

单索面混合梁斜拉桥简化建模与荷载试验

宋泽冈¹, 邓旭东¹, 周雨亭²

(1. 云南省公路科学技术研究院, 云南 昆明 650051; 2. 云南建投博昕工程建设中心试验有限公司, 云南 昆明 650599)

摘要:为准确评价斜拉桥成桥时的承载能力和工作性能,以六库怒江二桥[(81+175) m 独塔单索面混合梁斜拉桥]为对象,提出基于线域单元模拟钢箱梁的简化建模方法,建立桥梁有限元模型;通过静载及动载试验测试,得到桥梁结构控制截面应力、挠度(或位移)、索力、冲击系数、频率等参数实测值,经过对比分析,对桥梁结构承载能力和工作性能进行评价。结果表明:提出的简化建模方法具有建模效率高、出错率低、后处理简便等优势,其计算精度满足桥梁总体分析要求;该桥结构强度、刚度具有一定的安全储备,动力性能良好,承载能力和工作性能符合设计要求。

关键词:混合梁斜拉桥;静、动力性能;荷载试验;简化建模

中图分类号: U448.27

文献标志码: A

斜拉桥是由受压的塔、受拉的索和受弯压的梁共同承载的自锚式结构体系。得益于斜拉索的弹性支承作用,主梁弯矩显著减小,通过调整斜拉索的初张力可以使主梁内力分布均匀,另外,斜拉索的水平分力对主梁施加了预压力^[1],这些优点造就了斜拉桥卓越的跨越能力及经济竞争力。但是,由于斜拉桥属高次超静定结构,设计计算及施工控制复杂,有必要对其成桥时的承载能力和工作性能进行荷载试验检验,而如何建立反映实际结构的基准有限元模型^[2],如何对试验结果进行评价,是值得研究和探讨的关键问题。

在斜拉桥的有限元建模方面,方志等^[3]基于多状态下的静、动态测试数据,对斜拉桥的梁板有限元模型进行了修正;陈常松等^[4]把空间桁架模型通过刚度等效转换成平面桁架或单梁模型的方法,有效地减少了钢桁梁公路斜拉桥仿真分析计算的单元数与节点数;周林仁等^[5]针对大跨斜拉桥结构提出了一种子结构模型修正方法,达到了模型修正精准度高的目标;张玉平等^[6]建立了基于不同横隔梁设置方案的斜拉桥板壳单元模型,研究了横隔梁对箱梁剪力滞效应的影响;李加武等^[7]研究了开口断面斜拉桥基于单主梁、三主梁及壳单元模型下的动力特性差异;Benedettini等^[8]基于实测数据对一座组合梁斜拉桥的梁板有限元模型进行了修正,较准确模拟了实桥模态特性。在斜拉桥的承载能力、受力性能评价方面,李元兵等^[9]以苏通大桥斜拉桥为背景,研究了千米级斜拉桥在静力荷载作用下

结构的整体力学行为;曹少辉等^[10]基于成桥荷载试验,研究了一座预应力混凝土双塔双索面斜拉桥的静、动力性能;叶敏等^[11]通过荷载试验,评定了一座双塔混合梁斜拉桥的受力性能及承载能力。

该文以云南六库怒江二桥^[12]为对象,提出一种基于线域单元模拟钢箱梁的简化建模方法,该方法较实体模型、板壳模型具有建模效率高、出错率低、后处理简便等优点;通过实桥静载及动载试验,对试验结果进行对比分析,评定桥梁结构的承载能力与工作性能,以验证简化模型计算精度是否满足桥梁总体分析要求。

1 工程概况

六库怒江二桥是连接六库新城区与老城的关键工程,为跨越怒江而设。该桥为主跨 175 m 的独塔单索面钢—混混合梁斜拉桥,跨径布置为 81 m(边跨)+175 m(主跨),桥面宽 32 m,桥梁全长 268 m。桥型总体布置见图 1。

该桥采用塔—墩—梁固结体系,索塔位于桥面中央分隔带上,采用钢筋混凝土工字形截面,桥面设计高程以上塔高 70 m。全桥共设 52 根斜拉索,于索塔两侧各布置 13 对,斜拉索由 7 mm 高强度平行钢丝($f_{pk}=1\ 670\text{ MPa}$)组成,单根最长为 172 m、最大重量为 8.3 t。主梁采用钢—混结合的形式,其中边跨采用预应力混凝土箱梁,长度为 81 m;主跨由预应力混凝土箱梁、

收稿日期:2021-10-18(修改稿)

基金项目:云南省交通运输厅科技创新及示范项目(编号:云交科教便[2021]86号一(二));云南省交通运输厅科技项目(编号:云交科教[2018]13号)

作者简介:宋泽冈,男,硕士,高级工程师, E-mail:94181915@qq.com

钢—混结合段、钢箱梁加强段、钢箱梁组成,对应长度为 $(8.75 + 2 + 3.5 + 160.75)$ m;箱梁采用梁高 2.8 m 的等高单箱五室断面。设计荷载为公路—Ⅰ级,人群荷载 3 kN/m^2 ,按双向六车道布置。

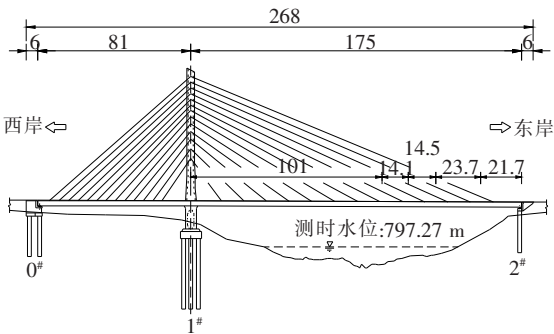


图 1 桥型总体布置(单位:m)

2 简化建模介绍

斜拉桥有限元模型主梁常用的模拟形式有:平面梁模型、空间梁模型、梁格模型、板壳模型和实体模型^[2]。前两种梁单元模型建模相对简便,计算速度快,后处理便捷,但因无法准确考虑主梁的质量分布及翘曲刚度而易导致扭转计算结果失真;梁格模型可较准确模拟主梁的质量分布,但其横向刚度难以准确设定;板壳模型和实体模型较真实地模拟了主梁的质量分布和刚度特性,但存在建模较复杂、计算效率较低、后处理繁琐的缺点。

六库怒江二桥主梁为钢—混混合梁形式,鉴于此次分析任务是为桥梁荷载试验提供理论数据,即在不需要进行细部分析的前提下,该文提出采用线域单元模拟钢箱梁、空间梁单元模拟混凝土箱梁的简化建模方法,避免了用板壳单元或实体单元带来的建模复杂、出错率高、节点单元划分数量庞大致后处理繁琐等局限性。基于线域单元模拟钢箱梁的简化建模方法极大地提高了钢—混混合梁的建模效率,主要体现在:其截面可用 CAD 的 dxf 格式文件导入桥梁通用有限元软件,建模快捷;同时,线域单元具有近似梁单元的属性,从而使钢箱梁与混凝土箱梁单元的连接变得简便。另外,通过 CAD 可精准绘制出钢箱梁的钢板、加劲肋等细部构造,基于此建立的单元模型,实现了其截面特性的准确模拟。

应用上述简化建模方法,建立六库怒江二桥 Midas/Civil 有限元模型(图 2),主梁单元模型见图 3。

建模时以设计图纸、相关规范和实测的成桥索力为依据,着重对结构的施工过程、刚度、质量和边界条件进行精确模拟,尽量减小建模误差和参数误差^[13];通过对模型中斜拉索初张力的修正,使其成桥索力与实际一致。该桥结构模型共划分为 98 个节点、119 个单元。塔、墩、混凝土箱梁采用空间梁单元模拟;钢箱梁采用赋予厚度的线域单元模拟;斜拉索采用等效桁架单元模拟,其弹性模量按 Ernst 公式修正的方法计入垂度效应影响。边界条件:墩底、支座底采用固结,支座采用弹性连接模拟,塔—墩—梁固结采用刚性连接模拟,斜拉索与塔、梁间的锚固连接采用节点耦合的方式模拟。

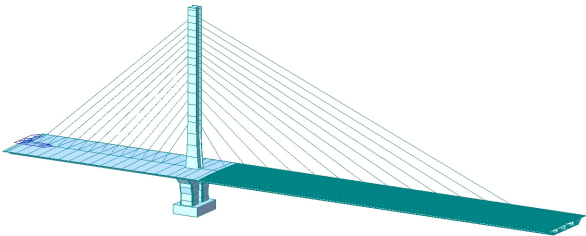


图 2 桥梁有限元模型

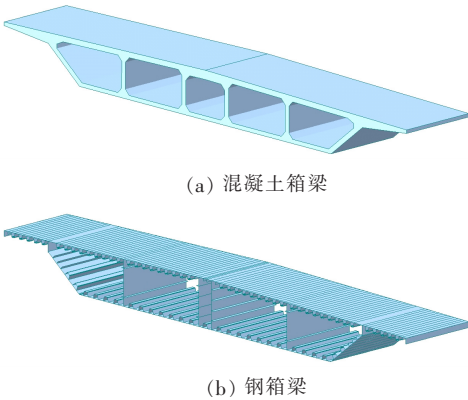


图 3 主梁单元模型

3 荷载试验方案

3.1 荷载试验内容及测试参数

根据该桥结构特点,实施静载试验、动载试验(包括动力响应试验与自振特性试验)^[14],测试主梁、索塔及斜拉索相应静、动态参数。该桥试验内容及测试参数见表 1。

3.2 测点布置

静载及动载试验测试截面见图 4,各截面具体测点布置见图 5。

表 1 荷载试验内容及测试参数

试验类型	测试项目		测试参数
	部位	试验工况或位置	
静载试验	主梁	边跨、主跨最大正弯矩	应力、挠度
		最大负弯矩	应力
		主跨最大挠度	挠度
	索塔	塔底最大正弯矩	应力
		塔顶最大纵桥向位移	位移
动载试验	斜拉索	Z7、B13 最大索力增量	索力
	动力响应试验	主梁 $L/2$ 、 $3L/4$ 附近截面	动应变、冲击系数
	自振特性试验	主梁 边跨四分点、主跨六分点	频率、阻尼比

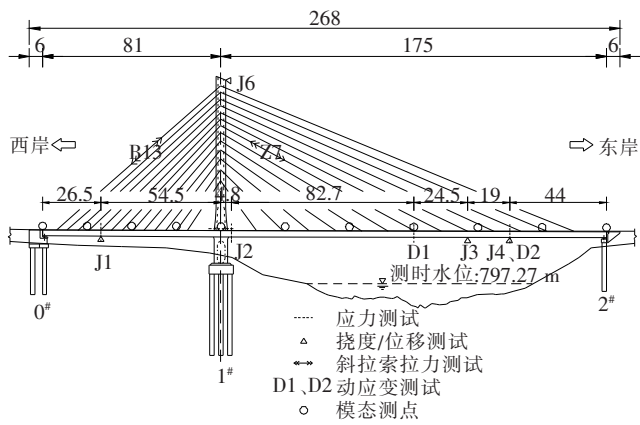


图 4 静载及动载试验测试截面(单位:m)

静载试验:按最不利受力的原则,选取主梁边跨和主跨最大正弯矩(J1、J4)截面、最大负弯矩(J2)截面、最大挠度(J3)截面,索塔塔底最大正弯矩(J5)截面、塔顶(J6)截面共计 6 个截面进行应力及挠度(或位移)测点布设;对主跨 Z7、边跨 B13 两对斜拉索索力增量进行测试。动载试验:动应变测点布设于主跨 $L/2$ 、 $3L/4$ (L 为跨径)附近(D1、D2)截面;模态测点沿纵桥向按边跨四分点、主跨六分点原则共设置 11 个测试截面,于桥面左、右侧布置。

3.3 静载试验方案

静载试验是通过试验车加载的方式等效设计荷载,在结构控制截面内力影响线最不利位置布载,使主梁、索塔控制截面及斜拉索处于最不利受力状态,应满足试验荷载效率在 0.85~1.05 范围内;经计算,该桥采用 16 辆 36 t 双后轴汽车进行加载,试验车参数:轴距 3.8 m+1.4 m,前轴重 7 t、双后轴重 29 t。该桥试验车沿横桥向布置情况见图6;限于篇幅,仅在图中示

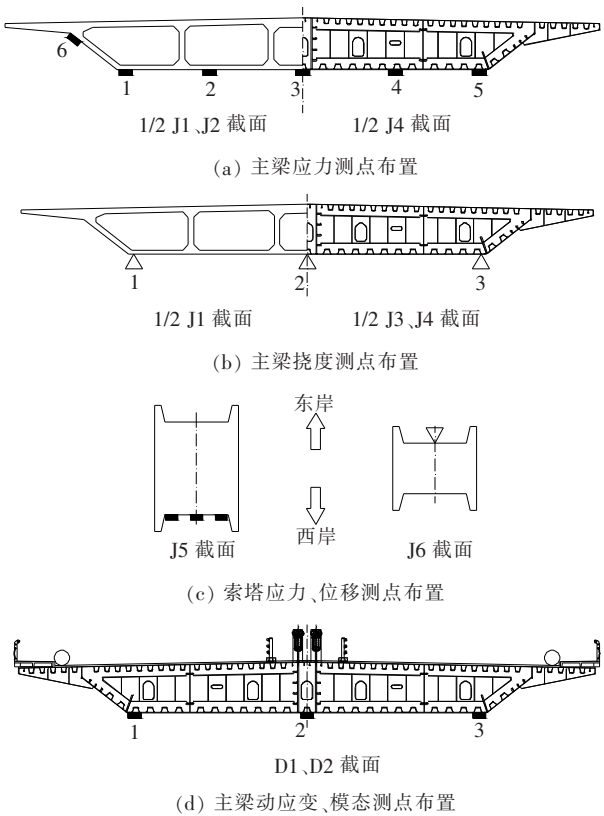


图 5 测点布置

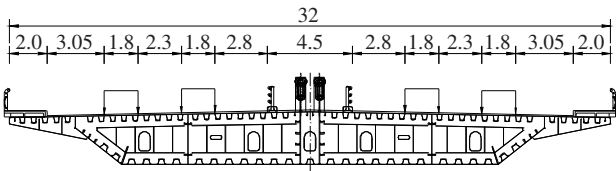


图 6 试验车横向布置(单位:m)

出工况 S4 试验车纵向布置情况;静载试验工况测试项目及荷载效率见表 2。

表 2 静载试验工况测试项目及荷载效率

工况 编号	测试截面 或位置	测试项目	设计荷载计算值 $S' \cdot (1+\mu)$	试验荷载效 应值 S_s	试验荷载 效率 η_q
S1	主梁	J1 截面最大正弯矩	29 002 kN·m	30 039 kN·m	1.04
S2	主梁	J2 截面最大负弯矩	-73 177 kN·m	-71 077 kN·m	0.97
S3	索塔	J5 截面最大正弯矩	49 831 kN·m	48 220 kN·m	0.97
	Z7 斜拉索	最大索力增量	744.9 kN	766.5 kN	1.03
	主梁	J3 截面最大挠度	-236.1 mm	-218.4 mm	0.93
S4	主梁	J4 截面最大正弯矩	59 944 kN·m	62 467 kN·m	1.04
	索塔	J6 截面最大纵桥向(往东岸)位移	54.2 mm	52.5 mm	0.97
	B13 斜拉索	最大索力增量	483.6 kN	474.8 kN	0.98

3.4 动载试验方案

3.4.1 动力响应试验方案

动力响应试验是通过测试桥跨结构在动荷载作用下的动态响应,分析桥梁结构的动态增量或冲击系数,进一步评价桥梁结构的工作性能。选取主跨 $L/2$ 、 $3L/4$ 附近(D1、D2)截面进行动力响应测试,按试验类型分为有障碍行车试验、无障碍行车试验,分别模拟桥面有无损伤时行车对桥跨结构的冲击作用。该桥动力响应试验用 2 辆试验车加载,有障碍行车试验工况的标准障碍物置于主跨 $L/2$ (D1)截面桥面,测点布置见图 4、5,试验工况见表 3。

表 3 动力响应试验工况

试验类型	工况编号	车速/(km·h ⁻¹)
无障碍行车 (跑车)试验	D1-1	20
	D1-2	30
	D1-3	40
有障碍行车 (跳车)试验	D2-1	20
	D2-2	30
	D2-3	40

3.4.2 自振特性试验方案

结构的自振特性参数,又称为振动模态参数或动力特性参数,主要包括结构的自振频率、阻尼比和振型,都是由结构形式、材料性能等结构固有特性所决定,与外荷载无关。该桥自振特性参数采用脉动法(即环境随机振动法)测定,具体方法为:首先测试由环境随机激振引起的桥梁结构微幅振动响应,然后采用 DASP 软件对振动信号进行快速傅里叶变换(FFT)处理,并应用随机子空间法(SS1 法)对模态参数进行识

别。该桥模态测点布置见图 4、5。

4 荷载试验结果与分析

4.1 静载试验

(1) 应力测试结果

主梁、索塔主测截面应力对比见图 7。

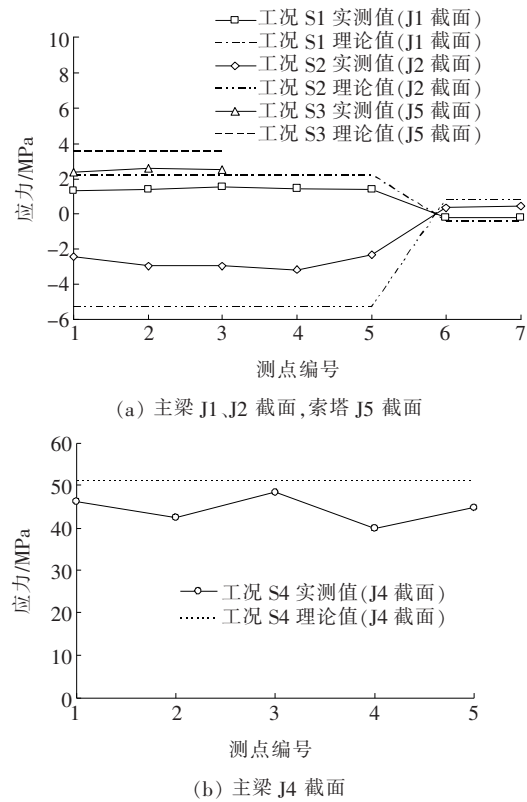


图 7 主梁、索塔主测截面应力

由图 7 可知:混凝土箱梁(J1、J2 截面)应力校验系数(实测值/理论值)为 0.44~0.72,部分测点出现

残余应变,相对残余应变最大为19.1%(位置:工况S2下J2截面测点4);钢箱梁(J4截面)应力校验系数为0.78~0.95,未出现残余应变;索塔(J5截面)应力校验系数为0.66~0.72,其中测点2出现4.0%的相对残余应变。

(2) 挠度、位移测试结果

主梁主测截面挠度对比见图8。分析试验结果可知:混凝土箱梁(J1截面)挠度校验系数为0.65~0.70,未出现残余变形;钢箱梁(J3、J4截面)挠度校验系数为0.88~0.91,测点均出现残余变形,相对残余变形最大为4.1%;工况S4下,索塔塔顶(J6截面)最大纵桥向位移实测值为44.0 mm(理论值为52.5 mm),校验系数为0.84,未出现残余变形。

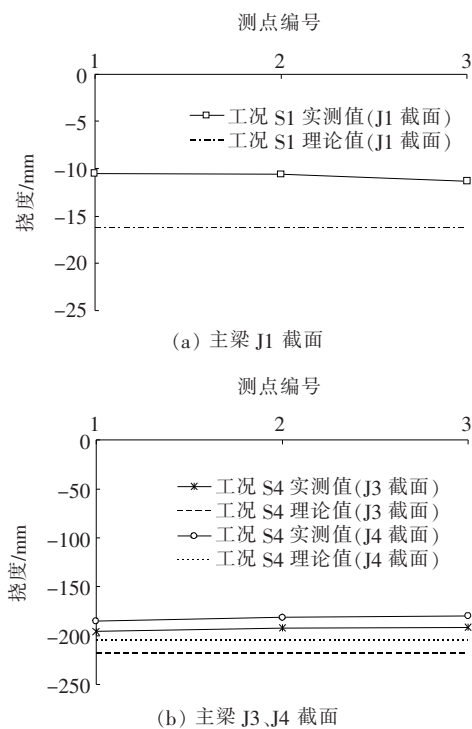


图8 主梁主测截面挠度

工况S4下,主跨(钢箱梁)最大挠度实测值为-195.8 mm,对应挠跨比为 $L/894$,小于规范规定的限值 $L/400$ (即437.5 mm),表明主梁(钢箱梁)刚度符合规范规定^[15]。

(3) 索力测试结果

Z7、B13斜拉索索力增量对比见图9。分析试验结果可知:主跨Z7斜拉索索力增量校验系数为0.75,边跨B13斜拉索索力增量校验系数为0.93(上游侧)、0.96(下游侧)。

(4) 静载试验小结

主梁测点应力和挠度、索塔测点应力和位移、斜拉索索力增量的校验系数均小于规范限值1,相对残余应变或变形均小于规范限值20%,表明桥梁结构强度、刚度具有一定的安全储备,主梁、索塔及斜拉索在试验荷载作用下处于弹性工作状态^[14,16]。

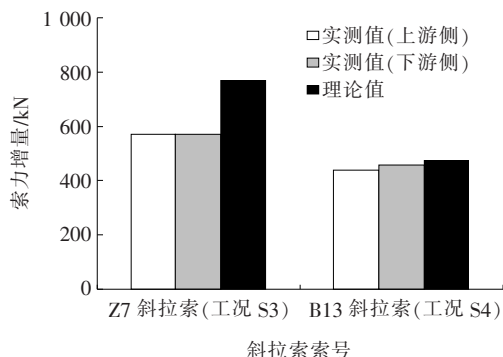


图9 索力增量

4.2 动载试验

4.2.1 动力响应试验

根据试验实测的动应变时程曲线计算得到主梁主测截面冲击系数如图10所示。

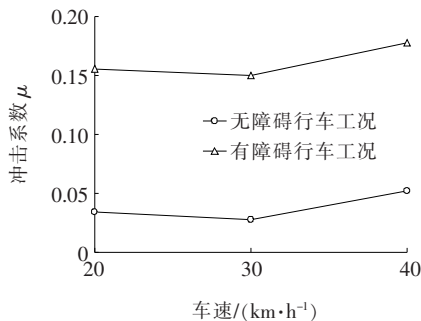


图10 主梁主测截面冲击系数

由图10可知:桥梁结构在无障碍行车工况下冲击系数 μ 为0.028~0.052,有障碍行车工况下为0.150~0.178,其值在正常范围;冲击系数与车速之间无明显相关性;有障碍行车工况下冲击系数较无障碍行车工况明显增大,平均增大3.2倍。

4.2.2 自振特性试验

根据试验实测的振动信号分析得到主梁自振特性参数(表4),振型见图11。由表4可知:主梁前几阶振型均为竖弯模态,与该桥宽主梁(横向刚度比竖向刚度大)的设计相符;各振型频率实测值与理论值相差较小,主梁1阶竖弯频率(即基频)实测值(0.625 Hz)略大于理论值(0.598 Hz),表明桥梁结构实际刚度与理论刚度相当;实测阻尼比为0.012 4~0.025 4,其数值

表 4 主梁自振特性参数

模态类型	阶数	频率/Hz		实测 阻尼比
		理论值	实测值	
竖弯	1	0.598	0.625	0.025 4
	2	1.266	1.375	0.019 7
	3	1.489	1.525	0.012 4
横弯	1	2.336	2.200	0.018 6

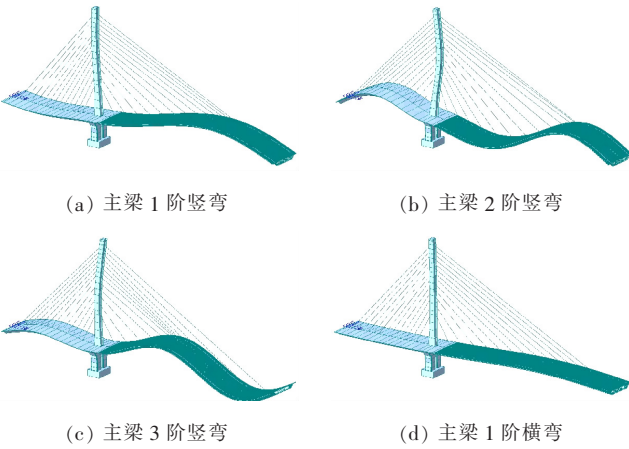


图 11 桥梁振型

较小,表明桥梁振动衰减较慢。综上,该桥结构自振特性为低频、小阻尼振动,与斜拉桥的振动特性相符,参数值在正常范围,表明桥梁结构整体刚度正常。

5 结论

(1) 该文提出的基于线域单元模拟钢箱梁的简化建模方法,具有建模效率高、出错率低、后处理简便等优势;通过实桥荷载试验分析,实测值与理论值吻合较好,表明其计算精度满足桥梁总体分析要求,为钢—混混合梁的简化建模提供了新思路。

(2) 在试验荷载作用下,主梁、索塔及斜拉索处于弹性工作状态,动力性能参数在正常范围;有障碍行车工况下冲击系数明显增大,表明桥面铺装不平整或局部缺陷会给桥梁结构的工作状况带来不利影响,维持良好的桥面平整度对改善桥梁结构的受力状态极为重要;该桥结构自振特性为低频、小阻尼振动,与斜拉桥的振动特性相符。

(3) 试验结果表明:该桥结构强度、刚度具有一定的安全储备,动力性能良好,承载能力和工作性能符合设计要求。

参考文献:

[1] 邵旭东. 桥梁工程[M]. 2 版. 北京:人民交通出版社, 2007.

[2] 方志,张国刚,唐盛华,等. 混凝土斜拉桥动力有限元建模与模型修正[J]. 中国公路学报,2013,26(3):77—85.

[3] 方志,唐盛华,张国刚,等. 基于多状态下静态测试数据的斜拉桥模型修正[J]. 中国公路学报,2011,24(1):34—41.

[4] 陈常松,刘灿,董道福. 钢桁梁公路斜拉桥主梁刚度等效研究[J]. 中外公路,2015,35(5):163—166.

[5] 周林仁,欧进萍. 斜拉桥结构模型修正的子结构方法[J]. 振动与冲击,2014,33(19):52—58.

[6] 张玉平,李传习. 横隔梁对斜拉桥箱梁剪力滞效应的影响[J]. 中外公路,2009,29(1):116—120.

[7] 李加武,黄森华,王新. 开口断面斜拉桥主梁动力特性的有限元简化计算[J]. 建筑科学与工程学报,2013,30(4):59—64.

[8] BENEDETTINI F, GENTILE C. Operational Modal Testing and FE Model Tuning of a Cable-Stayed Bridge[J]. Engineering Structures,2011, 33(6):2 063—2 073.

[9] 李元兵,张启伟,季云峰. 千米级斜拉桥结构静力行为试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版),2011,39(4):495—500,523.

[10] 曹少辉,田仲初,赵剑. 马岭河大桥成桥荷载试验研究[J]. 中外公路,2012,32(5):160—163.

[11] 叶敏,邹力,胡明. 鄂东长江公路大桥主桥静动载试验[J]. 世界桥梁,2012,40(3):68—71.

[12] 张焱,陈孔令,刘黎阳,等. 六库怒江二桥设计[J]. 桥梁建设,2013,43(1):59—64.

[13] 彭涛,田仲初,张建仁,等. 基于多目标优化的混凝土斜拉桥静动力有限元模型修正[J]. 振动与冲击,2018,37(21):108—116.

[14] 长安大学. 公路桥梁荷载试验规程:JTG/T J21—01—2015[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.

[15] 重庆交通科研设计院. 公路斜拉桥设计细则:JTG/T D65—01—2007[S]. 北京:人民交通出版社,2007.

[16] 交通部公路科学研究院. 公路桥梁承载能力检测评定规程:JTG/T J21—2011[S]. 北京:人民交通出版社,2011.