

## 预制混凝土悬臂板灌浆套筒连接的性能分析

张 超<sup>1</sup>, 王艺霖<sup>2</sup>, 夏志国<sup>1</sup>, 付如林<sup>1</sup>

(1. 新疆北新国际工程建设有限责任公司, 新疆 乌鲁木齐 830092;

2. 山东建筑大学 土木工程学院, 山东 济南 250101)

**摘要:**目前, 预制混凝土悬臂板的灌浆套筒连接技术需要更加深入的理论层面支撑。为此, 文章选取半灌浆套筒连接进行专题研究, 构建套筒内连接钢筋拉力与其影响因素之间的定量关系, 并进行了拓展分析。研究表明: 影响套筒内连接钢筋拉力值的内部因素包括连接钢筋自身参数(直径与嵌入长度)、套筒自身参数(弹性模量、厚度、内径、环向应变)、灌浆料自身参数(抗压强度), 其中连接钢筋自身参数的影响最为显著; 提升预制悬臂板承载能力的优选推荐措施是增大连接钢筋的直径和嵌入长度。本文结论可为相关工程研究提供参考。

**关键词:** 悬臂板; 连接钢筋; 灌浆料; 套筒; 龄期

中图分类号: TU375

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)06-0060-06

doi: 10.13402/j.gcjs.2025.06.076

## Performance analysis of grouting sleeve connection for precast concrete cantilever slab

ZHANG Chao<sup>1</sup>, WANG Yilin<sup>2</sup>, XIA Zhiguo<sup>1</sup>, FU Rulin<sup>1</sup>

(1. Xinjiang Beixin International Engineering Construction Co., Ltd., Wulumuqi 830092, Xinjiang, China;

2. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, Shandong, China)

**Abstract:** The grouting sleeve connection technology for prefabricated concrete cantilever slabs requires more in-depth theoretical support. Therefore, a special study is conducted on the semi-grouting sleeve connection. Quantitative relationship between the tensile force of the connection steel bars inside the sleeve and its influencing factors is constructed and analyzed. Research has shown that internal factors affecting the tensile force of steel bars inside the sleeve include the self-parameters of the connection steel bars (diameter and embedded length), the self-parameters of the sleeve (elastic modulus, thickness, inner diameter, circumferential strain), and the self-parameters of the grouting material (compressive strength), among which the self-parameters of the connection steel bars have the most significant impact. Besides, the preferred recommended measure to enhance the load-bearing capacity of prefabricated cantilever slabs is to increase the diameter and embedded length of the connection steel bars.

**Key words:** cantilever slab; connection steel bars; grouting material; sleeve; age stage

装配式或装配整体式混凝土结构中常会出现预制混凝土悬臂板构件, 如预制阳台板、预制雨篷板、预制空调板等, 这类预制悬臂板构件与其支撑构件之间常采用灌浆套筒连接的方式<sup>[1-2]</sup>。

灌浆套筒连接一般包括全灌浆套筒连接与半灌浆套筒连接两大类, 在此情况下均可采用。但相比之下, 更宜于采用半灌浆套筒连接的方式: 1) 在预制混凝土悬臂板内布置套筒并与板内钢筋进行

收稿日期: 2024-11-13

基金项目: 教育部“长江学者和创新团队发展计划”资助项目(IRT13075)

作者简介: 张 超(1991—), 男, 工程师, 从事装配式混凝土结构方面的研究。

通信作者: 王艺霖(1981—), 男, 副教授, 从事装配式混凝土结构方面的研究。

机械连接;2)在用作支撑的混凝土构件上布置外伸的连接钢筋,其一端与支撑构件内的钢筋笼做好连接,或者直接在混凝土进行锚固;另一端可伸入预制悬臂板的套筒内并通过灌浆料实现连接。由于在套筒一端采用了机械连接方式,这种半灌浆套筒连接比全灌浆套筒连接具有效率高、效果好、湿作业量小等突出优势。

目前关于半灌浆套筒连接技术的相关研究已有不少,从研究方法来看,主要分为试验研究和数值模拟研究两大类。吴胤良等<sup>[3]</sup>研究了不同位置连接半灌浆套筒预拼桥墩的抗震性能(考虑半灌浆套筒在桥墩中的不同位置、通过低周反复加载试验来模拟研究预拼桥墩的抗震性能);徐若琳等<sup>[4]</sup>研究了装配式结构中半灌浆套筒钢筋连接的本构关系(基于室内半灌浆套筒头钢筋连接模型试验,在单调拉伸试验和反复循环加载试验数据的基础上构建了应力-应变关系曲线模型);周奎等<sup>[5]</sup>研究了塑性膨胀剂对半灌浆套筒单向拉伸连接破坏模式的影响;夏落等<sup>[6]</sup>研究了一种新型半灌浆套筒结构(在普通半灌浆套筒结构基础上,在灌浆端增加了与钢筋焊接的锚固板)的性能;李明涛<sup>[7]</sup>研究了高温后半灌浆套筒连接的力学性能(考虑温度、锚固长度、保护层厚度等变量进行了拉拔试验)等。在数值模拟研究方面,胡少华等<sup>[8]</sup>研究了半灌浆套筒连接件抗拉伸性能受部分参数(钢筋直径及锚固长度、灌浆料强度、钢筋偏置缺陷等)影响的规律;李凌志等<sup>[9]</sup>研究了反复拉压荷载下半灌浆套筒连接件的黏结滑移性能并进行了数值模拟方式的优化开发;孙志远<sup>[10]</sup>研究了带锚固板半灌浆套筒及其连接的预制拼装桥墩的参数化分析(基于ABAQUS模型分析了连接筋直径、套筒长度、桥墩节段数量、墩内配箍率、轴压比等参数对桥墩力学性能的影响)等。此外,还有综合运用试验和数值模拟方法的相关研究,如乔崎云等<sup>[11]</sup>针对低负温情况下锚固长度对半灌浆套筒连接性能的影响问题进行了试验研究与数值模拟。

然而,为了促进半灌浆套筒连接技术的进一步成熟,需着重从理论分析层面对其连接性能进行更全面深入的探究,找出影响其连接性能的主要因素,从而可为实际工程应用提供更可靠地指

导。同时,也能更好地助力于存在实际连接缺陷、灌浆料龄期不足等特殊情况<sup>[12-13]</sup>时的连接性能分析。为此,本文将面向预制混凝土悬臂板构件的连接问题,选取半灌浆套筒连接形式,采用理论分析为主、结合试验研究的方式来开展半灌浆套筒连接性能的深层次探究,得到有应用价值的具体结论。

## 1 预制混凝土悬臂板采用半灌浆套筒连接的理论分析

根据结构力学概念,预制混凝土悬臂板在自身及外界荷载作用下会在连接部位(靠近支撑构件的端部截面)出现明显的负弯矩,该截面的上部区域受拉,因此应在此端部截面的上部区域布置半灌浆连接接头。连接钢筋在支撑构件内做好固定后向外伸出、到达接头的套筒内部并被灌浆料紧密包裹,套筒的内侧与悬臂板内的钢筋进行机械连接(图1)。



图1 预制悬臂板与支撑构件之间的连接示意

在预制混凝土悬臂板端部截面上,连接钢筋会承受明显的拉力。在某种荷载作用下连接钢筋内达到的拉力值记为 $T(N)$ ,此时端部截面承受的弯矩记为 $M(N \cdot m)$ 。

如果连接接头的性能达标,应是连接钢筋出现受拉屈服<sup>[14]</sup>。考虑到钢筋屈服后会出现明显拉长、进而导致悬臂板出现明显的整体移位而严重影响正常使用,可将连接钢筋出现屈服作为悬臂板的承载能力极限状态,即取 $T = f_y A_s$ ( $f_y$ 为连接钢筋屈服强度,MPa; $A_s$ 为钢筋截面积, $mm^2$ )。如果连接接头的性能不达标,连接钢筋一般会出现拔出破坏(原因如灌浆料龄期不足、灌浆不饱满等)<sup>[15]</sup>,则 $T < f_y A_s$ 。

$M$ 作用下,悬臂板端面在半灌浆套筒下部区域的混凝土会与支撑构件在接触面上产生挤压作用而受压,该区域受压区混凝土的压应变从套筒下端开始、到悬臂板底部达到最大。为简化起见,可假设压应变的零点在连接钢筋的形心处、且从

上到下符合线性分布规律。根据应力与应变之间的比例关系,受压区混凝土的压应力也符合线性分布,最大压应变对应的混凝土最大压应力记为 $\sigma_{cmax}$ (MPa)。连接钢筋上部的混凝土可认为不与支撑构件接触而无需考虑受力。由此可建立预制悬臂板端部截面的受力分析图如图 2 所示。其中, $x_c$ 、 $x_t$ 分别为连接钢筋形心处至预制板底面、顶面的垂直距离。

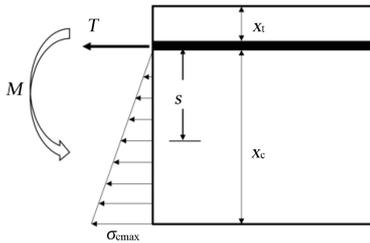


图 2 悬臂板端部截面的受力分析

将悬臂板的高度记为  $h$  (mm), 宽度记为  $w$  (mm)。根据受压区混凝土压应力的线性分布假定, 距连接钢筋形心处竖向距离为  $s$  的混凝土压应力为  $\frac{\sigma_{cmax}}{x_c} s$ 。

基于图 2 建立水平方向的合力平衡条件如式 (1) 所示。

$$\int_0^{x_c} \frac{\sigma_{cmax}}{x_c} s \cdot g \cdot w \cdot g \cdot d \cdot s = T \quad (1)$$

式中:  $\sigma_{cmax}$  为最大压应变对应的混凝土最大压应力, MPa;  $x_c$  为连接钢筋形心处至预制板底面的垂直距离, mm;  $s$  为距连接钢筋形心处竖向距离, mm;  $w$  为悬臂板宽度, mm;  $T$  为连接钢筋内达到的拉力值, N。

同时根据连接钢筋形心处的力矩平衡可知: 外力矩  $M$  等于混凝土受压区产生的总内力矩, 总内力矩可由混凝土各处压应力乘以其作用面积后再乘以其到连接钢筋形心处的力臂可得, 由此得式 (2):

$$\int_0^{x_c} \frac{\sigma_{cmax}}{x_c} s \cdot g \cdot w \cdot g \cdot s \cdot g \cdot d \cdot s = M \quad (2)$$

式中:  $M$  为端部截面承受的弯矩, kN·m。

具体到半灌浆套筒连接接头, 记套筒内部的等效直径为  $d_i$  (mm), 连接钢筋的直径为  $d$  (mm)、在套筒内的纵向长度为  $l$  (mm)。从连接钢筋的纵向来看,  $T$  应等于其与灌浆料接触面上的黏结应

力  $\tau_u$  (MPa) 与  $\tau_u$  作用面积的乘积。 $\tau_u$  作用面积可由连接钢筋的周长 ( $\pi d_s$ ) 乘以其在套筒内的纵向长度  $l$  得到。由此可得:

$$T = \tau_u \pi d l \quad (3)$$

式中:  $\tau_u$  为连接钢筋与灌浆料接触面上的黏结应力, MPa;  $d$  为连接钢筋的直径, mm;  $l$  为连接钢筋在套筒内的纵向长度。

$\tau_u$  的实际分布情况较为复杂, 参考已有研究可假设其沿连接钢筋纵向均匀分布<sup>[16-17]</sup>。进而参考相关研究<sup>[18]</sup>,  $\tau_u$  可按式 (4) 计算:

$$\tau_u = (\alpha \sqrt{\sigma_y} + \beta) \sqrt{f_{gc}} \quad (4)$$

式中:  $\sigma_y$  为套筒内壁与灌浆料之间的约束应力, MPa;  $f_{gc}$  为灌浆料抗压强度, MPa;  $\alpha$  和  $\beta$  为待定系数。

然后在横截面上进行考察: 接头受拉时套筒内部处于环向受拉状态, 存在着环向力  $F_u$  (N), 其对应环向应力  $\sigma_u$  (MPa), 二者之间的关系为

$$\sigma_u = \frac{F_u}{tl} \quad (5)$$

式中:  $\sigma_u$  为套筒内部的环向应力, MPa;  $F_u$  为套筒内部的环向力, N;  $t$  为套筒厚度, mm。

环向应力  $\sigma_u$  与环向应变  $\varepsilon_u$  之间符合本构关系  $\sigma_u = \varepsilon_u \times E_u$ 。由此可得:

$$F_u = \varepsilon_u = E_u t l \quad (6)$$

式中:  $\varepsilon_u$  为套筒内部的环向应变;  $E_u$  为套筒材料的弹性模量, MPa。

对于套筒横截面这种对称型截面可取其一半范围进行分析。同时考虑套筒内壁与灌浆料之间存在的相互作用(可用约束应力  $\sigma_y$  来表征), 可得到套筒截面分析图如图 3 所示。其中,  $\gamma$  为某  $\sigma_y$  与该处垂直方向的夹角。

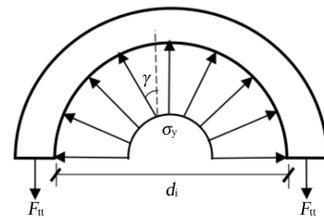


图 3 套筒截面分析图

基于图 3、根据竖向平衡条件, 各处  $\sigma_y$  在竖向产生向上的合力  $F_y$  (N), 其大小应等于向下的合力  $2F_u$ 。  $F_y$  可基于图 3 进行积分得到:

$$F_y = 2l \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sigma_y \cos \gamma \cdot \frac{d_i}{2} d\gamma \cdot \sin \gamma = \frac{d_i \sigma_y l}{2} = 2F_u \quad (7)$$

式中:  $F_y$  为各处  $\sigma_y$  在竖向产生的向上合力, N;  $\gamma$  为某  $\sigma_y$  与该处垂直方向的夹角;  $d_i$  为套筒的内直径, mm。

故可得:

$$\sigma_y = \frac{4F_u}{d_i l} \quad (8)$$

结合式(6)可得

$$\sigma_y = \frac{4\varepsilon_u E_u t}{d_i} \quad (9)$$

综合式(3)、(4)、(9)可得 T 计算式如下:

$$T = \left( \alpha \sqrt{\frac{4\varepsilon_u E_u t}{d_i}} \right) \sqrt{f_{gc}} \cdot \pi dl = \alpha \sqrt{\frac{4\varepsilon_u E_u t f_{gc}}{d_i}} \cdot \pi dl + \beta \sqrt{f_{gc}} \cdot \pi dl \quad (10)$$

为确定式(10)中的待定系数  $\alpha$  和  $\beta$ , 进行试验研究如下。

## 2 试验研究

### 2.1 试件情况

预制混凝土悬臂板试件的尺寸选取为 900 mm × 250 mm × 80 mm (长 × 宽 × 高)。试件内布置两个套筒, 套管长度  $L = 140$  mm、内径  $d_i = 30$  mm、厚度  $t = 2$  mm、外径为 32 mm, 选取套筒保护层厚度为 10 mm, 得  $x_1 = 26$  mm、 $x_c = 54$  mm。材质为 45# 钢, 屈服强度实测值为 451 MPa, 弹性模量实测值  $E_u = 2.02 \times 10^5$  MPa, 泊松比  $\nu_1 = 0.27$ 。



图4 套筒

采用 C30 混凝土, 实测 28 d 轴心抗压强度为 22.5 MPa, 弹性模量实测值为  $3.01 \times 10^4$  MPa。灌浆料为中德新亚 C85 型钢筋连接套筒灌浆料。制作 40 mm × 40 mm × 160 mm 的棱柱体试件按《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》(GB/T 17671—2021)进行 1、3、5、7、14、28 d 龄期的灌浆料抗压强度测定, 结果如表 1 所示。

每个套筒内各布置一根直径  $d = 12$  mm 的 HRB400 钢筋作为连接钢筋, 实测屈服强度  $f_y$  值

表1 灌浆料各龄期的抗压强度测定值

龄期/d	抗压强度值/MPa
1	28.6
3	45.2
5	53.9
7	69.1
14	77.4
28	86.8

为 445 MPa, 实测弹性模量值为  $2.06 \times 10^5$  MPa, 其在套筒内的嵌入长度  $l = 100$  mm。连接钢筋在支撑构件内的锚固长度按《混凝土结构设计规范》的要求计算得到,  $l_{aE}$  取为 260 mm。

为获取  $\varepsilon_u$  值, 在各套筒距开口端 50 mm 处布置一个环向应变测点, 采用长度 3 mm 的应变片。



图5 成型后的试件

### 2.2 加载与结果分析

在灌浆料龄期达到 28 d 时进行加载 ( $f_g = 86.8$  MPa)。对试件自重, 按其材质 (钢筋混凝土) 取重度为  $25 \text{ kN/m}^3$ , 可得沿试件纵向的线均布恒载为  $25 \text{ kN/m}^3 \times 0.25 \text{ m} \times 0.08 \text{ m} = 0.50 \text{ kN/m}$  (0.25 m 和 0.08 m 分别为试件的宽度和厚度)。加载方式为在试件顶面用堆载物 (210 mm × 150 mm × 130 mm 的钢制质量块和沙子) 施加均布荷载。加载分为两个等级:  $1.0 \text{ kN/m}^2$  和  $2.0 \text{ kN/m}^2$ , 对应的沿试件纵向线均布活荷载分别为  $1.0 \text{ kN/m}^2 \times 0.25 \text{ m} = 0.25 \text{ kN/m}$  和  $2.0 \text{ kN/m}^2 \times 0.25 \text{ m} = 0.50 \text{ kN/m}$ 。则总的纵向线均布荷载分别为  $0.75 \text{ kN/m}$  和  $1.00 \text{ kN/m}$ , 对应的悬臂板端部截面负弯矩的大小分别为  $303.75 \text{ N}\cdot\text{m}$  和  $405 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

采用 DH3816N 应力应变测试分析系统获得两级荷载作用下、套筒环向应变值  $\varepsilon_u$  分别为  $0.630 \times 10^{-6}$  和  $5.789 \times 10^{-6}$ 。

根据  $w = 250$  mm、 $x_c = 54$  mm 以及式(2)可得  $\sigma_{\text{max}}$  分别为 1.25 MPa 和 1.67 MPa。代入式(1)可得相应的 T 分别为 8.44 kN 和 11.25 kN, 进而分

别代入式(10)并进行联立求解后可得： $a=0.214$ 、 $\beta=0.201$ 。则式(10)可修正为

$$T = \left( 0.214 \sqrt{\frac{4\varepsilon_u E_u t}{d_i}} + 0.201 \right) \sqrt{f_{gc}} \cdot \pi d l \quad (11)$$

### 3 拓展分析

#### 3.1 预制悬臂板荷载承受能力的因素分析

式(11)展示了预制混凝土悬臂板采用半灌浆套筒连接时,在某种荷载工况下,影响套筒内连接钢筋拉力值  $T$  的因素,包括连接钢筋的相关参数(直径与嵌入长度)、套筒的相关参数(弹性模量、厚度、内径、环向应变)、灌浆料的相关参数(抗压强度)。

进一步由式(11)的结构来看,连接钢筋的相关参数(直径与嵌入长度)属于较强影响因素、其余因素属于较弱影响因素(在根号内),因此要想显著提高连接钢筋的拉力值  $T$ ,应优先从加大其直径和嵌入长度入手。

对于实际应用来说,为使预制悬臂板在连接之后能正常使用, $T$ 的极限值是连接钢筋屈服强度与截面积的乘积。因此在目前以HRB400钢筋为主流类型的情况下,通过加大钢筋直径和其在套筒内的嵌入长度可最直接地增强预制悬臂板的荷载承受能力。

#### 3.2 预制混凝土悬臂板提前发挥作用的可行性分析

若让预制混凝土悬臂板提前发挥作用、以达到缩短工期的目的,需在灌浆料未达到28d龄期时即让半灌浆套筒连接投入使用,此时可参考表1数据来确定选定龄期时的 $f_g$ 值(对于未在表1中直接列出的龄期对应数据,可经数据拟合后得到)。连接钢筋此时需承受的拉力可由如下步骤得到:首先根据悬臂板上的实际荷载工况和图1确定此时的 $M$ ;然后根据式(2)确定相应的 $\sigma_{\max}$ ;进而根据式(1)确定此时的 $T$ 。

随后将 $f_g$ 值和 $T$ 值代入式(11),即可得到一个更加具体的 $T$ 与各影响因素间的定量关系式,结合已知的各因素取值可用于辅助判断此龄期连接的预制悬臂板能否承受对应的荷载工况。

### 4 结 语

采用灌浆套筒连接(尤其是半灌浆套筒连接)

的预制混凝土悬臂板构件在实际工程中获得了大量应用,但其理论分析基础还有提升空间。本文面向更宜采用的半灌浆套筒连接情况进行了以理论分析为主、试验研究为辅的专题深入研究,建立了套筒内连接钢筋拉力值 $T$ 与其各影响因素之间的定量关系。主要结论如下。

(1)影响套筒内连接钢筋拉力值 $T$ 的因素除荷载工况外,主要包括连接钢筋自身参数(直径与嵌入长度)、套筒自身参数(弹性模量、厚度、内径、环向应变)、灌浆料自身参数(抗压强度)。其中,连接钢筋自身参数的影响最为显著。

(2)若要让连接后的预制悬臂板在更大荷载作用下不发生连接钢筋的受拉屈服、能保持正常使用,对应的推荐措施是提高连接钢筋的强度等级、增大其直径和在套筒内的嵌入长度。由于目前采用的钢筋等级比较统一,故主要推荐采用后两个措施。

### 参考文献:

- [1] WANG W, MAJ, WANGX. Seismic behavior of a precast RC frame-shear wall structure using full/half grout sleeve connections [J]. *Engineering Structures*, 2023, 280: 115685 - 115685.
- [2] 刘宏波,叶晓旭,魏鲁彬,等. 钢筋微粗半灌浆套筒黏结性能试验. *工程建设*, 2024, 56(11): 15 - 21.
- [3] 吴胤良,卢海林. 不同位置连接半灌浆套筒预拼桥墩抗震性能试验研究[J]. *建筑结构*, 2024, 54(10): 14 - 19; 64.
- [4] 徐若琳,崔永坤. 装配式结构中半灌浆套筒钢筋连接的本构关系研究[J]. *砖瓦*, 2024(4): 87 - 89; 93.
- [5] 周奎,欧阳伟,刘昕毅,等. 塑性膨胀剂对半灌浆套筒连接破坏模式的影响[J]. *喀什大学学报*, 2023, 44(3): 61 - 65.
- [6] 夏落,王金贵. 装配式混凝土结构节点半灌浆套筒连接性能试验与分析[J]. *建筑与预算*, 2024(3): 22 - 24.
- [7] 李明涛. 高温后半灌浆套筒连接力学性能试验研究[J]. *工业建筑*, 2022, 52(7): 106 - 112; 71.
- [8] 胡少华,王英涛. 半灌浆套筒连接件抗拉伸性能有限元研究[J]. *佛山科学技术学院学报(自然科学版)*, 2024, 42(2): 53 - 61.
- [9] 李凌志,朱高岩,刘建,等. 反复荷载下半灌浆套筒连接件模拟及优化[J]. *公路*, 2023, 68(9): 136 - 142.

- [10] 孙志远. 带锚固板半灌浆套筒连接的预制拼装桥墩力学性能研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2023.
- [11] 乔崎云,翟宏磊,曹万林. 低负温下锚固长度对半灌浆套筒连接性能试验研究与数值模拟[J]. 建筑结构,2023,53(增刊1):1223-1228.
- [12] 苏立坡,王占文,刘子业,等. 考虑钢筋偏心影响的铸造半灌浆套筒连接性能试验研究[J]. 建筑结构,2023,53(8):78-85.
- [13] 彭建和,吴韬,侯高峰,等. 灌浆缺陷对半灌浆套筒接头力学性能影响的试验研究[J]. 混凝土与水泥制品,2023(11):62-66.
- [14] 周忠晨,丁桂华,李二要. 连接缺陷对半灌浆套筒连接性能的影响[J]. 中国建筑金属结构,2022(11):14-16.
- [15] 李明涛. 高温后半灌浆套筒连接力学性能试验研究[J]. 工业建筑,2022,52(7):106-112;71.
- [16] HOSSEINI S J A, RAHMAN A B A. Effects of spiral diameter on the bond stress-slip relationship in grouted sleeve connector [J]. Malaysian Construction Research Journal (MCRJ), 2015, 12(1): 1-20.
- [17] 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.
- [18] UUTRAUER R E, HENRY R L. Influence of normal pressure on bond strength [J]. ACI Journal Proceedings, 1965, 62(5): 577-586.

(上接第53页)

- [4] 吴成龙,王其辉,李绍辉,等. 预制钢骨混凝土柱钢梁组合节点试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2023,45(4):103-113.
- [5] 戎贤,郝君临,张健新. 基于性能的新型装配式钢节点混凝土框架结构抗震设计[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2023,39(6):979-988.
- [6] 范夕森,贾文启,张子健. 角钢连接的装配式异形柱框架边节点抗震性能研究[J]. 建筑结构,2023,53(19):25-32;24.
- [7] 张健新,李晨晨,戎贤,等. 不同连接形式的装配式混凝土梁柱节点受力性能试验研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文),2023,45(2):123-130.
- [8] 邓扬,李爱群,张昀路,等. 新型装配式销轴混凝土梁柱节点抗震性能分析[J]. 东南大学学报(自然科学版),2022,52(3):461-470.
- [9] 徐天鸿,王书琪,田石柱. 反弯点高度比对强梁弱柱钢框架混合试验影响分析[J]. 广西大学学报(自然科学版),2022,47(1):22-30.
- [10] 谢鲁齐,章锦洋,刘晨昱. 基于可更换耗能连接的装配式混凝土梁柱节点力学性能试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版),2021,51(1):1-8.
- [11] HU B, WU Y F. Effect of shear span-to-depth ratio on shear strength components of RC beams [J]. Engineering Structures, 2018, 168(8): 770-783.
- [12] ZHOU Y W, GUO M, SUI L L, et al. Shear strength components of adjustable hybrid bonded CFRP shear-strengthened RC beams [J]. Composites, 2019, 163(4): 36-51.