

空间梁格在多格式箱梁中的应用

黄奶清¹, 何沛祥¹, 叶宽友²

(1. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 合肥 230601; 2. 西南交大土木工程设计有限公司厦门分公司, 厦门 361012)

摘要:梁格法是借用计算机来分析桥梁上部结构的一种比较实用有效的空间分析方法,但传统梁格法受模型及网格划分和单元刚度计算复杂性的限制,特别是在多格式箱梁中截面特性计算难度大,在桥梁电算方面未能得到广泛运用。本文基于梁格法的基本原理,建立空间梁格模型,文章最后通过算例验证了该模型的有效性和实用性。

关键词:梁格法; 多格式箱梁; 空间梁格; hambly 梁格

中图分类号: U443.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-4540(2009)01-034-03

Application of Space Grillage Model in Multi-Cell Box-Girder

HUANG Nai-qing¹, He Pei-xiang¹, Ye Kuan-you²

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Xiamen branch of Southwest Jiaoda Civil Engineering Design CO., Ltd., Ximen 361012, China)

Abstract: Although grillage method is an effective method for analyzing bridge deck by computer, it has not been widely used on computer calculation of bridges because of the restriction of traditional grillage model and the complexity of meshing and the element stiffness computation, especially on the complexity of element stiffness of multi-cell box-girder. Based on basic principles of grillage method, space grillage model is builded, and its effectiveness is verified.

Key words: grillage method; Multi-Cell Box-Girder; space grillage model; hambly grillage model

随着交通事业的发展,弯梁桥、斜弯桥及宽箱梁桥等各种结构形式桥梁的不断涌现,迫切需要对结构进行空间内力和变形分析。设计者必须根据分析对象和要求,选择恰当的数值分析模型和相应的分析程序,并对结构进行相应的力学抽象、简化和离散,然后根据计算程序的要求,将离散后的结构用相应的数据文件描述出来^[1]。合理正确的结构建模和数值模拟是桥梁结构分析成功的关键。空间结构分析常用的方法有:基于数值分析的有限元法、有限条法、有限段法和梁格系分析法。梁单元法、板壳法、实体元法均属于有限元法。而目前对这类桥主要的方法有梁单元法、板

壳法、实体元法及梁格法。由于梁单元法无法得到内力的横向分布;板壳法和实体元法模型复杂,计算耗时长,数据处理繁杂;梁格法计算费用经济,基本概念清晰、易于理解和使用,整体精度能满足工程设计要求^[2]。梁格法作为桥梁空间分析的一种简化方法,其关键在于采用合理的梁格划分方式和正确地等效梁格的刚度。比板壳有限元方法建模简单,求解方便,但是传统的梁格法前期的截面特性计算量较大,而且容易把截面特性计算错误。空间梁格法是在传统梁格的理论上,对梁格模型进行了优化,避开了截面特性的计算,能够快捷而准确的运用梁格法实现对复杂桥

收稿日期:2008-08-03

作者简介:黄奶清(1982-),男,硕士研究生,主要研究方向为道路与桥梁。

梁的结构电算。

1 梁格法基本原理

梁格法是将结构原型模拟成便于计算机分析的等效梁格,通过对等效梁格的分析,得到结构原型的力学性能和内力情况。梁格法的主要思路是将上部结构用一个等效梁格来模拟,将分散在箱梁每一区段内的弯曲刚度和抗扭刚度集中于最临近的等效梁格内,实际结构的纵向刚度集中于纵向梁格构件内,而横向刚度则集中于横向梁格构件内^[3]。由于梁格能较好地模拟原结构的受力性能,而且便于用计算机分析,因此广泛用于各类桥梁的分析中。它不仅适用于板式、梁板式及箱梁截面的上部结构,而且对分析弯、斜梁桥特别有效。另外,梁格法可以考虑各种不规则支承的情况和斜弯桥等形状不规则的桥梁。在分析这类桥梁中,桥梁空间分析的简化方法-梁格法具有很大的优势^[4]。

从理论上讲,梁格必须满足以下等效原则:当原形实际结构和对应的等效梁格承受相同荷载时,两者的挠曲应是恒等的,而且在任一梁格内的弯矩、剪力和扭矩应等于该梁格所代表的实际结构部分的内力。由于实际结构和梁格体系有着不同的结构特性,上述“等效”的理想状态是难以达到的,模拟只能是近似的^[5]。

2 空间梁格模型

2.1 空间梁格网格划分

鉴于桥梁上部结构的形状和支座布置的多样性,对于梁格的划分很难提出一个通用的一般法则。空间梁格的单元划分也是基于传统梁格的基础上,纵向构件的位置与纵向腹板相重合,这种布置可使腹板剪力直接由横截面上同一点的梁格剪力来表示。为了加载方便,可在悬臂端部设置虚拟的纵向构件。横向上,传统的梁格模型假设整个横截面围绕通过质心的单一中性轴弯曲,其计算精度依赖于整个横截面的中性轴位置的精确确定。对于多格式箱梁,传统方法是用剪力-柔性梁格将每一腹板用一根纵向构件的梁格来模拟,将箱梁分隔成多片工字梁,尽量使工字梁的重心在同一水平线上,同时加入一些横向单元来模拟各工字梁之间的横向连接,有时还会引入一些虚

拟单元,从而形成一个平面网格。空间梁格法在横向梁格划分时工字梁是对中分隔,这样可以避开截面特性质的计算,而箱梁顶板与底板各用一个单元来模拟横向连接单元。在计算悬臂行车道板时,曾做了这样一个假定,无论是T形或箱形梁均假定梁肋的抗弯刚度远远大于悬臂行车道板的刚度,故悬臂行车道板的根部应视为嵌固端^[6]。故在横向连接单元的模拟上,由这个假定加之梁格法的基本原理,对横向连接单元进行近似的刚度等效,根据位移等效原则,在相同荷载条件下跨中挠度相同换算出横向连接的等效刚度。见图1。

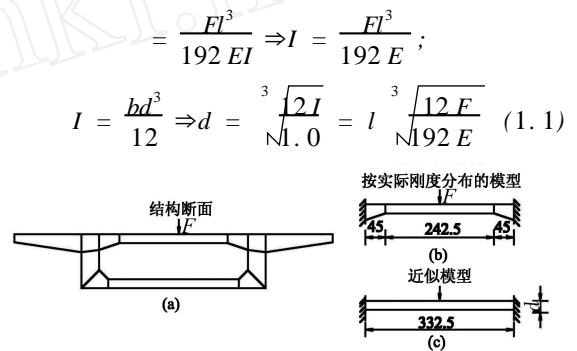


图1 横向连接刚度转换示意图

2.2 单元刚度矩阵

梁格分析的基本理论主要是梁格中梁单元刚度矩阵的求解,目前求解单元刚度矩阵最主要的方法用卡氏第二定理求得单元柔度矩阵,再经过求逆矩阵的方法求得单元刚度矩阵^[6~8]。空间梁格中的梁单元的刚度分析是以节点位移做为未知量,在求解任一端的刚度矩阵时,是先求解某端的柔度矩阵,然后再求解逆矩阵的方法求该端的刚度矩阵,同理求得另一端的刚度矩阵。

由某一端的节点位移与节点力之间的关系可得出梁单元内任意截面的力与节点位移之间的关系,则梁单元的总的应变能为:

$$U = \frac{1}{2} \mathbf{F}^T \mathbf{D} \mathbf{F} \mathbf{d}$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 1/EA & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/GA_{xy} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/GA_{xz} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/GJ & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/EI_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/EI_z \end{bmatrix}$$

由卡氏第二定理: $j = \frac{\partial U}{\partial F_j} f F_j$

求得柔度矩阵, 通过逆矩阵求解出单元刚度矩阵 K_{ij} , 从而得出梁单元的刚度矩阵为:

$$K^e = \begin{pmatrix} FK_{ij} F^T & FK_{jj} \\ K_{ji} F^T & K_{jj} \end{pmatrix}$$

其中, F 为单元的截面内力; f 为单元 j 端的柔度系数。

3 算例分析

现以一座 30m 简支梁为例, 箱梁宽 12.4m, 单箱双室, 顶板厚 25cm, 底板厚 22cm, 腹板厚 40cm, 梁高 140cm, 具体尺寸如图 2。

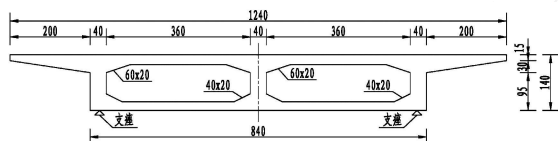


图 2 箱梁截面尺寸示意图

空间梁格模型 (Space Grillage Model, 简称 SGM): 采用空间有限元软件, 纵向梁格间距 3m, 横向将箱梁分隔成三片主梁 (MG1 ~ MG3), 顶底板中对分隔, 顶底板分别用一个单元来模拟, 全桥共 4 个横向连接 (Link1 ~ Link4)。由公式 (1.1), 横向连接的等效厚度分别为: Link1、Link2 (顶板) 厚 28.2cm; Link3、Link4 (底板) 厚 24.6cm。

Hambly 梁格模型 (Hambly Grillage Model, 以下简称 HGM): 采用空间有限元软件, 为保证各梁格截面的质心在同一中性轴上, 通过 hambly 公式迭代, 得出了 Hambly 模型的截面特性值见表 1。

表 1 Hambly 模型的截面特性值表

| | 横断面积 | 抗扭惯性矩 | 抗弯惯性矩 | 重心到底部距离 |
|--------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| | $A_x (m^2)$ | $I_x (m^4)$ | $I_z (m^4)$ | $y_1 (m)$ |
| 主梁 MG1 | 2.093 | 0.089 | 0.547 | 0.815 |
| 主梁 MG2 | 2.452 | 0.097 | 0.668 | 0.816 |
| 主梁 MG3 | 2.119 | 0.090 | 0.555 | 0.816 |

空间实体单元模型 (Solid Model, 简称 SM): 采用 midas 空间有限元软件, 实体单元, 共 440 个单元, 847 个节点。自重作用下各主梁跨中位移的对比结果见表 2 和表 3。

表 2 自重作用下跨中位移对比表 mm

| | MG1 | MG2 | MG3 |
|-----|---------|---------|---------|
| SM | - 32.06 | - 31.92 | - 32.02 |
| SGM | - 33.81 | - 34.09 | - 34.44 |
| HGM | - 31.07 | - 31.04 | - 31.03 |

表 3 自重作用下跨中上缘正应力对比表 MPa

| | MG1 | MG2 | MG3 |
|-----|--------|--------|--------|
| SM | - 6.11 | - 6.11 | - 6.12 |
| SGM | - 6.2 | - 6.08 | - 6.31 |
| HGM | - 6.18 | - 6.19 | - 6.16 |

在 MG1 主梁的相同位置施加偏心荷载, 空间梁格和 hambly 梁格采用单元偏心的均布单元荷载, 50kN/m; 实体采用节点荷载, 起终点节点荷载 75kN, 中间节点荷载 150kN。在偏心荷载作用下各主梁跨中位移对比见表 4 与表 5 以及图 3 ~ 图 5。

表 4 偏载作用下跨中位移对比表 mm

| | MG1 | MG2 | MG3 |
|-----|---------|--------|--------|
| SM | - 11.43 | - 8.99 | - 7.20 |
| SGM | - 15.00 | - 9.82 | - 5.29 |
| HGM | - 18.63 | 9.63 | - 0.78 |

表 5 偏载作用下跨中上缘正应力对比表 MPa

| | MG1 | MG2 | MG3 |
|-----|--------|--------|--------|
| SM | - 2.18 | - 1.81 | - 1.63 |
| SGM | - 2.58 | - 1.86 | - 1.13 |
| HGM | - 3.55 | - 1.88 | - 0.16 |

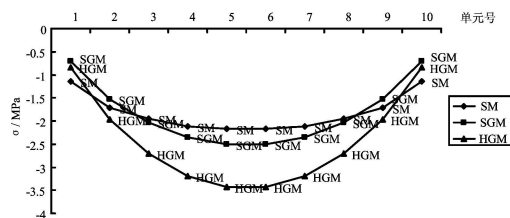


图 3 偏载作用下主梁 MG1 应力对比表

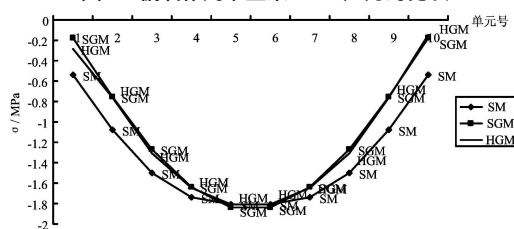


图 4 偏载作用下主梁 MG2 应力对比表

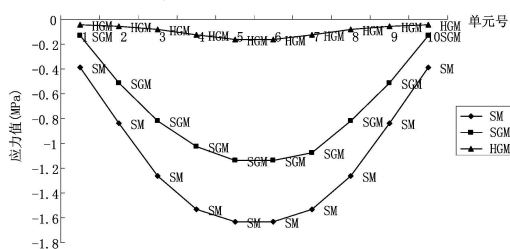


图 5 偏载作用下主梁 MG3 应力对比表

(下转第 44 页)

内力是非常方便的,只要比例尺选得适当,若再利用计算机画无极速度图,并用解析公式算桁架内力,则计算桁架内力不仅简单,而且计算结果也比较精确;更主要的是在求桁架内力之前不要求桁架的支座反力。总之,由无极速度图法确定平面静定桁架内力为确定桁架内力从方法上提供了一条新途径。

参考文献

- 1 龙驭球,包世华. 结构力学() (第2版) [M]. 北京:高等教育出版社,2006:62 - 73.

- 2 哈尔滨工业大学理论力学教研室. 理论力学(上册) (第4版) [M]. 北京:高等教育出版社,1983:173 - 176.
- 3 张速,王媛. 平面几何构造分析的无极速度图法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2005,28(10):1325 - 1329.
- 4 张速. 平面机构自由度与无极速度图法关系的研究[J]. 安徽建筑工业学院学报,2005,13(3):11 - 14.
- 5 叶敏,肖龙翔. 分析力学[M]. 天津:天津大学出版社,2001:56 - 57.

(责任编辑 王颖)

(上接第36页)

通过以上图表的对比显示,SM模型、SGM模型、HGM模型三种模型的比较发现:在自重作用下,三种建模方法算出来的精度相当,跟实体单元模型比误差都在5%以内。对于宽箱梁,在荷载作用下某些截面的变形不再保持平面,而出现翘曲变形,不再符合平截面假定^[7]。在偏载作用下,由于空间梁格法把顶底板分别用一个等效厚度的单元来连接,考虑了结构的扭转和翘曲,更真实的反映结构的实际情况,从而减小了误差。

4 结 论

空间梁格法在计算多格式箱梁中其精度比较精确的,空间梁格法的运用解决了传统梁格中截面特性值计算难度大的问题,为结构的计算分析提供极大的方便以及实用,使梁格法更好的运用于多格式斜弯桥,对于密排式板梁或小箱梁,由于单梁本身就是一个横向梁格,同样也可以用这方法来分析。通过工程实际的应用分析可见,梁格分析的准确度取决于梁格刚度的模拟和梁格单元

受力的受力特性。空间梁格法在考虑剪力滞、扭转、畸变产生的截面翘曲有待深入研究。

参考文献

- 1 谢海波. 新型梁格法在桥梁结构空间分析中应用研究[D]. 湖南:长沙理工大学,2006.
- 2 戴公连,李建桥. 桥梁结构空间分析设计方法与应用[M]. 北京:人民交通出版社,2001:1 - 37.
- 3 Hambly E C. Bridge Deck Behaviour [M]. London: E & FN Spon,1976:1 - 116.
- 4 张丽. 多格式斜弯箱梁空间分析的梁格法研究[D]. 福建:福州大学,2007.
- 5 王富万,杨文兵. 梁格法在桥梁上部结构分析中的应用[J]. 华中科技大学学报,2006,23(sup. 1):80 - 90.
- 6 项海帆. 高等桥梁结构理论[M]. 北京:人民交通出版社,2000:1 - 12.
- 7 卢彭真,张俊平. 梁格理论在某斜交连续梁结构分析中的应用[J]. 铁道工程学报,2006(1):48 - 52.
- 8 吴善幸,陈华鹏,黄剑源. 城市不规则箱形桥梁的格子梁分析[J]. 宁波大学学报(理工版),1996(3):126 - 134.

(责任编辑 陈玲)