

桥梁半平行钢丝索的对称断丝损伤力学模型

彭崇梅^{1,2}, 张启伟¹, 李元兵²

(1. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 基于 Love 曲杆理论, 考虑钢丝间的接触力、摩擦力和泊松效应对钢丝螺旋半径的影响, 建立静力拉伸荷载下半平行钢丝索的对称断丝力学模型, 并通过数值计算和参数分析研究断丝后索体内钢丝拉力分布规律。结果表明: 钢丝间摩擦系数、断丝径向位置对钢丝拉力分布影响最大。

关键词: 钢丝索; 对称断丝; 拉伸荷载; 摩擦系数

中图分类号: U443.38

文献标志码: A

Damage Model of Multilayered Semi-parallel Wire Cables for Bridges with Symmetric Wire Breaks

PENG Chongmei^{1,2}, ZHANG Qiwei¹, LI Yuanbing²

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Based on the theory of Love's curved bar, the mechanical model for multilayered semi-parallel wire cables under static tensile loads with symmetric wire breaks was derived by taking into consideration the inter-wire contact and friction as well as the Poisson's ratio effect on radius of break wire helix. The distribution of wire axial force was studied by numerical calculation and parameter analysis. Results show that the parameters affecting the most the distribution of wire axial force are inter-wire friction coefficients and radial position of break wires.

Key words: wire cables; symmetric wire breaks; tensile loads; friction coefficients

拉索是斜拉桥与吊杆式拱桥等索支承桥梁的重要受力构件, 由于施工和使用过程中的磨损、老化、腐蚀、断丝等原因, 相当一部分拉索在成桥后不久便

出现严重损伤, 甚至导致桥梁坍塌。高强钢丝断丝或钢绞线断丝是拉索损伤的重要形式之一, 断丝的发生对拉索内力重分布及整根拉索的损伤演化起着决定性作用。研究表明, 拉索断丝损伤演化与荷载形式以及钢丝间的接触、摩擦、滑移及钢丝材料本构等因素有关。

目前, 半平行钢丝索是实际工程中拉索的主要应用形式, 但是, 这方面的研究文献较少。Matteo 等^[1]基于平行钢丝假定的延性模型和延-脆性模型, 采用 Monte-Carlo 方法研究了 Williamsburg 桥主缆的安全系数, 并通过试验, 推荐断丝拉力影响长度取 3 倍主缆丝扣间距。Faber 等^[2]基于相互平行直钢丝的并联模型, 采用概率方法研究了半平行钢丝索的静力拉伸强度和疲劳寿命。上述研究是基于平行钢丝假定的并联模型, 未考虑钢丝间接触、摩擦和滑移等相互作用因素, 且未涉及断丝模型, 但与半平行钢丝索几何相近的钢绞线研究则取得了一定的进展。Cappa^[3]通过测试一股钢绞线(7 丝)外层单根钢丝断裂后发现, 与断丝相邻的两根钢丝拉力比原来增大 20%, 而断丝对称处钢丝拉力则比原来减小 20%。Raouf 等^[4-5]基于半连续模型, 发现在钢绞线(钢丝绳)中, 外层单根钢丝断裂后, 在影响长度内, 断丝内力随到断丝处距离的增加而增大, 并且断丝影响长度存在一个上限, 约为 2.5 倍捻距。MacDougall^[6]研究了砼构件中无黏结预应力 7 丝钢绞线对称断丝后钢丝内力分布, 考虑了钢丝间接触和摩擦的影响, 发现断丝拉力的增加与到断丝处距离成指数关系, 而未断钢丝则呈现指数衰减。李元兵^[7]在 MacDougall^[6]的基础上, 采用有限元方法研究了钢绞线吊杆断丝后截面内钢丝拉力分布及护套握裹力、钢丝间摩擦系数等对钢丝拉力分布的影响。

鉴于半平行钢丝索具有螺旋外形的特点及本身

收稿日期: 2012-03-13

基金项目: 国家自然科学基金(50978199); 土木工程防灾国家重点实验室自主研究课题(SLDRCE09-B-16)

第一作者: 彭崇梅(1984—), 男, 博士生, 主要研究方向为桥梁健康监测及状态评估。E-mail: xige125@163.com

通讯作者: 张启伟(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桥梁健康监测及状态评估。

E-mail: zhangqw@tongji.edu.cn

构造的特殊性,内部钢丝接触复杂,既不能采用并联模型,也不能直接应用钢绞线研究中的现象和规律,且从以往研究来看,用以描述钢丝间接触、摩擦和滑移的物理量也很难通过试验方法获得,从而难以准确描述多层半平行钢丝索的受力行为。本文基于Love^[8]曲杆理论,忽略钢丝弯矩、扭矩和剪力,考虑泊松效应对钢丝螺旋半径的影响以及钢丝间的接触力和摩擦力,推导了多层半平行钢丝索的对称断丝模型;通过数值计算和参数分析研究了断丝后索体内钢丝拉力分布规律,讨论了钢丝间摩擦系数、护套握裹力、不同径向位置断丝对钢丝拉力分布的影响。

1 基本方程

考虑一 n 层半平行钢丝索(见图1),钢丝弹性模量为 E ,面积为 A_0 ,吊杆长度为 L ,索体中有 n_b 根断丝,断丝排列为对称布置(见图2)。以钢丝断裂处为参考点(坐标原点), x 轴平行于核心钢丝轴向,协同坐标 s 沿钢丝螺旋方向,两坐标轴之间换算关系为: $s=x/\sin\alpha$,索体内各钢丝半径均为 R ,螺旋角为 α 。索体中钢丝根据钢丝螺旋半径进行分层,中心钢丝为第0层,半径为 R_1 ,其余各层依次由里向外进行编号,各层钢丝螺旋半径为各外层钢丝中心相对螺旋中心的距离,以 r_i 表示, i 表示钢丝层编号(见图2a)。为方便描述,图中六边形虚线所围成的钢丝环分别对应第1,2,3,..., k 环钢丝。断丝后护套对断裂钢丝的握裹力沿轴向呈均匀分布,单位长度护套握裹力为 w_b 。各钢丝间摩擦系数为 μ ,内部接触力为 $X_{ms,i}$,则钢丝间单位长度的摩擦力为 $f(s)=\mu X_{ms,i}$,断丝轴力为 $T_b(s)$,未断钢丝轴力为 $T_{u,i}(s)$,断丝拉索总轴向力为 F_b ,完好拉索总轴向力为 F 。

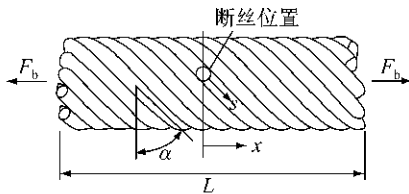


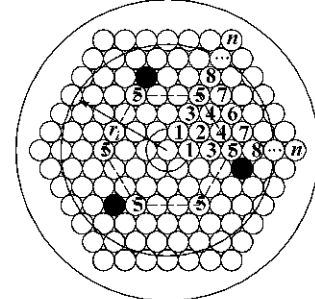
图1 半平行钢丝索断丝示意图

Fig.1 Geometry sketch of semi-parallel wire cable with break wires

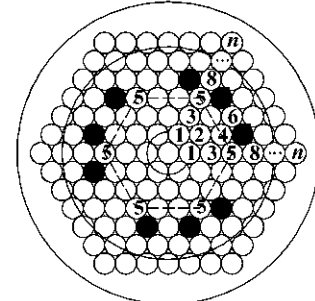
1.1 平衡方程

假定:所有断丝均发生在轴向同一位置,钢丝间完全接触,摩擦系数为一定值,并且忽略钢丝间接触变形。根据Love^[8]曲杆理论,单根钢丝有六个独立平衡方程,受力如图3所示。图3中 G, G' 和 H 为弯

矩分量和扭矩分量; K, K' 和 θ 为曲率分量和扭率合量; N, N' 为剪力分量; T 为轴向拉力分量,单位长度外部荷载分量为 X, Y, Z 。



a 3 根断丝



b 9 根断丝

图2 对称断丝排列示意图

Fig.2 Examples of symmetric wire breaks arrangements

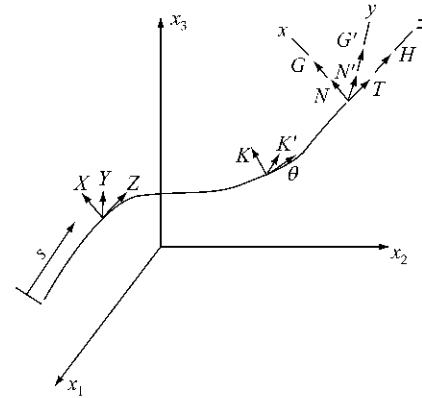


图3 单根螺旋钢丝受力图

Fig.3 Loads on a thin wire helix

对多层半平行钢丝索,忽略弯矩、扭矩和剪力的影响, $X = X_{ms,i}(s) - \Delta X_{ms,k}$, $Z = \mu(X_{ms,i}(s) + \Delta X_{ms,k} + 2P_{ms,k})$,钢丝平衡方程可简化为

$$T_{u,i}(s) \frac{\cos^2 \alpha}{r_i} + X_{ms,i}(s) - \Delta X_{ms,k} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{dT_{u,i}(s)}{ds} + \mu[X_{ms,i}(s) + \Delta X_{ms,k} + 2P_{ms,k}] = 0 \quad (2)$$

式中: $P_{ms,k}$ 表示第 k 环钢丝间环向接触力, $\Delta X_{ms,k}$ 为第 $(k+1)$ 环钢丝作用于第 k 环钢丝的接触力,计算

外环钢丝作用于内环钢丝的接触力时,可取该环钢丝接触力平均值进行简化。

根据文献[9],外层未断钢丝的轴向应变 $\xi_i(s)$ 和剪切应变 $\tau_i(s)$ 可表示为

$$\varepsilon(s) = \xi_i(s) + \frac{\delta\alpha}{\tan \alpha} \quad (3)$$

$$\tau_i(s) = -\frac{\delta r_i \cot \alpha}{r_i} - \frac{\delta\alpha - \xi_i(s) \cot \alpha}{r_i} \quad (4)$$

式中: $\varepsilon(s)$ 表示拉索轴向应变。

为简化后续推导过程,假定加载和断丝过程中索体不发生扭转,即 $\tau_i(s) = 0$,代入式(3)和(4),可得

$$\xi_i(s) = \varepsilon(s) \sin^2 \alpha + \frac{\cos^2 \alpha}{r_i} \delta r_i = \lambda_i \varepsilon(s) \quad (5)$$

式中: λ_i 表示第 i 根钢丝应变系数。

忽略钢丝间的接触变形,仅考虑泊松效应对螺旋半径改变的影响,则螺旋半径的变分 δr_i 可表示为

$$\delta r_i = - \left\{ \nu_1 R_1 + \left[(r_i - R_1) \sum_{j=2}^i \nu_j \lambda_j \right] / (i-1) \right\} \varepsilon(s) \quad (6)$$

式中: ν_j 表示第 j 层钢丝的泊松比。由于半平行钢丝排列的特殊性,内层钢丝对外层钢丝螺旋半径的影响取平均值进行简化。

未断钢丝总拉力可表示为

$$F_u(s) = \varepsilon(s) \left(EA_c + \sum_{i=1}^n m_i EA_0 \lambda_i \sin \alpha - n_b EA_0 \lambda_b \sin \alpha \right) = K_u \varepsilon(s) \quad (7)$$

式中: A_c 为中心钢丝面积, m_i 表示第 i 层钢丝数, K_u 为未断钢丝总拉力系数,未断钢丝总拉力又可表示为

$$F_u(s) = F_b - n_b T_b(s) \sin \alpha \quad (8)$$

联立(7),(8)两式,可得

$$\varepsilon(s) = \frac{F_b - n_b T_b(s) \sin \alpha}{K_u} \quad (9)$$

则外层未断钢丝拉力可表示为

$$T_{u,i}(s) = EA_0 \lambda_i \varepsilon(s) = \frac{EA_0 \lambda_i}{K_u} [F_b - n_b T_b(s) \sin \alpha] \quad (10)$$

未断钢丝接触力可表示为

$$X_{ms,i} = -T_{u,i} \frac{\cos^2 \alpha}{r_i} + \Delta X_{ms,k} \quad (11)$$

式中等号右边第一项为第 i 层钢丝的附加接触力,计算时可将外环钢丝对内环钢丝接触力取平均值进行简化,如 $\Delta X_{ms,2} = (2X_{ms,4} + X_{ms,5})/2$,而断丝所在钢丝环对内环钢丝的接触力应修正为

$$\Delta X_{ms,k_b-1} = \left[\sum_{i \neq i_b} \eta_i X_{ms,i} + \frac{(m_{i_b} - n_b)}{m_{i_b}} X_{ms,i_b} + \frac{n_b}{m_{i_b}} X_{ms,i_b} \right] / \phi_{k_b-1} \quad (12)$$

式中: i_b 为断丝所在钢丝层, k_b 为断丝所在钢丝环, η_i 和 ϕ_{k_b-1} 为权系数,与 k_b 有关;当断丝处于最外层时,上式中 $\Delta X_{ms,k_b}$ 即为护套握裹力 w_s 。

由式(11)和(12)可以看出,接触力表达式均存在公因子 $[F_b - n_b T_b(s) \sin \alpha]$,即

$$\begin{aligned} \Delta X_{ms,k} &= \lambda_{\Delta X,k} [F_b - n_b T_b(s) \sin \alpha] \\ X_{ms,i} &= \left(-\frac{EA_0 \lambda_i \cos^2 \alpha}{K_u r_i} + \lambda_{\Delta X,k} \right) [F_b - n_b T_b(s) \sin \alpha] \end{aligned} \quad (13)$$

联立式(1),(2)和(13)可得

$$\frac{dT_b(s)}{ds} + \mu \left[-T_b(s) \frac{\cos^2 \alpha}{r_b} + 2(\lambda_{\Delta X,b} + \lambda_{P,b})(F_b - n_b T_b(s) \sin \alpha) \right] = 0 \quad (14)$$

式中: $\lambda_{\Delta X,b}$ 和 $\lambda_{P,b}$ 分别为 $\Delta X_{ms,b}$ 和 $P_{ms,b}$ 提取公因式 $[F_b - n_b T_b(s) \sin \alpha]$ 时的系数。引入边界条件,断丝处, $T_b(0) = 0$,求解上述微分方程,可得

$$T_b(s) = \frac{-2F_b(\lambda_{\Delta X,k_b+1} + \lambda_{P,b})(-1 + e^{\lambda_T \mu s})}{\lambda_T} \quad (15)$$

其中,

$$\lambda_T = \frac{1 + \cos(2\alpha) + 4n_b r_b (\lambda_{\Delta X,k_b+1} + \lambda_{P,b}) \sin \alpha}{2r_b} \quad (16)$$

由式(15)可知断丝拉力的增加与到断丝处距离成指数关系。

1.2 影响长度 L_a

随着断丝拉力的增加,未断钢丝中拉力则会相应减少,当同一层中断丝和未断钢丝拉力相等时,对应的区间长度定义为影响长度,以 L_a 表示。

完好拉索外层钢丝拉力为

$$T_{u,i} = \frac{F_b EA_0 \lambda_i}{EA_c + \sum_{j=1}^n m_j EA_0 \lambda_j \sin \alpha} \quad (17)$$

当 $x = L_a/2$ 时,式(17)与 $T_b(L_a/2)$ 相等

$$\begin{aligned} \frac{F_b EA_0 \lambda_b}{EA_c + \sum_{j=1}^n m_j EA_0 \lambda_j \sin \alpha} &= \\ \frac{-2F_b(\lambda_{\Delta X,k_b+1} + \lambda_{P,b})[-1 + e^{\lambda_T \mu L_a/(2 \sin \alpha)}]}{\lambda_T} \end{aligned} \quad (18)$$

求解,可得影响长度 L_a 为

$$L_a = \frac{2\sin\alpha}{\mu\lambda_T} \ln \left[1 - \frac{\lambda_T \chi}{2(\lambda_{\Delta X, k_b+1} + \lambda_{P,b})} \right] \quad (19)$$

其中,

$$\chi = \frac{\lambda_b}{1 + \sum_{j=1}^n m_j \lambda_j \sin \alpha}$$

由式(19)可以看出,影响长度与拉索破断力无关,与内部钢丝摩擦系数成反比。

1.3 索力剩余系数 γ

索力剩余系数 γ 可定义为断丝后索力 F_b 与完好时索力 F 的比值

$$\gamma = F_b / F \quad (20)$$

计算索力剩余系数时,引入相容条件: $\Delta_b = \Delta$ 。其中,

$$\Delta = \frac{FL}{EA_c + \sum_{j=1}^n m_j EA_0 \lambda_j \sin \alpha} \quad (21)$$

当影响长度大于索长,即 $L_a > L$ 时,积分区间为 $[0, L/2]$,由式(9),(15)和(16)可求得索体延伸量为

$$\Delta_b = 2 \int_0^{L/2} \{ [F_b \lambda_T + 2m_b F_b (\lambda_{\Delta X, k_b+1} + \lambda_{P,b}) (-1 + e^{\lambda_T \mu x / \sin \alpha}) \sin \alpha] / [\lambda_T K_u \sin \alpha] \} dx \quad (22)$$

积分得

$$\Delta_b = \frac{F_b \Gamma}{K_u \mu \lambda_T^2} \quad (23)$$

其中,

$$\Gamma = 4m_b [-1 + e^{(\lambda_T \mu L \csc \alpha)/2}] (\lambda_{\Delta X, k_b+1} + \lambda_{P,b}) \sin \alpha + \lambda_T \mu L [-2m_b (\lambda_{\Delta X, k_b+1} + \lambda_{P,b}) + \lambda_T \csc \alpha] \quad (24)$$

引入相容条件,相应的索力剩余系数

$$\gamma = F_b / F = \frac{K_u \mu \lambda_T^2 L}{(EA_c + \sum_{j=1}^n m_j EA_0 \lambda_j \sin \alpha) \Gamma} \quad (25)$$

当影响长度小于等于索长,即 $L_a \leq L$ 时,积分区间为 $[0, L_a/2]$,延伸量为影响长度内和影响长度外延伸量之和,由式(9),(15),(16)和(21)可求得索体延伸量为

$$\Delta_b = \frac{F_b \Psi}{K_u \mu \lambda_T} + \frac{F_b (L - L_a)}{EA_c + \sum_{j=1}^n m_j EA_0 \lambda_j \sin \alpha} \quad (26)$$

$$\Psi = -2m_b \chi \sin \alpha + \mu L_a [-2m_b (\lambda_{\Delta X, k_b+1} + \lambda_{P,b}) + \lambda_T / \sin \alpha] \quad (27)$$

引入相容条件,相应的索力剩余系数 γ 为

$$\gamma = F_b / F = (K_u \mu \lambda_T L) / \left[(EA_c + \sum_{j=1}^n m_j EA_0 \lambda_j \sin \alpha) \Psi + K_u \mu \lambda_T (L - L_a) \right] \quad (28)$$

2 方程的求解

对于给定的半平行钢丝索,先假定螺旋钢丝半径变化量 δr_i 为某一量值,代入式(5),可得 λ_i ,将新的 λ_i 代入式(6),得到新一轮的 δr_i 值,再回代式(5),如此循环迭代,直到相邻两次循环的 δr_i 变化值小于给定误差为止;将计算得到的 λ_i 代入式(7),得未断钢丝总拉力系数 K_u ,代入式(10)和(11),得外层未断钢丝拉力 $T_{u,i}$ 和接触力 $X_{ms,i}$,对于给定的坐标 s ,假定 $T_b(s)$,代入式(1),(12)和(13),可得 $\Delta X_{ms,b}$,将 $\Delta X_{ms,b}$ 代入式(14)和(15),可得新一轮的 $T_b(s)$ 和接触力 $\Delta X_{ms,b}$,如此循环,直到前后两轮计算得到的 $\Delta X_{ms,b}$ 差值小于给定误差,然后进入下一坐标 $s + \Delta s$ 的计算,重复以上过程,直到整根索长计算完为止。将上述计算结果代入式(19),可得影响长度 L_a ,代入式(25)或(28),可得索力剩余系数 γ 。全部计算过程可通过编程实现。

3 数值分析与讨论

为讨论各参数取值对对称断丝模型的影响,参考桥梁工程中半平行钢丝缆索(吊杆)构造的技术参数,如无特别说明,均以 $\Phi 5-127$ 的半平行钢丝索为例进行讨论,索长 L 为 6 m,钢丝直径为 5 mm,钢丝弹性模量 E 取 197.9 GPa,泊松比 ν 取 0.3,内部钢丝间摩擦系数 μ 取 0.12,护套握裹力 w_s 为 $2.0 \times 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$; n 等于 15,断丝数为 8 根,所有断丝断口均位于 $L/2$ 截面处。

3.1 索内钢丝拉力分布

拉索出现对称断丝时,索体内钢丝拉力分布如图 4 和 5 所示,图中 T_i 表示第 i 层钢丝拉力, T_0 表示拉索平均钢丝拉力。图 4 表示断丝发生在第 4 层时对应的索内钢丝拉力分布;图 5 表示假定断丝分别发生在第 7 层、第 9 层和第 13 层时对应的索内钢丝拉力分布。

结果表明,对称断丝情况下钢丝拉力分布规律为:

(1)在断丝影响长度范围内,断丝和未断钢丝拉力随断丝位置的指数分布规律不明显,基本成线性关系。

(2)断丝拉力随到断裂处距离的增加近似线性增加,断丝拉力变化明显;而未断钢丝在断裂处拉力最大,随到断裂处距离的增加近似线性衰减,最大钢

丝拉力位于断丝处,拉力增长系数为 6.71%,与断丝率相等。

(3)断丝后,在影响长度内,各未断钢丝拉力增大,但对于多层平行钢丝绳,当断丝数相对索体内总钢丝数较小时,拉力变化不明显,而在影响长度外,索体内同层各钢丝拉力相等,断丝越往外层,断丝拉力增长越缓慢。

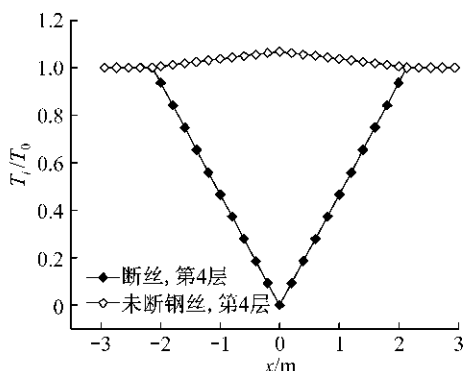


图 4 钢丝拉力分布规律 ($L_a \leq L$)

Fig.4 Distribution of wire axial force ($L_a \leq L$)

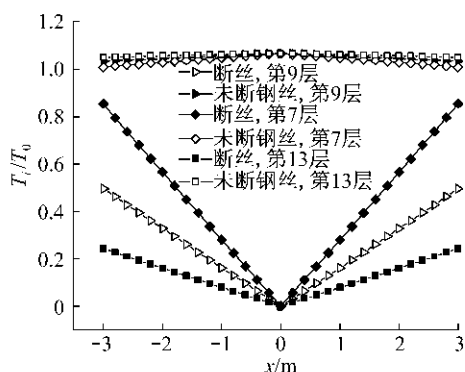


图 5 钢丝拉力分布规律 ($L_a > L$)

Fig.5 Distribution of wire axial force ($L_a > L$)

3.2 摩擦系数的影响

拉索截面内钢丝受环境腐蚀等因素影响,摩擦系数不断增大,摩擦力对索内各钢丝拉力分布的影响加剧. 根据文献[10],建议钢绞线摩擦系数取 0.11~0.22,由于半平行钢丝绳中防腐油脂有一定的润滑作用,适当放宽,取摩擦系数 μ 变化范围为 0.05~0.20,相应的断丝影响长度和索力剩余系数变化曲线如图 6 和 7 所示. 图 6 和 7 中曲线分别对应断丝发生在索体内第 4 层、第 7 层和第 9 层时,断丝影响长度和索力剩余系数的变化。

由图 6 和 7 可知:

(1)随着摩擦系数的增加,断丝影响长度逐渐变小,对于给定的摩擦系数,断丝越往外层,影响长度越大,且随着摩擦系数的增大,影响长度减小的速度

变缓。

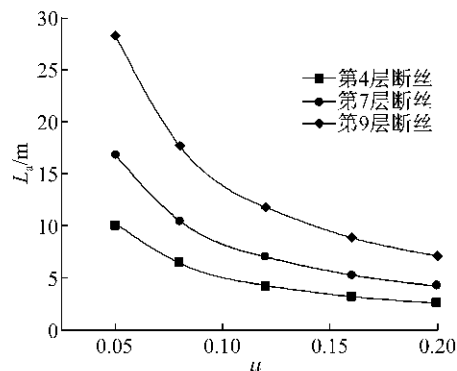


图 6 影响长度与摩擦系数关系曲线

Fig.6 Variation of the affected length with coefficient of inter-wire friction

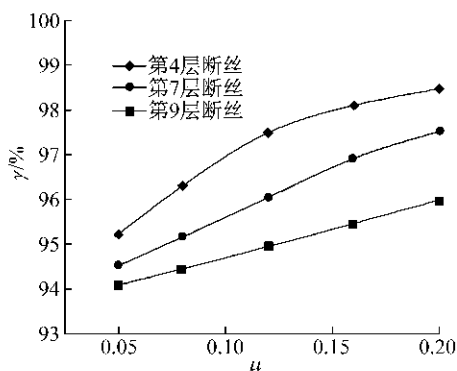


图 7 索力剩余系数与摩擦系数关系曲线

Fig.7 Variation of the remaining prestress fraction with coefficients of inter-wire friction

(2)随着摩擦系数的增加,断丝索力剩余系数逐渐变大,对于给定的摩擦系数,断丝越往外层,索力剩余系数减小得越多,索力剩余系数变化范围越窄. 当断丝位于第 4 层时,最小索力剩余系数为 95.22%,变化宽度为 3.26%;而当断丝位于第 9 层时,最小索力剩余系数为 94.08%,略高于拉索断丝剩余率 93.70%,变化宽度为 1.91%。

3.3 护套握裹力的影响

根据拉索的制作工艺,索内钢丝在编束、轻度扭转后,在外层反向绕制缠包带,再热挤 HDPE 护套,索内钢丝在缠包和护套冷凝的过程中均会对索内钢丝产生径向接触力,称为护套握裹力,护套对索体内钢丝的握裹力难以准确计算,此处假定为均匀受压的圆环,当护套应力为 1 MPa 时,可得护套握裹力为 $1.0 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$,护套握裹力变化范围为 $1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$,相应的影响长度和索力剩余系数变化曲线如图 8 和 9 所示. 图 8 和 9 中曲线分别对应断丝发生在索体内第 4 层、第 7 层和

第9层时,断丝影响长度和索力剩余系数的变化。

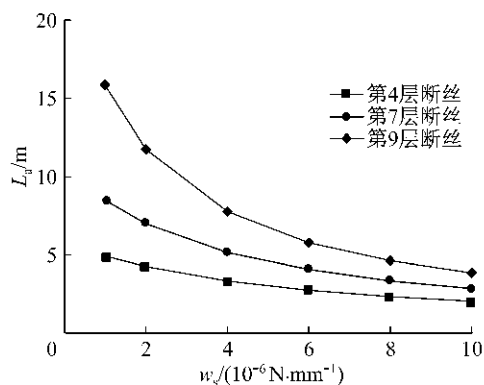


图8 影响长度与护套握裹力的关系曲线

Fig.8 Variation of the affected length with sheath wrapped force

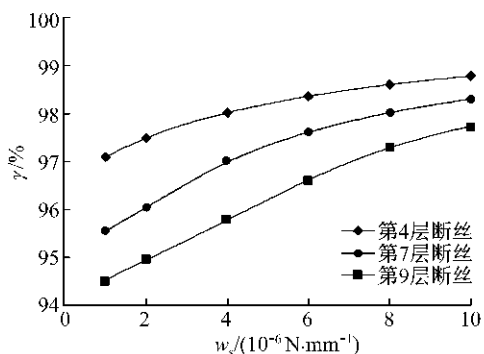


图9 索力剩余系数与护套握裹力的关系曲线

Fig.9 Variation of the remaining prestress fraction with sheath wrapped force

由图8和9可知:

(1)随着护套握裹力的增加,断丝影响长度逐渐减小,对于给定的护套握裹力,断丝越往外层,影响长度越大,且随着护套握裹力的增大,影响长度变化趋于稳定,总大于1倍捻距,如断丝位于第4层时,最小影响长度为2.047 m,大于1倍捻距1.572 m。

(2)随着护套握裹力的增加,索力剩余系数逐渐增加,且增加速度趋缓,对于给定的护套握裹力,断丝越往外层,索力剩余系数越小,索力剩余系数变化范围越宽。当断丝位于第4层时,最小索力剩余系数为97.10%,变化宽度为1.69%;而当断丝位于第9层时,最小索力剩余系数为94.53%,变化宽度为3.21%。

3.4 断丝径向位置的影响

当断丝位于不同钢丝层时,断丝影响长度和索力剩余系数的变化如图10和11所示。图10和11中断丝径向位置分别对应断丝发生在索体内第4

层、第7层、第9层和第13层(最外层)。

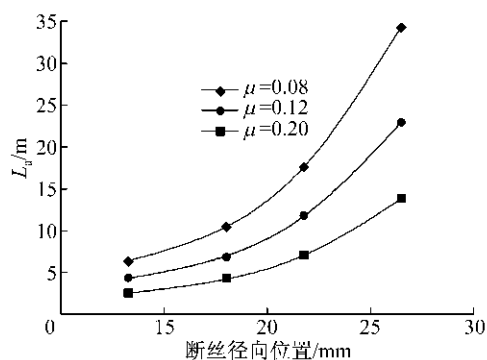


图10 影响长度与断丝径向位置关系曲线

Fig.10 Variation of the affected length with a function of radial location of broken wires

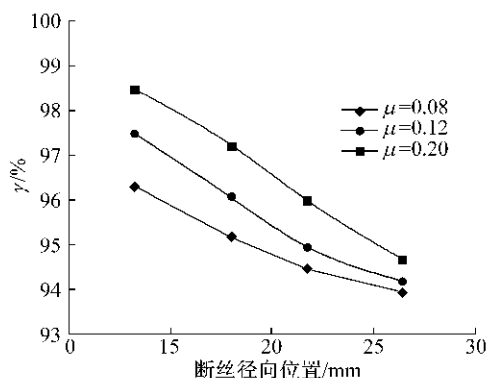


图11 索力剩余系数与断丝径向位置关系曲线

Fig.11 Variation of the remaining prestress fraction with a function of radial location of broken wires

由图10和11可以看出:

(1)影响长度随断丝径向位置的增加而快速增加,对于给定的断丝径向位置,随着摩擦系数的减小,影响长度增加,且断丝越往外层,影响长度增加的速度越快,影响长度大于1倍捻距,小于25倍捻距。

(2)索力剩余系数随断丝径向位置的增加而下降,且断丝越往外层,索力剩余系数减小的速度变缓;对于给定的断丝径向位置,随着摩擦系数的减小,索力剩余系数相应减少,索力剩余系数变化范围越窄。当摩擦系数为0.08时,最小索力剩余系数为93.95%,高于拉索断丝剩余率93.70%,变化宽度为2.36%;当摩擦系数为0.20时,最小索力剩余系数为94.69%,变化宽度为3.79%。

3.5 断丝数目的影响

拉索由于施工或使用过程中的磨损、腐蚀等原因,索体钢丝会发生断裂,且随着腐蚀的加剧或车辆、温度等外荷载作用,会使截面内其他钢丝进一步

断裂. 为研究断丝数目对索体钢丝拉力分布的影响, 假定断丝所在钢丝层为第 7 层, 变化断裂钢丝数目 n_b (3~9 根), 相应的断丝影响长度和索力剩余系数变化曲线如图 12 和 13 所示.

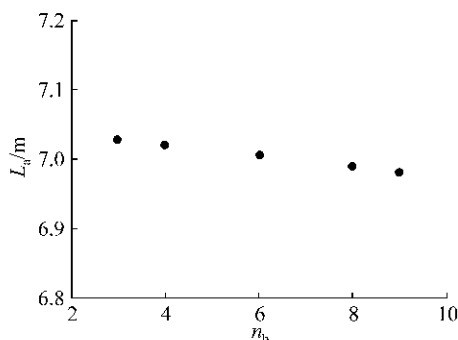


图 12 影响长度与断丝数目的关系曲线

Fig. 12 Variation of the affected length with the wire break numbers

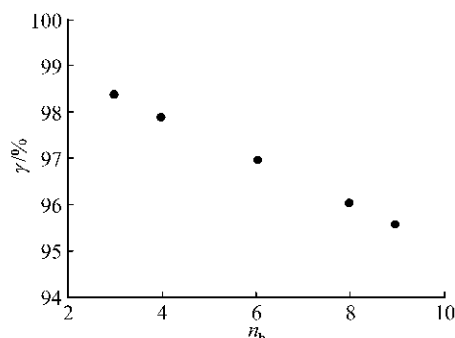


图 13 索力剩余系数与断丝数目的关系曲线

Fig. 13 Variation of the remaining prestress fraction with the wire break numbers

由图 12 和 13 可知:随着索内断丝数目的增加, 断丝影响长度逐渐变小, 但影响长度总大于 1 倍捻距; 索力剩余系数随索内断丝数目的增加而减小, 且两者基本成线性关系, 索力剩余系数变化范围不大. 最小索力剩余系数为 95.57%, 变化宽度为 2.80%.

4 结论

(1) 断丝拉力随到断裂处距离的增加成线性增加; 未断钢丝在断裂处拉力最大, 随到断裂处距离的增加呈现线性衰减. 在影响长度外, 各钢丝拉力分布又变为均匀.

(2) 通过参数敏感性分析, 探讨了各参数对影响长度和索力剩余系数的影响. 结果表明摩擦系数越大, 护套握裹力越大, 断丝越靠里层, 影响长度越小. 影响长度变化范围较大, 在常用参数范围内, 为 1~25 倍捻距; 索力剩余系数受摩擦系数和断丝径向位置影响最大. 当断丝位于第 13 层时, 索力剩余系数最小, 为 93.95%, 高于拉索断丝剩余率 93.70%, 各参数变化时, 索力剩余系数最大变化宽度可达 3.79%.

实际工程中, 拉索由于腐蚀、磨损等因素引起的断丝多为多层断丝或非对称断丝, 断丝形式、钢丝间接触变形、钢丝断口处的滑移等均会改变索内钢丝的拉力分布, 这些因素的影响值得进一步研究.

参考文献:

- [1] Matteo J, Deodatis G, Billington D P. Safety analysis of suspension-bridge cables: Williamsburg Bridge[J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(11):3197.
- [2] Faber M H, Englund S, Rackwitz R. Aspects of parallel wire cable reliability[J]. Structural Safety, 2003, 25:201.
- [3] Cappa P. An experimental study of wire strains in an undamaged and damaged steel strand subjected to tensile load [J]. Experimental Mechanics, 1988, 28(4):346.
- [4] Raoof M. Wire recovery length in a helical strand under axial-fatigue loading[J]. International Journal of Fatigue, 1991, 13 (2):127.
- [5] Raoof M, Kraincanic I. Recovery length in multilayered spiral strands [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1995, 121(7): 795.
- [6] MacDougall C. Behavior of monostrand tendons with broken wires [D]. London: The University of Western Ontario, 2001.
- [7] 李元兵. 拱桥吊杆力学行为及损伤退化研究[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2008.
LI Yuanbing. Research on the mechanical behavior and damage deterioration of suspender for arch bridges [D]. Shanghai: College of Civil Engineering of Tongji University, 2008.
- [8] Love. A treatise on the mathematical theory of elasticity [M]. New York: Dover Publications, 1944.
- [9] LeClair R A. Axial response of multilayered strands with compliant layers[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1991, 117(12):2884.
- [10] Margetts R, Spikes H A. Single contact testing and the lubrication of wire ropes [C]//Conference on Offshore Applications. Aberdeen: [s. n.], 1983: 455-463.