

基于 ANSYS 的蜂窝梁受力性能分析*

王立福, 杨佑发, 石 诚

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:蜂窝梁作为一种经济合理的构件形式在工程中得到了广泛的研究和应用,但是关于孔洞对蜂窝梁弹塑性性能影响的研究还不够深入。利用非线性有限元分析方法对六边形孔蜂窝梁进行了弹塑性分析,研究了孔洞对蜂窝梁的应力分布、塑性区分布及挠曲变形的影响,并与实腹梁的受力性能进行了分析比较,对工程设计提出了建议。

关键词:蜂窝梁;非线性;有限元;ANSYS

中图分类号:TU313.3

文献标识码:A

文章编号:1006-7329(2004)02-0072-04

Load Characteristics Analysis of Castellated Beam Based on ANSYS

WANG Li-fu, YANG You-fa, SHI Cheng

(College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P.R. China)

Abstract: In order to analyze the influence of holes on castellated beam behavior, one typical castellated beam with hexagon holes are studied through nonlinear finite-element analysis. Stress and plastic distribution, flexural deflection are investigated and compared with those of beam without holes and proposition to design practice are put forward.

Keywords: castellated beam; nonlinear finite-element analysis; ANSYS

蜂窝梁是将宽翼缘工字钢(或H型钢)或普通工字钢按一定的折线或圆弧线切割后错位焊接而成的空腹梁。蜂窝梁的截面高度 H 与原工字钢的截面高度 h 之比称作扩张比;在蜂窝梁的空腹部分由上翼缘或下翼缘与部分腹板所组成的T形截面的等截面部分称为“桥”;蜂窝梁的实腹部分称为“墩”;桥与墩相接处称为“桥趾”。由于扩张后的截面高度较原工字钢有较大的增加,从而提高了梁的刚度和承载能力,既节省了钢材,又减轻了梁体本身的自重。同时,蜂窝梁制作简单,腹板的空洞既美观又便于穿设管线,因此蜂窝梁在工程中具有很大的实用价值,正得到越来越广泛的应用。

本文利用非线性有限元分析方法对六边形孔蜂窝梁进行了弹塑性分析,研究了孔洞对蜂窝梁受力性能的影响,分析了其应力分布、塑性区分布及挠曲变形,与实腹梁的受力性能进行了分析比较,并对工程设计提出了建议。

1 有限元分析模型

蜂窝梁计算模型的扩张比取为1.5,跨度 $l=6912$ mm,由I32a工字钢切割焊接而成,相应的几何尺寸、测点布置及孔洞编号如图1和图2所示。

利用通用有限元分析软件ANSYS建立有限元分析模型,采用三维4节点壳单元进行网格划分,孔洞周围用较小的单元细化(如图3)。为突出孔洞构造对蜂窝梁受力性能的影响,建模时忽略了焊缝和焊接残余应力的影响。材料为Q235钢,分析时简化为理想弹塑性模型,采用Von Mises屈服准则及其相

* 收稿日期:2003-12-05

基金项目:重庆市科委资助项目(7771)

作者简介:王立福(1978-),男,山东潍坊人,硕士生,主要从事结构性能分析研究。

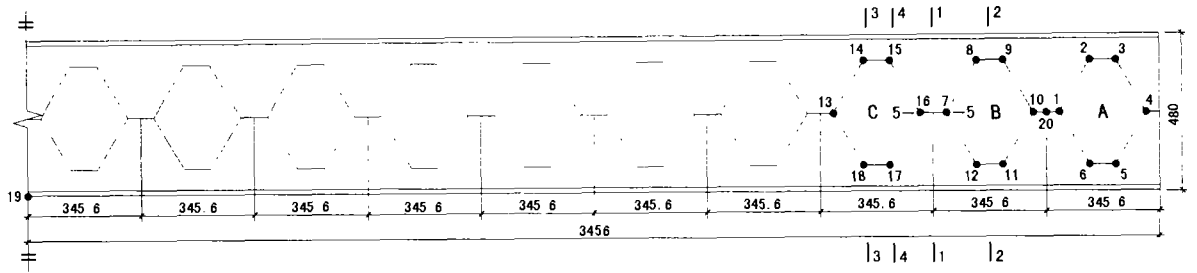


图 1 蜂窝梁构造尺寸(mm)

关的流动法则。材料弹性模量为 $2.06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$,泊松比为 0.3,屈服强度为 235 N/mm^2 。在梁的上翼缘由 0 到 0.5 N/mm^2 逐步施加均布面荷载,当梁的某一截面形成“塑性铰”后,程序在求解有限元方程 $[K]\{\delta\} = \{P\}$ 时就会出错,也就预示着梁的破坏。

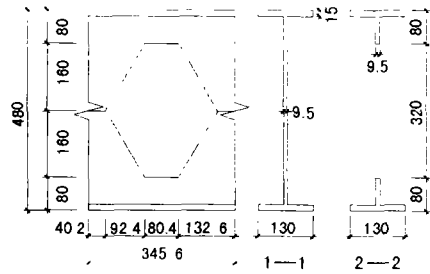


图 2 孔洞和截面尺寸/mm

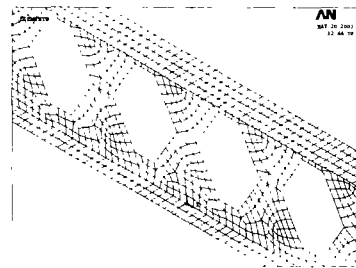


图 3 模型的有限元网格

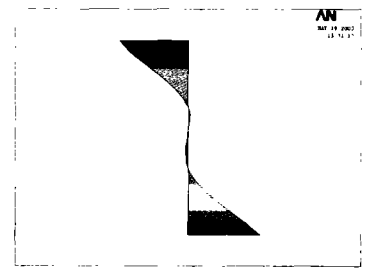


图 4 桥墩截面的正应力分布

2 计算结果及分析

2.1 应力分布

沿以下几条路径分析了蜂窝梁在荷载作用下的应力分布情况:(1)桥墩截面 1-1;(2)梁桥截面 2-2;(3)桥趾截面 3-3,4-4;(4)墩腰截面 5-5。

图 4 为 1-1 截面的正应力分布,从图中可以看出:由于受孔洞的影响,蜂窝梁实腹段沿梁高方向的正应力分布呈非线性分布,与实腹梁截面的应力分布具有很大的差别,不符合材料力学的平截面假定。笔者另外还计算了其它几根相同跨度、不同扩张比的六边形孔蜂窝梁,结果表明:随着扩张比的减小,桥墩截面的正应力分布渐趋于直线分布。

梁桥截面 2-2、桥趾截面 3-3、4-4 的正应力分布分别如图 5-A、5-B、5-C 所示,均呈梯形分布,但孔洞 C 的左右两个桥趾截面的正应力分布在分布形式上是不同的。之所以会出现这种差异,是因为桥趾截面的正应力受剪力次弯矩的影响而由两部分组成:弯矩正应力和剪力次弯矩正应力。

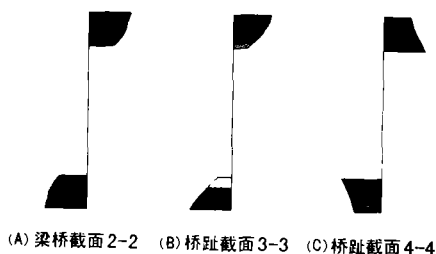


图 5 梁桥、桥趾截面的正应力分布

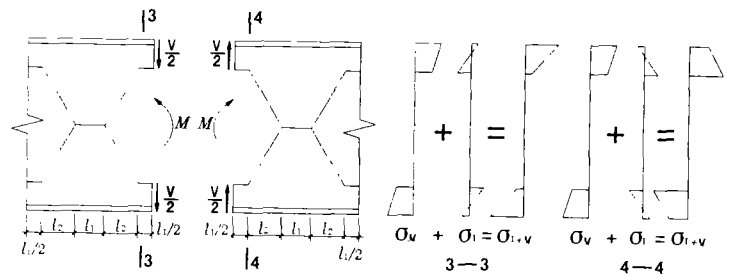


图 6 桥趾截面的正应力叠加

如图 6,假定梁桥中部截面的剪力为 V ,上下两个 T 形截面各承担 $V/2$;桥趾截面处的弯矩为 M ,则桥趾截面处的正应力为:

$$\sigma = \frac{M_y}{I} + \frac{V l_1 y'}{4 I_T}$$

其中 I 为整个梁桥截面的惯性矩; I_T 为 T 型截面的惯性矩; l_1 为梁桥宽度; y 和 y' 分别为计算高度处距离梁桥截面形心和 T 形截面形心的高度。

图 7、图 8 分别给出了蜂窝梁桥墩截面 1-1 和实腹梁横截面的剪应力和 Von Mises 应力分布, 可以看出两者的 Von Mises 应力分布是截然不同的。在实腹梁中, Von Mises 应力沿梁高方向呈抛物线形分布, 翼缘处大而腹板中间位置小。但对蜂窝梁而言, 沿梁高方向 Von Mises 应力却近似呈侧置的“W”形分布, 并有明显的应力集中现象, 在墩腰处出现 Von Mises 应力峰值。之所以会出现这种现象, 是由于腹板的开洞而造成的。蜂窝梁在腹板的开洞导致腹板的不连续性且面积削弱较大, 使剪应力沿梁高分布非常不均匀, 并在墩腰处具有较大的峰值。

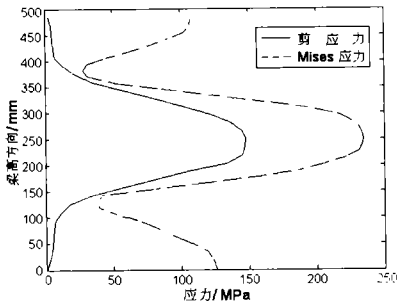


图 7 1-1 截面应力分布

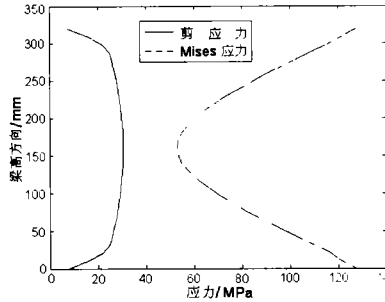


图 8 实腹梁横截面应力分布

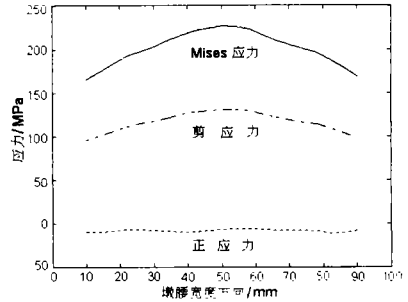


图 9 5-5 截面应力分布

在实腹钢梁的设计中, 剪应力对腹板强度的影响往往很小, 多数情况下可忽略不计, 但对于蜂窝梁而言, 由于腹板的开洞使墩腰处的剪应力具有明显的峰值, 特别是在靠近梁端的部位, 就有可能因墩腰处剪应力过大而发生破坏。因此在对蜂窝梁进行控制截面的验算时, 剪应力成为重要的控制因素。

图 9 为墩腰截面 5-5 处沿墩腰宽度的应力分布, 可见沿墩腰的宽度方向剪应力的分布也呈现非线性性质: 中间大而两端孔角处小。与正应力相比, 剪应力的非线性性质更为明显, 对墩腰部位的受力影响也更加显著。在墩腰的中间部位, 剪应力表现为最大值, 根据剪应力互等定理, 该剪力值与 1-1 截面的剪应力峰值是相等的, 而墩腰处是靠焊缝连接的, 在峰值剪应力的作用下, 就很可能造成该处连接焊缝的破坏。当应力集中区域存在焊接缺陷(尤其是靠近梁端的剪力较大处)时, 就会进一步加重应力集中, 很容易造成裂缝的扩展, 从而引起墩腰处的破坏。因此设法减小墩腰处的应力集中, 尽量减少墩腰处的焊接缺陷是保证蜂窝梁良好工作性能的重要措施。

通过以上分析可知, 受腹板开洞影响, 蜂窝梁横截面应力分布与实腹梁是不同的, 孔洞的存在使某些部位存在严重的应力集中, 其受力机理不符合传统的弯曲理论。鉴于此, 在工程设计中对腹板强度和连接焊缝进行验算时, 都需考虑孔洞对应力分布的影响, 进行简化计算时应将作用剪力作适度提高。

2.2 塑性分布和挠曲变形

图 10 是整个蜂窝梁的 Von Mises 应力分布云图, 可见六边形孔蜂窝梁的塑性区域主要集中于靠近梁端孔洞的各孔角、上下桥墩的连接部位和跨中一定范围内上下翼缘和腹板。孔角部位的塑性扩展区域较小, 仅限于孔角处的局部范围; 而跨中腹板的塑性发展则主要集中于靠近翼缘的梁桥高度范围内。

图 11、12、13 分别为孔 A、B、C 各角点的 Von Mises 应力随荷载的变化曲线, 结合图 14 可知, 在荷载作用下, 孔角由于应力集中而先于其它部位进入屈服。对于每个孔洞而言, 首先进入屈服的是靠近支座方向的上下两个孔角, 然后是靠近跨中方向的上下两个孔角, 墩腰处的两个孔角的塑性发展则明显晚于上下孔角。随后, 距离两端支座较近的实腹段墩腰部位, 由于受孔洞的影响而存在应力集中(如图 7), 在较大的剪力作用下进入屈服, 并且随着荷载的增加, 塑性区域逐渐向跨中的腹板扩展, 同时跨中的上下翼缘由于承受弯曲应力而进入屈服并向翼缘两侧和腹板扩展。

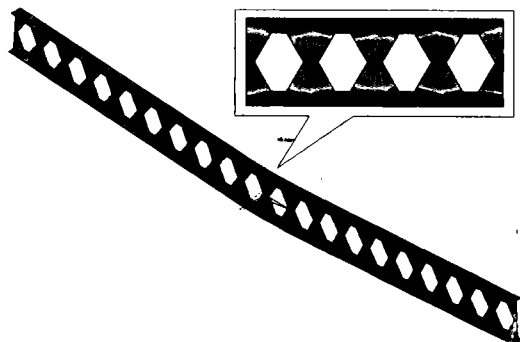


图 10 蜂窝梁的 Von Mises 应力分布云图

最终在弯、剪的共同作用下,跨中段的孔洞梁桥全截面进入屈服,形成塑性铰而导致整个梁的破坏。

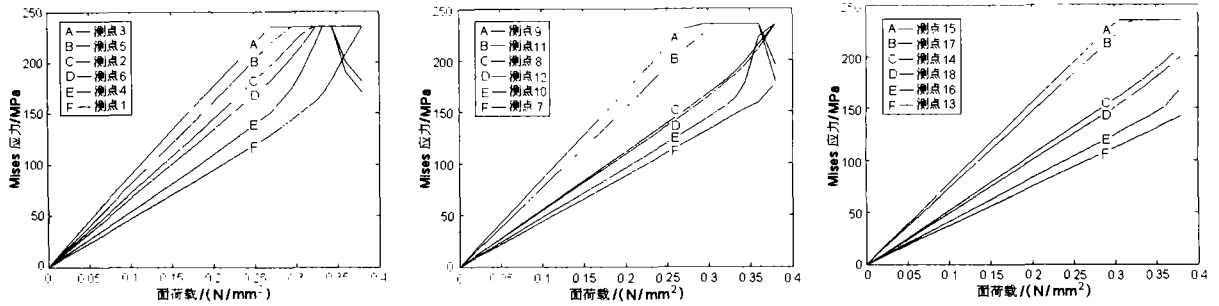


图 11 角点 1-6 的荷载 - 应力曲线 图 12 角点 7-12 的荷载 - 应力曲线 图 13 角点 13-18 的荷载 - 应力曲线

由图 14 中跨中挠度随荷载的变化曲线(曲线 F)可以看出,跨中挠度随荷载的变化大致可分为三段:a 点之前为弹性阶段,挠度与荷载呈线性关系;当超过 a 点后,部分孔角进入塑性,但由于塑性区域较小且靠近梁的端部,塑性区域的扩展对挠度并未产生明显的影响;在 b 点, A 孔靠近支座处的上下孔角发生局部破坏,随后跨中上下翼缘也进入屈服,并向两侧扩展,致使跨中挠度迅速增加;随着塑性区向腹板的深入,到达 c 点时由于跨中段某个截面完全屈服,也就是形成了塑性铰,塑性铰的转动使跨中挠度急剧增加,曲线斜率接近于无限大。

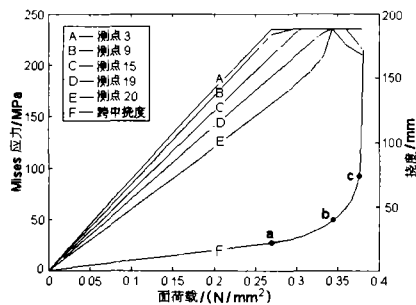


图 14 测点 3、9、15、19、20 的荷载 - 应力曲线及跨中挠度荷载的变化曲线

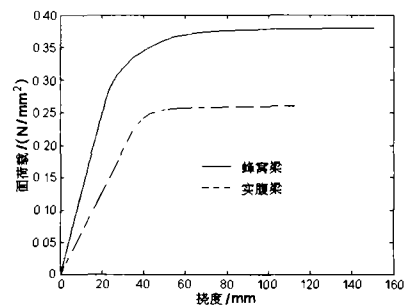


图 15 蜂窝梁和实腹梁的荷载 - 跨中挠度曲线对比

表 1 结算结果对比

结果数据	弹性位移 (mm)	弹性极限承载力 (N/mm ²)	破坏荷载 (N/mm ²)
实腹梁	38.917 3	0.239 2	0.260 4
蜂窝梁	21.886 1	0.269 6	0.380 3

图 15 为梁的荷载 - 跨中挠度曲线,结合表 1 可知:蜂窝梁弹性极限荷载比未经切割的实腹梁提高 12.58%;蜂窝梁的破坏荷载比实腹梁的破坏荷载提高 46.15%。同时可以算得蜂窝梁的初始刚度(弹性刚度)是实腹梁的初始刚度的 2.01 倍。显然,对蜂窝梁而言,承载能力的提高没有刚度提高那么明显。这主要是因为蜂窝梁的孔洞对剪应力的分布有很大的影响,使得蜂窝梁的破坏与实腹梁不同,是由弯剪共同作用引起的。故此,在设计蜂窝梁时,不能片面的追求扩张比,虽然大的扩张比能够提高梁的抗弯刚度,但同时也会由于开洞过大使腹板削弱较多而降低抗剪承载能力。

3 结论

利用非线性有限元分析方法对蜂窝梁进行了弹塑性分析,研究了其应力分布、塑性区分布及挠曲变形,并对蜂窝梁和实腹梁的受力性能进行了分析比较。通过以上分析,可以得到如下结论:

1) 由于扩张后的蜂窝梁截面高度较原工字钢有较大的增加,从而有效提高了梁的刚度和承载能力,但从本文的计算结果来看,蜂窝梁承载能力的提高没有刚度提高明显。

4 发展展望

当然,就目前而言,此种机制在中国现有情况下还难以实施,因为此机制的假设条件并不成熟。但根据我国政治、经济、体制改革的发展思路方向来看,体制的转变公众参与机制的推行是众望所归,它无疑是吻合的,因此,此评价机制的建立应该是具有广阔研究前景的。

参考文献:

- [1] 王唯铭.不可遏制的活力——东西方尺度比照中的上海百年建筑[M].上海:上海文艺出版社,2000.
- [2] 仁致远.城市规划师的历史与责任[J].规划师,2003,19(1):84-86.
- [3] 朱文华(执笔).中外城市规划比较研究课题组.香港台湾地区及国外城市规划机构设置研究[J].城市规划,1999,23(3),38-42.
- [4] 黄玉英,龙国英.建构公众参与的城市规划机制[J].规划师,2003,19(3):56-89.
- [5] 殷洁,罗小龙.我国城市规划中 NGO 的发展与思考[J].规划师,2003,19(1):74-76.
- [6] Clare Maruls, Carolyn Francis.人性空间——城市开放空间设计导则[M].北京:中国建筑工业出版社,2001.
- [7] 朱文华.谈我国城市规划管理体制变革[J].规划师,2003,19(5):7-12.
- [8] 徐磊青,杨公侠.环境心理学[M].上海:同济大学出版社,2002.
- [9] 钱健,宋雷.建筑外环境设计[M].上海:同济大学出版社,2001.
- [10] 吕忠梅.环境法[M].北京:法律出版社,2000.

(上接第 75 页)

2) 受腹板开洞的影响,蜂窝梁的应力分布、受力机理并不符合传统的弯曲理论,故在进行设计计算时应考虑腹板开洞对应力分布所造成的影响。

3) 靠近蜂窝梁端部的腹板因作用剪力较大,剪力使该截面有很大的应力和变形,可增加实腹段宽度或加肋予以加强。

4) 在设计蜂窝梁时,不能片面的追求扩张比,虽然大的扩张比能够提高梁的抗弯刚度,但同时也会由于开洞过大使腹板削弱较多而降低抗剪承载能力。

参考文献:

- [1] 王洪范,王立新.蜂窝梁的应用和计算方法[J].工业建筑,1994,(8):3-4.
- [2] 王良才.空腹钢梁设计若干问题的探讨[J].广西土木建筑,1995,20(3):98-100.
- [3] 何一民,郝建丽.蜂窝梁及蜂窝压弯杆件的强度计算[J].工业建筑,1994,(8):5-8.
- [4] 苏益声,王良才.多边形孔蜂窝钢梁优化设计初探[J].广西大学学报,1994,19(3):242-244.
- [5] 王万桢,顾强.钢框架梁柱焊节点的有限元分析[J].建筑结构,2002,32(9):7-10.
- [6] 陈绍蕃.钢结构设计原理[M].北京:科学出版社,1997.