

玻璃纤维和聚丙烯纤维改善混凝土微观结构研究

吕志恒, 程铭, 蒋喜生, 周奕辉, 贾艳敏*

(东北林业大学 土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要: 该文主要研究了混凝土轴心抗压强度、劈裂抗拉强度和抗折强度在掺入玻璃纤维和聚丙烯纤维前后的变化,并通过扫描电子显微镜研究混凝土的内部结构及掺入纤维对内部结构的影响。比较了两种纤维混凝土和普通混凝土的微观结构特征,并与其宏观力学性能建立联系。研究了纤维混凝土的抗空气渗透性能,以表征纤维混凝土的耐久性。结果表明:均匀分布的玻璃纤维的掺入可提高混凝土抗渗性和混凝土界面过渡区的稳定性,水灰比为0.30、玻璃纤维体积掺量为1.35%时各项力学性能指标最佳。聚丙烯纤维掺量较小时,混凝土渗透性良好,强度略有提高,但掺量大时,聚丙烯纤维均匀性降低,混凝土渗透性增大,力学性能大幅降低。

关键词: 玻璃纤维; 聚丙烯纤维; 混凝土微观结构; 力学性能; 扫描电镜(SEM)

普通混凝土脆性较大、耐久性差,耐碱玻璃纤维(GF)弹性模量高,研究发现,在混凝土中加入玻璃纤维可显著提高混凝土抗压强度,减少混凝土的缺陷,改善其抗弯拉性能。聚丙烯纤维(PPF)抗拉强度高,耐腐蚀,能抑制混凝土内部微裂缝的扩展,提高混凝土强度,并可有效改善结构的抗裂性和韧性。混凝土界面过渡区是其宏观性能的约束条件。因此,该文设置两组不同水灰比试验,通过抗渗试验研究纤维混凝土耐久性,通过扫描电镜研究纤维对混凝土微观结构的影

响,并探究微观结构对混凝土强度的影响规律。

1 力学性能试验

1.1 试验材料

胶凝材料:①水泥:P. O. 42.5级水泥;②矿粉:密度 2.89 g/cm^3 ,强度等级S95级;③粉煤灰和硅灰。纤维:采用玻璃纤维和聚丙烯纤维,两种纤维参数见表1。

表1 纤维主要参数

纤维	纤维长度/mm	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa	断裂伸长率/%	吸水性	熔点/ $^{\circ}\text{C}$	纤维直径/ μm	拉伸极限/%
玻璃纤维	12	2.36	$>1\ 500$	4 286.0	36.4	小	169		
聚丙烯纤维	12	0.91	>486	$>4.8 \times 10^3$				18~48	>15

细集料:天然河砂,细度模数为2.66,属于中砂,满足级配要求。

粗集料:5~20 mm连续级配碎石,压碎值指标为14.87%。

外加剂:聚羧酸系高性能减水剂,减水率为25%~40%。

水:自来水。

1.2 配合比设计及力学性能

试验采用两种水灰比,配合比见表2。每组水灰比下分6组试验,其中PC为素混凝土基准组,不同掺量的玻璃纤维混凝土和聚丙烯纤维混凝土分别用G1~G3、PP1~PP3表示,具体列于表3。试件规格列于表4。

收稿日期:2020-05-10(修改稿)

基金项目:国家级大学生创新训练计划项目(编号:201810225151)

作者简介:吕志恒,男,本科在读。E-mail:lzhiheng@126.com

*通信作者:贾艳敏,女,博士,教授,博士生导师。E-mail:yanminjia2008@126.com

表 2 配合比设计

组别	水灰比	组成/(kg·m ⁻³)							减水剂/ %
		水泥	粉煤灰	硅灰	矿粉	水	砂	碎石	
A	0.30	280	65	16	32	129	694	1234	11
B	0.35	240	74	18	37	129	677	1204	10

表 3 纤维体积掺量

试验编号	玻璃纤维/%	聚丙烯纤维/%
PC	0	0
G1	0.45	0
G2	0.90	0
G3	1.35	0
PP1	0	0.45
PP2	0	0.90
PP3	0	1.35

表 4 试件参数

测定项目	长×宽×高(直径×高)/ (mm×mm×mm)	数量
抗压强度	100×100×100	3×14
抗折强度	300×100×100	3×14
劈裂抗拉强度	150×300	3×14

试验按照 GB/T 50081—2016《普通混凝土力学性能试验方法标准》进行,养护 28 d 后进行力学性能试验,表 5 为混凝土强度试验结果。

表 5 混凝土 28 d 强度试验结果

编号	立方体抗压强度		劈裂抗拉强度		抗折强度		编号	立方体抗压强度		劈裂抗拉强度		抗折强度	
	强度/ MPa	相对值	强度/ MPa	相对值	强度/ MPa	相对值		强度/ MPa	相对值	强度/ MPa	相对值	强度/ MPa	相对值
A-PC	33.2	1.00	7.2	1.00	6.5	1.00	B-PC	31.8	1.00	6.5	1.00	5.2	1.00
A-G1	37.3	1.12	7.7	1.07	5.6	0.86	B-G1	39.9	1.25	6.3	0.97	6.2	1.21
A-G2	44.4	1.34	9.2	1.28	7.4	1.13	B-G2	44.8	1.41	8.9	1.38	7.5	1.46
A-G3	46.2	1.39	10.0	1.39	8.2	1.27	B-G3	23.5	0.74	6.9	1.07	6.3	1.22
A-PP1	35.0	1.05	7.1	0.99	5.5	0.85	B-PP1	32.3	1.01	7.0	1.08	5.5	1.07
A-PP2	39.5	1.19	8.3	1.16	5.5	0.84	B-PP2	24.0	0.75	5.5	0.85	4.8	0.93
A-PP3	18.9	0.57	5.8	0.80	4.9	0.75	B-PP3	10.3	0.32	1.9	0.29	2.6	0.51

由表 5 可以看出:玻璃纤维不仅大大提高了混凝土的立方体抗压强度,对混凝土劈裂抗拉强度和抗折强度提高作用也十分显著。当聚丙烯纤维掺量较小时,各项强度有小幅提升,掺量较大时强度大幅下降,且水灰比较大时强度降幅更大。

2 抗渗性能试验

2.1 试验装置及操作

试验选用英国 Autoclam 渗透测试仪,通过对混凝土的透气性进行检测,评定其耐久性能。

按照 Autoclam 仪器的要求,将试件标准养护 28 d 后移至恒温恒湿环境[温度(40±2)℃,相对湿度 12%±2%]中 14 d,将混凝土试件用夹具固定在 Au-

toclam 测试机上,测试透气性。

2.2 抗渗试验结果分析

由 Autoclam 渗透测试仪确定的空气渗透性系数划分为 4 个质量等级,评价标准见表 6。

表 6 Autoclam 测试指标保护质量等级

质量	空气渗透性指标/[Ln (Pressure)·min ⁻¹]	质量	空气渗透性指标/[Ln (Pressure)·min ⁻¹]
很好	≤0.10	差	(0.50,0.90]
好	(0.10,0.50]	较差	>0.90

表 6 表明:最小的空气渗透性系数对应最优的抗渗性能和最优的质量等级。

表 7 为 A、B 两组试样的抗空气渗透性试验结果。

表7 Autoclam 渗透测试系统试验结果

空气渗透			空气渗透		
编号	性指标/ (Ln · min ⁻¹)	质量	编号	性指标/ (Ln · min ⁻¹)	质量
A-PC	0.160 2	好	B-PC	0.241 9	好
A-G1	0.167 9	好	B-G1	0.279 0	好
A-G2	0.114 1	好	B-G2	0.078 9	很好
A-G3	0.110 3	好	B-G3	0.108 7	好
A-PP1	0.107 9	好	B-PP1	0.232 7	好
A-PP2	0.123 4	好	B-PP2	0.340 3	好
A-PP3	0.445 2	好	B-PP3	0.416 3	好

由表7可得:

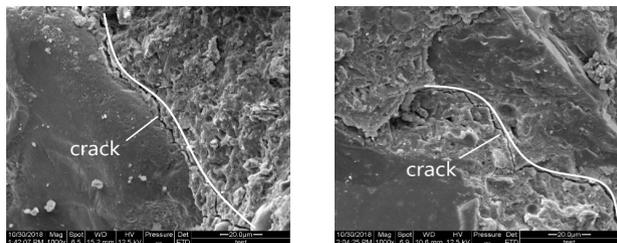
(1) 随着玻璃纤维掺量的增加,A、B两组试件的空气渗透性系数均先增大后减小。A组玻璃纤维掺量为1.35%时的空气渗透性系数最小;B组玻璃纤维掺量为0.90%时,空气渗透性系数最小。

(2) 随着聚丙烯纤维掺量的增加,A组试件的空气渗透性系数先减小后增大。聚丙烯纤维掺量为0.45%时A组空气渗透性系数最小。B组的空气渗透性系数先减小后有所上升,聚丙烯纤维掺量为0.45%时的空气渗透性系数最小。

3 SEM扫描电镜分析

3.1 微观电镜下的素混凝土

水泥水化反应生成C-S-H凝胶(水化硅酸钙)和氢氧化钙晶体(CH)。铝酸钙与硫酸钙反应生成含水硫酸铝钙矿物钙矾石(AFT)和其他中间相产物。C-S-H是硅酸盐水泥水化的主要产物,充分水化的水泥浆体中,C-S-H凝胶约占70%,它是水泥产生强度的主要原因。各种水化产物相互联系成空间网络。图1为基准组混凝土基体微观结构电镜扫描图。



(a) A组素混凝土骨料与浆体接触面图

(b) B组素混凝土骨料与浆体接触面图

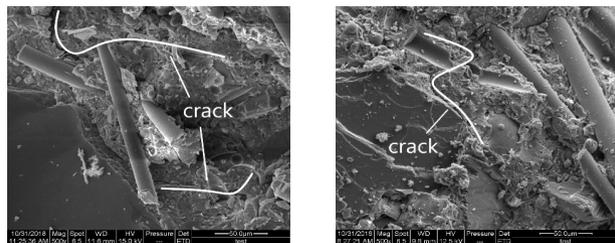
图1 素混凝土 SEM 扫描电镜图

由图1可知:组成混凝土基体的各晶体之间仍有较大间距,在一些结晶结合不良区域,混凝土硬化收缩容易产生微裂隙,这些微裂隙的存在造成混凝土的内部缺陷和力学性能下降。

在宏观层面,混凝土可看作由水泥浆体和分散在水泥浆基体中的粒料构成,是一种两相材料,而从微观角度观察,混凝土结构不均匀且十分复杂,大颗粒集料周围水泥浆的结构组成不同于水泥浆基体。集料周围的界面过渡区一般更加薄弱,对混凝土的力学性能影响因而也更大,它通常被看作混凝土微结构的第三相。由于集料粒径、水灰比、养护及施工工艺的不同,界面过渡区易出现裂缝。A组试件(W/B=0.30)强度普遍大于B组(W/B=0.35)也印证了这一点。

3.2 玻璃纤维混凝土分析

A-G3和B-G2为表5中抗压强度、劈裂抗拉强度和抗折强度均最优的玻璃纤维混凝土,两组试件SEM电镜扫描结果如图2所示。



(a) A-G3

(b) B-G2

图2 玻璃纤维混凝土 SEM 电镜扫描图

从图2中可以看到:大量水化硅酸钙凝胶和棒状钙矾石,并且骨料附近区域的界面过渡区结构致密。结合表7可知:A-G3和B-G2空气渗透性指标分别提升了31.15%和67.38%,其中B-G2抗渗性最优,说明玻璃纤维在混凝土中分散均匀。当试件上作用外力时,界面过渡区将首先出现微裂缝,这时一些跨越裂缝散落分布的玻璃纤维起到连接的作用,依靠与混凝土的黏结作用及自身强度承受部分荷载,减缓裂缝的扩宽。持续加载,这些裂缝发展加宽,并在基体薄弱区产生新的微裂缝,新的微裂缝发展初期跨越玻璃纤维,将难以继续扩展,因此玻璃纤维有效地提高了混凝土基体抗裂性能。

3.3 聚丙烯纤维混凝土分析

图3为聚丙烯纤维混凝土 SEM电镜扫描图。

由图3(a)、(d)可以看出:与素混凝土类似,可以看到大量水化硅酸钙凝胶,并且结构致密。结合表5可知:聚丙烯纤维掺量较少时,各项力学性能指标与基

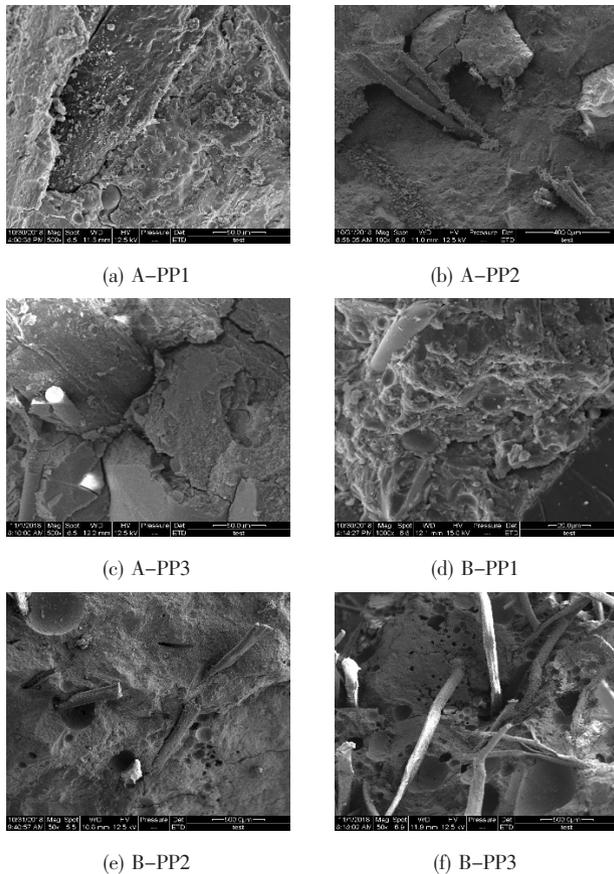


图 3 聚丙烯纤维混凝土 SEM 电镜扫描图

准组大致相当。由表 5 和图 3(b)、(c)可知, A 组试件结构相对致密, 立方体抗压强度和劈裂抗拉强度分别提升 19% 和 16%; B 组试件出现较多缺陷, 各项强度也均低于基准组, 结合表 7 可知: B-PP2 空隙率也变大, 这是因为随着聚丙烯纤维掺量增加, 界面过渡区明显增大导致内部缺陷增加。分析表 5 和图 3(c)、(f), 可以看到混凝土内部缺陷显著增加, 强度已明显不满足要求, 由表 7 可知: 聚丙烯纤维混凝土空隙率也持续变大, 这是因为聚丙烯纤维的掺入会在混凝土内部形成更多的界面缺陷区, 使混凝土均匀性降低。水灰比较大的 B 组下降得更为迅速, B-PP3 的立方体抗压强度和劈裂抗拉强度仅为基准组的 30% 左右。

4 结论

(1) 掺入玻璃纤维对水灰比为 0.30 和 0.35 的两组试验混凝土的抗压强度、劈裂抗拉强度及抗折强度均有较大提升。其中, 水灰比较小的 A 组增幅最大,

对应最大增幅分别为 39%、39%、27%。聚丙烯纤维掺量较低时各项力学性能有小幅提升作用, 掺量增大后对各项力学性能有明显的负面影响。

(2) 混凝土抗渗性在玻璃纤维掺入后有提升, 玻璃纤维在 1.35% 的体积掺量下, 混凝土抗渗性能优于基准组。两种水灰比下聚丙烯纤维为 0~0.90% 的掺量范围内抗渗性能良好, 继续加大掺量抗渗性变差。

(3) 混凝土的力学性能受集料与浆体之间相对薄弱的界面过渡区影响, 界面过渡区强度随水灰比增大而变薄弱。玻璃纤维在混凝土中形成三向网络, 对集料的沉降有抑制作用, 降低了界面过渡区的水灰比, 同时提高了界面过渡区的稳定性, 一定程度上弥补了混凝土的缺陷, 降低了空隙率, 使混凝土的劈裂抗拉强度和抗折强度得到提升。

(4) 混凝土集料的沉降可被少量聚丙烯纤维加入后形成的三向网络抑制, 聚丙烯降低界面过渡区的水灰比, 使得混凝土力学性能小幅改善。但掺量较大时在混凝土中的均匀性会降低, 界面过渡区的聚丙烯纤维增多, 混凝土缺陷也增加, 空隙率增大, 力学性能随之变差。

参考文献:

- [1] 邓宗才, 薛会青, 王力, 等. 耐碱玻璃纤维混凝土的弯曲韧性[J]. 新型建筑材料, 2009(5).
- [2] 李燕飞, 杨健辉, 丁鹏, 等. 混杂纤维混凝土力学性能研究[J]. 玻璃钢/复合材料, 2013(2).
- [3] 张恒. 多尺度纤维混杂对水泥混凝土性能的影响[J]. 中外公路, 2016(6).
- [4] 李家正, 牟伟楠, 王磊, 等. 混凝土界面过渡区物相微结构表征方法及演变规律浅析[J]. 长江科学院院报, 2017(8).
- [5] 杨启斌, 陈峰. 基于 Autoclam 渗透测试的玄武岩纤维高性能混凝土抗渗性能研究[J]. 四川建筑科学研究, 2017(3).
- [6] 李迁. 土木工程材料[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015.
- [7] 林家富. 基于 SEM 的玄武岩纤维混凝土力学性能及微观结构研究[J]. 施工技术, 2018(9).
- [8] P. Kumar Mehta, Paulo J. M. Monteiro. Concrete Microstructure, Properties, and Materials[M]. McGraw-Hill Professional, 2005: 21-47.
- [9] GB/T 50081-2016 普通混凝土力学性能试验方法标准[S].