

文章编号: 1674-599X(2021)03-0085-06

# 上翼缘作用均布荷载的钢梁整体稳定研究

陈雪雪<sup>1, 2</sup>, 潘文<sup>1, 2</sup>, 孙玥<sup>3</sup>

(1.昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650500; 2.云南省抗震工程技术研究中心, 云南 昆明 650500;  
3.云南民族大学 电气信息工程学院, 云南 昆明 650031)

**摘 要:**为研究悬臂梁构件的整体稳定性, 确定悬臂梁不需要进行整体稳定计算的临界条件, 考虑了无支撑约束和上翼缘与刚性铺板相连2种情况, 采用ABAQUS有限元分析软件对上翼缘在均布荷载作用下的双轴对称工字形截面悬臂梁进行整体稳定承载力计算。研究结果表明: 上翼缘与刚性铺板相连的悬臂梁整体稳定承载力约为不设支撑时的2倍, 并得到悬臂梁不需要进行整体稳定计算的临界扭转参数  $K_{cr}$ 。

**关键词:** 工字形截面; 悬臂梁; 均布荷载; 临界扭转参数

中图分类号: TU391

文献标志码: A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.03.013

## The overall stability study of steel beam with uniformly distributed load on the upper wing edge

CHEN Xue-xue<sup>1,2</sup>, PAN Wen<sup>1,2</sup>, SUN Yue<sup>3</sup>

(1.School of Construction Engineering, Kunming University of Science and Technology, Yunnan Kunming 650500, China;  
2.Engineering Structure Seismic Mitigation and Isolation Technique Engineering Research Center of Yunnan Province, Yunnan Kunming 650500, China;  
3. School of Electrical and Information Technology, Yunnan Minzu University, Yunnan Kunming 650031, China)

**Abstract:** In order to study the overall stability of the cantilever beam member, the critical condition for cantilever beam without global stability calculation was analyzed. Two cases of the unsupport constraint and the upper flange connection with the rigid pavement were considered, the ABAQUS finite element analysis software was used to investigate the overall stability of double axisymmetric I-section cantilever beam subjected to under uniform load at the upper flange. The results show the overall stability bearing capacity of cantilever beam connected with rigid slab at the upper flange was about twice as large as that without support. The critical torsional parameter  $K_{cr}$  for cantilever beam without overall stability calculation was then calculated.

**Key words:** I-section; cantilever beam; uniformly distributed load; critical torsion parameter

钢梁的破坏大多因失稳造成, 而失稳过程的发生往往很突然, 且造成巨大损失。工字形截面构件平面外刚度较差, 如果没有足够的侧向约束, 当荷载较大时容易发生平面外失稳破坏<sup>[1]</sup>。工字形截面悬臂钢梁通常为阳台、雨棚等悬挑结构的主要受力构件, 负责把结构上的荷载传给支座, 因此, 保证悬臂梁的稳定是结构设计必须解决的问题。

国内外学者在20世纪就开始对工字形截面悬

臂梁的整体稳定进行研究。郭耀杰等人<sup>[2-3]</sup>对双轴对称工字形截面悬臂钢梁进行研究, 得到悬臂梁在不同荷载情况下整体稳定承载力的计算表达式。Oezdemir等人<sup>[4]</sup>研究不同载荷和边界条件对悬臂钢梁稳定性的影响。秦桦等人<sup>[5]</sup>对单轴对称工字形截面悬臂钢梁进行研究, 得到悬臂梁的整体稳定承载力表达式、等效弯矩系数和整体稳定系数。Anderson等人<sup>[6]</sup>对单轴对称和双轴对称的悬臂梁分别进行了理论和试验研究。刘卜精<sup>[7]</sup>对弯扭联合作

收稿日期: 2020-09-04

作者简介: 陈雪雪(1988—), 女, 昆明理工大学硕士生。

用的工字形截面悬臂梁进行分析,得出弯扭系数的表达式。何斌等人<sup>[8]</sup>对均布荷载和自由端集中力同时作用的双轴对称截面悬臂梁在有封口梁和无封口梁的两种情况进行分析,求出这两种情况下的临界荷载表达式和稳定系数表达式。刘迎春等人<sup>[9-10]</sup>对自由端作用集中力和设有扭转支撑的悬臂梁进行整体稳定分析,得出钢梁无量纲临界弯矩计算公式,并对集中力作用位置对悬臂梁承载力的影响进行分析。2018年实施的《钢结构设计标准》(GB50017-2017)只给出双轴对称工字形等截面悬臂梁的整体稳定系数计算方法,按公式(1)计算,对双轴对称截面 $\eta_b=0$ , $\beta_b$ 按标准的表格确定,当 $\varphi_b$ 大于0.6时,采用 $\varphi_b'$ 代替 $\varphi_b$ , $\varphi_b'$ 用式(2)计算。

$$\varphi_b=\beta_b\frac{4320}{\lambda_y^2}\cdot\frac{Ah}{W_x}\left[\sqrt{1+\left(\frac{\lambda_y t_1}{4.4h}\right)^2}+\eta_b\right]\varepsilon_k\quad(1)$$

$$\varphi_b'=1.07-\frac{0.282}{\varphi_b}\leqslant 1.0.\quad(2)$$

式中: $\varphi_b$ 、 $\varphi_b'$ 为弹性、弹塑性整体稳定系数; $\beta_b$ 为梁整体稳定的等效弯矩系数; $\lambda_y$ 为梁在侧向支撑点间对界面若昼y-y的长细比; $A$ 为梁毛截面面积, $\text{mm}^2$ ; $W_x$ 为抗弯截面系数, $\text{mm}^3$ ; $h$ 、 $t_1$ 为梁截面高度和受压翼缘厚度, $\text{mm}$ ; $l_1$ 为梁受压翼缘侧向支撑点之间的距离, $\text{mm}$ ; $i_y$ 为梁毛截面对y轴的回转半径, $\text{mm}$ ; $\eta_b$ 为截面不对称影响系数; $\varepsilon_k$ 为钢号修正系数。

悬臂钢梁的扭转参数 $K$ 在满足一定条件下,结构达到极限承载力时,不发生整体失稳,产生强

度破坏。当弹塑性稳定系数 $\varphi_b'\geqslant 0.95$ ,即弹性整体稳定系数 $\varphi_b\geqslant 2.5$ 时,梁的稳定承载力与梁的强度承载力相当,可只按强度、刚度和局部稳定来设计钢梁<sup>[11]</sup>。当不满足条件时,需要加设支撑来保证钢梁的整体稳定。作者拟考虑了上翼缘均布荷载作用下,在没有侧向支撑和上翼缘与刚性铺板相连2种情况时,通过分析得到 $\varphi_b$ 与 $K$ 的关系,进而根据 $\varphi_b\geqslant 2.5$ 得出悬臂梁不需要进行整体稳定计算的临界条件,并对比了这2种情况下悬臂梁的整体稳定性。

1 计算模型建立

为了对上翼缘作用均布荷载且无支撑的悬臂梁进行了分析,本研究建立了5种截面尺寸的有限元分析模型,每种截面尺寸制作了7种不同长度的构件。均布荷载作用在模型上翼缘。模型一为无支撑悬臂梁构件,模型二为上翼缘与刚性铺板相连悬臂梁构件。构件钢材选用Q235,扭转参数 $K$ 由式(3)进行计算。无支撑悬臂梁构件尺寸参数见表1。表1中H200、H300、H400、H500、H600为工字形截面高度 $h\times$ 宽度 $b\times$ 翼缘厚度 $t_w\times$ 翼缘高度 $t_f$ ,分别代表截面H200 $\times$ 100 $\times$ 4 $\times$ 6、H300 $\times$ 150 $\times$ 4 $\times$ 6、H400 $\times$ 200 $\times$ 6 $\times$ 10、H500 $\times$ 250 $\times$ 6 $\times$ 10、H600 $\times$ 300 $\times$ 8 $\times$ 14, $L$ 为悬臂梁的长度,单位均为 $\text{mm}$ 。

$$K=\sqrt{\frac{GI_tL^2}{\pi^2EI_w}}.\quad(3)$$

式中: $L$ 为悬臂梁长度; $GI_t$ 为截面扭转刚度; $EI_w$ 为截面翘曲刚度。

表1 模型一尺寸参数  
Table 1 Dimensional parameters of the Model 1

序号	H200		H300		H400		H500		H600	
	$L/\text{m}$	$K$	$L/\text{m}$	$K$	$L/\text{m}$	$K$	$L/\text{m}$	$K$	$L/\text{m}$	$K$
1	1.0	0.28	1.5	0.18	2.0	0.22	2.0	0.14	3.0	0.21
2	1.5	0.41	2.0	0.24	2.5	0.28	2.5	0.18	3.5	0.24
3	2.0	0.55	2.5	0.3	3.0	0.33	3.0	0.21	4.0	0.27
4	2.5	0.69	3.0	0.37	3.5	0.39	3.5	0.25	4.5	0.31
5	3.0	0.82	3.5	0.43	4.0	0.44	4.0	0.28	5.0	0.34
6	3.5	0.97	4.0	0.49	5.0	0.56	5.0	0.35	5.5	0.38
7	4.0	1.10	5.0	0.61	6.0	0.67	6.0	0.43	6.0	0.41

对于上翼缘与刚性铺板相连的工字形截面悬臂梁,刚性铺板对钢梁上翼缘提供连续侧向支撑,并且刚性铺板把结构所受的荷载均匀地传递到钢

梁的上翼缘。本研究为分析上翼缘与刚性铺板相连的工字形截面悬臂梁的稳定,建立了5种截面尺寸的分析模型,每种截面尺寸制作了6种不同长度

的构件。在工字形截面悬臂梁模型上翼缘施加连续侧向约束和均布荷载。构件材料采用 Q235 钢材。上翼缘与刚性铺板相连悬臂梁模型尺寸参数见表 2。

表2 模型二尺寸参数  
Table 2 Dimensional Parameters of the Model 2

序号	H200		H300		H400		H500		H600	
	L/ m	K	L/ m	K	L/ m	K	L/ m	K	L/ m	K
1	1.5	0.41	2.0	0.24	2.0	0.33	3.0	0.21	5.5	0.38
2	2.0	0.55	2.5	0.30	2.5	0.39	3.5	0.25	6.0	0.41
3	2.5	0.69	3.0	0.37	3.0	0.44	4.0	0.28	6.5	0.44
4	3.0	0.82	3.5	0.43	3.5	0.50	4.5	0.32	7.0	0.48
5	3.5	0.97	4.0	0.49	4.0	0.56	5.0	0.35	7.5	0.51
6	4.0	1.10	5.0	0.61	5.0	0.67	6.0	0.43	8.0	0.55

2 临界条件

2.1 K - φ<sub>b</sub>曲线

利用计算结果可以得到各种截面的扭转参数K和弹性整体稳定系数φ<sub>b</sub>的关系曲线，即K - φ<sub>b</sub>曲线。无支撑工字形截面悬臂梁K - φ<sub>b</sub>曲线如图1所示。上翼缘与刚性铺板相连的工字形截面悬臂梁

K - φ<sub>b</sub>曲线如图2所示。弹性整体稳定系数φ<sub>b</sub>的计算式为：

$$\varphi_b = \frac{M_{cr}}{Wf_y} \quad (4)$$

式中：M<sub>cr</sub>为弹性稳定临界弯矩，分析中取M<sub>cr</sub> = q<sub>cr</sub>L<sup>2</sup>/2；W为抗弯截面系数；f<sub>y</sub>为钢材的屈服强度，Q235钢材取235 N/mm<sup>2</sup>；q<sub>cr</sub>为ABAQUS计算出的悬臂梁临界均布荷载<sup>[1]</sup>。

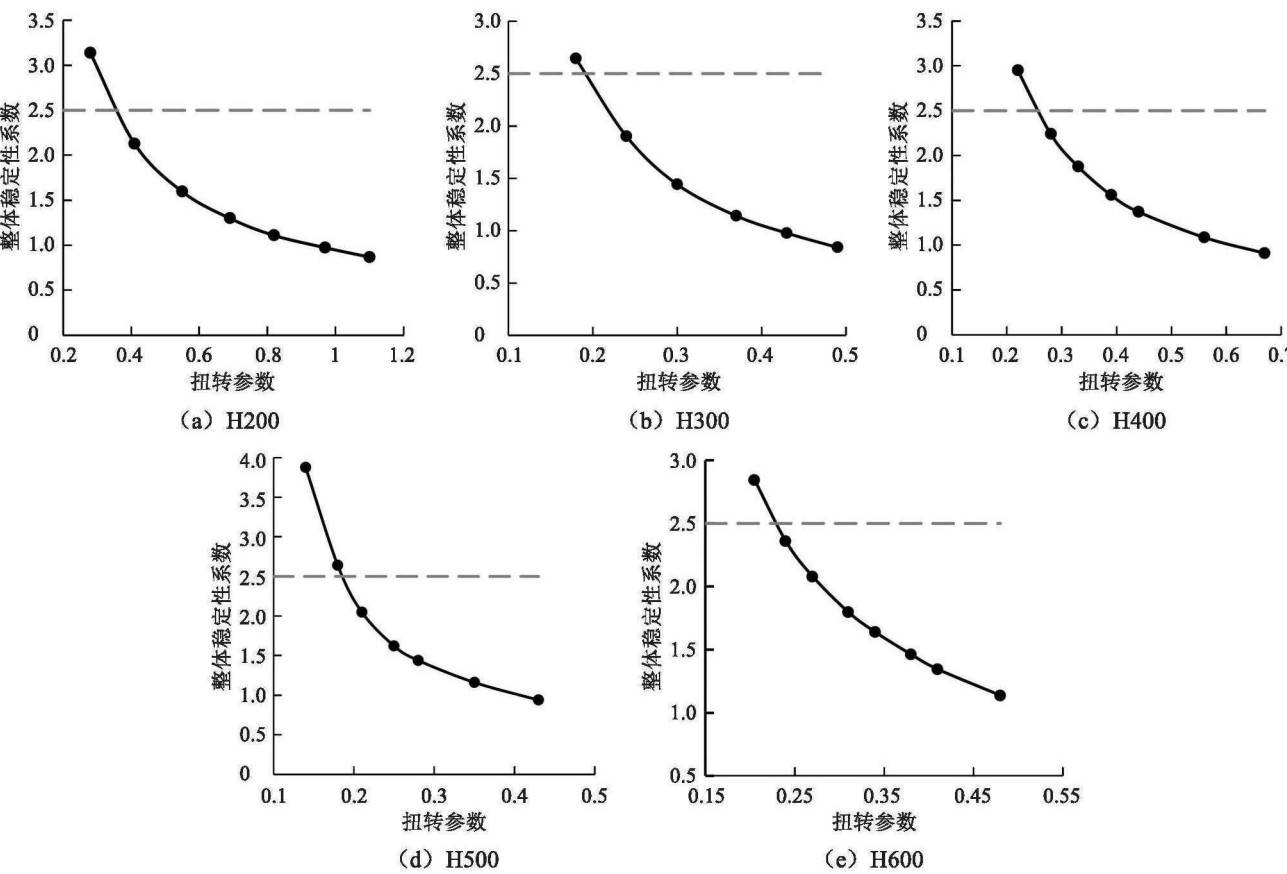


图1 无支撑工字形截面悬臂梁K - φ<sub>b</sub>曲线  
Fig. 1 The K - φ<sub>b</sub> curve of the I-shaped cantilever beam without support

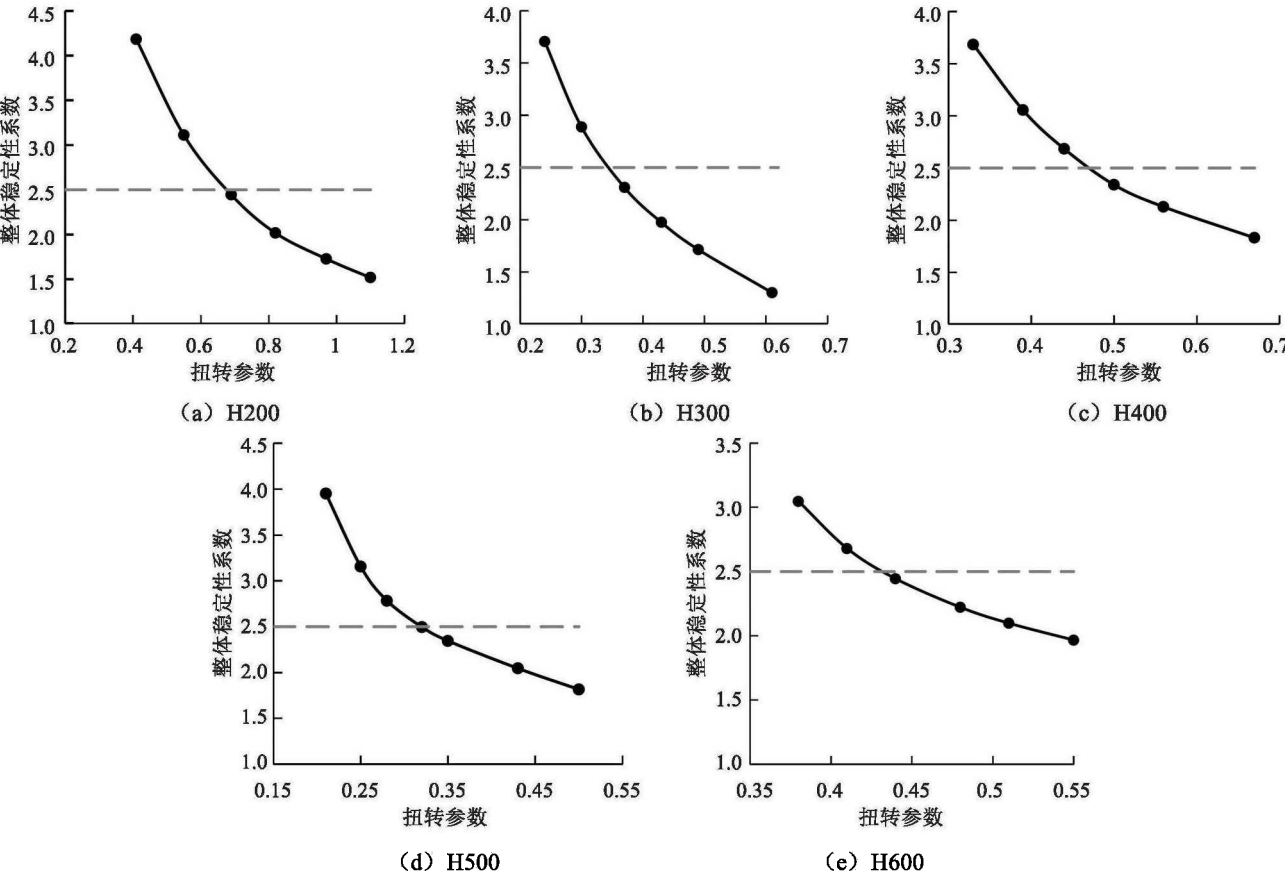


图2 工字形截面悬臂梁  $K - \varphi_b$  曲线

Fig. 2 The  $K - \varphi_b$  curve of I-shaped cantilever beam

2.2 临界扭转参数  $K_{cr}$

从图1~2中可以看出，随着悬臂梁长度增加，扭转参数  $K$  也增大，梁的弹性稳定系数  $\varphi_b$  逐渐减小；当悬臂梁的扭转参数较小时，弹性整体稳定系数下降幅度较大，即  $K - \varphi_b$  曲线较陡；随着扭转系数变大，弹性整体稳定系数减小幅度逐渐变小，即  $K - \varphi_b$  曲线趋于平缓。当悬臂钢梁的弹性整体稳定系数  $\varphi_b \geq 2.5$  时，即钢梁进入弹塑性阶段时的整体稳定系数  $\varphi'_b \geq 0.95$ ，可不需考虑梁的整体稳定问题，只需按强度、刚度、板件宽厚比来设计悬臂梁<sup>[11]</sup>。设弹性整体稳定系数  $\varphi_b = 2.5$  时对应的临界扭转参数  $K_{cr}$ 。

对于相同荷载工况和约束条件的工字形截面钢梁，梁的长度、高度、翼缘厚度和翼缘高度对构件的整体稳定性能影响较大，而腹板厚度对构件的整体稳定性能影响较小。本模型构件的截面高度  $h$  和宽度  $b$  的比值均为2，且相同截面的悬臂梁长度增加导致弹性整体稳定系数  $\varphi_b$  减小，由此可以探究工字形截面悬臂梁截面高度与翼缘厚度

比值  $h/t_f$  与临界扭转参数  $K_{cr}$  的关系。不同约束情况下各截面悬臂梁的临界扭转系数见表3。 $K_{cr_0}$  为对应截面无支撑悬臂梁的临界扭转参数， $K_{cr}$  为对应截面上翼缘与刚性铺板相连的悬臂梁的临界扭转参数。

表3 悬臂梁临界扭转参数

Table 3 Critical torsional parameters of cantilever beam			
截面尺寸	$h/t_f$	$K_{cr_0}$	$K_{cr}$
H200×100×4×6	33.3	0.35	0.67
H300×150×4×6	50.0	0.19	0.32
H400×200×6×10	40.0	0.26	0.48
H500×250×6×10	50.0	0.18	0.34
H600×300×8×14	42.9	0.23	0.44

通过对表3中数据进行分析、拟合，发现临界扭转参数和  $h/t_f$  成一次线性关系，由此可获得2种约束情况下的工字形截面悬臂梁的临界扭转参数与  $h/t_f$  的关系：

$$K_{cr_0} = \frac{-0.0095h}{t_f} + 0.65.$$

(5)

$$K_{cr} = \frac{-0.019h}{t_f} + 1.30.$$

(6)

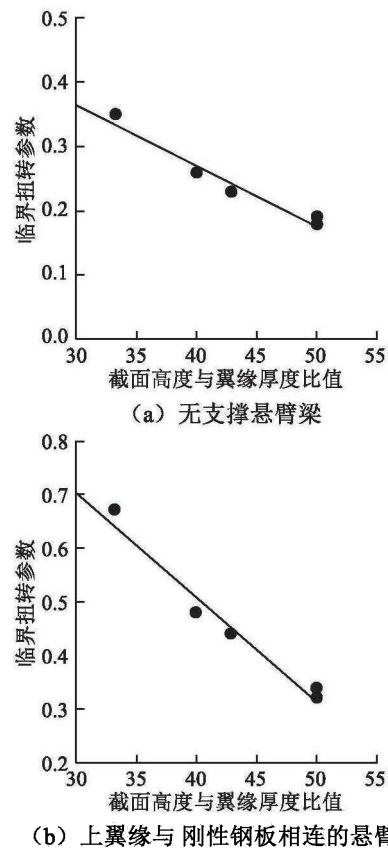


图3 临界扭转参数与截面高度与翼缘厚度比值的一次线性拟合曲线

Fig. 3 Linear fitting curve of critical torsion parameter and ratio of section height to flange thickness

从图3中可以看出，对于相同截面的工字形截面悬臂梁，上翼缘有连续侧向刚性支撑时的临界扭转参数 $K_{cr}$ 约为无支撑约束时的临界扭转参数 $K_{cr_0}$ 的2倍。若 $K \leq K_{cr}$ ，不需要考虑梁的整体稳定，对于工字形截面悬臂梁不用加设支撑来保证构件整体稳定；若 $K > K_{cr}$ ，需要考虑钢梁的整体稳定，应加设支撑来防止梁出现整体失稳。

3 侧向约束对稳定性能影响

对于上翼缘与刚性铺板相连的工字形截面悬臂梁，刚性铺板对钢梁上翼缘的连续侧向支撑作用，可以提高钢梁的整体稳定承载力。通过对比有无设置上翼缘连续侧向支撑的工字形截面悬臂梁的整体稳定承载力 $q_{cr}$ 可以发现，上翼缘与刚性铺板相连的工字形截面悬臂梁稳定承载力约为无支撑悬臂梁的2倍。工字形截面悬臂梁的整体稳定

承载力见表4。 $q_{cr_0}$ 、 $q_{cr}$ 分别为无支撑、上翼缘与刚性铺板相连的工字形截面悬臂梁整体稳定承载力所对应的均布荷载。

表4 悬臂梁的整体稳定承载力  
Table 4 The stability bearing capacity of cantilever beam

截面尺寸	L/m	$q_{cr_0}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	$q_{cr}/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$
H200	1.5	60.0	117.9
	2.5	13.2	24.8
	3.5	5.0	9.0
H300	2.0	68.3	139.6
	3.0	19.1	39.4
	4.0	7.7	15.7
H400	3.0	87.9	164.3
	4.0	36.2	71.8
	5.0	18.3	35.9
H500	3.0	152.0	308.1
	4.0	62.6	116.3
	5.0	31.0	62.7
H600	5.0	81.7	156.4
	6.0	46.5	92.7
	7.0	29.0	57.9

4 结论

通过有限元软件ABAQUS对工字形截面悬臂梁模型进行计算和分析，得出结论为：

- 1) 上翼缘作用均布荷载的工字形截面悬臂钢梁，得到无支撑和上翼缘与刚性铺板相连的2种约束情况下的临界扭转参数 $K_{cr}$ 。当 $K \leq K_{cr}$ 时，不需要考虑梁的整体稳定，对于工字形截面悬臂梁不用加设支撑来保证构件整体稳定；若 $K > K_{cr}$ ，需要考虑钢梁的整体稳定，应加设支撑来防止梁出现整体失稳。
- 2) 上翼缘有连续侧向约束的工字形截面悬臂梁稳定承载力约为无支撑悬臂梁的2倍。该成果适用于焊接工字形截面悬臂梁。

参考文献(References):

[1] 舒赣平,辛连春,郑宝锋,等. 不锈钢焊接工字形截面梁整体稳定性分析[J]. 工业建筑, 2015, 45(12): 23-31. (SHU Can-ping, XIN Lian-chun, ZHENG Bao-feng, et al. Study of lateral torsional buckling strength of stainless steel beam of welded I-Section[J]. Industrial Construction, 2015, 45 (12): 23-31. (in Chinese))

- [2] 郭耀杰. 悬臂构件稳定性理论及其应用[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1997. (GUO Yao-jie. The theory of the stability of cantilever components and its applications [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1997. (in Chinese))
- [3] 张磊, 童根树. 工字形截面悬臂钢梁的稳定性研究[J]. 工程力学, 2003, 20(4): 176-182. (ZHANG Lei, TONG Gen-shu. On stability of I-section steel cantilevers[J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(4): 176-182. (in Chinese))
- [4] Oezdemir K M, Topkaya C. Lateral buckling of overhanging crane trolley monorails[J]. Engineering Structures, 2006, 28(8): 1162-1172.
- [5] 秦桦, 郭成喜. 单轴对称工字形截面悬臂钢梁在横向荷载作用下的整体稳定性研究[J]. 工程力学, 2009, 26(9): 152-155. (QIN Hua, GUO Cheng-xi. Stability of monosymmetric I-section cantilevers[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26 (9): 152-155. (in Chinese))
- [6] Anderson J M, Trahair N S. Stability of monosymmetric beams and cantilevers[J]. Journal of the Structural Division, 1972, 98(1): 269-286.
- [7] 刘卜精. 弯扭联合作用下双轴对称工字形悬臂梁的整体稳定研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012. (LIU Bu-jing. Overall stability research of biaxial symmetric I-shaped cantilever beam under combined bending and torsion[D]. Changsha: Hunan University, 2012. (in Chinese))
- [8] 何斌, 付国, 田兴运, 等. 双轴对称截面悬臂钢梁稳定性分析[J]. 钢结构, 2016, 31(12): 24-27. (HE Bin, FU Guo, TIAN Xing-yun, et al. Stability analysis of double symmetric I-section cantilever steel beams[J]. Steel Construction, 2016, 31(12): 24-27. (in Chinese))
- [9] 刘迎春, 邓世林, 张文福, 等. 集中荷载作用下扭转支撑悬臂梁弯扭屈曲分析[J]. 东北石油大学学报, 2017, 41(3): 103-110, 11-12. (LIU Ying-chun, DENG Shi-lin, ZHANG Wen-fu, et al. Flexural-torsional buckling analysis for cantilever beam with torsional bracing under concentrated load[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2017, 41(3): 103-110, 11-12. (in Chinese))
- [10] 王青. 大跨度铁路钢桁梁柔性拱桥的弹性稳定性[J]. 交通科学与工程, 2018, 34(4): 16-21. (WANG Qing. Static elastic stability of long-span railway steel truss flexible arch bridge[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2018, 34(4): 16-21. (in Chinese))
- [11] 陈绍藩. 钢结构设计原理[M]. 北京: 科学出版社, 2016. (CHEN Shao-fan. Principle of steel structure design[M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese))