

钢纤维和聚丙烯纤维混凝土配合比试验研究

李俊毅¹, 叶国良¹, 刘天伟²

(1. 天津港湾工程研究所, 天津 300222; 2. 中港第一航务工程局二公司, 山东 青岛 266071)

摘要: 文章根据长江口深水航道治理工程大圆筒结构对钢纤维和聚丙烯纤维混凝土的强度要求, 进行了大量的室内纤维混凝土配合比试验和现场纤维混凝土配制试验, 得出了满足设计要求的纤维混凝土配合比, 并经实际施工证明是成功的。

关键词: 钢纤维; 聚丙烯纤维; 纤维混凝土

中图分类号: TU528.572; **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-3688(2003)01-0009-05

Experimental Study on Design Mix of Steel and Polypropylene Fiber Concrete

LI Jun-yi¹, YE Guo-liang¹, LIU Tian-wei²,

(1. Tianjin Port Engineering Institute, Tianjin 300222, China;

2. No. 2 Eng. Co. of CHEC-Tianjin Port Const. Corp., Qingdao 266071, China)

Abstract: Based on the strength requirements of the steel and polypropylene fiber concrete in the large diameter cylinders used on the regulation project for the deep water navigational channels in the Yangtze River, a lot of laboratory tests as well as field tests were made on the design mix proportions for the fiber concrete, from which mix proportions meeting the design requirement were obtained. The mix proportions proved to be successful after being actually used on the project.

Key words: steel fiber; polypropylene fiber; fiber concrete

1 前言

长江口深水航道治理工程大圆筒结构试验段工程1~4号筒高22.2m, 外径12m, 壁厚: 顶部7m部分厚度25cm, 中部2m变截面厚度25~21cm, 底部13.2m部分厚度21cm。混凝土强度等级为C60, 1号、2号筒顶部3m范围混凝土掺加45kg/m³钢纤维, 设计劈裂抗拉强度为5.5MPa, 4号筒顶部3m范围掺加118kg/m³钢纤维, 设计劈裂抗拉强度为8.5MPa, 其余混凝土掺加1.2kg/m³聚丙烯纤维, 设计劈裂抗拉强度为5.5MPa。

为大圆筒筒壁混凝土提供合理的配合比以满足筒壁混凝土的轴拉强度及耐振性要求, 天津港湾工程研究所于2001年3~7月对钢纤维和聚丙烯纤维混凝土的配合比及其强度进行了系统的试验研究, 提出了建议配合比设计方案; 2001年8~9月根据建议配合比设计方案在中港一航局二公司中心试验站及青岛显浪预制现场采用当地的砂子、

石子、水泥等材料, 进行了现场钢纤维和聚丙烯纤维混凝土的配合比及强度配制试验, 并增加了几种纤维进行配合比试验。根据室内和现场试验结果, 得到了配制高强纤维混凝土的一些规律, 得出了大圆筒预制实际采用的纤维混凝土配合比。

2 室内试验

设计要求: 圆筒混凝土强度等级C60; 钢纤维混凝土劈裂抗拉强度两个指标分别为5.5MPa及8.5MPa; 聚丙烯纤维混凝土劈裂抗拉强度5.5MPa。

采用国家、行业有关标准进行试验。

2.1 原材料

水泥采用天津骆驼牌42.5普通硅酸盐水泥; 砂子采用龙口海砂, 细度模数2.9, 属中砂; 石子采用石灰石碎石, 最大粒径20mm; 外加剂采用TH高效减水剂; 掺合料为国产硅灰; 拌和水为天津自来水; 采用的纤维规格及性能指标列于表1。

2.2 纤维混凝土拌制工艺

(1) 聚丙烯纤维混凝土拌制: 先将水泥、砂子、石子、掺合料、合成纤维投入强制式搅拌机中拌和1min, 然后将

收稿日期: 2002-10-10

作者简介: 李俊毅(1965-), 男, 工学硕士, 高级工程师, 副总工程师, 建筑材料专业, 从事建筑材料及施工的研究工作。

表1 纤维规格及性能指标

纤维品种	产品型号	长度 mm	长径比	相对密度	抗拉强度 MPa
钢纤维	江苏 S-4	30	60	7.8	380
	湖北 SFL-32	32	64	—	—
聚丙烯纤维	国产水泥防裂 PP 纤维	15~19	—	0.9	—

外加剂及水投入搅拌机,再拌和 3min。

(2)钢纤维混凝土拌制:先将水泥、砂子、石子、外加剂、掺合剂、水投入强制式搅拌机中拌和 3min,然后将钢纤维均匀分散地投入搅拌机,再拌和 3min。

2.3 试验结果及分析

纤维混凝土配合比及其力学性能试验结果列于表 2。

从表 2 可以分析得出:

表2 纤维混凝土配合比及力学性能试验结果

试验编号	配合比	水灰比	砂率 (%)	碎石用量 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	用水量 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	硅灰掺量 (%)	纤维品种及掺量			TH 外加剂掺量 (%)	坍落度 mm	28d 抗压强度 MPa	28d 劈裂抗拉强度 MPa
							品种	体积率 (%)	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$				
J30	1 : 1.33 : 2.17	0.30	38	500	150	8	聚丙烯纤维	0.13	1.2	0.8	120	67.9	6.3
J32	1 : 1.65 : 2.48	0.32	40	440	140	8	聚丙烯纤维	0.13	1.2	1.2	160	71.1	6.5
G0.6	1 : 1.33 : 2.17	0.30	38	500	150	8	S-4 钢纤维	0.6	45	1.2	190	76.3	7.2
G2.5-1	1 : 1.93 : 1.30	0.27	60	550	148	15	S-4 钢纤维	2.5	196	2.5	30	87.6	10.8
G2.5-2	1 : 1.76 : 1.44	0.29	55	550	160	8	S-4 钢纤维	2.5	196	2.5	50	82.2	10.4
G2.0	1 : 1.09 : 1.78	0.25	38	600	150	15	S-4 钢纤维	2.0	156	2.5	30	83.0	9.3
G1.5-1	1 : 1.09 : 1.78	0.25	38	600	150	10	S-4 钢纤维	1.5	118	2.5	140	88.9	7.4
G1.5-2	1 : 1.85 : 2.36	0.32	44	440	141	8	SFL-32 钢纤维	1.5	118	2.5	55	88.9	7.2

(1)聚丙烯纤维掺量 $1.2\text{kg}/\text{m}^3$,水灰比 0.30~0.32,用水量 $140\sim 150\text{kg}/\text{m}^3$,硅灰掺量 8%,TH 外加剂掺量 0.8%~1.2%时,可配制 28d 劈裂抗拉强度达 5.5MPa 的聚丙烯纤维混凝土。聚丙烯纤维混凝土强度等级满足 C60 要求。

(2)S-4 钢纤维掺量 0.6%(体积率),水灰比 0.30,用水量 $150\text{kg}/\text{m}^3$,硅灰掺量 8%,TH 外加剂掺量 1.2%时,可配制 28d 劈裂抗拉强度达 5.5MPa 的钢纤维混凝土。钢纤维混凝土强度等级满足 C60 要求。

(3)S-4 钢纤维掺量 2.5%(体积率),水灰比 0.27~0.29,用水量 $148\sim 160\text{kg}/\text{m}^3$,硅灰掺量 8%~15%,TH 外加剂掺量 2.5%时,可配制 28d 劈裂抗拉强度达 8.5MPa 的钢纤维混凝土。钢纤维混凝土强度等级满足 C60 要求。

(4)采用 S-4 端钩型钢纤维与 SFL-32 波纹型钢纤维配

制的钢纤维混凝土的劈裂抗拉强度相当。

(5)根据上述结论推荐配合比的编号为表 2 中的 J32, G0.6 和 G2.5-2。

3 现场试验

3.1 原材料

水泥采用大宇水泥厂 P. I52.5R 硅酸盐水泥。骨料为青岛地区河砂和石灰石质碎石。河砂经过人工过筛,碎石经过筛洗。

外加剂采用 GWTH 高效减水剂和 GS 缓凝剂、MFN 缓凝高效减水剂。掺和料采用国产硅灰、挪威 971D 型和 940U 型硅灰、山东胶州的沸石粉及上海 I 级粉煤灰、S95 矿渣微粉,品质见表 3。

表3 掺和料性能

厂家型号	细度 (%) (0.045mm 筛)	烧失量 (%)	SiO ₂	密度 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	火山灰活性 (%)	需水量比 (%)
国产硅灰	2	2.52	86.1	—	116	101
挪威 971D 型硅灰	0.5	1.26	97.6	2.17	114	100
挪威 940U 型硅灰	0.8	2.09	93.5	2.2	107	102
胶州沸石粉	—	13.35	55.0	—	合格	—
I 级粉煤灰	8.6	3.58	—	—	95	96
S95 矿渣微粉	$361\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$	0.48	—	2.88	96	102

聚丙烯纤维采用国内代销美国产的 19mm 长网状聚丙烯纤维、上海产的 51mm 和 38mm 长网状聚丙烯纤维。

钢纤维采用上海 HAREX 铣削钢纤维、江苏 S-4 端钩

钢纤维及上海 DRAMIX 冷拉型端钩钢纤维。上海 HAREX 钢纤维外观似截断的韭菜叶,横截面略带弧状,弧内侧面粗糙,外侧表面光滑,径向扭曲,两端有带钩的锚尾。其它两

种钢纤维外形基本相似,均带端钩。上海 DRAMIX 钢纤维以水溶性快速胶水粘结成排,加入混凝土可迅速分散。三种钢纤维规格型号性能指标见表 4。

3.2 混凝土拌和与成型方法

将骨料、水泥、掺合剂加入强制式拌和机中干拌 1min,再加入水和外加剂搅拌,在混凝土达到要求的坍落度后,将纤维分散均匀地加入混凝土中搅拌 1~2min,直至纤维在混凝土中分散均匀。

混凝土成型时采用振动台,振动时间 60s。试件抹面完毕后用塑料薄膜覆盖。

3.3 聚丙烯纤维混凝土试验结果与分析

不同聚丙烯纤维混凝土配合比及其力学性能试验结果列于表 5。

表 4 钢纤维规格型号

生产厂家	规格型号	长度 mm	长径比	母材抗拉强度 MPa	材质及加工
上海 HAREX	Ami04-32-600	32	35~40	>700	16Mn 合金钢铣削
江苏	S-4	30	50~60	>550	A ₃ 冷扎带钢
上海 DRAMLX	RC-80/60-BN	60	80	>1 150	冷拉钢丝切割
	RC-65/35-BN	35	64		

表 5 聚丙烯纤维混凝土试验结果

试验编号	水泥用量 kg·m ⁻³	硅灰		水胶比	砂率 (%)	坍落度 mm	外加剂		聚丙烯纤维			28d 抗压强度 MPa	28d 劈裂抗拉强度 MPa
		品种	用量 kg·m ⁻³				品种	掺量 (%)	厂家	长度 mm	掺量 kg·m ⁻³		
YT-15	456	国产	40	0.337	40	50	TH	1.32	美国产	19	1.2	91.8	5.9
YT-3	516 P.O52.5R			0.358	36	25	MFN	1.2	美国产	19	0.9	67.4	4.3
YT-6	511			0.379	40	135	MFN	1.5	美国产	19	1.2	78.2	5.4
YT-20	461	国产	40	0.318	40	70	TH	1.34	上海产	51	1.2	98.6	6.6
YT-28	458	971D	40	0.320	40	30	TH	1.3	上海产	38	1.2	81.9	6.2
YT-29	460	940U	40	0.310	40	80	TH	1.8	上海产	38	1.2	90.4	6.3
YT-35	504	940U	44	0.301	38	65	TH	1.8	上海产	38	1.2	90.0	6.4
YT-38	556	940U	48	0.280	37	130	TH/GS	2.4/0.05	上海产	38	1.2	77.2	6.1
YT-40	522	940U	28(5%)	0.300	40	40	TH	1.8	上海产	38	1.2	84.2	6.4
YT-41	506	940U	44(8%)	0.300	40	65	TH	1.8	上海产	38	1.2	90	6.1
YT-33	499			0.315	40	10	TH	1.8	上海产	38	1.2	76.1	5.5
YT-39	580			0.29	38	75	TH/GS	2.5/0.05	上海产	38	1.2	88.9	5.3
YT-49	550			0.286	40	15	TH	3	上海产	38	1.2	71.8	4.8 中值

注:表中未注明的水泥均为大宇 P. 152. 5R 水泥。

从表 5 中可以分析得出:

(1)采用美国产及上海产聚丙烯纤维,在掺量为设计值 1.2kg/m³ 时,掺 5%~8% 的硅灰,混凝土强度基本满足设计要求,如表中的编号为 YT-20、YT-29、YT-35、YT-40;不掺硅灰的混凝土不能满足设计要求,如表中的编号为 YT-3、YT-6、YT-33、YT-39、YT-49。

(2)在混凝土配合比基本相同时,纤维越长,混凝土劈裂抗拉强度越高。但纤维越长,分散性越差,现场混凝土搅拌时越容易结团。

(3)聚丙烯纤维掺量较小(0.9kg/m³)的一组混凝土劈裂抗拉强度比掺量为 1.2kg/m³ 的混凝土劈裂抗拉强度低,达不到设计要求。

(4)掺聚丙烯纤维及硅灰的混凝土劈裂抗拉强度约为抗压强度的 7% 左右。

(5)试验中还发现两类纤维在混凝土中的分散效果不同,以美国产的长 19mm 聚丙烯纤维分散效果最好,上海产的长 38mm 的次之,51mm 长的聚丙烯纤维分散效果最差。

综合上述试验结果以及经济因素,施工中采用上海产长 38mm 的聚丙烯纤维。

3.4 钢纤维混凝土试验结果及分析

不同钢纤维混凝土配合比及其力学性能试验结果列于表 6。

从表中可分析得出:

(1)钢纤维掺量为 45kg/m³ 时,有 4 个配合比(表中带 * 号者)配置的混凝土劈裂抗拉强度能满足要求,以上海 DRAMIX 35mm 长的钢纤维混凝土劈裂抗拉强度最高。但从经济方面考虑,选择江苏 S-4 端钩钢纤维,用于配制劈裂抗拉强度 5.5MPa 的钢纤维混凝土。

(2)当钢纤维掺量在 118kg/m³ 时(1.5% 体积掺量),只有上海 DRAMIX 的两种不同长度钢纤维的混凝土能够达到设计要求的劈裂抗拉强度,原因是 DRAMIX 钢纤维母材强度最高、长径比大,在混凝土中的粘结性较好,可更好地提高混凝土抗拉性能。因此选择该钢纤维,用于配制劈裂抗拉强度 8.5MPa 的钢纤维混凝土。当钢纤维掺量提高至 195kg/m³ 时(2.5% 体积掺量),混凝土劈裂抗拉强度无显著提高。

(3)在混凝土相同配合比时,不同长度的钢纤维(上海 DRAMIX)混凝土劈裂抗拉强度基本相同。考虑较长的钢纤维在混凝土中易弯折,纤维长度以略长于骨料最大粒径时较好。因此采用上海 DRAMIX 35mm 长的钢纤维。

表6 不同钢纤维混凝土试验结果

试验编号	水泥用量 kg·m ⁻³	硅灰		水胶比	砂率 (%)	坍落度 mm	外加剂		钢纤维			28d 抗压 强度 MPa	28d 劈裂 抗拉强度 MPa
		品种	用量 kg·m ⁻³				品种	掺量(%)	厂家	长度 mm	掺量 kg·m ⁻³		
YT-8	527			0.357	45	60	MFN	1.2	上海 HAREX	32	45	76.1	6.4*
YT-10	517			0.376	45	180	MFN	1.5	上海 HAREX	32	45	86.9	5.2
YT-21	463	国产	40	0.310	40	45	TH	1.5	江苏	30	45	103.0	6.7*
YT-17	460	国产	40	0.315	38	40	TH	2.2	江苏	30	45	104	6.8*
YT-31	460	挪威 940U	40	0.316	40	70	TH	1.6	江苏	30	45	92	5.8
YT-23	460	国产	40	0.310	40	60	TH	1.5	上海 DRAMIX	35	45	99.7	7.5*
YT-14	551			0.351	51	180	MFN	1.5	上海 HAREX	32	115	76.3	6.0
YT-11	518	0		0.383	48	150	MFN	1.2	上海 HAREX	32	118	88.3	6.2
YT-24	552	国产	48	0.283	55	120	TH	3	上海 DRAMIX	35	118	97.4	10.5*
YT-25	552	挪威 971D	48	0.283	55	110	TH	3	上海 DRAMIX	60	118	94.4	10.8*
YT-32	565	挪威 940D	49	0.283	55	80	TH	3	江苏	30	118	97.5	8.1
YT-13	512			0.417	60	60	MFN	1.5	上海 HAREX	32	112	71.3	5.5
YT-12	509			0.380	40	10	MFN	1.5	上海 HAREX	32	118	73.6	5.3
YT-22	555	国产	48	0.305	55	20	TH	3	江苏	30	172	101.0	9.7
YT-26	552	挪威	48	0.300	55	75	TH	3	上海 DRAMIX	35	195	94.1	11.1
YT-18	518	国产	45	0.332	55	0	TH	3.5	江苏	30	196	108.0	10.2
YT-19	559(P.O 42.5R)	国产	49	0.300	55	0	TH	3	江苏	30	199	93.3	10.4

注:表中未注明的水泥均为大宇 P. I52. 5R 水泥。

(4) 江苏 S-4 端钩钢纤维掺量在 118kg/m³(1.5% 体积掺量)时,混凝土劈裂抗拉强度达不到设计的 8.5MPa 要求。将掺量增加到 172~199kg/m³(2.0%~2.5% 体积掺量)时,钢纤维混凝土劈裂抗拉强度才能达到设计要求。但较高钢纤维掺量的混凝土和易性不好,钢纤维易结团,不利于混凝土施工。

3.5 其它掺和料混凝土试验结果

由于硅灰价格较高,为寻求较低价格的混凝土掺和料,还进行了沸石粉、I 级粉煤灰及 S95 矿渣微粉作混凝土掺

和料的试验。试验结果列于表 7。

从表 7 中可知纤维混凝土中掺加不同掺量的沸石粉、粉煤灰和矿渣微粉,纤维混凝土抗压及劈裂抗拉强度均达不到设计要求。

4 现场纤维混凝土施工配合比及实际强度

4.1 纤维混凝土施工配合比

根据上述室内纤维混凝土配合比试验和现场纤维混凝土配制试验结果,大圆筒混凝土预制所采用的施工配合比如表 8。

表7 掺不同掺和料的混凝土试验结果

试验编号	水泥用量 kg·m ⁻³	掺和料		水胶比	砂率 (%)	坍落度 mm	TH 外加 剂掺量 (%)	聚丙烯纤维			28d 抗压 强度 MPa	28d 劈裂 抗拉强度 MPa
		品种	用量 kg·m ⁻³					厂家	长度 mm	掺量 kg·m ⁻³		
YT-36	410	沸石灰	76	0.400	40	10	2.6	江苏钢纤维	30	45	53.8	4.5
YT-37	453	沸石灰	80	0.351	38	10	3.0	上海产	38	1.2	47.8	4
YT-42	498	I 级 粉煤灰	40(15%)	0.307	39	10	1.8	上海产	38	1.2	76.3	5.4
YT-44	540	I 级 粉煤灰	60(10%)	0.283	39	50	3.0	上海产	38	1.2	77.5	5.8
YT-45	510	I 级 粉煤灰	90(15%)	0.283	39	40	3.0	上海产	38	1.2	75	5.6
YT-46	497	I 级 粉煤灰	120(20%)	0.282	39	70	3.0	上海产	38	1.2	70.2	5.4
YT-50	509	I 级 粉煤灰	90(15%)	0.305	50	60	3.0	上海 DRAMIX 钢纤维	35	118	74.2	8.3 中值
YT-43	501	S95 矿 渣微粉	88(15%)	0.305	39	170	3.0	上海产	38	1.2	72.6	5
YT-47	450	S95 矿 渣微粉	150(25%)	0.292	39	50	3.0	上海产	38	1.2	69.7	5.5
YT-48	389	S95 矿 渣微粉	209(35%)	0.297	39	150	3.0	上海产	38	1.2	67.2	5.1
YT-51	389	S95 矿 渣微粉	210(35%)	0.305	50	150	3.0	上海 DRAMIX 钢纤维	35	118	72.8	8.9 中值

注:表中水泥均为大宇 P. I52. 5R 水泥。

表8 施工采用的聚丙烯纤维、钢纤维混凝土配合比

配合比编号	水泥用量 kg·m ⁻³	硅灰		水胶比	砂率 (%)	坍落度 mm	外加剂		纤维		
		品种	用量 kg·m ⁻³				品种	掺量(%)	厂家	长度 mm	掺量 kg·m ⁻³
Pbn2001-74	460	971D	40	0.31	40	60~80	TH/GS	1.8/0.05~0.1	上海新纺织	38	1.2
Pbn2001-89	520	940U	45	0.299	38	80~120	TH/GS	1.8/0~0.05	上海新纺织	38	1.2
Pbn2001-75	483	940U	42	0.314	40	60~80	TH	1.6	江苏钢纤维	30	45
Pbn2001-83	552	940U	48	0.283	55	60~80	TH	3.0	上海DRAMIX 钢纤维	35	118

4.2 混凝土拌和程序及施工保证措施

大圆筒预制在青岛显浪预制场进行。每个大圆筒分7层浇筑。现场纤维混凝土采用JS500(0.5m³)型卧轴强制式拌和机拌和,吊罐运输混凝土。现场纤维混凝土拌和程序如图1。

采用吊罐法施工的聚丙烯纤维混凝土,坍落度在80mm以下时施工操作难度较大,较适宜的混凝土坍落度在100mm以上。

4.3 现场混凝土强度

现场混凝土施工时,进行了混凝土拌和物及硬化混凝土性能试验,并留置了混凝土抗压、劈裂及弹性模量试件。聚丙烯纤维混凝土、钢纤维混凝土性能指标分别列于表9、表10。

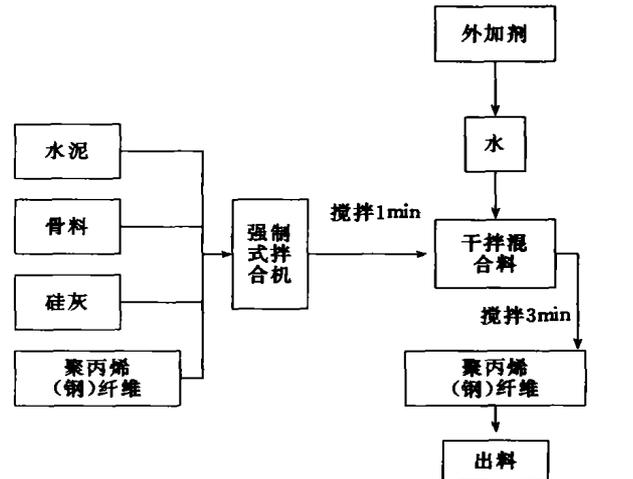


图1 现场纤维混凝土拌和程序

表9 现场聚丙烯纤维混凝土性能指标

配合比编号	水泥用量 kg·m ⁻³	硅灰		坍落度 mm	试件 组数	28d 抗压强度 MPa		28d 劈裂抗拉强度		28d 静力受压弹性 模量平均值 ×10 ⁴ MPa
		品种	用量 kg·m ⁻³			平均值	变化范围	平均值	变化范围	
Pbn2001-74	460	971D	40	60~80	4	80.3	72.2~92.7	6.9	6.3~7.7	3.08(1组)
Pbn2001-89	520	940U	45	80~120	21	82.3	68.6~97.5	6.5	5.8~7.6	3.18(7组)

表10 现场钢纤维混凝土试验结果

施工部位	配合比编号	试件组数	坍落度 mm	28d 抗压强度 MPa	28d 劈裂抗拉 强度 MPa	28d 静力受压弹性 模量×10 ⁴ MPa
1号圆筒顶层	Pbn2001-75	1	100	77.8	6.6	2.81
2号圆筒顶层	Pbn2001-75	1	115	75.4	6.6	3.24
3号圆筒顶层	Pbn2001-83	1	90	81.2	10.2	2.91

从表9、表10中可知,采用室内试验得出的聚丙烯纤维混凝土、钢纤维混凝土配合比进行现场配置混凝土,其抗压强度与劈裂抗拉强度均满足设计要求。

5 结论

正式采用劈裂抗拉强度8.5MPa的钢纤维混凝土用于工程实践在国内尚属首次。通过室内系统配合比试验和现场大圆筒预制实际结果,达到了预期目的,可以得出如下几点结论:

(1)根据室内纤维混凝土配合比试验的结果,掺加一定的硅灰和纤维能配制出满足设计要求抗拉强度8.5MPa的混凝土;

(2)根据室内纤维混凝土配合比试验结果提出了施工配合比,经现场取样混凝土强度结果验证可满足设计要求;

(3)现场采用的钢纤维和聚丙烯纤维的添加方法及混凝土搅拌工艺是可行的,可在今后施工中借鉴。