

独塔自锚式悬索桥地震响应分析

杨孟刚¹, 胡建华^{2,3}, 陈政清^{1,2}

- (1. 中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙, 410075;
2. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙, 410082;
3. 湖南省交通规划勘察设计院, 湖南 长沙, 410011)

摘要: 以佛山市平胜大桥为研究对象, 采用空间非线性有限元法, 研究了独塔自锚式悬索桥的地震响应特性; 考虑了一致输入、行波输入、多点输入这 3 种地震动模式以及多种地震波组合, 并就塔梁不同连接方式对结构响应的影 响进行探讨。研究表明: 行波效应对主梁位移影响较大, 使得横向位移增大近 80%, 竖向位移增大约 150%, 而对结构内力影响不明显; 竖向地震动分量使主塔轴力和主梁弯矩明显增大; 与塔梁通过滑动支座连接相比, 塔梁通过固定支座连接时主梁纵向位移显著减小, 主塔弯矩显著增大, 因此, 在进行独塔自锚式悬索桥的抗震设计时, 可在塔梁处增设阻尼器, 以达到减震效果。

关键词: 悬索桥; 独塔; 地震响应; 地震动

中图分类号: U448.25

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2005)01-0133-05

Seismic Response Analysis of self-anchored Suspension Bridge with Single tower

YANG Meng-gang¹, HU Jian-hua^{2,3}, CHEN Zheng-qing^{1,2}

- (1. School of Civil and Architectural Engineering, Central South University, Changsha 410075, China;
2. School of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
3. Hunan Communication Planning and Prospecting Design Institute, Changsha 410011, China)

Abstract: Seismic response characteristics of self-anchored suspension bridge with single tower were investigated with spatial nonlinear finite element method, taking Pingsheng bridge in the city of Foshan as an example. Three seismic ground motions, i. e., synchronous excitation, traveling seismic excitations and multiple-support seismic excitations, were considered, and different seismic wave superpositions were also considered. The influence of structure response by two different junctures between tower and girder was discussed. The results show that traveling seismic excitations have much effect on displacement of girder and little effect on inner force of structure. Transverse and longitudinal displacements increase about 80% and 150% respectively under traveling seismic excitations. Axial force of tower and bending force of girder increase distinctly under vertical excitations. Girder longitudinal displacement of fixed juncture between tower and girder is smaller than that of glide juncture between tower and girder, but bending force of tower is contrary. So damper fixed between tower and girder can be used to reduce seismic response for aseismic design of self-anchored suspension bridge with single tower.

Key words: suspension bridge; single tower; seismic response; seismic ground motion

收稿日期: 2004-07-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59895410)

作者简介: 杨孟刚(1976-), 男, 江西安义人, 讲师, 博士研究生, 从事大跨度桥梁几何非线性与桥梁抗震研究

论文联系人: 杨孟刚, 男, 讲师, 博士研究生; 电话: 0731-2655039(O); E-mail: yangmg_cn@sohu.com

从 20 世纪 80 年代开始, 项海帆等对大跨度传统缆索承重桥梁在非一致激励下的地震反应进行了分析与研究^[1-5]。与传统悬索桥相比, 自锚式悬索桥的主缆直接锚固至加劲梁的两端, 主缆的水平拉力由加劲梁来承受, 加劲梁的变形又对主缆的水平拉力产生影响, 所以, 自锚式悬索桥在受力上与传统悬索桥不同^[6-9]。同时, 由于我国现行公路桥梁抗震设计规范对此类桥梁的抗震设计尚无具体规定^[10], 因此, 必须研究自锚式悬索桥在不同输入模式下的地震响应。在此, 作者以佛山市平胜大桥为研究对象, 采用空间非线性有限元法, 对其地震时程响应进行分析与研究。平胜大桥是一座双幅单跨独塔自锚式悬索桥, 主跨 350 m(目前为世界同类型桥梁之首), 主缆垂度为 28 m, 主缆矢跨比为 1/12.5, 塔高为 136 m, 拉索间距为 12 m。

1 结构非一致激励地震动方程

采用集中质量法分析, 结构非一致激励的地震动方程可以表示为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\delta}_s \\ \ddot{\delta}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C}_s & \mathbf{C}_{sb} \\ \mathbf{C}_{sb}^T & \mathbf{C}_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\delta}_s \\ \dot{\delta}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s & \mathbf{K}_{sb} \\ \mathbf{K}_{sb}^T & \mathbf{K}_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_s \\ \delta_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{F}_b \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: 下标 s 和 b 分别表示结构和支承自由度; $[\mathbf{M}]$,

$[\mathbf{C}]$ 和 $[\mathbf{K}]$ 为相应的质量、阻尼、刚度矩阵; $\{\ddot{\delta}\}$, $\{\dot{\delta}\}$ 和 $\{\delta\}$ 为相应自由度的绝对加速度、速度和位移矢量。

为了求解方程(1), 将结构位移分解成两部分: 拟静力位移 $\{\delta_s\}$ 和动力位移 $\{\mathbf{V}_s\}$ 。从而, 有:

$$\begin{bmatrix} \delta_s \\ \delta_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_s \\ \delta_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{V}_s \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (2)$$

经过化简^[11-13], 方程(1) 可以用下面 2 个简单方程表示:

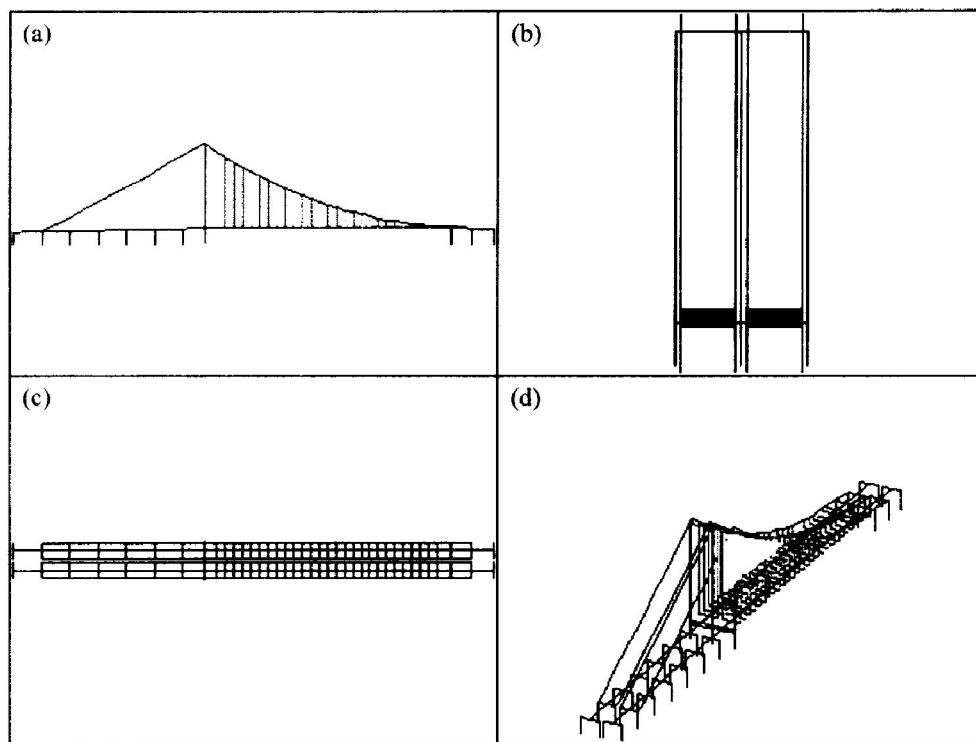
$$[\mathbf{K}_s]\{\delta_s\} + [\mathbf{K}_{sb}]\{\delta_b\} = \{\mathbf{0}\}; \quad (3)$$

$$[\mathbf{M}_s]\{\ddot{\mathbf{V}}_s\} + [\mathbf{C}_s]\{\dot{\mathbf{V}}_s\} + [\mathbf{K}_s]\{\mathbf{V}_s\} = [\mathbf{M}_s][\mathbf{K}_s]^{-1}[\mathbf{K}_{sb}]\{\ddot{\delta}_b\} \quad (4)$$

由方程(3) 可以求出拟静力位移 $\{\delta_s\}$, 由方程(4) 可以求出动力位移 $\{\mathbf{V}_s\}$, 据式(2) 即可得到结构总位移。

2 有限元模型及地震波

采用空间三维非线性有限元方法建立平胜大桥计算力学模型, 如图 1 所示。主梁、主塔、横梁、墩均采用空间梁单元进行模拟; 吊杆采用空间杆单元进行模拟; 缆索采用 2 节点空间悬链线索单元进行模拟^[14]。根据静力分析结果可知, 该桥桩基刚度相当大, 故将桩基础模拟成固结基础, 将主梁和墩之间模拟成顺桥向的滑动。主梁和塔之间的连接考虑了 2 种方案: 滑动支座和固定支座。



(a) 一立面图; (b) 一侧面图; (c) 一平面图; (d) 一透视图
图 1 K1 和 K2 土层的平胜大桥空间有限元分析模型
Fig. 1 Spatial FEM model of Pingsheng bridge

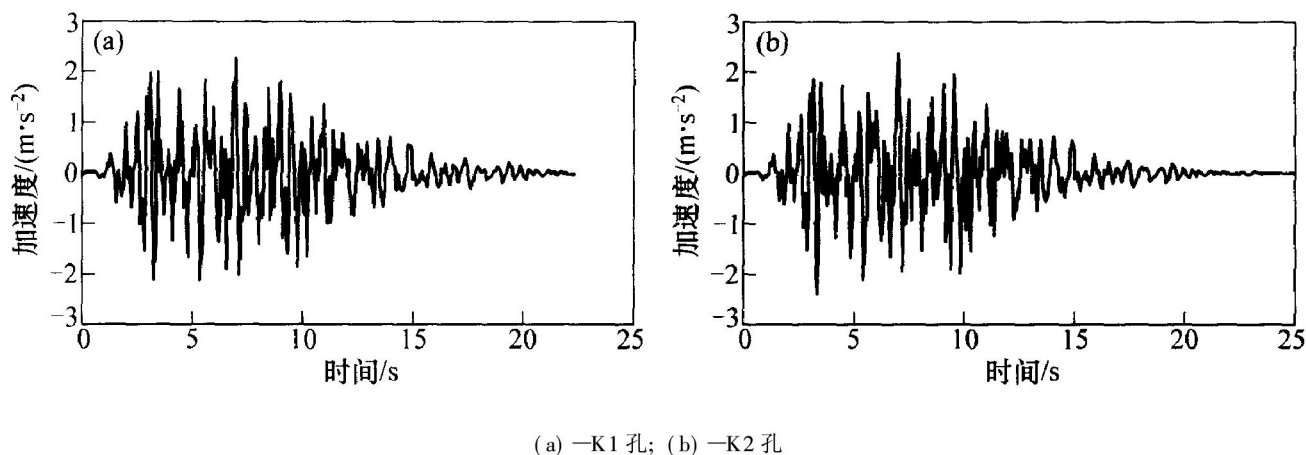


图 2 K1 和 K2 孔对应土层的地震加速度波

Fig. 2 Acceleration wave under earthquake of K1 and K2 earth layer

《佛山市平胜大桥地震安全性评价报告》提供了 2 个钻孔点位的土层合成地震波。2 个钻孔点位的位置分别是 K1 和 K2。其中: K1 位于北浔岸; K2 位于和顺岸。故这里采用 K1 和 K2 的土层合成地震波作为两岸的输入地震波,如图 2 所示。剪切波速为 190.2 m/s 。

对平胜大桥地震时程响应进行分析时,考虑 3 种地震波的输入模式:一致输入、行波输入和多点输入。无论采用何种地震波输入模式,当考虑竖向地震动输入时,竖向分量取水平分量的 $2/3$ 。时程分析采用 Wilson- θ 法^[15],计算步长取 0.02 s 。

3 计算结果与分析

为了表达方便,记主梁和塔之间通过固定支座连接为方案 1;主梁和塔之间通过滑动支座连接为方案 2。

3.1 位移响应计算结果与分析

针对以上 2 种方案,计算了一致输入、行波输入、多点输入 3 种输入模式下的响应。每种输入模式又考虑了纵向、纵向+竖向、横向、横向+竖向 4 种地震波组合。各种输入模式下关键位置的位移响应最大值见表 1。从表 1 可以看出:

a. 在 3 种输入模式下,2 种方案的塔顶位移相近,说明塔顶位移不受地震动输入模式以及主梁与塔连接方式的影响;

b. 一致输入和多点输入下的主跨中点位移相近,行波输入对主跨中点横向位移和竖向位移影响较大,横向位移增大近 80%,竖向位移增大 1.5 倍

左右,说明行波效应对主梁的位移影响不可忽视。

c. 方案 2 的纵向位移远大于方案 1 的纵向位移,这是方案 2 的主梁纵向方向约束减弱所致。

3.2 内力响应计算结果与分析

从位移响应的分析结果可知,多点输入时得到结构响应与一致输入时的相近,故这里仅列出一致输入和行波输入下的结构内力响应结果,见表 2 和表 3(其中, N 为轴力, Q 为剪力, M 为弯矩)。塔底弯矩、轴力响应如图 3 所示。

从表 2、表 3 可以看出:

a. 仅有纵向地震动分量时,一致输入和行波输入时的内力响应几乎相等,这是由于平胜大桥是独塔且其他墩与主梁滑动连接;

b. 竖向地震动分量使塔底轴力增大 5~8 倍,弯矩、剪力变化不大;

c. 竖向地震动分量使主跨跨中点弯矩明显增大。考虑了竖向地震动分量后,方案 1 的主跨跨中点弯矩增大 20% 左右,方案 2 的跨跨中点弯矩增大 120% 左右,若同时考虑行波效应,则增加量更大。这说明竖向地震动分量对该类型桥梁的内力响应影响较大。

从图 3 可以看出:

a. 行波效应对主塔的弯矩响应影响不大,使轴力响应有所减小。

b. 方案 1 的弯矩是方案 2 的弯矩的 4~5 倍,方案 1 的轴力也比方案 2 的轴力大。这表明,对于主塔,方案 1 的抗震性能比方案 2 的弱。

表 1 结构的位移响应

Table 1 Displacement response of structure

塔梁连接方式	位置	一致输入			行波输入			多点输入		
		纵向	横向	竖向	纵向	横向	竖向	纵向	横向	竖向
方案 1	塔顶	12.00	13.70	-	12.00	12.10	-	12.00	13.80	-
	主跨跨中	3.56	10.70	7.03	3.42	18.80	18.40	3.56	10.80	7.84
方案 2	塔顶	11.50	13.40	-	12.50	12.10	-	11.30	13.30	-
	主跨跨中	12.10	9.41	7.71	16.50	17.10	18.90	13.80	9.46	7.65

注:表中位移均相对于主塔基础的位移。

表 2 一致输入下结构的纵向内力响应

Table 2 Longitudinal inner force response of structure under synchronous excitation

塔梁连接方式	位置	纵向			纵向+ 竖向		
		N/kN	Q/kN	$M/(kN \cdot m)$	N/kN	Q/kN	$M/(kN \cdot m)$
方案 1	主跨跨中	3.10×10^4	1.22×10^2	2.54×10^4	3.25×10^4	1.24×10^2	3.07×10^4
	塔底	3.31×10^3	7.25×10^4	1.36×10^6	2.12×10^4	7.38×10^4	1.39×10^6
方案 2	主跨跨中	1.91×10^3	2.95×10^1	7.32×10^3	1.68×10^3	7.14×10^1	1.61×10^4
	塔底	2.06×10^3	1.03×10^4	2.68×10^5	1.78×10^4	1.03×10^4	2.78×10^5

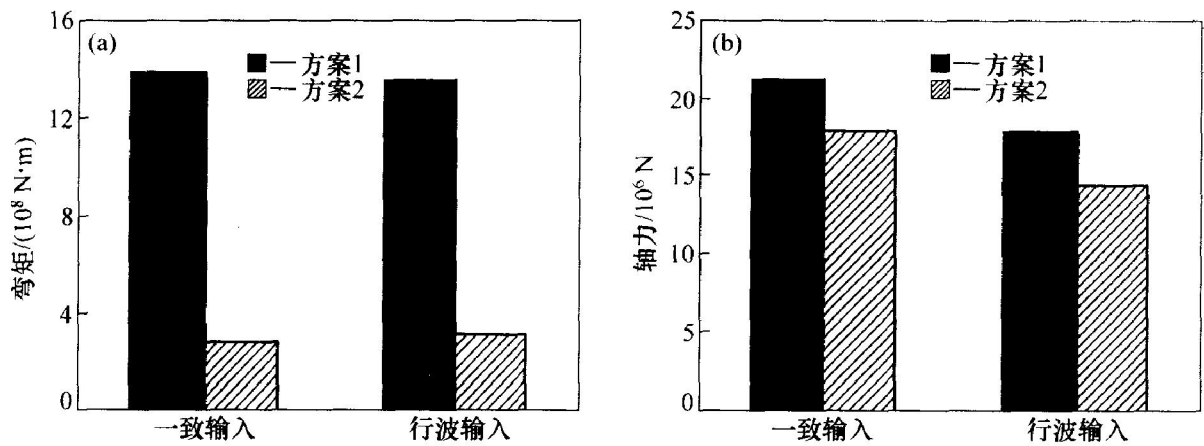
注: N 为轴力; Q 为剪力; M 为弯矩。

表 3 行波输入下结构的纵向内力响应

Table 3 Longitudinal inner force response of structure under traveling seismic excitations

塔梁连接方式	位置	纵向			纵向+ 竖向		
		N/kN	Q/kN	$M/(kN \cdot m)$	N/kN	Q/kN	$M/(kN \cdot m)$
方案 1	主跨跨中	3.10×10^4	1.22×10^2	2.54×10^4	3.24×10^4	7.92×10^2	4.02×10^4
	塔底	3.31×10^3	7.25×10^4	1.36×10^6	1.79×10^4	7.41×10^4	1.36×10^6
方案 2	主跨跨中	1.91×10^3	2.95×10^1	7.29×10^3	3.34×10^3	6.07×10^2	1.79×10^4
	塔底	2.05×10^3	1.03×10^4	2.68×10^5	1.43×10^4	9.99×10^3	3.08×10^5

注: N 为轴力; Q 为剪力; M 为弯矩。



(a) 一塔底弯矩响应; (b) 一塔底轴力响应

图 3 塔底内力响应

Fig. 3 Inner force response at foot of tower

4 结 论

a. 行波效应对主梁的位移响应影响较大,而且会使得在“纵向+ 竖向”地震动组合时的内力响应增大,说明行波效应对独塔自锚式悬索桥的影响不可忽视。

b. 竖向地震动分量使主塔轴力迅速增大,同时使主梁弯矩明显增大。说明在进行独塔自锚式悬索桥抗震分析时,必须考虑竖向地震动分量。

c. 与塔梁通过滑动支座连接相比,塔梁通过固定支座连接时主梁纵向位移显著减少,主塔弯矩显著增大。所以,在进行独塔自锚式悬索桥抗震设计时,要对 2 种连接形式进行验算、比较,必要时在塔

梁处增设阻尼器,以达到减震效果。

参考文献:

- [1] 项海帆. 斜张桥在行波作用下的地震反应分析[J]. 同济大学学报, 1983, 2: 1-9.
XIANG Hai-fan. Earthquake Response Analysis of Cable-stayed Bridges under the Action of Traveling Waves [J]. Journal of Tongji University, 1983, 2: 1-9.
- [2] 范立础, 袁万城, 胡世德. 上海南浦大桥纵向地震反应分析[J]. 土木工程学报, 1992, 25(3): 2-8.
FAN Li-chu, Yuan Wan-cheng, Hu Shi-de. Longitudinal Seismic Response Analysis for Shanghai Nanpu Bridge [J]. China Civil Engineering Journal, 1992, 25(3): 2-8.
- [3] ABDEL-GHAFFAR A M, RUBIN L I. Lateral Earthquake Response of Suspension Bridges [J]. Journal of Structural Engineering, 1983, 109(3): 664-675.
- [4] BERRAH M, KAUSEL E. Response Spectrum Analysis of Structures Subjected to Spatially Varying Motions [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1992, 21: 461-470.
- [5] LEGER P, IDE I M, PAULTRE P. Multiple-support Seismic Analysis of Large Structures [J]. Computers & Structures, 1990, 36(6): 1153-1158.
- [6] JOHN A O, DAVID P B. Self-anchored Suspension Bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 1999, 4(3): 151-156.
- [7] 张元凯, 肖汝城, 金成棣. 自锚式悬索桥的设计[J]. 桥梁建设, 2002, 5: 30-32.
ZHANG Yuan-kai, Xiao Ru-cheng, Jin Cheng-di. Design of Self-anchored Suspension Bridge [J]. Bridge Construction, 2002, 5: 30-32.
- [8] 楼庄鸿. 自锚式悬索桥[J]. 中外公路, 2002, 22(3): 49-51.
LOU Zhuang-hong. Self-anchored Suspension Bridges [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2002, 22(3): 49-51.
- [9] John S, Rafal M, Marwan N. Design of Looping Cable Anchorage System for New San Francisco-Oakland Bay Bridge Main Suspension Span [J]. Journal of Bridge Engineering, 2002, 7(6): 315-324.
- [10] 交通部公路规划研究院. 公路工程抗震设计规范 (JTJ 004-89)[M]. 北京: 人民交通出版社, 1990.
Highway Programming Institute of Ministry of Communications. Specifications of Earthquake Resistant Design for Highway Engineering (JTJ 004-89) [M]. Beijing: China Communication Press, 1990.
- [11] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1992.
LI Guo-hao. Stability and Vibration of Bridge Structures [M]. Beijing: China Railway Press, 1992.
- [12] 范立础. 桥梁抗震[M]. 上海: 同济大学出版社, 2001.
FAN Li-chu. Bridge Aseismic [M]. Shanghai: Tongji University Press, 2001.
- [13] 范立础. 大跨度桥梁抗震设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
FAN Li-chu. Aseismic Design of Long-span Bridge [M]. Beijing: China Communication Press, 2001.
- [14] 杨孟刚, 陈政清. 基于 UL 列式的两节点悬链线索元非线性有限元分析[J]. 土木工程学报, 2003, 36(8): 63-68.
YANG Meng-gang, CHEN Zheng-qing. The Non-linear Finite Element Analysis for Two-node Catenary Element of Cable Structure Based on UL Formulation [J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(8): 63-68.
- [15] 巴特 K J, 威尔逊 E L. 有限元分析中的数值方法[M]. 林公豫, 罗恩, 译. 北京: 科学出版社, 1985.
BATHE K J, WILSON E L. Numerical Methods in Finite Element Analysis [M]. LIN Gong-yu, LUO En, translate. Beijing: Science Press, 1985.