

文章编号: 1004-4574(2009) 03-0043-05

# 大跨径预应力混凝土连续梁桥地震反应分析

高大峰, 张静娟, 刘伯栋

(西安建筑科技大学 结构工程与抗震教育部重点实验室, 陕西 西安 710055)

**摘 要:** 大跨连续梁桥纵向延伸较长, 地震发生时各个支承处的地震波的振幅和频率是不同的。以某 12 跨预应力混凝土连续梁桥为例, 推导了结构的运动方程, 采用有限元结构分析软件 ANSYS 建立了该桥的动力分析模型, 进行了模态分析和时程分析。通过输入不同波速的地震波, 计算行波激励下桥梁的地震反应, 并和一致激励下的结果进行对比, 分析了行波效应对桥梁地震反应的影响。结果表明: 滑动支座摩擦力减小了桥梁纵向的地震反应, 但对桥梁横向地震反应影响较小。行波效应减小了制动墩的纵向地震反应, 增大了其它桥墩的纵向地震反应, 但对桥梁横向地震反应影响较小。

**关键词:** 连续梁桥; 地震波; 行波效应; 地震反应分析

中图分类号: U 448 21<sup>+</sup> 5

文献标识码: A

## Seismic response analysis for long-span continuous bridges

GAO Da-feng, ZHANG Jing-juan, LU Bo-dong

(Key Laboratory of Structural Engineering and Earthquake Resistance Ministry of Education

Xi'an University of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

**Abstract** Long-span continuous bridges have large extended length longitudinally and the amplitude and frequency of the earthquake wave at different supports of the bridges are different when earthquake occurs. In this paper, by taking a 12-span continuous prestressed concrete bridge as an example, the dynamic equation of the structure was derived and the dynamic model of the bridge was also established by use of finite element analysis program ANSYS. Furthermore, the modal analysis and time history analysis of the bridge were carried out. The seismic responses analysis of the bridge under excitation of travelling were numerically simulated and compared with the results from the case of constant excitation. It shows that the glide support friction force reduces the bridge longitudinal earthquake response but has a less influence on its transversal earthquake response. The traveling wave effect reduces the longitudinal earthquake response of braking pillar and increases longitudinal earthquake response of the bridge piers but has a less influence on the transversal earthquake response of the bridge.

**Key words** continuous bridge; earthquake wave; travelling wave effect; seismic response analysis

随着施工技术和设备的不断发展, 预应力钢筋混凝土连续梁桥得到了空前的发展。目前, 连续梁桥一联的跨数已不仅仅局限于 3 至 5 跨, 而是正在向多跨长联的方向发展, 例如很多大型桥梁的引桥大多为多跨连续梁桥, 其纵向延伸长度有的长达数千米。地震发生时, 传到各墩底的地震波必然存在时间滞后, 在进行地震反应分析时, 若采用一致输入则不能精确反映各墩底输入的相位变化, 因此要考虑行波效应以便研究桥梁的地震反应。

收稿日期: 2008-12-16 修订日期: 2009-04-20

作者简介: 高大峰 (1962-), 男, 副教授, 博士, 主要从事结构工程抗震科研。E-mail: zjj153@163.com

本文基于地震激励下结构的运动方程,对某 12 跨预应力混凝土箱梁桥进行了行波激励下地震反应数值模拟,用软件 ANSYS 进行时程分析,考察墩底纵向剪力、面内弯矩和墩顶纵向位移等要素。分别研究了考虑行波效应下不同波速对大桥的地震反应,并将计算结果与一致激励下的进行了比较。

## 1 结构运动方程

对于大跨桥梁结构,地震响应分析需要考虑支点受到不同地震运动的影响<sup>[1]</sup>。采用集中质量离散化模型,结构的运动方程可表示成:

$$\begin{bmatrix} M_a & 0 \\ 0 & M_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_a \\ \ddot{u}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_a & C_{ab} \\ C_{ba} & C_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_a \\ \dot{u}_b \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_a & K_{ab} \\ K_{ba} & K_b \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_a \\ u_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ F_b \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $\ddot{u}_a$ ,  $\dot{u}_a$  和  $u_a$  分别是结构非支承处节点的绝对加速度、速度和位移向量,  $M_a$ ,  $C_a$  和  $K_a$  分别为相应的质量、阻尼和刚度矩阵;  $\ddot{u}_b$ ,  $\dot{u}_b$  和  $u_b$  分别为支承处节点的绝对加速度、速度和位移向量,  $M_b$ ,  $C_b$  和  $K_b$  分别为相应的质量、阻尼和刚度矩阵;  $C_{ab}$ ,  $C_{ba}$  和  $K_{ab}$ ,  $K_{ba}$  分别为支承处节点和非支承处自由度之间的耦合阻尼矩阵和耦合刚度矩阵。  $F_b$  为支承处反力矩阵。

结构的位移向量  $u_a$  可分解为拟静力位移  $u_a^s$  和动力反应相对位移  $u_a^d$ , 即

$$u = \begin{Bmatrix} u_a \\ u_b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} u_a^s \\ u_b \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} u_a^d \\ 0 \end{Bmatrix}. \quad (2)$$

展开式 (1) 的第一行可得

$$M_a \ddot{u}_a + C_a \dot{u}_a + K_a u_a = -C_{ab} \dot{u}_b - K_{ab} u_b, \quad (3)$$

将式 (2) 代入式 (3), 可得

$$M_a \ddot{u}_a^d + C_a \dot{u}_a^d + K_a u_a^d = -M_a \ddot{u}_b^s - [C_a \quad C_{ab}] \begin{Bmatrix} \dot{u}_b^s \\ \dot{u}_b \end{Bmatrix} - [K_a \quad K_{ab}] \begin{Bmatrix} u_a^s \\ u_b \end{Bmatrix}. \quad (4)$$

由于拟静力位移满足平衡

$$[K_a \quad K_{ab}] \begin{Bmatrix} u_a^s \\ u_b \end{Bmatrix} = 0 \quad (5)$$

因此, 有:

$$u_a^s = -K_a^{-1} K_{ab} u_b = R u_b, \quad (6)$$

其中,  $R = -K_a^{-1} K_{ab}$  称影响矩阵, 其力学意义为结构支承节点的单位静力位移引起的非支承节点的拟静力位移。

如果采用阻尼矩阵只与刚度矩阵成正比, 式 (4) 右端第二项也将为零; 如果阻尼矩阵只与质量矩阵成正比或是质量矩阵与刚度矩阵的耦合, 则此项不为零。C lough 和 Penzien 在 Dynamics of Structure 中建议忽略此项影响<sup>[2]</sup>, 则式 (4) 演变为

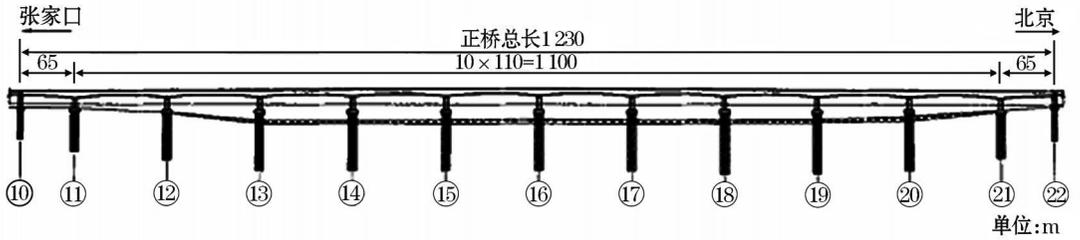
$$M_a \ddot{u}_a^d + C_a \dot{u}_a^d + K_a u_a^d = -M_a R \ddot{u}_b. \quad (7)$$

式 (7) 即为多点非一致输入下桥梁结构的运动方程. 在进行地震反应分析考虑行波效应时式 (7) 右端的各支座处的地震地面运动加速度向量  $\ddot{u}_b$  按具有一定时间差 (按地震波从一个支座运行到另一个支座所需的时间) 的同一条地震波加速度记录进行取值<sup>[3]</sup>。

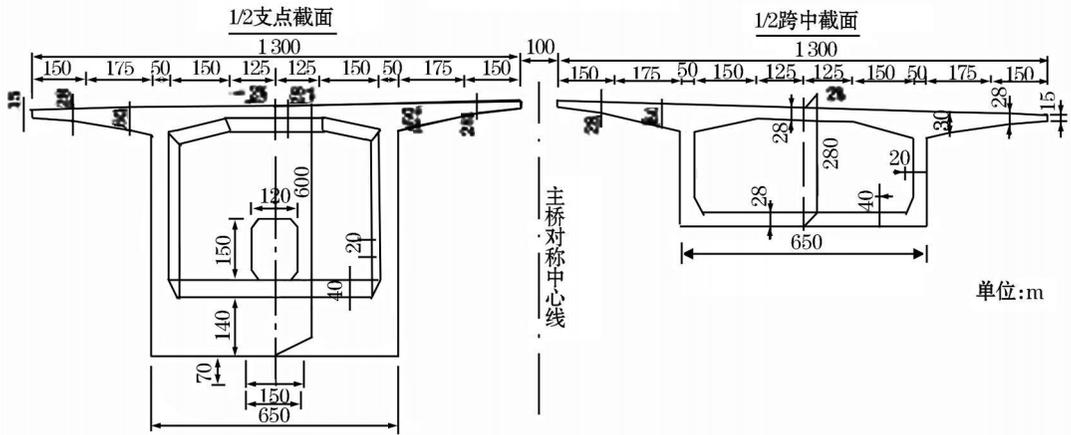
## 2 工程实例

### 2.1 工程概况

官厅湖特大桥是北京—张家口高速公路上的一座特大型桥梁,全长 2350m。主桥跨径布置为 (65+ 10 × 110+ 65)m,桥面宽 27m,双向 4车道,中间设 1m 中央分隔带,主梁为两个独立的单箱单室预应力混凝土连续箱梁,单箱顶板宽 13m,底板宽 6.5m,腹板为直腹板。跨中截面梁高 2.8m,墩顶梁高 6.0m,梁高沿跨径方向按圆弧线变化。桥墩采用圆端形混凝土实体墩,16号墩为制动墩,主桥基础采用大直径钻孔桩。桥址处基本烈度为 VII 度,按 VII 度设防。主桥示意图如图 1 所示。



(a) 立面布置图



(b) 主梁标准截面图

图 1 桥梁示意图

Fig 1 Sketch of bridge

### 2.2 动力特性

本文选用计算量小且能较真实计算梁特性的空间三维梁单元 beam 188 模拟变截面主梁和桥墩,承台和桩采用 44 号梁单元模拟,支座采用能释放梁端约束的 44 号梁单元模拟,用弹簧单元模拟桩-土作用中的土弹簧。依据上述所离散的结构有限元模型,运用子空间迭代法,取前 300 阶振型,总的振型参与质量系数达到 90% 以上,进行该桥的自振特性计算。

### 2.3 地震动输入

由于缺乏桥址区的实际地震记录和地震危险性概率分析报告,本文采用典型的强震记录 E1centro 南北向的地震波,地震加速度峰值为 0.3569g 对加速度峰值进行调整,其调整系数为 0.4203,调整后的地震波加速度峰值为 0.15g 如图 2。

### 2.4 一致激励下的地震反应分析

分析图 3-5 可见,工况 2 的情况下,考虑支座的摩擦力,桥梁地震反应小于工况 1 下的情况。每个桥墩

表 1 前 10 阶自振频率和振型

Table 1 Natural frequencies and mode of first ten orders

阶次	频率 /Hz	振型	阶次	频率 /Hz	振型
1	0.6102	竖弯	6	1.5391	横弯
2	1.2652	纵弯	7	1.5904	横弯
3	1.3074	横弯	8	1.6137	横弯
4	1.3918	横弯	9	1.6544	横弯
5	1.5073	横弯	10	1.7057	横弯

表 2 工况列表

Table 2 Operating mode

工况号	支座摩擦力	地震波输入模式
工况 1	不考虑	纵 (1 0) + 横 (1 0)
工况 2	考虑	纵 (1 0) + 横 (1 0)

墩底纵向剪力和面内弯矩都减小了: 其中图 5 纵向剪力减小幅度最大的为 11号墩, 为 32%; 面内弯矩减小幅度最大的为 15号墩, 为 31%; 而横向剪力和面外弯矩改变量量很小, 可以忽略不计 (论文中略). 可见, 滑动支座摩擦力减小了桥梁纵向地震内力反应。

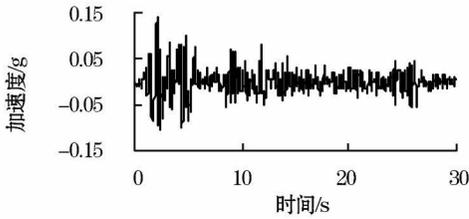


图 2 调整后的地震速度时程记录

Fig 2 Adjusted seismic velocity history

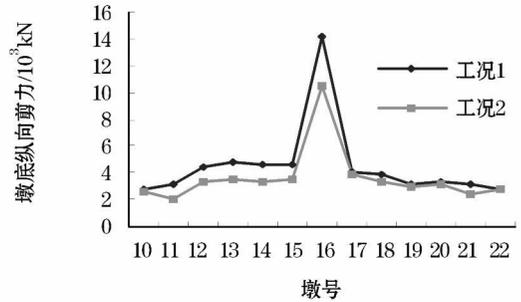


图 3 不同工况下各墩底纵向剪力

Fig 3 Longitudinal shear forces on bottom of piers under different operating modes

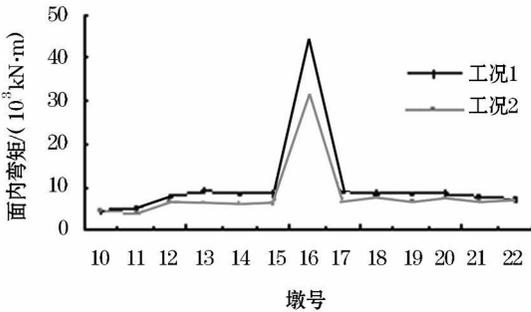


图 4 不同工况下各墩底面内弯矩

Fig 4 Bending moments on bottom of piers under different operating modes

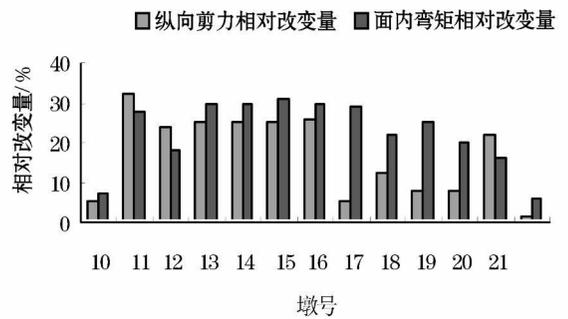


图 5 纵向剪力和面内弯矩的相对改变量

Fig 5 Relative change of longitudinal shears and bending moments

### 2.5 考虑行波效应的地震反应分析

该桥梁行波效应分析中, 由于结构地震响应受表面视波速度影响未知, 而表面视波速的确定有很困难<sup>[4]</sup>. 设地震波为纵波, 纵波 (P波) 在地壳中的波速约为 200~1400m/s<sup>[5]</sup>, 在本文行波效应分析中分别取纵波波速为: 200m/s 300m/s 400m/s 500m/s 800m/s 1400m/s 也就是波到达不同主桥桥墩之间的时间差分别为 0.55s 0.37s 0.28s 0.22s 0.14s 0.08s 计算中对于地震波的输入方向作了如下假定: 假定地震波沿桥纵向从左向右传播. 本文所考察的要素包括各墩底纵向剪力、面内弯矩和各墩顶的纵向位移, 得到不同波速下的桥墩的地震反应曲线见图 6~9

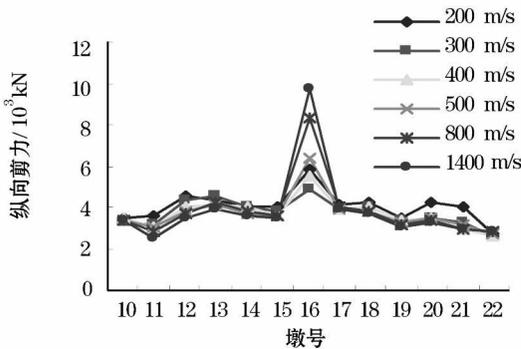


图 6 不同波速下各墩底纵向剪力

Fig 6 Longitudinal shear forces on bottom of piers under different wave velocities

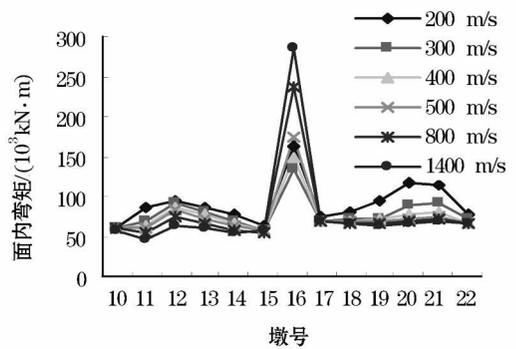


图 7 不同波速下各墩底面内弯矩

Fig 7 Bending moments on bottom of piers under different wave velocities

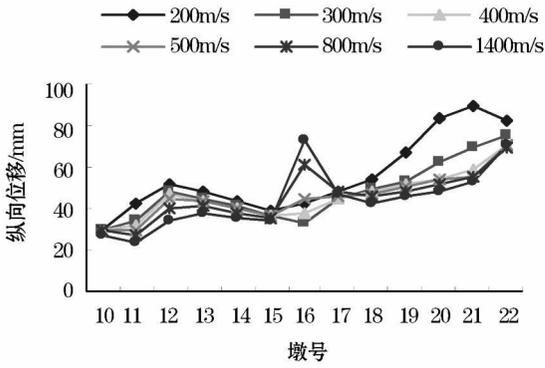


图 8 不同波速下各墩顶纵向位移

Fig 8 Longitudinal displacement of top of piers under different wave velocities

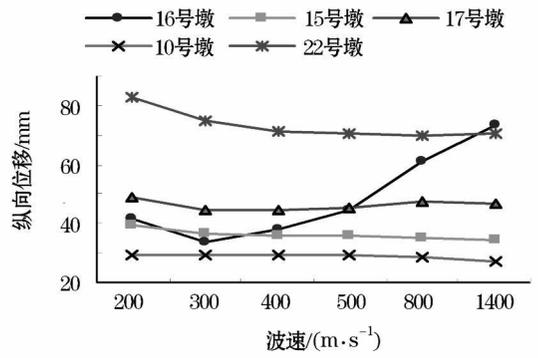


图 9 不同波速下部分墩顶纵向位移

Fig 9 Longitudinal displacement of top of some piers under different wave velocity

分析图 6-9 可见:

(1) 对于中墩 (16号墩), 当波速在 300m/s 左右时, 无论是内力反应还是位移反应数值均为最小。在图 9 中看出 16号墩当波速小于 300m/s 反应随波速的增大而减小; 当波速大于 300m/s 时, 反应随波速的增大而增大。

(2) 对于其它墩, 其内力和位移反应趋势是随着波速的增大而减小, 特别是当波速小于 300m/s 时, 变化趋势尤其明显。

(3) 在图 9 中对比, 近波源处的 10号墩和远波源处的 22号墩, 可以得出, 随着波速的增大 10号墩的地震反应变化趋势小于 22号墩的地震反应变化趋势。可见行波效应的影响随着地震动的输入方向不同而不同。

(4) 总的来说, 行波效应减小了中墩的地震反应, 是有利的, 但是却增大了其它桥墩的地震反应, 这又是不利的。

### 3 结论与建议

本文以官厅湖大桥为背景, 分析了不同行波速度对大跨度连续梁桥地震反应的影响。

(1) 在考虑支座的摩擦力时桥梁的纵向地震反应减小, 是因为滑动支座摩擦力增加了上下部结构的连接刚度, 从而有效地改善了桥梁的整体性, 使它们更能整体承受地震载荷, 另外, 由于支座摩擦的滞回特性, 使其在地震过程中耗散了大量的能量, 因此, 滑动支座的摩擦存在对桥梁的抗震是有利的;

(2) 不同波速下, 桥梁的地震反应不同, 波速越大, 地震反应越接近于一致激励时的地震反应;

(3) 行波效应减小了中墩地震反应, 是有利的, 但是却增大了其他墩的地震反应, 是不利的;

(4) 不同的行波输入方向, 行波响应对于桥墩内力和变形的影响也不相同;

(5) 本文的更深一步结论还需建立在大量计算的基础上, 有待完善。

### 参考文献:

- [1] 李忠献, 史志利. 行波激励下大跨度连续刚构桥的地震反应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(2): 68-76.
- [2] 谢旭. 桥梁结构地震响应分析与抗震设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [3] 宋一凡. 公路桥梁动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [4] 王明晔, 叶爱君, 胡世德. 行波激励下多跨连续梁桥地震反应分析[J]. 结构工程师, 2007, 23(4): 49-54.
- [5] 郭继武. 建筑抗震设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.