

聚丙烯纤维混凝土试验研究

卢安琪, 祝焯然, 李克亮, 黄国平, 胡智农, 陈健

(南京水利科学研究所, 江苏 南京 210029)

摘要: 对在混凝土中掺入聚丙烯纤维的工艺, 以及掺入聚丙烯纤维后对混凝土性能的影响进行了试验研究. 室内试验及工程应用结果表明, 聚丙烯纤维混凝土能有效地减少混凝土塑性收缩裂缝, 明显改善混凝土抗变形能力, 有利于提高混凝土的耐久性.

关键词: 聚丙烯纤维; 混凝土; 性能; 试验; 应用实例

中图分类号: TU528.572 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-640X(2002)04-0014-06

Experimental study of polypropylene fiber reinforced concrete

LU An-qi, ZHU Ye-ran, LI Ke-liang, HUANG Guo-ping, HU Zhi-nong, CHEN Jian

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Techniques of adding polypropylene fiber (PPF) into concrete and influences of the polypropylene fiber on concrete properties are studied through tests. Results of laboratory tests and application show that the polypropylene fiber reinforced concrete (PFRC) can reduce plastic shrinkage cracks of concrete, and can improve the deformation resistance property and durability of concrete greatly.

Key words: polypropylene fiber (PPF); concrete; property; test; application example

聚丙烯纤维抗拉强度高, 能耐酸、碱、盐等化学腐蚀. 掺入占混凝土体积 0.05% ~ 0.2% 的聚丙烯纤维, 既可有效地抑制混凝土的塑性收缩开裂, 改善混凝土的抗渗、抗冻和抗蚀等性能, 又可提高混凝土的抗冲击性、柔韧性和抗疲劳性, 加之, 聚丙烯纤维的价格低廉, 掺入工艺简单, 已在国内外得到了广泛地应用.

近年来, 国内外已建成一批混凝土面板堆石坝. 但是, 大多数堆石坝的混凝土面板均会发生裂缝, 少数坝的面板的裂缝还很严重, 必须修补才能运行. 混凝土面板的防裂、防渗问题也急待解决. 在面板的混凝土中掺入聚丙烯纤维, 以提高混凝土的综合性能应是一条有效的措施. 为了在水工混凝土中引进应用聚丙烯纤维的技术, 深入了解聚丙烯纤维对混凝土性能的影响, 进行了聚丙烯纤维混凝土的试验研究.

1 试验用原材料

- (1) 水泥: 海螺牌 P. O42.5 普通硅酸盐水泥.
- (2) 粉煤灰: II 级粉煤灰.

收稿日期: 2002-03-15

作者简介: 卢安琪 (1942-), 女, 上海人, 教授级高级工程师, 主要从事水工混凝土及其外加剂的试验研究.

(3)聚丙烯纤维:改性聚丙烯纤维的性能见表1.

(4)外加剂:减水剂BLY(掺量为占水泥重量的1%)和NMR(掺量为占水泥重量的0.75%).

(5)集料:细度模数为2.67的中粗砂及Ⅱ级配卵石.

表1 改性聚丙烯纤维的性能

Tab.1 Properties of the modified polypropylene fiber

直径 / μm	纤维长度 / mm	燃点 / $^{\circ}\text{C}$	熔点 / $^{\circ}\text{C}$	抗拉强度 / MPa	极限拉伸率 / $(\%)$
62~69	15 \pm 1	590	160~170	119.2	484

2 聚丙烯纤维掺入混凝土的工艺研究

在混凝土中掺入聚丙烯纤维的工艺有:

干予拌法[A]: 砂+石+水泥+纤维 $\xrightarrow{\text{干拌}}$ +水 $\xrightarrow{\text{湿拌}}$ 混凝土;

湿拌法[B]: 砂+石+水泥+纤维+水 $\xrightarrow{\text{湿拌}}$ 混凝土;

干予拌法[C]: 砂+石+纤维 $\xrightarrow{\text{干拌}}$ +水泥 $\xrightarrow{\text{干拌}}$ +水 $\xrightarrow{\text{湿拌}}$ 混凝土

掺入工艺是否正确对改善混凝土质量有着较大的作用,投料顺序、搅拌时间均会影响纤维分布的均匀性.用以下3种方法检查聚丙烯纤维的掺入工艺:①用水洗法判断新拌混凝土中纤维的分布情况;②对已硬化混凝土进行切片,利用扫描电子显微镜观察、统计混凝土中纤维的分布情况;③比较不同搅拌工艺条件下混凝土的抗压强度.检查结果表明,3种掺入方法搅拌出混凝土的纤维均匀度均能满足施工要求,搅拌时间以5 min为宜(见表2).干予拌法要比湿拌法有利于纤维在混凝土中均匀分散,表现为干予拌法混凝土比湿拌法强度略高,硬化混凝土中纤维分布更均匀.干予拌法[C]又比干予拌法[A]略好,纤维先与砂、石搅拌,使其得到强烈搓碾而分散更好,但在实际操作中干予拌法[C]会增加搅拌步骤和时间,故本次试验中采用干予拌法[A].

表2 不同掺入工艺的混凝土强度

Tab.1 Compressive strength of PFRC with different addition techniques

搅拌工艺	搅拌时间 / min	水洗法检测纤维分布 与理论值偏差/ $(\%)$	坍落度 / cm	28 d 抗压强度 / MPa
干予拌法[A]	1(干拌),4(湿拌)	-10~+13	6~8	36.6
湿拌法[B]	5(湿拌)	-	6~8	34.3
干予拌法[C]	1.5(干拌),4(湿拌)	-9	6~8	38.4

3 掺入聚丙烯纤维对混凝土性能的影响

3.1 聚丙烯纤维混凝土配合比及试验方法

为了比较在混凝土中掺入聚丙烯纤维不同的量(分别为0.6、0.9、1.2和1.5 kg/m^3)以及粉煤灰不同掺量(分等量替代和以1.3超量系数替代)后,对混凝土性能的影响,进行了A、B系列聚丙烯纤维混凝土配合比及其性能试验,其中,A系列为在配合比中保持水泥用量不变,适量增大用水量;B系列为保持水灰比不变,增加每方混凝土水泥和水的用量,以便使各试验组混凝土的坍落度相同.A、B系列聚丙烯纤维混凝土配合比及每方混凝土的材料用量见表3.

试验方法除特殊说明外,均按现行行业标准《水工混凝土试验规程》^[1]进行.

表3 聚丙烯纤维混凝土配合比及材料用量

Tab.3 Mix proportions and material weights of PFRC

试验组 编号	粉煤灰		水胶比 /(%)	砂率 /(%)	混凝土材料用量/(kg·m ⁻³)					
	掺量/(%)	超量系数			水泥	粉煤灰	水	聚丙烯纤维	砂	卵石
A-1	15	1	0.38	37	254	45	114	0	695	1234
A-2	15	1	0.40	37	254	45	120	0.6	689	1 226
A-3	15	1	0.40	37	254	45	121	0.9	688	1 224
A-4	15	1	0.41	37	253	45	123	1.2	686	1 220
A-5	15	1.3	0.42	35	254	58	125	0.9	643	1 242
A-6	-	-	0.41	38	300	-	124	0.9	710	1 210
B-1	15	1.3	0.41	34	252	58	123	0	623	1 266
B-2	15	1.3	0.41	34	262	61	128	0.9	615	1 250
B-3	15	1.3	0.42	34	262	61	129	1.2	615	1 250
B-4	15	1.3	0.42	34	262	61	130	1.5	615	1 248

3.2 聚丙烯纤维混凝土性能

3.2.1 拌和物性能 掺入聚丙烯纤维后,明显地减少了混凝土表面泌水和骨料沉降,泌水率下降,泌水推迟 20 min 开始,提早 30 min 结束.泌水总量随时间的变化见图 1.试验结果表明,混凝土凝结时间与聚丙烯纤维掺量之间无明显规律,初凝提前 1~1.5 h,终凝也略有提前.聚丙烯纤维的掺入对混凝土密度和含气量无影响(见表 4).

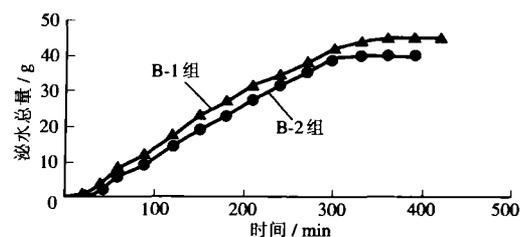


图1 泌水量随时间变化

Fig.1 Variation of bleeding amount with time

表4 聚丙烯纤维混凝土拌合物性能

Tab.4 Properties of PFRC mixture

试验组 编号	粉煤灰		纤维掺量 /(kg·m ³)	含气量 /(%)	凝结时间/(h:min)		密度 /(kg·m ⁻³)	坍落度/cm		
	掺量/(%)	超量系数			初凝	终凝		0	0.5 h	1.0 h
A-1	15	1	0	4.5	8:42	10:25	2 320	7.0	3.1	1.5
A-2	15	1	0.6	5.0	7:10	8:40	2 300	8.1	-	1.9
A-3	15	1	0.9	4.9	7:00	9:06	2 305	8.1	4.5	2.3
A-4	15	1	1.2	5.0	7:10	9:15	2 320	6.6	3.7	2.4
A-5	15	1.3	0.9	4.1	7:20	9:45	2 311	7.1	4.8	2.2
A-6	-	-	0.9	4.6	7:35	10:00	2 300	6.1	5.9	0.7

3.2.2 塑性收缩性能 基于 Paul P. Kraai 测定混凝土塑性收缩裂缝的试验方法^[2],将掺与不掺聚丙烯纤维的砂浆(3组共6块)浇注在 610 mm×915 mm×19 mm 的木模中,木模底板与四周衬塑料薄膜,离木模周边约 20 mm 处固定 20 mm×20 mm 钢丝网或 \varnothing 8 钢筋,以限制混凝土的收缩变形,模拟混凝土的实际工作环境.浇注完砂浆板后,立即以风速约为 5 m/s 吹其表面,加速试件表面水份蒸发.连续吹风 24 h 后,测出试件表面的裂缝宽度和长度,用计权法^[2]得到的开裂指数评定其抗裂能力.试验结果分别见图 2、图 3 和表 5.

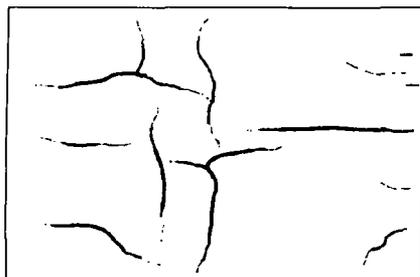


图2 不掺纤维砂浆板裂缝

Fig.2 Cracks in the blank mortar panel

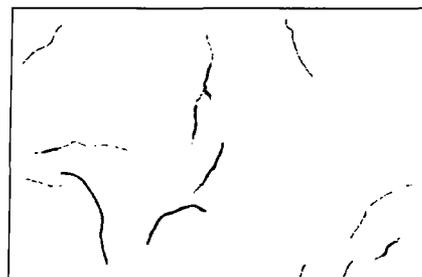


图3 掺纤维砂浆板裂缝

Fig.3 Cracks in PPF reinforced mortar panel

表5 聚丙烯纤维砂浆塑性收缩性能试验结果

Tab.5 Test results of plastic shrinkage property of PPF reinforced mortar

试件	(水泥+粉煤灰):砂			BLY /(%)	NMR /(%)	水	纤维掺量 /(kg·m ⁻³)	开裂 指数	对比值	约束 方式
1-1	0.85	0.15	1.5	1	0.75	0.372	-	97.8	100	钢筋
1-2	0.85	0.15	1.5	1	0.75	0.372	0.9	45.1	46	
2-1	1	-	1.5	-	-	0.5	-	181.4	100	钢丝网
2-2	1	-	1.5	-	-	0.5	0.9	77.0	42.4	
3-1	1	0.176	2.75	1.18	0.88	0.385	-	1.5	100	钢丝网
3-2	1	0.176	2.71	1.18	0.88	0.405	0.9	0	0	

试验结果表明,混凝土表面塑性裂缝的出现与水泥和水的用量以及外加剂的品种等有关.3组砂浆板的配合比和约束方式不同,出现裂缝的情况也不同,但均表明掺聚丙烯纤维能明显抑制塑性收缩,使容易开裂的砂浆裂缝减少变细,使少裂缝的砂浆不裂.

3.2.3 干缩性能 干缩试验结果见表6.试验结果表明,由于聚丙烯纤维的弹性模量较低,不能起到类似钢纤维骨架的作用,对混凝土的干缩特性的影响不明显.

表6 聚丙烯纤维混凝土干缩试验结果

Tab.6 Test results of drying shrinkage property of PFRC

试验组 编号	粉煤灰		纤维掺量 /(kg·m ⁻³)	干缩率(×10 ⁻⁶)					
	掺量/(%)	超量系数		3 d	7 d	14 d	28 d	60 d	90 d
A-1	15	1	0	107	191	275	401	506	554
A-2	15	1	0.6	109	204	284	407	504	540
A-3	15	1	0.9	105	182	273	390	478	513
A-4	15	1	1.2	112	190	283	405	490	528
A-5	15	1.3	0.9	106	184	267	370	465	495
A-6	-	-	0.9	114	188	270	400	510	554

3.2.4 力学性能、变形性能及弯曲韧性系数 聚丙烯纤维混凝土力学性能、变形性能及弯曲韧性系数的试验结果见表7.试验结果表明,当掺与不掺聚丙烯纤维的混凝土保持坍落度一致时,掺的比不掺的用水量约增加5~10 kg/m³.采用适量增加水灰比的方法保持坍落度,虽使混凝土的早期强度略低,但28 d抗压强度和抗拉强度与不掺的基本相同,抗折强度略增.聚丙烯纤维混凝土的弹性模量略低于不掺纤维的普通混凝土,除粉煤灰超量替代组外,其极限拉伸率大于普通混凝土,极限拉伸率随纤维掺量增加而增加.聚丙烯纤维掺入量为1.2 kg/m³时,28 d极限拉伸率比普通混凝土提高16%.这种低弹性模量和高极限拉伸率说明聚丙烯纤维混凝土的变形能力优于普通混凝土,有利于面板混凝土抗裂.聚丙烯纤维混凝土的弯曲韧性系数比普通混凝土提高较多,A系列高5%~35%,B系列高60%~136%.掺与不掺聚丙烯纤维混凝土弯曲试验的典型荷载-挠度曲线见图4.可见,当荷载达到峰值时,普通混凝土试件出现了第一条裂缝,此时很快卸载,随即断裂而失去承载力,荷载挠度曲线延伸较小.而聚丙烯纤维混凝土试件在发生初裂后,承载能力也下降,但在一段时间内仍继续保持其承载能力,其峰后覆盖面积比普通混凝土大,表明了聚丙烯纤维混凝土对荷载能量有较高的吸收能力和对动荷载的较高抵抗力.从而改善了混凝土传统脆性的弱点,这对支承在堆石坝体和反滤砂砾石层上的混凝土面板,适应水荷载作用下的变形、防止裂缝的发生和发展具有重要意义.

聚丙烯纤维混凝土弯曲韧性系数按《钢纤维混凝土试验方法》CECS13:89,即ASTM C 1018测定,试件尺寸为100 mm×100 mm×400 mm,并按日本土木工程协会方法JSCE-SF4处理数据^[3].

表7 聚丙烯纤维混凝土力学性能、变形性能及弯曲韧性系数

Tab.7 Mechanical deformation properties and toughness index of PFRC

试验组 编号	抗压强度 /MPa				抗折强度 /MPa	轴拉强度 /MPa		极限拉伸率 ($\times 10^{-6}$)		抗拉弹模 ($\times 10^4$ MPa)		弯曲韧性 系数/MPa
	7 d	28 d	60 d	90 d		7 d	28 d	7 d	28 d	7 d	28 d	
A-1	28.3	37.6	38.6	38.7	3.89	2.64	3.16	96	108	3.07	3.41	0.75
A-2	25.6	33.0	35.2	35.9	3.63	2.58	3.11	107	115	2.92	3.19	0.79
A-3	23.1	33.2	35.3	37.7	3.89	2.31	3.20	104	117	2.73	3.09	1.01
A-4	23.2	32.9	35.4	37.8	3.98	2.14	3.11	108	125	2.88	3.04	0.91
A-5	25.7	34.2	42.4	42.6	3.96	2.10	2.87	89	104	2.85	3.25	0.81
A-6	25.6	34.3	36.6	40.0	4.23	2.98	3.07	123	130	2.84	2.97	0.98

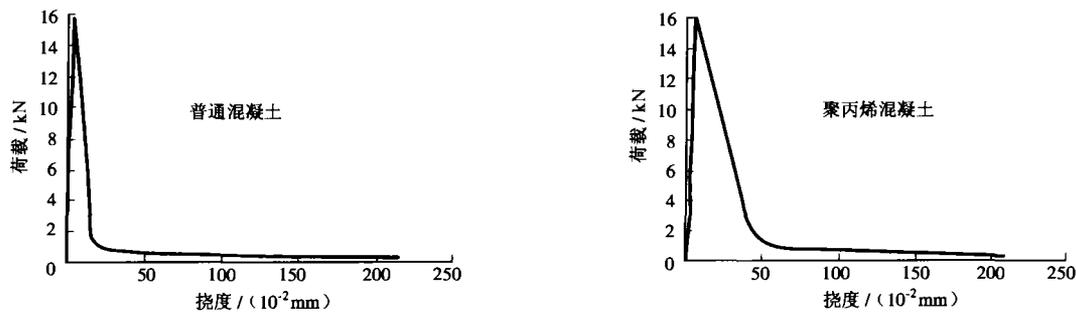


图4 典型荷载-挠度曲线

Fig.4 Typical load-deflection curves

3.2.5 抗渗性能 试验结果表明,A系列聚丙烯纤维混凝土抗渗标号均大于等于W20.掺聚丙烯纤维混凝土的水灰比虽比普通混凝土大,但最终加压到2.1 MPa时,其渗水高度比普通混凝土减少16%~49%,可见,抗渗能力优于普通混凝土.在实际工程中,当混凝土大面积暴露时,掺聚丙烯纤维后将减少、细化由于失水干燥、温差引起的裂缝,抗渗效果将显著提高.

3.2.6 抗冻性能 按快冻法进行抗冻试验,试验结果见表8.掺入聚丙烯纤维后可使混凝土抗冻标号比普通混凝土提高50~100多个冻融循环,各冻融试验组的混凝土组失重率均较小,而相对动弹性模数则下降较多,说明混凝土冻融破坏是因其内部产生微裂所致.当掺入聚丙烯纤维不少于0.9 kg/m³时,将有助于抑制和减少微裂缝的产生和发展,提高混凝土的抗冻性.冻融循环后,其抗弯强度较高也充分说明了这一点.

表8 聚丙烯纤维混凝土的抗冻融试验结果

Tab.8 Test results of freeze-thaw resistance of PFRC

试验组 编号	50 冻融循环		100 冻融循环		150 冻融循环		200 冻融循环		冻融循环 后抗弯强 度/MPa
	失重率 /(%)	相对动弹 模数/(%)	失重率 /(%)	相对动弹 模数/(%)	失重率 /(%)	相对动弹 模数/(%)	失重率 /(%)	相对动弹 模数/(%)	
A-1	0	99.4	0.50	84.6	0.92	<60	-	-	4.2
A-2	0	98.4	0.39	87.9	1.03	83.2	2.12	56.7	3.8
A-3	0	98.8	0	91.1	0	89.9	0.72	79.5	6.4
A-4	0	96.2	0.21	92.0	0.50	84.0	1.21	73.9	4.7
A-5	0	96.0	0	94.6	0	92.0	0.12	77.4	6.0
A-6	0	98.5	0	91.4	0	90.5	0.18	77.2	5.7

注:(1)A-1组冻融150次,其他组均冻融200次后测试冻后抗弯强度;
(2)当相对动弹性模数下降至60%或失重率达5%,即认为试件已破坏

3.2.7 抗冲磨及耐气候老化性能 当聚丙烯纤维掺量为 0.6、0.9 和 1.2 kg/m³ 时,与水泥用量相同的普通高强混凝土相比,抗冲磨强度分别提高 33%、49% 和 58%^[3]。

裸露的聚丙烯纤维在氙灯辐射下,其抗拉强度和伸长率降低较大,但氙灯对掺入聚丙烯纤维的砂浆的抗压、抗拉、抗折等力学性能等无不利影响^[4]。

4 工程应用实例

白溪水库大坝的二期混凝土面板浇筑自高程▽128.5 m 至▽173.4 m,正处于发电死水位▽140.0 m 至正常蓄水位▽170.0 m 的水位变动区,且常受到寒流、大风、波浪和夏季太阳暴晒等恶劣环境的侵袭,而混凝土面板厚仅为 43.5 至 30.0 cm。在上述试验研究的基础上,经过现场施工验证,将聚丙烯纤维混凝土首次应用于白溪水库面板堆石坝的面板中。综合比较各混凝土试验组的性能和费用等因素,选择 A-3 组混凝土配合比作为白溪水库大坝二期混凝土面板的施工配合比。二期面板混凝土总量为 11 000 m³,浇筑历时 77 d。从施工现场对混凝土的检测结果来看,二期面板的聚丙烯纤维混凝土各项指标完全满足设计要求。现场观测结果表明,二期面板的裂缝最大宽度达到和超过 0.20 mm 的仅有 4 条,裂纹总数量、宽度、深度、长度都较一期混凝土面板有明显改善。到目前为止,二期面板在经受了蓄水运行考验后,发生的裂缝很有限,充分显示了聚丙烯纤维混凝土良好的抗裂性。

5 结 语

(1)聚丙烯纤维先与水泥、砂、石料干拌,然后再湿拌,比直接湿拌的分散效果好。直接湿拌也能满足均匀性要求,搅拌时间以 5 min 为宜。聚丙烯纤维掺入混凝土中,对混凝土的密度、含气量影响不大。坍落度略减,凝结时间略有提前。

(2)室内对比试验表明,塑性开裂指数可降低 54%~58%,聚丙烯纤维能有效防止和减少混凝土塑性收缩开裂。

(3)聚丙烯纤维混凝土的抗冻性能较普通混凝土提高 50~100 多个冻融循环,且抗渗性能有所改善。

(4)掺入聚丙烯纤维能显著提高混凝土的弯曲韧性、极限拉伸率和延性,降低弹性模量,改善了混凝土的变形性能,有利于面板混凝土的抗裂。

(5)采用聚丙烯纤维混凝土后,白溪水库大坝二期混凝土面板的防裂、抗渗、抗变形能力以及耐久性 etc 较一期普通混凝土面板有显著改善。

参 考 文 献:

- [1] SD105-82, 水工混凝土试验规程[S].
- [2] Paul P Kraai. A proposed test to determine the cracking potential due to drying shrinkage of concrete [J]. **Concrete Construction**, 1985, 30(9): 775-777.
- [3] Chen L, Mindess S, Morgan D R, *et al.* Comparative toughness testing of fiber reinforced concrete [A]. Stevens D J, *et al.* **Testing of Fiber Reinforced Concrete** [C]. ACI, 1995, 41-75.
- [4] 卢安琪,李克亮,祝焯然,等. 聚丙烯纤维混凝土抗冲磨试验研究[J]. 水利水电技术, 2002, (4): 37-39.
- [5] 卢安琪,祝焯然,李克亮,等. 聚丙烯纤维混凝土耐气候老化性能试验研究[J]. 混凝土, 2002, (1): 61-63.