

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2013.03.022

PP 单丝纤维自密实混凝土强度与抗渗性能

何小兵^{1,2}, 严波¹

(1. 重庆大学资源及环境科学学院, 重庆 400030;

2. 重庆交通大学山区桥梁与隧道工程国家重点实验室培育基地, 重庆 400074)

摘要:采用力学试验、渗水标号试验、渗水高度试验和氯离子渗透试验研究了聚丙烯(PP)单丝纤维自密实混凝土强度、抗渗性能,通过扫描电镜观察了纤维自密实混凝土的微观结构,从材料的组成结构和断裂力学原理上分析了PP单丝纤维对自密实混凝土强度以及抗渗性能的影响机理。结果表明:当PP单丝纤维自密实混凝土体积掺量不超过0.15%时,PP纤维自密实混凝土具有较好的抗渗性能,渗水标号大于S35;PP单丝纤维体积掺量不超过0.1%时,自密实混凝土的强度和抗水渗性能随着纤维体积掺量的增加而提高,电通量有所增加,而当体积掺量超过0.15%后,强度仍然有增长,电通量急剧增加;与普通自密实混凝土相比,0.10%单丝PP纤维自密实混凝土具有较好的强度特性和抗渗性能,28d弯拉强度提高16.4%,28d劈裂强度提高13.4%,56d氯离子渗透电通量为919C,渗水高度减少57%。

关键词:纤维自密实混凝土;聚丙烯单丝纤维;强度;抗渗性能

中图分类号:TU528.572 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2013)03-0137-08

Strength Properties and Permeability of Polypropylene Monofilament Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete

He Xiaobing^{1,2}, Yan Bo¹

(1. College of Resources and Environmental, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China;

2. State Key Laboratory Breeding Base of Mountain Bridge and Tunnel Engineering,

Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China)

Abstract: Strength properties and permeability of the self-compacting concrete, which are reinforced with polypropylene monofilament fiber of different volume fractions, were investigated through mechanical test, water permeability test and chloride permeability test (chloride penetrability based on charge passed). Then, the microstructure of the polypropylene fiber reinforced self-compacting concrete (PFRSCC) was observed through scanning electronic microscope. The impact of polypropylene fiber on strength properties and permeability was analyzed according to the material composition and fracture theory. The results show that: 1) PFRSCC, when the volume fraction of polypropylene monofilament fiber is less than 0.15%, has good impermeability, characterized with high impermeability mark (>S35, based on Chinese Standard Test Method T 0568-2005); 2) When the volume fraction of polypropylene monofilament fiber is less than 0.10%, PFRSCC's strength properties and water impermeability increase with the addition of polypropylene fiber, and electric flux increases slightly. Whilst when the volume fraction of polypropylene

收稿日期:2012-12-26

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973)项目(2012CB723305);交通土建工程材料国家地方联合工程实验室开放基金(LHSYS-2012-002)

作者简介:何小兵(1978-),男,副教授,博士生,主要从事道路、桥梁研究,(E-mail)david.hxb@gmail.com。

fiber is higher than 0.15%, electric flux increases dramatically; 3) Compared with ordinary self-compacting concrete, PFRSCC, 0.10% polypropylene fiber has 16.4% increase in flexural tensile strength, 13.4% increase in splitting strength and 57% decrease in permeation depth, and chloride ion penetrability is low, about 919 C at 56 d.

Key words: fiber reinforced self-compacting concrete; polypropylene monofilament fiber; strength; permeability

纤维自密实混凝土(Fiber Reinforced Self-Consolidating Concrete 或 Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete, 简称 FRSCC)是在混凝土混合物中掺入一定长度和体积掺量的纤维而配制的一种仅依靠自身重力作用就能填充模筑混凝土的钢筋空隙而达到密实的混凝土,其施工快速、噪音小,试件成型质量高,硬化后的韧性、抗裂性及抗冲击性好,是高性能自密实混凝土发展趋势之一^[1-3]。

由于自密实混凝土的浆料体量大、水灰比小,纤维常可以用来增强其抗裂性能。根据所选用的纤维的模量不同,纤维自密实混凝土可以分为高模量纤维自密实混凝土(如钢纤维自密实混凝土、碳纤维自密实混凝土等)和低模量纤维自密实混凝土(聚丙烯纤维自密实混凝土、聚丙烯腈自密实混凝土以及聚乙烯醇自密实混凝土)。其中,低模量纤维又称之为柔性纤维。由于对柔性纤维阻裂、增强机理认识不足,国内外通常采用高模量纤维来增强自密实混凝土性能,进行了大量基本性、验证性的研究,研究了钢纤维自密实混凝土混合物性质及混合物配合比设计方法^[4-5],不同钢纤维形式及其掺量对自密实工作性及力学性能的影响^[6-9],复杂环境下(多向受力、高温)钢纤维自密实混凝土力学性能^[10-11],钢纤维和自密实混凝土的界面性能^[14],钢纤维自密实混凝土的断裂性能^[15],并对钢纤维自密实混凝土基本力学性能指标进行了数值模拟和试验验证^[12-13];部分学者还对玻璃纤维自密实混凝土的配制方法、强度及流变性能进行了研究^[16-18]。总的来说,高模量纤维自密实混凝土具有较好的阻裂、增强作用,可以用来配制超高强混凝土,但其对自密实混凝土工作性的负面影响较大。由于材料抗渗性是影响材料耐久性的重要指标,文献[19-21]初步研究了玻璃纤维和钢纤维的抗渗透性能,钢纤维自密实混凝土的氯离子渗透能力是阻碍其在氯离子环境下使用的重要因素;玻璃纤维能改善自密实混凝土的渗透性能,相关研究有待进一步开展。

柔性纤维通常被用来改善自密实混凝土的收缩性能^[22-23],如聚丙烯单丝纤维、聚丙烯腈单丝纤维等。研究表明,聚丙烯(PP)单丝纤维自密实较钢纤

维自密实有更好的工作性^[24],且表现出良好的增强效应^[25],能提高自密实混凝土的断裂能^[15],显著改善自密实混凝土的抗裂、抗冲击性能^[26],而有关 PP 单丝纤维自密实混凝土抗渗性能较系统的研究还少有报道。

本文研究了 PP 单丝纤维体积掺量对自密实混凝土强度及抗渗性能(水渗透性和氯离子渗透性)的影响,并从材料的组成结构和断裂力学原理上分析了 PP 单丝纤维对自密实混凝土强度及抗渗性能的影响机理。

1 试验设计

1.1 原材料

试验采用普通硅酸盐水泥,粉煤灰满足 GB/T 1596-2005 和 CECS 203:2006 技术规程中 I 级要求,粗骨料选用 5~20 mm 的石灰石碎石,细集料选用细度模数为 2.71 的河砂,柔性纤维采用混凝土用聚丙烯单丝纤维,高效减水剂选用固含量为 27% 聚羧酸系高效减水剂。具体技术指标见表 1~4。

表 1 水泥技术指标

筛余量 (80 μm)/%	凝结时间/min		3 D 强度/MPa		安定性
	初凝	终凝	抗压	弯拉	
3.6	171	255	19.3	3.7	合格

表 2 粉煤灰技术指标

筛余量 (45 μm)/%	表观密度/ (g·cm ⁻³)	含水量/%	烧失量/%	需水量比/%
4.8	2.48	0.3	3.2	93.8

表 3 集料技术指标

集料	表观密度/ (g·cm ⁻³)	含水量/ %	压碎值/ %	针片状 含量/%	含泥量/ %
细集料	2.67	2.08	—	—	0.8
粗集料	2.78	0.13	12.7	11.3	0.5

表 4 聚丙烯(PP)单丝纤维技术指标

直径/ μm	密度/ (g·cm ⁻³)	弹性模量/ MPa	拉伸强度/ MPa	断裂延 伸率/%	熔点/ ℃
31	0.91	3 850	635	21	165

1.2 配合比

PP单丝纤维自密实混凝土配合比采取在普通自密实混凝土混合料中直接掺入PP单丝纤维的方式获得。与普通混凝土不同的是,PP单丝纤维自密实混凝土的配合比首先要满足工作性的要求,而根据 Binham Plastic Fluid 方程可知,纤维的掺入必将导致 Binham 粘度增加。因此,在不改变原有自密实混凝土配合比的情况下,纤维有一基于工作性的最佳体积掺量范围。当纤维体积掺量超过该范围后,可以采用增加砂率、减水剂用量、胶凝材料用量以及水胶比等方式改善工作性。

普通自密实混凝土的基准配合比为:水胶比 0.3,胶凝材料用量 550 kg/m^3 ,粗集料用量 834 kg/m^3 ,粉煤灰占胶凝材料的 30%,砂率为 50%,减水剂占胶凝材料的 1%;纤维采用长度为 12 mm 的 PP 单丝纤维,体积掺量分别为 0.05%、0.1%、0.15%、0.2%。

1.3 试验方法

1) PP 单丝纤维自密实混凝土制备

PP 单丝纤维自密实混凝土配制时,先将集料、胶凝材料倒入搅拌机干拌 1~2 min,然后加入 PP 单丝纤维干拌 1~2 min,接着加入高效减水剂和 80%左右的水拌合 1 min 左右,再加入剩下的水拌合 1 min 左右,然后停止搅拌并观察是否有离析、纤维成团等状况,1~2 min 内进行坍落扩展度(SF)和 U 型仪(Δh)试验,并制备相应的抗压、劈裂、抗折试件以及抗渗试件进行强度试验和抗渗性试验。试验共制备 5 种混合料,FS-M-0、FS-M-5、FS-M-10、FS-M-15 和 FS-M-20,分别对应 0、0.05%、0.1%、0.15% 和 0.2% 体积掺量的 PP 单丝纤维。

2) PP 单丝纤维自密实混凝土工作性试验^[27-28]

试验采用坍落扩展度检测纤维自密实混凝土的填充性,采用 U 型仪检测间隙通过性和抗离析性。根据自密实混凝土的相关规范及条款,采用坍落扩展度($SF \geq 550 \text{ mm}$)和 U 型仪高度差($\Delta h \leq 30 \text{ mm}$)对纤维自密实混凝土的工作性进行综合评价。如果 PP 单丝纤维掺入到自密实混凝土后,混合料的工作性达不到要求,采用增加减水剂和胶凝材料用量方式进行改善(由于试验配合比中砂率较高和提高水胶比会影响强度,试验中没有采用此两种方式改善工作性),直至满足工作性要求。表 5 为纤维掺入到自密实混凝土后混合料工作性和 28 d 强度试验结果。

表 5 自密实混凝土工作性能和 28 d 抗压强度值

组别	体积掺量/%	坍落扩展度/mm	U 型仪高度差/mm	28 d 抗压强度/MPa
FS-M-0	0.00	700	0	42.5
FS-M-5	0.05	625	15	41.8
FS-M-10	0.10	605	25	42.2
FS-M-15	0.15	520	35	40.9
FS-M-20	0.20	480	42	39.2

FS-M-15-I、FS-M-15-II 分别对应增加高效减水剂和胶凝材料方式(其中:I 表示该组采用了增加高效减水剂的方式改善工作性,II 表示改组采用了增加胶凝材料用量的方式改善工作性)。调整时,当采用只改变单一因素就能达到,其它条件都不发生改变;如果采用改变单一参数无法满足工作性要求时,可以采用复合调整的方式,先提高减水剂用量,在增加胶凝材料用量。FS-M-20 编号方式一样。表 6 为调整配合比后的 PP 纤维自密实混凝土混合料工作性和 28 d 抗压强度试验结果。

表 6 调整配合比后的 PP 纤维自密实混凝土工作性能和 28 d 抗压强度

组别	调整方式	坍落扩展度/mm	U 型仪高度差/mm	28 d 抗压强度/MPa
FS-M-15-I	减水剂增加都 1.25%	550	25	45.8
FS-M-15-II	胶凝材料增加到 570 kg/m^3	560	25	46.3
FS-M-20-I	减水剂增加都 1.50%	560	30	44.3
FS-M-20-II	胶凝材料增加到 590 kg/m^3	580	25	45.9

3) PP 单丝纤维自密实混凝土抗渗试验^[29-31]

采用水渗透试验、氯离子渗透试验方法进行 PP 单丝纤维自密实抗渗性能研究(见图 1~3)。水渗透方法采用水泥混凝土抗渗试验方法(T 0568—2005)和水泥混凝土渗水高度试验方法(T 0569—2005),每组 6 个试件;氯离子渗透试验采用电量法(JTJ/T 193—2009,ASTM C 1202),测试试件 28 d 和 56 d 养护龄期下的电通量,每组 3 个试件。当电通量小于 100 C,氯离子不渗透;当电通量在 100~1 000 C 时,氯离子渗透能力很低;当电通量在 1 000~2 000 C 时,氯离子渗透能力低;当电通量在 2 000~4 000 C 时,氯离子渗透能力中等;当电通量大于 4 000 C 时,氯离子渗透能力很强。



图 1 抗渗性试验图

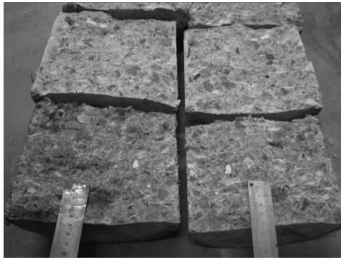


图 2 渗水高度试验图

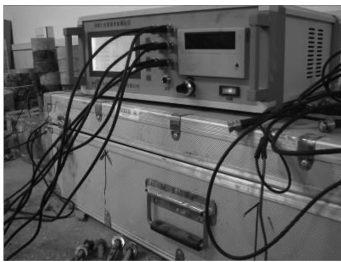


图 3 氯离子渗透试验

4) PP 单丝纤维自密实混凝土早期强度试验^[29]

在确定 PP 单丝纤维自密实混凝土配合比后,成型 100 mm × 100 mm × 100 mm 立方体抗压、劈裂试件和 100 mm × 100 mm × 400 mm 抗折试件,每组 3 个试件,测试其 28 d 强度值。

2 试验结果与分析

2.1 纤维体积掺量对自密实混凝土工作性及 28 d 抗压强度的影响

图 4、图 5 分别为 PP 单丝纤维体积掺量与自密实混凝土工作性和 28 d 抗压强度关系曲线。当 PP 纤维的体积掺量超过 0.10% 后,混凝土工作性已不满足自密实的工作性要求,抗压强度有不同程度的降低。实际拌合过程中也发现,当掺量达到 0.10% 后,纤维分散性差,成团现象明显,混凝土工作性急剧下降。因此,在不改变自密实混凝土原有配合比情况下,纤维最大体积掺量不宜超过 0.10%。

2.2 调整配合比后的 PP 纤维自密实混凝土工作性及 28 d 抗压强度

当 PP 单丝纤维体积掺量超过 0.10% 后,自密

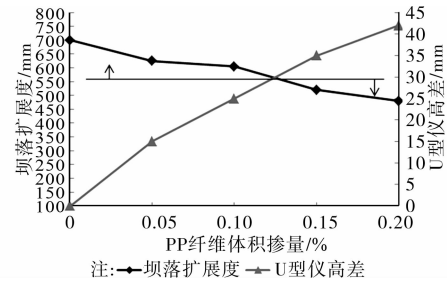


图 4 自密实混凝土工作性与 PP 单丝纤维体积掺量关系曲线

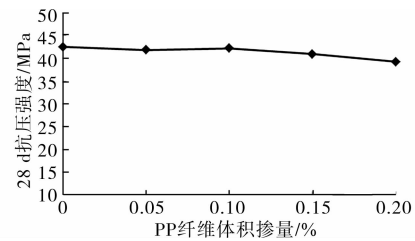


图 5 自密实混凝土 28 d 抗压强度与 PP 纤维体积掺量关系曲线

实混凝土工作性已不满足规程要求,需进行配合比调整。表 6 显示,通过提高高效减水剂用量和增加胶凝材料的用量都可以显著改善 PP 单丝纤维自密实的工作性,且 28 d 抗压强度较普通自密实混凝土有 4%~9% 不同程度的提高;但当减水剂的用量由 1.25% 增加到 1.5% 时,0.2% 纤维体积掺量自密实混凝土相对于 0.15% 体积掺量的混凝土的工作性和 28 d 强度没有增量效应,建议减水剂的掺量不要超过 1.5%;增加胶凝材料用量会带来成本和开裂风险的增加,胶凝材料的用量也需要控制在一定的范围,因此 PP 纤维的体积掺量不宜超过 0.15%。

2.3 PP 纤维自密实混凝土抗渗性能

根据 PP 纤维自密实混凝土工作性试验结果,采用 PP 单丝纤维制备 FS-M-0、FS-M-5、FS-M-10、FS-M-15-I、FS-M-20-I 5 组试件,养护 28 d 进行抗渗试验(渗水标号、渗水高度和氯离子渗透),同时还制备一组 56 d 养护龄期的试件进行氯离子渗透试验。

2.3.1 渗水标号 试验时,水压力从 0.1 MPa 开始,每隔 8 h 增加水压力 0.1 MPa,当压力增加至 3.6 MPa 后停止试验(抗渗仪的最大水压力为 4.0 MPa)。当纤维体积掺量不超过 0.15% 时,水压力增加至 3.6 MPa 时试件表面均未发现渗水,渗水标号大于 S35;当纤维掺量达到 0.2%,FS-M-20-I 压力达到 0.4 MPa 就有 3 个试件出现表面渗水情况,渗水标号为 S3。因此,PP 单丝纤维的体积掺量不宜超过 0.15%;当纤维体积掺量在 0~0.15%,渗水标号无法定量评价 PP 单丝纤维自密实混凝土的

水渗透性能。为了比较抗水渗透性能情况,试验采用渗水高度来定量评价PP纤维对自密实混凝土抗渗性能的影响。

2.3.2 渗水高度 按水泥混凝土渗水高度试验方法,对渗水标号大于S35试件进行劈裂试验,量取渗水高度(图6),表7为渗水高度平均值。试验结果表明,当PP单丝纤维体积掺量不超过0.10%时,PP纤维自密实混凝土的渗水高度随体积掺量的增加而减少;当PP纤维的体积掺量超过0.10%后,尽管此时的渗水高度较普通自密实混凝土仍然小,渗水高度又开始升高。由于可见,当纤维体积掺量不宜超过0.10%时,PP纤维自密实的水抗渗性能显著优于普通自密实混凝土,渗水高度减少57%。

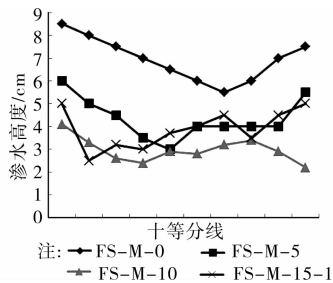


图6 纤维自密实混凝土渗水高度

表7 渗水高度平均值

组别	纤维体积掺量/%	平均渗水高度/mm
FS-M-0	0.00	70
FS-M-5	0.05	44
FS-M-10	0.10	30
FS-M-15-1	0.15	40

2.3.3 氯离子渗透 图7、图8为不同体积掺量下,28d和56dPP单丝纤维自密实混凝土抗氯离子渗透试验结果(电通量)。

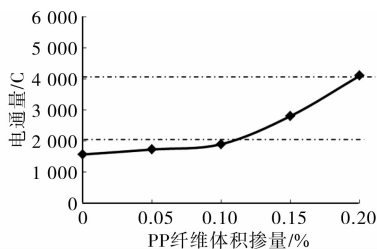


图7 28d龄期PP纤维自密实混凝土电通量与PP纤维体积掺量关系曲线

图7、图8氯离子渗透试验结果表明,当PP单丝纤维体积掺量在0.10%以内时,尽管PP纤维自密实混凝土的电通量随PP纤维体积掺量的增加而

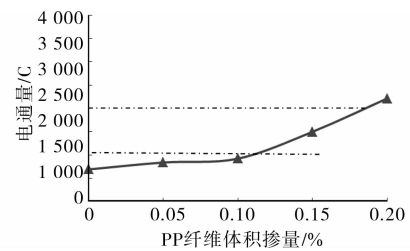


图8 56d龄期PP纤维自密实混凝土电通量与PP纤维体积掺量关系曲线

增加,但28dPP纤维自密实混凝土电通量不超过2000C左右,56dPP不超过1000C,氯离子渗透能力属于“渗透能力低”和“渗透能力很低”的水平;当纤维体积掺量超过0.10%后,电通量随纤维体积掺量的增加而急剧增加,PP纤维自密实混凝土氯离子渗透能力达到中等及以上。因此,纤维体积掺量不宜超过0.10%。

需要说明的是,尽管电通量试验中的PP纤维自密实混凝土的氯离子渗透能力高于普通自密实混凝土,但根据ASTM C1202-12和JGJ/T 193-2009规范,56d龄期PP纤维自密实混凝土属于氯离子渗透能力很低的评定等级,可以在氯离子环境中使用。

有关PP纤维普通混凝土研究表明,相对普通混凝土而言,PP纤维普通混凝土中较大毛细孔的数量增加,但大孔、过渡孔的数量减少,材料整体性能变好,其中毛细孔的增加将影响到渗透性能,将导致氯离子渗透试验电通量结果变大。而混凝土内部的微裂缝也是导致其抗渗性能降低的重要原因,PP纤维在水泥基材料中具有阻裂、增强作用,材料的微裂缝等缺陷大大减少,水压力法较电通量法更能反映这方面的变化。因此,宜采用水压力法和氯离子渗透法综合评定PP纤维增强水泥基材料的抗渗性能,也可以借鉴来定性解释PP纤维自密实混凝土电通量试验结果与抗水渗透的结果相矛盾的结论。同时,有待开展压汞试验了解PP纤维自密实混凝土的孔隙结构的分布特点和孔径分布范围,进一步解释上述现象。

2.4 PP单丝纤维自密实混凝土28d强度

图9~11为满足工作性要求的PP单丝纤维自密实混凝土的28d抗压强度、28d劈裂强度和28d弯拉强度与PP纤维体积掺量之间的关系。试验结果表明,纤维体积掺量不超过0.15%时,纤维的掺量对抗压强度的影响较小,劈裂强度和弯拉强度随着纤维体积掺量的增加而增加;当纤维体积掺量超过0.15%后,纤维自密实混凝土抗压强度、劈裂强度和弯拉强度出现不同程度的降低。

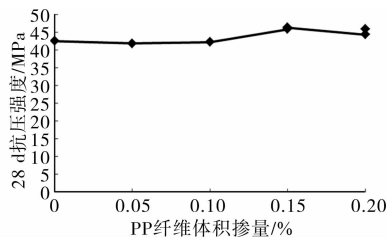


图 9 纤维自密实混凝土抗压强度与纤维体积掺量的关系曲线

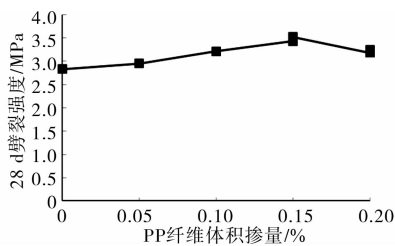


图 10 纤维自密实混凝土劈裂强度与纤维体积掺量的关系曲线

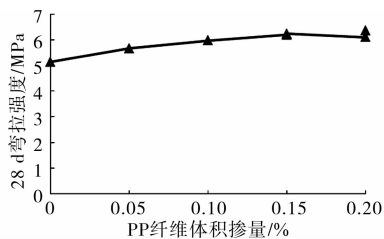


图 11 纤维自密实混凝土弯拉强度与纤维体积掺量的关系曲线

3 PP 纤维对自密实混凝土强度和抗渗性能影响分析

新拌自密实混凝土性能为非牛顿流体,可以用宾汉姆塑性流体(Bingham Plastic Fluid)近似描述其流变性能。根据宾汉姆流变方程 $\tau = \tau_0 + \eta_0 \dot{\gamma}$,当纤维掺量达到一定程度,宾汉姆粘度 η_0 增加,自密实混凝土的工作性逐步丧失,因此必须确定理想的纤维选型和掺量。通过采用提高胶凝材料和高效减水剂的用量,使新拌混凝土屈服剪切应力 τ_0 降低,重新获得高流动性,从而可以提高纤维的掺量,但胶凝材料和高效减水剂的用量过大会造成 τ_0 、 η_0 过小,进而造成新拌混凝土的离析。因此,PP 纤维体积掺量有一定的范围。试验中也发现,当纤维体积掺量超过 0.15% 后,PP 纤维分散性差,新拌 PP 纤维自密实混凝土有不同程度的离析现象发生。

当 PP 单丝纤维体积掺量不超过 0.10% 时,扫描电镜显示 PP 纤维自密实混凝土的纤维表明上大

量的 C-H-S 凝胶(图 16),其与水泥基体形成良好的粘接;而大量乱向分布的 PP 纤维上的 C-H-S 凝胶相互延伸搭接形成一个网络结构,当一处纤维受力,荷载会很快传递到受影响的区域,形成整体受力,而对于 PP 网状纤维其整体受力性能更好,从而提高材料的强度指标。

抗渗试验中,当纤维体积掺量不超过 0.10% 时,渗水高度随着纤维体积掺量的增加而减少,而电通量有所增加(但电通量结果属于氯离子渗透能力较低的等级),看似矛盾的结果实际上并不矛盾。大量的研究表明,随着纤维掺量的增加,水泥基材料中较大毛细孔的数量增加,但大孔、过渡孔的数量减少,从而表现出了上述性质,材料抗氯离子的渗透能力还是强的,且电通量试验结果都处于规范规定中的氯离子渗透能力很低的评级中,可以在氯离子环境中使用。当纤维体积掺量超过 0.15% 后,由于 PP 纤维分散性较差,大孔、过渡孔的数量急剧增加,导致材料抗渗性能急剧降低。

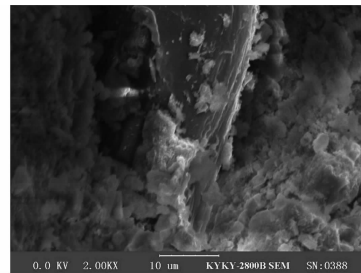


图 12 PP 单丝纤维自密实混凝土的 SEM 微观结构

再者,从断裂力学的角度来看,纤维自密实混凝土的破坏程是一个裂缝萌生与发展的过程。根据线弹性断裂力学的应力强度因子叠加原理^[32-33],当一根纤维横跨裂缝时将会产生一个反向的应力强度因子,阻止裂纹的进一步扩展,此时裂纹尖端的应力强度因子 $K = K^c - K^f$,其中 K^f 为纤维产生的反向应力强度因子, K^c 为自密实混凝土裂纹尖端的应力强度因子。当裂纹穿过一系列乱向分布的纤维后,且纤维为网状相连时,其裂纹尖端的应力强度因子更小,材料抗裂性能及强度指标提高。

4 结 语

通过对 PP 单丝纤维自密实混凝土的土强度、抗渗性能研究,可以得出如下结论:

1) 采用“粉煤灰+水泥”粉体系方法配制而成的 PP 单丝纤维自密实混凝土强度等级不超过 C50,属于中低强度自密实混凝土,相应的研究成果适用于中低强度自密实混凝土。对于采用“双掺或多掺”

(超细磨粉煤灰、矿物掺合料、高效外加剂等)技术配制的PP单丝纤维高强自密实混凝土(C60~C80)的强度、抗渗性及其机理有待进一步研究。

2)通过提高胶凝材料和高效减水剂用量可以显著改善柔性纤维自密实混凝土的工作性,能将PP单丝纤维的最大掺量提高到0.20%,PP纤维和基体共同受力变形,材料的整体力学性能得到提升。

3)PP纤维自密实混凝土具有较好的抗水渗透能力,当PP纤维体积掺量不超过0.15%,渗水标号达到S35以上;当PP纤维体积掺量不超过0.10%,PP纤维自密实混凝土渗水高度随着纤维体积掺量的增加而增加。

4)当PP纤维体积掺量在0.10%以内时,尽管PP纤维自密实混凝土的电通量随PP纤维体积掺量的增加而增加,28dPP纤维自密实混凝土电通量小于2000C,56dPP纤维自密实混凝土电通量小于1000C,氯离子渗透能力低;当纤维体积掺量超过0.10%后,PP纤维自密实混凝土电通量随纤维体积掺量的增加而急剧增加,PP纤维自密实混凝土氯离子渗透能力达到中等及以上。

5)综合考虑强度、水渗透性和氯离子渗透性能,PP单丝纤维的最佳体积掺量为0.10%,28d弯拉强度提高16.4%,28d劈裂强度提高13.4%,56d氯离子渗透电通量为919C,渗水高度减少57%。

参考文献:

- [1] Bonen D, Shah S P. Fresh and hardened properties of self-consolidating concrete [J]. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2005, 7(1): 14-26.
- [2] Ozyurt N, Mason T O, et al. Correlation of fiber dispersion, rheology and mechanical performance of FRCs [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2007, 29(2): 70-79.
- [3] Brown M C, Ozyildirim C, et al. Investigation of Fiber-Reinforced Self-Consolidating Concrete [R]. Virginia: Federal Highway Administration, 1-24, 2010.
- [4] Grünwald S, Walraven J C. Parameter-study on the influence of steel fibers and coarse aggregate content on the fresh properties of self-compacting concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2001, 31(12): 1793-1798.
- [5] Ferrara L, Park Y D, Shah S P. A method for mix-design of fiber-reinforced self-compacting concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2007, 37(6): 957-971.
- [6] Ghanbarpour S, Mirmoradi S H, Barari A. The effect of type and volume fraction (VF) of steel fiber on the mechanical properties of self-compacting concrete [J]. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 2010, 8(3): 247-256.
- [7] Gencil O, Brostow W, Datashvili T, et al. Workability and mechanical performance of steel fiber-reinforced self-compacting concrete with fly ash [J]. *Composite Interfaces*, 2011, 18(2): 169-184.
- [8] Akcay B, Tasdemir M A. Mechanical behavior and fiber dispersion of hybrid steel fiber reinforced self-compacting concrete [J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 28(1): 287-293.
- [9] Deeb R, Ghanbari A, Karihaloo B L. Development of self-compacting high and ultra-high performance concretes with and without steel fibers [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2012, 34(2): 185-190.
- [10] Fantilli A P, Vallini P, Chiaia B. Ductility of fiber-reinforced self-consolidating concrete under multi-axial compression [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2011, 33(4): 520-527.
- [11] Khaliq W, Kodur V. Thermal and mechanical properties of fiber reinforced high performance self-consolidating concrete at elevated temperatures [J]. *Cement and Concrete Research*, 2011, 41(11): 1112-1122.
- [12] Cunha V M C F, Barros J A O, Sena C J M. An integrated approach for modeling the tensile behavior of steel fiber reinforced self-compacting concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 2011, 41(1): 64-76.
- [13] Khalj G, Nazari A. Modeling split tensile strength of high strength self-compacting concrete incorporating randomly oriented steel fibers and SiO₂ nanoparticles [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2012, 43(4): 1887-1892.
- [14] Cunha V M C F, Barros J A O, Sena-Cruz J M. Pullout behavior of steel fibers in self-compacting concrete [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2010, 22(1): 1-9.
- [15] 罗素蓉, 李豪. 纤维自密实混凝土断裂能试验研究 [J]. *工程力学*, 2010, 27(12): 119-123.
- Luo S R, Li H. Experimental investigation on the fracture energy of fiber reinforced self-compacting concrete [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 27(12): 119-123.
- [16] Barlurenga G. Cracking control of concretes modified with short AR-glass fibers at early age: Experimental results on standard concrete and SCC [J]. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37(12): 1624-1638.
- [17] Jaganadha R K, Swaroopa R M, Seshagiri R M V. Behavior of fiber reinforced medium and high strength

- self-compacting concrete [J]. International Journal of Earth Sciences and Engineering, 2010, 3(5):720-728.
- [18] Umar A, Tamini A. A critical study of the effect of viscosity modifying admixture and glass fibers on the properties of self-compacting concrete [J]. Journal of Structural Engineering (Madras), 2011, 38(2):190-199.
- [19] Ganesan N, Indira P V, Santhosh K P T. Durability aspects of steel fiber-reinforced SCC [J]. Indian Concrete Journal, 2006, 80(5):31-37.
- [20] Srinibasa R P, Seshadri S T, Sravana P. Durability studies on glass fiber SCC [J]. Indian Concrete Journal, 2009, 83(10):44-52.
- [21] El-dieb A S. Mechanical, durability and microstructural characteristics of ultra-high-strength self-compacting concrete incorporating steel fibers [J]. Materials and Design, 2009, 30(10):4286-4292.
- [22] Nehdi M, Ladanchuk J D. Fiber synergy in fiber-reinforced self-consolidating concrete [J]. ACI Materials Journal, 2004, 101(6):508-517.
- [23] El-dieb A S, Reda T M M. Flow characteristics and acceptance criteria of fiber-reinforced self-compacted concrete (FR-SCC) [J]. Construction and Building Materials, 2012, 27(1):585-596.
- [24] Gencil O, Ozel C, Brostow W, et al. Mechanical properties of self-compacting concrete reinforced with polypropylene fibers [J]. Materials Research Innovations, 2011, 15(3):216-225.
- [25] Mazaheripour H, Ghanbarpour S, Mirmoradi S H, et al. The effect of polypropylene fibers on the properties of fresh and hardened lightweight self-compacting concrete [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(1):351-358.
- [26] He X B, Yang Q G. Research on impact properties of flexible fiber reinforced self-compacting concrete in middle-low intensity[C]// Shi C, Yu Z, Khayat K H, et al. Proc. 65 of RILEM. Paris: RILEM Press, 2009: 577-585.
- [27] CCES 02—2004 自密实混凝土设计与施工指南[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [28] CECS 203:2006 自密实混凝土应用技术规程[S]. 北京:中国计划出版社,2006.
- [29] JTG E30—2005 公路工程水泥及水泥混凝土试验规程[S]. 北京:中国交通出版社,2005.
- [30] ASTM C1202—12 Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride Ion penetration [S]. ASTM Press,1997.
- [31] JGJ/T 193—2009 混凝土耐久性评定检验标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
- [32] 何小兵, 杨庆国, 何国基. 聚丙烯纤维增强水泥稳定碎石基层材料的抗冲刷性能[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(2):263-267.
- He X B, Yang Q G, He G J. Anti-erosion property of polypropylene fiber reinforced cement-stabilized macadam base material [J]. Journal of Building Material, 2010, 13(2):263-267.
- [33] He X B, Huang F, Zhang C Y. Mechanism and experimental verification of degradation of RC beams induced by concrete/rebar bonding failure [J]. Key Engineering Materials, 2011, 452/453:877-880.

(编辑 胡 玲)