

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2022.10.065

城市隧道排烟竖井对主隧道结构的影响研究

高法启, 李逸, 邹琦

(中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010)

摘要:以长阳凤凰山隧道工程为例,借助 Midas/GTS 有限元软件对排烟竖井与主隧道结构节点进行三维数值模拟,研究灰岩地层中排烟竖井施工对主隧道结构的影响。计算结果显示:竖井施工前后主隧道与竖井连接处的最大压应力由 0.16 MPa 增至 1.42 MPa,出现应力集中现象,表明竖井施工改变了主隧道的受力状态;竖井施工前后,拱顶沉降值由 3.05 mm 增至 3.12 mm,底部隆起值由 2.41 mm 增至 2.95 mm,表明竖井对拱顶沉降影响较小而对底部隆起影响稍大。为确保隧道结构安全,消除排烟竖井对主隧道结构产生的不利影响,提出了加强衬砌支护设计参数及主隧道增加环框梁等措施。

关键词:城市隧道;排烟竖井;三维数值分析;应力集中

中图分类号: U452

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2022)10-0259-04

0 引言

随着城市经济快速增长及人口的高度集中,对于城市隧道的修建需求日益迫切,越来越多的城市隧道正在兴建^[1]。城市隧道由于交通量大、设有人行道且处于封闭环境中,一旦发生火灾后果将极其严重,因此城市隧道的通风排烟设计极为重要^[2]。城市隧道的重点排烟设计通常采用排烟竖井^[3-4],但有关排烟竖井对主隧道结构安全的影响研究并不多见。本文以长阳凤凰山隧道工程为例,通过 Midas/GTS^[5]三维数值模拟,研究排烟竖井对主隧道结构的影响,并根据计算结果提出具体建议,供类似工程借鉴。

1 工程概况

1.1 主隧道概况

长阳凤凰山隧道位于湖北省宜昌市长阳土家族自治县境内,北起廪君大道,穿越凤凰山,南接四冲二街。隧道为城市次干路,设计时速 30 km/h,双向 2 车道 + 人行道单洞隧道。隧道长 545 m,标准断面净宽 14.1 m,净高 9.37 m,隧道二衬厚度 0.6 m。隧道标准段横断面见图 1。

1.2 排烟竖井设置

由于隧道内设置人行道,考虑到重点排烟的需要,通过在隧道小里程洞口处设置排烟竖井的方式,

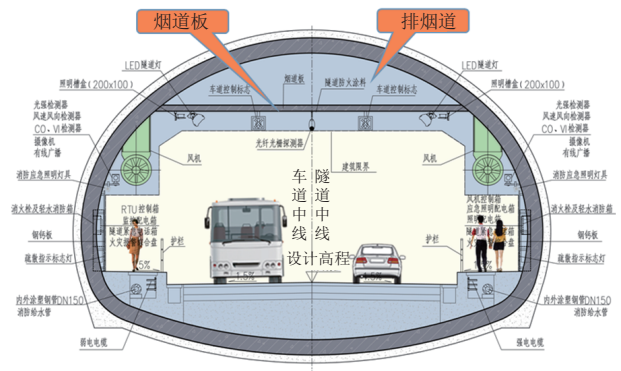
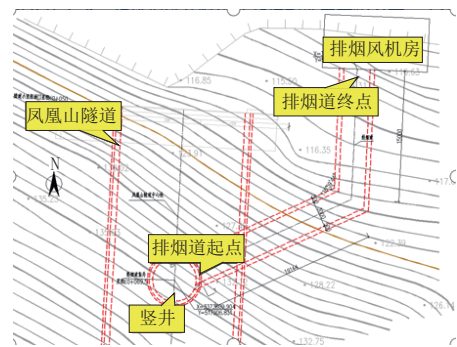
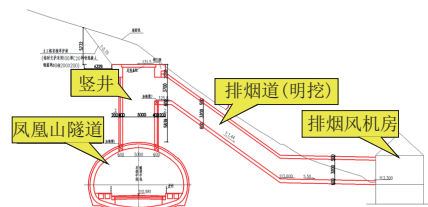


图 1 隧道标准段断面图

将排烟道从隧道顶部接到地表高程以下,再通过明挖的排烟道将烟气排到排烟风机房中。竖井截面为圆形,内径为 5 m,位于主隧道正上方(见图 2)。



(a) 平面图



(b) 横断面图

图 2 主隧道与排烟竖井连接示意图

收稿日期: 2021-12-17

作者简介:高法启(1982—),男,硕士,一级注册结构工程师、注册土木工程师(岩土)、一级建造师,高级工程师,主要从事市政工程设计与管理工。

主隧道及排烟竖井均采用复合式衬砌,按新奥法原理设计^[6-7],初期支护以钢架、锚杆、钢筋网、混凝土共同组成联合支护系统,二次衬砌为钢筋混凝土。初期支护主要承受施工期间的荷载,保证施工期间的围岩稳定;二次衬砌与初期支护共同承受永久荷载,保证隧道结构安全。排烟竖井在主隧道二次衬砌施做并达到设计强度后再进行施工,排烟竖井为永久结构,因此需要分析排烟竖井对主隧道结构的影响,并根据分析结果采取相应的保护措施。

2 工程地质

根据长阳凤凰山隧道项目岩土工程勘察报告,隧道主要处于中风化炭质灰岩地层中,地表覆盖厚约8m的碎石土。碎石土为残、坡积成因,褐色、灰褐色,呈棱角状,母岩成分为中风化灰岩,其间为黏性土充填,整体呈松散状。中风化炭质灰岩主要矿物成分为钙质矿物和少量黏土矿物,钙质胶结,岩质较新鲜,节理裂隙发育,沿裂隙面有白色方解石脉,方解石脉可见少量小的岩溶孔隙,裂隙充填物为黏土矿物,属较硬岩。碎石土及中风化炭质灰岩的物理力学参数见表1。

表1 岩土体物理力学参数表

岩性	天然重度/ (kN·m ⁻³)	抗剪强度		弹性模量 /GPa	泊松比
		c/kPa	φ/(°)		
碎石	19.80	8	25	0.5	0.30
中风化灰岩	25.99	600	34	25.3	0.26

3 数值模拟

3.1 岩土本构模型

岩土材料本构模型选用 Mohr-Coulomb (M-C) 模型。该模型作为一种理想弹塑性模型^[8-9],基于非关联的流动法则,采用的是理想弹塑性 M-C 屈服条件并且考虑屈服强度极限准则,具体表达式见式(1)~式(4)。

$$f_{MC} = I_1 \sin \varphi + \frac{1}{2} [3(1 - \sin \varphi) \sin \theta^t + \sqrt{3} (3 + \sin \varphi) \cos \theta^t] \sqrt{J_2} - 3c \quad (1)$$

$$g_{MC} = I_1 \sin \psi + \frac{1}{2} [3(1 - \sin \psi) \sin \theta^t + \sqrt{3} (3 + \sin \psi) \cos \theta^t] \sqrt{J_2} - 3c \quad (2)$$

$$\theta^t = \frac{1}{3} \cos^{-1} \left[\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3^t}{J_2^{3/2}} \right] \quad (3)$$

$$f_{MC}^t = a_t I_1 + \sqrt{J_2} - k_t \quad (4)$$

$$\text{其中: } a_t = \frac{2 \sin \varphi}{3(1 - \sin \varphi) \sin \theta^t + \sqrt{3} (3 + \sin \varphi) \cos \theta^t},$$

$$k_t = \frac{6c \sin \varphi}{3(1 - \sin \varphi) \sin \theta^t + \sqrt{3} (3 + \sin \varphi) \cos \theta^t}$$

式中: f_{MC}^t 为 M-C 屈服准则; g_{MC}^t 为 M-C 屈服准则的势函数; I_1 为第1应变不变量; c 、 φ 、 ψ 分别为土体黏聚力、摩擦角和膨胀角; θ^t 为 t 时刻 M-C 模型屈服面中应力线的旋转角; I_1^t 、 J_2^t 、 J_3^t 、分别为 t 时刻的第1、第2、第3偏应力不变量; a_t 为 I_1 和空间中 M-C 模型的斜率; k_t 为 I_1 、 $\sqrt{J_2}$ 和空间中 M-C 模型的截距。

3.2 模型建立

采用 Midas /GTS 三维数值模拟分析软件建立排烟竖井、主隧道及地层模型;岩土体本构模型选为 M-C 模型,模型尺寸为 80 m × 80 m × 80 m。模型网格根据地勘报告分为2层,上层为厚8m的碎石土,下层为中风化炭质灰岩。为实现网格的耦合,在选好几何模型后,对所有实体执行连接操作,以保证模型内部网格的耦合。模型四周约束水平位移,模型底部约束竖向及水平位移。模型荷载为重力荷载。施工模拟分析前,需先进行初始地应力平衡,以保证三维模拟的精确度,整体模型见图3。

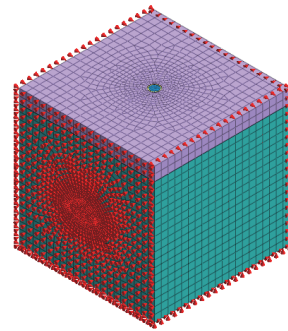


图3 整体模型

根据工程设计实际情况,主隧道采用 CD 法开挖,竖井采用全断面开挖。主隧道模型与竖井连接模型见图4。

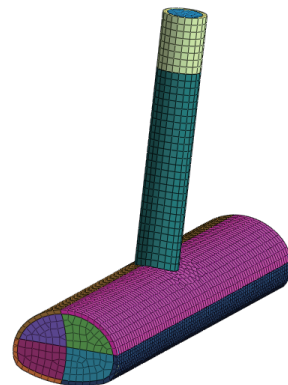


图4 主隧道与竖井连接模型

3.3 计算过程

3.3.1 初始地应力平衡

为进行模型的初始地应力平衡,获得模型的初始地应力场,需对建立的地层结构模型的土体进行固结过程模拟。对模型施加边界条件后,按照岩土工程勘察报告对各层土体赋予相应的参数,使土体在自重作用下进行应力平衡,得到整个地层结构模型的初始应力场,并将模型位移清零。

3.3.2 隧道及竖井开挖过程模拟

利用 Midas/ GTS 软件的施工阶段模拟功能进行隧道及竖井开挖过程的模拟,隧道为 CD 法开挖,竖井为全断面开挖。隧道及竖井二衬采用实体单元进行模拟,隧道初支采用板单元进行模拟,锚杆采用植入式桁架单元进行模拟。土体采用 M-C 本构模型,初支、二衬及锚杆采用弹性模型。利用软件的施工阶段模拟功能,进行隧道及竖井开挖过程的模拟。隧道 CD 法开挖模型网格划分见图 5。

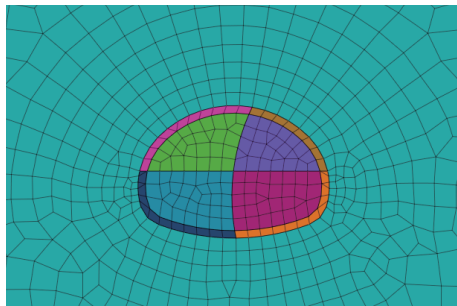


图 5 隧道 CD 法开挖模型网格划分

4 计算结果及分析

4.1 应力

竖井开挖前后,主隧道与竖井连接处的应力分布见图 6。根据应力计算结果可知,竖井的布置改变了隧道局部受力模式。竖井影响范围内采用传统的二维平面应变模型来进行数值模拟已经不能反映隧道的真实受力状态,利用三维数值模拟分析竖井对隧道结构的影响更为合理。

竖井未施工前,隧道拱顶二衬最大应力约为 0.16 MPa;竖井开挖后,竖井与主隧道接口处混凝土最大压应力值约为 1.42 MPa;与竖井相接处主隧道整体受力状态也发生改变,即隧道顶部内侧受压区范围扩大,拱腰处外侧受压区范围相应缩小。这表明竖井的施工改变了主隧道的受力状态,竖井与主隧道接口处产生了应力集中现象。为消除竖井施工对主隧道结构的不利影响,确保主隧道结构安全,设计采取相应措施,如加强衬砌支护设计参数、主隧道增

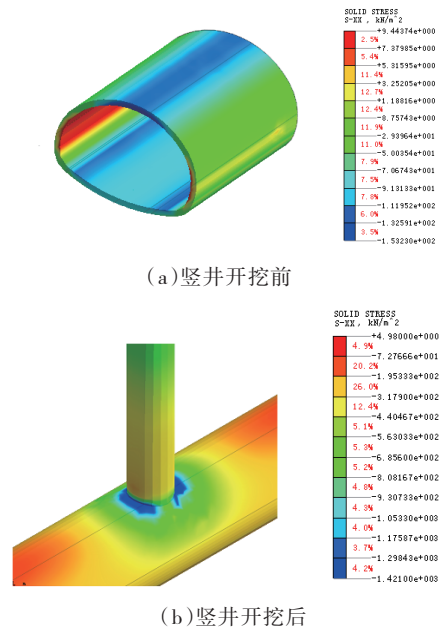


图 6 隧道应力分布

加环向框架梁等。

4.2 位移

隧道竖向位移计算结果见图 7。

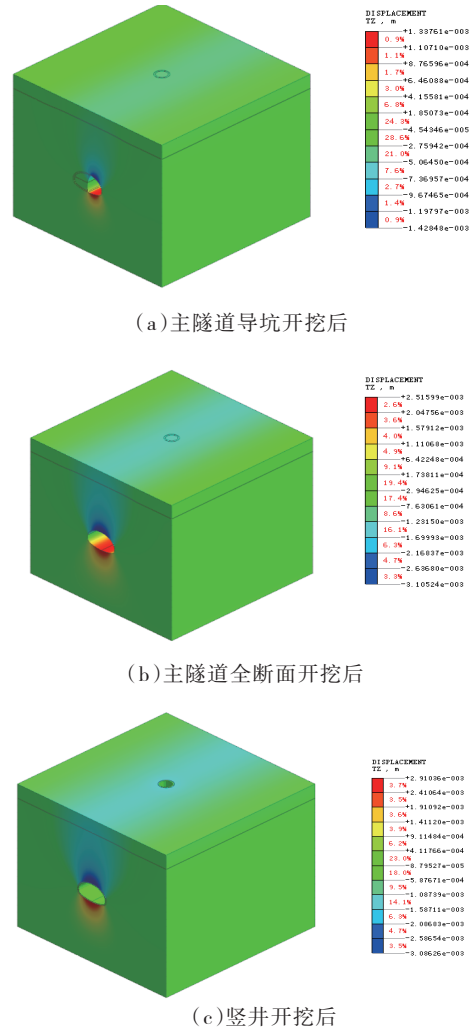


图 7 隧道竖向位移

由图7可知,主隧道导坑开挖后,隧道拱顶最大竖向位移为1.42 mm,主隧道全断面开挖后增至3.05 mm,增长115%。待竖井开挖后,拱顶最大位移增至3.12 mm,较上一工况仅增长2.3%,说明竖井的设置对拱顶沉降影响很小。

主隧道导坑开挖后,隧道底部隆起值为1.33 mm,全断面开挖后增至2.41 mm,增长81%。待竖井开挖后,隧底隆起值增至2.95 mm,较上一工况增长22.4%,说明竖井的设置对隧底隆起影响稍大。

对隧道及竖井各阶段沉降值及隧底隆起值的统计结果见表2。

表2 隧道及竖井沉降值及隧底隆起值 单位:mm

位移部位	导坑开挖后	全断面开挖后	竖井开挖后
隧顶沉降	-1.42	-3.05	-3.12
隧底隆起	1.33	2.41	2.95
竖井沉降			-3.01

根据设计标准,各工况下的拱顶沉降及底部隆起均在安全允许范围内,说明采用CD法进行该隧道的开挖是安全的。竖井开挖后,拱顶沉降增加不明显,隧底隆起增加较明显,是由于竖井开挖的卸荷作用所致。增大后的隆起值仍在安全范围内,说明本工程采取的措施安全合理。

5 结 语

(1)排烟竖井施工前后,主隧道与竖井连接处的最大压应力由0.16 MPa增至1.42 MPa,出现应力集中现象。

(2)由于排烟竖井的卸荷作用,对拱顶沉降影响较小,对底部隆起影响稍大。

(3)为消除排烟竖井对主隧道结构的不利影响,采取加强衬砌支护设计参数、主隧道增加环向框架梁等措施,可以保证隧道结构安全。

参考文献:

- [1] 黄宏伟. 城市隧道与地下工程的发展与展望[J]. 地下空间, 2001(4): 311-317, 339-340.
- [2] 张先富. 妈湾跨海隧道排烟技术及人员疏散研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [3] 张煜, 李刚, 李证吉, 等. 防排烟竖井管分段式倒装施工技术[J]. 施工技术, 2018, 47(增刊4): 1680-1682.
- [4] 赵洪仓, 何旭. 超深竖井施工技术简介[J]. 科技信息, 2011(11): 677-678, 657.
- [5] 李治. Midas/GTS 在岩土工程中的应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- [6] 孙文, 岳大昌. 隧道工程新奥法原理、施工与存在问题浅析[J]. 公路交通技术, 2012(2): 98-100, 105.
- [7] 宋汉华, 杨建辉, 尚岳全. 隧道新奥法原理与发展[J]. 隧道建设, 2008(1): 11-14.
- [8] 李雪苑. 各向异性应力条件下大变形柱孔扩张弹塑性解析解[J]. 工程建设与设计, 2021(19): 106-108.
- [9] 张宁. 数值流形方法在转动、接触和弹塑性计算中的若干改进[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴, 为您提供平台, 携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话: 021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com