

文章编号:1671-1637(2026)07-0081-17

# 外包UHPC加固长期荷载作用下CFST墩柱轴压力学性能

孔文渊<sup>1</sup>, 邢智权<sup>2,3</sup>, 陈力波<sup>1</sup>, 郑立<sup>4</sup>, 吴晓磊<sup>5</sup>, 陈誉<sup>\*2,3</sup>

(1. 福州大学土木工程学院, 福建 福州 350108; 2. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124; 3. 福州大学结构工程国际暨港澳台联合实验室, 福建 福州 350116; 4. 福建建工集团有限责任公司, 福建 福州 350003; 5. 中庆建设有限责任公司, 吉林 长春 130000)

**摘要:**为研究长期荷载作用对墩柱加固后性能的影响, 设计了20个不同长期荷载比和截面加固形式的轴压试验构件, 采用预应力长期持荷加载装置对钢管混凝土(CFST)试件施加轴向压力, 监测了试件应变变形发展情况; 采用外包超高性能混凝土(UHPC)对试件进行扩大截面加固, 形成组合墩柱构件, 对加固后墩柱进行轴压极限加载, 分析了长期荷载对加固后墩柱破坏特征和力学性能的影响; 建立考虑核心混凝土收缩徐变的有限元模型, 进一步开展了参数分析研究截面参数对加固效果的影响; 基于试验和数值模拟结果, 提出了考虑长期荷载影响的UHPC加固CFST墩柱轴压极限承载力预测公式。研究表明: 低长期荷载比条件下加固后墩柱主要表现为加固层端部劈裂破坏, 高长期荷载比作用下则表现为柱中截面加固层压溃破坏; 长期荷载作用下因核心混凝土收缩徐变导致钢管承担更大荷载, 柱脚发生局部变形并产生跨中附加挠度, 降低变形协调性能, 进而导致加固效果下降; 加固层配筋率和长期荷载比对加固后墩柱承载力影响显著, 低长期荷载比能够一定程度改善构件受力性能, 当加固层配筋时能有效限制长期荷载的不利影响, 使承载力折减系数降低到10%以内, 建议实际应用中加固层配筋率达到1%以上。研究提出的极限承载力预测公式可为长期荷载作用下CFST构件的加固设计提供参考。

**关键词:**桥梁工程; 墩柱承载力; 轴压试验; UHPC加固; 长期荷载; 约束效应

**中图分类号:**U443.22 **文献标志码:**A **DOI:**10.19818/j.cnki.1671-1637.2026.011

## Axial compression performance of CFST pier column under long-term load reinforced by encased UHPC

KONG Wen-yuan<sup>1</sup>, XING Zhi-quan<sup>2,3</sup>, CHEN Li-bo<sup>1</sup>, ZHENG Li<sup>4</sup>, WU Xiao-lei<sup>5</sup>, CHEN Yu<sup>\*2,3</sup>

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China; 2. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 3. International and Hong Kong, Macao and Taiwan Connection Laboratory of Structural Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, Fujian, China; 4. Fujian Construction Engineering Group Co., Ltd., Fuzhou 350003, Fujian, China; 5. Zhongqing Construction Co., Ltd., Changchun 130000, Jilin, China)

**出版历程:**2025-04-03 收稿, 2025-05-14 修回, 2025-08-22 录用

**基金项目:**福建省科技厅高校产学研合作项目(2024Y4013); 福建省住房和城乡建设厅科学技术计划项目(2022-K-083, 2023-K-65, 2023-K-96); 国家级大学生创新创业训练项目(202410386018)

**作者简介:**孔文渊(1996-), 男, 安徽合肥人, 博士研究生, E-mail: wenyuankong@163.com。

**\*通信作者:**陈誉(1978-), 男, 湖北荆州人, 教授, 博士生导师, 工学博士, E-mail: yuchen@bjut.edu.cn。

**引用格式:**孔文渊, 邢智权, 陈力波, 等. 外包UHPC加固长期荷载作用下CFST墩柱轴压力学性能[J]. 交通运输工程学报, 2026, 26(7): 81-97.

**Citation:** KONG Wen-yuan, XING Zhi-quan, CHEN Li-bo, et al. Axial compression performance of CFST pier column under long-term load reinforced by encased UHPC[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2026, 26(7): 81-97.

**Abstract:** To investigate the influence of long-term loading on the post-reinforcement performance of pier columns, 20 axial compression specimens were designed with varying long-term load ratios and section reinforcement configurations. A prestressed long-term loading device was employed to apply sustained axial compression to concrete-filled steel tube (CFST) specimens, and the evolution of strain and deformation was monitored. The specimens were subsequently reinforced by encasing ultra-high performance concrete (UHPC) to form composite pier columns, which were then tested under ultimate axial compression. The effects of long-term loading on failure modes and mechanical behavior were systematically analyzed. A finite element model incorporating core concrete shrinkage and creep was established, and parametric studies were conducted to evaluate the influence of sectional parameters on reinforcement efficiency. Based on experimental and numerical results, a predictive formula for the ultimate axial bearing capacity of UHPC-reinforced CFST pier columns accounting for long-term loading effects was proposed. The results indicate that under low long-term load ratios, splitting failure occurs at the ends of the reinforced layer, whereas under high ratios, crushing failure predominates at the mid-height section. Long-term loading induces additional load transfer to the steel tube due to concrete shrinkage and creep, leading to local deformation at the column base and increased mid-span deflection, which impairs deformation compatibility and reduces reinforcement effectiveness. The reinforcement ratio of the encased layer and the long-term load ratio significantly influence the ultimate capacity. A moderate long-term load ratio can moderately improve the mechanical response, while the inclusion of reinforcement in the UHPC layer effectively mitigates the adverse effects of long-term loading, limiting the capacity reduction coefficient to within 10%. A reinforcement ratio exceeding 1% is recommended for practical applications. The proposed formula offers a reliable reference for the design of CFST member reinforcements under long-term loading.

**Keywords:** bridge engineering; bearing capacity of pier column; axial compressive test; reinforced by UHPC; long-term load; confinement effect

**Publication history:** Received 2025-04-03; Received in revised form 2025-05-14; Accepted 2025-08-22

**Funding:** University Industry-study-research Cooperation Project of Fujian Province Science and Technology Department (2024Y4013); Science and Technology Plan Project of Housing and Urban-rural Construction Industry of Fujian Province (2022-K-083, 2023-K-65, 2023-K-96); National College Students Innovation and Entrepreneurship Training Project (202410386018)

\* **Corresponding author:** CHEN Yu, professor, PhD, E-mail: yuchen@bjut.edu.cn.

## 0 引 言

钢管混凝土结构(Concrete-filled Steel Tube, CFST)凭借承载性能高、变形能力强、抗震性能优异、施工过程简单等优点,广泛应用于大跨度桥梁结构中<sup>[1-3]</sup>。当前中国从大基建时代逐步转向高质量、高效能发展阶段,既有结构已进入维修加固重要时期。钢管混凝土结构的常用加固方法包括外包纤维复合材料加固<sup>[4]</sup>、外套钢管加固<sup>[5]</sup>和增大面积法加固<sup>[6-7]</sup>。超高性能混凝土(Ultra-high Performance Concrete, UHPC)具有超高强度和良好的耐久性<sup>[8]</sup>,在桥面板、桥梁墩柱和公路防撞墙等工程的应用中

展现出显著性能优势,能够有效改善结构长期服役性能。采用 UHPC 对长期荷载作用下的 CFST 墩柱进行扩大截面加固,其必要性源于中国桥梁基础设施建设的背景与材料性能的革新需求:①中国基础设施建设时间跨度大,目前仍有大量桥梁是在 20 世纪 80 年代前修建,由于当时的设计方法与现行规范有所不同,加之交通流量增大、结构老化和累积损伤等原因,很多既有桥梁结构存在超限服役风险<sup>[9]</sup>;② UHPC 凭借其良好的力学性能和耐久性、加工绿色低碳和施工便捷性对旧桥改造工程具有显著优势,推动桥梁工程向高性能、可持续方向转型升级。研究表明采用 UHPC 加固显著提高了构件的抗裂性

能和刚度,当钢筋网与UHPC协同受力时能更好地提高加固性能<sup>[10-11]</sup>。

混凝土结构在服役期内长期荷载的作用下会产生徐变和收缩<sup>[12]</sup>,从而使构件变形和裂缝增大,过高的长期荷载会对构件承载性能造成不利影响。从上个世纪开始,对混凝土徐变机理的研究引起广泛关注,各国规范均给出了混凝土徐变计算模型,包括EC2模型和ACI-209模型等。韩林海等<sup>[13-14]</sup>通过对徐变模型进行修正得到了适用于钢-混组合构件时效作用下纵向变形的计算方法,为后续开展组合构件在长期荷载作用下的受力性能研究奠定了基础;徐倩等<sup>[15]</sup>分析了CFST在长期荷载作用下的受力性能,推导出考虑长期荷载作用的轴心受压构件荷载-变形曲线表达式,经研究发现长期荷载对构件轴压承载力的影响可能减小也可能增加;Ma等<sup>[16]</sup>对考虑长期荷载作用的CFST叠合构件进行了研究,由于外部混凝土承担的轴向荷载最大,长期荷载作用后外部混凝土卸载率相较内部核心混凝土更大;Zhao等<sup>[17-18]</sup>研究发现,长期荷载作用下钢管混凝土轴压承载力有1%~4%的小幅度提高<sup>[19]</sup>;赵萌萌等<sup>[20]</sup>研究发现长期荷载使组合柱中的钢管和型钢提前进入塑性屈服,改善了对混凝土的约束作用,使组合柱极限承载力提高,而混凝土强度提高会增大长期荷载对构件的影响,含钢率的增加则会使长期荷载影响减弱;李小芳<sup>[21]</sup>研究发现长期荷载产生的徐变增加了弯矩二阶效应,降低了圆钢管混凝土偏压柱侧向刚度和稳定承载力;肖思柯<sup>[22]</sup>对钢管再生混凝土柱开展了考虑初应力与徐变的稳定性能研究;饶琛辉<sup>[23]</sup>通过对FRP-混凝土-钢双壁空心柱研究发现,混凝土长期稳定徐变应变与应力比呈线性关系;Wang等<sup>[24]</sup>通过参数回归,提出了考虑钢管初应力和长期荷载作用后内置型钢CFST柱强度指标计算方法。现有文献研究主要关注长期荷载作用下CFST构件力学性能,含钢率、长细比和长期荷载比是影响加固性能的主要因素,然而现有研究的长期荷载比大多设置在0.6及以下,且鲜有涉及钢管混凝土墩柱在长期荷载作用后的加固性能研究。

鉴于上述调查分析,开展UHPC加固长期荷载作用下CFST墩柱的轴压性能研究有切实的工程意义。本文研究UHPC加固长期荷载作用下CFST墩柱的力学性能,目的是对墩柱进行扩大截面加固时,更准确地衡量长期荷载作用对加固后构件性能的不利影响,从而实现优选加固方案和加固参数的目的。本文首先对钢管混凝土墩柱试件开展长期持荷加载

试验,然后采用外包UHPC对长期荷载作用下的CFST墩柱进行扩大截面加固,形成外包超高性能混凝土-钢管混凝土组合墩柱(Concrete-filled Steel Tube Pier Reinforced by Encased Ultra-high Performance Concrete, UC-CFST),再对加固后墩柱进行轴压极限加载,通过设计不同加固截面形式和长期荷载比等参数,研究外包UHPC的加固效果。通过有限元方法开展参数分析,对不同加固层厚度、UHPC强度、加固层配筋率、长期荷载比等参数下的构件力学性能进行研究,最终结合相关规范,引入考虑长期荷载影响的修正系数,提出UHPC加固长期荷载作用后CFST墩柱的极限承载力预测公式。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

试验共设计20个试件,包括8个CFST试件和12个UC-CFST试件,研究长期荷载比对不同截面加固形式墩柱的力学性能影响,试件参数设置如表1所示,试件编号中符号SUC代表加固后组合截面为正方形,采用未配筋UHPC加固;SUCR代表加固后组合截面为正方形,采用含配筋的UHPC加固;SCFST代表加固对象为方钢管混凝土墩柱;CCFST代表加固对象为圆钢管混凝土墩柱;符号Lr0.3表示长期荷载比为0.30,长期荷载比 $L_r$ 的计算方法为

$$L_r = \frac{N_r}{P_u} \quad (1)$$

式中: $N_r$ 为施加在构件上的长期恒定荷载; $P_u$ 为钢管混凝土墩柱轴心受压承载力设计值。

承载力折减系数定义为不同长期荷载比作用下的试件极限承载力相比未经长期荷载作用试件极限承载力的降低幅度,负值代表长期荷载作用后试件承载力提升。根据《钢管混凝土结构技术规范》(GB 50936—2014)的要求,对受压为主的CFST构件,圆形截面的钢管外径与壁厚之比 $b/T$ (径厚比)不应大于 $135(235/f_{sa})$ ,矩形截面径厚比不应大于 $60\sqrt{235/f_{sa}}$ ;对受弯为主的CFST构件,圆形截面径厚比不应大于 $177(235/f_{sa})$ ,矩形截面径厚比不应大于 $135\sqrt{235/f_{sa}}$ , $f_{sa}$ 为钢管屈服强度。本文的SCFST截面尺寸为120 mm×120 mm,CCFST横截面直径为120 mm,厚度设置为3 mm,径厚比为40,均小于受压和受弯构件的限值要求。试件如图1所示,墩柱试件高度为360 mm,核心混凝土强度等

表 1 试件设计参数及测试结果

Table 1 Design parameters and test results of specimens

| 试件编号             | 加固前截面尺寸/mm | 加固后截面边长/mm | 长期荷载比 | 极限承载力/kN | 轴压刚度/(kN·mm <sup>-1</sup> ) | 延性系数 | 承载力折减系数/% |
|------------------|------------|------------|-------|----------|-----------------------------|------|-----------|
| SCFST-Lr0.0      | 边长为 120    |            | 0.0   | 911.6    | 387.5                       | 3.2  | 0.0       |
| SCFST-Lr0.3      | 边长为 120    |            | 0.3   | 897.4    | 390.0                       | 2.5  | 1.6       |
| SCFST-Lr0.5      | 边长为 120    |            | 0.5   | 836.4    | 388.7                       | 2.8  | 8.2       |
| SCFST-Lr0.7      | 边长为 120    |            | 0.7   | 819.2    | 389.1                       | 3.1  | 10.1      |
| SUC-SCFST-Lr0.0  | 边长为 120    | 160        | 0.0   | 2 195.2  | 590.8                       | 1.2  | 0.0       |
| SUC-SCFST-Lr0.3  | 边长为 120    | 160        | 0.3   | 2 314.6  | 425.4                       | 1.1  | -5.4      |
| SUC-SCFST-Lr0.5  | 边长为 120    | 160        | 0.5   | 1 935.2  | 355.0                       | 1.3  | 11.8      |
| SUC-SCFST-Lr0.7  | 边长为 120    | 160        | 0.7   | 981.8    | 304.0                       | 1.8  | 55.3      |
| SUCR-SCFST-Lr0.0 | 边长为 120    | 160        | 0.0   | 2 305.2  | 582.3                       | 1.3  | 0.0       |
| SUCR-SCFST-Lr0.3 | 边长为 120    | 160        | 0.3   | 2 341.6  | 467.9                       | 1.2  | -1.6      |
| SUCR-SCFST-Lr0.5 | 边长为 120    | 160        | 0.5   | 2 290.6  | 446.1                       | 1.1  | 0.6       |
| SUCR-SCFST-Lr0.7 | 边长为 120    | 160        | 0.7   | 2 216.2  | 433.2                       | 0.9  | 3.9       |
| CCFST-Lr0.0      | 半径为 120    |            | 0.0   | 867.2    | 188.1                       | 1.8  | 0.0       |
| CCFST-Lr0.3      | 半径为 120    |            | 0.3   | 825.9    | 187.6                       | 1.6  | 4.8       |
| CCFST-Lr0.5      | 半径为 120    |            | 0.5   | 789.3    | 185.6                       | 1.6  | 9.0       |
| CCFST-Lr0.7      | 半径为 120    |            | 0.7   | 727.7    | 178.0                       | 2.4  | 16.1      |
| SUC-CCFST-Lr0.0  | 半径为 120    | 160        | 0.0   | 2 360.2  | 629.9                       | 1.1  | 0.0       |
| SUC-CCFST-Lr0.3  | 半径为 120    | 160        | 0.3   | 2 304.6  | 546.2                       | 0.8  | 2.4       |
| SUC-CCFST-Lr0.5  | 半径为 120    | 160        | 0.5   | 1 646.8  | 475.2                       | 1.1  | 30.2      |
| SUC-CCFST-Lr0.7  | 半径为 120    | 160        | 0.7   | 973.0    | 386.8                       | 1.9  | 58.8      |

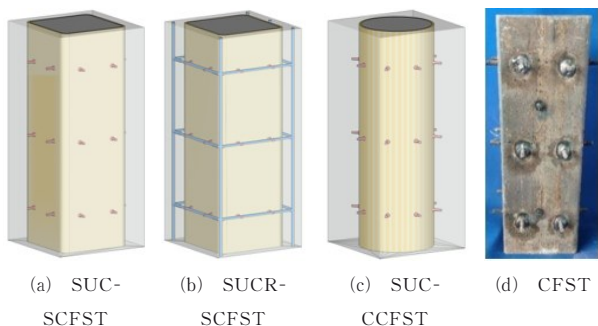


图 1 墩柱试件

Fig. 1 Pier column specimens

级为 C30。根据《钢管混凝土叠合柱结构技术规程》(CECS 188—2005)的要求,钢管的直径不宜小于柱截面短边长度的 1/3,避免外包混凝土在组合截面中的占比过大使钢管无法为混凝土提供充分的约束,因此本文钢管直径与加固后柱截面边长的比值设置为 0.75,加固后形成边长 160 mm 的方形截面。SUC-SCFST、SUCR-SCFST、SUC-CCFST 试件的加固层截面积在组合墩柱总截面积中的占比分别为 0.44、0.44、0.56。

UHPC 加固高度范围与柱高相同,UHPC 钢纤维体积掺量为 3%。CFST 柱外表面沿环向等间距焊接 8 根栓钉,栓钉直径为 6 mm,长度取加固层厚

度的 80%,沿柱高方向均匀布置 3 层。SUCR-SCFST 系列中,箍筋和纵筋采用直径 2 mm 和 4 mm 的钢丝代替。根据《混凝土结构试验方法标准》(GB/T 50152—2012),采用小直径的光圆钢丝模拟原结构中的大直径变形钢筋,并通过材性试验已保证屈服强度和弹性模量与原型钢筋一致。美国混凝土结构规范 ACI 318-19 允许缩尺模型使用等效配筋率,根据《钢管混凝土拱桥技术规范》(GB 50923—2013),钢管混凝土构件截面含钢率宜为 4%~20%,本文构件加固后 SUC-SCFST、SUCR-SCFST、SUC-CCFST 试件截面含钢率(包括钢管和加固层配筋)分别为 5.5%、5.8%、4.5%。

## 1.2 材料性能

CFST 柱的制作采用热轧 Q235 钢管,实测钢材屈服强度  $f_{sa}$  为 317.2 MPa,抗拉强度为 403.6 MPa,弹性模量为 201.4 GPa,加固层钢丝屈服强度为 283.6 MPa。钢管内填混凝土采用普通 C30 混凝土,根据《混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)测试方法测得内填普通混凝土的轴心抗压强度平均值为 19.1 MPa。外包 UHPC 加固层的原材料为波特兰水泥 42.5 R、硅灰、石英砂(10~70 目)、石英粉(400 目)、水、高效减水剂和钢纤维(长度为 6 mm,直径为 0.2 mm,体积含量为 3%),水胶比



为 0.18,UHPC 配合比见表 2。养护结束后对预留 UHPC 立方体和棱柱体试块进行加载,测得 UHPC 试块的立方体抗压强度为 134.7 MPa,抗拉强度为 8.9 MPa,弹性模量为 46.1 GPa。

表 2 UHPC 配合比

| Table 2 Mix proportion of UHPC |       |         |         |         |       |      |       |     |
|--------------------------------|-------|---------|---------|---------|-------|------|-------|-----|
| 水泥                             | 硅灰    | 石英砂     |         |         | 石英粉   | 减水剂  | 水     | 钢纤维 |
|                                |       | 40~70 目 | 20~40 目 | 10~20 目 | 400 目 |      |       |     |
| 844.5                          | 253.4 | 118.2   | 346.3   | 447.6   | 79.4  | 21.1 | 241.5 | 234 |

1.3 加载装置

1.3.1 长期持荷加载

CFST 试验柱养护完成 28 d 后开始施加长期荷载,加载装置如图 2 所示。先将自研长期荷载装置上下承压端板打磨平整,将试验柱端部表面与上下端板的轴线对齐,确保长期荷载加载和极限加载过

程中试件受轴心荷载作用。试件将预应力钢绞线穿入端板预设孔洞中,安装定位锚具与传感器后,通过油泵控制千斤顶施加预应力,配合数据采集系统实时监测荷载大小。为了避免应力松弛造成荷载值波动,采用 3% 的预应力超张拉,并在持荷加载过程中实时监测。

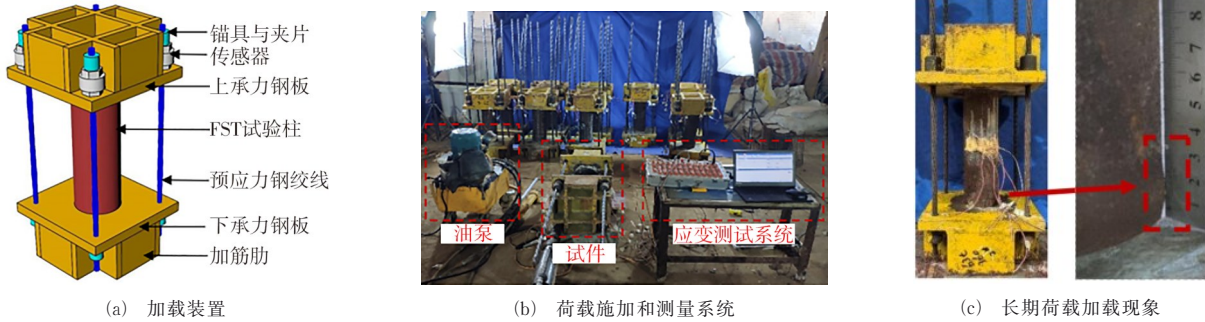


图 2 长期荷载加载装置

Fig. 2 Long-term loading application devices

在长期荷载加载过程中,核心混凝土会发生收缩徐变,由于上下承压钢板与外侧钢管的存在,核心混凝土处于相对密闭环境中,与外界几乎无湿度交换。图 3 为测量获得的试件竖向应变随时间的变化曲线,竖向应变通过柱端千分表测得的竖向位移换算得到。可知,CFST 试验柱的竖向徐变变形前期发展较快,长期持荷加载后的前 150 d 的变形量为终值的 70% 左右。如图 2(c)所示,长期荷载施加达到预计的 800 d 时,观察到受较大长期荷载比作用的试

件钢管端部产生了微小的局部变形。如图 4 所示,在保证柱端预应力的状态下采用模具浇筑外包 UHPC 加固层,浇筑完成 12 h 后拆除模板,对 UHPC 加固长期荷载作用下的 CFST 柱试件进行自然养护。

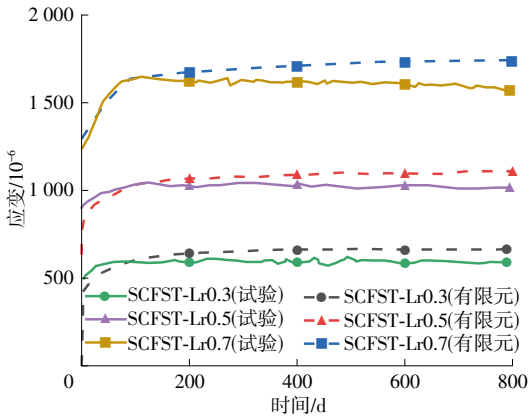


图 3 长期荷载下竖向应变随时间变化曲线

Fig. 3 Longitudinal strain versus time curves under long-term load

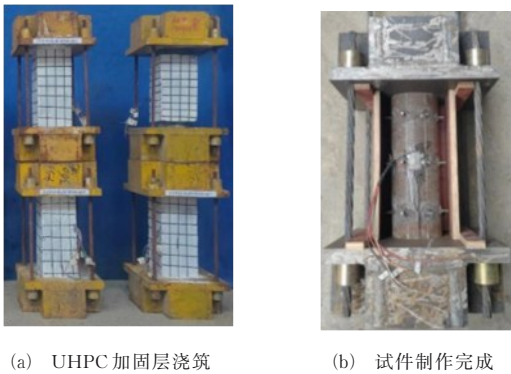


图 4 UHPC 加固层浇筑与养护

Fig. 4 Pouring and maintenance of UHPC reinforced layer

1.3.2 轴压极限加载

考虑到试件卸载可能导致残余变形,再加载时受力性能可能会产生误差,且与墩柱在工程应用中进行加固的实际受力情况不符,因此参考李小芳<sup>[21]</sup>的试验方法,采取不拆除长期荷载加载装置的方法,

直接继续进行轴压极限加载直至构件发生破坏。极限加载阶段采用 5 000 kN 电液伺服压力试验机对试件施加轴压荷载,加载装置如图 5 所示。试验加载前期采用  $25 \text{ kN} \cdot \text{min}^{-1}$  的荷载控制,当加载至预估极限承载力的 70% 时,切换为位移控制加载,加载速度为  $0.3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ,当破坏阶段荷载降低到峰值的 70% 时停止加载。荷载通过压力试验机数据采集系统获得,应变与位移通过静态采集系统 DH9816N 获得。如图 6 所示,在钢管和外包 UHPC 的柱中截面的两相邻表面分别粘贴竖向和横向应变片监测加载过程中的变形情况,钢管竖向应变片和横向应变片分别用 S-V 和 S-H 表示,外包 UHPC 竖向应变片和横向应变片分别用 C-V 和 C-H 表示。

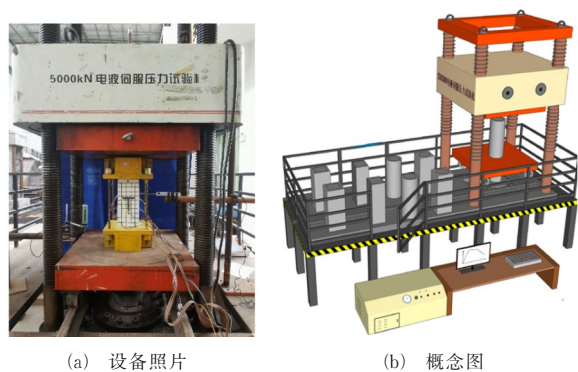


图 5 轴压荷载加载装置

Fig. 5 Axial compression loading device

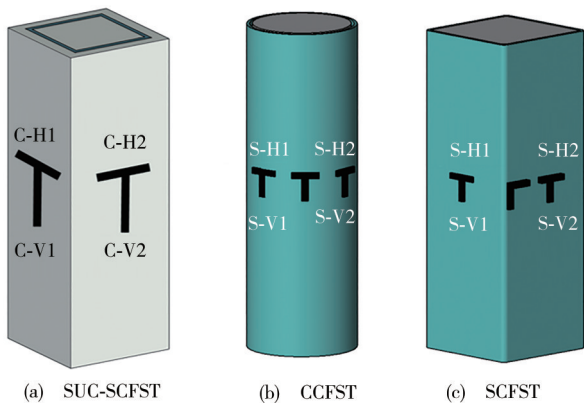


图 6 应变片布置

Fig. 6 Arrangement of strain gauges

## 2 试验结果分析

### 2.1 破坏模式

各试件的破坏模式如图 7 所示。随着荷载的增加,CFST 试件钢管端部出现局部变形并随着荷载增加越来越明显,当达到峰值荷载时,试件中部呈环状局部屈曲的破坏模式。对于未经长期荷载作用的 UC-CFST 试件,当荷载增加到极限承载力的 85%

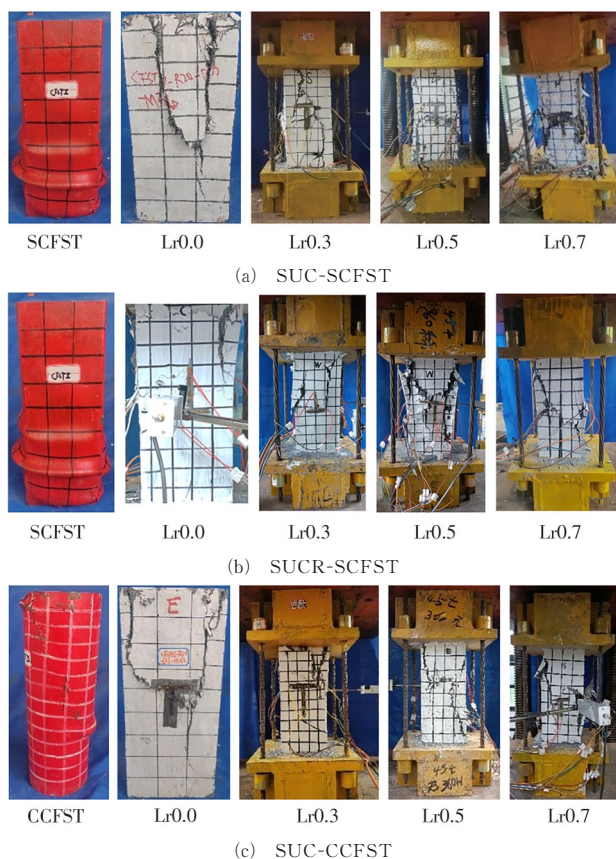


图 7 试件破坏模式对比

Fig. 7 Comparison of failure modes of specimens

左右时,试验柱逐渐进入弹塑性工作状态,UHPC 加固层端部表面出现纵向裂缝。随着荷载增加,UC-CFST 试件的轴压刚度和承载力迅速下降,外包 UHPC 加固层裂缝逐渐加深且向下部扩展,最终呈现柱端局部破坏。相比外包普通混凝土的 CFST 柱<sup>[25]</sup>,外包 UHPC 的 CFST 试件由于内部钢纤维的桥联作用,并未出现明显的剥落现象。长期荷载作用下的 UC-CFST 墩柱表现出不同的轴压破坏模式,试件表现为柱中截面加固层破坏,且随着长期荷载比的增加,加固层的破坏程度愈发严重,外包 UHPC 逐渐从端部劈裂破坏转为柱中压溃破坏。

### 2.2 荷载-位移曲线

各试件的荷载-轴向位移曲线如图 8 所示, $\Delta$  为试件纵向变形, $P$  为轴压荷载。如图 8(a)和(b)所示,CFST 试件在加载达到峰值后,随着轴向加载位移增加荷载缓慢下降,承载力下降阶段试件仍具备良好的承载能力,表现为延性破坏特征。如图 8(c)所示,UC-CFST 墩柱的典型荷载-位移曲线可分为 4 个阶段,包括弹性阶段、弹塑性阶段、破坏阶段和平台阶段。加载的初始弹性阶段荷载-位移曲线斜率稳定,随着加载接近峰值荷载,外包 UHPC 表面开始



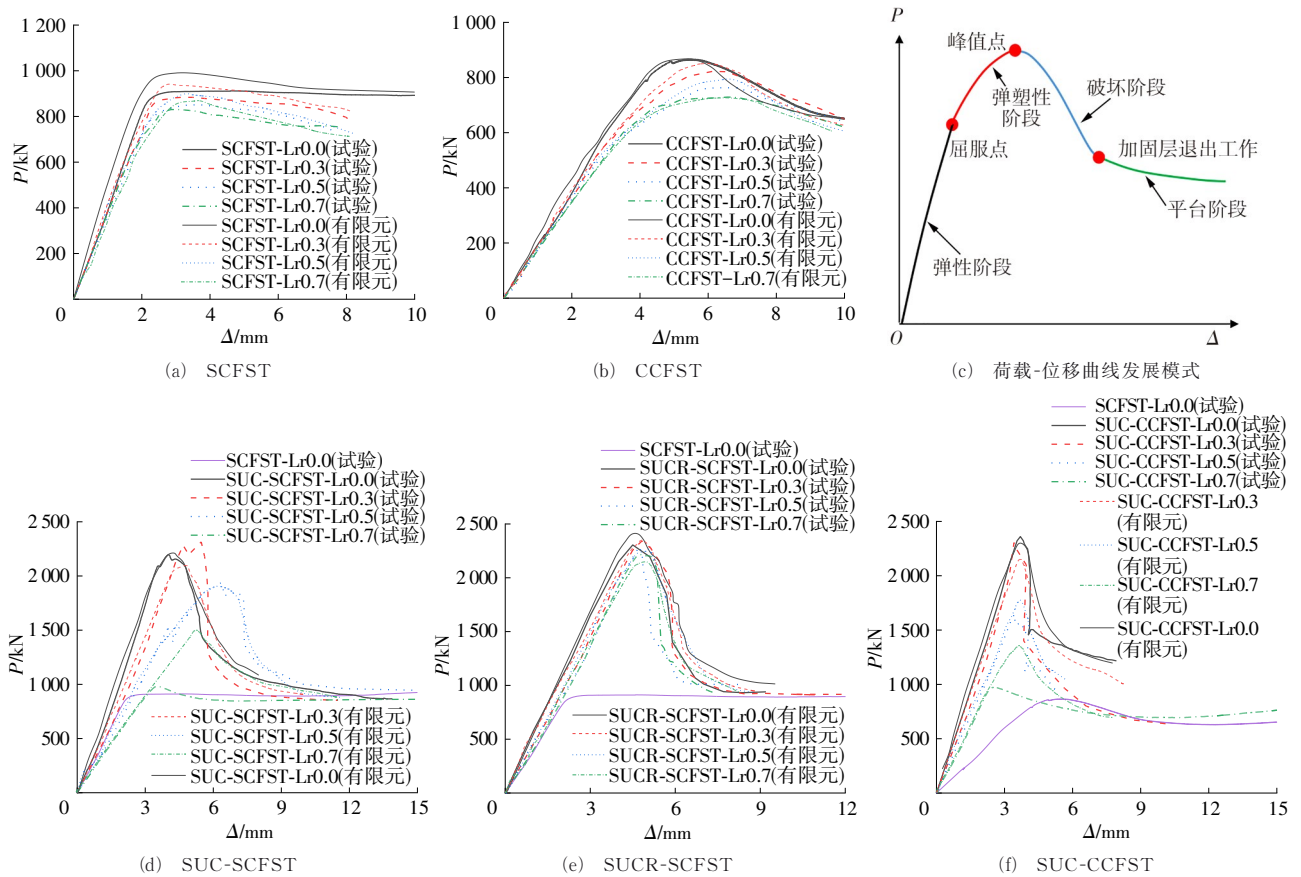


图8 不同长期荷载比条件下荷载-轴向位移曲线试验结果和模拟结果

Fig. 8 Test results and simulated results of load-axial displacement curves under different long-term loading ratios

出现细小的裂缝,钢管进入屈服状态,曲线斜率减小,构件进入弹塑性阶段。当荷载达到峰值后,外包UHPC发生破坏退出工作,构件承载力下降,荷载主要由内部CFST承担。如图8(d)~(f)所示,UC-CFST试件由于增加了混凝土用量使构件含钢率降低,在轴压加载过程中表现为脆性破坏,加载达到峰值后荷载迅速下降,直到降低到与未加固试件相当的承载力水平后逐渐保持稳定。由于加固层内置钢筋提高了外包UHPC对核心区的约束作用,试件SUCR-SCFST-Lr0.0的极限承载力略大于试件SUC-SCFST-Lr0.0。

随着长期荷载比从0增加到0.7,钢管由于混凝土徐变承担了更大的荷载,局部区域产生塑性变形,CFST试件和UC-CFST试件的峰值荷载和轴压刚度整体上呈逐渐降低的趋势。不同长期荷载比条件下,SUCR-SCFST系列的各试件峰值荷载相差不大,可见加固层内配置钢筋能够弱化核心混凝土徐变收缩导致的构件内外层变形不协调的影响,使加固层能够有效限制钢管局部变形,从而提升加固效果。

### 2.3 极限承载力和轴压刚度

各组CFST和UC-CFST试件的极限承载力试验测试值 $P_{u, test}$ 列于表1中,承载力折减系数 $\varphi_P$ 随长期荷载比变化情况如图9所示。

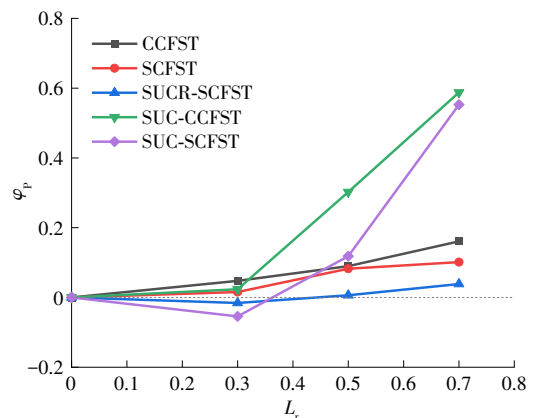


图9 长期荷载比对极限承载力的影响

Fig. 9 Influence of long-term loading ratio on ultimate bearing capacity

总体而言 $\varphi_P$ 随长期荷载比增大呈上升趋势,当长期荷载比为0.7时,折减系数从高到低分别为SUC-CCFST (58.8%)、SUC-SCFST (55.3%)、CCFST (16.1%)、SCFST (10.1%)、SUCR-

SCFST(3.9%)。试验结果表明,未配筋 UC-CFST 试件的极限承载力对长期荷载作用表现出更高的敏感性,而配筋试件的承载力在长期荷载作用下未出现显著折减。由于加固层角部区域缺乏内部钢管支撑且栓钉锚固长度不足使有效受力面积减小,因此当采用方形截面 UHPC 加固圆钢管混凝土时,试件的承载力折减幅度明显高于方形截面 UHPC 加固方钢管混凝土。

值得注意的是,部分试件在低长期荷载比条件下表现出承载性能得到改善的现象,长期荷载比为 0.3 工况下的 SUC-SCFST 和 SUCR-SCFST 试件承载力相比对照组略有提升,而当长期荷载比进一步增大时承载力表现为削弱。主要原因在于长期荷载对构件性能会产生正面和负面两方面的影响。一方面,长期荷载作用下核心混凝土的徐变效应导致其内部应力逐渐向钢管转移<sup>[26]</sup>,使钢管在加固前承担更多初始荷载,Han 等<sup>[27]</sup>研究发现,矩形 CFST 试件在长期荷载作用下承载力比对照组高 7% 以上。Freudenthal 等<sup>[28-30]</sup>在素混凝土试验中也观察到类似的现象,强度的提高可能是由于外部压力作用使混凝土水化反应程度加剧造成的<sup>[15]</sup>。根据 Hellesland 等<sup>[31]</sup>的研究,竖向荷载使混凝土中的微裂缝开展得到改善,同时也提高了凝胶材料间的范德华力。另一方面,由图 2(c)可知,长期荷载导致钢管柱端区域进入弹塑性阶段或发生局部屈曲,削弱其后续承载能力,李永进等<sup>[32]</sup>通过分析钢管与内填混凝土之间的接触应力,发现过大的长期荷载还会使局部区域钢管与内填混凝土脱粘导致变形协调性下降,这一点也在后文的应变分析中得到验证。当长期荷载比较小时,承载力由正向作用主导;长期荷载较大时,承载力转变为钢管与核心混凝土的初始塑性损伤主导。

轴压刚度  $K$  通过荷载-位移曲线的割线斜率来确定,定义为 40% 峰值荷载与对应轴向位移的比值。各试件的轴压刚度试验值列于表 1 中。轴压刚度折减系数  $\varphi_K$  定义为不同长期荷载比条件下的试件轴压刚度相对于未经长期持荷作用试件轴压刚度的降低率,各组 CFST 和 UC-CFST 试件的  $\varphi_K$  随长期荷载比变化情况如图 10 所示。试件的轴压刚度随着长期荷载比的增加整体上呈现逐渐减小的趋势,CFST 试件的轴压刚度受长期荷载比影响较小,在 3 类加固方式中,加固层受钢筋网约束的 SUCR-SCFST 试件在不同长期荷载比作用下的轴压刚度相对更稳定。

## 2.4 荷载-应变曲线

不同长期荷载比作用下试件的荷载-应变曲线

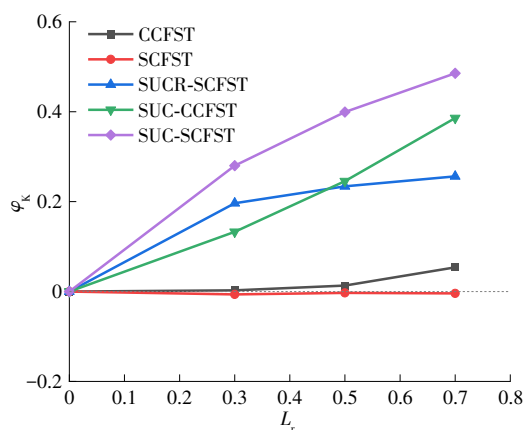


图 10 长期荷载比对轴压刚度的影响

Fig. 10 Influence of long-term loading ratio on axial stiffness

见图 11。由图 11(a)~(c)可知,当长期荷载比为 0.3 时,柱中截面位置外包 UHPC 和内部钢管的应变沿截面环向分布比较均匀,相邻截面的应变发展程度接近。对应于试验构件表现为端部劈裂破坏,UHPC 竖向压应变发展不充分,达到峰值荷载后压应变迅速减小。相比 UHPC 表现出的脆性破坏特征,钢管应变的发展更充分,峰值荷载作用钢管竖向压应变和横向拉应变超过  $6.0 \times 10^{-3}$ 。当长期荷载比从 0.3 增加到 0.5 时,柱中截面的外包 UHPC 加固层竖向应变发展程度显著增加,破坏时压应变峰值达到  $9.0 \times 10^{-3}$ ,对应由于长期荷载比增加试件逐渐由端部劈裂转变为柱中压溃的破坏模式。当长期荷载比增加时,钢管应变发展程度降低,达到峰值荷载时柱中截面钢管刚好达到受压屈服状态。总体而言,当长期荷载比为 0.3 时,钢管竖向应变发展程度高于外包 UHPC;而当长期荷载比达到 0.5 时,钢管竖向应变发展程度远低于 UHPC,且钢管横向拉应变没有充分发展,UHPC 对内部核心区的约束效应相比钢管更加显著。

由图 11(d)~(f)可知,当试件的长期荷载比从 0.3 增加到 0.7,相邻截面的应变发展模式区别较大,加载初期柱中 UHPC 加固层的其中一侧表面表现出竖向受拉的偏心受压破坏特征,钢管相邻截面的一侧应变发展速度远高于另一侧,说明较高的长期荷载比会导致构件产生跨中附加挠度,使跨中截面应变分布更不均匀,最终导致柱中截面发生破坏。

对比图 11(g)、(h)中试件 SUCR-SCFST-Lr0.5 与图 11(a)~(c)中试件 SUC-SCFST 的应变可知,相比加固层无配筋的试件,加固层配筋时构件跨中相邻表面的应变发展趋势和达到峰值荷载时的应变发展程度更接近,相同位置的钢管与外包加固



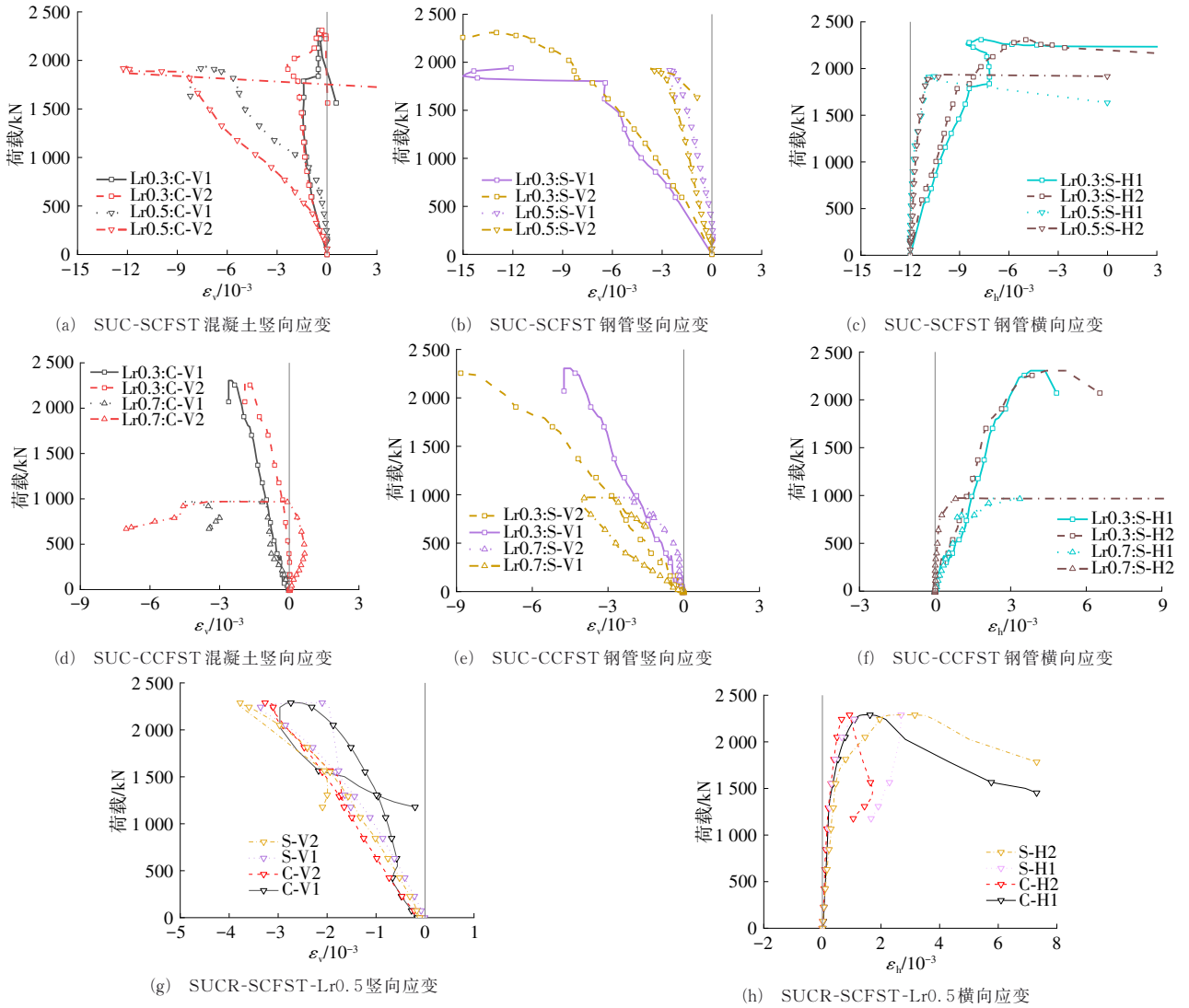


图11 不同长期荷载比下荷载-应变曲线

Fig. 11 Load-strain curves under different long-term loading ratios

层的应变发展模式也更加接近,试件的变形协调性更好。由于纵筋分担了部分荷载,达到峰值荷载时UHPC加固层的应变发展程度有所下降。

综合分析可知,由于长期荷载加载阶段钢管局部区域进入塑性状态或发生局部屈曲,钢材弹性变形空间被压缩,刚度发生退化,无法继续有效分担荷载;加固层没有经历长期荷载的作用,在加载初期仍处于弹性阶段,导致在极限加载过程中与内部钢管混凝土的应变协调不足,钢材应变发展速度减缓而外包UHPC应变发展加快,导致加固层过早破坏,内部核心区的强度未充分利用,最终降低构件的承载能力。当加固层配筋时,UHPC与钢管之间的变形协调性明显提高,偏心受压特征不明显,混凝土与钢管协同受力,避免由于长期荷载作用导致的应力集中和局部破坏。

### 3 有限元分析

#### 3.1 有限元建模

##### 3.1.1 材料本构

采用ABAQUS建立UC-CFST构件的有限元模型,采用考虑时间效应的三维黏弹性模型模拟长期荷载作用下的混凝土本构,并采用子程序(UMAT)计算材料本构模型的雅可比矩阵,相关参数设置参考文献[33]、[34],模型具体表达式为

$$d\sigma_{ij}(t) = \delta_{ij} \left[ \lambda \epsilon_{kk}(t) - \int_0^t \phi_1(t-t_0) \frac{\partial \epsilon_{kk}(t_0)}{\partial t_0} dt_0 \right] + 2G\epsilon_{ij}(t) - \int_0^t \phi_2(t-t_0) \frac{\partial \epsilon_{ij}(t_0)}{\partial t_0} dt_0 \quad (2)$$

$$\lambda = E(t_0) - 2G(t_0) / [1 + \varphi_{\max}(t_0)] \quad (3)$$

$$G = G(t_0) / [1 + \varphi_{\max}(t_0)] \quad (4)$$

$$\psi_1(t) = -\left\{ \varphi_{\max}(t_0) / [1 + \varphi_{\max}(t_0)] \right\} [E(t_0) - 2G(t_0)] e^{-ht} \quad (5)$$

$$\psi_2(t) = -2 \left\{ \varphi_{\max}(t_0) / [1 + \varphi_{\max}(t_0)] \right\} G(t_0) e^{-ht} \quad (6)$$

式中:  $t_0$  为混凝土加载龄期;  $t$  为长期荷载作用时间;  $\varphi_{\max}(t_0)$  为徐变终值系数, 与环境湿度、加荷龄期、混凝土坍落度、构件尺寸、细骨料和混凝土含气量有关, 根据文献[35]取 0.9;  $G$  和  $E$  分别为混凝土剪切模量和弹性模量;  $\psi_1(t)$  和  $\psi_2(t)$  分别为体积应变  $\epsilon_{kk}(t)$  和剪切应变  $\epsilon_{ij}(t)$  对应的松弛函数<sup>[36]</sup>。

极限加载阶段的核心混凝土本构采用塑性损伤模型进行模拟, 基于考虑套箍作用的短期荷载作用下混凝土应力-应变关系<sup>[26]</sup>模型进行修正, 具体修正方法包含 2 个假定, 即认为收缩徐变效应对混凝土强度无直接影响, 仅使应力-应变本构的应变值发生偏移, 该方法作为模拟长期荷载作用下组合构件稳定承载力分析的主流方法, 准确性已在多项研究中得到验证<sup>[21,37]</sup>。引入收缩徐变系数进行调整后的混凝土应变  $\epsilon$  表达式如下

$$\epsilon = [1 + \varphi(t, t_0)] \epsilon_{10} + \epsilon_{sh} \quad (7)$$

$$\varphi(t, t_0) = \frac{(t - t_0)^{0.6} \varphi_{\max}(t_0)}{10 + (t - t_0)^{0.6}} \quad (8)$$

式中: 收缩应变  $\epsilon_{sh}$  根据文献[26]取  $5.36 \times 10^{-4}$ ; 徐变系数  $\varphi(t, t_0)$  参考美国规范 ACI 209 进行计算。

该模型较为详细地考虑了可能影响混凝土收缩的各项特性, 如养护天数、相对湿度和材料用量修正系数等。

UHPC 的单轴受压应力-应变关系选用参考文献[38]给出的本构模型, 该模型被中国学者广泛应用于有限元分析中, 具有较好的计算精度, 且收敛性较好<sup>[39-40]</sup>, 模型的具体公式如下

$$n = \frac{E_u}{E_{us}} \quad (9)$$

$$\xi = \frac{\epsilon}{\epsilon_{uc}} \quad (10)$$

$$\sigma = \begin{cases} \frac{f_{uc}(n\xi - \xi^2)}{1 + (n-2)\xi} & \epsilon \leq \epsilon_0 \\ \frac{f_{uc}\xi}{2(\xi-1)^2 + \xi} & \epsilon > \epsilon_0 \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\sigma$  为 UHPC 压应力;  $f_{uc}$  为 UHPC 单轴抗压强度;  $E_u$  为弹性模量;  $E_{us}$  为峰值点处的割线模量;  $\epsilon_{uc}$  为峰值压应变。

中国对于 UHPC 单轴受拉应力-应变本构的研

究相对较少, 本文选取 Hassan 等<sup>[41]</sup>提出的本构模型, 作为该模型数据来源的 UHPC 试块纤维掺量与本文相近, 用于有限元分析具有较高的计算精度和效率, 模型表达式如下

$$\sigma = \begin{cases} f_{ut}(1.09x + 0.82x^2 - 0.91x^3) & x \leq 1 \\ \frac{f_{ut}x}{5.5(x-1)^{1.9} + x} & x > 1 \end{cases} \quad (12)$$

$$x = \frac{\epsilon}{\epsilon_{ut}} \quad (13)$$

式中:  $f_{ut}$  为 UHPC 单轴抗拉强度;  $\epsilon_{ut}$  为 UHPC 峰值拉应变。

UHPC 单轴受压、受拉损伤因子根据 Supartono<sup>[42]</sup>提出的能量等价原理进行计算, 适用于单轴拉压加载下的脆性材料, 直接关联损伤与能量耗散, 物理意义明确, 广泛应用于混凝土材料的模拟, 公式如下

$$D = 1 - \sqrt{\frac{\sigma}{E_u \epsilon}} \quad (14)$$

式中:  $D$  为 UHPC 损伤因子。

钢管和钢筋网应力-应变关系为

$$\sigma = \begin{cases} E_s \epsilon & 0 < \epsilon \leq \epsilon_y \\ f_y + 0.001E_s(\epsilon - \epsilon_y) & \epsilon_y < \epsilon \leq \epsilon_u \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $E_s$  为钢材弹性模量;  $f_y$  为屈服强度;  $\epsilon_y$  为屈服应变;  $f_u$  为极限强度;  $\epsilon_u$  为极限应变。

### 3.1.2 部件装配及边界条件

图 12 为有限元模型, 核心混凝土、栓钉和 UHPC 加固层采用 C3D8R 实体单元进行模拟, 钢管采用 S4R 壳单元进行模拟, 加载端板采用 R3D4 刚性单元进行模拟, 加固层钢筋网采用桁架单元模拟并内置于 UHPC 中。核心混凝土-钢管, 加固层内表面-钢管, 组合柱-加载端板界面之间均采用面-面接触模拟, 法线方向定义为硬接触, 允许接触后分离, 切线方向采用库仑摩擦接触, 钢与加载端板(钢材)之间摩擦因数取 0.3, 钢与混凝土之间的摩擦因数取 0.6<sup>[26,43]</sup>。相关研究表明考虑钢管与混凝土界面之间的滑移性能对 CFST 结构的整体受力性能影响不大<sup>[44]</sup>, 且钢管外表面没有经历腐蚀作用, 因此本文建模时未考虑长期荷载作用引起的钢管与混凝土之间粘结性能的退化。在端板几何中心建立参考点并分别与上、下端板外表面节点进行耦合约束, 下端板参考点约束所有平动和转动自由度, 上端板参考点仅释放轴向平动自由度并施加轴向荷载。在第 1 个分析步中通过型号改变的方式删除外包 UHPC, 对内

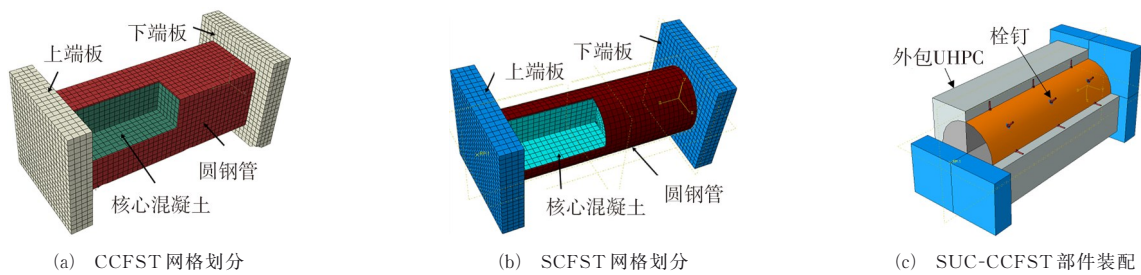


图 12 有限元模型

Fig. 12 Finite element model

部钢管混凝土以集中力形式施加长期恒定荷载; 800 d 的徐变模拟完成后, 在第 2 个分析步中激活外包 UHPC 部件参与极限加载受力, 采用位移加载直到构件发生破坏。

为了选择合适的网格尺寸进行建模, 选取试件 SUC-CCFST-Lr0.0 开展不同网格尺寸下的有限元模拟极限承载力分析, 模拟结果如表 3 所示。由表 3 可知, 当网格尺寸从 20 mm 减小到 10 mm 时, 极限承载力模拟值增加了 19.5%, 计算误差较大。当网格尺寸从 10 mm 减小到 5 mm 时, 极限承载力模拟值增加了 0.7%, 说明模型计算结果趋于收敛, 当网格尺寸处于该区间内的模型计算结果误差小。但尺寸为 5 mm 模型的计算时间约为尺寸 10 mm 模型的 12 倍, 出于平衡计算精度和计算效率的考虑, 最终选择网格尺寸为 10 mm 的模型开展有限元分析。

表 3 网格尺寸敏感性分析

Table 3 Sensitivity analysis of mesh size

| 钢管网格尺寸/mm | 内填混凝土网格尺寸/mm | 加固层网格尺寸/mm | 单元数量/个  | 计算时间/min | 极限承载力模拟值/kN |
|-----------|--------------|------------|---------|----------|-------------|
| 5.0       | 5.0          | 5.0        | 113 504 | 392      | 2 315.3     |
| 7.5       | 7.5          | 7.5        | 527 724 | 136      | 2 315.3     |
| 10.0      | 10.0         | 10.0       | 29 264  | 33       | 2 298.2     |
| 12.5      | 12.5         | 12.5       | 26 240  | 30       | 2 288.4     |
| 13.5      | 13.5         | 13.5       | 23 008  | 24       | 2 426.7     |
| 15.0      | 15.0         | 15.0       | 21 296  | 20       | 2 029.2     |
| 20.0      | 20.0         | 20.0       | 19 256  | 14       | 1 924.0     |

3.2 模拟结果验证

长期荷载施加阶段 SCFST 试件的纵向应变-时间曲线的有限元模拟结果与试验结果的对比如图 13 所示, 模拟得到的纵向变形前期发展较快, 200 d 后逐渐稳定, 与试验结果吻合。所有试件的轴向荷载-位移曲线的试验及有限元分析结果对比如图 8 所示, 有限元模型分析得到的荷载-位移曲线与试验结果比较吻合。有限元模拟极限承载力对比见图 13, 90% 试件的有限元模拟误差在 10% 范围以内, 对于

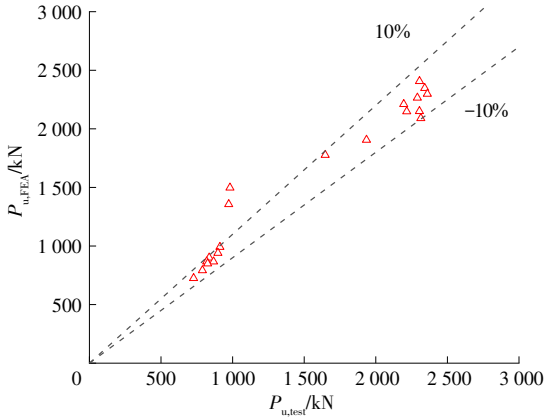


图 13 有限元模拟极限承载力对比

Fig. 13 Comparison of ultimate bearing capacities in finite element simulation

长期荷载比为 0.7 且加固层内未布置钢筋网的 UC-CFST 试件, 有限元模型由于未能充分考虑长期荷载加载引起的钢管局部屈曲和损伤的影响, 导致模拟结果偏大。

CFST 试件的应力分布如图 14(a)、(b) 所示, 钢管局部屈曲形态和位置与试验结果一致。未经长期荷载作用的试件混凝土压缩损伤如图 14(c) 所示, 压缩损伤集中在试件端部, 且呈现斜向劈裂的特征, 与试验构件的端部破坏模式吻合。经历长期荷载作用的试件混凝土压缩损伤如图 14(d) 所示, 组合墩柱表现为柱中压溃, 柱中加固层受压损伤严重, 与试验现象吻合。总体而言, 建立的有限元模型能够较好地模拟外包 UHPC 加固长期荷载作用下 CFST 墩柱的轴压力学性能。

3.3 参数分析

3.3.1 截面设计参数的影响

本节主要对试验中未涉及的加固参数包括钢管厚度  $T$ 、UHPC 强度等级  $f_{uc}$  以及 UHPC 加固层在组合截面中的面积占比  $S_A$  开展有限元参数分析, 有限元模拟的结果如图 15 所示。根据《钢管混凝土结构技术规范》(GB 50936—2014) 的要求, 对受压为主的钢管混凝土构件, 圆形截面的钢管外径与壁厚之



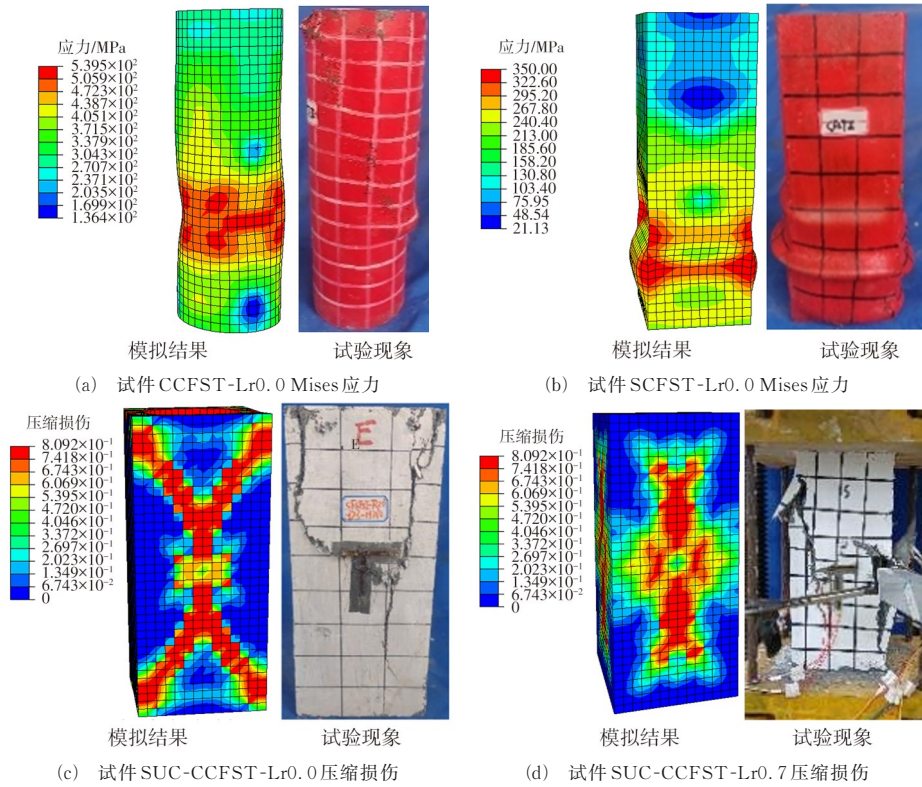


图 14 有限元模拟破坏模式

Fig. 14 Failure modes in finite element simulation

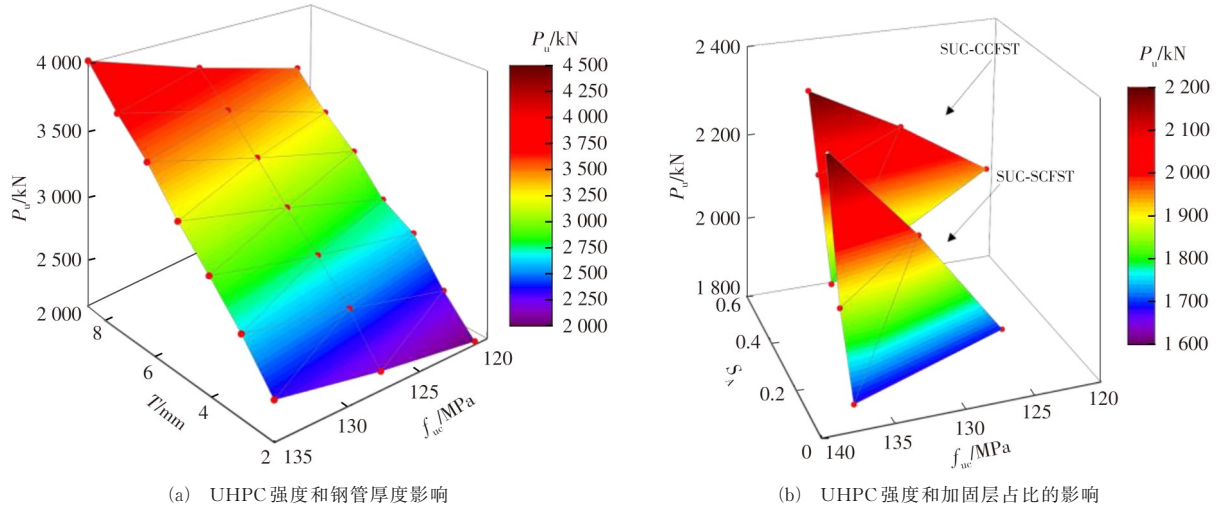


图 15 关键加固参数对极限承载力影响

Fig. 15 Influence of key reinforcement parameters on ultimate bearing capacity

比  $b/T$  不应大于  $135(235/f_{sa})$ , 矩形截面不应大于  $60\sqrt{235/f_{sa}}$ ; 对受弯为主的构件, 圆形截面不应大于  $177(235/f_{sa})$ , 矩形截面不应大于  $135\sqrt{235/f_{sa}}$ 。本文的钢管直径均为 120 mm, 为了满足受压和受弯构件的限值要求, 钢管厚度不应低于 0.9 mm。根据《钢管混凝土叠合柱结构技术规程》(CECS 188—2005) 的要求, 钢管的直径不宜小于柱截面短边长度的 1/3, 即钢管直径为 120 mm 时组合柱截面边长不

应小于 360 mm。《超高性能混凝土技术标准: 基本性能与试验方法》(T/CBMF 37—2018) 建议 UHPC 最低强度等级为 120 MPa。因此, 本文进行参数分析所建模型的钢管厚度变化范围为 2~8 mm; 组合墩柱的截面边长设置为 140、150、160 mm, 对应不同的  $S_A$  值; UHPC 强度等级设置为 121、128、135 MPa。钢管厚度对 UC-CFST 墩柱极限承载力的影响如图 15(a) 所示。各 UHPC 强度等级对应下的构件极限承载力

随钢管厚度增加而均匀增加,在径厚比为 15~60 的范围内,钢管径厚比每减小 10,构件极限承载力提高约 16.4%。UHPC 加固层面积比和 UHPC 强度对墩柱极限承载力的影响如图 15(b)所示,UC-CFST 墩柱的极限承载力总体随着 UHPC 抗压强度和加固层面积比的增加而提高。

### 3.3.2 加固层配筋率的影响

由试验分析可知,影响长期荷载作用后构件加固效果的主要因素有长期荷载比、加固层内的配筋情况以及截面形式等,本节对不同长期荷载比  $L_r$ 、加固层面积比  $S_A$  和加固层配筋率  $R_b$  的 UC-CFST 墩柱开展有限元参数分析,极限承载力模拟结果如图 16 所示。加固层配筋率分别为 0、0.6%、1.2%,长期荷载比  $L_r$  分别为 0、0.3、0.5、0.7。可知,当加固层配筋率为 0 时,极限承载力折

减系数  $\varphi_p$  随着长期荷载比增大显著增加,长期荷载比为 0.7 时折减幅度达到 30% 以上。随着加固层配筋率增加,长期荷载比对承载能力的不利影响减小,当加固层配筋率达到 1.2% 时,长期荷载比 0.7 对应的极限承载力折减系数仅有 8%,说明加固层内配置钢筋网对于 CFST 墩柱长期荷载作用后的加固性能具有显著的提升作用。主要原因在于内置钢筋网可有效分散 UHPC 加固层的内部应力,抑制裂缝的扩展路径,通过钢筋的延性性能改善 UHPC 的脆性破坏模式。试验中加固层纵向和横向钢丝节点被焊接在栓钉端部,间接提高了 UHPC 与 CFST 之间的变形协调能力,增强构件的整体性,避免局部应力集中导致的破坏,分析结果证明该方法能显著减小长期荷载比对承载性能的不利影响。

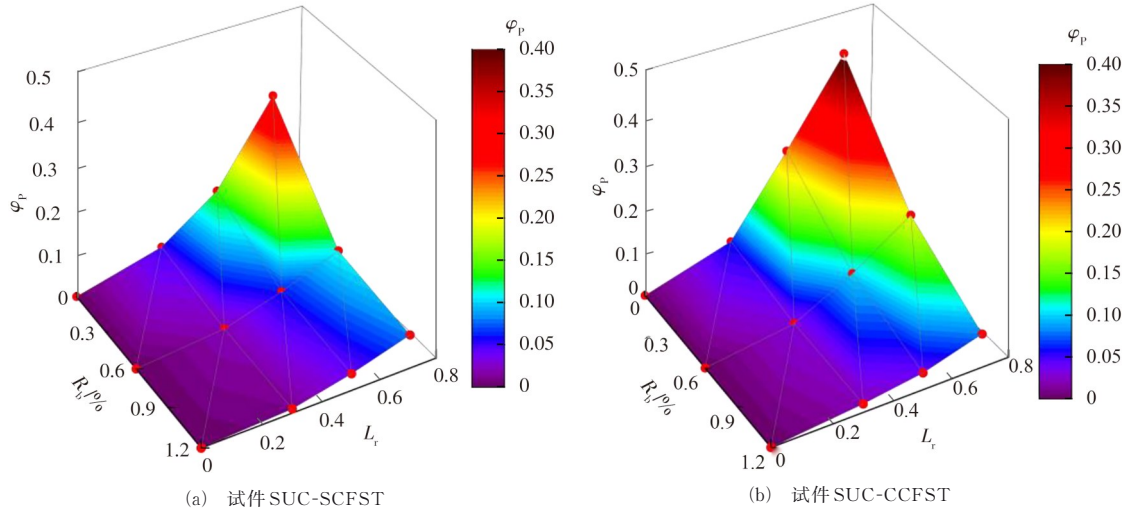


图 16 长期荷载比和加固层配筋率对承载力折减系数的影响

Fig. 16 Influence of long-term loading ratio and steel content of reinforced layer on strength reduction coefficient

### 3.4 极限承载力预测公式

考虑钢管对核心混凝土以及箍筋对 UHPC 加固层的约束作用,本文采用叠加法计算 UC-CFST 墩柱的轴压承载力,为提高受压构件的安全冗余,《钢管混凝土结构技术规范》(GB 50936—2014)建议对受压 CFST 构件承载力计算时考虑 0.9 的附加系数,吴庆雄等<sup>[25]</sup>发现外包普通混凝土加固层的 CFST 短柱达到极限承载力时,加固层可以达到材料的极限抗压应变,但此时内部被加固 CFST 短柱并未达到其材料的极限压应变,所以计算公式中需要添加折减系数 0.9 来保证轴压承载力设计值的安全冗余度,与《钢管混凝土叠合柱结构技术规程》(CECS 188—2005)相关折减系数的规定一致。考虑到在长期荷载的作用下,加固层和内部钢管混凝土

土变形协调能力有限,构件破坏时组合柱截面的内外层材料可能无法同时达到材料设计强度,因此,本文采用 0.9 的附加系数来保证安全余量,构件的轴压极限承载力  $P_u$  表达式如下

$$P_u = 0.9(A_{sa}f_{sa} + A_c f_{c,c} + A_{uc,o}f_{uc} + A_{uc,i}f_{uc,c} + A_{sb}f_{sb}) \quad (16)$$

式中:  $A_{sa}$  为钢管截面积;  $f_{sa}$  为 CFST 柱钢管抗压强度;  $A_c$  为 CFST 柱核心混凝土截面积;  $f_{c,c}$  为考虑钢管约束效应的核心混凝土抗压强度;  $A_{uc,o}$  为外包 UHPC 中箍筋加固范围外的截面积;  $f_{uc}$  为 UHPC 轴心抗压强度;  $A_{uc,i}$  为 UHPC 中箍筋加固范围内的截面积;  $f_{uc,c}$  为考虑箍筋约束作用的 UHPC 抗压强度;  $A_{sb}$  为加固层纵筋横截面积;  $f_{sb}$  为纵筋抗压强度。

$f_{c,c}$  的计算方法参考《钢管混凝土结构技术规

范》(GB 50936—2014)中钢管混凝土轴压构件的设计方法,其抗压强度计算公式为

$$f_{c,c} = (1.212 + B\theta + C\theta^2) f_c \quad (17)$$

式中: $f_c$ 为核心混凝土轴心抗压强度; $B$ 和 $C$ 均为规范建议的截面形状影响系数,对圆截面构件取 $B = 0.176f_s/213 + 0.974$ , $C = -0.104f_c/14.4 + 0.031$ ,对方形截面构件取 $B = 0.131f_s/213 + 0.723$ , $C = -0.070f_c/14.4 + 0.026$ ; $\theta$ 为钢管套箍系数, $\theta = (A_{sa}f_{sa})/(A_c f_c)$ 。

外包加固层中箍筋约束范围内的材料强度 $f_{u,c}$ 的计算参考文献[45]中普通箍筋约束混凝土的抗压强度计算方法为

$$f_{u,c} = (1 + 1.79\lambda) f_{uc} \quad (18)$$

式中: $\lambda$ 为配箍特征值,由体积配箍率计算得到。

根据试验和数值模拟结果对参数进行非线性回归是得到考虑长期荷载作用的承载力折减系数 $\varphi_p$ 表达式的方法之一<sup>[21,26]</sup>,未加固的CFST长柱或偏压构件主要影响因素有长细比、长期荷载比、偏心率等参数,另外韩林海<sup>[26]</sup>指出当构件中混凝土占比越大则承载力受徐变收缩影响越大。由于本文对象为长细比较小的轴心受压构件,因此没有考虑长细比和偏心率的影响,除了考虑长期荷载比外,引入加固层面积占比和配筋率来评估加固参数的影响。引入折减系数 $\varphi_p$ 后,UHPC加固长期荷载作用后钢管混凝土墩柱的极限承载力 $P_{u,L}$ 的计算方法修正为如下形式

$$P_{u,L} = (1 - \varphi_p) P_u \quad (19)$$

$$\varphi_p = f(R_b) f(S_A) f(L_r) \quad (20)$$

通过对第3.3节有限元模拟结果进行回归分析得到各影响系数的计算公式如下

$$f(R_b) = 0.632 - 81.5R_b + 3350R_b^2 \quad (21)$$

$$f(S_A) = 0.456 - 0.00748S_A + 3.47S_A^2 \quad (22)$$

$$f(L_r) = -0.148L_r + 1.41L_r^2 - 0.459L_r^3 \quad (23)$$

式中: $f(R_b)$ 、 $f(S_A)$ 、 $f(L_r)$ 分别为UHPC配筋率、加固层面积比和长期荷载比的影响系数。

通过上述公式得到UC-CFST墩柱极限承载力计算结果 $P_{u,cal}$ 以及有限元模拟值 $P_{u,FEA}$ 绘制于图17中,可知大部分数据点的计算误差在10%范围内,计算结果的误差均值为3.7%,变异系数为5.8%,公式预测结果整体偏小,预留了一定的安全余量,该方法能够较准确地预测UHPC加固长期荷载作用下CFST墩柱的轴压极限承载力。

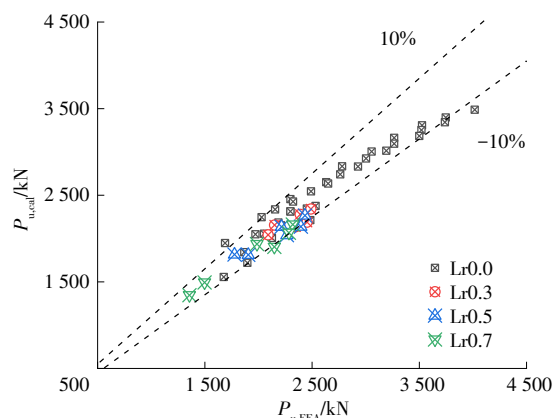


图17 公式预测极限承载力

Fig. 17 Ultimate bearing capacity predicted by formula

## 4 结 语

(1)通过开展CFST墩柱长期持荷加载、UHPC扩大截面加固和加固后墩柱轴压极限加载试验,研究发现长期荷载作用下CFST墩柱的纵向变形集中在受力初期,长期持荷加载150 d时的变形量为变形量终值的70%左右,低长期荷载比条件下加固后墩柱主要表现为加固层端部混凝土劈裂破坏,高长期荷载比作用下则表现为柱中截面加固层混凝土压溃破坏。

(2)对各设计参数下试件的承载力进行比较发现,未配筋UHPC加固后CFST试件极限承载力表现出更明显的受长期荷载效应折减的现象,当长期荷载比为0.7时承载力折减幅度达到40%以上。高长期荷载比条件下跨中截面UHPC加固层呈现小偏心受压破坏特征,柱脚钢管局部变形并产生柱中附加挠度,UHPC-钢管的变形协调性降低,后续加载时加固层被动承担更大荷载并发生破坏,从而降低墩柱的整体承载能力。

(3)通过有限元模型开展了相关参数扩展分析,随着加固层配筋率增加,长期荷载比对承载能力的不利影响显著减小,当加固层配筋率达到1.2%时,长期荷载比0.7对应的试件承载力折减幅度仅有8%,实际工程中高轴压比工况下需通过提高UHPC配筋率以保证加固效果。

(4)参考现行钢管混凝土设计规范,考虑加固层箍筋的约束作用,引入长期荷载影响系数,通过回归分析提出了加固后墩柱的轴压极限承载力预测公式,预测公式具有较高的精度,可为该类结构的实用设计方法提供参考。

(5)本文主要研究对象为低长细比墩柱,现有相关研究表明长细比是影响长期荷载下钢管混凝土构



件力学性能的重要因素之一,后续研究工作将主要围绕不同长细比的墩柱展开,另外将尝试通过建立理论分析模型推导长期作用下UHPC加固CFST墩柱的极限承载力公式,完善和补充本文基于数据回归提出的实用设计方法。

## 参考文献:

## Reference :

- [1] 陈挺地,王胜斌,冯克岩,等.不同连接构造的预制拼装钢管混凝土桥墩数值模拟与地震响应特点[J].振动与冲击,2024,43(7):134-143.  
CHEN Ting-di, WANG Sheng-bin, FENG Ke-yan, et al. Numerical simulation and seismic response characteristics of prefabricated assembled concrete filled steel tube columns with different connection constructions [J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(7): 134-143.
- [2] 于鹏,余存,任兆永,等.车辆参数对大跨钢管混凝土拱桥车桥耦合振动响应的影响规律研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2025,52(1):118-131.  
YU Peng, YU Cun, REN Zhao-yong, et al. Study on influence law of vehicle parameters on vehicle-bridge coupling vibration response of long-span concrete-filled steel tube arch bridge [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2025, 52(1): 118-131.
- [3] 李明鸿,刘晏辰,夏梦涛,等.爆炸荷载下预制节段拼装双层钢管混凝土墩柱的动力响应数值模拟[J].东南大学学报(自然科学版),2024,54(3):647-657.  
LI Ming-hong, LIU Yan-chen, XIA Meng-tao, et al. Numerical simulation on dynamic response of precast segmental CFST columns under blast loading [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2024, 54(3): 647-657.
- [4] WANG Q L, ZHAO Z, SHAO Y B, et al. Static behavior of axially compressed square concrete filled CFRP-steel tubular (S-CF-CFRP-ST) columns with moderate slenderness [J]. Thin-walled Structures, 2017, 110: 106-122.
- [5] LI W J, LIANG H J, LU Y Y, et al. Axial behavior of slender RC square columns strengthened with circular steel tube and sandwiched concrete jackets [J]. Engineering Structures, 2019, 179: 423-437.
- [6] CAI J M, PAN J L, TAN J W, et al. Nonlinear analysis of ECC-encased CFST columns under axial compression [J]. Journal of Building Engineering, 2020, 31: 101401.
- [7] 张峰,高小华,高磊,等.HB-FRP加固混凝土梁研究综述[J].交通运输工程学报,2020,20(6):35-47.  
ZHANG Feng, GAO Xiao-hua, GAO Lei, et al. Review on research on concrete beam reinforced with HB-FRP [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(6): 35-47.
- [8] 梅葵花,亢文波,刘洋,等.氯盐环境下预损伤UHPC-HPC组合梁抗弯性能[J].交通运输工程学报,2024,24(1):117-130.  
MEI Kui-hua, KANG Wen-bo, LIU Yang, et al. Flexural behavior of pre-damaged UHPC-HPC composite beams in chloride corrosion environment [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2024, 24(1): 117-130.
- [9] 黄群贤,郭子雄,陈志超.预应力钢板箍与CFRP复合加固RC墩柱轴压性能试验研究[J].中国公路学报,2022,35(2):136-145.  
HUANG Qun-xian, GUO Zi-xiong, CHEN Zhi-chao. Experimental study on axial compression performance of RC pier column strengthened by PSJ and CFRP [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(2): 136-145.
- [10] 张阳,党祺,穆程.UHPC加固箱梁顶板受弯性能试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2017,44(3):8-18.  
ZHANG Yang, DANG Qi, MU Cheng. Experimental study on flexural behavior of top deck of box girder strengthened with ultra high performance concrete [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(3): 8-18.
- [11] 林上顺,陶志蕾,夏樟华,等.不同UHPC加固措施的RC墩柱轴压性能试验研究[J].世界桥梁,2022,50(6):102-108.  
LIN Shang-shun, TAO Zhi-lei, XIA Zhang-hua, et al. Experimental study on axial compression performance of RC pier columns strengthened with different UHPC solutions [J]. World Bridges, 2022, 50(6): 102-108.
- [12] 宋瑞年,占玉林,刘芳,等.钢-混凝土组合试件长期推出试验与有限元分析[J].交通运输工程学报,2019,19(3):36-45.  
SONG Rui-nian, ZHAN Yu-lin, LIU Fang, et al. Long-term push out test and finite element analysis of steel-concrete composite specimens [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(3): 36-45.
- [13] 韩林海,陶忠,刘威,等.长期荷载作用下方钢管混凝土轴心受压柱的变形特性[J].中国公路学报,2001,14(2):52-57.  
HAN Lin-hai, TAO Zhong, LIU Wei, et al. Long-term effects in concrete-filled steel box columns under sustained loading [J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(2): 52-57.
- [14] WANG Y Y, GENG Y, RANZI G, et al. Time-dependent behaviour of expansive concrete-filled steel tubular columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(3): 471-483.
- [15] 徐倩,宋晓冰.长期荷载对方钢管混凝土轴心受压柱承载力的影响研究[J].钢结构,2016,31(9):25-29.  
XU Qian, SONG Xiao-bing. Research on the effects of long-term loading on the bearing capacity of square concrete-filled steel tubes [J]. Steel Construction, 2016, 31(9): 25-29.
- [16] MA D Y, HAN L H, LI W, et al. Behaviour of concrete-encased CFST stub columns subjected to long-term sustained loading [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 151: 58-69.
- [17] ZHAO M Z, WANG Y Y, LEHMAN D E, et al. Response and modeling of steel tubes filled with recycled fine and coarse aggregate concretes under long-term loading [J]. Journal of Structural Engineering, 2021, 147(11): 04021166.

- [18] GENG Y, WANG Y Y, CHEN J, et al. Time-dependent behaviour of 100% recycled coarse aggregate concrete filled steel tubes subjected to high sustained load level [J]. *Engineering Structures*, 2020, 210: 110353.
- [19] 曹万林, 刘亦斌, 肖建庄, 等. 配筋再生混凝土棱柱体徐变试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2020, 41(12): 141-147, 164.  
CAO Wan-lin, LIU Yi-bin, XIAO Jian-zhuang, et al. Experimental study on creep of reinforced recycled concrete prism [J]. *Journal of Building Structures*, 2020, 41(12): 141-147, 164.
- [20] 赵萌萌, 史艳莉. 长期荷载作用对内配工字型钢方钢管混凝土轴压短柱力学性能影响 [J]. *兰州理工大学学报*, 2021, 47(6): 122-130.  
ZHAO Meng-meng, SHI Yan-li. Effect of long-term loading on mechanical behavior of square CFST columns with inner profiled I-shaped steel subjected to axial loading [J]. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2021, 47(6): 122-130.
- [21] 李小芳. 圆钢管混凝土偏压柱徐变后承载力研究 [D]. 福州: 福州大学, 2022: 86.  
LI Xiao-fang. Study on bearing capacity of concrete filled circular steel tubular columns under eccentric compression after creep [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2022: 86.
- [22] 肖思柯. 考虑初应力与徐变影响的钢管再生混凝土柱稳定性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022: 87.  
XIAO Si-ke. Research on the stability of rcfst columns considering the effects of initial stress and creep [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022: 87.
- [23] 饶琛辉. 高应力持载下 FRP-混凝土-钢双壁空心柱的长期变形性能与持载后的轴压力学性能 [D]. 广州: 华南理工大学, 2023: 104.  
RAO Chen-hui. Long-term deformation behavior of FRP-concrete-steel double-skin tubular column under high-stress-ratio sustained loading and axial compression behavior after the sustained loading [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023: 104.
- [24] WANG W D, JIA Z L, XIAN W, et al. Performance of SRCFST member under long-term loading and preload on steel tube [J]. *Journal of Building Engineering*, 2023, 73: 106700.
- [25] 吴庆雄, 许志坤, 袁辉辉, 等. 外包超高性能混凝土钢管混凝土叠合短柱轴压性能试验研究 [J]. *建筑结构学报*, 2023, 44(12): 183-193.  
WU Qing-xiong, XU Zhi-kun, YUAN Hui-hui, et al. Experimental study of axial compressive performance of UHPC-encased CFST composite stub columns [J]. *Journal of Building Structures*, 2023, 44(12): 183-193.
- [26] 韩林海. 钢管混凝土结构: 理论与实践 [M]. 3 版. 北京: 科学出版社, 2016.  
HAN Lin-hai. Concrete filled steel tubular structures [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 2016.
- [27] HAN L H, YANG Y F. Analysis of thin-walled steel RHS columns filled with concrete under long-term sustained loads [J]. *Thin-Walled Structures*, 2003, 41(9): 849-870.
- [28] FREUDENTHAL A M, ROLL F. Creep and creep-recovery of concrete under high compressive stress [J]. *ACI Journal Proceedings*, 1958, 54: 1111-1142.
- [29] DHIR R K, SANGHA C M. A study of the relationships between time, strength, deformation and fracture of plain concrete [J]. *Magazine of Concrete Research*, 1972, 24(81): 197-208.
- [30] COOK D J, CHINDAPRASIRT P. Influence of loading history upon the compressive properties of concrete [J]. *Magazine of Concrete Research*, 1980, 32(111): 89-100.
- [31] HELLESLAND J, AAS-JAKOBSEN I A, GREEN R. A stress and time dependent strength law for concrete [J]. *Cement and Concrete Research*, 1972, 2(3): 261-275.
- [32] 李永进, 廖飞宇. 长期荷载作用下钢管混凝土偏压柱力学性能的有限元分析 [J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2012, 41(6): 664-668.  
LI Yong-jin, LIAO Fei-yu. Finite element analysis on the concrete-filled steel tubular beam-column subjected to long-term sustained loading [J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2012, 41(6): 664-668.
- [33] 李永进, 廖飞宇. 长期荷载作用对钢管混凝土叠合柱力学性能影响 [J]. *北京工业大学学报*, 2013, 39(8): 1187-1192.  
LI Yong-jin, LIAO Fei-yu. Behaviour of concrete filled steel tube reinforced concrete columns subjected to long-term sustained loading [J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2013, 39(8): 1187-1192.
- [34] HAN L H, LI Y J, LIAO F Y. Concrete-filled double skin steel tubular (CFDST) columns subjected to long-term sustained loading [J]. *Thin-Walled Structures*, 2011, 49(12): 1534-1543.
- [35] 李永进, 廖飞宇. 钢管混凝土中核心混凝土的徐变系数终值研究 [J]. *华东交通大学学报*, 2012, 29(5): 7-12.  
LI Yong-jin, LIAO Fei-yu. Research on ultimate creep coefficient of core concrete in concrete-filled steel tube columns [J]. *Journal of East China Jiaotong University*, 2012, 29(5): 7-12.
- [36] 杨挺青, 罗文波, 危银涛, 等. 黏弹性理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.  
YANG Ting-qing, LUO Wen-bo, WEI Yin-tao, et al. Viscoelastic theory and application [M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [37] 赖秀英, 陈宝春, 郑娟, 等. 考虑持久荷载影响的 CFT 柱稳定承载力试验研究 [J]. *建筑科学*, 2023, 39(3): 65-73.  
LAI Xiu-ying, CHEN Bao-chun, ZHENG Juan, et al. Experimental study on stability capacity of CFT columns considering the influence of long-term load [J]. *Building Science*, 2023, 39(3): 65-73.
- [38] 杨剑, 方志. 超高性能混凝土单轴受压应力-应变关系研究 [J]. *混凝土*, 2008(7): 11-15.  
YANG Jian, FANG Zhi. Research on stress-strain relation of ultra high performance concrete [J]. *Concrete*, 2008(7): 11-15.

- [39] 章世祥,王 序,何迈杰,等. UHPC圆形空心管柱轴压性能试验[J]. 中国公路学报,2023,36(9):134-143.  
ZHANG Shi-xiang, WANG Xu, HE Mai-jie, et al. Experimental study on axial compression performance of UHPC columns with circular hollow section [J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(9): 134-143.
- [40] 李传习,韦积璠,贺龙飞. 平钢板-UHPC组合桥面板湿接缝抗正弯试验与接缝折减系数[J]. 土木工程学报,2025,58(2):72-85.  
LI Chuan-xi, WEI Ji-jun, HE Long-fei. Experimental study on resistance to positive bending of wet joints in steel-UHPC composite bridge deck and joint reduction coefficient [J]. China Civil Engineering Journal, 2025, 58(2): 72-85.
- [41] HASSAN A M T, JONES S W, MAHMUD G H. Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behaviour of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC) [J]. Construction and Building Materials, 2012, 37: 874-882.
- [42] SUPARTONO F, SIDOROFF F. Anisotropic damage modeling for brittle elastic materials [J]. Archives of Mechanics, 1985, 37: 521-534.
- [43] 樊军超,赵均海,尤浩镗. 装配式复式钢管混凝土节点抗震性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2023,55(10):49-62.  
FAN Jun-chao, ZHAO Jun-hai, YOU Hao-qiang. Study on seismic performance of prefabricated CFDST joint [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2023, 55(10): 49-62.
- [44] HAJJAR J F, SCHILLER P H, MOLODAN A. A distributed plasticity model for concrete-filled steel tube beam-columns with interlayer slip [J]. Engineering Structures, 1998, 20(8): 663-676.
- [45] 钱稼茹,程丽荣,周栋梁. 普通箍筋约束混凝土柱的中心受压性能[J]. 清华大学学报(自然科学版),2002,42(10):1369-1373.  
QIAN Jia-ru, CHENG Li-rong, ZHOU Dong-liang. Behavior of axially loaded concrete columns confined with ordinary hoops [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2002, 42(10): 1369-1373.