

CFRP布带加固T形截面混凝土柱轴心受压试验

程东辉,高佩罡,曹佳丽

(东北林业大学土木工程学院,黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要 目的 研究轴心压力作用下碳纤维(CFRP)布加固T形截面混凝土柱力学性能。方法 设计制作9根T形截面混凝土柱,其中1根为未采用CFRP布约束的普通混凝土柱,其余8根混凝土柱分成两组,每组包含3根CFRP布用量相同、但是CFRP布的幅宽和净间距不同的试验柱,以及1根CFRP布沿柱高方向全包裹的试验柱,其中第Ⅱ组试件在T形截面柱翼缘与腹板转角处利用角钢对CFRP布进行锚固。通过静载试验获得各试件受压极限承载力、构件破坏模式以及材料的应力变化等试验数据。结果 CFRP布带加固T形截面混凝土柱,当CFRP布用量相同时,同等情况下T形截面柱极限承载力提高幅度随着CFRP布带净间距的减小而增大;在轴心压力作用下,在T形柱翼缘与腹板转角处采取适当的CFRP布锚固措施,能够较好发挥CFRP布的抗拉强度,提高构件的极限承载力。结论 CFRP布带加固T形柱,能够在节约材料的基础上获得良好的加固效果。

关键词 T形截面混凝土柱;CFRP布带;极限承载力;轴心受压

中图分类号 TU375.3

文献标志码 A

Axial Compression of T-section Concrete Columns Strengthened with CFRP Strip

CHENG Donghui, GAO Peigang, CAO Jiali

(School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, China, 150040)

Abstract: In order to carry out the study on the mechanical properties of T-shaped cross-section concrete columns reinforced with carbon fiber (CFRP) sheets under axial pressure, 9 T-section concrete columns were designed, one of them is an ordinary concrete column that is not constrained by CFRP cloth, the remaining 8 concrete columns are divided into two groups, each group contains 3 test columns with the same amount of CFRP cloth, but different widths and net spacing of CFRP

收稿日期:2020-09-18

基金项目:国家自然科学基金项目(51908108);中央高校基本科研业务费创新团队与重大项目培育资金项目(2572016EBC1)

作者简介:程东辉(1971—),男,教授,博士,主要从事钢筋混凝土结构及预应力钢筋混凝土结构方面研究。

cloth, and 1 column with CFRP cloth fully wrapped along the height of the column. At the second group of test pieces, the CFRP cloth at the corner of flange and web of the T-section column is anchored by angle steel. Through static load test, the test data of the ultimate load capacity of the specimen, the failure mode of the member, and the stress change of the material are obtained. The results show that ultimate bearing capacity of T-section concrete columns strengthened with CFRP cloth increases with the decrease of the CFRP cloth net spacing under the same conditions when the consumption of CFRP cloth is same; Under axial pressure, appropriate CFRP cloth anchoring measures at the corner of flange and web of the T-section column, the tensile strength of CFRP can be full exerted and the ultimate bearing capacity of the members can be improved. So T-section column strengthened with CFRP cloth can save material and attain good reinforcement effect.

Key words: T-section concrete column; CFRP cloth; ultimate bearing capacity; axial compression

在结构纵横墙交接处、平面转折处等部位采用 T 形、L 形等异形截面柱^[1-6], 相较于矩形截面柱具有减轻结构自重、使室内空间更加整洁、提高空间布置灵活性等优势, 在满足广大人民群众实际需求的同时也实现了节约资源和保护环境的目的。但随着时间的增长, 部分既有建筑在使用过程中逐渐出现了一系列问题。早期建筑物的使用功能可能发生改变, 实际使用荷载增加, 导致原有体系不能满足新的承载力要求。由于新旧设计规范标准不同, 导致一些既有建筑不能满足当前规范的功能要求, 难以继续使用。长期使用过程中材料老化、腐蚀性介质侵蚀等因素也会导致建筑物使用寿命缩短或承载力降低。M. N. Youssef^[7]通过对纤维增强聚合物(Fiber Reinforced Polymer, FRP)约束下的轴心受压混凝土柱的应力-应变关系曲线进行试验研究, 发现受压柱存在 FRP 约束强、弱之分, 并依据试验给出了关于强、弱约束临界点的判断公式。朱俊涛等^[8]采用 CFRP 布带面积占圆柱表面积的 30% 和 50% 的两种加固率加固不同损伤程度的混凝土圆柱, 并对其进行轴心受压试验研究, 损伤程度相同的试件, 当增加 CFRP 布用量时, 其极限承载力和延性随之增大; 当 CFRP 布带面积一定时, 混凝土柱损伤程度越大其极限承载力越低, 且当损伤程度超过 0.6 时, 此时混凝土柱出现竖向微裂缝, 极限承载力下降较快。熊进

刚等^[9]进行了 8 根 CFRP 布加固混凝土方形截面柱的轴心受压试验, 分析了 CFRP 布不同净间距、不同幅宽、不同转角曲率半径等因素对加固效果的影响。CFRP 布净间距越小, 混凝土柱极限承载力提高越大; CFRP 布幅宽越大, 混凝土柱极限承载力提高越明显、变形能力越好; 此外, 柱承载能力的提高与柱转角曲率半径的增大并不呈线性增长关系, 曲率半径低于 20mm 时, CFRP 布易在转角处撕裂; 曲率半径超过 50 mm 时, 对混凝土截面面积有所削弱, 承载能力受到一定影响。薛鹏娜^[10]研究了在轴心压力作用下, 矩形截面混凝土柱采用 CFRP 布和角钢共同加固方法后柱的力学性能。得到了当采用角钢、CFRP 布单一加固以及 CFRP 布、角钢复合加固方法时, 试验柱的极限承载力、破坏形态以及延性等。当混凝土柱采用角钢、CFRP 布共同加固时, 其破坏形式属于延性破坏, 加固混凝土柱的承载力显著提高, 受力性能得到明显改善。卢亦焱等^[11]进行了 22 根 CFRP 布与角钢复合加固轴心受压混凝土方形截面短柱的试验, 复合加固混凝土方形截面柱充分发挥了 CFRP 布和角钢加固混凝土柱的各自优势, 二者能协调工作、共同作用, 获得良好的力学性能。目前, 在结构加固中, CFRP 布加固、外包角钢加固是其中较为常见的加固方法。由于 CFRP 布具备轻质、高强度、耐腐蚀、施工方便、不增加混凝土构件截面尺寸

以及方便剪裁等优点^[12-18],因此被广泛地应用在实际工程中。但是,利用 CFRP 布对受压构件加固的研究多针对于规则形混凝土受压构件,如矩形、圆形截面柱等,而且在《混凝土结构加固设计规范》(GB50367—2013)利用复合材料对混凝土构件进行约束加固的规定中,尚无异形截面柱的加固设计方法及加固构造措施。为了探究采用 CFRP 布加固对 T 形截面柱力学性能的影响,笔者提出了对 T 形截面柱采用 CFRP 布带加固方式,并依据 CFRP 布用量相同但幅宽和净距不同的状况,设计制作了一定数量的试验柱,对 CFRP 布带加固混凝土 T 形截面柱进行轴心受压试验,CFRP 布带加固 T 形柱,能够在节约材料的基础上获得良好的加固效果。

1 试 验

1.1 试件设计

为了能够准确预测 T 形柱在轴心压力作用下截面应力分布、以期能够采用正确的加固方式,在确定加固方案前利用有限元分析软件对 T 形截面柱开展了轴心压力作用下的应力分析(见图 1)。

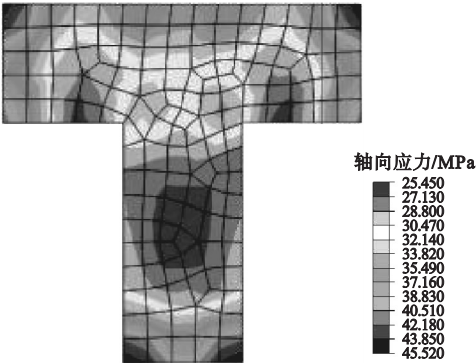


图 1 T 形截面柱轴心压力作用下的应力云图

Fig. 1 Stress nephogram of T column under axial pressure

在轴心压力作用下,T 形截面柱腹板处、翼缘下边缘远离腹板处受压且压应力较大,而翼缘与腹板交界处混凝土受压较小。针对 T 形截面柱的应力分布特点,为了充分发挥 CFRP 布的抗拉强度,可以考虑利用 CFRP 布

沿 T 形截面环绕粘贴,在翼缘与腹板交接处利用角钢对 CFRP 布进行锚固,防止加载过程中该处 CFRP 布与混凝土首先发生剥离。

为验证这种加固方式的合理性,设计制作了 9 根截面尺寸相同的 T 形截面混凝土柱,其中 1 根为普通混凝土柱,其余 8 根柱分成两组,第 I 组含有 4 根试验柱,其中 3 根采用 CFRP 布用量相同、但是 CFRP 布的幅宽和净间距不同的加固方法;第 4 根为 CFRP 布沿柱高方向全包裹的试验柱。第 II 组试件 CFRP 布加固方式与第 I 组完全相同,只是第 II 组试件在翼缘与腹板相交处利用角钢对 CFRP 布进行锚固。T 形柱肢长 300 mm,肢厚 100 mm,混凝土强度等级 C35,截面配置了 10 Φ 10 纵向受力钢筋,钢筋强度等级为 HRB400,箍筋为 Φ 6@100,箍筋强度等级为 HPB300。试件参数如表 1 所示,混凝土加固如图 2 所示。

加固时所用 CFRP 布采用上海牛固建筑科技有限公司产品,其力学性能指标如表 2 所示。浸渍胶采用上海牛固建筑科技有限公司生产的 A、B 双组份无溶剂高强度环氧类胶黏剂按体积比为 2:1 配制,其性能指标如表 3 所示。钢筋材料性能如表 4 所示。

表 1 试件参数及 CFRP 布用量

Table 1 Test piece parameters and CFRP cloth usage

| 组别 | 试件编号 | 柱高度/ mm | CFRP 布 | 幅宽/ mm | 净距/ mm |
|----|----------|------------|--|-----------|-----------|
| | | | 带总面积/ 10 ⁵ mm ² | | |
| I | JGZ - A1 | 1 000 | 6.3 | 150 | 275 |
| | JGZ - A2 | 1 000 | 6.3 | 90 | 137.5 |
| | JGZ - A3 | 1 000 | 6.3 | 65 | 91.7 |
| | JGZ - A4 | 1 000 | 14 | 1 000 | 0 |
| II | JGZ - B1 | 1 000 | 6.3 | 150 | 275 |
| | JGZ - B2 | 1 000 | 6.3 | 90 | 137.5 |
| | JGZ - B3 | 1 000 | 6.3 | 65 | 91.7 |
| | JGZ - B4 | 1 000 | 14 | 1 000 | 0 |

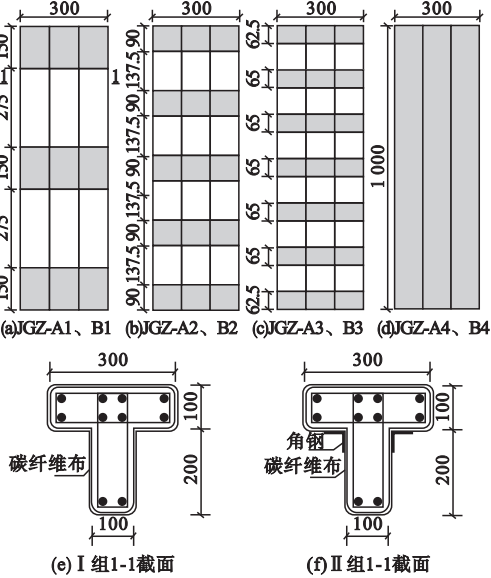


图2 混凝土加固示意图

Fig. 2 Concrete reinforcement diagram

表2 碳纤维布材料性能

| Table 2 CFRP cloth material properties | | | |
|--|----------|-------------------|-------|
| 厚度/mm | 抗拉强度/MPa | 弹性模量/MPa | 伸长率/% |
| 0.111 | 3 710 | 2.5×10^5 | 1.7 |

表3 碳纤维浸渍胶材料性能

| Table 3 Carbon fiber impregnated rubber material performance | | | | |
|--|------------|----------|----------|-------|
| 抗拉强度/MPa | 受拉弹性模量/MPa | 抗压强度/MPa | 粘结强度/MPa | 伸长率/% |
| 35 | 2 500 | 75 | 5.51 | 1.81 |

表4 钢筋材料性能

| Table 4 Rebar material performance | | | |
|------------------------------------|-------|----------|----------|
| 钢筋种类 | 直径/mm | 屈服强度/MPa | 极限强度/MPa |
| HRB400 | 10 | 424 | 590 |
| HPB300 | 6 | 390 | 525 |

1.2 试验加载与数据量测

在5 000 kN 压力试验机上进行加载。试验采用分级加载,前期每级荷载控制在计算极限荷载值的10%,每级加载间隔约为2 min。当荷载达到计算极限荷载的90%

后,以柱轴向位移1 mm/min 进行加载,当承载力下降到极限荷载的60%时停止加载。在CFRP 布带之间的混凝土表面及CFRP 布包裹处的混凝土表面均粘贴应变片,在CFRP 布各表面以及柱的纵向受力钢筋表面粘贴应变片,用以监测各种材料的应力变化。在柱两端设置位移计,用以监测试验试件轴向变形。试验加载及量测装置如图3 所示。

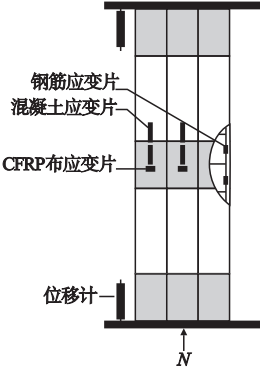


图3 试验加载及量测装置图

Fig. 3 Test loading and measuring device

2 破坏现象

普通混凝土柱 JGZ - 1 在加载过程中,当加载至极限荷载的70%左右时,试件腹板中部表面首先出现裂缝。继续加载,混凝土柱各表面纵向裂缝不断增多,裂缝高度不断发展,当达到承载力极限状态时,柱的腹板底部混凝土被压碎,试件宣告破坏。

第I组试件中,当JGZ - A1 接近极限荷载时,腹板中部、CFRP 布带之间的混凝土表面首先出现裂缝并开展迅速,当试件达到极限承载力时,纵向受力钢筋率先屈服,腹板处混凝土被压碎,试件破坏,破坏时CFRP 布带并未与混凝土发生剥离,破坏是由于CFRP 布带之间的混凝土被压碎引起的。JGZ - A2 和JGZ - A3 两根试件破坏过程大致相同;加载前期试件无明显变化,继续加载,部分环氧树脂胶由于应力过大而开裂,发出“啪啪啪”的响声。临近破坏时,柱下方翼缘、腹板处混凝土外鼓,引起翼缘与腹板转角处CFRP 布

带逐渐发生剥离,混凝土失去约束,加固柱破坏。JGZ - A4 在接近极限荷载时,可以听到间断的碳纤维断裂声,此时腹板两侧混凝土发生明显横向变形,部分 CFRP 布发生剥离,最终伴随着下方翼缘与腹板转角处 CFRP 布的撕裂,试件宣布破坏。

第Ⅱ组试件中,JGZ - B1 在临近极限状态时,翼缘处混凝土裂缝快速发展、腹板中下部区域混凝土外鼓,当达到极限荷载时,混凝土被压碎。JGZ - B2 和 JGZ - B3 两根试件破坏过程大致相同:当接近极限荷载时,裂缝贯穿试件中下部区域,柱表面混凝土剥落,翼缘与腹板相交处角钢均发生一定程度的弯曲,但 CFRP 布带未被拉断。JGZ - B4 加载至极限荷载的 80% 时,可以听到环氧树脂开裂产生的声音,临近极限荷载时,由于腹板中上部混凝土的横向变形,角钢发生明显弯曲。当达到极限荷载时,试件上方未被角钢固定的 CFRP 布发生剥离,混凝土柱被压碎。试件最终破坏现象如图 4 所示。

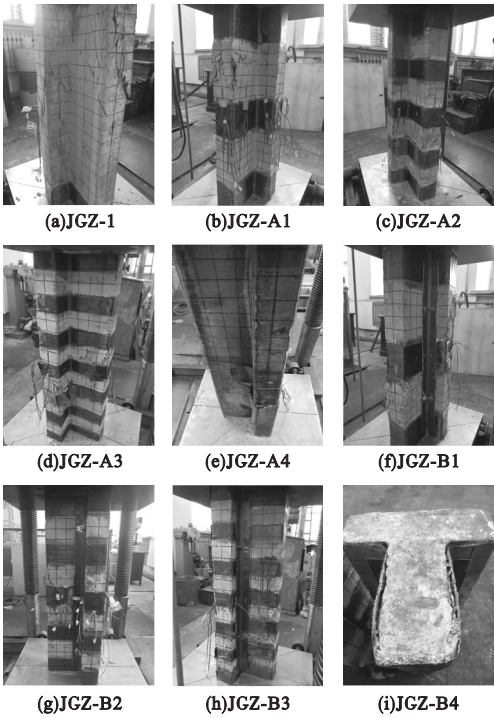


图4 试件破坏现象

Fig. 4 The destruction of each specimen

3 试验结果分析

3.1 承载力分析

混凝土柱的屈服荷载及极限荷载实测值如表 5 所示。

表5 试件承载力

| Table 5 Bearing capacity of each specimen | | | | |
|---|---------|------------|---------|------------|
| 试件编号 | 屈服荷载/kN | 屈服荷载提高幅度/% | 极限荷载/kN | 极限荷载提高幅度/% |
| JGZ - 1 | 1 300 | — | 1 402 | — |
| JGZ - A1 | 1 410 | 8. 46 | 1 530 | 9. 12 |
| JGZ - A2 | 1 500 | 15. 38 | 1 651 | 17. 76 |
| JGZ - A3 | 1 590 | 22. 31 | 1 772 | 26. 39 |
| JGZ - A4 | 1 620 | 24. 62 | 1 861 | 32. 74 |
| JGZ - B1 | 1 523 | 17. 15 | 1 725 | 23. 04 |
| JGZ - B2 | 1 700 | 30. 77 | 1 881 | 34. 16 |
| JGZ - B3 | 1 768 | 36. 00 | 1 960 | 39. 80 |
| JGZ - B4 | 1 804 | 38. 77 | 2 071 | 47. 72 |

3.1.1 CFRP 布对承载力的影响

相较于普通混凝土柱 JGZ - 1, 利用 CFRP 布带加固 T 形截面混凝土柱能够有效地提高极限承载力, 主要是因为 CFRP 布带能够对接触部分的混凝土起到约束作用。构件受荷过程中, 随着荷载的增加, 混凝土内部裂缝逐渐发展, 构件横向变形增大, 引起 CFRP 布带环向约束应力的增加, 该约束应力反作用于构件的混凝土中, 使混凝土承受环向压应力, 限制了混凝土裂缝的发展, 使混凝土的极限压应变得到提高、进而提升了混凝土柱的极限承载力。

3.1.2 翼缘与腹板处角钢的间接作用

翼缘与腹板交接处利用角钢对 CFRP 布进行锚固的第Ⅱ组试件, 其实测承载力明显高于同等情况下的第Ⅰ组试件承载力。其主要原因在于: 前期的应力分析表明, 在轴心压力作用下, T 形构件的腹板处混凝土及翼缘处混凝土的压应力较大, 而翼缘与腹板转角处承受的应力较小。在轴向压力下, 翼缘及腹板的混凝土横向变形容易使转角处 CFRP

布承受法向拉力,该拉力易使 CFRP 布与混凝土剥离,从而导致 CFRP 布的加固失效。第Ⅱ组试件在翼缘与腹板转角处设置角钢,对 CFRP 布起到一定锚固作用,使腹板处的混凝土在荷载作用下发生较大横向变形时,CFRP 布能够充分发挥其抗拉强度,更好地约束了混凝土的横向变形和纵向裂缝的开展,因此第Ⅱ组试件实测极限承载力较第Ⅰ组试件承载力有较大幅度的提升。

3.1.3 CFRP 布的带宽与净间距对承载力的影响

从表 5 可以看出,当 CFRP 布用量相同时,CFRP 布带之间的净间距越小,加固后的极限承载力越大,主要原因在于:在轴向压力作用下,混凝土的横向变形受到 CFRP 布的约束作用,使混凝土处于三向压力作用,CFRP 布对混凝土的环向压力作用随着 CFRP 布距离的增加而逐渐减弱直至消失,因此,在 CFRP 布用量相同时,若 CFRP 布带宽度大而 CFRP 布带净距较远时,布带中间部分的混凝土受到的约束作用不明显,在轴心压力作用下,该处混凝土的横向变形受到的约束小,形成破坏截面,最终该处的混凝土被压碎。反之,若加固时 CFRP 布带间距较小,布带中间的混凝土也受到 CFRP 布带的约束影响,延缓了混凝土裂缝的开展,提高了混凝土极限压应变,进而提高了极限承载力。这也进一步说明两组试件中 CFRP 布沿构件高度方向全部粘贴时的试件承载力最大的原因。

3.2 荷载-轴向位移分析

试验柱的轴向变形可以通过布置在柱上下两端的位移计获得。图 5 为各试件的荷载-位移实测曲线。表 6 为试件实测的屈服位移和极限位移,以及由此计算得到的延性系数。试验过程中各试件的纵向受力钢筋屈服时刻位移值相差不多,之所以第Ⅱ组试件的延性系数比第Ⅰ组延性系数高,就是因为翼缘与腹板转角处设置的角钢起到了很好的锚固作用,使 CFRP 布较好地发挥了抗拉强度,极限

承载力提高幅度较大,因此延性系数较高。

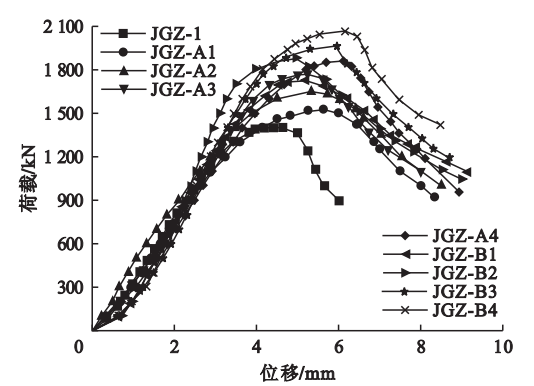


图 5 荷载-轴向位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curve

表 6 试件位移

Table 6 Displacement of each specimen

| 试件编号 | 屈服位移/ | 极限位移/ | 延性系数 |
|--------|-------|-------|------|
| | mm | mm | |
| JGZ-1 | 3.44 | 4.41 | 1.28 |
| JGZ-A1 | 4.33 | 5.63 | 1.30 |
| JGZ-A2 | 3.90 | 5.32 | 1.36 |
| JGZ-A3 | 3.94 | 5.42 | 1.38 |
| JGZ-A4 | 4.34 | 6.11 | 1.41 |
| JGZ-B1 | 3.81 | 5.20 | 1.36 |
| JGZ-B2 | 3.49 | 4.95 | 1.42 |
| JGZ-B3 | 4.15 | 5.95 | 1.43 |
| JGZ-B4 | 4.14 | 6.06 | 1.46 |

注:延性系数为试验柱极限位移与屈服位移的比值。

3.3 荷载作用下 CFRP 布与钢筋应力变化

加载过程中 CFRP 布以及钢筋应力变化情况如图 6 所示,正值、负值分别表示钢筋应力增量和 CFRP 布应力增量。从图 6 可以看出,加载初期,两组试件中 CFRP 布与钢筋应力增量呈线性关系且 CFRP 布应力增量明显小于钢筋应力增量,这是因为加载初期柱的横向变形不大,CFRP 布拉应力较小,荷载主要是由钢筋及混凝土承担。当纵向受力钢筋屈服时继续加载,混凝土的横向变形显著增大,导致 CFRP 布的拉应力增加较快,此后所增加的荷载主要是 CFRP 布的环向约束引起混凝土极限压应变的提高、来承担增加的荷载。

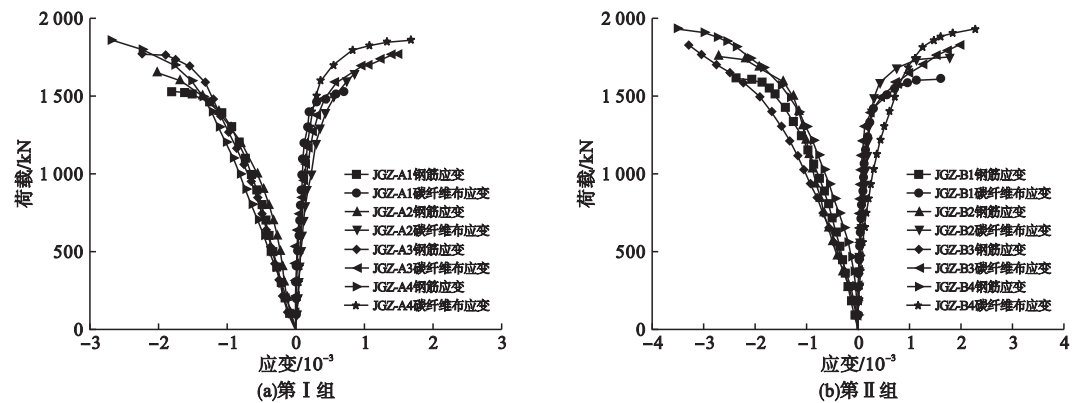


图 6 荷载 - CFRP 布、钢筋应力变化

Fig. 6 Load-CFRP cloth, steel bar stress change

3.4 混凝土应变曲线

图 7 为在荷载作用下,混凝土轴向应力变化的实测曲线。可以看出,加载初期,CFRP 布约束处以及未约束处混凝土应变曲线基本呈线性变化,且在钢筋屈服后混凝土应变值迅速增大,对于同一根试验柱,CFRP 布约束处的混凝土应变值明显高于未约束处混凝土应变值,以 JGZ - B2 为例,当达到极

限承载力时,CFRP 布约束处的混凝土极限压应变达到 4×10^{-3} ,未约束处混凝土应变接近 2.4×10^{-3} ,这说明轴向压力作用引起的混凝土压应变,在 CFRP 布约束处大而在 CFRP 布带之间小,说明 CFRP 布的约束能够有效提高混凝土的极限压应变,改善混凝土柱在轴心压力作用下的力学性能。

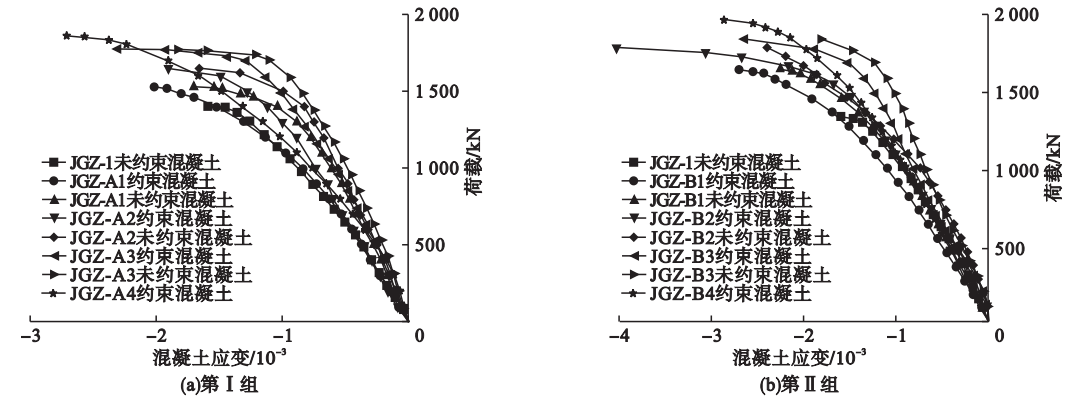


图 7 荷载 - 混凝土应变曲线

Fig. 7 Load-concrete strain curve

4 结 论

(1) 当 CFRP 布用量相同时,同等情况下 T 形截面柱的极限承载力提高幅度与 CFRP 布带净间距有关:净间距越小,提高幅度越大。

(2) 试验过程中,CFRP 布带、混凝土以及纵向受力钢筋体现了较好的协同受力

性能。

(3) 在轴心压力作用下,在翼缘与腹板转角处设置一定的 CFRP 布锚固措施,能够较好发挥 CFRP 布的抗拉强度,提高构件的极限承载力。

(4) 采用 CFRP 布带加固 T 形截面柱,不但具有良好的加固效果,而且提高了加固效果的稳定性,降低加固成本。

参考文献

- [1] YANG Y, ZHANG L, XUE Y C, et al. Experimental research on the fire performance of a special cross-shaped composite column with a high-strength concrete-filled steel tubular core[J]. Advances in structural engineering, 2018, 21(11): 1608–1619.
- [2] WU H P, QIAO Q Y, CAO W L, et al. Axial compressive behavior of special-shaped concrete filled tube mega column coupled with multiple cavities [J]. Steel and composite structures, 2017, 23(6): 633–646.
- [3] CHEN Z P, XU J J, CHEN Y L, et al. Axial compression ratio limit values for steel reinforced concrete (SRC) special shaped columns[J]. Steel and composite structures, 2016, 20(2): 295–316.
- [4] 王晓林. 钢筋混凝土异形柱结构及其构件受力性能分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2011. (WANG Xiaolin. The mechanical behavior analysis of R.C structure with specially shaped columns and related components[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2011.)
- [5] 薛建阳, 刘祖强, 赵鸿铁, 等. 型钢混凝土异形柱结构受力性能研究的发展现状[J]. 工业建筑, 2014, 44(3): 134–146. (XUE Jianyang, LIU Zuqiang, ZHAO Hongtie, et al. State of the art research on mechanical performance of steel reinforced concrete irregular section column structures [J]. Industrial construction, 2014, 44(3): 134–146.)
- [6] 崔熙光, 万广宇, 田虹. CFRP 加固钢筋混凝土腹板受拉 L 形柱的试验研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2008, 24(3): 402–406. (CUI Xiguang, WAN Guangyu, TIAN Hong. Experimental study on reinforced concrete web plate tensioned L-shaped columns strengthened with CFRP [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2008, 24(3): 402–406.)
- [7] YOUSSEF M N, FENG M Q, MOSALLAM A S. Stress-strain model for concrete confined by FRP composites [J]. Composites part B: Engineering, 2007, 38(5/6): 614–628.
- [8] 朱俊涛, 王新玲. CFRP 条带加固损伤混凝土柱受压性能试验研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2015, 37(1): 100–105. (ZHU Juntao, WANG Xinling. Experimental study on the axial compression performance of damaged concrete column reinforced by CFRP sheets [J]. Earthquake resistant engineering and retrofitting, 2015, 37(1): 100–105.)
- [9] 熊进刚, 占美森, 唐爱华. 碳纤维布加固混凝土方形截面柱的轴心受压试验及承载力计算[J]. 建筑科学, 2006(6): 4–6. (XIONG Jingang, ZHAN Meisen, TANG Aihua. Experiment and calculation of bearing capacity of concrete columns strengthened with carbon fiber reinforced polymer laminates [J]. Building science, 2006, 22(6): 4–6.)
- [10] 薛鹏娜. 钢筋混凝土轴心受压构件复合加固的试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006. (XUE Pengna. Experimental research on uniaxial compressing structure member composite strengthening [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.)
- [11] 卢亦焱, 史健勇, 赵国藩. 碳纤维布和角钢复合加固轴心受压混凝土柱的试验研究[J]. 建筑结构学报, 2003, 24(5): 18–23. (LU Yiyang, SHI Jianyong, ZHAO Guofan. Experimental research on concrete columns strengthened with the combination of CFRP and angle steel [J]. Journal of building structures, 2003, 24(5): 18–23.)
- [12] WANG K, CHEN Y, WAN J. Compressive behavior of post-heated circular CFST short columns externally strengthened with CFRP sheets [J]. Journal of adhesion science and technology, 2018, 32(8): 833–853.
- [13] SHARUNH B S S, K N C. Review on carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and their mechanical performance [J]. Materials today: proceedings, 2019, 19(2): 658–662.
- [14] BURAK D, ONUR K. Effectiveness of seismic repairing stages with CFRPs on the seismic performance of damaged RC frames [J]. Structural engineering and mechanics, 2018, 67(3): 233–244.
- [15] 来文汇, 潘景龙, 金熙男. 三种不同截面形状 FRP 约束混凝土应力-应变关系的试验研究 [J]. 工业建筑, 2004, 34(10): 81–84. (LAI Wenhui, PAN Jinglong, JIN Xinan. Experimental study on stress-strain relationship of FRP confined concrete with three different section shapes [J]. Industrial construction, 2004, 34(10): 81–84.)
- [16] 谢志红, 李健章, 郭永昌. 碳纤维增强复合材料条带约束圆弧形方柱轴压性能试验研究 [J]. 工业建筑, 2016, 46(3): 9–13. (XIE Zhihong, LI Jianzhang, GUO Yongchang. Experimental study of axial compressive properties of circularized square columns confined by CFRP strips [J]. Industrial construction, 2016, 46(3): 9–13.)
- [17] 彭亚萍, 刘增夕, 马明. 条带式 FRP 约束混凝土方柱的轴压承载力分析 [J]. 武汉理工大学学报, 2010, 32(3): 24–28. (PENG Yaping, LIU Zengxi, MA Ming. Analysis of axial compressive bearing capacity of square concrete columns confined with striped FRP [J]. Journal of Wuhan university of technology, 2010, 32(3): 24–28.)
- [18] 贾明英, 程华. 不同 FRP 约束混凝土圆柱轴心受压性能试验研究 [J]. 工业建筑, 2002, 32(5): 65–68. (JIA Mingying, CHENG Hua. Experimental research of properties of circular-columns in different FRP shells under axial compression [J]. Industrial construction, 2002, 32(5): 65–68.)

(责任编辑: 徐玉梅 英文审校: 唐玉兰)