

文章编号: 1002-0268 (2004) 07-0051-03

南京长江第二大桥南汉主桥流线形薄壁扁平钢箱梁分析的新方法

刘丽萍¹, 王应良²

(1. 中交公路规划设计院, 北京 100010; 2 四川省交通厅公路设计院, 四川 成都 610041)

摘要: 本文介绍南京长江第二大桥南汉主桥流线形扁平薄壁钢箱梁横隔板的空间节段模型和采用梯形纵向加劲肋钢桥面计算的等效格子梁法, 分析了正交异性板的第二体系的应力, 和传统的 Peklan-Esslinger 法相比较, 采用空间节段模型和等效格子梁法得到的结果更加全面、准确。

关键词: 流线形薄壁钢箱梁; 正交异性板钢桥面; 空间节段模型; 等效格子梁

中图分类号: U448 213

文献标识码: A

New Analysis Methods of Nanjing Yangtze River Second Bridge Streamline Flat Thin-walled Box Girder

LIU Li-ping¹, WANG Ying-liang²

(1. Highway Planning and Design Institute, Beijing 100010, China;

2 Sichuan Highway Design Institute, Sichuan Chengdu 610041, China)

Abstract: In this paper, the spatial phase model of thin wall streamline flat box girder's traverse plate and equivalent girder beam are introduced into the analysis of orthotropic steel plate with trapezoidal longitudinal rib and the second system stress of orthotropic plate. Compared with Peklan-Esslinger traditional method the results of stress analysis got by spatial phase model and Equivalent girder beam method are more precise and complete.

Key words: Streamline flat thin wall box girder; Orthotropic steel plate; Spatial phase model; Equivalent girder beam

0 前言

自从 1966 年英国建成采用流线形薄壁扁平钢箱梁作为加劲梁的跨度为 988m 的 Serpen 桥以后, 流线形薄壁扁平钢箱梁以其突出的优点逐渐被工程界所认识和重视, 现在大跨度的悬索桥和斜拉桥的加劲梁大多采用流线形薄壁扁平钢箱梁。可以毫不夸张地说, 流线形薄壁扁平钢箱梁以及正交异性板钢桥面技术已经成为衡量一个国家钢桥技术水平的重要标志之一。

我国在流线形薄壁扁平钢箱梁和正交异性板钢桥面技术方面的起步比较晚。直到 20 世纪 90 年代初才开始在大跨度桥梁中采用, 但发展速度非常快, 目前建成和在建采用流线形薄壁钢箱梁作为加劲梁的大跨

度桥梁有 10 余座。从 1992 年起, 中交公路规划设计院在虎门珠江大桥、江阴长江大桥、厦门海沧大桥和南京长江大桥、湖北军山长江大桥等一些大跨度桥梁设计中都采用了流线形薄壁扁平钢箱梁和正交异性板钢桥面技术。下面将介绍南京长江第二大桥南汉主桥流线形薄壁扁平钢箱梁结构分析中的一部分内容, 即分析流线形薄壁扁平钢箱梁横隔板的空间节段模型和计算纵向加劲肋二系应力的等效格子梁法。

1 空间节段模型分析横隔板的结构行为

1.1 钢箱梁横隔板和结构行为概述

在桥梁的纵向钢箱梁桥面板上的荷载由桥面板传给纵向加劲肋, 再由纵向加劲肋传给横隔板, 在横隔

板面内横隔板相当于纵肋的弹性支撑,减小了纵向加劲肋的跨度和受压失稳时的自由长度;在桥梁的横向,横隔板和有效宽度内的钢箱梁的上下翼缘共同作用,另外由于横隔板还要承受钢桥面的自重、二期恒载和汽车活载,尤其是汽车车轮下的局部压应力比较大。在横向正应力、竖向正应力和剪应力的共同作用下,横隔板的稳定性比较突出。由于检修和通讯的要求,需要在横隔板上开设人洞、电缆洞。横隔板上的入洞、电缆洞应该开设在压应力和剪应力的综合指标比较小的位置。为了考虑有效宽度内钢箱梁的上下翼缘对横隔板的横向弯曲刚度的贡献,对节段梁段采用空间有限元模型计算横隔板上的横向正应力、竖向正应力和剪应力。

横隔板对纵向加劲肋的弯曲还有约束作用,但是由于横隔板的厚度较薄、高度较大,其对纵肋的面外约束作用比较小,设计时通常不考虑。

1.2 南京长江第二大桥南汊主桥的加劲梁横隔板空间阶段有限元模型

南京长江二桥加劲梁采用单箱三室的钢箱梁,其中钢箱梁的梁高为 3.5m,宽 33.6m,钢箱梁的横向设置 2% 的斜坡。钢箱梁的横隔板采用间距为 3.75m 的实体隔板。钢箱梁的纵向隔板在边墩、辅助墩和桥塔处采用实体式隔板,在其余处采用桁架式隔板。吊点处横隔板的中间厚度为 12mm,靠近斜拉索处的厚度为 16mm,非吊点处横隔板的厚度为 10mm。

本桥钢箱梁横隔板的间距比较大、横隔板的类型数量较多,且吊点处横隔板的厚度和非吊点处横隔板的厚度均不相同,不失一般性和为了安全起见,分别计算吊点、非吊点处横隔板在恒载和汽车活载作用下的应力分布。

计算吊点和非吊点处横隔板的应力分布,其计算模型是在斜拉索和钢箱梁的连接处伸出一个与斜拉索的面积相等、抗弯和抗扭刚度比较小的梁单元。在梁单元的上部固结,钢箱梁的顶板、底板、腹板和横隔板采用平壳单元,纵隔板采用平壳和空间梁单元的组单元模拟。1/4 计算模型图如图 1 所示。由于横隔板的高度比较大,厚度较小,活载引起的面外弯曲导致的弯曲应力比较小,横隔板面内的薄膜应力比较大,因此计算时板壳的边界取自由的边界。

汽车活载采用 8 车道荷载,沿桥的横向在内侧的 4 个车道布汽-20 的主车,在外侧的 4 个车道布汽-超 20 的重车。沿桥的纵向在内侧把 4 个汽-超 20 的主车的重轮布在横隔板处,在外侧的 4 个车道把汽-超 20 的重车布在横隔板两侧各 0.7m 处,因为这样的纵向

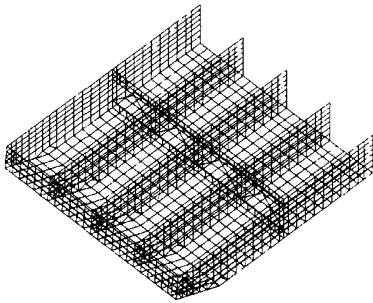


图 1 部分空间阶段计算模型

和横向布载对于横隔板的受力是比较不利的。计算横隔板时没有考虑汽车活载的冲击系数。一期恒载自动计入,二期恒载作均匀分布的荷载作用在顶板上。对于横隔板的强度和稳定的验算采用中交公路规划设计院和西南交通大学共同编写的钢箱梁分析系统 SBGAS 进行计算。

1.3 南京长江第二大桥南汊主桥钢箱梁横隔板的应力分析

采用空间节段模型可以得到所需要分析横隔板上各点的应力张量,由于篇幅所限,此处只给出有斜拉索处横隔板和无斜拉索处横隔板的 Mises 应力 $\sigma_{mises} = \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 3\tau_{12}^2}$ 的等值线图分别如图 2 和图 3 所示。分析图 2 和图 3 可以看出,在横隔板的中间和纵隔板的外侧附近处的位置处有 3 个 Mises 应力都比较小的区域。因此,笔者认为在这些位置上预留的人洞和电缆洞是比较合适的。

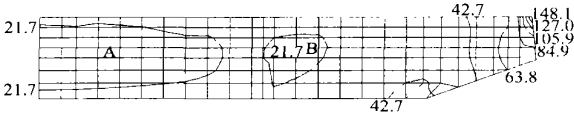


图 2 有斜拉索处横隔板的 Mises 应力等值线图

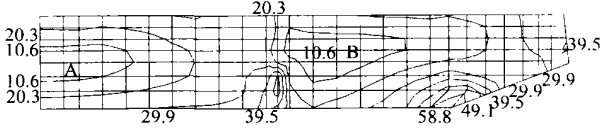


图 3 无斜拉索处横隔板的 Mises 应力等值线图

2 采用梯形纵向加劲肋桥面分析的等效格子梁法

通常采用 Peklian-Esslinger 法(以下简称 P-E 法)分析流线形钢箱梁的正交异性板钢桥面分析,但是严格的讲 P-E 法只适用于简支在钢箱梁腹板的情况,等效格子梁法假想在各个纵肋之间有分配梁和纵肋刚性相接,荷载通过假想的分配梁分配给其他的纵肋,采用一般的位移法程序求解,等效格子梁法可以考虑有悬臂桥面板、钢箱梁内设置纵隔板等情况,使用的范

围比较广。

上世纪 60 年代末美国曾用等效格子梁理论计算分析了一些正交异性板钢桥面并实验比较, 发现在无桥面铺装时, 采用等效格子梁法计算得到的纵、横肋的竖直位移、弯曲应力都和实验值符合很好。等效格子梁的思路是将正交异性钢桥面等效为假想的格子梁体系, 分配梁具体的等效刚度的推导比较复杂, 具体参见参考文献 [2] 和 [4], 钢箱梁分析系统 SBGAS 即是采用等效格子梁理论编写的分析正交异性板钢桥面的结构分析程序。

2.1 算例

采用以上理论, 笔者编制了正交异性板钢桥面的结构分析程序 OSAP, 分析了算例正交异性钢桥面的二系应力, 其结构简图如图 4 所示, 等效格子梁的计算模型如图 5 所示。假设在纵肋跨中设置假想的一个等效刚度分配梁, 其刚度由 OSAP 程序求得为 $I_{(eq)} = 5.45\text{e}5\text{mm}^4$ 。计算结果如表 1 所示。

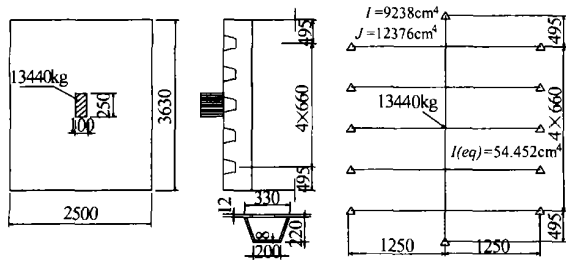


图 4 算例结构简图 图 5 等效格子梁计算模型图

表 1 等效格子梁法和 P-E 计算结果比较

项目	等效格子梁法	P-E 法
纵肋跨中上缘应力 /MPa	-50.6	-55.7
纵肋跨中下缘应力 /MPa	+131.0	+144.1

2.2 等效格子梁法和 P-E 法的比较

在轮轴荷载作用下, 在单个纵肋范围内的弯矩呈抛物线分布, P-E 法采用抛物线的峰值乘以纵肋的上口宽度和纵肋间距的和, 而等效格子梁法是采用积分的方法, 如图 6 所示。

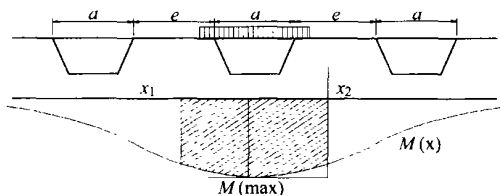


图 6 纵肋的弯矩比较图

(1)P-E 法: 计算得到纵肋中心单位宽度上的弯矩 $M(\max)$ 之后, 乘以纵肋的间距 $(a+e)$, 得到作用在实际桥面板的一根纵肋上的弯矩 $M(R)$ 为

$$M(R)=M(\max)\times (a+e)$$

其物理意义是图 6 所示矩形包围的面积。

(2)积分法:对纵肋宽度范围内 $(a+e)$ 的弯矩 $M(x)$ 进行积分,得到作用在实际桥面板的一根纵肋上的弯矩 $M(R)$ 为

$$M(R) = \sum_{n=1}^{\infty} M(n) \int_{x_1}^{x_2} \sin \frac{n\pi x}{L} dx$$

其物理意义是图 6 所示的曲线 $M(x)$ 包围的面积。

比较表 1 等效格子梁法和 P-E 法的计算结果可以发现, 和传统的 P-E 法相比较, 等效格子梁法得到的结果比采用 P-E 法得到的结果小, 这是比较合理的。

2.3 南京长江第二大桥南汊主桥钢箱梁的第二体系的应力

南京长江第二大桥南汉主桥钢箱梁的第二体系的应力,在双车道汽-超20作用下,等效格子梁计算模型的 $1/4$ 如图7所示,纵肋的跨中和支点的应力计算结果如表2所示。

南京长江二桥悬索桥钢箱梁正交异性板钢桥面的主要参数:纵肋的上口宽 300mm;横肋的间距 3 750mm;纵肋的下口宽 170mm;钢箱梁的梁高 3 000mm;纵肋的高度 280mm;钢箱梁顶板的厚度 14mm;纵肋的厚度 8mm;钢箱梁底板的厚度 10mm;横肋的厚度 10mm。

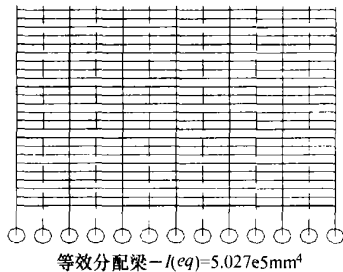
图 7 $1/4$ 等效格子梁计算模型

表2 南京长江大桥钢箱梁第二体系应力计算表

项目	等效格子梁法		P-E 法	
	跨中	支点	跨中	支点
纵肋上缘应力 MPa	-22.9	+19.3	-25.2	+23.2
纵肋下缘应力 MPa	+67.0	-56.4	+73.0	-61.8

注: 纵肋的冲击系数取 1.35 P-E 法的结果取自参考文献 [4]。

3 结论

(1) 采用空间节段模型可以比较全面、细致的分析钢箱梁横隔板的结构行为, 直接给出隔板上各点的应力张量, 用于检算横隔板的稳定和选择在横隔板上开孔的位置。 (下转第 62 页)

参考文献:

[1] Gilbert RL Bradford MA. Time-Dependent Behavior of Continuous Composite Beams at Service Loads [R] . UNICIV Rep. R-307, School of Civil Engineering University of New South Wales, Sydney, Australia

[2] Gilbert RL Time-Dependent Analysis of Composite Steel-Concrete Sections [J] . Journal of Structural Engineering, ASCE 115 (11): 2687—2705

[3] Gilbert RL Time Effects in Concrete Structures [J] . Amsterdam: Elsevier, 1988.

[4] Hyo-Gyoung Kwark, Young-Jae Seo Long-Term Behavior of Composite Girder Bridges [J] . Computers and Structures, 2000 (74): 583—

599.

[5] L.H Ichinose, E Watanabe, H Nakai. An Experimental Study on Creep of Concrete Filled Steel Pipes [J] . Journal of Constructional Steel Research, 2001 (57): 453—466.

[6] Boltzmann L Zur Theorie Der Elastischen Nachwirkung [J] . Pogg. Ann. Physik, 1876 (7): 642

[7] 聂建国. 钢-混凝土组合梁长期变形的计算与分析 [J] . 建筑结构, 1997 (1): 42—45.

[8] 叶贵如. 斜拉桥非线性有限元计算和施工过程分析 [D] . 浙江大学博士学位论文, 2000.

[9] 徐兴, 等. 虚拟层合单元法及其在桥梁工程中的应用 [J] . 土木工程学报, 1998, 31 (3) .

(上接第 53 页)

(2) 等效格子梁法的计算结果比较可靠, 适用范围比较广, 可以用于有纵隔板、有悬臂的正交异性板钢桥面的第二体系应力分析。

参考文献:

[1] AISC. Design Manual for Orthotropic Steel Plate Deck Bridge [M] . 1963.

[2] Bouwkap, Powell Structural Behavior of an Orthotropic Steel Plate Deck Bridge [R] . Report to California Department of Public Works, Division of Highway and U. S. Department of Commerce Bureau of Public Roads, Univ. of California, 1967.

[3] Homborg, Tenks; Drehsteife Kreuzverbe [M] . 1962

[4] 王应良, 吴喆, 冯良平. 南京长江二桥钢箱梁计算报告 [R] . 四川: 西南交通大学, 1998.

[5] 王应良, 李小珍, 强士中. 梯形加肋正交异性板钢桥面分析的等效格子梁法 [J] . 四川: 西南交通大学学报, 1999 (5) .

(上接第 57 页)

年的运营之后, 一期混凝土下缘一旦开裂, 将直接降低其抗弯刚度, 从而影响结构的使用性能。

3 结论

(1) 采用本文提出的全过程分析理论, 可以综合考虑混凝土收缩、徐变及钢梁松弛等时效因素, 对预弯组合梁进行从钢梁预压至运营任意年后的全过程分析。

(2) 时效因素对预弯组合梁的受力性能影响较为显著, 它使钢梁中的应力趋于均匀, 但对于一期混凝土, 时效因素会引起较大的预应力损失, 应引起重视。

(3) 在长期荷载作用下, 预弯组合梁有持续上拱

的趋势, 其上拱量不会影响结构的使用性能。

参考文献:

[1] 黄侨, 吴红林, 陈雪峰. 预弯组合梁桥的技术、经济性比较 [J] . 东北公路, 2001 (1) .

[2] 毛学明, 万臻, 赵人达. 预弯组合梁设计及其电算程序 [J] . 四川建筑, 2002 (3) .

[3] 黄侨, 任廷柱, 张树仁. 预弯组合梁桥的全过程时效分析理论及试验研究 [J] . 中国公路学报, 1999 (4) .

[4] 黄侨. 大跨度 PC 桥梁结构的长期性能分析 [C] . 全国桥梁结构学术大会论文集, 1992

[5] Gilbert R L, Mickle Borough C. Design of Prestressed Concrete [M] . London: Unwin, Hyman, 1992

[6] Motth, Anderson F E. Tsing Yi Bridge Improvement [R] . Final Report, 1984.