

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.04.033

# 兴泉铁路绿谷二号隧道上跨施工对既有福厦铁路陈坝隧道影响研究

范德全

(中铁二十四局集团福建铁路建设有限公司,福建 福州 350013)

**摘要:**为了研究隧道穿越施工对既有隧道结构的影响,该文以兴泉铁路绿谷二号隧道上跨既有福厦铁路陈坝隧道工程为背景,采用有限元数值模拟方法,研究新建隧道上跨施工对既有隧道的位移场及应力场影响的变化规律。研究结果表明:绿谷二号开挖对既有陈坝隧道的影响区域大致为立交段前后60 m范围内,最大隆起量1.04 mm,最大水平收敛位移0.254 mm,满足位移控制标准;与新建隧道未开挖前相比,既有陈坝隧道的轴力减小了0.74%,弯矩减小了6.7%~1.6%,剪力减小了1.5%~7.7%,满足隧道衬砌强度的要求;既有陈坝隧道衬砌的总体安全系数大于2,衬砌的安全系数满足要求。该文数值模拟结果与实测结果具有较好的一致性,可为实际施工方案提供参考。

**关键词:**交叉隧道;上跨施工;开挖影响;数值模拟

**中图分类号:**U455 **文献标志码:**A

## 0 引言

随着中国交通运输事业的快速发展,线路与线路间相互交叉愈加普遍,新建线路需穿越既有线路的情况越来越多<sup>[1-3]</sup>。隧道穿越施工不可避免地会对既有隧道结构造成影响,导致其变形产生及应力增加。若处理不当,对既有线路的运营安全将产生不利影响<sup>[4-5]</sup>。

近年来,针对新建线路上穿既有线路工程的相关研究较多<sup>[6-8]</sup>,而对于隧道上穿中由于开挖卸荷引起的既有隧道结构变形及稳定性研究还相对较少。Li等<sup>[9]</sup>采用离心试验模型研究了地铁隧道上穿既有过江隧道,发现通过对既有隧道周围土体进行注浆加固可减少地表竖向隆起值;王勇等<sup>[10]</sup>采用数值模拟方法,开展了重庆红岩村大断面公路隧道小净距上跨施工对既有地铁隧道的影响分析,得到轨道环线隧道二次衬砌的应力、变形的分布与变化规律;赵丰等<sup>[5]</sup>依托新建塔石岭铁路隧道上跨既有公路隧道工程,开展了隧道控制爆破安全距离研究;梁荣柱等<sup>[11]</sup>研究了新建隧道近距离上穿对既有地铁隧道纵

向变形的影响,给出了在新建隧道卸荷作用下估算既有隧道纵向变形的解析公式;王军琪等<sup>[12]</sup>以西安地铁3号线太白南路站Ⅲ-C至Ⅱ-B间过街通道上跨既有隧道为依托工程,开展了黄土地区通道上跨既有地铁隧道衬砌受力分析研究;贺美德<sup>[2]</sup>系统研究了浅埋暗挖隧道上穿既有盾构隧道的变形规律及受力情况,并提出了相应的变形控制措施。综上可知,新建隧道上穿既有隧道的情况越来越多,如何确定新建隧道上穿对既有隧道结构的影响以及预测既有隧道的变形具有较强的理论研究和工程实际意义。

本文以兴泉铁路绿谷二号隧道上跨既有福厦铁路陈坝隧道为背景,采用三维有限元数值模拟方法开展新建隧道施工对既有隧道内力及变形规律的影响研究,并对比分析数值模拟结果和实测结果,以期类似工程施工提供一定的指导和借鉴。

## 1 工程概况

兴泉铁路绿谷二号隧道地处福建省惠安县境内,隧道里程HLD1K18+242~HLD1K19+145,全长903 m,为单线隧道,隧道最大埋深54 m。陈坝

收稿日期:2022-08-01

作者简介:范德全,男,大学本科,高级工程师.E-mail:Hdq7609@163.com

隧道里程 K1027+272~K1028+631, 全长 1 359 m, 隧区内上覆地层为第四系全新统坡残积层粉质黏土, 下伏基岩为晚侏罗世永兴超单元花岗岩。绿谷二号隧道与陈坝隧道交叉点(兴泉线里程 HLD1K19+093.4=杭深线 K1027+547), 两隧道结构最小净距为 23 m, 与既有隧道夹角约为  $64^{\circ}47'33''$ , 绿谷二号隧道与陈坝隧道的平面及空间关系如图 1、2 所示。

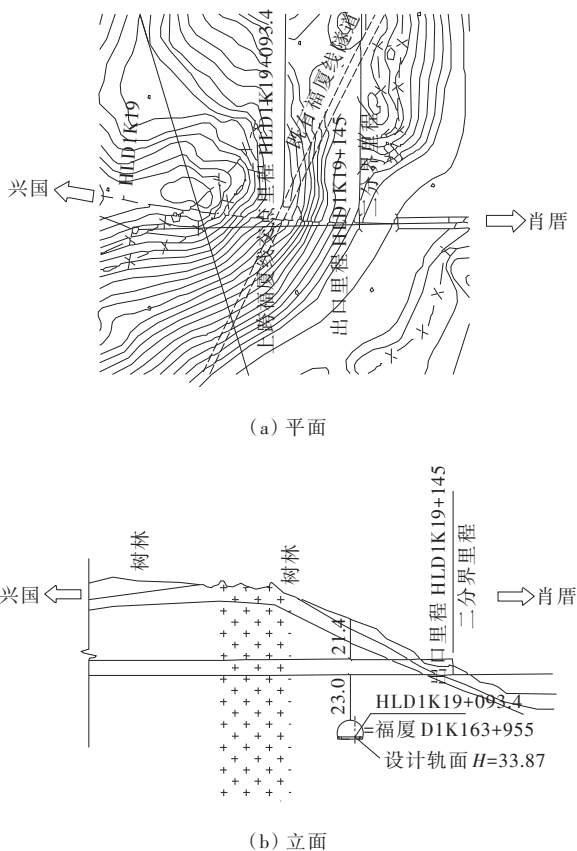


图 1 绿谷二号隧道与陈坝隧道位置关系(单位:m)

## 2 上跨既有隧道施工数值模拟

### 2.1 计算模型及参数

采用 Midas/GTS 软件进行数值模拟, 且按实际尺寸模拟, 计算模型如图 2 所示, 隧道左、右侧和下方土体考虑 3.5 倍隧道宽度, 其尺寸为  $150\text{ m} \times 100\text{ m} \times 130\text{ m}$ , 既有隧道拱底距离模型底部 48 m, 新建隧道拱腰距离模型侧边界 45 m, 斜交处新建隧道埋深约 21.4 m, 模型的上表面为地表, 取为自由边界; 侧面边界水平位移受到约束, 底面边界为固定边界。按照设计断面  $V_c$  衬砌进行模拟(图 3), 地层采用

Mohr-Coulomb 准则, 新建隧道衬砌和既有隧道初期支护采用 3D 实体单元, 既有隧道二衬采用板单元。

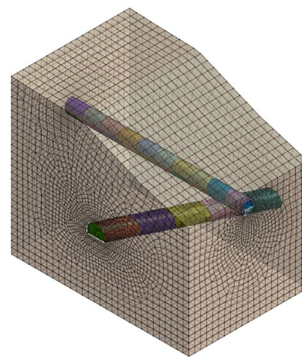


图 2 绿谷二号隧道(上)与陈坝隧道(下)近接段计算模型

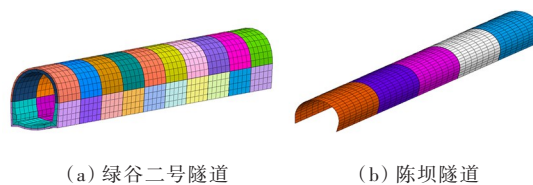


图 3 隧道衬砌结构单元划分图

根据绿谷二号隧道与陈坝隧道的岩土工程地质勘察报告和设计资料, 围岩基本物理参数见表 1, 隧道结构材料参数见表 2。

表 1 花岗岩物理参数

重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ GPa	泊松比	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )	黏聚力/ kPa
26.0	1.0	0.30	25	150

表 2 隧道材料参数

材料	重度/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	弹性模量/GPa	泊松比
C25 喷混凝土	23.0	23.0	0.200
C25 混凝土	23.0	28.0	0.200
C35 钢筋混凝土	25.0	32.5	0.200
C20 混凝土	23.0	25.5	0.200
HRB400 钢筋	78.5	200.0	0.167

数值模拟过程中考虑的永久荷载包括初衬自重和地层压力, 隧道初衬自重按设计尺寸及材料标准重度计算确定, 初始应力场由自重应力产生。不考虑浅埋隧道土体构造应力的影响, 垂直地压采用上覆土层的天然重度近似计算, 水平地压为垂直地压乘以侧土压系数  $K_0$ 。

### 2.2 计算工况

绿谷二号隧道上跨陈坝隧道交叉段的施工在很

大程度上会影响既有陈坝隧道结构的变形和应力分布。采用数值模拟时,先对既有隧道进行开挖,再对新建隧道进行开挖。其中,既有隧道为Ⅲ级复合式衬砌,采用全断面法;新建上跨隧道为V<sub>o</sub>型复合式衬砌,采用上下台阶法,具体计算工况如表3所示。其中,结构和地层均按最不利分析,以对模型进一步简化:陈坝隧道不考虑拱顶局部锚杆的作用,绿谷二号隧道不考虑超前支护的作用。

表3 计算工况

工况	工况描述
全断面法 开挖	初始应力场→开挖核心土→施作初期支护→施作二衬 开挖
上下台阶 法开挖	既有隧道开挖后二次应力场→开挖上部核心土→施作 上部锚杆→施作上部喷混凝土→开挖下部核心土→施 作下部边墙锚杆→施作下部初期支护→施作仰拱及拱 圈浇筑→施作仰拱填充

### 3 数值模拟结果及分析

#### 3.1 既有陈坝隧道开挖分析

陈坝隧道为全断面开挖,以下主要分析开挖完成后地层竖向应力、二衬结构的应力(即二次应力场)。二次应力场情况下位移已清零,上部隧道开挖产生的位移均为附加位移。

##### (1) 竖向应力(二次应力场)

图4为陈坝隧道开挖完成后的竖向应力情况。

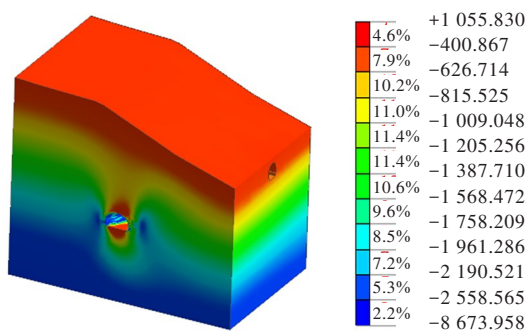


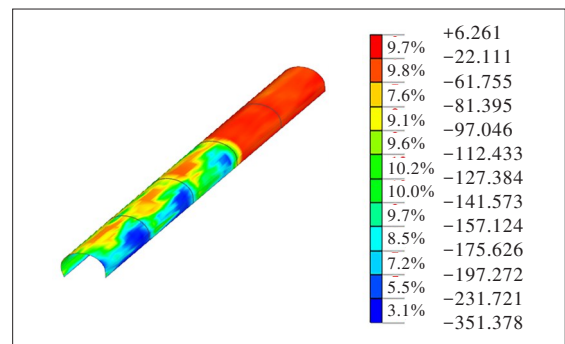
图4 陈坝隧道开挖完成后的竖向应力(单位:kPa)

由图4可知:上部地层表现为受拉,最大值约为1.056 MPa,隧道周围地层及下部地层均表现为受压,压应力最大值为8.674 MPa。

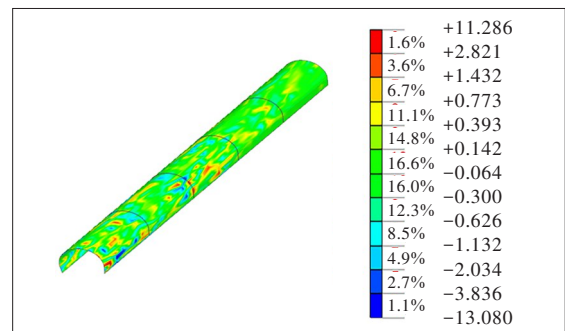
##### (2) 二衬内力

陈坝隧道开挖完成后,分析其二次衬砌的横向

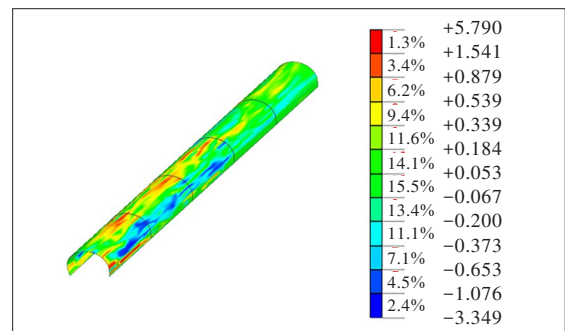
弯矩、横向轴力和剪力,以便与上部隧道开挖后陈坝隧道的内力进行对比(图5)。



(a) 环向轴力(单位:kN/m)



(b) 环向剪力(单位:kN/m)



(c) 环向弯矩(单位:km·m/m)

图5 陈坝隧道二衬内力分布

由图5可知:隧道开挖后,陈坝隧道的二衬整体表现为环向受压,沿纵向每延米最大轴力为351.38 kN/m,弯矩表现为两侧拱腰为负弯矩,拱顶为正弯矩,最大弯矩为5.79 kN·m/m,拱顶附近,最大剪力为11.29 kN/m。

#### 3.2 绿谷二号隧道开挖对陈坝隧道的影响

分别开挖第10 m、30 m、40 m、50 m、100 m、150 m时,对陈坝隧道二次衬砌的位移及内力值进行分析。根据位移协调原则,初期支护的位移与二衬一

致,故不再分析。

### 3.2.1 绿谷二号隧道开挖对陈坝隧道的位移影响

#### (1) 竖向位移

绿谷二号开挖对陈坝隧道二衬竖向位移的影响情况见图6。由图6可知:绿谷二号开挖会导致斜交段既有陈坝隧道衬砌发生轻微隆起,影响范围约60 m,且随着开挖的进行,陈坝隧道顶部的隆起值先逐

渐增大后略微减小,最大隆起量为1.04 mm,满足竖向变形的要求,说明围岩条件较好,上部隧道开挖对下部隧道的影响较小。

#### (2) 水平位移

绿谷二号开挖对陈坝隧道二衬水平位移的影响情况如图7所示。由图7可知:绿谷二号开挖会导致斜交段既有陈坝隧道衬砌产生一定的附加水平位

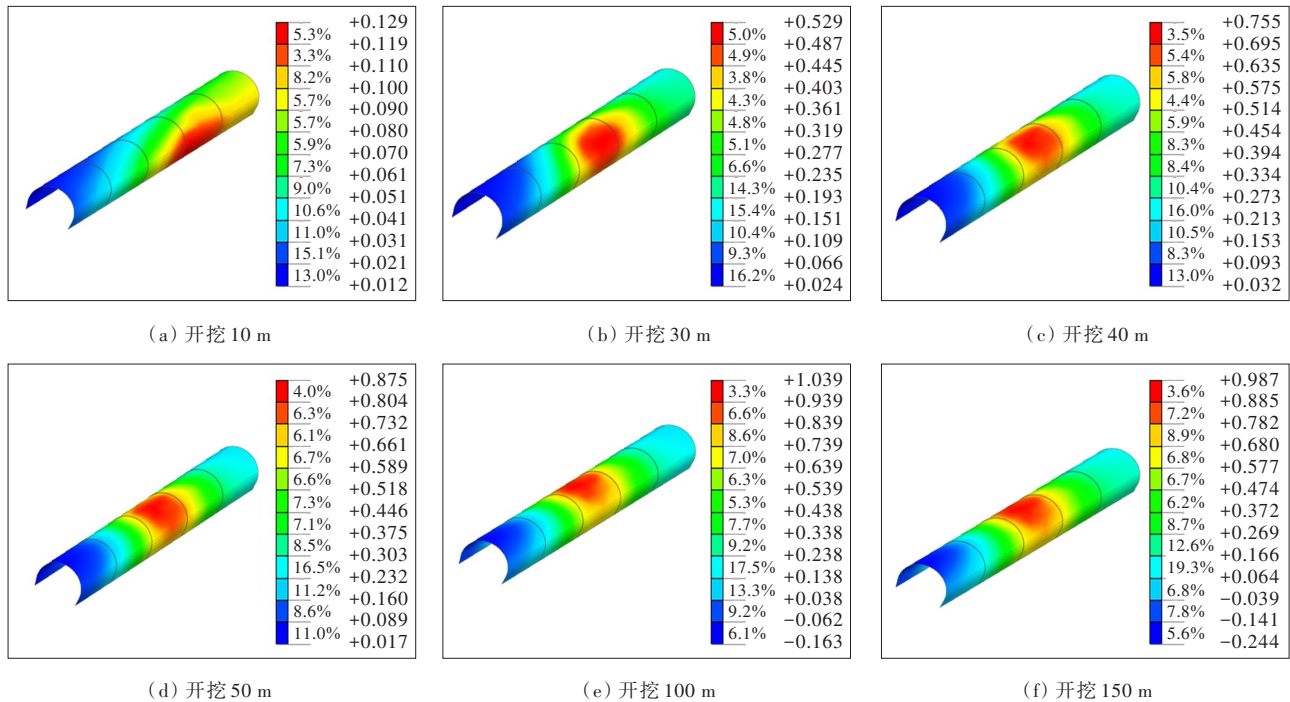


图6 绿谷二号开挖对陈坝隧道二衬竖向位移的影响(单位:mm)

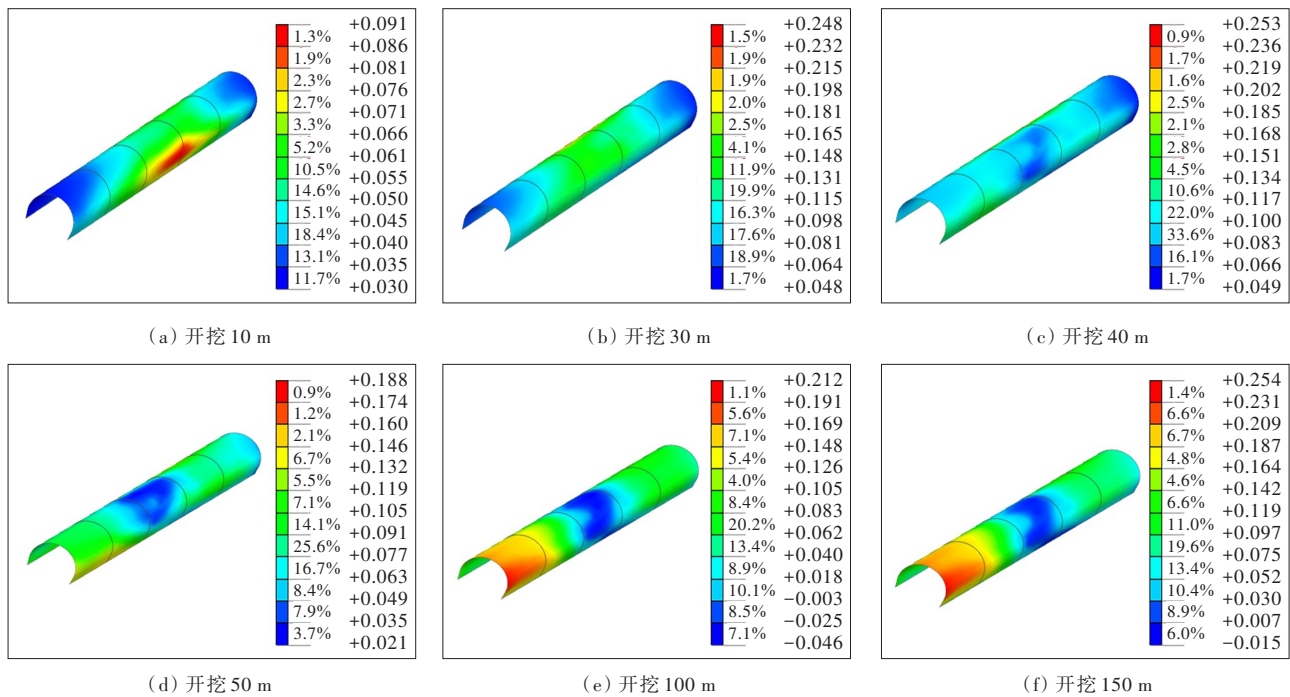


图7 绿谷二号开挖对陈坝隧道二衬水平位移的影响(单位:mm)



移,主要影响两侧拱腰,且随着开挖的进行,该位移呈现逐渐增加的趋势,最大值为0.254 mm,满足水平变形的要求,说明围岩条件较好,上部隧道开挖对下部隧道的影响较小。

### 3.2.2 绿谷二号隧道开挖对陈坝隧道的内力影响

提取陈坝隧道的内力(环向),包括环向的轴力、

弯矩和剪力,分别从开挖进度10 m、30 m、40 m、50 m、100 m、150 m的角度进行分析。

#### (1) 轴力

绿谷二号开挖对陈坝隧道二衬横向轴力的影响情况如图8所示。由图8可知:既有隧道的轴力基本维持为348.6~348.8 kN/m,上部隧道的开挖对既有

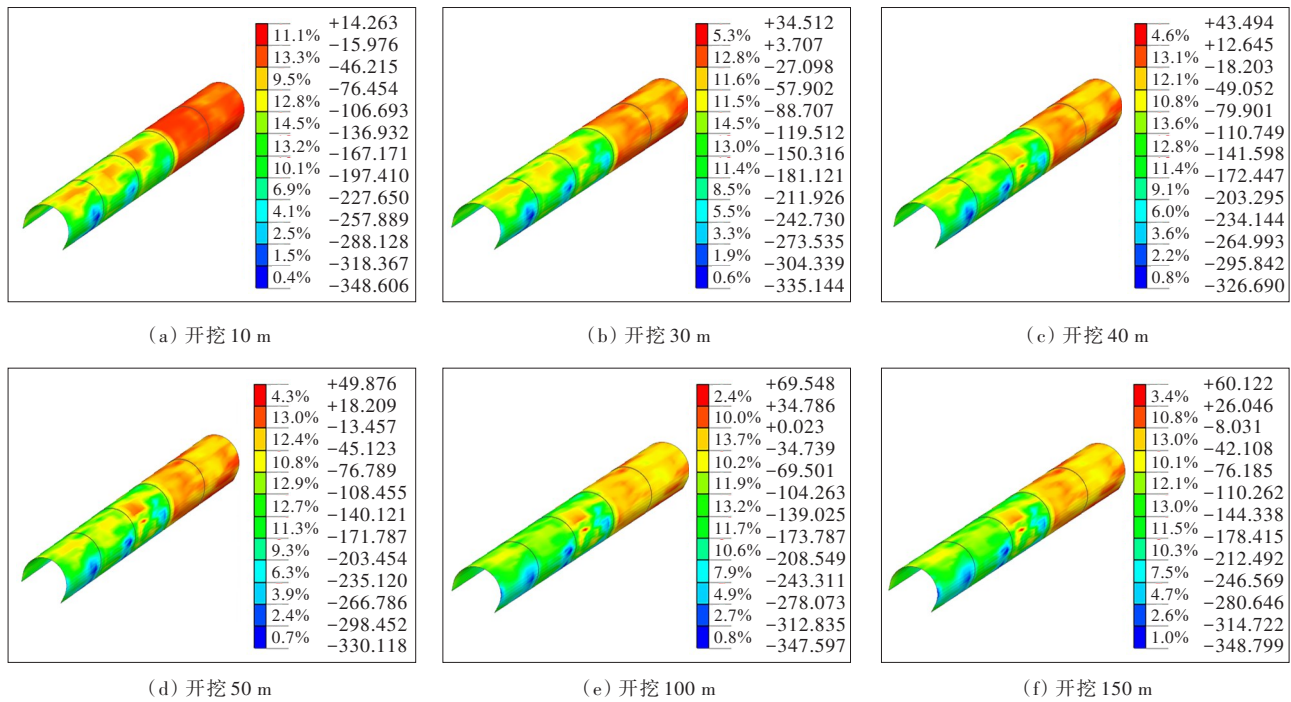


图8 绿谷二号开挖对陈坝隧道二衬横向轴力的影响(单位:kN/m)

隧道的影响较小,整体上,随着上部隧道的开挖先减小后增大,表现为压力。部分地段存在轻微的拉应力,呈逐渐增大的趋势,量值较小。上部隧道开挖后的轴力与原隧道开挖后的轴力351.38 kN/m相比减小了0.74%。

#### (2) 弯矩

绿谷二号开挖对陈坝隧道二衬横向弯矩的影响如图9所示。由图9可知:上部隧道开挖后,既有隧道二衬的横向弯矩整体上变化也不明显,既有隧道整体弯矩约为1 kN·m/m,部分位置应力集中段达到5.4~5.7 kN·m/m,整体上较小,与二次应力状态下(5.79 kN·m)相比减小了1.6%~6.7%。

#### (3) 剪力

绿谷二号开挖对陈坝隧道二衬横向剪力的影响情况如图10所示。由图10可知:上部隧道开挖后,既有隧道二衬的剪力变化规律与弯矩类似,整体剪

力约为0.4 kN/m,部分应力集中点的剪力为10.42~11.12 kN/m,与陈坝隧道自身开挖后最大剪力值(11.29 kN/m)相比降低了1.5%~7.7%。

### 3.3 既有隧道围岩塑性区分析

绿谷二号开挖对陈坝隧道围岩影响的塑性区变化云图如图11所示。由图11可知:上部隧道开挖后,既有隧道的塑性区整体上变化不明显,主要集中在两边的拱墙位置;当隧道开挖越接近既有隧道时,塑性区的变化有稍微增大的趋势,但是变化很小,说明上部隧道开挖对下部隧道的塑性变形影响较小。

### 3.4 既有隧道截面承载能力验算

为了便于分析既有隧道内力的变化规律,分别提取既有隧道拱顶斜交段(最不利位置)的几个单元的弯矩、轴力和剪力进行分析,对应测点分别为A~E(每个测点对应一个单元,单元纵向长度为3 m,以下

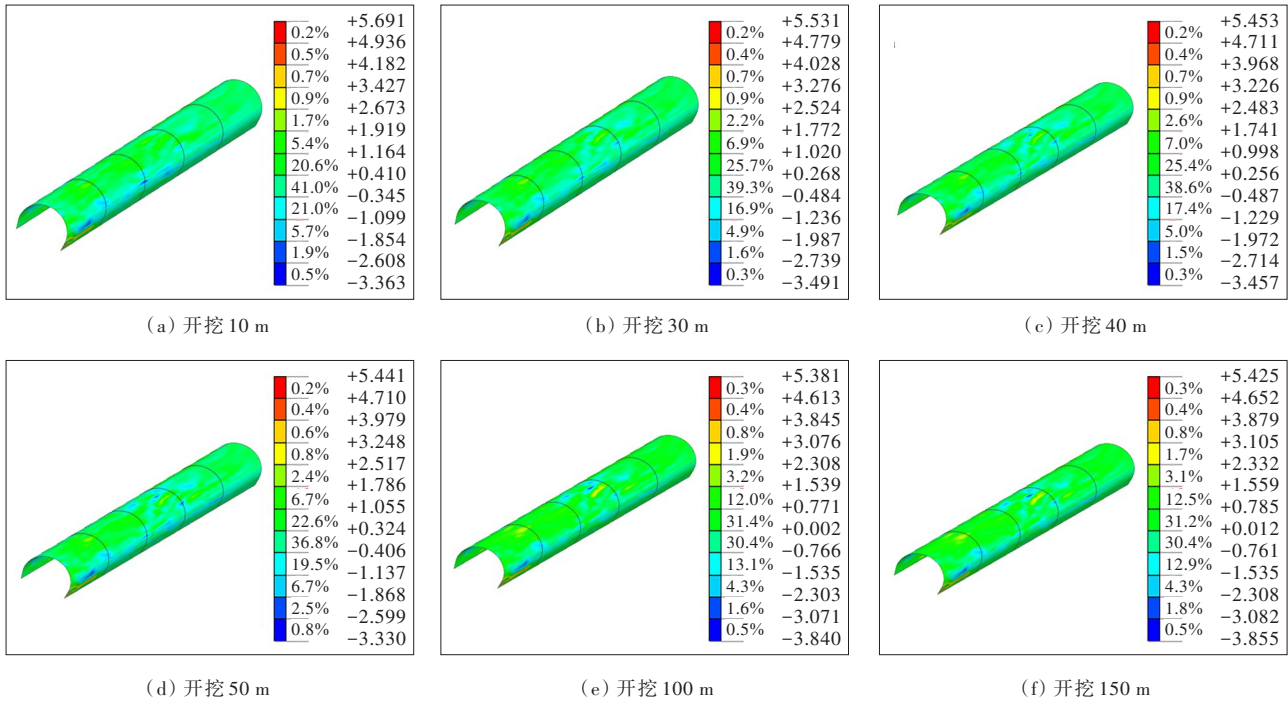


图9 绿谷二号开挖对陈坝隧道二衬横向弯矩的影响(单位:km·m/m)

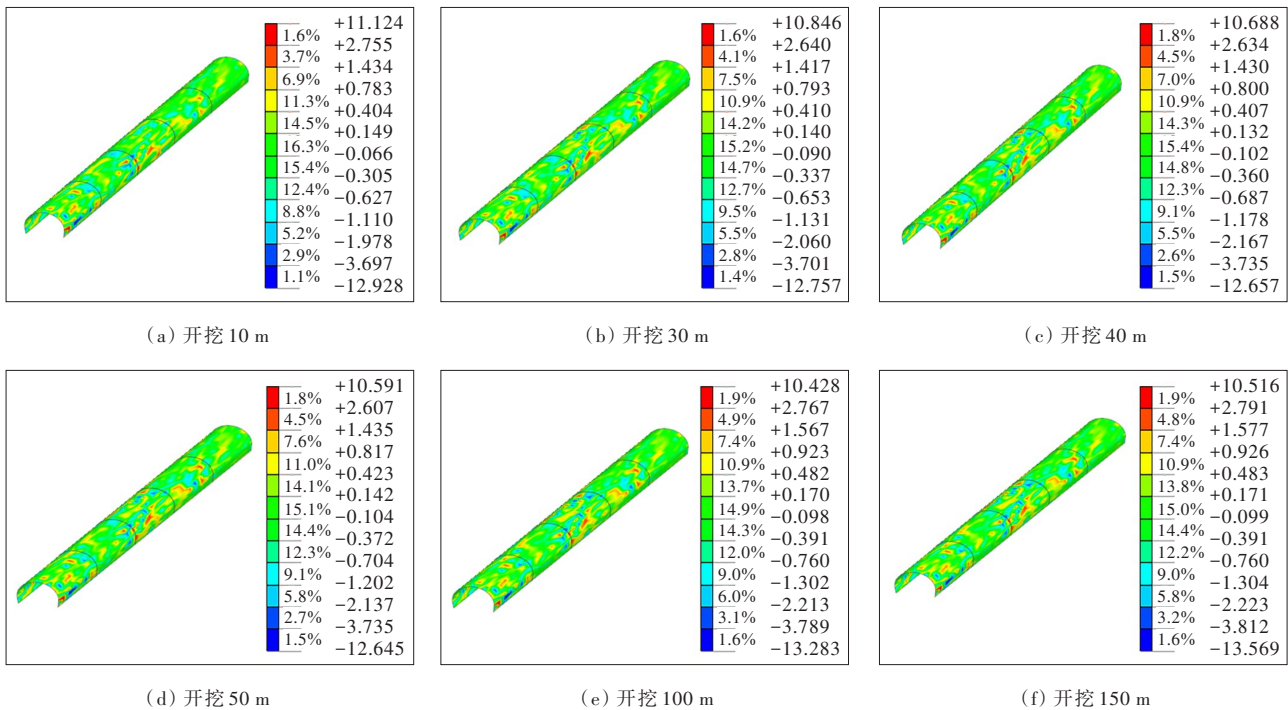


图10 绿谷二号开挖对陈坝隧道二衬横向剪力的影响(单位:kN/m)

计算表中内力均为每延米的值),单元内力监测点布置情况如图12所示。分别对每个测点的数据进行分析,衬砌的安全系数在整个开挖过程中均满足要求(大于2),说明在开挖过程中,下部既有陈坝隧道是安全的。以测点A为例,其不同开挖步下斜交段陈坝隧道二衬拱顶单元安全系数均满足要求(表4)。

#### 4 数值模拟结果与现场实测结果对比分析

为了评估绿谷二号隧道开挖对既有隧道的影响,分别在绿谷二号隧道上跨陈坝隧道交叉位置、距交叉

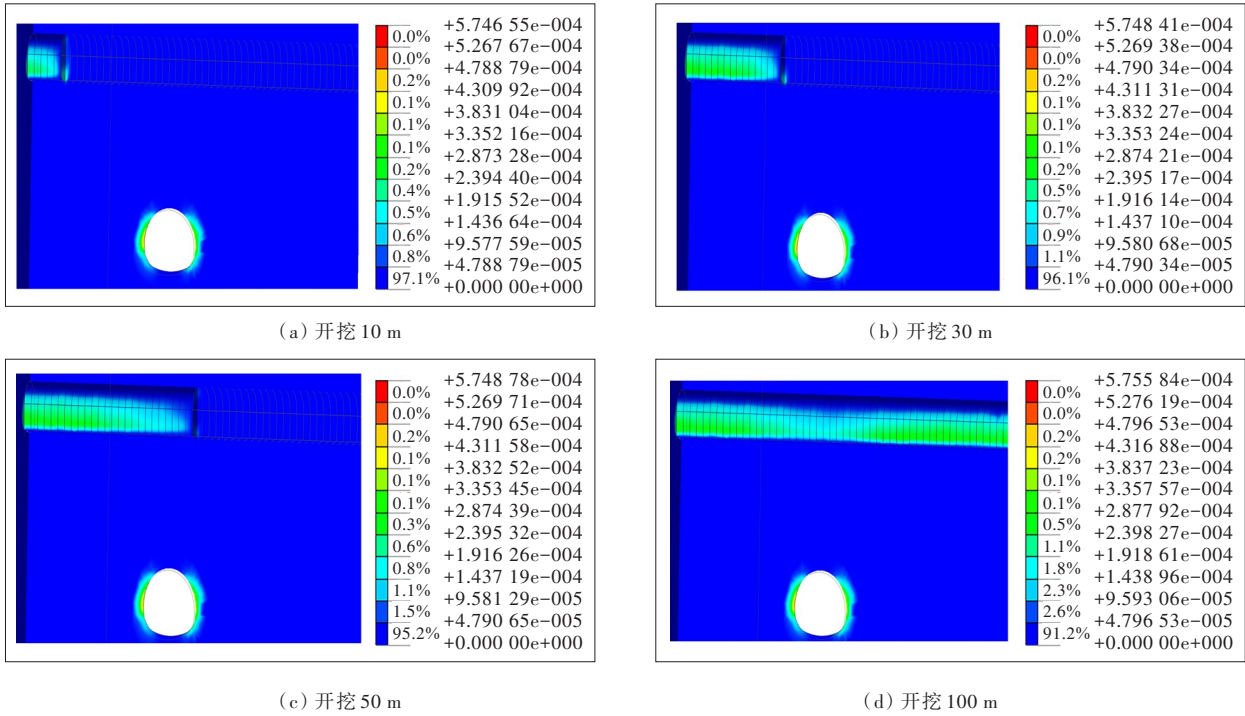


图 11 既有隧道围岩塑性区变化云图

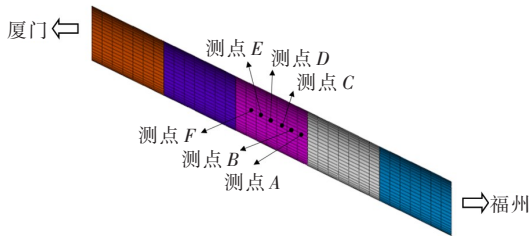


图 12 单元内力监测点布置示意图

表 4 不同开挖步下斜交段陈坝隧道二衬拱顶单元安全系数(测点 A)

开挖进尺/m	轴力/kN	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	安全系数
0	-155.41	-0.40	-0.41	35.12
10	-155.45	-0.39	-0.42	34.97
20	-162.65	-0.39	-0.40	34.65
30	-180.67	-0.50	-0.25	34.20
40	-184.24	-0.57	-0.31	33.61
50	-186.98	-0.61	-0.33	32.90
.....				
100	-194.29	-0.67	-0.30	28.62
110	-194.57	-0.67	-0.30	27.77
120	-195.06	-0.67	-0.30	26.94
130	-195.46	-0.68	-0.30	26.16
140	-195.80	-0.68	-0.30	25.46
150	-195.87	-0.68	-0.30	24.83

位置 20 m、50 m 及 100 m 布置测点。陈坝隧道斜交位置拱顶位移随开挖进尺的变化规律如图 13 所示。

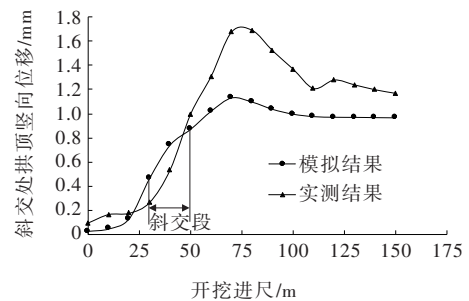


图 13 陈坝隧道斜交位置拱顶位移随开挖进尺的变化规律

由图 13 可知:数值计算上跨施工的案例,既有隧道发生隆起,与实测规律一致;且两者随着上部隧道开挖,下部隧道拱顶位移均表现为隆起,且随着开挖的进行,拱顶隆起值逐渐增大,到开挖 70 m 左右,隆起值达到最大值,模拟值为 1.12 mm,实测值为 1.69 mm,而后隆起值逐渐减小,模拟值保持在 0.98 mm 左右,实测值保持在 1.25 mm 左右,整个过程均满足位移控制要求<sup>[13]</sup>,验证了数值计算结果的有效性和可靠性。

陈坝隧道斜交位置水平收敛位移的数值模拟结果与现场实测结果对比见图 14。由图 14 可知:随着上部隧道开挖,下部隧道拱腰位移基本表现为向开

挖方向,右侧拱腰靠近开挖侧,位移相比左侧略大,整体规律为随上部隧道的开挖,下部隧道两腰的位移先增大后减小,开挖至 80 m 后,位移回弹一部分并维持在某一稳定值,数值模拟结果与实测结果呈现的规律略有差异,但整体趋势一致,数值模拟结果的最大水平收敛位移为 0.27 mm,实测最大位移为 0.33 mm,两者较为接近,且出现位置也较为接近,满足 4 mm 位移控制标准。

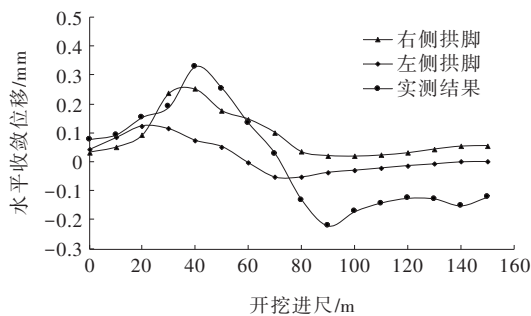


图 14 陈坝隧道斜交位置拱腰位移随开挖进尺的变化规律

## 5 结论

针对兴泉铁路绿谷二号隧道上跨既有福厦铁路陈坝隧道工程,采用数值模拟方法开展上跨工程施工对既有隧道结构的稳定性影响研究,并与实测结果进行对比,得到以下主要结论:

(1) 绿谷二号开挖对既有陈坝隧道的影响区域大致为立交段前后 60 m 范围内,开挖导致衬砌整体向上隆起,最大隆起量 1.04 mm,最大水平收敛位移 0.254 mm,满足 4 mm 位移控制标准。

(2) 绿谷二号隧道开挖后,引起既有陈坝隧道内力降低,影响范围大致为立交位置前后 30 m 处,其中轴力相比新建隧道未开挖前减小了 0.74%,弯矩减小了 6.7%~1.6%,剪力减小了 1.5%~7.7%。

(3) 斜交段既有陈坝隧道衬砌的总体安全系数大于 2,衬砌的安全系数在整个开挖过程中均满足要求,说明上部隧道开挖过程中,下部隧道始终处于安全状态。

(4) 数值计算与实测计算结果表明,两者呈现的

规律基本一致,验证了数值计算结果的有效性和可靠性,数值模拟计算能够为实际施工方案提供参考。

## 参考文献:

- [1] GHABOUSSI J, HANSMIRE W H, PARKER H W, et al. Finite element simulation of tunneling over subways[J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1983, 109(3): 318-334.
- [2] 贺美德. 浅埋暗挖法隧道上穿既有盾构隧道的变形控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2015.
- [3] 于建新, 杨建平, 赵武胜, 等. 新建公路隧道上穿既有供水隧洞施工安全监测技术[J]. *公路*, 2020, 65(1): 303-308.
- [4] BYUN G W, KIM D G, LEE S D. Behavior of the ground in rectangularly crossed area due to tunnel excavation under the existing tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2006, 21(3/4): 361-366.
- [5] 赵丰, 薛亚东, 李硕标, 等. 新建铁路隧道上跨既有公路隧道控制爆破安全距离研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2016, 13(7): 1365-1371.
- [6] 白鹏程. 超浅埋暗挖大跨隧道下穿既有隧道的沉降控制技术[J]. *现代隧道技术*, 2020, 57(3): 175-181.
- [7] 莫坤, 代家宝, 罗丽娟, 等. 厚填土平台下近临既有有线双连拱地铁隧道关键施工技术研究[J]. *中外公路*, 2022, 42(3): 160-166.
- [8] 张涛, 何海健, 张怀静, 等. 双洞隧道下穿施工引起既有隧道沉降的计算方法[J]. *铁道建筑*, 2018, 58(10): 40-43.
- [9] LI P, DU S J, MA X F, et al. Centrifuge investigation into the effect of new shield tunnelling on an existing underlying large-diameter tunnel[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, 42: 59-66.
- [10] 王勇, 王国欣, 李金会, 等. 新建公路隧道小净距上跨施工对既有地铁隧道影响分析: 以重庆红岩村隧道上跨既有轨道环线隧道工程为例[J]. *隧道建设(中英文)*, 2020, 40(S1): 160-168.
- [11] 梁荣柱, 夏唐代, 胡军华, 等. 新建隧道近距离上穿对既有地铁隧道纵向变形影响分析[J]. *岩土力学*, 2016, 37(S1): 391-399.
- [12] 王军琪, 康佐, 赵杰. 黄土地区通道上跨既有地铁隧道衬砌受力分析[J]. *铁道工程学报*, 2015, 32(11): 120-127.
- [13] 中铁二院工程集团有限责任公司. 铁路隧道设计规范: TB 1003—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社有限公司, 2016.