

引用本文:杨 鸥,彭昭军,刘艳芝,等. 8.8 级拼接锚栓单向拉伸试验[J]. 建筑科学与工程学报,2020,37(4):69-77.

YANG Ou, PENG Zhao-jun, LIU Yan-zhi, et al. Monotonic Tensile Test of Spliced 8.8-grade Jointed Bolts[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(4): 69-77.

DOI:10.19815/j.jace.2019.07021

8.8 级拼接锚栓单向拉伸试验

杨 鸥, 彭昭军, 刘艳芝, 康黎静

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:为了研究采用钢螺纹套筒连接 2 个 8.8 级螺栓所组成的拼接锚栓的拉伸性能,对 12 组 36 个 8.8 级拼接锚栓试件进行拉伸试验,以确定不同直径的螺栓和钢螺纹套筒的连接长度,进而确定不同直径锚栓钢螺纹套筒的下料长度;为了确定套筒连接的影响,对 4 组 12 个 8.8 级螺栓进行拉伸试验,并与拼接锚栓试件试验结果进行对比分析。结果表明:当螺杆直径 d 为 16 mm,两螺杆与钢螺纹套筒的连接长度均为 $0.75d$ (螺杆拧入套筒 7 丝扣)时,试件的破坏均为螺杆从钢螺纹套筒中拔出,其余拼接锚栓试件破坏均为套筒外螺杆被拉断;在相同连接长度下,不同直径不同螺距试件的螺杆螺纹平均挤压应力、平均剪切应力、平均弯曲应力大小相差很小,说明在螺杆与钢螺纹套筒连接长度范围内,3 种应力的的大小只与直径倍数的连接长度有关;同一直径螺杆单边连接长度越小,拼接锚栓拉伸变形能力越好,拼接锚栓的延性越好,建议螺杆与套筒单边连接长度为螺杆直径的 1 倍(16, 20, 24 mm 直径的螺杆拧入套筒 9 丝扣, 27 mm 直径的螺杆拧入套筒 10 丝扣),这样既能保证不发生螺杆从套筒中拔出的现象,也能使锚栓有较好的延性;螺杆试件抗拉强度比拼接锚栓试件略高,但相对于螺杆刚度,拼接锚栓试件刚度略有退化。

关键词:8.8 级螺栓;拼接锚栓;钢螺纹套筒;拉伸试验

中图分类号:TU398

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2020)04-0069-09

Monotonic Tensile Test of Spliced 8.8-grade Jointed Bolts

YANG Ou, PENG Zhao-jun, LIU Yan-zhi, KANG Li-jing

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China)

Abstract: In order to study the tensile behavior of the spliced anchor bolt by connecting two 8.8 grade bolts with steel thread sleeve, tensile tests were carried out on 12 groups of 36 grade 8.8 spliced anchor bolt specimens to determine the connection length of bolt and steel thread sleeve with different diameters, and then determine the length of steel thread sleeve with different diameter anchor bolts. In order to determine the influence of sleeve connection, tensile tests were carried out on 12 grade 8.8 bolts in 4 groups, and the results were compared with the test results of spliced anchor bolts. The results show that when the bolts diameter $d = 16$ mm, and the connection length between the two screws and the steel thread sleeve is $0.75d$ (screwed into sleeves 7 buckles), the failure of the specimens is that the bolts are pulled out from the steel

收稿日期:2019-08-06

基金项目:国家自然科学基金项目(51578229);湖南省自然科学基金项目(2018JJ3058)

作者简介:杨 鸥(1981-),男,湖南永州人,副教授,工学博士,E-mail:ouyanghnu@hnu.edu.cn。

通信作者:刘艳芝(1982-),女,湖南新化人,副教授,工学博士,E-mail:liuyan zhi@hnu.edu.cn。

thread sleeve, and the rest of the spliced anchor bolt specimens are damaged by the failure of the bolt outside the sleeve. The average extrusion stress, average shear stress and average bending stress of screw threads of specimens with different diameters, different pitches have little difference at the same connection length, which indicates that, within the range of the connecting length of the screw and the steel thread sleeve, the magnitude of the three stresses is only related to the connection length for multiples of diameter. The smaller the length of one-sided connection of the same diameter screw, the better the tensile deformation ability and ductility of the splice anchor bolt, so it is suggested that the length of one-sided connection between screw and sleeve is d (16, 20, 24 mm diameter screws screwed into sleeves 9 buckles, 27 mm diameter screws screwed into sleeves 10 buckles), which can not only ensure that the screw is not pulled out of the sleeve, but also has good ductility. The tensile strength of the single bolt is slightly higher than that of the spliced anchor bolt, but the stiffness of the spliced anchor bolt is slightly degraded when compared with the single bolt.

Key words: 8.8-grade bolt; jointed bolt; steel thread sleeve; tensile test

0 引言

随着装配式钢-混凝土组合结构逐渐应用在实际工程中,对装配式钢-混凝土组合结构关键构件之间连接部位受力机理和设计方法的研究也逐渐引起研究者的关注^[1-3]。目前国内外鲜见有对预制装配式钢管混凝土柱脚关键连接部位力学性能和设计方法的研究。柱脚节点是决定建筑结构稳定承载力的主要因素,它将上部结构的轴力、弯矩和剪力通过锚栓连接件传递到下部基础,来保证上部结构与基础可靠连接。因此,柱脚节点锚栓锚固性能的安全、可靠关系到整个建筑的安全。本文研究了一种 8.8 级拼接锚栓,拼接锚栓由预埋锚栓、螺纹钢套筒、连接锚栓组成,预埋锚栓预埋于基础中并与螺纹套筒连接,螺纹套筒另一端表面与基础表面平齐,连接锚栓与基础表面端套筒连接,并通过六角头螺母将柱脚固定于基础上,通过给锚栓适当的埋深及其他构造措施,使得柱脚节点抗拔键破坏形成为拼接锚栓的连接螺杆断裂,将断裂的连接螺杆替换成完好无损的螺杆,以实现柱脚“可拆改”和“可修复”。

近年来国内外对钢筋机械螺纹连接进行了较为系统的研究。黄晟霖^[4]对 500 MPa 级高强钢筋剥肋滚轧直螺纹连接进行了试验研究,确定了适合不同直径钢筋的直螺纹连接套筒设计尺寸,研究发现当连接长度能够满足螺纹不先于钢筋破坏的要求时,增加连接长度并不能使连接强度有所提高,且套筒厚度的增大并不能提高连接强度;套筒的长度以满足拧入的钢筋丝扣头螺纹个数不超过 13 个为宜;套筒外径与钢筋公称直径的比值控制在 1.6 左右为

佳,不宜超过 1.8。邢怀念等^[5]采用英制 460 MPa 钢筋,对剥肋滚轧和直接滚轧螺纹套筒接头进行了一系列静载、动载试验研究,结果表明:直螺纹接头能达到等强连接,剥肋滚轧直螺纹接头的变形性能优越于直接滚轧直螺纹接头;直螺纹接头性能等级能达到《钢筋机械连接通用技术规程》(JGJ 107—2003)^[6] I 级接头要求;在应力比为 0.2 的疲劳荷载下,英制 460 MPa 钢筋剥肋滚轧直螺纹接头的疲劳强度设计值可取为 207 MPa。王贺郑等^[7]对多种规格型号的滚轧直螺纹钢筋接头进行了动态力学性能试验,并找出了钢筋接头疲劳断裂的原因和规律。安晶等^[8]采用有限元软件 ANSYS 对钢筋剥肋滚轧直螺纹套筒连接方式下不同连接长度的钢筋与套筒的应力分布进行计算分析,结果表明钢筋和套筒最佳连接长度为 9~11 丝扣螺纹。Ruangrassamee 等^[9]研发了一种可耗散较大能量的钢筋直螺纹机械连接接头,这种接头的钢筋并不是对顶连接,而是在两被连接的钢筋之间留有一段空隙,而且这种接头与规范 UBC1997^[10]规定不同的是套筒强度比连接钢筋强度低,在反复拉压作用下达到能量耗散作用,研究者通过单向拉伸、单向压缩及反复拉压研究了不同的套筒壁厚及套筒中空间隙的长度对此类接头连接性能的影响,结果表明:接头的承载力由套筒壁厚控制,在单向压缩试验中,相对于普通无连接钢筋,连接件屈曲后承载力更高,接头的能量耗散是普通无连接钢筋的 5 倍;在单向拉伸试验中,随着套筒中空间隙长度的增加,接头能量耗散能力也增加,但普通无连接接头钢筋的延性大概是有连接接头的 5 倍;在反复拉压试验中,接头的能量耗散能力随套筒

中空间隙长度的增加而增加。高中勤等^[11]为了解决实际工程中锚栓偏差过大的问题,使用了钢螺纹套筒接长锚栓的技术,锚栓与钢螺纹套筒材质为 Q235 或 Q345,钢螺纹套筒直径根据抗拉强度等强原理计算确定,钢螺纹套筒长度取螺帽厚度的 2 倍,实际工程中取螺帽厚度的 3 倍,然而这种取法并不一定安全,本文后面会加以说明。

上述研究表明,国内外对钢筋直螺纹机械连接接头的研究已经比较完备,对于钢螺纹套筒接长 Q235 或 Q345 材质的锚栓有一定的实际工程经验,但对于 8.8 级螺栓机械连接接头的研究尚未开展。本文对钢螺纹套筒连接的 2 根 8.8 级螺杆所组成的拼接锚栓试件进行拉伸试验,以研究拼接锚栓的拉伸性能。为了实现柱脚节点“可拆改”和“可修复”的目的,使用 8.8 级高强螺杆作为柱脚锚栓相对于普通强度锚栓,可以减小锚栓直径从而减小对柱脚基础配筋的扰动;另外使用螺纹套筒连接锚栓除了实现柱脚节点“可拆改”和“可修复”的目的,还可以解决可能因锚栓埋深太大或由于施工误差导致的锚栓竖向位置不准确而带来的锚栓接长问题;地脚锚栓高位固定时,锚栓长度可能不够,可以参考拼接锚栓的连接方式,接长地脚锚栓;拼接锚栓及改进拼接锚栓还可以改善柱脚节点的延性,增强柱脚节点的抗

震耗能性能,这在后续锚栓抗拔试验中已经加以详细说明。

1 试验试件

为了研究拼接锚栓拉伸性能,获得锚栓在各种直径下与钢套管的连接长度,本试验选用 8.8 级发黑全螺纹高强度直螺杆,16 mm 直径的螺杆由 35 号钢加工制作而成,其余直径的螺杆由 45 号钢加工制作而成,钢螺纹套管采用 40Cr 材质制作而成,强度达到 10.9 级螺栓强度。8.8 级螺杆螺纹和钢螺纹套筒螺纹均按《普通螺纹直径与螺距系列》(GB/T 193—2003)^[12],《普通螺纹基本尺寸》(GB/T 196—2003)^[13],《普通螺纹公差》(GB/T197—2003)^[14]加工,连接螺杆拧入套管深度即连接长度,最大连接长度参考 JG/T 163—2013^[15]附录表 A.1 钢筋机械连接用直螺纹套筒最小尺寸参数表,取直接滚轧直螺纹钢筋连接用套筒长度的一半;套筒的下料长度由 2 倍的连接长度加 5 mm 确定,套筒外径参考 JG/T 163—2013^[15]附录表 A.1 中直接滚轧直螺纹钢筋连接用套筒外径,此套筒外径与螺栓直径比值为 1.53 左右,与黄晟霖^[4]所提到的套筒外径与钢筋公称直径比值控制在 1.6 左右比较相符。设计 10 组 30 个拼接锚栓试件。各试件规格见表 1。

表 1 试件规格

Tab. 1 Details of Specimens

试件编号	锚栓直径/ mm	套筒外径/ mm	两锚栓拧入套筒 长度/mm	套筒下料长度/ mm	连接锚栓下料 长度/mm	预埋锚栓下料 长度/mm	试件数
S16075	16	26	12(0.75 <i>d</i>)	29	200	200	3
S16100	16	26	16(<i>d</i>)	37	200	200	3
S16125	16	26	20(1.25 <i>d</i>)	45	200	200	3
S20075	20	32	15(0.75 <i>d</i>)	35	200	200	3
S20100	20	32	20(<i>d</i>)	45	200	200	3
S20125	20	32	25(1.25 <i>d</i>)	55	200	200	3
S24075	24	40	18(0.75 <i>d</i>)	41	200	200	3
S24100	24	40	24(<i>d</i>)	53	200	200	3
S24125	24	40	30(1.25 <i>d</i>)	65	200	200	3
S27075	27	44	20(0.75 <i>d</i>)	45	200	200	3
S27100	27	44	27(<i>d</i>)	59	200	200	3
S27125	27	44	34(1.25 <i>d</i>)	73	200	200	3
B16	16				300		3
B20	20				300		3
B24	24				300		3
B27	27				300		3

注:试件 S16075 中,S 表示拼接,16 表示全螺纹高强螺杆直径为 16 mm,75 表示两全螺纹高强螺杆拧入长度为 0.75 倍螺杆直径;*d* 为相应螺杆直径;拧入长度 0.75*d* 相当于 16,20,24 mm 直径螺杆拧入套筒 7 丝扣螺纹,27 mm 直径螺杆拧入套筒 8 丝扣螺纹;拧入 *d* 相当于 16,20,24 mm 直径螺杆拧入套筒 9 丝扣螺纹,27 mm 直径螺杆拧入套筒 10 丝扣螺纹;拧入 1.25*d* 相当于 16,20,24 mm 直径螺杆拧入套筒 11 丝扣螺纹,27 mm 直径螺杆拧入套筒 12 丝扣螺纹;试件 B-16 为单个螺栓试件,B 表示螺栓,16 表示螺栓直径为 16 mm。

材性试验在湘潭大学 1 000 kN 万能试验机上完成,8.8 级螺栓及钢螺纹套筒力学性能测试值如表 2 所示。

表 2 8.8 级锚栓与钢螺纹套筒力学性能测试值
Tab.2 Test Values of Mechanical Properties of
8.8-grade Bolt and Steel Thread Sleeve

试件编号	平均抗拉强度/MPa	平均延伸率/%
M16	832.7	5.23
M20	836.8	8.37
M24	844.2	4.62
M27	824.6	8.98
钢螺纹套筒	1 135.1	2.15

2 试验加载装置及方案

试验加载装置采用湖南大学结构实验室的 500 kN 万能材料试验机,如图 1 所示。按照规范 GB/T 228.1—2010^[16] 中的规定和要求,本次拉拔试验通过位移控制加载速度,控制速度为 5 mm·min⁻¹,拉拔过程中的拉拔力、位移等数值可通过力传感器直接在显示器上读取并保存。试验过程中采用量程为 25 mm 的中国台湾 EEE 数显千分表测量套筒段拼接锚栓接头及螺杆在拉伸过程中的变形,如图 2 所示,当力加载到极限值过后出现下降段时,取下千分表数据采集线,以防止千分表数据采集接口被震坏,螺栓断裂或螺栓从钢螺纹套筒中拔出时停止加载。

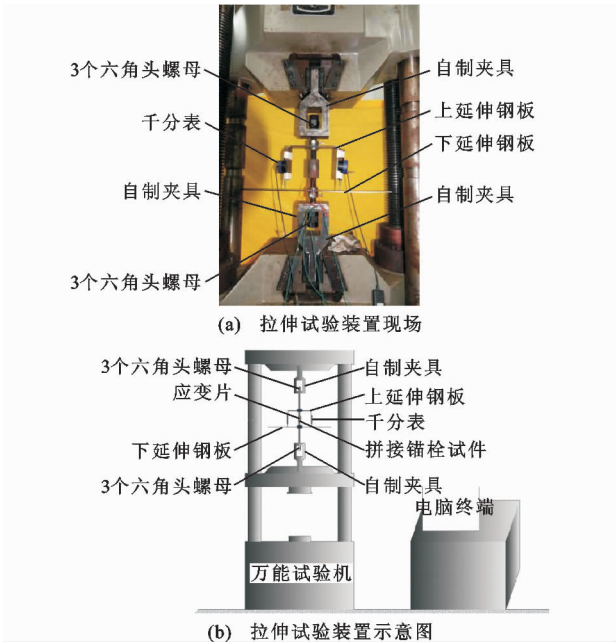


图 1 试验装置
Fig.1 Experimental Setup

由于万能材料试验机自带夹具的夹持力太小,本试验采用自制夹具夹持试件,自制夹具通过上下

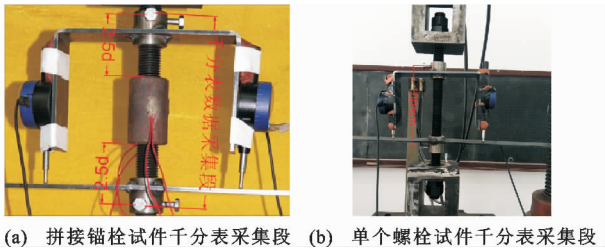


图 2 千分表采集段示意图
Fig.2 Schematic of Acquisition Segment by Dial Gauge

各 3 个六角头螺母锚住试件以达到夹持试件的作用,如图 1(b)所示。自制夹具由拉伸试验机自带夹具进行夹持,在夹持试件前先进行自制夹具对中。对于拼接锚栓试件,本试验通过螺丝将上下延伸钢板固定于距套筒两端 2.5 倍直径的上下两螺杆上,对于螺杆拉伸试件,则是用螺丝将上下延伸钢板以 100 mm 的距离固定于螺杆上。而后将千分表用橡皮泥及橡皮膏固定于上延伸钢板上,橡皮泥起初始固定千分表作用,并在试件断裂瞬间起缓冲作用以保护千分表。将千分表测头与下延伸钢板接触,以测量距离套筒两端 2.5 倍直径处两测点的相对位移,如图 2 所示。

3 试验结果及分析

3.1 试件破坏模式

在预试验中,自制夹具上下各通过 1 个六角头螺母锚栓 16 mm 直径的 8.8 级螺杆,在加载过程中出现了六角头螺母滑移,16 mm 直径的螺杆螺纹被磨平的现象,因此文献^[11]由单个六角头螺母厚度确定钢螺纹套筒长度不一定安全。

试验结果表明,拼接锚栓试件仅 S16075 的 3 个试件破坏模式为螺杆从钢螺纹套筒中拔出,螺杆螺纹被磨平,套筒螺纹完好无损,如图 3(a)所示;其余试件均为螺杆拉断破坏,且破坏截面均在套筒外,如图 3(b)所示。

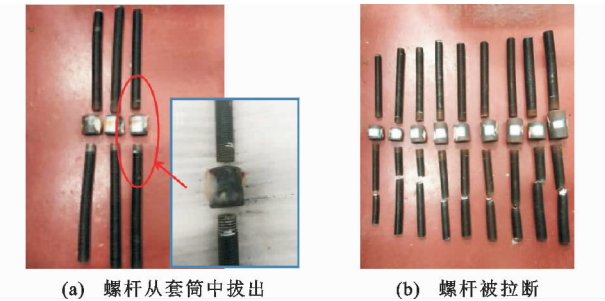


图 3 试件破坏形态
Fig.3 Failure Modes of Specimens

3.2 螺纹应力计算与相关试验数据统计

螺纹应力计算参考《钢结构设计手册》^[17],螺纹应力分 3 个方面计算,分别为:螺纹挤压应力计算,螺杆螺纹剪切应力计算,螺杆螺纹弯曲应力计算。

(1) 螺纹挤压应力计算

螺纹的主要参数如图 4 所示,其中,大径 d 为螺纹的公称直径,是与外螺纹牙顶(或内螺纹牙底)相重合的假想圆柱体直径。小径 d_1 常用于强度计算,是与外螺纹牙底(或内螺纹牙顶)相重合的假想圆柱体直径。 d_1 与螺杆公称直径 d 、螺距 P 的关系为 $d_1=d-1.082\ 5P$ 。中径 d_2 常用于几何计算,是一个假想圆柱体的直径,该圆柱的母线上牙型沟槽和凸起宽度相等;螺距 P 为相邻两螺纹牙在中径线上对应点间的轴向距离,线数 n 为螺纹的螺旋线数目,导程 S 为沿螺纹上同一条螺旋线转 360° 所移动的轴向距离, $S=nP$; h 为螺纹工作高度, h 与螺距 P 的关系为 $h=0.541P$;螺纹升角 ψ 为中径 d_2 圆柱上螺旋线的切线与垂直于螺纹轴线平面的夹角, $\tan(\psi)=nP/(\pi d_2)$,牙型角 α 为在轴向截面内,螺纹牙型两侧边的夹角,牙侧角 β 为在轴向截面内,螺纹牙型一侧边与螺纹轴线的垂线之间的夹角。螺纹挤压应力按式(1)计算

$$\sigma_p=\frac{F}{\pi d_2 h z} \tag{1}$$

式中: σ_p 为挤压应力; F 为试件峰值荷载; z 为实际

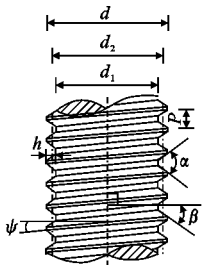


图 4 螺纹主要参数示意图

Fig. 4 Schematic of Main Thread Parameters

工作的螺纹牙圈数,即螺杆拧入套筒的丝扣数。

(2) 螺杆螺纹剪切应力计算

$$\tau=\frac{F}{\pi d_1 b z} \tag{2}$$

式中: τ 为螺杆螺纹剪切应力; b 为螺纹牙底宽度, $b=0.75P$ 。

(3) 螺杆螺纹弯曲应力计算

$$\sigma_b=\frac{3Fh}{\pi d_1 b^2 z} \tag{3}$$

式中: σ_b 为螺杆螺纹弯曲应力。

各试件螺纹挤压应力按式(1)计算,螺杆螺纹剪切应力按式(2)计算,螺杆螺纹弯曲应力按式(3)计算,计算结果及其他相关试验数据如表 3 所示。

同一螺杆直径不同连接长度试件的等效应力-等效应变曲线($\sigma\epsilon$)如图 5 所示。图 5 中的等效应力为试验机采集的力值与螺杆有效截面的比值,等

表 3 试验数据与螺纹应力计算结果

Tab. 3 Experimental Data and Calculation Results of Threads Stress

试件编号	峰值点荷载 平均值/kN	峰值点等效应力 平均值/MPa	峰值等效应变 平均值/%	螺纹挤压应力 平均值 σ_m /MPa	螺纹剪切应力 平均值 τ_b /MPa	螺纹弯曲应力 平均值 σ_n /MPa	破坏形态
S16075	119.72	763.98	1.23	342.25	262.33	567.67	螺杆被拔出
S16100	127.57	814.12	3.22	283.65	217.42	470.48	螺杆被拉断
S16125	125.98	803.95	2.20	229.19	175.66	380.13	螺杆被拉断
S20075	201.40	822.03	6.98	368.50	282.44	611.19	螺杆被拉断
S20100	201.08	820.71	5.51	286.15	219.33	474.61	螺杆被拉断
S20125	198.49	810.18	4.25	231.12	177.14	383.33	螺杆被拉断
S24075	278.48	791.12	3.47	353.84	271.21	586.87	螺杆被拉断
S24100	282.07	801.35	2.60	278.76	213.66	462.35	螺杆被拉断
S24125	278.34	790.75	2.50	225.06	172.50	373.29	螺杆被拉断
S27075	362.29	789.30	7.22	354.56	269.74	583.69	螺杆被拉断
S27075-4	459.28	1 000.60	5.00	449.48	341.95	739.95	螺杆被拉断
S27100	360.39	785.15	6.58	282.16	214.65	464.50	螺杆被拉断
S27125	354.08	771.41	6.06	231.01	175.75	380.31	螺杆被拉断
B16	129.17	824.32	2.92				螺杆被拉断
B20	202.67	827.88	5.46				螺杆被拉断
B24	292.14	828.77	3.09				螺杆被拉断
B27	369.86	805.09	7.14				螺杆被拉断

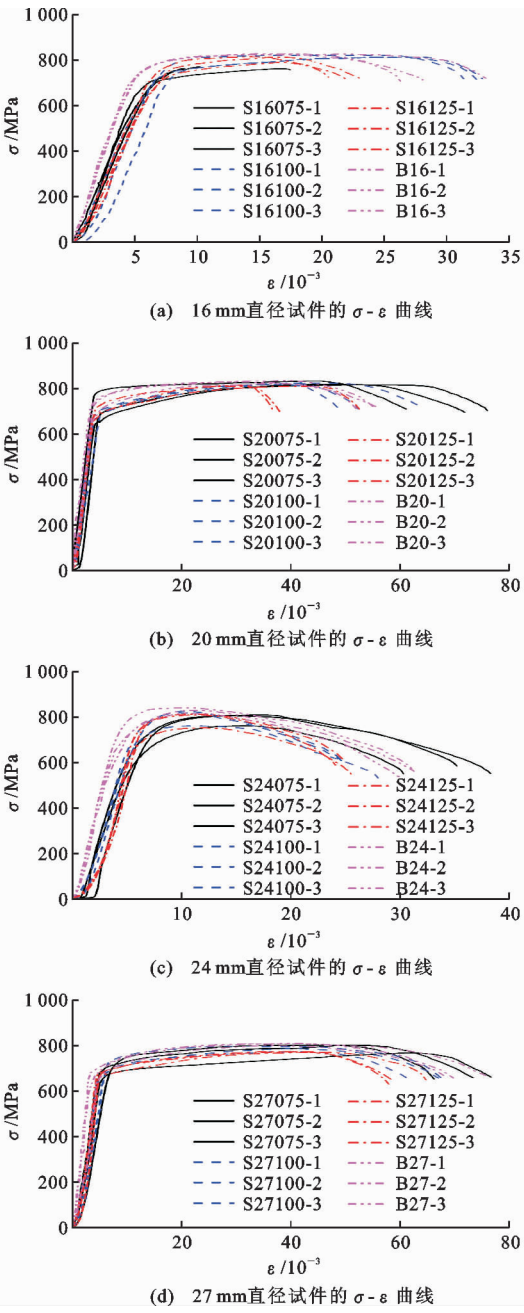


图5 同一直径螺杆试件的等效应力-等效应变曲线
Fig. 5 Equivalent Stress-equivalent Strain Curves of the Same Diameter Screw Specimens

效应变为千分表所测相对位移与千分表数据采集段长度的比值。

3.3 试件承载力与应力分析

从表3及图5可知,试件的等效峰值应力均低于材性试验强度甚至低于800 MPa,这是拉伸试验过程中的偏拉及六角头螺母与自制夹具间锚固缺陷所致,这在后续拼接锚栓抗拔试验中也观察到了类似的现象。锚栓的锚固缺陷在实际工程中应加以重视。实际工程中,柱脚节点抗拔键连接是通过锚栓

与六角头螺母将柱脚底板固定于混凝土基础上,若柱脚底板太薄,在拉拔荷载作用下,柱脚底板产生比较大的弯曲变形,六角头螺母发生倾斜,或者柱脚底板处锚栓孔洞太大,在拉拔荷载作用下六角头螺母也会发生倾斜。这2种情况均会在六角头螺母、锚栓、柱脚底板三者相接处产生其他方向的接触应力,导致锚固缺陷,降低了锚栓拉拔承载力。实际工程中柱脚底板厚度应适当加大,底板处锚栓孔洞不宜太大,为了避免施工误差导致锚固缺陷的产生,锚栓抗拉承载力设计值应该进行适当折减。

从表3可知,S16075的3个试件峰值点等效应力平均值已达到S16100与S16125的6个试件峰值点等效应力平均值的94.4%。S16075的3个试件螺杆与钢螺纹套筒的连接长度为12 mm,连接丝扣数为7,由S16075拉伸荷载峰值平均值分别除以螺杆与钢螺纹连接套筒长度以及螺杆拧入钢螺纹套筒丝扣数得到。单位连接长度承担的荷载为9.98 kN,每一丝扣平均承担的荷载为17.1 kN,螺杆直径为16 mm的试件中最大峰值荷载为128.39 kN,128.39 kN/17.1 kN=7.51,这说明对于16 mm直径的螺杆,当它与钢螺纹套筒连接的丝扣数为8,连接长度为14 mm时,足以保证拼接锚栓的破坏模式为套筒外螺杆被拉断,而不是从套筒中拔出。

由表3可以看出,螺杆的承载力比同一直径拼接锚栓试件略高,这可能是由于拼接锚栓在偏拉荷载作用下,钢螺纹套筒对上下两螺杆有一定的约束作用,使螺杆受力更复杂,增加其他方向的应力使得拼接锚栓抗拉强度降低。

由表3可以看出,S20075,S24075,S27075三种试件的平均挤压应力、平均剪切应力、平均弯曲应力比S16075相应极限强度还要大,但S20075,S24075,S27075并没有发生螺杆从套筒中拔出破坏,这是因为16 mm直径的螺杆是由强度较低的35号钢加工制作而成,而20,24,27 mm直径的螺杆是由强度较高的45号钢加工制作而成。S16075的3个试件16 mm直径的螺杆与钢螺纹套筒连接的平均挤压极限强度 σ_{pmax} 、平均剪切极限强度 τ_{max} 、平均弯曲极限强度 σ_{bmax} 分别为342.252,262.330,567.667 MPa,S16100的3个试件螺杆螺纹的3种计算应力平均值分别为283.658,217.420,470.482 MPa,剩余17.12%的连接强度,S16125的3个试件螺杆螺纹的3种计算应力平均值分别为229.185,175.667,380.132 MPa,剩余33.04%的连接强度,近乎为17.12%的2倍。表3中S27075-4试件为补做试件,

螺杆采用的是用于后续拼接锚栓与混凝土黏结锚固性能试验的同一批螺杆,其螺杆应力已达到 1 000.6 MPa,远超过 800 MPa,其螺杆螺纹的挤压应力、剪切应力、弯曲应力分别为 449.476, 341.947, 739.951 MPa,分别为 16 mm 直径螺杆平均挤压极限强度、平均剪切极限强度、平均弯曲极限强度的 1.31 倍、1.30 倍、1.30 倍,为 S27075-1, S27075-2, S27075-3 三个试件平均挤压应力、平均剪切应力、平均弯曲应力的 1.27 倍,且 S27075-1, S27075-2, S27075-3 三个试件并没有发生螺纹破坏。这说明,对于 27 mm 直径的螺杆,拧入套筒 0.75 倍的螺杆直径,接头在单向拉伸作用下具有很高的安全储备。各直径试件螺杆螺纹 3 种应力分别随螺杆与套筒同一直径倍数连接长度变化如图 6 所示,其中, l 为连接长度。

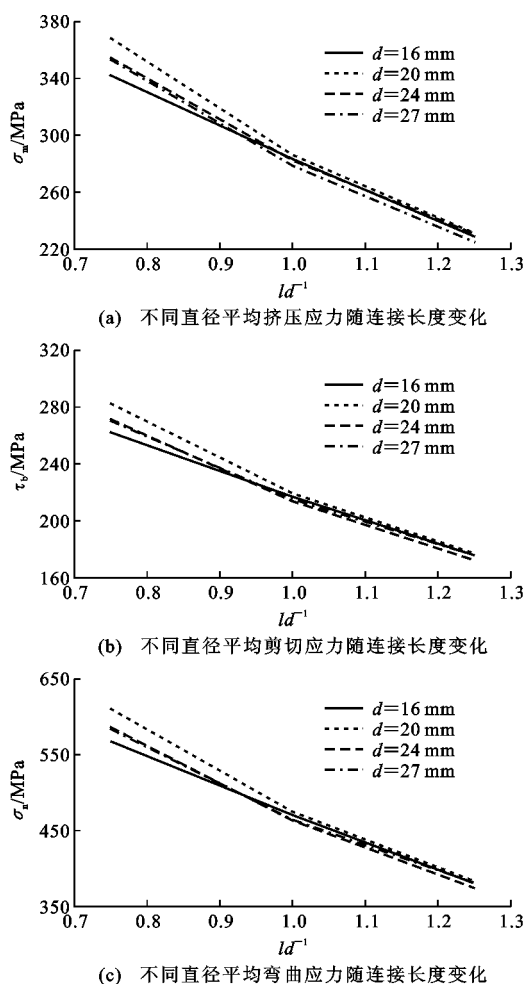


图 6 不同直径螺杆试件螺纹应力随连接长度变化

Fig. 6 Variation of Stresses of Screw Thread with Spliced Length of Different Diameter Screw Specimens

由图 6 可以看出,平均挤压应力、平均剪切应力、平均弯曲应力随各直径螺杆与套筒连接长度变

化的趋势几乎完全一致,而且同一直径倍数连接长度下,各直径螺杆螺纹的 3 种应力大小很接近,尤其在连接长度为 $d, 1.25d$ 时,各直径的 3 种应力大小几乎一致。虽然 27 mm 直径的螺杆拧入套筒的丝扣数比 16, 20, 24 mm 直径的螺杆拧入套筒的丝扣数多一丝扣,但只要 27 mm 直径试件跟其他直径试件连接长度一致,即连接长度都为螺杆直径同样的倍数,27 mm 直径螺杆 3 种应力随连接长度变化趋势及 3 种应力的大小与其他 3 种直径试件没有任何明显区别。拼接锚栓峰值点等效拉应力差不多大小时,即使是在不同直径不同连接丝扣数拼接锚栓破坏时,平均挤压应力、平均剪切应力、平均弯曲应力的大小在同一直径倍数连接长度下也差不多,且螺杆拉应力小的试件 3 种应力也小。这说明拼接锚栓拉应力相同时,拼接锚栓螺杆螺纹的平均挤压应力、平均剪切应力、平均弯曲应力只跟螺杆与套筒连接长度有关,与螺杆直径及螺杆拧入钢螺纹套筒丝扣数等无关。分析原因为:计算 3 种应力的几个参数除了力以外其他参数都与螺杆公称直径及螺距有关,然而按照《普通螺纹基本尺寸》(GB/T 196—2003)^[13]螺距并不是随螺杆直径的变化而变化,比如本试验所使用的 16, 20, 24, 27 mm 直径螺杆的螺距分别为 2, 2.5, 3, 3 mm,可见 27 mm 直径的螺杆与 24 mm 直径螺杆的螺距是一样的,而螺杆与套筒连接长度 $0.75d, d, 1.25d$ 都随直径变化而变化,这也是 27 mm 直径螺杆在与其他试件同一直径倍数连接长度下拧入套筒的丝扣数却不一样的原因。

3.4 试件变形性能分析

由表 3 可知,所有试件接头延伸率均低于材性试验中无套筒连接螺杆延伸率。由表 3 及图 5 可以看出,除 S16075 的 3 个试件螺杆未达极限强度从而未来得及进行充分的塑性变形就从套筒中拔出来了,导致 S16075 的 3 个试件的延伸率远低于同是 16 mm 直径螺杆的另 2 种试件,对于其他同一螺杆直径试件,螺杆与钢螺纹套筒连接长度越大,千分表数据采集段的延伸率越小,即钢螺纹套筒与螺杆连接接头延性越小,这是由于螺杆与钢螺纹套筒连接长度越小,同一拉伸力作用下螺杆与钢螺纹套筒连接的每一丝扣所承受的拉伸力越大,到拉伸试验后期塑性变也越大。其中 S16100 的 3 个试件平均延伸率比 S16125 的 3 个试件平均延伸率提高了 46.7%, S20075 的 3 个试件的平均延伸率比 S20100 的 3 个试件平均延伸率提高了 26.7%, S20100 的 3 个试件平均延伸率比 S20125 的 3 个试件平均延伸

率提高了 29.7%, S24075 的 3 个试件平均延伸率比 S24100 的 3 个试件平均延伸率提高了 33.5%, S24100 的 3 个试件平均延伸率比 S24125 的 3 个试件平均延伸率提高了 4.0%, S27075 的 3 个试件平均延伸率比 S27100 的 3 个试件平均延伸率提高了 9.7%, S27100 的 3 个试件平均延伸率比 S27125 的 3 个试件平均延伸率提高了 8.5%。各直径平均延伸率随连接长度变化如图 7 所示。

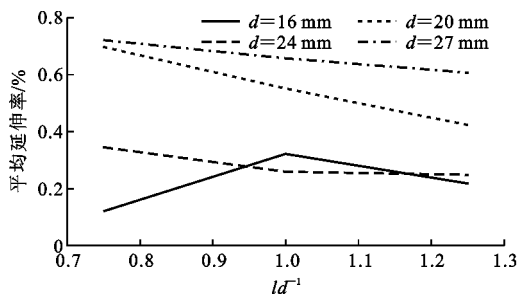


图 7 不同直径螺杆试件平均延伸率随连接长度变化
Fig. 7 Variation of Average Elongation with Different Spliced Lengths of Different Diameter Screw Specimens

由图 7 可以看出:直径为 27 mm 与直径为 20 mm 的试件平均延伸率随连接长度几乎为线性变化,考虑到同一直径试件千分表数据量测段螺杆长度均为 $2.5d$,这说明螺杆与钢螺纹套筒连接段的平均延伸率也是随着连接长度线性变化,进而可以推测螺杆与套筒连接的每一丝扣平均所承担的力几乎也随连接长度线性变化;直径 24 mm 的试件在连接长度为 $0.75d$ 时比连接长度为 d , $1.25d$ 两种连接长度试件平均延伸率大了许多,分析原因为 24 mm 直径的试件在 $0.75d$ 连接长度时螺纹塑性变形比其他 2 种直径大得多,导致千分表数据两量测段延伸率比其他 2 种试件大许多。

在加载前期,相对于螺杆试件,拼接锚栓在加载前期刚度有一定的退化(图 5),这可能是由于拼接锚栓在加载前期中既有螺纹变形又有螺杆变形。加载初期拼接锚栓试件还有一定的滑移,而螺杆试件加载初期没有滑移,这是由拼接锚栓螺杆与套筒螺纹间有初始间隙导致的。

综合以上分析,每种直径螺杆拧入钢螺纹套筒(d (16, 20, 24 mm 直径螺杆拧入套筒 9 个丝扣, 27 mm 直径螺杆拧入套筒 10 个丝扣)的深度是偏于安全的,且接头延性也比较好,螺杆拧入套筒 9 丝扣的长度与安晶等^[8]提出的钢筋和套筒最佳连接长度为 9~11 丝扣螺纹比较吻合。

4 结 语

(1)螺栓与钢螺纹套筒的单边连接长度越小,钢螺纹套筒与螺杆连接的单一丝扣所承担的荷载越大,拉伸试验后期单一丝扣塑性变形越大,钢螺纹套筒与螺杆连接接头的变形能力越好。

(2)当螺栓与钢螺纹套筒的单边连接长度为 $0.75d$,即螺杆拧入套筒 7 丝扣时,除 S16075 的 3 个试件均从钢螺纹套筒中拔出外,其余直径的试件均是套筒外螺杆断裂,且 S16075 的 3 个试件拉伸荷载峰值平均值已经达到 S16100, S16125 的 6 个试件拉伸荷载峰值平均值的 94.4%。

(3)计算了 S16075 每一丝扣的平均极限承载力,并由此计算得出,16 mm 直径的螺杆拧入钢螺纹套筒 8 丝扣既能保证螺杆断于套筒外而不是从套筒中拔出,且对于 27 mm 螺杆直径的拼接锚栓,单边连接长度为 $0.75d$ 时,接头在单向拉伸作用下有比较大的安全储备。

(4)计算了各直径试件在不同连接长度下螺杆螺纹的平均挤压压力、平均剪切应力、平均弯曲应力,分析了 3 种应力随螺杆与套筒连接长度的变化,发现在同一直径倍数的连接长度下,不同直径不同螺距的试件 3 种应力大小相差很小,说明螺杆与钢螺纹套筒连接长度范围内,3 种应力的的大小只与同一直径倍数的连接长度有关。

(5)为了实际工程中钢螺纹套筒连接 8.8 级螺杆接头有更多的安全储备,建议每种直径螺杆拧入钢螺纹套筒 d ,即 16, 20, 24 mm 直径的螺杆拧入套筒 9 丝扣, 27 mm 直径的螺杆拧入套筒 10 丝扣,这样既能保证螺栓不从钢螺纹套筒中拔出,又能保证钢螺纹套筒与螺杆连接接头有比较好的延性。

(6)8.8 级螺杆采用强度达到 10.9 级螺栓强度的钢螺纹套筒连接时,套筒长度可按 $2d+5$ mm 计算,这样的钢螺纹套筒长度比 JG/T 163—2013 附录表 A.1 钢筋机械连接用直螺纹套筒最小尺寸参数表规定的套筒长度小。钢螺纹套筒外径可参考 JG/T 163—2013 附录表 A.1 钢筋机械连接用直螺纹套筒最小尺寸参数表规定的套筒外径。

(7)螺杆抗拉强度比拼接锚栓试件略大;相比于螺杆刚度,拼接锚栓试件抗拉刚度略有退化。

参考文献:

References:

[1] XIAO J Z, HUANG X, SHEN L M. Seismic Behavior

- of Semi-precast Column with Recycled Aggregate Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2012,35:988-1001.
- [2] SHEN L Y, TAM V W Y, LI C Y. Benefit Analysis on Replacing in Situ Concreting with Precast Slabs for Temporary Construction Works in Pursuing Sustainable Construction Practice[J]. Resources Conservation and Recycling, 2009,53(3):145-148.
- [3] YANG K H, OH M H, KIM M H, et al. Flexural Behavior of Hybrid Precast Concrete Beams with H-steel Beams at Both Ends[J]. Engineering Structures, 2010,32(9):2940-2949.
- [4] 黄晟霖. 500 MPa 高强钢筋机械连接技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学. 2016.
- HUANG Sheng-lin. Research on Mechanical Connection of 500 MPa High Strength Rebars[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [5] 邢怀念, 张小鹏, 刘增利, 等. 钢筋滚轧直螺纹套筒连接性能试验研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(增): 846-849.
- XING Huai-nian, ZHANG Xiao-peng, LIU Zeng-li, et al. Experimental Study on the Properties of Rebar Parallel Thread Sleeve Joint[J]. Industrial Construction, 2009,39(S):846-849.
- [6] JGJ 107—2003, 钢筋机械连接通用技术规程[S].
- JGJ 107—2003, General Technical Specification for Mechanical Splicing of Bars[S].
- [7] 王贺郑, 苗同臣, 李永娟. 滚轧直螺纹钢筋接头疲劳试验研究[J]. 工业建筑, 2013, 43(增): 622-624, 643.
- WANG He-zheng, MIAO Tong-cheng, LI Yong-juan. The Fatigue Experiment Study of Rolled Straight Thread Rebar Joints [J]. Industrial Construction, 2013,43(S):622-624,643.
- [8] 安 晶, 王振波. 钢筋直螺纹连接强度分析[J]. 江南大学学报:自然科学版, 2009, 8(3): 331-334.
- AN Jing, WANG Zhen-bo. Strength Analysis of Reinforcebar Connector[J]. Journal of Jiangnan University: Natural Science Edition, 2009, 8(3): 331-334.
- [9] RUANGRASSAMEE A, MOUNNARATH P. Monotonic and Cyclic Behaviors of Energy-dissipating Threaded Mechanical Splices [C]//WCEE. Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing: China Seismological Press, 2008.
- [10] UBC1997, Uniform Building Code[S].
- [11] 高中勤, 庄晓亭, 王 亮, 等. 钢构件与混凝土构件连接锚栓接长技术[J]. 钢结构, 2010, 25(2): 64-65, 60.
- GAO Zhong-qin, ZHUANG Xiao-ting, WANG Liang, et al. Connection of Steel and Concrete Members with Anchor Bolt Joint Techniques[J]. Steel Construction, 2010, 25(2): 64-65, 60.
- [12] GB/T 193—2013, 普通螺纹直径与螺距系列[S].
- GB/T 193—2013, General Purpose Metric Screw Threads — General Plan[S].
- [13] GB/T 196—2003, 普通螺纹基本尺寸[S].
- GB/T 196—2003, General Purpose Metric Screw Threads — Basic Dimensions[S].
- [14] GB/T 197—2003, 普通螺纹公差[S].
- GB/T 197—2003, General Purpose Metric Screw Threads — Tolerances[S].
- [15] JG/T 163—2013, 钢筋机械连接用套筒[S].
- JG/T 163—2013, Couplers for Rebar Mechanical Splicing[S].
- [16] GB/T 228.1—2010, 金属材料拉伸试验: 第1部分: 室温试验方法[S].
- GB/T 228.1—2010, Metallic Materials — Tensile Testing — Part1: Method of Test at Room Temperature[S].
- [17] 但泽义, 柴 昶, 李国强, 等. 钢结构设计手册[M]. 4版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- DAN Ze-yi, CHAI Chang, LI Guo-qiang, et al. Manual of Steel Structure Design[M]. 4th ed. Beijing: China Building Industry Press, 2019.