DOI：10.15986/j.1006-7930.2017.03.004

套管加强 H 型钢梁腹板开孔截面承载力计算

杨应华[1]，吴言亮[2]

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院，陕西 西安 710055；2. 河南省金华夏建工集团股份有限公司，河南 周口 466000)

摘要：对套管加强梁腹板开孔梁柱节点展开的后续研究．运用 ABAQUS 有限元软件分析了腹板开孔梁段和套管加强 H 型钢梁腹板开孔梁段在弯矩、剪力及弯剪联合作用下的应力分布规律，发现套管对截面抗弯能力提高不大，但对截面抗剪承载力有大幅度的提高．文章结论给出了以开孔率和套管厚度为参数的截面抗弯、抗剪承载力公式及弯-剪相关公式.

关键词：开孔梁；抗弯承载力；抗剪承载力；弯-剪相关公式

中图分类号：TU391　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1006-7930(2017)03-0332-08

Evaluation of load bearing capacity of H type steel beams with stub tube reinforced web opening

YANG Yinghua[1], *WU Yanliang*[2]

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;
2. Henan Jinhuaxia Construction Group Limited company, Henan, Zhoukou 466000, China)

Abstract: The paper is a follow-up research of reduced beam section connections with stub tube reinforced web opening. The AB-AQUS finite element software is used to analyze the static behavior of short beams with web opening and short beams with stub tube reinforced web opening, under bending, shearing and combined action. It is demonstrated that stub tubes can significantly increase the shear resistance of the short beam, while just a little improvement is recorded in moment resistance. Base on the FEM results, formulas considering opening ratio and thickness of the stub tube for predicting the bending, shearing and combined strength of short beams with stub tube reinforced web opening are proposed.

Key words: web opening; bending strength; shear strength; combined bending-shearing strength

对套管加强梁腹板开孔梁柱节点的后续展开研究，文献[1]的研究结果表明：套管加强梁腹板开孔梁柱节点既能达到塑性铰外移的目的，又能满足节点的抗剪要求，使节点具有足够的承载力和良好的抗震性能，但其未涉及套管加强梁腹板开孔截面承载力的计算，为更好地进行该类节点的设计，对此展开必要的研究.

对于实腹梁截面，根据材料力学可知，应力和弯矩的函数关系可以用下式表示[2]：

$$\sigma_x=\frac{M_x y}{I_x} \tag{1}$$

式中：M_x 为计算截面处弯矩值；I_x 为计算截面绕主轴 x 的惯性矩；y 为计算应力点到主轴 x 的距离.

截面上任一点在剪力 V 作用下的剪应力计算公式为：

$$\tau=\frac{VS_x}{I_x t} \tag{2}$$

式中：V 为计算截面剪力值；S_x 为计算剪应力处以上或以下毛截面对中和轴 x 的面积矩；I_x 为计算截面绕主轴 x 的惯性矩；t 为计算应力截面处构件厚度.

根据公式(1)和(2)可得到，实腹梁截面相应的抗弯和抗剪承载力.

同样，梁腹板开孔截面的强度包括截面的抗弯强度和截面的抗剪强度．以图 1 所示的简支梁为例，根据计算简图可以算出削弱截面承受弯矩 $M_{o,Sd}$ 和截面承受剪力 $V_{o,Sd}$，与削弱截面抗弯承载力 $M_{o,Rd}$ 和抗剪承载力 $V_{o,Rd}$ 比较，可判断截面承载力是否满足要求.

关于梁腹板削弱截面处强度计算，文献[3]指出腹板开圆孔时，截面抗力可根据修正的空腹桁架理论得出：

$$M_{o,Rd}=fW_{o,pl}\geqslant M_{o,Sd} \tag{3}$$

$$V_{o,Rd}=f_v A_{vo}\geqslant V_{o,Sd} \tag{4}$$

收稿日期：2016-06-27　　**修改稿日期**：2017-05-22

作者简介：杨应华(1965－)，男，博士，教授，主要从事钢结构方面的研究．E-mail：yhyang@xauat.edu.cn

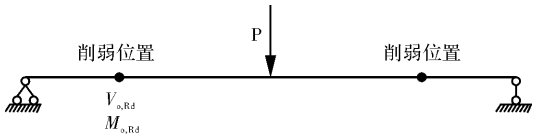

图 1　截面部分削弱梁的计算简图

Fig. 1　Simple calculation diagram of the RBS beam

式中：$M_{o,Rd}$为削弱最深处截面抗弯承载力；$V_{o,Rd}$为削弱最深处截面抗剪承载力；$M_{o,Sd}$为截面实际所受弯矩；$V_{o,Sd}$为截面实际所受剪力；$W_{o,pl}$为削弱截面塑性模量，计算公式为：

$$W_{o,pl}=W_{pl}-\frac{d_o^2 t_w}{4} \tag{5}$$

其中：W_{pl}为未削弱截面的全截面塑性模量；$A_{vo}=A_v-d_o t_w$，$A_v=ht_w$；f 为钢材屈服强度设计值；f_v 为钢材抗剪强度设计值；h 为梁全截面高度；d_0 为截面削弱直径；t_w 梁腹板厚度.

由于套管加强 H 型钢梁腹板开孔截面处的应力分布较为复杂，国内外已有研究成果对套管加强 H 型钢梁腹板开孔截面处的强度计算很少涉及. 文献[4]指出套管加强后的截面抗弯抗剪承载力可通过式(6)和(7)得出：

$$\frac{Q_H}{Q_{we}}=1+\frac{1}{(100H)^2}\left[165\frac{M_s}{98}+1\ 112\left(\frac{d}{H}-0.3\right)^2+36\frac{M_s}{98}+115\right]-\frac{M_s}{9\ 800} \tag{6}$$

$$M_s=\frac{B_s t^2}{4}f_y \tag{7}$$

公式(6)和(7)中，Q_{we}为腹板开孔削弱截面处能承受的剪力，M_s 为套管的塑性弯矩，Q_H 为套管加强 H 型钢梁腹板开孔削弱截面处能承受的剪力，d 为钢套管内径，B_s 为钢管套管的长度，t 为钢套管的厚度，f_y 为套管的材料屈服强度.

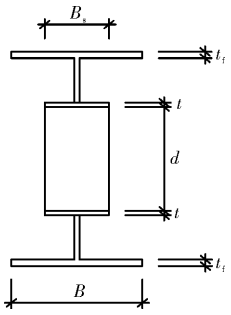

图 2　套管加强截面

Fig. 2　Section with tube reinforcement

但是公式(6)的使用范围很小，仅为 $d/H\leqslant 0.3$，不能满足开孔半径较大的套管加强 H 型钢梁腹板开孔截面的承载力计算，为此下文通过建立有限元模型进行分析，从而提出能满足开孔半径较大的套管加强 H 型钢梁腹板开孔削弱截面处的强度计算方法.

1　有限元模型

为了研究套管加强 H 型钢梁腹板开孔截面的抗弯和抗剪能力，取一小段在梁跨中开孔的梁，梁段长 600 mm，图 3 和图 4 分别为 H 型钢梁腹板开孔梁段和套管加强 H 型钢梁梁段的受力简图.

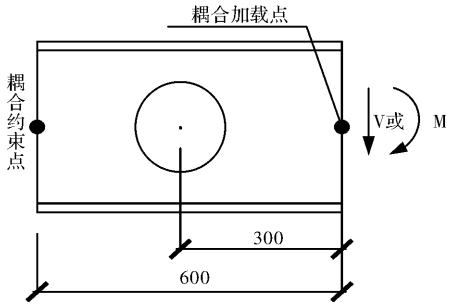

图 3　腹板开孔梁段

Fig. 3　Short beam with web opening

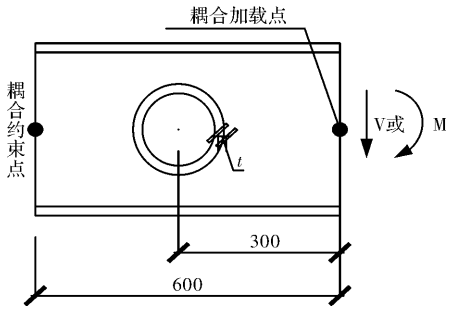

图 4　套管加强 H 型钢梁腹板开孔梁段

Fig. 4　Short H type beam with stub tube reinforced web opening

参考文献[1]的研究试件，梁截面取为 H400 mm × 200 mm×8 mm×12 mm，套管参数建立如表 1 所示，r 为开孔半径，t 为套管厚度. 根据文献[5]套管长度选为 b_s，$b_s\geqslant 2\left(\frac{h_0}{30}+40\right)$ mm，h_0 为腹板高度.

表 1　试件编号及参数取值

Tab. 1　Models and their parameters

试件编号	r/mm	t/mm	试件编号	r/mm	t/mm
A	105	0	C	135	0
A8	105	8	C8	135	8
A12	105	12	C12	135	12
A15	105	15	C15	135	15
B	120	0	D	150	0
B8	120	8	D8	150	8
B12	120	12	D12	150	12
B15	120	15	D15	150	15

理论分析阶段，考虑钢材屈服强度取 $f_y=235$ MPa，$E=2.06\times10^5$ MPa，$\upsilon=0.3$. 有限元模型运用 C3D8R 单元，网格尺寸划分约为 18 mm. 用耦合的方式将梁段一端固定，另一端施加荷载，如图 3，4 所示.

材料本构关系及以 A8 为例的试件网格划分结果分别如图 5 和 6 所示.

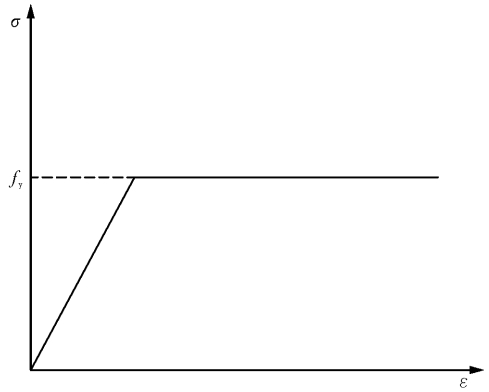

图 5 钢材本构关系

Fig. 5 Constitutive relationship of steel

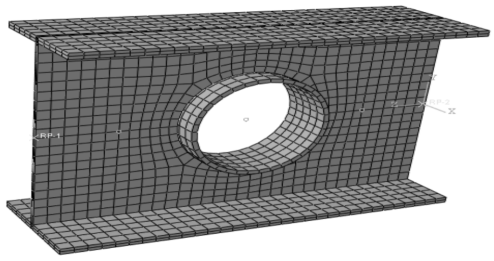

图 6 A8 的有限元试件

Fig. 6 FEA model of A8

2 有限元分析结果

2.1 破坏准则

文献[6]根据有限元分析调试期间的试算以及后期对各种情况分析的结果，归纳出试件破坏及相应承载力的准则如下.

在弯矩作用下，或者削弱处剩余全截面进入塑性，即剩余截面上 Mises 应力值全部达到材料屈服强度 $f_y=235$ MPa，或者计算刚开始不收敛时梁端施加的弯矩值即为其抗弯承载力；在剪力作用下，如图 7 所示，考察梁段腹板削弱处与翼缘相邻的单元积分点，当其剪应力与等效塑性应变曲线达到最高点时，梁端部所施加的剪应力即为其抗剪承载力. 此时，在削弱处上下部分腹板上最大剪应力分布范围达到最大，且即将发生较大的剪切变形.

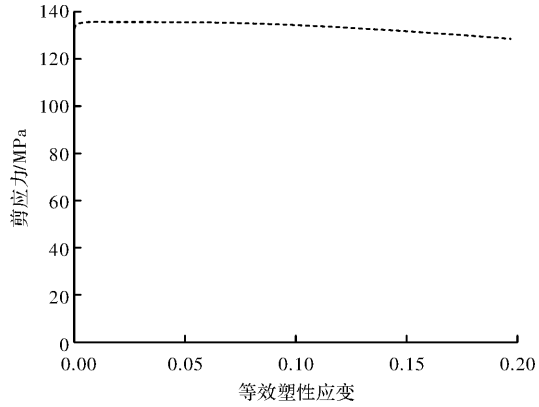

图 7 剪应力-等效塑性应变曲线

Fig. 7 Shear stress-equivalent plastic strain curve

2.2 应力及变形特征

开孔梁段和套管加强开孔梁段在弯矩和剪力作用下的应力分布及变形特征(试件 A、A8 为例).

(1)纯弯矩作用

试件 A 在端弯矩作用下，破坏时的 Mises 变形云图及正应力分布分别如图 8 和 9 所示. 可以得到：在梁端纯弯作用下，H 型钢梁削弱截面处全截面达到屈服. H 型钢梁实腹段截面处的应力呈三角形分布，与公式(1)的函数曲线相吻合，开孔截面处的应力分布为矩形分布，这一现象与空腹桁架理论的削弱处梁段正应力呈矩形分布的假定完全一致.

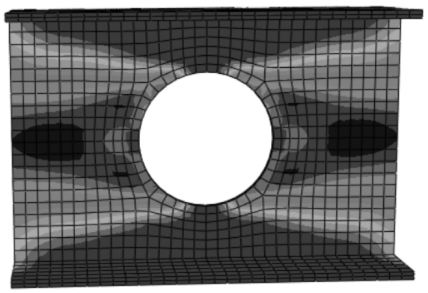

图 8 弯矩作用下 A 的变形云图

Fig. 8 Deformation distribu-tion diagram of A under bending

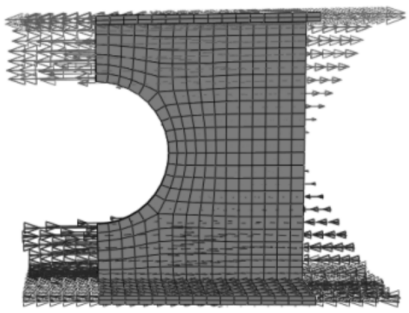

图 9 弯矩作用下 A 的正应力分布图

Fig. 9 Normal stress distribu-tion diagram of A under bending

试件 A8 在端部弯矩作用下，破坏时的 Mises 变形云图及正应力分布图分别如图 10 和图 11 所示. 由图 10 可以看出在弯矩作用下，由于套管的存在使得 H 型钢梁腹板开孔削弱处截面屈服区分布范围变大，和试件 A 的应力分布情况不同．由图 11 可以看出在套管作用下，梁段 A8 与梁段 A 应力分布的不同之处在于，削弱处截面正应力不再呈矩形，空腹桁架理论的假设不再成立.

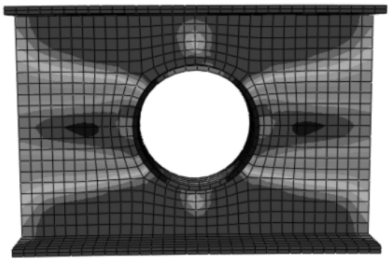

图 10　弯矩作用下 A8 的变形云图

Fig. 10　Deformation distribu-tion diagram of A8 under bending

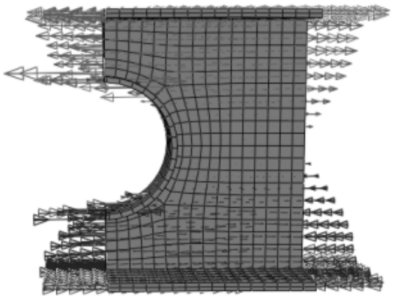

图 11　弯矩作用下 A8 的正应力分布图

Fig. 11　Normal stress distribu-tion diagram of A under bending

通过对试件结果的观察，发现在弯矩作用下套管加强 H 型钢梁腹板开孔梁段的套管上的应力，除了有沿梁纵向的正应力还包括沿梁横向上的应力，分别如图 12、13 所示．由图 12 和图 13 所示应力分布可以看出，和梁削弱孔上下部分腹板接触的套管应力较大.

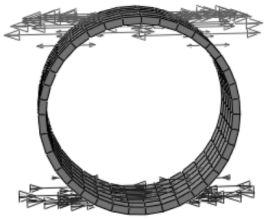

图 12　套管沿梁段纵向正应力分布

Fig. 12　Longitudinal normal stress distribution in the tube

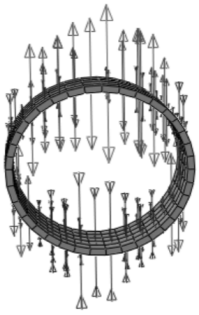

图 13　套管沿梁段横向正应力分布

Fig. 13　Transverse normal stress distribution in the tube

(2)剪力作用

试件 A 在端部剪力作用下，破坏状态的剪应力变形云图如图 14 所示．可以看出在剪力作用下，梁削弱上下部分腹板剪应力最大达到了 135.7 MPa，这与材料抗剪强度 $f_v = 0.577 f_y = 135.6$ MPa 相同. 提取梁削弱最深处上翼缘每单元积分点处的剪应力值，沿翼缘边缘向翼缘中心方向剪应力呈对称分布，上翼缘剪应力值分别为 5.7、5.5、9.6、6.3 和 21.6 MPa. 较腹板剪应力值要小的多，印证了翼缘板对抗剪贡献可以忽略.

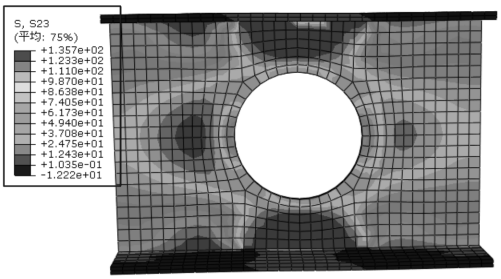

图 14　剪力作用下 A 的变形云图

Fig. 14　Deformation distribution diagram of A under shear

由于削弱部分剪应力分布较为复杂，提取了在离约束端距离分别为 100 mm 和 300 mm 处沿梁腹板高度的剪应力值，如图 15 所示．可见实腹部分的剪应力分布满足公式(2)的规律，腹板开孔部分的应力分布情况比较复杂，在孔边缘较小，在靠近翼缘部分最大.

试件 A8 在端部剪力作用下，破坏状态的剪应力变形云图 16 所示.

对比图 14 可知，套管的引入使得梁开孔处的腹板都达到了屈服状态，剪应力分布情况发生改变了，提高了抗剪能力．同样提取距约束端分别为 100 mm 和 300 mm 处沿梁腹板高度方向上的剪应力值，得到剪应力分布如图 17，对比图 15 可知，套管的引入使得 H 型钢梁腹板开孔上下部分的腹

板剪应力分布比较均匀，且近似成矩形分布.

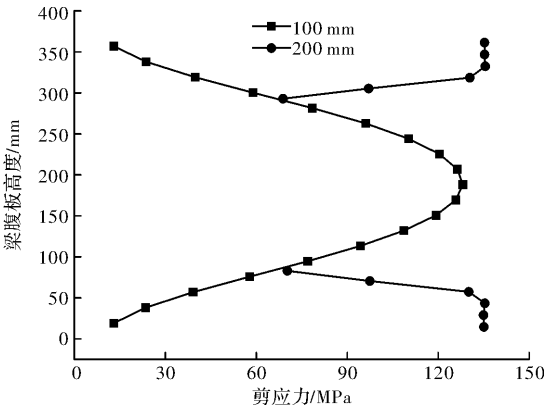

图 15 剪力作用下 A 的剪应力分布图

Fig. 15 Shear stress distribution of A under sheaar

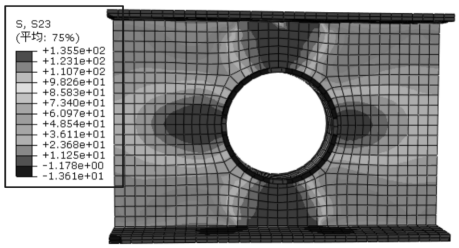

图 16 剪力作用下 A8 的变形云图

Fig. 16 Deformation cloud diagram of A8 under shear

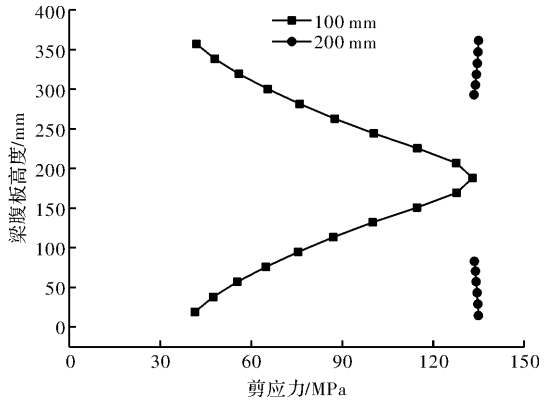

图 17 剪力作用下 A8 的剪应力分布图

Fig. 17 Shear stress distribution of A8 under sheaar

图 18 为在剪力作用下，套管上的应力分布情况，由图可知应力分布集中在与梁纵线相交为±450的截面处，与图 12 和 13 表现出的试件 A 的套管上的应力分布有很大不同.

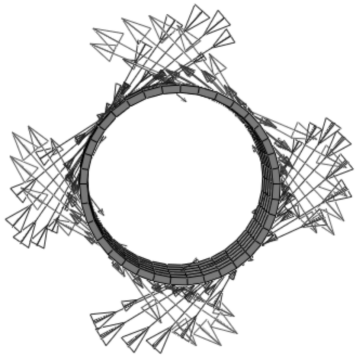

图 18 剪力作用下 A8 套管的应力分布图

Fig. 18 Stress distribution in the tube of A8 under shear

2.3 有限元结果与公式的对比

表 2 为试件 A、B、C 和 D 开孔削弱截面处承载能力按式(3)和(4)计算的结果与上节的有限元计算结果的对比．按公式(3)和(4)计算时，取材料的屈服值计算.

由表 2 中数据可知，公式(3)和(4)计算值与有限元计算值相当接近，可见公式(3)和(4)有相当高的准确性.

考虑全截面塑性时，梁未削弱截面的抗弯能力按下式计算：

$$M_{Rd}=f_y W_{pl} \tag{8}$$

式中：W_{pl}为实腹截面全截面塑性模量.

抗剪承载力为：

$$V_{Rd}=0.577 f_y h t_w \tag{9}$$

按式(8)和(9)的得到的截面抗弯和抗剪承载能力分别为 $M_{Rd}=285.3$ kN·m，$V_{Rd}=433.9$ kN.

相比表 2 中数据，得到 H 型钢梁腹板开孔后，截面的抗弯承载能力减少了 7.3%～14.9%，抗剪承载能力减少了 50.2%～76.2%，可见截面抗剪承载力较抗弯承载力下降幅度大.

表 2 公式计算结果与有限元结果对比

Tab. 2 Comparison of formula results with the finite element results

试件编号	$M_{o,Rd}$/kN·m		FEM-(3) /%	$V_{o,Rd}$ /kN		FEM-(4) /%
	(3)	FEM	(3)	(4)	FEM	(4)
A	264.5	264	−0.19	206.1	216	4.80
B	258.2	257.1	−0.43	173.6	177	1.95
C	251	250.8	−0.08	141.1	141	−0.07
D	242.9	243	0.04	108.4	103.1	−4.89

2.4　套管加强 H 型钢梁腹板开孔截面强度计算方法

将有限元计算得到的腹板开孔梁段削弱截面处的承载力和套管加强 H 型钢梁腹板开孔截面处的承载力相比较，以分析套管对开孔截面处的承载力贡献情况，见表 3.

可以得到，套管对截面抗弯能力的贡献较小，且套管厚度的变化对截面抗弯能力的影响很小．套管的作用，使得套管加强 H 型钢梁腹板开孔截面抗剪能力有较大提高，达到 12.5% ～ 48.4%，而且套管厚度的变化对抗剪能力的影响也相对较大.

表 3　各试件有限元计算的抗力值

Tab. 3　The finite element results of models

试件编号	M_{Rd}/kN·m	与未加强截面差值/%	V_{Rd}/kN	与未加强截面差值/%
A	264	0.0	216	0.0
A8	274.7	4.1	243	12.5
A12	275.8	4.5	249	15.3
A15	276	4.5	261	20.8
B	257.1	0.0	177	0.0
B8	271	5.4	207	16.9
B12	272.7	6.1	213	20.3
B15	273.6	6.4	219	23.7
C	250.8	0.0	141	0.0
C8	266.7	6.3	174	23.4
C12	268.6	7.1	183	29.8
C15	269.8	7.6	189	34.0
D	243	0.0	103.1	0.0
D8	259	6.6	144	39.7
D12	261.76	7.7	150	45.5
D15	263.1	8.3	153	48.4

由上文分析可知，套管加强 H 型钢梁腹板开孔截面强度与套管厚度相关，并且在不同开孔半径下，套管对截面强度的影响不同，借鉴公式(3)、(4)，提出套管加强 H 型钢梁腹板开孔截面抗弯和抗剪承载力影响系数 α 和 β，给出套管加强 H 型钢梁腹板开孔截面承载力计算公式如下：

$$M_{t,Rd}=\alpha f_y W_{o,pl} \tag{10}$$

$$V_{t,Rd}=0.577\beta f_y A_{vo} \tag{11}$$

系数 α 和 β 与梁的开孔率 Φ 和套管的厚度 t 相关，其中：$\Phi=d_0/h$，d_0 为开孔直径，h 为梁截面高度．由表 3 和式(10)、(11)可得 α、β 的有限元分析结果.

图 19 和图 20 分别为 H 型钢梁腹板开孔截面抗弯承载能力影响系数 α 和抗剪承载能力影响系数 β 随开孔率 Φ 和套管厚度 t 变化的分布曲面.

对套管加强 H 型钢梁腹板开孔截面承载能力影响系数 α、β 进行拟合，得到套管加强 H 型钢梁腹板开孔截面的承载能力影响系数计算公式：

$$\alpha=1+0.027\Phi+0.063\Phi^2+0.003\Phi t \tag{12}$$

$$\beta=1-0.665\Phi+1.347\Phi^2+0.019\Phi t \tag{13}$$

由公式(12)和(13)可知，给出特定的 Φ 和 t 可

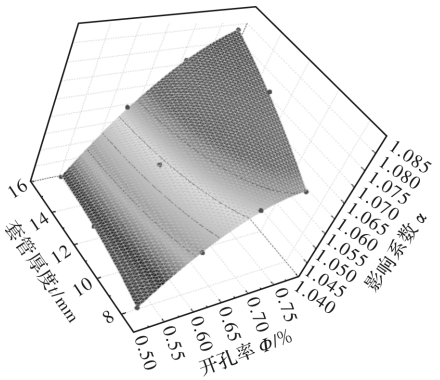

图 19　抗弯承载力影响系数 α 分布曲面

Fig. 19　Distribution of factor α

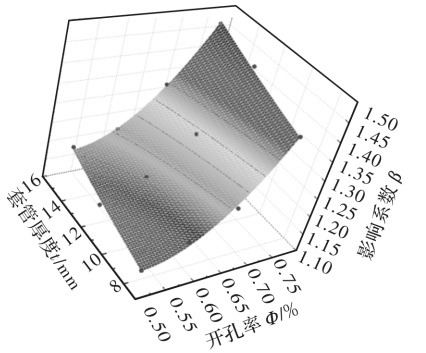

图 20　抗剪承载力影响系数 β 分布曲面

Fig. 20　Distribution of factor β

以得到特定的 α、β，并带入式(10)和(11)可以得到特定的 H 型钢梁腹板开孔截面的承载力值，其值与有限元计算结果对比如表 4 所示.

由表 4 可知，用公式(10)、(11)、(12)和(13)得到的值与有限元计算结果吻合较好，误差在 5% 以内，满足精度要求.

表 4 式(10)和(11)与有限元结果对比

Tab. 4 Comparison of the formula results with the finite element results

试件编号	$M_{t,Rd}$/kN·m		FEM-(10) /%	$V_{t,Rd}$ /kN		FEM-(11) /%
	(10)	FEM	FEM	(11)	FEM	FEM
A8	275.1	274.7	−0.15	236.9	243	2.57
A12	276.6	275.8	−0.29	245.5	249	1.43
A15	277.6	276	−0.58	252.0	261	3.57
B8	270.2	271	0.30	207.3	207	−0.14
B12	271.8	272.7	0.33	215.5	213	−1.16
B15	273.0	273.6	0.22	221.4	219	−1.08
C8	266.0	266.7	0.26	177.9	174	−2.19
C12	267.7	268.6	0.34	185.1	183	−1.13
C15	269.0	269.8	0.30	190.5	189	−0.79
D8	260.2	259	−0.46	140.9	144	2.20
D12	262.1	261.76	−0.13	146.7	150	2.25
D15	263.5	263.1	−0.15	151.2	153	1.19

3 套管加强 H 型钢梁腹板开孔截面强度计算方法检验

(1)为了验证套管加强 H 型钢梁腹板开孔截面承载能力影响系数 α，β 的适用性，用前文所述方法随机建立一试件，其几何参数取：梁截面 H400 mm×200 mm×8 mm×12 mm，r=115 mm，t=8 mm.

有限元计算的 H 型钢梁腹板开孔处的截面抗弯承载力为 M_{FEM}=260.3 kN·m，按(3)计算得到的 H 型钢梁腹板开孔截面抗弯承载力为 $M_{(3)}$=260.4 kN·m，验证了 H 型钢梁腹板开孔截面抗弯能力按公式(3)计算与有限元计算结果的统一. 将 Φ= 0.575 和 t=8 带入(12)，得到 α=1.05，用 α 带入(10)，可得套管加强 H 型钢梁腹板开孔截面抗弯承载能力为 $M_{t,Rd}$=273.4 kN·m，有限元计算结果为 $M_{t,FEM}$ = 272.34 kN·m，相差为 0.37%，可见用式(12)表达的系数 α 有较高的精度.

有限元计算得到的截面抗剪承载力为 V_{FEM}=189 kN，H 型钢梁腹板开孔截面按式(4)得到抗剪承载力为 $V_{(4)}$=184.4 kN，说明公式(4)与有限元计算结果高度统一. 同样的，将 Φ 和 t 带入(13)，可得到 β=1.15，带入式(11)，得套管加强 H 型钢梁腹板开孔截面抗剪承载能力为 $V_{t,Rd}$=212.1 kN，有限元计算截面抗弯承载力为 $V_{t,FEM}$=219 kN，两者差为 3.2%，可见用式(13)表达的套管加强 H 型钢梁腹板开孔截面抗剪承载力影响系数 β 有较高的准确度.

(2)任取一梁截面 H450 mm×220 mm×10 mm×14 mm 来验证公式(12)和(13)对不同梁截面的适用性. 取套管长度为 110 mm，满足式 $b_s \geqslant 2(\frac{h_0}{30}+40)$ 的要求 r=115 mm，t=8 mm.

同样方法可以得到，$M_{(3)}$ = 377.4 kN·m，M_{FEM}=376 kN·m，两者几乎相同. 将 Φ=0.6 和 t=8 带入式(12)，可得 α=1.05，将 α=1.05 带入式(10)，可得 $M_{t,Rd}$=396.3 kN·m，有限元计算结果为 $M_{t,FEM}$ = 392.8 kN·m，两者差值仅为 0.89%，印证了系数 α 对不同梁截面的适用性.

同样，得到 $V_{(4)}$=244.0 kN，有限元计算得到的截面抗剪承载力为 V_{FEM}=245 kN，可见公式(4)与有限元计算值一致. 将 Φ 和 t 带入式(13)，可得系数 β=1.18，将 β 带入式(11)，可得截面抗剪承载能力为 $V_{t,Rd}$=287.9 kN，而有限元计算结果为 $V_{t,FEM}$=290.5 kN，两者相差为 0.89%，可见拟合得到的套管加强 H 型钢梁腹板开孔截面抗剪承载力影响系数 β 对该截面同样适用.

4 套管加强 H 型钢梁腹板开孔截面剪力-弯矩相关关系

通常套管加强 H 型钢梁腹板开孔截面既有较大的弯矩也有较大的剪力，需要考虑二者的相互影响. 本节对套管加强 H 型钢梁腹板开孔截面剪力-弯矩相关关系进行研究.

4.1　加载方法

对套管加强 H 型钢梁腹板开孔梁段端面分两阶段分别施加剪力 V 和弯矩 M，第一阶段施加的剪力 $V_{t,u}$ 满足 $V_{t,u}/V_{t,Rd}=0.2$、0.4、0.6、0.8 和 0.9，保证套管加强 H 型钢梁腹板开孔截面不会因为剪力的作用而破坏，第二阶段作用弯矩，根据前文所述的破坏准则，可得到套管加强 H 型钢梁腹板开孔截面破坏时的极限弯矩值 $M_{t,u}$，可得 $M_{t,u}/M_{t,Rd}$，从而描绘出 $V_{t,u}/V_{t,Rd}-M_{t,u}/M_{t,Rd}$ 相关曲线，对得到的曲线进行拟合可得相关关系函数．其中，V_t，R_d、$M_{t,Rd}$ 为套管加强 H 型钢梁腹板开孔截面按式(10)和(11)所得到的截面抗力；$V_{t,u}$，$M_{t,u}$ 为套管加强 H 型钢梁腹板开孔截面所受剪力值和弯矩值.

4.2　应力分布

类似 2.1 节所述，在弯矩-剪力联合作用下，计算刚开始不收敛时，削弱处截面 Mises 应力均达到材料屈服应力，此时的弯矩值为 $M_{t,u}$．以试件 C8 为例，在剪力为 $0.6V_{t,Rd}$ 时，图 21 给出了套管加强 H 型钢梁腹板开孔截面在弯-剪联合作用下破坏时的 Mises 应力云图.

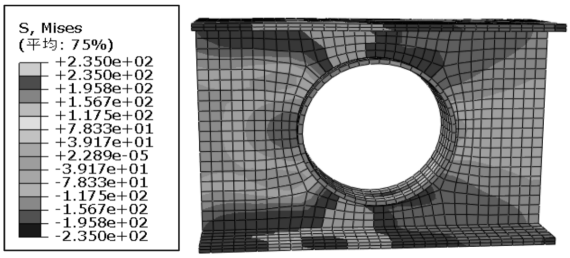

图 21　弯-剪联合作用下破坏模式

Fig. 21　Failure mode under bend-shear load

4.3　计算结果分析

对试件 A8、B8、C8 和 D8，按上述方法分阶段作用剪力和弯矩，可以得到各试件的 $M_{t,u}$．表 5 为各试件在不同弯矩-剪力作用下的截面破坏弯矩 $M_{t,u}$ 及 $M_{t,u}/M_{t,Rd}$.

表 5　截面弯-剪联合相关结果

Tab. 5　Moment-shear interaction results

试件编号	$M_{t,Rd}$ /kN	$V_{t,u}/V_{t,Rd}$									
		0.2		0.4		0.6		0.8		0.9	
		$M_{t,u}$/kN	$\frac{M_{t,u}}{M_{t,Rd}}$	$M_{t,u}$ /kN	$\frac{M_{t,u}}{M_{t,Rd}}$	$\frac{M_{t,u}}{M_{t,Rd}}$	$M_{t,u}$ /kN	$\frac{M_{t,u}}{M_{t,Rd}}$	$\frac{M_{t,u}}{M_{t,Rd}}$	$M_{t,u}$ /kN	$\frac{M_{t,u}}{M_{t,Rd}}$
A8	274.7	249	0.91	225.2	0.82	198.7	0.72	166.9	0.61	145.5	0.53
B8	271	249	0.92	226.9	0.84	202.4	0.75	173.6	0.64	154.3	0.57
C8	266.7	247.4	0.93	227.2	0.85	205.1	0.77	178.7	0.67	160.3	0.60
D8	259	243.6	0.94	225.5	0.87	205.4	0.79	180	0.69	160.2	0.62

图 22 为根据表 5 中数据得到的各试件在弯矩-剪力联合作用下发生破坏时的分布情况，图中曲线为拟合得到的弯矩-剪力相关曲线，曲线函数表达式为：

$$\left(\frac{V_{t,u}}{0.98V_{t,Rd}}\right)^{2.4}+\left(\frac{1.2M_{t,u}}{M_{t,Rd}}\right)^{2.4}=1 \qquad (14)$$

由图 22 可以看出，各试件在弯矩-剪力联合作用下的破坏分布点均在曲线外侧，可以得到按式(14)建议的套管加强 H 型钢梁腹板开孔截面弯-剪相关公式是偏于安全的.

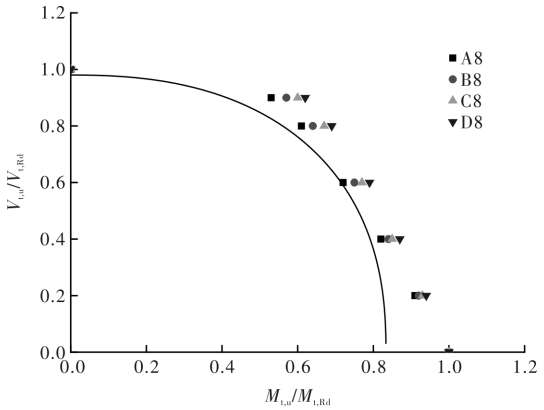

图 22　弯-剪相关曲线

Fig. 22　Moment-shear interaction curve

5　结论

(1)通过前文有限元分析，得到了腹板开圆孔截面及套管加强梁腹板开圆孔截面分别在弯矩、剪力和弯-剪联合作用下，破坏时截面应力的分布变化规律.

(2)分析表明，套管对开孔截面的抗弯承载力提高不大，且套管厚度的对截面抗弯承载能力的

（下转第 368 页）

various details[J]. China Civil Engineering Journal, 2014, 38(5): 72-79.

[5] MIEHAEL N Bugeja, JOSEPH M Bracci, WALTER P Moore Jr. Seismic behavior of composite RCS frame systems[J]. Joumal of Structural Engineering, 2000, 126(4): 429-435.

[6] LIANG Xuemei, GUSTAVO J, PARRA-Moniesinos. Seismic behavior of reinforced concrete column-steel beam subassemblies and frame systems[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(2): 310-319.

[7] CHENG Chintung, CHEN Chengchih. Seismic behavior of steel beam and reinforced concrete column connections[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61(4): 587-606.

[8] 陆铁坚，贺子瑛，余志武，等．钢-混凝土组合梁与混凝土柱节点的抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报，2008, 29(1): 71-74.
LU Tiejian, HE Ziying, YU Zhiwu, et al. Experimental research on seismic behavior of SC beam to RC column connection[J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 29(1): 71-74.

[9] 张战廷，刘宇峰．ABAQUS中的混凝土塑性损伤模型[J]. 建筑结构，2011, 44(8): 299-311.
ZHANG Zhanting, LIU Yufeng. The plastic damage model of concrete in ABAQUS[J]. Journal of Structural Engineering, 2011(8), 44: 299-311.

[10] 腾智明．钢筋混凝土基本试件[M]. 北京：清华大学出版，1987.
TENG Zhiming. The reinforced concrete specimens [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1987.

[11] Esmaeily A, Xiao Y. Behavior of reinforced concrete columns under variable axial loads: analysis[J]. ACI Structural Journal, 2005, 102(5): 736-744.

[12] 黄远，聂建国，陶慕轩，等．考虑楼板组合作用的方钢管混凝土组合框架受力性能有限元分析[J]. 建筑结构学报，2011, 32(3): 109-116.
HUANG Yuan, NIE Jianguo, TAO Muxuan, et al. Finite element analysis on behavior of rectangular CFST frame considering composite action of floor slab [J]. Journal of Building Structures, 2011(8), 44: 299-311.

(编辑 吴海西)

(上接第339页)

贡献很小;但套管厚度对开孔截面抗剪承载能力的提高作用较大;套管的加强作用对有较大开孔率的截面更加显著.

(3)根据分析结果,给出了套管加强H型钢梁腹板开孔截面的抗弯、抗剪及弯剪联合作用的承载力计算公式,具有较高的精度,可供参考.

参考文献 References

[1] 杨应华,吴言亮．套管加强梁腹板开孔梁柱节点滞回性能分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2015,47(6):788-792.
YANG Yinghua, WU Yanliang. Hysteretic behavior of reduced beam section connections with stub tube reinforced web opening [J]. J. Xi′an Univ. of Arch. & Tech. (Natural science Edition), 2015, 47(6): 788-792.

[2] 夏志斌,姚谏．钢结构-原理与设计[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
XIA Zhibin, YAO Jian. Steel structures-principles and design [M]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2012.

[3] CHUNG K F, LIU TCH, KO ACH. Investigation on Vierendeel mechanism in steel beams with circular web openings[J]. J. Construct. Steel Res., 2001, 57(5): 467-490.

[4] 青木博文．结构设计专家入门(钢结构篇)[M]. 北京:中国建筑工业出版社. 2012.
HIROFUMI Aoki. Introduction to structure design expert (steel structure)[M]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2012.

[5] 中华人民共和国建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局联合发布. 钢结构设计规范: GB 50017-2003[S]. 2003.
The Ministry of construction of the People′s Republic of China and AQSIQ jointly issued. Code for design of steel struc-tures: GB 50017-2003[S]. 2003.

[6] 吴言亮．套管加强梁腹板开孔节点力学性能研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2016.
WU Yanliang. Mechanical behavior of reduced beam section connections with tube reinforced web opening [D]. Xi′an: Xi′an Univ. of Arch. & Tech, 2016.

(编辑 吴海西)