

掺入钢纤维对混凝土塑性收缩开裂的影响研究*

徐蕾

(新疆工程学院 土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830023)

摘要: 混凝土在干燥环境中会产生自然收缩, 当收缩受到抑制时产生张应力, 从而产生塑性收缩裂缝. 为了减少混凝土塑性收缩开裂, 通过在混凝土中添加3种不同体积、不同长径比的钢纤维, 在56 MPa和73 MPa两种不同抗压强度水平下进行了塑性收缩实验, 对纤维体积和钩型钢纤维的长径比对混凝土塑性收缩开裂及其它性能的影响进行了研究. 结果表明: 掺入钢纤维可以显著增强混凝土的抗塑性收缩开裂性能, 总塑性收缩裂纹面积与纤维体积之间存在较好的对应关系, 但掺入钢纤维在新拌和硬化状态下会对混凝土某些其它性能产生不利影响.

关键词: 高强度混凝土; 塑性开裂; 渗出; 钢纤维

DOI: 10.13568/j.cnki.651094.651316.2022.10.29.0001

中图分类号: TU362 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-7675(2023)04-0492-06

引文格式: 徐蕾. 掺入钢纤维对混凝土塑性收缩开裂的影响研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文), 2023, 40(4): 492-497.

英文引文格式: XU Lei. Experimental study of shear strength of brick masonry walls assembled with different types of mortar[J]. Journal of Xinjiang University(Natural Science Edition in Chinese and English), 2023, 40(4): 492-497.

Experimental Study of Shear Strength of Brick Masonry Walls Assembled with Different Types of Mortar

XU Lei

(College of Civil Engineering, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi Xinjiang 830023, China)

Abstract: Concrete undergoes natural shrinkage in a dry environment, and when shrinkage is suppressed, tensile stress is generated, resulting in plastic shrinkage cracks. In order to reduce plastic shrinkage cracking of concrete, plastic shrinkage experiments were conducted by adding three types of steel fibers with different volumes and length to diameter ratios to concrete at two different compressive strength levels of 56 MPa and 73 MPa. The effects of fiber volume and length to diameter ratio of hooked steel fibers on plastic shrinkage cracking and other properties of concrete were studied. The research results indicate that the addition of steel fibers can significantly enhance the plastic shrinkage cracking resistance of concrete. There is a good correspondence between the total plastic shrinkage crack area and fiber volume, but the addition of steel fibers in the newly mixed and hardened state can have adverse effects on certain other properties of concrete.

Key words: high strength concrete; plastic cracking; exudation; steel fiber

0 引言

塑性收缩开裂是常见于大表面积混凝土构件的主要问题, 如桥面板、地坪板、隧道衬砌、薄表面修复和楼面板等, 通常发生在尚未凝固达到足够的拉伸强度之前的早期阶段, 因为水分从混凝土表面蒸发的速度超过其被下部的水分取代的速度, 使得混凝土易于收缩, 混凝土收缩程度取决于诸多因素, 包括材料特性、环境温度和相对湿度、混凝土在干燥环境下的年限以及结构尺寸, 当这种收缩被限制时, 混凝土将产生裂缝以释放所累积的拉伸应力, 塑性开裂会导致混凝土耐久性严重下降, 通过在混凝土中添加随机分布的短离散纤维可降低其脆性, 预防塑性开裂的发生^[1-4].

纤维对混凝土机械性能的影响取决于纤维的体积、长度比以及水泥基体与纤维之间的粘结力^[5-8]. Sivakumar等^[9]研究了用于控制高强度硅粉混凝土的塑性收缩裂缝的掺量为0.5%钢纤维和非钢纤维混合组合性能, 发现混

* 收稿日期: 2022-10-29

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金“基于地震倒塌率目标的ECC新型抗震结构设计方法研究”(2022D01A53).

作者简介: 徐蕾(1979-), 女, 硕士, 副教授, 主要从事钢筋混凝土抗震结构及材料的研究, E-mail: xulijun612@163.com.

合纤维混凝土显示出比单独钢纤维更好的抗裂性能, 并且随着非钢纤维添加量的增加, 总裂缝面积相应减小, 与普通混凝土相比, 塑性收缩裂缝减少了50%~99%, 钢-聚酯组合使得裂缝降低了99%, 而钢-玻璃纤维组合性能不佳, 这是由于玻璃的高刚度不能在低应力水平下起作用, 从而导致早期裂纹. 曾国东等^[10]研究了花岗岩石粉、粉煤灰对混凝土工作性、抗压强度、早期塑性抗裂性能的影响规律, 发现掺合料品种、掺量对混凝土早期塑性开裂性能影响差异显著, 15%~20%掺量的粉煤灰或15%掺量的花岗岩石粉能有效降低混凝土早期开裂风险. 徐蕾^[11]对含短亚麻纤维的小份砂浆样品的限制性和无限制性塑性收缩性能进行了实验研究, 发现亚麻纤维在控制混合砂浆限制性塑性收缩方面, 比市场所售的聚丙烯和玻璃纤维更为有效, 当亚麻纤维的体积分数处于0.3%时, 与普通砂浆相比, 产生的裂缝总面积至少减少了99.5%, 最大裂缝宽度不到0.022 mm, 比以往减少了98.5%. Banthia等^[12]研究了聚丙烯纤维直径、纤维长度和几何形状对混凝土塑性收缩的影响, 使用3种单丝和1种原纤化聚丙烯纤维, 结果表明: 较长的纤维在减少裂缝面积、最大裂缝宽度和裂缝数量方面更为有效; 较细的纤维比粗的纤维在抵抗塑性开裂方面更为有效, 因为细纤维具有更大的表面积, 可与胶结基体结合, 因此将更多的拉应力转移到纤维上.

本文主要研究掺入端钩形钢纤维的纤维体积和长径比对普通和高强度混凝土塑性收缩开裂性能的影响, 以及纤维体积与塑性收缩裂缝长度、宽度和面积之间的关系.

1 实验方案

1.1 所用材料

钢纤维增强混凝土 (SFRC) 混合物由普通硅酸盐水泥、粉碎石灰石骨料、高效减水剂和3种不同长径比 (55、65和80) 的钩端钢纤维制成; 骨料分为1、2、3、4级, 尺寸分别为20、14、10、5 mm, 比重分别为2.68、2.67、2.68、2.68; 高效减水剂的用量为水泥重量的0.8%; 掺入的纤维分别按0.5%、1.0%和1.5% (按混凝土体积计) 添加.

1.2 混合比例和混合程序

改性混凝土的比例见表1. 将骨料和水泥拌和30 s后, 添加钢纤维拌和30 s, 然后在15 s内加入水 (含高效减水剂), 继续拌和2 min.

表 1 混凝土混合物的掺和比例及掺和物名称

混凝土系列	水泥 /kg·m ⁻³	高效减水剂 /kg·m ⁻³	水 /kg·m ⁻³	水灰比	粗骨料/kg·m ⁻³			细骨料/kg·m ⁻³
					类型1/20 mm	类型2/14 mm	类型3/10 mm	类型4/<5 mm
A	450	3.60	241	0.54	202	369	353	756
B	560	4.48	239	0.43	190	347	331	708

使用稠度计评估新拌混凝土的可使用性, 记录混凝土试样单位重量后通过振动台将所有样品压在模具中. 使用两块840 mm×540 mm×40 mm矩形塑性收缩实验板 (胶合板基础金属边缘), 暴露于相同的环境条件下 (图1), 测试期间温度在24~27 °C、相对湿度保持在(60±5)%、风扇风速为18 km/h, 将水加到所有实验板的混凝土搅拌机中的干料中之后, 启动风机25 min. 塑性收缩裂缝的测定程序如下: 混合后, 将新拌混凝土放入平板模具中, 用直尺抹平混凝土表面, 再用抹刀进一步平滑至表面平滑光洁, 等渗出水开始蒸发后进行抹灰. 在混凝土浇筑5.5 h后手持显微镜和求积仪分别测量裂缝宽度和裂缝长度, 通过每张试件总裂缝长度乘以平均裂缝宽度的乘积之和计算总裂缝面积.

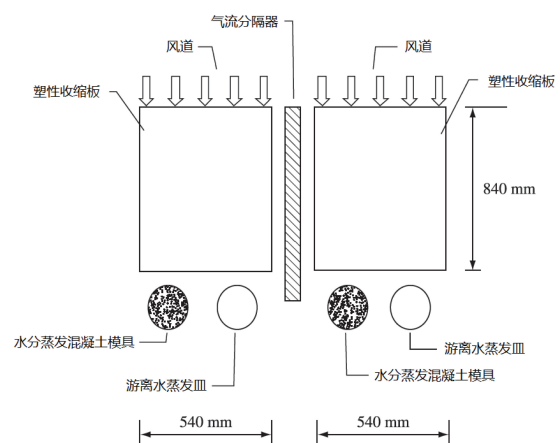


图 1 塑性收缩实验板

2 实验结果和讨论

2.1 新拌混凝土

A、B两组混凝土的维勃实验测定时间、湿密度、抗压强度和渗水量测试的结果见表2. 随着纤维体积的增加,所有长径比的维勃时间都会增加. 对于所有混凝土系列,纤维体积的增加也会略微增加混凝土的湿密度.

表 2 混凝土拌合物稠度测定时间、湿密度、抗压强度和渗水量实验结果

系列	长径比	纤维体积/%	维勃时间/s	湿密度/kg·m ⁻³	渗水量/mL	28天抗压强度/MPa
A	-	0.0	2.30	2 297	23.00	56.13
	55	0.5	3.00	2 326	23.25	52.25
	55	1.0	5.25	2 345	9.25	54.50
	55	1.5	13.20	2 378	12.75	56.43
	65	0.5	4.10	2 330	9.00	54.87
	65	1.0	14.30	2 408	12.00	54.90
	65	1.5	26.46	2 422	28.50	52.20
	80	0.5	4.50	2 338	38.00	53.63
	80	1.0	15.70	2 399	6.25	54.83
	80	1.5	30.41	2 417	3.75	54.07
B	-	0.0	3.80	2 332	1.25	73.25
	55	0.5	4.70	2 363	1.00	68.00
	55	1.0	8.00	2 383	0.70	69.01
	55	1.5	16.00	2 413	0.50	70.50
	65	0.5	6.03	2 372	0.20	71.20
	65	1.0	18.00	2 418	2.00	72.60
	65	1.5	29.56	2 444	1.00	73.00
	80	0.5	6.10	2 375	0.50	69.00
	80	1.0	17.32	2 437	1.50	67.00
	80	1.5	32.62	2 452	1.25	67.00

B系列中的水泥含量更高,导致与所有A系列试样相比,B系列试样的渗水量明显减少. 对于长径比为55的情况,随着纤维体积的增加,两个系列的渗出率逐渐降低,这是由于纤维阻塞了水通过的孔隙所致^[13]. 通过实验结果还可以看出,随着纤维体积的增加,抗压强度有所降低.

2.2 塑性收缩开裂

2.2.1 水分蒸发速率和首次裂纹开裂时间

塑性收缩开裂结果见表3. 图2和图3分别显示了纤维体积和长径比对A系列和B系列混凝土的水分蒸发速率和首次开裂时间的影响.

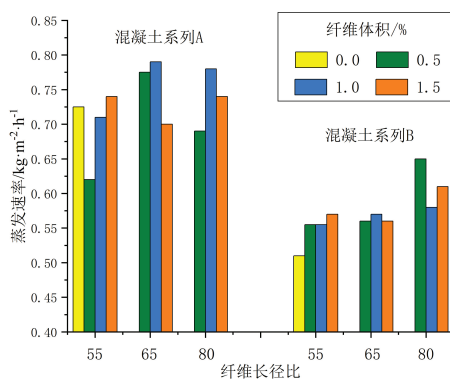


图 2 A系列和B系列混凝土的纤维体积和纤维长径比对水分蒸发速率的影响

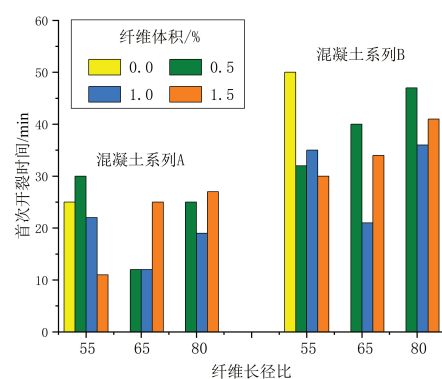


图 3 A系列和B系列混凝土的纤维体积和纤维长径比对首次开裂时间的影响

表 3 塑性收缩开裂实验结果

系列	长径比	纤维 体积 /%	裂缝 数量	首次开裂 时间 /min	新拌水泥 水分蒸发率 /kg·m ⁻² ·h ⁻¹	总裂缝 长度 /mm	平均裂缝 宽度 /mm	最大裂缝 长度 /mm	最大裂缝 宽度 /mm	总裂缝 面积 /mm ²	*开裂 比例 /%	**塑性 收缩开裂 减少率/%
A	-	0.0	14	25	0.724	3 366	0.090	524	0.52	306.95	100	-
	55	0.5	25	30	0.618	2 590	0.110	176	0.32	285.10	92.88	7.12
	55	1.0	28	23	0.708	2 267	0.120	314	0.40	272.04	88.63	11.37
	55	1.5	22	12	0.738	2 129	0.090	250	0.30	192.04	62.56	37.44
	65	0.5	45	15	0.784	2 258	0.102	250	0.40	239.28	77.95	22.05
	65	1.0	47	15	0.799	1 933	0.104	220	0.54	200.55	65.34	34.66
	65	1.5	31	25	0.708	1 233	0.110	135	0.30	131.66	42.89	57.11
	80	0.5	41	25	0.693	2 055	0.120	150	0.60	246.59	80.33	19.67
	80	1.0	37	20	0.784	2 166	0.090	150	0.30	194.75	63.45	36.55
	80	1.5	23	28	0.738	875	0.093	100	0.25	80.00	26.05	73.95
B	-	0.0	63	50	0.512	2 571	0.230	176	1.00	700.43	100	-
	55	0.5	53	33	0.558	1 919	0.210	90	0.50	407.52	58.18	41.82
	55	1.0	72	37	0.558	2 802	0.130	140	0.32	367.88	52.52	47.48
	55	1.5	44	30	0.588	1 849	0.110	125	0.30	202.46	28.90	71.10
	65	0.5	78	40	0.573	2 594	0.142	85	0.55	370.54	52.90	47.10
	65	1.0	45	22	0.588	2 341	0.140	170	0.35	322.99	46.11	53.89
	65	1.5	44	35	0.573	1 684	0.120	162	0.30	201.12	28.71	71.29
	80	0.5	77	48	0.648	2 918	0.140	95	0.42	416.54	59.47	40.53
	80	1.0	46	35	0.603	1 981	0.120	120	0.30	239.56	34.20	65.80
	80	1.5	46	41	0.618	1 866	0.120	100	0.30	210.35	30.03	69.97

注：*为相对普通混凝土的开裂率；**为相对普通混凝土的塑性收缩开裂的减少率。

B系列试件的首次开裂时间是A系列试件的两倍，推测原因是A系列试件的水灰比高，造成其试件的蒸发速率比B系列试件高得多，从而导致了较早的首次开裂时间^[11]。B系列中所有纤维改性混凝土均显示出较高的水分蒸发率，是由于沿纤维形成了优先渗水通道，这些通道可以供水分补充干燥表面并降低毛细应力值^[14]，所有纤维改性混凝土的首次开裂时间都比普通混凝土小。从实验结果可以看出，纤维的长径比和纤维体积对水分的蒸发速率和首次开裂时间没有明显影响。

2.2.2 塑性收缩与纤维体积

图4~6分别显示了所有混凝土试件的纤维体积和塑性收缩裂缝长度、宽度以及面积之间的关系。当两种混凝土系列的所有试件都使用1.5%纤维体积时，可观测到总裂缝长度、最大裂缝宽度和总裂缝面积明显减少。大多数情况下，纤维体积的增加会导致裂缝长度、最大裂缝宽度和总裂缝面积的减小。

对于B系列试件，增加纤维体积分数为0.5%的纤维长径比会导致总裂缝长度的增加（图4）。当纤维体积分数为1.0%时，长径比的增加却导致总裂缝长度的减少。对于1.5%纤维体积的A系列混凝土，纤维长径比的增加会导致总裂缝长度的减少。与55的纤维长径比相比，当纤维长径比从65增大到80时，总裂缝长度分别减少42%和65%。另一方面，从实验结果可以总结出，纤维体积为1.5%是有效减少改性混凝土总裂缝长度的临界比例。

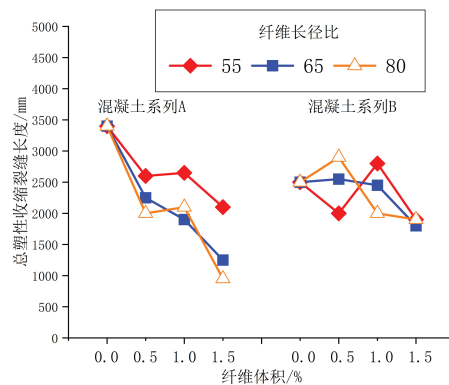


图 4 A系列和B系列混凝土的纤维体积对总塑性收缩裂缝长度的影响

从实验结果可以总结出，纤维体积为1.5%是有效减少改性混凝土总裂缝长度的临界比例。

2.2.3 塑性收缩与纤维长径比

由图5可知,对于A系列和B系列混凝土,当纤维体积分别为1.5%和1.0%时,随着纤维长径比的增加,总的塑性收缩裂缝面积减小.可以明显看出纤维长径比不会影响最大的塑性收缩裂缝宽度.

2.2.4 塑性收缩率与强度水平

由图5和图6可知,28天时抗压强度为73 MPa(B系列)的普通混凝土最大裂缝宽度和总裂缝面积比抗压强度为56 MPa(A系列)的大,可推导出水泥含量较高的混凝土总裂缝面积较大.由图5还可以看出,A系列混凝土最大裂缝宽度约为B系列混凝土最大裂缝宽度的一半,可得出结论:塑性收缩开裂发生率随水泥体积分数的增加而增加.

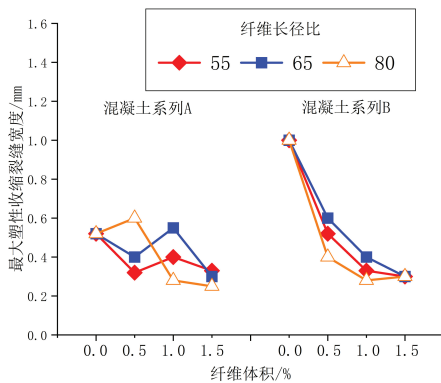


图5 A系列和B系列混凝土的纤维体积对最大塑性收缩裂缝宽度的影响

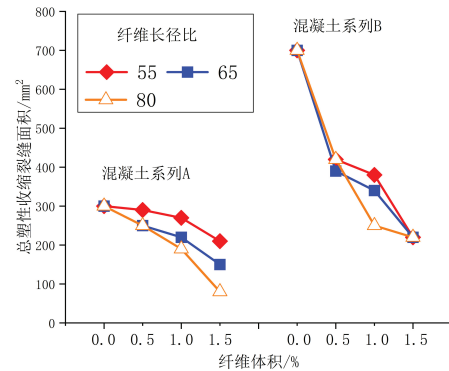


图6 A系列和B系列混凝土的纤维体积对总塑性收缩裂缝面积的影响

2.2.5 总塑性收缩裂缝面积与纤维体积

采用回归分析研究总塑性收缩裂缝面积(A_t)与纤维体积(V_f)之间的线性关系^[15].表4显示了回归分析的实验结果.通过回归分析获得的关系如下:

$$A_t = a(V_f) + b \quad (1)$$

式中: A_t 为总塑性收缩裂缝面积(mm^2), V_f 为纤维体积(%), a 和 b 为回归系数.实验数据曲线和回归线见图7、图8.

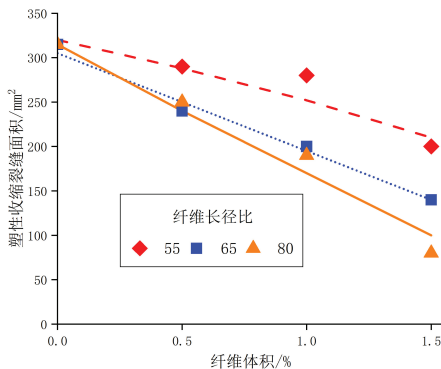


图7 A系列混凝土的总塑性收缩裂缝面积与纤维体积的关系

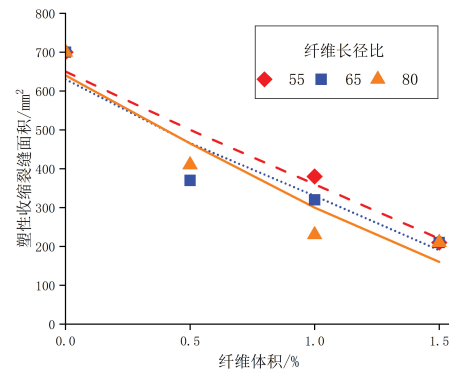


图8 B系列混凝土的总塑性收缩裂缝面积与纤维体积的关系

由图7和图8可知,总塑性收缩裂缝面积与纤维体积之间存在线性关系,由于裂缝宽度的减小,总裂缝面积随着纤维体积分数的增加而减小;由相关系数结果可知,大多数都在0.85以上,因此总塑性收缩裂缝面积与纤维体积之间存在较好的对应关系.

表4 总塑性收缩裂缝面积 (mm^2) 和纤维体积 (%) 之间的回归分析结果

混凝土试件	纤维长径比	回归系数		相关系数
		<i>a</i>	<i>b</i>	
A	55	-72	318	0.850
	65	-113	304	0.989
	80	-147	317	0.964
B	55	-307	650	0.913
	65	-310	631	0.874
	80	-329	639	0.894

3 结论

1) 加纤维会增加新拌混凝土维勃时间和湿密度。总塑性收缩裂缝面积与钢纤维体积百分比呈线性关系。

2) 与A系列混凝土相比, B系列混凝土的渗水量明显减少。B系列普通混凝土的首次开裂时间是A系列普通混凝土的两倍, 从这个角度来说, 建议混凝土可以适当降低水灰比以延后开裂时间。

3) 长径比和纤维体积对水分蒸发速率和首次开裂时间没有明显影响。纤维长径比并没有显著影响总裂缝长度; 纤维体积掺量为1.5%是有效减少改性混凝土总裂缝长度的临界比例, 建议钢纤维掺量按照1.5%执行。

参考文献:

- [1] 于韵, 王晓玘, 邓芳明. SAP对高强混凝土塑性阶段抗裂性能的影响[J]. 混凝土, 2021, 3: 27-30+34.
- [2] 郭相伟, 喻林, 谭涛, 等. 防裂抗渗剂对混凝土早期开裂及抗渗性的影响[J]. 新型建筑材料, 2021, 48(8): 155-158.
- [3] 徐蕾. 玻璃纤维对水泥混凝土塑性开裂性能的影响[J]. 新型建筑材料, 2013, 40(10): 29-31.
- [4] 徐蕾. 聚丙烯纤维对水泥加固风积沙抗压强度的影响研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2013, 8: 51-54.
- [5] 郝磊, 韩建国, 阎培渝, 等. 膨胀剂提升混凝土抗塑性开裂能力研究[J]. 混凝土, 2019, 2: 48-51+56.
- [6] 刘加平, 汤金辉, 韩方玉. 现代混凝土增韧防裂原理及应用[J]. 土木工程学报, 2021, 54(10): 47-54+63.
- [7] 唐明, 傅柏权, 张威. 聚丙烯纤维混凝土早期塑性开裂特征及分形评价[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2007, 23(4): 602-605.
- [8] 罗小虎, 宗翔, 王佳. 芳纶纤维橡胶混凝土的塑性开裂与韧性研究[J]. 河南城建学院学报, 2021, 30(4): 47-51.
- [9] SIVAKUMAR A, SANTHANAM M. A quantitative study on the plastic shrinkage cracking in high strength hybrid fibre reinforced concrete[J]. Cement & Concrete Composites, 2007, 29(7): 575-581.
- [10] 曾国东, 周敏, 杨腾宇, 等. 矿物掺合料对混凝土塑性收缩裂缝的影响[J]. 混凝土, 2020, 3: 105-107+116.
- [11] 徐蕾. 应用亚麻纤维减少混凝土塑性收缩开裂的研究[J]. 混凝土, 2013, 10: 91-94.
- [12] BANTHIA N, GUPTA R. Influence of polypropylene fiber geometry on plastic shrinkage cracking in concrete[J]. Cement & Concrete Research, 2006, 36(7): 1263-1267.
- [13] 胡昱, 牛旭婧, 杨宁, 等. 低热水泥混凝土早期塑性开裂风险研究[J]. 混凝土, 2021, 3: 19-22+26.
- [14] 莫石秀, 郭寅川, 覃潇, 等. 混杂纤维增强内养生水泥混凝土力学、收缩及断裂性能研究[J]. 公路交通科技, 2021, 38(8): 1-8.
- [15] MIHASHI H, LEITE J P B. State-of-the-art report on control of cracking in early age concrete[J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2004, 2(2): 141-154.

责任编辑: 张自强