

文章编号:1674-2974(2016)01-0089-08

端部设肋方钢管混凝土框架柱抗震性能分析^{*}

黄 远[†],朱正庚,杨 扬,易伟建,张 锐

(湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082)

摘 要:提出了一种端部设肋方钢管混凝土框架柱,采取在柱端部区域设置纵向加劲肋的方式避免端部过早地发生局部屈曲,以提高其承载力,改善延性和抗震性能.采用通用非线性有限元软件 MSC. Marc 建立壳-实体精细有限元分析模型对已有试验进行了非线性有限元分析,有限元分析结果与试验结果吻合良好.在验证了有限元模型合理性的基础上,分析了不同参数条件下端部设肋方钢管混凝土框架柱的力学性能.研究表明,端部加劲肋能够延缓钢管壁的鼓曲,提高柱的承载力,显著改善柱的延性和抗震性能.端部加劲肋的设置长度以柱的1~2倍边长为宜,高度和厚度应满足一定的构造要求,可以通过增大加劲肋的厚度或增加每边加劲肋的设置数量来提高柱的承载力,且后者效果更好.

关键词:方钢管混凝土框架柱;端部设肋;有限元;抗震分析;延性

中图分类号:TU398

文献标识码:A

Seismic Analysis of the Square Concrete-filled Steel Tube Frame Column with End Ribs

HUANG Yuan[†], ZHU Zheng-geng, YANG Yang, YI Wei-jian, ZHANG Rui

(College of Civil Engineering, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: A square concrete-filled steel tube frame column with end ribs was put forward. The end longitudinal rib was used to avoid the premature local buckling of steel tube wall and then to improve the load carrying capacity, ductility and seismic performance of concrete-filled steel tube. Refined nonlinear finite element (FE) models were established by using MSC. Marc to study the existing experiments, and the results from the FE models fit well with the test data. Based on the reasonability of the FE models, parametric analyses were carried out to further explore the behavior of the square concrete-filled steel tube frame column with end ribs. The analyses have shown that the end ribs can delay the local buckling of the steel tube and improve the load carrying capacity, ductility and seismic performance. The length of the end ribs are to be set at 1~2 times the sectional side length from the column end, and the height and thickness of the end ribs should satisfy certain structural requirements. The increase of the thickness of the end ribs or the number of end ribs on each side can improve the load carrying of the column, and the latter is better.

Key words: square concrete-filled steel tube frame column; end ribs; finite element; seismic analysis; ductility

^{*} 收稿日期:2015-03-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51108171,51338004), National Natural Science Foundation of China(51108171,51338004);湖南省自然科学基金资助项目(14JJ3054);中央高校科研业务费资助项目(2014HNDX)

作者简介:黄 远(1982-),男,湖南衡阳人,湖南大学副教授,博士

[†] 通讯联系人, E-mail: huangy@hnu.edu.cn

钢管混凝土结构充分发挥了混凝土和钢材的优点,弥补了各自的缺点,具有承载力高、塑性和韧性好、施工方便、耐火性能和经济效果好等优点^[1-3]. 方钢管混凝土结构同时还具有建筑布局灵活、节点形式简单等优点,是发展前景广阔的一种结构形式^[4-6].

已有的试验研究发现,方钢管混凝土框架柱中钢管的宽厚比若超过一定的限值时,在荷载的作用下钢管壁端部较易产生向外的局部鼓曲,降低构件的承载能力及延性^[7]. 为了延缓方钢管混凝土框架柱的端部鼓曲,改善构件的延性和抗震性能,国内外学者已展开相关的试验和理论研究. 吕西林^[8]等进行了9个设置栓钉的方钢管混凝土柱低周反复试验;张耀春^[9]等进行了9根带肋薄壁方钢管混凝土柱的滞回性能试验研究;Mao^[10]等在方钢管混凝土柱端部设置钢板或钢板条约束钢管的局部屈曲,提高了方钢管混凝土柱的承载力和延性. 上述试验中,除Mao仅在端部设置约束外,其他试验均沿钢管壁全长设置栓钉或纵向加劲肋,但由于地震作用下方钢管混凝土框架柱仅在端部发生局部鼓曲,柱中部设置的栓钉或纵向加劲肋并不能完全发挥作用. 本文采用有限元软件MSC. Marc建立了设肋方钢管混凝土框架柱的壳-实体精细非线性有限元分析模型,在验证了有限元模型合理性的基础上,分析了不同参数条件下端部设肋方钢管混凝土框架柱的力学性能,为端部设肋方钢管混凝土框架柱的抗震设计和实际应用提供一定的参考.

1 有限元模型

对设肋方钢管混凝土框架柱进行非线性有限元模拟的关键影响因素包括单元类型、单元之间的连接、材料本构关系、边界条件以及求解方法. 下面对各影响因素分别进行说明. 试验模型如图1所示,有限元模型如图2所示. 试件的混凝土、钢管强度及试验结果见文献^[9].

1.1 单元类型

设肋方钢管混凝土框架柱有限元分析模型包括管内混凝土、钢管壁及纵向加劲肋. 管内混凝土采用八节点各向同性六面体单元(7号)模拟,钢管壁及加劲肋采用四节点薄壳单元(139号)模拟.

1.2 单元之间的连接

对于钢管壁与管内混凝土之间的粘结模拟,在Marc中将钢管壁与管内混凝土分别设置为接触单

元,两种接触单元之间通过“Touching”连接,摩擦系数取为0.25^[11].

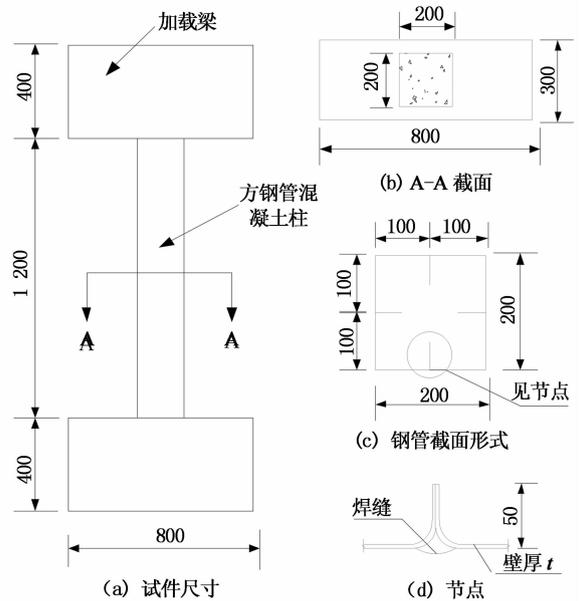


图1 试验试件

Fig. 1 Experimental specimen

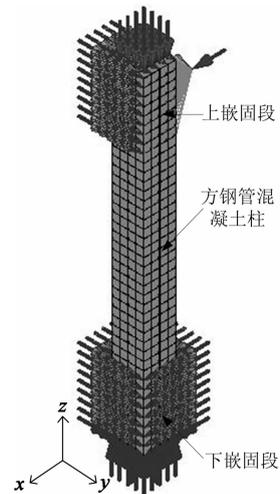


图2 有限元模型及边界条件

Fig. 2 The finite element model and boundary conditions

通过试验观察^[9],加劲肋始终与混凝土保持良好粘结,因此模型中将加劲肋的节点与混凝土的节点耦合,使加劲肋与相应混凝土的位移保持一致.

1.3 材料的本构模型

1.3.1 混凝土

混凝土材料采用Marc中提供的混凝土弹塑性本构模型“Oral Buyukozturk”^[12]. 混凝土的单轴应力-应变曲线采用韩林海^[1]建议的曲线,如图3所示. 泊松比取为0.2,弹性模量按式(1)计算^[13]:

$$E_c = \frac{10^5}{2.2 + 34.7/f_{ck}} \quad (1)$$

式中 f_{ck} 为混凝土抗压强度标准值。

混凝土的受拉开裂及软化行为通过开裂应力、受拉软化模量、裂面剪力传递系数 3 个参数定义,混凝土的开裂应力根据文献[14]由式(2)确定:

$$f_t = 0.26f_{cu}^{2/3} \quad (2)$$

式中 f_{cu} 为混凝土立方体抗压强度,根据陆新征[15]的建议,受拉软化模量取为弹性模量的 0.1 倍,裂面剪力传递系数取为 0.25。

1.3.2 钢材

钢管壁和加劲肋采用双折线弹塑性本构关系,屈服面选为“Von Mises”,应力-应变曲线如图 4 所示。图中 f_y, ε_y 分别为屈服强度及屈服应变,弹性模量和泊松比取试验值。

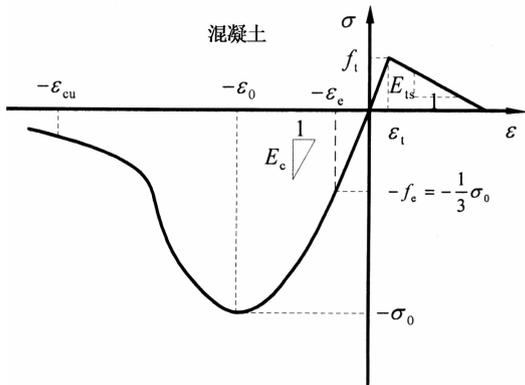


图 3 混凝土的单轴应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain model used for concrete

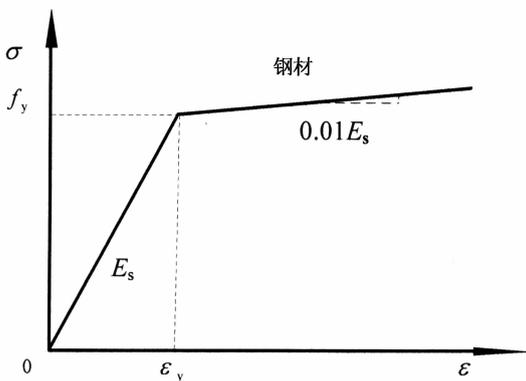


图 4 钢材的应力-应变曲线

Fig. 4 Stress-strain model used for steel

1.4 边界条件

方钢管混凝土框架柱上下两端有加载梁,柱嵌入其中。模型中没有建立加载梁的部分,而是建立了嵌入加载梁中的方钢管混凝土柱,分别命名为下嵌固段、上嵌固段。约束下嵌固段所有节点 x, y 方向的平动自由度及其底部所有节点 x, y, z 3 个方向的

平动自由度;约束上嵌固段所有节点 y 方向的平动自由度。竖向荷载采用“Face Load”的方式将等效均布应力施加在上嵌固段顶部的混凝土单元上。为了保证嵌固段内管内混凝土与钢管壁之间不发生滑移以及施加在混凝土上的竖向荷载在嵌固段内均匀可靠地分布到整个柱截面,将嵌固段内的混凝土单元与钢管壁单元通过“Glue”连接。水平荷载采用位移控制的单点加载,为了避免应力集中导致计算不收敛,在柱顶部建立独立的附加节点,附加节点与上嵌固段内的所有节点采用“Link”连接,使上嵌固段内的所有节点与附加节点具有相同 x 向位移。边界条件如图 2 所示。

1.5 求解控制

求解控制采用程序默认的“Newton-Raphson”平衡迭代法,收敛准则采用相对力(residual force)收敛,荷载增量步数经试算设置为 100,收敛容差设置为 5%。分析中模型将发生较大的弹塑性变形,为考虑几何非线性,打开求解控制的大应变(Large strain)选项。

2 模型验证

为了验证上述有限元参数选取的合理性,采用上述参数设置对文献[9]中的全部 9 个试件进行有限元分析。文献[9]为滞回性能试验,本文模型采用单调加载方式模拟滞回曲线,因为单调加载计算效率高,误差在可以接受的范围之内,单调加载曲线与滞回曲线的骨架曲线几乎重合,能够代表构件的受力特性。有限元分析结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出,有限元分析曲线的走向与试验曲线基本一致,最大承载力误差控制在 5% 以内,可以认为有限元分析结果与试验结果吻合良好。

图 6 为试件 C4N3 在位移为 35 mm 时混凝土的应变与钢管壁的应力分布云图,可以看出较大的应力、应变均集中在柱的两端,此时钢管壁端部已经屈服,受压翼缘发生了局部鼓曲,这些与文献[9]描述的试验现象很接近,说明该模型可较真实地模拟出设肋方钢管混凝土框架柱的受力性能。

综上所述,该有限元模型能够比较真实地模拟设肋方钢管混凝土框架柱的受力性能,选取的参数合理适用,可以在此模型的基础上,改变加劲肋的设置范围,对仅在端部设置加劲肋的方钢管混凝土框架柱的受力性能进行分析。

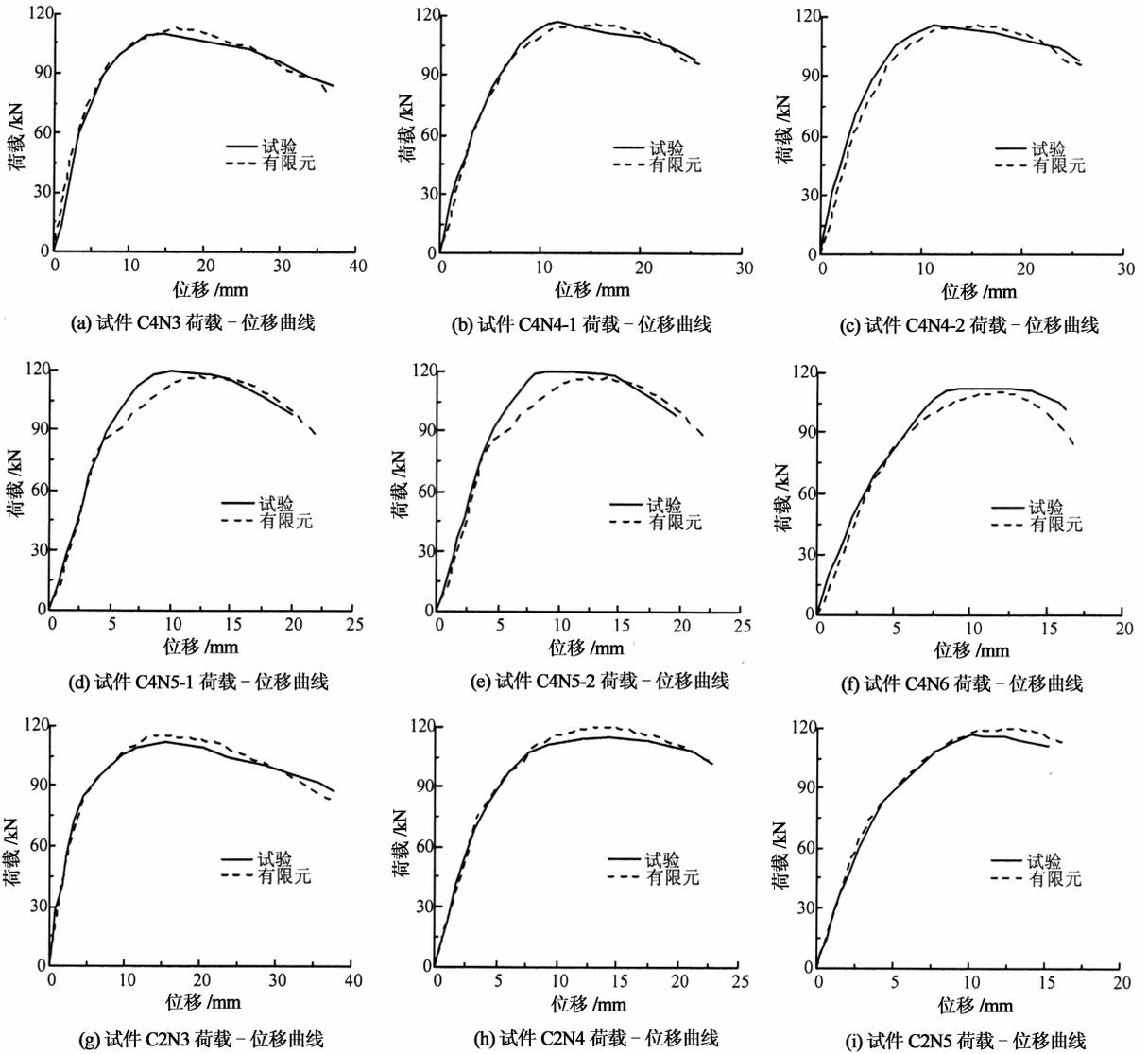


图5 设肋方钢管混凝土框架柱模型验证曲线

Fig. 5 Model validation curves of square concrete-filled steel tube frame column with ribs

3 参数分析

本文在验证了设肋方钢管混凝土框架柱有限元模型的合理性之后,采用有限元分析的方法对仅在端部设肋的方钢管混凝土框架柱各影响参数进行计算分析,对比各参数条件下的荷载-位移曲线,分析各参数对端部设肋方钢管混凝土框架柱的承载力、刚度,延性以及抗震性能的影响。

分别选取端部加劲肋的设置长度、加劲肋的高度、加劲肋的厚度、柱每边加劲肋的设置数量、轴压比、钢管壁厚度作为分析参数,如表1所示,其他参数同文献[9]。其中,基准试件加劲肋的设置长度为200 mm、高为50 mm、厚度为3 mm、每边设置数量为1条、轴压比为0.4、钢管壁厚为3 mm。

表1 参数分析取值

Tab. 1 Variables for parametric study

参数	取值			
加劲肋长度/mm	0	200	400	全长
加劲肋高度/mm	0	25	50	75
加劲肋厚度/mm	0	3	4.5	6
每边数量/条	0	1	2	3
轴压比	0.2	0.4	0.6	—
钢管壁厚/mm	3	4.5	6	—

3.1 端部加劲肋的设置长度

选取端部加劲肋的长度分别为一倍柱的边长(200 mm)、两倍柱的边长(400 mm)、全长设置加劲肋和不设端部加劲肋,其他条件不变的4个模型,计算得到的荷载-位移曲线如图7所示。

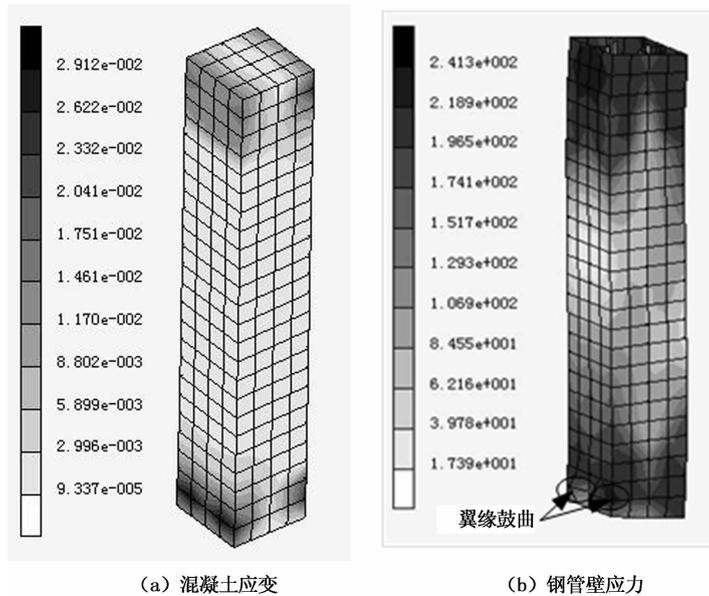


图 6 有限元分析云图

Fig. 6 The cloud pictures of finite element analysis

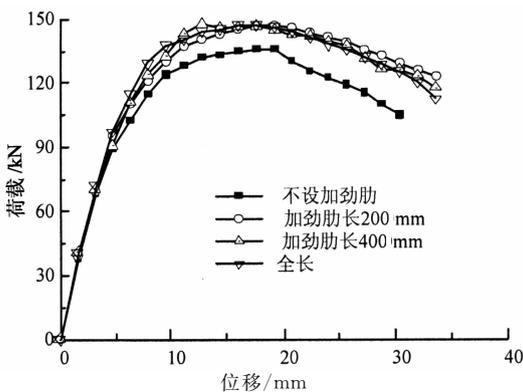


图 7 不同端部加劲肋长度下的荷载-位移曲线

Fig. 7 The load-displacement curve under different length of the end ribs

从图 7 可以看出,端部设肋方钢管混凝土框架柱的承载力比普通方钢管混凝土框架柱的承载力高,随着加劲肋长度的增加,方钢管混凝土框架柱的荷载-位移曲线几乎不变,仅承载力有微小的提高,下降段稍微变陡.这是因为,方钢管混凝土框架柱在荷载作用下仅在端部发生局部鼓曲,在端部设置加劲肋能够有效地延缓端部鼓曲,从而提高方钢管混凝土框架柱的承载力,但过长地设置加劲肋并不能充分发挥出加劲肋的作用,反而由于加劲肋与混凝土之间的应力集中使荷载-位移曲线的下降段稍微变陡.因此,端部设肋方钢管混凝土框架柱的加劲肋设置长度以 1~2 倍柱边长为宜,不需全长设置加劲肋.

3.2 加劲肋的高度

选取加劲肋的高度分别为 25 mm, 50 mm, 75

mm 和不设端部加劲肋,其他条件不变的 4 个模型,计算得到的荷载-位移曲线如图 8 所示.

从图 8 可以看出,端部设肋方钢管混凝土框架柱的承载力比普通方钢管混凝土框架柱的承载力高,随着端部加劲肋高度的增大,方钢管混凝土框架柱的荷载-位移曲线几乎不变.一般情况下,加劲肋的高度越大,刚度就越大,加劲肋与混凝土之间的粘结就越可靠,钢管壁端部也就越不容易发生局部鼓曲.本文由于加劲肋与混凝土始终粘结良好,耦合了加劲肋与混凝土的节点,因此,随着端部加劲肋高度的增加,加劲肋对端部钢管壁的约束作用并没有增强,方钢管混凝土框架柱的荷载-位移曲线几乎不变.在实际应用中,加劲肋的高度只需满足加劲肋与混凝土始终粘结良好的构造要求,可参考文献[16].

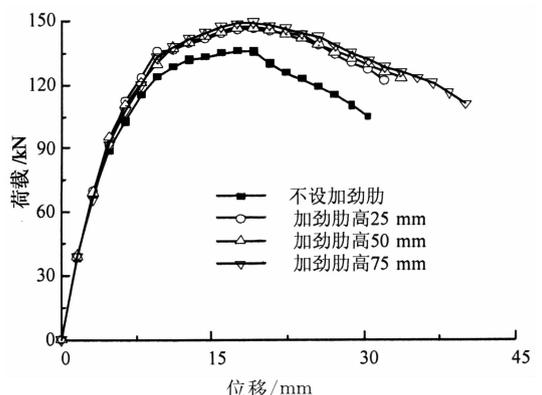


图 8 不同加劲肋高度下的荷载-位移曲线

Fig. 8 The load-displacement curve under different height of the end ribs

3.3 加劲肋的厚度

选取加劲肋的厚度分别为 3 mm, 4.5 mm, 6 mm 和不设端部加劲肋, 其他条件不变的 4 个模型, 计算得到的荷载-位移曲线如图 9 所示。

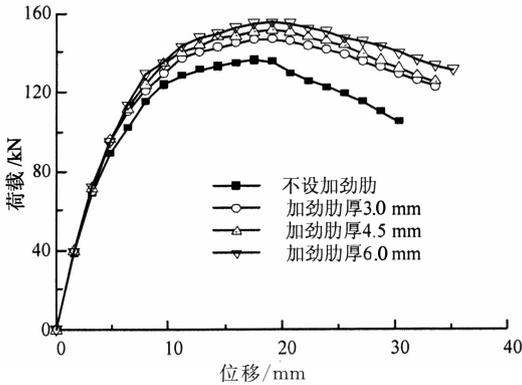


图 9 不同加劲肋厚度下的荷载-位移曲线
Fig. 9 The load-displacement curve under different thickness of the end ribs

从图 9 可以看出, 随着加劲肋厚度的增大, 端部设肋方钢管混凝土框架柱的承载力略有提高. 这是因为, 增大加劲肋的厚度, 相当于增加了柱的内部配筋面积, 同时提高了加劲肋的刚度, 加劲肋对端部钢管壁的约束作用增强, 从而提高了方钢管混凝土框架柱的承载力. 本文由于加劲肋与混凝土始终粘结良好, 耦合了加劲肋与混凝土的节点, 因此, 随着加劲肋厚度的增大, 加劲肋对端部钢管壁的约束作用不变. 在实际应用中, 加劲肋的厚度应满足加劲肋与混凝土始终粘结良好的构造要求, 可结合加劲肋的高度和文献[16]确定, 可以通过适当增大加劲肋的厚度来提高端部设肋方钢管混凝土框架柱的承载力。

3.4 每边加劲肋的设置数量

选取每边加劲肋的设置数量分别为 1 条、2 条、3 条和不设端部加劲肋, 其他条件不变的 4 个模型, 计算得到的荷载-位移曲线如图 10 所示。

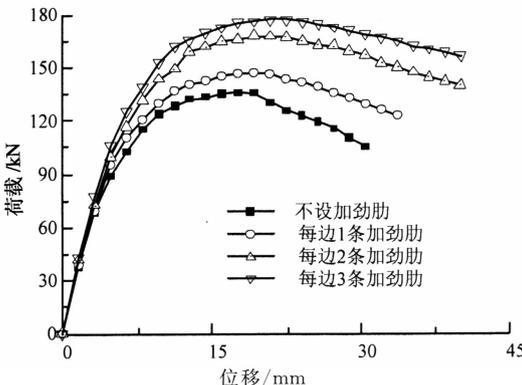


图 10 不同加劲肋设置数量下的荷载-位移曲线
Fig. 10 The load-displacement curve under different number of the end ribs

从图 10 可以看出, 随着每边端部加劲肋数量的增加, 端部设肋方钢管混凝土框架柱的承载力有较大的提高. 这是因为, 增加端部加劲肋的数量能够更好地延缓端部钢管壁的局部鼓曲, 同时相当于增加了柱的内部配筋面积, 从而提高了方钢管混凝土框架柱的承载力, 且效果比仅增大加劲肋的厚度要好. 因此, 可以通过增加端部加劲肋的设置数量来延缓柱端的局部鼓曲, 提高方钢管混凝土框架柱的承载力。

3.5 轴压比

轴压比是结构在水平荷载作用下的承载力、刚度以及延性的重要影响因素, 因此分别选取轴压比为 0.2, 0.4, 0.6 时, 端部不设加劲肋和端部设加劲肋的模型各 1 个, 其他条件不变, 计算得到的荷载-位移曲线如图 11 所示。

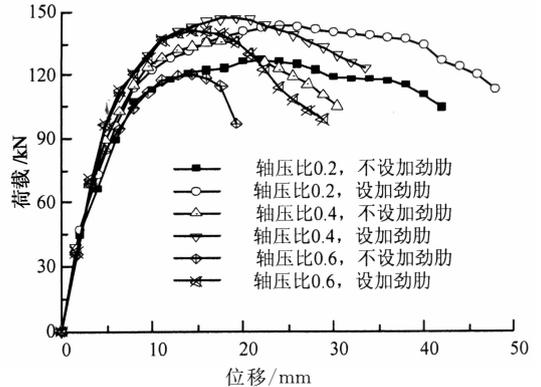


图 11 不同轴压比下的荷载-位移曲线
Fig. 11 The load-displacement curve under different axial load ratio

延性系数可以用位移、转角、曲率等来表示, 本文中的延性用位移延性来表示. 定义方钢管混凝土框架柱的承载力下降为最大承载力的 85% 时的位移为极限位移, 对应的荷载为极限荷载, 钢管壁的应力达到屈服应力时的位移为屈服位移, 对应的荷载为屈服荷载. 各模型的延性计算结果如表 2 所示。

从图 11 可以看出, 端部设置加劲肋能够提高方钢管混凝土框架柱的承载力; 随着轴压比的增大, 柱的初始刚度几乎不变, 极限位移变小, 曲线的下降段越陡峭. 从表 2 可以看出, 轴压比越大, 方钢管混凝土框架柱的延性呈越低趋势; 端部设肋方钢管混凝土框架柱的延性系数是端部不设加劲肋方钢管混凝土框架柱的延性系数的 1.20~1.30 倍, 说明端部设置加劲肋能够显著延缓钢管壁的鼓曲, 改善方钢管混凝土框架柱的抗震性能。

3.6 钢管壁的厚度

钢管壁的厚度是普通方钢管混凝土框架柱力学

性能的重要影响因素,也对端部设肋方钢管混凝土框架柱中加劲肋的作用产生重要影响.分别选取钢管壁厚为 3.0 mm,4.5 mm,6.0 mm 时,端部不设加劲肋和端部设加劲肋的模型各 1 个,其他条件不变,计算得到的荷载-位移曲线如图 12 所示,延性计算结果如表 3 所示.

从图 12 可以看出,端部设置加劲肋能够提高方钢管混凝土框架柱的承载力;随着钢管壁厚度的增加,方钢管混凝土框架柱的刚度增大,承载力与极限位移显著提高,曲线的下降段越平缓.从表 3 可以看出,随着钢管壁厚度的增加,方钢管混凝土框架柱的延性呈提高趋势;端部设肋方钢管混凝土框架柱的延性系数是端部不设加劲肋方钢管混凝土框架柱的延性系数的 1.15~1.20 倍,说明端部设置加劲肋能够延缓钢管壁的鼓曲,显著改善方钢管混凝土框架

柱的抗震性能.

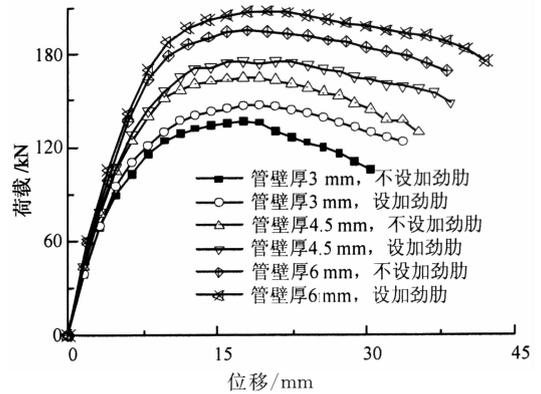


图 12 不同壁厚下的荷载-位移曲线
Fig. 12 The load-displacement curve under different wall thickness

表 2 不同轴压比下的延性系数

Tab. 2 Ductility factor under different axial pressure ratio

轴压比	加劲肋	极限荷载 /kN	极限位移 /mm	屈服荷载 /kN	屈服位移 /mm	延性系数
0.2	不设端部加劲肋	108.1	41.0	93.3	6.5	6.31
	设端部加劲肋	121.6	45.0	90.3	5.5	8.18
0.4	不设端部加劲肋	115.5	27.2	88.9	4.8	5.67
	设端部加劲肋	124.9	32.8	95.0	4.8	6.83
0.6	不设端部加劲肋	102.0	18.8	68.7	3.2	5.87
	设端部加劲肋	119.9	22.8	70.6	3.2	7.12

表 3 不同壁厚下的延性系数

Tab. 3 Ductility factor under different wall thickness

壁厚/mm	加劲肋	极限荷载 /kN	极限位移 /mm	屈服荷载 /kN	屈服位移 /mm	延性系数
3.0	不设端部加劲肋	115.5	27.2	88.9	4.8	5.67
	设端部加劲肋	124.9	32.8	95.0	4.8	6.83
4.5	不设端部加劲肋	140.0	31.2	111.9	5.6	5.57
	设端部加劲肋	149.3	37.6	117.3	5.6	6.7
6.0	不设端部加劲肋	166.2	39.0	136.5	6.0	6.5
	设端部加劲肋	177.0	41.5	133.1	5.5	7.5

4 结 论

本文根据试验结果,对不同轴压比下的全长设肋方钢管混凝土框架柱进行了非线性有限元分析,分析结果表明,有限元模型和各计算参数选取合理,与试验结果吻合良好.通过改变端部加劲肋的设置长度、加劲肋的高度、加劲肋的厚度、柱每边加劲肋的设置数量、轴压比和钢管壁厚度,对端部设肋方钢

管混凝土框架柱进行参数分析,得到以下结论:

1) 端部加劲肋的设置长度以柱的 1~2 倍边长为宜;在加劲肋高度满足构造要求的前提下,继续增大加劲肋的高度对方钢管混凝土框架柱的力学性能基本没有影响.

2) 增大端部加劲肋的厚度和增加端部加劲肋每边的数量都将提高方钢管混凝土框架柱的承载力,且增加端部加劲肋每边的数量在相当于增加了柱内配筋的同时显著加强了对端部钢管壁的约束,其对

承载力的提高作用更加明显。

3) 端部设肋方钢管混凝土的轴压比越大, 极限位移越小, 曲线下降越快, 延性系数呈降低趋势; 钢管壁的厚度越大, 承载力和极限位移越大, 曲线下降越慢, 延性系数呈增大趋势; 在方钢管混凝土框架柱的端部设置加劲肋能够延缓钢管壁的鼓曲, 提高柱的承载力, 显著改善方钢管混凝土框架柱的抗震性能。

本文仅对部分参数在给定的条件下对端部设肋方钢管混凝土框架柱的受力性能进行了数量有限的有限元分析, 更为具体有效的结论还有待进一步的非线性有限元分析和试验分析。

参考文献

- [1] 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: 23—24.
HAN Lin-hai. Concrete-filled steel tube structures—Theory and practice [M]. 2ed. Beijing: Science Press, 2007: 23—24. (In Chinese)
- [2] 凡红, 徐礼华, 杜国锋. 方钢管混凝土柱-钢梁节点静力性能试验研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2007, 34(9): 11—15.
FAN Hong, XU Li-hua, DU Guo-feng. Experimental studies on static behavior of concrete-filled steel square tubular column-steel beam connection [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2007, 34(9): 11—15. (In Chinese)
- [3] 霍静思, 何远明, 肖莉萍, 等. 高温后钢管混凝土抗多次冲击力学性能试验研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2012, 39(9): 6—10.
HUO Jing-si, HE Yuan-ming, XIAO Li-ping, *et al.* Experimental study on the dynamic behavior of concrete-filled steel tube after exposure to high temperatures under multiple impact loadings [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2012, 39(9): 6—10. (In Chinese)
- [4] 聂建国, 黄远, 樊健生. 考虑楼板组合作用的方钢管混凝土组合框架受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(3): 99—108.
NIE Jian-guo, HUANG Yuan, FAN Jian-sheng. Experimental study on load-bearing behavior of rectangular CFST frame considering composite action of floor slab [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(3): 99—108. (In Chinese)
- [5] 樊海涛, 周绪红. T型矩形钢管混凝土受压节点性能研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2002, 29(1): 105—109.
FAN Hai-tao, ZHOU Xu-hong. Behavior of concrete-filled rectangular steel tubular compression loaded T-connections [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2002, 29(1): 105—109. (In Chinese)
- [6] 赵跃宇, 易壮鹏, 王连华. 初始应力对钢管混凝土拱桥面内极限承载能力的影响[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2007, 33(3): 1—5.
ZHAO Yao-yu, YI Zhuang-peng, WANG Lian-hua. Effects of initial stress on the in-plane ultimate bearing capacity of CFST arch bridges [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2007, 33(3): 1—5. (In Chinese)
- [7] 黄宏, 张安哥, 李毅, 等. 带肋方钢管混凝土轴压短柱试验研究及有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(2): 75—82.
HUANG Hong, ZHANG An-ge, LI Yi, *et al.* Experimental research and finite element analysis on mechanical performance of concrete-filled stiffened square steel tubular stub columns subjected to axial compression [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(2): 75—82. (In Chinese)
- [8] 梁江浩, 吕西林, 殷小微, 等. 设置栓钉的方钢管混凝土柱抗震性能试验[J]. 结构工程师, 2012, 28(2): 116—121.
LIANG Jiang-hao, LV Xi-lin, YIN Xiao-wei, *et al.* Seismic behavior of CFRT columns with different stud arrangements [J]. Structural Engineers, 2012, 28(2): 116—121. (In Chinese)
- [9] 张耀春, 徐超, 卢孝哲. 带肋薄壁方钢管混凝土柱的滞回性能[J]. 东南大学学报, 2007, 37(1): 100—106.
ZHANG Yao-chun, XU Chao, LU Xiao-zhe. Hysteretic behavior of square concrete-filled thin-walled steel tubular columns with ribs [J]. Journal of Southeast University, 2007, 37(1): 100—106. (In Chinese)
- [10] MAO X Y, XIAO Y. Seismic behavior of confined square CFT columns [J]. Engineering Structures, 2006, 28(10): 1378—1386.
- [11] HUANG C S, YEH Y K. Axial load behavior of stiffened concrete-filled steel columns [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(9): 1222—1230.
- [12] BUYUKOZTURK O. Nonlinear analysis of reinforced concrete structures [J]. Computer & Structures, 1997, 7(1): 149—156.
- [13] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 287.
GB 50010—2010 Code for design of concrete structures [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010: 287. (In Chinese)
- [14] 过镇海. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 26.
GUO Zheng-hai. Reinforced concrete theory and analyse [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003: 26. (In Chinese)
- [15] 陆新征, 江见鲸. 混凝土结构有限元分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 196—211.
LU Xin-zheng, JIANG Jian-jing. Finite element analysis of concrete structures [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 196—211. (In Chinese)
- [16] 成戎, 王志浩, 石潇岩. 加劲肋在大宽厚比方钢管混凝土柱中的应用[J]. 工业建筑, 2008, 38(1): 100—102.
CHENG Rong, WANG Zhi-hao, SHI Xiao-yan. Application of reinforcing ribs in large w/t ratio concrete filled square steel tubes [J]. Industrial Construction, 2008, 38(1): 100—102. (In Chinese)