

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.04.016

## 独塔单索面预应力斜拉桥爆破 拆除倒塌解体过程分析\*

黄小武<sup>1,2,3</sup>, 谢先启<sup>2,3</sup>, 陈德志<sup>2,3</sup>, 刘昌邦<sup>2,3</sup>, 伍岳<sup>2,3</sup>, 周祥磊<sup>4</sup>

(1. 武汉科技大学理学院, 武汉 430065; 2. 江汉大学精细爆破国家重点实验室, 武汉 430056;  
3. 武汉爆破有限公司, 武汉 430056; 4. 中钢集团武汉安全环保研究院有限公司, 武汉 430081)

**摘要:** 斜拉桥属于高次超静定结构体系,在爆破拆除失稳倒塌过程中动力响应特征复杂,相关技术及科学问题研究较少。为探索斜拉桥爆破拆除失稳倒塌力学机理,依托某独塔单索面预应力斜拉桥爆破拆除工程案例,借助动力学有限元程序 LS-DYNA 模拟了斜拉桥整体模型的失稳倒塌运动过程,重点分析了主塔、主梁、斜拉索三种基本构件的动力响应特征。研究表明:采用半波余弦函数形式的加载曲线作为重力荷载,有效避免了显式突加荷载对结构产生的震荡效应;主塔定向倒塌是斜拉桥失稳倒塌的核心,塔身运动过程符合爆破设计方案,总体呈现“首次下坐→缓慢偏转→二次下坐→加速偏转”四个阶段;斜拉索在随着主塔定向倒塌的过程中,斜拉索轴向动力响应复杂,应力起伏振荡频繁,应力峰峰值区间为 4.81~14.9 MPa;主梁在失稳倒塌过程中整体呈现“中间高、两头低”的姿态,最大位移差为 2.62 m,局部剪切破坏作用明显。主塔的可靠倒塌是斜拉桥成功爆破拆除的关键,主墩的短暂支撑作用有利于主梁充分破碎解体。

**关键词:** 预应力斜拉桥; 爆破拆除; 倒塌解体; 数值模拟

中图分类号: TU746.6 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2021)04-0108-07

## Analysis of Collapse and Disintegration Process of Prestressed Cable-stayed Bridge with Single Tower and Single Cable Plane by Demolition Blasting

HUANG Xiao-wu<sup>1,2,3</sup>, XIE Xian-qi<sup>2,3</sup>, CHEN De-zhi<sup>2,3</sup>, LIU Chang-bang<sup>2,3</sup>, WU Yue<sup>2,3</sup>, ZHOU Xiang-lei<sup>4</sup>

(1. College of Science, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China;

2. State Key Laboratory of Precision Blasting, Jiangnan University, Wuhan 430056, China;

3. Wuhan Explosions & Blasting Co., Ltd., Wuhan 430056, China; 4. SINOSTEEL Wuhan Safety & Environmental Protect Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430081, China)

**Abstract:** Cable-stayed bridge is a high-order statically indeterminate structure system. Dynamic response characteristics are complex in the instability and collapse process induced by blasting demolition, and there are few studies on related technical and scientific issues. In order to explore the mechanical mechanism of instability and collapse of cable-stayed bridge induced by blasting demolition, based on an actual engineering that prestressed cable-stayed bridge with single tower single cable plane induced by blasting demolition. Dynamic finite element program LS-DYNA is used to simulate the instability and collapse process of the whole cable-stayed bridge model, and the dynamic response characteristics of the main tower, main beam and stay cable were analyzed. Results show that using the loading curve in the form of half-wave cosine function as the gravity load can effectively avoid the shock effect of explicit sudden load on the structure. The directional collapse of the main tower is the core of the instability and collapse of the cable-stayed bridge. Movement process of the tower body conforms to the established blasting design scheme, and it generally presents four stages: first sitting→slow deflection→second sitting→accelerated deflection. In the process of

the directional collapse of the main tower, the axial dynamic response of the stay cable is complex, and the stress fluctuation oscillation is frequent. Peak value range of stress is 4.81 ~ 14.9 MPa. In the process of instability and collapse, the main beam shows the posture of "high in the middle and low in both ends". Maximum displacement difference is 2.62 m, and the local shear failure is obvious. Reliable collapse of the main tower is the key to the successful blasting demolition of the cable-stayed bridge. The short-term support of the main pier is conducive to the full crushing and disintegration of the main beam.

**Key words:** prestressed cable-stayed bridge; blasting demolition; collapse and disintegration; numerical simulation

拆除爆破是爆破工程的重要分支,相比人工、机械拆除方式,爆破拆除技术在一次性拆除高大建筑物、高耸构筑物和超长桥梁等对象时,其安全、高效、经济的优点尤为显著。近年来,国内外实施了多项不同结构类型桥梁的爆破拆除项目,有城市高架桥、跨江/河拱桥(梁桥)、钢结构桥和斜拉桥等等。例如,湖北省武汉3.5 km 沌阳高架桥(简支梁桥)、四川省简阳590.08 m 沱江大桥(双曲拱桥)、美国纽约旧塔潘齐大桥(钢结构桥)。桥梁爆破拆除技术比较成熟,爆破工程师们在总结实践成果的基础上,得到了桥梁爆破拆除中关于爆破切口、起爆网路、延期时间等关键参数的设计准则,以及合理的安全防护措施和科学的现代管理方法<sup>[1-4]</sup>。一方面,在工程实践中,桥梁爆破拆除的对象多为梁式桥和拱桥,斜拉桥则相对较少,有关斜拉桥爆破拆除技术及其科学问题研究更不多见。另一方面,斜拉桥由于其结构形式合理、跨越性能良好、造价经济、外形优美等优点,在大跨度桥梁中占比逐年增大。因此,斜拉桥爆破拆除技术及其相关课题值得深入探究,为以后类似爆破拆除工程提供技术储备。

斜拉桥是由主塔、主梁、斜拉索三种基本构件组成,属于高次超静定结构体系,桥面以加劲梁受压或受弯为主,支撑体系主要是斜拉索受拉及桥塔受压为主<sup>[5]</sup>。斜拉桥爆破拆除技术研究方面,周祥磊等采用桥面原地坍塌爆破技术与主塔定向控制爆破技术相结合的手段成功爆破拆除了独塔单索面预应力斜拉桥<sup>[6]</sup>,爆破效果良好。斜拉桥动态冲击响应问题研究方面,陈祺以安徽省内某千米级斜拉桥为背景进行了整船整桥碰撞模拟分析,依据模拟分析得到的最大碰撞力、动态响应等数据<sup>[7]</sup>,为桥梁设计提供参考依据。戴智涵根据某斜拉桥工程模型建立

了A型斜拉桥桥塔有限元模型,运用LS-DYNA软件,采用“三阶段连续耦合”有限元方法对桥塔爆炸损伤破坏直至倒塌全过程进行了数值模拟<sup>[8]</sup>,研究了桥塔局部破坏和整体倒塌阶段过程,分析了桥塔局部响应和整体响应阶段的破坏机理和破坏模式。Cyrille Denis Tetougueni等通过非线性动力分析,对三种结构形式的斜拉桥的结构响应进行了评估<sup>[9]</sup>,并根据不同的荷载参数和荷载位置,得出了斜拉桥可能的直接和即将发生的损伤。Hashemi S K通过估算爆炸荷载、构建精细的仿真模型和合理的材料参数,分析了桥面上方和桥塔附近不同爆炸位置以及不同爆炸范围情况下,斜拉桥结构构件在爆炸荷载作用下的局部破坏规律以及整体结构的连续倒塌趋势<sup>[10,11]</sup>。Edmond K. C.分析了斜拉桥在距离桥塔和桥墩0.5 m、桥面上方1.0 m处遭受1000 kg TNT当量的爆炸荷载作用下,桥塔、桥墩和桥面的损伤机理和严重程度,并研究了桥梁在采用FRP加固桥梁后跨时的抗爆效果<sup>[12,13]</sup>。

有关斜拉桥动态冲击破坏问题研究,多集中在桥塔、主梁和斜拉索等主要构件受碰撞、爆炸等偶然动荷载作用下的损伤破坏规律,而关于斜拉桥整体结构失稳倒塌规律的相关研究相对较少。本文以文献<sup>[6]</sup>为工程背景,通过LS-DYNA动力学有限元软件构建等比例独塔单索面预应力斜拉桥有限元模型,计算其爆破拆除时的失稳倒塌运动全过程,重点分析主塔、主梁和斜拉索的动力响应特征,并研究各主要构件的冲击破坏规律。

## 1 独塔单索面预应力斜拉桥有限元模型

### 1.1 主塔、主梁及斜拉索模型

独塔单索面预应力斜拉桥由主塔、墩柱、桥梁和斜拉索组成,桥梁结构如图1所示。主塔为空心钢筋砼结构,长5 m,宽2.7 m,高64 m,内圈为劲性骨架,采用C50号混凝土,主塔重量约为1856 t。主墩为实心钢筋砼结构,长17 m,宽5 m,河床面以上高9.5 m。桥梁由19个梁块、合拢段和协作体系组成,主梁为单箱三室预应力砼薄腹箱梁,梁块呈倒梯形,上边长

收稿日期:2021-07-29

作者简介:黄小武(1989-),男,工程师、博士研究生,主要从事工程爆破研究与实践工作,(E-mail)840022742@qq.com。

通讯作者:谢先启(1960-),男,中国工程院院士、教授级高级工程师,主要从事工程爆破理论与技术研究,(E-mail)xxqblast@163.com。

基金项目:湖北省自然科学基金重点项目(创新群体2020CFA043);湖北省重点研发计划项目(2020BCA084)

24.7 m,下边长13.5 m,高2.2 m,板壁厚为0.25 m。见图2。9对斜拉索分别施加轴向预应力,呈平行对

称布置,水平夹角为30°,梁上索距为9 m。独塔单索面预应力斜拉桥爆破拆除方案,详见文献[6]。

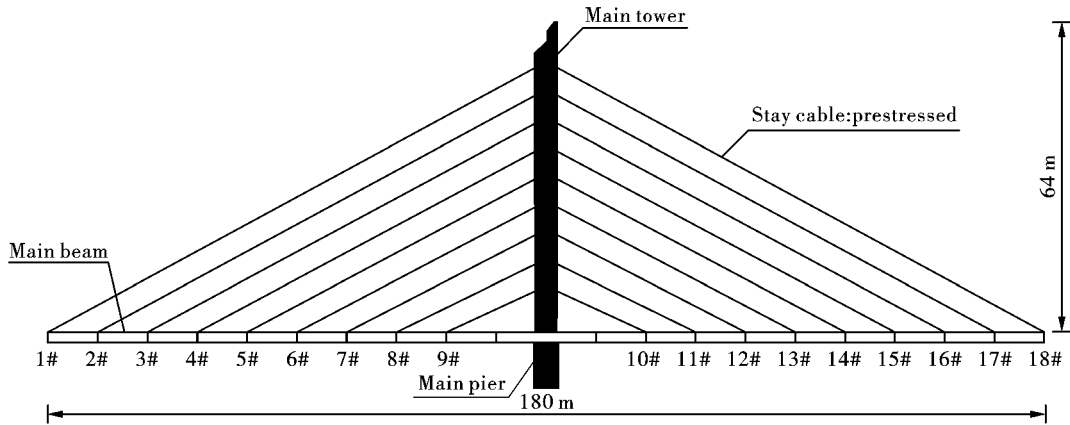


图1 斜拉桥模型

Fig. 1 Cable-stayed bridge model

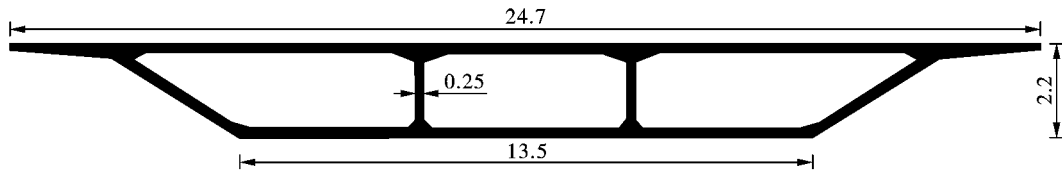


图2 主梁横截面(单位:m)

Fig. 2 Cross section of main beam(unit:m)

斜拉桥的主塔、主墩均采用8节点实体单元,主梁采用4节点壳单元,斜拉索采用梁单元。网格单元边长为4cm,局部有限元网格精细划分,整个有限元模型包含131456个实体单元、70550个壳单元、2948个梁单元,节点总数为258840。见图3、图4。

### 1.2 材料模型及关键参数

钢筋混凝土材料采用“整体式”模型<sup>[14]</sup>,其失稳倒塌破坏过程的弹塑性力学行为采用 PLASTIC\_KINEMATIC (MAT\_003) 材料模型来描述,该材料模型需要定义参数较少,使用方便,计算效率较高;通过定义失效应变参数  $\epsilon_f = 0.0065$ ,控制实体单元的破坏失效。斜拉索只承受拉力而不能承受压力,采用离散单元材料模型 CABLE\_DISCRETE\_BEAM (MAT\_071) 进行模拟。考虑斜拉索的预应力,自外向内每3根拉索的预应力分别为7.0 MPa、6.5 MPa和6.0 MPa。主塔爆破切口形成瞬间,斜拉索预应力开始松弛,设置预应力持续时间为1.6 s。索单元两端采用共节点方式分别与主梁和主塔连接,临近的单元采用刚体材料 RIGID (MAT\_020) 实现锚固效果。河床简化为平面,也采用刚性材料。见表1。

### 1.3 初始应力与动态接触算法

在爆破切口形成前,考虑桥梁结构的自身重力和斜拉索预应力,分析斜拉桥的初始应力状态。在前处理过程中,将结构的节点定义为节点组,通过定义重力加速度时程曲线,利用关键字 \*LOAD\_BODY\_GENERIZED 将重力荷载施加到结构上。为避免显式突加荷载对结构产生的震荡效应,采用半波余弦函数形式的加载曲线作为重力荷载,其表达

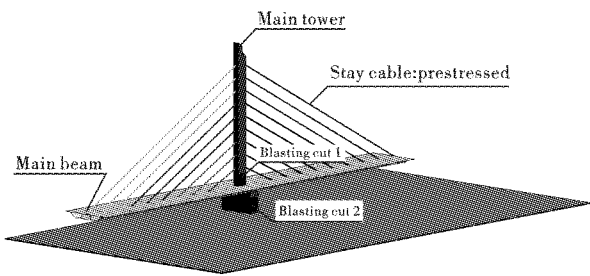


图3 斜拉桥有限元模型

Fig. 3 FEM model of cable-stayed bridge

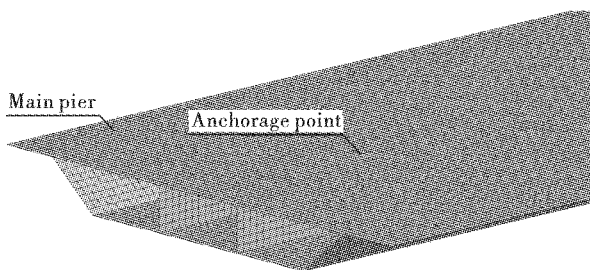


图4 主梁网格单元

Fig. 4 Mesh elements of main beam

式为

$$f(x) = \frac{g}{2} \left[ 1 - \cos\left(\frac{\pi t}{t_0}\right) \right] \quad (0 \leq t \leq t_0) \quad (1)$$

式中: $g$ 为重力加速度; $t_0$ 为正弦加载时间。

为得到稳定的重力场,通过试运算,可知整个桥梁结构在1.6 s后振动趋于稳定;即爆破切口范围的实体单元在1.6 s后通过MAT\_ADD\_EROSION定义失效时间实现失稳倒塌效果。

表1 材料物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of material

主塔、主墩、主梁(钢筋混凝土)				斜拉索(钢)			河床(刚体)	
$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$E/\text{GPa}$	$\sigma/\text{MPa}$	$\varepsilon_f$	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$E/\text{GPa}$	$F_0/\text{MPa}$	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$\mu$
2500	30	70	0.0065	7850	210	6.0/6.5/7.0	2500	0.2

有限元网格界面之间的动态接触采用罚函数法定义,该方法通过定义主动节点与接触面之间的虚拟法向界面弹簧,从而避免网格界面之间相互穿透<sup>[15]</sup>。采用自动侵蚀单面接触模式(CONTACT\_AUTOMATIC\_ERODING\_SINGLE\_SURFACE)避免不同材料性质的实体单元网格界面的穿透(如桥塔-主梁、桥塔-地面和主梁-地面之间的接触);采用自动点面接触模式(CONTACT\_AUTOMATIC\_NODES\_TO\_

SURFACE)避免梁单元节点在不同尺寸网格之间的穿透(如斜拉索-主梁和斜拉索-地面之间的接触)。

## 2 仿真结果及分析

通过LS-PrePost后处理软件读取斜拉桥爆破拆除失稳倒塌过程,如图5所示,斜拉桥失稳、倒塌、触地整个过程总历时约9.9 s,倒塌过程与文献[6]的观测结果基本吻合。

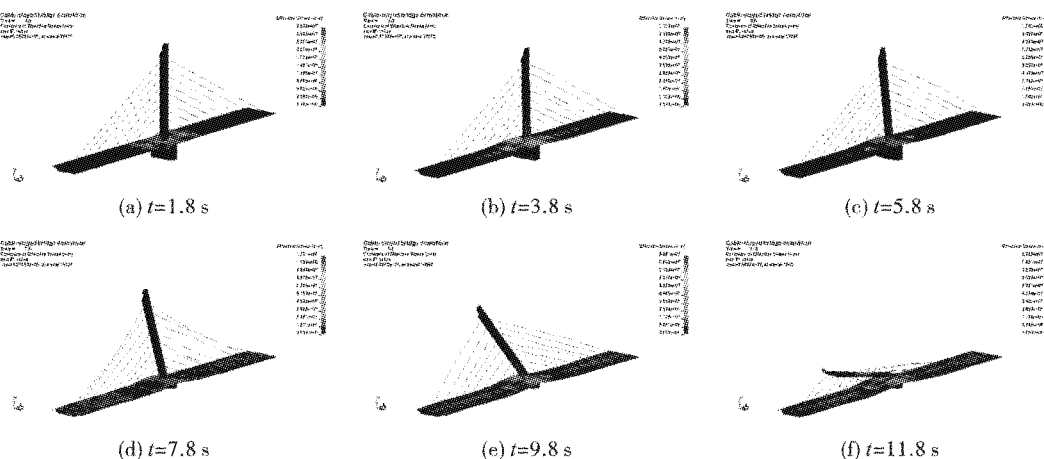


图5 斜拉桥爆破拆除失稳倒塌过程

Fig. 5 Collapse process of cable-stayed bridge induced by blasting demolition

### 2.1 主塔倒塌过程分析

选取主塔顶部7390号单元,读取其竖向位移、竖向速度时程曲线,如图6所示。可以看出,塔身运动过程总体呈现“首次下坐→缓慢偏转→二次下坐→加速偏转”四个阶段:(1)主塔爆破切口形成时,出现“首次下坐”(从1.6 s至3.2 s),塔身失重、超重状态转换频率快,导致爆破切口附近的单元压溃失效,主塔爆破切口逐渐闭合;(2)塔身开始朝着设计的倒塌方向缓慢偏转(从3.2 s至6.2 s);(3)主墩爆破切口形成(6.2 s),塔身出现“二次下坐”(从6.2 s至7.8 s),塔身失重、超重状态转换频率较慢;(4)塔身绕着底部支点加速偏转,触地瞬间竖向速度峰峰值达41.3 m/s,与河床地面高速冲击,直接

导致主塔端部破碎解体。

### 2.2 斜拉索动态响应分析

依次选取1#~18#斜拉索的中间单元,读取其轴向应力时程曲线,其动态特征基本相似;以14#拉索中间26370号单元的轴向应力时程曲线为例,如图7(a)所示。从图中可以看出,自主塔爆破切口形成时(1.6 s),斜拉索预应力松弛归零。在主塔爆破切口形成时(2.3 s),斜拉索轴向应力陡增,并到达峰峰值。在随着主塔定向倒塌的过程中,轴向应力起伏振荡频繁。依次读取1#~18#斜拉索在2.3 s时的峰峰值,如图7(b)所示。由图可见,各处斜拉索的峰峰值呈现无规律性的起伏变化,左侧斜拉索轴向应力峰峰值区间为[7.16 MPa, 11.5 MPa],右侧斜拉索轴向应

力峰峰值区间为[4.81 MPa,14.9 MPa]。

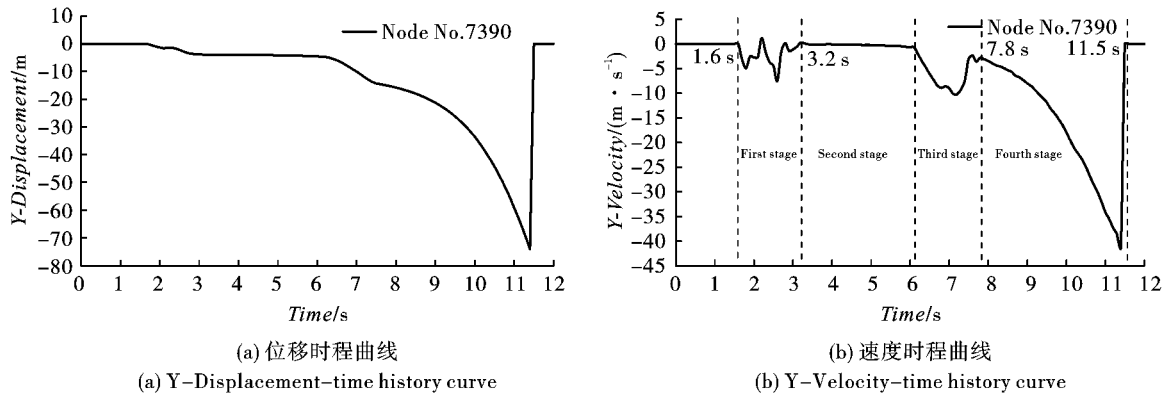


图6 主塔顶部单元(No.7390)运动过程

Fig. 6 Movement process of top element (No. 7390) on main tower

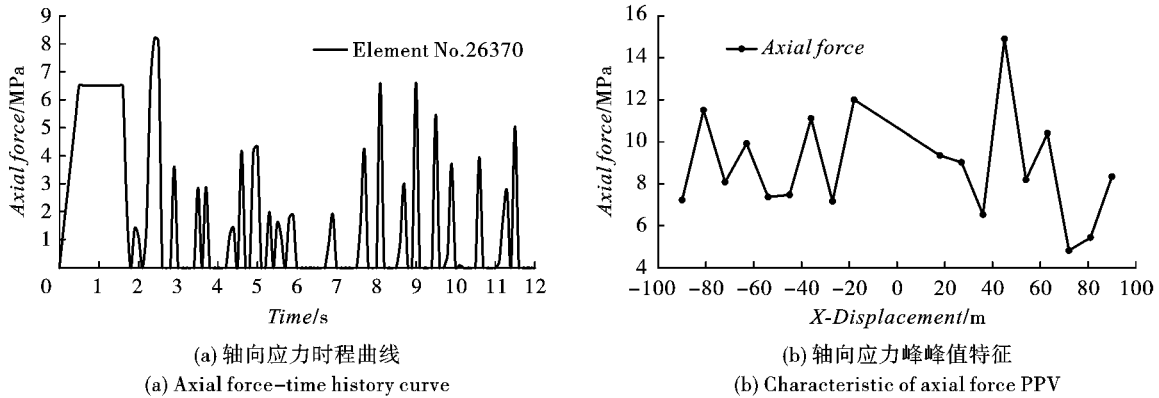


图7 斜拉索动力响应特征

Fig. 7 Dynamic response characteristic of stay cables

### 2.3 主梁坍塌过程分析

依次读取斜拉桥主梁左侧端点(No. 72495)、1/4处(No. 80475)和中间位置(No. 66435)3处节点的竖向位移时程曲线,如图8(a)所示。计算结果表明,端点处节点和1/4处节点的竖向位移时域特征几乎一致,总体经历了两次坍塌过程:(1)主塔爆破切口形成后(1.6 s),斜拉索预应力松弛归零,主梁垂直坍塌;(2)主墩爆破切口形成后(6.2 s),主梁继续坍塌。而斜拉桥中间位置节点由于主墩的支撑作用,只在主墩爆破切口形成后,经历了一次坍塌触地过程。但是,文献[6]的影像资料表明,除主梁的中间部分受主墩支撑作用外,两侧的梁体在主塔爆破切口形成后直接一次性坍塌触地,并没有经历两次坍塌过程。究其原因,是由于主梁在有限元建模时简化为连续结构,导致计算刚度大于实际刚度,造成主梁自斜拉索预应力解除至主墩爆破切口形成(1.6~6.2 s),仍然能够支撑起自身结构。

选取主塔爆破切口闭合时刻(3.2 s),依次读取主梁上斜拉索锚点( $S_x=0$ 的位置对应主塔)的竖向

位移,如图8(b)所示。结果表明,在主墩的支撑作用下,主梁整体呈现“中间高、两头低”的姿态,最大位移差为2.62 m,剪切破坏作用明显。

## 3 结论

依托金葵大桥爆破拆除工程案例,通过动力学有限元仿真技术模拟了斜拉桥整体模型失稳、倒塌全过程,重点分析了主塔、斜拉索和主梁三大基本构件的倒塌运动过程及其动力学特征,得到如下结论:

(1) 离散单元材料模型 CABLE\_DISCRETE\_BEAM(MAT\_071)可以很好地模拟斜拉索的预应力作用,以及失稳倒塌过程中斜拉索的动力学特征;采用半波余弦函数形式的加载曲线作为重力荷载,有效避免了显式突加荷载对结构产生的震荡效应。

(2) 主塔定向倒塌是斜拉桥失稳倒塌的核心,塔身运动姿态符合爆破设计方案,总体呈现“首次下坐→缓慢偏转→二次下坐→加速偏转”四个阶段;主塔端部触地瞬间竖向速度峰峰值达41.3 m/s,与河床地面高速冲击,直接导致端部破碎解体。

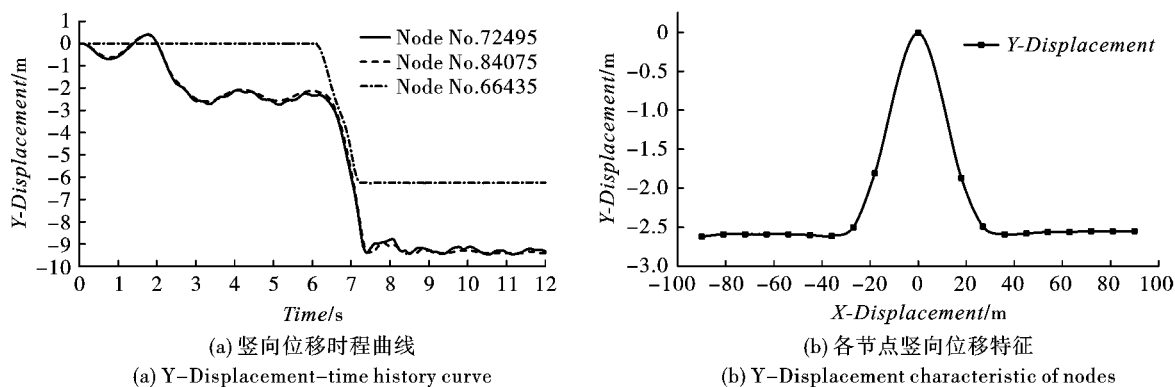


图8 主梁动力响应特征

Fig. 8 Dynamic response characteristic of main beam

(3) 斜拉索自主塔爆破切口形成时(1.6 s)预应力松弛归零,在主塔爆破切口形成时(2.3 s)轴向应力陡增,并到达峰峰值;在随着主塔定向倒塌的过程中,斜拉索轴向动力响应复杂,应力起伏振荡频繁,应力峰峰值区间为4.81~14.9 MPa。

(4) 在主墩的支撑作用下,主梁在失稳坍塌过程中整体呈现“中间高、两头低”的姿态,最大位移差为2.62 m,局部剪切破坏作用明显。

### 参考文献(References)

- [1] 谢先启,贾永胜,姚颖康,等. 复杂环境下城市超长高架桥精细爆破拆除关键技术研究[J]. 中国工程科学, 2014,16(11):65-71.
- [1] XIE Xian-qi, JIA Yong-sheng, YAO Ying-kang, et al. Key technologies of precision demolition blasting of ultra-long urban viaduct in complicated surroundings[J]. Engineering Sciences, 2014, 16(11): 65-71. (in Chinese)
- [2] 王威,贾永胜,刘昌邦,等. 连续梁跨江危桥应急抢险爆破拆除[J]. 爆破, 2020,37(3):90-94.
- [2] WANG Wei, JIA Yong-sheng, LIU Chang-bang, et al. Emergency blasting demolition of continuous beam bridge across river[J]. Blasting, 2020, 37(3): 90-94. (in Chinese)
- [3] 甄梦阳,李本伟,陈德志,等. 1160 m长城市高架桥爆破拆除[J]. 爆破, 2017,34(2):91-95.
- [3] ZHEN Meng-yang, LI Ben-wei, CHEN De-zhi, et al. Explosive demolition of 1160 m long urban viaduct[J]. Blasting, 2017, 34(2): 91-95. (in Chinese)
- [4] 赵明生,龙源,贾永胜,等. 预应力混凝土连续梁桥控制爆破拆除[J]. 爆破, 2015,32(4):103-109.
- [4] ZHAO Ming-sheng, LONG Yuan, JIA Yong-sheng, et al. Control blasting technology for bridge with prestressed continuous concrete beams[J]. Blasting, 2015, 32(4): 103-109. (in Chinese)
- [5] 池瑜. 独塔单索面混凝土斜拉桥索力确定及优化[D]. 武汉:武汉理工大学, 2009.
- [5] CHI Yu. Determining and optimization of cable force of concrete cable-stayed bridge[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009. (in Chinese)
- [6] 周祥磊,陈德志,罗鹏,等. 独塔单索面预应力斜拉桥爆破拆除[J]. 爆破, 2020,37(4):89-93.
- [6] ZHOU Xiang-lei, CHEN De-zhi, LUO Peng, et al. Blasting demolition of prestressed cable-stayed bridge with single tower and single cable plane[J]. Blasting, 2020, 37(4): 89-93. (in Chinese)
- [7] 陈祺. 船舶与千米级斜拉桥碰撞数值仿真及桥墩防撞装置分析[D]. 合肥:合肥工业大学, 2017.
- [7] CHEN Qi. Numerical simulation of ship collision with kilometer-scale cable stayed bridge and bridge pier anti-collision equipment[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2017. (in Chinese)
- [8] 戴智涵. 斜拉桥桥塔爆炸损伤破坏数值模拟研究[D]. 长沙:国防科技大学, 2017.
- [8] DAI Zhi-han. Simulation on the damage and collapse of the cable-bridge tower under blasting loads[D]. Changsha: University of Defense Technology, 2017. (in Chinese)
- [9] TETOUGUENI C D, ZAMPIERI P, PELLEGRINO C. Structural performance of a steel cable-stayed bridge under blast loading considering different stay patterns[J]. Engineering Structures, 2020, 219: 110739.
- [10] HASHEMI S K, BRADFORD M A, VALIPOUR H R. Dynamic response of cable-stayed bridge under blast load[J]. Engineering Structures, 2016, 127: 719-736.
- [11] HASHEMI S K, BRADFORD M A, VALIPOUR H R. Dynamic response and performance of cable-stayed bridges under blast load: Effects of pylon geometry[J]. Engineering Structures, 2017, 137: 50-66.
- [12] TANG E, HONG H. Numerical simulation of a cable-stayed bridge response to blast loads, Part I: Model development and response calculations[J]. Engineering

- Structures, 2010, 32(10):3180-3192.
- [13] HONG H, TANG E. Numerical simulation of a cable-stayed bridge response to blast loads, Part II: Damage prediction and FRP strengthening [J]. Engineering Structures, 2010, 32(10):3193-3205.
- [14] 孙金山, 贾永胜, 姚颖康, 等. 拆除爆破数值模拟中钢筋混凝土构件的建模及参数取值方法[J]. 爆破, 2020, 37(3):115-121.
- [14] SUN Jin-shan, JIA Yong-sheng, YAO Ying-kang, et al. Simplification and parameter selection of reinforced concrete component for numerical simulation of demolition blasting[J]. Blasting, 2020, 37(3):115-121. (in Chinese)
- [15] LSTC. LS-DYNA version 970 keyword user's manual [M]. Livermore Software Technology Corporation, 2014.

英文编辑:柯波

(上接第100页)

- [4] 李顺波, 李泽华, 李宏伟, 等. 顶部空气间隔装药对岩石爆破块度影响的试验研究[J]. 爆破器材, 2020, 49(6):61-64.
- [4] LI Shun-bo, LI Ze-hua, LI Hong-wei, et al. Experimental study on the influence of top air-deck charge on rock fragmentation in blasting [J]. Blasting Equipment, 2020, 49(6):61-64. (in Chinese)
- [5] 谢烽, 江雅勤, 余德运, 等. 钙结砾岩空气间隔装药爆破试验及应用[J]. 爆破, 2020, 37(4):63-68.
- [5] XIE Feng, JIANG Ya-qin, YU De-yun, et al. Test and application of calcium conglomerate air-decked charge blasting[J]. Blasting, 2020, 37(4):63-68. (in Chinese)
- [6] 段军, 常诗源, 张鹏飞, 等. 双利铁矿台阶爆破空气间隔长度研究与应用[J]. 中国矿业, 2020, 29(6):155-158.
- [6] DUAN Jun, CHANG Shi-yuan, ZHANG Peng-fei, et al. Study and application of bench blasting interval length in Shuangli mine [J]. China's Mining, 2020, 29(6):155-158. (in Chinese)
- [7] 张晓平, 马建军, 刘令. 露天深孔空气间隔装药爆破的数值模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(33):13599-13605.
- [7] ZHANG Xiao-ping, MA Jian-jun, LIU Ling. Numerical simulation of open-air deep-hole air-decking charge blasting [J]. Science, Technology and Engineering. 2020, 20(33):13599-13605. (in Chinese)
- [8] 梁瑞, 解丽娜, 周文海, 等. 中部空气间隔装药结构不耦合状态光面爆破效果研究[J]. 矿冶工程, 2019, 39(1):25-28.
- [8] LIANG Rui, XIE Li-na, ZHOU Wen-hai, et al. Research on smooth blasting with decoupled explosive charge in a mid column air deck system [J]. Mining and Metallurgy Engineering, 2019, 39(1):25-28. (in Chinese)
- [9] 张耿城, 郭连军, 贾建军, 等. 某露天铁矿爆破振动对边坡的动态响应特征研究[J]. 中国矿业, 2020, 29(12):165-169.
- [9] ZHANG Geng-cheng, GUO Lian-jun, JIA Jian-jun, et al. Response characteristics of blasting vibration to rock slope in an open-pit iron mine [J]. China's Mining, 2020, 29(12):165-169. (in Chinese)
- [10] 高启栋, 卢文波, 杨招伟, 等. 水平光面爆破激发地震波的成分及衰减特征[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(8):167-179.
- [10] GAO Qi-dong, LU Wen-bo, YANG Zhao-wei, et al. Components and attenuation characteristics of seismic waves induced by horizontal smooth blasting [J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(8):167-179. (in Chinese)
- [11] 卢子冬, 宋晓鸣. 露天煤矿采空区快速治理的爆破技术[J]. 工程爆破, 2019, 25(3):76-80.
- [11] LU Zi-dong, SONG Xiao-ming. Rapid governance blasting technology of open-pit coal mine goaf [J]. Engineering Blasting, 2019, 25(3):76-80. (in Chinese)
- [12] 刘小伟, 张树伟, 杨晓科. BHPO 预裂爆破机理研究及工程试验[J]. 现代矿业, 2011(4):11-13.
- [12] LIU Xiao-wei, ZHANG Shu-wei, YANG Xiao-ke. Mechanism research and engineering test of BHPO pre-split blasting [J]. Modern Mining, 2011(4):11-13. (in Chinese)
- [13] 张志呈, 韦家修, 罗尧东, 等. 定向卸压隔振爆破在生产实践中的应用[J]. 爆破, 2013(2):118-121.
- [13] ZHANG Zhi-cheng, WEI Jia-xiu, LUO Yao-dong, et al. Directional pressure relief isolation blasting application in production practice [J]. Blasting, 2013(2):118-121. (in Chinese)
- [14] 黄建坤. 周期性排桩和波屏障在土木工程减振中的应用研究[D]. 北京:北京交通大学, 2014.
- [14] HUANG Jian-kun. Periodic pile and its application in civil engineering vibration wave barrier [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014. (in Chinese)
- [15] 尹吉, 王明君. 预裂爆破技术在某露天矿中的应用[J]. 露天采矿技术, 2014(9):65-67.
- [15] YIN Ji, WANG Ming-jun. Application of pre-splitting blasting technology in the open-pit mine [J]. Open-pit Mining Technology, 2014(9):65-67. (in Chinese)

英文编辑:黄刚