

文章编号:1007-9629(2023)09-1003-08

墩粗钢筋在高强钢纤维混凝土中的黏结锚固性能

陈子璇¹, 李新星², 肖建庄^{1,*}, 陈宣言¹, 李水生²

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;

2. 中国建筑第五工程局有限公司, 湖南 长沙 410004)

摘要:为探究墩粗钢筋与高强钢纤维混凝土之间的黏结锚固性能,以黏结长度、保护层厚度和钢筋类型为试验变量,开展拔出试验.通过黏结-滑移曲线、破坏模式、黏结强度及峰值滑移等分析墩粗钢筋-高强钢纤维混凝土的黏结-滑移性能.结果表明:混凝土的黏结强度随着黏结长度的增加而降低,且对墩粗钢筋试件的影响更明显;提高保护层厚度可以提升黏结性能,但作用有限;钢筋进行墩粗处理可以有效提高钢筋与混凝土之间的黏结强度,显著降低峰值滑移,改变破坏模式.基于试验数据,建立了混凝土的黏结-滑移关系.

关键词:黏结-滑移关系;墩粗钢筋;高强钢纤维混凝土;拔出试验;锚固长度

中图分类号:TU375.1

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.09.008

Bond Behavior between Upsetting Steel Bar and High Strength Steel Fiber Reinforced Concrete

CHEN Zixuan¹, LI Xinxing², XIAO Jianzhuang^{1,*}, CHEN Xuanyan¹, LI Shuisheng²

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. China Construction Fifth Engineering Division Co., Ltd., Changsha 410004, China)

Abstract: Pull-out tests were carried out in order to investigate the bond behavior between upsetting steel bar and high strength steel fiber reinforced concrete (SFRC). The bond lengths, concrete coverage thicknesses and different types of steel bar were considered. Bond-slip relationship, failure pattern, bond strength and the corresponding slip were analyzed. The results show that the bond strength decreases with the increase of bond length, which is more obvious in the upsetting steel bar specimens than normal steel bar specimens. Increasing the concrete coverage thickness can improve the bond strength, but the effect is limited. The upsetting steel bar can effectively enhance the bond strength between steel bar and SFRC, significantly reduce the relative slip and change the failure pattern. In addition, based on the experimental data, the bond-slip relationship between normal/upsetting steel bar and SFRC is established.

Key words: bond-slip relationship; upsetting steel bar; high strength steel fiber reinforced concrete; pull-out test; anchorage length

钢纤维的加入提高了混凝土的抗拉强度和抗裂
缝发展能力^[1-2].与无钢纤维的混凝土相比,钢纤维混
凝土(SFRC)的黏结强度和破坏模式显著改善^[3-6],且
基本锚固长度有所降低.SFRC常被用作预制拼装混

凝土桥梁和建筑的现浇接缝材料^[7].然而,相比整浇
试件,由于钢筋与后浇SFRC之间存在滑移现象,在
预制装配试件的接缝处仍能观察到较大位移^[8-9],因
此,本文拟通过机械锚固进一步增强钢筋与SFRC之

收稿日期:2022-11-03; 修订日期:2023-01-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52078358)

第一作者:陈子璇(1996—),女,福建霞浦人,同济大学博士生.E-mail:1810761@tongji.edu.cn

通讯作者:肖建庄(1968—),男,山东沂南人,同济大学教授,博士生导师,博士.E-mail:jzx@tongji.edu.cn

间的黏结性能.机械锚固是提高钢筋-混凝土黏结-滑移性能的重要方式之一.配有横向钢筋的机械锚固试件的滑移量显著降低,且表现出一定延性^[10-11].相比于其他机械锚固方式,钢筋墩粗的处理方式无需进行焊接,不仅降低了施工难度,还能避免钢筋连接区布置空间不足的问题.

鉴于此,本文从改变钢筋的锚固端外形着手,将钢筋的1个端头进行墩粗处理,增大末端与混凝土的接触面积.通过普通钢筋、墩粗钢筋与混凝土之间的拔出试验,以黏结长度和保护层厚度为变量,研究锚固端钢筋墩粗对钢筋-SFRC黏结-滑移性能的影响规律及影响机理.

1 试验设计

1.1 试验材料

试验材料包括设计强度等级为80 MPa的SFRC和HRB400热轧带肋钢筋.HRB400钢筋直径为

14 mm,材料性能如表1所示.SFRC用原材料如下:水泥为P·O 42.5普通硅酸盐水泥;粗骨料为粒径5~20 mm级配碎石;细骨料为天然河砂,表观密度为2.82 g/cm³;矿粉为S95矿粉,表观密度为0.78 g/cm³;矿物掺合料为Ⅱ级粉煤灰和表观密度为2.78 g/cm³且SiO₂含量(质量分数,文中涉及的含量、水胶比等均均为质量分数或质量比)大于90%的硅灰;外加剂为聚羧酸减水剂,减水率大于30%;钢纤维为长度35.00 mm、直径0.55 mm的端钩型钢纤维,抗拉强度为1 200 MPa.SFRC水胶比为0.27,配合比如表2所示.自然养护28 d后测得边长为100 mm立方体试件的抗压强度为93.5 MPa.

表1 HRB400钢筋的材料性能

Table 1 Material property of HRB400 steel bar

Yield strength/MPa	Ultimate strength/MPa	Elongation/%
425	605	26

表2 SFRC的配合比

Table 2 Mix proportion of SFRC

Cement	Mineral powder	Silica fume	Fly ash	Fine aggregate	Coarse aggregate	Water	Water reducer	Steel fiber	kg/m ³
430	70	30	70	625	1 110	162	12	120	

1.2 试件设计及制作

混凝土拔出试件尺寸为150 mm×150 mm×150 mm,以钢筋类型(墩粗钢筋及普通钢筋)、黏结长度 l 和保护层厚度 c 为试验参数.其中,墩粗钢筋试件的黏结长度为(3~6) d (d 为钢筋直径),普通钢筋试件的黏结长度为(5~8) d ;2种试件的保护层厚度为 $2d$ 和 $4d$.墩粗钢筋-SFRC拔出试件和普通钢筋-SFRC拔出试件各设置8组,每组2个试件,共

计32个试件.将钢筋热处理后进行人工锤击墩粗处理,使墩粗端直径为18 mm,另外在墩头处焊接1段长90 mm、直径12 mm的钢筋,用于测量钢筋自由端的位移.试件内设置1段硬质PVC塑料管,以改变钢筋的黏结长度,同时避免加载端混凝土受局部挤压的影响.试件混凝土保护层厚度 c 的变化可以通过偏心布置钢筋实现^[12].试件设计如图1所示.

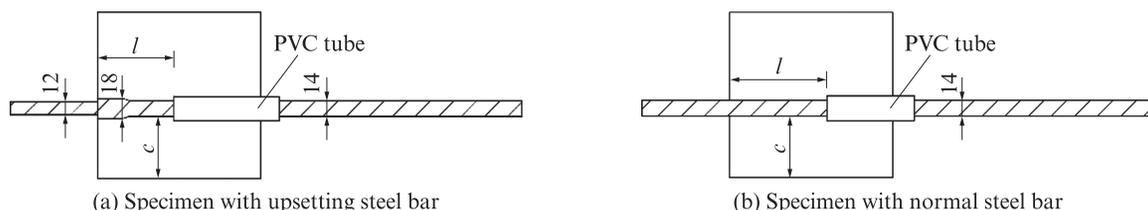


图1 试件设计

Fig. 1 Specimen design (size: mm)

1.3 加载及量测方案

按照CECS13:2009《纤维混凝土试验方法标准》的要求,拔出试验采用WA-600B万能试验机进行加载,试验加载装置如图2所示.为避免加载端钢筋自身变形、颈缩对滑移量测量值的影响,将钢筋自由端的位移作为钢筋滑移量,通过2个千

分表测量后取平均值.试件标准养护28 d后开展试验.

需要说明的是,混凝土拔出试验前,先预加载至1 kN,再将荷载卸至0 kN,然后正式开始加载.钢筋屈服前采用力加载方式,加载速率为2 kN/min;钢筋屈服后采用位移加载方式,加载速率为

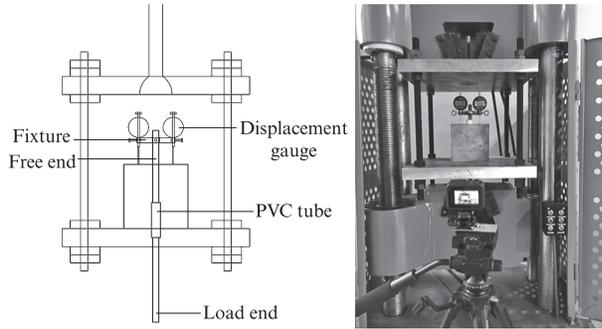


图2 试验加载装置
Fig. 2 Test loading device

5 mm/min. 当钢筋自由端滑移量达到 15 mm 时或者试件承载力显著下降时,认为试件破坏,即停止

试验.

2 试验结果

试验记录峰值拉拔荷载 F_u (kN)及其对应的峰值滑移 s_u (mm),各组试件参数及主要试验结果如表3所示.其中试件编号 N(D)-15d-c2d-1 中的首字母 N 表示普通钢筋试件,D 表示墩粗钢筋试件,15d 表示黏结长度为 5 倍钢筋直径,c2d 表示保护层厚度为 2 倍钢筋直径,1 表示是该组的第 1 个试件;其余编号依此类推.

钢筋混凝土的极限黏结应力(黏结强度) τ_u (MPa)由式(1)计算得到:

表3 各钢筋-SFRC 试件参数及主要试验结果
Table 3 Parameters and main test results of steel-SFRC specimens

Specimen No.	l /mm	c /mm	F_u /kN	\bar{F}_u /kN	τ_u /MPa	$\bar{\tau}_u$ /MPa	s_u /mm	\bar{s}_u /mm	Failure pattern
N-15d-c2d-1	5d	2d	90.7	89.4	29.5	29.0	0.27	0.38	Splitting failure
N-15d-c2d-2			88.0		28.6		0.49		
N-16d-c2d-1	6d	2d	92.9	89.9	25.2	24.3	0.36	0.36	Splitting failure
N-16d-c2d-2			86.8		23.5		0.37		
N-17d-c2d-1	7d	2d	93.4	93.5	21.7	21.7	0.21	0.17	Steel bar tensile failure
N-17d-c2d-2			93.6		21.7		0.13		
N-18d-c2d-1	8d	2d	94.3	94.8	19.2	19.2	0.07	0.05	Steel bar tensile failure
N-18d-c2d-2			95.2		19.3		0.04		Shear compression failure
N-15d-c4d-1	5d	4d	90.0	92.5	29.2	30.0	0.91	0.74	Steel bar tensile failure
N-15d-c4d-2			94.9		30.8		0.56		
N-16d-c4d-1	6d	4d	94.5	92.5	25.6	25.0	0.17	0.36	Steel bar tensile failure
N-16d-c4d-2			90.5		24.5		0.54		
N-17d-c4d-1	7d	4d	96.1	95.4	22.3	22.1	0.08	0.12	Steel bar tensile failure
N-17d-c4d-2			94.6		22.0		0.17		
N-18d-c4d-1	8d	4d	95.6	94.6	19.4	19.2	0.04	0.06	Steel bar tensile failure
N-18d-c4d-2			93.5		19.0		0.07		
D-13d-c2d-1	3d	2d	93.0	90.1	50.3	48.8	0.98	0.76	Shear compression failure
D-13d-c2d-2			87.1		47.2		0.53		
D-14d-c2d-1	4d	2d	87.2	88	35.4	35.7	0.21	0.23	Shear compression failure
D-14d-c2d-2			88.7		36.0		0.25		
D-15d-c2d-1	5d	2d	94.6	93.4	30.7	30.3	0.17	0.20	Steel bar tensile failure
D-15d-c2d-2			92.1		30.0		0.22		
D-16d-c2d-1	6d	2d	95.7	93.3	25.9	25.3	0.08	0.15	Steel bar tensile failure
D-16d-c2d-2			90.9		24.6		0.23		Shear compression failure
D-13d-c4d-1	3d	4d	95.3	94.2	51.6	51.0	—	0.96	Steel bar tensile failure
D-13d-c4d-2			93.1		50.4		0.96		
D-14d-c4d-1	4d	4d	91.7	92.9	37.2	37.7	0.38	0.37	Steel bar tensile failure
D-14d-c4d-2			94.2		38.3		0.36		
D-15d-c4d-1	5d	4d	94.8	93.9	30.8	30.5	0.30	0.22	Steel bar tensile failure
D-15d-c4d-2			93.0		30.2		0.14		
D-16d-c4d-1	6d	4d	92.4	94.6	25.0	25.6	0.10	0.10	Steel bar tensile failure
D-16d-c4d-2			96.8		26.2		0.10		

$$\tau_u = \frac{F_u}{\pi dl} \quad (1)$$

2.1 破坏模式

试验过程中主要观察到3种破坏模式:混凝土剪压破坏、混凝土劈裂破坏和钢筋拉断破坏.试件的典型破坏形态如图3所示.由图3可见:(1)墩粗钢筋试件 D-13d-c2d、D-14d-c2d 及 D-16d-c2d-2(以 D-13d-c2d-2 为例)发生混凝土剪压破坏,裂缝较大且数量较多,初始裂缝出现在钢筋的自由端附近;随着荷载的增加,裂缝逐渐发展,最终呈现从墩头向外放射的贯

穿斜裂缝,混凝土出现剪压椎体破坏,最大裂缝宽度约为3 mm;在极限荷载时,钢筋与混凝土产生明显滑移,同时钢筋墩头和钢筋肋处的混凝土被刮出.(2)普通钢筋试件 N-15d-c2d、N-16d-c2d(以 N-15d-c2d-2 为例)发生混凝土劈裂破坏,试件裂缝较小且单一,裂缝主要在加载端附近出现;随着荷载的增加,裂缝从混凝土加载端边缘贯穿到自由端边缘,钢筋被拔出,最大裂缝宽度为0.5 mm.(3)未提及的其余普通钢筋和墩粗钢筋试件(以 D-13d-c4d-2 为例)均发生钢筋拉断破坏,试件表面均未发现明显裂缝.

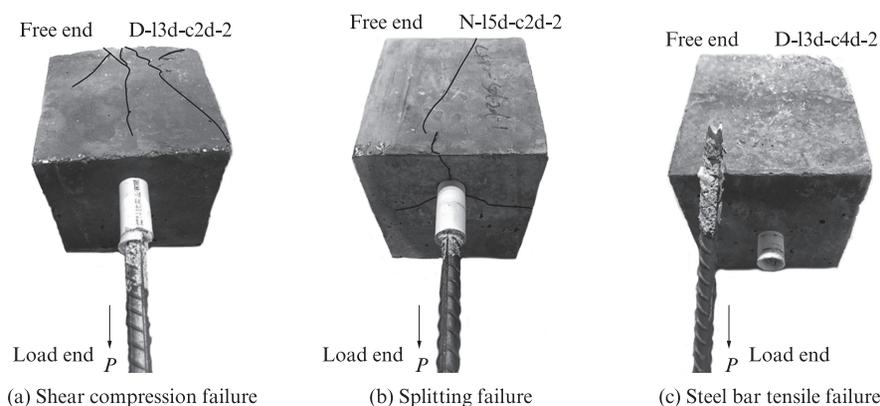


图3 试件破坏模式

Fig. 3 Failure patterns of specimens

2.2 黏结-滑移曲线

各试件典型黏结-滑移(τ - s)曲线如图4所示.混凝土剪压破坏和劈裂破坏试件可记录到完整的 τ - s 曲线.与普通钢筋混凝土的 τ - s 曲线类似,墩粗钢筋混凝土包括微滑移、裂缝发展、下降和残余阶段.钢筋拉断破坏试件的 τ - s 曲线仅记录到上升段数据.

在加载初期,试件的黏结应力主要由化学胶着力 and 机械咬合力提供,自由端钢筋基本无滑移;随着荷载的增加,保护层开始产生微裂缝,自由端产生微小位移,此时墩粗钢筋试件墩头开始发挥锚固作用;随着裂缝的进一步发展, τ - s 曲线的斜率逐渐变缓,直至极限黏结强度;随后,保护层逐渐形成贯穿劈裂裂缝或剪压锥形裂缝,黏结应力缓慢下降,滑移量进一步增大.由于SFRC中钢纤维的桥联作用,混凝土并未发生脆性破坏,仍能提供一定的机械咬合力和摩擦力.总体上,各试件的 τ - s 曲线与试验观察的破坏过程相符.

3 影响黏结锚固的因素

3.1 黏结长度

试件黏结强度 τ_u 、峰值滑移 s_u 与黏结长度 l 的关系如图5、6所示.由图5、6可见:(1)随着黏结长度的增加,试件的黏结强度逐渐减小,并与黏结长度呈线性关系.这是因为黏结长度较大时应力分布不均匀,高

应力区相对较短,故黏结强度相对较低.(2)随着黏结长度的增加,试件的峰值滑移显著降低,其中墩粗钢筋试件更为明显.(3)当保护层厚度为 $2d$ 或 $4d$ 时,黏结长度对墩粗钢筋试件黏结强度的影响较普通钢筋试件更加明显.这是由于墩粗钢筋的墩头处提供了较大的集中应力.

3.2 保护层厚度

试件黏结强度 τ_u 、峰值滑移 s_u 与保护层厚度 l 的关系如图7、8所示.由图7、8可见:(1)随着保护层厚度的增大(由 $2d$ 增至 $4d$),试件黏结强度略微提高,例如墩粗钢筋试件 D-13d-c4d 的黏结强度较 D-13d-c2d 提高4.5%,普通钢筋试件 N-15d-c4d 的黏结强度较 N-15d-c2d 提高3.4%.这说明保护层厚度对混凝土黏结强度的影响不如黏结长度的影响显著.(2)随着保护层厚度的增大(由 $2d$ 增至 $4d$),试件的峰值滑移减小,例如墩粗钢筋试件 D-13d-c4d 的峰值滑移较 D-13d-c2d 降低20%,普通钢筋试件 N-15d-c4d 的峰值滑移较 N-15d-s2d 降低49%.(3)当黏结长度较小时,增大保护层厚度的作用更为明显.这是因为增大保护层厚度相当于增加了参与环向受力的混凝土面积,延缓了裂缝的开展和蔓延,使试件的破坏模式发生改变.(4)当黏结长度较长($6d$ 或 $8d$)时,钢筋与混凝土接触面局部的黏结应力降低, $2d$ 保护层厚度

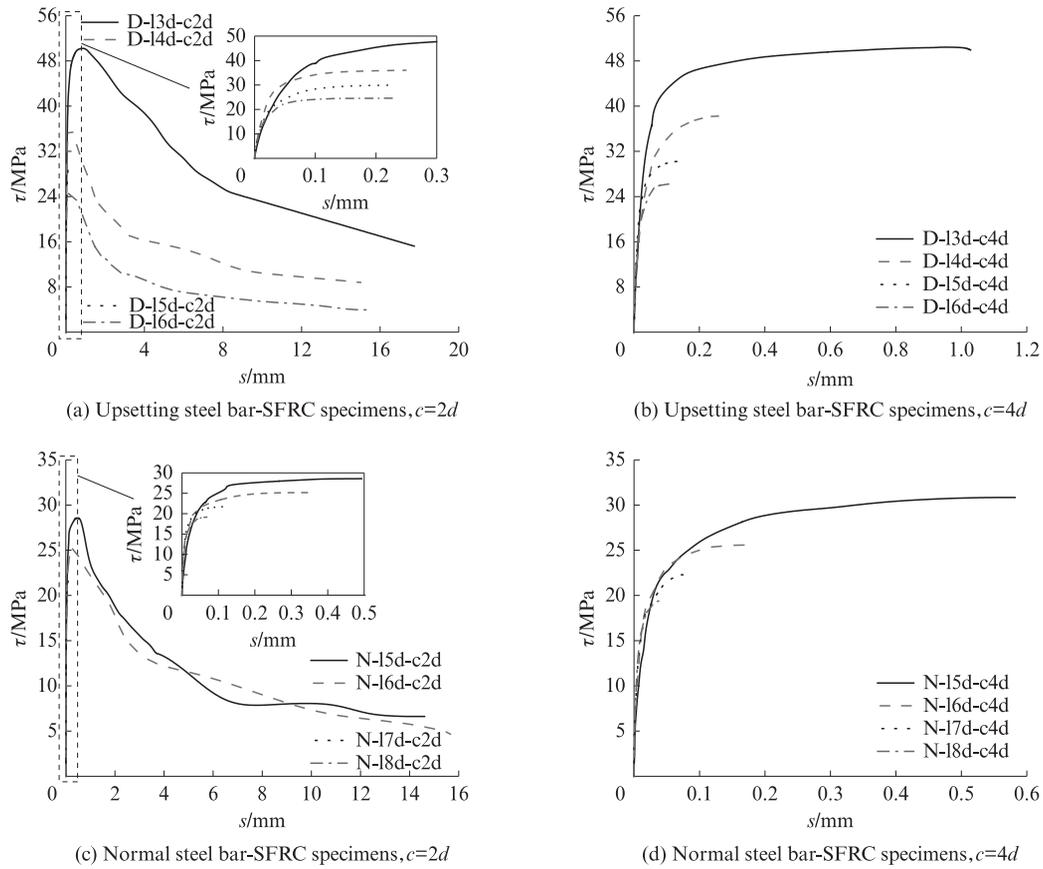


图4 各试件典型黏结-滑移曲线

Fig. 4 Typical bond-slip curves of each specimen

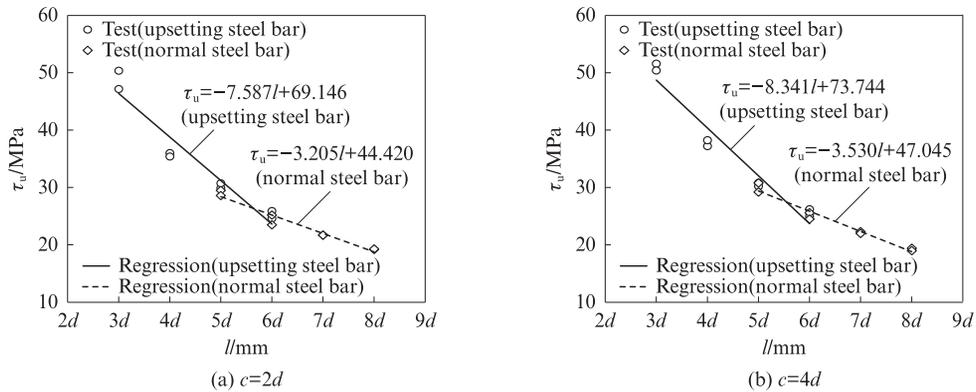


图5 试件黏结强度与黏结长度的关系

Fig. 5 Relationship between bond strength and bond length of specimens

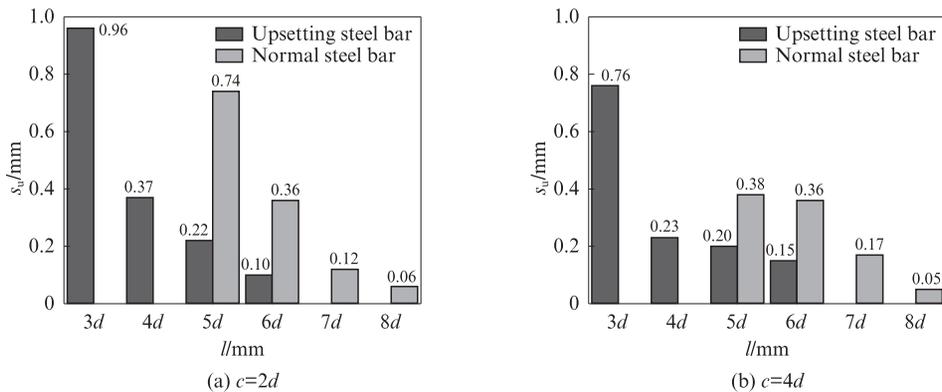
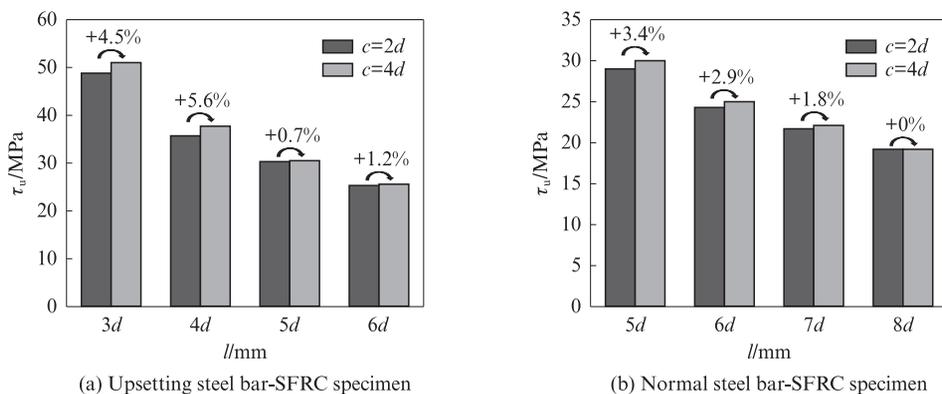


图6 试件峰值滑移与黏结长度的关系

Fig. 6 Relationship between peak slip and bond length of specimens

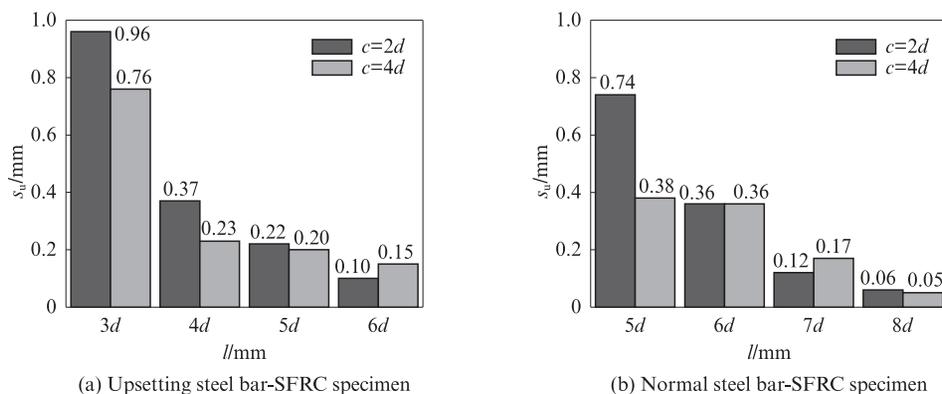


(a) Upsetting steel bar-SFRC specimen

(b) Normal steel bar-SFRC specimen

图7 试件黏结强度与保护层厚度的关系

Fig. 7 Relationship between bond strength and coverage thickness of specimen



(a) Upsetting steel bar-SFRC specimen

(b) Normal steel bar-SFRC specimen

图8 试件峰值滑移与保护层厚度的关系

Fig. 8 Relationship between peak slip and coverage thickness of specimen

的环向混凝土已能够对钢筋提供足够的握裹力,环向应力未达到抗拉强度,混凝土表面无明显劈裂裂缝,此时再增大保护层厚度,对黏结强度和峰值滑移的影响已不显著,例如对墩粗钢筋试件 D-16d-s2d、D-16d-s4d 和普通钢筋试件 N-18d-s2d、N-18d-s4d 来说,其黏结强度和峰值滑移基本保持一致。

3.3 钢筋墩粗处理

对钢筋进行墩粗处理可显著提高钢筋与混凝土之间的锚固性能,使得试件破坏模式由混凝土劈裂破坏向混凝土剪压破坏或钢筋拉断破坏转变.在保护层厚度为 $2d$ 情况下,对于普通钢筋试件,只有当黏结长度为 $7d$ 时,钢筋才能达到极限承载力;而对于墩粗钢筋试件,当黏结长度为 $5d$ 时即可使钢筋拉断.图9为钢筋墩粗处理对试件峰值滑移的影响.由图9可见:钢筋墩粗处理对于试件峰值滑移的影响十分显著;在同等保护层厚度情况下,黏结长度为 $5d$ 和 $6d$ 的墩粗钢筋试件的峰值滑移较普通钢筋试件降低 $47\% \sim 72\%$.因此,在连接节点中采用墩粗钢筋代替普通钢筋可减小钢筋在SFRC中的基本锚固长度,降低连接节点长度,进而节省钢筋降低工程造价,利于施工.

墩粗钢筋试件展现出特有的混凝土剪压破坏特

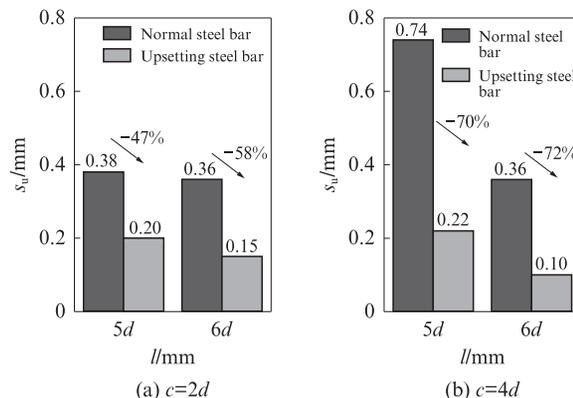


图9 墩粗钢筋对试件峰值滑移的影响

Fig. 9 Effect of upsetting steel bar on peak slip of specimens

征,这与墩头产生的内力分布密切相关.在加载初期,由直锚段钢筋引起的黏结力和摩擦力起主要作用;而随着相对滑移量的增加,直锚段钢筋的黏结作用下降,墩头的锚固作用占主导.钢筋直锚段对环向混凝土施加拉应力的同时,墩头对其周围的混凝土基体施加集中剪压应力,因此混凝土出现椎体破坏,形成多裂缝,造成表层混凝土脱落,如图10所示.墩粗钢筋试件的破坏模式与墩头附近的混凝土约束作用密切相关,受黏结长度的影响较弱.例如,尽管

D-15d-s2d 试件足够使钢筋拉断, D-16d-s2d-2 试件仍然出现了墩头处剪压破坏, 可能是墩头周围混凝土浇筑质量不佳导致的. 为保证墩粗钢筋黏结锚固的安全性和可靠性, 结合本试验情况, 建议墩粗钢筋与混凝土锚固时保护层厚度保证大于 $2d$.

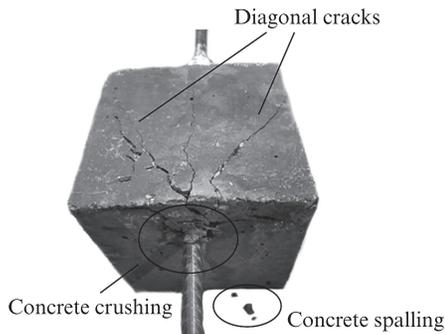


图 10 墩粗钢筋试件剪压破坏特征

Fig. 10 Splitting failure of specimen with upsetting steel bar

4 黏结-滑移关系

图 4 显示, 墩粗钢筋试件与普通钢筋试件的 τ - s 曲线形状基本一致. 因此, 对于墩粗钢筋试件, 在墩头处局部破坏不起控制作用的情况下, 可在有限元模拟中对钢筋-混凝土界面采用与普通钢筋相同形式的 τ - s 曲线. 当试件破坏模式为混凝土劈裂破坏或剪压破坏时, 可记录包含上升段及下降段的 τ - s 曲线. 对这部分数据进行拟合, 并参考 Xiao 等^[13]的研究, 采

用归一化无量纲参数黏结应力 $\bar{\tau}$ 和滑移 \bar{s} , 建立墩粗钢筋及普通钢筋与 SFRC 间的黏结-滑移本构关系, 如式(2)、(3)^[14-15]所示.

$$\bar{\tau} = \frac{\tau}{\tau_u}, \quad \bar{s} = \frac{s}{s_u} \quad (2)$$

$$\bar{\tau} = \begin{cases} (\bar{s})^a, & \bar{s} \leq 1 \\ \frac{\bar{s}}{b(\bar{s}-1)^2 + \bar{s}}, & \bar{s} > 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: a 和 b 为修正常数, 可通过试验数据进行确定.

式(3)中的计算式分别由 Haraji^[14]和过镇海^[15]基于普通钢筋与普通混凝土拔出试验及混凝土受压全曲线的下降段提出, 通过修正常数 a 和 b , 将其推广至 SFRC 中. 通过对试验数据进行回归分析, 确定本试验中的 $a=0.1$, 而普通混凝土试件的 $a=0.3$ ^[14], 因此 SFRC 试件的 τ - s 曲线上升段较普通混凝土更陡; 常数 b 与 τ - s 曲线下降部分的面积相关, b 值越小, 则峰值后残余承载力及耗散能量越大. 本试验通过回归分析, 将 b 值取为 0.15, 与普通混凝土基本保持同一水平. 试件的黏结-滑移本构关系如图 11 所示. 由图 11 可见: 总体上试件的 $\bar{\tau}$ - \bar{s} 预测曲线与试验曲线拟合良好, 表明式(3)可以适用于 SFRC 与墩粗钢筋及普通钢筋的黏结-滑移过程. 需要指出的是, 受试验组数的限制, 式(3)对不同混凝土强度、钢筋直径和钢筋强度的适用性未得到充分验证, 可针对不同情况对修正常数 a 和 b

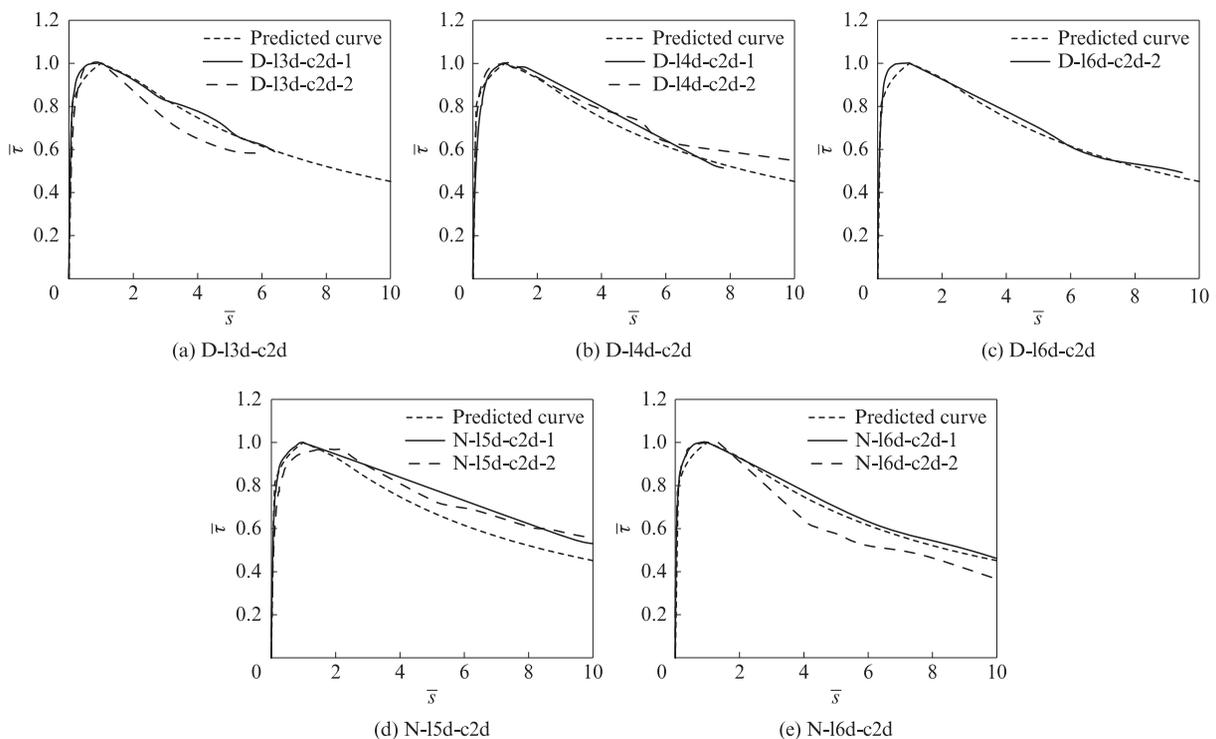


图 11 试件的黏结-滑移本构关系

Fig. 11 Bond-slip constitutive relationship of specimens

进行调整,以便更好地满足实际情况.

5 结论

(1)当黏结长度较小时,普通钢筋试件呈现混凝土劈裂破坏,裂缝由加载端开始逐渐向自由端开展;而墩粗钢筋试件的破坏模式为由墩头处集中的局压应力导致的混凝土局压破坏,裂缝首先出现在自由端,呈现由墩头向外放射的贯穿斜裂缝,周围混凝土形成椎体破坏.墩粗钢筋-SFRC的黏结-滑移曲线与普通钢筋-SFRC基本一致,包括微滑移、裂缝开展、下降和残余阶段.

(2)随着黏结长度的增加,试件的黏结强度降低,大致与黏结长度呈线性关系,且黏结长度对墩粗钢筋试件的影响较普通钢筋试件更加明显.当黏结长度增大时,墩粗钢筋试件和普通钢筋试件的峰值滑移均逐渐减小;当黏结长度较小时,黏结长度的增加对试件的峰值滑移减小的作用更为明显.对于墩粗钢筋试件和普通钢筋试件,当保护层厚度由 $2d$ 增至 $4d$ 时,其黏结强度略微提高,峰值滑移降低,且黏结长度较小时,增大保护层厚度的作用更为明显.

(3)钢筋墩粗处理可提高钢筋与混凝土之间的黏结强度,显著降低峰值滑移,使破坏模式由混凝土劈裂破坏向剪压破坏或钢筋拉断破坏转变.

(4)建立了墩粗钢筋-SFRC的归一化黏结-滑移关系.

参考文献:

- [1] XIAO J Z, SCHNEIDER H, DÖNNECKE C, et al. Wedge splitting test on fracture behaviour of ultra-high strength concrete [J]. Construction and Building Materials, 2004, 18(6):9-15.
- [2] 赵健, 廖霖, 张帆, 等. 钢纤维混凝土弯曲性能和纤维分布试验研究[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(4):838-845.
ZHAO Jian, LIAO Lin, ZHANG Fan, et al. Experimental study on flexural properties and fiber distribution of steel fiber reinforced concrete[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(4):838-845. (in Chinese)
- [3] 侯利军, 刘泓, 徐世焱, 等. 锈蚀钢筋与钢纤维混凝土的黏结性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(7):146-155.
HOU Lijun, LIU Hong, XU Shiliang, et al. Experimental study on bond behavior between corroded rebar and steel fiber reinforced concrete [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(7):146-155. (in Chinese)
- [4] 延潇, 史庆轩, 徐赵东. 钢纤维对混凝土与变形钢筋之间黏结性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(1):45-52.
YAN Xiao, SHI Qingxuan, XU Zhaodong. Experimental study on bond behavior between concrete and deformed steel bar with different steel bar [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(1):45-52. (in Chinese)
- [5] YAZICI S, AREL H S. The effect of steel fiber on the bond between concrete and deformed steel bar in SFRCs [J]. Construction and Building Materials, 2013, 40:299-305.
- [6] MARCHAND P, BABY F, KHADOUR A, et al. Bond behaviour of reinforcing bars in UHPFRC [J]. Materials and Structures, 2016, 49(5):1979-1995.
- [7] 霍文斌, 张阳, 黄龙田, 等. 配筋UHPC湿接缝界面抗弯性能及影响因素[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(3):525-532.
HUO Wenbin, ZHANG Yang, HUANG Longtian, et al. Flexural behavior and influence factors of reinforcement interface of UHPC wet-joint [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(3):525-532. (in Chinese)
- [8] XU W J, MA B, DUAN X Z, et al. Experimental investigation of seismic behavior of UHPC connection between precast columns and footings in bridges[J]. Engineering Structures, 2021, 239:112344.
- [9] 徐文靖, 邵晓东, 马彪, 等. 采用UHPC连接的预制拼装桥墩构造及试验研究[J]. 土木工程学报, 2022, 55(12):105-116, 127.
XU Wenjing, SHAO Xiaodong, MA Biao, et al. Technical and experimental studies of precast bridge piers with the UHPC connection [J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(12):105-116, 127. (in Chinese)
- [10] 刘立新, 王莉荔. 热轧带肋钢筋机械锚固性能的试验研究[J]. 建筑结构, 2009, 39(增刊1):895-898.
LIU Lixin, WANG Lili. Experimental study on bond-anchorage behavior of hot-rolled ribbed bars in concrete with mechanical anchorage measure[J]. Building Structures, 2009, 39(Suppl 1):895-898. (in Chinese)
- [11] 刘立新, 赵镇, 张龔, 等. 带扩大套头钢筋机械锚固性能的试验研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2008, 103(3):103-107.
LIU Lixin, ZHAO Zhen, ZHANG Yan, et al. Experimental study on mechanical anchoring performance of rebar with expanded sleeve[J]. Journal of Zhengzhou University(Engineering Science), 2008, 103(3):103-107. (in Chinese)
- [12] 侍刚, 邵旭东, 高立强, 等. HRB400钢筋与超高性能混凝土粘结性能试验研究[J]. 桥梁建设, 2021, 51(6):7.
SHI Gang, SHAO Xudong, GAO Liqiang, et al. Experimental research on bond performance between HRB400 rebar and ultra-high performance concrete[J]. Bridge Construction, 2021, 51(6):7. (in Chinese)
- [13] XIAO J Z, FALKNER H. Bond behaviour between recycled aggregate concrete and steel rebars[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(2):395-401.
- [14] HARAJI M. Development/splice strength of reinforcing bars embedded in plain and fiber reinforced concrete[J]. ACI Structure Journal, 1994, 91(5):511-520.
- [15] 过镇海. 混凝土的强度和变形:试验基础和本构关系[M]. 北京:清华大学出版社, 1997:31-36
GUO Zhenhai. Strength and deformation of concrete-experimental foundation and constitutive relationship[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997:31-36 (in Chinese)