

文章编号:1005-0523(2018)06-0029-06

隧道爆破开挖对既有水工隧道变形的影响

赵秀绍, 谭周勇, 李 凯, 刘宇云

(华东交通大学江西省岩土工程基础设施安全与控制重点实验室, 江西 南昌 330013)

摘要:以凤潭隧道为背景, 基于有限元软件 ABAQUS, 从隧道监测点位移、振动速度的角度出发, 进行邻近小净距隧道爆破开挖对既有水工隧道变形影响过程的三维数值分析。结果表明: 左右导洞爆破相较于单导洞爆破对既有水工隧道衬砌拱顶的影响更大, 爆破荷载峰值对于既有水工隧道位移及质点震动速度存在较大影响; 水工隧道正上方起爆所引起的衬砌拱顶位移更大, 爆破导洞的位置对于既有水工隧道位移及质点震动速度存在影响。

关键词:铁路隧道; 数值模拟; 小净距隧道; 变形量; 质点震动速度

中图分类号: U69

文献标志码: A

近年来, 随着国内交通基础设施的不断发展, 地下空间得到了广泛地开发和利用, 新建的隧道邻近现有结构物, 如小净距隧道、上下交叉隧道和其他形式的近接工程^[1]。受地形及地质条件的限制, 新建隧道与现有隧道之间的净距通常较小, 对既有隧道结构安全会产生不利影响, 爆破开挖产生的地震波会影响现有隧道围岩和衬砌结构的安全和稳定^[2]。

由于地下工程地质条件的不确定性和复杂性, 数值计算软件被广泛用于分析邻近隧道爆破开挖对既有隧道的变形影响。谢晓锋等^[3]通过对不同近距下的既有隧道与立交下穿隧道的模型进行数值分析, 得出钻爆开挖对不同近距的既有隧道衬砌的影响规律。刘敦文等^[4]通过数值模拟与实际测量对比分析, 得出施工隧道的最大装药量对既有隧道产生的影响规律。于天生, 赵镇林^[5-6]利用有限元软件对小近距隧道采用爆破开挖的过程进行了数值模拟分析。刁心宏, 梁志辉等^[7-8]利用有限元软件 ABAQUS 对不同开挖方案下的隧道数值分析了围岩的变化规律。本文基于 Mohr-Coulomb 弹塑性模型, 利用有限元分析软件 ABAQUS, 从隧道监测点位移、振动速度的角度出发, 进行邻近小净距隧道爆破开挖对既有水工隧道变形影响过程的三维数值分析。

1 工程概况

凤潭隧道为双洞单向行车双车道型式隧道, 左右洞测设线距离为 18 m, 左右线隧道净距为 13.4 m。凤潭隧道与宁波市白溪水库引水工程中的黄坛至鳧溪段输水隧洞相交, 两者交角约为 74°。输水隧洞拱顶到凤潭隧道设计高程处距离为 11.028 m, 到仰拱底距离为 8.228 m。在确保凤潭隧道下方输水隧洞安全情况下, 凤潭隧道开挖采用机械法与钻爆法(导洞控制爆破、导洞周边围岩预裂松动爆破)协同开挖方式。采用控制爆破技术在凤潭隧道起拱线上方开凿导洞(图中①, ⑥部分), 为后续的机械法开挖提供临空面, 导洞形成后, 再采用机械法开挖导洞周边围岩, 施工顺序为 1-2-III-4-V-6-7-VIII-9-X-XI-XII。隧道横断面如图 1 所示。

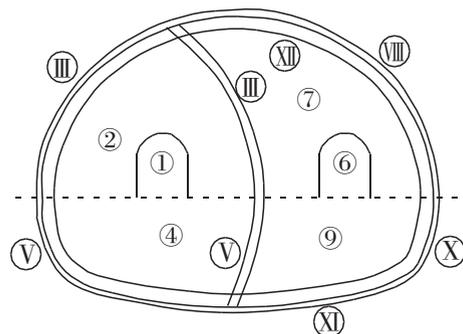


图 1 凤潭隧道横断面图

Fig.1 Cross section profile of Fengtan tunnel

收稿日期: 2018-06-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(5166080059)

作者简介: 赵秀绍(1978—), 男, 副教授, 博士, 研究方向为岩土工程、道路与铁道工程。

通讯作者: 谭周勇(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程、道路与铁道工程。

2 计算模型及爆破冲击荷载的确定

2.1 数值计算模型的建立

采用二维计算模型,基于数值计算 ABAQUS 软件来实现相邻小净距隧道爆破振动对既有水工隧道动力响应的有限元数据分析。计算模型中的坐标以既有隧道纵向设置为横轴,既有隧道的铅垂方向设置为纵轴。新旧隧道在空间位置上相互垂直,根据隧道设计资料,新建隧道断面跨度为 15.56 m,高度为 11.61 m。一般来说,隧道的开挖掘进对围岩位移影响范围为距离隧道中心 3 到 5 倍的隧道开挖宽度^[6],故计算模型长度 100 m,模型高度 90 m。所建计算模型左右两侧设置为水平约束,底部设置为固定约束,顶部设置为自由边界。既有隧道埋深为 32 m,输水隧洞正常运营时水压为 0.4 MPa,隧道内径 4 m,隧道岩体初始应力场仅考虑自重应力。

隧道地质条件为均质、各向同性地层,以使所建计算模型简化。采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型来模拟分析隧道爆破振动对既有水工隧道动力响应过程中围岩的塑性变形。为保证计算精度及计算时间,模型中隧道及距离隧道中心附近区域土体的网格划分较为细致,单元网格边长为 0.5 m,距离隧道中心附近区域远处的土体单元网格边长增大至 2 m。计算模型中所采用岩体的动力参数均根据现场多次测试、参照相关文献来获得,为使计算结果贴近工程实际,其中岩体的动力参数中围岩的动弹模量提升 3 倍,衬砌的动弹模量提升 25%,动泊松比为 0.8 倍,岩体力学参数如表 1 所示。

表 1 岩体力学参数
Tab.1 Mechanical parameters of rock mass

材料	荷载类型	弹性模量/GPa	泊松比	重度/(kN/m ³)	粘聚力/MPa	内摩擦角/(°)
IV级围岩	静载	20	0.3	22	0.5	30
	动载	60	0.24	22	0.5	30
整体式衬砌	静载	24	0.2	25	-	-
	动载	20	0.3	22	0.5	30

2.2 爆破冲击荷载的确定

在数值模拟数据分析过程中,确定合理的爆破荷载参数,如加载的波形、峰值应力、作用位置及方向、荷载加卸载时间等,对计算得出结果的准确性及可信度举足轻重。一般在数值计算中,可将爆破荷载简化为可进行加卸载过程的三角形波,爆破荷载以压力的形式作用在隧道周壁,作用方向为垂直于隧道边界面^[9]。峰值荷载采用经验计算公式

$$P_{\max} = \frac{139.97}{Z} + \frac{844.81}{Z^2} + \frac{2154}{Z^3} - 0.8034 \quad (1)$$

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \quad (2)$$

式中:Z 为比例距离,m;R 为炮眼至荷载作用面的距离,m;Q 为炮眼装药量,kg。

最不利情况取 0.85 m,即与底板最近掏槽眼的距离。则 $Z=0.54$, $P_{\max}=16.54$ MPa,。

其中 P_{\max} 为可进行加卸载过程的三角形的峰值,根据工程实际及相关文献,隧道爆破荷载的加载时间设置为 10 ms,卸载时间设置为 90 ms,爆破震动总计算时间设置为 500 ms。隧道爆破荷载时程曲线示意图如图 2 所示。

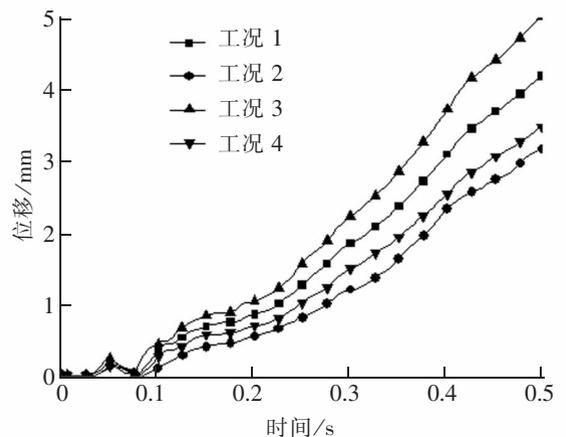


图 2 隧道周壁爆破荷载时程曲线表
Fig.2 Time range curve of tunnel wall blasting load

3 爆破冲击荷载作用下临近输水隧洞稳定性分析

根据风潭隧洞距离既有引水隧洞最近(8.228 m)的4种最不利工况条件,采用有限元数值软件分析了风潭隧道爆破开挖对既有水工隧道衬砌的影响。其中,工况1为开挖隧洞中线位于引水隧洞的正上方,两条导洞同时爆破开挖,爆破峰值荷载均为16.54 MPa;工况2为开挖隧洞中线位于引水隧洞的正上方,单侧导洞爆破开挖,爆破峰值荷载为16.54 MPa;工况3为导洞中线位于引水隧洞的正上方,两条导洞同时爆破开挖,爆破峰值荷载均为16.54 MPa;工况4为导洞中线位于引水隧洞的正上方,单侧导洞爆破开挖,爆破峰值荷载为16.54 MPa。

3.1 不同工况下既有水工隧洞的位移特征

4种工况下既有水工隧道衬砌拱顶位移随时间变化见图3。工况3条件下既有水工隧道处拱顶位移为5.07 mm,是4种工况下最不利施工工况。

工况1与工况2的位移相比,工况1爆破荷载为33.07 MPa(左右导洞爆破),工况2爆破荷载为16.54 MPa(单导洞爆破)。工况1的位移峰值为4.18 mm,工况2的位移峰值为3.19 mm,左右导洞同时爆破相较于单导洞爆破对既有水工隧道衬砌拱顶的影响更大,爆破荷载数值对于既有水工隧道位移存在影响。

工况1与工况3的位移云图相较,工况1的位移峰值为4.18 mm,工况3的位移峰值为5.03 mm,说明水工隧道正上方起爆所引起的衬砌拱顶位移更大,爆破导洞的位置对于既有水工隧道位移存在影响。

图3为上述4种不利工况条件下,爆破冲击荷载作用下既有水工隧道(拱顶)的最大衬砌位移点随时间变化图。从图中可以看出,4种工况位移变化趋势相近,皆呈现位移随时间变化而增大的规律。4种工况中,在工况3施工条件下,引起的既有水工隧道拱顶位移值最大,为5.03 mm,其余3种工况下开挖引起的既有水工隧道拱顶位移的大小依次为工况1(4.18 mm)、工况4(3.47 mm)、工况2(3.17 mm)。

上述4种工况下风潭隧洞开挖过程中爆破荷载对既有水工隧道的位移影响很小,4种工况下的位移峰值分别为:工况1(2.49 mm)、工况2(1.48 mm)、工况3(3.32 mm)、工况4(1.78 mm)。

3.2 不同工况下既有水工隧洞的质点振动速度

围岩位移监测一般以拱顶沉降和边墙水平变形为主要控制参数^[10]。图4为上述4种不利工况条件下既有水工隧道不同监测点位置处的质点振动速度图(顺时针取8个监测点),横轴与纵轴表示速度,单位为cm/s,由图4可知,工况3条件下,既有水工隧道处拱顶位移处质点振动速度速度最大,其值为12.63 cm/s,是4种工况下最不利施工工况。

工况1与工况2的位移云图相比,工况1的质点振动速度峰值为6.94 cm/s,工况2的速度峰值为3.90 cm/s,左右导洞爆破相较于单导洞爆破对既有水工隧道衬砌的质点振动速度影响更大,爆破荷载数值对于既有水工隧道的质点振动速度存在影响。

工况1与工况3的位移云图相较,工况1的质点振动速度峰值为6.94 cm/s,工况3的质点振动速度峰值为12.63 cm/s,说明水工隧道正上方起爆所引起的衬砌质点振动速度更大,爆破导洞的位置对于既有水工隧道质点振动速度存在影响。

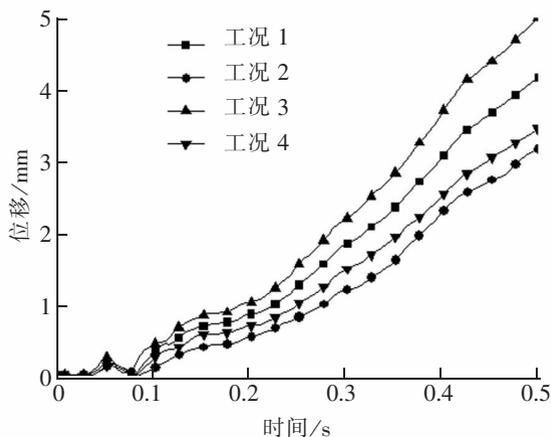


图3 4种工况下既有水工隧道衬砌拱顶位移随时间变化图

Fig.3 Variation of crown displacement of existing hydraulic tunnel lining under 4 working conditions

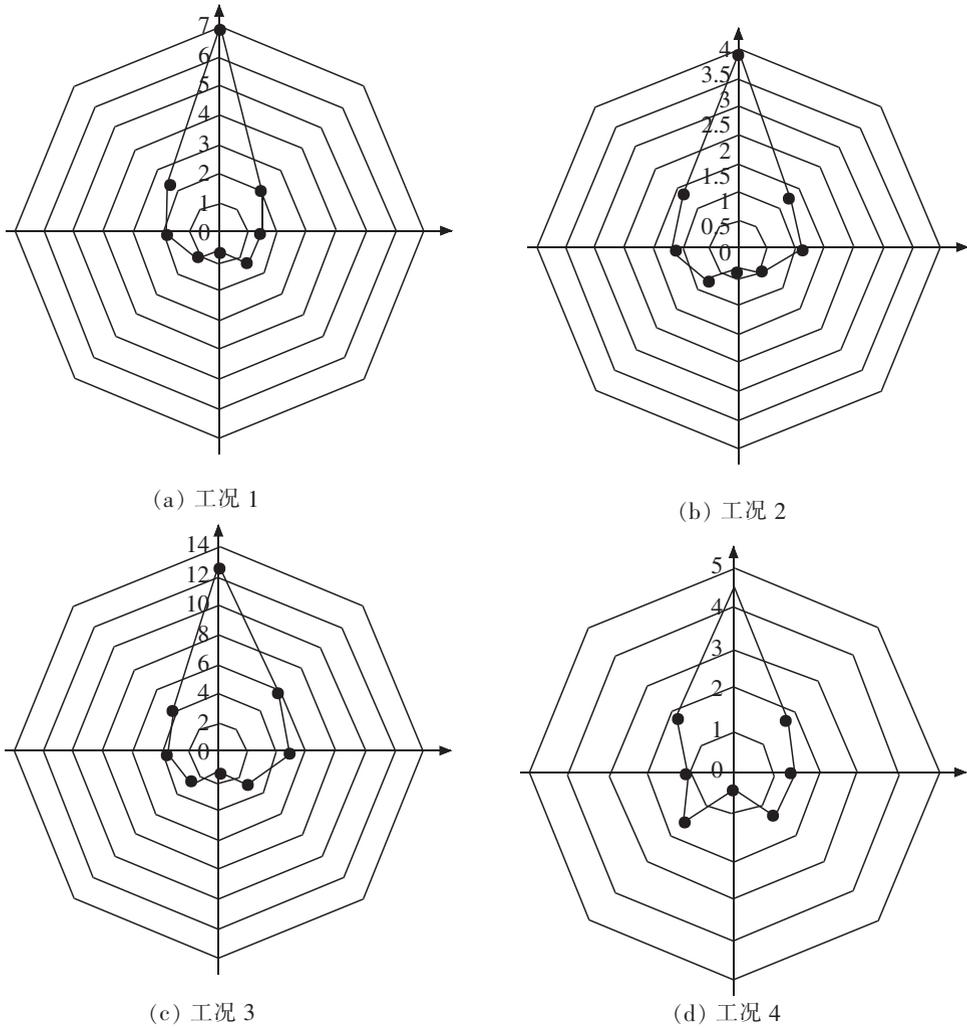


图 4 4种最不利工况条件下水工隧洞边墙质点振动速度图

Fig.4 Vibration velocity diagram of side walls of sewer tunnels under 4 most unfavorable working conditions

图 5 为上述 4 种不利工况条件下，爆破冲击荷载作用下既有水工隧道(拱顶)的最大衬砌质点振动速度随时间变化图。从图 5 可以看出，在 4 工况 3 施工条件下，其引起的既有水工隧道拱顶质点振动速度最大为 12.63 cm/s，新建隧道开挖引起的既有水工隧道拱顶质点振动速度数值依次为工况 1 (6.94 cm/s)，工况 4 (4.50 cm/s)，工况 2(3.90 cm/s)。

对于混凝土衬砌，质点振动速度是一个重要的控制指标。根据爆破安全规程 (GB6722-2014)规定,水工隧洞爆破振动安全允许标准如表 2 所示。

通过对 4 种工况下新建隧道爆破开挖对既有隧道衬砌的稳定性影响进行有限元数值模拟与分析,得知 1,2,4 工况条件下的隧道爆破引

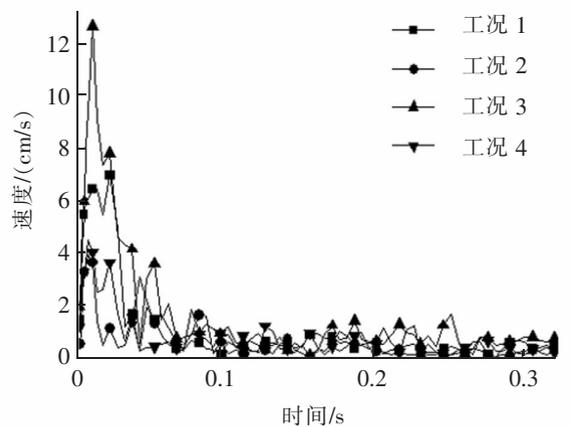


图 5 4种工况下既有水工隧道衬砌拱顶质点振动速度随时间变化图

Fig.5 The vibration velocity of a hydraulic tunnel lining vault particle with time under 4 working conditions

起输水隧洞衬砌拱顶质点振动速度均小于 10 cm/s, 工况 3 条件下的隧道爆破引起输水隧洞衬砌拱顶质点振动速度峰值为 12.63 cm/s, 超过规范要求, 但考虑到水工隧道中水压对既有水工隧道的稳定性存在影响, 水压对于工况 3 中的质点震动速度数值存在影响, 可讨论具体施工工序后再进行施工。由此可知, 上述 4 种工况中的隧道爆破对输水隧洞的影响均在安全允许范围之内。

表 2 爆破振动安全允许标准
Tab.2 Safety allowable standard for blasting vibration

序号	保护对象类别	安全允许质点振动速度/(cm/s)		
		$f \leq 10$ Hz	$10 \text{ Hz} \leq f \leq 50$ Hz	$f > 50$ Hz
6	水工隧洞	7~8	8~10	10~15

注: 本设计属于“地下浅孔爆破 $f=60\sim 300$ Hz”, 相关规范中规定允许安全质点振动速度 V 最小值为 10 cm/s, 故本次爆破安全允许速度值取 10 cm/s。

4 结论

1) 左右导洞爆破相较于单导洞爆破对既有水工隧道衬砌拱顶的影响更大, 爆破荷载峰值对于既有水工隧道位移及质点震动速度存在较大影响。

2) 水工隧道正上方起爆所引起的衬砌拱顶位移更大, 爆破导洞的位置对于既有水工隧道位移及质点震动速度存在影响。

3) 1, 2, 4 工况条件下的隧道爆破引起输水隧洞衬砌拱顶质点振动速度等别为 6.94, 3.90, 4.50 cm/s, 均小于 10 cm/s; 因此上述 3 种开挖方式下既有水洞隧洞衬砌结构处于安全范围内。

4) 工况 3 条件下既有水工隧道处拱顶位移为 5.01 mm, 质点振动速度峰值为 12.63 cm/s, 是 4 种工况下最不利施工工况; 因此建议当凤潭隧道开挖到既有引水隧洞正上方时不要采用双导洞同时爆破开挖的方案, 可以将质点振动速度峰值控制为工况 4 条件下的 4.50 m/s。

参考文献:

- [1] 朱合华, 黄锋, 徐前卫. 变埋深下软弱破碎隧道围岩渐进性破坏试验与数值模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1113-1122.
- [2] 张程红. 邻近隧道爆破施工引起的既有隧道衬砌振动速度阈值分析[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2009.
- [3] 谢晓锋, 吴从师, 邓小钊, 等. 立交下穿隧道爆破振动对既有隧道影响研究[J]. 中外公路, 2013, 33(6): 208-212.
- [4] 刘敦文, 宋广晨, 褚夫蛟, 等. 隧道爆破开挖对邻近隧道安全影响的数值分析[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(2): 64-68.
- [5] 于天生. 小净距隧道爆破开挖对邻近隧道的的影响分析[J]. 工程与建设, 2013, 27(5): 652-654.
- [6] 赵镇林. 三孔小净距隧道合理净距确定与爆破振动响应研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- [7] 刁心宏, 朱陈, 于洋. 不同开挖方案下隧道围岩稳定性及变性特征分析[J]. 华东交通大学学报, 2017, 34(1): 21-27.
- [8] 梁志辉, 杨新安, 江星宏. 高速铁路隧道分修过渡结构的施工力学特性研究[J]. 华东交通大学学报, 2017, 34(6): 26-32.
- [9] 黄锋, 朱合华. 开挖进尺对大断面隧道变形的影响[J]. 铁道建筑, 2013(8): 56-58.
- [10] 孙箭林. 钻爆法施工下穿既有隧道的的影响研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.

Influence of Blasting Vibration on the Existing Hydraulic Tunnel Deformation

Zhao Xiushao, Tan Zhouyong, Li Kai, Liu Yuyun

(Jiangxi Key Laboratory of Geotechnical Engineering Infrastructure Security and Control, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: By taking a shallow tunnel in the Fengtan railway line as the research object, based on the finite element software ABAQUS, this study conducted the three dimensional numerical analysis of the influence of adjacent small tunnel blasting vibration on the deformation of close-spaced hydraulic tunnel in light of two aspects including the tunnel monitoring point displacement and the vibration velocity. The results are as follows: compared with the single pilot tunnel, the blasting of the pilot tunnels has more influence on the vault of the existing hydraulic tunnel, and the peak value of blasting load has great influence on the displacement of the existing hydraulic tunnel and the velocity of particle vibration; the displacement of the lining vault is greater when the blasting vibration is detonated at the top of the hydraulic tunnel, and the position of blasting pilot tunnel affects the displacement of existing hydraulic tunnel and vibration velocity of particles.

Key words: railway tunnel; numerical simulation; small spacing tunnels; deformation; the velocity of particle vibration