

文章编号:1000-582X(2013)04-142-08

曲墙式土体隧道围岩结构的爆炸动力响应

程选生, 王建华, 苏佳轩

(兰州理工大学 土木工程学院, 兰州 730050)

摘要:为了找出爆炸动力作用下的力学规律、隧道围岩结构的薄弱部位和最容易失效的单元,通过建立土体隧道动力分析有限元整体模型,综合考虑非线性动力方程的求解方法、材料模型的选取、爆炸冲击波的输入方法和收敛性及流-固耦合效应的实现因素,利用显式动力有限元程序 ANSYS/LS-DYNA 进行数值模拟,探讨了土体隧道围岩结构在爆炸作用下不同单元的时间历程曲线,分析了爆炸作用下土体隧道围岩结构的动力响应问题,从而为隧道的抗爆设防设计提供参考依据。

关键词:爆炸;曲墙式;土体隧道;围岩结构;动力响应

中图分类号:TU48

文献标志码:A

Explosion dynamic response of soil surrounding tunnel with curve wall

CHENG Xuansheng, WANG Jianhuan, SU Jiakuan

(School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: It's significant to obtain the mechanic laws and weak parts of soil tunnel, and the most likely failure elements under the explosion shock action to prevent terrorist attacks which can cause tremendous loss of human life and property and collapse and damage of many buildings and construction. Therefore, numerical simulation for soil tunnels is carried through the explicit dynamic finite element program ANSYS/LS-DYNA, and the time-history curves are discussed about the soil surrounding tunnel under explosion action. The dynamic response of soil tunnel under the explosion action is analyzed by establishing finite element integral model of soil tunnel dynamic analysis and comprehensively considering the solving method of nonlinear dynamic equation, the selection of different material models, the method of explosion shock wave input and the convergence and realizing factors of fluid-solid coupling effect. Thus, a reference for antiknock design of tunnels is presented.

Key words: explosion; curve wall; soil tunnel; soil surrounding tunnel; dynamic response

为了更好地控制爆炸的破坏程度,有效地防止各种建筑物和构筑物遭受严重破坏,保证人们生命安全,最大限度地降低财产损失,需要充分研究爆炸机理,考虑爆炸所处的介质环境。由于爆炸作用的

特殊性,实地测量和试验模型都具有一定局限性,有限元仿真模拟分析成了解决此问题的重要方法。李忠献等^[1-3]采用有限元、无穷元和杆件体系建立了地下衬砌及周围有限土区、远场无限土区以及基底滑

收稿日期:2012-12-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50778087);兰州理工大学博士基金资助项目(0508);兰州理工大学优秀青年教师培养计划资助项目(Q200809)

作者简介:程选生(1972-),男,兰州理工大学教授,博士后,主要从事地下工程结构等研究,(E-mail)cxs702@126.com。

移隔震大跨结构的计算模型,对由地下隧道内发生意外爆炸引起的地下爆炸波作用下基底滑移隔震动力响应进行了全面的分析。罗昆生等^[4]为研究炸弹在地面爆炸时对地铁区间隧道的影响,应用 LS-DYNA 软件分析了在地铁上方不同当量装药爆炸时地铁区间隧道的动力响应,得到了不同情况下地铁区间隧道的位移、速度及应变时程曲线,并进行了地面爆炸时地铁区间的安全评估。国胜兵等^[5]考虑竖向和水平向爆炸地震波对地下结构的耦合效应,基于有效应力动力分析方法,运用二维显式有限差分程序 FLAC 对地下结构在竖向和水平向爆炸地震波作用下的动力响应进行数值分析。Daniel 等^[6]在考虑土介质与结构的弹塑性,采用有限元 DYN3D 对由回填土、隔振材料、埋置炸药和部分埋置结构组成的土-结构体系进行了地下爆炸冲击作用下的动力相互作用分析。杜修力等^[7]基于显式有限元计算程序 LS-DYNA3D 和粘弹性人工边界条件,建立了爆腔-地下结构-软回填隔振层-岩土介质系统三维粘弹塑性动力响应分析模型,进行炸药爆炸作用下地下结构的动力响应分析,进一步讨论了软回填层的隔振效果。田力等^[8]针对双线地铁隧道中单侧隧道内爆炸引起的附近地面建筑物的动力响应及滑移隔振效应,采用将包含隧道的有限土区和地面多层建筑耦合而成相互作用的整体模型进行了数值模拟研究,并利用八结点等参单元和集中质量体系模拟了包含隧道有限土区和地面的多层建筑。刘建民等^[9]利用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 对炸药地面爆炸或侵入土中浅层爆炸 2 种情形下埋地管道的动力响应问题作了三维模拟,并分析了炸药设置方式、炸药用量、爆心距和管道管径等因素对埋地管道损伤的作用。Syrunin 等^[10]针对各种材料的圆柱型、球形等壳体密闭结构遭受内外爆炸作用下的响应等做了大量的试验和数值分析。申祖武等^[11]利用 ALE 算法和炸药爆轰产物 JWL 状态方程,采用动力分析有限元程序 LS-DYNA3D,对二层框架结构建筑物在爆炸冲击波作用下的动力特性进行了数值模拟,并通过结构模型的爆炸试验,得出不同位置处质点压力和加速度时程曲线;凌贤长等^[12]以覆盖饱和砂土层的浅埋地下圆拱直墙式防护隧道免遭炸弹触地爆炸触发冲击波破坏的保护效应为目的,基于 Buckingham π 定理,采用量纲分析方法,并结合考虑土-结构体系非线性爆炸冲击动力响应、土-结构接触面爆炸冲击动力响应以及爆炸冲击波-结构动力相互作用的相似性,求解了土-结

构爆炸冲击相互作用模爆试验的模型设计相似关系。

笔者在现有文献的基础上,综合考虑非线性动力方程的求解方法、材料模型的选取、爆炸冲击波的输入方法、收敛性及流-固耦合效应的实现因素,利用显式动力有限元程序 ANSYS/LS-DYNA 探讨土体隧道围岩结构在爆炸作用下不同单元的时间历程曲线,分析爆炸作用下土体隧道围岩结构的动力响应。

1 基本理论

在动载作用下,设单元结点在任一时刻发生虚位移 $\delta \mathbf{q}^e$,单元也产生相应的虚位移 $\delta \mathbf{d}$ 和虚应变 $\delta \boldsymbol{\varepsilon}$,则单元内产生的虚应变能为

$$\delta U = \iiint_V \delta \boldsymbol{\varepsilon}^T \boldsymbol{\sigma} dV, \quad (1)$$

式中: ρ 为材料密度; ν 为线性阻尼系数; V 为单元体积,加速度引起的惯性力为 $-\rho \dot{\mathbf{d}} dV$,速度引起的阻尼力为 $-\nu \dot{\mathbf{d}} dV$,则外力所做的虚功为

$$\delta W = \iiint_V \delta \mathbf{d}^T \mathbf{P}_V dV + \iint_A \delta \mathbf{d}^T \mathbf{P}_S dA + \delta \mathbf{d}^T \mathbf{P}_C - \iiint_V \rho \delta \mathbf{d}^T \dot{\mathbf{d}} dV - \iiint_V \nu \dot{\mathbf{d}}^T \delta \mathbf{d} dV, \quad (2)$$

式中: \mathbf{P}_V 、 \mathbf{P}_S 和 \mathbf{P}_C 分别为作用于单元上动态体力、动态面力和动态集中力; A 为单元面积。

由于

$$\mathbf{d} = \mathbf{N} \mathbf{q}^e, \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B} \mathbf{q}^e, \delta U = \delta W, \quad (3)$$

故单元的运动方程为

$$\mathbf{m}^e \dot{\mathbf{q}}^e + \mathbf{c}^e \dot{\mathbf{q}}^e + \mathbf{k}^e \mathbf{q}^e = \mathbf{R}^e(t), \quad (4)$$

式中: $\mathbf{k}^e = \iiint_V \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV$, $\mathbf{m}^e = \iiint_V \mathbf{N}^T \rho \mathbf{N} dV$, $\mathbf{c}^e = \iiint_V \mathbf{N}^T \nu \mathbf{N} dV$, $\mathbf{R}^e(t) = \iiint_V \mathbf{N}^T \mathbf{P}_V dV + \iint_A \mathbf{N}^T \mathbf{P}_S dA + \mathbf{N}^T \mathbf{P}_C$ 。

将各单元特性矩阵组装成整个结构的特性矩阵,即有

$$\mathbf{M} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{C} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K} \mathbf{q} = \mathbf{R}(t), \quad (5)$$

式中: \mathbf{q} 为所有结点位移分量组成的 n 节列阵; n 为结构总自由度数; $\mathbf{R}(t) = \sum_{i=1}^n \mathbf{R}_i(t)$ 称为结点载荷列阵; \mathbf{K} 、 \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 分别为结构的刚度矩阵、质量矩阵和阻尼矩阵。

结构的固有特性由结构本身决定,与外部载荷无关,它是由 1 组模态参数定量描述。固有特性分析就是对模态参数进行计算,一是避免结构出现共

振和有害的振型,二是为动力响应分析提供必要的依据。由于固有特性与外载无关,且阻尼对固有频率和振型影响不大,所以可以通过无阻尼自由振动方程计算固有特性。无阻尼自由振动方程为

$$\dot{M}\ddot{q} + Kq = 0, \quad (6)$$

通过求解可以得到广义特征值方程

$$(K - \omega^2 M)\Phi = 0. \quad (7)$$

2 分析模型

为了模拟高能量的炸药,采用立方体 TNT 炸药包进行模拟计算,其尺寸为 $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$,炸药底部边界距底部为 15.6 m ,隧道净高度为 8.8 m ,净宽度为 9.8 m ,隧道衬砌厚度为 0.4 m 。根据圣维南原理,取周围土体尺寸为隧道宽度的 4 倍左右,即取模型总高度为 40 m ,宽度 40 m ,厚度取 8 m ,其中土体部分高度为 20 m ,分析模型如图 1 所示。

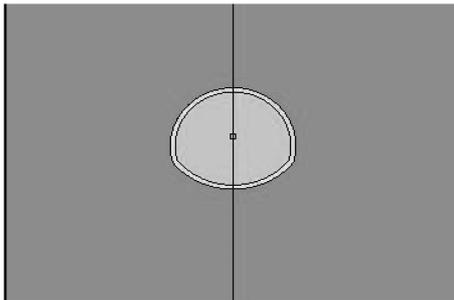


图 1 有限元分析模型

在 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件中建模,模型主要由土体围岩结构、衬砌结构、空气和 TNT 炸药 4 种材料组成。为了准确地模拟隧道中爆炸冲击波的传播过程以及爆炸波对围岩结构的破坏作用过程,避免 Lagrange 单元网格的形状畸变有可能导致计算的中断,在模拟时将土体、隧道混凝土、空气和炸药 4 种材料均划分为 Euler 网格,采用多物质 ALE 算法,允许同一个网格中包含多种物质,在分析过程中不考虑所有材料的重力作用。数值模拟中由于钢筋混凝土建模的复杂性,采用了整体式对隧道衬砌结构进行建模。有限元分析单元采用三维实体 Solid164 八节点六面体单元。为了节省计算时间,根据模型的对称性,取其 1/4 模型进行模拟分析。材料模型共有 4 种物质:土体;隧道混凝土;空气;炸药。

因为土体本身就具有非线性,土体材料使用了 LS-DYNA 中的 D-P 模型,具体参数如表 1 所示。

表 1 土体材料参数

材料号	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	剪切 模量/Pa	泊松比	摩擦角/ ($^{\circ}$)	粘聚力/ Pa
1	1 565	5.2×10^7	0.25	0.58	6.12×10^4

隧道衬砌为 0.4 m 厚的 C25 混凝土,采用了 Johnson-Holmquist-Concrete 模型来模拟具有大应变、大应变率以及较高压力的衬砌结构混凝土材料,其参数见表 2。

表 2 衬砌结构材料参数

材料号	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	剪切模量/ Pa	应变率 系数	单轴压缩 强度/Pa	失效 应变
2	2 500	1.12×10^{10}	0.007	1.19×10^7	0.02

采用 MAT_NULL 材料模型来模拟空气、水等流体材料,该材料模型通常需要与状态方程联用。空气材料参数见表 3。

表 3 空气材料参数

材料号	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	压力截断值	动力粘度系数
3	1.2	0.0	0.0

LS-DYNA 有限元程序提供了用于模拟炸药爆炸作用的数值模型,即高能炸药材料模型,并结合 1 个描述爆炸生成气体压力-体积关系的状态方程。TNT 炸药材料参数见表 4。

表 4 TNT 炸药材料参数

材料号	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	爆速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	动力粘度系数
4	1 630	7×10^3	2.0×10^{10}

3 动力有限元分析

3.1 位移时程分析

为了便于分析土体隧道围岩结构的动力响应,考虑围岩结构上不同位置处单元的位移情况和隧道结构的对称性,取围岩结构上对应于衬砌结构上的单元,一次取单元 41561、41461、41331、41251、41181。参考单元如图 2 所示。

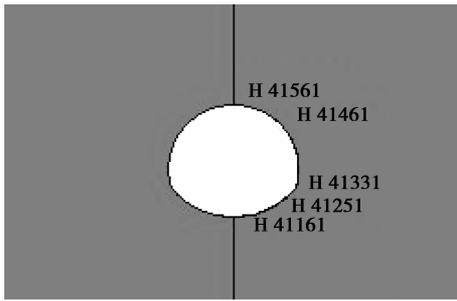
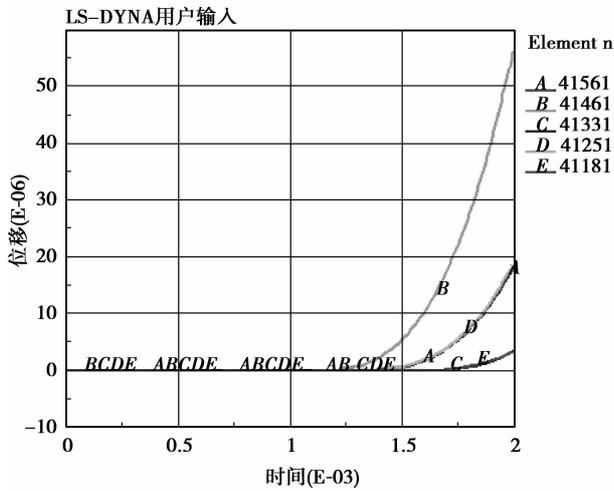
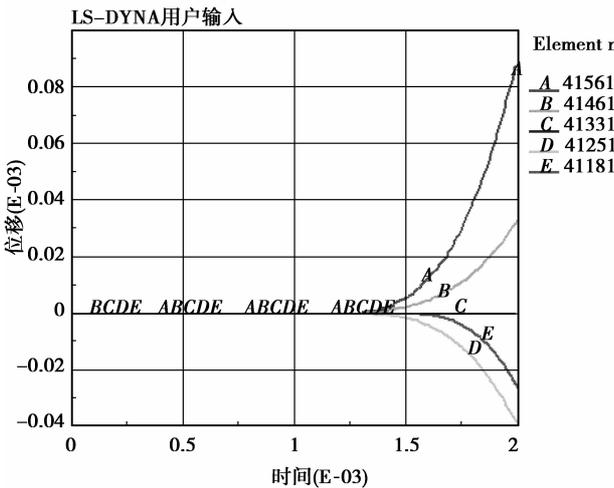


图 2 单元示意图

根据 LS-DYNA 分析,单元 41561、41461、41331、41251、41181 在 x 方向和 y 方向的位移变化曲线如图 3 所示。



(a) x 方向单元位移变化曲线



(b) y 方向单元位移变化曲线

图 3 单元的位移变化曲线图

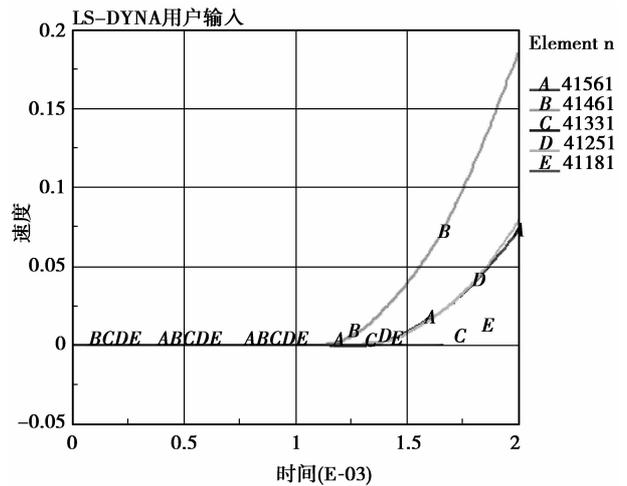
由图 3 可知,不同单元的位移变化不是很大,但对应于衬砌结构顶部和肩部的单元位移较大,如曲线 A 和曲线 B,最大位移 0.2 mm 左右;其他部位的

位移变化不大,这是因为爆炸作用时衬砌结构顶部及肩部的变形过大,就会引起相对应部位围岩结构的位移增大,而位移量较小主要是因为爆炸的大部分能量被隧道衬砌吸收。

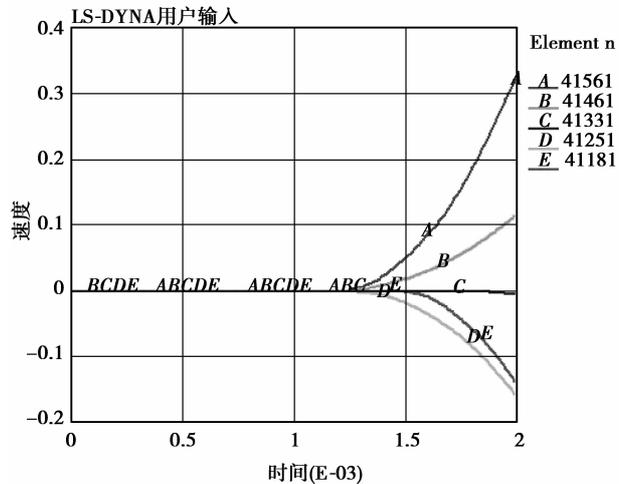
3.2 速度时程分析

在分析隧道围岩结构单元速度时程时,参考单元同上,其速度变化曲线如图 4 所示。

对于隧道围岩结构的单元在不同时刻的速度而言,定义竖向速度向上取正值,向下取负值,水平速度向右取正值,向左取负值。由图 4 可以看出,在炸药爆炸前期即 $t < 1.2$ ms 时,各单元的振动速度均为零,随着时间的增加,围岩结构部分单元的速度开始增加,其中在 x 方向对应于隧道衬砌结构肩部单元(B 曲线)的速度急剧增加,一直呈增加趋势,在 y 方向,对应于隧道衬砌结构顶部单元(A 曲线)的速度随着时间的增加而增大。



(a) x 方向单元速度变化曲线

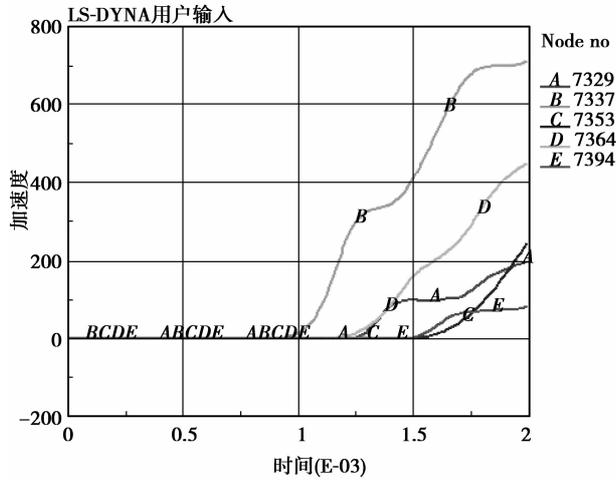


(b) y 方向单元速度变化曲线

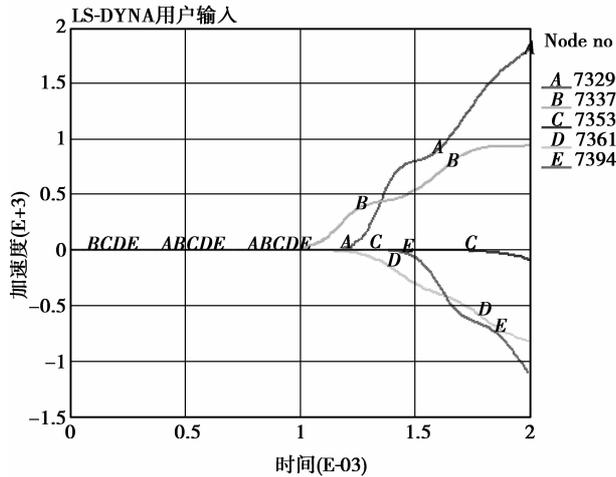
图 4 单元的速度变化曲线图

3.3 加速度时程分析

在分析隧道围岩结构单元加速度时程时,参考单元同上,其加速度变化曲线如图 5 所示。



(a) x方向单元的速度变化曲线



(b) y方向单元的加速度变化曲线

图 5 单元的加速度变化曲线图

爆炸时隧道围岩结构结点在 $t < 1.0$ ms 时加速度均为零,随后隧道围岩结构对应于衬砌结构肩部、顶部单元(B 曲线和 A 曲线)的振动加速度峰值最大,各单元的 5 条加速度变化曲线基本呈增长趋势;加速度峰值波动较大且一次比一次大,由此可见,炸药爆炸冲击波作用时反射和多次反射到对应的围岩结构部位也是比较强烈的。

3.4 压力时程分析

在分析隧道围岩结构单元及结点压力时程时,依然取相同的参考单元,其压力变化曲线如图 6 所示。

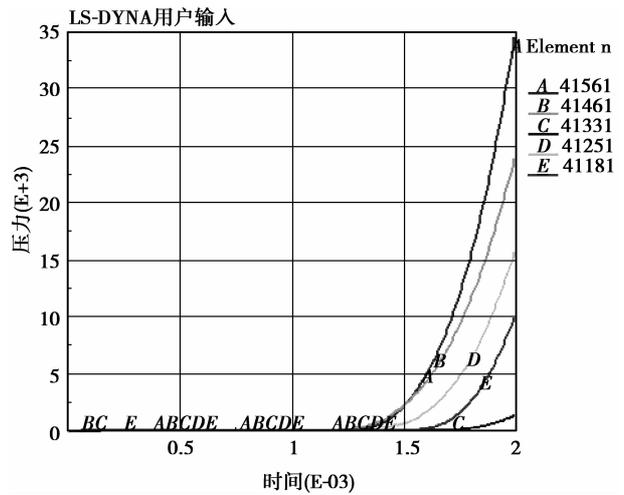
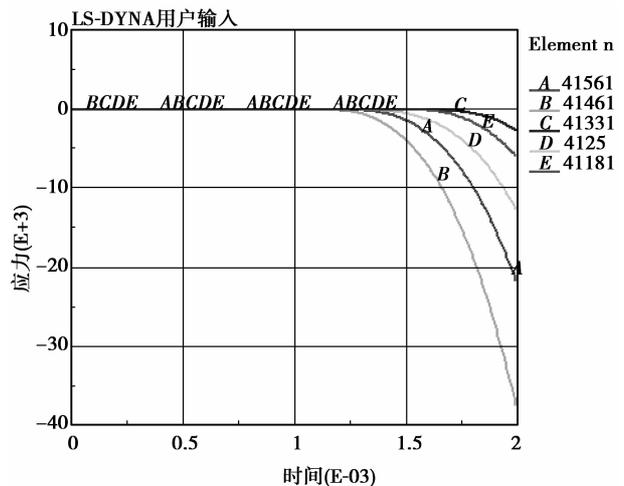


图 6 单元的压力变化曲线图

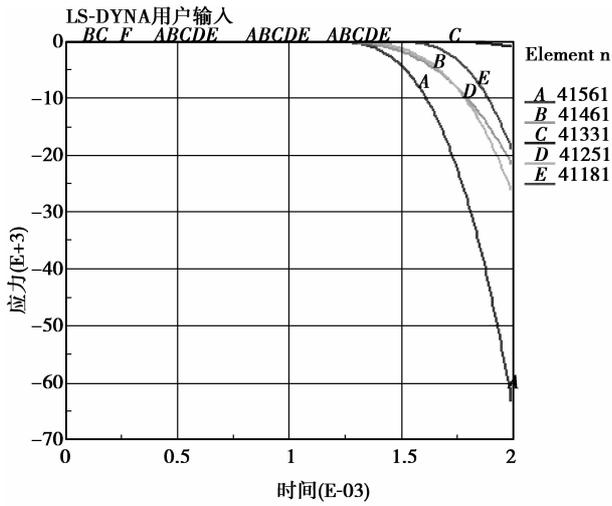
当爆炸冲击波到达隧道围岩结构前,即 $t < 1.2$ ms 时隧道围岩结构各部位所受压力均为 0;在爆炸冲击波到达隧道围岩结构后,对应于衬砌结构顶部和肩部(即 A、B 曲线)压力时程曲线波动较大;也就是说对应与衬砌结构的顶部和肩部围岩结构单元损伤威胁较大,最易达到破坏。这是因为当炸药用量较大时,对应于衬砌结构顶部和肩部所吸收的爆炸能和所承受的爆炸冲击波更多的缘故。

3.5 应力时程分析

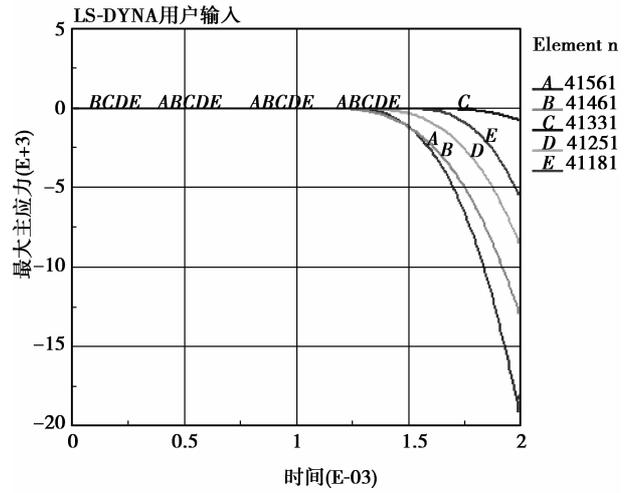
在分析隧道围岩结构单元及结点应力时程时,依然取相同的参考单元,其应力变化曲线如图 7 所示。



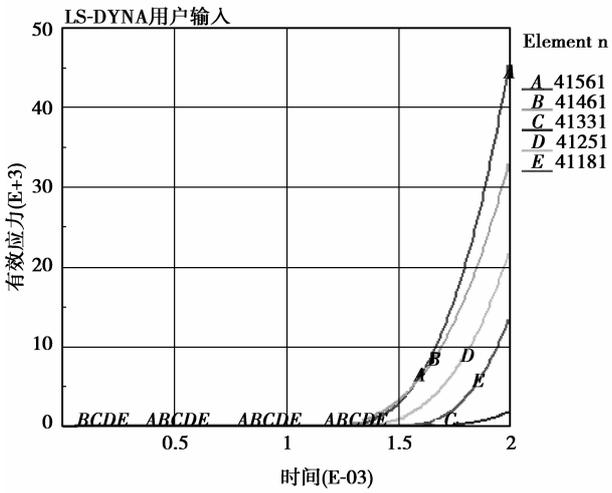
(a) x方向单元的应力曲线



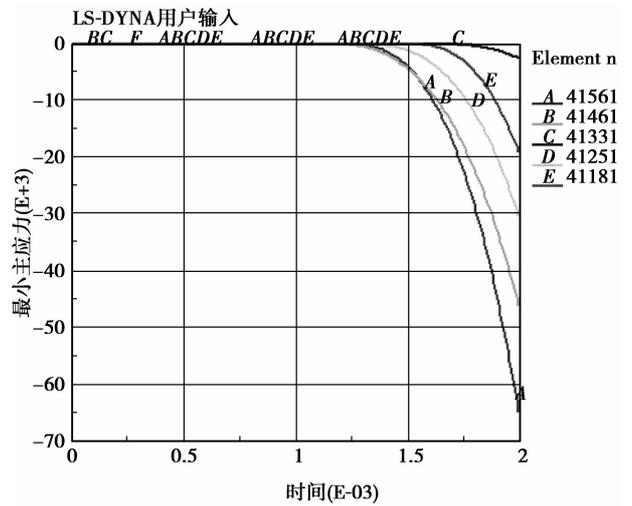
(b) y 方向单元的应力曲线



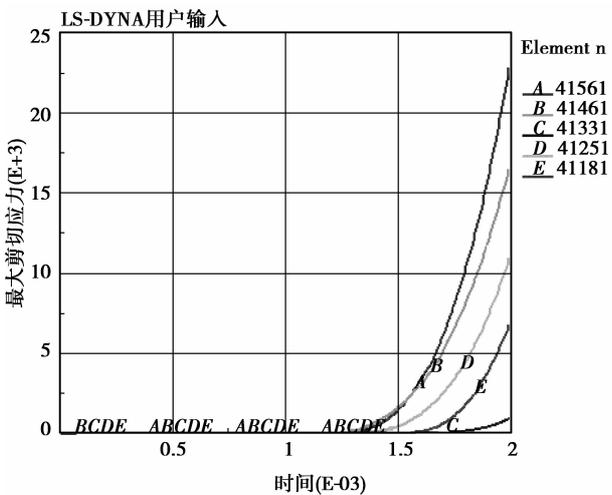
(e) 单元的最大主应力曲线



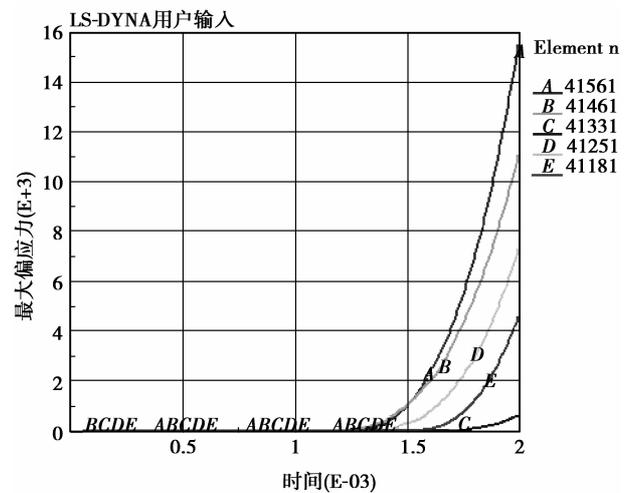
(c) 单元的有效应力曲线



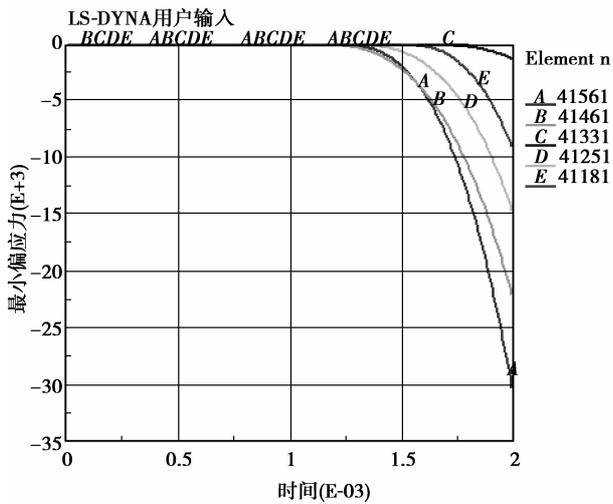
(f) 单元的最小主应力曲线



(d) 单元的最大剪切应力曲线



(g) 单元的最大偏应力曲线



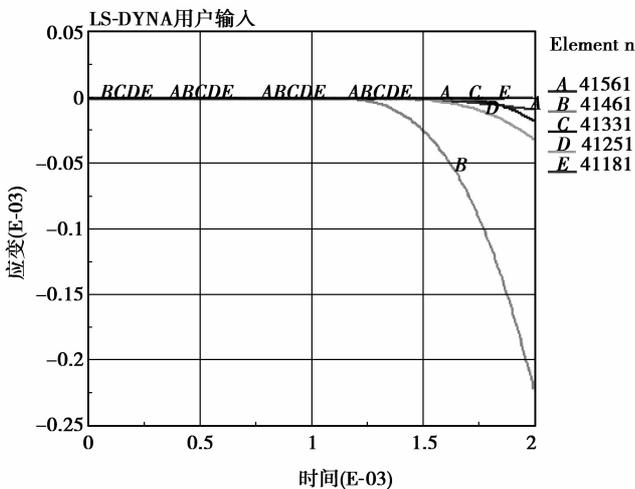
(h) 单元的最小偏应力曲线

图 7 单元的应力变化曲线图

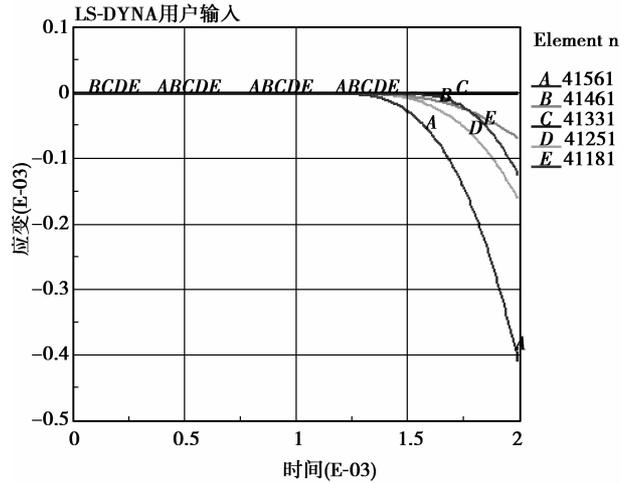
隧道围岩结构的最大应力出现在对应于衬砌结构肩部和顶部位置单元和结点,最大有效应力值 $\sigma_{rmax} = -38 \text{ kPa}$, $\sigma_{ymax} = -64 \text{ kPa}$, $\tau_{max} = 22.5 \text{ kPa}$ 。与衬砌结构相比,其值降低幅度较大,超过了土体的容许应力值($[\sigma_w] = 56 \text{ kPa}$, $[\sigma_r] = 7.3 \text{ kPa}$);从围岩结构有效应力曲线图可以看出,当爆炸作用对应于衬砌结构顶部和肩部位置最先达到峰值,且有效应力峰值较大,这说明爆炸冲击波作用下此处的土体也最易受损或破坏。

3.6 应变时程分析

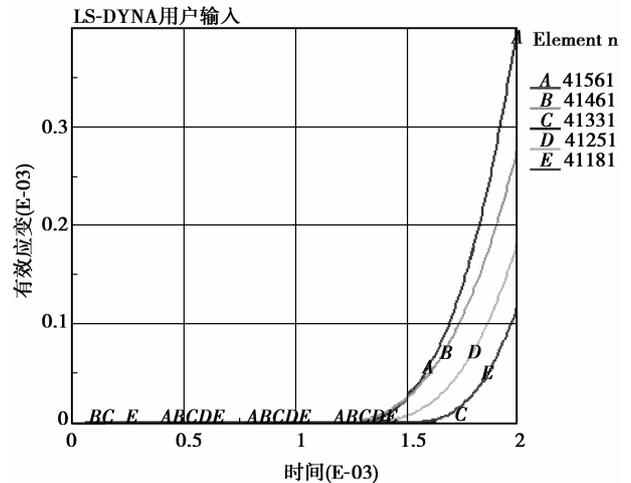
采取以上相同的参考单元,其应变变化曲线如图 8 所示。



(a) x方向单元的应变曲线



(b) y方向单元的应变曲线



(c) 单元的有效应变曲线

图 8 单元的应变变化曲线图

从图 8 可知,隧道围岩结构在 x 向和 y 向应变最大值分别出现在对应于衬砌结构肩部和顶部的位置,且随着时间的增加呈增长的趋势。从隧道围岩结构的有效塑性应变图可以看出,最大值集中在对应于衬砌结构顶部和肩部位置,这和应力分析的结果很吻合。但围岩结构的单元应变值较小,这说明爆炸时大部分能量被衬砌吸收了的缘故,所以围岩结构受创就较小。

4 结论

通过建立土体隧道动力分析有限元整体模型,综合考虑非线性动力方程的求解方法、材料模型的选取、爆炸冲击波的输入方法、收敛性及流-固耦合效应的实现因素,利用显式动力有限元程序 ANSYS/LS-DYNA 进行数值模拟,探讨了土体隧

道围岩结构在爆炸作用下不同单元的时间历程曲线,分析了爆炸作用下土体隧道围岩结构的动力响应问题,并得到如下结论。

1)对应于衬砌结构肩部和顶部的围岩结构的单元位移都较大,爆炸作用对这2处的损伤较大,如果炸药能量继续增强将会使其首先在这2处发生破坏。

2)在爆炸前期,各单元的振动速度均为零,随着时间的增加,对应于衬砌结构肩部的单元的速度急剧增加,而后开始衰减,并会出现最大的负速度,呈周期变化趋势,在整个爆炸过程,其速度始终是增加的。

3)对应于隧道衬砌结构顶部、肩部的单元的振动加速度峰值最大,但最终加速度基本趋近于零,加速度曲线均出现了2次峰值或多次峰值,由此可见,爆炸冲击波的反射和多次反射现象是比较强烈的。

4)当爆炸作用到达隧道围岩结构迎爆面时,隧道围岩结构各部位所受应力均为零,随后其结点的压力时程曲线明显不同,对应于顶部、肩部及底部的单元压力时程曲线波动较大,是最易发生损伤或破坏的部位。

参考文献:

- [1] 李忠献,刘志侠,丁阳. 爆炸荷载作用下钢结构的动力响应与破坏模式[J]. 建筑结构学报, 2008, 49(4): 106-111.
LI Zhongxian, LIU Zhixia, DING Yang. Dynamic responses and failure modes of steel structures under blast loading[J]. Journal of Building Structures, 2008, 49(4):106-111.
- [2] 李忠献,田力. 地下爆炸波作用下基底滑移隔震建筑-土-隧道相互作用的动力分析[J]. 工程力学, 2004, 21(6):56-64.
LI Zhongxian, TIAN Li. Dynamic interaction analysis of sliding base-isolated building-soil-tunnel subjected to underground explosion wave [J]. Engineering Mechanics, 2004, 21(6):56-64.
- [3] 李忠献,田力. 地下爆炸波作用下基底滑移隔震大跨结构的动力响应分析[J]. 计算力学学报, 2005, 22(4): 457-564.
LI Zhongxian, TIAN Li. Dynamic response analysis for sliding base-isolated long-span structures subjected to underground explosion waves[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2005, 22(4):457-564.
- [4] 罗昆升,王勇,赵跃堂,等. 地铁区间隧道在地面爆炸荷载作用下的数值模拟[J]. 解放军理工大学学报:自然科学版, 2007, 8(6):674-679.
LUO Kunsheng, WANG Yong, ZHAO Yuetang, et al. Numerical simulation of section subway tunnel under surface explosion[J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2007, 8(6):674-679.
- [5] 国胜兵,王明洋,赵跃堂,等. 爆炸地震波作用下地下结构动力响应数值分析[J]. 世界地震工程, 2004, 20(4):137-142.
GUO Shengbing, WANG Mingyang, ZHAO Yuetang, et al. Dynamic numerical analysis of underground structures under action of explosion seismic wave[J]. World Earthquake Engineering, 2004, 20(4):137-142.
- [6] Daniel J L, Krauthammer T. Assessment of numerical simulation capabilities for medium-structure interaction systems under explosive loads [J]. Computers and Structures, 1997, 63(5):875-887.
- [7] 杜修力,廖维张,田志敏,等. 炸药爆炸作用下地下结构的动力响应分析[J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(5): 474-480.
DU Xiuli, LIAO Weizhang, TIAN Zhimin, et al. Dynamic response analysis of underground structures under explosion-induced loads [J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(5):474-480.
- [8] 田力,李忠献,郝洪. 双线隧道中单侧隧道内爆炸引起地面建筑的动态响应及滑移隔震研究[J]. 工程力学, 2008, 25(8):133-138.
TIAN Li, LI Zhongxian, HAO Hong. Dynamic responses and sliding isolation of buildings on the ground subjected to explosion inside one of two-way tunnels[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(8): 133-138.
- [9] 刘建民,陈文涛. 爆炸荷载下埋地管道动力响应分析研究[J]. 工程爆破, 2008, 14(2):20-24.
LIU Jianmin, CHEN Wentao. Dynamic response study of buried pipeline subjected to blast loads [J]. Engineering Blasting, 2008, 14(2):20-24.
- [10] Syrunin M A, Fedorenko A G, Ivanov A G. Dynamic strength of fiber glass shell[J]. Journal de Physique IV, 1997, 7(3):517-521.
- [11] 申祖武,龚敏,王天运,等. 爆炸冲击波作用下建筑结构动力特性的数值模拟与试验[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(2):104-106.
SHEN Zuwu, GONG Min, WANG Tianyun, et al. Numerical simulation and experimental study on dynamic response of the buildings structure under blast shock wave [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(2):104-106.
- [13] 凌贤长,胡庆立,欧进萍,等. 土-结爆炸冲击相互作用模爆试验相似设计方法[J]. 岩土力学, 2004, 25(8): 1249-1253.
LING Xianchang, HU Qingli, OU Jinping, et al. A scale modeling method of simulation explosion test of soil-structure impactive interaction due to exploding[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(8):1249-1253.