

陈胜, 徐采薇, 徐其功, 等. 极限状态下灌浆套筒内锚固钢筋的受力原理及变形分析[J]. 华南地震, 2023, 43(2): 151-157. [CHEN Sheng, XU Caiwei, XU Qigong, et al. Stress Principle and Deformation Analysis of Anchoring Steel in Grouting Sleeve Under Limit State [J]. South China journal of seismology, 2023, 43(2): 151-157]

极限状态下灌浆套筒内锚固钢筋的 受力原理及变形分析

陈 胜¹, 徐采薇^{1,2}, 徐其功¹, 陈传涛¹, 屈洋广¹

(1. 广东省建科建筑设计院有限公司, 广州 510110; 2. 墨尔本大学基础设施工程学院, 澳大利亚 帕克维尔 3010)

摘要: 灌浆套筒作为目前装配式混凝土建筑中较常用的一种结构构件间的连接形式, 其性能直接关系到装配式建筑的整体抗震性能。此课题研发了一种灌浆套筒内钢筋极限状态下有效锚固段长度的计算方法, 并结合多组灌浆套筒分别进行单向拉伸、高应力反复拉压、大变形反复拉压等试验, 对计算方法的可行性进行了验证, 研究成果对评价灌浆套筒的安全性具有重要的现实意义。

关键词: 灌浆套筒; 装配式建筑; 钢筋锚固长度; 钢筋受力变形

中图分类号: TU37

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2023)02-0151-07

DOI: 10.13512/j.hndz.2023.02.17

Stress Principle and Deformation Analysis of Anchoring Steel in Grouting Sleeve Under Limit State

CHEN Sheng¹, XU Caiwei^{1,2}, XU Qigong¹, CHEN Chuantao¹, QU Yangguang¹

(1. Guangdong Jianke Architectural Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510110, China; 2. Department of Infrastructure Engineering, University of Melbourne, Parkville 3010, Australia)

Abstract: As a commonly used connection form between structural members in prefabricated concrete buildings, the performance of grouting sleeve is directly related to the overall seismic performance of prefabricated buildings. A calculation method for the effective anchorage section length of the steel bar in the grouting sleeve under the limit state was developed, and its feasibility was verified by combining the multiple sets of grouting sleeves with the tests of uniaxial tension, high stress repeated tension and compression, and large deformation repeated tension and compression. The research results have great practical significance for evaluating the safety of grouting sleeves.

Keywords: Grouting Sleeve; Prefabricated buildings; Anchorage section length of steel bar; Reinforcement deformation

收稿日期: 2022-06-20

基金项目: 广东省建筑工程集团科技创新项目(JGLX2022004)

作者简介: 陈胜(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩土工程、结构工程方面的工作。

E-mail: 406896132@qq.com

通信作者: 徐采薇(1996-), 女, 博士, 主要从事建筑结构方面的研究。

E-mail: 710070466@qq.com

0 引言

装配式建筑作为推动我国实现建筑工业化的重要抓手，得到了国家和地方各级部门的大力支持，社会层面也开展了大量针对装配式建筑的研究。现阶段，装配式混凝土建筑是我国装配式建筑的主要结构形式，根据装配式混凝土结构的特性和装配式建造方式的特点，钢筋灌浆套筒连接成为装配式混凝土建筑中结构构件间最常用的一种连接方式。长期以来，由于社会各界对灌浆套筒连接形式的可靠性产生了较多的质疑，业界内对灌浆套筒的力学性能开展了大量的试验和理论分析^[1-4]，大量的研究成果也让钢筋灌浆套筒的宏观力学性能也得到了初步验证。但是，从微观的角度出发，灌浆套筒内的锚固钢筋的受力和变形情况也是直接关系到套筒性能的重要因素，本课题通过结合理论分析和试验研

究，对灌浆套筒内锚固段钢筋的受力情况和变形性能进行了系统性的研究。

本课题设计了专门针对灌浆套筒内钢筋锚固段的受力及变形研究的创新性试验试件，通过对试件进行单向拉伸、高应力反复拉压、大变形反复拉压等试验，根据试件内锚固段灌浆料的崩裂情况，通过测量得到套筒内钢筋最终的有效锚固长度，并据此结合理论分析提出灌浆套筒内连接钢筋变形的计算方法，根据此方法计算得出的钢筋有效锚固长度为设计时验算连接节点处的钢筋延性和灌浆套筒连接的整体可靠性提供了理论支持。

1 试验设计

为充分分析灌浆套筒内锚固钢筋的受力情况，本次试验设计了一种双套筒试件，试件分为双半灌浆套筒和双全灌浆套筒，试件的示意图见图 1。

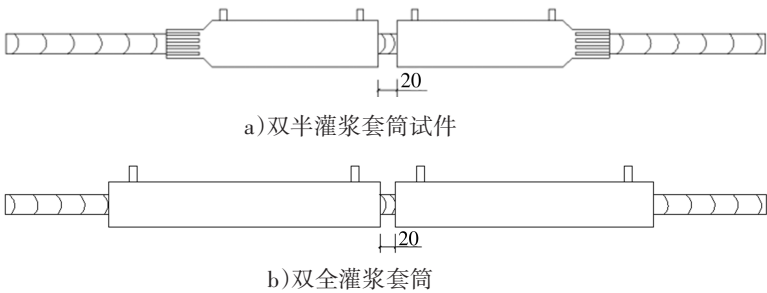


图 1 双灌浆套筒试件示意图

Fig.1 Schematic diagram of double grouting sleeve specimen

本次试验设计的双灌浆套筒试件主要是为保证试验时外露钢筋的破坏和灌浆料与锚固段钢筋的崩裂均发生在中间的连接部位，根据文献^[5-6]为理论基础，半套筒的外端连接钢筋(螺纹端)均采用比中间部分连接钢筋大两个直径型号以上的钢筋，而全套筒的外端连接钢筋采用比中间连接钢筋大一个直径型号的钢筋，这样既保证了钢筋的破坏发生在中间连接处，又形成了一个对称的结构，这样一组试件就可以发生两个对称的锚固段

破坏，可用于对比分析的试验结果更多也更具有参考性。本次试验共制作了 12 组双灌浆套筒试件，其中 6 组为双全套筒(25/22，28/25 各三组)，6 组为双半套筒(25/18，32/22 各三组)，按照国家行业标准《钢筋套筒灌浆连接应用技术规程》JGJ 355-2015^[7]中关于单向拉伸、高应力反复拉压、大变形反复拉压的实验要求，按表 1 的试验项目对试件开展试验研究。

表 1 试件规格及试验项目
Table 1 Specimen specification and test items

试件编号	中间连接钢筋直径/mm	外端连接钢筋直径/mm	单向拉伸试验	高应力反复拉压 试验	大变形反复拉压 试验
22-全-1	22	25	√		
22-全-2	22	25		√	
22-全-3	22	25			√

(转下表)

(接表1)

试件编号	中间连接钢筋直径/mm	外端连接钢筋直径/mm	单向拉伸试验	高应力反复拉压试验	大变形反复拉压试验
25-全-1	25	28	√		
25-全-2	25	28		√	
25-全-3	25	28			√
18-半-1	18	25		√	
18-半-2	18	25			√
18-半-3	18	25			√
22-半-1	22	32	√		
22-半-2	22	32			√
22-半-3	22	32			√

2 套筒内锚固钢筋的受力情况分析

2.1 常规状态时套筒内钢筋的受力情况分析

灌浆套筒从开始受力起,套筒内钢筋和灌浆料在整个锚固长度上产生的相互作用力(摩擦力、粘聚力等)可近似为从外向内线性递减的形式^[8],因此,钢筋表面的应力整体分布可近似呈圆锥形分布(图2),另外,按照现行的国家行业标准JGJ

355-2015^[7]中规定,套筒内钢筋锚固的长度不应小于8d,本次试验组均按照8d的锚固长度实施,而钢筋表面的应力总和应等于钢筋所受轴向拉力的总和,计算公式如公式(1):

$$F = \int_0^{l=8d} \tau_l dl = \pi \tau_{max} l = \pi \tau_{max} 8d \tag{1}$$

公式(1)中, F 为钢筋所受轴向拉力, τ 为钢筋表面的摩擦应力值(锚固应力), l 为锚固段钢筋的长度。

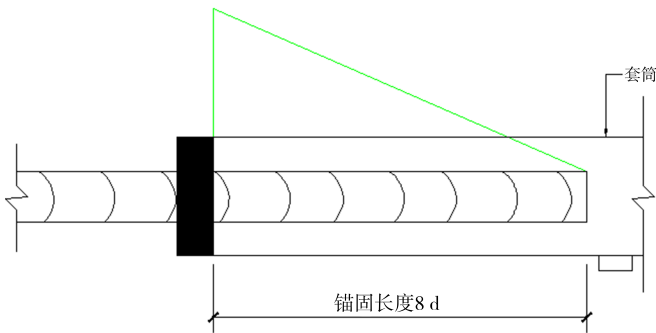


图2 锚固段钢筋表面受力分布—圆锥形应力分布

Fig.2 Stress distribution on the surface of steel bar in the anchorage section—conical stress distribution

按照图2所示的外表面应力分布,则连接钢筋内的应力分布也呈递增变化,由此导致钢筋靠近外侧部分一定范围内的钢筋内部的拉应力超过屈服强度,钢筋产生塑性变形,导致钢筋产生相对较大的颈缩变形进而破坏钢筋与灌浆料之间的粘合,另外,内嵌钢筋与灌浆料在靠近连接外侧产生了较大的摩擦力,导致灌浆料内力增大,当到达一定内力时灌浆料可发生崩裂,因此,试验试

件在试验完成时(极限状态下)都发生了如图3中所示的灌浆料崩裂的情况。

2.2 极限状态时套筒内钢筋的受力情况分析

在灌浆套筒试件发生破坏时,由于靠近外侧的灌浆料在极限状态下发生了崩裂,套筒内锚固段钢筋表面的受力情况会发生变化,本次研究假设在外部拉力增大的过程中,锚固段钢筋表面的

受力情况由图 2 所示的圆锥形分布逐渐过渡为在锚固长度范围内均匀分布,而发生崩裂的灌浆料部分与钢筋之间的连接发生破坏,摩擦力及粘合力

完全消失,最终的应力分布如图 4 所示的圆柱体,而应力总和依然等于钢筋所受外部拉力的总和,应力总和可根据公式(2)进行计算。



图 3 灌浆套筒内灌浆料崩裂情况

Fig.3 Cracking of the grouting material in grouting sleeve

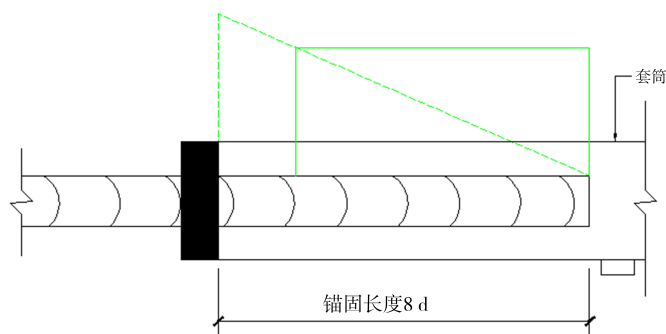


图 4 锚固段钢筋表面受力分布—圆柱形应力分布

Fig.4 Stress distribution on the surface of steel bar in the anchorage section—cylindrical stress distribution

$$F = \int_{l_0}^l \tau_l dl = 2\pi\tau_{\max} \frac{(l - l_0)^2}{l} \quad (2)$$

联立公式(1)和公式(2)可得,套筒中灌浆料发生崩裂的长度与钢筋的锚固长度间存在如公式(3)所示的关系,

$$l_0 = \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2}\right) \cdot l \quad (3)$$

本次试验所用的套筒的钢筋锚固长度均为 8 d,则灌浆料发生崩裂的长度与连接钢筋的直径存在如公式(4)的关系,

$$l_0 = \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{2}\right) \cdot 8d = 2.344d \quad (4)$$

3 理论计算数据与试验结果的对比分析

由试验现象可得,试验过程中,当试验试件达到极限抗拉强度时,都是中间的连接钢筋发生破坏,而不同试件由于外端连接钢筋的直径不同,受力情况和变形情况也不同,由表 2 可以计算出不同试件在中间连接钢筋达到极限抗拉强度时,外端连接钢筋的应力情况。

由表 2 可知,所有的半灌浆套筒试件的外端钢筋在极限状态时都未达到屈服强度(400~440 kPa),则半灌浆套筒试件在达到极限状态时外段钢筋产生的变形可以忽略不计。

表 2 灌浆套筒连接钢筋尺寸及应力情况
Table 2 Size and stress of grouting sleeve connecting steel bar

试件编号	中间连接钢筋直径/mm	外端连接钢筋直径/mm	试件极限抗拉应力/kPa	外端钢筋等效应力/kPa
22-全-1	22	25	628.22	486.49
22-全-2	22	25	625.58	484.45
22-全-3	22	25	624.79	483.84
25-全-1	25	28	653.94	521.32
25-全-2	25	28	658	524.55
25-全-3	25	28	651.9	519.69
18-半-1	18	25	593	307.41
18-半-2	18	25	581.71	301.56
18-半-3	18	25	588	304.82
22-半-1	22	32	627.07	296.39
22-半-2	22	32	627.71	296.69
22-半-3	22	32	625.34	295.57

表 2 中全灌浆套筒试件的外端钢筋的等效拉应力均超过了钢筋母材的屈服强度，此时外端钢筋会产生一定的塑性应变，因此外端钢筋的变形不可以忽略。以外部钢筋直径 25 mm 的套筒试件为例，需根据表 2 中全套筒外端钢筋的等效拉应力大小结合图 5 中 25 mm 钢筋母材在对应的拉应力作用下的应变量，再通过全套筒外端(两端)钢筋的自由段长度，计算得出在试验达到及现状态时外端

钢筋产生的变形量，同理可以计算使用 28 mm 直径的外端钢筋的试件产生的变形量。

表 3 为各组灌浆套筒试件在夹具间的总长度、两端钢筋的长度、两端钢筋的总变形量、试件在极限状态时的总变形量、中间连接钢筋产生的变形量(包括裸露段和灌浆料崩裂后增加的裸露钢筋产生的形变的总和)等数据。

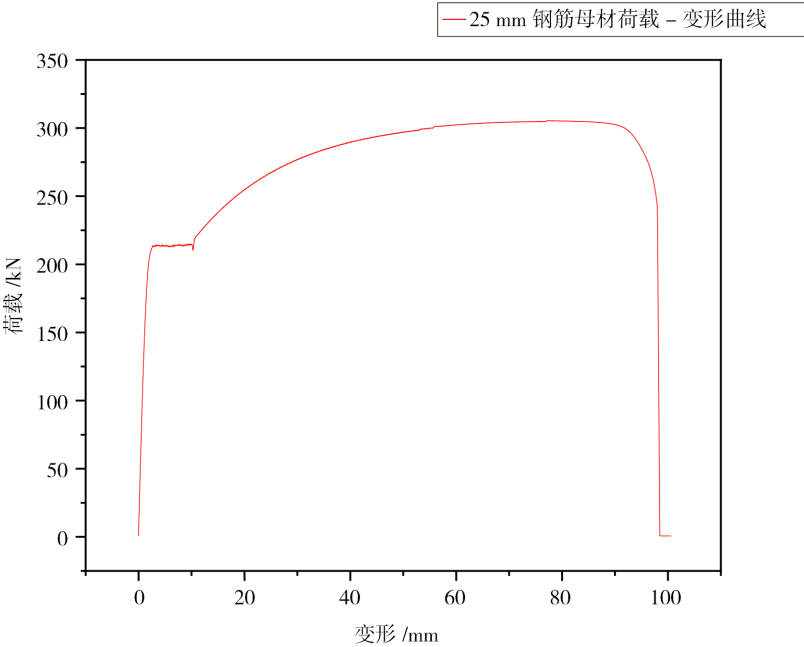


图 5 25 mm 钢筋母材单向拉伸试验荷载—位移图

Fig.5 Load-displacement diagram for uniaxial tensile test of 25 mm steel bar base material

表 3 灌浆套筒试件产生变形量的试验测量值

Table 3 Test measurement of deformation of grouting sleeve specimen

试件编号	试件在夹具间 总长/mm	两端裸露钢筋 总长/mm	两端裸露钢筋 变形量/mm	试件极限状态时 总变形量/mm	中间连接钢筋产 生的变形量/mm
22-全-1	577	97	8.22	36.2	27.98
22-全-2	605	125	8.64	37.8	29.16
22-全-3	590	110	7.92	43.5	35.58
25-全-1	915	361	10.16	43.7	33.54
25-全-2	910	356	10.96	44.2	33.24
25-全-3	905	351	10.56	38.6	28.04
18-半-1	1150	274	0	23.6	23.6
18-半-2	1164	288	0	25.0	25.0
18-半-3	1140	264	0	24	24.0
22-半-1	1220	254	0	27	27.0
22-半-2	1240	274	0	28.5	28.5
22-半-3	1230	264	0	33.2	33.2

由表 3 中得出的各试件中间连接钢筋的变形量
和不同直径钢筋母材在极限拉应力下的应变(伸长率)，可以反算出极限状态下中间连接段发生变形的钢筋的总长度，计算结果如表 4 所示。

表 4 根据试验测得变形量反算的发生变形的中间段连接钢筋总长度

Table 4 The total length of connecting steel bar in the deformed middle section
calculated according to the deformation measured in the test

试件编号	中间连接钢筋产生的变形量/mm	极限状态下的伸长率 (母材)/(%)	中间段产生变形的连接钢筋总长度 (测量值/伸长率)/mm
22-全-1	27.98	16.5	169.58
22-全-2	29.16	16.5	176.73
22-全-3	35.58	16.5	215.64
25-全-1	33.54	18	186.33
25-全-2	33.24	18	184.67
25-全-3	28.04	18	155.78
18-半-1	23.6	16	147.50
18-半-2	25.0	16	156.25
18-半-3	24.0	16	150.00
22-半-1	27.0	16.5	163.64
22-半-2	28.5	16.5	172.73
22-半-3	33.2	16.5	201.21

另外，根据公式(4)计算的灌浆料发生崩坏
的深度和试件中间连接处原本裸露在外的钢筋自由段
的长度(56 mm)，可以通过计算得到试件在极限状
态时发生变形的中间连接钢筋的总长度，具体计算
结果和试验数据的对比如表 5 所示。

由表 5 的数据对比可知，计算结果和试验数据
的结果误差在 1%~15% 之间(试件 22-全-3、25-
全-3 和 22-半-3 在试验过程中发生失稳等情况，不
作为对比数据)，表 5 的对比结果表明，使用本研
究所推导的计算套筒口灌浆料崩裂深度的方法得到

表5 发生变形的中间段连接钢筋总长度理论计算值和试验测量值的对比

Table 5 Comparison between the theoretical calculation value and the experimental measurement value of the total length of connecting steel bar in the deformed middle section

试件编号	中间段产生变形的连接钢筋 总长度(测量值/伸长率)/mm	套筒内参与变形的钢 筋长度(计算值)/mm	中间段产生变形的连接钢 筋总长度(计算值)/mm	误差(计算值-测量 值)/计算值
22-全-1	169.58	112.75	168.75	0%
22-全-2	176.73	118.49	174.49	-1%
22-全-3	215.64	114.81	170.81	-26%
25-全-1	186.33	125.36	181.36	-3%
25-全-2	184.67	127.66	183.66	-1%
25-全-3	155.78	125.11	181.11	14%
18-半-1	147.50	79.16	135.16	-9%
18-半-2	156.25	82.04	138.04	-13%
18-半-3	150.00	83.76	139.76	-7%
22-半-1	163.64	99.96	155.96	-5%
22-半-2	172.73	115.36	171.36	-1%
22-半-3	201.21	110.52	166.52	-21%

的理论计算结果和通过试验得到的结果具有可比性，推导计算公式时假设的极限状态下锚固段钢筋表面的受力分布(图4)可认为是一种针对灌浆套筒内钢筋受力情况的合理假设。

4 结论

(1)本研究通过对套筒内锚固钢筋在不同工况下表面所受应力变化的假设，使用数学推导的方法得出了灌浆套筒在极限状态下套筒内灌浆料崩裂深度与连接钢筋锚固长度间的关系的解析计算方法，并将计算结果与试验结果进行了对比，证明了该计算方法具有可行性；

(2)本研究通过试验，证明了套筒内的钢筋锚固段的灌浆料在极限状态下会发生崩裂，说明灌浆套筒内钢筋的锚固长度必须得到保证；

(3)套筒内部灌浆料的崩裂导致一部分锚固段钢筋形成了新的自由段，灌浆套筒的整体延性性能得到了提高，运用本课题推导的计算方法，为设计时验算连接节点的延性和可靠性提供了理论支持，解决了业界长期以来对灌浆套筒连接延性性能的质疑。

参考文献

[1] 余琼,王子沁,白少华,等. 套筒灌浆搭接接头拉伸试验及受理机理分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(4): 96-110.

[2] 陈春晖,徐其功,李娜,等. 预制柱上套筒灌浆连接的试验研究及平行试件验证 [J]. 广东土木与建筑, 2020, 27(12): 7-9.

[3] 毛娜,徐其功. 装配式混凝土结构强连接和延性连接的实现方法 [J]. 建筑技术开发, 2019, 46(16): 2.

[4] 徐其功,黄海斌,徐采薇,等. 钢筋套筒灌浆连接中的下套筒钢筋施工工艺及安装速度影响研究[J]. 建筑施工, 2019, 41(9): 4.

[5] 徐其功,李娜,毛娜,等. 一种装配式竖向构件与基础的强连接构造: ZL201721928269.1[P]. 2018-09-11.

[6] 李娜,徐其功,毛娜,等. 装配式竖向构件与基础的延性连接构造和施工方法与流程: ZL20172197118.4 [P]. 2018-09-11.

[7] 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.

[8] 周文轩. 钢筋套筒灌浆连接受拉性能数值模拟[J]. 华南地震, 2022, 42(1): 127-132.