

# 碳纤维对自密实混凝土性能的影响及其微观机理分析

李建仙

(山西交通职业技术学院, 山西 太原 030031)

**摘要:** 研究了碳纤维体积掺量和水胶比对自密实混凝土工作性能、力学性能和抗氯离子侵蚀性能的影响,并利用扫描电子显微镜(SEM)对碳纤维自密实混凝土微观性能进行了分析。结果表明:碳纤维掺量增大和水胶比减小会使拌和物的流动性降低,但仍符合 GJ/T 283—2012《自密实混凝土应用技术规程》的要求。当其掺量不高于 0.6% 时,碳纤维在浆体中分散均匀,可有效限制自密实混凝土中微裂纹的扩展,改善断裂韧性,提高劈裂抗拉强度,并增强抗氯离子侵蚀性能,但会在一定程度上降低其抗压强度。当  $W/B=0.36$ ,碳纤维体积掺量为 0.2% 时,其劈裂抗拉强度和抗氯离子侵蚀性能比对照组分别提升了 10.5% 和 14.8%,综合性能最佳。

**关键词:** 碳纤维; 自密实混凝土; 工作性能; 力学性能; 抗氯离子侵蚀

自密实混凝土(Self-Compacting Concrete, SCC)的拌和物在施工过程中,无需经过振捣,仅在自身重力作用下便能通过钢筋间隙,自行填充建筑模板并达到密实状态,是一种具有良好工作性能的高性能混凝土。而纤维自密实混凝土(Fiber Reinforced Self-compacting Concrete, FRSCC)则是在 SCC 中掺入纤维,使其兼具了自密实混凝土和纤维增强混凝土二者的优点,以克服自密实混凝土拌和物因高流动性带来的稳定性较差等缺点,并进一步提高了 SCC 的强度、韧性和耐久性。

SCC 在高层建筑、公路、桥梁等诸多工程领域中都有着广泛的应用,在保障 SCC 基本施工性能的前提下,对 FRSCC 进行研究是改善其力学性能,提高抗裂性和尺寸稳定性行之有效的方法。蔡怀森等对纤维自密实水泥基补强材料的抗裂性能进行了研究,发现聚丙烯纤维和聚乙烯醇纤维的掺入能降低自密实补强材料的开裂指数,且掺入聚乙烯醇纤维的抗裂性能优于聚丙烯纤维;张虎等探讨了钢纤维对自密实轻骨料混凝土的影响,指出掺杂钢纤维可提高其抗压强度、改善劈裂抗拉强度并优化早期收缩性能;毕继红等研究显示,玄武岩纤维体积掺量不超过 0.3% 时,玄武岩纤维的掺入能够有效抑制微裂纹的扩展,掺入纤维后 SCC 的抗折强度比素混凝土提高了 30.4%,但对抗压强度的影响不大。因此,目前关于 FRSCC 的研究多集中

在钢纤维、聚丙烯纤维、玄武岩纤维等方面,为促进碳纤维自密实混凝土(Carbon Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete, CFRSCC)的发展,该文重点考察碳纤维体积掺量和水胶比对自密实混凝土工作性能、力学性能和抗氯离子侵蚀性能的影响及相关机理,以期在实际工程应用提供指导。

## 1 原材料与试验方法

### 1.1 原材料

水泥采用 P.O. 42.5 级普通硅酸盐水泥;硅灰为山东生产,其中  $SiO_2$  含量  $\geq 95\%$ ;粗骨料为 5~16 mm 连续级配的花岗岩碎石;细骨料为细度模数为 2.8 的中砂;减水剂为聚羧酸高效减水剂,固含量 35%,减水率 30%;碳纤维(Carbon Fiber, CF)选用南京产长度为 12 mm 的短切碳纤维,其具体物理性能指标如表 1 所示。

### 1.2 试验方法

碳纤维自密实混凝土的配合比设计如表 2 所示。试验中以 10% 掺量的硅灰取代水泥,改善自密实混凝土的流动性能,并降低水泥用量以降低生产能耗。文中着重探讨了水胶比( $W/B$ )等于 0.36 和 0.42 时,不同 CF 体积掺量(0%、0.2%、0.4%、0.6% 和 0.8%)对自密实混凝土工作性能及力学性能的影响。

收稿日期:2019-05-02

基金项目:山西省重点研发计划项目(编号:201603D121023-2)

作者简介:李建仙,女,讲师.E-mail: ljxsxjt08@yeah.net

表 1 碳纤维的物理性能指标

直径/ $\mu\text{m}$	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	含碳量/ %	抗拉强 度/GPa	拉伸模 量/GPa	断裂伸 长率/%	体积电阻率/ $(\Omega \cdot \text{cm})$
10~15	1.6~1.76	$\geq 95$	3.6~3.8	240~280	1.5~2.0	$1.5 \times 10^{-3}$

表 2 碳纤维自密实混凝土配合比设计

编号	水胶比	CF 掺量/%	材料组成/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$					减水剂/ %
			水泥	硅灰	粗骨料	细骨料	水	
CFRSCC-1	0.36	0	460.8	51.2	870	712	184.3	2.5
CFRSCC-2	0.36	0.2	460.8	51.2	870	712	184.3	2.5
CFRSCC-3	0.36	0.4	460.8	51.2	870	712	184.3	2.5
CFRSCC-4	0.36	0.6	460.8	51.2	870	712	184.3	2.5
CFRSCC-5	0.36	0.8	460.8	51.2	870	712	184.3	2.5
CFRSCC-6	0.42	0	395.1	43.9	870	712	184.3	2.5
CFRSCC-7	0.42	0.2	395.1	43.9	870	712	184.3	2.5
CFRSCC-8	0.42	0.4	395.1	43.9	870	712	184.3	2.5
CFRSCC-9	0.42	0.6	395.1	43.9	870	712	184.3	2.5
CFRSCC-10	0.42	0.8	395.1	43.9	870	712	184.3	2.5

参照 JGJ/T 283—2012《自密实混凝土应用技术规程》，采用强制式搅拌机将粗细骨料搅拌 1 min，再加入一半用水量，搅拌 0.5 min，随后加入水泥、硅灰、减水剂、碳纤维和另一半用水量，并充分搅拌 2 min。观察碳纤维自密实混凝土搅拌过程中的纤维分散情况以及拌和物离析等情况，根据流动性再搅拌 0.5 min，而后立即进行工作性能测试。

1.3 性能检测

采用坍落度筒法测量混凝土停止流动后 2 个互相垂直方向的直径，计算平均坍落扩展度；采用 J 环法测试混凝土通过钢筋间隙后的扩展度，以评价其间隙通过性能；参考 GB/T 50081—2002《普通混凝土力学性能试验方法》测试自密实混凝土的抗压强度和劈裂抗拉强度，试件规格为 100 mm×100 mm×100 mm，每组测试 3 个试件，结果取均值；参照 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》测试自密实混凝土的氯离子迁移系数；采用美国 FEI 公司 Quanta 200FEG 生产的场发射环境扫描电子显微镜对 CF 自密实混凝土试件断面的微观形貌进行分析。

2 结果与分析

2.1 CF 自密实混凝土工作性能分析

在满足流动性的前提下，自密实混凝土的稳定性是其实际浇筑中首要考虑的问题，稳定性差的自密实

混凝土在浇筑时容易出现离析泌水等问题，无法进行正常的泵送施工。为了考察 CF 掺量对自密实混凝土工作性能的影响，选用坍落度法和 J 环法对其填充能力和流动能力进行了测试，并观察自密实混凝土在拌和过程中是否泌水，以评价其抗离析性能。图 1 为 W/B 等于 0.36 和 0.42 时，CF 体积掺量对自密实混凝土坍落扩展度和 J 环扩展度的影响。由图 1(a)可知：当 W/B=0.36 时，CF 自密实混凝土的坍落扩展度为 575~700 mm，J 环扩展度为 540~685 mm。由图 1(b)可知：当 W/B=0.42 时，CF 自密实混凝土的坍落扩展度为 685~730 mm，J 环扩展度为 640~705 mm。不难发现，CF 自密实混凝土的坍落扩展度值均大于 550 mm，坍落扩展度与 J 环扩展度之间的差值均小于 50 mm，满足 JGJ/T 283—2012《自密实混凝土应用技术规程》的要求。当 CF 体积掺量低于 0.4% 时，更进一步满足了该评价标准对一级自密实混凝土扩展度值 (700±50) mm 的要求。

自密实混凝土拌和物质量越均匀，扩展度越大，表明混凝土在自身重力作用下的流动性和钢筋间隙通过性越好。尽管随着 CF 体积掺量的增加，自密实混凝土的坍落扩展度和 J 环扩展度逐渐减小，流动性能有所降低，但是其各项工作性能仍符合标准的规定，无明显的离析泌水现象，满足自密实混凝土的稳定性需求。另外，比较 W/B=0.36 和 W/B=0.42 时的扩展度值可知，水胶比的增大，使自密实混凝土拌和物的扩展度

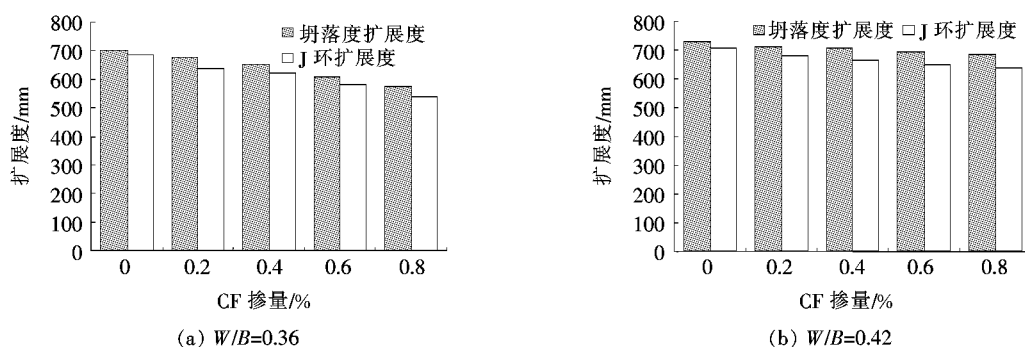


图 1 CF 掺量对自密实混凝土扩展度的影响

增加。表明水胶比的增大会在一定程度上降低浆体的黏聚性,增强自密实混凝土的流动性,增大纤维自密实混凝土拌和物离析的可能性。Bui 等研究显示:水灰比大于 0.37 时,混凝土拌和物将处于离析不稳定的状态,该文中的自密实混凝土掺杂了一定量的碳纤维,使得  $W/B=0.42$  时,混凝土拌和物仍有较好的稳定性能,也说明了 CF 能提高混凝土的抗离析性能。

碳纤维掺杂降低了混凝土的流动性,提高了混凝土的抗离析性的原因可归结如下:① 随着碳纤维掺量的增加,其在自密实混凝土中互相搭接增多,一定程度

上降低了自密实混凝土的填充效果;② 碳纤维可吸附一部分自密实混凝土中的水分子,降低胶凝材料的和易性,增大了黏聚性,从而造成了自密实混凝土流动性能的降低;③ 掺入碳纤维后,用于包覆纤维的水泥浆体增多,导致胶凝材料对粗细骨料的包覆程度相对降低,使自密实混凝土流动性和间隙通过能力下降。

## 2.2 CF 自密实混凝土力学性能分析

### 2.2.1 CF 掺量对抗压强度的影响

图 2 为两种水胶比及不同养护龄期条件下,CF 体积掺量对自密实混凝土抗压强度的影响规律。

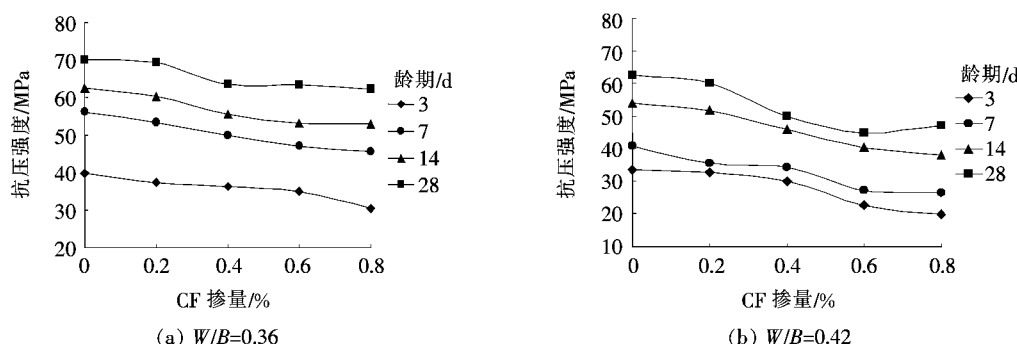


图 2 CF 掺量对自密实混凝土抗压强度的影响

由图 2 可知:随着 CF 掺量的增加,自密实混凝土的抗压强度呈现逐渐下降的趋势。养护龄期 28 d 时,制备的自密实混凝土的抗压强度为 47.2~70.3 MPa,仍能满足自密实混凝土的工程应用需求。随着养护龄期的延长,自密实混凝土的抗压强度显著增大。

比较两组数据,不难发现:① 碳纤维对自密实混凝土早期抗压强度的影响要大于后期,碳纤维掺量对其抗压强度的影响随养护龄期的延长逐渐降低;② 水胶比对自密实混凝土的抗压强度也有着显著的影响。水胶比增大,自密实混凝土的抗压强度降低,CF 掺量对自密实混凝土抗压强度的影响也越大。碳纤维对自密实混凝土早期性能的影响强于后期的原因在于基体

早期水化不充分,强度普遍不高,浆体和碳纤维之间的黏结强度较低,导致在自密实混凝土内部纤维和浆体之间的薄弱界面层的影响较为显著。而水胶比增大会导致抗压强度减小的原因则在于胶凝材料含量的减少,降低了水泥水化产物硅酸钙(C-S-H 凝胶)的含量,从而降低了浆体间的密实度及其和纤维之间的结合力,以致对抗压强度产生不利影响。

### 2.2.2 CF 掺量对劈裂抗拉强度的影响

CF 掺量对劈裂抗拉强度的影响见图 3。

由图 3 可知:① 28 d 养护龄期下,  $W/B=0.36$  时,自密实混凝土的劈裂抗拉强度为 5.2~6.2 MPa,比  $W/B=0.42$  时的劈裂抗拉强度(5.07~5.78 MPa)

略高一些,且养护龄期的延长,有助于提升混凝土的劈裂抗拉强度;② 随 CF 掺量的增加,自密实混凝土的劈裂抗拉强度整体上呈现先显著增加后趋于平缓的趋势。甚至当纤维掺量超过 0.6% 时,劈裂抗拉强度有略微下降的趋势,表明碳纤维的掺加宜适量。

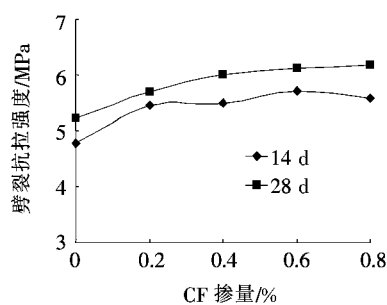
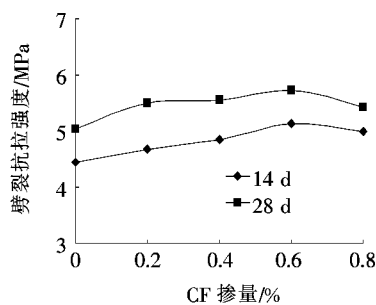
(a)  $W/B=0.36$ (b)  $W/B=0.42$ 

图 3 CF 掺量对自密实混凝土劈裂抗拉强度的影响

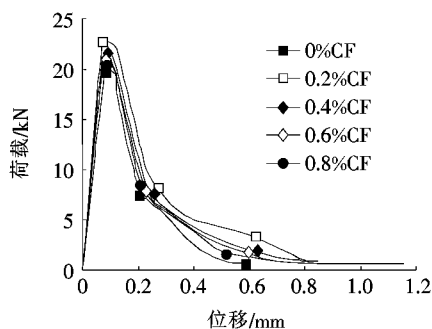
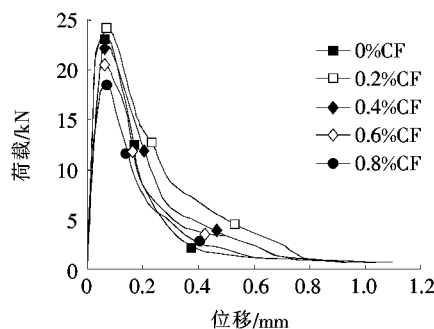
(a)  $W/B=0.36$ (b)  $W/B=0.42$ 

图 4 CF 自密实混凝土荷载—位移曲线

由图 4 可见:在线弹性阶段,掺入 CF 对自密实混凝土荷载变化的响应并不明显。当位移大于 0.07 mm 后,对照组自密实混凝土试件的荷载迅速下降,一旦裂缝失稳会立即扩展并发生脆性破坏,而掺有碳纤维的混凝土试件荷载的下降则较为缓慢,其荷载—位移曲线所覆盖的面积也更大,荷载的峰值也有所提高。试件破坏时位移的增大,表明 CF 的掺入增大了自密实混凝土的微裂纹扩展范围,而极限荷载和断裂位移同时提高表明了试件破坏时需要吸收更多的能量,改善断裂韧性。

另外,比较图 4(a)、(b)不难发现,两种水胶比下,均是 0.2%CF 掺量下自密实混凝土试件的极限荷载最大,荷载—位移曲线覆盖的面积最大,表明 CF 体积掺量以控制在 0.2% 为宜,此时混凝土的断裂韧性最佳。

### 2.3 CF 自密实混凝土微观形貌及机理分析

CF 自密实混凝土是由胶凝材料(水泥、硅灰、粉煤灰等)、粗细骨料和碳纤维等组成的复合材料,其宏观

### 2.2.3 CF 掺量对抗裂性能的影响

为了更好地分析自密实混凝土的断裂韧性,探讨碳纤维对自密实混凝土抗裂性能的影响,对不同 CF 掺量下自密实混凝土试件进行弯曲性能测试,得到如图 4 所示的荷载—位移曲线。

力学性能受到相界面微观结构的显著影响。CFRSCC 的微观结构由水泥浆体、水泥浆体—骨料界面过渡区以及碳纤维—水泥浆体界面过渡区构成,其中碳纤维与水泥浆体之间的相界面往往是混凝土内部结构的薄弱层。即碳纤维与浆体之间的黏结性能以及碳纤维的破坏形式等直接影响了自密实混凝土的宏观性能。因此,该文利用扫描电子显微镜(SEM)测试了 CFRSCC 混凝土的微观形貌,并从微观结构上分析了碳纤维改善自密实混凝土断裂性能的机理。

图 5、6 分别为  $W/B=0.36$  和 0.42 时,不同 CF 掺量下自密实混凝土的 SEM 图。由图 5、6 可知:对于未掺碳纤维的素混凝土来说,其微观形貌中存在大孔洞,且水胶比越大,产生的孔洞也越多。当 CF 掺量超过 0.6% 时,微观形貌中的纤维团簇现象增多,此时碳纤维的分散性降低[图 5(d)、(e)]和[图 5(d)、(e)],浆体中裂缝和孔洞增多,纤维集聚在一起,易形成应力点和薄弱界面层,使碳纤维不能充分发挥作用,造成宏

观力学性能下降。总体来看,一定掺量的碳纤维能较均匀地分散在混凝土内部,形成三维乱向分布并构成有效搭接。碳纤维—水泥浆体除了是混凝土的薄弱层,还起到将应力从碳纤维传导至浆体或从浆体传导至纤维的作用,良好的界面黏结性能是其充分发挥作

用,改善自密实混凝土断裂性能的基础。从图 5(b)、6(b)可知,胶凝材料包覆碳纤维,无明显裂缝,即便纤维被拔出或拉断,纤维表面仍然残存一些水化产物或浆体(图 7),可以判断碳纤维与水泥浆体界面之间的黏结较为紧密,界面黏结力良好。

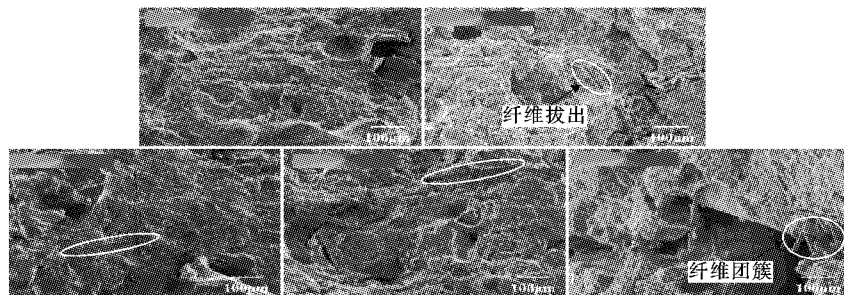


图 5  $W/B=0.36$  时,不同 CF 掺量下的自密实混凝土的 SEM 图

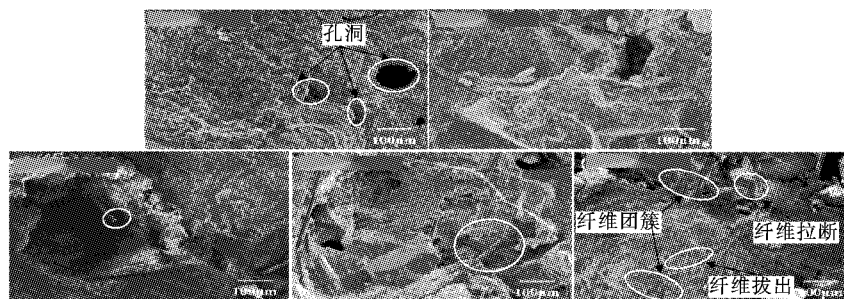
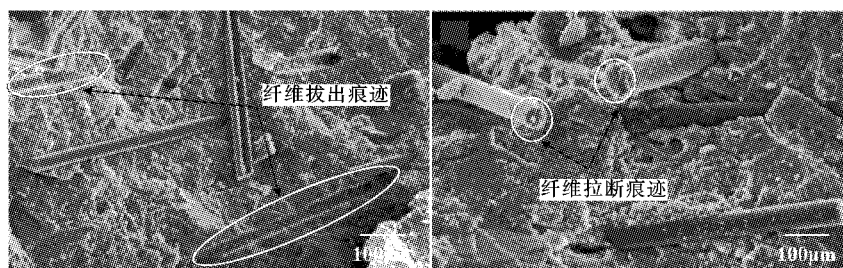


图 6  $W/B=0.42$  时,不同 CF 掺量下的自密实混凝土的 SEM 图



(a) 被拔出

(b) 被拉断

图 7 自密实混凝土中碳纤维典型状态微观形貌图

综上,一方面碳纤维本身具有较高的抗拉强度(表 1),当 CF 自密实混凝土承受荷载时,基体通过界面黏结力将荷载传递或分担给碳纤维,碳纤维参与了受力变形,并吸收了部分能量,碳纤维和基体共同作用承担荷载;另一方面,乱向分布的碳纤维使裂缝扩展路径复杂化并可桥接在宏观裂缝的两侧,阻碍裂缝、微裂纹的进一步扩展。二者综合作用提高了自密实混凝土的抗裂性能,改善了脆性破坏状态。微观结构分析与前文力学性能的测试结果基本吻合,亦证明了前文分析的合理性。

图 7 进一步给出了 CF 自密实混凝土破坏时,碳纤维被拔出和拉断的典型状态图。由图 7 可知:自密实混凝土受力破坏时,碳纤维被拔出和拉断的情况同时存在。当外界荷载大于内部水泥基体和纤维共同承受力时,纤维或被拔出或被拉断以消耗能量,当以纤维拉断为主时,碳纤维则充分发挥了其抗拉性能,改善混凝土的抗拉性能。若否,则说明纤维和浆体之间的界面结合力不强,对力学性能的改善程度也有限。

#### 2.4 CF 自密实混凝土抗氯离子渗透性

除了工作性能和力学性能,该文还进一步考察了

CF 掺量对自密实混凝土抗氯离子侵蚀性能的影响,结果如图 8 所示,以期反映纤维自密实混凝土的耐久性,为复杂环境中建筑工程的服役性能评价提供参考。

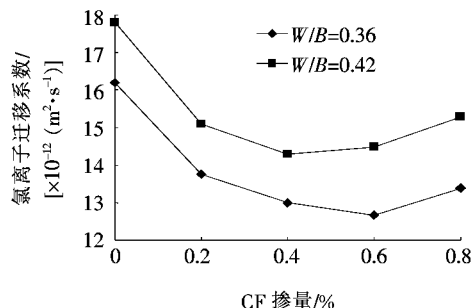


图 8 CF 掺量对自密实混凝土氯离子迁移系数的影响

由图 8 可知:随着 CF 掺量的增加,自密实混凝土的氯离子迁移系数先降低后逐渐增大。水胶比增大会增大氯离子迁移系数,即降低自密实混凝土的抗渗性能。当 CF 掺量为 0.2%、 $W/B=0.36$  时,混凝土的氯离子迁移系数为  $13.8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ,比未掺杂时降低了 14.8%。由前文分析可知,CF 的掺入提高了黏聚性能,改善了浆体的抗离析性能。另外,微观分析也表明浆体自密实性能的改善,减少了混凝土内部结构中的孔洞等有害孔隙,在微观层面上浆体空隙率的降低,增加了自密实混凝土的抗渗性,在一定程度上抑制了氯离子的内部迁移,改善了耐久性能。

### 3 结论

(1) 自密实混凝土中掺杂碳纤维会增大浆体的黏聚性,提高抗离析性能,降低了浆体的流动性和填充能力,且纤维掺量越大对工作性能的影响也越显著,但仍满足 JGJ/T 283—2012《自密实混凝土应用技术规程》的要求。

(2) 碳纤维的掺入提高了自密实混凝土的劈裂抗拉强度、断裂韧性和抗氯离子侵蚀能力,但会在一定程度上降低其抗压强度,且对抗压强度的影响随龄期的延长逐渐降低。养护龄期 28 d 时,试验中抗压强度的降低幅度为 11.5%~25.1%。当  $W/B=0.36$ ,碳纤维的体积掺量为 0.2% 时,自密实混凝土 28 d 的抗压强度、劈裂抗拉强度和氯离子迁移系数分别为 69.4 MPa、5.78 MPa 和  $13.8 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ,综合性能最优。

(3) SEM 分析显示碳纤维在水泥浆体中成三维乱向分布并互相搭接,能有效抑制微裂纹在自密实混

凝土中的延伸扩展,改善自密实混凝土的断裂韧性。水胶比的增大会降低自密实混凝土中胶凝材料含量,孔洞增多,从而对碳纤维自密实混凝土的力学性能和抗氯离子侵蚀性能产生负面影响。

### 参考文献:

- [1] Goodier C I. Development of Self-Compacting Concrete [J]. Structures & Buildings, 2003, 156(4): 405-414.
- [2] 刘运华,谢友均,龙广成.自密实混凝土研究进展[J].硅酸盐学报,2007(5).
- [3] El-Dieb A S, Taha M M R. Flow Characteristics and Acceptance Criteria of Fiber-Reinforced Self-Compacted Concrete (FR-SCC) [J]. Construction & Building Materials, 2012, 27(1): 585-596.
- [4] Hossain K M A, Lachemi M, Sammour M, et al. Strength and Fracture Energy Characteristics of Self-Consolidating Concrete Incorporating Polyvinyl Alcohol, Steel and Hybrid Fibres [J]. Construction & Building Materials, 2013, 45(45): 20-29.
- [5] M. Pająk, T. Ponikiewski. Flexural Behavior of Self-Compacting Concrete Reinforced with Different Types of Steel Fibers [J]. Construction & Building Materials, 2013, 47(10): 397-408.
- [6] 赵军,高丹盈.高性能自密实混凝土的力学及变形性能试验研究[J].中外公路,2006(2).
- [7] 乔东华.高性能自密实混凝土在公路工程中的应用与研究[J].中外公路,2012(5).
- [8] 蔡怀森,郑光和,张凯.纤维自密实水泥基补强材料抗裂性能研究[J].人民黄河,2012(3).
- [9] 张虎.自密实钢纤维轻骨料混凝土的早期性能与损伤分析[J].材料导报,2017(20).
- [10] 毕继红,周继业,鲍春,等.玄武岩纤维自密实混凝土的性能试验研究[J].新型建筑材料,2018(1).
- [11] Yehia S, Douba A E, Abdullahi O, et al. Mechanical and Durability Evaluation of Fiber-Reinforced Self-Compacting Concrete [J]. Construction & Building Materials, 2016, 121(9): 120-133.
- [12] 龙武剑,林汉鑫,陈振荣,等.纤维对自密实混凝土力学性能影响的研究[J].混凝土,2014(5).
- [13] 周玲珠,罗远彬,郑愚,等.高掺量聚丙烯纤维自密实混凝土制备及其性能研究[J].硅酸盐通报,2017(12).
- [14] Bui V K, Montgomery D, Hinczak I, et al. Rapid Testing Method for Segregation Resistance of Self-Compacting Concrete [J]. Cement & Concrete Research, 2002, 32(9): 1489-1496.