

预应力组合梁在负弯矩作用下的塑性铰长度研究

贾远林^{1,2}, 陈世鸣¹, 王新娣¹

(1. 同济大学 土木工程学院 上海 200092; 2. 同济大学 建筑设计研究院 上海 200092)

摘 要: 为了研究体外预应力组合梁在负弯矩作用下的塑性铰长度, 采用悬臂梁模型, 运用有限元方法对截面支撑条件、跨高比及几何性质对塑性铰长度等参数的影响进行了分析。分析结果表明, 组合梁在负弯矩作用下的力学性能受稳定控制, 其支座单边塑性铰长度约为 0.5 倍钢梁腹板高度, 并不随截面几何性质、加载方式等的改变而明显变化。

关键词: 预应力组合梁; 负弯矩; 塑性铰长度; 转动能力; ABAQUS

中图分类号: TU 394 **文献标识码:** A

0 引言

延性是指结构或构件在承载能力无显著下降情况下承受变形的能力, 度量延性的一个重要指标是塑性铰长度。近年来这方面的研究主要针对钢筋混凝土结构进行, 对组合梁或预应力组合梁在负弯矩作用下的研究尚不多见。Chen 通过对普通组合梁负弯矩失稳的研究, 认为支座单边塑性铰长度为腹板局部失稳半波长的长度, 即钢梁高度的 0.5 倍^[1]。朱聘儒根据试验取整个塑性铰区长度为 2 倍梁高^[2]。聂建国、樊建生根据试验结果将整个塑性铰长度取值 1.75 倍梁高^[3]。余志武用组合截面有效高度的 2 倍表征塑性铰长度^[4]。从相关文献可以看出, 塑性铰长度的取值方法既不统一也缺乏必要的论证。笔者拟采用有限元软件 ABAQUS 对普通组合梁和预应力组合梁进行参数分析, 研究表明, 该方法经与试验对比, 其精度可以满足进一步参数分析的要求^[5]。综合各参数分析结果, 给出了组合梁在负弯矩作用下计算长度的值, 对优化结构设计具有参考价值。

1 塑性铰长度定义

延性概念具有丰富的内涵, 从延性的本质来看, 它反应了一种非弹性变形的能力, 这种能力能保证强度不会因为发生非弹性变形而急剧下降, 转动能力是延性的一种表达方式。试验和理论分析都表明, 组合梁负弯矩的非线性转角主要集中

在靠近梁中支座的一小段长度之内, 此段之内截面均具有较大的弯矩截面曲率, 超越此区段, 非线性曲率就逐渐下降为 0, 支座和非线性曲率基本为 0 截面之间的距离就是塑性铰区长度。

研究中, 转动能力采用如下公式表达:

$$\theta_u(x) = \theta_u - \theta_y = \theta_u - \int_0^x \frac{P(L-z)}{EI_{cr}} dz \quad (1)$$

式中: θ_u 为截面承载能力下降至塑性承载能力 M_p 之前的塑性铰区总的转角; θ_y 为截面承载能力下降至塑性承载能力 M_p 之前的塑性铰区的线性转角; θ_u 为截面承载能力下降至塑性承载能力 M_p 之前的非线性转角; I_{cr} 为负弯矩区开裂后的惯性矩, 其它符号意义如图 1 所示。

M_p 为采用简化塑性计算方法计算的截面塑性弯矩。由于负弯矩区体外预应力筋距离截面中和轴较近, 在梁的外荷载增大过程中预应力增量不甚显著, 梁的承载力计算可不考虑预应力增量的影响^[6]。式(2)为截面塑性弯矩 M_p 的计算公式:

$$M_p = M_t + A_{st} f_{st} (y_1 + y_4/2) + A_p \sigma_p (y_3 + y_4/2) \quad (2)$$

式中: M_t 为钢梁绕自身中和轴塑性抗弯承载能力; A_{st} 为普通受拉钢筋面积; A_p 为体外预应力筋面积; f_{st} 为普通受拉钢筋强度设计值; σ_p 为体外预应力筋应力。当 A_p 为 0 时, 则为普通组合梁。负弯矩塑性弯矩计算简图见图 2。

2 参数分析

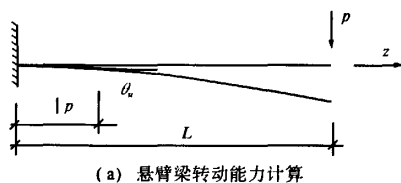
采用有限元方法^[5], 对可能影响组合梁塑性

收稿日期: 2009-01-17; 修订日期: 2009-04-12

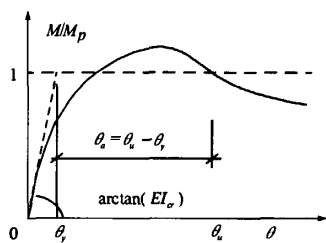
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50678132)

作者简介: 贾远林 (1977-), 男, 河南唐河人, 同济大学博士, 主要从事结构工程研究。E-mail: 5JYL@tongji.edu.cn

铰长度的参数进行了计算分析. 参数分析过程中, 除特殊说明外, 均取以下基准参数: 梁长 3 m, 钢材钢筋屈服强度 345 MPa, 预应力钢绞线屈服强度 1 680 MPa, 张拉后应力 1 000 MPa, 弹性模量 1.92×10^5 ; 混凝土板厚 130 mm, 宽 1 000 mm, 混凝土强度为 C40; 钢梁上下翼缘宽 250 mm, 上翼缘厚 8 mm, 下翼缘厚 25 mm; 腹板高 600 mm, 厚 16 mm. 综和力比为 0.4, 普通力比为 0.3.



(a) 悬臂梁转动能力计算



(b) 塑性铰转动曲线

图1 转动能力计算示意

Fig.1 Mode calculating the rotation capacity

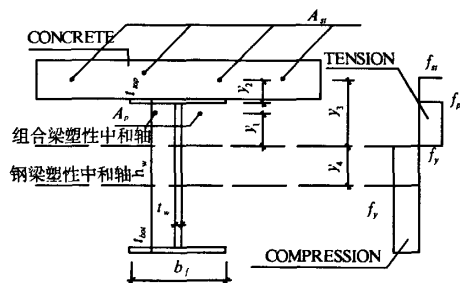


图2 负弯矩截面塑性弯矩计算简图

Fig.2 Stress distributed over cross-section with simple plasticity theory

钢梁初始几何缺陷按《钢结构工程施工质量验收规范》(GB50205-2001)选取, 取腹板高度的2/1 000.

为研究不同截面参数对塑性铰长度影响, 分别对不同位置的侧向支撑, 不同的截面几何性质进行了研究. 数据处理取横轴为沿梁长距离中支座的距离, 单位为腹板高 H_w , 纵坐标为沿梁长的非线性转角积分 $\theta_s(x)$, 单位为 mRAD, 横坐标为沿梁长方向距离中支座的距离, 单位为一个腹板高度.

2.1 梁侧向支撑对塑性铰长度的影响

实际设计中, 往往采取梁端下翼缘加侧向支撑的方式避免梁整体失稳的发生. 研究表明: 为避免发生整体失稳, 侧向支撑距离支座的距离必须满足^[7]

$$L_c = 0.45 i_c \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (2)$$

式中: i_c 为梁受压部分的回转半径, 受压部分可简化采用受压翼缘连同 1/3 腹板高.

为研究侧向支撑对于梁端塑性铰长度的影响, 计算了 3 根组合梁, 3 根梁侧向支撑距离中支座的距离分别为 1 倍、1.5 倍和 2 倍腹板高. 计算结果如图 3 所示, 从图上可以看出, 随着中支座距离侧向支撑距离的变化, 转动能力稍有变化, 但塑性铰的长度基本保持 0.5 倍的腹板高度不变. 下边的研究中均采用侧向支撑距离中支座距离为 1 倍腹板高.

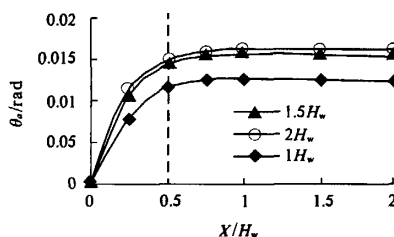


图3 不同侧向支撑 θ_s - 距支座距离曲线

Fig.3 Curves of beams with different L_c

2.2 梁跨高比对塑性铰长度的影响

混凝土梁塑性铰的成因是截面上的弯矩达到塑性极限弯矩, 并由此产生转动, 研究者对混凝土梁塑性铰长度进行了大量的研究, 发现混凝土梁塑性铰长度多有如下规律^[8]: 随着跨高比的增加而增加, 随着梁有效高度的增加而增加. 而组合梁负弯矩区塑性铰形成机理与混凝土梁塑性铰形成机理存在质的区别, 组合梁负弯矩区塑性铰的形成是由局部失稳和非线性变形共同作用而产生的非线性转角. 为研究组合梁剪跨比与塑性铰长度的关系, 此处计算了悬臂梁长分别为 1 800, 2 400, 3 000, 4 800 共 4 根梁, 计算结果如图 4 所示. 图中横坐标为悬臂梁距支座距离与腹板高度的比值, 纵坐标为距离中支座范围内的塑性转动.

从图 4 可以看出, 随着组合梁剪跨比的增加, 塑性铰区的转动能力减小. 但随着梁剪跨比的增加, 并未出现像混凝土梁中塑性铰长度增加的现象, 悬臂梁的塑性转动主要集中在腹板高度 0.5 倍之内.

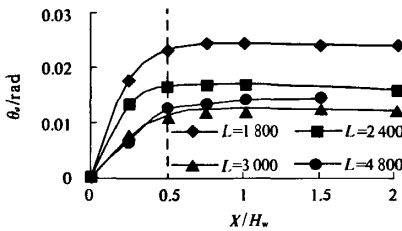


图4 不同跨度 θ_s - 距支座距离曲线
Fig.4 Curves of beams with different L

2.3 腹板高厚比

对于承受负弯矩的组合梁,腹板一方面自己承受弯矩,按弹性压杆理论,腹板又为翼缘提供侧向约束,腹板的高厚比对截面的承载能力和延性有较大影响.腹板高厚比增加降低了稳定承载力.为研究腹板高厚比对塑性铰转动能力和塑性铰长度的影响,对比了腹板高厚比不同的3个截面,如图5所示.从图5可以看出随着腹板高厚比的增加,塑性铰的转动能力从腹板高厚比为500/16的0.022下降至600/12的0.010.然而,非线性转角仍然集中在0.5倍的腹板高度之内,长度并未明显改变.

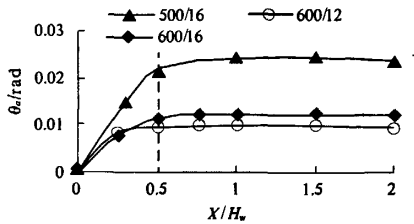


图5 不同腹板高度 θ_s 转角 - 距支座距离曲线
Fig.5 Curves of the beams with different web

2.4 力比对塑性铰长度的影响

随着钢筋配筋率的增加,塑性中和轴升高,增加了腹板受压部分的高厚比,降低了板件的屈曲临界应力,降低稳定承载力.朱聘儒、余志武分别采用普通力比和综和力比来分别表示钢筋和预应力钢筋含量的多少.

普通力比^[2]:

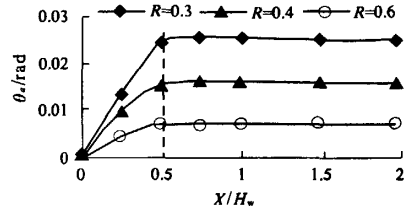
$$R_0 = \frac{A_s f_u}{A_s f_y} \quad (4)$$

综和力比^[4]:

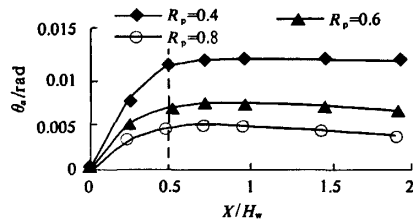
$$R_p = \frac{A_s f_u + A_p \sigma_p}{A_s f_y} \quad (5)$$

为研究普通组合梁随力比的变化对塑性铰长度的影响,计算了普通力比分别为0.3、0.4和0.6的3根组合梁,计算结果如图6(a)所示,从图上

可以看出随着力比的增加转动能力下降,但塑性铰长度并未发生明显的变化,仍然集中在0.5倍腹板高度之内.为研究预应力筋综和力比对塑性铰长度的影响,计算了普通力比为0.3,综和力比分别为0.4、0.6和0.83组梁.结果如图6(b)所示,与普通组合梁相似,随着力比的增加,塑性铰区的转动能力下降,然而塑性铰长度并未发生明显变化,非线性转动仍然集中在0.5倍的腹板高度之内.



(a) 普通组合梁不同力比



(b) 预应力组合梁不同综和力比

图6 不同力比 θ_s - 距支座距离曲线

Fig.6 Curves of beams with different R or R_p

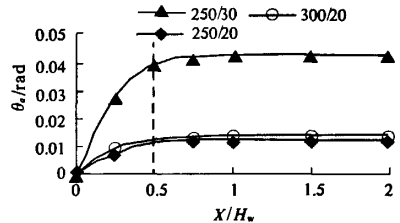


图7 不同翼缘宽厚比 θ_s - 距支座距离曲线

Fig.7 Curves of beams with different flange

2.5 翼缘宽厚比

组合梁负弯矩区的局部失稳往往是翼缘和腹板的相关失稳,相互影响,先失稳板件又加速尚未失稳板件的失稳.对比了两组不同翼缘宽厚比的组合梁如图7所示.从图7可以看出,翼缘厚度250/30的截面负弯矩区的转动能力大大高于300/20的转动能力.非线性转角仍然集中在0.5倍的腹板高度范围内.

3 结论

笔者研究了跨高比、支撑距离中支座的距离、

综合力比以及截面几何参数对预应力组合梁塑性铰长度和转动能力的影响,结果表明无论普通组合梁或是预应力组合梁,在梁端负弯矩作用下的塑性铰长度约为 0.5 倍的钢梁腹板高度.本结论对认识组合梁在负弯矩作用下的延性,对连续组合梁的塑性设计具有参考价值.

参考文献:

- [1] CHEN S M. Instability of composite beams in hogging bending[D]. Warwick university, 1992.
- [2] 朱聘儒,高向东.钢-砼连续组合梁塑性铰特性及内力重分布研究[J].建筑结构学报,1990,11(6): 26-37.
- [3] 樊建生,聂建国.钢-压型钢板混凝土连续组合梁调幅系数试验研究[J].建筑结构学报,2001,22(2):57-60.
- [4] 余志武,周凌宇,罗小勇.钢-部分预应力混凝土连续组合梁内力重分布研究[J].建筑结构学报, 2002,23(6):64-69.
- [5] CHEN S M, JIA Y L, WANG X D, Study of inelastic buckling of continuous composite beams-finite element analysis[C]. The 8th International Conferences on Advances in Structural Engineering and Mechanics (ASEM'08), Korea, 2008.
- [6] CHEN S, Experimental study of prestressed steel-concrete composite beams with external tendons for negative moments[J]. Journal of constructional steel research, 2005, 61(12):1613-1630.
- [7] AHTI L. Available rotation capacity of composite bridge plate girders under negative moment and shear[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61:305-327.
- [8] 蒲黔辉,杨永清.部分预应力混凝土梁塑性铰区长度的研究[J],西南交通大学学报,2002,37(2):195-198.

Study of the Plastic Hinge Length of Steel and Concrete Composite Beams with External Tendons under Negative Bending

JIA Yuan - lin^{1,2}, CHEN Shi - ming¹, WANG Xin - di¹

(1. School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Architecture Design & Research Institute, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to study the length of the plastic zone in prestressed composite beams under negative moment, parameter analysis was performed with FEM by using the cantilever beam model. The analysis results show that the behavior of the composite beam is governed by buckling and the plastic hinges length of composite beam is about one-half the height of steel beam web, and does not vary with the geometric properties.

Key words: prestressed composite beam; negative moment; length of plastic hinges; rotation capacity; ABAQUS