

H型钢梁翼缘开孔研究

郝润霞¹,张安康²,田志昌¹,苏丽丽³

(1. 内蒙古科技大学土木工程学院,内蒙古 包头 014010;2. 中铁十九局集团第二工程有限公司,辽宁 辽阳 111000;3. 万郡房地产(包头)有限公司,内蒙古 包头 014030)

摘要 目的 研究 H 型钢梁翼缘开孔的最优设计,使实际工程中电气管线铺设达到美观、实用的效果. 方法 采用 ANSYS 有限元分析软件,对刚性连接、柔性连接、半刚性连接的 H 型钢梁进行翼缘开孔模拟. 针对不同开孔直径、数量、位置,翼缘宽度,钢梁长度等参数进行分析. 结果 当翼缘宽度 < 100 mm 时,不建议开孔;当翼缘宽度 < 150 mm,建议开孔直径为 25 mm;当翼缘宽度为 130 mm 时,建议开孔补强;当翼缘宽度 ≥ 150 mm 时,建议开孔直径为 35 mm. 开孔位置选择接近反弯点或弯矩为零且不应小于整体梁长度的 $1/6$ 处;多组开孔选择翼缘两侧对称开孔;同等条件下,优先选用长度较小的钢梁进行开孔. 结论 在项目进行施工前,可以依据工程图纸,进行开孔钢梁位置和补强板的设定. 运用集成化生产模式,在工厂直接进行开孔和补强. 在条件允许的情况下,运用整体铸造的方式,可以更好地保证产品质量.

关键词 H 型钢梁;翼缘开孔;ANSYS;翼缘宽度;开孔直径

中图分类号 TU391 文献标志码 A

Research on Flange Opening of H-shaped Beam

HAO Runxia¹, ZHANG Ankang², TIAN Zhichang¹, SU Lili³

(1. School of Civil engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, China, 014010; 2. China Railway 9th Breau group Second Engineering Co. Ltd., Liaoyang, China, 111000; 3. Wanjun Real Estate (Baotou) Co. Ltd., Baotou, China, 014030)

Abstract: The optimal design of the flange opening of the H-shaped steel beam is studied to achieve the aesthetic and practical effect of laying the electrical pipeline in the actual project. Finite element analysis software ANSYS was used to simulate the flange opening of H-shaped steel beams with rigid connection, flexible connection and semi-rigid connection. The parameters of different opening diameter, number of openings, opening location, flange width, steel beam length were analyzed. When the flange width is less than 100 mm, it is not recommended to open the hole; when the flange width is 100 ~ 150 mm, the recommended hole diameter is 25 mm; when the flange width is greater than 150 mm, the recommended hole diameter is 35 mm; when the flange

收稿日期:2018-01-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51268042)

作者简介:郝润霞(1972—),女,副教授,主要从事钢结构住宅方面研究.

width is 130 mm, the recommended opening diameter is 35 mm, need to strengthen treatment. The recommended position of the opening is close to the anti-bending point or the place where the moment is zero and it should not be less than 1/6 of the overall beam length; multiple sets of openings are recommended to choose symmetrical openings on both sides of the flange; under the same conditions, it is recommended to use smaller steel beams for openings. Before the construction of the project, according to the engineering drawings, the position of the opening steel beam and the setting of the reinforcement board can be set. The use of integrated production mode, in the factory to directly open and reinforce, to meet the actual construction needs of the H-beam flange opening. If conditions permit, the use of integral casting can better ensure product quality.

Key words: H beam; flange opening; ANSYS; flange width; opening diameter

钢结构由于具有强度高、自重轻、易于加工、平面布置灵活、施工周期短等优点而被广泛应用^[1]。钢框架结构是钢结构中常见的一种结构体系,在项目建设中往往会遇到电气管线在不同楼层、房间之间穿越,而常用的H型钢梁作为主要的承重构件通常不允许开孔,电气管线只能绕过钢梁外露来进行铺设作业,影响建筑结构的美观。目前,专家学者对钢梁腹板开洞进行了较为深入的研究,常见的主要有H型钢梁腹板开洞和“狗骨式”节点两种^[2-10]。谢晓栋、杨庆山、李波等^[2-3]对H型钢梁腹板开孔的钢框架梁柱节点进行试验研究和有限元分析,结果表明在腹板的适当位置开设一定大小的圆孔,可以形成“空腹梁”机制,达到塑性铰外移的目的。戴绍斌、陈建兵等^[5-6]对钢框架结构在侧向荷载作用下梁柱反弯点之间的典型梁单元进行试验分析,发现“狗骨式”节点主要是通过削弱梁来保护节点,即削弱部分的梁能起到一个保险丝的作用,“狗骨式”针对普通节点塑性区小的缺陷,对梁进行削弱,使得较长的一段梁同时进入塑性,真正地做到了延性设计,充分发挥了钢材的性能。但对翼缘开洞的情况则缺乏必要的分析,至今一些翼缘开洞的相关文献^[11-16],也没有相应标准或者相关规定。笔者根据在万郡大都城项目施工中所遇到的技术难题,依据工程图纸,研究H型钢

梁翼缘开孔的最优设计,达到实际工程中电气管线铺设美观、实用的效果,解决工程实际中H型钢梁的翼缘开孔问题。

1 补强板样式设计

笔者依据工程图纸,对万郡大都城三期项目中17#楼进行分析,H型钢梁是主要承担均布荷载下的受弯构件。在图纸设计中,梁的连接方式可以分为刚性连接、柔性连接、半刚性连接。针对于不同连接的受力方式,计算H型钢梁的理论极限荷载^[17]。H型钢梁翼缘开孔补强板按照“等惯性矩的原则”设计^[18-21],减弱或弥补H型钢梁翼缘开孔造成的损伤,H型钢梁和补强板具体设置方式如图1所示^[13]。图中 H 为钢梁截面高度; T_w 为钢梁翼缘厚度; T_f 为钢梁腹板厚度; B 为钢梁翼缘宽度; A_1 为补强板长度; B_1 为补强板宽度; d 为开孔直径。

参考H型钢梁腹板开洞补强措施,补强板长度 A_1 为

$$A_1 = 3d. \quad (1)$$

为满足焊缝要求,补强板两边距边缘10 mm,补强板宽度为

$$B_1 = B/2 - 20. \quad (2)$$

补强板厚度 t 取 Y 轴和 x 轴计算厚度较大的值。

Y 轴补强板厚度 t_y :

$$t_y = \frac{dT_f \frac{B^2}{16} + \frac{1}{12} T_f d^3}{\frac{1}{12} \left(\frac{B}{2} - \frac{T_w}{2} - 20 \right)^3 + \left(\frac{B}{2} - \frac{T_w}{2} - 20 \right) \left(\frac{B}{4} + \frac{T_w}{4} \right)^2} \quad (3)$$

X轴补强板厚度为 t_x :

$$t_x = \frac{dT_f \left(\frac{H}{2} - \frac{T_f}{2} \right)^2 + \frac{1}{12} d T_f^3}{\left(\frac{B}{2} - \frac{T_w}{2} - 20 \right) \left(\frac{H}{2} - T_f - \frac{t}{2} \right)^2 + \frac{1}{12} t^2 \left(\frac{B}{2} - \frac{T_w}{2} - 20 \right)} \quad (4)$$

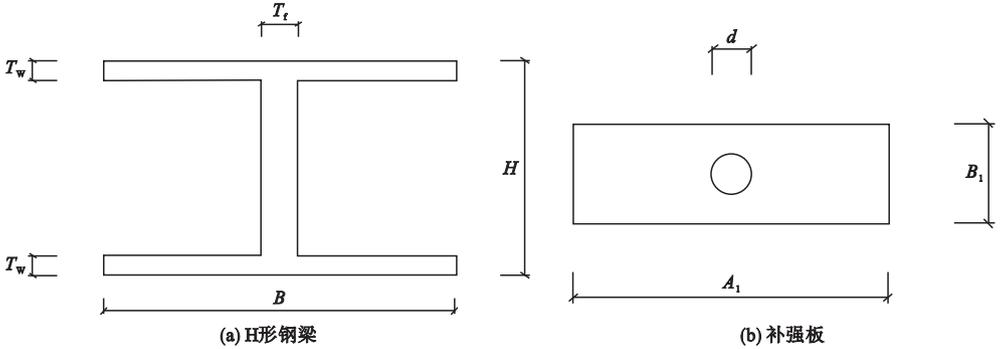


图1 H形钢梁和补强板样式示意图

Fig. 1 Sketch of H-beam and reinforcement plate pattern

2 H型钢筒支梁翼缘开孔研究

笔者选用性能优良的H型钢梁,材质Q345B,3种钢梁的型号为:H400 mm × 150 mm × 8 mm × 12 mm、H400 mm × 130 mm × 8 mm × 12 mm、H400 mm × 100 mm × 8 mm × 12 mm,跨度为6 000 mm.采用ANSYS有限元软件模拟,定义H型钢梁为非线性、几何非线性两种情况材料.假定材料的弹塑性本构关系为双线性随动强化模式,强化后的屈服强度为420 MPa,在达到屈服强度之后,材料的切线模量 $E_t = 0.005E = 1.03 \times 10^3$ MPa,材料服从Von - Mises屈服准则,进入塑性之后满足Prandtl - Reuss塑性流动法则.

2.1 翼缘宽度对钢梁开孔的影响

2.1.1 开孔与未开孔钢梁的最大应力比较

笔者选取简支梁作为分析模型,固定单元长度,不同宽度,自由网格划分.在梁的上翼缘面上施加极限均布荷载,模拟钢梁在理论极限荷载作用下,柔性连接状态下的受力

性能.当钢梁翼缘宽度为100 mm时,补强板的计算宽度小于翼缘开孔直径 $d = 35$ mm,不满足补强板开孔的基本要求,不宜开孔.这个结果也充分说明无论钢梁两端是哪种连接形式,当补强板计算宽度小于开孔直径时,都是不适合开孔.

在钢梁跨中部位的单侧翼缘上下同时进行垂直开孔,开孔直径为35 mm.开孔位置是不同上翼缘单侧部分开孔型心位置处的坐标向量,且随着翼缘宽度的改变而改变.垂直开孔位置分别在钢梁翼缘的3 000 mm、37.5 mm、3 000 mm、32.5 mm、3 000 mm、25 mm处,距腹板的最小距离分别为18 mm、13 mm、5.5 mm.任何截面形式的钢梁,开孔后钢梁的挠度都会有所增加,Von应力也会有所增加,翼缘开孔部位的应力集中也比较严重,对钢梁损害十分明显.不同宽度类型钢梁的挠度和最大应力如表1所示.钢梁长度为 L ,在钢梁 $L/2$ 位置处应力集中如图2所示.分析跨中开孔后受力可以发现,随着钢梁翼缘宽度的逐步变小,开孔后钢梁的挠度都是增大的,说

明开孔时对钢梁的损坏也是明显的。

工程中电气管线铺设都是在 H 型钢梁翼缘上下垂直的位置进行竖向成组开孔,来满足电气管线铺设的需要。钢梁开孔后残余应力并没有降低梁的强度,梁截面弯矩仍然可以达到全塑性弯矩,只不过梁的变形比不考虑残余变形时发展得更快。钢梁设计阶段已经控制了非弹性变形值,所以钢梁的残余应力不予考虑。

表 1 不同宽度类型钢梁的挠度和最大应力

Table 1 Deflection and maximum stress of steel beams of different width types

钢梁 编号	截面形式/mm	未开孔		跨中开一组孔	
		挠度/ mm	最大 Von 应力/MPa	挠度/ mm	最大 Von 应力/MPa
1	H400 × 150 × 8 × 12	13.20	423.73	13.35	423.75
2	H400 × 130 × 8 × 12	12.67	423.53	12.83	423.57
3	H400 × 100 × 8 × 12	11.99	423.27	12.16	423.29

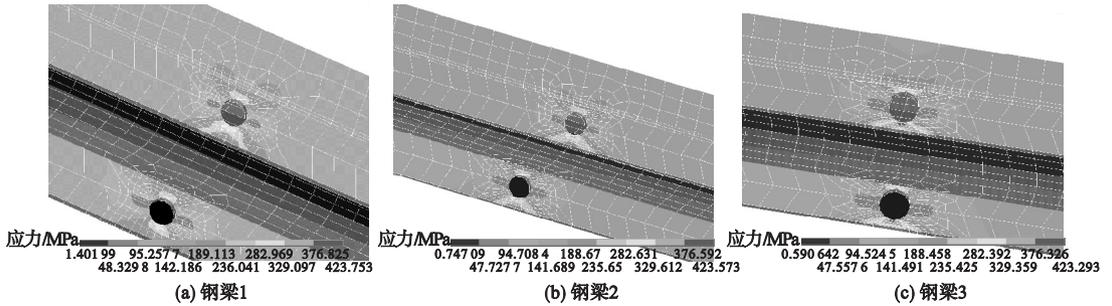


图 2 在钢梁 L/2 位置处开孔应力集中

Fig. 2 Hole stress at L/2 hole location

2.1.2 补强后钢梁的受力性能分析

钢梁翼缘开孔后,钢梁引发的应力集中。为了减弱对于钢梁截面的损害,采用对钢梁翼缘内侧焊接补强板进行补强。翼缘开孔补强板参数如见表 2 所示。随着钢梁翼缘宽度的改变,钢梁开孔部位的应力集中也是越来越严重,钢梁 2、钢梁 3 中应力已经超过了材料边缘屈服纤维极限值。由表 2 可以看出,当钢梁连接为柔性连接、电气管线 $d \geq 35$ mm 时,3 号钢梁的钢梁翼缘宽度 < 100 mm 时,补强板计算宽度小于开孔直径,不应进行电气管线的开孔;对于钢梁翼缘宽度为 130 mm 时,开孔后建议补强。截面形式为 H400 mm × 150 mm × 8 mm × 12 mm、H400 mm × 130 mm × 8 mm × 12 mm 两种形式的 H 型钢梁,在跨中开孔补强后的挠度和最大应力如表 3 所示。

孔后未补强情况下得到了明显缓和(见图 3)。应力值在材料的屈服纤维极限应力值范围内,满足受弯构件的屈服准则。

表 2 翼缘开孔补强板参数

Table 2 The parameters of the flange opening reinforcement plate calculated mm

钢梁编号	截面形式	补强板	补强板	补强板
		长度	宽度	厚度
1	H400 × 150 × 8 × 12	105	55	9
2	H400 × 130 × 8 × 12	105	45	12
3	H400 × 100 × 8 × 12	105	30 < 35	—

表 3 两种截面跨中开孔补强后的挠度和最大应力
Table 3 The deflection and maximum stress after reinforced of two kinds of cross-section openings in the middle of the beam

编号	截面形式/ mm	补强后挠度/ mm	补强后最大 Von 应力/MPa
1	H400 × 150 × 8 × 12	13.27	423.75
2	H400 × 130 × 8 × 12	12.74	423.54

H 型钢梁翼缘开孔补强后比未开孔钢梁承载力略微有所下降,在钢梁可以承受的范围内。补强后钢梁开孔部位的应力相对于于开

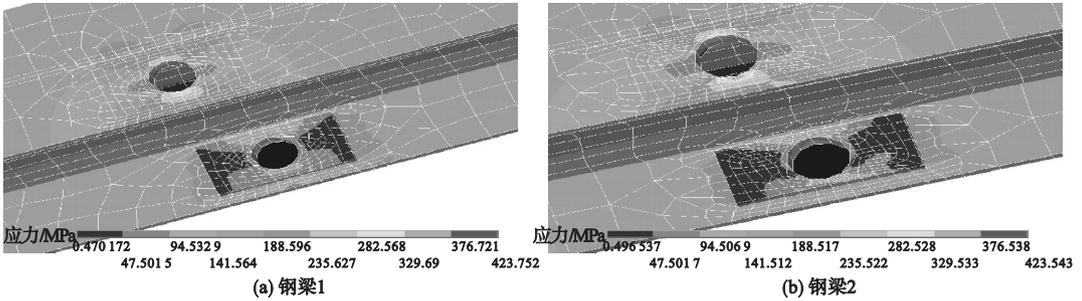


图3 在钢梁L/2位置处开孔补强后应力集中

Fig. 3 Stress concentration diagram of hole position reinforced at L/2

2.2 开孔数量对钢梁性能的影响

为了研究钢梁开孔数量对于钢梁的影响,采取在各个截面在理论极限荷载作用下进行模拟,翼缘单侧开孔部位分比为两组和四组.第一种钢梁开两组孔位置分别在钢梁翼缘的3 000 mm、37.5 mm、3 500 mm、37.5 mm处,开四组孔的位置在2 500 mm、37.5 mm、3 000 mm、37.5 mm、3 500 mm、37.5 mm、4 000 mm、37.5 mm处,距腹板的最小距离都是18 mm,开孔直径都是35 mm;第二种钢梁开两组孔位置分别在钢梁翼缘的3 000 mm、32. mm、3 500 mm、32.5 mm处,开四组孔的位置在钢梁翼缘的2 500 mm、32.5 mm、3 000 mm、32.5 mm、3 500 mm、32.5 mm、4 000 mm、32.5 mm处,距腹板的最小距离都是13 mm,开孔直径都是35 mm. ANSYS有限元模拟结果如表4所示.由表4可以看出,在理论弹性极限荷载作用下,随着钢梁翼缘开孔数量的增加,钢梁的挠度在不断变化.由表1、表4可知,在未开孔、开一组孔、开两组孔的时候,钢梁的挠度随钢梁数量增加呈现线性发展.开两组孔过后,钢梁挠度的变化逐渐开始变得变化缓

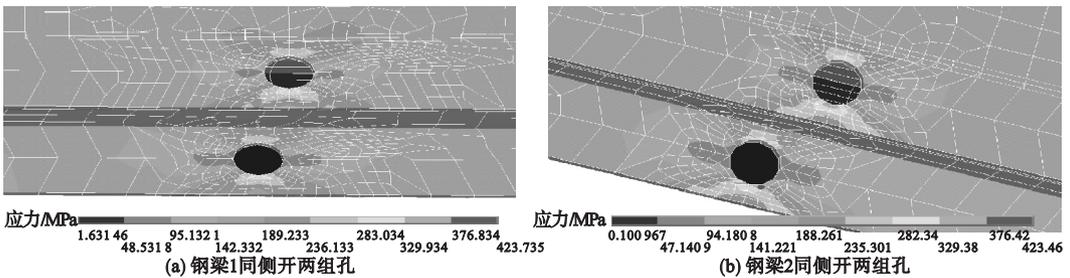
慢,这说明钢梁翼缘开孔位置的变化对于钢梁的损害程度不相同.随着钢梁翼缘开孔数量不断增加,开孔位置由不断变化,钢梁的最大 Von 应力也不断变大.

表4 两种形式梁开两组孔和四组孔时的挠度和最大应力值

Table 4 The deflection and the maximum stress value of two forms beams, two sets of holes and four sets of holes

钢梁编号	截面形式/ mm	开两组孔		开四组孔	
		挠度/ mm	最大 Von 应力/ MPa	挠度/ mm	最大 Von 应力/ MPa
1	H400 × 150 × 8 × 12	13.50	423.76	13.61	423.77
2	H400 × 130 × 8 × 12	12.99	423.60	13.12	423.62

图4为钢梁在纯弯矩段和弯剪段共同作用下应力分布,在钢梁翼缘的开孔部位,随着钢梁翼缘开孔数量增加,孔周围的应力集中也越明显.为最大程度上保证结构或构件的性能,模拟选取最不利的情况,发现越是接近钢梁反弯点位置或弯矩为零的点开孔越有利,在相同条件下,钢梁挠度和最大 Von 应力较小.



(a) 钢梁1同侧开两组孔

(b) 钢梁2同侧开两组孔

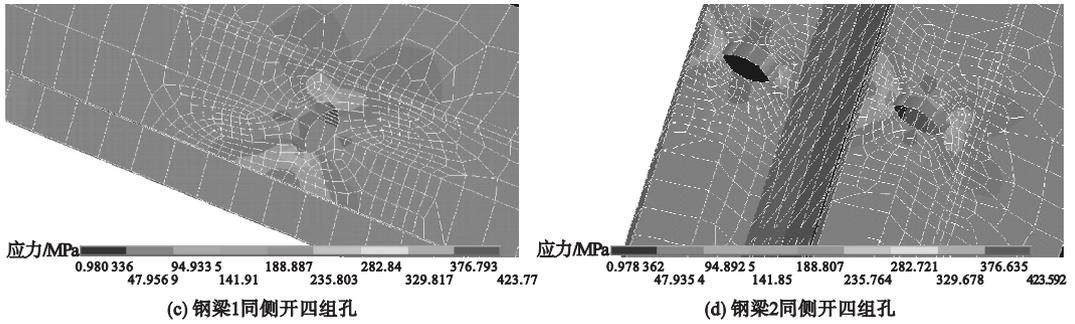


图4 钢梁在纯弯矩段和弯剪段共同作用下应力集中

Fig. 4 Stress concentration of steel beams in the pure bending moment and shear section of the role under the map

2.3 对称开孔对钢梁性能的影响

为探究H型钢梁的最佳使用性能,笔者尝试运用两侧对称开孔.第一种钢梁开两组孔位置分别在钢梁翼缘的3250mm、37.5mm、3250mm、112.5mm处,开四组孔的位置分别在钢梁翼缘的2750mm、37.5mm、2750mm、112.5mm、3750mm、37.5mm、3750mm、112.5mm处,距腹板的最小距离都是18mm,开孔直径都是35mm;第二种钢梁开两组孔位置分别在钢梁翼缘的3250mm、32.5mm、3250mm、

97.5mm处,开四组孔的位置分别在钢梁翼缘的2750mm、32.5mm、2750mm、97.5mm、3750mm、32.5mm、3750mm、97.5mm处,距腹板的最小距离都是13mm,开孔直径都是35mm.采用ANSYS软件进行模拟,得出两种形式梁对称开两组孔和四组孔时的挠度和最大应力(见表5).

由表5可以看出,同一种钢梁在翼缘两侧进行对称开孔时,开两组孔和四组孔时挠度情况较小,最大应力几乎相同.

表5 两种形式梁对称开两组孔和四组孔时的挠度和最大应力

Table 5 Two forms of beams deflection and maximum stress values for two sets of holes and four sets of holes symmetrically

钢梁编号	截面形式/mm	开两组孔		开四组孔	
		挠度/mm	最大 Von 应力/MPa	挠度/mm	最大 Von 应力/MPa
1	H400 × 150 × 8 × 12	13.31	423.78	13.33	423.79
2	H400 × 130 × 8 × 12	12.79	423.57	12.82	423.62

钢梁在纯弯矩段和弯剪段共同作用下应力集中如图5所示.任何截面形式的H型钢梁,随着翼缘开孔数量的增加,应力集中的现象都是越来越加剧,且应力集中的最大值都超过了钢梁边缘纤维屈服荷载.这说明在同等条件下,无论采用哪种开孔方式,或者如何的采取有利措施进行规避或减轻开孔对于钢梁的损害,开孔数量越多,钢梁的挠度、应力最大值、应力集中都会加剧.因此,H型钢梁翼缘开孔不可避免地要造成对于钢梁本身的损害,通过模拟分析,只能找到有利的方法去

开孔和补强措施,来减弱钢梁开孔带来的危害.

在钢梁翼缘左右同时开孔时,钢梁的挠度变化和应力峰值都比单侧整体开孔要小,说明在一定程度上钢梁翼缘左右对称开孔是比较有利的.对比开孔周围的应力集中情况,对称开孔明显比单侧开孔时应力集中有所缓解,说明对称开孔可以在一定程度上可有效地减弱钢梁开孔后引起的应力集中.因此,钢梁的翼缘在需要进行同时开孔组数较多时,应该优先选用对称开孔.

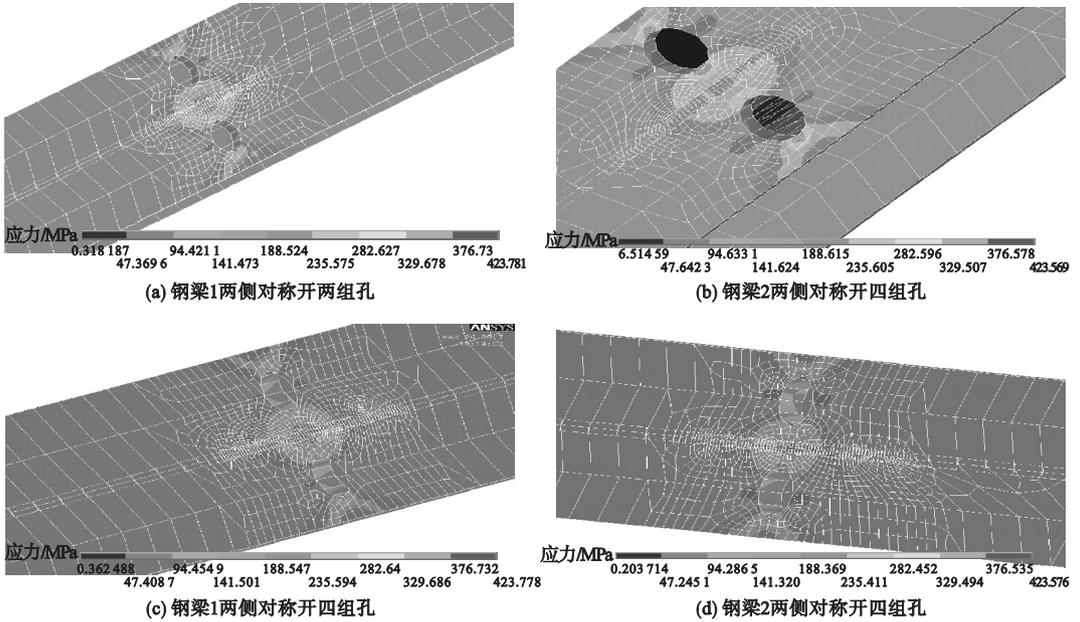


图5 钢梁在纯弯矩段和弯剪段共同作用下应力集中

Fig. 5 Stress concentration of steel beams in the pure bending moment and shear section under the combined effect

3 H型钢两端固定翼缘开孔研究

通过对简支梁H型钢梁翼缘开孔的研究发现,在接近梁的反弯点或弯矩为零的点进行开孔对于钢梁本身损害比较小.因此笔者提出通过钢梁的弯矩图来寻找钢梁的最佳开孔位置.

3.1 开孔直径对于钢梁性能的影响

依据施工图纸,采用有限元软件ANSYS进行模拟.选取截面形式为:H400 mm × 150 mm × 8 mm × 12 mm、H400 mm × 130 mm × 8 mm × 12 mm、H400 mm × 120 mm × 8 mm × 12 mm,跨度6 000 mm的钢梁,材料属性和适用原则与简支梁一致.建筑电气管线的通用开孔直径为25 mm和35 mm,开孔位置设在 $L/2$ 处,第一组开孔 $d=35$ mm,具体开孔位置分别在钢梁翼缘的3 000 mm、37.5 mm、3 000 mm、32.5 mm,3 000 mm、30 mm处,距腹板的最小距离分别为18 mm、13 mm、10.5 mm;第二组开孔 $d=25$ mm,具体开孔位置分别在钢梁翼缘的3 000 mm、37.5 mm、3 000 mm、32.5 mm,

3 000 mm、30 mm处,距腹板的最小距离分别为23 mm、18 mm、15.5 mm.3种形式梁开不同直径孔时的挠度和最大应力如表6所示.

表6 3种形式钢梁开不同直径孔时的挠度和最大应力

Table 6 The deflection and maximum stress value of three forms of beams with different diameter holes

钢梁 编号	截面形式/ mm	开一组 $d=35$ mm的孔		开一组 $d=25$ mm的孔	
		挠度/ mm	最大 Von 应力/ MPa	挠度/ mm	最大 Von 应力/ MPa
1	H400 × 150 × 8 × 12	13.43	420.04	10.73	411.14
2	H400 × 130 × 8 × 12	10.36	420.02	10.29	418.86
3	H400 × 120 × 8 × 12	10.17	420.21	10.10	378.52

由表6可以知,同一种钢梁截面形式,在其他条件相同时,不同直径的开孔,挠度随开孔直径的减小而减小,最大 Von 应力值随开孔直径的减小而减小.说明钢梁翼缘开孔直径越小,在一定程度上可以降低对于钢梁的损害.

3种形式梁开不同直径孔时钢梁在 $L/2$ 处开孔应力集中如图6所示.由图6可以看出,钢梁的翼缘宽度不小于150 mm时,钢梁在同等条件下,孔直径越小,应力集中现象越明显;钢梁翼缘宽度小于150 mm时,开孔的

直径越大应力集中现象越明显.在同等条件下,当钢梁翼缘宽度不小于150 mm时,应优先选用直径为35 mm的孔径进行开孔;当钢梁翼缘宽度小于150 mm时,应优先选用开孔直径为25 mm的孔径进行开孔.

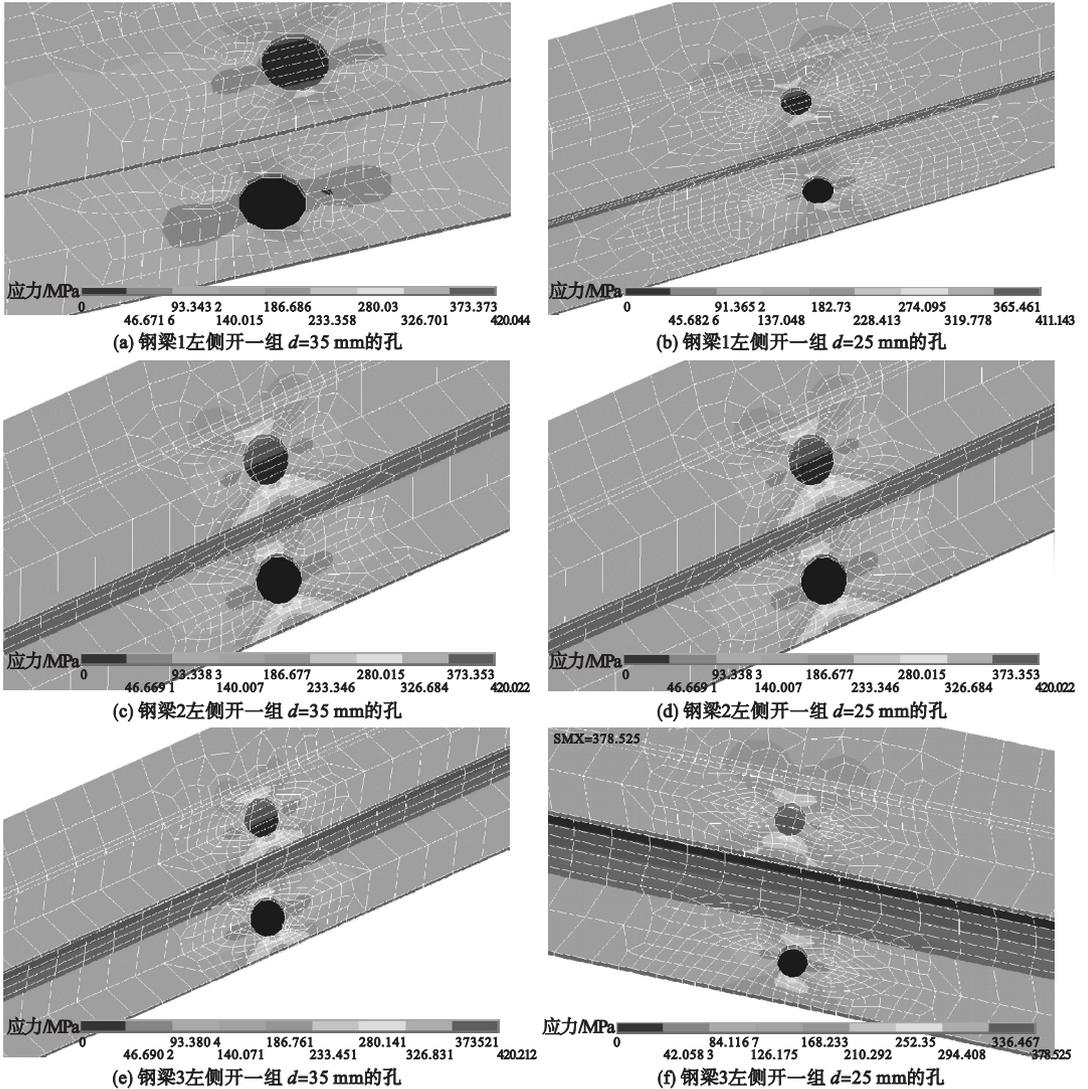


图6 3种不同宽度形式梁开不同直径孔时钢梁在 $L/2$ 处开孔应力集中

Fig. 6 Beam stress concentration of steel beam with 3 different width forms for different diameters opened at $L/2$

4 H型钢半刚性连接翼缘开孔研究

钢结构住宅设计经常是一端固定一端铰接的半刚性连接.由于长度不同在开孔时会导致不同的受力效果.笔者选取截面为H400 mm

$\times 150$ mm $\times 8$ mm $\times 12$ mm,梁的跨度为5 000 mm、6 000 mm、7 000 mm,材料属性和适用原则与简支梁一致,均布荷载进行分析,开孔位置设在钢梁 $L/2$ 处,左侧翼缘部位进行一组上下垂直开孔,3种不同长度的钢梁开孔时的挠度和最大应力值如表7所示.

表7 3种不同长度的钢梁开孔时的挠度和最大应力值

Table 7 The deflection and maximum stress values of steel beams opened with three different lengths

钢梁编号	长度/ mm	开一组 $d=35$ mm 孔	
		挠度/mm	最大 Von 应力/MPa
1	5 000	7.98	345.85
2	6 000	12.93	423.72
3	7 000	23.62	426.84

由表7可以看出,在H型钢梁其他条件一致的情况下,随着钢梁长度的不断增加,开孔后钢梁的挠度发生了急剧变大,另外随着钢梁长度的逐渐变大,钢梁的最大 von 应力

值也在逐渐增加。

图7为不同长度钢梁翼缘开孔后的应力集中。可以看出,随着钢梁长度的增加,H型钢梁翼缘开孔周围应力集中呈现加剧状态。说明在均布荷载值一定的情况下,钢梁其他条件不变,钢梁的长度越大,对于钢梁整体的作用力也就越大,对钢梁的损害也越明显。因此对不同长度的钢梁开孔时,应优先选取整体长度较小的H型钢梁进行翼缘开孔,并进行补强。

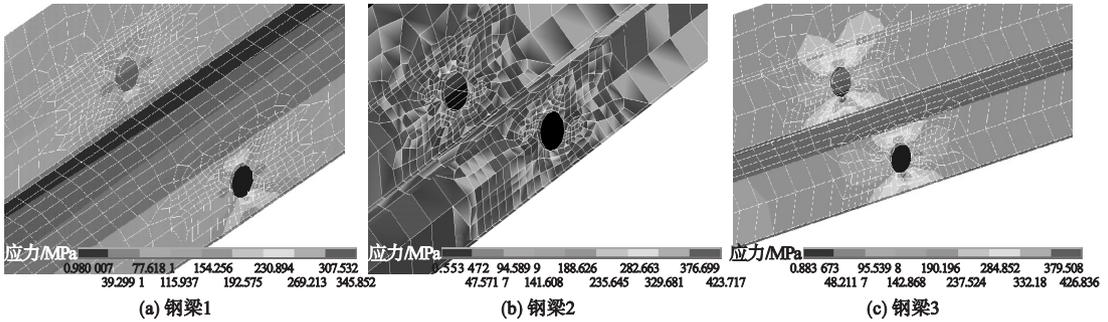


图7 不同长度钢梁翼缘开孔后的应力集中

Fig. 7 Stress concentration after openings of steel flanges of different lengths

5 结论

(1)在实际施工的过程中,电气管线 $d \geq 35$ mm 时,对于钢梁翼缘宽度 < 100 mm 时,不建议进行电气管线开孔;对于钢梁翼缘为 130 mm 时,建议开孔后应进行补强。

(2)钢梁在越是接近反弯点位置或弯矩为零的点开孔越是有利,在其距离梁柱连接部位 $L/6$ 距离内不建议进行开孔。

(3)钢梁翼缘需要同时开多组孔时,应该优先选用翼缘两侧对称开孔。

(4)钢梁翼缘宽度 ≥ 150 mm 时,应优先选用孔径为 35 mm 电气管线进行开孔,可以缓解应力集中现象;钢梁翼缘宽度 < 150 mm 时,应优先选用开孔直径为 25 mm 电气管线的大小进行开孔,可以有效缓解应力集中现象。

(5)同等条件下,仅有参数长度的不同时,应优先选取整体长度较短的H型钢梁进

行翼缘开孔。

参考文献

- [1] 陈芳,刘重阳. 钢管束混凝土组合结构在高层钢结构住宅中的应用[J]. 住宅产业, 2016(5): 39-44.
(CHEN Fang, LIU Chongyang. Steel-tube bundled concrete structure in the application of high-rise steel structure [J]. Housing industry, 2016(5): 39-44.)
- [2] 谢晓栋,杨娜,杨庆山. 钢结构腹板开洞型节点参数分析[J]. 工业建筑, 2006, 36(5): 76-82.
(XIE Xiaodong, YANG Na, YANG Qingshan. Parameter analysis of steel reduced web connection [J]. Industrial construction, 2006, 36(5): 76-82.)
- [3] 李波,杨庆山,茹继平. 腹板开孔型钢框架梁柱节点抗震性能试验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(8): 1303-1305.
(LI Bo, YANG Qingshan, RU Jiping. Experimental research on behaviors of connection of steel moment-resisting frames with opening on beam web [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2006, 38(8): 1303-1305.)
- [4] 茹继平,杨娜,杨庆山. 翼缘削弱型钢框架梁

- 柱节点的性能研究综述[J]. 工程力学, 2004, 21(1): 61-66.
(RU Jiping, YANG Na, YANG Qingshan. A review on the seismic performance of steel moment connections with reduced beam sections [J]. Engineering mechanics, 2004, 21(1): 61-66.)
- [5] 戴绍斌, 刘文吉, 黄俊. 狗骨式刚性连接节点的受力性能试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2004, 26(12): 56-58.
(DAI Shaobin, LIU Wenji, HUANG Jun. Experimental research on working behavior of dog-bone style rigid connection joint [J]. Journal of Wuhan university of technology, 2004, 26(12): 56-58.)
- [6] 陈建兵, 尤元宝, 万水. 钢-混凝土组合梁开孔波折板连接件受剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(4): 115-123.
(CHEN Jianbing, YOU Yuanbao, WAN Shui. Experimental study on shear behavior of perforated corrugated plate connectors in steel and concrete composite beam [J]. Journal of building structures, 2013, 34(4): 115-123.)
- [7] YANG Q S, BO L I, YANG N. Investigation on behaviors of the connection with opening in beam web of steel moment resisting frames [J]. Engineering mechanics, 2007, 24(9): 111-116.
- [8] LI B, YANG Q S, RU J P. Experimental research on behaviors of connection of steel moment-resisting frames with opening on beam web [J]. Journal of Harbin institute of technology, 2006, 38(8): 1303-1305.
- [9] WANG X L, SHEN S Z, YIN Z Z, et al. Experimental research on mechanical behavior of beam-column connections with openings on beam webs in steel frames [J]. Engineering mechanic, 2006, 23(6): 65-76.
- [10] ROSS C A, JEROME D M, TEDESCO J W, et al. Strengthening of reinforced concrete beams with externally bonded composite laminates [J]. Aci structural journal, 1999, 96(2): 212-220.
- [11] 何军, 单建华. H型钢翼缘孔洞性能研究及其加固处理措施[J]. 固体力学学报, 2008, 29(增刊1): 41-44.
(HE Jun, SHAN Jianhua. Research on performance of H-shaped steel flange holes and strengthening measures [J]. Chinese journal of solid mechanics, 2008, 29(S1): 41-44.)
- [12] 郁有升, 王燕. 钢框架梁翼缘削弱型节点力学性能的试验研究[J]. 工程力学, 2009, 26(2): 168-175.
(YU Yousheng, WANG Yan. Experimental study on the mechanical property of reduced beam section connections of steel frames [J]. Engineering mechanics, 2009, 26(2): 168-175.)
- [13] 吴元莅, 郝际平, 丁戈. H型钢框架梁翼缘开洞措施研究[J]. 建筑结构, 2011, 41(增刊1): 954-957.
(WU Yuanli, HAO Jiping, DING Ge. Research on flange openings of H-steel beam [J]. Building structure, 2011, 41(S1): 954-957.)
- [14] 刁莉莉. 翼缘开洞 H型钢梁的强度研究及其加固措施[J]. 山西建筑, 2012, 38(20): 79-80.
(DIAO Lili. Research on strength of H-shaped steel beam with flange opening and reinforcement measures [J]. Shanxi architecture, 2012, 38(20): 79-80.)
- [15] 贾鹏刚, 郝际平, 郑江, 等. 钢梁翼缘开孔补强技术试验研究[J]. 建筑科学, 2013, 29(5): 39-43.
(JIA Penggang, HAO Jiping, ZHENG Jiang, et al. Experimental studies on flange openings of steel beams with reinforcing [J]. Building science, 2013, 29(5): 39-43.)
- [16] 王万祯, 杨保证, 黄友钱, 等. 梁翼缘、腹板开孔方钢管混凝土柱-H型钢梁节点力学性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(3): 96-103.
(WANG Wanzen, YANG Baozheng, HUANG Youqian, et al. Low-cycle reversed loading tests on joints of H-style steel beam-square steel tubular column filled with concrete with opening holes at beam flanges and web [J]. Journal of building structures, 2012, 33(3): 96-103.)
- [17] 赵占彪, 段绪胜, 高宗章. 钢结构[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
(ZHAO Zhanbiao, DUAN Xusheng, GAO Zongzhang. Steel structure [M]. Beijing: China Water Conservancy and Hydropower Press, 2015.)
- [18] DAWIN D. Steel and composite beams with web opening [J]. American institute of steel construction, 2003(10): 7-16.
- [19] MARK P. Design of simply-supported composite beams with large web penetrations [J]. One steel manufacturing pty limited, 2001(5): 16-27.
- [20] GHOBADI M S, GHASSEMIEH M, MAZROI A, et al. Seismic performance of ductile welded connections using T-stiffener [J]. Journal of constructional steel research, 2009, 65(4): 766-775.
- [21] GHOBADI M S, MAZROI A, GHASSEMIEH M. Cyclic response characteristics of retrofitted moment resisting connections [J]. Journal of constructional steel research, 2009, 65(3): 586-598.