

文章编号: 1674-599X(2020)02-0066-07

基于应力幅差的非对称吊杆破损安全性能分析

尹银蓉¹, 李睿¹, 王鹏¹, 何永伟²

(1. 昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650500;

2. 云南睿德道路桥梁工程设计有限公司, 云南 昆明 650500)

摘 要: 为了提高拱桥吊杆的安全性能, 基于破损安全双吊杆理论(即对双吊杆采用不同面积比, 并设定截面积较小的为主承重吊杆 F 杆, 截面积较大的为安全吊杆 S 杆), 提出一种通过改变双吊杆应力幅差从而实现吊杆先后破坏断裂的设计方法(即在 S 杆下方增设不同刚度的橡胶垫块)。以云南省某下承式拱桥为例, 通过有限元软件, 模拟分析双吊杆在不同的面积比和橡胶垫块刚度下该设计方法是否能达到破损安全的目的。研究结果表明: 该设计方法有效。适当增加 S 杆的面积比, 有利于 F 杆破断瞬间 S 杆的安全性; 且合理地调整与 S 杆串联的橡胶垫块的刚度, 有利于提高吊杆的破损安全性能。

关键词: 下承式拱桥; 双吊杆; 吊杆骤断; 破损安全

中图分类号: U448.53

文献标志码: A

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.02.011

Safety performance analysis of asymmetric suspender damage based on the different amplitude of stress

YIN Yin-rong¹, LI Rui¹, WANG Peng¹, HE Yong-wei²

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology,

Kunming 650500, China;

2. Yunnan Ruide Road and Bridge Engineering Design Co., Ltd., Kunming 650500, China)

Abstract: In order to improve the safety performance of the suspenders of arch bridges, based on the theory of double suspenders for damaged safety (adopting different area ratio for double suspenders, and setting the smaller section area as F-bar and the larger as S-bar), a design method was proposed to achieve the successive failure and fracture of suspenders by changing the stress amplitude difference of double suspenders (adding rubber cushion blocks with different rigidity under S-bar). Taking a through arch bridge in Yunnan Province as an example, it was analyzed whether the goal of damage safety can be achieved using this design method under different area ratio and rubber pad stiffness by the finite element software simulation. The results show that the design method is effective, and properly increasing the area ratio of the S-bar is conducive to the safety of the S-bar at the moment of breaking of the F-bar, and reasonably adjusting the rigidity of the rubber cushion block in series with the S-bar is conducive to improving the safety performance of the damaged safety suspender.

Key words: through arch bridge; double suspenders; suspender rupture; damage safety

下承式拱桥吊杆在服役期间, 受到来自外界环境的耦合作用和变幅应力作用, 容易发生疲劳破

坏。纵观国内、外下承式拱桥吊杆的服役史, 由于吊杆骤断而导致桥梁坍塌的事故时有发生^[1-4], 表

收稿日期: 2019-11-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51568029); 云南省交通科技项目(云交科(2012)04 号)

作者简介: 尹银蓉(1995-), 女, 昆明理工大学硕士生。

明现有的基于增大吊杆安全系数富余度的拱桥吊杆设计理论^[5]不能很好地控制吊杆骤断问题。由于系杆拱桥梁在运营阶段的外界环境和受力的复杂性^[2-5],仅依靠现有的在静力准则下的双吊杆设计理论很难维持在吊杆骤断情况下桥梁剩余结构的安全^[6-7]。因此,在拱桥吊杆研究中引入“破损安全吊杆理论”^[8-10]显得十分重要。现有的破损安全吊杆是基于“多路传力”^[11-12]的方法来构建的,即针对桥梁的关键部位,采用2个或2个以上的组件来传递荷载。当其中一个组件失效了,相邻的组件可以顶替或分担其承受的荷载,以保证结构整体的安全,并保证足够的时间来对失效组件进行维修和更换。基于破损安全吊杆理论构建的桥梁吊杆具有安全预警和保证结构安全的双重效果^[13]。

现采用的破损安全吊杆理论是通过改变单元参数的取值(如:改变吊杆的截面积和张拉力的大小等)使得作用于同一位置处的2根吊杆产生面积差或应力差,从而实现2根吊杆的寿命差^[14]。吴昊^[8]提出了应力差型和强度差型的破损安全系统,满足破损安全设计的要求。作者基于破损安全双吊杆理论,拟提出一种通过改变双吊杆应力幅差,从而实现吊杆先、后破断的新设计方法。结合工程实例,对双吊杆采用不同的面积比,并假设截面积较小的为主承重吊杆(F杆),截面积较大的为安全吊杆(S杆),且在S杆下方增设不同刚度的橡胶垫块,通过有限元软件,模拟不同的F杆与S杆的面积比和橡胶垫块刚度,对F杆破断冲击作用下的破损安全双吊杆单元的安全性能进行分析。

1 基于应力幅差的破损安全理论公式

一套吊杆系统由2根吊杆及橡胶垫块组成,如图1所示。

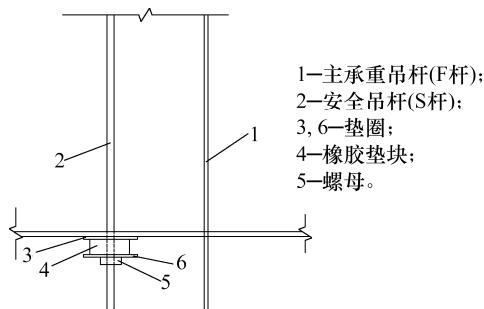


图1 基于应力幅差的破损安全吊杆系统

Fig. 1 Broken safety suspender system based on the difference amplitude of stress

设F杆的截面面积为 A_F , S杆的截面面积为 A_S , 且 $A_S > A_F$ 。F杆的刚度为 K_F , 由于S杆与橡胶垫块串联, 因此, S杆的整体刚度为:

$$K'_S = \frac{K_S K_p}{K_S + K_p} \quad (1)$$

式中: K_p 为橡胶垫块的刚度; K_S 为S杆的刚度。

吊杆的受力分析分为3个阶段: 破断前的S杆和F杆的静力分析、F杆破断瞬间S杆内力变化及破断后S杆的受力情况。

1) 破断前, 由F杆和S杆共同承担同一吊点位置的力, 内力会按照刚度分配原则进行重分配。假设该套吊杆系统整体受力的大小为 T , 则S杆所受到的力 T'_1 和F杆受到的力 T'_2 分别为:

$$T'_1 = \frac{K'_S}{K'_S + K_F} T \quad (2)$$

$$T'_2 = \frac{K_F}{K'_S + K_F} T \quad (3)$$

则S杆和F杆的应力分别为:

$$\sigma_S = \frac{K'_S T}{(K'_S + K_F) A_S} \quad (4)$$

$$\sigma_F = \frac{K_F T}{(K'_S + K_F) A_F} \quad (5)$$

设S杆的抗拉标准强度为 f_1 ; F杆的抗拉标准强度为 f_2 。由于2根吊杆所用材料相同, 则有 $f_1 = f_2 = f$ 。根据《公路桥梁斜拉桥设计细则(JTG/TD65-1—2007)》^[9], 运营状态下的斜拉索的安全系数不应小于2.5, 即得到:

$$\frac{f_1}{\sigma_S} \geq 2.5 \quad (6)$$

$$\frac{f_2}{\sigma_F} \geq 2.5 \quad (7)$$

2) F杆破断瞬间, 由于突然骤断, 将会产生一个大于F杆在正常受力情况下的冲击力。根据何嘉^[10]的研究, 当吊杆骤断时, 其动力放大系数取 $\beta=2$, 即有2倍的F杆破断前的受力加载在S杆上, 由式(3)和(4), 得到S杆所受到的内力 T'_3 和应力 σ'_S 分别为:

$$T'_3 = \frac{K'_S + 2K_F}{K'_S + K_F} T \quad (8)$$

$$\sigma'_S = \frac{K'_S + 2K_F}{(K'_S + K_F) A_S} T \quad (9)$$

且在破断瞬间, 为保证S杆能够承受住F杆骤断带来的单独承载的冲击力, 其瞬时安全系数为

$$\frac{f}{\sigma'_s} \geq 1.$$

3) F杆破断后,冲击力消失,S杆将单独进行承载,此时,S杆受到的内力为 T 。则安全吊杆的应力为:

$$\sigma''_s = \frac{T}{A_s}. \quad (10)$$

根据《公路桥梁斜拉桥设计细则(JTG D65-1—2007)》,运营状态下的斜拉索的安全系数不应小于2.5^[8],即 $\frac{f}{\sigma''_s} \geq 2.5$ 。

2 基于应力幅差的破损安全理论分析

2.1 工程实例

采用云南省某预应力混凝土梁拱组合下承式拱桥,计算跨径43.34 m,矢跨比 $f=1/4$,桥面设计为双向四车道,净宽19.0 m,设计荷载为汽车-20级,挂车-100级。全桥共7对吊杆,并在每个吊点位置处设置了2根平行双吊杆,吊杆中心间距为1.0 m,吊点间距为5.0 m。

根据桥梁施工图的相关尺寸,对拱肋、吊杆、系梁及主梁等建立模型^[11-15]。全桥有限元模型如图2所示。该模型采用桁架单元模拟拱肋,采用梁单元模拟系杆及横梁,采用板单元模拟桥面板。恒荷载考虑自重和二期恒载,二期恒载考虑桥面铺装、人行道和栏杆等。活载按设计要求考虑双向四车道的汽车荷载。边界条件的设置为外部简支。为方便计算,对吊杆进行了编号,如图3所示。

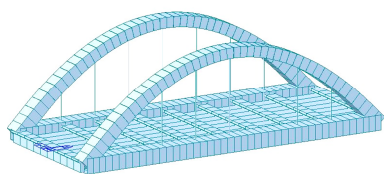


图2 全桥有限元模型

Fig. 2 The finite element model of the full bridge

2.2 吊杆分析方案

本桥通过改变双吊杆面积比和2根吊杆的弹性刚度来评估其在F杆破断时S杆的安全性,即在不同F杆与S杆的截面积之比和橡胶垫块刚度下,当吊杆的承载力不足或损伤达到其容限时,F杆破断,而同一位置处的S杆依然安全。根据S杆、F杆面积比值的不同,分6个方案进行研究,见表1。其

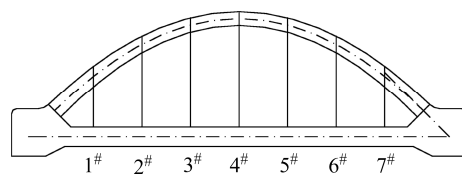


图3 吊杆编号

Fig. 3 Hanger number

表1 各计算方案下一个吊点处S杆、F杆的面积比

Table 1 Area ratio of S-bar and F-bar at a typical point in different calculation scheme

方案	A_F/A_S	
	边吊杆	其他吊杆
方案1	8/20	14/32
方案2	9/19	15/31
方案3	10/18	16/30
方案4	11/17	18/28
方案5	12/16	20/26
方案6	13/15	21/25

中,每个方案边吊杆和其他吊杆的面积比一致。

通过调整橡胶垫块的刚度,改变双吊杆的应力幅差,实现吊杆先、后破断的目的。作者研究了4种橡胶垫块刚度(5 000,10 000,100 000和500 000 kN/m)对双吊杆破损安全吊杆单元安全性能的影响。

2.3 吊杆受力行为和安全性能分析

何嘉^[10]分析了短、中、长3种吊杆破断对其他吊杆的影响。当这3种吊杆破断后,内力受影响最大的是与F杆位于同一吊点的S杆。因此,在吊杆的F杆破断瞬间和破断后,不仅分析得到同一吊点的S杆的安全性能,而且分析得到短吊杆的S杆在F杆破断瞬间内力最大,受力最不利。对于本桥,边吊杆(1#和7#吊杆)的面积小于其他吊杆的,且中吊杆(4#吊杆)的受力最大,因此,仅分析1#和4#吊杆在F杆破断时S杆的安全性。在F杆破断瞬间,需考虑吊杆系统的内力重分布。在F杆破断后,模型中考虑将F杆单元“杀死”,并将该“杀死”单元的2倍力附加在S杆上。

2.3.1 破损安全吊杆受力行为分析

在4种不同的橡胶垫块刚度下,方案1~6不同面积比的1#和4#吊杆的受力情况分别见表2~5。其中:F杆破断瞬间,S杆所受到的力为2倍F杆正常运营时的内力与S杆的内力之和^[8]。

从表2~5中可以看出,在橡胶垫块刚度不变、

表 2 橡胶垫块刚度为 5 000 kN/m 时, 1[#]和 4[#]吊杆的受力情况

Table 2 Stress of No.1 and No.4 suspenders with rubber pad stiffness of 5 000 kN/m

方案	1 [#] 吊杆内力/kN				4 [#] 吊杆内力/kN			
	S 杆(正常运营)	F 杆(正常运营)	S 杆(F 杆破断瞬间)	S 杆(F 杆断后)	S 杆(正常运营)	F 杆(正常运营)	S 杆(F 杆破断瞬间)	S 杆(F 杆断后)
方案 1	1 091.0	722.9	2 536.8	1 094.1	1 664.8	1 478.5	4 621.8	1 682.6
方案 2	1 036.6	798.8	2 634.2	1 040.0	1 610.9	1 541.5	4 693.9	1 627.7
方案 3	982.3	872.7	2 727.7	986.6	1 557.4	1 603.1	4 763.6	1 574.1
方案 4	927.4	935.9	2 799.2	932.7	1 451.7	1 724.3	4 900.3	1 467.6
方案 5	872.8	998.4	2 869.6	878.1	1 347.0	1 841.5	5 030.0	1 361.8
方案 6	818.9	1 068.6	2 956.1	823.8	1 295.0	1 898.5	5 092.0	1 309.0

方案	1 [#] 吊杆应力/MPa				4 [#] 吊杆应力/MPa			
	S 杆(正常运营)	F 杆(正常运营)	S 杆(F 杆破断瞬间)	S 杆(F 杆断后)	S 杆(正常运营)	F 杆(正常运营)	S 杆(F 杆破断瞬间)	S 杆(F 杆断后)
方案 1	300.6	498.0	699.4	301.5	286.7	582.0	796.4	289.8
方案 2	300.7	489.1	764.4	301.8	286.4	566.3	834.9	289.5
方案 3	300.8	481.0	835.5	302.2	286.1	552.1	875.5	289.3
方案 4	300.6	468.9	907.9	302.5	285.7	527.9	965.0	289.0
方案 5	300.6	458.5	988.9	302.6	285.5	507.4	1 066.7	288.8
方案 6	300.9	453.0	1 086.6	302.8	285.5	498.2	1 123.0	288.7

表 3 橡胶垫块刚度为 10 000 kN/m 时, 1[#]和 4[#]吊杆的受力情况

Table 3 Stress of No.1 and No.4 suspenders with rubber pad stiffness of 10 000 kN/m

方案	1 [#] 吊杆内力/kN				4 [#] 吊杆内力/kN			
	S 杆(正常运营)	F 杆(正常运营)	S 杆(F 杆破断瞬间)	S 杆(F 杆断后)	S 杆(正常运营)	F 杆(正常运营)	S 杆(F 杆破断瞬间)	S 杆(F 杆断后)
方案 1	1 116.8	708.2	2 533.2	1 122.3	1 735.8	1 425.4	4 586.6	1 765.6
方案 2	1 061.3	783.8	2 628.9	1 067.1	1 678.5	1 490.3	4 659.1	1 708.2
方案 3	1 005.9	857.8	2 721.5	1 012.1	1 621.9	1 553.4	4 728.7	1 651.4
方案 4	949.5	922.0	2 793.5	954.0	1 510.6	1 677.6	4 865.8	1 539.7
方案 5	893.6	985.4	2 864.4	897.8	1 401.1	1 797.8	4 996.7	1 429.7
方案 6	838.9	1 055.7	2 950.3	845.3	1 346.9	1 856.2	5 059.3	1 375.2

方案	1 [#] 吊杆应力/MPa				4 [#] 吊杆应力/MPa			
	S 杆(正常运营)	F 杆(正常运营)	S 杆(F 杆破断瞬间)	S 杆(F 杆断后)	S 杆(正常运营)	F 杆(正常运营)	S 杆(F 杆破断瞬间)	S 杆(F 杆断后)
方案 1	307.7	487.9	698.4	309.2	298.9	561.1	790.3	304.1
方案 2	307.8	480.0	762.9	309.5	298.4	547.5	828.7	303.7
方案 3	308.0	472.7	833.6	309.9	297.9	535.0	869.1	303.3
方案 4	307.8	461.9	906.0	309.4	297.3	513.6	958.2	303.2
方案 5	307.8	452.6	987.1	309.4	297.0	495.4	1 059.6	303.2
方案 6	308.2	447.5	1 084.5	310.6	296.9	487.1	1 115.8	303.1

正常运营状态下, S 杆受到的轴力随着其面积占比的减小而减小, 但 S 杆和 F 杆的应力不变。这是由于同一吊点处的 S 杆和 F 杆按照刚度分配原则来共同承担该吊点处的力; 在 S 杆锚固位置处增设的橡胶垫块降低了 S 杆的整体刚度, 进而减小了 S 杆的应力幅, 使两根吊杆形成应力幅差。在 F 杆破断瞬间, S 杆的应力随其面积占比的减小而增大。F 杆破断后, S 杆所受到的轴力和应力与正常运营时 S 杆的相差不大。其原因是拱肋和系梁的刚度较大,

而内力是按刚度进行分配的。

从表 2~5 可以看出, 当 S 杆和 F 杆的面积比相同和正常运营状态下, 增大橡胶垫块的刚度, S 杆的整体刚度增大, 其所受到的轴力和应力均逐渐增大; 且 4[#]吊杆中 S 杆的应力增大幅度大于 1[#]吊杆中 S 杆的, 4[#]吊杆中 F 杆的应力减小幅度大于 1[#]吊杆中 F 杆的。在 F 杆破断瞬间, S 杆的轴力随橡胶垫块刚度的增大而减小, 且由于 4[#]吊杆受力最大, 因此, 其轴力变化的幅度最大。在 F 杆破断后, 减小

表 4 橡胶垫块刚度为 100 000 kN/m 时, 1[#]和 4[#]吊杆的受力情况

Table 4 Stress of No.1 and No.4 suspenders with rubber pad stiffness of 100 000 kN/m								
方案	1 [#] 吊杆内力/kN				4 [#] 吊杆内力/kN			
	S 杆(正常运营)	F 杆(正常运营)	S 杆(F 杆破断瞬间)	S 杆(F 杆断后)	S 杆(正常运营)	F 杆(正常运营)	S 杆(F 杆破断瞬间)	S 杆(F 杆断后)
方案 1	1 285.0	623.3	2 531.6	1 302.9	2 096.8	1 140.0	4 376.8	2 164.4
方案 2	1 221.9	696.8	2 615.5	1 238.1	2 027.2	1 210.5	4 448.2	2 093.8
方案 3	1 159.1	769.4	2 697.9	1 174.6	1 958.4	1 280.2	4 518.8	2 025.1
方案 4	1 094.2	838.6	2 771.4	1 108.7	1 823.0	1 417.6	4 658.2	1 889.1
方案 5	1 029.9	907.2	2 844.3	1 043.5	1 689.9	1 552.5	4 794.9	1 757.9
方案 6	967.6	977.9	2 923.4	980.7	1 623.9	1 619.0	4 861.9	1 684.9

方案	1 [#] 吊杆应力/MPa				4 [#] 吊杆应力/MPa			
	S 杆(正常运营)	F 杆(正常运营)	S 杆(F 杆破断瞬间)	S 杆(F 杆断后)	S 杆(正常运营)	F 杆(正常运营)	S 杆(F 杆破断瞬间)	S 杆(F 杆断后)
方案 1	354.1	429.4	697.9	359.0	361.1	448.7	754.1	372.7
方案 2	354.4	426.6	759.0	359.3	360.4	444.7	791.2	372.4
方案 3	354.9	424.0	826.4	359.8	359.8	440.9	830.5	372.2
方案 4	354.7	420.1	898.9	359.6	358.8	434.0	917.3	372.0
方案 5	354.7	416.6	980.2	359.6	358.2	430.2	1 016.8	372.8
方案 6	355.5	414.5	1 074.6	360.5	358.0	424.9	1 072.3	371.6

表 5 橡胶垫块刚度为 500 000 kN/m 时, 1[#]和 4[#]吊杆的受力情况

Table 5 Stress of No.1 and No.4 suspenders with rubber pad stiffness of 500 000 kN/m								
方案	1 [#] 吊杆内力/kN				4 [#] 吊杆内力/kN			
	S 杆(正常运营)	F 杆(正常运营)	S 杆(F 杆破断瞬间)	S 杆(F 杆断后)	S 杆(正常运营)	F 杆(正常运营)	S 杆(F 杆破断瞬间)	S 杆(F 杆断后)
方案 1	1 371.6	586.9	2 545.4	1 393.7	2 215.7	1 033.3	4 282.3	2 285.2
方案 2	1 303.4	658.9	2 621.2	1 324.3	2 144.7	1 104.3	4 353.3	2 210.7
方案 3	1 253.3	730.7	2 714.7	1 255.9	2 074.0	1 175.0	4 424.0	2 138.3
方案 4	1 166.3	801.5	2 769.3	1 187.7	1 933.3	1 315.8	4 564.9	1 994.2
方案 5	1 097.5	872.0	2 841.5	1 118.1	1 793.4	1 455.8	4 705.0	1 851.3
方案 6	1 029.6	943.2	2 916.0	1 048.8	1 723.7	1 525.4	4 774.5	1 779.2

方案	1 [#] 吊杆应力/MPa				4 [#] 吊杆应力/MPa			
	S 杆(正常运营)	F 杆(正常运营)	S 杆(F 杆破断瞬间)	S 杆(F 杆断后)	S 杆(正常运营)	F 杆(正常运营)	S 杆(F 杆破断瞬间)	S 杆(F 杆断后)
方案 1	377.9	404.3	701.7	384.0	381.6	406.7	737.9	393.6
方案 2	378.1	403.5	760.7	384.3	381.3	405.7	774.3	393.2
方案 3	378.2	402.7	831.6	384.7	381.0	404.7	813.1	393.0
方案 4	378.1	401.5	898.2	385.2	380.5	402.9	898.9	392.7
方案 5	378.0	400.5	979.2	385.3	380.1	401.1	997.8	392.6
方案 6	378.3	399.8	1 071.9	385.5	380.0	400.3	1 053.0	392.4

橡胶垫块的刚度,使得破断后 S 杆的轴力和应力接近正常运营时 S 杆的。表明:设置柔性的橡胶垫块能够使吊杆的内力状态更稳定;4[#]吊杆中 S 杆的应力增大幅度大于 1[#]吊杆中 S 杆的。

2.3.2 破损安全吊杆的安全性能分析

根据公式 $\frac{f_{pk}}{\sigma} = m$, 其中, f_{pk} 为吊杆抗拉标准强度。计算出的各个工况吊杆的应力 σ , 再计算各个吊杆的安全系数 m , 分别见表 6~9。从表 6~9

中可以看出,橡胶垫块刚度不变,在正常运营状态和 F 杆破断后这 2 种工况下, S 杆的安全系数相同,且 S 杆和 F 杆的面积比变化不会对吊杆的安全系数有较大的影响。在 F 杆破断瞬间,适当增大 S 杆所占的面积比可以提高 S 杆的安全系数;按照设计细则^[9]要求,在施工阶段(F 杆破断瞬间), S 杆的安全系数要保持在 2 以上,因此,方案 4~6 的面积比均不符合要求。

表 6 橡胶垫块刚度为 5 000 kN/m 时, 1[#]和 4[#]吊杆的安全系数

Table 6 Safety factor of No.1 and No.4 suspenders with rubber pad stiffness of 5 000 kN/m

方案	1 [#] 吊杆的安全系数				4 [#] 吊杆的安全系数			
	S 杆(正常运行)	F 杆(正常运行)	S 杆(F 杆破断瞬间)	S 杆(F 杆断后)	S 杆(正常运行)	F 杆(正常运行)	S 杆(F 杆破断瞬间)	S 杆(F 杆断后)
方案 1	6.19	3.73	2.66	6.17	6.49	3.20	2.34	6.42
方案 2	6.19	3.80	2.43	6.16	6.49	3.28	2.23	6.42
方案 3	6.18	3.87	2.23	6.15	6.50	3.37	2.12	6.43
方案 4	6.19	3.97	2.05	6.15	6.51	3.52	1.93	6.44
方案 5	6.19	4.06	1.88	6.15	6.51	3.67	1.74	6.44
方案 6	6.18	4.11	1.71	6.14	6.51	3.73	1.66	6.44

表 7 橡胶垫块刚度为 10 000 kN/m 时, 1[#]和 4[#]吊杆的安全系数

Table 7 Safety factor of No.1 and No.4 suspenders with rubber pad stiffness of 10 000 kN/m

方案	1 [#] 吊杆的安全系数				4 [#] 吊杆的安全系数			
	S 杆(正常运行)	F 杆(正常运行)	S 杆(F 杆破断瞬间)	S 杆(F 杆断后)	S 杆(正常运行)	F 杆(正常运行)	S 杆(F 杆破断瞬间)	S 杆(F 杆断后)
方案 1	6.04	3.81	2.66	6.02	6.22	3.31	2.35	6.12
方案 2	6.04	3.88	2.44	6.01	6.23	3.40	2.24	6.12
方案 3	6.04	3.93	2.23	6.00	6.24	3.48	2.14	6.13
方案 4	6.04	4.03	2.05	6.01	6.26	3.62	1.94	6.13
方案 5	6.04	4.11	1.88	6.01	6.26	3.75	1.76	6.13
方案 6	6.04	4.16	1.72	5.99	6.26	3.82	1.67	6.14

表 8 橡胶垫块刚度为 100 000 kN/m 时, 1[#]和 4[#]吊杆的安全系数

Table 8 Safety factor of No.1 and No.4 suspenders with rubber pad stiffness of 100 000 kN/m

方案	1 [#] 吊杆的安全系数				4 [#] 吊杆的安全系数			
	S 杆(正常运行)	F 杆(正常运行)	S 杆(F 杆破断瞬间)	S 杆(F 杆断后)	S 杆(正常运行)	F 杆(正常运行)	S 杆(F 杆破断瞬间)	S 杆(F 杆断后)
方案 1	5.25	4.33	2.67	5.18	5.15	4.15	2.47	4.99
方案 2	5.25	4.36	2.45	5.18	5.16	4.18	2.35	4.99
方案 3	5.24	4.39	2.25	5.17	5.17	4.22	2.24	5.00
方案 4	5.24	4.43	2.07	5.17	5.18	4.29	2.03	5.00
方案 5	5.24	4.46	1.90	5.17	5.19	4.34	1.83	4.99
方案 6	5.23	4.49	1.73	5.16	5.20	4.38	1.73	5.01

表 9 橡胶垫块刚度为 500 000 kN/m 时, 1[#]和 4[#]吊杆的安全系数

Table 9 Safety factor of No.1 and No.4 suspenders with rubber pad stiffness of 500 000 kN/m

方案	1 [#] 吊杆的安全系数				4 [#] 吊杆的安全系数			
	S 杆(正常运行)	F 杆(正常运行)	S 杆(F 杆破断瞬间)	S 杆(F 杆断后)	S 杆(正常运行)	F 杆(正常运行)	S 杆(F 杆破断瞬间)	S 杆(F 杆断后)
方案 1	4.92	4.60	2.65	4.84	4.87	4.57	2.52	4.73
方案 2	4.92	4.61	2.45	4.84	4.88	4.58	2.40	4.73
方案 3	4.92	4.62	2.24	4.83	4.88	4.60	2.29	4.73
方案 4	4.92	4.63	2.07	4.83	4.89	4.62	2.07	4.74
方案 5	4.92	4.64	1.90	4.83	4.89	4.64	1.86	4.74
方案 6	4.92	4.65	1.74	4.82	4.89	4.65	1.77	4.74

当 S 杆和 F 杆的面积比相同且正常运行状态下, 增大橡胶垫块的刚度, S 杆的安全系数会逐渐减小, F 杆的安全系数会逐渐增大。则 S 杆和 F 杆的安全系数之差变小, 不容易保证吊杆的先、后破断这一目的的实现。在 F 杆破断瞬间, S 杆的安全

系数随着橡胶垫块刚度的增大而增大, 且由于 4[#]吊杆的受力最大, 因此, 其安全系数变化的幅度最大。在 F 杆破断后, 减小橡胶垫块的刚度可以提高 S 杆的安全系数, 且能使其数值接近正常运行时 S 杆的安全系数, 使吊杆的内力状态更稳定。

3 结 论

针对某下承式拱桥的吊杆进行了破损安全吊杆的安全性能分析。通过改变双吊杆的面积比和橡胶垫块的刚度,分析其在 F 杆破断瞬间 S 杆的安全性能。根据计算和分析,得出的结论为:

1) 该设计方法有效。通过改变双吊杆的面积比和改变 S 杆的橡胶垫块刚度,可以实现双吊杆应力幅的改变,从而实现吊杆先、后破断,达到破损安全的目的。

2) 适当增大 S 杆的面积比有利于 F 杆破断瞬间 S 杆的安全性。在保持边吊杆面积比恒定的基础上,适当增大吊杆中 S 杆的面积比有利于全桥吊杆的安全性。

3) 应该合理地调整与 S 杆串联的橡胶垫块的刚度。如果橡胶垫块的刚度太大,其在运营过程中容易受外界环境的耦合作用和变幅应力作用的影响,导致 S 杆在较高的应力状态下,其安全寿命达不到预期而提早破断,而且也达不到破损安全吊杆的要求;如果橡胶垫块的刚度太小,则不利于 F 杆破断瞬间时 S 杆的安全性。

参考文献(References):

- [1] 李正嘉,孙广俊,李鸿晶,等.系杆拱桥吊杆更换数值模拟与方案优化[J].公路工程,2017,42(6):48-53,63.(LI Zheng-jia,SUN Guang-jun,LI Hong-jing,et al.Numerical simulation and scheme optimization of suspender replacement of tied arch bridge[J].Highway Engineering,2017,42(6):48-53,63.(in Chinese))
- [2] 马亚飞,鲁保勇,汪国栋,等.大跨桥梁吊杆平行钢丝间摩擦特性分析[J].交通科学与工程,2019,35(4):40-46.(MA Ya-fei,LU Bao-yong,WANG Guo-dong,et al.Analysis of friction characteristics between parallel steel wires of suspenders of long-span bridges[J].Journal of Transport Science and Engineering,2019,35(4):40-46.(in Chinese))
- [3] 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 Qing-kai. Study on structural behavior of short suspenders of long-span half through arch bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University,2003.(in Chinese))
- [4] 陈思甜,王静,龚尚龙.钢管砼拱桥吊杆更换施工控制技术[J].重庆交通学院学报,2005,24(2):12-17.(CHEN Si-tan,WANG Jing,GONG Shang-long.Construction control technology of suspender replacement of CFST arch bridge[J].Journal of Chongqing Jiaotong University,2005,24(2):12-17.(in Chinese))
- [5] 徐俊,陈惟珍,刘学.斜拉索退化机理及钢丝力学模型[J].同济大学学报:自然科学版,2008,36(7):911-915.(XU Jun,CHEN Wei-zhen,LIU Xue.Degradation mechanism of the stay cable and mechanical model of steel wire [J].Journal of Tongji University:Natural Science Edition,2008,36(7):911-915.(in Chinese))
- [6] Watson S C,Stafford D G.Cables in trouble[J].Civil Engineering,1988,58(4):38-41.
- [7] Haight R Q,Billington D P,Khazem D.Cable safety factors for four suspension bridge[J].Journal of Bridge Engineering,1997,2(4):157-167.
- [8] 吴昊.拱桥吊杆断裂响应分析及对策研究[D].西安:长安大学,2017.(WU Hao.Fracture response analysis and countermeasure research of the suspender of the arch bridge[D]. Xi'an:Chang'an University,2017.(in Chinese))
- [9] 重庆交通科研设计院.JTG/TD65-01—2007,公路桥梁斜拉桥设计细则[S].北京:人民交通出版社,2007.(Chongqing Communications Research and Design Institute. JTGT/D 65-01—2007,Guidelines for design of highway cable-stayed bridges[S]. Beijing: China Communications Press,2007.(in Chinese))
- [10] 何嘉.拱式桥梁及其吊杆的破损安全性能研究[D].昆明:昆明理工大学,2010.(HE Jia.Study on damage safety performance of arch bridge and its suspender[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2010.(in Chinese))
- [11] 汤国栋,陈宜言,姜瑞娟,等.破损安全桥梁拉索及其系统研究[J].四川大学学报:工程科学版,2007,39(6):14-20.(TANG Guo-dong,CHEN Yi-yan,JIANG Rui-juan,et al.Study on cables and systems of damaged safety bridges[J].Journal of Sichuan University:Engineering Science Edition,2007,39(6):14-20.(in Chinese))
- [12] 汤国栋,杨弘,朱正刚,等.桥梁吊杆及拉索的健康诊断[J].公路,2002(9):36-41.(TANG Guo-dong,YANG Hong,ZHU Zheng-gang, et al. Health diagnosis of bridge suspenders and stay cables[J]. Highway, 2002(9): 36-41. (in Chinese))
- [13] 王鹏,李睿,朱德祥,等.基于破损安全设计的拱桥吊索安全性能分析[J].公路交通科技:应用技术版,2018(12):117-119.(WANG Peng, LI Rui, ZHU De-xiang, et al. Safety performance analysis of arch bridge sling based on damage safety design [J]. Highway Transportation Technology: Application Technology Version, 2018(12): 117-119.(in Chinese))
- [14] 高显平.下承式拱桥破损安全吊杆的可靠度研究[D].成都:西南交通大学,2010.(GAO Xian-ping. Study on reliability of safety suspender in damage of through arch bridge[D].Chengdu:Southwest Jiaotong University,2010. (in Chinese))
- [15] 陈兵.中、下承式拱桥吊杆载荷行为及安全性研究[D].成都:四川大学,2003.(CHEN Bing. Study on load behavior and safety of suspenders of through arch bridges [D].Chengdu:Sichuan University,2003.(in Chinese))