

DOI:10.11784/tdxbz202504038

# UHPC-混凝土-钢组合板节点抗弯性能试验 研究和理论分析

罗贤志, 吴逸凡, 张素梅, 向阳欢

(哈尔滨工业大学(深圳)智能土木与海洋工程学院, 深圳 518055)

**摘要:** 超高性能混凝土(UHPC)-混凝土-钢组合板凭借其卓越的物理力学性能成为解决装配式地下结构严峻耐久性问题的理想构件形式。然而, 由于其材料特性、结构形式和施工工艺与传统钢筋混凝土构件存在较大差异, 现有的构件拼装节点难以直接应用于这种新型组合板。为此, 本文在已有节点形式的基础上开发了平接和榫接两种新型 UHPC-混凝土-钢组合板连接节点, 通过节点受弯试验测试了节点在弯矩作用下的整体工作性能和破坏模式; 结合数值分析方法, 探究了关键设计参数对节点抗弯性能影响规律及其作用机制; 最后, 根据试验和数值分析结果提出了节点抗弯刚度和抗弯承载力计算方法。研究表明: 节点的抗弯承载力由受拉区连接螺栓强度控制, 其典型破坏模式为连接螺栓受拉断裂; 新型连接节点的抗弯承载力与变形能力的匹配度较好, 正常使用阶段具有足够的变形控制能力, 峰值弯矩作用下节点的接缝张开量小于 2 mm; 增大连接螺栓预紧力可提高节点的早期抗弯刚度, 但对节点承载能力影响有限; 适度施加轴向压力可在提高节点早期抗弯刚度的同时提升节点抗弯承载力; 所提出的节点抗弯刚度和承载力计算方法具有较好适用性, 可供实际工程设计参考。

**关键词:** 超高性能混凝土; 组合板; 连接节点; 抗弯性能; 预紧力; 轴向压力

中图分类号: TU317.1

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2026)03-0309-12

## Experimental Study and Theoretical Analysis of Flexural Performance of UHPC-Concrete-Steel Composite Slab Joints

Luo Xianzhi, Wu Yifan, Zhang Sumei, Xiang Yanghuan

(School of Intelligent Civil and Ocean Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen),  
Shenzhen 518055, China)

**Abstract:** Owing to their exceptional physical and mechanical properties, ultra-high performance concrete (UHPC)-concrete-steel composite slabs have emerged as an ideal solution to addressing the severe durability challenges of pre-fabricated underground structures. However, due to significant differences in material characteristics, structural configurations and construction techniques compared with the conventional reinforced concrete components, the existing joints cannot be directly applied to these novel composite slabs. To address this issue, two innovative joint types (i.e., flat and tenon-groove joints) based on the existing joint configurations were developed in this paper. Flexural tests were conducted to evaluate the integrated performance and failure modes of these joints under bending moments. Numerical analysis was also employed to investigate the influences of key design parameters on the joint's flexural performance and the underlying mechanisms. Finally, calculation methods for the joint's bending stiffness and flexural capacity were proposed based on experimental and numerical results. The findings demonstrate that the flexural capacity of joints is governed by the tensile strength of connecting bolts in the tension zone, with the bolts' tensile fracture being the typical failure mode. The novel connecting joints exhibit well-matched flexural capacity and deformation compatibility, and they provide sufficient deformation control in serviceability limit states, with their open-

收稿日期: 2025-04-28; 修回日期: 2025-10-01.

作者简介: 罗贤志 (1996—), 男, 博士研究生, luoxianzhi\_hit@163.com.

通信作者: 张素梅, smzhang@hit.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52178130).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52178130).

ing width remaining below 2 mm under peak bending moments. Increasing the bolt's pretension force enhances the initial bending stiffness but has limited impact on the ultimate load-bearing capacity. Moreover, moderate axial compression improves both the initial bending stiffness and the flexural capacity. The proposed calculation methods for bending stiffness and flexural capacity show strong applicability and can serve as references for the design of practical engineering.

**Keywords:** ultra-high performance concrete (UHPC); composite slab; joint; flexural performance; preload; axial compression

地下结构是现代基础设施的重要组成部分,其所处环境的特殊性对构件性能提出了更高的要求<sup>[1-6]</sup>,特别是在耐久性、抗裂性和施工效率方面.中国地域辽阔,地质条件和环境特征多样,这进一步增加了复杂地下结构设计施工的难度<sup>[7-9]</sup>.在此背景下,研发具有卓越综合性能的新型结构构件成为地下工程领域的重要研究方向.

超高性能混凝土 (ultra-high performance concrete, UHPC) 的强度和耐久性远优于普通混凝土,是提升工程结构在恶劣服役环境下工作性能的理想材料<sup>[10-11]</sup>.为解决地下结构所面临的耐久性和施工效率瓶颈,结合 UHPC 开发了一种 UHPC-混凝土-钢组合构件.该构件通过在迎土侧引入 UHPC,利用其优异的抗裂、抗渗能力,有效阻隔地下水及有害离子对结构的侵蚀;构件的背土侧设置连续钢板,钢板在参与结构受力的同时又完全包裹构件内部普通混凝土,阻断了普通混凝土与外部环境的直接接触,消除了隧道内部温度、湿度交替变化和高浓度二氧化碳对结构耐久性的不利影响.该构件采用预制装配式构造,通过预制成型带空腔的 UHPC-钢板单元,待现场拼装完成后再灌注普通混凝土,显著降低了运输与施工成本,大幅提升了施工效率.

在装配式地下结构工程中,构件连接节点的可靠性是确保结构整体服役性能的关键<sup>[12]</sup>,众多学者已对此开展了一系列研究.朱瑶宏等<sup>[13]</sup>开展了混凝土隧道管片节点性能足尺试验,研究了采用不同螺栓连接形式和螺栓布置方式对节点承载能力和破坏模式的影响.张力等<sup>[14]</sup>通过试验研究了盾构隧道管片螺栓接头在正负弯矩作用下的破坏特征和损伤特性,并对接头的细观损伤进行了定量分析.柳献等<sup>[15]</sup>针对运营地铁耐久性损伤问题,开展了连接螺栓锈蚀工况下节点力学性能的足尺试验,揭示了螺栓损伤对节点不同受力阶段的影响规律.文献[15-19]探究了大弯矩和大偏心距工况下装配式类矩形隧道纵缝节点的力学性能,并对节点设计构造提出了改进建议.张稳军等<sup>[20]</sup>基于深圳地铁实际工程,通过有限元分析方法对管片接头进行数值分析,研究了螺栓预紧力对

接头受力性能的影响.黄广南等<sup>[21]</sup>依托湛江湾跨海隧道工程,通过三维数值分析对比了不同形式的螺栓接头受力性能及其对管片结构的影响,提出了接头设计和施工建议.

当前装配式地下结构连接节点的研究主要集中在传统钢筋混凝土隧道管片节点领域,而 UHPC-混凝土-钢组合板在细部构造和材料性能方面与常规管片存在本质差异.在此背景下,本研究基于现有节点形式研发了平接式和榫接式这两种新型 UHPC-混凝土-钢组合板连接节点:这通过 4 点受弯试验测试和评估节点在弯矩作用下的整体工作性能和破坏模式;通过精细化数值模拟深入分析关键设计参数对节点抗弯性能的影响规律及其作用机理;最后,基于试验与数值分析结果建立具有工程实用价值的节点抗弯刚度和承载力计算方法.

## 1 试验概况

### 1.1 节点设计

针对新型组合板的构造特点(图 1)并参考现有地下装配式结构节点形式,开发了如图 2 所示的钢-UHPC 双排螺栓连接节点.该节点设计充分融合了传统节点优势与新材料特性,主要包含平接和榫接这两种构造形式,以满足不同工程场景的需求.节点采用双排螺栓对称布置,确保其在正、负弯矩作用下均能形成有效的传力路径,其中钢制端板作为核心传力构件,既为高强螺栓提供可靠锚固,又能将拉力高效传递至构件底部钢板或上部纵向钢筋.在耐久性设计方面,通过 UHPC 层整体包覆钢制端板外侧,使得

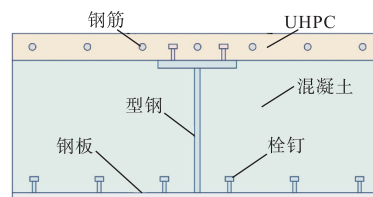


图 1 UHPC-混凝土-钢组合板构造

Fig.1 Configuration of UHPC-concrete-steel composite slab

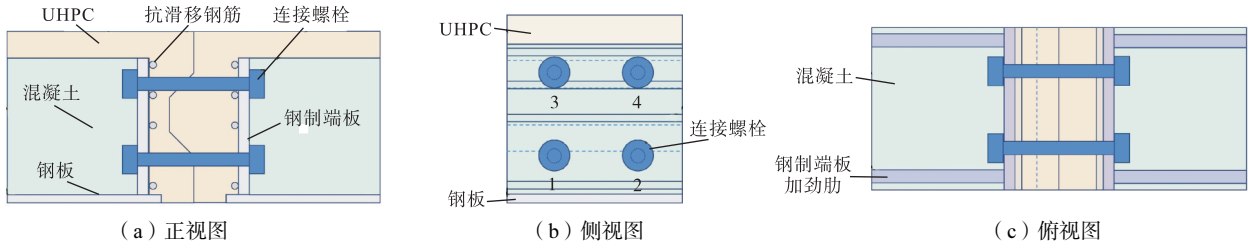


图2 UHPC-混凝土-钢组合板连接节点构造

Fig.2 Configuration of UHPC-concrete-steel composite slab joint

UHPC层不仅参与结构受力,同时也为钢构件提供长效防护.在钢-UHPC界面处焊接抗滑移钢筋,以提升异质材料间的界面黏结性能<sup>[22]</sup>.这种节点构造形式通过多层次的协同工作机制,可较好解决新型组合板连接中的传力可靠性和耐久性等关键技术问题.

1.2 试件设计

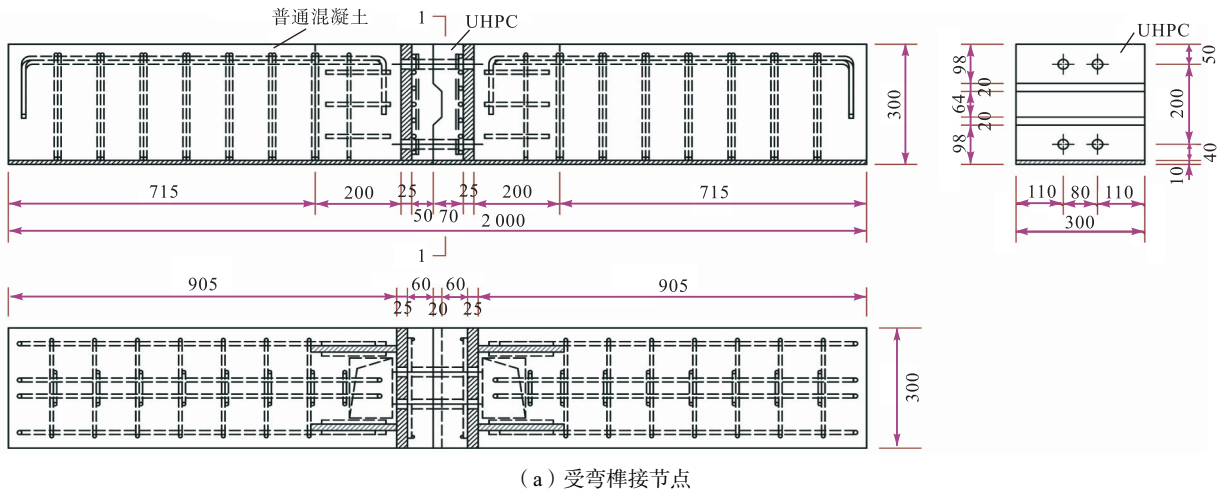
综合考虑构件尺寸和设备加载能力,试验设计了如表1所示的3种试件以探究凹凸榫和轴向压力对节点抗弯性能的影响.实际结构中为满足防水抗渗需要,构件连接节点处需设置密封垫、嵌缝槽等构造,

但考虑到该类构造对节点力学性能影响较小,试件设计中对此进行简化考虑.无轴向荷载作用的平接和榫接节点试件外廓尺寸为2000 mm × 300 mm × 300 mm(图3(a));施加轴向压力的平接节点试件出

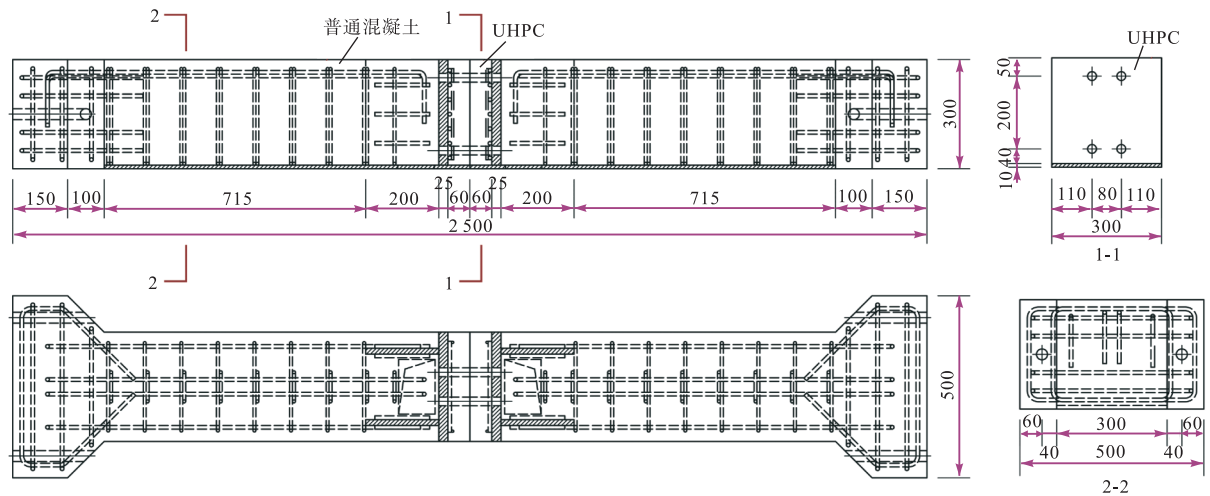
表1 组合板节点试件设计

Tab.1 Design of composite slab joint specimens

试件编号	试件类型	轴向荷载/kN	试件尺寸/(mm × mm × mm)
CW-1	平接	0	2 000 × 300 × 300
CW-2	榫接	0	2 000 × 300 × 300
YW-1	平接	0 ~ 400	2 500 × 500 × 300



(a) 受弯榫接节点



(b) 弯矩和轴力共同作用平接节点

图3 UHPC-混凝土-钢组合板连接节点试件详图(单位:mm)

Fig.3 Detailed diagram of UHPC-concrete-steel composite slab joint specimens(unit:mm)

于轴向加载需要,在试件两端额外设置了穿孔牛腿,其外廓尺寸为 2500 mm × 500 mm × 300 mm(图 3(b)).节点钢制端板和加劲肋的厚度分别为 25 mm 和 16 mm,构件底部钢板的厚度为 10 mm,钢制端板外设有 60 mm 厚 UHPC 层,连接螺栓采用两排两列布置的 8.8 级 M20 螺栓.为保证破坏发生于节点处,对试件非节点区段的抗弯和抗剪性能进行了加强,试件细部构造见图 3.试件所用钢板等级为 Q235,钢筋等级为 HRB400,混凝土等级为 C60;UHPC 的纤维掺量为 2.0%,纤维类型为平直纤维和端勾纤维 1:1 混合的混杂纤维,平直纤维和端勾纤维的直径分别为 0.20 mm 和 0.22 mm,长度均为 16 mm.

1.3 试件制作和材料性能

试件加工过程大体可分为钢构件加工、UHPC 浇筑、节点拼装和混凝土浇筑共 4 个阶段.节点钢构件所有焊缝均为角焊缝满焊(图 4(a)),焊接完成需对焊接变形进行校正,钢制端板与 UHPC 连接一侧焊有抗滑移钢筋(图 4(b)).节点钢构件加工完成后支模浇筑节点区 UHPC(图 4(c)),标准养护 28 d 后拆模(图 4(d)).将试件对位拼装后(图 4(e))对高强螺栓施拧,施拧时先按设计拧紧力矩的 50% 进行初拧,再按 100% 拧紧力矩进行终拧,拧紧顺序按对角线操作.经检测,施拧完成后单根螺栓的预紧力约为 55 kN,螺栓应变约为 850  $\mu\epsilon$ .螺栓施拧完成后,绑扎构件区钢筋笼并浇筑混凝土.

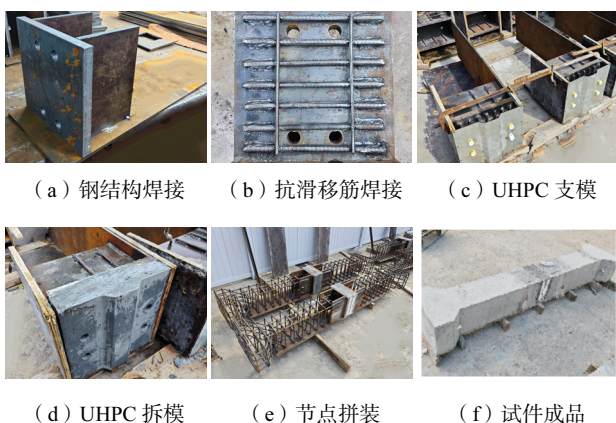


图 4 组合板连接节点试件加工

Fig.4 Manufacturing of composite slab joint specimens

UHPC、混凝土和钢材的基本力学性能测试分别按《活性粉末混凝土》<sup>[23]</sup>、《混凝土物理力学性能试验方法标准》<sup>[24]</sup>和《金属材料拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》<sup>[25]</sup>进行.

普通混凝土的立方体抗压强度和弹性模量分别为 63.3 MPa 和 36.4 GPa;UHPC 达到抗压强度时发生脆性破坏,抗压强度和弹性模量分别为 145.4 MPa

和 43.6 GPa, UHPC 受拉时具有明显的应变硬化特性和多缝开裂行为,抗拉强度为 8.2 MPa. 高强螺栓的屈服强度和极限抗拉强度分别为 635.7 MPa 和 852.1 MPa. 钢筋和钢板的主要力学性能指标见表 2.

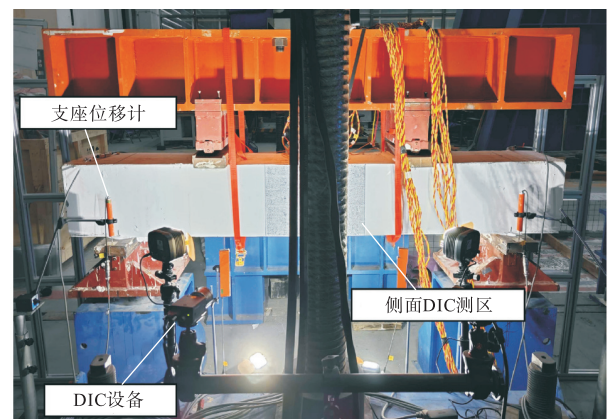
表 2 螺栓、钢板与钢筋力学性能

Tab.2 Mechanical properties of bolts, steel plates and rebar

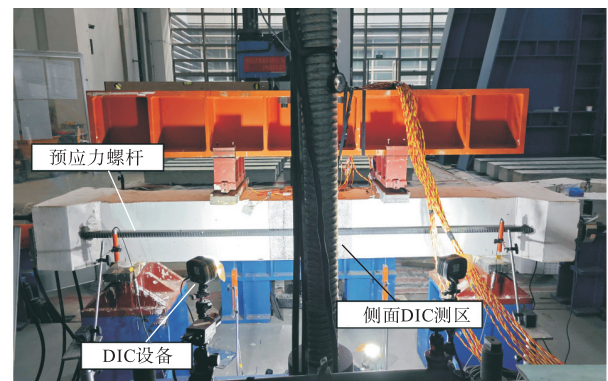
类别	规格	屈服强度/MPa	极限抗拉强度/MPa
螺栓	直径 20 mm	635.7	852.1
钢筋	直径 10 mm	454.4	637.0
钢板	厚度 10 mm	321.8	466.5
钢板	厚度 16 mm	298.2	453.9
钢板	厚度 25 mm	256.7	416.6

1.4 加载与量测方案

试验使用 JAW-1000A 型 100t 丝杠式电液伺服系统进行静力加载(图 5(a)),无轴向荷载作用的试件按《混凝土结构试验方法标准》<sup>[26]</sup>进行单调分级加载.加载前期采用力控制加载,加载速率为 15 kN/min,每级施加荷载 30 kN(对应节点弯矩每级施加 6 kN · m);荷载施加至节点预估承载力的 80% 后转为位移控制加载,加载速率为 0.5 mm/min,每级施加位移 1 mm 直至试件破坏;各加载级均持荷



(a) 受弯试件加载



(b) 弯矩和轴力共同作用试件加载

图 5 试件加载及测量系统

Fig.5 Loading and measurement system for specimen

2 min 用以观察和记录试验现象. 有轴向压力作用试件中的轴向压力通过对称布置在节点两侧的穿心千斤顶施加(图 5(b)), 采用循环加载制度以评估节点服役阶段受往复荷载作用时间的性能演化: 首次循环不对试件施加轴向压力, 将竖向荷载施加至 300 kN 后卸载至 0 kN; 第 2 次循环对试件施加 200 kN 的轴向压力, 将竖向荷载施加至 350 kN 后卸载至 0 kN; 第 3 次循环对试件施加 300 kN 的轴向压力, 将竖向荷载施加至 400 kN 后继续逐级施加竖向荷载, 直至试件破坏. 试件侧面布置一套三维数字图像相关(digital image correlation, DIC)测量系统, 用以监测节点侧面的位移和应变场; 连接螺栓栓杆上布设有应变片, 用以监测加载过程中螺栓所承担的轴力; 试件支座处布设电子千分表, 用于监测加载过程中试件的刚体位移.

## 2 试验结果和分析

### 2.1 试验现象

平接和榫接节点受弯变形过程较为相似(图 6 和图 7), 现以试件 CW-1 为例说明试验现象. 加载初期试件未发生明显变形, 节点拼接面在承受 6 ~ 10 kN·m 弯矩作用时开始张开, 且张开量和张开高度随荷载增大逐渐增加. 节点弯矩增加至约 25 kN·m 时, 节点处 UHPC 与钢制端板间自下而上有竖向裂缝开展, 这是钢制端板在螺栓拉力下发生出平面变形所致. 荷载继续增大至 45 kN·m 时, 节点 UHPC 中性轴附近出现水平裂缝. 施加弯矩至 125 kN·m 时, 节点顶部 UHPC 局部压溃并伴随碎块脱落. 平接和榫接节点试件的峰值承载力分别为

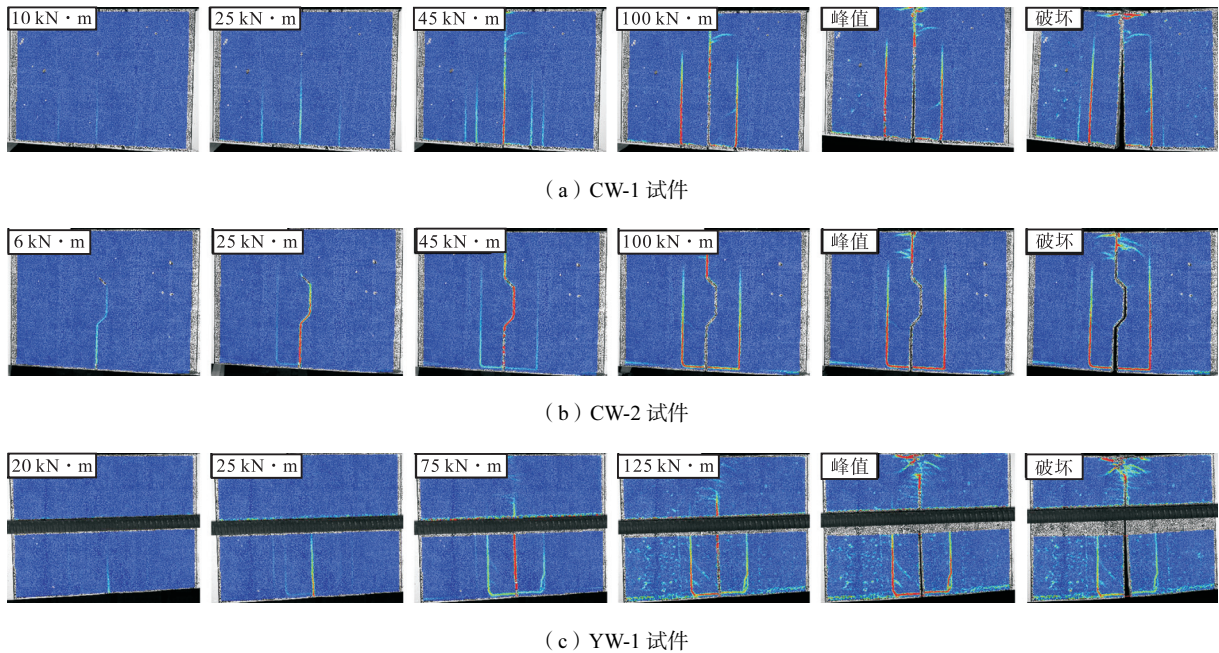


图 6 组合板连接节点受弯响应

Fig.6 Flexural response of composite slab joints

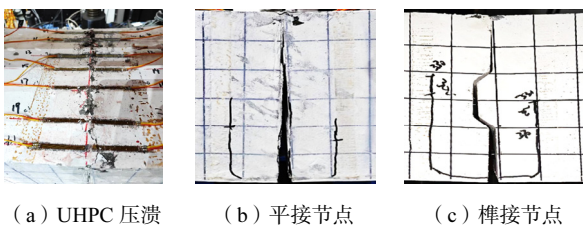


图 7 组合板连接节点受弯破坏模式

Fig.7 Bending failure modes of composite slab joints

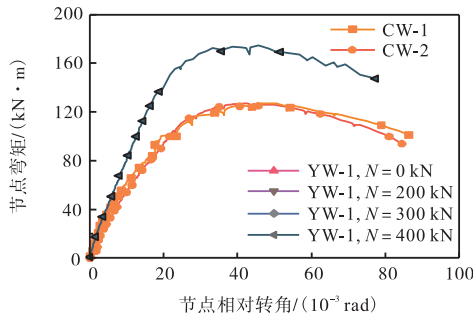
127.2 kN·m 和 126.9 kN·m. 荷载下降至约 85% 峰值荷载时, 节点下排螺栓被拉断并发出巨大声响, 节点挠度、接缝张开量迅速增大, 试件承载力则急剧下

降. 对于受弯矩和轴力共同作用的试件 YW-1, 在循环加载阶段施加不同大小的弹性弯矩后节点接缝逐渐张开, 但撤去弯矩后节点接缝近似完全闭合. 施加 400 kN 轴向压力后, 节点接缝在弯矩约 20 kN·m 时才张开, 该值明显大于仅受弯矩作用试件的 6 ~ 10 kN·m; 试件 YW-1 的峰值承载力为 177.7 kN·m, 同样明显大于仅受弯矩作用试件的峰值承载力, 试件的最终破坏模式为下排螺栓被拉断.

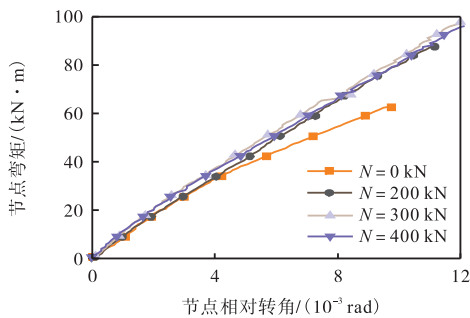
### 2.2 节点弯矩-相对转角关系

仅受弯矩作用时, 平接和榫接节点的弯矩-相对转角曲线基本一致(见图 8(a), 其中  $N$  为轴向压力),

这主要是由于 UHPC 的抗压强度远高于普通混凝土的抗压强度,以致节点受弯时 UHPC 的受压区高度较小,未发展至凹凸榫槽范围. 结合图 8 和组合板连接节点弯矩-接缝张开量曲线(图 9)可见,在节点受压区设置 UHPC 可有效避免普通混凝土连接节点中较为常见的凹凸榫槽应力集中破坏. 在加载初期(0~20 kN·m),仅受弯矩作用试件的相对转角随荷载增加近似线性增大. 此时 UHPC 内因预紧螺栓而产生的压应力尚未被完全抵消,节点接缝两侧 UHPC 仍处于紧密贴合状态,因此节点在该阶段具有较大的抗弯刚度. 荷载增大至足以抵消螺栓预紧力的作用后(20~120 kN·m),节点接缝随荷载增大自下而上张开,试件刚度逐渐降低. 下排螺栓受拉屈服后(大于 120 kN·m),节点相对转角随荷载增大迅速增加;由于 8.8 级高强螺栓无明显屈服点,试件的弯矩-相对转角曲线亦无明显屈服平台. 对比试件 CW-1 和 YW-1 的弯矩-相对转角曲线可知,由于施加轴向压力可提高节点接缝面在受载前的压应力,试件 YW-1 的初始抗弯刚度和承载能力明显高于试件 CW-1 的对应值. 对比 3 次循环加载对应的弯矩-相对转角曲线可知(图 8(b)),节点抗弯刚度在循环荷载作用下具有较好的一致性.



(a) 全部试件单调加载



(b) YW-1 试件 3 次循环加载

图 8 组合板连接节点弯矩-相对转角曲线

Fig.8 Bending moment-relative angle curves of composite slab joints

### 2.3 节点荷载-接缝张开量曲线

接缝张开量是装配式地下结构连接节点的重要变形控制指标,《盾构隧道工程设计标准》<sup>[27]</sup>中要求:在不考虑拼装误差的前提下,岩质地层或周边存在重要建(构)筑物时,接缝张开量不大于 2 mm;大断面盾构隧道或位于软土地层时,接缝张开量不大于 4 mm. 由接缝张开量随节点弯矩的发展变化规律(图 9)可知,各节点试件在接缝张开量达到 2 mm 时均已进入弹塑性阶段,此后承载力增长缓慢而接缝张开量迅速增大,接缝张开量达到 4 mm 时节点已进入峰值后的承载力下降阶段. 由此可见,新型连接节点的抗弯承载力与变形能力的匹配度较好,正常使用阶段具有足够的变形控制能力. 对比试件 CW-1 和 CW-2 的节点弯矩-接缝张开量曲线可以发现,加载早期平接节点由于接缝处 UHPC 受压接触面积较榫接节点更大而具有更高的抗弯刚度. 对比试件 CW-1 和 YW-1 的弯矩-接缝张开量曲线可以发现,施加轴向压力可在一定程度上提高节点控制变形的能力.

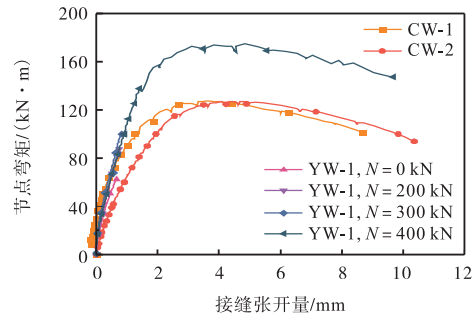


图 9 组合板连接节点弯矩-接缝张开量曲线

Fig.9 Bending moment-maximum opening width curves of composite slab joints

由节点接缝处沿测点高度方向的变形量分布(图 10)可知,弯矩作用下节点接缝底部受拉、顶部受压,底部受拉张开量远大于顶部压缩量. 随着弯矩增大,接缝张开量增长的速度不断加快,各节点在达到承载能力前的接缝处变形均符合平截面特征,满足受弯正截面承载能力计算假定.

### 2.4 连接螺栓节点弯矩-应变分析

节点连接螺栓应变随节点弯矩的变化情况见图 11. 节点安装时为每颗螺栓施加了 55 kN 的预紧力,故螺栓在加载前处于受拉状态,图 11 中螺栓应变为节点加载后的应变增量. 位于节点下部受拉区的 1 号、2 号螺栓与构件间的空隙已在节点装配施拧阶段被消除,故其应变随荷载增大近似线性增大. 3 号、4 号螺栓靠近节点受压区,其内部预紧力随节点所受弯矩增大而逐渐卸载,这表现为二者在加载初期的应变为负值. 节点达到峰值荷载后,节点接缝所在截面的

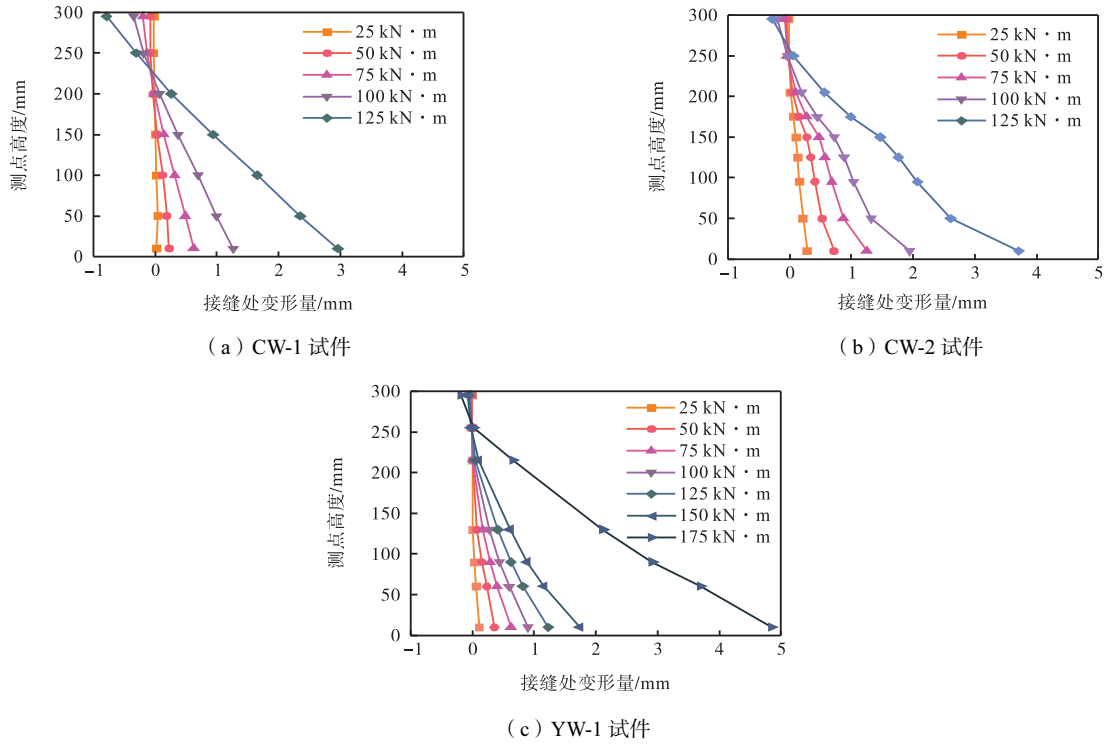


图 10 组合板节点接缝处沿测点高度方向的变形量分布

Fig.10 Distribution of deformations along the height of composite slab joints

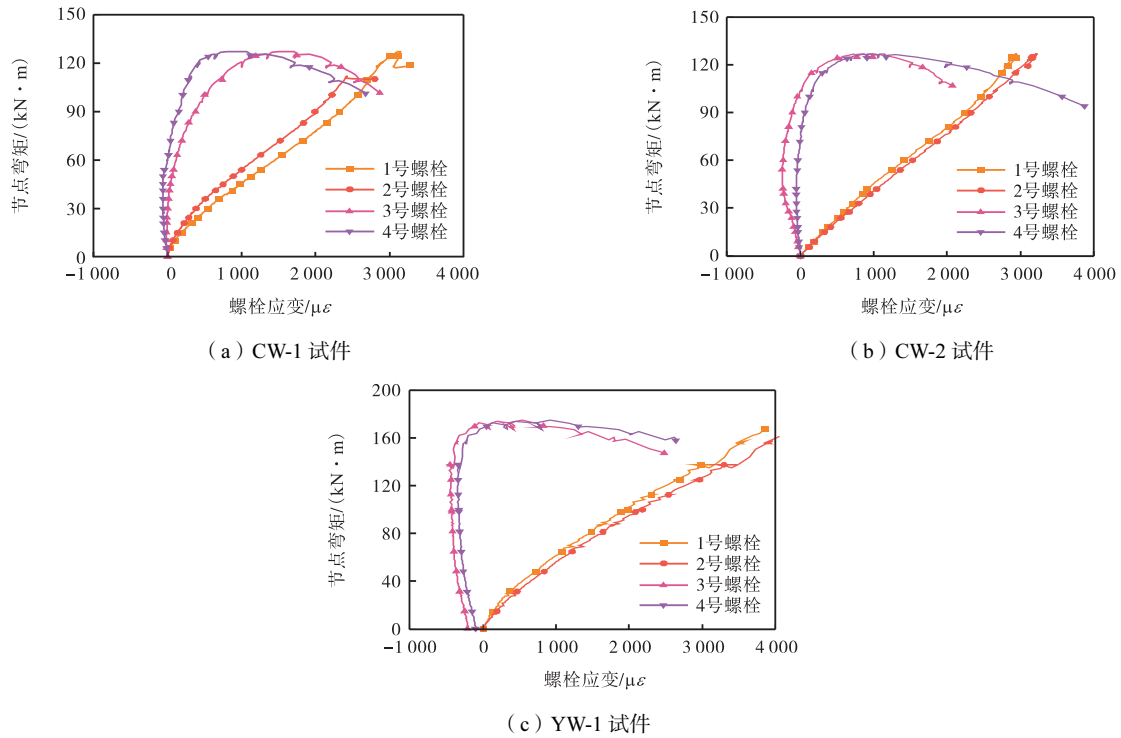


图 11 组合板节点连接螺栓节点弯矩-应变曲线

Fig.11 Bending moment-strain curves of bolts in composite slab joints

中和轴随荷载增大逐渐上升,致使 3 号、4 号螺栓所在位置逐渐由受压转变为受拉,该阶段螺栓拉应变迅速增大。3 号、4 号螺栓的拉力臂较短,对节点抗弯承载力的贡献相对有限,故该阶段 3 号、4 号螺栓应变的迅速增长也未显著提升节点的抗弯承载力。

### 3 数值模拟和参数分析

#### 3.1 模型建立和验证

为进一步探究关键设计参数对节点受力性能的

影响,现基于 ABAQUS 有限元软件建立组合板连接节点数值分析模型(图 12). 由于平接节点和榫接节点抗弯行为相近,此处以平接节点为例进行建模分析,其中模型规格尺寸、边界条件和加载制度均与试验保持一致. UHPC 采用混凝土损伤塑性模型模拟,其单轴拉、压行为分别采用张哲等<sup>[28]</sup>和 Lu 等<sup>[29]</sup>提出的本构模型;连接螺栓、钢筋和钢板均采用双线性本构模型并通过弹塑性模型模拟;普通混凝土采用《混凝土结构设计规范》<sup>[30]</sup>推荐的应力-应变关系并通过塑性损伤模型模拟. 混凝土损伤塑性模型中的膨胀角和偏心率分别取为 30°和 0.1,双轴与单轴受压屈服应力比和不变应力比分别取为 1.16 和 0.6667,黏滞系数取 0.0005. 混凝土和钢材材性按第 1.3 节中的实测值确定. 节点接缝面为“硬”接触,螺栓预紧力通过“螺栓荷载”施加. 图 13 对比了试件 CW-1 的节点弯矩-相对转角曲线试验值和模型预测值,可见所建立的有限元模型可较好预测组合板连接节点的力学行为.

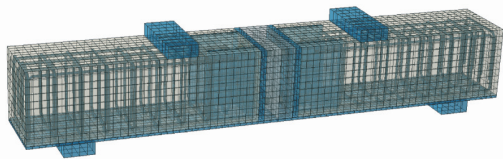


图 12 组合板节点有限元模型

Fig.12 Finite element model of composite slab joint

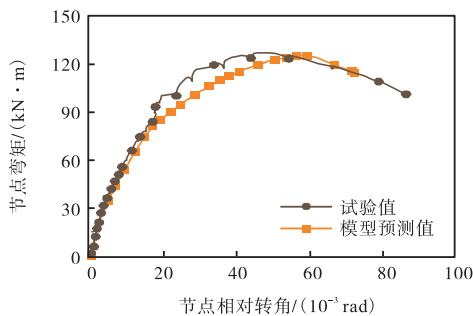
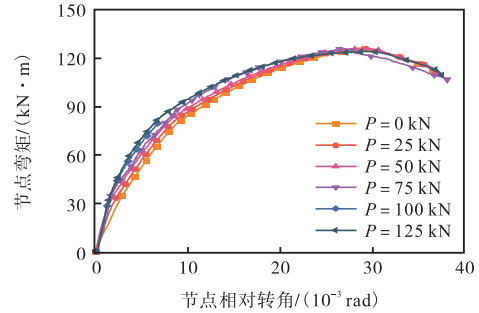


图 13 有限元模型验证

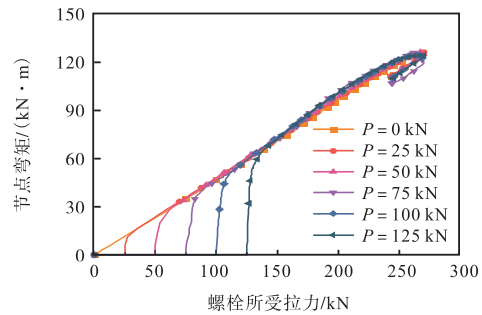
Fig.13 Validation by finite element model

### 3.2 螺栓预紧力影响

图 14(a)展示了不同螺栓预紧力( $P$ )下节点相对转角随节点弯矩增大的发展变化规律,可见螺栓预紧力大小主要影响节点中前期受弯性能. 对螺栓施加预紧力后,节点受外部弯矩作用时需先克服受拉区螺栓预紧力,预紧力被完全克服后接缝面才开始受拉张开,因此节点接缝初次张开时的弯矩随螺栓预紧力增大而增加. 此外,由于节点抗弯承载力主要由螺栓的抗拉强度和受压区 UHPC 的抗压强度决定,改变螺



(a) 节点相对转角



(b) 螺栓所受拉力

图 14 螺栓预紧力对组合板节点抗弯性能影响

Fig.14 Effect of bolt preload on flexural performance of composite slab joints

栓预紧力对节点的抗弯承载力无显著影响. 不同预紧力下螺栓所受拉力随节点荷载增大的发展变化规律见图 14(b). 当节点下部受拉螺栓内的拉力抵消其预紧力时,节点接缝开始受拉张开,而接缝张开后下部受拉螺栓的内力发展与其原有预紧力无关,因此预紧力对螺栓在加载中后期的内力发展的影响有限.

### 3.3 轴向压力影响

不同轴向压力作用下节点相对转角随荷载增大的发展如图 15 所示. 与施加螺栓预紧力的作用类似,施加轴向压力同样可以抑制节点接缝张开,且接缝受拉张开时对应的弯矩随轴向压力增大而增加. 与施加螺栓预紧力不同的是,对节点施加轴向压力可显著提高节点的抗弯承载力,这主要是由于对节点施加轴向压力的效果等同于减小了节点受拉螺栓所受拉力,在受压区 UHPC 的抗压强度未被充分利用时,这种因施加轴向压力导致的节点螺栓内力变化可显著提高节点抗弯承载力. 然而,当受压区 UHPC 的抗压强度在峰值弯矩作用下近似被充分利用时,节点的抗弯承载力不再由受拉区连接螺栓的抗拉强度控制,而是转变为由受压区 UHPC 的抗压强度和受拉区连接螺栓的抗拉强度共同控制,这导致在施加较大轴向压力时节点受压区 UHPC 或普通混凝土在下部受拉区连接螺栓屈服前就已被压溃.

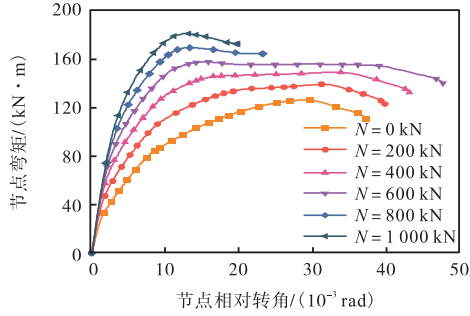


图 15 轴向压力对组合板节点抗弯性能影响

Fig.15 Effect of axial compression on flexural performance of composite slab joints

## 4 节点设计方法

### 4.1 抗弯刚度

接缝张开前,节点拼接面两侧 UHPC 在轴向压力及螺栓预紧力的作用下保持紧密贴合,节点整体可视为连续体而无需考虑接缝的存在(图 16),其抗弯刚度的计算式为

$$K_1 = \frac{E_u I_u}{t_1 + t_2} \quad (1)$$

式中:  $E_u$  和  $I_u$  分别为 UHPC 的弹性模量和截面惯性矩的大小;  $t_1$  和  $t_2$  分别为节点两侧 UHPC 层的厚度. 轴向压力与螺栓预紧力是否被克服决定了接缝面张开与否,节点接缝面张开弯矩的计算式为

$$M_{\text{open}} = N \frac{h}{2} + n_b P (h - a_s) \quad (2)$$

式中:  $n_b$  为靠近受拉区边缘的连接螺栓数量;  $h$  和  $a_s$  的含义见图 16.

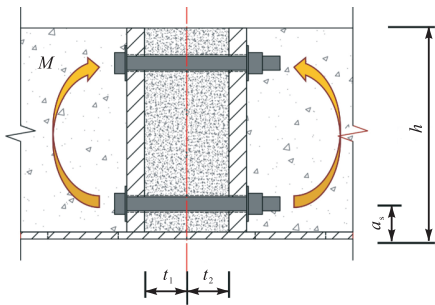


图 16 接缝张开前的组合板节点抗弯刚度计算

Fig.16 Calculation of flexural stiffness of composite slab joints before seam opening

螺栓预紧力被克服后的节点变形主要来自于节点接缝张开,工程中较为关心的也是节点在该阶段的抗弯刚度. 由于 UHPC 强度较高且节点受压区高度较小,可近似将节点受压区边缘视为转动中心(图 17),因此下列计算式成立.

$$K_2 = \frac{dM}{d\theta} \quad (3)$$

$$\theta = \frac{\Delta l}{h - a_s} \quad (4)$$

$$\Delta l = \frac{N_t^b L_1}{A_c E_b} + \frac{N_t^b L_2}{A_0 E_b} \quad (5)$$

$$N_t^b = \frac{M - N \frac{h}{2}}{n_b (h - a_s)} \quad (6)$$

式中:  $K_2$  为接缝张开后的组合板节点抗弯刚度;  $\theta$  为节点接缝面张开角度;  $\Delta l$  为靠近受拉区边缘连接螺栓的伸长量;  $L_1$ 、 $L_2$  分别为连接螺栓螺纹段和非螺纹段的长度;  $A_c$ 、 $A_0$  分别为连接螺栓螺纹段和非螺纹段的截面积;  $E_b$  为连接螺栓的弹性模量;  $N_t^b$  为单个连接螺栓所承受的拉力.

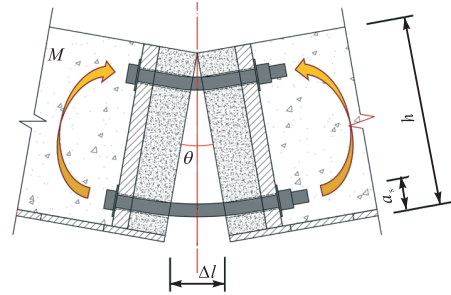


图 17 接缝张开后的组合板节点抗弯刚度计算

Fig.17 Calculation of flexural stiffness of composite slab joints after seam opening

### 4.2 抗弯承载力

新型组合节点受弯破坏主要为受拉区连接螺栓受拉屈服和受压区 UHPC 压溃破坏(图 18). 《盾构隧道工程设计标准》<sup>[27]</sup>认为,计算螺栓节点抗弯承载力时可将螺栓节点中的螺栓视为钢筋并按混凝土偏心受压构件计算节点承载力(式(7)~(10)). 该标准<sup>[27]</sup>推荐的节点抗弯承载力计算方法未考虑上排螺栓的承载力贡献,但出于预留安全储备的角度,仍建议按其推荐的方法进行新型连接节点的抗弯承载力设计. 施加轴向压力可在一定程度上提高新型连接节点的抗弯承载力,但设计时可不予考虑或偏于保守考虑,以保证节点具有一定的冗余承载力.

$$M_u = n_b N_t^b \left( h_0 - \frac{x}{2} \right) + N \left( \frac{h}{2} - \frac{x}{2} \right) \quad (7)$$

$$x = \frac{n_b N_t^b + N}{\alpha_1 f_c b} \quad (8)$$

$$h_0 = h - a_s \quad (9)$$

$$N_t^b = A_c f_t^b \quad (10)$$

式中:  $M_u$  为新型连接节点的抗弯承载力;  $x$  为 UHPC

受压区高度;  $\alpha_1$  为等效矩形内力图系数;  $f_c$  为 UHPC 轴心抗压强度;  $b$  为节点单元有效宽度;  $f_t^b$  为螺栓抗拉强度设计值. UHPC 的等效矩形内力图系数  $\alpha_1$ 、轴心抗压强度  $f_c$  可按《活性粉末混凝土结构技术规程》<sup>[31]</sup> 确定. 按式(7)计算的试件 CW-1、CW-2 和 YW-1 抗弯承载力分别为 130.0 kN、130.0 kN 和 182.8 kN, 与实测抗弯承载力 127.2 kN、126.9 kN 和 177.7 kN 吻合良好, 可见通过式(7)计算新型连接节点的承载力可行.

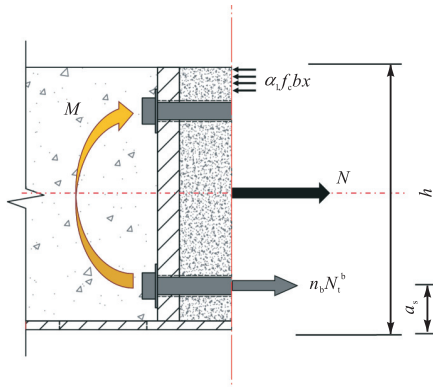


图 18 组合板节点抗弯承载力计算简图

Fig.18 Simplified diagram of calculation of flexural bearing capacity of composite slab joints

## 5 结 论

本文在已有节点形式的基础上开发了平接和榫接两种新型 UHPC-混凝土-钢组合板连接节点, 通过节点受弯试验测试了其在弯矩作用下的整体工作性能和破坏模式; 结合数值分析方法, 探究了关键设计参数对节点抗弯性能影响规律及其作用机制; 最后, 根据试验和数值分析结果提出了节点抗弯刚度和抗弯承载力计算方法. 以下为本文得出的结论.

(1) 基于 UHPC-混凝土-钢层状组合板的构造特征, 提出了由 UHPC、钢板和对拉螺栓协同受力的新型节点设计方案. 测试和分析结果表明: 新型连接节点的抗弯承载力与变形能力的匹配度较好, 正常使用阶段具有足够的变形控制能力, 可满足组合板连接的承载和变形控制需求, 节点构造方案合理可行.

(2) 增大连接螺栓预紧力能够提高节点接缝的初始张开弯矩; 施加轴向压力同样可以显著抑制接缝张开, 提高节点接缝的初始张开弯矩; 在受压区 UHPC 的抗压强度未被充分利用时, 适度施加轴向压力还可有效提升节点的抗弯承载力.

(3) 节点承载力由受拉区螺栓抗拉强度和受压区 UHPC 抗压强度共同控制, 其受弯典型破坏模式

表现为连接螺栓受拉断裂; 节点在峰值弯矩作用下接缝张开量控制在 2 mm 以内, 整体工作性能良好; 本文提出的抗弯刚度和承载力计算方法可较好地预测新型节点的弯曲刚度和抗弯承载力, 可供实际工程设计参考.

## 参考文献:

- [1] 戴志仁, 王 俊, 胡瑞青. 轨道交通工程裂缝与渗漏机理及其应对措施[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(2): 103-108.  
Dai Zhiren, Wang Jun, Hu Ruiqing. Mechanism and countermeasures of structural cracks and leakage in urban rail transit [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(2): 103-108 (in Chinese).
- [2] 朱 旻, 陈湘生, 王雪涛. 盾构隧道衬砌结构性能演化分析与思考[J]. 工程力学, 2022, 39(3): 33-50.  
Zhu Min, Chen Xiangsheng, Wang Xuetao. Analysis and thinking on structural performance evolution of shield tunnel lining [J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(3): 33-50 (in Chinese).
- [3] Xu Y J, Bai X, Chu K F. Underground space in metro area: Constituent, influencing factors and improving strategies of the spatial vitality [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 703: 012016.
- [4] Yang X R, Lin F. Prefabrication technology for underground metro station structure [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 108: 103717.
- [5] Admiraal H, Cornaro A. Future cities, resilient cities—The role of underground space in achieving urban resilience [J]. Underground Space, 2020, 5(3): 223-228.
- [6] Chen Z L, Chen J Y, Liu H, et al. Present status and development trends of underground space in Chinese cities: Evaluation and analysis [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 71: 253-270.
- [7] 巩江峰, 王 伟, 王 芳, 等. 截至 2023 年底中国铁路隧道情况统计及 2023 年新开通重点项目隧道情况介绍 [J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(2): 377-392.  
Gong Jiangfeng, Wang Wei, Wang Fang, et al. Statistics of China's railway tunnels by the end of 2023 and

- overview of tunnels of key new projects in 2023[J]. Tunnel Construction, 2024, 44(2): 377-392(in Chinese).
- [8] 顾鸿宇, 许东, 李丹, 等. 地下水对城市地下空间开发的制约及机理[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(16): 6533-6545.  
Gu Hongyu, Xu Dong, Li Dan, et al. The restriction and mechanism of groundwater to the development of urban underground space[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(16): 6533-6545(in Chinese).
- [9] 刘松玉, 李洪江, 童立元, 等. 城市地下结构污染腐蚀耐久性的若干问题[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增2): 7-17.  
Liu Songyu, Li Hongjiang, Tong Liyuan, et al. Some problems on polluted erosive durability of urban underground structures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(Suppl 2): 7-17(in Chinese).
- [10] Su X, Ren Z G, Li P P. Review on physical and chemical activation strategies for ultra-high performance concrete(UHPC)[J]. Cement & Concrete Composites, 2024, 149: 105519.
- [11] Li J Q, Wu Z M, Shi C J, et al. Durability of ultra-high performance concrete—A review[J]. Construction and Building Materials, 2020, 255: 119296.
- [12] 裴利华. 盾构隧道管片结构设计研究[J]. 铁道标准设计, 2009(12): 86-91.  
Pei Lihua. Design on segment structure of shielding tunnels[J]. Railway Standard Design, 2009(12): 86-91(in Chinese).
- [13] 朱瑶宏, 柳献, 张晨光, 等. 地铁盾构隧道纵缝接头螺栓形式对比试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(6): 1427-1435.  
Zhu Yaohong, Liu Xian, Zhang Chenguang, et al. Contrast test research on longitudinal joint with different forms of bolts in metro shield tunnel[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(6): 1427-1435(in Chinese).
- [14] 张力, 封坤, 何川, 等. 盾构隧道管片接头破坏特征及损伤特性试验研究[J]. 土木工程学报, 2021, 54(5): 98-107.  
Zhang Li, Feng Kun, He Chuan, et al. Experimental study on failure behaviors and damage characteristics of segmental joints of shield tunnels[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(5): 98-107(in Chinese).
- [15] 柳献, 金山, 黄庆华. 环向连接螺栓耐久性损伤下盾构隧道衬砌结构力学性能试验研究[C]//中国土木工程学会2017年学术年会. 上海, 中国, 2017.  
Liu Xian, Jin Shan, Huang Qinghua. Experimental study on the mechanical performance of shield tunnel lining structure under durability damage of circumferential connecting bolts[C]//2017 Annual Academic Conference of the China Civil Engineering Society. Shanghai, China, 2017(in Chinese).
- [16] Liu X, Liu Z, Ye Y H, et al. Mechanical behavior of quasi-rectangular segmental tunnel linings: Further insights from full-scale ring tests[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 79: 304-318.
- [17] Liu X, Ye Y H, Lu Z, et al. Mechanical behavior of quasi-rectangular segmental tunnel linings: First results from full-scale ring tests[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 71: 440-453.
- [18] Lu L, Lu X L, Fan P F. Full-ring experimental study of the lining structure of Shanghai Changjiang Tunnel[J]. Journal of Civil Engineering and Architecture, 2011, 5(8): 732-739.
- [19] Wang Z W, Fei J B, Ma W B, et al. Full-scale loading experiments on performance of UHPC joints for prefabricated mountain tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 131: 104784.
- [20] 张稳军, 张云旆, 宋晓龙. 盾构隧道弯螺栓接头力学特性受预紧力影响的数值研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(增2): 203-206.  
Zhang Wenjun, Zhang Yunpei, Song Xiaolong. Numerical study on mechanical behavior of bent bolted connection in shield tunnel under effect of preload[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(Suppl 2): 203-206(in Chinese).
- [21] 黄广南, 杨小平, 唐欣薇, 等. 高水头下不同螺栓连接管片纵缝接头受力性能研究[J]. 施工技术, 2019, 48(21): 38-42, 59.  
Huang Guangnan, Yang Xiaoping, Tang Xinwei, et al. Study on mechanical behavior of segment joints with

- different bolts under high hydraulic pressure[J]. Construction Technology, 2019, 48(21): 38-42, 59(in Chinese).
- [22] 邵旭东, 甘屹东, 李 嘉, 等. 钢-超薄 UHPC 组合桥面板界面抗剪焊接构造[J]. 中国公路学报, 2018, 31(11): 91-101.
- Shao Xudong, Gan Yidong, Li Jia, et al. Interfacial shear resistance of welded structure of composite deck system composed of orthotropic deck and ultrathin UHPC layer[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(11): 91-101(in Chinese).
- [23] GB/T 31387—2015 活性粉末混凝土[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- GB/T 31387—2015 Reactive Powder Concrete[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015(in Chinese).
- [24] GB/T 50081—2019 混凝土物理力学性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- GB/T 50081—2019 Standard for Test Methods of Concrete Physical and Mechanical Properties[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2019(in Chinese).
- [25] GB/T 228.1—2021 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
- GB/T 228.1—2021 Metallic Materials—Tensile Testing—Part 1: Method of Test at Room Temperature[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021(in Chinese).
- [26] GB 50152—2012 混凝土结构试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- GB 50152—2012 Standard for Test Method of Concrete Structures[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2012(in Chinese).
- [27] GB/T 51438—2021 盾构隧道工程设计标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- GB/T 51438—2021 Standard for Design of Shield Tunnel Engineering[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2021(in Chinese).
- [28] 张 哲, 邵旭东, 李文光, 等. 超高性能混凝土轴拉性能试验[J]. 中国公路学报, 2015, 28(8): 50-58.
- Zhang Zhe, Shao Xudong, Li Wenguang, et al. Axial tensile behavior test of ultra high performance concrete[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(8): 50-58(in Chinese).
- [29] Lu Z H, Zhao Y G. Empirical stress-strain model for unconfined high-strength concrete under uniaxial compression[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2010, 22(11): 1181-1186.
- [30] GB/T 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2024.
- GB/T 50010—2010 Standard for Design of Concrete Structures[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2024(in Chinese).
- [31] DBJ 43/T 325—2017 活性粉末混凝土结构技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- DBJ 43/T 325—2017 Technical Specification for Reactive Powder Concrete Structures[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2017(in Chinese).

(责任编辑: 武立有)