

不同开孔方案下钢板抗剪能力退化规律研究

李鹏飞¹, 赵炳震¹, 李阳¹, 杜颜胜², 张霓^{3*}, 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: 本文采用ANSYS有限元软件对点蚀钢板的抗剪承载力进行研究, 通过前期试验结果验证了所建立有限元模型的准确性, 基于此模型研究了开孔位置、开孔形状、径深比和材料强度等参数对钢板抗剪承载力折减的影响, 并对其折减因子的变化规律进行了研究。研究结果表明: 不同形状的开孔对抗剪承载力虽有影响, 但影响幅度较小, 不同开孔形状的模型其抗剪承载力的退化规律一致; 模型的抗剪承载力折减因子会随着开孔位置的变化而变化, 模型中心为最危险的开孔位置, 其折减因子最小, 处于模型四个角开孔位置的折减因子最大; 改变径深比对模型抗剪承载力的退化影响不大, 开孔体积率能更准确地体现开孔程度对抗剪承载力的退化影响; 模型的抗剪承载力折减因子与材料强度无关。通过响应曲面法进行回归分析, 拟合出归一化后开孔位置的横、纵坐标以及开孔面积比与钢板抗剪承载力折减因子的回归方程。研究结果可为开孔钢板抗剪性能退化程度的评估提供参考。

关键词: 开孔钢板; 抗剪承载力; 开孔位置; 开孔形状; 退化规律; 响应曲面法

中图分类号: TU392.4

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)08-0054-11

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20240723001

Research on the Degradation Law of Shear Capacity of Steel Plates under Different Hole Opening Schemes

LI Pengfei¹, ZHAO Bingzhen¹, LI Yang¹, DU Yansheng², ZHANG Ni^{3*}, 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: zhangni@lntu.edu.cn

Abstract: In this paper, ANSYS finite element software is used to study the shear capacity of pitted steel plate, and the accuracy of established numerical model is verified through previous experimental results. Based on this model, the influence of parameters such as opening position, opening shape, diameter to depth ratio and material strength on the reduction of the shear capacity of steel plate is studied. And the change rule of its reduction factor is studied. The results show that the opening shapes have an effect on the shear strength, but the effect is small. The degradation of the shear strength of specimens with different opening shapes is the same. The reduction factor of the shear strength of the models will change with the opening position. The center of the models is the most dangerous opening position with the smallest reduction factor, and the opening position at the four corners of the models result in the largest

收稿日期: 2024-07-23

基金项目: 中国博士后科学基金(2021M690033), 陕西省交通运输厅交通科研项目(24-54K), 陕西省住建厅科技计划(2023-K21)

作者简介:

李鹏飞(1976—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事钢结构施工力学方面的研究。E-mail: 1342070696@qq.com。

赵炳震(1988—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事钢结构施工力学方面的研究。

通信作者:

张霓(1985—), 女, 博士, 副教授, 主要从事钢结构与组合结构受力机理方面的研究。E-mail: zhangni@lntu.edu.cn。

reduction factor. The ratio of diameter to depth can not clearly represent the degradation law of shear capacity of the models, but the opening volume rate can better represent the effect of opening degree on the degradation of shear. The reduction factor of shear capacity is independent of material strength. Through the response surface method, a regression analysis is carried out to fit an equation relating the transverse and longitudinal coordinates of the normalized opening position, the ratio of the opening area and the reduction factor of the shear capacity of the steel plate. The research results can provide a reference for evaluating the degradation degree of shear properties of steel plates with openings.

Keywords: perforated steel plate; shear capacity; opening position; opening shape; degradation law; response surface method

钢板是钢结构中最常用的一种构件类型,在实际工程中,地震作用和风荷载随着建筑物高度的增加而显著增加,导致抗弯框架的建造成本上升,而采用钢板剪力墙结构能够很好地抵抗水平荷载,为结构提供更好的稳定性和安全性。钢板因其具有良好的抗剪能力,可以提高连接件或建筑物的抗剪承载力。因此,抗剪承载力是钢板最重要的结构性能。由于钢板施工简单轻便,结构的外观在加固完成后没有改变,故钢板可更便捷地连接到钢柱和钢梁上,有效提高了钢结构的横向刚度。在实际工程中,为了满足建筑的使用功能要求,钢结构中的钢板常常因为安装设备、管线等设施而开设各种形式的洞口;对于老化的钢结构,开孔可能由腐蚀引起。钢板开孔会明显降低钢板构件的刚度和承载能力,进而对结构产生不利的影响。对此国内外学者对开孔钢板的抗剪承载力进行了研究:SABOURI-GHOMI等^[1]研究了开孔对钢板剪力墙性能的影响,发现开孔的存在会导致结构性能的降低。VALIZADEH等^[2]通过对中心开孔钢板试件进行循环水平剪切试验,研究了开孔尺寸和板的长细比对钢板剪力墙抗震性能的影响。AFSHARI等^[3]用有限元软件研究了不同开孔位置的钢板剪力墙在水平加载情况下的承载力退化及变形,并提出了一个适用于各种几何规格的钢板剪力墙的无量纲开孔承载力退化公式。

除了钢板剪力墙结构上的人工开孔外,当锈蚀严重到一定程度时,也会导致钢板上出现孔洞,大量研究表明^[4-8],钢板在其服役期间,根据其受到不同环境的影响,会产生不同程度的锈蚀情况。锈蚀是随机产生的,往往发生在钢板的表面,轻者形成点蚀,重者会产生由点蚀造成的成片锈蚀,甚至会使钢材变脆从而形成穿透锈蚀。锈蚀会引起钢材截面减小和表面粗糙不规则,从而导致钢材厚度减小、刚度和强度下降,影响钢材的屈服强度和极限强度,还会导致其延性和弹性模量的变化^[9],易发生应力集中现象,使构件的承载能力大幅降低^[10],甚至使结构发生整体垮塌。

近些年来,有学者逐渐关注点蚀钢板极限承载力退化问题,并对该问题开展了一些研究。王仁华等^[11]基于多尺度有限元理论,使用均匀分布的圆柱体点蚀模型,考虑了局部点蚀的构建、多尺度区域的划分和跨尺度界面

的连接,提出了细微尺度点蚀海洋平台结构的建模和其极限承载力的计算方法。ZHANG等^[12]拟合出点蚀损伤船体板在轴压和剪切复合荷载下的极限强度评估公式,并分析了带有不同形状、分布状态和深度参数的点蚀对极限强度的影响,利用有限元分析拟合出基于锈蚀体积损失的船体板极限强度评估公式。WEN等^[13]研究了点蚀和穿孔损伤I型波纹钢腹板的剪切屈曲行为,分析了点蚀孔的深度、位置和孔径对构件临界荷载、极限强度和失效模式的影响,结果表明锈蚀体积是影响构件极限承载力的关键因素,锈蚀的位置可能影响失效模式。FENG等^[14-15]研究了点蚀损伤的船体板抗压极限承载力的影响因素,分析了点蚀程度、深度、位置、形状和分布等典型参数对船体板轴压极限强度的影响规律。

由上述研究可以看出,国内外学者对钢板开孔造成其性能的退化进行了一些研究,但仍然不够全面,并且对于开孔位置与钢板抗剪承载力退化关系的研究不够系统。无论是钢结构中为了实现建筑功能而对钢板进行开孔^[16],还是海洋与港口钢结构工程中钢板锈蚀导致出现孔洞,都会对钢板构件的截面造成削弱,进而影响到钢板的承载能力和结构的使用要求。因此,有必要开展开孔对钢板抗剪性能影响规律的研究。杨斌等^[17]通过设计不同开孔位置、开孔率及不同形状的钢板抗剪试验,并结合数值模拟,发现开孔位置对钢板抗剪承载力影响显著,提出了采用折减系数来考虑抗剪承载力的降低程度。本文在前期试验工作的基础上^[17],采用ANSYS有限元软件建立有限元模型,系统研究了开孔参数对钢板抗剪性能退化规律的影响,揭示了开孔位置、开孔形状、径深比和材料强度等参数对钢板抗剪承载力退化规律的影响。

1 有限元模型

1.1 试件模型

针对前期试验中的试件^[17],建立有限元分析模型,试验中采用了板厚为2 mm和4 mm的两种钢板。模型采用长、宽均为500 mm的钢板,试件的厚度 t 通过使用游标卡尺测得的数据确定,模型的开孔位置依照试验试件定位,并且开孔半径 r 与文献^[17]中一致。试件模型采用材性试验得出的真实应力-应变曲线作为本构模型,如

图1所示。

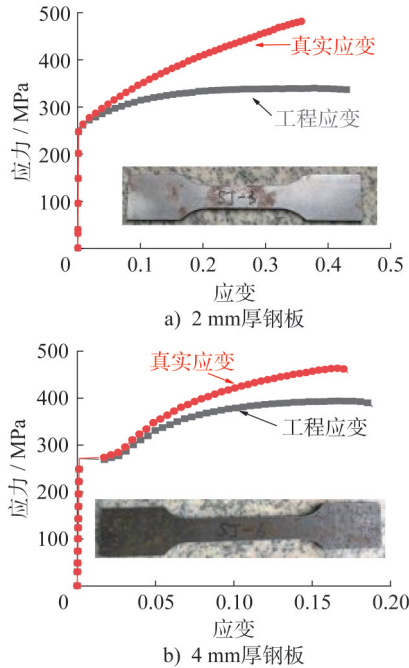


图1 材料的本构模型真实应力-应变曲线

Fig. 1 The true stress-strain curves of the constitutive model of the material

通过局部坐标系确定开孔的圆心位置,选中开孔半径内的节点,再根据这些节点选中所在单元,“杀死”这些通过节点选中的单元,这些被选中单元虽然仍然在模型当中,但其刚度对于整体刚度来说为0,不参与计算,从而达到开孔的效果。

1.2 边界条件及加载方式

根据钢板抗剪试验中试件的边界条件及加载方式,在钢板试件的四周设置一个刚性钢梁,并且使用Beam188单元建立试件四周的框架刚性钢梁模型,其截面类型为H型钢。

在钢梁之间的耦合点可以发生角位移,钢板通过一系列边界节点与框架钢梁连接,如图2a)所示。假设试件与周边框架刚性连接,而且在加载过程中连接良好,不发生滑移。框架的顶部钢梁面外方向(z 方向)被固定,使其在加载过程中只产生加载方向的位移;底部钢梁限制了 x 、 y 和 z 三个方向的自由度,使其成为固定端保持不动。对模型进行静态分析,将位于上侧钢梁的节点设置为加载点,并采用施加水平位移的方式加载,沿上侧钢梁的长度方向施加水平位移。试件的模型如图2b)、c)所示,其中,SJ表示试件的拼音首字母,第一个数字表示钢板厚度,第二个数字表示试件编号。

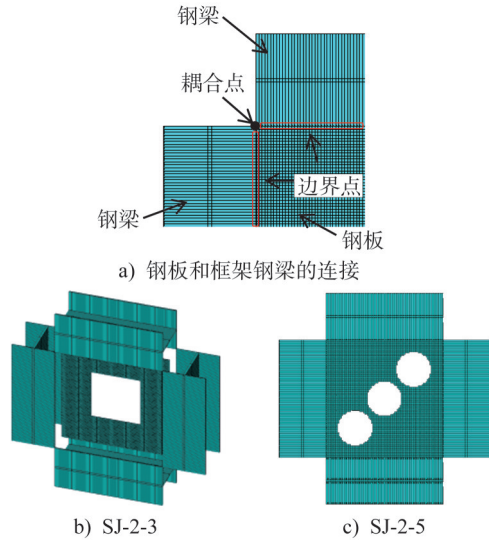


图2 试件有限元模型

Fig. 2 The FEM of specimens

1.3 初始缺陷

在实际工程中,模型在使用之前会经过设计、加工制作、运输和安装等环节,而在这一系列操作中由于设计误差、制作工艺、温度变化和运输碰撞等因素导致试件产生初始缺陷。初始缺陷会影响模型的使用情况和承载力大小,因此为准确验证试验结果,引入初始缺陷十分必要,但由于每一个模型的误差是因模型的随机性和多样性而产生的,因此,初始缺陷也应当是一个存在范围,而非一个确切的固定值。

采用特征值屈曲分析的方法^[18]来施加初始缺陷,在进行模型非线性分析之前,对模型进行特征值屈曲分析,获得特征值及扩展解,将得到的缺陷分布模态乘以不同的缺陷比例因子后引入非线性分析中。由于初始缺陷具有随机性,本文设置不同的初始缺陷的幅值: $h_w/250$ 、 $h_w/1\ 000$ 、 $h_w/1\ 500$ 、 $h_w/2\ 000$ 、 $h_w/2\ 500$ 、 $h_w/3\ 000$ 、 $h_w/3\ 500$ 、 $h_w/5\ 000$ 和 $h_w/25\ 000$ 等。每个模型选取部分或全部的缺陷值进行有限元数值模拟分析。这里, h_w 为钢板的高度,对于本研究 $h_w=500$ mm。

1.4 单元类型

在有限元建模过程中,钢板模型所选的单元类型可以为Shell壳单元,也可以选择实体单元Solid,但是Solid单元建模复杂,计算时间也很长,不利于模拟分析。Shell单元建模简单,计算时间相对较短,能保证计算结果的精确性。模型钢板采用Shell181单元进行模拟。

1.5 单元尺寸

为了保证模拟结果的精确性,采用四边形映射网格划分的方法,探讨网格尺寸对抗剪性能的影响,以试件

SJ-2-7(尺寸 500 mm×500 mm×2 mm,开孔率 19%,开孔形状为 124 mm 的圆孔,数量 4 个)为例,设计不同的网格尺寸对比分析。图 3 为不同网格尺寸模型的荷载-位移曲线,通过对模型设置不同的网格单元边长,设计了 2 mm、5 mm、8 mm、10 mm 和 20 mm 等网格宽度。研究表明,随着网格尺寸的增大,得到的极限荷载逐渐降低,同时计算所需要的时间也变短。网格宽度为 2 mm 和 5 mm 时,模拟分析得到的极限荷载均接近试验的极限荷载,结合计算精度和时长情况,选择尺寸为 5 mm 的网格为模型的模拟计算网格大小。

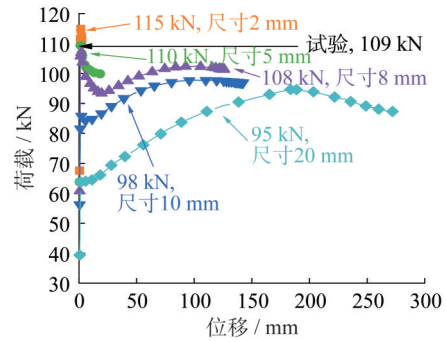


图 3 网格敏感度分析

Fig. 3 Mesh sensitivity analysis

2 模型验证

利用建立的有限元模型,与试验的抗剪承载力进行对比。表 1 为有限元与试验结果对比,由表可知,误差最大的是模型 SJ-2-4,为 7%。通过有限元模拟分析得知,施加不同的初始缺陷,得到模型的极限荷载不同。对于本试验选用的部分 2 mm 厚钢板,其抗剪承载力受初始缺

陷幅值影响较大,影响范围最大可达到 50%;而对于 4 mm 厚的钢板来说,初始缺陷对其影响在 10% 以内,抗剪承载力几乎不受初始缺陷的影响,通过施加不同初始缺陷进行模拟,得到模型抗剪承载力的变化范围,本试验 12 个模型的抗剪承载力均与缺陷范围内的极限荷载吻合较好,最大误差在 7% 以内。

表 1 试验与有限元的抗剪承载力对比

Table 1 Comparison of shear capacities between the test and FEA

文献[17]试件编号	开孔形状	开孔直径 D_o/mm	开孔数量	钢板厚度 t/mm	开孔率 χ	试验荷载/kN	模拟荷载/kN	模拟中的初始缺陷	误差
SJ-2-1	圆形	250	1	1.7	0.19	85	83	$h_w/1\ 000$	2.5%
SJ-2-2	矩形	220	1	1.7	0.19	96	93	$h_w/3\ 000$	3.0%
SJ-2-3	圆形	18	196	1.7	0.19	91	87	$h_w/2\ 500$	4.0%
SJ-2-4	圆形	142	3	1.7	0.19	79	85	$h_w/2\ 500$	7.0%
SJ-2-5	圆形	142	3	1.7	0.19	105	105	$h_w/250$	0.2%
SJ-2-6	圆形	124	4	1.7	0.09	83	85	$h_w/2\ 000$	2.0%
SJ-2-7	圆形	120	2	1.7	0.09	109	110	$h_w/2\ 500$	0.9%
SJ-2-8	圆形	120	2	1.7	0.09	103	100	$h_w/1\ 000$	2.0%
SJ-2-9	圆形	120	2	1.7	0.09	119	115	$h_w/2\ 500$	3.0%
SJ-2-10	圆形	120	2	1.7	0.09	186	189	$h_w/3\ 000$	1.6%
SJ-4-1	圆形	142	3	4.0	0.19	198	196	$h_w/250$	1.0%
SJ-4-2	圆形	142	3	4.0	0.19	120	120	$h_w/250$	0

3 开孔钢板抗剪承载力参数化分析

基于有限元模型的准确性,研究开孔形状、开孔位置、径深比和材料强度等参数对钢板抗剪承载力的影响。

3.1 开孔形状的影响

在实际工程中,锈蚀的形状可能是任意形状,锈蚀的形状往往与锈蚀的严重程度有关。本节考虑圆形、方形和长圆形 3 种形状。通常使用锈蚀率来表示锈蚀严重程

度,锈蚀率又分为质量损失率、面积锈蚀率和体积损失率。在本节的研究中,不考虑锈蚀深度的影响,采用穿透锈蚀的模型,用面积锈蚀率来评估锈蚀的严重程度,面积锈蚀率参照开孔率公式计算。

$$\begin{aligned}
 \text{开孔率} &= \frac{S_c}{S_0} \times 100\% = \frac{1}{ab} \sum_{i=1}^n \pi r_i^2 \times 100\% \\
 &= \frac{1}{ab} \sum_{i=1}^n a_{ci} b_{ci} \times 100\% \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中： S_c 为孔洞的面积； S_0 为模型的面积； a 为模型的宽度； b 为模型的高度； r_i 为对应编号孔洞的半径； a_{ci} 为对应编号孔洞的宽度； b_{ci} 为对应编号孔洞的高度。

分别研究在同一位置相同开孔率的圆形、方形和长圆形开孔对抗剪承载力的影响。模型的尺寸均为500 mm×500 mm×2 mm。不同开孔形状模型参数信息如表2所示。其中,PEA-1-3和PEA-1-5的开孔形状为两个相交于圆心的长圆形,PEA-1-4和PEA-1-6的开孔形状为相切圆组成的长圆形。

表2 开孔率4.5%不同开孔形状模型试件的参数信息

Table 2 Parameter information of models with different hole shapes and a hole opening rate of 4.5%

编号	开孔形状	开孔数量	开孔位置	开孔尺寸/mm	开孔面积/mm ²
PEA-1-1	圆形	1	中心	$r=60$	11 309
PEA-1-2	方形	1	中心	106×106	11 309
PEA-1-3	长圆形	1	中心	$r=47, 141\times 94$	11 357
PEA-1-4	长圆形	1	中心	$r=40, 160\times 80$	11 426
PEA-1-5	长圆形	1	中心	$r=47, 141\times 94$	11 357
PEA-1-6	长圆形	1	中心	$r=40, 160\times 80$	11 426

注： $r=47, 141\times 94$ 中， $r=47$ 为长圆形圆弧处半径，141为长圆形长，94为其宽，其余类推。

在研究开孔模型的承载能力退化情况时,通常使用折减因子表示模型承载能力退化程度,例如,PAIK等^[18]用折减因子对最小横截面承载力退化情况进行量化表征。为了反映不同开孔位置相对于未锈蚀钢板的极限荷载的退化程度,参照PAIK等^[18],王仁华等^[11]对开孔板极限强度折减因子的研究,定义无量纲折减因子 η :

$$\eta = \frac{\Gamma_c}{\Gamma_0} \quad (2)$$

式中： Γ_c 为开孔钢板的抗剪承载力； Γ_0 为未开孔钢板的抗剪承载力,通过有限元模拟计算为140.819 kN。

不同开孔形状的两个模型荷载-位移曲线如图4所示,在相同的开孔率和相同锈蚀位置的情况下,六个模型中,圆形开孔的模型极限承载力最高,竖向长边较长的长圆形的承载能力最低。而且四种不同类型的长圆形,由于长边和短边的大小及方向不同得到的承载能力也不同。但六个模型的承载能力相差幅度不大,即相同开孔率的不同形状的开孔对抗剪承载力虽然有影响,但影响幅度较小。通过式(2)计算得出的六个模型的折减因子如图5所示,证明开孔形状对抗剪极限承载力影响程度很小。

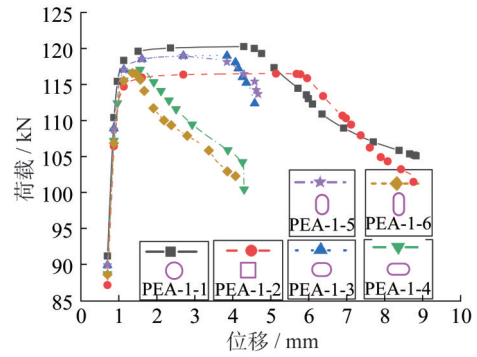


图4 不同开孔形状模型的荷载-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves of models with different opening shapes

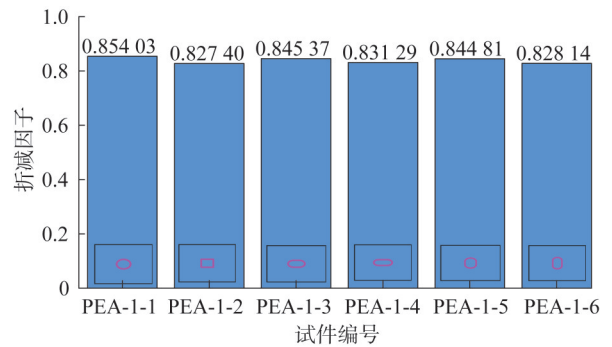


图5 不同锈蚀形状的折减因子

Fig. 5 Reduction factors with different corrosive shapes

3.2 开孔位置的影响

开孔形状对钢板的抗剪承载力影响程度虽然很小,但不同开孔位置的钢板极限承载力退化程度不一致,本节分别考虑圆形、方形和长圆形的不同开孔位置对钢板抗剪承载力的影响,设计三组2 mm厚模型,每一组分别设计九个模型,每个模型在其中一个位置开孔,九个模型分别在九个不同的位置开孔,探讨不同开孔位置以及不同开孔形状对抗剪承载力退化程度的影响,三组模型每一组的开孔率均为4.5%,为穿透开孔。对模拟的模型施加了初始缺陷进行了屈曲分析。

图6为不同开孔位置的模型及命名情况,每一个图的右下角表示模型编号的前缀,最后一位的编号代表模型开孔位置 d 的编号,由图中不同位置的编号来确定,取1~9,编号的英文字母表示开孔形状的英文首字母。第一组为半径60 mm的圆形开孔模型,每个模型开孔分别处于不同的位置,第二组为边长均为106 mm的方形开孔模型,与圆形开孔处于相同的开孔位置,第三组为横向放置半径47 mm相切圆组成的长圆形开孔模型。图7为中间开孔的三组模型。

图8、图9和图10为圆形、方形和长圆形开孔九个模型的有限元分析的荷载-位移曲线。在图8中,开孔位置

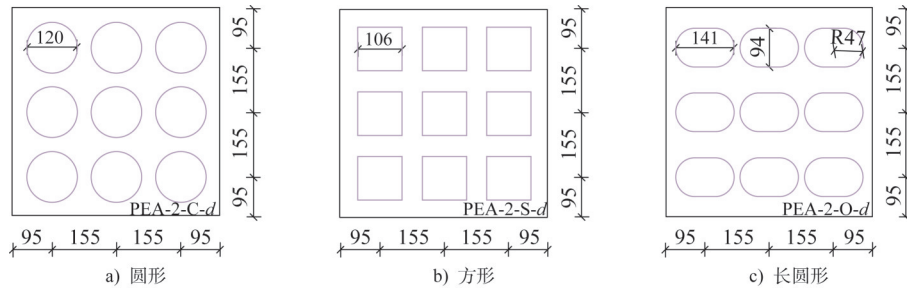


图6 不同开孔位置钢板的模型命名

Fig. 6 Naming of models for steel plates with different opening positions

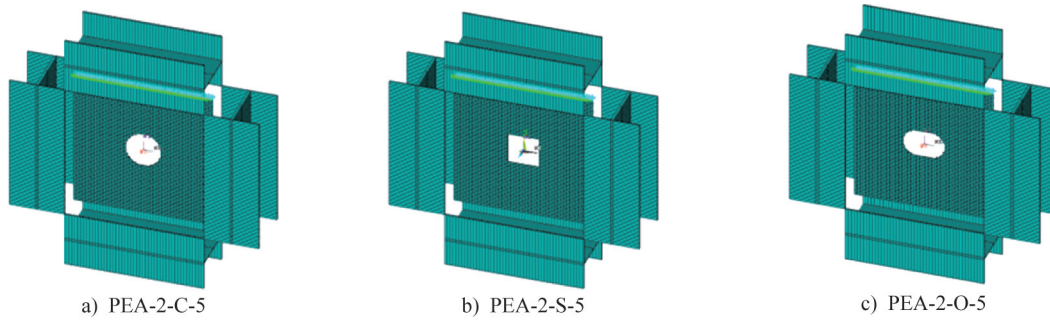


图7 中心开孔的三组模型

Fig. 7 Three sets of models with central opening

为中心 (PEA-2-C-5) 的抗剪承载力最低, 处于模型四个角开孔位置的抗剪承载力最强 (PEA-2-C-1、3、7、9), 四个角的承载力相差不大, 其余位置的极限荷载由中心向四角逐渐增强。在图9中, 开孔位置为中心 (PEA-2-S-5) 的抗剪承载力最低, 然后由中心向四周逐渐增强, 当开孔位置在模型的四个角时, 其抗剪承载力最强 (PEA-2-S-1、3、7、9), 四个角的承载力相差不大。图10中, 开孔长圆形模型的抗剪承载力退化趋势与圆形和方形基本保持一致, 均呈现中心小, 四周大的状态。在荷载增加的过程中, 模型的次对角线形成拉力场, 这种受拉是由于受到水平的剪切荷载形成薄膜效应导致的。有限元分析表明, 开孔的位置在张力场方向时, 承载力较小, 其中板的中心位置最小, 在非张力场方向的锈蚀对模型抗剪承载力的影响与其向张力场对角线方向投影和距离有关, 当投影的位置越接近中心, 投影距离拉力对角线越近, 其抗剪承载力越小, 这是由于开孔参与形成对角线张力场的缘故。

为了在任意开孔位置的模型中, 利用开孔坐标的无量纲参数 i 和 j 来表示抗剪承载力折减因子, 这里以板的中心位置为坐标原点, 纵横坐标按照板的比例位置由公式(3)和(4)确定, 使开孔位置坐标 x 和 y 的变化范围从 $-0.5l \sim 0.5l$ 变为 $-0.5 \sim 0.5$ 。图11、图12和图13分别为圆形、方形和长圆形开孔模型的折减因子云图。对比分析三个图, 虽然方形开孔和圆形开孔的模型在受到水平

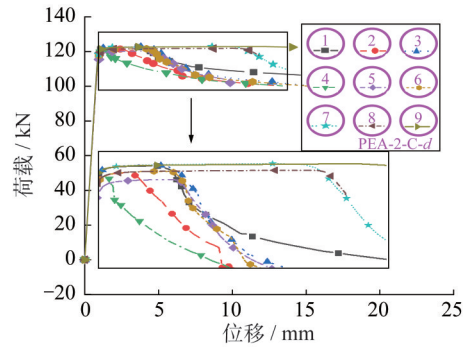


图8 圆形开孔模型的荷载-位移曲线
Fig. 8 Load-displacement curves of circular opening models

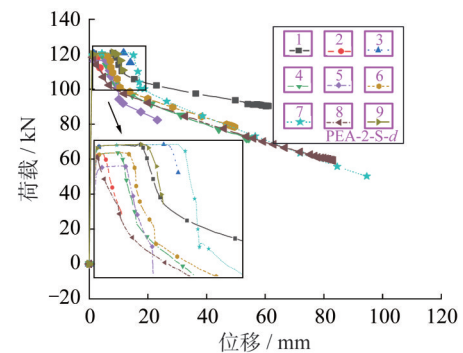


图9 方形开孔模型的荷载-位移曲线图
Fig. 9 Load-displacement curves of square opening models

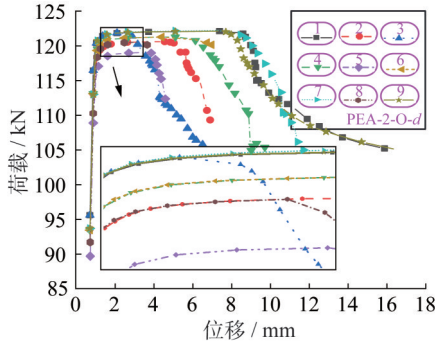


图 10 长圆形开孔模型的荷载-位移曲线
Fig. 10 Load-displacement curves of slotted opening models

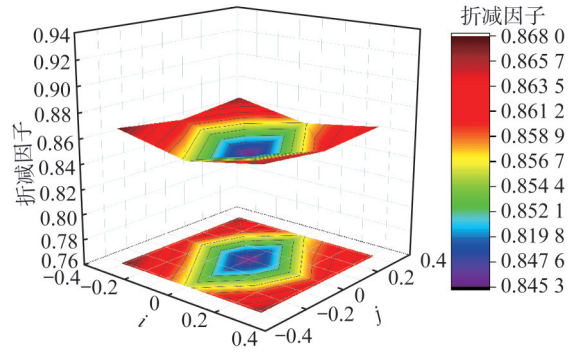


图 13 不同开孔位置长圆形开孔模型的折减因子
Fig. 13 Reduction factor of slotted opening at different positions of models

剪力时,承载力退化的趋势一致,但是每一个方形开孔模型的承载力均小于相应的圆形开孔模型的承载力。方形开孔与圆形开孔相比,其四个直角易出现应力集中现象。在对模型进行水平剪力加载时,其直角处易发生撕裂,由此可能导致其承载力比圆形开孔钢板的低。

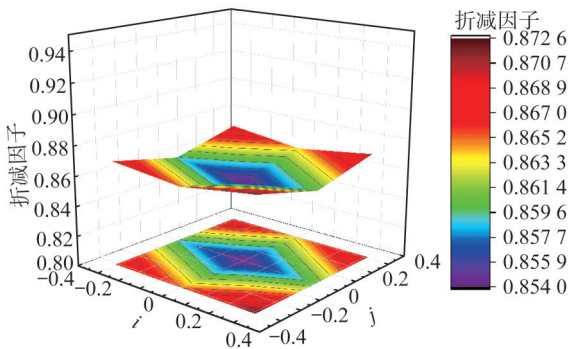


图 11 不同开孔位置圆形开孔模型的折减因子
Fig. 11 Reduction factor of circular opening at different positions of models

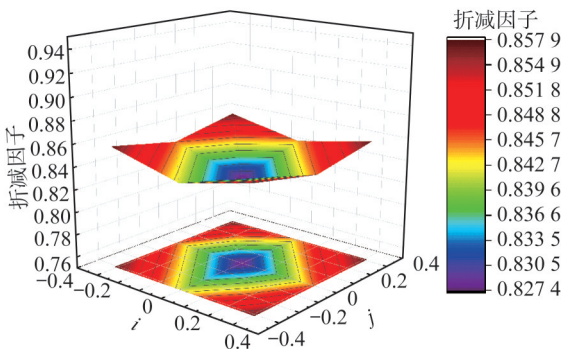


图 12 不同开孔位置方形开孔模型的折减因子
Fig. 12 Reduction factor of square opening at different positions of models

$$i = \frac{x}{l} \quad (3)$$

$$j = \frac{y}{l} \quad (4)$$

式中: x 为坐标位于模型中心时,开孔点形心的横坐标; y 为坐标位于模型中心时,开孔点形心的纵坐标; l 为模型的边长。

根据三组不同开孔位置得到的抗剪承载力折减因子变化规律,利用响应曲面法(RSM)对影响因子及其交互作用进行评价并进行优化计算。通过 Box-Behnken 实验设计 3 因素 3 水平的响应曲面优化实验。实验中以归一化后横、纵坐标以及锈蚀面积比作为影响因素,分别设定编码为“ A 、 B 、 C ”,以开孔钢板模型的抗剪承载力折减因子为评价指标,设计 27 组响应曲面实验,见表 3。

表 3 开孔位置不同模型折减因子 RSM 设计因素水平编码
Table 3 Coding table of RSM design for reduction factor of models with different opening positions

因素	编码	实际水平	
i : 开孔点形心的横坐标 (归一化)	A	-0.310	0.310
j : 开孔点形心的纵坐标 (归一化)	B	-0.310	0.310
S_c/S_0 : 开孔面积比	C	0.045	0.046

实验因素和实验水平通过 Design-Expert 软件进行设计, RSM 实验结果如表 4 所示。根据表 4 的结果,利用实验模型表示响应值与因素值之间的变化关系,得出拟合公式(5):

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k (\beta_i X_i) + \sum_{i=1}^k (\beta_{ii} X_i^2) + \sum_{i < j} (\beta_{ij} X_i X_j) \quad (5)$$

式中: Y 为 RSM 系统响应值; β_0 为偏移项偏移系数; β_i 为线性偏移系数; β_{ii} 为二阶偏移系数; β_{ij} 为交互效应系数; X_i 、 X_j 、 X_{ij} 为各因素水平值分析的主效应和交互效应。

根据设计的 27 组实验和取得相应的实验结果,通过 Design-Expert 软件对分析中的 Box-Behnken 实验进行计

表4 响应曲面实验结果
Table 4 Experiment results of response surface

编号	变量			响应值	编号	变量			响应值
	A	B	C	抗剪承载力折减因子		A	B	C	抗剪承载力折减因子
1	-0.31	0.31	0.045 236	0.870 05	15	0.31	0	0.044 944	0.846 02
2	0	0.31	0.045 236	0.863 96	16	-0.31	-0.31	0.044 944	0.857 87
3	0.31	0.31	0.045 236	0.870 83	17	0	-0.31	0.044 944	0.841 48
4	-0.31	0	0.045 236	0.859 35	18	0.31	-0.31	0.044 944	0.857 58
5	0	0	0.045 236	0.854 03	19	-0.31	0.31	0.045 428	0.867 15
6	0.31	0	0.045 236	0.860 44	20	0	0.31	0.045 428	0.856 35
7	-0.31	-0.31	0.045 236	0.869 71	21	0.31	0.31	0.045 428	0.865 36
8	0	-0.31	0.045 236	0.865 02	22	-0.31	0	0.045 428	0.861 21
9	0.31	-0.31	0.045 236	0.872 55	23	0	0	0.045 428	0.845 37
10	-0.31	0.31	0.044 944	0.857 48	24	0.31	0	0.045 428	0.861 09
11	0	0.31	0.044 944	0.844 39	25	-0.31	-0.31	0.045 428	0.867 92
12	0.31	0.31	0.044 944	0.857 69	26	0	-0.31	0.045 428	0.856 05
13	-0.31	0	0.044 944	0.845 83	27	0.31	-0.31	0.045 428	0.867 13
14	0	0	0.044 944	0.827 40					

算,得到回归模型并对其进行方差分析,得到拟合二次多项回归模型如式(6),变量 φ 表示抗剪承载力折减因子。

$$\varphi = -335.424 + 0.086A + 0.271B + 14\ 858.354C - 0.002AB - 1.9AC - 6BC + 0.12A^2 + 0.108B^2 - 164\ 130C^2 \quad (6)$$

回归方程(6)仅适用于初始缺陷为0.000 1/250、尺寸为500 mm×500 mm×2 mm的Q235钢模型。

对上述的二阶模型进行方差分析,如表5所示。表中模型方差的结果显示,上述各项因素与响应值之间呈显著线性关系,通过F值和P值检验相关显著性,P值越小,对应变量的显著性越强。F值为33.23,P值<0.000 1,远远小于0.05,回归效果较好,模型显著。 $R^2=0.946\ 2$,则该模型不能解释变异占0.053 8,与实际拟合较好,可以使用该回归分析试验结果。修正复相关系数 $R^2_{Adj}=0.917\ 7$,则91.77%响应值的相应编号能用该模型来解释,因此,该模型拟合程度和回归性较好,误差较小,对折减因子进行分析和预测可以使用该模型。试验精确度 A_p 为20.980 1(>4),较为合理。同时变异系数为0.356 6%(<10%),说明该模型具有良好的可行性和精确度。模型组一次项C极其显著,A、B不显著,故从F值大小可知单因素影响顺序 $C>A>B$;二次项 A^2 、 B^2 和 C^2 差异极其显著;交互项AB、AC和BC不显著,如图14所示。综上所述,RSM能够较好地反映开孔位置和开孔面积比对开孔钢板抗剪

承载力折减因子的影响规律。

3.3 径深比的影响

在真实锈蚀的环境里,桥梁的钢腹板接近下翼缘处最易被锈蚀,故本节的开孔位置均设置在接近模型下边缘处。开孔部分采用圆柱体,考虑开孔体积率(D_o)的影响,探究开孔直径 D_c 、开孔深度 T_c 和 D_c/T_c 对钢板抗剪承载力的影响。在本节中采用4 mm厚的钢板模型进行分析,模型的尺寸均为4 mm×500 mm×500 mm,考虑开孔直径 D_c 为40 mm,50 mm和60 mm,开孔深度 T_c 为0.5~4 mm的开孔,按0.5 mm依次递增。图15为本节考虑径深比影响设计的模型。

图16、图17和图18分别为所有模型的荷载-开孔径深比散点图、荷载-开孔深度散点图和荷载-DOPV散点图。随着模型的开孔深度 T_c 增大,抗剪承载力降低。而开孔深度 T_c 越大,随着开孔直径 D_c 的增大,其承载力退化越大,承载力随开孔直径 D_c 的增大而减小。显然,当开孔位置确定时,随着开孔体积的变大,抗剪承载力减小。模型的抗剪承载力随径深比的增大而增大,然而,当径深比相同时,由于开孔的直径和深度同时增加,承载力存在不同幅度的退化,不能观察出明显的退化规律,此时,开孔体积率(D_o)更能准确表示开孔程度对抗剪承载力退化的影响。

表5 折减因子回归模型的方差分析
Table 5 Analysis of variance of reduced factor regression model

来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	0.002 8	9	0.000 3	33.23	<0.000 1	◎
A	3.155×10^{-7}	1	3.155×10^{-7}	0.033 7	0.856 5	*
B	1.389×10^{-7}	1	1.389×10^{-7}	0.014 8	0.904 5	*
C	0.000 7	1	0.000 7	73.98	<0.000 1	◎
AB	5.058×10^{-7}	1	5.058×10^{-7}	0.054 0	0.819 0	*
AC	2.479×10^{-7}	1	2.479×10^{-7}	0.026 5	0.872 7	*
BC	2.476×10^{-6}	1	2.476×10^{-6}	0.264 4	0.613 7	*
A ²	0.000 8	1	0.000 8	84.81	<0.000 1	◎
B ²	0.000 6	1	0.000 6	69.16	<0.000 1	◎
C ²	0.000 5	1	0.000 5	52.81	<0.000 1	◎
残差项	0.000 2	17	9.326×10^{-6}			
总和	0.003 0	26				
变异系数	0.356 6%		20.980 1	$R^2=0.946 2$	$R^2_{Adj}=0.917 7$	$R^2_{Pred}=0.874 5$

注:◎, P<0.001, 极其显著; *, 不显著。

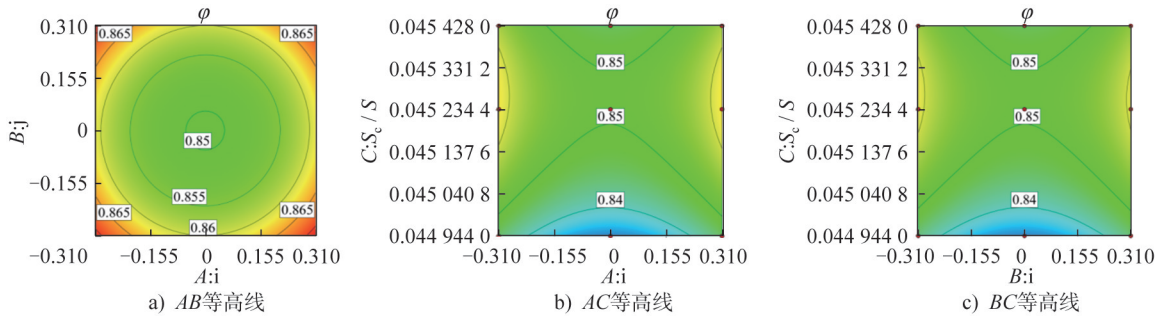


图14 开孔位置和开孔面积比对钢板抗剪承载力折减因子影响的等高线图
Fig. 14 Contour map of the influence of opening positions and opening area ratios on the reduction factor of shear bearing capacity

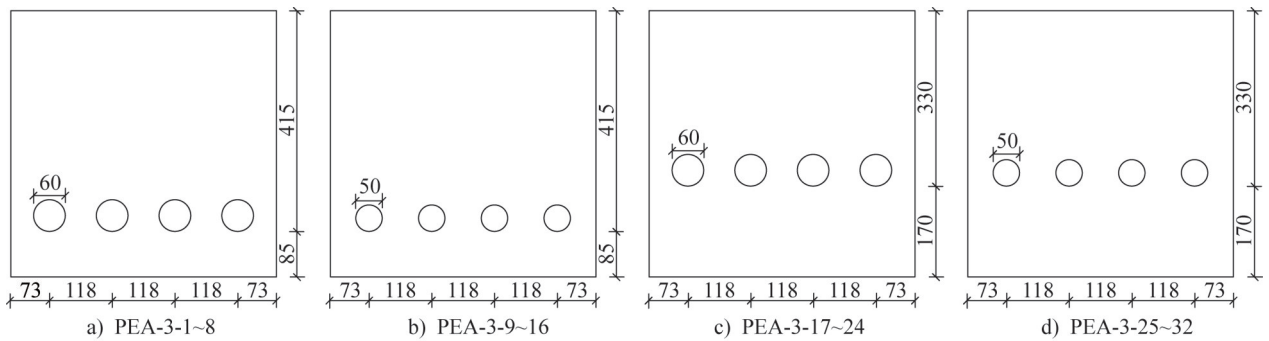


图15 径深比模型
Fig. 15 Models of diameter depth ratio

3.4 材料强度的影响

本节研究不同强度钢板对开孔后抗剪承载力折减因子的影响, 选用与模型板厚度一致的模型, 分别采用 Q235、Q345、Q390、Q420 和 Q460 钢, 试验采用理想化弹

塑性本构, 初始缺陷为 $0.5/250=0.002$ m。模型的承载力性能如图 19 所示。不同材料强度的抗剪折减因子如表 6 所示。由表可知材料强度属性对开孔钢板的抗剪承载力折减因子的影响非常小。

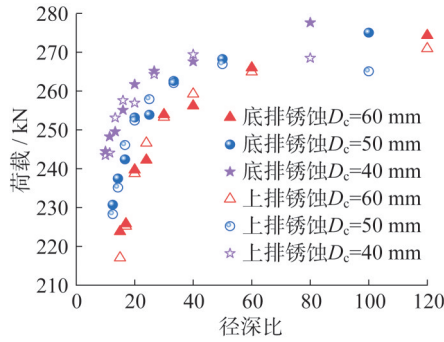


图 16 荷载-开孔径深比散点图

Fig. 16 Load-opening aperture depth ratio scatter diagram

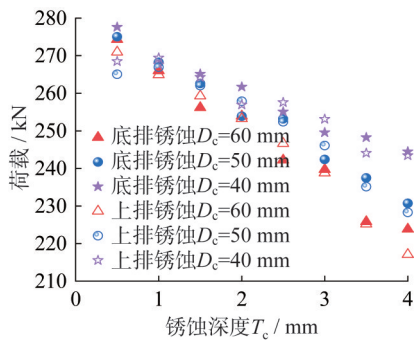


图 17 荷载-开孔深度散点图

Fig. 17 Load-opening depth scatter diagram

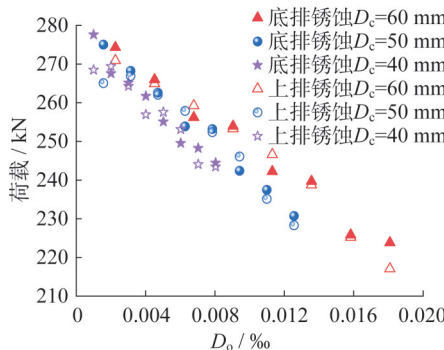


图 18 荷载-开孔体积率散点图

Fig. 18 Load- D_0 scatter diagram

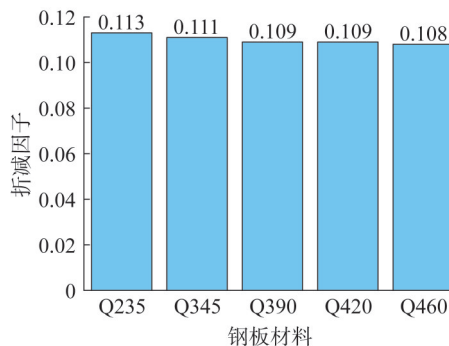


图 19 不同钢材强度的抗剪折减因子

Fig. 19 Reduction factors of different steel strengths

表 6 开孔与未开孔不同钢材强度模型试有限元模拟的抗剪承载力

Table 6 The shear capacities of models of different steel strengths with or without openings

钢板材料	开孔板/kN	未开孔板/kN	折减因子
Q235	14.158	124.840	0.113
Q345	20.007	180.819	0.111
Q390	22.293	204.170	0.109
Q420	23.819	219.074	0.109
Q460	25.869	239.794	0.108

4 结论

本文采用 ANSYS 有限元软件分析及试验验证相结合的方法,对开孔钢板的抗剪承载力进行研究,讨论了开孔位置、开孔形状、径深比和材料强度等参数对钢板抗剪承载力折减的影响,得到如下结论:

(1) 不同开孔形状对抗剪承载力虽然有影响,但影响幅度较小,圆形开孔的模型极限承载力最高,竖向长边较长的长圆形开孔的模型极限承载力最低。不同开孔形状的模型,其抗剪承载力的退化规律一致。

(2) 模型的抗剪承载力折减因子会随着开孔位置的变化而变化,模型中心为最危险的开孔位置,其折减因子最小,处于模型四个角开孔位置的折减因子最大。

(3) 通过 Design-Expert 软件的响应曲面法进行回归分析,拟合出归一化后开孔位置的横、纵坐标以及开孔面积比与钢板抗剪承载力折减因子的回归方程。

(4) 径深比对钢板的抗剪承载力的影响不明显,而开孔体积率能更准确地体现开孔程度对抗剪承载力的退化影响。

(5) 模型的抗剪承载力折减因子与材料强度无关,材料强度属性对开孔钢板的抗剪承载力折减因子的影响可以忽略不计。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.

[3] 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.
- [4] ZHAO Z W, GAO T, LIU J X, et al. Local bearing capacity of steel beam webs with random pit corrosion [J]. Structures, 2023, 48: 1259-1270. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.01.044.
- [5] 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.
- [6] 李安邦, 徐善华. 锈蚀对钢板表面特性及CFRP板-锈蚀钢板界面黏结性能的影响 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(2): 746-758. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20210422.001.
- LI Anbang, XU Shanhua. Effect of corrosion on the surface properties of steel plate and interfacial bonding properties between CFRP plate and corroded steel plate [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(2): 746-758. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20210422.001. (in Chinese)
- [7] ZHAO Z W, LIU J X, WANG B, et al. Post-buckling shear capacity of the corroded end panels of H-shaped steel beams [J]. Thin-Walled Structures, 2023, 184: 110499. DOI: 10.1016/j.tws.2022.110499.
- [8] AHN J H, CHEUNG J H, LEE W H, et al. Shear buckling experiments of web panel with pitting and through-thickness corrosion damage [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 115: 290-302. DOI: 10.1016/j.jcsr.2015.08.032.
- [9] BAO A, GUILLAUME C, SATTER C, et al. Testing and evaluation of web bearing capacity of corroded steel bridge girders [J]. Engineering Structures, 2021, 238: 112276. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.112276.
- [10] MA H B, YANG Y, HE Z, et al. Experimental study on mechanical properties of steel under extreme cyclic loading considering pitting damage [J]. Ocean Engineering, 2019, 186: 106091. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2019.05.073.
- [11] 王仁华, 方媛媛, 林振东, 等. 点蚀损伤下海洋平台结构剩余强度的多尺度分析方法 [J]. 工程力学, 2016, 33(1): 238-245. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.06.0524.
- WANG Renhua, FANG Yuanyuan, LIN Zhendong, et al. Multi-scale analysis of residual strength of offshore platforms with pitting corrosion [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(1): 238-245. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2014.06.0524. (in Chinese)
- [12] ZHANG Y, HUANG Y, ZHANG Q, et al. Ultimate strength of hull structural plate with pitting corrosion damage under combined loading [J]. Ocean Engineering, 2016, 116: 273-285. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2016.02.039.
- [13] WEN Z Y, WEI X, XIAO L, et al. Experimental evaluation of the shear buckling behaviors of corrugated webs with artificial corrosion pits [J]. Thin-Walled Structures, 2019, 141: 251-259. DOI: 10.1016/j.tws.2019.04.034.
- [14] FENG L, HE J K, HU L C, et al. A parametric study on effects of pitting corrosion on steel plate's ultimate strength [J]. Applied Ocean Research, 2020, 95: 102026. DOI: 10.1016/j.apor.2019.102026.
- [15] FENG L, HU L C, CHEN X G, et al. A parametric study on effects of pitting corrosion on stiffened panel's ultimate strength [J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2020, 12: 699-710. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2020.08.001.
- [16] 王伟, 李启才. 不同参数对开圆洞钢板剪力墙抗震性能的影响 [J]. 常州工学院学报, 2019, 32(5): 6-14. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0436.2019.05.003.
- WANG Wei, LI Qicai. The influence of different parameters on the seismic performance of steel plate shear wall [J]. Journal of Changzhou Institute of Technology, 2019, 32(5): 6-14. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0436.2019.05.003. (in Chinese)
- [17] 杨斌, 赵炳震, 杜颜胜, 等. 局部开孔对矩形钢板抗剪承载力影响研究 [J]. 建筑钢结构进展, 2025, 27(6): 35-43. DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20240117001.
- YANG Bin, ZHAO Bingzhen, DU Yansheng, et al. Investigation on the influence of local opening on shear capacity of rectangular steel plates [J]. Progress in Steel Building Structures, 2025, 27(6): 35-43. DOI: 10.13969/j.jzgjgz.20240117001. (in Chinese)
- [18] PAIK J K, KIM B J, SEO J K. Methods for ultimate limit state assessment of ships and ship-shaped offshore structures: Part I: Unstiffened plates [J]. Ocean Engineering, 2008, 35(2): 261-270. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2007.08.004.