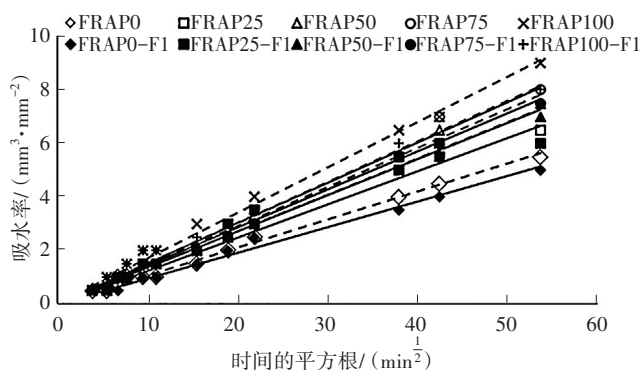


图6 不同时间下的钢纤维细再生集料混凝土
毛细管吸水率

Fig. 6 Capillary water absorption of steel fiber fine recycled aggregate concrete at different times

表7 不同含量细再生集料混凝土吸附系数的变化

Table 7 Variation of adsorption coefficient of fine recycled aggregate concrete with different contents

试件	吸附系数/(mm·min ^{1/2})
FRAP0	0.105
FRAP25	0.136
FRAP50	0.146
FRAP75	0.152
FRAP100	0.170
FRAP0-F1	0.099
FRAP25-F1	0.124
FRAP50-F1	0.135
FRAP75-F1	0.143
FRAP100-F1	0.149

3 结论

通过不同原材料、细再生集料的不同配合比,以及对不含钢纤维和含钢纤维的细再生集料两种水泥混凝土试件进行力学性能研究,并将细再生集料水泥混凝土应用于道路工程发现,在细再生集料混凝土加入钢纤维后,混凝土的拉伸性能明显得到提高,进而使得细再生集料水泥混凝土路面的耐久性得到改善。具体结论如下:

1) 随着细再生集料掺量的增加,细再生集料水

泥混凝土的抗压强度会降低。当细再生集料掺量替代率超过50%后,混凝土抗压强度降低更为明显。因此,细再生集料替代天然沙的最佳含量应保持在50%左右。

2) 加入钢纤维的细再生集料水泥混凝土,当细再生集料的替代率达到75%时,混凝土抗压强度已达到40 MPa以上。

3) 钢纤维提高了细再生集料水泥混凝土劈裂抗拉强度和抗弯强度的40%~50%。

4) 掺入1%钢纤维后,细再生集料水泥混凝土的韧性及延展性均提高了约5倍。

5) 随着细再生集料掺量的增加,混凝土的吸水率和吸附性随之增加。若在混凝土中加入钢纤维,吸水率和吸附性会有所降低。这是因为钢纤维填充了细再生集料水泥混凝土的孔隙,使得试件的孔隙减小,吸附性下降。

参考文献(References):

- [1] 董方园, 郑山锁, 宋明辰, 等. 高性能混凝土研究进展I: 原材料和配合比设计方法[J]. 材料导报, 2018, 32(1): 159-166. DOI: 10.11896/j.issn.1005-023X.2018.01.020.
DONG Fangyuan, ZHENG Shansuo, SONG Mingchen, et al. Research progress of high performance concrete I: raw materials and mix proportion design method [J]. Materials Review, 2018, 32(1): 159-166. DOI: 10.11896/j.issn.1005-023X.2018.01.020.
- [2] 施敏蛟, 林忠财. 人造骨料制造与养护工艺研究概述[J]. 混凝土, 2019(9): 56-61. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2019.09.014.
SHI Minjiao, LING Zhongchai. Review on the manufacturing and curing process of artificial aggregate [J]. Concrete, 2019(9): 56-61. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2019.09.014.
- [3] 苏龙海. 废旧沥青混合料的再生利用研究[J]. 建筑工程技术与设计, 2016(2): 500-501. DOI: 10.3969/j.issn.2095-6630.2016.02.480.
SU Longhai. Study on recycling of waste asphalt mixture [J]. Architectural Engineering Technology and Design, 2016(2): 500-501. DOI: 10.3969/j.issn.2095-6630.2016.02.480.
- [4] 邹桂莲, 彭超杰, 廖湘南, 等. 再生粗骨料对沥青混合料路用性能的影响[J]. 中外公路, 2017, 37(2): 272-

275. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2017.02.061.
- ZOU Guilian, PENG Chaojie, LIAO Xiangnan, et al. Influence of recycled coarse aggregate on road performance of asphalt mixture[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2017, 37 (2): 272-275. DOI: 10.14048/j.issn.1671-2579.2017.02.061.
- [5] 余琦, 许立, 高金仓, 等. 建筑垃圾再生集料沥青稳定碎石基层性能研究[J]. 交通科学与工程, 2021, 37 (2): 1-7, 97. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.02.001.
- YU Qi, XU Li, GAO Jincang, et al. Pavement performance of asphalt treated permeable base using construction waste recycled aggregate [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(2): 1-7, 97. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.02.001.
- [6] 郭立成, 任晔, 曾国东, 等. 不同强度废旧混凝土水泥稳定再生材料路用性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40 (5): 1760-1766. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2021.05.034.
- GUO Licheng, REN Huang, ZENG Guodong, et al. Road performance of cement stabilized recycled materials with different strength waste concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(5): 1760-1766. DOI: 10.16552/j.cnki.issn1001-1625.2021.05.034.
- [7] 赵亮平, 高丹盈, 朱海堂. 钢纤维对混凝土强度和韧性的影响[J]. 华北水利水电学院学报, 2012, 33(6): 29-32. DOI: 10.19760/j.ncwu.zk.2012.06.007.
- ZHAO Liangping, GAO Danying, ZHU Haitang. Influences of steel fiber on strength and toughness of concrete [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2012, 33 (6): 29-32. DOI: 10.19760/j.ncwu.zk.2012.06.007.
- [8] 赵健, 廖霖, 张帆, 等. 钢纤维混凝土弯曲性能和纤维分布试验研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(4): 838-845. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2020.04.015.
- ZHAO Jian, LIAO Lin, ZHANG Fan, et al. Experimental study on flexural properties and fiber distribution of steel fiber reinforced concrete[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23 (4): 838-845. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2020.04.015.
- [9] 钟晨, 叶中豹, 王颖. 钢纤维混凝土增强增韧机理和力学分析[J]. 河北北方学院学报(自然科学版), 2019, 35 (7): 37-42, 49. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1492.2019.07.007.
- ZHONG Chen, YE Zhongbao, WANG Ying. Strengthening and toughening mechanism and mechanical analysis of steel fiber-reinforced concrete[J]. Journal of Hebei North University (Natural Science Edition), 2019, 35 (7): 37-42, 49. DOI: 10.3969/j.issn.1673-1492.2019.07.007.
- [10] 姜丽伟. 超长复合型纤维水泥混凝土路用性能试验研究[J]. 公路, 2012, 57 (11): 20-25. DOI: 10.3969/j.issn.0451-0712.2012.11.006.
- JIANG Liwei. Experimental study on road performance of super-long composite fiber cement concrete [J]. Highway, 2012, 57 (11): 20-25. DOI: 10.3969/j.issn.0451-0712.2012.11.006.
- [11] SHI X J, GRASLEY Z, HOGANCAMP J, et al. Microstructural, mechanical, and shrinkage characteristics of cement mortar containing fine reclaimed asphalt pavement [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32 (4): 402-410. DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003110.
- [12] 王新杰, 张天睿, 朱平华, 等. 不同取代率下三代循环再生混凝土抗冻性能研究[J]. 混凝土, 2021(8): 127-132. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2021.08.029.
- WANG Xinjie, ZHANG Tianrui, ZHU Pinghua, et al. Frost resistance of third generation recycled concrete with different replacement rate [J]. Concrete, 2021(8): 127-132. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2021.08.029.
- [13] 梁志成. 钢纤维增强砼力学及耐久性能研究[J]. 公路与汽运, 2020(3): 81-85, 96.
- LIANG Zhicheng. Study on mechanics and durability of steel fiber reinforced concrete [J]. Highways & Automotive Applications, 2020(3): 81-85, 96.
- [14] 王志亮, 诸斌. 钢纤维混凝土三轴压缩下的强度和韧度特性[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(3): 301-305, 311. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2012.03.002.
- WANG Zhiliang, ZHU Bin. Strength and toughness characteristic of steel fiber reinforced concrete in triaxial compression [J]. Journal of Building Materials, 2012, 15 (3): 301-305, 311. DOI: 10.3969/j.issn.1007-9629.2012.03.002.
- [15] 刘杰. 钢纤维再生混凝土拉压性能及其相互关系[D]. 郑州: 郑州大学, 2016.
- LIU Jie. Study on the relationship between pressure and tensile properties of steel fiber recycled concrete [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016.
- (责任编辑: 罗容; 校对: 李脉; 英文编辑: 杜明瑞)