

梁格法在桥梁上部结构分析中的应用

王富万¹ 杨文兵¹

(1. 华中科技大学 土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 梁格法是桥梁结构空间分析的一种有效方法, 但由于传统梁格法受模型及其网格划分和单元刚度计算高复杂性的条件限制, 在桥梁结构电算方面未得到广泛应用. 基于梁格法的基本原理, 提出了宽翼缘上部结构分析的改进梁格模型, 并总结了梁格单元划分和截面特性计算的一般方法, 最后通过算例验证了该模型和方法的有效性.

关键词: 梁格法; 结构分析; 改进梁格模型; 截面特性

中图分类号: U 443.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7037(2006)S1-0080-03

随着柔性桥、弯梁桥及宽箱梁桥等结构形式的涌现, 迫切需要对结构进行空间内力和变形分析. 目前通用的方法主要有梁单元法、板壳元法、三维实体元法以及梁格法. 其中, 梁单元法无法得到内力的横向分布; 板壳元法和实体元法模型复杂, 计算费用高, 数据处理繁琐^[1]; 梁格法计算费用经济, 结果提取方便并能与现行桥规匹配, 在工程分析中得到了一定应用. 现有文献表明, 传统梁格法对带有宽翼缘的上部结构, 其精度有限, 同时其网格划分和单元刚度计算仍是个难点. 为此, 基于梁格法的基本原理, 结合实际应用, 提出宽翼缘上部结构分析的改进梁格模型, 并总结梁格单元划分和截面特性计算的一般原则和方法, 旨在快捷而准确地用梁格法实现桥梁结构电算.

1 梁格法基本原理

梁格法的基本思想是用等效梁格代替桥梁上部结构, 将分散在板式或箱梁每一区段内的弯曲刚度和抗扭刚度集中于最邻近的等效梁格内, 实际结构的纵向刚度集中于纵向梁格构件内, 横向刚度集中于横向梁格构件内^[2]. 理想的刚度等效原则应该满足: 当原型实际结构和对应的等效梁格承受相同荷载时, 两者的挠曲将是恒等的, 并且每一梁格内的弯矩、剪力和扭矩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在结构特性上的差异, 这种等效只是近似的, 但对一般的设计, 梁格法的计算精度是足够的.

2 改进梁格模型

传统的平面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. 但是对于带有宽翼缘的桥梁上部结构, 其中性轴位置沿着桥宽方向存在较大的变化, 使得翼缘有绕其自身质心弯曲的趋势^[3,4], 从而在局部较大地改变了中性轴位置. 要精确得到其中性轴位置是比较困难的. 为了更准确地模拟上部结构, 基于梁格法的基本原理, 提出宽翼缘上部结构分析的改进梁格模型.

改进梁格模型解除了传统平面梁格法中梁格系必处于在同一平面的约束, 允许梁格系在三维空间上分布(图1). 平面梁格模型中梁格系是布置在整个横截面的一个近似中性轴上, 而在改进梁格模型中, 每根梁则布置在其所代表部分的各自中性轴上. 改进梁格模型中, 所有的梁布置在两个平面内, 一个是翼缘部分, 另一个是主桥面部分, 两部分为刚性连接. 通常情况下, 可以定义一组弹性模量足够大的梁(称为刚性梁)来模拟刚性连接, 或者将该组连接梁的截面特性设置为其它梁格构件截面特性的104倍. 与此同时, 为了保证两梁格平面不发生相对转动及在纵向方向上相对位移为零, 可定义约束方程耦合各刚性梁两端结点的各旋转自由度. 此外, 由于同一梁格平面内各梁存在绕自身中轴弯曲的趋势, 可能使整个梁格模型出现畸变情况. 因此, 可约束同一平面内所有节

收稿日期: 2006-02-24

作者简介: 王富万(1981-), 男, 硕士研究生; 武汉, 华中科技大学土木工程与力学学院(430074).

点对应的旋转自由度

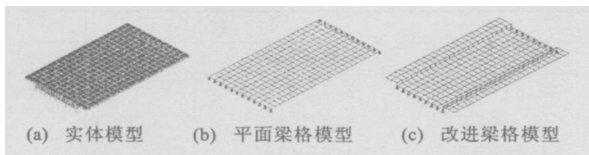


图1 某单跨板桥的三种模型示意

3 梁格单元划分及刚度计算

3.1 网格划分

总体上, 梁格网格的划分必须视桥梁上部结构及支座情况而定, 然而, 根据结构力学相关原理及工程实际经验, 可得梁格划分的一般原则如下:

a 梁格网格尽量重合于设计受力线 例如, 平行于预应力或者梁构件, 沿着边梁及支座上的受力线等, 以有效模拟结构工作状态

b 梁格网格尽量符合原型结构内力分布状况 例如, 板桥梁格等效模型中, 每根边缘梁格必须接近上部结构边缘处垂直剪力流的合力

c 梁格横向和纵向构件间距应尽量接近, 以使梁格结构对荷载的静力分布足够灵敏

d 平面梁格模型的划分应尽量使各部分的形心轴位置和整体的形心轴位置相同

3.2 梁格截面特性计算

梁格法中荷载分配是以加载位置及单元间的相对刚度为依据的, 刚度与构件截面特性有关, 因而梁格单元的截面特性正确计算是保证计算精度的关键

对于板式上部结构, 钢筋混凝土及预应力混凝土实体板桥可以按正交各向同性板计算^[2], 其截面特性可以按式(1)计算

$$i = h^3/12; \quad c = h^3/6, \quad (1)$$

式中, i 为单位板宽构件的惯性矩; c 为单位板宽构件的有效抗扭常数; h 为板的厚度

对于箱梁, 纵向构件一般划分为若干工字梁, 因而纵向单元特性计算较为简单, 即纵向单元面积就是对应工字梁面积; 单元的抗弯惯性矩为其对应工字梁的抗弯惯性矩; 抗剪面积是对应工字梁的腹板横截面面积 横向单元可以认为是由上下两块板组成的空腹断面, 在荷载作用下一致地绕它们的共同重心水平中性轴弯曲(图2). 横向梁格的面积即为其所代表范围内顶底板的面积和, 惯性矩按绕板的共同重心计算

$$i = (h^2d + h^2d) = h^2dd/(d + d), \quad (2)$$

式中, d , d , h 和 h 为板的厚度及各板至它们的形心的距离(图2).

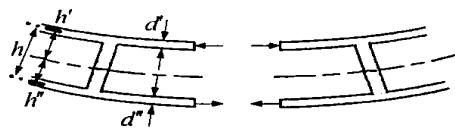


图2 箱形梁横向弯曲示意

箱梁结构作整体扭转时, 大多数的剪力流通过围绕着顶板、底板和腹板的周界流动, 只有少量通过中间腹板 剪力-柔性梁格理论认为, 上部结构内的扭矩是由顶板和底板内的相反剪力流形成的, 抗扭刚度主要由顶板和底板提供 单位纵向或横向梁格构件的抗扭常数计算

$$c = 2(h^2d + h^2d) = 2h^2dd/(d + d). \quad (3)$$

4 算例分析

算例 长40 m, 宽12.8 m 的双跨混凝土板桥空间简支, 其中主体桥面宽8 m, 厚1 m, 两翼缘各宽2.4 m, 厚0.4 m. 混凝土材料常数: 弹性模量 $E = 35 \text{ GPa}$, 泊松比 $\nu = 0.1667$, 密度 $\rho = 2625 \text{ kg/m}^3$. 荷载情况为自身重力

梁格模型: 为了保证计算精度, 梁格系横向构件间距设为1 m.

纵向构件设置: 图3为整桥的1/2横截面, S1~S6部分相应地各设置了一纵向构件(C1~C6). 图4平面梁格模型中, 所有纵向构件C1~C6处于同一平面; 改进梁格模型中, 纵向构件C1~C2与C3~C6分别布置于两个平面, 其间通过刚性梁连接, C2和C3间设置有纵向虚拟构件

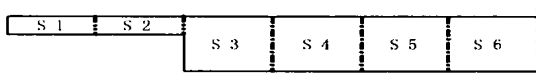


图3 桥面纵向梁格构件的划分

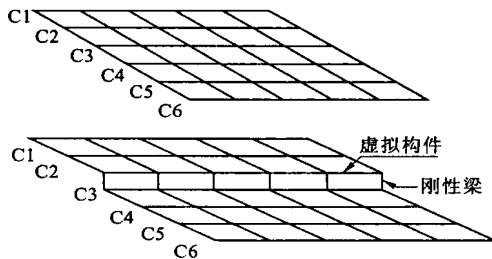


图4 梁格网格划分示意

构件截面特性: 由于网格划分结构上的差异, 平面梁格模型(Grillage Modal, 以下简称GM)和改进梁格模型(Improved Grillage Modal, 以下简称IGM)的构件截面特性有较大的差别(表1).

表1 梁格构件截面特性

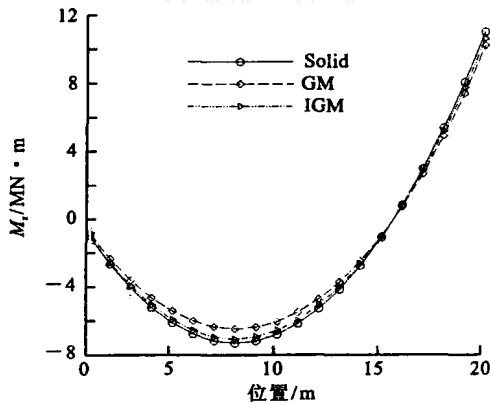
| | | GM | | | IGM | |
|-----|----|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| | | 翼缘构件 | 主桥构件 | 翼缘构件 | 主桥构件 | 虚拟构件 |
| 抗弯 | 横向 | 2.88×10^{-2} | 8.68×10^{-2} | 5.33×10^{-3} | 8.33×10^{-2} | - |
| 惯性矩 | 纵向 | 3.45×10^{-2} | 8.68×10^{-2} | 6.4×10^{-3} | 8.33×10^{-2} | 1.6×10^{-3} |
| 扭转 | 横向 | 1.07×10^{-2} | 1.67×10^{-1} | 1.28×10^{-2} | 1.67×10^{-1} | - |
| 常数 | 纵向 | 2.42×10^{-1} | 2.01×10^{-1} | 1.54×10^{-2} | 1.67×10^{-1} | 3.2×10^{-3} |

表2 竖向位移对比

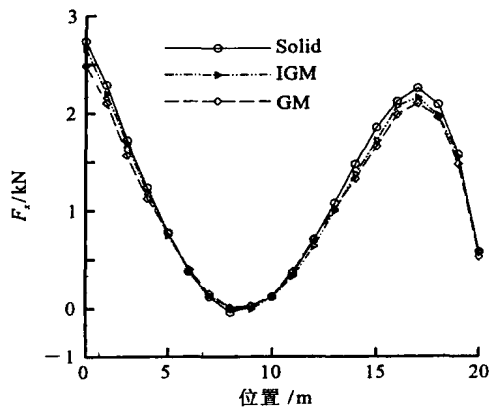
| 位移/mm | | 梁格系纵梁编号 | | | | | | 最大相对误差 |
|-------|-------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | /(%) |
| 1/8跨 | Solid | -4.832 | -4.616 | -4.476 | -4.527 | -4.531 | -4.426 | - |
| | GM | -4.675 | -4.545 | -4.421 | -4.437 | -4.434 | -4.324 | 3.24 |
| | IGM | -4.732 | -4.568 | -4.475 | -4.454 | -4.421 | -4.354 | 2.43 |
| 1/2跨 | Solid | -8.419 | -8.133 | -8.061 | -8.096 | -8.044 | -7.998 | - |
| | GM | -8.198 | -8.023 | -7.964 | -7.935 | -7.882 | -7.854 | 3.35 |
| | IGM | -8.151 | -7.860 | -7.962 | -7.936 | -7.929 | -7.905 | 2.62 |

图5所示为自重作用下,顺桥方向上结构的整体弯矩和轴力对比图, Solid 曲线采用的是 ANSYS 中 Solid65 单元的计算结果(通过静力等效求得)。由于对称性,图5中只绘出了其中一跨(且称前跨)的受力情况。图5和表2的对比表明,无论是考虑弯矩、轴力还是位移,梁格法和实体元法计算的结果都是一致的。这说明:在合理划分梁格网格以及正确计算截面特性的情况下,梁格法

与三维实体元法的计算精度相差不大,完全能够满足结构设计和工程计算的精度要求。对比还显示,由于结构上的改进,整体上 IGM 模型的计算精度要比传统 GM 模型有较大的提高。



(a) 弯矩对比



(b) 轴力对比

图5 整体受力情况对比

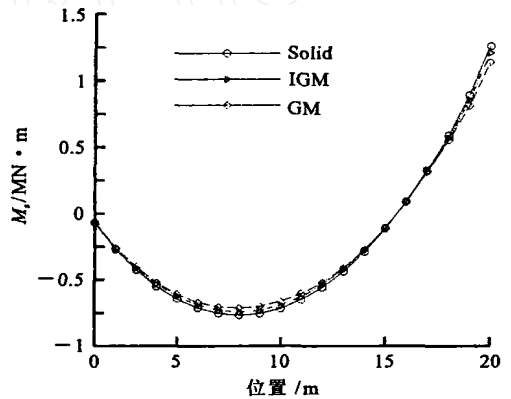


图6 主桥构件C4弯矩对比

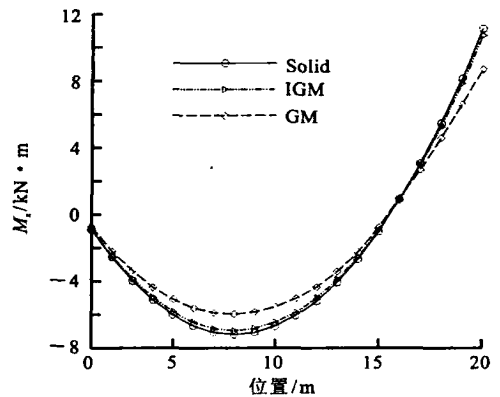


图7 翼缘构件C1弯矩对比

图6和图7的结果对比显示, GM 模型、IGM 模型和三维实体模型在计算宽翼缘结构主桥构件时精度相当, 误差基本上在 5% 以内。但是, GM 模型计算得到的翼缘部分受力与真实情况(以实

(下转第90页)

Steel Cofferdam Design of South Pylon in Sutong Bridge

OUYAN G X iao-yong^{1,2} H E M ao-sheng² R E N H ui-x ing^{1,2}

(1. School of Civil Eng. & Mechanics, HUST, Wuhan 430074, China;

2. Second Road Eng. Bureau of China Road & Bridge Co., Xi'an 710065, China)

Abstract: The Sutong Bridge is a double-cable-plane double-pylon steel box girder cable-stayed bridge. The main span is the longest in the world. The South Pylon steel cofferdam is the enclosure water structure for the pile cap. Its scale is unprecedented. Subjected to the Changjiang River's bad hydrology condition influence its work condition is complicated, and its design is difficult. This paper introduces the South Pylon steel cofferdam's structure design, calculation, strength and the stability analysis.

Key words: Sutong Bridge; pylon; steel cofferdam; structure

(上接第 82 页)

体法结构为标准) 有较大的差异, 算例中最大负弯矩误差甚至达到 20%。由于允许梁格系在三维空间上分布, 同时假设翼缘构件绕其自身中性轴弯曲, IGM 模型能更合理地模拟结构的真实情况, 计算精度有大幅提高。由于无需计算整个横截面的近似中性轴, 特别是对于某些横截面复杂的结构, 使用 IGM 模型能减少截面计算的工作量, 提高计算效率。

经验证, 文中提出 IGM 模型和网格划分及截面特性计算方法也适合箱形梁的计算分析。

a 文中所总结的梁格网格划分以及构件截面特性计算的原则和方法是合理的。改进梁格模型通过分别将翼缘部分和主桥面的梁格构件布置于两个不同的平面上, 并用刚性梁连接两平面, 能有效地分析带宽翼缘的桥梁上部结构。

b 与三维实体元法比较, 梁格法能更快速方

便地建模、计算以及提取结果, 保证了计算精度。

c 需要特别指出的是, 刚性梁材料常数或截面特性的选择, 对某些结构可能比较敏感, 需要设计人员自己把握。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Hambly E C. Bridge Deck Behaviour[M]. London: E&FN Spon, 1976.
- [3] O'Brien E J, Keogh D L. Neutral Axis Variation in Bridge Decks [A]. In: Third International Conference on Computational Structures Technology [C]. Budapest: Civil-Comp Press, 1996.
- [4] O'Brien E J, Keogh D L. Upstand finite element analysis of slab bridge [J]. Computers & Structures, 1998, 69(6): 671-683.

Application of Grillage Method in Bridge Decks Analysis

WANG Fu-wan¹ YANG Wen-bing¹

(1. School of Civil Eng. & Mechanics, HUST, Wuhan 430074, China)

Abstract: Although grillage method is an effective method of analyzing bridge deck, it has not been widely used on computer calculation of bridges for the restriction of traditional grillage model and the complexity of meshing and element stiffness computation. Based on basic principles of grillage method, an improved grillage model of wide cantilevers bridge deck is brought forth and its effectiveness is verified after generalizing rules of grillage meshing and sectional characteristic.

Key words: grillage method; structural analysis; improved grillage model; sectional characteristic