

悬索桥吊索断裂动力响应分析的有限元模拟方法研究

邱文亮, 吴广润[†]

(大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要:为精确模拟吊索断裂动力过程,基于拆除构件法,对模拟悬索桥断索动力过程的数值方法展开研究.以某自锚式悬索桥为工程背景,详述了三种悬索桥吊索断裂动力过程模拟方法(瞬时刚度退化法、瞬时加载法、等效卸载法)的机理和特点,并对影响结构断索动力响应的因素展开分析.研究表明:采用瞬时刚度退化法模拟悬索桥吊索断裂动力过程简单有效;悬索桥断索后结构的动力响应与限元分析模型中是否包含失效吊索单元、断索持续时间、断索过程中吊索拉力损失变化关系以及断索工况等因素密切相关.

关键词:悬索桥;断索;动力分析;数值模拟;拆除构件法;影响因素

中图分类号:U448.25

文献标志码:A

Research on Simulation Method of Dynamic Response Analysis for Suspension Bridges Subjected to Hanger-breakage Events

QIU Wenliang, WU Guangrun[†]

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

Abstract: In order to accurately simulate the dynamic process of the cable rupture event, based on the alternate load path (ALP) method, the numerical simulation methods for dynamic analysis of suspension bridges subjected to hanger-breakage event are studied. Taking a prototype self-anchored suspension bridge as the background, the basic principles and characteristics of three methods (e.g., the instantaneous stiffness degradation method, the instantaneous loading method and the equivalent unloading method) are illustrated. In addition, the influencing factors on structural dynamic effect of the collapse responses are quantitatively analyzed. The results indicate that the instantaneous stiffness degradation method is simple and effective to simulate the dynamic process of the hanger-breakage event. The hanger loss induced dynamic responses are closely associated with the influencing factors, such as the broken hanger elements in the finite element model, the duration and time-dependent tension loss function of the breakage process, and hanger loss scenarios.

Key words: suspension bridge; cable rupture; dynamic analysis; numerical simulation; alternate load path method; influencing factors

* 收稿日期:2020-09-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778108), National Natural Science Foundation of China(51778108)

作者简介:邱文亮(1971—),男,吉林蛟河人,大连理工大学教授,博士

[†] 通信联系人, E-mail: wuguangrun@outlook.com

拉、吊索是缆索承重桥(斜拉桥、悬索桥以及中下承式拱桥)中最重要的承重构件,其基本力学性能和耐久性能对结构安全和正常使用产生巨大影响。拉、吊索通常设计有防护措施,具有较高的安全系数,但是桥梁在长期服役期间,拉、吊索出现病害进行维修更换的案例层出不穷,极端荷载作用下桥梁发生断索的报道也屡见不鲜^[1]。例如,2011年10月,印度尼西亚 Kutai Kartanegara 悬索桥一根吊索断裂引发吊索连续断裂,最后结构整体倒塌^[2]。事故发生时工人正在对吊索进行维护保养,造成11人死亡、30多人失踪。2019年10月,台湾宜兰县南方澳大桥一根吊索断裂,引发结构剧烈振动和相邻吊索连续断裂,最后主梁整体崩塌^[3]。缆索承重桥拉、吊索突然断裂后剩余结构的内力、变形和刚度将重分配,同时产生显著的动力效应。合理地分析断索事故对桥梁结构服役性能的影响,首先需要对断索动力过程进行准确模拟。

现有规范针对桥梁断索计算仅给出指导性规定,如美国后张法预应力协会(Post-Tensioning Institute, PTI)给出两种断索分析方法:一种是拟动力分析方法,该方法采用静力分析方法加上1个2.0的动力放大系数;另一种是动力分析方法。国内已有研究发现,在拟动力分析中桥梁不同构件和截面使用相同动力放大系数不合理,动力分析计算出的结构断索响应更能反映真实情况^[4-8]。吴庆雄等^[9]通过接触碰撞和单元删除的方式进行了拱桥吊杆断裂过程动力分析。曲兆乐等^[10]对比了全动力分析方法和半动力分析方法两种模拟斜拉桥拉索断裂失效动力过程方法的特点。悬索桥与斜拉桥、拱桥的结构形式不同,在断索动力分析中主缆振动和吊索冲击作用均起到重要作用,断索造成悬索桥连续倒塌及结构破坏机理也不同。此外,悬索桥断索分析中涉及吊索断裂模拟方式和影响结构动力响应的因素也有待进一步探究。

基于拆除构件法,本文详述了瞬时刚度退化法、瞬时加载法以及等效卸载法,3种模拟吊索断裂动力过程的基本原理。以某自锚式混凝土悬索桥为工程背景,采用有限元软件 ABAQUS 建立了全桥模型,对悬索桥断索动力分析方法和影响因素展开研究。

1 悬索桥断索动力分析方法

拆除构件法又称为变换荷载传递路径法,广泛应用于建筑结构构件失效和连续倒塌分析^[11-12]。该方

法不考虑构件破坏原因,只关注构件失效后剩余结构响应。桥梁断索后结构的初始响应由几何突变后构件振动引起,基于拆除构件法悬索桥断索有限元动力分析可以采用刚度退化法、瞬时加载法和等效卸载法。

1.1 刚度退化法

悬索桥是多自由度体系结构,其基本动力学平衡方程为:

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{X}} + \mathbf{C}(t) \cdot \dot{\mathbf{X}} + \mathbf{K}(t) \cdot \mathbf{X} = \mathbf{P}(t) \quad (1)$$

式中: \mathbf{M} 为结构质量矩阵; \mathbf{X} 为结构位移矩阵; $\mathbf{C}(t)$ 为结构阻尼矩阵,分析中采用线性瑞利阻尼; $\mathbf{K}(t)$ 为结构总刚度矩阵,构件失效会导致 $\mathbf{K}(t)$ 改变; $\mathbf{P}(t)$ 为施加在结构上的荷载矩阵。如图1所示,破断拉索从开始失去内力到完全失去承载力所经历的时间定义为断索持续时间 Δt 。

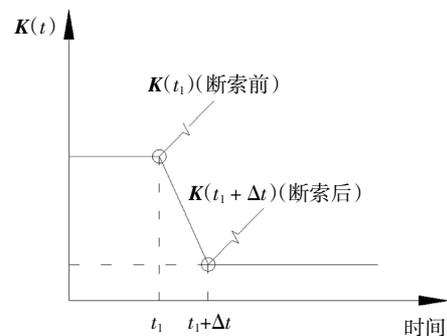


图 1 结构整体刚度矩阵随时间变化

Fig.1 Change of structural stiffness during the cable rupture process

在有限元分析中,通过瞬时刚度退化法进行吊索断裂模拟有两种方式:一种是移除失效吊索;另一种是改变失效吊索刚度。无论采取哪种方式均能改变结构总刚度矩阵,使断裂吊索的内力转变成惯性力施加于剩余结构上,进而引起结构产生动力响应。

1.2 瞬时加载法和等效卸载法

与刚度退化法模拟吊索断裂过程的机理不同,改变结构动力学平衡方程中荷载矩阵也可以模拟断索动力过程。通过施加动荷载来进行悬索桥断索动力分析有两种方式^[6]:一种是断裂吊索依然保留在结构上的突加荷载法,如图2(a)所示;另一种是移除断裂吊索的等效荷载卸载法,如图2(b)所示。

采用突加荷载法模拟吊索断裂,首先在失效吊索两端施加一对随时间变化的拉力,记为 $F_1(t)$,如图3(a)所示。由于失效吊索仍保留在分析模型中,其拉力会随着 $F_1(t)$ 的增长而增加,直至结构达到平衡状态,此时吊索拉力等于所施加外力。采用等效荷载

卸载模式模拟吊索断裂,首先需要移除吊索,同时在移除吊索两端施加一对与拉索内力大小相等方向相反的拉力,记为 $F_2(t)$,如图 3(b)所示. 等结构振动稳定后再将 $F_2(t)$ 减小为 0.

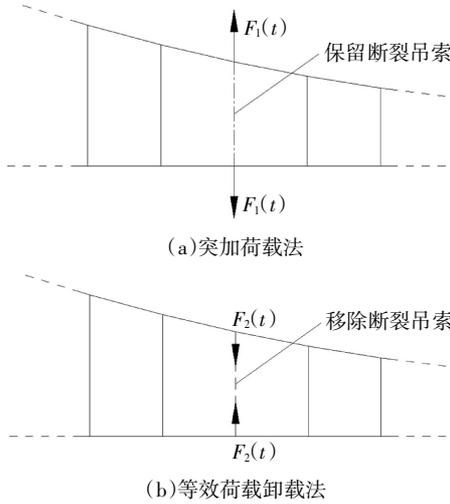


图 2 突加荷载法和等效荷载卸载法
Fig.2 Demonstration of the instantaneously loading method and unloading equivalent force method

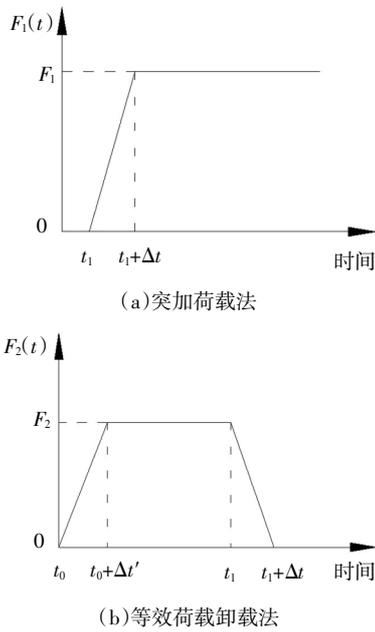


图 3 施加荷载时程曲线
Fig.3 Time-history curves of the applied load

悬索桥进行断索动力分析时主缆振动的影响不可忽略,而断索前主缆初始状态直接影响断索后主缆振动. 瞬时加载法和等效卸载法两种模式有各自的优点和局限性. 瞬时加载法在全桥计算模型上保留了失效吊索,可以较真实地反映断索前的状态,但

有限元模型中包含了断索后结构中并不存在的单元,并且确定 F_1 需要多次迭代. 等效荷载卸载法在断索分析时删除了失效吊索,可以更好地捕获断裂后的结构状态.

1.3 断索动力响应的影响因素

悬索桥吊索断裂引起结构响应的动力效应与 Δt 密切相关,从结构动力学基本知识可推断,断索后结构最大动力响应会随着 Δt 增大而减小. 吊索断裂伴随着复杂的机械作用和内力重分配,引起吊索断裂的原因不同(例如锈蚀、火灾、车辆撞击和爆炸),吊索断裂过程中其拉力随时间变化会有极大差异. 吊索可能会在很短的时间内发生断裂,吊索承载力会在瞬间丧失,吊索断裂也可能是一个逐渐损失承载力的过程. 为了描述断索过程中吊索拉力随时间变化的关系,假定吊索断裂独立于其诱发原因,通过 Δt 和吊索拉力损失函数 $l_{rel}(t)$ 描述吊索断裂的不确定性^[13]. 吊索拉力损失函数采用幂指数函数,数学表达式为:

$$l_{rel}(t) = \left(\frac{t - t_0}{\Delta t} \right)^\alpha, t_0 \leq t \leq t_0 + \Delta t \quad (2)$$

式中: α 为损失函数指数因子. 相同 Δt 内吊索不同模式的断裂过程可通过改变 α 实现,如图 4 所示. 当 $\alpha = 1$ 时,吊索内力损失函数为线性关系,内部钢丝在 Δt 内均匀地发生断裂.

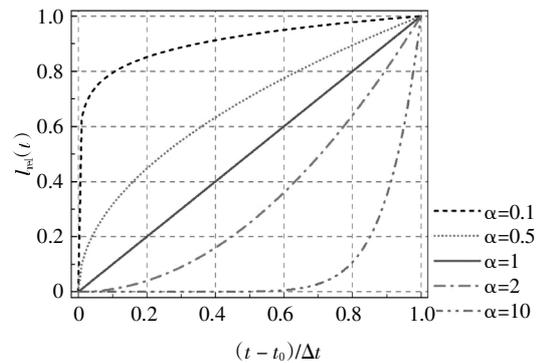


图 4 断裂吊索拉力损失函数
Fig.4 Tension loss function of the failed hanger

采用上述假定,失效拉索内力变化关系为:

$$F_i(t) = E(t_0)A[1 - l_{rel}(t)] = E(t_0)A \left[1 - \left(\frac{t - t_0}{\Delta t} \right)^\alpha \right] \quad (3)$$

式中: $E(t_0)$ 为拉索弹性模量; A 为拉索面积.

已有桥梁断索案例表明,断裂吊索的破断位置存在很大的不确定性,统计数据表明^[14]: 大部分拉、吊

索断裂部分集中在锚固区根部, 少部分断裂位置集中在索体. 采用刚度退化法进行断索分析时设定两种工况: 工况 1 表示失效吊索单元全部删除; 工况 2 表示只将断裂部位的吊索单元删除. 为了考虑同一根吊索断裂位置对断索后动力响应的影响, 工况 2 划分为 3 种情形, 如图 5 所示.

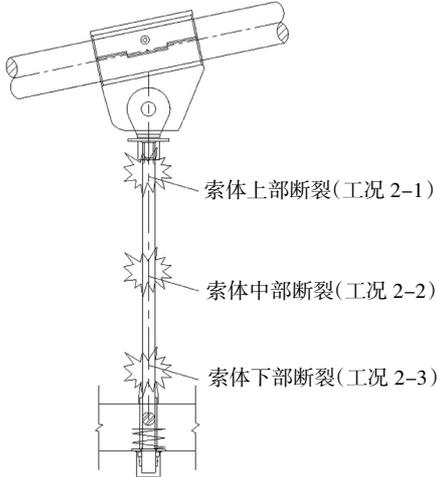


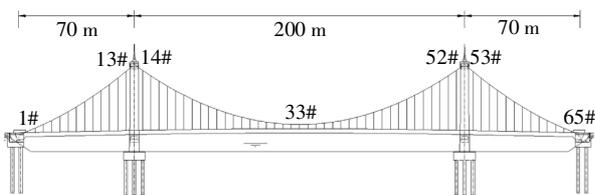
图 5 吊索破断位置

Fig.5 Failure position of the hanger

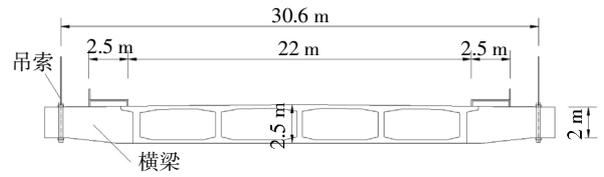
2 工程背景及有限元简介

2.1 工程概况

选取某自锚式混凝土悬索桥为工程背景, 该桥总宽度为 27 m, 计算跨径为 70 m + 200 m + 70 m, 如图 6(a)所示. 桥塔为“门”式钢筋混凝土框架结构, 索塔高 54.5 m, 宽 30.6 m. 主缆对称布置, 主跨矢跨比为 1 : 5.5, 边跨矢跨比为 1 : 15.7, 吊索间距为 5 m, 全桥共 130 根. 主缆由 32 根 169φ5.2 mm 预制平行钢丝索编排而成, 吊索由 127φ5.2 mm 平行高强镀锌钢丝组成. 主梁采用混凝土箱梁, 单箱 4 室如图 6(b)所示. 梁高 2.5 m, 顶板厚 0.23 m, 底板厚 0.22 m, 中腹板厚 0.35 m, 边腹板厚 0.45 m. 主缆和吊索采用高强镀锌钢丝, 极限强度为 1 670 MPa, 弹性模量为 2×10^5 MPa. 主梁和桥塔采用 C50 混凝土, 轴心抗压强度标准值为 35 MPa, 轴心抗拉强度标准值为 3 MPa.



(a)整体布置



(b)主梁截面构造

图 6 某混凝土自锚式悬索桥

Fig.6 Geometry of a typical self-anchored suspension bridge

2.2 有限元模型

全桥有限元空间模型采用 ABAQUS2016 建立, 如图 7 所示. 主梁、横梁以及桥塔采用空间梁单元模拟, 可考虑扭转质量和扭转刚度. 主缆和吊索使用桁架单元模拟, 可考虑缆索张力对其弯曲刚度的影响. 为了更精确地计算主缆线形和考虑主缆局部振动影响, 两个吊索之间主缆划分为 4 个单元. 吊索夹具使用质量单元建模, 质量集中在夹具所在主缆节点上. 考虑到索塔的群桩基础对断索分析影响极小, 模型中索塔底部采用固结约束. 依据梁底布置的支座类型, 主梁通过限制自由度来施加边界约束. 分析模型基频为 0.41 Hz, 振型特征是主梁一阶对称竖向弯曲, 分析模型一阶扭转频率为 1.01 Hz.

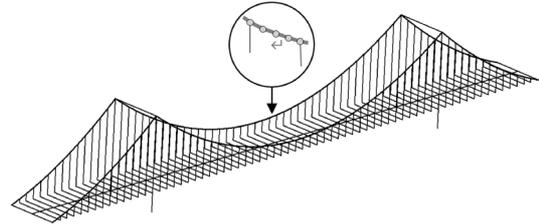


图 7 全桥有限元空间模型

Fig.7 Three-dimensional finite element (FE) model of the bridge

2.3 荷载和断索工况

本研究中悬索桥进行断索动力分析, 主要关注断索后结构动力响应, 因此仅考虑结构恒荷载. 加劲梁、桥塔、主缆和吊索的自重是通过将其横截面积乘以密度自动算出. 桥面上二期铺装和附属物的荷载集度为 108 kN/m, 主缆上保护层的荷载集度为 0.37 kN/m. 1~9 号、57~65 号吊索夹具重量为 12 kN, 10~17 号、49~56 号吊索夹具重量为 16 kN, 18~48 号吊索夹具重量为 10 kN.

公路桥涵设计通用规范(JTG D60—2015)规定, 悬索桥任何一根吊索的断裂都不应引起结构整体坍塌. 近代悬索桥相邻吊索的间距一般不大, 在卡车碰撞和爆炸等极限情况下存在多根吊索同时断裂的可

能^[15-16]. 本文考虑单根吊索和单边两根相邻吊索同时断裂两种极限情况. 为简化分析将桥梁结构划分为5个区域,如图8所示,各区域分别选取单根吊索和单边相邻两根吊索进行断索动力分析.

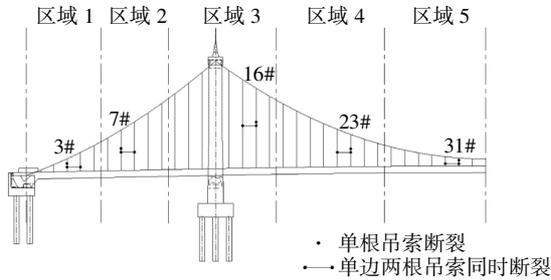


图8 断索工况

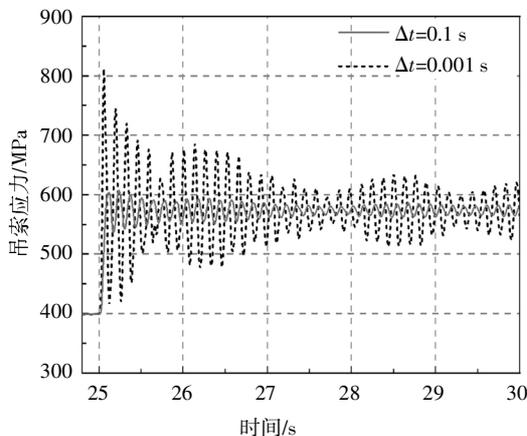
Fig.8 Hanger-loss scenarios

3 分析结果

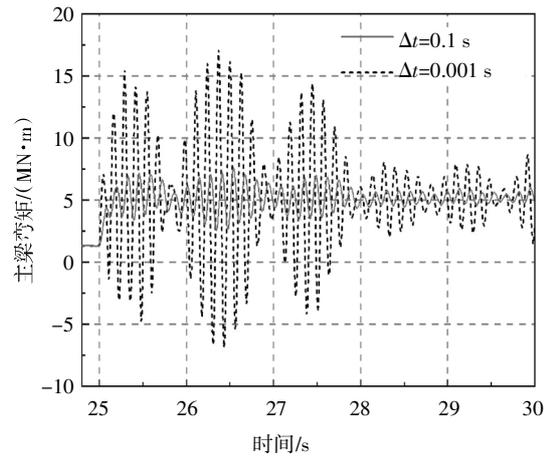
3.1 结构的断索时程响应分析

基于刚度退化法,将失效吊索单元完全删除(工况1),图9给出了7号吊索断裂后结构动力响应时程曲线.从结果可以看出, Δt 取0.001 s吊索瞬间断裂后结构响应剧烈波动, Δt 取0.1 s断索后结构动力响应极值显著下降.如图9(a)所示,7号吊索瞬间断裂,相邻的6号吊索应力最大值为826 MPa,达到了其初始值的2.11倍, Δt 取0.1 s时6号吊索应力最大值下降607 MPa.如图9(b)所示,7号吊索瞬间断裂后主梁弯矩最大值为17.2 MN·m, Δt 取0.1 s主梁弯矩最大值下降7.6 MN·m.如图9(c)所示,7号吊索瞬间断裂后主梁扭矩最大值为31.9 MN·m, Δt 取0.1 s主梁扭矩最大值下降16.5 MN·m.

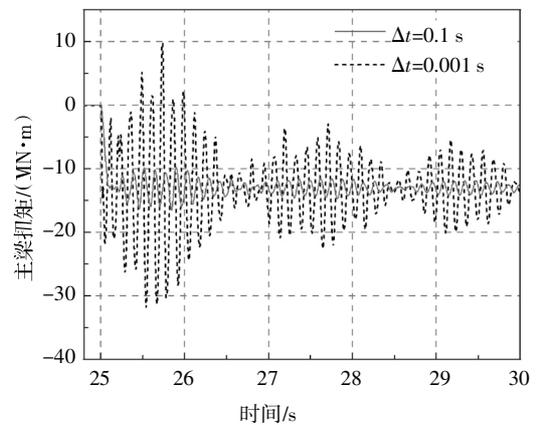
Δt 取0.001 s,采用刚度退化法模拟7号吊索分别在工况1和工况2情况下断裂,表1给出了结构动力响应极值.结果表明,采用刚度退化法模拟断索



(a)6号吊索应力



(b)断索位置处主梁弯矩



(c)断索位置处主梁扭矩

图9 7号吊索断裂后结构动力响应时程曲线

Fig.9 Time-history curves of structural dynamic responses subjected to the breakage of hanger 7

时,吊索单元是否全部删除会影响结构断索动力响应,通过删除吊索断裂部位处单元模拟断索时同一吊索断裂位置对动力响应影响不明显.如表1所示,工况2-1、工况2-2、工况2-3下结构断索动力响应极值基本相同,工况2下吊索应力最大值在比工况1下的结果下降了约5%,主梁弯矩最大值增加了约5.8%,主梁扭矩最大值增加了约28.4%.

表1 7号吊索在不同断索工况下结构动力响应极值

Tab.1 Structural maximum responses subjected to the sudden breakage of hanger 7 with different scenarios

工况	6号吊索应力/MPa	主梁弯矩/(MN·m)	主梁扭矩/(MN·m)
1	826	17.2	31.9
2-1	789	18.3	39.7
2-2	787	18.6	40.7
2-3	784	18.2	40.1

Δt 取 0.001 s, 采用突加荷载法和等效卸载法模拟 7 号吊索断裂, 图 10 给出了断索后结构动力响应时程曲线. 从图 10 中可以看出, 突加荷载法计算出的吊索应力和主梁扭矩极值大于等效卸载法计算结果, 突加荷载法计算出的主梁弯矩最大值小于等效卸载法计算结果. 如图 10 所示, 采用突加荷载法和

等效卸载法计算出的吊索应力最大值分别为 952 MPa 和 826 MPa, 主梁弯矩最大值分别为 11.3 MN·m 和 17.2 MN·m, 主梁扭矩分别为 39.2 MN·m 和 31.9 MN·m. 结合表 1 可以看出, 等效卸载法与刚度退化法(工况 1)计算结果相同.

3.2 Δt 和 $I_{rel}(t)$ 对结构响应动力效应的影响

为定量描述 Δt 对结构响应动力效应的影响, 定义动力放大系数(η), 数学表达式为:

$$\eta = \left| \frac{S_d - S_0}{S_s - S_0} \right| \quad (4)$$

式中: S_0 表示断索前所关注构件内力(应力、剪力、弯矩或位移); S_d 表示断索后构件动力响应极值; S_s 表示断索后结构处于稳定状态时构件内力.

在敏感性分析中, 设定 Δt 位于 0.001 s 和 10 s 之间. 采用刚度退化法(工况 1)模拟 7 号吊索断裂, 图 11 给出了断索持续时间与结构响应(相邻吊索应力、断索位置处主梁弯矩和扭矩)动力放大系数之间的关系. 可以看出, 动力放大系数随 Δt 的增大而减小. 相应的曲线变化规律可以划分为 3 个阶段: $\Delta t < 0.01$ s (1/240 的结构振动基本周期) 时, η 的数值达到最大且几乎保持不变, 结构响应的动力效应达到最大; Δt 从 0.01 s 增加到 1 s 时, η 急剧下降, 结构响应动力效应随之减弱; Δt 大于 >1 s (2/5 的结构振动基本周期) 时, η 逐渐接近于 1, 此时可忽略结构响应的动力效应.

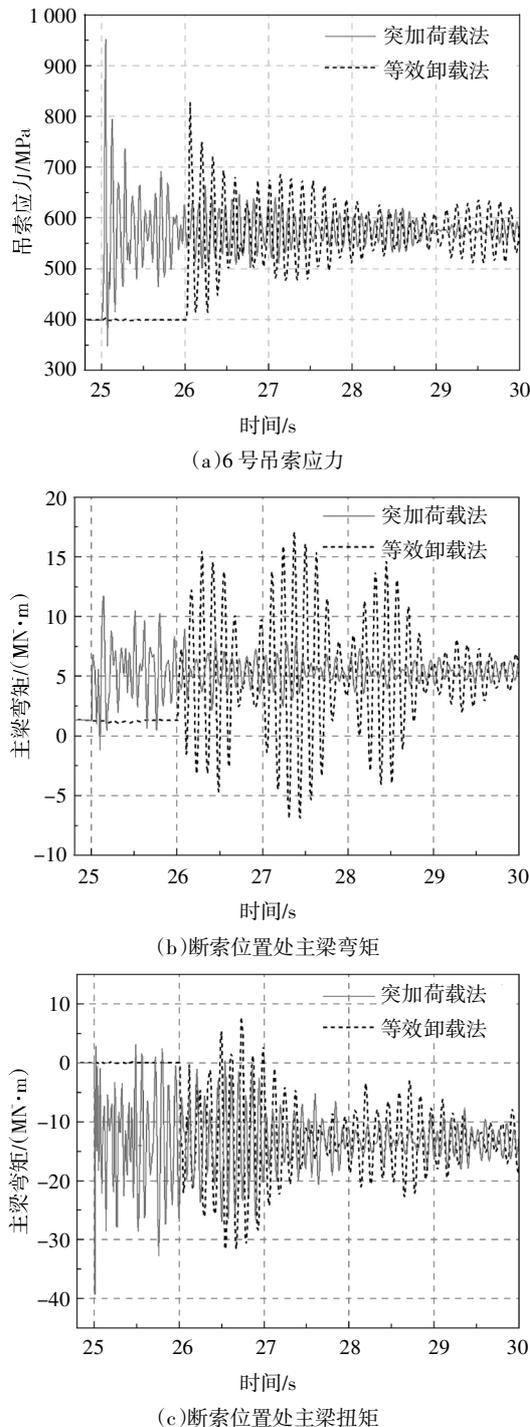


图 10 7 号吊索瞬间断裂后结构动力响应时程曲线
Fig.10 Time-history curves of structural dynamic responses subjected to the sudden breakage of hanger 7

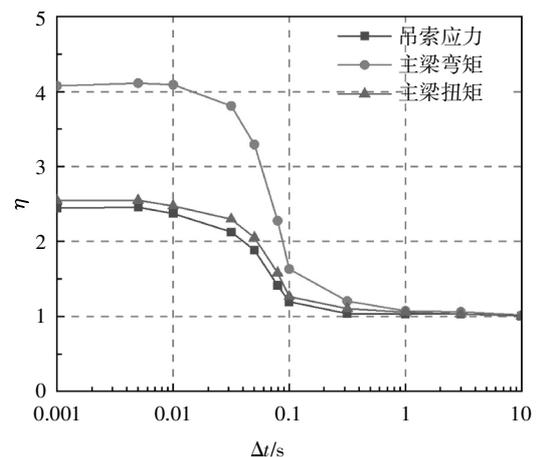
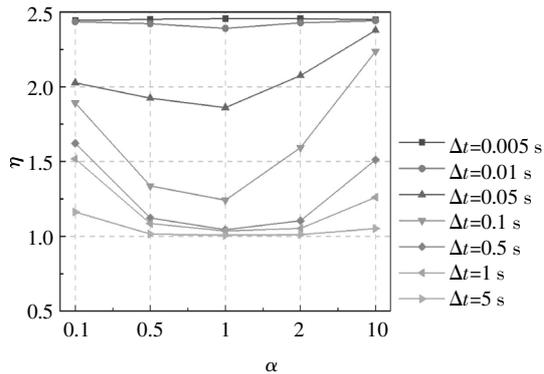


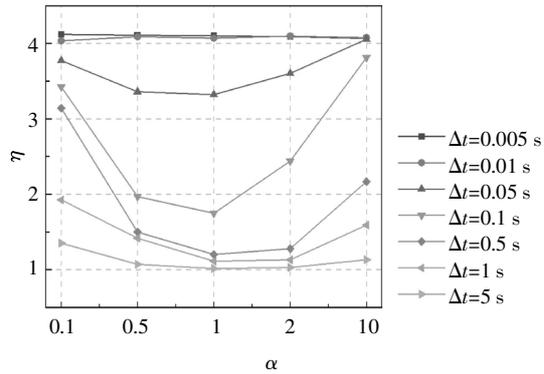
图 11 断索持续时间与动力放大系数的关系
Fig.11 Relation between Δt and DAF

采用等效卸载法模拟 7 号吊索断裂, 图 12 给出了吊索拉力损失函数指数因子与结构响应动力放大系数之间的关系. 从图 12 可以看出, 损失函数指数因子 α 显著影响结构断索响应动力效应, 并且影响程度与 Δt 密切相关. α 取 1 时, 结构断索响应的动

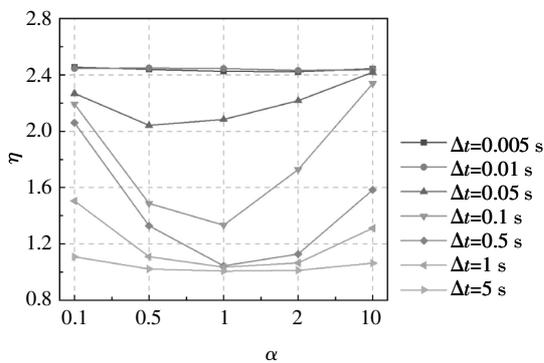
力效应最小. 结构 $\Delta t < 0.01$ s 时, α 对结构断索响应动力放大系数几乎没有影响; Δt 在 0.01~0.1 s 之间时, α 对结构断索响应动力放大系数影响程度逐渐增强; 当 Δt 从 0.1 s 增加到 5 s 时, α 对结构断索响应动力放大系数影响程度逐渐减弱. 如图 12 所示, Δt 取 0.1 s 时, 随着 α 从 0.01 增加到 10, 吊索应力 η 先从 1.89 减小到 1.24, 再增加到 2.24, 主梁弯矩 η 从 3.42 减小到 1.75, 随后增加到 3.81, 主梁扭矩 η 先从 2.19 减小到 1.33, 再增加到 2.34.



(a) 6号吊索应力动力放大系数



(b) 断索位置处主梁弯矩动力放大系数



(c) 断索位置处主梁扭矩动力放大系数

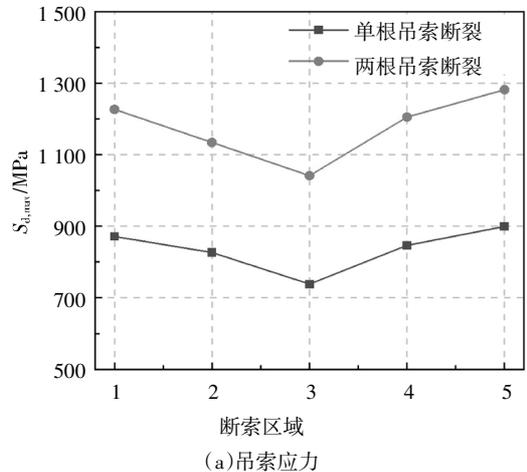
图 12 吊索拉力损失函数指数因子与动力放大系数关系

Fig.12 Relation between α and η

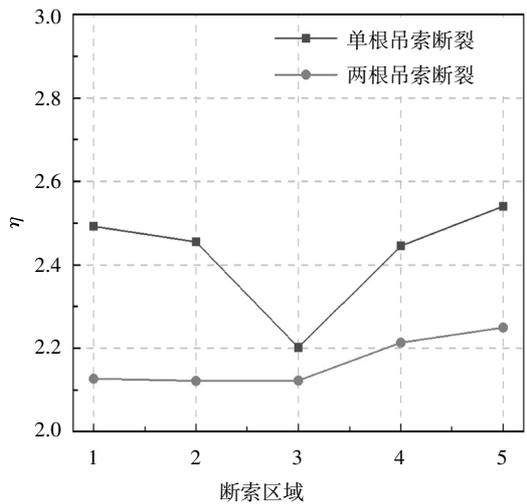
3.3 吊索断裂位置和根数对断索动力响应的影响

依据图 8 中划分的工况, 图 13~图 15 给出了吊

索断裂位置和根数对结构动力响应的影响. 图 13 给出了不同位置单根吊索以及单边相邻两根吊索瞬间断裂后, 剩余吊索应力最大值和动力放大系数. 结果表明, 长吊索(区域 3 位置处吊索)应力最大值小于短吊索(区域 1 或区域 5 位置处吊索)应力最大值. 两根吊索同时断裂比单根吊索断裂引起的吊索动力响应最大值有大幅度增长, 但对应的动力放大系数有所下降. 如图 13(a)所示, 单根吊索断裂后吊索应力最大值为 738~900 MPa, 单边相邻两根吊索同时断裂后, 剩余吊索应力最大值为 1 041~1 271 MPa. 如图 13(b)所示, 单根吊索断裂引起吊索应力动力放大系数为 2.2~2.55, 两根吊索同时断裂引起吊索应力放大系数为 2.12~2.25.



(a) 吊索应力



(b) 动力放大系数

图 13 断索根数和位置对吊索应力影响

Fig.13 Relation between the number and location of the failed hanger the dynamic response of hangers' tensile stress

图 14 为不同位置单根吊索以及单边相邻两根吊索瞬间断裂后, 主梁弯矩极值和动力放大系数. 结

果表明,断索引起主梁弯矩动力放大系数波动剧烈,边跨跨中(区域 2)和中跨跨中(区域 5 处)位置处的吊索断裂后主梁弯矩较大.如图 14(a)所示,区域 2 位置处,单根和两根吊索瞬间断裂引起的主梁弯矩极值分别为 17.2 MN·m 和 18.6 MN·m.区域 5 位置处,单根和两根吊索瞬间断裂引起的主梁弯矩极值分别为 16.6 MN·m 和 32.3 MN·m.如图 14(b)所示,单根吊索断裂后主梁弯矩动力放大系数在 2.24~4.16 之间,两根吊索后主梁弯矩动力放大系数处于 1.65~3.02 之间.

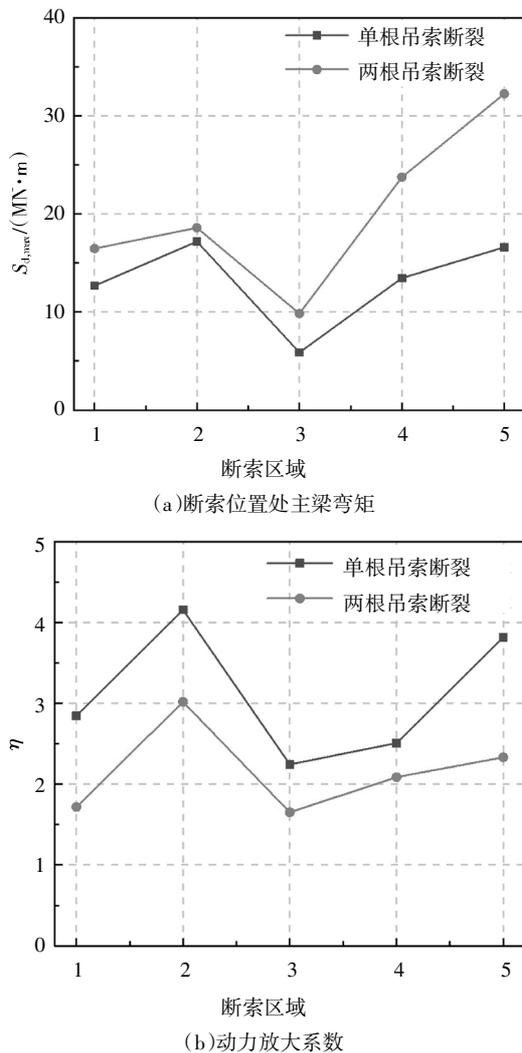


图 14 断索根数和位置对主梁弯矩影响

Fig.14 Relation between the number and location of the failed hanger and the dynamic response of girder's bending moment

图 15 为不同位置单根吊索以及单边相邻两根吊索瞬间断裂后主梁扭矩极值和动力放大系数.结果表明,断索引起的主梁扭矩不可忽视,两根吊索同时断裂比单根吊索断裂引起的主梁扭矩最大值有大幅度增长.如图 15(a)所示,单根吊索断裂后主梁最

大弯矩为 25.9~31.9 MN·m,两根吊索同时断裂后主梁最大弯矩为 47.9~62.1 MN·m.如图 15(b)所示,单根吊索断裂后主梁扭矩动力放大系数为 2.02~2.43 之间,两根吊索同时断裂后主梁弯矩动力放大系数为 1.86~2.37 之间.

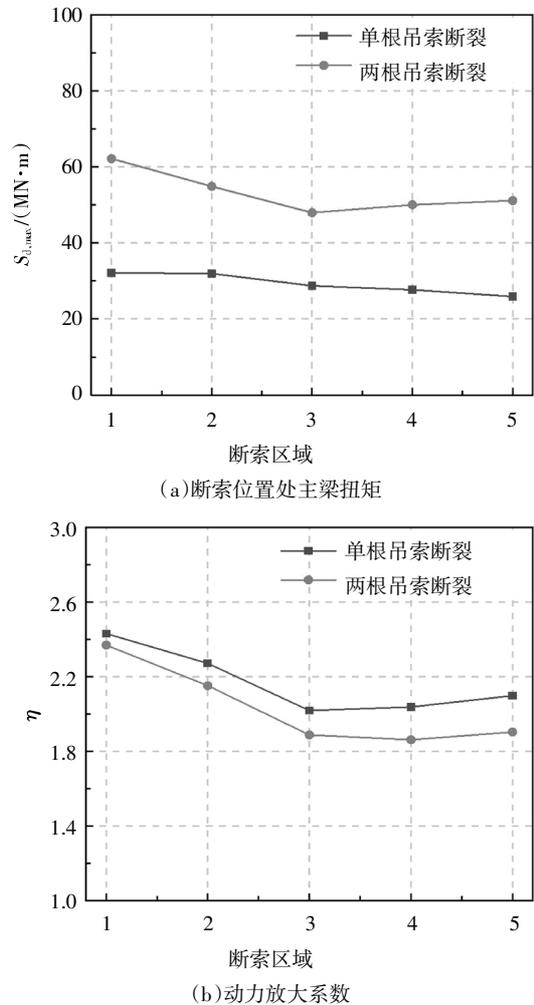


图 15 断索根数和位置对主梁扭矩影响

Fig.15 Relation between the number and location of the failed hanger and the girder's torsional moment

4 结论

通过对悬索桥断索动力分析的有限元模拟方法展开研究,得到以下结论:

1)刚度退化法、突加荷载法和等效卸载法 3 种模拟悬索桥吊索断裂过程的方法,每种方法都有其优点和局限性.进行悬索桥断索动力分析时,刚度退化法简单有效;等效卸载法既可真实反映断索前的结构状态,又可较好地捕获断索后结构响应;突加荷载法施加的外荷载需要多次迭代确定,分析模型中存在的断裂吊索对计算结果有一定影响.

2) 悬索桥断索响应动力效应与 Δt 以及 $l_{rel}(t)$ 密切相关。 α 取 1, 吊索拉力损失函数是线性关系, 结构断索响应动态效应最小。 $\alpha < 1$ 时, 结构断索响应的动态效应最小值随着 α 增加而减小。 $\alpha > 1$ 时, 结构断索响应的动态效应最小值随着 α 的增加而增加。吊索拉力损失函数为线性关系, $\Delta t < 0.01$ s (1/240 的结构振动基本周期) 时, 结构断索响应的动态效应达到最大且趋于稳定, $\Delta t > 1$ s (2/5 的结构振动基本周期) 时, 结构响应的动态效应可忽略不计。

3) 同一吊索断裂位置对结构动力响应的极值几乎没有影响, 不同吊索断索位置和根数显著影响悬索桥的动力响应。单边相邻两根吊索同时断裂比单根吊索断裂引起的结构动力响应更加剧烈, 但对应的结构响应动力放大系数有所降低。

参考文献

- [1] 刘扬, 汪勤用, 鲁乃唯. 考虑拉索抗力退化的斜拉桥体系可靠度评估[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(9): 83—91.
LIU Y, WANG Q Y, LU N W. System reliability assessment of cable-stayed bridges considering cable resistance degradation [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(9): 83—91. (In Chinese)
- [2] KAWAI Y, SIRINGORINGO D, FUJINO Y. Failure analysis of the hanger clamps of the kutai-kartanegara bridge from the fracture mechanics viewpoint[J]. Journal of JSCE, 2014, 2(1): 1—6.
- [3] 罗婉玉. 历史桥梁以建筑咨询模型探讨防灾管理维护之研究[D]. 台北: 中国科技大学, 2020: 3.
LUO W Y. The study of disaster prevention and maintenance management by building information model of historical bridge [D]. Taipei: China University of Technology, 2020: 3. (In Chinese)
- [4] 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.
- [5] QIU W L, JIANG M, ZHANG Z. Responses of self-anchored suspension bridge to sudden breakage of hangers [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2014, 50(2): 241—255.
- [6] ZHOU Y F, CHEN S R. Time-progressive dynamic assessment of abrupt cable-breakage events on cable-stayed bridges [J]. Journal of Bridge Engineering, 2014, 19(2): 159—171.
- [7] WU G R, QIU W L, WU T. Nonlinear dynamic analysis of the self-anchored suspension bridge subjected to sudden breakage of a hanger[J]. Engineering Failure Analysis, 2019, 97: 701—717.
- [8] 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 R L, FANG K, GUAN K. Robustness analysis of self-anchored suspension bridge with loss of a single sling[J]. Bridge Construction, 2014, 44(6): 35—39. (In Chinese)
- [9] 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—149.
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—149. (In Chinese)
- [10] 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.
QU Z L, SHI X F, LI X X, et al. Research on dynamic simulation methodology for cable loss of cable-stayed bridges [J]. Structural Engineers, 2009, 25(6): 89—92. (In Chinese)
- [11] 蔡建国, 王峰岚, 冯健, 等. 大跨空间结构连续倒塌分析若干问题探讨[J]. 工程力学, 2012, 29(3): 143—149.
CAI J G, WANG F L, FENG J, et al. Discussion on the progressive collapse analysis of long-span space structures [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(3): 143—149. (In Chinese)
- [12] 周云, 张琴, 胡翔, 等. 基于拆除构件法的全装配式框架结构连续倒塌分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(5): 1—13.
ZHOU Y, ZHANG Q, HU X, et al. Progressive collapse analysis of fully assembled precast concrete frame structures based on column removal method [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(5): 1—13. (In Chinese)
- [13] 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.
- [14] 杨世聪. 桥梁拉索腐蚀-疲劳问题及服役可靠性[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018: 2—5.
YANG S C. Research on the corrosion-fatigue problems and service reliability of the bridge cables and hangers [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018: 2—5. (In Chinese)
- [15] 公路悬索桥设计规范: TG/T D65-05—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
Specification for design of highway suspension bridges: TG/T D65-05—2015 [S]. Beijing: People's Communications Press, 2015. (In Chinese)
- [16] SHOHIJAVAN M, STAROSSEK U. Structural robustness of long span cable-supported bridges in a cable-loss scenario [J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(2): 4017133.