

文章编号:1002-0268(2006)07-0064-04

宜宾长江公路大桥主桥地震反应分析

李贞新¹, 李俊¹, 李小珍¹, 郭丰哲², 程海根¹, 庄卫林³

(1. 西南交通大学 土木工程学院 四川 成都 610031; 2. 铁道第五勘察设计院, 北京 102600;
3. 四川省公路工程咨询监理公司, 四川 成都 610031)

摘要:结合宜宾长江公路大桥斜拉桥的工程设计实例,采用大型有限元分析程序 ANSYS,选取空间 BEAM4、LINK8 及 MASS21 单元建立动力计算模型。用子空间迭代法对宜宾长江公路大桥主桥的动力特性进行了计算,根据桥址场地地震动参数,用反应谱法和时程分析法进行地震反应对比分析,并按桥规对结构进行抗震性能验算。结果表明,宜宾长江大桥主桥抗震结构体系采用弹性索体系是合适的。

关键词:宜宾长江公路大桥;斜拉桥;动力特性;地震反应

中图分类号:U448.27

文献标识码:A

Earthquake Response Analysis of the Main Highway Bridge of Yibin Yangtze River Bridge

LI Zhen-xin¹, LI Jun¹, LI Xiao-zhen¹, GUO Feng-zhe², CHENG Hai-gen¹, ZHUANG Wei-lin³

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

2. The Fifth Institute of Railway Survey and Design, Beijing 102600, China;

3. Highway Engineering Consultants and Supervision Company of Sichuan Province, Sichuan Chengdu 610031, China)

Abstract: An engineering design case about Yibin Yangtze River Highway cable-stayed bridge is investigated, using the finite element analysis program ANSYS. Element BEAM4, Element LINK8, Element MASS21 are used in the dynamic FEM. The dynamics characteristics of the main bridge of Yibin Yangtze River Highway bridge are analyzed by sub-space iteration method. According to the earthquake dynamic parameters of the bridge site the earthquake response is analyzed using the earthquake response spectrum method and the time history analytical method. And the aseismic capability check is processed according to bridge standards. The results of the analysis prove that the elastic cable system is appropriate for the seismic structure system of the main bridge of Yibin Yangtze River Highway bridge.

Key words: Yibin Yangtze River Highway Bridge; cable-stayed bridge; dynamic characteristic; earthquake response

0 引言

引起桥梁确定性振动或随机振动的因素,除车辆荷载外,主要有风振、雨振及地震。近些年来逐步形成了振动控制的理论,并取得了一些宝贵的经验。

地震发生后,地震波的传播在沿途地基上将产生振动,通过基础激发构造物振动,这时地基土、基

础、结构将相互作用,形成多质点多自由度体系的强迫振动。振动时,斜拉桥各构件产生加速度,形成了惯性力,在惯性力的作用下,产生结构内力和变形,若内力和变形超过结构的容许范围,结构开裂、钢筋屈服、直至桥梁倒塌。

大跨度斜拉桥抗震设计中有3个控制截面,即

(1) 直接影响结构功能的截面,如主塔塔根断面;

收稿日期:2005-03-30

作者简介:李贞新(1979-),男,河南南阳人,博士研究生,研究方向为桥梁结构动力学。(lizhenxin_1999@163.com)

(2) 在长期荷载作用下有利，而在地震作用下成为薄弱环节的断面；(3) 在地震作用下发生最大动反应的断面。显然，3 种断面的重合是最不利的。

宜宾长江公路大桥位于四川省宜宾市，主桥桥跨布置采用 184 m+460 m+184 m 双塔双索面钢筋混凝土斜拉桥。主梁的截面形式为分离式双箱梁，半漂浮体系，在索塔下横梁与梁体间设置弹性水平索。斜拉索全桥共 152 对，按双索面扇形布置，索距在主梁上为 6.0 (3.0) m。索塔采用 H 型，设两道横梁。本文分别采用反应谱法及动态时程法对结构进行抗震对比分析，并按桥规对结构的重要截面进行抗震验算。

1 动力特性

大桥的抗震性能首先取决于大桥的结构动力特性。斜拉桥动力特性分析的图式传统上采用单梁鱼骨式模型，由于这种模型不能考虑主梁约束扭转刚度对结构动力特性的影响，近年来有学者提出采用二梁式或三梁式模型。但进一步的研究表明，对于箱梁斜拉桥，其自由扭转刚度占绝对优势，约束扭转刚度仅占总扭转刚度的 5% 以下，可以忽略不计。本桥是箱梁斜拉桥，可以忽略约束扭转刚度的影响，同时考虑到二梁式或三梁式模型可能会产生其他方面的误差，因而仍采用单梁鱼骨式模型，如图 1 所示。

图 1 宜宾长江大桥全桥动力分析模型

Fig.1 The dynamic analytical model of Yibin Yangtze River Highway Bridge

宜宾长江大桥在成桥状态下的边界约束条件如图 2 所示。模型相应的约束信息如下：①桥台与主梁间除 u_y 、 u_z 、 θ_x 约束外，其余均放松；②辅助墩与主梁间除 u_y 、 u_z 、 θ_x 约束外，其余均放松；③桥塔与主梁间除 u_y 约束外，其余均以弹性索连接。

桥梁动力特性分析的有限元法，把桥梁结构的斜拉索及纵向弹性索离散为多个空间杆单元，把桥梁结构的梁、塔、基础离散为多个三维梁单元，于是结构的平衡方程为

$[K]\{\delta\}=\{F\}$ (1)

将 $\{\delta\}=\{x\}\sin\omega t$ ， $\{F\}=-[M]\{\delta\}$ 代入式 (1) 得

$[K]\{x\}=\omega^2 [M]\{x\}$ (2)

图 2 宜宾长江大桥边界约束示意图

Fig.2 Sketch map of boundary restraint of Yibin Yangtze 式中 $[K]$ 是总刚度矩阵 $[M]$ 是总质量矩阵 $\{x\}$ 是振型向量； ω 是圆频率。

由 (2) 式可写出下列瑞雷商

$$\omega^2 = \frac{\{x\}^T [K] \{x\}}{\{x\}^T [M] \{x\}}$$
 (3)

由子空间迭代法，即可求出所需要的自振频率和相应的振型向量，限于篇幅，表 1 列出了本桥成桥状态前 10 阶的自振频率及相应振型的主要特点。

River Highway Bridge

表 1 结构的自振频率及振型特征

Tab.1 Natural frequencies and mode characteristics of the structure

阶次	频率/Hz	振型特点
1	0.258	主梁对称侧弯
2	0.299	主梁对称竖弯
3	0.315	5# 辅助墩纵弯
4	0.346	两塔同向、同塔反向侧弯
5	0.352	纵飘+主梁竖弯
6	0.385	两塔同向、同塔同向侧弯
7	0.434	主梁反对称竖弯
8	0.443	6# 辅助墩纵弯
9	0.511	菜园沱塔的两肢反向侧弯
10	0.515	罗锅沱塔的两肢反向侧弯

2 抗震性能对比分析

对于大跨度桥梁的抗震问题，首先是要确定一个经济合理的抗震设计标准。目前我国公路工程抗震设计规范和铁路工程抗震设计规范的抗震设计标准均只适用于一般的桥梁。有一种观点是按全国地震烈度区划图的基本烈度增加 1 度作为大桥的抗震设计烈度，这种方法比较简单，但由于基本烈度本身就是一个比较模糊的宏观尺度，对于重要的生命线工程来说，这种方法显得过于粗糙。因此，我们根据本桥的重要性及地震的随机性，参照国内外一些大桥的抗震设计标准，提出以 100 年超越概率 10% 的中震标准检算结构物强度，以 100 年超越概率 5% 的大震标准检算结构物位移。

根据地震安全性评价研究报告,桥址区场地稳定,地震时,不会发生一定规模的崩塌、滑坡等不良地质作用,并且地基不存在砂土液化问题,因此从地震构造环境来看是比较有利的建桥场址。

在进行反应谱法与时程分析法计算结果整理时,表中规定如下:

(1) 纵向+竖向地震输入,塔、墩、主梁的弯矩是指绕横桥向转动的弯矩。

(2) 横向+竖向地震输入,塔、墩的弯矩指绕顺桥向转动的弯矩,主梁的弯矩在反应谱中指绕竖直方向转动的弯矩,而在时程分析中指绕横桥转动的弯矩。

(3) 塔的内力均指单肢塔柱,1#、2#、5#和6#辅助墩的内力均指单墩。

2.1 反应谱分析

反应谱方法的特点是可以较少的计算量获得结构的最大反应值。结构地震振动方程为

$$[M]\{\ddot{\delta}\}+[C]\{\dot{\delta}\}+[K]\{\delta\}=-[M]\{I\}\ddot{\delta}_g(t) \tag{4}$$

式中, $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 分别为体系的质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵; $\{\delta\}$ 是质点对地面的相对位移向量,为时间 t 的函数,如仅考虑纵桥向地震动的作用,则 $\{I\}$ 为对应于纵桥向自由度取 1,其余为 0 的列阵; $\ddot{\delta}_g(t)$ 是地面地震动时程。

根据振型分解法,可得到第 i 振型第 j 质点的地震振动方程。

$$\ddot{\delta}_{ji}(t)+2\xi_i\varpi_i\dot{\delta}_{ji}(t)+\varpi_i^2\delta_{ji}(t)=-\gamma_i\varphi_{ji}\ddot{\delta}_g(t) \tag{5}$$

式中, φ_{ji} 是第 j 质点的第 i 振型坐标; γ_i 是第 i 振型的振型参与系数, $\gamma_i=\frac{\{\varphi\}_i^T[M]\{I\}}{\{\varphi\}_i^T[M]\{\varphi\}}$ 。

由式 (5) 求出各振型的地震反应后,考虑到各振型反应的最大值不可能同时发生,各振型的最大反应不能直接求代数和,必须考虑不同振型最大反应值的组合问题。目前应用广泛的是基于随机振动理论提出的各种组合方案,如完全二次型方根法(CQC 法)、平方和开方法(SRSS 法)。

为得到足够精确的反应谱分析结果,取前 200 阶振型进行叠加,在此范围内包括了塔、梁、墩底主要振型。

在反应谱分析中,输入 100 年超越概率 10% (P_1 概率) 和 100 年超越概率 5% (P_2 概率) 水平下的场地地震动反应谱值,采用纵向地震输入+竖向地震输入和横向地震输入+竖向地震输入两种反应谱组合,输入的竖向反应谱值取 2/3 的纵向(顺桥向)反应谱值,计算时没有考虑结构的非线性影响。

2.1.1 100 年超越概率 10% 的反应谱计算结果

表 2 给出了 $P_2=10\%$ 概率地震作用下,结构重要截面的内力。

表 2 重要截面的内力反应 ($P_2=10\%$)

Tab.2 Internal force response of important section

截面位置	纵向+竖向输入		横向+竖向输入	
	弯矩/ N.m	轴力/N	弯矩/N.m	轴力/N
菜园沱岸塔柱底	9.93E+08	4.75E+07	9.17E+08	6.24E+07
罗锅沱岸塔柱底	1.43E+09	5.32E+07	1.38E+08	1.26E+07
1# 墩底	2.96E+06	7.63E+06	1.35E+07	7.43E+06
2# 墩底	4.36E+06	5.89E+06	2.06E+07	5.61E+06
5# 墩底	1.18E+07	6.43E+07	7.11E+06	7.54E+06
6# 墩底	1.15E+07	8.86E+06	4.77E+06	1.19E+07
7# 墩底	2.63E+08	5.59E+06	5.66E+08	5.00E+06
主梁主跨跨中	5.08E+07	1.35E+07	5.23E+07	9.11E+06
菜园沱主梁边跨跨中	9.93E+08	3.07E+07	1.70E+07	9.28E+06
罗锅沱主梁边跨跨中	1.43E+09	3.00E+07	1.72E+07	9.34E+06

2.1.2 100 年超越概率 5% 的反应谱计算结果

表 3 给出了 $P_2=5\%$ 概率地震作用下,结构重要截面的位移反应。

表 3 重要截面的位移反应 ($P_2=5\%$) /m

Tab. 3 Displacement response of important section (unit:m)

截面位置	纵向+竖向输入		横向+竖向输入	
	顺桥位移	竖向位移	横桥位移	竖向位移
菜园沱塔柱顶	0.1731	0.003339	0.0465	0.003339
罗锅沱塔柱顶	0.16571	0.003715	0.0426	0.003715
菜园沱主梁梁端	0.13734	4.97E-04	0.008955	5.55E-04
罗锅沱主梁梁端	0.14288	3.35E-04	0.00758	4.02E-04
主梁主跨跨中	0.143	0.20116	0.005474	0.27047
菜园沱主梁边跨跨中	0.13612	0.045623	0.007483	0.046477
罗锅沱主梁边跨跨中	0.1417	0.04337	0.006873	0.046652
1# 墩顶	0.007714	0.002446	1.09E-09	0.002724
2# 墩顶	0.016486	0.0018	5.01E-09	0.001505
5# 墩顶	0.32075	0.003823	3.72E-07	0.003691
6# 墩顶	0.26085	0.005065	1.39E-07	0.006013
7# 墩顶	0.06825	0.000297	2.31E-07	0.000341

2.2 时程分析

动力时程分析法是随着强震记录的增多和计算机技术的广泛应用而发展起来的,是公认的精细分析方法。其执行步骤如下:

(1) 将振动过程分为一系列相等或不相等的微小时间间隔 Δt ;

(2) 假定在 Δt 时间间隔内,位移、速度和加速度按一定规律变化(本计算采用 Newmark- β 法);

(3) 求解 $t+\Delta t$ 时刻结构的地震反应。 $t+\Delta t$ 时刻结构的动力平衡方程可以表示为如下的增量形式

$$\{K_D\}\{\Delta\delta\}_{t+\Delta t}=\{\Delta F_D\} \tag{6}$$

式中， $\{K_D\}$ 和 $\{\Delta F_D\}$ 分别为结构等效动力刚度和等效荷载向量。

动力时程分析法可以精确地考虑地基和结构的相互作用，地震过程相位差及不同地震时程多分量多点输入，结构的各种非线性因素（包括几何、材料、连接条件非线性）以及分块阻尼等问题。

在时程分析中，桥塔的地震反应均指罗锅沱塔。

2.2.1 100 年超越概率 10%的反应谱计算结果

表 4 给出了 $P_2=10\%$ 概率地震作用下，结构重要截面的内力。

表 4 重要截面的内力反应 ($P_2=10\%$)

Tab. 4 Internal force response of important section

截面位置	纵向+竖向输入		横向+竖向输入	
	弯矩/ N.m	轴力/N	弯矩/N.m	轴力/N
塔底	8.98E+08	1.14E+07	8.44E+08	2.70E+07
1# 墩底	4.87E+05	1.75E+06	5.42E+06	1.72E+06
2# 墩底	7.19E+05	2.44E+06	8.31E+06	2.71E+06
5# 墩底	6.33E+06	1.57E+06	2.47E+06	3.56E+06
6# 墩底	5.03E+06	1.19E+06	1.91E+06	3.82E+06
7# 墩底	4.48E+07	3.59E+06	2.16E+08	3.92E+06
主梁中跨跨中	1.30E+07	2.56E+06	5.46E+08	1.80E+06
主梁边跨跨中	7.36E+06	1.65E+07	2.56E+08	5.18E+06

2.2.2 100 年超越概率 5%的反应谱计算结果

表 5 给出了 $P_2=5\%$ 概率地震作用下，结构重要截面的位移反应。

表 5 重要截面的位移反应 ($P_2=5\%$)/m

Tab.5 Displacement response of the important section (unit:m)

截面位置	纵向+竖向输入		横向+竖向输入	
	顺桥向位移	竖向位移	横桥向位移	竖向位移
塔顶	0.2001	—	0.2791	—
主梁梁端	0.1341	—	0.0005	—
主梁中跨跨中	0.1307	0.1644	0.3848	0.1583
主梁边跨跨中	0.1320	0.0233	0.0309	0.0138
1# 墩顶	0.0018	—	0.0120	—
2# 墩顶	0.0034	—	0.0237	—
5# 墩顶	0.2376	—	0.0431	—
6# 墩顶	0.1515	—	0.0316	—
7# 墩顶	0.0156	—	0.0176	—

2.3 对比分析

由以上分析可以看出：

(1) 采用反应谱法和时程分析法两种方法对宜宾长江大桥进行了地震反应分析时，两种方法的计算结果基本一致，说明计算得到的结构内力和变形

能够反映实际地震作用下的结构反应。

(2) 反应谱的计算结果稍大于时程分析法的计算结果 结构的地震内力建议采用反应谱法的计算结果。

3 抗震验算

由于反应谱的计算结果稍大于时程分析法的计算结果，故采用恒载内力值与反应谱法（超越概率 10%）计算得到的地震反应值按《桥规》（JTG D60-2004）进行极限承载力组合，进行截面承载力检算。计算结果表明：该桥在 100 年超越概率 10%的地震作用下，辅助墩、主塔、交界墩的底部截面均满足极限承载能力要求。

4 结语

(1) 采用反应谱法和时程分析法两种方法对宜宾长江大桥进行了地震反应分析，两种方法的计算结果基本一致，说明计算得到的结构内力和变形能够反映实际地震作用下的结构反应。

(2) 反应谱的计算结果稍大于时程分析法的计算结果 结构的地震内力建议采用反应谱法的计算结果。

(3) 该桥在 100 年超越概率 10%的地震作用下，辅助墩、主塔、交界墩的底部截面均满足极限承载能力要求。

(4) 宜宾长江大桥抗震结构体系采用弹性索体系是合适的。

(5) 建议适当降低弹性索刚度或抗震结构体系采用弹性索+阻尼器体系，以便进一步减轻地震反应。

参考文献：

[1] 范立础, 胡世德, 叶爱君, 等. 大跨度桥梁抗震设计 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.

[2] 叶爱君. 桥梁抗震[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.

[3] 严国敏. 现代斜拉桥[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1995.

[4] 林元培. 斜拉桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 1994.

[5] 贺学锋, 许晓锋, 唐光武, 等. 大跨径混凝土斜拉桥动力特性和地震时程响应分析[C]. 北京: 人民交通出版社, 2000.

[6] 顾安邦, 向中富, 贺学锋, 等. 大跨径斜拉桥抗风、抗震和稳定性分析[C]. 北京: 人民交通出版社, 2002.

[7] 陈星烨, 邵旭东, 等. 大跨度斜拉桥地震线性与非线性响应分析[J]. 湖南大学学报, 2002, 29 (2): 106-111.

[8] 颜娟, 张哲, 黄才良. 广东金马大桥动力分析[J]. 公路交通科技, 2003, 20 (1): 71-73.

[9] 李龙安. 海口世纪大桥抗震抗风分析 [J]. 武汉工业大学学报, 2000, 22 (1): 46-49.