

拱桥钢绞线吊杆不对称断丝后的力学行为

刘剑锋, 李元兵, 张启伟

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 基于断丝前后吊杆两端边界位移约束条件不变的相容条件,建立了不对称断丝后钢绞线吊杆的损伤力学模型,并推导了不对称断丝后钢丝应变与影响长度、吊杆拉力损失率之间关系的表达式。结果表明:不对称断丝后,在影响长度内各钢丝拉力分布不均匀,与断丝相邻的外层未断钢丝拉力增大,其余钢丝拉力变化与断丝形式显著相关,在影响长度外各钢丝拉力分布又变为均匀;随着到断裂处距离的增加,断丝拉力呈指数或线性增加,而与断丝相邻钢丝拉力则呈指数衰减。在影响长度范围内,钢绞线拉力损失率基本为一限值,略高于钢绞线内钢丝断丝率,而护套握裹力、摩擦力等对吊杆内力重分布影响显著。

关键词: 拱桥;吊杆;不对称断丝;力学模型;内力重分布

中图分类号: U448.22

文献标志码: A

Mechanical Behavior of Damaged Strand Suspender with Asymmetric Broken Wires in Arch Bridges

LIU Jianfeng, LI Yuanbing, ZHANG Qiwei

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A mechanical model is proposed to describe the behavior of a damaged strand suspender with asymmetric broken wires in this paper, and the relations between the coefficient of inter-wire friction, the external contact force between sheathing and wires, the affected length of the suspender with broken wires, and the remaining tensile force of the suspender are investigated. Results show that forces in the broken and unbroken wires of the suspender are not equal over the affected length, centered at the break, but are equal beyond. The unbroken wire strains within the affected length are not uniform and have maximum strains occurring in the unbroken wires adjacent to the broken wires, but the rest of unbroken wires are significantly associated with the forms of broken wires. The strain in the broken wire is zero at the

wire break and increases exponentially with distance from the break. The strain in the unbroken wires is a maximum at the wire break and decreases exponentially with distance from the break. Within the affected length, the remaining prestress fraction approaches a lower limit, which is a little more than the loss of the cross-sectional area of the suspender. Meanwhile, the stress redistribution of a damaged suspender with asymmetric broken wires is significantly affected by contact forces between sheathing and outer wires, and frictions between broken wires and king wires.

Key words: arch bridge; suspender; asymmetric broken wire; mechanical model; stress redistribution

拱桥短吊杆断丝的损伤力学行为控制着吊杆结构的整体力学行为。钢丝在腐蚀和疲劳交变作用下一旦发生脆断,吊杆截面内其余钢丝会在短期内进行内力重分布而进一步开裂脆断,直至吊杆脆性断裂并发生桥面垮塌事故(见图1),如四川宜宾南门大桥(2001)、美国俄亥俄州 Sliver 桥(1967)、新疆孔雀河大桥(2011)、福建公馆大桥(2011)等。在这些桥梁的坍塌事故中,不仅反映出中、下承式拱桥所面临的严峻的结构安全问题,还折射出研究人员对拱、吊杆、梁组合体系中,复杂的有别于失稳或振动破坏的损伤断裂行为的认识问题。目前,桥梁工作者尤其学术界对吊杆的安全性问题越来越重视,并已开展了一些研究工作。文献[1]中通过对南门大桥短吊杆断裂事故进行研究后认为,温度、腐蚀和疲劳是导致短吊杆断裂的主要因素。徐俊^[2]认为,护套破损老化、钢丝锈蚀和腐蚀疲劳开裂是斜拉索损伤退化的主要机理。Raoof 等^[3]发现,在钢绞线钢丝绳中,外层单根钢丝断裂后,在影响长度内随着到钢绞线断裂处距离的增加,脆断钢丝内力逐步增大。MacDougall^[4]进一步指出,随着到钢绞线断裂处距离的增加,断丝内

收稿日期: 2018-05-16

基金项目: 江苏省交通科学研究计划(20131157)

第一作者: 刘剑锋(1979—),男,博士生,主要研究方向为桥梁健康监测、检测与安全评估。E-mail: liujf@tongji.edu.cn

通信作者: 李元兵(1979—),男,高级工程师,工学博士,主要研究方向为桥梁结构损伤退化理论及应用。E-mail: ctl_258@163.com

力呈指数增加,而未断钢丝则呈指数衰减.基于钢绞线吊杆自身构造的特殊性以及内部钢丝接触、挤压和滑移等因素的复杂性,刘剑锋等^[5]详细研究了钢丝脆断后钢绞线吊杆对称断丝力学行为.本文主要针对不对称断丝后钢绞线吊杆损伤力学行为展开研究,着重讨论钢丝不对称脆断后钢绞线吊杆损伤力学模型及数值验证方法.

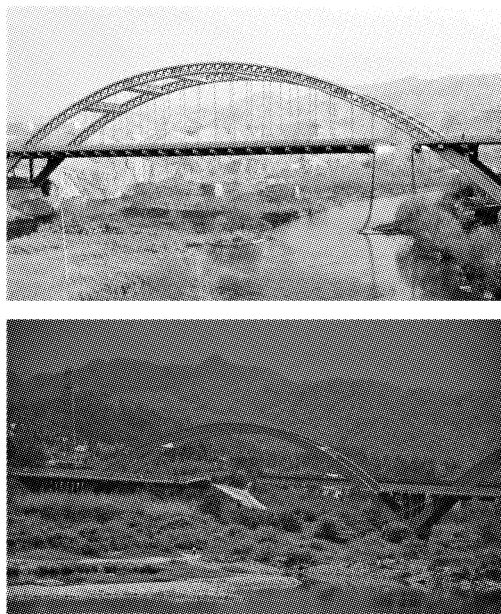


图 1 短吊杆断裂事故

Fig.1 Short suspenders collapsed

1 不对称断丝后的吊杆损伤力学模型

1.1 基本假定

吊杆截面内某一束钢绞线出现不对称断丝时,由于外部接触力不平衡,会产生垂直于钢绞线轴向的变形.这种变形产生以下几个影响:①增加与断丝相邻两根外层钢丝的螺旋半径;②减小其余三根外层钢丝的螺旋半径;③由于钢绞线不对称断丝,使得与断丝相邻两根外层钢丝的外部接触力增大,其余三根外层钢丝的外部接触力减小,因而不对称断丝后钢绞线内各外层钢丝内力分布不均匀.

理论推导前作如下基本假定:①所有断丝均出现在同一位置(沿钢束);②所有未断钢丝的应变均在弹性范围内;③钢丝与钢丝间完全接触,且不考虑接触变形;④吊杆截面内摩擦因数均相等,为一定值;⑤不考虑吊杆横截面位移;⑥钢丝开裂脆断期间,吊杆截面钢丝无其余损伤.

1.2 基本平衡方程

吊杆截面内某一束钢绞线(7 丝)如图 2 所示,断

丝形式分别为 1、1、4、1、4、6、1、4、7 等四种.钢绞线内各钢丝半径为 R ,螺旋角为 α ,螺旋半径 $R_h = 2R$,捻距 $p = 2\pi R_h \tan \alpha$,曲率半径 $\rho_0 = R_h / \cos^2 \alpha$,钢丝弹性模量为 E ,钢丝净面积为 A_0 ,吊杆长度为 L .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 轴沿钢丝螺旋方向,两坐标轴之间的换算关系为 $s = x / \sin \alpha$.钢丝与护套间的摩擦力较小,忽略不计.断丝后护套对断裂钢丝新的握裹力单位长度为 w_{sb} .各钢丝间摩擦因数为 μ ,断丝与相邻钢丝间接触力为 $X_c(s)$,钢丝间单位长度的摩擦力 $f(s) = \mu X_c(s)$,断丝轴力为 $N_b(s)$,断丝轴向应变为 $\epsilon_b(s)$,未断钢丝轴力为 $N_u(s)$.断丝前,吊杆拉力为 F ,核心钢丝净面积为 A_c ,核心钢丝轴力 $N_c = F / (1 + 6 \sin^3 \alpha)$,外层各钢丝轴力 $N_0 = F \sin^2 \alpha / (1 + 6 \sin^3 \alpha)$ ^[4].断 n 根钢丝后,吊杆拉力变为 F_{bn} ,未断裂钢丝拉力总和为 $F_u(x)$,核心钢丝轴向应变 $\epsilon_c(x) = \Delta u / \Delta x$,其中 Δu 为钢绞线微段沿轴向 Δx 的变形.

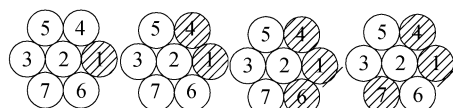


图 2 钢绞线吊杆截面内不对称断丝示意图

Fig.2 Diagram of asymmetric broken wire arrangement in cross-section of strand suspender

图 3 为距离断裂截面 s 处断丝微段 Δs 的静力平衡立面图,断丝微段 Δs 力平衡方程如下所示^[4]:

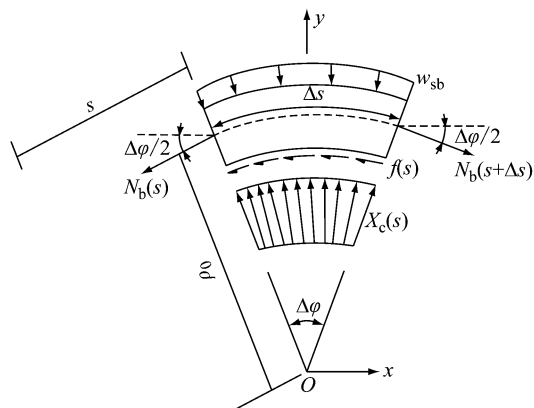


图 3 断丝静力平衡图

Fig.3 Equilibrium of forces acting on a broken wire

x 方向上:

$$(N_b(s + \Delta s) - N_b(s)) \cos \frac{\Delta \varphi}{2} - \int_0^{\Delta s} f(s) ds = 0 \quad (1)$$

y 方向上:

$$\int_0^{\Delta s} X_c(s) ds = N_b(s) \sin \frac{\Delta \varphi}{2} + N_b(s + \Delta s) \sin \frac{\Delta \varphi}{2} + w_{sb} \Delta s \quad (2)$$

图4为断一根丝时钢绞线内核心钢丝接触力平衡图.与断丝相邻两根钢丝和核心钢丝间接触力分别为 X_{+60° 和 X_{-60° ,与断丝相对的钢丝与核心钢丝间接触力为 X_{+180° ,其余两根钢丝与核心钢丝间接触力分别为 X_{+120° 和 X_{-120° ,断丝与核心钢丝间接触力为 X_b .由力平衡知:

$$X_{+60^\circ} + X_{-60^\circ} + X_b = X_{+120^\circ} + X_{-120^\circ} + X_{+180^\circ} \quad (3)$$

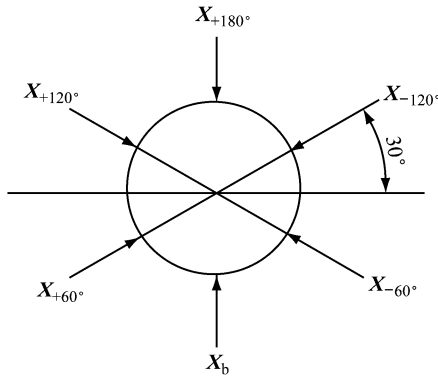


图4 断一根丝时核心钢丝接触力平衡图

Fig.4 Equilibrium of core wire contact force with one broken wire

1.3 不对称断丝损伤力学模型

因 $\Delta \varphi/2$ 较小,故 $\cos(\Delta \varphi/2) \approx 1$, $\sin(\Delta \varphi/2) \approx \Delta \varphi/2$.联立方程(1)和(2)并求极限,可得断裂钢丝在 x 断面的轴力、应变,如下所示:

$$N_b(x) = \frac{w_{sb} R_h}{\cos^2 \alpha} \left(\exp \frac{\mu \cos^2 \alpha x}{R_h \sin \alpha} - 1 \right) \quad (4)$$

$$\epsilon_b(x) = \frac{w_{sb} R_h}{EA_0 \cos^2 \alpha} \left(\exp \frac{\mu \cos^2 \alpha x}{R_h \sin \alpha} - 1 \right) \quad (5)$$

钢绞线轴向变形 δ_p 引起的螺旋半径变化 δ_h 分别为^[6]

$$\begin{aligned} \delta_h(\pm 60^\circ) &= \frac{\delta_p}{2}, \delta_h(\pm 120^\circ) = -\frac{\delta_p}{2}, \\ \delta_h(+180^\circ) &= -\delta_p \end{aligned} \quad (6)$$

由钢丝螺旋半径变化 δ_h 所引起的未断裂钢丝应变分别为

$$\begin{aligned} \epsilon_{\pm 60^\circ}(x) &= \frac{\sin^2 \alpha \Delta u}{\Delta x} + \frac{\delta_p \cos^2 \alpha}{2R_h}, \\ \epsilon_{\pm 120^\circ}(x) &= \frac{\sin^2 \alpha \Delta u}{\Delta x} - \frac{\delta_p \cos^2 \alpha}{2R_h}, \\ \epsilon_{+180^\circ}(x) &= \frac{\sin^2 \alpha \Delta u}{\Delta x} - \frac{\delta_p \cos^2 \alpha}{R_h} \end{aligned} \quad (7)$$

钢绞线内部接触力(单位长度)可按 $X_0 =$

$N_0 \cos^2 \alpha / R_h$ 计算.外层钢丝与核心钢丝间的接触力分别为

$$\begin{aligned} X_b &= \frac{N_b(x) \cos^2 \alpha}{R_h}, X_{\pm 60^\circ}(x) = \frac{N_{\pm 60^\circ}(x) \cos^2 \alpha}{R_h}, \\ X_{\pm 120^\circ}(x) &= \frac{N_{\pm 120^\circ}(x) \cos^2 \alpha}{R_h}, X_{+180^\circ}(x) = \frac{N_{+180^\circ}(x) \cos^2 \alpha}{R_h} \end{aligned} \quad (8)$$

各外层钢丝的轴力分别为

$$\begin{aligned} N_{\pm 60^\circ}(x) &= EA_0 \epsilon_{\pm 60^\circ}(x), N_{\pm 120^\circ}(x) = EA_0 \epsilon_{\pm 120^\circ}(x), \\ N_{+180^\circ}(x) &= EA_0 \epsilon_{+180^\circ}(x) \end{aligned} \quad (9)$$

将式(6)~(9)代入式(3)并消除 δ_p ,不对称断丝后各外层钢丝的应变分别为

$$\begin{aligned} \epsilon_{\pm 60^\circ}(x) &= \frac{5 \sin^2 \alpha \Delta u}{4 \Delta x} - \frac{\epsilon_b(x)}{4}, \\ \epsilon_{\pm 120^\circ}(x) &= \frac{3 \sin^2 \alpha \Delta u}{4 \Delta x} + \frac{\epsilon_b(x)}{4}, \\ \epsilon_{+180^\circ}(x) &= \frac{\sin^2 \alpha \Delta u}{2 \Delta x} + \frac{\epsilon_b(x)}{2} \end{aligned} \quad (10)$$

由于吊杆剩余拉力

$$F_{bl} = EA_0 \sin \alpha (2 \epsilon_{\pm 60^\circ}(x) + 2 \epsilon_{\pm 120^\circ}(x) + \epsilon_{+180^\circ}(x) + \epsilon_b(x)) + EA_c \epsilon_c(x)$$

则根据式(5)、(10)可得

$$\frac{\Delta u}{\Delta x} = \frac{F_{bl} - 1.5 EA_0 \epsilon_b(x) \sin \alpha}{E(4.5 A_0 \sin^3 \alpha + A_c)} \quad (11)$$

根据式(11)可得核心钢丝轴力,如下所示:

$$\begin{aligned} N_c(x) &= EA_0 \epsilon_c(x) = EA_0 \frac{\Delta u}{\Delta x} \\ &= \frac{F_{bl} - 1.5 EA_0 \epsilon_b(x) \sin \alpha}{4.5 \sin^3 \alpha + 1} \end{aligned} \quad (12)$$

根据式(10)、(12)可得外层未断钢丝轴力分别为

$$\begin{aligned} N_{\pm 60^\circ}(x) &= 1.25 \sin^2 \alpha N_c(x) - 0.25 N_b(x), \\ N_{\pm 120^\circ}(x) &= 0.75 \sin^2 \alpha N_c(x) + 0.25 N_b(x), \\ N_{+180^\circ}(x) &= 0.5 \sin^2 \alpha N_c(x) + 0.5 N_b(x) \end{aligned} \quad (13)$$

1.4 影响长度

影响长度 L_a 是指外层断丝与未断钢丝拉力不均匀区域(当 $x = \pm L_a/2$ 时,外层各钢丝拉力相等),可得

$$N_b\left(\frac{L_a}{2}\right) = \frac{\sin^2 \alpha}{1 + 6 \sin^3 \alpha} F_{bl} \quad (14)$$

将式(14)代入式(4)可得不对称断丝后断丝影响长度 L_a 的表达式,如下所示:

$$L_a = \frac{2 R_h \sin \alpha}{\mu \cos^2 \alpha} \ln \left(\left(\frac{\sin^2 \alpha}{1 + 6 \sin^3 \alpha} \right) \left(\frac{F_{bl} \cos^2 \alpha}{w_{sb} R_h} \right) + 1 \right) \quad (15)$$

1.5 钢绞线拉力剩余率

钢绞线拉力剩余率 γ 可定义为

$$\gamma = \frac{F_{bn}}{F} \quad (16)$$

在 $0 \leq x \leq L_a/2$ 时,钢绞线拉力与伸长量的关系式可表示为

$$\int du = \int \frac{F_u(x)}{EA_0((6-n)\sin^3\alpha + 1)} dx \quad (17)$$

由于吊杆两端外部边界约束条件不变,整根吊杆断丝前后总的伸长量不变^[4],即 $\Delta = \Delta_{bn}$ (Δ 为吊杆断丝前总的伸长量, Δ_{bn} 为吊杆断丝后总的伸长量)。

当影响长度小于等于钢绞线长度,即 $L_a \leq L$ 时,钢绞线拉力剩余率

$$\gamma = \frac{1}{\frac{6\sin^3\alpha + 1}{4.5\sin^3\alpha + 1} \left(1 + \frac{1.5R_h w_{sb}}{F_{bl} \cos^2\alpha} \left(1 - \frac{2R_h \sin\alpha}{\mu L \cos^2\alpha} \left(\exp\left(\frac{\mu L \cos^2\alpha}{2R_h \sin\alpha} - 1\right) \right) \right) \right)} \quad (19)$$

$$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{L_a}{L} \left(\lambda_{bl} \frac{6\sin^3\alpha + 1}{4.5\sin^3\alpha + 1} - 1 \right)} \quad (18)$$

式中:

$$\lambda_{bl} = 1 - \left[\frac{\frac{1.5\sin^2\alpha}{6\sin^3\alpha + 1}}{\sin\alpha \ln\left(\frac{\sin^2\alpha}{6\sin^3\alpha + 1} \frac{\cos^2\alpha}{R_h} \frac{F_{bl}}{w_{sb}} + 1\right)} - \frac{1.5R_h w_{sb}}{F_{bl} \cos^2\alpha} \right]$$

当影响长度大于钢绞线长度,即 $L_a > L$ 时,钢绞线拉力剩余率

2 数值分析与讨论

2.1 有限元模型

采用 Ansys 软件中单元生死功能来模拟钢丝的脆断问题^[7-9],钢丝采用 solid45 三维实体单元,屈服准则采用 Von Mises 屈服准则. 根据该屈服准则,单轴拉伸状态下钢丝临界剪应力取 $\sigma_y/3$ (σ_y 为屈服应力). 完好、损伤钢丝弹性模量分别为 1.996×10^5 、 1.932×10^5 MPa,泊松比为 0.27. 损伤钢丝实体模型不考虑大应变属性,材料非线性选用多线性同向强化应力-应变关系,考虑钢丝间摩擦力和护套握裹力,计算参数如表 1 所示. 有限元模型如图 5 所示. 为降低计算成本,模拟时钢丝长度仅取 350 mm.

表 1 钢绞线吊杆计算参数

Tab.1 Calculating parameter of strand suspender

R/mm	R _h /mm	p/mm	$\alpha/(^{\circ})$	L/mm	A ₀ /mm ²	E/MPa	ν
3.5	7.0	629	86	3 000	38.48	1.996×10^5	0.27

2.2 吊杆截面内力重分布规律

吊杆截面内力重分布的理论计算值与有限元模拟结果如图 6 所示. 从图 6 可得到以下结果:

(1)断钢丝 1 时,在影响长度内,断裂处破断钢丝拉力为零,随着到断裂处距离的增加呈指数增加;与钢丝 1 相邻的外层未断钢丝拉力最大,随距离的增加呈指数衰减;与钢丝 1 相对的未断钢丝拉力最小,随距离的增加呈指数增加;在影响长度外,各钢丝拉力分布又变为均匀。

(2)断钢丝 1、4 时,与断丝相邻的钢丝 2、5、6 拉力增大且应变相等,并随距离的增加呈指数衰减;与断丝相对的钢丝 3、7 拉力减小,并随距离的增加呈指数增加。

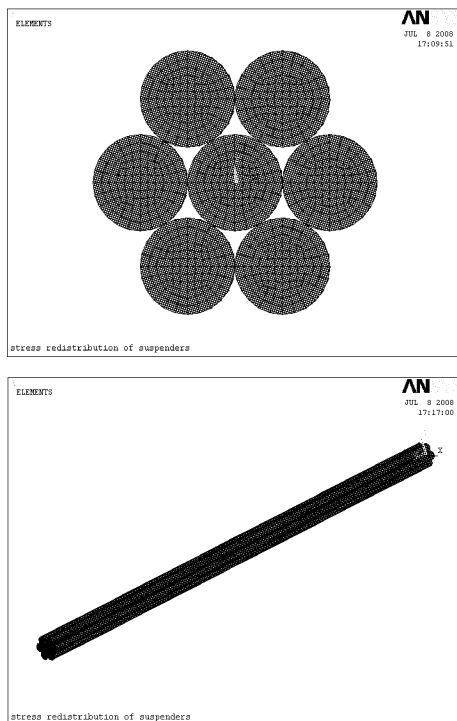


图 5 钢绞线吊杆有限元模型

Fig.5 Finite element model of strand suspender

(3)断钢丝 1、4、6 时,与断丝相邻的钢丝 2、5、7 拉力增大(钢丝 2 最显著),并随距离的增加呈指数衰减;钢丝 3 拉力减小,并随距离的增加呈指数增加。

(4)断钢丝 1、4、7 时,非断丝拉力均增大,并随距离的增加呈指数衰减. 由于有限元模拟结果相对理论推导而言有许多假定,并引入了一定的模拟误差,如钢丝间的接触变形、摩擦、滑移、挤压等均无法精确模拟,导致有限元模拟结果存在一定程度的失真,但对断丝瞬间吊杆截面内各钢丝内力重分布规律而言,两种结果近似并具有可比性,后续参数分析时重点依据理论推导公式进行分析。

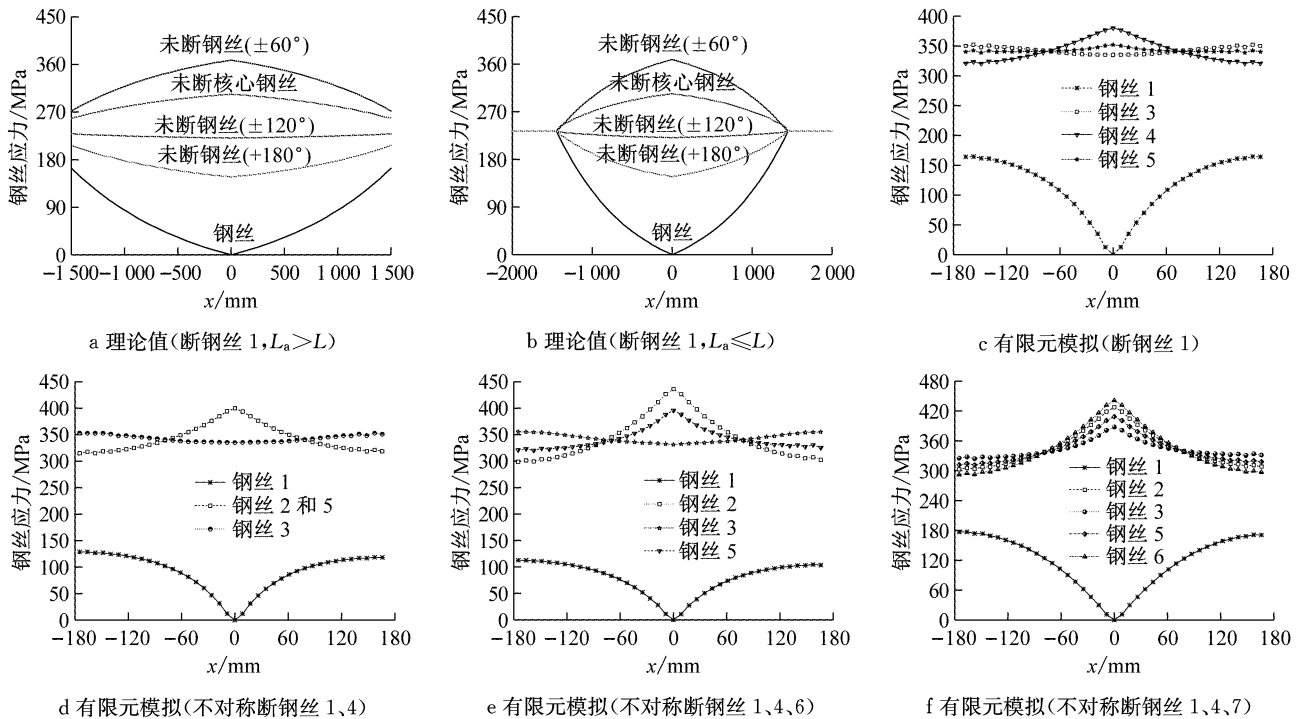


图6 不对称断丝时钢绞线吊杆内力重分布规律

Fig.6 Stress redistribution of strand suspender with asymmetric broken wires

2.3 钢绞线拉力损失率

不对称断丝情况下,钢绞线拉力损失率理论计算与有限元模拟结果如表2所示。结果表明:①在影响长度范围内,钢绞线拉力损失率最低限值均高于钢绞线内钢丝断丝率,附加应力损失主要由护套应力增加或钢丝变形引起的;②钢绞线拉力损失率主要受护套握裹力、捻角、钢丝半径、摩擦因数、钢丝长度等影响;③钢丝长度越大、直径越小,摩擦因数越大、护套握裹力越大以及螺旋角越小,钢绞线拉力损失率就越小。钢丝拉力损失率参数敏感性分析如图7所示。

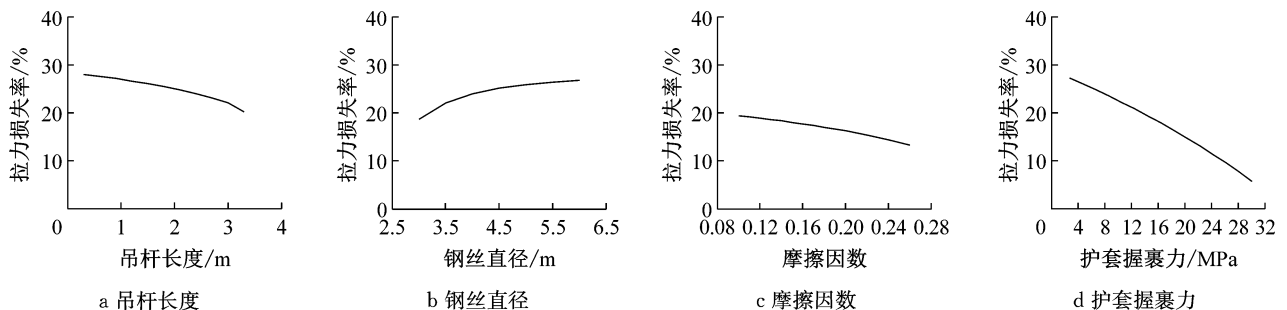


图7 钢绞线拉力损失率参数敏感性分析(不对称断钢丝1)

Fig.7 Parameter sensitivity analysis of strand's remaining prestressing fraction with wire 1 broken

图8可知:影响长度与摩擦因数成反比,随摩擦因数增大,影响长度急剧降低;影响长度与螺旋半径成正比,随螺旋半径增大,影响长度基本呈线性增加;影

表2 钢绞线拉力损失率

Tab.2 The remaining prestressing fraction of strand suspender

断丝编号	拉力损失率/%		断丝率
	有限元模拟	理论计算	
1	16.0	16.3	14.3
1,4	31.8	29.5	28.6
1,4,6	46.0	44.1	42.9
1,4,7	44.8	43.2	42.9

2.4 影响长度

不对称断丝情况下,影响长度受摩擦因数、螺旋半径、螺旋角及护套握裹力等影响,如图8所示。由

影响长度与螺旋角成正比,随螺旋角增大,影响长度基本呈线性增加;影响长度与护套握裹力成反比,随护套握裹力增大,影响长度呈指数衰减。

2.5 护套握裹力对吊杆内力重分布的影响

图 9 为护套握裹力分别为 5、10、20、30 MPa 时, 不对称断钢丝 1 情况下各钢丝拉力重分布的演化规律. 由图 9 可知: 护套握裹力增加对钢丝 1(断丝) 的影响最为显著, 对钢丝 4 和 6($\pm 60^\circ$) 的影响次之, 对钢丝 5 和 7($\pm 120^\circ$) 的影响最不显著, 对钢丝 2(核心

钢丝) 和钢丝 3($+180^\circ$) 的影响居中. 随护套握裹力的增加, 钢丝 1、3、5、7 拉力逐步增大, 而其余钢丝拉力逐步变小. 这表明护套握裹力对断丝及与断丝相邻的钢丝内力重分布影响非常明显, 对其余钢丝内力重分布的影响则小得多.

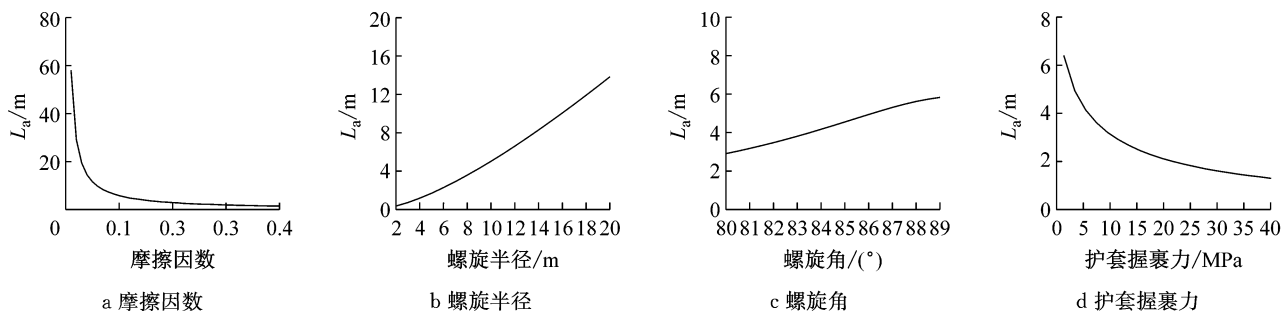


图 8 影响长度参数敏感性分析(不对称断 1、4、6 丝)

Fig.8 Parameter sensitivity analysis of affected length with wires 1, 4 and 6 broken

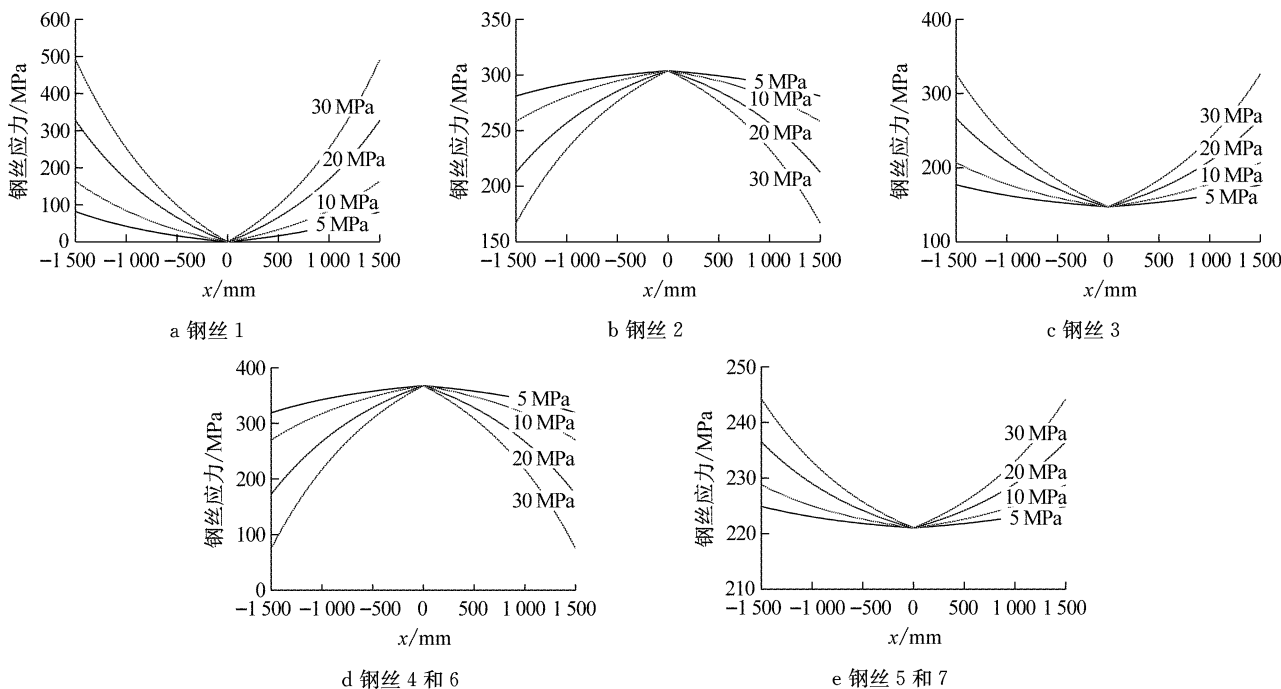


图 9 护套握裹力对吊杆内力重分布的影响

Fig.9 Effect of contact forces between sheathing and outer wires on stress redistribution of suspender

2.6 钢丝间摩擦力对吊杆内力重分布的影响

图 10 为摩擦因数分别为 0.10、0.15、0.20、0.25 时, 不对称断钢丝 1 情况下各钢丝内力重分布的演化规律. 由图 10 可知: 摩擦因数增加对钢丝 1(断丝) 的影响最为显著, 对钢丝 4 和 6($\pm 60^\circ$) 的影响次之, 对钢丝 5 和 7($\pm 120^\circ$) 的影响最不显著, 对钢丝 2(核心

钢丝) 和钢丝 3($+180^\circ$) 的影响居中. 随摩擦因数的增加, 钢丝 1、3、5、7 拉力逐步增大, 而其余钢丝拉力逐步变小. 这表明摩擦因数对断丝及与断丝相邻

3 结论

(1) 不对称断丝后, 在影响长度内各钢丝拉力分布不均匀, 与断丝相邻的外层未断钢丝拉力增大, 其余钢丝拉力变化与断丝形式显著相关, 而在影响长度外各钢丝拉力分布又变为均匀.

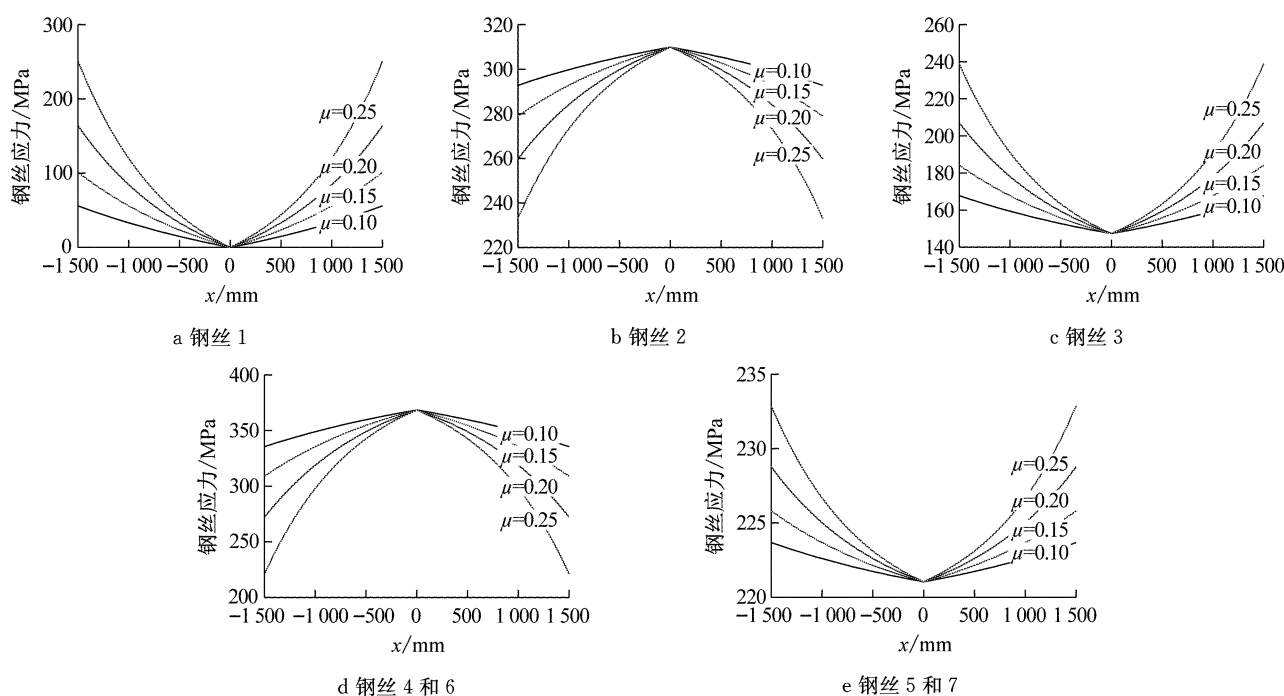


图10 钢丝间摩擦力对吊杆内力重分布的影响

Fig.10 Effect of friction between broken wires and king wires on stress redistribution of suspender

(2)在影响长度外,断裂处破断钢丝拉力为零,随着到断裂处距离的增加呈指数或线性增加;与断丝相邻钢丝在断裂处拉力最大,随到断裂处距离的增加呈指数或线性衰减。护套握裹力、摩擦力等对吊杆内力重分布影响显著。

(3)在影响长度范围内,钢绞线拉力损失率最低限值均高于钢绞线内钢丝断丝率;钢丝长度越大、直径越小,摩擦因数越大、护套握裹力越大以及螺旋角越小,钢绞线拉力损失率就越小。

(4)护套握裹力、摩擦力对断丝及与断丝相邻钢丝的内力重分布影响非常明显,对其余钢丝内力重分布的影响则小得多。

参考文献:

- [1] 孔庆凯. 大跨中承式拱桥短吊杆结构行为研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2003.
KONG Qingkai. Structural behavior study on short suspenders of half through arch bridges with large span [D]. Chengdou: Southwest Jiaotong University, 2003.
- [2] 徐俊. 拉索损伤演化模型及剩余使用寿命评估[D]. 上海: 同济大学, 2006.
XU Jun. Damage evolution model and residual service life assessment of stay cable [D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [3] RAOOF M, KRAINCANIC I. Recovery length in multilayered spiral strands[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1995, 121(7):795.
- [4] MACDOUGALL C. Behavior of monostrand tendons with broken wires[D]. London: The University of Western Ontario, 2001.
- [5] 刘剑锋, 李元兵, 柏平, 等. 钢丝脆断后钢绞线吊杆对称断丝力学行为[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2014, 42(4):547.
LIU Jianfeng, LI Yuanbing, BAI Ping, et al. Mechanical behaviour of damaged strand suspender with symmetric broken wires in arch bridges[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2014, 42(4):547.
- [6] MACHIDA S, DURELLI A J. Response of a strand to axial and torsional displacements[J]. Journal of Mechanical Engineering Science, 1973, 15(4):241.
- [7] YU Yujie, CHEN Zhihua, LIU Hongbo. Advanced approaches to calculate recovery length and force redistribution in semi-parallel wire cables with broken wires [J]. Engineering Structures, 2017, 131:44.
- [8] MONTOYA A, WAISMAN H, BETTI R. A simplified contact-friction methodology for modeling wire breaks in parallel wire strands[J]. Computers and Structures, 2012, 100/101:39.
- [9] IVANCO V, KMET S, FEDORKO G. Finite element simulation of creep of spiral strands[J]. Engineering Structures, 2016, 117:220.