

文章编号:1671-2579(2005)01-0091-04

## 聚丙烯纤维混凝土力学性能室内试验研究

陈宏友

(湖南省怀化路桥总公司, 湖南 怀化 418000)

**摘 要:** 聚丙烯纤维混凝土配合比设计是确保聚丙烯纤维混凝土强度的重要环节。通过试验对影响聚丙烯纤维混凝土力学性能因素进行了分析,并同普通混凝土进行了对比,可为聚丙烯纤维混凝土配合比设计提供依据。

**关键词:** 聚丙烯纤维; 混凝土; 力学性能; 试验研究

20世纪80年代初期,美国军队的混凝土专家为解决军用混凝土工事在受炮火攻击后的抗碎问题,同时也为解决军事工程的耐久性问题,测试研究了很多种材料和方法。最后确认,在混凝土中加入一定量的聚丙烯纤维效果最好,于是混凝土专家与美国最大的化工产品企业——合成工业公司的聚丙烯材料专家共同研制用于混凝土的专用纤维,并于1984年成功研制出混凝土聚丙烯纤维——“FIBERMESH”,这是世界上第一种成功用于混凝土增强的聚丙烯纤维。

聚丙烯纤维在提高混凝土性能方面扮演着日益重要的角色。但是混凝土是一种脆性材料,韧性差,抗疲劳能力低,易产生裂纹,抗冲击碎裂性差,这种问题不是因为强度不够,而是耐久性不够。多年来,工程技术人员从原材料、配合比、外加剂、制造工艺、养护工艺等多方面加以研究改进,虽取得了一些成效但不理想。因此,混凝土的高性能化才是解决问题的关键。本文从聚丙烯纤维混凝土配合比设计入手,选择最佳配合比是确保聚丙烯纤维混凝土强度的重要环节,并对聚丙烯纤维的掺量对混凝土强度的影响进行试验比较和分析,为聚丙烯纤维混凝土配合比设计提供借鉴。

## 1 聚丙烯纤维混凝土的特性

### 1.1 聚丙烯纤维的物理性能

聚丙烯纤维是一种塑料纤维,材料为白色,半透明状,并呈现网状或束状单丝结构,在混凝土中搅拌时分

散成单丝状。

聚丙烯纤维的各项物理性能指标见表1。

表1 聚丙烯纤维网的物理性能指标

项目	指标值	项目	指标值
比重	0.91	抗拉强度/MPa	560~770
纤维长度/mm	12~51	弹性模量/MPa	3 500
纤维直径	6 000~26 000 丹尼尔	极限延伸率/%	8
熔点/℃	160~170	泊松比	0.29~0.46
燃点/℃	590	抗酸、碱 腐蚀能力	高
吸水性	无	毒性	无
导电性	低	导热性	低

### 1.2 聚丙烯纤维混凝土的性能

聚丙烯纤维是一种新型的混凝土增强纤维,被称为混凝土的“次要增强筋”(即不代替受力钢筋),对混凝土性能产生如下影响:

#### (1) 聚丙烯纤维抑制混凝土的塑性收缩龟裂

混凝土浇筑初期呈流塑状态时,其中比重大的物质(砂、石等)会自然地因自重向下移动,同时迫使比重较小的水向上运动,因而会形成条带状微细裂纹,即所谓“塑性收缩龟裂”。所以在普通混凝土中,这种塑性收缩龟裂,总是或多或少地早已潜伏在混凝土当中,严重影响混凝土的整体耐久性。掺入纤维后,大量均匀分布的纤维限制了混凝土浇筑初期不同比重物质的相对运动,首先抑制了毛细管的发展,进而抑制了塑性龟

收稿日期:2004-09-15

作者简介:陈宏友,男,大学本科,工程师。

裂裂纹的产生,提高了混凝土的整体性。美国圣荷西州大学等试验结果表明,纤维对混凝土龟裂程度的控制效果,比普通混凝土高 90%~100%。这就保证了凝固后的混凝土有较大的密度和较高的强度,加上纤维的约束作用,能够更好地抵抗温度变形和其他外力引起的裂缝发展。

### (2) 增强混凝土的抗冲性和柔韧性

试验表明,由于纤维在混凝土中的牵扯约束作用,混凝土破裂前聚丙烯纤维大约有 15% 的拉长,承担了部分破裂能量,从而使混凝土的柔韧性比普通混凝土提高大约 40%,抗冲击能力提高约 1 倍,抗疲劳性能也增加了 3 倍。

聚丙烯纤维混凝土的抗压强度与素混凝土相当,但能在一定程度上提高弯曲强度,提高的程度与纤维掺量有关。有研究者采用美国 MTS(850 型)电液伺服式疲劳试验机进行聚丙烯纤维混凝土弯曲疲劳性能试验,按三分点法对试件加荷。试验结果表明,聚丙烯纤维混凝土的应力与疲劳寿命间的关系和普通混凝土相似,即满足:

$$\sigma/s = \alpha - \beta \lg N_f \quad (1)$$

式中: $\sigma$ ——疲劳强度,MPa;

$s$ ——静载一次作用下的极限弯拉应力,MPa;

$\alpha$ 、 $\beta$ ——回归参数,由试验条件、加载方式及材料特性等因素决定;

$N_f$ ——疲劳破坏次数。

当纤维掺量为 0.9 kg/m<sup>3</sup> 时,回归参数  $\alpha$ 、 $\beta$  分别较普通混凝土提高了 8.34%、18.94%,这说明掺加聚丙烯纤维在一定程度上改善了混凝土的弯曲疲劳性能。

### (3) 减少混凝土的渗透性和增强其抗冻性能

试验表明,掺量为 1.186 kg/m<sup>3</sup> 的纤维混凝土,由于抑制了微裂缝的发展,比普通混凝土可减少 79% 的渗水。从而防止和延缓了渗水、潮湿气体和氯化物等

有害介质对混凝土的侵蚀和对受力钢筋的锈蚀,延长了建筑物的使用寿命。这一特点对贮水工程、海岸工程特别重要。

### (4) 增加混凝土的耐磨损性能

根据公路抗磨损试验,加纤维的混凝土,抗磨损能力增加 105%,并减少材料损耗 34.4%。

许多工程实践也证明,聚丙烯纤维混凝土有较好的抗磨损性能。

### (5) 经济

以桥梁、高速公路路面为例,采用 65 mm 厚耐磨、防震、抗裂的铺装层,分别用钢纤维混凝土、聚丙烯纤维混凝土和用钢丝加固面层进行比较。钢纤维的掺量按“钢纤维混凝土结构设计与施工规程(CECS38:92)”要求的体积率 1%~1.5%,取 100 kg/m<sup>3</sup>,单价 4 500 元/t;纤维网以标准掺量 0.9 kg/m<sup>3</sup>,价格 118 元计;钢丝网采用广州市路面工程常用的 TMD3030 型扩张型金属网代替,单价为 26 元/m<sup>2</sup>。则每 m<sup>2</sup> 铺装层加强材料价格分别为 29.3 元、7.67 元和 26 元,由此说明,要采用钢纤维、钢丝两种材料,在运输、安装过程将会增加费用,并在施工中增加麻烦。

## 2 聚丙烯纤维网混凝土配合比设计

### 2.1 原材料的选择

(1) 级配砂,见表 2。

(2) 级配碎石,见表 3。

表 2 级配砂范围

项目	通过下列筛孔(mm)的质量百分数/%					
	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15
河砂	92.1	82.1	74.2	54.1	22.1	1.0
设计要求	100.0~90.0	100.0~75.0	90.0~50.0	59.0~30.0	30.0~8.0	10.0~0.0

注:细度模数为 2.46,属中砂,符合混凝土用砂要求

表 3 级配碎石范围

项目	下列筛孔(mm)的通过率/%							
	37.5	31.5	26.5	19	16	9.5	4.75	2.36
大碎石	100.0	95.7	59.8	30.8	1.4	0.0	0.0	0.0
中碎石	100.0	100.0	100.0	94.9	78.5	35.8	10.4	1.2
合成级配	100.0	97.2	73.9	53.2	28.4	12.5	3.6	0.4
设计要求	100.0	100~95	80~68	60~40	40~25	25~10	10~0	5~0

注:大碎石与中碎石配合比分别为 65%、35%

(3) 聚丙烯纤维,聚丙烯纤维采用西安博赛特纤维网混凝土有限公司提供的美国纤维网公司生产的合

成纤维,成品每袋 0.9 kg,纤维长度 12~51 mm。

(4) 水泥,采用坪塘 P.O32.5 水泥,经抽样检验,

符合国家标准。

## 2.2 混凝土配合比设计

混凝土配合比设计是根据设计强度、工作性、耐久性、耐磨性及简易性等要求和经济合理的原则选用原材料,通过计算、试验和必要的调整,确定混凝土单位体积中各种组成材料的用量,然后确定试验最佳配合比,见表 4。

表 4 混凝土配合比

项目	数值		
纤维掺量/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	0	1.8	2.7
水灰比	0.5		
砂率/%	34		

## 3 力学性能试验结果及分析

### 3.1 试验方法

(1) 混凝土抗压和抗折强度试验是将标准养护到规定龄期的  $150\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$  立方体试件进行抗压强度试验;将  $150\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 550\text{ mm}$  小梁试件按三分点法测定其抗折强度。

(2) 劈裂抗拉强度试验,采用  $150\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$  立方体试件,标准养护至规定龄期后,将试件安放在带有球形铰座的压力机上,并垫上钢制弧形垫条和木质垫板,试件的轴心对准试验机下压板中心,垫条应垂直于试件成型时的顶面,当上压板与垫条接近时,调整球铰座,使接触均衡,按规定速度连续均匀加荷至破坏。记录最大荷载,计算劈裂强度。

(3) 轴心抗压强度试验采用  $150\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 300\text{ mm}$  棱柱体试件,标准养护至规定龄期,将试件直

立放置,试件轴心对准试验机下压板中心,按规定速度加荷,直至破坏,测定其轴心抗压强度。

(4) 静态抗压弹性模量是指压应力为轴心抗压强度 40% 时的加荷割线模量。采用  $150\text{ mm}\times 150\text{ mm}\times 300\text{ mm}$  棱柱体试件,标准养护至规定龄期,将试件直立放置,试件轴心对准试验机下压板中心,以规定速度加荷到轴心抗压强度 40% 对应的荷载  $P_A$ , 然后以同样的速度卸荷至零,如此反复预压 3 次后,按上述同样的速度进行第 4 次加荷,先加荷到应力为  $0.5\text{ MPa}$  的初荷载  $P_0$ , 保持  $30\text{ s}$  后分别读取两侧仪表读数;然后继续加荷至控制荷载  $P_A$ , 保持  $30\text{ s}$  后分别读取两侧仪表读数。两侧读数增值的平均值即为该次试验的变形值。如此反复进行加荷、持荷、读数,直至相邻两次变形值之差不大于  $0.003\text{ mm}$  时;以同样的速度加荷直至破坏,计算抗压弹性模量。

### 3.2 试验结果与分析

(1) 混凝土材料用量,见表 5。

表 5  $1\text{ m}^3$  混凝土材料用量

混凝土类型	水泥 /kg	砂 /kg	碎石 /kg	水 /kg	坍落度 /mm
基准混凝土	500	810	810	195	58
聚丙烯纤维掺量 $1.8\text{ kg}/\text{m}^3$ 混凝土	500	810	810	195	55
聚丙烯纤维掺量 $2.7\text{ kg}/\text{m}^3$ 混凝土	500	810	810	195	52

(2) 7 d 混凝土试验结果,见表 6。

(3) 28 d 混凝土试验结果,见表 7。

(4) 试验结果分析。

从表 6、表 7 可知:① 掺聚丙烯纤维  $1.8\text{ kg}/\text{m}^3$  混

表 6 7 d 混凝土试验结果

指标	抗压强度/MPa	抗折强度/MPa	劈裂强度/MPa	轴心抗压强度/MPa	抗压模量/GPa
基准混凝土	27.7	3.90	2.46	23.6	23.2
掺 $1.8\text{ kg}/\text{m}^3$ 聚丙烯纤维混凝土	30.2(1.09)	4.28(1.10)	2.71(1.10)	25.9(1.10)	25.7(1.11)
掺 $2.7\text{ kg}/\text{m}^3$ 聚丙烯纤维混凝土	31.4(1.13)	4.59(1.18)	3.03(1.23)	27.8(1.18)	27.3(1.18)

注:括号内数据为较基准混凝土的强度比

表 7 28 d 混凝土试验结果

指标	抗压强度/MPa	抗折强度/MPa	劈裂强度/MPa	轴心抗压强度/MPa	抗压模量/GPa
基准混凝土	33.7	5.16	2.47	34.0	31.0
掺 $1.8\text{ kg}/\text{m}^3$ 聚丙烯纤维混凝土	38.9(1.15)	5.84(1.13)	2.90(1.17)	37.7(1.14)	34.9(1.13)
掺 $2.7\text{ kg}/\text{m}^3$ 聚丙烯纤维混凝土	40.0(1.19)	6.26(1.21)	3.14(1.27)	40.0(1.18)	37.2(1.20)

注:括号内数据为较基准混凝土强度比

凝土,较基准混凝土 7 d 强度增加 10% 左右,28 d 强度增加 15% 左右;② 掺聚丙烯纤维 2.7 kg/m<sup>3</sup> 混凝土,较基准混凝土 7 d、28 d 强度均增加 20% 左右。③ 掺聚丙烯纤维后混凝土强度随龄期增长,较基准混凝土增加的幅度略大一些。④ 根据试验结果,以及考虑其经济适用性,一般聚丙烯纤维最佳掺量为 1.8 kg/m<sup>3</sup>。

## 4 聚丙烯纤维掺入量及使用说明

### 4.1 掺入量

聚丙烯纤维掺入量每 1 m<sup>3</sup> 混凝土为 0.9~2.7 kg,但最低掺量不低于 0.5 kg,根据砂、石料、水泥用量的变化及工程对抗裂的要求,可适当增加掺量,一般最佳掺量为 1.8 kg/m<sup>3</sup>。它同混凝土骨料、外加剂、掺合料和水泥都没有任何反应,对搅拌设备及施工工艺也没有特别要求,只需适当保证搅拌时间即可使用。

### 4.2 使用说明

(1) 根据建议掺量及每次搅拌的混凝土方量,准确称量纤维、砂石料后,将纤维投入搅拌机,将集料连同纤维一起加水搅拌,搅拌完成后随机取样,若纤维已均匀分散成单丝,则混凝土可投入使用,如果仍有成束纤维则可延长搅拌时间 30 s 再使用,加入纤维的混凝土同普通混凝土的施工及养护工艺完全相同。

(2) 加入纤维后,混凝土粘聚性增强,坍落度有很小的损失,但不会对工作性能有不利影响。如确需提高坍落度,不可加大用水量,只能稍增大减水剂用量。加入纤维后,仍应严格按照国家有关规程施工及养护。

## 5 结语

(1) 聚丙烯纤维混凝土是一种新型的合成纤维混

凝土,少量纤维的加入,可较大程度地改善混凝土的收缩性能、耐久性、抗冲击性能。同时抗折和抗压能力也明显提高,在路面工程中,能够减薄路面厚度,延长路面使用寿命。

(2) 聚丙烯纤维混凝土能有效地防止和减少塑性收缩裂缝。室内和现场试验都证明,聚丙烯纤维混凝土有明显的阻裂性能,可显著提高混凝土的抗变形能力,干缩率也有所减少。

(3) 聚丙烯纤维混凝土施工工艺与普通混凝土的施工工艺基本相同。

(4) 由于聚丙烯纤维混凝土能有效地抑制裂缝产生,使混凝土防渗、抗冻融能力得到改善,从而使混凝土耐久性大大提高。

(5) 聚丙烯纤维的掺量,对混凝土的力学性能有显著的影响,并且随着纤维量的增加,混凝土的抗压强度和抗折强度有增加的趋势。

(6) 聚丙烯纤维混凝土具有优良的弯曲疲劳性能,尤其在高应力比下,与普通混凝土相比,疲劳寿命可成倍增长。

(7) 由于聚丙烯纤维无毒、无刺激,化学性能稳定、耐化学腐蚀能力强,施工操作简单,在混凝土工程中具有广阔的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 郭景强,陈贺新,等. 聚丙烯纤维自密实混凝土的研究及应用[J]. 河南科学,2002(6).
- [2] 姚武,李杰,等. 聚丙烯纤维对混凝土抗拉强度的影响[J]. 混凝土,2001(10).
- [3] 徐至钧. 聚丙烯纤维在混凝土中的应用[J]. 建筑技术,2002(1).

## 我国主跨在 450 m 以上的悬索桥

桥名	建成年	主跨	桥名	建成年	主跨
润扬长江大桥	2005 年	1 490 m	虎门大桥	1997 年	888 m
江阴长江大桥	1999 年	1 385 m	厦门海沧大桥	1999 年	648 m
香港青马大桥	1997 年	1 377 m	重庆鹅公岩长江大桥	2001 年	560 m
宜昌长江大桥	2001 年	960 m	汕头海湾大桥	1995 年	452 m
西陵长江大桥	1996 年	900 m	重庆丰都长江大桥	1997 年	450 m

摘自 2005 年 1 月 25 日《交通建设质量简讯》