

# 新建铁路隧道上穿施工对既有铁路隧道影响分析

臧万军<sup>1,2</sup>, 梁亚茹<sup>1,2</sup>

(1. 地下工程福建省高校重点实验室, 福建 福州 350118;

2. 福建理工大学 土木工程学院, 福建 福州 350118)

**摘要:** 采用 MIDAS 有限元软件, 模拟两隧道间距为 2.76、4.76、6.76 m 时, 新建铁路隧道上穿既有隧道的施工过程, 对比分析既有隧道的位移和应力变化情况, 并与现场监测数据对比验证。结果表明, 3 种不同间距下, 随着新建隧道开挖, 既有隧道竖向位移向上隆起, 水平位移在两隧道交叉点前向左偏移, 两隧道交叉点后向右偏移, 既有隧道横断面竖向位移大于水平位移, 既有隧道应力变化趋势以两隧道交叉点为界, 先波动增长后波动递减, 且最大拉应力位于既有隧道左边墙处; 既有隧道位移与应力变化和两隧道间距呈反比, 以两隧道间距 2.76 m 为基准, 间距每增加 2 m, 既有隧道最大竖向位移依次降低了 21%、36%, 最大水平位移依次降低了 57%、53%, 最大拉应力依次降低了 11%、21%; 基于既有隧道位移结果, 总结了不同间距下既有隧道关键部位的位移预测公式, 且间距为 2.76 m 时, 既有隧道位移及围岩应力数值模拟结果均接近现场实测数据。

**关键词:** 铁路隧道; 上穿施工; 数值模拟; 监控量测

中图分类号: U456

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2024)01-0001-07

## Analysis of impact of new railway tunnel over-crossing construction on existing railway tunnels

ZANG Wanjun<sup>1,2</sup>, LIANG Yaru<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Underground Engineering in Colleges and Universities of Fujian Province, Fuzhou 350118, China;

2. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** The MIDAS finite element software was used to simulate the construction process of the new railway tunnel passing through the existing tunnel above when the spacing between the two tunnels was 2.76, 4.76 and 6.76 m. The displacement and stress changes of the existing tunnel were compared and analyzed, and verified with the on-site monitoring data. Results show that under three different spacings, with the excavation of the new tunnel, the vertical displacement of the existing tunnel rises upward; the horizontal displacement is offset to the left in front of the intersection of the two tunnels, and to the right after the intersection of the two tunnels; the vertical displacement of the cross-section of the existing tunnel is greater than the horizontal one; the stress change trend of the existing tunnel is bounded by the intersection of the two tunnels, with the fluctuation increasing first and then decreasing, and the maximum tensile stress is located at the left wall of the existing tunnel. The displacement and stress changes of the existing tunnels were inversely proportional to the spacing between the two tunnels; taking the spacing between the two tunnels as the benchmark, for each 2 m increase in the spacing, the maximum vertical displacement of the existing tunnels decreased by 21% and 36%, the maximum horizontal displacement decreased by 57% and 53%, and the maximum tensile stress decreased by 11% and 21% in turn. Based on the displacement results of existing tunnels, the displacement prediction formula of key parts of existing tunnels at different spacings was summarized, and the numerical simulation results of existing tunnel displacement and surrounding rock stress at a spacing of 2.76 m were close to the measured data on site.

**Keywords:** railway tunnel; over-crossing construction; numerical simulation; monitoring measurements

随着我国城市化水平的不断提高,修建了大量的地下工程,由于条件限制出现新旧隧道立体交叉的现象,新隧道施工对既有隧道的影响越来越引起人们的重视。

国内外学者对隧道立体交叉工程开展了一定的研究,李志南等<sup>[1~2]</sup>对近距离上穿运营地铁盾构隧道均采用数值模拟与现场监测相结合的方法,得出可有效控制盾构隧道变形顶管和压板设计方案以及管土摩擦力对临近隧道的影响规律。Ning 等<sup>[3~4]</sup>基于现场监测数据,对土岩复合层双盾构隧道造成的现有铁路轨道变形进行了分析,采用数值模拟揭示了硬层比、隧道埋深和铁路路基加固对铁路轨道变形的影响规律。杨三资等<sup>[5~6]</sup>运用 FLAC-3D 有限元软件,比选了隧道不同开挖方法对地表沉降、既有隧道洞周变形和塑性区分布特征的影响,总结了立交区域上、下层隧道施工的影响规律。陈华东等<sup>[7]</sup>应用两阶段法和 Laplace 变换法,将既有隧道视为搁置在 Pasternak 黏弹性地基上的 Euler-Bernoulli 梁,推导出了既有隧道结构纵向变形的黏弹性解答,分析了相关参数对既有结构变形的影响。张晓清等<sup>[8~10]</sup>采用模型试验和数值模拟相结合的方法,研究盾构隧道施工的力学响应过程。总体而言,隧道近接施工对既有隧道影响的研究均以下穿为主,上穿施工对既有隧道变形影响的研究还不够全面。

本研究依托某实际上穿隧道工程,采用 Midas 有限元软件对新建铁路隧道上穿既有铁路隧道施工全过程进行数值模拟,分析不同间距下既有铁路隧道的变形和围岩应力规律,并结合现场监测数据验证数值模拟的可靠性,为今后类似工程提供参考。

## 1 工程概况及模型建立

### 1.1 工程概况

某新建单线铁路隧道全长 258 m,设计时速 60 km/h,隧道最大埋深约 56 m。进口端与既有隧道交叉,交叉角  $30^\circ$ ,隧道间夹岩层厚度约 2.76 m,如图 1 所示。隧道地层岩性主要为侏罗系上统南园组凝灰岩,自上而下分别为全风化、强风化和弱风化花岗岩,山坡地表上分布第四系残坡积层粉质黏土。

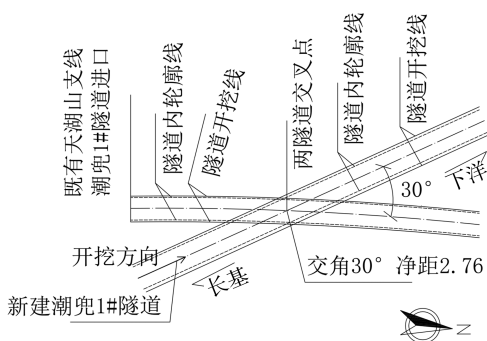


图 1 新建隧道与既有隧道平面关系

Fig.1 Plane relationship between the new tunnel and the existing one

### 1.2 模型建立及参数选取

既有隧道净空尺寸  $5.46\text{ m} \times 6.25\text{ m}$ ,新建隧道净空尺寸  $5.3\text{ m} \times 6.15\text{ m}$ 。采用 Midas GT NX 有限元软件数值模拟新建隧道上穿既有隧道施工。为降低边界效应影响,土体边界取 3 倍以上隧道洞径宽度。选取模型尺寸:横向 160 m,竖向 100 m,纵向 90 m。模型顶面无约束,底面为竖向约束,左、右与前、后均采用法向约束,计算模型如图 2 所示。围岩均为 V 级。

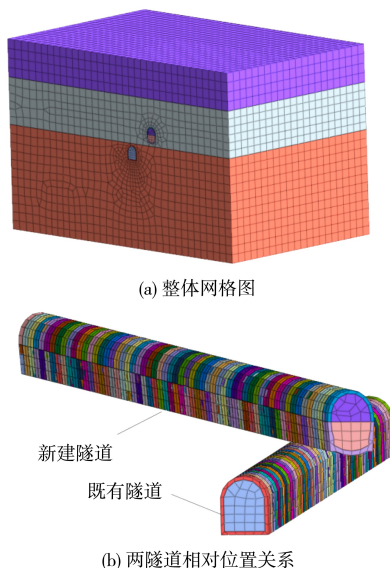


图 2 隧道计算模型图

Fig.2 Tunnel calculation model

由于实际工程复杂,为便于分析且不失一般性,对结果影响不大的条件简化,假定:材料均为各项同性、连续并且均质,隧道土体采用德鲁克-普拉格本构模型;支护结构为钢筋混凝土材料,由于该材料以弹性变形为主,故隧道初期支护和二次衬砌采用弹性模型;施工过程中忽略开挖

对土体、材料参数的影响。物理力学参数根据地质勘察报告取值,见表 1。

表 1 物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters

| 材料     | 重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$ | 弹性模量/MPa | 泊松比  | 黏聚力 $c/\text{kPa}$ | 摩擦角 $\varphi/(^{\circ})$ |
|--------|---------------------------------------------|----------|------|--------------------|--------------------------|
| 全风化花岗岩 | 19.5                                        | 5.0      | 0.35 | 18                 | 25                       |
| 强风化花岗岩 | 21.5                                        | 400.0    | 0.42 | 60                 | 45                       |
| 弱风化花岗岩 | 24.0                                        | 500.0    | 0.45 | 80                 | 45                       |
| 初期支护   | 22.0                                        | 28.0     | 0.20 |                    |                          |
| 二次衬砌   | 23.0                                        | 32.5     | 0.20 |                    |                          |
| 锚杆     | 78.5                                        | 100.0    | 0.30 |                    |                          |

1.3 开挖方法及步骤

建立上、下两隧道净距 2.76、4.76、6.76 m 的模型。开挖步骤:①初始地应力平衡,施工前对岩土体设置初始地应力分析;②既有隧道采用全断面开挖,由于分析的是新建隧道对既有隧道的影响,因此在既有隧道开挖完成后,设置位移清零;③新建隧道采用进尺 2 m 的两台阶法开挖。

2 既有隧道位移与应力分析

2.1 既有隧道位移分析

根据数值模拟结果,3 种不同间距下的既有隧道位移趋势大致相似,竖向位移都经历了“急速增加-缓慢增加-趋于稳定”的过程,水平位移均以两隧道交叉点为界,交叉点前逐渐左偏移,交叉点逐渐右偏移,提取净距 2.76 m 时既有隧道位移变化最大的拱顶处分析。

既有隧道拱顶的竖向位移变化如图 3(a)所示,对图中规定“+”位移向上,“-”位移向下。可以看出,新建隧道开挖对既有隧道影响大致在距两隧道交叉点距离前后 30 m 范围内。新建隧道开挖至 40 m 前,既有隧道拱顶竖向位移持续隆起,且呈指数型增长,在靠近两隧道交叉点处的拱顶竖向位移值变化最大,该阶段累计最大增量占总位移的 85.32%。新建隧道开挖 40 m 后,继续开挖至 90 m 时结束,既有隧道的隆起值变化逐渐平缓至稳定。这是因为上部新建隧道开挖,既有隧道上方的围岩应力释放,导致拱顶发生隆起,并

不断增大,随着上部新建隧道开挖位置距既有隧道越来越远,对既有隧道上方的围岩影响逐渐变小,既有隧道拱顶处的竖向位移逐渐趋于稳定。

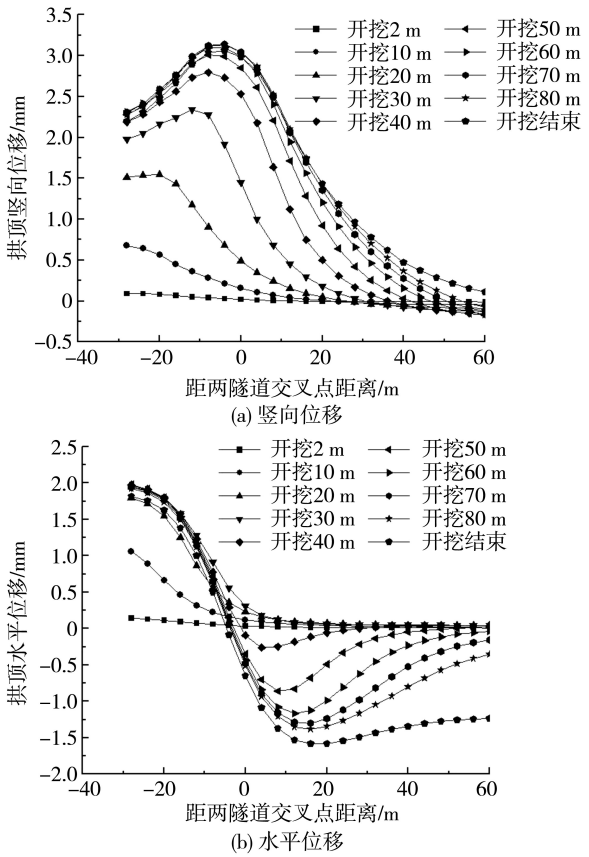


图 3 新建隧道施工时既有隧道拱顶位移  
Fig.3 Displacement of existing tunnel vaults during new tunnel construction

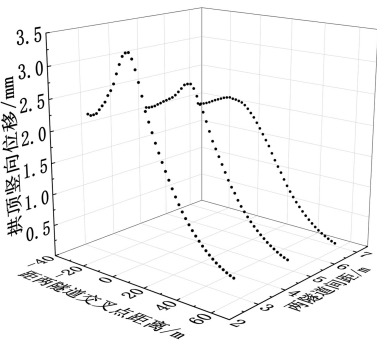
新建隧道施工时,既有隧道拱顶的水平位移变化如图 3(b)所示,对图中规定“+”位移向右,“-”位移向左。可以看出,未经过交叉点前的拱顶测点逐渐水平向右偏移,两隧道交叉点后的拱顶测点逐渐水平向左偏移;既有隧道拱顶水平位移方向随着新建隧道的开挖方向变化,整体曲线呈“8”字型。新建隧道开挖到 10 m 时,靠近新建隧道掌子面的拱顶处向掌子面方向偏移,远离新建隧道掌子面的拱顶无明显变化。在开挖到 30 m 时,未经过两隧道交叉点的拱顶测点均达到最大值。开挖 40 ~ 90 m 时结束,位于新建隧道右下方的拱顶测点开始向左偏移,开挖完毕向左偏移的拱顶测点达到最大值。这是因为新建隧道开挖时,周围的土体受到较大的水平应力,从而导致既有隧道的侧向土体受力增加,在横向上产生变形,由于新建隧道开挖方向的应力传递,变形可

能会朝着新建隧道开挖方向偏移。

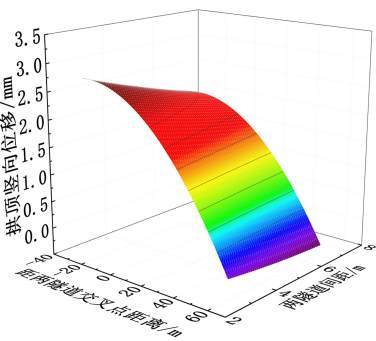
2.2 既有隧道竖向位移对比分析

新建隧道的开挖与既有隧道拱顶、左边墙、右边墙竖向位移变化关系以及最大值如图 4 所

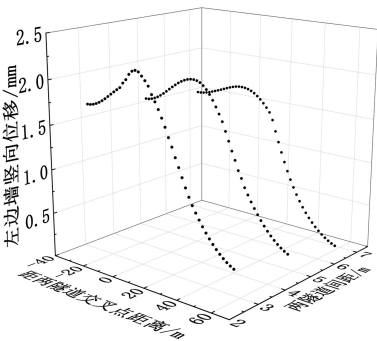
示。在 3 种不同净距工况下,上部隧道开挖后,既有隧道整体竖向位移向上,且既有隧道拱顶、左边墙、右边墙的位移曲线走势相似,均呈“下台阶”状。



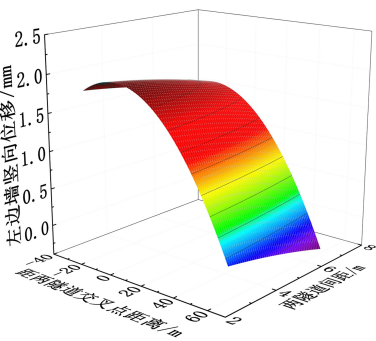
(a1) 既有隧道拱顶水平位移



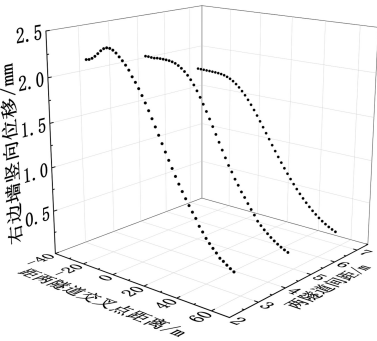
(a2) 既有隧道拱顶水平位移拟合曲面



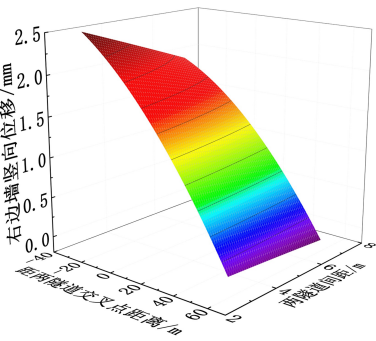
(b1) 既有隧道左边墙水平位移



(b2) 既有隧道左边墙水平位移拟合曲面



(c1) 既有隧道右边墙水平位移



(c2) 既有隧道右边墙水平位移拟合曲面

图 4 既有隧道竖向位移

Fig.4 Vertical displacement of existing tunnels

分析图 4(a1,b1,c1)可知,既有隧道与两隧道交叉点距离越近,则既有隧道竖向位移越大。在两隧道交叉点附近,既有隧道竖向位移达到最大。随着距离两隧道交叉点越来越远,既有隧道拱顶的隆起值逐渐变小。在两隧道距交叉点 50 m 以后,既有隧道竖向位移逐渐稳定。间距 2.76 m 的拱顶、左边墙、右边墙竖向位移最大值分别为 3.29、2.17、2.34 m。与之相比,间距 4.76 m 的

拱顶、左边墙、右边墙最大竖向位移分别降低了 21%、11%、11%;间距 6.76 m 的拱顶、左边墙、右边墙最大竖向位移分别降低了 36%、22%、24%,说明随着两隧道间距增大,既有隧道的竖向位移呈逐渐减小的趋势,这可能是由于增大的间距减轻了相互干扰和相互影响,从而改善了隧道的稳定性和结构性能。从既有隧道断面来看,既有隧道竖向位移变化幅度为拱顶>右边墙>左边墙。

根据空间散乱数据点的二次多项式插值法原理与方法,利用 origin 对既有隧道竖向位移结果进行分析,并作出拟合曲面图 4(a2,b2,c2)。

拟合得到既有隧道拱顶竖向位移:

$$Z_{拱顶} = 2.931 - 0.023l - 0.197y - 3.752l^2 + 0.007y^2 + 0.001ly \quad (1)$$

既有隧道左边墙竖向位移:

$$Z_{左边墙} = 2.001 - 0.006l - 0.009y - 0.0004l^2 - 0.007y^2 - 0.0002ly \quad (2)$$

既有隧道右边墙竖向位移:

$$Z_{右边墙} = 2.199 - 0.026l - 0.094y - 0.0001l^2 + 0.0009y^2 + 0.001ly \quad (3)$$

式中, $l$ 为距两隧道交叉点距离,m; $y$ 为两隧道间距,m; $Z$ 为既有隧道竖向位移,mm。

由数据分析可知,式(1)(2)(3)的拟合曲线相关系数均达 0.9 以上。根据上述公式,可计算两隧道在不同间距下既有隧道竖向变形规律,为其他上穿隧道工程施工对既有隧道竖向变形影响提供参考。

### 3.2 既有隧道水平位移对比分析

新建隧道开挖完成后,在两隧道间距 2.76、4.76、6.76 m 3 种工况下既有隧道拱顶、左边墙、右边墙水平位移变化关系及最大值如图 5 所示。在 3 种不同净距工况下,受上穿隧道开挖影响,既有隧道拱顶、左边墙、右边墙的水平位移曲线走势均呈扭“8”字形。

由图 5(a1)可知,在两隧道间距 2.76 m 工况下,既有隧道拱顶测点未通过两隧道交叉点时,水平位移向右,且最大向右位移位于洞口处。随着既有隧道拱顶测点逐渐靠近两隧道交叉点时,水平向右位移呈减小趋势,且减小趋势大幅度增加。在通过两隧道交叉点后,既有隧道拱顶处水平位移变为向左,最大水平向左位移在两隧道交叉点后 10 m 范围内。随着既有隧道拱顶测点距两隧道交叉点越来越远,既有隧道拱顶处水平向左位移逐渐减小,且减小趋势较为缓慢。图 5(b1)中,3 种间距下既有隧道左边墙水平位移与既有隧道拱顶处变化趋势相同,均由水平位移向右变为水平位移向左。图 5(c1)中既有隧道右边墙在 4.76、6.76 m 间距下,水平位移均向左偏移。这是因为新建隧道上穿既有隧道时,既有隧道靠近掌子面的一侧首先发生变形,远离掌子面的一侧随后发生变形,因此既有隧道的两侧边墙均有向开挖方

向偏移的趋势,但两侧边墙的偏移大小并不一样,右边墙偏移量整体大于左边墙。间距 2.76 m 工况下,既有隧道拱顶、左边墙、右边墙最大水平位移为 -1.83、-1.05、-1.12 mm。与之相比,间距 4.76 m 工况的既有隧道拱顶、左边墙、右边墙最大水平位移降低了 57%、87%、86%;间距 6.76 m 工况下,既有隧道拱顶、左边墙、右边墙最大水平位移分别占间距为 2.76 m 工况下的 53%、80%、78%。说明随着间距的增加,既有隧道的水平位移变化逐渐减小,且减小的趋势也逐渐变缓,与既有隧道竖向位移和间距的规律一致。根据空间散乱数据点的二次多项式插值法原理与方法,利用 origin 将上述既有隧道不同位置的水平位移变形结果拟合为曲面如图 5(a2,b2,c2)所示,对应的拟合公式如下。

拟合得到既有隧道拱顶水平位移:

$$X_{拱顶} = -0.377 - 0.075l + 0.068y + 0.0005l^2 - 0.017y^2 + 0.006ly \quad (4)$$

既有隧道左边墙水平位移:

$$X_{左边墙} = -0.019 - 0.035l + 0.005y - 0.00005l^2 - 0.007y^2 + 0.003ly \quad (5)$$

既有隧道右边墙水平位移:

$$X_{右边墙} = -0.031l - 0.203y - 0.0001l^2 + 0.014y^2 + 0.003ly \quad (6)$$

式中, $X$ 为既有隧道水平位移,mm。

由数据分析可知,拟合曲线相关系数达 0.9 以上。根据上述公式,可预测两隧道在不同间距下既有隧道水平方向变形规律。

### 3.3 既有隧道横断面位移对比分析

两隧道交叉点处既有隧道横断面轮廓竖向位移及横向位移对比见图 6。由图 6 可知,水平位移较小,且 3 种不同间距下水平位移区别不大,均在 1 mm 以内。两隧道间距 2.76 m 时,既有隧道横断面最大竖向位移为 3.27 mm,是该断面最大水平位移的 3.37 倍。说明不同间距工况下,该横断面竖向位移受影响更大,可能是土体的竖向应力集中、压缩、变形以及传递路径较短等因素共同作用所致。

### 3.4 既有隧道结构应力分析

根据数值模型计算结果,得出最大拉应力出现在既有隧道左边墙处,既有隧道结构左边墙应力变化规律如图 7 所示。

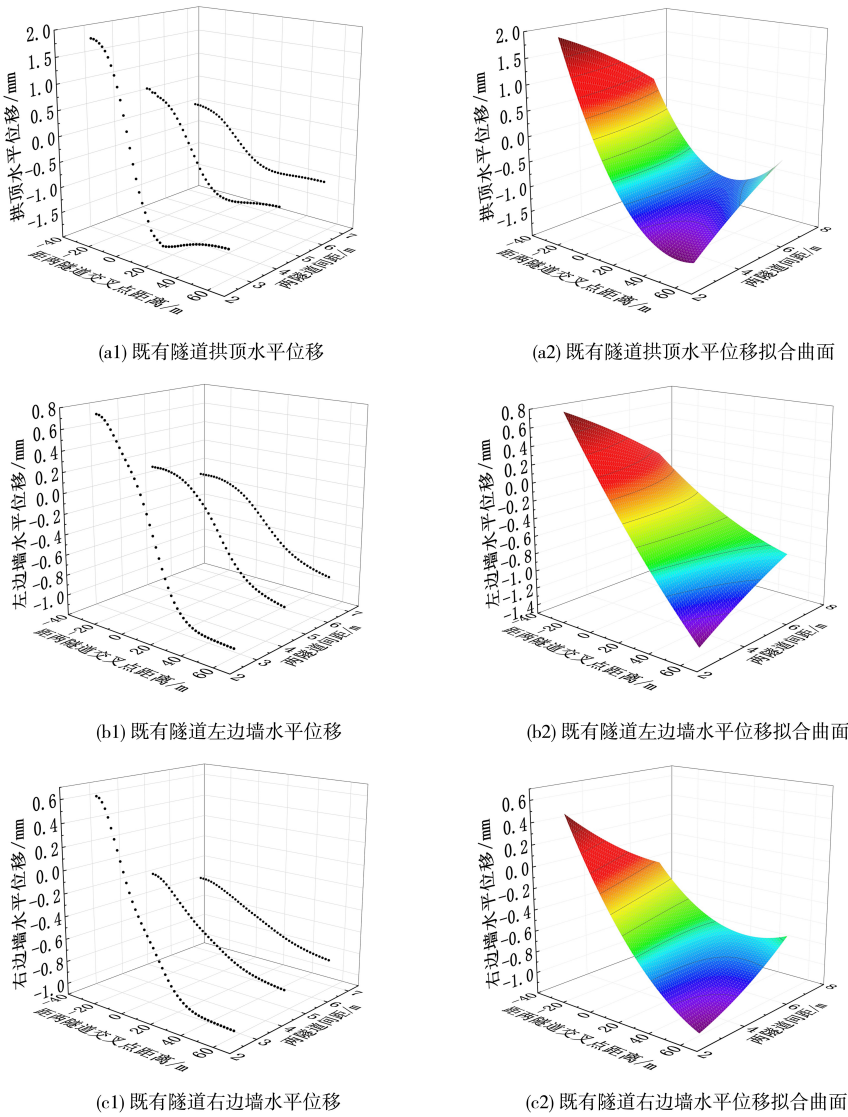


图 5 既有隧道水平位移

Fig.5 Horizontal displacement of existing tunnels

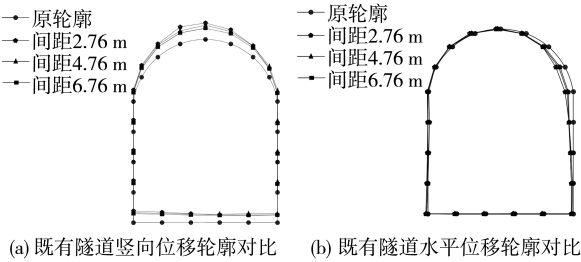


图 6 两隧道交叉点处既有隧道断面位移对比  
(变形扩大 200 倍)

Fig.6 Comparison of displacement of existing tunnel sections at intersection of two tunnels  
(deformation expansion by 200 times)

不同工况下,既有隧道的最大主应力分别为 1.24、1.10、0.97 MPa,均在控制值 5 MPa 范围内。

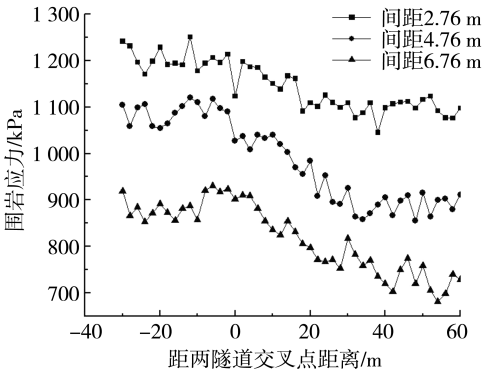


图 7 既有隧道结构最大主应力变化

Fig.7 Maximum principal stress variation of existing tunnel structure

围岩拉应力在靠近两隧道交叉点处呈波动增长趋

势,随着两隧道距离越来越远,拉应力呈波动递减趋势。

### 3 现场实测与数值模拟结果对比

#### 3.1 监测内容

根据 TB 10314-2021《邻近铁路营业线施工安全监测技术规程》<sup>[11]</sup> 和设计文件,针对既有隧道布置多个监测断面,从洞口处依次每隔 10 m 布置一个测点。

#### 3.2 监测结果与数值模拟对比

根据既有隧道监测断面布置,取既有隧道的拱顶处测点,分析既有隧道竖向及周边水平位移情况,如图 8 所示。

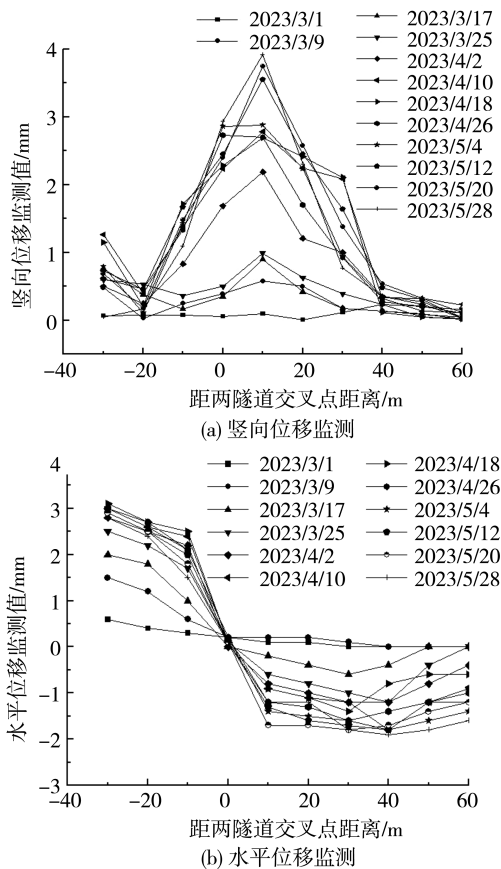


图 8 既有隧道拱顶监测

Fig.8 Existing tunnel vault monitoring

在隧道施工中,随着新建隧道的开挖,既有隧道拱顶处竖向位移逐渐增大,累计最大竖向位移监测值为 3.93 mm,既有隧道拱顶处水平位移随着新建隧道的开挖方向偏移,开挖完成后最大水平位移监测值为-3.11 mm,将图 3 与图 8 对比可知,数值模拟的隧道竖向、水平位移变形

规律基本一致,均接近现场实测,且都在位移控制值 8 mm 范围内。图 9 取位于两隧道交叉点处的既有隧道内墙角测点,与同位置数值模拟结果对比可知,既有隧道墙角内侧受压,数值模拟与现场监测数据趋势大致相同,但实测数据结果呈波动状,可能是现场实测数据受施工条件、天气等因素影响所致。

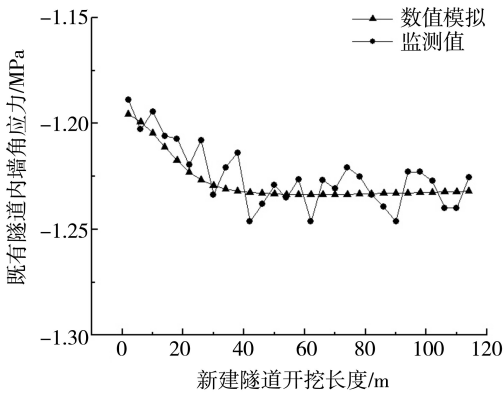


图 9 既有隧道内墙角应力数值模拟与监测

Fig.9 Numerical simulation and monitoring of wall angular stress in the tunnel

### 4 结论

1) 3 种不同间距下,随着新建隧道开挖,既有隧道竖向位移均向上隆起,都经历了“急速增加-缓慢增加-趋于稳定”的过程,开挖结束后呈“台阶”状;既有隧道水平位移均在两隧道交叉点前向左偏移,在两隧道交叉点后向右偏移,开挖完成后呈“8”字形;既有隧道横断面竖向位移均大于水平位移,水平位移变化均在 1 mm 以内,而竖向位移最大为 3.27 mm;既有隧道应力变化趋势均以两隧道交叉点为界,先波动增长后波动递减,且最大拉应力均位于既有隧道左边墙处。

2) 既有隧道位移与应力变化均与两隧道间距呈反比,以两隧道间距 2.76 m 为基准,间距每增加 2 m,既有隧道最大竖向位移依次降低 21%、36%,最大水平位移依次降低 57%、53%,最大拉应力依次降低 11%、21%。

3) 基于既有隧道位移结果,总结了不同间距下既有隧道关键部位的位移预测公式,且间距为 2.76 m 时,既有隧道位移及围岩应力数值模拟结果均接近现场实测数据,验证了该公式的有效性。

(下转第 15 页)

4) 四滚刀回转破岩对靠近回转中心的内侧  
岩石破坏更大,回转半径越小,左右两侧塑性变形

差距越大,产生的侧向合力整体指向滚刀外侧,致  
使滚刀内侧刀圈磨损要高于外侧刀圈磨损。

参考文献:

[1] TEALE R. The mechanical excavation of rock—experiments with roller cutters[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts,1964,1(1):63-78.

[2] 莫振泽,李海波,周青春,等. 楔刀作用下岩石微观劣化的试验研究[J]. 岩土力学,2012,33(5):1333-1340.

[3] 王超,乔世范,刘红中. TBM 破岩过程的滚刀受力计算模型研究[J]. 工程力学,2021,38(10):54-63.

[4] 谭青,李建芳,夏毅敏,等. 盘形滚刀破岩过程的数值研究[J]. 岩土力学,2013,34(9):2707-2714.

[5] 刘亚迪,齐文聪,刘浩飞,等. 多滚刀协同破岩过程数值模拟与滚刀布置规律研究[J]. 煤炭科学技术,2023,51(5):232-244.

[6] 孙金山,陈明,陈保国,等. TBM 滚刀破岩过程影响因素数值模拟研究[J]. 岩土力学,2011,32(6):1891-1897.

[7] 江华,张晋勋,唐飞鹏,等. 北京砂卵石地层盾构先行撕裂刀切削过程数值模拟分析[J]. 煤炭学报,2021,46(S1):539-548.

[8] ZHANG Z Q,ZHANG K J,DONG W J,et al. Study of rock-cutting process by disc cutters in mixed ground based on three-dimensional particle flow model[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2020,53(8):3485-3506.

[9] TEALE R. The concept of specific energy in rock drilling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts,1965,2(1):57-73.

(责任编辑:陈雯)

(上接第 7 页)

参考文献:

[1] 李志南,潘珂,王位赢. 并行顶管近距离上穿既有盾构隧道的安全分析[J]. 地下空间与工程学报,2020,16(S2):939-944,975.

[2] 吴垠龙,刘维,贾鹏蛟,等. 矩形顶管近距离上穿既有隧道施工扰动分析[J]. 地下空间与工程学报,2022,18(6):1968-1978.

[3] JIAO N,SUN S,LIU J Y,et al. Analysis of existing railway deformation caused by double shield tunnel construction in soil-rock composite stratum[J]. Energy Reports,2023,9:159-165.

[4] ZHANG C P,ZHANG X,FANG Q. Behaviors of existing twin subway tunnels due to new subway station excavation below in close vicinity[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2018,81:121-128.

[5] 杨三资,张顶立,苏洁. 基于数值模拟的北京地区地下道路立交隧道围岩变形分析[J]. 土木工程学报,2016,49(S2):103-106.

[6] 刘传涛. 新建公路隧道上穿既有铁路隧道施工方案比选[J]. 人民长江,2019,50(11):167-173.

[7] 陈华东,申文明,张文杰. 上穿隧道引起既有隧道变形的黏弹性分析[J]. 力学季刊,2022,43(4):958-969.

[8] 张晓清,张孟喜,吴应明,等. 多线叠交盾构隧道近接施工模型试验[J]. 上海交通大学学报,2015,49(7):1040-1045.

[9] 刘新荣,王吉明,郭子红,等. 新建立交隧道施工对既有隧道影响的模型试验[J]. 重庆大学学报,2012,35(12):84-93.

[10] 翁效林,陈禹勋,贾金昌,等.大跨度双连拱隧道下穿既有地铁近接施工围岩力学特征模型试验研究[J].建筑科学与工程学报.2023,40(6):137-147.

[11] 刘喆,倪光斌,林传年,等. TB 10314—2021《邻近铁路营业线施工安全监测技术规程》内容解析[J]. 铁道标准设计,2022,66(6):184-189.

(责任编辑:陈雯)