

吴子东, 何岸, 叶嘉彬. 灌浆缺陷对钢筋套筒动态连接性能的影响[J]. 华南地震, 2023, 43(2): 143–150. [WU Zidong, HE An, YE Jiabin. Influence of Grouting Defects on Dynamic Connection Performance of Steel Sleeve [J]. South China journal of seismology, 2023, 43(2): 143–150]

## 灌浆缺陷对钢筋套筒动态连接性能的影响

吴子东<sup>1</sup>, 何岸<sup>1</sup>, 叶嘉彬<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学土木与交通学院, 广州 510641; 2. 广州机施建设集团有限公司, 广州 510700)

**摘要:** 为了研究灌浆缺陷对钢筋套筒动态连接性能的影响, 对22个带缺陷的钢筋套筒试件进行拉伸试验, 分析缺陷类型、缺陷尺寸、加载速率对钢筋套筒试件连接性能的影响规律。结果表明: 钢筋套筒的连接承载力与缺陷尺寸呈负相关, 其中中部缺陷影响最大, 端部缺陷次之, 厚度缺陷最小; 试件的粘结强度与钢筋的锚固长度 $l$ 呈负相关, 锚固长度每减小0.5 $d$ , 粘结强度平均增大0.9 MPa。试件的粘结强度与加载速率呈正相关, 高速率试件粘结强度平均增大8%; 随着钢筋与灌浆料滑移量的增大, 两者之间的粘结力先增后减, 呈现有规律的变化。最后归纳总结出考虑缺陷类型和加载速率的钢筋套筒粘结强度公式以及试验相关的钢筋与灌浆料的粘结强度-滑移曲线。

**关键词:** 灌浆缺陷; 钢筋套筒连接件; 动态力学性能; 粘结滑移曲线

中图分类号: TU398+.2

文献标志码: A

文章编号: 1001-8662(2023)02-0143-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2023.02.16

## Influence of Grouting Defects on Dynamic Connection Performance of Steel Sleeve

WU Zidong<sup>1</sup>, HE An<sup>1</sup>, YE Jiabin<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering & Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 2. Guangzhou Machinery Construction Group Co., Ltd., Guangzhou 510710, China)

**Abstract:** In order to study the influence of grouting defects on the dynamic connection performance of steel sleeve, tensile tests were conducted on 22 steel sleeve specimens with defects, and the influence of defect types, defect sizes, and loading rates on the connection performance of steel sleeve specimens were analyzed. The results show that there is a negative correlation between the connection bearing capacity of the steel sleeve and the defect size, with the central defect having the greatest impact, the end defect taking the second place, and the thickness defect being the smallest; the bond strength of the specimen is negatively correlated with the anchor length of the reinforcement, which increases by an average of 0.9 MPa for each 0.5  $d$  decrease in the anchor length. The bond strength of the specimen is positively correlated with the loading rate, and the bond strength of the high-speed specimen increases by an average of 8%; with the increase of slip between the reinforcement and the grouting

收稿日期: 2022-12-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(52108143)

作者简介: 吴子东(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事装配式结构的研究。

E-mail: 253014250@qq.com

通信作者: 何岸(1988), 男, 副教授, 主要从事钢-混凝土组合结构、装配式结构的研究。

E-mail: hean@scut.edu.cn

material increases, the cohesive force between the two increases first and then decreases, showing a regular change. Finally, the bond strength formula of steel sleeve considering defect type and loading rate and the bond strength-slip curve of steel bar and grouting material related to the test are summarized.

**Keywords:** Grouting defects; Steel sleeve connector; Dynamic mechanical properties; Bond slip curve

## 0 引言

近些年来,随着可持续发展和绿色发展理念的不断提升,建筑工业化研究有所回暖,装配式建筑越来越受到重视。而装配式中预制构件间的连接技术是关键,主要通过对节点和拼接缝直接的对接形成整体<sup>[1]</sup>。其中灌浆套筒连接技术多用于工程建设中,灌浆套筒连接可完成装配式建筑节点处的拼接,一般的竖向构件分为上下两部分,将套筒预先放置在上部构件中,下部构件预留好锚固钢筋,通过拼接将其对中插入。然后对拼接缝进行封堵,通过入浆孔将高强度的灌浆料灌入,直至出浆口冒出后及时进行封堵,确保灌浆饱满。

灌浆套筒连接技术在装配式建筑中有着至关重要的作用,国内外学者对灌浆套筒连接件的力学性能进行了大量的研究。Hua<sup>[1]</sup>等制作35个钢筋套筒试件进行了拉伸试验,发现典型的失效模式是钢筋拉伸断裂失效、灌浆钢筋粘结失效、灌浆套筒粘结失效和套筒拉伸失效。Haber<sup>[2]</sup>等对市售机械接头套筒试件在不同载荷条件下进行单轴拉伸,发现机械接头显著降低了钢筋的变形能力。Seo<sup>[3]</sup>等设计了一种全新的灌浆套筒并以不同套筒长度作为变量进行了粘结性能试验,结果表明做端头处理的套筒锚固效应显著提升,使得承载力提高。陈海彬等<sup>[4]</sup>对27个足尺钢管混凝土柱灌浆套筒连接试件进行了单向拉伸试验,研究发现灌浆套筒的承载力和粘结强度与灌浆料强度呈正相关。王国庆等<sup>[5]</sup>研究了灌浆套筒在高温下的性能,发现随着温度的升高灌浆套筒的承载能力呈下降的趋势,特别是超过400℃接头的承载力下降得很快。郑清林等<sup>[6]</sup>通过试验发现灌浆缺陷对装配式混凝土柱的影响,主要为降低试件的承载力和延性,导致试件的滞回曲线捏缩效应增强,试件耗能能力下降,加速试件的刚度退化等。陈曦等<sup>[7]</sup>通过试验发现当缺陷率为45%时试件整体呈现出钢筋滑移破坏模式。陈东等通过拉伸试验发现灌浆缺陷会导致缺陷处的钢筋应变减小。

灌浆套筒连接技术作为主要的连接方式,在

施工工艺、质量控制以及对已有套筒产品的连接接头的性能、在售灌浆套筒的质量控制以及性能检测等方面均有较多的研究,而对带缺陷灌浆套筒以及灌浆套筒的动态连接性能的研究则比较少。已有的研究表明缺陷会对连接点造成直接的力学性能影响,然而缺陷具体位置对构件的具体影响尚在研究中。同时装配式钢筋混凝土柱也容易受到爆炸、车辆碰撞等冲击荷载,由于荷载振幅大、荷载持续时间短,这与静力荷载有很大不同。由于应变率效应,灌浆砂浆和钢筋的材料强度均有明显提高。但是由于套筒约束下的灌浆料在动态拉伸载荷作用下的材料动态特性相当复杂,目前静态方法设计的灌浆套筒的破坏模式及相应的粘结承载力理论能否适用尚不清楚。因此,有必要进一步研究灌浆套筒的动态粘结性能。

本文将对带缺陷灌浆套筒的动态连接性能进行试验研究,分析缺陷类型、加载速率等不同参数对灌浆套筒试件连接性能的影响,并总结出相关的承载力理论,为灌浆缺陷对结构力学性能影响的研究和装配式结构抗冲击性能研究提供参考价值。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

根据《钢筋套筒灌浆连接应用技术规程》(JGJ355-2015)和《钢筋机械连接技术规程》(JGJ107-2010),制作20个半灌浆钢筋套筒接头进行试验。试验参数包括缺陷类型和加载速率,其中缺陷类型分为端部缺陷、中部缺陷和厚度缺陷。端部缺陷如图1(a)所示,在套筒灌浆端的端部设置长度为2.5~4d(d为钢筋直径),厚度1mm的灌浆缺陷,长度增量为0.5d;中部缺陷如图1(b)所示,在套筒灌浆端的中部设置长度为2.5~4d,厚度1mm的灌浆缺陷,长度增量为0.5d;厚度缺陷是在中部缺陷的基础上,设置长度为4d,厚度1~3mm的灌浆缺陷,厚度增量为1mm。厚度为1mm的厚度缺陷试件和长度为4d的中部缺陷试件

是同一试件。加载速率分为 5 mm/min 和 1000 mm/min。

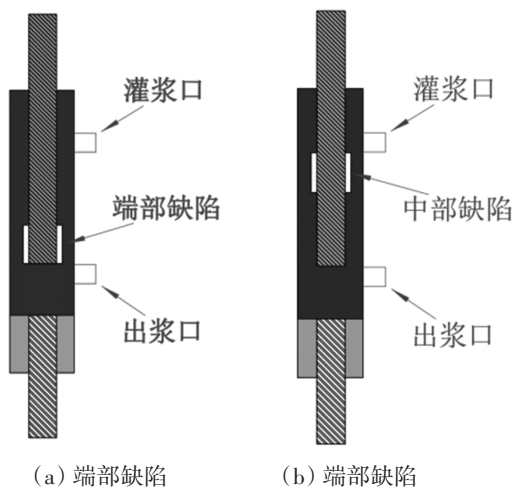


图1 灌浆缺陷设计  
Fig.1 Grouting defect design

1.2 试件制作

半灌浆钢筋套筒试件制作步骤如下：①在灌

浆端钢筋上缠绕橡胶带来设置不同缺陷，见图 2(a)；②将钢筋安装到套筒上并固定在定制の木架上，确保钢筋位于套筒轴心上，见图 2(b)；③制作灌浆料，依个从套筒灌浆口注入灌浆料，待灌浆料从出浆口溢出时用胶塞封口，见图 2(c)；④灌浆完成后将试件放置在标准养护室内养护 28 天，并留置 9 个 40 mm×40 mm×160 mm 试块进行材性试验，见图 2(d)。

1.3 材料性能

钢筋为直径 12 mm 的 HRB400 级带肋钢筋，屈服强度为 410.7 MPa，极限强度为 610.2 MPa，弹性模量为 190 GPa。半灌浆套筒由优质碳素钢制成，长度为 155 mm，外径 38 mm，内径 30 mm。灌浆料试块测得的 1 d、3 d、28 d 抗压强度分别为 55.22 MPa、74.30 MPa、89.12 MPa，灌浆料初始流动度为 342 mm，30 min 流动度为 326 mm，满足《钢筋连接用套筒灌浆料》JG/T408-2019 规定。



图2 试件制作

Fig.2 Test piece fabrication



1.4 试件加载和数据测量

试验采用万能试验机，根据《钢筋套筒灌浆连接应用技术规程》(JGJ355-2015)进行拉伸，加载方式为位移加载，加载速率根据试件分别设为5 mm/min 和 1000 mm/min。记录试件拉伸过程中的施加荷载、拉伸位移、灌浆端钢筋与灌浆料间的滑移，荷载和位移数据由试验机自动读出，滑移由引伸计读出，如图3所示，在钢筋上固定与套筒等直径的钢环，确保引伸计能测量出钢筋与灌浆料间的滑移。

2 试验现象与结果分析

2.1 试验现象与试验结果

试件的破坏形式分为钢筋拉断破坏和钢筋拔出破坏，分别如图4(a)和图4(b)所示。试验时灌浆端钢筋与灌浆料的粘结力随着施加荷载的增大而增大，当试件的极限粘结力比钢筋的极限承载力大时，发生钢筋拉断破坏；当试件的极限粘结力比钢筋的极限承载力小时，发生钢筋拔出破坏，



图3 引伸计设置

Fig.3 Extensometer setting



(a)钢筋拉断破坏



(b)钢筋拔出破坏

图4 试件破坏形式

Fig.4 Failure mode of test piece

钢筋拔出时，会有小部分灌浆料随之一同拔出，呈棱台伞状。

试验结果如表1所示。表中编号DB-2.5 d-5的DB表示端部缺陷，2.5 d表示缺陷长度为2.5 d，5表示加载速率为5 mm/min。ZB表示中部缺陷，HD表示厚度缺陷。ZB-4 d-5与HD-1-5、ZB-4 d-1000与HD-1-1000为相同试件。

除了试件DB-30-5为钢筋拉断破坏，其余试件均为钢筋拔出破坏，表明试件DB-30-5和试件DB-30-1000的极限荷载为钢筋的极限承载力，其余钢筋拔出试件的极限荷载为钢筋与灌浆料的极限粘结力。

相同加载速率下试件的屈服荷载基本相同，约等于该加载速率下钢筋的屈服荷载。

同一缺陷类型的试件，极限承载力均随着缺陷尺寸的增大而减小，缺陷每增大1 d，承载力平均下降4.44 kN。相同缺陷尺寸下，中部缺陷试件比端部缺陷试件的极限承载力小，表明中部缺陷对粘结力的影响更大。厚度缺陷试件的极限承载力随着厚度的成倍增大略微减小，说明厚度缺陷对粘结力的影响较小。同一缺陷下，试件承载力随着加载速率的增大而增大，表明高速率会提高钢筋与灌浆料的粘结强度。

表1 试验结果  
Table 1 Test result

缺陷类型	试件编号	试件屈服荷载/kN	试件极限荷载/kN	破坏形式	粘结强度试验值/MPa	粘结强度计算值/MPa	比值
端部缺陷	DB-2.5 d-5	46.31	68.93	钢筋拉断破坏	27.70	27.55	0.99
	DB-3 d-5	47.12	63.6	钢筋拔出破坏	28.12	28.34	1.01
	DB-3.5 d-5	46.43	59.26	钢筋拔出破坏	29.11	29.14	1.00
	DB-4 d-5	46.77	54.33	钢筋拔出破坏	30.02	29.93	1.00
中部缺陷	ZB-2.5 d-5	45.89	65.01	钢筋拔出破坏	26.13	26.11	1.00
	ZB-3 d-5	46.33	61.26	钢筋拔出破坏	27.08	27.20	1.00
	ZB-3.5 d-5	46.58	57.95	钢筋拔出破坏	28.47	28.28	0.99
	ZB-4 d-5	46.51	52.97	钢筋拔出破坏	29.27	29.36	1.00
厚度缺陷	HD-1-5	46.51	52.97	钢筋拔出破坏	29.27	29.36	1.00
	HD-2-5	46.77	52.01	钢筋拔出破坏	28.74	29.36	1.02
	HD-3-5	45.94	50.74	钢筋拔出破坏	28.04	29.36	1.05
端部缺陷	DB-2.5 d-1000	49.93	75.19	钢筋拔出破坏	30.22	29.76	0.98
	DB-3 d-1000	50.83	69.01	钢筋拔出破坏	30.51	30.62	1.00
	DB-3.5 d-1000	50.55	64.43	钢筋拔出破坏	31.65	31.48	0.99
	DB-4 d-1000	50.56	58.55	钢筋拔出破坏	32.35	32.34	1.00
中部缺陷	ZB-2.5 d-1000	50.63	70.21	钢筋拔出破坏	28.22	28.22	1.00
	ZB-3 d-1000	49.88	66.73	钢筋拔出破坏	29.50	29.38	1.00
	ZB-3.5 d-1000	50.36	63.58	钢筋拔出破坏	31.24	30.55	0.98
	ZB-4 d-1000	50.84	56.93	钢筋拔出破坏	31.46	31.72	1.01
厚度缺陷	HD-1-1000	50.84	56.93	钢筋拔出破坏	31.46	31.72	1.01
	HD-2-1000	51.22	56.17	钢筋拔出破坏	31.04	31.72	1.02
	HD-3-1000	50.34	54.66	钢筋拔出破坏	30.21	31.72	1.05

2.2 荷载—滑移曲线

下图5为低速率试件的荷载—滑移曲线。施加荷载时，灌浆端钢筋的受力情况如图6所示，钢筋受到外部拉力，从而使钢筋与灌浆料界面产生粘结应力 $\tau$ ，根据力的平衡，施加荷载等于钢筋与灌浆料之间的粘结力，滑移为钢筋与灌浆料之间的滑移，因此该曲线可看作粘结力随滑移量增

大的变化。

由图可知：当滑移量很小时，粘结力随着滑移量的增大而急剧增大；当滑移量超过1 mm左右，粘结力增速放缓，慢慢达到峰值；达到峰值后，粘结力缓慢下降，下降曲线近似线性；下降到一定值后，粘结力随着滑移量的增大基本保持不变。各试件的粘结滑移曲线具有较好的相似性。

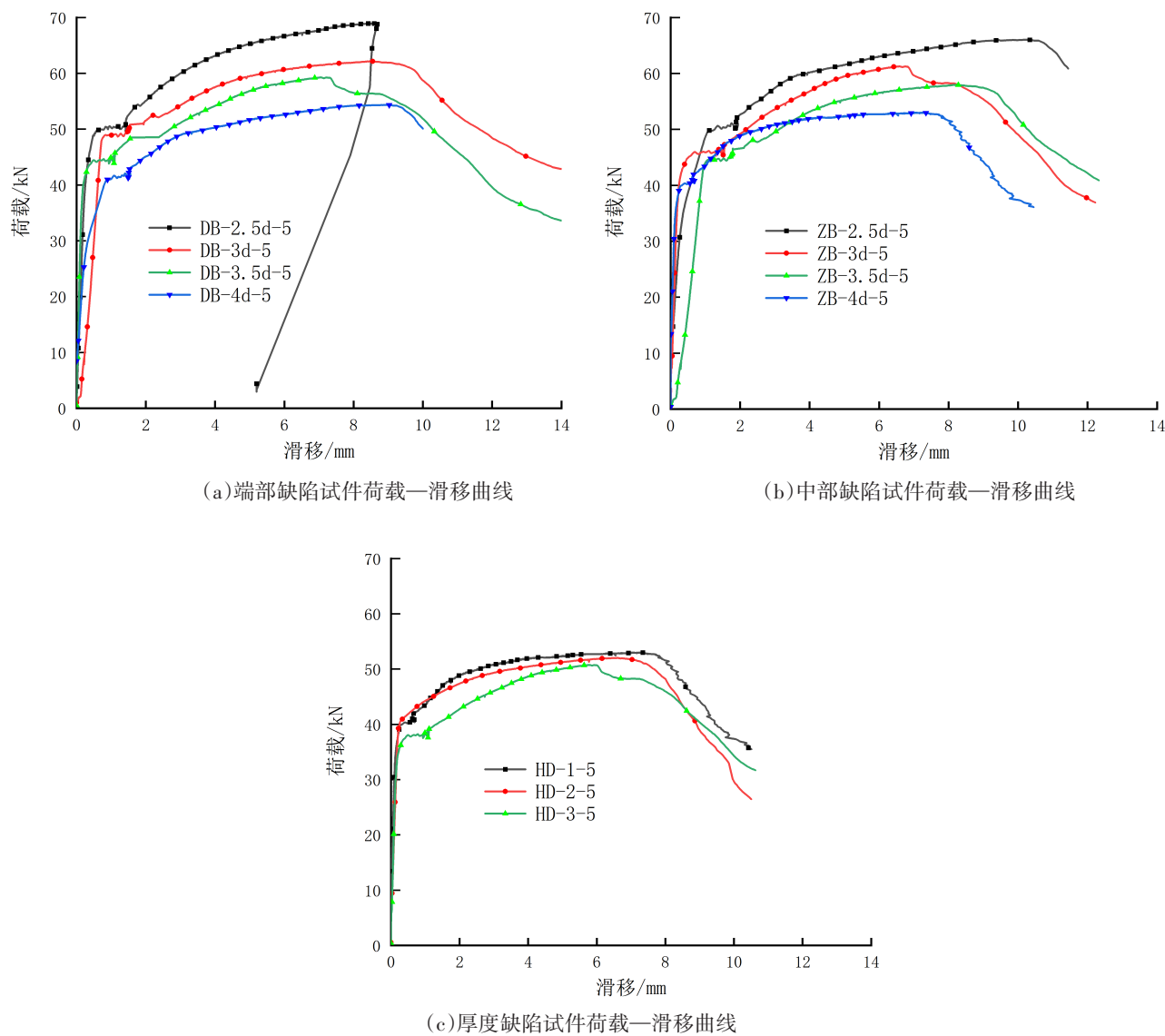


图5 试件荷载—滑移曲线  
Fig.5 Load-slip curve of test piece

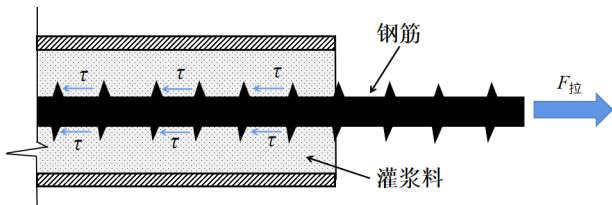


图6 灌浆端钢筋受力示意图  
Fig.6 Schematic diagram of the stress on the reinforcement at the grouting end

3 钢筋套筒灌浆料粘结强度分析

3.1 粘结强度结果

假设粘结强度沿着钢筋长度均匀分布,试件粘结强度 $\tau_u$ 表达式如式(1)所示:

$$\tau_u = \frac{P}{\pi dl} \tag{1}$$

式(1)中: $P$ 为试件极限承载力(kN); $d$ 为钢筋直径(mm); $l$ 为钢筋与灌浆料的锚固长度(mm)。

各试件粘结强度试验结果如表1所示。由表1可知,随着缺陷长度的增大,钢筋的锚固长度减小,粘结强度变大,即试件的粘结强度与钢筋的锚固长度 $l$ 呈负相关,锚固长度每减小0.5  $d$ ,粘结强度平均增大0.9 MPa。试件的粘结强度与加载速率呈正相关,高速率试件粘结强度平均增大8%。

3.2 粘结承载力计算公式

套筒对灌浆料的约束力限制了灌浆料的劈裂破坏,从而增强了钢筋套筒的承载力,Ahn<sup>[8]</sup>等采用套筒约束强度的平方根考虑该增强作用并且给出了约束强度的计算方法,见式(2)。

$$f_n = 56 - 5.7(l/d) - 0.15f_c \tag{2}$$

式(2)中: $f_n$ 为套筒对灌浆料的径向约束力(MPa); $l$ 为钢筋的锚固长度(mm); $d$ 为钢筋直径(mm); $f_c$ 为灌浆料的抗压强度(MPa)。

对于灌浆料强度,国内外普遍采用灌浆料强度的平方根来考虑其对粘结力的影响。由前文可知试件的粘结强度与钢筋的锚固长度 $l$ 呈负相关。通过拟合分析表3数据建立钢筋套筒的粘结强度 $\tau_u$ 计算方法见式(3)和式(4),该式考虑了套筒约束强度、灌浆料强度、钢筋的锚固长度以及缺陷类型。

端部荷载:  $\tau_u = 0.42\sqrt{f_n}\sqrt{f_c}(2.74 + 0.01l)$  (3)

中部荷载:  $\tau_u = 0.57\sqrt{f_n}\sqrt{f_c}(2.11 + 0.01l)$  (4)

上式中:各参数含义同前。

以上公式均只考虑荷载为准静态的情况。试验结果表明,粘结强度与加载速率呈正相关,而研究表明<sup>[10]</sup>,这是因为材料的强度与加载速率有关,因此式(2)、(3)、(4)中的灌浆料强度 $f_c$ 也与加载速率有关。灌浆料的动力提高系数与应变率的关系参考闫东明<sup>[9]</sup>的试验结论:

$$\frac{f}{f_c} = 1.0 + \alpha \lg\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s}\right) \tag{5}$$

式(5)中: $f$ 与 $f_c$ 分别为动态抗压强度和准静态抗压强度; $\dot{\varepsilon}$ 为动态应变率; $\dot{\varepsilon}_s$ 为准静态应变率; $\alpha$ 为材料性质相关参数,根据试验结果拟合分析得 $\alpha$ 为0.035。

结合式(3)、(4)、(5)可得考虑荷载速率的钢筋套筒粘结强度 $\tau_{u,0}$ 表达式见式(6)和(7), $R^2$ 为0.92。公式的粘结强度计算结果以及与试验结果的比值如表1所示。

端部荷载:  $\tau_{u,0} = 0.42\sqrt{f_n}\sqrt{f}(2.74 + 0.01l)$  (6)

中部荷载:  $\tau_{u,0} = 0.57\sqrt{f_n}\sqrt{f}(2.11 + 0.01l)$  (7)

3.3 粘结强度—滑移曲线

根据试验的荷载—滑移曲线得出简化的钢筋与灌浆料的粘结强度—滑移曲线如图7所示,各特征点均取试验结果平均值,具体取值见表2,其中粘结强度峰值根据式(6)和(7)得出。

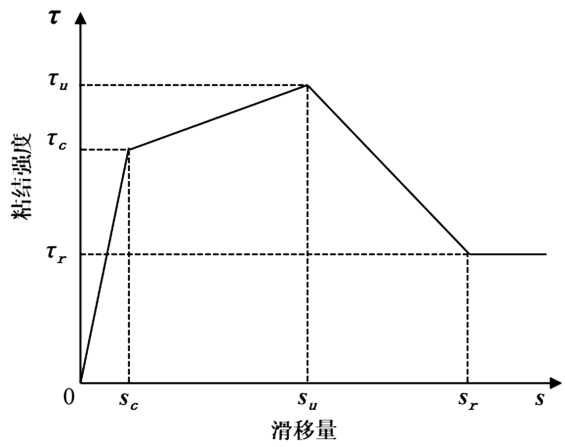


图7 粘结强度—滑移曲线  
Fig.7 Bond strength-slip curve

线性段( $0 \leq s \leq s_c$ )  $\tau = k_1 s$  (8)

劈裂段( $s_c < s \leq s_u$ )  $\tau = \tau_c + k_2(s - s_c)$  (9)

下降段( $s_u < s \leq s_r$ )  $\tau = \tau_u + k_3(s - s_u)$  (10)

残余段 ( $s > s_r$ )  $\tau = \tau_r$  (11)

式中: $k_1$ 为线性段斜率,  $\tau_u/s_c$ ;  
 $k_2$ 为劈裂段斜率,  $(\tau_u - \tau_c)/(s_u - s_c)$ ;  
 $k_3$ 为下降段斜率,  $(\tau_r - \tau_u)/(s_r - s_u)$ ;  
 $\tau$ 为粘结强度(MPa);  
 $s$ 为相对滑移(mm)。

表2 粘结强度—滑移曲线参数取值  
Table 2 Parameter value of bond strength-slip curve

特征点	$S_c$	$S_u$	$S_r$	$\tau_c$	$\tau_r$
参数值	0.6 d	0.62 d	0.98 d	0.78 $\tau_u$	0.46 $\tau_u$

## 4 结论

本文通过对22个带缺陷的钢筋套筒试件进行拉伸试验,分析缺陷类型、缺陷尺寸、加载速率对钢筋套筒试件连接性能的影响,得出以下结论:

(1)所钢筋套筒的连接承载力与缺陷尺寸呈负相关,缺陷每增大1d,承载力平均下降4.44 kN;其中中部缺陷影响最大,端部缺陷次之,厚度缺陷最小。

(2)钢筋套筒的粘结强度与钢筋的锚固长度 $l$ 呈负相关,锚固长度每减小0.5d,粘结强度平均增大0.9 MPa。试件的粘结强度与加载速率呈正相关,高速率试件粘结强度平均增大8%。

(3)随着钢筋与灌浆料滑移量的增大,两者之间的粘结力先增后减,呈现有规律的变化,各试件的粘结滑移曲线具有较好的相似性。

(4)归纳总结出同时考虑缺陷类型和加载速率的钢筋套筒粘结强度公式,代入试验数据与试验结果方差 $R^2$ 为0.97,并根据试验的荷载—滑移曲线总结出相关的钢筋与灌浆料的粘结强度—滑移曲线。

## 参考文献

- [1] Ling J H, Rahman A B A, Ibrahim I S. Feasibility study of grouted splice connector under tensile load[J]. Construction and Building Materials, 2014(50):530–539.
- [2] Haber Z B, Saudi M S, Sanders D H. Behavior and simplified modeling of mechanical reinforcing bar splices[J]. ACI Structural Journal, 2015, 112(2):179.
- [3] Seo S Y, Nam B R, Kim S K. Tensile strength of the grout-filled head-splice-sleeve[J]. Construction and building materials, 2016(124):155–166.
- [4] 陈海彬,武立伟. 苏幼坡钢管灌浆套筒连接受拉性能的试验研究[J]. 世界地震工程, 2016, 32(2):18–24.
- [5] 王国庆. 钢筋套筒灌浆连接高温性能试验研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2017.
- [6] 郑清林,王霓,陶里,等. 灌浆套筒力学性能影响因素分类及其机理分析[J]. 四川建筑科学研究, 2017, 43(3):5–9.
- [7] 陈曦,苗启松,杨参天,等. 缺陷可检修型半灌浆套筒连接拉伸性能试验研究[J]. 工程力学, 2020, 37(9):199.
- [8] Ahn B I, Kim H K, Park B M. Confining effect of mortar grouted splice sleeve on reinforcing bar[J]. Journal of the Korea Concrete Institute, 2003, 15(1):102–109.
- [9] 闫东明,林皋,王哲,等. 不同应变速率下混凝土直接拉伸试验研究[J]. 土木工程学报, 2005(06):97–103.