

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2023.04.007

钢纤维和聚合物对混凝土断裂特征的影响及机理分析

郭广磊¹, 孙世强¹, 李颖¹, 郑艺伟², 梅迎军^{*2}

(1. 中交路桥南方工程有限公司, 北京 101121; 2. 重庆交通大学 交通土建工程材料国家地方联合工程实验室, 重庆 400074)

摘要: 为了改善混凝土微观结构特征与断裂韧性采取在混凝土中复掺钢纤维和聚合物乳液, 通过三点弯曲断裂试验得到了普通混凝土、钢纤维混凝土、聚合物乳液改性混凝土及钢纤维聚合物混凝土荷载-变形曲线及相应裂纹张开宽度, 计算得到了断裂能、临界应力强度因子和裂纹尖端张开位移等断裂特征参数。通过氮吸附试验和压汞试验, 得到了混凝土总孔隙体积、总比表面积、中值孔径及平均孔径等微观孔结构特征参数, 分析了钢纤维和聚合物乳液对混凝土增强增韧的机理。结果表明: 掺入钢纤维后, 混凝土压折比从8下降到5.29~6.21, 临界荷载及变形分别增加了48.9%~112.3%和10.7%~136.1%, 断裂能、临界应力强度因子和裂纹尖端张开位移分别增加了595.4%~1936.4%, 96.8%~177.7%, 158.3%~233.3%, 总孔隙体积、总比表面积和中值孔径分别降低了2.2%~45.9%, 8.0%~75.2%, 6.7%~43.7%; 与钢纤维混凝土相比, 复掺聚合物乳液后, 混凝土压折比降低到4.85, 且聚合物乳液掺量越大, 压折比越小, 三点弯曲断裂临界荷载及对应的变形增加幅度不明显, 断裂能、临界应力强度因子和裂纹尖端张开位移分别增加了24.4%~61.0%, 7.9%~54.0%, 27.8%~144.4%, 混凝土总孔隙体积和总比表面积分别减小了28.1%~43.7%和42.5%~67.7%, 复掺聚合物乳液能有效提高钢纤维混凝土断裂性能; 混凝土三点弯曲荷载-变形曲线更饱满, 下降段更加平缓, 且复掺效果优于单掺。

关键词: 道路工程; 断裂韧性; 三点弯曲断裂试验; 水泥混凝土; 钢纤维; 聚合物乳液; 临界应力强度因子; 裂纹尖端张开位移

中图分类号: TU528.572

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268(2023)04-0053-08

Influence of Steel Fiber and Polymer on Fracture Characteristics of Concrete and Mechanism Analysis

GUO Guang-lei¹, SUN Shi-qiang¹, LI Ying¹, ZHENG Yi-wei², MEI Ying-jun^{*2}

(1. South Engineering Co., Ltd. of Road & Bridge International Co., Ltd., Beijing 101121, China;

2. National & Local Joint Engineering Laboratory of Transport Civil Engineering Materials, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In order to improve the microstructure characteristics and fracture toughness of concrete by mixing steel fiber and polymer emulsion in concrete, the load-deformation curves and crack opening widths of ordinary concrete, steel fiber reinforced concrete, polymer emulsion modified concrete and steel fiber polymer concrete are obtained by three-point bending fracture test, and the fracture characteristic parameters such as fracture energy, critical stress intensity factor and crack tip opening displacement are calculated. By nitrogen adsorption test and mercury injection test, the total pore volume, total specific surface area, median pore diameter and average pore diameter of concrete are obtained, and the mechanism of strengthening and toughening concrete by the incorporation of steel fiber and polymer is analyzed. The result shows that (1)

收稿日期: 2022-09-14

基金项目: 重庆市科技局科技项目 (cstc2019jcsx-msxmX00140); 中交路桥南方工程有限公司科技项目 (科技-2020-342)

作者简介: 郭广磊 (1984-), 男, 河北衡水人, 高级工程师. (578250450@qq.com)

* 通信作者: 梅迎军 (1976-), 男, 湖北黄冈人, 博士, 教授. (mycq_2000@163.com)

After mixing steel fiber, the ratio of compression strength to flexural strength of concrete decreased from 8 to 5.29–6.21, the critical load and deformation increased by 48.9%–112.3% and 10.7%–136.1% respectively, the fracture energy, critical stress intensity factor and crack tip opening displacement increased by 595.4%–1 936.4%, 96.8%–177.7% and 158.3%–233.3% respectively, and the total pore volume, total specific surface area and median pore diameter decreased by 2.2%–45.9%, 8.0%–75.2% and 6.7%–43.7% respectively. (2) Compared with steel fiber reinforced concrete, after mixing polymer emulsion, the ratio of compressive strength to flexural strength decreased to 4.85. The more the polymer content, the smaller the ratio of the compressive strength to flexural strength. The increments of critical load and corresponding deformation of three-point bending fracture are not significant. The fracture energy, critical stress intensity factor and crack tip opening displacement increased by 24.4%–61.0%, 7.9%–54.0%, 27.8%–144.4% respectively, the total pore volume and total specific surface area of concrete decreased by 28.1%–43.7% and 42.5%–67.7% respectively. The composite polymer emulsion can effectively improve the fracture performance of steel fiber reinforced concrete. (3) The curves of bending load-deformation of concrete obtained by three-point bending fracture test are plumper, the descending section is more gentle, and the effect of composite mixing is better than that of single mixing.

Key words: road engineering; fracture toughness; three-point bending fracture test; cement concrete; steel fiber; polymer emulsion; critical stress intensity factor; crack tip opening displacement

0 引言

混凝土作为被广泛应用的建筑材料,脆性大,易开裂,受到力作用时,内部容易产生裂纹,且不能靠自身阻止裂纹的扩展,这使得其在工程应用中受限,不能较好地发挥其优势。掺入钢纤维可有效解决混凝土内部易开裂问题^[1]。钢纤维混凝土不仅改善了素混凝土力学性能^[2]、疲劳性能^[3-4]和耐久性能^[5-6],同时,提高了混凝土变形能力^[7]。因而,钢纤维混凝土已广泛应用于土木建筑与水利工程,是一种使用范围广、前景好、实用性佳的建筑材料^[8-9]。但钢纤维与水泥石界面薄弱区^[10]影响了钢纤维增强增韧的作用效果。为增强钢纤维与水泥石界面薄弱区,可在钢纤维混凝土掺入矿粉、硅灰^[11]及聚合物^[12]等材料对钢纤维与水泥石的界面进行增强,提高钢纤维作用效果。

为此,本研究采取在混凝土中复掺钢纤维和聚合物以达到对混凝土增强增韧的目的。采用 RILEM TC50-FMC 公布的混凝土断裂能测试方法,采用三点弯曲试验测定混凝土荷载-变形曲线及相应裂缝嘴张开宽度,并通过理论分析,计算混凝土断裂能、有

效裂纹长度、临界应力强度因子及裂纹尖端张开位移等断裂特征参数;同时,通过氮吸附试验和压汞试验对混凝土微观结构进行测试,分析钢纤维和聚合物对混凝土增强增韧规律。

1 试验材料及方案设计

1.1 试验材料

水泥:普通硅酸盐 42.5 R 水泥;砂:普通河砂,细度模数 2.83;碎石:5~20 mm 连续级配;钢纤维:武汉新途工程新材料科技有限公司生产,抗拉强度大于 980 MPa,长 30 mm、直径 0.51 mm 的钢丝波浪压痕型多锚固点钢纤维;聚合物:上海某公司羧基丁苯胶乳乳液,密度 1.01 g/cm³,平均粒径为 150 nm,玻璃化温度 13 ℃,含固量 50%~52%,pH 值 7.8~10,25 ℃ 的黏度为 35~150 mPa·s,表面张力 30~48 mN/m。

1.2 试验方案

混凝土强度等级 C40,基准配合比为:水泥:砂:碎石:水=441:873:946:190,W/C=0.43,钢纤维(S)为混凝土体积掺量,聚合物乳液(L)掺量为占水泥质量,具体配比如表 1 所示。

表 1 混凝土中钢纤维和聚合物乳液配比设计

Tab. 1 Mix design of steel fiber and polymer in concrete

编号	S0	S6	S9	S12	L6	L9	L12	L18	S6L12	S9L6	S9L9	S9L12	S9L18	S12L12
钢纤维/%	0	0.6	0.9	1.2	0	0	0	0	0.6	0.9	0.9	0.9	0.9	1.2
聚合物/%	0	0	0	0	6	9	12	18	12	6	9	12	18	12

2 试验方法

2.1 新拌混凝土工作性

混凝土工作性评价参考《公路工程水泥及水泥混凝土试验规程》(JTG 3420—2020)。

2.2 力学性能

混凝土抗压强度、抗折强度及劈裂抗拉强度测试按《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)进行。

2.3 断裂试验

三点弯曲断裂试验试样尺寸为100 mm×100 mm×400 mm,每个配比3个试样,龄期72 d。试样切口宽2 mm,高25 mm。加载设备为CSS-44020型电子万能试验机,加载速率0.002 mm/s,数据采集频率2次/s,支

点间距离300 mm。荷载和跨中变形分别通过荷载传感器和位移计测量,同时采用引伸计测量裂缝口张开位移。

2.4 氮吸附法

采用氮吸附法试验测试混凝土微观孔结构特征参数,具体方法参考文献[13]。

2.5 压汞试验

采用汞压入(MIP)试验测试水泥混凝土的微观孔结构,具体方法参考文献[14]。

3 试验结果及分析

3.1 工作性能

3.1.1 工作性能测试结果

不同配合比的新拌混凝土工作性能测试结果如表2所示。

表2 新拌混凝土坍落度测试结果

Tab.2 Slump test result of fresh concrete

编号	S0	S6	S9	S12	L6	L9	L12	L18	S6L12	S9L6	S9L9	S9L12	S12L12
坍落度/mm	65	40	33	25	125	155	175	—	160	60	100	108	80
黏聚性	良好	良好	良好	良好	良好	良好	良好	—	良好	良好	良好	良好	良好
保水性	无	少量	无	少量	少量	少量	少量	—	无	无	少量	少量	少量

注:聚合物乳液掺量为18%时,不适合采用坍落度评价其工作性能。

3.1.2 钢纤维对工作性能影响

在混凝土中掺入钢纤维后,新拌混凝土坍落度从65 mm下降到25 mm,表明,在混凝土中掺入钢纤维极大降低了混凝土的流动性。钢纤维对新拌混凝土工作性能影响的机理在于:钢纤维成乱向分布于混合料中,对混合料各组分起到了支撑、架空作用,造成拌和物内部摩擦力增大,从而使得其流动度减小、和易性变差。同时,由于钢纤维的掺入使得表面积增大,占用了大量的水,从而减小了混凝土坍落度。

3.1.3 聚合物乳液对工作性能影响

在钢纤维混凝土中复掺聚合物乳液时,新拌混

凝土的坍落度从65 mm增加到175 mm,混凝土流动性得到极大提高,同时,减小了混凝土的泌水和离析现象。聚合物乳液对混凝土工作性能影响的机理在于:聚合物乳液加入新拌混凝土中,在成膜的最初阶段,聚合物乳液中的颗粒起到了“滚珠轴承”作用;同时,聚合物乳液的表面活性作用降低了水泥浆的黏度和屈服应力,增加了新拌混凝土的流动性。

3.2 力学性能

3.2.1 力学性能测试结果

不同配合比混凝土28 d抗压强度、抗折强度及劈裂强度试验结果如表3所示。

表3 混凝土28 d抗压抗折及劈裂强度测试结果

Tab.3 Result of 28 d compressive strength, flexural strength and splitting strength test of concrete

编号	S0	S6	S9	S12	L6	L9	L12	S6L12	S9L6	S9L9	S9L12	S12L12
抗压强度/MPa	41.6	45.8	49.7	50.2	31.0	30.6	29.8	36.0	44.5	42.3	34.0	39.8
抗折强度/MPa	5.22	8.66	8.22	8.08	6.27	7.63	6.24	7.67	7.55	8.45	7.01	8.07
劈裂强度/MPa	3.39	3.94	4.14	4.44	3.19	3.03	3.15	2.80	3.86	3.43	3.15	3.84
压折比	7.94	5.29	6.05	6.21	4.94	4.02	4.77	4.69	5.89	5.01	4.85	4.93

3.2.2 钢纤维和聚合物混凝土力学性能影响

(1) 抗压强度影响分析

在混凝土中掺入0.6%~1.2%的钢纤维时,混凝土

抗压强度增大10.6%~21.0%,且钢纤维掺量越大抗压强度越大,但当钢纤维掺量超过0.9%后,对混凝土抗压强度提高的幅度收窄。

与体积掺量为0.9%的钢纤维混凝土相比,复掺聚合物乳液后,混凝土抗压强度降低了10.6%~31.6%,且聚合物乳液掺量越多,混凝土抗压强度越小。

(2) 抗折强度影响分析

随着钢纤维掺入,混凝土抗折强度增加了54.8%~65.9%,但钢纤维掺量超过0.6%后,混凝土抗折强度略有下降,钢纤维最佳掺量为0.6%,其原因在于纤维掺量大,难以分散均匀,导致部分纤维未被砂浆完全裹覆,从而影响纤维增强效果的发挥^[15-16]。

在钢纤维混凝土中复掺聚合物乳液后,混凝土抗折强度先是略有下降,当聚合物乳液掺量达到9%时,混凝土抗折强度最大,表明聚合物乳液最佳掺量为9%。混凝土中加入钢纤维和聚合物可以改善混凝土弯曲韧性,提高其抗裂性能。

(3) 劈裂抗拉强度影响分析

随着钢纤维的掺入,混凝土劈裂强度增加了16.2%~31.0%,且钢纤维掺量越大,劈裂强度提高幅度越大。在钢纤维混凝土中复掺聚合物乳液后,劈裂强度下降,但聚合物乳液掺量低于9%时,混凝土劈裂强度依然大于普通混凝土。

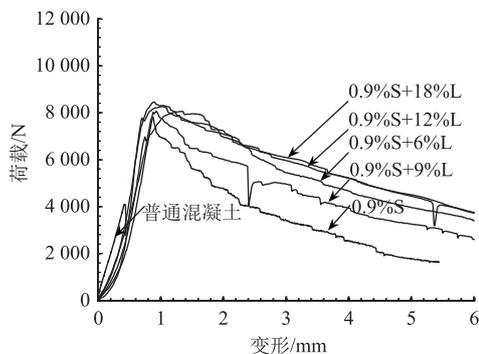
(4) 压折比

普通混凝土压折比接近8,掺入钢纤维后,压折比降低到5.29~6.21,表明钢纤维掺入提高了混凝土的韧性。在钢纤维混凝土中复掺聚合物乳液后,混凝土的压折比甚至降低到4.85,且聚合物乳液掺量越大,压折比越小。这表明在钢纤维混凝土中复掺聚合物乳液,混凝土的韧性得到进一步改善。

3.3 断裂性能

3.3.1 断裂试验测试结果

钢纤维混凝土、聚合物改性混凝土及钢纤维聚



(a) 钢纤维掺量0.9%, 聚合物掺量0~18%

合物混凝土三点弯曲断裂试验荷载-变形曲线分别如图1~3所示。临界荷载、临界荷载对应的变形以及裂缝嘴张开宽度测试结果如表4所示。

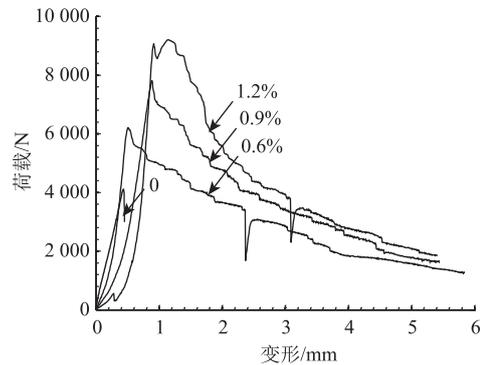


图1 钢纤维混凝土三点弯曲荷载-变形曲线

Fig. 1 Curves of bending load vs. deformation of steel fiber concrete obtained by three-point bending fracture test

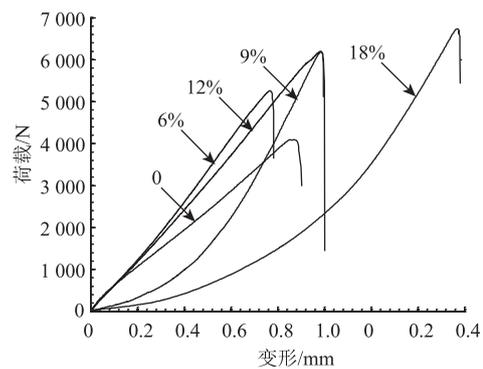
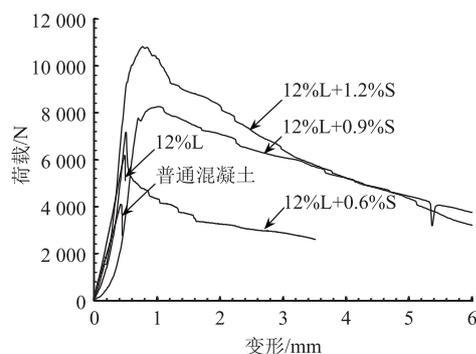


图2 聚合物改性混凝土三点弯曲荷载-变形曲线

Fig. 2 Curves of bending load vs. deformation of polymer modified concrete obtained by three-point bending fracture test



(b) 聚合物掺量12%, 钢纤维掺量0~1.2%

图3 钢纤维聚合物混凝土三点弯曲荷载-变形曲线

Fig. 3 Curves of bending load vs. deformation of steel fiber polymer concrete obtained by three-point bending fracture test

3.3.2 三点弯曲断裂特征

根据试验测试结果,钢纤维和聚合物乳液单掺、

复掺后,混凝土试样三点弯曲断裂特征如下:

(1) 与普通混凝土相比,掺入0.6%~1.2%的

表4 混凝土三点弯曲断裂试验结果

Tab. 4 Result of three-point bending fracture test of concrete

试样编号	临界荷载/N	临界荷载对应变形/	临界荷载对应裂纹嘴	临界荷载提高幅度/%	变形提高幅度/%	裂纹嘴张开宽度
		mm	张开宽度/mm			提高幅度/%
S0	4 173.7	0.425	0.040	—	—	—
S6	6 214.2	0.471	0.058	48.9	10.7	43.8
S9	8 342.0	0.942	0.075	99.9	121.5	87.5
S12	8 859.6	0.998~1.009	0.373	112.3	136.1	832.5
L6	5 354.7	0.399	0.045	28.3	-6.1	11.3
L9	5 815.5	0.526	0.059	39.3	23.6	46.3
L12	6 195.2	0.502	0.045	48.4	18.1	11.3
L18	6 737.4	0.785	0.061	61.4	84.7	52.5
S6L12	6 638.3	0.596	0.057	59.1	40.2	41.3
S9L6	8 770.1	1.015~1.021	0.332	110.1	139.5	728.8
S9L9	8 846	1.116~1.118	0.442	111.9	162.8	1 005.0
S9L12	8 229.5	0.912~0.929	0.504	97.2	116.6	1 160.0
S9L18	8 794	1.124~1.144	0.700	110.7	166.8	1 648.8
S12L12	10 246.1	0.776~0.782	0.410	145.5	83.3	925.0

钢纤维后, 混凝土的临界荷载提高 48.9%~112.3%, 临界荷载对应的变形提高 10.7%~136.2%, 裂纹嘴张开宽度增大 43.8%~832.5%。这表明, 采用裂纹嘴张开宽度作为评价指标更能体现钢纤维对混凝土三点弯曲断裂性能的作用效果。

(2) 钢纤维的掺入改变了混凝土裂缝扩展形态, 纤维掺量越大, 裂缝扩展路径越粗糙, 甚至出现多缝开裂的情况, 在混凝土开裂的裂纹尖端存在钢纤维咬合区, 纤维掺量越大, 咬合区离试样上缘距离越小。当钢纤维掺量为 1.2% 时, 在临界荷载 ± 10 N 范围内, 荷载-变形曲线饱满, 此范围内产生的变形量高达 0.04 mm。可见, 采用钢纤维混凝土的结构, 即使是

产生了较大的变形, 依然具有较高的承载能力。

(3) 在钢纤维混凝土中复掺聚合物乳液后, 混凝土临界荷载增加幅度在 5% 左右, 甚至略有降低, 但临界荷载对应的变形增加幅度达 20% 左右, 而临界荷载对应裂纹嘴张开宽度提高幅度在 342.0%~832.7% 左右, 且混凝土荷载-变形曲线更饱满, 下降段更加平缓饱满。

3.3.3 钢纤维和聚合物对混凝土断裂特征影响

参考文献 [17] 的方法, 混凝土临界荷载对应 δ_0 , $2\delta_0$ 和 $3\delta_0$ 变形处断裂能计算结果见表 5。临界应力强度因子、有效裂纹长度及裂纹尖端张开位移等断裂特征参数计算结果见表 6。

表5 混凝土断裂能计算结果

Tab. 5 Calculated fracture energy of concrete

试样编号	断裂能/(N·mm ⁻¹)			断裂能提高幅度/%		
	δ_0	$2\delta_0$	$3\delta_0$	δ_0	$2\delta_0$	$3\delta_0$
S0	806.4	—*	—	—	—	—
S6	1 149.5	3 604.7	5 607.4	42.5	347.0	595.4
S9	2 819.1	9 127.6	13 336.1	249.6	1 031.9	1 553.8
S12	3 984.8	11 889.9	16 421.8	394.1	1 374.4	1 936.4
L6	1 006.3	—	—	24.8	—	—
L9	1 118.2	2 283.0	3 218.8	38.7	183.1	299.2
L12	1 355.8	—	—	68.1	—	—
L18	1 634.6	—	—	102.7	—	—
S9L6	3 563.0	10 611.8	16 592.6	341.8	1 215.9	1 957.6

续表 5

试样编号	断裂能/(N·mm ⁻¹)			断裂能提高幅度/%		
	δ_0	$2\delta_0$	$3\delta_0$	δ_0	$2\delta_0$	$3\delta_0$
S9L9	4 891.9	13 328.8	20 060.2	506.6	1 552.9	2 387.6
S9L12	4 496.0	12 114.4	18 713.4	457.5	1 402.3	2 220.6
S9L18	5 659.8	14 462.6	21 471.4	601.9	1 693.5	2 562.6
S6L12	1 417.6	7 882.3	11 827.7	75.8	877.5	1 366.7
S12L12	4 435.1	12 011.2	18 299.8	450.0	1 389.5	2 169.3

*: 表示三点弯曲断裂试验中, 变形达到 $1\delta_0$ 后试样即断裂。

表 6 混凝土断裂特征参数计算结果

Tab. 6 Calculated fracture characteristic parameters of concrete

试样编号	弯曲抗拉强度/MPa	裂纹嘴张开宽度弹性部分/mm	弹性模量/ ($\times 10^4$ N·mm ⁻²)	临界应力因子/ (MPa·m ^{-1/2})	裂纹尖端张开位移/mm	有效裂纹长度/mm	断裂参数提高幅度/%			
							弯曲抗拉强度	临界应力因子	裂纹尖端张开位移	有效裂纹长度
S0	3.34	0.014	3.52	0.824	0.006	34.3	—	—	—	—
S6	4.97	0.029	3.57	1.622	0.016	41.6	48.8	96.8	158.3	21.3
S9	6.68	0.035	3.74	2.085	0.018	40.4	99.9	153.0	200.0	17.8
S12	7.09	0.038	3.81	2.289	0.020	41.3	112.3	177.7	233.3	20.4
L6	4.73	0.021	3.31	1.146	0.009	36.4	41.6	39.1	50.0	6.1
L9	4.65	0.027	3.32	1.428	0.014	40.0	39.2	73.3	133.3	16.6
L12	4.96	0.028	3.34	1.500	0.015	39.7	48.4	82.0	141.7	15.7
L18	5.39	0.030	3.29	1.614	0.015	39.4	61.4	95.9	150.0	14.9
S9L6	7.02	0.040	3.54	2.250	0.023	41.1	110.2	173.1	283.3	19.8
S9L9	7.08	0.044	3.53	2.420	0.019	42.6	112.0	193.7	216.7	24.2
S9L12	6.58	0.043	3.45	2.300	0.038	41.8	97.0	179.1	533.3	21.9
S9L18	7.04	0.065	3.40	3.210	0.044	49.5	110.8	289.6	633.3	44.3
S6L12	5.31	0.040	3.31	2.008	0.0205	45.1	59.0	143.7	241.7	31.5
S12L12	8.20	0.064	3.42	3.270	0.0265	46.3	145.4	296.8	341.7	35.0

根据表 5 混凝土三点弯曲试验断裂能计算结果及表 6 混凝土三点弯曲试验断裂参数计算结果, 可知:

(1) 在普通混凝土中掺入 0%~1.2% 的钢纤维后, 混凝土弯曲抗拉强度提高幅度为 48.8%~112.3%, 裂纹尖端张开位移提高 158.3%~233.3%, 断裂能提高 595.4%~1936.4%, 断裂性能得到显著改善。

(2) 在普通混凝土中掺入聚合物乳液后, 混凝土弯曲抗拉强度提高幅度为 39.2%~61.4%, 裂纹尖端张开位移提高 50%~150%, 断裂能提高 24.8%~102.7%。

(3) 与体积掺量为 0.9% 的钢纤维混凝土相比, 复掺 6%~18% 的聚合物乳液后, 混凝土弯曲抗拉强度提高幅度在 5% 左右, 甚至有下降, 但断裂能、临界应力因子、裂纹尖端张开位移、有效裂纹长度等分别提高了 24.4%~61.0%, 7.9%~54.0%, 27.8%~144.4% 和 1.7%~22.5%。这表明在钢纤维混凝土中复

掺聚合物乳液能有效提高混凝土弯曲韧性。

(4) 钢纤维和聚合物乳液复掺后, 混凝土断裂特征参数提高幅度大小依次为: 裂纹尖端张开位移>断裂能>临界应力因子>弯曲抗拉强度>有效裂纹长度。

3.4 孔隙特征

3.4.1 孔隙特征测试结果

根据氮吸附试验测试得到的总孔隙体积、总比表面积测试及根据压汞试验测试得到的体积中值孔径、表面积中值孔径和平均孔径测试结果如表 7 所示。

3.4.2 钢纤维对混凝土孔隙特征影响

随着钢纤维的掺入, 混凝土总孔隙体积、总比表面积及体积中值孔径降低, 且随着钢纤维掺量增加, 总孔隙体积、总比表面积及体积中值孔径下降幅度增大。当钢纤维掺量为 1.2% 时, 总孔隙体积、总比表面积及体积中值孔径分别降低 459.5%, 75.2% 和

表7 混凝土孔隙特征参数

Tab. 7 Characteristic parameters of concrete pore structure

试样 编号	氮吸附法		压汞试验		
	总孔隙体积/ ($\times 10^{-3} \text{ cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	总比表面积/ ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	体积中值 孔径/nm	表面积 中值 孔径/nm	平均 孔径/ nm
S0	34.90	41.11	76.4	8.7	26.0
S6	34.13	37.84	71.3	8.1	23.6
S9	29.54	25.51	52.6	7.8	20.5
S12	18.87	10.18	43.0	7.9	19.0
L6	39.27	44.85	62.7	7.9	22.6
L12	27.85	17.25	64.6	8.2	23.5
L18	14.03	7.29	55.9	7.3	20.5
S6L12	26.79	18.94	47.2	7.4	18.9
S9L6	55.77	64.47	67.4	8.5	23.9
S9L12	21.23	14.68	86.3	8.8	28.5
S9L18	17.65	8.23	61.0	8.1	22.6
S12L12	16.62	9.51	48.8	7.6	19.6

43.7%。这表明,钢纤维作为填料填充并黏结在孔隙之间,从而改变了混凝土内部的孔隙结构^[18],提高混凝土内部的密实性。钢纤维对混凝土孔隙特征影响的机理在于:钢纤维限制了混凝土的收缩开裂,在混凝土失水硬化过程中限制了毛细孔的收缩变形,减小了混凝土特征孔隙的尺寸,对水泥混凝土孔隙具有细化的功能。

3.4.3 聚合物对混凝土孔隙特征影响

在钢纤维混凝土中掺入聚合物乳液后,随着聚合物乳液掺量的增加,总孔隙体积和总比表面积先增后减,当掺量超过6%后,总孔隙体积和总比表面积分别减小28.1%~43.7%和42.5%~67.7%,表明聚合物乳液能有效改善钢纤维与水泥石基体之间的界面黏结,改善钢纤维-水泥石界面薄弱区,从而达到提高钢纤维混凝土断裂性能的目的。

聚合物乳液对混凝土孔隙特征影响的机理在于:聚合物乳液改善了混凝土和易性,使混凝土在振捣作用下更易于密实,孔隙更小;同时,聚合物乳液失水成膜后,有助于封堵、填塞混凝土中大孔及联通孔,改善了混凝土微观孔结构。

4 结论

(1) 在普通混凝土中掺入钢纤维后,压折比降低到5.29~6.21,提高了混凝土的韧性。复掺聚合物乳液后,混凝土的压折比甚至降低到4.85,且聚合物乳液掺量越大,压折比越小,混凝土的韧性得

到进一步改善。

(2) 与钢纤维混凝土相比,钢纤维聚合物混凝土三点弯曲断裂临界荷载及临界荷载对应的变形增加幅度不明显,而断裂能及裂纹尖端张开位移分别增加了24.4%~61.0%和27.8%~144.4%。复掺SBR乳液能有效提高钢纤维混凝土断裂性能。

(3) 在混凝土中同时掺入钢纤维和聚合物乳液后,能显著提高混凝土断裂性能,断裂特征参数提高幅度大小依次为:裂纹尖端张开位移>断裂能>临界应力因子>弯曲抗拉强度>有效裂纹长度。

(4) 钢纤维和聚合物能显著提高混凝土断裂性能,且钢纤维和聚合物乳液复掺效果优于单掺。作用机理是,钢纤维细化了混凝土的孔隙,使混凝土总孔隙体积和总比表面积分别下降2.2%~45.9%,8.0%~75.2%,在钢纤维混凝土中复掺6%以上的聚合物乳液后,混凝土总孔隙体积和总比表面积分别下降28.1%~43.7%,42.5%~62.7%。

参考文献:

References:

- [1] MINDESS S, YOUNG J F. 混凝土[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2005.
MINDESS S, YOUNG J F. Concrete [M]. 2nd ed. Beijing: Beijing Chemical Industry Press, 2005.
- [2] 李德春, 许冲, 崔振东, 等. 基于正交试验的纤维混凝土力学性能影响研究[J]. 混凝土, 2022, (6): 29-32, 39.
LI De-chun, XU Chong, CUI Zhen-dong, et al. Influence of Fiber Reinforced Concrete on Mechanical Properties Based on Orthogonal Test [J]. Concrete, 2022, (6): 29-32, 39.
- [3] 夏冬桃, 谢少军, 朱峰, 等. 基于Weibull分布的超短微丝钢纤维增强混凝土冲击寿命分析[J]. 混凝土, 2022, (5): 19-24.
XIA Dong-tao, XIE Shao-jun, ZHU Feng, et al. Study on Impact Life of Ultra-short Microwire Steel Fiber Reinforced Concrete by Weibull Distribution [J]. Concrete, 2022, (5): 19-24.
- [4] 梅迎军, 赵翔, 代超, 等. 弯曲荷载作用下钢纤维聚合物混凝土疲劳寿命[J]. 公路交通科技, 2015, 32(9): 20-25.
MEI Ying-jun, ZHAO Xiang, DAI Chao, et al. Fatigue Life of Steel Fiber Reinforced Polymer Concrete under Bending Load [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(9): 20-25.
- [5] 同月苹, 王艳, 张少辉. 隧道衬砌纤维混凝土力学性

- 能与耐久性能的研究进展 [J]. 材料科学与工程学报, 2022, 40 (3): 528-536.
- TONG Yue-ping, WANG Yan, ZHANG Shao-hui. Research Progress on Mechanical Properties and Durability Properties of Tunnel Lining Fiber Reinforced Concrete [J]. Journal of Materials Science and Engineering [J]. 2022, 40 (3): 528-536.
- [6] 付建. 不同纤维对高性能混凝土耐久性能及微观结构的影响 [J]. 新型建筑材料, 2020, 47 (4): 34-38.
- FU Jian. Effect of Fiber Types and Contents on Durability and Microstructure of High Performance Concrete [J]. New Building Materials, 2020, 47 (4): 34-38.
- [7] 杨文, 谢昱昊, 毕耀, 等. 钢纤维掺量及种类对超高性能混凝土拉伸应力应变的影响 [J]. 混凝土, 2022, (5): 37-42, 47.
- YANG Wen, XIE Yu-hao, BI Yao, et al. Influence of Steel Fiber Volume Content and Types on Tensile Stress-strain of Ultra-high Performance Concrete [J]. Concrete, 2022, (5): 37-42, 47.
- [8] 邓一三, 李德明, 陈代秉. 钢纤维混凝土管片顶推工况下的力学响应试验 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2022, 41 (8): 127-132.
- DENG Yi-san, LI De-ming, CHEN Dai-bing. Mechanical Response Test of SFRC Segment under Jacking Construction [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2022, 41 (8): 127-132.
- [9] CAO G D, LI Z J, JIANG S Q, et al. Experimental Analysis and Numerical Simulation of Flow Behavior of Fresh Steel Fibre Reinforced Concrete in Magnetic Field [J]. Construction and Building Materials, 2022, 347: 128505.
- [10] 代超, 刘伟超. 钢纤维-水泥石基体界面粘结性能研究进展综述 [J]. 公路交通技术, 2014 (5): 16-22.
- DAI Chao, LIU Wei-chao. Overview for Development of Research on Adhesive Property of Steel Fiber-cement Matrix Interface [J]. Technology of Highway and Transport, 2014 (5): 16-22.
- [11] 梅迎军, 王召兵, 代超. 硅灰对钢纤维-水泥石界面黏结强度影响 [J]. 重庆交通大学学报 (自然科学版), 2017, 36 (1): 24-29, 116.
- MEI Ying-jun, WANG Zhao-bing, DAI Chao. Silica Fume's Impact on the Interface Bond Strength of Steel Fiber-cement Matrix [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2017, 36 (1): 24-29, 116.
- [12] 常豹, 陈伟. 丁苯乳液对钢纤维混凝土韧性和微观结构的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2015, 34 (7): 1791-1797.
- CHANG Bao, CHEN Wei. Effect of SBR on the Toughness and Microstructure of Steel Fiber-reinforced Concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34 (7): 1791-1797.
- [13] 向超, 梅迎军. 硅灰对钢纤维混凝土力学性能及结构特征的影响 [J]. 混凝土与水泥制品, 2015 (7): 55-57.
- XIANG Chao, MEI Ying-jun. Influence of Silica Fume on Mechanical Properties and Structure Characteristics of Steel Fiber Reinforced Concrete [J]. China Concrete and Cement Products, 2015 (7): 55-57.
- [14] 梅迎军, 李志勇, 王培铭, 等. SBR 乳液对水泥砂浆长期收缩性能影响及机理分析 [J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31 (3): 142-146.
- MEI Ying-jun, LI Zhi-yong, WANG Pei-ming, et al. Effect and Mechanism of Styrene-butadiene Rubber Latex on the Long Term Shrinking Performance of Mortar [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2009, 31 (3): 142-146.
- [15] CHO B H, NAM B H. Concrete Composites Reinforced with Graphene Oxide Nanoflake (GONF) and Steel Fiber for Application in Rigid Pavement [J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 17: 01346.
- [16] VITA N, SHARMA A. Behavior of Single Bonded Anchors in Non-cracked and Cracked Steel Fiber Reinforced Concrete under Short-time Tensile Loading [J]. Engineering Structures, 2021, 245: 112900.
- [17] 梅迎军, 王培铭, 李志勇, 等. 钢纤维聚合物水泥砂浆三点弯曲断裂性能 [J]. 西安建筑科技大学学报 (自然科学版), 2013, 45 (5): 652-657.
- MEI Ying-jun, WANG Pei-ming, LI Zhi-yong, et al. Three-point Bending Fracture Performance of Steel Fiber Reinforced Polymer Modified Cement Mortar [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2013, 45 (5): 652-657.
- [18] NIAKI M H, FERREIDON A. Experimental Study on the Mechanical and Thermal Properties of Basalt Fiber and Nano Clay Reinforced Polymer Concrete [J]. Composite Structures, 2018, 191: 231-238.