

聚乙烯醇纤维混凝土早期抗裂抗渗性能试验

闻 洋,陈 伟

(内蒙古科技大学土木工程学院,内蒙古 包头 014010)

摘 要 目的 研究聚乙烯醇纤维对混凝土抗裂抗渗性能的影响. 方法 用3种不同长度(6 mm、8 mm、12 mm),4种不同掺量(0.6 kg/m^3 、 0.8 kg/m^3 、 1.2 kg/m^3 、 1.4 kg/m^3)的聚乙烯醇纤维设计13组纤维混凝土,通过平板约束试验和渗水高度试验,与基准混凝土进行对比,研究聚乙烯醇(PVA)纤维长度、掺量对混凝土早期抗裂及抗渗性能的影响. 结果 对比掺加不同长度纤维混凝土试件的裂缝情况及渗水深度,得出掺入8 mm的PVA纤维混凝土平均渗水深度为49.21 mm,裂缝降低系数由0.82提高到1,在聚乙烯醇纤维掺量 $0 \sim 1.4 \text{ kg/m}^3$ 变化中不同长度的纤维均掺加 1.4 kg/m^3 时裂缝的降低系数从0.85提高到1,平均渗水高度维持在49.76 mm,各项性能均表现最佳. 结论 PVA纤维能有效抑制早期塑性裂缝的产生并显著提高材料的抗渗性,且选用长度8 mm、掺量为 1.4 kg/m^3 的聚乙烯醇纤维时各项性能表现最佳.

关键词 聚乙烯醇纤维;长度;掺量;抗渗;抗裂

中图分类号 TU392.3

文献标志码 A

Effect of Polyvinyl Alcohol Fiber on Anti-cracking and Impermeability of Concrete

WEN Yang, CHEN Wei

(School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, China, 014010)

Abstract: In order to study the influence of polyvinyl alcohol fibers on the crack resistance and impermeability of concrete, design 13 groups of fiber concrete by using three kinds of polyvinyl alcohol fibers of different length (6 mm, 8 mm, 12 mm) and four different content (0.6 kg/m^3 , 0.8 kg/m^3 , 1.2 kg/m^3 , 1.4 kg/m^3), through the plate restraint and seepage height test, and compared with the benchmark concrete, the effect of length and content of polyvinyl alcohol (PVA) fiber on the early crack resistance and impermeability of concrete. The results show: by observing the cracks and seepage depth with different lengths of fiber concrete specimens, the average seepage height of the 8 mm PVA fiber concrete specimens is 49.21 mm, the fracture reduction factor increases from 0.82 to 1, content in the range of $0 \sim 1.4 \text{ kg/m}^3$, the reduction coefficient of the cracks increased from 0.85 to 1 and the average seepage height remained at 49.76 mm with 1.4 kg/m^3 of different

收稿日期:2017-05-24

基金项目:国家自然科学基金项目(51768056);内蒙古自治区自然科学基金项目(2013MS0715)

作者简介:闻洋(1976—),男,副教授,博士,主要从事钢与混凝土组合结构方面研究.

fiber additions. PVA fibers can effectively inhibit the early plastic cracks in concrete production and it can significantly improve the impermeability of concrete. PVA fibers can effectively suppress generation of cracks in the early plastic and significantly improve the impermeability of the material, when the selection of 8 mm and the dosage of $1.4\text{ kg} / \text{m}^3$ of the polyvinyl alcohol fibers best performance.

Key words: polyvinyl alcohol fiber; length; content; impermeability; cracking

混凝土作为实际工程中的重要材料,其最大的缺陷就是易产生裂缝,而裂缝的存在使得水、氯离子及其他有害物质更容易进入结构内部,从而劣化结构的强度,严重影响其耐久性,降低建筑物的使用寿命,造成不可挽回的经济损失^[1-5]. 目前,国内外的学者们通常在混凝土中加入纤维来改善其抗裂抗渗性能. 作为增强材的纤维主要有金属纤维、合成纤维、碳纤维等几大类,在国内外科研中对于钢纤维、碳纤维、聚丙烯纤维等研究较多. 易成等^[6]研究了高强度(HSC)与普通强度(NSC)两个系列的素混凝土与钢纤维混凝土,通过劈裂试验测试混凝土的抗裂纹扩展能力及带裂缝试件的水渗透性. 贡金鑫等^[7]通过测试混凝土吸水率、渗透高度、抗氯离子渗透性(电通量)、不同深度氯离子浓度等指标,研究聚丙烯纤维对高性能混凝土抗渗性能的影响. NinoslavPešić等^[8]的研究表明,在混凝土中掺加废弃的HDPE塑料纤维,其混凝土的抗渗性能得到改善,纤维掺量从0.4%增加到1.25%,渗透系数由80%降到35%. 俞家欢等^[9]研究聚丙烯纤维掺量对磷酸镁水泥混凝土力学性能和耐久性能的影响,得出其在磷酸镁水泥混凝土中的最佳掺量.

经过特殊工艺生产的聚乙烯醇(PVA)纤维具有高模量、高强度、低伸度、无公害无毒性的特点,掺加少量聚乙烯醇纤维就可提

高混凝土的力学、耐久性等各项性能. 学者们对聚乙烯醇(PVA)纤维的抗拉、抗压、抗冻性能进行了诸多的研究. 王海龙等^[10]通过将一定量的粉煤灰、硅灰和偏高龄土代替水泥来探究聚乙烯醇(PVA)纤维增强水泥基复合材料的抗拉性能. 王浩宇等^[11]探究粉煤灰掺量和纤维掺量对PVA纤维水泥基复合材料力学性能及抗冻性能的影响,结果表明粉煤灰及纤维掺量对抗折强度影响较大,对抗压强度影响较小. C. A. Juarez等^[12]研究了两种天然纤维以及合成纤维(PVA)的体积分数为0.1%和0.7%时对塑性开裂的影响.

目前针对聚乙烯醇纤维混凝土的研究仅是单一变量^[13-15],并没有把多种长度和多种掺量结合到一起,而这些研究远远不能令人满意,因此笔者着重于考察不同长度PVA纤维在掺量 $0 \sim 1.4\text{ kg} / \text{m}^3$ 对混凝土抗裂抗渗性能的影响,并就聚乙烯醇纤维提高混凝土抗裂及抗渗性能的影响机理进行讨论,同时获得合理掺量为实际工程提供参考.

1 试 验

1.1 原材料

水泥:包头蒙西水泥厂生产的P. O42. 5普通硅酸盐低碱水泥,化学成分和物理力学性能分别见表1和表2. 各项性能符合《通用硅酸盐水泥(GB175—2007/XG1—2009)》标准要求.

表1 水泥化学成分

Table 1 The chemical composition of the cement						%
w(SiO ₂)	w(Al ₂ O ₃)	w(Fe ₂ O ₃)	w(CaO)	w(MgO)	w(SO ₃)	LOSS
24. 85	6. 32	3. 65	57. 80	2. 43	1. 94	0. 88

表 2 水泥的物理力学性能

Table 2 Physical and mechanical properties of the cement						
比表面积/($\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$)	凝结时间/min		抗压强度/MPa		抗折强度/MPa	
	初凝	终凝	3d	28d	3d	28d
371	123	183	5.6	25.4	8.5	47.6

I 级粉煤灰(Fly ash,FA),密度 2.58 g/cm^3 ,烧失量 3.75%,需水比 82%,45 μm 方孔筛的筛余:8.6%,含水量 0.3%.

集料:II 区中砂,细度模数 2.7,含泥量 2.3%,石子选用 5~31.5 mm 碎石,粗细骨料技术指标符合《普通混凝土用砂、石质量及检验方法(JGJ 52—2006)》标准要求.

外加剂:GL-JB3 聚羧酸高效减水剂,褐色固体,固体质量分数约 25%,减水率

30%左右.
水:自来水.
纤维:6 mm、8 mm 及 12 mmPVA 纤维,具体参数见表 3. 采用强制式搅拌机搅拌材料,先将除纤维以外的其他材料投入搅拌机,再逐渐投入纤维.当纤维全部投入完毕后,再搅拌 1 min,以此保证纤维在混凝土中分散均匀.

表 3 聚乙烯醇(PVA)纤维的基本性能

长度/ mm	直径/ mm	伸长率/%	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ GPa	线密度/ ($\text{g}\cdot\text{km}^{-1}$)
6	0.04	6.88	1 727	43	0.216
8	0.04	7.06	1 730	42	0.223
12	0.04	6.98	1 670	40	0.221

1.2 配合比

以 C40 混凝土为基准,通过控制水泥砂浆和减水剂的用量,将新拌混凝土的塌落度

控制在 140~180 mm. 通过对混凝土原料及配合比的检验和优化,得出最终配合比见表 4.

表 4 各试件配合比

Table 4 Mixing ratio of concrete samples							kg/m^3
编号	ρ (水泥)	ρ (粉煤灰)	ρ (水)	ρ (砂)	ρ (石)	ρ (减水剂)	ρ (纤维)
JZ	350	70	171	710	1 065	10.10	—
P0.6/6	350	70	171	710	1 065	10.94	0.6
P0.8/6	350	70	171	710	1 065	10.94	0.8
P1.2/6	350	70	171	710	1 065	10.94	1.2
P1.4/6	350	70	171	710	1 065	10.94	1.4
P0.6/8	350	70	171	710	1 065	10.94	0.6
P0.8/8	350	70	171	710	1 065	10.94	0.8
P1.2/8	350	70	171	710	1 065	10.94	1.2
P1.4/8	350	70	171	710	1 065	10.94	1.4
P0.6/12	350	70	171	710	1 065	10.94	0.6
P0.8/12	350	70	171	710	1 065	10.94	0.8
P1.2/12	350	70	171	710	1 065	10.94	1.2
P1.4/12	350	70	171	710	1 065	10.94	1.4

注:P0.6/6、P0.8/6、P1.2/6、P1.4/6 表示 6 mm 的纤维掺量分别为 0.6 kg/m^3 、0.8 kg/m^3 、1.2 kg/m^3 、1.4 kg/m^3 ,以此类推.

1.3 试验方案

1.3.1 平板试验

笔者采用平板试验法,试件成型后在表面覆盖塑料薄膜,2h后取下薄膜,开始暴露实验,并用电风扇吹试件表面,电风扇功率不小于100 W,试件中部上表面风速5~7m/s,环境温度(20±5)℃,相对湿度不大于60%。记录成型24h后裂缝数量、裂缝长度、裂缝宽度,基于试验现象及结果确定PVA纤维对混凝土早龄期抗裂性能的影响。平板试验模具如图1所示,平板试验成型图如图2所示。

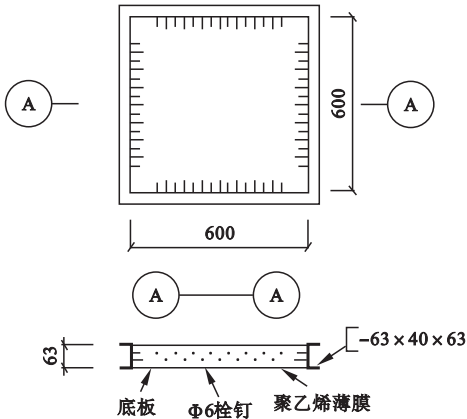


图1 平板试件模具示意图

Fig.1 Plat specimens mold diagram

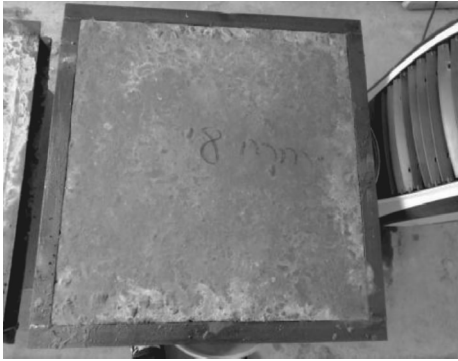


图2 平板试验成型图

Fig.2 Flat test molding diagram

1.3.2 渗水深度试验

基准及PVA纤维混凝土抗渗性能试件均为上端直径175 mm,下端直径185 mm,高150 mm的圆台体,标准养护28d后进行试验。试验时,水压从0.1 MPa开始,以后每隔8h增加0.1 MPa水压,并随时观察试件端面渗水情况。试验结束后劈开试件测量渗透高度进行对比。

2 结果与讨论

2.1 聚乙烯醇纤维对混凝土开裂的影响

经过平板试验后各试件24h内单位面积的总开裂面积和最大裂缝宽度结果见表5。

表5 混凝土早期塑形裂缝情况表

Table 5 Early remodeling concrete cracks fact sheet

编号	最大裂缝长度/mm	最大裂缝宽度 /mm	单位裂缝总面积/mm ²	裂缝降低系数
JZ	57.4	2.3	234.39	—
P0.6/6	48.6	1.3	87.56	0.63
P0.8/6	30.2	0.8	64.36	0.73
P1.2/6	18.4	0.6	55.25	0.76
P1.4/6	10.4	0.4	34.36	0.85
P0.6/8	20.4	0.7	42.16	0.82
P0.8/8	9.05	0.4	14.68	0.93
P1.2/8	3.2	0.1	8.78	0.96
P1.4/8	0	0	0	1
P0.6/12	34.6	0.8	64.5	0.73
P0.8/12	20.6	0.6	48.5	0.80
P1.2/12	5.6	0.2	33.52	0.85
P1.4/12	1.2	0.1	12.82	0.93

在 8 mm 的 PVA 纤维条件下,纤维掺量、长度对混凝土试件开裂面积、开裂宽度的影响规律如图 3、图 4 所示.从图中可以看出,混凝土试件的单位裂缝总面积、裂缝宽度均随着纤维掺量的增加而不断降低.

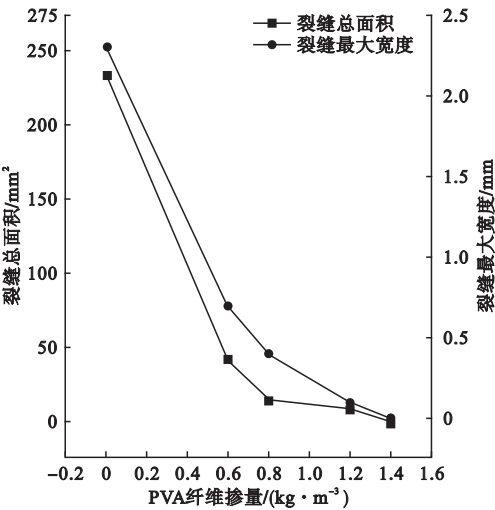


图 3 不同聚乙烯醇纤维掺量的混凝土抗裂性能
Fig. 3 Crack resistance of concrete with different contents of polyvinyl alcohol fiber

降低系数分别为 0.82、0.93、0.96、1,随着纤维掺量的逐渐增加,图中曲线斜率逐渐减小,且在掺量为 1.4 kg/m³ 时,裂缝的面积、裂缝宽度均下降为 0,达到抗裂性能的最佳状态.

在 PVA 纤维掺量为 1.4 kg/m³ 的条件下,单位裂缝总面积较普通混凝土分别提高 85%、100%、93%,最大裂缝宽度分别提高 82.6%、100%、95.6%.可以看出随着长度的增加裂缝的面积及宽度均不同程度的减少,但纤维长度对裂缝总开裂面积及裂缝宽的影响较大.同时观察曲线发现在 8~12 mm 有上升趋势,得出纤维长度 L 与粗集料最大粒径 D 的比值为 1:4 时,相容性更好,混凝土抗裂性能更优^[16].

试验结果表明,PVA 纤维对试件塑性开裂性能的影响表现为随着 PVA 纤维掺量的增加,裂缝的宽度、长度与裂缝总开裂面积呈下降趋势,PVA 纤维有效地遏止了塑性裂缝的产生与发展.

2.2 PVA 纤维对混凝土抗渗性能的影响

采用逐级加压法进行深水高度试验,经检测及计算得出的渗透高度及渗透系数见表 6.根据表 6 绘制 8 mm 条件下 PVA 纤维掺量对混凝土渗水高度影响的柱状图(见图 5)和渗透系数柱状图(见图 6).

由图 5 及表 6 可以看出,未参加 PVA 纤维的混凝土渗水高度高达 113.45 mm,掺量 0.6 kg/m³ 时的 6 mm、8 mm、12 mm PVA 纤维混凝土渗水高度分别为 88.12、65.21、78.41,分别为素混凝土的 77.7%、57.5%、69.1%,可知 8 mm 长的纤维发挥的作用更大.对比素混凝土与参加 8 mm 长纤维试件的渗水高度,分别提高 42.5%、55.5%、62.1%、66.3%,由此可见纤维在参加 0.8 kg/m³ 及更多时渗水高度可提高 50% 以上,随着纤维掺量的逐渐增加提高的速率变慢.

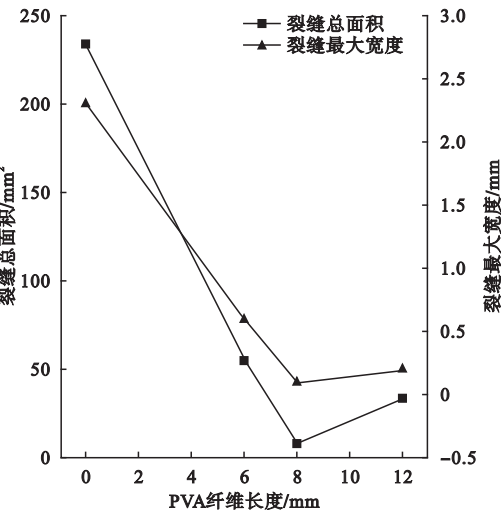


图 4 不同聚乙烯醇纤维长度的混凝土抗裂性能
Fig. 4 Crack resistance of concrete with different length of polyvinyl alcohol fiber

较基准混凝土而言,掺量为 0.6 kg/m³、0.8 kg/m³、1.2 kg/m³、1.4 kg/m³ 时,裂缝

表6 PVA纤维混凝土试件的渗透系数

Table 6 The permeability coefficient of PVA fiber concrete samples

编号	平均渗水高度/mm	最大渗水高度/mm	渗透系数/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)	最大渗透系数/($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$)
JZ	113.45	121.20	2.61×10^{-9}	2.98×10^{-9}
P0.6/6	88.12	90.54	1.57×10^{-9}	1.66×10^{-9}
P0.8/6	70.23	76.52	1.01×10^{-9}	1.18×10^{-9}
P1.2/6	56.51	61.11	6.48×10^{-10}	7.58×10^{-10}
P1.4/6	49.11	50.54	4.82×10^{-10}	5.11×10^{-10}
P0.6/8	65.21	70.42	8.63×10^{-10}	1.01×10^{-9}
P0.8/8	50.43	56.32	5.16×10^{-10}	6.43×10^{-10}
P1.2/8	43.02	49.56	4.02×10^{-10}	5.17×10^{-10}
P1.4/8	38.21	44.20	2.92×10^{-10}	3.91×10^{-10}
P0.6/12	78.41	85.11	1.25×10^{-9}	1.47×10^{-9}
P0.8/12	68.35	74.56	9.48×10^{-10}	1.13×10^{-9}
P1.2/12	50.37	54.32	5.15×10^{-10}	5.98×10^{-10}
P1.4/12	45.33	50.80	4.11×10^{-10}	5.16×10^{-10}

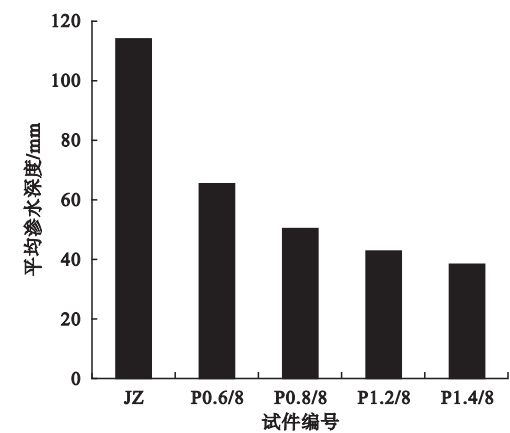


图5 不同纤维掺量对混凝土渗水深度的影响
Fig.5 The effects of different fiber contents on the seepages height of concrete

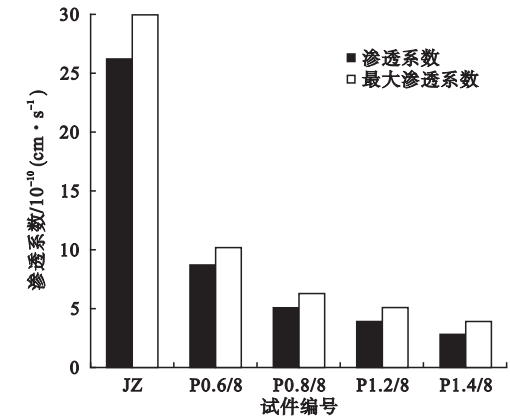


图6 不同纤维掺量对混凝土渗透系数的影响
Fig.6 The effects of different fiber contents on the permeability coefficients of concrete

由图6可知,素混凝土的渗透系数为 $2.61\times10^{-9}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$,最大渗透系数为 $2.98\times10^{-9}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$,二者比值为0.88,加入 0.6 kg/m^3 纤维的试件渗透系数为 $8.63\times10^{-10}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$,最大渗透系数 $1.01\times10^{-9}\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$,加入 0.8 kg/m^3 纤维的试件渗透系数与最大渗透系数比值为0.85,加入 1.2 kg/m^3 纤维的试件渗透系数与最大渗透系数比值为0.78,加入 1.4 kg/m^3 纤维的试件渗透系数与最大渗透系数比值为0.73,由此可以看出随着纤维掺量的增加渗透深度逐渐趋于平稳.

综上所述,PVA纤维可以改善混凝土的抗渗性能,降低混凝土的渗透高度,随着纤维掺量的不断增加,渗透系数和最大渗透系数比值逐渐减小.虽然加入 0.6 kg/m^3 的6 mm纤维,但是抗渗性能仍能提高22.3%,因此PVA纤维对抗渗性能效果甚佳.

3 PVA改善混凝土性能机理分析

(1) 试件初步成型时由于含水率较大,表面水分大量蒸发,使得混凝土表层材料毛细管中的张力对材料表面形成拉应力,同时由于水泥与集料之间产生不均匀沉降而出现

的泌水现象及水泥水化反应的急剧开展,产生早期塑性收缩裂缝。PVA 的掺入使得失水面积减少,同时表层混凝土因失水产生的拉应力减小,因此大大减少了混凝土早期塑性裂缝的产生。

(2)PVA 纤维以乱向分散在混凝土中且弹性模量远远高于初凝混凝土的弹性模量,依靠其与水泥基体之间机械咬合力及界面吸附粘力等,提高了材料抵抗塑性开裂的抗拉强度,从而使混凝土结构表面的裂缝产生得到有效抑制,使微裂纹减少甚至消失,同时纤维的加入降低了混凝土的空隙率,进而提高了混凝土的抗渗性能。

(3)当基材处于塑性阶段时,应力几乎不变而应变不断增加,此时基材中出现大量的微裂缝,早期微裂缝是混凝土后期宏观裂缝的开始。当纤维混凝土因收缩而产生拉应力时,此时裂缝开展长度小于 PVA 纤维间距,犹如在混凝土中掺入纤维筋^[17-18],这些纤维筋抑制了混凝土开裂的过程,提高了混凝土断裂韧性,因此裂缝的开展受到限制,并且耗费裂缝开展的能量限制裂缝的继续发展。当拉应力达到基材抗拉强度时,PVA 纤维的存在迫使裂缝的延伸改变方向,使拉应力传递纤维混凝土未开裂的部位,出现更多新的细小裂缝,但 PVA 纤维混凝土却未发生断裂。

4 结 论

(1)在水灰比相同的情况下 PVA 纤维的加入可以显著改善混凝土的早期抗裂、抗渗性能。PVA 纤维混凝土可以保持良好的完整性,随着纤维掺量的增加混凝土抗裂抗渗性能均优于普通混凝土。

(2)对比发现掺加 8 mmPVA 纤维的混凝土可以完全避免裂缝的产生,裂缝降低系数高达 1,且最佳掺量为 1.4 kg/m^3 ,而掺加 12 mmPVA 纤维的混凝土裂缝降低系数最高可达 93%,说明纤维的长度并不是越长越有

利,由本实验得出实际工程中宜采用长度为 8 mm 的聚乙烯醇纤维。

(3)聚乙烯醇纤维长度为粗骨料最大粒径的 1/4 时,随着纤维掺量的增加,试件的抗渗性能逐渐提高,掺加 8 mmPVA 的试件比普通混凝土抗渗性提高 42.5%,掺加 6 mm 及 12 mm 的 PVA 试件较普通混凝土可提高 22.3%~30.8%。

参考文献

- [1] MEHTA P K. Building durable structures in the 21st century[J]. The India concrete journal, 2001(7): 437-443.
- [2] 张利萍. 混凝土高性能外加剂的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2005.
(ZHANG Liping. Research on high performance concrete admixture [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2005.)
- [3] 李林香, 谢永江, 冯仲伟, 等. 混凝土的收缩及防裂措施概述[J]. 混凝土, 2011(4): 113-117.
(LI Linxiang, XIE Yongjiang, FENG Zhongwei, et al. General comments of shrinkage of concrete and the methods of crack resistance [J]. Concrete, 2011(4): 113-117.)
- [4] 陈剑毅, 胡明玉, 肖烨, 等. 复杂环境下矿物掺和料混凝土的耐久性分析[J]. 硅酸盐通报, 2011, 30(3): 639-644.
(CHEN Jianyi, HU Mingyu, XIAO Ye, et al. Study on mineral admixture concrete durability under the complex environment[J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2011, 30(3): 639-644.)
- [5] 黄国栋, 马芹永. 混杂纤维混凝土力学性能试验研究与分析[J]. 地下空间与工程学报, 2010, 6(2): 329-333, 340.
(HUANG Guodong, MA Qinyong. Experimental study and analysis of layer hybrid fiber reinforced concrete mechanical performance [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2010, 6(2): 329-333, 340.)
- [6] 易成, 谢和平, 高伟. 钢纤维对混凝土裂纹的抑制及其对抗渗性能的影响[J]. 土木工程学报, 2004, 37(3): 19-25.
(YI Cheng, XIE Heping, GAO Wei. Effects of steel fiber on the restraining for propagation of concrete crack and on the permeability of concrete [J]. China civil engineering journal, 2004, 37(3): 19-25.)

- [7] 贡金鑫,郭育霞.聚丙烯纤维高性能混凝土抗渗性能的试验研究[J].新型建筑材料,2006(11):50-52.
(GONG Jinxin, GUO Yuxia. Experimental study on impermeability of polypropylene fiber high performance concrete[J]. New building materials,2006(11):50-52.)
- [8] NINOSLAV Pešić, STANA Živanović, REYES G, et al. Mechanical properties of concrete reinforced with recycled HDPE plastic fibres[J]. Construction and building materials, 2016,115:362-370.
- [9] 俞家欢,熊攀辉,汲野,等.聚丙烯纤维掺量对磷酸镁水泥混凝土性能影响[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2017,33(2):266-274.
(YU Jiahuan, XIONG Panhui, JI Ye, et al. Effect of polypropylene fiber content on properties of magnesium phosphate cement concrete[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science),2017,33(2):266-274.)
- [10] 王海龙,罗月静,彭光宇,等.掺合料对纤维增强水泥基材料拉伸性能的影响[J].西南交通大学学报,2017,52(1):61-68.
(WANG Hailong, LUO Yuejing, PENG Guanyu, et al. Effect of admixtures on tensile behavior of fiber reinforced cementitious composites[J]. Journal of southwest jiaotong university,2017,52(1):61-68.)
- [11] 王浩宇,田稳苓.聚乙烯醇纤维水泥基复合材料的力学性能及抗冻性能试验研究[J].工业建筑,2017,47(1):123-125,130.
(WANG Haoyu, TIAN Wenling. Effect of admixtures on tensile behavior of fiber reinforced cementitious composites experimental study of mechanical properties and frost resistance of PVA-ECC[J]. Industrial construction,2017,47(1):123-125,130.)
- [12] JUAREZ C A, FAJARDO G. Comparative study between natural and PVA fibers to reduce plastic shrinkage cracking in cement based-composite[J]. Construction and building materials,2015,91:164-170.
- [13] 肖长发.高强度聚乙烯醇纤维结构与性能研究[J].高科技纤维与应用,2005,30(2):11-17.
(XIAO Changfa. Structure and properties of high strength PVA fiber[J]. Hi-tech fiber & application,2005,30(2):11-17.)
- [14] 钱桂枫,高祥彪,钱春香. PVA纤维对混凝土力学性能的影响[J].混凝土与水泥制品,2010(3):52-54.
(QIAN Guifeng, GAO Xiangbiao, QIAN Chunxiang. PVA fiber influence on the mechanical properties of concrete[J]. China concrete and cement products,2010(3):52-54.)
- [15] 谢永亮,赵亮,张勇.聚乙烯醇、聚丙烯混合纤维混凝土的抗冲击性能研究[J].混凝土,2017(8):70-73.
(XIE Yongliang, ZHAO Liang, ZHANG Yong. Research on the impact resistance properties of polyvinyl alcohol and polypropylene fiber concrete[J]. Concrete, 2017(8):70-73.)
- [16] 管宗莆,李小颖,李世华,等.矿物掺合料和聚丙烯纤维对混凝土塑性收缩开裂的影响[J].硅酸盐通报,2013,32(5):794-797.
(GUAN Zongpu, LI Xiaoying, LI Shihua, et al. Effect of mineral admixture and polypropylene fiber on concrete crack property[J]. Bulletin of the Chinese ceramic society, 2013,32(5):794-797.)
- [17] 李光伟.聚丙烯纤维对混凝土抗裂性能的影响[J].水电站设计,2002,18(2):98-100,104.
(LI Guangwei. Effect of polypropylene fiber on crack resistance of concrete[J]. Design of hydroelectric power station,2002,18(2):98-100,104.)
- [18] GUNAYISI E, GESOGLU M. Strength and drying shrinkage properties of self compacting concretes incorporating multi-system blended mineral admixtures[J]. Construction and building materials,2010,24(4):1878-1887.