

# 多次爆炸载荷作用下浅埋隧道破坏过程的持续同调特征分析\*

刘小飞<sup>1</sup>, 游世辉<sup>2</sup>

(1. 湘潭大学 土木工程与力学学院, 湖南 湘潭 411105;  
2. 枣庄学院 机电工程学院, 山东 枣庄 277160)

**摘要:** 浅埋隧道在多次爆炸载荷作用下的破坏特征是防护工程设计和评估的重要研究问题, 发展适应浅埋特征安全预警方法具有重要意义. 采用离散元法建立浅埋隧道力学模型, 运用 Saint-Venant 载荷等效原理将爆炸载荷看作一系列均匀作用在地表的动力, 基于离散元法得到各次爆炸载荷作用后的动力响应和隧道围岩损伤演化过程, 利用强度折减法得出隧道围岩的安全系数. 引入持续同调理论, 采用持续同调的数学方法对离散元模型在多次爆炸载荷作用下的破坏特征进行定量与定性分析. 结果表明, 持续同调的方法能准确反映隧道围岩的拓扑特征, 其中 1 维条形码连通半径最大值能对隧道失稳进行有效预警. 这为隧道安全设计与灾害预报研究提供了一种全新的数学方法.

**关键词:** 持续同调; 浅埋隧道; 离散元; 多次爆炸载荷

**中图分类号:** O302

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.21656/1000-0887.400222

## 引 言

地下人防工程、防护工程和地铁隧道等工程结构在爆炸载荷作用下的安全问题是关系到地下工程在战争或意外爆炸条件下生存和保障能力的重要问题<sup>[1]</sup>. 研究爆炸载荷作用下隧道结构破坏过程的持续同调特征具有非常重要的理论和现实意义.

由于隧道围岩结构往往被层面和节理面等弱结构面所切割, 其结构呈现不连续性, 所以国内外学者多采用离散元法对隧道围岩的损伤演化进行研究<sup>[2-6]</sup>. 最近几年, 持续同调方法不断被国内外学者引入大数据、人工智能、智能制造、材料基因计划、机器与深度学习等领域<sup>[7-13]</sup>. 在隧道破坏过程的持续同调特征方面, 目前国内外几乎没有相关研究. 但隧道的拓扑优化在防护与设计中有举足轻重的作用, 沈才华等<sup>[14]</sup>引入拓扑优化理论, 对隧道开挖进行了拓扑优化分析; 来弘鹏等<sup>[15]</sup>基于连续体的结构优化理论和有限元方法, 对不同应力场单拱隧道和连拱隧道衬砌结构进行拓扑优化研究, 然而过往研究操作复杂且缺乏对外力作用下的考虑. 持续

\* 收稿日期: 2019-07-22; 修订日期: 2020-02-26

基金项目: 国家自然科学基金(51375416)

作者简介: 刘小飞(1994—), 男, 硕士生(E-mail: 773078501@qq.com);

游世辉(1962—), 男, 教授, 博士生导师(通讯作者. E-mail: shihuiyou@hotmail.com).

引用格式: 刘小飞, 游世辉. 多次爆炸载荷作用下浅埋隧道破坏过程的持续同调特征分析[J]. 应用数学和力学, 2020, 41(11): 1237-1249.

同调是一种在描述数据的几何、结构和拓扑方面强有力的通用技术,它可以连续调整覆盖尺度、得到所有尺度上的网络,然后计算同调群“从生到死”的拓扑不变量的变化,尤其是它精准处理图像的优势,结合目前地下工程使用探地雷达等得到图像,可以严格精准地描述隧道岩体的结构特征和演化规律,且可以将拓扑信息引向机器学习以及人工智能,在隧道工程领域,这是一种全新高效的分析方法。

本文采用离散元软件 UDEC 模拟研究多次爆炸载荷作用下隧道围岩的动态响应,通过分析多次爆炸波作用下隧道围岩位移、速度的结果来研究隧道围岩的稳定性和破坏的原因.运用软件自带的强度折减法得出隧道整体的安全系数.最后,将隧道围岩看成是多尺度结构网络,用持续同调的方法分析多次爆炸载荷作用下隧道围岩的拓扑特征,并基于 1 维条形码的参数来描述隧道围岩的损伤演化规律。

## 1 持续同调基本原理

持续同调源于 Morse 理论,在持续的空间变化中,它通过单纯复形,构造出同调群,得到反映持续同调特征的条码图,并以之研究数据间的拓扑特征.持续同调可以在很广的空间尺度上检测持续的特征,这些特征与过滤尺度无关,更能代表空间的真实特征,这在计算不同空间拓扑特征方面是一种高效严谨的方法。

### 1.1 单纯复形

单纯形:任意一个有限的顶点集合,顶点间构成的最大无关向量的秩为  $n$ .假设维度为  $n$ ,则单纯形  $V$  可表示为

$$V = \{v_i, i = 0, 1, \dots, n\}. \quad (1)$$

单纯复形:单纯复形是单纯形的集合,可表示为  $K$ .它满足:1)  $K$  中任意一个单纯形的任意面仍属于  $K$ ; 2)  $K$  中任意两个单纯复形  $k_1, k_2$  的交集是空集或是与二者共享面中的其中一个。

### 1.2 同调群

假设  $(v_0, v_1, \dots, v_n)$  是  $n$  维单纯形  $A'$  的顶点,设置换  $\phi$ , 则

$$(v_0, v_1, \dots, v_n) = \text{sign}(\phi)\phi(v_0, v_1, \dots, v_n). \quad (2)$$

求取边缘,再推广到一般情况得

$$\partial(v_0, v_1, \dots, v_n) = \sum_{i=0}^n (-1)^i (v_0, v_1, \dots, v_{i-1}, v_{i+1}, \dots, v_n), \quad (3)$$

其中  $(v_0, v_1, \dots, v_{i-1}, v_{i+1}, \dots, v_n)$  表示去掉顶点  $v_i$  得到的  $n-1$  维定向单纯形.再假设  $A$  为有限的单纯复形,设  $A$  上的全体定向  $q$  维单纯复形为集合  $Q = \{q_i, i = 1, 2, \dots, m\}$ , 则在该集合上以整数为系数的线性组合构成的自由交换群记为  $G_q(A)$ :

$$G_q(A) = \left\{ \sum_{i=1}^m \lambda_i q_i, i \in \mathbf{Z} \right\}, \quad (4)$$

并将  $G_q(A)$  称为  $A$  的  $q$  维链群.根据边缘的定义确定一个同态,为边缘同态,即

$$\partial: G_q(A) \rightarrow G_{q-1}(A). \quad (5)$$

令单个顶点的边缘为零,同时令  $G_{-1}(A) = 0$ .由于同态  $\partial$  的核为闭链群,即同态  $\partial$  的核中的元素都是  $G_q(A)$  的闭链,记为  $Z_q(A)$ .边缘闭链是指某个闭链是其高一维链的边缘,即  $G_{q+1}(A)$  中的链求边缘得到的  $G_q(A)$  的链,由边缘闭链构成的群称为边缘闭链群,记为  $B_q(A)$ .则  $q$  维同调群定义为

$$H_q(X, A) = \frac{Z_q(A)}{B_q(A)}. \quad (6)$$

### 1.3 持续同调

对于顶点集  $V = \{v_0, v_1, \dots, v_n\}$ , 设顶点集为点云集, 即可度量化. 现在引入连通半径  $\varepsilon$  的概念(假如两点之间的距离小于  $\varepsilon$ , 则称两点之间的连接为连通), 以  $V$  中每个顶点为圆心, 以  $\varepsilon/2$  为半径画小球  $d$ , 假如  $p$  个小球的交集不是空集, 则这  $p$  个顶点构成了一个  $p-1$  维单纯复形, 随着  $\varepsilon$  的增大, 构成复形的单纯形数量也在增加, 这就形成一个复形流  $A_0 \subset A_1, \dots, \subset A_n$ . 再对复形流求不同时刻的同调群  $H_p(A_0), H_p(A_1), \dots, H_p(A_n)$ , 这就是持续同调.

### 1.4 条形码

条码图用来反映在连通半径增加过程中持续同调变化的拓扑特征, 它是实数轴  $\mathbf{R}$  上的有限个区间组成的集合, 一般可以表示为  $[a, b)$  或  $[a, +\infty)$ , 其中  $a, b \in \mathbf{R}$ . 以下对持续同调简单的举例说明, 图 1 是拓扑不变量 Betti 数, 0 维 Betti 数  $b_0$  表示联通体的个数, 1 维 Betti 数  $b_1$  表示一维孔洞的个数, 2 维 Betti 数  $b_2$  表示三维空腔或空间的个数, 更高维以此类推.

	point	circle	ball	torus
$b_0$ :	1	1	1	1
$b_1$ :	0	1	0	2
$b_2$ :	0	0	1	1

图 1 不同维 Betti 数

Fig. 1 Different Betti numbers

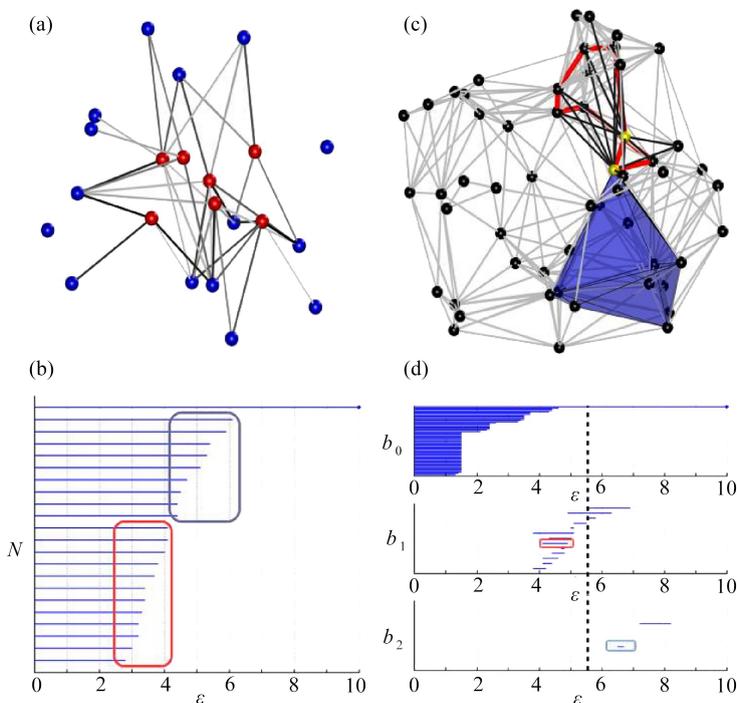


图 2 单纯复形及其对应条形码

Fig. 2 The simplicial complex and its corresponding barcode

图 1 是一个点、一个圆、一个空球体和一个环面的 Betti 数, 对于圆环面, 添加两个辅助环

来解释  $b_1 = 2$ 。

图 2 是点云集到条码图的数据拓扑特征演示,图 2(a) 表示空间中的点,构成一个度量空间;图 2(b) 就是其对应的  $b_0$  条码图,纵坐标是点的个数,横坐标是连通半径;图 2(d) 是度量空间图 2(c) 的条码图,它的上、中、下三个纵坐标分别是  $b_0, b_1, b_2$ , 取不同的  $\varepsilon$  得到的单纯复形结构。图 2(d) 中第一个条码图表示连通体个数,当  $\varepsilon$  比较小时,纵坐标就表示其点的个数,但随着  $\varepsilon$  不断变大,  $b_0$  变为 1, 可以理解为伴随连通半径变大只有一个“点”了。图 2(d) 中第二个条码图表示一维孔洞个数,第三个条码图表示三维空腔或空间的个数,当  $0 < \varepsilon < 3.82$  时,  $b_1 = 0, b_2 = 0$ ; 当  $6.46 < \varepsilon < 6.7$  时,形成了一个一维孔洞、一个三维空腔或空间,  $b_1 = 1, b_2 = 1$ ; 当  $8.2 < \varepsilon$  时,  $b_1 = 0, b_2 = 0$ , 一维孔洞、三维空腔或空间被填满。

## 2 多次爆炸载荷作用下隧道稳定影响的模拟分析

### 2.1 离散元模型的建立

离散元模型的建立参照重庆五路口地铁站的实际情况<sup>[16]</sup>,五路口隧道区间折法线大跨度断面隧道起讫点里程为 DK60+920.559~DK61+255.889,隧道总长 105.33 m,采用矿山法施工,隧道拱顶距地面大约 16 m,开挖断面宽 20.40 m、高 17.99 m,属于特大断面暗挖隧道,经勘探隧道围岩大部分是砂岩,属于 IV 级围岩。

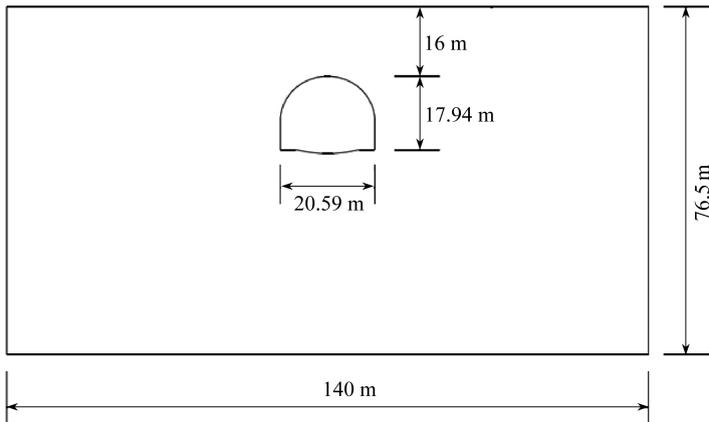


图 3 模型尺寸

Fig. 3 Model sizes

表 1 隧道围岩力学参数

Table 1 Mechanical parameters of the tunnel surrounding rock

density $\rho / (\text{kg}/\text{m}^3)$	bulk modulus $K / \text{GPa}$	shear modulus $G / \text{GPa}$	internal friction angle $\phi / (^\circ)$	cohesive force $c / \text{MPa}$	tensile strength $T / \text{MPa}$
2 300	4.17	1.92	35	0.5	1.0

表 2 节理力学参数

Table 2 Joint mechanics parameters

normal stiffness $k_n / \text{GPa}$	tangential stiffness $k_t / \text{GPa}$	internal friction angle $\phi_k / (^\circ)$	cohesive force $c_k / \text{MPa}$	tensile strength $T_k / \text{MPa}$
10	10	20	0.04	0

综合考虑隧道埋深和边界效应对隧道围岩变形的影响,根据实际工程数据,建立了一个用

于本文研究的离散元计算模型,如图3所示。模型宽度  $l = 140 \text{ m}$ ,高度  $h = 76.5 \text{ m}$ ,开挖隧道顶部埋深  $f = 16 \text{ m}$ ,开挖隧道断面宽度  $l_1 = 20.59 \text{ m}$ ,开挖高度  $h_1 = 17.94 \text{ m}$ 。隧道围岩的力学参数和节理力学参数如表1和表2所示,围岩的力学参数和节理力学参数严格根据工程地质报告中围岩等级对应的材料参数选取。在模拟中,爆破作用会引起岩体的变形,因此设置岩体和节理都选用 Mohr-Coulomb 准则。根据文献[16],当节理面间距为  $5 \text{ m}$ 时,围岩的破坏面积、塑性面积和平均位移都最大,所以本文选择两条间距为  $5 \text{ m}$ 、倾角为  $50^\circ/110^\circ$  贯穿隧道围岩的节理。为了使模型边界不影响模拟的精确性,在模型受重力作用下达到平衡状态后对底部和两侧施加黏性边界条件,并对两侧施加水平方向约束,对底部施加竖直方向约束。

模拟假设隧道正上方地面受到爆炸冲击,具体模型中以施加爆炸荷载来模拟未支护隧道受地面爆炸的影响。根据文献[17]的研究,模拟隧道受来自地面爆炸荷载作用时,相当于在模型顶部施加一个随时间变化的均布荷载。在数值模拟过程中,爆炸荷载时程曲线主要处理成三角形、指数型等形式<sup>[18]</sup>,本文采用三角形形式,而爆炸荷载的持续时间通常认为在  $1.0 \times 10^{-6} \sim 0.1 \text{ s}$  之间<sup>[19]</sup>。综合考虑模型是浅埋隧道以及离散元计算时,相比于连续介质力学的计算方法,应力波在内部传递过程相对缓慢,所以爆炸荷载的持续时间取  $35 \text{ ms}$ ,其中升压时间  $5 \text{ ms}$ ,正压作用时间  $30 \text{ ms}$ ,同时爆炸荷载的取值也相对较大,以模拟破坏的最大情况。

爆炸荷载取用等效均布荷载进行计算,计算公式为

$$P = \frac{2R}{L} \cdot P_0, \quad (7)$$

式中  $P$  为等效均布荷载,  $R$  为炮孔半径,  $L$  为炮孔的孔间距,本文中炮孔孔间距取值为  $1.25 \text{ m}$ ,  $P_0$  为单个炮孔作用时产生的荷载。

$$P(t) = P_m \cdot f(t), \quad (8)$$

$$P_m = \frac{1}{8} \cdot \rho_c \cdot D^2 \cdot \kappa_c^{-6} \cdot \eta, \quad (9)$$

式中  $f(t)$  是爆炸荷载随时间变化的指数型函数,  $P_m$  为爆炸荷载的峰值,  $D$  是炸药爆速,  $\rho_c$  为装药密度,  $\kappa_c$  为不耦合系数,  $\eta$  为孔壁压力受爆轰气体影响的扩大倍数,本模型取值为 9。

所以,得出均布荷载的公式为

$$P = \frac{R}{4L} \cdot \rho_c \cdot D^2 \cdot \kappa_c^{-6} \cdot \eta \cdot f(t). \quad (10)$$

参考文献[17]中2号岩石参数,炸药爆速为  $3.5 \text{ km/s}$ ,装药密度为  $1000 \text{ kg/m}^3$ ,炮孔半径为  $0.055 \text{ m}$ ,装药不耦合系数为 1.447。经计算  $P_m = 1.5 \times 10^9 \text{ Pa}$ ,  $P = 1.38 \times 10^8 f(t)$ 。

## 2.2 多次爆炸载荷作用下隧道的动态响应

在仅受重力作用和初始边界条件的自然状态下,隧道围岩力学状态趋于稳定,模型的最大位移和隧道上部塌陷区位移分别为  $0.232, 0.208 \text{ m}$ 。对模型进行第一次到第五次爆炸荷载施加,分析其速度与位移的矢量图与云图后得到以下4个表格(表3~6)。

从模型最大位移表(表3)和隧道上部塌陷区位移表(表5)可看出,随着爆破次数的增加,其位移的增加量越来越大。第一次施加爆炸荷载后,相对于自然状态下的位移,隧道最上部的下降位移增加  $0.064 \text{ m}$ ,隧道的最大位移增加  $0.157 \text{ m}$ 。在第一次爆炸后,隧道上部塌陷区的下降速度加快,之后随着爆炸次数增加,隧道最上部的下降位移相对于自然状态下的位移分别增加  $0.596, 1.181, 1.913, 3.123 \text{ m}$ 。但对比表3和表5可以发现,隧道上部并不是塌陷最大位移处,隧道最大位移处在隧道底部的左右两侧,隧道围岩左右两底边也是受力最大的地方。结合

模型最大速度表(表4)和隧道上部塌陷区速度表(表6)可以看到,由于爆炸载荷相对较大,而实际模型是浅埋隧道,故速度相对较大.第一次爆炸中,隧道最大速度为 17.42 m/s,隧道上部塌陷区的最大速度为 10.45 m/s,不同位置的速度差异较大,随着爆炸次数的增加,隧道围岩破坏的速度也越来越快,第一次爆破后岩体的速度有一个非常大的增加,这说明爆破次数越多,对岩体稳定性的破坏效果越明显.但鉴于本文主要选取的是围岩块体的位移特征,而爆炸在隧道围岩中的破坏速度还与爆炸载荷大小、围岩力学参数等相关,故不做深入研究.

表3 模型最大位移

Table 3 Maximum displacements of the model

burst/time	1	2	3	4	5
displacement $d_m$ /m	0.389	1.149	1.997	3.028	4.758

表4 模型最大速度

Table 4 Maximum speeds of the model

burst/time	1	2	3	4	5
speed $v_m$ / (m/s)	17.42	20.76	27.07	38.87	46.47

表5 隧道上部塌陷区位移

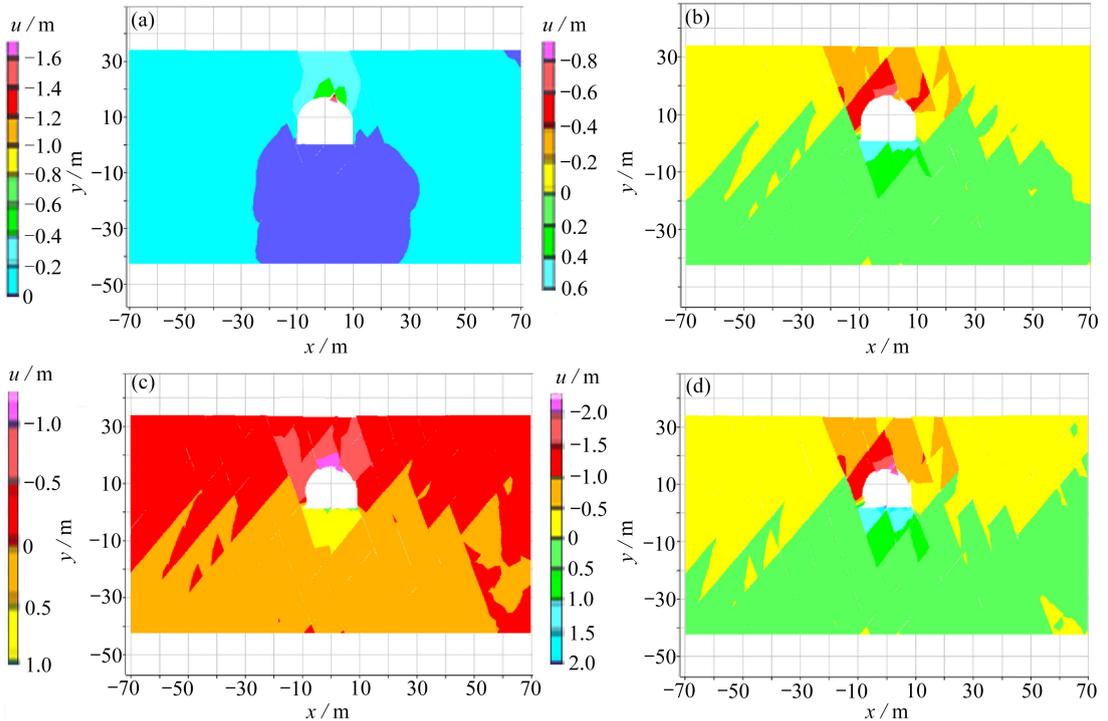
Table 5 Displacements of the upper collapse zone in the tunnel

burst/time	1	2	3	4	5
displacement $d_u$ /m	0.272	0.804	1.389	2.121	3.331

表6 隧道上部塌陷区速度

Table 6 Speeds of the upper collapse zone in the tunnel

burst/time	1	2	3	4	5
speed $v_u$ / (m/s)	10.45	14.54	16.24	23.32	27.88



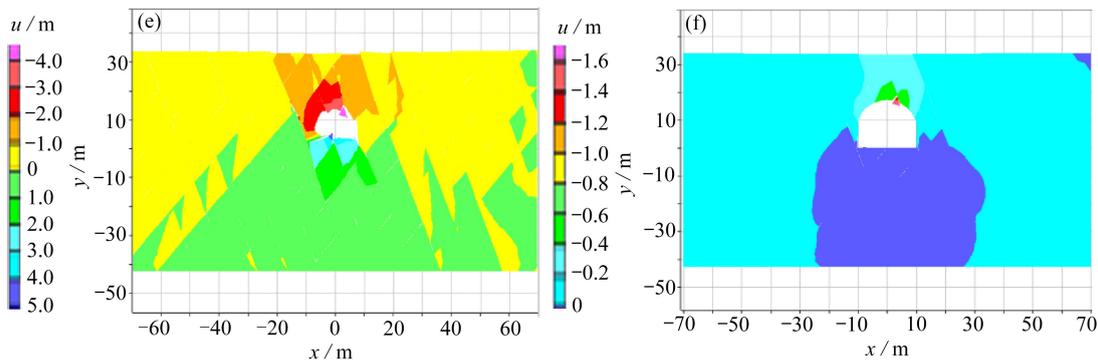


图 4 1 至 5 次施爆与自然状态下的隧道位移云图

Fig. 4 One to five explosions and tunnel displacement contours under natural conditions

注 为了解释图中的颜色,读者可以参考本文的电子网页版本,后同。

图 4(a)~(f) 分别是 1 至 5 次施加爆炸载荷后及自然状态下的隧道位移云图,当地基土体及隧道结构一定时,爆炸荷载作用下,隧道结构最大位移随爆炸荷载强度、爆炸荷载作用时间增大而增大,随隧道埋深增大而减小,近似呈线性关系<sup>[20]</sup>。结合本文施加的爆炸载荷较大且为多次、隧道围岩未进行支护加固、岩体为砂岩特质等因素可知,隧道会产生较大变形。从图中可以看出,在 5 次施加爆炸载荷后,隧道已经严重坍塌。

根据郑颖人等<sup>[20]</sup>一批学者的大量研究,强度折减法已应用于隧道稳定性的判断。在求出隧道围岩整体安全系数的同时,得到潜在的滑移面,为后续隧道稳定性评价提供可靠的依据。本文研究的隧道模型是浅埋隧道,所以破坏形式主要研究滑移为主。

对于本文研究的 Mohr-Coulomb 模型,当结构面未滑动或张开时,抗拉强度和抗剪强度为

$$\begin{cases} T_{\max} = -TA_c, \\ F_{\max}^t = cA_c + F^n \tan \phi, \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $T_{\max}$  为最大拉力,  $T$  为结构面抗拉强度,  $A_c$  为接触面积,  $F_{\max}^t$  为结构面抗剪强度,  $F^n$  为法向应力,  $c, \phi$  分别为结构面的凝聚力和内摩擦角。

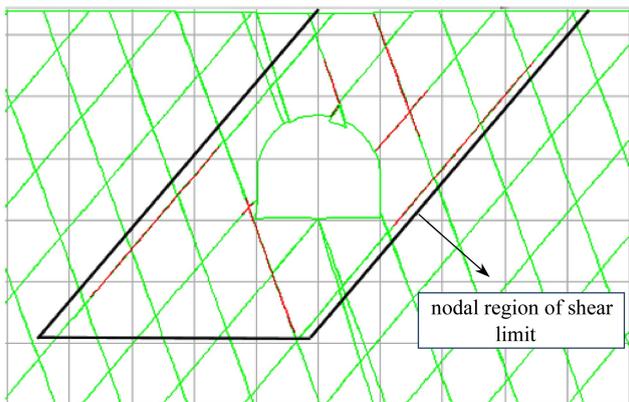


图 5 第一次爆破后达到剪切极限的节点图

Fig. 5 The map of nodes reaching shear limits after first blasting

当隧道围岩出现滑移时,其抗拉强度和抗剪强度为

$$\begin{cases} T_{\max} = T_{\text{residual}}, \\ F_{\max}^n = C_{\text{residual}} A_c + F^n \tan \phi, \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $T_{\max}$  为最大拉力,  $T_{\text{residual}}$  为残余拉力,  $F_{\max}^n$  为残余剪力,  $C_{\text{residual}}$  为残余凝聚力,  $F^n$  为法向应力,  $A_c$  为接触面积,  $\phi$  为结构面的内摩擦角。

UDEC 程序可对变形体和结构面的强度参数进行折减, 当隧道失稳时, 内置的强度折减计算程序计算得到隧道的整体安全系数<sup>[21]</sup>。从隧道围岩平衡状态开始, 对变形块体结构面参数  $c, \phi$  值进行折减, 根据计算, 折减系数为 1.52 时, 隧道处于极限状态。

从第一次爆破后达到剪切极限的节点图(图 5)可看出, 在经过第一次爆破后, 塌陷区的边界已经达到了剪切强度极限。从图 4 各次爆炸后的位移云图可以看出, 在第一次施加爆炸载荷后, 隧道围岩随着爆炸次数的增加, 塌陷开始变得越来越明显。在第一次爆炸载荷作用后, 塌陷区已达到剪切强度极限, 再施加爆炸载荷后即出现大面积坍塌。

### 3 多次爆炸载荷作用下隧道围岩的持续同调特征

引入持续同调的数学方法来分析多次爆炸载荷作用下隧道围岩的稳定性, 在研究隧道围岩在爆炸载荷作用下的块体位移时, 先把围岩划分成无数块体组成的图像, 把块体看做欧氏空间的一个点云集。图 6 是在开挖自然状态下的隧道围岩块体散点图, 即自然状态下的隧道围岩点云集。

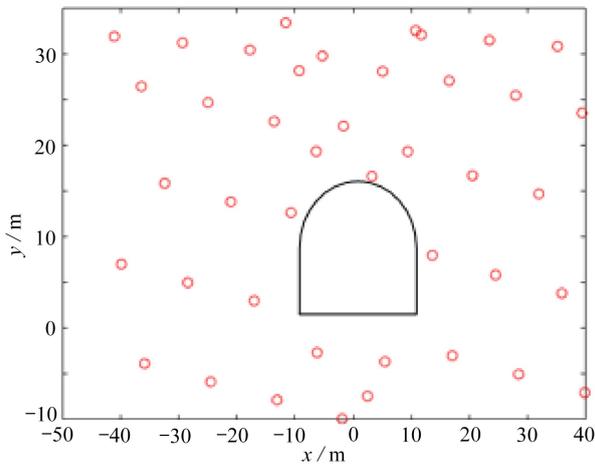


图 6 自然状态下隧道围岩块体散点图

Fig. 6 The scatter plot of tunnel rock blocks in the natural state

选取隧道围岩周围最近且在爆炸载荷作用下位移大于 0.01 m 的 42 个块体作为点云集, 利用 JAVAPLEX 软件得出持续同调拓扑特性的相关参数, 根据其条形码可以得到空间的同调信息如下。

图 7(a) 是 0 维 Betti 数的条形码图, 从图中可以看出, 块体间的连通半径绝大部分是在 0~12 这个区间,  $\varepsilon$  从自然状态到 1 至 5 次爆炸最大值几乎没有变化, 在选取块体区域一定情况下, 由于爆炸载荷大小的原因, 边缘块体的位移变化比较小。当  $\varepsilon < 1$  时, 从开挖到第五次爆炸的  $b_0 = 42$ , 此时从自然状态到 1 至 5 次爆炸由于连通半径还比较小, 纵坐标数还展现的是选取隧道空间的块体数; 当  $1 < \varepsilon < 11.65$  时, 伴随施爆次数增加, 0 维 Betti 数的上层呈“稀薄”且

减少的趋势,这说明隧道围岩块体的间距在拉近,由于施爆次数的增加,造成隧道围岩向中间坍塌;当  $11.65 < \varepsilon$  时,所有块体连通成一个连通体.但从爆炸开始,  $\varepsilon$  开始逐渐变小,是由于爆炸导致隧道围岩开始坍塌,隧道“孔洞”开始被压缩,此时即部分  $\varepsilon$  开始不断减小.从图 7(b) 的 1 维 Betti 数条形码图可以看出,随着爆炸次数的增加,  $\varepsilon$  始终在一个区间变化:  $8 < \varepsilon < 25$ .随着自然状态到多次施加爆炸载荷,1 维条形码最长的一条直线  $\varepsilon$  开始逐渐变小,它表示块体之间形成的 1 维“洞”之间的直径在逐渐变小,这个“洞”是由块体的位置关系或者说它们在欧式空间中的几何结构造成的,当然这其中不止一个“洞”,还有许多小的“洞”,属于条形码的杂音,我们可以忽略不计.

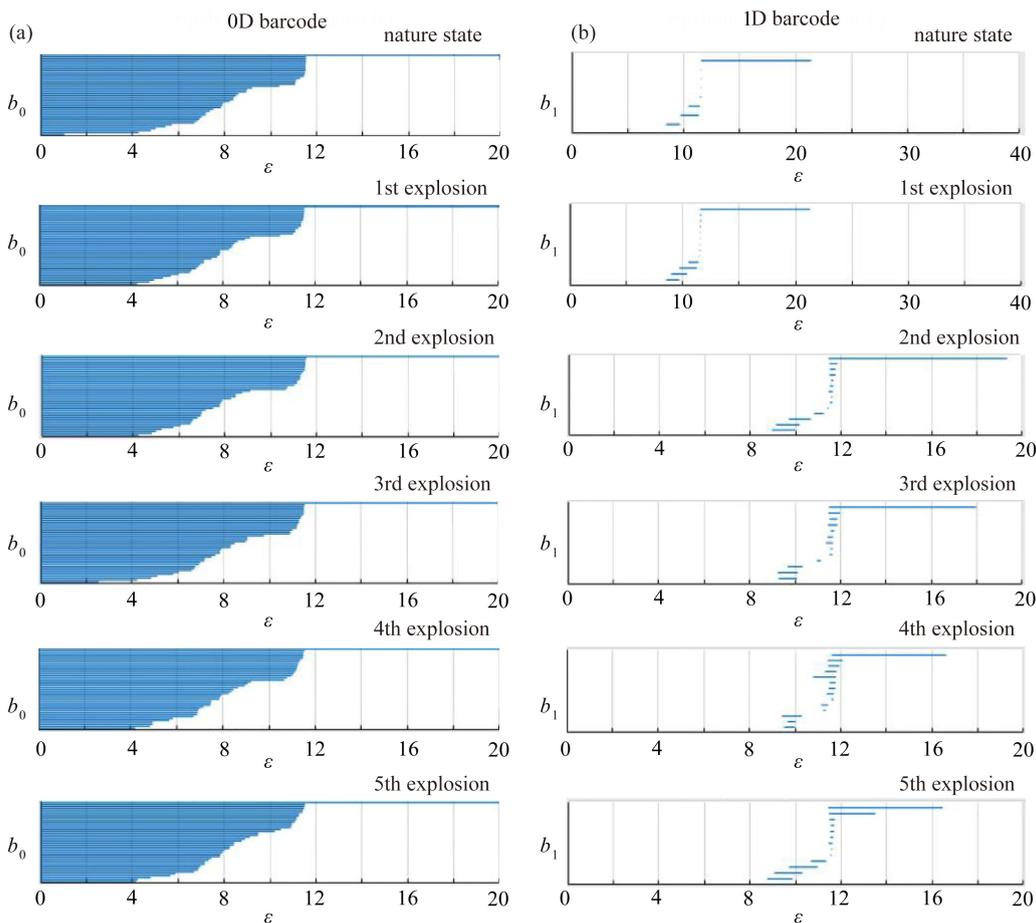


图 7 自然状态与 1 至 5 次施爆隧道围岩块体  $b_0/b_1$  条形码图

Fig. 7 For the natural state and 1 to 5 times of explosions' tunnel surrounding rock blocks'  $b_0/b_1$  barcodes

图 8 是图 7(b) 的一维条形码  $\varepsilon$  最大值从自然状态到施加爆炸载荷 1 至 5 次的变化曲线.由图可知,随着爆炸次数的增加  $\varepsilon$  最大值呈减小趋势,自然状态下的  $\varepsilon$  最大值为 21.82.隧道伴随着施爆次数增加坍塌在不断加剧,隧道开始不断缩小,在第一次爆炸后,  $\varepsilon$  最大值为 21.78,变化量为 0.04,之后 2 至 5 次施爆后  $\varepsilon$  最大值相对于自然状态下变化值分别为 2.17, 3.84, 5.4, 5.7,说明伴随着施爆次数的增加,形成孔洞的连通半径在减小.第一次施加爆炸载荷后,  $\varepsilon$  变化量较小,第二次施加爆炸载荷时,相较于第一次出现 53 倍的变化,结合上一节图 4 和图 5 可

知,在第一次施加爆炸载荷后,隧道围岩达到了剪切极限,即隧道开始剧烈崩塌,塌陷区达到剪切极限后,造成块体间形成的孔洞开始缩小, $\varepsilon$  最大值变化剧烈加快,变得越来越小.此时可以看出,隧道围岩剪切极限可以与 1 维条码图的  $\varepsilon$  最大值建立对应关系,即隧道在安全系数以内, $\varepsilon$  最大值几乎不变,当隧道围岩在爆炸载荷作用下突破剪切极限,隧道开始坍塌, $\varepsilon$  最大值开始减小,且减小的程度与坍塌速度呈线性关系.爆炸次数增加,坍塌的位移在加大,块体之间形成的最大“洞”在减小,根据上面得出推论,在第一次爆炸载荷作用后隧道围岩塌陷区即达到剪切强度极限,这时  $\varepsilon = 21.78$ , 当  $\varepsilon < 21.78$  后,隧道造成破坏,继续对隧道施加爆炸载荷, $\varepsilon$  最大值快速减小,隧道围岩破坏急剧增加.由此可见,隧道围岩的安全系数可以用 1 维条码图的  $\varepsilon$  最大值对应表达,当  $\varepsilon$  最大值突破极限值,隧道开始失稳破坏, $\varepsilon$  最大值也开始下降.

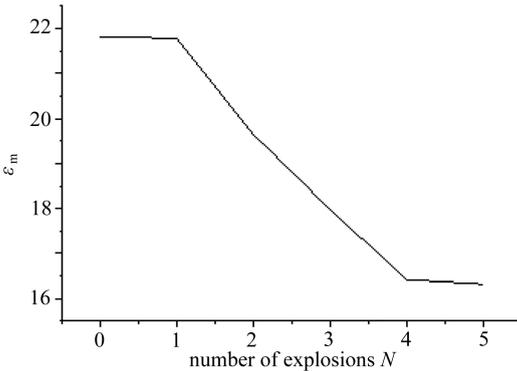


图 8 1 维条码图的  $\varepsilon$  最大值随爆炸次数变化图

Fig. 8 One-dimensional barcodes' maximum  $\varepsilon$  values changing with the number of explosions

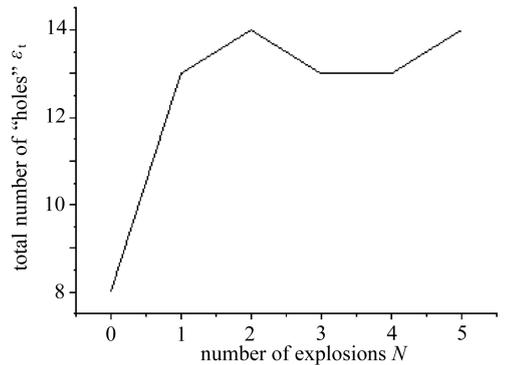


图 9 爆炸过程形成的“洞”总数

Fig. 9 The total number of "holes" formed during explosions

图 9 是自然状态下与 1 至 5 次施爆后 1 维条码图的纵坐标数量,即图 7(b) 的横线总量,它反映了在连通半径变大过程中,隧道围岩持续形成“孔洞”数量.自然状态下,1 维条码图“洞”总数为 8,此时形成了 8 个“孔洞”,多余的孔洞是由于在进行 JAVAPLEX 计算时,去掉了一些位移小且面积较小孔洞造成的.在爆炸载荷开始施加后,迅速增加到了 13,此后皆在 13~14 变化.爆炸载荷下,隧道被破坏,会形成表面突出块体和内部块体位移,“洞”数也就伴随着爆炸载荷施加而快速增加.即施加爆炸载荷会增加“孔洞”数,总体呈现增长之势.

## 4 结 论

1) 本文将一种全新的数学方法——持续同调,引入隧道安全设计与灾害预报研究领域,通过一个隧道模型在多次爆炸载荷作用下的破坏特征研究,证明持续同调用于隧道工程领域的可行性和准确性.

2) 基于离散元法得到各次爆炸载荷作用后的动力响应和隧道围岩损伤演化过程,运用持续同调数学方法对离散元浅埋隧道模型在多次爆炸载荷作用下的破坏特征进行研究.结果表明:随着爆炸次数增加,0 维 Betti 数发生少量变化,即施爆改变了围岩结构分布,0 维  $\varepsilon$  整体呈现减小趋势,反映出了施爆使得围岩坍塌靠拢,且从 1 维 Betti 数的“孔洞”数可以看出,爆炸载荷会增加“孔洞”数,总体呈现增长之势;隧道围岩的安全系数可以用 1 维条码图的  $\varepsilon$  最大值对应表达,当  $\varepsilon$  最大值突破极限值,隧道开始失稳破坏, $\varepsilon$  最大值也开始下降.可以用 1 维条码图的  $\varepsilon$  最大值来判断隧道围岩是否到达最大剪切强度极限,从而判断隧道围岩崩塌临界点.

3) 运用持续同调的方法来研究爆炸载荷作用下的浅埋隧道,可以结合目前隧道工程领域的研究,利用探地雷达等手段得出地下隧道工程的几何结构,即可用持续同调的方法对其进行拓扑特征分析,还可以将数据用到支持向量机、BP神经网络等机器学习领域,即可对浅埋隧道的防护工程设计和评估进行智能化且精确化研究,这为隧道安全设计与灾害预报研究提供了一种全新的研究思路。

#### 参考文献(References):

- [1] BULSON P S. *Explosive Loading of Engineering Structures*[M]. London: Spon Press, 1997.
- [2] 张良, 管晓明, 张春巍, 等. 浅埋隧道爆破地下马蹄形管道的振动响应研究[J]. 爆破, 2019, **36**(2): 117-125.(ZHANG Liang, GUAN Xiaoming, ZHANG Chunwei, et al. Vibration response of horseshoe-shaped pipeline under tunnel blasting[J]. *Blasting*, 2019, **36**(2): 117-125.(in Chinese))
- [3] 李秀茹, 郭恩栋, 张文静, 等. 基于离散元法的爆炸载荷作用下深埋隧道失稳破坏模拟研究[J]. 灾害学, 2019, **34**(1): 87-93.(LI Xiuru, GUO Endong, ZHANG Wenjing, et al. Simulation study on the failure of deep tunnel under blasting load[J]. *Journal of Catastrophology*, 2019, **34**(1): 87-93.(in Chinese))
- [4] 汪成兵. 均质岩体中隧道围岩破坏过程的实验与数值模拟[J]. 岩体力学, 2012, **33**(1): 103-108.(WANG Chengbing. Laboratory and numerical investigation on failure process of tunnel constructed in homogeneous rock[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, **33**(1): 103-108.(in Chinese))
- [5] OSOULI A, BAJESTANI B M. The interplay between moisture sensitive roof rocks and roof falls in an Illinois underground coal mine[J]. *Computers and Geotechnics*, 2016, **80**: 152-166.
- [6] SHREEDHARAN S, KULATILAKE P H S W. Discontinuum-equivalent continuum analysis of the stability of tunnels in a deep coal mine using the distinct element method[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, **49**(5): 1903-1922.
- [7] 张景亮, 鞠先孟. 持续同调在图像分类和识别中的应用[J]. 应用数学与计算数学学报, 2017, **31**(12): 494-508.(ZHANG Jingliang, ZHAI Xianmeng. Application of continuous coherence in image classification and recognition[J]. *Communication on Applied Mathematics and Computation*, 2017, **31**(12): 494-508.(in Chinese))
- [8] HAJJI M, WANG B, SCHEIDEGGER C, et al. Visual detection of structural changes in time-varying graphs using persistent homology[C]//2018 IEEE Pacific Visualization Symposium (PacificVis). Kobe, 2018: 125-134. DOI: 10.1109/PacificVis.2018.00024.
- [9] KRAMAR M, GOULLET A, KONDIC L, et al. Persistence of force networks in compressed granular media[J]. *Physical Review E*, 2013, **87**(4): 042207.
- [10] HIRAOKA Y, NAKAMURA T, HIRATA A, et al. Hierarchical structures of amorphous solids characterized by persistent homology[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, **113**(26): 7035-7040.
- [11] NAKAMURA T, HIRAOKA Y, HIRATA A, et al. Description of medium-range order in amorphous structures by persistent homology[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, **113**: 7035-7040. DOI: 10.1073/pnas.1520877113.
- [12] HIRATA A, MATSUE K, CHEN M W. *Structural Analysis of Metallic Glasses With Computational Homology*[M]. Springer, 2016.

- [13] ARDANZA-TREVLJANO S, ZURIGUEL I, AREVALO R, et al. Topological analysis of tapped granular media using persistent homology[J]. *Physical Review E*, 2014, **89**: 052212.
- [14] 沈才华, 刘松玉, 童立元, 等. 公路隧道开挖的拓扑优化研究[J]. 公路工程, 2008, **33**(4): 70-74.(SHEN Caihua, LIU Songyu, TONG Liyuan, et al. Topological optimization of highway tunnel excavation[J]. *Highway Engineering*, 2008, **33**(4): 70-74.(in Chinese))
- [15] 来弘鹏, 谢永利, 杨晓华, 等. 软弱围岩公路隧道衬砌结构形式拓扑优化[J]. 公路, 2011(4): 203-207.(LAI Hongpeng, XIE Yongli, YANG Xiaohua, et al. Topological optimization of highway tunnel lining structure in weak surrounding rock[J]. *Highway*, 2011(4): 203-207.(in Chinese))
- [16] 王余岩. 节理岩体中大跨度隧道的离散元法分析[D]. 硕士学位论文. 重庆: 重庆大学, 2014.(WANG Yuyan. Discrete element analysis of the large-span tunnel in the jointed rock mass [D]. Master Thesis. Chongqing: Chongqing University, 2014.(in Chinese))
- [17] 张玉成, 杨光华, 刘鹏, 等. 爆炸载荷在数值模拟中的等效施加方法研究[J]. 地下空间与工程学报, 2012, **8**(1): 56-64.(ZHANG Yucheng, YANG Guanghua, LIU Peng, et al. An equivalent approach for acting blasting load in dynamic numerical simulation of blasting vibration[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2012, **8**(1): 56-64.(in Chinese))
- [18] MANOUCHEHRIAN A, CAI M. Analysis of rockburst in tunnels subjected to static and dynamic loads[J]. *Journal of Rock Mechanics & Geotechnical Engineering*, 2017, **9**(6): 12-23.
- [19] 章毅, 周布奎, 于潇, 等. 地面炸药库爆炸对地铁隧道的影响[J]. 防护工程, 2019, **6**(3): 33-37.(ZHANG Yi, ZHOU Bukui, YU Xiao, et al. Effect of accidental explosion of ground explosive depot on metro tunnel[J]. *Protective Engineering*, 2019, **6**(3): 33-37.(in Chinese))
- [20] 郑颖人, 邱陈瑜, 张红, 等. 关于土体隧洞围岩稳定性分析方法的探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(10): 1968-1980.(ZHENG Yingren, QIU Chenyu, ZHANG Hong, et al. Exploration of stability analysis methods for surrounding rocks of soil tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, **27**(10): 1968-1980.(in Chinese))
- [21] 李清龙. 缓倾岩层隧道塌方机理及治理措施研究[D]. 硕士学位论文. 成都: 成都理工大学, 2015.(LI Qinglong. Study on collapse mechanism and treatment measures of tunnel with gently inclined rock layer[D]. Master Thesis. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.(in Chinese))

# Analysis on Persistent Homology Characteristics of Failure Processes of Shallow Buried Tunnels Under Multi-Time Explosions

LIU Xiaofei<sup>1</sup>, YOU Shihui<sup>2</sup>

(1. *College of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan, Hunan 411105, P.R.China;*

2. *School of Mechanical and Electrical Engineering, Zaozhuang University, Zaozhuang, Shandong 277160, P.R.China*)

**Abstract:** The failure characteristics of shallow buried tunnels under multi-time explosions make an important research issue in the design and evaluation of protection engineering. It is of great significance to develop a method for early warning of the safety for shallow buried features. The discrete element method was used to establish the mechanical model for the shallow buried tunnel. With the Saint-Venant principle the blast loads were treated as a series of dynamic forces acting uniformly on the surface. Based on the discrete element method, the dynamic response under each blast load and the damage evolution process of the tunnel surrounding rock were obtained. The strength reduction method was used to calculate the safety factor of the surrounding rock. The persistent homology theory was introduced to quantitatively and qualitatively analyze the failure characteristics of the discrete element model under multi-time explosive loads. The results show that, the method of persistent homology can accurately reflect the topological characteristics of the surrounding rock. The maximum 1D barcode connection radius can effectively predict tunnel instability. The work provides a new mathematical method for tunnel safety design and disaster prediction research.

**Key words:** persistent homology; shallow buried tunnel; discrete element; multi-time explosions

**Foundation item:** The National Natural Science Foundation of China(51375416)