

## 大跨度连续刚构桥的地震反应分析

陈卉卉<sup>1</sup>, 贾程<sup>2</sup>

(1. 解放军理工大学 工程兵工程学院, 江苏 南京 210007; 2. 河海大学 土木工程学院, 江苏 南京 210098)

**摘要:**以贵州虎跳河特大桥为工程背景,利用有限元程序 ANSYS 建立动力分析模型,进行连续刚构桥动力特性分析、反应谱分析以及动力时程响应分析。结果表明,不同方向地震波输入对动力时程响应分析影响较大,采用反应谱方法较动力时程响应分析安全。

**关键词:**连续刚构桥;地震反应分析;反应谱分析;时程响应分析

中图分类号:U441.3 文献标识码:A 文章编号:1671-5322(2008)02-0074-05

近年来,国家兴建了大量重要的大跨度连续刚构桥,对于日益增大的跨径,如何保证结构良好的动力及抗震性能正在成为设计中的决定性因素<sup>[1,2]</sup>。在建的虎跳河特大桥位于贵州省境内,为双壁柔性墩连续刚构,桥梁全长1957.74 m,主跨跨径达到225 m。从完善结构设计和保障结构安全的角度出发,分析该桥的动力特性及地震响应特性,对评价结构的动力性能和抗震性能,具有重要意义。本文有限元程序选用的是 ANSYS,采用空间梁单元建立桥梁模型,对该桥进行了动力特性分析、反应谱分析以及动力时程响应分析<sup>[3]</sup>。在进行地震反应分析过程中,考虑不同的地震波输入方式,重点分析了竖向地震波对结构内力和位移反应的影响。

### 1 大跨径连续刚构桥有限元建模

#### 1.1 工程概况

在建的虎跳河特大桥,跨径为120 m + 4 m ×

225 m + 120 m,连续刚构半幅桥宽采用单箱单室,C60 砼,三向预应力,箱宽6.7 m,翼板悬臂2.65 m,全宽12 m。箱梁根部高13 m,端部及跨中高4.2 m。箱梁高度采用1.80次抛物线方式从箱梁根部高13 m变化至端部及跨中高4.2 m。箱梁底板厚度采用2.1次抛物线方式从箱梁根部厚135 cm变化至端部及跨中厚32 cm。箱梁腹板厚度从3.0 m节段70 cm变化到3.5 m节段的60 cm,以及从3.5 m节段60 cm变化到4.3 m节段的50 cm。箱梁节间腹板厚度变化均采用一个箱梁节段(350 cm和430 cm)长度渐变过渡。0号块件横隔板内梁段底板厚度为150 cm、腹板厚度为120 cm。主墩为双薄壁墩,6~10号墩高分别为:120m、164m、88m、84m、94m。主墩墩身一般为钢筋砼双薄壁墩身,其中6、10号薄壁墩为空心薄壁墩,采用C50 砼。7、8、9号为矩形实体截面墩,采用C40 砼。该桥主桥立面图如图1所示。

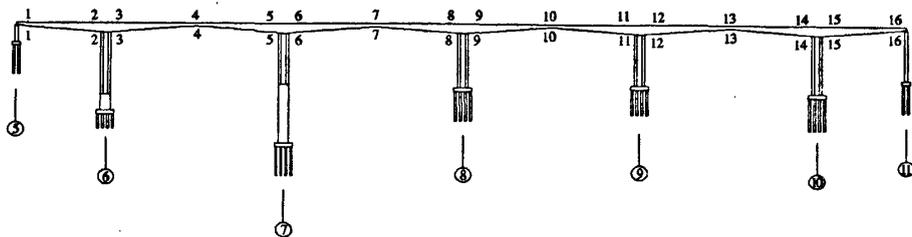


图1 虎跳河大桥主桥立面图

Fig.1 Elevation view of Hutiao River large bridge

收稿日期:2008-02-18

作者简介:陈卉卉(1982-),女,江苏东台人,助教,硕士,主要研究方向为大跨度桥梁抗震性能。

## 1.2 三维梁单元模型

该桥的两幅之间有中央分隔带,每幅相对独立,因此动力及地震分析仅针对其中的一副。为准确地建立用于动力及地震反应分析所用的杆系模型,主梁采用 Beam188 来模拟,主梁与桥墩之间的连接采用刚性单元 MPC184 来模拟<sup>[4]</sup>。本文只对 5#墩—11#墩之间的大跨度刚构主桥进行抗震计算分析。建立计算模型如图 2 所示。

## 2 动力特性分析

在上述计算模型的基础上,运用有限元程序计算了桥的自振特性。在表 1 中给出了模型前 10 阶振型的频率计算结果,并分析了前 10 阶振型的形态。

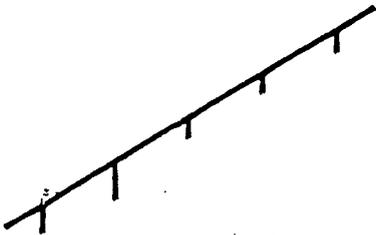


图 2 虎跳河特大桥有限元计算模型

Fig. 2 The computation model of Hutiao River large bridge by Finite Element Method

表 1 前 10 阶自振频率

Table 1 The first ten nature vibration frequency

振型阶次	频率/Hz	振型阶次	频率/Hz
1	0.088 26	6	0.310 88
2	0.150 84	7	0.408 82
3	0.161 88	8	0.448 98
4	0.180 88	9	0.541 38
5	0.216 61	10	0.553 66

在前 10 阶振型中,振型差别较大。1 阶振动形态是主桥的侧向横弯,2 阶振动形态为顺桥向的振动,因此对于纵向除了要保证桥墩在地震作用下不发生任何形式的破坏之外,还要注意梁端部要有足够的位移空间。3 阶至 7 阶振动形态均为横向弯曲变形,8 阶振动形态为竖向振动,9 阶振动形态为横向振动,10 阶振动形态为竖向振动。

## 3 反应谱分析

### 3.1 地震动输入模式

本文采用单点响应谱分析。地震动输入时按

两种模式进行以作对比,其中模式 1 的地震动组合系数为:纵向(1.0) + 横向(1.0);模式 2 的地震动组合系数为:纵向(1.0) + 横向(1.0) + 竖向(0.5)。

### 3.2 反应谱的选择

根据桥址处具体的场地条件,参照《公路工程抗震设计规范》(JTJ004-89),其场地土类型确定为 II 类场地土,反应谱采用 II 类场地土的标准反应谱为谱分析的曲线。II 类场地土标准反应谱的谱曲线见图 3。结构的阻尼比为 0.05<sup>[3]</sup>。

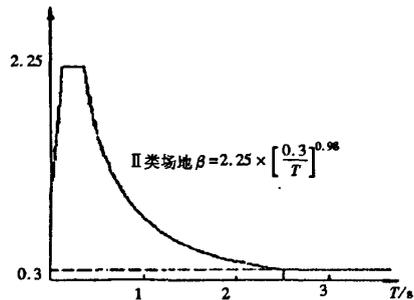


图 3 II 类场地土标准反应谱

Fig. 3 The Standard Response Spectrum of the second class site soil

### 3.3 计算结果

计算得出两种工况下,桥墩底部和顶部的面内、面外最大弯矩,以及桥墩底部最大轴力,各双薄壁墩以及梁截面编号详见图 1。工况 1 下部分截面计算值如表 2-4 所示。

## 4 动态时程分析

### 4.1 地震波的选择

本文中采用 EI-Centro 波,时间步长为 0.02 s。

### 4.2 计算结果

在地震时程分析计算过程中,分别考虑 2 种工况进行计算,其模式与前文反应谱分析相同。另外墩、梁截面的编号方式与反应谱分析时采用的方法相同。在表 5 中列出工况 1 墩底内力的最大值,在图 4~图 6 示出工况二 6-1 号墩内力时程图。

### 4.3 数据分析

从本文的计算数据中发现,对于连续刚构桥,地震的作用效果主要体现在桥墩的底部和顶部,墩身内力反应最大值发生在墩底截面处,此截面是墩体最危险截面,考虑到墩顶截面处内力也比较大且位于墩梁固结处内力较为复杂,因此,对于

表 2 7~8 号墩内力计算结果

Table 2 Internal forces results of the seventh and the eighth piers

墩台号	最大轴力 $F/kN$	墩顶弯距/ $kN \cdot m$		墩底弯距/ $kN \cdot m$	
		$M_x$	$M_y$	$M_x$	$M_y$
7-1	7.287E+02	2.383E+03	9.645E+03	2.387E+03	1.341E+04
7-2	8.491E+02	2.553E+03	9.655E+03	2.557E+03	1.342E+04
8-1	6.055E+03	1.035E+04	4.092E+04	1.035E+04	4.391E+04
8-2	5.755E+03	9.919E+03	4.098E+04	9.921E+03	4.394E+04

表 3 部分主梁截面计算结果

Table 3 Results of some main beam cross-section

截面	$M_x/kN \cdot m$	$M_y/kN \cdot m$	$M_z/kN \cdot m$	$U_x/m$	$U_y/m$	$U_z/m$
3-3	1.189E+04	8.288E+03	2.208E+04	0.141 0	0.304 6	0.008 7
4-4	1.145E+04	2.914E+03	7.377E+04	0.140 1	0.513 8	0.069 7
5-5	1.123E+04	5.541E+03	8.854E+04	0.139 6	0.575 2	0.004 0
6-6	1.806E+04	1.579E+04	8.621E+04	0.139 6	0.565 2	0.004 4

表 4 7~8 号墩位移计算结果

Table 4 Displacement results of the seventh and the eighth piers

工况	墩台号	$U_x/m$	$U_y/m$	$U_z/m$
1	7-1	0.140 3	0.512 5	0.002 1
	7-2	0.140 3	0.506 9	0.002 5
	8-1	0.137 8	0.152 3	0.008 8
	8-2	0.137 8	0.140 5	0.008 4
2	7-1	0.140 3	0.512 5	0.002 3
	7-2	0.140 3	0.506 9	0.003 2
	8-1	0.137 8	0.152 3	0.008 8
	8-2	0.137 8	0.140 5	0.008 4

表 5 7~8 号墩墩底内力最大值

Table 5 The maximum results of internal forces of the seventh and the eighth piers bottom

墩台号	$F_z$ 轴力/ $kN$	$M_x/kN \cdot m$	$M_y/kN \cdot m$
7-1	5.361E+03	1.750E+03	1.100E+04
7-2	7.112E+03	1.759E+03	1.134E+04
8-1	4.124E+03	8.235E+03	3.654E+04
8-2	3.887E+03	8.005E+03	3.698E+04

桥梁的抗震设计需要在桥墩两端局部区域加强。

与反应谱计算结果相同,在地震荷载作用下,考虑竖向地震动输入时,墩底最大轴力增大,且增幅很大。因此在地震反应分析中应该考虑竖向地震动输入。

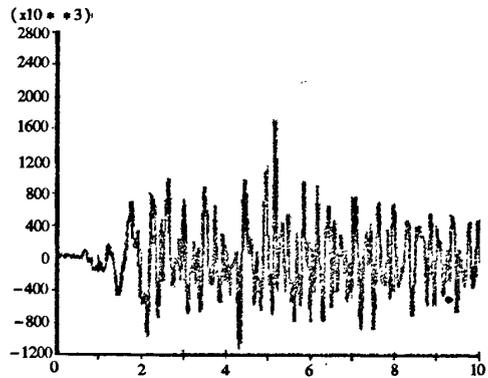


图 4 6-1 号墩墩底轴力时程

Fig. 4 The time history diagram of axial force at 6-1 pier bottom (Condition2)

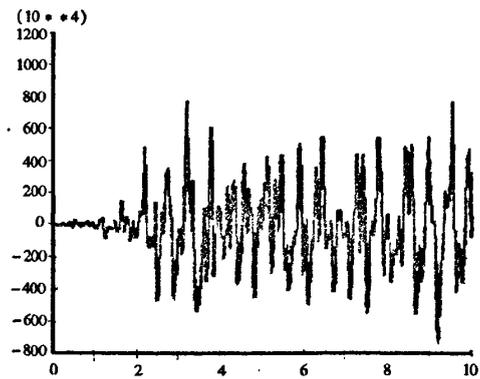


图 5 6-1 号墩墩底  $M_x$  时程

Fig. 5 The time history diagram of  $M_x$  at 6-1 pier bottom (Condition2)

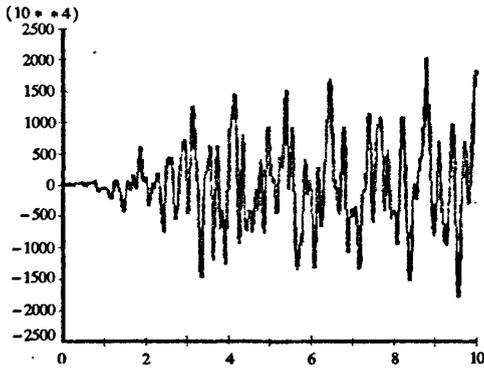


图 6 6-1 号墩墩底 My 时程

Fig.6 The time history digram of My at 6-1 pier bottom ( Condition2)

### 5 反应谱法与时程响应法计算结果比较分析

经过前述分析计算,分别得出虎跳河特大桥地震反应谱分析和时程响应分析的计算结果,为分析、验证虎跳河特大桥在地震作用下的安全性,并比较反应谱分析和时程响应分析的可靠性,分别给出工况二下两种方法计算结果对比,部分数据见表 6、表 7。

表 6 反应谱法与时程法部分主梁跨中位移计算结果对比表  
Table 6 Displacement results of some main beam mid-span by spectrum response analysis and time-history response analysis

主跨跨中截面	分析方法	$U_x/m$	$U_y/m$	$U_z/m$
7-7	反应谱法	0.139 4	0.392 5	0.121 3
	时程分析法	0.990 0	0.371 0	0.092 0
10-10	反应谱法	0.138 5	0.112 4	0.054 7
	时程分析法	0.975 0	0.950 0	0.033 0

表 7 反应谱法与时程法部分墩内力计算结果对比表

Table 7 Displacement results of some piers by spectrum response analysis and time-history response analysis

墩号	分析方法	最大轴力/kN	$M_x/kN \cdot m$	$M_y/kN \cdot m$
6-2	反应谱法	2.672E+03	1.041E+04	2.413E+04
	时程分析法	1.973E+03	8.236E+03	1.836E+04
7-2	反应谱法	1.083E+03	2.557E+03	1.343E+04
	时程分析法	8.390E+02	1.759E+03	1.134E+04

将反应谱法计算结果与时程响应法计算结果比较可以发现,按反应谱计算得到的结果大于按时程响应计算得到的结果,时程分析受地震波输入方向的影响更为明显,总体来看,对本文计算模型采用规范反应谱分析得到的结果是偏安全的。根据欧洲桥梁抗震设计规范(ENVI998-2)第 4.2.4 条的规定,时程分析的结果不能用于放松

根据反应谱法得到的结果,即如果时程分析的结果比反应谱的结果小,就应该取反应谱的结果。因此,在运用已有的地震波记录进行大跨度桥梁的地震反应计算时,为安全起见,应该同时采用时程分析法和反应谱法进行计算,并取两者的较大值作为最后采用的结果<sup>[5]</sup>。

#### 参考文献:

[1] 李国豪. 桥梁结构稳定与振动[M]. 北京:中国铁道出版社,1992.  
[2] 范立础,胡世德,叶爱君. 大跨度桥梁抗震设计[M]. 北京:人民交通出版社,2001.  
[3] 郝文化. Ansys 土木工程应用实例[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.

- [4] 博弈创作室. Ansys7.0 基础教程与实例详解[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.  
 [5] 范立础. 桥梁抗震[M]. 上海:同济大学出版社,1997.

## Seismic Analysis of Long – span Continuous Rigid Frame Bridges

CHEN Hui-hui<sup>1</sup>, JIA Cheng<sup>2</sup>

- (1. Engineering Institute of Engineering Crops, P. L. A University of Science and Technology, Jiangsu Nanjing 210007, China;  
 2. Department of Engineering Mechanics, College of Civil Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Taking the under construction approach bridge of Hutiao River large bridge in GuiZhou province as the engineering background, a dynamic model for it is established and modal response analysis, spectrum response analysis and time – history response analysis are made by Finite Element Method. The modeling method and the dynamic results in this paper lead to the conclusion that the response under combination input of shock from different orientations is different, and the spectrum response analysis is more secure than time – history response analysis.

**Keywords:** continuous rigid bridge; seismic resisting; spectrum response analysis; time – history response analysis

(上接第 60 页)

### 参考文献:

- [1] 曹翠星,何桂平,孙成仁. 泡沫沥青冷再生技术[J]. 公路,2003(11):99 – 102.  
 [2] 拾方治,赫振华,吕伟民,等. 泡沫沥青混合料设计方法的试验研究[J]. 公路交通科技,2004,21(10):1 – 4.  
 [3] 赵永宽,钱华,舒嵩岭. 泡沫沥青冷再生技术的研究[J]. 交通标准化,2005(9):61 – 65.  
 [4] 拾方治,吕伟民,等. 泡沫沥青混合料的特性[J]. 中外公路,2003,23(3):93 – 96.  
 [5] 孙大权,李秀君,拾方治,等. 泡沫沥青特性与混合料设计方法的试验研究[J]. 石油沥青,2004,18(4):14 – 17.

## Influence of the Cement Addition on the Moisture Sensitivity of the Foam Asphalt Mixture

ZHANG Mao-feng, HUANG Wei-rong, LIU Zhi-qian

(School of Civil Engineering & Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** Mix the foam asphalt mixture on the condition of different cement content and adding order, do splitting strength test and analyze the influence of the cement addition on its moisture sensitivity. Through tests, it is found that the moisture sensibility of the foam asphalt mixture which is made by mixing cement with aggregate first, and then with foam asphalt, could be remarkably improved.

**Keywords:** foam asphalt mixture; cement content; adding order; splitting strength; retained splitting strength ratio; moisture sensitivity