

异形钢框架节点域力学性能有限元分析

隋伟宁,李晓敏,刘 洋

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要 目的 研究一种由冷弯方钢管柱 H 型钢梁、上翼缘外加强环板、下翼缘贯通隔板构成的异形钢框架节点在地震作用下的力学性能。方法 采用有限元软件 ABAQUS 进行分析,考察低周往复荷载作用下不同参数对节点域力学性能的影响,参数包括钢管柱宽度与弯角处曲率半径比、钢管柱径厚比、钢管柱宽度与梁高比。结果 在弹性阶段,随着 D/t 的增大屈服抗剪承载力提高,随着 D/h 的增大屈服抗剪承载力提降低,而 D/r 对屈服抗剪承载力基本无影响。在弹塑性阶段,随着 D/r 与 D/t 的增大,极限抗剪承载力均降低,随着 D/h 的增大极限抗剪承载力提高。结论 引入修正系数 φ 的屈服抗剪承载力计算公式可以较好地评价异形钢框架节点域的力学性能。

关键词 异形钢框架节点域;有限元分析;冷弯方钢管;抗剪承载力;直接分析法

中图分类号 TU317

文献标志码 A

Finite Element Analysis of Mechanical Properties of Irregular Panel Zone in Steel Frame Structure

SUI Weining, LI Xiaomin, LIU Yang

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: In order to study the mechanical properties of irregular panel zone under earthquake action, which is composed of a cold-formed square steel tube, H-shaped steel beam, an upper flange external diaphragm, a lower flange through diaphragm. The multi-parameter analysis was carried out by finite element analysis software ABAQUS. Under the low cyclic loading, the effect of the above parameters on the mechanical properties of the panel zone is discussed. The main parameters include the ratio of the width of the steel column tubular to the radius of curvature at the corner, the column tubular diameter to thickness ratio, the width of the column tubular and the beam height ratio. In the elastic stage, the yield shear capacity increases with the increase of D/t , with D/h increases the yield shear capacity and decreases, while D/r has no effect on the yield shear capacity. In the elastoplastic stage, the ultimate shear capacity decreases with the increase of D/r and D/t , and the ultimate shear capacity increases with the increase of D/h . The calculation formula of panel zone shear capacity correction coefficient φ of the node domain is introduced to

收稿日期:2019-06-05

基金项目:国家自然科学基金项目(51108278);辽宁省自然科学基金项目(20180550595)

作者简介:隋伟宁(1979—),女,副教授,博士,主要从事钢结构方面研究。

evaluate the mechanical properties of the panel zone. The research results of this study can be used for the panel zone mechanics model in the direct analysis method.

Key words: irregular panel zone in steel frame structure; finite element analysis; cold-formed square steel tube; shear load bearing capacity; direct analysis method

兵库县南部地震和美国北岭地震震害调查结果表明^[1-2],中低层钢结构建筑物梁柱节点部位过早开裂,影响梁柱塑性变形能力的发挥,导致结构发生脆性断裂破坏.各国学者提出了多种设计对策^[3-6],其中“平衡节点域”是解决脆性断裂破坏的对策之一.文献[7]通过控制节点域抗剪承载力实现节点域的“平衡设计”,提出当节点域抗剪承载力设计值为梁屈服时节点域处产生剪力的1.1倍时,结构的抗震性能最优.外加强环板式节点虽然属于半刚性节点,但是与贯通隔板式节点相比,保证了柱子的连续性,更加符合我国设计规范^[8].基于外加强环板式节点的空间造型不利于建筑空间的有效利用,且在梁端负弯矩作用下,与下翼缘连接的外加强环板受高宽比影响,很容易引起局部失稳^[9-10],从而造成结构承载力和刚度的迅速下降.基于此,笔者采用有限元分析方法对上环下贯式节点域在地震作用下的力学性能进行研究,获得该新型异形节点域抗剪承载力评价公式,丰富直接分析法可用的节点域设计模型.

1 有限元模型及验证

1.1 网格划分及材料特性

笔者建立的上环下贯式节点域模型如图1所示.有限元模型采用S4R壳单元,为了保证计算精度和减少计算时间,节点域附近网格划分较密,节点域其余部分网格划分较疏.建模分析时未考虑焊缝以及焊接残余应力影响,有限元模型如图2所示.材料的应力-应变曲线采用简化的二折线模型,钢材屈服强度 $f_y=360\text{ MPa}$,弹性模量 $E=206\text{ GPa}$,泊松比 $\nu=0.3$.根据文献[9-10]研究成果,冷弯方钢管柱焊缝部位屈服强度 $f_w=1.39 f_y$ 、平

板部位屈服强度 $f_{t2}=1.08 f_y$ 、弯角部位屈服强度 $f_c=1.42 f_y$.

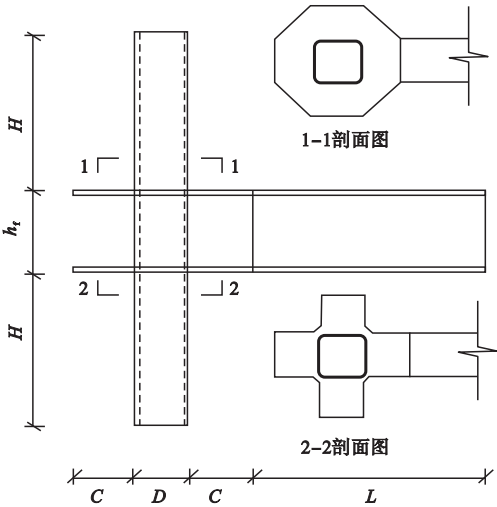


图1 方钢管-H型钢梁节点

Fig. 1 Diagram of square steel tubular column-H-shaped steel beam joint

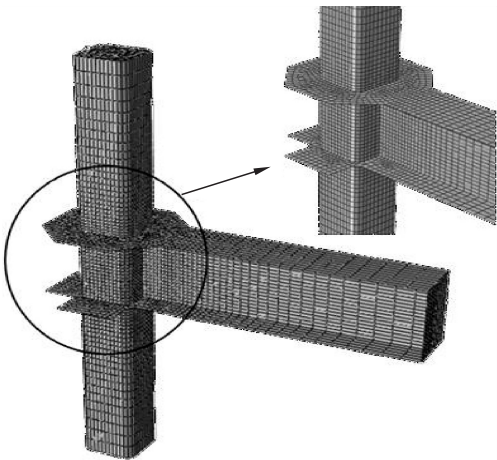


图2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

1.2 荷载及边界条件

首先在柱顶施加在轴向压力,再在梁端部施加竖向力,直至节点破坏,边界条件见图3.梁端施加的竖向力采用位移控制,加载制度见图4.

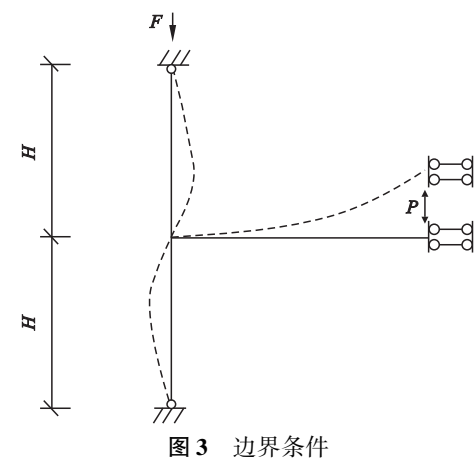


图 3 边界条件

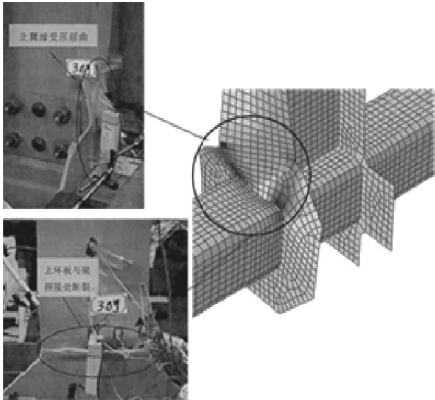


图 5 有限元模型与试验破坏状态

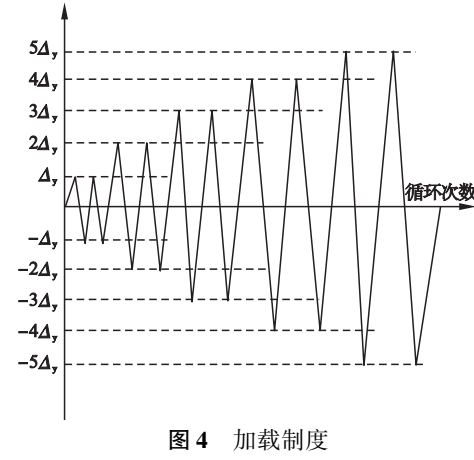


图 4 加载制度

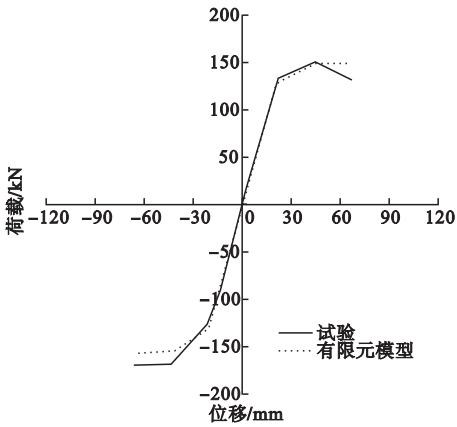


图 6 试验和有限元骨架曲线对比

1.3 有限元模型验证

笔者将有限元模拟结果与文献[11]中试验结果进行对比,以验证模型的正确性. 图 5 为有限元和试验对比图,从图中可以看出,有限元分析方法很好地模拟了试验过程中外加加强环板出现的局部失稳现象. 图 6 为试验和有限元分析获得的荷载 - 位移骨架曲线对比曲线,从图中可以看出,虽然在加载后期有限元分析结果与试验结果略有不同,但是在屈服前,有限元分析结果与试验结果吻合较好. 由于有限元建模过程中,未考虑焊缝及焊接残余应力等的影响,但是由于误差很小,且有限元分析结果同样表现出双向加载不对称现象,可以认为有限元分析方法能很好地模拟试验破坏模态、部分框架结构的承载力和变形性能.

2 节点域屈服剪力

节点域的受力状态如图 7 所示.

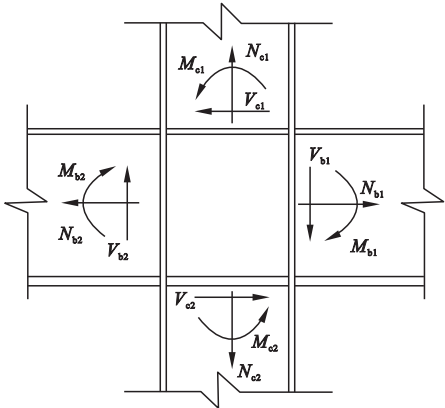


图 7 节点域应力状态

节点域处剪力为

$$V_{pz} = \frac{M_{b2} + M_{b2}}{d_b - t_{bf}} - \frac{V_{c2} + V_{c2}}{2}. \quad (1)$$

Von Mises 屈服准则对应的节点域屈服抗剪承载力为

$$V_{py} = \frac{f_y}{\sqrt{3}} A_{cw} \sqrt{1 - n^2}. \quad (2)$$

式中: f_y 为钢管柱屈服强度标准值; A_{cw} 为节点域的有效抗剪体积. 可以看出节点域的屈服抗剪承载力与材料的屈服强度和节点域的抗剪有效面积相关.

文献[12]给出的 I 型和 H 型柱截面对应的节点域有效抗剪面积为

$$A_{cw} = A_c - 2b_{cf}t_{cf} + t_{cf}(t_{cw} + 2r_c). \quad (3)$$

式中: A_c 为柱横截面积; b_{cf} 和 t_{cf} 分别为柱翼缘板的宽度和厚度; d_b 为梁高; t_{bf} 为梁翼缘厚度; t_{cw} 为柱翼缘厚度; r_c 为 H 型钢根部圆角半径.

文献[13]给出的节点域有效抗剪面积

$$A_{cw} = \frac{(d_c - t_c)}{\kappa} t_p. \quad (4)$$

式中: 箱形、方形柱中 $\kappa = \frac{9}{8}$; 圆形柱中 $\kappa = \frac{4}{\pi}$.

文献[8]中, 节点域有效抗剪面积计算式如下:

$$A_{cw} = \frac{(d_c - t_c)}{\varphi} t_p. \quad (5)$$

式中: φ 为折减系数, 箱型截面柱 $\varphi = (5\sqrt{3})/6$, 圆形截面柱 $\varphi = (3\sqrt{3})/2\pi$; d_c 为柱外壁直径; t_c 为柱壁厚度; t_p 为节点域厚度, 对于 H 型截面为腹板厚度, 对于矩形或圆形截面为两倍壁厚.

3 设计参数对节点域力学性能分析

3.1 节点域分析参数的确定

采用验证后的有限元模型, 考察平衡节点域设计的冷弯厚壁方钢管-H 型钢梁连接节点在低周往复荷载作用下的工作机理和破坏模态. 其中柱长 H 、梁长 L 、梁翼缘宽 b_f 、翼缘板 t_f 、梁腹板厚度 t_w 以及钢管柱直径 D 在分析过程中保持不变, 选取方钢管弯角处曲率半径 r 为 20 mm、30 mm、60 mm、80 mm, 钢管柱壁厚度 t 为 6 mm、7 mm、8 mm、10 mm、12 mm, 梁高 h 为 240 mm、260 mm、280 mm、300 mm、320 mm、340 mm, 轴压比为 0.1、0.2、0.3、0.4 时的 16 组模型, 研究弯角部位几何形状和钢材冷作硬化引起的材料屈服承载力变化对上环下贯式部分钢框架节点域承载力和刚度的影响. 由文献[14-19]的研究成果, 定义 D/r 为钢管柱宽度与弯角处曲率半径比, D/t 为钢管柱的宽度与厚度比, D/h 为钢管柱宽度与梁高度比.

3.2 D/r 对节点域应力分析

为了考察弯角处占整个受剪截面的比率对节点域受力性能的影响, 改变 D/r 建立 3 个模型, 钢管柱宽度均取为 200 mm. 弹塑性阶段的等效塑性应变分布云图如图 8 所示. 从图中可以看出, 在弹塑性阶段, 节点发生等效塑性应变的区域主要在节点域平板部位、上环板与柱连接处、上环板与下贯板, 塑性应变沿节点域对角线发展. 节点域产生塑性区域的面积随着 D/r 的增大而增加.

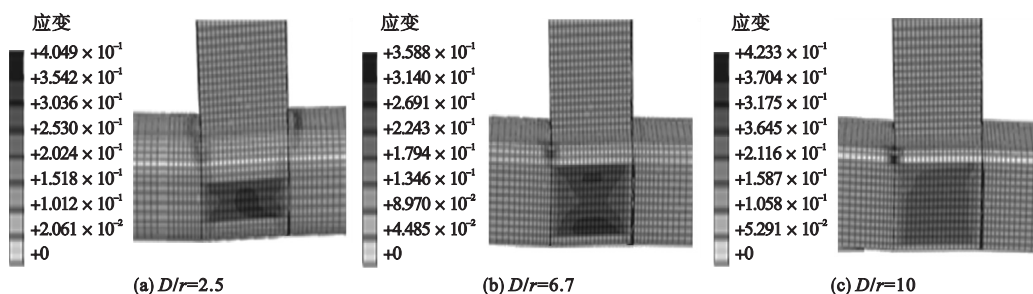


图 8 弹塑性阶段的等效塑性应变分布云图

Fig. 8 Equivalent plastic strain distribution contour plot of the limit stage

根据式(2)和式(3)整理得节点域剪力-剪切角($V-\gamma$)滞回曲线与骨架曲线如图9、图10所示.从图中可以看出,在弹性阶段内,骨架曲线基本重合,说明不同的 D/r 值表现出的力学性能一致;弹塑性阶段, D/r 值越大,有限元节点模型的极限抗剪承载力越小,在达到极限荷载之后下降较为平缓,说明理想状态下试件拥有良好的延性性能.

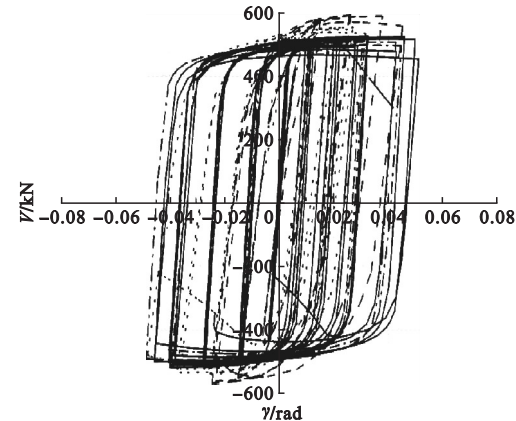


图9 不同 D/r 下节点滞回曲线

Fig. 9 Hysteretic curves of the different D/r

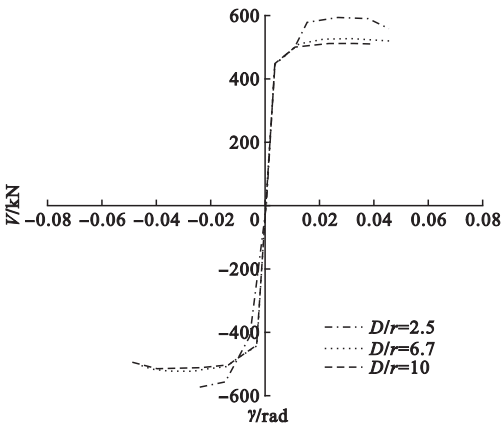


图10 不同 D/r 下节点骨架曲线

Fig. 10 Skeleton curves of the different D/r

D/r 在2.5~10时有限元模型的力学性能结果见表1.当 D/r 增大,屈服抗剪承载力 V_y 、节点域初期抗剪刚度 K_1 与延性系数 μ 也增大,极限抗剪承载力 V_u 减小,节点域的屈服抗剪承载力计算值与有限元得出的值差距逐渐减小,说明 D/r 的变化对节点域的抗剪承载力和初期抗剪刚度均有较大影响.

表 1 不同 D/r 下节点力学性能

Table 1 Mechanical properties of the different D/r

编号	D/r	V_{py}/kN	V_y/kN	V_u/kN	$K_1/(\text{kN}\cdot\text{rad}^{-1})$	μ
A-1	10	447	447	508	122 500	5.666 7
A-2	6.7	447	444	521	111 250	5.575 0
A-3	2.5	447	424	589	84 800	5.060 0

3.3 D/t 对节点域应力分析

为研究 D/t 对节点域应力的影响,笔者建立 D/t 在16.7~28.6的不同模型.极限阶段的等效塑性应变分布云图如图11所示.可以看出,当 D/t 的值为16.7时,节点发生等效塑性应变的区域主要在上环板与梁连接处、上环板与下贯板.当 D/t 取值在20~28.6时,节点发生等效塑性应变区域主要在节点域平板部位、上环板与柱连接处、上环板与下贯板,塑性应变沿节点域对角线发展.当 D/t 为28.6时,在靠近节点域的下柱端也产

生等效塑性应变,产生应力集中现象.研究表明节点域产生塑性区域的面积将会随着 D/t 的增大而增加.

D/t 在16.7~28.6内变化的各有限元节点模型剪力-剪切角($V-\gamma$)滞回曲线与骨架曲线如图12、图13所示.从图中可以看出,在弹性阶段内,随着 D/t 增大,屈服抗剪承载力呈减小的趋势;在弹塑性阶段,极限抗剪承载力随着 D/t 的增大而减小;在达到极限荷载之后下降较为平缓,说明理想状态下试件拥有良好的延性性能.

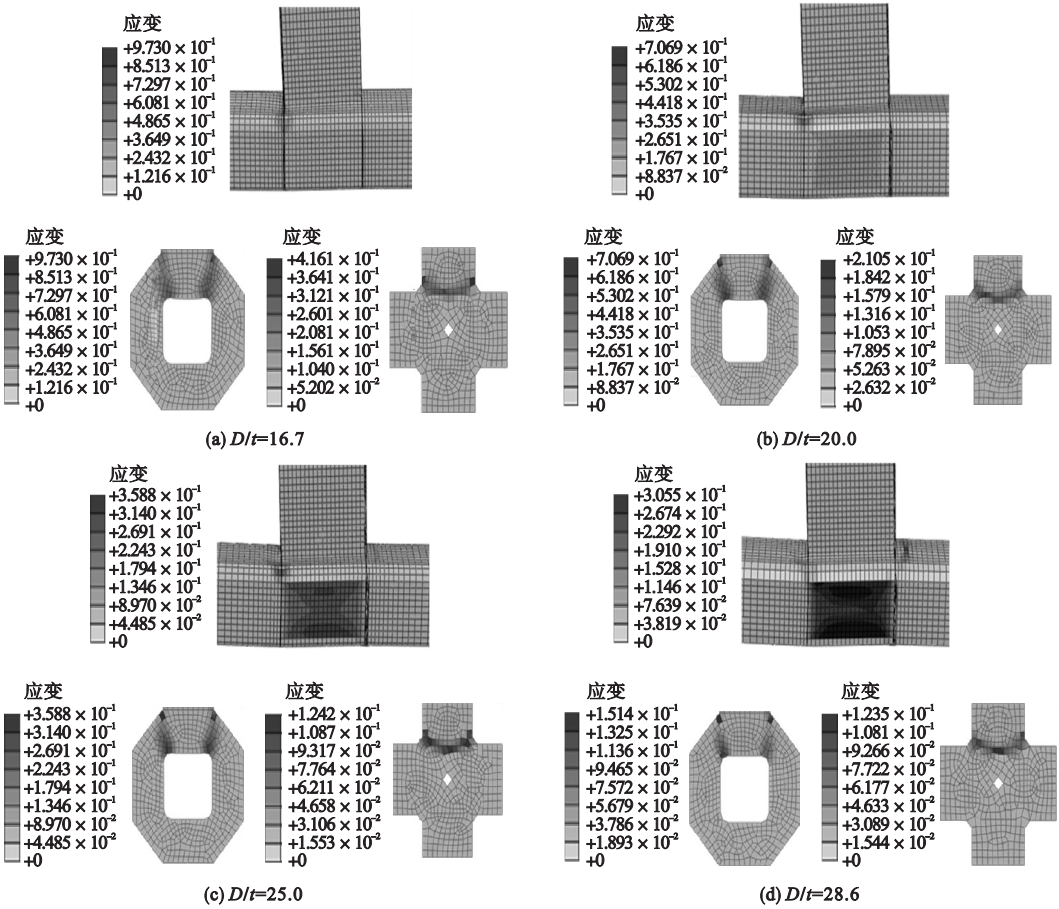


图 11 弹塑性阶段的等效塑性应变分布云图

Fig. 11 Equivalent plastic strain distribution contour plots of the limit stage

D/t 对节点的承载能力储备系数 S_r 影响不明显,对节点屈服后承载力继续提高的能力影响较小.节点域的延性随着 D/t 的增大而增大, D/t 值越大,有限元模型节点域在地震作用下耗能能力越强.

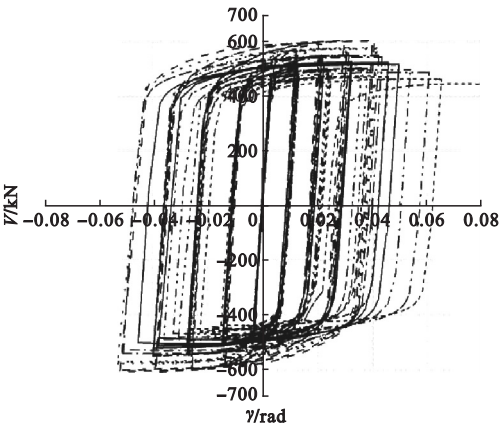


图 12 不同 D/t 下节点滞回曲线

Fig. 12 Hysteretic curves of the different D/t

D/t 在 16.7 ~ 33.3 时有限元模型力学性能结果见表 2. 由表可知, D/t 的改变对节点域的抗剪承载力和初期刚度有不同程度的影响. V_y 、 V_u 与 K_1 随着 D/t 的增加而减小.

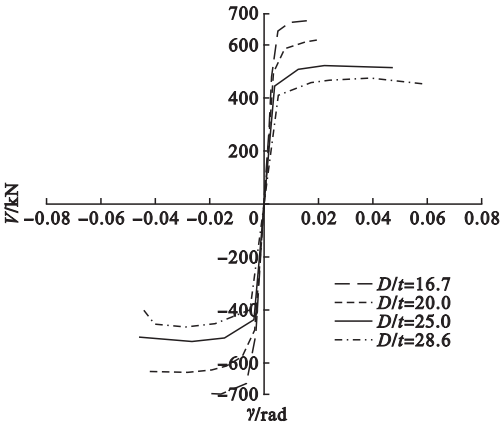


图 13 不同 D/t 下节点骨架曲线

Fig. 13 Skeleton curves of the different D/t

表 2 不同 D/t 下节点力学性能

Table 2 Mechanical properties of the different D/t

编号	D/t	V_{py}/kN	V_y/kN	V_u/kN	$K_1/(\text{kN}\cdot\text{rad}^{-1})$	μ
B-1	28.6	395	409	471	79 265	5.587 5
B-2	25.0	447	445	521	111 250	5.325 0
B-3	20.0	546	492	619	132 973	5.297 3
B-4	16.7	641	530	690	160 606	3.909 1

3.4 D/h 对节点域应力分析

为研究 D/h 对节点域应力的影响,建立 D/h 在 0.59~0.83 的不同模型.弹塑性阶段的等效塑性应变分布云图如图 14 所示.从图中可以看出,当 D/h 在 0.59~0.63 时,节点发生等效塑性应变的区域主要在上环板与梁连接处、节点域、靠近节点域处的上柱端与下柱端、上环板、下贯板;当 D/h 在 0.67~0.83 变化时,节点发生等效塑性应变区域主要在节点域平板部位、上环板与柱连接处、上环板、下贯板,塑性应变沿节点域对角线发展.

研究表明节点域进入塑性区域的面积随着 D/h 值的增大而减小.

D/h 在 0.59~0.83 变化时各节点模型的剪力-剪切角($V-\gamma$)滞回曲线与骨架曲线如图 15、图 16 所示.由图可知,节点域的滞回曲线均为较为饱满的梭形.在弹性阶段内,试件处于弹性阶段,剪力-剪切角曲线呈直线, D/h 越大屈服抗剪承载力越大;加载后期, D/h 越大节点域的极限抗剪承载力越大,在达到极限荷载之后下降较为平缓,说明理想状态下试件拥有良好的延性性能.

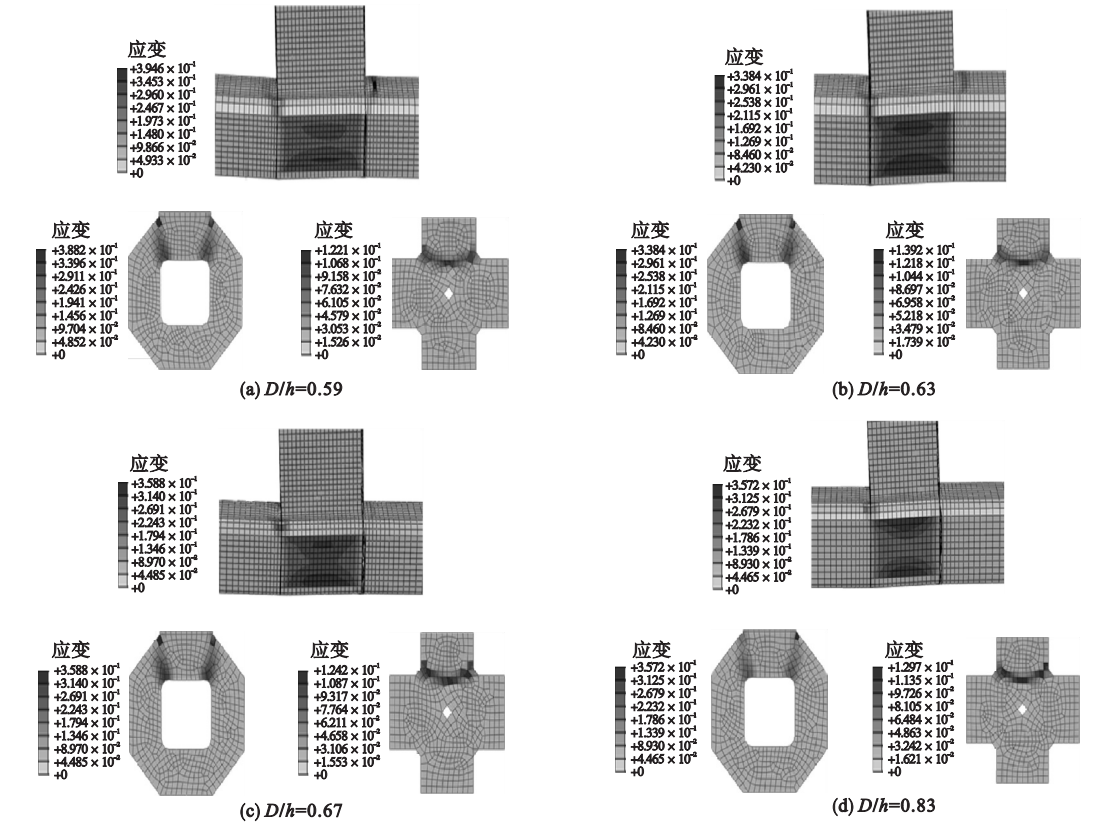


图 14 弹塑性阶段的等效塑性应变分布云图

Fig. 14 Equivalent plastic strain distribution contour plots of the limit stage

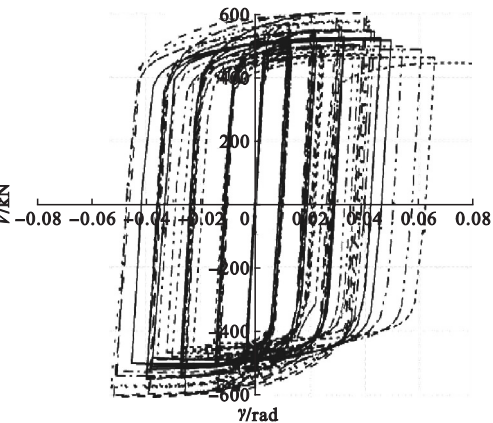


图 15 不同 D/h 下节点滞回曲线

Fig. 15 Hysteretic curves of the different D/h

D/h 在 0.59 ~ 0.83 时不同模型节点域的力学性能结果见表 3. 由表可知,随着 D/h 的增大, V_y 、 V_u 和 K_1 都处于增长趋势;但节点域的延性系数 μ 降低,地震作用下的耗能

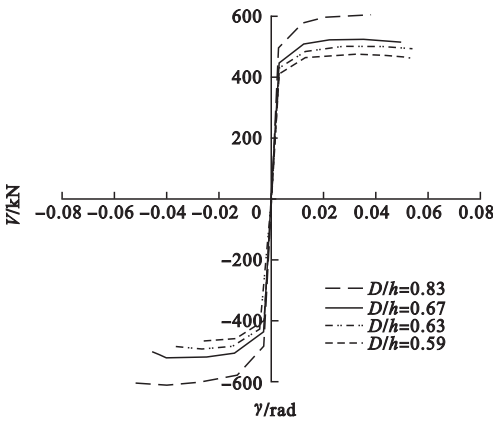


图 16 不同 D/h 下节点骨架曲线

Fig. 16 Skeleton curves of the different D/h

能力也会降低.说明 D/h 的变化对节点域的极限抗剪承载力和初期抗剪刚度均有较大影响.

表 3 不同 D/h 下节点力学性能

Table 3 Mechanical properties of the different D/h

编号	D/h	V_{py}/kN	V_y/kN	V_u/kN	$K_1/(\text{kN}\cdot\text{rad}^{-1})$	μ
C-1	0.59	405	409	473	99 756	6.048 8
C-2	0.63	426	428	499	107 000	5.900 0
C-3	0.67	447	445	521	111 250	5.325 0
C-4	0.83	509	493	597	133 243	5.567 6

4 节点域屈服抗剪承载力公式的修正

4.1 单参数对承载能力影响曲线

通过修正系数 φ 对冷弯厚壁方钢管-H型钢梁框架节点域处的抗剪承载力计算公式进行修正,修正系数 φ 计算如下:

$$\varphi = V/V_{py} \tag{6}$$

式中: V 为根据有限元得出的屈服抗剪承载力; V_{py} 为根据文献[8]得出的屈服抗剪承载力.

不同参数对修正系数影响曲线见图 17. 由图可知, D/r 、 D/t 、 D/h 对冷弯厚壁方钢管-H型钢梁节点域处抗剪承载力修正系数 φ 公式影响均比较大.

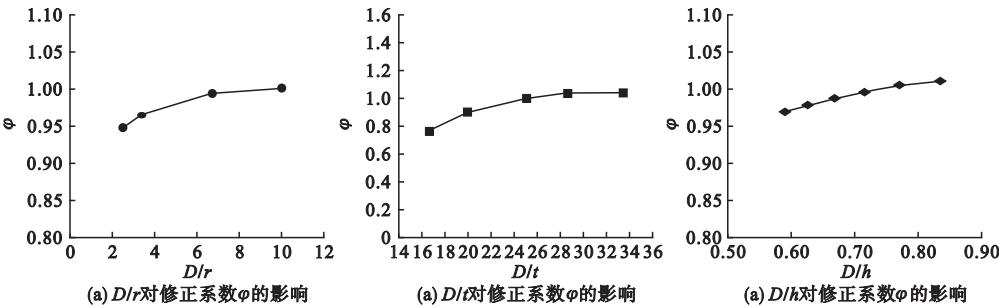


图 17 影响参数曲线

Fig. 17 Effect of each parameter on φ

4.2 修正系数 φ 回归分析

上述分析表明 D/r 、 D/h 、 D/t 在修正时均需考虑,3 个参数均为非线性关系,所以关于修正系数 φ 的评价式采用幂函数形式,计算式为

$$\varphi = A \times \left(\frac{D}{r}\right)^{x_1} \times \left(\frac{D}{t}\right)^{x_2} \times \left(\frac{D}{h}\right)^{x_3}. \quad (7)$$

通过 excel 软件中的数值分析拟合可得 $A=0.23$, $X_1=0.45$, $X_2=0.15$, $X_3=0.03$. 将各数值带入式(7),得到 φ 的评价式为

$$\varphi = 0.23 \times \left(\frac{D}{r}\right)^{0.45} \times \left(\frac{D}{t}\right)^{0.15} \times \left(\frac{D}{h}\right)^{0.03}. \quad (8)$$

4.3 对修正系数 φ 计算式评价

利用式(8)将计算结果与有限元模拟结果进行对比,结果见图 18. 从图中可以得出,有限元分析值与计算值比值的平均值和方差值分别为 1.000 3、0.025 8,在正态分布的置信区间为[0.949 7, 1.050 9]. 由此可见,式(8)可以较好地评价修正系数 φ ,可为冷弯厚壁方钢管-H 型钢梁节点设计计算提供借鉴.

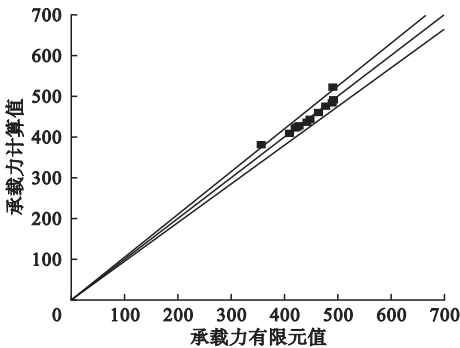


图 18 计算结果与有限元结果对比

Fig. 18 Comparison diagram of calculated and finite element

5 结 论

(1)冷弯厚壁方钢管柱-H 型钢梁节点域的抗剪承载力、初始刚度和延性等力学性能均随 D/r 、 D/t 、 D/h 的变化而产生不同程度的变化.

(2)对冷弯厚壁方钢管梁柱节点域的屈服抗剪承载力修正系数评价公式中,需要考虑钢管柱宽度与弯角处曲率半径比 D/r 、钢管柱宽度与柱壁厚度比 D/t 与钢管柱宽度与梁高 D/h 的影响.

(3)在一定范围内,得到的公式可以较好地评价修正系数 φ .

参考文献

[1] KUNNATH S K, MALLEY J O. Advances in seismic design and evaluation of steel moment frames: recent findings from FEMA/SAC phase II project [J]. Journal of structural engineering, 2002, 128 (4) : 415 - 419.

[2] MALLEY J O. SAC steel project: summary of phase I testing investigation results [J]. Engineering structures, 1998, 20 (4) : 300 - 309.

[3] 牟犇,陈功梅,张春巍,等. 带外加强环不等高梁-钢管混凝土柱组合节点抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38 (5) : 77 - 84. (MOU Ben, CHEN Gongmei, ZHANG Chunwei, et al. Experimental investigation on seismic behavior on steel unequal-depth-beams to CFT column connection with external diaphragm [J]. Journal of building structures, 2017, 38 (5) : 77 - 84).

[4] 王万祯,李华,郭鸣鸣,等. 隔板贯通方钢管轻骨料混凝土柱-H 形梁与箱形梁异形节点抗震性能试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35 (1) : 40 - 50. (WANG Wanzhen, LI Hua, GUO Mingming. Test on seismic behavior of diaphragm-through irregular joints of lightweight aggregate concrete-filled square steel tubular column and H-section steel beam and steel box beam [J]. Journal of architecture and civil engineering, 2018, 35 (1) : 40 - 50).

[5] 隋伟宁,白雪,李幅昌. 节点域构造不同的外加强环式梁柱异型钢框架节点有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2013, 29 (4) : 675 - 681. (SUI Weining, BAI Xue, LI Guochang. Finite element analysis on steel beam-column strengthened by plate ring with different details in the panel zone [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2013, 29 (4) : 675 - 681).

[6] 贾连光,王哲,刘艳飞. 孔洞位置对蜂窝式梁柱节点破坏形式的影响[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2015, 31 (5) : 838 - 846. (JIA Lianguang, WANG Zhe, LIU Yanfei. Influences of hole position on the damage form of castellated beam column joints [J]. Journal of Shenyang

- jianzhu university (natural science), 2015, 31 (5):838-846).
- [7] JIN Jun, SHERIF E T. Evaluation of FEMA-350 seismic provisions of steel panel zones [J]. Structure engineering, 2005, 131 (2): 250-258.
- [8] 中华人民共和国建设部. 钢结构设计标准: GB50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
(Ministry of Construction of the PRC. Standard of design of steel structures: GB50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.)
- [9] 李元齐, 李功文, 沈祖炎, 等. 冷弯厚壁型钢考虑冷弯效应的屈服强度计算方法研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(5): 1-7.
(LI Yuanqi, LI Gongwen, SHEN Zuyan, et al. Modification method for yield strength of cold-formed thick-walled steel sections considering cold-forming effect [J]. Journal of building structures, 2015, 36(5): 1-7.)
- [10] 沈祖炎, 温东辉, 李元齐, 等. 冷弯厚壁钢管截面不同部位材料特性分布模型[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(7): 981-990.
(SHEN Zuyan, WEN Donghui, LI Yuanqi, et al. Distribution patterns of material properties for cross-section of cold-formed thick-walled steel rectangular tubes[J]. Journal of tongji university (natural science), 2016, 44 (7): 981-990.)
- [11] 林坤洪. 新型方管柱与 H 型钢梁下贯上环隔板式节点受力性能研究与应用[D]. 南京: 东南大学, 2016.
(LIN Kunhong Mechanical performance research and application of bottom-through-diaphragm top-ring joint connecting square steel tube column and H-shaped steel beam [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.)
- [12] Eurocode 3. Design of steel structures-part 1-4: general rules supplementary rules for stainless steels [S]. Brussels: European Standard Committee, 2003.
- [13] NTC DM14 Gennaio 2008. Italian technical code for constructions [S]. Rome: [s. n.], 2008.
- [14] 张圳堡. 方钢管柱-H 型钢梁柱外传力式节点抗震性能及参数分析[D]. 广州: 广州大学, 2017.
(ZHAN Zhenbao. Analysis on seismic behaviors and parameters of H-beams to square steel tubular column joints transferring forces outside columns [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2017.)
- [15] 赵根田, 陈明, 马晓飞. 冷弯型钢组合截面 T 形节点抗震性能研究[J]. 工程力学, 2015 (1): 184-191.
(ZHAO Gentian, CHEN Ming, MA Xiaofei. Seismic behavior of t-shaped joint using cold-formed compound section steel [J]. Journal of engineering mechanics, 2015(1): 184-191.)
- [16] 祝令民. 外加强环拼接形式对方钢管柱-H 型钢梁节点力学性能的影响[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2014.
(ZHU Lingmin. Influence of external stiffening ring splice forms on mechanical properties of square steel tubular column to h-shaped beam connections [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2014.)
- [17] 李怀宁, 郁有升, 梁晓楠. 梁柱弱轴连接节点参数的变化对节点域性能的影响分析[J]. 工程建设, 2014, 46(2): 6-11.
(LI Huaining, YU Yousheng, LIANG Xiaonan. Analysis of influence of weak axis connection parameters variation of beam-column on node area performance [J]. Journal of engineering construction, 2014, 46(2): 6-11.)
- [18] 柴昶, 刘迎春. 冷成型焊接圆钢管径厚比限值合理取值的讨论[J]. 建筑结构, 2015 (3): 44-47.
(CHAI Chang, LIU Yingchun. Discussion on limited value of diameter-thickness ratio for cold-formed welded circular steel tube [J]. Journal of building structures, 2015 (3): 44-47.)
- [19] 闻洋, 姜雯丽霞, 韩洪鹏, 等. 基于正交的圆钢管再生混凝土柱力学性能研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2019, 35(3): 462-469.
(WEN Yang, JIANG Wenlixia, HAN Hongpeng, et al. Study on mechanics properties of recycled concrete filled circular steel tube columns based on orthogonal design [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2019, 35 (3): 462-469.)

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)