

大跨度上承式钢筋混凝土拱桥行波效应分析

王 波

(中国市政工程西南设计研究总院有限公司, 四川 成都 610031)

摘 要: 为探究地震行波效应对大跨度上承式拱桥关键部位内力的影响规律, 为同类桥梁抗震设计提供参考, 选取云南某 115 m 上承式钢筋混凝土拱桥工程案例, 建立 MIDAS Civil 空间有限元模型, 分析桥梁动力特性, 地震输入采用动态时程分析法, 对比分析了不同波速工况下拱圈及拱上立柱的内力响应。结果表明行波效应显著影响结构内力分布与幅值, 拱脚处轴力、剪力及弯矩变化明显, 拱顶弯矩变化尤为显著。得出结论: 行波效应可能导致关键截面内力大幅增加, 建议在抗震设计中兼顾一致激励与非一致激励分析, 以确保结构安全。

关键词: 上承式钢筋混凝土拱桥; 动力分析; 行波效应

中图分类号: U448.22

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)10-0082-04

Analysis on Traveling Wave Effect of Long-span Deck Reinforced Concrete Arch Bridge

WANG Bo

(China Southwest Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

Abstract: To investigate the influence of seismic traveling wave effects on the internal forces in critical sections of long-span deck arch bridges and to provide the references for seismic design of similar structures, a 115-m deck reinforced concrete arch bridge in Yunnan is selected as an engineering example, and a MIDAS Civil finite element model is established to analyze the dynamic characteristics of the bridge. The dynamic time-history analysis method is used for the seismic input, and the comparative analysis is conducted on the internal force responses of arch ribs and spandrel columns under the different wave velocity conditions. The results indicate that traveling wave effects significantly influence the distribution and amplitude of internal forces in the structure. The axial force, shear force and bending moment at the arch foot change significantly. And the change in the bending moment of the vault is particularly significant. The conclusion is that the traveling wave effects may cause the great increases in internal forces at critical sections. It is suggested that both consistent and inconsistent excitation analyses should be taken into account in seismic design to ensure structural safety.

Keywords: deck reinforced concrete arch bridge; dynamic analysis; traveling wave effect

0 引 言

山区桥梁结构通常采用大跨度钢筋混凝土拱桥^[1], 跨径 150 m 以内的此类拱桥较为常见。混凝土箱型拱桥静载作用下受力性能良好, 但由于截面刚度较大, 拱脚进入基岩持力层, 为超静定无铰拱, 延性较差, 大跨度拱桥被认为是抗震性能相对较差的桥型^[2]。拱桥结构形式特殊, 地震响应分析复杂^[3], 地震动在传播的过程中会在拱桥桥墩特别是拱桥支承处形成不同的地震作用^[4]。当考虑工程抗震设计安全时, 既有研究表明, 地震动的空间易变性对于大

跨度桥梁的地震响应影响较大^[5]。对于主跨较大或场地条件复杂的桥梁结构, 需突破传统一致激励假设的局限性, 采用考虑波传播效应和场地土层差异性的非一致地震激励模式, 在结构计算中主要采用行波法, 即不同支撑点给予不同的地震波, 或给予地震波到达桥梁支撑点的时间延迟^[6-7], 各点的波形及频率成分不变, 只是存在时间滞后和振幅衰减, 是一个各支点运动完全相干情况的相位差模型^[8]。本文以云南已建成某双幅大跨度钢筋混凝土箱拱为例, 研究了地震波空间输入的差异对桥梁结构的作用。

1 工程概况

建设桥梁位于云南省, 设计荷载: 城-A 级, 基本地震烈度为 6 度, 地震动峰值加速度为 0.05g。桥面

收稿日期: 2025-01-24

作者简介: 王波(1990—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁设计工作。

宽度 30 m,纵坡 3.88%,桥梁分两幅设计,左、右两幅桥梁宽均为 14.99 m,在国内双幅大跨度桥梁较为少见。

桥梁为单跨上承空腹式拱桥(见图 1),为悬链线无铰拱,主拱圈矢跨比为 1/5,计算跨径 115 m,矢高 23 m,拱轴系数 $m=2.24$ 。拱桥为钢筋混凝土等截面箱拱,主拱采用 C50 混凝土,拱箱宽 14.99 m,高 2.6 m;顶板厚 0.25 m,底板厚 0.25 m,顶底板在拱脚通过 2 m 范围渐变厚至 0.5 m,然后变为 6 m 实腹段区段。拱上立柱和盖梁采用 C30 钢筋混凝土结构,桥面梁体结构采用 12 m 等跨的后张预应力空心板,拱顶实腹段采用容重较小的泡沫混凝土。



图 1 上承式钢筋混凝土拱桥

2 动态时程分析理论

动态时程分析可以考虑结构的多自由度振动,模拟地震波的非一致激励输入,获取一段时间内地震作用下的结构的速度、位移、加速度等响应,能够较为完整地模拟出结构在地震作用中从弹性阶段进入塑性阶段,从开裂出现、损坏、到结构破坏的整个过程^[9],时程分析法作为一种动态响应计算方法,在对复杂结构的模拟上有显著优势。不仅能有效处理结构动力响应中的几何非线性与材料非线性特性,还可计算阻尼矩阵非比例分布等情况。同时在激励输入方面能够准确反映多支承体系在空间分布地震动作用下的非同步激励效应,能够进行考虑非一致输入,成为考虑地震空间影响因素分析的有效手段^[10]。

多点激励作用下多自由度体系的运动方程如下:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\dot{x} + [K]x = -[M]\{I\}\ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

式中: $[M]$ 为质量矩阵; $[C]$ 为阻尼矩阵; $[K]$ 为刚度矩阵; x 为位移; $\dot{x}$ 为速度; $\ddot{x}$ 为加速度; I 为单位向量; $\ddot{x}_g(t)$ 为输入的地震响应。

求解的数学手段很多,包括 Wilson- θ 法以及 Newmark- β 法^[11]等,求解过程中将一段时间分解为足够小的时间步,通过时间步的初始边界条件进行求解。逐步积分中,须确保收敛速度足够快,同时确保误差积累在精度要求范围内。

3 模型建立

3.1 计算模型

结合抗震计算需求,采用有限元软件 MIDAS Civil 立主桥和引桥偶联的全桥计算模型(见图 2),以考虑到引桥对主桥的地震响应的影响^[12]。上部空心板与盖梁之间连接采用 6 自由度弹簧单元模拟橡胶支座的支承作用,竖向刚度 K_v 为 1.01×10^6 N/mm,水平刚度 K_h 为 1.67×10^3 N/mm,拱脚与地基刚性连接。全桥模型共计 310 个空间梁单元。地震响应分析采用直接积分法,混凝土结构阻尼比为 0.05,通过提取两个主要震动方向的自振频率来确定瑞利阻尼矩阵^[13],采用 Newmark 法对结构进行计算分析。

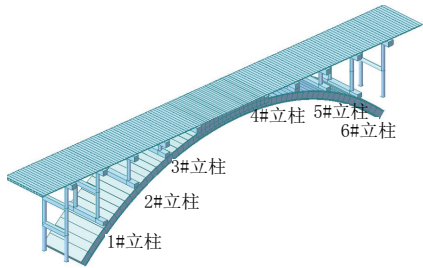


图 2 桥梁有限元计算模型

3.2 地震波输入

桥址位于 II 类场地,基本烈度为 VI 度,反应谱特征周期值为 0.40 s。根据《城市桥梁抗震设计规范》^[14](CJJ 166—2011)确定地震 E1 地震反应谱,采用人工波拟合程序将反应谱转换生成时程波(见图 3)。计算持续时间为 40 s,时间间隔 0.01 s,桥址位于 II 类场地,剪切波速大于 250 m/s。虑地震行波效应影响时,考虑地震波从左至右传播,只考虑纵向输入,选取了 400、600、1 000、1 500 m/s 和一致激励 5 种工况进行对比分析,四种波速下地震动波作用下在左右拱脚之间传播的时间差分别为 0.29、0.19、0.12、0.08 s。

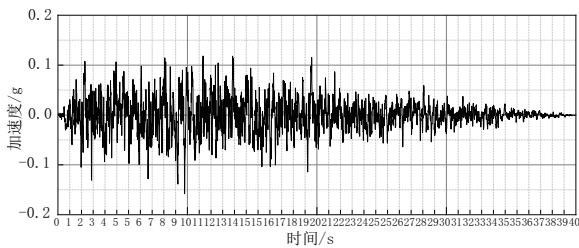


图 3 地震时程波

4 计算结果与分析

4.1 动力特性计算

桥梁地震作用下的频谱特性计算是桥梁地震响

应分析的基础。

根据结构动力学方程：

$$[M]\{\ddot{u}\}+[K]\{u\}=0 \tag{2}$$
$$([K]-\lambda[M])\phi=0 \tag{3}$$

(2)式存在非零解：

$$\det([K]-\lambda[M])=0 \tag{4}$$

求解式(4)的数值计算方法有：邓柯莱法、瑞利-里兹法^[15]等。

通过前两阶频率计算可得到Newmark法中的质量和刚度因子。通过模型计算,得出前四阶主要频率和振型特点见表1。

表 1 桥梁动力特性

序号	频率 <i>f</i> /Hz	振型特点
1	1.597	拱圈反对称竖弯
2	2.488	拱圈正对称竖弯
3	4.312	拱圈反对称竖弯
4	4.821	拱圈正对称竖弯

4.2 拱圈计算结果与分析

计算结果表明,由于桥梁纵坡较大,两侧内力分布并不严格对称。工况按照波速逐渐增加至一致激励顺序,前两组工况和后三组工况内力沿拱圈分别表现出了相似的变化趋势。图4所示轴力的计算结果表明轴力分布整体呈现两侧拱脚较大,中间拱顶较小的分布,拱脚、拱座与立柱连接处刚度变化,弯矩较大出现局部增长,尤其在立柱高度较低,线刚度较大的3#、4#立柱处增长较为明显。图5所示剪力总体变化趋势为先减小、后增加、再减小、最后增加的变化趋势,低速工况下局部有小幅波动。图6所示弯矩从拱脚到拱顶则先减小,然后增加,再减小,在拱顶和1/4拱圈附近位置出现变化的极小值。

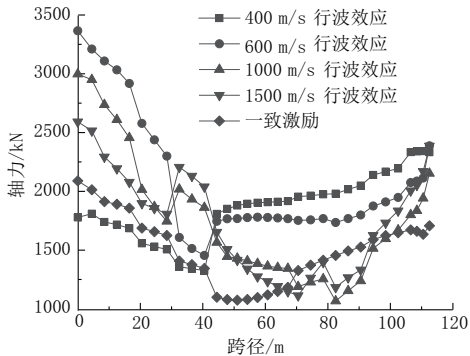


图 4 轴力变化图

考虑行波效应,对比不同波速工况下的内力响应数值变化幅度。相比于一致激励,拱脚处轴力变化幅度为-15%~61%,剪力变化幅度为-33%~45%,弯矩变化幅度为-27%~49%;拱顶处轴力增长幅度为

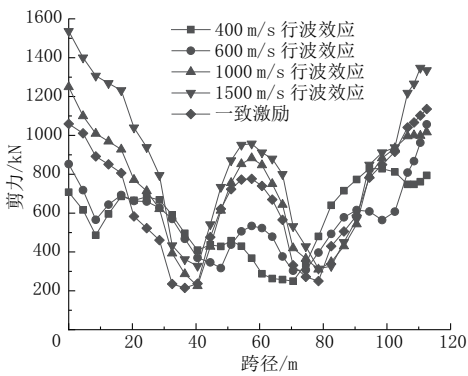


图 5 剪力变化图

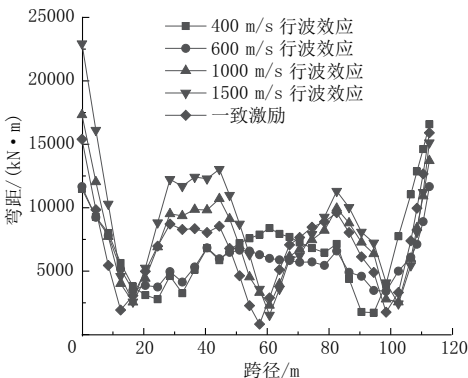


图 6 弯矩变化图

-16%~74%,剪力变化幅度为-53%~23%,弯矩变化幅度较大为336%~860%。拱顶纵向位移变化较小,增长幅度为1%~21%。

地震作用下拱脚、拱顶截面响应见表2、表3。

表 2 地震作用下拱脚截面响应

波速/ (m·s ⁻¹)	拱脚最大内力					
	轴力/kN		剪力/kN		弯矩/(kN·m)	
	五环 路侧	镇毕 路侧	五环 路侧	镇毕 路侧	五环 路侧	镇毕 路侧
400	1 778	2 332	708	794	11 482	16 578
600	3 365	2 387	852	1 057	11 659	11 663
1 000	2 997	2 153	1 249	1 017	17 319	13 704
1 500	2 592	2 386	1 536	1 335	22 928	15 125
一致激励	2 088	1 707	1 059	1 136	153 97	15 900

表 3 地震作用下拱顶截面响应

波速/ (m·s ⁻¹)	拱顶最大内力			拱顶纵向最大 位移/mm
	轴力/kN	剪力/kN	弯矩/(kN·m)	
400	1 903	368	7 884	8.0
600	1 779	534	62 96	7.4
1 000	1 385	883	3 313	6.9
1 500	1 274	957	3 582	6.7
一致激励	1 096	776	822	6.6

对比拱顶和拱脚同一位置在不同波速地震波激励作用下的内力响应可以看出行波效应的影响明显。由于上承式钢筋混凝土拱桥构造相对复杂,参与质量和振型分布离散化,在非一致激励的作用下,

内力响应随波速变化复杂,内力并不呈随波速简单单调增加或者减少。由于较大纵坡引起的非对称性,拱脚两侧内力响应差异较大。五环路北一侧变化幅值较大,另一侧拱脚内力变化较小,拱顶的内力变化则随波速呈单调变化。见图 7 至图 9。

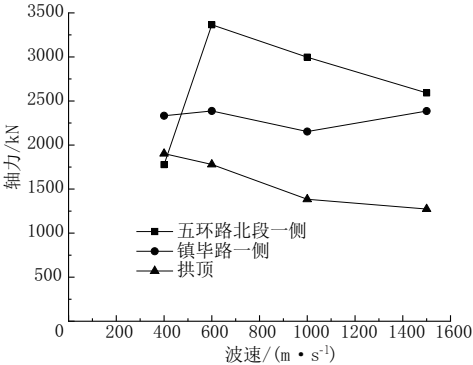


图 7 拱顶和拱脚截面轴力变化图

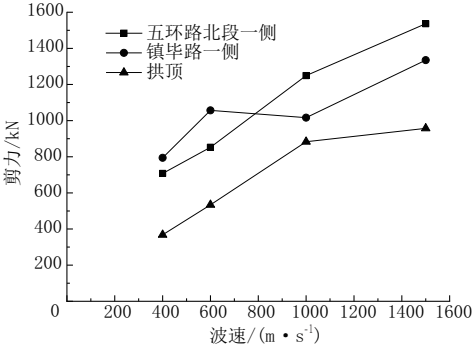


图 8 拱顶和拱脚截面剪力变化图

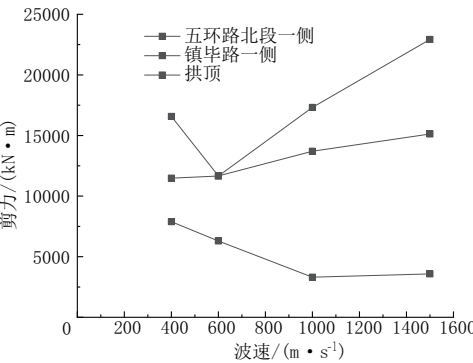


图 9 拱顶和拱脚截面弯矩变化图

5 拱上立柱计算结果与分析

拱上立柱在地震中将上部水平力传递到下部拱圈,由立柱与线刚度的关系可知,短柱在地震中分配到更大的上部水平力,内力响应也随之增长。五环北路一侧拱脚到拱顶的 1#~3#立柱在不同波速下内力响应表明:内力响应随波速大致呈先增加后减小的趋势,并在波速 1 500 m/s 时达到峰值,相比于一致激励,1#~3#立柱剪力分别增加了 31%、52%、37%,弯矩分别增加了 43%、44%、39%,见图 10、图 11。

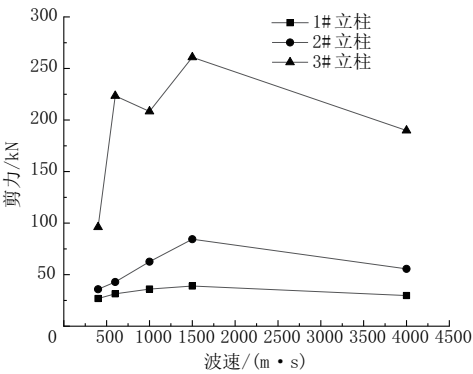


图 10 拱上立柱剪力变化图

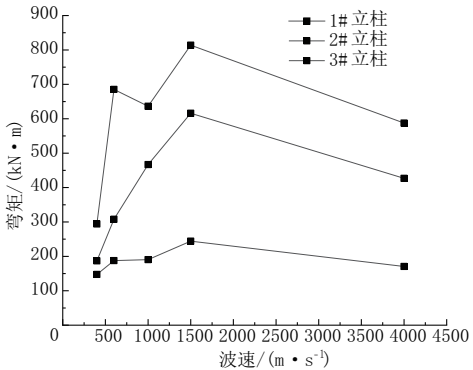


图 11 拱上立柱弯矩变化图

6 结 语

文章以云南某大跨度上承式钢筋混凝土拱桥为例,在动力特性分析的基础上分析了行波效应对结构响应的影响。结论说明:行波效应对拱圈内力分布形式以及内力大小有显著影响,拱脚、拱顶、拱上立柱连接等控制截面内力在部分波速下有明显增大,因此,行波效应作为此类桥梁抗震设计的重要影响因素,在今后此类桥梁的设计应得到足够重视,抗震验算过程中不仅要进行一致激励验算,还应重视非一致激励验算。

参考文献:

[1] 唐堂,钱永久.既有大跨度混凝土拱桥震害机理分析[J].地震工程学报,2016,38(5):701-706.
[2] 唐堂,钱永久,王磊.基于 IDA 的套箍加固拱上立柱抗震性能评估[J].地震工程学报,2021,43(5):1168-1175.
[3] 高忠虎,吴忠铁,狄生奎,等.考虑行波效应下钢管混凝土系杆拱桥隔震研究[J].中外公路,2023,43(5):84-90.
[4] 唐堂,钱永久.大跨度钢筋混凝土拱桥地震行波效应分析[J].地震工程与工程振动,2016,36(2):111-116.
[5] 贾文涛,马博男.考虑行波效应的钢管混凝土拱桥地震响应分析[J].工程结构,2021,42(5):193-196.
[6] 周胜.某大跨度钢管混凝土拱桥行波效应分析[J].重庆建筑,2022(1):23-26.
[7] 童申家,吴星,李纲.大跨钢管混凝土拱桥地震行波效应分析[J].桥梁建设,2008(2):27-30.

(下转第 90 页)