

隧道爆破施工对地表框架结构的影响分析

缪宏兵¹, 田宇杰²

(1. 如皋市石庄镇建设服务中心, 江苏 如皋 226531;
2. 中设设计集团股份有限公司南通分公司, 江苏 南通 226000)

摘要:以重庆某隧道爆破施工为研究背景,对开挖过程中地表建筑的震动进行监测,并辅以 ANSYS/LS-DYNA 进行仿真分析,通过流固耦合的方法,建立隧道炸药爆破有限元模型,分析隧道埋深 15 m 时,8 层框架结构在隧道爆破作用下的动力响应特性,以掌握结构的最大应力值以及房屋振动速度传播规律。结果表明,结构受隧道爆破影响最明显的在竖直方向,最大可以达到 6.76 cm/s,后在 2~3 cm/s 左右波动,与实测数据均值 2.38 cm/s 比较接近;炸药的作用对结构产生的最大应力为 2.4 MPa 左右,远远低于材料屈服失效强度。

关键词:隧道;爆破施工;框架结构

中图分类号:U456 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5322(2018)01-0057-07

随着社会面貌的快速提升以及人们活动日益频繁,路面堵塞现象时常困扰着人们。地下交通开发和修建能有力缓解这一问题,较为发达的城市已经普遍开始使用隧道这一交通方式。在对地下空间实施建设时,出现了地下空间穿过地表建筑安全性的问题。如某些隧道工程的施工因地质等因素而广泛采用钻爆法。但对于城市而言,强大的爆炸会产生引力波从爆炸点蔓延至四周,周围建筑物会因此受到震动。当应力波扩散,振幅与建筑物自身的振幅频度相似,会出现建筑物共振反应^[1],所以在使用钻爆法施工的过程中,就会出现引力波振幅破坏建筑物的现象。本文以重庆市某隧道工程为例,通过对现场施工爆破振速监测和有限元数值模拟,研究浅埋隧道在爆破荷载作用下,地表建筑的动力响应规律,探讨结构的安全性,以期作为类似工程参考。

1 监测数据分析

经过多次现场监控采集,整理得结构测点爆破振动数据见表 1。

对建筑的监测数据进行分析,爆破振动的主振频率主要分布 13.7 Hz≤f≤42.7 Hz 范围内,可

以确定爆破的安全允许振速 2.38 cm/s。在建筑物高度不变的情况下随着爆源距离的增大,建筑物的三向爆破速度无一例外都呈现减小的趋势,说明各测点峰值速度随爆源距离增大而减小,这与爆破地震波的传播衰减规律相符^[2]。

通过图 1 可知,在建筑物与爆源水平距离相同的情况下,随着建筑物楼层高度不同,建筑各楼层 x 向峰值振速随高度的变化无明显规律,但分析建筑各楼层 y 向(竖直向)爆破速度可以得到结论:建筑物楼层中部振速衰减较为明显,楼层的底端处爆破速度约为楼层中部爆破速度的 2.4 倍。

2 有限元模型的建立

2.1 工程概况

隧道左线位于曲线半径 $R=2\,200(4\,000)$ m 的圆曲线上,隧道纵坡 1.25%,右线位于曲线半径 $R=1\,500(2\,500)$ m 的圆曲线上,隧道纵坡 1.25%。左线隧道起止桩号为:ZK0+100~ZK0+840,隧道全长 740 m,右线隧道按其长度划分,属于中隧道起止桩号为:YK0+100~ZK0+840,隧道全长 740 m。隧道的施工地段是典型的侵蚀丘陵斜坡地貌。从钻探揭露情况可以得出,项目

表 1 监测数据整理表

Table 1 Monitoring data collation table

爆破中心至测点距离/m	x 向		y 向		z 向	
	振速 $v/$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	频率 f/Hz	振速 $v/$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	频率 f/Hz	振速 $v/$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	频率 f/Hz
15	1.57	29.37	2.38	34.62	1.22	37.35
16.2	0.92	39.34	1.82	31.57	1.71	31.69
17.1	0.84	27.49	2.07	41.77	1.29	32.64
19.1	0.83	38.64	1.71	13.70	1.48	19.85
21.2	0.63	37.47	1.35	29.53	0.66	41.57
23.5	0.92	19.61	1.18	16.59	0.8	37.38
24.8	0.89	35.55	0.47	26.40	0.89	20.37
26.5	0.63	30.51	0.76	16.33	0.32	14.52
27.9	0.57	31.83	0.52	18.66	0.21	30.58
28.5	0.54	42.34	0.38	41.31	0.18	13.78
31.9	0.35	24.68	0.19	16.41	0.54	40.52
33.8	0.29	31.76	0.37	42.73	0.15	17.73
35	0.18	29.37	0.16	34.62	0.22	37.35
38	0.09	39.34	0.12	31.57	0.17	31.69

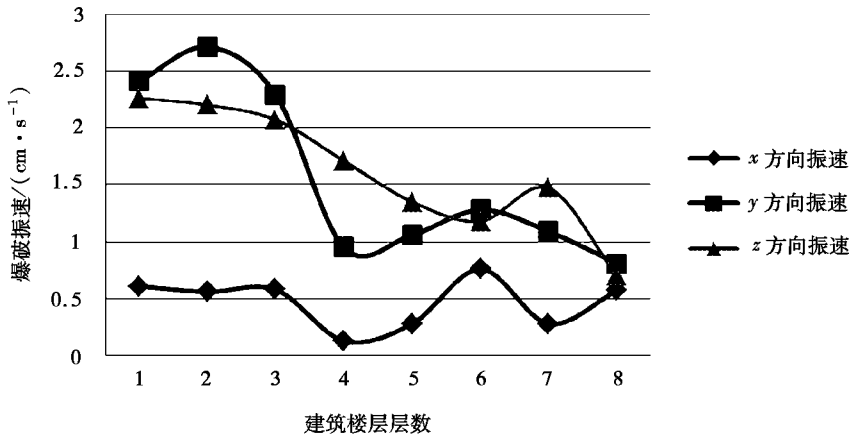


图 1 楼层层数与各方向振速关系图

Fig. 1 Relationship between storey number and vibration velocity in each direction

所在场地总的来说,基岩面较为平缓,起伏较小;但地形条件及人工开挖对隧道进口段与出口段影响较大,导致基岩面地形变化较大,基岩面高差最大 26.5 m。围岩岩石参数如表 2 所示。

2.2 模型的建立

监测结构主要由型钢组成,横向 3 跨,每跨 6 m,纵向两跨,每跨 5 m,总共 8 层,每层 3 m,采用箱型柱和 H 钢构件,柱子用箱型柱 600 mm(宽度)×600 mm(高度)×36 mm(厚度),梁用钢构件 H550×250×10×16($H \times B \times t_1 \times t_2$)。整个框架结构采用共节点的方式连接在一起,该种连接默认焊接部位材料与母材材料一样,强度一样,且分析过程中模型应力较连续^[3]。用同样的方法建立隧道以及围岩的模型,单元尺寸采用 30 cm,隧道单元数为 24 928 个,围岩单元数为 773 032 个,

表 2 岩石力学参数	
Table 2 Rock mechanics parameters	
参数	值
杨氏模量 E/GPa	25.5
泊松比 ν	0.15
剪切模量 G/GPa	11.09
体积模量 K/GPa	12.14
密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	2.28
单轴抗压强度 σ_c/MPa	57
巴氏拉伸强度 σ_t/MPa	5.8

空气和炸药至于隧道内部,空气单元数为 140 143 个,炸药单元数为 1 个,结构模型如图 2 所示。对于房屋框架结构的立柱,横梁腹板,横梁翼板均采用壳单元,单元类型为 shell163,房屋框架,围岩,隧道,炸药,空气都采用 solid164 实体单元,空气参数与炸药参数见表 3~表 4^[4]。

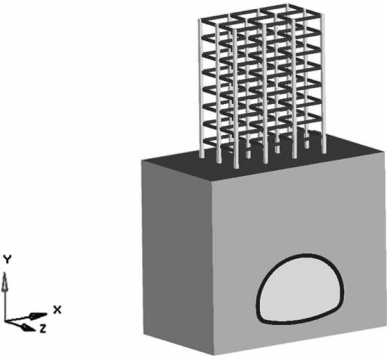


图 2 结构有限元模型
Fig. 2 Structural finite element model

表 3 空气参数
Table 3 Air parameters

参数	值
密度	1.29E-3
$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	
C_0	-1E-6
C_1	0
描述状态方程 * EOS_LINEAR_ POLYNOMIAL 的 独立物理常数	0
C_2	0
C_3	0
C_4	0.4
C_5	0.4
C_6	0
初始单位体积内能 E_0	2.5E-6
初始相对体积 V_0	1

表 4 炸药参数
Table 4 Explosive parameters

参数	值
密度 $\rho/$ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1.63
爆速 $V/$ ($\text{cm}\cdot\mu\text{s}^{-1}$)	0.671
爆压 $P/$ GPa	3.43
描述 JWL 状态方程的 独立物理常数	
A/GPa	321.9
B/GPa	0.182
V_0	1
R_2	0.8
ω	0.15
初始单位体积内能 E_0/GPa	3.51
初始相对体积 V_0	1

空气定义为空材料模型,其状态方程(*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL)表示为:

$$P = C_0 + C_1v + C_2v^2 + C_3v^3 + (C_4 + C_5v + C_6v^2)E_0 \tag{1}$$

炸药量为 30 kg,并用 JWL 状态方程来模拟炸药爆轰过程中压力和比容的关系,即

$$P = A\left(1 - \frac{\omega}{R_1V}\right)e^{-R_1V} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2V}\right)e^{-R_2V} + \frac{\omega E_0}{V} \tag{2}$$

式中: A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为材料常数; P 为压力; V 为相对体积; E_0 是初始比内能。

3 爆破作用下炸药压力波传播过程分析

为研究爆破作用下应力的传播过程,对不同时刻下结构的应力云图进行分析,图 3~图 6 分别为结构在不同时刻下的应力云图。图 3 为 4 000 μs 时的应力云图,此时炸药爆轰波并未到达隧道表面,隧道底部应力主要是因为重力作用下形成的;图 4 为 6 000 μs 时结构的应力云图,此时爆轰波到达隧道表面,因此隧道底部应力较大,此时应力最大为 0.2 MPa。8 000 μs 时,隧道应力逐渐在隧道表层传播,由刚才较小的区域逐渐传播开来,此时隧道最大等效应力为 0.53 MPa。在 13 000 μs 时隧道所受应力增大,此时爆轰波也传播至其他隧道区域,呈弧形扩散。14 000 μs 时,如图 5,应力扩大区域更加明显,且在建筑物底部已经形成明显的应力影响,之后,应力波继续扩展传播,可以看到沿建筑物由底部逐渐上升,21 000 μs 时已传播至整个建筑物结构。由图 6 可看出,由于余震及房屋本身的振动,又存在一个应力上升期。

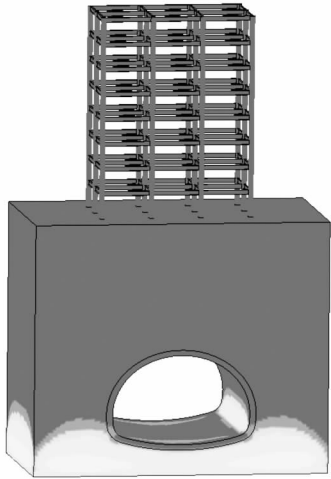
爆破振动荷载作用下建筑物破坏一般是在管体所受应力大于容许应力 $[\sigma_s]$ 后而发生的断裂破坏。大量试验表明应力波荷载作用下,钢管材料屈服点十分明显,能反应弹塑性材料产生破坏的 Von-Mises 屈服准则可用于其安全性的评价。

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} < [\sigma_s]$$

(2)

其中,钢材容许应力在不考虑温度及焊缝影响时, $[\sigma_s] = \sigma_s \times n$, σ_s 为管材最小屈服强度, n 为强度折减系数,取 0.72。提取立柱在整个爆破过程中的最大应力时程曲线,如图 7 所示。

模型参数值：
时间：3988.8 us
结构有效应力极值：
最小值=3.51012e-16，位于单元#16099；
最大值=9.65421e-09，位于单元#525062。

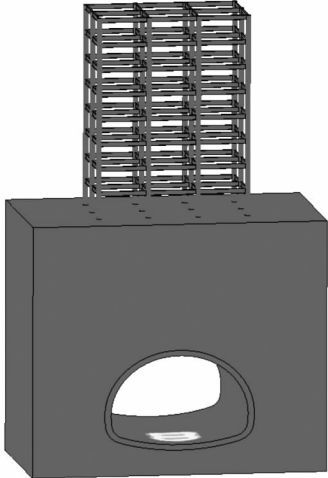


应力值对照图
9.654e-09
8.689e-09
7.723e-09
6.758e-09
5.793e-09
4.827e-09
3.862e-09
2.896e-09
1.931e-09
9.654e-10
3.510e-16

图 3 4 000 μs 时模型等效应力云图

Fig.3 4 000 μs model equivalent stress cloud

模型参数值：
时间：5993.9 us
结构有效应力极值：
最小值=5.36388e-14，位于单元#804185；
最大值=2.0392e-06，位于单元#823194。

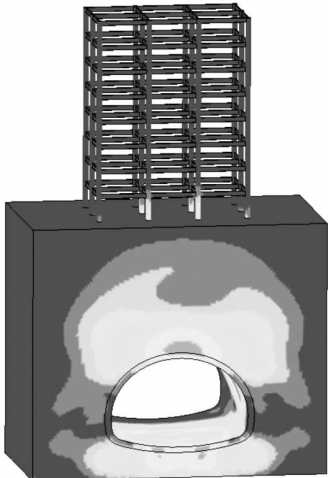


应力值对照图
2.039e-06
1.835e-06
1.631e-06
1.427e-06
1.224e-06
1.020e-06
8.157e-07
6.118e-07
4.078e-07
2.039e-07
5.364e-14

图 4 6 000 μs 时模型等效应力云图

Fig.4 6 000 μs model equivalent stress cloud

模型参数值：
时间：13996 us
结构有效应力极值：
最小值=6.69708e-11，位于单元#416442；
最大值=3.50185e-06，位于单元#815482。



应力值对照图
3.502e-06
3.152e-06
2.801e-06
2.451e-06
2.101e-06
1.751e-06
1.401e-06
1.051e-06
7.004e-07
3.502e-07
6.697e-11

图 5 14 000 μs 时模型等效应力云图

Fig.5 14 000 μs model equivalent stress cloud

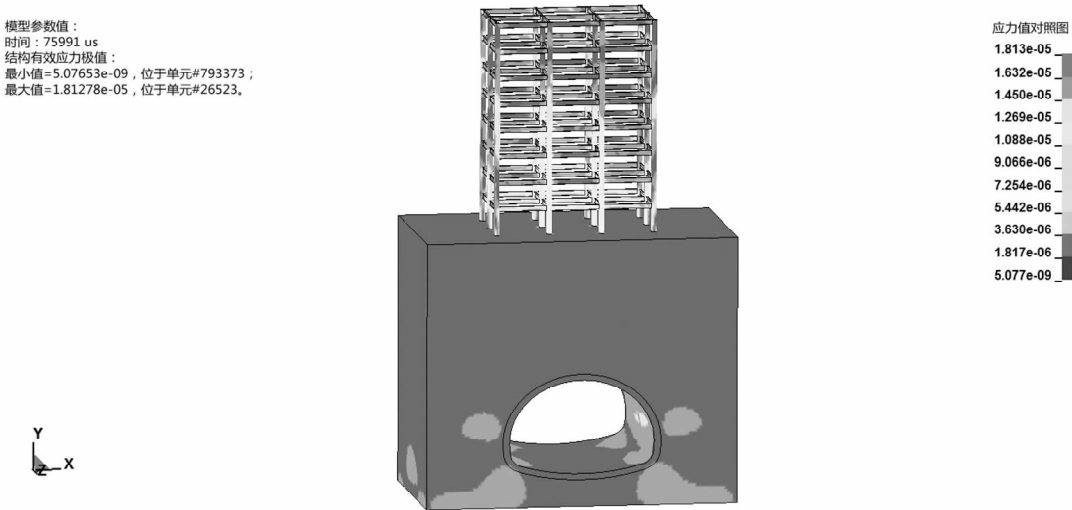


图 6 76 000 μs 时模型等效应力云图

Fig.6 76 000 μs model equivalent stress cloud

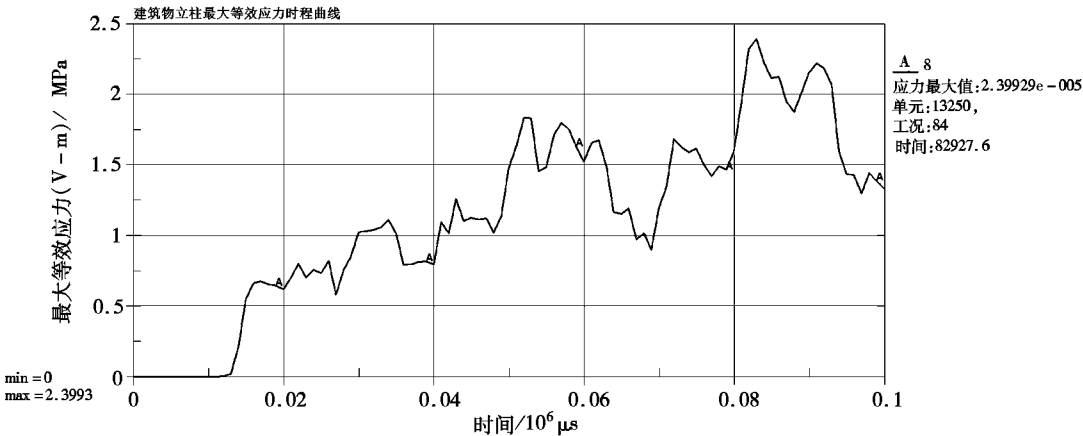


图 7 建筑物立柱爆破过程中最大等效应力时程曲线

Fig.7 Maximum equivalent stress time-history curve during the blasting process of building column

由图 7 可以看出,建筑物的等效应力最大为 2.4 MPa。对于屈服强度 235 MPa 的钢材来说安全系数较大。即,在既定爆破荷载作用不会导致建筑物发生屈服或破坏。

4 爆破作用下速度时程曲线分析

研究表明,结构中产生的应力与震速成正比,质点峰值震动速度充分利用了波的能量和地应力的关系,可以作为爆破震动破坏的物理量^[5-6],既反映了能量的大小,又反映了结构的受力状况,从而让人对爆破震动效应有很好的了解。鉴于此,提取不同楼层位置点进行速度时程分析,分别获得 8 个楼层各点的速度时程曲线,图 8 ~ 图 10 分别为中间楼层点的 x 、 y 、 z 3 向速度时程曲线,由曲线可以看出, x 向最大速度为 0.23 cm/s, y 向即竖直方向的速度最大为 6.76 cm/s,方向为向下,向

上最大速度为 4 cm/s, z 向楼层最大速度为 5.12 cm/s,由此可以看出楼层速度主要表现在竖直方向以及前后方向, x 向速度曲线表现比较杂乱,数值相对其他两个方向要小很多,而 y 向的速度曲线表现的相对有规律些,炸药主要引起房屋竖直方向的振动,在 $7\text{E}4 \mu\text{s}$ 左右时刻,炸药的爆轰波到达房屋处,此时引起房屋最大的竖直方向振动。之后由于余震以及房屋本身的振动,速度一直处于波动状态,大小在 2 ~ 3 cm/s 左右,与试验实测 30 kg 下埋深 15 m 爆破时所测数据 2.38 cm/s 比较接近,说明了仿真的可靠性。由于炸药安置在房屋靠前的位置,因此爆破过程中对房屋造成了在 z 向(前后方向)不均衡的响应,因此 z 向速度在后期还有偏大的趋势。

不同楼层的振速模拟值与实测数据对比曲线如图 11 所示,进一步验证模拟的可信度。即,建

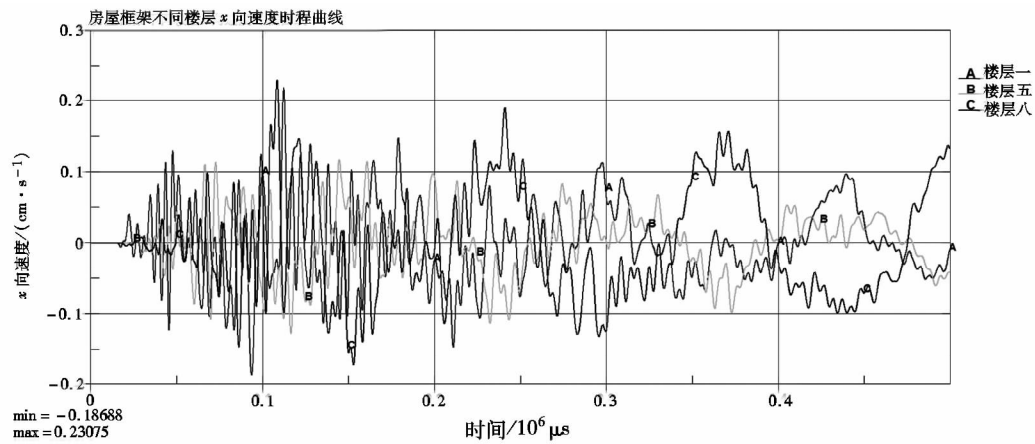


图 8 不同楼层 x 向速度时程曲线
Fig.8 x -speed velocity curve for different floors

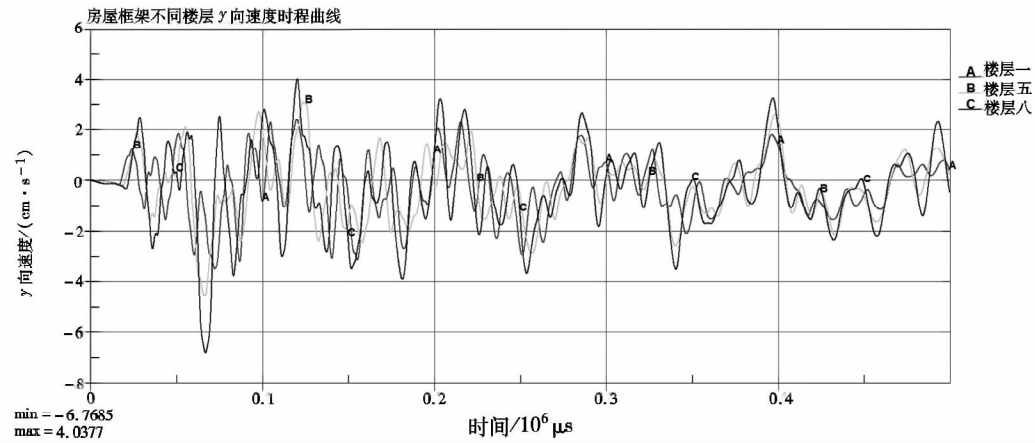


图 9 不同楼层 y 向速度时程曲线
Fig.9 y -speed velocity curve for different floors

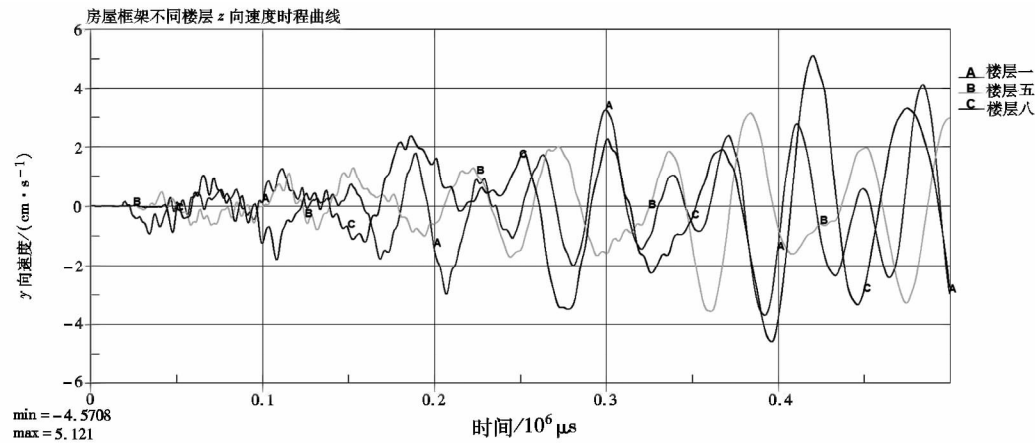


图 10 不同楼层 z 向速度时程曲线
Fig.10 z -speed velocity curve for different floors

筑物与爆源距离相同的情况下,建筑物中部楼层振速衰减明显,楼层的底端竖向爆破速度约为楼层中部爆破速度的 2.4 倍。

5 结论

本文采用 Hypermesh14.0 联合 ANSYS/LS -

DYNA对框架结构受隧道爆破作用进行仿真模拟,建立了 8 层框架楼层,分析了隧道爆破施工中表层建筑的应力传播过程,并对该框架结构不同楼层点的速度进行了分析,得出以下结论:(1)炸药在 6 000 μs 左右到达隧道底部,在 14 000 μs 对房屋框架造成应力反映,21 000 μs 炸药的作用

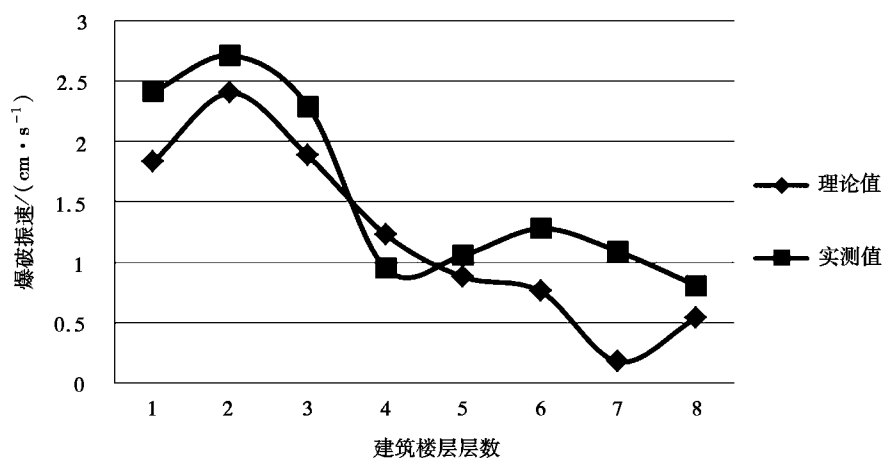


图 11 不同楼层 y 向模拟数值与实测数值对比曲线图

Fig. 11 Comparison of y-level simulation values and measured values for different floors

效果让整个框架结构有应力的反映,房屋框架在爆破作用下最大应力为 2.4 MPa 左右,远远低于材料屈服失效强度,结构安全。(2)房屋受隧道爆破影响最明显的在竖直方向,最大可以达到 6.76 cm/s,后在 2~3 cm/s 左右波动,与试验实测 30 kg 下埋深 15 m 爆破时所测数据均值 2.38

cm/s 比较接近,可见结构处于安全状态。(3)在建筑物与爆源距离相同的情况下,房屋受隧道爆破影响最明显的在 y 向(竖直方向),其中部竖向爆破振速衰减最为明显,底层楼层竖向爆破速度约为楼层中部竖向爆破速度的 2.4 倍。

参考文献:

[1] 曹孝君,张继春,吕和林,等. 浅埋隧道掘进爆破地表震动效应的数值模拟[J]. 西南交通大学学报,2006,41(6):680-684.

[2] 张玉成,杨光华,刘鹏,等. 爆破荷载在数值计算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.

[3] 李军,刘瑞,侯庆军. 大跨度公路隧道动态施工围岩稳定性数值分析[J]. 盐城工学院学报(自然科学版),2008,21(2):70-73.

[4] 袁光英,王庆国. 不耦合装药爆破效应数值分析[J]. 陕西理工学院学报,(自科版),2013(5):28-31

[5] 张永兴,张远华. 隧道爆破开挖条件下地表建筑振动速度响应研究[J]. 地震工程与工程振动,2010,30(6):112-119.

[6] 楼晓明,郑俊杰,马建军,等. 隧道爆破振动速度研究[J]. 有色金属(矿山部分),2007,59(3):31-34.

Impact Analysis of Tunnel Blasting on the Surface Frame Structure

MIAO Hongbing¹,TIAN Yujie²

(1. Rugao Shizhuang Town Construction Service Center,Rugao Jiangsu 226531, China;
2. China Design Group Limited by Share Ltd Nantong branch,Nantong Jiangsu 226000, China)

Abstract:Taking the blasting construction of a tunnel in Chongqing as the research background, the vibration of the surface building in the process of excavation is monitored. The simulation analysis is carried out with ANSYS/LS-DYNA, and the finite element model of tunnel explosive blasting is established by the method of fluid solid coupling. Based on the analysis of the dynamic response characteristics of the 8 story frame structure under the blasting action of tunnel, the maximum stress value of the structure and the propagation rule of the vibration velocity of the building are obtained when the tunnel depth is 15m. The results show that the most obvious influence of tunnel blasting is vertical direction, the maximum can reach 6.76cm/s, and finally fluctuates from 2~3 cm/s, which is close to the average 2.38 cm/s of measured data. The maximum stress produced by the action of explosives to the structure is about 2.4Mpa. It is far below the yield failure strength of the material.

Keywords:Tunnel; blasting construction; frame structure (责任编辑:张英健)