

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021112224021989

文章编号:1674-599X(2024)01-0060-08

引用格式:戴理朝,王冲,陈鹏,等.大幅变宽连续箱梁桥受弯性能研究[J].交通科学与工程,2024,40(1):60-67.

Citation: DAI Lizhao, WANG Chong, CHEN Peng, et al. Mechanical characteristics of continuous box-girder bridge with sharply variable width [J]. J. Transp. Sci. Eng., 2024, 40(1): 60-67.

大幅变宽连续箱梁桥受弯性能研究

戴理朝¹,王冲²,陈鹏¹,赵威³

(1.长沙理工大学土木工程学院,湖南长沙410114;2.广西交科集团有限公司,广西南宁530000;

3.中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司,湖南长沙410014)

摘要:为研究大幅变宽度连续箱梁桥的宽跨比对其力学特性的影响,以湖南省长益高速公路互通匝道变宽预应力混凝土连续梁桥为工程背景,分别建立梁格模型与单梁模型,对其弯矩、挠度及应力进行分析。研究结果表明:在仅考虑自重与二期荷载作用下,随着宽跨比的增加,各纵梁沿横截面承担的弯矩逐渐趋于均匀,各纵梁承担的应力相对平均偏差增大,空间效应明显;与增加箱室宽度而变宽的主梁相比,通过增加箱室数量而变宽的主梁的挠度与弯矩分布更加均匀。

关键词:连续箱梁桥;异型结构;梁格法;宽跨比;有限元模型

中图分类号:U448.213

文献标志码:A

Mechanical characteristics of continuous box-girder bridge with sharply variable width

DAI Lizhao¹, WANG Chong², CHEN Peng¹, ZHAO Wei³

(1.School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2.Guangxi Communications Technology Group Co., Ltd., Nanning 530000, China;

3.China Energy Engineering Group Zhongnan Surveying and Design Institute Co., Ltd., Changsha 410014, China)

Abstract: The effect of the width-to-span ratio on the mechanical characteristics of a large widened continuous box girder bridge is investigated. This study is based on the actual project of widening prestressed concrete continuous girder bridge for the expansion and interchange ramp of Changyi expressway in Hunan province. A grillage model and a single beam model for a continuous box-girder bridge with sharply variable width are established to analyze its bending moment, deflection and stress. The results show that under the combined effects of self-weight and secondary loads, as the width-to-span ratio increases, the moments borne by each longitudinal beam along the cross-section gradually become more uniform. However, the relative deviation in stress distribution among the longitudinal beams increases, indicating significant spatial effects. Compared to widening the main beam by increasing the width of the chambers, widening the main beam by increasing the number of chambers results in a more uniform distribution of deflection and bending moment.

收稿日期:2021-11-22

项目基金:国家自然科学基金项目(52008035);湖南省创新研究群体项目(2020JJ1006);湖南省交通科技项目(201619)

作者简介:戴理朝(1989—),男,长沙理工大学副教授,博士。E-mail:lizhaod@csust.edu.cn

Key words: continuous box-girder bridge; special-shaped structure; grillage method; width-to-span ratio; finite element model

随着交通量的日益增加,立交桥的修建可有效解决城市道路拥堵等问题。为减少占地、增加城市美观,需设置一些横向变宽、分叉等异形结构桥梁^[1-2]。这种异形结构桥梁的线型变化多端,受力与曲线桥梁类似。在竖向荷载作用下,变宽度截面梁会产生扭转,甚至导致挠曲变形,且存在纵向弯曲、扭转、畸变及横向挠曲等变形模式,与等宽箱梁相比,变宽连续箱梁的应力状态空间分布更加复杂^[3-4]。研究变宽度桥梁的受力特征对确保其安全极为重要。一些学者^[5-7]利用梁格对正交和斜交变宽梁桥进行了计算,其计算结果表明:相较于实体模型,梁格法能较好地反映变宽箱梁的受力特点,满足工程设计要求。马旭涛等^[8]对宽度为 34.50 ~ 48.49 m 的分岔式变宽箱梁桥进行受力分析,发现梁格模型中各纵梁受力与支座横向布置位置有关。何嘉等^[9]研究了宽度为 15.26 ~ 23.80 m 桥梁的力学特征,认为在恒载、活载作用下,边纵梁的受力情况较中间纵梁的更不利。陈博^[10]采用梁格法对宽度范围为 14.7 ~ 29.7 m 的变宽箱梁桥进行建模分析,发现增加纵梁的抗扭刚度可以改善结构的横向分配性能。这些连续箱梁桥的变宽幅度均在 20 m 以内,针对变宽大于 20 m 的大幅变宽连续箱梁桥的研

究少见。与普通变宽连续箱梁相比,大幅变宽连续箱梁桥的弯矩、挠度、应力会表现出不同特征。因此,本研究拟以湖南省长益高速互通匝道变宽预应力混凝土连续梁桥为工程背景,分别建立梁格模型与单梁模型,对其弯矩、挠度和应力进行分析,并分析宽跨比对其力学特性的影响,以期类似桥梁设计提供借鉴。

1 工程概况

湖南省长益高速公路互通匝道变宽度的预应力混凝土连续梁桥在 200 m 范围内桥面由 16.75 m 大幅度变宽至 63.40 m,跨径组合为 (35+5×33) m,梁高 2.0 m,主梁为单箱多室结构,箱室数量与宽度随桥宽变化而变化。顶板厚 25.0 cm,腹板厚 45.0 ~ 60.0 cm,底板厚 25.0 ~ 40.0 cm,其在支座附近局部加厚。主梁断面采用变箱室数与变箱室宽度两种方式结合进行桥面变宽,如图 1 所示。本桥为纵向、横向预应力体系,钢绞线抗拉强度标准值为 1 860 MPa,上部结构采用 C50 混凝土。桥面为采用双向 2% 横坡。桥面铺装采用 8.0 cm 厚 C50 钢纤维混凝土,10.0 cm 厚沥青混凝土,荷载等级为公路-I 级。

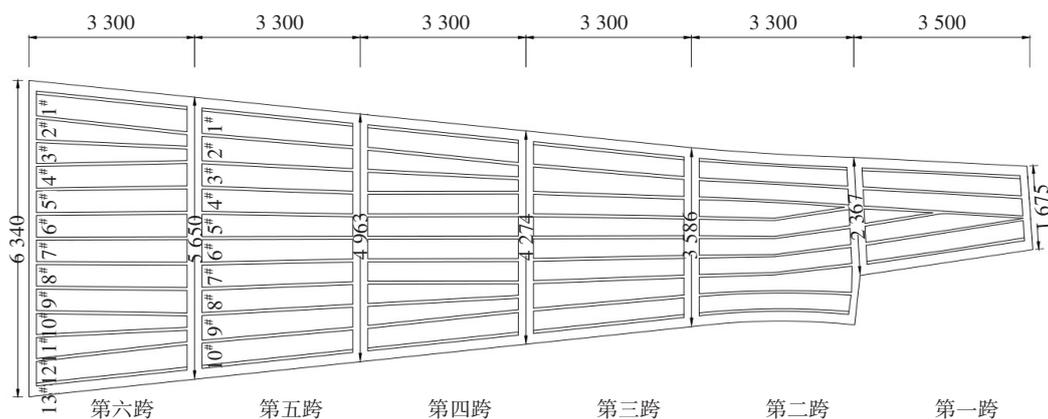


图 1 大幅变宽预应力混凝土连续梁桥构造(单位:cm)

Fig. 1 Structure of large widened prestressed concrete continuous box girder bridges (unit: cm)

2 大幅变宽箱梁桥有限元模型的建立

常用的变宽度桥梁计算方法有:单梁模型、梁

格模型、板壳模型与实体模型。单梁模型建模速度快,在普通桥梁设计中被广泛应用,但其无法体现结构的横向受力特征。板壳模型或实体模型计算结果与桥梁实际情况最为接近,但建模过程复杂,

不能直观给出结构的内力,也不便于结构的构造和配筋设计,实际工程中很少应用^[11-12]。梁格模型采取了一定简化方式,用等效梁格代替桥梁上部结构,通过纵横梁格的合理划分,得到的结果与现行规范验算体系匹配,是目前计算分析变宽桥梁最为快捷、有效的方法^[13]。本研究分别采用梁格法模型与单梁法模型对大幅变宽度预应力混凝土连续箱梁桥进行建模。

梁格模型为Hambly平面梁格模型,该模型共有871个节点、1333个单元。基于平面梁格理论,梁格法等效原则应该满足在相同荷载下等效梁格体系与原结构所产生的变形相同,并且所划分的梁格内的弯矩、剪力等内力也必须和原结构所产生

的内力相同^[14]。为满足等效原则,纵向梁格划分采用基于腹板对中划分方式,划分后的各纵梁采用移轴公式与原整体截面中性轴一致,各纵梁与原截面腹板位置重合,其箱梁各腹板结果采用纵梁结果指代。由于主梁截面沿跨径方向为变箱室构造,因此,在有限元软件中将梁截面划分为5~13根纵梁,以第六跨纵梁划分为例,其纵梁号编制如图2所示,其他跨纵梁号按相同方法编制。横向梁格采用不等距划分,考虑计算精度等要求,在横梁、截面变化处等关键部位进行网格加密。分别计算纵、横梁格构件的截面特性,在有限元软件中利用截面特性调整系数,使得梁格模型与实际结构等效^[15-16]。

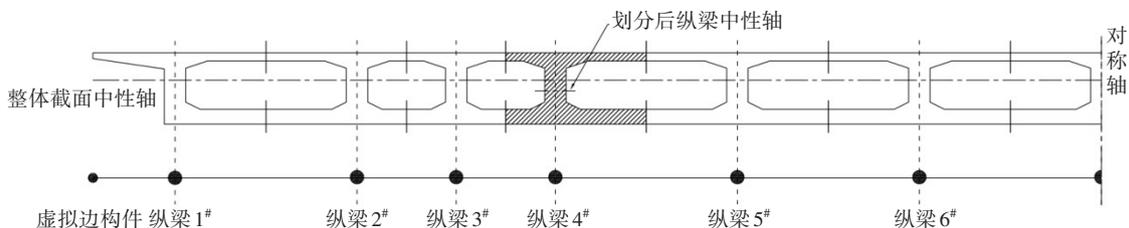
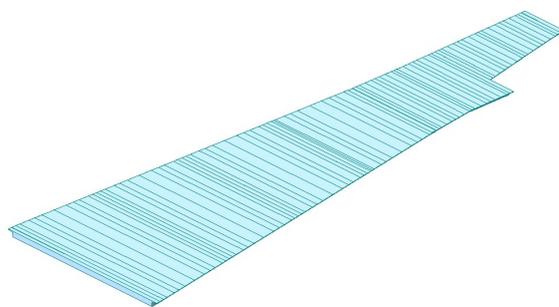


图2 第六跨跨中截面“基于腹板对中”划分

Fig. 2 Meshing of the mid-span section of the sixth span

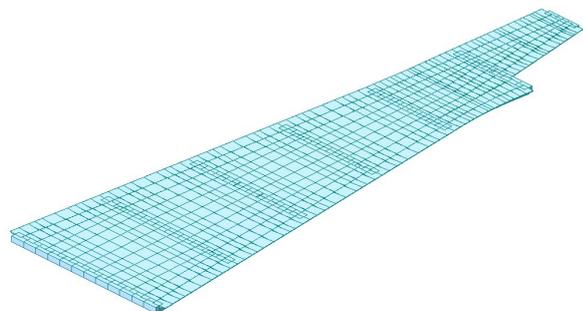
该桥的单梁模型由95个节点、87个单元组成,在程序中采用截面偏心和变截面方法来模拟匝道汇入以及变宽等实际结构情况。桥面荷载加载按实际结构荷载位置进行模拟,通过荷载偏心加载在单梁模型中。梁格模型和单梁模型网络划分如图3所示,支座布置形式如图4所示。其中,无箭头符号表示约束桥梁横桥向、顺桥向与竖向变形,横向单箭头符号表示约束桥梁横桥向和竖向变形,双箭头符号表示只约束竖向变形。



(b) 单梁模型

图3 大幅变宽连续箱梁桥有限元模型

Fig. 3 Finite element model of large widened continuous box girder bridges



(a) 梁格模型

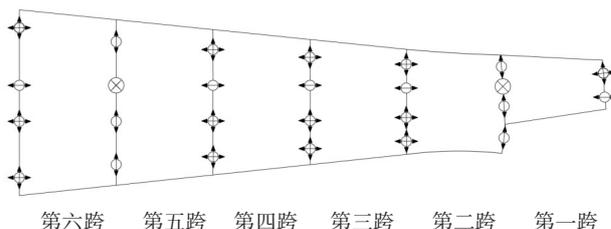


图4 大幅变宽连续箱梁桥支座布置形式

Fig. 4 Arrangement of bearings for large widened continuous box girder bridges

3 计算结果分析

3.1 虚拟横梁剪切刚度对梁格分析的影响

计算虚拟横梁的截面特性时由于简化计算,等效虚拟横梁截面的剪切刚度通常不等于理论剪切刚度,使结构的内力计算结果与理论值存在偏差。为研究虚拟横梁剪切刚度对梁格模型计算结果的影响,将虚拟原始剪切原始刚度分别缩小与扩大为原先的 10%、1%、10 倍、100 倍,并选取自重与二期恒载作用下第三跨跨中截面的内力分布结果进行对比分析,计算结果如图 5 所示。

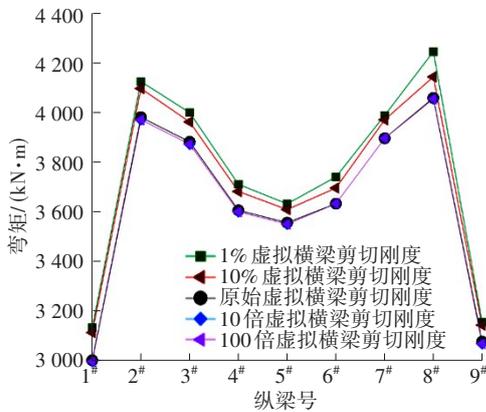


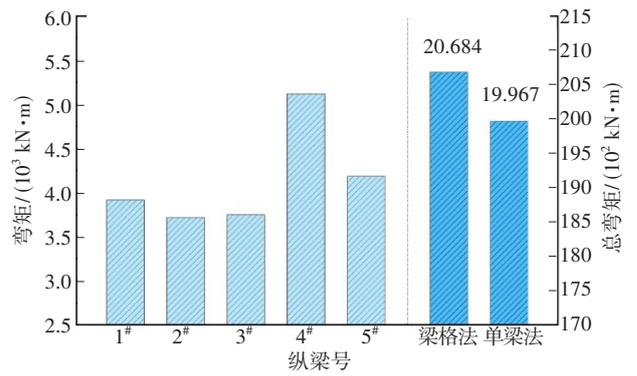
图 5 不同虚拟横梁剪切刚度对第三跨跨中弯矩的影响

Fig. 5 Line chart of the bending moment in the middle of the third span under different shear stiffness of the virtual beam

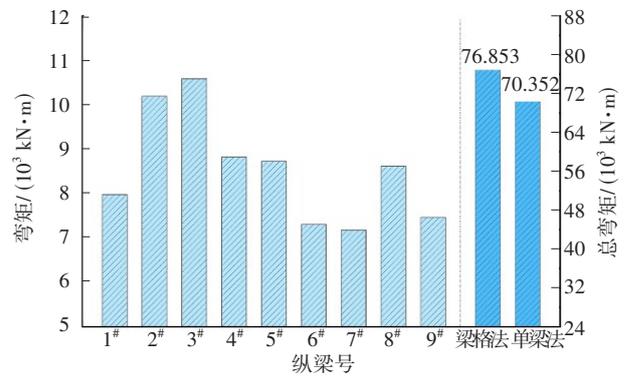
从图 5 可以看出,当虚拟横梁剪切刚度缩小为原始刚度大小的 10% 和 1% 时,其跨中弯矩有所增大,但总体增幅不超过 3%,且边纵梁的增幅大于中部纵梁;当虚拟横梁剪切扩大为原始刚度的 10 倍和 100 倍时,其跨中弯矩几乎不变,可认为对结构内力的影响很小。这表明:在建模分析中,可扩大虚拟横梁的剪切刚度以等效为理论剪切刚度,从而降低与理论值的偏差。

3.2 弯矩对比分析

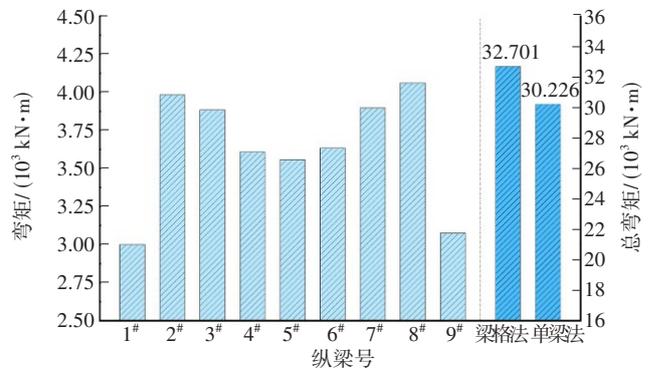
为研究大幅变宽连续箱梁桥的宽跨比对其弯矩的影响,选取自重与二期恒载作用下各跨跨中弯矩并对比每一跨弯矩的分布及其变化,如图 6 所示。在图 6 中,虚线左侧为梁格模型各纵梁弯矩,虚线右侧为梁格模型各纵梁总弯矩及单梁模型各纵梁总弯矩。



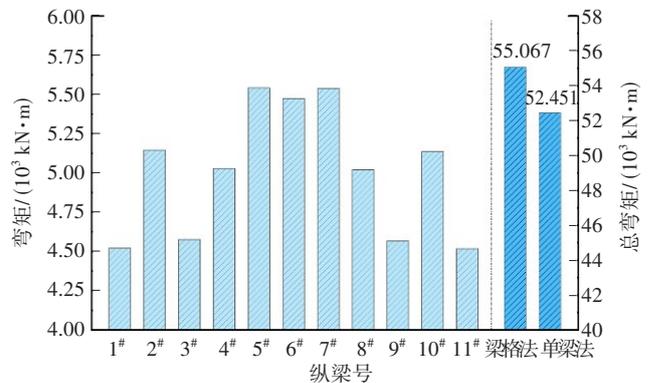
(a) 第一跨



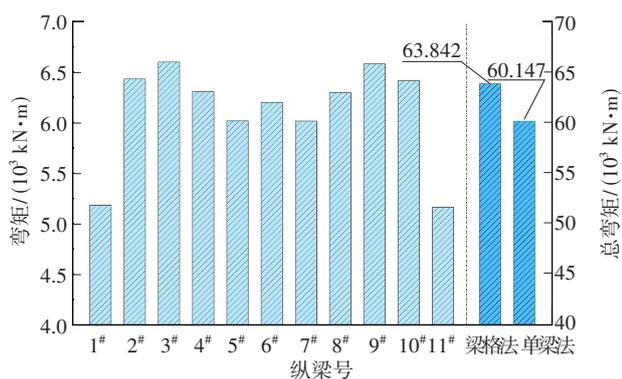
(b) 第二跨



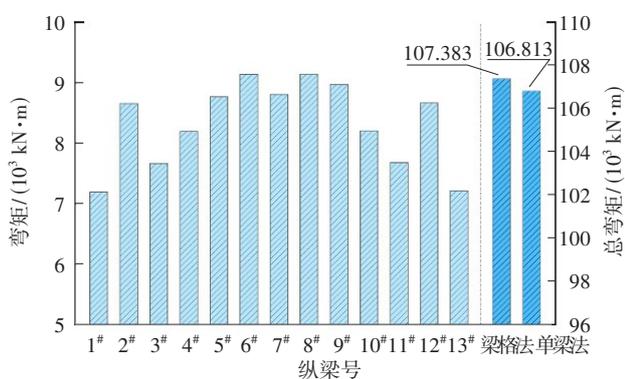
(c) 第三跨



(d) 第四跨



(e) 第五跨



(f) 第六跨

图6 各跨跨中弯矩

Fig. 6 Histogram of mid-span bending moment of each span

从图6可以看出,单梁模型与梁格模型跨中截面总弯矩基本相同,梁格模型的总弯矩略大于单梁模型的,相差在10%以内。各跨主梁弯矩在空间分布上有所差异,大致沿主梁横截面中线保持左右对称。由于匝道汇入影响,第一跨与第二跨主梁设计沿桥梁中线不对称,在偏心荷载作用下,出现了各纵梁承担的弯矩沿中线两侧分布不对称的情况。

第三跨与第五跨采用增加箱室宽度的截面变宽方式(I型变宽),宽跨比由1.19增大至1.61,各纵梁弯矩与其平均值的相对偏差(平均相对偏差)由4.60%降低至2.65%。第四跨与第六跨采用增加箱室数的截面变宽方式(II型变宽),宽跨比由1.40增大至1.82,平均相对偏差由5.50%降低至5.11%。这表明:当主梁变宽方式相同时,随着宽跨比的增加,沿横桥向各纵梁的平均相对偏差逐渐减小(计算相对偏差时,去除最外侧边纵梁弯矩结果,降低误差),主梁的弯矩分布更均匀。

从第三跨到第六跨,宽跨比由1.19增大至1.82,

平均相对偏差分别为4.60%、5.50%、2.65%、5.11%。不难发现,平均相对偏差与变宽方式有关,由I型变宽转为II型变宽后,平均相对偏差明显增大,不随着宽跨比的增加而降低,这表明相对宽跨比,主梁截面的变宽方式对其弯矩的影响更大。由图6(c)~(f)可知,从I型变宽过渡到II型变宽时,由于边纵梁承担的弯矩逐渐向中纵梁转移,从而缓解了横向联系偏小的边纵梁受力情况,主梁的弯矩分布明显发生改变,在工程中选用合适截面变宽形式以改善主梁的弯矩分布。

3.3 挠度对比分析

在自重和二期荷载作用下,梁格模型与单梁模型的整体位移计算结果,如图7所示。两种模型沿纵桥向线型大体一致,梁格模型与单梁模型相比,能进一步体现出主梁横向变形,模拟更真实。为研究大幅变宽连续箱梁桥的宽跨比对挠度的影响,取两种模型在自重和二期荷载作用下各跨跨中沿横桥向竖向挠度计算结果,如图8所示。

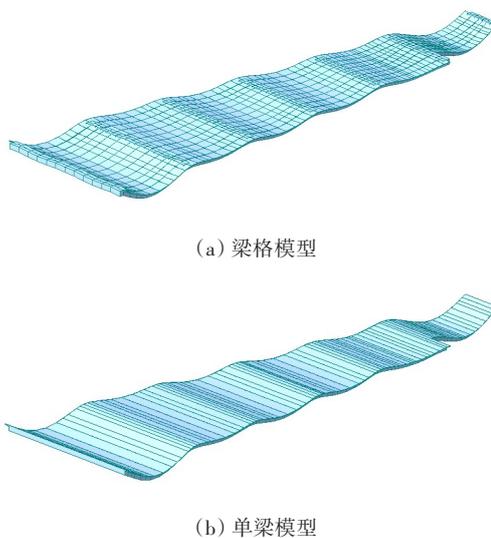


图7 两种模型整体位移计算结果

Fig. 7 Overall displacement calculation results for the two models

从图8(a)~(b)可以看出,梁格模型挠度普遍大于单梁模型的,并且各纵梁挠度值反映出极大的空间差异性。第一跨与第二跨由于匝道汇入影响,在偏心荷载作用下主梁发生刚性扭转,挠度分布表现为一条斜直线。

从图8(c)~(e)可以看出,在第三跨到第五跨范围,其宽跨比由1.19增加至1.61,主梁各跨跨中竖

向挠度均表现为由中纵梁到边纵梁,挠度逐渐增大,结果呈凹曲线且大致关于截面质心对称。

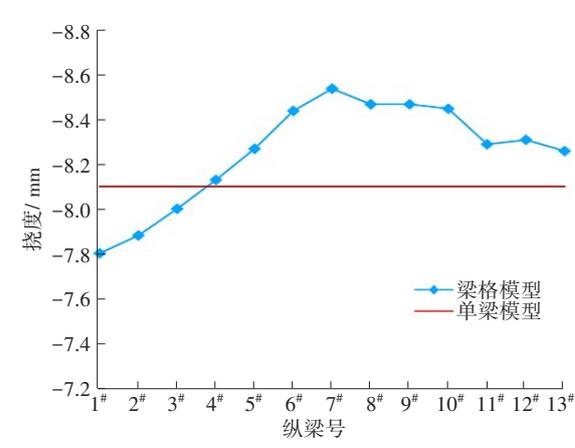
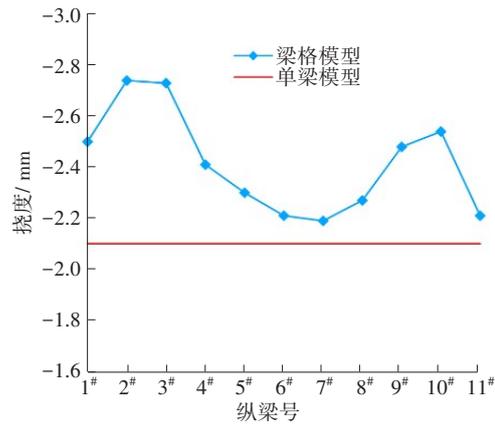
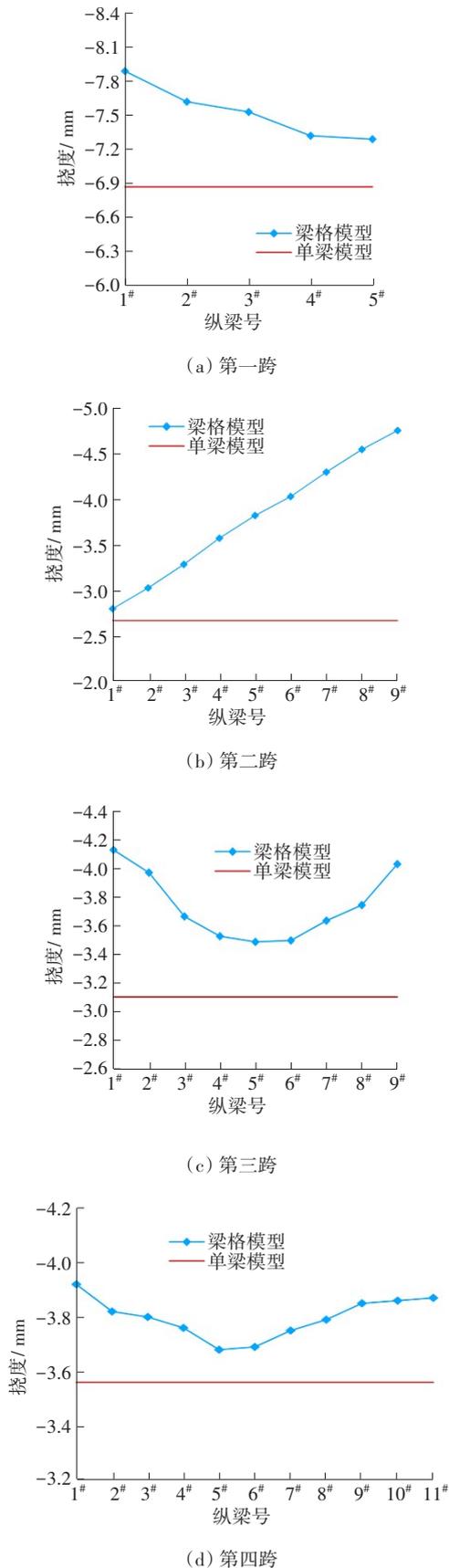


图 8 各跨跨中挠度的变化

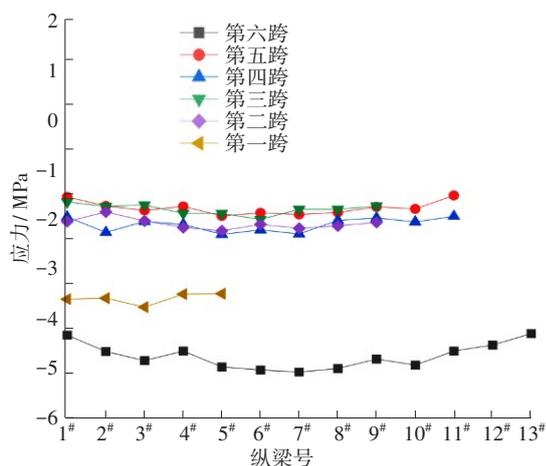
Fig. 8 Line chart of deflection change for each span

主梁各纵梁竖向挠度的偏差大小主要受主梁截面变宽方式的影响。从第三跨到第四跨,跨中横向挠度曲线逐渐趋向平缓,而第五跨横向挠度差值增大,这可能是从第三跨到第四跨(宽跨比由 1.19 变化为 1.40)采用增加箱室数量方式变宽,虽然桥梁整体宽度增加,但单个箱室宽度减少,整体横向刚度有所提升,而从第四跨到第五跨(宽跨比由 1.40 变化为 1.61)采用变箱室宽度形式,单个箱室宽度增加,各箱室抗剪扭性能降低,进而导致各纵梁竖向挠度不均匀加剧。由第五跨到第六跨挠度,内力分布由边纵梁向中纵梁转移,主梁发生较为明显的扭转变形,箱室数量增加导致边纵梁抗扭性能增加,使得其挠度未表现出沿斜直线分布的情况。

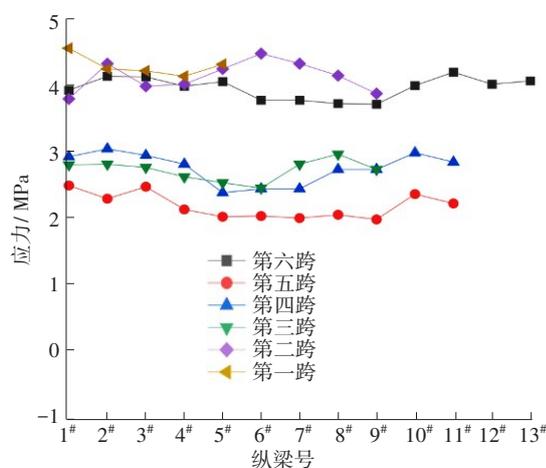
3.4 应力对比分析

图 9 为梁格模型在荷载工况恒载(自重和二期荷载)作用下各纵梁跨中上下缘应力结果。

从图9可以看出,主梁上缘应力分布沿横桥向表现为由内向外逐渐减小,下缘应力的表现则相反。其原因可能是边纵梁的横向联系效应不及中纵梁的,当荷载作用于翼缘板时,会在边纵梁处额外产生翘曲正应力与变宽度桥梁弯扭效应的耦合影响,进而导致箱梁上下缘应力结果产生差异。



(a) 上缘应力



(b) 下缘应力

图9 各跨跨中上、下缘应力曲线

Fig. 9 Stress polyline diagram of the upper and lower edges of each span

表1为宽跨比与主梁上、下缘各纵梁承担应力的相对平均偏差。偏差值越大,主梁应力分布越不均匀。增长倍率的计算方法为第二跨到第六跨的宽跨比、相对平均偏差除以第一跨的宽跨比、相对平均偏差。由表1可知,从第一跨到第五跨,上、下缘应力相对平均偏差随宽跨比的增加而增加,且增

长倍率总体相差在5%以内,可认为二者存在线性关系,梁体应力分布空间效应明显。

表1 梁格模型应力结果偏差

Table 1 Deviation of stress results in beam grid model

序号	宽跨比	上缘应力 相对平均 偏差/ %	下缘应力 相对平均 偏差/ %	宽跨比增 长倍率	上缘应 力增长 倍率	下缘应 力增长 倍率
第一跨	0.58	2.09	2.64			
第二跨	1.02	3.87	4.60	1.76	1.85	1.74
第三跨	1.19	4.47	4.53	2.05	2.14	1.72
第四跨	1.40	5.56	6.79	2.41	2.66	2.57
第五跨	1.61	5.64	7.48	2.78	2.70	2.83
第六跨	1.82	4.49	3.44	3.14	2.15	1.30

4 结论

本研究以湖南省长益高速公路互通匝道变宽预应力混凝土连续梁桥为工程背景,分别建立梁格模型与单梁模型以分析宽跨比对大变幅变宽桥梁弯矩、挠度、应力的影响,得到结论:

1) 在大幅变宽预应力混凝土连续梁桥梁格建模分析中,可扩大虚拟横梁的剪切刚度以等效为理论剪切刚度,从而降低与理论值的偏差。

2) 随着宽跨比的增加,各纵梁承担的弯矩逐渐趋于均匀。宽跨比由0.58变化至1.82,各纵梁跨中弯矩相对平均偏差由9.94%逐渐减小到5.11%。

3) 各纵梁承担的应力的空间效应随宽跨比的增加更为明显。当宽跨比由0.58变化到1.61时,各纵梁承担的上、下缘应力相对平均偏差分别由2.09%、2.64%增长到5.64%、7.48%。

4) 主梁截面的变宽方式,相对宽跨比而言,对其弯矩与挠度的影响更大。与增加箱室宽度变宽的主梁相比,增加箱室数量的变宽主梁,其弯矩与挠度沿横桥向分布更加均匀。工程中,选用合适主梁截面变宽方式,可以改善大幅变宽度桥梁的力学性能。

本研究仅考虑在自重与二期恒载作用下,大幅变宽连续梁桥的宽跨比对其力学特性的影响。在汽车荷载、预应力、温度荷载等荷载工况下,设计参数的改变对结构特性及结构细部构造的影响有待进一步研究。

参考文献(References):

- [1] SUN J, HU S W, YANG J. The layout and design of the urban irregular bridge [J]. *Destech Transactions on Materials Science and Engineering*, 2017: 36-42. DOI: 10.12783/dtmse/icimm2016/6223.
- [2] RAMOS Ó R, SCHANACK F, ORTEGA G, et al. Unusual structural effects in a variable-depth box girder bridge: the pujayo viaduct [J]. *Engineering Structures*, 2011, 33 (2) : 615-620. DOI: 10.1016/j.engstruct.2010.11.020.
- [3] TU B, FANG Z, DONG Y, et al. Time-variant reliability analysis of widened deteriorating prestressed concrete bridges considering shrinkage and creep [J]. *Engineering Structures*, 2017, 153: 1-16. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.09.060.
- [4] SHI X F, LI X X, RUAN X, et al. Analysis of structural behaviour in widened concrete box girder bridges [J]. *Structural Engineering International*, 2008, 18(4): 351-355. DOI: 10.2749/101686608786455117.
- [5] 高扬. 连续变宽箱形桥梁计算精度研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2015, 33(3): 345-348. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1402.2015.03.006.
- GAO Yang. The accuracy of calculation in continuous widened box girder bridge [J]. *Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition)*, 2015, 33 (3) : 345-348. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1402.2015.03.006.
- [6] 勾凤山, 胡朝辉. 基于梁格法的某斜交变宽连续箱梁桥荷载试验分析[J]. 铁道勘察, 2011, 37(5): 90-92, 95. DOI: 10.19630/j.cnki.tdkc.2011.05.027.
- GOU Fengshan, HU Zhaohui. Loading test and analysis of a skew variable-width continuous box girder bridge based on grillage method [J]. *Railway Investigation and Surveying*, 2011, 37(5) : 90-92, 95. DOI: 10.19630/j.cnki.tdkc.2011.05.027.
- [7] 杨成龙. 分叉式异形混凝土连续箱梁桥结构空间静力学行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- YANG Chenglong. Study on the spatial static mechanics behavior of bifurcate concrete continuous box girder bridge [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [8] 马旭涛, 缪星, 邱文军. 基于剪力-柔性梁格法的分岔式变宽箱梁分析[J]. 黑龙江交通科技, 2021, 44(1): 101-103. DOI: 10.16402/j.cnki.issn1008-3383.2021.01.047.
- MA Xutao, MIAO Xing, QIU Wenjun. Analysis of space effect of widened box-girder bridge based on beam grid method [J]. *Communications Science and Technology Heilongjiang*, 2021, 44(1): 101-103. DOI: 10.16402/j.cnki.issn1008-3383.2021.01.047.
- [9] 何嘉, 李睿, 周亦唐, 等. 异形箱梁桥受力特点分析[J]. 昆明理工大学学报(理工版), 2010, 35(4): 44-50. DOI: 10.3969/j.issn.1007-855x.2010.04.010.
- HE Jia, LI Rui, ZHOU Yitang, et al. Analysis of mechanical characteristics of irregular box girder bridge [J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology (Science and Technology)*, 2010, 35(4) : 44-50. DOI: 10.3969/j.issn.1007-855x.2010.04.010.
- [10] 陈博. 异形混凝土箱梁桥静力性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2007.
- CHEN Bo. Static performance study on irregular concrete box girder bridge [D]. Xi'an: Chang'an University, 2007.
- [11] 韩小宇. 异形变宽箱梁桥基于梁格法若干问题研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- HAN Xiaoyu. Study on the grillage analogy method in irregular box girder bridge [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [12] Jiao C, Zhang Y, Hao S. The advantages of the analysis of curved box beam using the grillage method [M]. *Challenges and Advances in Sustainable Transportation Systems*. 2014: 507-514.
- [13] PANDEY A K, NAGARAJAN P. Analysis of Slab Culvert Bridges using Conventional Method and Grillage Method [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 936(1): 012013. DOI: 10.1088/1757-899x/936/1/012013.
- [14] HAMBLY E C. Bridge deck behaviour [M]. 2nd ed. New York: Chapman and Hall, 1991.
- [15] XU Y F. Application of grillage method in analysis of ramp bridges with box-girder [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2010, 44/45/46/47: 3086-3091. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amm.44-47.3086.
- [16] THÉORET P, MASSICOTTE B, CONCIATORI D. Analysis and design of straight and skewed slab bridges [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2012, 17(2) : 289-301. DOI: 10.1061/(asce)be.1943-5592.0000249.

(责任编辑: 欧兆虎; 校对: 罗容; 英文编辑: 杜明瑞)