

文章编号: 1000-7598-(2006) 增-0759-05

地铁区间隧道内爆炸效应研究

葛 涛¹, 耿 民²

(1. 解放军理工大学工程兵工程学院, 南京 210007; 2. 北京参保建筑设计研究院, 北京 100850)

摘 要: 为了评估南京地铁区间隧道内爆炸破坏效应, 利用有限元分析软件 LS-DYNA3D 软件, 计算了 10kgTNT 距隧道底部距离为 1.1m 的内爆炸工况。该软件中的化学爆炸空气冲击波模拟关键字避开了复杂烦琐的欧拉计算和 ALE 耦合分析过程, 使得模型构建大大简化。计算得到了结构中不同关键节点的位移与速度时程曲线与不同单元的加速度时程曲线和最大主应变。结果表明地铁区间隧道在 10kgTNT 内爆作用下是安全的。

关 键 词: 地铁; 区间隧道; 内爆炸; 数值模拟

中图分类号: O 389

文献标识码: A

Study on inner explosion of sectional tunnel in subway

GE Tao¹, GENG Min²

(1. Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China;

2. Beijing Canbao Institute of architectural design, Beijing 100850, China)

Abstract: In order to evaluate the inner explosion effect of sectional tunnel in subway in Nanjing, the engineering situation of inner explosion of 10 kg TNT with 1.1 m distance from tunnel bottom is numerically simulated with LS-DYNA3D. The keyword of simulation of air blast due to conventional weapon avoids complex and trivial Euler calculation and ALE coupling analysis, so as to simplify model construction. The history of displacements and velocities of different nodes were obtained, the history of acceleration of elements and their maximum principal strain were obtained as well. The result that the sectional tunnel in subway is safe with inner explosion of 10 kg TNT.

Key words: subway; sectional tunnel; inner explosion; numerical simulation

1 前 言

近年来爆炸恐怖活动有愈演愈烈之趋势, 各类爆炸案时有发生, 爆炸恐怖活动已成为当今恐怖分子最常用、最普遍与最主要的破坏形式。世界反恐活动也相应地对结构内爆炸的防护提出了新的课题和要求, 在各种重要的建筑物和构筑物设计中越来越注意内爆炸荷载作用问题。南京地铁是一项国家重点工程和南京市标志性建筑。作为与人民休息相关的基础设施, 其内部爆炸研究具有至关重要的地位。炸药在建筑物内部爆炸, 由于受到建筑物墙壁的限制, 产生的空气冲击波传播规律异于在自由大

气中的传播。杨科之, 杨秀敏利用三维数值模拟计算程序, 归纳出空气冲击波沿坑道方向的传播规律^[1]。钟方平采用 NND 差分格式, 获得容器壁任一点爆炸作用载荷的变化特征^[2]。张振华, 朱锡等运用大型商业有限元程序 MSC.DYTRAN 数值模拟了水下爆炸载荷作用下自由环肋圆柱壳的非线性动态响应, 计算结果与实验吻合较好^[3]。

内爆炸作用载荷的确定对于结构防护及爆炸容器研究具有重要的意义, 研究表明载荷特征(如峰值、上升时间、持续时间、衰减特性等)对结构的具体响应细节有比较明显的影响^[4]。获得比较准确、可靠的爆炸隧道内壁作用载荷分布情况, 对于研究结构动力响应具有重大意义。

收稿日期: 2006-07-10

作者简介: 葛涛, 男, 1978 年生, 博士生。主要从事岩石动力学与防护工程方面的研究。

2 地铁区间隧道内爆炸荷载分析

2.1 数值计算模型

装药起爆过程和空气冲击波波传播过程是非常复杂的过程,用有限元分析要占用巨大的硬件资源。最近 LSTC 的开发人员在 LS-DYNA 软件中加入了简化的化学爆炸空气冲击波模拟关键字“*LOAD_BLAST”,该关键字结合大量的化爆试验给出了一定距离上的空气冲击波荷载时程曲线和荷载开始作用时间,该关键字对几何条件比较规则的模型的模拟是比较准确的。使用该关键字可以避开复杂烦琐的欧拉计算和 ALE 耦合分析过程,使得模型构建大大简化。该关键字需要的主要参数包括 TNT 当量、模型迎爆面空间参数、起爆时间和起爆方式等。该关键字不能考虑爆轰产物对结构的影响,也不能考虑碎片对结构的侵彻作用,因此仅适用于比例距离较大的情况。

数值计算采用三维有限元建模。隧道衬砌选用封顶块管片在正上方的拼装(简称通缝拼装)。为消除边界效应的影响,纵向取六环建模,重点考察中间环的变形和破坏情况。结构上方的覆盖层为 9 m,建模时取左、右和底部的介质厚度也同为 9 m,左、右和底部边界设置为透射边界。结点总数为 908 928,单元总数为 812 160。在距结构底部 1.1 m 处设置炸药,炸药为 10 kgTNT。如图 1 所示。

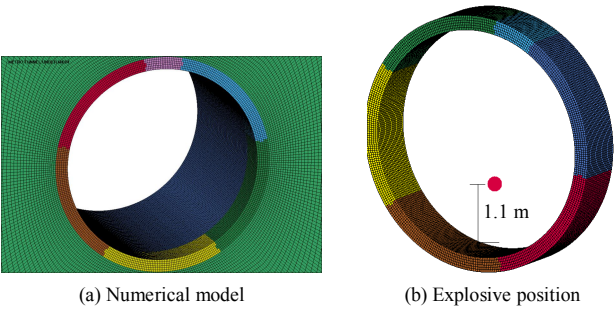


图 1 有限元模型与炸药位置示意图
Fig.1 Numerical model and explosive position

2.2 材料模型

2.2.1 混凝土模型

混凝土采用 LS-DYNA 中的 SOIL_CONCRETE 模型,混凝土材料的物理力学参数取值见表 1~4,表中的变量说明见文献[5],单位取国际标准单位。

表 1 混凝土的物理力学参数
Table 1 Physico-mechanics parameters of concrete

名称	ro/kg·m ⁻³	g/GPa	k/GPa	lcpv	lcyp	lcfp
数值	2500	13.15	17.5	1	2	3
名称	lcrp	pc	out	b	fail	
数值	4	-1.8E+7	1	0.3	2	

表 1 中曲线 1 代表压力和体积应变的关系,其取值见表 2。

表 2 混凝土的压力和体积应变关系
Table 2 Relation between press and bulk strain of concrete

体积应变	压力/MPa	体积应变	压力/MPa
0.002 290 00	40.075	0.043 628 7	302.880 00
0.004 873 67	55.912 4	0.046 212 3	325.660 00
0.007 457 33	71.242 6	0.048 796 0	349.940 99
0.010 041 00	86.1911 04	0.051 379 7	375.847 01
0.012 624 70	100.883	0.053 963 3	403.504 99
0.015 208 30	115.445	0.056 547 0	433.040 00
0.017 792 00	130.001	0.059 130 7	464.577 98
0.020 375 70	144.678	0.061 714 3	498.243 01
0.022 959 30	159.6	0.064 298 0	534.160 99
0.025 543 00	174.892 99	0.066 881 7	572.459 01
0.028 126 70	190.683 01	0.069 465 3	613.260 03
0.030 710 30	207.096	0.072 049 0	656.691 97
0.033 294 00	224.255 01	0.074 632 7	702.878 98
0.035 877 70	242.288	0.077 216 3	751.945 98
0.038 461 30	261.32	0.079 800 0	804.019 97
0.041 045 00	281.475 01	0.579 800 0	37853.9 99

表 1 中曲线 2 代表 Von-Mises 有效应力和压力的关系,其取值见表 3。Von-Mises 有效应力等效应力(又称为广义剪应力、应力强度或者八面体剪应力)是从偏应力中推导出的,它是剪切应变能的度量。等效应力用于确定一般应力状态是否发生了屈服。

表 3 混凝土 Von-Mises 有效应力和压力的关系
Table 3 Relation between pressure and Von-Mises effective stress

压力/MPa	V-M 有效应力 /MPa	压力/MPa	V-M 有效应力 /MPa
-3.4	0.0	700	158.129
0.0	23.4	750	159.52
50	41.497	800	160.646
100	65.9424	850	161.546
150	85.557	900	162.267
200	101.295	950	162.846
250	113.923	100	163.311
300	124.056	105	163.683
350	132.186	110	163.983
400	138.71	115	164.223
450	143.944	120	164.415
500	148.144	125	164.57
550	151.514	130	164.694
600	154.218	290	165.197
650	156.388	500	165.197

表 1 中曲线 3 代表混凝土开始破坏时塑性应变与压力的对应关系,曲线 4 代表混凝土达到残余强度时塑性应变与压力的对应关系。其取值见表 4。

表 4 达到残余强度时的塑性应变和压力的关系
Table4 Relation between plastic strain and pressure with remainder concrete strength

压力/MPa	塑性应变 (曲线 3)	塑性应变 (曲线 4)
0.0	0.0	0.01
15	0.0	0.01
100	0.04	0.05
1000	0.49	0.50
10000	4.90	5.00

2.2.2 砂土材料模型

砂土采用 SOIL_AND_FOAM 模型, 材料的屈服条件可以表示为

$$J_2 = a_0 + a_1 p + a_2 p^2 \quad (1)$$

其中: p 为静水压力, $p = -\frac{1}{3} I_1$

$$\sqrt{J_2} = k - a I_1 \quad (2)$$

整理得:

$$J_2 = k^2 - 2akI_1 + a^2 I_1^2 \quad (3)$$

式中, $a = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 \pm \sin \varphi)}$, $k = \frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 \pm \sin \varphi)}$ (+代表

inner, -代表 outer)。 c 和 φ 分别为 cohesion 和 angle of friction。

因此, 式(2)可以表示为:

$$J_2 = k^2 + 6akp + 9a^2 p^2 \quad (4)$$

对比(3)式和(4)式, 可以得到:

$$a_0 = k^2; \quad a_1 = 6ak; \quad a_2 = 9a^2 \quad (5)$$

结构周围砂土介质的物理力学性质见文献[6]。计算结果输出不同工况在不同时刻的状态图, 包括 Von-Mises 有效应力、压力和结构位移等物理量。为了详细考察关键位置的动态响应, 计算部分单元的物理量时间历程曲线, 测点具体位置见图 2。

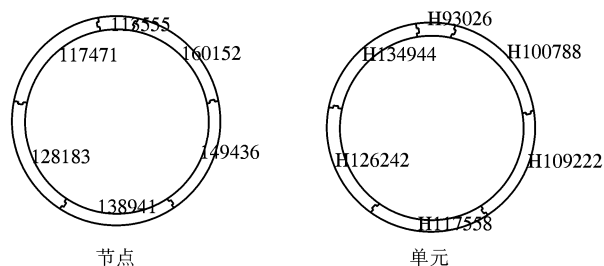


图 2 结构上节点、单元编号位置

Fig.2 Serial numbers of nodes and elements

3 数值计算结果分析

3.1 结构不同位置处的位移情况

图 3 为结构结点的垂直方向位移时程曲线与水

平方向位移时程曲线, 图中各结点编号具体位置见图 2。在内爆炸冲击荷载作用下, 衬砌结构垂直方向的最大位移约为 1.3 mm, 水平方向的位移沿垂向左右对称, 最大位移约为 0.8 mm。两个方向上的最大位移值均发生在结构下部距爆源较近位置。

3.2 结构不同位置处的速度情况

图 4 为结构结点的垂直方向速度时程曲线与水平方向速度时程曲线。在垂直方向, 结构振动响应的最大速度约为 0.3 m/s; 在水平方向, 结构振动响应的最大速度约为 0.16 m/s。

3.3 结构不同位置处的加速度情况

图 5 为结构结点的垂直方向位移时程曲线与水

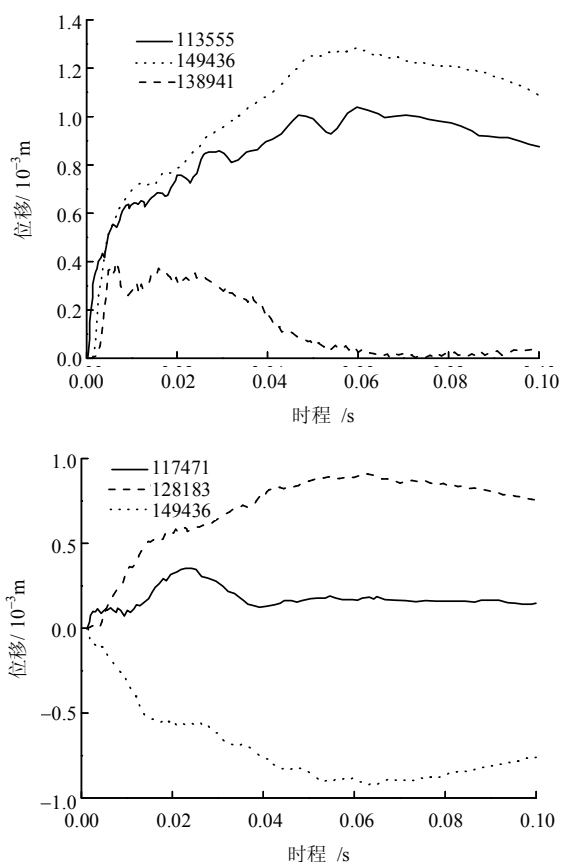
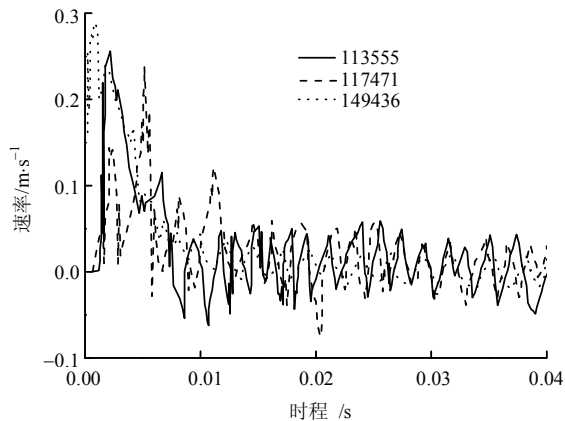


图 3 结构结点位移的时程曲线

Fig.3 History curves of displacements of the nodes



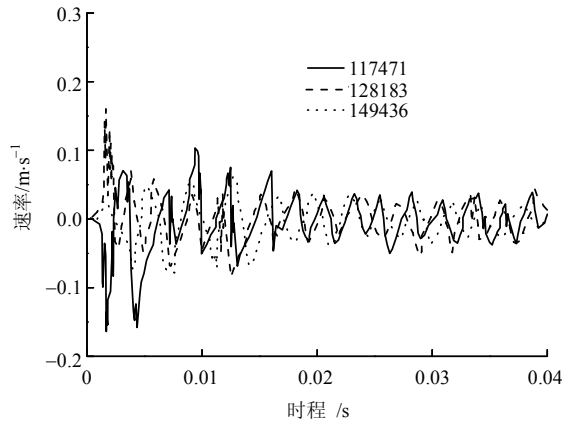


图 4 结构节点的速度时程曲线

Fig.4 History curves curves of velocities of the nodes

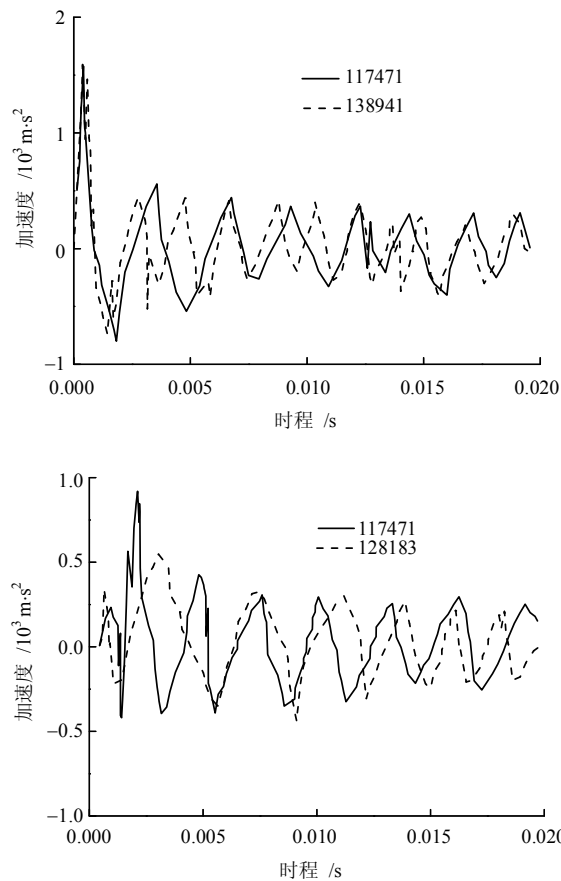


图 5 结构关键单元处的加速度时程曲线

Fig.5 History curves of acceleration of the key elements

平方向位移时程曲线。由图可以看出, 结构振动的加速度值较小, 最大值在 2500 m/s^2 左右。

3.4 结构不同位置处的应变分布

图 6 为给定结构上单元的最大主应变(拉应变)时程曲线。从图中可以看出, 在内爆炸作用下, 结

构上的应变很小, 都小于 100 个微应变。

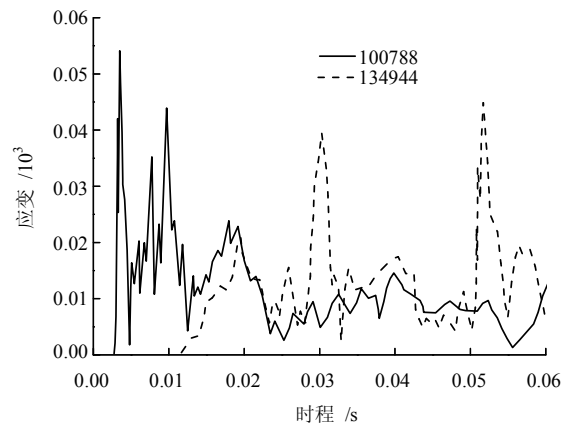


图 6 结构单元的最大主应变时程曲线

Fig.6 History curves of max principal stresses of the elements

4 结 论

通过对以上 10kgTNT 内爆炸效应的数值计算结果分析表明, 在内爆炸冲击荷载作用下, 衬砌结构垂直方向的最大位移约为 1.3 毫米, 水平方向的位移最大值位移约为 0.8 毫米。结构振动响应的最大速度, 在垂直方向约为 0.3 m/s ; 在水平方向约为 0.16 m/s 。加速度幅值较小, 最大值在 2500 m/s^2 左右。结构上单元的最大应变小于 100 个微应变。结构局部没有发生永久塑性变形。因此, 南京地铁区间隧道在 10 kgTNT 内爆作用下是安全的。

参 考 文 献

- [1] 杨科之, 杨秀敏. 坑道内化爆冲击波的传播规律[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(1): 37—40.
- [2] 钟方平, 双层圆柱形爆炸容器弹塑性结构响应的实验和理论研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 1999.
- [3] 张振华, 朱锡等. 水下爆炸载荷作用下自由环肋圆柱壳的非线性动态响应研究[J]. 爆炸与冲击, 2003 增刊.
- [4] Hunan P.R., Anhui P.R. Dynamic response of cylindrical explosive chambers to Internal blast loading produced by a concentrated charge[J]. *Int.J.Impact Engng.* 1997. 19(NOS9-10): 831—845.
- [5] LS-DYNA Keyword User's Manual. Version 970[M]. California: LSTC, 2003.
- [6] 赵跃堂, 杨树才. 地铁区间隧道环境力学效应及战备效能研究[R]. 南京: 解放军理工大学工程兵工程学院, 2005.