

# 钢制灌浆套筒连接性能试验研究

吴 涛, 成 然, 刘全威

(长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061)

**摘要:** 为了降低套筒成本, 方便现场施工, 在前期试验的基础上, 设计制作了一组小型化钢制套筒, 完成了 31 个小型化套筒灌浆连接件的拉拔试验, 并基于 Mises 屈服准则对筒壁应力的实测值与计算值进行了对比。结果表明: 当钢筋锚固长度为  $1.0l_a$  ( $l_a$  为套筒灌浆钢筋计算锚固长度) 时, 除一个试件滑丝外, 18 个试件均为接头外钢筋拉断破坏, 且抗拉强度均大于连接钢筋抗拉强度标准值; 当钢筋锚固长度为  $0.6l_a$  时, 除一个试件钢筋拉断外, 11 个试件均为钢筋拔出破坏, 且残余承载力约为试件极限承载力的 1/2; 筒壁应力的实测值与计算值吻合较好, 建立的筒壁应力计算式可以为灌浆套筒设计提供参考。

**关键词:** 预制装配式结构; 小型化套筒; 拉拔试验; Mises 屈服准则; 筒壁应力

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2018)03-0309-08

## Experimental research on connection performance of steel grouted sleeve splice

WU Tao, CHENG Ran, LIU Quanwei

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

**Abstract:** In order to reduce the size and cost of the grouted sleeve, and provide convenience for site construction, a set of miniaturized grouted sleeves were designed at the basis of the previous experimental study. The direct tensile load test of 31 miniaturized grouted sleeve splices were completed, and the measured values of the wall stress were compared with the calculated values based on the Mises yield criterion. The results show that when the anchorage length is  $1.0l_a$  ( $l_a$  is the calculated anchorage length of steel bar in the grouted sleeve), the 18 specimens are steel bar rupture failure outside the joint in addition to a specimen slip screw, and the tensile strength is greater than specified tensile strength of the splice bar. For the specimens of anchorage length is  $0.6l_a$ , the 11 specimens are pullout failure in addition to a specimen is steel bar rupture, and the residual bearing capacity can reach about half of the ultimate bearing capacity of the specimens. The calculated values of the sleeve wall stress based on the Mises yield criterion are in good agreement with the measured values, and the calculation formula of the sleeve wall stress can be used as a reference for the design of the grouted sleeve splice.

**Key words:** precast concrete structure; miniaturized grouted sleeve; direct tensile load test; Mises yield criterion; sleeve wall stress

套筒灌浆连接是预制装配式混凝土结构纵向受力钢筋有效且可靠的钢筋连接方式, 研究和改进套筒灌浆连接方式对预制装配式结构的发展有着重要意义, 国内外学者对灌浆套筒的设计和应用已有了大量研究。20 世纪 60 年代末, 余占疏<sup>[1]</sup>首次提出了 NMB 套筒, 后传入日本等地并得到了广泛的应用。Einea、Alias、Ling<sup>[2-4]</sup>等设计制作了不同内壁构造和不同型号尺寸的套筒灌浆连接件并通过试验对其可行性进行了研究。Henin<sup>[5]</sup>设计了一种采用无缝钢管制作, 管壁内表面布有螺纹的灌浆套筒, 并通过单向拉伸试验和数值模拟对

套筒灌浆连接件的承载力进行了研究。Hosseini、Moosavi<sup>[6-7]</sup>等对内部设置剪力键的套筒灌浆连接件进行了研究并给出了最小剪力键设置间距。郑永峰<sup>[8]</sup>提出了一种采用低合金高强无缝钢管通过滚压工艺冷加工而成的新型变形灌浆套筒, 并通过单向拉伸和反复拉压试验对其力学性能进行了研究。目前, 国内的多家公司也致力于灌浆套筒的设计和研发工作, 但所生产的钢制套筒尺寸普遍较大且笨重, 造成套筒成本过高, 施工不便等问题。

本文在前期试验研究和理论分析的基础上,

收稿日期: 2017-05-31

修改稿日期: 2018-05-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578072); 陕西省自然科学基金(2016JM5070); 陕西省科技统筹创新工程计划项目(2015KTZDSF03-04)

第一作者: 吴 涛(1976—), 男, 博士, 教授, 主要从事钢筋混凝土结构基本理论及工程结构抗震性能研究。E-mail: wutao@chd.edu.cn

设计制作了一组小型化灌浆套筒,完成了小型化套筒灌浆连接件的拉拔试验,研究了不同钢筋锚固长度试件的破坏过程、破坏形态、荷载-位移曲线等,并基于 Mises 屈服准则,对筒壁应力的实测值与计算值进行了对比分析。

## 1 套筒灌浆连接件受力机理

套筒灌浆连接件由钢制或铸铁套筒、灌浆料以及连接钢筋三部分组成,国内外已有很多种套筒灌浆接头,且形式多种多样,总体上可分为全灌浆套筒接头和半灌浆套筒接头两大类<sup>[9]</sup>,本文重点研究半灌浆套筒接头的力学性能,图 1(a)为套筒灌浆连接件构造。

套筒灌浆连接件主要依靠材料之间的粘结作用来实现钢筋之间力的传递。钢筋与灌浆料之间的粘结作用由钢筋与灌浆料之间的化学胶结力  $f_1$ 、钢筋与灌浆料表面摩阻力  $f_2$  和钢筋表面变形肋与灌浆料之间的机械咬合力  $f_3$  三部分组成,灌浆料和套筒之间的粘结作用也主要由这三部分组成,其中机械咬合力主要由筒壁内侧的剪力键提供。

同时,在轴向力  $F$  作用下,由于钢筋的锥楔作用,钢筋会产生法向力  $q$ ,对灌浆料产生径向压力,灌浆料中的压力通过接触界面传递给套筒,套筒和套筒外的混凝土为灌浆料提供有效的侧向约束力  $f_{n1}$  和  $f_{n2}$ ,可以有效增强材料接触面的黏结锚固作用,确保接头的传力能力<sup>[2]</sup>,套筒灌浆连接件的受力机理如图 1(b)所示。

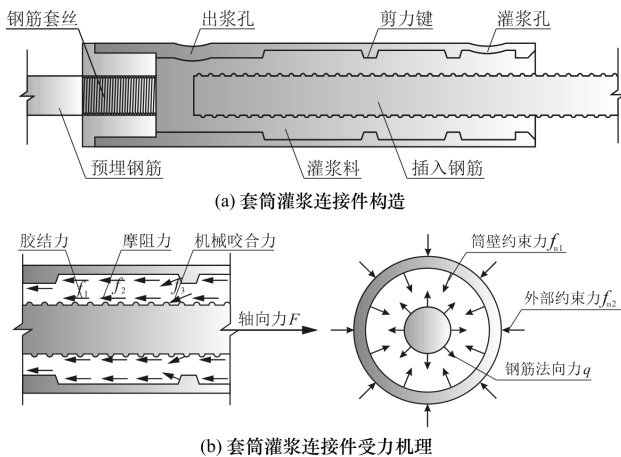


图 1 套筒灌浆连接件示意图

Fig. 1 Schematic diagram of grouted sleeve splice

## 2 小型化灌浆套筒设计

### 2.1 锚固长度

根据对套筒灌浆连接件受力机理分析,以钢筋受拉屈服为界限设计钢筋在套筒内的锚固长度,

并参考文献[5],给出套筒灌浆连接件中钢筋的锚固长度计算式:

$$l_a = \frac{F_y}{0.56df_{cu}} \quad (1)$$

式中:  $F_y$  为钢筋的屈服拉力;  $d$  为钢筋直径;  $f_{cu}$  为灌浆料的抗压强度;设计时取为 80 MPa。

根据式(1)可计算出不同直径钢筋在套筒灌浆连接件内的锚固长度。

### 2.2 筒壁厚度

基于之前已完成的 12 个套筒灌浆连接件拉拔试验,运用厚壁圆筒理论,建立了灌浆套筒筒壁的力学模型如图 2 所示,并给出钢制套筒筒壁应力的计算模型<sup>[10]</sup>:

$$\begin{cases} \sigma_z = \frac{Fz}{\pi(R^2 - R_0^2)l_a} \\ \sigma_r = -\frac{qd - (2R_0 - d)\bar{f}_t}{2R_0} \\ \sigma_\theta = \frac{qd^2(3R_0^2 + R^2)}{R_0^2(4R^2 - d^2)} - \nu\sigma_z \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $F$  为钢筋轴向拉力;  $q$  为锥楔作用下钢筋的横向作用力;  $\bar{f}_t$  表示灌浆料拉应力平均值;  $R$  为套筒外半径;  $R_0$  为套筒内半径;  $d$  为钢筋直径;  $\sigma_z$ 、 $\sigma_\theta$  和  $\sigma_r$  分别为套筒的纵向应力、横向应力和径向应力;  $\nu$  为套筒的泊松比。

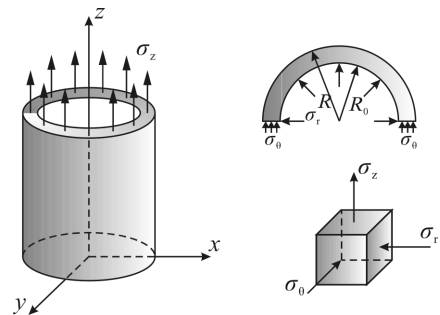


图 2 灌浆套筒筒壁力学模型

Fig. 2 Mechanical model of grouted sleeve wall

设计当钢筋达到极限强度  $f_u = 540 \text{ N/mm}^2$  时,确定不同直径套筒的内径、外径及筒壁壁厚,如表 1 所示,根据式(2)计算得筒壁的三向应力  $\sigma_z$ 、 $\sigma_r$ 、 $\sigma_\theta$ 。根据文献[11]和[12]的试验和经验,计算中取钢筋肋与灌浆料接触面的夹角  $\beta$  为  $30^\circ$ ,钢筋肋与灌浆料接触面的摩擦系数  $\mu$  为 0.4,泊松比  $\nu$  为 0.3。

Mises 屈服准则是在 Tresca 屈服准则的基础上发展演变而来,考虑了中间主应力的影响,在工程研究领域得到了广泛的应用。其表达式为

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_s^2 \quad (3)$$

式中:  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  分别为第一、第二和第三主应

力;  $\sigma_s$  为材料的单向拉伸屈服极限.

设  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ , 当试件受轴向荷载时, 筒壁的三向主应力满足  $\sigma_1 = \sigma_z$ ,  $\sigma_2 = \sigma_r$ ,  $\sigma_3 = \sigma_\theta$ , 将  $\sigma_1$ 、

$\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  带入式(3)可得出基于 Mises 屈服准则下的筒壁应力, 并与 Mises 屈服准则下的允许应力 400 MPa 进行比较, 如表 1 所示.

表 1 套筒尺寸选取及基于 Mises 屈服准则的筒壁应力

Tab. 1 Selection of sleeve size and sleeve wall stress based on Mises yield criterion

钢筋直径 /mm	$F_y/\text{kN}$	套筒内径 $R_0/\text{mm}$	套筒外径 $R/\text{mm}$	套筒壁厚 $t/\text{mm}$	锚固长度 $l_a/\text{mm}$	Mises 筒壁 应力/MPa	Mises 筒壁应 力/允许应力
12	61.04	12	14	2	85	430.92	1.08
12	61.04	13	15	2	85	400.77	1.01
14	83.08	13.5	16	2.5	100	412.76	1.04
14	83.08	14.5	17	2.5	100	387.14	0.97
16	108.52	15	18	3	110	400.55	1.01
16	108.52	16	19	3	110	378.22	0.95
20	169.56	16	20	4	140	428.10	1.08
20	169.56	17	21	4	140	406.23	1.02
22	205.17	19	23	4	155	446.05	1.12
22	205.17	20	24	4	155	426.29	1.07
25	264.94	20.5	25	4.5	175	472.05	1.19
25	264.94	21.5	26	4.5	175	452.70	1.14
28	332.34	24	29	5	195	458.04	1.15
28	332.34	25	30	5	195	441.81	1.11
32	434.07	27	33	6	225	441.34	1.10
32	434.07	29	35	6	225	427.48	1.07

2.3 剪力键数量

为了方便套筒生产, 剪力键厚度  $t_s$  均取为 3 mm, 剪力键沿套筒纵向的长度均取为 5 mm. 套筒内壁与灌浆料之间的粘结作用由灌浆料与套筒之间粘结力以及由剪力键产生的机械咬合力两部分组成, 可建立剪力键数量的计算式:

$$\frac{F - 2\pi R_0 l_a \tau_u}{n\pi(R_0^2 - (R_0 - t_s)^2)} \leq [\sigma] = f_{cu} \quad (4)$$

$$\tau_u = (1 + 2.1 \frac{d}{l_a}) f_t \quad (5)$$

式中:  $\tau_u$  为筒壁与灌浆料的粘结强度, 其值根据文献[13]统计回归的光圆钢筋与混凝土粘结强度公式(5)计算;  $f_t$  为灌浆料的抗拉强度, 取  $f_t = 0.27 f_c^{2/3}$ ;  $n$  为剪力键个数;  $[\sigma]$  为允许应力, 设计时取为 80 MPa.

套筒内剪力键数量  $n$  均取为 3 个, 并根据式(4)和(5)验算套筒内剪力键的设置是否合理. 例如选取插入钢筋直径为 20 mm 的套筒, 计算出的剪力键处灌浆料的应力为 79.55 MPa, 小于灌浆料 80 MPa 的允许应力, 其余型号套筒的验算也都符合要求.

2.4 套筒参数

根据以上灌浆套筒设计参数, 每种型号套筒选择一组进行具体参数的设计, 如图 3 所示为小型化套筒具体尺寸, 表 2 所示为套筒详细参数. 其中, 锚固钢筋端部距螺纹端部距离预留 15 mm, 满足《钢筋套筒灌浆连接应用技术规程》(JGJ 355-2015)[14] 对安装中钢筋外露长度误差 +15 mm 的要求. 表 3 为新型设计小型化套筒尺寸参数与已有套筒尺寸参数对比.

考虑到出浆孔位于基本锚固长度  $l_a$  截面处, 会造成该处套筒截面削弱, 且当钢筋达到极限强度时该截面处筒壁应力最大, 因此在设计时对该截面的筒壁壁厚适当增加.

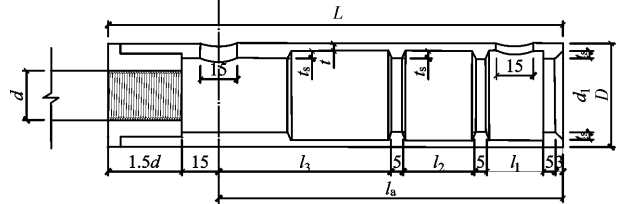


图 3 套筒尺寸详图

Fig. 3 Detailed size of grouted sleeve

表 2 套筒详细参数  
Tab. 2 Detailed parameters of grouted sleeve

钢筋直径/mm	$D$ /mm	$d_1$ /mm	$L$ /mm	$l_1$ /mm	$l_2$ /mm	$l_3$ /mm	$t$ /mm	$t_s$ /mm	$M$
12	30	20	118	15	15	37	2	3	M12.9 * 2.0-6H
14	32	21	136	16	19	47	2.5	3	M14.9 * 2.0-6H
16	36	24	149	18	21	53	3	3	M16.9 * 2.0-6H
20	42	28	185	23	29	70	4	3	M20.9 * 2.5-6H
22	46	32	203	26	32	79	4	3	M22.9 * 2.5-6H
25	50	35	228	30	37	90	4.5	3	M25.9 * 3.0-6H
28	58	42	252	33	42	102	5	3	M28.9 * 3.0-6H
32	66	48	288	39	49	119	6	3	M32.9 * 3.0-6H

注： $D$  表示套筒外径， $d_1$  表示套筒端口内径， $L$  表示套筒总长， $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$  表示剪力键之间净距， $M$  表示螺纹型号， $t$  表示套筒壁厚， $t_s$  表示剪力键厚度。

表 3 新型设计小型化套筒与已有套筒尺寸对比  
Tab. 3 Comparison of miniaturized grouted sleeve with existing grouted sleeve

钢筋 直径/mm	套筒外直径 $D$ /mm					套筒长度 $L$ /mm				
	本文	建研 院	湖南 恒邦	现代 营造	柳州 OVM	本文	建研 院	湖南 恒邦	现代 营造	柳州 OVM
12	30	34	34	36	/	118	124	124	130	/
14	32	38	38	38	/	136	139	139	140	/
16	36	40	40	40	54	149	159	159	150	195
20	42	45	45	44	62	185	195	195	190	195
22	46	50	50	48	/	203	215	215	195	/
25	50	54	54	53	67	228	240	240	238	220
28	58	62	62	58	70	252	265	265	271	250
32	66	71	71	/	75	288	305	305	/	275

3 试验概况

3.1 试件设计

委托湖南恒邦钢筋连接技术有限公司加工制作小型化套筒，选取钢筋直径为 12、16、20 和 25 mm 的小型化灌浆套筒，设计了 9 组套筒灌浆连接试件，其中 6 组试件的锚固长度为  $1.0l_a$ ，包括一组套筒壁厚为 1 mm 的试件和一组无剪力键的试件，在编号时分别以字母 T 和 N 表示，另外 3 组试件的锚固长度为  $0.6l_a$ 。

为了量测筒壁的纵、横向应变，在每个套筒上张贴一组纵向和横向应变片，图 4(a)为套筒筒壁应变片示意图，图 4(b)为套筒筒壁应变片布置实物图。

3.2 试件材性

灌浆料采用中德新亚生产的套筒专用高强无收缩灌浆料，在给试件灌浆时，留取一组共 3 个灌

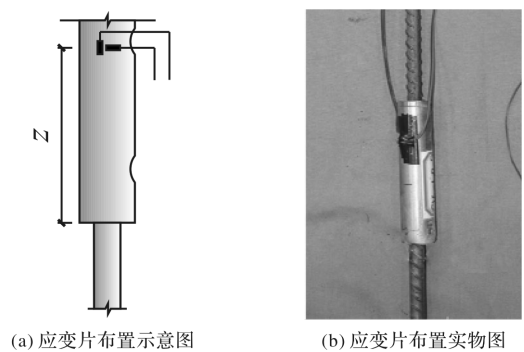


图 4 套筒灌浆连接件应变片布置图  
Fig. 4 Strain gauge arrangement of the grouted sleeve splice

浆料试块(40 mm×40 mm×160 mm)与套筒试件一起养护，待 28 d 在材料实验室微机控制 YA-300 级全自动压力试验机上测其抗压强度，测得灌浆料的平均抗压强度为 84.33 MPa。

钢筋强度等级均为 HRB400，选取直径 12 mm、16 mm、20 mm 和 25 mm 的钢筋各 3 根，

取长度为 450 mm,在万能试验机上测量钢筋的屈服拉力和极限拉力,另外每组选择一根钢筋,在中部两面各贴一枚应变片测量屈服前钢筋表面的应变,钢筋力学性能如表 4 所示。

表 4 钢筋力学性能

Tab. 4 Mechanical properties of steel bars

直径/mm	屈服强度 均值/MPa	极限强度 均值/MPa	弹性模量 /MPa
12	430.08	574.43	$1.90 \times 10^5$
16	435.58	590.30	$1.98 \times 10^5$
20	448.32	594.80	$2.07 \times 10^5$
25	437.87	599.18	$1.93 \times 10^5$

3.3 加载制度

套筒灌浆连接件加载试验在长安大学结构与抗震实验室 100 t 万能试验机上进行,采用由荷载控制的单向加载,加载速率为 0.3 kN/s,直至套筒灌浆连接件的钢筋拉断或者滑移破坏。采用 DH3820 动态数据采集仪,实时采集套筒筒壁上纵向和横向应变片的数据。

4 试验结果及分析

表 5 为试验测得套筒灌浆连接件的屈服拉力、极限拉力、连接钢筋抗拉强度和试件的最终破坏

形态,其中屈服拉力根据试验机所得数值确定,图 5 为部分套筒灌浆连接件破坏形态。9 组共 31 个试件的灌浆套筒试验后均整体完好,未发生套筒断裂。其中,锚固长度为  $1.0l_a$  的 19 个试件除 S16-1.0N-2 钢筋滑丝外,其余试件均为接头外钢筋拉断破坏,抗拉强度均大于连接钢筋抗拉强度标准值 540 MPa,满足《钢筋套筒灌浆连接应用技术规程》(JGJ 355-2015)<sup>[14]</sup>中关于套筒灌浆接头抗拉强度的要求;锚固长度为  $0.6l_a$  的 12 个试件除 S16-0.6-3 钢筋拉断外,其余试件均为钢筋拔出破坏,极限拉力接近钢筋的极限拉力。

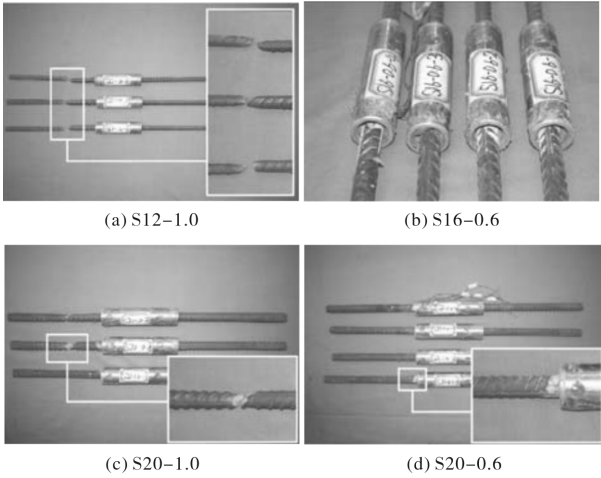


图 5 试件破坏形态

Fig. 5 Typical failure modes of specimens

表 5 试验结果与破坏形态

Tab. 5 Experimental results and failure modes

试件编号	屈服拉力/kN	极限拉力/kN	连接钢筋抗拉强度/MPa	破坏形式
S12-1.0-1	48.67	64.38	569.49	R
S12-1.0-2	45.31	64.10	567.00	R
S12-1.0-3	49.14	64.50	570.63	R
S16-1.0-1	86.68	115.65	575.49	R
S16-1.0-2	83.64	116.47	579.58	R
S16-1.0-3	85.33	115.23	573.38	R
S20-1.0-1	136.93	184.03	586.08	R
S20-1.0-2	144.63	185.03	589.25	R
S20-1.0-3	135.52	185.21	589.82	R
S25-1.0-1	212.79	287.17	585.32	R
S25-1.0-2	213.99	285.42	581.74	R
S25-1.0-3	214.20	286.63	584.21	R
S16-1.0T-1	85.37	116.60	580.22	R
S16-1.0T-2	86.73	115.95	576.99	R
S16-1.0T-3	82.17	115.52	574.83	R
S16-1.0N-1	83.74	117.52	584.78	R
S16-1.0N-2	83.26	105.39	/	S

续表 5

试件编号	屈服拉力/kN	极限拉力/kN	连接钢筋抗拉强度/MPa	破坏形式
S16-1.0N-3	85.26	115.44	574.45	R
S16-1.0N-4	82.67	104.35	564.18	R
S16-0.6-1	89.11	116.26	/	P
S16-0.6-2	85.79	112.59	/	P
S16-0.6-3	89.27	120.43	599.27	R
S16-0.6-4	80.99	104.58	/	P
S20-0.6-1	142.27	173.20	/	P
S20-0.6-2	138.31	176.17	/	P
S20-0.6-3	136.92	179.28	/	P
S20-0.6-4	144.45	168.35	/	P
S25-0.6-1	212.14	284.65	/	P
S25-0.6-2	212.08	283.44	/	P
S25-0.6-3	214.92	279.99	/	P
S25-0.6-4	228.07	251.83	/	P

注: S12-1.0-1 中, 12 表示钢筋直径, 1.0 表示锚固长度为  $1.0l_a$ , 1 表示试件编号, R 表示钢筋拉断破坏, P 表示钢筋拔出破坏, S 表示钢筋滑丝。

#### 4.1 荷载-位移曲线

图 6 为典型试件的荷载-位移曲线, 其中横坐标为万能试验机夹具之间的相对位移, 纵坐标为万能试验机采集对应位移下的荷载。以 S20-1.0 试件为例, 钢筋拉断破坏套筒灌浆连接件的荷载-位移曲线与钢筋材性试件的荷载-位移曲线相似, 都经历了弹性、屈服、强化和颈缩四个阶段, 但由于套筒内部灌浆料的影响, 套筒灌浆连接件屈服阶段的荷载-位移曲线有比较明显的波动, 屈服过程较钢筋材性试件要长。

当锚固长度为  $0.6l_a$  时, 以 S20-0.6 试件为例, 钢筋拔出破坏套筒灌浆连接件的荷载-位移曲线与钢筋材性试件的荷载-位移曲线的弹性和屈服阶段相似, 进入强化阶段后, 由于钢筋与灌浆料间的黏结强度小于其抗拉强度, 随着钢筋与灌浆料之间的咬合齿被剪断<sup>[15]</sup>, 钢筋被缓慢拔出。由于套筒的约束作用, 钢筋拔出破坏仍表现出一定的延性, 钢筋在拔出过程中荷载-位移曲线比较平稳, 3 组试件的残余承载力基本保持在极限承载力的 1/2 左右。

#### 4.2 筒壁应力实测值与计算值对比

在每组试件中随机选取一个试件, 分析筒壁在弹性阶段的应力, 并与实测值进行对比。筒壁

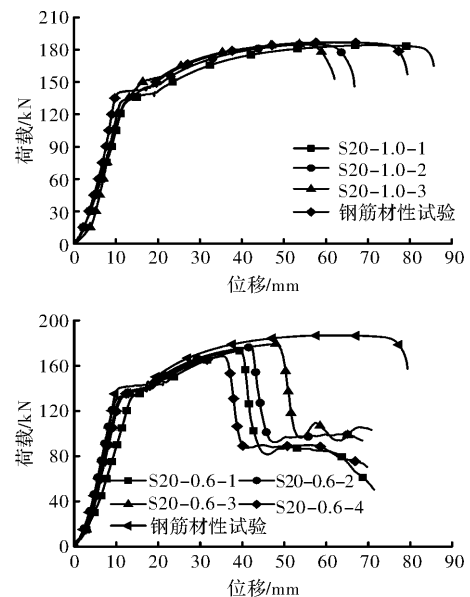


图 6 试件荷载-位移曲线

Fig. 6 Load-displacement curves of specimens

应力计算值可由式(2)求得, 套筒的弹性模量取为  $2.05 \times 10^5$  MPa。筒壁应力实测值通过筒壁的应变片测得, 在试验过程中无法测量套筒的径向应力  $\sigma_r$ , 根据弹性力学知识, 在筒壁外表面径向应力可近似取为零。将筒壁三向应力的实测值和计算值分别带入式(3), 得出基于 Mises 屈服条件下的筒壁应力, 如表 6 所示, 其中 S16-1.0-3 试件未得到实测值。

表 6 Mises 筒壁应力实测值与计算值对比

Tab. 6 Comparison between measured and calculated values of Mises sleeve wall stress

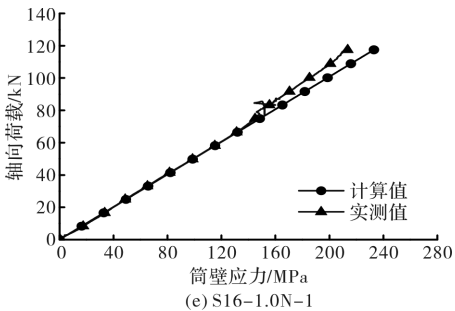
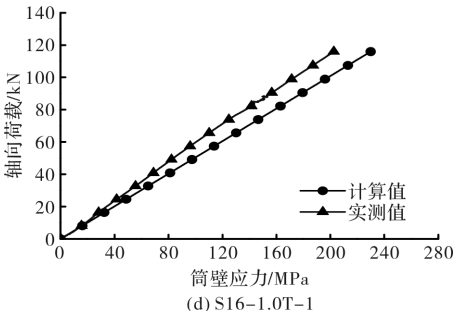
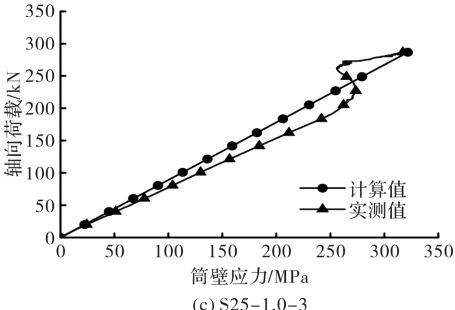
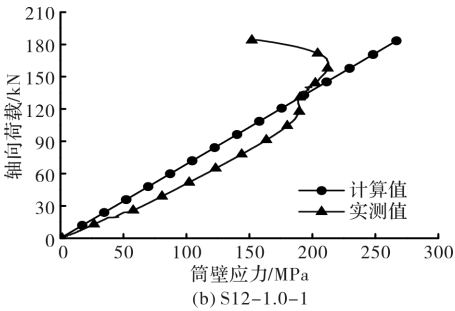
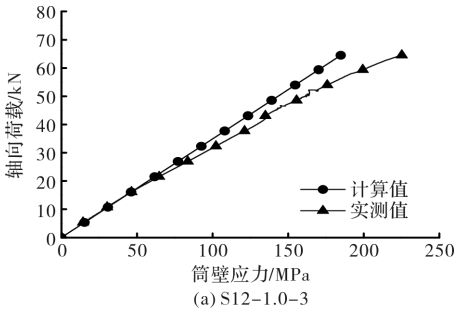
试件编号	贴片位置 壁厚/mm	应变片位 置 $z$ /mm	轴向荷 载/kN	Mises 筒壁应 力实测值/MPa	Mises 筒壁应 力计算值/MPa	实测值/ 计算值
S12-1.0-3	5	85	30.74	96.78	88.07	1.09
S16-1.0-3	6	110	66.78	/	132.41	/
S20-1.0-1	7	140	104.12	179.82	151.54	1.19
S25-1.0-3	7.5	175	160.42	209.35	180.08	1.16
S16-1.0T-1	6	110	66.93	112.47	132.71	0.85
S16-1.0N-1	6	110	68.67	135.16	136.15	0.99
S16-0.6-4	3	49	67.03	168.87	178.12	0.95
S20-0.6-4	4	63	98.76	184.94	171.26	1.08
S25-0.6-4	4.5	78.5	156.32	237.14	200.88	1.18

4.2.1 锚固长度为  $1.0l_a$  的试件

图 7(a)~(e) 分别为锚固长度  $1.0l_a$  的试件在轴向荷载  $F$  作用下, 基于 Mises 屈服准则的套筒筒壁应力实测值与计算值的对比图. S12-1.0-3 试件在加载初期实测值与计算值基本吻合, 随着荷载增加, 实测值与计算值差值变大, 但整体吻合较好. S20-1.0-1 和 S25-1.0-3 试件在钢筋屈服前实测值与计算值吻合较好, 钢筋屈服后, 筒壁应力出现较大波动. S16-1.0T-1 试件的实测值与计算值整体吻合较好, 随着荷载增加, 实测值与计算值差值逐渐变大. S16-1.0N-1 试件在钢筋屈服前, 实测值与计算值基本吻合, 钢筋屈服后, 实测值与计算值差值逐渐变大. 由于此组试件套筒内没有设置剪力键, 与计算模型最为相近, 因此此组试件的实测值与计算值较其他试件最为吻合.

4.2.2 锚固长度为  $0.6l_a$  的试件

图 7(f)~(h) 分别为锚固长度为  $0.6l_a$  的试件在轴向荷载  $F$  作用下, 基于 Mises 屈服准则套筒筒壁应力实测值与计算值之间的对比图. 筒壁的应力状态与锚固长度为  $1.0l_a$  的试件有所差异, 加载中后期由于钢筋与灌浆料之间产生较大滑移, 导致筒壁应力不再随轴向荷载线性增长, 最后甚



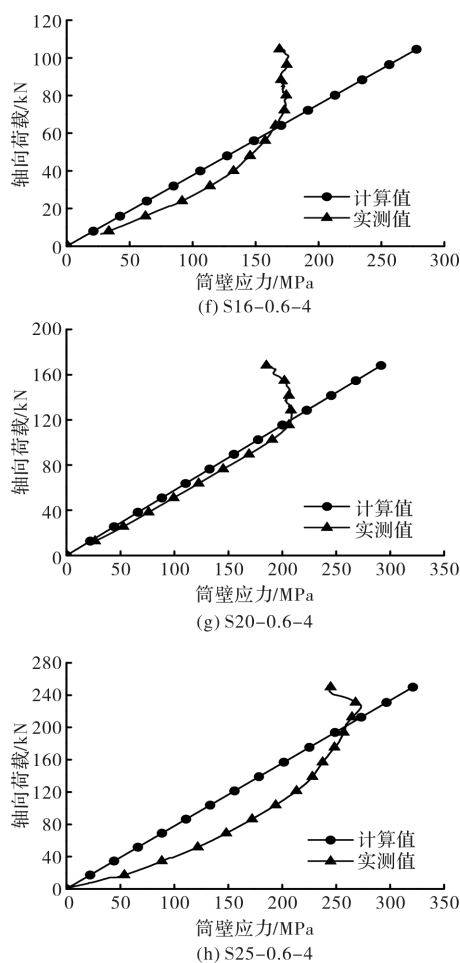


图7 Mises筒壁应力实测值与计算值对比图

Fig.7 Comparison between measured and calculated values of Mises sleeve wall stress

至出现缩小趋势。

#### 4.2.3 误差分析

通过以上8组试件的对比发现,实测值与计算值以及当钢筋达到极限荷载时实测值与原始设计值之间存在一定的偏差,造成偏差的主要原因有:

(1)在筒壁应力计算时,没有考虑套筒剪力键对筒壁应力的影响。

(2)钢筋锚固长度较短的试件,在加载中后期钢筋与灌浆料之间产生较大滑移。

(3)套筒制作时在基本锚固长度 $l_a$ 处考虑到出浆孔对截面的削弱,适当增加了筒壁厚,导致设计值与最后实测值存在偏差。

## 5 结论

(1)锚固长度为 $1.0l_a$ 的套筒灌浆连接件除一个试件滑丝外,其余18个试件均为接头外钢筋拉断破坏,且抗拉强度均大于连接钢筋的抗拉强度标准值,满足《钢筋套筒灌浆连接应用技术规程》(JGJ355-2015)关于套筒灌浆接头抗拉强度的要求。

(2)锚固长度为 $0.6l_a$ 的套筒灌浆连接件除一个试件拉断外,其余11个试件均为钢筋拔出破坏,且试件的残余承载力基本保持在极限承载力的1/2左右。

(3)基于Mises屈服准则的套筒筒壁应力的计算值与实测值吻合较好,所建立的筒壁应力计算式可以为灌浆套筒设计提供参考。

## 参考文献 References

- [1] YEE A A, HON. D. Structural and economic benefits of precast/prestressed concrete construction[J]. PCI Journal, 2001, 46(4):34-42.
- [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] ALIAS A, ZUBIR M A, SHAHID K A, et al. Structural performance of grouted sleeve connectors with and without transverse reinforcement for precast concrete structure[J]. Procedia Engineering, 2013, 53(7): 116-123.
- [4] 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.
- [5] HENIN E, MORCOUS G. Non-proprietary bar splice sleeve for precast concrete construction[J]. Engineering Structures, 2015, 83:154-162.
- [6] HOSSEINI S J A, ABD. RAHMAN A B. Analysis of spiral reinforcement in grouted pipe splice connectors[J]. Heythrop Journal, 1973, 14(4): 396-416.
- [7] MOOSAVI M, JAFARI A, KHOSRAVI A. Bond of cement grouted reinforcing bars under constant radial pressure[J]. Cement & Concrete Composites, 2005, 27(1):103-109.
- [8] 郑永峰. GDPS灌浆套筒钢筋连接技术研究[D]. 南京:东南大学,2016.  
ZHENG Yongfeng. Research on rebar splicing system by GDPS grout-filled coupling sleeve[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [9] 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):113-117.  
HAN Chao, ZHENG Yimin, ZHAO Yong. Research and application development of grout sleeve splicing for reinforcement[J]. Construction Technology, 2013, 42(21): 113-117.

(下转第323页)



- Chongqing University, 2010.
- [13] 重庆交通科研设计院. 公路隧道设计规范: JTG D70-2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- Chongqing Communication Technology Research & Design Institute Co., LTD. Code for design of road tunnel: JTG D70-2004[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [14] 刘小军, 张永兴. 地形因素及围岩类别对偏压隧道的影响效应分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2010, 42(2): 205-210.
- LIU Xiaojun, ZHANG Yongxing. Analysis of unsymmetrically loaded tunnel according to topographic factors and classification of the surrounding rocks[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2010, 42(2): 205-210.
- (编辑 吴海西)
- 
- (上接第 316 页)
- [10] 吴涛, 刘全威, 成然, 等. 钢筋套筒灌浆连接性能试验研究及筒壁应力分析[J]. 工程力学, 2017, 34(10): 68-75.
- WU Tao, LIU Quanwei, CHENG Ran, et al. Experimental study and stress analysis on mechanical performance of grouted sleeve splice[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(10): 68-75.
- [11] TEPFERS R. Cracking of concrete cover along anchored deformed reinforcing bars[J]. Magazine of Concrete Research, 1979, 31(106): 3-12.
- [12] 徐有邻. 变形钢筋-混凝土粘结锚固性能的试验研究[D]. 北京: 清华大学, 1990.
- XU Youlin. An experimental study of bond-anchorage properties of bars in concrete[D]. Beijing: Tsinghua University, 1990.
- [13] 徐有邻, 沈文都. 钢筋外形对粘结性能的影响[J]. 工业建筑, 1987, 17(3): 28-32.
- XU Youlin, SHEN Wendu. Influence of reinforcement shape on bonding properties[J]. Industrial Construction, 1987, 17(3): 28-32.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢筋套筒灌浆连接应用技术规程: JGJ 355-2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of People's Republic of China. Technical specification for grout sleeve splicing of rebars: JGJ 355-2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.
- [15] 郑永峰, 郭正兴. 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): 94-102.
- ZHENG Yongfeng, GUO Zhengxing. Experimental study and finite element analysis on behavior of deformed grout-filled pipe splice[J]. Journal of building structures, 2016, 37(3): 94-102.
- (编辑 吴海西)