



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 112014310 A

(43) 申请公布日 2020.12.01

(21) 申请号 202010930217.8

(22) 申请日 2020.09.07

(71) 申请人 广西大学

地址 530004 广西壮族自治区南宁市西乡塘区大学东路100号

(72) 发明人 谢开仲 梁亦登

(74) 专利代理机构 广西南宁公平知识产权代理有限公司 45104

代理人 蓝文苑 杨立华

(51) Int. Cl.

G01N 19/00 (2006.01)

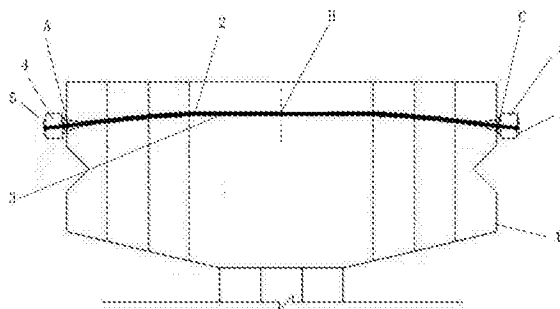
权利要求书3页 说明书9页 附图2页

(54) 发明名称

一种预应力管道摩阻损失试验及计算方法

(57) 摘要

本发明提供的预应力管道摩阻损失计算方法,该试验及计算方法包含:(1)对预应力钢束进行多次不对称张拉和对称张拉操作并记录相关数据;(2)基于赫兹接触理论中的应力均匀分布原理,推导出预应力管道摩阻影响系数的计算公式;(3)根据推导的计算公式,利用两次张拉的预应力钢束伸长量差值计算预应力管道摩阻影响系数,评估预应力摩阻损失。本发明的方法基于赫兹接触理论的应力均分布原理以及巧妙运用了胡克定律,试验方法便捷经济,能够有效合理地计算出预应力管道摩阻影响系数和预应力摩阻损失值,适用于预应力钢束对称布置的预应力混凝土桥梁,本发明的预应力管道摩阻损失试验方法测试方便快捷、效率高、成本低廉、经济性好、准确率高。



1. 一种预应力管道摩阻损失试验方法,其特征在于:对两端锚固定的主桥梁内预应力管道两侧的预应力钢束分别进行多次不对称张拉和对称张拉,不对称张拉是张拉预应力钢束一端,对称张拉是同时张拉预应力钢束两端。

2. 根据权利要求1所述的预应力管道摩阻损失试验方法,其特征在于,试验方法包括如下步骤:

①分别设定主桥梁内预应力管道两侧的预应力钢束一端为A端,中点为B端,另一端为C端,在预应力钢束A端和C端分别安装千斤顶,并分别通过工具锚固定;

②所述不对称张拉为张拉A端至设计控制张拉力,C端固定不张拉,通过压力表读取并记录预应力钢束A端各工况下的张拉力,通过钢板尺测量并记录相应各工况下的预应力钢束伸长量;

③所述对称张拉为松开A端工具锚让预应力钢束回到无张拉状态,同时张拉预应力钢束A、C两端至设计张拉控制力值,则 $N_A=N_C=N_{con}$ ,此时AB段和BC段预应力钢束平均张拉力相等,通过压力表读取并记录预应力钢束A端和B端在各工况下的张拉力,通过钢板尺测量并记录相应各工况下的预应力钢束伸长量;

④对调预应力钢束的A端和C端,重复三次步骤②和③的操作。

3. 根据权利要求2所述的一种预应力管道摩阻损失试验方法,其特征在于,所述不对称张拉和对称张拉均采用分级加载,分别以张拉力的10%、25%、50%、75%、100%张拉。

4. 根据权利要求2所述的一种预应力管道摩阻损失试验方法,其特征在于,所述不对称张拉AC段预应力钢束平均张拉力的计算公式为:

$$\bar{N}_{AC} = \frac{N_A(1 - e^{-(kL + \mu\theta_L)})}{kL + \mu\theta_L} \quad (18)$$

式中: $\bar{N}_{AC}$ 表示AC段预应力钢束平均张拉力; $N_A$ 表示预应力钢束A端张拉力; $e$ 表示自然常数; $L$ 表示AC段长度(m); $\theta_L$ 表示预应力钢束理论空间曲线包角; $k$ 表示实际管道偏差影响系数; $\mu$ 表示实际管道摩擦影响系数。

5. 根据权利要求2所述的一种预应力管道摩阻损失试验方法,其特征在于,所述对称张拉AB段和BC段预应力钢束平均张拉力的计算公式为:

$$\bar{N}_{AB} = \bar{N}_{BC} = \frac{N_{con}(1 - e^{-\frac{1}{2}(kL + \mu\theta_L)})}{\frac{1}{2}(kL + \mu\theta_L)} \quad (20)$$

式中: $\bar{N}_{AB}$ 表示AB段预应力钢束平均张拉力; $\bar{N}_{BC}$ 表示BC段预应力钢束平均张拉力; $N_{con}$ 表示设计控制张拉力; $e$ 自然常数; $\theta_L$ 表示预应力钢束理论空间曲线包角; $k$ 表示实际管道偏差影响系数, $\mu$ 表示实际管道摩擦影响系数。

6. 一种预应力管道摩阻损失计算方法,其特征在于,包括如下步骤:

(1)假设主桥梁内预应力管道两侧的预应力钢束与弯曲部分管道内壁相贴,从弯道上取某微分段为分离体,通过求和管道弯曲引起的摩擦阻力和管道偏差引起的摩擦阻力,获得预应力钢束在某微分段内管道总摩擦力和管道摩擦引起的总预应力损失的计算公式;

(2)通过权利要求1的预应力管道摩阻损失试验方法获得的试验数据,分别计算出多个

工况下的预应力钢束不对称张拉和对称张拉的平均张拉力,获得两种张拉情况下的预应力钢束伸长量差值的计算公式;

(3) 通过整理分析步骤(2)的数据,获得实际管道摩擦影响系数和管道偏差影响系数的计算公式,并计算出实际管道摩擦影响系数和管道偏差影响系数;

(4) 通过步骤(3)的实际管道摩擦影响系数和管道偏差影响系数代入步骤(1)中的管道摩擦引起的总预应力损失的计算公式,计算出实际管道摩擦引起的总预应力损失值。

7. 根据权利要求6所述的一种预应力管道摩阻损失计算方法,其特征在于,所述预应力钢束伸长量差值计算公式为:

$$2 \cdot \frac{\frac{1}{2} L \bar{N}_{AB}}{AE_p} - \frac{L \bar{N}_{AC}}{AE_p} = \Delta L \quad (21)$$

式中: $\bar{N}_{AB}$ 表示AB段预应力钢束平均张拉力; $\bar{N}_{BC}$ 表示BC段预应力钢束平均张拉力;A表示预应力钢束截面面积( $m^2$ ); $E_p$ 表示预应力钢束弹性模量;L表示预应力钢束AC段长度; $\Delta L$ 表示不对称张拉和对称张拉情况下预应力钢束伸长量差值(m)。

8. 根据权利要求6所述的一种预应力管道摩阻损失计算方法,其特征在于,所述实际管道摩阻影响系数的计算公式如下:

$$1 - 2e^{-0.5y} + e^{-y} - ay = 0 \quad (23)$$

式中: $y$ 为 $kL + \mu\theta_L$ ,其中 $\mu$ 表示管道摩擦影响系数, $k$ 表示管道偏差影响系数,L表示预应力钢束AC段长度, $\theta_L$ 表示预应力钢束理论空间曲线包角; $a$ 为 $\frac{\Delta LE_p}{L\sigma_{con}}$ ,其中 $\Delta L$ 表示不对称张拉和对称张拉情况下预应力钢束伸长量差值(m), $E_p$ 表示预应力钢束弹性模量, $\sigma_{con}$ 表示设计张拉控制应力。

9. 根据权利要求6所述的一种预应力管道摩阻损失计算方法,其特征在于,所述实际管道摩擦影响系数 $\mu$ 和管道偏差影响系数 $k$ 的计算公式如下:

$$\begin{cases} \mu \sum_{i=x}^n \theta_{Li}^2 + k \sum_{i=x}^n \theta_{Li} L_i - \sum_{i=x}^n \theta_{Li} y_i = 0 \\ \mu \sum_{i=x}^n \theta_{Li} L_i + k \sum_{i=x}^n L_i^2 - \sum_{i=x}^n L_i y_i = 0 \end{cases} \quad (27)$$

式中: $y_i$ 表示第*i*管道测试数据对应的数值解; $L_i$ 表示第*i*个管道对应的预应力钢束空间曲线长度; $\theta_{Li}$ 表示第*i*个管道对应的理论预应力钢束空间曲线包角(rad); $n$ 表示实测管道数目, $\mu$ 表示实际管道摩擦影响系数, $k$ 表示管道偏差影响系数。

10. 根据权利要求6所述的一种预应力管道摩阻损失计算方法,其特征在于,所述实际管道摩擦引起的总预应力损失值的计算公式为:

$$N_s = N_{con} - N_x = N_{con} \cdot (1 - e^{-(\mu\theta + kx)}) \quad (16)$$

将式(27)计算出的管道摩擦影响系数 $\mu$ 和管道偏差影响系数 $k$ 代入式(16),计算出管道摩擦引起的预应力损失量;

式中, $N_s$ 表示管道摩擦引起的总预应力损失值, $N_x$ 表示距离张拉端管道长度为*x*处的预应力钢束轴向力, $N_{con}$ 表示设计控制张拉力; $x$ 表示预应力钢束某位置; $\theta$ 表示预应力钢束空

间弯曲角; $e$ 表示自然常数。

## 一种预应力管道摩阻损失试验及计算方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于桥梁工程中的预应力混凝土桥梁预应力管道摩阻损失测试领域,涉及一种预应力管道摩阻损失试验及计算方法。

### 背景技术

[0002] 目前测试预应力管道摩阻损失的方法主要有应变分布法和拉力比法。

[0003] 1) 应变分布法。应变分布法即沿预应力筋长度方向不同位置粘贴应变片,并通过锚具预留出的孔眼将测试导线引出。通过测试预应力筋沿长度方向应变的变化情况,求得各阶段预应力管道摩阻损失,进而求得相关管道摩阻影响系数。采用应变分布法测试预应力孔道摩阻损失参数时,计算精度受测试误差的影响相对较小,只要合理布置测试点即可有效控制测试误差在求解过程中的放大现象。但该测试方法需要大量应变片,布置繁琐复杂,只适合在理论研究中采用,不适合在实际工程测试工作中推广。

[0004] 2) 拉力比法。被测试预应力钢束在安装时,直接在锚垫板前安装压力传感器,然后安装工作锚、夹片和限位板,钢束一端作为主动端进行张拉,另一端固定作为被动端不张拉,通过压力传感器测试两端拉力差值,可知预应力摩阻损失量,从而求得管道摩阻影响系数。拉力比法虽然测试过程相对方便,但测试误差在求解过程中会被明显放大,特别是当测试预应力钢束角度差较小、测试钢束长较短的情况下,测试误差放大现象更为明显,致使测试结果的离散性较大。

### 发明内容

[0005] 针对上述现有技术存在的问题,本发明提供测试方便快捷、效率高、成本低廉、准确率高的一种预应力管道摩阻损失试验及计算方法,具体方案如下:

[0006] 一种预应力管道摩阻损失试验方法,对两端锚固定的主桥梁内预应力管道两侧的预应力钢束分别进行多次不对称张拉和对称张拉,不对称张拉是张拉预应力钢束一端,对称张拉是同时张拉预应力钢束两端。

[0007] 进一步地,试验方法包括如下步骤:

[0008] ①分别设定主桥梁内预应力管道两侧的预应力钢束一端为A端,中点为B端,另一端为C端,在预应力钢束的A端和C端分别安装千斤顶,并分别通过工具锚固定;

[0009] ②所述不对称张拉为张拉A端至设计控制张拉力,C端固定不张拉,通过压力表读取并记录AC段预应力钢束各工况下的张拉力,通过钢板尺测量并记录相应各工况下的预应力钢束伸长量;

[0010] ③所述对称张拉为松开A端工具锚让预应力钢束回到无张拉状态,同时张拉预应力钢束两端至设计张拉控制力值,则 $N_A=N_C=N_{con}$ ,此时AB段和BC段预应力钢束平均张拉力相等,通过压力表读取并记录AB段和BC段预应力钢束各工况下的张拉力,通过钢板尺测量并记录相应各工况下的预应力钢束伸长量;

[0011] ④对调预应力钢束的A端和C端,重复三次步骤②和③的操作。

[0012] 进一步地,所述不对称张拉和对称张拉均采用分级加载,分别以张拉力的10%、50%、100%张拉。

[0013] 进一步地,所述AC段预应力钢束平均张拉力的计算公式为:

$$[0014] \quad \bar{N}_{AC} = \frac{N_A(1 - e^{-(kL + \mu\theta_L)})}{kL + \mu\theta_L} \quad (18)$$

[0015] 式中: $\bar{N}_{AC}$ 表示AC段预应力钢束平均张拉力; $N_A$ 表示预应力钢束A端张拉力; $e$ 表示自然常数; $L$ 表示AC段长度(m); $\theta_L$ 表示预应力钢束理论空间曲线包角; $k$ 表示实际管道偏差影响系数, $\mu$ 表示实际管道摩擦影响系数。

[0016] 进一步地,所述AB段和BC段预应力钢束平均张拉力的计算公式为:

$$[0017] \quad \bar{N}_{AB} = \bar{N}_{BC} = \frac{N_{con}(1 - e^{-\frac{1}{2}(kL + \mu\theta_L)})}{\frac{1}{2}(kL + \mu\theta_L)} \quad (20)$$

[0018] 式中: $\bar{N}_{AB}$ 表示AB段预应力钢束平均张拉力; $\bar{N}_{BC}$ 表示BC段预应力钢束平均张拉力; $N_{con}$ 表示设计控制张拉力; $e$ 表示自然常数; $\theta_L$ 表示理论弯曲角, $k$ 表示实际管道偏差影响系数, $\mu$ 表示实际管道摩擦影响系数。

[0019] 所述的一种预应力管道摩阻损失试验方法适用于预应力钢束对称布置的预应力混凝土桥梁。

[0020] 一种预应力管道摩阻损失计算方法,包括如下步骤:

[0021] (1)假设主桥梁内预应力管道两侧的预应力钢束与弯曲部分管道内壁相贴,从弯道上取某微分段为分离体,通过求和管道弯曲引起的摩擦阻力和管道偏差引起的摩擦阻力,获得预应力钢束在某微分段内管道总摩擦力和管道摩擦引起的总预应力损失的计算公式;

[0022] (2)通过权利要求1的预应力管道摩阻损失试验方法获得的试验数据,计算出预应力钢束不对称张拉和对称张拉的平均张拉力,并获得两种张拉情况下的预应力钢束伸长量差值的计算公式;

[0023] (3)通过整理分析步骤(2)的试验数据,获得实际管道摩擦影响系数和管道偏差影响系数的计算公式,并计算出实际管道摩擦影响系数和管道偏差影响系数;

[0024] (4)通过步骤(3)的实际管道摩擦影响系数和管道偏差影响系数代入步骤(1)中的管道摩擦引起的总预应力损失的计算公式,计算出实际管道摩擦引起的总预应力损失值。

[0025] 进一步地,所述预应力钢束伸长量差值计算公式为:

$$[0026] \quad 2 \cdot \frac{\frac{1}{2}L\bar{N}_{AB}}{AE_p} - \frac{L\bar{N}_{AC}}{AE_p} = \Delta L \quad (21)$$

[0027] 式中: $L$ 表示AC段长度; $\bar{N}_{AB}$ 表示AB段预应力钢束平均张拉力; $\bar{N}_{BC}$ 表示BC段预应力钢束平均张拉力; $A$ 表示预应力钢束截面面积( $m^2$ ); $E_p$ 表示预应力钢束弹性模量; $\Delta L$ 表示两次张拉情况下预应力钢束伸长量差值(m)。

[0028] 进一步地,所述实际管道摩擦影响系数 $\mu$ 和管道偏差影响系数 $k$ 的计算公式如下:

$$[0029] \quad \begin{cases} \mu \sum_{i=x}^n \theta_{Li}^2 + k \sum_{i=x}^n \theta_{Li} L_i - \sum_{i=x}^n \theta_{Li} y_i = 0 \\ \mu \sum_{i=x}^n \theta_{Li} L_i + k \sum_{i=x}^n L_i^2 - \sum_{i=x}^n L_i y_i = 0 \end{cases} \quad (27)$$

[0030] 式中： $y_i$ 表示第*i*管道测试数据对应的数值解； $L_i$ 表示第*i*个管道对应的预应力钢束空间曲线长度； $\theta_{Li}$ 表示第*i*个管道对应的理论预应力钢束空间曲线包角(rad)； $n$ 表示实测管道数目， $\mu$ 表示实际管道摩擦影响系数， $k$ 表示管道偏差影响系数。

[0031] 进一步地，所述实际管道摩擦引起的总预应力损失值的计算公式为：

$$[0032] \quad N_s = N_{con} - N_x = N_{con} \cdot (1 - e^{-(\mu\theta + kx)}) \quad (16)$$

[0033] 将式(27)计算出的管道摩擦影响系数 $\mu$ 和管道偏差影响系数 $k$ 代入式(16)，计算出管道摩擦引起的预应力损失量；

[0034] 式中， $N_s$ 表示管道摩擦引起的总预应力损失值， $N_x$ 表示距离张拉端管道长度为*x*处的预应力钢束轴向力 $N_{con}$ 表示设计控制张拉力； $x$ 表示预应力钢束某位置； $\theta$ 表示预应力钢束空间弯曲角； $e$ 表示自然常数。

[0035] 本发明的优点

[0036] (1) 本发明的预应力管道摩阻损失试验方法测试方便快捷、效率高。

[0037] 在传统的试验方法中，采用应变分部法测量预应力损失，操作复杂，不适用于实际工程；采用拉力比法测量预应力损失，需要在预应力钢束张拉两端安装传感器，测量误差较大。本发明提出的试验方法无需安装应变片或传感器，主要利用现有张拉设备，通过对预应力钢束多次不对称和对称张拉即可获得试验所需数据，试验过程方便快捷，有效节省试验时间，避免影响施工进度。

[0038] (2) 本发明的预应力管道摩阻损失试验方法成本低廉，经济性好。

[0039] 在传统的试验方法中，应变分部法需要购买大量的应变片粘贴在预应力钢束上，拉力比法也需要使用精确昂贵的大吨位压力传感器，本发明提出的试验方法则不需要使用应变片和传感器，更具经济性。

[0040] (3) 本发明的预应力管道摩阻损失试验方法和计算方法获得的摩阻影响系统和管道偏差影响系数准确率高。

[0041] 在传统的试验方法中，应变分部法主要采用应变片获取预应力钢束不同位置的应变，测量结果依赖于应变片的测量精度，试验过程的应变测量误差也会在计算摩阻影响系数过程中放大，特别是具有平弯或竖弯的预应力钢束；拉力比法采用压力传感器测量预应力钢束两端拉力从而得知预应力损失，测量结果也依赖于传感器精度，测量误差也会在计算摩阻影响系数过程中被明显放大，计算结果离散性较大。本发明提出的试验方法中，对预应力钢束进行多次不对称张拉和对称张拉，基于胡克定律，利用两种张拉方式下预应力钢束的伸长量差值直接求得预应力损失，有效避免了应变片的测量误差，摩阻影响系数计算结果精度更高。

## 附图说明

[0042] 图1为主桥梁纵向截面内预应力管道的预应力钢束张拉示意图。

[0043] 图2为图1的预应力钢束张拉过程中管道弯曲段的某一微分段的管道弯曲摩阻力

示意图。

[0044] 图3为图1的预应力钢束张拉过程中管道直线段的某一微分段的管道偏差摩阻力示意图。

[0045] 图4为图1实桥仿真数值模型在不同摩阻系数下0号块应力和实际工程应力实测对比图。

[0046] 图1中：

[0047] 1:主桥梁;2:预应力管道;3:预应力钢束;4:千斤顶;5:工具锚;

[0048] 图2中：

[0049]  $d1$ :预应力钢束微分段; $R_1$ :微分段曲率半径; $d\theta$ :微分段对应的圆心角; $dF_1$ :微分段上的摩阻力; $N$ :微分段 $d1$ 左端沿切线方向的作用力; $N+dN$ :右端沿切线方向的作用力; $dP$ :预应力钢束与微段管壁间的法向压力; $dF$ :某微分段内管道总摩擦力;

[0050] 图3中：

[0051]  $d1_2$ :直线段预应力钢束微分段; $R_2$ :平均曲率半径; $d\theta_2$ :相应的弯曲角度; $dF_2$ :微分段上的摩阻力; $N_2$ :微分段 $d1_2$ 左端沿切线方向的作用力; $N_2+dN_2$ :右端沿切线方向的作用力; $dP_2$ :预应力钢束与微段管壁间的法向压力;

### 具体实施方式

[0052] 下面结合附图和具体实施例对本发明作进一步地解释和说明,需要注意的是,本具体实施例不限定本发明的权利范围。

[0053] 如图1的所示,本具体实施例提供的一种预应力管道摩阻损失试验方法和计算方法,在实际工程中,主桥梁1的体内预应力钢束3对称分布,通过对两端锚固定的主桥梁1内预应力管道2两侧的预应力钢束3分别进行多次不对称张拉和对称张拉,不对称张拉是张拉预应力钢束3一端,对称张拉是同时张拉预应力钢束3两端。

[0054] 具体试验方法包括步骤如下:

[0055] ①预应力钢束3的张拉示意图如附图1所示,分别设定主桥梁1内预应力管道2两侧的预应力钢束3一端为A端,中点为B端,另一端为C端,在预应力钢束3的A端和C端分别安装千斤顶4,并通过工具锚5固定;

[0056] ②所述不对称张拉为张拉A端至设计控制张拉力,C端固定不张拉,张拉采用分级加载,分别以张拉力的10%、25%、50%、75%、100%张拉,通过压力表读取并记录AC段预应力钢束3各工况下的张拉力,通过钢板尺测量并记录相应各工况下的预应力钢束3伸长量;

[0057] ③所述对称张拉为松开A端工具锚4让预应力钢束3回到无张拉状态,同时张拉预应力钢束3的A、C两端至设计张拉控制力值,则 $N_A=N_C=N_{con}$ ,此时AB段和BC段预应力钢束3平均张拉力相等,分级加载,分别以张拉力的10%、25%、50%、75%、100%张拉,通过压力表读取并记录AB段和BC段预应力钢束3各工况下的张拉力,通过钢板尺测量并记录相应各工况下的预应力钢束3伸长量;

[0058] ④对调预应力钢束3的A端和C端,重复三次步骤②和③。

[0059] 计算方法包括如下步骤:

[0060] (1)假设主桥梁1纵向截面内预应力管道2的预应力钢束3与弯曲部分管道内壁相贴,从弯道上取某微分段 $d1$ 为分离体,通过求和管道弯曲引起的摩擦阻力和管道偏差引起



的摩擦阻力,获得预应力钢束3在某微分段内管道总摩擦力和管道摩擦引起的总预应力损失的计算公式;

[0061] 如附图2所示,先计算管道弯曲引起的摩擦阻力,假设预应力钢束3与弯曲部分管道内壁相贴,从弯道上取微分段 $d_1$ 为分离体,曲率半径为 $R_1$ ,其对应的圆心角为 $d\theta$ ,微分段上的摩擦阻力为 $dF$ ,并且假定微分段 $d_1$ 左端沿切线方向的作用力为 $N$ ,方向为正,右端沿切线方向的作用力为 $N+dN$ ,方向为负。从微分段 $d_1$ 的静力平衡条件可知,作用两端切向方向的拉力 $N$ 和 $N+dN$ ,将产生一个指向圆心的径向压力,混凝土对微分段的反力为 $dP_1$ ,该力的表达式为

$$[0062] \quad dP_1 = N \cdot \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) + (N + dN) \cdot \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) = 2N \cdot \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) + dN \cdot \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) \quad (1)$$

[0063] 忽略微分段 $d_1$ 内张拉力高阶变量对径向压力的作用,则径向压力 $dP_1$ 为

$$[0064] \quad dP_1 = 2N \cdot \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) \quad (2)$$

[0065] 微分段 $d_1$ 对应的圆心角 $d\theta$ 较小,可取 $\sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) \approx \frac{d\theta}{2}$ ,那么径向压力可表示为

$$[0066] \quad dP_1 = N \cdot d\theta \quad (3)$$

[0067] 径向压力产生的摩擦阻力 $dF_1$ 方向与微分段拉力方向相反,根据库伦摩擦定律,其值等于径向压力乘以管道摩擦系数 $\mu$ ,可表示为

$$[0068] \quad dF_1 = -\mu \cdot dP_1 = -\mu N \cdot d\theta \quad (4)$$

[0069] 再计算管道偏差引起的摩擦阻力,实际工程中,管道位置的偏差分布具有一定的随机性,在计算过程中可假设管道位置具有正负偏差,且预应力钢束3与管道壁相贴合。如附图3所示,取预应力钢束3的微分段 $d_2$ 为分离体,平均曲率半径为 $R_2$ ,相应的弯曲角为 $d\theta_2$ ,同理,预应力钢束3与微段管壁间的法向压力为

$$[0070] \quad dP_2 = N_2 \cdot d\theta_2 = N \cdot \frac{dl_2}{R_2} \quad (5)$$

[0071] 引入管道偏差系数 $k$ ,  $k = \frac{\mu}{R_2}$ ,那么摩擦阻力 $dF_2$ 为

$$[0072] \quad dF_2 = -\mu \cdot dP_2 = -kR_2 \cdot N_2 \cdot \frac{dl_2}{R_2} = -kN_2 \cdot dl_2 \quad (6)$$

[0073] 最后计算管道摩擦总预应力损失,预应力钢束3在某微分段内管道总摩擦力 $dF$ 为

$$[0074] \quad dF = dF_1 + dF_2 \quad (7)$$

[0075] 由微分段预应力钢束3静力平衡条件可知

$$[0076] \quad N + dF = N + dN \quad (8)$$

[0077] 结合(7)式得

$$[0078] \quad dN = dF = -N \cdot (\mu d\theta + k dl) \quad (9)$$

[0079] 可以变形为

$$[0080] \quad \frac{dN}{N} = -(\mu d\theta + k dl) \quad (10)$$

[0081] 将上式两边积分得

[0082]  $\ln N = -(\mu\theta + kl) + C$  (11)

[0083] 由张拉端边界条件： $\theta = 0, l = 0, N = N_{con}$ ，代入(11)式可得

[0084]  $C = \ln N_{con}$  (12)

[0085] 那么(11)式可表示为

[0086]  $\ln \frac{N}{N_{con}} = -(\mu\theta + kl)$  (13)

[0087] 可以写成

[0088]  $N = N_{con} \cdot e^{-(\mu\theta + kl)}$  (14)

[0089] 即距离张拉端管道长度为 $x$ 处，预应力钢束3轴向力为

[0090]  $N_x = N_{con} \cdot e^{-(\mu\theta + kx)}$  (15)

[0091] 管道摩擦引起的总预应力损失 $N_s$ 为

[0092]  $N_s = N_{con} - N_x = N_{con} \cdot (1 - e^{-(\mu\theta + kx)})$  (16)

[0093] 在某微分段长度为 $l$ 的预应力钢束3中，平均张拉力为

[0094] 
$$\bar{N} = \frac{\int_0^l (N e^{-(\mu\theta + kx)}) dx}{l} = N \cdot \frac{\int_0^l (e^{-(\mu\theta + kx)}) dx}{l} = \frac{N \cdot (1 - e^{-(\mu\theta + kl)})}{\mu\theta + kl}$$
 (17)

[0095] (2) 通过预应力管道摩擦阻损失试验方法获得的试验数据，分别计算出在多个工况下AC段预应力钢束3不对称张拉的平均张拉力 $\bar{N}_{AC}$ 和计算出AB段和BC段预应力钢束3不对称张拉的平均张拉力 $\bar{N}_{AB}$ 和 $\bar{N}_{BC}$ ，并获得两种张拉情况下的预应力钢束伸长量差值的计算公式：

[0096] 假设钢束AC段为理论曲线，理论空间曲线包角为 $\theta_L$ ，其中

[0097] 
$$\frac{0.5\theta_L}{\sin 0.5\theta_L} = \frac{L}{S}$$
 (18)

[0098] 式中： $L$ 为预应力钢束3AC段长度(m)； $S$ 为预应力钢束3投影长度。

[0099] 所述AC段预应力钢束3不对称张拉的平均张拉力 $\bar{N}_{AC}$ 的计算公式为：

[0100] 
$$\bar{N}_{AC} = \frac{N_A (1 - e^{-(kL + \mu\theta_L)})}{kL + \mu\theta_L}$$
 (19)

[0101] 所述AB段和BC段预应力钢束3不对称张拉的平均张拉力 $\bar{N}_{AB}$ 和 $\bar{N}_{BC}$ 计算公式为：

[0102] 
$$\bar{N}_{AB} = \bar{N}_{BC} = \frac{N_{con} (1 - e^{-\frac{1}{2}(kL + \mu\theta_L)})}{\frac{1}{2}(kL + \mu\theta_L)}$$
 (20)

[0103] 根据胡克定律，获得两种张拉情况下的预应力钢束3伸长量差值的计算公式为：

[0104] 
$$2 \cdot \frac{\frac{1}{2} L \bar{N}_{AB}}{AE_p} - \frac{L \bar{N}_{AC}}{AE_p} = \Delta L$$
 (21)

[0105] 式中： $A$ ——预应力钢束3截面面积( $m^2$ )； $E_p$ ——预应力钢束3弹性模量； $\Delta L$ ——两次张拉情况下预应力钢束3伸长量差值(m)。

[0106] 代入式 (17) 和式 (19) 变形得

$$[0107] \quad \frac{(1 - e^{-\frac{1}{2}(kL + \mu\theta_L)})}{\frac{1}{2}(kL + \mu\theta_L)} - \frac{(1 - e^{-(kL + \mu\theta_L)})}{kL + \mu\theta_L} = \frac{\Delta LE_p}{L\sigma_{con}} \quad (22)$$

[0108] 令  $kL + \mu\theta_L$  为  $y$ ,  $\frac{\Delta LE_p}{L\sigma_{con}}$  为  $a$ , 则有:

$$[0109] \quad 1 - 2e^{-0.5y} + e^{-y} - ay = 0 \quad (23)$$

[0110] 通过二分迭代法对方程 (23) 求解可得  $y$  值。

[0111] (3) 通过整理并分析步骤 (2) 的数据, 基于赫兹接触理论中的应力均匀分布原理和胡克定律, 获得实际管道摩擦影响系数  $\mu$  和管道偏差影响系数  $k$  的计算公式;

[0112] 由于实际施工与理论设计存在差异, 所以不可避免的会产生误差, 假设误差为  $\Delta$ , 则:

$$[0113] \quad \mu\theta_L + kL - y = \Delta \quad (24)$$

[0114] 若有  $n$  束预应力钢束 3, 则:

$$[0115] \quad \mu\theta_{Li} + kL_i - y_i = \Delta_i \quad (25)$$

[0116] 利用最小二乘法原理, 全部预应力钢束 3 误差的平方和  $q$  为:

$$[0117] \quad q = \sum_{i=x}^n (\Delta_i)^2 = \sum_{i=x}^n (\mu\theta_{Li} + kL_i - y_i)^2 \quad (26)$$

$$[0118] \quad \text{当} \begin{cases} \frac{\partial q}{\partial \mu} = 0 \\ \frac{\partial q}{\partial k} = 0 \end{cases} \text{时, } q = \sum_{i=x}^n (\Delta_i)^2 \text{ 取得最小值, 则有:}$$

$$[0119] \quad \begin{cases} \mu \sum_{i=x}^n \theta_{Li}^2 + k \sum_{i=x}^n \theta_{Li} L_i - \sum_{i=x}^n \theta_{Li} y_i = 0 \\ \mu \sum_{i=x}^n \theta_{Li} L_i + k \sum_{i=x}^n L_i^2 - \sum_{i=x}^n L_i y_i = 0 \end{cases} \quad (27)$$

[0120] 式中:  $y_i$ ——第  $i$  管道测试数据对应的数值解;  $L_i$ ——第  $i$  个管道对应的预应力钢束 3 空间曲线长度;  $\theta_{Li}$ ——第  $i$  个管道对应的理论预应力钢束 3 空间曲线包角 (rad);  $n$ ——实测管道数目。

[0121] (4) 通过计算出步骤 (3) 的实际管道摩擦影响系数和管道偏差影响系数, 代入步骤 (1) 中预应力钢束 3 在该某微分段内管道摩擦引起的总预应力损失的计算公式, 计算出实际管道摩擦引起的总预应力损失值。

[0122] 通过求解方程组 (27) 获得管道摩擦影响系数  $\mu$  和管道偏差影响系数  $k$ , 将计算出的  $\mu$  值和  $k$  值代入公式 (16) 计算出管道摩擦引起的预应力损失量。

[0123] 下面以广西某大桥是桥跨组合为 125m+200m+125m 的预应力混凝土连续刚构桥为例:

[0124] 该桥采用悬臂浇筑法施工, 纵向预应力钢束 3 采用低松弛预应力钢绞线, 所述纵向预应力钢束 3 包括顶板束和腹板束, 公称直径 15.2mm, 抗拉强度标准值  $f_{pk} = 1860\text{MPa}$ , 弹性模

量 $E_p=2.03 \times 10^5$ MPa, 松弛率小于0.035, 设计锚下张拉控制应力1395MPa, 纵向预应力钢束3采用大吨位群锚体系, 预应力钢绞线锚具均采用I类锚具, 采用与相应钢绞线匹配的成套产品, 包括锚垫板、锚板、夹片和锚下螺旋筋等。锚固效率系数不小于95%, 预应力束管道2采用金属波纹管, 管道摩阻系数设计值 $\mu=0.25$ 和管道偏差系数设计值 $k=0.0015$ 。

[0125] 全桥单端悬臂浇筑共计26个梁段, 试验拟以6#梁段预应力钢束3作为摩阻测试对象, 由于公式中的 $\mu$ 和 $k$ 之间存在耦合关系, 所以试验应测试2个及以上不同参数类型的管道, 方可利用最小二乘法原理求解得 $\mu$ 和 $k$ 值, 测试预应力钢束3的参数如表1所示。

[0126] 表1试验钢束设计参数表

	位置	钢束编号	钢束规格	$N_{con}$ (kN)	$L$ (cm)	$L_q$ (cm)	$\theta$ (rad)
[0127]	顶板束	T6	15-22	4265.9	4885.3	614.4	0.7679
	腹板束	W6	15-22	4265.9	5269.6	1256.6	1.5708

[0128] 试验时采用张拉设备与实际施工时所用设备相同, 所用主要设备如表2所示。

[0129] 表2试验设备一览表

	仪器名称	数量	用途
[0130]	YDC6000型穿心式液压千斤顶	2台	张拉/锚固
	液压油泵	2台	张拉/读值
	工具锚	2套	张拉/锚固
	钢板尺	2把	量测伸长量
	钢笔、记录纸	若干	记录数据

[0131] 3.2试验结果分析

[0132] 对实测数据进行计算分析处理, 根据公式(27)通过最小二乘法原理计算管道摩阻系数 $\mu$ 和 $k$ 值, 计算过程见表4。

[0133] 表3管道摩阻系数分析计算表

钢束编号	$\Delta\bar{L}(mm)$	$a_i$	$y_i$	$\theta_{Li}^2$	$\theta_{Li}L_i$	$y_i\theta_{Li}$	$L_i^2$	$y_iL_i$
[0134] 左侧 T6	22.0	0.03277	0.14057	0.01055	4.71798	0.01358	2386.61561	5.31114
右侧 T6	21.3	0.03053	0.13030	0.00977	4.71798	0.01258	2386.61561	4.92336
左侧 W6	33.5	0.05652	0.25668	0.07471	19.73867	0.09615	2776.86842	10.46129
右侧 W6	32.6	0.05413	0.24433	0.07111	19.73867	0.09152	2776.86842	9.95791
	$\Sigma$			0.16614	48.91330	0.21383	10326.96805	30.65370

[0135] 所述 $\Delta\bar{L}$ 为3次预应力钢束3张拉试验伸长量平均值。

[0136] 根据表3测试数据分析计算结果, 将表中常数数值代入公式27得:

[0137] 
$$\begin{cases} 0.29927\mu + 48.91330k - 0.16614 = 0 \\ 48.91330\mu + 10326.96805k - 30.65357 = 0 \end{cases}$$

[0138] 对式(27)进行求解得: $\mu=0.314, k=0.00145$ 。

[0139] 将试验计算结果与现有规范对比,如表4所示。

[0140] 表4管道摩阻系数对比表

	影响系数系数	实测值	设计值	公路规范	铁路规范
[0141]	摩阻系数 $\mu$	0.31	0.25	0.20~0.25	0.20~0.26
	偏差系数 $k$	0.0015	0.0015	0.0015	0.002~0.003

[0142] 注:公路规范指《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG3362-2018);铁路规范指《铁路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(TB10002.3-2005)。

[0143] 设计预估的预应力钢束3的摩阻损失值为:

$$[0144] \quad T6:N_s = 2N_{con} \cdot (1 - e^{-(\mu\theta + kx)}) = 4265.9 \times (1 - e^{-(0.25 \times 0.2985 + 0.0015 \times 24.427)}) = 898.39 \text{ kN}$$

$$[0145] \quad W6:N_s = 2N_{con} \cdot (1 - e^{-(\mu\theta + kx)}) = 4265.9 \times (1 - e^{-(0.25 \times 0.7854 + 0.0015 \times 26.348)}) = 1792.7 \text{ kN}$$

[0146] 实测的预应力钢束3的摩阻损失值为:

$$[0147] \quad T6:N_s = 2N_{con} \cdot (1 - e^{-(\mu\theta + kx)}) = 4265.9 \times (1 - e^{-(0.31 \times 0.2985 + 0.0015 \times 24.427)}) = 1033.9 \text{ kN}$$

$$[0148] \quad W6:N_s = N_{con} \cdot (1 - e^{-(\mu\theta + kx)}) = 4265.9 \times (1 - e^{-(0.31 \times 0.7854 + 0.0015 \times 26.348)}) = 2102.9 \text{ kN}$$

[0149] 采用有限元软件MIDAS CIVIL对实桥建立仿真数值模型分析计算结果。

[0150] 根据数值模型计算结果,以桥墩和0号块梁段连接截面应力为目标对象,通过在数值模型中分别代入摩阻影响系数的设计值( $\mu=0.25, k=0.0015$ )和试验值( $\mu=0.31, k=0.0015$ ),对比0号块梁段应力的理论变化值和实测值,可以有效判别摩阻试验结果的准确性,实桥建立仿真数值模型在不同摩阻系数下0号块应力和实际工程应力实测对比图如图4所示。

[0151] 由图4可知,在4号块施工阶段之前,0号块梁段应力的设计理论值( $\mu=0.25, k=0.0015$ )和试验理论值( $\mu=0.31, k=0.0015$ )变化曲线基本重合,说明本发明提出的试验测试方法及计算公式是合理有效的。

[0152] 由表4和计算的预应力钢束的摩阻损失值可以看到,实测所得摩阻系数 $\mu$ 和偏差系数 $k$ 比设计值以及规范值较大,表明预应力管道2与预应力钢束3的摩擦阻力相对设计预期值要大,即实际上预应力管道2摩擦引起的预应力钢束损失值比设计预估值大得多,不利于桥梁结构的安全性,也会对桥梁施工线形控制产生不利影响。

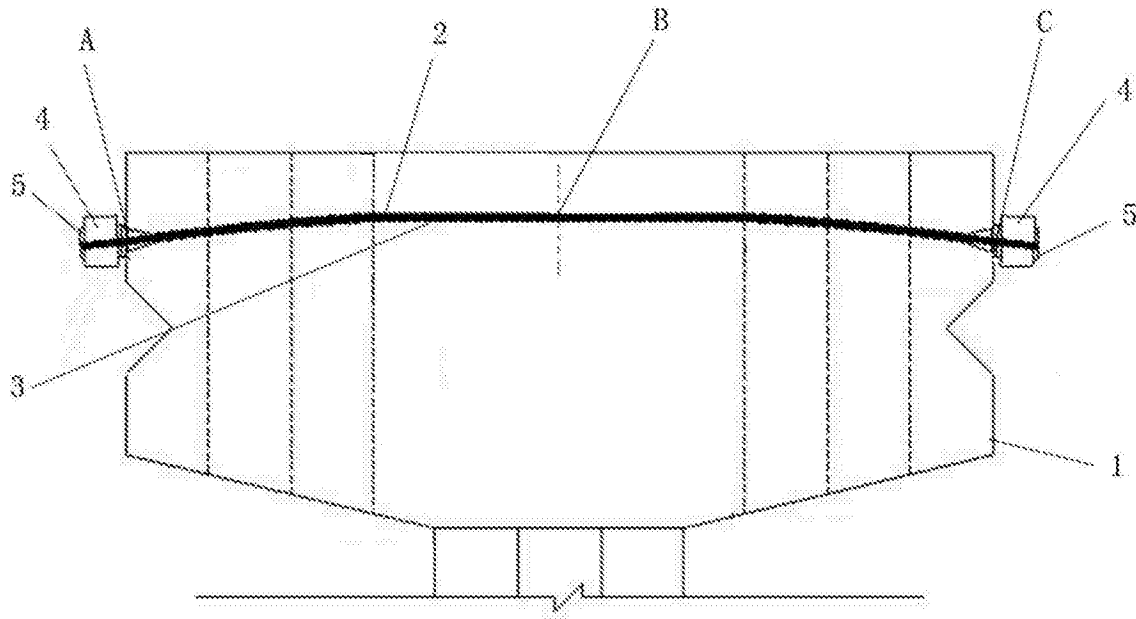


图1

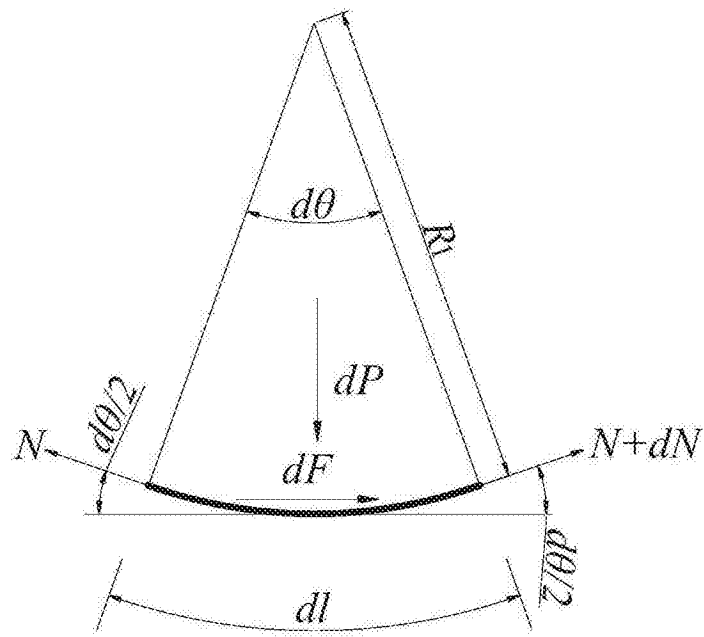


图2

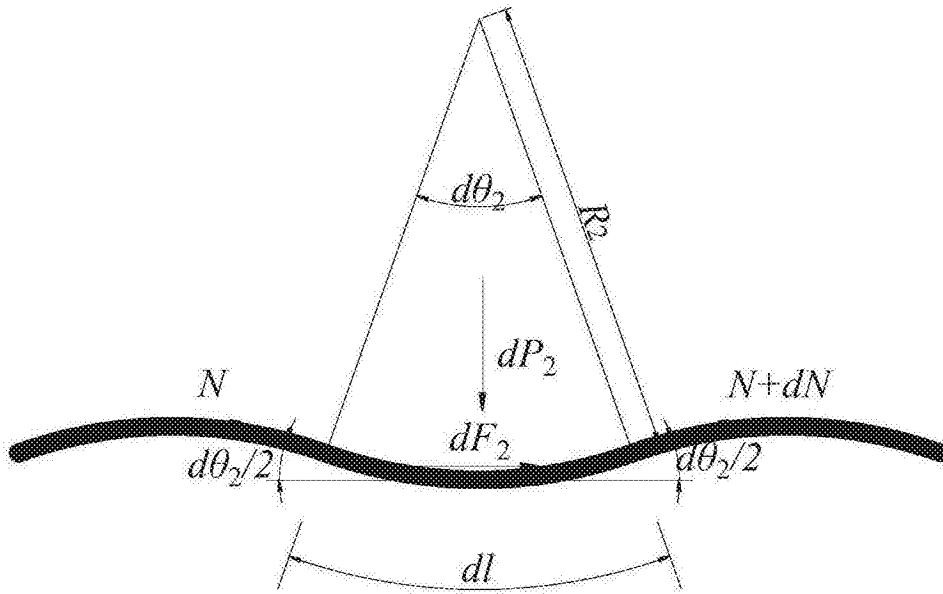


图3

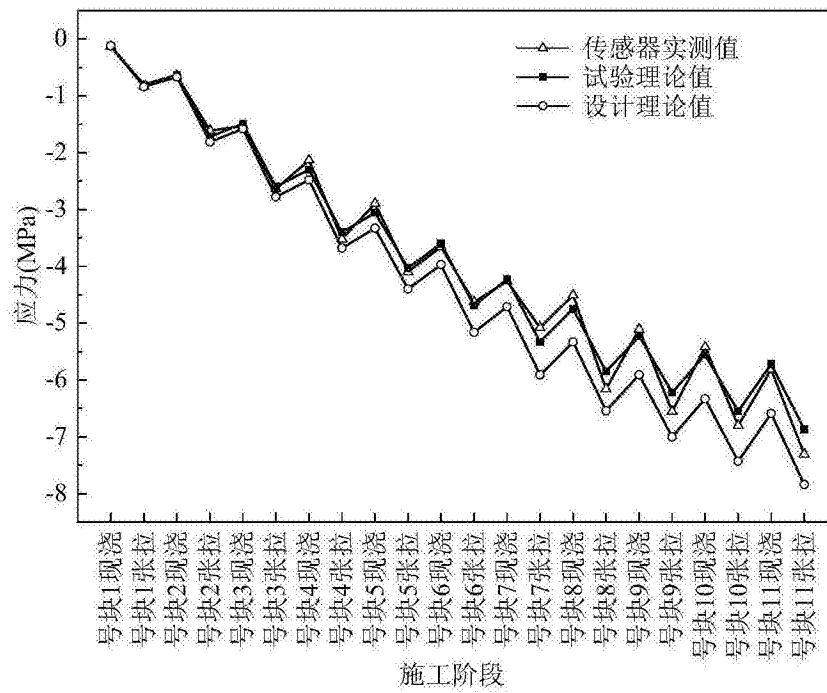


图4