

局部开孔对矩形钢板抗剪承载能力影响研究

杨斌¹, 赵炳震^{1*}, 杜颜胜², 赵中伟³

(1. 陕西建工集团股份有限公司, 西安 710082; 2. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072;
3. 辽宁工程技术大学 土木工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: 由于钢板具有优越的抗剪性能, 故其被广泛地应用于建筑结构以及船舶海洋工程中。在实际工程中, 由于使用中的需要或者锈蚀等原因, 钢板开孔的现象屡见不鲜。开孔会减小钢板的有效抗剪面积进而降低抗剪承载能力。本文开展了矩形孔和圆形孔两种开孔类型对钢板抗剪承载力影响的研究。通过试验研究了开孔位置、开孔率对钢板抗剪承载力的影响。结果表明: 开孔位置对钢板抗剪承载力有显著影响; 抗剪承载力的降低程度不能简单通过开孔率进行评估。在此基础上, 通过理论和试验验证了数值模型的可靠性, 进而通过参数分析研究了两种开孔形状在不同位置 and 不同高宽比下对钢板抗剪承载力的影响规律, 提出了衡量抗剪承载力降低程度的折减系数及其理论计算公式。通过对比结果可以得出, 所提出的理论计算公式可以准确衡量开孔位置对钢板抗剪承载力的影响, 可为开孔钢板抗剪承载力的准确评估提供参考。

关键词: 开孔钢板; 抗剪承载力; 开孔位置; 钢板屈曲; 强度破坏; 折减系数

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)06-0035-09

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240117001

Investigation on the Influence of Local Opening on Shear Capacity of Rectangular Steel Plates

YANG Bin¹, ZHAO Bingzhen^{1*}, DU Yansheng², ZHAO Zhongwei³

(1. Shaanxi Construction Engineering Group Co., Ltd., Xi'an 710082, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

*Corresponding author: tjhbzbz@qq.com

Abstract: Steel plates have been widely adopted in building structures and marine engineering. The steel plates with opening are always needed due to the using function or corrosion caused by surrounding environment. The opening can reduce the effective shear area and then decrease the shear capacity. The influence of rectangular and circle opening on the shear capacity of steel plates is investigated in the presented work. The influence of opening position and opening ratio were studied through experiment. The experimental results indicate that the opening position has obvious influence on the shear capacity and the decrease of shear capacity cannot be simply estimated by the opening ratio. Then, a numerical model was developed and validated by the experimental and theoretical results. A parametric analysis was performed to reveal the influence of opening position on shear strength of steel plates. A reduction factor was proposed to consider the influence of opening and a formula for reduction factor was proposed. The accuracy of the formula was

收稿日期: 2024-01-17

基金项目: 中国博士后科学基金面上项目(2021M690033), 陕西省交通运输厅交通科研项目(23-49K), 陕西省住建厅科技计划(2023-K21)

作者简介:

杨斌(1983—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事复杂钢结构施工力学方面的研究。E-mail: 137330504@qq.com。

通信作者:

赵炳震(1988—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事钢结构相关研究。E-mail: tjhbzbz@qq.com。

validated through comparison of results. The work presented in this study can provide a foundation for the estimation of shear strength of steel plates.

Keywords: steel plate with opening; shear capacity; position of opening; buckling of steel plate; strength failure; reduction factor

由于钢板具有优越的延性、抗剪刚度以及抗剪承载能力而被广泛的应用于工业与民用建筑以及船舶海洋工程中,如钢板剪力墙、钢梁腹板等。在实际工程中,由于各种原因钢板需要开孔,如门窗洞口、管线穿越、建筑造型等,如图1所示。此外,由于钢板的锈蚀等原因,钢板也会随机产生孔洞,进而削弱钢板的抗剪承载能力。

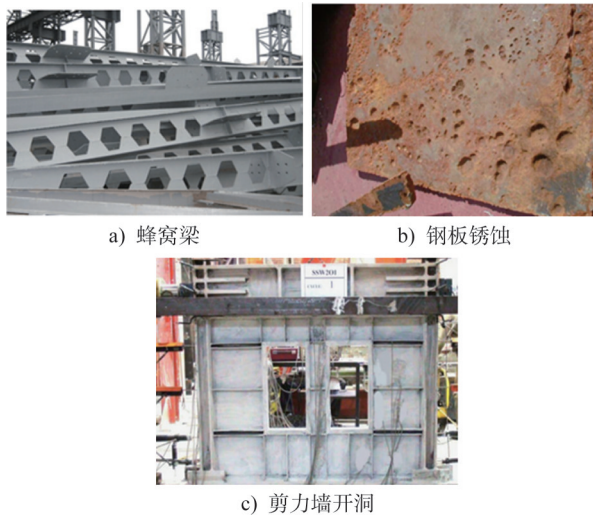


图1 钢板开洞示例

Fig. 1 Cases of steel plates with openings

钢板优越的抗剪承载能力是其最重要的力学性能。量化孔洞对钢板抗剪承载力的影响是准确评估结构安全性能的前提。已有研究中,对未开孔钢板力学性能的研究较多。王先铁等^[1]研究了非均匀竖向压应力对非加劲钢板剪力墙临界屈曲剪应力的影响,得到了竖向加劲钢板剪力墙临界屈曲剪应力随加劲肋加劲系数的变化曲线及阈值刚度。聂建国等^[2-3]推导了竖向加劲钢板剪力墙在竖向荷载作用下的弹性屈曲应力计算公式并提出了平面组合桁架模型和弯曲变形简化公式。SABOURI-GHOMI等^[4]采用试验方法研究了矩形开孔钢板剪力墙的抗剪刚度、抗剪极限承载力。研究结果表明两个矩形开孔之间的距离对抗剪刚度、抗剪极限承载力没有影响。VALIZADEH等^[5]通过6个缩尺钢板的试验对圆形开孔钢板剪力墙的滞回性能进行了研究。研究结果表明,开孔后钢板的抗剪初始刚度和抗剪承载力会显著降低,而且降低程度会随着圆孔半径的增加而急剧增大。

造成孔洞的另外一个重要原因就是钢结构的锈蚀,锈蚀会显著降低钢板尤其是薄钢板的有效厚度。锈蚀对

钢板抗剪刚度以及抗剪承载力的影响已经逐步得到了众多学者的关注^[6-9]。为研究钢板锈蚀的影响,试验中经常采用人工钻孔的方法来模拟点锈蚀。AFSHARI等^[10]研究了钢板局部开孔对钢板抗剪承载力的影响。由于锈蚀的随机性,随机有限元是研究锈蚀钢板力学性能的有力工具。目前已有许多基于随机有限元模拟的钢板力学性能退化研究^[11-13],包括抗压、抗拉以及抗剪研究等。

钢板的开孔现象在实际工程中屡见不鲜,但目前缺少将开孔对钢板抗剪承载力的影响进行量化的研究成果。基于该研究背景,本文对开孔位置、开孔大小、开孔形状和钢材等级对钢板抗剪承载力的影响进行了研究。

实际工程中为结构布设管线、减轻自重等需对钢板剪力墙以及钢梁腹板等进行开孔;另外,我国一大批钢结构已经经历了数十年的服务期,使用环境复杂以及后期维护工作的不到位,致使钢结构的锈蚀现象已屡见不鲜。针对上述两种情况,本文成果可以为开孔钢板或局部锈蚀钢板抗剪承载能力的评估提供参考。

1 数值模型的建立

本文基于有限元软件 ANSYS 建立了带有开孔钢板的有限元模型。采用 Shell181 单元建立钢板的数值模型,通过生死单元法去掉孔洞所在位置的单元来模拟开孔的影响^[9]。钢板尺寸为 500 mm×500 mm,只建立加载架内部的钢板模型。钢板四周的加载架采用 Beam188 单元模拟,Beam188 与钢板四周共用相同节点同时通过截面偏移功能避免加载架与钢板的冲突,如图2所示。钢梁截面为 H182 mm×150 mm×10.4 mm×6 mm,材料为理想弹性材料。相邻钢梁在角部相同位置建立节点,耦合相同位置节点的平动自由度,实现铰接转动,以消除加载过程中外部加载架自身反力的影响。

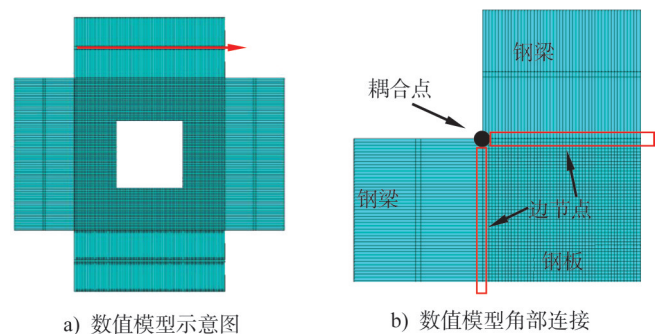


图2 开孔钢板数值模型

Fig. 2 Numerical model of steel plates with opening

2 基于理论计算的数值模型验证

对于不开孔的钢板,其抗剪承载力可以用理论计算公式计算得到。纯剪作用下的薄钢板,在达到剪切强度 $f_y/\sqrt{3}$ 之前,往往会发生屈曲,此时钢板内的剪应力为临界剪应力 τ_{cr} ,该应力可根据式(1)计算得到:

$$\tau_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \times \left(\frac{t_w}{L}\right)^2 \leq \tau_y = \frac{f_y}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

式中: ν 为钢材的泊松比,取值0.3; E 为弹性模量; τ_y 为剪切强度; t_w 为钢板厚度; L 为钢板宽度; f_y 为钢材屈服强度。

对于本文的正方形四边简支板,屈曲系数 k 的取值为9.35^[9]。由此钢板失稳时所对应的抗剪承载力可通过式(2)计算得到。

$$F_{cr} = \tau_{cr} L t_w \quad (2)$$

钢板屈服后,主拉力场的形成会进一步提高钢板的抗剪承载力,主拉力场对抗剪承载力的提高可通过式(3)计算得到。

$$V_y = \frac{1}{2} f_y L t_w \sin(2\alpha) \quad (3)$$

式中: α 为斜拉力场的倾角,可通过式(4)进行计算,本文取44.4°。

$$\tan^4 \alpha = \frac{1 + \frac{t_w L}{2A_c}}{1 + t_w h \left(\frac{1}{A_b} + \frac{h^3}{360I_c L} \right)} \quad (4)$$

式中: A_c 和 A_b 分别为钢板上部梁和两侧柱的截面面积,本文中均等于加载架的截面面积; I_c 为加载架的截面惯性矩; h 为钢板的高度。

将临界剪应力与拉力场对抗剪承载力的贡献相加即可得到考虑屈曲后强度的钢板抗剪承载力的计算公式(5)。当钢板材料强度得到充分发挥时(即不发生失稳),其抗剪承载力的计算公式为式(6)。

$$F_u = F_{cr} + V_y \leq \frac{f_y}{\sqrt{3}} L t_w \quad (5)$$

$$F_u = \frac{f_y}{\sqrt{3}} L t_w \quad (6)$$

为了验证本文所建立数值模型预测钢板抗剪承载力的可靠性,将数值模型计算结果与理论公式计算结果进行对比。由于理论计算公式只考虑了屈服强度 f_y 的影响而未考虑抗拉强度 f_u 的影响,故在进行数值计算时,将钢材的本构模型设置为理想弹塑性的双折线模型,且切线模量为0。将钢材的屈服强度分别设定为345 MPa和690 MPa。在数值计算中,采用一致模态缺陷法对钢板施加初始缺陷。为了研究缺陷幅值对抗剪承载力的影响,将缺陷幅值分别设为 $h/2500$ 和 $h/250$ 。

数值模拟计算结果与理论计算结果对比如图3所示。图3a)所示为钢板厚度为0.1~0.9 mm时两种缺陷幅值所对应的剪力-位移曲线。从图中可以看出,对于理想弹塑性本构、切线模量为0的钢材,几何缺陷幅值对抗剪承载力并无影响,该结论与文献[9]的研究成果一致。从图3b)和c)中可以看出,钢板厚度超过1 mm以后,公式(5)的计算结果超过公式(6)的计算结果。意味着钢板由失稳破坏转变为强度破坏。在强度破坏之前,数值模型计算结果与公式(5)的计算结果高度一致,在强度破坏时,数值模拟结果与公式(6)的计算结果高度一致。由此验证了该有限元模型预测钢板抗剪承载力的可靠性。

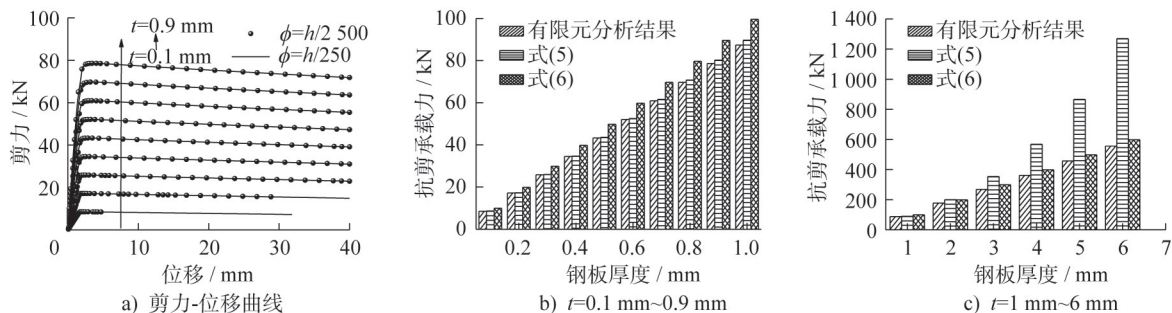


图3 抗剪承载力对比($f_y=345$ MPa)

Fig. 3 Comparison of shear capacity based on different methods ($f_y=345$ MPa)

3 基于试验的数值模型验证

3.1 试件设计

为了验证本文所建立数值模型的可靠性。利用试验结果对其进行验证。采用激光切割的方式对钢板进行钻孔。为了研究开孔位置、开孔大小以及钢板厚度对抗剪

承载力的影响,本次试验共设计13个试件。试件编号设定为SJ- n - m ,其中 n 代表钢板的厚度, m 代表试件的序号。钢板的厚度共分为1.7 mm和4 mm两种。需要指出的是,对于1.7 mm厚的钢板,不同位置的厚度存在一定程度的偏差,由于是同一批钢板,本文采用多次测量

求平均值作为最终钢板厚度。钢板尺寸为 900 mm × 900 mm。试件的详细信息如表 1 所示,其中开孔率是指孔洞面积与钢板面积的比。试件 SJ-2-3 的开孔形状设定为矩形,通过与 SJ-2-1 的对比得出开孔形状对抗剪承载力的影响。每个试件的示意图如图 4 所示。SJ-2-11 为

参考试件,该试件不开孔。钢板剪力通过外部加载框架进行施加。加载框架通过 8 段带有螺栓孔的槽钢构成,如图 5 所示。加载架所用槽钢的截面高度为 200 mm,加载架内部钢板的尺寸为 500 mm × 500 mm。钢板通过四周的螺栓与加载架相连,以保证足够的抗剪强度。

表 1 试件信息表

Table 1 Information of specimens

试件编号	开孔形状	开孔直径 D_c /mm	开孔数量	钢板厚度 t /mm	开孔率 χ
SJ-2-1	圆形	250	1	1.7	0.19
SJ-2-2	矩形	220	1	1.7	0.19
SJ-2-3	圆形	18	196	1.7	0.19
SJ-2-4	圆形	142	3	1.7	0.19
SJ-2-5	圆形	142	3	1.7	0.19
SJ-2-6	圆形	124	4	1.7	0.09
SJ-2-7	圆形	120	2	1.7	0.09
SJ-2-8	圆形	120	2	1.7	0.09
SJ-2-9	圆形	120	2	1.7	0.09
SJ-2-10	圆形	120	2	1.7	0.09
SJ-2-11	—	—	—	1.7	—
SJ-4-1	圆形	142	3	4.0	0.19
SJ-4-2	圆形	142	3	4.0	0.19

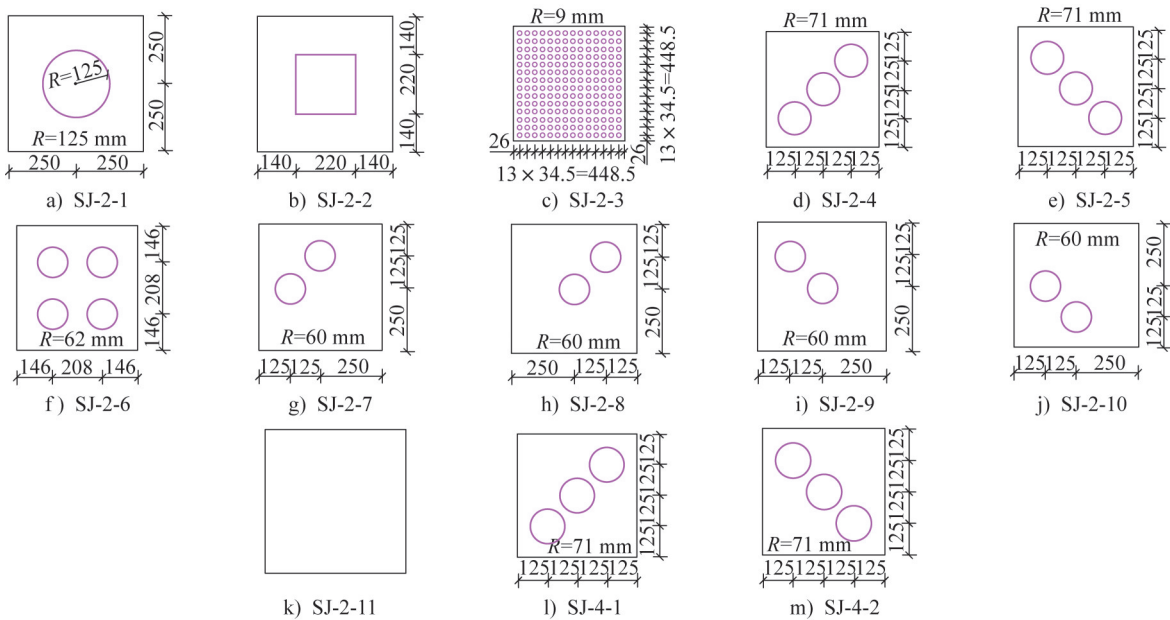


图 4 试件示意图

Fig. 4 Schematic diagram of specimens

3.2 加载装置

加载试验在自平衡反力架上进行,通过水平放置的液压千斤顶对位于加载架顶部的刚性梁进行加载,在千

斤顶与加载架之间设置压力传感器以获得水平剪力的值。钢梁通过四个 M24 的高强螺栓将水平剪力传递到加载架,进而对钢板施加荷载。加载架通过底部的抗剪

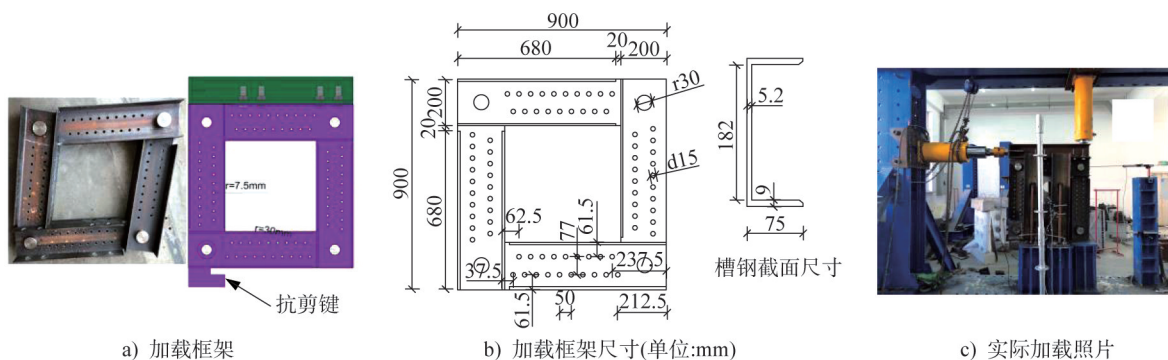


图5 加载示意图

Fig. 5 Loading diagram

键与反力架连接,以承受上部传来的水平剪力。同时为保证加载架的面外稳定性,在加载架两侧分别布置两个侧向支撑。在加载架的顶部和底部分别设置位移传感器,将两者的差值作为加载架顶部的位移变形。

3.3 钢材本构

为了验证所建立数值模型预测的开孔钢板抗剪承载力的可靠性,将试验所得到的荷载-位移曲线与数值模型所得结果进行对比。有限元所采用的钢材本构模型通过标准拉伸试验得到,针对两种厚度钢材各进行三次拉伸试验。拉伸试验所得不同厚度钢材的应力-应变曲线如图6所示。从图中可以看出,两种钢材的屈服强度接近,但是极限强度相差较大。该应力-应变曲线为工程应力-应变曲线,在有限元模型中采用公式(7)和(8)转换得到真实的应力应变。

$$\sigma_t = \sigma_e \times (1 + \epsilon_e) \quad (7)$$

$$\epsilon_t = \ln(1 + \epsilon_e) \quad (8)$$

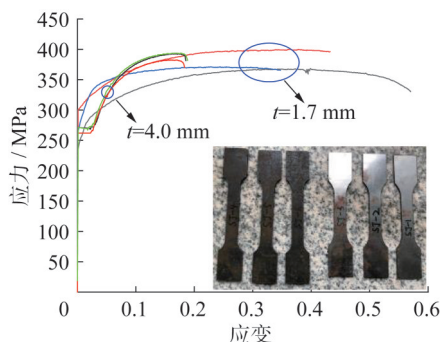


图6 钢材应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of steel

3.4 结果对比分析

将试验所得到的钢板抗剪承载力与数值计算结果进行对比如图7所示。需要指出的是,由于试验中钢板与加载架通过普通螺栓连接,两者在加载过程中存在滑移,因此,试验所得到的荷载-位移曲线并不能准确反映钢板

的抗剪刚度。而本文主要研究的是开孔钢板的抗剪极限承载力,因此,抗剪承载力的对比是本文研究的重点。同时,为了研究缺陷幅值对抗剪承载力的影响,利用参数分析列出了不同缺陷幅值下钢板纯剪作用下的荷载-位移曲线,如图7所示(图中数字为各试件抗剪极限承载力)。

从图7所示结果可以看出,总体上,钢板的抗剪极限承载力对初始缺陷的幅值比较敏感,这与2.1节所示结果不同。这是由于本节采用的是钢材的实际本构模型,考虑了极限抗拉强度的影响。因此可以得出结论,钢板的抗剪承载力由两部分组成,即分别由屈服强度和极限强度贡献。由屈服强度决定的抗剪承载力不受缺陷幅值的影响,而由极限强度决定的抗剪承载力对缺陷比较敏感。另外,从数值模拟计算结果可以看出,初始缺陷幅值并不影响钢板屈曲后的力学性能,屈曲后不同缺陷幅值所对应的荷载-位移曲线趋于重合。

通过不同试件的荷载-位移曲线的对比可以看出,不同开孔形式对缺陷的敏感性也大不相同。如SJ-2-5, SJ-2-7和SJ-2-8的计算结果表明,当开孔沿主拉应力分布时,初始缺陷对该试件抗剪承载力影响很小,而其承载力的数值模拟结果与试验结果也高度吻合,从而进一步验证了数值模拟结果的可靠性。当开孔沿主压应力分布时,初始缺陷幅值对抗剪承载力影响较大,如SJ-2-5。通过SJ-2-5可以看出,当初始缺陷幅值小于 $h/2500$ 时,抗剪承载力不再随缺陷幅值的减小而增大,当缺陷幅值大于 $h/250$ 时,抗剪承载力也不再随幅值的增大而减小;通过观察可以看出,试验所得结果基本位于缺陷幅值为 $h/2500$ 和 $h/250$ 所对应的抗剪承载力之间。SJ-4-1和SJ-4-2的计算结果表明,初始缺陷对钢板的抗剪承载能力没有影响。这是由于当钢板厚度为4 mm时,钢板的破坏属于强度破坏,可以在图3所示结果中看出。

从图7中可以看出,在相同的开孔率下,当开孔沿钢板主拉应力分布时对抗剪承载力的影响小于当开孔沿主压应力分布的情况,如SJ-2-4和SJ-2-5, SJ-2-8和SJ-2-9, SJ-4-1和SJ-4-2,试验所得抗剪承载力分别为104 kN

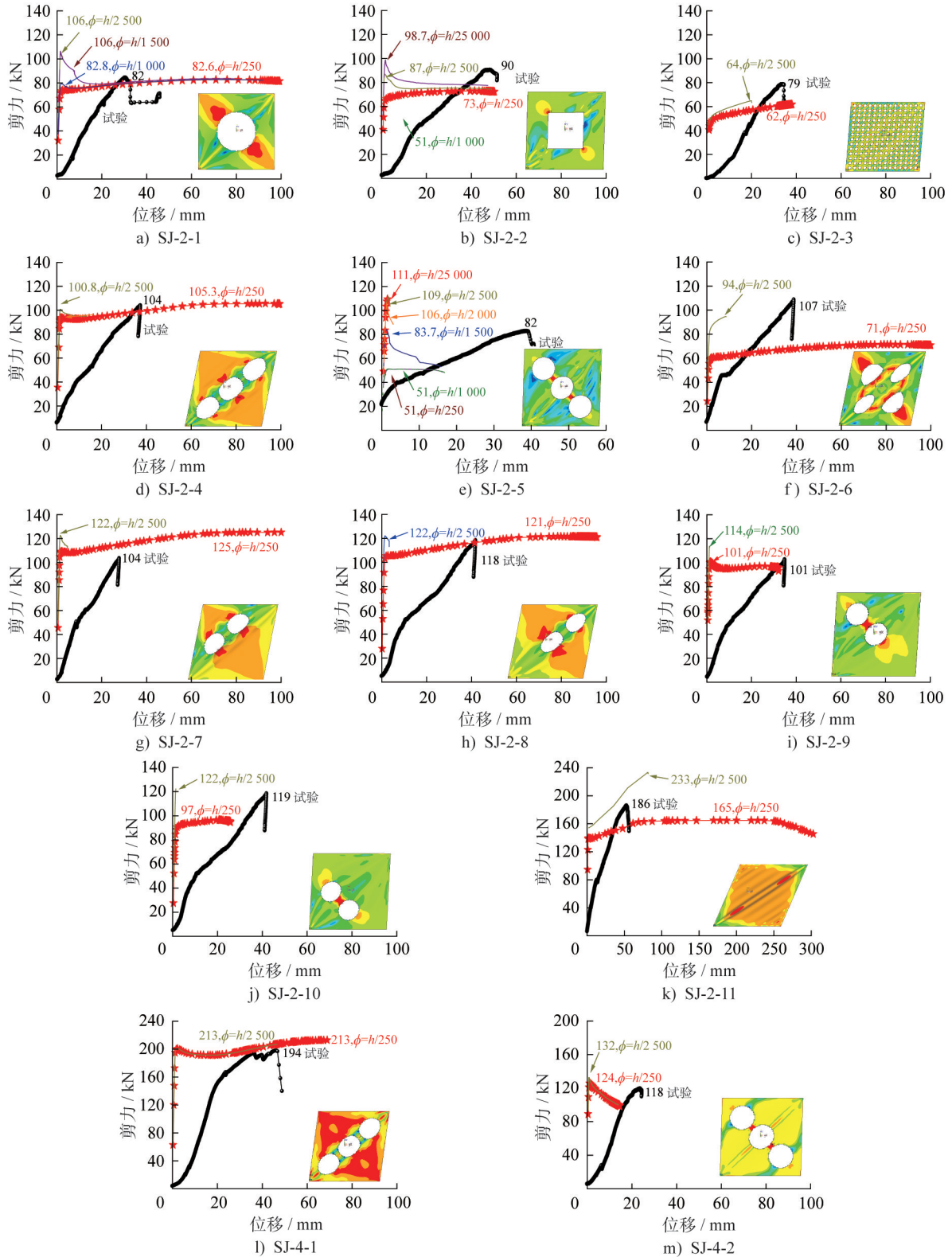


图7 不同方法所得剪力-位移曲线结果对比

Fig. 7 Comparison of shear force-displacement curves with different methods

和 82 kN, 118 kN 和 101 kN, 194 kN 和 118 kN。同样的开孔率当沿钢板主拉或主压应力分布不同时对厚度为分别 2 mm 和 4 mm 钢板抗剪承载力的影响分别达到 20% 和 40%。这是由于开孔沿主压应力分布时其阻断了钢板

屈曲后拉力场的形成。

从试件 SJ-2-7 和 SJ-2-8 以及 SJ-2-9 和 SJ-2-10 的结果对比中可以看出, 试验所得两种对比试件的抗剪承载力分别是 104 kN 和 118 kN, 101 kN 和 119 kN。在相

同开孔率和开孔形状的前提下,开孔位置对抗剪承载力的影响达到了近20%。可以说开孔位置对钢板的抗剪承载力有显著影响。

基于试验和数值模型所得到的钢板的破坏模式对比如图8所示。从图中可以看出,数值模型可以准确反映钢板的应力分布与破坏形态。

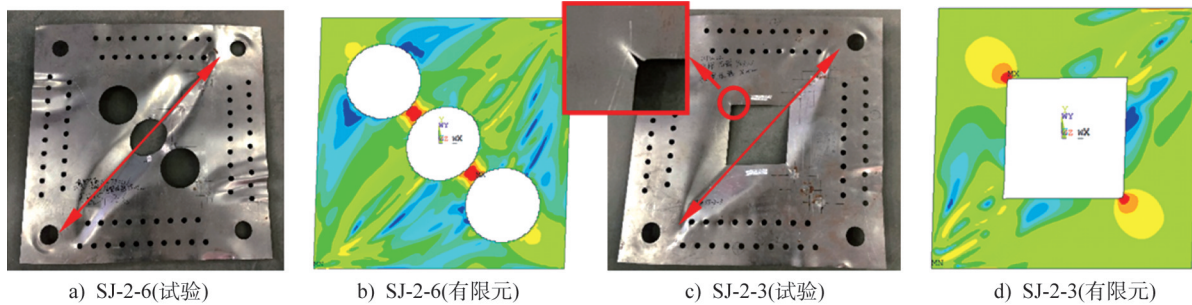


图8 破坏模式对比

Fig. 8 Comparison of failure modes

4 开孔位置及形状影响参数分析

4.1 矩形孔

从上述的结果分析可以看出,开孔位置对钢板的抗剪承载力有显著的影响,因此本节研究了矩形孔开孔位置对钢板抗剪承载力的影响。为了消除钢板具体尺寸的影响,本节采用相对坐标来定义开孔的相对位置。以孔的中心位置代表孔在钢板中的相对坐标 ξ 和 η ,根据式(9)和(10)计算得到。

$$\xi = \frac{2x}{L} \quad (9)$$

$$\eta = \frac{2y}{h} \quad (10)$$

式中: x 和 y 是开孔形心的坐标; L 和 h 是钢板的宽和高(图9)。 ξ 和 η 为相对坐标,取值范围为 $-1 \leq \xi, \eta \leq 1$ 。

采用1.7 mm厚钢板的本构模型,将矩形孔的边长设定为62 mm,初始缺陷幅值设定为 $h/250$,钢板厚度设定为2 mm。通过参数分析,逐步改变相对坐标(进行400次计算)所得到的抗剪承载力随矩形孔位置的变化云图如图10所示。从图中可以看出,当开孔位于钢板中心时,钢板的抗剪极限承载力最低。抗剪承载力随相对坐标 ξ 和 η 的变化规律基本一致,且变化曲面呈现凹谷型。

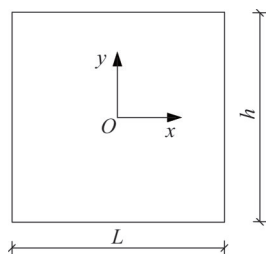


图9 钢板坐标系示意图

Fig. 9 Schematic diagram of steel plate coordinate system

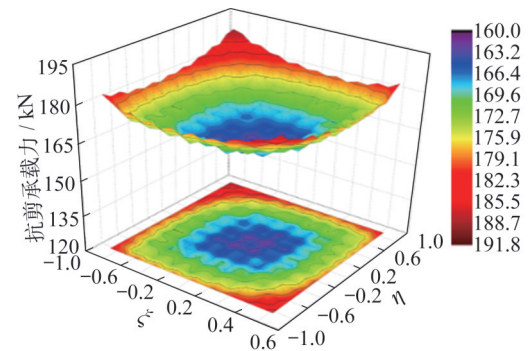


图10 开孔中心位置对抗剪承载力影响(矩形孔)

Fig. 10 Influence of opening position on shear capacity (rectangular opening)

为了表现开孔对钢板抗剪承载力的影响程度,将开孔的影响用折减系数 λ 的形式表示。折减系数定义为开孔后钢板的抗剪承载力与未开孔钢板抗剪承载力的比值,式(11)所示。

$$\lambda = \frac{F}{F_0} \quad (11)$$

式中: F 是开孔钢板的抗剪极限承载力, F_0 是对应未开孔钢板的抗剪极限承载力。

假设开孔在钢板形心位置时的抗剪承载力降低 ΔF ,根据图10所示云图形状,则开孔形心坐标为 ξ 和 η 时,抗剪承载力的变化量为:

$$F = F_0 - (1 - \alpha\xi^2)(1 - \beta\eta^2) \times \Delta F = F_0 - (1 - \alpha\xi^2)(1 - \beta\eta^2) \times (F_0 - F_c) \quad (12)$$

式中: F_c 为开孔形心与钢板形心重合时的抗剪承载力; α 和 β 为待定系数。

将式(12)两边同时除以未开孔钢板的抗剪承载力 F_0 ,可得式(13)。

$$\lambda = 1 - (1 - \alpha\xi^2)(1 - \beta\eta^2) \times (1 - \lambda_c) \quad (13)$$

式中： λ_c 为开孔形心与钢板形心重合时的抗剪承载力折减系数。

基于数值模型所得到的开孔尺寸为62 mm和31 mm时所对应的折减系数云图如图11和图12所示。同时将式(13)的计算结果与数值模型计算结果对比。式(13)中的 λ_c 经过数值模拟计算得到。经过试算,当 α 和 β 取值均为1时,公式计算结果与数值模拟结果吻合最好,对比结果如图11和图12所示。

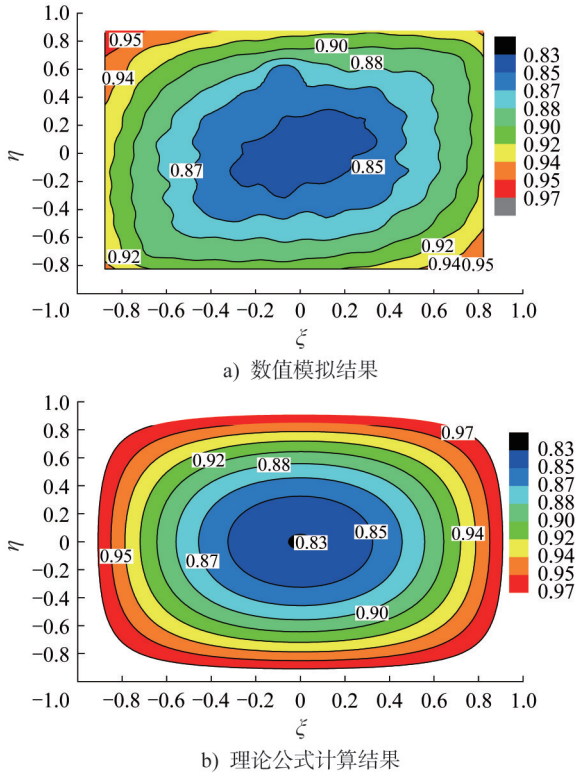


图11 折减系数云图对比($D_c=62$ mm)

Fig. 11 Comparison of reduction factor contour ($D_c=62$ mm)

4.2 圆形孔

本节研究了圆形孔开孔位置对钢板抗剪承载力的影响,并进行了参数分析。为便于比较,采用面积相等原则将圆形孔与矩形孔等效。面积相等指矩形开孔面积与圆形开孔面积相等。图11所示计算结果为采用边长为62 mm的矩形孔,如采用面积相等原则,则圆形开孔的直径为70 mm。因此,将圆形开孔的直径设置为70 mm时所得折减系数云图如图13所示。从图中可以看出,圆形孔的折减系数大于图11所示矩形孔的折减系数。圆形孔的折减系数比矩形孔的折减系数大约2.4%。因此,可以说明开孔面积相等时,矩形孔对钢板的抗剪承载力更不利。但两者相差较小,简化计算时可以忽略该影响。

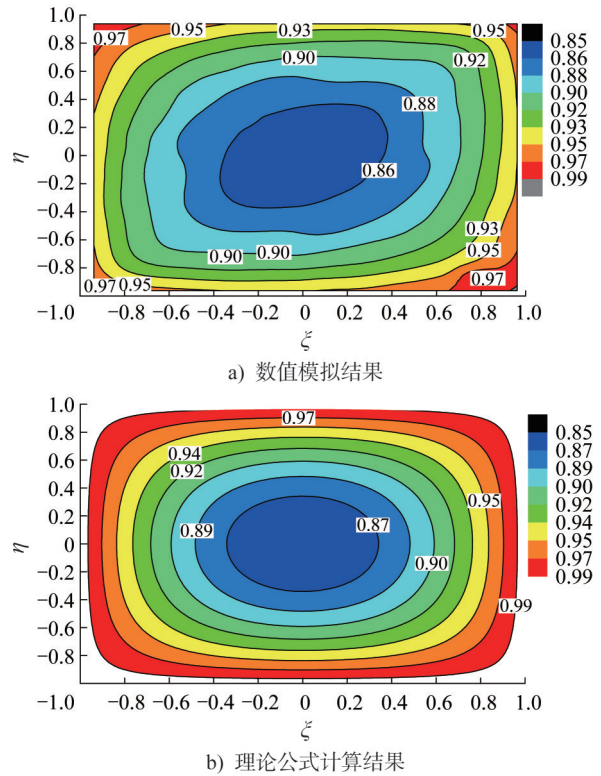


图12 折减系数云图对比($D_c=31$ mm)

Fig. 12 Comparison of reduction factor contour ($D_c=31$ mm)

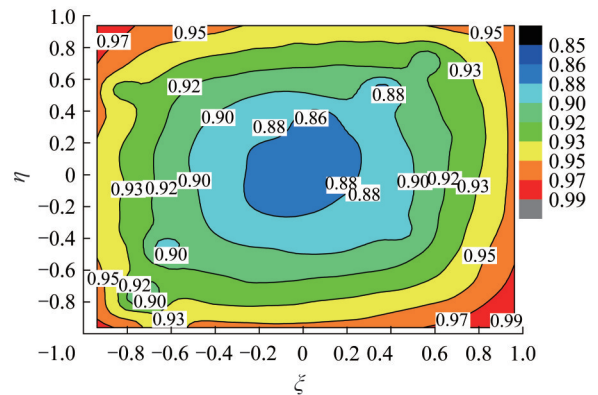


图13 折减系数云图($D_c=70$ mm)

Fig. 13 Reduction factor contour ($D_c=70$ mm)

5 不同长宽比钢板开孔位置影响分析

上述分析都是针对方形钢板,为了研究所得结论对于矩形钢板的适用性,本节对宽和高别是1.0 m和0.5 m的钢板展开分析。钢板厚度为2 mm,开孔为圆形孔且直径 D_c 为70 mm。同样通过式(9)和(10)对孔在钢板中的相对坐标进行转换,所得折减系数云图如图14所示。从图中可以看出,矩形钢板与方形钢板的折减系数云图一致,因此上述结论同样适用于矩形钢板。

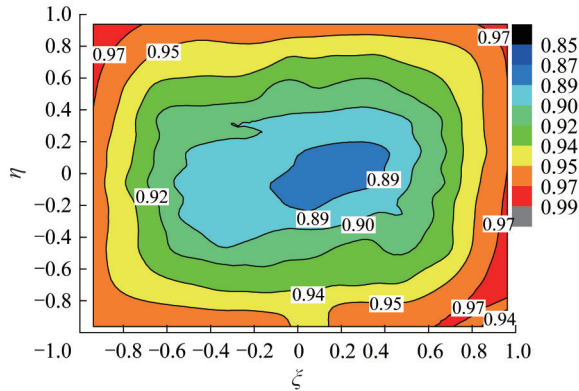


图 14 高宽比对折减系数影响

Fig. 14 The influence of height-width ratio on reduction factor

6 结论

本文对开孔钢板的抗剪承载力进行了研究,利用理论计算公式和试验结果分别对数值模型进行了验证,然后研究了开孔位置、钢材强度、钢板厚度以及开孔形状对开孔钢板抗剪承载力的影响。结论如下:

(1) 钢板的抗剪承载力由两部分组成,即分别由屈服强度和极限强度两部分贡献。由屈服强度决定的抗剪承载力不受缺陷幅值的影响,而由极限强度决定的抗剪承载力对缺陷比较敏感。

(2) 在相同的开孔率下,当开孔沿钢板主拉应力分布时对抗剪承载力的影响小于当开孔沿主压应力分布时的情况。在相同开孔率和开孔形状的前提下,开孔位置对抗剪承载力的影响达到了近20%。

(3) 当矩形孔与圆形孔面积相等时,两种形状的开孔对钢板抗剪承载力的削弱程度基本一致。本文结论适用于具有不同高宽比及不同开孔形状的钢板抗剪承载力计算。

参考文献:

[1] 王先铁,林麟璋,宋文俊,等.非均匀竖向压应力作用下钢板剪力墙的剪切屈曲[J].土木工程学报,2016,49(增刊2):26-31. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2016.s2.005.
WANG Xiantie, LIN Linhui, SONG Wenjun, et al. Shear buckling of steel plate shear wall under non-uniform vertical compressive stress [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49 (Suppl. 2) : 26-31. DOI: 10.15951/j. tmgxcb. 2016. s2.005. (in Chinese)

[2] 聂建国,黄远,樊健生.钢板剪力墙结构竖向防屈曲简化设计方法[J].建筑结构,2010,40(4):1-4,18. DOI:10.19701/j.jzjg.2010.04.001.
NIE Jianguo, HUANG Yuan, FAN Jiansheng. Vertical buckling-resistant design of steel plate shear wall structure [J]. Building

Structure, 2010, 40 (4) : 1-4, 18. DOI: 10.19701/j. jzjg. 2010.04.001. (in Chinese)

[3] 马晓伟,聂建国,陶慕轩.钢板-混凝土组合剪力墙正常使用阶段有效刚度[J].土木工程学报,2014,47(7):18-26. DOI: 10.15951/j.tmgxcb.2014.07.029.
MA Xiaowei, NIE Jianguo, TAO Muxuan. Effective stiffness of steel plate-concrete composite shear wall structures in serviceability state [J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 47 (7) : 18-26. DOI: 10.15951/j. tmgxcb. 2014. 07. 029. (in Chinese)

[4] SABOURI-GHOMI S, MAMAZIZI S. Experimental investigation on stiffened steel plate shear walls with two rectangular openings [J]. Thin-Walled Structures, 2015, 86: 56-66. DOI:10.1016/j.tws.2014.10.005.

[5] VALIZADEH H, SHEIDAII M, SHOWKATI H. Experimental investigation on cyclic behavior of perforated steel plate shear walls [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 70: 308-316. DOI: 10.1016/j.jcsr.2011.09.016.

[6] WITKOWSKA M, GUEDES SOARES C. Ultimate strength of locally damaged panels [J]. Thin-Walled Structures, 2015, 97: 225-240. DOI: 10.1016/j.tws.2015.09.025.

[7] SHI X H, ZHANG J, GUEDES SOARES C. Experimental study on collapse of cracked stiffened plate with initial imperfections under compression [J]. Thin-Walled Structures, 2017, 114: 39-51. DOI: 10.1016/j.tws.2016.12.028.

[8] KHEDMATI M R, NOURI Z H M E. Analytical simulation of nonlinear elastic-plastic average stress-average strain relationships for un-corroded/both-sides randomly corroded steel plates under uniaxial compression [J]. Thin-Walled Structures, 2015, 86: 132-141. DOI: 10.1016/j. tws. 2014.10.012.

[9] ZHAO Z W, ZHANG N, WU J J, et al. Shear capacity of steel plates with random local corrosion [J]. Construction and Building Materials, 2020, 239: 117816. DOI: 10.1016/j. conbuildmat.2019.117816.

[10] AFSHARI M J, GHOLHAKI M. Shear strength degradation of steel plate shear walls with optional located opening [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2018, 18(4): 1547-1561. DOI: 10.1016/j.acme.2018.06.012.

[11] WANG R H, SHENOI R A, SOBEY A. Ultimate strength assessment of plated steel structures with random pitting corrosion damage [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2018, 143: 331-342. DOI: 10.1016/j.jcsr.2018.01.014.

[12] ZHAO Z W, ZHANG H W, XIAN L N, et al. Tensile strength of Q345 steel with random pitting corrosion based on numerical analysis [J]. Thin-Walled Structures, 2020, 148: 106579. DOI: 10.1016/j.tws.2019.106579.

[13] ZHAO Z W, ZHANG N, WU J J, et al. Shear capacity of steel plates with random local corrosion [J]. Construction and Building Materials, 2020, 239: 117816. DOI: 10.1016/j. conbuildmat.2019.117816.