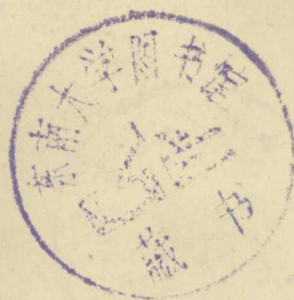


1992年11月10日~12日
南京东南大学

纤维水泥与纤维混凝土

全国第四届学术会议论文集
(二)



中国土木工程学会
混凝土与预应力混凝土学会 纤维混凝土委员会

86.1685

3/2

纤维水泥与纤维混凝土

全国第四届学术会议论文集

(二)

一九九二年十一月十日~十二日

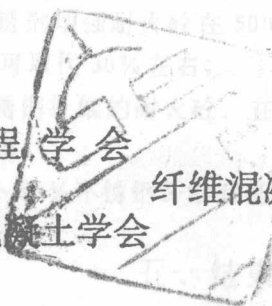
南京 东南大学



中国土木工程学会

纤维混凝土委员会

混凝土与预应力混凝土学会



宜兴市闸口金属纤维厂

向您提供

低碳结构钢扭曲型钢纤维

我厂参照国外先进技术,在有关科研单位的支持和协助下,研制成功了新型的低碳结构钢扭曲型钢纤维。几年来,经各种混凝土建(构)筑物的使用表明,这种扭曲型钢纤维应用于混凝土中具有易搅拌成型、粘接强度高、增强效果显著等特点,能明显地改善混凝土的力学性能。因而得到了上级主管部门和有关科研单位的充分肯定和重视,并已通过了省级鉴定。

* 技术指标 *

我厂生产的扭曲型钢纤维主要技术指标是根据 GB700—65 和 GB700—79 及钢纤维混凝土对钢纤维的基本要求而定的。其规格有 $0.3 \times 0.4 \times 25$ 、 $0.4 \times 0.5 \times 28$ 几种。钢纤维在受力过程中能达到的最大应力不低于 600MPa,且 90° 弯曲一次不断裂, 45° 弯曲四次不断裂。

* 适用范围 *

用本厂产品拌制的混凝土可适用于公路路面、桥面、机场跑道;矿山井巷、隧道、涵洞等衬砌和支护;建(构)筑物补强、防震设施加固和边坡稳定加固;堤坝、码头、水工建筑;重型设备基础和核试验构筑物等工程。

* 使用效果 *

采用扭曲型钢纤维混凝土浇筑各种路面,其面层厚度可减薄 25%~50%;用于修补罩面层,厚仅为 5~7cm;路面的伸缩缝间距可延长 50~60m,提高路面平整度,减小车辆行驶所产生的噪音;路面基材用量可减少 50%,工程量也大为减小;因能延长路面寿命而降低维修费用。若用于制作大口径离心管道、薄型墙板等,可减轻自重而便于运载使用。用于隧道、洞库、边坡衬砌和补强加固,更具有明显的技术经济效果。

欢迎选用扭曲型钢纤维。欢迎来人、来函联系洽谈业务

厂址:江苏省宜兴市栎树镇

邮政编码:214216

电挂:7133

厂长:周福民

电话:05218-711364-108

采用切削法生产低碳钢扭曲钢纤维的厂家 —江苏省武进县前黄水利建筑材料厂

本厂生产的 Q/320223A, AJ002—90 两种型号的钢纤维, 呈扭曲状, 增强了钢纤维与基材之间的粘结啮合力, 与同类产品相比, 增强砼抗拉、抗压、抗冲击耐疲劳特性能明显提高, 并且易搅拌成型, 不会结团, 便于使用, 是钢纤维家族中的佼佼者。

产品规格

型 号	规格 (当量直径 D×长度)	截面尺寸 (厚×宽)mm×mm	截面积 (mm ²)
DN—20	D×20	0.4×0.3	0.12
DN—25	D×25	0.4×0.3	0.12
DN—30	D×30	0.4×0.3	0.12

产品质量性能

弯曲形式	弯曲次数
90°	一次不断裂
135°	四次不断裂

本厂宗旨

质量第一 用户至上
价格合理 代办托运

欢迎来人来函洽谈业务!

厂址:江苏省常州市南门外前黄镇 电话:区号 0519 609697

电挂:1408 账号:前黄营业所 0053712 邮政编码:213172

厂长:徐秋元

嘉兴钢纤维厂向您提供 —经纬牌 E—I 钢纤维

我厂生产的经纬牌 E—I 型钢纤维,具有优良的物理力学性能,是理想的新型建材,可广泛用于建筑、水利、交通、矿山、冶金、煤炭行业的混凝土工程。

一九九〇年五月全国钢纤维专家云集嘉兴参加我厂受《钢纤维混凝土结构设计与施工规程》编制组委托举办的第四次工作会议,会议期间与会代表一致认为我厂生产的钢纤维在全国钢纤维产品中质量上乘,增强混凝土性能好。

E—I 型钢纤维的规格和性能:25×0.6×0.35mm 异型,冷轧钢纤维切割而成,在混凝土中掺入 1.5—2%(体积掺量)钢纤维时混凝土性能可提高:

抗拉强度	120—170%	抗剪强度	25—70%
抗冲击强度	11—19 倍	冲击疲劳强度	10—20 倍
抗弯韧度	14—20 倍	抗 冻 融	3 倍
抗 渗	8kgf/cm ²		

本厂宗旨:质量第一,信誉至上,原为国家的能源交通水利,建筑行业竭诚服务,愿为混凝土工程更坚固耐久更安全高效作贡献。

厂址:浙江省嘉兴市文昌路 47 号

电话:85810

邮编:314001



东南大学建筑材料试验室

东南大学材料科学与工程系（原土木工程系）建材试验室技术力量雄厚，试验仪器设备齐全。自七十年代以来，长期进行钢纤维与钢纤维砼、及其他建筑材料的性能，生产及工程应用等方面的研究。近几年来，全国已有几十家钢纤维生产厂及使用单位委托我室进行了钢纤维及 SFRC 性能检测、技术咨询。

本室检测内容有：钢纤维抗拉强度、反复弯曲次数、当量直径及长径比；钢纤维砼的配合比设计，不同钢纤维体积掺量的 SFRC 的拉、压、弯、剪强度、弯曲韧性及其提高率；根据需要还可进行钢纤维化学元素分析、SFRC 的收缩、抗冻、抗冲击、耐磨及疲劳试验等性能测试；本室可为钢纤维生产、设计及施工单位提供技术咨询、联合开发、及工程监理等技术合作；还可在其它建筑材料的性能试验研究方面提供服务。欢迎有关单位前来洽谈。

单 位：东南大学材料科学与工程系建材实验室

地 址：南京市四牌楼 2 号

联系人：秦鸿根

电 话：631700，634691 转 3231

邮 编：210018

电 挂：0515

目 录

一.综合报告

- 1.钢纤维砼结构与施工规程编写要点 赵国藩 黄承逵(1)
- 2.新型纤维增强水泥复合材料的研究现状与开发前景 沈荣熹(9)
- 3.纤维增强水泥基的复合效应和细观机理 孙伟(26)

二.材料性能与增强机理

- 4.钢纤维砼双向破坏准则的研究 董毓利 樊承谋 潘景龙(40)
- 5.SFRC 复合材料的蠕变延迟断裂试验研究 马勇 郭晓辉 孙珏(47)
- 6.钢纤维增强砼动态断裂能 郭晓辉 朱健 杨强 闫立新(55)
- 7.乱向钢纤维增强砼抗拉理论研究 梁军林 蒲心诚 丛钢(60)
- 8.应用散斑干涉法对钢纤维砼增强机理的进一步探讨 李书进 彭少民(71)
- 9.钢纤维增强砼的动态断裂扩展 郭晓辉 朱健 闫立新 郭建民(76)
- 10.钢纤维增强砼拉伸损伤本构特性 彭晓辉 王显耀 马勇 纪国华(83)
- 11.SFRC 复合材料的蠕变延迟断裂模型 马勇 郭晓辉 孙珏(88)
- 12.异形钢纤维形状对钢纤维砼性能的影响 金正生 庞云 邓美瑁 王义珍(93)
- 13.螺旋钢纤维应力传递机理的研究 姚立宁(103)
- 14.异形钢纤维抗拔性能对比试验研究 谢秉洪 邹东明 王珀 钟汉才(108)
- 15.道路大骨料钢纤维砼机理与纤维方向效应研究 王文安 刘平 茆田杨(116)
- 16.异形钢纤维增强机理初探 谢秉洪 王珀(123)
- 17.二级配钢纤维砼纤维增强效果的研究 彭骏 黄承逵 赵国藩(129)
- 18.二级配钢纤维砼疲劳特性的研究 黄承逵 赵国藩 彭骏(138)
- 19.高强砼与钢纤维砼冲击和疲劳特性的研究 孙伟 严云(147)
- 20.原状粉煤板应用于 SFRC 的试验研究 李秋义(155)
- 21.钢纤维海工砼耐久性初探 金伟华 陈慧瑛(163)
- 22.SFRC 耐磨特性及机理分析 秦鸿根 孙伟(169)
- 23.钢纤维增强碾压砼性能研究 邹东明 方坤何(176)
- 24.碾压复合层钢纤维砼路面的研究 孙继印 徐吉恩 罗光大(184)
- 25.钢纤维膨胀砼变形行为及力学特性的研究 金锦花 赵景海 樊承谋(188)
- 26.硅灰钢纤维砼的性能 吴淑华 李启棣 何亚雄(196)
- 27.聚合物水泥提高钢纤维砼的界面粘结强度 张明如 宋中健 樊承谋(201)
- 28.钢纤维与混凝土粘结力正交设计试验研究 徐吉恩 孙继印 罗光大(209)

三.构件和结构性能

- 29.钢纤维高强砼在结构中应用研究综述 蒋永生(213)

30.装配式框架钢纤维砼齿槽节点	章文纲 程铁生 迟维胜 邵式亮	(219)
31.三维增强 S-GRC 梁正截面强度分析	傅秀黛 陈文渊 刘庆琛	(227)
32.钢纤维砼梁在冲击荷载下的韧性和动力响应	王璋水 申光前	(235)
33.钢纤维砼本构关系的研究	董毓利 樊承谋 潘景龙	(243)
34.钢纤维砼双向受力试验设备的研制	董毓利 潘景龙 樊承谋	(249)
35.钢纤维砼双向受压损伤的研究	董毓利 潘景龙 樊承谋	(258)
36.F.R 桥面铺装与连续桥面板强度计算	李士恩	(265)
37.钢纤维增强砼整体弹性模量的理论计算	张庆宗 张福保	(273)
38.钢纤维钢筋砼叠合构件的试验分析与计算方法	邵永松 张立平	(281)
39.受拉区掺入钢纤维砼叠合受弯构件理论及试验研究	邵永松 张立平	(287)
40.钢纤维高强砼牛腿计算方法的探讨	高俊峰 邱洪云 蒋永生	(295)
41.钢纤维砼环状受拉应力-应变全曲线研究	卢亦焱 何少溪	(301)
42.配筋钢纤维砼受扭构件力学性能的研究	李其廉	(311)
43.异型钢纤维增强结构胶补强的阻裂分析	何亚伯 罗光大 江庆岳 黎家旋	(319)
44.配筋钢纤维砼拱桥主拱强度验算	蒙云	(325)
45.SFRC 增强孔口高应力区的研究	何菊芳 袁文清	(330)
46.SFRC 道面板极限破坏试验研究	蒙云	(337)
47.钢纤维砼路面计算模式及优化设计研究	蒙云	(346)
48.部分钢纤维砼梁弯曲性能的研究	高丹盈	(355)
49.钢筋-钢纤维砼板冲切的试验研究	盛欣荣 杨光华 石志民	(364)
50.钢纤维砼纯扭构件的开裂强度和极限强度	王岗 原明昭	(372)
51.Cora-3 判别法对钢纤维砼梁极限弯矩的模式识别	周祥	(379)
52.钢纤维细石砼屋面伸缩缝间距的计算方法	王春印 王彦才 杨光华 罗福周	(386)
53.钢纤维砼板材轴拉实验方法的研究	高坚新	(391)

四.新型纤维增强水泥基材

54.影响云母鳞片对水泥基体增强效果的主要因素	王武祥 沈荣熹	(396)
55.聚丙烯纤维-钢纤维水泥基复合材料力学性能的研究	林江 陈志源	(404)
56.聚丙烯纤维增强水泥砂浆的弯曲性能研究	王显耀 崔江余 孙珏	(411)
57.碳纤维增强轻质砼(CFRC)物理力学性能的研究	张其颖 吕忠亚 李仍元	(417)
58.无石棉轻质纤维水泥平板的研究	崔琪 崔玉忠 沈荣熹	(425)
59.混杂纤维增强水泥砂浆的弯曲性能研究	崔江余 王显耀 孙珏	(433)

五.施工技术与应用研究

- 60.钢纤维在钢板桥面沥青铺装中的应用研究 覃淑媛(441)
- 61.碾压钢丝网、钢纤维砼抗弯强度分析及其在路面工程中的应用 . . . 张荣辉(448)
- 62.钢纤维砼工程应用三例 卢良浩(456)
- 63.钢纤维混凝土路面经济评价 蒙云(462)
- 64.钢纤维混凝土在建筑工程中的应用 张忠刚 唐昆仑(470)
- 65.钢纤维砼在多年冻土地地区的应用研究 张秀华 聂让 武敬民(475)
- 66.异型钢纤维振动分散筛的分析 秦学优 李俊彦 何亚伯 罗光大(481)
- 67.剪切法钢纤维机自磨刀具的研究 袁家辞 李皋 杨佑安 罗红兵(486)
- 68.异型钢纤维新加工原理的研究 丁沃圻 王国顺 徐克文 袁家辞 黄晓(490)
- 69.异型钢纤维砼修补路面错台的分析
. 王尧生 李国良 黎家旋 罗光大 刘光泉(495)
- 70.波纹钢纤维砼在道路中的应用 周明春 林介文 曾焕金(500)
- 71.异形钢纤维增强结构胶试验研究 罗光大 徐吉恩 陶定宇 林树 陆光(505)
- 72.钢纤维生产的技术经济效益分析 吴德发(510)
- 73.钢纤维砼刚性防水层在平台屋顶中的应用
. 张春漪 刁心红 陈柏林 鲁基林(515)
- 74.钢纤维在城市道路改造上的应用 王自成 姚素珍 徐力 季辉(521)
- 75.碳素钢纤维耐火砼在 ANS 罩上的试验研究
. 宁志善 王晶 王振生 马庆山(528)
- 76.钢纤维聚合物水泥砂浆在防水工程中的应用
. 张忠刚 安玉杰 刘永春 陈玉坤 周洪波(531)
- 77.纤维混凝土路面的施工 金志强(533)
- 78.纤维混凝土路面施工工艺的研究 徐屏 黄俊 刘炳强(539)
- 79.钢纤维砼路面设计的技术探讨 季辉 余自强 刘惠君(546)
- 80.钢纤维细石砼刚性屋面施工技术及其实践
. 王春印 王彦才 戴维忠 卢元鹏(554)
- 81.早强膨胀钢纤维砼补强机场迫贯通裂缝试验研究
. 曾焕金 程俊祥 罗光大(557)
- 82.钢纤维砼悬辊管试验研究
. 胡幸生 张先进 许振增 陈锋 傅国祥 顾敏煜(564)
- 83.短切纤维增强水泥轻质内墙板预拌泵注工艺设备的研究
. 祁振庆 史伟明 姜邦 蒋云强(572)
- 84.钢纤维砼板覆盖保温层外包旧房节能技术之一 易成 徐鹏 樊承谋(580)
- 85.钢纤维砼板覆盖保温层外包旧房节能技术之二 隋承飞 王永利 樊承谋(586)
- 86.普通钢纤维取代不锈钢纤维增强防火砼的试验研究 章杰春 孙伟(594)

配筋钢纤维混凝土受扭构件力学性能的研究

李其廉

提 要

本文通过12根配筋钢纤维混凝土(SFRC)构件和3根相同尺寸钢筋混凝土(RC)构件的纯扭对比试验研究,分析了钢纤维的掺入对钢筋混凝土构件抗扭力学性能的影响。在变角度空间桁架理论的基础上,首次提出了配筋钢纤维混凝土构件的开裂扭矩和极限扭矩的计算公式。另外,本文还分析了钢纤维的掺入对钢筋混凝土构件的抗扭刚度和扭转断裂能的影响。从而,为编制完善的《钢纤维混凝土结构设计与施工规程》提供了依据。

一、前 言

钢纤维混凝土是将短向钢纤维随机地掺入混凝土中而形成的一种新型复合材料。由于这种材料具有较高的抗拉强度和较好的抗冲击、抗磨、耐疲劳性能,因此,它被广泛应用于水工、交通、土木工程建筑中。随着工程科技人员对此种材料的不断研究,已经对其在抗拉、抗裂、抗弯强度等方面的研究取得了较好的成果,我国《钢纤维混凝土结构设计与施工规程》已完成。但是,迄今为止,对配筋钢纤维混凝土抗扭力学性能的研究,国内外尚未见诸文献。为了探讨钢纤维对钢筋混凝土构件抗扭力学性能的影响,我们进行了本次试验,并取得了一些成果,献于诸位专家和同行,请不吝赐教^{〔1〕}。

二、试验概况

1、试件设计

本次试验共设计15根同样尺寸的矩形截面受扭试件,其中12根为不同纤维含量的配筋钢纤维混凝土试件,其它3根为钢筋混凝土试件,所有15根试件的混凝土强度等级配比相同:水:水泥:砂:石:减水剂=216:416:861:861:8.32,试件尺寸为80×140×450mm

李其廉(1965.10),硕士,河北省建筑科学研究所。

为了保证扭转破坏发生在试件中间区域，具体配筋方式见图1。

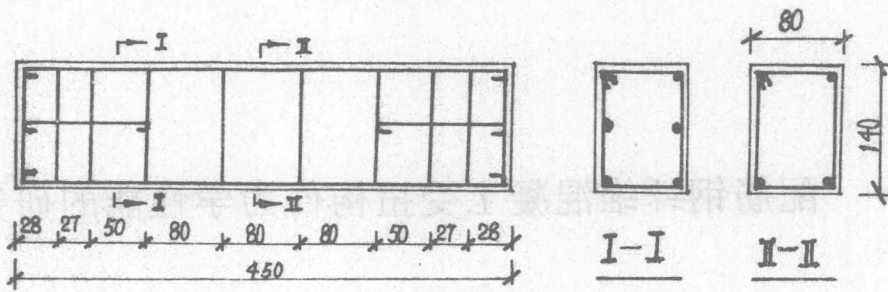


图1 试件配筋方式

12根配筋钢纤维混凝土试件分为四组，每组3个试件，四组的钢纤维体积率 V_f 分别为：0.5%、1.0%、1.5%、2.0%。

2、材料选用

试件的纵、箍筋均采用 $\phi 3.5$ ，经回火处理后，其实际屈服强度为 234.4N/mm^2 。水泥采用河北省邯郸产“太行牌”425°普通硅酸盐水泥，河沙，细度模数2.61，粗骨料为碎石，最大粒径15mm，减水剂采用苏州产“S”型早强高效减水剂，按水泥重量的2%掺入。钢纤维采用黑龙江省庆安钢铁厂生产的101-1°熔抽钢纤维，其规格为： $0.2 \times 1.0 \times 25\text{mm}$ ，长径比 $L_f/d_f=50$ 。

3、试件制作

本试验中15根试件及其伴随试块均在河北省第一建筑工程公司工地现场浇注，在浇注过程中，先将称好的砂、石、水泥及减水剂均匀拌和后，再均匀撒入钢纤维，然后加水拌和，装入钢模内，采用模外振捣，24小时后脱膜，自然养护到试验期。

试件的几何尺寸及有关参数见表1。

4、观测手段及内容

现浇试件时，混凝土保护层预留槽，以便在钢筋上贴应变片，钢筋上的应变片采用 $3 \times 5\text{mm}$ ，混凝土表面变形通过与轴线成 45° 斜线的 $5 \times 100\text{mm}$ 电阻应变片和应变仪测读。

试件的扭转角通过试件端部的电子倾角传感器和应变仪来测定。试件的裂缝通过读数放大镜观测。

试验在自制的加力架上进行，见图2。



图2 试验加力架示意图

扭矩—扭转角记录见表2。

三、配筋钢纤维混凝土构件抗扭强度

1、配筋钢纤维混凝土构件开裂扭矩

钢筋混凝土构件在开裂前钢筋的应力很小，可以忽略钢筋对开裂扭矩的影响。对于

表1 试件的有关参数

梁号	截面尺寸 (mm)		高宽比 h/b	钢纤维 品种	钢纤维 长径比 l_f/d_f	钢纤维 体积率 $V_f(\%)$	混凝土 立方体 强度 MPa	混凝土 劈裂 强度 MPa	受拉纵 筋数、 径	纵筋 总面积 (mm^2)	纵筋 屈服 强度 MPa	开裂 扭矩 ($KN\cdot m$)	极限 扭矩 ($KN\cdot m$)	扭转角 (弧度)
	h	b												
CB-1	140	80	1.75	/	/	0	29.8	2.05	4 Φ 3.5	38.47	234.4	1.04	1.0486	0.31
CB-2	140	80	1.75	/	/	0	29.7	1.98	4 Φ 3.5	38.47	234.4	1.018	1.0192	0.29
CB-3	140	80	1.75	/	/	0	28.9	2.03	4 Φ 3.5	38.47	234.4	1.03	1.0388	0.33
SFRCB-1	140	80	1.75	熔抽	50	0.5	29.6	2.17	4 Φ 3.5	38.47	234.4	0.98	1.078	0.35
SFRCB-2	140	80	1.75	熔抽	50	0.5	30.5	2.14	4 Φ 3.5	38.47	234.4	0.95	1.9098	0.34
SFRCB-3	140	80	1.75	熔抽	50	0.5	31.2	2.20	4 Φ 3.5	38.47	234.4	1.01	1.1662	0.38
SFRCB-4	140	80	1.75	熔抽	50	1.0	31.7	3.02	4 Φ 3.5	38.47	234.4	1.078	1.176	0.50
SFRCB-5	140	80	1.75	熔抽	50	1.0	30.9	3.04	4 Φ 3.5	38.47	234.4	1.106	1.2544	0.52
SFRCB-6	140	80	1.75	熔抽	50	1.0	31.5	3.00	4 Φ 3.5	38.47	234.4	1.05	1.0976	0.49
SFRCB-7	140	80	1.75	熔抽	50	1.5	31.2	3.40	4 Φ 3.5	38.47	234.4	1.15	1.2042	0.54
SFRCB-8	140	80	1.75	熔抽	50	1.5	31.5	3.52	4 Φ 3.5	38.47	234.4	1.176	1.2936	0.53
SFRCB-9	140	80	1.75	熔抽	50	1.5	32.0	3.64	4 Φ 3.5	38.47	234.4	1.202	1.323	0.54
SFRCB-10	140	80	1.75	熔抽	50	2.0	31.1	4.40	4 Φ 3.5	38.47	234.4	1.25	1.421	0.59
SFRCB-11	140	80	1.75	熔抽	50	2.0	30.6	4.33	4 Φ 3.5	38.47	234.4	1.225	1.372	0.58
SFRCB-12	140	80	1.75	熔抽	50	2.0	31.8	4.26	4 Φ 3.5	38.47	234.4	1.20	1.323	0.58

表2 扭矩—扭转角记录表

梁号 \ 扭矩 (N·m) \ 扭转角 (deg/m)	0	96	196	294	392	490	588	686	784	882	980	1078	1176	1274	1372
CB-1	0	.063	0.18	0.27	0.34	0.46	0.51	0.60	0.66	0.74	0.83	0.89			
CB-2	0	.061	0.17	0.28	0.35	0.45	0.50	0.59	0.61	0.71	0.80	0.88			
CB-3	0	.065	0.18	0.30	0.34	0.45	0.51	0.60	0.66	0.72	0.81	0.90			
SFRCB-1	0	.06	0.15	0.32	0.35	0.46	0.52	0.61	0.65	0.71	0.82	0.86	1.0		
SFRCB-2	0	.079	0.16	0.30	0.34	0.46	0.50	0.59	0.64	0.72	0.81	0.89	1.1		
SFRCB-3	0	.082	0.15	0.32	0.34	0.46	0.52	0.61	0.63	0.71	0.82	0.86	1.05		
SFRCB-4	0	.065	0.19	0.26	0.35	0.47	0.53	0.62	0.68	0.73	0.82	0.90	0.95	1.14	1.46
SFRCB-5	0	.06	0.15	0.29	0.34	0.45	0.50	0.63	0.66	0.72	0.82	0.92	0.96	1.15	1.48
SFRCB-6	0	.079	0.17	0.32	0.35	0.47	0.53	0.64	0.68	0.73	0.80	0.90	0.99	1.12	1.45
SFRCB-7	0	.078	0.18	0.33	0.37	0.45	0.54	0.65	0.69	0.70	0.79	0.89	0.98	1.10	1.20
SFRCB-8	0	.065	0.19	0.26	0.34	0.47	0.53	0.62	0.67	0.72	0.82	0.91	0.96	1.05	1.21
SFRCB-9	0	.061	0.19	0.31	0.36	0.47	0.56	0.63	0.72	0.75	0.81	0.87	0.94	1.04	1.15
SFRCB-10	0	.064	0.18	0.26	0.35	0.46	0.52	0.61	0.66	0.73	0.82	0.90	1.02	1.10	1.14
SFRCB-11	0	.063	0.19	0.30	0.39	0.45	0.58	0.60	0.72	0.74	0.82	0.91	1.00	1.09	1.13
SFRCB-12	0	.079	0.18	0.35	0.38	0.47	0.52	0.62	0.75	0.85	0.91	1.03	1.13	1.20	1.25

配筋钢纤维混凝土构件同样如此，其开裂扭矩应等于相应的钢纤维混凝土构件的开裂扭矩，当 $L_e/d_e \cdot V_e$ 小于1.5时也等于钢纤维混凝土构件的极限扭矩^[1]

文献[1]给出了钢纤维混凝土构件抗扭强度计算模式：

$$T_r = T(1 + \alpha_r \frac{L_e}{d_e} V_e) \quad (1)$$

T_r ：钢纤维混凝土构件开裂扭矩；

T ：混凝土构件开裂扭矩；

α_r ：钢纤维对抗扭强度增强系数；

$L_e/d_e \cdot V_e$ ：纤维特征参数。

经回归计算 $\alpha_r = 0.2$ ，开裂扭矩试验

值与计算值之间的相互关系见图3。

由此可见，二者符合程度尚好，因此作者建议：当 $L_e/d_e \cdot V_e \leq 1.5$ 时，配筋SFRC构件开裂扭矩可用下式计算：

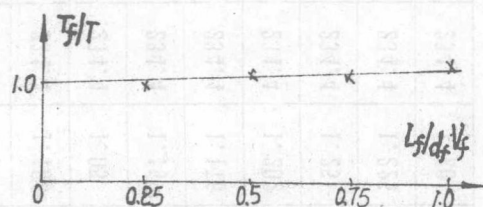


图3 试验值与理论值比较

$$\mu = 0.961 \quad \sigma = 0.0013 \quad \delta = 0.0013$$

$$T_r = T(1 + 0.2 \frac{L_r}{d_r} V_r) \quad (2)$$

2、配筋钢纤维混凝土构件极限扭矩

我国现行的《混凝土结构设计规范》GBJ10-89中钢筋混凝土构件极限扭矩就是在考虑开裂混凝土抗扭能力，用变角空间桁架理论计算钢筋抗扭能力的基础上，把试验数据经精选后而得到的半理论半经验公式，其表达式为：

$$T = T_c + T_s = \alpha W_t f_t + \beta_s A_{cor} \sqrt{\xi} \frac{A_{s1} f_{sv}}{s} \quad (3)$$

式中 W_t ：受扭构件的截面塑性抵抗矩；

f_t ：混凝土抗拉强度；

A_{cor} ：截面核芯面积， $A_{cor} = b_{cor} \times h_{cor}$ ， b_{cor} 、 h_{cor} 为箍筋长肢和短肢内皮之距；

ξ ：为纵筋、箍筋数量和强度比值，称配筋强度比； $\xi = \frac{A_{s1} f_y}{\mu_{cor} f_{sv}} \cdot \frac{s}{A_{s1} f_{sv}}$

其中 A_{s1} ：横截面上纵筋总面积；

f_y ：纵筋设计强度；

μ_{cor} ：截面核芯周长； $\mu_{cor} = 2(b_{cor} + h_{cor})$ ；

s ：箍筋间距；

A_{s1} ：单肢箍筋面积；

f_{sv} ：箍筋设计强度；

α 、 β_s ：通过对矩形截面受扭构件试验数据分析求得的系数。

试验表明：配筋钢纤维混凝土构件扭曲破坏与钢筋混凝土构件在受力情况及破坏形态上有相似之处，为了与现行《混凝土结构设计规范》GBJ10-89相衔接，配筋SFRC构件极限扭矩的计算也采用(3)式的模式，即极限扭矩为纤维混凝土开裂后的抗扭能力与钢筋的抗扭能力之和，因此，配筋SFRC构件极限扭矩的一般表达式为：

$$T = \alpha_s W_t f_{ts} + \beta_{ss} A_{cor} \sqrt{\xi} \frac{A_{s1} f_{sv}}{s} \quad (4)$$

式中 T ：配筋SFRC构件极限抗扭强度；

f_{ts} ：钢纤维混凝土抗拉强度；

α_s 、 β_{ss} ：通过对配筋SFRC矩形截面受扭构件试验数据分析求得的系数；

其它符号意义同前。

表3 配筋SFRC构件极限扭矩计算表

钢纤维体积率 V_f	0.5%	1.0%	1.5%	2.0%
抗拉强度平均值 $f_{ts}(MP_a)$	1.39	1.93	2.25	2.77
$\sqrt{\xi} A_{cor} A_{s1} f_{sv} / s W_t f_{ts}$	0.329	0.237	0.203	0.165
试验值 $T / W_t f_{ts}$	2.14	1.68	1.585	1.366

将(4)式写成:

$$T/W_t f_{ft} = \alpha_r + \beta_{sr} \sqrt{\xi A_{sr} A_{st} f_{uv}} / s \cdot W_t \cdot f_{ft}$$

利用本试验的结果确定 α_r 、 β_{sr} ，由表1的试验结果可计算表3。将表3的数据绘于图4上，以直线拟合试验值。

由此可得 $\alpha_r = 0.56$ $\beta_{sr} = 4.7$

$$\text{故 } T = 0.56 W_t f_{ft} + 4.7 A_{sr} \sqrt{\xi \frac{A_{st} f_{uv}}{s}} \quad (5)$$

$$\mu = 1.007 \quad \sigma = 0.00014 \quad \delta = 0.00014$$

为配筋SFRC构件极限扭矩计算公式。

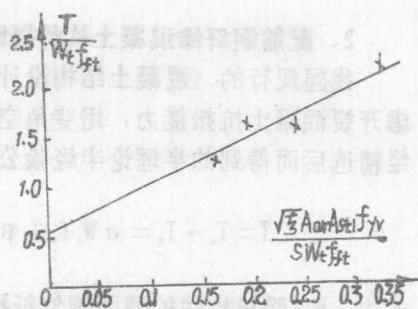


图4 试验值的拟合线

四、配筋钢纤维混凝土构件抗扭刚度

对于配筋SFRC构件的抗扭刚度的研究国内外文献尚未报道，本次试验的四组12根不同纤维含量的配筋SFRC矩形截面构件的扭矩 (T)—扭转角 (θ) 曲线如图5所示。

配筋SFRC构件的T— θ 曲线其形状如图6所示

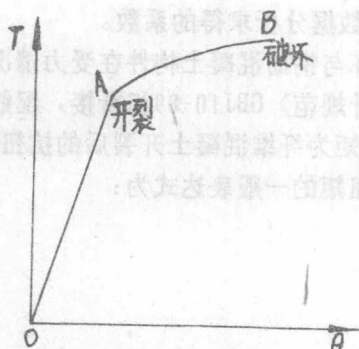


图6 配筋SFRC构件T— θ 形状线

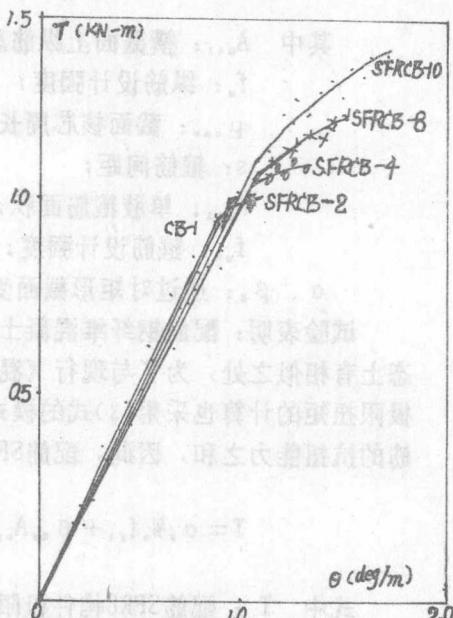


图5 配筋SFRC构件T— θ 曲线

在构件开裂前(OA段)，T— θ 曲线成直线上升关系，当构件开裂后(AB段)，T— θ 曲线与钢筋混凝土构件 T— θ 曲线不同，是平缓的曲线状，没有出现钢筋混凝土构件开裂瞬间的“大变形”。这是由于掺入钢纤维后改变了钢筋混凝土构件受扭机理，当构件开裂时，钢纤维阻裂作用充分发挥，开裂后扭矩由混凝土、钢纤维和钢筋共同承担，扭曲剪应力在钢纤维从混凝土基体漫漫拔出过程中得到缓缓释放。

由图6可见，配筋SFRC构件的扭曲线大致分为两段，OA段为弹性阶段，AB段为弹塑性阶段。为了简化计算，把AB段也理想化为直线(以割线模量代替)，如图7所示。

根据以上分析，参照图5的试验结果，给出配筋SFRC构件抗扭刚度计算公式。

构件开裂前，其抗扭刚度与钢筋砼构件几乎相同，但比按弹性理论计算值略小。因

此, 构件开裂前的抗扭刚度 B_{tr} 仍可用钢筋混凝土构件的计算公式。文献[2]给出了这一公式:

$$B_{tr} = K_1 G_c I_t \quad (6)$$

式中 B_{tr} : 开裂前配筋SFRC构件的抗扭刚度;

$$G_c: \text{混凝土剪切模量; } G_c = \frac{E_c}{2(1 + \gamma_c)}$$

其中 E_c : 混凝土的弹性模量,

γ_c : 混凝土的泊松比;

I_t : 按圣维南原理算得的混凝土截面弹性抗扭惯性矩;

K_1 : 对国内127根纯扭试验数据分析所得的系数, 取0.65。

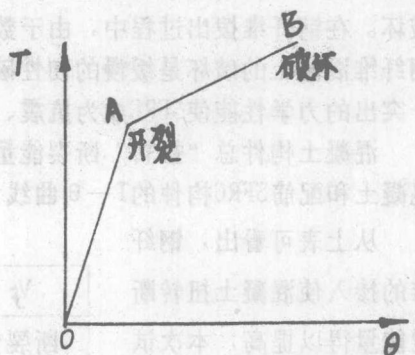


图7 配筋SFRC构件扭曲理想线

构件开裂后, 其抗扭刚度比开裂前有所降低, 并且与纤维特征参数 $L_f / d_f \cdot V_f$ 有关, 不妨采用下面的模式, 来计算该段抗扭刚度:

$$B'_{tr} = K_2 K_1 G_c I_t (1 + \alpha_{tr} V_f L_f / d_f) \quad (7)$$

式中 $k_2 < 1.0$ α_{tr} 为纤维抗扭刚度增强系数; 其它符号意义同前。

当 $K_2 = 0.4$ $\alpha_{tr} = 0.2$ 时, 按(7)式的计数值与试验值见表4。

表4. 非弹性阶段抗扭刚度计算表

V_f	0.5%	1.0%	1.5%	2.0%
试验值	0.87	0.93	0.97	1.03
理论值	0.865	0.924	0.967	1.029

$$\mu = 1.004 \quad \sigma = 0.0004 \quad \delta = 0.0004$$

把表4绘于图8上, 可以看出二者符合程度较好。因此, 开裂后配筋SFRC构件抗扭刚度 B'_{tr}

用下式计算:

$$B'_{tr} = 0.26 G_c I_t (1 + 0.2 V_f L_f / d_f) \quad (8)$$

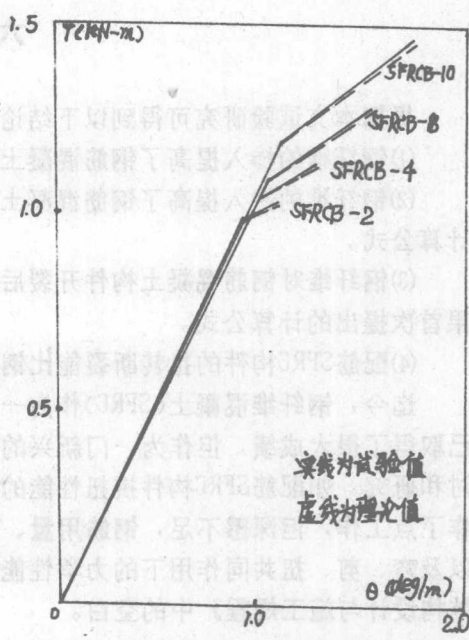


图8 配筋SFRC构件开裂后抗扭刚度

五、配筋SFRC 构件扭转断裂能

钢纤维加入混凝土中改变了混凝土的力学性能, 脆性材料基本上变成了韧性材料。由于钢纤维的存在阻止了混凝土内部裂缝的发展, 使钢纤维混凝土的初裂荷载明显高于

混凝土。在混凝土基体开裂以后，裂缝两侧的混凝土借助于横跨裂缝的钢纤维仍能继续工作，复合材料的应力仍可进一步上升，直至最大荷载，钢纤维被拔出，复合材料开始破坏。在钢纤维拔出过程中，由于数目众多的钢纤维脱粘需要吸收大量的能量，因此，钢纤维混凝土的破坏是缓慢的韧性破坏，其韧性和延性比相应的素混凝土要大的多，这一突出的力学性能使SFRC成为抗震、抗爆、抗冲击性荷载的优良建筑材料。

混凝土构件总“扭转”断裂能量可用扭转曲线下的面积表示，图5为本次试验钢筋混凝土和配筋SFRC构件的T— θ 曲线，表5列出了试验曲线下的测量结果。

从上表可看出，钢纤维的掺入使混凝土扭转断裂能量得以提高，本次试验的最大提高值达3倍。

表5 断裂能量计算表

V_f	0	0.5%	1.0%	1.5%	2.0%
断裂值	0.466	0.583	0.913	1.15	1.40
提高倍数	—	1.25	2.00	2.50	3.00

断裂能随纤维体积率 V_f ($V_f \leq 2\%$) 的增加而增大。

六、 结论

根据本文试验研究可得到以下结论：

- (1)钢纤维的掺入提高了钢筋混凝土构件的开裂扭矩，即(2)式。
- (2)钢纤维的掺入提高了钢筋混凝土构件的极限扭矩，(5)式是根据本试验首次提出的计算公式。
- (3)钢纤维对钢筋混凝土构件开裂后的抗扭刚度有一定影响，(8)式是根据本次试验结果首次提出的计算公式。
- (4)配筋SFRC构件的扭转断裂能比钢筋混凝土构件有较大程度的提高。

迄今，钢纤维混凝土(SFRC)作为一种新型的工程材料在其性能研究和工程应用方面已取得了很大成绩，但作为一门新兴的学科，SFRC结构理论还有许多问题有待进一步探讨和研究。如配筋SFRC构件抗扭性能的研究，国内外未进行报道，虽然作者在这一课题作了点工作，但深感不足，钢筋用量、纤维品种和基体强度等各因素对抗扭性能的影响以及弯、剪、扭共同作用下的力学性能需有人作进一步的研究，以填补《钢纤维混凝土结构设计施工规程》中的空白。

参 考 文 献

[1] 安玉杰，钢纤维混凝土计算方法的研究，大连理工大学博士生论文，1990.9。
[2] 殷芝霖，钢筋混凝土构件的抗扭刚度，《建筑技术通讯，建筑结构》，1981, NO.3, P17-24。
[3] 李其廉，配筋钢纤维混凝土受扭构件力学性能的研究，河北农大土木工程系硕士学位论文，1991.3。