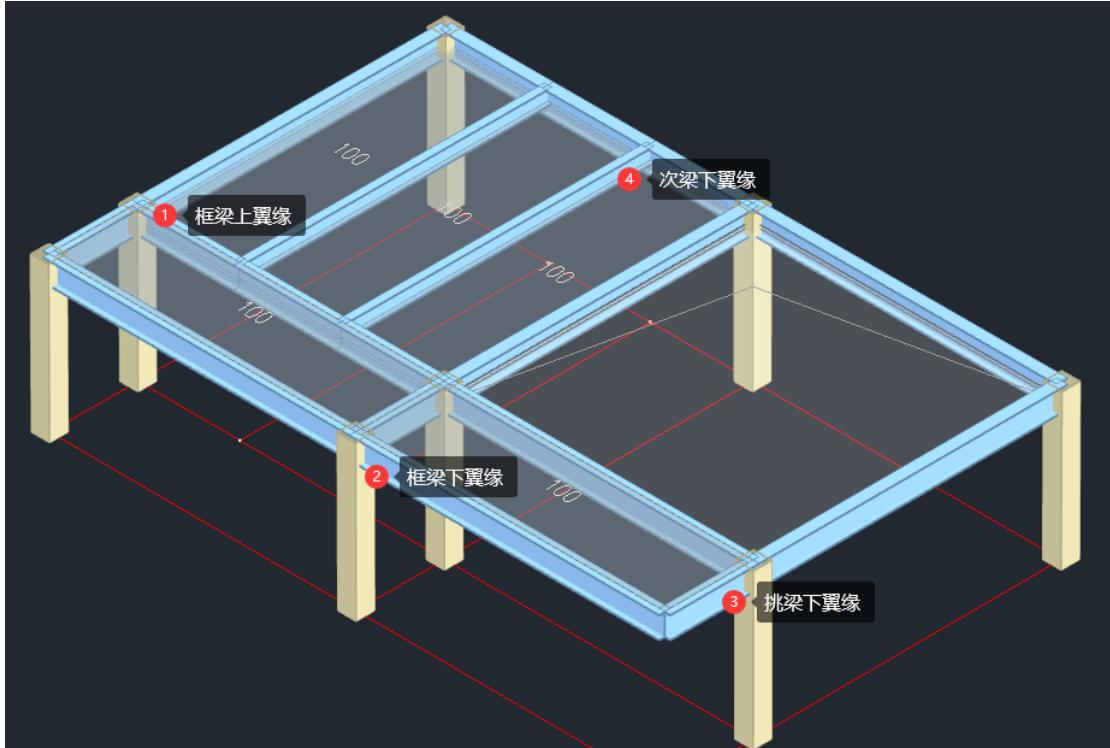


也谈钢梁下翼缘稳定验算

张月月

开篇以一个问题引出今天的话题：图一中钢梁可能发生畸变屈曲的是？



图一

- (A)框梁①梁端上翼缘
- (B)框梁②梁端下翼缘
- (C)挑梁③梁端下翼缘
- (D)次梁④梁端下翼缘

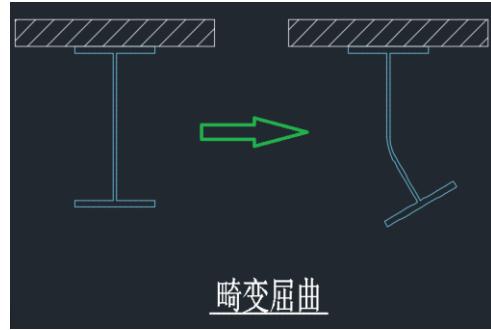
要解答该问题我们首先需要了解什么是畸变屈曲？

什么是畸变屈曲

畸变屈曲是钢框架梁在受力过程中负弯矩区可能发生的一种失稳现象，它不同于梁的整体屈曲和局部屈曲。

梁的整体屈曲是指梁受压翼缘沿梁平面外屈曲带动梁产生整体弯扭失稳，此时翼缘与腹板交线的夹角不变；局部屈曲为板的局部面外屈曲，限制板件宽厚比可以防止这种屈曲。

而当钢梁上有混凝土楼板时，楼板起侧向支撑和提供扭转约束的作用，在负弯矩区，下翼缘受压而上翼缘受拉，上翼缘由于楼板的约束无法发生整个截面的扭转变形，可由于钢梁截面通常较高且腹板较薄，容易发生弯曲变形，即使上翼缘无法转动，整个下翼缘也可能因腹板弯曲而发生以腹板为弹性支座的侧向弯曲和扭转变形，这就是畸变屈曲，如图二示意。在这种情况下，下翼缘与腹板交线的夹角可能变化。



图二

畸变屈曲与稳定性验算

畸变屈曲通常发生在框架梁端部，特别是当负弯矩作用下，下翼缘受压而上翼缘受拉时。此外，如果上翼缘有混凝土楼板，楼板起侧向支撑和提供扭转约束的作用，也会增加下翼缘畸变屈曲的风险。

《钢结构设计标准》GB 50017-2017（下文简称《钢标》）第 6.2.7 条提出框架梁下翼缘的稳定性应进行简单计算以防止负弯矩区的畸变屈曲。这是与旧规范相比新增的内容，为评判梁下翼缘稳定性提供了依据。

6.2.7 支座承担负弯矩且梁顶有混凝土楼板时，框架梁下翼缘的稳定性计算应符合下列规定：

1 当 $\lambda_{n,b} \leq 0.45$ 时，可不计算框架梁下翼缘的稳定性。

2 当不满足本条第1款时，框架梁下翼缘的稳定性应按下列公式计算：

$$\frac{M_x}{\varphi_d W_{1x} f} \leq 1.0 \quad (6.2.7-1)$$

$$\lambda_e = \pi \lambda_{n,b} \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (6.2.7-2)$$

$$\lambda_{n,b} = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} \quad (6.2.7-3)$$

$$\sigma_{cr} = \frac{3.46 b_1 t_1^3 + h_w t_w^3 (7.27 \gamma + 3.3) \varphi_1}{h_w^2 (12 b_1 t_1 + 1.78 h_w t_w)} E \quad (6.2.7-4)$$

$$\gamma = \frac{b_1}{t_w} \sqrt{\frac{b_1 t_1}{h_w t_w}} \quad (6.2.7-5)$$

$$\varphi_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{5.436 \gamma h_w^2}{l^2} + \frac{l^2}{5.436 \gamma h_w^2} \right) \quad (6.2.7-6)$$

式中： b_1 ——受压翼缘的宽度(mm)；

t_1 ——受压翼缘的厚度(mm)；

W_{1x} ——弯矩作用平面内对受压最大纤维的毛截面模量(mm^3)；

φ_d ——稳定系数，根据换算长细比 λ_e 按本标准附录D表D.0.2采用；

$\lambda_{n,b}$ ——正则化长细比；

σ_{cr} ——畸变屈曲临界应力(N/mm^2)；

l ——当框架主梁支承次梁且次梁高度不小于主梁高度一半时，取次梁到框架柱的净距；除此情况外，取梁净距的一半(mm)。

3 当不满足本条第1款、第2款时，在侧向未受约束的受压翼缘区内，应设置隅撑或沿梁长设间距不大于2倍梁高并与梁等宽的横向加劲肋。

图三

《钢标》第 6.2.7 条明确：支座承担负弯矩且梁顶有混凝土楼板时，框架梁下翼缘的稳定性计算应符合以下规定：

- 当正则化长细比小于等于 0.45 时，可不计算框架梁下翼缘的稳定性。
- 当正则化长细比大于 0.45 时，应按照规定的稳定应力计算公式验算下翼缘的稳定性。
- 当框架梁的下翼缘稳定性计算不满足上述两款要求时，在侧向未受约束的受压翼缘区段内，应设置隅撑或沿梁长设置间距不大于 2 倍梁高并与梁等宽的横向加劲肋。这是为了防止畸变屈曲的发生。

下翼缘稳定性验算公式和过程

《钢标》第 6.2.7 条同时提供了验算下翼缘稳定性的公式，包括正则化长细比和畸变屈曲临界应力的计算。

1. 正则化长细比 $\lambda_{n,b}$ 和畸变屈曲临界应力计算与下翼缘宽度和厚度、腹板高度和厚度及侧向支承间距相关。

$$\begin{aligned}\lambda_{n,b} &= \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} \\ \sigma_{cr} &= \frac{3.46b_1t_1^3 + h_w t_w^3 (7.27\gamma + 3.3)\varphi_1}{h_w^2(12b_1t_1 + 1.78h_w t_w)} E \\ \gamma &= \frac{b_1}{t_w} \sqrt{\frac{b_1 t_1}{h_w t_w}} \\ \varphi_1 &= \frac{1}{2} \left(\frac{5.436\gamma h_w^2}{l^2} + \frac{l^2}{5.436\gamma h_w^2} \right)\end{aligned}$$

图四

2. 当正则化长细比 $\lambda_{n,b} > 0.45$ 时，应根据换算长细比 λ_e 查附录 D 表 D.0.2 得到稳定系数 ϕ_d ，再按照下列稳定应力比公式验算下翼缘的稳定性：

$$\frac{M_x}{\phi_d W_{1x} f} \leq 1.0$$

图五

其中， M_x 是梁端弯矩设计值， W_{1x} 是弯矩作用平面内对受压最大纤维的毛截面模量。当上述公式满足时，判断下翼缘稳定性满足要求，若不满足时，则需要设置加劲肋，为下翼缘提供更加刚强的约束，并带动楼板对框架梁提供扭转约束。设置加劲肋后，刚度很大，一般不再需要计算整体稳定和畸变屈曲。

问题分析与解答

回到前面提出的问题，我们通过前文对畸变屈曲概念、重要性及规范条文和公式的解读，已经可以了解到，容易发生畸变失稳的位置是在框架梁负弯矩区的下翼缘且梁顶有楼板。那么，首先可以确定的是选项(B)，并排除选项(A)。对选项(C)，悬挑梁的非悬挑端也是负弯矩区且梁顶有混凝土楼板，实际也会有下翼缘畸变屈曲的风险。至于选项(D)的非框架梁，如果

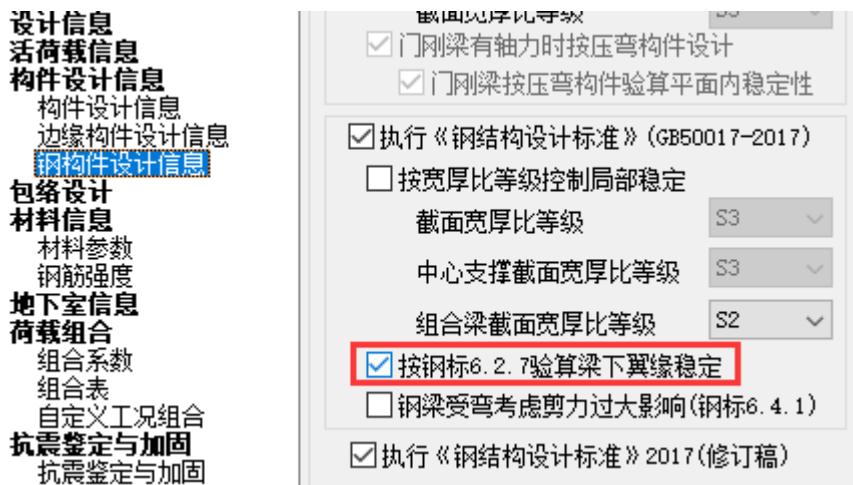
是两端铰接的梁，没有负弯矩区，可以不考虑畸变屈曲，但若是梁端刚接时，也存在畸变屈曲的问题。

YJK 软件中下翼缘稳定性验算的处理和操作

YJK 软件提供了按照《钢标》第 6.2.7 条进行钢梁畸变失稳验算的功能，具体的操作流程如下：

1. 设置验算对象

首先，程序在前处理——计算参数提供选项【按钢标 6.2.7 验算梁下翼缘稳定】，默认勾选。



图六

勾选后，程序自动对所有钢梁打上“验算下翼缘稳定”的灰白色标记，表示将会按照《钢标》第 6.2.7 条进行钢梁畸变失稳验算，可在前处理——特殊梁定义，进行查看，见图七。如果确定某些钢梁不需要进行下翼缘稳定性验算，也支持在这里取消定义，即执行【下翼缘稳定】命令，然后单选或框选不需要验算的梁，灰白色标记消失就代表取消成功。



图七

2. 确定验算对象并输出验算结果

在构件设计阶段，程序首先会对所有钢梁进行正则化长细比计算，正则化长细比计算可在程序设计结果——计算书中用构件详细功能进行查看，如图八所示。



3. 正则化长细比验算

$$b_1 = 200.00, t_1 = 13.00, h_w = 374.00, t_w = 8.00$$

$$\gamma = \frac{b_1}{t_w} \sqrt{\frac{b_1 t_1}{h_w t_w}} = \frac{200.00}{8.00} \times \sqrt{\frac{200.00 \times 13.00}{374.00 \times 8.00}} = 23.30$$

$$\varphi_1 = \left(\frac{5.436 h_w^2}{l^2} + \frac{l^2}{5.436 h_w^2} \right) / 2 = \left(\frac{5.436 \times 23.30 \times 374.00^2}{4050.00^2} + \frac{4050.00^2}{5.436 \times 23.30 \times 374.00^2} \right) / 2 = 1.00$$

$$\sigma_{cr} = \frac{3.46 b_1 t_1^3 + h_w t_w^3 (7.27 \gamma + 3.3) \times \varphi_1}{h_w^2 (12 b_1 t_1 + 1.78 h_w t_w)} E$$

$$= \frac{3.46 \times 200.00 \times 13.00^3 + 374.00 \times 8.00^3 \times (7.27 \times 23.30 + 3.3) \times 1.00}{374.00^2 \times (12 \times 200.00 \times 13.00 + 1.78 \times 374.00 \times 8.00)} \times 206000.00 = 1398.88$$

$$\lambda_{n,b} = \sqrt{f_y/\sigma_{cr}} = \sqrt{355.00/1398.88} = 0.50$$

图八

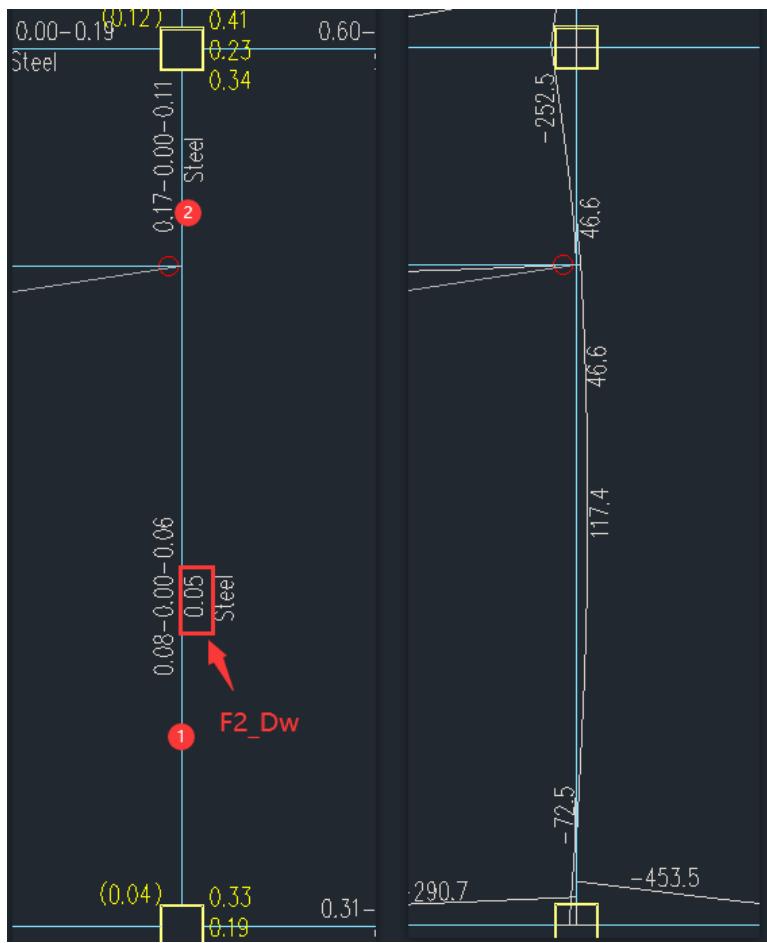
然后按《钢标》第 6.2.7 条要求对梁端负弯矩和梁顶楼板进行判断：

- 1) 对梁端有负弯矩且梁两侧或单侧房间有楼板并板厚大于 10mm 的梁，会在构件信息中输出正则化长细比计算结果。当判断正则化长细比 $\lambda_{n,b} > 0.45$ 时，进行下翼缘稳定性验算，并输出验算结果，同时进行图形结果的显示，见图九、十中 1 号梁；当判断正则化长细比 $\lambda_{n,b} \leq 0.45$ 时，不进行下翼缘稳定性验算，见图九、十中 2 号梁。

PS：构件信息中以 F2_Dw 区分钢梁整体稳定性验算输出标记，同时将钢梁下翼缘稳定性验算结果单独输出到配筋简图钢梁线下方是从 4.0 版本开始的。之前版本程序对于钢梁整体稳定和下翼缘稳定均以 F2 输出。

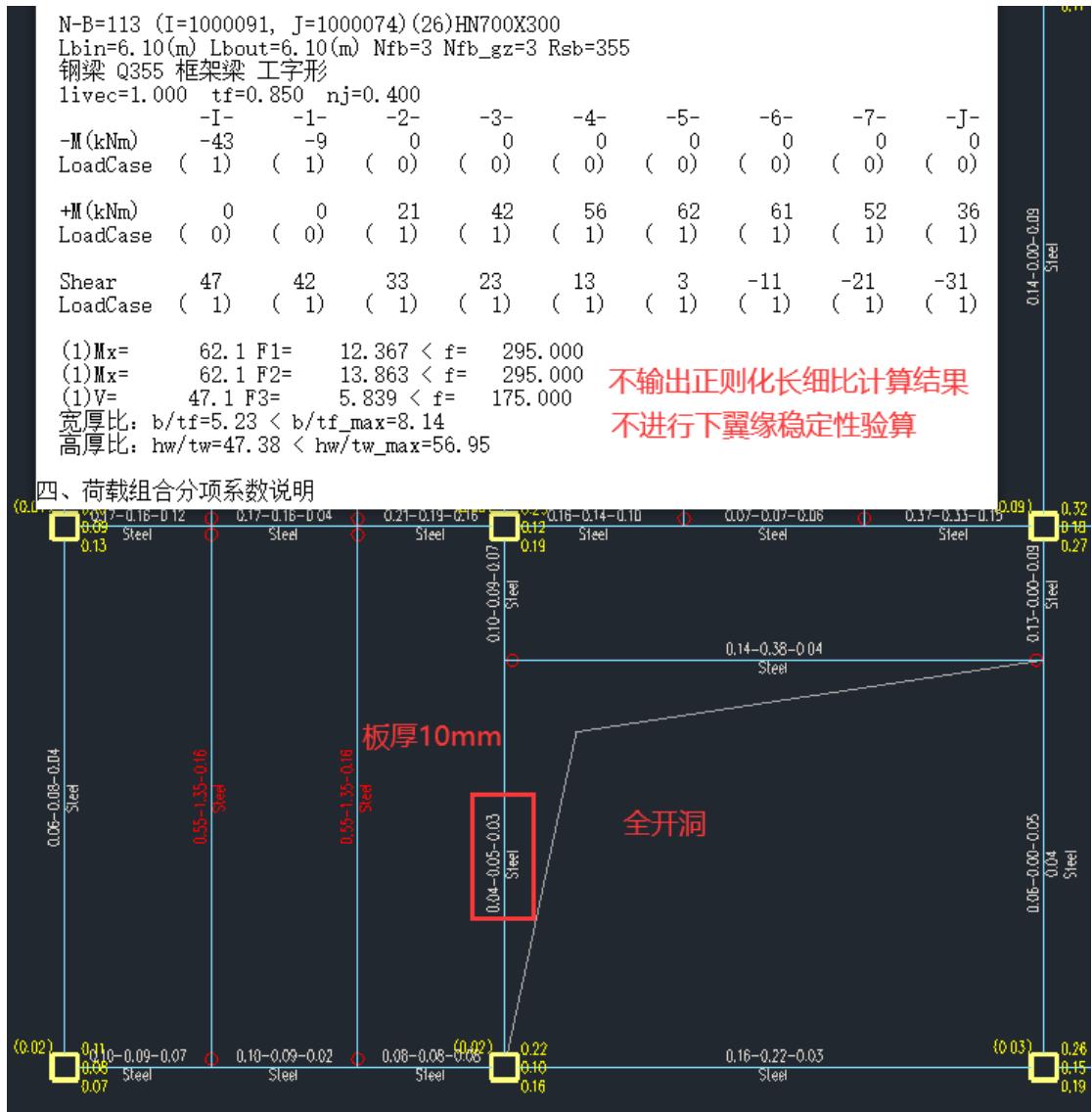
N-B=4 (I=1000022, J=1000001) (26) HN700X300 ① Lb1n=6.10(m) Lbput=6.10(m) Nfb=3 Nfb_gz=3 Rsb=355 钢管 Q355 框架梁 工字形 Livec=1.000 tf=0.850 nj=0.400 -M (kNm) -73 -13 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 LoadCase (1) (0) (0) (0) (0) (0) (0) (0) (0) +M (kNm) 0 0 43 84 109 117 110 86 47 LoadCase (0) (0) (1) (1) (1) (1) (1) (1) Shear 82 76 63 44 22 -4 -25 -47 -68 LoadCase (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1)	N-B=35 (I=1000001, J=1000023) (26) HN700X300 ② Lb1n=2.00(m) Lbput=2.00(m) Nfb=3 Nfb_gz=3 Rsb=355 钢管 Q355 框架梁 工字形 Livec=1.000 tf=0.850 nj=0.400 -M (kNm) 0 -14 -39 -67 -100 -135 -174 -213 -252 LoadCase (0) (2) (1) (1) (1) (1) (1) +M (kNm) 47 17 0 0 0 0 0 0 LoadCase (1) (1) (0) (0) (0) (0) (0) Shear -116 -123 -130 -137 -144 -150 -155 -158 -159 LoadCase (1) (1) (1) (1) (1) (1) (1)
(1) Mx= 117.4 F1= 23.372 < f= 295.000 (1) Mx= -72.5 F2_Dw= 15.069 < f= 295.000 (1) V= 81.7 F3= 10.136 < f= 175.000 宽度比, b/t=5.23 < b/tf_max=8.14 厚度比, hw/tw=47.38 < hw/tw_max=56.95 正则化长细比, λ_n,b=0.54 > 0.45	(1) Mx= -252.5 F1= 50.259 < f= 295.000 (1) V= -159.3 F3= 19.751 < f= 175.000 宽度比, b/t=5.23 < b/tf_max=8.14 厚度比, hw/tw=47.38 < hw/tw_max=56.95 正则化长细比, λ_n,b=0.21 < 0.45

图九



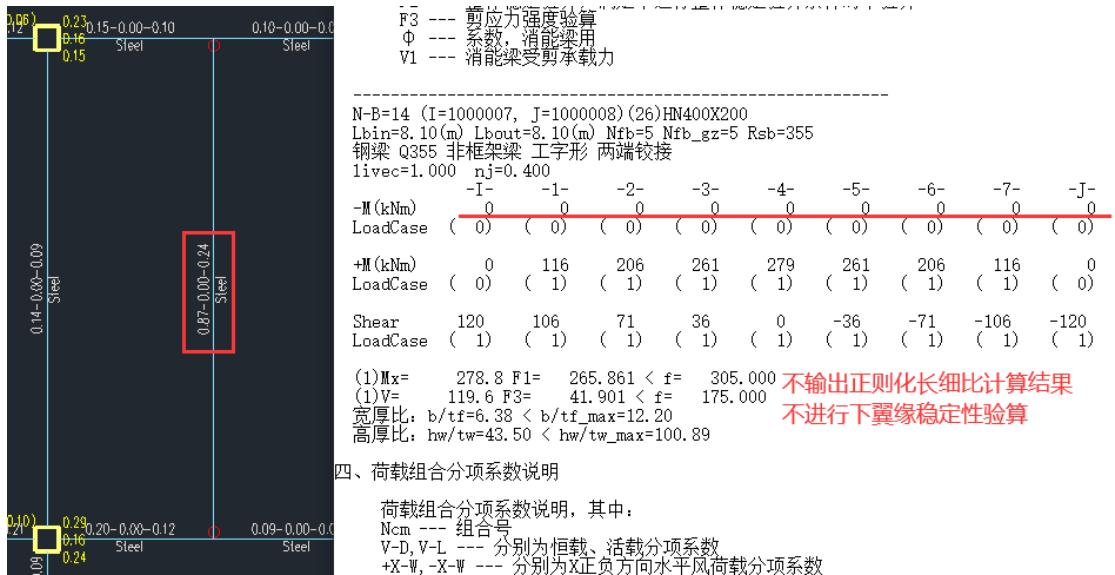
图十

- 2) 对两侧房间板厚 $\leqslant 10\text{mm}$ 或全开洞的梁，在构件信息和图形显示中不输出正则化长细比计算结果，当然也不进行下翼缘稳定性验算，见图十一。



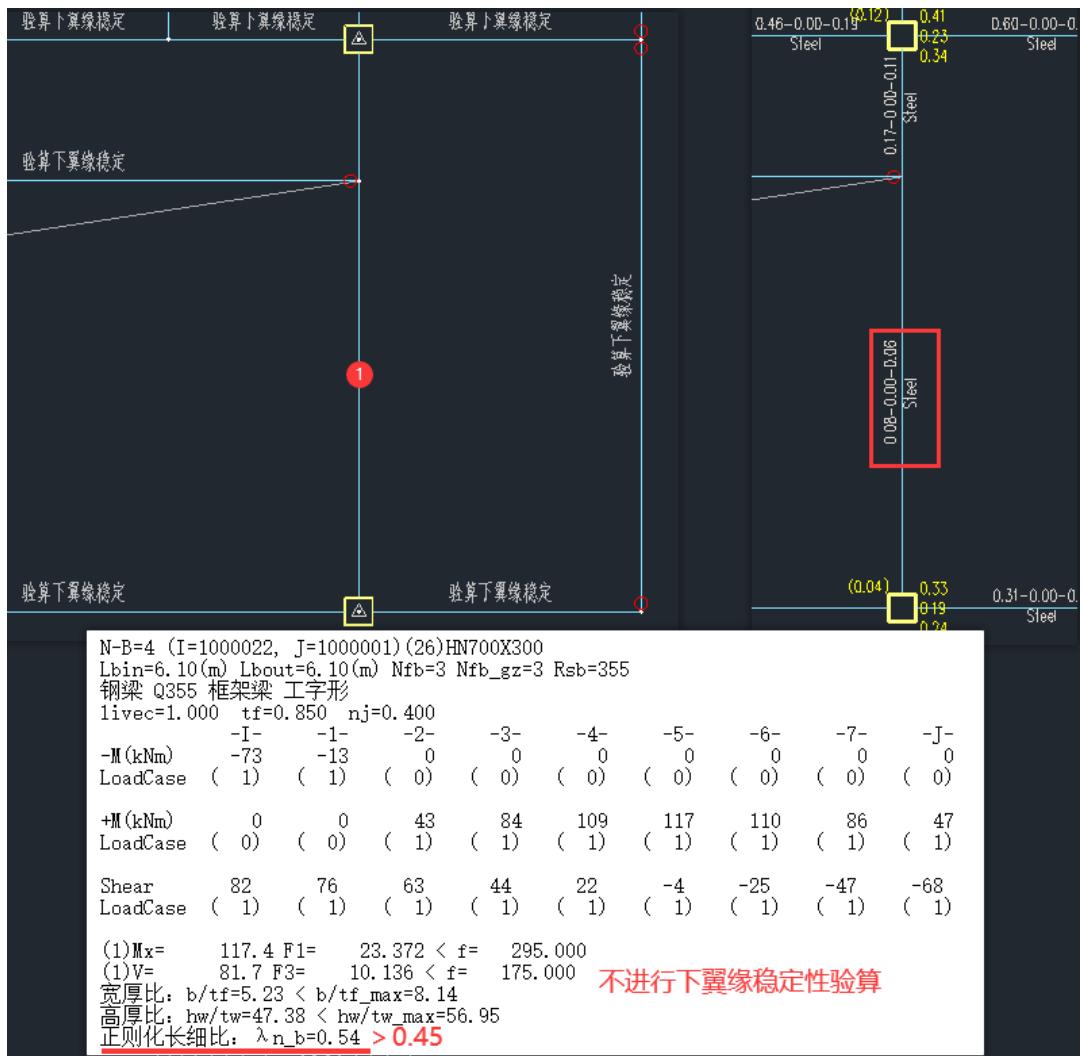
图十一

- 3) 对梁端没有负弯矩的梁，在构件信息和图形显示中同样不输出正则化长细比计算结果，也不进行下翼缘稳定性验算，见图十二。



图十二

- 4) 对前处理——特殊梁定义取消【下翼缘稳定】属性的梁, 即便梁端有负弯矩且梁顶板厚大于10mm, 程序在构件信息中输出框架梁正则化长细比, 而不进行框架梁下翼缘稳定性验算。



图十三

几点说明：

- 1) 《钢标》第 6.2.7 条条文说明提到：正则化长细比 $\lambda_{n,b} \leq 0.45$ 时，截面尺寸刚好能满足公式 (6.2.7-1) 的稳定应力比验算，但是对于抗震设计，要求应更加严格。至于如何严格？限值是否还按 0.45？规范并没有明确，因此程序目前对非抗震组合和抗震组合仍然按限值 0.45 控制。如果您有相关意见或建议，可以反馈我们。
- 2) 为保证框架结构抗震性能，《钢标》第 17.3.4 条给出了“工字形梁受弯正则化长细比 $\lambda_{n,b}$ 限值”，见图十四。对设置了按《钢标》进行性能设计的工程，程序仍按公式 (6.2.7-3) 计算正则化长细比 $\lambda_{n,b}$ ，限值执行表 17.3.4-2 的要求，并对超过限值的构件在构件信息中给出提示，如图十五所示。

表17.3.4-2 工字形梁受弯正则化长细比 $\lambda_{n,b}$ 限值

结构构件延性等级	I 级、II 级	III 级	IV 级	V 级
上翼缘有楼板	0.25	0.40	0.55	0.80

注：受弯正则化长细比 $\lambda_{n,b}$ 应按本标准式(6.2.7-3)计算。

图十四

性能设计（《钢结构设计标准》（GB50017-2017））

性能等级	4	延性等级	III
耗能构件抗弯刚度EI折减系数	1		
耗能构件轴向刚度EA折减系数	1		
耗能构件性能系数	0.55		
非耗能构件内力调整系数 β_e	1.32		

N-B=5 (I=1000019, J=1000002) (26)HN700X300
Lbin=6.10(m) Lbout=6.10(m) Nfb=3 Nfb_gz=3 Rsb=355
钢梁 Q355 框架梁 工字形 宽厚比等级S3 耗能构件 延性等级3
liven=1.000 tf=0.850 nj=0.400
Ω_min=0.550 β_e=1.000

LoadCase	-I-	-1-	-2-	-3-	-4-	-5-	-6-	-7-	-J-
-M(kNm)	-110	-64	-28	-0	0	0	0	2	-35
N(kN)	0	0	0	0	0	0	0	25	25
LoadCase	(6)	(6)	(6)	(6)	(0)	(0)	(0)	(5)	(5)

LoadCase	+M(kNm)	40	56	72	80	87	89	77	51	21
+N(kN)	27	27	24	22	0	0	0	0	0	0
LoadCase	(5)	(5)	(5)	(5)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(6)

LoadCase	Shear	62	58	47	33	25	-21	-35	-48	-56
LoadCase	(6)	(6)	(6)	(6)	(6)	(5)	(5)	(5)	(5)	(5)

(6) Mx= -110.1 F1= 21.926 < 1/γ_re*f= 345.000
(6) Mx= -110.1 F2_Dw= 22.890 < 1/γ_re*f= 345.000
(6) V= 61.7 F3= 7.284 < 1/γ_re*f= 87.500
宽厚比: b/tf=5.23 < b/tf_max=10.58
高厚比: hw/tw=47.38 < hw/tw_max=75.67
**正则化长细比超限: λ_n b=0.54 > λ_n bmax=0.40 《钢标》17.3.4-2
性能系数: Ω=15.49 > Ω_min=0.55

图十五

限于篇幅的关系，今天的内容就到此为止了，关于下翼缘稳定性验算的常见问题、保证下翼缘稳定性的措施探讨及正则化长细比相关算例，我们会在后面的文章中持续更新，敬请关注。