

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2024.07.068

# 纯弯钢梁整体稳定有限元计算分析

杨凯<sup>1,2</sup>,殷亮<sup>1,2</sup>,吴志刚<sup>1,2</sup>

(1.安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司,安徽合肥230088;2.公路交通节能与环保技术及装备交通运输行业研发中心,安徽合肥230088)

**摘要:**使用有限元进行梁单元整体稳定分析时,为得到不同单元类型的计算精度,对工字形截面(开口截面)与箱形截面(闭口截面)进行纯弯作用下整体稳定分析,分别使用6自由度梁单元、7自由度梁单元、板单元进行数值计算,并与理论计算对结果进行分析对比。根据分析得到不同截面类型适用的有限元模型:对于开口截面,计算受弯、压弯稳定时,应采用7自由度单元;对于闭口截面可偏安全的采用6自由度单元计算。

**关键词:**钢结构;整体稳定;弯扭屈曲;翘曲刚度;7自由度单元

中图分类号:U442.5+1

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2024)07-0287-03

## 0 引言

钢结构具有材料匀质、自重轻、强度高等优点,同时为提高结构受力效率与经济性,钢混组合梁桥在桥梁中广泛应用。在中小跨径桥梁中,为方便制造、运输、架设并降低结构造价,钢板组合梁桥与分离钢箱组合梁桥应用较多。常用典型断面如图1所示。

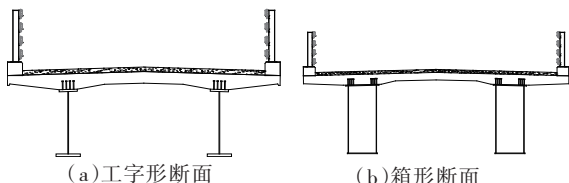


图1 常用钢混组合梁断面

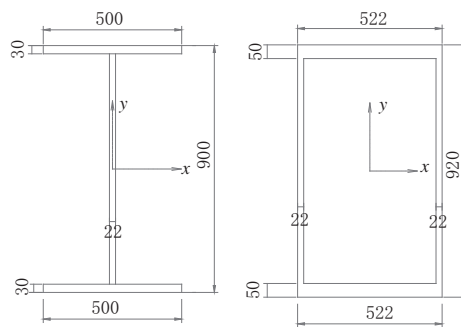
钢梁存在整体稳定与局部稳定问题<sup>[1-2]</sup>,局部稳定可通过板件宽厚比进行控制。在施工过程中,钢梁当作桥面板施工的支架,桥面板与钢梁未结合前,整体失稳问题较为突出。《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)中给出不需要验算整体稳定工字形截面与箱形截面简支梁的条件,对于不满足构造条件的情况,给出相应验算整体稳定的计算公式,公式较为复杂<sup>[3-4]</sup>。在实际项目中工程师通常使用梁单元进行有限元线性屈曲分析,并按屈曲系数大于4控制。针对不同截面(开口截面或闭口截面),选用6自由度单元与7自由度单元,计算精度不同,本文通过对6自由度梁单元模型、7自由度梁单元模型、板单元模型进行线性屈曲分析,并与理论分析进行对比,确定合理可行的有限元模拟方法。

收稿日期:2023-06-17

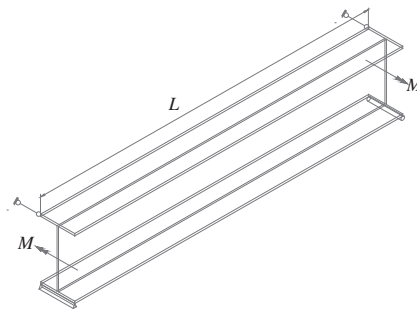
作者简介:杨凯(1990—),男,硕士,高级工程师,从事组合结构桥梁设计与研究工作。

## 1 几何模型

为便于计算对比,本文选取双轴对称工字形、箱形截面,并在梁端施加单位弯矩,使结构处于简支纯弯状态。材料为Q355,侧向支撑长度取12m,如图2所示。为得到整体失稳计算结果,根据《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)设定翼缘、腹板宽厚比,以防止局部失稳先于整体失稳发生,见表1。



(a)截面尺寸(单位:mm)



(b)约束与作用

图2 截面构造与约束

## 2 有限元模型

### 2.1 有限元模型

本文的梁单元模型中,钢梁支座采用铰接,一端

表1 截面尺寸控制

项目	工字形	箱形
受压翼缘宽厚比	7.97	9.56
受拉翼缘宽厚比	7.97	9.56
腹板高厚比	38.2	37.3

限制 UX,UY,UZ 位移,另一端限制 UX,UY 位移,即释放纵向位移 UZ<sup>[5]</sup>。两端约束绕 Z 轴的转动,即 RZ,使用 MIDAS Civil2022 建模计算。板单元模型使用 MIDAS FEANX 建模进行计算,为实现与梁单元相同约束,端部对形心节点进行约束(见图 3),其余端部节点与形心节点进行耦合连接,同时针对箱梁截面其弹性临界弯矩较大,为防止腹板局部失稳对整体失稳计算结果产生过大影响,在腹板设置合适距离竖向加劲肋。

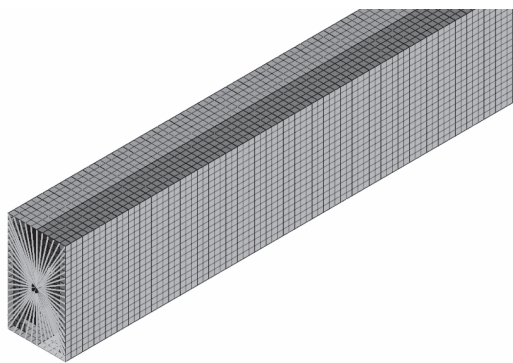


图3 箱形截面板单元模型

## 2.2 有限元分析结果

针对工字形截面梁,根据线性屈曲计算得到的弹性临界弯矩,6 自由度梁单元为 2909 kN·m,7 自由度梁单元为 4811 kN·m,板单元为 4746 kN·m。6 自由度梁单元与 7 自由度梁单元屈曲模态均为梁体整体侧弯,板单元屈曲模态为上翼缘连带腹板侧扭。不同单元的屈曲模态如图 4 所示。

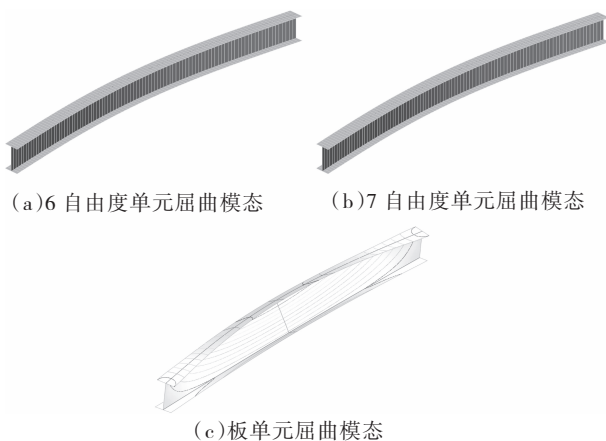


图4 工字型截面梁整体稳定屈曲模态

针对箱形截面梁,根据线性屈曲计算得到的弹性临界弯矩,6 自由度梁单元为 171 506 kN·m,7 自由度

梁单元为 174 568 kN·m,板单元为 167 620 kN·m。屈曲模态与工字形截面表现相同,即 6 自由度梁单元与 7 自由度梁单元屈曲模态均为梁体整体侧弯,板单元屈曲模态为上翼缘连带腹板侧扭。

## 3 理论分析

当梁的侧向支撑间距较大或无侧向支撑时,在主平面内承受竖向荷载或弯矩作用,钢梁的受压翼缘等同于受压杆件,如无与腹板相连接,则存在沿刚度较小方向失稳的可能,但腹板为受压翼缘提供了连续的支承作用,使其在这一方向的刚度得到了提高,因此受压翼缘只会在翼缘板平面内发生失稳。受压翼缘连带相邻腹板发生侧倾,但构件的受拉部分则抵抗着这种侧向变形,因此受压翼缘侧倾严重而受拉部分侧倾较小,整体上形成构件的扭转<sup>[6]</sup>。这种现象叫做钢梁丧失整体稳定或钢梁侧向弯扭屈曲,或称钢梁侧扭屈曲。根据弹性稳定理论,承受纯弯矩的等截面简支工形梁的临界弯矩值按式(1)进行计算。工字形截面与箱形截面计算结果见表 2。

表2 整体稳定理论分析计算结果

截面	<i>l</i> / m	<i>I<sub>y</sub></i> / mm <sup>4</sup>	<i>I<sub>t</sub></i> / mm <sup>4</sup>	<i>I<sub>w</sub></i> / mm <sup>4</sup>	<i>M<sub>cr</sub></i> / (kN·m <sup>-1</sup> )
工字形	12	6.26 × 10 <sup>8</sup>	1.20 × 10 <sup>7</sup>	1.18 × 10 <sup>14</sup>	4 810
箱形	12	3.44 × 10 <sup>9</sup>	7.89 × 10 <sup>9</sup>	1.30 × 10 <sup>14</sup>	174 304

$$M_{cr} = \frac{\pi}{l} \sqrt{EI_y (GI_t + EI_w \frac{\pi^2}{l^2})} \quad (1)$$

式中:*l* 为侧向支撑点间距; *EI<sub>y</sub>* 为截面侧向抗弯刚度; *GI<sub>t</sub>* 为截面自由扭转刚度; *EI<sub>w</sub>* 为截面翘曲刚度。

## 4 结果分析

通过对比分析,针对工字形截面,可知 7 自由度单元、板单元、理论分析的结果基本一致,6 自由度单元与理论分析相差较大,结果对比见表 3。主要由于 6 自由度单元无约束扭转双力矩,可将公式(1)修改为公式(2),同时将取为 0,计算可得为 2 892 kN·m 与 6 自由度单元计算结果基本一致。

表3 结果对比

截面	6 自由度单元	7 自由度单元	板单元	理论分析
工字形	结果 / (kN·m)	2 909	4 811	4 810
	计算值 / 理论值	0.60	1.00	1.00
箱形	结果 / (kN·m)	171 506	174 568	174 304
	计算值 / 理论值	0.98	1.00	0.96

对于箱形截面,4种计算方法得到结果基本一致,翘曲刚度对截面弹性临界弯矩贡献不大;板单元计算结果相对偏小原因主要为腹板变形对整体稳定有折减。

$$M_{cr} = \frac{\pi}{l} \sqrt{EI_y GI_t \left(1 + \frac{\pi^2 EI_{\omega}}{GI_t l^2}\right)} \quad (2)$$

$$K = \sqrt{\frac{\pi^2 EI_{\omega}}{GI_t l^2}} \quad (3)$$

式中: $M_{cr}$ 为截面弹性临界弯矩; $EI_y$ 为截面刚度; $K$ 为扭转刚度常数; $l$ 为侧向支撑点间距; $EI_{\omega}$ 为截面自由扭转刚度; $GI_t$ 为截面翘曲刚度。

一般用扭转刚度常数  $K$  来衡量翘曲刚度对截面抗扭的贡献。 $K$  值越大,翘曲刚度对截面抗扭贡献越大。根据研究,当  $K$  小于 0.1 时,截面翘曲刚度对抗扭刚度总贡献低于 10%,可以偏安全不考虑翘曲刚度的贡献<sup>[7]</sup>,如图 5 所示。针对本文中的工字梁  $K=1.328$ ,箱形梁  $K=0.054$ ,小于 0.1,因此在计算临界失稳弯矩时,6 自由度单元计算结果与 7 自由度单元计算结果接近。

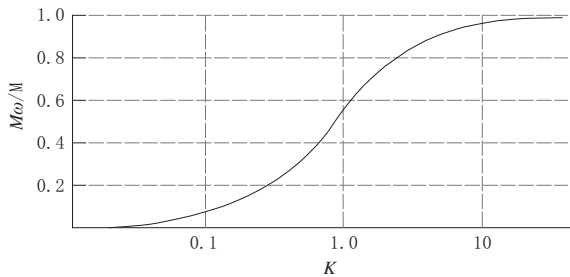


图 5 常数  $K$  与翘曲刚度对抗扭刚度贡献关系

## 5 结 语

本文对工字形截面(开口截面)与箱形截面(闭口截面)进行纯弯作用下整体稳定分析,分别使用 6 自由度单元、7 自由度单元、板单元进行计算,并结合理论计算进行分析对比,主要结论如下。

(1) 钢梁整体稳定除与梁侧向支撑长度、侧向抗弯刚度、抗扭刚度有关外,还与截面翘曲刚度有关,可通过扭转刚度常数  $K$  衡量翘曲刚度的贡献;

(2) 6 自由度单元与 7 自由度单元均无法得到真实失稳模态,但 7 自由度单元数值计算结果与理论分析相同,可以实现工程计算目标;

(3) 对于开口截面,截面抗扭惯性矩与扇性惯性矩对截面侧扭失稳刚度贡献均较大,计算开口截面受弯、压弯稳定时,采用 7 自由度单元;

(4) 对于闭口截面,可以偏安全不考虑翘曲刚度的贡献,采用 6 自由度单元计算。

### 参考文献:

- [1] 陈绍蕃. 钢结构设计原理(3 版)[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [2] 刘占科, 靳璐君, 周绪红, 等. 钢构件整体稳定直接分析法研究现状及展望[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(8): 1-12.
- [3] JTG D64—2015, 公路钢结构桥梁设计规范[S].
- [4] 王泉宇, 李新生. 简支钢箱梁整体抗倾覆稳定分析[J]. 苏州科技大学学报(工程技术版), 2022, 35(2): 26-31.
- [5] 杨波. 工字梁在弯矩和均布荷载作用下的整体稳定[J]. 钢结构, 2012, 27(11): 23-25, 86.
- [6] 曹文龙, 郭小农. 铝合金结构构件理论和试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [7] 陈雪雪, 潘文, 孙玥. 上翼缘作用均布荷载的钢梁整体稳定研究[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(3): 85-90.

## 《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴, 为您提供平台, 携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: [cdq@smedi.com](mailto:cdq@smedi.com)