

公铁立体交叉隧道施工先后顺序比选研究

郭洪雨 钟方杰 郑云辉 鞠露莹 李长俊

(浙江数智交院科技股份有限公司 杭州 310030)

[摘要] 随着地下交通工程的高速发展,立体交叉隧道在施工期间相互影响的案例日渐增多,由于交叉隧道施工顺序对隧道结构安全影响明显,成为一个值得探讨的问题。依托义东高速公路东阳段双线西甌山公路隧道与上方邻近杭温高铁单线梧坞隧道的立体交叉工程,以多线立体交叉隧道施工顺序对周边围岩及隧道结构的影响为研究对象,建立了弹塑性有限元模型,模拟了隧道施工过程中,下方公路隧道先施工以及上方隧道先施工两种工况,对比分析了两种工况下后施工隧道对先施工隧道的位移及应力的影响规律。得出结论:两种工况均满足隧道安全设计要求,但上部隧道后开挖时,其施工开挖过程对下部双线隧道的影响更小,故对于此类立体交叉隧道而言,选用先下后上的施工顺序更为合理。

[关键词] 立体交叉隧道;施工顺序;高铁隧道;公路隧道

0 引言

随着我国公路隧道及铁路隧道建设的大规模兴起,地下构筑物密度逐渐增大,地下空间不得不面临平行或交叉等立体交叠隧道建设情况。新建隧道的下穿施工过程中会对地层的应力场和位移场产生扰动,使既有隧道的位移、应力产生变化,对既有隧道的安全性造成很大影响^[1-3]。因此,在新建隧道施工过程中,有必要对既有隧道的应力、位移等特性进行相应的分析,以确保既有隧道在此过程中的安全性。针对这一问题,很多学者对立体交叠隧道施工过程进行了数值模拟及有限元分析。徐林生^[4]将FLAC 3D软件首次应用于上海市明珠线二期上下近距离典型交叠盾构隧道的数值模拟中,分别研究了在不加固土体与加固土体两种情况下的地面隆起沉降情况。李强和曾德顺^[5]修改了SAP程序,采用三维弹塑性有限元研究了新建隧道从既有隧道下方垂直穿过时,对既有隧道的变形影响情况。王伟等^[6]利用Marc有限元软件,对上海复兴东路双线盾构越江隧道的施工过程进行了模拟,研究了后行隧道施工对先行

隧道的影 响并得出了两隧道合理间距的建议值,为隧道间距的优化设计提供了依据。国内外学者针对不同地区不同土质的交叠隧道施工过程数值模拟^[7-10]对实际工程具有重要指导意义,但上述研究中的数值模拟及分析大都是针对单线隧道的交叠施工过程所进行的,实际工程中隧道施工的立体交叠情况远比上下皆为单线隧道的情况更为复杂。此外现有研究极少涉及到双线大断面公路隧道近距离下穿高铁隧道。此类立体交叉结构在变形控制及隧道结构安全性上要求较高,有较大的研究价值。

本文应用FLAC 3D有限差分软件,针对义东高速公路东阳段双线西甌山大断面公路隧道与单线杭温高铁梧坞隧道立体交叉施工过程建立了弹塑性有限元模型,模拟了下方西甌山双线隧道先施工与上方梧坞隧道先施工两种工况,分析了两种工况下后施工隧道对先施工隧道的位移、应力等影响,并给出了实际施工过程中两隧道立体交叉部位修建顺序的建议,并且为类似大断面双线隧道下穿单线隧道立体交叉部位的施工顺序选择提供了参考。

收稿日期:2020-12-18

作者简介:郭洪雨(1981-),男,高级工程师,主要从事桥梁与隧道工程工作。

1 工程概况

拟在义东高速公路东阳段修建单线杭温高铁梧坞隧道和下穿此条隧道的双线西甌山公路隧道，两条隧道相对位置在空间上立体交叉，竖向设计线之间上下相距约 20m（建成后净距离约 11m）。

西甌山公路隧道在与杭温高铁梧坞隧道交叉处桩号为：YK10+452~YK10+473，ZK10+446~ZK10+467，设计交叉处岩质以中风化晶屑凝灰岩为主，工程性质一般，为Ⅳ级围岩，考虑到杭温高铁上跨，为减少该段隧洞顶部的沉降，对西甌山隧道与杭温高铁交叉段及前后 5 米范围内采用加强衬砌设计。高铁梧坞隧道上跨西甌山隧道交叉桩号为 DK155+261~DK155+312，属于进口浅埋段，Ⅴ级围岩，表层覆盖残坡积粉质黏土，厚 0.5~1.0m。岩体大致处于较破碎和较完整之间的状态，节理裂隙稍发育。地下水为基岩裂隙水，稍发育。

2 数值模拟

2.1 计算模型及边界条件

根据设计图纸和勘察报告对计算模型进行简化，采用 FLAC 3D 有限差分软件建立数值分析模型，图 1 所示为隧道开挖完成后的模型。

模型上半部分为Ⅴ级围岩，下半部分为Ⅳ级围岩，沿西甌山双线隧道纵向为 Y 方向，长度为 60m；沿梧坞隧道纵向为 X 方向，长度为 80m；Z 轴正向竖直向上，模型顶部参照梧坞隧道进口纵断面模拟为具有一定坡度的山体，模型高 70m~110m。其中，Ⅳ级围岩、Ⅴ级围岩及围岩加固圈采用摩尔库伦模型，两条隧道初期支护及仰拱采用弹性模型。模型左右边界、前后边界均采用法向约束，底部边界施加三个方向约束。

实际施工过程中，先施工隧道开挖并完成复合式衬砌支护，待其稳定后，再开挖后施工隧道，本次数值模拟计算仅考虑隧道超前支护和初期支护作用。二次衬砌作为安全储备。

根据隧道勘察资料 and 支护设计情况，参考《公路隧道设计规范》（JTG 3370.1-2018）和《铁路隧道设计规范》（TB1003-2016）推荐的

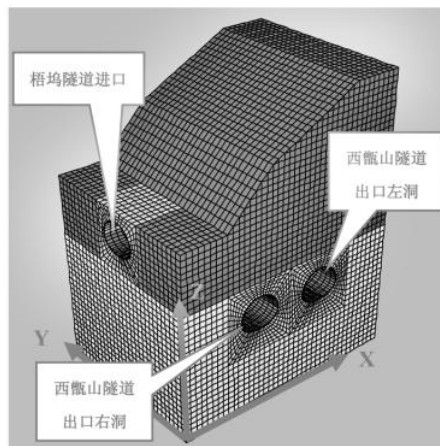


图 1 模型三维视图

各级围岩计算参数范围，模型基本材料物理力学参数如表 1 所示。其中初期支护弹性模量换算如下：

西甌山隧道初期支护采用 C25 混凝土，弹性模量为 28GPa，厚度为 28cm，钢拱架间距为 50cm，截面面积为 35.6cm²，弹性模量为 200GPa，故换算后初期支护弹性模量为：

$$a = 28 + \frac{35.6}{50 \times 28} \times 200 = 33.1 \text{ GPa}$$

梧坞隧道初期支护采用 C25 混凝土，弹性模量为 28GPa，厚度为 28cm，钢拱架间距为 60cm，截面面积为 30cm²，弹性模量为 200GPa，故换算后初期支护弹性模量为：

$$b = 28 + \frac{30}{60 \times 28} \times 200 = 31.6 \text{ GPa}$$

表 1 主要材料物理力学参数

类型	密度 kg/m ³	变形模量 GPa	泊松比	内摩 擦角°	黏聚力 MPa
Ⅳ级围岩	2.3	3	0.32	38	0.5
Ⅴ级围岩	2.1	1.5	0.35	26	0.15
西甌山隧道围 岩加固圈	2.4	4.5	0.3	40	0.7
梧坞隧道围岩 加固圈	2.3	2.5	0.33	30	0.3
西甌山隧道初 期支护及仰拱	2.5	33.1	0.2	—	—
梧坞隧道初期 支护及仰拱	2.5	31.6	0.2	—	—

2.2 施工步骤

高铁隧道与公路隧道上下间距仅 10m，因此后施工隧道在施工过程中可能对先施工隧道产生影响，所以共设计两种工况对上下行隧道立体交叉段进行数值分析，以确定两条隧道合理的施工先后顺序，数值模拟过程如图 2 所示。

工况一：西甌山隧道先施工并支护完成，梧坞隧道使用三台阶法施工通过西甌山隧道上方，每次循环 0.6m。

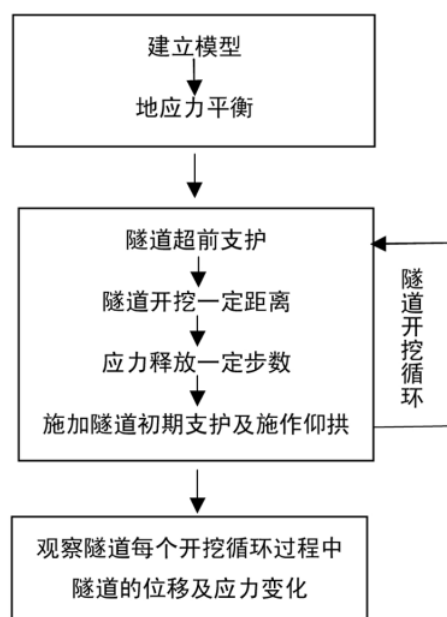


图 2 隧道数值模拟开挖过程

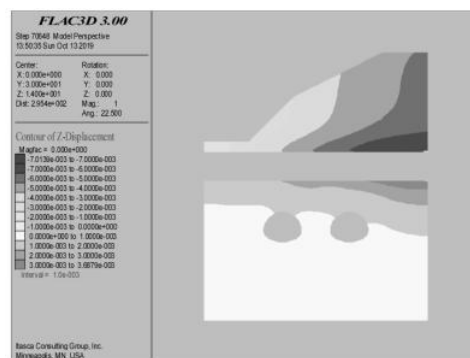
3 计算结果分析

3.1 工况一隧道位移、应力分析

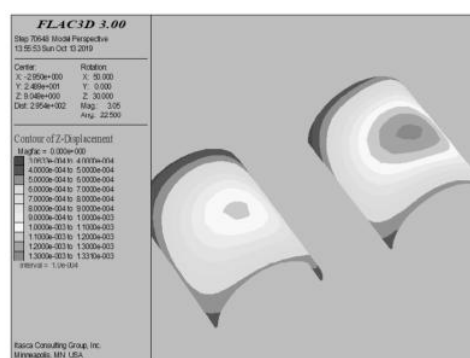
此工况主要考虑高铁梧坞隧道的开挖对先施工完成的西甌山隧道的的影响。梧坞隧道开挖完成后，西甌山隧道的竖向位移云图如图 3 所示。从图 3 (b) 三维云图可看出，西甌山隧道的最大位移在其纵向中线拱顶处，故对 Y=30m 截面进行分析。

从图 3 (a)、图 3 (b) 可以看出，高铁梧坞隧道开挖导致西甌山隧道出现了向上隆起的现象，左洞最大位移约 1.33mm，右洞最大位移约为 1.20mm，隆起最大位置均在拱顶，衬砌侧腰处位移变化不明显。造成这种现象主要是因为梧坞高铁隧道的开挖导致西甌山隧道拱顶应力释放，使围岩竖直方向应力减少，围岩有向

上回弹的趋势。此过程中回弹量仅 1.2mm，基本不影响西甌山隧道安全。



(a) Y=30m 截面位移云图



(b) 左右洞位移云图

图 3 梧坞隧道开挖完成后的西甌山隧道
竖向位移及竖向应力云图

梧坞隧道开挖过程中，西甌山隧道的拱顶位移也随开挖进程发生变化，如图 4 所示。

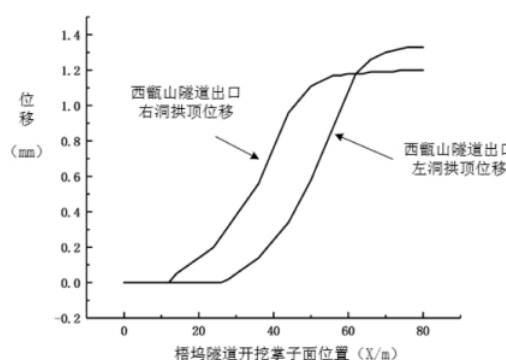


图 4 西甌山隧道拱顶位移变化图

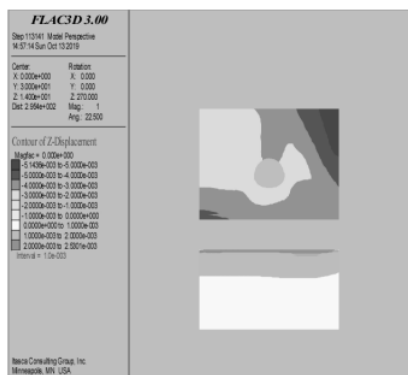
从图 4 可以看出，在梧坞隧道开挖施工过程中，随着西甌山隧道上方不断卸载，其左右洞拱顶逐渐隆起，直至梧坞隧道开挖完成，西

甌山隧道拱顶位移达到稳定最大值,左洞拱顶位移最大值为 1.2mm 左右,右洞拱顶位移最大值为 1.4mm 左右。其中,左洞最终拱顶位移值大于右洞,是由于左侧隧道埋深较大,故卸载时回弹较大。

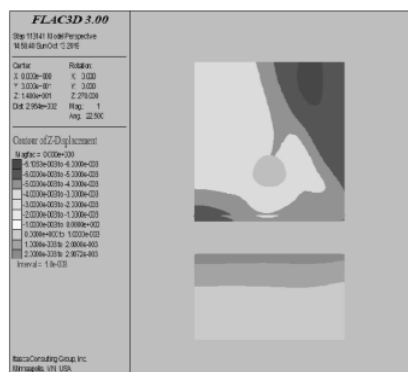
3.2 工况二隧道位移、应力分析

此工况主要分析双线西甌山隧道的施工过程对先施工的梧坞隧道的影响。西甌山隧道开挖完成后,模型竖向位移云图如图 5 所示,其中西甌山隧道左洞、右洞的位移平面云图分别取 $X=52\text{m}$ 和 $X=28\text{m}$ 截面处进行分析。

从图 5 可以看出,西甌山隧道开挖导致围岩松动,使隧道本身发生沉降,其中左洞沉降量约 5mm,右洞沉降量约 4mm。



西甌山隧道右洞垂直方向位移云图 ($X=28\text{m}$)



西甌山隧道左洞垂直方向位移云图 ($X=52\text{m}$)

图 5 西甌山隧道开挖完成后的位移云图

在西甌山隧道开挖过程中,梧坞隧道的位移变化如图 6 所示。

从图 6 可看出,西甌山隧道开挖至距离梧坞隧道约 10~15m 时,梧坞隧道即开始产生沉

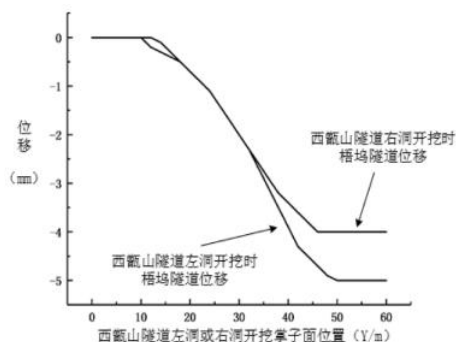


图 6 梧坞隧道位移变化图

降,当其开挖并支护完成后,梧坞隧道竖向沉降迅速增大至 5mm 左右。因此建议梧坞隧道先施工时对其隧底进行预加固,提高西甌山隧道施工时拱顶围岩的稳定性,以减小西甌山隧道位移。

对比工况一和工况二可发现,工况一中后施工梧坞单线隧道使先施工的西甌山双线隧道隆起,隆起最大值为 1.4mm 左右,工况二中后施工西甌山隧道使先施工的梧坞隧道发生沉降,沉降最大值为 5mm 左右。两者隧道衬砌结构设计均满足安全要求,但工况一影响较小。因此,出于安全考虑,建议优先采用工况一进行交叉施工,即下部双线西甌山隧道先施工并支护完成,后开挖梧坞隧道。此建议与文献 [11]、[12] 针对单线和多线隧道施工所采用的“先下后上”的施工顺序相同。

4 结论

本文以义东高速公路东阳段双线大断面西甌山公路隧道下穿杭温高铁隧道为背景,采用有限差分软件 FLAC 3D 对双线西甌山隧道和单线梧坞隧道的施工顺序进行两种工况的数值模拟,分析两种施工工况下后行隧道对先行隧道的影响,得出以下结论:

(1) 下部双线大断面西甌山公路隧道先修建,上部单线梧坞隧道后施工时,西甌山隧道施工对高铁梧坞隧道衬砌结构位移变化影响较小,结构设计偏向安全,故建议采用先施工下部双线大断面公路隧道,后施工上部单线高铁隧道的顺序对两条隧道进行施工。

(2) 后施工下部双线隧道 (下转第 35 页)

气情况下的限速策略,为隧道的合理限速提供参考。

参考文献

- [1] 倪娜. 山区高速公路隧道密集段交通特性及安全保障技术研究 [D]. 西安: 长安大学, 2017.
- [2] JTG/T D70/2-01-2014. 公路隧道照明设计细则 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- [3] 裴玉龙, 程国柱. 高速公路运行车速调查与限制车速问题研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003, 35 (2): 168-172.
- [4] 张晋伟. 高速公路隧道及互通区运行车速模型研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2009.
- [5] 杜志刚, 潘晓东, 郭雪斌, 等. 高速公路隧道进出口视觉震荡与行车安全研究 [J]. 中国公路学报, 2007, 20 (5): 101-105.
- [6] Petros I. Traffic Flow Models and impact of Combined Lane Change and Speed Limit Control on Environment in case of High Truck Traffic Volumes [R]. California: National Center for Sustainable Transportation, 2016.
- [7] Zhang Sheng Rui. Research on Speed Limit of Freeway Tunnel Group Based on Artificial Neural Network [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 97 (2): 892-895.

(上接第9页)影响较大,建议不可避免时,应对先施工隧道进行预加固处理,以保证结构安全。

参考文献

- [1] 许焱星, 许庆君, 雷浩, 张雄伟. 立交交叉隧道围岩变形特性及合理净距的稳定性研究 [J]. 科技创新与应用, 2021 (01): 111-113.
- [2] 洪永佳. 新建隧道群下穿既有高速公路隧道安全分析及施工保障 [J]. 路基工程, 2020 (06): 54-59.
- [3] 刘殿柱, 高全臣, 王鑫尧. 上下交叉隧道爆破振动特性研究 [J]. 北京理工大学学报, 2020, 40 (12): 1267-1274.
- [4] 徐林生. 公路隧道施工围岩稳定性监测预报系统与隧道工程数值模拟研究 [D]. 同济大学博士后研究报告. 2001, 06.
- [5] 李强, 曾德顺. 盾构施工中垂直交叉隧道变形的三维有限元分析 [J]. 岩土力学, 22 (3): 334-338.
- [6] 王伟, 夏才初, 朱合华, 等. 双线盾构越江隧道合理间距优化与分析 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25 (z1): 3311-3316.
- [7] 朱洪江. 空间交叉隧道爆破施工动力响应分析 [J]. 四川建筑, 2020, 40 (02): 131-134+136.
- [8] 董捷, 仲帅. 隧道下穿施工对夹层岩柱围岩应力影响研究 [J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17 (04): 947-956.
- [9] 王乐明, 徐坤. 立交交叉隧道施工力学行为研究 [J]. 铁道标准设计, 2012 (z1): 45-49.
- [10] 汪波, 张胜, 何川. 偏压状态下新建隧道下穿既有构筑物合理施工方法研究 [J]. 铁道标准设计, 2010, (12): 70-75.
- [11] 孙钧, 刘洪洲. 交叠隧道盾构法施工土体变形的三维数值模拟 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 2002, 30 (4): 379-385.
- [12] 张芳, 潘浩. 盾构施工对某邻近既有隧道的影响分析 [J]. 皖西学院学报, 2017 (02): 138-142.