

文章编号: 1673-9469 (2018) 01-0038-04

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.01.009

肢长比对 CFRP 布加固钢筋混凝土 L 形柱 力学性能的影响

张云峰, 梅宝瑞, 邬亚滨

(东北石油大学 土木建筑工程学院, 黑龙江 大庆 163318)

摘要: 为研究肢长比对偏压下 CFRP 布加固钢筋混凝土 L 形截面柱的力学性能影响规律, 对不同肢长比的构件进行 ABAQUS 数值模拟。将得到的试验参数进行分析, 结果表明: 随着肢长比的增大, 极限承载力下降; 肢长比越大, 其受拉区 CFRP 布、钢筋两者的抗拉特性发挥得越充分, CFRP 布对承载力提高的幅度越大, 所以 CFRP 布对肢长比较大的钢筋混凝土 L 形柱的加固效果较明显。

关键词: 结构设计; L 形柱; 肢长比; 偏心受压; CFRP 布加固

中图分类号: TU375.3

文献标志码: A

Effect of limb length ratio on the mechanical performance of reinforced concrete L - shaped columns strengthened with CFRP cloth

ZHANG Yunfeng, MEI Baorui, WU Yabin

(School of Civil Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China)

Abstract: In order to study the effect of limb length ratio on the mechanical properties of Reinforced Concrete L - shaped Columns Strengthened with CFRP cloth, numerical simulation of ABAQUS with different limb length ratio is carried out. The obtained test parameters are analyzed, and the result shows: with the increase of limb length ratio, the ultimate bearing capacity decreases; the reinforcing effect of CFRP cloth on L-shaped reinforced concrete columns with larger limbs is obvious. The larger the ratio of the limb length, the larger the bearing capacity is. The tensile properties of both CFRP cloth and steel bar in the tension zone also play a full role.

Key words: architectural design; L shape column; limb length ratio; eccentric compression; CFRP cloth reinforcement

近年来, 由于钢筋混凝土异形柱结构体系的广泛应用, 对于钢筋混凝土异形柱结构体系的探索与研究^[1-5]成为一项重要课题。钢筋混凝土异形截面柱可能面临施工后混凝土浇筑强度低, 设计荷载与实际应用荷载不符合等情况, 因此采用合理的加固方式尤为必要。碳纤维布作为一种相对成熟的加固材料, 对异形柱的加固具有重要意义。目前的发展趋势还主要是碳纤维材料加固传统而且常规的混凝土构件^[6-9], 并且在加固领域具有较为明显的效果。

目前, 关于碳纤维布加固钢筋混凝土异形截面柱的相关研究较为匮乏, 崔熙光等^[10]得出了 L 形截面柱加固的承载力计算公式, 分析碳纤维粘贴量和配筋率对其抗压弯承载力的影响。构件截面几何参数作为影响其力学性能最主要的因素, 其对该组合柱的力学性能影响研究基本没有。本文基于 ABAQUS 有限元分析的结果, 分析肢长比对 CFRP 布加固钢筋混凝土 L 形截面柱的影响规律, 为工程实际应用以及后续学者的研究提供科学依据。

收稿日期: 2017-11-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51308028); 黑龙江省教育厅科学技术项目 (12543023)

作者简介: 张云峰 (1966-), 男, 吉林扶余人, 博士, 教授, 主要从事混凝土结构、组合结构相关研究。

1 有限元模型的验证及试件设计

1.1 有限元模型的建立

1.1.1 本构关系模型

CFRP 布的本构模型是达到材料的极限拉应变 ε_f 前假定该种材料为理想的纯弹性体，当达到 CFRP 布的极限拉应变 ε_f 时，材料发生断裂失去承载能力。为了简化计算的需要，钢材采用理想弹 - 塑性本构模型，混凝土采用混凝土损伤塑性模型。

1.1.2 属性定义

定义混凝土、钢筋、CFRP 布以及端头的本构关系、密度、泊松比、弹塑性等力学参数，其中混凝土塑性损伤模型相关数据如表 1 所示。

作为主要的加固材料的 CFRP 布，其截面属性定义为膜，混凝土柱以及异形柱顶部端头的截面属性设定为均质材料，钢筋的截面属性设定为桁架，设定后把各个截面属性指派给绘制的部件，进而结束部件的绘制以及截面属性的指派。

1.1.3 网格划分

对钢筋混凝土异形柱以及 CFRP 布进行网格划分，其中设置全局单元尺寸为 0.02。刚性端头只是作为一个辅助加载而设计的一个部件，并非主要研究对象，因此其中设置全局单元尺寸为 1，可采用六面体单元，因其具有良好的收敛性，故被广泛地应用。钢筋笼进行相应的网格划分后，通过指派单元类型工具将钢筋笼指派为 T3D2 三维桁架单元，因桁架单元可以有效地反映拉、压杆件的受力情况，故常见的杆件类均选择三维空间桁架单元。混凝土

和刚性端头采用 C3D8R 单元，即实体三维八结点线性六面体单元。异形柱各个部件的网格划分见图 1。

1.1.4 荷载的定义和边界条件

为了得到 CFRP 布加固钢筋混凝土异形截面柱的承载力全曲线，主要采用位移加载方式，从而获得加固前后异形柱的荷载 - 挠度曲线。在荷载模块中定义钢筋混凝土异形柱底端的边界条件，然后通过施加位移荷载，完成对混凝土柱的加载。位移荷载施加在混凝土端头的参考点处。同时约束混凝土柱底面的六个自由度，使混凝土柱完全固定，保证模型的正常计算。

1.2 模型验证

CFRP 布加固钢筋混凝土 L 形柱的有限元模型相关参数与文献 [10] 试验设计的参数一致。分别绘制钢筋混凝土异形截面柱 Z1 和 Z2 的荷载 - 挠度曲线，将模拟曲线与参考文献中的曲线进行相应的对比分析见图 2。

由图 2 可知，模拟试件的曲线与参考文献中的

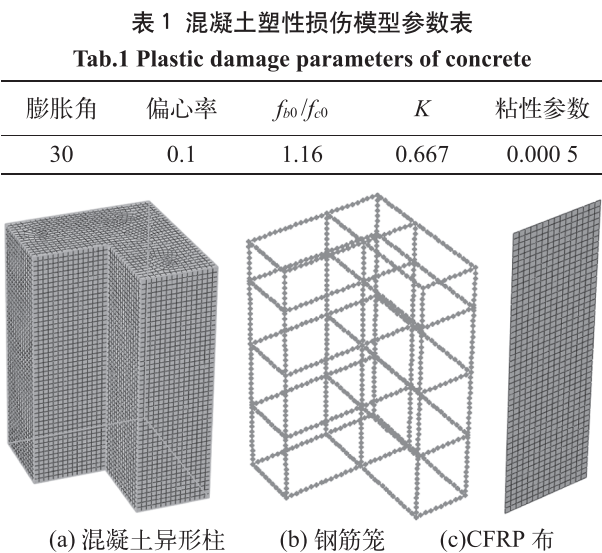


图 1 异形柱网格划分
Fig.1 column grid

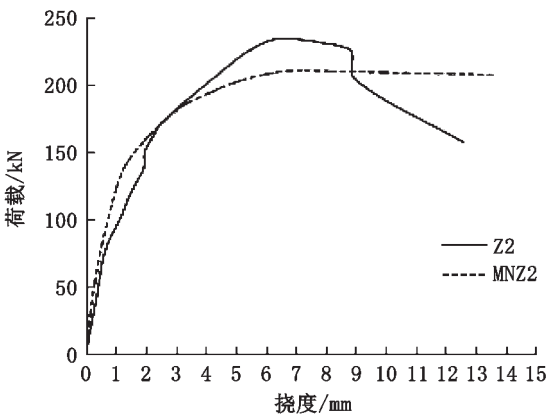
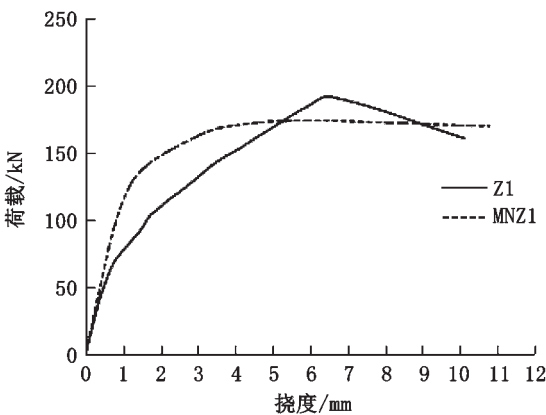


图 2 荷载 - 挠度曲线对比图
Fig.2 Load-deflection curve contrast diagram

曲线大体趋势相一致，变化规律吻合良好。但是曲线并不完全一致，根据需要提取了各个试件的极限承载力进行了对比分析，具体数值如表 2 所示。

由表 2 可知，Z1 的试验试件承载力与模拟试件承载力的误差为 12.6%；Z2 的试验试件承载力与模拟试件承载力的误差为 8.7%。由此可以看出，未加固的钢筋混凝土 L 形柱 Z1 与采用 CFRP 布加固后的 L 形柱 Z2，两个柱的有限元模拟结果和试验结果极限承载力的误差值介于 10% 左右，说明本文所建

表 2 试件承载力
Tab.2 Bearing capacity of specimens

试件编号	试验试件承载力 /kN	模拟试件承载力 /kN	试验与模拟数值误差百分比 /%
Z1	190	174	12.6
Z2	230	210	8.7

立的有限元模型具有较高的准确性。

1.3 试件设计参数

根据《混凝土异形柱结构技术规程》规定，异形柱全部纵向受力钢筋的配筋率，非抗震设计时不应大于 4%；抗震设计时不应大于 3%，故取 1.7%，纵向受力钢筋根数为 20 根。并且按照相关规定，异形柱的肢厚取值范围为 200 mm ~ 300 mm，模拟构件肢厚取值为 300 mm。本文异形柱的柱高皆取 3 300 mm，混凝土强度等级为 C30，钢筋材料为 HRB335。加固 CFRP 布厚度为 0.167 mm，具体参数如表 3。所有加固柱均采用双层加固。

肢长比是指异形柱各个柱肢的比值，对于等肢异形柱而言，其肢长比为 1。L 形截面柱的柱肢总长度为 1 800 mm，近荷载处的柱肢长度分别为 900、1 050 以及 1 200 mm，其肢长比分别 1、1.4、2。具体截面形式如图 3 所示。

本文所设计的试件长细比均小于 17.5，因此可以近似忽略重力二阶效应对异形柱试件的力学性能相关影响。所需模拟试件的具体参数如表 4 所示。

2 有限元结果分析

2.1 不同肢长比作用下构件的荷载－挠度曲线分析

为了研究不同肢长比作用下钢筋混凝异形截面柱加固前后构件挠度的影响，绘制荷载－挠度曲线如图 4 所示。

钢筋混凝异形截面柱在使用 CFRP 布加固后，

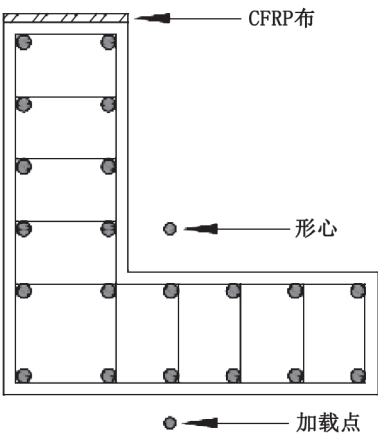


图 3 L 形截面柱及加载图
Fig.3 L-shaped section column and loading diagram

表 3 CFRP 布参数
Tab.3 The parameter of CFRP cloth

材料名称	理论厚度 /mm	弹性模量 /(N·mm ⁻²)	面密度 /(g·mm ⁻²)	泊松比
CFRP	0.167	2.4 × 10 ⁵	300	0.17

表 4 试件设计参数
Tab.4 Design parameters of specimens

试件编号	混凝土等级	配筋率	肢长比	CFRP 布粘贴层数	偏心距
LXZ-1	C30	0.017	1	0	3 000
LXZ-2	C30	0.017	1	2	3 000
LXZ-3	C30	0.017	1.4	0	3 000
LXZ-4	C30	0.017	1.4	2	3 000
LXZ-5	C30	0.017	2	0	3 000
LXZ-6	C30	0.017	2	2	3 000

荷载挠度曲线总体规律基本一致，在加载的初期阶段，图 4 中的两条荷载－挠度曲线基本重合且这些曲线的切线斜率相对较大，说明构件整体处于一个弹性受力阶段。荷载的继续增大，图 4(a)、(b) 中的两条荷载－挠度曲线不再重合，但它们切线的斜率却都在逐渐变小，由于本文设计的异形柱为短柱，发生剪切破坏，因此荷载－挠度曲线没有明显的下降段，故认为柱子达到极限承载力后，该构件破坏。

经现象分析得出：在加载的初期，柱受到的荷载较小，核心混凝土发生的纵向变形较小且未开裂，CFRP 布的约束作用还没完全发挥。在这个阶段主要是核心混凝土承受荷载，所以呈现出图 4 中两条荷载－位移曲线重合的情况；随着荷载继续增加，受拉侧混凝土开裂，受拉区 CFRP 布的工作效果越来越明显，就呈现出加固与未加固柱承载力的差值

越来越大；且肢长比越大，混凝土开裂荷载越小，因此 CFRP 布受力越早，其加固效果也越好。

2.2 不同肢长比作用下构件的承载力分析

由上文荷载位移曲线可以看出，不同肢长比对

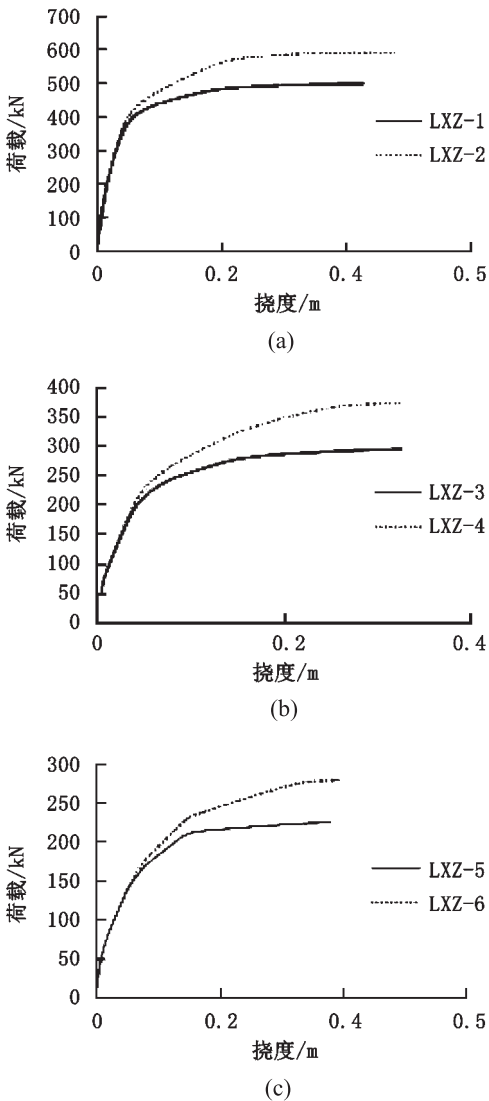


图 4 荷载 - 挠度曲线
Fig.4 Load-deflection curve

CFRP 布加固钢筋混凝土异形柱的极限承载能力有很大影响，故提取出有限元模型中该试件的极限承载力，具体如表 5 及图 5 所示。

从表 5 及图 5 可以得出：在其他参数不变的情况下，随着肢长比的增大，极限承载力下降。黏贴 CFRP 布极限承载力会提高，肢长比是 1 时，加固后的试件，构件极限承载能力提高 19%；在肢长比是 1.4 时，加固后的试件，构件极限承载能力提高 22%；在肢长比是 2 时，加固后的试件，构件极限承载能力提高 24%。

经分析得出：在控制偏心距不变的情况下，随着肢长比的增大，异形柱截面中和轴向受压区移动，使得受拉区钢筋混凝土纵向受拉钢筋所占比例较原来有所减少，故极限承载力逐渐减小。但此时其受拉区 CFRP 布、钢筋更加充分的发挥抗拉特性，其承载力提高的幅度也较为明显。因此，CFRP 布对肢长比较大的钢筋混凝土异形柱加固效果较为明显。

3 结论

1) 在加载的初期，柱受到的荷载较小，核心区混凝土发生的纵向变形较小且未开裂，CFRP 布的

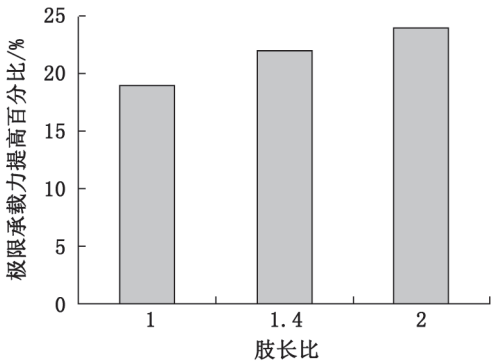


图 5 极限荷载 - 肢长比
Fig.5 Ultimate load - limb length ratio

表 5 各个构件的承载力

Tab.5 The bearing capacity of each component

试件编号	混凝土等级	配筋率	肢长比	CFRP 布粘 贴层数	偏心距	极限承载力 /kN	极限承载力 提高幅度
LXZ-1	C30	0.017	1	0	3 000	495	-
LXZ-2	C30	0.017	1	2	3 000	590	0.19
LXZ-3	C30	0.017	1.4	0	3 000	317	-
LXZ-4	C30	0.017	1.4	2	3 000	388	0.22
LXZ-5	C30	0.017	2	0	3 000	225	-
LXZ-6	C30	0.017	2	2	3 000	278	0.24

(下转第 47 页)

参考文献:

- [1] 李伟, 焦守林, 蒋丽丽. 钢管桁架在输煤栈桥中的应用[J]. 山东煤炭科技, 2015(9): 127-129.
- [2] FUNG T C, SOH C K, GHOWH M, et al. Ultimate capacity of completely overlapped tubular joints I. An experimental investigation[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2001, 57(8): 855-880.
- [3] FUNG T C, SOH C K, GHOWH M, et al. Ultimate capacity of completely overlapped tubular joints II. Behavioral study[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2001, 57(8): 881-906.
- [4] 隋炳强, 罗兴隆, 王发强, 等. 中美欧圆钢管相贯节点设计方法比较[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2012, 29(2): 20-23.
- [5] 严德绪, 万红霞, 王小平. 钢管受拉变截面拼接节点试验及有限元分析[J]. 工业建筑, 2014(6): 112-116.
- [6] 陈汗青, 万艳玲, 王国刚. 数字图像处理技术研究进展[J]. 工业控制计算机, 2013, 26(1): 72-74.
- [7] 程效军, 许诚权, 周行泉. 基于 PhotoModeler Scanner 的普通数码相机快速检校研究[J]. 遥感信息, 2011(4): 80-84.
- [8] 冯文灏. 近景摄影测量[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2002.
- [9] 梁菲. 近景摄影测量在桥梁变形监测中的应用[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2010.
- [10] 郭庆林. 沥青混合料内部应力分布及其对粘弹性能的影响研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.

(责任编辑 王利君)

(上接第41页)约束作用还没完全发挥。随着荷载继续增加, 受拉侧混凝土开裂, 受拉区 CFRP 布的工作效果越来越明显, 于是就呈现出加固与未加固柱承载力的差值越来越大。

2) 在其他参数不变的情况下, 随着肢长比的增大, 极限承载力下降。

3) 黏贴 CFRP 布能提高构件极限承载能力, 当肢长比分别为 1、1.4 和 2 时, 极限承载力分别提高 19%、22% 和 24%。

4) 肢长比越大, 受拉区 CFRP 布、钢筋的抗拉特性发挥的越充分, CFRP 布对承载力提高的幅度越大, 所以 CFRP 布对肢长比较大的钢筋混凝土 L 形柱的加固效果较为明显。

参考文献:

- [1] RONG Bin, FENG Changxi, ZHANG Ruoyu, et al. Compression-bending performance of L-shaped column composed of concrete filled square steel tubes under eccentric compression[J]. International Journal of Steel Structures, 2017, 17(1): 325-337.
- [2] 刘广斌. 钢筋混凝土异形柱抗震性能分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
- [3] 郝彬. 十字形截面方钢管混凝土组合异形柱压弯性能研究及可靠度和优化分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2014.
- [4] 刘红飞. 钢筋混凝土异形柱框架结构抗震性能分析[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2016.
- [5] 施柏楠, 张新培. 混凝土异形柱抗剪承载力可靠度分析及公式调整[J]. 土木工程学报, 2017, 50(2): 18-25.
- [6] DWI Agus Setiawan Wardaya, HANDOKO Sugiharto, PAMUDA Pudjisuryadi. Compressive Strength of Post Fire Exposed Concrete Column Wrapped with Fiber Reinforced Polymer[J]. Civil Engineering Dimension, 2017, 19(2): 105-110.
- [7] OMAR Ahmed Farghal, HESHAM Mohamed Ahmed Diab. Prediction of axial compressive strength of reinforced concrete circular short columns confined with carbon fiber reinforced polymer wrapping sheets[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2013, 32(19): 1406-1418.
- [8] ISSA Moshen A, ALROUSAN Rajai Z, ISSA Moussa A. Experimental and Parametric Study of Circular Short Columns Confined with CFRP Composites[J]. Journal of Composites for Construction, 2009, 13(2): 135-147.
- [9] 曹怀超. 碳纤维布及组合加固改善高强混凝土方柱延性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [10] 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.

(责任编辑 王利君)