DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.041

洞窟下紧邻隧道爆破振动响应分析及控爆措施研究

梁师俊
(浙江建设职业技术学院，浙江 杭州 311231)

摘要：新建隧道下穿紧邻地下洞窟(群)的爆破开挖将引起已有洞窟(群)振动响应，影响已有洞窟(群)安全。该文以下穿已有防空洞窟(群)杭州北干山隧道为工程背景，针对洞窟(群)下紧邻隧道爆破开挖的耦合装药不设置减振孔、耦合装药设置减振孔、非耦合装药不设置减振孔、非耦合装药设置减振孔4种上下台阶爆破开挖施工方式，在炸药爆破荷载作用下的洞窟振动响应进行了计算机数值模拟。数值模拟采用三维非线性有限元程序LS－DYNA，得到了4种爆破开挖方式上方洞窟底板的振动速度、等效应力等动力响应指标。数值模拟结果表明：从爆破应力波峰值速度、等效应力峰值等方面，非耦合装药设置减振孔方式相对其他3种情况均具有相当优势，因此，洞窟(群)下紧邻隧道爆破开挖推荐采用非耦合装药设置减振孔的钻爆方式，该数值模拟结果在实际工程现场爆破得到了验证，最危险状态下采用非耦合装药设置减振孔的上下台阶法爆破后，上方洞窟底板峰值速度小于规范允许值，设计安全。

关键词：洞窟；紧邻；爆破振动；数值模拟

1 引言

随着国民经济的发展，地下基础设施建设空前发展，下穿地下既有构筑物的新建地下隧道越来越多。由于地下空间开发一般遵循“先来先到”的规则及地质、地形条件制约，新建隧道工程与已有构筑物之间的间距设计得很小。因此，在新建隧道爆破施工过程中，已有洞窟(群)极易受到新建隧道施工的影响，危及新建隧道的施工安全及已有洞窟(群)的正常使用。因此，对新建隧道施工技术，特别是钻爆法施工提出了较高的要求。目前，国内外针对既有隧道的邻近隧道爆破施工振动问题研究多见，如钱耀锋、谭忠盛分析了复线隧道爆破对邻近隧道的安全影响；对爆破荷载作用下地下空间动力响应问题也开展了许多理论研究，如Lee分析了应力波的衍射问题和应力集中问题，Manoogian分析了地下结构在地震波作用下的解析解。但邻近地下防空洞窟(群)的隧道爆破施工振动影响研究还较少。该文针对地下防空洞窟(群)下爆破开挖紧邻隧道，通过三维数值模拟计算，分析不同钻爆方式、不同炮孔装药方式、不同减震孔设置方式等情况下，爆破振动对隧道上方紧邻洞窟的影响，提出相关的控爆措施，并根据工程实例验证，以供洞窟(群)下紧邻隧道爆破开挖设计、施工借鉴。

2 工程概况

杭州北干山新开隧道工程呈南北向，道路宽21 m，隧道上方有防空洞窟分布，隧道与洞窟平面交叉于K0＋837～K1＋035，长度约200 m，共涉及8个洞窟，对隧道施工影响最大的是50#洞窟，处于K0＋840～K0＋890桩号之间，洞窟宽度9.2 m，长42 m，高8 m。洞窟内堆放有粮食，约计4.5 t/m^2，容量约为1 050 t。洞窟底板高程与隧道顶部开挖设计高程最小高差为7.07 m。隧道与紧邻洞窟群平面如图1所示。

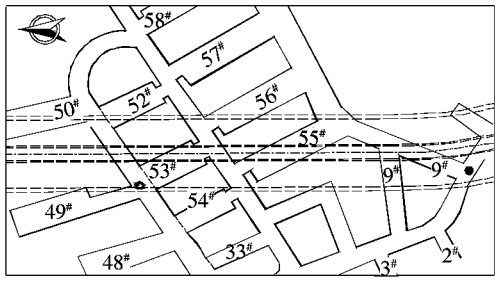


图1 新建隧道与紧邻洞窟群平面图

根据工程地质勘察，隧道岩石较完整，围岩质量较好，围岩节理发育，易产生掉块，属Ⅲ、Ⅳ级围岩。隧道

收稿日期：2018－07－14

作者简介：梁师俊，男，硕士，副教授，E－mail：liangshijun@vip.163.com

采用三心圆断面，上半断面半径 6.486 m，下半断面两侧半径 5.16 m，拱底半径 12.8 m。

3 数值计算模型的建立

计算采用通用显示动力有限元程序 LS－DYNA 进行。为更好地分析新建隧道爆破施工对已有地下防空洞窟(群)的振动响应，考察爆破振动效应(速度、加速度、应力等)峰值的变化。

数值模拟单位采用 cm－g－μs 系统，模型尺寸与实际工程尺寸比例为 1∶1。

3.1 模型几何尺寸

目前，动力计算在时间域内求解非线性问题，一般将边界取得尽可能远，有研究认为，隧道爆破振动对既有结构物的影响，当边界范围大于 3 倍隧道开挖直径后，对振动效应的峰值影响已相当小。该工程建模时将左、右及下边界取 4 倍隧道开挖直径，上边界为自由表面(地面)，前后边界为自由山坡表面，隧道纵向为一期施工的全长 300 m。

3.2 计算参数选取

(1) 岩石材料

模拟时，假设岩石材料为连续弹塑性体，屈服条件为 Mises 屈服条件，考虑爆破或冲击荷载下，岩石材料产生快速变形，与受静载荷作用情况相比，应变率明显提高，因此隧道围岩及地下防空洞窟(群)周围岩石采用非线性塑性随动强化材料模型 MAT_PLASTIC－KINEMATIC，不考虑应变率影响，材料参数如表 1 所示。

表 1 岩石参数

ρ/(kg·m^{-3})	E/GPa	υ	σ/MPa	E_{tan}/MPa
2 500	14.5	0.19	26.1	120

注：ρ 为岩石密度；E 为弹性模量；υ 为泊松比；σ 为屈服应力；E_{tan} 为切线模量。

(2) 堵泥材料

爆破孔堵泥选用 MAT_SOIL_AND_FOAM 材料模型，材料参数如表 2 所示。

表 2 堵泥材料参数

ρ/(kg·m^{-3})	E/GPa	υ	σ/MPa
2 000	137	0.30	2.53×10^{-5}

(3) 炸药材料

选用高能炸药材料模型 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 模拟炸药材料，结合 EOS_JWL 状态方程描述爆轰产物压力。炸药材料模型及状态方程参数如表 3 所示。

表 3 炸药参数

ρ/(kg·m^{-3})	v/(m·s^{-1})	E_0/GPa	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω
1 230	4 300	3.15	420	4.4	3.55	0.16	0.41

注：ρ 为炸药密度；v 为炸药爆速；E_0 为炸药爆压；A、B、R_1、R_2、ω 为系数。

3.3 数值模型建立

从隧道围岩等级看，该工程隧道爆破开挖方式可选用上下台阶法和预留核心土法。

工程爆破施工前，为验证不同的爆破施工对上方洞窟的影响，进行了预留核心土法和上下台阶法光面爆破试验，在离爆点距离 30 m 的 50# 洞窟底部测得的垂直方向典型振动波形如图 2、3 所示。

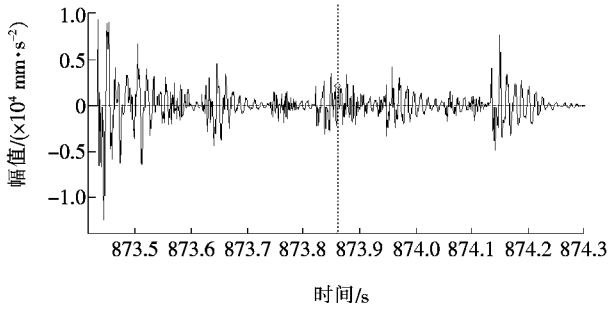


图 2 预留核心土法振动波形图

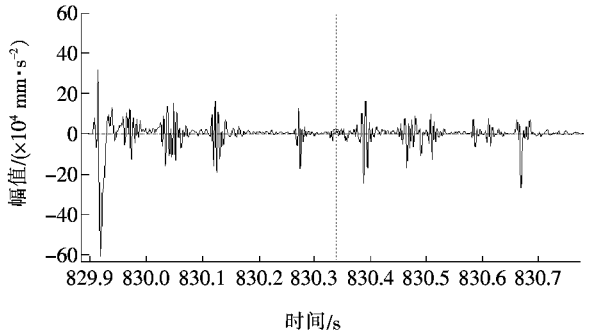


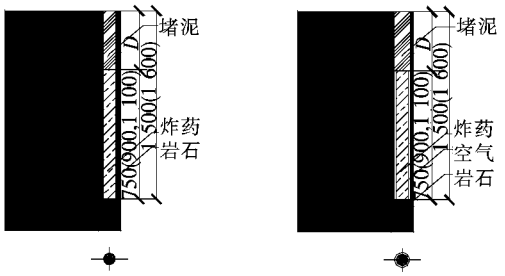
图 3 上下台阶法振动波形图

从图 2、3 可以看出：预留核心土法爆破时的反射波波动相当大，对上方洞窟的危害也较大，而上下台阶法对上方洞窟的影响相较预留核心土法有明显的下降，根据试验爆破结果，该工程有限元模拟采用上下台阶法光面爆破。

有限元模拟耦合装药和径向非耦合装药两种不同

炮孔装药方式，根据工程实际爆破方案，炮孔模型直径在非耦合装药时为 42 mm，耦合装药时为 32 mm，非耦合装药时，炮孔壁与药包之间径向留 5 mm 空气层，装药方式如图 4 所示。

周边孔与辅助孔孔底在同一垂直面上，炮孔深度均为 1.5 m，掏槽孔加深 10 cm，为 1.6 m。为保证爆炸效果，选用堵泥堵塞，装药长度和堵塞长度根据炮孔不同而不同。炮孔装药如表 4 所示。



(a) 耦合装药　　(b) 非耦合装药

图 4　装药方式(单位：mm)

模拟设置周边减振孔和不设置周边减振孔两种炮孔设置方式，设置周边减振孔时，周边孔不装药，为空眼。炮孔间距 1.5 m，排距 0.75 m，炮孔设置如图 5 所示。

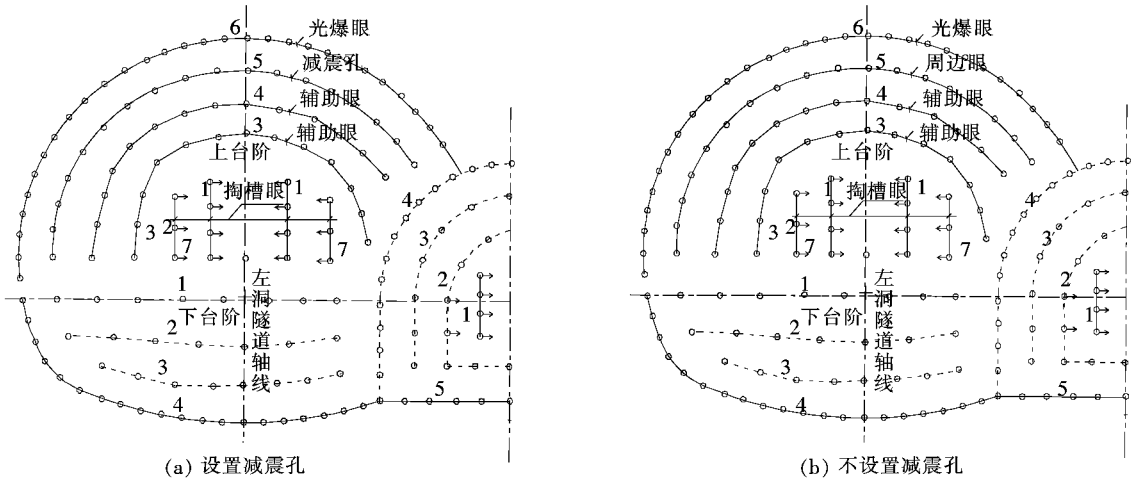
不设置周边减振孔时按 1－3－5－7－9 段跳段依次起爆中心 4 对掏槽孔、两侧 3 对掏槽孔、第 1 道辅助孔、第 2 道辅助孔、周边孔和光爆孔，设置周边减震孔时按 1－3－5－7－9 段跳段依次起爆中心 4 对掏槽孔、两侧 3 对掏槽孔、第 1 道辅助孔、第 2 道辅助孔、光爆孔。

对洞窟(群)下紧邻隧道爆破，为分析炮孔设置方式对防空洞窟爆破振动响应的影响，考虑耦合装药设置周边减震孔、耦合装药不设置周边减震孔、非耦合装药设置周边减振孔、非耦合装药不设置周边减振孔 4 种计算工况。

数值分析建模时，规定 X 轴正向为沿隧道轴线里程桩号增大方向，Y 轴正向为竖直向上，Z 轴正向为隧道掘进横断面方向，计算模型如图 6 所示。

表 4　炮孔装药参数

炮孔名称	编号	炮孔数/个	孔深/m	装药系数	药卷规格/mm	每孔装药重量/kg	共计药重/kg
中心掏槽眼	1	8	1.6	0.7	32	1.1	8.8
两侧掏槽眼	3	6	1.6	0.7	32	1.1	6.6
第 1 辅助眼	5	7	1.5	0.6	32	0.9	6.3
第 2 辅助眼	7	11	1.5	0.6	32	0.9	9.9
周边眼	9	15	1.5	0.6	32	0.9	13.5
光爆眼	9	19	1.5	0.5	32	0.7	13.3



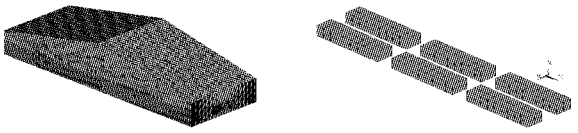
(a) 设置减震孔　　(b) 不设置减震孔

图 5　炮孔设置方式

在三维计算中，围岩、堵泥、空气、炸药均采用 8 节点的 Solid164 三维实体单元模拟，将岩石、堵泥划分

为 Lagrange 网格，炸药、空气划分为 ALE 网格，采用流固耦合算法模拟爆炸过程。

模型底面与左右两侧面采用无反射边界，前后边界表面、上边界表面及既有洞室表面为自由边界，整个模型共划分单元 331 274 个，节点 434 754 个。



(a) 整体模型 (b) 洞窟模型

图 6 有限元模型

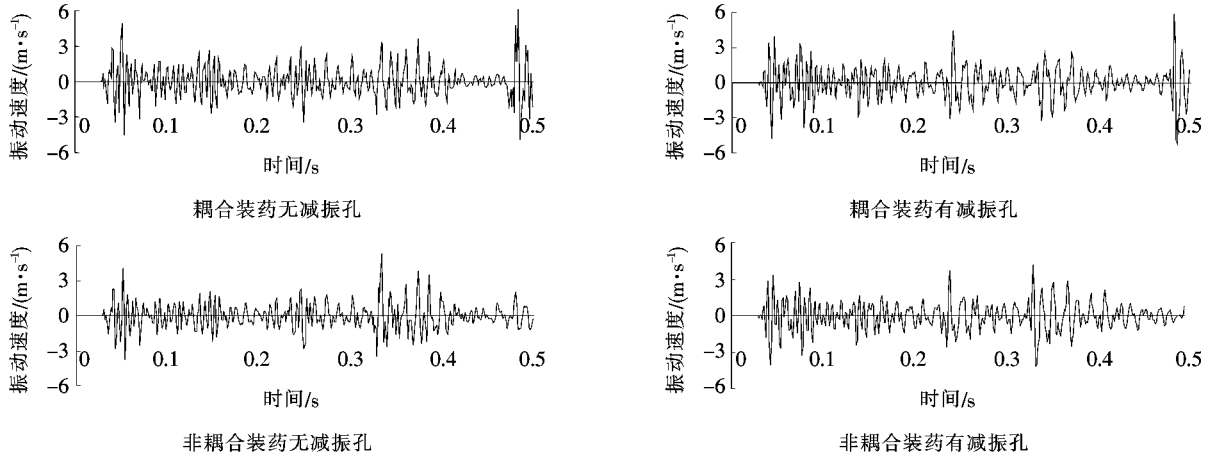
3.4 爆破控制标准

考虑该隧道工程紧邻地下防空洞的实际情况，该工程爆破震动安全评价采用以最大质点振动速度为主，兼顾最大质点振动加速度的双指标控制标准。依据 GB 6722—2014《爆破安全规程》爆破振动安全允许标准，该工程的地下防空洞最接近矿山巷道，标准规定对振动频率大于 50 Hz 的矿山巷道安全允许振速为 20～30 cm/s，考虑到地下防空洞的施工情况、使用年限及隧道爆破周边环境，出于安全考虑，设计安全允许振速取为规程允许振速范围中值的 1/3，即 8 cm/s。

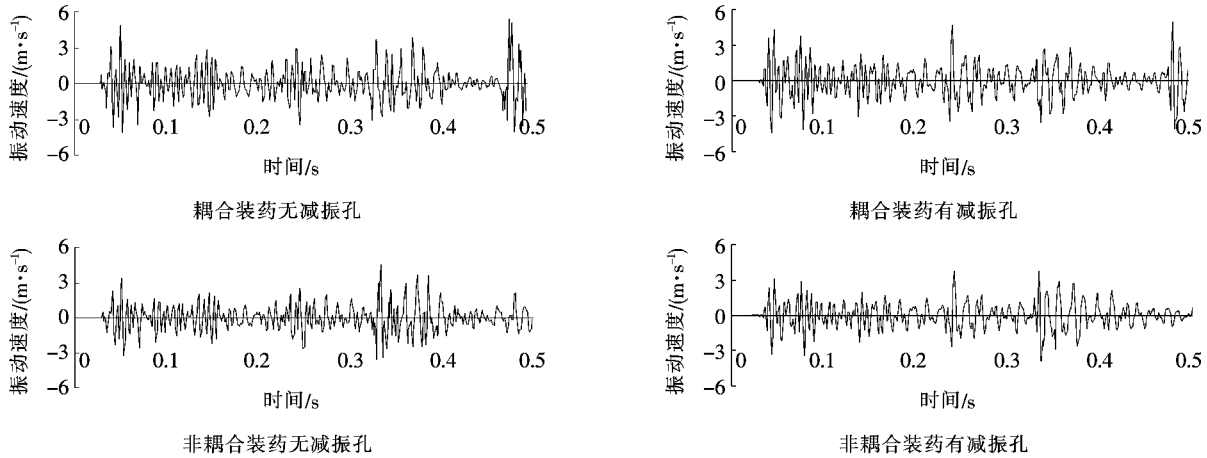
4 数值计算结果及分析

4.1 爆破振动分析

图 7 为 50# 洞窟底板同一节点不同工况下的速度时程曲线。



(a) Y 方向



(b) Z 方向

图 7 不同炮孔设置、装药方式振动速度时程曲线

4 种不同计算工况下，50# 洞窟底板同一节点位置下 Y、Z 方向振动速度峰值如表 5 所示。

由表 5 可知：① 耦合装药条件下，有减振孔时 Y 方向峰值振动速度比无减振孔降低 12.13%、Z 方向降

低 29.90%；非耦合装药条件下，有减振孔时 Y 方向峰值振动速度比无减振孔降低 16.79%、Z 方向减低 24.30%；② 设置减振孔的速度时程曲线比相同装药方式不设置减振孔时程曲线在各个时间点有不同程度的缩减。

表 5　有限元模拟测点振动速度峰值

项目		振动速度峰值/(cm·s^{-1})	
		Y	Z
耦合装药	无减振孔	6.10	5.92
	有减振孔	5.36	4.15
非耦合装药	无减振孔	5.42	5.02
	有减振孔	4.51	3.80

其原因在于周边空眼减振孔设置存在的空气层对爆破振动产生的能量存在缓冲作用，不管是耦合装药还是非耦合装药，均可有效降低邻近洞窟振动速度。

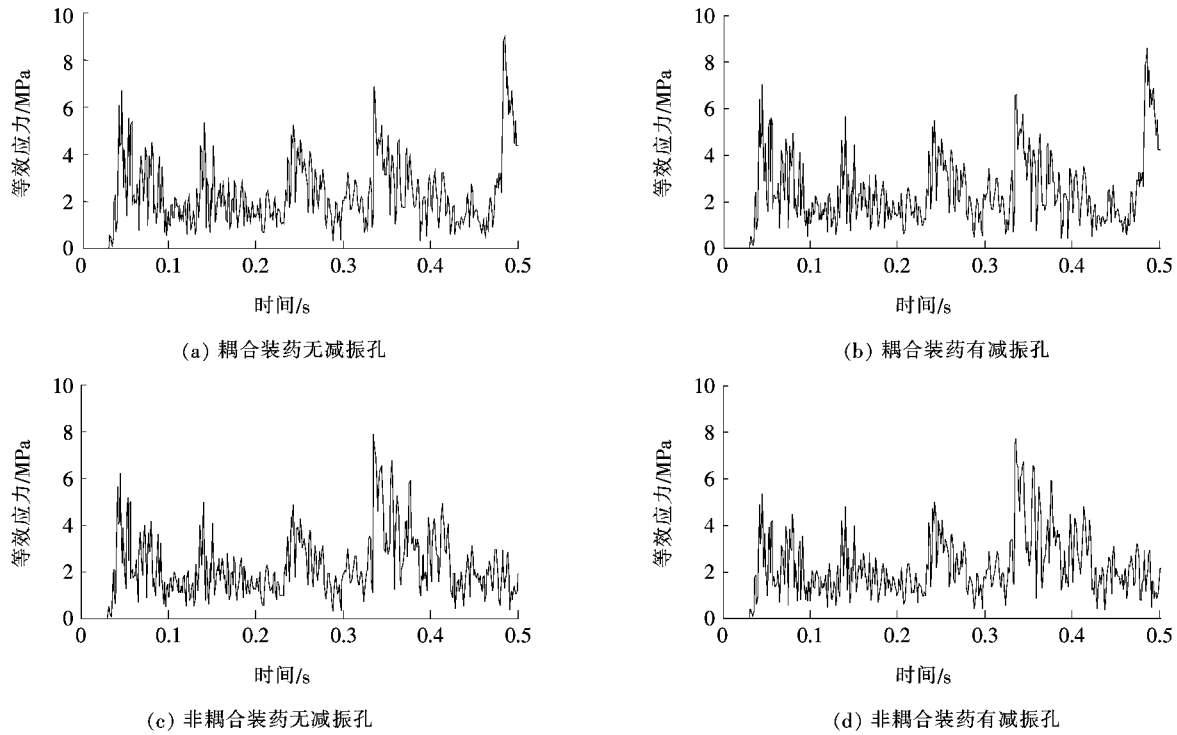
(1) 不设置减振孔时，非耦合装药 Y 方向速度峰值降低 11.15%、Z 方向降低 15.20%；设置减振孔时，非耦合装药 Y 方向速度峰值降低 15.86%、Z 方向降低 8.43%。

说明相同减振孔设置条件下，非耦合装药较耦合装药对上方洞窟(群)振动速度有一定的减缓作用。

(2) 4 种工况条件下，耦合装药无减振孔两个方向振动峰值速度最大；非耦合装药有减振孔两个方向振动峰值速度最小；耦合装药有减振孔、非耦合装药无减振孔两个方向振动峰值速度居中，但耦合装药有减振孔两个方向振动峰值速度均比非耦合装药无减振孔两个方向振动峰值速度略低。

4.2　应力衰减分析

图 8 为不同工况下位于 50# 洞窟底板同一位置单元的等效应力时程曲线。



(a) 耦合装药无减振孔　　(b) 耦合装药有减振孔

(c) 非耦合装药无减振孔　　(d) 非耦合装药有减振孔

图 8　50# 洞窟底板典型单元等效应力时程曲线

表 6 为不同工况下位于 50# 洞窟底板同一位置单元等效应力峰值。

表 6　有限元模拟单元等效应力峰值　　MPa

耦合装药		非耦合装药	
无减振孔	有减振孔	无减振孔	有减振孔
8.99	7.90	8.62	7.76

由表 6 可知：

(1) 4 种工况条件下，耦合装药无减振孔引起 50# 洞窟底板单元等效应力峰值最大，为 8.99 MPa；非耦合装药有减振孔 50# 洞窟底板单元等效应力峰值最小，为 7.76 MPa；耦合装药有减振孔与非耦合装药无减振孔 50# 洞窟底板单元等效应力峰值居中。

(2) 不设减振孔时，非耦合装药与耦合装药相比，等效应力峰值降低 4.12%；设置减振孔时，非耦合装药与耦合装药相比，等效应力峰值降低 1.77%。

(3) 耦合装药时,有减振孔与无减振孔相比,等效应力峰值降低 12.12%;非耦合装药时,有减振孔与无减振孔相比,等效应力峰值降低 9.98%。

说明在减振孔设置条件相同时,非耦合装药等效应力峰值与耦合装药相比略有降低,应力衰减程度基本一致;在装药方式相同时,设置减振孔等效应力峰值与不设置减振孔相比有大幅降低。

数值计算结果分析可知:周边设置空眼减振的非耦合装药上下台阶法爆破开挖对隧道上方紧邻洞窟的振动响应影响最小,上方紧邻洞窟的质点最大振动速度满足规范安全要求、质点最大振动加速度除 Y 方向略超过设计安全值外均满足设计要求。

5 现场监测情况验证

根据数值模拟结果,现场采用"上下台阶法开挖,周边设空眼减振、选用低爆速和小直径炸药、非耦合装药、微差爆破"掘进,炮孔设置见图 5(a),炮孔装药见图 4(b)。

K0+837 处爆破,掏槽孔爆心与上方洞窟底板距离为 12.5 m,现场监测洞窟底板 Y 方向峰值振动速度为 6.01 cm/s,满足规范安全要求,但比有限元模拟结果 4.72 cm/s 略高。究其原因:① 有限元模拟时隧道围岩全部按Ⅳ级计算,没有考虑部分Ⅲ级围岩情况;② 防空洞窟施工期间,曾遇到 2 m 宽的小断层,发生过较大的塌方,导致洞窟底部超挖较大,此种情况模拟时也没有考虑。

6 结论

(1) 上下台阶钻爆 4 种不同工况条件下爆破应力波对洞窟产生影响方面具有明显的不同。

(2) 周边设置空眼减振孔不管装药方式如何,均可有效降低上方紧邻洞窟(群)振动速度、等效应力。

(3) 不管是否设置周边空眼减振孔,采用非耦合装药方式对上方紧邻洞窟(群)振动速度、等效应力均有一定的减缓作用。

(4) 经综合比较分析,从爆破应力波峰值速度、等效应力等方面,非耦合装药设置减振孔方式相对其他 3 种情况均具有相当大的优势。因此,具有相同环境的实例工程中推荐采用非耦合装药设置减振孔的上下台阶钻爆法爆破施工。

(5) 有限元模拟结果应用于实例隧道爆破开挖实践表明,最危险状态下采用非耦合装药设置减振孔的上下台阶法爆破后,上方洞窟底板峰值速度小于规范允许值,设计安全。

参考文献:

[1] 黄祚琼.地铁车站暗挖隧道穿越既有线的施工技术研究[J].现代隧道技术,2014(2).

[2] 王占生,张顶立.浅埋暗挖隧道近距下穿既有地铁的关键技术[J].岩土力学与工程学报,2007(增 2).

[3] 万良勇,宋战平,曲建生,等.新建地铁隧道"零距离"下穿既有车站施工技术分析[J].现代隧道技术,2015(1).

[4] 钟冬望,吴亮,余刚.邻近隧道掘进爆破对既有隧道的影响[J].爆破与冲击,2010(5).

[5] 钱耀锋,王星华.爆破施工对邻近隧道安全的影响[J].北京交通大学学报,2014(4).

[6] 谭忠盛,杨小林,王梦恕.复线隧道施工爆破对既有隧道的影响分析[J].岩石力学与工程学报,2003(2).

[7] Lee V,Cao H.Diffraction of SV Waves by Circular Canyons of Various Depths [J].Journal of Engineering Mechanical,1989,115(9):2 035-2 056.

[8] Cao H,Lee V W.Scattering and Diffraction of Plane P Waves by Circular Cylindrical Canyons with Variable Depth-to-Width Ratio[J].European Journal of Obstetrics & Gynecology and Reproductive Biology,1979,9(3):141-150.

[9] Manoogian M,Lee V.Diffraction of SH-Waves by Subsurface Inclusions of Arbitrary Shape[J].Journal of Engineering Mechanical,1996,122(2):123-129.

[10] 龚智辉,胡畏,吴祖松,等.爆破荷载作用下双洞大跨公路隧道之间的相互影响研究[J].公路工程,2011(4).

[11] 戴俊.岩石动力学特性与爆破理论[M].北京:冶金工业出版社,2002.

[12] 刘国华,王振宇.爆破荷载作用下隧道的动态响应与抗爆分析[J].浙江大学学报:工学版,2004(2).

[13] GB 6722-2014 爆破安全规程[S].

[14] 梁师俊,朱海东,赵波.隧道爆破施工条件下近间距洞窟振动测试与分析[J].铁道建筑,2013(4).