

# 爆炸荷载下弹性支撑地下拱结构的动力响应

陈 卓<sup>1</sup>, 孙惠香<sup>1</sup>, 袁英杰<sup>1</sup>, 冷冰林<sup>2</sup>, 王英武<sup>3</sup>

(1. 空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038; 2. 95338 部队工程质量监督站, 广州, 510030;  
3. 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安, 710068)

**摘要** 弹性支撑是常用的隔振减振手段, 研究爆炸荷载下弹性支撑地下拱结构的动力响应对提高地下防护工程内部人员及设备的战场生存能力具有重要意义。应用 ANSYS/LS-DYNA 非线性显式动力有限元分析程序, 模拟了爆炸荷载下弹性支撑地下拱结构的模态和动力响应, 得到了低阶自振圆频率变化曲线和拱顶、拱肩、拱脚动力响应时程曲线。结果表明: 弹性支撑减小结构固有频率, 延长结构自振周期, 具有良好隔振减振作用; 临界刚度系数导致结构的一、二阶模态易同时激发, 结构设计时应予以避免; 与刚性支撑地下拱结构相比, 弹性支撑地下拱压力、应力峰值减小, 出现时间延长, 竖向位移峰值增大, 抗爆承载力提高; 弹性支撑的刚度系数并非越小越好, 应根据结构抗爆承载力和极限位移设计要求合理设置。

**关键词** 爆炸荷载; 弹性支撑; 地下拱结构; 动力响应; 数值模拟

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2020.06.015

**中图分类号** TU928 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2020)06-0093-08

## Research on Dynamic Response of the Underground Arch Structure with Elastic Support under Condition of Explosive Load

CHEN Zhuo<sup>1</sup>, SUN Huixiang<sup>1</sup>, YUAN Yingjie<sup>1</sup>, LENG Binglin<sup>2</sup>, WANG Yingwu<sup>3</sup>

(1. Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;  
2. Engineering Quality Supervision Station, Unit 95338, Guangzhou 510030, China; 3. Xi'an  
Institute of Optics and Precision Machinery, Chinese Academy of Sciences,  
Xi'an 710068, China)

**Abstract** Elastic support is a commonly used means to the vibration isolation and the vibration reduction. Research on the dynamic response of elastically supported underground arch structures under condition of explosive loads is of great significance for improving the battlefield survivability of personnel and equipment in underground protection projects. In this Paper, the ANSYS/LS-DYNA nonlinear explicit dynamic finite element analysis program is applied to simulate the modal and dynamic response of underground arch structure with elastic support under condition of blast load, thus obtaining the low order natural frequency variation curve and the dynamic response time history curve of arch crown, arch shoulder and arch foot. The results show that the elastic support reduces the natural frequency of the structure, extends the natural vibration period of the structure, and has a good vibration isolation and vibration reduction

**收稿日期:** 2020-07-24

**基金项目:** 国家自然科学基金(51208506)

**作者简介:** 陈 卓(1996—), 男, 陕西武功人, 硕士生, 主要从事结构工程与防护工程研究。E-mail: czsole@sina.com

**引用格式:** 陈卓, 孙惠香, 袁英杰, 等. 爆炸荷载下弹性支撑地下拱结构的动力响应[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2020, 21(6): 93-100. CHEN Zhuo, SUN Huixiang, YUAN Yingjie, et al. Research on Dynamic Response of the Underground Arch Structure with Elastic Support under Condition of Explosive Load[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2020, 21(6): 93-100.

effect. With the critical stiffness coefficient leading the first and the second modes of the structure to be easily excited at the same time, such a case should be avoided in the structural design. Compared with rigidly supported underground arches, the elastically supported underground arch is low in pressure and stress peaks, long in their appearance, good in vertical displacement peaks, and improvement in blast resistance. As for the stiffness coefficient of the elastic support, this does not mean the less the better without principle, it should be done reasonably according to the structural anti-blasting capacity and ultimate displacement design requirements.

**Key words** explosion load; elastic support; underground arch structure; dynamic response; numerical simulation

地下防护工程是我军保存战争实力的重要设施,钻地武器即便没有侵彻到结构埋深,其爆炸产生的巨大冲击波也会使地下防护工程产生强烈振动,对内部人员及设备构成严重威胁,隔振减振装置可有效减少爆炸冲击荷载对结构的破坏作用。在结构基础处设置弹性支撑是常用的隔振减振手段,炸药爆炸产生瞬态、强烈的冲击能量以位能的形式储存在弹性支撑中,使其产生变形,较短时间后弹性支撑释放能量恢复原状,达到隔振减振的目的<sup>[1]</sup>。

国内外学者对弹性支撑结构的动力响应做了大量研究。Yang Y B 等指出弹性支撑会显著降低弹性支撑桥梁的自振频率<sup>[2]</sup>。Bradford M A 等发现弹性支撑刚度系数对拱的屈曲载荷和屈曲行为有较大影响<sup>[3-4]</sup>。Legeron F 等针对隔振结构的设计提出了一种计算竖向地震作用时弹性支撑动力响应的简化方法<sup>[5]</sup>。Yi Z P 等从变分原理推导了考虑几何缺陷的弹性支撑圆拱的平衡方程<sup>[6]</sup>。Chakraborty 等发现选择合适的刚度和类型的基础隔振体系,能够有效减少结构的振动<sup>[7]</sup>。康婷等研究了爆炸冲击荷载作用下弹性支撑对拱结构动力特性和动力响应的影响,证明刚度设置合理的弹性支撑和阻尼支撑能有效提高结构的抗爆承载能力<sup>[1]</sup>。宋春明等发现竖向弹性支撑使爆炸荷载作用下拱的弯矩峰值减小、增加峰值的到达时间,提高拱的抗爆或承受瞬态荷载的能力<sup>[8]</sup>。叶茂等研究了带弹性支撑的连续梁桥并建立耦合力学分析模型,得出连续梁合理选择支座刚度可有效降低桥梁跨中位移随机响应的结论<sup>[9]</sup>。张志俊等发现弹性支撑在中、高频段具有很好的隔振性能,当支座竖向刚度降低,桥梁响应中的静力成分增大,动力成分先减小再增大<sup>[10]</sup>。

现有研究大多针对地表结构,对地下拱结构动力响应的研究较少。本文应用 ANSYS/LS-DYNA 有限元分析软件,通过 ALE 算法,对爆炸荷载下弹性支撑地下拱进行数值模拟,研究弹性支撑对结构

模态和动力响应的影响,为地下防护工程的建设提供参考。

## 1 基础隔振理论

根据结构动力学定义,振动是指任意给定的系统内,在平衡位置附近作往复运动的现象。“隔振”指使结构隔离振动,控制结构在动力干扰下的各项反映值在容许范围内的措施,“隔震”指隔离地震作用,故“隔震”是“隔振”的一个特定内容;“减振”指对振动进行抑制,尽量减少有害振动,“减震”指对地震的振动进行抑制,尽量减少地震对建筑物的有害影响。

弹性支撑拱可看作质量-弹簧系统,理论分析模型简化为图 1 所示的单自由度体系<sup>[11]</sup>。弹簧连接的质量块  $m$  和基础视为刚体,质量块  $m$  受到外部激励荷载  $F(t) = F_0 \sin \omega t$ ,则运动方程为:

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t) \quad (1)$$

式中: $k$  为竖向弹性支撑的刚度; $c$  为黏性阻尼的系数; $u$ 、 $\dot{u}$ 、 $\ddot{u}_g$  分别为  $m$  的竖向振动位移、速度和加速度。假设质量块  $m$  基底有一简谐位移  $u_g(t) = u_{g0} \sin \omega t$ ,求其二阶导可得:

$$\ddot{u}_g(t) = -\omega^2 u_{g0} \sin \omega t \quad (2)$$

式中: $u_{g0}$  为基底位移振幅,将式(2)代入式(1)可得质量块的相对位移:

$$u(t) = \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 R_d u_{g0} \sin(\omega t - \varphi) \quad (3)$$

式中: $R_d = \frac{1}{\sqrt{[1 - (\frac{\omega}{\omega_n})^2]^2 + [2\xi(\frac{\omega}{\omega_n})]^2}}$ , 定义为动

力放大系数; $\xi$  为阻尼比; $\omega$  为激励力频率; $\omega_n$  为体系固有圆频率; $\varphi$  为相角,反应体系振动位移与外部荷载的相应关系;则质量块的总位移  $u'(t)$  为:

$$u'(t) = u(t) + u_g(t) = u_{g0} R_d \sqrt{1 + [2\xi(\frac{\omega}{\omega_n})]^2} \sin(\omega t - \varphi) \quad (4)$$

至此可求出该单自由度体系的振动传递系数  $T$ :

$$T=R_d\sqrt{1+[2\xi\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)]^2}$$

(5)

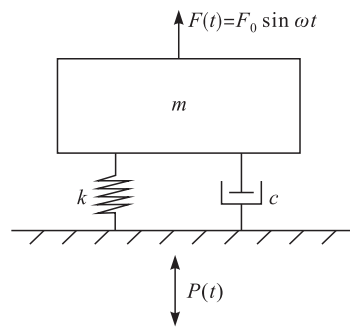


图 1 单自由度隔振体系<sup>[11]</sup>

图 2 为传递系数  $T$  随频率比  $\frac{\omega}{\omega_n}$  和阻尼比  $\xi$  的变化曲线<sup>[11]</sup>。由图可知,当频率比  $\frac{\omega}{\omega_n} > \sqrt{2}$  时,传递系数  $T < 1$ ,此时弹簧起到隔振作用。由此可知,减少弹簧刚度  $k$  降低隔振体系固有圆频率  $\omega_n$ ,可取得良好的隔振效果。

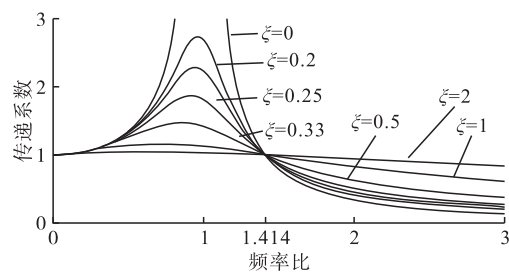


图 2 振动传递系数

2 数值模拟

2.1 数值模拟方案

本文模拟工况中围岩岩性为花岗岩;炸药中心距拱顶 6 m,0.70 m×0.70 m×0.35 m 集团装药,装药量 279 kg,采用中心起爆方式;弹性支撑拱采

用共节点建模方法,由钢筋混凝土支护层、竖向弹性支撑和钢筋混凝土垫块组成,混凝土中 HRB335 级钢筋  $\Phi 18@200$ ,双层网状布置;拱埋深 10 m、高 4.5 m、跨度 14 m,两侧各取 5 m 宽岩体,竖向弹性支撑设在 1 m 厚钢筋混凝土垫块上部,高 0.5 m,因洞室为细长结构,长度方向取 6 m 进行研究。

考虑模型为对称结构,为节省计算时间,建立 1/4 模型进行数值模拟,在对称面采用对称约束,非对称面采用无反射边界条件模拟半无限介质,围岩、弹性支撑拱和炸药均处于空气域中。计算模型如图 3 所示。

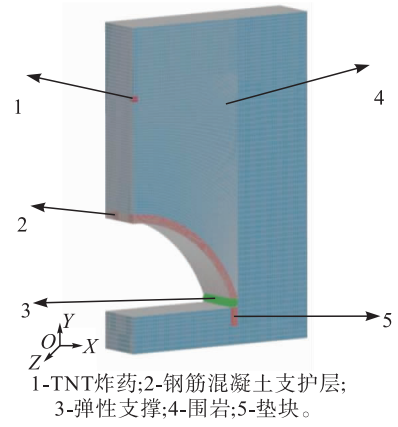


图 3 弹性支撑地下拱结构计算模型

2.2 本构模型及材料参数

围岩与钢筋视为弹塑性材料,选用等向随动强化模型 \* MAT\_PLASTIC\_KINEMATIC 材料模型,该模型充分考虑应变率的影响,适合描述材料的各向同性硬化和随动硬化塑性,参数见表 1<sup>[12-13]</sup>。

混凝土选用 \* MAT\_JOHNSON\_HOLMQUIST\_CONCRETE 材料模型,该模型综合考虑了大应变、高应变率 and 高压效应,并考虑了损伤及损伤积累,适合用于爆炸冲击等强动载作用下混凝土的动力响应问题,参数见表 2<sup>[1]</sup>。

表 1 岩石及钢筋材料参数

| 模型材料 | 密度/(kg·m <sup>-3</sup> ) | 弹性模量/Pa | 泊松比  | 等效屈服强度/Pa | 切线模量/Pa |
|------|--------------------------|---------|------|-----------|---------|
| 岩石   | 2 600                    | 5.5E10  | 0.27 | 1.17E8    | 0       |
| 钢筋   | 7 850                    | 2.0E11  | 0.30 | 3.00E8    | 2.1E9   |

天然岩体一般具有节理裂隙,是不均匀介质,为便于研究,宏观上将岩体看成连续、各向同性的均质体,不计实际上存在的节理裂隙和地应力的影响。空气采用 \* MAT\_NULL 材料模型及 \* EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL 状态方程;高能炸药选用

\* MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN 模型和 \* EOS\_JWL 状态方程描述,详细参数见参考文献[14~15]。弹性支撑假设为线弹性弹簧,包含拱脚下表面、钢筋混凝土垫块上表面 2 个节点,本文选用 \* MAT\_SPRING\_ELASTIC 材料模型。

表 2 混凝土材料参数

| 密度/<br>( $\text{kg} \cdot \text{m}^3$ ) | 剪切模<br>量/Pa          | 归一化<br>黏聚强度         | 归一化<br>压力硬<br>化系数 | 应变率<br>系数     |
|-----------------------------------------|----------------------|---------------------|-------------------|---------------|
| 2 400                                   | 1.49E10              | 0.79                | 1.6               | 0.007         |
| 压力硬化<br>系数                              | 准静态<br>单轴压缩<br>强度/Pa | 最大拉伸<br>流体静压/<br>Pa | 参考<br>应变率         | 断裂前最小<br>塑性应变 |
| 0.61                                    | 4.8E7                | 4E6                 | 1E-6              | 0.01          |
| 归一化<br>最大强<br>度系数                       | 压碎压<br>力/Pa          | 压缩体<br>积应变          | 压密<br>压力<br>/Pa   | 压密体<br>积应变    |
| 7.0                                     | 1.6E7                | 0.001               | 8E8               | 0.1           |
| 损伤<br>常数 1                              | 损伤<br>常数 2           | 压力<br>常数 1/Pa       | 压力<br>常数 2/Pa     | 压力<br>常数 3/Pa |
| 0.04                                    | 1.0                  | 8.5E10              | -1.71E11          | 2.08E11       |

### 2.3 单元划分与算法选择

弹性支撑选用 COMBI165 弹簧单元,本文工况中共计 186 个,限制只能发生 Y 轴方向振动,如图 4 所示,其余材料选用 SOLID164 单元。为解决 Lagrange 算法因材料变形过大产生负体积导致中止计算的问题,选用 ALE(arbitrary lagrange-euler)算法计算高能炸药的爆炸过程,弹性支撑、钢筋混凝土支护层和垫块视为固体,采用 Lagrange 网格描述;空气、炸药视为流体,采用 Euler 网格描述;固体、流体材料通过 \*CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID 关键字耦合。围岩与支护层进行面面接触定义,设置 \*HOURLASS 关键字控制沙漏能,避免产生沙漏现象。

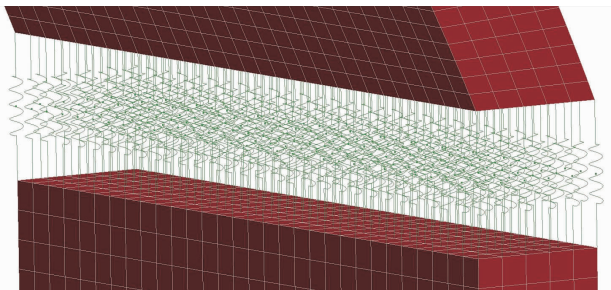


图 4 弹簧单元布置示意图

### 3 数值模拟方案验证

美国陆军部基于大量试验数据出版的常规武器防护设计技术手册(TM5-855-1)给出了自由场应力峰值的计算方法。文献[16]认为当炸药的埋置深度

$h_k$  满足  $h_k \geq 0.6\sqrt[3]{c}$  (m) 时,稀疏波从地面反射的影响较小,岩体中爆炸产生的冲击波和压缩波在传播过程中遵从“爆炸相似率”,此时引爆位置和爆轰波形的影响可以忽略,并按照量纲分析给出了 TM5-855-1 中的自由场峰值压力简化公式:

$$P_{\max} = \gamma \left( \frac{\sqrt[3]{C}}{r} \right)^\alpha \quad (6)$$

式中:  $P_{\max}$  为岩体中爆炸波阵面的峰值压力(MPa);  $c$  为炸药质量(kg);  $r$  为测点到爆炸中心的距离(m);  $\gamma, \alpha$  为试验常数,对于花岗岩,  $\gamma = 32, \alpha = 2$ 。

由上文可知  $c$  为 279 kg,埋深  $h_k$  为 4 m,  $h_k \geq 0.6\sqrt[3]{c}$ ,满足式(6)的使用条件。选取刚性支撑方案中炸药正下方岩体单元为测点,将数值模拟结果与式(6)计算结果进行对比,结果见表 3。由表可知,数值模拟结果与理论计算结果差值均在 15% 以内,表明数值模拟计算参数和模型选取合理,模拟结果具有较高可信度。

表 3 峰值压力模拟与计算结果

| $r/\text{m}$   | 2.0   | 2.5   | 3.0   | 3.5   | 4.0  |
|----------------|-------|-------|-------|-------|------|
| 数值模拟<br>结果/MPa | 302.8 | 186.4 | 130.8 | 98.7  | 74.6 |
| 理论计算<br>结果/MPa | 341.6 | 218.6 | 151.8 | 111.5 | 85.4 |

### 4 结构模态分析

模态是结构的固有振动特性,由振动系统的整体刚度和质量决定,每一阶模态拥有特定的频率、阻尼和模态参数。定义单个 COMBI165 弹簧单元的刚度系数为  $k$ ,当  $k$  足够大时将视为刚性支撑。采用数值方法进行大量计算,决定选取  $k$  取 0~30 MN/m 的弹性支撑拱和刚性支撑拱前 5 阶自振圆频率  $\omega_1 \sim \omega_5$ ,绘制关系曲线,如图 5、图 6 所示,分析模态阶数、刚度系数与自振圆频率的关系。

由图 5 可见,刚性支撑拱  $\omega_2 \sim \omega_3$  增幅最小,为 6 rad/s,  $\omega_3 \sim \omega_4$  增幅最大,为 91 rad/s,外部荷载影响下  $\omega_2, \omega_3$  易同时激发;分析图 6 可知,弹性支撑拱各阶自振圆频率随刚度系数  $k$  的增加而增大,其中  $\omega_1, \omega_3$  曲线的上升趋势逐渐放缓,趋于定值,当  $k = 3$  MN/m 时  $\omega_1 \approx \omega_2$ ,  $k = 7$  MN/m 时  $\omega_3 \approx \omega_4$ ,  $k = 1$  MN/m 时  $\omega_4 \approx \omega_5$ ,邻阶自振圆频率曲线在相互接近时发生转向。对比分析图 5、图 6 可知,结构的自振圆频率随模态阶数的增加而增大;在  $k$  取 0~30 MN/m 时,弹性支撑拱前 5 阶自振圆频率均小于刚性支撑拱,且  $k$  越小,自振圆频率减少越多。

定义  $k=3 \text{ MN/m}$  为弹性支撑拱弹性支撑的临界刚度系数,此时  $\omega_1 \approx \omega_2$ ,结构 1、2 阶模态在爆炸荷载下易被同时激发,产生剧烈振动响应,设计时应避免临界刚度系数。进一步分析弹性支撑拱的振型图发现, $k < 3 \text{ MN/m}$ , $\omega_1$ 、 $\omega_2$  的振型图分别为对称、反对称,与刚性支撑拱结构的振型序列相反; $k \geq 3 \text{ MN/m}$ , $\omega_1$ 、 $\omega_2$  的振型图则为反对称、对称,与刚性支撑拱结构的振型序列相同,如图 7 所示。

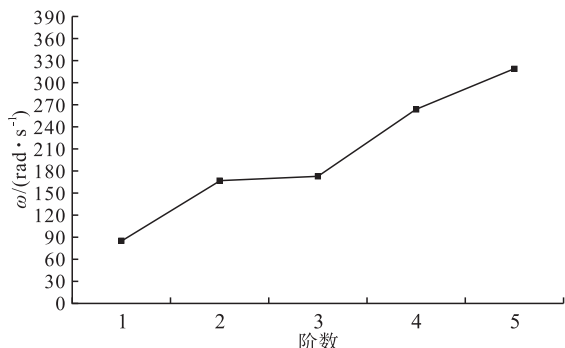
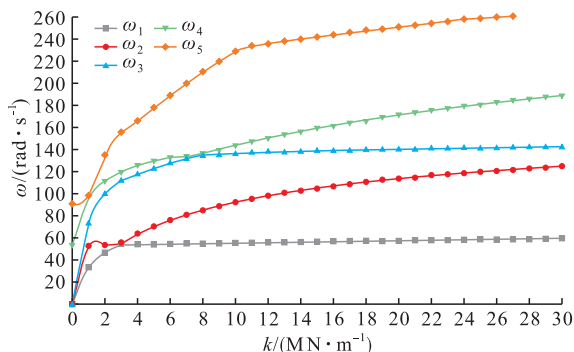
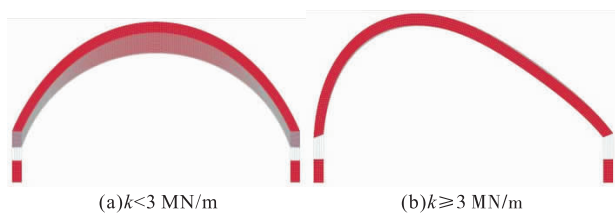


图5 刚性支撑拱结构的自振圆频率

图6 低阶自振圆频率随  $k$  的变化曲线图7 不同刚度下  $\omega_1$  的振型图

隔振的一个基本原则是降低振动系统的自振频率,由以上分析可见, $k$  较小且非临界刚度系数的弹性支撑拱较刚性支撑拱:结构的固有频率减少、自振周期延长,外部荷载影响低阶模态激发产生共振现象的可能性降低,弹性支撑对结构动力响应的降低起到积极作用。

## 5 爆炸荷载下弹性支撑地下拱结构的动力响应

### 5.1 计算点和刚度系数的选取

地下拱结构纵深较长,为便于研究取炸药中心所在断面(X-Y 平面),选取拱顶、拱肩、拱脚内表面

单元为研究点,如图 8 所示。

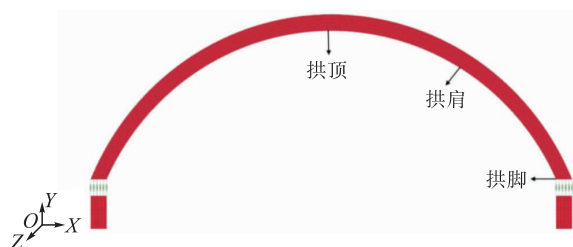


图8 研究点位置示意图

为考察支撑刚度与结构动力响应情况的联系,根据上节结论,计算了刚度系数  $k$  取  $1 \text{ MN/m}$ 、 $5 \text{ MN/m}$ 、 $10 \text{ MN/m}$ 、 $50 \text{ MN/m}$ 、 $100 \text{ MN/m}$  的弹性支撑拱和刚性支撑拱的动力响应,计算时间  $t = 0.05 \text{ s}$ ,并绘制爆炸荷载下结构各研究点的压力、最小主应力和位移时程曲线。

### 5.2 刚度系数对结构压力的影响

图 9~11 为结构拱顶、拱肩、拱脚的时程曲线。由图可知:由于爆炸产生的应力波在围岩和拱结构间来回反射、透射,作用于结构的是高频振荡压力,此时结构做自由振动,研究点压力曲线不断振荡,达到峰值压力后逐渐衰减;炸药爆炸后极短时间内( $t \approx 0.005 \text{ s}$ ),各研究点压力时程曲线近似重合,这是因为此时结构受到的压力较小,弹性支撑未起到明显隔振减振作用;爆炸荷载下弹性支撑拱较刚性支撑拱出现峰值压力的时间延长,且刚度系数越小,出现峰值压力的时间越晚。

列出时程曲线中研究点的峰值压力,如表 4 所示,括号内为拱顶、拱肩、拱脚峰值压力占刚性支撑拱对应研究点峰值压力的百分比。

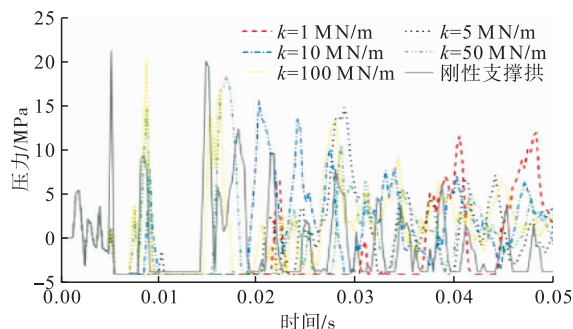


图9 拱顶压力时程曲线

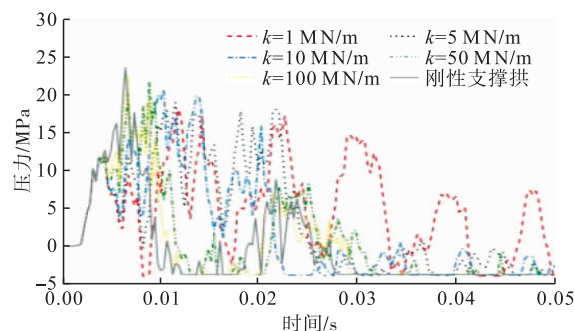


图10 拱肩压力时程曲线

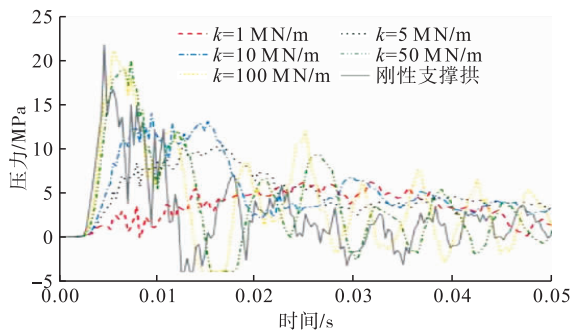


图 11 拱脚压力时程曲线

表 4 研究点的峰值压力

| 刚度系数/<br>( $\text{MN} \cdot \text{m}^{-1}$ ) | 拱顶峰值<br>压力/MPa | 拱肩峰值<br>压力/MPa | 拱脚峰值<br>压力/MPa |
|----------------------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| 1                                            | 12.0(56.3%)    | 18.1(76.4%)    | 6.2(28.4%)     |
| 5                                            | 14.8(69.5%)    | 19.0(80.2%)    | 10.5(48.2%)    |
| 10                                           | 15.6(73.2%)    | 20.7(87.3%)    | 14.0(64.2%)    |
| 50                                           | 18.3(85.9%)    | 21.8(92.0%)    | 21.0(96.3%)    |
| 100                                          | 20.5(96.2%)    | 22.5(94.9%)    | 21.1(96.8%)    |
| 刚性支撑拱                                        | 21.3(100%)     | 23.7(100%)     | 21.8(100%)     |

由表 4 可知:刚度系数与研究点峰值压力关系密切,刚度系数越小,研究点峰值压力越小,刚度系数与峰值压力成正相关;爆炸荷载下刚度系数相同时,拱肩较拱顶、拱脚峰值压力更大,表明拱肩为结构的薄弱部位;刚度系数较小时,对拱脚峰值压力的影响最大,拱肩的影响最小,例如  $k=1 \text{ MN/m}$ ,拱脚峰值压力为 6.2 MPa,较刚性支撑拱的 21.8 MPa 减少 15.6 MPa,隔振效率为 71.6%,此时拱顶的隔振效率为 43.7%,拱肩隔振效率为 23.6%,拱脚峰值压力减少幅度最大。

### 5.3 刚度系数对结构最小主应力的影响

图 12~14 为结构拱顶、拱肩、拱脚处最小主应力时程曲线。由图可见:研究点最小主应力大多为负值,表明结构整体主要受拉应力影响;最小主应力时程曲线在计算时间内不断振荡,达到峰值后逐渐衰减;刚度系数越小,研究点出现最小主应力峰值的时间越晚,数值越小。

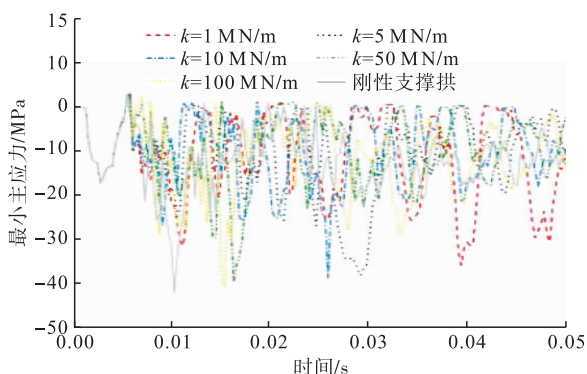


图 12 拱顶最小主应力时程曲线

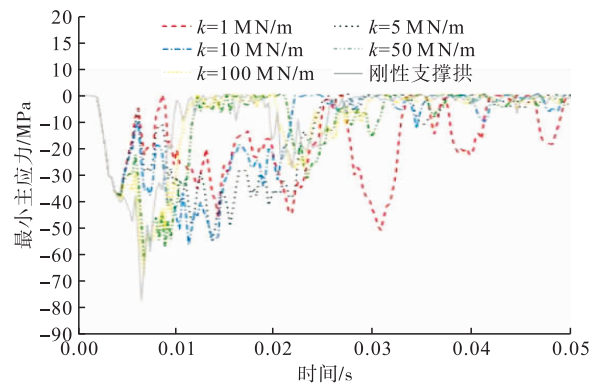


图 13 拱肩最小主应力时程曲线

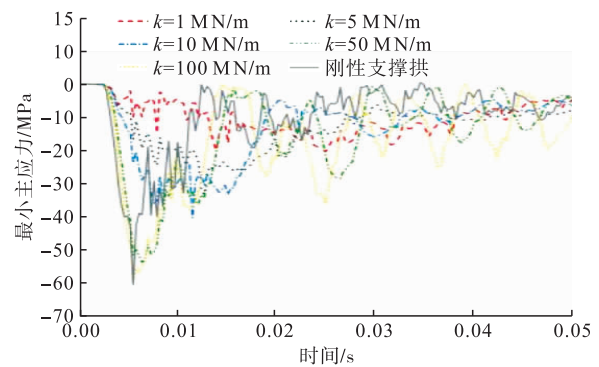


图 14 拱脚最小主应力时程曲线

表 5 为不同支撑方案下拱顶、拱肩、拱脚的最小主应力峰值,同刚性支撑拱对应研究点最小主应力峰值比值在表内括号中列出。

表 5 研究点的最小主应力峰值

| 刚度系数/<br>( $\text{MN} \cdot \text{m}^{-1}$ ) | 拱顶最小主应<br>力峰值/MPa | 拱肩最小主应<br>力峰值/MPa | 拱脚最小主应<br>力峰值/MPa |
|----------------------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| 1                                            | -35.9(84.9%)      | -50.9(65.5%)      | -20.5(33.8%)      |
| 5                                            | -38.1(90.1%)      | -55.0(70.8%)      | -33.4(55.1%)      |
| 10                                           | -38.7(91.5%)      | -56.4(72.6%)      | -40.4(66.7%)      |
| 50                                           | -69.6(93.6%)      | -62.4(80.3%)      | -53.9(88.9%)      |
| 100                                          | -41.2(97.4%)      | -68.1(87.6%)      | -60.1(99.2%)      |
| 刚性支撑拱                                        | -42.3(100%)       | -77.7(100%)       | -60.6(100%)       |

分析表 5 可知:刚度系数与最小主应力峰值成正相关;拱肩处最小主应力峰值普遍较拱顶和拱脚更大;不同刚度系数下研究点最小主应力峰值均超过 C30 混凝土抗拉强度 10 倍以上,根据最大拉应力破坏准则混凝土受拉破坏,但应力远小于 HRB335 级钢筋的屈服强度,此时爆炸引起结构混凝土整体开裂,未出现震塌、崩落等局部破坏;刚度系数较小时,对拱脚最小主应力峰值影响最大,拱顶影响最小,如  $k=1 \text{ MN/m}$  时,拱脚最小主应力峰值为 -20.5 MPa,较刚性支撑拱的 -60.6 MPa 减少 40.1 MPa,隔振效率为 66.2%,此时拱顶隔振效率为 15.1%,拱肩隔振效率为 34.5%,拱脚最小主应力峰值的减少幅度最大。

### 5.4 刚度系数对结构竖向位移的影响

图15~17为拱顶、拱肩、拱脚处竖向位移时程曲线。

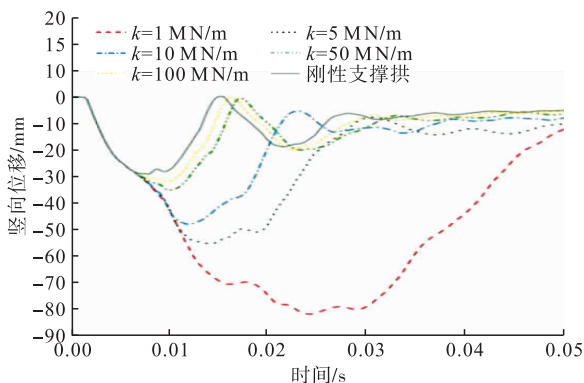


图15 拱顶竖向位移时程曲线

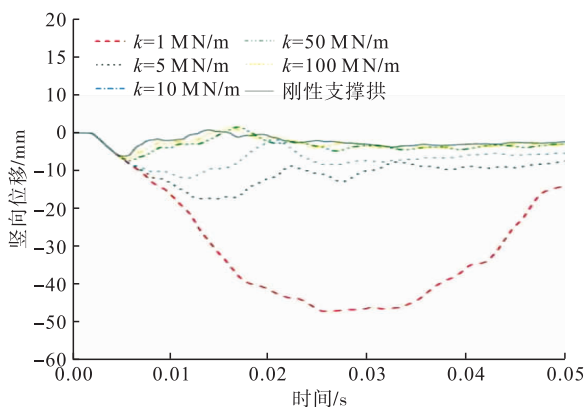


图16 拱肩竖向位移时程曲线

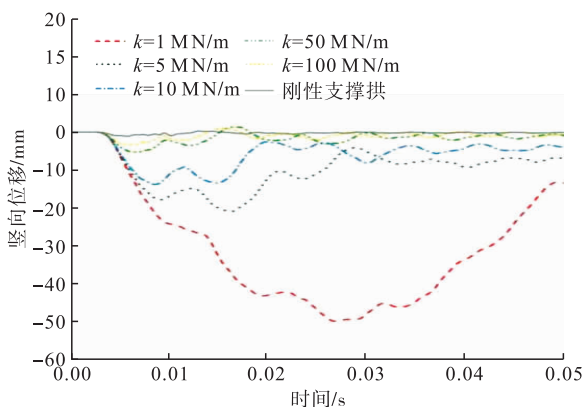


图17 拱脚竖向位移时程曲线

由图可知:刚度系数越小,研究点竖向位移峰值越大,弹性支撑的变形越大,刚度系数与竖向位移峰值成负相关;拱顶、拱肩和拱脚位移大多为负值,拱结构沿Y轴负方向运动;研究点达到位移峰值后,由于弹性恢复力的影响,支撑变形逐渐恢复,结构竖向位移减小并开始做自由振动;拱顶位移峰值最大,这是因为拱顶处于迎爆面,位移响应较拱肩和拱脚更为敏感;研究点位移时程曲线初始阶段近似重合,随后刚度系数较大的位移时程曲线斜率增大并出现峰值,刚度系数较小的位移时程曲线斜率几乎不变,

结构位移继续增大,出现峰值的时间更晚、数值更大;减小刚度系数并非总是对结构的缓冲减振起积极作用,如 $k=1$  MN/m时拱顶峰值压力、最大主拉应力分别为12.0 MPa、35.9 MPa,均未达到结构的破坏极限,但位移峰值为81.7 mm,可能出现因结构竖向位移过大而无法继续承载的情况,需综合考虑抗爆承载力和极限位移设计要求,根据工程实际选择刚度系数。

## 6 结论

本文应用ANSYS/LS-DYNA数值分析弹性支撑地下拱结构的模态和爆炸荷载下结构的动力响应,得出以下结论:

- 1)弹性支撑使结构的固有频率减小,自振周期延长,对结构动力响应的降低起到积极作用;
- 2) $k=3$  MN/m为弹性支撑地下拱弹性支撑的临界刚度系数,此时结构的一、二阶模态在外部荷载激励下易同时激发,产生剧烈响应,结构设计时应予以避免;
- 3)弹性支撑地下拱与刚性支撑地下拱相比,结构的压力、应力峰值减小,出现时间延长,竖向位移峰值增大,此时弹性支撑产生变形,消耗较多能量,结构的抗爆承载力提高,弹性支撑具有良好的隔振减振作用;
- 4)弹性支撑的刚度系数减小到某一阈值时结构的竖向位移过大而无法继续承载,应根据结构抗爆承载力和极限位移设计要求合理设置弹性支撑的刚度系数。

## 参考文献

- [1] 康婷,白应生,孙惠香,等. 爆炸冲击荷载作用下弹性支撑拱结构的动力响应分析[J]. 应用力学学报, 2017, 34(4): 679-684.
- [2] YANG Y B, LIN C L, YAU J D, et al. Mechanism of Resonance and Cancellation for Train-Induced Vibrations on Bridges with Elastic Bearings[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 269(1/2): 345-360.
- [3] BRADFORD M A, WANG T, PI Y L, et al. In-Plane Stability of Parabolic Arches with Horizontal Spring Supports I: Theory[J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(8): 1130-1137.
- [4] WANG T, BRADFORD M A, GILBERT R I, et al. In-Plane Stability of Parabolic Arches with Horizontal Spring Supports II: Experiments[J]. Journal of Structural Engineering, 2007, 133(8): 1138-1145.
- [5] LEGERON F, SHEIKH M N. Bridge Support Elastic

- Reactions Under Vertical Earthquake Ground Motion [J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(10): 2317-2326.
- [6] YI Z P, WANG L H, TU G Y. The In-Plane Buckling of Elastic Support Circular Arches Considering the Geometrical Imperfections [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 639-640(1): 786-789.
- [7] MONDAL P D, GHOSH A D, CHAKRABORTY S. Performances of Various Base Isolation Systems in Mitigation of Structural Vibration Due to Underground Blast Induced Ground Motion [J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2016, 17(4): 1750043.
- [8] 宋春明, 王明洋. 动支座对拱结构抗爆承载力的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2009, 29(3): 312-317.
- [9] 叶茂, 张鹏, 傅继阳, 等. 带弹性支撑多跨连续梁桥的车桥耦合演变随机振动 [J]. *振动与冲击*, 2014, 33(3): 76-82.
- [10] 张志俊, 李小珍, 张迅, 等. 弹性支座对桥梁车致振动的隔振效果研究 [J]. *工程力学*, 2015(4): 111-119.
- [11] 刘晶波, 杜修力, 李宏男, 等. *结构动力学* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [12] 任辉启, 穆朝民, 刘瑞朝. 精确制导武器侵彻效应与工程防护 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [13] 孙惠香, 许金余, 朱国富, 等. 爆炸作用下跨度对地下结构破坏形态的影响 [J]. *空军工程大学学报(自然科学版)*, 2013, 14(2): 90-94.
- [14] 李世民, 李晓军, 李洪鑫. 温压炸药坑道内爆炸冲击波的数值模拟研究 [J]. *应用力学学报*, 2012, 29(5): 119-124, 156.
- [15] LSTC. *LS-DYNA Keyword User's Manual* [M]. California: Livermore Software Technology Corporation (LSTC), 2007.
- [16] 罗兴柏, 张玉玲, 丁玉奎. *爆炸力学理论教程* [M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.

(编辑: 姚树峰)

\*\*\*\*\*

(上接第 59 页)

- [10] 吴双忱, 左峥嵘. 基于深度卷积神经网络的红外小目标检测 [J]. *红外与毫米波学报*, 2019, 38(3): 371-380.
- [11] ZHANG X X, ZHU X. Moving Vehicle Detection in Aerial Infrared Image Sequences via Fast Image Registration and Improved YOLOv3 Network [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(11): 4312-4335.
- [12] LIU Y, CHEN X, CHENG J, et al. Infrared and Visible Image Fusion with Convolutional Neural Networks [J]. *International Journal of Wavelets, Multiresolution and Information Processing*, 2018, 16(3): 1850018.
- [13] NEUBECK A, VAN Gool L. Efficient Non-Maximum Suppression [C]//18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06). IEEE, 2006, 3: 850-855.
- [14] 江泽涛, 蒋琦, 黄永松, 等. 基于潜在低秩表示与复合滤波的红外与弱可见光增强图像融合方法 [J]. *光子学报*, 2020, 49(4): 162-173.
- [15] 汪勇, 张英, 廖如超, 等. 基于可见光、热红外及激光雷达传感的无人机图像融合方法 [J]. *激光杂志*, 2020, 41(2): 141-145.
- [16] 黄福升, 蔺素珍. 基于拉普拉斯金字塔变换方法的多波段图像融合规则比较 [J]. *红外技术*, 2019, 41(1): 64-71.
- [17] 车敏, 张红梅, 拓明福. 小波变换和边缘信息的光谱图像融合研究 [J]. *激光杂志*, 2019, 40(11): 71-75.
- [18] 刘明君, 董增寿. 基于多特征的红外与可见光图像融合 [J]. *激光杂志*, 2019, 40(10): 81-85.
- [19] 唐聪, 凌永顺, 杨华, 等. 基于深度学习的红外与可见光决策级融合检测(英文) [J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(6): 456-470.
- [20] 王芳莲, 李喜艳. 基于双层次决策规则的红外与可见光图像融合 [J]. *半导体光电*, 2020, 41(2): 282-286.
- [21] LI C, ZHAO N, LU Y, et al. Weighted Sparserepresentation Regularized Graph Learning for RGB-T Object Tracking [C]//Proceedings of the 25th ACM international Conference on Multimedia. 2017: 1856-1864.
- [22] MA J, ZHOU Z, WANG B, et al. Infrared and Visible Image Fusion Based on Visual Saliency Map and Weighted Least Square Optimization [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2017, 82: 8-17.
- [23] LI H, WU X J. Infrared and Visible Image Fusion Using Latent Low-Rank Representation [R]. arXiv Preprint arXiv:1804.08992, 2018.
- [24] LI H, WU X J. DenseFuse: A Fusion Approach to Infrared and Visible Images [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2018, 28(5): 2614-2623.

(编辑: 徐敏)