

文章编号:1673-2049(2019)02-0021-09

钢筋套筒灌浆连接件的力学性能

吴涛,王 坤,刘毅斌,张 彬

(长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061)

摘要:对20个套筒灌浆连接件进行单轴拉伸试验,研究了套筒种类、锚固长度和钢筋直径对套筒筒壁应变的影响。采用ANSYS Workbench有限元软件,以钢制套筒连接件为原型进行建模分析,对比了试验和有限元模拟得到的钢筋应力-筒壁应变曲线。采用相同的建模方法建立了2种规格的钢制套筒连接件模型,通过模拟试件的单轴受拉试验研究了净距改变对套筒筒壁应变的影响。结果表明:钢筋直径和锚固长度相同的钢制套筒与铸铁套筒对比,其筒壁应变在相同钢筋应力水平下较小;当套筒材质、钢筋直径相同时,连接锚固越长的试件具有越小的筒壁应变值;以连接钢筋直径作为变量时,连接钢筋越粗的试件其筒壁应变值越大;模拟的曲线可以反映出试件的破坏过程,可以较好地表现出筒壁测点的应变实际发展,证明有限元方法能够有效模拟套筒灌浆连接件单向拉伸状态下的受力状态;在相同拉力水平下,净距大的连接件筒壁部分的筒壁应变较小。

关键词:预制装配式结构;套筒灌浆连接;拉拔试验;筒壁应力

中图分类号:TU377.9

文献标志码:A

Mechanical Performance of Reinforcement Grouted Sleeve Connection

WU Tao, WANG Shen, LIU Yi-bin, ZHANG Bin

(School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: Twenty grouted sleeve connections were tested under uniaxial tension, and the effects of sleeve type, anchorage length and reinforcement diameter on the strain of sleeve wall were studied. Using finite element software ANSYS Workbench and taking steel sleeve connections as prototype, the stress-strain curves of steel bars obtained by experiment and finite element simulation were compared. Using the same modeling method, two models of steel sleeve connections with different specifications were established. The effect of net distance change on the strain of sleeve wall was studied by uniaxial tension test of simulated specimens. The results show that compared with cast iron sleeve, steel sleeve with the same diameter and anchorage length has smaller wall strain at the same steel stress level. When the material of sleeve and the diameter of reinforcement are the same, the longer the connection anchorage, the smaller the strain of the tube wall. When the diameter of the connecting bar is taken as a variable, the thicker the connecting bar is, the larger the strain value of the tube wall is. The simulation curves can reflect the failure process of the specimens and show the actual development of strain at the measured points of the tube wall. It is proved that the finite element method can effectively simulate the stress state of the sleeve grouted connections under uniaxial tension. At the same tension level, the tube wall strain of the barrel part with large net distance is small.

收稿日期:2018-08-27

基金项目:国家自然科学基金项目(51578072,51708036);陕西省科技统筹创新工程计划项目(2015KTZDSF03-04)

作者简介:吴 涛(1976-),男,安徽霍山人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:wutao@chd.edu.cn。

Key words: prefabricated assembly structure; grouted sleeve connection; pull-out test; sleeve wall stress

0 引言

预制装配式结构有施工效率高、能耗小、污染少的优点。套筒灌浆连接在 20 世纪 70 年代广泛应用于美、日、欧等地区^[1]并获得了长足的发展。Einea 等^[2]设计了 4 种不同类型的圆钢管灌浆套筒,通过试验研究发现约束灌浆料可提高黏结性能。Kim 等^[3-4]针对灌浆套筒进行了参数化研究并提出了黏结强度的计算公式。Ling 等^[5-7]研究了不同类型套筒的黏结性能。Alias 等^[8]研究了锚固长度对黏结强度的影响。Hosseini 等^[9]在套筒中加设螺旋箍筋,试验发现该构造可以有效减小钢筋的滑移。此后 Rahman 等^[10]又在连接钢筋端头设置锥形螺帽以改善连接件的锚固性能。Henin 等^[11]通过对套筒接头构造改良来提升套筒连接性能。Elsayed 等^[12]通过试验研究提出了可以保证接头达到钢筋极限承载力有效锚固长度。

随着中国生态文明建设的发展,预制装配式结构逐渐成为主流的结构形式。进入 21 世纪后,中国开始对套筒连接进行深入研究。黄小坤等^[13]在 2010 年采用日本生产的套筒及灌浆料进行了连接件的试验研究,初步确定了套筒灌浆连接的可靠性。吴小宝等^[14]通过试验探究了钢筋等级、龄期等因素对灌浆部分锚固作用的影响。王瑞等^[15]通过数值分析验证了其试验结果。李骥天^[16]利用试验得到了灌浆套筒连接件的本构关系。朱万旭等^[17]利用试验检测了半灌浆式套筒的强度及连接性能。黄远等^[18-19]对半灌浆套筒连接进行了参数化试验,分析了连接件尺寸、钢筋位置及灌浆缺陷位置对连接性能的影响程度。黄俊等^[20]提出在套筒端头设置楔体,试验证明该构造可以有效提高黏结性能。马江剑等^[21-22]研究了高温下灌浆套筒的连接性能,对提高连接的防火性提出了相应的设计建议。

中国预制装配式结构常用的套筒材料主要有钢

制和球墨铸铁 2 种,但对这 2 种不同材料制作的连接件的力学性能对比研究较少。本文完成了 20 个半灌浆套筒连接件试验,建立了筒壁纵向、横向应变与钢筋应力之间的关系曲线;通过 ANSYS Workbench 软件模拟了单轴拉伸作用下的连接件,对比分析了试验及有限元模拟的筒壁应变与轴向力曲线,并利用有限元方法研究了净距对黏结性能的影响。

1 试验概况

1.1 试验设计

为研究连接构造对套筒连接件力学性能的影响,选取 3 种影响因素进行试验设计。提出了 8 种构造的套筒灌浆连接件,并制作出 20 个试件进行单向拉伸试验,试件参数如表 1 所示,图 1 为钢制和铸铁套筒灌浆连接件构造,其中, l_a 为连接钢筋计算锚固长度, l 为连接钢筋的实际锚固长度, M 为套筒螺母的螺纹槽直径。

1.2 试验材料

根据试验设计,套筒的选材有钢制及铸铁 2 种(图 2)。钢制半灌浆套筒及球墨铸铁半灌浆套筒的生产商分别为湖南恒邦钢筋连接技术有限公司和深圳市现代营造科技有限公司。选用中德新亚公司生产的灌浆料,在制作连接件前测得灌浆料早强为 54.45 MPa,养护 28 d 后该灌浆料的强度达到 80.59 MPa。表 2 为钢筋力学性能。

1.3 试验装置

将套筒连接件两端的连接钢筋固定在万能试验机的夹具上进行单轴拉伸(图 3),应用 DH3820 动态数据采集仪,对套筒筒壁上的应变片(图 4)数据进行实时采集。

2 试验结果及分析

2.1 试验结果

试验记录了套筒灌浆连接件在单轴拉伸作用下

表 1 试件参数

Tab. 1 Parameters of Specimens

套筒类别	连接钢筋直径 d /mm	l_a /mm	筒身总长 L /mm	套筒外径 D /mm	套筒内径 d_1 /mm	套筒壁厚 t /mm
钢制套筒	16	110	159	40	33	3.5
	20	143	195	45	38	3.5
铸铁套筒	16	110	150	40	32	4.0
	20	143	190	44	36	4.0

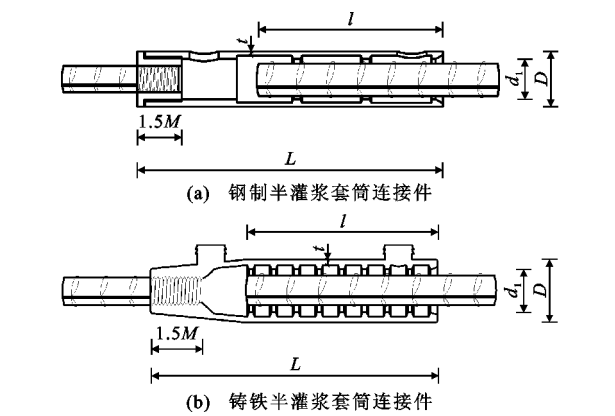


图 1 半灌浆套筒连接件构造

Fig. 1 Details of Semi-grouting Sleeve Connector



图 2 套筒照片

Fig. 2 Pictures of Sleeves

表 2 钢筋力学性能

Tab. 2 Mechanical Performance of Steel Bar

直径/mm	弹性模量/ 10 ⁵ MPa	极限强度/ f_u /MPa	屈服强度/ MPa	断后伸长 率/%
16	2.09	620.0	453.1	11.30
	2.02	628.1	453.0	12.10
	2.08	639.6	452.8	11.90
20	2.06	632.6	487.3	11.90
	2.03	619.4	469.1	11.80
	1.92	626.9	482.8	13.10

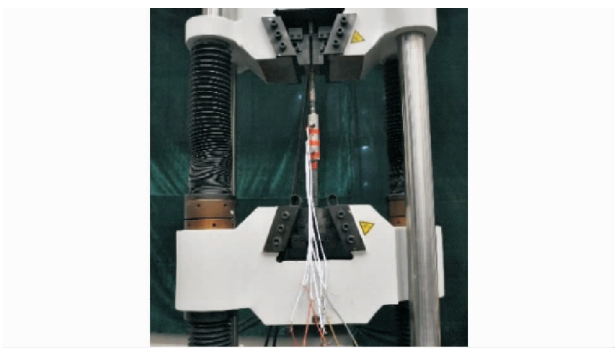


图 3 加载装置

Fig. 3 Loading Setup

破坏的全过程,试验结果如表 3 所示。

分析试验得到的套筒灌浆连接件在拉伸作用下的荷载-位移曲线,将其破坏过程分成4个阶段:①加

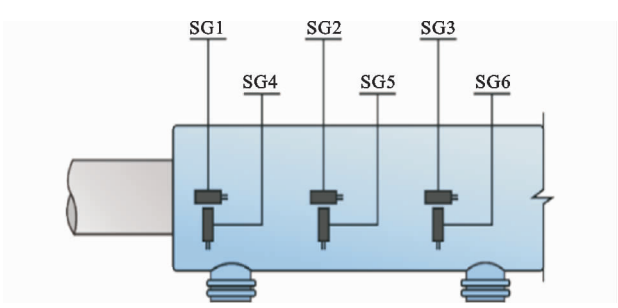


图 4 筒壁应变片布置

Fig. 4 Strain Gauge Positions of Sleeve Wall

表 3 套筒灌浆连接件试验结果

Tab. 3 Test Results of Grouted Sleeve Connections

套筒类型	总伸长率 $A_{sg1}/\%$	屈服强度 f_y/MPa	最大应力 f_{mst}	破坏形态
S16-100-1	23.3	465.9	643.4	TB
S16-100-2	18.3	465.5	625.0	TB,GS
S16-100-3	32.3	468.2	625.4	TB
S16-110-1	25.3	496.8	625.1	TB
S16-110-2	23.3	440.8	602.0	TB
S16-110-3	20.3	465.5	630.8	TB
S20-130-1	20.3	429.5	584.0	TB,GS
S20-130-2	20.3	426.9	584.6	TB,GS
S20-130-3	30.3	442.0	604.8	TB,GS
S20-143-1	18.3	451.9	604.0	GB
S20-143-2	17.3	450.2	610.9	GB
S20-143-3	18.3	472.8	637.7	TB,GS
C16-100-1	22.3	468.1	627.9	TB
C16-100-2	12.3	472.7	631.0	GB
C16-100-3	12.3	472.7	630.9	GR,GS
C16-110-1	15.3	471.0	628.5	GB
C16-110-2	21.3	462.4	626.2	GB
C16-110-3	13.3	462.0	627.2	GB
C20-130-1	30.3	440.3	586.9	TB
C20-143-1	16.3	443.8	596.2	GB

注:以 S20-130-1 为例,S 表示套筒为钢制材料(C 表示铸铁套筒),20 表示连接钢筋的直径为 20 mm,130 表示连接钢筋的锚固长度为 130 mm,1 表示每组 3 个试件的第 1 个试件;破坏形态 TB,GB,GS 分别表示套丝端连接钢筋断裂、灌浆端连接钢筋断裂和连接件灌浆侧灌浆料滑移显著。

载初期连接件在轴力作用下的变形与钢筋材性相似,曲线表现出明显的线性增长趋势,连接件处于弹性阶段;②随着荷载的增大,屈服台阶形成,曲线的屈服台阶部分即试件的屈服阶段,对比钢筋材性曲线发现连接件的屈服台阶较长(图 5),这是因为灌浆料参与受拉作用并产生了相对滑移,导致连接件在相近的屈服荷载下产生了较大的变形;③随着荷载的进一步增长,灌浆料最终滑出至 5 mm(图 6)时

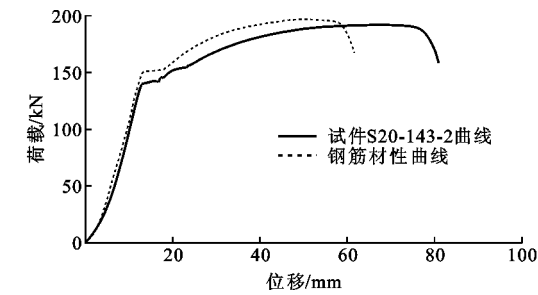


图 5 荷载-位移曲线对比

Fig. 5 Comparison of Load-displacement Curves

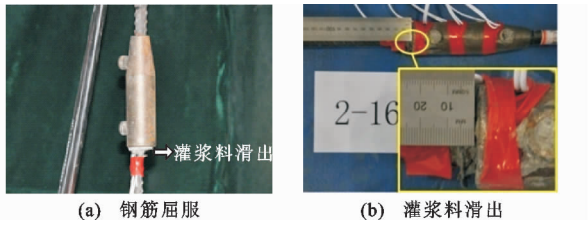


图 6 破坏过程

Fig. 6 Failure Process

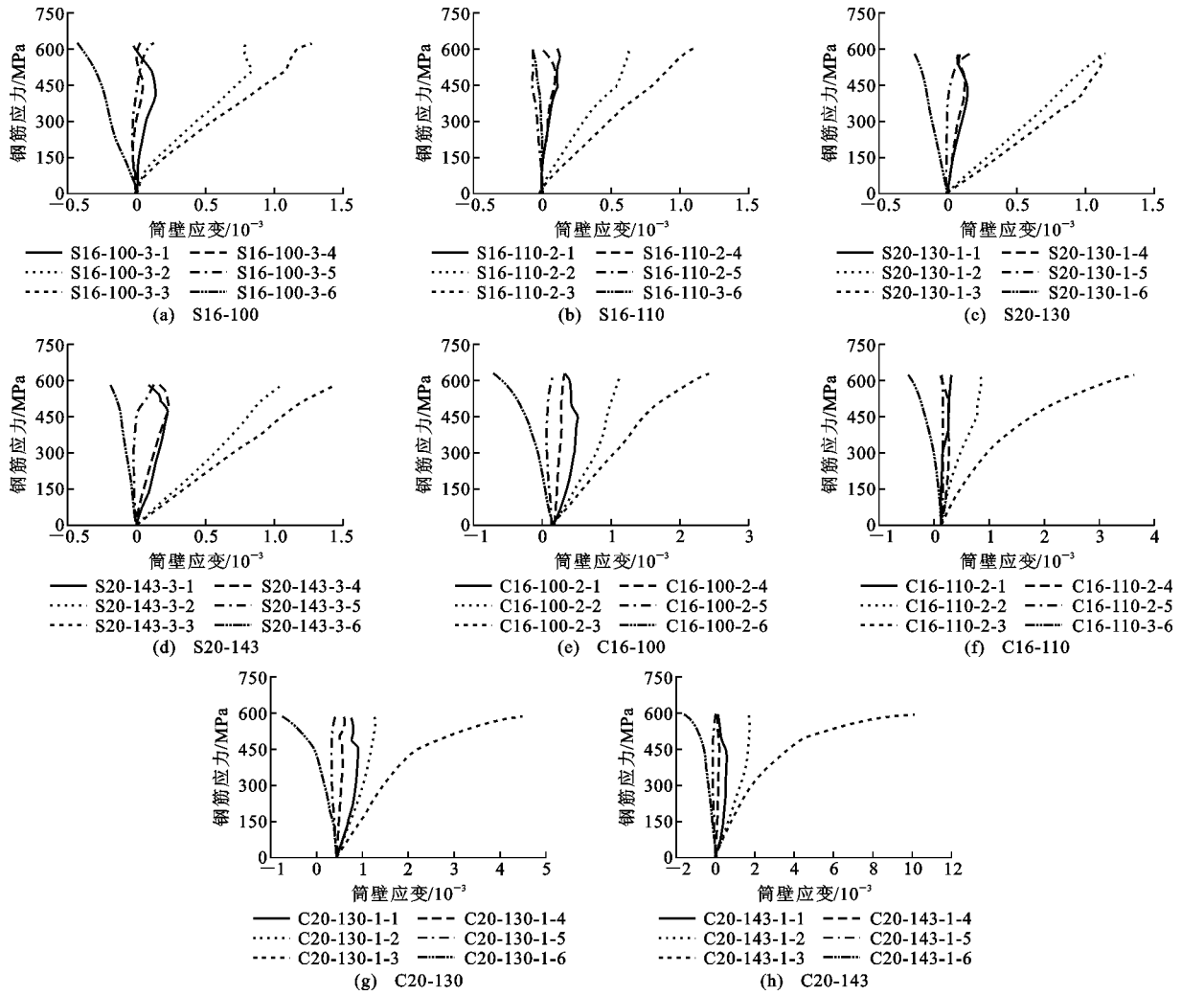


图 7 钢筋应力-筒壁应变关系曲线

Fig. 7 Curves of Steel Bar Stress and Sleeve Wall Strain

不再增加,曲线在经过屈服段后又表现出明显的增长趋势,这一阶段为连接件的强化阶段,连接件的抗拉承载力在此阶段达到峰值;④加载的最后阶段为颈缩阶段,套筒连接件因连接钢筋在短时间内拉断而失效,具体破坏形态见表 3。

2.2 钢筋应力-筒壁应变曲线

通过采集的纵向、横向应变值,选取其中 8 组建立钢筋应力-筒壁应变曲线,见图 7。由图 7 可知:

(1)在连接件受拉时,套筒因为灌浆料的黏结作用与连接钢筋一同受力,观察到筒壁的应变由钢筋锚固端向灌浆口逐渐减小。加载过程中锚固端附近套筒筒壁应变始终较大,故认为连接件最有可能在锚固端发生破坏。

(2)对比不同材质套筒连接件在单轴受拉作用下的筒壁应变曲线发现,2 种套筒连接件在拉拔作用下各测点筒壁应变变化趋势基本一致。当筒壁应变较小时,由连接件连接钢筋的应力与筒壁应变都

近似表现为线性关系;达到一定拉力水平时,铸铁套筒筒壁的应力-应变曲线发展接近于二次函数。从加载开始到连接钢筋拉断时,铸铁套筒的筒壁应变在各加载阶段都大于钢制套筒的筒壁应变。

(3)当连接件因钢筋拉断而导致失效时,具有较长锚固长度的连接件筒壁横向应变绝对值较小。

2.3 影响因素分析

2.3.1 套筒材料

由图 7(b),(f)与图 7(d),(h)对比分析可知,连接件因套筒选材不同,其在拉伸作用下的变形有明显区别。根据表 1 提供的套筒参数可以发现,连接钢筋直径及锚固长度一致时,铸铁套筒的筒壁要略厚于钢制套筒。将试验曲线按套筒材质差异进行对比分析发现,筒壁较厚的铸铁套筒在相同的拉力水平下产生了较大的筒壁应变,这是因为铸铁套筒握裹力强于钢制材料,灌浆料传递到筒壁的拉力更大。

2.3.2 钢筋直径

由图 7(b),(d)与图 7(f),(h)对比分析可知:在处于加载状况时,采用较大公称直径连接钢筋的连接件将会产生较大的筒壁应变;随着荷载不断增大,不同直径钢筋连接件的筒壁应变差值也不断增大。

2.3.3 锚固长度

由图 7(c),(d)与图 7(e),(f)对比分析可知:在加载初期筒壁应变受锚固长度的影响较小;连接钢筋屈服后,在同一拉力水平下连接件钢筋的锚固长度越长,其筒壁应变越小。

3 有限元分析

3.1 模型建立

借助有限元软件 ANSYS Workbench^[23]模拟钢制套筒灌浆连接件轴向受拉时的受力状态,分析灌浆料应变、筒壁应变随钢筋应力的变化状态。通过与试验结果和理论计算结果的对比,验证有限元软件 ANSYS Workbench 模拟套筒与灌浆料及灌浆料与连接钢筋间相互作用的有效性。

3.1.1 线性静力分析原理

在使用 ANSYS Workbench 对钢制套筒灌浆连接件进行线性静力分析过程中,位移矢量 \boldsymbol{x} 通过式(1)的矩阵方程得到

$$\boldsymbol{K}\boldsymbol{x}=\boldsymbol{F}$$
 (1)

式中: \boldsymbol{K} 为连续性、线弹性材料的刚度矩阵,能够考虑边界的非线性; \boldsymbol{F} 为静力荷载向量,忽略惯性影响且不考虑其随时间的变化。

3.1.2 定义材料属性

根据套筒的厂家规格、灌浆料以及钢筋的材性试验可知,在 ANSYS Workbench 的前处理器中按表 4 定义的材料属性进行赋值。

表 4 套筒、灌浆料及钢筋材料属性
Tab.4 Properties of Sleeves, Grouting Material and Steel Bars

材料	弹性模量 $E/10^5\text{ MPa}$	泊松比	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa
套筒	2.0	0.30	350	600
灌浆料	0.3	0.18		80
直径 16 mm 钢筋	2.0	0.30	453	629
直径 20 mm 钢筋	2.0	0.30	480	626

钢筋与套筒采用双线性随动强化模型 BKIN,服从 Mises 屈服准则;灌浆料采用多线性等向强化模型 MISO,服从 Willam-Warnke 五参数破坏准则^[24]。

3.1.3 定义单元类型

在套筒灌浆连接件单元定义中,使用 Solid185 单元对钢筋及套筒进行模拟,灌浆料使用 Solid65 模拟,钢筋与套筒均采用 8 节点 Solid185 实体单元模拟,接触单元 Targe170 和 Conta174 分别模拟钢筋与灌浆料及灌浆料与套筒之间的黏结。接触方式选择摩擦接触,摩擦因数设置为 0.2。

3.2 模拟结果分析

以钢筋直径 16 mm 的钢制套筒灌浆连接件为例,利用 ANSYS Workbench 软件对其进行有限元分析,得到在轴向荷载作用下灌浆料及套筒的累积塑性应变等效应力云图。

3.2.1 S16-100-3 试件模拟

当力从 0 kN 增至 86 kN 时,试件刚度较大,荷载-位移的关系大致表现为线性。当荷载 $F=86\text{ kN}$ 时,套丝钢筋率先屈服;当加载至 $F=90\text{ kN}$ 时,连接钢筋进入强化段,在拉力作用下迅速伸长,伸出部分钢筋完全进入塑性阶段,套筒口灌浆料应变增大。图 8 为灌浆料在拉伸下的累积塑性应变和套筒的累积塑性应变。

对试件 S16-100-3 受轴向拉伸作用时套筒壁的纵向、横向应变试验值与有限元模拟值进行比较(图 9)。应变片 1,4,6 测点的试验值与模拟值吻合较好,应变片 5 测点的模拟值误差较大;钢筋进入屈服状态后,套筒壁纵向应变的试验值离散性较强,对比套筒壁的试验值与模拟值发现纵向应变的误差较小。

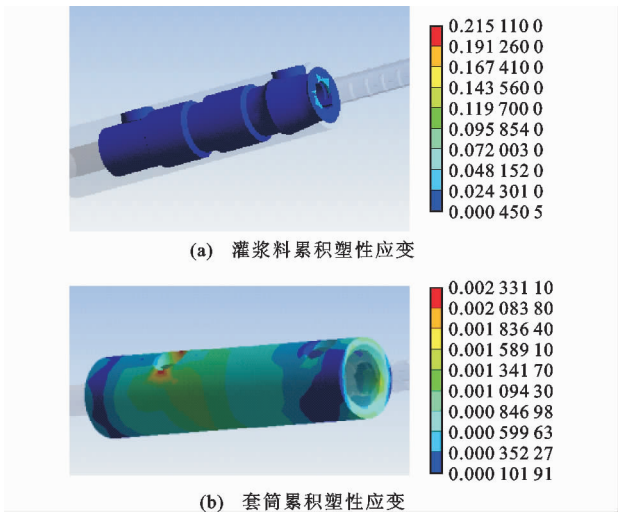


图 8 S16-100-3 试件累积应变云图

Fig. 8 Accumulated Strain Nephogram of S16-100-3

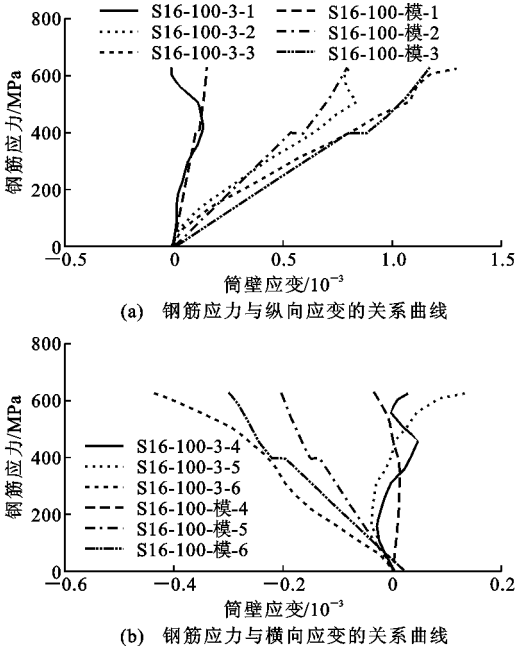


图 9 S16-100-3 试验结果与模拟结果对比

Fig. 9 Comparisons of Simulated and Experimental Results of S16-100-3

3.2.2 S16-110-2 试件模拟

当荷载 $F=83\text{ kN}$ 时,钢筋首先达到屈服;当加载至 $F=88.5\text{ kN}$ 时,连接钢筋进入强化段,在拉力作用下迅速伸长,伸出部分钢筋完全进入塑性阶段,最终钢筋应力超过极限拉应力导致连接失效。图 10 为试件在拉伸作用下灌浆料累积塑性应变和套筒的累积应变。

对试件 S16-110-2 受轴向拉伸作用时套筒壁的纵向、横向应变试验值与有限元模拟值进行比较,结

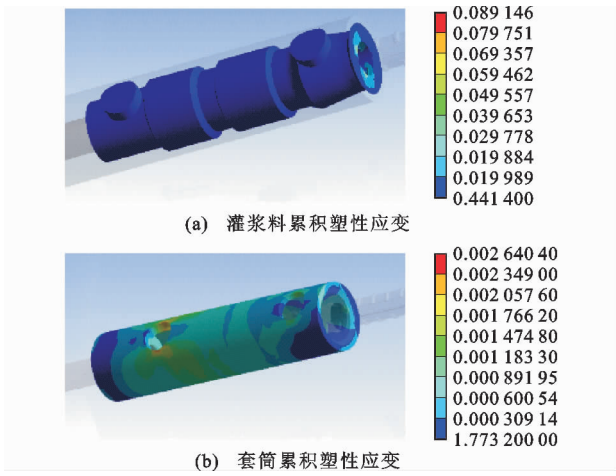


图 10 S16-110-2 累积应变云图

果见图 11。应变片测得的试验值与软件的模拟值对比有偏差,相较试验值,纵向应变的模拟值均偏小,而横向应变的模拟值均偏大。

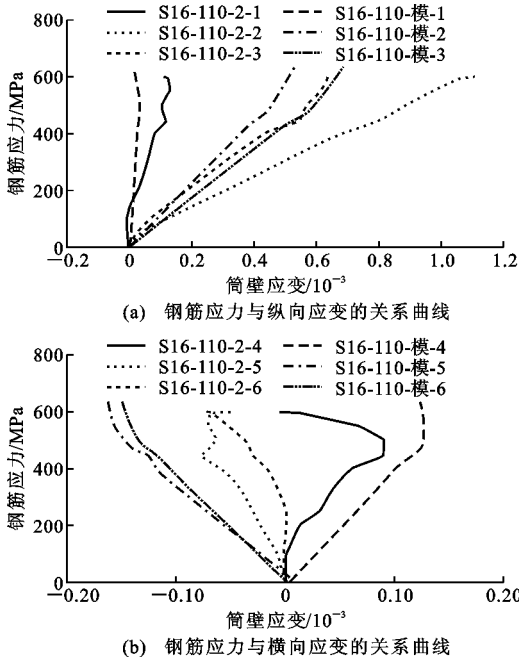


图 11 S16-110-2 试验结果与模拟结果对比

Fig. 11 Comparisons of Simulated and Experimental Results of S16-110-2

由试件 S16-100-3, S16-110-2 的模拟结果可知:筒壁纵向、横向应变在弹性阶段呈线性增长趋势;当锚固钢筋进入屈服阶段时,筒壁应变增长趋势加快;随后钢筋进入塑性强化阶段,筒壁应变也随着钢筋应力增加而线性增加,塑性强化阶段的钢筋应力-筒壁应变斜率较弹性阶段大,最后钢筋拉断失效,筒壁应变也达到最大值。

模拟得到的筒壁应变曲线具有明显的阶段性,

曲线的各发展阶段反映了套筒连接件的整个破坏过程。再将筒壁应变的试验值与模拟值进行对比,发现试验曲线在达到一定应力水平后,其筒壁应变就可能出现波动,难以观察发展规律;模拟得到的应变值与试验值间还存在一定的误差。模拟曲线与试验曲线的发展趋势较为相似,试验曲线发生波动时的应力水平与模拟曲线斜率突变对应的应力水平也非常接近。综上分析,试验中灌浆料的初始缺陷产生误差,模拟结果能够反映试验中筒壁的变形状况,有限元方法能够有效模拟试件在单轴拉伸作用下的筒壁应变。

4 净距影响的数值方法研究

除了锚固长度和套筒尺寸,套筒与钢筋间的净距对于连接件的力学性能亦有影响。依据相关规定^[25]建立了 4 组模型,其中钢筋直径选用 16 mm 和 20 mm 两种尺寸,净距采用 10 mm 和 15 mm 两种规格。模型建立方法与第 3.1 节一致,图 12 为 2 种规格套筒模型示意。

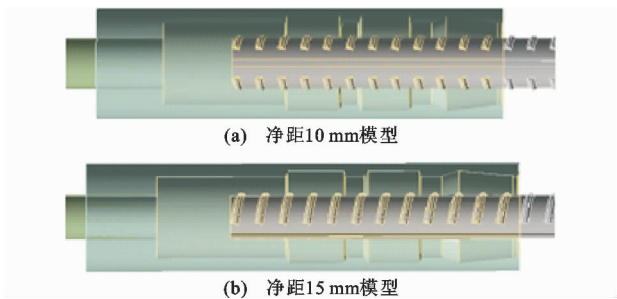


图 12 套筒模型
Fig. 12 Sleeve Models

通过模拟得到不同净距条件下的钢筋应力-筒壁应变关系。图 13 为直径 16 mm 钢筋套筒不同净距试件的应力-应变曲线。分析曲线发现弹性阶段的钢筋应力-筒壁应变大体表现为线性关系,且由 2,3,5,6 测点曲线观察到相同应力水平下净距为 10 mm 的试件筒壁测点位置应变大于净距为 15 mm 的试件;当钢筋屈服和连接进入塑性阶段时,对照组曲线的斜率相近。全加载过程中套筒内壁与钢筋间净距对 1,4 测点的筒壁应变影响很小。

图 14 为直径 20 mm 钢筋套筒不同净距试件的应力-应变曲线。分析曲线发现弹性阶段的钢筋应力-筒壁应变大体表现为线性关系,且由 2,3,6 测点曲线反映出相同应力水平下净距为 10 mm 的试件测点筒壁应变大于净距为 15 mm 的试件;进入塑性阶段后,2~6 测点的应变增长都有所减缓,对照曲线

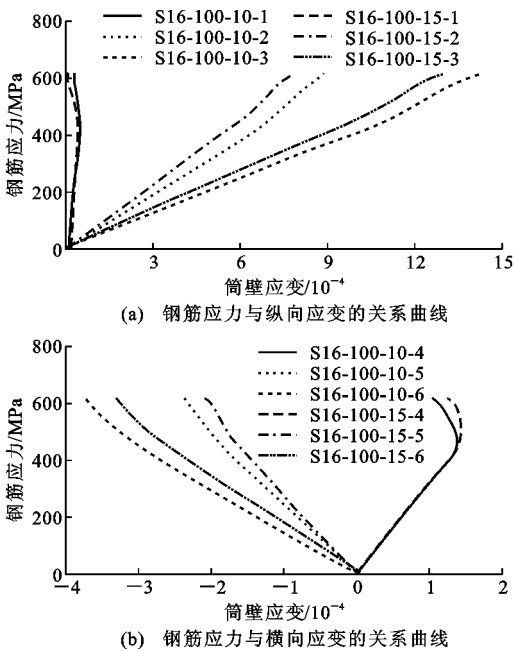


图 13 S16-100 不同净距试件钢筋应力-筒壁应变曲线
Fig. 13 Steel Bar Stress and Sleeve Wall Strain Curves of S16-100 with Different Clear Distances

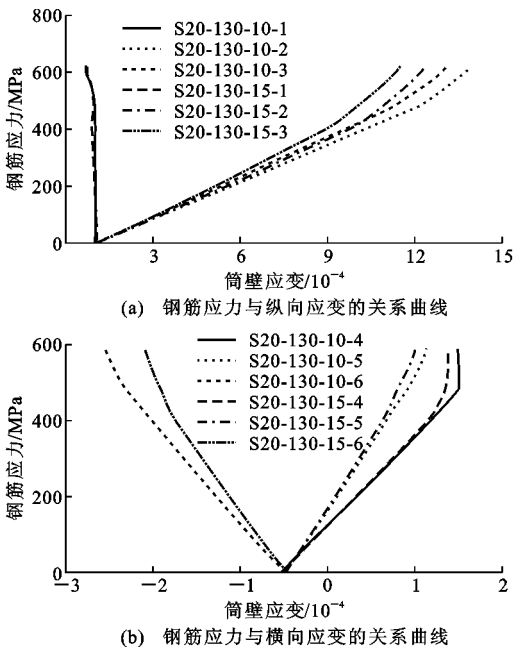


图 14 S20-130 不同净距试件钢筋应力-套筒应变曲线
Fig. 14 Steel Bar Stress and Sleeve Wall Strain Curves of S20-130 with Different Clear Distances

斜率接近。从连接件开始加载到试件破坏,1,4,5 测点的筒壁应变基本不受净距影响。

分析认为模拟试件在 1,4 测点应变值变化不大,这是因为 1,4 测点在套筒口,受力比较小,且 1,4 测点在套筒净距不同时的应变规律与筒壁部分的测点并不一致;2,3,6 测点的应变值变化比较大,且

无论是直径为 16 mm 还是直径为 20 mm 的模拟套筒连接件,相同钢筋应力时,净距 10 mm 的模拟试件 2,3,5,6 测点处纵向、横向应变大于净距 15 mm 模拟试件测点 1 的应变。综上所述,随着净距增大套筒筒壁部分应变变小。

5 结 语

(1)对 20 个套筒连接件进行了单轴拉伸试验,其破坏过程与钢筋材性类似,最终破坏形态均为连接钢筋拉断。

(2)实时采集应变反映出单向加载过程中,筒壁应变自灌浆端至锚固端不断增加,且锚固端部筒壁应变最大。

(3)对试验测得的钢筋应力-筒壁应变曲线进行影响因素分析:在其他条件一致时,连接钢筋锚固长度增加,套筒筒壁应变减小;连接钢筋直径增大,套筒筒壁应变增大;钢制套筒筒壁应变比铸铁套筒筒壁应变小。

(4)ANSYS Workbench 有限元软件的数值模型能够较好地模拟钢制套筒灌浆连接件的力学性能。通过改变模型中的套筒净距(灌浆段最小内径与连接钢筋公称直径的差值)进行参数分析可知:在相同应力条件下,灌浆套筒净距越大,筒壁应变越小。

参考文献:

References:

- [1] 韩超,郑毅敏,赵勇. 钢筋套筒灌浆连接技术研究与应用进展[J]. 施工技术,2013,42(21):113-116.
HAN Chao,ZHENG Yi-min,ZHAO Yong. Research and Application Development of Grout Sleeve Splicing for Reinforcement[J]. Construction Technology, 2013,42(21):113-116.
- [2] EINEA A,YAMANE T,TADROS M K. Grout-filled Pipe Splices for Precast Concrete Construction[J]. PCI Journal,1995,40(1):82-93.
- [3] KIM H K,AHN B I. Bond Strength of Grout-filled Splice Sleeve Considering Effects of Confinement[J]. Journal of the Korea Concrete Institute,2003,15(4):615-624.
- [4] KIM H K. Confining Effect of Mortar-filled Steel Pipe Splice[J]. Architectural Research,2008,10(2):27-35.
- [5] LING J H,RAHMAN A B A,IBRAHIM I S,et al. Behaviour of Grouted Pipe Splice Under Incremental Tensile Load[J]. Construction and Building Materials,2012,33:90-98.
- [6] LING J H,RAHMAN A B A,IBRAHIM I S,et al. Tensile Capacity of Grouted Splice Sleeves[J]. Engineering Structures,2016,111:285-296.
- [7] LING J H,LIEW Y F,LEONG W K,et al. Modelling the Response of Tapered Head Sleeve Connection Under Tensile Load Using Finite Element Method[J]. Asian Journal of Civil Engineering,2017,18(5):837-852.
- [8] ALIAS A,SAPAWI F,KUSBIANTORO A,et al. Performance of Grouted Splice Sleeve Connector Under Tensile Load[J]. Journal of Mechanical Engineering and Sciences,2014,7(1):1094-1102.
- [9] HOSSEINI S J A,RAHMAN A,BAHARUDDIN A. Analysis of Spiral Reinforcement in Grouted Pipe Splice Connectors[J]. Gradevinar,2013,65(6):537-546.
- [10] 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,2015,789-790:1176-1180.
- [11] HENIN E,MORCOUS G. Non-proprietary Bar Splice Sleeve for Precast Concrete Construction[J]. Engineering Structures,2015,83:154-162.
- [12] ELSAYED M,NEHDI M L. Experimental and Analytical Study on Grouted Duct Connections in Precast Concrete Construction[J]. Materials and Structures,2017,50(4):1-15.
- [13] 黄小坤,田春雨. 预制装配式混凝土结构的研究进展[C]//赵宁,肖从真. 全国高层建筑结构学术交流会论文集. 北京:中国建筑科学研究院,2010:377-383.
HUANG Xiao-kun,TIAN Chun-yu. Research Progress of Precast Concrete Structures[C]//ZHAO Ning,XIAO Cong-zhen. Proceedings of National Academic Conference on High-rise Building Structures. Beijing:China Academy of Building Research,2010:377-383.
- [14] 吴小宝,林峰,王涛. 龄期和钢筋种类对钢筋套筒灌浆连接受力性能影响的试验研究[J]. 建筑结构,2013,43(14):77-82.
WU Xiao-bao,LIN Feng,WANG Tao. Experimental Research on Effects of Grout Age and Types of Steel Bars on Mechanical Behavior of Grout Sleeve Splicing for Reinforcing Bars[J]. Building Structure,2013,43(14):77-82.
- [15] 王瑞,陈建伟,王宁. 钢筋套筒灌浆连接性能有限元分析[J]. 华北理工大学学报:自然科学版,2019,41(1):47-56.

- WANG Rui, CHEN Jian-wei, WANG Ning. Finite Element Analysis of Connection Performance of Reinforcement Sleeve Grouting[J]. Journal of North China University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2019, 41(1): 47-56.
- [16] 李骥天. 装配式结构中半灌浆套筒钢筋连接的本构关系研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- LI Ji-tian. Constitutive Relation of Steel Bar Connected by Half Grouting Sleeve Applied for Fabricated Concrete Structure[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [17] 朱万旭, 邵炼, 汪洋, 等. 钢筋的半灌浆式套筒连接技术研究[J]. 建筑技术, 2015, 46(10): 937-940.
- ZHU Wan-xu, SHAO Lian, WANG Yang, et al. Study on Semi-grouting Coupler Connecting Technique for Steel Reinforcement [J]. Architecture Technology, 2015, 46(10): 937-940.
- [18] 黄远, 朱正庚, 黄登, 等. 钢筋半套筒灌浆连接的静力拉伸试验研究[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2016, 44(2): 26-32.
- HUANG Yuan, ZHU Zheng-geng, HUANG Deng, et al. Investigation into Half Grout Sleeve Splicing for Rebars via Static Tensile Test[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2016, 46(2): 26-32.
- [19] 郑清林. 灌浆缺陷对套筒连接接头和构件性能影响的研究[D]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2017.
- ZHENG Qing-lin. Experimental Study on Effects of Grouted Defects on Behaviors of Grout Sleeve Splicing and Specimens[D]. Beijing: China Academy of Building Research, 2017.
- [20] 黄俊, 鲁志伟, 戴绍斌, 等. 内置楔形体灌浆套筒连接接头力学性能试验研究[J]. 工业建筑, 2019, 49(1): 77-84.
- HUANG Jun, LU Zhi-wei, DAI Shao-bin, et al. Experimental Study on Mechanical Properties of Built-in Wedge Grout-filled Sleeve Splice[D]. Industrial Construction, 2019, 49(1): 77-84.
- [21] 马江剑. 高温后半灌浆套筒连接试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.
- MA Jiang-jian. The Experimental Research of Semi-grouting Sleeves Splicing for Rebars After Exposed to High Temperature[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.
- [22] 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.
- WANG Guo-qing. Experiment Study on Connection Behaviour of Gout-filled Pipe Splices Connector in High Temperature[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2017.
- [23] 浦广益. ANSYS Workbench 基础教程与实例详解[M]. 2版. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- PU Guang-yi. Basic Tutorials and Examples of ANSYS Workbench[M]. 2nd ed. Beijing: China Water & Power Press, 2013.
- [24] 宋玉普. 多种混凝土材料的本构关系和破坏准则[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
- SONG Yu-pu. Constitutive Relationship and Failure Criteria of the Concrete Materials[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2002.
- [25] 聂成才, 刘克, 张守钊. 解读《钢筋套筒灌浆连接应用技术规程》[J]. 居业, 2015(24): 82, 84.
- NIE Cheng-cai, LIU Ke, ZHANG Shou-zhao. Understanding of *Technical Specification for Grout Sleeve Splicing of Rebars* [J]. Create Living, 2015(24): 82, 84.