

预应力混凝土连续箱梁单梁模型与梁格模型 有限元对比分析与研究

苏鹏, 李恒, 魏景和

(广东纵横工程检测有限公司, 广东 佛山 528226)

摘要: 以某预应力混凝土变截面连续箱梁为研究对象, 采用MIDAS Civil对其分别进行单梁模型和梁格模型的内力计算, 通过两种模型的计算结果与静载试验实测结果的对比分析, 探究基于两种模型计算变截面连续箱梁受力状态和结构变形的可靠性和合理性。研究表明: 在恒载和设计荷载作用下, 对于预应力混凝土连续箱梁, 在采用单梁模型和梁格模型进行计算分析时, 两种模型的计算结果基本相同; 在偏载作用下, 通过静载试验计算结果分析, 梁格模型内力计算结果比单梁模型内力计算结果均偏小, 并且两种模型误差超过了5%, 对结果影响评价的准确度不容忽视; 梁格模型能够准确地计算连续箱梁在横桥向的应力分布、应力大小和结构变形, 相较于单梁模型, 梁格模型更能反映结构的空间受力特性, 表明采用梁格法计算分析变截面连续箱梁桥更符合工程要求。

关键词: 变截面连续箱梁; 单梁模型; 梁格模型; MIDAS Civil; 静载试验

中图分类号: U441

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)01-0086-05

Finite Element Comparison, Analysis and Research on Single-beam Model and Beam-grillage Model of Prestressed Concrete Continuous Box Girder

SU Peng, LI Heng, WEI Jinghe

(Guangdong Zongheng Engineering Inspection Co., Ltd., Foshan 528226, China)

Abstract: Taking a prestressed concrete continuous box girder with variable cross-section as the research object, MIDAS Civil is used to calculate the internal force of the single-beam model and the beam-grillage model respectively. The calculation results and the static load measured results of the two models are compared and analyzed to explore the reliability and rationality of the force state and the structural deformation of the continuous box girder with variable cross-section calculated according to the two models. The research results show that under the action of constant load and design load, for the prestressed concrete continuous box girder, the calculation results of the two models are basically the same when the single-beam model and the beam-grillage model are used for the calculation and analysis. Under the action of bias load, through the analysis of the calculation results of the static loading test, the internal force calculation results of the beam-grillage model are smaller than those of the single-beam model, and the error of the two models exceeds 5%. The accuracy of the impact evaluation on the results cannot be ignored. The beam-grillage model can accurately calculate the stress distribution, stress magnitude and structural deformation of the continuous box girder in the transverse direction, and the beam-grillage model can reflect the spatial force characteristics of the structure better than the single-beam model, which indicates that the variable cross-section continuous box girder bridge calculated and analyzed by using the beam-grillage method is more suitable for the engineering requirements.

Keywords: variable section continuous box girder; single-beam model; beam-grillage model; MIDAS Civil; static load test

0 引言

随着城市建设规模的不断发展, 城市桥梁的设计越来越重视结构的美观性和舒适性。由于预应力

混凝土变截面连续箱梁跨径较大、结构整体性好、自重相对较轻、外形美观且能够增大桥下净空高度, 因此, 该类桥型在城市桥梁建设中被广泛应用和推广。但是, 随着这种桥型结构的宽跨比逐渐增大, 其受力特性也会变得越来越复杂, 且其横向空间效应更加明显, 仅进行常规的简化单梁计算往往存在较大的误差, 因此选择合适的计算分析方法是保证其工程

收稿日期: 2024-02-02

作者简介: 苏鹏(1991—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥隧检测工作。

质量的关键。目前,有关连续箱梁桥结构的计算分析方法主要包括平面杆系单梁模型、三维实体单元模型和梁格模型^[1-3]。对于这种变截面连续箱梁桥,采用传统的单梁模型结合偏载放大效应进行分析计算,无法有效控制计算结果的准确性,保证结构安全,主要是因为单梁模型无法准确地分析箱梁的畸变、弯曲、扭转、剪力滞等因素^[4]。三维实体单元模型能计算出最接近实际受力状态的结果,对局部应力化分析也非常有效,但是该方法建模过程和数据处理效率低下,且无法提取需要的内力计算结果^[5]。因此,这种变截面连续箱梁的受力分析,多采用梁格法进行建模分析,只要梁格划分合理、梁格刚度等效正确,足够满足工程要求^[6]。

以佛山市虹岭路跨线桥荷载试验为案例,采用MIDAS Civil分别构建单梁模型和梁格模型的内力分析计算,并与静载试验实测数据相互校核,可为类似工程提供参考。

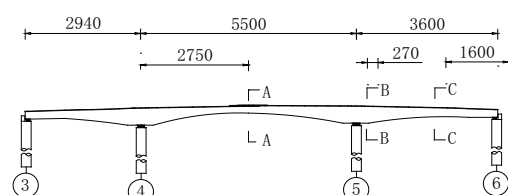
1 工程概况

佛山市虹岭路跨线桥是一座预应力混凝土变截面连续箱梁桥,主跨跨径组合为29.40 m+55.00 m+36.00 m。桥梁全宽17.00 m,支点高3.05 m,跨中梁高1.85 m,为预应力混凝土单箱双室,垂直腹板。桥梁底宽10.00 m,翼板长3.40 m,腹板变宽厚度60.00 cm(支点)至40.00 cm(跨中),底板变宽厚度40.00 cm(支点)至24.00 cm(跨中),顶部箱室内厚度25.00 cm,悬臂厚度20.00 cm,根部厚度50.00 cm。混凝土强度等级为C50。桥面铺装采用6 cm C40混凝土铺装+8 cm 沥青混凝土铺装,采用盆式橡胶支座。该桥的设计荷载为公路—I级。

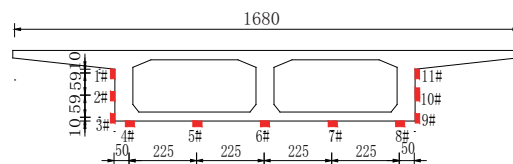
该桥静载试验方案根据《公路桥梁荷载试验规程》(JTG/T J21-01—2015)制定^[7]。工况一和工况三均采用8辆三轴加载车进行加载,为优化加载工序,节省加载时间,工况二在工况一的基础上加了2辆加载车。实际三轴加载车辆参数如下:总重320 kN,轴重为64 kN(前轴)+2×128 kN(双后轴),纵向轴距3.69 m+1.35 m,横向轮距1.85 m。具体荷载工况见表1,控制截面、测点位置及车辆荷载布置见图1,现场检测实况照片见图2。

表1 桥梁结构静载试验工况

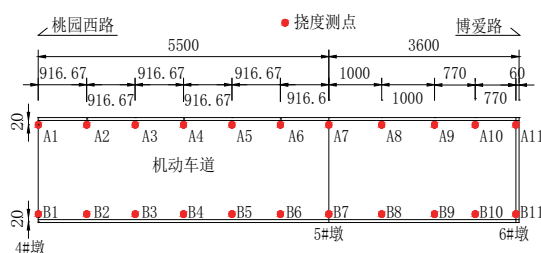
工况	项目	控制截面
工况一	第5#跨跨中最大正弯矩(偏载)	A-A截面
工况二	第5#跨墩顶最大负弯矩(偏载)	B-B截面
工况三	第6#跨最大正弯矩(偏载)	C-C截面



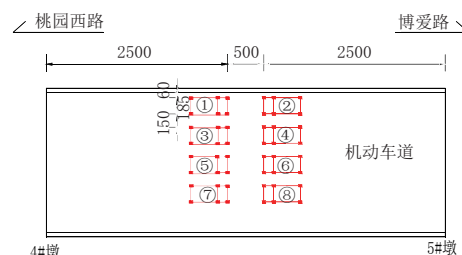
(a)桥梁结构检测控制截面立面图



(b)A截面应变测点布置图



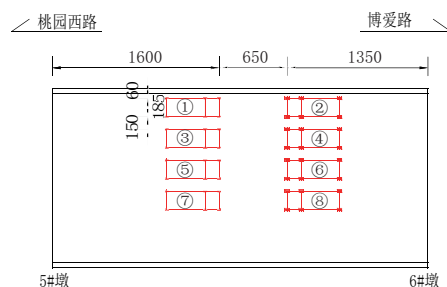
(c)桥面挠度测点布置图



(d)工况I车辆偏载布置图



(e)工况II车辆偏载布置图



(f)工况III车辆偏载布置图

图1 静载试验控制截面各测点及加载车辆布置图(单位:cm)



图2 车辆加载工作照片

2 有限元模型

2.1 梁格模型

虹岭路跨线桥采用MIDAS Civil软件“基于腹板间对中”的切割方式建立梁格模型,模型共213个单元,有限元模型如图3所示。将箱梁按腹板数量横向划分为3个纵向构件(见图4),各个纵向构件中性轴与原整体截面中性轴一致,在纵向构件之间设置虚拟横梁将其连成整体,并在两侧翼板端部设置虚拟横梁,以便于施加荷载。栏杆、铺装等二期恒载根据实际情况分别施加于纵向构件上。

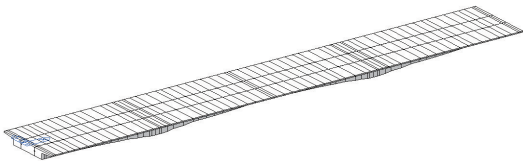


图3 梁格计算模型

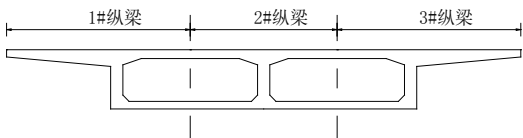


图4 主梁横截面划分

2.2 单梁模型

由于单梁模型简单直观,对桥梁结构的尺寸和恒载数值模拟比较准确,可用于校核梁格模型构建的合理性和准确性。采用MIDAS Civil软件建立桥的单梁模型,模型共76个单元,有限元模型如图5所示。

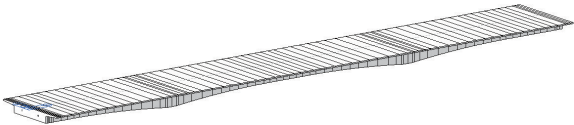


图5 单梁计算模型

3 模型对比复核

3.1 竖向支座反力对比分析

对比两种模型在结构自重+二期恒载共同作用

下各竖向支座反力计算结果(见表2)。计算结果显示:单梁模型同一桥墩的两个支座竖向反力稍有不同,而梁格模型同一桥墩的两个支座竖向反力完全一致;梁格模型在结构自重+二期恒载共同作用下,同一桥墩竖向支座反力基本一致,两种模型支座反力最大比值为0.97~1.03,相对误差不超过5%,满足工程误差需求。

表2 恒载作用下两种模型竖向支座反力对比表

桥墩号	单梁模型		梁格模型		最大比值
	1#支座竖向反力/kN	2#支座竖向反力/kN	1#支座竖向反力/kN	2#支座竖向反力/kN	
3#墩	1 163.9	1 176.6	1 132.6	1 132.6	1.03
4#墩	9 324.4	9 319.2	9 569.1	9 569.1	0.97
5#墩	9 837.5	9 831.5	10 144.3	10 144.3	0.97
6#墩	1 850.9	1 869.1	1 791.5	1 791.5	1.03

3.2 弯矩对比分析

对比两种模型在恒载及设计荷载作用下弯矩计算结果(见表3至表6)。计算结果显示:单梁模型和梁格模型在结构自重+二期恒载共同作用下,主跨最大正弯矩比值为1.02,墩顶最大负弯矩比值为1.04;在设计荷载作用下,主跨最大正弯矩比值为1.00,墩顶最大负弯矩比值为1.05。在相同荷载作用下,梁格模型的弯矩效应值比单梁模型的偏大,偏差值均未超过5%,满足工程误差需求。

表3 恒载作用下两种模型主跨最大正弯矩对比表

梁体号	梁格模型		单梁模型	比值
	恒载主跨最大正弯矩/(kN·m)	恒载主跨最大正弯矩合计/(kN·m)	恒载主跨最大正弯矩/(kN·m)	
1#纵梁	10 513.6			
2#纵梁	14 015.5	35 042.7	34 301.3	1.02
3#纵梁	10 513.6			

表4 恒载作用下两种模型墩顶最大负弯矩对比表

梁体号	梁格模型		单梁模型	比值
	恒载墩顶最大负弯矩/(kN·m)	恒载墩顶最大负弯矩合计/(kN·m)	恒载墩顶最大负弯矩/(kN·m)	
1#纵梁	-26 631.8			
2#纵梁	-43 299.1	-96 562.7	-93 262.8	1.04
3#纵梁	-26 631.8			

通过以上计算结果对比分析,设计中在相同荷载作用下,梁格模型和单梁模型相同支座的竖向反力和各截面的弯矩效应非常接近,误差均未超过

表5 设计荷载作用下两种模型主跨最大正弯矩对比表

梁体号	梁格模型		单梁模型	比值
	设计荷载主跨最大正弯矩/(kN·m)	设计荷载主跨最大正弯矩合计/(kN·m)	设计荷载主跨最大正弯矩/(kN·m)	
1#纵梁	4 117.6			
2#纵梁	4 776.2	12 253.3	12 288.3	1.00
3#纵梁	3 359.5			

表6 设计荷载作用下两种模型墩顶最大负弯矩对比表

梁体号	梁格模型		单梁模型	比值
	设计荷载墩顶最大负弯矩/(kN·m)	设计荷载墩顶最大负弯矩合计/(kN·m)	设计荷载墩顶最大负弯矩/(kN·m)	
1#纵梁	-5 716.8			
2#纵梁	-7 396.3	-17 401.5	-16 558.4	1.05
3#纵梁	-4 288.4			

5%。这说明该桥梁格模型的梁格划分合理、梁格刚度等效正确,足够满足工程要求,可以用来评价荷载试验结果的准确性。

4 结果对比分析

4.1 应变对比分析

该桥荷载试验实际加载采用偏载的方式,各工况控制截面下横桥向梁底应变具体情况见表7和图6、图7、图8所示。由图表可以看出:相对于梁格模型,单梁模型应变值普遍偏大,两种模型的应变最大差值A6测点为26 $\mu\epsilon$,占实测弹性值的46.43%,对结果评价的准确度影响不可忽略;梁格模型理论计算值分布曲线更接近于实测曲线,变化趋势基本一致,均表现为1#纵梁梁底应变最大,3#纵梁梁底应变次之,2#纵梁梁底应变最小,表明梁格模型能够更准确地模拟桥梁的横向空间受力分布特性。

4.2 挠度对比分析

各工况控制截面下最大挠度横桥向分布具体情况见表8。由表8数据可知:相对于梁格模型,单梁模型同一测点挠度理论计算值均比梁格模型理论计算值偏大,两种模型的挠度最大差值B4测点为3.73 mm,占实测弹性值的38.26%,对结果评价的准确度影响不可忽略;不同工况汽车荷载偏载作用下,梁格模型理论计算值分布曲线更接近于实测曲线,均表现为偏载侧挠度值比另一测线挠度值大,与实际更为贴切,进一步表明梁格模型能够更准确地模拟桥梁的横向空间受力分布特性。

表7 汽车荷载偏载作用下各模型不同工况下梁底应变对比表

工况	测点	实测弹性值 $\mu\epsilon$	单梁理论值 $\mu\epsilon$	梁格理论值 $\mu\epsilon$
工况一:主跨最大正弯矩	A4	73	90	85
	A5	68	90	75
	A6	56	91	65
	A7	59	91	71
	A8	64	91	77
工况二:墩顶最大负弯矩	B4	-30	-36	-34
	B5	-28	-36	-32
	B6	-26	-36	-30
	B7	-26	-36	-31
	B8	-26	-36	-31
工况三:边跨最大正弯矩	C4	62	79	71
	C5	57	79	66
	C6	54	79	61
	C7	55	79	64
	C8	58	79	66

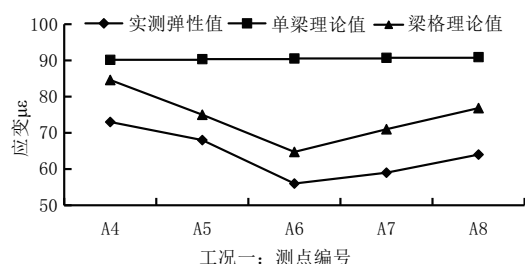


图6 工况一:各模型梁底应变对比图

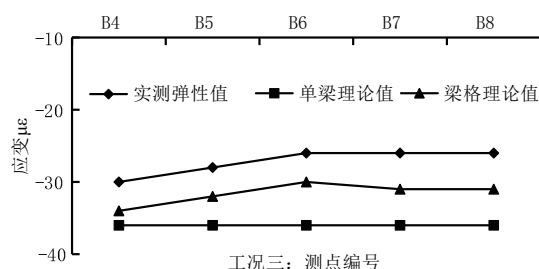


图7 工况二:各模型梁底应变对比图

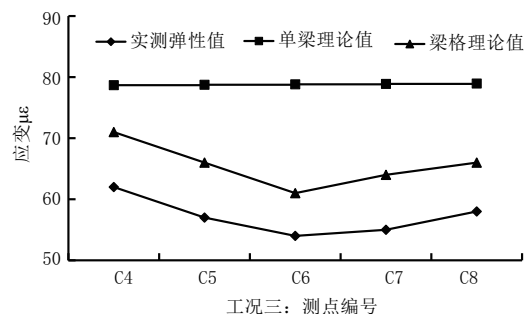


图8 工况三:各模型梁底应变对比图

4.3 自振频率对比分析

目前,结构动力特征值的计算方法较多,常用的有 Lanczos 法、子空间迭代法和多重 Ritz 向量法等^[9]。Lanczos 方法由矢量迭代、Ritz 分解和解三对角矩阵特征值问题等三步构成。与其他方法相比,该方法

表8 汽车荷载偏载作用下各模型不同工况下

		最大挠度对比表		单位:mm
工况	测点	实测弹性值	单梁理论值	梁格理论值
工况一:主跨 最大正弯矩	A4	11.68	15.73	13.62
	B4	9.75	15.73	12.00
工况三:边跨 最大正弯矩	A9	5.47	7.69	6.45
	B9	4.63	7.69	5.58

保证求解效率的同时具有最高的精度^[10]。该桥两种模型均采用 Lanczos 法分析前3阶竖向自振频率,两种模型的自振频率理论计算值与实测值对比见表9。通过表9数据可知,两种模型的各阶自振频率计算值均小于实测值,说明所检测的桥梁的结构动力特性满足实际使用要求,结构的整体刚度较大,且两种模型的各阶自振频率计算值基本一致,也从侧面反映了梁格模型梁格划分合理、梁格刚度等效正确。

表9 各模型自振频率实测值与计算值对比表 单位:Hz

阶次	实测值	单梁模型	梁格模型
竖向1阶	2.64	2.05	2.05
竖向2阶	4.88	3.98	4.02
竖向3阶	6.59	5.66	5.65

5 结 论

通过对虹岭路跨线桥(变截面连续箱梁)荷载试验实测数据与单梁模型和梁格模型的理论计算值对比分析可知。

(1)设计阶段,在相同荷载作用下,梁格模型和单梁模型相同支座竖向反力和各截面的弯矩效应非常接近,误差均未超过5%。可通过单梁模型验证梁

格模型梁格划分是否合理,梁格刚度等效是否正确。

(2)静力荷载偏载作用下,相对于梁格模型,单梁模型的应变和挠度均偏大,且两种模型的计算结果差值较大,对结果评价的准确度影响不可忽略。梁格模型的理论计算值与静载试验实测值变化趋势基本一致,梁格模型能更准确地模拟桥梁的横向空间受力分布特性,其计算结果更符合实际受力状态。

(3)采用单梁模型和梁格模型对变截面连续箱梁进行自振频率分析,两种模型的计算结果基本一致,均可用来评价结构的整体刚度。

参考文献:

- [1] 马勇毅,张威振.剪力一柔性梁格法在 Midas 中的具体应用[J].中外公路,2007,27(5):173-175.
- [2] 陈向阳,檀威.空间梁格模型与平面单梁模型计算简支梁桥内力比较分析[J].湖南交通科技,2015,41(4):117-121.
- [3] 孟磊,刘皓楠,王用中.波形钢腹板PC箱梁的特点及经济效益分析[J].建筑与工程,2009(13):649-650.
- [4] 张玥,李志成,许有俊,等.单箱多室变截面连续宽箱梁桥梁梁格模型研究[J].计算机仿真,2018,35(4):218-222.
- [5] 朱雪光.梁格法在鱼腹式宽箱梁桥上部结构分析中的应用[J].市政技术,2021,39(7):69-72.
- [6] 文家清,严定国,王元汉.异形连续箱梁桥的空间分析方法研究[J].中外公路,2005,25(4):93-95.
- [7] JTG/T J21-01—2015,公路桥梁荷载试验规程[S].
- [8] E.C. 汉勃利.桥梁上部构造性能[M].北京:人民交通出版社,1982.
- [9] 张子明,杜成斌,周星德.结构动力学[M].北京:清华大学出版社,2008.
- [10] 刘丹.基于 Lanczos 算法的模态重分析方法的研究与应用[D].长沙:湖南大学,2014.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

官方网址:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:roadfloodbridge@163.com

