

文章编号:1671-8879(2019)04-0082-10

基于螺纹联接的预应力精轧螺纹钢筋张拉力 识别原理与技术

钟新谷,张天予,彭 雄,舒小娟,沈明燕

(湖南科技大学 结构抗风与振动控制湖南省重点实验室,湖南 湘潭 411201)

摘 要:为了防止预应力混凝土箱梁桥腹板开裂,以混凝土箱梁桥预应力精轧螺纹钢筋张拉力测试,并修订相关规程。视预应力精轧螺纹钢筋锚固螺母与锚垫板为弹簧联接,联接弹簧的刚度为其接触面法向接触刚度。放弃精轧螺纹钢筋与锚固螺母固结假定,视其钢筋、螺母螺纹为弹簧联接,视螺纹为悬臂结构,并基于图乘法计算联接弹簧刚度,建立预应力精轧螺纹钢筋锚固系统弯曲振动动力学模型。考虑到精轧螺纹钢筋联接传力过程中,每圈螺纹传力大小的不均匀性,越远离接触面传力越小,导致精轧螺纹钢筋的外露长度发生相对变化,影响测试结果的正确性,提出其法向接触刚度的修正方程。最后,开展了室内模型试验和多座桥梁的现场试验。研究表明:该方法解决了预应力精轧螺纹钢筋锚固系统因外露长度不同引起的张拉力测试误差,获得了锚固螺母与锚垫板法向接触刚度与张拉力关系式,该关系式符合接触面法向刚度与法向力关系的一般规律;模型试验和现场试验均表明其法向接触刚度与张拉力关系具有稳定性,其原理可应用于现场桥梁测试和相关规范修订。规范的实施对彻底解决竖向预应力损失过大和失效的问题具有重要意义,该研究结果对于土木工程类似结构的张拉力、机械结构类似的紧固力测试与分析具有参考意义。

关键词:桥梁工程;张拉力识别;固有频率识别;精轧螺纹钢筋;弹簧联接;接触刚度

中图分类号:U443

文献标志码:A

DOI:10.19721/j.cnki.1671-8879.2019.04.010

Tension identification principle and technology for prestressing fine-rolling screw-thread steel bars based on a threaded connection model

ZHONG Xin-gu, ZHANG Tian-yu, PENG Xiong, SHU Xiao-juan, SHEN Ming-yan

(Key Laboratory of Wind-resistant and Vibration Control for Structure of Hunan Province,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, Hunan, China)

Abstract: To prevent web cracking of a pretensioned concrete box girder bridge, this study aimed to provide a more efficient accurate test technique for effective tensile force of prestressing fine-rolling screw-thread steel bars and revised the relevant regulations. It was considered that the anchorage nut and the anchor plate of prestressing fine-rolling screw-thread steel bars were connected by springs and the stiffness of the coupling spring was the normal contact stiffness of the contact surface. Dismissing the fixation assumption of the steel bars and anchorage nut, the connection between the steel bar and nut threads were considered as a cantilever structure and the

收稿日期:2019-01-12

基金项目:国家自然科学基金项目(51178183)

作者简介:钟新谷(1962-),男,湖南长沙人,教授,博士研究生导师,E-mail:464397070@qq.com。

stiffness of springs was calculated using the graphic multiplication method. The dynamic model of the bending vibration of the prestressing fine-rolling screw-thread steel bars was established. During the process of joint force transmission of fine-rolling screw-thread steel bars, the force transmission in each lap of thread was non-uniform, and the farther away from the contact surface, the smaller the force transmission. This may change the length of the exposed segment of the steel bars and affect the accuracy of the test results. Based on the thread characteristics, a modified equation of the normal contact stiffness of the contact surface was proposed. Finally, model tests and field tests of multiple bridges were conducted. The results show that the problem of the tension test error caused by the different exposed segment lengths of the anchor system of the prestressing fine-rolling screw-thread steel bars is solved using this method. The relationship between the normal contact stiffness and tension of the anchorage nut and anchor plate is obtained and which conforms to the general rule of the relationship between the normal contact stiffness and force. The results of the model and field tests show that the relationship between the normal contact stiffness and tension is stable and effective and can be used to conduct field tests and revise the current test specifications. The implementation of this code is of great significance to thoroughly solve the problem of excessive loss and failure of vertical prestress. It can be extended to other structures with a similar anchorage system. 6 tabs, 11 figs, 21 refs.

Key words: bridge engineering; tension identification; natural frequency identification; fine-rolling screw-thread steel bar; spring connection; contact stiffness

0 引言

预应力混凝土箱梁桥具有抗扭刚度大,伸缩装置少,自平衡悬臂施工、便于养护等优点,自20世纪70年代以来,在中国得到了迅速发展和广泛应用,跨径在150 m左右的预应力混凝土箱梁桥已有数百座^[1]。在预应力混凝土箱梁桥发展和应用的过程中,箱梁腹板普遍出现裂缝,引起众多专家学者的关注^[1-5],无箱不裂的现象,至今仍时有发生^[5]。裂缝产生的重要原因之一是竖向精轧螺纹钢筋预应力失效。

工程师和学者提出用钢绞线代替精轧螺纹钢筋作为竖向预应力筋,一般采用3~5根 Φ^{15} .2极限抗拉强度1 860 MPa的钢绞线。相对于精轧螺纹钢筋,钢绞线张拉不需要人工拧紧锚固螺母,规避了人工随意性,但实际上部分工人并没有严格按相关规范施工,采用钢绞线做竖向预应力筋的预应力混凝土箱梁桥仍然存在开裂。另外,由于精轧螺纹钢筋锚固连接方便,便于施工挂篮锚固等优点,目前除少数桥梁使用钢绞线做竖向预应力筋外,大部分桥梁仍采用精轧螺纹钢筋做竖向预应力筋。

在设计阶段没有充分考虑变截面预应力混凝土箱梁桥空间受力特征是造成病害的主要原因之一^[6-8],目前所使用偏载系数对于剪应力严重偏小,

在设计阶段留下腹板拉应力超限甚至开裂的隐患,设计工程师已意识到这种情况,虽然采用竖向预应力作为安全储备,但未按实际剪应力进行校核,同时缺少可靠的竖向预应力检测手段,往往达不到设计要求,即使采用竖向预应力作为安全储备也并不可靠。

目前,评估与控制竖向精轧螺纹钢筋有效张拉力的方法是根据千斤顶的液压压力与输出的精轧螺纹钢筋张拉力、预应力筋伸长量与张拉力之间的线性关系,推算精轧螺纹钢筋有效张拉力。该方法精度有限,且存在如下缺陷:预应力精轧螺纹钢筋张拉前的初始外露段长度无法准确测量,导致伸长量计算中的长度初始值无法准确确定,带来较大的测试误差;由于竖向预应力精轧螺纹钢筋下锚固点埋置于混凝土中,在预应力张拉过程中,精轧螺纹钢筋与混凝土产生剪切变形,该变形混入伸长量的测量数值中,影响张拉力的准确推算;该方法仅能在预应力的张拉过程中使用,对于精轧螺纹钢筋张拉后的有效张拉力无法及时、准确进行无损检测,无法保证预应力精轧螺纹钢筋张拉力达到设计要求。

解决竖向精轧螺纹钢筋预应力损失过大或失效问题最直接、最有效的途径就是提出一种及时、准确、有效的无损检测方法,并制定相应的检测标准。一方面,通过相关方法和检测标准制定能很好约束、

规范竖向预应力筋的施工行为,使其具有可控性;另一方面,有效的检测手段可以促使施工单位改进施工工艺,提高施工的可靠度,从而达到彻底解决竖向预应力损失过大和失效的问题。这些措施对防止预应力混凝土箱梁桥腹板开裂、提高耐久性和可靠性具有重要的意义。钟新谷等视竖向预应力精轧螺纹钢的外露段(含螺母段)为悬臂梁,提出了通过测试外露段固有频率变化,获得其有效张拉力的测试方法,该方法视螺母与精轧螺纹钢、螺母与锚垫板为固定连接,与实际接触联接不符,以其研究为基础编制了《预应力混凝土箱梁桥腹板竖向预应力精轧螺纹钢张拉力检测规程》(DB43/T 847—2013),在应用过程中发现精轧螺纹钢外露段过长时,测试张拉力会产生较大误差^[9-11]。鉴于此,本文放弃文献[9]、文献[10]中螺母与精轧螺纹钢、螺母与锚垫板固定连接假定,视预应力精轧螺纹钢锚固螺母与锚垫板为弹簧联接,联接弹簧的刚度为其接触面法向接触刚度;其钢筋螺纹与螺母螺纹同样为弹簧联接,联接弹簧刚度视螺纹为悬臂结构并基于图乘法计算,建立了预应力精轧螺纹钢锚固系统弯曲振动力学模型。考虑到精轧螺纹钢各螺纹传力的不均匀性,提出了其法向接触刚度的修正方程,并通过室内模型试验和多座桥梁的现场试验,验证了本文方法的可靠性。

1 基于锚固螺母与锚垫板、精轧螺纹钢接触联接的力学模型

基于图1建立的预应力精轧螺纹钢锚固体系力学模型如图2所示。设锚固螺母与锚垫板的法向接触刚度为 k ,锚固螺母与锚垫板视刚度为 k 的弹簧联接;放弃文献[9]、文献[10]精轧螺纹钢与锚固螺母固结的假定,图2(b)视精轧螺纹钢螺纹与锚固螺母螺纹相互作用刚度为 k_s 的弹簧联接。图2所示结构模型与机械工程螺栓紧固构件类似,文献[12]中视螺母与螺杆固结,研究了拉杆转子的横向振动,表明横向振动固有频率与螺栓紧固力成正比;文献[13]~文献[16]视螺杆螺纹与螺母螺纹为刚度 k_s 的弹簧联接,建立离散的螺母、螺杆模型,分析了不同机械联接的螺栓紧固构件轴向振动特性。本文以此为基础,建立精轧螺纹钢与螺母螺纹接触联接的横向振动力学模型。基于横向振动力学模型分析,在精轧螺纹钢外露段顶端横向安装加速度传感器,并连接到信号分析仪,在竖向预应力精轧螺纹钢外露的顶端用横向击振锤施加瞬态激励,得到

其振动信号,分析振动信号获得其横向振动固有频率,基于图2所示力学模型的横向振动固有频率与接触刚度 k 关系,得到接触刚度。基于接触刚度 k 与接触面的法向力(预应力精轧螺纹钢的锚固张拉力 T)存在单调增加关系^[17],间接识别预应力精轧螺纹钢的锚固张拉力。Tian等完成了144组机械接触面的法向和切向接触刚度试验,通过瞬态激励构件获得固有频率,基于接触面为弹簧联接和界面单元联接,建立分析模型识别不同法向应力情况下接触面法向刚度和切向刚度,研究表明通过瞬态激励具有类似有接触面的结构,获得固有频率识别接触面法向刚度具有可行性^[18-19]。

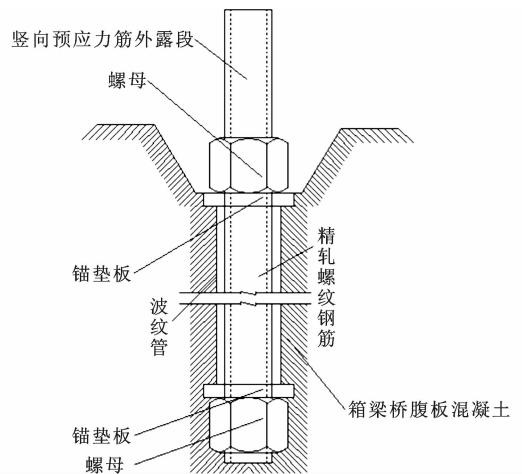


图1 预应力精轧螺纹钢构造示意

Fig. 1 Sketch of prestressing fine-rolling screw-thread steel bars structure

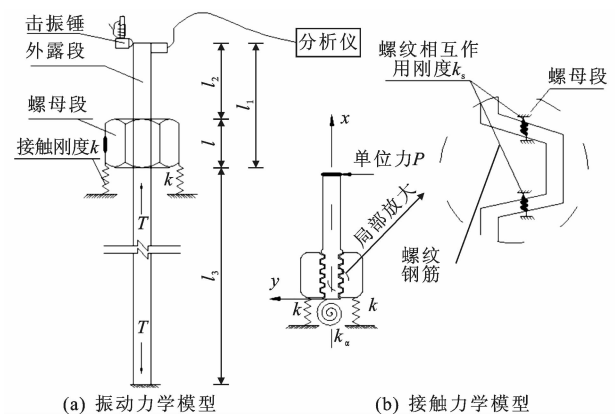


图2 预应力精轧螺纹钢振动力学模型及示意

Fig. 2 Sketch of vibration mechanical model of prestressing fine-rolling screw-thread steel bars structure

1.1 精轧螺纹钢锚固系统挠曲线方程

假定:①图2所示锚固螺母、精轧螺纹钢在螺母与锚垫板接触面无 y 方向位移;②锚固螺母与精轧螺纹钢通过螺纹接触传递轴力,视为刚度为 k_s

的弹簧联接;③横向弯曲时允许 y 方向锚固螺母与精轧螺纹钢产生滑移,忽略滑移对弯曲的影响。设锚固螺母段、锚固螺母段的精轧螺纹钢、外露段精轧螺纹钢挠曲线方程分别为

$$y_1 = a_{11}x^3 + a_{12}x^2 + a_{13}x \quad x \in 0, l \quad (1)$$

$$y_2 = b_{11}x^3 + b_{12}x^2 + b_{13}x \quad x \in 0, l \quad (2)$$

$$y_3 = c_{11}x^3 + c_{12}x^2 + c_{13}x + c_{14} \quad x \in 0, l + l_2 \quad (3)$$

式中: x 为沿精轧螺纹钢轴向的纵坐标; y_1 、 y_2 、 y_3 为挠度; a_{11} 、 a_{12} 、 a_{13} 、 b_{11} 、 b_{12} 、 b_{13} 、 c_{11} 、 c_{12} 、 c_{13} 、 c_{14} 均为待定系数; l 为螺母长度; l_2 为精轧螺纹钢外露段长度。

如图2所示,在单位力 P 作用下,设锚固螺母、精轧螺纹钢的抗弯刚度分别为 EI_1 、 EI_2 , 锚固螺母与锚垫板接触面弯矩平衡方程为

$$EI_1 y_1''|_{x=0} = y_1'|_{x=0} kR^2 \quad (4)$$

式中: E 为弹性模量; I_1 、 I_2 分别为锚固螺母与精轧螺纹钢的截面惯性矩; $y_1''|_{x=0}$ 、 $y_1'|_{x=0}$ 分别为 $x=0$ 时挠度 y_1 的二阶导数、一阶导数; R 为锚固螺母的内圆半径与外切圆半径之和的二分之一。

同时锚固螺母顶面弯矩平衡方程为

$$EI_1 y_1''|_{x=l} = 0 \quad (5)$$

精轧螺纹钢在锚固螺母与锚垫板接触面弯矩平衡方程为

$$EI_2 y_2''|_{x=0} = y_2'|_{x=0} k_a \quad (6)$$

式中: k_a 为锚固张拉段的抗弯刚度,基于小变形忽略轴力对弯曲耦合作用, $k_a = \frac{4EI_2}{l_3}$, l_3 为锚固张拉段长。

基于精轧螺纹钢弯矩连续有

$$EI_2 y_2''|_{x=l} = -l_2 \quad (7)$$

精轧螺纹钢弯矩平衡方程为

$$y_2'|_{x=0} k_a + \int_0^l (y_2'' - y_1'') k_s R_1^2 dx = l_1 \quad (8)$$

式中: k_s 为锚固螺母、精轧螺纹钢螺纹相互作用弹簧刚度 k_{st} 的均布值, $k_s = k_{st}/q$, q 为螺距; $y_2''|_{x=l}$ 、 $y_2'|_{x=l}$ 分别为 $x=l$ 时挠度 y_2 的二阶导数、一阶导数; R_1 为精轧螺纹钢半径; l_1 为 l 与 l_2 之和; y_1' 、 y_2' 分别为挠度 y_1 、 y_2 的一阶导数。

精轧螺纹钢锚固系统弯矩平衡方程为

$$y_1'|_{x=0} kR_1^2 + y_2'|_{x=0} k_a = l_1 \quad (9)$$

由式(4)~式(9),根据锚固螺母段、外露段精轧螺纹钢挠曲线方程连续条件可得

$$a_{11} = \frac{l_1}{6EI_1} - \frac{k_a}{3EI_1} \frac{Ak+B}{Ck+D}$$

$$a_{12} = \frac{-l_1}{2EI_1} + \frac{k_a}{2EI_1} \frac{Ak+B}{Ck+D}$$

$$a_{13} = \frac{l_1}{2kR_1^2} - \frac{k_a}{2kR_1^2} \frac{Ak+B}{Ck+D}$$

$$b_{11} = \frac{-l_2}{6EI_2} + \frac{k_a}{6EI_2} \frac{Ak+B}{Ck+D}$$

$$b_{12} = \frac{-k_a}{2EI_2} \frac{Ak+B}{Ck+D}$$

$$b_{13} = \frac{Ak+B}{Ck+D}$$

$$c_{11} = -\frac{1}{6EI_2}$$

$$c_{12} = \frac{l_2}{2EI_2}$$

$$c_{13} = 3b_{11}l^2 + 2b_{12}l + b_{13}$$

$$c_{14} = b_{11}l^3 + b_{12}l^2 + b_{13}l$$

其中

$$A = l_1 + k_s \left(\frac{l^3 l_2}{6EI_2} + \frac{l_1 l^3}{6EI_1} - \frac{l^2 l_1}{2EI_1} \right), B = \frac{l_1 k_s l}{2R^2},$$

$$C = k_a + l^3 \left(\frac{k_a}{6EI_2} + \frac{k_a}{6EI_1} \right) k_s - l^2 \left(\frac{k_a}{2EI_2} + \frac{k_a}{2EI_1} \right) k_s + lk_s, D = l \frac{k_a k_s}{2R^2}.$$

1.2 锚固螺母、精轧螺纹钢螺纹相互作用刚度

螺母与钢筋截面如图3所示,图中 d_t 、 d_v 、 d_s 分别为锚固螺母直径、精轧螺纹钢公称直径,螺纹最外缘直径。螺纹结构示意图见图4,图中 l_c 、 l_p 、 l_z 、 h 、 λ 、 φ 分别为螺纹螺距、螺纹底宽、一圈螺纹长度、螺纹高度、螺纹上侧面倾角、下侧面倾角。设 δ_s 为精轧螺纹钢的螺纹作用于锚固螺母螺纹接触线中点的位移,视螺纹高度方向为悬臂梁^[13-15],则悬臂梁的长度为螺纹高度 h ,设螺纹传递的轴向接触力等效为集中力 P_{sti} ,作用位置为 $y = h/2$,由图乘法可得 δ_s 为

$$\delta_s = \int_0^{\frac{h}{2}} \frac{\overline{M}M_p}{EI_p} dy =$$

$$\int_0^{\frac{h}{2}} \left[\frac{P_{sti}}{h} \left(\frac{h^2}{2} + \frac{y^2}{2} - hy \right) \right] \left(\frac{h}{2} - y \right) (I_p E)^{-1} dy \quad (10)$$

式中: \overline{M} 为单位荷载作用在螺纹接触线中点的螺纹弯矩; M_p 为均布荷载 $\frac{P_{sti}}{h}$ 作用在螺纹上的弯矩; I_p 为螺纹截面的惯性矩, $I_p = \frac{l_z [l_p - 2y \tan(\lambda)]^3}{12}$,近似计算可得 $l_z = \pi d_s$,由文献[20]得 $\lambda = \varphi = 45^\circ$ 。

将相关参数代入式(10),令 $\left(h^3 - \frac{l_p^3}{4} + \frac{10hl_p^2}{8} - 2h^2 l_p \right) \frac{(2l_p h - h^2)}{l_p^2 (l_p - h)^2} = F$, $\left(2h^2 - \frac{5hl_p}{2} + \frac{3}{4} l_p^2 \right) \cdot$

$\frac{2h}{l_p(l_p-h)}=G, \frac{5h-3l_p}{4} \ln\left(\frac{l_p-h}{l_p}\right)=H, \frac{h}{8}=J$, 得到 δ_s 显式表达为

$$\delta_s = \frac{3P_{sti}}{2\pi d_s h E} (F+G+H+J) \quad (11)$$

同理可得, 锚固螺母作用于精轧螺纹钢筋螺纹接触线中点的位移 δ_t 为

$$\delta_t = \frac{3P_{sti}}{2\pi d_s h E} (F+G+H+J) \quad (12)$$

由式(11)、式(12)可得, 锚固螺母与精轧螺纹钢筋螺纹相互作用的弹簧刚度为

$$k_{st} = \left(\frac{\delta_s}{P_{sti}} + \frac{\delta_t}{P_{sti}} \right)^{-1} \quad (13)$$

由式(13)可得, k_{st} 的均布值 k_s 表达式为

$$k_s = k_{st}/l_c \quad (14)$$

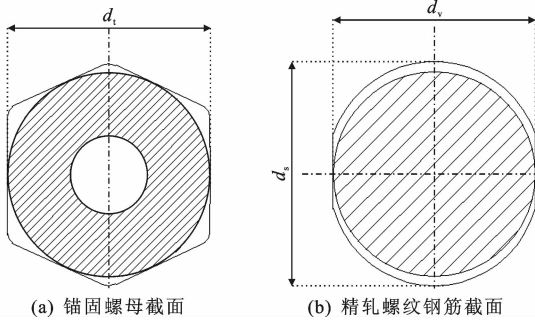


图3 螺母与钢筋截面

Fig. 3 Nut and steel bar sections

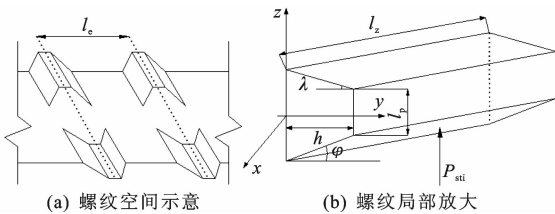


图4 螺纹结构示意图

Fig. 4 Sketch of screw structure

1.3 精轧螺纹钢筋锚固系统固有频率近似分析

如图2所示, 在单位力 P 作用下, 精轧螺纹钢筋锚固系统的最大荷载势能 U_{\max} 、最大动能 T_{\max} 分别为

$$U_{\max} = \frac{1}{2} y_3 \Big|_{x=l_2} = \frac{1}{2} (c_{11} l_2^3 + c_{12} l_2^2 + c_{13} l_2 + c_{14}) \quad (15)$$

$$T_{\max} = \frac{1}{2} \omega^2 \left[\int_0^l m_1 y_1^2 dx + \int_0^l m_2 y_2^2 dx + \int_0^{l_2} m_3 y_3^2 dx \right] \quad (16)$$

式中: m_1 、 m_2 为锚固螺母、精轧螺纹钢筋单位长度质量; ω 为一阶固有频率; $y_3 \Big|_{x=l_2}$ 为 $x=l_2$ 时挠度 y_3

的函数值。

由能量守恒定理、式(15)、式(16)得到的一阶固有频率近似解为

$$\omega^2 = \frac{U_{\max}}{T_{\max}} = \frac{c_{11} l_2^3 + c_{12} l_2^2 + c_{13} l_2 + c_{14}}{\int_0^l m_1 y_1^2 dx + \int_0^l m_2 y_2^2 dx + \int_0^{l_2} m_3 y_3^2 dx} \quad (17)$$

通过测试获得 ω , 按式(14)计算 k_s , 并将式(1)~式(3)中的相关参数代入式(17)中, 则可以求解锚固螺母与锚垫板接触面法向刚度 k 。

2 精轧螺纹钢筋横向振动固有频率、接触刚度与张拉力关系模型试验

2.1 模型制作与试验方案

试验模型为 3 000 mm(长)×3 600 mm(宽)×1 200 mm(高)的钢筋混凝土实体, 混凝土强度等级 C50。在模型内预留双排孔道, 每排 5 孔, 孔道的中心距约为 450 mm, 直径 50 mm。模型浇灌前在孔道两端设置了锚垫板和局部承压钢筋, 锚垫板钢材为 Q235。试验采用直径 32 mm 的 PSB780 精轧螺纹钢筋及配套 YGM/YGL 型锚具, 试验模型如图 5 所示。为了保持外露长度 l_2 不变, 在精轧螺纹钢筋上锚点安装测试力传感器并进行张拉精轧螺纹钢筋作业, 在下锚点进行测试, 本次试验共进行 5 根钢筋试验, 分别张拉到 100、200、300、400、500 kN。

2.2 精轧螺纹钢筋横向振动信号测试与接触刚度 k 计算

测试仪器为 Hi-Techniques 公司的 Synergy 信号分析仪, 采用灵敏度为 10 mV/(m/s²) 的 Brüel & Kjær 4514-B-001 型加速度传感器。试验步骤: 测量锚固螺母质量与高度, 测量精轧螺纹钢单位长度质量; 张拉完成后, 通过测力传感器获得锚固张拉力, 按图 2 所示安装加速度传感器, 启动信号分析仪, 采样频率 200 kHz; 在横向人工用击振锤击振精轧螺纹钢的外露段顶端, 击振锤锤头材料为邵氏硬度 D60 氯丁橡胶, 获得相应精轧螺纹钢横向振动信号, 并对其进行快速傅氏变换(FFT), 分别得到张拉力为 100、200、300、400、500 kN 精轧螺纹钢横向振动频率, 如表 1 所示。直径 32 mm 的 PSB780 精轧螺纹钢筋及配套 YGM/YGL 型锚具几何力学参数^[20]如下: 螺母长度 $l=0.07$ m, 螺母质量 $m_s=1.748$ kg, 钢筋单位体积质量 $\rho=7\,800$ kg/m³, 螺纹螺距 $l_c=0.016$ m, 螺纹底宽 $l_p=0.007$ m, 螺纹高度 $h=0.002$ m, $k_c=13\,725.43$ N·m/rad, 由式(14)计

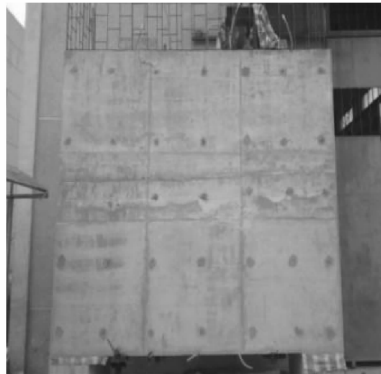
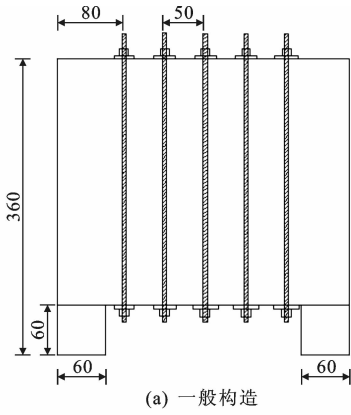


图 5 预应力精轧螺纹钢试验模型

Fig. 5 Experimental model of prestressing fine-rolling screw-thread steel bars

算的螺纹联接刚度 $k_{st} = 1.996\ 813 \times 10^9\ \text{N/m}$ 。表 1 测试结果、相关参数代入式(17)计算螺母与锚垫板接触面法向刚度值,如图 6 所示。

表 1 各外露段长度下的自振频率测试均值

Tab. 1 Testing mean values of natural vibration frequencies for each exposed segment length

| T/kN | 不同 l_2 (cm) 下的测试频率/Hz | | | | | |
|------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 |
| 100 | 512.8 | 405.9 | 338.5 | 274.0 | 260.8 | 211.0 |
| 200 | 537.7 | 455.7 | 367.8 | 301.8 | 278.4 | 231.5 |
| 300 | 553.8 | 467.4 | 383.9 | 316.5 | 285.8 | 243.2 |
| 400 | 565.5 | 471.8 | 392.7 | 325.3 | 290.1 | 249.1 |
| 500 | 574.3 | 474.7 | 400.0 | 331.1 | 293.0 | 252.0 |

2.3 基于精轧螺纹钢锚固系统螺纹传力特征的刚度值修正

由图 6 可知:对于同一外露长度,随张拉力增加,接触面法向刚度同步增加;张拉力相同情况下,随外露长度增加接触面法向刚度 k 值减少,但与相同法向力的接触面法向刚度相等规律不符^[18-19]。主要原因是锚固螺母与精轧螺纹钢的螺纹传递张拉力并不具有一致性,一般靠近接触面第 1 圈螺纹

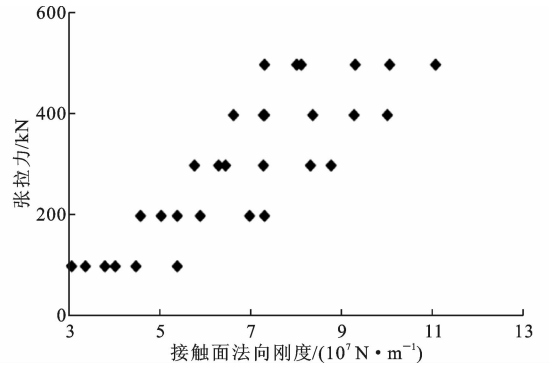


图 6 接触刚度 k 与张拉力 T 关系

Fig. 6 Relations between contact stiffness k and tension T

时传递的张拉力占总张拉力的 30%~40%,其他圈螺纹依次递减。在锚固段精轧螺纹钢与螺母存在非接触部分,精轧螺纹钢与螺母非接触长度比图 2 中的外露长度 l_2 要大,按固定长度计算就会出现图 6 所示情况。显然应对图 6 进行修正,经过多种修正方式比较,按下式可得到比较理想的修正结果

$$k_{tr} = k \frac{T}{T_e} \left(\frac{l_2}{0.08} \right)^{0.7} \quad (18)$$

式中: k_{tr} 为修正接触刚度; T_e 为精轧螺纹钢极限拉力,PSB780 精轧螺纹钢极限拉力取 630 kN。

文献[11]规定的精轧螺纹钢连接器的长度为 0.16 m,外露段的最小安全长度不能小于 0.08 m。将表 1 相关参数代入式(18)计算 k_{tr} 值如图 7 所示。由图 7 可知,修正后的螺母与锚垫板接触面法向刚度 k 值具有良好的收敛性,拟合张拉力与接触刚度关系曲线为 $T = 4.087\ 3 \times 10^{-6} k + 78.997$,其判定系数 $R^2 = 0.990\ 1$,表明张拉力与接触刚度具有良好的线性关系,并与文献[19]研究结果具有一致性。

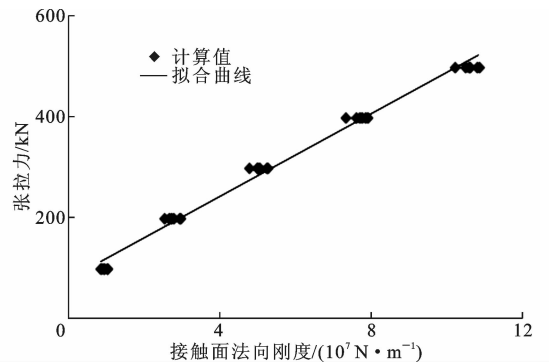


图 7 修正后接触刚度 k 与张拉力 T 关系

Fig. 7 Relations between contact stiffness k and tension T after correction

2.4 锚固张拉段 k_a 影响分析

预应力混凝土箱梁桥腹板竖向预应力筋的长度一般为 3~12 m, $k_a = 4 EI_2 / l_3$, 其值在 13 725.43~

3 431.36 N·m/rad。张拉段 k 与 T 的关系如图 8 所示。由图 8 可知,考虑锚固张拉段的刚度与否,不影响接触刚度与测试张拉力的线性关系,但影响线性关系的斜率,会对张拉力的测试精度产生影响,而文献[9]、文献[10]中未考虑锚固张拉段的影响。

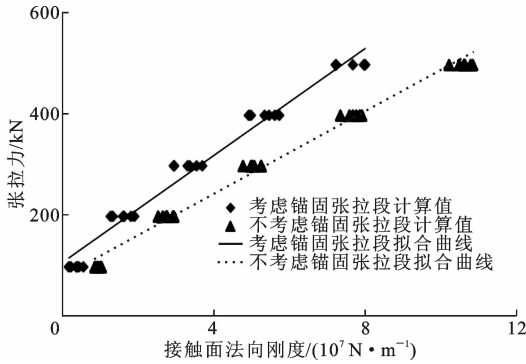


图 8 张拉段对接触刚度 k 与张拉力 T 关系的影响

Fig. 8 Influences of tension segment on relationships between contact stiffness k and tension T

3 接触刚度与张拉力关系现场试验

有效张拉力测量现场试验如图 9 所示^[21]。安装锚固螺母、通过连接套筒将待张拉的竖向预应力精轧螺纹钢联接、安装反力架、千斤顶、自锁螺母等,并在张拉千斤顶与自锁螺母之间安装测力传感器,安装磁力表座及百分表。启动油泵张拉千斤顶使竖向预应力精轧螺纹钢的张拉力达到预定张拉力,通过测力传感器测量张拉力,关闭油泵的回油阀。拧紧锚固螺母后,记录百分表数值,再次测量张拉力。放松千斤顶,再次记录百分表数值,拆除自锁螺母、反力装置等,有效张拉力计算参照文献[21]。按图 2 所示安装加速度传感器,与室内模型试验步骤相同,获得外露段固有频率。2008 年以来完成了 50 多座桥梁现场试验,其中现场测试的 5 座桥梁数据如表 2~表 6 所示。2013 年测试贵州黔中南水利枢纽工程草地坡渡槽、焦家渡槽;2014 年测试的贵州余凯(余庆—凯里)高速公路重安江大桥、黄平大桥;2017 年测试的贵州铜怀(铜仁—怀里)高速公路中木林大桥。所给出的桥梁竖向预应力筋均为直径 32 mm 的 PSB780 精轧螺纹钢。同理,将表 2~表 6 数据代入式(17)得到的接触刚度再代入式(18)进行变换,结果如图 10 所示。5 座桥梁的接触刚度与锚固张拉力关系表明,对于同一类型的精轧螺纹钢接触面法向刚度值与张拉力关系具有一致性。

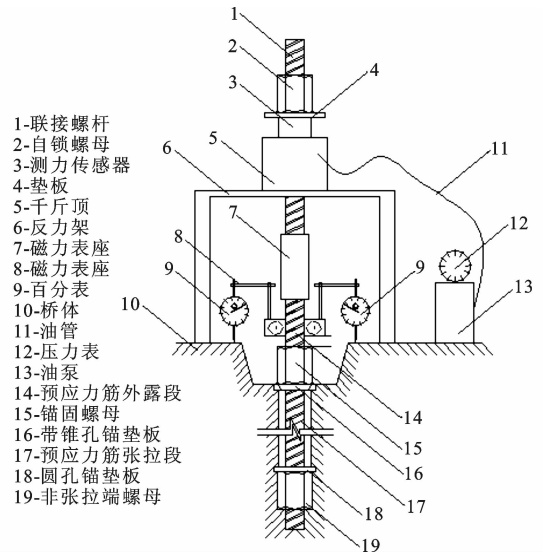


图 9 张拉工艺及回缩损失、张拉力测量示意

Fig. 9 Schematic of tension technology, retraction loss and tension measurement

表 2 重安江大桥试验数据

Tab. 2 Experimental data for Chonganjiang Bridge

| l_2/m | 测试频率/Hz | 有效张拉力 T/kN |
|---------|---------|--------------|
| 0.139 | 568.70 | 250.68 |
| 0.149 | 591.41 | 494.54 |
| 0.154 | 593.10 | 588.44 |
| 0.172 | 443.80 | 218.40 |
| 0.178 | 470.30 | 485.20 |
| 0.182 | 454.70 | 627.62 |
| 0.169 | 469.90 | 256.37 |
| 0.175 | 480.00 | 468.02 |
| 0.184 | 460.50 | 635.06 |
| 0.180 | 424.60 | 244.41 |
| 0.186 | 418.40 | 441.92 |
| 0.190 | 420.10 | 630.63 |
| 0.149 | 552.50 | 219.73 |
| 0.153 | 554.40 | 400.51 |
| 0.159 | 562.40 | 614.60 |

表 3 黄平大桥试验数据

Tab. 3 Experimental data for Huangping Bridge

| l_2/m | 测试频率/Hz | 有效张拉力 T/kN |
|---------|---------|--------------|
| 0.135 | 618.00 | 221.79 |
| 0.142 | 634.30 | 422.19 |
| 0.149 | 603.70 | 615.35 |
| 0.156 | 537.30 | 239.49 |
| 0.162 | 508.80 | 410.02 |
| 0.168 | 503.50 | 623.87 |
| 0.151 | 553.50 | 228.63 |
| 0.157 | 553.80 | 431.95 |
| 0.163 | 531.90 | 624.33 |
| 0.150 | 547.20 | 191.25 |
| 0.157 | 540.40 | 403.52 |
| 0.164 | 532.90 | 676.97 |

表 4 草地坡渡槽试验数据

Tab. 4 Experimental data for Caodipo Aqueduct

| l_2/m | 测试频率/Hz | 有效张拉力 T/kN |
|---------|---------|--------------|
| 0.216 | 320.60 | 89.74 |
| 0.223 | 316.70 | 227.54 |
| 0.236 | 301.90 | 411.49 |
| 0.240 | 295.70 | 494.08 |
| 0.244 | 290.60 | 615.38 |
| 0.194 | 335.80 | 185.16 |
| 0.202 | 358.50 | 165.74 |
| 0.213 | 356.80 | 345.47 |
| 0.218 | 345.00 | 483.35 |
| 0.224 | 335.00 | 586.15 |

表 5 焦家渡槽试验数据

Tab. 5 Experimental data for Jiaojia Aqueduct

| l_2/m | 测试频率/Hz | 有效张拉力 T/kN |
|---------|---------|--------------|
| 0.207 | 341.90 | 287.27 |
| 0.214 | 348.80 | 431.31 |
| 0.219 | 342.10 | 626.08 |
| 0.171 | 427.50 | 392.82 |
| 0.179 | 456.80 | 447.24 |
| 0.182 | 446.20 | 662.04 |
| 0.131 | 641.50 | 303.08 |
| 0.138 | 645.20 | 506.07 |
| 0.143 | 636.00 | 676.59 |
| 0.193 | 400.30 | 218.93 |
| 0.199 | 394.20 | 451.00 |
| 0.205 | 390.00 | 602.54 |
| 0.180 | 393.70 | 212.95 |
| 0.188 | 432.00 | 502.30 |
| 0.193 | 422.20 | 593.94 |
| 0.173 | 439.30 | 230.14 |
| 0.181 | 413.40 | 461.47 |
| 0.192 | 396.50 | 629.27 |

4 预应力筋张拉力测试原理应用

按照图 9 所示方法,分级张拉预应力筋,一般从 200 kN 开始,每级增加 100~200 kN,至设计张拉力,每级按文献[21]计算锚固张拉段的有效张拉力,测量相应外露段的几何参数等,测试外露段频率。按式(17)计算接触刚度 k 并按式(18)进行变换,重复上述过程,完成 3 根竖向预应力筋试验。用最小二乘法拟合接触刚度 k_{r} 与张拉力的线性方程为

$$T = ak_{\text{r}} + b \quad (19)$$

式中: a 、 b 为拟合参数。

预应力筋张拉施工完成后,按照图 2 所示方法测试外露段频率,测量预应力钢筋相关几何参数,按

表 6 中木林大桥试验数据

Tab. 6 Experimental data for Zhongmulin Bridge

| l_2/m | 测试频率/Hz | 有效张拉力 T/kN |
|---------|---------|--------------|
| 0.278 | 225.36 | 202.6 |
| 0.283 | 217.97 | 370.3 |
| 0.289 | 212.12 | 452.6 |
| 0.294 | 210.94 | 556.3 |
| 0.243 | 274.22 | 192.3 |
| 0.250 | 267.19 | 349.6 |
| 0.257 | 261.33 | 474.8 |
| 0.260 | 255.47 | 580.0 |
| 0.277 | 216.83 | 195.4 |
| 0.286 | 213.29 | 349.1 |
| 0.297 | 202.74 | 550.4 |
| 0.299 | 203.91 | 560.1 |
| 0.273 | 214.46 | 217.8 |
| 0.282 | 214.40 | 344.4 |
| 0.287 | 208.64 | 449.8 |
| 0.295 | 202.74 | 578.0 |
| 0.264 | 221.49 | 194.9 |
| 0.273 | 230.87 | 353.1 |
| 0.277 | 223.83 | 455.3 |
| 0.288 | 216.83 | 587.5 |
| 0.215 | 323.44 | 186.8 |
| 0.222 | 323.44 | 350.7 |
| 0.227 | 311.73 | 455.6 |
| 0.235 | 304.69 | 584.0 |

规范^[20]确定预应力钢筋相关力学参数。按式(17)计算接触刚度 k ,由式(18)、式(19)得

$$T = ak \frac{T}{T_e} \left(\frac{l_1}{0.08} \right)^{0.7} + b \quad (20)$$

由式(20)得预应力筋张拉力为

$$T = \frac{b}{1 - ak/T_e (l_1/0.08)^{0.7}} \quad (21)$$

相关的计算过程嵌固在信号分析仪器内,形成专用预应力筋张拉力测试仪(发明专利:ZL200810143752.8),测试过程如图 11 所示。

5 结 语

(1)本文视精轧螺纹钢与锚固螺母竖向弹簧联接,基于参考文献中的轴向分析拓展至弯曲分析,模型试验与现场试数据均表明其具有可行性,视锚固螺母与锚垫板接触联接表明法向接触刚度与张拉力关系具有稳定性。

(2)通过精轧螺纹钢锚固系统精轧螺纹钢外露长度修正,解决了外露长度过长时张拉力测试偏小的问题,大量的数据分析表明其修正方式具有

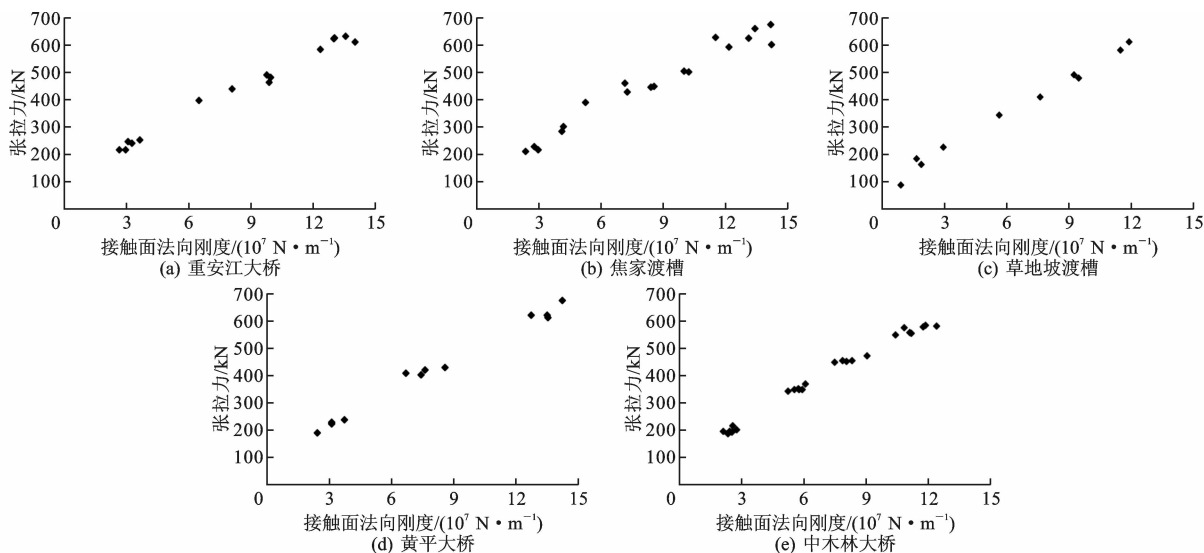


图 10 5 座大桥接触刚度 k 与张拉力 T 关系

Fig. 10 Relations between contact stiffness k and tension T for 5 bridges

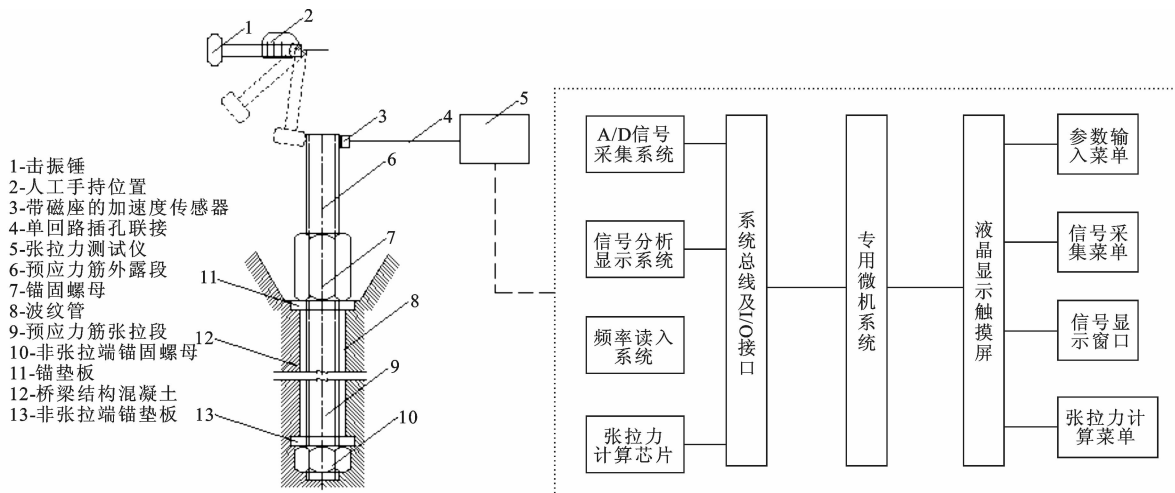


图 11 仪器组成与测试示意

Fig. 11 Instrument composition and test

良好一致性,并应用于交通运输部行业标准《桥梁用预应力精轧螺纹钢张拉力检测方法》(JT 2015—173)(报批稿)。

(3) 本文研究扩展了螺栓类结构的分析领域,同时对于土木工程类似结构的张拉力、类似机械结构的紧固力测试与分析具有参考意义。

(4) 本文在考虑精轧螺纹钢与锚固螺母弹簧联接时忽略了螺纹之间的剪切作用,其对分析和测试结果的影响需进一步研究。

参考文献:

References:

[1] 刘一吾. 大跨径 PC 连续刚构桥的合理构造与腹板裂缝机理研究[D]. 西安:长安大学,2012.

LIU Yi-wu. The reasonable structure of long-span PC continuous rigid frame and web crack research[D]. Xi'an:Chang'an University,2012.

[2] 周军生,楼庄鸿. 大跨径预应力混凝土连续刚构桥的现状和发展趋势[J]. 中国公路学报,2000,13(1):31-36.

ZHOU Jun-sheng, LOU Zhuang-hong. The status quo and developing trends of large span prestressed concrete bridges with continuous rigid frame structure [J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(1):31-36.

[3] 方志,汪剑. 预应力混凝土箱梁桥竖向预应力损失的实测与分析[J]. 土木工程学报,2006,39(5):78-84.

FANG Zhi, WANG Jian. Vertical prestressing loss in

- the box girder of long-span PC continuous bridges [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(5): 78-84.
- [4] 钟新谷. 预应力混凝土连续箱梁桥裂缝分析防治及钢箱-混凝土组合梁研究[D]. 长沙:湖南大学,2002.
ZHONG Xin-gu. Analysis and prevention of the cracks in continuous prestressed concrete box-girder bridges and research on concrete-filled steel box composite beams [M]. Changsha: Hunan University, 2002.
- [5] 王东东. 预应力作用下混凝土箱梁桥空间应力分析[D]. 长沙:长沙理工大学,2013.
WANG Dong-dong. The study on spatial stress of concrete box girder bridge under the influence of prestress[D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2013.
- [6] SENNAH K M, KENNEDY J B. Literature review in analysis of box-girder bridges[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2002, 7(2): 134-143.
- [7] 程翔云, 尚春青. 对箱形截面连续梁活载内力增大系数公式的评述[J]. *公路*, 2000(1): 17-19.
CHENG Xiang-yun, SHANG Chun-qing. A review on the formula of the stress amplification coefficient in continuous box-girder bridge[J]. *Highway*, 2000(1): 17-19.
- [8] 王勇, 刘永健, 唐小方. 混凝土连续箱梁偏载系数简化算法研究[J]. *长沙交通学院学报*, 2006, 22(3): 35-39.
WANG Yong, LIU Yong-jian, TANG Xiao-fang. Study on the simplified calculations of the eccentric-loaded coefficients of the continuous concrete box-beam[J]. *Journal of Changsha Communications University*, 2006, 22(3): 35-39.
- [9] 钟新谷, 杨滔, 沈明燕, 等. 混凝土箱梁桥腹板竖向预应力筋张拉力检测方法[J]. *中国公路学报*, 2010, 23(4): 64-69.
ZHONG Xin-gu, YANG Tao, SHEN Ming-yan, et al. Dynamic method for the tension test of vertical prestressing bars in webs of concrete box girder bridges [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2010, 23(4): 64-69.
- [10] ZHONG Xin-gu, YANG Tao, SHEN Ming-yan, et al. Method for testing the tension of vertical prestressing bars in webs of concrete box girder bridges[J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2011, 16(3): 438-444.
- [11] DB 43/T 847—2013, 预应力混凝土箱梁桥腹板竖向预应力精轧螺纹钢筋张拉力检测规程[S].
DB 43/T 847—2013, Standard for detecting tension force of vertical prestressing fine rolling steel bars in web of PC box[S].
- [12] 汪光明, 饶柱石, 夏松波. 拉杆转子力学模型的研究[J]. *航空学报*, 1993, 14(8): 419-423.
WANG Guang-ming, RAO Zhu-shi, XIA Song-bo. The analysis of mechanical model of rod fastening rotor [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1993, 14(8): 419-423.
- [13] DAABDIN A. Static and dynamic analysis of knuckle shape threaded joints [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 1990, 25(2): 225-232.
- [14] CHEN J H, HSIEH S C, LEE A C. The failure of threaded fasteners due to vibration[J]. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 2005, 219(3): 299-314.
- [15] DAADBIN A, CHOW Y M. A theoretical model to study thread loosening [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 1992, 27(1): 69-74.
- [16] WILEMAN J, CHOUDHURY M, GREEN I. Computation of member stiffness in bolted connections[J]. *Journal of Mechanical Design*, 1991, 113(4): 432-437.
- [17] FU W P, HUANG Y M, ZHANG X L, et al. Experimental investigation of dynamic normal characteristics of machined joint surfaces [J]. *Journal of Vibration and Acoustics*, 2000, 122(4): 393-398.
- [18] TIAN H, LI B, LIU H, et al. A new method of virtual material hypothesis-based dynamic modeling on fixed joint interface in machine tools[J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2011, 51(3): 239-249.
- [19] MAJUMDAR A, BHUSHAN B. Fractal model of elastic-plastic contact between rough surfaces[J]. *Journal of Tribology*, 1991, 113(1): 1-11.
- [20] GB/T 20065—2006, 预应力精轧螺纹钢规范[S].
GB/T 20065—2006, Screw-thread steel bars for the prestressing of concrete[S].
- [21] 钟新谷, 颜永先, 沈明燕, 等. 预应力混凝土箱梁桥腹板竖向预应力回缩损失控制与测试分析[J]. *铁道学报*, 2014, 36(8): 98-103.
ZHONG Xin-gu, YAN Yong-xian, SHEN Ming-yan, et al. Research on vertical prestress loss in webs of prestressed concrete box girder due to anchorage slip [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2014, 36(8): 98-103.