

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.12.019

悬索桥索夹螺杆复拧分批紧固效应足尺试验研究

周勇军¹, 贾利强^{1,2}, 文德安³, 罗之然¹, 赵煜¹, 穆丰睿¹

(1. 长安大学 公路大型结构安全教育部工程研究中心, 陕西 西安 710064; 2. 广西欣港交通投资有限公司, 广西 南宁 530000; 3. 中交第二公路工程局有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要:为研究悬索桥索夹螺杆复拧时分批紧固效应以提高运营期间螺杆紧固效率, 文章以龙门大桥 SJ5 索夹为背景, 开展分批紧固工艺室内足尺模型试验, 分别研究单拉伸器和双拉伸器作用对螺杆有效紧固力大小和分布的影响规律, 并分析紧固顺序、初始有效紧固力和最终复拧张拉力对螺杆紧固效率的影响。研究表明:从索夹两端向中间对称紧固螺杆时紧固力分布较均匀且损失较小;螺杆初始有效紧固力越大对分批紧固效应影响越小。建议采用两轮次对螺杆进行复拧, 其中第 1 轮次采用 0.9 倍设计值作为最终张拉力可减小分批紧固效应的影响, 使螺杆有效紧固力分布更加均匀;第 2 轮次可适当提高张拉力, 既可减小分批紧固效应的影响又可以获得更大的最终螺杆有效紧固力;若采用 1 轮次张拉可设置 1.25 倍超张拉系数, 若采用 2 轮次张拉可设置 1.15 倍超张拉系数。该研究结果可为实际工程螺杆力分批紧固和检测提供技术支持。

关键词:悬索桥;螺杆;紧固力;分批复拧;紧固顺序;紧固效率

中图分类号:U445

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2025)12-1713-10

Full-scale experimental research on staged re-tightening effect of cable clamp bolts in suspension bridges

ZHOU Yongjun¹, JIA Liqiang^{1,2}, WEN Dean³, LUO Zhiran¹, ZHAO Yu¹, MU Fengrui¹

(1. Engineering Research Center for Large Highway Structure Safety of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Guangxi Xingang Communications Investment Co., Ltd., Nanning 530000, China; 3. CCCC Second Highway Engineering Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to enhance the efficiency of cable clamp bolt staged re-tightening during the operation period of suspension bridge, taking the SJ5 cable clamp of the Longmen Bridge as an example, an indoor full-scale model test was conducted to study the staged re-tightening effect. The research focused on the impact of single and double tensioners on the magnitude and distribution of effective bolt preload. Additionally, an analysis was performed on the effects of tightening sequence, initial effective preload, and final tension force on the efficiency of bolt tightening. The research results indicate that when tightening the bolts symmetrically from two ends toward the center of the clamp, the preload distribution is more uniform with less loss. A larger initial effective preload results in a smaller impact on the staged re-tightening effect. It is recommended to re-tighten the bolts in two rounds. In the first round, 0.9 times the design bolt force is suggested to reduce the staged re-tightening effect and achieve a more uniform distribution of effective bolt preload. Increasing tension force appropriately in the second round can reduce the preload loss and yield a greater effective bolt preload. If only one round of re-tightening is used, the tension force can be set to 1.25 times the design bolt force, and if two round of re-tightening is used, the tension force can be set to 1.15 times the design bolt force. The conclusions can provide technical support for the staged re-tightening and testing of bolt preload in practical engineering applications.

收稿日期:2023-07-17;修回日期:2023-12-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52278738);陕西省“科学家+工程师”资助项目(2025QCY-KXJ-136)和广西科技重点研发计划资助项目(桂科 AB23026125)

作者简介:周勇军(1978—),男,湖北孝感人,博士,长安大学教授,博士生导师,通信作者,E-mail:zyj@chd.edu.cn;

赵煜(1974—),男,陕西西安人,博士,长安大学教授,博士生导师。

Key words: suspension bridge; bolt; preload; staged re-tightening; tightening sequence; tightening efficiency

悬索桥结构中,索夹是主缆与吊索的连接及传力构件。车辆荷载、主缆镀锌钢丝蠕变和螺杆松弛等因素均会导致索夹螺杆紧固力下降。文献[1]通过对关门桥索夹螺杆紧固力的检测发现,其螺杆在大桥运营 1 000 d 的时间里紧固力下降了约 40%;文献[2]通过对解放路 3 号桥索夹的试验研究发现,索夹螺杆在拧紧后的 10 d 内紧固力损失了 8.53%;文献[3]对多座悬索桥索夹螺杆紧固力检测时发现,悬索桥索夹螺杆紧固力损失现象严重,多数桥梁超过 90% 螺杆剩余紧固力低于设计值的 70%。《公路缆索结构体系桥梁养护技术规范》(JTG/T 5122—2021)规定:悬索桥主要构件的定期检查应包括抽检索夹螺杆紧固力,在检测及复拧过程中,应保持紧固力不低于其安装设计值的 70%。受操作空间限制,通常采用分批紧固的方法对索夹螺杆组进行复拧紧固。在紧固过程中由于主缆和索夹的变形,后紧固螺杆会对先紧固螺杆的紧固力产生影响,这种现象称为分批紧固效应,其会影响索夹螺杆有效紧固力的均匀分布。

紧固过程中螺栓的分批紧固效应主要取决于紧固顺序、被连接件厚度、螺栓间距和施加张拉力大小等^[4-5]。目前,国内外研究学者对螺杆分批紧固效应进行了大量研究。文献[6]对索夹螺杆分批紧固工艺进行研究,对不同数量拉伸器紧固过程中螺杆紧固力的重分配进行测量,并优化了紧固方案;文献[7]对漏斗车体螺栓组装配工艺进行研究,结果表明分批紧固效应主要受到先后拧紧的螺栓间的距离影响;文献[8]对索拱结构螺栓紧固顺序进行试验和有限元仿真研究,结果表明,采用从中心向外侧的紧固顺序可以减少螺栓预紧力的损失;文献[9]通过改变紧固顺序和预紧力大小对长板形被连接件螺栓弹性相互作用的影响进行有限元分析,结果表明,沿长度方向对称紧固时结合面接触最为均匀密集;文献[10]对大型数控机床的安装精度进行分析研究,并阐述了地脚螺栓弹性相互作用机制;文献[11]在分析螺栓预紧力预测模型的基础上,提出减少最小变形安装误差和均匀螺栓结合面压力分布的地脚螺栓分步紧固工艺方法;文献[12]对索夹螺杆安装紧固工艺进行研究,发现从两端向中间紧固螺杆可以有效减小螺杆紧固力的损失;文献[13]通过实桥试验研究索夹长度、螺杆数量、紧固工序对串扰效应的影响规律,提出从索夹两端向中间对称紧固优化的紧固顺序。

随着螺杆紧固力增大,主缆内钢丝逐渐密实,主缆空隙率逐渐减小,主缆截面整体性增强,横向刚度增大,且平行钢丝间的挤压作用使得钢丝应力分布不均,此时螺杆紧固力与主缆截面横向刚度呈显著的非线性关系^[14-15]。

由于主缆截面在紧固过程的强非线性特性,目前很少有学者对运营期间的索夹螺杆复拧紧固工艺进行研究,且对紧固顺序的优化还存在一定争议^[8,12-13]。为此,本文以龙门大桥为工程背景,制作室内足尺试验考虑主缆非线性特性以研究螺杆紧固顺序、初始有效紧固力大小和施加张拉力大小等因素对索夹螺杆分批紧固效应的影响规律,预期成果可为实际运营悬索桥索夹螺杆复拧提供技术支持。

1 分批紧固效应理论

螺杆分批紧固效应本质上体现为紧固力作用下应力、应变和位移特征在被连接结构中传递,进而通过被连接结构、螺杆相互作用对各螺杆紧固力产生影响。各螺杆紧固力变化既与施加的张拉力相关,也与螺杆分布、被连接结构材料和尺寸以及紧固工艺等密切相关。

螺杆紧固力状态与各螺杆紧固力变化量间近似存在以下线性关系^[9,16-17]:

$$\mathbf{F}_0 + \mathbf{A}\Delta\mathbf{F} = \mathbf{F}_i \quad (1)$$

其中: \mathbf{F}_0 为每轮加载前螺杆的初始紧固力($n \times 1$), n 为螺杆组中的螺杆数; \mathbf{A} 为弹性相互作用系数矩阵($n \times n$); $\Delta\mathbf{F}$ 为每轮加载螺杆紧固力增量($n \times 1$); \mathbf{F}_i 为每轮加载后螺杆的有效(剩余)紧固力($n \times 1$)。确定弹性相互作用矩阵 \mathbf{A} 是研究螺杆组弹性相关性的关键,以 a_{ij} 表示加载 j 号螺杆的载荷增量与 i 号螺杆载荷变化量之比,即

$$a_{ij} = (f_i - f_{i(j-1)}) / \Delta f_j \quad (2)$$

其中: Δf_j 为拧紧螺杆 j 时,螺杆 j 紧固力的增加量; f_{ij} 为紧固螺杆 j 后,螺杆 i 的有效(剩余)紧固力。

2 足尺模型试验概况

2.1 模型设计

龙门大桥主缆采用 127 根索股,每根索股由 127 根镀锌高强钢丝组成,文献[12]研究表明,主缆截面在受到索夹夹紧后,其截面应力分布呈外圈大、内圈小的特点,可认为主缆的径向变形以及镀锌层蠕变主要集中在外圈的钢丝。由于在室内试验过程中不易对主缆进行锚固,充分考虑试验

成本和试验条件,采用钢管混凝土代替中间部分主缆,外层采用索股包裹,既可节省试验材料又可模拟主缆的非线性特性^[18]。

室内试验主缆断面设计如图 1 所示。钢管采用直径 610 mm、壁厚 10 mm 的 Q235 钢材,混凝土采用 C30 标号,钢管混凝土灌浆结束后养护 28 d 再进行组装。

为保证索夹内主缆空隙率并考虑到索股六边形排列安装的困难,故将外层索股由 36 根改成 40 根,并改为圆周排列,将空隙部分填入镀锌高强钢丝,保证外圈镀锌高强钢丝在预紧状态时空隙率可达到 20%。SJ5 索夹螺杆采用 MJ45 螺杆连接,螺杆设计紧固力为 705 kN。

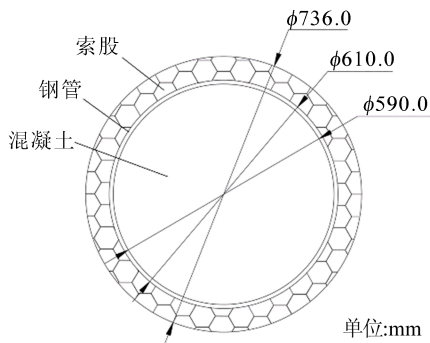
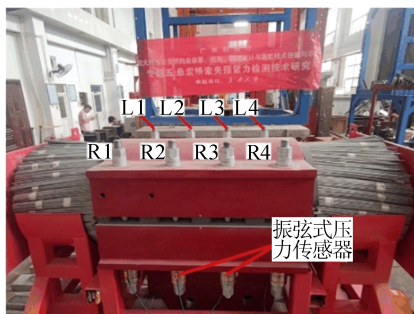
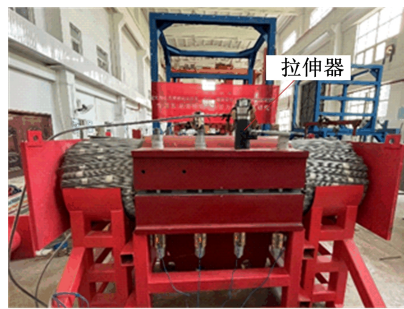


图 1 模型试验主缆断面设计

室内试验及加载装置如图 2 所示。



(a) 室内试验装置



(b) 试验加载装置

图 2 室内试验及加载装置

图 2a 中 L1~L4 和 R1~R4 分别代表索夹左、右侧的第 1~4 排螺杆,每根螺杆下端均安装振弦式压力传感器,并通过 JMZX-3006 综合测试仪读取螺杆紧固力。试验前对压力传感器进行测试标定,保证试验过程中数据的准确性。加载装置采用自研的拉伸器进行紧固力的施加。

2.2 试验工况

悬索桥运营养护阶段,对索夹螺杆进行复拧紧固时,考虑到现场操作空间和设备重量问题,通常采用单拉伸器或双拉伸器进行紧固,因此针对实际情况在试验室内设置了单拉伸器紧固工况和双拉伸器紧固工况。

2.2.1 紧固顺序对螺杆分批紧固效应的影响

为模拟实桥环境中索夹运营多年的情况,对索夹螺杆设置 352.5 kN(0.5 倍设计紧固力)的初始有效紧固力,随后按本文设计的紧固顺序对螺杆进行紧固,完成全部螺杆紧固工作为第 1 轮,随后进行的复拧紧固为第 2 轮。第 1 轮和第 2 轮的紧固力均为 705.0 kN。

螺杆施力装置通过智能液压泵设置的目标张拉力为 705.0 kN(1.0 倍设计紧固力),并通过拉伸器施加给螺杆,随后设置扭矩扳手 50 N·m 的扭矩对拉伸器进行拧紧操作,完成后记录各螺杆螺母下压力传感器读数。工况设计见表 1 所列。

表 1 紧固顺序工况

拉伸器	工况	紧固顺序	备注
单拉伸器	1	L1→L2→L3→L4→R4→R3→R2→R1	单侧环绕
	2	L2→R3→R2→L3→L1→R4→R1→L4	中间向两端
	3	L1→R4→R1→L4→L2→R3→R2→L3	两端向中间
双拉伸器	1	(L1, R4)→(L2, R3)→(L3, R2)→(L4, R1)	双侧顺序
	2	(L2, R3)→(L3, R2)→(L1, R4)→(L4, R1)	中间向两端
	3	(L1, R4)→(L4, R1)→(L2, R3)→(L3, R2)	两端向中间

2.2.2 初始有效紧固力对螺杆分批紧固的影响
运营期间,索夹螺杆紧固力损失可达 40%~

60%^[3],为研究索夹螺杆初始有效紧固力大小对分批紧固效应的影响,设置螺杆初始有效紧固力分别

为 282.0 kN(0.4 倍设计紧固力)、352.5 kN(0.5 倍设计紧固力)和 423.0 kN(0.6 倍设计紧固力),试验工况分别记为工况 4、工况 5、工况 6。拉伸器最终目标张拉力设置为 705.0 kN,随后按照从两端向中间的紧固顺序对索夹螺杆进行紧固。

2.2.3 最终复拧张拉力对螺杆分批紧固的影响

对索夹螺杆进行紧固时,应确定合适的张拉力。张拉力过大会影响螺杆及螺母的安全,特别是对已经通车多年的桥梁;张拉力过小有可能在初期紧固力损失过大,达不到紧固效果。张拉力大小应为螺杆设计紧固力的 0.9~1.1 倍,但不得使索夹抗滑移安全系数低于 3。因此设置拉伸器

目标张拉力分别为 634.5 kN(0.9 倍设计紧固力)、705.0 kN(1.0 倍设计紧固力)和 775.5 kN(1.1 倍设计紧固力),试验工况分别记为工况 7、工况 8、工况 9,螺杆的初始有效紧固力设置为 352.5 kN,紧固顺序从两端向中间。

3 分批紧固效应试验

3.1 紧固顺序对螺杆分批紧固的影响

3.1.1 紧固过程中各螺杆紧固力变化规律

通过室内足尺模型试验,采用单拉伸器进行复拧,得到紧固过程中各螺杆紧固力变化曲线如图 3 所示。

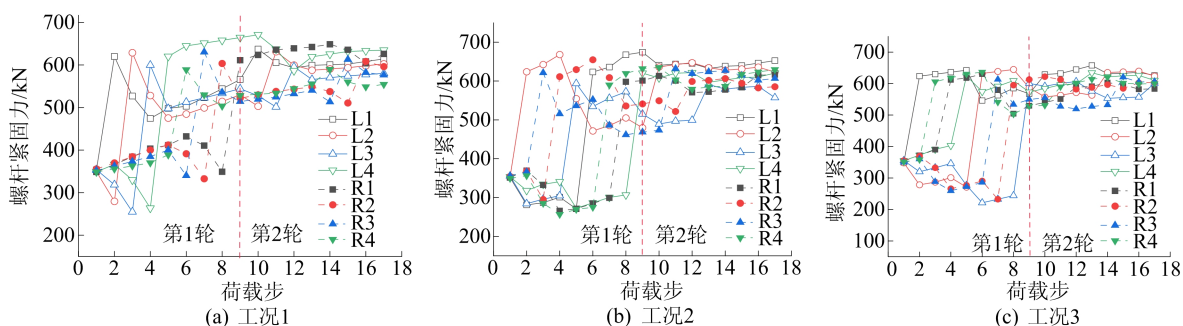


图 3 单拉伸器不同紧固顺序下螺杆紧固力变化曲线

由图 3 可知:第 1 轮紧固时,各螺杆紧固力变化幅度较大,第 1 轮紧固过程中,工况 1~工况 3 的紧固力最大值和最小值相差分别为 403.0、411.4、423.6 kN;而第 2 轮紧固时,紧固力变化幅度大幅减小,第 2 轮紧固过程中,工况 1~工况 3 的紧固力最大值和最小值相差分别为 169.7、173.9、138.3 kN。其原因是在第 1 轮紧固时,主

缆压缩变形量大,分批紧固效应影响大;而第 2 轮紧固时,主缆压缩变形量小,弹性模量显著提高,减小了分批紧固效应的影响。随着紧固轮次的增加,工况 3 分批紧固效应影响逐渐减小且减小幅度最大。

采用双拉伸器进行复拧,得到紧固过程中各螺杆紧固力变化曲线如图 4 所示。

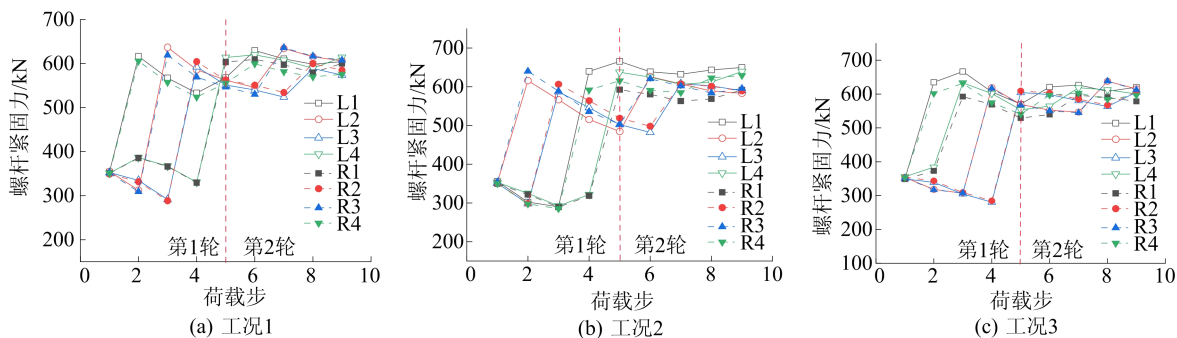


图 4 双拉伸器不同紧固顺序下螺杆紧固力变化曲线

由图 4 可知,螺杆紧固力变化趋势与单拉伸器紧固工况基本相同。第 1 轮紧固,工况 1~工况 3 的紧固力最大值和最小值相差分别为 348.4、379.9、386.0 kN;第 2 轮紧固,工况 1~工况 3 的紧固力最大值和最小值相差分别为 112.0、167.6、

98.7 kN。随着紧固轮次增加,工况 3 分批紧固效应影响逐渐减小且减小幅度最大。

3.1.2 紧固结束时螺杆有效紧固力分布规律

紧固结束时螺杆有效紧固力分布规律如图 5 所示。

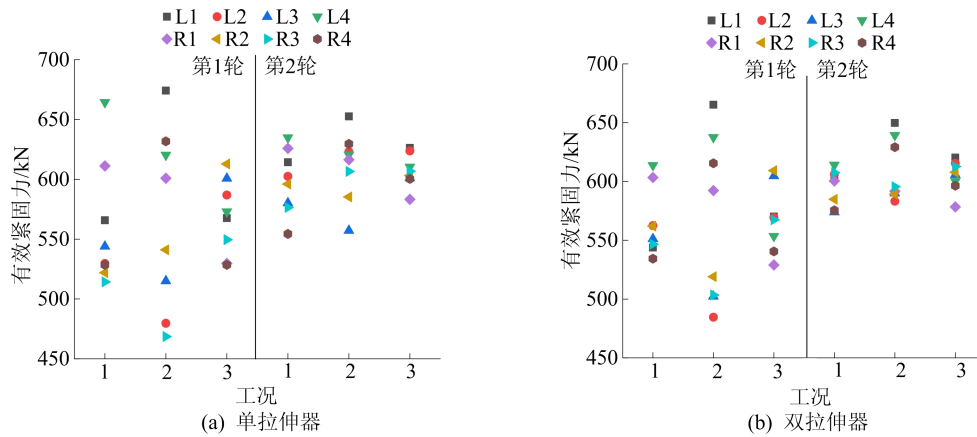


图 5 不同紧固顺序紧固结束时各螺杆有效紧固力分布

由图 5a 可知:采用单拉伸器,第 1 轮紧固结束时,工况 1~工况 3 的有效紧固力最大值和最小值相差分别为 150.1、205.6、84.4 kN;第 2 轮紧固结束时,工况 1~工况 3 的效紧紧固力最大值和最小值相差分别为 80.5、95.4、43.0 kN。由图 5b 可知:采用双拉伸器,第 1 轮紧固结束时,工况 1~工况 3 的有效紧固力最大值和最小值相差分别为 80.3、180.7、79.4 kN;第 2 轮紧固结束时,工况 1~工况 3 的有效紧紧固力最大值和最小值相差分别为 41.9、66.6、40.1 kN。工况 3 在单、双拉伸器紧固工况下紧固结束时有效紧固力相差均最小。

3.1.3 紧固效率分析

为比较不同紧固工艺对分批紧固效应的影响程度,即比较不同紧固工艺在效率上的差异,定义

指标“索夹多根螺杆有效紧固力效率”为某个紧固循环结束时所有螺杆有效紧固力与其总张拉力的比值:

$$\eta = \left(\sum_{i=1}^8 F_i \right) / 8P \quad (3)$$

其中: η 为有效紧固力效率; F_i 为第 i 根螺杆的有效紧固力; P 为拉伸器施加给螺杆的张拉力。

有效紧固力效率高意味着分批紧固效应影响程度较小,反之则意味着分批紧固效应影响程度大。同时引入有效紧固力平均值和标准差,反映螺杆有效紧固力的分布情况。综合考虑有效紧固力效率、有效紧固力平均值和标准差,分析不同紧固工艺对紧固效率的影响。有效紧固力效率、有效紧固力平均值和标准差数据连线的紧固效率雷达图如图 6 所示。

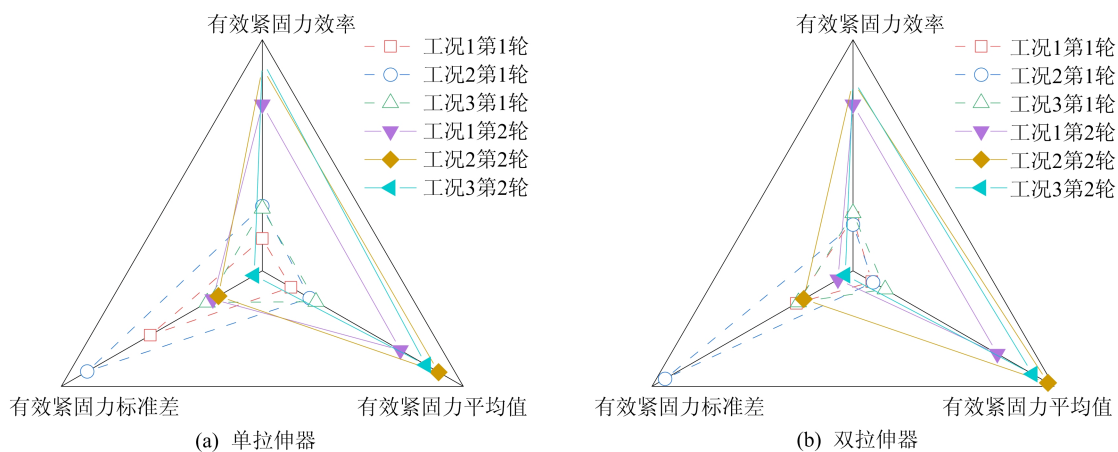


图 6 不同紧固顺序紧固效率雷达图

有效紧固力效率越高,有效紧固力平均值越高,有效紧固力标准差越小,则紧固效果越好且有效紧固力分布均匀性越好。在紧固效率分析雷达图中各工况数据点连线组成的三角形中,随着有

效紧固力标准差角度增大,有效紧固力效率和有效紧固力平均值的连线增长,紧固效率越高且有效紧固力分布均匀性越好。

综合考虑有效紧固力效率、有效紧固力平均值

和标准差 3 个维度表现。从图 6a 可以看出:在第 1 轮中,工况 3 最优,有效紧固力效率为 92.7%,有效紧固力平均值和标准差分别为 568.7、29.2 kN;在第 2 轮中,工况 3 最优,有效紧固力效率为 99.1%,有效紧固力的平均值和标准差分别为 607.0、12.8 kN。

由图 6b 可知:在第 1 轮中,工况 3 最优,有效紧固力效率为 92.5%,有效紧固力平均值和标准

差分别为 568.0、26.3 kN;在第 2 轮中,工况 3 最优,有效紧固力效率为 98.3%,有效紧固力平均值和标准差分别为 604.7、12.3 kN。

3.2 初始有效紧固力对螺杆分批紧固的影响

3.2.1 紧固过程中各螺杆紧固力变化规律

采用单拉伸器时,紧固过程中各螺杆紧固力变化随不同初始有效紧固力变化曲线如图 7 所示。

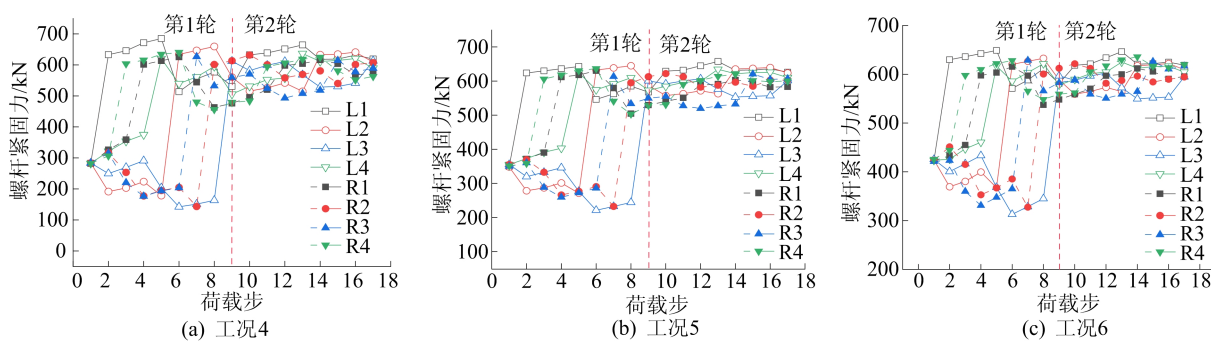


图 7 单拉伸器不同初始有效紧固力下螺杆紧固力变化曲线

从图 7 可以看出:随着初始有效紧固力的增大,紧固过程中各螺杆紧固力变化幅度减小,第 1 轮紧固过程中,工况 4~工况 6 的紧固力最大值和最小值相差分别为 542.3、423.6、335.8 kN;第 2 轮紧固过程中,工况 4~工况 6 的紧固力最大值和最小值相差分别为 180.5、138.3、96.8 kN。

分析原因可知,随着初始有效紧固力的增加,主缆弹性模量增大,导致分批紧固效应影响逐渐减小。

采用双拉伸器时,紧固过程中各螺杆的紧固力随不同初始有效紧固力的变化曲线如图 8 所示。

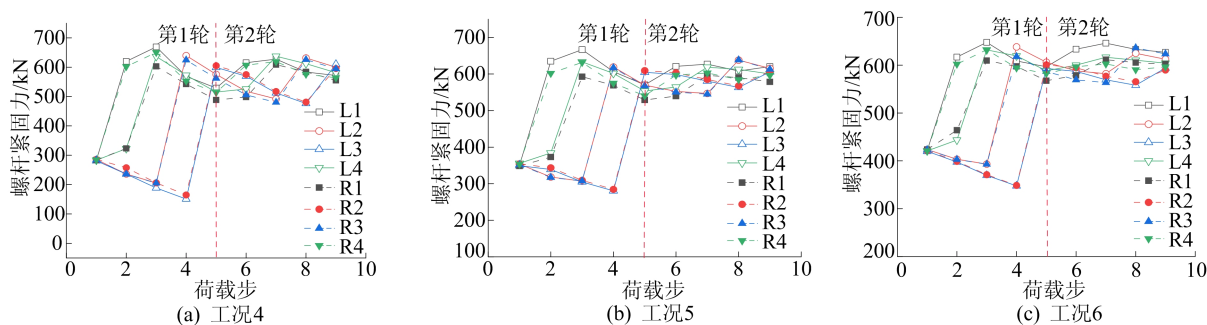


图 8 双拉伸器不同初始有效紧固力下螺杆紧固力变化曲线

由图 8 可知,螺杆紧固力变化趋势与单拉伸器紧固工况基本相同。第 1 轮紧固过程中,工况 4~工况 6 的紧固力最大值和最小值相差分别为 518.2、386.0、300.2 kN;第 2 轮紧固过程中,工况 4~工况 6 的紧固力最大值和最小值相差分别为 161.0、98.7、88.0 kN。随着初始有效紧固力的增加,分批紧固效应影响逐渐减小。

3.2.2 紧固结束时螺杆有效紧固力分布规律

紧固结束时螺杆有效紧固力分布规律如图 9 所示。

由图 9a 可知:第 1 轮紧固结束时,工况 4~工况 6 的有效紧固力最大值和最小值相差分别为 137、84.4、64.2 kN;第 2 轮紧固结束时,工况 4~工况 6 的有效紧固力最大值和最小值相差分别为 56.1、43.0、25.5 kN。

由图 9b 可知:第 1 轮紧固结束时,工况 4~工况 6 的有效紧固力最大值和最小值相差分别为 116.8、79.4、44.7 kN;第 2 轮紧固结束时,工况 4~工况 6 的有效紧固力最大值和最小值相差分别为 55.3、40.1、37.0 kN。在单、双拉伸器紧固工

况下,随着初始有效紧固力的增大紧固结束时有效紧固力相差逐渐减小。

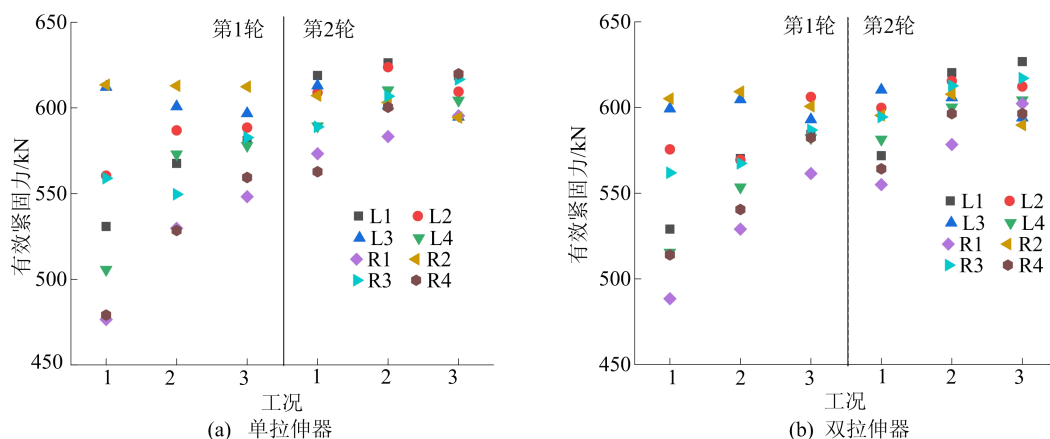


图 9 不同初始有效紧固力下紧固结束时各螺杆有效紧固力分布

3.2.3 紧固效率分析

不同初始有效紧固力下紧固效率雷达图如图 10 所示。

考虑有效紧固力效率、有效紧固力平均值和标准差 3 个维度表现。由图 10a 可知:在第 1 轮中,工况 6 最优,有效紧固力效率为 95.1%,有效紧固力平均值和标准差分别为 580.9、18.9 kN;在第 2 轮中,工况 6 最优,有效紧固力效率为

99.6%,有效紧固力的平均值和标准差分别为 608.8、10.3 kN。由图 10b 可知:在第 1 轮中,工况 6 最优,有效紧固力效率为 95.7%,有效紧固力平均值和标准差分别为 587.2、12.7 kN;在第 2 轮中,工况 6 最优,有效紧固力效率为 98.8%,有效紧固力的平均值和标准差分别为 605.4、11.8 kN。说明在复拧螺杆时,初始紧固力大可减小分批紧固损失效应。

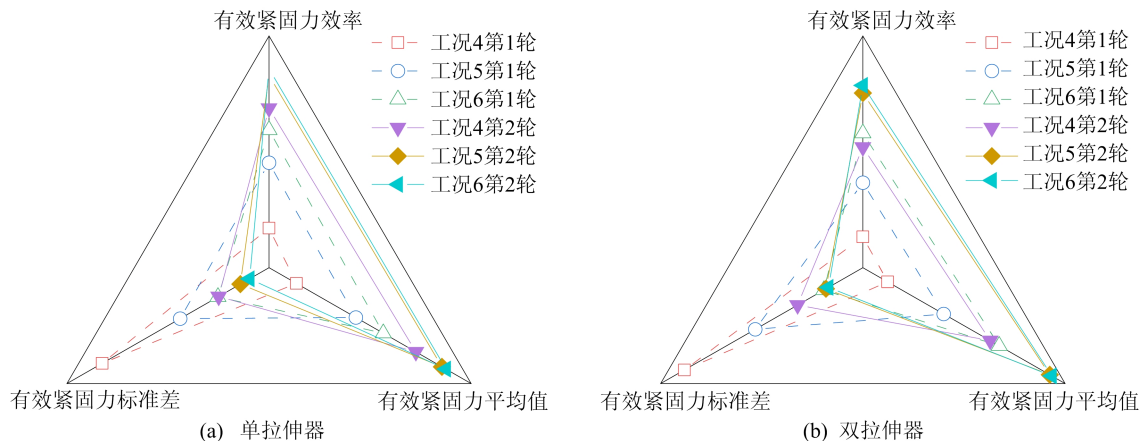


图 10 不同初始有效紧固力下紧固效率雷达图

3.3 复拧最终张拉力对螺杆分批紧固的影响

3.3.1 紧固过程中各螺杆紧固力变化规律

采用单拉伸器时,紧固过程中工况 7~工况 9 的各螺杆紧固力变化随最终张拉力变化曲线如图 11 所示。

从图 11 可以看出:随着最终张拉力的增大,紧固过程中紧固力变化幅度也随之增大,在第 1 轮紧固过程中,工况 7~工况 9 的紧固力最大值与最小值相差分别为 337.3、423.6、

567.6 kN;在第 2 轮紧固过程中,工况 7~工况 9 的紧固力最大值与最小值相差分别为 108.3、138.3、192.2 kN。

随着最终张拉力的增加,分批紧固效应影响逐渐增大。这可能是较大的张拉力导致主缆产生较大的压缩变形量,使相邻螺杆的伸长量大幅减小,因此紧固力大幅减小。

采用双拉伸器时,紧固过程中各螺杆紧固力变化随最终张拉力变化曲线如图 12 所示。

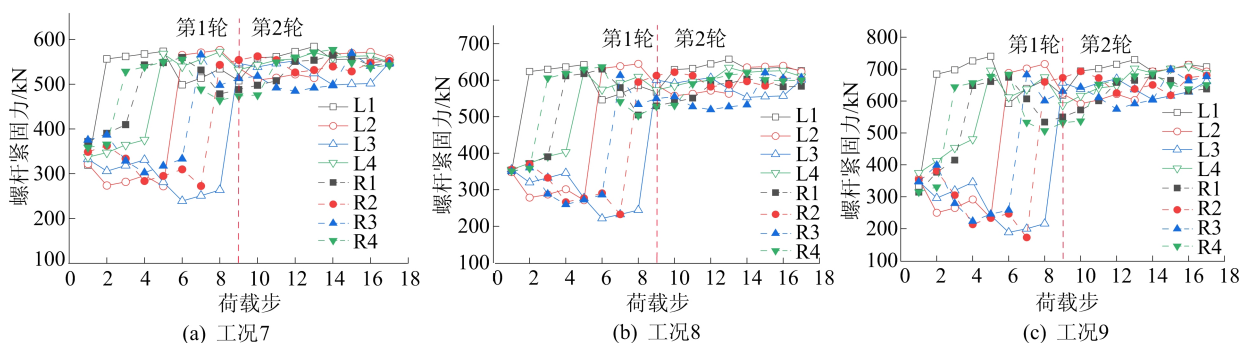


图 11 单拉伸器紧固工况螺栓紧固力随荷载步变化曲线

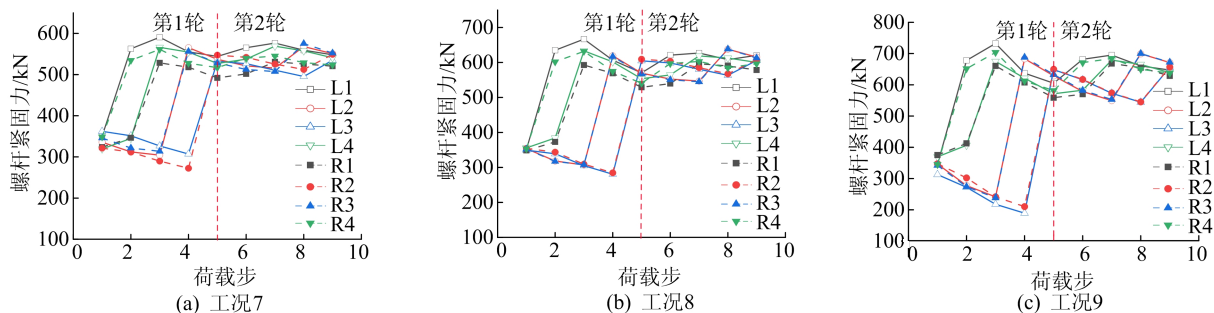


图 12 双拉伸器紧固工况螺栓紧固力随荷载步变化曲线

由图 12 可知,螺栓紧固力变化趋势与单拉伸器紧固工况基本相同。第 1 轮紧固过程中,工况 7~工况 9 的紧固力最大值和最小值相差分别为 318.3、386.0、542.9 kN;第 2 轮紧固过程中,工况 7~工况 9 的紧固力最大值和最小值相差分别

为 81.1、98.7、155.8 kN。随着最终张拉力的增加,分批紧固效应影响逐渐增大。

3.3.2 紧固结束时螺栓有效紧固力分布规律

紧固结束时螺栓有效紧固力分布规律如图 13 所示。

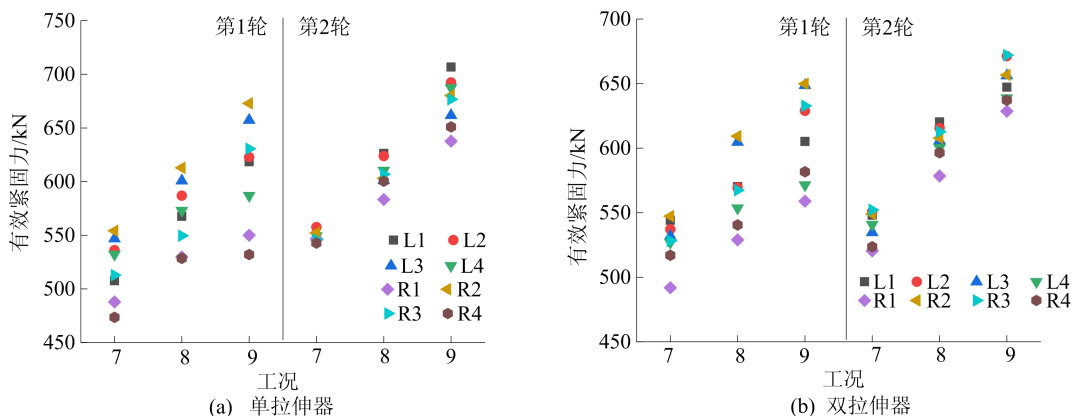


图 13 紧固结束时各螺栓有效紧固力分布

由图 13a 可知:第 1 轮紧固结束时,工况 7~工况 9 有效紧固力最大值和最小值相差分别为 80.6、84.4、140.9 kN;第 2 轮紧固结束时,工况 7~工况 9 有效紧固力最大值和最小值相差分别为 14.9、43.0、69.1 kN。由图 13b 可知:第 1 轮紧固结束时,工况 7~工况 9 有效紧固力最大值和最小值相差分别为 55.4、79.4、90.9 kN;第 2 轮

紧固结束时,工况 7~工况 9 有效紧固力最大值和最小值相差分别为 31.8、40.1、43.4 kN。在单、双拉伸器紧固工况下,随着最终张拉力的增大紧固结束时有效紧固力相差逐渐增大。

3.3.3 紧固效率分析

不同最终张拉力下紧固效率雷达图如图 14 所示。综合考虑有效紧固力效率、有效紧固力平

均值和标准差 3 个维度表现。

由图 14a 可知:在第 1 轮中,工况 7 最优,有效紧固力效率为 94.0%,有效紧固力平均值和标准差分别为 518.9、26.6 kN;在第 2 轮中,工况 8 最优,有效紧固力效率为 99.1%、有效紧固力平均值和标准差分别为 607.0、12.8 kN。

由图 14b 可知:在第 1 轮中,工况 7 最优,有效紧固力效率为 95.8%,有效紧固力平均值和标准差分别为 526.0、16.1 kN;在第 2 轮中,工况 9

最优,有效紧固力效率为 98.2%,有效紧固力平均值和标准差分别为 664.4、13.2 kN。在单、双拉伸器紧固工况中,对索夹螺杆进行紧固时第 1 轮施加 0.9 倍设计螺杆力的张拉力可以减小分批紧固效应的影响,得到更高的有效紧固力效率且有效紧固力分布更均匀。第 2 轮次紧固时,适当提高最终张拉力(1.1 倍设计螺杆力)既可以减小分批紧固效应的影响,又可以获得更大的最终螺杆有效紧固力,得到更高的紧固效率。

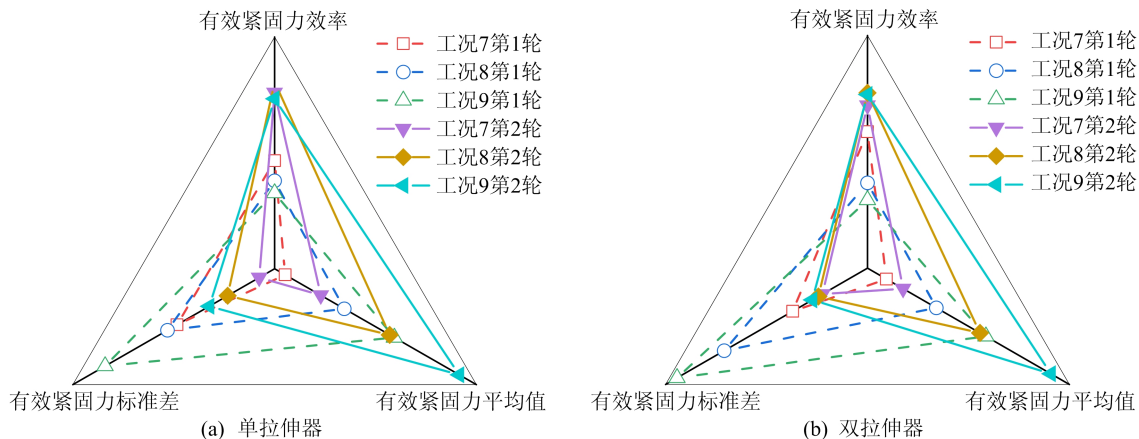


图 14 不同最终张拉力下紧固效率雷达图

由紧固结束时工况 1~工况 9 的各螺杆有效紧固力分布规律可知,2 轮次复拧能够有效减小分批紧固效应,使各螺杆的有效紧固力分布更均匀,在 1 轮次的紧固过程中,各螺杆的紧固力损失均值大部分在 20%~30%之间,在 2 轮次紧固过程中,各螺杆的紧固力损失均值大部分在 10%~20%之间。因此在考虑安全的基础上,在 1 轮次紧固时可设置 1.25 倍的超张拉系数,在 2 轮次紧固时可设置 1.15 倍的超张拉系数,使得螺杆达到有效紧固力均匀分布状态和接近于设计值的目的。

4 结 论

1) 从索夹两端向中间对称紧固螺杆是较为理想的索夹螺杆紧固顺序。

2) 螺杆组的初始有效紧固力越大,分批紧固效应影响越小,索夹在较少的紧固次数下即可达到有效紧固力均匀分布状态的目的。

3) 在各紧固工况中 1 轮次紧固后,紧固力损失大,紧固效率低,因此建议采用 2 轮次对螺杆进行复拧,第 1 轮采用 0.9 倍设计值的复拧张拉力对螺杆进行紧固,可降低螺杆分批紧固效应的影响,使螺杆组紧固力分布更加均匀;第 2 轮在规定

的张拉力范围内采用较大的张拉力,既可以减小分批紧固效应的影响,又可以得到更大的螺杆有效紧固力。

4) 在 1 轮次的紧固过程中,各螺杆的紧固力损失均值多数处于 20%~30%之间,在 2 轮次的紧固过程中,各螺杆的紧固力损失均值多数处于 10%~20%之间。因此在考虑安全的基础上,在 1 轮次紧固时可设置 1.25 倍的超张拉系数,在 2 轮次紧固时可设置 1.15 倍的超张拉系数,最终使得螺杆达到有效紧固力均匀分布状态和接近于设计值的目的。

[参 考 文 献]

- [1] 中国公路学会桥梁与结构工程学会. 日本本州-四国联络桥上部结构设计标准·及解说[M]. 北京: [出版者不详], 1998.
- [2] 缪新耕, 薛花娟. 解放路三号桥索夹抗滑试验研究[J]. 公路, 2006, 51(10): 22-25.
- [3] 张鹏飞. 悬索桥索夹螺杆预紧力下降原因分析与预防性养护对策[J]. 公路, 2019, 64(2): 101-105.
- [4] BIBEL G, EZELL R. Bolted flange assembly: preliminary elastic interaction data and improved bolt-up procedures[J]. Bulletin-Welding Research Council, 1996, 408: 1-27.

(下转第 1728 页)

- [4] 孙全德. 沙发式桥台的加筋土基础[J]. 国外桥梁, 1994, 22(4):316-318.
- [5] 田小草, 应荣华, 张起森. 应用土工格栅处理软土地基上的桥头跳车问题[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(6):744-746.
- [6] 彭芳乐, 李福, 林平, 等. 格栅加筋挡土墙加载速率相关的变形强度特性分析及有限元模拟[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(2):174-180.
- [7] TATSUOKA F, HIRAKAWA D, NOJIRI M, et al. A new type of integral bridge comprising geosynthetic-reinforced soil walls[J]. Geosynthetics International, 2009, 16(4):301-326.
- [8] 周志刚, 郑健龙, 宋蔚涛. 土工格栅加筋柔性桥台的机理分析[J]. 中国公路学报, 2000, 13(1):18-21.
- [9] 肖成志, 刘贺, 王荣霞, 等. 土工格栅加筋土柔性桥台结构性能的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(4):767-772.
- [10] 申大为, 徐明, 刘鹏飞. 加筋土整体式桥地震反应研究[J]. 工程力学, 2018, 35(10):135-143.
- [11] FAKHARIAN K, ATTAR I H. Static and seismic numerical modeling of geosynthetic-reinforced soil segmental bridge abutments[J]. Geosynthetics International, 2007, 14(4):228-243.
- [12] 郭鹏飞. 静荷载作用下加筋土柔性桥台位移影响数值分析[D]. 太原: 中北大学, 2021.
- [13] VABU-HEJLEH N, OUTCALT S, WANG T, et al. Performance of geosynthetic-reinforced walls supporting the Founders/Meadows Bridge and approaching roadway structures, Report 1: design, materials, construction, instrumentation, and preliminary results [R]. Colorado: Colorado Department of Transportation, 2000:1-97.
- [14] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013:143-235.
- [15] 石丽峰. 地震作用下整体式桥台的动力响应数值模拟与试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- [16] 毛海君. 二级悬臂式挡墙振动台模型试验与动力分析[J]. 地下空间与工程学报, 2015, 11(增刊 1):108-112.

(责任编辑 吴亮)

(上接第 1721 页)

- [5] NASSAR S A, ALKELANI A A. Effect of tightening speed on clamp load distribution in gasketed joints [J]. SAE Transactions, 2006, 20:811-825.
- [6] 杨晓燕, 伊建军, 荆国强, 等. 悬索桥索夹螺杆分组张拉工艺研究[J]. 世界桥梁, 2021, 49(3):46-50.
- [7] 杜俊锋. 复合材料漏斗车结构性能及螺栓拧紧工艺研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- [8] 陈耀, 冯健, 盛平, 等. 新广州站内凹式索拱结构索夹节点抗滑性能分析[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(5):27-32.
- [9] 陈成军, 杨国庆, 常东方, 等. 基于有限元法的螺栓组连接弹性相互作用研究[J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33(10):131-135.
- [10] 王永青, 吴嘉锟, 刘海波. 基于弹性相互作用的大型数控机床地脚螺栓预紧顺序规划[J]. 制造技术与机床, 2015, 65(8):82-85.
- [11] 王先根, 张建润. 龙门加工中心地脚螺栓组分步预紧工艺研究[J]. 机械科学与技术, 2018, 37(6):839-847.
- [12] 何恺. 铁路悬索桥长索夹下主缆应力及索夹抗滑承载力研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [13] MIAO R, SHEN R, TANG F, et al. Nonlinear interaction effect on main cable clamp bolts tightening in suspension bridge[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2021, 182:106663.
- [14] 蒋树勤, 周勇军, 曹资源, 等. 基于拉拔法的索夹螺杆紧固力检测试验[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2024, 44(6):72-80.
- [15] 沈锐利, 何恺, 黄振. 悬索桥索夹部位主缆钢丝之间非线性关系的分析模型[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(1):111-118.
- [16] 谢林君, 任欣, 周深彪, 等. 高压容器封头螺柱预紧过程中的弹性相关性[J]. 动力工程学报, 2010, 30(9):720-725.
- [17] 杨国俊, 郝宪武, 宋涛, 等. 基于非对称悬索桥的振动基频估算公式[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2016, 39(11):1536-1542.
- [18] 周勇军, 贾利强, 杨帆, 等. 考虑主缆镀锌层蠕变的索夹螺杆紧固力损失预测[J]. 中国公路学报, 2024, 37(7):157-167.

(责任编辑 吴亮)