

# 钢筋与钢纤维再生混凝土锚固性能研究

程东辉,宋超,何国玉

(东北林业大学土木工程学院,黑龙江哈尔滨150040)

**摘要** 目的 研究钢筋与钢纤维再生混凝土的锚固性能,以现行《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)中月牙纹外形热轧钢筋的极限粘结强度计算公式为基础,提出极限粘结强度计算公式,为此类构件粘结锚固性能的研究提供理论与试验基础。**方法** 对不同钢筋直径、再生粗骨料取代率及钢纤维体积掺量的16组64个粘结锚固试件进行拉拔试验,分析各参数变量对钢筋和再生混凝土粘结性能的影响。**结果** 随着再生粗骨料取代率的增加,粘结强度变化较小;粘结强度随着钢纤维体积掺量的增加而增大;钢筋直径对粘结强度产生一定的影响,当钢筋直径为28 mm时,粘结强度提升较为明显。**结论** 笔者所推出的钢筋与钢纤维再生混凝土的粘结强度计算公式,能够为再生混凝土的相关规范编写及其工程应用提供可靠的理论依据和设计参考。

**关键词** 钢纤维再生混凝土;钢筋;拉拔试验;粘结滑移;锚固长度

中图分类号 TU378 文献标志码 A

## Study on Anchorage Performance of Rebar and Steel Fiber Recycled Concrete

CHENG Donghui, SONG Chao, HE Guoyu

(School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, China, 150040)

**Abstract:** In order to study the anchorage performance of rebar and steel fiber recycled concrete, the formula for calculating the ultimate bond strength is proposed based on the formula for calculating the ultimate bond strength of hot-rolled rebar with crescent shape in the current Code for Design of Concrete Structures (GB50010—2010), which lays a theoretical and experimental foundation for the study of bond and anchorage performance of such components. Pull-out tests were carried out on 16 groups of 64 bond anchorage specimens with different diameter of rebar, replacement ratio of recycled coarse aggregate and volume content of steel fiber. The effects of parameters on bond performance of rebar and recycled concrete were analyzed. The results show that the bond strength changes slightly with the increase of replacement ratio of recycled coarse aggregate; the bond strength increases with the increase of volume fraction of steel fiber; the

收稿日期:2019-06-02

基金项目:国家自然科学基金重大研究计划项目(90915003);中央高校基本科研业务费创新团队与重大项目培育资金项目(2572016EBC1)

作者简介:程东辉(1971—),男,教授,博士,主要从事预应力混凝土、装配式混凝土结构等方面研究。

diameter of rebar has a certain effect on the bond strength, when the diameter of rebar is 28 mm, the bond strength increases obviously. The formula of bond strength between rebar and steel fiber recycled concrete can provide reliable theoretical basis and design reference for the compilation of relevant specifications of recycled concrete and its engineering application.

**Key words:** steel fiber recycled concrete; rebar; pull-out test; bond stress-slip; anchorage length

再生混凝土是指将废弃混凝土构件经过破碎、清洗、分级后,按一定的比例与级配混合,形成再生混凝土骨料,用以部分或全部代替砂、石等天然骨料配制而成的混凝土<sup>[1-2]</sup>. 虽然与普通混凝土相比,再生混凝土具有密度低、自重轻、塌落度小、耐久性较差、弹性模量较低的缺陷<sup>[3-5]</sup>,但是在实际工程中,通过合理的配比设计、掺入适量外加剂等方法,再生混凝土的性能仍可满足使用要求. 近年来,有研究者尝试在再生混凝土中掺入一定量纤维材料以提高其力学性能,取得了较好的效果. 肖建庄等<sup>[6-7]</sup>采用标准立方体中心拔出试验,研究了不同组成及不同强度的混凝土与 CFRP 带肋筋之间的黏结滑移性能,结果表明再生粗骨料的使用降低了混凝土与 CFRP 筋之间的黏结强度. 周静海等<sup>[8-9]</sup>研究了废弃纤维掺入量等因素对废弃纤维再生混凝土立方体试件劈裂抗拉强度的尺寸效应,结果表明废弃纤维再生混凝土劈裂抗拉强度随废弃纤维掺入量的增加呈现先增大后减小的趋势,当废弃纤维掺入量为 0.12% 时,劈裂抗拉强度最大. 高丹盈等<sup>[10-11]</sup>进行了钢筋与钢纤维再生混凝土黏结试件的拉拔试验,提出了有关于再生粗骨料取代率和纤维体积率的钢筋与钢纤维再生混凝土黏结滑移本构模型. 杨海峰等<sup>[12]</sup>研究了螺纹钢锈蚀后与再生混凝土间的粘结滑移性能,结果表明再生混凝土与锈蚀钢筋间的粘结刚度基本呈下降趋势,0.5% 锈蚀率下降显著,从 0.5% 至 2.5% 锈蚀率时粘结刚度下降幅度较小. C. Wang<sup>[13]</sup>针对钢纤维再生混凝土抗冻性能展开研究,结果表明钢纤维可以提高再生混凝土的抗冻性能,且针对提高普通混

凝土抗冻性能的方法对钢纤维再生混凝土仍然适用.

在再生混凝土中掺入钢纤维,可以充分发挥钢纤维对再生混凝土的增强和增韧作用,弥补再生粗骨料存在初始微裂纹和微孔隙的缺陷<sup>[12]</sup>. 针对钢纤维再生混凝土钢筋锚固性能相关研究开展较少且粗直径钢筋与再生混凝土间的粘结性能研究领域的空白,笔者对钢纤维再生混凝土与 HRB400 级钢筋锚固性能开展研究,探讨混凝土再生粗骨料取代率、钢纤维体积掺量和钢筋直径对粘结锚固性能的影响,并提出极限粘结强度计算公式,为此类构件粘结锚固性能的研究和推广奠定了理论基础.

## 1 试验方案设计

### 1.1 试件材料及配合比

为了开展钢纤维再生混凝土与钢筋锚固性能研究,设计制作了一批钢筋与再生混凝土锚固试件(简称钢筋锚固试件). 其中试验用的再生粗骨料采用实验室废弃混凝土构件. 试验仍采用了一部分天然粗骨料,试验用钢纤维采用剪切型钢纤维,长径比为 46; 水泥采用 P. O 42.5 普通硅酸盐水泥,钢筋采用普通热轧月牙肋 HRB400 级钢筋,骨料性能如表 1 所示,钢筋实测力学性能如表 2 所示,钢纤维特征参数如表 3 所示.

表 1 骨料主要材性

Table 1 Main performance of aggregate

骨料种类	级配/mm	表观密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	压碎 指标/%	吸水 率/%
再生粗骨料	5~31.5	2 471	14.52	4.81
天然石子	5~31.5	2 693	10.52	1.21

表2 钢筋的物理力学性能

Table 2 Physical and mechanical properties of rebar

直径/mm	屈服强度/MPa	极限抗拉强度/MPa
16	433	661
22	414	479
28	551	676

表3 钢纤维特征参数

Table 3 Characteristic parameters of steel fibers

纤维类型	抗拉强度/MPa	长度/mm	等效直径/mm	长径比
剪切型 钢纤维	680	30	0.65	46

参照文献[14]对再生混凝土和普通混凝土进行配合比设计,具体配合比参数如表4所示,普通混凝土强度等级为C40,水灰比

取0.36,砂率取0.38.在普通混凝土配合比的基础上,用再生粗骨料等质量取代天然粗骨料,即可得到再生混凝土的配合比.

表4 普通混凝土配合比

Table 4 Mixture ratio of ordinary concrete

kg

$m$ (水泥)	$m$ (细骨料)	$m$ (粗骨料)	$m$ (水)	$m$ (减水剂)	$m$ (钢纤维)
430	746	1 199	155	5.16	109.0

注:钢纤维密度取 $7\ 800\ \text{kg}/\text{m}^3$ ;普通混凝土中钢纤维体积掺量为1.4%;减水剂掺量为胶凝材料用量的1.2%.

## 1.2 试件参数设计

以钢筋直径、再生粗骨料取代率、钢纤维体积掺量为参数变量,设计了16组试件,每

组包含4个条件相同的粘结锚固试件,共64个试件.详细参数如表5所示.

表5 拔出试件参数表

Table 5 Parameters of pull-out specimens

试件编号	$f_{cu}/\text{MPa}$	$d/\text{mm}$	$r/\%$	$V_f/\%$	试件长×宽×高/mm	$l_a/\text{mm}$
I-1	C40	22	0	1.4	220×220×220	160
I-2	C40	22	30	1.4	220×220×220	160
I-3	C40	22	60	1.4	220×220×220	160
I-4	C40	22	100	1.4	220×220×220	160
I-5	C40	28	0	1.4	320×320×320	160
I-6	C40	28	30	1.4	320×320×320	160
I-7	C40	28	60	1.4	320×320×320	160
I-8	C40	28	100	1.4	320×320×320	160
I-9	C40	16	0	1.4	220×220×220	160
I-10	C40	16	30	1.4	220×220×220	160
I-11	C40	16	60	1.4	220×220×220	160
I-12	C40	16	100	1.4	220×220×220	160
II-1	C40	22	60	0.0	220×220×220	110
II-2	C40	22	60	0.7	220×220×220	110
II-3	C40	22	60	1.4	220×220×220	110
II-4	C40	22	60	2.0	220×220×220	110

注: $f_{cu}$ 为混凝土强度,MPa; $d$ 为钢筋直径,mm; $r$ 为再生粗骨料取代率,%; $V_f$ 为钢纤维掺量,%; $l_a$ 为粘结长度,mm.

试件为混凝土立方体,其尺寸根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》(GBT 50082—2009)<sup>[15]</sup>确定,混凝土中心埋置 HRB400 级月牙纹钢筋,钢筋与混凝土间的粘结长度为 5 倍钢筋直径,在粘结区段外的钢筋利用硬质 PVC 套管与混凝土隔离.钢筋伸出混凝土表面的长度:自由端取 50 mm,加载端取 500 mm,标准拔出试件示意图如图 1 所示.

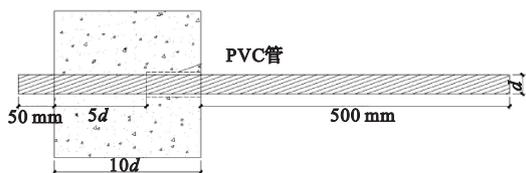
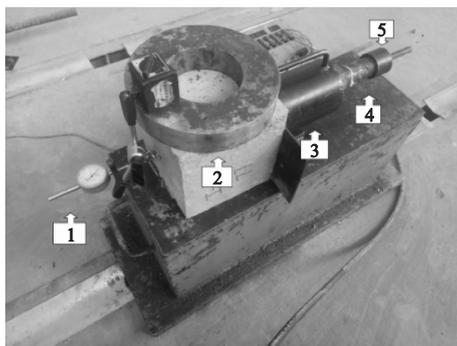


图 1 拔出试件示意图

Fig. 1 The sketch of pull-out specimen

### 1.3 试验方法

参照《混凝土结构试验方法标准》(GB 50152—92)的试验方法进行拉拔试验.为了监测试验过程中钢筋与混凝土间滑移量的变化,在钢筋自由端设置位移计以监测钢筋在拉拔过程中的滑移状况;利用穿心式千斤顶对钢筋施加拉力.为了监测荷载变化,在千斤顶与夹具间设置了穿心式压力传感器.粘结试验装置如图 2 所示.



1.百分表; 2.承重板; 3.穿心千斤顶;  
4.自制传感器; 5.锚具。

图 2 粘结试验装置

Fig. 2 Bonding test device

加载时,首先采用力控制加载,加载速率为 12 kN/min,当钢筋自由端滑移 0.2 mm 后,采用钢筋滑移量控制加载,加载速率为

0.02 mm/min;当出现滑移增量不变而荷载降低现象后,加载速率改为 0.05 mm/min,直至加载到钢筋拔出或钢筋拔断导致钢筋锚固试件破坏.

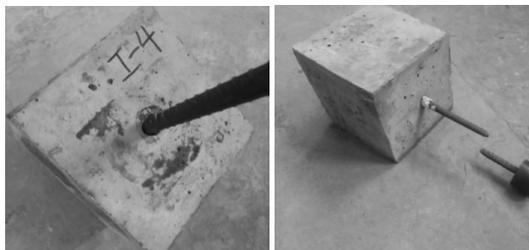
## 2 试验结果与分析

### 2.1 破坏形态

钢纤维再生混凝土钢筋锚固试件在试验过程中出现了如下破坏形态.

(1)钢筋拔出破坏(见图 3(a)):在加载初期,加载端首先出现混凝土剥落现象;随着荷载增大,自由端逐渐出现滑移,且伴随少量混凝土碎屑掉落.当加载至荷载最大值后,钢筋位移量虽然逐渐增大但千斤顶的拉力不再增加,这种现象持续一段时间后千斤顶拉力逐渐下降,钢筋滑移量持续增大.直至钢筋拔出宣告试件破坏.试验结束后,观察试件表面,混凝土无明显裂缝.

(2)钢筋拔断破坏(见图 3(b)):在加载初期,钢筋的自由端首先出现滑移;随着荷载增加,钢筋拉应力逐渐增大,达到屈服强度后钢筋未被拔出,而是随着拉力增加出现颈缩现象,随后钢筋被拉断,此时另一侧钢筋自由端滑移量较小.这主要是由于钢筋直径越小,极限粘结强度越大,荷载达到一定值时,钢筋应力首先达到极限抗拉强度,而此时粘结应力还未达到极限粘结强度.



(a) 钢筋拔出破坏

(b) 钢筋拔断破坏

图 3 试件破坏形式

Fig. 3 Failure modes of specimens

由设置于试件中的荷载传感器可测得各试件破坏时的极限拉拔力.进而可知破坏时各试件中混凝土与钢筋的极限粘结强度.试

验结果如表6所示.

表6 主要试验结果  
Table 6 Main test results

试件编号	$f_{cu}^t/\text{MPa}$	$P_u/\text{kN}$	$\tau_u/\text{MPa}$	$\tau/\text{MPa}$	$\tau_u/f_{cu}$	破坏形态
I-1	55.20	138	12.45	—	0.23	屈服前拔出
I-2	58.31	136	12.31	—	0.21	屈服前拔出
I-3	56.53	134	13.01	—	0.23	屈服前拔出
I-4	55.47	145	13.11	—	0.24	屈服前拔出
I-5	56.22	262	18.59	—	0.33	屈服前拔出
I-6	56.84	262	18.60	—	0.33	屈服前拔出
I-7	55.20	265	18.86	—	0.34	屈服前拔出
I-8	55.50	278	19.72	—	0.36	屈服前拔出
I-9	58.58	124	14.65	—	0.25	屈服前拔出
I-10	56.52	—	—	16.50	—	拔断破坏
I-11	53.90	—	—	15.95	—	拔断破坏
I-12	50.93	—	—	16.13	—	拔断破坏
II-1	57.20	119	15.62	—	0.27	屈服前拔出
II-2	56.99	127	16.72	—	0.29	屈服前拔出
II-3	57.96	134	17.97	—	0.31	屈服前拔出
II-4	55.81	144	18.99	—	0.34	屈服前拔出

注: $f_{cu}^t$ 为混凝土强度; $P_u$ 为极限荷载; $\tau_u$ 为极限粘结应力; $\tau$ 为钢筋拉断时钢筋与混凝土间的粘结应力.

## 2.2 粘结机理分析

根据各粘结锚固试件的受力过程及破坏形态,可分析得出钢筋与钢纤维再生混凝土间的粘结锚固破坏主要经历了以下阶段.

在加载初期,滑移段钢筋锚固传力模型如图4(a)所示,此时钢筋的拉拔力主要由化学胶着力承担,随着荷载增加,钢筋和混凝土之间出现表面滑脱裂缝和肋背拉脱裂缝(见图4(a)中①和②所示);此时钢筋与混凝土间胶结力丧失,拉拔力转由钢筋与混凝土间摩擦阻力和机械咬合力承担.随着荷载继续增大,由应力集中引起肋顶斜裂缝(见图4(a)中③所示),钢筋横肋前混凝土被压碎,形成新的挤压面(见图4(a)中④所示),作用在斜面上挤压力 $\sigma$ 的纵向分力 $\sigma_l$ 构成钢筋与混凝土间的粘结力,横向分力 $\sigma_r$ 构成环向拉应力.

随着荷载持续增加,滑移加速段钢筋锚固传力模型如图4(b)所示,此时钢筋肋前的

混凝土继续被压碎,形成新的挤压面(见图4(b)中⑤所示).当环向拉应力 $\sigma_r$ 大于混凝土的极限拉应力后,会导致试件内出现纵向裂缝(见图4(b)中⑥所示),该裂缝由钢筋表面向试件表面发展.当试件保护层厚度小于临界保护层厚度时,纵向裂缝会延伸至试件表面,使试件发生劈裂破坏,当试件保护层厚度大于临界保护层厚度时,纵向裂缝延伸至某一位置后,不再发展.此时由于裂缝逐步扩展,导致混凝土对钢筋的握裹力大幅度降低,粘结刚度逐渐减小,滑移量迅速增长, $\tau$ - $s$ 进入到滑移加速段,粘结应力发展到极限粘结强度.

当粘结应力达到最大值,下降段钢筋锚固传力模型如图4(c)所示,此时钢筋肋前混凝土继续被压碎,粘结应力不断减小,滑移量持续增加,直到肋前混凝土全部被压碎,拉拔力由钢筋表面与混凝土间的摩擦力承担,此时滑移量继续增大,粘结强度趋于一个定值.

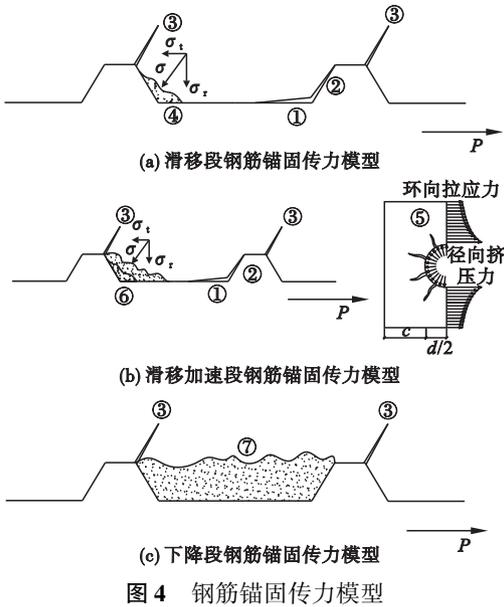


图4 钢筋锚固传力模型

Fig. 4 Force transfer model in reinforcement anchorage

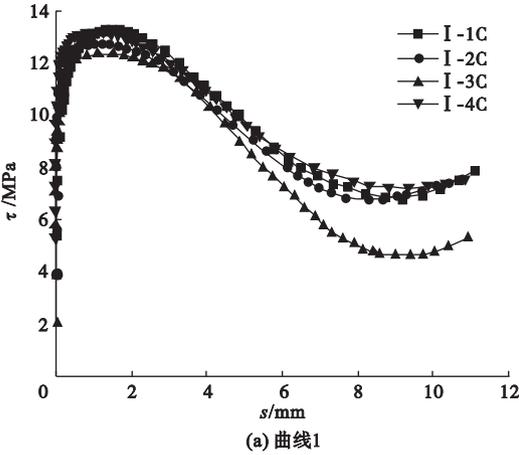
### 2.3 粘结应力-滑移曲线

试验过程中各试件实测的平均粘结应力-滑移( $\tau$ - $s$ )曲线如图5所示. 由图可知, 试件发生拔出破坏的 $\tau$ - $s$ 曲线特征与普通混凝土相似.  $\tau$ - $s$ 曲线全过程可分为四个阶段.

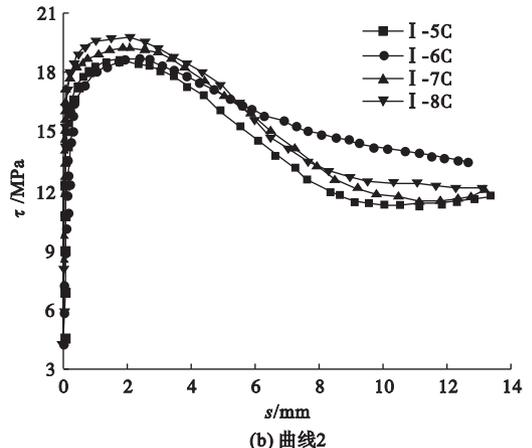
(1) 滑移段: 当粘结应力达到5 MPa左右, 自由端出现滑移值, 此时 $\tau$ - $s$ 曲线进入到滑移段, 粘结应力急剧上升, 而自由端滑移量较小, 曲线呈线性特征.

(2) 滑移加速段: 当粘结应力达到14.5 MPa, 约为 $0.85 \tau_u$ 时, 曲线进入到滑移加速段, 此时粘结应力增加缓慢, 而滑移量快速增加.

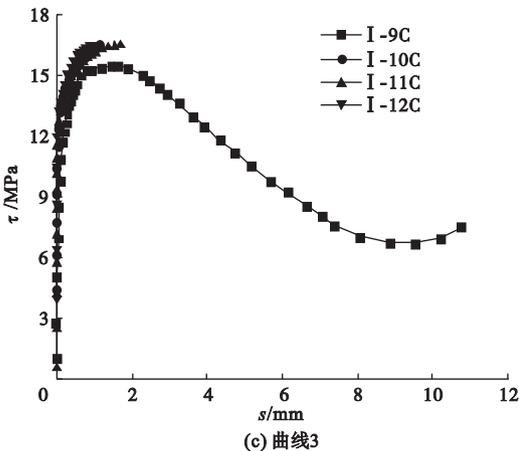
(3) 下降段: 当粘结应力达到17.4 MPa, 即粘结应力极限值后,  $\tau$ - $s$ 曲线进入下降段, 滑移量持续增大, 粘结力迅速减小.



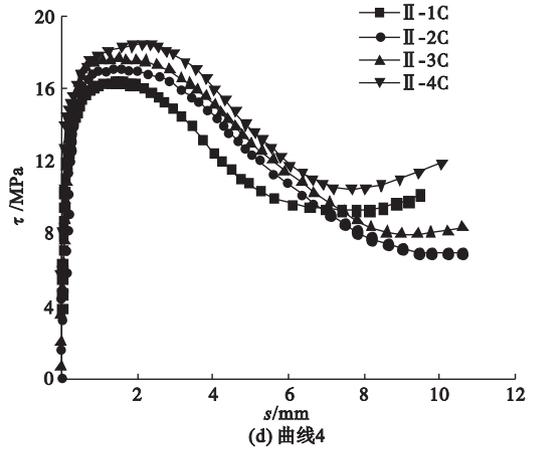
(a) 曲线1



(b) 曲线2



(c) 曲线3



(d) 曲线4

图5 试件实测粘结滑移曲线

Fig. 5 The practical  $\tau$ - $s$  curve of specimens

(4) 残余段:当滑移值达到 9 mm 左右时,曲线进入到残余段,此时,粘结应力几乎不再下降,而滑移继续增加。

## 2.4 粘结锚固性能影响因素分析

### 2.4.1 混凝土再生粗骨料取代率

表 7 给出了混凝土再生粗骨料取代率对于粘结锚固性能影响的统计结果. 其中滑移特征值  $s_s$ 、 $s_u$ 、 $s_r$  分别表示为  $\tau$ - $s$  曲线上与强

度特征值  $\tau_s$ 、 $\tau_u$ 、 $\tau_r$  相对应的横坐标值,其中,  $\tau_s$  表示粘结应力增长缓慢而滑移量快速增加,  $\tau$ - $s$  曲线在上升段出现明显转折的点;  $\tau_u$  表示当荷载最大时对应的平均粘结应力为极限粘结应力;  $\tau_r$  表示钢筋和混凝土间咬合齿被切断,钢筋与再生混凝土间粘结应力不再变化,在  $\tau$ - $s$  曲线上表现为平直段的起点。

表 7 再生骨料取代率试验结果统计

Table 7 Statistical results of recycled aggregate replacement rate

试件编号	$r/\%$	$f_{cu}/\text{MPa}$	$\tau_s/\text{MPa}$	$\tau_u/\text{MPa}$	$\tau_r/\text{MPa}$	$s_s/\text{mm}$	$s_u/\text{mm}$	$s_r/\text{mm}$
I-1	0	55.2	11.55	12.45	6.24	0.43	1.86	9.38
I-2	30	58.31	11.22	12.31	6.01	0.28	1.59	9.36
I-3	60	56.53	11.53	12.13	6.02	0.34	1.51	9.78
I-4	100	55.47	12.61	13.11	7.30	0.19	1.47	9.61
I-5	0	56.22	16.71	18.59	11.40	0.41	1.61	9.84
I-6	30	56.84	16.47	18.60	12.99	0.28	2.30	10.35
I-7	60	55.2	16.06	19.59	11.56	0.24	2.08	10.89
I-8	100	55.5	17.82	19.72	12.35	0.19	2.02	11.07
I-9	0	58.58	14.77	15.45	7.43	0.44	1.93	9.31
I-10	30	56.52	15.01	—	—	0.38	—	—
I-11	60	53.9	15.14	—	—	0.33	—	—
I-12	100	50.93	14.84	16.30	7.72	0.26	1.51	7.77

从表 7 中可以看出,当混凝土再生骨料取代率在 0 ~ 70% 变化时,粘结强度特征值  $\tau_s$ 、 $\tau_u$ 、 $\tau_r$  基本不变,当再生骨料取代率为 100% 时,粘结强度特征值有小幅度提升,提升幅度在 10% 左右. 出现这种现象的原因是由于再生粗骨料表面附着大量水泥砂浆,骨料表面粗糙,使得新旧水泥砂浆结合紧密,对粘结性能有提高作用。

随着再生粗骨料取代率的增加,滑移特征值  $s_s$  明显下降,再生骨料取代率对  $s_u$ 、 $s_r$  影响较小. 这主要是由于再生骨料在破碎过程中,易在其内部产生横向裂纹,再生骨料掺量越大,其负面影响越明显,导致裂缝发展越早,滑移值  $s_s$  越小。

### 2.4.2 钢纤维体积掺量

表 8 给出了钢纤维体积掺量试验结果。

表 8 钢纤维体积掺量试验结果统计

Table 8 Statistical results of steel fiber volume content

试件编号	$V_f/\%$	$f_{cu}/\text{MPa}$	$\tau_s/\text{MPa}$	$\tau_u/\text{MPa}$	$\tau_r/\text{MPa}$	$s_s/\text{mm}$	$s_u/\text{mm}$	$s_r/\text{mm}$
II-1	0	57.2	14.41	15.62	8.50	0.25	1.49	7.87
II-2	0.7	56.99	15.03	16.72	7.20	0.24	1.52	9.57
II-3	1.4	57.96	15.17	17.64	9.34	0.26	1.59	9.01
II-4	2	55.81	16.56	18.99	11.20	0.27	1.84	7.83

由表8可以看出,钢纤维体积掺量在0~2%变化时,随着钢纤维体积掺量的增加,粘结强度特征值 $\tau_s$ 、 $\tau_u$ 逐渐增大,残余强度特征值 $\tau_r$ 呈现先减小再增大的趋势.已有研究表明,钢筋在滑移过程中,混凝土内部通常会大量产生裂缝,加入钢纤维可以抑制裂缝的发展,提高混凝土的抗拉强度,从而提高劈裂强度 $\tau_s$ 及极限粘结强度 $\tau_u$ .随着钢纤维体积掺量的增加,滑移值 $s_s$ 先减小再增大, $s_u$ 逐渐增大, $s_r$ 先增大再减小.与普通混凝土相比,当钢纤维掺量为2%时,滑移值 $s_u$ 提高24%左右,粘结强度特征值 $\tau_s$ 、 $\tau_u$ 分别增大15%和22%.

### 2.4.3 钢筋直径

表9给出了钢筋直径对于粘结锚固性能影响的统计结果,可以看出:当直径为16 mm

和22 mm时,钢筋直径对钢筋与再生混凝土间粘结性能的影响规律与普通混凝土相同,极限粘结强度随着钢筋直径的增大而减小;在相同条件下,与直径16 mm的月牙纹钢筋比较,直径为28 mm的钢筋极限粘结强度提高25%.根据已有研究成果及本次试验结果,分析认为出现这种现象的原因有以下两个方面:其一是由于直径28 mm的试件相对粘结长度( $d/l_a$ )较小,粘结应力分布较为均匀;其二是由于直径越大,钢筋外形参数 $\alpha_A$ 略有增加,对粘结性能有增强作用.粘结强度特征值 $\tau_s$ 、 $\tau_r$ 变化规律与极限粘结强度相同,不再赘述.随着钢筋直径的增大,滑移值 $s_s$ 呈现下降趋势;滑移值 $s_u$ 、 $s_r$ 明显上升,上升幅度在30%左右.

表9 钢筋直径试验结果统计

Table 9 Statistical results of rebar diameter

编号	$d/l_a$	$f_{cu}/\text{MPa}$	$\tau_s/\text{MPa}$	$\tau_u/\text{MPa}$	$\tau_r/\text{MPa}$	$s_s/\text{mm}$	$s_u/\text{mm}$	$s_r/\text{mm}$
I-9	0.10	58.58	14.77	15.45	7.43	0.44	1.93	9.31
I-1	0.14	55.2	10.92	12.45	6.24	0.43	1.86	9.38
I-5	0.18	56.22	16.71	18.59	11.40	0.41	1.61	9.84
I-12	0.10	50.93	14.84	16.3	7.72	0.26	1.51	7.77
I-4	0.14	55.47	2.61	13.11	7.30	0.19	1.47	9.61
I-8	0.18	55.50	17.82	19.72	12.40	0.19	2.02	11.10

## 3 钢筋锚固长度的计算

### 3.1 锚固长度的计算

以《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)<sup>[16]</sup>中月牙纹外形热轧钢筋的极限粘结强度计算公式为基础,综合考虑钢纤维掺量、钢筋直径、锚固长度、混凝土强度等参数,对试验数据进行回归分析,得到钢纤维再生粗骨料混凝土极限粘结强度的计算公式:

$$\frac{\tau_u}{f_{cu}} = 5.159 \times (0.03384V_f + 0.214) \times (0.89149 \frac{d}{l_a} + 0.070). \quad (1)$$

以文献[17]中提出的锚固长度计算方

法,根据我国钢材、混凝土材料和构件几何尺寸的统计参数,按照确定的锚固强度可靠指标,可得出不同钢纤维掺量下钢筋锚固长度(见表10).

表10 再生混凝土带肋钢筋锚固长度

Table 10 Anchorage length of reinforced recycled concrete

$V_f/\%$	$l_a/d$
0	17.99
0.70	13.86
1.40	12.26
2.00	10.62

### 3.2 钢筋临界锚固长度及极限锚固长度

文献[17]根据锚固长度极限状态方程,

给出  $l_a/d$  计算公式:

$$\frac{l_a}{d} = \frac{f_y}{4\tau_u} \quad (2)$$

将锚固破坏与钢筋屈服同时发生所需的锚固长度称为临界锚固长度 ( $l_a^{cr}$ ). 以 HRB400 级钢筋为基础, 将钢筋屈服按  $f_y = 400$  MPa 考虑, 代入式 (2), 同时将按式 (1) 计算的  $\tau_u$  值一并带入式 (2), 可得不同钢纤维掺量下钢筋的临界锚固长度 (见表 11).

表 11 再生混凝土变形钢筋临界锚固长度

Table 11 Critical anchorage length of reinforced recycled concrete

$V_f/\%$	$l_a/d$
0	9.88
0.70	7.33
1.40	6.13
2.00	4.89

将锚固破坏与钢筋拉断同时发生时所需的钢筋锚固长度称为极限锚固长度 ( $l_a^u$ ). 以 HRB400 级钢筋为基础, 将钢筋极限抗拉强度按  $f_u = 540$  MPa 考虑, 代入式 (2) 中, 同时将按式 (1) 计算的  $\tau_u$  值一并带入式 (2), 可得不同钢纤维掺量下钢筋的极限锚固长度 (见表 12).

表 12 再生混凝土变形钢筋极限锚固长度

Table 12 Limit anchorage length of reinforced recycled concrete

$V_f/\%$	$l_a^u/d$
0	19.42
0.70	15.79
1.40	14.08
2.00	12.31

当  $l_a < l_a^{cr}$  时, 说明在钢筋达到屈服强度前, 钢筋与混凝土间已经发生锚固破坏, 钢筋未能充分发挥强度; 当  $l_a > l_a^u$  时, 说明钢筋与混凝土间未发生锚固破坏时钢筋即被拉断, 锚固长度过长. 因此, 锚固长度  $l_a$  应小于极限锚固长度并大于临界锚固长度, 即  $l_a^{cr} < l_a < l_a^u$ . 将计算结果列于图 6 中, 可以看出, 计

算结果符合要求.

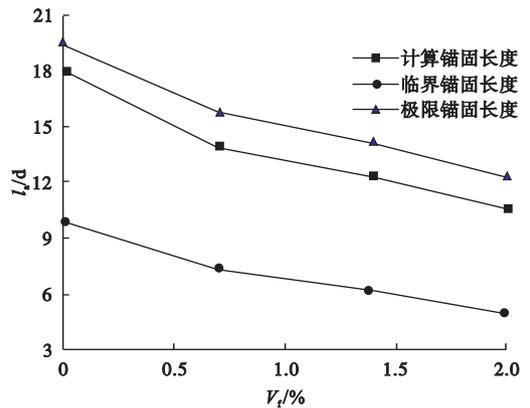


图 6 锚固长度计算值

Fig. 6 Calculated results of anchorage length

## 4 结 论

(1) 再生骨料取代率在 0 ~ 70% 内变化时, 随着再生粗骨料取代率的增加, 粘结强度特征值变化相对较小; 当再生骨料取代率为 100% 时, 粘结强度特征值有小幅度提升, 提升幅度在 10% 左右.

(2) 随着钢纤维体积掺量的增加, 钢纤维再生混凝土粘结强度特征值  $\tau_s$ 、 $\tau_u$  逐渐增大, 残余强度特征值  $\tau_r$  先减小再增大, 与普通混凝土相比, 当钢纤维掺量为 2% 时, 粘结强度特征值  $\tau_s$ 、 $\tau_u$  分别增大 15% 和 22%.

(3) 根据试验数据的统计, 笔者提出了关于钢纤维掺量、钢筋直径、粘结长度、混凝土强度等参数变量的极限粘结强度计算公式, 为此类构件粘结锚固性能的研究奠定了理论基础.

## 参考文献

[1] 李鹏程, 彭有开, 李峰, 等. 再生粗骨料对钢筋混凝土之间粘结性能的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2016, 38(增刊1): 6-12. (LI Pengcheng, PENG Youkai, LI Feng, et al. Effects of coarse recycled aggregate on the bond behavior between concrete and rebars [J]. Civil and environmental engineering, 2016, 38(S1): 6-12.)

[2] KISKU N, JOSHI H, ANSARI M, et al. A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material [J]. Construction and building materials, 2017, 131: 721-740.

- [3] 曹万林,刘熙,乔崎云,等. 钢筋中高强再生混凝土黏结滑移性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2016,37(增刊2):127-134.  
(CAO Wanlin, LIU Xi, QIAO Qiyun, et al. Experimental study on bond slip behavior of ordinary and high strength recycled concrete and steel bars [J]. Journal of architectural structure, 2016, 37(S2): 127-134.)
- [4] KIM S W, YUN H D, PARK W S, et al. Bond strength prediction for deformed steel rebar embedded in recycled coarse aggregate concrete [J]. Materials and design, 2015, 83: 257-269
- [5] KOLAY P K, AKENTUNA M. Characterization and utilization of recycled concrete aggregate from Illinois as a construction material [C]// American Society of Civil Engineers Geo-Congress 2014. Atlanta, Georgia: Geotechnical Special Publication, 2014: 3561-3570.
- [6] 肖建庄,廖清香,张青天,等. 海水海砂再生混凝土与玻璃纤维增强塑料筋黏结性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(7): 884-890.  
(XIAO Jianzhuang, LIAO Qingxiang, ZHANG Qingtian, et al. Bond behavior between seawater sea-sand recycled aggregate concrete and glass fiber reinforced polymer bars [J]. Journal of tongji university (natural science edition), 2018, 46(7): 884-890.)
- [7] 肖建庄,张鹏,张青天,等. 海水海砂再生混凝土的基本力学性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(2): 16-22.  
(XIAO Jianzhuang, ZHANG Peng, ZHANG Qingtian, et al. Basic mechanical properties of seawater sea-sand recycled concrete [J]. Journal of building science and engineering, 2018, 35(2): 16-22.)
- [8] 周静海,康天蓓,王凤池,等. 废弃纤维再生混凝土劈裂抗拉强度尺寸效应试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018, 34(6): 1036-1044.  
(ZHOU Jinghai, KANG Tianbei, WANG Fengchi, et al. Experimental study on size effect test of splitting tensile strength of waste fiber recycled concrete [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2018, 34(6): 1036-1044.)
- [9] 周静海,葛峰,康天蓓,等. 长期持续荷载下废弃纤维再生混凝土徐变破坏规律研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(10): 3317-3321.  
(ZHOU Jinghai, GE Feng, KANG Tianbei, et al. Damage laws study of waste fiber recycled concrete creep under long-term sustained load [J]. Silicate bulletin, 2018, 37(10): 3317-3321.)
- [10] 高丹盈,朱倩. 钢筋与钢纤维再生混凝土黏结滑移性能及模型[J]. 中国公路学报, 2018, 31(6): 172-180.  
(GAO Danying, ZHU Qian. Constitutive model and bond stress-slip behavior between rebar and steel fiber reinforced recycled concrete [J]. China journal of highways, 2018, 31(6): 172-180.)
- [11] 张丽娟. 钢纤维再生混凝土配合比设计及其性能计算方法[D]. 郑州: 郑州大学, 2017.  
(ZHANG Lijuan. Mixture design and performance calculation method of steel fiber reinforced recycled concrete [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2017.)
- [12] 杨海峰,邓志恒,覃英宏. 钢筋锈蚀后与再生混凝土间粘结-滑移本构关系研究[J]. 工程力学, 2015, 32(10): 114-122.  
(YANG Haifeng, DENG Zhihuan, QIN Yinghong. Study on bond-slip constitutive relation between steel bars and recycled concrete [J]. Engineering mechanics, 2015, 32(10): 114-122.)
- [13] WANG C, XIAO J, ZHANG G, et al. Interfacial properties of modeled recycled aggregate concrete modified by carbonation [J]. Construction and building materials, 2016, 105: 307-320.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土配合比设计规程: JGJ 55—2000 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.  
(Ministry of Construction of the People's Republic of China. Specification for mix design of ordinary concrete: JGJ 55—2000 [S]. Beijing: China Construction Industry Publishing, 2000.)
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: GBT50082—2009 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.  
(Ministry of Construction of the People's Republic of China. Standard for long-term performance and durability testing method of ordinary concrete: GBT50082—2009 [S]. Beijing: China Construction Industry Publishing, 2009.)
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.  
(Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Construction Industry Publishing, 2010.)
- [17] 贾方方. 钢筋与活性粉末混凝土粘结性能的试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.  
(JIA Fangfang. Experimental study on bond properties between steel bar and reactive power concrete [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.)  
(责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)