

基于梁格理论的人字形桥梁动力特性分析

卢彭真¹, 张俊平², 刘爱荣², 梅力彪²

(1. 西南交通大学土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 广州大学土木工程学院, 广东 广州 510405)

摘要:基于梁格理论采用通用有限元程序软件 SAP2000 对典型人字形桥梁结构的振动频率及振型进行了模拟分析, 并讨论了主要结构参数对其动力特性的影响, 可为人字形桥梁的动力设计提供参考。

关键词:人字形桥梁结构; 动力特性; 有限元法; 分析

中图分类号: U441; TU311.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2006)01-0031-05

Analysis on Dynamic Characteristics of Y-shape Bridge Based on Grillage Theory

LU Peng-zhen¹, ZHANG Jun-ping², LIU Ai-rong², MEI Li-biao²

(1. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China)

Abstract: The structure of Y-shape Bridge is an effective way for solving the city traffic problem. Based on the grillage theory and using common finite element software SAP2000, the vibration frequency and shaking type of structure of Y-shape Bridge are analyzed, and main structure parameter, impacting on its dynamic characteristics are discussed. The result could be a reference for the design of Y-shape Bridge.

Key word: Structure of Y-shape Bridge; Dynamic characteristics; FEM; Analysis

0 前言

城市高架桥工程和立交枢纽工程是解决现代城市交通问题的有效途径。而人字形桥梁则是城市高架桥工程和立交枢纽工程中常用的结构形式。人字形桥梁结构的主要特点是:多采用连续梁的结构体系;结构截面形式通常采用薄壁箱形梁;匝道曲线部分的曲率半径比较小。另外,人字形桥梁结构在理论上由于采用薄壁箱形梁截面,因此约束扭转和畸变效应比较突出,同时由于人字形桥梁结构两分叉结构的相互联系和制约作用,又使得约束扭转和畸变效应更加显著。如果箱形梁的较宽以及其翼缘比较宽,则剪力滞产生的效应也非常突出。随着我国城市建设的发展,车流量也在迅速增加,某些桥梁的超载现象比较严重,多数城市高架桥以及立交桥均不同程度地存在振动比较厉害的现象。针对这一问题,本文从多数人字形桥梁结构中抽象出典型的人字形桥梁结构,基于通用有限元程序软件 SAP2000

对其振动频率及振型进行模拟分析,并讨论主要结构参数对其动力特性的影响,为人字形桥梁的动力设计提供参考,确保城市高架桥及城市立交枢纽工程的安全运营。

人字形桥梁结构主要有以下两种结构:(1)主桥在与两分叉线相接的横梁处开始分成两支独立的桥梁结构,待浇筑完毕后才在两支线的连接处浇筑顶板、底板、翼缘板、及小半径曲线腹板。这种结构适用于两分支线的交角不太大及桥面不太宽的情况。(2)通过增加变宽箱室的结构形式实现变宽。这种结构适用于两分支线的交角较大且桥面较宽的情况。典型的人字形桥梁整体布置图见图1所示。

1 有限元模型及参数选取

1.1 基于梁格理论^[2-4]

梁格理论的基本思想就是用一个等效的梁格来代替上部结构。为便于分析,把分散在板的每一区

收稿日期:2005-07-06

作者简介:卢彭真(1974—),男(汉族),浙江人,工程师,研究方向为新型桥梁结构。

段内的弯曲和抗扭刚度集中于最邻近的等效梁格内,板的纵向刚度集中于纵向梁格内,横向刚度集中于横向梁格内。理想的梁格刚度应该是:当原型板和等效的梁格承受相同的荷载时,这两个结构的挠曲将是恒等的,而且在任一梁格内的弯矩、剪力以及扭矩将等于该梁所代表的板部分的截面上应力的合力。

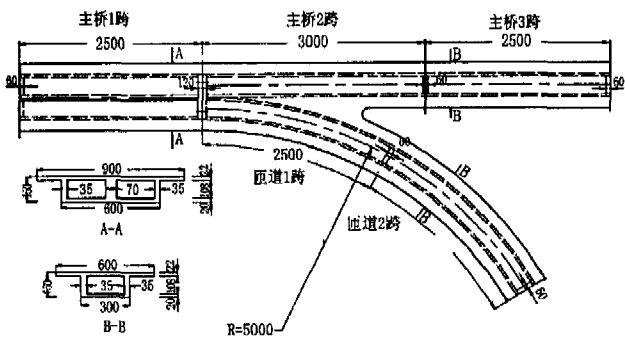


图1 某人字形桥梁结构的总体布置

Fig. 1 The whole drawing of a Y-shape bridge structure.

1.1.1 计算模型

针对典型人字形桥梁的结构特点,基于梁格理论对其进行简化。简化等效模拟是:主桥一跨在箱梁3腹板处设置3根纵向梁格,其他跨(包括主线以及匝道)均采用2根纵向主梁格,在结构的边缘各设置了一根虚拟纵梁。同时根据人字形桥梁的跨径与总长,在模拟横梁时主桥共设置虚拟横梁33根,匝道设置了虚拟横梁21根。全桥共划分了422个空间梁单元,简化和离散的梁格有限元模型见图2所示。

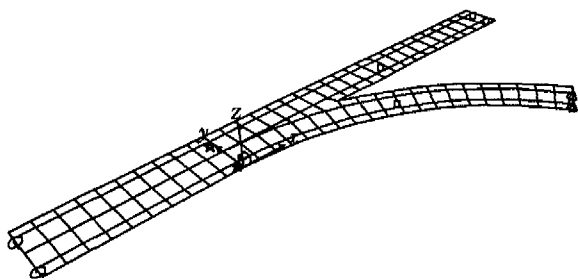


图2 某人字形桥梁空间梁格有限元模型

Fig. 2 Model of FEM of bridge space grillage for a Y-shape Bridge.

1.1.2 截面特性分析^[5]

箱梁在偏心荷载作用下可分为四种基本状态:纵向弯曲、横向弯曲、刚体扭转及扭转变形。依据箱梁的变形与位移可推出梁格构件的等效截面刚度。

(1) 纵向梁格刚度

弯曲刚度: $EI_y = E$ 。(梁格构件所代表的截面对箱梁整体截面的 y 中性轴的惯性矩)

格扭转刚度: $GJ_x = G$ 。(梁格构件所代表的顶板、底板翼缘对 x 中性轴的惯性矩)

即:截面单位宽度内的扭转刚度:

$$GJ_x = 2G(h'^2 d' + h''^2 d'') = \frac{2Gh^2 d' d''}{d' + d''}$$

剪切刚度:腹板内的剪力流由弯曲剪力流和扭转剪力流组成,由于剪力流使腹板产生剪切变形,纵向梁格的剪切面积应等于腹板的横截面积。

(2) 横向梁格刚度

每单位宽度内抗弯刚度:

$$EI_x = (h'^2 d' + h''^2 d'') = \frac{h^2 d' d''}{d' + d''}$$

每单位宽度内扭转刚度:

$$GJ_y = 2G(h'^2 d' + h''^2 d'') = \frac{2Gh^2 d' d''}{d' + d''}$$

等效剪切刚度:

$$GA_s = \frac{d'^3 + d''^3}{l} \cdot \frac{d_w^3 l}{[d_w^3 l + (d'^3 + d''^3) h] E}$$

若箱梁内有横隔板,则 A_s 中还应包括横隔板面积。

1.2 基于板壳理论

板壳有限元法是按板理论将结构按实际组成情况离散为若干板元来进行分析的有限元方法。采用板壳单元处理人字形桥梁结构分析时后处理工作量相对较大,难以直接给出内力,通常以给出应力为主,但对整桥的动力特性的分析比较准确,能够与梁格理论的计算结果进行比较对照。

1.2.1 计算模型

板壳有限元模型见图3所示,即采用梁格与板壳两种不同的理论对人字形桥梁的振型以及频率等动力特性分别进行计算对比,从而能较好地把握人字形桥梁结构的动力特性。

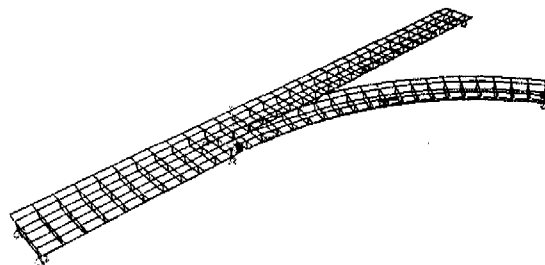


图3 板壳有限元模型

Fig. 3 Model of shell FEM for a Y-shape Bridge.

1.2.2 截面特性分析

由于板桥模型是按照实际箱形梁的顶底板、腹板以及横隔板的实际情况进行模拟的,因此其截面

特性可以直接在通用程序中给予模拟实现,所以板壳模型虽然建模处理比较困难以及后处理工作量较大,但能直接模拟结构的截面的刚度特性,这一点比梁格模型来得简单方便。即板壳模型的截面特性只要按照结构隔板的截面特性直接在程序中输入即可,不需专门的处理直接在程序中实现。

2 计算结果及分析

2.1 模态分析基本方程^[6-8]

结构在强迫振动时的动力响应与结构系统的固有特性密切相关,因此为了研究人字形桥梁结构在外荷载作用下产生的振动,首先要研究其固有振动特性,即分析其固有频率与振型。另外对于一般结构系统而言,阻尼对于频率的影响较小,因此理论分析人字形桥梁结构的固有频率与振型时忽略了阻尼的影响。则系统自由振动方程为

$$[M]\{\ddot{Y}\} + [K]\{Y\} = \{0\} \quad (1)$$

式中 $[M]$ 、 $[K]$ 分别为系统的总质量矩阵、刚度矩阵; $\{Y\}$ 为对应于系统自由度的广义坐标列阵。

则上式的解为

表1 典型人字形桥梁前6阶竖向与扭转自振频率与振型(第一种约束条件)

| 分析理论 | 板壳理论 | | | | | | 梁格理论 | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 振型阶次 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 频率/Hz | 4.239 | 5.570 | 5.727 | 7.278 | 9.099 | 11.07 | 4.074 | 5.224 | 5.558 | 6.95 | 8.237 | 9.56 |
| 振型描述 | 竖弯 | 竖弯 | 竖弯 | 竖弯 | 弯扭 | 反扭 | 竖弯 | 竖弯 | 竖弯 | 竖弯 | 弯扭 | 反扭 |

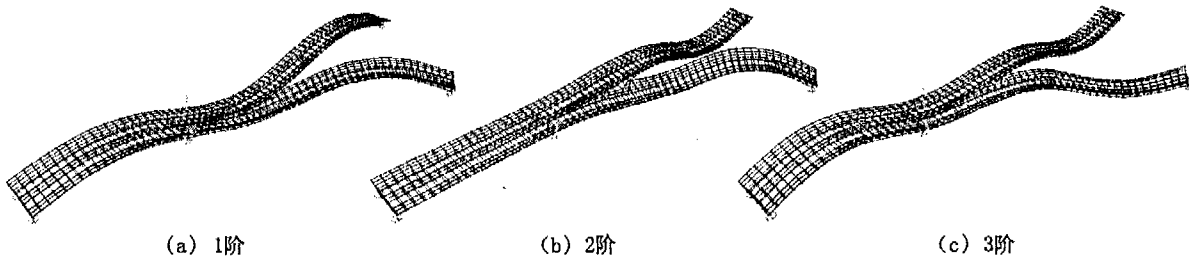


图4 典型人字形桥梁板壳模型前3阶振型

Fig. 4 The first 3 steps of shaking type for shell model of Y-shape.

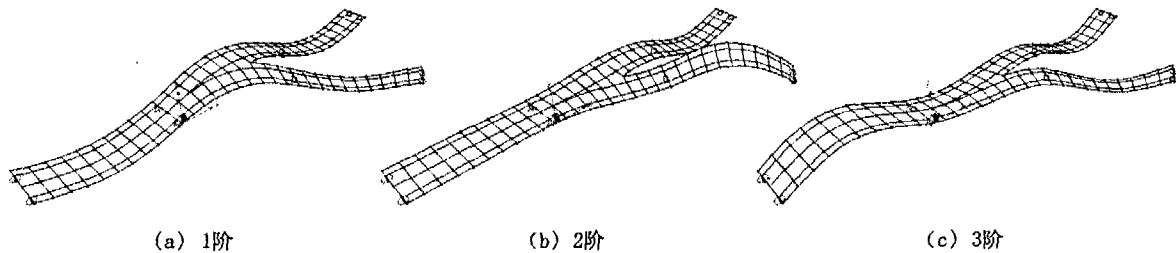


图5 典型人字形桥梁格模型前3阶振型

Fig. 5 The first 3 steps of shaking type for grillage model of Y-shape bridge.

$$\{Y\} = \{A\} \sin(\omega t + \phi) \quad (2)$$

式中 ω 为无阻尼固有振动频率; A 为振幅矢量; ϕ 为相角。系统的特征列式为

$$|[K] - \omega^2[M]| = 0 \quad (3)$$

则由上式固有频率方程可得结构的固有频率 ω_i ($i = 1, 2, 3, \dots, n$),从而根据固有频率可得相应的固有振型。

2.2 有限元计算结果及分析^[9-10]

为了验证理论计算的准确性,采用板壳理论与梁格理论分别对人字形桥梁进行动力特性的分析。板壳理论的模型计算采用与梁格理论计算的约束条件相同,即采用第一种约束条件。典型人字形桥梁板壳与梁格理论动力特性计算结果见表1。

从表1看,两种理论的计算结果比较接近,前6阶振型基本一致以及频率非常接近,从中可以确定理论计算的结果是准确的。取两种理论计算的平均值作为其竖向的基频,即4.156 Hz,说明竖向刚度相对扭转刚度较弱,横向抗扭刚度比较理想。板壳与梁格理论计算的前3阶振型分别见图4与图5。

3 结构动力特性参数分析

从以上固有频率方程来看,固有频率与系统的质量矩阵以及刚度矩阵有关,但对于同一结构在具体构造及布置情况的不同,许多因素对其频率也会有不同的影响。人字形桥梁除了系统质量矩阵以及整体刚度对固有频率有直接影响外,分叉处暗横梁刚度设置的大小、匝道部分半径设置的不同以及支座形式的变化都对其固有频率及振型产生不同程度的影响。

3.1 分叉处暗横梁刚度的影响

分叉处暗横梁是人字形桥梁结构中的重要构件,但通过对暗横梁采用相差 50 倍左右的刚度模拟计算分析可见,暗横梁刚度的变化对自振频率的影响却并不是很大,在竖弯振型中比原来的频率增大 6% 左右。

3.2 匝道半径的影响

匝道曲线半径的设置相差并不是很大的情况下,对典型人字形桥梁结构固有频率的影响也不是很显著。在跨径一样的情况下设置相差 5 m 的不同曲线半径进行计算,其基频竖弯随着半径增加而变大,但变化的幅度并不是很大,即半径增加 5 m 时,其固有频率增大 3% 左右。

3.3 主梁不同截面的影响

本文采用的两种理论,其结构截面形式完全不同。梁格理论相当于纵横上设置杆件体系,板壳模型是根据典型人字形桥梁结构的实际结构进行模拟。以两种不同理论对统一结构不同截面的计算发现,截面形式的不同对固有频率的影响较大。在梁格模型中,梁格刚度小于板壳刚度时,固有频率的计算结果就小于板壳模型,直到梁格模型中的梁格刚度尽可能等效于相对应的板壳刚度计算结果才能符合。同时,固有频率计算符合的程度与梁格模型中纵横梁格的模拟及网格划分的细密有关,越密越接近。反映出结构采用不同截面形式导致不同的截面特性,特别是不同的刚度;也说明了人字形桥梁通常采用横截面抗弯以及抗扭刚度较大的箱形梁截面的原因所在,即不仅在受力上及结构使用性能上比通常的简支板梁显得更加合理实用,同时对提高结构的固有频率确保行车平稳安全也是非常有利的。

3.4 不同约束条件的影响

为了了解不同约束条件对人字形桥梁动力特性的影响,基于板壳模型分别采用两种不同约束条件进行计算,结果列表 2。

表 2 两种约束条件下板壳模型的前 6 阶竖向与扭转自振频率与振型

| 振型阶次 | 第 1 种约束条件 | | | | | | 第 2 种约束条件 | | | | | |
|-------|-----------|-------|-------|-------|-------|------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 频率/Hz | 4.18 | 4.856 | 5.257 | 5.701 | 6.770 | 7.63 | 4.242 | 5.617 | 5.707 | 7.321 | 8.992 | 9.302 |
| 振型描述 | 竖弯 | 扭转 | 扭转 | 竖弯 | 弯扭 | 弯扭 | 竖弯 | 竖弯 | 竖弯 | 竖弯 | 扭转 | 弯扭 |

从表 2 可见:第一种约束条件,即仅在分叉处的内横梁下设置抗扭双支座,其它地方均设置竖向单支座时,扭转的振型出现比较早,同时在后面几阶振型中均存在不同程度的扭转变形。在第 2 种约束条件下,即在分叉处的内横梁及结构的 3 个端部设置抗扭双支座,除了曲线匝道间设置竖向偏心单支座外,其他设置竖向单支座时,其基本振型是竖弯,而

扭转出现的振型较迟,同时在相应的扭转振型下,扭转变形的程度较第 1 种约束弱。说明了人字形桥梁设置抗扭双支座比竖向单向支座具有明显的抗扭作用,同时在曲线匝道间设置预偏心对抗扭也起到较理想的抗扭效果。板壳模型第 1、2 两种不同约束条件下的前 3 阶竖弯与扭转振型分别见图 6 与图 7 所示。

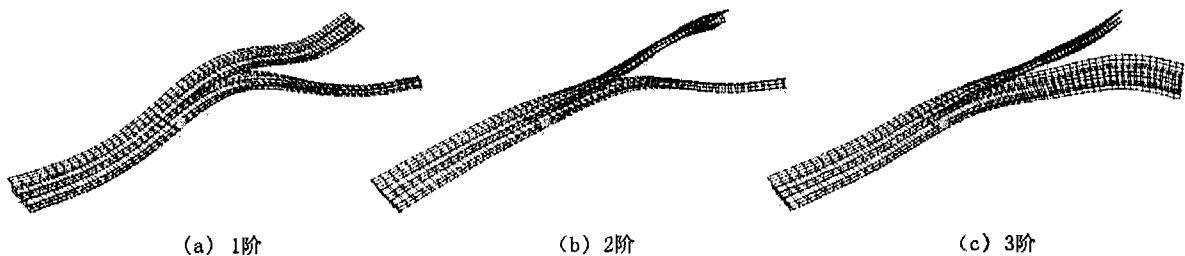


图 6 板壳模型第 1 种约束条件下的前 3 阶振型

Fig. 6 The first 3 steps of shaking type under the 1st kind of restraint terms for shell model.

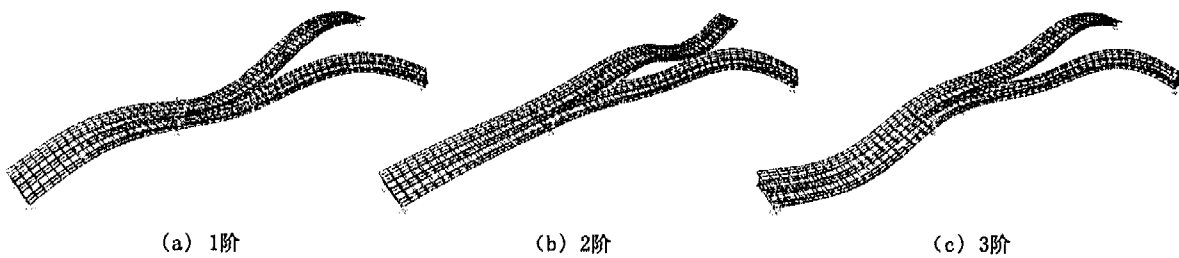


图7 板壳模型第2种约束条件下的前3阶振型

Fig.7 The first 3 steps of shaking type under the second kind of restraint terms for shell model.

4 结语

人字形桥梁结构通常是由直线梁与曲线梁组合而成的一个组合受力体系,其一方面具有直线梁与曲线梁两者的结构特点及受力行为,另外又包含了桥梁宽度变化、坡度变化、曲率变化三种空间非线性因素的影响,同时人字形桥梁结构两分叉结构相互联系相互制约,因此其动力性能有其自身的特点。人字形桥梁结构横向刚度相对竖向刚度较大,即基频通常为竖弯,但,支座设置不合理时其横向扭转效应比较显著,不利于人字形桥梁结构的整体受力以及平稳行车,故设计时,在保证满足抗震刚度要求的前提下,应根据人字形桥梁结构受力以及使用的实际情况,采取适当的措施,来改善结构的受力性能,即如在匝道曲线跨间设置预偏心支座、在结构的端部和分叉处设置抗扭双支座以及增加设置横隔板的

数量来减小由于约束扭转产生的翘曲以及畸变翘曲等,尽可能提高其横向刚度,以满足人字形桥梁整体结构的稳定,有利于行车的安全。

[参考文献]

- [1] 姚玲森. 曲线梁[M]. 北京:人民交通出版社,1989.
- [2] E C Hambly. 桥梁上部构造性能[M]. 北京:人民交通出版社,1982.
- [3] 张叔辉. 曲桥分析的薄壁箱梁单元[J]. 土木工程学报,1984,17(2):1-13.
- [4] 戴公连,李德建. 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.
- [5] 宋一凡. 公路桥梁动力学[M]. 北京:人民交通出版社,2000.
- [6] 唐友刚. 高等结构动力学[M]. 天津:天津大学出版社,2003.
- [7] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动[M]. 北京:中国铁道出版社,1996.