

基于正交试验法的悬索桥索夹螺杆 紧固力损失影响因素

周勇军^{1,2}, 穆丰睿², 蔡诚³, 杨帆⁴

(1. 长安大学公路大型结构安全教育部工程研究中心, 西安 710064; 2. 长安大学公路学院, 西安 710064;
3. 广西欣港交通投资有限公司 广西钦州 535000; 4. 陕西省交通规划设计研究院有限公司, 西安 710065)

摘要:为研究悬索桥索夹螺杆紧固力损失的影响因素及敏感度,建立了广西某大桥索夹局部有限元模型,并利用蠕变试验结果对有限元模型进行验证。在此基础上,分别考虑螺杆的应力松弛速率、主缆蠕变速率、主缆空隙率、吊索力大小、螺杆的初始紧固力、索夹倾角和主缆与索夹温差等因素,利用正交试验法设计27种索夹螺杆紧固力损失的有限元分析工况,研究它们对螺杆紧固力的影响。研究表明:索夹螺杆紧固力损失随螺杆自身应力松弛速率的增大而增大;主缆蠕变速率对索夹螺杆紧固力损失的影响极其显著,索夹螺杆紧固力损失随主缆蠕变速率的增大而显著增大;索夹与主缆的温差对索夹螺杆紧固力损失的影响显著,螺杆紧固力损失随主缆与索夹温差的增大而减小;常见的主缆空隙率对索夹螺杆紧固力损失的影响相对较小;吊索力大小对索夹螺杆紧固力损失的影响可以忽略不计;螺杆紧固力损失随螺杆初始紧固力增大呈现先增大后减小的规律;索夹倾角对同一索夹不同位置的螺杆紧固力损失的影响有所差异;本文研究结论可为悬索桥的设计及养护提供参考。

关键词:桥梁工程;螺杆紧固力;正交试验;应力松弛;温差;初始紧固力

中图分类号:U44 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2025)04-1188-09

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230719

Influence factors of preload loss in cable clamp bolt of suspension bridge based on orthogonal experiment method

ZHOU Yong-jun^{1,2}, MU Feng-rui², CAI Cheng³, YANG Fan⁴

(1. Large Structures Highway Safety Engineering Research Center of the Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 3. Guangxi Xingang Transportation Investment Co., Ltd., Qinzhou 535000, China; 4. Shaanxi Provincial Transport Planning Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to study the influence factors affecting the preload loss of the cable clamp bolt of the suspension bridge and its sensitivity, a local finite element model of the cable clamp in a suspension bridge in Guangxi province was established, and then was verified by the creep test results. Next, 27 finite

收稿日期:2023-07-10.

基金项目:广西科技重点研发计划项目(桂科 AB23026225);陕西省秦创原“科学家+工程师”队伍建设项目(2025QCY-KXJ-136).

作者简介:周勇军(1978-),男,教授,博士.研究方向:桥梁结构动力分析与检测.E-mail:zyj@chd.edu.cn

element models of bolt clamp were set up by using the orthogonal experiment method to study the influence factors on preload loss which include the stress relaxation rate of the bolt, the creep rate of the cable, the porosity of the cable, the suspender force, the initial preload of the bolt, the cable clamp inclination angle and the temperature difference between cable and clamp. The research results show that: the preload loss of the bolts increases with the stress relaxation rate of the bolts. The cable creep rate has a significant impact on the preload loss of the bolts. The preload loss increases significantly with the cable creep rate. The temperature difference between the clamp and the cable has a significant impact on the preload loss of the bolt, the bolt preload loss decreases as the temperature difference increases. The influence of the cable porosity on the preload loss of the bolts is relatively small. The impact of the suspender force on the preload loss of the bolt is negligible. The preload loss of the bolts initially increase and then decrease with the increasing initial preload of the bolts. The influence of the cable clamp inclination angle on the different bolts in the same clamp is unclear. The research conclusions can provide references for the design and maintenance of the suspension bridge cable.

Key words: bridge engineering; bolt preload; orthogonal experiment; stress relaxation; temperature difference; initial preload

0 引言

悬索桥是大跨径桥梁中最有竞争力的桥型。悬索桥的索夹通过高强螺栓的紧固力夹紧主缆,成为悬索桥主缆与吊索的连接及传力构件,起着将结构恒载和车辆活载等荷载产生的吊索拉力传递至主缆的关键作用^[1]。然而,由于受到自身材料特性、荷载作用等内外因素的作用,高强螺栓的紧固力会产生不同程度的损失,当紧固力下降到一定程度时,会导致索夹松动或滑移,从而改变悬索桥缆索结构体系,致使结构内力重新分配,严重影响悬索桥的结构受力安全。

针对悬索桥索夹螺栓紧固力损失影响因素,众多学者已开展了大量的研究工作:国外相关研究^[2]认为螺栓紧固力的损失与主缆钢丝镀锌层的蠕变等原因有关,且损失程度可以达到65%。《日本本州—四国连络桥上部结构设计标准及解说》^[3]中指出螺栓紧固力的损失主要由7个原因造成:主缆钢丝镀锌层的蠕变、螺栓材料时效松弛、主缆受力变细、索夹变形、主缆内钢丝排列变化和主缆空隙率变小、主缆缠包带的变形、索夹和主缆的温差。费卿等^[4]认为索夹螺栓紧固力降低可能是由于在长期使用后主缆的挤紧程度提高,空隙率减小造成的。Tendo等^[5]通过试验研究发现与螺栓所连接结构的材料屈服强度越高,螺栓的应力松弛率越低。Alkelani等^[6]通过室内试验,研究了垫片材料、螺栓间距以及紧固顺序等对螺栓紧固力的影响。徐浩等^[7]利用有限元仿真模拟

分析了初始预紧力对螺栓紧固力的损失影响,研究结果表明螺栓蠕变是螺栓紧固力损失的主要因素。刘海波等^[8]通过理论分析建立了螺栓紧固力蠕变计算模型,并通过有限元模拟解释了蠕变对螺栓紧固力损失的影响规律。Xu等^[9]、Kim^[10]通过对螺栓进行拉拔试验建立了螺栓垫板刚度与蠕变损伤关系模型。沈锐利等^[11]用ANSYS软件建立带端索夹的主缆多尺度有限元模型,研究吊索力作用下索夹的极限抗滑摩阻力、主缆与索夹表面接触压力及螺栓拉力随吊索力的变化规律。周勇军等^[12]考虑主缆镀锌层蠕变对悬索桥索夹螺栓紧固力的损失规律和预测模型开展了研究,为螺栓紧固力检测与养护提供了技术支持。

目前对悬索桥运营阶段索夹螺栓紧固力损失的研究虽较多,但大多是提出可能的影响因素以及开展单一因素分析,缺少因素之间的耦合研究,对各影响因素的敏感性分析也不多见。基于此,本文开展了室内试验和数值仿真研究,采用有限元软件对悬索桥索夹进行局部建模,结合正交试验对索夹螺栓紧固力损失影响因素的敏感性进行了分析,研究成果可为悬索桥索夹螺栓设计及养护提供参考。

1 数值模型

1.1 索夹模型建立

本文以广西某大桥上下对合型索夹为研究对象,索夹型号为SJ5,索夹主缆直径为736 mm,索夹长1 250 mm,索夹壁厚35 mm,索夹左右各设

有 4 根型号为 MJ45 的螺杆, 高强螺杆纵向间距为 315 mm, 横向间距为 785 mm。模型主体分为三大部分, 即上下索夹、高强螺杆和主缆。模型整体均采用三维实体单元 C3D8R 模拟, 其中螺杆和螺母合并为一两端具有头部的螺栓; 主缆采用正交各向异性的实体单元等效替代, 单元局部坐标系采用柱坐标系定义, 其三向的材料弹性模量^[13] $E_{ZZ} = 1.95 \times 10^5$ MPa、 $E_{RR} = 2.2 \times 10^4$ MPa、 $E_{TT} = 3.6 \times 10^4$ MPa, 泊松比 $\nu_{ZR} = 0.26$, $\nu_{ZT} = 0.26$ 、 $\nu_{RT} = 0.02$ 。为能更好地模拟实际结构受力特点, 各构件之间接触设置和摩擦因数参考文献^[12,14]和《公路悬索桥设计规范》(JTG/TD 65-05-2015), 同时将主缆一端进行固结, 另一端仅释放主缆轴向位移和转角。模型中上下索夹与螺杆材料弹性模量为 210 GPa, 泊松比为 0.3^[15]; 主缆的温度膨胀系数取 1.2×10^{-5} 。整体坐标系下主缆轴向为 Z 轴, 竖直方向为 Y 轴, 垂直于 YOZ 平面为 X 轴, 模型共计 56 734 个单元, 索夹有限元模型如图 1 所示。

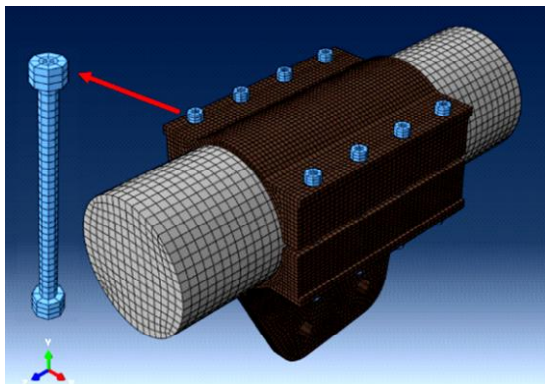


图 1 索夹有限元模型

Fig. 1 Finite element model of cable clamp

1.2 蠕变参数设置

由于本文要考虑螺杆的应力松弛速率、主缆蠕变速率对索夹螺杆紧固力损失的影响, 因此需设置螺杆和主缆的蠕变参数来模拟应力松弛速率、主缆蠕变速率。常见的蠕变理论模型有 Norton 模型、时间硬化模型、应变硬化模型、损伤蠕变模型。考虑到悬索桥索夹螺杆紧固力损失主要是由于材料蠕变的前两阶段所导致的, 因此选取时间硬化理论模型。该模型认为蠕变速率下降是由于时间所导致材料硬化, 对于某一给定温度下, 应力、蠕变应变和时间存在一定的关系, 其表达式为:

$$\epsilon_c = A\sigma^n t^m \quad (1)$$

式中: ϵ_c 为蠕变应变; A 、 m 、 n 均为与温度相关的材

料常数, 由蠕变试验确定; σ 为应力; t 为时间。

蠕变应变和应力又存在以下关系:

$$\frac{d\epsilon_c}{dt} = -\frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} \quad (2)$$

式中: E 为弹性模量。

联立式(1)和式(2), 积分并代入初始条件 $t=0, \sigma=\sigma_0$ 可推导考虑初始应力的时间硬化蠕变模型, 表达了剩余应力随时间变化的规律, 其表达式为^[16]:

$$\sigma_t = [(n-1)EAt^m + \sigma_0^{1-n}]^{\frac{1}{1-n}} \quad (3)$$

式中: σ_t 为剩余应力; σ_0 为初始应力。

为获得螺杆相关的蠕变参数, 开展了螺杆蠕变试验, 试验总体布置如图 2 所示。试验所采用的螺杆型号为 MJ45 螺杆, 其材料为 40CrNiMoA。螺杆的安全系数一般大于 2, 因此设置螺杆的初始应力分别为 0.4、0.45、0.5 倍的极限抗拉强度设计值 f_{py} 作为螺杆应力松弛试验的 3 种工况。在加载完成后的 10 h 内每 2 h 利用压力传感器采集一次螺杆紧固力, 10 h 后每 4 h 采集一次螺杆紧固力, 总共采集 120 h 试验数据。对式(3)中的 3 个蠕变参数 A 、 n 、 m 进行最小二乘拟合。主缆相关蠕变参数的获取则是利用文献^[17]中初始应力在 0.5、0.6 和 0.7 倍极限抗拉强度设计值 f_{py} 下高强钢丝的应力松弛试验结果进行拟合, 得到螺杆和

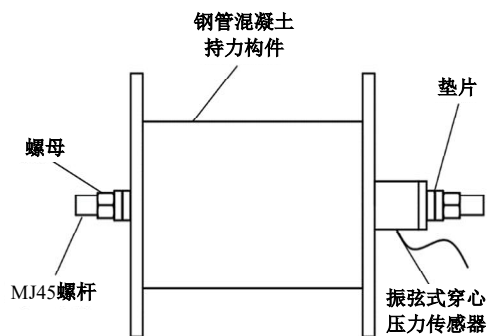


图 2 螺杆蠕变试验总体布置

Fig. 2 General layout of bolt creep experiment

主缆的各蠕变参数拟合结果(见表1)。

表1 材料蠕变参数

构件	初始应力 /MPa	$A/10^{-6}$	n	m
螺杆	391	1.346 6	0.374 8	0.282 1
	453	3.714 1	0.351 2	0.256 5
	515	4.328 4	0.3253	0.270 6
主缆	850	433.280 0	1.159 0	0.286 5
	1 120	70.203 0	1.034 8	0.194 3
	1 190	10.836 0	1.088 5	0.148 4

1.3 索夹有限元模型验证

选取螺杆和主缆在各自首个工况下获得的蠕变参数 A 、 n 、 m 代入式(3)中,得到螺杆和主缆的各自蠕变模型理论值曲线结果(见图3),结果表明随时间增加,有限元模型中螺杆和主缆的剩余应力变化规律与蠕变模型理论值结果一致,通过有限元软件计算得到的螺杆和主缆的剩余应力值相较于式(3)计算值较大,但蠕变模拟全时段计算结果误差均不超过10%,计算精度满足工程要

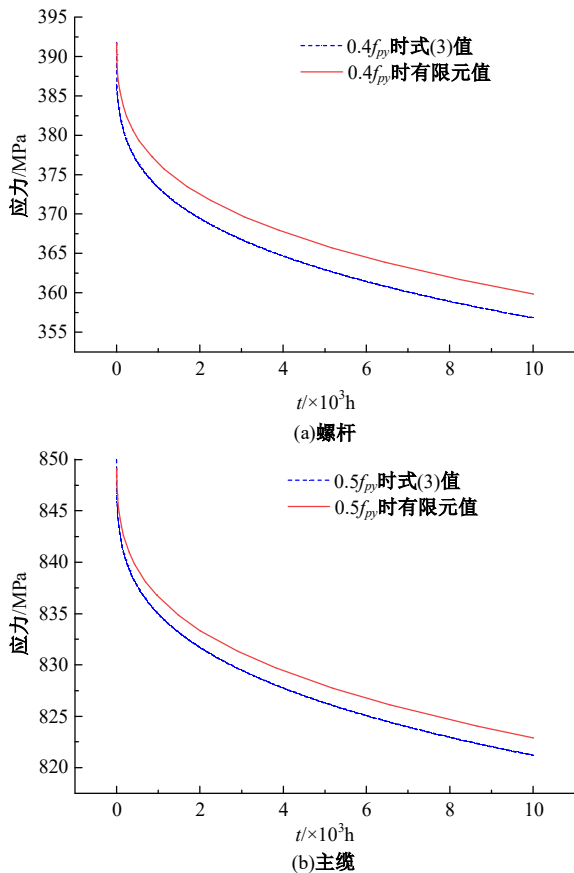


图3 螺杆与主缆剩余应力理论值与有限元值对比

Fig.3 Comparison of stress in bolt and cable between theoretical values and finite element values

求,表明本文建立的索夹有限元模型可以模拟实际索夹的受力行为,并准确地模拟出蠕变因素对索夹螺杆紧固力损失的影响规律。

2 正交试验

正交试验法^[18]是通过预先设计好的正交表来安排试验的一种试验设计方法,正交试验能够大幅减少试验次数。对于正交试验计算结果的分析,极差 R 值的大小反映了各因素对试验结果的影响程度大小,水平均值 K 的大小反映了某一因素下不同水平对试验结果的影响值大小。

悬索桥索夹螺杆紧固力的损失受到诸多因素的影响,且各因素相互耦合,作用机理复杂。通过调研,本文对悬索桥索夹螺杆紧固力损失问题的研究主要考虑7个因素:螺杆的应力松弛速率、主缆蠕变、主缆空隙率、吊索力大小、螺杆的初始紧固力、索夹倾角、主缆与索夹温差,各影响因素参数选取如表2所示。

(1)螺杆应力松弛速率:根据《公路悬索桥设计规范》(JTG/T D65-05-2015)规定,索夹螺栓宜采用40CrNiMoA、40Cr、35CrMo等合金结构,本文选取上文有限元计算得到的不同初始应力下螺杆松弛率的0.8、1.0、1.2倍作为螺杆应力松弛速率的参数取值。

(2)主缆蠕变:上文对主缆在应力分为0.5、0.6、0.7倍抗拉强度设计值下的蠕变模型参数进行了拟合,因此主缆蠕变速率取值为0.5、0.6、0.7,其对应的主缆力分别为 3.616×10^5 、 4.340×10^5 、 5.063×10^5 kN。

(3)主缆空隙率:根据《公路悬索桥设计规范》(JTG/T D65-05-2015)规定悬索桥索夹内主缆空隙率应为16%~20%,因此本文选取的主缆空隙率为16%、18%和20%。

(4)吊索力大小:本文所采用的索夹实际所受吊杆力值约为1 500 kN,而目前悬索桥的车辆荷载占比通常在15%左右,因此本文选取的吊索力作用值分别为1 500、1 750、2 000 kN,变化幅值约为15%。

(5)螺杆的初始紧固力:40CrNiMoA螺杆的抗拉强度要求为大于980 MPa^[19],模型采用的螺杆直径为45 mm,因此其最大设计拉力为1 558 kN,本文选取的螺杆的初始紧固力分别为螺杆抗拉强度的30%、40%、50%,即470、620、780 kN。

(6)索夹倾角:实际悬索桥索夹倾角最大值为

表 2 螺栓紧固力损失正交试验影响因素及水平

Table 2 Orthogonal experiment influencing factors and levels of bolt preload loss

因素水平	螺栓应力松弛 速率①	主缆蠕变速率 ②	主缆空隙 率/%③	吊索力大小/kN ④	螺栓的初始紧 固力/kN⑤	索夹倾角/(°) ⑥	主缆与索夹 温差/°C⑦
水平 1	0.8	0.5	16	1 500	470	0	-2
水平 2	1.0	0.6	18	1 750	620	10	0
水平 3	1.2	0.7	20	2 000	780	20	2

20°左右,因此本文选取的索夹倾斜角度分别为 0°、10°、20°。

(7)主缆与索夹温差:文献^[20,21]研究发现主缆内外侧温差在 1.6 °C左右,因此本文对主缆与索夹之间的温差分别选取为-2、0、2 °C。

根据选取的因素及相应的水平数,得到的 L27(3⁷)正交试验工况如表 3 所示。

表 3 螺栓紧固力损失正交试验工况

Table 3 Orthogonal experiment cases of bolt preload loss

工况	螺栓应 力松弛 速率	主缆 蠕变 速率	主缆 空隙 率/%	吊索力 大小/ kN	螺栓的初 始紧固 力/kN	索夹 倾角 /(°)	主缆与 索夹温 差/°C
1	0.8	0.5	16	1 500	470	0	-2
2	0.8	0.5	16	1 500	620	10	0
3	0.8	0.5	16	1 500	780	20	2
4	0.8	0.6	18	1 750	470	0	-2
5	0.8	0.6	18	1 750	620	10	0
6	0.8	0.6	18	1 750	780	20	2
7	0.8	0.7	20	2 000	470	0	-2
8	0.8	0.7	20	2 000	620	10	0
9	0.8	0.7	20	2 000	780	20	2
10	1.0	0.5	18	2 000	470	10	2
11	1.0	0.5	18	2 000	620	20	-2
12	1.0	0.5	18	2 000	780	0	0
13	1.0	0.6	20	1 500	470	10	2
14	1.0	0.6	20	1 500	620	20	-2
15	1.0	0.6	20	1 500	780	0	0
16	1.0	0.7	16	1 750	470	10	2
17	1.0	0.7	16	1 750	620	20	-2
18	1.0	0.7	16	1 750	780	0	0
19	1.2	0.5	20	1 750	470	20	0
20	1.2	0.5	20	1 750	620	0	2
21	1.2	0.5	20	1 750	780	10	-2
22	1.2	0.6	16	2 000	470	20	0
23	1.2	0.6	16	2 000	620	0	2
24	1.2	0.6	16	2 000	780	10	-2
25	1.2	0.7	18	1 500	470	20	0
26	1.2	0.7	18	1 500	620	0	2
27	1.2	0.7	18	1 500	780	10	-2

3 索夹螺栓紧固力损失影响因素敏感性分析

根据表 3 的正交试验工况,运用有限元计算软件建立 27 个索夹局部模型,分别计算不同工况下各螺栓应力变化曲线,从中提取出不同角度索夹各螺栓 0 时刻的初始应力与 10 000 h 时的剩余应力。

考虑到本文所建立的有限元模型为对称结构,且荷载也是对称施加,因此选取索夹单侧的 4 根螺栓进行分析,为了方便识别,从索塔向跨中依次编号为 1~4 号,如图 4 所示。定义紧固力损失率:

$$S(t) = (\sigma_0 - \sigma_t) / \sigma_0 \times 100\% \quad (4)$$

式中:S(t)为 t 时刻螺栓紧固力的损失率。

基于索夹各螺栓在各工况下的紧固力损失率计算结果,进行正交试验极差分析,得到 1~4 号

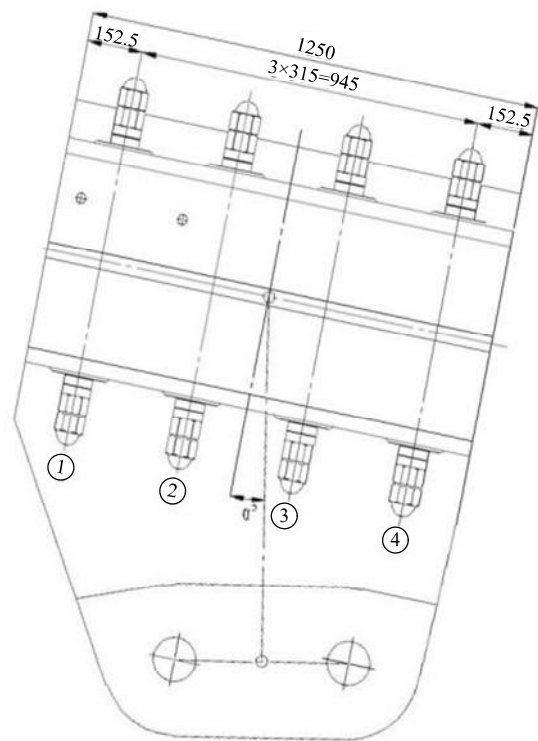


图 4 螺栓编号示意(尺寸单位:mm)

Fig. 4 Schematic diagram of bolt number (unit: mm)

螺栓紧固力损失率的均值曲线如图 5~11 所示, 计算极差得到各因素敏感度 R 值曲线如图 12 所示。

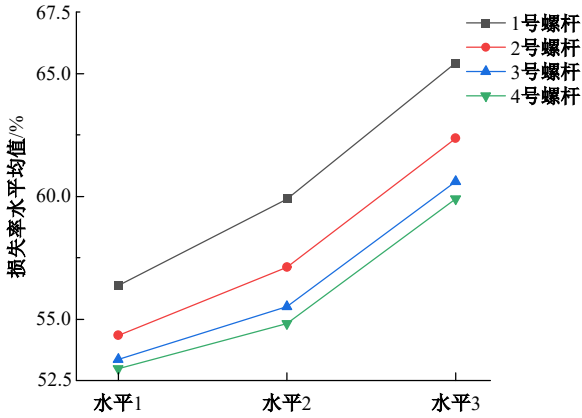


图 5 不同螺栓应力松弛速率水平下的紧固力损失率

Fig. 5 Preload loss rate under different stress relaxation rate of bolts

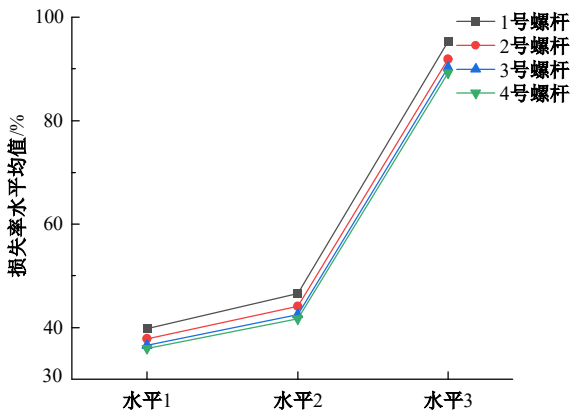


图 6 不同主缆蠕变速率水平下的紧固力损失率

Fig. 6 Preload loss rate under different cable creep rate

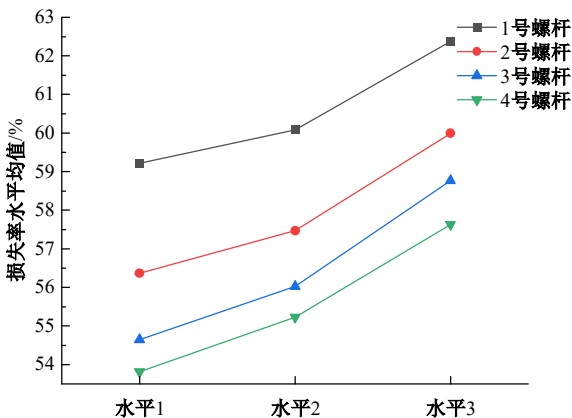


图 7 不同主缆空隙率水平下的紧固力损失率

Fig. 7 Preload loss rate under different cable porosity

由图 5~11 可知:

(1)随着螺栓自身应力松弛速率的增大,索夹系统中 1~4 号螺栓紧固力损失率均有明显增大,

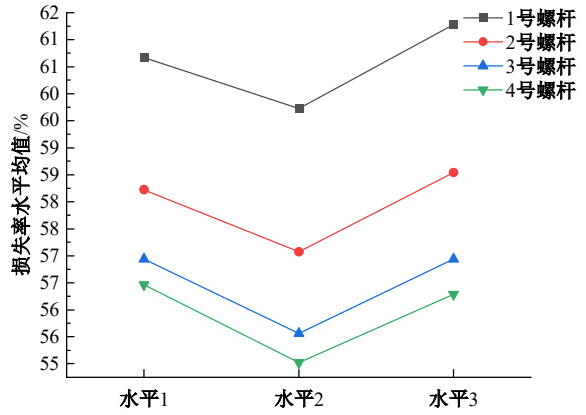


图 8 不同吊索力水平下的紧固力损失率

Fig. 8 Preload loss rate under different suspender force

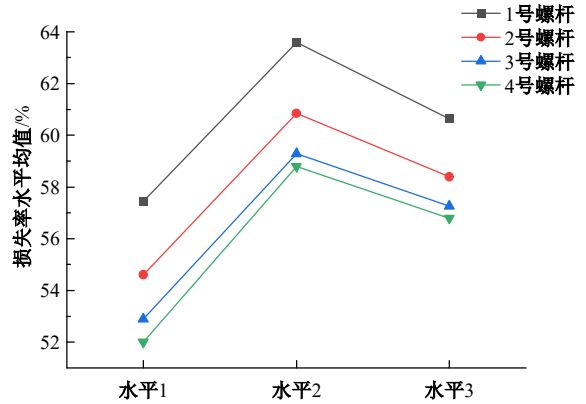


图 9 不同螺栓初始紧固力水平下的紧固力损失率

Fig. 9 Preload loss rate under different initial preload of bolts

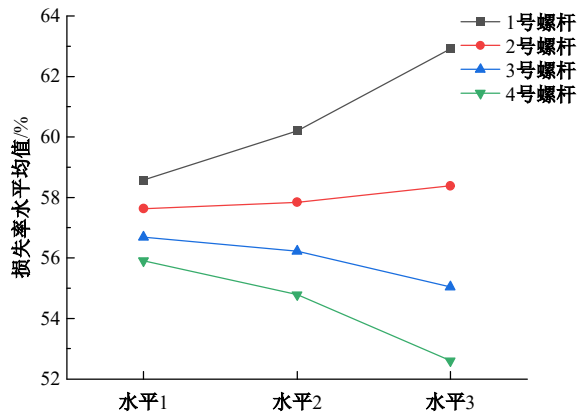


图 10 不同索夹倾角水平下的紧固力损失率

Fig. 10 Preload loss rate under different cable clamp inclination angles

且 1 号螺栓损失率大于 4 号螺栓。

(2)随着主缆蠕变速率的增大,索夹系统中 1~4 号螺栓紧固力损失率和损失速率均随之增大,且 1 号螺栓损失率大于 4 号螺栓。

(3)索夹系统中的 1~4 号螺栓紧固力损失率

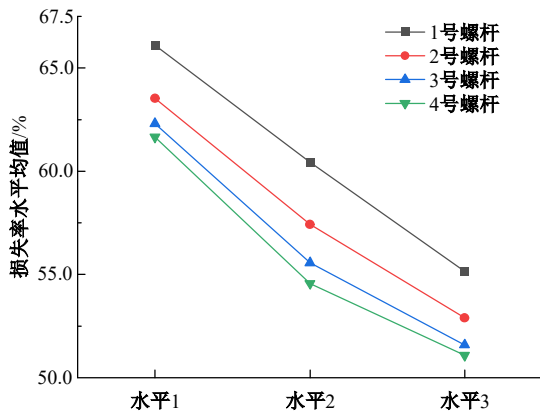


图 11 不同温差水平下的紧固力损失率

Fig. 11 Preload loss rate under different temperature difference levels

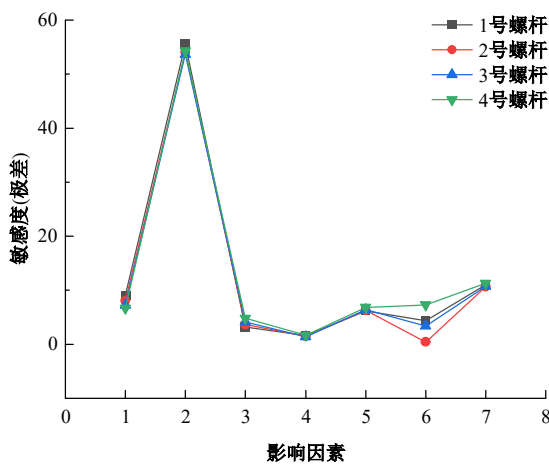


图 12 1~4号螺栓各影响因素敏感度

Fig. 12 Sensitivity of influencing factors on preload of bolts 1-4

随主缆空隙率的增大而增大,紧固力损失速率几乎相同。原因在于随着主缆空隙率的增大,主缆径向刚度降低,主缆径向变形也随之增大,螺栓紧固力损失值也随之增大。

(4)随着吊索力的增加,索夹系统中1~4号螺栓紧固力损失率均呈现先减小后增大的规律。但索夹分别在1 500 kN和2 000 kN的吊索力作用下,1~4号螺栓紧固力损失率大小相差不大。

(5)随着螺栓初始紧固力的增大,索夹系统中1~4号螺栓紧固力损失率均呈现先增大后减小的规律。

(6)随着索夹倾角的增大,索夹系统中1号螺栓紧固力损失率明显增大,2、3号螺栓紧固力损失率变化较1、4号螺栓小,4号螺栓紧固力损失率明显减小。分析认为,随着索夹倾角的增大,1号螺栓(索夹上端螺栓)所分配的吊索力比例降低,

螺栓内力随之减小,因此其最终剩余的紧固力相对于初始紧固力的比例也随之减小,即紧固力损失率大。2、3号螺栓的位置靠近索夹中部,其螺栓中点和吊索力作用点连线与竖直方向的夹角较1、4号螺栓小,因此其紧固力损失率受到索夹角度影响较小。对4号螺栓(索夹下端螺栓)而言,索夹倾角的增大致其分配的吊索力比例大,螺栓内力随之增大,其最终剩余的紧固力相对于初始紧固力的比例也随之增大,即紧固力损失率低。

(7)随着主缆相较于索夹温度的增大,索夹系统中1~4号螺栓紧固力损失率均明显减小。分析认为,主缆的主要材料为高强钢丝,会随温度的变化发生热胀冷缩现象,而随着主缆相较于索夹温度的增大,其膨胀程度随之增大,索夹受到主缆沿径向向外的作用力也增大,最终导致螺栓的紧固力也随之增大,故紧固力损失率降低。

总的来说,1~4号螺栓的紧固力损失率在螺栓应力松弛速率、主缆蠕变、主缆空隙率、吊索力、螺栓的初始紧固力和索夹与主缆的温差这6个影响因素作用下展现出相似的损失规律,即在同样的影响因素水平下,1~4号螺栓紧固力损失率以及相邻螺栓间损失率降低幅值均逐渐减小。对索夹倾角而言,螺栓的位置对紧固力损失率的变化规律有较大影响。

由图12可以看出,1~4号螺栓各影响因素敏感度展现出相似的变化规律,但不同位置螺栓之间紧固力损失率影响因素的主次顺序存在差异:

(1)对于1号螺栓:主缆蠕变速率>温差>螺栓应力松弛速率>螺栓的初始紧固力>索夹倾角>主缆空隙率>吊索力大小。

(2)对于2号螺栓:主缆蠕变速率>温差>螺栓应力松弛速率>螺栓的初始紧固力>主缆空隙率>吊索力大小>索夹倾角。

(3)对于3号螺栓:主缆蠕变速率>温差>螺栓应力松弛速率>螺栓的初始紧固力>主缆空隙率>索夹倾角>吊索力大小。

(4)对于4号螺栓:主缆蠕变速率>温差>索夹倾角>螺栓的初始紧固力>螺栓应力松弛速率>主缆空隙率>吊索力大小。

同时发现2、3号螺栓对主缆蠕变速率、吊索力大小、索夹倾角、温差这4项影响因子的敏感程度低于1、4号螺栓,而且随着索夹螺栓位置从上端向下端偏移,1~4号螺栓对螺栓应力松弛速率

这一影响因子的敏感程度逐渐降低,对主缆空隙率和螺杆的初始紧固力的敏感程度逐渐升高,但敏感程度变化幅度并不大。综上整体分析得到各影响因子敏感性参数分析,如表4所示。

表4 螺杆紧固力损失敏感性参数分析

Table 4 Sensitivity parameter analysis for bolt preload loss

因素	1号螺杆	2号螺杆	3号螺杆	4号螺杆
螺杆应力松弛速率	****	***	***	***
主缆蠕变速率	*****	*****	*****	*****
主缆空隙率	**	**	**	**
吊索力大小	**	*	*	**
螺杆的初始紧固力	***	***	***	***
索夹倾角	***	**	**	***
温差	****	***	***	****

注:*****表示该参数对螺杆紧固力损失十分显著;****表示显著;***表示较为显著;**表示影响较小;*表示影响不大。

总而言之,主缆蠕变速率、温差、螺杆应力松弛速率为影响索夹螺杆紧固力损失最显著的3个因素。在一定程度上提高螺杆的初始紧固力有助于减小螺杆紧固力损失。

4 结 论

(1)主缆蠕变速率对索夹螺杆紧固力损失的影响极其显著,索夹螺杆紧固力损失率和损失速率均随主缆蠕变速率的增大而显著增大,因此在保证经济的情况下,应尽量提高主缆的安全系数,降低主缆的轴向荷载大小。

(2)螺杆自身应力松弛速率和螺杆的初始紧固力对索夹螺杆紧固力损失的影响较显著,索夹螺杆紧固力损失随螺杆自身应力松弛速率的增大而增大,随螺杆初始紧固力增大呈现先增大后减小的规律。采用蠕变速率较小的材料、把控构件加工质量等措施可以有效降低螺杆应力松弛所造成的索夹螺杆紧固力损失。

(3)索夹与主缆的温差对索夹螺杆紧固力损失的影响显著,索夹螺杆紧固力损失随主缆相较于索夹温度的增大而减小。

(4)常见的主缆空隙率对索夹螺杆紧固力损失的影响较小,索夹螺杆紧固力损失程度随主缆空隙率的增大而增大,但总体上影响不大。

(5)索夹倾角对索夹上不同位置处螺杆紧固力损失的影响有所差异,随着索夹倾角的增大,索夹系统中较高处螺杆紧固力损失率明显增大,索

夹中部螺杆紧固力损失率变化较稳定,较低处螺杆紧固力损失率明显减小。

参考文献:

- [1] 王俊,李加武,王峰,等. 简化U形峡谷风速分布及其对悬索桥抖振响应的影响[J]. 吉林大学学报:工学版, 2023, 53(6): 1658-1668.
Wang Jun, Li Jia-wu, Wang Feng, et al. Wind speed distribution in simplified U-shaped valley and its effect on buffeting response of long-span suspension bridge[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2023, 53(6): 1658-1668.
- [2] Mayrbaurl R M, Camo S. Guidelines for Inspection and Strength Evaluation of Suspension Bridge Parallel-Wire Cables[M]. USA: Transportation Research Board, 2004.
- [3] 中国公路学会桥梁与结构工程学会. 日本本州-四国连络桥上部结构设计标准及解说[M]. 北京: 中国公路学会桥梁与结构工程学会, 1998.
- [4] 费卿, 梁锦润. 自锚式悬索桥索夹滑移分析及修复技术[C]//中国公路学会桥梁和结构工程分会2017年全国桥梁学术会议论文集, 广州, 中国, 2017: 654-659.
- [5] Tendo M, Yamada K, Shimura Y. Stress relaxation behavior at high-tension bolted connections of stainless-steel plates[J]. Journal of Engineering Materials & Technology, 2001, 123(2): 198-202.
- [6] Alkelani A A, Housari A B, Nassar A S. A proposed model for creep relaxation of soft gaskets in bolted joints at room temperature[J]. Journal of Pressure Vessel Technology(ASME), 2008, 13(1): No. 011211-1-6.
- [7] 徐浩, 王崑, 马跃. 螺栓联接蠕变松弛有限元分析[J]. 机械设计与制造, 2013, 271(9): 39-41, 45.
Xu Hao, Wang Wei, Ma Yue. Finite element analysis of creep relaxation in bolted connections[J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2013, 271(9): 39-41, 45.
- [8] 刘海波, 吴嘉锟, 王永青. 地脚螺栓蠕变松弛对大型数控机床几何精度衰退的影响[J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(9): 14-17, 140.
Liu Hai-bo, Wu Jia-kun, Wang Yong-qing. The effect of creep relaxation of anchor bolts on the geometric accuracy degradation of large CNC machine tools [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(9): 14-17, 140.
- [9] Xu H, Wang F, Cheng X. Pullout creep properties of grouted soil anchors[J]. Journal of Central South

- University of Technology, 2007, 14(1): 474-477.
- [10] Kim N. Performance of tension and compression anchors in weathered soil[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, 129(12): 1138-1150.
- [11] 沈锐利, 何恺, 苗如松. 基于多尺度模型的销接式索夹极限抗滑摩阻力分析[J]. *桥梁建设*, 2018, 48(5): 16-20.
Shen Rui-li, He Kai, Miao Ru-song. Analysis of ultimate sliding friction resistance of pin connected cable clamps based on multi-scale models[J]. *Bridge Construction*, 2018, 48(5): 16-20.
- [12] 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.
Zhou Yong-jun, Jia Li-qiang, Yang Fan, et al. Research on Preload Loss Prediction of Clamp Bolt Considering Cable Creep of Galvanized Layer[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2024, 37(7): 157-167.
- [13] 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.
He Kai. Research on stress of main cable under long cable clamp and anti sliding bearing capacity of cable clamp of railway suspension bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [14] 唐冕, 车天鑫, 宋旭明, 等. 基于蠕变理论的自锚式悬索桥索夹预紧力研究[J]. *华南理工大学学报: 自然科学版*, 2022, 50(1): 59-68.
Tang Mian, Che Tian-xin, Song Xu-ming, et al. Study on pretension force of cable clamp of self anchored suspension bridge based on creep theory[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 50(1): 59-68.
- [15] 梅葵花, 经德良, 黄平明, 等. 悬索桥主缆温度效应的分析研究[C]//中国公路学会桥梁和结构工程学会 2001 年桥梁学术研讨会论文集, 重庆, 中国, 2001.
- [16] 吕佳欣, 肖毅. 复合材料螺栓连接预紧力松弛的改进预测模型[J]. *工程力学*, 2018, 35(10): 229-237.
Lyu Jia-xin, Xiao Yi. Improved approach to modeling preload relaxation in bolted composite joints[J]. *Engineering Mechanics*, 2018, 35(10): 229-237.
- [17] 陆光闰. 预应力高强钢丝松弛性能研究[J]. *土木工程学报*, 1997, 44(6): 41-46.
Lu Guang-lyu. Research on relaxation performance of prestressed high strength steel wire[J]. *Journal of Civil Engineering*, 1997, 44(6): 41-46.
- [18] 周勇军, 全伟, 贺拴海. 基于正交试验的连续刚构桥地震响应敏感性参数分析[J]. *地震研究*, 2006, 29(2): 176-181, 216.
Zhou Yong-jun, Quan Wei, He Shuan-hai. Analysis of seismic response sensitivity parameters of continuous rigid frame bridges based on orthogonal tests[J]. *Earthquake Research*, 2006, 29(2): 176-181, 216.
- [19] 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.
Jiang Shu-qin, Zhou Yong-jun, Cao Zi-yuan, et al. Experiment on detection of preload force in bolt clamp by pulling method[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2024, 44(6): 72-80.
- [20] 黄铁生. 大岛大桥主缆施工[J]. *国外桥梁*, 1993, 21(3): 175-180.
Huang Tie-sheng. Construction of the main cable of the Oshima Bridge[J]. *Foreign Bridges*, 1993, 21(3): 175-180.
- [21] 《中国公路学报》编辑部. 中国桥梁工程学术研究综述·2024[J]. *中国公路学报*, 2024, 37(12): 1-160.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's pavement engineering research: 2024[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2024, 37(12): 1-160.