

引用格式:

谷悦, 刘保华, 张繁, 曹琛, 张施龙, 廖贤陵. 油菜秸秆纤维混凝土抗冻性能的试验研究[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2023, 49(5): 603–608.

GU Y, LIU B H, ZHANG F, CAO C, ZHANG S L, LIAO X L. Experimental study on the frost resistance of the rape straw fiber reinforced concrete[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2023, 49(5): 603–608.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



油菜秸秆纤维混凝土抗冻性能的试验研究

谷悦, 刘保华*, 张繁, 曹琛, 张施龙, 廖贤陵

(湖南农业大学水利与土木工程学院, 湖南 长沙 410128)

摘要: 将处理后的油菜秸秆纤维切成 10~15 mm、>15~20 mm、>20~25 mm、>25~30 mm 等 4 种长度, 以体积掺量分别为 0.2%、0.4%、0.6%、0.8% 掺入混凝土中, 进行冻融循环试验, 观察油菜秸秆纤维混凝土冻融循环 25、50、75、100 次的表现形貌, 测定其质量和动弹性模量, 研究油菜秸秆纤维长度和体积掺量对混凝土抗冻性能的影响, 并对油菜秸秆纤维混凝土的使用寿命进行预测。结果表明: 当油菜秸秆纤维长度>15~20 mm、体积掺量为 0.2% 时, 混凝土的抗剥落能力最强, 冻融循环 100 次后, 其相对动弹性模量最大, 为 93.1%, 较普通混凝土的提高 34.4%, 抗冻性能最佳; 威布尔分布模型和一元二次函数模型均能较好地反映油菜秸秆纤维混凝土的冻融损伤过程, 一元二次函数模型的拟合精度均大于 0.98; 仅考虑冻融劣化作用, 抗冻性能最佳组的油菜秸秆纤维混凝土的使用寿命约为普通混凝土的 2.4 倍, 在哈尔滨使用寿命可达 16.7 a、拉萨可达 17.3 a、石家庄可达 36.7 a、长沙可达 136.1 a、上海可达 189.3 a。

关键词: 油菜秸秆纤维混凝土; 抗冻性能; 相对动弹性模量

中图分类号: TU528.572

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2023)05-0603-06

Experimental study on the frost resistance of the rape straw fiber reinforced concrete

GU Yue, LIU Baohua*, ZHANG Fan, CAO Chen, ZHANG Shilong, LIAO Xianling

(College of Water Resources & Civil Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: The treated rape straw fiber was cut into 4 lengths of 10-15 mm, >15-20 mm, >20-25 mm and >25-30 mm, and mixed into the rape straw fiber concrete with the volume content of 0.2%, 0.4%, 0.6% and 0.8% for each fiber length respectively, which were used to carry out the freeze-thaw cycle test. The apparent morphology of the rape straw fiber reinforced concrete was observed for 25, 50, 75 and 100 freeze-thaw cycles, and its mass and dynamic elastic modulus were measured. The effects of the length and volume content of the rape straw fiber on the freeze-resistance of concrete were studied, to predict the service life of rape straw fiber reinforced concrete. The results showed that the concrete had the strongest anti-stripping ability, when the length of rape straw fiber was larger than >15-20 mm and the volume content was 0.2%. After 100 freeze-thaw cycles, its relative dynamic elastic modulus was the largest of 93.1% with the best freezing resistance, which was 34.4% higher than that of ordinary concrete. Both Weibull distribution model and one-dimensional quadratic function model could well reflect the freeze-thaw damage process of the rape straw fiber reinforced concrete. The fitting accuracy of one-dimensional quadratic function model is greater than 0.98. Considering only the effect of freeze-thaw deterioration, the service life of the rape straw fiber reinforced concrete with the best freeze-resistance was about 2.4 times that of ordinary concrete, which could meet the service life of 16.7 years in Harbin,

收稿日期: 2022-08-22

修回日期: 2023-06-20

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2019JJ60030)

作者简介: 谷悦(1997—), 女, 辽宁葫芦岛人, 硕士研究生, 主要从事混凝土材料研究, 1774629611@qq.com; *通信作者, 刘保华, 硕士, 副教授, 主要从事新型建筑材料及土木工程结构研究, bhliu@hunau.edu.cn

17.3 years in Lasha, 36.7 years in Shijiazhuang, 136.1 years in Changsha, 189.3 years in Shanghai.

Keywords: rape straw fiber reinforced concrete; frost resistance; relative dynamic modulus of elasticity

冻融破坏对混凝土的结构和使用寿命构成严重威胁^[1-4]。研究提高混凝土的抗冻性能和延长使用寿命具有重要的现实意义^[5-6]。

油菜秸秆具有粗纤维含量高、木质部纤维组织发达、表面质地坚硬、抗拉强度高和韧性优良的特性^[7-8]。研究发现,油菜秸秆纤维掺入混凝土中有阻裂、增韧、保温和提高力学性能的作用^[9-11]。有关油菜秸秆纤维混凝土性能的研究,已取得一系列有益成果。曾哲等^[12]研究表明,当油菜秸秆纤维长度为30~40 mm、体积掺量为0.1%时,混凝土的抗压强度最佳;当纤维长度为20~30 mm、体积掺量为0.2%时,混凝土的劈裂抗拉和抗折强度最优。张文俊等^[13]研究表明,当纤维长度为>30~35 mm、体积掺量为1.5%时,混凝土的抗碳化性能提升最显著。陈登等^[14]研究表明,油菜秸秆的掺入能够降低混凝土的导热系数,改善混凝土的保温性能,且粉状秸秆的改善效果优于条状秸秆。对于油菜秸秆纤维混凝土的研究主要集中在力学性能^[15]、保温性能^[16]、抗碳化性能^[17]和抗盐类侵蚀性能^[18]等方面。笔者对油菜秸秆纤维混凝土进行快速冻融循环试验,观察不同冻融循环次数下混凝土的表观形貌,测定其质量、横向基频,研究不同长度和体积掺量的油菜秸秆纤维混凝土的抗冻性能,并利用寿命预测模型预测混凝土的使用寿命,以期对油菜秸秆纤维混凝土的应用和推广提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

选取距地表200 mm以上的油菜秸秆,清洗后晒干,去除内部絮状物,并裁切成长度10~15 mm、>15~20 mm、>20~25 mm、>25~30 mm的秸秆段,置于2%的NaOH溶液中浸泡24 h^[19-20],用清水洗净后于烘箱中烘烤6 h,制得表观密度为0.34 g/cm³的油菜秸秆纤维。

混凝土材料:水泥,P·O42.5普通硅酸盐水泥;粗骨料,粒径5~20 mm连续级配的碎石;细骨料,河砂,细度模数2.47;减水剂,萘系减水剂,减水

率20%;硅灰,高活性微硅灰。

1.2 方法

1.2.1 试件制作

混凝土设计强度为C35,依据JGJ 55—2011^[21]和预备试验结果,确定混凝土用水量为176 kg/m³,经计算,水泥、砂、石质量比为1.00:1.76:3.56,水灰比为0.50。设置4种纤维长度(10~15 mm、>15~20 mm、>20~25 mm、>25~30 mm)和4种纤维体积掺量(0.2%、0.4%、0.6%、0.8%)。为确保油菜秸秆纤维在混凝土中分布均匀,避免结团或成束,采用先干拌,后逐次加水湿拌的搅拌方式:首先在卧式搅拌机加入粗骨料、细骨料,搅拌60 s,再加入水泥、减水剂、硅灰、油菜秸秆纤维,搅拌60 s,将水等分3次加入,每次搅拌30 s。搅拌完成后将拌合物装入试模,插捣振实,置于振动台振动60 s,抹平表面,养护24 h后拆模,在静水中养护28 d。

制作100 mm×100 mm×400 mm的棱柱体混凝土试件进行冻融循环试验,17组试件,每组3个,以不掺油菜秸秆纤维混凝土作对照。各组纤维长度及体积掺量见表1。

表1 油菜秸秆纤维混凝土试件的纤维长度和体积掺量
Table 1 Length and volume content of the rape straw fiber for the samples of the rape straw fiber reinforced concrete

试件	秸秆纤维体积掺量/%	秸秆纤维长度/mm
A1	0.2	10~15
A2	0.2	>15~20
A3	0.2	>20~25
A4	0.2	>25~30
B1	0.4	10~15
B2	0.4	>15~20
B3	0.4	>20~25
B4	0.4	>25~30
C1	0.6	10~15
C2	0.6	>15~20
C3	0.6	>20~25
C4	0.6	>25~30
D1	0.8	10~15
D2	0.8	>15~20
D3	0.8	>20~25
D4	0.8	>25~30
CK	0.0	

1.2.2 冻融试验

依据 GB/T 50082—2009^[22], 在 TDR-28 型混凝土快速冻融循环试验机上进行油菜秸秆纤维混凝土试件的快速冻融循环试验。取静水养护 28 d 后的试件, 擦干表面水分并称重, 使用 DT-20 混凝土动弹性模量测试仪测定混凝土试件初始横向基频, 观察表现形貌后开始冻融循环试验。分别于循环 25、50、75、100 次后取出试件, 用清水冲去表面浮渣, 擦干表面水分, 再称重, 测试横向基频, 观察表现形貌, 记录试验结果。将试件正反两面颠倒再放入试验机内, 继续进行冻融试验, 循环 100 次后, 停止试验。当相对动弹性模量低于 60% 或质量损失率大于 5% 时试件被破坏, 停止试验。

用试件质量损失率和相对动弹性模量来表征冻融损伤程度。

1.2.3 混凝土冻融损伤模型及寿命预测模型的建立

选用与混凝土较吻合的形状参数和尺度参数威布尔模型^[23]对油菜秸秆纤维混凝土的冻融损伤进行预测。对两参数威布尔公式进行变换并代入试验数据, 得到油菜秸秆纤维混凝土威布尔分布冻融损伤模型。

根据朱晨飞等^[24]的研究, 建立油菜秸秆纤维混凝土一元二次函数冻融损伤模型。

分别对油菜秸秆纤维混凝土威布尔分布冻融损伤模型和一元二次函数冻融损伤模型进行回归

拟合, 决定系数 R^2 能够衡量拟合结果的精确度。当 $0.9 < R^2 \leq 1$ 时, 表明拟合精度好; 越接近 1, 表示拟合精度越高^[25]。

根据冻融损伤模型, 可计算出油菜秸秆纤维混凝土的最大抗冻次数 N 。利用寿命预测模型^[26], 对油菜秸秆纤维混凝土的使用寿命进行预测。

室内外损伤比例系数 (S) 是达到相同损伤时标准室内冻融一次相当于天然条件下的冻融次数。中国水利水电科学研究院在北京十三陵抽水蓄能电站进行混凝土抗冻耐久性的现场试验, 得到 $S=12$ 。不同地区的环境条件千差万别, 简单的取同一数值并不合理。室内外损伤比例系数取值使用武海荣等^[27]提出的计算方法, 根据标准室内冻融速率和不同地区现场最冷月降温速率确定室内外损伤比例系数。

1.3 数据分析

采用 Excel 2016 软件对数据进行统计整理, 并进行相关回归分析。

2 结果与分析

2.1 油菜秸秆纤维长度和体积掺量对冻融混凝土外部破损的影响

经过 100 次冻融的油菜秸秆纤维混凝土的表现形貌如图 1 所示。



1 CK 试件; 2 试件 A1; 3 A2 试件; 4 A3 试件; 5 A4 试件; 6 B2 试件; 7 C2 试件; 8 D2 试件。

图 1 油菜秸秆纤维混凝土 100 次冻融循环后的表现形貌

Fig.1 Apparent morphology of the rape straw fiber reinforced concrete after 100 freeze-thaw cycles

经受 100 次冻融循环后油菜秸秆纤维混凝土的表现形貌均较为完整。普通混凝土出现表层砂浆轻微剥落、掉渣的现象(图 1-1)。A1 试件(纤维体积掺量为 0.2%、纤维长度为 10~15 mm)表面剥蚀较严重, 分布大量较大孔洞(图 1-2); A2 试件(纤维体积掺量为 0.2%、纤维长度为 >15~20 mm)表面剥蚀较轻, 虽周边粗糙不平, 但中心部位较为平整光滑, 表现形貌较普通混凝土完好(图 1-3); A3 试件(纤维体积掺量为 0.2%、纤维长度为 >20~25 mm)表面均匀分布少量较

大孔洞(图 1-4); 而相同纤维掺量的 A4 试件(纤维长度 >25~30 mm)表层砂浆严重脱落, 表面可见裸露的粗骨料, 呈蜂窝麻面形态(图 1-5)。当纤维长度 >15~20 mm 时, 随着纤维体积掺量的增多, 混凝土表面破损情况愈发严重, 其中纤维体积掺量为 0.4% 的 B2 试件表面密布较小孔洞(图 1-6); 纤维体积掺量为 0.6% 的 C2 试件表面粗糙不平, 表层纤维失去砂浆粘结, 棱角脱落(图 1-7); 纤维体积掺量为 0.8% 的 D2 试件表面粗糙不平, 可见大量裸露的纤维和粗骨料, 严重剥

落(图 1-8)。可见,油菜秸秆纤维的掺入能够提升混凝土的抗剥落性能,改善混凝土的抗冻性能,其中长度>15~20 mm、体积掺量为 0.2%的混凝土的抗冻性能最佳。

2.2 油菜秸秆纤维长度和体积掺量对冻融混凝土质量的影响

油菜秸秆纤维混凝土冻融循环作用下的质量损失率列于表 2。

表 2 冻融循环作用下油菜秸秆纤维混凝土的相对动弹性模量和质量损失率

试件	相对动弹性模量/%				质量损失率/%			
	冻融循环 25次	冻融循环 50次	冻融循环 75次	冻融循环 100次	冻融循环 25次	冻融循环 50次	冻融循环 75次	冻融循环 100次
A1	99.8	97.6	95.7	92.1	0.0	0.0	0.0	0.0
A2	100.3	98.2	96.5	93.1	0.0	0.0	0.0	0.0
A3	98.6	97.1	94.0	89.4	0.1	0.1	-0.1	-0.1
A4	97.7	96.1	92.6	87.4	0.0	0.0	-0.1	-0.1
B1	98.5	95.0	90.4	81.2	0.0	0.0	0.0	0.0
B2	99.5	97.2	93.5	86.3	0.0	-0.1	-0.2	-0.4
B3	97.8	91.3	85.9	77.4	0.0	0.0	-0.4	-0.5
B4	92.8	86.3	79.2	71.8	-0.1	-0.2	-0.4	-0.5
C1	94.3	78.1	59.6	—	0.0	0.0	0.0	0.0
C2	97.6	95.5	91.5	81.8	0.0	-0.1	-0.2	-0.3
C3	96.9	90.3	83.3	70.4	0.1	0.2	-0.5	-0.6
C4	94.9	73.8	55.3	—	-0.1	-0.2	-0.5	-0.6
D1	94.5	86.9	58.4	—	0.0	0.0	0.0	0.0
D2	96.9	93.0	89.5	85.3	0.0	0.0	-0.1	0.0
D3	94.6	87.4	81.6	68.4	0.1	0.0	-0.3	-0.3
D4	94.4	82.5	56.2	—	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3
CK	97.2	88.7	74.0	58.7	0.1	-0.1	-0.2	-0.3

“—”表示试件已破坏。

由表 2 可知,冻融后的油菜秸秆纤维混凝土质量损失小,仅 25 次、50 次冻融循环后部分试件质量下降,其余试件质量未发生变化,甚至出现了增加的现象。这是由于混凝土试件所经受的冻融循环次数较少,无大体积块体脱落,表层剥落的混凝土质量较小。但由于在冻融循环作用下,混凝土试件表面和内部均会产生裂缝,随着冻融循环次数增多,裂缝的数量逐渐增多,长度和宽度逐渐增大,裂缝之间相互贯通,环境中的水通过裂缝渗入试件内部,能够抵消试件表层脱落引起的质量下降,导致试件出现了质量不降反增现象。

由于油菜秸秆纤维混凝土质量损失率变化微小,且出现了质量不降反增的现象,存在较大误差,这也说明质量损失率并不能很好地评价混凝土的冻融损伤情况。

2.3 油菜秸秆纤维长度和体积掺量对冻融混凝土内部损伤的影响

油菜秸秆纤维混凝土冻融后,其相对动弹性模量如表 2 所示。

从表 2 可以看出,随着冻融循环次数的增多,

总体上油菜秸秆纤维混凝土的相对动弹性模量呈递减的趋势。普通混凝土 100 次冻融循环后,相对动弹性模量下降至初始值的 58.7%,低于 60%,发生冻融破坏;纤维长度>15~20 mm、体积掺量为 0.2%的 A2 试件,经受 25 次冻融循环后相对动弹性模量达到 100.3%,表明纤维混凝土仍在进行水化反应,且水化可以发挥一定的损伤自愈效用^[28];纤维长度>15~20 mm 的 A2、B2、C2、D2 试件的下降趋势最慢,100 次冻融循环后,其相对动弹性模量相比于普通混凝土分别增加了 33.4%、27.6%、23.1%、26.6%;而纤维长度>25~30 mm 的 A4、B4、C4、试件的相对动弹性模量下降速率最快。可见,当纤维长度>15~20 mm 时,混凝土相对动弹性模量达到最大,侧面反映了纤维长度>15~20 mm 的混凝土抗冻性能最佳。

纤维体积掺量为 0.2%的 A1、A2、A3、A4 试件的相对动弹性模量下降趋势平缓,100 次冻融循环后,它们的相对动弹性模量比普通混凝土的分别增加了 33.4%、34.4%、30.7%、28.7%。总体上,纤维体积掺量为 0.2%的混凝土相对动弹性模量最大,间接说明 0.2%的纤维体积掺量对混凝土抗冻性

能提升效果最好。

综上，油菜秸秆纤维能够改善混凝土的抗冻性能，当纤维长度>15~20 mm、体积掺量为 0.2%时，改善效果最佳。

3 油菜秸秆纤维混凝土冻融损伤模型的比较与寿命预测

分析冻融后的油菜秸秆纤维混凝土的表观形貌、质量损失率及相对动弹性模量，结果表明，一定长度和体积掺量的油菜秸秆纤维能够改善混凝土的抗冻性能。由于质量损失率存在较大误差，因而仅将相对动弹性模量数据代入冻融损伤模型，并借助寿命预测模型对油菜秸秆纤维混凝土的使用寿命进行预测。

3.1 油菜秸秆纤维混凝土冻融损伤模型

分别对油菜秸秆纤维混凝土威布尔分布冻融损伤模型和一元二次函数冻融损伤模型进行回归拟合，结果列于表 3、表 4。

表 3 威布尔分布冻融损伤模型拟合系数和决定系数

Table 3 Fitting coefficient and determination coefficient of Weibull distribution freeze-thaw damage model

试件	A	B	R ²
A1	2.489 9	-13.820 0	0.973 1
A2	1.937 9	-11.610 0	0.989 3
A3	1.495 5	-9.197 6	0.978 2
A4	1.248 4	-7.899 9	0.957 0
B1	1.851 9	-10.189 0	0.994 2
B2	2.469 6	-13.303 0	0.998 6
B3	1.743 7	-9.361 1	0.991 6
B4	1.069 7	-6.060 8	0.997 3
C1	1.994 5	-9.242 3	0.998 9
C2	1.441 5	-8.487 6	0.934 2
C3	1.690 1	-8.901 7	0.995 2
C4	2.249 2	-10.139 0	0.989 0
D1	1.976 1	-9.360 9	0.934 8
D2	1.166 2	-7.209 9	0.999 4
D3	1.335 4	-7.226 0	0.985 0
D4	2.053 7	-9.520 2	0.984 7
CK	2.120 5	-10.385 0	0.999 6

A、B 分别为回归方程一次项和常数项拟合系数。

表 4 一元二次函数冻融损伤模型系数和决定系数

Table 4 Coefficient and correlation coefficient of one variable quadratic function freeze-thaw damage model

试件	a	b	c	R ²
A1	-7E-06	-6E-05	1.000 8	0.994 2
A2	-8E-06	8E-05	1.001 3	0.989 7
A3	-9E-06	-0.000 1	0.998 5	0.997 1
A4	-9E-06	-0.000 3	0.997 3	0.993 2
B1	-2E-05	7E-05	0.997 9	0.995 6
B2	-2E-05	-0.000 4	0.998 7	0.997 2
B3	-1E-05	-0.001 0	1.002 5	0.995 6
B4	-1E-06	-0.002 7	0.998 7	0.999 7
C1	-5E-05	-0.001 6	1.004 1	0.996 6
C2	-2E-05	-0.000 2	0.994 1	0.981 4
C3	-2E-05	-0.000 6	0.998 6	0.997 1
C4	-5E-05	-0.002 2	1.009 4	0.986 1
D1	-9E-05	-0.001 6	0.990 7	0.983 1
D2	-2E-06	-0.001 3	1.000 5	0.999 5
D3	-2E-05	-0.001 4	0.996 2	0.991 7
D4	-8E-05	-0.000 5	0.995 9	0.997 1
CK	-4E-05	-0.000 7	1.004 2	0.997 3

a、b、c 分别为回归方程二次项、一次项和常数项拟合系数。

由表 3 和表 4 可知，威布尔分布的冻融损伤模型的决定系数均在 0.930 0 以上，一元二次函数冻融损伤模型决定系数均在 0.980 0 以上，可见一元二次函数冻融损伤模型具有更高的精度，能够更好地反映和预测油菜秸秆纤维混凝土在冻融循环过程中的损伤劣化。

3.2 油菜秸秆纤维混凝土寿命预测

在快速冻融条件下，以相对动弹性模量低于 60%作为混凝土的冻融破坏标准，将 Y=0.6 代入精度较高的一元二次函数冻融损伤模型中，可得到普通混凝土及抗冻性能最佳的 A2 组混凝土最大抗冻次数分别为 92 次和 219 次。对两组混凝土在哈尔滨、拉萨、石家庄、长沙、上海的使用寿命进行预测，结果列于表 5。

表 5 不同地区油菜秸秆纤维混凝土的预测寿命

Table 5 Life prediction of the rape straw fiber reinforced concrete in different regions

城市	年平均冻融循环次数	实验室冻融降温速率/(°C·h ⁻¹)	室外环境冻融降温速率/(°C·h ⁻¹)	使用寿命/a	
				普通混凝土	A2 试件
哈尔滨	129	12.5	1.115	7.0	16.7
拉萨	100	12.5	1.410	7.2	17.3
石家庄	78	12.5	0.825	15.4	36.7
长沙	32	12.5	0.530	57.2	136.1
上海	23	12.5	0.530	79.5	189.3

年平均冻融循环次数取自文献[29]；冻融降温速率取自文献[27]；室外环境冻融降温速率取中间值。

从表5可以看出,仅考虑冻融劣化作用,基于实验室模拟结果,纤维混凝土的使用寿命约为普通混凝土的2.4倍,油菜秸秆纤维明显改善混凝土的抗冻性能。纤维长度>15~20 mm、体积掺量为0.2%的纤维混凝土在华中及东部地区的使用寿命明显高于东北、华北和西南地区。能够满足华中和东部地区耐用年限100 a以上的重要建筑和高层建筑、华北地区耐用年限为25~50 a的次要建筑、东北和西南地区耐用年限为15 a以下的临时建筑的要求。

参考文献:

- [1] 孟博旭,许金余,彭光. 纳米碳纤维增强混凝土抗冻性能试验[J]. 复合材料学报, 2019, 36(10): 2458-2468.
- [2] 邓宗才,张鹏飞,刘爱军,等. 高强度纤维素纤维混凝土抗冻融性能试验研究[J]. 公路, 2009, 54(7): 304-308.
- [3] CAVDAR A. Investigation of freeze - thaw effects on mechanical properties of fiber reinforced cement mortars[J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 58: 463-472.
- [4] KOSIOR-KAZBERUK M, BERKOWSKI P. Surface scaling resistance of concrete subjected to freeze-thaw cycles and sustained load[J]. Procedia Engineering, 2017, 172: 513-520.
- [5] 高蕾,陈拴发. 配合比设计参数对高性能混凝土抗冻性敏感特性的影响[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(4): 27-31.
- [6] 潘钢华,孙伟,姜阳. 高强混凝土抗冻性的理论和实验研究[J]. 硅酸盐学报, 1999, 27(6): 637-643.
- [7] 甘国渝,邹家龙,陈曦,等. 中国油菜生产格局与施肥研究现状[J]. 湖北农业科学, 2022, 61(1): 5-11.
- [8] 宋新南,房仁军,王新忠,等. 油菜秸秆资源化利用技术研究[J]. 自然资源学报, 2009, 24(6): 984-991.
- [9] 陈兵,刘宁. 基于磷酸镁水泥的植物茎秆增强混凝土试验研究[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(6): 1046-1050.
- [10] 刘巧玲,刘保华,张强. 油菜秸秆纤维混凝土力学性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2012(12): 51-53.
- [11] 耿睿,姚勇,褚云朋,等. 秸秆纤维混凝土力学性能影响因素分析[J]. 混凝土与水泥制品, 2017(12): 54-56.
- [12] 曾哲,刘保华,张文俊,等. 低掺量油菜秸秆纤维混凝土力学性能试验研究[J]. 中国农业科技导报, 2019, 21(6): 117-123.
- [13] 张文俊,刘保华,周文,等. 油菜秸秆纤维混凝土抗碳化性能的试验研究[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(1): 96-100.
- [14] 陈登,宋旭艳,姜正平,等. 秸秆与粉煤灰复掺对混凝土性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(4): 100-103.
- [15] 宋星宇,姚勇,褚云朋,等. 油菜秸秆和粉煤灰对砂浆性能影响因素分析[J]. 混凝土与水泥制品, 2018(5): 48-52.
- [16] 曾哲,刘巧玲,刘保华,等. 油菜秸秆纤维混凝土保温性能试验研究[J]. 中国农学通报, 2018, 34(35): 130-134.
- [17] 刘巧玲,张文俊. 温湿度对油菜秸秆混凝土抗碳化性能影响试验研究[J]. 中阿科技论坛(中英文), 2021(10): 88-90.
- [18] 黄伟,刘保华,齐臻,等. 油菜秸秆灰分混凝土抗硫酸盐的侵蚀性能[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2016, 42(2): 222-224.
- [19] BLEDZKI A K, REIHMANE S, GASSAN J J. Properties and modification methods for vegetable fibers for natural fiber composites[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1996, 59(8): 1329-1336.
- [20] 杨政险,李慷,张勇,等. 天然植物纤维预处理方法对水泥基复合材料性能的影响研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2022, 50(2): 522-532.
- [21] JGJ 55—2011 普通混凝土配合比设计规程[S].
- [22] GB/T 50082—2009 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准[S].
- [23] 徐存东,李智睿,连海东,等. 冻融循环下玄武岩纤维混凝土的耐久性寿命预测[J]. 混凝土, 2022(1): 1-6.
- [24] 朱晨飞,刘晓军,李文哲,等. 混杂纤维混凝土冻融耐久性与损伤模型研究[J]. 工业建筑, 2015, 45(2): 10-14.
- [25] 丁思统. 威布尔(Weibull)分布及其拟合[J]. 江西农业大学学报, 1985, 7(3): 45-52.
- [26] 李金玉,彭小平,邓正刚,等. 混凝土抗冻性的量化设计[J]. 混凝土, 2000(12): 61-65.
- [27] 武海荣,金伟良,延永东,等. 混凝土冻融环境区划与抗冻性寿命预测[J]. 浙江大学学报(工学版), 2012, 46(4): 650-657.
- [28] 康天蓓,金立伟,周静海,等. 基于超声检测的废弃纤维再生混凝土弹性模量试验研究[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(8): 3248-3253.
- [29] 李晔,姚祖康,孙旭毅,等. 铺面水泥混凝土冻融环境量化研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2004, 32(10): 1408-1412.

责任编辑: 罗慧敏
英文编辑: 吴志立