

文章编号: 1001-2486(2009)03-0033-04

剪切变形对夹芯复合材料悬臂箱梁挠度的影响^{*}袁端才¹, 徐文明¹, 蒋志刚¹, 蒙上阳²

(1. 国防科技大学 指挥军官基础教育学院, 湖南 长沙 410072; 2. 中国人民解放军 63961 部队, 北京 100012)

摘要: 为了分析剪切变形对夹芯复合材料悬臂箱梁挠度的影响, 推导了夹芯复合材料薄壁箱梁的等效弯曲刚度和剪切刚度, 将夹芯复合材料悬臂箱梁等效为具有等跨度等刚度的均质箱梁; 利用初等梁理论得到了考虑剪切变形的夹芯复合材料悬臂箱梁的挠曲线方程; 分析了剪切变形对夹芯复合材料薄壁箱梁挠度的影响, 为复合材料薄壁箱梁的设计提供了理论参考。

关键词: 夹芯复合材料; 悬臂箱梁; 初等梁理论; 剪切变形

中图分类号: O347 文献标识码: A

Flexibility Effect of Shearing Deformation on Cantilever Box Girder of Sandwich Composite Materials

YUAN Duan-cai¹, XU Wen-ming¹, JIANG Zhi-gang¹, MENG Shang-yang²

(1. College of Basic Education for Commanding Officers, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Chinese People's Liberation Army 63961 Unit, Beijing 100012, China)

Abstract: To analyze the flexibility effect of shearing deformation on cantilever box girder of sandwich composite materials, the equivalent bending stiffness and shear stiffness of the box girder are deduced, the cantilever box girder is equivalent to an isotropy box girder which has the same long-span and stiffness. The flexibility which takes shear deformation into account of sandwich composite materials of cantilever box girder is analyzed by primary beam theory. The effect of shear deformation to the whole flexibility of the box girder is analyzed. The methods and conclusions are available for the designers on box girder of sandwich composite materials.

Key words: sandwich composite materials; cantilever box girder; primary beam theory; shearing deformation

目前, 渡河桥梁装备的结构材料主要是钢质材料, 钢质材料存在自重大、易腐蚀的不足。从长远来看, 高性能复合材料无疑是最具潜力的替代材料。在渡河桥梁装备中应用复合材料, 减轻结构重量, 提高机动能力, 成为未来发展的重要方向之一^[1]。大跨度桥梁的架设离不开导梁, 悬臂推出架设法中采用的导梁属悬臂薄壁箱梁, 导梁的挠度往往成为设计的控制因素。因此, 开展夹芯复合材料悬臂箱梁挠度的理论分析, 对新型军用导梁的研制具有一定的指导意义。

李宏江等^[2]结合波形钢腹板箱梁的结构特点并应用初等梁理论, 提出了该种箱梁受弯时考虑剪切变形影响的挠度计算方法, 并利用模型试验和有限元分析进行了验证。吴亚平^[3]以层合板理论为基础, 考虑了薄壁箱梁的剪切剪滞效应^[4-5], 略去耦合影响, 提出了一种复合材料薄壁箱梁弯曲的计算方法, 并与实验结果进行了对比。就目前文献来看, 夹芯复合材料薄壁箱梁的研究尚不多见, 本文推导夹芯复合材料薄壁箱梁的等效弯曲刚度和剪切刚度, 将夹芯复合材料悬臂箱梁等效为具有等跨度等刚度的均质箱梁, 利用初等梁理论计算考虑剪切变形的夹芯复合材料悬臂箱梁的挠度, 分析剪切变形对夹芯复合材料薄壁箱梁挠度的影响。

1 夹芯复合材料薄壁箱梁的弯曲刚度与剪切刚度

为了简化分析, 采用 Sandwich 夹芯板理论, 将铝合金蜂窝夹芯层等效为一均质的、厚度不变的正交异性层。对于正六边形夹芯蜂窝, 等效弹性参数^[6-7]表示为:

* 收稿日期: 2008-07-07

作者简介: 袁端才(1963-), 男, 副教授, 博士。

$$\begin{cases} E_x = E_y = \frac{4}{\sqrt{3}} \left(\frac{t}{l} \right) E \\ G_{xy} = \frac{\sqrt{3}}{2} \gamma \left(\frac{t}{l} \right)^3 E \\ G_{xz} = \frac{\gamma}{\sqrt{3}} \frac{t}{l} E \\ G_{yz} = \frac{\sqrt{3}}{2} \gamma \frac{t}{l} G \\ \mu_{xy} = \frac{1}{3} \end{cases} \quad (1)$$

式中, E 、 G 为夹芯材料的弹性工程常数; l 、 t 分别为夹芯蜂窝单元的边长和厚度; γ 为修正系数, 理论计算时取 1.0。

夹芯复合材料薄壁箱梁弯曲时仍采用初等梁理论中的基本假设: 薄壁箱梁在纯弯曲状态下, 梁的横截面变形服从平截面假设, 即变形前的平面在变形后仍保持为平面。荷载作用下夹芯复合材料薄壁箱梁处于平衡状态时, 横截面法向的正应力 α_x 产生的弯矩等于该截面的外力矩 M , 即

$$M = \int_A \alpha_x z \, dA = \int_A E_x \frac{z}{\rho} \, dA = \frac{1}{\rho} \int_A E_x z^2 \, dA \quad (2)$$

由弯曲刚度的定义, 薄壁箱梁的截面弯矩和弯曲曲率 ρ 的关系为:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{EI_y} \quad (3)$$

式中, EI_y 为夹芯复合材料薄壁箱梁截面的总体抗弯刚度, 由式(2)和(3)可得:

$$\overline{EI_y} = \int_A E_x z^2 \, dA \quad (4)$$

实际工程应用中常采用对称的层合板, 文中的夹芯复合材料薄壁箱梁也采用双轴对称的铺设结构, 计算的截面惯性矩的中性轴即为对称轴 y 轴, 如图 1 所示。

由(4)式得夹芯复合材料箱梁截面的抗弯刚度

$$\overline{EI_y} = \sum_{i=1}^{m+n} E_x^{(i)} \int_A z^2 \, dA = \sum_{k=1}^m E_x^{(k)} I_y^{(k)} + \sum_{l=1}^n E_x^{(l)} I_y^{(l)} \quad (5)$$

式中, $I_y^{(k)}$ 和 $I_y^{(l)}$ 分别是翼板的第 k 层和腹板的第 l 层对中性轴 y 轴的惯性矩, 翼板和腹板的铺层总数分别为 m 和 n 。夹芯复合材料箱梁是一种薄壁结构, 层合板的剪切模量较低, 剪切变形对箱梁挠度的影响不可忽略, 否则会造成大的计算误差。设复合材料箱梁的剪切刚度为 \overline{GA} , 则

$$\overline{GA} = \sum_{i=1}^{m+n} G_i A_i = \sum_{k=1}^m G_k A_k + \sum_{l=1}^n G_l A_l \quad (6)$$

式中, G_k 为翼板铺层厚度方向的剪切刚度, G_l 为腹板铺层面内方向的剪切刚度。

2 夹芯复合材料薄壁箱梁挠曲线方程

计算出夹芯复合材料薄壁箱梁的整体弯曲刚度和剪切刚度后, 将其等效为等跨度等刚度的均质箱梁, 采用初等梁理论计算其挠度。

初等梁理论中梁的挠曲线方程是从纯弯曲的平面假设导出的, 只考虑了弯矩所引起的挠度, 忽略了剪力对挠度的影响, 按照 Timoshenko 理论, 在弯矩、剪力共同作用下的梁的挠度, 包括了弯矩引起的挠度

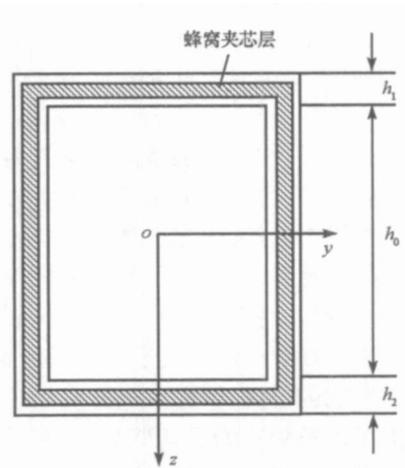


图 1 夹芯复合材料薄壁箱梁截面
Fig. 1 Section of sandwich composite materials box girder

和剪力引起的挠度。分析剪力引起的挠度时, 仍假设原来垂直于中性轴的平面变形后仍然保持为平面, 但不与中性轴垂直, 只有箱梁的竖向剪切位移与中性轴垂直。

对于在均布荷载作用下的悬臂箱梁, 如图 2 所示, 跨径为 l , 均布荷载 q 作用在箱梁的全跨上, 那么

$$Q(x) = q(l - x) \quad (7)$$

$$M(x) = \frac{1}{2}q(l - x)^2 \quad (8)$$

可推得夹芯复合材料薄壁箱梁弯曲变形时总挠度

$$z = \frac{q}{2EI_y} \left(\frac{1}{2}l^2x^2 - \frac{1}{3}lx^3 + \frac{1}{12}x^4 \right) + \frac{kq}{GA} \left(lx - \frac{1}{2}x^2 \right) \quad (9)$$

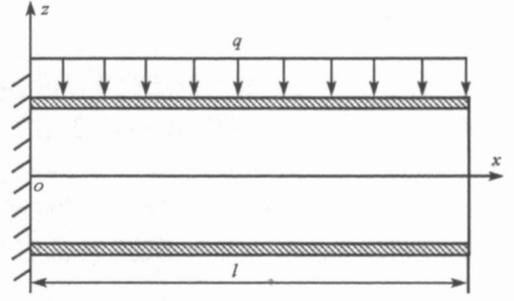


图 2 均布荷载作用下的悬臂箱梁
Fig. 2 Cantilever box girder under equally distributed load

计算夹芯复合材料悬臂箱梁的挠度时, 在翼板的上表面作用一均布荷载, 均布荷载值的大小与薄壁箱梁翼板面积之积为 $1.0 \times 10^3 N$ 。为了分析剪切变形对夹芯复合材料箱梁的影响, 分别对 6m、12m、24m 和 36m 四种长度的薄壁箱梁进行挠度分析。夹芯复合材料薄壁箱梁截面高为 0.725m, 宽为 0.475m; 复合材料单向板为 T30Q5208, 层合板铺层角度为 $[0/45/-45/90/C_8]_s$, 复合材料单向板的厚度为 0.2mm, 铝合金蜂窝夹芯的厚度为 8mm。根据夹芯复合材料薄壁箱梁的截面尺寸, 计算出箱梁截面的弯曲刚度和剪切刚度, 得到 6m、12m、24m 和 36m 四种长度的夹芯复合材料薄壁箱梁的挠曲线方程如表 1。

表 1 不同长度箱梁的挠曲线方程

Tab. 1 Flexibility equations of box girders

| 箱梁长度 | 不考虑剪切变形的挠曲线方程 | 考虑剪切变形的挠曲线方程 |
|------|---|---|
| 6m | $5.15 \times 10^{-6} \times (18x^2 - 2x^3 + 0.0833x^4)$ | $5.15 \times 10^{-6} \times (18x^2 - 2x^3 + 0.0833x^4) + 1.375 \times 10^{-5} \times (6x - 0.5x^2)$ |
| 12m | $2.58 \times 10^{-6} \times (72x^2 - 4x^3 + 0.0833x^4)$ | $2.58 \times 10^{-6} \times (72x^2 - 4x^3 + 0.0833x^4) + 6.88 \times 10^{-6} \times (12x - 0.5x^2)$ |
| 24m | $1.29 \times 10^{-6} \times (288x^2 - 8x^3 + 0.0833x^4)$ | $1.29 \times 10^{-6} \times (288x^2 - 8x^3 + 0.0833x^4) + 3.44 \times 10^{-6} \times (24x - 0.5x^2)$ |
| 36m | $8.58 \times 10^{-7} \times (648x^2 - 12x^3 + 0.0833x^4)$ | $8.58 \times 10^{-7} \times (648x^2 - 12x^3 + 0.0833x^4) + 2.29 \times 10^{-6} \times (36x - 0.5x^2)$ |

3 剪切变形对挠度的影响

由考虑剪切变形和不考虑剪切变形的夹芯复合材料薄壁箱梁的挠曲线方程, 可分析剪切变形对挠度的影响。图 3 给出了夹芯复合材料悬臂箱梁的剪切挠度占总挠度的比例随箱梁长度的变化关系。对于长度为 6m 的复合材料薄壁箱梁, 剪切变形引起的挠度占总挠度的 12.9%; 当长度为 12m 时, 剪切变形对挠度的影响迅速减至 3.56%; 长度为 24m、36m 时的剪切变形对挠度的影响不超过 1%, 可以忽略其对整个夹芯复合材料箱梁挠度的影响。该结论和各向同性材料的箱梁结果相似, 即截面尺寸与箱梁长度之比较大者其剪切变形对挠度的影响要大于截面尺寸与箱梁长度之比较小者。所不同的是, 对于普通梁, 当梁的高度与跨度之比小于 1/10 时, 就可以忽

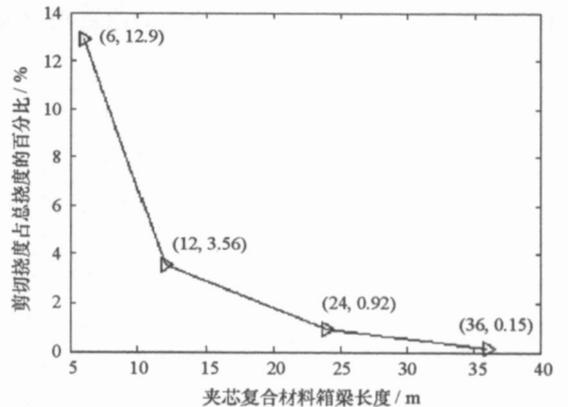


图 3 剪切挠度与复合材料箱梁长度的关系
Fig. 3 The relation of shearing flexibility and box girder length

略剪切变形对挠度的影响,但对于夹芯复合材料薄壁箱梁,梁的高度与跨度之比要小于 $1/20 \sim 1/18$ 时才可以忽略剪切变形对挠度的影响。

4 结束语

(1) 计算夹芯复合材料箱梁的挠度时,可将夹芯铺层等效为均质的厚度不变的正交异性层,推导出复合材料箱梁截面的弯曲刚度和剪切刚度,将夹芯复合材料箱梁等效为等刚度等跨度的均质箱梁进行计算。

(2) 剪切变形对夹芯复合材料箱梁挠度的影响比普通箱梁严重,在高跨比小于 $1/20 \sim 1/18$ 时才可忽略剪切变形对夹芯复合材料箱梁挠度的影响。

参考文献:

- [1] 刘建成,林铸明,许德强,等. 复合材料在渡河桥梁中的应用和发展[J]. 工兵装备研究, 2004, 23(1): 41- 45.
- [2] 李宏江,叶见曙,万水,等. 剪切变形对波形钢腹板箱梁挠度的影响[J]. 交通运输工程学报, 2002, 2(4): 17- 20.
- [3] 吴亚平. 复合材料薄壁箱梁的剪滞剪切效应分析[J]. 土木工程学报, 1996, 29(4): 31- 37.
- [4] Xiang Y Q, Yao Y D, Wang J F. Analysis of Shear Lag Effect in Box Girder of Cable-stayed Bridge with Mono-tower and Mono-cable Plane[C]// Proceedings of IABSE Symposium, Shanghai, 2004: 284- 285.
- [5] Wu G F, Xu H. Theoretical and Experimental Study on Shear Lag Effect of Partially Cable-stayed Bridge [J]. Zhejiang University Science, 2005, 6A (8): 875- 877.
- [6] 夏利娟,金成定,汪痒宝. 卫星结构蜂窝夹层板的等效计算[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(7): 999- 1001.
- [7] Fu M H, Yin J R. Equivalent Elastic Parameters of the Honeycomb Core[J]. Acta Mechanica Sinica, 1999, 31 (1): 113- 118.
- [8] 何伟. 利用 MSC Patran/Nastran 分析复合材料夹层结构[J]. 计算机辅助工程, 2006, 15(suppl).
- [9] 石建军,吴东辉,迟波,等. Shell91 单元在复合材料蜂窝夹层结构分析中的应用[J]. 纤维复合材料, 2006(3): 40- 42.

(上接第5页)

参考文献:

- [1] 程富强. 环周进汽的汽-液两相流喷射升压装置研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2002.
- [2] 严俊杰,刘继平,邢泰安,等. 变截面超音速汽-液两相流升压过程的研究[C]// 中国工程热物理学会 2002 年学术会议, 大连, 2002.
- [3] 杨晨,唐胜利,何祖威. 一种两相流动态数学模型的建模方法及应用[J]. 发电设备, 1999, 39 (3): 11- 20.
- [4] 郭锦鹏. 低压蒸汽喷射器换热装置的特性研究[D]. 武汉: 华北电力大学, 2004.
- [5] 刘继平,严俊杰,陈国慧. 进水温度对汽液两相流激波升压特性影响的实验研究[J]. 热能动力工程, 2001, 16(6): 622- 624.
- [6] 严俊杰,刘继平,邢泰安,等. 变截面通道内超音速两相流升压过程的研究[J]. 西安交通大学学报, 2003, 27(3): 221- 224.