

钢筋镦粗半灌浆套筒黏结性能试验

刘宏波^{1,2}, 叶晓旭¹, 魏鲁彬¹, 汪凯柄¹, 杨奥齐¹

(1. 河北建筑工程学院 土木工程学院, 河北 张家口 075000;
2. 河北省土木工程诊断、改造与抗灾重点实验室, 河北 张家口 075000)

摘要:为增强钢筋-灌浆料界面的黏结强度,提升灌浆套筒的连接性能,提出1种钢筋镦粗后伸入半灌浆套筒锚固端的连接方式。通过进行12个试件的单调轴向拉伸试验,研究不同镦头长度、锚固长度对钢筋-灌浆料界面黏结性能的影响。结果表明:1)锚固长度一定时,镦头长度为2 cm的镦粗钢筋与灌浆料的极限黏结强度相比普通试件提升11.0%~12.1%,但界面的黏结强度会随镦头长度的增加而降低;2)界面的黏结强度与锚固长度呈明显的负线性相关,且对普通试件的影响较镦粗试件更加明显;3)界面极限黏结力相同时,普通钢筋锚固长度为 $4d$ (d 为钢筋公称直径),镦粗钢筋锚固长度仅需 $3d$ 。本文成果可为灌浆套筒连接的设计优化提供一定的借鉴与参考。

关键词:黏结性能; 镦粗钢筋; 灌浆套筒

中图分类号:TU375

文献标识码:A

文章编号:1673-8993(2024)11-0015-07

doi:10.13402/j.gcjs.2024.11.143

Bond performance test of steel bar upsetting semi-grouting sleeve

LIU Hongbo^{1,2}, YE Xiaoxu¹, WEI Lubin¹, WANG Kaibing¹, YANG Aoqi¹

(1. School of Civil Engineering, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou 075000, Hebei, China;
2. Hebei Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Diagnosis, Reconstruction and Disaster Resistance, Zhangjiakou 075000, Hebei, China)

Abstract: In order to enhance the bond strength of the interface between steel bar and grouting material and improve the connection performance of the grouting sleeve, one connection method extending into the anchor end of the semi-grouting sleeve after the steel bar is upset is proposed. The monotonic axial tensile test of 12 specimens is carried out to study the effects of different upsetting lengths and anchorage lengths on the bonding properties of the rebar-grouting interface. The results show that: 1) When the anchorage length is constant, the ultimate bonding strength of the upsetting steel bar with an upsetting length of 2 cm and the grouting material is increased by 11.0%~12.1% compared with the ordinary specimens, but the bonding strength of the interface is decreased with the increase of the upsetting length. 2) The bonding strength of the interface is obviously negatively linearly correlated with the anchorage length, and the influence on the ordinary specimen is more obvious than that of the upsetting specimen. 3) When the ultimate cohesion force of the interface is the same, the anchorage length of the ordinary steel bar is $4d$ (d is the nominal diameter of the steel bar), and the anchorage length of the upsetting steel bar is only $3d$. The results can provide some references for the design optimization of grouting sleeve connection.

Key words: adhesion property; upsetting steel bar; grouting sleeve

收稿日期: 2024-04-01

基金项目: 河北省高校2022年基本科研业务费项目(2022CXTD01); 河北建筑工程学院博士基金资助项目(B-202103);
2024年度校级研究生创新基金资助项目(XY2024007); 河北建筑工程学院研究生创新基金项目(XY2025042)

作者简介: 刘宏波(1977—),男,副教授,博士,从事建筑结构、结构抗震方面的研究。

通信作者: 叶晓旭(1999—),男,硕士研究生,从事建筑结构方面的研究。

确保构件之间的连接性能和整体稳定性是当前装配式混凝土房屋建造中的关键问题^[1]。由于装配式结构的连接部位较小、操作空间有限,传统机械连接方式不便于施工,目前在实际施工过程中普遍采用灌浆套筒连接方式^[2]。

灌浆套筒力学性能的影响因素可分为套筒、灌浆料、钢筋 3 个部分^[3]。肖建庄等^[4]认为,三者之间存在两个黏结界面,即套筒与灌浆料之间的黏结界面,灌浆料与钢筋之间的黏结界面。界面的黏结强度直接影响灌浆套筒的连接性能与整体性,其具体影响表现为灌浆套筒的受拉承载力由两类界面的黏结承载力、钢筋受拉承载力的最小值所决定。为提升界面之间的黏结强度,学者们开发了各式各样的新型套筒。对于套筒与灌浆料黏结界面,SAYADI 等^[5]通过在套筒表面打入螺栓,研究螺栓数量与螺栓位置对新型套筒连接性能的影响,发现螺栓出现在套筒非弹性阶段时会提升界面的黏结强度;诸钧政^[6]通过在套筒表面打孔并插入销钉,进行单向拉伸和反复拉压试验,发现销钉集中布置在套筒两端可有效提高套筒与灌浆料的机械咬合作用。对于灌浆料与钢筋黏结界面,RAHMAN 等^[7]通过在锚固钢筋末端设置螺纹并套上锥形螺母,研究锥形螺母及其倾角对套筒连接性能的影响,发现带有锥形螺母的钢筋与灌浆料之间具有更高的黏结强度,该连接方式能够减小锚固长度以提供结构的连续性;SEO 等^[8]通过在钢筋上设置端头,进行轴向拉伸试验,发现端头的存在明显增强了钢筋与灌浆料之间的黏结作用;朱高岩等^[9]通过有限元模拟发现,在锚固钢筋中部设置锚固板可以提升钢筋-灌浆料之间的黏结强度。

如前所述,国内外学者从增强不同界面黏结作用的角度开展了各种新型灌浆套筒连接方式的研究。但是这些措施受套筒与钢筋加工工艺难易程度影响,实施困难,经济性指标不高,存在较多缺点。相比于此,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^[10],增强结构的安全裕度。为此,本文提出将钢筋墩粗作为半灌浆套筒锚固钢筋的连接方式,研究钢筋墩粗对钢筋-灌浆料界面黏结强度的影响,以期对灌浆套筒连接

的设计优化提供一定的借鉴。

1 试验概况

1.1 试件设计与制作

在实际工程中,灌浆套筒接头外钢筋发生断裂可被接受,视为可靠,钢筋锚固长度往往不小于 $8d$ (d 为钢筋公称直径, mm)。为获得钢筋墩粗后与灌浆料之间的极限黏结强度、探究钢筋墩粗对黏结强度的贡献,需使界面极限黏结力小于钢筋受拉承载力,确保钢筋发生拔出破坏。若发生套筒外钢筋拉断破坏,仅可得知黏结强度大于钢筋受拉承载力,无法得出具体黏结强度的数值。因此设置钢筋锚固长度为 $3d$ 、 $4d$, 试验所用钢筋直径均为 20 mm。锚固钢筋墩粗后端头直径均为 24 mm, 墩头长度分为 2.0、2.5、3.0 cm。

设计 12 个半灌浆套筒试件,试验参数为有无墩头,墩头长度,锚固长度。具体参数如表 1 所示,试件编号中 PT 为普通钢筋;DT 为墩粗钢筋; d 后的数字为墩头长度, cm;“-”后的数字为编次。

试件制作步骤如下。

(1) 套筒固定:将钢筋按照锚固长度伸入套筒内,并用橡胶塞在底部封口;调整位置保证套筒与钢筋竖向垂直对中。

(2) 灌浆:采用水泥胶砂搅拌机搅拌 3~4 min,然后静置 2 min。待气泡全部析出,将搅拌均匀的灌浆料倒入灌浆枪内,由下方灌浆口匀速灌入,待上方出浆口出浆时,迅速用橡胶塞封堵。全部套筒应在 30 min 内完成灌浆,以防止灌浆料流动性变差。

(3) 养护:灌浆完成后放入标准养护室进行养护,转移过程应水平缓慢,防止浆体扰动。

1.2 材料性能

1.2.1 套筒型号

采用型号为 GTJB4-20/20 的钢制半灌浆套筒,如图 1 所示。其中: M 为螺纹直径, mm; D 为外径, mm; d 为内径, mm; L 为套筒长度, mm; L_1 为灌浆孔位置, mm; L_2 为出浆孔位置, mm; L_3 为钢筋连接螺纹长度, mm。套筒参数如表 2 所示。套筒内部有横向平行排列的沟槽,能增强灌浆料与铸铁接触面的机械黏合力,保证其受力稳定与性能满足要求。

表 1 试件参数

组别	试件编号	锚固长度/mm	镦头长度/cm	钢筋直径/mm	镦头直径/mm
A	PT3d-1	60	0	20	0
	PT3d-2	60	0	20	0
	PT3d-3	60	0	20	0
B	DT3d2-1	60	2.0	20	24
	DT3d2-2	60	2.0	20	24
C	DT3d2.5-1	60	2.5	20	24
	DT3d2.5-2	60	2.5	20	24
D	DT3d3-1	60	3.0	20	24
	DT3d3-2	60	3.0	20	24
E	PT4d	80	4.0	20	0
F	DT4d2-1	80	2.5	20	24
	DT4d2-2	80	2.5	20	24

表 2 半灌浆套筒参数

连接钢筋 直径/mm	螺纹直 径/mm	牙型 角/(°)	外径/ mm	内径/ mm	套筒长 度/mm	灌浆孔 位置/mm	出浆孔 位置/mm	钢筋连 接螺纹 长度/mm	钢筋插入限值/mm		套筒净 重/kg
									下限	上限	
20	M20.6×2.5	60	45	33.3	210	30	162	28	160	170	1

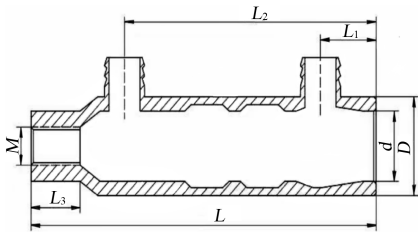


图 1 半灌浆套筒

1.2.2 钢筋性能

钢筋牌号为 HRB400，长度为 250 mm，直径为 20 mm。随机抽取同批次 3 根进行拉拔试验。试验测得该钢筋平均屈服强度为 484.4 MPa，平均极限抗拉强度为 667.3 MPa。钢筋的屈服强度和极限抗拉强度符合《钢筋机械连接技术规程》(JGJ 107—2016)的要求。

1.2.3 灌浆料性能

采用 CGM 钢筋连接用套筒灌浆料，具有高强早强、无收缩、流动性能好等优点。试验测试参照《钢筋连接用套筒灌浆料》(JG/T 408—2019)，留置 40 mm×40 mm×160 mm 棱柱体试块，每组 3 个试块。试块的抗折试验与抗压试验均在标准室温下进行。试验分别测试灌浆料在 1、3、28 d 的抗折、抗压强度，结果如表 3 所示。

表 3 灌浆料性能

类型	水胶比	龄期/d	抗折强度/MPa	抗压强度/MPa
高强灌浆料	0.11	1	11.5	60.4
		3	13.6	70.0
		28	14.9	89.5

1.3 加载方案

采用 WAW-2000D 微机控制电液伺服万能试验机进行加载，如图 2 所示。设备上下有钳口，试验时将机械连接端钢筋夹于上钳口，锚固端钢筋夹于下钳口。上下钳口分别起到固定试件和升降控制作用，装夹试件时应垂直安装，保证试件与机器的中心线重合。试验采取单项拉伸加载制度，采用位移控制的方式加载，万能试验机的夹头分离速率为 10 mm/min。

2 试验结果与分析

2.1 试验现象及破坏形式

试验的主要结果如表 4 所示。试件均发生黏结滑移破坏，且钢筋未屈服。加载初期无明显变化，之后听到钢筋与灌浆料之间有明显的错动声。当钢筋-灌浆料界面黏结力小于外荷载时，钢筋

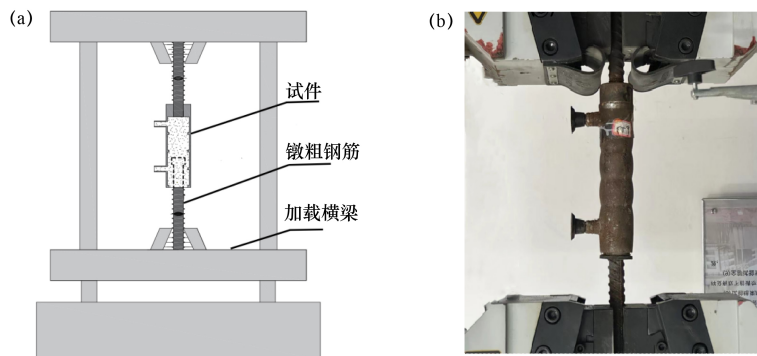


图 2 试验加载装置

表 4 试验结果

组别	试件编号	极限黏结力/kN	极限强度/MPa	极限黏结强度/MPa	极限位移/mm	破坏形式
A	PT3d-1	95.8	302.73	25.42	10.71	钢筋拔出
	PT3d-2	100.3	311.95	26.62	11.16	钢筋拔出
	PT3d-3	102.7	320.53	27.26	13.65	钢筋拔出
B	DT3d2-1	106.4	328.74	28.24	12.02	钢筋拔出
	DT3d2-2	106.1	327.80	28.16	11.98	钢筋拔出
C	DT3d2.5-1	87.1	275.24	23.16	10.65	钢筋拔出
	DT3d2.5-2	91.7	289.77	24.34	12.47	钢筋拔出
D	DT3d3-1	89.6	283.14	23.78	11.71	钢筋拔出
	DT3d3-2	84.4	267.34	22.40	10.95	钢筋拔出
E	PT4d	106.7	337.17	21.24	14.50	钢筋拔出
F	DT4d2-1	124.6	393.02	24.80	16.39	钢筋拔出
	DT4d2-2	118.0	372.89	23.49	15.74	钢筋拔出

在钢筋套筒内发生滑移，随之钢筋拔出。观察破坏后的试件，灌浆料被钢筋带出且呈圆锥体破坏，同时随着钢筋被拉出套筒外，部分灌浆料的碎渣会被带出。当钢筋被全部拉出到套筒外时，对于普通钢筋而言，滑移面较为光滑，截面呈较规则圆形并伴有明显的裂纹。对于镦粗钢筋而言，由于镦头处钢

筋直径发生变化，滑移面较为粗糙呈不规则形状，并伴有细小裂纹，破坏形态如图 3 所示。

2.2 荷载-滑移曲线

典型钢筋未屈服拔出试件的荷载滑移曲线如图 4 所示。由图 4 可知：试件的荷载滑移曲线分为两个阶段。其中，第一阶段为弹性阶段，加载初

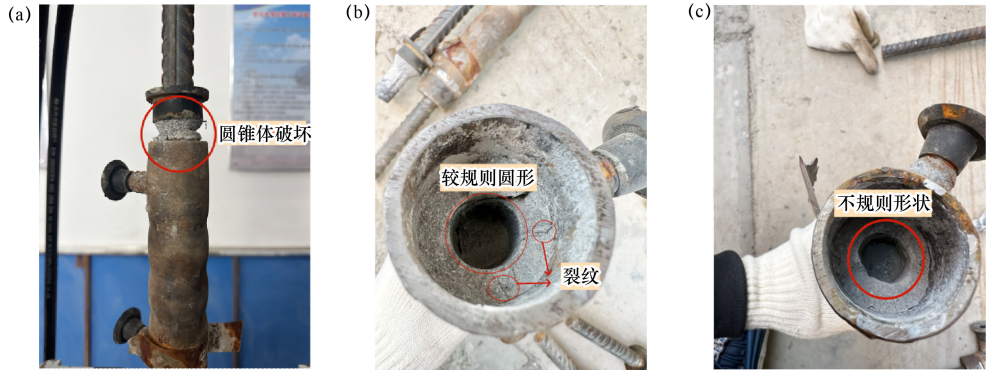


图 3 破坏形态

期荷载滑移曲线呈线性发展趋势, 图线近似为一条直线, 黏结力随滑移量增大而增大。此阶段试件的黏结应力首先由界面的胶结力提供, 随后钢筋镢头及钢筋与灌浆料间的机械咬合力发挥作用, 线斜率逐渐增加。第二阶段为锚固端钢筋拔出破坏阶段, 随着荷载的继续增加, 曲线迅速下降。由于钢筋-灌浆料界面的黏结作用小于灌浆套筒连接件的屈服强度, 钢筋在进入屈服阶段前与灌浆料发生滑移直至拔出破坏。此阶段界面的黏结作用主要依靠钢筋与灌浆料之间的摩阻力。

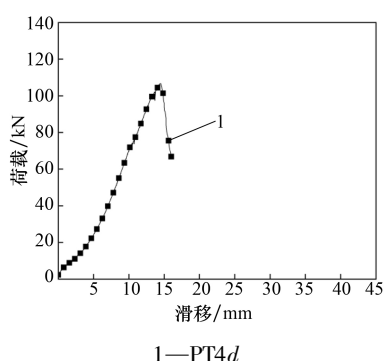


图4 荷载-滑移曲线

2.2.1 不同镢头长度试件

图5(a)为锚固长度为3d情况下试件的荷载-滑移曲线。由图5(a)可知: 普通锚固钢筋试件的极限黏结力为95.8 kN, 极限位移为10.71 mm。镢头长度为2.0 cm试件的极限黏结力为106.4 kN, 极限位移为12.02 mm, 相比普通锚固钢筋构件黏结力与极限位移分别提升10.5%与12.2%。表明镢头长度为2.0 cm灌浆套筒的黏结力与连接性能有所增强。镢头长度分别为2.5、3.0 cm试件的极限黏结力相比普通锚固钢筋构件黏结力有所降低, 但极限位移有所增加。表明镢头长度为2.5、3.0 cm的钢

筋并不能增加与灌浆料之间的黏结强度, 但与普通构件相比仍表现出更好的变形能力。

图5(b)为锚固长度为4d情况下试件的荷载-滑移曲线。由图5(b)可知: 普通锚固钢筋构件的极限黏结力为106.7 kN。镢头长度为2.0 cm试件的极限黏结力为124.6 kN, 极限位移为16.39 mm, 相比普通锚固钢筋构件分别提升14.9%与13.0%。表明在4d锚固长度下, 镢头长度为2.0 cm钢筋与灌浆料的黏结力有较大提升。

2.2.2 不同锚固长度试件

图6为不同锚固长度试件的荷载-滑移曲线。由图6可知: 随着锚固长度的增加, 钢筋与灌浆料之间的黏结力增强。对于普通锚固钢筋构件而言, 4d锚固长度试件的极限黏结力与极限位移相比3d锚固长度试件分别提升11.4%与29.9%。对于镢头长度为2.0 cm的试件而言, 4d锚固长度下的极限承载力与极限位移相比3d锚固长度均有较大的提升。锚固长度为4d时的普通钢筋极限黏结力为106.7 kN, 镢头长度为2.0 cm的镢粗钢筋在锚固长度为3d时的极限黏结力即可达到106.4 kN, 两者基本相等。

2.3 黏结强度分析

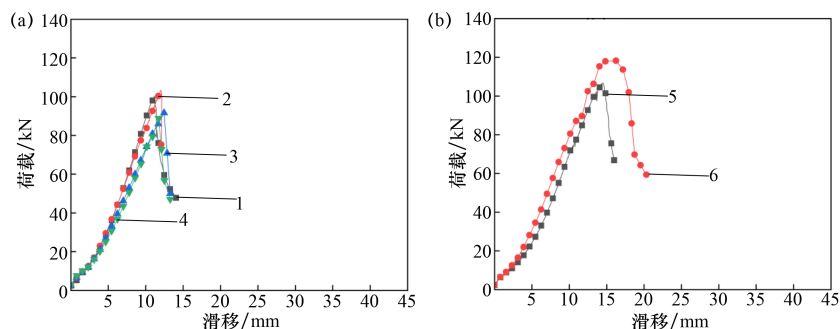
钢筋-灌浆料界面的极限黏结强度由式(1)计算得出。

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

式中: τ_u 为极限黏结强度, MPa; P_u 为极限黏结力, kN; d 为钢筋直径, mm; l 为锚固长度, mm。

2.3.1 钢筋镢粗处理

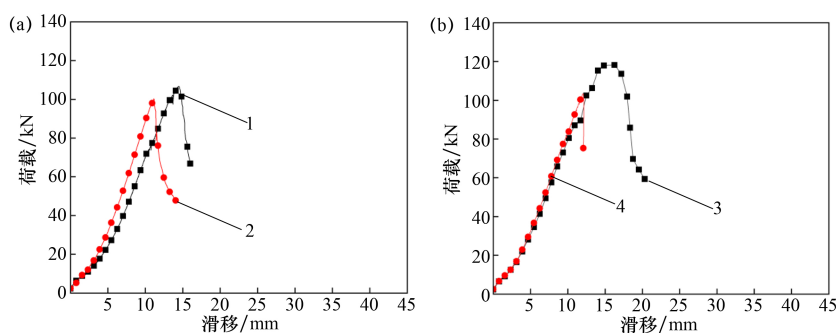
图7为镢头长度为2 cm的钢筋对界面黏结强



锚固长度: (a) 3d; (b) 4d

1—PT3d-1; 2—DT3d2-1; 3—DT3d2.5-2; 4—DT3d3-1; 5—PT4d; 6—DT4d2-1。

图5 不同镢头长度试件的荷载-滑移曲线

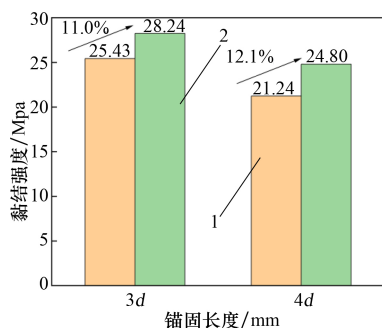


(a) 普通钢筋; (b) 镦粗钢筋

1—PT4d; 2—PT3d-1; 3—DT4d-1; 4—DT3d-1。

图 6 不同锚固长度试件的荷载-滑移曲线

度的影响。由图 7 可知:钢筋镦粗处理后,镦头长度为 2.0 cm 的镦粗钢筋与灌浆料的黏结强度显著提升。在锚固长度为 3d 情况下,镦粗后界面的黏结强度从 25.43 MPa 提升到 28.24 MPa,增加了 11.0%。在锚固长度为 4d 情况下,镦粗后界面的黏结强度从 21.24 MPa 提升到 24.80 MPa,增加了 12.1%。



1—普通试件; 2—镦头长度 2.0 cm 试件。

图 7 钢筋镦粗对镦头长度为 2.0 cm 的试件黏结强度的影响

图 8 为不同镦头长度的钢筋对界面黏结强度的影响。由图 8 可知:界面的黏结强度会随镦头长度的增加而降低,且镦头长度为 2.5、3.0 cm 钢筋的黏结强度低于普通钢筋的黏结强度。

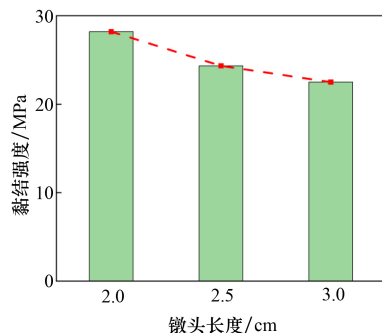
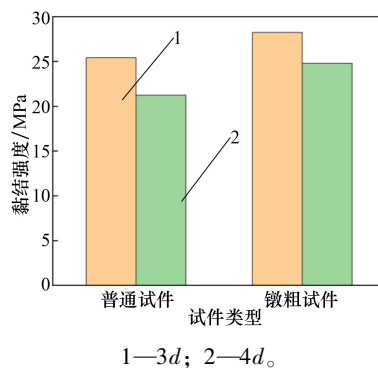


图 8 钢筋镦粗对不同镦头长度试件黏结强度的影响

2.3.2 钢筋锚固长度

界面的黏结强度随锚固长度的关系如图 9 所示。由图 9 可知:界面的黏结强度与锚固长度呈明显的负线性相关。这是由于当锚固长度较小时,黏结应力集中在一定范围内,高应力区相对较大,黏结应力分布更为均匀;当锚固长度增加时,黏结应力存在范围增大,高应力区所占比例减小,黏结应力分布相差较大,使得锚固段的平均黏结强度减小。锚固长度对普通试件黏结强度的影响较镦粗试件更加明显。这是由于镦粗钢筋在镦头处发生直径变化,增加了与灌浆料间的机械咬合力,产生了较强的黏结作用,从而削弱了锚固长度对其黏结强度的影响。镦粗钢筋锚固长度为 4d 试件的黏结强度基本可达到普通钢筋锚固长度为 3d 试件的黏结强度,两者仅相差 0.64%。



1—3d; 2—4d。

图 9 锚固长度对试件黏结强度的影响

3 结 论

(1) 锚固长度一定时,镦头长度为 2.0 cm 试件的极限黏结力、极限位移相比普通试件分别提升 10.5%~14.9% 与 12.2%~13.0%,钢筋-灌浆料界面的极限黏结强度相比普通试件提升 11.0%~

12.1%。界面的黏结强度会随镦头长度的增加而降低,镦头长度为 2.5、3.0 cm 的黏结强度低于普通钢筋的黏结强度。

(2) 随着锚固长度的增加,界面的黏结强度与锚固长度呈明显的负线性相关,且锚固长度对普通试件黏结强度的影响较镦粗试件更加明显,这是由于镦粗钢筋在镦头处有较强的黏结作用。

(3) 镦粗钢筋锚固长度为 $4d$ 试件的黏结强度基本可达到普通钢筋锚固长度为 $3d$ 试件的黏结强度,两者仅相差 0.64%。界面黏结力相同时,普通钢筋锚固长度为 $4d$,而镦粗钢筋锚固长度只需 $3d$ 。

参考文献:

- [1] 李宪军,邓美林,何廷树. 装配式建筑套筒灌浆连接系统膨胀约束关键技术研究[J]. 建筑结构,2021,51(9):43-48.
- [2] 高向玲,李梓桀. 灌浆套筒连接中高强钢筋锚固长度研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2019,47(8):60-64.
- [3] 刘良林,肖建庄. 钢筋套筒灌浆连接研究进展[J]. 建筑结构学报,2023,44(1):235-247.
- [4] 肖建庄,刘良林,李建新,等. 套筒灌浆连接受拉性能回顾与分析[J]. 结构工程师,2020,36(1):1-9.
- [5] SAYADI A A, RAHMAN A B, SAYADI A, et al. Effective of elastic and inelastic zone on behavior of glass fiber reinforced polymer splice sleeve [J]. Construction and Building Materials, 2015, 80: 38-47.
- [6] 诸钧政. 新型销钉-UHPC 灌浆组合套筒连接性能试验与理论研究[D]. 南京:东南大学,2019.
- [7] RAHMAN A B A, YOON L H, IBRAHIM I S, et al. Performance of grouted splice sleeves with tapered bars under axial tension [J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 789: 1176-1180.
- [8] 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.
- [9] 朱高岩,王丽娟,夏文传,等. 带锚固板半灌浆套筒拉伸性能数值分析[J]. 铁道标准设计,2024,68(2):100-107.
- [10] 陈子璇,李新星,肖建庄,等. 墩粗钢筋在高强钢纤维混凝土中的黏结锚固性能[J]. 建筑材料学报,2023,26(9):1003-1010.