

# 混杂纤维高性能混凝土配合比优化设计

王 量<sup>1</sup>, 鞠丽艳<sup>2</sup>, 胡春花<sup>3</sup>

(1.上海嘉华混凝土有限公司,上海市 200031;2.上海申通地铁集团有限公司,上海市 200031;

3.上海市杨浦区建设工程质量检测站,上海市 200438)

**摘 要:**研究低掺量情况下混杂(钢-聚丙烯)纤维混凝土各组分对混凝土性能的影响及程度,采用正交试验设计方案,找出混杂纤维低掺量情况下,混凝土在满足强度、工作性(施工性能)、耐久性各方面优良性能时的较优配比,对混杂纤维高性能混凝土进行优化设计。

**关键词:**混杂纤维;钢纤维;聚丙烯纤维;高性能混凝土;正交试验

**中图分类号:**TU377.94 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-7716(2006)04-0174-04

## 0 前言

现代混凝土技术正朝着高强度、高韧性、高阻裂、高耐久、高体积稳定性的方向发展。在水泥基体中掺入纤维是强化、韧化混凝土,并改善其性能的有效途径。由于多相、多组分混凝土本身具有多尺度层次的结构特征,因而用单一纤维增强其作用是有限的,而采用不同性能和不同尺度的纤维混杂增强,能使其在混凝土不同的结构层次、性能层次上充分发挥各种纤维的尺度和性能效应,达到逐级阻裂与强化的功能,配制成高性能的混凝土。

混杂纤维混凝土是混凝土研究的一个新兴领域,在许多方面尚有待进一步系统地探讨和研究,诸如各组分掺量、纤维混杂比例、复合材料各组分间的关系及其对混凝土强度、耐久性、工作性的影响,目前混杂纤维混凝土研究表明,纤维混杂混凝土极具发展前景。该文旨在通过正交试验研究分析各组分对混杂纤维(钢/聚丙烯纤维混杂)混凝土性能的影响及程度,并对混凝土配合比进行选择,获得较优配比,实现混杂纤维高性能混凝土配合比的优化设计。

## 1 试验原材料

试验用水泥为 42.5 级普通硅酸盐水泥;石子粒径 5~16 mm,堆积密度 1630 kg/m<sup>3</sup>;砂子细度模数 2.65,堆积密度 1 500 kg/m<sup>3</sup>,含泥量 1.5%;钢纤维为钢丝型纤维,长径比为 30/0.6,比重 7.8g/cm<sup>3</sup>;聚丙烯纤维为长坚聚丙烯纤维,纤维长度为 12 mm,直径为 18 μm,熔点为 165~173℃,比重 0.91 g/cm<sup>3</sup>;粉煤灰汇能 II 级复合粉煤灰,烧

失量为 2.8%;减水剂为 Grace 高效减水剂 S20,主要成分为萘磺酸甲醛缩合物。

该研究采用正交试验设计的方法,主要选择钢纤维/聚丙烯纤维掺量;水灰比;用水量;砂率;粉煤灰掺合料;减水剂作为正交试验的影响因素,除钢纤维/聚丙烯纤维掺量取 6 个水平外,其余因素均取 3 个水平。根据所选用的影响因素及水平数综合考虑,该文选用了 L<sub>18</sub>(6×36),即 7 因素 6 水平和 3 水平混杂正交表。方案表头设计、方案安排及结果见表 1(表中各水平排序已经过随机处理)。主要选择混杂纤维高性能混凝土的力学性能(抗压、抗折、劈裂抗拉强度)、耐久性(抗氯离子渗透性能)、工作性(坍落度)作为正交试验的考核指标。

## 2 正交试验

### 2.1 影响因素及考核指标选择

#### 2.1.1 影响因素

##### (1)钢纤维/聚丙烯掺量

纤维的掺入将在一定程度上改变传统混凝土内部结构的格局,影响到混凝土的搅拌及均匀性,从而影响混凝土性能,同时由于高掺量所带来的经济方面的原因也影响其应用,出于经济、性能方面的考虑,该文采用了六个水平,见表 1(均为体积百分含量)。

##### (2)水灰比

水灰比始终是混凝土性能最为重要的影响因素之一,水灰比越低,混凝土愈密实,有利于提高力学性能和耐久性,对于高性能混凝土,以及考虑到纤维的掺入使得混凝土工作性有所降低,为保证混杂纤维混凝土有较高的工作性,该试验所用混凝土水胶比为 0.30、0.34、0.38 三个水平,见表 1。

##### (3)用水量

收稿日期:2006-05-09

作者简介:王量(1972-),男,上海人,工程师,主要从事混凝土制品技术的研究和管理工作。

混凝土拌合物中水的含量决定着硬化后孔隙量的多少,而孔隙特别是毛细孔对混凝土耐久性和力学性能的影响至关重要,对高性能混凝土更要控制混凝土用水量,以确保耐久性。日本规范规定,用水量 185~175 kg/m<sup>3</sup> 的混凝土,属于耐久性混凝土;用水量 < 175 kg/m<sup>3</sup> 的混凝土,属于高耐久性混凝土;这个标准可作为混凝土耐久性能设计时的参考,该文采用 170 kg/m<sup>3</sup>、180 kg/m<sup>3</sup>、190 kg/m<sup>3</sup> 三个水平,见表 1。

(4)砂率

砂率也是影响混凝土性能的因素之一,其主要影响混凝土施工性能,在混杂纤维混凝土中掺入纤维会降低工作性,故应增大砂率,但砂率不能过大,否则将会产生泌水等现象,影响混凝土的性能。该文采用了 35%、40%、45% 三个水平进行研究,见表 1。

(5)粉煤灰矿物外加剂

矿物外加剂的掺入对于高性能混凝土而言,是必不可少的。粉煤灰矿物外加剂的加入可减少水泥用量,降低混凝土造价,降低早期混凝土水化热,并在一定程度上改善混凝土各方面的性能。考虑到粉煤灰对混凝土的实际作用效果,该文采用了 15%、20%、30% 三个水平。

(6)减水剂

对于高性能混凝土,高效减水剂的使用必不可少。减水剂的掺入既起到了降低水胶比的作

用,又使混凝土有较高工作性。故该文使用了高效减水剂 S20,并采用 1.0%、1.2%、1.5% 三个水平,见表 1。

2.1.2 考核指标

耐久性为高性能混凝土最重要的性能及考核指标。而钢筋混凝土最重要的耐久性问题就是钢筋锈蚀,氯离子又是引起锈蚀的元凶,同时也是考核混凝土耐久性的主要方式,因此该文中采用电量法,测量混凝土的抗氯离子渗透性能。对于混杂纤维高性能混凝土,抗压、抗折、抗拉强度也是重要的力学性能。此外对高性能混凝土而言,不仅要有高耐久性和强度,工作性也是极为重要的方面,它直接影响混凝土搅拌、浇灌等施工性能,因此也是重要考核指标。该文从耐久性、工作性、强度 3 个方面进行考核。

2.1.3 试验项目与方法

该研究采用 100 mm × 100 mm × 100 mm (抗压强度、劈裂抗拉强度)和 100 mm × 100 mm × 400 mm (抗折强度)2 种混凝土试件。试验参照钢筋纤维混凝土试验方法 CECS13:89 进行。混杂纤维混凝土抗氯离子渗透性试验参照 ASTM 1202-97 进行,见图 1。先将砂、石、混杂纤维干混,然后加入水泥、粉煤灰搅拌,达到一定均匀程度时,再加水和减水剂拌和,成型。

3 试验结果分析(见表 2)

表 1(L<sub>16</sub>6 × 36)正交试验方案及试验结果

试验号	A S/P	B 水胶比	C 用水量	D 砂率	E 粉煤灰	F 减水剂	G 空	抗压强度 /MPa	抗折强度 /MPa	劈拉强度 /MPa	电通量 /C	坍落度 /cm
1	1(0.4/0.25)	1(0.30)	1(190)	1(40)	1(20)	1(1.5)	1	65.79	6.16	3.60	1952	8.2
2	1	2(0.34)	2(180)	2(45)	2(15)	2(1.0)	2	63.27	6.27	3.43	1781	9.1
3	1	3(0.38)	3(170)	3(35)	3(25)	3(1.2)	3	69.93	6.59	5.04	2110	12.0
4	2(0.7/0.2)	1	1	2	2	3	3	77.43	7.22	5.33	1624	3.2
5	2	2	2	3	3	1	1	64.32	6.76	4.94	2422	6.2
6	2	3	3	1	1	2	2	67.05	6.41	4.22	2285	11.5
7	3(0.5/0.1)	1	2	1	3	2	3	70.44	7.11	5.13	1425	1.3
8	3	2	3	2	1	3	1	45.69	6.86	4.33	1792	6.3
9	3	3	1	3	2	1	2	48.66	6.39	3.66	2152	14.8
10	4(0.6/0.15)	1	3	3	2	2	1	65.16	6.96	5.69	1723	0.6
11	4	2	1	1	3	3	2	56.07	6.83	4.04	2095	4.8
12	4	3	2	2	1	1	3	44.58	6.28	3.43	2418	12.2
13	5(0.8/0.05)	1	2	3	1	3	2	66.15	9.70	7.46	2310	0.0
14	5	2	3	1	2	1	3	65.16	8.90	6.91	2511	3.1
15	5	3	1	2	3	2	1	57.36	8.09	6.23	3156	9.9
16	6(0.8/0.05)	1	3	2	3	1	2	62.52	8.41	5.35	1996	0.9
17	6	2	1	3	1	2	3	61.35	9.37	5.43	2334	13.6
18	6	3	2	1	2	3	1	73.14	8.27	5.28	2096	13.8

注:A、D、E、F 项为百分数;C 单位为:kg/m<sup>3</sup>;A 为体积百分含量;S 代表钢纤维;P 代表聚丙烯纤维。

表 2 正交试验结果的直观分析

指标	因素	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K'1	K'2	K'3	K'4	K'5	K'6	R
抗压强度 /MPa	A	198.99	208.8	164.79	165.81	188.67	197.01	66.33	69.6	54.93	55.27	62.89	65.67	14.67
	B	407.49	357.03	360.72				67.92	59.51	60.12				8.41
	C	366.66	384.42	375.33				61.11	64.07	62.56				2.96
	D	397.65	350.85	375.57				66.28	58.48	62.6				7.8
	E	350.61	392.82	380.64				58.44	65.47	63.44				7.03
	F	351.03	384.63	388.41				58.51	64.11	64.74				6.23
	G	371.46	363.72	388.89				61.91	60.62	64.82				4.2
劈裂强度 /MPa	A	12.07	14.49	13.12	13.16	20.6	16.06	4.02	4.83	4.37	4.39	6.87	5.35	2.85
	B	32.56	29.13	27.81				5.43	4.86	4.64				0.79
	C	28.34	29.62	31.54				4.72	4.94	5.26				0.54
	D	29.13	28.1	32.27				4.86	4.68	5.38				0.7
	E	28.52	30.25	30.73				4.75	5.04	5.12				0.37
	F	27.89	30.18	31.43				4.65	5.03	5.24				0.59
	G	30.02	28.16	31.32				5	4.69	5.22				0.53
抗折强度 /MPa	A	19.02	20.39	20.36	20.07	26.69	26.05	6.34	6.8	6.79	6.69	8.9	8.68	2.56
	B	45.56	44.99	42.03				7.59	7.5	7.01				0.58
	C	44.06	44.39	44.13				7.34	7.4	7.36				0.06
	D	43.68	43.13	45.77				7.28	7.19	7.63				0.44
	E	44.78	44.01	43.79				7.46	7.34	7.3				0.16
	F	42.9	44.21	45.47				7.15	7.37	7.58				0.43
	G	43.1	44.01	45.47				7.18	7.34	7.58				0.4
电通量 /C	A	5843	6331	5369	6236	7977	6426	1948	2110	1790	2079	2659	2142	869
	B	11030	12935	14217				1838	2156	2370				532
	C	13313	12452	12417				2219	2075	2070				149
	D	12364	12767	13051				2061	2128	2175				114
	E	13451	12704	12027				2242	2117	2005				237
	F	13091	11887	13204				2182	1981	2201				201
	G	13141	12619	12422				2190	2103	2070				120
坍落度 /cm	A	18	18.8	24.6	37.3	7	18.3	3	3.13	4.1	6.22	1.17	3.05	5.05
	B	37.4	34.8	51.8				6.23	5.8	8.63				2.83
	C	54.3	39.1	30.6				9.05	6.52	5.1				3.95
	D	40.4	45	38.6				6.73	7.5	6.43				1.07
	E	40.5	37	46.5				6.75	6.17	7.75				1.58
	F	60.9	24.9	38.2				10.15	4.15	6.37				6
	G	38.5	36.2	43.3				6.42	6.03	7.22				1.19

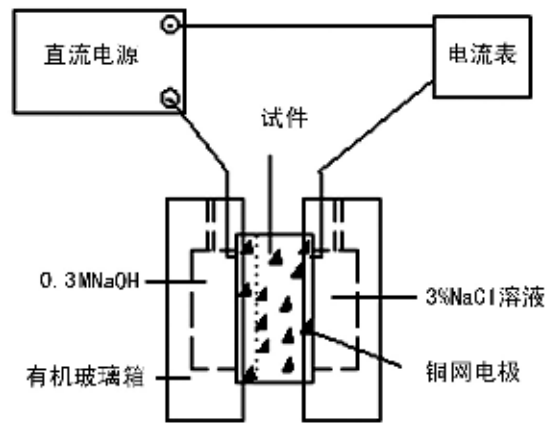


图 1 直流电电量法渗透性试验装置

从表 1 的试验结果及表 2 的直观分析结果可见,当钢纤维体积含量为 0.4% ~ 0.9%,聚丙烯纤维体积含量在 0.1% ~ 0.6%之间;水胶比为 0.3 ~

0.38;用水量为 170 ~ 190 kg/m<sup>3</sup>;砂率为 35% ~ 45%;粉煤灰为 15% ~ 25%;高效减水剂为 1.0% ~ 1.5%时,对混杂纤维混凝土的抗压强度因素的影响顺序为:A→B→D→E→F→C,其中 A、B、D、E 对抗压强度的影响较大,其他因素的影响比较小。对于劈裂抗拉强度,影响的顺序为:A→B→D→F→C→E,其中 A、B、D、F 对劈裂抗拉强度的影响较大,其他因素的影响较小。对于抗折强度,影响因素为 A→B→D→F→E→C,其中 A、B、D、F 的影响较大,其他因素的影响较小。对于抗氯离子渗透性能,因素的影响顺序为:A→B→E→F→C→D,其中 A、B 影响最大,其余较小。对于坍落度的影响顺序为 F→A→C→B→E→D,其中 A、B、C、F 的影响较大。

从以上分析得出,在 6 个因素(钢纤维 / 聚丙烯

烯纤维、水胶比、用水量、砂率、粉煤灰掺量、减水剂掺量)影响下的混杂纤维混凝土的28 d抗压强度、劈裂抗拉强度、抗折强度、坍落度和抗氯离子渗透性能(电通量)等五项指标的最优配合比(前四者取各因素的最大值,最后一个取最小值)分别是: $A_2B_1C_2D_1E_2F_3$ 、 $A_5B_1C_2D_1E_3F_3$ 、 $A_5B_1C^2D_3E_1F_3$ 、 $A_4B_3C_1D_1E_3F_1$ 和 $A_3B_1C_3D_1E_3F_2$ 。通过对各水平及各最佳配比中的各因素的排序位置,并结合误差范围值,对次要因素做弱化处理,从而得到六因素对工作性及强度影响的最佳配比为: $A_5B_1C_2D_1E_3F_3$ 。从耐久性、工作性及强度三个方面考虑将 $A_5B_1C_2D_1E_3F_3$ 与 $A_3B_1C_3D_1E_3F_2$ 比较,最后得出混杂纤维高性能混凝土优化配合比为: $A_3B_1C_3D_1E_3F_2$ 。

#### 4 混杂纤维增强混凝土机理

从正交试验得出的试验结果可以看出,影响混杂纤维混凝土性能的因素中混杂纤维、水胶比、粉煤灰作用较大。水胶比对混凝土性能的影响是经诸多试验证明了的重要因素,再次表明,水胶比也是影响混杂纤维混凝土性能的主要方面。

混杂纤维对混凝土的影响也是很重要的。加入混杂纤维将使混凝土的内部结构发生改变,产生新的界面,同时混凝土内部产生孔隙的几率增加,混凝土内部薄弱环节增多。因此混杂纤维的掺入量,搅拌情况,纤维被砂浆包裹情况,将会对混凝土各性能产生极为重要的影响。低掺量的钢纤维/聚丙烯纤维混杂的加入,采用裹砂石工艺,使用强制搅拌机,使得其能在混凝土基体中均匀分散,不易结团,并对骨料起承托作用,混凝土坍落度变化不大,坍落度经时损失更小,拌合物不易泌水、离析,并使混凝土中各成分的分布更为均匀,纤维、骨料与水泥石之间的结合更为紧密;而且纤维的加入对混凝土初期收缩起到约束作用,使得混凝土内部孔隙不再扩展,减小了内部孔隙的尺寸,增强了混凝土抵抗外部介质侵蚀的能力,提高了耐久性;同时混凝土整体性更好,提高了混凝土强度,更由于纤维抗拉强度较大,使得混凝土劈裂抗拉强度及抗折强度均较大。

磨细的粉煤灰对混凝土强度影响较大,而未经磨细的粉煤灰对混凝土后期强度的影响也较大。根据以上分析及试验可以看出,粉煤灰对混凝土各强度影响都较大,主要是利用了粉煤灰的火山灰效应,它在混凝土内部发生二次反应,产生更多的水化产物,从而改善混凝土内部界面结构及孔隙结构,降低混凝土内部孔隙率,最终提高混凝土各强度。从上述试验结果可知,粉煤灰的掺量对强度的影响规律是较大掺量增强效果更明显,而其对混杂纤维混凝土的耐久性影响却不很显著,这与其对普通混凝土耐久性的影响明显不同,其原因可能与粉煤灰掺量有关。

#### 5 结论

(1)混杂纤维混凝土组分:混杂纤维、水胶比、粉煤灰对混凝土工作性、强度、耐久性影响极大,分别对混杂纤维混凝土的性能均有不同程度的增强及改善作用。

(2)减水剂、砂率、用水量对混杂纤维混凝土强度及耐久性影响较小,均可在该文所述百分比范围内取较大值,有利于提高混凝土施工性能,即工作性。

(3)混杂纤维高性能混凝土最优配比为: $A_3B_1C_3D_1E_3F_2$ ,即混杂纤维(S/P)含量为:0.5%/0.1%,水胶比为:0.30,用水量为 $170\text{ kg/m}^3$ ,砂率为:40%,粉煤灰为:25%,减水剂为:1.0%。

#### 参考文献

- [1]汤佩钊.复合材料及其应用技术[M].重庆:重庆大学出版社,1998
- [2]吴中伟,廉慧珍.高性能混凝土[M].北京:中国铁道出版社,1999
- [3]华 渊.纤维混杂效应的试验研究[J].混凝土与水泥制品,1998,(4):21~24
- [4]孙 伟.纤维混杂及其与膨胀剂复合对水泥基材料的物理性能的影响[J].硅酸盐学报,2000,(2):95-104
- [5]姚武,蔡江宁,陈兵,吴科如.混杂纤维增韧高性能混凝土的研究[J].三峡大学学报(自然科学版),2000,24(1)
- [6]路新瀛.电学和电化学技术与混凝土耐久性[J].混凝土与水泥制品,1998,(4):10-13