

报告编号:

密级: 内部

版本: V1.0

中驰 SPZ80 年钢立柱产品 疲劳仿真报告

中驰股份产品创新中心

2019 年 11 月

目录

一、项目背景.....	1
1.1 设计内容.....	1
1.2 设计标准.....	1
1.3 SPZ80 年钢立柱规格.....	1
1.4 设计荷载及荷载组合.....	3
1.5 SPZ80 年钢立柱技术指标.....	5
二、列车气动风压脉动力及设计取值.....	6
2.1 我国设计规范的相关规定.....	6
2.2 英国规范空压值计算公式.....	7
2.3 SPZ80 年钢立柱荷载设计.....	8
三、SPZ80 年钢立柱结构计算.....	8
3.1 疲劳计算(摘取 GB/T 50017-2017).....	8
3.2 SPZ80 年钢立柱材料参数及其应力-循环曲线.....	11
3.3 SPZ80 年钢立柱设计指标.....	14
四、SPZ80 年钢立柱有限元模拟.....	16
4.1 结构分析所采用的单元.....	16
4.2 模型网格划分.....	17
4.3 加载边界条件.....	17
4.4 计算工况及分析.....	18
五、结论.....	23
附录 K 疲劳计算的构件和连接分类.....	24

中驰 SPZ80 年钢立柱产品疲劳仿真报告

一、项目背景

1.1 设计内容

声屏障是铁路工程中广泛采用的声屏障结构形式，声屏障固定在 H 型钢立柱上，其中 H 型钢立柱通过不锈钢螺母固定在浇灌混凝土的预埋螺栓上。Q235B 型钢以其抗弯能力强、施工简单、成本低和结构重量轻等优点，在高铁等轨道交通场合得以大量的应用。

本项目拟对上海中驰集团有限公司开发的高铁 80 年寿命的 SPZ80 年钢立柱进行的疲劳计算，以保证 H 型钢立柱在设计荷载作用下满足疲劳寿命要求。

1.2 设计标准

GB/T 11263-2017 《热轧 H 型钢和剖分 T 型钢》

GB/T 700-2006 《碳素结构钢》

GB/T 50017-2017 《钢结构设计规范》

GB/T 50661-2011 《钢结构焊接规范》

GB/T 2975-2018 《钢及钢产品 力学性能试验取样位置及试样制备》

GB/T 51335-2018 《声屏障结构技术标准》

GB/T 799-1988 《地脚螺栓》

GB/T 3098 《紧固件机械性能》

GB/T5267-2002 《紧固件表面处理》

TBT3122-2010 《铁路声屏障构件及测试方法》

TB10621-2014 《高速铁路设计规范》

JGJ82-2011 《钢结构高强度螺栓连接技术规程》

《新建时速 300-350 公里客运专线铁路设计暂行规定（铁建设[2007]47 号）

《铁路工程建设通用参考图 时速 250 公里、350 公里高速铁路 路基插板式声屏障安装图 通环(2018)8325》

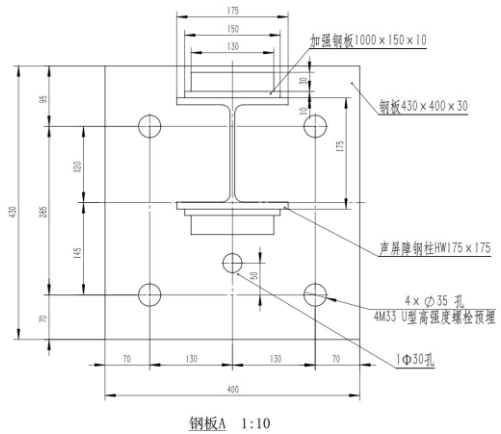
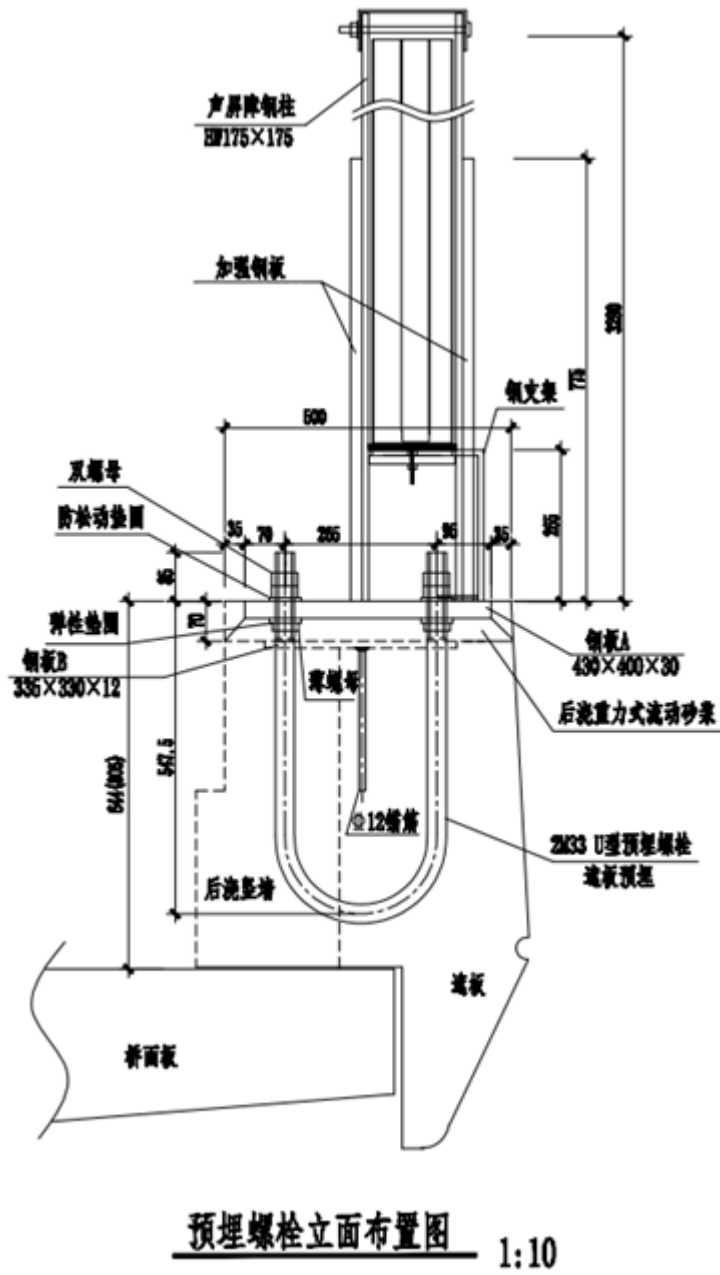
《铁路工程建设通用参考图 时速 250 公里、350 公里高速铁路 桥梁插板式声屏障安装图 通环(2018)8323》

1.3 SPZ80 年钢立柱规格

声屏障高度依据动车组车窗下边距轨面的高度确定，将声屏障高度分为标准高度和可加高 1m 通透隔声板高度两类。根据《铁路工程建设通用参考图 时速 250 公里、350 公里高速铁路 桥梁插板式声屏障安装图 通环(2018)8323》，本次次 SPZ80 年钢立柱的设计尺寸适用于桥梁上声屏障高度为 3.3m 的一般地区，结合 GB/T 11263-2017 《热轧 H 型钢和剖分 T 型钢》，H 型钢规格为：175×175×7.5×11×3339（mm），H 型钢底板规格为：430×400×



30 (mm), SPZ80 年钢立柱设计图纸如图 1 所示, SPZ80 年钢立柱与金属声屏障安装示意图 2 所示, 桥梁插板式声屏障示意图如图 3 所示。



声屏障单元 (2m跨度) 基础工程数量表

编号	名称	规格	单位	数量	附注
1	高强度螺栓	M33 U型	个	2	45#钢
2	细纹钢筋	Φ12	m	0.5	HRB400
3	螺母	M33 薄型 GB/T6172.1-2018	个	4	Q235B
		M33 GB/T1229-2006	个	8	45#钢
4	防松动垫圈	M33	个	4	45#钢
5	弹性垫圈	M33 厚度3mm	个	4	三元乙丙橡胶
6	钢板B	335x330x12 (mm)	块	1	根据环境温度选择
7	灌注砂浆	重力式流动砂浆 M40	m³	0.008	-

预埋螺栓立面布置图 1:10

图 1 SPZ80 年钢立柱设计图纸 (参考通环 (2018) 8023-36)

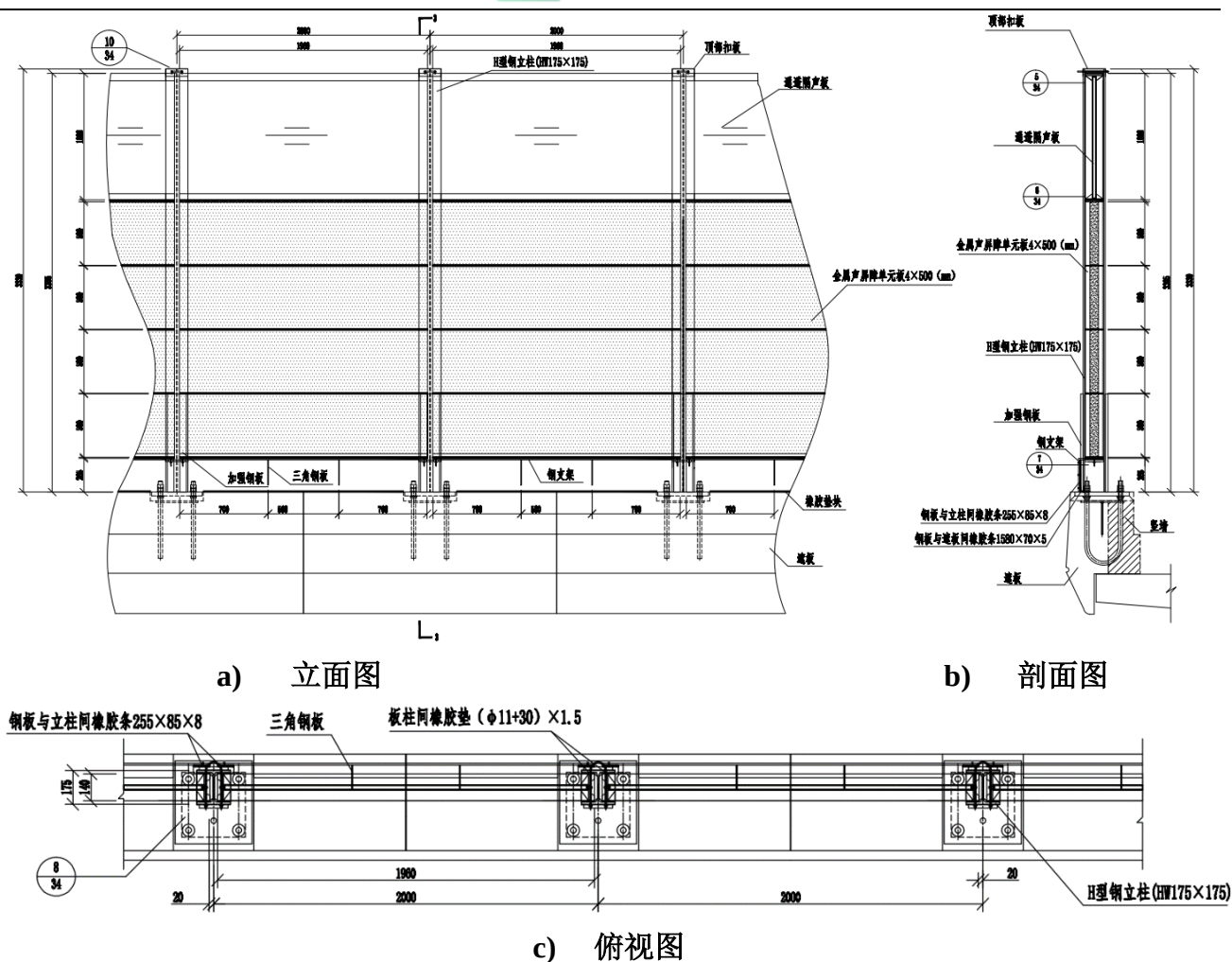


图 2 SPZ80 年钢立柱与金属声屏障安装示意图（参考：通环（2018）8023-31）

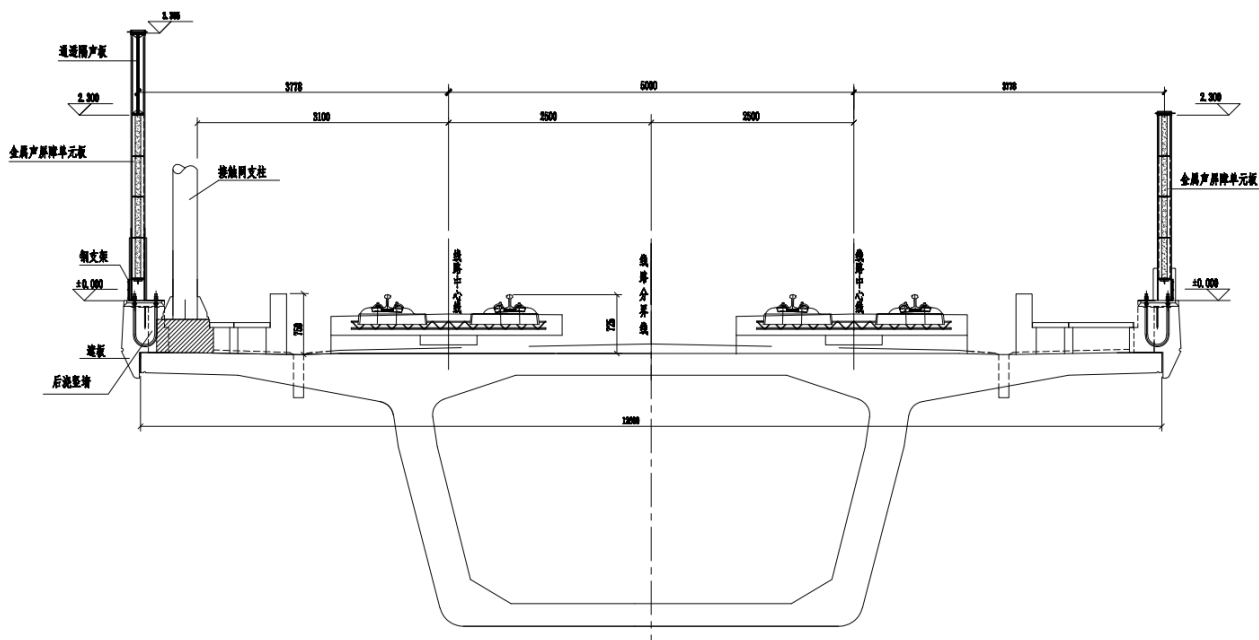


图 3 桥梁插板式声屏障示意图（参考：通环（2018）8023-29）

1.4 设计荷载及荷载组合

根据《铁路工程建设通用参考图 时速 250 公里、350 公里高速铁路 桥梁插板式声屏障

安装图 通环(2018)8323》，设计荷载及荷载组合如下。

1、设计荷载

声屏障荷载应包括自重、自然风荷载、列车气动力荷载及其他荷载。

(1) 自重：按实际设计尺寸及材料计算。

(2) 列车脉动力：

A、列车气动风压值：见表 1。

表1 列车气动风压值

设计运行速度 V (km/h)	$V=250$	$V=350$
列车气动风压值 (kN/m^2)	≤ 0.45	≤ 0.9

B、脉动响应系数：见表 2。

表2 脉动响应系数

设计运行速度 V (km/h) 声屏障高度		$V=250$	$V=350$
		脉动响应系数	脉动响应系数
金属声屏障	$H=2.3m$	1.05	1.25
	$H=3.3m$	1.85	2.11
非金属声屏障	$H=2.3m$	1.21	1.87
	$H=3.3m$	2.42	2.57

(3) 自然风荷载(依据《铁路工程建设通用参考图 时速 250 公里、350 公里高速铁路 桥梁插板式声屏障安装图 通环(2018)8323》):

a、风荷载计算中关于风速及风压的规定

动车组运行时，设计风速和其对应的风压依据列车设计运行速度确定，详见表 3

表3 动车组运行限制风速（风荷载 A）

设计运行速度 V (km/h)	设计风速 (m/s)	基本风压 (kN/m^2)
$V=250$	≤ 25	≤ 0.39
$V=350$	≤ 20	≤ 0.25

无动车组运行时，设计风速和基本风压按照风速分为一般地区和台风地区，详见表 4。

表4 无动车组运行时基本风压（风荷载 B）

地区	设计风速 (m/s)	基本风压 (kN/m^2)
一般风速地区	≤ 30	≤ 0.56
台风地区	32.7~48	0.67~1.44

当设计最大风速大于 30 m/s（基本风压大于 0.56 kN/m²）的非台风地区，应该按实际风压重新验算。

当设计最大风速大于 48 m/s（基本风压大于 1.44kN/m²）的台风地区，应该按实际风压重

新验算。

b、自然风荷载计算

自然风荷载 $W=k_1 \times k_2 \times k_3 \times W_0$ ，其中 k_1 （风载体型系数）=1.3； k_2 （风压高度变化系数）=1.13； k_3 （地形、地理条件系数）=1.3； W_0 （基本风压）按表 3、表 4 取值。

(4) 地震力：本次设计只考虑横向水平地震力。地震力分级如下：

一般风速地区：按抗震设防烈度为 6 度地区（ A_g 为 0.05g）、7 度地区（ A_g 为 0.15g）、8 度地区（ A_g 为 0.30g）三类分级。

台风地区：不考虑地震作用。

2、荷载组合：计算按下列荷载组合，取最不利荷载组合进行设计。

(1) 一般风速地区：

动车组运行时：自重+列车脉动力+自然风荷载 A+水平地震力；

动车组停行（无车）时：自重+自然风荷载 B+水平地震力；

(2) 台风地区

动车组停行（无车）时：自重+风荷载 B；

1.5 SPZ80 年钢立柱技术指标

上海中驰集团综合多项标准，如：GB/T 51335-2018《声屏障结构技术标准》、GB/T 50017-2017《钢结构设计规范》、《铁路工程建设通用参考图 时速 250 公里、350 公里高速铁路 桥梁插板式声屏障安装图 通环(2018)8323》等要求，提出 SPZ80 年钢立柱结构主要控制标准，如表 3 所示。

表5 SPZ80 年钢立柱结构主要控制标准

项目	指标参数
列车气动风压	列车时速按 350km/h 考虑，一般地区 3.3m 风屏障
H 型钢柱	175×175×7.5×11×3339（mm）
H 型钢底板	430×400×30（mm）
使用年限	≥80 年
挠度	≤L/200
抗拉、抗弯强度	≤215N/mm ²
焊缝强度	≤215N/mm ²
H 型钢抗疲劳强度（应力幅值）	≤119N/mm ² （参考 H3.2 节中 HW175 型钢应力-循环数据表）
焊缝抗疲劳强度（应力幅值）	≤61N/mm ² （参考 H3.2 节中 SPZ80 年钢立柱的焊缝应力-循环数据表）
连接螺栓（抗拉强度）	≤210N/mm ²
U 型螺栓	≤600N/mm ²

抗疲劳性能	1300 万次
-------	---------

注：1300 万次借鉴于 210 对/日（ $210 \times 2 \times 365 \times 80 = 1226.4$ 万次数）

二、列车气动风压脉动力及设计取值

高速行驶的列车使列车周围的空气产生强烈扰动，在行驶的列车通过声屏障的瞬间，这一扰动将会加剧。从而引起声屏障表面的空气压力发生突变，形成一种瞬态压力冲击，在约几十毫秒之间相继出现正、负压力峰值，这一瞬态压力冲击即为列车驶过声屏障时产生的列车风脉冲动力。该脉动力由三个部分组成：一个先正压后负压的头波、中间由于车厢间的间隔产生的间隙波以及一个先负压后正压的尾波。头波正压大于负压，尾波负压大于正压。脉动力的分布与列车的车速、轨道中心线至声屏障距离、列车的车头系数以及声屏障高度等因素有关。列车通过声屏障时产生的脉冲波由不同频率的部分组成，国内外有关研究机构的研究表明：当列车以 350km/h 的速度行驶时，其通过声屏障时产生的脉冲波的能量主要集中在 4~6Hz 的范围内。由于列车气动风压脉动力是动力荷载，当脉动力的主要能量集中的频率同 H 型钢立柱的自振频率相同时，就会产生共振，H 型钢立柱结构将会产生严重的破坏。

另外，在使用期内，列车设计通行次数高达 210 对/日，列车气动风压脉动力还可能造成 H 型钢立柱疲劳破坏。

2.1 我国设计规范的相关规定

我国设计规范《新建时速 300-350 公里客运专线铁路设计暂行规定》（铁建设[2007]47 号）第 6.2.22 对气动力计算作了规定

6.2.22 气动力计算应符合下列规定：

由驶过列车引起的气动压力和气动吸力，应由一个 5m 长的移动面荷载+q 及一个 5m 长的移动面荷载-q 组成。

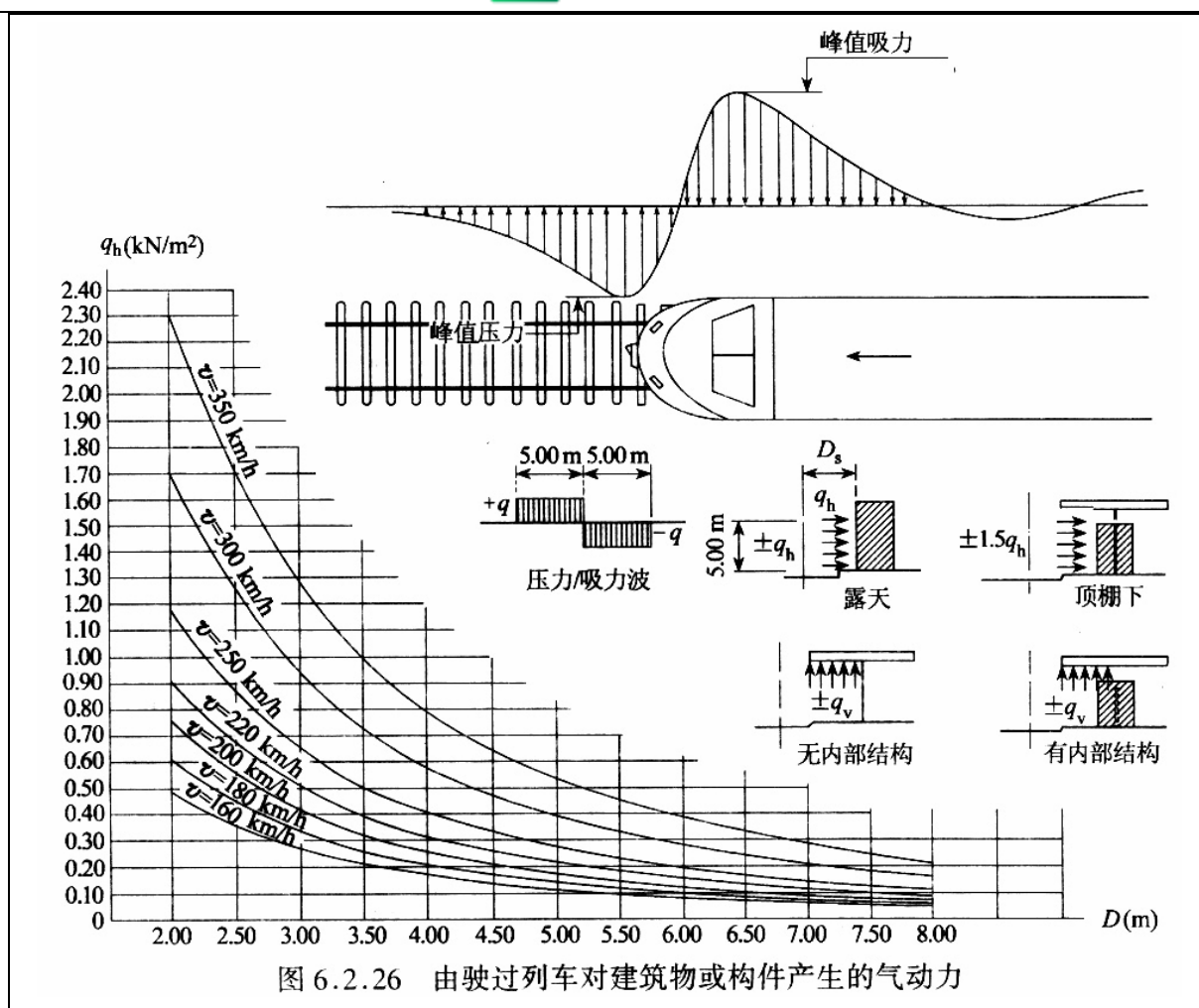
气动力应分为水平气动力 q_h 和垂直气动力 q_v 。水平气动力作用在轨顶之上的最大高度为 5m。水平气动力 q_h 可由图 6.2.26 的曲线查取。垂直气动力 q_v 可按下列式计算：

$$q_v = 2q_h \cdot \frac{7D + 30}{100} \quad (\text{kN/m}^2) \quad (6.2.26)$$

式中， q_h ——水平气动力（ kN/m^2 ）； D ——作用线至线路中心距离（m）

对顶盖下的建筑物或构件， q_h 与 q_v 应乘以 1.5 的阻挡系数。面荷载 q_h 和 q_v 必须与有车的风荷载叠加。

对于因气动力可引起自振的结构，其气动力还应考虑动力放大系数，该系数通过研究确定。



从图中可知， $D=3.75m$ （依据 1.3 节桥梁插板式声屏障示意图中 $D\approx 3.75m$ ）、 $V=350\text{ km/h}$ 时，列车水平气动力 $q_h=0.90\text{ kN/m}^2$ ，该值与《铁路工程建设通用参考图 时速 250 公里、350 公里高速铁路 桥梁插板式声屏障安装图 通环(2018)8323》中时速 350km 列车的列车气动风压 $\leq 0.9\text{ kN/m}^2$ 一致。

2.2 英国规范空压值计算公式

空压值 p_{1k} 的计算公式如下

$$p_{1k} = \frac{\rho v_v^2}{2} k_1 C_{p1}$$

$$C_{p1} = \frac{2.5}{(Y+0.25)^2} + 0.02$$

式中， k_1 为列车形状系数，货车 $k_1=1.00$ ，客车 $k_1=0.85$ ，流线型车头如 ICE 系列等 $k_1=0.60$ ； ρ 为空气密度，取 1.25 kg/m^3 ； v_v 为列车车速，单位 m/s ； C_{p1} 为空压系数，取决于轨道中心线至屏障距离； Y 为轨道中心线至声屏障距离，单位 m 。

当 $Y=3.75m$ 时， $C_{p1}=0.17625$ ，取 $k_1=0.60$ 、 $\rho=1.25\text{ kg/m}^3$ 、 $v_v=350\text{ km/h}=97.2\text{ m/s}$ ，则有 $p_{1k}\approx 0.624\text{ kN/m}^2$ 。

2.3 SPZ80 年钢立柱荷载设计

依据 2.1 级 2.2 节国内外各技术标准对列车气动风压的规定，及《铁路工程建设通用参考图 时速 250 公里、350 公里高速铁路 桥梁插板式声屏障安装图 通环(2018)8323》中时速 350km 列车的气动风压 $\leq 0.9 \text{ kN/m}^2$ ，本次设计关于时速 350km 列车的 SPZ80 年钢立柱的疲劳分析中，气动基本风压可取 $P_A=0.9 \text{ kN/m}^2$ ，脉动响应系数取值 2.11。本次 SPZ80 年钢立柱疲劳分析中，取 1.4 节中最不利荷载组合进行计算，计算方式如下：

(1)强度计算：依据结构设计规范进行强度、挠度及稳定性计算。

强度计算时选取最不利荷载组合：自重+最大列车脉动力（ $2.11 \times 0.9 = 1.899 \text{ kN/m}^2$ ）+风荷载 B（基本风压 1.44 kN/m^2 ）+水平地震力（ $A_g=0.3g$ ），即：总和为：自重+（ $1.899 \text{ kN/m}^2 + 1.44 \text{ kN/m}^2 = 3.339 \text{ kN/m}^2$ ）+水平地震力（ $A_g=0.3g$ ）。鉴于《铁路工程建设通用参考图 时速 250 公里、350 公里高速铁路 桥梁插板式声屏障安装图 通环(2018)8323》中时速 350km 声屏障设计中要满足 $5 \text{ kPa} > 3.339 \text{ kPa}$ 的设计要求，故本次强度分析采用 5 kPa 进行强度分析。

(2)疲劳计算：依据设计使用寿命按运行 CRH 系列动车组为 210 对/日控制。

疲劳荷载主要为：自重+最大列车脉动力（ $2.11 \times 0.9 = 1.899 \text{ kN/m}^2$ ）+风荷载 A（ $W=1.3 \times 1.13 \times 1.3 \times 0.25 = 0.477425 \text{ kN/m}^2$ ）+水平地震力（ $A_g=0.3g$ ），即：总和为：自重+（ $1.899 \text{ kN/m}^2 + 0.477425 \text{ kN/m}^2 = 2.376425 \text{ kN/m}^2$ ）+水平地震力（ $A_g=0.3g$ ）。

综上，我们选取方式 1：自重+ 3.339 kN/m^2 +水平地震力（ $A_g=0.3g$ ），进行结构强度、挠度、应力极限等计算；我们选取方式 2：自重+ 2.376425 kN/m^2 +水平地震力（ $A_g=0.3g$ ），进行疲劳计算。

三、SPZ80 年钢立柱结构计算

3.1 疲劳计算(摘取 GB/T 50017-2017)

1、依据国标 GB/T 50017-2017《钢结构设计规范》16.2.1 中描述，在结构使用寿命期间，当常幅疲劳或变幅疲劳的最大应力幅符合下列公式时，则疲劳强度满足要求。

a、正应力幅的疲劳计算：

$$\Delta\sigma < \gamma_t [\Delta\sigma_L] \quad (16.2.1-2)$$

对焊接部位：

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \quad (16.2.1-2)$$

对非焊接部位：

$$\Delta\sigma = \sigma_{\max} - 0.7\sigma_{\min} \quad (16.2.1-2)$$

b、剪应力幅的疲劳计算：

$$\Delta\tau < [\Delta\tau_L] \quad (16.2.1-4)$$

对焊接部位：

$$\Delta\tau < \tau_{\max} - \tau_{\min} \quad (16.2.1-5)$$

对非焊接部位：

$$\Delta\tau < \tau_{\max} - 0.7\tau_{\min} \quad (16.2.1-6)$$

c、板厚或直径修正系数 γ_t 应按下列规定采用：

对于横向角焊缝连接和对接焊缝连接，当连接板厚 $t(\text{mm})$ 超过 25mm 时，应按下式计算：

$$\gamma_t = \left(\frac{25}{t}\right)^{0.25} \quad (16.2.1-7)$$

对于螺栓轴向受拉连接，当螺栓的公称直径 d (mm) 大于 30mm 时，应按下式计算：

$$\gamma_t = \left(\frac{30}{t}\right)^{0.25} \quad (16.2.1-8)$$

d、其余情况取 $\gamma_t = 1.0$

式中： $\Delta\sigma$ ——构件或连接计算部位的正应力幅 (N/mm^2)；

σ_{max} ——计算部位应力循环中的最大拉应力(取正值) (N/mm^2)；

σ_{min} ——计算部位应力循环中的最小拉应力或压应力 (N/mm^2)，拉应力取正值，压应力取负值；

$\Delta\tau$ ——构件或连接计算部位的剪应力幅 (N/mm^2)；

τ_{max} ——计算部位应力循环中的最大剪应力 (N/mm^2)；

τ_{min} ——计算部位应力循环中的最小剪应力 (N/mm^2)；

$[\Delta\sigma_L]$ ——正应力幅的疲劳截止限 (N/mm^2)，根据附录 K 规定的构件和连接类别按表 16.2.1-1 采用；

$[\Delta\tau_L]$ ——剪应力幅的疲劳截止限 (N/mm^2)，根据附录 K 规定的构件和连接类别按表 16.2.1-2 采用。

表 16.2.1-1 正应力幅的疲劳计算参数

构件与连接类别	构件与连接相关系数		循环次数 n 为 2×10^6 次的 容许正应力幅 $[\Delta\sigma]_{2 \times 10^6}$ (N/mm^2)	循环次数 n 为 5×10^6 次的 容许正应力幅 $[\Delta\sigma]_{5 \times 10^6}$ (N/mm^2)	疲劳截止限 $[\Delta\sigma_L]_{1 \times 10^8}$ (N/mm^2)
	C_z	β_z			
Z1	1920×10^{12}	4	176	140	85
Z2	861×10^{12}	4	144	115	70
Z3	3.91×10^{12}	3	125	92	51
Z4	2.81×10^{12}	3	112	83	46
Z5	2.00×10^{12}	3	100	74	41
Z6	1.46×10^{12}	3	90	66	36
Z7	1.02×10^{12}	3	80	59	32
Z8	0.72×10^{12}	3	71	52	29
Z9	0.50×10^{12}	3	63	46	25
Z10	0.35×10^{12}	3	56	41	23
Z11	0.25×10^{12}	3	50	37	20
Z12	0.18×10^{12}	3	45	33	18
Z13	0.13×10^{12}	3	40	29	16
Z14	0.09×10^{12}	3	36	26	14

表 16.2.1-2 剪应力幅的疲劳计算参数

构件与连接类别	构件与连接的相关系数		循环次数 n 为 2×10^6 次的 容许剪应力幅 $[\Delta\tau]_{2 \times 10^6}$ (N/mm^2)	疲劳截止限 $[\Delta\tau_L]_{1 \times 10^8}$ (N/mm^2)
	C_J	β_J		
J1	4.10×10^{11}	3	59	16
J2	2.00×10^{10}	5	100	46
J3	8.61×10^{21}	8	90	55

2、当常幅疲劳计算不能满足本标准式（16.2.1-1）或式（16.2.1-4）要求时，应按下列规定进行计算：

a、正应力幅的疲劳计算应符合下列公式规定：

$$\Delta\sigma \leq \gamma_t [\Delta\sigma] \quad (16.2.2-1)$$

当 $n \leq 5 \times 10^6$ 时：

$$[\Delta\sigma] = \left(\frac{C_z}{n} \right)^{1/\beta_z} \quad (16.2.2-2)$$

当 $5 \times 10^6 < n \leq 1 \times 10^8$ 时：

$$[\Delta\sigma] = \left[\left([\Delta\sigma]_{5 \times 10^6} \right)^2 \frac{C_z}{n} \right]^{1/(\beta_z + 2)} \quad (16.2.2-3)$$

当 $n > 1 \times 10^8$ 时：

$$[\Delta\sigma] = [\Delta\sigma_L] \quad (16.2.2-4)$$

b、剪应力幅的疲劳计算应符合下列公式规定：

$$\Delta\tau \leq [\Delta\tau] \quad (16.2.2-5)$$

当 $n \leq 1 \times 10^8$ 时：

$$[\Delta\tau] = \left(\frac{C_J}{n} \right)^{1/\beta_J} \quad (16.2.2-6)$$

当 $n > 1 \times 10^8$ 时：

$$[\Delta\tau] = [\Delta\tau_L] \quad (16.2.2-7)$$

式中： $[\Delta\sigma]$ ——常幅疲劳的容许正应力幅(N/mm²)：

n ——应力循环次数；

C_z 、 β_z ——构件和连接的相关参数，应根据本标准附录 K 规定的构件和连接类别，按本标

准表 16.2.1-1 采用；

$[\Delta\sigma]_{5 \times 10^6}$ ——循环次数 n 为 5×10^6 次的容许正应力幅 (N/mm²)，应根据本标准附录 K 规定的

构件和连接类别，按本标准表 16.2.1-1 采用；

$[\Delta\tau]$ ——常幅疲劳的容许剪应力幅 (N/mm²)；

C_J 、 β_J ——构件和连接的相关系数，应根据本标准附录 K 规定的构件和连接类别，按本标

准表 16.2.1-2 采用。

3.2 SPZ80 年钢立柱材料参数及其应力-循环曲线

H 型钢立柱采用的 175H 型钢 Q235B 型号，具体材料参数见表 6。

表6 HW175 型钢 Q235B 材料参数

项目	参数
弹性模量 E	2.1e+5MPa
抗剪模量	8.24e+4MPa
泊松比	0.274
密度	7830kg/m ³
屈服强度	235MPa
极限强度	370MPa
疲劳极限	85 MPa

依据 3.1 节中疲劳计算方式，本次设计的 1300 万次 SPZ80 年钢立柱疲劳分析满足 3.1 节中 16.2.2-3 公式的范围，且 HW175 型钢符合附表 K 中 Z1 的构件类别。根据 3.1 节中表 16.2.1-1 正应力幅的疲劳计算参数、公式 16.2.2-1、公式 16.2.2-2、公式 16.2.2-3、公式 16.2.2-4 可知：HW175 型钢 Q235B 应力-循环数据表及通过拟合的 S-N 曲线图如下表 7 及图 4 所示。

表 7 HW175 型钢 Q235B 应力-循环数据表

序号	循环次数 N	允许正应力幅	超高周疲劳极限
循环次数 $n \leq 2 \times 10^6$			
1	5.00E+05	176.00	85
2	1.00E+06	176.00	85
$n \geq 2 \times 10^6$ 循环次数 $n \leq 5 \times 10^6$			
3	2.00E+06	176.02	85
4	3.00E+06	159.05	85
5	4.00E+06	148.02	85
6	5.00E+06	139.99	85
$n \geq 5 \times 10^6$ (140) 循环次数 $n \leq 1 \times 10^8$			
7	5.00E+06	139.99	85
8	6.00E+06	135.80	85
9	7.00E+06	132.36	85
10	8.00E+06	129.44	85
11	9.00E+06	126.93	85
12	1.00E+07	124.72	85
13	1.10E+07	122.75	85
14	1.20E+07	120.98	85
15	1.30E+07	119.38	85
16	1.40E+07	117.92	85
17	1.50E+07	116.57	85
18	1.60E+07	115.32	85
19	1.70E+07	114.16	85
20	1.80E+07	113.08	85
21	1.90E+07	112.06	85

22	2.00E+07	111.11	85
23	3.00E+07	103.85	85
24	4.00E+07	98.99	85
25	5.00E+07	95.37	85
26	6.00E+07	92.52	85
27	7.00E+07	90.17	85
28	8.00E+07	88.19	85
29	9.00E+07	86.47	85
30	1.00E+08	84.97	85
循环次数 $n \geq 1 \times 10^8$			
31	1.00E+08	85.00	85
32	5.00E+08	85.00	85
33	1.00E+09	85.00	85

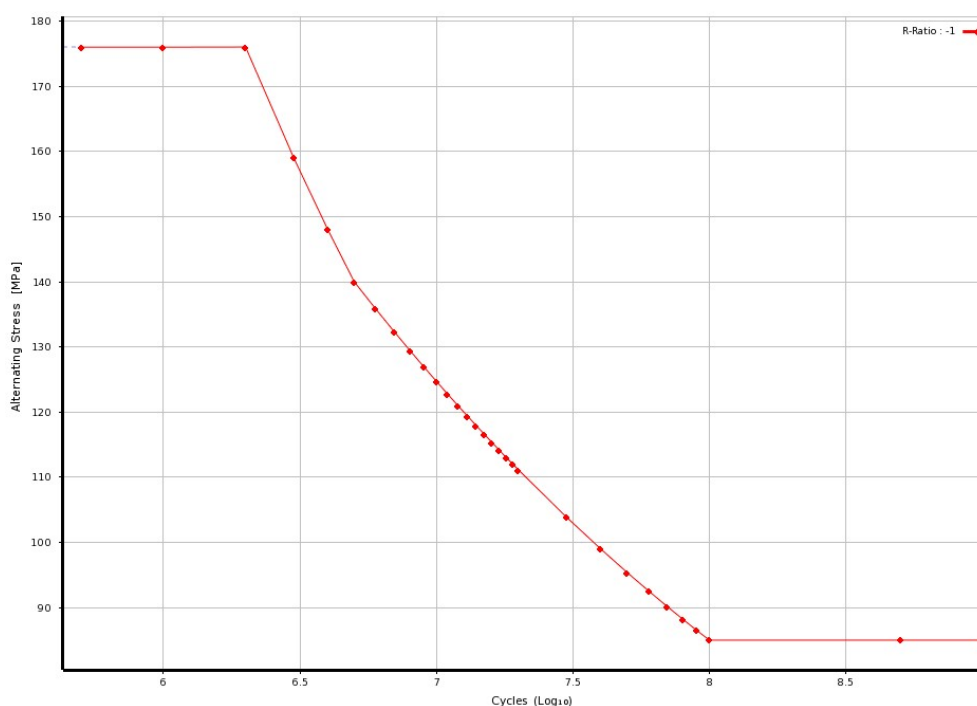


图 4 HW175 型钢 Q235B 的 S-N 曲线

依据 3.1 节中疲劳计算方式，本次设计的 1300 万次 SPZ80 年钢立柱疲劳分析满足 3.1 节中 16.2.2-3 公式的范围，且 SPZ80 年钢立柱的焊接方式符合附表 K 中 Z5 的构件类别。根据 3.1 节中表 16.2.1-1 正应力幅的疲劳计算参数、公式 16.2.2-1、公式 16.2.2-2、公式 16.2.2-3、公式 16.2.2-4 可知：SPZ80 年钢立柱的焊缝应力-循环数据表及通过拟合的 S-N 曲线图如下表 8 及图 5 所示。

表 8 SPZ80 年钢立柱的焊缝应力-循环数据表

序号	循环次数 N	允许正应力幅	超高周疲劳极限
循环次数 $n \leq 2 \times 10^6$			
1	5.00E+05	100.00	41
2	1.00E+06	100.00	41
$n \geq 2 \times 10^6$ 循环次数 $n \leq 5 \times 10^6$			
3	2.00E+06	100.00	41
4	3.00E+06	87.36	41
5	4.00E+06	79.37	41

6	5.00E+06	73.68	41
n $\geq 5 \times 10^6$ (74)循环次数 n $\leq 1 \times 10^8$			
7	5.00E+06	73.81	41
8	6.00E+06	71.17	41
9	7.00E+06	69.00	41
10	8.00E+06	67.19	41
11	9.00E+06	65.62	41
12	1.00E+07	64.25	41
13	1.10E+07	63.04	41
14	1.20E+07	61.95	41
15	1.30E+07	60.97	41
16	1.40E+07	60.07	41
17	1.50E+07	59.25	41
18	1.60E+07	58.49	41
19	1.70E+07	57.78	41
20	1.80E+07	57.13	41
21	1.90E+07	56.51	41
22	2.00E+07	55.94	41
23	3.00E+07	51.58	41
24	4.00E+07	48.70	41
25	5.00E+07	46.57	41
26	6.00E+07	44.90	41
27	7.00E+07	43.54	41
28	8.00E+07	42.39	41
29	9.00E+07	41.40	41
30	1.00E+08	40.54	41
循环次数 n $\geq 1 \times 10^8$			
31	1.00E+08	41.00	41
32	5.00E+08	41.00	41
33	1.00E+09	41.00	41

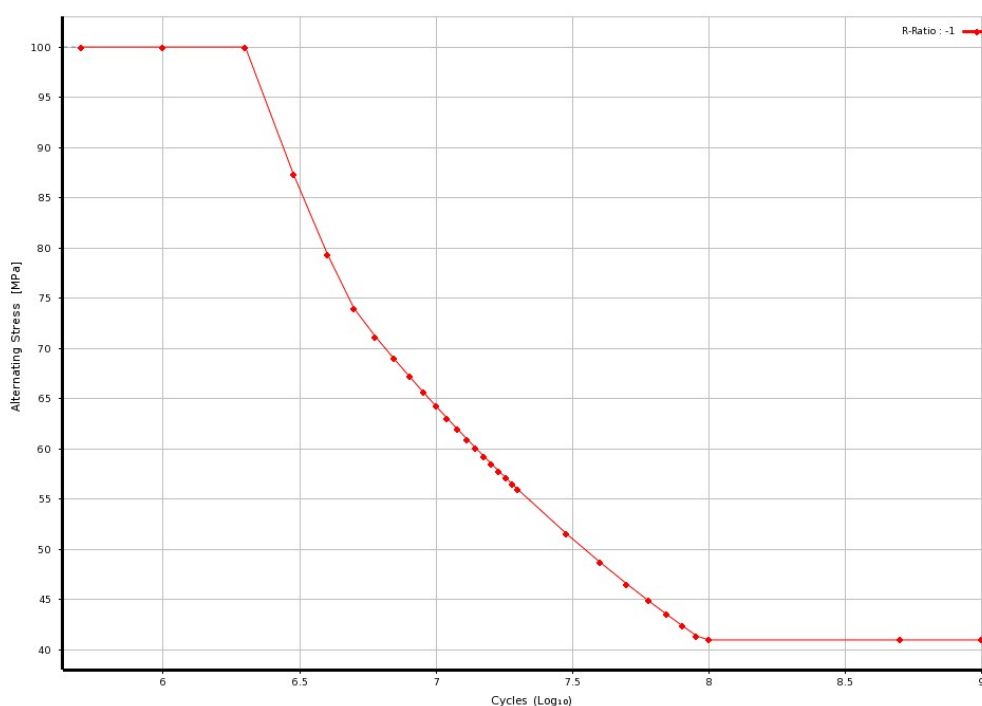


图 5 SPZ80 年钢立柱的焊缝的 S-N 曲线

3.3 SPZ80 年钢立柱设计指标

1、SPZ80 年钢立柱的疲劳分析荷载为：自重荷载+侧向风压荷载（ $F=3m \times 2m \times 2.376425kN/m^2 \approx 14.259 kN$ ）+水平地震力（ $Ag=0.3g$ ），采用正弦函数施加交变荷载，频率为 4HZ，如图 6 所示。型钢立柱的强度分析荷载为：自重荷载+侧向风压荷载（ $F=3m \times 2m \times 5kN/m^2=30 kN$ ）+水平地震力（ $Ag=0.3g$ ），采用正弦函数施加交变荷载，频率为 4HZ，如图 7 所示。

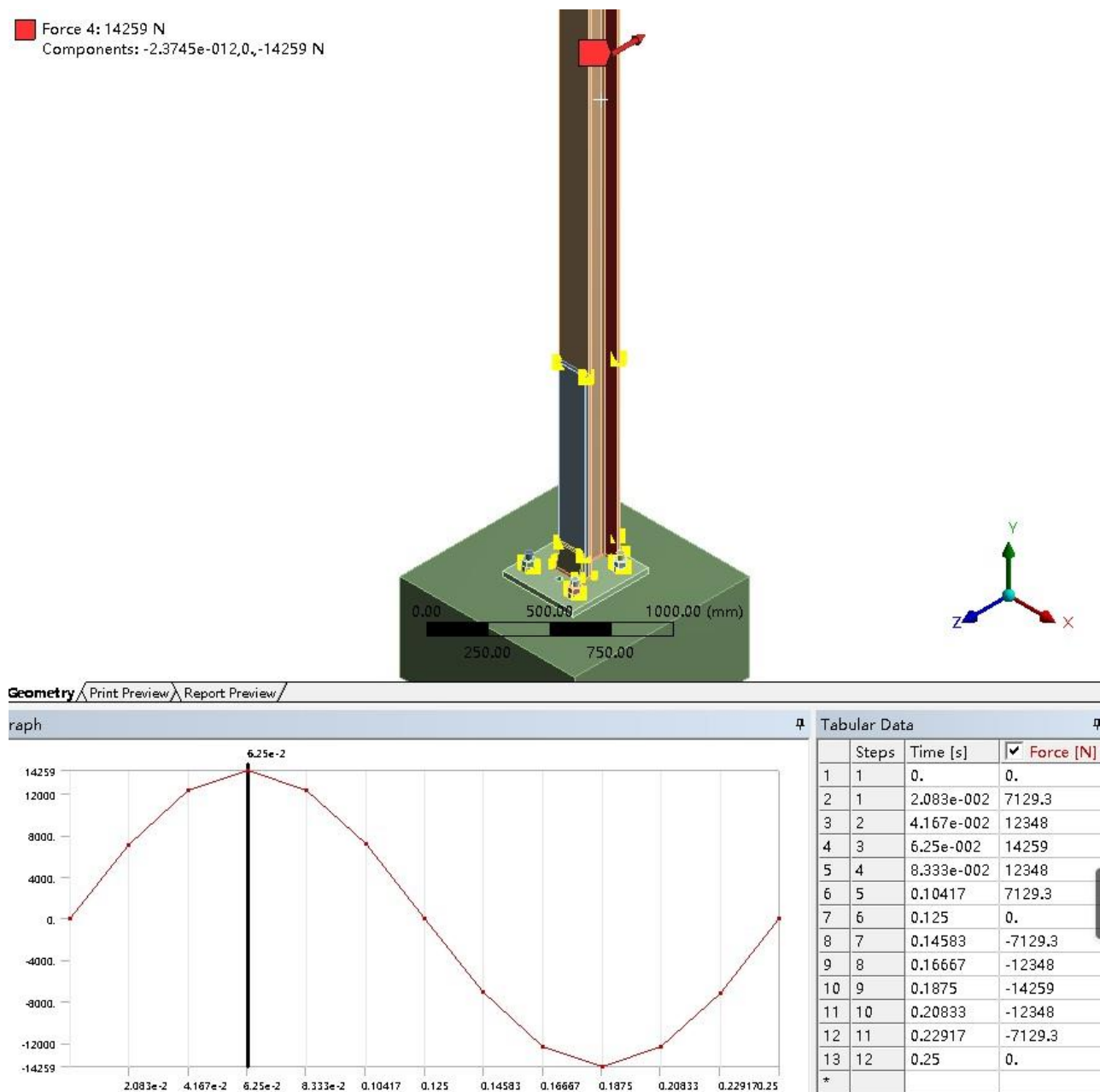


图 6 正弦交变荷载（疲劳分析荷载 4HZ、14.259 kN）

Force 5: 30000 N
Components: -1.6653e-012, 0, -30000 N

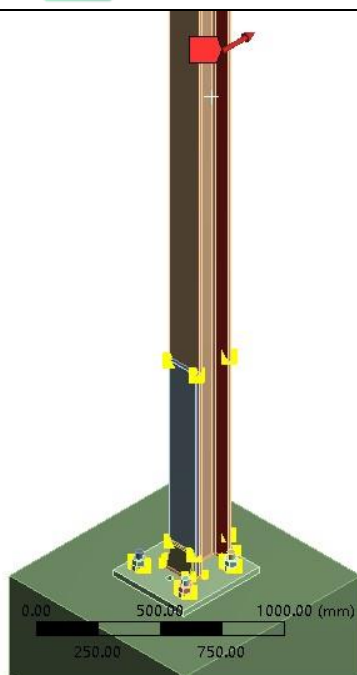


图 7 正弦交变荷载（强度分析荷载 4HZ、30 kN）

2、疲劳分析，荷载次数为 1300 万次(鉴于 210 对/日 ($210 \times 2 \times 365 \times 80 = 1226.4$ 万次数))，疲劳分析采用恒定正弦交替，应力类型采用 *Goodman* 拟合，如图 8 所示。

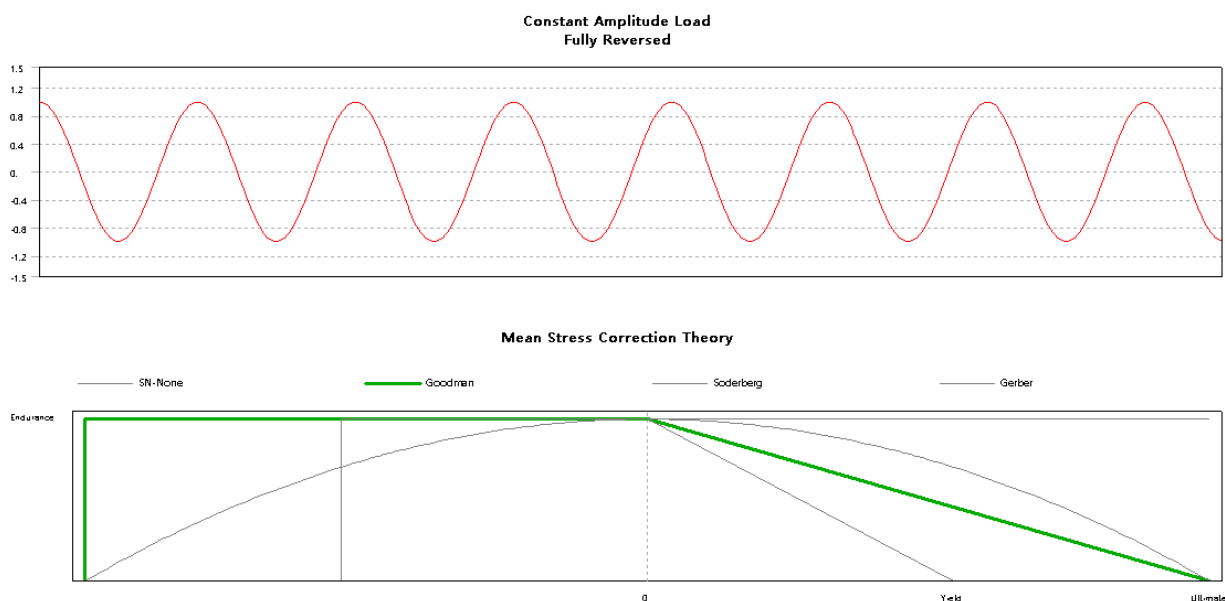


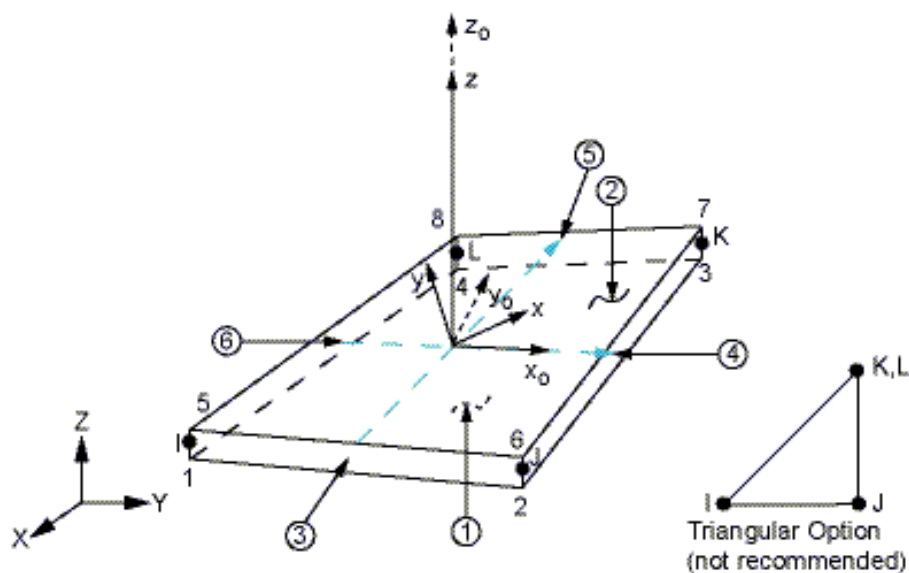
图 8 1300 万次常幅疲劳荷载设置

四、SPZ80 年钢立柱有限元模拟

本节采用非线性有限元分析程序 ANSYS，建立三维有限元分析模型，对 H 型钢立柱的结构受力及疲劳性能进行模拟分析。

4.1 结构分析所采用的单元

结构网格划分采用壳单元 SHELL181 来模拟，单元如下图 9 所示：



x_0 = Element x-axis if ESYS is not provided.

x = Element x-axis if ESYS is provided.

图 9 结构网格划分选取的壳单元 SHELL181

4.2 模型网格划分

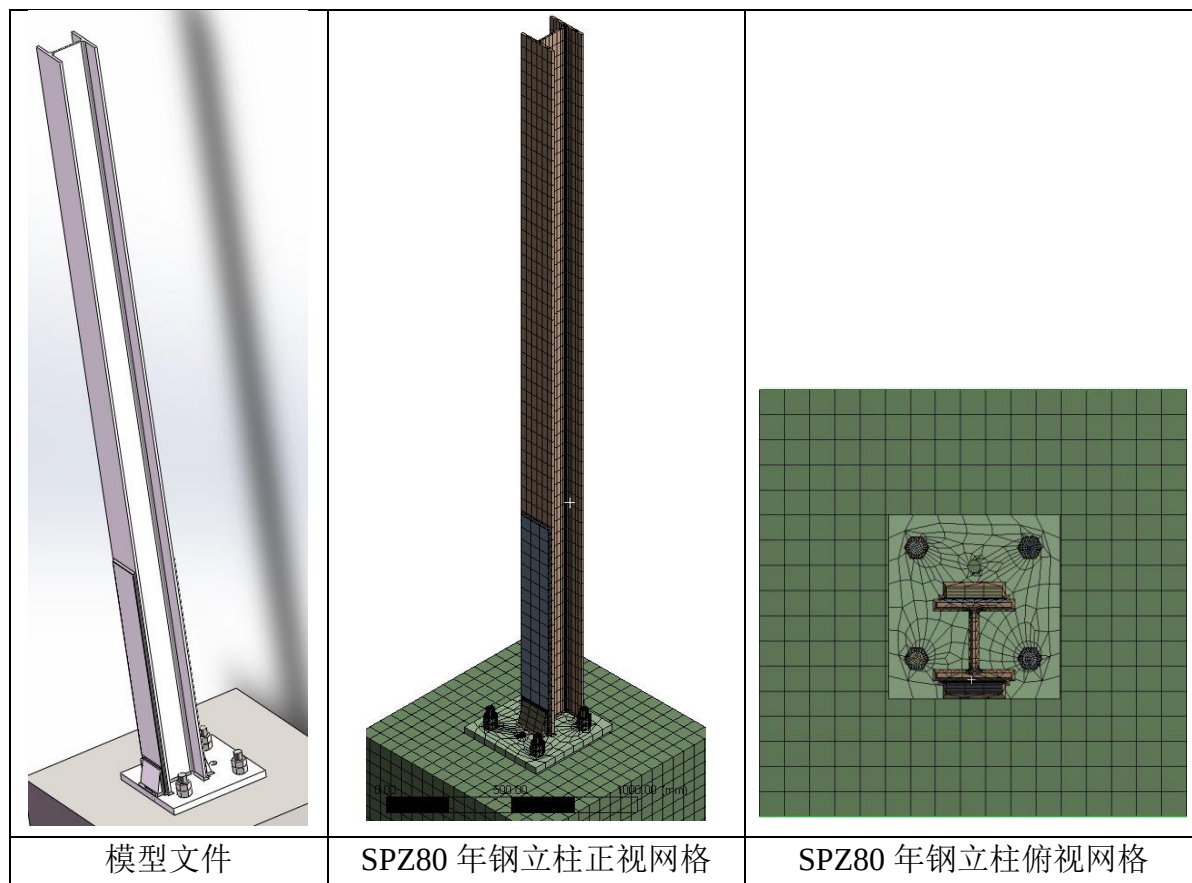


图 10 SPZ80 年钢立柱模型及网格划分

4.3 加载边界条件

金属声屏障单元板通过橡胶条嵌插在 SPZ80 年钢立柱之间，SPZ80 年钢立柱受到自重荷载及声屏障经风压间接给予 SPZ80 年钢立柱的侧向荷载。声屏障及 SPZ80 年钢立柱中荷载示意图如图 11、图 12 所示。

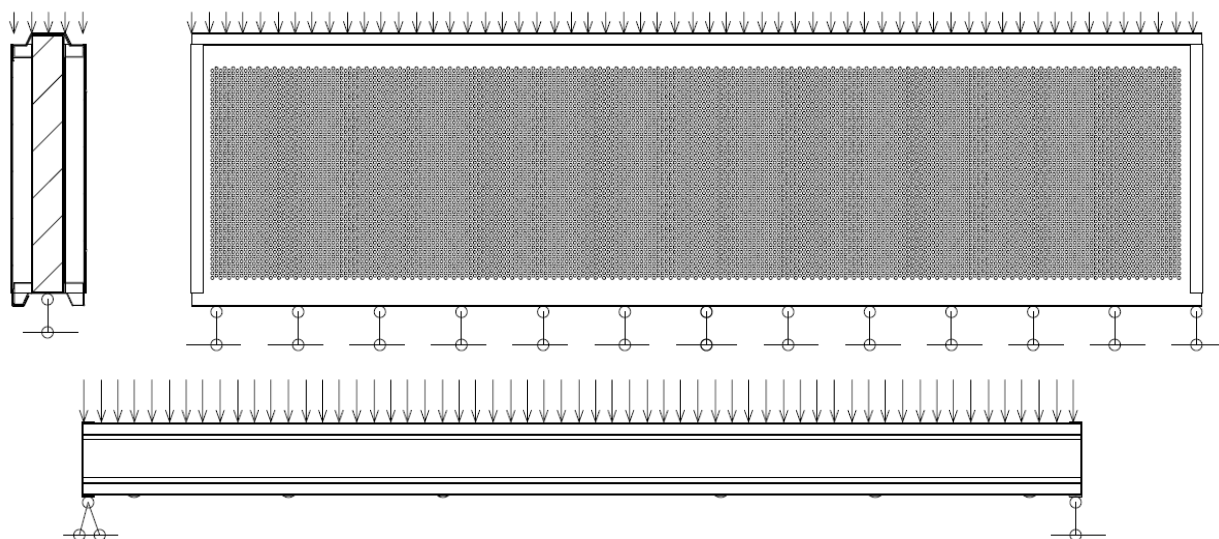


图 11 声屏障荷载示意图

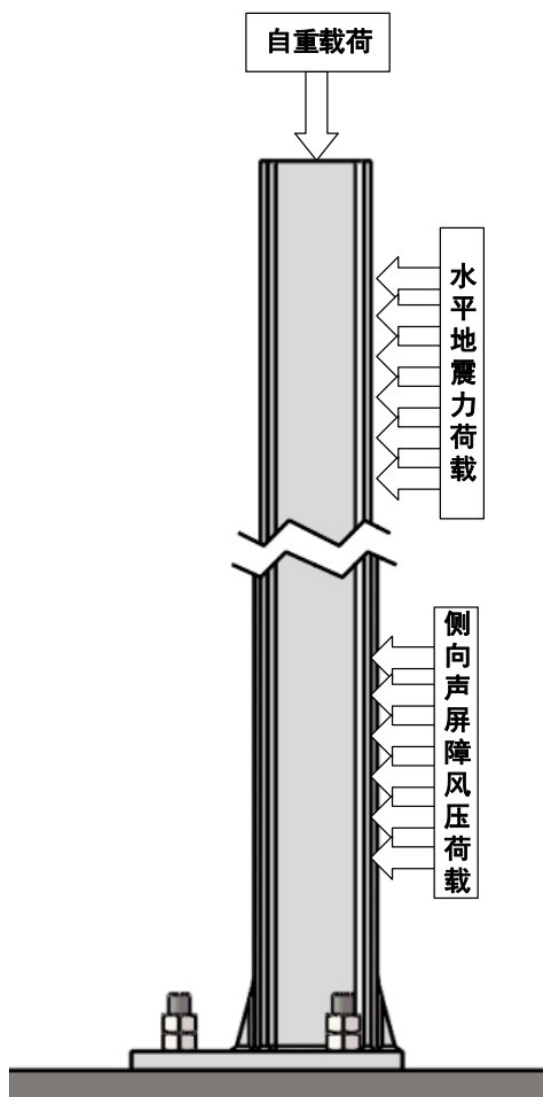


图 12 SPZ80 年钢立柱荷载示意图

4.4 计算工况及分析

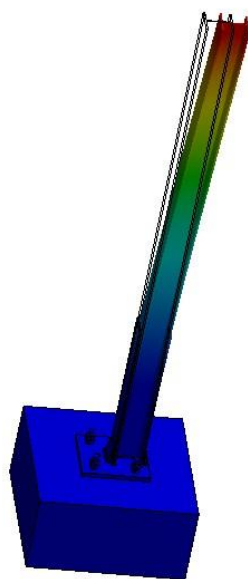
4.4.1 SPZ80 年钢立柱的强度分析

在仿真分析软件中加载 SPZ80 年钢立柱 5kPa 的强度分析荷载：自重荷载+侧向风压荷载（4HZ、 $F=30\text{ kN}$ ）+水平地震力（ $A_g=0.3g$ ），依据 4.3 节设置边界条件并求解得 SPZ80 年钢立柱在 5kPa 强度分析荷载下的位移量及应力分布图分布见图 13 及图 14 所示。

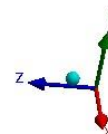
- 挠度设计分析：根据图 13 可知，在 5kPa 荷载下，SPZ80 年钢立柱的强度分析中最大位移量 $\Delta L_{max}=14.8\text{ mm} < (\text{挠度指标: } L/200=3339\text{ mm}/200 \approx 16.7\text{ mm})$ ，满足强度设计中挠度设计要求。
- 应力强度设计分析：根据图 14 可知，在 5kPa 荷载下，SPZ80 年钢立柱的强度分析中最大应力 $\Delta P_{max}=113.94\text{ Mpa} < \text{抗拉、抗弯强度: } 215\text{ N/mm}^2$ ，最大应力 $\Delta P_{max}=113.94\text{ Mpa} < \text{焊缝强度: } 215\text{ N/mm}^2$ ，最大应力 $\Delta P_{max}=113.94\text{ Mpa} < \text{连接螺栓抗拉强度: } 210\text{ N/mm}^2$ ，最大应力 $\Delta P_{max}=113.94\text{ Mpa} < \text{U 型螺栓强度: } 600\text{ N/mm}^2$ ，满足强度设计中抗拉、抗弯、焊缝强度、连接螺栓抗拉强度、U 型螺栓强度等强度设计要求。

M: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 6.25e-002

14.774 Max
13.637
12.501
11.364
10.228
9.0914
7.955
6.8186
5.6822
4.5457
3.4093
2.2729
1.1364
0 Min

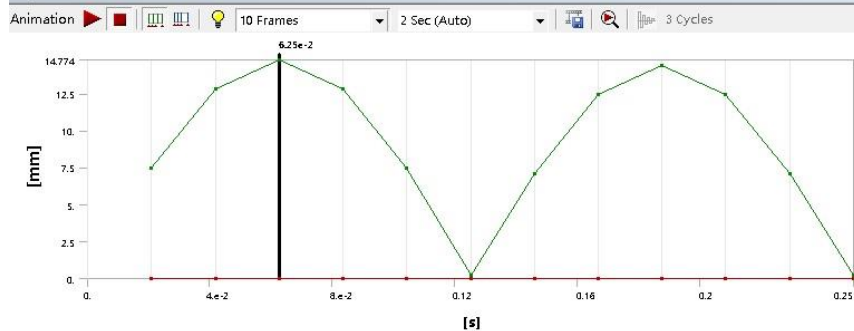


0.00 1000.00 2000.00 (mm)
500.00 1500.00



Geometry Print Preview Report Preview

Graph



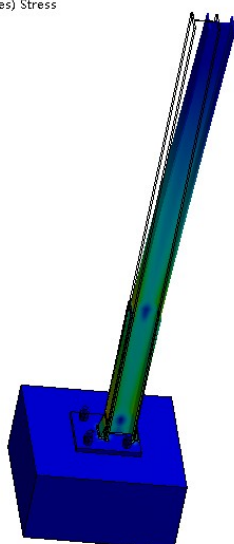
Tabular Data

	Time [s]	Minimum [mm]	Maximum [mm]
1	2.083e-002	0.	7.4863
2	4.167e-002	0.	12.821
3	6.25e-002	0.	14.774
4	8.333e-002	0.	12.821
5	0.10417	0.	7.4863
6	0.125	0.	0.19901
7	0.14583	0.	7.0883
8	0.16667	0.	12.423
9	0.1875	0.	14.376
10	0.20833	0.	12.423
11	0.22917	0.	7.0882
12	0.25	0.	0.19905

图 13 SPZ80 年钢立柱 5kPa 强度分析荷载下的位移分布图

M: Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 6.25e-002

113.94 Max
105.81
97.667
89.528
81.389
73.25
65.111
56.972
48.834
40.695
32.556
24.417
16.278
8.139
4.3903e-5 Min



0.00 1000.00 2000.00 (mm)
500.00 1500.00

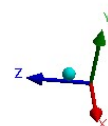


图 14 SPZ80 年钢立柱 5kPa 强度分析荷载下的应力分布图

4.4.2 SPZ80 年钢立柱的疲劳分析

在仿真分析软件中加载 SPZ80 年钢立柱的 1300 万次疲劳分析荷载：自重荷载+侧向风压荷载（4HZ、 $F=14.259\text{ kN}$ ）+水平地震力（ $A_g=0.3g$ ），依据 4.3 节设置边界条件并求解得 SPZ80 年钢立柱在 4HZ、1300 万次疲劳分析荷载下的位移量分布见图 15 所示，应力分布见图 16 所示、H 型钢应力分布图 17 所示、焊缝应力分布图 18 所示，寿命次数见图 19 所示，H 型钢安全系数见图 20 所示。

- H 型钢疲劳结果分析：根据图 17 可知，在 1300 万次 SPZ80 年钢立柱的疲劳分析中焊缝的正应力幅 $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} \approx 41.1\text{ MPa} < \text{H 型钢抗疲劳强度 } \gamma_t[\Delta\sigma_L] = 1.0 \times 119 = 119\text{ MPa}$ ，满足疲劳设计要求。
- 焊缝疲劳结果分析：根据图 18 可知，在 1300 万次 SPZ80 年钢立柱的疲劳分析中焊缝的正应力幅 $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 53.1\text{ MPa} < \text{焊缝抗疲劳强度 } \gamma_t[\Delta\sigma_L] = 1.0 \times 61 = 61\text{ MPa}$ ，满足疲劳设计要求。
- 寿命：根据图 19 可知，本次 SPZ80 年钢立柱的最低寿命次数 $> 1.3 \times 10^7$ 次，满足 1300 万次寿命设计要求。
- H 型钢安全系数：按照 1300 万次的设计要求，根据图 20 可知，本次 SPZ80 年钢立柱的 H 型钢安全系数 > 1.5 ，满足 GB/T 700-2006《碳素结构钢》中安全系数 > 1.5 的设计要求。

J: Static Structural
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 0.1875

7.3334 Max
6.8096
6.2858
5.762
5.2381
4.7143
4.1905
3.6667
3.1429
2.6191
2.0953
1.5714
1.0476
0.52381
0 Min

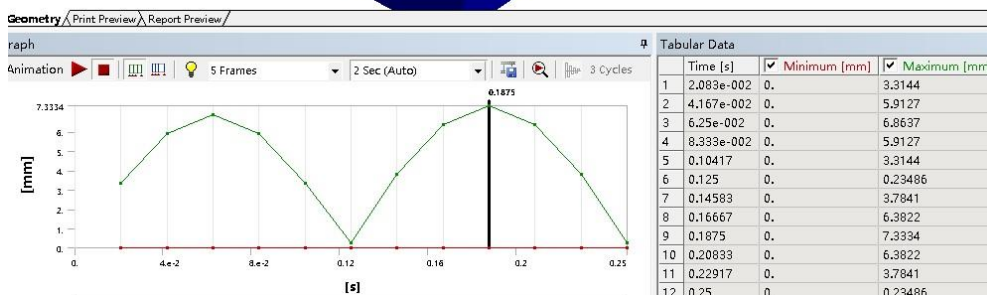
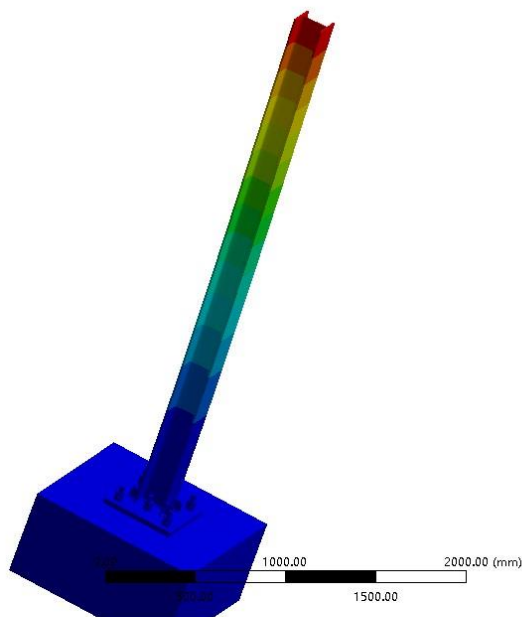


图 15 SPZ80 年钢立柱在疲劳分析荷载下的位移分布图

M: Static Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 0.1875

53.718 Max
49.881
46.044
42.207
38.37
34.533
30.696
26.859
23.022
19.185
15.348
11.511
7.6741
3.8371
5.8153e-5 Min

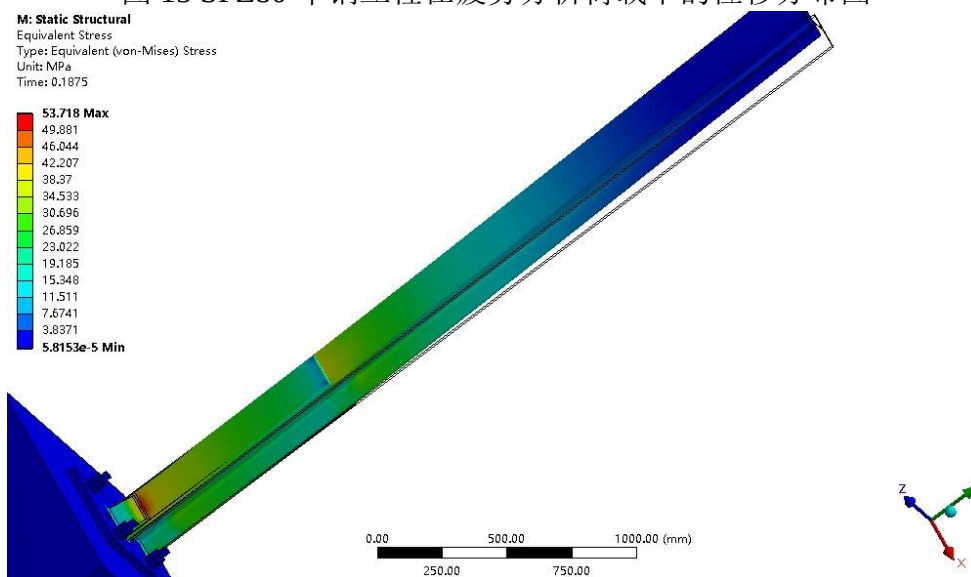


图 16 SPZ80 年钢立柱在疲劳分析荷载下的应力分布图

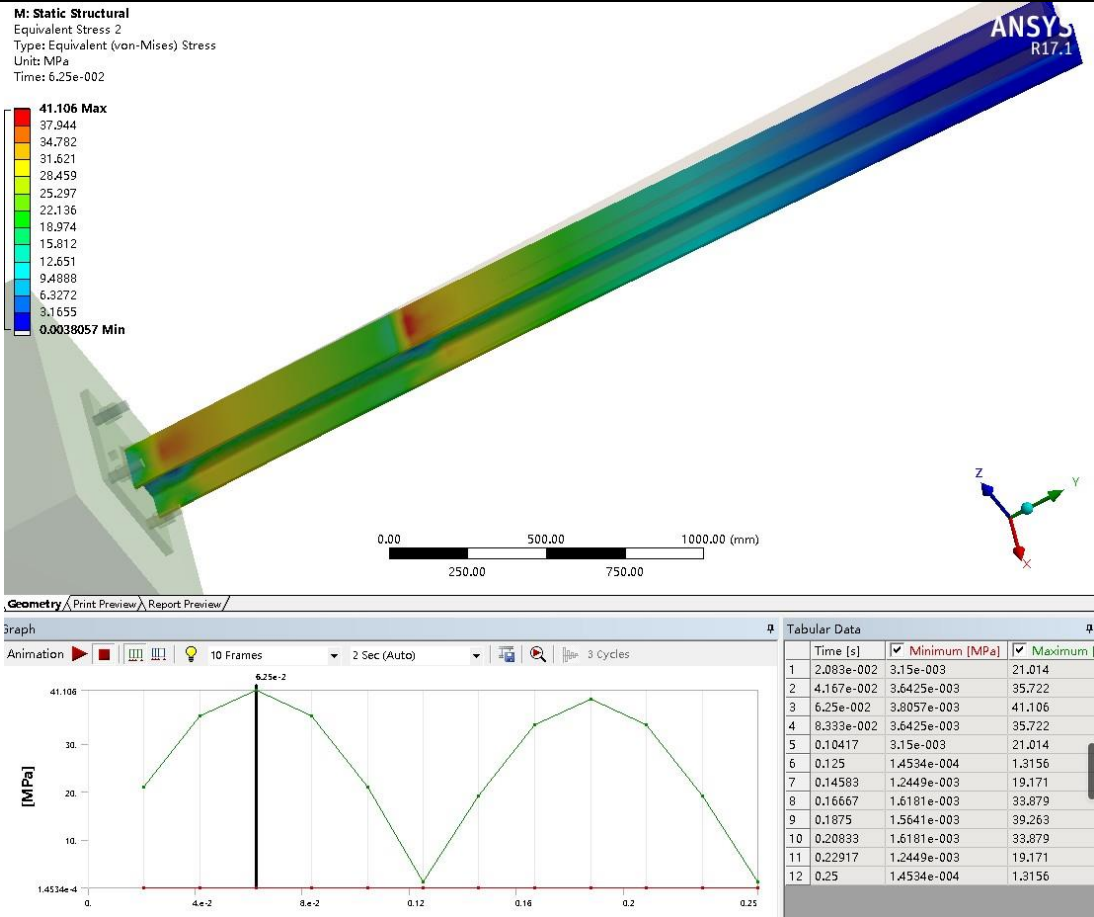


图 17 H 型钢在疲劳分析荷载下的应力分布图

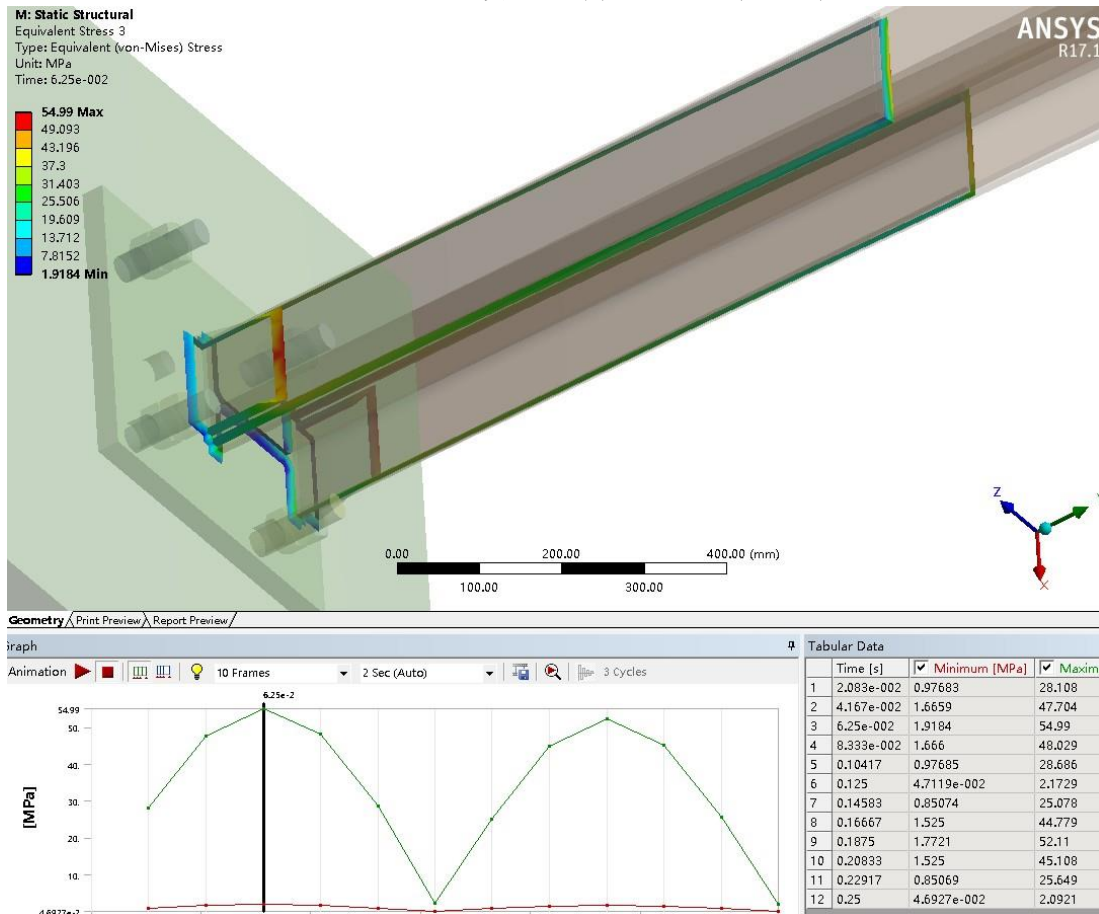


图 18 焊缝在疲劳分析荷载下的应力分布图

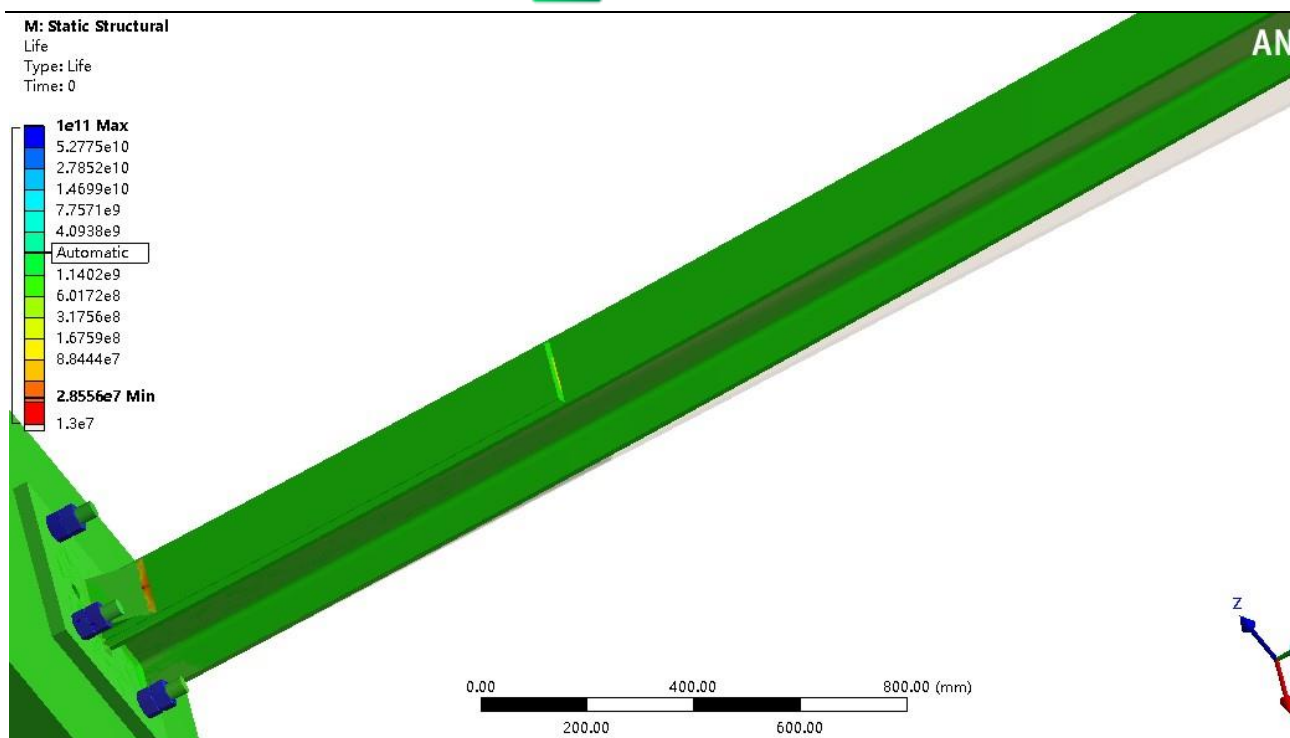


图 19 SPZ80 年钢立柱在疲劳分析荷载下的寿命分布图

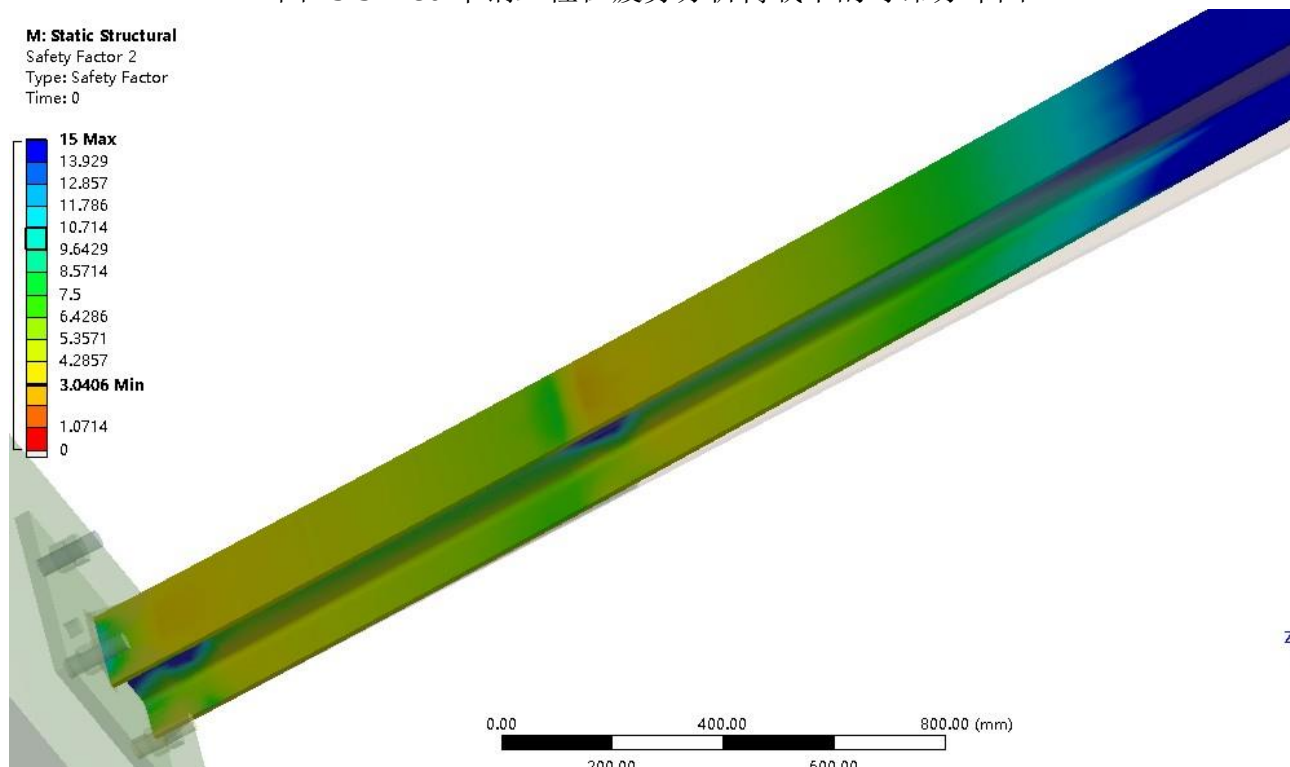


图 20 H 型钢在疲劳分析荷载下的安全系数图

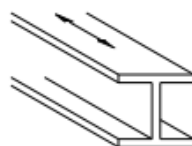
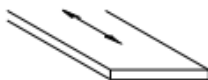
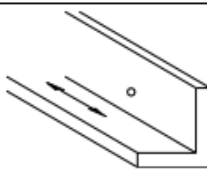
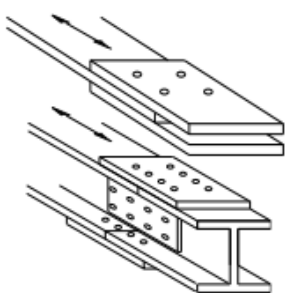
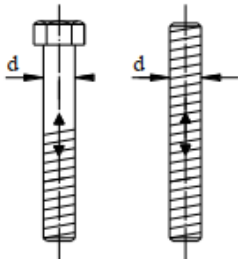
五、结论

本次分析采用非线性有限元分析软件 ANSYS 结合 1.2 节中的各项标准规范，建立三维有限元分析模型，对 SPZ80 年钢立柱的强度及疲劳性能进行了数字模拟。依据模拟并通过 4.4 节对设计指标进行了详细分析，最终得出中驰公司设计研发的 SPZ80 年钢立柱产品满足 80 年的疲劳寿命要求。

附录 K 疲劳计算的构件和连接分类

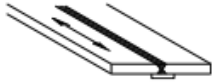
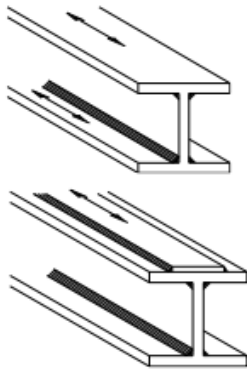
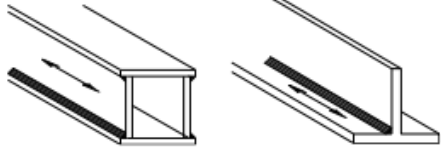
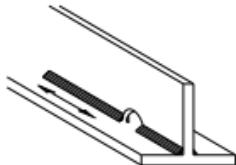
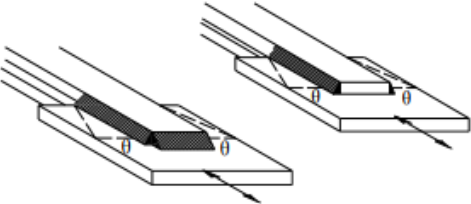
K.0.1 非焊接的构件和连接分类应符合表 K.0.1 的规定。

表 K.0.1 非焊接的构件和连接分类

项次	构造细节	说明	类别
1		无连接处的母材 轧制型钢	Z1
2		无连接处的母材 钢板 (1) 两边为轧制边或刨边 (2) 两侧为自动、半自动切割边(切割质量标准应符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205)	Z1 Z2
3		连系螺栓和虚孔处的母材 应力以净截面面积计算	Z4
4		- 螺栓连接处的母材 高强度螺栓摩擦型连接应力以毛截面面积计算；其他螺栓连接应力以净截面面积计算 - 铆钉连接处的母材 连接应力以净截面面积计算	Z2 Z4
5		受拉螺栓的螺纹处母材 连接板件应有足够的刚度，保证不产生撬力。否则受拉正应力应考虑撬力及其他因素产生的全部附加应力 对于直径大于 30mm 螺栓，需要考虑尺寸效应 应对容许应力幅进行修正，修正系数 γ_t ： $\gamma_t = \left(\frac{30}{d} \right)^{0.25}$ d—螺栓直径，单位为 mm	Z11

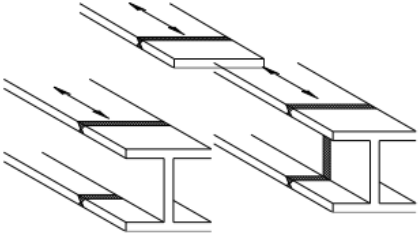
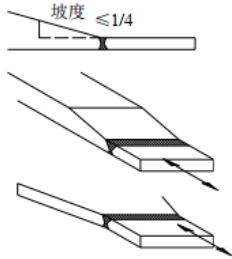
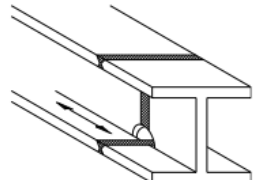
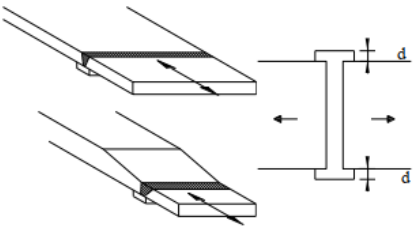
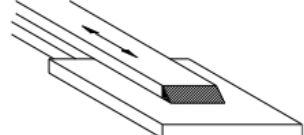
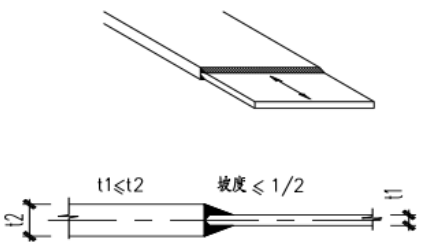
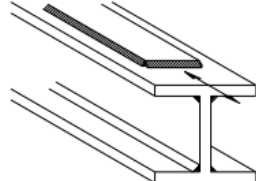
注：箭头表示计算应力幅的位置和方向。

K.0.2 纵向传力焊缝的构件和连接分类应符合表 K.0.2 的规定。
表 K.0.2 纵向传力焊缝的构件和连接分类

项次	构造细节	说明	类别
6		●无垫板的纵向对接焊缝附近的母材 焊缝符合二级焊缝标准	Z2
7		●有连续垫板的纵向自动对接焊缝附近的母材 (1) 无起弧、灭弧 (2) 有起弧、灭弧	Z4 Z5
8		●翼缘连接焊缝附近的母材 翼缘板与腹板的连接焊缝 自动焊，二级 T 形对接与角接组合焊缝 自动焊，角焊缝，外观质量标准符合二级 手工焊，角焊缝，外观质量标准符合二级 双层翼缘板之间的连接焊缝 自动焊，角焊缝，外观质量标准符合二级 手工焊，角焊缝，外观质量标准符合二级	Z2 Z4 Z5 Z4 Z5
9		●仅单侧施焊的手工或自动对接焊缝附近的母材，焊缝符合二级焊缝标准，翼缘与腹板很好贴合	Z5
10		●开工艺孔处焊缝符合二级焊缝标准的对接焊缝、焊缝外观质量符合二级焊缝标准的角焊缝等附近的母材，	Z8
11		●节点板搭接的两侧面角焊缝端部的母材 ●节点板搭接的三面围焊时两侧角焊缝端部的母材 ●三面围焊或两侧面角焊缝的节点板母材 (节点板计算宽度按应力扩散角 θ 等于 30° 考虑)	Z10 Z8 Z8

注：箭头表示计算应力幅的位置和方向。

表 K.0.3 横向传力焊缝的构件和连接分类

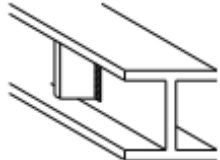
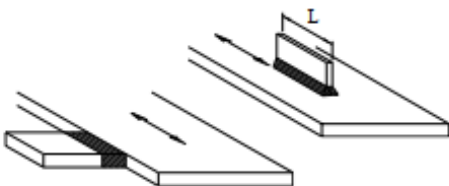
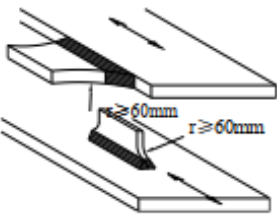
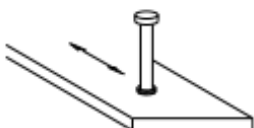
项次	构造细节	说明	类别
12		●横向对接焊缝附近的母材，轧制梁对接焊缝附近的母材 符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205 的一级焊缝，且经加工、磨平 符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205 的一级焊缝	Z2 Z4
13		●不同厚度(或宽度)横向对接焊缝附近的母材 符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205 的一级焊缝，且经加工、磨平 符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205 的一级焊缝	Z2 Z4
14		●有工艺孔的轧制梁对接焊缝附近的母材，焊缝加工成平滑过渡并符合一级焊缝标准	Z6
15		●带垫板的横向对接焊缝附近的母材 垫板端部超出母板距离 d $d \geq 10\text{mm}$ $d < 10\text{mm}$	Z8 Z11
16		●节点板搭接的端面角焊缝的母材	Z7
17		●不同厚度直接横向对接焊缝附近的母材，焊缝等级为一级，无偏心	Z8
18		●翼缘盖板中断处的母材(板端有横向端焊缝)	Z8

19		●十字型连接、T型连接 (1) K形坡口、T形对接与角接组合焊缝处的母材，十字型连接两侧轴线偏离距离小于$0.15t$，焊缝为二级，焊趾角$\alpha \leq 45^\circ$ (2) 角焊缝处的母材，十字型连接两侧轴线偏离距离小于$0.15t$	Z6 Z8
20		●法兰焊缝连接附近的母材 (1) 采用对接焊缝，焊缝为一级 (2) 采用角焊缝	Z8 Z13

注：箭头表示计算应力幅的位置和方向。

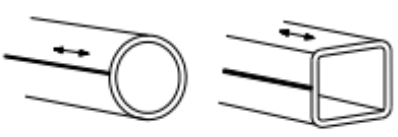
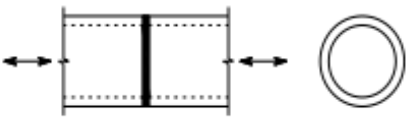
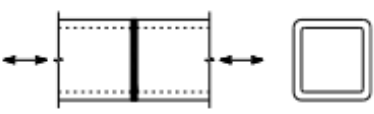
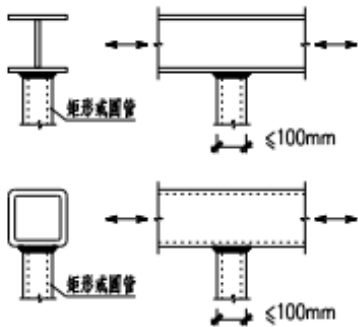
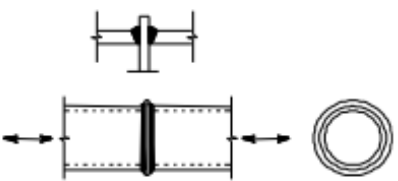
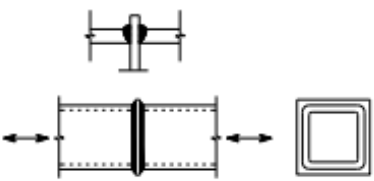
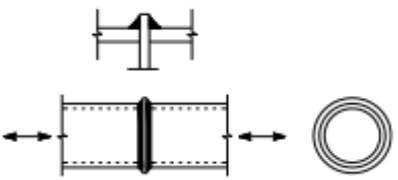
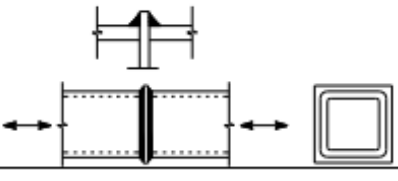
K.0.4 非传力焊缝的构件和连接分类应符合表 K.0.4 的规定。

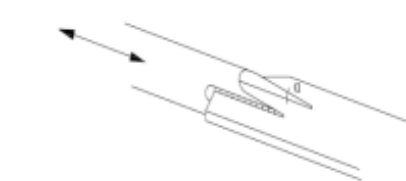
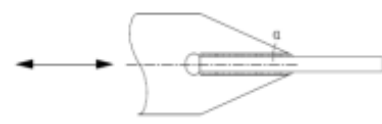
表 K.0.4 非传力焊缝的构件和连接分类

项次	构造细节	说明	类别
21		● 横向加劲肋端部附近的母材 - 肋端焊缝不断弧(采用回焊) - 肋端焊缝断弧	Z5 Z6
22		● 横向焊接附件附近的母材 (1) $t \leq 50\text{mm}$ (2) $50\text{mm} < t \leq 80\text{mm}$ t 为焊接附件的板厚	Z7 Z8
23		● 矩形节点板焊接于构件翼缘或腹板处的母材 (节点板焊缝方向的长度 $L > 150\text{mm}$)	Z8
24		● 带圆弧的梯形节点板用对接焊缝焊于梁翼缘、腹板以及桁架构件处的母材，圆弧过渡处在焊后铲平、磨光、圆滑过渡，不得有焊接起弧、灭弧缺陷	Z6
25		● 焊接剪力栓钉附近的钢板母材	Z7

注：箭头表示计算应力幅的位置和方向。

表 K.0.5 钢管截面的构件和连接分类

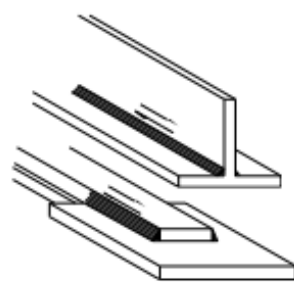
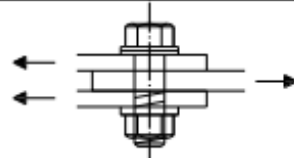
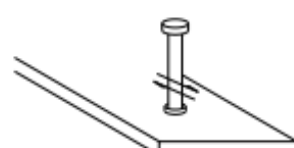
项次	构造细节	说明	类别
26		●钢管纵向自动焊缝的母材 (1)无焊接起弧、灭弧点 (2)有焊接起弧、灭弧点	Z3 Z6
27		●圆管端部对接焊缝附近的母材，焊缝平滑过渡并符合现行国家标准《钢结构工程施工质量验收规范》GB 50205 的一级焊缝标准，余高不大于焊缝宽度的 10%。 (1) 圆管壁厚 $8\text{mm} < t \leq 12.5\text{mm}$ (2) 圆管壁厚 $t \leq 8\text{mm}$	Z6 Z8
28		●矩形管端部对接焊缝附近的母材，焊缝平滑过渡并符合一级焊缝标准，余高不大于焊缝宽度的 10%。 (1) 方管壁厚 $8\text{mm} < t \leq 12.5\text{mm}$ (2) 方管壁厚 $t \leq 8\text{mm}$	Z8 Z10
29		●焊有矩形管或圆管的构件，连接角焊缝附近的母材，角焊缝为非承载焊缝，其外观质量标准符合二级，矩形管宽度或圆管直径不大于 100mm	Z8
30		●通过端板采用对接焊缝拼接的圆管母材，焊缝符合一级质量标准 (1) 圆管壁厚 $8\text{mm} < t \leq 12.5\text{mm}$ (2) 圆管壁厚 $t \leq 8\text{mm}$	Z10 Z11
31		●通过端板采用对接焊缝拼接的矩形管母材，焊缝符合一级质量标准 (1) 方管壁厚 $8\text{mm} < t \leq 12.5\text{mm}$ (2) 方管壁厚 $t \leq 8\text{mm}$	Z11 Z12
32		●通过端板采用角焊缝拼接的圆管母材，焊缝外观质量标准符合二级，管壁厚度 $t \leq 8\text{mm}$	Z13
33		●通过端板采用角焊缝拼接的矩形管母材，焊缝外观质量标准符合二级，管壁厚度 $t \leq 8\text{mm}$	Z14

34		● 钢管端部压扁与钢板对接焊缝连接（仅适用于直径小于 200mm 的钢管），计算时采用钢管的应力幅	Z8
35	 	● 钢管端部开设槽口与钢板角焊缝连接，槽口端部为圆弧，计算时采用钢管的应力幅 (1) 倾斜角 $\alpha \leq 45^\circ$ (2) 倾斜角 $\alpha > 45^\circ$	Z8 Z9

注：箭头表示计算应力幅的位置和方向。

K.0.6 剪应力作用下的构件和连接分类应符合表 K.0.6 的规定。

表 K.0.6 剪应力作用下的构件和连接分类

项次	构造细节	说明	类别
36		● 各类受剪角焊缝 剪应力按有效截面计算	J1
37		● 受剪力的普通螺栓 采用螺杆截面的剪应力	J2
38		● 焊接剪力栓钉 采用栓钉名义截面的剪应力	J3

注：箭头表示计算应力幅的位置和方向。