文章编号:1671-6833(2006)04-0079-05

大跨径PC斜拉桥地震响应非线性分析

戴 鹏, 郝宪武, 狄 谨

(长安大学桥梁与隧道陕西省重点实验室,陕西 西安 710064)

摘 要:基于大跨径桥梁地震反应分析方法,建立了斜拉桥动力分析空间有限元模型.考虑了几何非线性对结构动力特性及地震响应的影响,以一座大跨径预应力混凝土斜拉桥为研究对象,采用直接积分法对该桥进行了地震非线性时程分析.根据该桥的方案设计,比较了两种塔梁连接方式下结构的动力特性,分析了桩土作用效应对结构地震响应的影响.计算结果表明:在大跨径斜拉桥抗震设计时,应考虑桩土相互作用的影响;人工拟合地震动和相近场地实测地震动记录的计算结果相差较大,在抗震复核中应取最不利荷载作用.

关键词:桥梁工程;斜拉桥;地震响应;几何非线性;有限元分析

中图分类号:U 442.5 **文献标识码**:A

0 引言

随着我国交通建设的大发展,斜拉桥以其跨越能力大、施工方便、外形美观等优点,得到了广泛的应用.我国是一个地震多发的国家,地震对桥梁结构的破坏作用极大.大跨径斜拉桥往往是交通运输的枢纽,具有重要的工程地位,其抗震设计必须进行专门的研究.

目前,桥梁结构抗震分析方法主要采用反应谱法和动力时程法.反应谱法是结构抗震初步设计中广泛使用的一种方法,这种方法概念简单、计算方便,计算时间和费用都较低.但是反应谱法原则上只适用于弹性结构体系,在非线性及大跨径桥梁的抗震分析上存在着较大的误差[1].而非线性动力时程法能考虑结构各种复杂的非线性因素,是公认的较为精细的分析方法.

作者结合工程实例——辽宁营口辽河公路大桥[2],采用非线性动力时程分析方法对该桥进行了多维抗震分析.基于全桥空间三维有限元模型,把地震强迫振动的激振——地震加速度时程直接输入,应用大型有限元程序ANSYS对结构进行了空间地震时程分析.抗震分析中考虑了结构几何非线性的影响,采用不同的地震动作用,对结构进行了地震危险性分析.分析中考虑了"桩土作用"效应,比较了不同的结构分析模型对分析结果带来的影响,得到了一些有价值的结论.

1 非线性动力时程分析

1.1 几何非线性

大跨径斜拉桥是一种柔性结构,在荷载作用下,呈现比较明显的几何非线性特征.主要包括斜拉索的垂度效应、整个结构的几何大变形以及弯矩和轴向力的耦合作用等[3].因此,在进行大跨径斜拉桥结构分析时必须考虑非线性的影响.

斜拉索垂度效应引起的非线性影响采用Ernest公式得出的等代弹性模量考虑,即考虑索力对其弹性模量的影响,等代弹性模量的计算公式如下:

$$E=\frac{E_c}{1+\frac{(\gamma L)^2}{12\sigma^3}E_c} \tag{1}$$

式中:E为拉索的等代弹性模量;E_c为材料弹性模量;γ为材料比重;L为斜拉索的水平投影长度;σ为斜拉索初始应力.

大跨径斜拉桥整体结构刚度较弱,在荷载作用下将产生比较大的变形,大位移对结构刚度将有一定的影响,结构新的平衡应建立在变形后的构形上.在几何非线性计算中,采用随动坐标法修正单元的局部坐标,将结构的几何变化反应到结构的刚度矩阵中去.

收稿日期:2006-06-26;**修订日期**:2006-09-20

基金项目:陕西省交通科技基金资助项目(01-19K)

作者简介:戴 鹏(1978-),男,湖南长沙人,长安大学博士研究生,主要从事桥梁结构仿真与分析方法研究.

中国知网 https://www.cnki.net

斜拉索拉力将使主梁受轴力和弯矩共同作用,当结构发生大挠度及大转角时,采用有限元法进行分析,需要考虑梁单元轴向和弯曲刚度的耦合作用.引入结构单元的几何刚度矩阵,通过定义梁单元的切线刚度矩阵来考虑结构的非线性影响.利用大变形理论和非线性应力应变关系可以推导出单元的切线刚度矩阵:

$$[K]_T=[K]_E+[K]_G \tag{2}$$

式中:$[K]_T$ 为单元切线刚度矩阵;$[K]_E$、$[K]_G$ 分别为单元的弹性刚度矩阵和几何刚度矩阵.利用修正后的刚度矩阵,反复计算到满足已知条件为止.

1.2 运动平衡方程

根据达朗贝尔原理,可以推导出多自由度体系运动方程[4]:

$$[M]\{\ddot{u}\}+[C]\{\dot{u}\}+[K]\{u\}=\{F\} \tag{3}$$

对于斜拉桥结构在地震动作用下可表示为:

$$[M]\{\ddot{u}\}+[C]\{\dot{u}\}+[K]\{u\}= -\{E_x\}\ddot{U}_g-\{E_y\}\ddot{U}_g-\{E_z\}V_g \tag{4}$$

式中:[M]、[C]、[K]分别为结构体系的质量、阻尼和刚度矩阵;$\ddot{U}_g$、V_g 分别为水平方向和竖直方向的地面运动加速度;$\{E_x\}$、$\{E_y\}$、$\{E_z\}$分别为与纵向、横向和竖向荷载向量相对应的质量矩阵.对结构进行三维地震反应分析时:

$$\begin{aligned}\{E_x\}&=\{M_1,0,0,M_2,0,0,\cdots,M_n,0,0\}^T\\ \{E_y\}&=\{0,M_1,0,0,M_2,0,\cdots,0,M_n,0\}^T\\ \{E_z\}&=\{0,0,M_1,0,0,M_2,\cdots,0,0,M_n\}^T\end{aligned} \tag{5}$$

考虑结构的几何非线性影响时,[C]、[K]、[M]、{F}均为时间的函数,结构刚度矩阵是所求未知位移的函数.按照增量法,可以列出非线性增量形式的运动方程式.非线性运动方程的数值求解,采用 Newmark-β 直接积分法.

1.3 地震动输入

根据国家标准《公路工程抗震设计规范》(JTJ 004-89)和《建筑抗震设计规范》(GB50011-2001)的中国地震烈度区域划分,营口辽河公路大桥按7度设防,桥址南岸和北岸场地分别为Ⅲ和Ⅳ类场地土.时程分析方法需要预估桥址处在相应的设计概率水平时会发生多强的地震、地震发生的能量衰减规律、地震发生的持续时间、以及场地的加速度时程等场地的地震参数.这些重要的地震动参数可由国家地震部门提供或现场勘测得到.在对营口辽河公路大桥的地震反应分析过程中,分别采用了辽宁省地震研究所提供的人工地震加速度记录和与桥址场地条件相近的三条实际地震加速度记录,作为输入的地震荷载.按照100年超越概率10%,取地震波地表水平加速度峰值269.5 cm/s^2,地表垂直加速度峰值181.5 cm/s^{2}来检验结构物的强度,输入方式采用一致激振输入.

实际地震动分别采用Ⅲ和Ⅳ类场地的加速度记录:宁河天津波(1976年)、EL-Centro 波(1979年)和 Northridge 波(1994年),并按复核加速度峰值进行调幅.

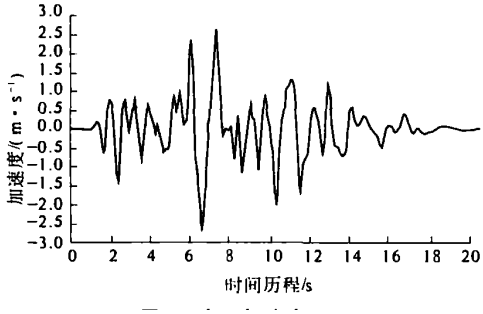

图1 人工加速度记录

Fig.1 Man-made acceleration record

2 空间有限元模型

2.1 工程概况

辽宁营口辽河公路大桥为一座双塔双索面预应力混凝土斜拉桥.桥型布置如图2所示,该桥跨径组成为50 m+100 m+370 m+100 m+50 m,桥面宽24 m.主梁采用形断面,梁高2.4 m.斜拉索采用高强平行钢丝,每塔布置22对索,主跨标准索距为8 m,边跨标准索距为4.5 m.主塔为钻石型塔,自承台顶以上塔高138.6 m.边墩和辅助墩均采用混凝土截面双柱墩,桩基采用φ2.5 m钻孔桩.

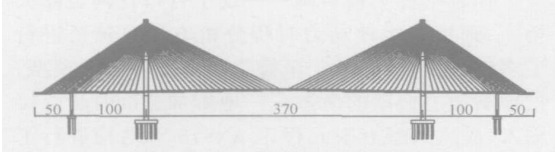

图2 营口辽河桥总体布置

Fig.2 Profile of the Liaohe bridge at Yingkou

2.2 空间有限元模型

营口辽河大桥的空间有限元分析采用多主梁模式,共分为5道纵梁,按照质量分布、抗弯及抗扭刚度等效原则将主梁截面面积及弯扭刚度等效分配到各纵梁上,采用此模式能有效地考虑约束扭转刚度,对于抗扭刚度较小的主梁截面可与实

中国知网 https://www.cnki.net

际吻合得较好. 主梁横向联系采用等效的横梁，横梁刚度取纵向布置的横隔板以及单位节段顶板横向刚度之和.

为了考虑斜拉索张力变化对刚度的影响，在计算拉索单元的非线性刚度时，先用式(1)计算有效刚度，然后由此结果再计算非线性刚度. 全桥主梁、桥塔和横梁采用三维非线性梁单元模拟；斜拉索采用只受拉的三维非线性杆单元模拟；结构的附加质量采用空间质点单元模拟.

结构边界条件按照实际支座布置方式设置. 分别建立了塔梁分离的全飘体系和塔梁设置纵向弹性约束的半漂体系两种有限元模型. 动力时程分析，分别计算了塔底固结及考虑“桩土作用”的两种计算模型. 全桥有限元模型如图 3 所示.

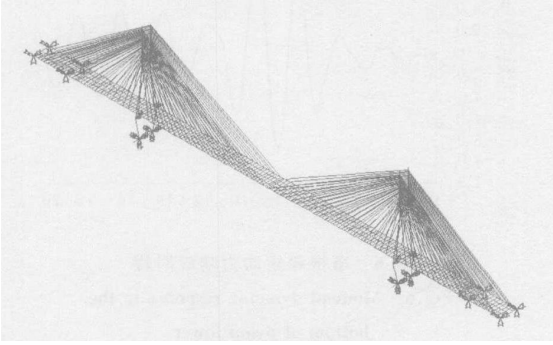

图 3　辽河大桥有限元模型

Fig. 3　Finite element model of the Liaohe bridge

3　计算结果分析

3.1　动力特性

根据设计方案分别计算了全飘和半飘两种塔梁连接方式下的动力特性. 并根据“*M* 法”计算等代土弹簧的刚度，采用边界弹簧单元模拟桩土结构的相互作用. 营口辽河桥基本频率及振型计算结果如表 1 所示.

从动力特性的分析结果可以看出：营口辽河大桥的固有周期较长，结构体系较柔，低阶振型的振动模态主方向单一. 塔梁连接采用弹性约束体系后，明显改变了结构顺桥向的动力特性，而横向和竖向的振动变化影响不大. 考虑桩土作用后，主梁的一阶频率变化较小，但是主塔的振动模态影响很大，其中主塔的对称侧弯频率由 0.969 Hz 减小到 0.436 Hz.

3.2　地震时程分析结果

地震发生时，一般是水平向和竖向激励同时进行，营口辽河大桥在单向地震作用时，其他方向的结构响应值很小，说明该桥空间耦合受力效应并不明显. 因此将三维激励分解为两维的地震荷载工况更为合理. 该桥在横向和竖向地震作用下的结构响应值较大，将人工地震动作用下关键截面内力及位移响应时程绘于图 4～图 7 中，主梁关键截面内力响应最大值列于表 2 中.

表 1　辽河大桥动力特性

Tab. 1　Dynamic property of the Liaohe bridge

频率	全飘体系			半飘体系		
阶次	基本频率/Hz	振型特征	桩土模型频率/Hz	振型特征	基本频率/Hz	振型特征
1	0.085	纵飘	0.078	纵飘	0.323	一阶对称竖弯
2	0.323	一阶对称竖弯	0.322	一阶对称竖弯	0.370	纵飘
3	0.468	一阶对称侧弯	0.436	主塔对称侧弯	0.461	一阶对称侧弯
4	0.479	一阶反对称竖弯	0.444	主塔反对称侧弯	0.480	一阶反对称竖弯
5	0.576	一阶对称扭转	0.467	一阶对称侧弯	0.577	一阶对称扭转
6	0.685	二阶对称竖弯	0.470	一阶反对称竖弯	0.688	二阶对称竖弯
7	0.853	一阶反对称扭转	0.588	一阶对称扭转	0.856	一阶反对称扭转
8	0.918	二阶反对称竖弯	0.652	二阶对称竖弯	0.924	二阶反对称竖弯
9	0.950	主塔反对称侧弯	0.829	一阶反对称扭转	0.972	主塔反对称侧弯
10	0.969	主塔对称侧弯	0.871	二阶反对称竖弯	0.991	主塔对称侧弯

地震危险性分析采用全桥一致激励，分别考虑了顺桥向和竖向及横桥向和竖向的地震动输入. 分别采用了人工地震记录和 3 条实际地震记录进行核算，计算模型分别采用了塔墩底固结和考虑桩土作用的两种计算模型. 表 3 列出了几种计算模型下塔底截面的部分内力峰值.

从计算结果可以看出：采用人工地震记录计算的剪力结果比同类场地实际地震记录 1 的计算结果要小 47%～75%，而弯矩则要大 45%～50%. 同类场地 3 条实测地震动作用下，结构的响

中国知网　https://www.cnki.net

应值也有一定的差别,内力最大相差近50%.可见,地震地面运动的影响因素复杂,同一类场地条件的不同地震动作用下,结构物的响应存在一定程度的差异.重要桥梁的地震危险性分析中,在无明确样本容量的规定下,宜取多条地震动进行复核,并取其中响应最大值进行抗震设计.

表2 主梁内力响应最值

Tab.2 Maximum internal force response of girder

截面	主跨跨中	主跨1/4跨	边跨跨中
轴力/kN	2 850	6 850	6 520
竖向剪力/kN	897	618	144
横向剪力/kN	59.1	15.2	3.85
扭矩/(kN·m)	75.7	110	66.5
横向弯矩/(kN·m)	226	45	12.2
竖向弯矩/(kN·m)	16 100	37 700	28 600

计算分析中考虑桩土与结构共同作用后,主塔墩底面剪力的计算结果比墩底固结模型的结果要大46%~51%,而弯矩的计算结果要小33%~37%.计算结果表明桩土结构相互作用对结构地震响应结果的影响较大,要准确地进行抗震评估,需考虑这种效应带来的影响.

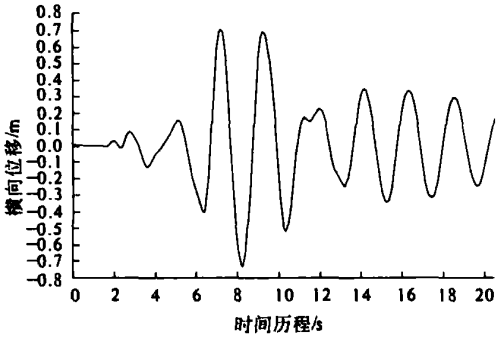

图4 塔顶位移动力响应时程

Fig.4 Displacement dynamic response in the top of pylon tower

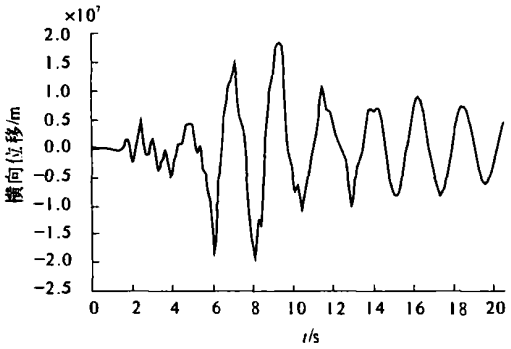

图5 塔根剪力动力响应时程

Fig.5 Moment dynamic response in the bottom of pylon tower

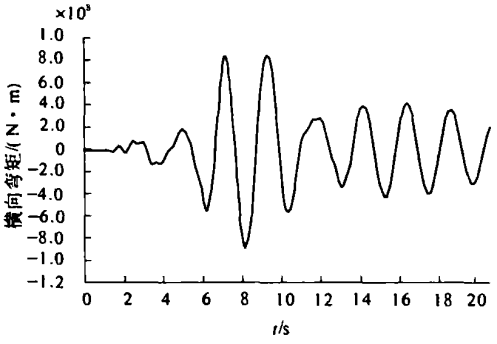

图6 塔根弯矩动力响应时程

Fig.6 Moment dynamic response in the bottom of pylon tower

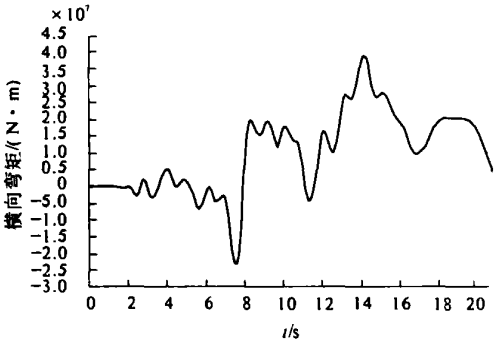

图7 跨中主梁弯矩动力响应时程

Fig.7 Moment dynamic response at middle main-span

表3 塔底内力响应

Tab.3 Internal force response in the bottom of pylon tower

计算模型			纵向剪力/kN	纵向弯矩/(kN·m)	横向剪力/kN	横向弯矩/(kN·m)
人工波		桩土	5.96E+04	1.57E+06	5.33E+04	3.47E+06
实测波	1	固结	5.48E+04	1.24E+06	1.18E+05	2.86E+06
		桩土	1.14E+05	7.85E+05	2.18E+05	1.91E+06
	2	桩土	1.34E+05	9.05E+05	1.98E+05	1.56E+06
	3	桩土	1.40E+05	9.48E+05	3.33E+05	2.93E+06

中国知网 https://www.cnki.net

4　结论

笔者以辽宁辽河公路大桥为研究背景，考虑大跨径斜拉桥几何非线性的影响，对全桥进行了地震动力时程分析．结合多种计算模型分析结果，得到如下几点主要结论．

(1) 动力分析结果表明，考虑“桩土作用”效应，对全桥主梁的固有周期和振动模态影响很小．对主塔的动力特性影响较大，主塔相应振动模态的频率下降了一半；

(2) 同一类场地条件的不同地震动作用下，结构物的响应存在一定程度的差异．结构动力特性参数比较复杂，在地震危险性分析中应该采用多条地震动时程来对结构进行计算检验．类似场地实测地震动记录与根据场地条件人工拟合的地震动记录的计算结果也存在一定的差异，对于重点工程，宜取其中响应最大值进行设计复核；

(3) 考虑“桩土作用”的计算模型和塔底固结模型的计算结果存在一定差异，墩底剪力的计算值增大，墩底弯矩的计算值减小；

(4) 营口辽河桥在地震荷载作用时，主梁主要受竖向激励，主塔主要受水平向的地震激励，各个方向的空间耦合受力效应不明显；

(5) 在 100 年超越概率 10%的地震荷载作用下($269.5\ cm/s^2$)，营口辽河桥的地震响应值较大，宜采用减震消能设计，以减小地震荷载的作用．

参考文献：

[1] 范立础．桥梁抗震[M]．上海：同济大学出版社，1997．

[2] 郝宪武，狄　谨，戴　鹏．营口辽河公路大桥关键技术研究报告[R]．西安：长安大学，2004．

[3] 华孝良，徐光辉．桥梁结构非线性分析[M]．北京：人民交通出版社，1997．

[4] 克拉夫 R W，彭　津 J．结构动力学[M]．北京：科学出版社，1981．

[5] ALLAM S M，DATTA T K．Seismic behaviour of cable－stayed bridges under multi－component random ground motion[J]．Engineering Structures，1999，21(1)：62～74．

[6] 李加武，卢　斌，刘健新．影响桥梁减震性能参数的试验研究[J]．郑州大学学报(工学版)，2002，23(2)：34～36．

[7] 孙利民，张晨南，潘　龙，等．桥梁桩土相互作用的集中质量模型及参数确定[J]．同济大学学报，2002，30(4)：409～415．

[8] NAZMY A S，ABDEL－GHAFFAR A M．Nonlinear earthquake－response analysis of long－span cable－stayed bridges theory[J]．Earthquake Eng Struct Dyn，1990，(19)：45～62．

Nonlinear Analysis of Seismic Respond for Long－span PC Cable－stayed Bridge

DAI Peng，HAO Xian－wu，DI Jin

(Key Laboratory for Bridge and Tunnel of Shanxi Province，Chang'an University，Xi'an 710064，China)

Abstract：Based on long－span bridge seismic analysis method，a spatial finite element model of cable－stayed bridge for dynamical analysis is established in this paper．The time history analysis for a long－span PC cable－stayed bridge is carried out with immediate integration method．The dynamic property and seismic response effects of geometric nonlinearities of the structure are calculated．According to design of the bridge，the difference dynamic property of two tower－girder connection types is compared．With some different seismic loads，the difference seismic response of the structure is compared．Considering pile－soil interaction，the difference seismic response of the structure is analyzed．The result shows that it must be considered pile－soil interaction in the seismic design of long－span cable－stayed bridge．There is a great deal of difference of calculations between the man－made seismic wave and actual seismic record of sites which are of similar environment．The worst loading condition in seismic calculation shall be taken into account．

Key words：bridge engineering；cable－stayed bridge；seismic response；geometric nonlinearities；finite element analysis

中国知网　https://www.cnki.net