

文章编号: 1002-0268 (2007) 03-0086-04

大跨径钢筋混凝土拱桥的地震时程响应分析

孙广龙¹, 宋建永², 元路宽¹, 刘祖胜³

(1. 北京工业大学, 北京 100022; 2. 交通部公路科学研究院, 北京 100088;
3. 四川省交通厅公路规划勘察设计研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 针对某在建 150 m 跨径钢筋混凝土箱形拱桥, 采用开发的基于 ANSYS 的大跨桥梁抗震分析计算模块进行地震加速度时程响应分析。选用天津波和 EL-Centro 波两种加速度时程曲线, 采用一致激励和行波激励分别进行地震时程响应分析。结果表明: 与一致激励相比, 考虑行波效应时, 拱脚弯矩、1/4 截面轴力和弯矩均有显著增大, 拱脚轴力、拱顶轴力和弯矩则有所减小; 各部位的顺桥向位移均增加。开发的抗震分析模块应用于实际工程中效果较好。

关键词: 桥梁工程; 拱桥; 地震时程响应; 一致激励; 行波效应

中图分类号: U448.22; U442.5⁺5 **文献标识码:** A

Seismic Time-history Response Analysis of Long-span Arch Bridge

SUN Guang-long¹, SONG Jian-yong², QI Lu-kuan¹, LIU Zu-sheng³

(1. Beijing University of Technology, Beijing 100022, China;
2. Research Institute of Highway Ministry of Communications, Beijing 100088, China;
3. Sichuan Province Communications Department Highway Planning, Survey, Design and Research Institute, Sichuan Chengdu 610041, China)

Abstract: Seismic time-history response behavior analysis of long-span reinforced concrete box arch bridge is analyzed by using the modules developed with the program ANSYS for a reinforced concrete arch bridge which is being built. This bridge's span is 150 meters. Two acceleration time-history curves Tianjin wave and EL-Centro wave are chosen to analyze seismic time-history response by using uniform excitation and traveling-wave excitation. The results show that compared with the results got from the uniform excitation method, the moment at end arch and at 1/4 span, the force at 1/4 span both increase a lot, but the force at end arch and top arch, the moment at top arch decrease when the traveling-wave effect is considered.

Key words: bridge engineering; arch bridge; seismic time-history response; uniform excitation; traveling-wave effect

0 前言

近几年国内外对大跨径桥梁的地震响应的影响因素分析研究较多, 特别是对于大跨径悬索桥和斜拉桥的地震分析开展了较为系统的研究工作。对于拱桥, 这方面的研究多集中在钢管混凝土拱桥的地震响应研究, 对于大跨度钢筋混凝土箱形拱桥地震响应的研究相对匮乏, 这说明该类桥梁的地震反应性能的研究还有许多工作要做。本文以在建跨径为 150 m 的钢筋混凝土箱形拱桥为分析对象, 选用天津波和 EL-Centro

波两种加速度时程曲线, 采用一致激励和考虑行波效应的多点激励分别进行地震时程响应分析。

1 基本理论

多自由度体系地震时一致激励地面运动方程为

$$M\ddot{y}(t) + C\dot{y}(t) + Ky(t) + ME\ddot{U}_g(t) = 0, \quad (1)$$

其中, M 、 C 、 K 分别为结构的质量、阻尼与刚度矩阵; $y(t)$ 为结构体系的动态相对位移; E 为惯性力指示向量; $\ddot{U}_g(t)$ 为不同支座处地震地面运动加速度向量。

多点激励下, 把结构反应的总位移分解为拟静态

收稿日期: 2006-01-19

基金项目: 交通部西部交通建设科技资助项目 (200331878011)

作者简介: 孙广龙 (1979 -), 男, 黑龙江牡丹江人, 工学硕士, 研究方向为桥梁工程. (guanglongsun1979@126.com)

位移和动态相对位移,其中拟静态位移采用静力求解,对于集中质量矩阵,推导可得其运动方程为

$$M\ddot{y}(t) + C\dot{y}(t) + Ky(t) + M\alpha\ddot{U}_g(t) = 0, \quad (2)$$

其中,拟静态矩阵 $\alpha = K^{-1}K_g$,其力学意义为支座节点各自由度方向单位静位移所引起的整个体系的拟静态位移, K_g 为结构内部节点对地面支座节点的刚度贡献。

一致激励时, $\ddot{U}_g(t) = Eb\ddot{U}_g(t)$,则式(2)与结构运动方程式(1)完全一致。把式(2)中的 $\ddot{U}_g(t)$ 按具有一定时间差的同一条地震加速度记录进行取值即可以考虑行波效应的影响^[2,3]。

2 工程算例

2.1 工程概况

某在建钢筋混凝土箱形拱桥,总体布置简图如图1所示。桥面宽 10 m,净跨径 150 m,净矢高 30 m,主拱圈为单箱双室截面,截面尺寸如图2所示,拱轴线采用悬链线,拱轴系数为 1.988。拱上建筑为简支梁式,跨径为 14.2 m。

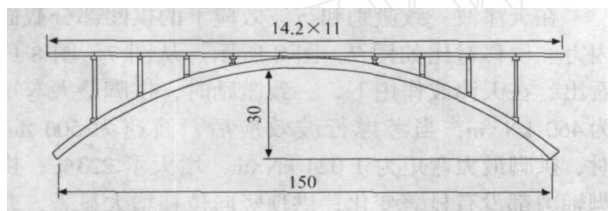


图1 拱桥立面图 (单位: m)

Fig. 1 Display of arch bridge (unit: m)

2.2 计算模型

本文中主拱圈、立柱、盖梁和横系梁均采用梁杆单元,全桥共划分 961 个节点, 853 个单元。主拱圈采用40号混凝土,弹性模量为 32.5×10^3 MPa;立

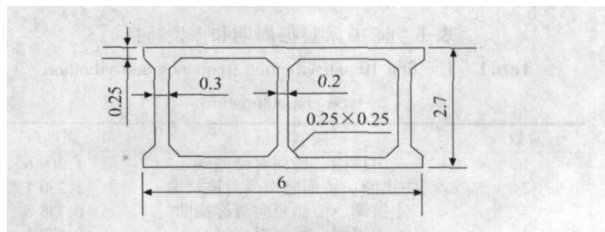


图2 主拱圈横断面 (单位: m)

Fig. 2 Cross section of the arch (unit: m)

柱、盖梁、横系梁、空心板等采用 30 号混凝土,弹性模量为 3×10^4 MPa。全桥模型如图3所示。

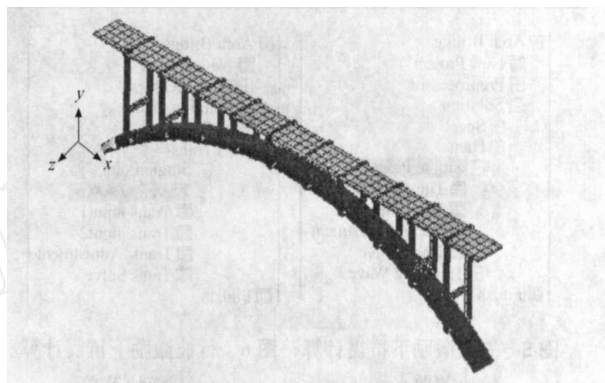


图3 全桥整体模型图

Fig. 3 Display of the entire bridge model

2.3 动力特性

分析和认识桥梁结构的动力特性是进行桥梁动力分析的基础。根据 2.2 节中建立的空间结构动力分析模型,计算得到结构的主要自振周期和相应振型特征。图4所示为第1、2阶振型。表1显示了前10阶的自振周期和振型特征。从表1中可见,第1阶振型对应的周期接近 1.3 s,因此在进行地震反应分析时,选用的时间为较短周期成分即可。

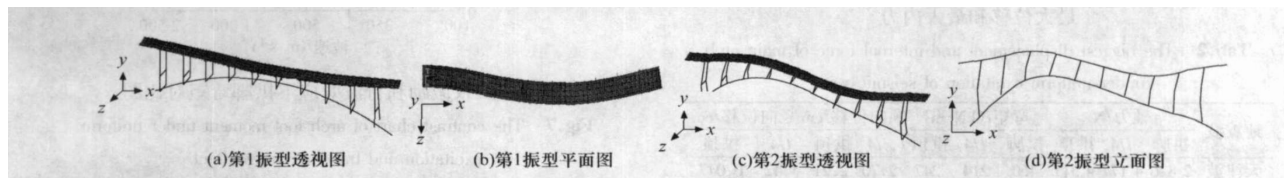


图4 第1、2阶振型

Fig. 4 The first and the second vibration type

2.4 时程分析

2.4.1 抗震计算模块介绍

基于 ANSYS 开发的大跨桥梁抗震计算模块,用户可以根据对话框输入分析需要的基本数据,结合参数化建模模块,应用起来比较方便^[10]。特别是对于不熟悉 ANSYS,不熟悉有限元分析和操作的工程设计人员很容易上手,因此,工程人员在桥梁的方案设计

和整个设计阶段可以采用这个模块进行桥梁结构的抗震性能分析,将抗震设计的思想融入设计过程之中,达到预期目的。

图5和图6分别列出了在一致激励和行波激励下的抗震计算模块菜单。用户根据自己的需要可以自定义地震波,也可以选择模块提供的地震波,同时可以进行幅值的自动调整等。

表1 前10阶自振周期和振型特征

Tab.1 The first 10 self-vibration frequency and vibration type characteristic

阶数	振型特征	周期/s
1	主拱圈、桥面对称侧倾	1.269 6
2	主拱圈、桥面竖向反对称挠曲	1.230 1
3	主拱圈、桥面竖向对称挠曲	0.748 8
4	主拱圈、桥面对称侧倾	0.577 5
5	主拱圈、桥面反对称侧倾	0.443 2
6	主拱圈、桥面竖向反对称挠曲	0.433 5
7	主拱圈、桥面竖向对称挠曲	0.397 1
8	主拱圈、桥面竖向对称轻微挠曲	0.369 9
9	主拱圈、桥面竖向反对称轻微挠曲	0.347 6
10	主拱圈、桥面竖向反对称扭转	0.329 4

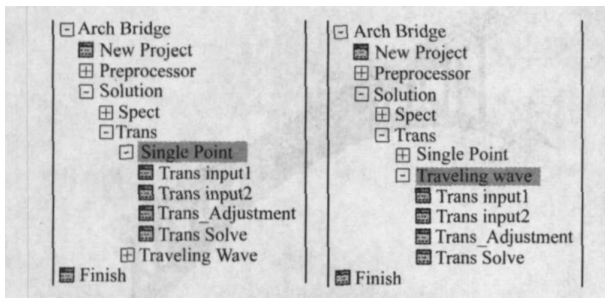


图5 一致激励下抗震计算模块菜单

Fig.5 Uniform excitation menu

图6 行波激励下抗震计算模块菜单

Fig.6 Traveling-wave excitation menu

2.4.2 一致激励

选择天津波和 EL-Centro 波,保持幅值和持时一致,使用上面介绍的基于 ANSYS 的大跨桥梁拱桥抗震计算模块进行加速度时程响应分析。计算分析时不考虑地基土与桥梁基础的动力相互作用的影响。加速度峰值调整为 $0.1g$ 。通过计算、分析、整理得到主拱圈关键部位的最大位移和最大内力,详见表2。

表2 地震波一致激励下主拱圈关键部位的最大位移和最大内力

Tab.2 The biggest displacement and internal force of main arch under uniform excitation of seismic wave

地震波	轴力/N		弯矩/(kN·m)		顺向位移/cm		竖向位移/cm	
	拱脚	1/4 拱顶	拱脚	1/4 拱顶	拱脚	1/4 拱顶	拱脚	1/4 拱顶
天津波	2 826 4	177 4	311 460	214 247	2.70	2.21	4.42	0.047
EL-Centro 波	2 829 3	043 3	267 367	160 175	1.37	1.07	2.13	0.063

表2中的计算结果表明,与在天津波激励下的内力、位移相比,在 EL-Centro 波激励下,拱脚轴力和竖向位移相差不大,但其他关键位置截面的内力和位移都要小很多。可见,在作时程分析计算时,对于地震波的遴选是很重要的工作,即使相同幅值和持时的地震波,时程分析的结果也可能相差甚远。地震波曲线通常为—随机振动曲线,难有规律可寻,无法用典型的数学曲线描述。所以如果有该场地的强震记录最为理想,如

果没有,则应尽可能地选择震级、震中距和土壤性质、卓越周期等条件相近的强震记录作为输入地震波的基本频谱。为了更具代表性,通常要选择多条地震波作时程分析,以便相互比较,做出判断。

2.4.3 行波效应

地震反应行波效应分析输入的地震波分别为实测的天津波和 EL-Centro 波,地震波传播速度分别为 100、250、500、1 000、2 500 m/s。计算分析模型如图3所示,详细计算结果如表3、表4所示。

表3 天津波不同波速下主拱圈关键部位的

最大位移和最大内力

Tab.3 The biggest displacement and internal force of main arch under different speed of Tianjin wave

波速/ (m·s ⁻¹)	轴力/N		弯矩/(kN·m)		顺向位移/cm		竖向位移/cm	
	拱脚	1/4 拱顶	拱脚	1/4 拱顶	拱脚	1/4 拱顶	拱脚	1/4 拱顶
100	2 825 4	455 2	876 505	234 113	3.13	3.25	5.28	7.94
250	2 829 5	207 3	070 646	318 85	2.51	3.55	4.92	13.13
500	2 829 5	549 3	680 1 024	357 156	3.19	3.50	4.87	11.14
1 000	2 830 5	008 3	051 771	304 165	3.10	2.75	4.46	6.24
2 500	2 822 3	505 2	849 562	254 209	2.70	2.19	4.32	2.57

在天津波一致激励和行波效应下的拱圈部分截面内力、位移对比如图7、图8所示。从图7、图8可看出,在天津波作用下,一致激励时,拱脚最大弯矩为460 kN·m,当考虑行波效应后,波速为500 m/s时,拱脚最大弯矩为1 024 kN·m,增大了223%;拱脚轴力都没有显著变化;拱顶竖向位移增大显著,并在低速阶段振荡变化。

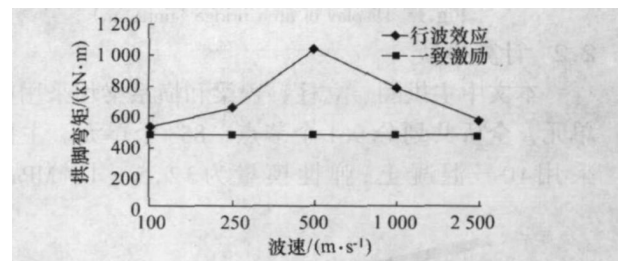


图7 一致激励和行波效应下拱脚弯矩对比图

Fig.7 The contrast chart of arch foot moment under uniform excitation and traveling-wave effect

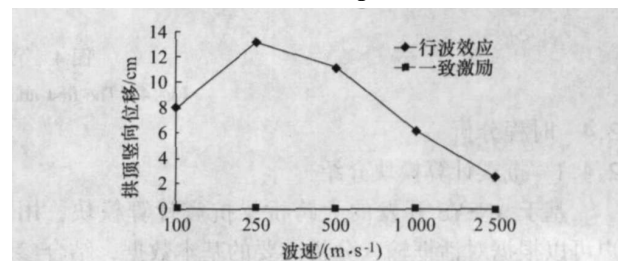


图8 一致激励和行波效应下拱顶竖向位移对比图

Fig.8 The contrast chart of arch top vertical displacement under uniform excitation and traveling-wave effect

表4 EL-Centro 波不同波速下主拱圈关键部位的最大位移和最大内力

Tab. 4 The biggest displacement and internal force of main arch under different speed of EL wave

波速/ (m·s ⁻¹)	轴力/N		弯矩/(kN·m)		顺向位移/cm		竖向位移/cm	
	拱脚	1/4	拱顶	1/4	拱脚	1/4	拱顶	1/4
100	2 733	6 084	3 041	475	282	106	3.32	3.35
250	2 730	7 665	4 249	651	290	97	1.26	1.87
500	2 736	5 558	2 140	667	262	109	2.04	1.34
1 000	2 728	5 990	2 988	704	295	125	2.18	1.28
2 500	2 736	3 486	1 331	410	204	141	1.64	1.11

在 EL-Centro 波一致激励和行波效应下的拱圈部分截面内力、位移对比如图 9、图 10 所示。从图 9、图 10 可看出, 在 EL-Centro 波作用下, 一致激励时, 拱脚最大弯矩为 367.2 kN·m, 当考虑行波效应后, 波速为1 000 m/s时, 拱脚最大弯矩为 704.2 kN·m, 增大了 192 %; 拱脚轴力没有显著变化; 拱顶竖向位移增大显著, 并随着波速增加逐渐减小。

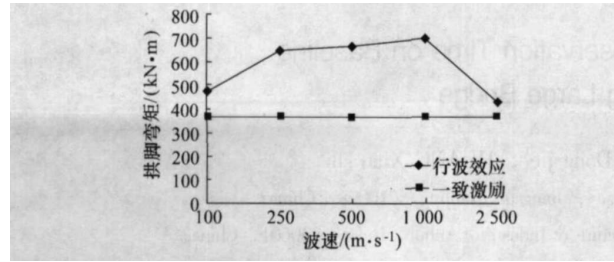


图9 一致激励和行波效应下拱脚弯矩对比图

Fig. 9 The contrast chart of arch foot moment under uniform excitation and traveling-wave effect

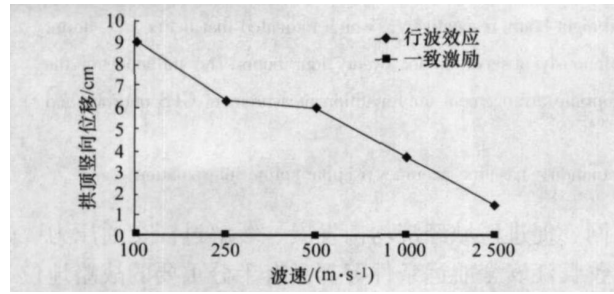


图10 一致激励和行波效应下拱顶竖向位移对比图

Fig. 10 The contrast chart of arch top vertical displacement under uniform excitation and traveling-wave effect

3 结论

通过采用时程分析的方法对山区大跨度拱桥的地

震响应进行了分析。在分析中分别考虑了在一致激励和行波效应作用下拱桥的内力和位移的变化。通过分析, 得到了如下结论。

(1) 与一致激励相比, 考虑行波效应时, 拱脚弯矩、1/4 截面轴力和弯矩均有显著增大, 拱脚轴力、拱顶轴力和弯矩则有所减小。

(2) 与一致激励相比, 考虑行波效应时, 拱桥各部位的顺桥向位移均增加, 顺桥向位移响应在天津波激励下低速阶段振荡变化, 而后随波速增大逐渐减小并逼近一致激励的计算结果; 同时注意到, 考虑行波效应后, 拱顶的竖向位移明显增大, 拱顶竖向位移在低速阶段振荡变化, 而后随波速增大逐渐减小。

(3) 将基于 ANSYS 二次开发的大跨桥梁抗震计算模块应用在实际工程中效果良好。

(4) 不同地震波时程响应分析计算结果差异显著。对于本例, 与在天津波激励下的内力、位移相比, 在 EL-Centro 波激励下, 拱脚轴力和竖向位移相差不大, 但其他关键位置截面的内力和位移都要小很多。

本文在建模和计算时并未考虑基础与土的相互作用以及非线性等因素, 因此对大跨钢筋混凝土拱桥地震响应作进一步的研究是有必要的。

参考文献:

[1] 范立础. 桥梁抗震 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1997.
[2] 史志利, 李忠献, 陈平. 大跨度斜拉桥多点激励地震反应分析 [J]. 特种结构, 2004, 21 (2): 46 - 50.
[3] 苗家武, 胡世德, 范立础. 大型桥梁多点激励效应的研究现状与发展 [J]. 同济大学学报, 1999, 27 (2): 189 - 193.
[4] 郑史雄, 周述华. 大跨度钢管混凝土拱桥的地震反应性能 [J]. 西南交通大学学报, 1999, 34 (3): 320 - 324.
[5] JTJ 004-89, 公路工程抗震设计规范 [S].
[6] 许金华, 王向坚. 大跨度拱桥在地震行波作用下的响应 [J]. 重庆交通学院学报, 1998, 17 (2): 1 - 10.
[7] 李正农, 楼梦麟. 大跨度桥梁结构地震动输入问题的研究现状 [J]. 同济大学学报, 1999, 27 (5): 592 - 597.
[8] Stonecutters Bridge: Frequency Analysis Model (Three Dimensional Model) [R]. Mitsubishi Heavy Industries, LTD.
[9] 欧进萍, 王光远. 结构随机振动 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
[10] 宋建永, 任红伟, 黄德耕. 波折腹板组合梁参数化建模与计算模块开发 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (3): 40 - 43.

(上接第 58 页)

[6] 张石波, 裴若娟. 浅谈尼尔森体系的钢管混凝土提篮拱在铁路桥梁中的运用前景 [J]. 桥梁建设, 2001 (4): 56 - 58.
[7] 邱文亮, 黄才良, 邓安泰. 钢管混凝土拱桥拱肋倾角对稳定性影响的研究 [J]. 公路交通科技, 2004, 21 (4): 53 - 55.

[8] 王弘. 钢管混凝土提篮拱桥静力稳定的参数分析 [J]. 有色冶金设计与研究, 2004, 25 (4): 52 - 56.
[9] 汤国栋, 谢玲玲, 陈向东, 等. 集束钢管混凝土提篮拱桥 [J]. 公路, 1997 (4): 17 - 19.