

DOI:10.11918/202201049

圆钢加固钢管混凝土偏压构件弯曲性能提升机制

刘德军^{1,2}, 夏志恒², 王 军³, 左建平^{1,2}, 常永全²

(1. 煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院, 北京 100083; 3. 山东建筑大学 土木工程学院, 济南 250101)

摘要: 为探索拱腹焊接圆钢对钢管混凝土偏压构件弯曲性能的提升机制, 在 ABAQUS 软件中建立了圆钢加固钢管混凝土梁数值模型, 并采用试验数据验证了模型的合理性。通过分析圆钢加固钢管混凝土偏压构件的弯矩-挠度曲线、弯矩-纵向应变曲线、环向应变曲线、约束指数和中性轴偏移规律, 揭示了焊接圆钢对钢管混凝土偏压构件弯曲性能的提升机制。进一步, 分析了圆钢直径以及构件长细比对圆钢加固钢管混凝土偏压构件弯曲性能的影响规律。结果表明: 焊接圆钢可以降低截面中性轴的位置, 增大受压侧钢管环向应变, 从而提高了受压区混凝土面积, 增强了受压侧钢管对混凝土的约束作用, 进一步提升钢管混凝土偏压构件的抗弯承载力和弯曲刚度, 并且圆钢直径越大提升幅度越高; 圆钢加固钢管混凝土偏压构件的极限弯矩随着轴压比的增加而减小, 减小的幅度随着圆钢直径和构件长细比的增加而增大, 焊接圆钢提升大长细比偏压构件弯曲性能的效果更好, 且对大长细比构件弯曲性能的提升效果随着轴压比的增加而增大。

关键词: 钢管混凝土; 数值模拟; 焊接圆钢; 偏压构件; 弯曲性能; 轴压比; 长细比

中图分类号: TU398.9

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2023)05-0122-10

Improvement mechanism for flexural performance of eccentric concrete-filled steel tube members reinforced with round steel

LIU Dejun^{1,2}, XIA Zhiheng², WANG Jun³, ZUO Jianping^{1,2}, CHANG Yongquan²

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, Beijing 100083, China;

2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;

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

Abstract: To explore the improvement mechanism of welding round steel at soffit on the flexural performance of eccentric concrete-filled steel tube (CFST) members, we established a numerical model of CFST beams reinforced with round steel by using ABAQUS software and verified the model by test results. By analyzing the bending moment-deflection curve, bending moment-axial strain curve, hoop strain curve, restraint index, and neutral axis offset of eccentric CFST members reinforced with round steel, the improvement mechanism of the flexural performance of the eccentric CFST members was revealed. Besides, the influence of the diameter of the round steel and the slenderness ratio of the beams on the flexural performance of eccentric CFST members reinforced with round steel was analyzed. Results show that welding round steel could lower the position of the neutral axis of the section and increase the hoop strain of the steel tube on the compression side. Therefore, the concrete area in compression was increased, and the restraint effect of the steel tube on the compression side on the concrete was enhanced. Furthermore, the flexural bearing capacity and flexural stiffness of the eccentric CFST members were improved, and the larger the diameter of the round steel, the greater the improvement. The ultimate bending moment of the eccentric CFST members decreased with the increase in the axial compression ratio, and the larger the diameter of round steel and the slenderness ratio of beams, the greater the reduction. Welding round steel had a better effect on improving the bending performance of the eccentric member with a large slenderness ratio, and the larger the axial compression ratio, the better the improvement effect.

Keywords: concrete-filled steel tube; numerical analysis; welding round steel; eccentric member; flexural performance; axial compression ratio; slenderness ratio

收稿日期: 2022-01-12; 录用日期: 2022-04-20; 网络首发日期: 2022-08-29

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.T.20220826.1644.024.html>

基金项目: 国家自然科学基金(51878658); 煤炭资源与安全开采国家重点实验室-北京高等学校卓越青年科学家计划项目联合基金资助(SKLCRSM20LH03); 中央高校基本科研业务费资助(2022JCCXLJ05)

作者简介: 刘德军(1985—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 刘德军, ldj@cumt.edu.cn.

钢管混凝土作为一种新兴的组合结构,具有承载能力高、韧性好、耐腐蚀、施工简单以及良好的经济性能,被广泛应用于框架结构、桥梁和深井巷道中^[1-3]。钢管混凝土的增强机制,在于管内混凝土在钢管的约束下处于三向受压状态,抗压强度成倍提高,反过来混凝土可以防止钢管过早屈曲,从而有效改善钢管的刚度。

在实际工程中,钢管混凝土偏压构件是最常见的构件,即使被用作柱的钢管混凝土构件也通常受到弯曲或横向荷载引起的偏心荷载。因此,近年很多学者对钢管混凝土偏压构件的力学性能进行了大量的研究,如文献[4-11]通过试验分析了钢管混凝土偏压构件的极限承载能力、破坏模式和应力应变分布规律,并给出了钢管混凝土偏压构件承载能力的实用计算公式;文献[12-18]通过数值模拟分析了钢管混凝土偏压构件的力学性能,并与理论公式和规范的计算结果进行了对比。

由于设计误差、制作误差、施工误差以及外部环境改变等因素,钢管混凝土偏心构件在服役过程中,往往因抗弯承载力不足而发生弯曲破坏^[19-20],因此需要对钢管混凝土构件进行抗弯加固。文献[21]比较了碳纤维聚合物的缠绕方式(包括全缠绕、U型缠绕和部分缠绕)对钢管混凝土构件弯曲性能的影响规律;文献[22]提出了CFRP加固铝合金钢管混凝土的抗弯强度和抗弯刚度的设计公式;文献[23-24]发现在偏心距较大的情况下CFRP对火灾后钢管混凝土柱加固效果不理想;文献[25]开展了CFRP筋加固的碳纤维聚合物混凝土管偏压试验。数值模拟方面,文献[26-27]建立了CFRP加固不锈钢管混凝土有限元模型,详细分析了试件的破坏模式、各部件的应力应变分布规律及相互作用;文献[28]通过数值模拟分析了I型截面CFRP加固钢管混凝土偏压复合短柱的极限承载能力,并与提出的承载能力理论进行了对比分析;文献[29]采用热-力耦合的方法建立了内配型钢的方钢管混凝土偏心受压柱火灾全过程的数值模型,得到火灾荷载比、长细比、偏心率及钢管含钢率等因素对构件承载力的影响规律。研究现状表明,缠绕CFRP和管内加筋是提高钢管混凝土构件抗弯强度的主要方法。但在实际应用中,许多钢管混凝土构件难以采用CFRP缠绕或管内加筋来提高抗弯强度,如应用于巷道支护的钢管混凝土支架^[19-20]。因此,管外加筋成为特定使用环境下提高钢管混凝土构件抗弯性能的有效方法。文献[30]开展了拱腹焊接圆钢加固钢管混凝土梁的四点弯曲试验,结合数值模拟揭示了拱腹焊接圆钢对钢管混凝土梁的抗弯承载性能提升机制,进一步提出了圆钢强化钢管混凝土梁正截面的弯曲承载性能计算理论。如前所介绍,钢管混

凝土构件通常处于轴力和弯矩共同作用的偏心受压状态下,而有关钢管混凝土偏压构件的抗弯加固研究尚未见到报道。

为此,本文采用ABAQUS软件研究圆钢加固偏压钢管混凝土构件的弯曲性能。首先,建立了圆钢加固钢管混凝土梁的数值模型,并采用试验数据验证了模型的合理性;其次,在钢管混凝土梁有限元模型两端施加大小和方向不变的轴力,然后施加弯曲荷载;通过分析弯矩-挠度曲线、弯矩-纵向应变曲线、环向应变曲线、约束指数和中性轴偏移规律探究了焊接圆钢对钢管混凝土偏压构件弯曲性能的提升机制,进一步分析了圆钢直径和构件长细比对圆钢加固钢管混凝土偏压构件抗弯性能的影响规律。

1 圆钢加固钢管混凝土梁数值模型

1.1 模型概况

基于文献[31]开展的圆钢加固钢管混凝土梁四点弯曲试验建立有限元模型。梁长度为3 620 mm,钢管的外径为194 mm,壁厚为10 mm。6根钢管混凝土梁中,1根不焊接圆钢,用作参考梁,其余5根拱腹分别通长焊接Φ40、Φ45、Φ50、Φ55和Φ60的圆钢。根据拱腹焊接圆钢的直径对试件进行编号,例如“B-50”,“B”为梁的英文缩写,“50”表示拱腹通长焊接Φ50圆钢,“B-0”为参考梁。试验采用四点弯曲试验。试样两端受滚子轴承的约束,允许试件绕平面内弯曲轴旋转。液压千斤顶的集中荷载通过22B工字梁制作的分配梁施加在试件的三分加载点上,三分点间的间距为940 mm。两个支座之间的距离,即梁的有效长度 L_e 为2 820 mm。

1.2 材料本构

钢管与圆钢的应力-应变关系采用文献[32]提出的双折线本构。文献[33]提出的约束混凝土的应力-应变关系被广泛用于模拟钢管混凝土柱偏压性能^[34-35]、钢管混凝土梁^[30]和翼缘钢混梁弯曲性能^[36],并取得较好的效果。钢管混凝土梁、翼缘钢混梁和偏心受压钢管混凝土构件中核心混凝土的应力状态相似,即钢管提供不均匀围压,核心混凝土处于不均匀压缩状态。因此,管内C40混凝土采用文献[33]提出约束混凝土的应力-应变关系。因塑性损伤模型(CDP)具有良好的收敛性,适用于静力学分析和动力学分析,因此本文采用CDP模型模拟混凝土的受力行为。模型中的膨胀角、流动势偏心率、黏度参数、双轴与单轴状态下强度比值(f_{bo}/f_c)以及拉伸子午线上第二应力不变量的比值(K)分别取 36° 、0.1、0、1.16和0.667^[37]。经焊接高温处理后,钢管和圆钢的平均屈服强度和极限强度分别约为395 MPa和560 MPa。

1.3 模型建立

采用ABAQUS软件建模时,混凝土、钢管和圆

钢均采用广泛应用于钢管混凝土结构模拟中的三维八节点实体单元 (C3D8R) 单元。采用面与面接触模拟核心混凝土与钢管之间的相互作用。由于钢管的刚度大于混凝土,因此钢管的内表面设为主表面,混凝土外表面设为从表面。切线方向定义为摩擦接触,摩擦系数取 0.6^[38-39]。法线方向定义为硬接触,仅传递压力。钢管和圆钢之间采用绑定接触,钢

管下部焊接表面定义为主表面,圆钢上部焊接部位表面定义为从表面。支座约束与试验一致,为简支支座。加载方式为在距简支座 940 mm 处施加竖向位移荷载。经网格敏感性分析,有限元模型见图 1。

1.4 模型合理性验证

提取有限元模拟得到的试件跨中弯矩-挠度曲线,并与试验结果进行对比,见图 2。

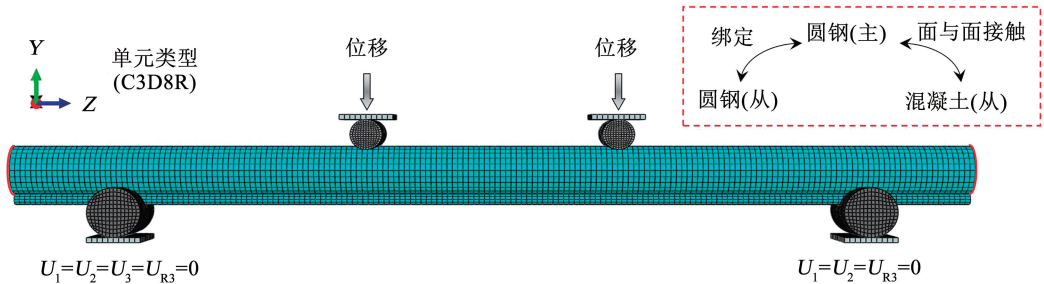


图 1 纯弯数值模型

Fig. 1 Numerical model of pure bending

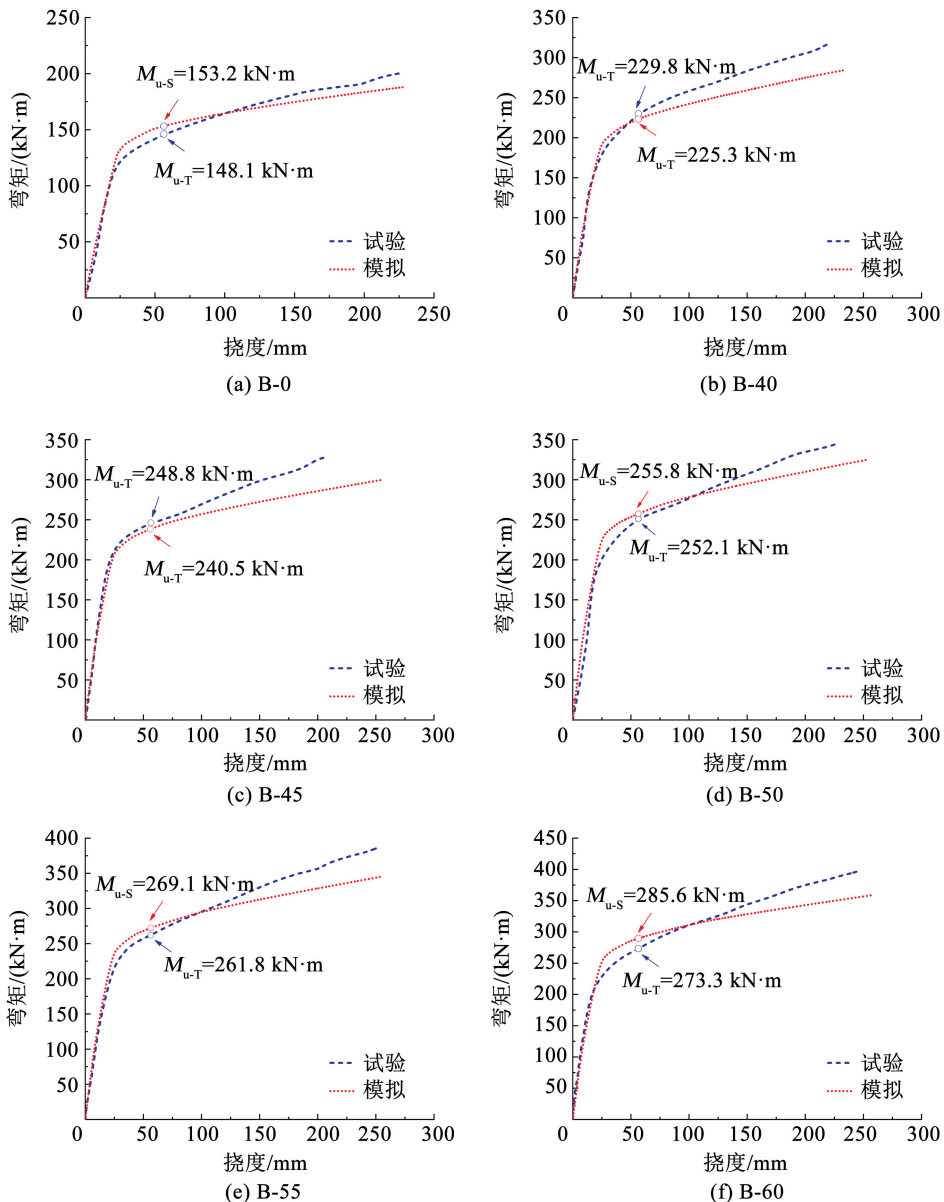


图 2 试验与数值模拟跨中弯矩-挠度对比

Fig. 2 Comparison of bending moment-deflection at mid-span between numerical analysis and test

试验和模拟中所有试件最大竖向位移均大于 $L_e/50 = 56.4 \text{ mm}$ 。因此,根据已有研究^[40],取跨中竖向位移为 $L_e/50 = 56.4 \text{ mm}$ 时对应的弯矩为极限弯矩,提取有限元模拟得到的试件极限弯矩,并与试验测得极限弯矩进行对比,见图2。结果表明,数值模拟与试验得到的6个试件的极限弯矩误差分别为3.44%、-1.96%、-3.34%、1.47%、2.88%和4.50%。另外,从整体上看,试验和数值模拟得到的弯矩-挠度曲线吻合较好。同时,数值模拟的破坏模式为整体弯曲破坏,与试验一致。因此,上述建立的数值模型可以较好地预测圆钢加固偏压钢管混凝土构件的弯曲力学行为。

2 圆钢加固钢管混凝土偏压构件数值模拟

2.1 圆钢加固偏压构件数值模型

圆钢加固偏压构件数值模型的材料属性、截面几何尺寸、钢管与混凝土之间和钢管和圆钢之间的相互作用以及边界条件与纯弯有限元模型完全一致。加载方式为首先在模型两端施加大小与方向不变的轴力,其次在距筒支座 940 mm 处施加竖向位移荷载。

选取轴压比 $n = 0.2$ 时的偏压构件作为研究对象。通过分析弯矩-挠度曲线、弯矩-纵向应变曲线、环向应变曲线、约束指数和中性轴偏移规律,来探究焊接圆钢提升钢管混凝土偏压构件弯曲性能的作用机制。轴压比计算公式为

$$n = \frac{N}{N_u} \quad (1)$$

式中: N 为施加在试件两端的轴力; N_u 为试件在轴心受压状态下的极限承载能力,由于构件属于长柱,在计算轴心受压承载能力时,需考虑长细比对构件承载能力的影响, N_u 按照文献[41]提出的公式计算。

2.2 弯矩-挠度曲线

提取加载过程中钢管跨中挠度和截面弯矩,结果见图3。

如图3所示,圆钢加固梁的抗弯承载能力和弯曲刚度显著提升,且提升幅度随着圆钢直径的增加而增大。钢管混凝土梁的抗弯承载能力随着跨中位移的增大先提升后降低,整体可以分为3个阶段:弹性段、硬化段和下降段。在弹性阶段,由于圆钢、钢管和管内受压区混凝土都处于弹性阶段,梁的抗弯刚度基本保持不变。随后,部件相继屈服,曲线进入硬化段直至弯曲承载力达到最大值。在硬化段,随着荷载的继续增加,曲线呈上凸型,斜率逐渐降低,

表明梁的刚度逐渐降低。当弯矩达到最大值后,随着荷载的继续增加,曲线进入下降段。与参考梁相比,圆钢加固梁下降阶段曲线明显变得平缓,且圆钢直径越大,下降阶段越平缓。

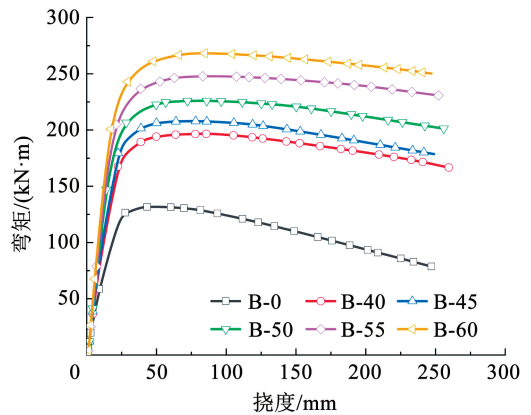


图3 跨中弯矩-挠度曲线

Fig. 3 Curves of bending moment-deflection at mid-span

2.3 弯矩-纵向应变曲线

图4给出了跨中钢管顶底点纵向应变与弯矩的关系曲线,图中拉应变为正,压应变为负。结果表明,当轴压比为0.2时,加载初期钢管底部受压,随着弯矩的增加随后转为受拉,跨中钢管顶部始终处于受压状态。与试件B-0相比,圆钢加固梁受拉区和受压区钢管达到屈服时,对应的弯矩均明显增加,且屈服弯矩随着圆钢直径的增加而增大。另外,随着荷载的增加,无加固参考梁(B-0)底部拉应变逐渐大于顶部压应变。对于圆钢加固梁,钢管底部拉应变的增加小于压应变的增加,且随着圆钢直径的增加,圆钢加固梁的极限拉应变减小,极限压应变增大,说明焊接圆钢可以充分利用受压区钢管的承压性能。

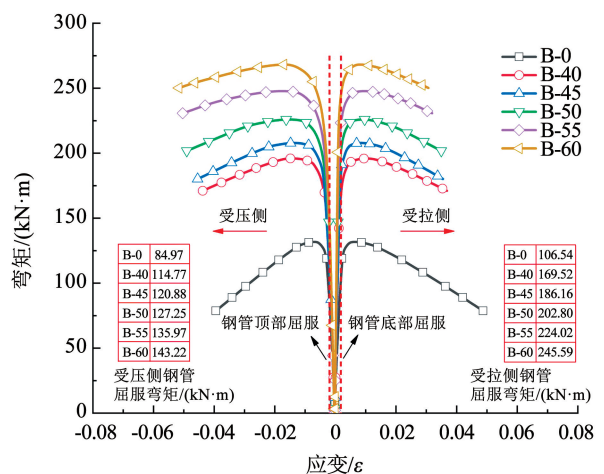


图4 弯矩-纵向应变曲线

Fig. 4 Curves of bending moment-axial strain

2.4 环向应变分布

图 5 以极坐标的形式给出了不同受力阶段试件

B-0 和 B-40 跨中截面弯矩 - 环向应变分布,沿跨中截面共均匀布置 20 个应变提取点。

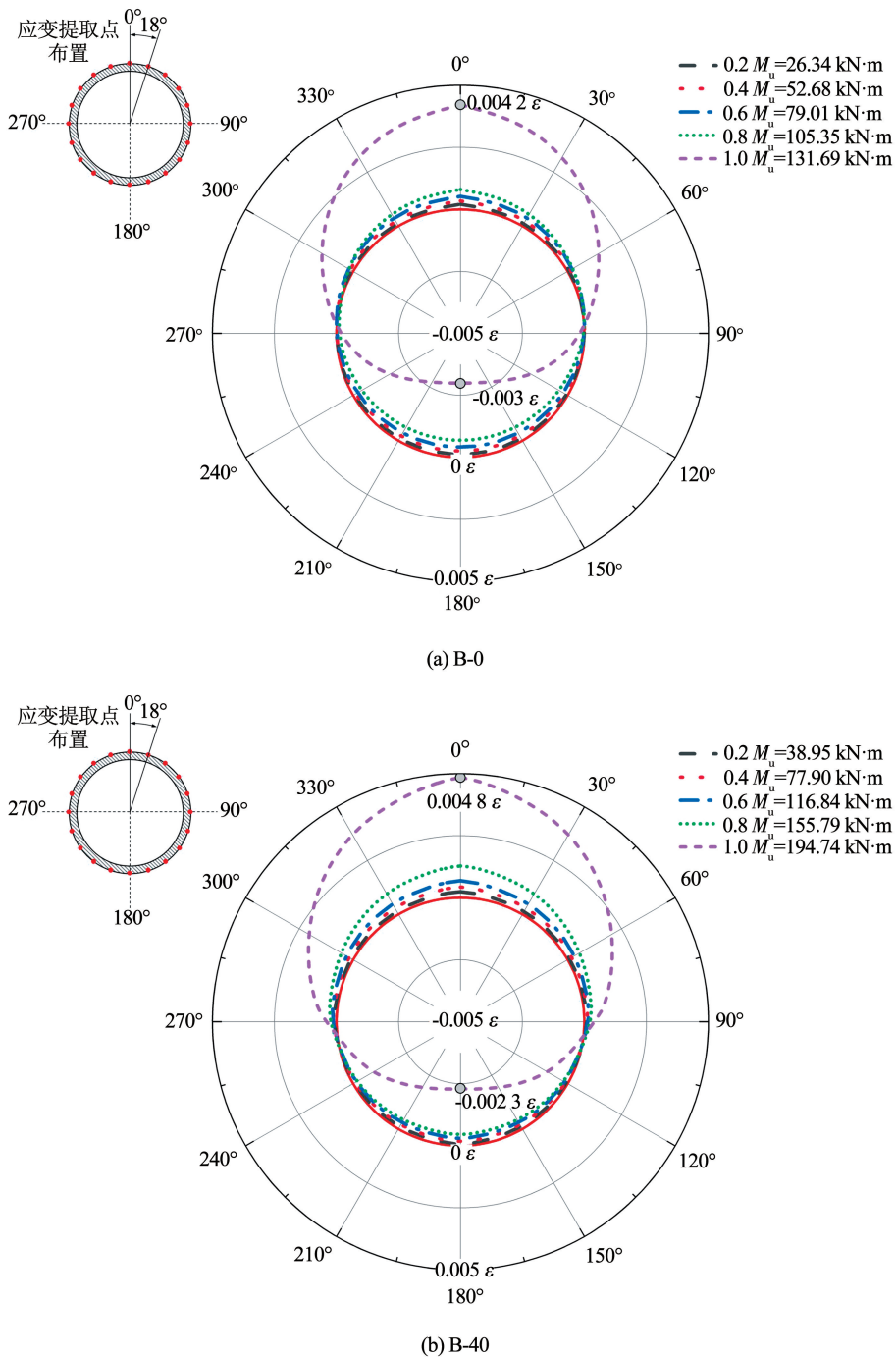


图 5 环向应变分布

Fig. 5 Distribution of hoop strain

从图 5 可以看出,加载初期,钢管环向应变缓慢增加。对于参考梁 B-0,受压侧和受拉侧环向应变增加速率基本一致,达到极限弯矩时,各测点的环向应变出现明显的差异,受压侧环向应变较大,受拉侧环向应变较小;与 B-0 相比,试件 B-40 受压侧环向应变增加速率增加,受拉侧环向应变增加速率降低,达到极限弯矩时,受压侧环向应变远大于受拉侧。

表明试件在加载过程中,由于试件的弯曲变形,跨中钢管截面对混凝土沿圆周的约束效应不均匀,焊接圆钢加固可以充分利用钢管受压侧和受压区混凝土的抗压承载性能。

2.5 约束指数

图 6 给出了钢管顶点环向应变 - 纵向应变曲线。

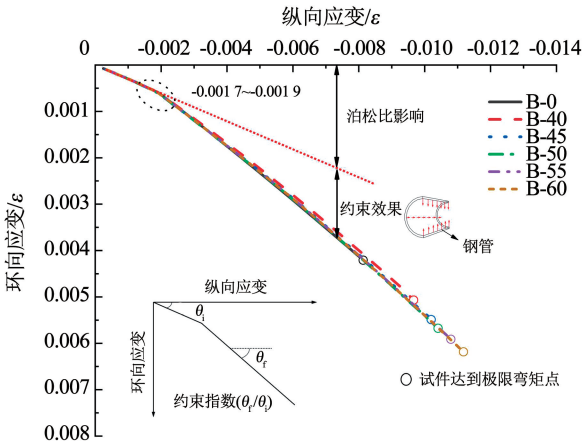


图6 跨中环向和纵向应变曲线

Fig. 6 Curves of hoop strain and axial strain at mid-span

如图6所示,曲线起始斜率反映了钢管泊松比。当钢管纵向应变为 $-0.0017 \sim -0.0019$ 时,曲线斜率增大,增加部分表明了受压区钢管对混凝土的约束效果。钢管对混凝土的约束指数^[42]可以由曲线的曲率变化(θ_r/θ)来确定,计算得到的约束指数为 $1.82 \sim 1.87$ 。从图可以看出,试件的环向应变-纵向应变曲线基本重合,但各部件达到极限弯矩时对应的环向应变和纵向应变随着焊接圆钢直径的增加而增大,说明试件达到极限弯矩时,焊接圆钢加固可以提高弯曲内侧钢管对混凝土的约束,但对约束指数基本没有影响。

2.6 中性轴偏移曲线

提取跨中截面的纵向应变,得到跨中截面中性轴位置与挠度关系曲线,见图7。纵向应变提取点与环向应变提取点一致。分析过程重点关注混凝土开裂、顶部受压区钢管屈服、圆钢屈服、底部受拉区钢管屈服和极限弯矩5个特征点的中性轴偏移规律。

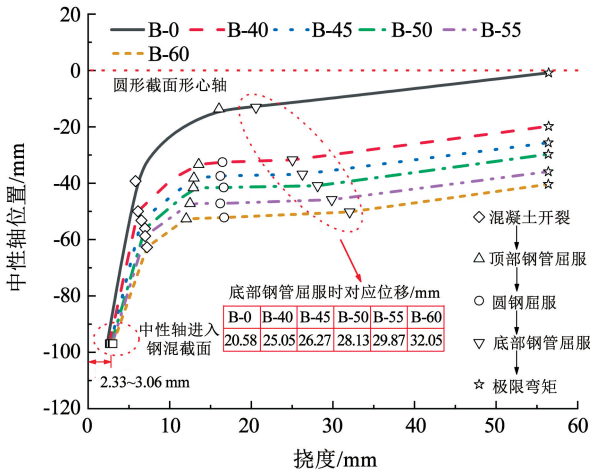


图7 中性轴偏移曲线

Fig. 7 Curves of neutral axis offset

由于试件在加载初期受到轴力作用,当试件

B-0、B-40、B-45、B-50、B-55 和 B-60 的跨中竖向挠度分别达到 2.33 mm、2.61 mm、2.73 mm、2.83 mm、2.95 mm 和 3.06 mm 时,中性轴进入钢管混凝土截面。对于未加固参考梁 B-0,由于混凝土抗压不抗拉,随着弯曲荷载的增加,受拉区混凝土率先开裂,在两端轴力和四点弯曲荷载的作用下,受压区钢管达到屈服,最后受拉区钢管达到屈服。对于圆钢加固梁,混凝土、受压区钢管和受拉区钢管达到屈服的顺序与参考梁 B-0 一致,圆钢屈服点在受压区钢管屈服点和受拉区钢管屈服点之间。中性轴位置随着试件弯曲荷载的增加逐渐往上偏移,偏移速度先快后慢,中性轴的偏移主要发生在顶部钢管达到屈服之前。圆钢加固梁中性轴的位置低于参考梁 B-0,随着圆钢直径的增加,中性轴的位置越低,且焊接圆钢加固对降低中性轴位置效果主要体现在混凝土开裂之后,说明焊接圆钢可以显著地增加受压区混凝土面积。另外,圆钢加固梁 B-40、B-45、B-50、B-55 和 B-60 受拉区钢管达到屈服时对应跨中竖向挠度分别为 20.58 mm、25.05 mm、26.27 mm、28.13 mm、29.87 mm 和 32.05 mm。说明焊接圆钢可以有效地延缓受拉侧钢管屈服,且随着焊接圆钢直径的增加,受拉侧钢管达到屈服对应的跨中竖向挠度越大。

3 圆钢加固钢管混凝土偏压构件参数分析

前述分析表明当轴压比 $n=0.2$ 时,焊接圆钢可以显著提高钢管混凝土偏压构件弯曲性能。因此,本节考虑轴压比为 0.1、0.2、0.4、0.6 和 0.8 时,采用前述建立的模型来研究圆钢直径和构件长细比对钢管混凝土偏压构件弯曲性能的影响。

3.1 圆钢直径对偏压长柱抗弯承载能力的影响

不同轴压比下的跨中弯矩-挠度曲线和 $N-M$ 曲线,如图8所示。图8(d)中 M_{u-60} 为试件 B-60 在纯弯荷载作用下的极限弯矩。

从图8(a)~(c)可以看出,随着轴压比的提高,弯矩-挠度曲线由硬化型转变为软化型,偏压长柱的抗弯承载力降低。焊接圆钢可以有效提高偏压长柱的抗弯承载力,随着焊接圆钢直径的提高,偏压长柱的极限承载力提高,弯矩-挠度曲线由硬化型转变为软化型的临界轴压比增大,弯矩-挠度进入下降阶段的曲线斜率降低。说明焊接圆钢加固可以延缓偏压构件抗弯承载力随着挠度增加而降低的趋势,验证了与参考梁相比,圆钢加固梁下降阶段曲线明显变得平缓的结论。圆钢加固梁的极限弯矩随着轴压比的增大而减小,减小的幅度随着圆钢直径的增加而增大(见图8(d))。

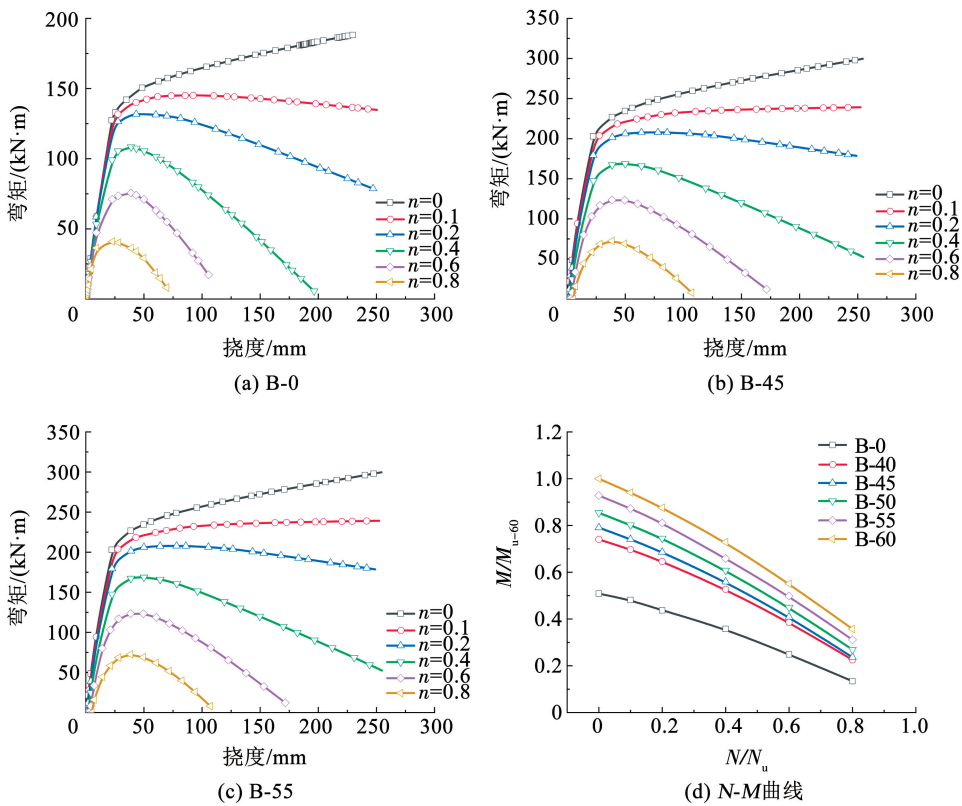


图 8 圆钢直径对偏压长柱承载能力影响

Fig. 8 Influence of round steel diameter on bearing capacity of long columns under eccentric loading

3.2 长细比对偏压构件抗弯承载力的影响

本文选取长度分别为 3 620 mm、2 400 mm、1 800 mm、1 200 mm 和 800 mm 的构件,研究长细比对圆钢加固钢管混凝土偏压构件抗弯承载能力的影响规律。圆形截面钢管混凝土构件的长细比 λ 可由式(2)计算:

$$\lambda = 4L/D \quad (2)$$

式中: L 为构件的长度, D 为钢管的外径。

以焊接 $\Phi 50$ 圆钢加固钢管混凝土构件为研究对象,绘制了不同种长细比的 $\Phi 50$ 圆钢加固构件在偏压荷载作用下的跨中弯矩-挠度曲线和 $N-M$ 曲线见图 9。

如图 9 所示,当长细比 $\lambda = 16.5$ 时,圆钢加固钢管混凝土构件的弯矩-挠度曲线为硬化型(图 9(a))。随着长细比的增加,构件的弯矩-挠度曲线由硬化型转化为软化型的临界轴压比降低(图 9(b)、9(c)),说明轴压比对抗弯承载能力的影响随着构件长细比的增加而增大。这是由于钢管混凝土构件在承受偏心荷载作用后,将产生纵向变形,对于长细比较小的构件,纵向变形较小,可以忽略不计,而对长细比较大的构件,纵向变形较大,需考虑轴力和纵向变形引起的附加弯矩的影响,且附加弯矩随着纵

向荷载即轴压比的增加而增大。不同长细比圆钢加固钢管混凝土构件的极限弯矩随着轴压比的增加而减小,且减小的幅度随着长细比的增加而增大(图 9(d))。

3.3 焊接圆钢对偏压构件的加固效果

为直观地观察焊接圆钢对不同长细比的偏压构件抗弯承载能力的提升效果,根据提取数据绘制圆钢加固构件极限弯矩提升曲线,见图 10。符号 η 表示在相同轴压比下 $\Phi 50$ 圆钢加固构件相对于未加固构件极限弯矩提升比值;符号 ζ 表示当长细比为 $\lambda = 74.6$ 时,相同轴压比下焊接不同直径圆钢加固构件相对于未加固构件极限弯矩提升比值。

从图 10 可以看出,当长细比 $\lambda > 37.1$ 时,圆钢加固构件的极限弯矩提升效果随着轴压比的增加而增大,速率先慢后快;当长细比 $\lambda \leq 37.1$ 时,圆钢加固构件的极限弯矩提升效果随着轴压比的增加先下降后有小幅上升。从曲线整体上来看,焊接圆钢对于长细比大的构件加固效果更好(见图 10(a))。当长细比 $\lambda = 76.4$ 时,焊接不同直径圆钢加固构件极限弯矩提升比值随着轴压比的增加而增大,且相同轴压比下圆钢加固构件极限弯矩提升幅度随着圆钢直径的增加而增大(见图 10(b))。

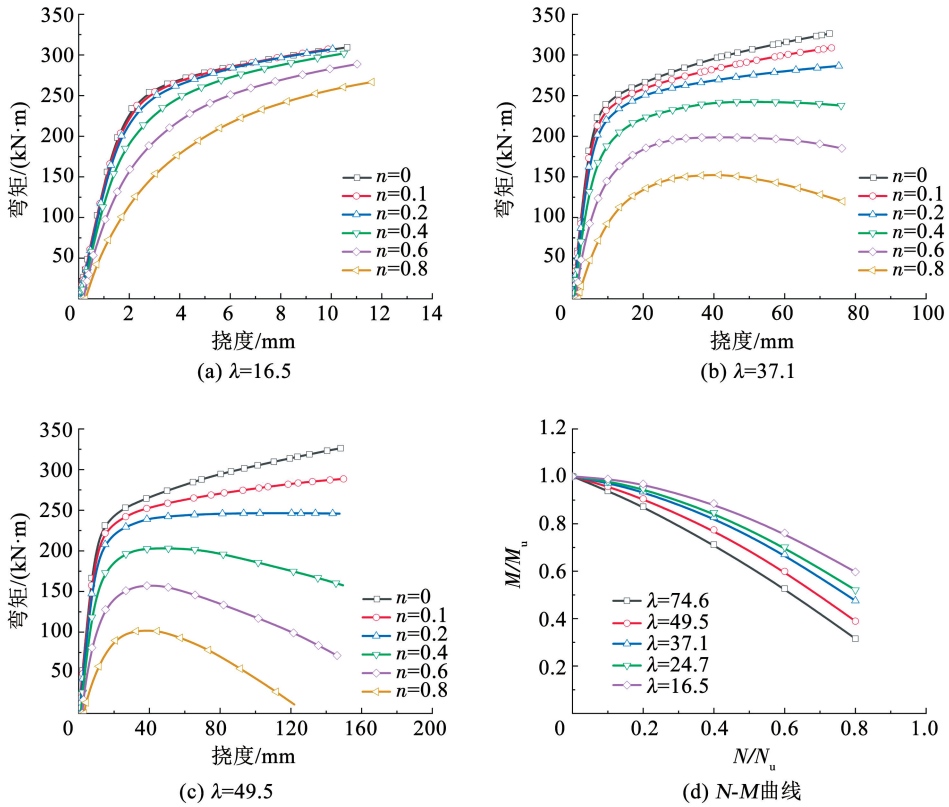


图 9 长细比对偏压构件承载能力影响

Fig. 9 Influence of slenderness ratio on bearing capacity of eccentric members

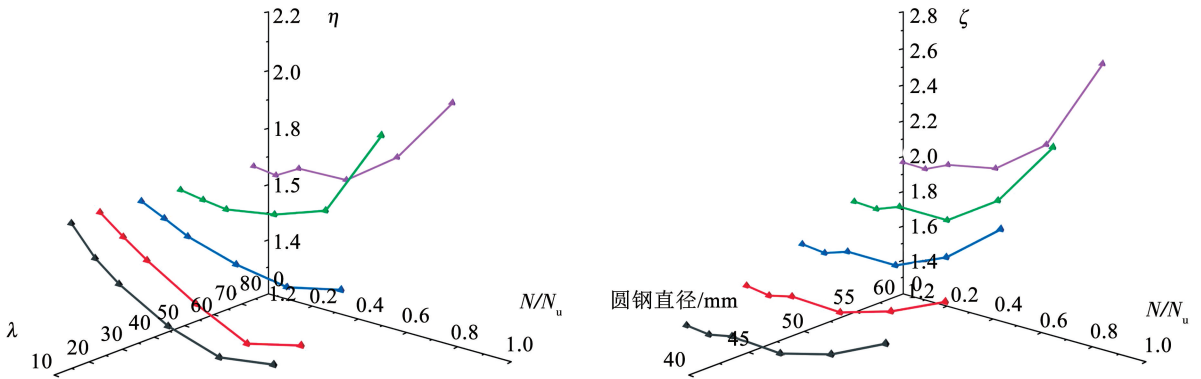


图 10 圆钢加固构件极限弯矩提升曲线

Fig. 10 Ultimate bending moment improvement curves of members reinforced with round steel

4 结 论

建立了圆钢加固钢管混凝土偏压构件有限元模型,通过对弯矩-挠度曲线,弯矩-纵向应变曲线、环向应变分布、约束指数和中性轴偏移规律分析,揭示了圆钢加固钢管混凝土偏压构件弯曲性能提升机制,并讨论了圆钢直径和构件长细比对不同轴压比下的偏压构件弯曲性能的影响。主要结论如下:

1) 得益于圆钢本身的抗弯性能和焊接圆钢有效地激发了管内混凝土的抗压能力,受拉侧焊接圆钢可以延缓钢管混凝土偏压构件受拉区钢管屈服,

有效提高钢管混凝土偏压构件的弯曲刚度和抗弯承载能力。

2) 圆钢加固钢管混凝土偏压构件的弯矩-挠度曲线由硬化型转化成软化型的临界轴压比随着焊接圆钢直径的增加而增大,随着构件长细比的增加而减小。

3) 整体而言,焊接圆钢对大长细比钢管混凝土偏压构件的弯曲性能的提升效果更好;对于大长细比偏压构件,弯曲性能提升效果随着轴压比的增加而增大,且相同轴压比下提升幅度随着圆钢直径的增加而增大。

参考文献

- [1] 钟善桐. 钢管混凝土结构在我国的应用和发展[J]. 建筑技术, 2001, 32(2): 80
ZHONG Shantong. Application and development of concrete-filled steel tube structure in China[J]. Architecture Technology, 2001, 32(2): 80. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4726.2001.02.001
- [2] 陈宝春, 韦建刚, 周俊, 等. 我国钢管混凝土拱桥应用现状与展望[J]. 土木工程学报, 2017, 50(6): 51
CHEN Baochun, WEI Jiangan, ZHOU Jun, et al. The application status and prospect of concrete-filled steel tube arch bridge in China[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(6): 51. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2017.06.006
- [3] 高延法, 王波, 王军, 等. 深井软岩巷道钢管混凝土支护结构性能试验及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增刊1): 2605
GAO Yanfa, WANG Bo, WANG Jun, et al. Performance test and application of concrete-filled steel tube supporting structure for soft rock roadway in deep mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(Sup.1): 2605
- [4] 蔡绍怀, 邸小坛. 钢管混凝土偏压柱的性能和强度计算[J]. 建筑结构学报, 1985(4): 37
CAI Shaohuai, DI Xiaotan. Performance and strength calculation of concrete filled steel tube columns under eccentric compression[J]. Journal of Building Structures, 1985(4): 37. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.1985.04.004
- [5] 李四平, 霍达, 王菁, 等. 偏心受压方钢管混凝土柱极限承载力的计算[J]. 建筑结构学报, 1998, 19(1): 45
LI Siping, HUO Da, WANG Jing, et al. Calculation of ultimate bearing capacity of concrete-filled square steel tube columns under eccentric compression[J]. Journal of Building Structures, 1998, 19(1): 45
- [6] 余志武, 丁发兴. 圆钢管混凝土偏压柱的力学性能[J]. 中国公路学报, 2008, 21(1): 43
YU Zhiwu, DING Faxing. Mechanical properties of concrete filled circular steel tube columns under eccentric compression[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(1): 43. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2008.01.008
- [7] 陶忠, 韩林海, 黄宏. 方中空夹层钢管混凝土偏心受压柱力学性能的研究[J]. 土木工程学报, 2003, 36(2): 37
TAO Zhong, HAN Linhai, HUANG Hong. Research on the mechanical properties of eccentrically compressed concrete-filled steel tube columns with square hollow sandwich [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(2): 37. DOI: 10.3321/j.issn:1000-131X.2003.02.007
- [8] 张素梅, 郭兰慧, 王玉银, 等. 方钢管高强混凝土偏压构件的试验研究与理论分析[J]. 建筑结构学报, 2004, 25(1): 21
ZHANG Sumei, GUO Lanhui, WANG Yuyin, et al. Experimental research and theoretical analysis of high-strength concrete square steel tube members under eccentric compression[J]. Journal of Building Structures, 2004, 25(1): 21. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6869.2004.01.003
- [9] 陈宗平, 李启良, 张向冈, 等. 钢管再生混凝土偏压柱受力性能及承载力计算[J]. 土木工程学报, 2012, 45(10): 78
CHEN Zongping, LI Qiliang, ZHANG Xiangang, et al. Mechanical performance and bearing capacity calculation of eccentrically compressed steel tube recycled concrete columns[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(10): 78. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2012.10.013
- [10] 陈宝春, 王来永, 欧智菁, 等. 钢管混凝土偏心受压应力—应变试验研究[J]. 工程力学, 2003, 20(6): 155
CHEN Baochun, WANG Laiyong, OU Zhijing, et al. Experimental study on stress-strain of concrete filled steel tube under eccentric compression[J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(6): 155. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4750.2003.06.028
- [11] VARMA A H, RICLES J M, SAUSE R, et al. Experimental behavior of high strength square concrete-filled steel tube beam-columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(3): 310. DOI: 10.1061/(asce)0733-9445(2002)128:3(309)
- [12] 李杉, 梁鸿骏, 卢亦焱, 等. 钢管混凝土加固钢筋混凝土方形截面偏压短柱受力性能分析[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(12): 127
LI Shan, LIANG Hongjun, LU Yiyang, et al. Mechanical performance analysis of reinforced concrete square-section eccentric short columns strengthened with concrete-filled steel tube [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(12): 127. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2016.12.016
- [13] 樊华, 王文达, 王景玄. 考虑真实火灾效应的钢管混凝土偏压构件耐火性能数值模拟[J]. 自然灾害学报, 2016, 25(4): 102
FAN Hua, WANG Wenda, WANG Jingxuan. Numerical simulation of fire resistance performance of concrete filled steel tube eccentric compression members considering real fire effects[J]. Journal of Natural Disasters, 2016, 25(4): 102. DOI: 10.13577/j.jnd.2016.0413
- [14] 黄宏, 李婷, 陈梦成. 方中空夹层钢管混凝土压弯扭构件数值模拟[J]. 华东交通大学学报, 2013, 30(4): 25
HUANG Hong, LI Ting, CHEN Mengcheng. Numerical simulation of compression, bending and torsion members of square hollow sandwich steel tube concrete [J]. Journal of East China Jiaotong University, 2013, 30(4): 25. DOI: 10.3969/j.issn.1005-0523.2013.04.005
- [15] HU H, HUANG C, CHEN Zhiliang. Finite element analysis of CFT columns subjected to an axial compressive force and bending moment in combination [J]. Journal of Construction Steel Research, 2005, 61(12): 1694. DOI: 10.1016/j.jcsr.2005.05.002
- [16] AN Yufeng, HAN Linhai. Behaviour of concrete-encased CFST columns under combined compression and bending[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 101: 316. DOI: 10.1016/j.jcsr.2014.06.002
- [17] HAN Linhai, YAO Guohuang, TAO Zhong. Behaviors of concrete-filled steel tubular members subjected to combined loading [J]. Thin-Walled Structures, 2007, 45(6): 601. DOI: 10.1016/j.tws.2007.04.008
- [18] OUYANG Y, KWAN A K H, LO S H, et al. Finite element analysis of concrete-filled steel tube (CFST) columns with circular sections under eccentric load [J]. Engineering Structures, 2017, 148: 387. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.06.064
- [19] LIU Dejun, ZUO Jianping, WANG Jun, et al. Bending failure mechanism and strengthening of concrete-filled steel tubular support [J]. Engineering Structure, 2019, 198: 109449. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.109449
- [20] 刘德军, 左建平, 刘海雁, 等. 我国煤矿巷道支护理论及技术的现状与发展趋势[J]. 矿业科学学报, 2020, 5(1): 23
LIU Dejun, ZUO Jianping, LIU Haiyan, et al. Current status and development trend of coal mine roadway support theory and

- technology in China[J]. *Journal of Mining Science*, 2020, 5(1): 23. DOI: 10.19606/j.cnki.jmst.2020.01.003
- [21] SUNDARRAJA M C, PRABHU G G. Flexural behaviour of CFST members strengthened using CFRP composites [J]. *Steel and Composite Structures*, 2013, 15(6): 623. DOI: 10.12989/scs.2013.15.6.623
- [22] ZHU Yao, CHEN Yu, HE Kang, et al. Flexural behavior of concrete-filled SHS and RHS aluminum alloy tubes strengthened with CFRP[J]. *Composite Structures*, 2020, 238(1): 111975. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.111975
- [23] TAO Zhong, HAN Linhai, ZHUANG Jinping. Cyclic performance of fire-damaged concrete-filled steel tubular beam-columns repaired with CFRP wraps [J]. *Journal of Construction Steel Research*, 2008, 64(1): 37. DOI: 10.1016/j.jcsr.2007.02.004
- [24] TAO Zhong, HAN Lihai, WANG Lingling. Compressive and flexural behavior of CFRP-repaired concrete-filled steel tubes after exposure to fire[J]. *Journal of Construction Steel Research*, 2007, 63(8): 1116. DOI: 10.1016/j.jcsr.2006.09.007
- [25] HADI M N S, KHAN Q S, SHEIKH M N. Axial and flexural behavior of unreinforced and FRP bar reinforced circular concrete filled FRP tube columns[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 122: 43. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.044
- [26] CHEN Yu, FENG Ran, HE Kang, et al. Flexural behaviour of concrete-filled stainless steel SHS and RHS tubes strengthened by CFRP [J]. *Thin-Wall Structures*, 2018, 122: 208. DOI: 10.1016/j.jcsr.2006.09.007
- [27] FENG Ran, CHEN Yu, WEI Jiangang, et al. Experimental and numerical investigations on flexural behaviour of CFRP reinforced concrete-filled stainless steel CHS tubes [J]. *Engineering Structures*, 2018, 156: 305. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.11.032
- [28] LI Guochang, ZHAN Zhichang, YANG Zhijian, et al. Behavior of concrete-filled square steel tubular stub columns stiffened with encased I-section CFRP profile under biaxial bending[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 169: 106065. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106065
- [29] 韩祎, 王景玄, 王文达. 内配型钢方钢管混凝土偏压构件受火全过程数值模拟[J]. *工程力学*, 2015, 32(增刊1): 61
HAN Yi, WANG Jingxuan, WANG Wenda. Numerical simulation of the whole process of internally fitted steel square concrete filled steel tubular members subjected to eccentric compression [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(Sup. 1): 61. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.05.S013
- [30] LIU Dejun, XIA Zhiheng, WANG Jun, et al. Flexural strengthening mechanism of concrete-filled steel tube beam by welding round steel at soffit of the beam[J]. *Structures*, 2021, 34: 2243. DOI: 10.1016/j.istruc.2021.08.081
- [31] 王军. 钢管混凝土圆拱的抗弯力学性能实验研究与工程应用 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2014
WANG Jun. Experimental study on flexural mechanical properties of concrete filled steel tubular circular arch and its engineering application [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2014
- [32] 韩林海. 钢管混凝土结构——理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 68
HAN Linhai. Concrete filled steel tubular structures——theory and practice[M]. Beijing: Science Press, 2006: 68
- [33] HU H, HUANG C, WU Mingwu, et al. Nonlinear analysis of axially load concrete-filled tube columns with confinement effect [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2003, 129(10): 1323. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:10(1322)
- [34] LEE S H, UY B, KIM S H, et al. Behavior of high-strength circular concrete filled steel tubular (CFST) column under eccentric loading [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2011, 67(1): 3. DOI: 10.1016/j.jcsr.2010.07.003
- [35] ELLOBODY E. Numerical modelling of fiber reinforced concrete-filled stainless steel tubular columns [J]. *Thin-Wall Structures*, 2013, 63: 5. DOI: 10.1016/j.tws.2012.10.005
- [36] AL-DUGELE R, CASHELL K A, AFSHAN S. Flexural behaviour of concrete filled tubular flange girders [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2018, 151: 266. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.09.017
- [37] KMEIECIK P, KAMINSKI M. Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into consideration [J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2011, 11(3): 625. DOI: 10.1016/S1644-9665(12)60105-8
- [38] LIU Dejun, ZUO Jianping, WANG Jun, et al. Large deformation mechanism and concrete-filled steel tubular support control technology of soft rock roadway: a case study [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2020, 116: 104721. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2020.104721
- [39] LI Guochang, ZHAN Zhichang, YANG Zhijian, et al. Behavior of concrete-filled square steel tubular stub columns stiffened with encased I-section CFRP profile under biaxial bending[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2020, 169: 106065. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106065
- [40] CHEN Yu, FENG Ran, GONG Wenzhi. Flexural behavior of concrete-filled aluminum alloy circular hollow section tubes [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 165: 178. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.104
- [41] 韩林海, 杨有福. 现代钢管混凝土结构技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 81
HAN Linhai, YANG Youfu. Modern concrete filled steel tubular structure technology[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004: 81
- [42] AHMED A, HASSAN M, MASMOUDI R. Flexural performance of unbonded posttensioned rectangular concrete filled FRP tube beams [J]. *Journal of Composites for Construction*, 2020, 24(5): 04020058. DOI: 10.1061/(asce)cc.1943-5614.0001063