

引用格式:

张文俊, 刘保华, 周文, 赵志华, 肖宏, 叶煜飘, 陈礼德. 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.

ZHANG W J, LIU B H, ZHOU W, ZHAO Z H, XIAO H, YE Y P, CHEN L D. Experimental study on carbonation resistance of rape straw fiber concrete[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2021, 47(1): 96-100.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



油菜秸秆纤维混凝土抗碳化性能的试验研究

张文俊¹, 刘保华^{1*}, 周文², 赵志华³, 肖宏¹, 叶煜飘¹, 陈礼德¹

(1.湖南农业大学水利与土木工程学院, 湖南 长沙 410128; 2.湖南省农业装备研究所, 湖南 长沙 410125; 3.湖南省衡阳市农业技术服务中心, 湖南 衡阳 421001)

摘要: 运用正交试验, 制作油菜秸秆纤维混凝土试件, 探究水灰比(0.45、0.50、0.55、0.60)、油菜秸秆纤维长度(15~20、>20~25、>25~30、>30~35 mm)和秸秆纤维体积掺量(0.50%、1.00%、1.50%、2.00%)对油菜秸秆纤维混凝土抗碳化性能的影响。极差分析结果表明, 3 因素对油菜秸秆混凝土抗碳化性能影响的大小依次为水灰比、秸秆纤维长度、秸秆纤维体积掺量, 最优组合为水灰比 0.45、秸秆纤维长度为 >30~35 mm、秸秆纤维体积掺量 1.50%。取最优水平组试件作电镜扫描观察, 发现油菜秸秆纤维的掺入, 能够改善水泥浆体内部孔隙结构, 使混凝土碳化深度最多可减小 35.31%, 从而提高混凝土的抗碳化性能。采用最小二乘法回归分析建立的油菜秸秆纤维混凝土碳化深度预测模型, 验证离散系数接近 0.05。

关键词: 油菜秸秆纤维混凝土; 水灰比; 纤维长度; 纤维体积掺量; 模型; 碳化

中图分类号: TU502^{+.4}

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2021)01-0096-05

Experimental study on carbonation resistance of rape straw fiber concrete

ZHANG Wenjun¹, LIU Baohua^{1*}, ZHOU Wen², ZHAO Zhihua³, XIAO Hong¹, YE Yupiao¹, CHEN Lide¹

(1.College of Water Resources and Civil Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2.Hunan Agricultural Equipment Research Institute, Changsha, Hunan 410125, China; 3.Hunan Hengyang Agricultural Technical Service Center, Hengyang, Hunan 421001,China)

Abstract: Under the condition of orthogonal test, rapeseed straw fiber concrete specimen were made to study the influence of water-cement ratio(0.45, 0.50, 0.55, 0.60), straw fiber length(15~20 mm, >20~25 mm, >25~30 mm, >30~35 mm) and straw fiber volume content(0.50%, 1.00%, 1.50%, 2.00%)on the carbonation depth of rape straw fiber concrete. The orthogonal test result shows that the influence of the three variables on the carbonization resistance of rape straw fiber concrete is water-cement ratio, straw fiber length and straw fiber volume content. The optimal level for carbonization resistance of rape straw fiber concrete is the water-cement ratio of 0.45, the straw fiber length of 30-35 mm, and the straw fiber volume content of 1.50%. The electron microscope scanning observation was found that the addition of straw into ordinary concrete could improve the microporous structure of cement slurry, so that the carbonation depth of concrete can be reduced by up to 35.31%, which indicates its carbonization resistance improves. The carbonation depth prediction model of rape straw fiber concrete was built through regression analysis of the least square method, and it was verified that the dispersion coefficient is close to 0.05.

收稿日期: 2020-03-12

修回日期: 2020-12-04

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2019JJ60030); 衡阳市农机局项目(2018XNY-JS151)

作者简介: 张文俊(1992—), 女, 山西吕梁人, 硕士研究生, 主要从事土木工程建筑材料研究, hunanzhangwenjun@163.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

Keywords: rape straw fiber concrete; water-cement ratio; fiber length range; fiber volume content; model; carbonization

杨惠芬^[1]研究发现,混凝土中掺入稻草纤维微粒,其抗压性能、劈裂抗拉性能及抗折(抗弯拉)性能都会降低,但韧性和抗冲击性能有所提高。刘巧玲等^[2]将油菜秸秆粉碎掺入素混凝土中,发现大量掺入油菜秸秆导致混凝土抗压强度降低。张强等^[3]将油菜秸秆灰分掺入普通混凝土中,发现混凝土抗压强度有所降低,但刘保华等^[4]的研究结果显示油菜秸秆灰分的掺入可使混凝土的保温性能有一定提高。曾哲等^[5-6]研究发现,当纤维长度30~40 mm、体积掺量0.1%时,混凝土抗压强度性能最好;当纤维长度20~30 mm、体积掺量0.2%时,劈裂抗拉和抗折强度性能最好;秸秆纤维掺量为2.5%的混凝土试件比秸秆纤维掺量为0的混凝土试件的导热系数均降低了30%左右。除力学性能和保温性能外,耐久性是评价混凝土使用寿命的重要指标,而碳化(空气中CO₂渗入混凝土与水化产物Ca(OH)₂反应生成CaCO₃和H₂O的过程)作为影响混凝土耐久性的的重要因素,会使混凝土碱度降低,混凝土孔溶液中氢离子数量增加,减弱了混凝土对钢筋的保护作用,使混凝土构件在工程长期服役过程中的使用功能受到严重影响^[7-10]。对普通混凝土抗碳化性能的研究表明:水灰比的影响极其显著。蒋利学^[11]发现大水灰比使混凝土孔隙中的游离水增多,有利于碳化反应。HOUST等^[12]研究表明,水灰比从0.4增长至0.8时,混凝土中的气体扩散系数将增长至少10倍。还有研究表明,水灰比在0.55以下时,基本上可以保证混凝土的抗碳化能力^[13]。方璟等^[14]研究发现,水灰比与碳化深度有明显的相关性。

笔者以水灰比、秸秆纤维长度和秸秆纤维体积掺量为变量,设计正交试验,通过测试油菜秸秆纤维混凝土试件的碳化深度,探究3个因素对混凝土抗碳化性能的影响。运用最小二乘法建立了油菜秸秆纤维混凝土的碳化深度预测模型。

1 材料和方法

1.1 油菜秸秆纤维的制备

取油菜距地表200 mm的秸秆,洗净,85℃烘

烤4 h,冷却后去芯,将保留的秸秆表面纤维部分处理成15~20、>20~25、>25~30、>30~35 mm等4种长度。采用2%的NaOH溶液浸泡^[15-16],以防秸秆纤维木质素在水泥浆中降解析出。排液法测得油菜秸秆纤维的表观密度为0.34 g/cm³。

1.2 制作油菜秸秆纤维混凝土试件

依照GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法标准》^[17],制作尺寸为100 mm×100 mm×400 mm的棱柱体非标准试件。使用CCB-70W混凝土碳化试验箱进行快速碳化试验,用测量精度为0.1 mm的游标卡尺测量混凝土试件养护3、7、14、28 d的碳化深度。对最优组28 d龄期试件进行电镜扫描,观察其内部孔隙结构。

混凝土试件采用强度等级为42.5MPa的世立牌快硬硫铝酸盐水泥^[18],细度模数为2.47的河砂。根据GB/T 14685—2011《建设用碎石卵石》^[19]并结合工程经验,不同单粒径卵石、碎石混合使用,碎石粒径9.5~16 mm、>20~26.5 mm,卵石粒径2.36~4.75 mm、>4.75~10 mm。萘系减水剂减水率为20%,掺量为水泥用量的1%;用5%水泥用量的硅灰(四川朗天牌)等量替代水泥^[20]。

1.3 混凝土碳化试验

以水灰比(0.45、0.50、0.55、0.60)、秸秆纤维长度(15~20、>20~25、>25~30、>30~35 mm)和秸秆纤维体积掺量(0.50%、1.00%、1.50%、2.00%)为变量设计正交试验(表1);参照JGJ 55—2011《普通混凝土配合比设计规程》^[21],进行配合比设计,计算每立方米材料用量(表2)。

表1 正交试验因素和水平

Table 1 Factors and levels			
水平编码	水灰比	秸秆纤维长度/mm	秸秆纤维体积掺量/%
1	0.45	15~20	0.50
2	0.50	>20~25	1.00
3	0.55	>25~30	1.50
4	0.60	>30~35	2.00

表 2 油菜秸秆纤维混凝土材料用量

水灰比	材料用量/(kg·m ⁻³)						
	水	水泥	砂	石	硅灰	减水剂	秸秆纤维
0.45	200	422.3	613	1304	22.2	4.22	18.18
0.50	200	380.0	622	1324	20.0	3.80	36.36
0.55	200	345.5	631	1342	18.2	3.45	54.54
0.60	200	316.7	638	1357	16.7	3.17	72.72

正交试验共 20 组, 每组 3 个, 共制作 60 个试件。按水灰比水平编码、秸秆纤维长度水平编码和秸秆纤维体积掺量水平编码顺序对试件进行编号, 编号中后 2 个数字为 0 时表示未掺入秸秆纤维。

2 结果与分析

2.1 油菜秸秆纤维混凝土的碳化深度

油菜秸秆纤维混凝土试件养护 3、7、14、28 d 的碳化深度测定结果列于表 3。

表 3 正交试验秸秆纤维混凝土试件的碳化深度

试验号	混凝土试件碳化深度/mm			
	3 d	7 d	14 d	28 d
1-0-0	9.46	12.18	15.67	23.39
1-1-1	8.68	11.64	16.50	22.95
1-2-2	7.55	11.33	15.35	21.44
1-3-3	7.68	10.12	14.95	21.33
1-4-4	6.12	10.67	12.86	18.24
2-0-0	7.63	11.00	13.69	21.82
2-2-1	7.19	10.30	17.54	23.88
2-1-2	8.39	12.54	13.42	25.35
2-4-3	7.58	11.11	14.78	19.36
2-3-4	8.22	10.47	15.82	22.26
3-0-0	10.47	15.20	18.00	26.84
3-3-1	9.00	12.67	16.65	25.80
3-4-2	8.53	10.21	14.90	21.50
3-1-3	9.17	12.50	20.16	29.56
3-2-4	9.60	13.50	19.22	25.93
4-0-0	11.24	16.39	19.17	28.33
4-4-1	9.93	14.63	17.50	25.43
4-3-2	9.39	14.83	19.17	28.94
4-2-3	10.33	15.09	19.04	30.79
4-1-4	11.85	16.33	22.15	32.27

对比水灰比 0.45 组 3 d 混凝土碳化深度, 掺入秸秆纤维后, 混凝土试件碳化深度相比基准混凝土试件碳化深度 9.46 mm, 分别减小了 8.25%、20.19%、18.82%、35.31%。对其他水灰比组 3 d 碳化深度进行对比计算, 发现 1-4-4 试件碳化深度值减小 35.31%, 减小程度最大。表明油菜秸秆纤维的掺入能够明显提高混凝土的抗碳化性能。

对混凝土养护 7 d 的碳化深度进行极差分析, 结果如表 4 所示。

表 4 油菜秸秆纤维混凝土养护 7 d 碳化深度极差分析

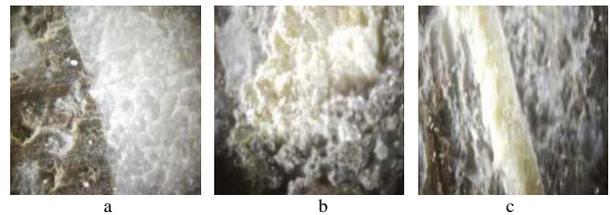
项目	水灰比	秸秆纤维长度	秸秆纤维体积掺量
y_{j1}	43.76	53.01	49.24
y_{j2}	44.42	50.22	48.91
y_{j3}	48.88	48.06	48.82
y_{j4}	60.88	46.59	50.97
\bar{y}_{j1}	10.94	13.25	12.31
\bar{y}_{j2}	11.11	12.56	12.23
\bar{y}_{j3}	12.22	12.01	12.21
\bar{y}_{j4}	15.22	11.65	12.74
R_j	4.28	1.60	0.53

y_{ji} 为 j 因素 i 水平所对应的碳化深度值之和; y_{ji} 为 j 因素 i 水平所对应碳化深度值的平均数; R_j 为 j 因素的极差。

对比 R_j 值, 可知 3 因素对油菜秸秆混凝土抗碳化性能影响大小依次为水灰比、秸秆纤维长度、秸秆纤维体积掺量。对于油菜秸秆纤维混凝土抗碳化性能 3 因素的最优水平组合为水灰比 0.45、秸秆纤维长度 >30~35 mm、秸秆纤维体积掺量 1.50%。

2.2 秸秆纤维混凝土试件的微观结构

选取抗碳化性能最优组(水灰比为 0.45、秸秆纤维长度 >30~35 mm、秸秆纤维体积掺量 1.50%)碳化 28 d 后的混凝土试件与基准混凝土试件(水灰比为 0.45), 采用 SEM 电镜扫描测试, 放大 400 倍, 结构如图 1 所示。



a 未掺油菜秸秆纤维的基准试件断面; b 秸秆纤维垂直于剖切方向的试件断面; c 秸秆纤维平行于剖切方向的试件断面。

图 1 油菜秸秆纤维混凝土试件电镜扫描结果

Fig.1 SEM scan results of straw fiber concrete specimen

图 1-b 中, 黄色区域为油菜秸秆纤维, 其余为混凝土水泥浆体, 比图 1-a 秸秆纤维与浆体交界处孔隙率明显增大; 图 1-c 相比图 1-a, 混凝土浆体孔隙率明显增大。这是由于油菜秸秆纤维吸收了浆体中部分水分, 使混凝土体系中水化产物减少, 使混凝土浆体孔隙率增大^[22]; 同时秸秆纤维为微孔结构材料, 水化物浆体产生和硬化过程中减小了浆体的平均孔径, 增加了混凝土内部的连续性, 改善了

其内部孔隙结构,使混凝土抗碳化性能得到提高。

2.3 油菜秸秆纤维混凝土碳化深度预测模型

参考文献[23],普通混凝土碳化深度与碳化时间平方根成正比,即 $y=k\sqrt{t}$,笔者建立基于水灰比、秸秆纤维长度、秸秆纤维体积掺量的油菜秸秆纤维混凝土碳化深度预测模型。

$$D=k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \sqrt{t}。$$

其中: D 为油菜秸秆纤维混凝土碳化深度(mm); k_1 为秸秆纤维体积掺量影响系数; k_2 为秸秆纤维长度影响系数; k_3 为水灰比影响系数; t 为碳化时间(d)。

采用最小二乘法对油菜秸秆纤维混凝土养护3、7、14 d的碳化深度进行回归分析,得:

$$k_1=22.6S+1.279, R_1=0.105;$$

$$k_2=2 \times 10^{-3}L+0.914, R_2=0.171;$$

$$k_3=9.395B, R_3=0.904。$$

即基于水灰比、秸秆纤维长度、秸秆纤维体积掺量的油菜秸秆纤维混凝土碳化深度预测模型为:

$$D=(22.6S+1.279) \cdot (2 \times 10^{-3}L+0.914) \cdot 9.395B \sqrt{t}。$$

其中: S 为秸秆纤维体积掺量(%); L 为秸秆纤维长度(取最大值)(mm); B 为水灰比; t 为碳化时间(d)。

通过模型计算各组试件28 d碳化深度值,并得到与28 d碳化深度实际测量值的比值,如表5所示。

表5 试件28 d碳化深度计算值与实测值

Table 5 Calculated value and measured value of 28 d carbonation depth

试验组号	碳化深度/mm		
	计算值	实测值	计算值/实测值
1-1-1	24.88	22.95	1.084 1
1-2-2	22.70	21.44	1.058 8
1-3-3	20.48	21.33	0.960 2
1-4-4	18.20	18.24	0.997 8
2-2-1	24.96	23.88	1.045 2
2-1-2	27.93	25.35	1.101 8
2-4-3	20.02	19.36	1.034 1
2-3-4	22.99	22.26	1.032 8
3-3-1	24.51	25.80	0.950 0
3-4-2	21.79	21.50	1.013 5
3-1-3	31.04	29.56	1.050 1
3-2-4	28.32	25.93	1.092 2
4-4-1	23.53	25.43	0.925 3
4-3-2	27.02	28.94	0.933 7
4-2-3	30.58	30.79	0.993 2
4-1-4	34.21	32.27	1.160 1

碳化深度计算值与实测值的比值平均为1.020 8,标准差0.056 1。离散系数0.054 9。考虑混凝土浇筑、养护和测量误差等因素的影响,碳化深度实测值与计算值之间会存在一定偏差^[24],结果显示离散系数接近0.05,说明预测模型基本可以用于工程实际。

参考文献:

- [1] 杨惠芬. 稻草纤维微粒混凝土的物理力学性能试验分析[J]. 四川水泥, 2016(11): 260-261.
YANG H F. Experimental analysis of physical and mechanical properties of straw fiber particulate concrete[J]. Sichuan Cement, 2016 (11): 260-261.
- [2] 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.
LIU Q L, LIU B H, ZHANG Q. Study on mechanical properties of rape straw fiber concrete[J]. China Concrete and Cement Product, 2012 (12): 51-53.
- [3] 张强, 刘保华, 刘巧玲, 等. 双掺油菜秸秆灰分和硅粉对混凝土性能的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2014, 40(3): 334-336.
ZHANG Q, LIU B H, LIU Q L, et al. Effect of rape straw ash and silica fume admixture on concrete performance[J]. Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2014, 40(3): 334-336.
- [4] 刘保华, 易恋, 曾哲, 等. 油菜秸秆灰分混凝土保温性能试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2018, 44(3): 330-333.
LIU B H, YI L, ZENG Z, et al. Experimental research on thermal insulation properties of the rape straw ash concrete[J]. Hunan Agricultural University (Natural Science), 2018, 44(3): 330-333.
- [5] 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.
ZENG Z, LIU B H, ZHANG W J, et al. Experimental study on mechanical properties of low-volume rape straw fiber concrete[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2019, 21 (6): 117-123.
- [6] 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.
ZENG Z, LIU Q L, LIU B H, et al. The experimental research on thermal insulation properties of rape straw fiber concrete[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34 (35): 130-134.
- [7] MEHTA P K, MONTEIROP J. 混凝土微观结构、性能和材料[M]. 覃维祖, 王栋民, 丁建彤, 译. 北京: 中国电力出版社, 2008: 78-79.
MEHTA P K, MONTEIROP J. Concrete Microstructure, Properties and Materials[M]. QIN W Z, WANG D M, DING J M, translated. Beijing: China Electric Power Press, 2008: 78-79.

- [8] 尹海朋, 关军, 王践诺, 等. 近年来混凝土碳化较快原因分析[J]. 商品混凝土, 2009(8): 62-63.
YIN H P, GUAN J, WANG J N, et al. Analysis of reasons for rapid carbonization in recent years[J]. Commercial Concrete, 2009(8): 62-63.
- [9] 傅晓松, 崔兆充, 邱红霞. 塔里木灌区混凝土碳化问题的思考[J]. 水利规划与设计, 2010(3): 57-59.
FU X S, CUI Z C, QIU H X. Consideration on carbonization of concrete in Tarim irrigation area[J]. Water Resources Planning and Design, 2010(3): 57-59.
- [10] 唐明述. 预防碳化提高钢筋混凝土的耐久性[J]. 商品混凝土, 2011(9): 29-34.
TANG M S. Prevent carbonization to improve the durability of enforced concrete[J]. Ready-mixed Concrete, 2011(9): 29-34.
- [11] 蒋利学. 混凝土碳化深度的计算模型及实验研究[D]. 上海: 同济大学, 1996.
JIANG L X. Calculation model and experimental study of concrete carbonation depth[D]. Shanghai: Tongji University, 1996.
- [12] HOUST Y F, WITTMANN F H. Influence of porosity and water content on the diffusivity of CO₂ and O₂ through hydrated cement paste[J]. Cement and Concrete Research, 1994, 24(6): 1165-1176.
- [13] 杨军. 混凝土的碳化性能与气渗性能研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2004.
YANG J. Study on carbonation and the air permeability of concrete[D]. Qingdao, China: Shandong University of Science and Technology, 2004.
- [14] 方璟, 梅国兴, 陆采荣. 影响混凝土碳化主要因素及钢筋锈蚀试验研究[J]. 混凝土, 1993(2): 23-26.
FANG J, MEI G X, LU C R. Study on the main factors affecting concrete carbonation and corrosion test of steel bars[J]. Concrete, 1993(2): 23-26.
- [15] ALEXANDER M G, DAVIS D E. Influence of aggregate on the compressive strength and elastic modulus of concrete[J]. Civil Engineer in South Africa, 1992, 34(5): 161-170.
- [16] HOLMER S, VAHAN A, ADRIANA M NOLASCO, et al. Plant fibre reinforced cement components for roofing[J]. Construction and Building Materials, 1999, 13(8): 433-438.
- [17] GB/T 50082—2009 普通混凝土长期性能和耐久性试验方法标准[S].
GB/T 50082—2009 Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete[S].
- [18] 夏天. 秸秆混凝土力学性能试验研究及密肋复合墙体有限元分析[D]. 长春: 吉林建筑大学, 2014.
XIA T. Experimental research on mechanical properties of straw concrete and finite element analysis of multi-ribbed composite wall[D]. Changchun: Jilin Jianzhu University, 2014.
- [19] GB/T 14685—2011 建设用碎石卵石[S].
GB/T 14685—2011 Pebble and crushed stone for building[S].
- [20] GB 50119—2003 混凝土外加剂应用技术规范[S].
GB 50119—2003 Code for concrete admixture application[S].
- [21] JGJ 55—2011 普通混凝土配合比设计规程[S].
JGJ 55—2011 Specification for mix proportion design of ordinary concrete[S].
- [22] 张长森, 刘学军, 荀和生, 等. 建筑垃圾-秸秆-镁水泥墙体保温材料的试验研究[J]. 混凝土, 2011(1): 78-80.
ZHANG C S, LIU X J, XUN H S, et al. Study on the preparation of wall in solution materials with construction waste, straw and magnesite oxychloride recement[J]. Concrete, 2011(1): 78-80.
- [23] 吴建华, 张亚梅, 孙伟. 混凝土碳化模型和试验方法综述及建议[J]. 混凝土与水泥制品, 2008(6): 1-7.
WU J H, ZHANG Y M, SUN W. Review and recommendations of concrete carbonization models and test methods[J]. China Concrete and Cement Products, 2008(6): 1-7.
- [24] 张海燕. 混凝土碳化深度的试验研究及其数学模型建立[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006.
ZHANG H Y. The experimentation study of concrete carbonation depth and mathematics model founded[D]. Yangling, China: Northwest A & F University, 2006.

责任编辑: 罗慧敏

英文编辑: 罗维