

灌浆不足对钢筋套筒连接力学性能影响试验

匡志平, 郑冠雨, 焦雪涛

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 基于已有钢筋套筒灌浆连接的研究成果,通过人为控制灌浆料含量,模拟实际工程中灌浆不足的缺陷,进行套筒连接的静力下单向拉伸试验,研究不同灌浆料含量对静力下钢筋套筒灌浆连接的力学性能、变形性能的影响;进行滞回受力下的高应力反复拉压试验和大变形反复拉压试验,研究不同灌浆料含量对钢筋套筒灌浆连接抗震性能的影响. 试验考虑灌浆料含量为影响因素,以钢筋上表面灌浆料的覆盖厚度为变量反映水平连接的灌浆料含量,以上侧钢筋在灌浆料中的锚固长度为变量反映竖向连接的灌浆料含量. 试验结果表明,钢筋套筒灌浆连接的破坏模式包括钢筋拔出和钢筋拉断,主要取决于钢筋与灌浆料间黏结承载力与钢筋抗拉承载力的相对大小,黏结承载力主要受灌浆料含量的影响.

关键词: 钢筋套筒灌浆连接; 灌浆不足; 单调拉伸; 高应力反复拉压; 大变形反复拉压

中图分类号: TU375; TU317.1

文献标志码: A

Experimental Study on Effect of Mechanical Behavior of Grout Sleeve Splicing for Reinforced Bars Due to Lack of Grout

KUANG Zhiping, ZHENG Guanyu, JIAO Xuetao

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on existing research results on grout sleeve splicing for reinforced bars, insufficient grouting defects in actual projects were simulated by controlling artificially the content of grout. Monotonic tension tests were carried to study the performance of mechanical properties and deformation. High-stress reversed tension and compression test and large-deformation reversed tension and compression test were carried to study the mechanical performance under minor and major earthquakes respectively. The content of grout was the only influencing factor in the test. The thickness of grout above the bar reflected the level of the grout content in horizontal connection, the upper steel's

anchorage length reflected grout content in vertical connection. The test results show that two categories of failure pattern might happen, pullout or fracture of the bar, which was decided by the bond capacity, between the bar and the grout, together with the tensile capacity of the bar. The bond capacity is mainly affected by grout content.

Key words: grout sleeve splicing for concrete reinforced bars; lack of grout; monotonic tension; high-stress reversed tension and compression; large-deformation reversed tension and compression

灌浆套筒在建筑中的应用始自 20 世纪 60 年代的美国. 余占疏博士首次发明了钢筋连接用灌浆套筒,即 NMB 套筒,并获得专利^[1]. 他将这种技术首先使用在檀香山一栋 38 层的 Ala Moana 旅馆建筑中,用于连接框架中的预制混凝土柱.

钢筋套筒灌浆连接是在金属套筒中插入带肋钢筋并通过灌浆料拌合物硬化而实现传力的钢筋连接方式^[2]. 该连接包括连接用灌浆套筒和连接用灌浆料两部分. 连接所用的金属套筒,通常采用铸造工艺或者机械加工工艺制造,通过灌浆料的传力作用连接带肋钢筋^[3]. 灌浆料是一种以水泥为基本材料,并配以细骨料、混凝土外加剂及其他材料混合而成的干混料,加水搅拌后具有规定的流动性、早强、高强、微膨胀等性能,填充于灌浆套筒与连接钢筋间隙内,并实现钢筋与灌浆套筒的可靠传力^[4]. 这种连接方法具有较高的抗拉、抗压强度,连接可靠,国内外很多专家学者都针对这种连接形式做过大量的研究.

2000 年,美国的 Kim 等对比了使用灌浆钢套筒连接技术的预制柱与现浇柱在地震作用下的响应^[5],对比了极限承载力、延性、耗能能力及破坏模式等指标,发现灌浆料强度及施工中钢筋的对中精

收稿日期: 2018-04-04

第一作者: 匡志平(1965—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为既有钢筋混凝土结构加固技术研究和混凝土结构抗爆性能研究. E-mail: zhipingkuang@163.com

通信作者: 焦雪涛(1992—),男,硕士生,主要研究方向为装配式混凝土构件连接. E-mail: jiao-xuetao@tongji.edu.cn

度对抗震性能影响较大,而经过合理设计与施工的预制柱构件抗震性能良好,达到了现浇构件的水平。

2015年,埃及的 Henin 等提出了一种新型灌浆套筒,通过试验和理论分析研究了该套筒的承载能力及灌浆料与套筒间的摩擦系数^[6]。研究结果表明,套筒长度取 16 倍钢筋直径时可保证接头的极限承载力大于单根连接钢筋的极限承载力;套筒内壁切削 3mm 高的螺纹可防止套筒与灌浆料之间发生滑移破坏;设计该套筒时,灌浆料与钢筋间的等效摩擦系数可近似取 1.0。

我国灌浆套筒连接的研究与应用水平相对落后,由于缺乏详实的理论分析和试验数据,工程界对预制装配结构的抗震性能一直心存疑虑。

2015年,东南大学的郑永峰和郭正兴等制作了 9 个用低合金无缝钢管通过冷滚压工艺形成的新型变形灌浆套筒进行了试验和有限元分析^[7-9]。通过接头单向拉伸试验,主要研究了套筒的约束机理及约束应力分布,试验研究表明,套筒内腔结构对套筒的约束机理及应变分布有显著影响,套筒应变分布与内腔结构对应,在光滑段和变形段表现出不同的规律。

对预制构件进行套筒灌浆连接时,灌浆料从灌浆孔注入套筒,通常认为当灌浆料从溢浆孔溢出时则灌浆完全。但在实际工程中,出于某些原因,可能出现灌浆料未完全填充套筒就从溢浆孔溢出的情况,此时若停止灌浆,已注入的灌浆料在本身的流动性和重力作用下成形、凝结、硬化,套筒内部出现脱空。对于竖向连接,脱空部分的存在使上侧钢筋在灌浆料中的锚固长度减小,影响了黏结承载力。对于水平连接,脱空部分的存在使灌浆料不能受到套筒的完全约束作用,使钢筋和灌浆料以及灌浆料和套筒之间的黏结强度受到削弱,进而影响了连接的力学性能和变形性能。

目前关于灌浆料填充不足对套筒灌浆连接力学性能影响的研究尚存在以下不足:

- (1) 灌浆料未充满时,对水平、竖向预制构件的灌浆套筒连接的力学性能的影响,尚缺乏相应的研究;
- (2) 不同灌浆料含量的(水平/竖向)套筒连接,力学性能的差异性研究;
- (3) 满足力学性能要求的灌浆料含量,缺乏相应研究。

1 试验研究目的

试验研究灌浆料未灌满的水平、竖向钢筋套筒

灌浆连接件。对预制构件进行套筒灌浆连接时,灌浆料从灌浆孔注入套筒,通常认为当灌浆料从溢浆孔溢出时则灌浆完全。但在实际工程中,可能出现灌浆料未完全填充套筒就从溢浆孔溢出的情况,此时若停止灌浆,已注入的灌浆料在本身的流动性和重力作用下成形、凝结、硬化,从而套筒内部出现脱空。基于灌浆料本身具有一定的流动性以及重力作用,水平连接和竖向连接中灌浆料成形不同:对于竖向连接,将出现竖向套筒顶部完全脱空,如图 1a 所示。对于水平连接,将出现水平套筒全长范围内的上部脱空,如图 1b 所示。

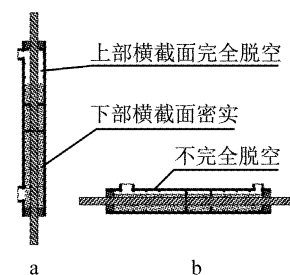


图1 钢筋套筒灌浆连接(灌浆料不足)截面

Fig.1 Cross section of grout sleeve splicing for reinforced bars (insufficient grouting)

参考规范^[4],本文设计了多种竖向及水平钢筋套筒灌浆连接试件,包含不同含量的灌浆料。试验总共分三批进行,分别为单调拉伸试验、高应力反复拉压试验和大变形反复拉压试验。试验主要目的是研究竖向和水平钢筋套筒灌浆连接在不同的灌浆料含量下的受力及变形性能,同时确定试件发生临界破坏时的灌浆料含量。

2 套筒试验方案

2.1 试件材料

试验所用钢筋连接用灌浆套筒由上海利物宝建筑科技有限公司提供,采用 GT4 20 型号套筒,其构造如图 2 所示,构造尺寸见表 1。连接钢筋采用 HRB400,直径 20 mm。套筒采用球墨铸铁制作,符合现行标准^[10]要求。球墨铸铁套筒材料性能符合下列规定:抗拉强度 ≥ 550 MPa,断后伸长率 $\geq 5\%$,球化率 $\geq 85\%$ 。

钢筋套筒连接用灌浆料采用利物宝建筑科技有限公司提供的超高强无收缩钢筋连接用灌浆料,具有早强、高强、高流态、微膨胀等优点的无机复合材料,对钢筋无锈蚀且耐久性好。灌浆料搅拌时间 3—5 min,拌合后于 40min 内灌注完成,逾时则应弃置

不用.

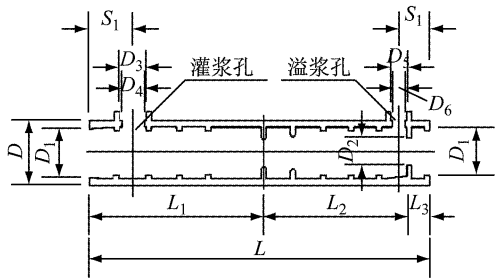


图 2 全灌浆套筒纵剖面

Fig.2 A longitudinal sectional view of full grouting sleeve splicing

表 1 GT4 20 套筒构造尺寸(mm)

Tab.1 GT4 20 sleeve construction size (mm)

长度	孔径	定位
L	370	D 52 S_1 46.5
L_1	180	D_1 40 S_2 28
L_2	170	D_2 24
L_3	20	D_3/D_4 25/22
		D_5/D_6 16/13

注: L 为套筒长度; L_1 为套筒灌浆孔端长度; L_2 为套筒溢浆孔端长度; L_3 为套筒胶塞端长度; D 为套筒外径; D_1 为套筒内直径; D_2 为套筒胶塞端内直径; D_3 为灌浆孔外径; D_4 为灌浆孔内直径; D_5 为溢浆孔外径; D_6 为溢浆孔内直径; S_1 为灌浆孔中心至套筒末端距离; S_2 为溢浆孔中心至套筒末端距离.

2.2 试件设计

试验分三批进行,试件编号规则如图 3 所示. 第一批为单调拉伸试验,第二批为高应力反复拉压试验,第三批为大变形反复拉压试验,考虑灌浆料含量的影响,试件一览表如表 2 所示.

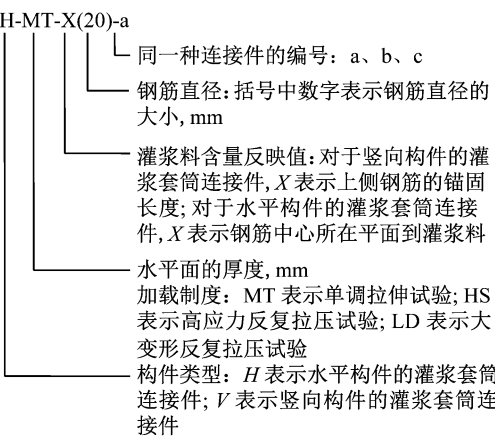


图 3 试件编号规则说明

Fig.3 Specimen number description

根据规范^[11],连接试件的测量标距应符合要求,如图 4 所示. 可知, L_3 为 $L+4d$,其中 L 为套筒长度. 试验前用小标记、细划线或细墨线标记标距 L_3 . 图中套筒长度 L 为 370 mm;宽口侧钢筋埋长(含

橡胶塞长度) L_1 为 180 mm;窄口侧钢筋埋长(含橡胶塞长度) L_2 为 190 mm;总伸长率测量标距 L_3 为 450 mm;总伸长率测量标距 L_{01} 为 100 mm,钢筋公称直径 d 为 20 mm,钢筋夹持及富余长度 h 为 140 mm.

表 2 试件编号表

Tab.2 Specimen numbers

序号	试件编号	上端钢筋锚固长度/mm	灌浆料覆盖厚度/mm
1—3	V-MT-4d	80	—
4—6	V-MT-5d	100	—
7—9	H-MT-0	—	0
10—12	H-MT-5	—	5
13—15	V-HS-4d	80	—
16—18	V-HS-5d	100	—
19—21	V-HS-6d	120	—
22—24	H-HS-5	—	5
25—27	V-LD-4d	80	—
28—30	V-LD-5d	100	—
31—33	V-LD-6d	120	—
34—36	V-LD-5	—	5

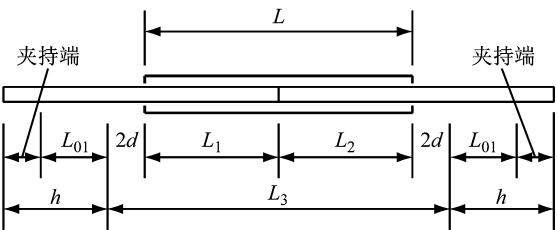


图 4 测定标距位置

Fig.4 Measured gauge position

2.3 试件制作

进行反复拉压试验的试件,出于加载装置需要,需将钢筋进行端部墩粗直螺纹加工,加工后的钢筋端部如图 5 所示.



图 5 加工后的钢筋墩粗直螺纹端头

Fig.5 The steel upsetting straight threaded end after processing

单向拉伸试件制作过程包括模板制作、连接件定位、灌浆料搅拌、灌注等. 严格控制用水量,确保灌浆料和水的质量比为 13% 左右,冬季用电水箱将水温控制在 $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. 搅拌好后需立即对浆料的流动

性进行测定,要求流动性指标不小于 300 mm,合格后方可灌浆。

根据规范^[4],试件的养护温度应为 $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$,相对湿度应大于 90%。试件采用耐久性试验室的养护箱进行养护,砂浆龄期 28 d,设置养护温度为 20°C ,相对湿度为 93%。

2.4 加载装置及加载制度

第一批为单调拉伸试验,采用同济大学工程耐久试验室的电液伺服万能材料试验机,量程为 500 kN,加载精度 2 kN。

第二批为高应力反复拉压试验和大变形反复拉压试验。加载仪器为同济大学建筑结构试验室的 200 t 伺服作动器。

参考规范^[11],并根据预试验的结果,确定所有试验形式的 3 种加载制度为:① 单向拉伸: $0 \rightarrow 0.6 f_{yk} \rightarrow 0$ (测量残余变形) \rightarrow 最大拉力 (记录抗拉强度) $\rightarrow 0$ (测定最大力总伸长率)。② 高应力反复拉压: $0 \rightarrow (0.9 f_{yk} \rightarrow -0.5 f_{yk})$ (反复 20 次) \rightarrow 破坏。③ 大变形反复拉压: $0 \rightarrow (2\epsilon_{yk} \rightarrow -0.5 f_{yk})$ (反复 4 次) $\rightarrow (5\epsilon_{yk} \rightarrow -0.5 f_{yk})$ (反复 4 次) \rightarrow 破坏。加载制度是以应力与应变的形式表示的,试验前需针对每个试件将其换算成力和位移的形式,以便设置伺服作动器的控制参数。钢筋屈服前后采用不同的方式控制加载速度:钢筋屈服前为荷载控制方式,屈服后为位移控制方式。在钢筋弹性范围内,试验机的加载速率设置为 $37 \text{ kN} \cdot \text{min}^{-1}$,并保持试验机控制器固定于这一速率位置上,直至获得屈服点;屈服段过后,试验机两夹头在力作用下的分离速率不超过 $0.5 L_{01} \text{ min}^{-1}$ 。

2.5 测量内容和测量方法

荷载值全程由相应的数据采集系统自动记录。荷载位移曲线由相应的数据采集系统自动记录。位移计对称布置于 L_3 的两侧,如图 6a、6b 中位移计 A 和位移计 A'。图中小圆圈表示固定螺栓; d 表示钢筋直径, $d=20 \text{ mm}$;进行单调拉伸试验时既要测量最大总伸长率,又要测量标距 L_3 内残余变形,反复拉压试验只需要测量标距 L_3 内残余变形。

根据规范^[11],单向拉伸和反复拉压试验时的变形测量仪表应在钢筋两侧对称布置,如图 7 所示,位移计 A 和位移计 A',取钢筋两侧仪表读数的平均值计算残余变形值。按规定的 3 种加载制度加载并卸载后,在标距 L_3 内测量变形。其中: u_0 为单向拉伸时,接头试件加载至 $0.6 f_{yk}$ 并卸载后在规定标距 L_3 内的残余变形; u_{20} 为高应力反复拉压时,按第 2 种加

载制度进行 20 次的反复拉压并卸载,测量标距 L_3 内的残余变形; u_4 为大变形反复拉压时,按第 3 种加载制度进行大变形反复拉压循环 4 次并卸载后,测量标距 L_3 内的残余变形; u_8 为大变形反复拉压时,按第 3 种加载制度进行大变形反复拉压循环 8 次,卸载后,测量标距 L_3 内的残余变形。

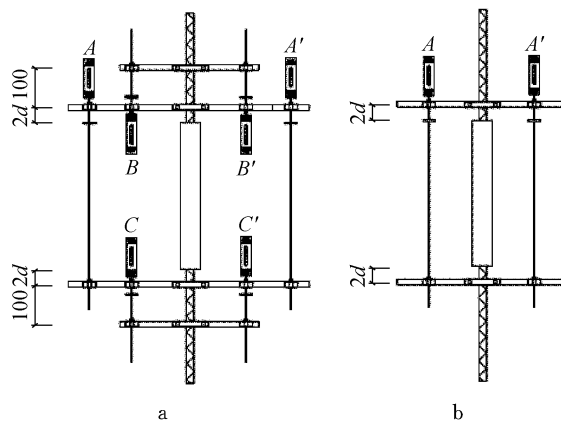


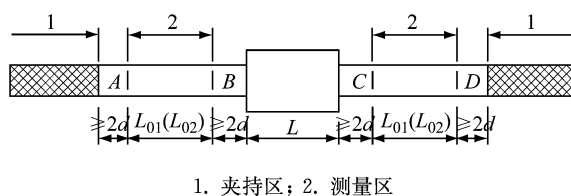
图 6 试验位移计布置 (mm)

Fig.6 Gauge composition (mm)

总伸长率是指连接试件在最大力下一定标距内测得的总伸长率,记为 A_{sgt} ,检验时,按 3 种加载制度加荷至最大力时,采用如图 7 所示的测量装置。只在单调拉伸试验时进行 (规范要求 $L_{01} \geq 100 \text{ mm}$,本试验取为 100 mm)。最大力总伸长率 A_{sgt} 为

$$A_{\text{sgt}} = \left[\frac{L_{01} - L_{02}}{L_{01}} + \frac{f_{\text{mst}}^0}{E} \right] \times 100\% \quad (1)$$

式中: f_{mst}^0 为试件达到最大力时的钢筋应力; E 为钢筋理论弹性模量; L_{01} 为加载前 A、B 或 C、D 间的实测长度,本试验取为 100 mm; L_{02} 为卸载后 A、B 或 C、D 间的实测长度。



1. 夹持区; 2. 测量区

图 7 总伸长率 A_{sgt} 的测点布置

Fig.7 Layouts of test gauges for total elongation after breaking

应用上式计算时,当试件颈缩发生在套筒一侧的钢筋母材时, L_{01} 和 L_{02} 应取另一侧标距间加载前和卸载后的长度。当破坏发生在接头长度范围内时, L_{01} 和 L_{02} 应取套筒两侧各自读数的平均值。

2.6 材料性能试验

灌浆料材料性能试验包括棱柱体抗压强度试验。根据规范^[4]的规定,灌浆料强度试验方法按现行

行业标准《水泥胶砂强度检验方法》GB/T 17671 的有关规定执行。

根据现行国家标准《水泥胶砂强度检验方法》GB/T 17671—1999 的规定,灌浆料材性试验试块养护温度 20℃,相对湿度 93%。取 1 组 3 个 40 mm×40 mm×160 mm 试件得到的 6 个抗压强度测定值的算术平均值为试验结果。如 6 个测定值中有一个超出 6 个平均值的±10%,就应剔除这个结果,而以剩下 5 个的平均数为结果。如果 5 个测定值中再有超过它们平均数±10%的,则此组结果作废。

根据规范^[4],灌浆料的强度应满足如下要求:1 d、3 d 和 28 d 龄期的抗压强度 f_c 应分别不小于 35 MPa、60 MPa 和 85 MPa。

根据规范^[12]对钢筋进行单调拉伸试验。试验时,对同一批次的纵筋保留长度为 450 mm 的 3 根进行静力拉伸试验,获得钢筋应力-应变曲线。

3 试验结果及分析

3.1 材料性能试验结果

灌浆料材料性能试验统计结果如表 3 所示,表中 C-01、C-02 和 C-03 分别表示 3 个批次的试件组。

表 3 灌浆料抗压强度试验统计结果

Tab.3 Material performance test results of grout

龄期/d	试件编号	平均强度 f_c /MPa
1	C-01	39.29
3	C-02	65.53
28	C-03	89.78

对于受力钢筋,预留一组试件用钢筋(每组 3 根),进行力学性能试验,强度结果见表 4,表中 C20-1、C20-2 和 C20-3 分别表示直径 20 mm 的带肋钢筋 3 根。

表 4 钢筋材料性能试验结果

Tab.4 Material performance test results of rebar

试件编号	C20-1	C20-2	C20-3
屈服强度 f_{ym} /MPa	440.76	439.88	441.81
极限强度 f_{um} /MPa	616.70	614.83	614.57
弹性模量 $E_m/(\times 10^3 \text{ MPa})$	201.53	202.13	202.63
屈服平台长度 $\Delta\epsilon_{ym}(\times 10^{-3})$	17.7	18.3	17.9
极限应变 ϵ_{um}	0.302	0.285	0.327
屈服比实测值 β_m	1.399 2	1.399 7	1.391 0

3.2 破坏形态

单向拉伸试验中试件共出现了两种破坏形态,分别为灌浆侧钢筋劈裂拔出(I)和溢浆侧钢筋刮犁式拔出(II)。水平连接件都是灌浆侧钢筋劈裂拔出(I),如图 8 所示,竖向连接件都是溢浆侧(上侧)钢

筋刮犁式拔出(II),如图 9 所示,各试件破坏形态汇总见表 5。对于水平连接件,灌浆侧钢筋锚固长度为 8 d,溢浆侧钢筋的锚固长度为 8.5 d,因此溢浆侧钢筋拥有比灌浆侧钢筋稍大的黏结承载力。同时,套筒溢浆侧端部比灌浆侧多设置了一道环肋,如图 2 所示,这道环肋有效约束了溢浆侧端部灌浆料,所以,水平连接件都发生灌浆侧钢筋的黏结破坏。由于水平连接的灌浆料并未充满整个套筒筒体,脱空部分的存在使套筒对灌浆料的约束作用大幅减小,钢筋与灌浆料之间的黏结强度被削弱,承载力下降,当钢筋与灌浆料之间发生黏结破坏时,界面裂缝向外发展,缺乏套筒约束作用的那部分灌浆料发生劈裂,如图 8b 所示,故水平连接都发生灌浆侧钢筋劈裂拔出,如图 8a 所示。对于试验中竖向连接,灌浆侧(下侧)钢筋的锚固长度为 8 d,溢浆侧(上侧)钢筋的锚固长度为 4 d 或 5 d,溢浆侧钢筋在灌浆料中的锚固长度明显小于灌浆侧钢筋,因此,溢浆侧钢筋的黏结承载力小于灌浆侧钢筋。试验机对连接件施加的拉力不断增大,当钢筋与灌浆料之间的黏结应力达到上侧钢筋的黏结承载力时,溢浆侧钢筋发生黏结破坏。溢浆端部灌浆料开裂形成圆锥体并被钢筋带出,如图 9a 所示,锥面与水平方向大致呈 45°角。钢筋发生刮犁式拔出破坏时,套筒内灌浆料形成光滑的圆柱面,如图 9b 所示。

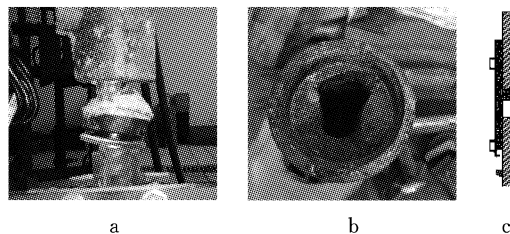


图 8 水平套筒宽口侧钢筋劈裂(I)

Fig.8 Wide side reinforced steel split of horizontal specimen (I)

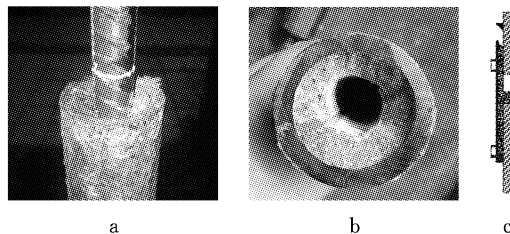


图 9 竖向套筒窄口侧钢筋刮犁式拔出(II)

Fig.9 Narrow side steel bar blade pulling out of vertical specimen (II)

反复拉压试验中试件共出现了 4 种破坏形态,分别为灌浆侧钢筋劈裂拔出(I)、溢浆侧钢筋刮犁

式拔出(Ⅱ)、灌浆侧钢筋拉断(Ⅲ)和溢浆侧钢筋拉断(Ⅳ),如图 10 和图 11 所示,各试件破坏形态汇总如表 6 和表 7 所示。反复拉压时灌浆侧钢筋劈裂拔出破坏仅发生在水平连接,即 H-HS-5 和 H-LD-5 系列试件。溢浆侧钢筋锚固长度为 4 d 的竖向连接件,均发生溢浆侧钢筋刮犁式拔出破坏(Ⅱ)。对于溢浆侧钢筋锚固长度为 6 d 的竖向连接件,反复拉压时的破坏形态均为钢筋拉断破坏,且发生(Ⅲ)或(Ⅳ)也没有一定规律。对于溢浆侧钢筋锚固长度为 5 d 的竖向连接件,大变形反复拉压试验时,破坏模式均为溢浆侧钢筋刮犁式拔出(Ⅱ),这与单向拉伸试验结果一致;但在高应力反复拉压时发生钢筋拉断破坏,且发生(Ⅲ)或(Ⅳ)破坏没有一定规律,这是与单向拉伸试验相比,破坏形态发生改变仅有一例。单向拉伸发生刮犁式黏结破坏,平均承载力为 189.3 kN,相比高应力反复拉压试验钢筋拉断的平均承载力 193.5 kN 略低。这是因为进行高应力反复拉压试验的试件龄期相比单向拉伸试验的试件多 80 d 左右,因此,灌浆料的强度有了小幅增长,使钢筋与灌浆料之间的黏结强度增大,从而使连接的抗拉承载力提高。而大变形反复拉压试验进行时,试验的试件龄期与单向拉伸试验的试件极为接近,灌浆料强度相差不大,所以破坏模式仍为溢浆侧钢筋刮犁式拔出(Ⅱ)。

3.3 荷载-变形曲线

本小节主要研究不同加载制度下钢筋套筒灌浆

表 5 单向拉伸试验结果汇总

Tab.5 Results summary of monotonic tension tests

试件编号	峰值荷载 P_u / kN	峰值荷载对应的 钢筋应力 σ_u /MPa	平均黏结强度 τ_u / MPa	残余变形 u_0 / ($\times 10^{-3}$ mm)	最大总伸长 率 δ /%	破坏形态
V-MT-4d-a	159.7	508.34	31.77	92	2.92	Ⅱ
V-MT-4d-b	170.4	542.40	33.90	93	4.20	Ⅱ
V-MT-4d-c	163.1	519.16	32.45	83	3.18	Ⅱ
V-MT-5d-a	186.6	593.97	29.70	117	7.55	Ⅱ
V-MT-5d-b	192.8	613.70	30.68	54	8.94	Ⅱ
V-MT-5d-c	188.6	600.33	30.02	86	7.86	Ⅱ
H-MT-0-a	147.5	469.51	14.67	184	2.26	Ⅰ
H-MT-0-b	137.6	437.99	13.69	124	0.23	Ⅰ
H-MT-0-c	147.6	469.82	14.68	167	2.01	Ⅰ
H-MT-5-a	196.3	624.84	19.53	91	9.32	Ⅰ
H-MT-5-b	187.0	595.24	18.60	96	8.87	Ⅰ
H-MT-5-c	183.5	584.10	18.25	84	6.65	Ⅰ

注: $\sigma_u = P_u / (\pi r^2)$; $\tau_u = P_u / (\pi dL)$, 其中 L 为拔出钢筋在灌浆料中的锚固长度。

连接的荷载-位移曲线。根据规范^[11],单向拉伸和反复拉压试验所采用的测量标距相同,连接的变形 δ 取值也相同,取标距 L_3 两端点相对位移。

3.3.1 单向拉伸荷载-位移曲线

图 12~图 15 所示为不同灌浆料含量的钢筋套

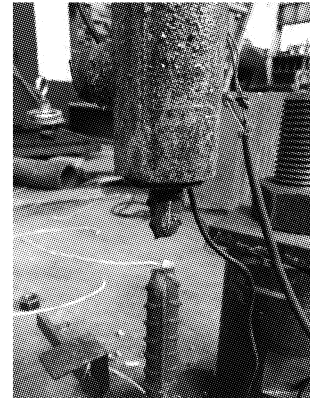


图 10 竖向套筒宽口侧钢筋拉断(Ⅲ)

Fig.10 Wide side steel pulling off of vertical specimen(Ⅲ)

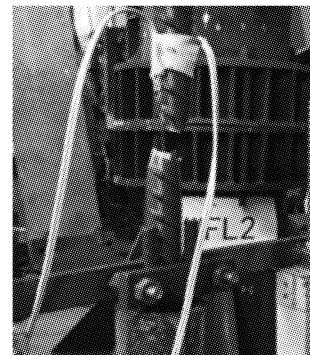


图 11 竖向套筒窄口侧钢筋拉断(Ⅳ)

Fig.11 Narrow side steel pulling off of vertical specimen(Ⅳ)

筒灌浆连接的单向拉伸荷载-变形曲线,从图中可以看出,加载初期为弹性阶段,荷载 P 与变形 δ 的关系基本呈一条直线。其中, H-MT-0 系列连接卸载阶段曲线与加载曲线呈直线但明显不重合,这是因为 H-MT-0 连接的极限承载力比较小,钢筋进入屈服平台

表 6 高应力反复拉压试验结果汇总

Tab.6 Results summary of high-stress reversed tension and compression tests

试件编号	峰值荷载 P_u/kN	峰值荷载对应的钢筋应力 σ_u/MPa	平均黏结强度 τ_u/MPa	残余变形 $u_{20}/(\times 10^{-3} \text{ mm})$	破坏形态
V-HS-4d-a	168.7	536.99	33.56	276	II
V-HS-4d-b	174.4	555.13	34.70	262	II
V-HS-4d-c	167.9	534.44	33.40	244	II
V-HS-5d-a	194.2	618.16	—	215	III
V-HS-5d-b	192.3	612.11	—	198	IV
V-HS-5d-c	189.4	602.88	—	231	III
V-HS-6d-a	194.3	618.48	—	167	IV
V-HS-6d-b	192.8	613.70	—	138	III
V-HS-6d-c	195.4	621.98	—	193	III
H-HS-5-a	189.4	602.88	18.84	121	I
H-HS-5-b	185.7	591.10	18.47	96	I
H-HS-5-c	191.4	609.24	19.04	142	I

注： $\sigma_u=P_u/(\pi r^2)$ ； $\tau_u=P_u/(\pi dL)$ ，其中 L 为拔出钢筋在灌浆料中的锚固长度；“—”表示因钢筋拉断，未得到黏结强度。

表 7 大变形反复拉压试验结果汇总

Tab.7 Results summary of large-deformation reversed tension and compression tests

试件编号	峰值荷载 P_u/kN	峰值荷载对应的钢筋应力 σ_u/MPa	平均黏结强度 τ_u/MPa	残余变形 $u_4/(\times 10^{-3} \text{ mm})$	残余变形 u_8/mm	破坏形态
V-LD-4d-a	173.3	551.63	34.48	326	—	II
V-LD-4d-b	171.4	545.58	34.10	267	—	II
V-LD-4d-c	167.6	533.49	33.34	282	—	II
V-LD-5d-a	197.1	627.39	—	261	0.521	II
V-LD-5d-b	194.8	620.07	—	227	0.432	II
V-LD-5d-c	192.6	613.06	—	196	0.418	II
V-LD-6d-a	198.4	631.53	—	187	0.382	IV
V-LD-6d-b	195.1	621.02	—	173	0.496	III
V-LD-6d-c	197.0	627.07	—	121	0.413	IV
H-LD-5-a	189.8	604.15	18.88	82	0.428	I
H-LD-5-b	185.7	591.10	18.47	113	0.439	I
H-LD-5-c	193.2	614.97	19.22	76	0.391	I

注： $\sigma_u=P_u/(\pi r^2)$ ； $\tau_u=P_u/(\pi dL)$ ，其中 L 为拔出钢筋在灌浆料中的锚固长度；“—”表示因钢筋拉断，未得到黏结强度。

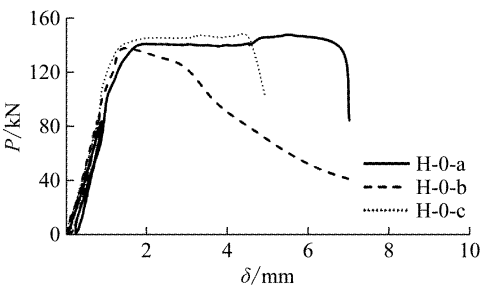


图 12 H-MT-0 单调拉伸荷载-位移曲线
Fig.12 P- δ curves of specimen H-MT-0

不久就发生失效，因此连接在失效前的变形比较小，均在 8 mm 以内，残余变形 u_{10} 因此显得就较大。其他所有试件，卸载阶段曲线与加载曲线呈直线且基本重合，这是因为连接失效时钢筋已经进入强化段，有了很大的塑性变形，所有残余变形 u_{10} 相较之下并不明显，图中对应曲线未呈现明显重复加载曲线。其后曲线形状的发展则与成形方式、灌浆料含量和试件

破坏形态有关。

对于水平连接，由于灌浆料含量不足，所以成形后的连接在套筒上表面形成了纵向条状脱空部分，纵向脱空部分的存在削弱了套筒对灌浆料的约束作用，使钢筋与灌浆料之间的黏结强度大大减小。

H-MT-0 系列连接钢筋上表面的灌浆料覆盖厚度为 0 mm，套筒对灌浆料的约束作用极小，钢筋与灌浆料间的黏结强度不足，荷载达到钢筋屈服荷载左右即达到峰值，此后荷载下降，连接发生灌浆侧钢筋与灌浆料之间的黏结破坏，灌浆料被劈裂，钢筋被拔出。荷载-变形曲线基本由弹性阶段、屈服阶段和下降段组成，屈服平台明显，如图 12 所示。H-MT-0-b 连接在荷载略小于钢筋屈服荷载时就失效，没有出现屈服阶段，可能是因为钢筋存在偏心。

H-MT-5 系列连接，钢筋上表面的灌浆料覆盖厚度为 5 mm，套筒对灌浆料的约束作用较 H-MT-0 系列连接有所增长，钢筋与灌浆料间的黏结强度也

有了提高,但黏结承载力仍然小于钢筋的拉断荷载,当施加于连接上的荷载增至略小于钢筋拉断荷载时达到峰值,此后荷载迅速下降,连接发生灌浆侧黏结破坏,灌浆料劈裂破坏,钢筋被拔出。荷载-变形曲线由弹性阶段、屈服阶段、强化阶段组成,有明显的屈服平台,曲线形状与钢筋拉伸曲线相似,如图13所示。

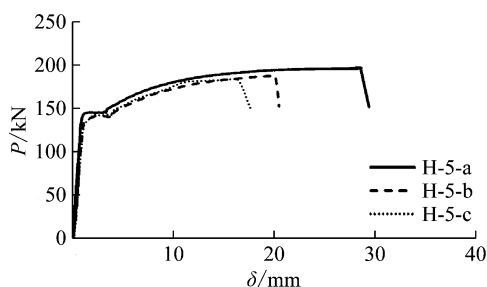


图13 H-MT-5 单调拉伸荷载-位移曲线

Fig.13 $P-\delta$ curves of specimen H-MT-5

对于竖向成形的连接,灌浆料含量的变化主要引起上侧钢筋锚固长度的变化,钢筋锚固长度范围内,灌浆料充满了整个横截面,套筒对灌浆料的约束作用完全发挥,钢筋与灌浆料之间的黏结强度也足够大。

V-MT-4 d 系列连接,拉伸荷载超过钢筋屈服荷载后发生溢浆侧(上侧)钢筋刮犁式拔出破坏,荷载-变形曲线可分为弹性阶段、屈服阶段、强化阶段、下降段和残余阶段。荷载达到峰值后,迅速下降,之后下降缓慢,在保持荷载基本不变的情况下发生很大的变形,称此荷载为残余荷载 P_{re} 。此时,钢筋与灌浆料之间已产生很大滑移,已发生刮犁式黏结破坏,荷载主要来自钢筋表面与灌浆料间的摩擦力,如图14所示。

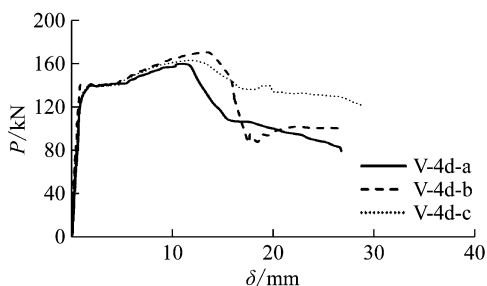


图14 V-MT-4 d 单调拉伸荷载-位移曲线

Fig.14 $P-\delta$ curves of specimen V-MT-4 d

V-MT-5d 系列连接,拉伸荷载在接近钢筋拉断荷载时发生溢浆侧(上侧)钢筋刮犁式拔出,荷载-变形曲线由弹性阶段、屈服阶段、强化阶段和下降段组

成。荷载达到峰值后,迅速下降,有明显的屈服平台,试件屈服强度与试验中钢筋的屈服强度相同,曲线形状与钢筋拉伸曲线相似,如图15所示。

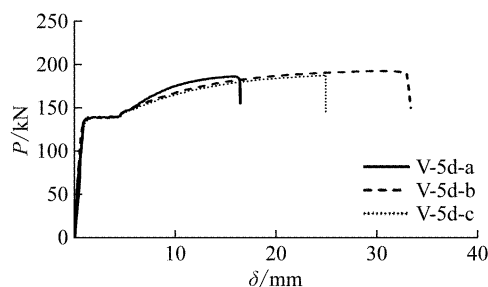


图15 V-MT-5 d 单调拉伸荷载-位移曲线

Fig.15 $P-\delta$ curves of specimen V-MT-5 d

文献^[13-15]中均给出了试验得到的荷载-变形曲线,研究其形状发现:若破坏时钢筋强度未超过钢筋屈服强度,荷载-变形曲线基本由弹性阶段、塑性发展阶段和下降段组成,无屈服阶段和强化阶段,与本文中 H-MT-0 试件的试验结果一致;若破坏时钢筋强度超过钢筋屈服强度甚至达到钢筋强度是钢筋拉断,则荷载-变形曲线亦有明显的屈服阶段和强化阶段,与本文中 H-MT-5、V-MT-4 d 和 V-MT-5 d 系列连接试验结果一致。

3.3.2 高应力反复拉压荷载-位移曲线

图16~图19为4种不同的钢筋套筒灌浆连接高应力反复拉压时的荷载-变形曲线。龄期比单调拉伸的连接试件长,在120 d左右,标准条件下养护。

由图16可见,连接的荷载-变形曲线受钢筋与灌浆料间的黏结滑移影响明显。首次正向加载上升段曲线与单向加载的一样,加载至控制荷载水平时首次正向卸载,因钢筋的弹性回缩,变形部分恢复,但由于钢筋与灌浆料之间存在着摩阻力,所以变形恢复量不大,正向卸载至零时,变形不能恢复到零,正向卸载曲线斜率大于首次正向加载斜率。首次反向加载时,首先要克服摩阻力作用,随荷载的反向增大变形变化缓慢,然后出现荷载停滞阶段,此时荷载基本不变,变形迅速增大,造成了荷载-变形滞回曲线中存在水平段。当变形继续减小时,钢筋肋与肋前灌浆料重新接触,荷载上升,此时上升段的曲线形状与前半个加载循环的相似;首次反向卸载时,与首次正向卸载类似,变形同样不能完全恢复,且反向卸载曲线斜率大于反向加载曲线的斜率。再次正向加载,仍要克服较小的摩阻力作用。此时由于反向加载使钢筋肋的一侧产生间隙,所以摩阻力被克服后,变形有一个迅速发展阶段,此时黏结刚度很小,导致荷载-变形曲线斜率接近于零,荷载变化很小,变形增

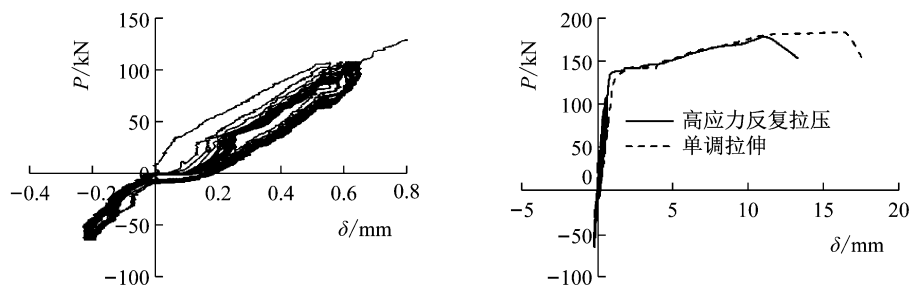


图 16 H-HS-5 连接高应力反复拉压荷载-位移曲线

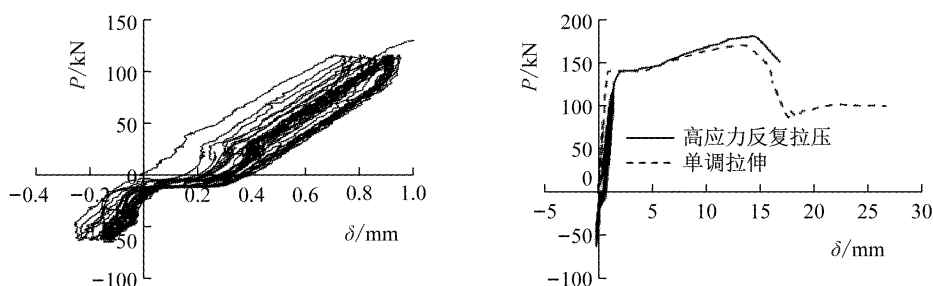
Fig.16 P- δ curves of specimen H-HS-5

图 17 V-HS-4 d 连接高应力反复拉压荷载-位移曲线

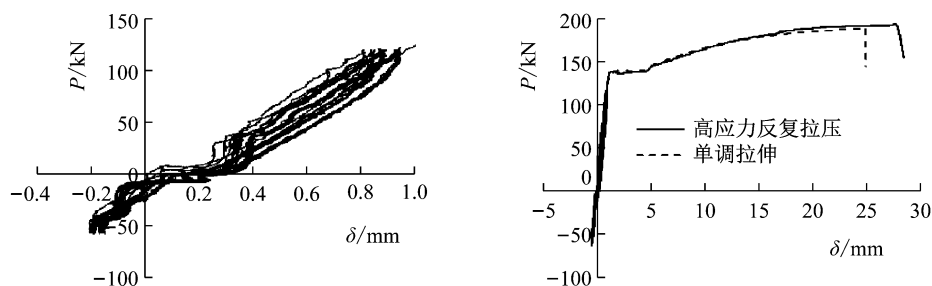
Fig.17 P- δ curves of specimen V-HS-4 d

图 18 V-HS-5 d 连接高应力反复拉压荷载-位移曲线

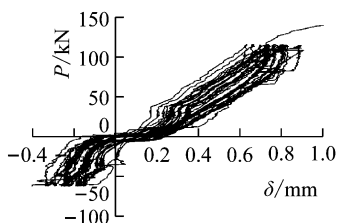
Fig.18 P- δ curves of specimen V-HS-5 d

图 19 V-HS-6 d 连接高应力反复拉压荷载-位移曲线

Fig.19 P- δ curves of specimen V-HS-6 d

大很快,构成了荷载-变形曲线滞回环的“捏拢”现象.当钢筋肋与肋前灌浆料重新接触后,黏结应力上升,荷载因而上升.

由图可见,高应力反复拉压荷载-变形滞回曲线的第 1 个循环的正反向上升段的形状为外凸形,从第 2 个循环开始正反向上升段曲线的形状由外凸形转变为内凹形,开始反映出滑移型的滞回特性.荷载

再次加载到正向控制荷载时,由于反复加载时钢筋灌浆料界面颗粒磨细,咬合齿破碎,滑移相比前一个循环增大,变形增大,表现出刚度退化.但这种变形的增大在前几个循环中表现更明显,随着循环次数的增加,变形增大越来越缓慢,如 V-6 d 连接的高应力反复拉压荷载-变形曲线.

通过与单向拉伸的结果对比发现,当荷载超过控制荷载水平后,荷载-变形曲线会基本沿着单向拉伸的骨架曲线延伸,曲线形状与前述单向拉伸时类似,先后进入屈服、强化和下降段,破坏时试件峰值荷载与单向拉伸时的基本相等,承载力退化不明显.

3.3.3 大变形反复拉压荷载-位移曲线

图 20~图 23 所示为 4 种不同的钢筋套筒灌浆连接在大变形反复拉压时的荷载-变形曲线.由图可见,首次正向加载上升段曲线与单向拉伸加载的一

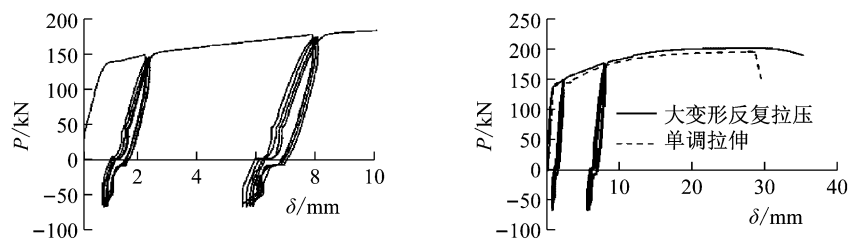


图 20 H-LD-5 连接大变形反复拉压荷载-位移曲线

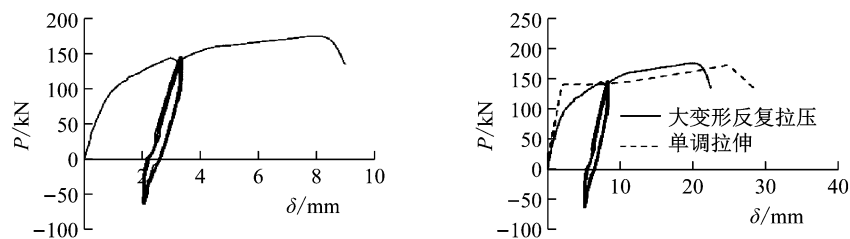
Fig. 20 P - δ curves of specimen H-LD-5

图 21 V-LD-4 d 连接大变形反复拉压荷载-位移曲线

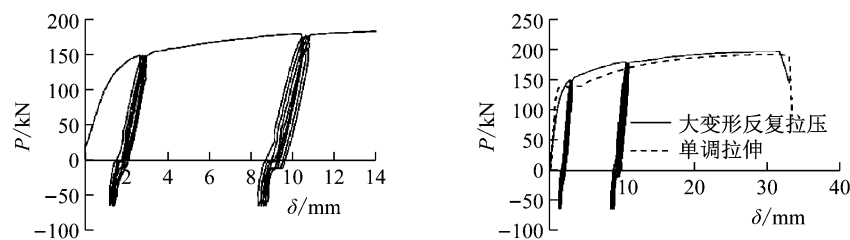
Fig. 21 P - δ curves of specimen H-LD-5

图 22 V-LD-5 d 连接大变形反复拉压荷载-位移曲线

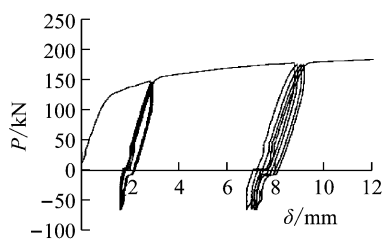
Fig. 22 P - δ curves of specimen H-LD-5

图 23 V-LD-6 d 连接大变形反复拉压荷载-位移曲线

Fig. 23 P - δ curves of specimen H-LD-5

样,加载至第一级控制位移水平时,曲线已进入屈服段甚至已强化;首次正向卸载,同样因钢筋的弹性回缩,变形部分恢复,但由于钢筋与灌浆料之间存在着摩阻力,变形恢复量不大,且钢筋以产生明显塑性变形,正向卸载至零时,由变形不能恢复到零;首次反向加载时,与高应力反复拉压时的首次反向加载类似,首先需要克服摩阻力作用,随后出现水平阶段,当变形继续减小时,荷载上升,反向上升段的曲线形状与前半个加载循环相似;首次反向卸载时,与首次正向卸载类似,变形同样不能完全恢复,且反向卸载

曲线斜率大于反向加载曲线的斜率.再次正向加载,仍要一定克服摩阻力作用,但摩阻力相对反向加载时的小.摩阻力被克服后,同样有正向加载水平段,构成了荷载-变形曲线滞回环的“捏拢”现象.当钢筋肋与肋前灌浆料重新接触后,黏结应力上升,荷载也随之上升.

由于反复加载时钢筋灌浆料界面颗粒磨细,咬合齿破碎,再次加载到正向控制位移时荷载较上一次降低,表现出强度的退化.但这种荷载的降低在主要发生在第一次循环中,后续循环中荷载逐渐稳定.当正向加载至第二级位移控制水平时,曲线会继续沿着单向拉伸曲线上升,达到第二级位移控制水平时正向卸载、反向加载、反向加载和再次正向加载的曲线形状以及表现出的强度退化规律与前一级位移水平下的循环类似.

完成第二级控制位移下的循环后继续加载,曲线与单向加载曲线相交后继续沿着单向拉伸曲线加载直至破坏.超过控制位移后继续加载时,荷载-变形曲线沿着单向拉伸加载曲线延伸,最后发生黏结

破坏或钢筋拉断,曲线形态与单向加载曲线类似。破坏时的峰值荷载退化与单调加载基本相等,承载力退化不明显。

由以上的分析可知,由于钢筋套筒灌浆连接受力性能受钢筋与灌浆料之间黏结性能影响明显,因此在反复拉压荷载作用下其表现出的刚度退化、强度退化和曲线的“捏拢”现象等力学表现与钢筋与混凝土间的黏结-滑移十分相似。

3.4 承载力

单向拉伸和反复拉压时试件抗拉承载力分别见表 5、表 6 和表 7 中的峰值荷载。它受钢筋极限抗拉强度以及钢筋与灌浆料之间的黏结强度影响,由这两个强度对应承载力的较小值控制。

此外,钢筋与灌浆料间的平均黏结强度 τ_u 为发生黏结破坏时,将峰值荷载 P_u 除以被拔出钢筋的埋设长度段表面积 πdL (d 为钢筋直径, L 拔出为拔出段钢筋埋长)得到

$$\tau_u = \frac{P_u}{\pi dL} \quad (2)$$

对于灌浆料含量不足的连接,在加载制度相同的情况下,承载力主要受成型方式和灌浆料含量的影响,下文将结合试验结果逐一讨论。

(1) 成型方式的影响。对于水平成形的连接,灌浆料的不足使成形后的连接在套筒上表面形成了纵向条状脱空部分,纵向脱空部分的存在削弱了套筒的约束作用,使钢筋与灌浆料之间的黏结强度大大减小, H-MT-5 系列连接的平均黏结强度为 18.79 MPa, H-MT-0 系列连接的平均黏结强度更是削弱到 14.35 MPa,二者的平均黏结强度均在 20 MPa 以下。对于竖向连接,钢筋锚固长度范围内,灌浆料充满了筒体横截面,套筒的约束作用完全发挥,钢筋与灌浆料之间的黏结强度足够大, V-MT-4 d 和 V-MT-5 d 系列连接的平均黏结强度均达到 30 MPa 以上。

(2) 灌浆料含量的影响。对于同一成型方式的连接,灌浆料含量越大,黏结承载力也越大,但黏结强度并不一定增大。对于水平成形的连接,灌浆料分布在套筒全长范围内,灌浆料含量不足造成套筒内上表面形成纵向脱空部分,灌浆料的含量越多,纵向脱空部分横截面越小,灌浆料与套筒的接触面积越大,套筒的约束作用就越明显,钢筋与灌浆料间的平均黏结强度就越大,其黏结承载力也相应提高, H-MT-5 系列连接与 H-MT-0 系列连接相比,其黏结承载力和平均黏结强度都提高了 31.0%。对于竖向连接,灌浆料含量越多,上侧钢筋锚固长度就越大,

其黏结承载力也相应提高,但黏结强度并不会因此增大,如表 5 所示, V-MT-5 d 系列连接上侧钢筋的锚固长度比 V-MT-4 d 系列连接多了一倍钢筋直径,其黏结承载力也因此比后者提高了 15.2%,但平均黏结强度却比后者减少了 7.9%。这是因为钢筋在灌浆料中的锚固长度也会影响平均黏结强度的大小,钢筋埋设长度越大,黏结强度沿钢筋纵向分布越不均匀,平均黏结强度越小。

3.5 讨论

规范^[11]根据强度和变形将连接分成三个等级。本试验中部分试件出现钢筋拉断的破坏模式,根据规范^[11]的规定,已满足 I 级连接抗拉强度的要求,其余连接试件均发生黏结破坏。

对于水平连接, H-0 不满足连接要求, H-5 虽然是连接失效,但抗拉强度与钢筋的抗拉强度标准值之比不小于 1.10,因此符合 I 级接头强度要求。对于竖向连接, V-4 d 的强度达到 III 级接头要求, V-5 d 发生连接失效,但强度能达到 I 级接头要求, V-6 d 发生钢筋拉断,达到 I 级接头要求。

根据荷载-变形曲线,按照规范^[11]附录 A.1 的方法,对于水平连接, H-0 变形不符合规范要求, H-5 的各变形值均能达到 I 级接头要求;对于竖向连接, V-4 d 的变形只能达到 III 级接头要求, V-5 d 和 V-6 d 均能达到 I 级接头的变形要求。

综上所述,本文试验中连接的破坏模式有钢筋拉断和黏结破坏(灌浆料劈裂或钢筋刮犁式拔出)两种,破坏模式取决于灌浆料含量的大小。在变形性能和延性方面,灌浆料含量越多,性能越好。

4 结论与展望

通过对灌浆料含量不同的钢筋套筒灌浆连接的单向拉伸、高应力反复拉压和大变形反复拉压试验研究,可以得到以下几个主要结论:

(1) 水平连接发生灌浆料劈裂破坏,竖向连接发生钢筋刮犁式拔出和钢筋拉断两类破坏。破坏形态主要取决于钢筋与灌浆料间的黏结承载力以及钢筋极限强度对应拉力的相对大小,灌浆料含量越大,黏结承载力越大,当连接的黏结承载力达到钢筋抗拉承载力时,破坏形态由黏结破坏(灌浆料劈裂或钢筋刮犁式拔出)转变为钢筋拉断。

(2) 连接的单调拉伸荷载-变形曲线形状与灌浆料含量有关。随着灌浆料含量的增大,黏结承载力增强,单调拉伸荷载-变形曲线越趋完整。如水平连接,

H-0 系列连接只进入到屈服段,H-5 系列连接已明显进入强化段,基本和钢筋的单调拉伸荷载-变形曲线相重合.高应力与大变形反复拉压时荷载-变形曲线受钢筋与灌浆料间黏结的影响明显,具有明显的捏拢现象,表现刚度退化、强度退化等.

(3) 高应力反复拉压和大变形反复拉压加载并未造成承载力的明显退化,且灌浆料含量越大,连接的变形性能越好.

(4) 将连接的受力及变形性能指标与规范规定进行了对比:对于水平连接,H-0 不符合规范要求,H-5 满足 I 级接头要求;对于竖向连接,V-4 d 符合 III 级接头要求,V-5 d 和 V-6 d 满足 I 级接头要求.

(5) 为使连接达到 I 级接头的要求,对于水平连接,灌浆料的含量至少应使钢筋上表面的覆没厚度达到 5 mm;对于竖向连接,灌浆料的含量至少应使上侧钢筋的锚固长度达到 5 d (d 为钢筋直径).

实际工程中,通常对已完成灌浆的构件采用 X 射线进行抽检来发现灌浆缺陷;对已经发现的灌浆缺陷,采用小口径的灌浆器进行人工补灌浆.但灌浆套筒的定量检测技术尚有待发展,补灌浆后套筒的力学性能,也有待进一步探究.

参考文献:

- [1] YEE A A. Structural and economic benefits of precast/prestressed concrete construction[J]. PCI Journal, 2001, 46 (4): 34.
- [2] 中华人民共和国行业标准. 钢筋套筒灌浆连接应用技术规程: JGJ355-2015 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
Profession Standard of the People's Republic of China. Technical specification for grout sleeve splicing of rebars: JGJ355-2015 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [3] 栗新. 工业化预制装配式(PC)住宅建筑的设计研究与应用[J]. 建筑施工, 2008, 30(3): 201.
LI Xin. Study on design and application of industrialized PC dwellings[J]. Architectural Engineering, 2008, 30 (3): 201.
- [4] 中华人民共和国建筑工业行业标准. 钢筋连接用套筒灌浆料: JG/T408-2013 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
Profession Construction Industry Standard of the People's Republic of China. Couples for rebar mechanical splicing: JG/T408-2013 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.
- [5] KIM Y. A study of pipe splice sleeves for use in precast beam-column connections[D]. University of Texas at Austin, 2000.
- [6] HENIN E, MORCOUS G. Non-proprietary bar splice sleeve for precast concrete construction [J]. Engineering Structures, 2015, 83: 154.
- [7] 郑永峰, 郭正兴, 孙志成. 新型变形灌浆套筒连接接头性能试验研究[J]. 施工技术, 2014, 43(22): 40.
ZHENG Yongfeng, GUO Zhengxing, SUN Zhicheng. Experimental study on the behavior of grouted deformed pipe splice [J]. Construction Technology, 2014, 43(22): 40.
- [8] 郑永峰, 郭正兴, 曹江. 新型灌浆套筒的约束机理及约束应力分布[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(12): 106.
ZHENG Yongfeng, GUO Zhengxing, CAO Jiang. Confinement mechanism and confining stress distribution of new grouting coupler for rebars splicing [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(12): 106.
- [9] 郑永峰. 变形灌浆套筒连接性能试验研究及有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(3): 94.
ZHENG Yongfeng. Experimental study and finite element analysis on behavior of deformed gout-filled pipe splice [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(3): 94.
- [10] 中华人民共和国国家标准. 球墨铸铁件: GB/T1348-2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
National Standards of the People's Republic of China. Spheroidal graphite iron castings: GB/T1348-2009 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- [11] 中华人民共和国行业标准. 钢筋机械连接通用技术规程: JGJ107-2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Profession Standard of the People's Republic of China. Technical specification for mechanical splicing of steel reinforcing rebar: JGJ107-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [12] 中国国家标准化管理委员会. 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法: GB/T228. 1-2010 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic materials—tensile testing—part 1: method of test at room temperature: GB/T228. 1-2010 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011.
- [13] LING J H, ABD RAHMAN A B, MIRASA A K, et al. Performance of CS-sleeve under direct tensile load: part 1: failure modes [J]. Malaysian Journal of Civil Engineering, 2008, 20(1): 89.
- [14] GOH H M. Parametric study of steel grouted splice sleeve with integrated double springs under axial tension[D]. Johore Johor Bahru: Universiti Teknologi Malaysia, 2009.
- [15] ONG H Y. Experimental study of grout filled splice sleeve integrated with shear key for precast concrete connection[D]. Johore Johor Bahru: Universiti Teknologi Malaysia, 2010.