

法兰-套管组合连接的圆CFRP-钢管混凝土节点抗弯性能

吕柏行 赵恒 刘博 咸贵军 肖海荣 郭志光 何俊

Flexural behavior of concrete-filled circular CFRP-steel tube with flange-sleeve joints

LYU Baihang, ZHAO Heng, LIU Bo, XIAN Guijun, XIAO Hairong, GUO Zhiguang, HE Jun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240722.006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

圆截面CFRP-钢管混凝土在弯-扭荷载作用下的性能

Behavior of circular section concrete filled CFRP steel tubular under bending-torsion load

复合材料学报. 2022, 39(11): 5557-5573 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220301.002>

圆形CFRP-钢复合管海水海砂珊瑚混凝土柱轴压性能试验研究

Experimental study on axial compression performance of CFRP-steel composite tube filled circular seawater sea-sand coral concrete columns

复合材料学报. 2022, 39(8): 3982-3993 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210909.012>

CFRP约束钢管-活性粉末混凝土短柱轴压性能

Axial compression behaviour of CFRP confined reactive power concrete filled steel tube stub columns

复合材料学报. 2021, 38(2): 439-448 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200608.003>

圆钢管自应力钢渣增强混凝土柱的受力机制及承载力计算

Mechanical behavior and bearing capacity calculation of self-stressing steel slag aggregate reinforced concrete filled circular steel tube columns

复合材料学报. 2020, 37(5): 1211-1220 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190916.001>

新型CFRP-UHPC组合管混凝土圆柱轴压性能

Axial compression behavior of novel concrete-filled circular CFRP-UHPC composite tubular columns

复合材料学报. 2023, 40(4): 2390-2404 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220623.003>

新型碳纤维增强复合材料-钢复合管海水海砂混凝土圆柱轴压试验

Axial compression behavior of new seawater and sea sand concrete filled circular carbon fiber reinforced polymer-steel composite tube columns

复合材料学报. 2021, 38(9): 3084-3093 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201117.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

法兰-套管组合连接的圆 CFRP-钢管混凝土节点抗弯性能



分享本文

吕柏行¹, 赵恒², 刘博¹, 咸贵军³, 肖海荣¹, 郭志光¹, 何俊^{*2}

(1. 中国建筑土木建设有限公司, 北京 100071; 2. 长安大学 建筑工程学院, 西安 710064;

3. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150000)

摘要: 在钢管混凝土外侧粘贴碳纤维增强复合材料 (CFRP) 形成的 CFRP-钢管混凝土拱架具有高承载力与刚度的优点, 用于高应力、极软岩、强采动和断层破碎带等不良地质条件下的大断面隧道支护。本文提出了一种新型法兰-套管组合连接形式, 用于 CFRP-钢管混凝土拱架的节点。通过四点弯曲试验研究了法兰厚度 (20 mm、30 mm、40 mm) 对 CFRP-钢管混凝土节点破坏模式、抗弯承载力、刚度等弯曲性能的影响。试验结果表明: 试件的破坏模式均为 CFRP 沿轴向剥离破坏, 法兰-套管节点完好, 该连接方式有效; 法兰厚度为 20 mm 时, 抗弯承载力和刚度与无节点试件的基本一致, 且抗弯承载力和刚度随着法兰厚度的增加而增大。通过有限元分析, 研究法兰厚度、套管长度和套管壁厚对 CFRP-钢管混凝土节点弯曲性能影响规律。有限元结果表明: 内聚力模型能较好地模拟 CFRP 剥离过程; 法兰厚度对节点力学特性影响显著, 套管长度和壁厚对节点力学特性影响较小; 对于工程中常用的直径为 140 mm 的 CFRP-钢管混凝土拱架节点, 建议法兰厚度取 20 mm, 套管长度取 200 mm, 套管壁厚取 5.5 mm。

关键词: 隧道工程; CFRP-钢管混凝土; 节点连接; 弯曲性能; 试验研究; 数值模拟

中图分类号: TB333; TU528.57 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2025)04-2126-12

Flexural behavior of concrete-filled circular CFRP-steel tube with flange-sleeve joints

LYU Baihang¹, ZHAO Heng², LIU Bo¹, XIAN Guijun³, XIAO Hairong¹, GUO Zhiguang¹, HE Jun^{*2}

(1. China Construction Civil Engineering Co., Ltd., Beijing 100071, China; 2. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 3. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150000, China)

Abstract: The concrete filled circular CFRP-steel tube arch formed by pasting carbon fiber reinforced polymer (CFRP) on the outer side of the concrete filled steel tube has higher bearing capacity and stiffness, and can be used for tunnel support under adverse geological conditions such as high stress, extremely soft rock, strong mining, and fault fracture zones. This article proposes a new type of flange-sleeve joint, which is used for concrete filled circular CFRP-steel tube arch in tunnel engineering. The influence of different flange thicknesses (20 mm, 30 mm, 40 mm) on the failure mode, flexural bearing capacity of concrete filled CFRP-steel tube joint under four-point bending was experimentally studied. The results show that the failure mode of the specimens is CFRP axial delamination, and the flange-sleeve joint is intact, indicating that this connection method is effective; When the flange thickness is 20 mm, the bending bearing capacity and stiffness of the specimen are basically the same as those of the node free specimen, and the bending bearing capacity and stiffness increase with the increase of flange thickness. Based on ABAQUS finite element analysis, a comparison was made with experimental results, and parameterized analysis was conducted using flange thickness, casing length, and casing wall thickness as variables. The finite element

收稿日期: 2024-05-14; 修回日期: 2024-07-01; 录用日期: 2024-07-12; 网络首发时间: 2024-07-22 15:45:01

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240722.006>

基金项目: 国家自然科学基金 (51808047); 陕西省自然科学基金研究项目 (2020JQ-388)

National Natural Science Foundation of China (51808047); Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2020JQ-388)

通信作者: 何俊, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为纤维增强复合材料 (FRP) 增强结构 E-mail: hejun@chd.edu.cn

引用格式: 吕柏行, 赵恒, 刘博, 等. 法兰-套管组合连接的圆 CFRP-钢管混凝土节点抗弯性能 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(4): 2126-2137.

LYU Baihang, ZHAO Heng, LIU Bo, et al. Flexural behavior of concrete-filled circular CFRP-steel tube with flange-sleeve joints[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(4): 2126-2137(in Chinese).

results indicate that the cohesive zone model can effectively simulate the delamination process of CFRP. The thickness of the flange has a significant influence on the mechanical properties of the joint, while the length and wall thickness of the sleeve have a relatively small influence on the mechanical properties of the joint. For specimens with a steel tube diameter of 140 mm and a CFRP thickness of 3 mm, it is recommended to take a flange thickness of 20 mm, a sleeve length of 200 mm, and a sleeve wall thickness of 5.5 mm.

Keywords: tunnel engineering; concrete-filled circular CFRP-steel tube; connection joint; flexural behavior; experimental study; numerical simulation

随着我国地下工程的迅速发展，建设规模不断扩大，工程建设过程中面临大量高应力、极软岩、强采动和断层破碎带等复杂地质条件。传统的 U 型钢拱架因其支护强度不足、变形大等原因，已经难以满足复杂条件围岩控制需求^[1]。钢管混凝土拱架具有承载力高与刚度大的优点，已广泛用于不良地质环境下隧道结构的支护。自 2000 年以来，众多学者对钢管混凝土拱架开展了大量的试验^[2]、理论^[3]及数值模拟^[4]研究。然而，在复杂地质环境下修建四车道或以上超大断面隧道时，需要大幅度增加钢管混凝土拱架尺寸才能满足强度与刚度的需求，这将导致钢材、混凝土用量的增加，以及施工难度的加大。

纤维增强复合材料 (Fiber reinforced polymer, FRP) 具有高强、轻质、耐腐蚀优异等优点，广泛用于土木工程领域。相比于玻璃纤维复合材料 (GFRP) 与玄武岩纤维复合材料 (BFRP)，碳纤维增强复合材料 (CFRP) 的弹性模量与拉伸强度明显更高^[5-6]。针对复杂地质条件下大断面隧道支护强度不足的问题，本文提出了在钢管外粘贴 CFRP 布，形成 CFRP-钢管混凝土拱架。该拱架能大幅度提高拱架的强度与刚度，且不增加截面尺寸与自重。

钢管混凝土拱架结构是通过多段拱构件装配而成，合理有效的连接形式是保证钢管混凝土拱架正常工作的基础。研究表明，连接节点是钢管混凝土拱架的薄弱部位，拱架强度未得到充分发挥而节点先发生弯曲破坏，这是工程中所不希望的破坏模式^[4,7]。为此，学者开展了大量的钢管混凝土节点连接方式及其抗弯性能的研究工作。目前，钢管混凝土拱架节点连接主要为法兰连接或套管连接两种方式。法兰节点的研究一般以法兰厚度与高强螺栓直径为变量，而套管节点的研究一般以套管长度与套管壁厚为变量，分析对极限弯矩、临界曲率增量等效抗弯刚度等力学参数的影响规律。研究表明，套管节点传力机制明确，对约束混凝土构件强化作用明显，且套管节点制作简单，加工成本低，施工方便，极大地降低了

施工难度和经济成本，建议套管连接方式作为钢管混凝土拱架首选^[8]。同时，文献 [4] 对钢管混凝土拱架节点参数提供了设计建议：对于套管连接方式，套管长度为 500~600 mm，套管壁厚不大于 8 mm，套管间隙不小于 4 mm；对于法兰连接方式，螺栓数量在 12~16 个之间，可根据工程实际选取强度等级较低的螺栓，法兰厚度在 12~16 mm 之间^[4]。

钢管混凝土拱架连接节点已进行了较为系统地研究，包括节点连接形式、抗弯性能及工程建议等。但是，关于 CFRP-钢管混凝土拱架节点的研究尚未见相关报道。基于此，本文提出一种新型的法兰-套管组合的连接形式，用于 CFRP-钢管混凝土拱架的连接。目前尚未有相关文献研究采用法兰-套管组合连接钢管混凝土或 CFRP-钢管混凝土拱架。本文以法兰厚度为变量，试验研究法兰厚度对 CFRP-钢管混凝土节点抗弯性能的影响规律，并揭示破坏机制。通过数值模拟手段，研究套管厚度与长度对 CFRP-钢管混凝土节点抗弯性能的影响规律。最后，对 CFRP-钢管混凝土拱架节点设计参数提出建议。本文提出的法兰-套管组合连接方式，不仅适用于隧道工程中 CFRP-钢管混凝土拱架的连接，而且适用于其他 CFRP-钢管混凝土结构的连接，研究成果可为相关工程设计提供数据支撑。

1 法兰-套管组合连接节点的构造

法兰连接或套管连接方式见图 1。套管连接是将钢管混凝土插入套管内，后将套管两端与钢管混凝土焊接在一起，见图 1(a)。为了便于安装，套管与钢管间需预留一定间隙；法兰连接是将法兰与钢管混凝土焊接，后通过螺栓将法兰连接在一起，见图 1(b)。为了增加法兰节点的强度与延性，往往会设置加劲肋。

钢管混凝土拱架的连接均需要在施工现场将法兰或套管焊接在钢管混凝土上，而对于 CFRP-钢管混凝土拱架节点，由于 CFRP 缠绕在钢管外

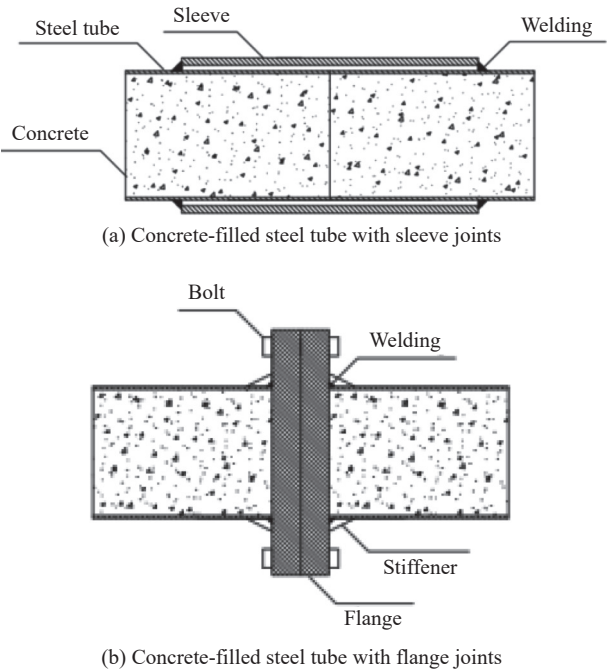


图 1 钢管混凝土常用连接形式

Fig. 1 Common connection forms of concrete-filled steel tube

表面,无法焊接。因此,单一的套管或法兰连接方式无法适用于 CFRP-钢管混凝土拱架节点。CFRP 与其他材料常见的连接形式为胶接,常温下胶粘剂固化需要 1.5~2 天。为了满足施工现场快速装配的需求,在工厂用环氧树脂胶将 CFRP-钢管混凝土与套管胶接在一起,环氧树脂胶固化成型后套管与法兰焊接在一起,形成法兰-套管节点,见图 2。施工现场仅需用螺栓将法兰连接在一起,实现 CFRP-钢管混凝土拱架结构的快速装配。

节点在弯曲状态下,套管与 CFRP 之间的环氧树脂胶分散了套管和 CFRP 之间相互作用力,使 CFRP 不受套管挤压破坏。钢套管的长度应满足最小粘结长度要求,一般不小于 200 mm^[9-10]。套管与钢管混凝土形成一个同心圆,套管内径略大于钢管混凝土外径,一般以 2~5 mm 为宜。间隙过小将导致安装困难,间隙过大将导致胶层的粘结强度降低^[11]。需要注意,套管与钢管混凝土

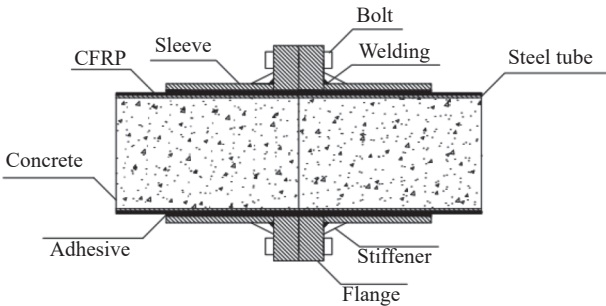


图 2 法兰-套管组合连接碳纤维增强复合材料 (CFRP)-钢管混凝土
Fig. 2 Flange-sleeve combination connection of concrete-filled carbon fiber reinforced polymer (CFRP)-steel tube

的空隙内,应将环氧树脂胶灌实,不能有较多的孔隙或气泡,保证套管与钢管混凝土之间具有较高的胶接强度。法兰与套管的焊接,应沿环向焊一圈。为了增加法兰与套管的连接性能,在法兰与套管之间可设置 4 道加劲肋。法兰之间的连接,可采用 4 个高强螺栓。

2 试验概况

2.1 试验设计

设计了 4 根 CFRP-钢管混凝土梁式构件,试验变量为法兰的厚度。其中,一根为无节点,可认为法兰厚度为 0,为对比试件,编号为 B-1。其余 3 根法兰厚度分别为 20 mm、30 mm、40 mm,编号分别为 B-2、B-3、B-4。

CFRP-钢管混凝土试件的圆管外径为 146 mm,内径为 140 mm。其中,CFRP 管厚度为 3 mm,钢管厚度为 3 mm,内填充 C50 混凝土,长度取四点弯曲试验中常见的 1 800 mm。螺栓均采用 10.9 级直径 33 mm 的高强螺栓,套管长度与厚度分别为 270 mm 与 8 mm。胶层厚度为 3 mm。法兰-套管节点的主要参数见表 1。

在试件的制作过程中,将钢管混凝土表面锈迹打磨掉,并用丙酮擦拭干净。在粘贴 CFRP 布时,纤维方向沿轴向布置。为了保证 CFRP 布不发生拉断破坏,CFRP 厚度为 3 mm,一共有 17 层。纤维布轴向长度与构件长度一致,无搭接。

表 1 法兰-套管节点的主要参数

Table 1 Main parameters of flange-sleeve joints

Specimen	Thickness of flange/mm	Diameter of bolt/mm	Length of flange-sleeve/mm	Thickness of sleeve/mm
B-1	—	—	—	—
B-2	20	33	300	8
B-3	30	33	300	8
B-4	40	33	300	8

试验目的是检验弯曲荷载作用下 CFRP-钢管混凝土试件通过法兰-套管组合节点连接的有效性,一方面保证“强节点、弱构件”,破坏发生在 CFRP-钢管混凝土上,而不是在法兰-套管组合节点上;另一方面是保证通过法兰-套管节点连接后,构件的抗弯强度与刚度不低于无节点的构件。

2.2 材料性能

碳纤维单向布是通过 T700 级碳纤维纱编织而成,型号为 ZX-I-300,由海宁市华超纤维复合材料有限公司提供。单层碳纤维单向布的弹性模量为 240 GPa,抗拉强度为 3 400 MPa,受拉断裂延伸率为 1.6%,有效厚度为 0.167 mm,见表 2。

表 2 碳纤维布力学性能

Table 2 Mechanical properties of CFRP sheet			
Thickness/mm	Tensile strength/MPa	Young's modulus/GPa	Elongation rate/%
0.167	3 400	240	1.6

钢管采用 Q235 碳素钢,按照《金属材料拉伸实验 第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)^[12] 中标准试验方法,进行了 3 个标准碳素钢试件拉伸试验,测得钢材的屈服强度为 290 MPa,抗拉强度为 405 MPa,泊松比为 0.3,弹性模量为 200 GPa,见表 3。

表 3 钢材力学性能

Table 3 Mechanical properties of steel			
Yield strength/MPa	Tensile strength/MPa	Young's modulus/GPa	Poisson's rate
290	405	200	0.3

核心混凝土的等级标号为 C50。依据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)^[13],测得与核心混凝土同条件养护下的立方体试块 (150 mm×150 mm×150 mm) 的抗压强度为 55.6 MPa。核心混凝土弹性模量为 32×10³ MPa,轴心抗压强度设计值为 33.4 MPa。

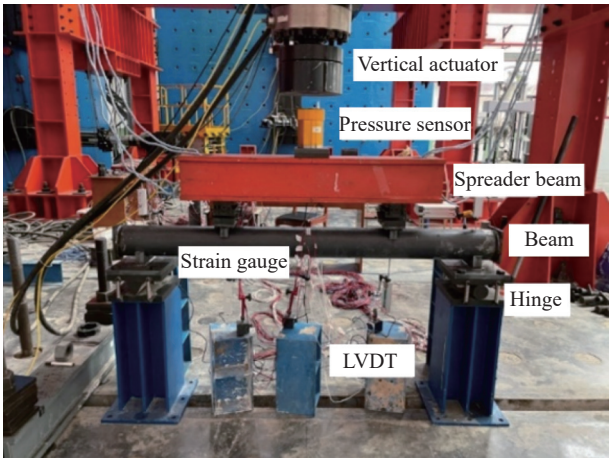
环氧树脂胶由上海华谊树脂有限公司提供,单向拉伸力学性能由厂家提供,拉伸强度为 50 MPa,拉伸模量为 2 500 MPa,极限拉应变为 4%,见表 4。

表 4 环氧树脂胶力学性能

Table 4 Mechanical properties of epoxy resin adhesive			
Tensile strength/MPa	Young's modulus/MPa	Elongation rate/%	
50	2 500	4	

2.3 加载与采集方案

采用美斯特工业系统有限公司 (MTS) 电液伺服压力试验机进行四点弯曲试验,加载点经分配梁对称布置在试验梁上,加载装置见图 3。采用位移控制方式进行加载,位移加载速率 0.01 mm/s,每 3 mm 为一级荷载,每级荷载之间停留 2 min,待荷载读数稳定后继续加载,直至外层 CFRP 剥离。CFRP 剥离后加载速率变为 0.03 mm/s,每 5 mm 为一级荷载,每级荷载之间停留 2 min,待荷载读数稳定后继续加载,加载至试件出现大变形为止。



LVDT—Linear variable displacement transducer

图 3 加载测试装置

Fig. 3 Loading and testing system

B-1 试件 (无节点) 的跨中横截面处,轴向应变片在环向八分点位置处布置,共 8 个应变片,应变片布置见图 4(a) 和图 4(c)。B-2~B-4 试件跨中为法兰-套管结点,取加载点与外套筒端部之间的中点处的横截面,轴向应变片在环向八分点位置处布置,共 8 个应变片,应变片布置见图 4(b) 和图 4(c)。所有试件位移计布置位置均相同,分别位于跨中、加载点正下方、支座正上方,位移计布置见图 4(a) 和图 4(b)。

3 试验结果及讨论

3.1 试件试验现象与破坏模式

试件破坏模式均为 CFRP 沿轴向的剥离破坏,见图 5。图 5(a) 为无节点 B-1 试件的破坏模式,试件 CFRP 已经完全剥离。图 5(b) 为法兰-套管节点 B-2~B-4 的破坏模式,法兰节点的约束作用,阻碍了 CFRP 向跨中剥离,剥离破坏发生在节点两侧,节点区域完好。试件破坏过程均为试件底

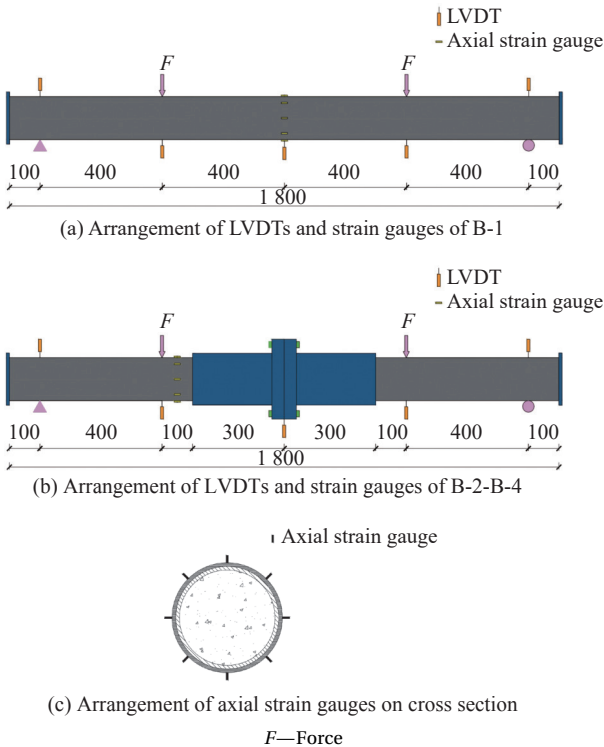


图 4 测点布置 (单位: mm)

Fig. 4 Measuring point arrangement (Unit: mm)

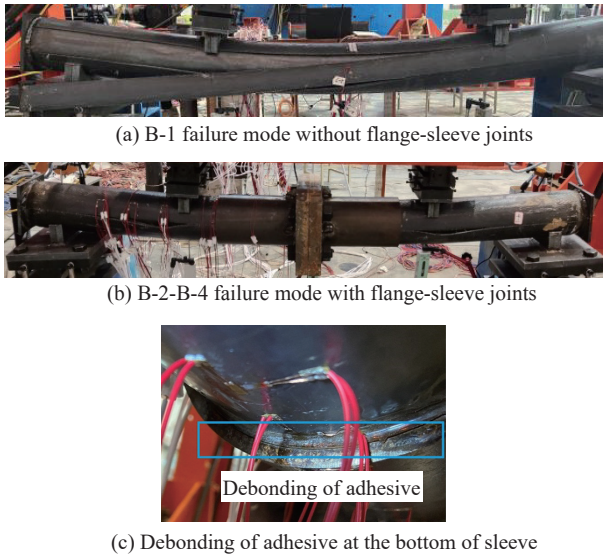


图 5 试件 B-1-B-4 破坏形态

Fig. 5 Failure mode of specimens B-1-B-4

部混凝土首先开裂, 下侧钢管受拉屈服, 上侧钢管受压屈服, 最后 CFRP 发生剥离破坏, 构件失效。

无节点的 B-1 试件, 加载初期, 试件处于弹性阶段, 无裂缝发展。当荷载增加到 15.5 kN 时, 跨中底部受拉区应变达到 2×10^{-3} , 表明此时受拉区混凝土开裂。随着荷载继续增大, 纯弯段裂缝数量逐渐增多, 裂缝宽度不断增大, 并向上延伸。

当荷载增加到 100.3 kN 时, 跨中底部受拉区应变达到 2×10^{-3} , 表明底部钢管受拉屈服。继续增大荷载, 钢管受拉屈服逐渐向上延伸。当荷载达到 154.5 kN 时, 跨中顶部受压区应变达到 2×10^{-3} , 表明顶部受压钢管屈服。随着“嘭”的一声, 梁右侧正面 CFRP 剥离, 此时梁跨中挠度达到 23.0 mm, 梁达到峰值荷载 177.1 kN。由于 CFRP 剥离, 梁的刚度大幅度降低, 荷载迅速降低至 146.9 kN。继续加载, 荷载重新增加, 当跨中位移加至 26.9 mm 时, 又发出“嘭”的一声, 梁右侧背面的 CFRP 剥离, 此时荷载为 120.2 kN。由于 CFRP 完全剥离, CFRP 不能承载, 仅由钢管混凝土承载, 可认为此时构件已经失效。

与无法兰节点 B-1 试件相比, B-2-B-4 试件中 CFRP-钢管混凝土与套管是通过环氧树脂胶接, 在 50.1 kN 左右时, CFRP-钢管混凝土与套管连接端部处可观察到环氧树脂胶发生剥离, 见图 5(c)。这是由于底部的 CFRP 承受的轴向受拉荷载, 通过胶层界面传递给钢管混凝土构件, 胶层界面将产生轴向的剪应力, 发生滑移。随着弯曲荷载的增大, 胶层界面的剪应力逐渐增大, 滑移增大。当滑移增大至极值时, 界面发生剥离破坏。继续增大荷载, 剥离区域逐渐向上, 向跨中延伸。由于粘结长度较长, 本试验中均为 300 mm, 直到构件失效, CFRP-钢管混凝土与套管并未完全脱粘, 这表明 CFRP-钢管混凝土与套管胶接长度为 300 mm 时, 能够保证节点连接安全。

3.2 试件的荷载-跨中挠度曲线

试验梁加载过程中的典型的荷载-跨中挠度曲线见图 6(a) (以 B-2 为例), 可分为 5 个阶段: (1) 弹性阶段。弹性阶段为开始加载至混凝土开裂, 此阶段荷载-跨中挠度曲线呈线性关系, 无裂缝产生, 梁混凝土全截面受力。随着荷载继续增大, 梁加载点附近受拉区混凝土逐渐产生塑性变形, 当拉应力达到混凝土的抗拉极限强度, 此处混凝土开始出现裂缝; (2) 塑性阶段。塑性阶段为混凝土开裂至钢管受拉屈服, 此阶段荷载-跨中挠度曲线呈非线性发展, 受拉区混凝土逐渐退出工作, 荷载主要由钢管和 CFRP 承担。裂缝宽度增大且不断向上延伸, 中和轴向上移动。当荷载-跨中挠度曲线出现明显转折, 纵向受拉钢管屈服; (3) 强化阶段。强化阶段为钢管受拉屈服至峰值荷载。区别于钢管混凝土, 钢管屈服后 CFRP 能继续提供荷载, 此时荷载仍以较大的斜率随挠度非线性增长,

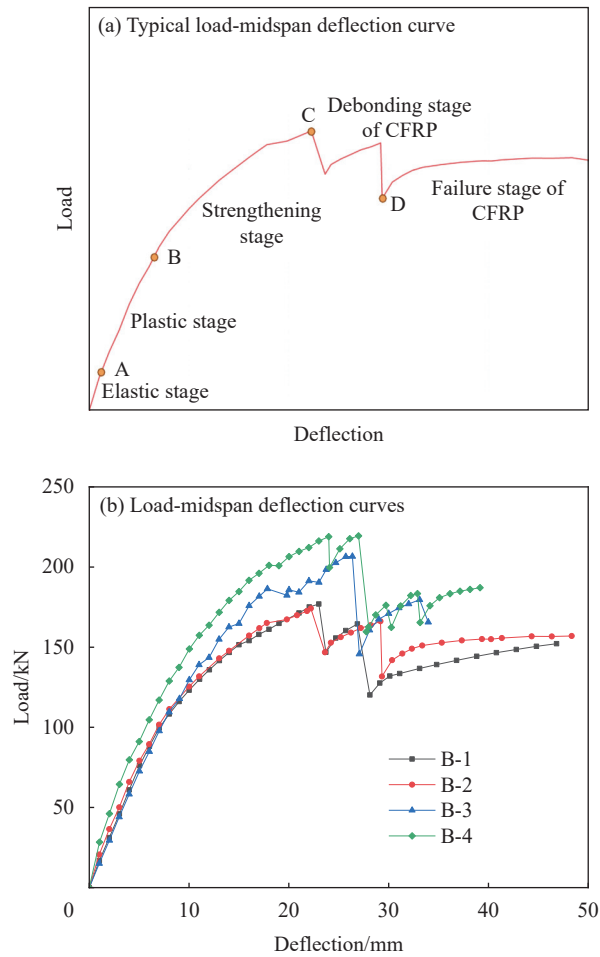


图 6 试件 B-1~B-4 荷载-跨中挠度曲线

Fig. 6 Load-midspan deflection curves of specimens B-1-B-4

但增长的斜率小于塑性阶段；(4)剥离阶段。此阶段为峰值荷载到 CFRP 完全剥离。一面 CFRP 剥离后，试件刚度大幅度降低，荷载迅速降低。部分 CFRP 能继续承载，荷载下降到一定值后会继续上升，此时上升的斜率小于强化阶段，直至另一面 CFRP 剥离，荷载瞬间降至最小值；(5) CFRP 失效阶段。此阶段 CFRP 完全脱粘，只剩下钢管混凝土，该阶段为典型的钢管混凝土的屈服阶段。

试件各阶段特征荷载与变形见表 5。本文认

为 C 点为试件的极限荷载，D 点为试件除去 CFRP 后钢管混凝土承担的荷载。D 点时，CFRP 完全剥离，由于 CFRP 是通长包裹，试件支座处的 CFRP 仍和钢管接触，两者之间的摩擦力使 CFRP 继续为试件提供荷载，使得试件的整体承载力随着挠度的增大而增加。

图 6(b) 显示了 B-1~B-4 试件的荷载-跨中挠度曲线。比较 B-1 与 B-2 发现，两者荷载-跨中挠度曲线基本重合，这是由于在荷载作用下，法兰会发生张开位移，一定程度上降低了试件的刚度。同时，套管约束了跨中部分梁的变形，一定程度上提高了试件的刚度。两者原因综合，使得法兰厚度为 20 mm 的 B-2 试件的刚度与无法兰的 B-1 试件一样。比较试件 B-2、B-3、B-4 可以发现，随着法兰厚度的增加试件的刚度增加，尤其是强化阶段。与试件 B-1 相比，随着法兰厚度的增加，试件 B-3 和 B-4 极限承载力分别增加了 16.8% 与 23.7%。这是由于法兰厚度增加，提高了试件的刚度。在 CFRP 剥离应变相同情况下，刚度大的试件能承受更大的荷载。

3.3 试件的应变分析

图 7 为 B-1~B-3 应变分布，其中应变沿高度取值，除上下边缘外(−1 与 1 处)，其他 3 个(−0.75、0、0.75 处)为左右测点的平均值。可以看到，试件加载至极限荷载过程中，各测点纵向应变的连线基本保持直线，变形基本符合平截面假定。而对于中和轴，在试件的初始加载阶段，中和轴基本上和截面的形心轴重合，随着荷载的不断加大，由于受拉区混凝土逐渐开裂并退出工作，中和轴不断向受压区移动。

4 有限元分析

4.1 材料本构

4.1.1 混凝土本构

用 ABAQUS 中的混凝土塑性损伤 (Concrete

表 5 试件 B-1~B-4 各阶段特征荷载与变形

Table 5 Characteristic loads and deformations at each stage of specimens B-1-B-4

Specimen	Eigenvalue	Point A	Point B	Point C	Point D	Load ratio of point C to point D
B-1	Load/kN	15.6	100.7	176.9	120.2	1.47
	Deflection/mm	0.9	7.1	23.0	28.1	
B-2	Load/kN	15.6	94.0	174.2	131.7	1.32
	Deflection/mm	0.7	6.3	22.2	29.3	
B-3	Load/kN	19.8	126.4	206.6	145.6	1.42
	Deflection/mm	1.3	9.7	26.4	34.0	
B-4	Load/kN	24.2	114.2	218.9	165.4	1.32
	Deflection/mm	0.7	6.7	24.0	33.1	

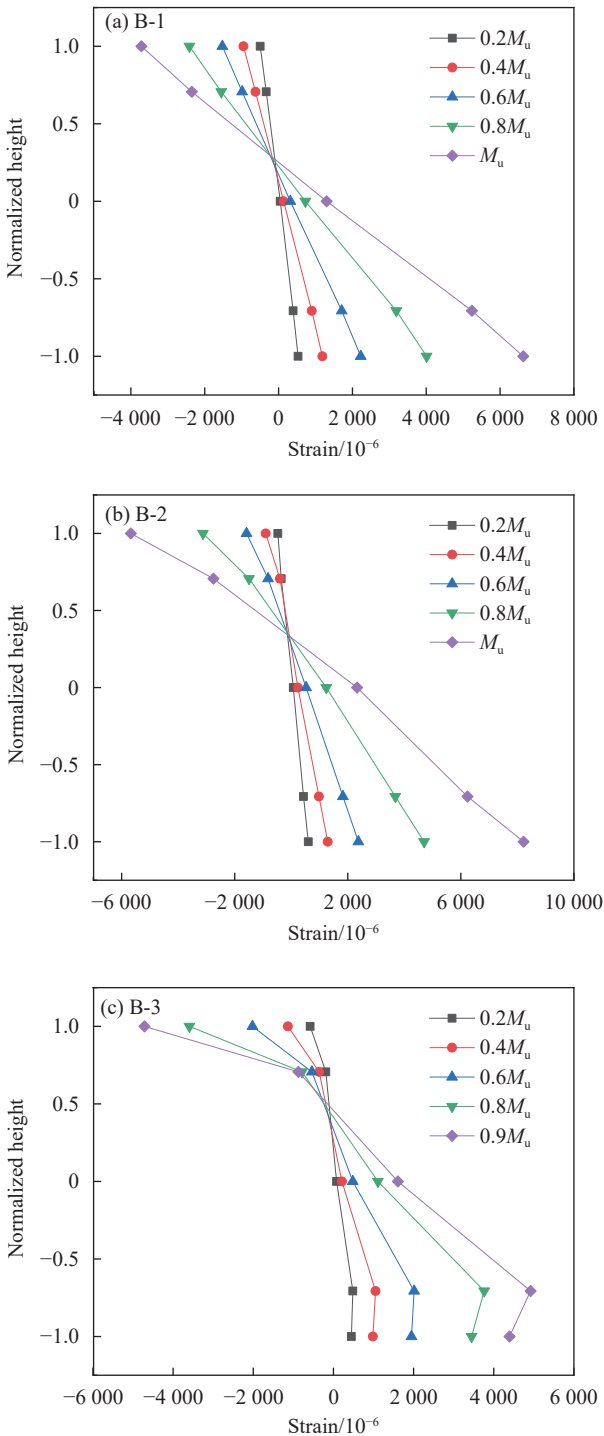


图 7 试件 B-1-B-3 截面高度轴向应变分布

Fig. 7 Axial strain distribution with cross-section height of specimens B-1-B-3

damaged plasticity, CDP) 模型表征混凝土材料的力学响应。混凝土的泊松比为 0.2, 弹性模量 E_c 用 ACI 318^[14] 中推荐的经验公式确定:

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \tag{1}$$

其中, f'_c 为 150 mm 混凝土立方体试块等效圆柱体抗压强度。

在 CDP 模型中, 膨胀角、偏心系数、双轴抗压强度与单轴抗压强度之比、不变应力比分别采用 30°、0.1、1.16 和 0.6667, 黏性系数为 0.001^[15]。在有限元分析中, 采用 Tao 等^[16] 提出的约束混凝土模型模拟被动约束下的混凝土单轴受压应力-应变关系。在混凝土到达受拉强度前, 其单轴受拉应力-应变关系为弹性, 受拉强度过后的软化段用断裂能来表示, 其中, 混凝土受拉峰值应力取为 $0.1f'_c$, 断裂能 G_F (N/m) 由下式确定^[17-18]:

$$G_F = \left(0.0469d_{\max}^2 - 0.5d_{\max} + 26\right) \left(\frac{f'_c}{10}\right)^{0.7} \tag{2}$$

其中, $d_{\max}$ 为混凝土粗骨料的粒径, 一般情况下可取 20 mm^[16]。

4.1.2 CFRP 和钢材本构

CFRP 应力-应变关系为线弹性。钢管和钢板采用 Tao 等^[19] 提出的钢材弹塑性模型, 该模型适用于屈服强度为 200~800 MPa 的钢材。和理想弹塑性模型不同的是, 该模型的应力-应变关系可以分为 4 个阶段, 具体表达式为

$$\sigma = \begin{cases} E_s \varepsilon, & 0 \leq \varepsilon < \varepsilon_y \\ f_y, & \varepsilon_y \leq \varepsilon < \varepsilon_p \\ f_u - (f_u - f_y) \left(\frac{\varepsilon_u - \varepsilon}{\varepsilon_u - \varepsilon_p} \right)^p, & \varepsilon_p \leq \varepsilon < \varepsilon_u \\ f_u, & \varepsilon \geq \varepsilon_u \end{cases} \tag{3}$$

其中: f_u 是极限强度; f_y 为屈服强度; E_s 为钢材的弹性模量; ε_y 是屈服应变; ε_p 是应变强化开始时的应变; ε_u 是对应于极限强度下的极限应变; p 是应变强化指数, 可通过下式确定:

$$p = E_p \left(\frac{\varepsilon_u - \varepsilon_p}{f_u - f_y} \right) \tag{4}$$

其中, E_p 为钢材应变强化开始时的弹性模量, 可以取为 $0.02E_s$ 。 ε_p 和 ε_u 分别用以下两式确定:

$$\varepsilon_p = \begin{cases} 15\varepsilon_y, & f_y \leq 300 \text{ MPa} \\ \left[15 - 0.018(f_y - 300)\right]\varepsilon_y, & 300 \text{ MPa} < f_y \leq 800 \text{ MPa} \end{cases} \tag{5}$$

$$\varepsilon_u = \begin{cases} 100\varepsilon_y, & f_y \leq 300 \text{ MPa} \\ \left[100 - 0.15(f_y - 300)\right]\varepsilon_y, & 300 \text{ MPa} < f_y \leq 800 \text{ MPa} \end{cases} \tag{6}$$

4.1.3 内聚力模型

有限元分析中, 采用内聚力模型 (Cohesive zone model, CZM) 来表征套管、CFRP 管之间胶

层的力学行为以及钢管、CFRP 管之间的粘结-滑移行为。

用 Campilho 等^[20]提出的牵引-分离模型表征胶层的法向行为,胶层极限拉应力为 σ ,刚度为 $K=E/t$, t 为胶层厚度, E 为胶层的弹性模量,损伤起始位移为 $\delta_1=\sigma/K$,断裂位移 $\delta_f=\varepsilon t$, ε 为胶层的极限应变,断裂能 $G_f=0.5\delta_f\sigma$ 。用 Wang 等^[21]提出的粘结-滑移模型表征胶层的切向行为,断裂能 $G_f=243t^{0.4}w^{1.7}$, w 为胶层的受拉应变能,可以近似取为 $w=\sigma^2/2E$,极限剪切应力 $\tau_{\max}=0.9\sigma$,损伤起始位移为 $\delta_1=2.6\sigma t^{0.34}/G$ 。选用二次强度准则来表征混合模式下内聚力模型损伤起始判据^[22],见下式:

$$\left(\frac{< t_n >}{\sigma_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{t_s}{\tau_{\max}}\right)^2 + \left(\frac{t_t}{\tau_{\max}}\right)^2 = 1$$

(7)

其中: $< >$ 表示压应力不会导致胶层损坏; t_n 、 t_s 、 t_t 分别是内聚力单元法向和两个剪切方向上的力; $\sigma_{\max}$ 为内聚力单元法向受力时的极限拉应力。当各项应力满足式(7)时,内聚力单元开始进入损伤段。

选用线性破坏准则表征内聚力模型的最终失效^[22],见下式:

$$\frac{G_n}{G_I} + \frac{G_s}{G_{II}} + \frac{G_t}{G_{II}} = 1$$

(8)

其中: G_n 、 G_s 、 G_t 分别是法向和两个剪切方向上的力及其位移所做的功; G_I 和 G_{II} 分别表示当受到纯法向力和纯剪切力时引起失效所需的界面断裂能。当各项力所做的功满足式(8)时,内聚力单元失效。

4.2 模型建立

圆 CFRP-钢管混凝土梁有限元模型见图 8。端板与钢管、钢管与法兰、胶层与其余部件之间的接触采用绑定(Tie)进行模拟;钢管与混凝土之间的接触法向为硬接触,切向采用罚函数,摩擦系数为 0.6^[16];其余部件之间的接触设置为法向硬接触,切向采用摩擦系数为 0.3 的罚函数。胶层采用内聚力单元 COH3D8 进行模拟,其余部件均采用三维实体单元 C3D8R 进行模拟。对网格进行收敛性验证后,混凝土的尺寸设置为 15 mm,钢管、碳纤维管和两者之间胶层的尺寸设置为 20 mm,节点内胶层的尺寸设置为 5 mm,支座和加载块的尺寸设置为 25 mm,端板、套筒、法兰的尺寸设置为 10 mm,螺栓的尺寸设置为 5 mm。

4.3 有限元模型验证

有限元模型和试验极限荷载对比如表 6 所示,荷载-跨中挠度曲线对比见图 9,荷载-CFRP 轴向应变曲线对比见图 10。结果表明,有限元模型极限荷载和试验之间的误差在 15% 以内,荷载-跨中挠度曲线、荷载-轴向应变曲线和试验结果吻合良好,有限元模型较为准确,可以进一步用作应力力和参数分析。

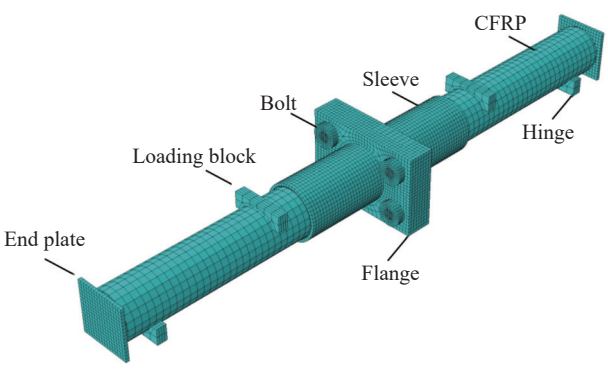


图 8 圆 CFRP-钢管混凝土梁有限元模型
Fig. 8 Finite element model of concrete-filled circular CFRP-steel tube beam

表 6 试件 B1~B4 有限元模型和试验极限荷载对比
Table 6 Comparison of ultimate load of specimens B-1-B-4 between finite element model and test

Specimen	Ultimate load of test P_T /kN	Ultimate load of simulation P_F /kN	Ratio of ultimate load P_T/P_F
B-1	176.9	160.3	0.91
B-2	174.2	198.9	1.14
B-3	206.6	210.0	1.02
B-4	218.9	211.8	0.97

4.4 有限元结果与参数分析

图 11 为峰值荷载时试件 B-1 和 B-2 的轴向应力云图。对比图 11(a)和图 11(b)发现,含节点试件的变形和应力主要发生在加载点附近,这是钢管跨中不连续导致的。由图 11(c)可知,法兰-套管节点的变形和应力主要发生在跨中,且距离跨中越远,应力越小。由图 11(d)和图 11(e)可以发现,螺栓均处于拉弯受力状态,不同的是,法兰上方的螺栓下侧受拉,法兰下方的螺栓内侧受拉,这和法兰对螺栓的作用力有关。

图 12 为峰值荷载时试件 B-2 套管内胶层损伤云图。“QUADSCRT”为内聚力单元的损伤变量,变量值达到 1 时,内聚力单元开始损伤,损伤不断累积最终导致单元删除(胶层破坏)。由图 12 可见,胶层损伤和破坏主要集中在套管端部附近,

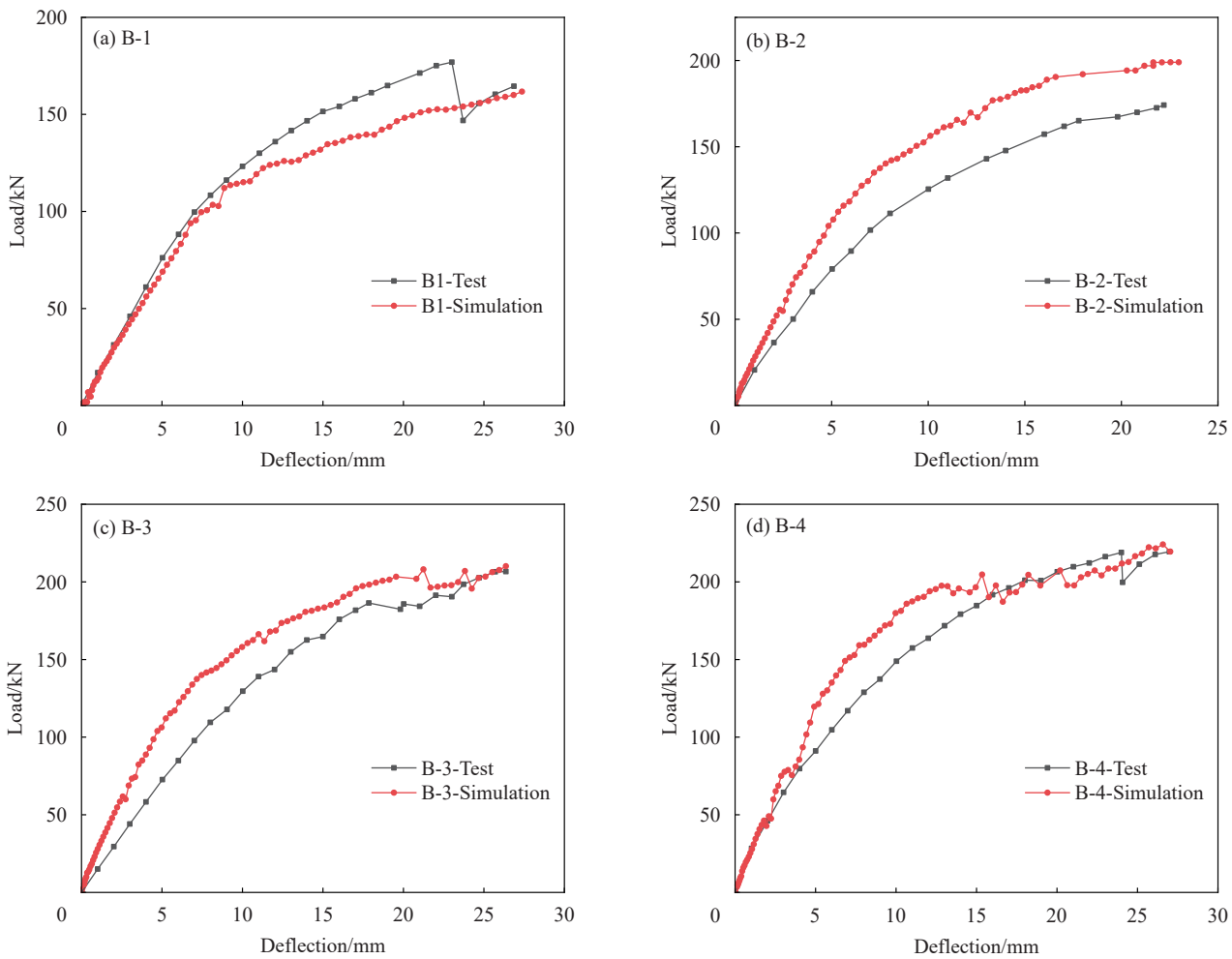


图 9 试件 B-1~B-4 有限元模型和试验荷载-跨中挠度曲线

Fig. 9 Load-midspan deflection curves of finite element model and experiment of specimens B-1-B-4

且沿横截面高度分布不均匀。在弯曲荷载的作用下，套管端部的最上和最下部胶层率先进入损伤阶段，随着荷载的不断增大，损伤胶层不断沿轴向向跨中、沿横截面向中性轴扩展，并最终破坏。峰值荷载时，仅有少量胶层破坏，剩余的胶仍能保证节点的粘结强度，证明了节点粘结的可靠性。

试验以法兰厚度作为变量分析不同厚度法兰对构件弯曲性能的影响规律，并未探究过薄和过厚法兰下不同构件荷载-跨中挠度曲线的发展规律，因此，以过薄的 10 mm 法兰和过厚的 45 mm 法兰对上述两种情况进行分析，不同法兰厚度下试件的荷载-跨中挠度曲线见图 13。结果表明：过薄的法兰由于自身刚度不足会导致试件整体刚度相较于 40 mm 法兰试件 (B-4) 下降 45%，并且法兰会先于构件剥离进入塑性屈服阶段，导致构件的整体承载能力低于 B-4 试件 19%；当法兰过厚时，试件的刚度和承载能力并不会发生明显的提高。

建议工程中法兰的厚度取为 20 mm。

在 20 mm 法兰下，本文进一步分析了套管长度和壁厚对试件荷载-跨中挠度曲线的影响规律，见图 14。试件的抗弯刚度和极限承载力随套管长度和套管壁厚的增大小幅增长，表明在本文选取的参数下套管长度和壁厚不是控制试件极限承载力的关键因素，控制节点极限承载力的关键因素是 CFRP-钢管混凝土自身的抗弯承载力。基于有限元分析，考虑法兰-套管连接方式的经济性和安全性，对于钢管直径为 140 mm，CFRP 厚度为 3 mm 的试件，建议法兰厚度 20 mm，套管长度 200 mm，套管壁厚 5.5 mm。

5 结论

(1) 提出了法兰-套管组合形式连接圆形碳纤维增强复合材料 (CFRP)-钢管混凝土，在受弯过程中节点未发生破坏，实现了强节点弱构件，证明

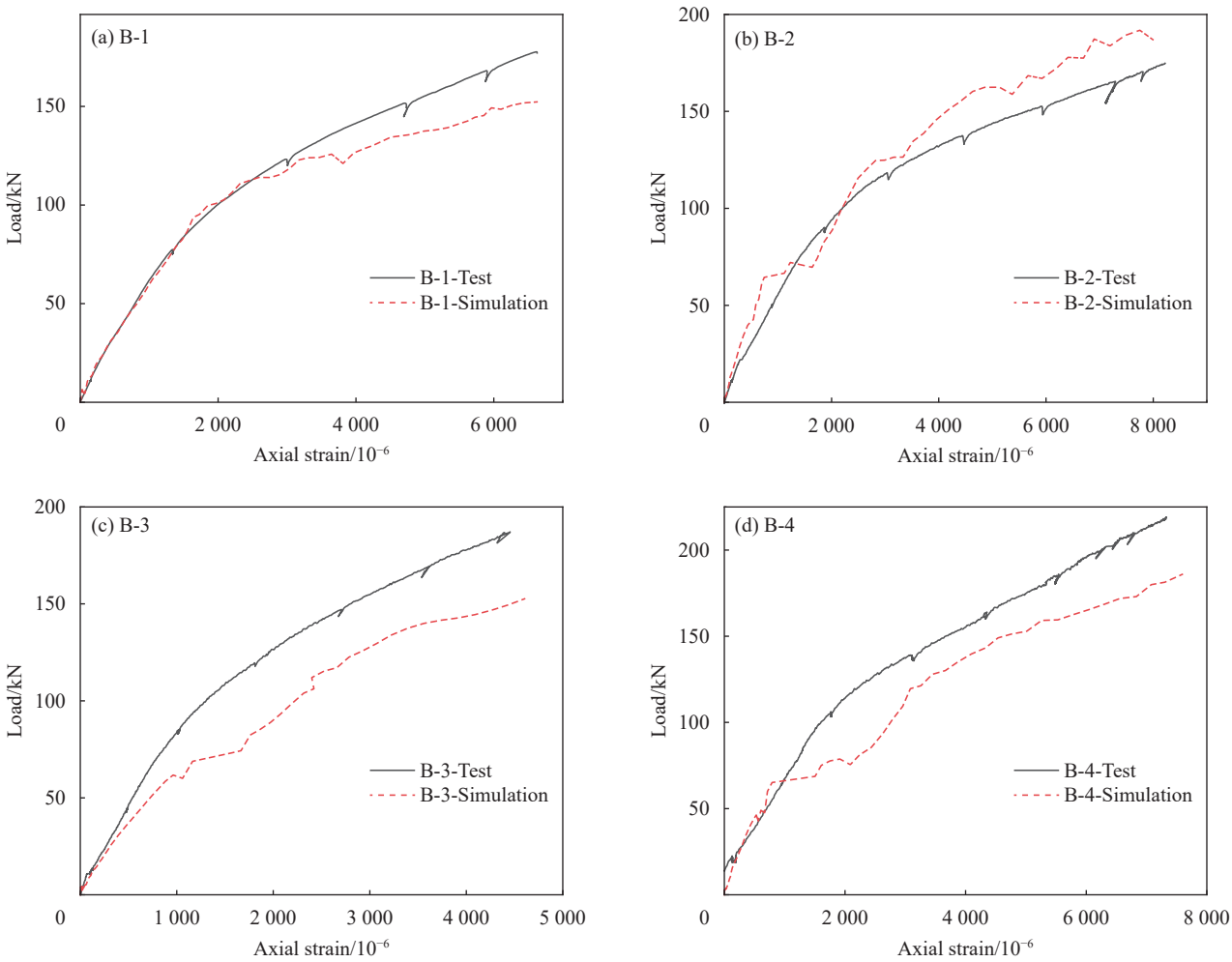
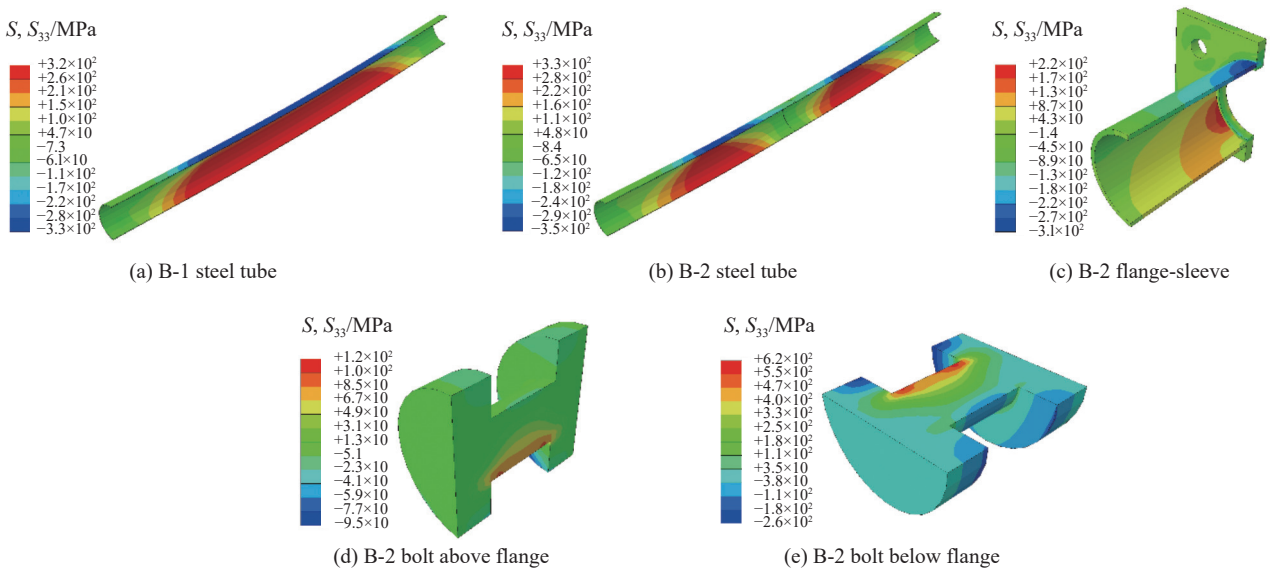


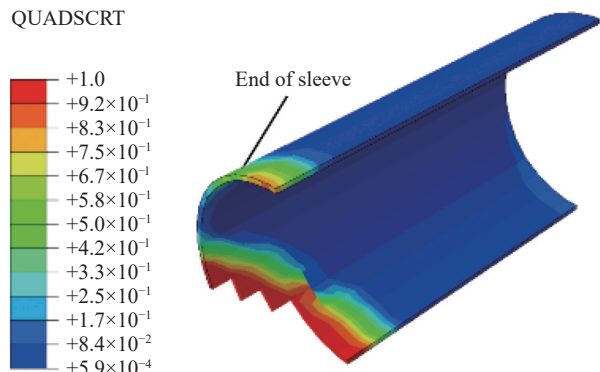
图 10 试件 B-1-B-4 有限元模型和试验荷载-轴向应变曲线
Fig. 10 Load-axial strain curves of finite element model and experiment of specimens B-1-B-4



S—Stress; S_{33} —Axial stress component in the specimen

图 11 峰值荷载时试件 B-1 和 B-2 的有限元模型应力云图
Fig. 11 Stress nephogram of finite element model of specimens B-1 and B-2 under maximum load

QUADSCRT



QUADSCRT—Under the quadratic nominal stress damage initiation criterion, the damage initiation threshold for cohesive elements is 1. Damage initiates in the element when this value is reached

图 12 B-2 套管内胶层损伤云图

Fig. 12 Damage nephogram of B-2 adhesive inside sleeve

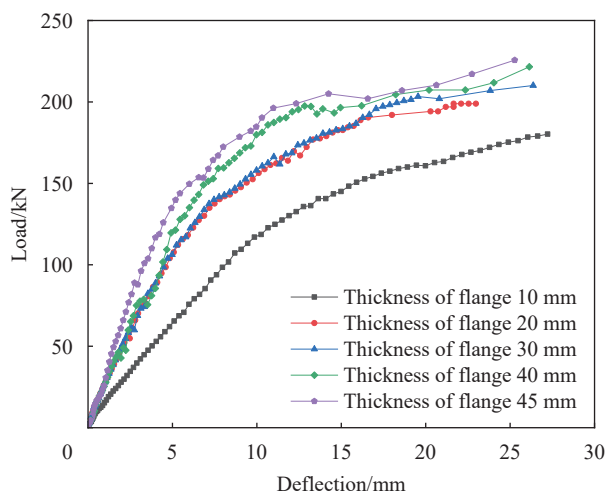


图 13 不同法兰厚度下试件的荷载-跨中挠度曲线

Fig. 13 Load-midspan deflection curves of specimens under different flange thicknesses

了该连接方式的有效性。

(2) 法兰-套管组合连接的 CFRP-钢管混凝土受弯破坏模式为 CFRP 沿轴向剥离破坏。破坏过程分为 5 个阶段, 分别为弹性阶段、塑性阶段、强化阶段、剥离阶段、失效阶段。

(3) CFRP-钢混凝土节点的抗弯刚度及极限承载力随法兰厚度的增加而增大。法兰厚度为 20 mm 时, 其抗弯刚度及极限承载力与无节点的基本一致。

(4) 采用内聚力模型能较好地模拟 CFRP 剥离过程。通过有限元参数分析发现, 法兰厚度对节点力学特性影响显著, 套管长度和壁厚对节点力学特性影响较小。对于工程中常用的直径为 140 mm 的 CFRP-钢管混凝土拱架, 法兰-套管节

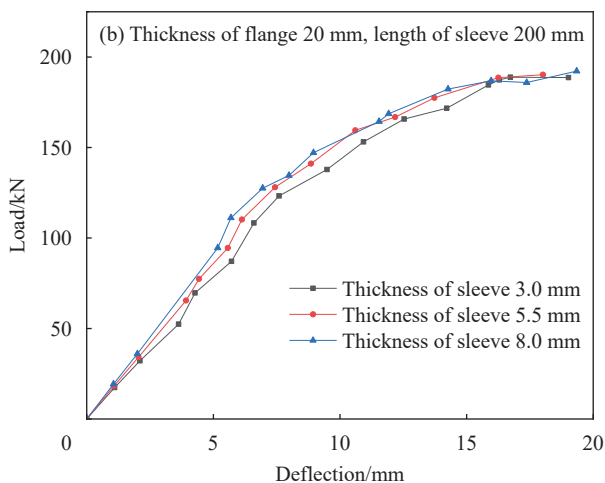
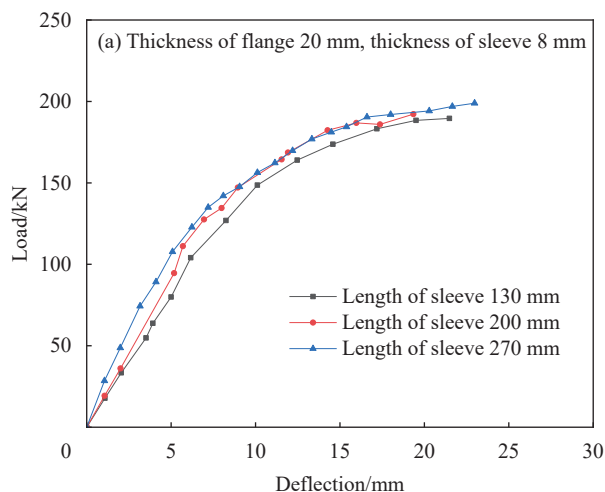


图 14 套管长度和厚度对试件荷载-跨中挠度曲线的影响

Fig. 14 Influence of the length and thickness of sleeve on the load-midspan deflection curves of specimens

点设计时, 建议法兰厚度取 20 mm, 套管长度取 200 mm, 套管壁厚取 5.5 mm。

参考文献:

- [1] 王琦, 许硕, 江贝, 等. 地下工程约束混凝土支护理论与技术研究进展 [J]. 煤炭学报, 2020, 45(8): 2760-2776.
WANG Qi, XU Shuo, JIANG Bei, et al. Research progress of confined concrete support theory and technology for underground engineering[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(8): 2760-2776(in Chinese).
- [2] 王琦, 肖宇驰, 江贝, 等. 交通隧道高强约束混凝土拱架性能研究与应用 [J]. 中国公路学报, 2021, 34(9): 263-272.
WANG Qi, XIAO Yuchi, JIANG Bei, et al. Research and application of high strength confined concrete arch in traffic tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(9): 263-272(in Chinese).
- [3] ZHANG W, LI W, YANG N, et al. Determination of the bear-

- ing capacity of a concrete-filled steel tubular arch support for tunnel engineering: Experimental and theoretical studies[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2017, 21(7): 1-14.
- [4] 赵卫平, 何宇翔, 徐国正, 等. 钢管混凝土支架节点压弯承载性能数值模拟 [J]. *煤炭学报*, 2024, 49(S2): 647-658.
ZHAO Weiping, HE Yuxiang, XU Guozheng, et al. Numerical simulation of compression bending bearing property of concrete filled steel tubular support joints[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(S2): 647-658(in Chinese).
- [5] 滕锦光. 新材料组合结构 [J]. *土木工程学报*, 2018, 51(12): 1-11.
TENG Jinguang. New-material hybrid structures[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(12): 1-11(in Chinese).
- [6] MIYANO Y, NAKADA M. Accelerated testing methodology for durability of CFRP [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 191: 107977.
- [7] 李为腾, 王乾, 杨宁, 等. 钢管混凝土拱架在巷道支护中的发展与现状 [J]. *土木工程学报*, 2016, 49(11): 97-114, 128.
LI Weiteng, WANG Qian, YANG Ning, et al. Development and present status of concrete filled steel tubular supporting arch in mine roadway[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2016, 49(11): 97-114, 128(in Chinese).
- [8] 鹿伟, 江贝, 王琦, 等. 深部软岩巷道方钢约束混凝土拱架基本构件力学特性及参数影响机制研究 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2020, 37(3): 473-480.
LU Wei, JIANG Bei, WANG Qi, et al. Mechanical characteristics and parameter influencing mechanism of square steel confined concrete arch components in deep soft rock roadway[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2020, 37(3): 473-480(in Chinese).
- [9] TENG J G, YU T, FERNANDO D. Strengthening of steel structures with fiber-reinforced polymer composites[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2012, 78: 131-143.
- [10] HE J, XIAN G J. Debonding of CFRP-to-steel joints with CFRP delamination[J]. *Composite Structures*, 2016, 153: 12-20.
- [11] XIA S H, TENG J G. Behaviour of FRP-to-steel bonded joints[C]//International Institute for FRP in Construction (IIFC). *Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures*, BBFS 2005. Hongkong: Iifc Secretariat, 2005: 419-426.
- [12] 国家市场监督管理总局. 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. *Metallic materials—Tensile testing: Part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228.1—2021*[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021(in Chinese).
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. *Standard for test methods of concrete physical and mechanical properties: GB/T 50081—2019*[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019(in Chinese).
- [14] American Concrete Institute. *Building code requirements for structural concrete and commentary: ACI 318*[S]. Farmington Hills, Michigan: ACI, 2011.
- [15] 武芳文, 刘一帆, 何岚清, 等. 钢纤维磷酸镁水泥混凝土梁受弯性能研究 [J]. *中国公路学报*, 2023, 36(9): 106-118.
WU Fangwen, LIU Yifan, HE Lanqing, et al. Flexural performance of steel fiber magnesium phosphate cement concrete beams[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2023, 36(9): 106-118(in Chinese).
- [16] TAO Z, WANG Z B, YU Q. Finite element modelling of concrete-filled steel stub columns under axial compression[J]. *Journal Construction Steel Research*, 2013, 89: 121-131.
- [17] BAŽANT Z P, BECQ-GIRAUDON E. Statistical prediction of fracture parameters of concrete and implications for choice of testing standard[J]. *Cement & Concrete Research*, 2002, 32(4): 529-556.
- [18] Comité Euro-international Du Béton. *CEB-FIP model code 1990*[S]. London: Thomas Telford Ltd., 1993.
- [19] TAO Z, WANG X Q, UY B. Stress-strain curves of structural and reinforcing steels after exposure to elevated temperatures[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2013, 25(9): 1306-1316.
- [20] CAMPILHO R D S G, MOURA M F S F D, DOMINGUES J J M S. Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2008, 45(5): 1497-1512.
- [21] WANG H T, WU G. Bond-slip models for CFRP plates externally bonded to steel substrates[J]. *Composite Structures*, 2018, 184: 1204-1214.
- [22] TENG J G, FERNANDO D, YU T. Finite element modelling of debonding failures in steel beams flexurally strengthened with CFRP laminates[J]. *Engineering Structures*, 2015, 86: 213-224.