

突然断索后双吊索形式自锚式悬索桥安全分析

邱文亮*, 吴广润, 张哲, 李恬

(大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 吊索是决定悬索桥结构安全的关键构件, 已建悬索桥的吊索普遍存在锈蚀的现象, 在锈蚀与疲劳荷载作用下, 吊索可能发生突然断裂. 已有研究及工程实例均表明, 单根吊索断裂后其余的吊索有连续断裂的危险, 从而导致全桥的倒塌. 使用双吊索可以改善断索对悬索桥结构安全的影响. 为研究双吊索对悬索桥安全性的改善程度以及断索后悬索桥结构的动力响应, 基于非线性静力和动力分析方法, 以某 200 m 的混凝土自锚式悬索桥为例, 进行了悬索桥断索后结构的响应研究. 研究表明, 双吊索能大幅度降低断索后悬索桥结构的响应, 从而提高了全桥在运营维护阶段的安全性. 研究结论可为悬索桥吊索的更换、维修和加固提供参考.

关键词: 自锚式悬索桥; 吊索断裂; 安全分析; 双吊索

中图分类号: U448

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201606007

0 引言

大跨度的斜拉桥、悬索桥和拱桥需要使用吊索、拉索或主缆结构. 早期建成的悬索桥受限于技术工艺水平、设计理念, 以及使用过程中的维护保养不到位, 大多面临着严重锈蚀问题. 吊索在严重锈蚀和高应力的环境下, 平均使用寿命不足 15 a^[1]. 严重锈蚀的吊索突然断裂, 会使桥梁结构产生剧烈的振动, 危及桥梁的安全. 近些年来, 由于吊索锈蚀的原因, 国内外很多大桥出现了使用和安全问题^[2].

江阴长江大桥建成于 1999 年, 是我国首座跨径超过 1 000 m 的悬索桥, 2009 年对其全部的 340 根吊索进行了更换^[1,3]. 汕头海湾大桥于 1995 年建成通车, 2000 年对所有吊索进行了防锈保养, 2012 年对部分锈蚀严重的吊索进行更换后, 吊索依然面临着严重的锈蚀问题, 2015 年对所有吊索进行了更换^[4]. 由于吊索发生疲劳断裂, 建成于 2002 年的印尼 Mahakam II 悬索桥在 2011 年发生倒塌. 从吊索断裂到整桥倒塌全过程只有 30 s, 造成了巨大的损失. 建成于 1998 年的新疆

库尔勒孔雀河大桥, 2011 年 4 月, 由于两根吊索断裂, 桥面坠落. 孔雀河大桥最后进行了拆除重建, 造成了严重的经济损失.

随着越来越多的桥梁进入维修加固期, 国内外许多学者针对吊索断裂对桥梁安全性的影响进行了研究. Ruiz-Teran 等通过对板式索桥拉索突然断裂的研究, 发现断索响应的分析必须采用动力分析方法^[5]. Bontempi 等研究了吊索断裂对悬索桥敏感性的影响, 结果表明吊索连续断裂会导致悬索桥的整体破坏^[6]. Mozos 等通过研究发现拉索的受损程度对断索时间有显著影响, 局部受损的拉索断裂时间为 0.003 75 s, 未受损的拉索断裂时间为 0.008 50 s^[7].

Qiu 等研究了自锚式悬索桥静力极限承载力的影响因素, 结果表明, 吊索的安全系数是自锚式悬索桥极限承载力的决定性因素之一^[8]. 之后他们研究了自锚式悬索桥断索对结构的影响, 研究结果表明, 使用动力方法得到的数据能更准确地反映断索后结构的响应情况. 在吊索不存在锈蚀的情况下, 一根吊索断裂不会导致其余吊索的连

续断裂^[8]. 沈锐利等研究了单根吊索断裂后悬索桥的强健性, 结果表明单根吊索断裂后其余吊索的动力效应明显^[9]. 李恬研究了单吊索形式的吊索断裂对自锚式悬索桥主梁、索塔、吊索、主缆、支座等主要结构内力的影响, 结果表明吊索断裂对主缆的影响较小, 对其余吊索、主梁以及索塔的影响较大^[10].

在中国, 近些年来有超过 20 座自锚式悬索桥建成, 吊索均采用平行镀锌钢丝. 根据中国规范^[11], 悬索桥在运营期间吊索的安全系数是 3.0, 在维修更换期间是 1.8. 针对悬索桥发生断索后其余吊索的安全系数及悬索桥其他构件的安全系数, 规范没有做出规定. 已建悬索桥运营情况表明, 作为生命线工程的悬索桥正在经受着锈蚀带来的吊索断裂挑战. 为此, 本文采用非线性静力和动力分析方法, 针对不同形式的吊索, 进行断索对悬索桥结构影响的研究.

1 悬索桥断索响应分析

索塔、主梁、支座和主缆属于自锚式悬索桥的基本构件, 吊索属于联系主缆和主梁的关键构件, 决定了悬索桥结构的整体安全. 为了研究双吊索形式的吊索对悬索桥安全性改善的程度, 本文对断索后悬索桥结构的动力响应过程进行了研究. 动力响应过程中, 主缆与吊索采用应力进行分析, 支座采用支座反力进行分析, 主梁采用弯矩、扭矩与剪力进行分析, 索塔采用弯矩进行分析.

悬索桥结构的动力响应过程如图 1 所示, 结构响应的状态 S 可以表示结构响应过程中的位移、弯矩、剪力、应力等状态. 图中 S_0 为在初始荷载作用下吊索未发生断裂前的状态, S_d 为在动力响应过程中的状态, $S_{d,max}$ 、 $S_{d,min}$ 为动力响应过程

中状态的最大值和最小值, S_s 为吊索断裂后最终的状态.

根据动态响应过程中的 S_0 、 S_d 、 S_s , 定义两个响应因数 f_{sa} 和 f_{ma} , 如式(1)所示:

$$f_{sa} = \frac{S_s}{S_0}$$
$$f_{ma} = \max \left| \frac{S_d}{S_0} \right|$$

(1)

2 工程背景及模型

2.1 工程背景

本文以目前世界上跨径最大的自锚式悬索桥——庄河市建设大街东桥——为研究背景, 全桥布置如图 2(a) 所示, 跨径 70 m+200 m+70 m. 庄河市建设大街东桥的主缆采用 $31 \times 127 \phi 5.2$ 平行钢索, 吊索采用 $97 \phi 7$ 平行钢索, 吊索顺桥向以 5 m 等间距布置. 混凝土主梁采用单箱四室截面, 如图 2(b) 所示. 每个索塔处采用两个盆式橡胶支座支撑主梁, 支座承载力 10 000 kN.

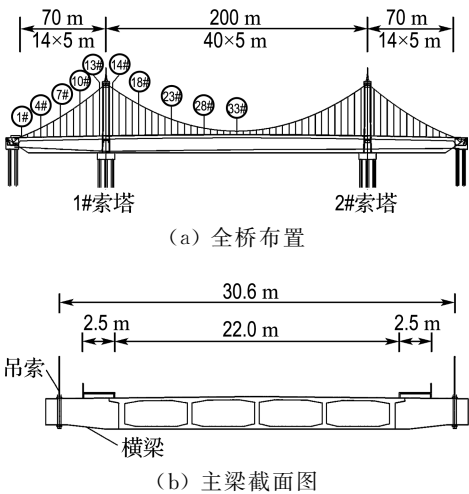


图 2 桥梁整体布置与主梁截面图
Fig. 2 The general layout of the whole bridge and the section of the girder

2.2 吊索及模型简介

单、双吊索的结构形式如图 3 所示, 吊索的上端通过索夹与主缆相连, 双吊索的横截面积和与单吊索的横截面积相同. 本文选取边跨的 1、4、7、10 号吊索, 索塔两侧的 13、14 号吊索, 中跨的 18、23、28、33 号吊索进行不同形式的吊索断裂后悬索桥结构响应的研究.

本文使用 ABAQUS 6.12 建立自锚式悬索

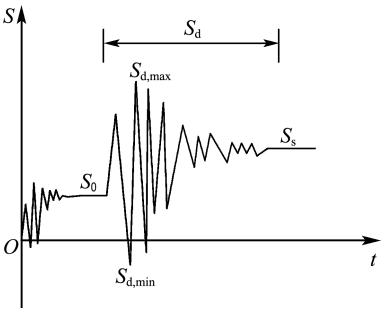


图 1 动力响应过程
Fig. 1 Dynamic response process

桥有限元模型,如图 4 所示. 模型中主梁、索塔、横梁用空间梁单元来模拟,考虑抗扭刚度和扭转质量惯性矩. 主缆和吊索用桁架单元模拟,考虑拉力对刚度的影响.

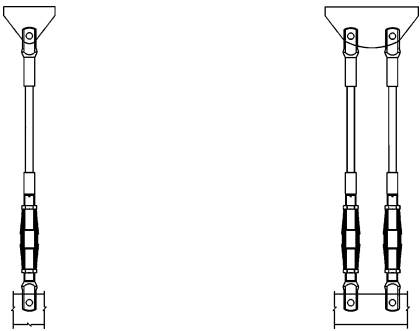


图 3 单、双吊索结构示意图

Fig. 3 Schematic of single and dual-shaped hanger

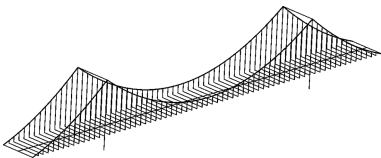


图 4 悬索桥有限元模型

Fig. 4 FE model of the suspension bridge

2.3 模拟方法

本文采用非线性静力和动力分析方法模拟研究悬索桥断索后的动力响应. 进行模拟分析时,积分步长在自重平衡振动稳定阶段采用 0.050 s,在断索分析阶段采用 0.001 s,吊索断裂时间采用 0.002 s. 模拟分析中采用瑞利阻尼,阻尼系数取 0.02.

非线性静力分析方法:

(1)调整模型的初始应力,使断索前的悬索桥在恒载作用下处于平衡状态. 在这种状态下,所有吊索的拉力相等,主梁和索塔弯矩较小.

(2)达到平衡状态后,单吊索形式的吊索将索力完全卸掉,双吊索形式的吊索将其中一根吊索的索力卸掉,结构重新达到平衡.

非线性动力分析方法:

(1)调整模型的初始应力,进行恒载作用下的成桥状态分析. 由于阻尼作用,悬索桥的振动持续一段时间后趋于稳定,如果结构各节点振动的最大位移小于 0.1 mm,则近似认为处于静态. 此时悬索桥处于断索前恒载作用下的平衡状态.

(2)在 0.002 s 内,单吊索形式的吊索索力完

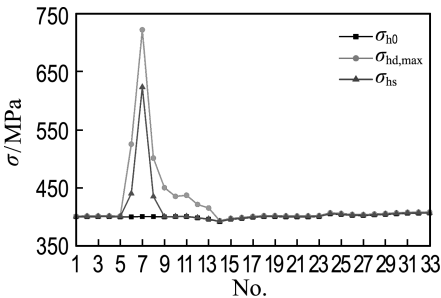
全卸掉,双吊索形式的吊索将其中一根吊索的索力卸掉,直至结构趋于稳定. 如果结构各节点振动的最大位移小于 0.1 mm,则可近似认为结构重新处于静态. 此时悬索桥处于断索后恒载作用下的平衡状态.

3 算例分析

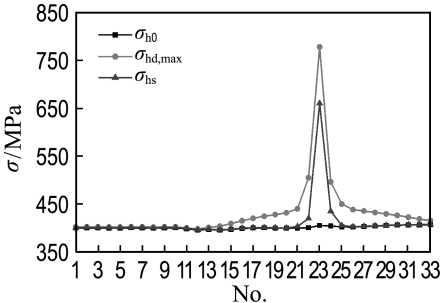
3.1 吊索的响应分析

图 5 给出了使用双吊索形式的边跨 7 号和中跨 23 号吊索断裂后,其余吊索应力的响应幅值

σ_{h0} 、 σ_{hs} 、 $\sigma_{hd,max}$.



(a) 7 号吊索



(b) 23 号吊索

图 5 断索后吊索的应力响应

Fig. 5 Stress response of hangers after the breakage of a hanger

对图 5 分析可以得出,边跨跨中的 7 号吊索断裂后,双吊索中另一根吊索的最终应力从 402 MPa 增加到 623 MPa,响应过程中最大应力从 402 MPa 增加到 722 MPa. 双吊索相邻的 6 号吊索最终应力从 402 MPa 增加到 439 MPa,响应过程中最大应力从 402 MPa 增加到 525 MPa.

23 号吊索断裂后,双吊索中另一根吊索的最终应力从 402 MPa 增加到 660 MPa,响应过程中最大应力从 402 MPa 增加到 778 MPa. 双吊索相邻的 22 号吊索最终应力从 402 MPa 增加到 435 MPa,响应过程中最大应力从 402 MPa 增加到

506 MPa.

图 6 给出了不同形式的吊索断裂后,相邻吊索应力的响应幅值 $\sigma_{hs}-\sigma_{h0}$ 、 $\sigma_{hd,max}-\sigma_{h0}$.表 1 为不同形式的吊索断裂后相邻吊索应力的响应因数.

从图 6 及表 1 中可以看出,使用双吊索,可以将断索后相邻吊索最大应力的响应幅值从 643 MPa 降低到 179 MPa,最终应力的响应幅值从 268 MPa 降低到 58 MPa.使用双吊索可以将断索后相邻吊索的应力响应因数 $f_{sa,h}$ 从 1.23~1.49 降低到 1.03~1.11, $f_{ma,h}$ 从 1.68~2.16 降低到 1.11~1.32.双吊索形式的吊索对断索后的其余吊索响应过程中的最大应力及最终应力均有极大的改善作用.

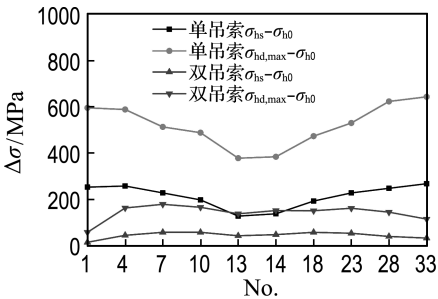


图 6 断索后相邻吊索应力的响应幅值
Fig. 6 Stress response amplitude of adjacent hangers after the breakage of a hanger

表 1 断索后相邻吊索应力的响应因数
Tab. 1 Stress response factors of adjacent hangers after the breakage of a hanger

吊索 编号	σ_{h0} /MPa	单吊索		双吊索	
		$f_{sa,h}$	$f_{ma,h}$	$f_{sa,h}$	$f_{ma,h}$
1	402	1.46	2.08	1.03	1.11
4	402	1.47	2.07	1.08	1.30
7	402	1.41	1.93	1.11	1.32
10	402	1.36	1.88	1.11	1.30
13	402	1.23	1.68	1.08	1.25
14	402	1.25	1.70	1.09	1.28
18	402	1.35	1.86	1.11	1.27
23	402	1.41	1.96	1.10	1.29
28	402	1.45	2.13	1.07	1.26
33	402	1.49	2.16	1.06	1.21

图 7 为双吊索形式的吊索一根断裂后,另一根吊索的响应因数.通过分析可以看出,双吊索中另一根吊索的响应因数 $f_{sa,h}$ 在 1.22~1.90, $f_{ma,h}$ 在 1.44~2.39,满足规范中悬索桥运营期间吊索安全系数的规定.

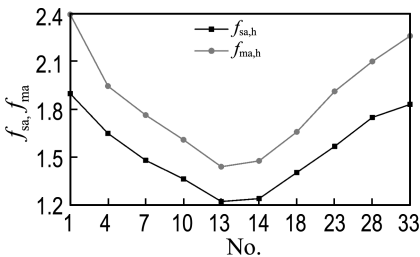


图 7 同编号留存吊索的响应因数
Fig. 7 Response factor of remaining hanger with the same number

3.2 主梁的响应分析

图 8 给出了不同形式的吊索断裂后,断索位置处主梁剪力的响应幅值 $Q_{bs}-Q_{b0}$ 、 $\max |Q_{bd}-Q_{b0}|$.表 2 为不同形式的吊索断裂后断索位置处主梁剪力的响应因数.

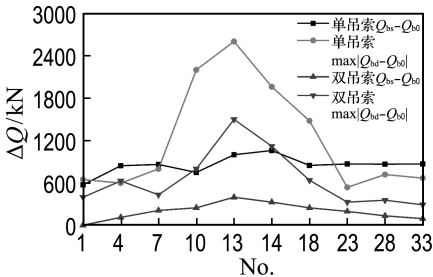


图 8 断索后主梁剪力的响应幅值
Fig. 8 Shear force response amplitude of beam after the breakage of a hanger

表 2 断索后主梁剪力的响应因数
Tab. 2 Shear force response factors of beam after the breakage of a hanger

吊索 编号	Q_{b0} /kN	单吊索		双吊索	
		$f_{sa,bf}$	$f_{ma,bf}$	$f_{sa,bf}$	$f_{ma,bf}$
1	745	1.77	2.64	1.01	1.54
4	905	1.93	2.60	1.13	1.82
7	687	2.26	3.42	1.31	1.94
10	1 350	1.41	3.19	1.19	1.78
13	1 700	1.59	3.12	1.56	2.67
14	1 540	1.69	2.96	1.21	1.94
18	1 250	1.68	2.86	1.20	1.71
23	1 050	1.83	2.34	1.19	1.50
28	933	1.93	2.70	1.15	1.53
33	850	2.02	2.81	1.11	1.46

从图 8 及表 2 中可以看出,索塔附近的吊索断裂后,主梁剪力响应的动力特性明显.使用双吊索可以将断索后断索位置处主梁的最大剪力响应

幅值从 2 600 kN 降低到 1 500 kN,最终剪力响应幅值从 1 060 kN 降低到 400 kN. 使用双吊索可以将断索后主梁的剪力响应因数 $f_{sa,bf}$ 从 1.41~2.26 降低到 1.01~1.56, $f_{ma,bf}$ 从 2.34~3.42 降低到 1.46~2.67.

图 9 给出了不同形式的吊索断裂后,断索位置处主梁弯矩的响应幅值 $M_{bs}-M_{b0}$ 、 $\max|M_{bd}-M_{b0}|$. 表 3 为不同形式的吊索断裂后断索位置处主梁弯矩的响应因数.

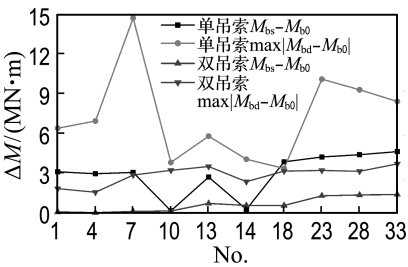


图 9 吊索断裂后主梁弯矩的响应幅值
Fig. 9 Bending moment response amplitude of beam after the breakage of a hanger

表 3 吊索断裂后主梁弯矩的响应因数
Tab. 3 Bending moment response factors of beam after the breakage of a hanger

吊索 编号	$M_{b0}/$ (kN·m)	单吊索		双吊索	
		$f_{sa,bm}$	$f_{ma,bm}$	$f_{sa,bm}$	$f_{ma,bm}$
1	1 950	2.56	4.26	1.01	1.91
4	3 700	1.78	2.86	0.99	1.41
7	2 500	2.20	6.88	1.02	2.12
10	-1 940	0.95	2.94	0.96	2.63
13	-10 650	0.75	1.54	0.94	1.32
14	-15 200	0.99	1.26	1.03	1.15
18	-1 520	1.09	1.22	1.03	1.20
23	3 330	2.25	4.02	1.37	1.95
28	6 455	1.67	2.44	1.20	1.48
33	7 420	1.62	2.13	1.18	1.49

从图 9 及表 3 中可以看出,边跨及中跨跨中的吊索断裂后,主梁弯矩响应的动力特性明显. 使用双吊索,可以将断索后断索位置处主梁最大弯矩的响应幅值从 14 700 kN·m 降低到 3 650 kN·m,最终弯矩的响应幅值从 4 300 kN·m 降低到 1 330 kN·m. 使用双吊索可以将断索后主梁弯矩的响应因数 $f_{sa,bm}$ 从 0.75~2.56 改善到 0.94~1.37, $f_{ma,bm}$ 从 1.22~6.88 降低到 1.15~2.63.

图 10 给出了不同形式的吊索断裂后,断索位置处主梁扭矩的响应幅值 $T_{bs}-T_{b0}$ 、 $T_{bd,max}-T_{b0}$. 在恒载作用下主梁的扭矩为 0,在活荷载与温度荷载下,主梁的最大扭矩为 15 890 kN·m. 表 4 为不同形式的吊索断裂后断索位置处主梁扭矩的响应因数, T_{b0} 取在活荷载与温度荷载下的最大值.

从图 10 及表 4 中可以看出,索塔附近的吊索断裂后,主梁扭矩响应的动力特性明显. 使用双吊索,可以将断索后断索位置处主梁最大扭矩的响应幅值从 41 900 kN·m 降低到 20 470 kN·m,最终扭矩响应幅值从 15 000 kN·m 降低到 5 700 kN·m. 使用双吊索可以将断索后主梁扭矩的响应因数 $f_{sa,bt}$ 从 0.63~0.94 降低到 0.04~0.44, $f_{ma,bt}$ 从 1.54~2.64 降低到 0.08~1.29.

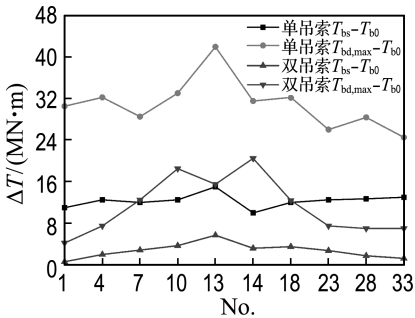


图 10 吊索断裂后主梁扭矩的响应幅值
Fig. 10 Torsion moment response amplitude of beam after the breakage of a hanger

表 4 吊索断裂后主梁扭矩的响应因数
Tab. 4 Torsion moment response factors of beam after the breakage of a hanger

吊索 编号	$T_{b0}/$ (kN·m)	单吊索		双吊索	
		$f_{sa,bt}$	$f_{ma,bt}$	$f_{sa,bt}$	$f_{ma,bt}$
1	15 890	0.69	1.92	0.04	0.26
4	15 890	0.79	2.03	0.13	0.47
7	15 890	0.76	1.79	0.18	0.79
10	15 890	0.79	2.08	0.23	1.16
13	15 890	0.94	2.64	0.36	0.98
14	15 890	0.63	1.98	0.20	1.29
18	15 890	0.76	2.03	0.22	0.78
23	15 890	0.79	1.64	0.17	0.47
28	15 890	0.80	1.78	0.44	0.11
33	15 890	0.82	1.54	0.44	0.08

3.3 主缆的响应分析

图 11 为不同形式的吊索断裂后,吊索断裂位

置处主缆应力的响应幅值 $\sigma_{cs}-\sigma_{c0}$ 、 $\sigma_{cd,max}-\sigma_{c0}$ 。

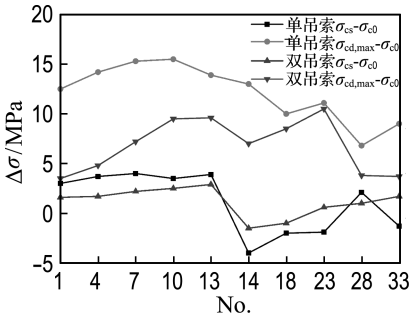


图 11 吊索断裂后主缆应力的响应幅值
Fig. 11 Stress response amplitude of cable after the breakage of a hanger

从图 11 中可以看出,使用双吊索可以降低断索后主缆的应力响应.单吊索断裂后主缆最大应力响应幅值为 15.5 MPa,主缆在恒载作用状态下应力范围为 451~567 MPa.断索对主缆产生的应力响应幅值为主缆在恒载作用下应力最小值的 3.4%,断索对主缆应力的影响较小.

3.4 支座的响应分析

图 12 与表 5 给出了不同形式的吊索断裂后,1 号索塔处断索侧支座反力的响应幅值 $F_{zs}-F_{z0}$ 、 $F_{zd,max}-F_{z0}$ 和支座反力的响应因数.

从图 12 及表 5 中可以看出,索塔附近的吊索断裂后,支座反力响应的动力特性明显.使用双吊索,可以将断索后最大支座反力的响应幅值从 3 650 kN 降低到 2 140 kN,最终支座反力的响应幅值从 1 180 kN 降低到 430 kN.使用双吊索可以将断索后支座反力的响应因数 $f_{sa,z}$ 从 1.00~1.48 改善到 1.00~1.17, $f_{ma,z}$ 从 1.33~2.48 降低到 1.11~1.87.

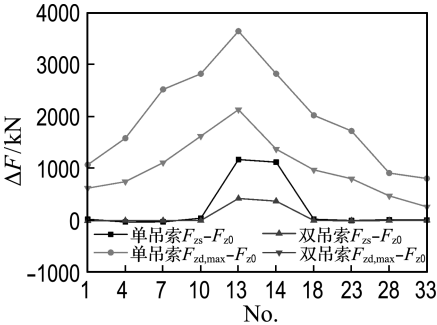


图 12 吊索断裂后支座反力的响应幅值
Fig. 12 Force response amplitude of bearing after the breakage of a hanger

表 5 吊索断裂后支座反力的响应因数

Tab. 5 Force response factors of bearing after the breakage of a hanger					
吊索 编号	F_{z0}/kN	单吊索		双吊索	
		$f_{sa,z}$	$f_{ma,z}$	$f_{sa,z}$	$f_{ma,z}$
1	2 470	1.01	1.44	1.00	1.26
4	2 470	1.00	1.64	1.00	1.31
7	2 470	1.00	2.02	1.00	1.45
10	2 470	1.02	2.15	1.00	1.66
13	2 470	1.48	2.48	1.17	1.87
14	2 470	1.46	2.15	1.15	1.56
18	2 470	1.01	1.82	1.00	1.40
23	2 470	1.00	1.70	1.00	1.33
28	2 470	1.01	1.37	1.00	1.19
33	2 470	1.01	1.33	1.00	1.11

3.5 索塔的响应分析

图 13 为不同形式的吊索断裂后,1 号索塔塔底横桥向弯矩的响应幅值 $M_{ths}-M_{th0}$ 、 $M_{thd,max}-M_{th0}$ 。

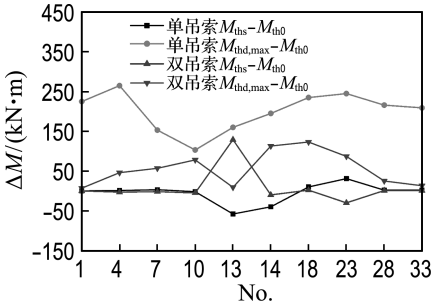


图 13 断索后索塔横桥向弯矩的响应幅值
Fig. 13 Lateral bending moment response amplitude of tower after the breakage of a hanger

从图 13 中可以看出,将单吊索改为双吊索后,可以降低断索后塔底横桥向弯矩响应幅值.单吊索形式的吊索断裂后塔底横桥向最大弯矩的响应幅值为 265 kN·m,单吊索形式的吊索断裂后塔底横桥向最终弯矩的响应幅值为 49 kN·m,索塔在恒载作用下塔底的横桥向弯矩为 14 915 kN·m,断索产生的索塔横桥向弯矩的响应幅值为恒载作用下索塔横桥向弯矩的 1.8%,断索对索塔横桥向弯矩的影响较小.

图 14 给出了不同形式的吊索断裂后,1 号索塔塔底顺桥向弯矩的响应幅值 $M_{ts}-M_{ts0}$ 、 $M_{tsd,max}-M_{ts0}$.表 6 为不同形式的吊索断裂后 1 号索塔塔底顺桥向弯矩的响应因数.

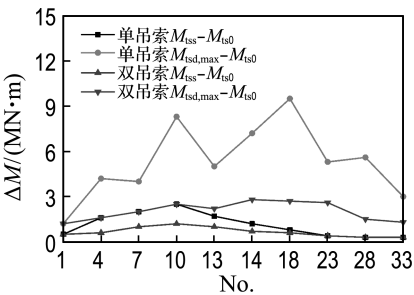


图 14 断索后索塔的顺桥向弯矩的响应幅值
Fig. 14 Longitudinal bending moment response amplitude of tower after the breakage of a hanger

表 6 断索后索塔的顺桥向弯矩的响应因数
Tab. 6 Longitudinal bending moment response factors of tower after the breakage of a hanger

吊索 编号	$M_{ts0}/$ (kN·m)	单吊索		双吊索	
		$f_{sa,ts}$	$f_{ma,ts}$	$f_{sa,ts}$	$f_{ma,ts}$
1	19 000	1.08	1.19	1.03	1.06
4	19 000	1.08	1.22	1.03	1.08
7	19 000	1.11	1.21	1.05	1.10
10	19 000	1.13	1.44	1.06	1.12
13	19 000	1.09	1.26	1.05	1.11
14	19 000	1.06	1.38	1.04	1.14
18	19 000	1.04	1.50	1.03	1.14
23	19 000	1.02	1.28	1.02	1.13
28	19 000	1.02	1.29	1.02	1.08
33	19 000	1.02	1.16	1.02	1.07

从图 14 及表 6 中可以看出,索塔附近的吊索断裂后,索塔顺桥向弯矩响应的动力特性明显.使用双吊索,可以将索塔最大顺桥向弯矩的响应幅值从 9 500 kN·m 降低到 2 800 kN·m,最终顺桥向弯矩的响应幅值从 2 500 kN·m 降低到 1 200 kN·m.使用双吊索可以将断索后索塔顺桥向弯矩响应因数 $f_{sa,ts}$ 从 1.02~1.13 改善到 1.02~1.06, $f_{ma,ts}$ 从 1.16~1.50 降低到 1.06~1.14.

4 结 论

(1)吊索断裂对主缆产生的应力仅为为主缆在恒载作用下应力的 3.4%,断索对主缆影响较小.吊索断裂后,吊索、主梁、索塔的动力响应显著,需要引起足够的重视.

(2)相比单吊索形式的吊索,使用双吊索形式的吊索可以使吊索应力的响应因数 $f_{ma,h}$ 从 2.16 降低到 1.32,主梁剪力的响应因数 $f_{ma,bf}$ 从 3.42

降低到 2.67,主梁弯矩的响应因数 $f_{ma,bm}$ 从 6.88 降低到 2.63,主梁扭矩的响应因数 $f_{ma,bt}$ 从 2.64 降低到 1.29,支座反力的响应因数 $f_{ma,z}$ 从 2.48 降低到 1.87,索塔的响应因数 $f_{ma,ts}$ 从 1.50 降低到 1.14.

(3)双吊索结构在其中一根吊索断裂后,另外一根吊索能够起到良好的辅助作用,显著地降低断索后悬索桥结构的响应,提高了悬索桥的整体安全性.在设计悬索桥、拱桥等包含索的大跨度结构时,建议选用双吊索形式的吊索.

参考文献:

[1] 石 伟,华剑平,郑国坤,等. 拱桥吊杆加固体系的应用探讨[J]. 预应力技术, 2014(5):3-6.
SHI Wei, HUA Jian-ping, ZHENG Guo-kun, *et al.* The application of the reinforced suspension-arch system bridge [J]. **Prestress Technology**, 2014(5):3-6. (in Chinese)
[2] 王力力,易伟建. 斜拉索的腐蚀案例与分析[J]. 中南公路工程, 2007, 32(1):93-98.
WANG Li-li, YI Wei-jian. Cases analysis on cable corrosion of cable-stayed bridges [J]. **Journal of Central South Highway Engineering**, 2007, 32(1): 93-98. (in Chinese)
[3] 孙洪滨. 江阴大桥吊索典型病害及更换工艺[J]. 科技创新与应用, 2014(31):70-71.
SUN Hong-bin. Typical disease and replacement process of Jiangyin bridge sling [J]. **Technology Innovation and Application**, 2014(31):70-71. (in Chinese)
[4] 王江鸿,王修山,阳春龙. 汕头海湾大桥试验吊索更换工程施工和监控[J]. 公路与汽运, 2015(6):172-177.
WANG Jiang-hong, WANG Xiu-shan, YANG Chun-long. Hanger replacement and monitoring of Shantou bay bridge project [J]. **Highways & Automotive Applications**, 2015(6):172-177. (in Chinese)
[5] Ruiz-Teran A M, Aparicio A C. Response of under-deck cable-stayed bridges to the accidental breakage of stay cables [J]. **Engineering Structures**, 2009, 31(7):1425-1434.
[6] Bontempi F, Giuliani L. Nonlinear dynamic analysis for the structural robustness assessment of a complex structural system [C] // **Proceedings of the**

2008 Structures Congress — Structures Congress 2008: Crossing the Borders. Reston: American Society of Civil Engineers, 2008:1-10.

[7] Mozos C M, Aparicio A C. Parametric study on the dynamic response of cable stayed bridges to the sudden failure of a stay, Part I: Bending moment acting on the deck [J]. **Engineering Structures**, 2010, **32**(10):3288-3300.

[8] QIU Wen-liang, JIANG Meng, HUANG Cai-liang. Parametric study on responses of a self-anchored suspension bridge to sudden breakage of a hanger [J]. **The Scientific World Journal**, 2014:512120.

[9] 沈锐利, 房凯, 官快. 单根吊索断裂时自锚式悬索桥强健性分析[J]. 桥梁建设, 2014, **44**(6):35-39.

SHEN Rui-li, FANG Kai, GUAN Kuai.

Robustness analysis of self-anchored suspension bridge with loss of a single sling [J]. **Bridge Construction**, 2014, **44**(6):35-39. (in Chinese)

[10] 李恬. 自锚式悬索桥吊索断裂研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.

LI Tian. Research of self-anchored suspension bridge to sudden breakage of hangers [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015. (in Chinese)

[11] 中交公路规划设计院有限公司. 公路悬索桥设计规范: JTG/T D65-05—2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2016.

CCCC Highway Consultants Co Ltd. Specification for Design of Highway Suspension Bridge: JTG/T D65-05-2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2016. (in Chinese)

Safety analysis of self-anchored suspension bridge with dual-shaped hanger after sudden breakage of hanger

QIU Wen-liang*, WU Guang-run, ZHANG Zhe, LI Tian

(School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Hangers are essential security parts of the suspension bridge structure. It is a general phenomenon that hangers have serious corrosion problems, and the hangers may fail suddenly under fatigue and corrosion effect. Existing research and engineering examples show that the breakage of a hanger can lead to the successive breakage of other hangers and then result in the collapse of the whole bridge at worst. Dual-shaped hanger can improve the safety of the suspension bridge related to the hanger failure. To research into the safety improvement and dynamic response of the suspension bridge after the breakage of the dual-shaped hanger, the study on the response of suspension bridge after hanger breakage is carried out using nonlinear static and dynamic methods, based on a 200 m self-anchored suspension bridge with concrete girder. The analytical results show that the dual-shaped hanger can reduce the response of suspension bridge after hanger breakage and improve the safety of the whole bridge during the service and maintenance stage. The conclusion can also provide a reference for the replacement, maintenance and reinforcement of suspension bridge hangers.

Key words: self-anchored suspension bridge; breakage of hanger; safety analysis; dual-shaped hanger