

DOI: 10.7672/sgjs2023160007

装配式贝雷梁精细化数值模拟与受力分析*

赵秋,蔡威,陈鹏,林雍新
(福州大学土木工程学院,福建 福州 350108)

[摘要] 为对装配式贝雷梁进行精细化模拟与分析,基于贝雷销轴的精细化接触模拟方法,建立贝雷梁实体有限元模型,验证线性状态下数值模拟方法的可行性。通过不同侧向支撑间距下的稳定分析,研究结构的受力性能。结果表明:销轴结构具有极大的安全储备;线性状态下贝雷梁的有限元模拟分析结果与试验值较贴合,表明提出的贝雷梁精细化数值模拟方法是可行的;非线性时贝雷梁的侧向支撑间距对结构的失稳模式起决定性作用。

[关键词] 装配式;贝雷梁;销轴接触;数值模拟;受力性能;非线性分析

[中图分类号] U441;TU731

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2023)16-0007-09

Refined Numerical Simulation and Stress Analysis of Prefabricated Bailey Beam

ZHAO Qiu, CAI Wei, CHEN Peng, LIN Yongxin

(School of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract: In order to carry out fine simulation and analysis of prefabricated Bailey beam, based on the fine contact simulation method of Bailey pin, a solid finite element model of Bailey beam is established, and the feasibility of numerical simulation method under linear state is verified. Through the stability analysis under different lateral support spacing, the mechanical performance of the structure is researched. The results show that the pin structure has great safety reserve. The results of finite element simulation of Bailey beam in linear state are in good agreement with the experimental data, which indicates that the refined numerical simulation method of Bailey beam is feasible. Considering the nonlinearity, the lateral support spacing of Bailey beam plays a decisive role in the instability mode of the structure.

Keywords: prefabricated; Bailey beam; pin shaft contact; simulation; stress performance; nonlinear analysis

0 引言

随着我国桥梁工程的发展,装配式贝雷梁被广泛应用于桥梁建设中。相较于其他支架,装配式贝雷梁具有结构传力路径明确、跨越障碍能力强、样式灵活多变,可与其他支架搭配使用等优点^[1-3]。然而贝雷梁的稳定问题较突出,是桥梁施工风险的主要来源^[4]。

针对贝雷梁的安全性问题,国内外已有大量学者通过理论分析、模型试验及数值模拟手段对其展开研究。符强等^[5]以漳卫新河大桥槽形贝雷梁支

架为工程背景,基于有限元分析原理,采用 ANSYS 探究贝雷梁的受力机理,并优化设计,有效改善贝雷梁支架的受力。彭容新等^[6]以成都某超宽桥现浇贝雷支架为研究对象,利用 ANSYS 有限元软件分别对其进行弹性屈曲与非线性分析。结果表明:该贝雷梁破坏主要为跨中支座处贝雷片的受压破坏及边跨贝雷片的局部失稳破坏。韩鹏飞等^[7]以福州环岛路现浇箱梁支架为工程背景,采用有限元软件 MIDAS Civil 对主梁现浇中贝雷梁支架建立空间有限元模型,计算分析其稳定性。杨泉勇^[8]利用有限元软件 MIDAS Civil 研究钢管立柱+贝雷梁的支架体系,对主要的贝雷梁及钢管立柱强度、稳定性、抗倾覆稳定性及地基承载力等力学性能进行验算分析。

目前,研究贝雷梁常使用《装配式公路钢桥多

* 国家自然科学基金面上项目(51478120);福建省自然科学基金面上项目(2019J01232)

[作者简介] 赵秋,教授,博士生导师, E-mail: zhaociu@fzu.edu.cn

[通信作者] 蔡威,硕士研究生, E-mail: 871404379@qq.com

[收稿日期] 2023-05-27

用途使用手册》^[9](以下简称《手册》)中的计算方法,利用有限元软件对其进行简单的整体线性分析,但未对贝雷梁整体、局部的非线性阶段进行系统的精细化研究,且针对贝雷梁的实体有限元模型也缺少一套标准的建模方法。针对上述问题,本文基于已验证的贝雷销轴有限元模型,建立带有销轴结构的贝雷梁实体模型,对贝雷梁进行精细化受力分析。研究成果可为今后贝雷式支架结构的有限元建立与分析提供重要的参考依据。

1 销轴模拟方法分析

贝雷梁的主梁桁架由贝雷片通过销轴连接而成,单个贝雷片由上、下弦杆,竖杆及斜杆焊接而成,上、下弦杆端部有阴阳接头,接头上有连接销孔^[8]。贝雷梁单元间完全依靠销轴传力,其受力状态以多面剪切和孔壁集中挤压为主,外力作用时,由于销轴与单双耳板间存在间隙,内部应力状态往往更复杂。因此贝雷销轴的接触分析尤为重要。

为明确销轴连接结构的受力机理并优化其结构设计,国内外学者基于销轴连接的荷载作用机理、应力分布和设计方法展开研究并积累了一定成果^[10-11]。颜东煌等^[12]以佛山东平大桥销轴连接结构的接触为背景,引入 Hertz 接触理论和接触刚度矩阵,通过有限元法分析了不同因素影响下销轴接触应力大小及分布情况,并认为摩擦系数对计算结果的影响不明显,而材料本构及拉力大小为主要影响因素。Strozzi 等^[13]采用有限元法和边界元法,进行光弹试验,研究销轴连接结构在斜荷载作用下的最大弹性等效力,最后提出考虑荷载倾斜角度、插销与孔径比的等效荷载公式。张欣等^[14]采用 ANSYS 实体单元及接触面单元建立了洞庭湖大桥销轴连接节点受力的精细化有限元模型,得到销孔接触面的接触应力及吊点耳板销孔局部承压应力分布情况。朱平^[15]采用 ABAQUS 建立了钢柱柱脚轴承节点的数值模型,分析其接触受力,得到轴承节点的破坏机理和各部件的破坏形态。曾勇全^[16]提出了销轴与耳板的多种公式计算方法,利用 ANSYS 验证了公式计算的适用性,并通过销轴与耳板构件的试验研究,验证了接触有限元模型和公式计算的合理性。

1.1 销轴有限元模型

为精确模拟装配式贝雷梁的受力与变形行为,需建立销轴节点的有限元模型并验证其正确性。根据文献^[16]中的销轴几何尺寸(见图 1)建立带有单耳板、双耳板的销轴节点几何有限元模型,其中单耳板厚度 $a = 34\text{mm}$,两侧双耳板厚度 $b = 20\text{mm}$,耳板宽度 $c = 100\text{mm}$,销轴直径 $r = 50\text{mm}$ 。在 Revit

中建立几何模型导入 workbench 中,简化边缘的倒角细节并对模型。

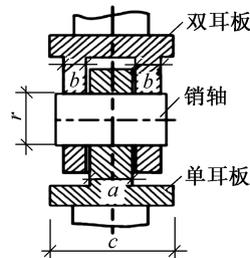


图 1 销轴几何尺寸

Fig.1 Geometrical dimension of pin shaft

该节点销轴材料采用 40CrMo,耳板采用 45 号钢,假设均为理想弹性体,泊松比为 0.29,弹性模量为 $2.06 \times 10^5 \text{MPa}$ 。边界条件为双耳板底部采用固定约束,单耳板上部施加垂直向上面荷载,共 800kN。为使接触分析顺利进行,根据凸凹面接触时,应将凸面设置为 contact surface,凹面设置为 target surface 的原则,选取耳板为 target surface,销轴为 contact surface(见图 2)。接触算法设置为增强拉格朗日法,接触类型为有摩擦接触,摩擦系数为 0.1。

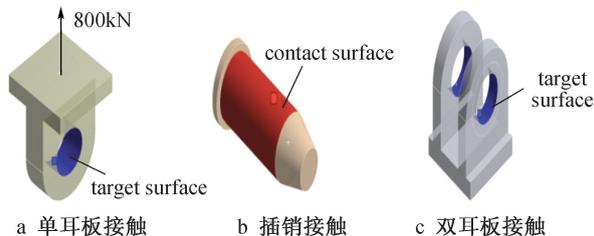


图 2 接触面的选择

Fig.2 Selection of contact surface

使用有限元软件中默认的 C3D20 单元对销轴节点模型进行网格划分,接触处采用较细网格,其他不关键处可采用较粗的网格,所以接触处单元尺寸为 3mm,其他为 5mm。网格模型如图 3 所示。

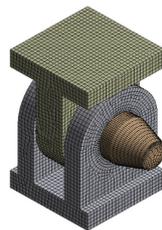


图 3 网格模型

Fig.3 Mesh model

1.2 接触模拟

两个独立的接触物体在受压状态下发生碰撞并互切,同时在构件局部产生应力与应变的现象称为接触,如图 4 所示。接触物体表面具有不相互穿

透、能传递法向压力和摩擦力,但不传递法向拉力的特点^[15-16]。故贝雷销轴连接中销轴和阴阳接头的荷载传递属于接触问题的范畴。

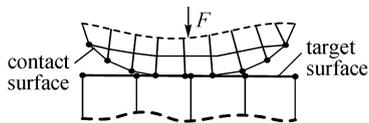


图4 接触示意

Fig.4 Contact diagram

销轴接触问题的经典解析算法为 Hertz 接触理论。但随着有限元方法的广泛应用,越来越多的销轴问题研究是在有限元模型的基础上开展的,研究思路主要分为简化计算和接触分析法^[17-18]。简化计算是简化接触关系,借助有限元分析软件进行合理简化;接触分析法在有限元法中常采用实体单元及接触面单元建立销轴连接节点区域局部有限元模型^[19],精细模拟销轴连接节点的受力。故本文以接触分析法为主对销轴进行有限元精细化分析。

但在有限元程序中,允许发生较小的穿透。为准确反应接触的物理特性,穿透量应尽可能小。这就需有较大的接触刚度,但又可能导致计算发散,所以合适的接触刚度,不仅要考虑计算成本,更应兼顾穿透量的大小。在软件中通过接触刚度因子来控制接触刚度。目前,针对接触刚度因子的选值,多采用试算法。从最小值开始计算,稳步增加,当计算结果无明显变化时,该值为理想的接触刚度。最大位移-接触刚度曲线如图 5a 所示,迭代次数-刚度曲线如图 5b 所示。

由图 5 可知,随着接触刚度因子的增大,模型最大位移趋于稳定。当接触刚度因子为 0.5~0.6 时,结构最大位移变化很小,但求解的迭代次数不断增大,计算时间和计算成本急剧增加。在确保求解精度的同时,应考虑求解代价,所以本文取接触刚度因子为 0.6。

穿透量是由最大允许穿透误差因子 (FTOLN) 决定的。穿透量的真实值为接触单元厚度 × FTOLN。当设置完 FTOLN 的值后,程序将不断迭代直至穿透值小于允许的最大范围。根据接触的物理特性,FTOLN 值应尽可能小。FTOLN 值对销轴最大等效应力的影响如表 1 所示。

表 1 FTOLN 对销轴最大等效应力值的影响

Table 1 The influence of FTOLN on the maximum equivalent stress of pin shaft

FTOLN	0.01	0.05	0.1	0.2	0.5	0.8	0.9
销轴最大应力/MPa	676	676	677	678	681	683	683

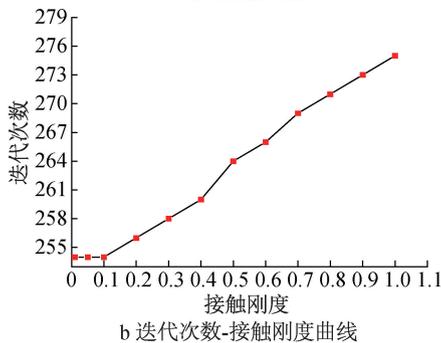
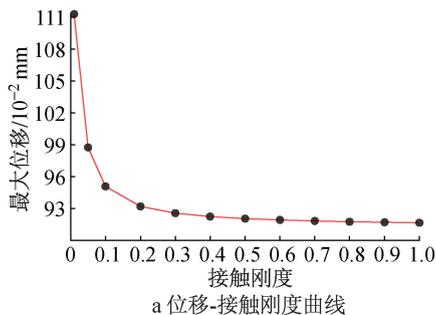


图 5 接触刚度对有限元分析的影响

Fig.5 Influence of contact stiffness on finite element analysis

由表 1 可知,采用不同的 FTOLN 值,销轴的最大等效应力值变化很小,所以 FTOLN 值对结构受力影响很小。

1.3 试验验证

有限元计算结果如图 6 所示。由图 6 可知,应力集中主要位于耳板与销轴接触处,局部应力偏大。

文献[14]中的测点布置如图 7a,7b 所示,测点直径为 71.5mm,故本文在双耳板上设置直径为 71.5mm 的路径 (见图 7c),并拾取该路径上的等效应力。根据文献[16]中提供的测点应力值,同时提取有限元模型路径上的应力进行对比分析,结果如图 8 和表 2 所示。

表 2 有限元与试验误差

Table 2 Finite element and test error

测点	1	2	3	4	5	6	7	8
误差/%	6.1	7.0	1.0	7.6	6.8	4.3	6.7	5.5
测点	9	10	11	12	13	14	15	16
误差/%	1.1	0.4	1.1	6.1	1.7	5.5	3.4	4.5
测点	17	18	19	20	21	22	23	24
误差/%	9.2	1.9	8.3	6.0	9.0	0.3	3.1	1.7

由图 8 和表 2 可知,本文采用的数值计算方法,与文献[16]的试验结果基本吻合,各测点有限元相对于试验的误差均小于 10%。因此,可判定该有限元模型与实际情况相符,该接触问题的建模方法是可取的。

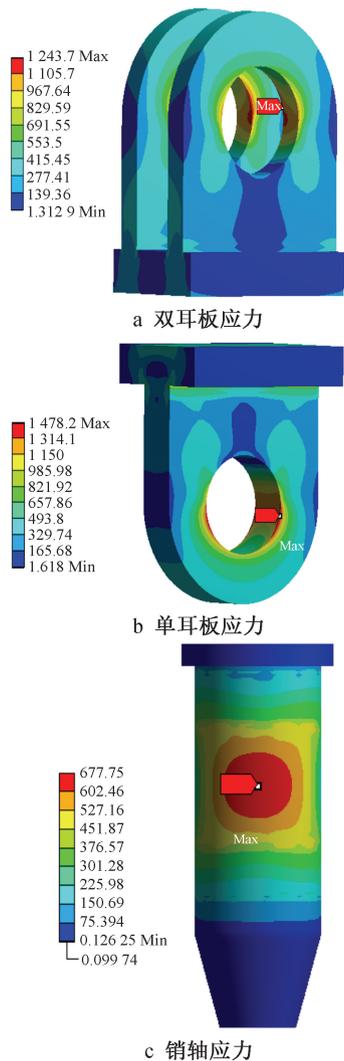


图 6 有限元计算结果(单位:MPa)

Fig.6 Finite element calculation results(unit:MPa)

2 贝雷梁销轴局部接触分析

2.1 线性分析

建立贝雷梁局部销轴有限元实体模型,对贝雷销轴展开精细化分析。贝雷片整体模型如图 9a 所示,根据贝雷片的连接方式,需建立与型钢焊接在一起的阴头模型(见图 9b)、贝雷插销模型(见图 9c)和阳头模型(见图 9d)。模型尺寸如表 3 所示。

表 3 贝雷片尺寸

Table 3 Bailey piece size

构件	构件轮廓尺寸/mm
插销	50×200
阳头端柱	168×185×1 706
阴头端柱	281×185×1 706

在实际贝雷销轴结构中,存在保险销以限制插销的位移,但由于保险销对贝雷销轴受力影响很小,因此对贝雷销轴进行有限元模拟时可对销轴节点进行简化,即认为不存在保险销。贝雷销轴的三

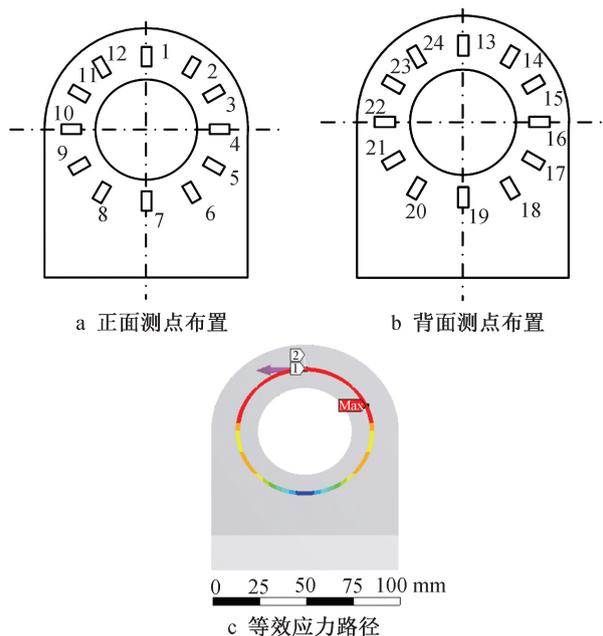


图 7 测点布置

Fig.7 Measurement point layout

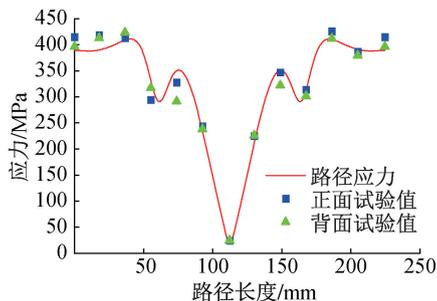


图 8 有限元与试验对比

Fig.8 Comparison between finite element and test

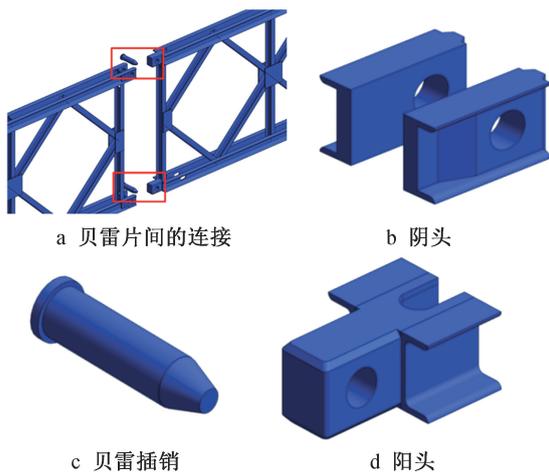


图 9 贝雷销轴节点

Fig.9 Bailey pin node

维实体模型如图 10 所示。贝雷销轴材料为 30CrMnSi,阴阳接头材料为 16Mn 钢,假设材料为理

想弹塑性,以双折线简化模型模拟本构关系,如图 11 所示。本文选取双折线强化弹塑性公式作为钢材的本构形式:

$$\sigma = \begin{cases} E_s \varepsilon_s & (\varepsilon_s \leq \varepsilon_y) \\ f_y + 0.01E_s(\varepsilon_s - \varepsilon_y) & (\varepsilon_s \geq \varepsilon_y) \end{cases} \quad (1)$$

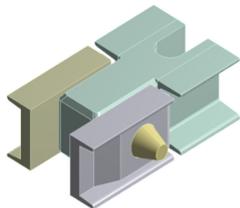


图 10 贝雷销轴实体模型

Fig.10 Bailey pin solid model

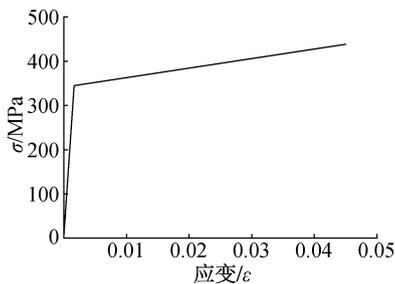


图 11 本构关系

Fig.11 Constitutive relation

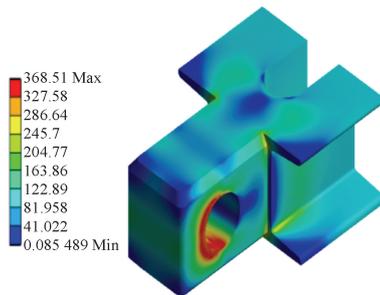
分别考虑轴拉和轴压 2 种工况,建立 2 组有限元模型。对贝雷销轴一端弦杆进行固定面约束,在另一端弦杆施加面荷载。逐步增大荷载,直至加载到弦杆的容许承载力(560kN)。由于篇幅限制,本文仅展示弦杆标准受拉荷载作用下的贝雷销轴 Mises 应力云图,如图 12 所示。

由图 12 可知,在轴力作用下,插销分别与阴头和阳头发生接触,且接触处应力明显大于其他区域。在弦杆容许轴力作用下,阴阳接头与弦杆轴力方向成 45° 处的孔壁区域已屈服,发生塑性变形,阴阳接头的其他区域应力较小,应力分布较均匀。销轴最大应力位于销轴的跨中,受拉时值为 532MPa,受压时值为 407MPa,仍小于销轴材料 30CrMnSi 的屈服强度(835MPa),表明销轴具有较高的安全性能。

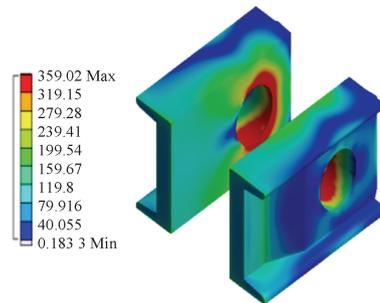
2.2 非线性分析

为进一步明确销轴的极限承载力,分别对受压和受拉状态下的贝雷销轴结构进行非线性分析。标准受拉、受压荷载作用下弦杆应力-结构最大位移曲线如图 13 所示。

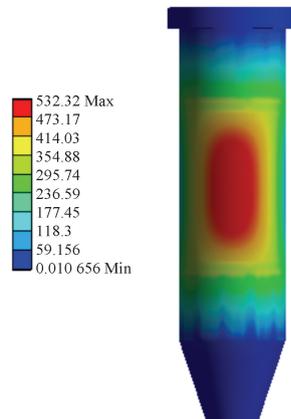
由图 13 可知,轴向受拉、受压时在弦杆轴力分别达到 940.4,1 044.3kN 前贝雷销轴结构处于线弹



a 阳头应力



b 阴头应力



c 插销应力

图 12 贝雷销轴 Mises 应力云图(单位:MPa)

Fig.12 Mises stress cloud diagram of Bailey pin(unit:MPa)

性状态,此时销轴结构的位移分别为 0.80,0.77mm。当弦杆轴力分别达到 1 564.6,1 779.9kN 时,结构达到最大极限承载力。当结构达到受拉、受压极限状态时,变形已十分明显,结构位移主要由插销的弯曲变形引起。由于《手册》中弦杆的容许轴力为 560kN,小于销轴结构进入塑性时的轴力,说明销轴结构具有极大的安全储备。

3 贝雷梁整体实体模型受力分析

目前关于贝雷结构的计算^[20-21],多将贝雷梁等效为具有相同截面特性的实腹梁结构,这种计算方法忽略了贝雷梁的局部效应,给结构的安全性带来隐患。为精确模拟贝雷梁的实际受力,建立带有销轴结构的贝雷梁有限元模型进行精细化模拟与受力分析。

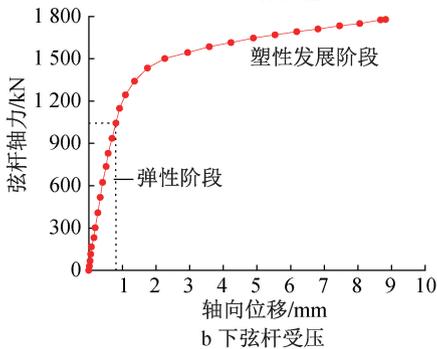
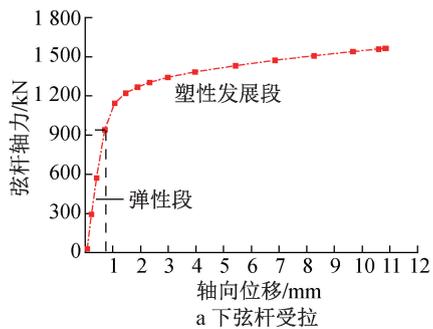


图 13 下弦杆应力-位移曲线(单位:MPa)

Fig.13 Stress-displacement curve of lower chord(unit:MPa)

3.1 实体有限元模型

根据贝雷梁的设计图纸在 Revit 中建立一榀跨径为 15m 的贝雷梁几何模型,导入 workbench 中进行几何前处理,采用软件默认的 Solid186 单元进行网格划分,为保证计算精度,采用较小的网格尺寸进行网格划分,并在贝雷销轴处加密,如图 14 所示。

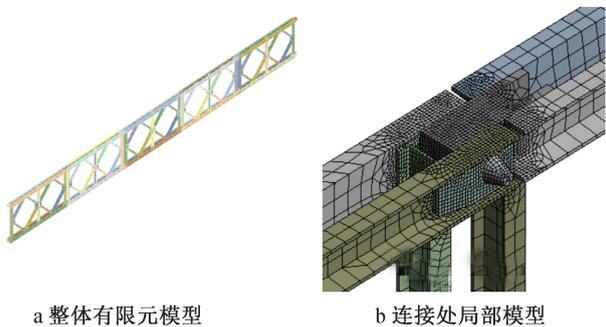


图 14 贝雷梁有限元模型

Fig.14 The finite element model of Bailey beam

针对贝雷片通过销轴连接的特点,常通过释放节点约束模拟铰接,这与贝雷销轴连接的实际受力存在一定偏差。本节在前文贝雷销轴接触分析的研究基础上,建立带有销轴结构的贝雷单梁有限元模型。根据实际受力情况,贝雷销轴节点采用面-面摩擦接触模拟,由于摩擦力的存在,销轴可传递少量弯矩。在有限元模拟中,由于贝雷梁桁架杆与竖杆、斜杆间的连接方式为焊接,因此采用“绑定”接

触对其进行模拟。模型中各部件的相互作用关系如图 15 所示。

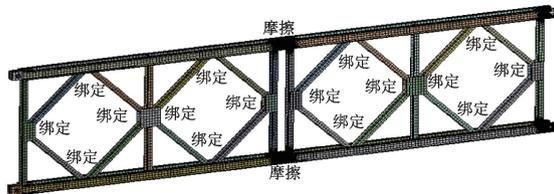


图 15 有限元模型接触关系

Fig.15 Contact relationship of finite element model

模型的边界条件为简支约束,约束布置于两端竖杆下部的垫板上。贝雷梁的理想简支边界条件为:限制垫片 1 底面 x, y, z 方向的平动自由度,释放 x 轴的转动自由度;约束垫片 2 底面 x, z 方向的平动自由度,释放 y 轴平动自由度和 x 轴的转动自由度,如图 16 所示。荷载以面荷载形式作用在弦杆与竖杆、斜杆的相交面上,方向竖直向下,各荷载数值相等,如图 17 所示。

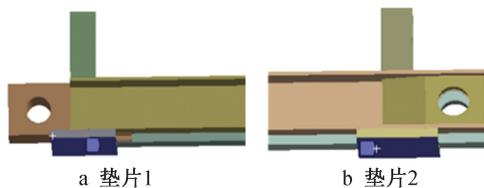


图 16 理想边界条件的设置

Fig.16 Setting of ideal boundary conditions

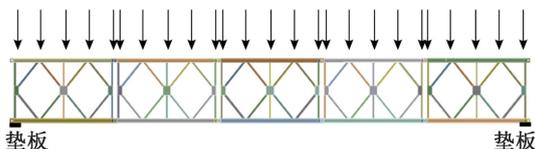


图 17 垫板位置及加载位置

Fig.17 Position of backing plate and loading position

3.2 模型验证

为验证模型的正确性,首先应进行线性阶段分析,并与贝雷梁试验进行对比。

针对此贝雷梁模型,以《手册》中桁架连接间隙角的试验结果为基础。该试验采用荷载控制加载的方式,在整个加载过程中以荷载作为控制量,在贝雷梁中间单元两端柱处,分 5 级施加单向向上的荷载 $P=300\text{kN}$ 。在各单销连接处及支座处,共对称布置 6 个位移测点(见图 18)。同时为校核荷载 P 的准确性,增设应变测量,用于计算杆件内力及结构的线性位移。测点布置在中间无剪力段上、下弦杆翼缘上,取计算内力平均值,以消除弦杆平面可

能存在的偏心受力。

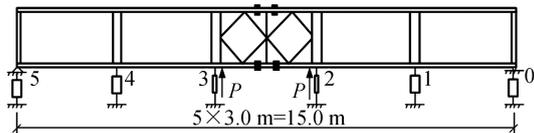


图 18 加载点与位移测点布置

Fig.18 Loading point and displacement measuring point layout

荷载 P 作用下的实体模型总位移如图 19 所示,提取实体有限元模型下的弦杆位移,与试验结果进行对比,如图 20 所示,提取图 21 中所示位置的上、下弦杆截面平均应力,如表 4 所示。

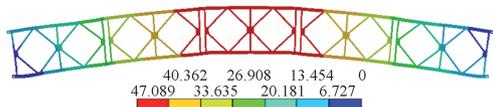


图 19 实体模型整体位移

Fig.19 Integral displacement of solid model

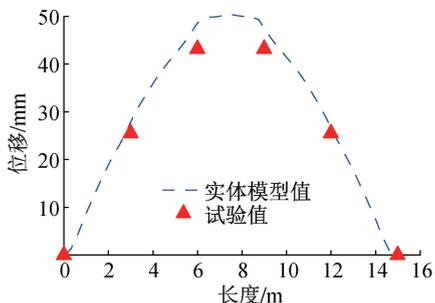


图 20 试验与有限元分析结果对比

Fig.20 Comparison of test and finite element analysis results

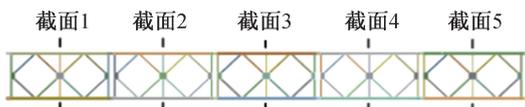


图 21 上、下弦杆截面

Fig.21 Section of upper and lower chords

表 4 上、下弦杆截面平均应力

Table 4 Average stress of upper and lower

	chord section					MPa
杆件	截面 1	截面 2	截面 3	截面 4	截面 5	
上弦杆	47.83	177.50	246.70	176.86	48.44	
下弦杆	56.42	177.11	241.15	177.55	56.31	

综合上述分析可知,在荷载 P 作用下结构仍处于弹性状态。在竖向荷载作用下结构整体上挠,上弦杆向上弯曲,并连带竖杆与斜杆发生倾斜,下弦杆仅发生上挠且无侧向变形。有限元模拟结果与试验值较贴合,结构的最大位移在跨中位置,值为

45.65mm。上、下弦杆最大应力均位于截面 3,分别为 246.70,241.15kN。

3.3 非线性阶段分析

为分析实体模型在非线性阶段的受力性能与破坏模式,取跨径为 15m 的简支贝雷梁,以面外支撑间距为变量,分别取侧向支撑点间距为 0.75, 1.5, 3, 5, 6, 7.5, 15m, 进行非线性稳定承载力分析。不同侧向支撑间距下贝雷梁实体模型荷载-位移曲线如图 22 所示。由于篇幅限制仅展示侧向支撑点间距为 15, 7.5, 6m 时的荷载-位移曲线。不同支撑点间距下的结构破坏模式如图 23 所示。

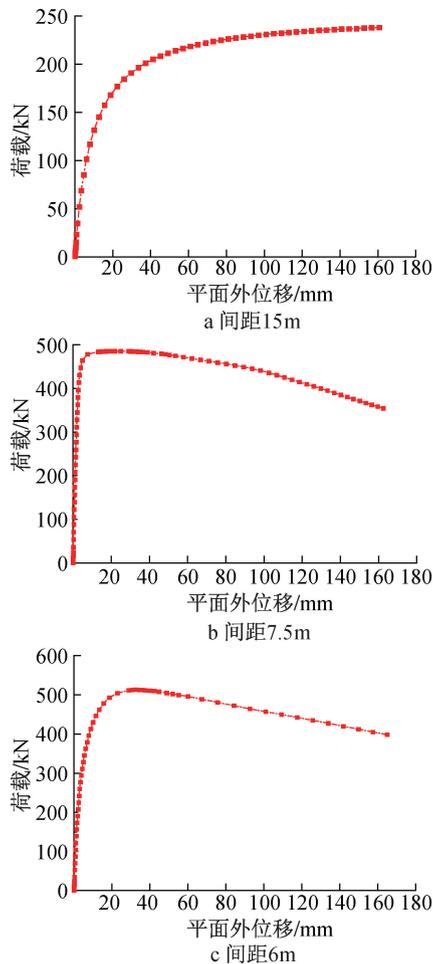


图 22 荷载-位移曲线

Fig.22 Load-displacement curve

由图 22, 23 可知,在考虑非线性时贝雷梁主要破坏模式为整体失稳与上弦杆的局部失稳。当侧向支撑间距为 15, 7.5m 时,贝雷梁发生整体失稳,而侧向支撑间距为 6, 5, 3, 1.5, 0.75m 时,破坏模式为单片贝雷梁上弦杆的局部失稳。不同结构破坏模式特点如表 5 所示。

4 结语

1) 弦杆在标准受拉和受压荷载作用下,贝雷销

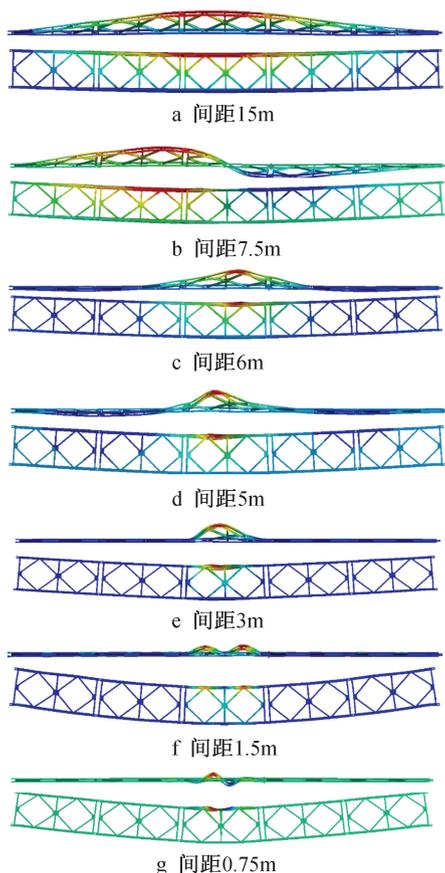


图 23 不同支撑点间距下的结构破坏模式

Fig.23 Structural failure modes under different support point spacings

表 5 不同结构破坏模式特点

Table 5 Characteristics of different structural failure modes

破坏模式	支撑间距/m	破坏特点
整体失稳	15	上弦杆向同侧偏移,下弦杆无侧向变形
	7.5	上弦杆呈一个完整的正弦波
局部失稳	6	跨中单元上弦杆发生局部面外失稳,其余支撑段内上弦杆发生少量的反向面外变形 两侧支撑段内的面外变形较 6m 时进一步减小 仅跨中单元的上弦杆发生面外弯曲破坏,且最大变形段达到屈服,但下弦杆仅发生下挠,无侧向变形
	5,3	跨中上弦杆失稳变形呈 M 形双波,其余杆件无明显变形
	1.5	跨中上弦杆失稳变形呈 M 形双波,其余杆件无明显变形
	0.75	跨中两支撑点间的上弦杆发生面外失稳,呈完整的正弦双波

轴最大应力发生在跨中销轴,下弦杆受拉、受压应力值分别为 532,407MPa,小于销轴材料 30CrMnSi 的屈服强度(835MPa)。表明贝雷销轴结构具有较高的安全性能。

2)当销轴结构轴向受拉或受压时,轴力分别在 940.4,1 044.3kN 时进入塑性阶段,远大于弦杆的

容许轴力 560kN,因此销轴结构比弦杆具有更高的安全储备。

3)采用《手册》中荷载控制加载的方式,在荷载 $P=300\text{kN}$ 作用下的结构仍处于弹性阶段。结构整体上挠,上弦杆向上弯曲并连带竖杆与斜杆发生倾斜,下弦杆仅发生上挠且无侧向变形。结构最大位移出现在跨中位置,值为 45.65mm。上、下弦杆最大应力分别为 246.70,241.15kN。

4)建立的带有销轴结构的贝雷梁实体有限元模型,在线性状态下有限元模拟分析结果与《手册》中的试验值较贴合,证明本文提出的贝雷梁精细化数值模拟方法是可行的。

5)贝雷梁侧向支撑间距对结构的破坏模式起决定性作用,贝雷梁侧向间距 $\geq 7.5\text{m}$ 时,结构发生整体失稳,而当侧向支撑间距 $\leq 6\text{m}$ 时,结构发生局部失稳,失稳模式为跨中单元的上弦杆发生面外弯曲破坏,出现明显的局部失稳变形,且弯曲变形最大部分的 Mises 应力达到屈服。

参考文献:

[1] 邓俊晔,裴智慧.现浇筒支梁贝雷架支撑系统优化设计[J].施工技术,2012,41(12):34-38.
DENG J Y, PEI Z H. Optimization design of Bailey support system for cast-in-place simply supported beam [J].Construction technology, 2012,41(12):34-38.

[2] 屈如意,张小霞,梁江涛,等.大跨度高空连廊结构施工用贝雷梁平台受力分析与施工工艺[J].施工技术(中英文),2023,52(8):74-78,84.
QU R Y, ZHANG X X, LIANG J T, et al. Force analysis and construction technology of Bailey beam platform for large-span high-altitude corridor structure construction [J].Construction technology, 2023,52(8):74-78,84.

[3] 杨泉勇.现浇箱梁贝雷梁+钢管支撑体系受力及应用分析[J].施工技术(中英文),2022,51(6):50-53,75.
YANG Q Y. Stress and application analysis of bailey beam + steel pipe support system of cast-in-place box girder [J].Construction technology, 2022,51(6):50-53,75.

[4] 赵秋,陈鹏,张骏超,等.钢桥板式加劲肋局部稳定试验与设计方法研究[J].中国公路学报,2022,35(6):49-61.
ZHAO Q, CHEN P, ZHANG J C, et al. Research on local stability test and design method of steel bridge plate stiffener [J].China journal of highway and transport, 2022,35(6):49-61.

[5] 符强,李延强.ANSYS 在贝雷梁施工支架检算及变形量预测中的应用研究[J].铁道建筑,2012,52(6):30-33.
FU Q, LI Y Q. Application of ANSYS in Bailey beam construction support calculation and deformation prediction [J].Railway engineering, 2012,52(6):30-33.

[6] 彭容新,潘伶俐,杨传建,等.超宽桥现浇段贝雷梁柱式支架的非线性分析[J].公路,2018,63(7):126-131.
PENG R X, PAN L H, YANG C J, et al. Nonlinear analysis of bailey beam-column supports in cast-in-place section of super-

- wide bridge [J]. Highway, 2018, 63 (7): 126-131.
- [7] 韩鹏飞,张俊华,廖满平.MIDAS Civil 在福州市环岛路项目现浇箱梁支架中的设计与验算[J].施工技术,2020,49(S1): 1203-1206.
HAN P F, ZHANG J H, LIAO M P. Design and checking calculation of MIDAS Civil in cast-in-place box girder support of Fuzhou Huandao Road Project [J]. Construction technology, 2020,49 (S1): 1203-1206.
- [8] 杨泉勇.现浇箱梁贝雷梁+钢管支撑体系受力及应用分析[J].施工技术,2022,51(6):50-53,75.
YANG Q Y. Stress and application analysis of cast-in-place box girder bailey beam + steel pipe support system [J].Construction technology, 2022,51 (6): 50-53,75.
- [9] 黄绍金,刘陌生.装配式公路钢桥多用途使用手册[M].北京:人民交通出版社,2002.
HUANG S J, LIU M S. Manual for multi-purpose use of assembled highway steel bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 2002.
- [10] 孙林松,王德信,谢能刚.接触问题有限元分析方法综述[J].水利水电科技进展,2001,21(3):18-20,68.
SUN L S, WANG D X, XIE N G. Review of finite element analysis methods for contact problems [J]. Advances in science and technology of water resources, 2001,21 (3): 18-20,68.
- [11] DUERR D.Pinned connection strength and behavior[J].Journal of structural engineering,2006,132(2):182-194.
- [12] 颜东煌,刘雪锋,田仲初,等.销轴连接结构的接触应力分析[J].工程力学,2008,25(1):229-234,240.
YAN D H, LIU X F, TIAN Z C, et al. Contact stress analysis of pin connection structure [J]. Engineering mechanics, 2008, 25(1): 229-234, 240.
- [13] STROZZI A, BALDINI A, NASCIMBENI M. Maximum equivalent stress in a pin-loaded lug subject to inclined loading [J]. The journal of strain analysis for engineering design, 2006, 41 (4): 297-309.
- [14] 张欣,谭皓.洞庭湖大桥销轴节点设计精细化分析[J].公路工程,2013,38(3):148-150,154.
ZHANG X, TAN H. Refined analysis of pin joint design of Dongting Lake Bridge [J].Highway engineering, 2013,38 (3): 148-150,154.
- [15] 朱平.某大剧院关节轴承节点试验研究及有限元分析[J].施工技术,2018,47(11):66-69,87.
ZHU P. Experimental study and finite element analysis of joint bearing joints of a grand theater [J].Construction technology, 2018,47 (11): 66-69,87.
- [16] 曾勇全.履带起重机臂架节点接触静强度分析与试验研究[D].沈阳:东北大学,2010.
ZENG Y Q. Analysis and experimental study on contact static strength of crawler crane jib joints [D].Shenyang: Northeastern University, 2010.
- [17] 罗永赤.钢结构工程中的销铰连接研究综述[J].长江大学学报(自然科学版),2009,6(1):292-295.
LUO Y C. Research on pin-hinge connection in steel structure engineering [J].Journal of Yangtze University(natural science), 2009,6(1): 292-295.
- [18] 朱浩.大型钢结构节点销轴连接接触力分布研究[D].武汉:武汉理工大学,2011.
ZHU H. Study on the contact force distribution of pin connection in large steel structure joints [D].Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011.
- [19] 王琪.基于光弹实验的销轴连接有限元分析方法研究[D].大连:大连理工大学,2013.
WANG Q. Research on the finite element analysis method of pin connection based on photoelastic experiment [D].Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [20] 高昊,苏俊省,杨科,等.桥塔横梁施工支撑体系设计与分析[J].施工技术(中英文),2022,51(16):90-94.
GAO H, SU J S, YANG K, et al. Design and analysis of construction support system of bridge pylon cross-beam [J]. Construction technology, 2022,51(16): 90-94.
- [21] 付文宣,袁灿,张克,等.五峰山长江大桥主塔横梁支架设计与施工关键技术[J].施工技术(中英文),2022,51(6):19-23,35.
FU W X, YUAN C, ZHANG K, et al. Key technology of design and construction of cross-beam supports for main tower of Wufengshan Yangtze River Bridge [J].Construction technology, 2022,51(6): 19-23,35.