

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2024.12.014

# 钢桁梁螺栓滑移与空间扭曲变形映射机理研究

徐路瑶<sup>1</sup>,王昱杰<sup>2</sup>,王志航<sup>2</sup>

(1.国能黄大铁路有限责任公司,山东 东营 257091;2.北京交通大学,北京市 100044)

**摘要:**对一座扭曲变形的 80 m 简支栓焊下承式钢桁梁桥进行了三维激光扫描精细测量和建模,并进行数值模拟,分析了节点螺栓预紧力变化对杆端抗弯刚度的影响、节点螺栓滑移与杆端抗弯性能映射关系,提出了用折减等效杆端抗弯刚度模拟螺栓滑移的简化模拟方法。当螺栓预紧力下降时,杆端抗弯刚度下降,且随着螺栓预紧力下降程度增大,杆端抗弯刚度下降速率变快。通过分析钢桁梁桥横向变形规律,在 EE0~EE4、EE5~EE10 和 A7~A9 处螺栓预紧力降低情况下,钢桁梁桥整体横向变形趋势与实际测量的横向变形趋势相同,且变形量相近。

**关键词:**钢桁梁桥;空间扭曲变形;三维激光扫描;简化分析方法;映射机理

**中图分类号:**U448.36;U441 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-7716(2024)12-0065-05

## 0 引言

钢桁梁桥具有施工便捷、跨越能力强、经济、美观大方、环保等优点,广泛用于铁路桥梁。既有重载铁路钢桁梁桥受初始加工缺陷,以及列车荷载和环境因素共同作用,容易出现杆件疲劳开裂、线梁偏心、螺栓滑移、脱落等病害。随着螺栓脱落及开裂等病害的发展,桁架桥受动荷载影响易出现不可自行恢复的空间变形,改变了桁架桥的空间变形性能及承载能力,影响桥梁运行安全。对于出现过大大空间变形的桁架桥梁,应及时进行变形监测及受力性能评估。

对于桁架梁桥的受力性能,国内外学者对钢桁梁桥的有限元模型建立、受力性能分析等方面进行了大量研究。Xia 等<sup>[1]</sup>采用有限元分析方法,使用 ANSYS 对钢桁梁桥进行了静力分析,通过施加车辆荷载,模拟钢桁梁桥的运营模式,对桥梁的危险区域进行了识别。Wang 等<sup>[2]</sup>提出了一种轻量化设计优化算法对加劲双层钢梁桥的设计参数进行优化,对钢桁梁桥设计参数的优化具有重要的理论意义。López 等<sup>[3]</sup>基于桥梁失效数据提出了一种分析钢桁梁桥初始损伤及损伤发展过程的方法,实现对钢桁梁桥初始损伤的检测并评估其结构状态。Chen 等<sup>[4]</sup>对关

键构件损失的钢桁架桥提出了一种量化交替荷载路径的分析方法。Zhou 等<sup>[5]</sup>针对钢桁梁桥,采用贝叶斯模型修正方法和有限元模型修正技术,实现了对实际钢桁梁桥损伤状态的有效检测。Costa 等<sup>[6]</sup>对一座百年钢桥的修复与加固过程进行研究,得到通过加强桥面系实现增加桥梁跨中抗弯刚度的加固策略。杨欣等<sup>[7]</sup>对一座连续钢桁梁桥在温度作用下的变形进行了分析,对比了实测和模拟的桥梁支座纵向位移和跨中挠度等,得出温度对桥梁支座纵向位移影响较大,对跨中竖向位移影响较小。综合国内外对钢桁梁桥的研究,针对钢桁梁桥损伤识别、受力性能等方面已形成了一系列方法,但对于存在较大空间扭曲变形的钢桁梁桥研究较少。

本文以存在空间扭曲变形的某简支栓焊钢桁梁桥为研究对象,从三个方面对该桁架桥进行了研究,包括桁架梁桥的空间变形测量及有限元仿真、节点螺栓滑移与杆端抗弯性能映射关系、节点螺栓滑移下钢桁梁桥扭曲变形规律分析。本文的研究结果将为该类型的桥梁提供研究依据。

## 1 工程背景

本文以一座下承式简支栓焊钢桁梁桥为研究对象,桥梁全貌如图 1 所示。钢桁梁桥跨度 80 m,采用竖杆三角形桁式结构,各节间长 8 m,桁高 11.5 m,主桁中心距为 8 m,整体结构形式布局如图 2 所示。

收稿日期:2024-07-12

作者简介:徐路瑶(1994—),男,硕士,工程师,主要从事铁路工程施工与管理工作。



图1 钢桁梁桥全貌

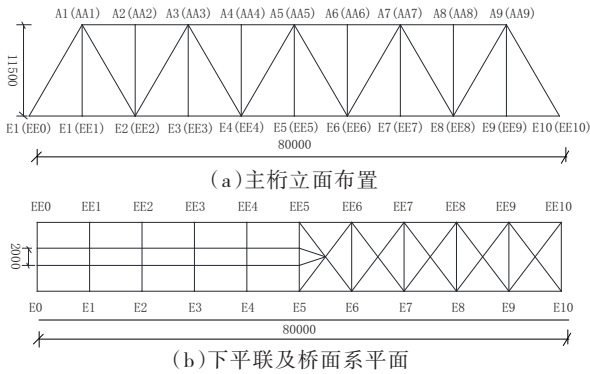


图2 钢桁梁桥整体结构形式(单位:mm)

该桥在常规检测中被发现桥梁纵向存在节点不均匀横向偏移,最大偏移量超过 50 mm。且在多次测量中发现存在偏移量逐渐增大的趋势。

## 2 空间扭曲变形钢桁梁桥有限元模型建立

### 2.1 钢桁梁桥空间扭曲形态精细化测量

利用三维激光扫描技术对钢桁梁桥实际外形进行现场测量,得到各节点和杆件的点云模型。将实测点云模型与参考设计模型进行对齐,得到钢桁梁桥上、下弦杆和节点的横向变形情况,如图3和表1所示。

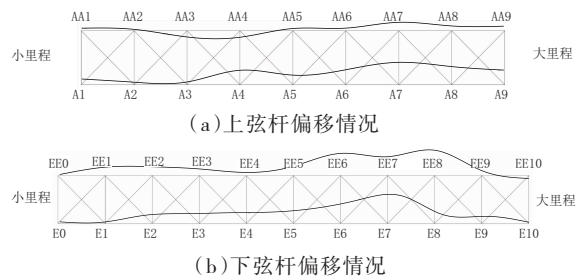


图3 节点横向偏移图示

表1 节点横向偏移量

单位:mm

节点号	偏移量	节点号	偏移量	节点号	偏移量	节点号	偏移量
A1	14.05	AA1	16.73	E0	-0.605	EE0	4.45
A2	10.63	AA2	13.59	E1	13.80	EE1	19.85
A3	11.00	AA3	-6.21	E2	17.13	EE2	20.31
A4	23.42	AA4	-6.93	E3	18.96	EE3	15.69
A5	18.22	AA5	15.80	E4	20.45	EE4	8.62
A6	23.92	AA6	16.82	E5	28.32	EE5	22.01
A7	31.87	AA7	31.99	E6	45.29	EE6	48.15
A8	27.42	AA8	22.71	E7	54.27	EE7	41.23
A9	23.62	AA9	21.97	E8	14.67	EE8	54.58
				E9	11.61	EE9	12.40
				E10	-0.59	EE10	-3.86

结合图3和表1可知,桥梁下弦节点E0(EE0)~E5(EE5)位置横向位移偏移量较小,变化较为均匀;节点E6(EE6)到E10(EE10)位置变形量先增大后减小,变形最严重位置出现在E6(EE6)到E8(EE8)位置,偏移量达到54.27 mm。与桥梁下弦节点相比,上弦节点横向偏移量整体较小。

### 2.2 钢桁梁桥整体及局部节点板有限元模型建立

基于三维激光扫描实测结果建立空间扭曲的钢桁梁桥有限元模型。主梁和轨道均采用Beam188单元建模,节点板采用刚性连接。桥梁和轨道通过Combin14单元进行连接,桥梁模型如图4(a)所示。

为了分析螺栓预紧力大小对杆件抗弯刚度的影

响模式,考虑螺栓实际布置情况建立局部节点板精细化有限元模型,如图4(b)所示。用于分析节点板不同螺栓预紧力损失工况下杆端抗弯刚度的变化规律,进而分析钢桁梁节点螺栓滑移与杆端抗弯性能映射关系。

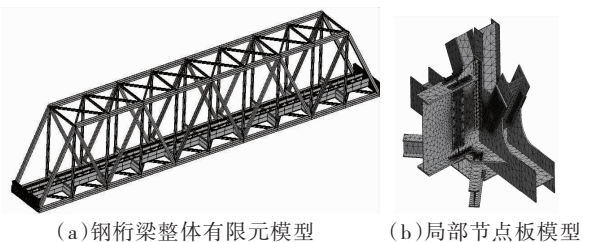


图4 钢桁梁全桥有限元模型

### 3 节点螺栓滑移与杆端抗弯性能映射关系研究

#### 3.1 节点螺栓滑移对杆端抗弯刚度影响研究

工程中螺栓滑移多表现为预紧力损失。在列车荷载作用下,节点部位承受的力更加复杂,与杆件相比,节点更易出现螺栓滑移问题。本文在图4(b)所建立的典型节点模型基础上,通过设置不同的螺栓预紧力损失工况来模拟节点螺栓滑移情况,详见表2。本小节共模拟下弦杆、竖杆、斜腹杆和横梁4种典型杆件在不同预紧力损失下的杆端抗弯刚度变化。

表2 螺栓预紧力工况

工况号	预紧力/kN	备注
1	200	理论值
2	160	
3	120	损伤值
4	100	

在正常运营状态下,桥梁的受力通常处于线性阶段。为简化计算模型,本研究对节点板上的各杆件进行了单独计算,并最终运用线性叠加原理分析了节点螺栓滑移对桥梁受力性能的影响。采用分步加载的方式,对弦杆、竖杆、斜腹杆和横梁分别施加450、150、500、1 200 kN·m的力矩,计算各杆件在不同螺栓预紧力和不同力矩作用下的转角,得到节点板杆件端部的力矩与转角关系<sup>[8]</sup>。加载示意图如图5所示,A和B分别为力矩施加点和响应计算点。

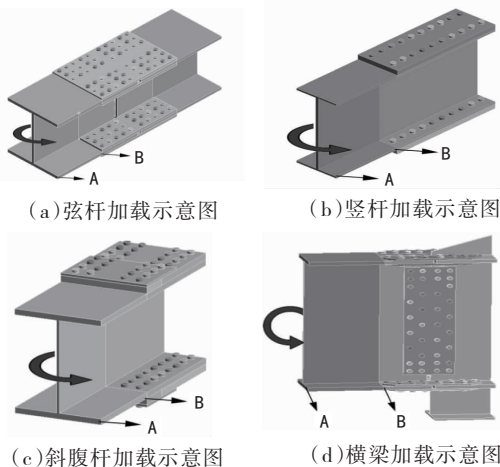


图5 加载示意

各工况的计算结果如图6所示。通过分析不同杆件的结果和各曲线的变化规律可得到以下结论。

(1)随着施加的力矩增大,各类杆件转角也增大,且斜率逐渐增加,表明杆端抗弯刚度与所受力矩之间为非线性关系。

(2)降低螺栓预紧力大小会引起杆端抗弯刚度

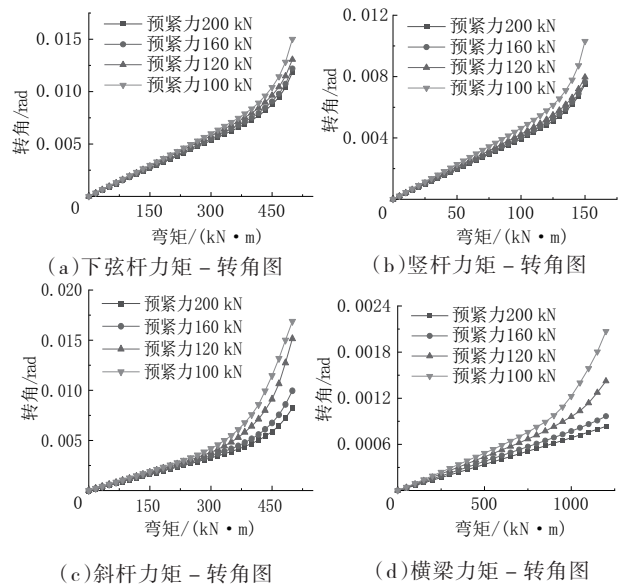


图6 弯矩与转角关系

的下降,表现为力矩-转角图斜率的变化速度增加。

对所有杆件各工况下力矩-转角曲线进行线性拟合,得到不同工况下杆端抗弯刚度。通过分析不同螺栓预紧力下杆端抗弯刚度大小,得到螺栓预紧力下降程度与杆端抗弯刚度下降程度的关系,如图7所示。

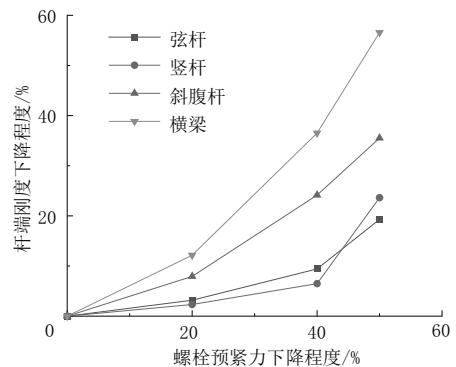


图7 螺栓预紧力与杆端抗弯刚度关系

由图7可知,随着螺栓预紧力损失程度增大,各杆件杆端抗弯刚度下降加快。在螺栓预紧力下降0%到40%范围内,各杆件变化趋势接近线性,此时桥梁处于线性工作阶段。当螺栓预紧力下降超过40%,弦杆和竖杆变化明显增大,此时桥梁已进入非线性工作阶段。相同螺栓预紧力下不同类型杆件杆端抗弯刚度变化不相同,横梁抗弯刚度下降较大,斜杆次之,竖杆、下弦杆抗弯刚度变化均较小。

#### 3.2 螺栓预紧力损失简化模拟方法

在整体模型中将杆端抗弯刚度降低等效为杆端单元刚度降低,以实现局部模型中螺栓预紧力损失的模拟。将与节点板连接的杆件分成3部分,中间部分占全长的8/10,两端各占全长的1/10。对两端单

元进行刚度折减以模拟杆端刚度下降,进而研究螺栓预紧力损失对整体钢桁梁桥扭曲变形的影响。本文首先研究桥梁在线性阶段时不同位置螺栓滑移对应的桥梁相对横向位移趋势,以桥梁变形模拟值和实测值相近似为目标对预紧力损失量进行调整,得到合适的螺栓预紧力损失量。再根据图7确定螺栓滑移区间内竖杆、弦杆、斜腹杆和横梁杆端刚度下降量。

### 4 钢桁梁桥扭曲变形规律分析

#### 4.1 单节点杆端单元刚度降低影响分析

为探究杆端单元降低后钢桁梁桥各节点的横向变形规律,在钢桁梁桥的纵梁上添加 100 kN/m 的均布荷载。由于大里程侧变形较大,因此只降低与 EE5~EE10 和 AA5~AA9 节点相连的杆端单元刚度。将加载后各节点横向位移减去无损伤下的各节点横向位移,得到相对横向位移。位移以 EE0 节点侧方向为正, E0 节点侧方向为负,如图 8 所示。结论如下:

(1)当下弦单个节点杆端单元刚度降低时,下弦节点会偏向损伤节点一侧,且损伤节点处偏移最大,此时上弦节点会整体向损伤一侧横向偏移。随着损伤节点从跨中向支座方向移动,下弦各节点横向偏移量逐渐降低。

(2)当上弦单个节点杆端单元刚度降低时,上弦节点向损伤节点一侧横向偏移,横向偏移量在损伤节点处最小,在两端节点处较大,此时下弦节点受影响较小。随着损伤节点从跨中向支座方向移动,下弦节点受影响较小,上弦节点偏移量在损伤节点处最小,并呈现向两端节点增大的趋势。

#### 4.2 多节点杆端单元刚度降低影响分析

根据三维激光扫描结果,横向变形主要发生在大里程一侧,最大变形发生在 E6~E8 节点处,因此将荷载施加在 E6~E8 节点之间。将钢桁梁桥大里程侧节点共分为 4 组,具体工况设置见表 3。加载后各节点横向位移如图 9 所示,位移以 EE0 节点侧为正, E0 节点侧为负。

由图 9 可知,结合仿真结果和实测结果,得出当 EE0~EE4、EE5~EE10 和 A7~A9 处螺栓滑移时,钢桁梁桥下弦节点会偏向 EE5~EE10 节点一侧,并在 E7 节点处达到最大。上弦节点整体向 EE5~EE10 节点一侧偏移,在 A7 节点处达到最大,此时钢桁梁桥整体横向变形与实际测量的横向变形趋势相同,且变形量相近(见图 10)。图中存在的误差点如

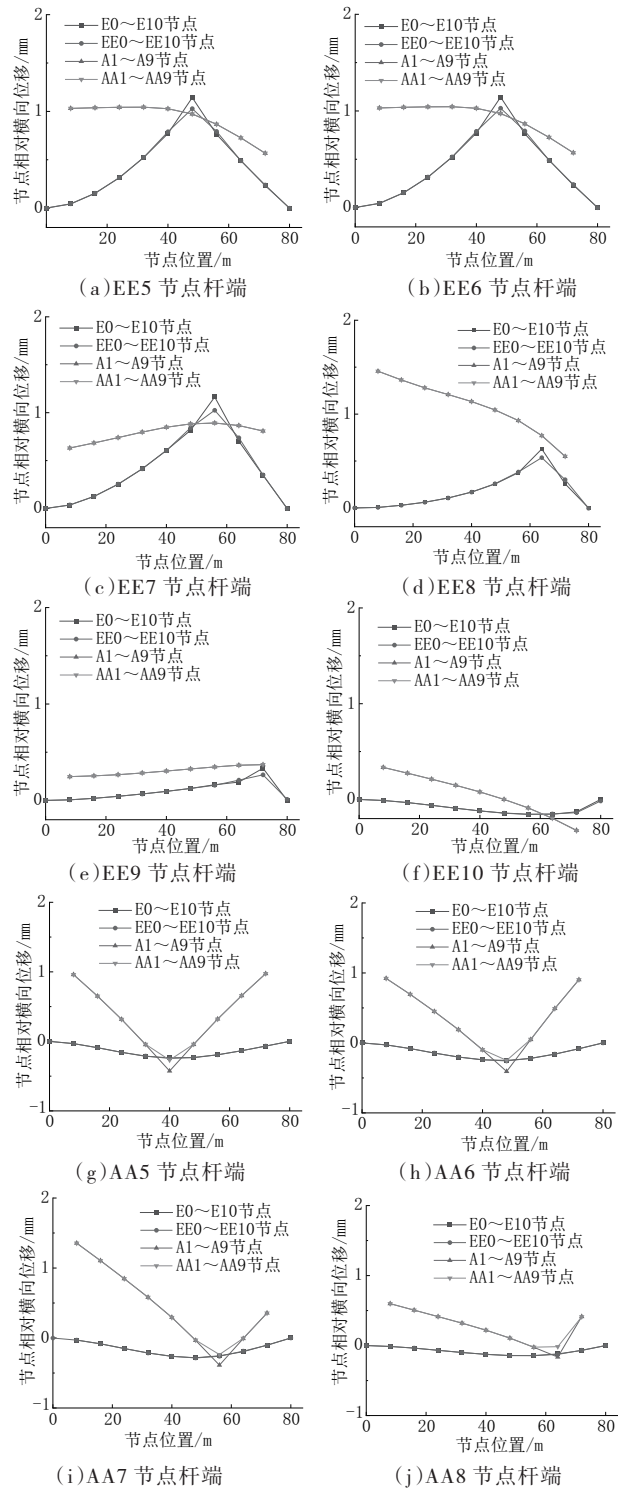


图 8 各节点相对横向位移

表 3 计算工况分组

工况编号	分组	节点范围
1	第 1 组	E5~E10
2	第 2 组	EE5~EE10
3	第 3 组	A5~A9
4	第 4 组	AA5~AA9
5	第 5 组	EE0~EE4
6	第 2 组、第 4 组	
7	第 2 组、第 3 组	

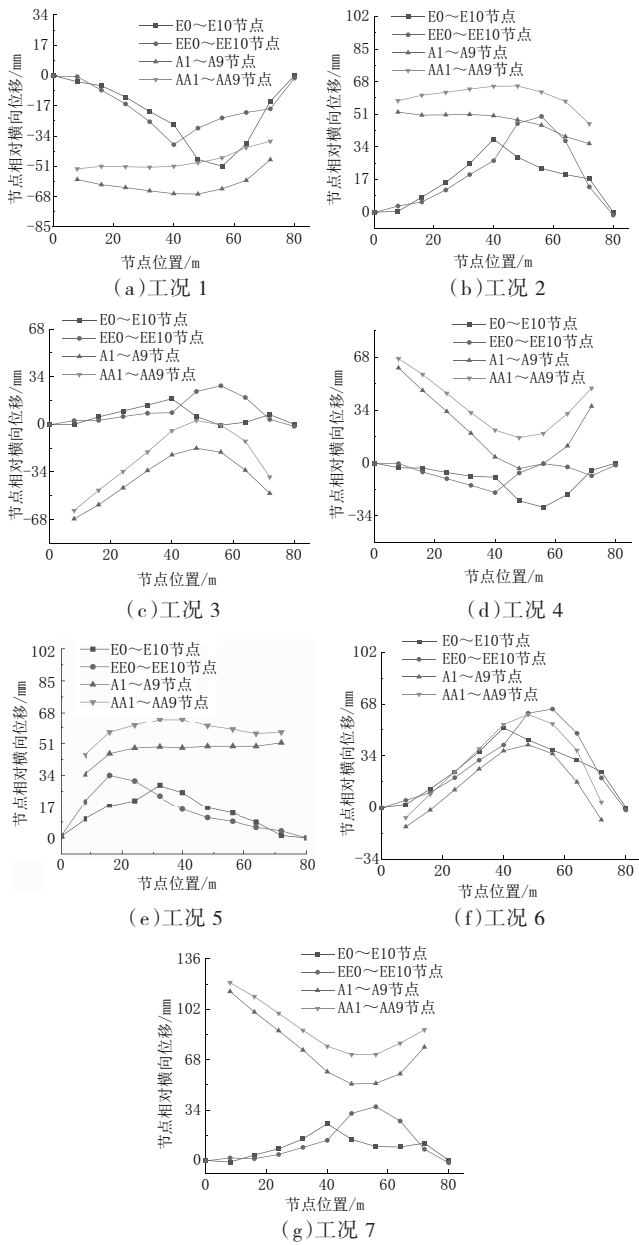


图9 不同工况下钢桁梁桥各节点相对横向位移

E4、E8,模拟变形和实际变形有所出入,可能由激光扫描时产生的误差及桥梁拼接施工引起的系统误差引起,较难通过螺栓滑移进行模拟。

根据本文所提出螺栓预紧力损失简化模拟方法确定的各区段杆端刚度下降量见表4。

### 5 结论

本文首先对钢桁梁桥空间扭曲形态进行了精细化测量并建立有限元模型,分析了螺栓预紧力对杆端抗弯刚度的影响,得到节点螺栓滑移与杆端抗弯性能映射关系,并提出在全桥模型中对螺栓预紧力损失的简化模拟方法,探究了节点螺栓滑移对钢桁梁桥横向变形的映射机理。主要工作和结论如下。

(1)利用三维激光扫描技术对钢桁梁的实际空间

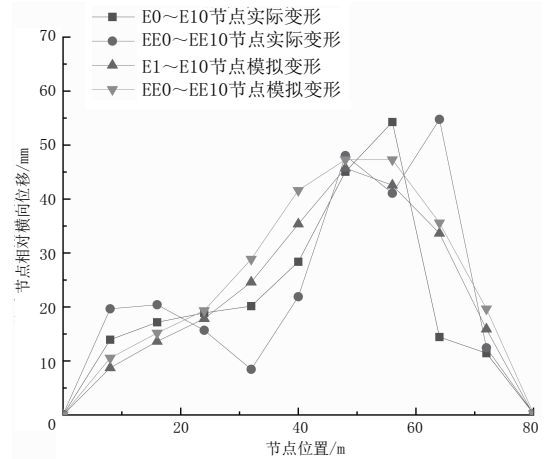


图10 钢桁梁桥下弦节点相对横向位移对比

表4 杆端刚度下降量

节点段	螺栓滑移量 /%	杆件类型	杆端刚度下降量 /%
EE0~EE4	20	竖杆	2.10
		弦杆	3.03
		斜腹杆	8.17
		横梁	12.37
EE5~EE10	30	竖杆	4.43
		弦杆	6.53
		斜腹杆	15.87
A7~A9	25	横梁	24.5
		竖杆	3.50
		弦杆	4.90
A7~A9	25	斜腹杆	12.84
		横梁	19.61

扭曲变形状况进行精确测量,根据测量结果建立空间扭曲变形状态下整体钢桁梁桥模型和局部节点板精细有限元模型,实现对钢桁梁桥变形状态的精确模拟。

(2)随着杆端的力矩增大,力矩-转角斜率逐渐增加,表明杆端抗弯刚度与所受力矩之间为非线性关系。随着节点螺栓预紧力损失程度增加,各类杆件杆端抗弯刚度下降加快,各杆件中横梁受螺栓预紧力影响最大,斜杆次之,下弦杆与竖杆受影响程度均较小。

(3)当EE0~EE4、EE5~EE10和A7~A9处螺栓预紧力下降时,钢桁梁桥整体横向变形结果与实测的横向变形趋势相同,且变形量相近。证明用折减等效杆端抗弯刚度模拟节点螺栓滑移的简化模拟方法对研究由螺栓滑移引起钢桁梁桥空间扭曲变形映射机理可行,对研究钢桁梁桥空间扭曲变形机理具有参考价值。

(下转第77页)

通过总体模型读取,第三体系内力专门建立了一个桥面板及相关钢梁的板单元模型,并通过节点弹性支撑模拟斜拉索对主梁的约束,通过在顶部桥面板单元施加面荷载模拟车轮荷载的作用,读取在不同工况下内力,分别与第一、第二体系叠加,根据叠加后的结果对桥面板进行配筋验算<sup>[4]</sup>。

### 3.2.3 桥塔强度验算

成桥状态下,主边跨拉索水平力相等,顺桥向弯矩为0,横桥向拉索倾斜面对称,弯矩也很小。成桥十年运营过程中,基本组合下桥塔顺桥向弯矩最大位置位于塔底,横桥向弯矩在下塔柱的塔顶与塔底,根据验算,截面配筋能够满足规范要求<sup>[4]</sup>。

拉索锚固在上塔柱钢混组合段上,为了更好的分析主塔钢锚箱受力及钢锚箱与塔壁的关系,建立实体有限元模型进行分析。模型中钢锚箱采用板单元模拟,混凝土塔壁采用实体单元模拟。通过施加标准组合及短期荷载组合下的斜拉索索力,分析主塔钢锚箱及塔壁局部受力情况。

钢锚箱在斜拉索索力作用下,大部分板件应力水平较低,低于100 MPa。斜拉索锚下钢板局部出现应力集中,实际设计中通过增加锚垫板厚度等构造措施予以解决。

## 4 结 语

该文以80 m+110 m不等跨的人字形独塔双索

面景观斜拉桥为例,设计时分别对结构体系、结构形式等进行比选,进而确定最优结构形式;在主梁、桥塔、拉索等关键部位进行研究和探索,并得到以下主要结论:

(1)混凝土主梁比较经济,恒载及地震力会比较大;钢箱梁重量轻,抗扭抗弯刚度大,容易出现疲劳裂纹;组合梁充分发挥了钢和混凝土两种材料的优点,类似造型的景观斜拉桥主梁宜选用钢混组合梁的结构形式,。

(2)上塔柱为拉索锚固区,受力复杂,宜采用钢混组合断面。中间钢塔,主要用于锚固斜拉索及传递斜拉索水平力,混凝土塔壁承受斜拉索传递的竖向力。

(3)非对称桥跨拉索的布置方式,边跨最外侧的拉索间距逐渐变小,其余对称布置,可以有效减少压重范围和压重重量,方便主梁构造设计。

(4)主梁采用全漂浮体系,通过计算分析组合梁钢梁、桥面板、桥塔等受力性能均满足规范要求,达到了预期效果,可为类似景观斜拉桥设计提供借鉴。

### 参考文献:

[1] 邵旭东,程翔云,李立峰.桥梁设计与计算[M].北京:人民交通出版社,2012.

[2] JTG/T3365-01—2020,公路斜拉桥设计规范[S].

[3] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].

[4] JTG 3362—2018,公路钢筋混凝土及预应力混凝土设计规范[S].

\*\*\*\*\*  
(上接第69页)

### 参考文献:

[1] Xia D, Shi L. Finite Element Analysis of Steel Truss Bridge Structure Based on ANSYS [J]. Journal of Engineering Research and Reports, 2023, 25(9):155-165.

[2] Wang L, Xi R, Guo X, et al. The Structural Design and Optimization of Top-Stiffened Double-Layer Steel Truss Bridges Based on the Response Surface Method and Particle Swarm Optimization[J]. Applied Sciences, 2023, 13(19):11033.

[3] López S, Makoond N, Sánchez - Rodríguez A, et al. Initiation and propagation of failures in steel truss bridges[J].ce/papers, 2023, 6(5):377-380.

[4] Chen X, Li H, Agrawal A K, et al. Alternate load paths redundancy

analysis of steel truss bridges[J].Journal of Bridge Engineering, 2022, 27(11):04022106.

[5] Zhou X, Kim C W, Zhang F L, et al. Vibration-based Bayesian model updating of an actual steel truss bridge subjected to incremental damage[J].Engineering Structures, 2022(260):114226.

[6] Costa B J A, Figueiras J A. Rehabilitation and condition assessment of a centenary steel truss bridge[J].Journal of Constructional Steel Research, 2013(89):185-197.

[7] 杨欣,张举兵,李小龙,等.基于监测数据的钢桁梁桥温度变形研究[J].工程力学,2024,41(增刊1):310-316.

[8] 李保龙. 铁路钢桁梁桥螺栓脱落病害对节点转动刚度影响分析[J].城市道桥与防洪,2020(12):87-90.