

纤维对混凝土裂缝宽度、曲折度及渗透性的影响

丁一宁*, 郝晓卫, 门旭

(大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 大连 116024)

摘 要: 为研究不同纤维(钢纤维(SF)、聚丙烯长纤维(Macro-PP)、聚丙烯短纤维(Micro-PP))对荷载作用下带裂缝混凝土渗透性能的影响,通过劈裂试验引入不同宽度的结构裂缝(50~200 μm),比较不同纤维对卸载后混凝土裂缝宽度及曲折度的影响。利用自主研发的渗透装置,分析了不同纤维类型、掺量及混杂方式对荷载作用下不同裂缝宽度混凝土渗透性的影响。研究发现:单掺 55 kg/m^3 SF 比 25 kg/m^3 渗透系数降低 95.7%。与单掺 SF 相比, SF 和 Macro-PP 的掺入具有正混杂效应; Micro-PP 与 SF 混杂体系中渗透系数基本无变化,研究表明 Micro-PP 对结构裂缝间桥接作用甚微,对渗透性的作用不明显。SF 和 Macro-PP 可有效限制裂缝的扩展,增大表面曲折度,降低开裂后混凝土的渗透性。

关键词: 纤维; 劈裂试验; 裂缝宽度; 曲折度; 渗透性; 混凝土

中图分类号: TU528.572

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2019)02-0491-07

Effect of fiber on the crack width, tortuosity and permeability of concrete

DING Yining*, HAO Xiaowei, MEN Xu

(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In order to study the effects of different fibers (steel fiber (SF), macro polypropylene fiber (Macro-PP) and micro polypropylene fiber (Micro-PP)) on the permeability of fractured concrete under loading, different cracks (50—200 μm) were introduced by splitting test. The effects of different fibers on the crack width and tortuosity after unloading were compared. The influence of different fiber types, dosage and hybrid methods on the permeability of concrete with different crack width under load was analyzed by using the permeability test setup. It is found that the permeability decreases by 95.7%, if the steel fiber content increases from 25 kg/m^3 up to 55 kg/m^3 . Compared with single-doped SF, the hybrid use of SF and macro-PP fibers indicates clear positive composite effect on the permeability; It has little change in permeability of cracked concrete reinforced with SF, micro-PP fiber and the combination of both fibers. The investigation demonstrates that the micro-PP fibers show low effect on restriction of the structural crack and the permeability. Steel fibers and macro-PP fibers restricts the expansion of cracks effectively, increases the tortuosity of crack surface greatly, and reduces the permeability of cracked concrete greatly.

Keywords: fiber; splitting test; crack width; tortuosity; permeability; concrete

混凝土在正常使用阶段一般带裂缝工作,而标准《普通混凝土抗渗性能和耐久性能实验方法》(GB/T 50082—2009)^[1]中的试验针对未开裂的完整标准混凝土试件进行抗渗性能测试,无法反映带裂缝混凝土在正常使用阶段的抗渗性能。而对于混

凝土构件的耐久性,开裂后混凝土的抗渗性比开裂前完整混凝土的抗渗性能更重要。在混凝土中掺入纤维可增强抗裂性能和增加韧性^[2],改变裂缝形态,减小裂缝宽度^[3-5]。

Kermani^[6]指出混凝土的渗透性存在应力阈值

收稿日期: 2018-01-29; 录用日期: 2018-03-22; 网络出版时间: 2018-04-17 11:07

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180413.004>

基金项目: 国家自然科学基金(51578109)

通讯作者: 丁一宁, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为纤维混凝土 E-mail: yinding@hotmail.com

引用格式: 丁一宁, 郝晓卫, 门旭. 纤维对混凝土裂缝宽度、曲折度及渗透性的影响[J]. 复合材料学报, 2019, 36(2): 491-497.

DING Yining, HAO Xiaowei, MEN Xu. Effect of fiber on concrete crack width, tortuosity and permeability of concrete[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(2): 491-497 (in Chinese).

效应,当混凝土应力小于 $0.4f_u$ (f_u 为混凝土抗压强度)时,渗透系数很低且变化很小,当应力大于 $0.4f_u$ 时,渗透系数迅速提高。王海龙等^[7] 针对氯离子渗透研究发现渗透性提高的临界应力水平为 $0.3\sim 0.4$ 。Banthia 和 Bhargava^[8] 发现素混凝土渗透试验中应力阈值约为 f_u 的 30%左右。Wang K. 等^[9] 通过预制不同宽度的裂缝发现,峰值应力对应的裂缝宽度小于 $20\ \mu\text{m}$,当裂缝宽度小于 $50\ \mu\text{m}$ 时,渗透系数较低; $50\sim 200\ \mu\text{m}$ 时,渗透系数迅速提高;大于 $200\ \mu\text{m}$ 时,渗流趋于稳定。Picandet 等^[10] 通过对空心圆柱混凝土试件施加轴向压力产生沿长度方向裂缝。C. Desemettre 等^[11] 通过预埋钢筋对混凝土试件施加轴向拉应力预制裂缝。Seong-Tae Yi 等^[12] 在圆饼试件预留楔形开口施加荷载产生贯穿裂缝,但实验过程无法进行荷载作用下渗透试验。Lawler 等^[13] 研究了混杂纤维对荷载下开裂砂浆渗透性的影响。

基于上述研究,借鉴劈裂试验^[14], 预制 $50\ \mu\text{m}$ 、 $100\ \mu\text{m}$ 、 $150\ \mu\text{m}$ 、 $200\ \mu\text{m}$ 不同裂缝宽度的试件,采用恒定水压法进行渗透实验,然后利用

Image Pro Plus(IPP)软件分析卸载后裂缝恢复宽度和裂缝曲折度,并讨论了不同纤维(钢纤维(SF)、聚丙烯长纤维(Macro-PP)、聚丙烯短纤维(Micro-PP))对荷载下混凝土渗透性的影响。

1 实验概况

1.1 原材料及配合比

标号为 P. O 42.5R 的普通硅酸盐水泥;细骨料为粒径为 $0\sim 5\ \text{mm}$ 的河砂;粗骨料为粒径为 $5\sim 10\ \text{mm}$ 的碎石;减水率为 30%的聚羧酸盐高效减水剂;选用 Dramix 钢纤维,维克聚丙烯短纤维 WK-2 和长纤维 WK-8,主要参数如表 1 和表 2 所示。

1.2 试件制备

参照《纤维混凝土试验方法标准 CECS13:2009》^[15],将新拌混凝土装模振捣,标准条件养护 28 d,圆饼直径为 $150\ \text{mm}$,厚度为 $50\ \text{mm}$ 。试件编号、配合比及 28 d 立方体抗压强度见表 3, SF25-LP4-SP1/混凝土代表 SF、Macro-PP、Micro-PP 质量掺量分别为 $25\ \text{kg}/\text{m}^3$ 、 $4\ \text{kg}/\text{m}^3$ 、 $1\ \text{kg}/\text{m}^3$,以此

表 1 钢纤维(SF)主要性能参数

Table 1 Performance parameters of steel fiber(SF)

Fiber	Type	Form	Length/mm	Diameter/mm	Ratio	Elastic modulus/GPa	Tensile strength/MPa	Number/kg
SF	RC-65/35	Hook	35	0.55	65	200	$>1\ 129$	14 500

表 2 聚丙烯长纤维(Macro-PP)和聚丙烯短纤维(Micro-PP)主要性能参数

Table 2 Performance parameters of macro(Macro-PP) and micro polypropylene fiber(Micro-PP)

Fiber	Type	Tensile strength/MPa	Elastic modulus/GPa	Elongation/%	Length/mm	Diameter/mm
SP(Micro-PP)	WK-2	>500	>3.9	<30	6—19	—
LP(Macro-PP)	WK-8	>450	>5	<30	30—50	0.4—1

表 3 混凝土试件配合比及抗压强度

Table 3 Mix proportion and compressive strength of concrete

Specimen	Cement/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Water/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Sand/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Stone/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Silica fume/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Plasticizer ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	SF/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	WK-8/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	WK-2/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	Strength/ MPa
Plain concrete	473.8	221.2	829.5	826.5	39.5	5.57	0	0	0	61.7
SF25/concrete	465.8	220.9	818.7	818.7	31.4	5.71	25	0	0	70.3
SF35/concrete	465.8	217.9	815.1	815.1	38.3	5.49	35	0	0	73.0
SF55/concrete	460.8	218	808.1	808.1	35.9	5.64	55	0	0	65.7
SF0-LP4/concrete	473.8	221.2	827.5	827.5	38.8	5.57	0	4	0	62.3
SF0-LP4-SP1/concrete	471.8	223.2	827.5	827.5	36.8	5.77	0	4	1	64.0
SF25-LP4/concrete	467.9	219.8	818.7	818.7	37.5	5.60	25	4	0	60.4
SF25-SP1/concrete	467.7	220.0	818.7	818.7	37.3	5.62	25	0	1	62.0
SF35-LP4/concrete	465.9	218.8	815.1	815.1	37.2	5.60	35	4	0	58.4
SF35-LP4-SP1/concrete	465.9	218.8	815.1	815.1	37.3	5.59	35	4	1	69.0
SF55-SP1/concrete	461.8	217	808.1	808.1	36.9	5.54	55	0	1	56.1
SF55-LP4-SP1/concrete	461.8	217	808.1	808.1	36.9	5.54	55	4	1	55.8

类推。可以看出,单掺 35 kg/m³ SF 试件抗压强度最大,在一定范围内,随着掺量的增大,变化趋势先增大后减小,但均相较于普通混凝土,强度均有提高。SF 的掺入对提高混凝土强度有积极作用,且 SF 最优掺量在 35 kg/m³ 左右。同时掺 3 种纤维时, SF35-LP4-SP1/混凝土试件抗压强度最大,在一定范围内抗压强度先增大后减小, SF25-LP4/混凝土、SF55-SP1/混凝土、SF55-LP4-SP1/混凝土强度比普通混凝土试件强度低,可能原因是随着纤维的掺入,增多了拌合物中的界面数量,纤维与骨料相互支撑,拌合物的密实度有所降低,混凝土基体内含气量增加,导致混凝土的抗压强度降低。而 SF35-LP4-SP1/混凝土比素混凝土抗压强度提高 15.4%,可能原因是混凝土受压时钢纤维对横向膨胀起限制约束作用。

1.3 试验方法

劈裂试验使用 1 000 kN 液压伺服试验机,采用位移控制,加载速率 0.05 mm/min,在试件前后沿中轴线方向分别固定 2 个 LVDT(Linear variable differential transformer),如图 1 所示。

试件前后表面直径变化为 Δd_{front} 和 Δd_{rear} ,即 $\Delta d_{front} = \Delta_{LVDT,1} + \Delta_{LVDT,2}$, $\Delta d_{rear} = \Delta_{LVDT,3} + \Delta_{LVDT,4}$; 径向位移 $D_v = (\Delta d_{front} + \Delta d_{rear})/2$ (D_v 为直径变化)由弹性变形和非弹性变形组成,为方便控制试件裂缝宽度(COD, Crack opening displacement),由于弹性变形较小,忽略弹性阶段,预设 COD 等级分别为 50 μm 、100 μm 、150 μm 、200 μm 。在劈裂试验过程中裂缝达到预定宽度等级后卸载。

结合劈裂试验及自身实验条件,对国内外所用渗透装置^[11, 16-17]进行总结,将荷载-裂缝宽度-渗透系数联系起来,模拟正常工作状态时混凝土渗透的情况(图 2)。试验开始后,打开水泵加压 0.2 MPa



图 2 荷载下渗透实验装置
Fig. 2 Permeability test setup under loading

使水充满渗透装置;加载速率为 0.05 mm/min,裂缝达到预定宽度后持载,记录一段时间内出水量。然后继续加载分别记录 100 μm 、150 μm 、200 μm 宽度下实验数据。通过达西定律计算在荷载作用下试件不同 COD 时的渗透系数^[14]:

$$k_w = \frac{QL}{A\Delta H} \tag{1}$$

式中: k_w 为渗透系数; Q 为单位时间内水流量(m^3/s); L 为试件厚度(m); A 为渗流面积(m^2); ΔH 为水位差(m)。

2 结果与分析

2.1 混凝土劈裂试验

图 3 为混凝土荷载-位移曲线。通过数据信息采集系统采集到的 LVDT 数据得到试件的径向位移 D_v 作为横坐标,荷载水平值作为纵坐标。图 3 分别代表了单掺及不同种类混掺纤维对混凝土承载力和延性的影响。观察图 3(a)可以看出,与普通混凝土相比,对于单掺 25 kg/m³、35 kg/m³、55 kg/m³ 的 SF/混凝土极限承载力分别提高 20% 左右,且破坏形式由脆性破坏转变为韧性破坏;由图 3(b)得到单掺 4 kg/m³ 的 Macro-PP/混凝土极限承载力提高 10% 左右;而图 3(c)与图 3(a)对比说明与单掺 SF 相比, SF 和 Macro-PP 对混凝土试件极限承载力和延性影响不大;同样从图 3(d)可以看出 Micro-PP 对于混凝土延性、极限承载力影响不大。

为研究卸载后纤维对开裂混凝土裂缝形态的影响,当试验卸载后裂缝宽度会有不同程度的恢复,定义裂缝比率 $\rho = \omega_1/\omega_0$ (ω_0 —卸载前裂缝宽度; ω_1 —卸载后裂缝宽度),卸载前后裂缝比率 COD 值的比值 ρ 反映了纤维对裂缝宽度的恢复。

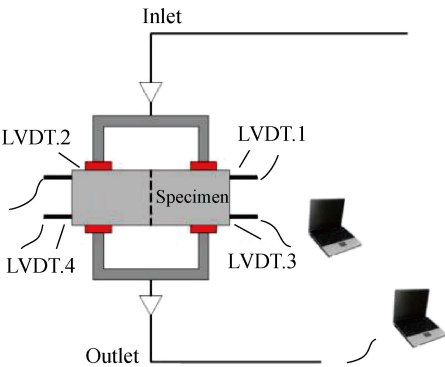


图 1 LVDT 传感器布置示意图
Fig. 1 Device diagram of LVDT

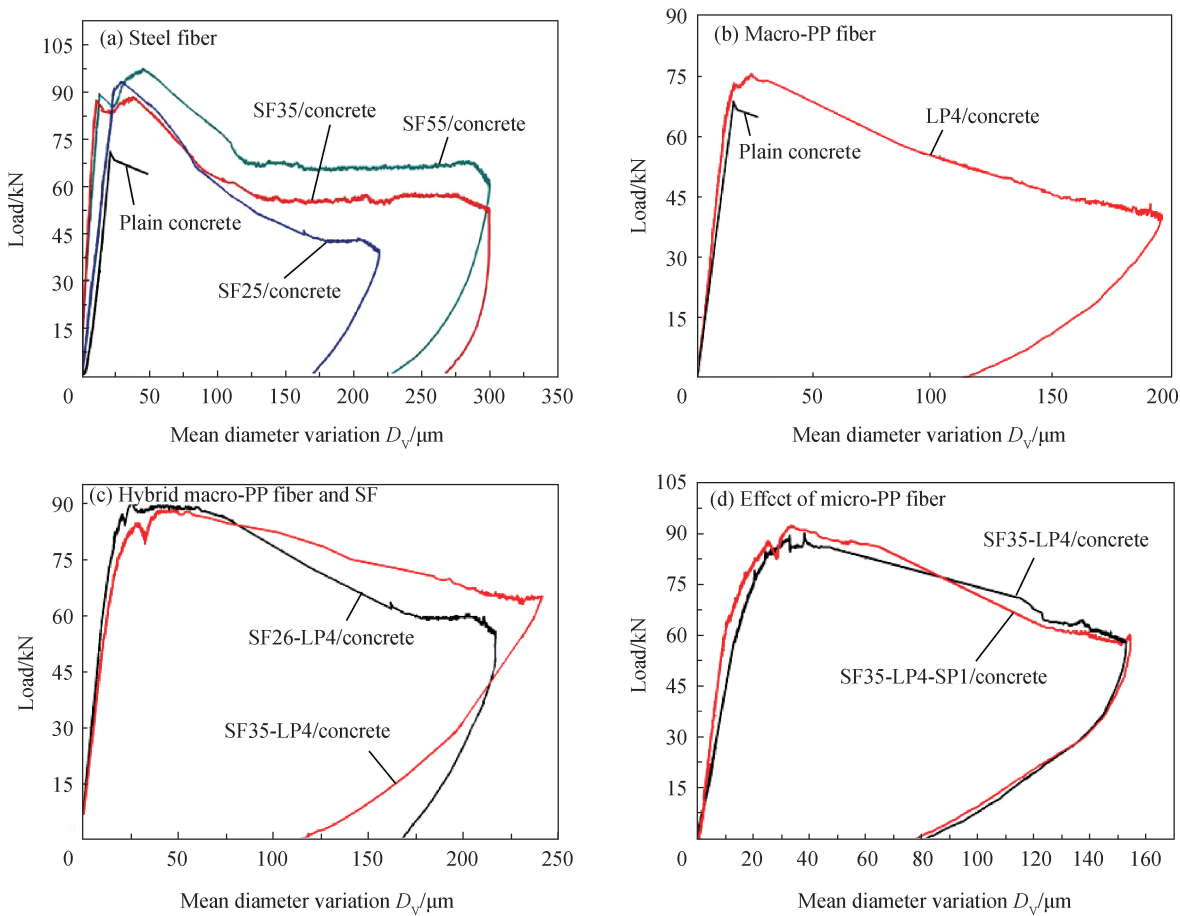


图 3 纤维对混凝土荷载-径向位移曲线的影响
Fig. 3 Effect of fiber on loading-diameter variation curves of the concrete

单掺、混掺纤维对混凝土试件卸载后裂缝比率变化如图 4 所示。由图 4(a)可以看出，当裂缝宽度小于 250 μm 时，裂缝比率 ρ 随着 SF 掺量的增加而减小，规律较明显，当裂缝大于 250 μm 时，裂缝较大，纤维的作用逐渐降低；由图 4(b)可以看出，相同掺量 SF 下，掺有 Macro-PP 的 ρ 明显低于单掺 SF 的试件，说明 Macro-PP 对恢复裂缝有积极作用。

SF55-LP4/混凝土与 SF55-LP4-SP1/混凝土对比发现，Micro-PP 的掺入对 ρ 影响不明显。这是由于混凝土开裂后，裂缝间的纤维桥接裂缝，限制裂缝的扩展和变形，桥接裂缝的纤维与基体产生滑移，消耗能量^[18]，当卸载后发生自身回弹促进裂缝宽度恢复，掺量越高，桥接裂缝的纤维越多，作用越明显。

Hubert 等^[19]考虑到裂缝的曲折度对渗透性的影响，Bear^[20]发现开裂混凝土渗透系数与裂缝曲折度的二次方成反比；为研究纤维对混凝土裂缝形态

的影响，引入试件表面主裂缝曲折度系数 ξ ： $\xi = L_{\text{ture}}/L_0$ (L_0 —沿裂缝长度起点和终点连线的长度； L_{ture} —沿裂缝拓展路径的实际长度)分析 ξ 的变化规律，探究不同纤维、种类及混杂方式对裂缝形态的影响。对裂缝采集清晰图像后导入 IPP 软件，计算 L_0 、 L_{ture} 和曲折度 ξ ，当裂缝宽度 COD 接近 200 μm 时，曲折度见表 4。可以看出，在掺量 55 kg/m³ 以内单掺 SF 时，掺量越高，曲折度 ξ 越大，当掺量为 55 kg/m³ 时，比普通混凝土曲折度增长 33%；说明 SF 对曲折度的影响较大，裂缝曲折度 ξ 随掺量的增加而增大。当 SF 与 Macro-PP 混杂时，与相同掺量 SF 相比，曲折度有明显提高，SF35-LP4/混凝土比 SF35/混凝土曲折度提高 6% 左右，SF25-LP4/混凝土比 SF25/混凝土曲折度提高 5% 左右，说明 Macro-PP 对曲折度的影响较明显。当 SF 与 Micro-PP 混杂时，曲折度 ξ 与单掺相同掺量的 SF 曲折度相比变化不明显；说明 Micro-PP 对裂缝曲折度影响不大。

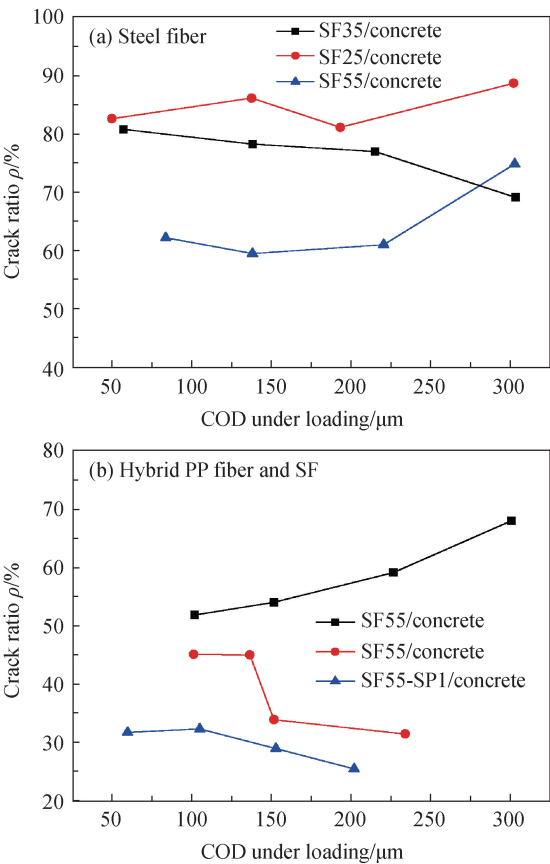


图 4 纤维对混凝土裂缝比率的影响

Fig. 4 Effect of fiber on crack ratio of concrete
(COD: Crack opening displacement)

2.2 混凝土渗透实验

利用混凝土渗透试验装置(图 2),由数据采集系统采集到的出水量通过式(1)得到渗透系数,图 5 为不同纤维种类、掺量的混凝土在不同宽度下的渗透系数与 COD 的关系。

由图 5(a)可知,荷载作用下混凝土渗透系数随着 SF 掺量的增加而减小;裂缝曲折度越大,水通过裂缝截面的速率越低;在 COD 为 150 μm 时, SF

掺量为 55 kg/m^3 的混凝土分别比掺量为 25 kg/m^3 和 35 kg/m^3 的渗透系数分别降低 97% 和 64%;在 COD 为 200 μm 时, SF 掺量为 55 kg/m^3 分别比 25 kg/m^3 和 35 kg/m^3 的渗透系数分别降低 95.7% 和 62.8%;当 COD 小于 50 μm 时, SF 混凝土渗透系数随 COD 变化不大,保持在低值,当 50 $\mu\text{m} < \text{COD} < 100 \mu\text{m}$ 时,渗透系数逐渐提高;100 $\mu\text{m} < \text{COD} < 300 \mu\text{m}$ 时,渗透系数迅速提高。当 $\text{COD} > 300 \mu\text{m}$ 时,渗透系数基本不变。

另外可以看出,随着 SF 掺量的增加,渗透性降低,原因可能由于纤维的掺入增加裂缝断面的曲折度。从图 5(b)可以看出,在 COD 为 100 μm 时, SF25-LP4/混凝土、SF35/混凝土和 SF35-LP4/混凝土比 SF25/混凝土的渗透系数分别降低 71.9%、88.0% 和 93.8%;在 COD 为 150 μm 时, SF25-LP4/混凝土、SF35/混凝土和 SF35-LP4/混凝土比 SF25/混凝土的渗透系数分别降低 90.8%、91.6% 和 97.6%;在 COD 为 200 μm 时 SF25-LP4/混凝土、SF35/混凝土和 SF35-LP4/混凝土比 SF25/混凝土的渗透系数分别降低了 79.2%、91.8% 和 88.7%;SF25-LP4/混凝土比 SF25/混凝土试件渗透性小, SF35-LP4/混凝土比 SF35/混凝土渗透性小,同样可能由于纤维的掺入增大裂缝曲折度,从而减小渗透性;从图 5(c)发现,与单掺 SF 相比, Micro-PP 与 SF 混杂体系中相同 COD 时渗透系数基本无变化,说明 Micro-PP 对开裂混凝土的渗透性影响不大。与之前图 5(a)、图 5(b)相比, Micro-PP 的掺入对混凝土试件的渗透性影响不明显。

3 结 论

在劈裂试验和渗流试验的基础上,研究纤维种类、掺量对混凝土裂缝宽度、曲折度和渗透性的影

表 4 裂缝宽度 200 μm 时纤维混凝土裂缝曲折度

Table 4 Crack tortuosity of fiber reinforcement concrete with 200 μm of COD

Specimen	Crack width/ μm	Length L_0 /mm	Length L_{tute} /mm	Tortuosity ξ
Plain concrete	—	150	188.551	1.257
SF25/concrete	200	140.214	183.400	1.308
SF35/concrete	200	149.530	210.987	1.411
SF55/concrete	200	138.584	232.128	1.675
SF0-LP4/concrete	200	137.440	175.098	1.274
LP4-SP1/concrete	200	144.759	183.554	1.268
SF25-LP4/concrete	200	146.311	200.592	1.371
SF25-SP1/concrete	200	147.215	186.080	1.264
SF35-LP4/concrete	200	143.145	212.857	1.487
SF35-LP4-SP1/concrete	200	147.215	222.736	1.513

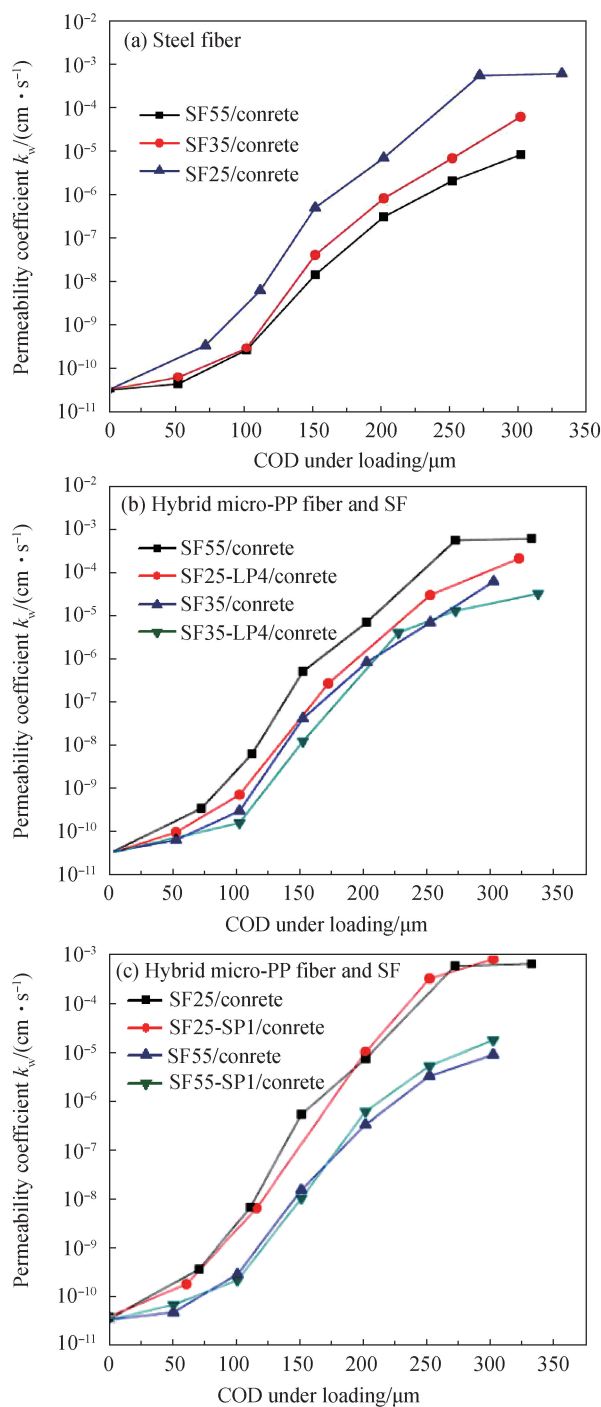


图5 纤维对混凝土渗透系数的影响

Fig. 5 Effect of fibers on permeability coefficient of concrete

响,得到以下结论:

(1) 与普通混凝土相比,钢纤维(SF)和聚丙烯长纤维(Macro-PP)能一定程度提高混凝土的极限承载力,使混凝土的破坏形式由脆性破坏变为韧性破坏,便于实验过程中对裂缝宽度(COD)的控制。

(2) 聚丙烯短纤维(Micro-PP)对桥接裂缝的效果不明显,对裂缝曲折度和混凝土的渗透性影响

较小。

(3) 当COD小于50 μm时,纤维混凝土渗透系数随裂缝宽度变化不大,保持在低值,当50 μm < COD < 100 μm时,渗透系数逐渐提高;100 μm < COD < 300 μm时,渗透系数迅速提高。当COD > 300 μm时,渗透系数基本不变。

(4) 单掺SF和Macro-PP均能促进卸载后混凝土裂缝宽度的恢复,提高混凝土表面裂缝曲折度,降低混凝土的渗透性。

(5) SF、Macro-PP及其混杂纤维体系能显著降低混凝土开裂后基体的渗透性,掺量越多,降低效果越明显。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准, GB/T 50082—2009 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Ministry of Construction of the PRC. Standard for test methods of long-term performance and durability of ordinary concrete: GB/T 50082—2009 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010 (in Chinese).
- [2] 邓宗才. 混杂纤维增强超高性能混凝土弯曲韧性与评价方法[J]. 复合材料学报, 2016, 33(6): 1274-1280.
DENG Zongcai. Flexural toughness and characterization method of hybrid fibers reinforced ultra-high performance concrete [J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2016, 33(6): 1274-1280 (in Chinese).
- [3] 俞家欢, 刘琼阳. 水泥基复合材料中纤维拉拔的变位约束细观力学模型[J]. 复合材料学报, 2008, 25(5): 147-150.
YU Jiahuan, LIU Qiongyang. Meso-scale variable engagement model for single fiber reinforced concrete under uniaxial tension [J]. Acta Materialiae Compositae Sinica, 2008, 25(5): 147-150 (in Chinese).
- [4] DING Y, YOU Z, JALALI S. Hybrid fiber influence on strength and toughness of RC beams [J]. Composite Structures, 2010, 92(9): 2083-2089.
- [5] DING Y, ZHANG Y, THOMAS A. The investigation on strength and flexural toughness of fibre cocktail reinforced self-compacting high performance concrete [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(1): 448-452.
- [6] KERMANI A. Permeability of stressed concrete: Steady-state method of measuring permeability of hardened concrete studies in relation to the change in structure of concrete under various shortterm stress levels [J]. Building Research and Information, 1991, 19(6): 360-366.
- [7] 王海龙, 张晓龙. 压荷载持续作用状态对混凝土中氯离子运输规律的影响 [J]. 水利学报, 2015, 46(8): 974-980.

- WANG Hailong, ZHANG Xiaolong. Effect of different sustained compressive loads on the chloride transportation in concrete[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(8): 974-980 (in Chinese).
- [8] BANTHIA N, BHARGAVA A. Permeability of stressed concrete and role of fiber reinforcement[J]. ACI Materials Journal, 2007, 104(1): 70-76.
- [9] WANG K, JANSEN D C, SHAH S P, et al. Permeability study of cracked concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(3): 381-393.
- [10] PICANDET V, KHELIDJ A, BASTIAN G. Effect of axial compressive damage on gas permeability of ordinary and high-performance concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(11): 1525-1532.
- [11] DESMETRE C, CHARRON J P. Water permeability of reinforced concrete with and without fiber subjected to static and constant tensile loading [J]. Cement and Concrete Research, 2012, 42(7): 945-952.
- [12] YI S T, HYUN T Y, KIM J K. The effects of hydraulic pressure and crack width on water permeability of penetration crack-induced concrete[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(5): 2576-2583.
- [13] LAWLER J S, ZAMPINI D, SHAH S P. Permeability of cracked hybrid fiber-reinforced mortar under load[J]. ACI Materials Journal, 2002, 99(4): 379-385.
- [14] WANG K, JANSE D C, SHAH S P, et al. Permeability study of cracked concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(3): 381-393.
- [15] 大连理工大学. 纤维混凝土试验方法标准[M]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
- Dalian University of Technology. Test methods used for steel fiber reinforced concrete[M]. Beijing: China Planning Press, 2010 (in Chinese).
- [15] ISMAIL M, TOUMI A, FRANCOIS R, et al. Effect of crack opening on the local diffusion of chloride in inert materials[J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34(4): 711-716.
- [16] YI S T, HYUN T Y, KIM J K. The effects of hydraulic pressure and crack width on water permeability of penetration crack-induced concrete[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(5): 2576-2583.
- [17] NAAMAN A E, NAMUR G G, ALWAN J M, et al. Fiber pullout and bond slip: I—Analytical study[J]. Journal of Structural Engineering, 1991, 117(9): 2769-2790.
- [18] HUBERT M, DESMETRE C, CHARRON J P. Influence of fiber content and reinforcement ratio on the water permeability of reinforced concrete[J]. Materials and Structures, 2015, 48(9): 2795-2807.
- [20] BEAR J. Dynamics of fluids in porous media[M]. Milton Keynes: Courier Corporation, 2013.