

DOI:10.11918/202409033

考虑系杆断裂的钢管混凝土刚架系杆拱桥动力响应分析

黄育凡^{1,2}, 戴思旸¹, 陈康明¹, 吴庆雄^{1,3}

(1. 福州大学 土木工程学院, 福州 350108; 2. 福建省土木工程多灾害防治重点实验室, 福州 350108;
3. 工程结构福建省高校重点实验室, 福州 350108)

摘要: 为方便计算分析系杆断裂后钢管混凝土刚架系杆拱桥动力响应特性, 采用动力系数考虑系杆断裂过程的动力效应, 建立了一种考虑系杆断裂效应的等效静力计算方法。与系杆断裂模型试验结果对比, 验证了考虑系杆断裂的有限元建模方法正确性。开展某钢管混凝土刚架系杆拱桥响应分析, 确定不同系杆断裂情况下的动力系数取值。结果表明: 系杆应作为刚架系杆拱桥系杆断裂动力分析主要构件, 桥墩面内弯矩和墩顶水平位移可作为辅助分析指标。单侧系杆断裂情况下, 断索侧墩顶位移较大, 非断索侧墩顶位移很小, 端横梁产生剪力和扭矩; 双侧系杆断裂情况下, 断索侧端横梁不产生扭矩, 拱肋轴力减小, 桥墩面外弯矩变化不明显。根据桥例分析结果, 采用考虑系杆断裂动力效应的刚架系杆拱桥等效静力法计算时, 建议单侧断索动力系数取 1.4, 双侧断索动力系数取 1.6。

关键词: 钢管混凝土拱桥; 刚架系杆拱; 系杆断裂; 系杆断裂试验; 动力响应; 等效静力法; 动力系数

中图分类号: U448.22+5 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2025)11-0115-09

Dynamic response analysis of CFST rigid frame tied arch bridge considering tie rod fracture

HUANG Yufan^{1,2}, DAI Siyang¹, CHEN Kangming¹, WU Qingxiong^{1,3}

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Fujian Provincial Key Laboratory on Multi-Disasters Prevention and Mitigation in Civil Engineering, Fuzhou 350108, China;
3. Key Laboratory of Civil Engineering, Fujian Province University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: To facilitate the computation and analysis of the dynamic response of concrete-filled steel tubular (CFST) rigid-frame tied-arch bridges after tie rod fracture, a dynamic coefficient is introduced to account for the dynamic effects during the fracture process. An equivalent static calculation method incorporating the effect of tie rod fracture is proposed. The validity of the finite element modeling approach for simulating tie rod fracture was verified through comparisons with experimental results from a physical model test. A response analysis was carried out on a CFST rigid-frame tied-arch bridge to determine dynamic coefficients under various tie rod fracture scenarios. The results demonstrate that the tie rods should be regarded as the primary components in the dynamic analysis of such bridges after fracture. The in-plane bending moment of the piers and the horizontal displacement at the pier top can serve as supplementary indicators. In the case of single-side tie rod fracture, significant displacement occurs at the pier top on the fractured side, while displacement on the non-fractured side is negligible. The end crossbeam is subjected to shear and torsion. In contrast, under double-side fracture conditions, no torsion is generated in the end crossbeam on the fractured side, the axial force in the arch rib decreases, and the out-of-plane bending moment of the pier shows little variation. Based on the analysis, it is recommended to use a dynamic coefficient of 1.4 for single-side fracture and 1.6 for double-side fracture when applying the equivalent static method for assessing CFST rigid-frame tied-arch bridges considering the dynamic effect of tie rod fracture.

Keywords: concrete filled steel tubular arch bridge; rigid frame tied arch; tie rod fracture; tie rod fracture test; dynamic response; equivalent static method; dynamic coefficient

系杆拱桥在中国有着广泛应用, 系杆索具有构件截面较小、应力幅高、疲劳问题突出、耐腐蚀性能

较弱的特点。系杆索在各种因素的共同作用下容易发生腐蚀、断丝等现象, 从而导致抗力下降, 甚至断

收稿日期: 2024-09-11; 录用日期: 2024-11-18; 网络首发日期: 2025-07-10

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250710.1107.006>

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFE0130300); 国家自然科学基金(51678154, 51608125); 福建省自然科学基金(2022J01093)

作者简介: 黄育凡(1986—), 男, 博士, 副教授

通信作者: 吴庆雄, wuqingx@fzu.edu.cn

裂^[1]。一些由吊杆断裂引起的拱桥连续倒塌事故已有报道,吊杆的安全性日益受到关注^[2]。与之相比,系杆都安装在系杆箱内,并且由于断裂的动力效应,系杆设计通常有相当大的冗余度,因此在日常检查中,系杆往往会被忽视,导致系杆健康状况甚至比吊杆更糟^[3]。如佛山佛陈大桥在投入使用 5 a 后发现系杆存在严重的腐蚀和断丝问题,31 根钢索完全断裂,20 根系杆中有 7 根钢绞线的横截面积腐蚀了 9%^[4]。四川绵阳飞来石大桥在投入使用 15 a 后进行检查,发现第二跨上游端的一根系杆因为钢丝严重腐蚀而破裂,另外由于钢丝互相缠绕,所有 48 根系杆都存在腐蚀和断丝问题^[5]。表 1 列出 6 座下承式钢管混凝土系杆拱桥的换索情况,一半是因为系杆损伤,另一半是因为发生系杆断裂,所有桥梁的系杆索更换周期远低于《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)^[6]规定的 20 a,其中更换周期最短的为 4 a,最长的为 15 a,平均仅为 7.7 a。

表 1 换索的 6 座刚架系杆拱桥

Tab. 1 Six rigid frame tied arch bridges with cable replacement

桥名	换索原因	系杆服役年限/a
武汉晴川桥	系杆损伤	4
金沙江佷果大桥	系杆损伤	8
绵阳飞来石大桥	系杆断索	15
峨边大渡河大桥	系杆断索	10
乐山沙湾大渡河大桥	系杆损伤	4
佛山佛陈大桥	系杆断索	5

当系杆断裂时,大部分由主拱产生的水平推力会转移到下部结构和基础上,拱脚可能会发生较大的水平位移,给主拱带来很大的附加弯矩。此外,由于系杆断裂带来的巨大冲击,内力和变形的增量会被放大,进而引发其余结构的破坏。为防止结构连续性倒塌,国内外规范对桥梁结构中的关键构件失效也作出了相关规定,系杆同样属于需要考虑的关键构件。根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)^[6]和《公路工程结构可靠性设计统一标准》(JTG 2120—2020)^[7]规定,公路桥涵的承载能力极限状态设计应考虑偶然状况,即当偶然破坏事件发生时,结构会发生与初始破断不成比例的连续性倒塌,因此需要考虑破坏安全极限状态下的可靠性。对于桥梁结构设计与验算来说,强健性设计应成为重要组成部分^[8]。

对于与斜拉桥相关的断索,美国斜拉桥协会《斜拉桥设计、测试和安装建议》(PTI 2012)^[9]规定,对于任一拉索断索,保证剩余结构不会发生连续性破坏,用静态索力的两倍去考虑斜拉桥拉索的突

然断裂而产生的冲击力,将冲击力同时作用于锚固位置的顶部和底部。许多研究人员利用有限元方法结合备用路径法研究了桥梁断索效应,主要关注悬索桥、斜拉桥的拉索以及拱桥的吊杆断裂效应和强健性分析。Starossek^[10]研究表明,在斜拉桥或悬索桥中,斜拉索或吊杆是特别容易受到影响的关键构件。田伟雄^[11]认为中间位置的吊杆缺失对连续刚架拱桥稳定性影响较大。Li 等^[12]主张吊杆是中承式拱桥的主要传力构件,其可靠性和耐久性对桥梁的安全至关重要。目前尚无针对考虑系杆断索的偶然状况的设计规定。

刚架系杆拱桥中系杆断索效应研究方面,Wu 等^[13]、Jiang 等^[14]、符晶华等^[15]、林超伟^[16]、朱劲松等^[17]采用有限元方法分析了系杆断裂对刚架系杆拱桥剩余结构内力和变形的影响,分析方法上直接在有限元模型中去除断裂的系杆,无法考虑系杆瞬时断裂对结构产生的动力效应。近年来,部分学者针对拱桥吊杆断裂开展了等效静力计算方法研究,如吴庆雄等^[18-21]、陈康明等^[22]开展了考虑吊杆断裂动力效应的中、下承式拱桥动力分析,分别对短吊杆和长吊杆断裂,提出了相应的动力系数建议值。聂尚杰等^[23]考虑吊杆动力放大系数,对一座刚架系杆拱桥进行了强健性设计。

综上所述,现有考虑斜拉索断裂的斜拉桥和吊杆断裂的中、下承式拱桥的等效静力计算方法已较为成熟,将复杂的动力计算问题转化为静力计算,简化了断索分析的计算效率。但对于刚架系杆拱桥考虑系杆断裂的等效静力方法还未见报道,对于各不利位置处考虑系杆断索的动力放大系数暂无定论。为此,本文参考和借鉴现有拉索断裂效应研究成果,以刚架系杆拱桥为研究对象,开展考虑系杆断裂的钢管混凝土刚架系杆拱桥动力响应分析,揭示单侧及双侧系杆断裂后剩余结构的动力响应,提出考虑系杆断裂等效荷载乘数的等效静力法,讨论适合系杆断裂等效静力计算的系数取值,研究成果可对钢管混凝土刚架系杆拱桥的系杆断裂分析提供参考。

1 考虑系杆断裂动力效应的等效静力法

采用模拟失效构件移除所产生的动力效应进行系杆断裂分析,有限元模型计算时间长且数据处理繁琐,如能采用静力计算则可提高分析效率。但静力分析仅能考虑系杆断索后结构的稳态响应,无法体现系杆断裂冲击效应对于剩余结构的影响。考虑引入动力放大系数,即结构构件失效引起的动力响应极值与静力响应的比值^[24]。根据结构动力学原

理, 动力荷载的大小不影响动力放大系数取值, 只与结构一阶固有频率及动力荷载作用时间相关, 具体表达为

$$y = \mu_D y_{st} \quad (1)$$

式中: y 为系杆断裂后结构动力响应, μ_D 为考虑系杆断裂的动力系数, y_{st} 为系杆断裂后结构静力响应。

分析系杆断裂效应时, 在拱脚系杆断索处施加一对大小相等、方向相反的集中力 N_1 为

$$N_1 = \mu_D N_0 \quad (2)$$

式中: N_1 为考虑系杆断裂效应的等效静力, μ_D 为考虑系杆断裂的动力系数, N_0 为无损状态下系杆索力。

系杆断裂等效静力法示意如图 1 所示。当一根系杆断索后, 在同侧的拱墩水平节点处施加一对大小相等方向相反的水平推力。当 $\mu_D = 1$ 时, 为不考虑动力效应的静力分析, 当等效静力分析结果与动力分析结果相等时, 认为此时的 μ_D 为合理的动力放大系数。因此, 动力系数取值是等效静力法分析的关键。

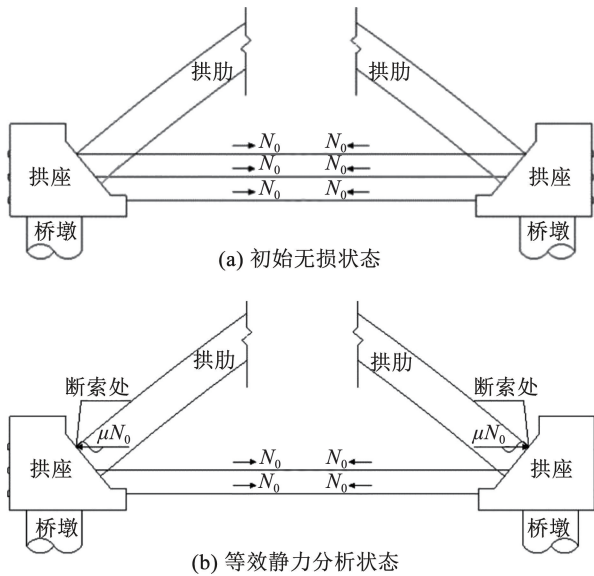


图 1 系杆拱桥等效静力法计算示意

Fig. 1 Schematic diagram of equivalent static method calculation for tied arch bridge

与吊杆断裂情况不同, 刚架系杆拱桥的系杆需在横向两侧拱脚分别布置一定数量来平衡拱脚水平推力, 系杆多采用集束型布置, 单根系杆受力相同, 当系杆断裂超过一定根数后, 剩余系杆由于无法平衡水平推力而使得桥梁发生垮塌危险, 在有限元计算中将无法得到计算结果。可通过设计水平推力, 以及系杆材料抗拉强度标准值、单侧系杆根数和单根系杆面积, 计算出可能会发生的系杆断裂根数的下限值。计算中分为单侧系杆断裂和双侧系杆同时断裂两种工况。

1) 单侧系杆断裂工况:

$$2H_0 \geq (2nA_{single} - n_{loss}A_{single})\sigma_u \Rightarrow$$

$$(2n - n_{loss}) \leq \frac{2H_0}{\sigma_u A_{single}} \Rightarrow$$

$$n_{loss} \geq 2n - \frac{2H_0}{\sigma_u A_{single}} \quad (3)$$

2) 双侧系杆断裂工况:

$$2H_0 \geq (2nA_{single} - 2n_{loss}A_{single})\sigma_u \Rightarrow$$

$$(2n - 2n_{loss}) \leq \frac{2H_0}{\sigma_u A_{single}} \Rightarrow$$

$$n_{loss} \geq n - \frac{H_0}{\sigma_u A_{single}} \quad (4)$$

式中: H_0 为桥墩水平推力, n 为系杆数量, A_{single} 为单根系杆截面面积, n_{loss} 为断索数量, σ_u 为系杆材料抗拉强度标准值。

通过式(3)和式(4), 可分别计算得到单侧和双侧系杆断裂后剩余系杆应力值, 如超过剩余系杆应力强度, 则不进行计算分析。

2 有限元计算方法与模型验证

2.1 考虑系杆断裂的有限元模拟方法

利用 ANSYS/LS-DYNA 分析程序进行系杆断裂模拟分析。采用考虑结构静力计算的初始状态的瞬时卸载法^[25], 通过等效荷载瞬时卸载法来模拟系杆断裂动力分析, 分析流程如图 2 所示。在 ANSYS/LS-DYNA 中首先通过前处理进行静力计算, 将计算结果导入小型重启文件, 利用应力初始化关键字, 在静力计算的初始状态下进行动力分析, 利用 ANSYS/LS-DYNA 完全重启功能, 模拟系杆断裂时删除对应系杆与桥墩的连接, 系杆将会瞬时退出工作。通过完全重启, 引入关键字 * STRESS_INITIALIZATION 以初始化剩余模型和非断裂系杆的变形及应力, 从而实现对系杆断裂全过程的模拟。

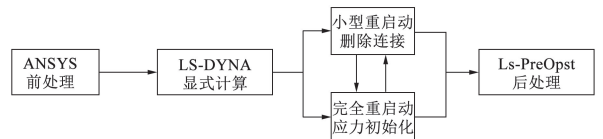


图 2 系杆断裂模拟过程

Fig. 2 Simulation process of tie rod fracture

对于拉索破断引起的剩余结构动力响应, 实际失效时间上限取系杆断裂后剩余结构基础周期 T 的 0.1 倍^[26]。系杆断索在实际情况中一般是瞬间破断的, 适合采用变换荷载路径法进行动力分析。文献^[27]认为对于拉索失效后的剩余结构构件来说, 失效时间越短放大效应越大, 当实际失效时间小于 $0.01T$ 时, 动力计算结果基本趋于稳定。实测了 14 座刚架系杆拱桥面内一阶阻尼比, 考虑了不同的结构阻尼比对于不同的桥梁结构的影响, 认为结构

阻尼比可偏安全的取 0.02, 此时阻尼对断索引起的体系振动可以进行有效的抑制和能量耗散。本文在试验模型的有限元分析中取断索触发装置断开时间 0.1 s, 在实桥动力分析中系杆断裂时间偏保守地取剩余结构基本周期 T 的 0.01 倍, 结构阻尼采用文献 [28] 中实测总结取 0.02。

2.2 系杆断索模型试验与有限元模型

为验证系杆断裂模拟方法的正确性, 根据钢管混凝土系杆拱桥系杆断裂试验结果^[29], 建立相应的有限元模型进行计算结果对比。

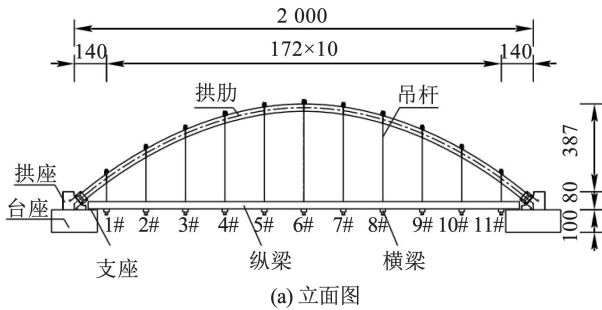
试验模型总体设计如图 3 所示, 主要由主拱、拱座、端横梁、桥面系、吊杆和系杆组成。钢材为 Q345 钢、混凝土为 C50、系杆和吊杆为 $\Phi 12.7$ 标准型钢绞线。试验模型对原桥主梁截面以 1:6.4 的比例进行了缩尺。为了对上部结构施加自重荷载, 按设计吊杆力考虑相似原理后设计悬吊桥面系。桥面系纵梁两端支承于台座上, 中间通过吊杆悬吊于主拱下。桥面系与系杆索相互独立。张拉双侧共 5 对系杆, 每根系杆索力为 12.63 kN, 单侧系杆力为 63.15 kN, 两侧共计 126.3 kN。利用电磁控制原理设计系杆断索触发装置, 实现系杆瞬时断裂现象, 共 4 根系杆断索, 即释放一侧系杆力为 50.52 kN, 系杆断裂时间控制在 0.1 s 以内, 研究结构一侧发生部分系杆断索时的结构响应, 试验模型照片如图 4 所示。



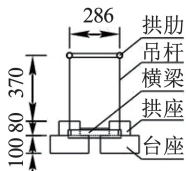
图 4 系杆拱桥断索试验模型

Fig. 4 Test model for cable breakage in tied arch bridge

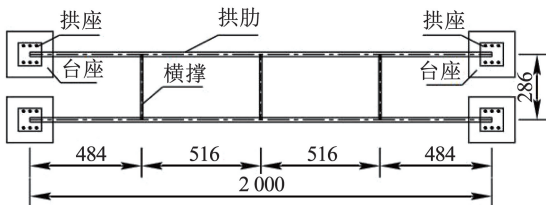
试验对应的 ANSYS/LS-DYNA 有限元模型如图 5 所示。模型由 22 根吊杆、44 根纵梁、11 根横梁和 48 个拱肋单元组成。吊杆采用仅受拉的三维杆单元 Link180 模拟, 纵梁、横梁和拱肋, 采用 Beam161 单元进行建模, 能充分考虑剪切变形的影响, 具备承受拉、压、弯、扭和剪的能力。材料属性、边界条件等与试验设置相同。材料屈服强度、弹性模量等根据材性试验实测结果取值, 钢材屈服强度和弹性模量分别为 368 MPa 和 2.05×10^5 MPa, 混凝土立方体抗压强度和弹性模量分别为 51.5 MPa 和 3.56×10^4 MPa。通过 ANSYS/LS-DYNA 中的刚性连接设置, 实现吊杆节点与纵梁节点、系杆节点与刚架节点、拱脚节点与刚架节点之间的节点耦合。根据 2.1 节介绍的方法实现系杆断裂模拟计算。



(a) 立面图



(b) 横断面图



(c) 平面图

图 3 试验模型总体布置 (cm)

Fig. 3 General layout of the test model (cm)

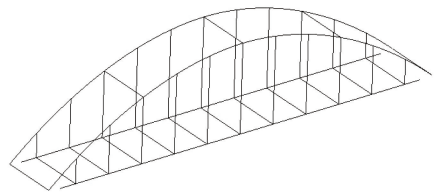


图 5 试验有限元模型

Fig. 5 Finite element model of test

2.3 有限元计算与试验结果对比

选取拱座位移、剩余系杆索力、拱肋应力响应作为分析指标, 将有限元模拟结果与试验结果进行对比, 如图 6 所示。可以看出, 有限元模拟曲线与试验实测响应曲线趋势基本一致。分别将系杆断裂后有限元计算与试验得到的拱座位移、剩余系杆索力和拱肋应力极值与稳态值进行对比, 汇总于表 2。可以看出, 有限元计算与试验得到的拱座位移响应极值与稳态值偏差在 4% 以内, 剩余系杆索力响应极值与稳态值偏差在 8% 以内, 拱肋应力响应极值与稳态值偏差在 11% 以内。验证了本文所建立的有限元模型和等效荷载瞬时卸载法可以较准确地模拟系杆断裂后剩余结构的动力响应。

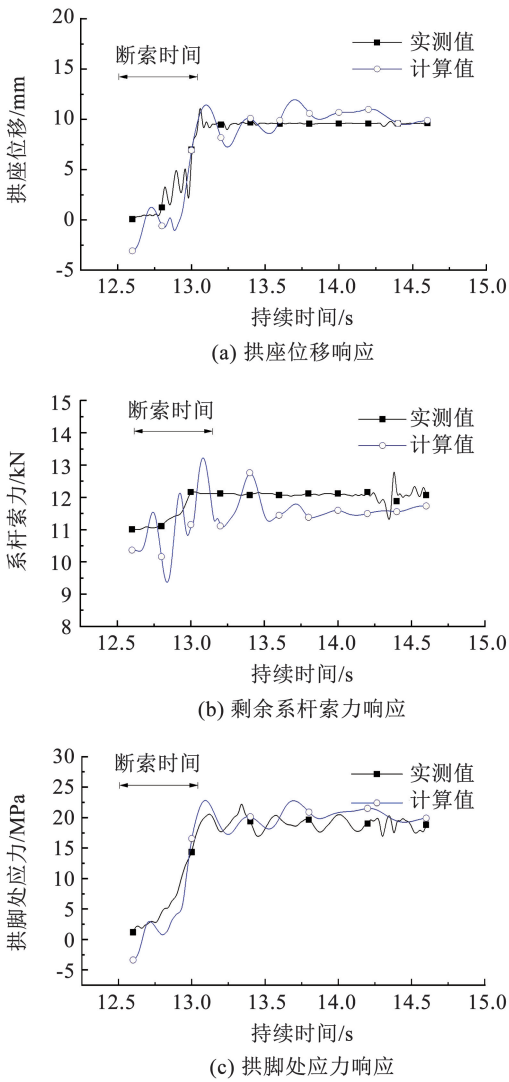


图 6 有限元计算与试验实测动力响应对比

Fig. 6 Comparison of dynamic response between finite element calculation and experimental results

表 2 有限元计算与试验实测值对比

Tab. 2 Comparison of finite element calculation and experimental measurement values

结果对比	拱座位移/mm		剩余系杆索力/kN		拱脚应力/MPa	
	极值	稳态值	极值	稳态值	极值	初始值
计算值	12.01	9.93	12.21	11.73	22.87	19.90
实测值	12.52	9.63	13.31	12.06	20.49	18.79

3 钢管混凝土刚架系杆拱桥系杆断裂动力分析

3.1 模型建立

某工程实际跨径 190 m 刚架系杆拱桥, 有 19 对吊杆和 8 对系杆。拱肋弦管采用 Q420 钢, 拱肋横撑、腹杆、上平联、下平联采用 Q355 钢, 主梁、纵梁钢材采用 Q345 钢; 拱肋弦管内采用 C60 混凝土, 桥面板采用 C50 混凝土, 桥墩及横梁采用 C40 混凝土;

土; 吊杆、系杆采用 Strand1860 钢绞线。设置 8 对系杆锚固于拱座端部, 为体外预应力束。在每道横梁上设置支撑架, 以保护索体、克服索的垂度, 降低系杆张拉时的摩擦损失。

采用相同有限元建模方法建立刚架系杆拱桥有限元模型, 如图 7 所示。各部件材料参数根据规范设计参数取值。系杆与桥墩、拱肋与桥墩间的连接采用弹性连接的刚接模拟方法, 通过刚性连接实现吊杆节点与纵梁节点、系杆节点与刚架节点、拱脚节点与刚架节点之间的节点耦合。桥墩底部设置固结约束。系杆断裂模拟计算方法与试验有限元计算模型一致。

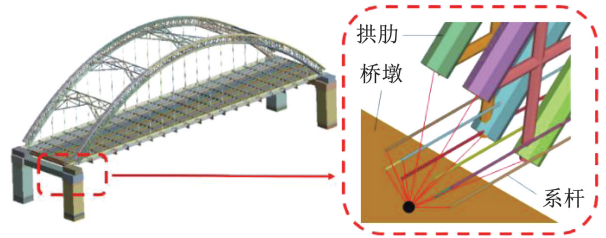


图 7 刚架系杆拱桥有限元模型

Fig. 7 Finite element model of rigid frame tied arch bridge

3.2 构件响应指标确定

与简支系杆拱桥不同, 刚架系杆拱桥的拱肋、系杆分别与桥墩固结, 系杆断裂后剩余结构共同受力, 断索冲击力会先作用于刚架再传递至拱肋。断索作用下刚架系杆拱的墩顶位移会小于简支系杆拱的拱座位移, 单侧系杆断裂将导致结构两侧冲击力和位移不同, 导致端横梁在剪力和弯矩作用下发生转动。因此, 选定系杆、拱肋、桥墩作为主要分析构件, 对比分析单侧和双侧系杆断裂情况下, 结构剩余系杆索力、桥墩水平推力、桥墩弯矩、墩顶水平位移和拱肋内力响应情况。单侧系杆总数 $n = 8$, 单侧拱脚水平推力 $H_0 = 29\ 897\ \text{kN}$, 系杆材料抗拉强度标准值 $\sigma_u = 1\ 860\ \text{N/mm}^2$, 单根系杆面积 $A_{\text{single}} = 0.007\ 69\ \text{m}^2$ 。根据式(3)和式(4), 计算得到单侧断裂根数 $n_{\text{loss}} = 5$, 双侧断裂根数 $n_{\text{loss}} = 4$ 时, 剩余系杆平均应力超过或接近抗拉强度标准值, 如表 3 所示。

表 3 系杆断裂数量计算

Tab. 3 Calculation results of the number of single side tie rod fractures

断裂系杆数量	剩余系杆平均应力/MPa	
	单侧系杆断裂	双侧系杆断裂
1	511	566
2	647	751
3	936	1 062
4	1 320	1 633
5	1 994	—

3.3 不同系杆断裂情况对比

计算单侧系杆由 1 根断裂至 5 根断裂, 双侧系杆由 1 根断裂至 4 根断裂, 将各部件动力响应极值汇总于表 4, 动力响应极值与初始状态对比增幅结果汇总于表 5。对比分析可知, 剩余系杆应力受系杆断裂影响较大, 考虑动力效应后的剩余系杆应力

大于静力理论计算结果, 需要考虑系杆断裂动力效应影响。单侧系杆断裂 5 根后剩余系杆应力增幅为 3.71 倍, 双侧系杆断裂 4 根后剩余系杆应力增幅为 3.25 倍, 系杆应作为刚架系杆拱桥断索动力分析主要构件。

表 4 不同系杆断裂情况下各构件动力响应极值

Tab. 4 Extreme values of dynamic response of components under different tie rod fracture

工况	系杆平均应力/MPa	桥墩水平推力/ 10^3 kN	桥墩面内弯矩/ 10^3 kN	桥墩面外弯矩/ 10^3 kN	墩顶水平位移/mm	拱肋内力/kN	端横梁扭矩/(kN·m)	端横梁剪力/kN
初始状态	510	0	-38.57	8.93	-1.77	-9 150	0	0
单侧 1 根	575	-7.57	100.94	8.935	0.46	-8 590	-3 478	572
单侧 2 根	807	-13.21	281.53	8.958	0.98	-8 265	-6 311	914
单侧 3 根	1 195	-22.61	582.5	8.997	1.85	-7 724	-11 967	1 847
单侧 4 根	1 505	-30.13	823.28	9.028	2.54	-7 291	-16 491	2 594
单侧 5 根	2 401	-38.32	1 062.24	9.044	3.71	-6 466	-21 016	3 411
双侧 1 根	651	-3.59	61.08	—	0.46	-8 775	—	—
双侧 2 根	974	-10.98	294.72	—	1.22	-8 126	—	—
双侧 3 根	1 639	-23.29	684.13	—	2.47	-7 044	—	—
双侧 4 根	2 171	-33.13	995.65	—	3.47	-6 178	—	—

表 5 不同系杆断裂情况下各构件动力响应变化幅值

Tab. 5 Dynamic response amplitude change of components under different tie rod fracture

工况	系杆平均应力增幅	桥墩面内弯矩增幅	桥墩面外弯矩增幅	墩顶水平位移增幅	拱肋内力降幅	%
单侧 1 根	13	362	0.1	126	-6	
单侧 2 根	58	830	0.3	155	-10	
单侧 3 根	134	1 610	0.8	205	-16	
单侧 4 根	195	2 235	1.1	244	-20	
单侧 5 根	371	2 854	1.3	310	-29	
双侧 1 根	28	258	—	126	-4	
双侧 2 根	91	864	—	169	-11	
双侧 3 根	225	1 874	—	240	-23	
双侧 4 根	325	2 681	—	296	-32	

桥墩面内弯矩和墩顶水平位移也受系杆断索影响较大, 增幅明显, 但由于初始状态下桥墩面内弯矩和墩顶水平位移值很小, 因此桥墩面内弯矩和墩顶水平位移可作为辅助分析指标。

单侧系杆断裂情况下, 断索侧墩顶位移较大, 非断索侧墩顶位移很小, 导致端横梁产生剪力和扭矩, 双侧断索无需考虑。单侧系杆断裂 5 根情况下, 端横梁扭矩为 -21 016 kN·m, 端横梁剪力为 3 411 kN, 端横梁应力依然满足强度要求。拱肋内力值在断索情况下减小, 桥墩面外弯矩变化不明显。因此, 后续等效静力分析中可不考虑端横梁、拱肋和桥墩面外弯矩影响。

4 等效静力法的动力系数取值分析

4.1 考虑系杆动力响应的 μ_D 取值

根据动力分析结果, 单侧系杆断裂 5 根、双侧系杆断裂 4 根时, 剩余系杆平均应力超过抗拉强度标准值, 视为结构破坏。因此, 单侧系杆断裂 5 根为单侧系杆断裂最不利工况, 双侧系杆断裂 4 根为双侧系杆断裂最不利工况。

关于动力放大系数, 根据动力学原理, 它只与结构的一阶固有频率及动力荷载作用的时间有关, 而与动力荷载的大小无关。动力放大系数指结构的动态位移响应与相同力值作用下的静态位移响应的比

值,考虑系杆断裂的动力响应时 μ 取值一般不超过 2.0^[30]。取不同动力系数 μ_D 变化幅值由 1.0 到 2.0, 计算由等效静力法得到的剩余系杆应力值, 并与动力计算值进行对比, 定义为效应比率。当效应比率为 1 时, 则表明等效静力法与动力计算得到的结构响应一致, 结果如图 8 所示。可以看出, 剩余系杆应力效应比率与动力放大系数 μ_D 呈线性相关。对于剩余系杆应力, 单侧最不利工况动力系数为 1.4, 双侧最不利工况动力系数为 1.6 时, 等效静力法计算得到的剩余系杆应力结果与动力计算结果一致。

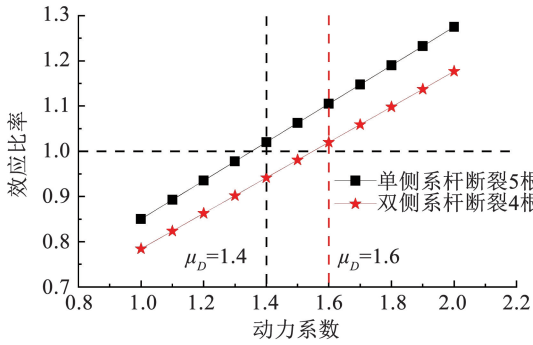


图 8 剩余系杆应力在不同动力系数下效应比率

Fig. 8 The effect ratio of residual tie stress under different dynamic coefficients

4.2 考虑桥墩动力响应的 μ_D 取值

系杆断裂后桥墩水平推力的效应比率如图 9 所示。可以看出, 桥墩水平推力效应比率与动力放大系数 μ_D 呈线性相关。单侧最不利工况动力系数为 1.3, 双侧最不利工况动力系数为 1.4 时, 等效静力法计算得到桥墩水平推力结果与动力计算结果一致。

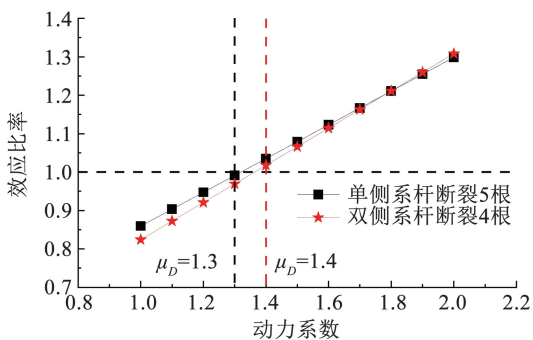


图 9 桥墩水平推力在不同动力系数下效应比率

Fig. 9 The effect ratio of horizontal thrust on bridge piers under different dynamic coefficients

系杆断裂后桥墩面内弯矩效应比率如图 10 所示。可以看出, 桥墩面内弯矩效应比率与动力放大系数 μ_D 呈线性相关。单侧最不利工况动力系数为 1.3, 双侧最不利工况动力系数为 1.6 时, 等效静力法计算得到桥墩面内弯矩结果与动力计算结果一致。

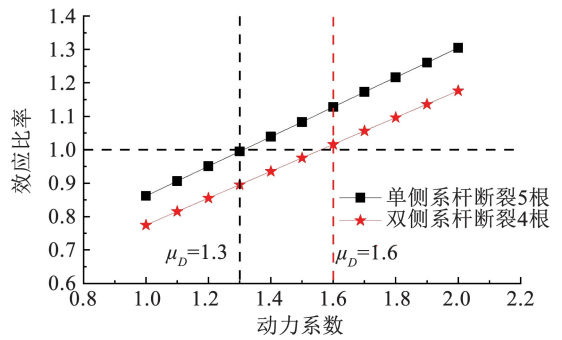


图 10 桥墩面内弯矩在不同动力系数下效应比率

Fig. 10 The effect ratio of in-plane bending moment on bridge pier surface under different dynamic coefficients

4.3 考虑墩顶水平移动动力响应的 μ_D 取值

系杆断裂后墩顶水平位移效应比率如图 11 所示。可以看出, 墩顶水平位移效应比率与动力放大系数 μ_D 呈线性相关。单侧最不利工况动力系数为 1.4, 双侧最不利工况动力系数为 1.6 时, 等效静力法计算得到墩顶水平位移与动力计算结果一致。

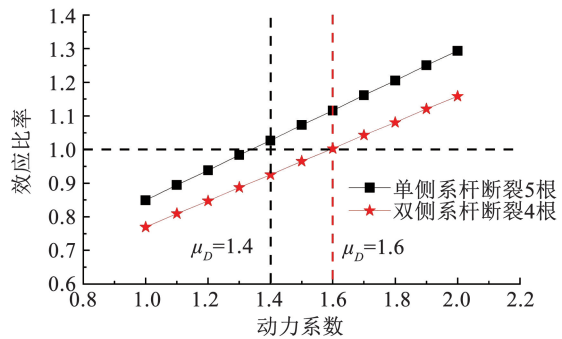


图 11 墩顶水平位移在不同动力系数下效应比率

Fig. 11 The effect ratio of horizontal displacement of arch pier nodes under different dynamic coefficients

4.4 考虑端横梁动力响应的 μ_D 取值

端横梁响应仅考虑单侧系杆断索最不利工况, 系杆断裂后端横梁内力响应的效应比率如图 12 所示。可以看出, 动力放大系数 μ_D 与端横梁响应效应比率呈线性相关。单侧最不利工况下端横梁扭矩和剪力动力系数为 1.3 时, 等效静力法计算得到端横梁内力响应与动力计算结果一致。

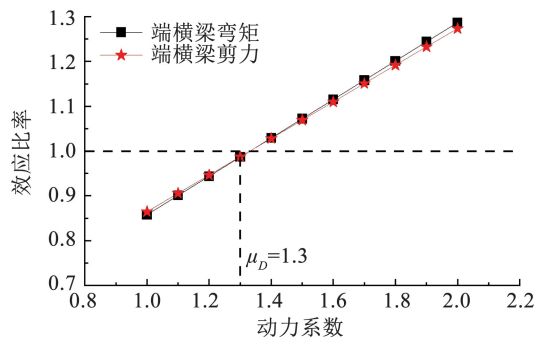


图 12 端横梁在不同动力系数下效应比率

Fig. 12 Effect ratio of end beam under different dynamic coefficients

4.5 动力系数 μ_D 取值讨论

将系杆断裂后刚架系杆拱桥各部件动力系数汇总于表 6, 取包络值得到单侧系杆断索动力系数为 1.4, 双侧断索动力系数为 1.6。单侧系杆断裂情况下, 等效静力法取动力系数 $\mu_D = 1.4$, 计算得到各部件响应极值, 与动力计算结果对比, 汇总于表 7。可以看出, 各控制指标误差不超过 2.6%。双侧系杆

断裂情况下, 等效静力法取动力系数 $\mu_D = 1.6$, 计算得到各部件响应极值, 与动力计算结果对比, 汇总于表 8。可以看出, 各控制指标误差不超过 1.9%。因此, 采用考虑系杆断裂动力效应的刚架系杆拱桥等效静力法计算时, 建议单侧断索动力系数取 1.4, 双侧断索动力系数取 1.6。

表 6 系杆断裂时各构件动力系数对比

Tab. 6 Comparison of dynamic coefficients of various components when the tie rod fracture

工况	动力系数						
	系杆力	水平推力	面内弯矩	墩顶位移	端横梁扭矩	端横梁剪力	建议取值
单侧系杆断裂	1.4	1.3	1.3	1.4	1.3	1.3	1.4
双侧系杆断裂	1.6	1.4	1.6	1.6	—	—	1.6

表 7 单侧系杆断裂各部件响应极值对比

Tab. 7 Comparison of extreme response values of various components for single side tie rod fracture

结果对比	系杆力/MPa	水平推力/kN	面内弯矩/(kN·m)	墩顶位移/mm	端横梁扭矩/(kN·m)	端横梁剪力/kN
动力计算结果	2 401	37 318	1 062.2	3.71	-21 016	3 411
$\mu_D = 1.4$ 时结果	2 449	37 980	1 056.6	3.81	-20 733	3 368

表 8 双侧系杆断裂部件响应极值对比

Tab. 8 Comparison of extreme response values of various components for double side tie rod fracture

结果对比	系杆力/MPa	水平推力/kN	面内弯矩/(kN·m)	墩顶位移/mm
动力计算结果	2 171	33 130	995.6	3.47
$\mu_D = 1.6$ 时结果	2 214	33 716	1 011.5	3.48

5 结 论

1) 建立了刚架系杆拱桥单侧系杆和双侧系杆断裂情况下, 系杆断裂数量静力计算方法。与系杆断裂模型试验对比, 验证了建立的有限元模型和等效荷载瞬时卸载法可较准确地模拟系杆断裂动力效应, 能够推广应用用于考虑系杆断裂过程的钢管混凝土刚架系杆拱桥动力响应分析。

2) 考虑动力效应后的剩余系杆应力大于静力理论计算结果, 需要考虑系杆断裂动力效应影响。系杆应作为刚架系杆拱桥断索动力分析主要构件, 桥墩面内弯矩和墩顶水平位移可作为辅助分析指标。单侧系杆断裂情况下, 断索侧墩顶位移较大, 非断索侧墩顶位移很小, 端横梁产生剪力和扭矩, 双侧断裂情况下, 断索侧端横梁不产生扭矩, 拱肋轴力减小, 桥墩面外弯矩变化不明显。等效静力分析中可不考虑端横梁、拱肋和桥墩面外弯矩影响。

3) 采用考虑系杆断裂动力效应的刚架系杆拱桥等效静力法计算时, 建议单侧断索动力系数取 1.4, 双侧断索动力系数取 1.6。本文结论是根据有限的模型试验和一座桥例分析得到的, 未来还需开

展更多桥例分析, 进一步完善考虑系杆断裂动力效应的动力系数取值。

参 考 文 献

- [1] 汤国栋, 廖光明, 严斌, 等. 桥梁钢索服役破断的安全评定与索力检测[J]. 公路, 2016, 61(12): 119
TANG Guodong, LIAO Guangming, YAN bin, et al. Safety assessment and cable force detection of bridge steel cable service failure[J]. Highway, 2016, 61(12): 119
- [2] 韦鸿, 黄铁. 桥梁吊杆受撞后检测方法及安全评价探讨[J]. 西部交通科技, 2014, 9(10): 39
WEI Hong, HUANG Tie. Discussions on testing methods and safety assessment of bridge booms after the collision[J]. Western China Communications Science and Technology, 2014, 9(10): 39
- [3] 交通运输部公路科学研究院. 拉吊索结构耐久构造与可检修易更换技术的研究专题一: 拉吊索结构耐久性调查与合理耐用性分析[R]. 北京: 交通运输部, 2011
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Research topic 1 on durable structure and repairable and easy to replace technology of suspension structures: investigation and reasonable durability analysis of suspension structure durability[R]. Beijing: Ministry of Transport of the People's Republic of China, 2011
- [4] 李烈佩, 罗宇. 佛陈大桥系杆拱的加固及认识[J]. 广东公路交通, 2001, 4(4): 10
LI Liepei, LUO Yu. Reinforcement and understanding of tied arch of Fochen bridge[J]. Guangdong Highway Communications, 2001, 4(4): 10

- [5] 康孝先, 刘路, 丁洪华. 系杆拱桥系杆更换关键技术研究与应用[J]. 公路, 2015, 60(8): 110
KANG Xiaoxian, LIU Lu, DING Honghua. Research and construction of key technologies for replacing ties in tied arch bridges [J]. Highway, 2015, 60(8): 110
- [6] 中华人民共和国交通运输部. 公路桥涵设计通用规范: JTG D60—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015
Ministry of Transport of the People's Republic of China. General specifications for design of highway bridges and culverts: JTG D60—2015[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015
- [7] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程结构可靠性设计统一标准: JTG 2120—2020[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2020
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Unified standard for reliability design of highway engineering structures: JTG 2120—2020[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2020
- [8] LONETTI P, PASCUZZO A. Vulnerability and failure analysis of hybrid cable-stayed suspension bridges subjected to damage mechanisms[J]. Engineering Failure Analysis, 2014, 45: 470
- [9] Post-Tensioning Institute. Recommendations for stay cable design, testing and installation; PTI DC45.1-12[S]. Farmington Hills: Post-Tensioning Institute, 2012
- [10] STAROSSEK U. Avoiding disproportionate collapse of major bridges [J]. Structural Engineering International, 2009, 19(3): 289
- [11] 田伟雄. 带中吊杆下承式系杆拱桥稳定性研究[J]. 中国市政工程, 2007(1): 28
TIAN Weixiong. Stability analysis of through tied-arch bridge with middle boom[J]. China Municipal Engineering, 2007(1): 28
- [12] LI H, LI R, CHEN Y, et al. Dynamic response analysis of suspenders of arch bridges sudden failure on failure-safety theory [J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 444-445: 1295
- [13] WU Q X, YU Y G, CHEN B C. Dynamic analysis for cable loss of a rigid-frame tied through concrete-filled steel tubular arch bridge [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(15): 144
- [14] JIANG X, WANG L, ZHANG H. Static and dynamic analysis of a through tied arch bridge [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 252(5): 77
- [15] 符晶华, 常立新, 姜德生, 等. 系杆断裂对拱桥健康状况的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2006, 28(10): 61
FU Jinghua, CHANG Lixin, JIANG Desheng, et al. Influence of ties broken on arch bridge health state [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, 28(10): 61
- [16] 林超伟. 重庆菜园坝长江大桥系杆评估方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005
LIN Chaowei. Research on damage evaluation method of tie bars in Caiyuanba Bridge[D]. Chongqing: Chongqing University, 2005
- [17] 朱劲松, 盛荣荣. 中承式系杆拱桥体系冗余度分析[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37(7): 1
ZHU Jingsong, SHENG Rongrong. Redundancy analysis of half-through tied arch bridge [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2018, 37(7): 1
- [18] 吴庆雄, 余印根, 陈宝春. 下承式钢管混凝土刚架系杆拱桥吊杆断裂动力分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(15): 144
WU Qingxiong, YU Yingen, CHEN Baochun. Dynamic analysis for cable loss of a rigid-frame tied through concrete-filled steel tubular arch bridge[J]. Journal of Vibration and Shock, 2014, 33(15): 144
- [19] 吴庆雄, 罗健平, 魏小康, 等. 考虑吊杆断裂过程的下承式钢管混凝土拱桥动力分析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2023, 51(3): 409
WU Qingxiong, LUO Jianping, WEI Xiaokang, et al. Dynamic analysis of through concrete filled steel tubular arch bridges considering the dynamic effect of suspenders fracture[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2023, 51(3): 409
- [20] 吴庆雄, 郑樵风, 尹永胜, 等. 考虑吊杆断裂的拱梁组合桥动力响应分析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 835
WU Qingxiong, ZHENG Qiaofeng, YIN Yongsheng, et al. Dynamic response analysis of arch-girder combined bridge considering the dynamic effect of suspenders fracture [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2023, 51(6): 835
- [21] 吴庆雄, 罗健平, 陈康明, 等. 吊杆断裂破坏安全极限状态下中、下承式拱桥悬吊桥面系简化计算方法[J]. 土木工程学报, 2024, 57(10): 57
WU Qingxiong, LUO Jianping, CHEN Kangming, et al. Simplified calculation method for suspension on bridge deck system of half-through and through arch bridge under safety limit condition of suspender fracture[J]. China Civil Engineering Journal, 2024, 57(10): 57
- [22] 陈康明, 吴庆雄, 罗健平, 等. 考虑吊杆断裂动力作用的钢管混凝土拱桥等效静力计算方法[J]. 土木工程学报, 2023, 56(6): 63
CHEN Kangming, WU Qingxiong, LUO Jianping, et al. Equivalent static calculation method for concrete-filled steel tubular arch bridges considering dynamic effect of hanger fracture [J]. China Civil Engineering Journal, 2023, 56(6): 63
- [23] 聂尚杰, 王铖铖, 刘琪, 等. 基于强健性的大跨径钢管混凝土刚架系杆拱桥设计[J]. 桥梁建设, 2023, 53(增刊1): 91
NIE Shangjie, WANG Chengcheng, LIU Qi, et al. Design of long-span concrete-filled steel tubular rigid frame tied arch bridge based on robustness[J]. Bridge Construction, 2023, 53(Sup. 1): 91
- [24] 余印根. 中、下承式拱桥悬吊桥面系强健性研究[D]. 福州: 福州大学, 2015
YU Yingen. Study on robustness of suspended floor system in half-through and through arch bridges[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2015
- [25] 聂琮. 基于拆除构件法对钢框架连续倒塌动力放大系数的研究[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2018, 32(3): 48
NIE Cong. Study on dynamic increase factor of steel frame progressive collapse based on alternate path method [J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 32(3): 48
- [26] United States General Services Administration. Progressive collapse analysis and design guidelines for new federal office buildings and major modernization projects [S]. Washington DC: General Services Administration, 2003
- [27] 范冰冰, 陈宝春, 吴庆雄. 考虑强健性的中、下承式拱桥技术状况评定[J]. 桥梁建设, 2018, 48(5): 64
FAN Binghui, CHEN Baochun, WU Qingxiong. Technical condition evaluation of half-through and through arch bridges considering robustness[J]. Bridge Construction, 2018, 48(5): 64
- [28] 余印根. 断索作用下悬吊桥面系结构动力响应试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, 19(6): 88
YU Yingen. Experiment study on the dynamic responses for a suspended floor system with broken hangers [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2021, 19(6): 88
- [29] 范冰冰. 下承式拉索系杆拱桥考虑强健性的断索效应计算与技术状况评定方法[D]. 福州: 福州大学, 2019
FAN Binghui. Calculation and technical condition evaluation method for cable breakage effect considering robustness of through type cable-stayed tied arch bridges[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2019
- [30] 蔡建国, 朱奕锋, 江超, 等. 基于应力比值法的张弦结构动力放大系数研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(1): 116
CAI Jianguo, ZHU Yifeng, JIANG Chao, et al. Research on dynamic amplification factor of tension string structure based on stress ratio method [J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(1): 116