

单根吊杆断裂对系杆拱桥吊杆内力重分布的影响研究

于 博¹, 张戎令^{1,2}, 毕来运³, 张新博¹, 吕文达⁴, 党理国¹

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州交通大学 道桥工程灾害防治技术国家地方联合工程实验室, 甘肃 兰州 730070;
3. 中铁工程设计咨询集团有限公司济南设计院, 山东 济南 250000; 4. 兰州铁道设计院有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 以实际一系杆拱桥为研究背景, 依据相似原理, 考虑几何相似、荷载相似和材料相似的要求, 浇筑 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。结果表明: 当某一吊杆发生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为明显; 计算结果为同类实际桥梁的管理及日常养护提供了参考, 对实际结构的设计、施工, 特别是运营维护具有重要的参考价值。

关键词: 系杆拱桥; 相似理论; 有限元模拟; 吊杆断裂; 内力重分布

中图分类号: U448.22⁺5

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)06-0889-06

Study on the influence of single hanger fracture on the internal force redistribution of the tied arch bridge

YU Bo¹, ZHANG Rongling^{1,2}, BI Laiyun³, ZHANG Xinbo¹, LÜ Wenda⁴, DANG Liguó¹

(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070;

2. Key Laboratory of Road & Bridges and Underground Engineering of Gansu Province, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

3. Jinan Design Institute of China Railway Engineering Design Consulting Group Co., Ltd., Jinan 250000, China;

4. Lanzhou Railway Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on the actual research of the tied arch bridge, the similarity principle, the geometric similarity, load similarity and material similarity requirements, with the indoor scale model of 1:16 is poured, this essay aims to analyze and calculate the impact on fracture of a single hanger to the other hangers at the typical position. Results show that the impact on the adjacent hanger of the same side arch rib is greater when a certain hanger is broken, and the stress of the hanger adjacent to the broken hanger increased by around 25%. At the position of the midspan, arch springing and one fourth of structure, the hanger has a slightly greater influence on other hangers. The hanger at the arch springing has the most obvious influence on the internal force redistribution of the remaining hangers. However, the single hanger fracture generally does not cause the chain reaction of other fractures of hangers. The laboratory bridge model is based on the simulation of influence of the actual bridge type on the internal force redistribution of the tied arch bridge after the single hanger breaks. Calculation results provide reference for the management and daily maintenance of actual bridges, which also has guiding significance for on-site construction.

Key words: tied arch bridge; similarity theory; finite element simulation; suspender fracture; internal force redistribution of boom

随着高速铁路建设的飞速发展, 系杆拱桥在铁路中的应用越来越多, 尤其在城区和城郊跨越公路、河流时, 不仅可以一跨而过, 而且起到美化景观的作用^[1]。其中, 吊杆作为拱桥关键受力构件,

对系杆拱桥能否满足正常使用、安全可靠提供了必要的保障。吊杆失效不但会引起吊杆内力的重分布^[2]、对拱桥结构整体安全产生不利影响, 还会引起拱桥自振特性的变化、拱肋稳定性的降低^[3], 甚

收稿日期: 2020-01-08 修改稿日期: 2020-11-11

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划滚动支持基金资助项目(IRT_15R29); 国家自然科学基金资助项目(51768033); 甘肃省教育厅高等学校科研基金资助项目(2018B-054)

第一作者: 于 博(1993—), 男, 硕士研究生, 主要从事装配式桥墩、低温混凝土方面的研究。E-mail: 414731257@qq.com

通信作者: 张戎令(1984—), 男, 博士, 教授, 主要从事干寒地区材料耐久性与结构全寿命关键技术及应用研究。E-mail: mogzrlggg@163.com

至引发桥面坍塌等安全事故发生,为日常出行带来安全隐患。

近些年来,由于吊杆骤断,导致拱桥桥面局部坍塌的安全事故屡见不鲜,如新疆孔雀河大桥、福建武夷山公馆大桥等,见图 1。通过对事故桥梁的调查发现,事故桥梁吊杆普遍存在索体 PE 护套裂损、下端护筒积水,锚头及钢丝腐蚀等严重问题^[4];又如 2019 年 10 月 1 日,中国台湾宜兰南方澳跨海大桥发生垮塌事故见图 2,此次事故中,其中一吊杆发生断裂,吊杆失效瞬间,释放了对拱肋向下的拉力,使得拱肋向上回弹,拱脚向跨中回缩^[5]。由于不同吊杆之间内力重分布影响,吊杆受力分配方式发生骤变,导致部分吊杆超出其承载能力,最终出现“多米诺骨牌”效应的吊杆连锁破坏,导致全桥整体垮塌。



图 1 孔雀河大桥坍塌现场

Fig. 1 Kong Quehe bridge collapse site



图 2 台湾宜兰大桥坍塌现场

Fig. 2 Yilan Bridge collapsed in Taiwan

目前基于系杆拱桥各构件,开展了大量的研究。文献[6]利用有限元软件对桥梁矢跨比、梁拱刚度比、屈曲稳定和动力特性进行分析研究;文献[7]通过有限元软件对动荷载作用下的短吊杆进行动力特性分析;文献[8]基于吊杆振动频率,考虑抗弯刚度、转动惯量、剪切变形等多种耦合影响,建立吊杆偏微分方程,对吊杆张拉力进行实用公式的推导;文献[9]以实际工程为背景对成桥吊杆索力和吊杆初始张拉力拱桥索力做了优化计算;文献[10-11]结合室内试验模型与有限元模型分析结果对系杆拱桥吊杆张拉过程进行模拟实验研究;文献[12-13]采用 ANSYS 有限元软件分析了单根吊杆断裂给桥梁整体结构性能影响。但由于吊杆受力状态复杂,因此,有必要对吊杆采取有效的防护措施,

以延长其使用寿命;同时,在设计、施工及运营阶段,有必要对吊杆发生断裂后其余吊杆静张力的重分布状况及安全储备^[14-15]予以考虑和重视。针对于某一吊杆断裂后,其余吊杆内力重分布的研究还较为缺乏,特别是开展真实缩尺模型进行定量研究,尚未见报道。

本文以一实际系杆拱桥为背景,依据相似比理论,在室内浇筑 1 : 16 的系杆拱桥试验模型,分析了典型吊杆发生断裂后对其余吊杆内力重分布的影响规律。

1 总体介绍说明

1.1 试验背景

本文基于一实际运营桥梁,该桥为双线铁路桥,主桥上部结构采用 128 m 单孔简支系杆拱,拱轴线采用二次抛物线,矢跨比 1/5,理论计算跨径 $L=128$ m,矢高为 25.6 m。根据相似原理,在试验室浇筑 1 : 16 的系杆拱桥模型图 3 所示。试验模型按照几何相似、荷载相似和材料相似进行制作。



图 3 系杆拱桥试验模型图

Fig. 3 Arc bridge test model diagram

考虑实际制作及工艺的要求,模型结构部分构件的尺寸做了实际性能变化范围内的几何变更,如钢丝绳束,综合购买的便捷性及操作的便利,在能满足试验要求的前提下,选择了直径 8 mm 的钢丝绳束。

1.2 静力特性相似条件

试验模型采用与原桥同种材料,材料特性中,弹性模型、应力、应变、泊松比及质量密度相似系数均为 1;几何特性中线位移、长度 L 相似系数为 1 : 16 面积 A 满足平方关系,惯性矩 I 为四次方关系;荷载相似条件集中荷载 p 为平方关系,线荷载 q 为 1 : 16 而集中弯矩 M 为三次方关系。

1.3 吊杆张拉及吊杆断裂模拟

考虑实际桥梁采用满堂支架法施工,模型系梁采用临时支架支撑体系,并模拟满堂支架施工流程。钢梁通过拉式传感器与吊杆相连,见图 4。为了梁体受力均衡,钢梁应水平放置,千斤顶垂直于钢梁且与梁体中轴线对中,通过千斤顶加载,可以

实现横桥向同一横断面位置处的一对吊杆的张拉. 张拉顺序与实际桥梁张拉顺序保持一致, 首次张拉 1/4 跨 5 根吊杆依次进行 1 根短吊杆、9 根跨中吊杆、3 根、7 根、2 根、8 根、4 根最后张拉 6 根吊杆. 全部吊杆张拉完成后, 移除临时支架. 同时, 应对 S 形拉式传感器进行标定, 标定后, 将其布置于每一根吊杆上端, 并与 3816 静态应变仪连接. 模型吊杆张拉力与原桥张拉力按照 $1:16^2$ 的相似关系进行换算, 考虑到吊杆锚固时存在应力损失, 根据室内试验得出, 将吊杆超张拉 15%, 可达到设计张拉力, 张拉吊杆时记录 3816 静态应变仪所示的动态数值, 当达到预期需要的张拉力时, 将吊杆锚固.

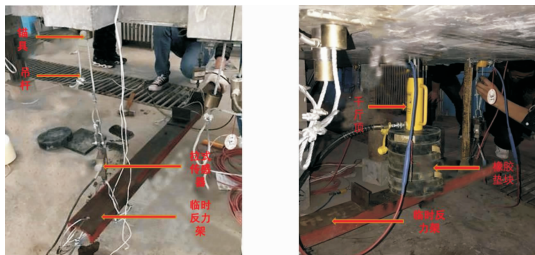


图 4 张拉反力装置安装及千斤顶加压

Fig. 4 Tensioning counterforce device installation and jack pressure

吊杆断裂失效的工况在模型中通过解除端部约束, 不承担荷载的方式进行模拟, 将各个吊杆单独断裂设置为单一工况, 进行某根吊杆断裂时将其约束进行解除, 完成该工况后, 重新进行吊杆力的调整, 使全桥吊杆应力恢复正常平衡状态.

1.4 有限元模型建立

建立实桥有限元模型, 拱肋、K 撑及系梁利用梁单元模拟, 共划分为 2 828 个梁单元; K 撑与拱肋之间共用节点; 吊杆采用桁架单元模拟共有 832 个桁架单元; 吊杆编号依次为: Z1~Z17 (拱肋 I), Y1~Y17 (拱肋 II) 见图 5. 由于该模型在横桥向和纵桥向均为对称结构, 本文仅对跨中以左模型进行研究. 吊杆与拱肋、吊杆与系梁及系梁与拱脚之间用弹性连接中的“刚性”连接, 全桥共 34 对、68 根吊杆. 针对有限元模型中的断裂吊杆失效, 采用钝化的方法进行模拟, 已有研究标明, 吊杆突然断裂后最大冲击系数最大可超过 2.0, 是诱发构件进一步损坏的重要原因, 但在模型对突然断裂的吊杆模拟时, 因不能精准控制断丝程度的轻重以及不能瞬间完成吊杆的切断, 而仅能通过有限元模型对吊杆截面面积进行消减等方式来满足吊杆断丝的工况模拟, 与实际模型不能形成相互对比论证, 在本文中不考虑吊杆突然断裂的冲击作用^[16]. 全

桥有限元模型如图 6 所示.

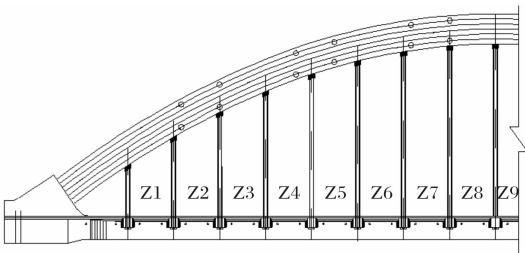


图 5 构件编号图

Fig. 5 Component numbering diagram

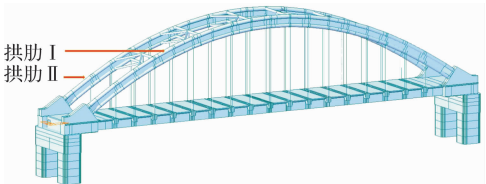


图 6 有限元模型标准视图

Fig. 6 Standard view of finite element model

2 有限元模型正确性校对

在吊杆张拉完成后, 对试验模型与有限元模型中, 全部吊杆的应力值进行比对, 见表 1.

构件/mm		原桥	模型	相似比
拱肋	外径	1 300	88	1 ∶ 14. 8
	壁厚	20	1. 3	1 ∶ 15. 4
主梁	顶板	400	25	1 ∶ 16
	底板	350	22	1 ∶ 15. 9
	腹板	550	35	1 ∶ 15. 7
吊杆	直径	100. 697	8	1 ∶ 12. 6

Z1、Z4 以及 Z9 吊杆 (对应拱脚处、四分之一截面处、跨中截面处) 分别断裂后将系梁和拱肋的竖向位移变化值进行比对, 见表 2、表 3.

表 2 全桥吊杆应力值表 (单位: MPa)

Tab. 2 Stress value of suspender of the whole bridge (Unit: MPa)

吊杆编号	有限元模型	试验模型	误差/%
Z1	152. 8	145. 2	4. 9
Z2	168. 0	158. 1	5. 9
Z3	185. 6	171. 7	7. 5
Z4	196. 1	179. 6	8. 4
Z5	195. 9	184. 5	5. 8
Z6	200. 5	216. 9	8. 2
Z7	189. 0	203. 6	7. 7
Z8	180. 5	191. 9	6. 3
Z9	181. 3	188. 9	4. 2

表3 系梁竖向位移变化值对比表(单位: mm)

Tab. 3 Comparison of changes in vertical displacement of system beams (Unit: mm)

系梁位置		系梁 1/2L			系梁 1/4L		
断裂吊杆	实桥有限元计算值	试验模型实测值	相似比转换值	实桥有限元计算值	试验模型实测值	相似比转换值	
Z1	0.27	0.02	0.32	0.38	0.03	0.48	
Z4	0.72	0.05	0.80	1.75	0.12	1.92	
Z9	2.17	0.13	2.08	0.68	0.05	0.80	

表4 拱肋竖向位移变化值对比表(单位: mm)

Tab. 4 Comparison of vertical displacement of arch rib (Unit: mm)

拱肋位置		I 拱肋 1/2L			I 拱肋 1/4L		
断裂吊杆号	实桥有限元计算值	试验模型实测值	相似比转换值	实桥有限元计算值	试验模型实测值	相似比转换值	
Z1	-0.59	-0.03	-0.48	0.55	0.04	0.64	
Z4	-0.78	-0.04	-0.64	3.81	0.21	3.36	
Z9	3.95	0.26	4.16	-0.64	-0.03	-0.48	

注: 由于建立的有限元模型为实桥模型, 所以将试验模型实测值利用相似比理论进行转化。

由表1可知, 全桥吊杆按设计顺序张拉完成后, 在自重作用下有限元模型吊杆应力值与室内试验模型吊杆应力值最大误差为8.4%, 最小误差仅为4.2%。通过表2及表3可知: 针对竖向位移变化值, 平均相对误差为9.3%。

当Z1、Z4、Z9吊杆分别断裂后, 试验模型与有限元模型中吊杆应力变化规律曲线见图7示。由图中曲线可知, 实测数值与有限元模型计算数值曲线吻合程度较高。

通过室内实测与有限元模型数据比对, 从吊杆、拱肋及系梁三方面, 论证了有限元模型的准确性和有效性。

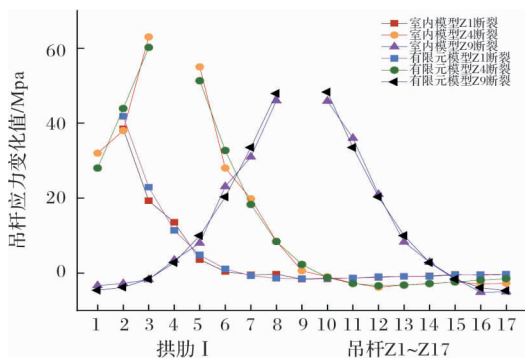


图7 吊杆应力对比图

Fig. 7 Derrick stress contrast figure

3 结果对比分析

3.1 单根吊杆破断对其余吊杆内力影响

利用有限元模型计算分析在恒载作用下拱肋 I Z1~Z9 吊杆分别断裂后, 全桥其余吊杆应力变化状况, 应力变化曲线见图8; Z1~Z9 分别断裂后拱肋 II 上其余吊杆(Y1~Y17)应力变化值见

图9。

进行室内模型吊杆破断试验, 得到了部分吊杆断裂造成其余吊杆内力重分布后应力变化值曲线见图8、图9。

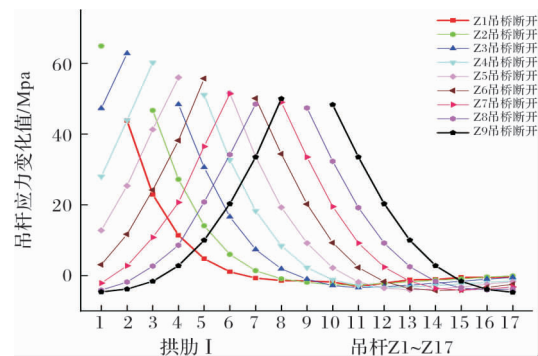


图8 拱肋 I 吊杆应力变化值图

Fig. 8 Arch rib I derrick stress value

由图8可以得出: 吊杆Z1发生断裂后与其临近的Z2吊杆应力增大43.8 MPa与Z1未断裂比较, Z2应力值增幅达25.7%; Z2吊杆断裂后, 与其相邻的Z3号吊杆应力增大46.7 MPa, 增幅达25.1%; Z3号吊杆发生断裂后, 与其相邻的Z4号吊杆应力增大48.4 MPa, 增幅为24.7%; Z4号吊杆断裂后, 与其相邻的Z5号吊杆应力增大51.1 MPa, 增幅为25.9%; Z5号吊杆断裂后, 与其相邻的Z6号吊杆应力增大51.6 MPa, 增幅为25.3%; Z6号吊杆断裂后, 与其相邻的Z7号吊杆应力增大50.1 MPa, 增幅为26.3%; Z7号吊杆断裂后, 与其相邻的Z8号吊杆应力增大49 MPa, 增幅为27.1%; Z8号吊杆断裂后与其相邻的Z9号吊杆应力增大47.4 MPa, 增幅为26.1%。

在本试验中 Z1~Z9 分别破断后同一拱肋其余吊杆应力变化值曲线整体变化趋势表现为: 破断吊杆同侧拱肋其余吊杆应力值均有不同程度的增幅, 其中位于破断吊杆两侧的相邻吊杆受到的影响最为显著, 随着远离破断吊杆, 内力重分布的影响逐级降低; 其中, Z7 吊杆破断后, 其左右两侧吊杆 Z6、Z8 由于受到最为严重的内力重分布影响, 其中 Z8 吊杆应力值增幅达到 27.1%, 随内力依次重新分配, Z2 吊杆应力变化值仅为 -2.1 MPa, Z13 应力变化值为 -1.6 MPa。

综上所述可得出, 当某一吊杆断裂后, 同侧拱肋多根吊杆应力均发生显著变化, 应力增幅达到 20%~30% 不等。

受拱肋 I 吊杆破断影响, 异侧拱肋各吊杆应力变化值曲线, 见图 9。由曲线变化趋势可知, 当拱肋 I 吊杆断裂后, 横桥向对应吊杆受到内力重分布影响最为显著, 其中拱肋 II 各吊杆最大应力变化值为 3.38 MPa, 增幅小于 1.5%, 与拱肋 I 各吊杆应力变化值相比, 拱肋 I 吊杆断裂所带来的内力重分布效果, 在拱肋 II 各吊杆应力分配上影响较低。

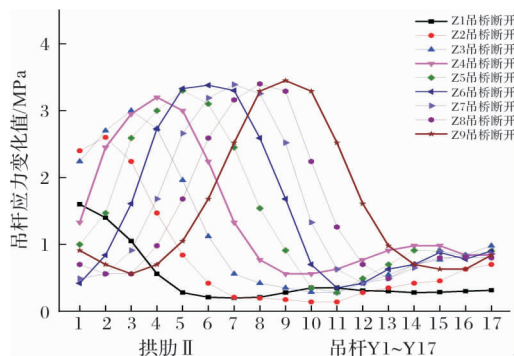


图 9 拱肋 II 吊杆应力变化值图

Fig. 9 Arch rib II derrick stress value

由上述分析表明, 当某一吊杆发生断裂, 异侧拱肋, 横桥向对应吊杆受到影响最大, 应力值增大 1.5%。

3.2 典型截面处吊杆破断对其余吊杆内力影响

根据吊杆安全性设计理论及实测吊杆应力分布规律, 选取拱脚位置(最短吊杆 Z1)、1/4 跨(吊杆长度居中 Z4)和跨中位置处吊杆(最长吊杆 Z9)为研究对象, 将有限元模型数据变化情况与室内模型所得数据两者相对比, 得到变化值曲线见图 10、图 11。

由图 10、图 11 可知, 试验模型实测值与有限元模型计算结果较为接近, 且曲线变化形态一致。

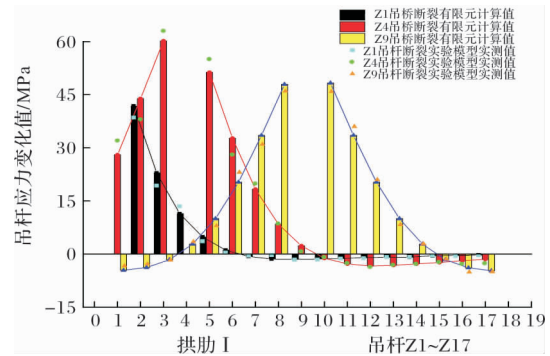


图 10 吊杆断裂后对拱肋 I 其余吊杆应力影响图

Fig. 10 Derrick after fracture of arch on rib I and the rest of the derrick stress influence diagram

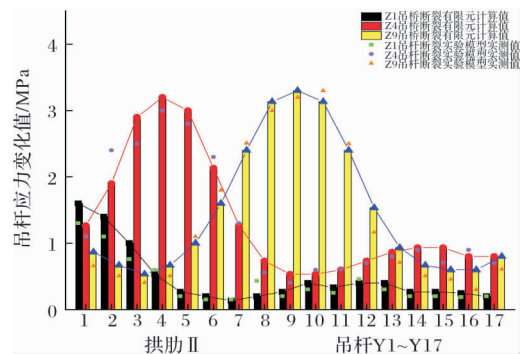


图 11 吊杆断裂后对拱肋 II 吊杆应力影响图

Fig. 11 Derrick after fracture of arch on rib II and derrick stress influence diagram

其中, Z1 断裂后, 其同侧拱肋 Z2~Z6 吊杆应力变化值增大, 与 Z1 号吊杆相邻的 Z2、Z3、Z4 应力变化值增幅达到 25.7%, 12.4%, 6.1%; Z7~Z17 吊杆应力减小值均小于 1%。异侧拱肋上 Y1~Y17 吊杆应力变化最大值仅为 1.6 MPa。

Z4 断裂后, 其同侧拱肋 Z1~Z3 和 Z5~Z9 吊杆应力增大, 与 Z4 相邻的 Z1、Z2、Z3、Z5、Z6、Z7 吊杆应力分别增加了 18.4%, 26.6%, 32.8%, 27.1%, 16.9%, 10.1%, 其中左右临近的 Z3 及 Z5 吊杆处应力变化值达到当前变化曲线的峰值; Z10~Z17 吊杆应力值减小。异侧拱肋 Y1~Y17 吊杆最大应力增大值为 1.3 MPa。

Z9 断裂后, 其同侧拱肋 Z4~Z8 和 Z10~Z14 吊杆应力增大, 与 Z9 相邻的 Z6、Z7、Z8、Z10、Z11、Z12 吊杆应力分别增加了 10.9%, 19.6%, 25.5%, 25.5%, 19.6%, 10.9%; Z1~Z3 和 Z15~Z17 吊杆应力变化值与 Z4 吊杆断裂后 Z10~Z17 吊杆应力变化数值接近; 异侧拱肋 Y1~Y17 吊杆最大应力增大值为 3.2 MPa。

按现行行业标准要求^[17]吊索的应力值应满足式 1 要求:

$$\sigma \leq 0.33 f_{tpk} \quad (1)$$

式中: σ 为系杆索的应力 N/mm^2 ; f_{tpk} 为系杆索的抗拉强度标准值 N/mm^2 .

依据标准计算可知: 试验中全桥吊杆应力须均小于 551 MPa, Z1、Z4、Z9 吊杆分别断裂后影响最大的吊杆分别是 Z2、Z3 和 Z8 吊杆, 应力值分别为 212.5 MPa, 351.5 MPa, 231.3 MPa.

在恒载作用下, 当 Z1、Z4、Z9 吊杆分别断裂后 Z2、Z3、Z8 吊杆应力分别增大了 25.7%, 32.8%, 25.5%, 相比全桥其余吊杆增幅较大, 强度安全储备明显降低.

3.3 单根吊杆断裂后对拱肋应力影响

在恒载条件下, 不同吊杆断裂后拱肋组合最大应力如图 12 所示.

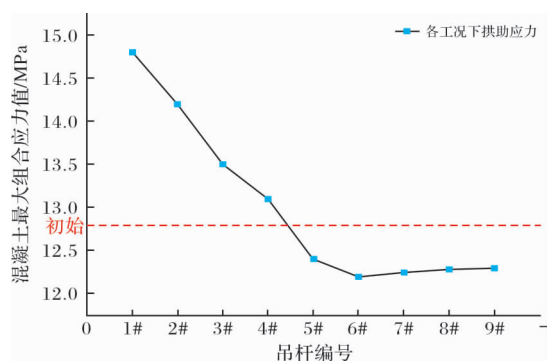


图 12 混凝土组合最大应力图

Fig. 12 Composite maximum stress diagram

混凝土应力值均为恒载作用下弯矩、剪力轴力立产生的组合最大值, 由图可知当单根吊杆发生断裂后, 拱肋应力较初始状态表现更为“敏感”其中短吊杆的断裂使得拱肋应力增大至 15%, 单根吊杆断裂后拱肋的组合最大应力产生均处于短吊杆拱脚位置处, 整个断裂工况拱肋均无拉应力出现, 且组合最大应力值满足规范要求 $\sigma_c \leq [\sigma_b]$ [18].

4 结论

(1) 吊杆破断失效时会导致同侧相邻吊杆发生应力重分布变化. 其中破断发生处两侧临近吊杆受到影响最大, 应力增大约 25%.

(2) 单根吊杆断裂一般不会引发其他吊杆断裂的连锁反应, 但不可忽视的是一旦发生破断, 安全储备将显著降低, 极有可能给全桥带来安全隐患.

(3) 跨中位置处吊杆一旦发生断裂后对系杆拱桥力学性能的影响较其余位置发生断裂更严重. 在实际桥梁中, 跨中吊杆一旦出现损伤, 应引起高度的重视.

参考文献 References

[1] 张戎令, 王起才, 马丽娜, 等. 考虑转动惯量和剪切变形

耦合的铰接吊杆索力实用计算公式[J]. 中国铁道科学, 2014, 35(5): 30-37.

ZHANG Rongling, WANG Qicai, MA Lina, et al. Practical formula for cable force of hinged suspender considering the coupling effect of moment of inertia and shear deformation[J]. China Railway Science, 2014, 35(5): 30-37.

[2] LI W. Analysis on impact of structural defect of tied arch bridge on internal force of suspenders[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2014.

[3] 陈淮, 葛素娟. 吊杆损伤对钢管混凝土拱桥自振特性影响的分析[J]. 桥梁建设, 2008(4): 24-26.

CHEN Huai, GE Sujuan. Analysis of influence of suspender damage on natural vibration characteristic of concrete-filled steel tube arch bridge[J]. Bridge Construction, 2008(4): 24-26.

[4] 龙跃, 左毅, 吴秋凡, 等. 拱桥拉索病害研究与对策[J]. 桥梁建设, 2005(3): 70-72, 80.

LONG Yue, ZUO Yi, WU Qiufan, et al. Study and countermeasures for deterioration of arch bridge cable hangers[J]. Bridge Construction, 2005(3): 70-72, 80.

[5] 郭涵. 台湾宜兰南方澳跨海大桥坍塌 12 人受伤 5 人失踪[EB/OL]. https://m.guancha.cn/international/2019_10_01_519957.shtml

GUO Han. 12 injured and 5 missing after the collapse of the South Australia sea crossing bridge in Yilan, Taiwan[EB/OL]. https://m.guancha.cn/international/2019_10_01_519957.shtml

[6] Z Min, W Yujue, Y Yongyi, et al. Research on the design of railway tied arch bridge[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2009.

[7] 杨建喜, 陈惟珍, 古锐. 拱桥短吊杆动力特性分析[J]. 桥梁建设, 2014, 44(3): 13-18.

YANG Jianxi, CHEN Weihen, GU Rui. Analysis of dynamic characteristics of short hangers of arch bridge[J]. Bridge Construction, 2014, 44(3): 13-18.

[8] 张戎令, 杨子江, 朱学辉, 等. 基于频率计算系杆拱桥吊杆张拉力的实用公式[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(5): 823-829.

ZHANG Rongling, YANG Zijiang, ZHU Xuehui, et al. Practical formula for calculate suspender tension based on frequency[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50(5): 823-829.

[9] 李剑锋. 下承式钢管混凝土系杆拱桥吊杆索力优化[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2018.

LI Jianfeng. The suspender force optimization of through CFST tied arch bridge[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018.

(下转第 904 页)

- [19] 贾倍煌. 供暖负荷朝向修正率的计算方法[J]. 暖通空调, 1992(4): 3-8.
JIA Beihuang. Calculation method of heating load orientation correction rate[J]. Journal of HV & AC, 1992(4): 3-8.
- [20] 张方遒. 采暖热负荷朝向修正率的计算[J]. 煤气与热力, 2001, 21(1): 84-86.
ZHANG Fangqiong. Calculation method of heating load orientation correction rate[J]. Journal of GAS & HEAT, 2001, 21(1): 84-86.
- [21] 吴继晨. 关于采暖热负荷朝向修正的研究[J]. 低温建筑技术, 2001(4): 40-42.
WU Jichen. Research on heating load orientation correction [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2001(4): 40-42.
- [22] 耿耿. 基于温度分布的寒地办公建筑高大过渡空间节能设计研究[D]. 天津: 天津大学, 2016: 19-20.
GENG Geng. Research on office building space energy efficiency design of large transitional space in severe cold area of China[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016: 19-20.

(编辑 吴海西 沈 波)

(上接第 894 页)

- [10] 祁强, 张戎令, 胡锐鹏, 等. 系杆拱桥施工过程索力变化规律试验研究[J]. 铁道科学与工程报, 2017, 14(9): 1893-1898.
QI Qiang, ZHANG Rongling, HU Ruipeng, et al. Experimental study on cable tension variation of tied arch bridge during construction process[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(9): 1893-1898.
- [11] 邓晓, 王起才, 张戎令, 等. 系杆拱桥吊杆索力张拉的模型试验研究[J]. 铁道建筑, 2015(6): 17-19.
DENG Xiao, WANG Qicai, ZHANG Rongling, et al. Experimental study on cable tension of tied arch bridge model[J]. Railway Engineering, 2015(6): 17-19.
- [12] 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 Ruili, 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.
- [13] STAROSSEK U, HABERLAND M. Approaches to measures of structural robustness[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2011, 7(7-8): 625-631.
- [14] ZOLI T, WOODWARD R. Design of long span bridges for cable loss[J]. IABSE Symposium Report, 2005, 90(9): 17-25.
- [15] ZHANG K, LEI J Q, CAO S S. Influence of damage of suspenders on static performances of steel-box stacked arch bridge [J]. Advanced Materials Research, 2013, 655-657: 1864-1867.
- [16] 孙广俊, 李正嘉, 章世祥, 等. 结构损伤对系杆拱桥结构性能的影响研究[J]. 桥梁建设, 2018, 48(2): 61-66.
SUN Guangjun, LI Zhengjia, ZHANG Shixiang, et al. Study of influences of structural damage on structural performance of tied arch bridge[J]. Bridge Construction, 2018, 48(2): 61-66.
- [17] 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: GB50923-2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
Ministry of Housing and Urban rural Development of The People's Republic of China. Technical code for concrete filled steel tubular arch bridge: Gb50923-2013[S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [18] 国家铁路局. 铁路桥涵混凝土结构设计规范: TB/10092-2017 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
National Railway Administration. Specification for design of concrete structures for railway bridges and culverts: TB/10092-2017[S]. Beijing: China Planning Press, 2017.

(编辑 吴海西 沈 波)