

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.03.009

基于 ABAQUS 的钢筋混凝土 单侧加固柱受力性能模拟分析

陈语阳, 关群

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:为研究旧钢筋混凝土柱单侧加固后的受力性能,文章采用 ABAQUS 有限元软件,针对其不同加固截面尺寸、不同侧向力方向、不同初始轴压比等情形,进行单调水平荷载作用下的模拟分析,并与未加固旧柱对比。研究表明:加固后钢筋混凝土柱在 2 个主轴方向侧向承载力显著提高,且随加固截面尺寸的增大而提高,但延性变化不显著;轴压比越大,柱在 2 个主轴方向的侧向承载力提高越显著,但后期延性下降更明显。

关键词:钢筋混凝土柱;单侧加固;承载能力;延性;有限元分析

中图分类号:TU375.3

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2023)03-0341-06

Simulation analysis on mechanical performance of one-side strengthened reinforced concrete columns based on ABAQUS

CHEN Yuyang, GUAN Qun

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to study the mechanical performance of the old reinforced concrete column after unilateral reinforcement, simulation analysis was conducted with different reinforced section sizes, different lateral force directions and different initial axial compression ratios under monotonic horizontal load using ABAQUS finite element software. Compared with unreinforced old columns, the results show that the lateral bearing capacity of reinforced concrete columns in the two main axis directions significantly increases after reinforcement, and increases with the increase of the size of the reinforced section, but the ductility does not change significantly; the greater the axial compression ratio, the more significant the increase in the lateral bearing capacity in the two main axis directions, but the later ductility decreases more significantly.

Key words: reinforced concrete column; one-sided reinforcement; bearing capacity; ductility; finite element analysis

0 引 言

21 世纪以来,人们对建筑安全的关注度越来越高,很多 20 世纪存留的老旧建筑虽然仍在服役,但已明显不符合目前国家相关建筑规范要求^[1-2],且一些建筑物存在设计缺陷和使用隐患,

对人身安全产生种种不利影响。文献[3-5]的研究结果表明,增大截面法即对结构试件进行后加固,对原有建筑物的安全性、抗震性和可靠性提升显著。

对于建筑物的抗震加固有多种方法,相比之下,单侧加固施工简便、节约空间,是一种更经济

收稿日期:2021-04-13;修回日期:2021-05-21

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0701400)

作者简介:陈语阳(1997—),男,安徽安庆人,合肥工业大学硕士生;

关群(1962—),女,江苏扬州人,博士,合肥工业大学教授,硕士生导师。

和环保的加固方式^[6-7],但目前对于单侧加固钢筋混凝土柱的研究仍较少,且结果难以为实际工程提供参考。本文通过 ABAQUS 有限元软件,对不同加固截面尺寸、不同侧向力方向、不同初始轴压比的单侧加固钢筋混凝土柱进行单调水平荷载作用下的模拟分析,并与未加固的旧柱对比,研究其加固后的受力性能和应用意义。

1 模型信息

1.1 试验模型

本模型中,旧柱柱高为 1 470 mm,截面尺寸为 300 mm×300 mm,混凝土强度等级为 C30,纵筋采用直径 12 mm 的 HRB400 级钢筋,箍筋采用直径 8 mm 的 HRB335 级钢筋;新增加固柱截面尺寸有 2 种,分别为 110 mm×300 mm(A 型)和 200 mm×300 mm(B 型),混凝土强度等级为 C35,纵筋采用直径 12 mm 的 HRB400 级钢筋,箍筋型号与旧柱相同;底座尺寸为 1 340 mm×750 mm×500 mm。试件尺寸及配筋如图 1 所示。

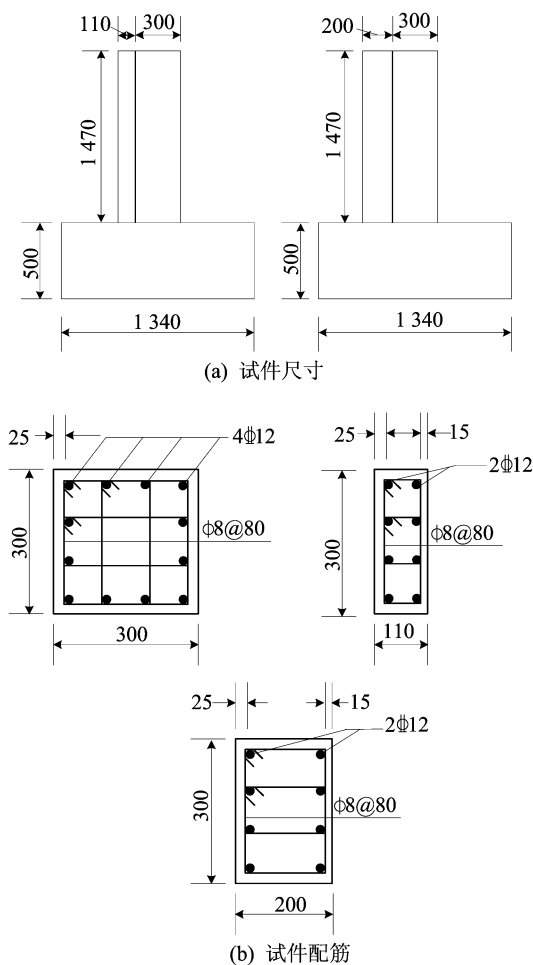


图 1 试件尺寸及配筋图

1.2 有限元模型的建立及本构关系

通过 ABAQUS 软件建立与试验相一致的结构模型,其中混凝土采用 Solid 单元 C3D8R 建模,钢筋采用 Truss 单元 T3D2 建模。本文混凝土采用塑性损伤模型,单轴受压、受拉模型采用文献[1]中所建议的 $\sigma-\varepsilon$ 关系式;钢筋采用硬化弹塑性模型,在 ABAQUS 约束作用中通过埋入(Embedded)的方式与混凝土共同作用,新旧混凝土界面通过绑定(Tie)命令黏接。相关的本构关系曲线和有限元模型分别如图 2、图 3 所示。

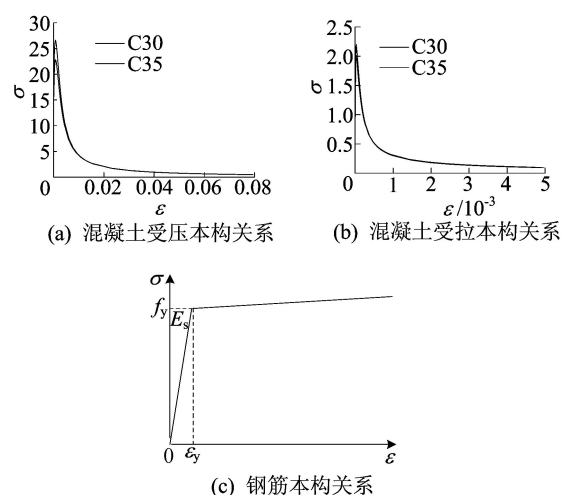


图 2 混凝土与钢筋本构关系曲线

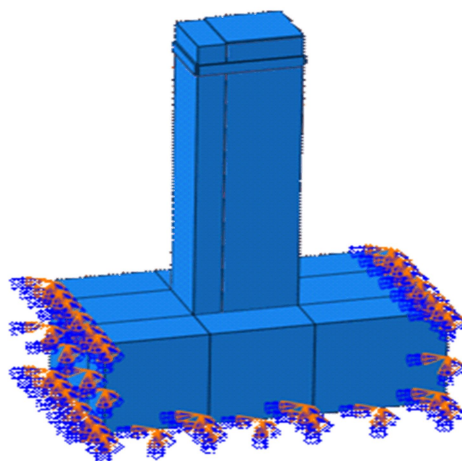


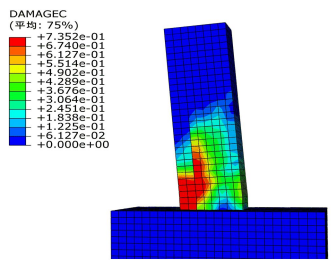
图 3 加固柱有限元模型

1.3 有限元模型的可行性验证

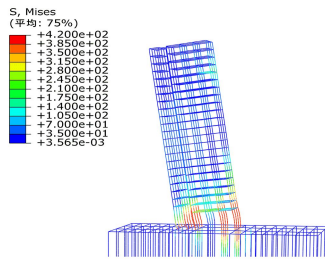
为验证本文有限元模型中各类参数选取的适用性和模型建立的可行性,选用文献[7]中的 PYJGZ-1 和 PYJGZ-3 加固柱(以下简称 Z1 和 Z3),采用上述本构关系及各类建模参数对其进

行数值模拟分析。验证试件受压损伤云图和钢筋应力云图如图 4 所示,2 个试件的试验与数值模拟荷载-位移曲线如图 5 所示,2 个试件峰值荷载、极限位移试验值与模拟值对比见表 1 所列。

在模拟计算中,Z1 和 Z3 试件在水平位移分别为 34.6、23.1 mm 时达到峰值荷载,其后曲线下降段明显,与文献[7]中荷载-位移曲线趋势和试件破坏情况吻合度良好。由表 1 可知,峰值荷载、极限位移的试验值与模拟值之间误差较小,在合理且可控的范围内,验证了本文模型建立和相关参数选取的合理性和可行性。



(a) 试件受压损伤云图



(b) 钢筋应力云图

图 4 验证组试件受压损伤云图和钢筋应力云图

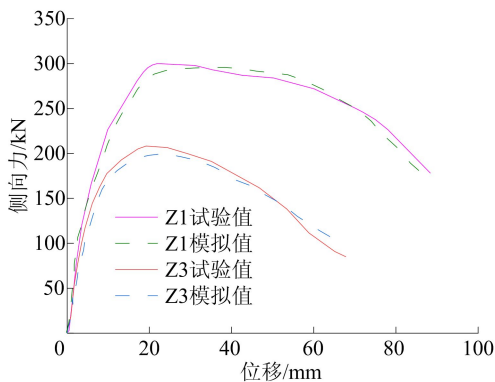


图 5 2 个试件试验与数值模拟荷载-位移曲线

表 1 2 个试件峰值荷载、极限位移试验与模拟结果对比

试件 编号	峰值荷载/kN		误差/%	极限位移/mm		误差/%
	试验值	模拟值		试验值	模拟值	
Z1	302.6	295.7	2.3	67.4	69.7	3.4
Z3	208.2	199.8	4.0	38.0	40.3	6.0

2 试验方案和试件参数

对加固钢筋混凝土柱施加单调水平位移荷载,加载方向分为 X_1 、 X_2 、 Y 3 个方向,水平加载点距柱顶 100 mm,如图 6 所示。

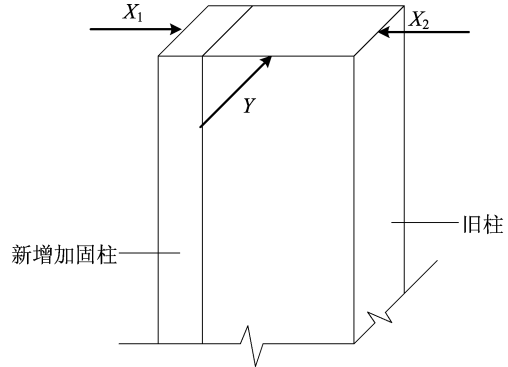


图 6 单调水平荷载加载示意图

在保持初始轴压比为 0.4 的情况下,共设置 7 根试验柱,其中 CW 为未加固旧柱, RSA 和 RSB 为新增 A 型、B 型 2 种截面尺寸的加固柱,试件加固前后尺寸及混凝土强度等级见表 2 所列。

本文通过引入 ABAQUS 相互作用模块中“生死单元(Model Change)”命令来模拟钢筋混凝土旧柱的加固过程及二次受力状态。具体分析步骤如下:

(1) 将新增加固柱失效,根据轴压比对旧柱施加相应的初始轴力,模拟出旧柱加固前的真实受力状态。

(2) 将步骤(1)中失效的加固柱激活,通过约束作用中的“Tie”命令与旧柱黏接绑定,确保符合工程实际中对加固部分的施工要求,最终形成与试验方案相一致的完整加固柱。

(3) 在柱顶预定位置处施加单调水平位移荷载进行计算。

表 2 试件加固前后尺寸及混凝土强度等级

试件 编号	加固厚度/ mm	截面尺寸 (长×宽)	混凝土强度等级	
			原墙体	加固墙体
CW		300×300	C30	
RSAY	110	410×300	C30	C35
RSAX1	110	410×300	C30	C35
RSAX2	110	410×300	C30	C35
RSBY	200	500×300	C30	C35
RSBX1	200	500×300	C30	C35
RSBX2	200	500×300	C30	C35

注:试件截面长、宽的单位为 mm。

3 同轴压比下的柱模拟结果分析

3.1 试件破坏情况

等效塑性应变是材料塑性变形能力的一种表征,对材料的组织和力学性能有重要的影响,可间接代表材料的破坏状态^[8-9]。本文柱的破坏状态用 ABAQUS 软件可视化结果中的等效塑性应变(PEEQ)云图表示,钢筋的应变采用 Mises 云图表示。试件 RSAX1 等效塑性应变云图和钢筋应力云图如图 7 所示。根据模拟结果发现各柱破坏类型相似,从图 7 可以看出:柱底受压区混凝土已基本压碎,底部损伤严重,试件变形较大,裂缝以横向为主,已不能继续承载;受拉侧钢筋应力增幅较受压侧更大,最后均达到屈服;箍筋应力增幅较慢,最后仍未屈服。

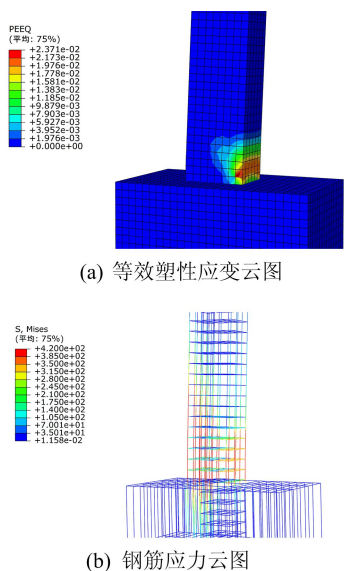


图 7 试件 RSAX1 等效塑性应变云图和钢筋应力云图

3.2 力-位移曲线分析

7 个试件单调水平荷载-位移曲线如图 8 所示,试件峰值荷载和位移见表 3 所列。

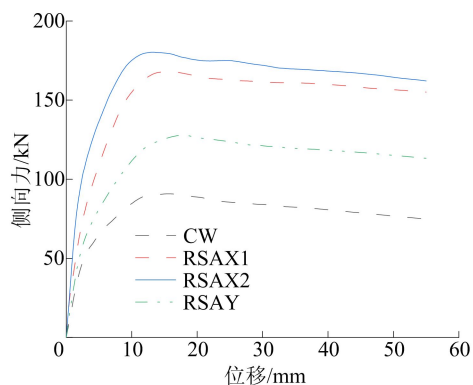
(1) 与未加固旧柱对比,新加固柱在 3 个水平方向的侧向承载力显著提高,其中 X_2 方向提升幅度最高,与未加固旧柱相比提高约 98.6%,加固后抗侧力效果提升显著。

(2) 在 X_1 、 X_2 、 Y 3 个水平方向上, X_2 方向的侧向承载力最高, Y 方向最低。其原因是相比于 X_1 方向新增的加固混凝土柱和其内部钢筋受拉, X_2 方向上新增的加固混凝土柱全部参与受压,侧向承载力提升效果更明显。

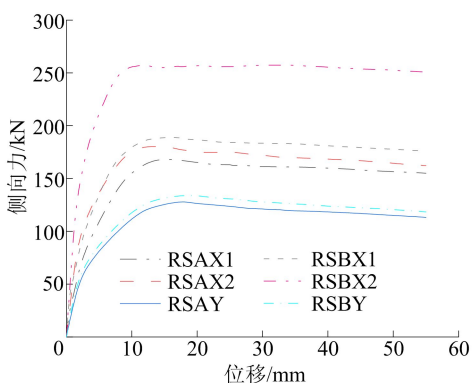
(3) 加固部分尺寸越大,加固柱侧向承载力

提升越大,RSB 试件在 3 个方向上的承载力均较 RSA 有所提升,其中在 X_2 方向上比 RSA 提升约 42.6%。其原因是新增截面越大,混凝土参与受压的范围越大,对试件承载力提升越明显。

(4) 与未加固柱相比,各加固柱峰值位移相近,延性下降段变化不明显。



(a) 单侧加固尺寸 110 mm 与未加固钢筋混凝土柱



(b) 单侧加固尺寸 110、200 mm 加固柱

图 8 7 个试件水平力-位移曲线

表 3 7 个试件峰值荷载与位移

试件参数	峰值荷载/kN	峰值位移/mm
CW	90.761	15.684
RSAX1	168.139	15.694
RSAX2	180.251	13.071
RSAY	127.820	17.936
RSBX1	188.883	15.883
RSBX2	257.067	11.931
RSBY	133.888	18.698

4 不同轴压比下的柱模拟结果分析

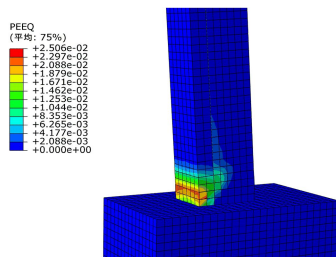
试验选取加固截面为 110 mm×300 mm 的加固柱,进行不同初始轴压比下的单调水平荷载位移加载,研究在不同轴压比下钢筋混凝土加固柱的受力性能和实际表现,3 种初始轴压比下试件轴力取值见表 4 所列。

表 4 3 种初始轴压比下的试件轴力取值

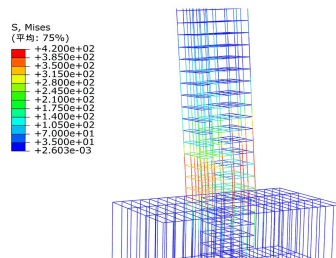
试件编号	初始轴压比	初始轴力/kN
RSAX1-0.2	0.2	257.4
RSAX1-0.4	0.4	514.8
RSAX1-0.6	0.6	772.2
RSAX2-0.2	0.2	257.4
RSAX2-0.4	0.4	514.8
RSAX2-0.6	0.6	772.2
RSAY-0.2	0.2	257.4
RSAY-0.4	0.4	514.8
RSAY-0.6	0.6	772.2

4.1 试件破坏情况

根据模拟结果发现,在不同轴压下各柱破坏类型相似,试件 RSAX2-0.6 的混凝土等效塑性应变云图和钢筋 Mises 云图如图 9 所示。从图 9 可以看出:试件弯曲破坏程度严重,柱底部受压区已基本压碎;受拉和受压钢筋应力增幅较大,在最后阶段均已屈服,箍筋在试件破坏后仍未屈服。



(a) 等效塑性应变云图



(b) 钢筋应力云图

图 9 试件 RSAX2-0.6 等效塑性应变云图和钢筋应力云图

4.2 力-位移曲线分析

在不同轴压比下,试件峰值荷载与位移见表 5 所列,各柱单调水平荷载-位移曲线如图 10 所示,各柱水平承载力随轴压比变化曲线如图 11 所示。

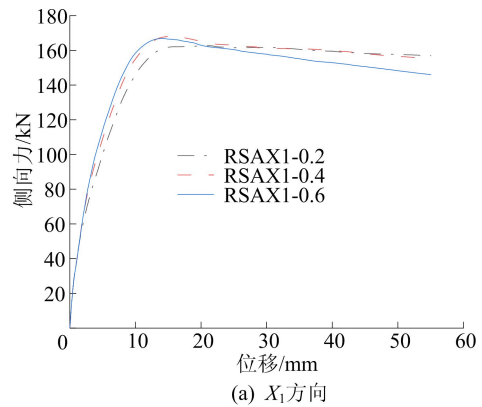
(1) 初始轴压比越大,加固试件的侧向承载力越高,其中 X_2 方向上试件轴压比为 0.6 时,比轴压比为 0.2 时提高约 37.5%。其原因是预先施加的轴压力给受压柱提供一定的压应力,使柱受拉区不至于过早开裂。

(2) X_1 方向上不同轴压比对其侧向承载力的

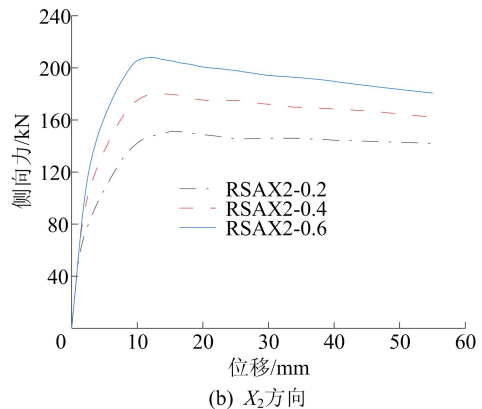
影响不明显。其原因是在 X_1 方向上新增加固混凝土截面处于受拉侧,受压侧仍处于旧柱端部,新增加固混凝土未起到协助旧柱共同受压的作用。

表 5 不同轴压比下试件峰值荷载与位移

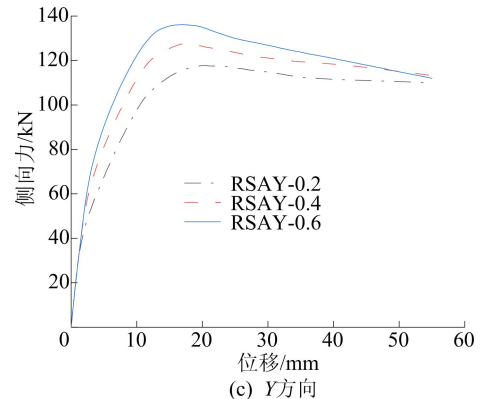
试件编号	峰值荷载/kN	峰值位移/mm
RSAX1-0.2	162.691	21.040
RSAX1-0.4	168.139	15.694
RSAX1-0.6	166.814	13.977
RSAX2-0.2	151.278	15.598
RSAX2-0.4	180.251	13.071
RSAX2-0.6	208.011	11.913
RSAY-0.2	117.734	20.220
RSAY-0.4	127.820	17.936
RSAY-0.6	136.107	16.866



(a) X_1 方向



(b) X_2 方向



(c) Y 方向

图 10 不同轴压比下试件水平力-位移曲线

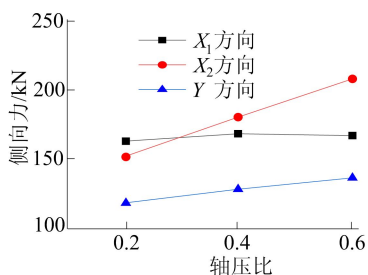


图 11 3 个加载方向上试件水平侧向力随轴压比变化曲线

此时水平侧向力起主导作用,水平承载力基本保持不变。

(3) X_1 、 X_2 、Y 3 个方向上的峰值位移均随轴压比增大而降低。在 X_1 、Y 方向,柱的延性呈下降趋势, X_2 方向上基本不变。分析其原因如下:随着轴压比增大, X_1 、Y 方向上的新增加固混凝土持续受压,虽然承载力有所提高,但是受拉区累计损伤更大,因而破坏阶段延性下降更明显; X_2 方向上新增加固混凝土处于受压侧,与旧柱形成整体共同承担侧向力,因而延性基本保持不变。

5 结 论

本文通过 ABAQUS 有限元软件,对不同加固截面尺寸、不同侧向力方向、不同初始轴压比单侧加固钢筋混凝土柱进行单调水平荷载作用下的模拟分析,并与未加固旧柱对比,结论如下:

(1) 与未加固旧柱相比,加固柱在 3 个水平方向上的承载力提升显著,且与新增加固截面厚度和初始轴压比呈正相关关系,有利于结构抗震,并且可根据实际需求选择合适且经济的加固厚度进行加固。

(2) 单侧加固钢筋混凝土柱在 3 个水平方向上的峰值位移均随轴压比增大而减小,延性呈下降趋势。在实际工程中,为满足建设需要,可适当进行卸载工作,提高结构的安全性。

(3) 该方法只在柱单侧进行加固施工,基本不用入户工作,方案可灵活设计且节约空间和资源,在最大程度上避免影响原先建筑的采光和通风,适用面广,加固效果优,因此可大力研究并推广此种加固方式。

(4) 对于试件加固的形式可灵活多变,相应

的公式计算须严格按照相关规范中的规定进行选用。同时,有关规范中对于加固试件的公式与原试件相比,体现了公式中参数的多样性,新增参数来源于新增加固部分对试件的各类影响;新增部分对整体而言有一个折减效应,在实际施工过程中,由于各类不可避免因素的干扰,不可能出现“1+1=2”的效应,因此在新增参数选取上要格外注意,不仅要严格遵循相关加固规范,而且要注意紧密结合施工现场的设备、环境和建筑类型等各类重要因素,作出综合且稳妥的判断,在这些工作的基础上,再进行加固试件的计算、设计和施工等。要真正实现安全且合适的加固计算,需要对相关参数的设计和取值进行更深入研究。

[参 考 文 献]

- [1] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2015:34-201.
- [2] 中国建筑科学研究院. 建筑结构可靠度设计统一标准:GB 50068—2018[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2018:11-22.
- [3] 胡惠荣,朱伯龙. 加大截面加固混凝土偏心受压柱的非线性全过程分析[J]. 工程力学,1996(A02):244-250.
- [4] 樊华,曹大富. 加大截面法加固偏心受压柱的承载力试验研究[J]. 工程力学,1997(A02):180-184.
- [5] 李振宝,陈磊,马华,等. 单侧加固钢筋混凝土柱受力性能数值模拟[J]. 土木工程学报,2014,47(增刊1):36-41.
- [6] 廖新雪,林文修,黎校君,等. 单、双面增大截面法加固剪力墙抗震性能对比研究[J]. 建筑结构,2017,47(增刊1):395-399.
- [7] 刘春阳,陈磊. 不对称单侧加固柱抗震性能试验研究及有限元分析[J]. 防灾减灾工程学报,2017,37(2):222-229.
- [8] ZHANG Z C, MANABE K, FURUSHIMA T, et al. Formulation of equivalent plastic strain accumulated in rotating bending process of metal tubes for severe plastic deformation[J]. Advanced Materials Research, 2014, 887/888: 907-911.
- [9] YANG J, WANG G Z, XUAN F Z, et al. Unified characterisation of in-plane and out-of-plane constraint based on crack-tip equivalent plastic strain[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2013, 36(6): 504-514.

(责任编辑 张淑艳)