

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20251009002

文章编号:1674-599X(2026)02-0023-10

引用格式:许之馨,程章宏,林昕,等.UHPM灌浆套筒连接的钢筋抗拉性能试验[J].交通科学与工程,2026,42(2):23-32.

Citation: XU Zhixin, CHENG Zhanghong, LIN Xin, et al. Test of reinforcing bars connected by UHPM grouting sleeves[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2026, 42(2): 23-32.

## UHPM灌浆套筒连接的钢筋抗拉性能试验

许之馨<sup>1</sup>,程章宏<sup>2</sup>,林昕<sup>3</sup>,张建帅<sup>1</sup>,林上顺<sup>1</sup>

(1.福建理工大学 土木工程学院,福建 福州 350108; 2.福建省交通规划设计院有限公司,福建 福州 350004;  
3.福建省福工科技咨询有限公司,福建 福州 350108)

**摘要:**【目的】研究钢管内灌超高性能混合材料(ultra-high performance mixture, UHPM)连接的工作机理。【方法】以钢管的丝距、直径,钢筋的锚固长度等为变化参数,制作12组采用钢管内灌UHPM连接的钢筋试件并进行单向抗拉性能试验。【结果】当试件的钢筋锚固长度满足要求、钢管直径适宜,且对钢管内部进行了车丝处理时,试件的破坏模式表现为钢筋被拉断,并未出现钢筋从超高性能混合材料中被拔出现象。钢管内灌注超高性能混合材料的连接方式具有可靠性。然而,对于钢管直径较小且内部未进行车丝处理的试件,钢管与灌浆料之间容易发生黏结滑移破坏,这种破坏会显著降低试件的抗拉性能。此外,钢筋的锚固长度是影响试件抗拉性能的关键因素。当钢筋锚固长度小于钢筋直径的7倍时,钢筋与UHPM之间易出现黏结滑移破坏,导致钢筋的抗拉强度无法得到充分发挥。【结论】相关研究为钢管内灌UHPM连接方式在实际工程中的推广应用奠定了基础。

**关键词:**钢管内灌UHPM连接;界面黏结性能;抗拉性能;试验;破坏模式

中图分类号:U443.22

文献标志码:A

## Test of reinforcing bars connected by UHPM grouting sleeves

XU Zhixin<sup>1</sup>, CHENG Zhanghong<sup>2</sup>, LIN Xin<sup>3</sup>, ZHANG Jianshuai<sup>1</sup>, LIN Shangshun<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350108, China; 2. Fujian Transportation Planning and Design Institute Co., Ltd., Fuzhou 350004, China; 3. Fujian Fugong Technology Consulting Co., Ltd., Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** [Purposes] This paper aims to investigate the working mechanism of ultra-high performance mixture (UHPM)-filled steel tube connections. [Methods] By employing the thread pitch and diameter of steel tubes, as well as the anchorage length of reinforcement bars as variable parameters, 12 groups of reinforcement bar specimens connected by UHPM-filled steel tubes were prepared, with uniaxial tensile tests carried out. [Findings] When the specimen's reinforcement anchorage length meets the requirement, the steel tube diameter is suitable, threads are incorporated inside the steel tube, and the failure mode of the specimen involves the reinforcement bar being fractured without being extracted from UHPM. Connections made with UHPM-filled steel tubes are reliable. However, for specimens featuring a smaller steel tube diameter without threads inside, bond-slip failure tends to occur between the steel tube and the grout, which significantly diminishes the tensile properties of the specimen. Additionally, the reinforcement anchorage length is a critical factor

收稿日期:2025-11-03

基金项目:福建省自然科学基金项目(2019J01779);福建省交通运输厅科技计划项目(JC202310)

通信作者:林昕(2002—),女,技术员,主要从事桥梁工程方面的研究工作。3214972934@qq.com

投稿网址:https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home

influencing the tensile performance of the specimen. When the reinforcement anchorage length is less than seven times its diameter, bond-slip failure is likely to occur between the reinforcement bar and UHPM, preventing the reinforcement bar from fully developing its tensile strength. [Conclusions] This study lays the groundwork for advancing the application and popularization of UHPM-filled steel tube connections in practical projects.

**Key words:** UHPM-filled steel tube connection; interfacial bond property; tensile property; test; failure mode

灌浆套筒连接技术已在装配式结构中得到了广泛应用<sup>[1-2]</sup>。灌浆套筒主要由钢筋、套筒和灌浆料三部分构成。众多学者已针对钢筋尺寸、钢筋形状等因素对套筒承载力的影响展开了研究<sup>[3]</sup>,结果表明,这些因素均会对套筒承载力产生影响。

此外,也有学者探究了改变套筒形状及其内部结构对提升其承载力的可行性,综合多方面因素考量,圆形套筒仍是灌浆套筒的首选方案。目前,常见的高强无收缩灌浆料和粉煤灰基灌浆料是主要的灌浆料类型。不少学者针对灌浆料的配合比、外加剂以及养护龄期等方面进行了研究<sup>[4]</sup>。然而,这些灌浆料的耐腐蚀性能尚不明确,若将其应用于海洋环境,可能存在一定安全隐患。

近年来,超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC) 凭借其优异的性能,在海洋工程及其他多个领域得到了广泛应用<sup>[5-7]</sup>,但UHPC多采用坚硬石材作为粗骨料,将其作为灌浆料使用时,会受到套筒直径的限制。基于UHPC的制备原理与方法,超高性能混合材料 (ultra-high performance mixture, UHPM) 的概念应运而生<sup>[8]</sup>,二者的根本区别在于粗骨料粒径不同。由于现有的UHPM均是通过微调UHPC的配合比来满足施工性能要求,尚未开展过关于UHPM配合比的专项研究,因此可参考的文献资料有限,在后续的试验设计和研究过程中,仅能参考UHPC配合比的设计与研究流程<sup>[9-10]</sup>。

为此,本文提出一种新型连接方式,即采用钢管内灌注超高性能混合材料(UHPM)进行连接(以下简称“钢管内灌UHPM连接”)。同时,开展了一系列基于该连接方式的钢筋抗拉性能试验,系统分析了不同参数(如钢管内部螺纹丝距、钢管直径、钢筋锚固长度等)变化对试件抗拉性能的影响规律,深入探究了该新型连接方式的工作机理,以期为其在实际工程中的推广应用提供理论支撑与实践依据。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计与制作

目前,已有较多关于采用灌浆套筒连接的钢筋抗拉性能试验研究<sup>[11-14]</sup>,这些研究可为本文的试验提供有益参考。以钢管的丝距、直径,钢筋的锚固长度等为变化参数,制作12组采用内灌UHPM钢管连接的钢筋试件,并对这些试件进行了单向抗拉性能试验。每组试验包含3个参数完全一致的试件。12组试件的设计参数如下:1) 钢管内部螺纹丝距发生变化,但钢管直径、钢筋锚固长度相同(共4组);2) 钢管内部螺纹丝距相同,但钢管直径、钢筋锚固长度发生变化(共8组)。各组试件的命名包含钢管直径、螺纹丝距、钢筋锚固长度等信息,如命名为G30-2-90的试件,表示该试件的钢管直径为30 mm,钢管的螺纹丝距为2 mm,钢筋锚固长度为90 mm。

参照卢绍斌<sup>[15]</sup>提出方法制作UHPM,在搅拌砂浆之前,需对各材料的称量误差进行严格把控,确保材料配比的精准性。待UHPM制作完成后,将其从钢管上部进行灌注,灌注过程中采用小钢筋进行振捣,且振捣次数不少于10次,以此提高UHPM在钢管内部的密实程度,具体操作如图1所示。



图1 试件灌浆示意图

Fig. 1 Specimen grouting

### 1.2 材料力学性能试验

试件均采用直径为14 mm的HRB400钢筋,按照《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》

(GB/T 228.1—2021)<sup>[16]</sup>对试件所用钢筋原料进行截取。钢筋的材料力学性能见表 1。

表 1 钢筋材料力学性能

Table 1 Mechanical properties of reinforcement bars

钢筋直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
14	463	653

试件钢管均采用冷加工的 Q235 无缝钢管。钢管的材料力学性能试验结果见表 2。

表 2 钢管材料力学性能

Table 2 Mechanical properties of steel tubes

外径/mm	壁厚/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	伸长率/%
30	5	245	390	26.5
38	5	256	405	25.6
48	5	270	396	26.1

试件灌浆料均采用超高性能砂浆(UHPM),制备材料包括水、水泥、硅灰、石英砂、减水剂等,参照卢绍斌<sup>[15]</sup>的研究成果设计配合比,具体配合比见表 3。UHPM 的材料性能测试依据《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T 70—2009)<sup>[17]</sup>的规定进行。试验结果表明:UHPM 试件的平均抗折强度为 13.2 MPa,平均抗压强度为 109 MPa。

表 3 UHPM 配合比

Table 3 UHPM mix ratio

水胶比	水泥	硅灰	20 ~ <40 目 石英砂	40 ~ 70 目 石英砂	减水剂
0.16	1	0.3	0.65	0.55	0.025

### 1.3 试验装置和加载方案

本文在福建理工大学结构馆进行试件的单向抗拉性能试验,试验装置如图 2 所示。

试验过程中,采用加载系统记录试件的荷载与

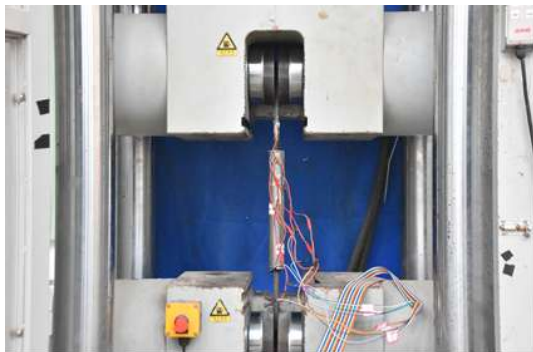


图 2 试件的拉伸装置

Fig. 2 Tensile device for specimens

位移变化;采用 JM3813 多用途静应变测试仪测量钢管与钢筋的应变;采用卷尺测量试件剖面的破坏深度。当钢筋发生拉断破坏或荷载下降至峰值荷载的 85% 以下时,试验终止。

## 2 影响试件连接性能的关键参数

### 2.1 钢管螺纹丝距

参照文献[18-19]的试验方法,对组名为 G30-0-90、G30-1.5-90、G30-2-90、G30-2.5-90 的 4 组试件进行拉伸试验,试验发现:当试件的钢筋达到屈服强度后发生滑移,并出现强化阶段与颈缩阶段。试件的荷载-位移关系曲线见图 3。

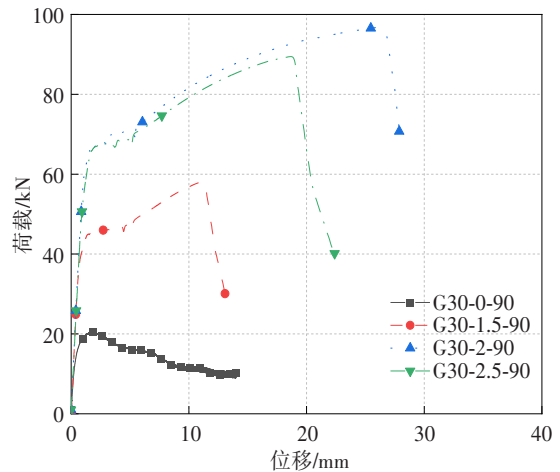


图 3 钢管单向拉伸结构荷载-位移关系

Fig. 3 Load-displacement relationship for unidirectional tensile steel tube structures

未车丝试件破坏现象为灌浆料滑移,灌浆料在与钢筋顶部接触位置断开;其余有车丝但丝距不同的试件的破坏现象均为钢筋拔出,且钢管内部灌浆料有压碎现象;对钢管内部进行车丝,能增强钢管和 UHPM 之间的界面黏结力。钢管内壁螺纹的丝距不同时,钢管与灌浆料之间的界面黏结强度亦有所不同。图 4 为本组试件的破坏剖面图。

各试件承载力和伸长率如下:G30-0-90 组试件的承载力为 20.265 kN,总伸长率为 13.2%;G30-1.5-90 组试件的承载力为 75.388 kN,总伸长率为 20.2%;G30-2-90 组试件的承载力为 96.776 kN,总伸长率为 17%;G30-2.5-90 组试件的承载力为 89.960 kN,总伸长率为 19%。其中极限承载力最高的是 G30-2-90 组试件。



(a) G30-0-90 试件破坏剖面



(b) G30-1.5-90 试件破坏剖面



(c) G30-2-90 试件破坏剖面



(d) G30-2.5-90 试件破坏剖面

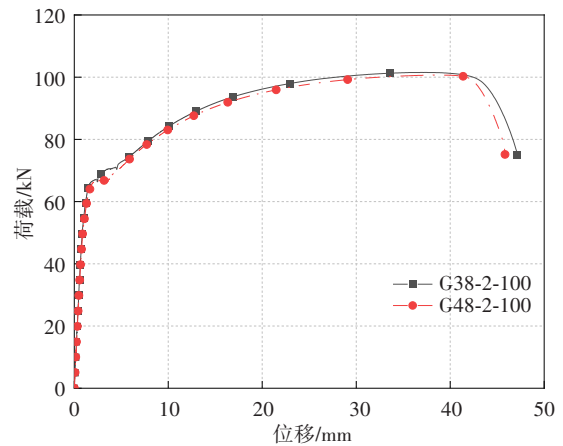
图4 试件破坏剖面图

Fig. 4 Damage profiles of specimens

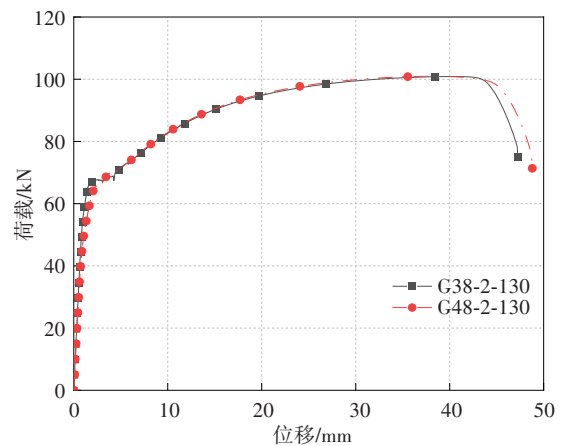
## 2.2 钢管直径和钢筋锚固长度

基于文献[20]的方法,首先,进行编号为G38-2-100、G48-2-100的2组试件拉伸试验,探究钢管直径变化对试件抗拉性能的影响规律,可以发现两个试件均经历弹性段、屈服段、强化段、下降段;当进入下降段时,两个试件钢筋均出现断裂现象。然

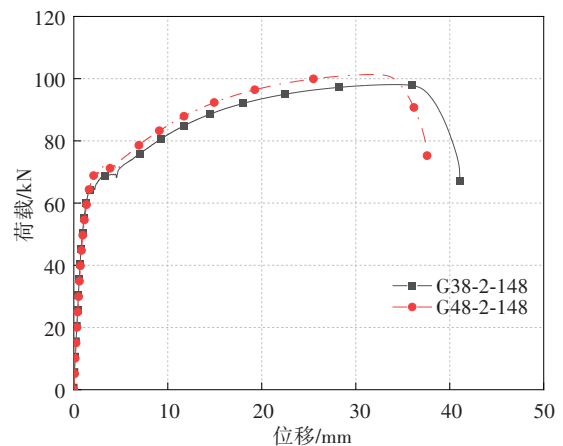
后,对编号为G38-2-130、G48-2-130、G38-2-148、G48-2-148、G38-2-178、G48-2-178的试件进行拉伸试验,与G38-2-100、G48-2-100试件相比,这些试件仅改变了钢筋的锚固长度。结果表明:这些试件的荷载-位移曲线走势与G38-2-100、G48-2-100相同。本组试件的荷载-位移关系曲线如图5所示。



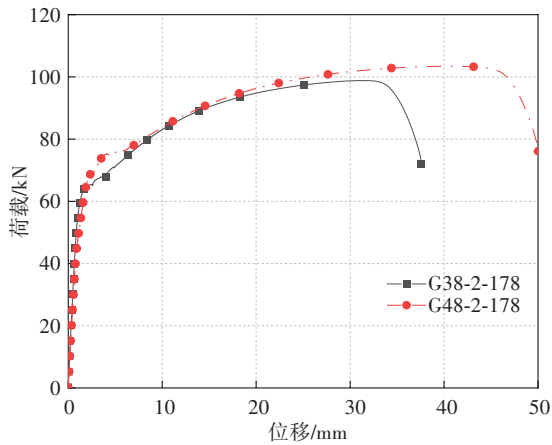
(a) G38-2-100、G48-2-100 试件荷载-位移曲线对比图



(b) G38-2-130、G48-2-130 试件荷载-位移曲线对比图



(c) G38-2-148、G48-2-148 试件荷载-位移曲线对比图

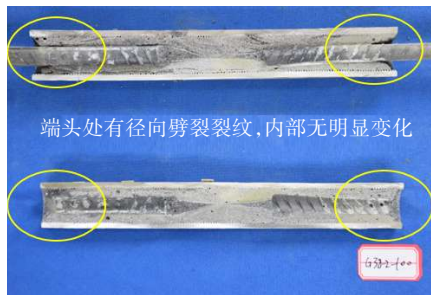


(d) G38-2-178、G48-2-178 试件荷载-位移曲线对比图

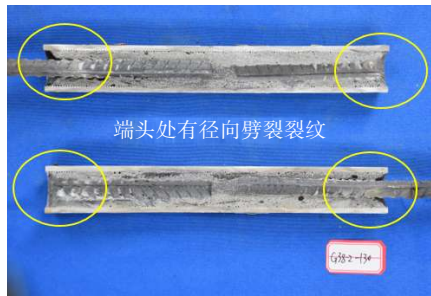
图 5 荷载-位移曲线对比图

Fig. 5 Comparison of load-displacement curves

试件的破坏形态如图 6 所示。由图 6 可知,对于钢管直径为 38 mm 的试件,在试件的内部未发现裂缝,也未出现明显的贯穿性裂纹,但在试件的两侧端部可见明显的径向劈裂裂纹;对于钢管直径为 48 mm 的试件,在钢管两侧端部有明显径向劈裂裂纹,且局部有斜向裂纹或灌浆料脱空现象。



(a) G38-2-100 试件破坏剖面



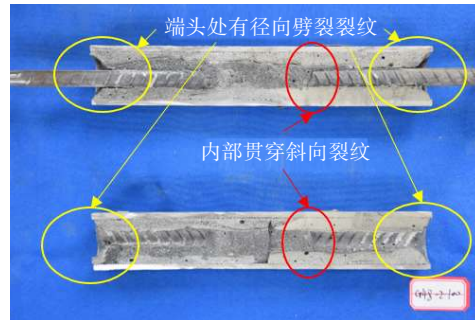
(b) G38-2-130 试件破坏剖面



(c) G38-2-148 试件破坏剖面



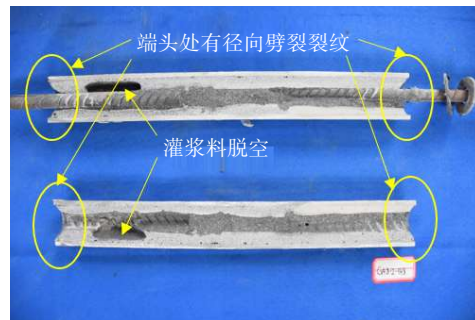
(d) G38-2-178 试件破坏剖面



(e) G48-2-100 试件破坏剖面



(f) G48-2-130 试件破坏剖面



(g) G48-2-148 试件破坏剖面



(h) G48-2-178 试件破坏剖面

图 6 试件破坏剖面

Fig. 6 Damage profile of specimens

单根钢筋(bar)、G38-2-100、G38-2-130、G38-2-148、G38-2-178的荷载-位移曲线如图7所示,由图7可知:该曲线分为弹性段、屈服段、强化段、下降段。在弹性段,试件的荷载和位移之间呈线性递增趋势;在屈服段,钢筋的应变增大较多;在强化段,随着钢筋锚固长度的增大,试件的延性有所降低;在下降段,随着钢筋直径缩小和荷载提高,钢筋被拉断。

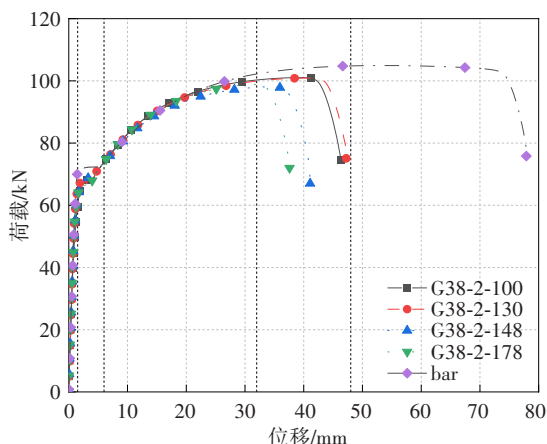


图7 荷载-位移曲线对比图

Fig. 7 Comparison of load-displacement curves

试件参数汇总见表4,由表4可知,8组试件承载力和伸长率如下:G38-2-100组试件的承载力为101.517 kN,总伸长率为20%;G48-2-100组试件的承载力为98.102 kN,总伸长率为18%;G38-2-130组试件的承载力为100.878 kN,总伸长率为19.2%;G48-2-130组试件的承载力为99.489 kN,总伸长率为19.2%;G38-2-148组试件的承载力为101.004 kN,总伸长率为18%;G48-2-148组试件的承载力为101.35 kN,总伸长率为16.9%;G38-2-178组试件的承载力为100.948 kN,总伸长率为20.2%;G48-2-178组试件的承载力为103.445 kN,总伸长率为18.6%。由试验数据可知,试件发生钢筋断裂破坏的极限承载力约为100.0 kN,总伸长率约为20%。所有试件中,G48-2-178组试件的极限抗拉承载力最高。

### 3 试件的传力机理与破坏模式

#### 3.1 试件的传力机理

为研究钢管内灌UHPM连接的传力机理,在钢管外壁的不同方向(顶部、四分之一、二分之一)也张贴了竖向和横向应变片,并将它们分别命名为

表4 试件参数汇总

Table 4 Summary of test specimen parameters

试验组	试验现象	破坏模式	承载力/kN	伸长率/%
G30-0-90	灌浆料包裹	灌浆料滑移	20.265	13.2
G30-1.5-90	灌浆料拉溃	钢筋滑移	75.388	20.2
G30-2-90	灌浆料拉溃	钢筋滑移	96.776	17.0
G30-2.5-90	灌浆料拉溃	钢筋滑移	89.960	19.0
G38-2-100	断裂处,灌浆料径向劈裂	钢筋断裂	101.517	20.0
G38-2-130	断裂处,灌浆料径向劈裂	钢筋断裂	100.878	19.2
G38-2-148	断裂处,灌浆料径向劈裂	钢筋断裂	101.004	18.0
G38-2-178	断裂处,灌浆料径向劈裂	钢筋断裂	100.948	20.2
G48-2-100	断裂处,灌浆料径向劈裂	钢筋断裂	98.102	18.0
G48-2-130	断裂处,灌浆料径向劈裂	钢筋断裂	99.489	19.2
G48-2-148	断裂处,灌浆料径向劈裂	钢筋断裂	101.350	16.9
G48-2-178	断裂处,灌浆料径向劈裂	钢筋断裂	103.445	18.6

$H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$ 、 $J_1$ 、 $J_2$ 、 $J_3$ ,应变片分布如图8所示。图9~14为8组试件在不同应变片处荷载-应变关系曲线。

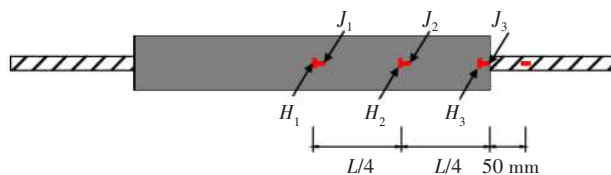


图8 钢管内灌UHPM连接件应变片分布

Fig. 8 Strain gauge layout for UHPM-filled steel tube connectors

由图9、10可知:在加载过程中,大部分试件组的钢管外壁顶部横向应变始终呈现正值,大部分试件组钢管外壁顶部纵向应变始终呈现负值;荷载达到80 kN左右时曲线发生明显曲折,说明此处发生滑移,对应变片影响较大;对比钢筋锚固长度一致的试件组可知,钢管直径较小的试件组竖向应变绝对值都明显更大,最大的是G38-2-100组的试件。

由图11、12可知,在加载过程中,所有试件组的钢管外壁四分之一位置处的竖向应变始终为正值,且大部分试件组的钢管四分之一位置处的横向应

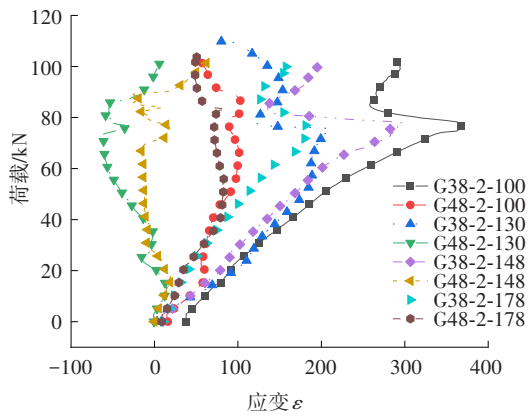


图9  $H_3$ 应变片处荷载-应变对比

Fig. 9 Load-strain comparison at  $H_3$  strain gauge

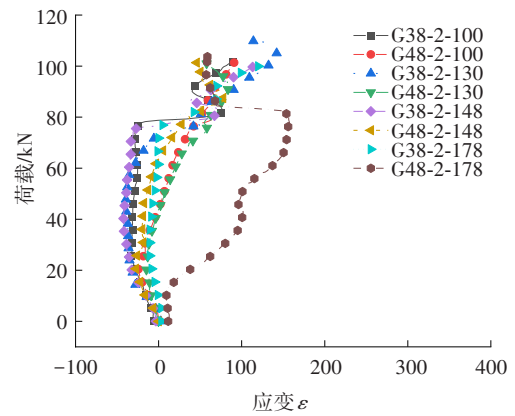


图10  $J_3$ 应变片处荷载-应变对比

Fig. 10 Load-strain comparison at  $J_3$  strain gauge

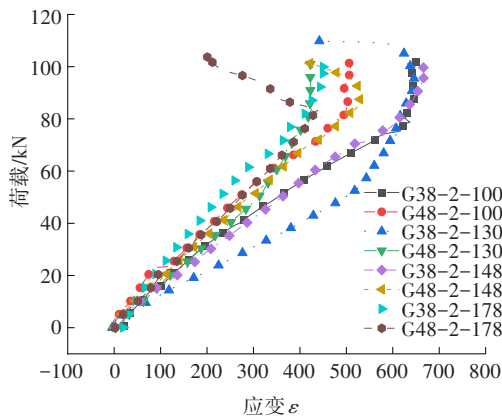


图11  $H_2$ 应变片处荷载-应变对比

Fig. 11 Load-strain comparison at  $H_2$  strain gauge

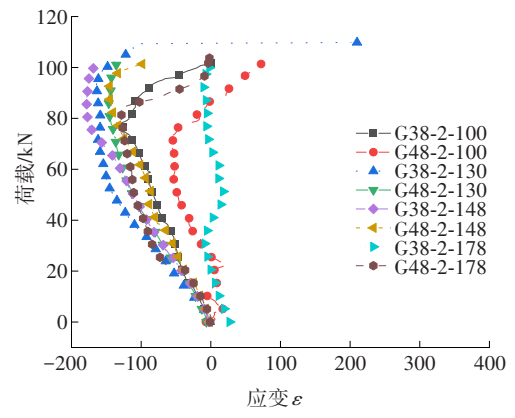


图12  $J_2$ 应变片处荷载-应变对比

Fig. 12 Load-strain comparison at  $J_2$  strain gauge

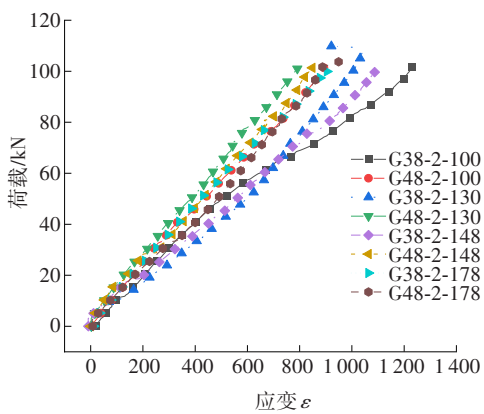


图13  $H_1$ 应变片处荷载-应变对比

Fig. 13 Load-strain comparison at  $H_1$  strain gauge

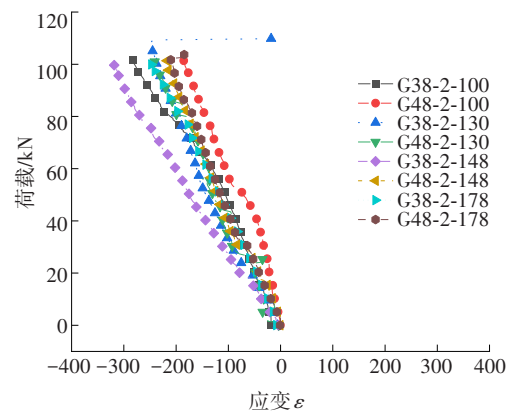


图14  $J_1$ 应变片处荷载-应变对比

Fig. 14 Load-strain comparison at  $J_1$  strain gauge

变始终为负值。当荷载达到80 kN左右时,不同试件组呈现出不同的应变变化特征:G48-2-178试件组的竖向和横向应变绝对值快速减小;G38-2-130和G48-2-148试件组的竖向应变绝对值逐渐减小;G38-2-100试件组的横向应变绝对值逐渐减小,这些现象均表明钢管在此处发生了收缩。

在荷载达到80 kN左右时,G48-2-100试件组的横向应变值由负变为正。这一现象表明滑移面已延伸至该位置,灌浆料的能量耗散量降低。当应变值变为正值时,意味着钢管因受到灌浆料的挤压而发生了膨胀。

由图13、14可知,在加载过程中,所有试件组钢

管外壁二分之一处竖向应变始终呈现正值,所有试件组钢管外壁二分之一处横向应变始终呈现负值,说明此处应力传递较好;从钢管外壁顶部到钢管外壁二分之一处,竖向、横向应变绝对值逐渐增强并在钢管外壁二分之一处达到峰值。

由以上现象可知:

1) 在试验中,钢筋作为媒介将黏结应力传递至灌浆料,而后再将黏结应力传递至外部钢管,这一过程实现了钢筋应力的传递,使得整个结构能共同承担外力。从结构的灌浆端到钢筋锚固端,钢管的纵向和横向应变绝对值逐渐增强,而在钢筋锚固端部,纵向和横向应变值达到峰值。

2) 当钢筋拉断时,锚固长度较长的试件钢管横向应变绝对值相对下降,应变出现紊乱,试验结束。

### 3.2 试件的破坏模式

根据试件的破坏剖面图,将试件的破坏模式分为三种<sup>[21-22]</sup>,第一种是钢筋断裂破坏,例如G38-2-100、G38-2-178、G48-2-178等试件均呈现此类破坏模式。该破坏模式以连接钢筋被拉断作为破坏标志,钢筋断裂大多发生在钢筋应变片粘贴位置。此外,当钢管与灌浆料的黏结强度大于钢筋的抗拉强度时,也会出现这种破坏情况。第二种是钢筋黏结滑移破坏,例如G30-2-90、G30-2.5-90等试件属于此类。此破坏模式以试件达到峰值荷载的85%作为破坏标志,通常发生在钢筋与灌浆料黏结强度较小的情况下。第三种是灌浆料黏结滑移破坏,以G30-0-90试件为代表。它同样以试件达到峰值荷载的85%作为破坏标志,一般出现在钢管与灌浆料黏结强度较小时。

发生钢筋断裂破坏的试件,其破坏现象为端头灌浆料出现径向劈裂斜裂纹,端头锥形剥落,灌浆料和钢筋、灌浆料和钢管传力明确,部分内部完好,部分内部出现轻微斜裂纹;发生钢筋黏结滑移破坏的试件,其破坏现象为灌浆料破坏,钢筋从灌浆料中拔出,内部裂纹向两端延伸;发生灌浆料黏结滑移破坏的试件,其破坏现象为钢管(仅出现在未车丝钢管)与灌浆料之间发生滑移,灌浆料包裹钢筋,灌浆料在与钢筋顶部的接触位置断开,断开形态随钢筋切面变化。

试验结果表明:对钢管内部进行车丝的试件,其钢管与灌浆料的界面黏结强度显著提高,不同丝距会影响界面黏结强度的大小;不同钢管直径的试件均会发生端部劈裂现象,且钢管内部会出现斜

向裂纹和灌浆料脱空现象;试件的钢筋锚固长度越大,钢筋与灌浆料的界面黏结强度越高。

## 4 结论

1) 试件的破坏模式分别为钢筋断裂破坏、钢筋黏结滑移破坏、灌浆料黏结滑移破坏。对于钢筋锚固长度大于钢筋直径的7倍、钢管直径适宜且钢管内部存在车丝的试件,其破坏模式为钢筋断裂,未发生钢筋从UHPM内拔出现象,说明连接可靠。

2) 钢管直径、钢管内部是否车丝是影响钢管与灌浆料黏结性能的关键参数。试验结果表明:对于钢管直径较小且钢管内部未车丝的试件,容易出现灌浆料黏结滑移破坏现象,显著降低试件的抗拉性能。

3) 钢筋锚固长度是影响试件抗拉性能的关键参数。当钢筋锚固长度小于钢筋直径的7倍时,容易发生钢筋黏结滑移破坏,未能充分发挥钢筋的抗拉强度,在实际工程中,应予以避免。

4) 钢管直径和钢筋锚固长度对试验破坏模型影响较大,在满足锚固长度条件下,钢管的直径越大、钢筋的锚固长度越长,在钢筋断裂时,钢筋的延伸率越小。

本文仅对试件开展单向拉伸试验,今后可在此基础上进一步开展试件在高应力反复拉压、大变形反复拉压作用下的受力性能试验,深入探究采用内灌UHPM钢管连接的钢筋在实际工程的适用性。

### 参考文献(References):

- [1] 邵旭东,刘也萍,邱明红,等.采用UHPC灌浆材料大口径全灌浆连接套筒接头的性能研究[J].土木工程学报,2020,53(2):81-91. DOI:10.15951/j.tmgcxb.2020.02.007.  
SHAO Xudong, LIU Yeping, QIU Minghong, et al. Research on performance of large diameter grout-filled splice sleeve joints with UHPC [J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53 (2): 81-91. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2020.02.007.
- [2] SUN W B, YANG C C, FAN W, et al. Vehicular impacts on precast concrete bridge piers with grouted sleeve connections [J]. Engineering Structures, 2022, 267: 114600. DOI:10.1016/j.engstruct.2022.114600.
- [3] 王磊.半灌浆套筒连接力学性能试验研究[D].西安:西安建筑科技大学,2018.  
WANG Lei. Experimental study on mechanical properties of semi-grouting sleeve connection [D].

- Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018.
- [4] 汪秀石, 杨智良, 吴照学. 装配式结构用高强套筒灌浆料性能试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2015(2): 65-68. DOI:10.19761/j.1000-4637.2015.02.017.  
WANG Xiushi, YANG Zhiliang, WU Zhaoxue. Experimental research on performance of high-strength cementitious grouting for prefabricated concrete structure [J]. China Concrete and Cement Products, 2015(2): 65-68. DOI:10.19761/j.1000-4637.2015.02.017.
- [5] TAHWIA A M, HAMIDO M A, ELEMAM W E. Using mixture design method for developing and optimizing eco-friendly ultra-high performance concrete characteristics [J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 18: e01807. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01807.
- [6] 张阳, 黄松龄, 刘颖峰, 等. 预应力UHPC加固RC梁抗弯性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(3): 23-31. DOI: 10.16339/j.cnki.hdxzbkb.2022024.  
ZHANG Yang, HUANG Songling, LIU Yingfeng, et al. Experimental study on flexural behavior of RC beams strengthened with prestressed ultra-high performance concrete [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2022, 49(3): 23-31. DOI:10.16339/j.cnki.hdxzbkb.2022024.
- [7] 赵华, 任国盛, 刘超群. 竹纤维对超高性能混凝土力学性能和自收缩的影响[J]. 混凝土, 2024(11): 113-116. DOI:10.3969/j.issn.1002-3550.2024.11.020.  
ZHAO Hua, REN Guosheng, LIU Chaoqun. Effect of bamboo fiber on mechanical properties and autogenous shrinkage of ultra-high performance concrete [J]. Concrete, 2024(11): 113-116. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3550.2024.11.020.
- [8] 刘新喜, 董蓬, 李玉. 干湿循环作用下炭质页岩声发射特征试验研究[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(6): 40-47. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021111623121963.  
LIU Xinxi, DONG Peng, LI Yu. Experimental study on acoustic emission characteristics of carbonaceous shale affected dry-wet cycling process [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2023, 39(6): 40-47. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021111623121963.
- [9] 黄卿维, 廖妙星, 陈宝春, 等. 超高性能砂浆砌体短柱轴压试验[J]. 交通运输工程学报, 2022, 22(1): 93-102. DOI:10.19818/j.cnki.1671-1637.2022.01.007.  
HUANG Qingwei, LIAO Miaoxing, CHEN Baochun, et al. Axial compression test of masonry short columns with ultra-high performance mortar [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2022, 22(1): 93-102. DOI:10.19818/j.cnki.1671-1637.2022.01.007.
- [10] LI C, CHEN B C, SENNAH K, et al. Experimental study on axial compressive behavior of stone masonry with ultra-high performance mortar [J]. Materials and Structures, 2023, 56(7): 124. DOI: 10.1617/s11527-023-02215-8.
- [11] 樊泽, 曾明辉, 胡志坚. 预制拼装桥墩连接构造抗震性能分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2019, 43(2): 357-362. DOI: 10.3963/j.issn.2095-3844.2019.02.035.  
FAN Ze, ZENG Minghui, HU Zhijian. Seismic performance analysis of precast segmental bridge piers connection configuration [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2019, 43(2): 357-362. DOI: 10.3963/j.issn.2095-3844.2019.02.035.
- [12] 韩娇, 陈真军, 杨林, 等. 灌浆料强度与灌浆套筒抗拉强度关系试验研究[J]. 四川建筑, 2024, 44(1): 154-156. DOI:10.3969/j.issn.1007-8983.2024.01.055.  
HAN Jiao, CHEN Zhenjun, YANG Lin, et al. Experimental study on the relationship between grouting material strength and tensile strength of grouting sleeve [J]. Sichuan Architecture, 2024, 44(1): 154-156. DOI:10.3969/j.issn.1007-8983.2024.01.055.
- [13] PAN H M, WU X M, SONG K, et al. Preparation of calcium sulphoaluminate cement-Portland cement-gypsum based sleeve grouting material: performance optimization and tensile properties of sleeve connector [J]. Construction and Building Materials, 2024, 418: 135341. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2024.135341.
- [14] WANG Y T, WAN K Y, XIANG H W, et al. Analysis and experimental study on mechanical properties of large-diameter grouted sleeve connections [J]. International Journal of Geomechanics, 2023, 23(6): 04023066. DOI:10.1061/ijgnai.gmng-8430.
- [15] 卢绍斌. 超高性能砂浆制备及其石砌体受压承载力研究[D]. 福州: 福州大学, 2021.  
LU Shaobin. Study on preparation of ultra-high performance mortar and compressive resistance of its stone masonry[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2021.
- [16] 国家市场监督管理总局, 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/T 228.1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.  
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Metallic materials—tensile testing—part 1: method of test at room temperature: GB/T 228.1—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑砂浆基本性

- 能试验方法标准: JGJ/T 70—2009[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test method of basic properties of construction mortar: JGJ/T 70—2009 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [18] WANG Z, ZHU J Z, WANG J Q, et al. Experimental study on a novel UHPC grout-filled pipe sleeve with mechanical interlocking for large-diameter deformed bars [J]. *Engineering Structures*, 2021, 226: 111358. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.111358.
- [19] 郑志涛, 杨皓东, 徐颖, 等. 锻压式半灌浆套筒结构设计及单向拉伸性能试验[J]. *结构工程师*, 2023, 39 (2): 97-106. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2023.02.008.
- ZHENG Zhitao, YANG Haodong, XU Ying, et al. Structure design and uniaxial tensile performance test of forging semi-grouting sleeve [J]. *Structural Engineers*, 2023, 39 (2) : 97-106. DOI: 10.15935/j. cnki. jgg cs.2023.02.008.
- [20] HUANG Y, ZHU Z G, NAITO C J, et al. Tensile behavior of half grouted sleeve connections: experimental study and analytical modeling [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 152: 96-104. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.154.
- [21] LIU Y H, XU N, ZHAO S C, et al. Proposal and experimental verification of enhancement method for half-grouted sleeve connection quality [J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 416: 135161. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.135161.
- [22] 郎圣淳, 严晓东. 带肋钢筋套筒灌浆连接破坏过程的有限元分析[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2025, 38 (1): 37-44. DOI: 10.20098/j.cnki.1001-5132.2023.1112.
- LANG Shengchun, YAN Xiaodong. Finite element analysis of damage process of grouted sleeve connections with ribbed reinforcing bars [J]. *Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition)*, 2025, 38 (1) : 37-44. DOI: 10.20098/j. cnki.1001-5132.2023.1112.

(责任编辑:薛仪;校对:熊怡)