

双圆盾构隧道在内部爆炸荷载下的响应分析

马险峰^{1,2}, 隋 涛¹, 尚金华³, 王东栋¹

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092;

3. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250014)

摘要: 以双圆断面为代表的新型断面隧道结构在软土地铁网络建设中逐渐增多, 其在内部爆炸荷载下的动力特性尚未有研究. 以软土地区双圆盾构隧道结构为对象, 采用动力有限元方法分析了其与炸药接触和非接触两种状态下 3 种当量炸药爆炸后的动力响应, 得出各工况下隧道结构的最终应力状态. 结果表明, 隧道结构与炸药接触时, 3 种工况下隧道结构都有不同程度的损坏, 其破坏程度随炸药当量数增加依次增强; 隧道结构与炸药非接触时, 10 kg 当量炸药爆炸后对隧道结构基本没有影响, 而 50, 100 kg 当量炸药爆炸后隧道结构已严重损坏. 该结果对软土地铁隧道运营安全管理具有参考价值.

关键词: 内爆炸; 接触; 非接触; 动力响应

中图分类号: TU 311; TU 312

文献标识码: A

Response Analysis of Dot Shield Tunnels Under Internal Explosion

MA Xianfeng^{1,2}, SUI Tao¹, SHANG Jinhua³, WANG Dongdong¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co. Ltd., Ji'nan 250014, China)

Abstract: Dot shield tunnels as a new cross-section of tunnels gradually are increasing in soft metro subway networks, but few studies have been made of their dynamic behavior under internal explosion so far. Based on dynamic finite element method, the paper presents an analysis of the dynamic behavior of dot shield tunnels under the condition of contact and non-contact explosive including 3 kinds of explosive charge, stress states of dot shield tunnels under 3 loading conditions are obtained. Analysis results show that different damages of tunnels occur under the condition of contact, and the damage increases with the increasing of the explosive charge, no damage occurs under the condition of non-contact including 10 kg explosive charge, serious damage occurs under the condition of non-contact including 50 kg and 100 kg

explosive charge. The study result provides a reference for safe operation of metro subway.

Key words: implosion; contact; non-contact; dynamic response

进入 21 世纪以来, 世界上的各类恐怖活动呈多发态势, 在一些地区, 爆炸袭击愈演愈烈. 这些爆炸不仅对地面上的各类结构物和人民生命安全造成致命破坏, 同时也对地下结构尤其是地铁结构抗爆提出新挑战. 地铁是关系城市交通命脉的基础性设施, 是恐怖分子袭击的主要目标, 所以内部爆炸对地铁影响的研究有重要的意义. 目前, 有关单圆盾构隧道内爆炸的文献较多, 而对双圆盾构隧道爆炸的研究很少. 罗昆升、王勇等对距离地面 1.5 m 处 100 kg TNT 当量炸药爆炸时对地铁区间单圆隧道结构的影响进行了研究^[1]. 国胜兵、王明洋等对爆炸地震波作用下地下结构的动力响应进行了研究^[2]. 杜修力、田志敏等对部分埋置结构在爆炸荷载作用的动力响应进行了研究^[3]. 目前, 对于地下结构内爆问题, 一般采用试验方法和数值模拟方法来研究, 然而由于经费和人力等各方面的原因, 目前很难采用试验方法研究原型隧道结构的爆炸行为, 经济且较合理的就是采用数值模拟方法, 这也是目前对原型结构内爆采用的较多的一种方法. 所以, 本文采用数值模拟方法模拟、计算和分析上海某一典型的地铁区间双圆盾构隧道在接触和非接触爆炸状态下, 3 种炸药当量的动力破坏行为, 并据此对双圆盾构隧道结构的稳定性进行评价.

1 数值模拟方法

本文采用 LS-DYNA 软件进行模拟双圆盾构隧道在内爆作用下的动力破坏行为. LS-DYNA 是一个

显式(中心差分时间积分法)非线性动力分析有限元程序,专门用于求解各种二维、三维结构的高速碰撞、爆炸和模压等大变形的动力响应。

1.1 中心差分显式时间积分方法

结构物在第 n 个时间步时的动力有限元离散方程为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t_n) = \mathbf{P}(t_n) - \mathbf{F}(t_n) + \mathbf{H}(t_n) \quad (1)$$

式中: \mathbf{M} 为单元质量矩阵; $\ddot{\mathbf{u}}(t_n)$ 为单元 t_n 时的加速度列阵; $\mathbf{P}(t_n)$ 为 t_n 时的外力矢量(包括体力经转化的等效节点力); $\mathbf{F}(t_n)$ 为 t_n 时的单元应力场等效节点力矢量; $\mathbf{H}(t_n)$ 为沙漏阻力(克服单点高斯积分引起的沙漏问题而引入的粘性阻力)以及接触力矢量。应用 t_n 时刻的已知量求解 t_{n+1} 时刻的未知量,其中心差分法的过程如下:

$$\ddot{\mathbf{u}}(t_n) = \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{P}(t_n) - \mathbf{F}(t_n) + \mathbf{H}(t_n)) \quad (2)$$

$$\mathbf{v}(t_{n+1/2}) = \mathbf{v}(t_{n-1/2}) + \ddot{\mathbf{u}}(t_n)\Delta t_n \quad (3)$$

$$\mathbf{u}(t_{n+1}) = \mathbf{u}(t_n) + \mathbf{v}(t_{n+1/2})\Delta t_{n+1} \quad (4)$$

式中: $t_{n-1/2} = 0.5(t_n + t_{n-1})$; $t_{n+1/2} = 0.5(t_{n+1} + t_n)$; $\Delta t_n = t_{n+1} - t_n$; $\Delta t_{n+1} = t_{n+2} - t_{n+1}$; $\mathbf{v}(t_{n+1/2})$ 为 t_{n+1} 时刻的速度矢量; $\mathbf{v}(t_{n-1/2})$ 为 $t_{n-1/2}$ 时刻的速度矢量。

$$\mathbf{x}(t_{n+1}) = \mathbf{x}(t_0) + \mathbf{u}(t_{n+1}) \quad (5)$$

式中: $\mathbf{x}(t_{n+1})$ 为 t_{n+1} 时刻节点坐标; $\mathbf{x}(t_0)$ 为 t_0 时刻节点坐标; $\mathbf{u}(t_{n+1})$ 为 t_{n+1} 时刻节点坐标增量。

1.2 炸药和空气材料的本构模型

应用 LS-DYNA 中的流固耦合方法,进行爆炸动荷载作用下隧道结构的内力响应分析,需要设定爆炸单元以及空气单元。选择位于隧道某一洞内中心的单元作为爆炸单元,爆轰压力 P 和单位体积内能 E 及相对体积 V 的关系采用 JWL 状态方程加以描述。

JWL 状态方程表述为^[4]

$$P = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E}{V} \quad (6)$$

式中: A, B, R_1, R_2, ω 为与炸药密度有关的试验参数。

空气材料本质就是忽略材料的强度,所以采用 LS-DYNA 中 *MAT_NULL 空材料模型进行模拟,并采用 *EOS_LINER_POLYNOMIAL 线性多项式状态方程描述。状态方程为

$$P = C_0 + C_1 u + C_2 u^2 + C_3 u^3 + (C_4 + C_5 u + C_6 u^2) E \quad (7)$$

式中: $u = \rho/\rho_0 - 1$, ρ 为当前密度, ρ_0 为初始密度;

$C_0 \sim C_6$ 为状态方程参数。

2 有限元模型和材料参数

2.1 有限元模型

上海某地铁区间双圆盾构隧道衬砌结构内径 5.7 m, 外径 6.3 m, 衬砌厚 30 cm, 注浆层厚 75 cm。根据圣维南原理, 数值分析时取隧道周围土体尺寸为隧道内径的 3~5 倍, 即 17.1~28.5 m。由于动力分析计算量较大, 对计算机硬件的要求较高, 过多的单元必然会显著增加计算时间, 故尽量减小模型的尺寸(图 1)。于是, 取土体侧边界距隧道侧边的距离为 17.15 m, 土体下边界距隧道最低点 17.15 m, 土体表面距离隧道中心 15.00 m。纵向土体取 16.00 m。利用 LS-DYNA 有限元计算模拟时, 采用 8 节点六面体 SOLID185 单元, 总共划分为 111 440 个单元, 其中隧道结构划分为 102 080 个单元(图 2)。

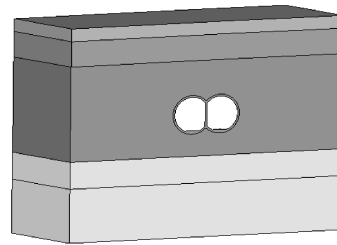


图 1 双圆盾构隧道整体模型图

Fig.1 Whole model diagram of dot shield tunnel

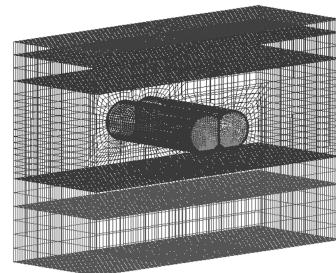


图 2 双圆盾构隧道整体模型网图

Fig.2 Whole model grids of dot shield tunnel

2.2 土体和结构材料的本构模型

土体结构自由场静力分析及隧道结构在初始应力作用下的静力分析采用弹性模型, 爆炸动力分析时, 土体的材料参数采用 DP(Drucker-Prager)模型参数。隧道结构采用塑性硬化模型。各向同性、随动硬化或者各向同性和随动硬化的混合模型与应变率有关, 可以考虑失效。可以通过在调整硬化参数 β 来选择各向同性或随动硬化。使用 Cowper-Symonds

模型考虑应变率,屈服力 σ_y 用与应变率有关的因数表示为^[4]

$$\sigma_y = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{\rho}} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \epsilon_p^{\text{eff}}) \quad (8)$$

式中: $\dot{\epsilon}$ 为应变率; C 和 ρ 为 Cowper-Symonds 应变率参数; σ_0 初始屈服应力; ϵ_p^{eff} 为有效塑性应变, E_p 为塑性硬化模量.

$$E_p = \frac{E_{\text{tan}} E}{E - E_{\text{tan}}}$$

表 1 土层物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of soil layers

土层	底面埋深/m	密度/(t·m ⁻³)	弹性模量/MPa		内聚力/kPa	泊松比	内摩擦角/(°)
			静力作用	动力作用			
杂填土	5.0	1.82	4.27	5.12	15.0	0.4	11.0
灰色粘土	7.0	1.85	17.30	20.76	10.0	0.3	10.2
粘土	22.5	1.80	18.25	21.90	4.1	0.3	10.5
粉质粘土	27.1	1.75	21.47	25.76	14.2	0.3	12.0
草灰色粉砂	35.0	1.80	21.92	26.30	6.1	0.3	10.2

表 2 钢筋混凝土(C50)材料特性参数

Tab.2 Reinforced concrete (C50) material characteristic parameters

参数名	参数值
钢筋混凝土密度	2.65×10 ³ t·m ⁻³
弹性模量	3.45×10 ¹⁰ Pa(静力作用)
	5.18×10 ¹⁰ Pa(动力作用)
屈服应力	18.48×10 ⁶ Pa(静力作用)
	27.76×10 ⁶ Pa(动力作用)
抗拉强度	1.89×10 ⁶ Pa(静力作用)
	3.1×10 ⁶ Pa(动力作用)
泊松比	0.2
应变率	0
抗压强度	23.10×10 ⁶ Pa(静力作用)
	34.70×10 ⁶ Pa(动力作用)

对双圆盾构地铁区间隧道进行爆炸计算时,土体采用 DP 模型,即应用 * MAT_DRUCKER_PRAGER 赋予土体材料参数,隧道结构采用塑性随动模型,即应用 * MAT_PLASTIC_KINEMATICS 赋予混凝土管片结构的材料参数.炸药和空气模型材料参数分别应用 * MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN (炸药材料参数)、* EOS_JWL(炸药状态方程)以及 * MAT_NULL、* EOS_LINER_POLYNOMIAL 赋予.炸药和空气的模型参数如表 3 和表 4 所示.

2.4 边界条件

2.4.1 静力边界条件

对于隧道管片材料采用有限元整体式建模,不考虑钢筋与混凝土之间的摩擦及滑移;衬砌管片与周围土体采用面面自由接触,并共用节点.三维有限

式中: E_{tan} 为切线模量; E 为弹性模量.

2.3 材料的力学参数

为了更清楚地研究爆炸荷载对隧道衬砌结构的影响,避免土层交界面对计算的影响,拟考虑隧道处于均一地层.计算中将土体概化分为 5 层,分别为杂填土、灰色粘土、粘土、粉质粘土和草灰色粉砂.隧道管片混凝土材料等级为 C50.土层和管片混凝土的物理力学参数见表 1 和表 2.

表 3 炸药模型材料参数及状态方程参数

Tab.3 Material model parameters for explosion and parameters for explosive state equation

参数名	参数值	参数名	参数值
炸药密度	1.63 t·m ⁻³	β	0.074
爆炸波速	6 930 m·s ⁻¹	ω	0.03
单位体积内能	7.0×10 ⁷ m ⁻³	R_1	4.15
A	3.74	R_2	0.95

表 4 空气材料模型及状态参数

Tab.4 Parameters for air material model and state equation

参数名	参数值	参数名	参数值
空气密度	1.30×10 ⁻⁶ t·m ⁻³	C_3	0
材料内能	2.5×10 ⁵ Pa	C_4	0.4
C_0	-1×10 ⁵ m ⁻³	C_5	0.4
$C_1 \sim C_2$	0	C_6	0

元计算模型侧面土体边界采用水平方向固定约束;底面土体边界采用垂直方向固定约束;土体表面采用自由边界.

2.4.2 动力边界条件

土体侧面及地面边界施加反射边界模型计算时,其计算模型边界会反射应力波,产生边界效应;土体侧面及地面边界施加无反射边界条件时,其计算结果不理想,所以动力边界条件与静力边界条件的选取一致.

3 计算结果

隧道结构遭受爆炸荷载的损坏程度随着爆炸荷

载的作用时间而增加,所以取隧道结构最终的破坏行为结果进行分析,即取 $5\,000\ \mu\text{s}$ 时隧道结构最大主应力及右隧道结构 A, B, C, D 4 点的最大主应力时程来分析隧道结构的损坏特性,如图 3 和图 4 所示.其损坏应力图如图 5~10 所示, A, B, C, D 4 点的应力时程曲线如图 11~16 所示.

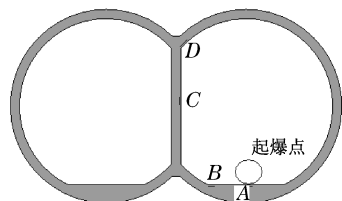


图 3 右侧隧道结构上选取的单元位置(接触)
Fig.3 Position of selected elements in the right tunnels(contact)

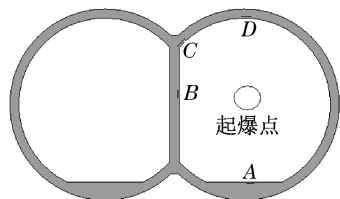


图 4 右侧隧道结构上选取的单元位置(非接触)
Fig.4 Position of selected elements in the right tunnels(non-contact)

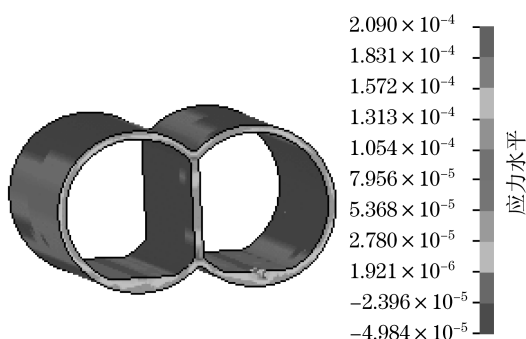


图 5 10 kg 炸药应力图(接触)
Fig.5 Stress map for TNT=10 kg(contact)

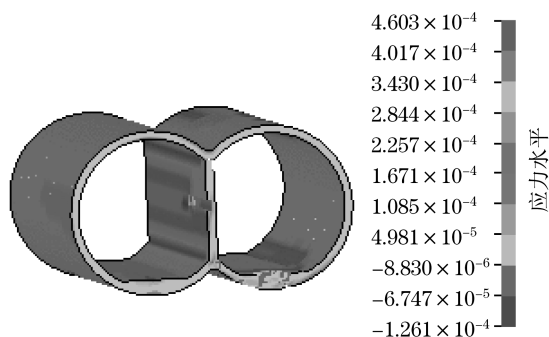


图 6 50 kg 炸药应力图(接触)
Fig.6 Stress map for TNT=50 kg(contact)

接触爆炸应力图见图 5~7,爆炸单元选取为右侧隧道底部垫层的道床中心上.

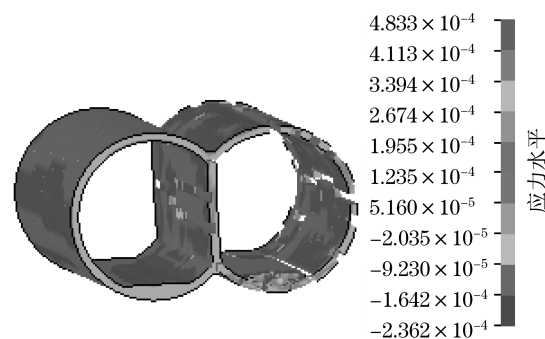


图 7 100 kg 炸药应力图(接触)
Fig.7 Stress map for TNT=100 kg(contact)

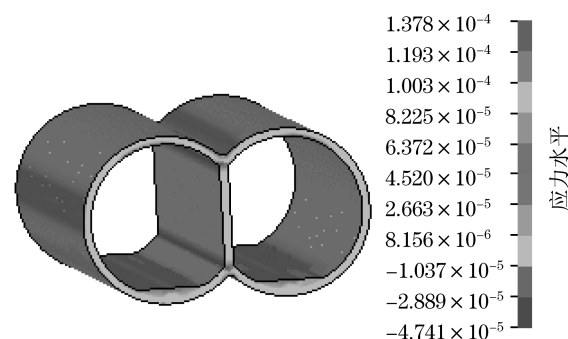


图 8 10 kg 炸药应力图(非接触)
图 8 Stress map for TNT=10 kg(non-contact)

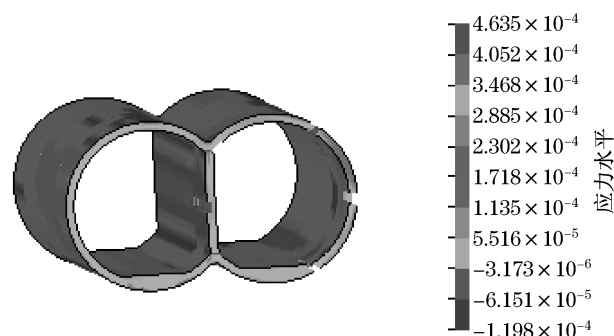


图 9 50 kg 炸药应力图(非接触)
Fig.9 Stress map for TNT=50 kg(non-contact)

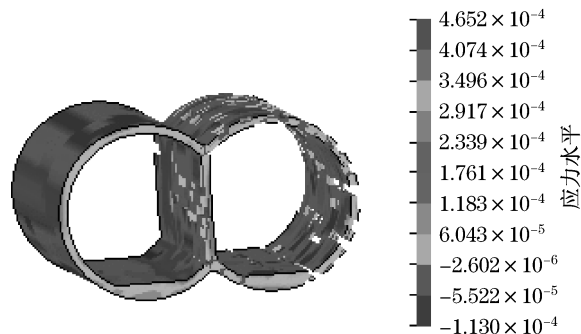


图 10 100 kg 炸药应力图(非接触)
Fig.10 Stress map for TNT=100 kg(non-contact)

非接触爆炸应力图见图 8~10,爆炸单元选取为右侧圆形隧道截面中心处。

由应力破坏结果可以看出,接触爆炸与非接触爆炸对隧道结构的破坏影响不同,如表 5 所示.当炸药放置在右边隧道结构垫层的道床中心时(即与隧道结构接触),隧道结构的破坏效应随着炸药量的增加而增强.当炸药放置在右边隧道结构的截面中心处时(即与隧道结构非接触),隧道结构在 10 kg 当量炸药时基本没有发生严重的破坏,在 50 kg 和 100 kg 当量炸药时均已发生严重的破坏。

表 5 隧道结构接触与非接触破坏结果
Tab.5 Damage results of dot shield tunnels under the condition of non-contact and contact

炸药量/kg	破坏结果	
	接触	非接触
10	垫层、管片部分破坏	未破坏
50	垫层、管片、中隔壁破坏	右隧道、中隔壁破坏
100	垫层、管片、中隔壁破坏	右隧道、中隔壁破坏

接触爆炸时右侧隧道结构不同位置处单元最大主应力 σ_m 的时程曲线图见图 11~13。

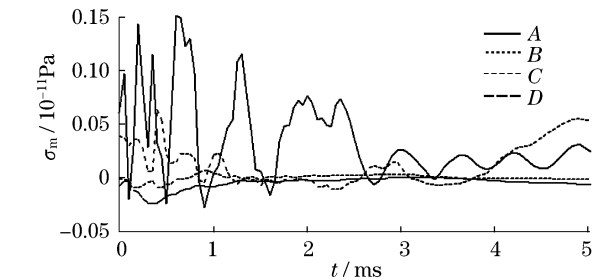


图 11 10 kg 炸药时隧道结构单元的最大主应力时程曲线(接触)
Fig.11 Time history of maximal principal stress of elements in tunnels for 10 kg TNT(contact)

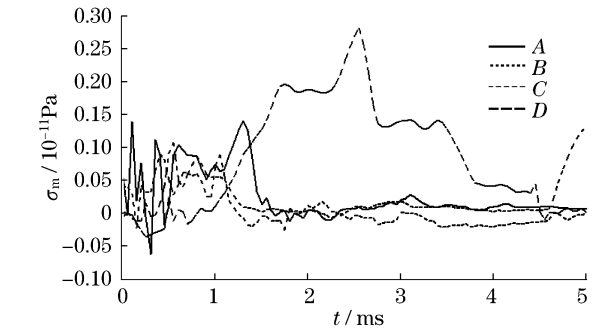


图 12 50 kg 炸药时隧道结构单元的最大主应力时程曲线(接触)
Fig.12 Time history of maximal principal stress of elements in tunnels for 50 kg TNT(contact)

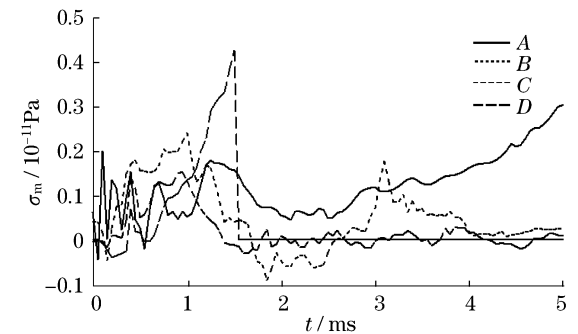


图 13 100 kg 炸药时隧道结构单元的最大主应力时程曲线(接触)
Fig.13 Time history of maximal principal stress of elements in tunnels for 100 kg TNT(contact)
非接触爆炸时右侧隧道结构不同位置处其单元最大主应力 σ_m 的时程曲线图见图 14~16。

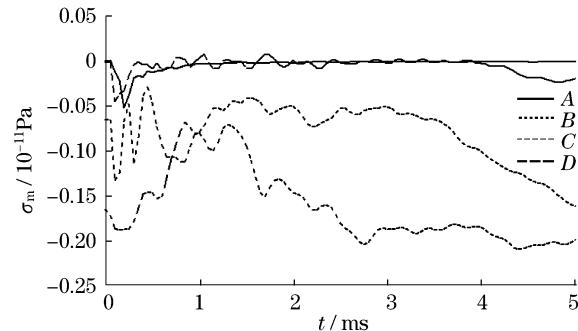


图 14 10 kg 炸药时隧道结构单元的最大主应力时程曲线(非接触)
Fig.14 Time history of maximal principal stress of elements in tunnels for 10 kg TNT(non-contact)

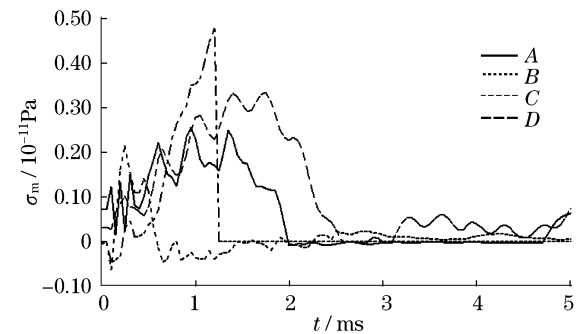


图 15 50 kg 炸药时隧道结构单元的最大主应力时程曲线(非接触)
Fig.15 Time history of maximal principal stress of elements in tunnels for 50 kg TNT(non-contact)

由隧道结构单元的最大主应力时程曲线图可知,对于接触爆炸,隧道结构选取的各单元的最大主应力峰值均很大程度上超过其材料的抗拉强度,且对垫层的影响最大.随着炸药当量的增加,结构所受的最

大主应力峰值也随之增大,且距离爆炸点越近,其峰值越大.对于非接触爆炸,当炸药当量为10 kg时,隧道结构中选出的各单元所受的最大主应力为压应力,其峰值小于材料的抗压强度,当炸药当量为50,100 kg时,隧道结构中选出的各单元所受的最大主应力为拉应力,其峰值均已超过材料的抗拉强度,且对C点(中隔墙与右隧道上部相交处)、垫层、拱顶处的影响较大.当炸药当量为50 kg时,接触爆炸对C点的最大主应力峰值的影响较100 kg的炸药大,对垫层、中隔墙、拱顶的最大主应力峰值的影响较100 kg的炸药小.

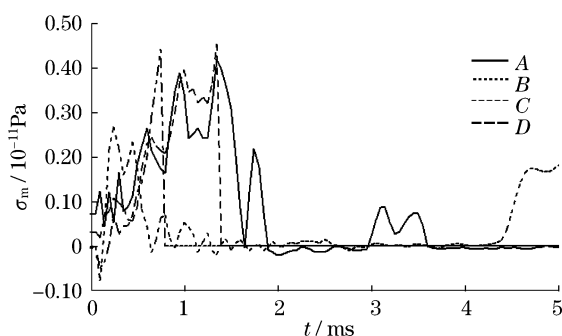


图16 100 kg炸药时隧道结构单元的最大主应力时程曲线(非接触)

Fig.16 Time history of maximal principal stress of elements in tunnels for 100 kg TNT (non-contact)

对于接触与非接触爆炸,当炸药当量为10 kg,隧道垫层结构单元的最大主应力峰值大于非接触爆炸时的最大主应力,当炸药当量为50 kg与100 kg时,接触爆炸的最大主应力峰值小于非接触爆炸,而其垫层处单元最大主应力峰值的作用时间早于非接触爆炸,即其破坏早于非接触爆炸.所以,当炸药量相同时,接触爆炸对垫层的破坏效应较大,而非接触爆炸对中隔墙的破坏效应较大.

单圆盾构隧道在爆炸荷载作用下的破坏结构与双圆不同.单圆隧道的破坏规律与双圆隧道结构基本相同,不同的是,单圆隧道的破坏结果比双圆隧道结构轻,其主要原因是双圆隧道因其有中隔墙,单侧隧道结构的破坏空间较单圆隧道小,所以其破坏也严重.

4 结论

本文通过研究双圆盾构隧道在3种炸药量工况

下的接触和非接触爆炸,得出以下结论:

(1) 爆炸当量为10 kg,爆心位于其中一条隧道的中央位置时,隧道结构基本上稳定,20 kg时,隧道结构有少量的破坏.当爆心位于其中一条隧道的道床中心位置处,即接触爆炸,10 kg炸药放在道床上时,底部混凝土垫层以及其下的管片将产生一定范围的破坏.

(2) 爆炸当量为50 kg,爆心位于一条隧道中心位置时,靠近中隔墙处的上部右隧道管片、底板,以及封顶管片和中隔墙均出现不同范围的破坏,当爆心在道床时,垫层下方的混凝土,底板垫层两侧与管片连接以及中隔墙的中上部都将破坏.

(3) 当爆炸当量为100 kg时,双圆断面隧道基本上全部破坏.

(4) 同样当量的炸药,接触爆炸对底板产生的破坏效应大于非接触爆炸,而对中隔墙的破坏效应小于非接触爆炸.

参考文献:

- [1] 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.
LUO Kunsheng, WANG Yong, ZHANG Yuetang, et al. Numerical simulation of section subway tunnel under surface explosion[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2007, 8(6):674.
- [2] 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.
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.
- [3] 廖维张,杜修力,田志敏.爆炸荷载作用下部分埋置结构响应的数值模拟方法[J].北京工业大学学报,2007,32(2):155.
LIAO Weizhang, DU Xiuli, TIAN Zhimin. Numerical simulation methods on dynamic response of partially-buried structure under blast loading[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2007, 32(2):155.
- [4] 尚晓江,苏建宇. Ansys LS-DYNA 动力分析方法与工程实例[M].北京:中国水利水电出版社,2005.
SHANG Xiaojiang, SU Jianyu. Ansys LS - DYNA dynamic analysis methods and engineering example[M]. Beijing: China Water Power Press, 2005.