

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201705141

多腔钢管混凝土分叉柱力学性能有限元分析

乔崎云,梁旭,曹万林,武海鹏,殷飞,李翔宇

(城市与工程安全减灾教育部重点实验室(北京工业大学),北京 100124)

摘要:为研究异形截面多腔钢管混凝土分叉柱的力学性能及设计方法,以北京某超高层建筑异形截面多腔钢管混凝土巨型分叉柱为原型,在已进行的低周反复荷载试验基础上,对异形截面多腔钢管混凝土分叉柱抗震性能进行有限元分析,研究了不同构造措施、不同钢材及混凝土强度等级等参数对钢管混凝土分叉柱抗震性能的影响.结果表明:基于本文提出的有限元建模方法,所得有限元分析结果与试验结果吻合较好;适当增加腔体数,设置肋板、角钢和钢管能够有效提高异形截面钢管混凝土分叉柱抗震性能;在等用钢量下,增加腔体数量比增加钢板厚度能更有效地提高分叉柱抗震性能;不同材料强度对异形截面钢管混凝土分叉柱抗震性能有较大影响,在进行其抗震设计时,宜选用强度等级匹配的钢材与混凝土.

关键词:多腔钢管混凝土;分叉柱;低周反复荷载试验;有限元分析;抗震性能

中图分类号: TU398.9;TU317.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2017)12-0075-07

FEM analysis on multi-cell CFST bifurcated columns

QIAO Qiyun, LIANG Xu, CAO Wanlin, WU Haipeng, YIN Fei, LI Xiangyu

(Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering (Beijing University of Technology), Ministry of Education, Beijing 100124, China)

Abstract: To study the mechanical properties and design method of CFST columns with special-shaped cross-section, based on the special-shaped multi-cell CFST bifurcated columns of a super-high building under construction in Beijing, the FEM analysis on the seismic behavior of the special-shaped concrete-filled bifurcated steel tube columns was carried out. The test parameters were the different constructional measures, different steel and concrete grades. The results show that the developed FEM analysis method has adequate accuracy compared with the test results. The seismic behavior of the columns increased with increasing the number of the cells, the installation of the stiffener, L-type steel and steel tube. Increasing the number of the cavities has a better effect on seismic behavior than the increasing thickness of the steel tube in the case of the same steel consumption. The materials strength has a great influence on the seismic performance of the bifurcated column, and the strength matching between the steel and concrete should be considered in seismic design.

Keywords: multi-cell CFST; bifurcated column; low cyclic test; FEM analysis; seismic behavior

随着时代的发展,中国的建筑趋于高层、超高层建筑.近年来,中国超高层建筑发展迅速,超高层建筑的竖向构件较多采用钢管混凝土组合结构,钢管混凝土具有承载力高、延性好、耐火性好以及施工简便等优点,应用广泛.随着建筑样式的多样化,有时为满足建筑的需要,会产生异形截面巨型钢管混凝土柱.同时为满足抗震性能要求,异形截面巨型钢管混凝土柱内部被钢板分隔成若干腔体,形成巨型多腔体钢管混凝土柱.天津 117 大厦,大连国贸中心,北京中国尊等超高层建筑,均采用了异形截面多腔钢管混凝土柱.

目前,对异形截面多腔钢管混凝土柱抗震性能的研究较为欠缺.曹万林等^[1-3]对异形截面多腔钢管

混凝土柱进行了抗震性能研究,提出了相关构造措施的建议,研究成果表明多腔钢管混凝土柱与单腔钢管混凝土柱相比,具有较好的抗震性能;钢管混凝土的截面构造及钢筋笼的设置对钢管混凝土柱的承载力和延性有较大的影响.张建伟等^[4]研究了不同构造措施对八边形截面多腔钢管混凝土柱抗震性能的影响,研究表明设置分腔板,竖向肋板及角钢能够显著提高其抗震性能.王丹等^[5]进行了 T、L 形截面钢管混凝土柱的抗震性能试验,研究表明轴压比、钢管壁厚和混凝土强度对承载力有较大影响.林震宇等^[6]对 L 形钢管混凝土柱的抗震性能试验表明设置加劲肋可以提高钢管混凝土柱的延性,且可以延缓钢板的屈曲.荣斌等^[7]进行了 L 形截面方钢管混凝土组合柱受压性能相关研究,并提出了相关计算公式.以上文献对多腔钢管混凝土结构进行了研究,但缺乏对不同腔体具有不同高度时的性能研究,如分叉柱等情况.

收稿日期: 2017-05-24

基金项目: 国家自然科学基金(51408017)

作者简介: 乔崎云(1985—),男,讲师,硕士生导师;

曹万林(1954—),男,教授,博士生导师

通信作者: 乔崎云, qiaoqiyun@bjut.edu.cn

F_b^0/f_c^0 为双轴等抗压强度和单轴抗压强度的比值, K 为常数,是拉、压子午线上第二应力不变量的比值。

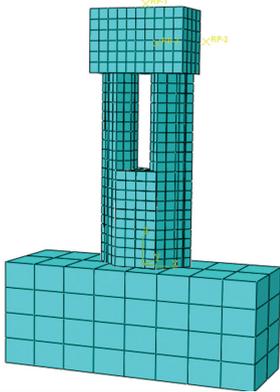


图 2 有限元分析模型

Fig.2 Finite element model

表 2 混凝土有限元计算模型参数取值

Tab.2 Parameters of concrete finite element models

膨胀角/(°)	偏心率	F_b^0/f_c^0	K	粘性参数
30	0.1	1.16	0.667	0.005

2.2 钢材本构关系及参数选取

钢材采用 Q345 钢,钢材本构曲线采用三折线模型,为更好模拟钢材实际应力-应变关系^[9],钢材屈服强度、钢材极限强度取实测值,泊松比取 0.3。

2.3 界面模拟与荷载施加

模型外钢板采用整体建模,分叉面上下分别建模后合并成为一个整体壳结构。钢板与混凝土界面接触采用表面与表面接触(Standard),其中钢板表面为主表面,混凝土表面为从表面,滑移公式为有限滑移。为确保主表面与从表面精确接触,从节点/表面调整选为“只为调整为删除过盈”。接触作用属性中,切向行为摩擦公式采用罚函数,摩擦系数取 0.4,法向行为采用硬接触。钢管内部钢板嵌入(embedded)到混凝土中。肋板与钢板绑定,且嵌入混凝土中。

基础底部为固定端,底面设置为完全固定,加载端为自由端。水平荷载采用一次加载,增加 2 个分析步,第一步施加竖向轴力,轴力大小为 900 kN,第二步在加载端施加位移荷载。多、高层结构弹塑性层间位移角限值为 1/50^[12],为更好模拟钢管混凝土模型破坏以及承载力下降,本文采用 1/30 弹塑性层间位移角,加载幅值为软件默认值。

2.4 单元的选取与网格划分

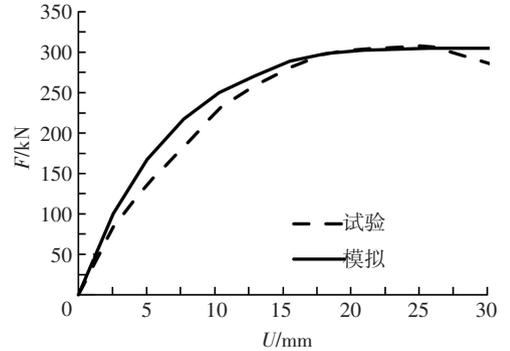
为更好模拟实际情况,简化计算,钢管部分采用 S4R 单元^[13],网格采用四边形自由化网格划分;肋板部分与混凝土采用 C3D8R 单元,网格采用六面体结构网格划分,其余部分按软件默认值选择。

按以上步骤建立试件的有限元模型,计算并得出有限元模型的水平荷载 F 与水平位移 U 的 $F-U$

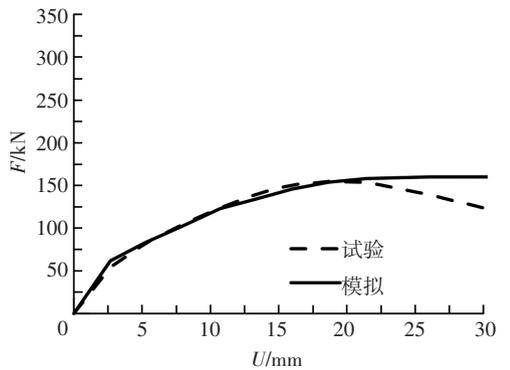
关系曲线,并与试验得出的 $F-U$ 关系曲线进行对比,从而验证有限元模拟的合理性与可信性。

2.5 有限元计算结果

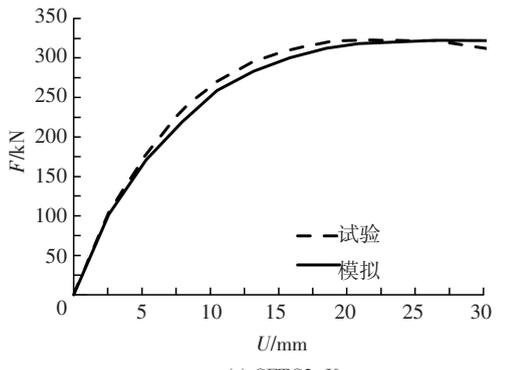
根据有限元分析结果,其 $F-U$ 曲线与试验的正向 $F-U$ 曲线对比见图 3。



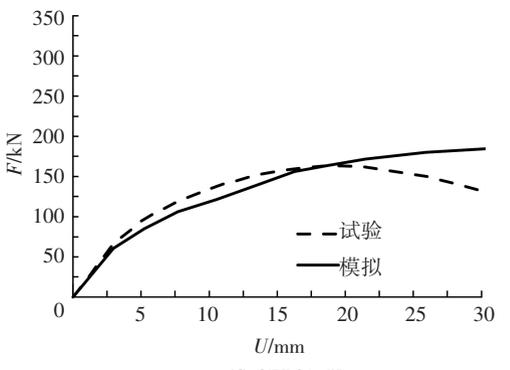
(a) CFTC1-X



(b) CFTC1-Y



(c) CFTC2-X



(d) CFTC2-Y

图 3 $F-U$ 曲线对比

Fig.3 Comparison of $F-U$ curves

试验得出的正向钢管混凝土分叉柱的骨架曲线与有限元分析得到的钢骨架曲线吻合良好,在试件加载初期,二者刚度基本一致;随着位移增大,试件开裂损伤,曲线开始出现偏移但总体较为吻合.试验得到的峰值荷载在同位移下的有限元分析得到的荷载比值为 1.009,有限元分析结果能准确模拟试验结果.

3 参数研究

3.1 不同构造措施对钢管混凝土力学性能的影响

3.1.1 模型设计

在试验模型基础上,设计 6 个有限元分析模型.其不同点在于腔体数量、竖向肋板、角部加角钢、边缘腔体内加钢管等构造措施.模型编号为 M1、M2、M3、M4、M5、M6.其中 M1 为无纵向肋板的 13 腔体试件,钢板厚 2 mm;M2 为八边形 7 腔体试件,钢板厚 3 mm, M2 与 M1 用钢量相同;M3 为加纵向肋板 13 腔体试件,钢板厚 2 mm;M4 为无纵向肋板 13 腔体试件,设置角钢,除角钢外板厚 2 mm,角钢为 40 mm×3 mm×920 mm(肢长×厚度×高度);M5 为无肋板 13 腔体,角部腔体内置直径 30 mm 钢管,钢板和钢管厚为 2 mm;M6 为加纵向肋板和直径 30 mm 钢管.模型设计图见图 4,模型设计参数及材料见表 3.

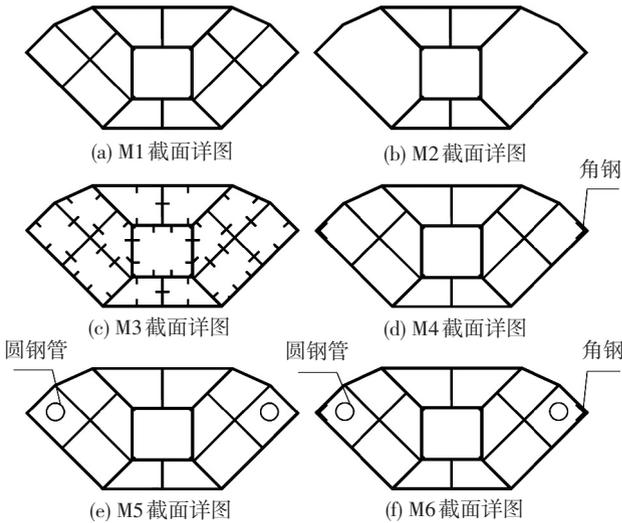


图 4 模型截面设计图

Fig.4 Cross section of models

表 3 模型设计参数

Tab.3 Parameters of model design

编号	钢板厚度/mm	试验轴压比	配钢率/%	截面特征	构造措施
M1	2	0.3	8.70	13 腔体	无纵向肋板
M2	3	0.3	8.70	7 腔体	无纵向肋板
M3	2	0.3	8.70	13 腔体	加纵向肋板
M4	2	0.3	8.70	13 腔体	无纵向肋板设置角钢
M5	2	0.3	8.70	13 腔体	无纵向肋板设置钢管
M6	2	0.3	8.70	13 腔体	无纵向肋板设置角钢和钢管

注:竖向加劲肋不计入配钢率

3.1.2 单元的选取与网格划分

为更好模拟实际情况并简化计算,钢管部分采用 S4R 单元,网格采用四边形自由化网格划分;肋板部分与混凝土采用 C3D8R 单元,网格采用六面体结构网格划分,其余部分按软件默认值选择.

3.1.3 计算结果

1)不同构造措施对钢管混凝土柱力学性能影响

图 5 为模型的 $F-U$ 曲线,可以看出, M6、M3、M4、M5、M1、M2 水平承载力依次降低. M2、M5、M1、M4 后期承载力略有下降,其中, M2 下降最为明显.这是由于试件 M2 为 7 腔体试件,截面构造措施较弱,延性较差,出现了较为明显的下降段.表 4 为水平极限荷载计算值.其中 F_y 为屈服承载力, F_u 为极限承载力; Δ_y 为与屈服承载力相对应的极限位移, Δ_u 为与极限承载力相对应的极限位移; μ 为延性系数 ($=\Delta_u/\Delta_y$).屈服点为按面积等效法确定.

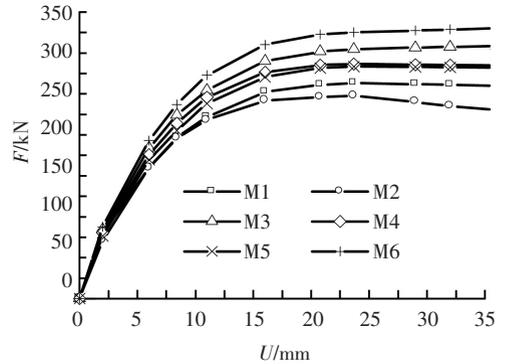


图 5 不同构造措施下水平荷载-位移曲线

Fig.5 Curve of $F-U$ with different constructions

表 4 模型水平极限承载力值

Tab.4 Ultimate loads of models

模型	F_y /kN	F_u /kN	Δ_y /mm	Δ_u /mm	μ
M1	188.2	263.4	7.9	23.7	3.00
M2	180.8	247.5	6.3	20.8	3.30
M3	232.3	308.6	9.2	36.0	3.91
M4	202.4	286.2	7.5	24.3	3.24
M5	210.5	283.1	8.0	26.5	3.31
M6	248.1	330.0	9.5	37.0	3.89

M2 与 M1 相比,极限承载力降低 7%,延性降低 10%,在等用钢量下,增加腔体数量比增加钢板厚度能更有效地提高分叉柱的抗震性能.分腔钢板可以降低外部钢管的宽厚比,延缓屈曲并提高承载力.

M3 与 M1 相比,极限承载力提高 17%,延性提高了 18%.表明竖向加劲肋的增设,能有效提高其抗震性能,竖向加劲肋可有效延缓钢板屈曲,提高钢板对混凝土的约束作用,增强混凝土与管壁的拉结性能,加强钢管和混凝土整体性.

M4、M5 与 M1 相比,极限承载力分别提高 9%、7%,延性分别提高 8%、10%.表明增设角钢或钢管能一定程度提高承载力和延性.M6 比 M1 极限承载力提

高 25%,且 M6 提高百分比大致等于 M3 和 M5 之和.

2) 应力变化分析

图 6 为达到极限承载力时钢材的 Mises 应力云图.由图可知,当达到极限承载力时,6 个模型柱脚钢管受压和受拉屈服(屈服压强为 345 MPa),且受压屈服范围明显大于受拉屈服范围,屈服区域由柱底逐渐向上延伸,分叉面处屈服区由分叉处向上下两个方向延伸.M1 分腔板屈服范围略低于外部钢管,说明内部分腔板可以延缓钢板屈曲,M2 由于分腔少,外部钢管屈曲面积较大;M3 纵向肋板与外部钢管屈曲范围相近,但纵向肋板屈曲范围略少于外部钢管,表明纵向肋板能延缓钢管屈曲.M4、M5 角钢和钢管屈服范围大致与外部钢管相同,表明添加角钢和钢管能够有效提高柱的承载能力.

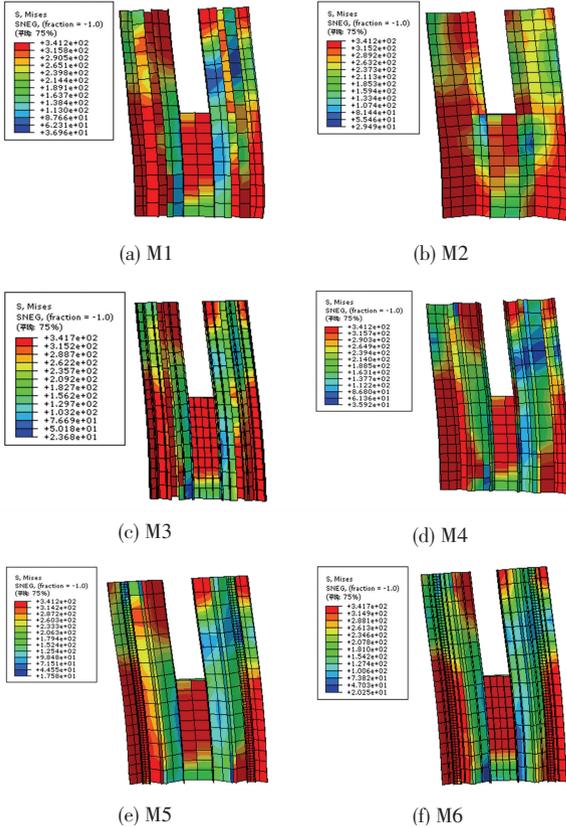


图 6 不同构造下钢管 Mises 应力云图

Fig.6 Mises stress of steel tubes with different construction

由图 7 可知,在极限承载力下,M2 中混凝土分担承载力较大,M6 中最小;表明在添加肋板和钢管后,钢管混凝土整体性有所提高.分叉柱的截面应力图可以看出,M2 受拉区域最小,在增加分腔板、纵向肋板、角钢之后,混凝土受拉面积增加,承载力有所提高.

综上所述,钢管混凝土柱在设置纵向肋板,角钢和钢管后,其水平承载力会有所提高,在同时设置纵向肋板和钢管、角钢后,水平极限承载力提高幅度大致为单个构造设置之和.

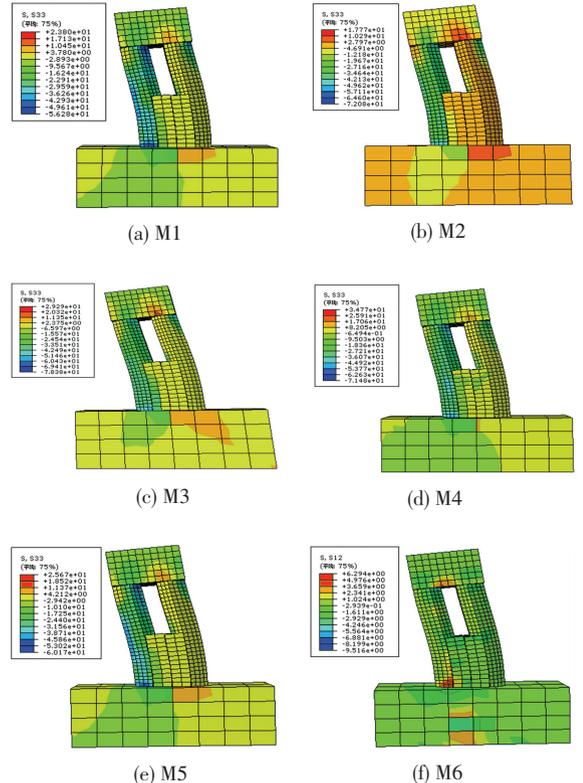


图 7 不同构造下混凝土 S33 应力云图

Fig.7 S33 stress of construction with different construction

3.2 不同材料强度等级模型分析

3.2.1 模型设计

以试验试件为原型,为研究不同强度材料对该截面形式的多腔钢管混凝土巨型分叉柱的力学性能的影响,坚持模型设计与实际试验相匹配原则,设计 6 个有限元模型.钢材强度分为 Q235、Q345、Q390、Q420.混凝土强度分为 C30、C40、C50.钢材强度设计值按照国家标准 GB 50017—2003《钢结构设计规范》选取.混凝土本构模型与钢材本构模型根据文献[9]选取.

模型分别编号为 H1、H2、H3、H4、H5、H6.其中 H1 使用 Q235 钢材,H2 为 Q345 钢材,H3 为 Q390 钢材,H4 使用 Q420 钢材,H5 使用 C30 混凝土,H6 使用 C50 混凝土.模型设计参数见表 5.

表 5 模型设计参数

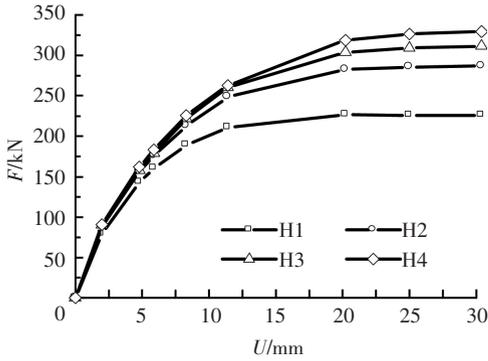
Tab.5 Parameters of model design

编号	钢材强度等级	混凝土等级	试验轴压比	配钢率/%	截面特征	构造措施
H1	Q235	C40	0.3	8.70	13 腔体	加纵向肋板
H2	Q345	C40	0.3	8.70	13 腔体	加纵向肋板
H3	Q390	C40	0.3	8.70	13 腔体	加纵向肋板
H4	Q420	C40	0.3	8.70	13 腔体	加纵向肋板
H5	Q345	C30	0.3	8.70	13 腔体	加纵向肋板
H6	Q345	C50	0.3	8.70	13 腔体	加纵向肋板

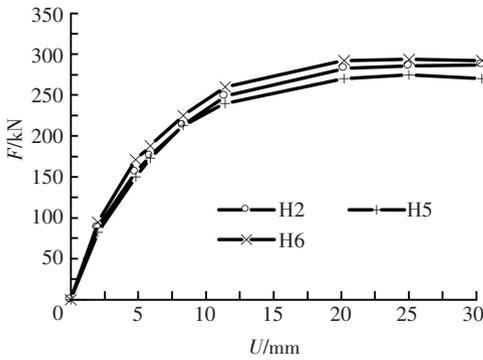
3.2.2 材料强度等级对分叉柱抗震性能的影响

图 8 为模型的 F-U 曲线.H4、H3、H2、H1 水平

承载力依次降低.表 6 为模型水平极限承载力计算值.其中 F_u 为模型极限承载力, Δ_u 为与水平力相对应的极限位移.



(a) 不同钢材等级



(b) 不同混凝土等级

图 8 不同材料强度等级模型 $F-U$ 曲线

Fig.8 $F-U$ curves with different materials

表 6 水平极限承载力

Tab.6 Ultimate loads of models

模型编号	F_u /kN	相对值	Δ_u /mm
H1	226.5	0.79	20.20
H2	286.1	1.00	25.25
H3	310.3	1.08	27.13
H4	328.5	1.15	28.17
H5	270.5	0.99	27.69
H6	300.8	1.01	27.69

由表 6 可以看出, H2 比 H1 极限承载力提高 21%; H3 比 H2 极限承载力提高 8%; H4 比 H3 极限承载力提高 7%; H5 比 H2 极限承载力降低 1%; H6 比 H2 极限承载力提高 1%. 由图 8 可以看出, 在水平位移小于 10 mm 时, H1 刚度最小, H2、H3、H4 刚度大致相同; 达到极限位移后, 钢材从 Q235 提高到 Q345 的承载力提高幅度最大, 当钢材强度再次提高时, 极限承载力提高幅度相对较小. 可以得出: 当混凝土等级为 C40 时, Q345 相对其他钢材而言, 性价比最高. 当混凝土等级提高时, 钢管混凝土柱的承载力和刚度略有提高. 同时, 混凝土与钢材的不同等级的组合, 对后期承载力的下降段即延性有一定影响, 设计中需充分考虑混凝土与钢材的强度匹配.

3.2.3 应力分析

图 9 为位移角为 1/100 时钢管 Mises 应力云图.

图 10、11 为位移角为极限荷载时的应力云图.

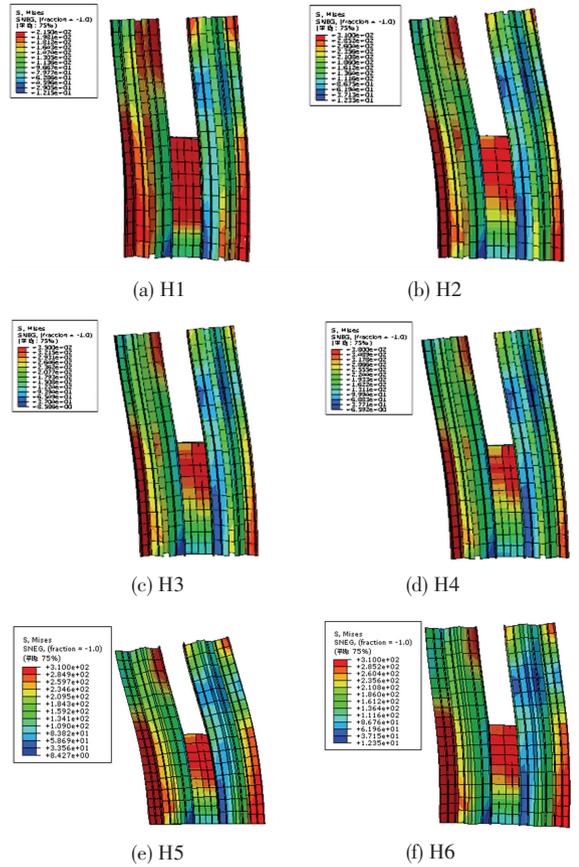


图 9 位移角为 1/100 钢管应力 Mises 云图

Fig.9 Mises stress of steel tube at 1/100 drift ratio

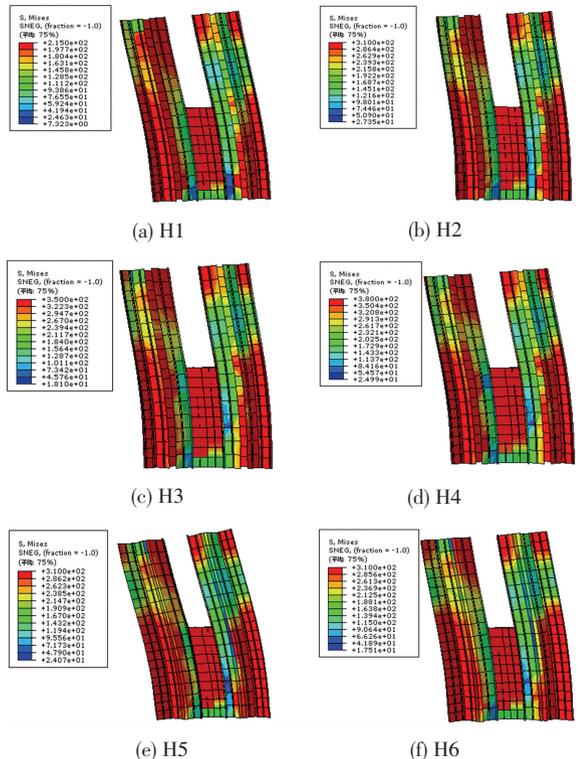


图 10 钢管应力 Mises 云图

Fig.10 Mises stress nephogram of steel tube

由图 9 可知, 位移角为 1/100 时, H1 钢管的屈服区域较大, 其次为 H2, H3、H4 屈服区域相近. 结合

图 10 可以看出,此时 H1 接近极限承载力状态,其他结构承载力仍处于上升段。

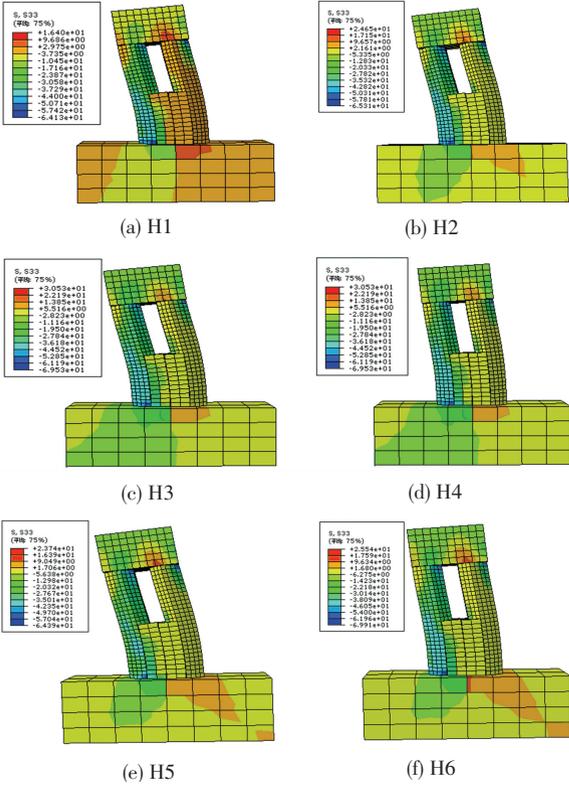


图 11 混凝土沿纵向应力 (S33) 分布图

Fig.11 S33 stress nephogram of concrete along longitude

由图 10、11 可以看出,在达到极限承载力时钢管屈服应力较为接近,混凝土的纵向应力 H1 明显小于 H2、H3、H4,且 H3、H4 之间应力范围变化不大.在分叉面,当钢管强度等级提高时,混凝土截面受拉区域随着钢管强度等级提高有小幅度的增加。

4 结 论

- 1) 基于本文提出的有限元建模方法,所得有限元分析结果与试验结果吻合较好。
- 2) 适当增加腔体数,设置肋板、角钢和钢管,能够有效提高异形截面钢管混凝土分叉柱抗震性能。
- 3) 在等用钢量下,增加腔体数量比增加钢板厚度能更有效地提高分叉柱抗震性能。
- 4) 不同材料强度对异形截面钢管混凝土分叉柱抗震性能有较大影响,在进行其抗震设计时,宜选用强度等级匹配的钢材与混凝土。

参 考 文 献

[1] 曹万林, 彭斌, 王智慧, 等. 底部加强型多腔钢管混凝土巨型柱抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(2): 120-129. DOI:10.13197/j.eeev.2012.02.020.
CAO Wanlin, PENG Bin, WANG Zhihui, et al. Experimental research on seismic behavior of bottom strengthened multi-cell CFST mega-columns[J]. Earthquake Engineering & Engineering Dynamics, 2012, 32(2): 120-129. DOI: 10.13197/j.eeev.2012.02.020.

[2] 彭斌, 曹万林, 王智慧, 等. 多腔钢管混凝土柱巨型框架抗震性能试验研究[J]. 结构工程师, 2012, 28(3): 128-234. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2012.03.020.
PENG Bin, CAO Wanlin, WANG Zhihui, et al. Experimental research on seismic behavior of Mega-Frame with Multi-Cell CFST columns[J]. Structural Engineers, 2012, 28(3): 128-234. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2012.03.020.

[3] 曹万林, 武海鹏, 王立长, 等. 不同加载方向下五边形截面钢管混凝土巨型柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014(1): 69-76. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2014.01.010.
CAO Wanlin, WU Haipeng, WANG Lichang, et al. Seismic behavior of pentagonal cross-section CFST mega-columns under horizontal loading in different directions[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(1): 69-76. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2014.01.010.

[4] 张建伟, 胡建华, 乔崎云, 等. 不同构造措施对异形截面多腔体钢管混凝土柱的力学性能影响[J]. 北京工业大学学报, 2015, 41(8): 1172-1178.
ZHANG Jianwei, HU Jianhua, QIAO Qiyun, et al. Mechanical properties of special-shaped multi-cell CFST columns with different construction measures[J]. Beijing Gongye Daxue Xuebao, 2015, 41(8): 1172-1178.

[5] 王丹, 吕西林. T形、L形钢管混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2005, 26(4): 39-44, 106. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2005.04.006.
WANG Dan, LU Xilin. Experimental study on seismic behavior of concrete-filled steel T-section and L-section columns[J]. Journal of Building Structures, 2005, 26(4): 39-44, 106. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2005.04.006.

[6] 林震宇, 沈祖炎, 罗金辉. 反复荷载作用下 L 形钢管混凝土柱滞回性能研究[J]. 建筑钢结构进展, 2009(2): 12-17.
LIN Zhenyu, SHEN Zuyan, LUO Jinhui. Hysteretic behavior of concrete-filled L-section steel tubular columns under cyclic loading[J]. Progress in Steel Building Structures, 2009(2): 12-17.

[7] 荣彬. 方钢管混凝土柱和 L 形截面方钢管混凝土组合异形柱研究[D]. 天津: 天津大学, 2005.
RONG Bin. Study on concrete-filled square steel tubular column and L-shaped column composed of concrete-filled square steel tubes[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005.

[8] 乔崎云, 李翔宇, 曹万林, 等. 异形截面多腔钢管混凝土分叉柱抗震性能试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2016(2): 1-8. DOI: 10.13197/j.eeev.2016.02.1.qiaoqy.001.
QIAO Qiyun, LI Xiangyu, CAO Wanlin, et al. Study on seismic behavior of complex cross-section multi-cell CFST bifurcated-columns[J]. Earthquake Engineering & Engineering Dynamics, 2016(2): 1-8. DOI: 10.13197/j.eeev.2016.02.1.qiaoqy.001.

[9] 韩林海. 钢管混凝土结构—理论与实践[M]. 第 2 版. 北京: 科学出版社, 2007: 73-83.
HAN Linhai. Steel Pipe Concrete Structure-Theory and Practice[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2007: 73-83.

[10] 武海鹏. 异形截面多腔钢管混凝土柱受力性能试验与理论研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2017.
WU Haipeng. Experimental and theoretical investigation on special-shaped CFT columns coupled with multiple cavities[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017.

[11] 雷拓, 钱江, 刘成清. 混凝土损伤塑性模型应用研究[J]. 结构工程师, 2008(2): 22-27. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2008.02.010
LEI Tuo, QIAN Jiang, LIU Chengqing. Application of damaged plasticity model for concrete[J]. Structural Engineers, 2008(2): 22-27. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2008.02.010.

[12] 钢结构设计规范: GB 50017—2003[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
Code for design of steel structures: GB 50017—2003[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003.

[13] 郭兰慧, 戎芹, 张素梅. 方钢管混凝土中钢管屈曲承载力研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(10): 6-11.
GUO Huilian, RONG Qin, ZHANG Sumei. Study on flexural capacity of steel tube in concrete-filled square steel tube[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2011, 43(10): 6-11.

(编辑 赵丽莹)