

悬吊桥面系拱桥加固改造安全性分析

张运清, 吴军鹏, 赵庆云, 刘康

山东省交通规划设计院集团有限公司, 山东 济南 250101

摘要:为改善以横梁受力为主的悬吊桥面系拱桥受力状态,采用更换吊杆及增设钢管桁架纵梁加固改造方案,以一座系杆拱桥为研究对象,在恒载、活载、温度荷载组合下分析加固改造后的拱桥结构动力性能。结果表明:吊杆断裂后对同侧相邻吊杆内力影响较大,安全系数满足《钢管混凝土拱桥技术规范:GB 50923—2013》要求,与断裂吊杆距离越远,对其余吊杆内力影响越小,对断裂吊杆异侧吊杆内力影响较小;吊杆断裂对系梁位移影响明显;对吊杆断裂后钢管桁架的关键部位进行受力验算,安全性结果满足《钢结构设计标准:GB 50017—2017》要求,该加固改造方案确保吊杆断裂后剩余结构的安全性。

关键词:桥梁工程;拱桥;悬吊桥面系;加固改造;有限元分析;吊杆断裂

中图分类号:U448.22;U445.72

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2025)04-0084-07

引用格式:张运清,吴军鹏,赵庆云,等.悬吊桥面系拱桥加固改造安全性分析[J].山东交通学院学报,2025,33(4):84-90.

ZHANG Yunqing, WU Junpeng, ZHAO Qingyun, et al. Safety analysis of reinforcement and renovation of suspension bridge floor system arch bridge [J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2025, 33(4): 84-90.

0 引言

拱桥造型美观、结构轻巧、施工便捷,跨越能力良好,在公路建设中应用广泛^[1-4]。早期修建拱桥多采用以横梁受力为主的悬吊桥面系,传力途径较单一^[5-6]。近年来,吊杆断裂导致多起桥面系连续垮塌事故,亟需研究在吊杆损伤或断裂后的结构安全性,以及提高该类型结构强度的安全措施等。于博等^[7]依据相似比理论制备1:16的室内缩尺模型,对典型位置单根吊杆断裂致使其余吊杆内力重分布的影响进行定量计算,认为某一吊杆断裂后对同侧拱肋相邻吊杆影响较大,与断裂吊杆相邻吊杆应力增大约25%;结构跨中、拱脚及四分点位置处吊杆断裂后对其余吊杆影响较大,位于拱脚处短吊杆对剩余吊杆的内力重分布影响最明显。邓育林等^[8]基于软件ANSYS建立大跨中承式钢管混凝土拱桥模型,分析拱桥吊杆破断后剩余结构的动力响应及吊杆对称破断与不对称破断下各重要构件的易损性,认为吊杆破断对邻近较短吊杆和桥面板梁的冲击影响较大,对主拱肋的影响较小,且短吊杆破断对剩余结构的影响明显高于长吊杆。不对称破断对桥面板梁冲击效应较大,极易导致桥面板梁连续破坏。刘剑锋等^[9]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,建立不对称断丝后钢绞线吊杆的损伤力学模型,推导不对称断丝后钢丝应变与影响长度、吊杆拉力损失率的关系表达式,模拟计算后认为不对称断丝后,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均匀。毕来运^[10]采用室内模型试验及有限元模拟分析相结合的方法,研究吊杆破损和断裂对钢管混凝土系杆拱桥力学性能的影响,得到背景实桥34根吊杆基于鲁棒性的重要性系数,拱脚附近、1/4跨径和跨中处的吊杆破断对系杆拱桥的承载力影响较大,根据吊杆内力与

收稿日期:2024-11-02

第一作者简介:张运清(1985—),男,河北衡水人,高级工程师,工学硕士,主要研究方向为桥梁检测与加固,E-mail:a15275162160@163.com。

损伤程度间的理论曲线定期检测吊杆内力变化,反推吊杆损伤程度,预测损伤吊杆剩余使用寿命,及早更换损伤吊杆避免吊杆断裂。柴文浩等^[11]建立系杆拱桥有限元模型,采用正装迭代和倒拆相结合的方法计算成桥索力,分析吊杆断裂数及断裂位置对主梁线形、剩余吊杆内力及拱肋应力的变化规律,结果发现任意吊杆断裂后主梁在断裂位置出现下挠峰值,且随断裂位置向跨中偏移,该峰值不断增大;吊杆断裂只引起同侧附近相邻吊杆的内力变化,对其余吊杆内力变化影响不大,跨中截面的吊杆对主梁线形和吊杆内力影响较大。夏欢等^[12]在服役 16 a 的中承式拱桥横梁间加设加劲钢管纵梁,研究平行钢丝吊杆存在劣化损伤时的桥梁承载能力,分析吊杆破断对结构动力放大系数和结构需求能力比的影响,评估吊杆发生连锁破断的风险。郝朝伟等^[13]对比分析采用单工字形、双工字形、箱形 3 种常用截面大纵梁加固典型飞燕式钢管混凝土系杆拱桥后桥梁关键部位的力学强度、模态、整体稳定性及抗震性能,综合考虑抗震性能需求与结构稳定性后确定加固大纵梁的截面形式,加固后关键结构恒载状态下的应力变化均小于 5%,横向振动频率、整体稳定性和抗震性能均得到不同程度改善。黄佳鑫等^[14]研究吊杆的破损安全优化设计方案,提出由内外部分组成的单吊杆优化方案代替传统的平行双吊杆,在安全束下方添加橡胶垫块,模拟计算原桥吊杆与基于应力差优化吊杆的内力,对比分析其使用寿命。现有研究成果中,对拱桥吊杆失效时间选取及吊杆断裂对剩余结构动力性能影响规律的研究较少。

本文以一座采用悬吊桥面系的下承式系杆拱桥为研究对象,通过更换吊杆及增设钢管桁架纵梁进行加固改造,采用软件 MIDAS 建立加固改造后的有限元分析模型,将吊杆断裂前的初始单元内力反向施加于对应的拱肋及系梁单元,分析吊杆断裂后对剩余结构动力性能的影响,研究吊杆断裂对剩余吊杆内力、拱肋与系梁位移、钢管桁架关键部位受力的变化规律,以期在实际监测和日常维护桥梁提供数据参考。

1 工程概况及加固方案

1.1 工程概况

某系杆拱桥跨径 80 m,桥面全宽 16.35 m,矢跨比 1/5,哑铃形拱肋截面高 1.8 m,共 15 对吊杆,顺桥向吊杆间距 5 m,每根吊杆采用 85 根 $\Phi 5$ mm 高强度低松弛镀锌钢丝组成;系杆由 4 根 $85\Phi 7$ mm 镀锌钢丝组成,桥面系由吊杆横梁、纵梁、桥面板组成,共设 3 道横撑,桥墩为 I 型截面。原桥设计汽车荷载标准为汽-超 20、挂-120。系杆拱桥总体布置如图 1 所示。

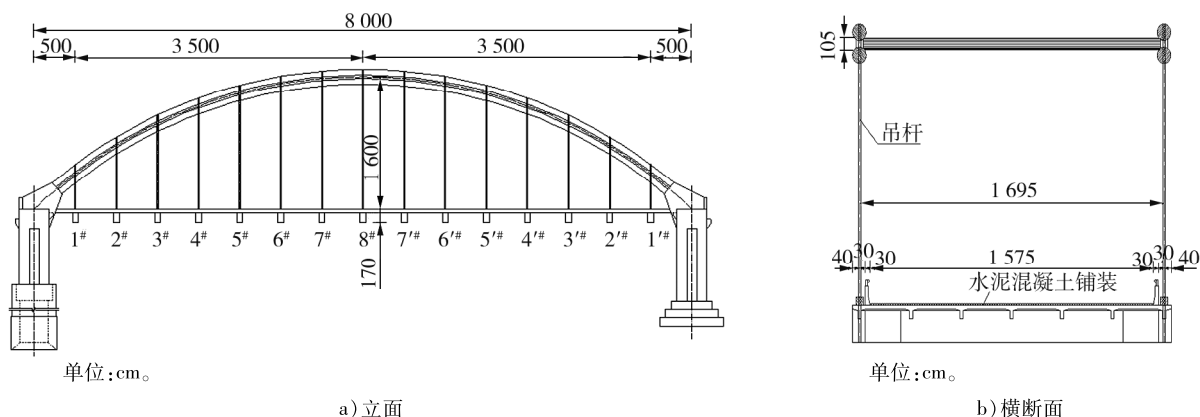


图 1 系杆拱桥总体布置示意图

1.2 加固改造方案

系杆拱桥采用以横梁受力为主的悬吊桥面系,未设置连续结构体系的主纵梁,吊杆已服役近 20 a,考虑原吊杆防护技术水平相对较低,检测发现下锚头保护罩渗水,渗油锈蚀严重。基于吊杆不断裂、桥面系吊杆断裂后不落梁的安全性要求^[15],对该桥提出加固改造方案:1)将原桥吊杆更换为 1 860 MPa 级 $\Phi 15.2$ mm 环氧喷涂钢绞线的 GJ15-19 型整束挤压吊杆,吊杆破断力为 4 940 kN;2)在原桥主纵梁增设钢管桁架,为提高钢管桁架的刚度,在高 40 cm、宽 18 cm 的原桥纵梁两侧采用圆钢管焊接形成 U 型桁架,

如图 2 所示。锚固钢板与吊杆横梁通过锚栓及对拉锚杆连接,其余钢杆件采用焊接方式。

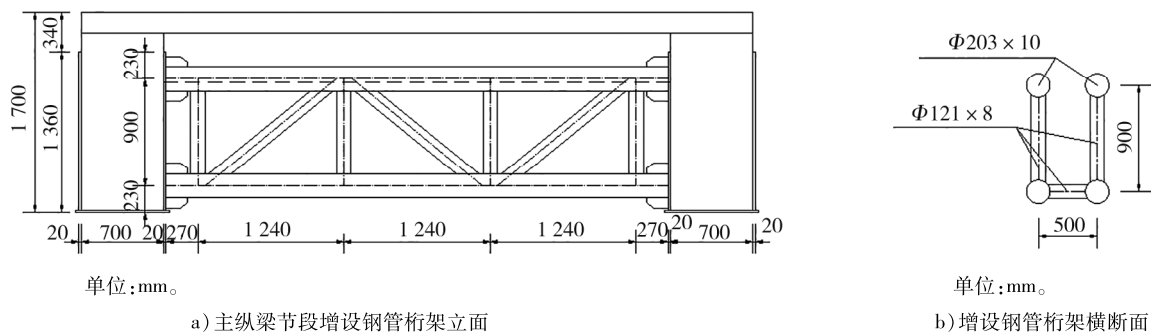


图 2 钢管桁架加固纵系梁示意图

2 有限元模型

按原桥结构图纸,通过软件 MIDAS CIVIL 建立加固改造后的系杆拱桥有限元模型,如图 3 所示。模型中拱肋、横梁、横撑、钢管桁架采用梁单元模拟,吊杆、系杆采用桁架单元模拟,拱脚与桥墩固结,桥墩底部固结,汽车荷载为公路-I 级。根据 2 个车道的实际位置,按横向分布计算吊杆力的最大增量,加载至断裂吊杆处,分析以上荷载共同作用下吊杆断裂对剩余结构动力性能的影响。

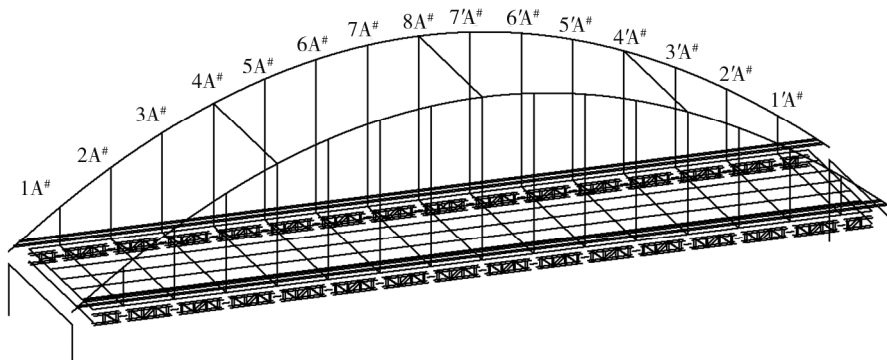


图 3 系杆拱桥有限元模型

3 吊杆断裂结构动力响应

现代桥梁设计遵循局部损伤不导致整体失效的原则,桥梁单个构件破坏,不会引起整体结构出现严重影响桥梁运行的变位或不可逆破坏^[16]。吊杆断裂可能引起剩余结构垮塌,桥梁结构突变导致构件振动,产生结构的初始动力响应。通过软件 MIDAS CIVIL 建立加固改造后拱桥的有限元模型,计算成桥状态下各单元内力,计算时考虑汽车荷载,根据 2 个车道的实际位置,按最不利影响线加载,受活载影响,计算吊杆力的最大增量为 381.6 kN。成桥状态下各单元内力作为吊杆断裂前的初始单元内力,之后去掉断裂吊杆单元,以断裂吊杆的初始内力作为反向力代替失效吊杆并分别施加于对应的拱肋及纵梁单元,再将反向力在失效时间内减至 0^[17],进行动力分析。

吊杆断裂失效时间影响桥梁结构的动态响应结果,以 2[#]短吊杆为例,分析吊杆在不同断裂失效时间下同侧相邻 1[#]吊杆、3[#]吊杆的最大内力,结果如表 1 所示。

表 1 在不同断裂失效时间下 2[#]吊杆同侧相邻吊杆的最大内力

吊杆断裂 失效时间/s	最大内力/kN	
	1 [#] 吊杆	3 [#] 吊杆
0.005	1 087.8	1 060.8
0.010	1 087.8	1 057.6
0.050	1 069.1	1 037.9
0.100	1 044.4	1 010.8
0.150	817.9	834.7
0.200	554.8	632.6

由表1可知:2[#]吊杆断裂失效时间越短,1[#]、3[#]吊杆的最大内力越大。吊杆断裂失效时间越短,剩余结构的动力响应结果越显著^[18],主要由竖向振型参与吊杆断裂后结构振动,吊杆断裂后结构第五阶竖向振动模态(振动周期为0.780 s)竖向变形较大,为分析吊杆断裂对剩余结构的不利影响,吊杆失效时间取剩余结构主要振动周期的1/100^[19],本次选取吊杆断裂失效时间约为0.010 s。

3.1 吊杆内力

该桥设有15对吊杆,因结构对称,仅模拟图1中同侧1[#]~8[#]吊杆断裂工况。分别以2[#]短吊杆断裂及8[#]长吊杆断裂为例,研究吊杆断裂时同侧相邻吊杆及同一横梁异侧吊杆内力变化规律,如图4所示。

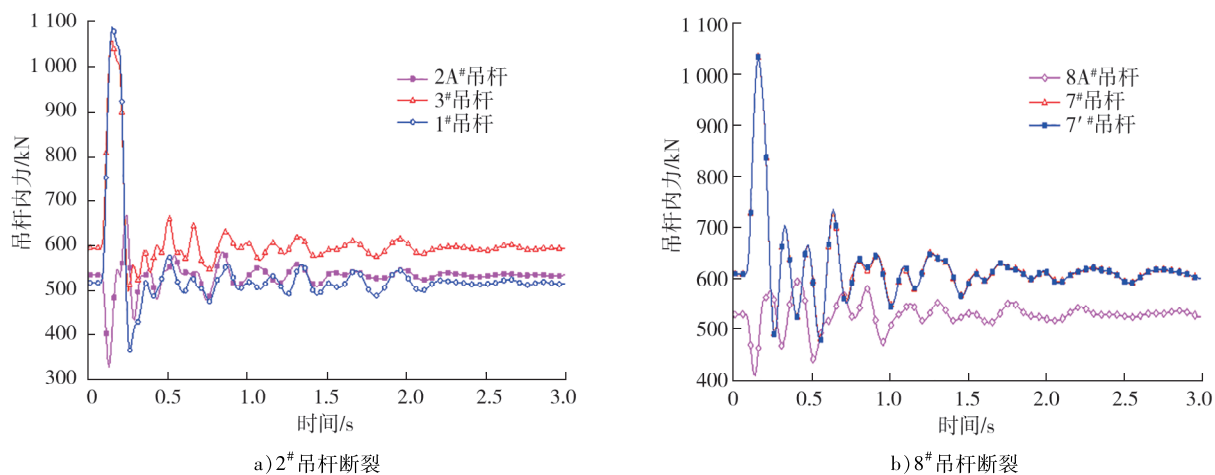


图4 不同吊杆断裂时同侧相邻吊杆及同一横梁异侧吊杆内力时程曲线

由图4可知:吊杆断裂瞬间,同侧相邻吊杆内力瞬间增大,随时间延长,内力震荡减小趋于相对稳定,内力重分布;2[#]吊杆断裂后0.15 s,1[#]、3[#]吊杆达到最大内力,分别为1 087.8、1 057.6 kN;8[#]吊杆断裂后0.16 s,7[#]、7'[#]吊杆达到最大内力,分别为1 032.8、1 033.5 kN;吊杆内力均较吊杆断裂前发生明显变化;吊杆断裂引起横梁横向扭转,异侧对称吊杆内力瞬间减小,随后增至最大内力并围绕初始状态上下震荡,2A[#]吊杆达到最大内力668.3 kN(初始内力为534.0 kN),8A[#]吊杆达到最大内力574.8 kN(初始内力为528.0 kN),异侧对称吊杆内力变化幅度相对较小。

动力放大系数为吊杆断裂后吊杆内力与断裂前同一吊杆内力之比,分别模拟计算同侧1[#]~8[#]吊杆断裂后剩余吊杆内力的动力放大系数,如表2所示。

表2 吊杆断裂后剩余吊杆内力的动力放大系数

断裂吊杆 编号	动力放大系数							
	1 [#] 吊杆	2 [#] 吊杆	3 [#] 吊杆	4 [#] 吊杆	5 [#] 吊杆	6 [#] 吊杆	7 [#] 吊杆	8 [#] 吊杆
1 [#]		1.50	1.08	1.08	1.04	1.04	1.04	1.05
2 [#]	2.10		1.78	1.18	1.09	1.08	1.07	1.08
3 [#]	1.19	1.83		1.77	1.19	1.05	1.06	1.08
4 [#]	1.17	1.21	1.81		1.72	1.19	1.08	1.05
5 [#]	1.14	1.11	1.22	1.76		1.68	1.19	1.10
6 [#]	1.14	1.13	1.05	1.21	1.71		1.69	1.22
7 [#]	1.16	1.13	1.08	1.10	1.21	1.70		1.70
8 [#]	1.10	1.13	1.13	1.06	1.11	1.22	1.70	

由表2可知:吊杆断裂引起瞬时冲击作用,通过与之相连的拱肋和系梁传递至剩余吊杆,两侧相邻吊

杆内力的动力放大系数最大,其他位置吊杆内力的动力放大系数相对较小,表明冲击作用仅对两侧相邻吊杆的内力有明显影响,吊杆与断裂吊杆距离越远,冲击作用对其内力影响越小;2[#]吊杆断裂后对同侧 1[#]吊杆内力产生动力响应,动力放大系数为 2.10,为最大动力放大系数;与断裂吊杆距离越远,吊杆内力动力放大系数越小,最小动力放大系数为 1.04。该桥全部吊杆更换为 GJ15-19 型整束挤压拉索吊杆,公称破断索力为 4 940 kN,满足安全系数不小于 3 的要求^[15]。

3.2 系梁、拱肋位移

吊杆断裂对吊杆两端连接的系梁、拱肋分别产生冲击作用,系梁、拱肋均发生相对位移,同侧 1[#]~8[#]吊杆断裂后各吊杆位置处的系梁、拱肋位移时程曲线如图 5 所示。

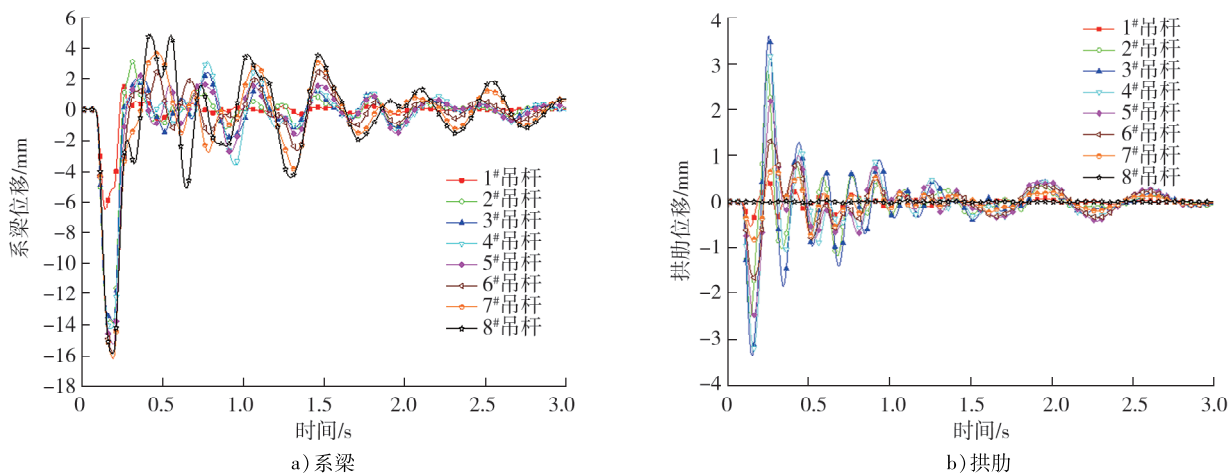


图 5 断裂吊杆处系梁、拱肋位移时程曲线

由图 5 可知:吊杆断裂后系梁、拱肋均产生上下振动,吊杆断裂后系梁存在竖向向下位移的峰值,随后在初始位置上下振动并逐渐减弱,直至趋于某一定值;各断裂吊杆位置处对应的系梁位移变化幅度最大,随着距断裂吊杆距离增大,断裂吊杆两侧其他吊杆对应的系梁位移变化幅度减小,但位移均较小;吊杆越长,吊杆断裂后与之相接的系梁向下竖向位移越大,7[#]吊杆竖向向下最大位移为 16.2 mm,表明长吊杆断裂对系梁位移的影响比短吊杆断裂明显;拱肋在初始状态位置出现向下、向上位移的峰值后,上下震荡并逐渐减弱,直至趋于某一定值;系梁产生的向下位移明显大于同一吊杆相接的拱肋,表明系梁抵抗吊杆断裂冲击能力弱于拱肋,吊杆断裂对系梁位移影响远大于拱肋,这与系梁刚度相对较弱、拱肋刚度相对较强有关。

3.3 桥面系

改造加固系杆拱桥后,在原钢筋混凝土纵梁位置增设钢管桁架纵梁,根据吊杆断裂后吊杆内力及系梁拱肋位移分析,吊杆断裂后对其附近系梁产生冲击效应最大,内力变化最明显。以吊杆断裂后竖向最大位移的 7[#]吊杆处横梁两侧钢管桁架中 I~IV 断面(如图 6 所示)为例,分析钢管桁架中关键部位,如纵梁与横梁连接锚栓、钢管与锚固钢板焊缝以及钢管的受力情况。

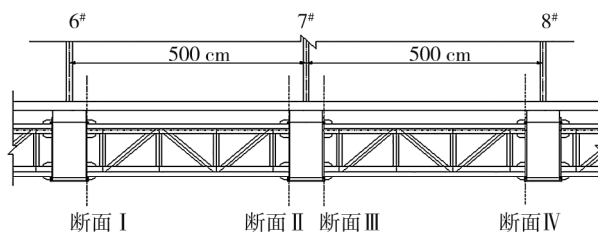


图 6 7[#]吊杆处横梁断面 I~IV 布置示意图

7[#]吊杆断裂后断面 I~IV 弯矩及剪力时程曲线如图 7 所示。由图 7a)可知:在吊杆断裂的冲击作用下,断面 I~IV 弯矩、剪力均存在突变。钢管桁架端部弯矩图中断面 II、III 位置处弯矩变化明显,在吊杆断裂后 0.16 s 分别达到最大弯矩 1 181.5、1 165.2 kN·m,断面 I、IV 位置处弯矩变化幅度相对较小,在吊杆断裂后 0.14 s 分别达到最大弯矩 -177.7、-213.2 kN·m。由图 7b)可知:断面 I、IV 与断面 II、III 位置剪力对称变化,断面 I~IV 在吊杆断裂后 0.15 s 分别达到最大剪力 -330.2、-283.8、285.8、331.9 kN。

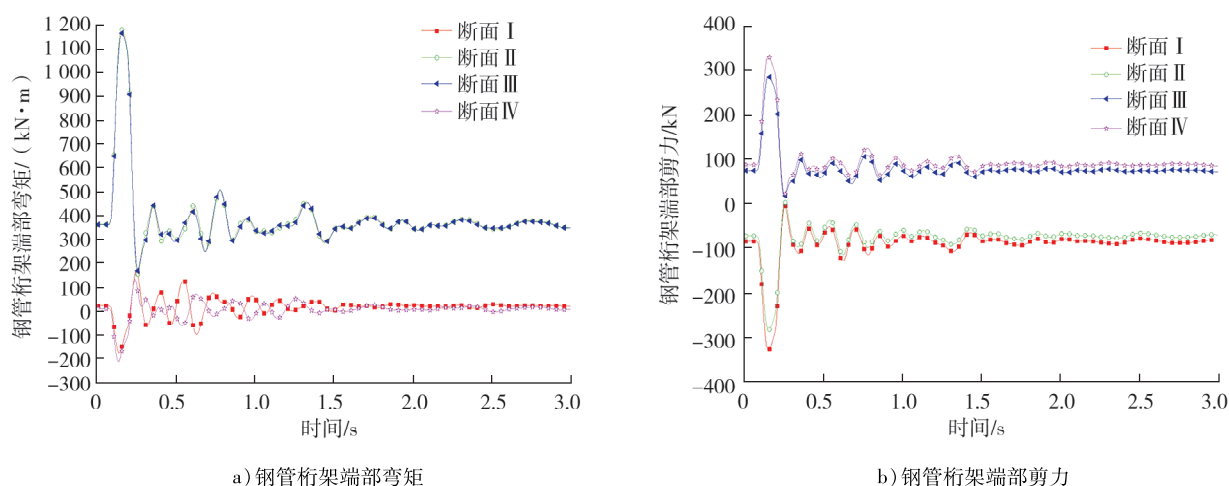


图7 7#吊杆断裂后断面I~IV弯矩和剪力时程曲线

根据断面I~IV的受力时程曲线,选取每处断面的最不利受力情况,根据文献[19]对钢管桁架的关键部位进行验算,结果见表3。由表3可知,吊杆断裂后钢管桁架的关键部位受力均满足要求^[19]。

从剩余吊杆内力、拱肋与系梁位移、钢管桁架关键部位受力3个方面分析吊杆断裂后系杆拱桥结构的动力性能,更换吊杆和增设钢管桁架纵梁加固方案能提高桥面系整体安全性,满足一根横梁两端对应吊杆失效后不落梁的要求^[15]。

表3 吊杆断裂后钢管桁架关键部位验算结果

位置	锚栓最大拉力/kN	端部钢管焊缝最大应力/MPa	端部钢管最大应力/MPa
断面I	66.3	74.6	157.9
断面II	126.9	134.7	238.8
断面III	127.2	150.4	268.0
断面IV	72.5	91.8	164.9
设计内力	172.7	200.0	305.0

4 结论

1)在恒载、活载、温度荷载组合下,分析加固改造后的系杆拱桥吊杆断裂后的结构动力性能。吊杆断裂引起的瞬时冲击作用通过与之相连的拱肋和系梁传递至剩余吊杆,实现内力重分布,相邻两侧吊杆内力的最大动力放大系数为2.10,与断裂吊杆距离最远吊杆内力的最小动力放大系数为1.04,吊杆断裂对异侧吊杆内力影响较小。

2)吊杆断裂后桥梁的系梁、拱肋均产生上下振动现象,吊杆断裂对系梁位移影响远大于拱肋,长吊杆断裂对系梁位移的影响比短吊杆明显。

3)吊杆断裂后,对改造加固后钢管桁架的关键部位进行受力验算,结果满足文献[19]要求。

加固改造后桥梁满足一根横梁两端对应吊杆失效后不落梁的能力要求,保证早期修建的以横梁受力为主的系拱桥整体安全性的需求,为今后类似桥梁加固改造提供参考。

参考文献:

- [1] 王红伟,谢开仲,郭晓,等.大跨度钢管混凝土拱桥拱肋混凝土灌注过程稳定性研究[J].世界桥梁,2019,47(5):49-53.
- [2] 涂光亚,袁航.大跨度钢管混凝土拱桥成桥状态钢管应力优化研究[J].中外公路,2020,40(2):140-143.
- [3] 郭鑫,颜东煌,袁晟,等.刚性系杆拱桥吊杆张拉索力施工控制研究[J].中外公路,2020,40(5):81-86.
- [4] 张军雷,崔海,王海雷.拱桥吊杆安全性加固改造方案设计研究[J].世界桥梁,2021,49(2):101-107.
- [5] 蒋国富,王华,郝天之.拱桥吊杆更换桥面位移控制方法[J].世界桥梁,2020,48(5):74-79.
- [6] 陈宝春,范冰冰,余印根,等.钢管混凝土拱桥强韧性设计[J].桥梁建设,2016,46(6):88-93.

- [7] 于博,张戎令,毕来运,等.单根吊杆断裂对系杆拱桥吊杆内力重分布的影响研究[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2020,52(6):889-894.
- [8] 邓育林,汪浩,梁永旗.大跨钢管混凝土拱桥吊杆破断动力响应与结构强健性分析[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2022,46(2):275-280.
- [9] 刘剑锋,李元兵,张启伟.拱桥钢绞线吊杆不对称断丝后的力学行为[J].同济大学学报(自然科学版),2019,47(4):451-457.
- [10] 毕来运.吊杆破断对系杆拱桥力学性能的影响研究[D].兰州:兰州交通大学,2019.
- [11] 柴文浩,杨雅勋,张宇航.吊杆断裂对系杆拱桥力学性能的影响[J].公路,2021,66(9):174-179.
- [12] 夏欢,金晓勤,晏班夫.拱桥在役损伤吊杆破断安全性研究[J].中外公路,2017,37(1):89-93.
- [13] 郝朝伟,王明法,张悦杉,等.以横梁受力为主的大跨拱桥桥面系加固大纵梁截面形式研究[J].世界桥梁,2021,49(6):103-109.
- [14] 黄佳鑫,李睿,孔丹,等.基于破损安全的柔性吊桥吊杆的优化设计[J].钢结构(中英文),2021,36(11):40-47.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部.钢管混凝土拱桥技术规范:GB 50923—2013[S].北京:中国计划出版社,2014.
- [16] 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.
- [17] 曲兆乐,石雪飞,李小祥,等.斜拉桥拉索断裂损伤的动力过程模拟方法研究[J].结构工程师,2009,25(6):89-92.
- [18] 余印根.中、下承式拱桥断索动力响应分析[J].福建建设科技,2015(5):18-21.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部.钢结构设计标准:GB 50017—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.

Safety analysis of reinforcement and renovation of suspension bridge floor system arch bridge

ZHANG Yunqing, WU Junpeng, ZHAO Qingyun, LIU Kang

Shandong Provincial Communications Planning and Design Institute Group Co., Ltd., Jinan 250101, China

Abstract: To improve the stress state of the suspension bridge floor system, which mainly experiences forces on the crossbeam, a reinforcement modification plan has been proposed that involves replacing the hangers and adding steel pipe truss longitudinal beams. Taking a tied arch bridge as the background, the dynamic performance of the reinforced arch bridge structure is analyzed under the combination of permanent load, live load, and temperature load. The results indicate that the failure of a hanger has a significant impact on the internal forces of adjacent hangers on the same side, meeting the requirement of *Technical Code for Concrete-filled Steel Tube Arch Bridges: GB 50923—2013* for a safety factor of three; the farther the distance from the broken hanger, the lesser the impact on the internal forces of the remaining hangers, while the effect on hangers on the opposite side of the broken hanger is relatively small; the failure of a hanger noticeably affects the displacement of the tie beam; the key parts of the steel pipe truss after the hanger failure are subjected to force verification, and the results meet the requirements of the *Standard for Design of Steel Structures: GB 50017—2017*. This reinforcement modification plan ensures the safety of the remaining structure after a hanger failure.

Keywords: bridge engineering; arch bridge; suspension bridge floor system; reinforcement and renovation; finite element analysis; hanger rod fracture

(责任编辑:王惠)