

行波效应对铁路大跨连续刚构桥地震反应的影响

张永亮, 陈兴冲, 夏修身

(兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要:介绍了模拟地震地面运动的大质量法,推导了大跨度桥梁考虑行波效应的分析模型及解析方法。以大准黄河特大桥为工程背景,选取墩身刚度、地震波视波速及不同的地震记录为主要参数,进行了考虑行波效应下铁路大跨连续刚构桥的时程反应分析,并与一致激励下的结果进行了对比。系统总结了此类桥梁在行波效应激励下的地震反应特点。本文分析方法和结果对同类桥梁的设计与研究具有一定的参考价值。

关键词: 铁路大跨连续刚构桥; 大质量法; 时程反应分析; 行波效应; 大准黄河特大桥

中图分类号: U442.55 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0844(2010)03-0268-05

The Excitation Effect of Traveling Waves on Seismic Response of Railway Long-span Continuous Rigid-frame Bridge

ZHANG Yong-liang, CHEN Xing-chong, XIA Xiu-shen

(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The large mass method for simulating ground motion is introduced, the model and equations used for considering the seismic effects of traveling wave on long-span bridge are derived. Taking Dazhun great bridge on Yellow river as an example, considering such main parameters as pier shaft stiffness, earthquake wave speed and different ground acceleration time-history, the seismic response of railway long-span continuous rigid-frame bridge under excitation of traveling waves is analyzed, and the comparative analysis of the results with uniform excitation are made also. The characteristics of seismic response on the bridge are systematically summarized. The analysis method and results in the paper are of certain reference to the design and research of similar bridges.

Key words: Railway long-span continuous rigid-frame bridge; Large mass method; Seismic response; Traveling wave effect; Dazhun great bridge on Yellow river

0 引言

地震频发的高烈度地震区往往处于高山峡谷等复杂地理位置,导致铁路桥梁的跨径也逐渐变大,结构形式也越来越复杂。预应力混凝土连续刚构桥因经济适用性好,桥面行车连续等优点,已成为铁路大跨桥梁常用的桥式。对日益增大的跨径,如何保证结构良好的动力及抗震性能已逐渐成为设计中的决定性因素^[1]。在实际工程的地震反应分析中,地震动输入方法常用的是一致激励法,即假定各支承点的地面运动是相同的,只考虑其随时间的变化。这

种假定对于跨度不大的桥梁来说与实际情况出入不是很大,分析结果是可以接受的。但对大跨度桥梁,应考虑地震动空间变异性的影响,以便更准确的获得结构地震反应的受力特点^[2-3]。行波效应是影响地震动空间变异性的主要因素之一。大质量法(LLM)是利用大型有限元软件分析行波效应较为实用的方法,文献[4~10]经分析均验证了大质量法实现复杂结构桥梁行波效应分析的准确性及有效性,其中文献[4~6]以公路大跨连续刚构桥为工程背景,进行了考虑行波效应的地震反应分析。但对

桥墩及主梁刚度均很大的铁路大跨连续刚构桥梁研究则相对较少。本文以大准铁路黄河大桥(96+132+96)m预应力混凝土刚构桥为工程背景,采用大质量法考虑行波效应,以视波速、地震波记录及墩身刚度为主要变化参数,研究行波效应对铁路大跨连续刚构桥地震反应的影响。

1 考虑行波效应的运动方程及求解方法

行波效应输入假定各墩底的地震动输入在波形及幅值上完全相同,各输入之间只相差一个相位,是一个各支点运动完全相干情况的相位差模型。分析结构的行波效应可采用大质量法(LMM)实现。对任意工程结构,通过有限元离散化,可得到结构的动

$$\begin{bmatrix} m_{11} & \cdots & m_{1j} & \cdots & m_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{j1} & \cdots & M_0 & \cdots & m_{jn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{n1} & \cdots & m_{nj} & \cdots & m_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_j \\ \vdots \\ U_n \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1j} & \cdots & c_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{j1} & \cdots & c_{jj} & \cdots & c_{jn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{n1} & \cdots & c_{nj} & \cdots & c_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{U}_1 \\ \vdots \\ \dot{U}_j \\ \vdots \\ \dot{U}_n \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & \cdots & k_{1j} & \cdots & k_{1n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{j1} & \cdots & k_{jj} & \cdots & k_{jn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ k_{n1} & \cdots & k_{nj} & \cdots & k_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_j \\ \vdots \\ U_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ M_0 \ddot{U}_0 \\ \vdots \\ P_n \end{Bmatrix} \quad (3)$$

式(3)的第 j 个方程为

$$m_{j1} \ddot{U}_1 + \cdots + M_0 \ddot{U}_j + \cdots + m_{jn} \ddot{U}_n + c_{j1} \dot{U}_1 + \cdots + c_{jj} \dot{U}_j + \cdots + c_{jn} \dot{U}_n + k_{j1} U_1 + \cdots + k_{jj} U_j + \cdots + k_{jn} U_n = M_0 \ddot{U}_0 \quad (4)$$

式(4)两边同除以 M_0 ,由于 M_0 远大于 m 及上式中的其它项,可以认为 $U_j = \ddot{U}_0$,因而保证了在基础激励处的加速度等于确定的数值。在进行多支承地震激励时,在每个支承点上附加一个大质量,支承点在激励方向放松约束,并施加产生该支承处的地震动地面加速度。如果考虑行波激励,则地面运动加速度按具有一定相位差的同一条地震波加速度记录进行输入,当所有支承点的地震波加速度记录完全相同时(也即无相位差),即为一致地震激励。

2 铁路大跨连续刚构桥有限元建模及动力特性分析

2.1 工程概况

大准黄河大桥主桥为一座高墩大跨预应力混凝土连续刚构桥。桥跨布置为(96+132+96)m悬臂浇筑连续变截面箱梁,单箱单室截面,箱梁顶板宽8.1m,底板宽6.1m。箱梁墩顶处梁高为9.2m,跨中梁高为5.0m,变高段梁底曲线采用二次抛物线。

力平衡方程

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = \{p\} \quad (1)$$

式中 $[M]$ 、 $[C]$ 和 $[K]$ 分别为结构的质量矩阵、阻尼矩阵及刚度矩阵; $\{\ddot{U}\}$ 、 $\{\dot{U}\}$ 和 $\{U\}$ 分别为结构各质点的加速度、速度及位移列向量; $\{p\}$ 为地面激励列向量。

LMM的基本原理是将一个质量很大的集中质量(大于整个结构质量的 10^6 以上)附着于基础激励处,然后释放基础激励方向的自由度,并在集中质量上施加与激励方向相同的一个力 F ,有

$$F = M_0 \ddot{U}_0 \quad (2)$$

式中 M_0 为集中大质量; $\ddot{U}_0$ 为基础激励加速度。将 M_0, F 代入结构的动力平衡方程,得如下的矩阵表达式:

二期恒载按77.4 kN/m计算。主墩采用C40混凝土变截面矩形空心墩,1、2、3#墩高分别为46.5 m、47.2 m和49.2 m,各层承台厚均为4.0 m,1#墩墩顶及4#桥台上均设置纵向活动的铸钢支座。各墩地地质状况基本相同,上层均为浅层粗圆砾土,下层均为石灰岩,除1#墩基础采用 $\Phi 1.25$ m钻孔灌注桩,其余墩均采用 $\Phi 2.5$ m钻孔灌注桩。桥址地震动峰值加速度0.15 g。大准黄河大桥主桥的布置图见图1。

2.2 有限元建模

采用大型有限元软件ANSYS进行建立了全桥三维空间有限元模型,以顺桥向为 x 轴、横桥向为 z 轴、竖向为 y 轴。变截面箱梁、桥墩、承台及破冰棱采用空间梁单元beam4模拟,桥面铺装等二期恒载采用集中质量单元mass21附加在主梁的节点上。因1#墩及桥台上均设置了纵向活动的铸钢支座,在有限元模型中仅约束竖向和横向平动自由度,其余墩与主梁之间的连接采用主从自由度约束模拟。由于桩底均嵌固在石灰岩下,地基较刚,故对所有桥墩承台底的全部自由度进行刚性约束。全桥共用153梁单元,102个质量单元。计算模型见图2。

为了便于探讨铁路大跨连续刚构桥受结构形式

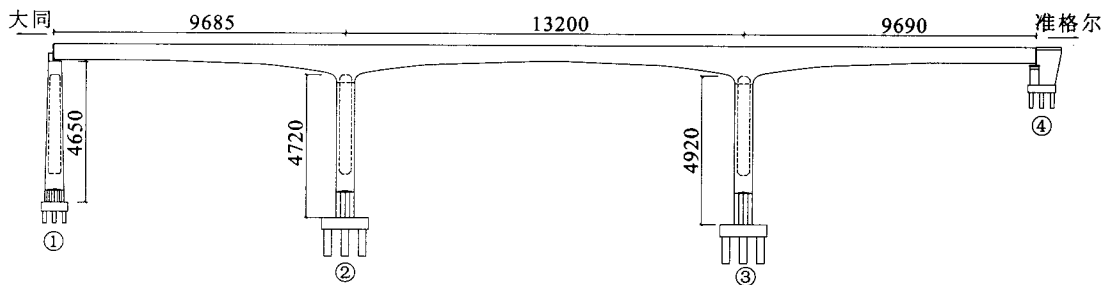


图1 大准黄河大桥总体布置

Fig.1 The layout of Dazhun bridge on Yellow river .



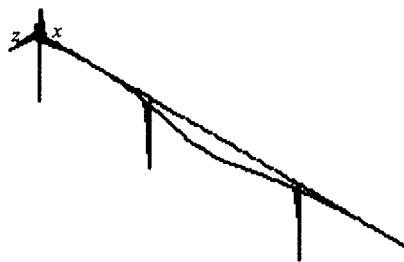
图2 大准黄河大桥的计算模型

Fig.2 Calculation model for Dazhun bridge.

和地震波空间变异性影响下的受力特点和规律,虚拟了另一模型,将3#墩高由49.2 m减少一半至24.6 m,其中桥墩的各控制截面尺寸保持不变。这样由原来的各墩高相近的规则桥梁变为墩高相差较大的非规则桥梁。原桥模型记为模型I,虚拟模型记为模型II。



(a) 第1阶振型



(b) 第2阶振型

图3 模型I振型图

Fig.3 Vibration shapes of model I .

3 行波效应激励下的时程反应分析

3.1 地震波的模拟与输入

地震时程分析采用的是本桥址工程场地50年超越概率63%地表安评地震动时程曲线,地震动峰值加速度为0.045 g。为了便于深入讨论不同的地震动中所含的地震波频率成分不同对行波效应的影响,本文根据场地情况还选择了EL-centro波,将其峰值调整至0.045 g。地震加速度时程见图4。假定震源出现在1#墩左侧,地震激励方向假定从1#墩向5#墩方向传播,且仅考虑地震动仅沿顺桥向输

2.3 动力特性分析

全桥动力特性的部分计算结果见表1及图3。由表1的分析结果可知,与模型I相比,模型II由于墩高的改变动力特性发生了较大的变化。体系的振型及频率出现的次序发生了改变,且其自振频率明显高于文献[1~3]的公路大跨连续刚构桥的自振频率(一阶自振频率在0.2~0.25 Hz)。

表1 全桥动力特性

振型阶数	模型 I		模型 II	
	频率/Hz	振型特征	频率/Hz	振型特征
第1阶	0.938	体系纵飘	1.227	体系一阶横弯振动
第2阶	1.127	体系一阶横弯振动	1.230	体系纵飘
第3阶	1.364	体系二阶横弯振动	1.430	体系二阶横弯振动
第4阶	1.528	体系竖向弯曲振动	1.629	体系竖向弯曲振动

入。因地震波在基岩中的传播速度一般大于500 m/s,在覆盖土层中的传播速度一般小于500 m/s,考虑地震波传播速度的各种可能性,分别取视波速为150、250、350、500、1 000及1 500 m/s六种情况。依次从1#、2#及3#墩承台底输入地震波,各种波速参数对应的承台底地震激励滞后时间见表2。

3.2 结果分析及讨论

分别采用一致输入和行波输入对该桥进行分析,地震反应分析采用Rayleigh阻尼矩阵,即

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (5)$$

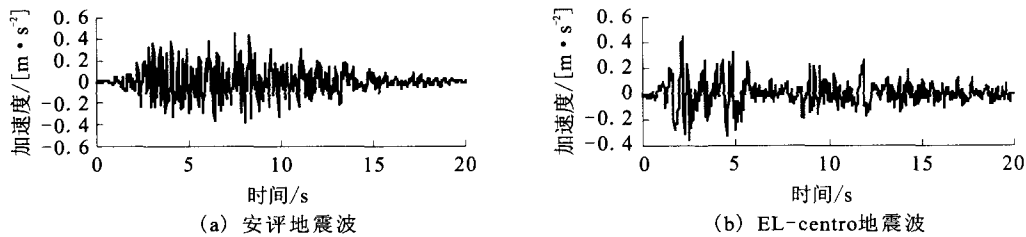


图4 输入地震波的加速度时程

Fig. 4 Acceleration time histories of seismic waves.

表2 视波波速及墩底激励滞后时间

基点至各墩承台底的距离/m		视波波速/[m·s ⁻¹]					
		1 500	1 000	500	350	250	150
		滞后时间/s					
1#-2#墩	96	0.06	0.10	0.19	0.27	0.38	0.64
1#-3#墩	228	0.15	0.23	0.46	0.65	0.91	1.52

式中:

$$\alpha = 2 \frac{\xi_i \omega_i - \xi_j \omega_j}{\omega_i^2 - \omega_j^2} \omega_i \omega_j$$

$$\beta = 2 \frac{\xi_i \omega_i - \xi_j \omega_j}{\omega_i^2 - \omega_j^2}$$
(6)

提取顺桥向振动的前两阶模型的自振频率,假定各阶振型的阻尼比均为0.05,算得 $\alpha=0.322$, $\beta=0.0077$ 。求解时采用Newmark- β 法,积分参数 $\gamma=0.5$, $\beta=0.25$,此时算法是无条件稳定的。分别选取2#及3#墩顺桥向的墩顶位移、墩顶及墩底截面的轴力及弯矩作为重点观察的量值。计算结果见表3~表6。

表3 安评波作用下模型I内力结果

视波速/[m·s ⁻¹]	2#墩顶		2#墩底		3#墩顶		3#墩底	
	轴力	弯矩	轴力	弯矩	轴力	弯矩	轴力	弯矩
一致激励	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1 500	1.012	0.966	0.954	0.983	0.874	0.873	0.965	0.922
1 000	0.995	0.949	0.946	0.710	0.863	0.827	0.947	0.891
500	0.848	1.038	0.768	0.783	0.882	1.149	0.765	0.720
350	0.703	0.963	0.658	0.605	0.821	1.153	0.789	0.613
250	0.668	0.754	0.642	0.649	0.727	0.747	0.696	0.616
150	1.006	0.743	0.986	0.981	1.003	1.051	0.825	0.909

注:表3中的数值为将考虑行波效应的反应量值与一致激励下的反应量值之比,表4~表6中的数值含义与此表相同。

从表3可知,随着安评地震波视波速的变化,模型I在视波速为500 m/s及350 m/s时仅3#墩墩顶弯矩增大15%,其余情况内力值均小于一致激励的内力值或与一致激励的内力值基本接近。

从表4可知,随着EL-centro地震波视波速的变化,模型I各墩墩底内力仅在150 m/s有所增加,其余情况墩底内力值均小于一致激励的计算结果,且随着视波速的减小各墩墩底的内力也逐渐减小;与墩底内力相比墩顶内力数值增加较大,2#墩墩顶

弯矩最大增大32%,3#墩墩顶弯矩最大增大48%。从表4还知,墩顶弯矩的增加幅度较墩顶轴力的增加幅度大;墩顶内力的变化与地震波视波速的变化无明显规律。对比表3及表4可知,EL-centro波的行波效应对该桥的影响明显高于安评地震波行波效应的影响,这说明含不同频率成分的地震波对同一结构的行波效应影响大小不同,因此在实际工程设计中一定要根据工程场地情况,选择多条地震波及不同视波速的影响,从中找出影响最为显著的行波效应组合。

表4 EL-centro波作用下模型I内力结果

视波速/[m·s ⁻¹]	2#墩顶		2#墩底		3#墩顶		3#墩底	
	轴力	弯矩	轴力	弯矩	轴力	弯矩	轴力	弯矩
一致激励	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1 500	1.007	1.228	1.065	0.968	0.873	1.084	0.983	0.871
1 000	0.963	1.253	1.092	0.922	0.847	1.094	0.947	0.794
500	0.877	1.157	0.955	0.796	0.769	1.095	0.767	0.730
350	0.727	0.961	0.769	0.626	0.728	1.226	0.695	0.641
250	0.630	0.787	0.635	0.508	0.471	0.687	0.548	0.371
150	1.145	1.316	1.169	1.081	1.288	1.484	1.156	1.147

表5 安评波作用下模型II内力结果

视波速/[m·s ⁻¹]	2#墩顶		2#墩底		3#墩顶		3#墩底	
	轴力	弯矩	轴力	弯矩	轴力	弯矩	轴力	弯矩
一致激励	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1 500	1.061	1.035	0.970	1.044	0.948	0.807	0.952	0.924
1 000	1.062	1.084	0.930	1.021	0.914	0.798	0.913	0.886
500	1.077	1.353	0.859	0.913	0.907	1.172	0.895	0.638
350	1.100	1.353	0.921	0.953	1.012	1.487	0.943	0.604
250	1.471	1.184	1.138	1.333	0.753	0.988	0.704	0.764
150	2.137	1.364	1.629	2.011	1.149	1.428	1.079	1.115

表6 地震波作用下位移结果

视波速/[m·s ⁻¹]	模型I				模型II	
	安评波		EL-centro波		安评波	
	2#墩顶	3#墩顶	2#墩顶	3#墩顶	2#墩顶	3#墩顶
一致激励	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1 500	1.010	0.897	1.028	0.853	1.148	0.885
1 000	1.000	0.866	1.007	0.818	1.164	0.846
500	0.845	0.701	0.859	0.755	1.033	0.635
350	0.639	0.567	0.634	0.636	1.213	0.538
250	0.680	0.670	0.458	0.531	1.574	0.808
150	1.175	1.113	1.000	1.231	2.623	1.135

对比表3与表5可知,行波效应对模型Ⅱ的影响明显高于模型Ⅰ的影响,说明行波效应对墩高相差悬殊的非规则桥梁的影响更大。对模型Ⅱ,随着安评地震波视波速的变化,2#墩(高墩)墩顶内力普遍增大,在视波速为150 m/s时2#墩顶弯矩增加约36%,墩顶轴力增加约1倍以上;而3#墩(矮墩)墩顶内力有增有减。从表5还知,行波效应对刚构墩墩顶的内力影响较墩底内力的影响更大。

从表6可知,随着地震波视波速的变化,模型Ⅰ仅在视波速为150 m/s时,各墩墩顶位移有所增大,其余情况内力值均小于一致激励的内力值或与一致激励的内力值基本接近;对该桥El-centro波行波效应的影响高于安评波的影响;通过对比模型Ⅰ与模型Ⅱ可知,行波效应对非规则桥梁墩顶位移的影响明显高于对规则桥梁的影响。

4 结论及建议

(1) 对铁路大跨连续刚构桥,按一致激励输入法进行地震反应分析所得结果并非总是偏于安全的,行波效应对结构地震反应的影响与地震波的视波速及自身的特性有关,因此在实际工程设计中应根据结构的场地情况考虑多条地震波及同一条地震波下不同视波速影响的行波效应组合,找出影响最为显著的行波组合,为结构的抗震设计提供依据。

(2) 行波效应对铁路大跨连续刚构桥墩墩顶截面内力的影响高于对墩底截面内力的影响,墩顶截面内力随着地震波的视波速的变化,有时高于一致激励输入下的结果,但墩底截面内力一般情况下均小于一致激励输入下的结果。

(3) 行波效应对墩高相差较为悬殊的非规则桥梁的地震反应影响更加显著,就本算例而言,墩顶弯矩最大可增加近50%,这一点应引起工程设计人员的注意。

(4) 本文所使用的大质量法模型,为大型复杂结构桥梁采用大型通用有限元程序考虑地震动的空间变异性提供了一种新的、可行的途径。该法容易被工程设计人员掌握,可供设计人员为大跨桥梁结构进行更全面的抗震分析。

[参考文献]

- [1] 石玉成,卢育霞.汶川8.0级地震甘肃灾区震害特点及恢复重建对策[J].西北地震学报,2009,31(1):1-7.
- [2] 曾金艳,李自红,陈文.基岩输入参数对场地地震反应的影响分析[J].西北地震学报,2009,31(2):110-114.
- [3] 李杰,李娜.基于二维相干性自锚式悬索桥的地震响应研究[J].西北地震学报,2008,30(2):150-154.
- [4] 王波,张海龙,徐丰.薄壁高墩大跨连续刚构桥地震时程反应参数研究[J].公路工程,2007,32(4):28-32.
- [5] 宋丹,田小红,吴辉科.大跨度刚构桥的行波效应影响分析[J].中南公路工程,2007,32(2):82-85.
- [6] 丰硕,项贻强,汪劲丰.大跨径连续刚构桥的动力性能及地震响应分析[J].中南公路工程,2005,30(4):77-81.
- [7] 王建军,秦荣,谢开仲.大跨度钢箱提篮拱桥地震反应的分析方法[J].兰州理工大学学报,2008,34(1):102-105.
- [8] 谢开仲,秦荣,林海瑛.大跨度CFST拱桥地震反应分析方法研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2005,29(5):700-703.
- [9] 童申家,吴星,李纲.大跨度钢管混凝土拱桥地震行波效应分析[J].桥梁建设,2005,(2):72-75.