

连续侧向约束条件下薄壁梁的整体稳定分析

陈进, 王俊平, 陶燕
(昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650224)

摘要: 通过能量法对存在连续侧向约束的薄壁梁的弹性整体稳定进行了分析, 分析中考虑了在连续侧向约束条件下, 梁端部负弯矩的存在, 对梁整体稳定承载力产生的不利影响. 通过运用有限元法的分析计算, 得出了在实际设计中考虑梁端部负弯矩影响的临界条件, 并提出了相应的避免出现整体失稳的构造措施.

关键词: 薄壁梁; 侧向约束; 薄壁截面; 弹性稳定

中图分类号: V214.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007 - 855X(2006)01 - 0065 - 04

Stability Analysis of Thin - Walled Beam with Continuous Translational Restraint

CHEN J in, WANG Jun-ping, TAO Yan

(Faculty of Civil and Architecture Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, China)

Abstract: Energy method is applied in the buckling analysis of thin - walled beam with continuous translational restraint. The influence of negative moment of tail beam is concerned in stability analysis. By the application of FEM, the critical condition is used to judge whether negative moment of the tail beam should be concerned in the stability analysis is obtained, and the corresponding structuring method is suggested to ensure the stability of beams.

Key words: thin - walled beam; translational restraint; thin - walled section; elastic stability

0 引言

随着我国钢产量的提高, 钢结构在建筑工程中得到广泛地使用. 由于钢材的强度较高, 因而截面较小, 构件较为细长, 并且多为薄壁构件, 所以稳定破坏是其主要的破坏形式. 为了提高构件的整体稳定承载力, 往往设置一定数量的支撑 (约束), 减小构件的计算长度, 控制构件发生整体失稳时的位移模态, 从而达到提高构件稳定承载力的目的. 钢构薄壁梁作为较为常见的结构构件, 由于其受力性能较好、制作方便, 在工程中得到大量使用. 但薄壁钢梁通常为开口截面, 如工形截面 (图 1), 其抗扭转的刚度较差, 在荷载作用下易发生弯扭形式的整体失稳——弯扭屈曲. 通常认为^[3, 6, 7], 梁的整体稳定问题主要是由受压翼缘的侧向弯曲引起的. 因此, 设置在受压翼缘的刚性侧向支撑被作为梁的有效约束, 起到减小梁的计算长度、提高梁整体稳定承载力的作用; 若有刚性铺板与梁的受压翼缘相连 (图 2), 则不用考虑整体稳定问题. 但在一般钢框架结构中, 框架梁与框架柱是刚性连接, 梁的两端存在一定大小的负弯矩, 使梁上翼缘在梁的中部受压, 而在梁端部受拉, 对应于梁的下翼缘则和上翼缘的情况相反; 对于多跨次梁, 若与主梁刚性相连, 则次梁将作为连续梁进行计算分析, 次梁在支座处也将出现一定大小的负弯矩 (图 3), 这种现象对梁的整体稳定将

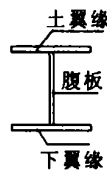


图1 工形截面梁
Fig.1 I section beam

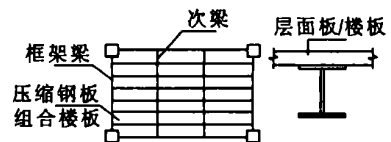


图2 梁板连接图
Fig.2 Connection of beam and slab

随着我国钢产量的提高, 钢结构在建筑工程中得到广泛地使用. 由于钢材的强度较高, 因而截面较小, 构件较为细长, 并且多为薄壁构件, 所以稳定破坏是其主要的破坏形式. 为了提高构件的整体稳定承载力, 往往设置一定数量的支撑 (约束), 减小构件的计算长度, 控制构件发生整体失稳时的位移模态, 从而达到提高构件稳定承载力的目的. 钢构薄壁梁作为较为常见的结构构件, 由于其受力性能较好、制作方便, 在工程中得到大量使用. 但薄壁钢梁通常为开口截面, 如工形截面 (图 1), 其抗扭转的刚度较差, 在荷载作用下易发生弯扭形式的整体失稳——弯扭屈曲. 通常认为^[3, 6, 7], 梁的整体稳定问题主要是由受压翼缘的侧向弯曲引起的. 因此, 设置在受压翼缘的刚性侧向支撑被作为梁的有效约束, 起到减小梁的计算长度、提高梁整体稳定承载力的作用; 若有刚性铺板与梁的受压翼缘相连 (图 2), 则不用考虑整体稳定问题. 但在一般钢框架结构中, 框架梁与框架柱是刚性连接, 梁的两端存在一定大小的负弯矩, 使梁上翼缘在梁的中部受压, 而在梁端部受拉, 对应于梁的下翼缘则和上翼缘的情况相反; 对于多跨次梁, 若与主梁刚性相连, 则次梁将作为连续梁进行计算分析, 次梁在支座处也将出现一定大小的负弯矩 (图 3), 这种现象对梁的整体稳定将

收稿日期: 2005 - 05 - 08 基金项目: 昆明理工大学科学研究基金资助 (项目编号: 2003 - 13).

第一作者简介: 陈进 (1974 ~), 男, 工学硕士, 讲师. 主要研究方向: 钢结构与设计. E - mail: chen4033@sina.com

产生一定的不利影响——即使考虑与梁上翼缘相连楼面板的连续侧向刚性约束作用。

对于这种情况《钢结构设计规范》中并没有明确规定,而只是在结构的塑性设计中,考虑由于塑性铰的出现,使框架梁的两端约束程度降低,则在梁端应设置侧向支撑构件(钢构设计规范 9.3.2条规定),保证梁整体稳定所需的边界条件。在《高层民用建筑钢结构技术规程》也基于同样目的,规定:抗震设防时,在框架横梁下翼缘距柱轴线 1/8 ~ 1/10 梁跨处应设置侧向隅撑(图 4)。

1 模型建立

本文采用能量法^[1],运用 Matlab 编制的有限元程序^[4]对图 5 的情况进行计算分析,考虑梁端负弯矩对梁整体稳定承载力的影响,给出框架梁及连续梁设计中是否考虑梁端负弯矩影响的临界条件。分析中考虑到楼面板的平面内的刚度近似无穷大,并忽略楼面板对梁的连续扭转约束,将楼面板作为梁的连续刚性侧向支撑,作用在梁的上翼缘处;同时将楼板传递荷载作为梁上的均布线荷载,采用的分析计算模型如图 5。

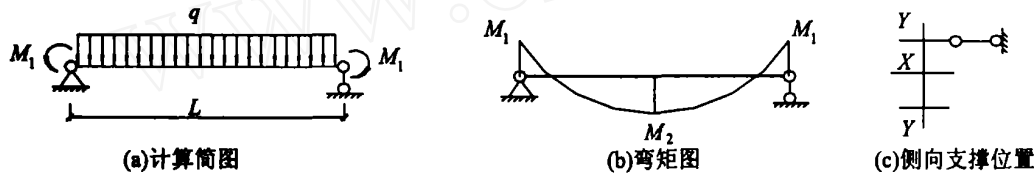


图5 计算分析模型
Fig.5 Calculation model

通常梁中内力 $|M_1/M_2| < 2$, 在分析中取 $|M_1/M_2| = 2$, 则模拟了梁中较不利的内力情况。根据文献 [7] 中的解释:当弹性整体稳定系数 $\phi_b > 2.5$ 时,即相当于梁进入弹塑时的整体稳定系数 $\phi_b = 0.95$, 则可不需考虑梁的整体稳定问题,而只需按强度计算来设计梁的截面尺寸,梁的弹性整体稳定系数 ϕ_b 表示为:

$$\phi_b = M_{cr}/M_{st} = M_{cr}/Wf_s \tag{1}$$

其中: M_{cr} 为弹性稳定临界弯矩,分析中 $|M_1/M_2| = 2$ 时,则 $M_{cr} = \frac{1}{12} q_c L^2$; W 为截面抵抗; f_s 为钢材的屈服强度; q_c 为弹性稳定临界均布荷载。

2 有限元分析

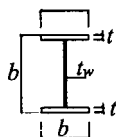
为使更具有有一般性,计算构件选取了与国产热轧 H 型钢截面尺寸相近的焊接双对称工形截面梁,钢材采用 Q235,并且选用了在梁设计中经常采用的中翼缘 HM 和窄翼缘 HN 两种截面类型。梁高选取 $h = 200 \sim 600 \text{ mm}$,翼缘宽度 $b = 100 \sim 300 \text{ mm}$,具体见表 1。

运用程序分析计算所选构件的弹性稳定临界弯矩,利用计算结

表 1 焊接工字形梁截面类型

Tab 1 Section types of welded I beam

截面尺寸标注	截面类型	h/mm	b/mm	t/mm	t_w /mm
	HN200	200	100	10	6
	HM200	200	150	10	6
	HN300	300	150	14	8
	HM300	300	200	14	8
	HN400	400	200	16	10
	HM400	400	300	16	10
	HN500	500	200	18	12
	HM500	500	300	18	12
	HN600	600	200	20	12
	HN600	600	300	20	12



果画出各种截面的扭转参数 $K = \sqrt{\frac{GI_t L^2}{2EI}}$ (G —剪切模量, I_t —扭转常数, L —梁长, E —弹性模量, I —扇性惯性矩) 和弹性整体稳定系数 $\varphi_b = M_{cr}/M_{st}$ 的关系曲线, 即 $K-\varphi_b$ 曲线, 见图 6 ~ 图 10

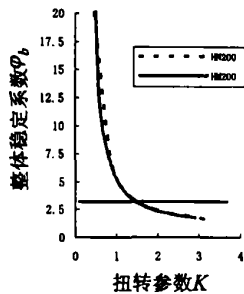


图6 $K-\varphi_b$ 曲线图 (HN200, HM200)
Fig.6 Curve of $K-\varphi_b$ (HN200, HM200)

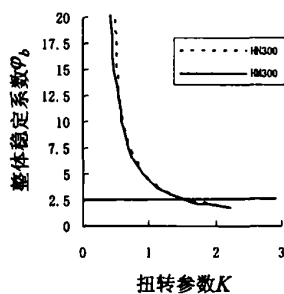


图7 $K-\varphi_b$ 曲线图 (HN300, HM300)
Fig.7 Curve of $K-\varphi_b$ (HN300, HM300)

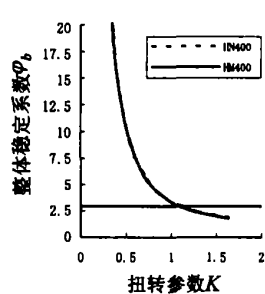


图8 $K-\varphi_b$ 曲线图 (HN400, HM400)
Fig.8 Curve of $K-\varphi_b$ (HN400, HM400)

经过以上的计算分析可看到: 对于中翼缘和窄翼缘的焊接工字形截面梁, 当梁的长度增大时, 扭转参数 K 也同时增大, 而 φ_b 的值则逐渐减小, 即梁的弹性稳定承载力 M_{cr} 逐渐降低, 并且发现当扭转参数 K 值较小时, 稳定承载力的下降幅度较大, $\varphi_b - K$ 曲线较陡, 当 K 值变大时, $\varphi_b - K$ 曲线下下降逐渐平缓, 直到 $\varphi_b = 2.5$. 这时梁虽然在上翼缘 (受压翼缘) 存在连续刚性侧向支撑, 梁的整体稳定问题仍然会发生。

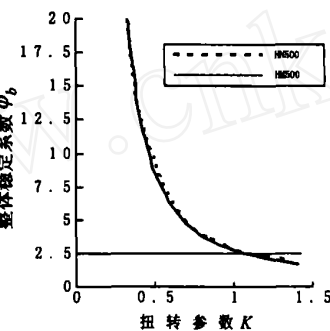


图9 $K-\varphi_b$ 曲线图 (HN500, HM500)
Fig.9 Curve of $K-\varphi_b$ (HN500, HM500)

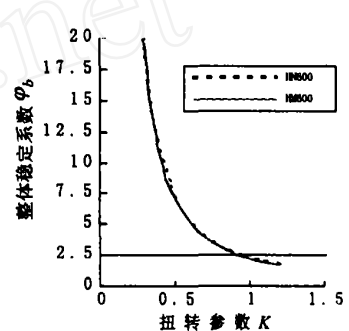


图10 $K-\varphi_b$ 曲线图 (HN600, HM600)
Fig.10 Curve of $K-\varphi_b$ (HN600, HM600)

3 结果讨论

由于梁端出现的负弯矩使得梁上翼缘在长度方向中部受压、端部受拉, 所以设置在上翼缘的刚性侧向支撑并没有约束住下翼缘出现的受压部分。当梁的长度增大时, 即扭转参数 K 增大, 下翼缘受拉部分的比例逐渐增大, 因此稳定承载力逐渐降低。这种情况在门式刚架的设计中也可以看到, 由于门式刚架的斜梁与柱刚性连接, 因此在斜梁的端部将存在一定大小的负弯矩, 而门式刚架的跨度通常较大, 即斜梁的扭转参数 K 较大, 这将对斜梁的整体稳定承载力产生较大的不利影响, 所以设计中通常在斜梁端部的负弯矩范围内设置隅撑, 保证下翼缘的受压部分不出现侧向弯曲, 从而保证斜梁的整体稳定, 见图 11。另外当 K 值较小时, 梁上翼缘受拉部分的侧向约束并不能为提高稳定承载力提供多少贡献^[6], 因此稳定承载力下降较快, $\varphi_b - K$ 曲线较陡; 但当 K 值逐渐增大时, 截面翘曲变形成为主导, 翼缘受拉部分的侧向约束作用逐渐明显起来, 因此稳定承载力下降幅度变小, $\varphi_b - K$ 曲线下下降表现逐渐平缓^[4-5]。通过以上多个截面的计算可以发现, 当梁的高度 h 相等时, 梁的截面宽度 b 的变化对于 $\varphi_b = 2.5$ 时对应的扭转参数 K 值的影响非常小, 并且当截面高度 h 与翼缘厚度 t 的比值 h/t 相等时, 其 $\varphi_b - K$ 曲线图在一定 K 值范围内也几乎相同,

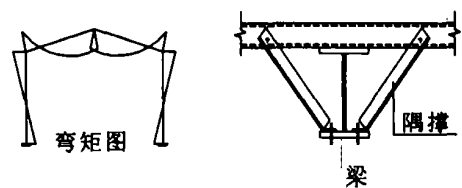


图11 门式刚架内力图及隅撑设置
Fig.11 Bend moment and corner bracing setting of gabled frame

为了验证以上结论的正确性,本文选择了两种不同高度,不同翼缘厚度,不同翼缘宽度,但截面高度与翼缘厚度比值 h/t 相同的截面分别对应于 $|M_1/M_2| = 2$, $|M_1/M_2| = 1$ 的情况进行了计算,截面几何特征见图 12,并将计算结果绘制其 $\phi_b - K$ 曲线(图 13、图 14).

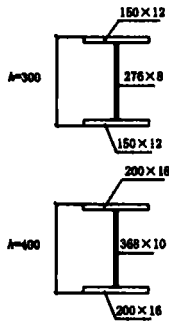


图12 截面几何特征
Fig.12 Geometric characteristics of section

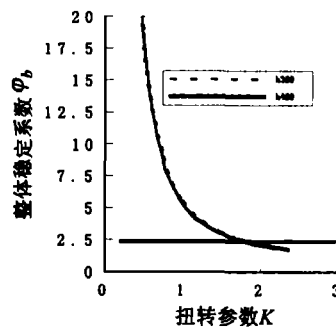


图13 $K-\phi_b$ 曲线图 ($|M_1/M_2|=1$)
Fig.13 Curve of $K-\phi_b$ ($|M_1/M_2|=1$)

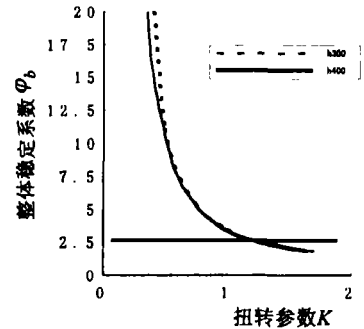


图14 $K-\phi_b$ 曲线图 ($|M_1/M_2|=2$)
Fig.14 Curve of $K-\phi_b$ ($|M_1/M_2|=2$)

从图 13、图 14 可以看到,两种不同截面分别对于 $|M_1/M_2| = 1$ 和 $|M_1/M_2| = 2$ 两种情况,其 $\phi_b - K$ 关系曲线基本相同,这验证了截面高度与翼缘厚度的比值 h/t 对于 $\phi_b - K$ 关系曲线有较大的影响.基于以上分析,本文利用程序计算结果绘制了当 $|M_1/M_2| = 2$ 时,构件梁截面高度与翼缘厚度的比值 h/t 与弹性稳定系数 $\phi_b = 2.5$ 时对应的临界扭转参数 K_{cr} 的关系曲线,并进行回归分析得出其规律性,见图 15 由其拟合曲线,可确定当弹性稳定系数 $\phi_b = 2.5$ 时,对应的临界扭转参数 K_{cr} 值大小.当构件的扭转参数 K 大于 K_{cr} 时,则在梁端弯矩与梁跨中弯矩的比值 $|M_1/M_2| = 2$ 时,将出现整体失稳的可能性,因此必须采取相应的构造措施——设置隅撑.

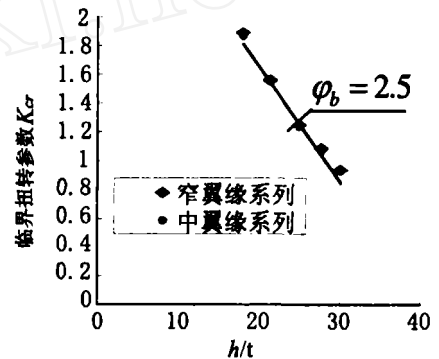


图15 $K_{cr}-h/t$ 关系曲线 (焊接工形截面)
Fig.15 Curve of $K_{cr}-h/t$ (welded I section)

4 结束语

为了保证薄壁框架梁或连续次梁设计的安全性,防止梁整体失稳的发生,本文建议对于 Q235 钢材焊接双对称工形截面梁,在均布线荷载作用时,构件 $K_{cr} - h/t$ 曲线拟合公式为:

$$K_{cr} = -0.08h/t + 3.25 \quad (2)$$

h —双对称工形截面的截面高度, t —翼缘的厚度, K_{cr} —构件的临界扭转参数, K —构件的扭转参数.

判断条件:(1)若构件的 $K < K_{cr}$,不需考虑梁端负弯矩的影响.(2)若构件的 $K > K_{cr}$,则需要考虑梁端负弯矩的影响,应在梁的下翼缘端部设置隅撑,防止梁出现整体失稳,如图 4、图 11 的构造.

参考文献:

- [1] 吕烈武,沈世钊,沈祖炎,胡学仁. 钢结构构件稳定理论 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983. 72~120
- [2] CHEN W F, ATSUTA T. Theory of Beam - columns, Space Behavior and design [M]. Eds McGraw - Hill, NY, 1997.
- [3] 中华人民共和国国家标准. GB50017 - 2003. 钢结构设计规范 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2003.
- [4] 陈进. 约束条件下薄壁梁的整体稳定研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2004.
- [5] 李开禧. 弹性薄壁杆件翘曲 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990. 5~70.
- [6] 陈绍蕃. 钢结构稳定设计指南 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004. 77~105.
- [7] 魏明钟. 钢结构设计新规范应用讲评 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1991. 69~105.