

## 高墩大跨度连续刚构桥的动力力学特性分析思考

李毅

中南勘察设计院集团有限公司, 湖北 武汉 430074

**[摘要]**连续刚构桥是预应力混凝土连续梁桥中一种特殊结构型式,即是一种桥墩主墩与上部结构主梁固结的预应力混凝土连续梁桥。连续刚构桥多用于山区环境中,充分利用其跨径大、桥墩高的优点,完成对河谷、峡沟的跨越。其中,连续刚构桥的桥墩高度较大、桥墩柔性较强,且河谷、峡沟处风力往往较大,对连续刚构桥梁的动力影响较为突出。因此,连续刚构桥的动力研究分析,是连续刚构桥研究中的一个重难点。本论文为了研究高墩大跨连续刚构桥动力特性的影响,以国内某大桥为工程背景,利用有限元软件 Midas Civil 2023 建立主桥三维模型,从桥梁自震频率、地震反应谱、车桥耦合动力、桥墩高度、动力特性优化等方面分析该桥梁的动力特性。结果表明:①主桥的自振频率与墩梁刚度比的变化呈正相关关系,变化速率呈先大后小的趋势;②主桥的1阶纵向频率受主墩高度变化影响也很大,变化幅度大于50%。本论文研究结论可为高墩大跨连续刚构桥的动力分析设计提供参考和指导。

**[关键词]**高墩大跨;连续刚构桥;动力特性;子空间迭代;有限元法;自振特性

DOI: 10.33142/sca.v7i3.11531

中图分类号: U448.22

文献标识码: A

### Analysis and Reflection on Dynamic Mechanical Characteristics of High Pier and Large Span Continuous Rigid-frame Bridges

LI Yi

Zhongnan Engineering Corporation Limited, Wuhan, Hubei, 430074, China

**Abstract:** Continuous rigid frame bridge is a special structural form of prestressed concrete continuous beam bridge, which is a type of prestressed concrete continuous beam bridge where the main pier of the bridge is fixed with the main beam of the upper structure. Continuous rigid frame bridges are often used in mountainous environments, fully utilizing their advantages of large spans and high piers to complete the crossing of river valleys and gorges. Among them, the pier height of continuous rigid frame bridges is relatively high, the pier flexibility is strong, and the wind force is often high in river valleys and canyons, which has a more prominent impact on the dynamic performance of continuous rigid frame bridges. Therefore, the dynamic research and analysis of continuous rigid frame bridges is a key and difficult point in the research of continuous rigid frame bridges. This paper aims to study the influence of high pier and long span continuous rigid frame bridges on dynamic characteristics. Taking a domestic bridge as the engineering background, a three-dimensional model of the main bridge is established using the finite element software Midas Civil 2023. The dynamic characteristics of the bridge are analyzed from the aspects of bridge natural frequency, seismic response spectrum, vehicle bridge coupling dynamics, pier height, and optimization of dynamic characteristics. The results show: ① There is a positive correlation between the natural frequency of the main bridge and the stiffness ratio of the piers and beams, and the rate of change shows a trend of first increasing and then decreasing; ② The first-order longitudinal frequency of the main bridge is also greatly affected by changes in the height of the main pier, with a variation amplitude greater than 50%. The research conclusion of this paper can provide reference and guidance for the dynamic analysis and design of high pier and large-span continuous rigid frame bridges.

**Keywords:** high piers and large spans; continuous rigid-frame bridge; power characteristics; subspace iteration; finite element method; natural vibration characteristics

#### 引言

近年来,随着我国东部、中部高速公路网日趋完善,高速公路等国家基础设施建设逐步向西部等山区区域推进,这样一来要跨越深沟和峡谷的桥梁越来越多。大跨度桥梁的结构型式一般采用悬索桥、斜拉桥、拱桥、连续梁桥、连续刚构,其中悬索桥多用于千米级特大桥,常规连续梁桥多用于桥墩高度较低桥梁,斜拉桥、拱桥和连续刚构桥都很适合跨越100~200米的深沟、峡谷,但斜拉桥和拱桥施工难度较大、造价较高,因此连续刚构桥成为山区高速公路跨越深沟、峡谷的第一选择,这种类型的桥梁

建设越来越多,国内学者、设计、建设单位对本类桥的已进行了大量的力学特性分析研究,但大多集中在连续刚构桥梁的静力分析领域,对本类桥梁的动力分析成果还相对较少。因此,本文以国内某已建成大桥为工程背景,从动力特性入手,分析和研究了不同墩梁刚度比对该类桥型自振特性和高墩稳定性的影响,以期能为本类桥梁的分析研究提供一定参考。

#### 1 前述

##### 1.1 项目背景

本桥梁主桥为三跨一联预应力混凝土连续刚构,其中

主跨 100m, 两个边跨均为 55m, 上部结构为直腹板变截面混凝土箱梁, 截面形式为单箱单室, 主梁顶面宽度为 12.5m、主梁底面宽度为 6.5m、悬臂长度为 3.0m, 主梁边支点及跨中为 2.0m, 中支点主梁高度为 6.0m, 主梁底缘及底板厚度按 2.0 次抛物线变化, 主梁顶板厚度为 0.3~0.5m, 底板厚度为 0.3~1.0m, 墩顶主梁中下部设有 1.2×0.8m 检修人孔, 全桥在墩顶、边支点等处共设置 10 处横隔板, 上部结构 C50 混凝土。下部结构采用矩形空心墩, 基础采用承台接群桩基础, 下部结构桥墩采用 C40 混凝土。主桥桥型布置图见图 1。

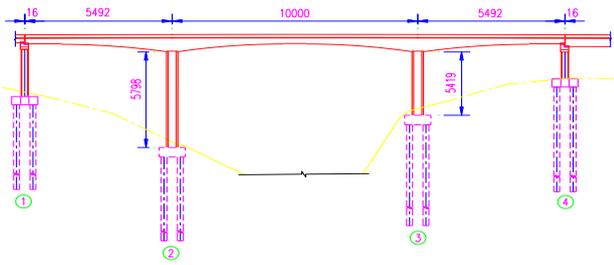


图 1 主桥桥型布置图 (单位: m)

### 1.2 计算理论

本文对高墩大跨度连续刚构桥的动力特性计算采用子空间迭代法理论。子空间迭代法也被称为同时迭代法, 它是一种用于求解大型、稀疏矩阵特征值问题的有效方法。该方法的核心思想是将原始问题分解为一系列较小的子问题, 并通过迭代过程逐步逼近最终解, 常用于工程领域结构计算, 特别是在结构动力学计算中, 子空间迭代法可以用于求解大型结构的自由振动频率, 尤其是那些需要忽略的高阶自由振动频率、自由度较大的系统, 能够提供较低阶的主振型信息, 快速准确地确定特征值大小。

### 1.3 有限元模型

本文采用桥梁通用计算软件 Midas Civil 2023 建立主桥的空间杆系有限元模型, 以计算分析高墩大跨度连续刚构桥梁在不同受力工况下动力反应特性。全桥结构模型简化为 288 个节点和 286 个单元, 其中主梁划分为 168 个单元, 各个主梁单元节点号为 1~169。下部结构主墩划分为 120 个单元, 主墩单元节点号为 170~287。主梁和主墩都采用 midas 梁单元来模拟, 在主墩墩底设置固定约束, 简化下部结构承台和桩基础的建模模拟。全桥有限元分析模型见图 2 所示。

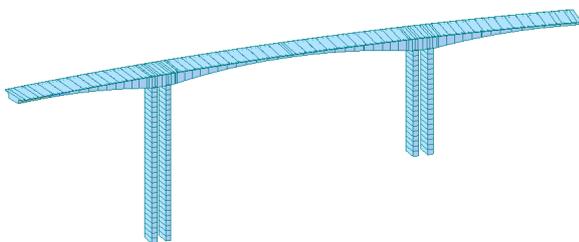


图 2 某大桥有限元分析模型示意图

## 2 墩梁刚度比对动力特性的影响分析

### 2.1 主桥自振特性影响分析

通过 midas 计算软件, 采用子空间迭代法理论, 计算分析本桥动力特性, 得: 该桥主桥的前 10 阶振型和对应的自振频率见附表 1, 四种主要振型图见图 3~6。

表 1 坞家湾大桥主桥计算振型及频率

阶数	$f_i$ 频率/Hz	振型特点描述
1	0.9673	主梁对称横弯、主墩横桥向侧弯
2	1.6438	主梁对称竖弯、主墩顺桥向竖弯
3	1.7752	主梁反对称横弯、主墩横桥向侧弯
4	1.9043	主梁对称竖弯、高墩顺桥向竖弯
5	1.9782	主梁对称竖弯、高墩顺桥向竖弯
6	2.6658	主梁反对称竖弯、主墩顺桥向竖弯
7	3.0089	主梁对称竖弯、主墩顺桥向竖弯
8	3.3468	主梁对称横弯、主墩横桥向侧弯
9	3.8862	主梁反对称竖弯、矮墩顺桥向竖弯
10	4.0652	主梁反对称横弯、主墩横桥向侧弯

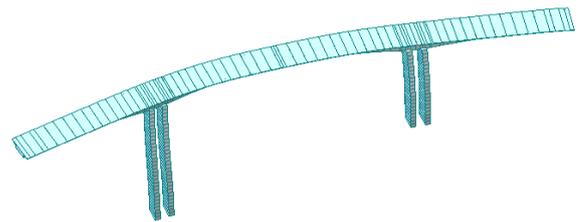


图 3 第一阶振型 ( $f_1=0.9673$ )

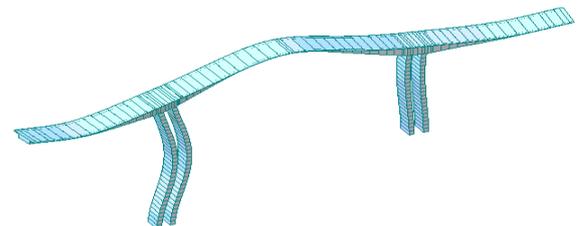


图 4 第二阶振型 ( $f_2=1.6438$ )

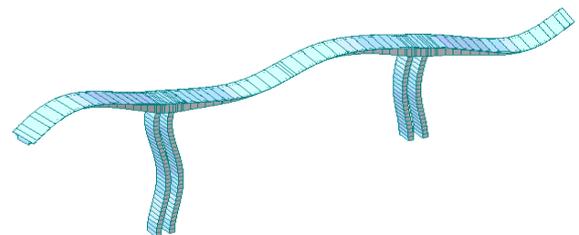


图 5 第三阶振型 ( $f_3=1.7752$ )

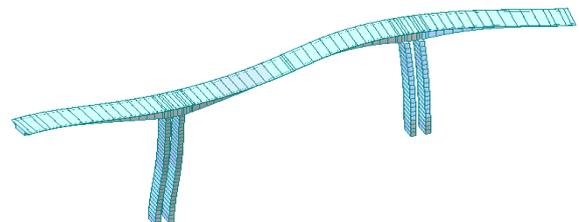


图 6 第八阶振型 ( $f_8=3.3468$ )

采用不同墩梁刚度比,对比计算本桥的动力响应特性值。本文取 0.5:1、1:1、2:1、4:1 四种不同取值的墩梁刚度比,对本桥的自振频率进行计算,得本桥动力性能与墩梁刚度比关系见图 7 所示。

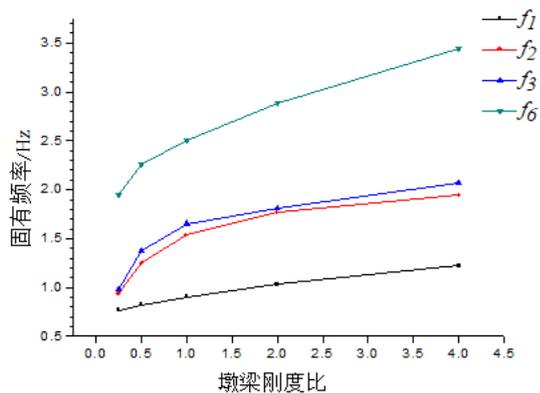


图 7 固有频率-墩梁刚度比影响关系曲线

由图 7 可以看出,本桥主梁、主墩的振型频率值都随墩梁刚度比的变化有较明显的变化,受影响程度明显。进一步分析可发现,当墩梁刚度比随着 0.5 倍至 4 倍逐渐增大时,主梁和主墩的各阶振型频率同样逐渐增大;其中,当处于第 6 阶的时候,即  $f_6$  曲线的固有频率-墩梁刚度比影响关系曲线的斜率最大,  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  固有频率-墩梁刚度比影响关系曲线斜率基本一致。

## 2.2 连续刚构高桥墩的稳定性研究分析

本章节选用 Midas Civil 2023 建立主桥模型,在保持主桥结构尺寸、边界条件都一样的前提下,通过模拟三种不同受力工况,采用子空间迭代法对连续刚构桥的高墩稳定性进行模拟计算。

荷载工况 1: 结构自重+钢束预应力荷载+挂篮自重+峡谷风荷载(横桥向,主梁两侧悬臂正向对称加载,  $F_{右} = F_{左}$ , 夹角  $90^\circ$ )

荷载工况 2: 结构自重+钢束预应力荷载+挂篮自重+峡谷风荷载(横桥向,主梁两侧悬臂正向非对称加载,  $F_{右} = 2.0 \times F_{左}$ , 夹角  $90^\circ$ )

荷载工况 3: 结构自重+钢束预应力荷载+挂篮自重+峡谷风荷载(横桥向,主梁两侧悬臂斜向对称加载,  $F_{右} = F_{左}$ , 夹角  $75^\circ$ )

对前述连续刚构主桥施加上述不同荷载工况,模拟主桥在不同荷载情况下的动力特性反应,计算主墩弹性稳定系数,得到分析结果见表 2 所示。

表 2 主墩弹性稳定性计算结果

荷载工况	失稳模式 I		失稳模式 II	
	稳定系数	失稳模式	稳定系数	失稳模式
1	239.3	纵桥向	568.2	横桥向
2	225.1	纵桥向	553.6	横桥向
3	226.9	纵桥向	556.4	横桥向

分析主桥在不同主墩与主梁的刚度比情况下,主墩的一阶稳定系数。主墩与主梁的刚度比分别为 0.5:1、1:1、2:1、4:1 时,高墩在最大悬臂施工阶段的第一类稳定系数计算结果见表 3~4 所示。

表 3 桥墩一阶稳定系数计算结果

墩梁刚度比	一阶稳定系数		
	荷载工况 1	荷载工况 2	荷载工况 3
0.5	118.6	115.3	118.6
1	241.2	239.8	246.5
2	509.3	497.9	507.4
4	1004.5	981.8	989.6

表 4 桥墩二阶稳定系数计算结果

墩梁刚度比	二阶稳定系数		
	荷载工况 1	荷载工况 2	荷载工况 3
0.5	317.4	318.4	313.3
1	596.6	591.2	590.4
2	1048.2	1048.7	1047.2
4	1703.4	1695.4	1698.1

由上述附表 3、4 可知:①在同一阶观察桥墩稳定系数变化情况时,不同荷载工况时,计算得到的桥墩稳定系数值几乎相同;②在同一阶观察桥墩稳定系数变化情况时,对于同一种荷载工况,随着墩梁刚度比逐渐增加,桥墩稳定系数变化明显。

下文在确定同一荷载工况的条件下,采用折线图方式进一步定量分析桥墩稳定系数与墩梁刚度比间的关系。

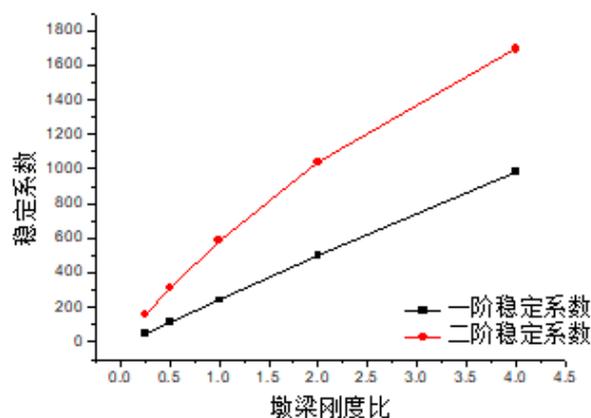


图 8 稳定系数与墩梁刚度比影响关系曲线 (荷载工况 2)

由上述分析可知:无论一阶稳定系数,还是二阶稳定系数,桥墩的稳定性系数都随着墩梁刚度比数值的增大而增大,桥墩的稳定性与墩梁刚度比大小联系密切。适当增加连续刚构桥梁的墩梁刚度比,对桥墩稳定性的提升帮助明显。

## 3 结论与展望

(1) 通过 Midas Civil 2023 建立有限元高墩大跨径

的全桥模型,模拟分析连续刚构桥主梁、主墩的振型频率,得到:本桥主梁、主墩的振型频率值都随墩梁刚度比的变化有较明显的变化,受影响程度明显。且当处于第6阶的时候,即 $f_6$ 曲线的固有频率-墩梁刚度比影响关系曲线的斜率最大, $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ 固有频率-墩梁刚度比影响关系曲线斜率基本一致

(2)通过Midas Civil 2023建立有限元局部模型对桥墩的稳定性进行模拟分析,得到:①荷载工况对桥墩稳定性影响较小;②主桥的墩梁刚度比对桥墩稳定性影响明显,桥墩的稳定性随墩梁刚度比的增加而增强。

(3)下一阶段可通过模拟不同截面尺寸大小的连续刚构桥在同样荷载工况条件下的动力特性反应,进一步对比不同结构刚度对桥梁的动力影响。

#### [参考文献]

[1]宋一凡.公路桥梁动力学[M].北京:人民交通出版社,2000.  
[2]马宝林.高墩大跨连续刚构桥[M].北京:人民交通出版

社,2001.

[3]范立础.桥梁减隔震设计[M].北京:人民交通出版社,2004.

[4]周勇军,赵煜,贺拴海.系梁设置对高墩大跨弯连续刚构桥动力特性及地震响应的影响[J].应用基础与工程科学学报,2011,8(4):608-618.

[5]宁波,韩智强,李科兴,等.高墩大跨连续刚构桥动力特性分析[J].中外公路,2017,21(6):133-136.

[6]罗刚,刘志军.高墩大跨铁路连续刚构桥动力特性分析研究[J].铁道工程学报,2016,10(10):68-72.

[7]李登科.高墩大跨度铁路桥梁动力特性分析[J].铁道建筑,2012,7(7):1-3.

[8]徐斌.高墩大跨连续刚构桥的设计及关键技术研究[J].铁道建筑,2015,6(6):10-13.

作者简介:李毅(1991.4—),汉族,硕士研究生学历,毕业院校为长沙理工大学,现就职中南勘察设计院集团有限公司。