

隧道原位单侧扩挖围岩力学特性解析分析*

杨宾^{1,2}, 林从谋^{1,2}, 张在晨³, 殷榕鹏^{1,2}, 温智捷^{1,2}

(1. 华侨大学 岩土工程研究所, 福建 厦门 361021; 2. 福建省隧道与地下空间工程研究中心, 福建 厦门 361021; 3. 北京迈达斯技术有限公司, 北京 100044)

摘要: 为通过解析计算分析隧道单侧扩挖围岩力学特性的特点, 考虑到围岩支护对隧道围岩的稳定起到重要作用, 针对已有的隧道围岩力学解析解, 在考虑支护反力作用的情况下, 结合 Schwarz 交替法进行求解, 提出了隧道原位扩挖围岩力学特性计算的解析算法。经大帽山隧道原位扩挖工程的围岩变形监测数据与 abaqus 数值模拟验证, 结果表明: 在考虑支护情况下隧道原位扩挖 Schwarz 交替法能得到较精确的围岩力学性质, 该方法有较好的适用性。随着扩挖宽的增加其围岩特性如下: (1) 在相切处即原隧道在开挖施工部分应力值变化较大, 扩挖部分的环向应力在拱顶处有拉应力产生。(2) 原隧道竖向, 水平位移值变化较小, 较稳定。扩挖部分的竖向位移有增大趋势, 水平位移有收敛趋势。(3) 相较于无支护的情况, 有支护力作用下, 隧道扩挖水平位移变形趋向于稳定, 竖向位移变化较小。

关键词: 隧道原位扩挖; 交替法; 支护力; 围岩特性

中图分类号: TU91

文献标识码: A

文章编号: 1673-0836(2018)06-1458-08

Mechanical Characteristics Analysis of Surrounding Rock of Unilateral Expansion Tunnels in Situ

Yang Bin^{1,2}, Lin Congmou^{1,2}, Zhang Zaicheng³, Yin Rongpeng^{1,2}, Wen Zhijie^{1,2}

(1. Research Institute of Geotechnical Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, P.R. China; 2. Fujian Tunnel and Underground Space Engineering Research Center, Xiamen, Fujian 361021, P.R. China; 3. Beijing MIDAS Information Technology Co. Ltd., Beijing 100044, P.R. China)

Abstract: In order to analyze the mechanical characteristics of tunnel side wall rock mass by means of analytical calculation, considering the tunnel lining plays an important role to keep the stability of surrounding rock in practical engineering, according to the analysis of the existing tunnel surrounding rock mechanics solutions, in the case of considering supporting force, combined with Schwarz alternating method, a calculation analysis algorithm of the surrounding rock deformation was provided. Construction between the surrounding rock deformation monitoring data and ABAQUS numerical simulation of the Damaoshan tunnel engineering show: in the case of considering support, tunnels expansion in situ Schwarz alternating method can get more precise surrounding rock mechanics properties of the expansion tunnel, the method has a better applicability. With the enlarging widths of the tunnel, its features are as follows: (1) At the tangent place of hole1 and hole 2 i.e. excavation construction part, the stress changes of the original tunnel is bigger. At the hole 2 i.e. expansion digging part, hoop stress has tensile stress in the vault. (2) Along the vertical, horizontal displacement of the original tunnel values change little, which is relatively stable. At the

* 收稿日期: 2017-12-31 (修改稿)

作者简介: 杨宾 (1991-), 男, 湖北黄石人, 硕士, 主要从事隧道工程研究。E-mail: 806501391@qq.com

通讯作者: 林从谋 (1957-), 男, 福建福州人, 博士, 教授, 主要从事隧道与岩土工程设计与施工技术研究。

E-mail: cmlin@hqu.edu.cn

基金项目: 福建省自然科学基金 (2014J01197)

digging part, the vertical displacement has increasing trend, expanding horizontal displacement has a trend of convergence. (3) Compared with no supporting force, when there is supporting force, the tunnel expansion horizontal displacement tends to be stable, and the vertical displacement change is smaller.

Keywords: tunnel expansion in situ; alternate method; supporting force; surrounding rock characteristics

0 引言

近年来,随着我国经济水平的提高和车流量增大,为了确保公路的通行顺畅,需对隧道公路通行能力提出更高的要求,在部分地区,双向四车道隧道已经不能满足通行量现行要求。为了提高通行能力,需要对原有隧道公路进行原位扩挖,以满足交通运输的要求。目前,在国内已经开展了许多针对隧道扩挖工程的研究,如泉厦高速大帽山隧道^[1-2],重庆市机场路渝州隧道^[3]、金鸡山隧道^[4]和渝中区鹅岭隧道^[5]。

目前关于隧道围岩力学特性解析求解的研究也越来越多,部分学者也利用复变函数来解决围岩应力位移的计算。对于双洞隧道解析算法研究,张路青等^[6]、苏峰等^[7]利用 Schwarz 交替法对双孔圆形洞室的围岩应力分析进行了研究。文献[7]考虑两隧洞开挖次序的影响和弹性半空间下相对位置的影响。针对隧道扩挖情况,将侧向扩挖隧道简化为平面双连通域问题,吴张中等^[8]通过 Schwarz 交替法推导出了侧向扩挖隧道复应力函数的具体形式,提出隧道原位扩挖的合理预测方法,但未考虑支护抗力作用,而实际工程中隧道衬砌对围岩的维稳起到重要作用,因此,在求解隧道原位扩挖围岩力学特性过程中,需深入考虑隧道衬砌的支护力对围岩的影响,对隧道原位扩挖的解析解进行完善和进一步计算。本文以大帽山原位2扩4隧道为工程背景,一一验证考虑支护抗力下的解析解,探讨支护抗力的影响,为原位扩挖隧道的施工提供解析计算支持。

1 隧道扩挖 Schwarz 交替法

1.1 隧道扩挖力学模型

利用 Schwarz 交替法对隧道围岩应力求解需确定非圆形隧道断面的映射函数表达式^[9],由于未知参数过多,会导致映射函数的表达式变得很复杂,最后难于求解。因此,往往针对隧道断面形式

采取等代圆法将隧道断面进行简化。等代圆半径的取值方式较多,本文以隧道原位扩挖为基准选择以下等代圆半径计算公式^[10]:

$$R = \frac{h+b}{4} \quad (1)$$

式中: h 为隧道高度; b 为隧道宽度。

可将隧道的既有隧道和扩挖部分分别简化为半径为 r_1 、 r_2 的相切圆,而土压力作用可以简化无穷远处竖向和水平应力分量 P_1 、 P_2 ,如图1所示。

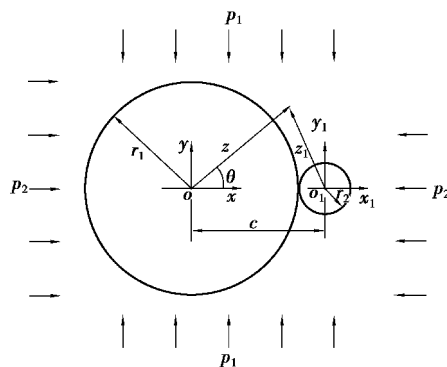


图1 等代圆法计算简图

Fig. 1 Computing model of equivalent circle method

1.2 Schwarz 交替法求解

以复变函数表示的围岩应力和位移分量关系分别为:

$$\sigma_r + \sigma_\theta = 4\text{Re}[\varphi_1'(z_1)] \quad (2)$$

$$\sigma_r - \sigma_\theta + 2\tau_{r\theta} = 2e^{2i\theta}[\bar{z}\varphi_1''(z_1) + \psi_1'(z_1)]e^{2i\alpha} \quad (3)$$

$$2G(u + iv) = \kappa\varphi_1(z_1) - z_1\overline{\varphi_1'(z_1)} - \overline{\psi_1(z_1)} \quad (4)$$

式中: $\varphi_1(z)$ 、 $\psi_1(z)$ 为复变函数; σ_r 、 σ_θ 、 $\tau_{r\theta}$ 分别为隧道围岩的径向、环向和剪切应力; G 为剪切模量, $G = E/2(1+\mu)$; κ 为与泊松比有关的计算常数, $\kappa = (3-\mu)/(1+\mu)$ 。

$\varphi_1(z)$ 、 $\psi_1(z)$ 及其导数形式在计算过程中均需要在 $O_1x_1y_1$ 坐标系与 Oxy 坐标系之间进行多次转化,其转换关系式为:

$$\varphi_2(z_2) = \varphi_1(z_2 + c) \quad (5)$$

$$\psi_2(z_2) = \psi_1(z_2 + c) + c\varphi_1'(z_2 + c) \quad (6)$$

由 $O_1x_1y_1$ 坐标系转换至 Oxy 坐标系下为:

$$\varphi_1(z_1) = \varphi_2(z_1 - c) \quad (7)$$

$$\psi_1(z_1) = \psi_2(z_1 - c) - c\varphi_2'(z_1 - c) \quad (8)$$

1.2.1 只存在孔 1 时的应力函数 $\varphi_{11}(z_1)$ 、 $\psi_{11}(z_1)$ 解^[3]

在无穷远处竖向和水平应力 P_1, P_2 和法向支撑力 T_1 作用下:

$$\varphi_{11}(z_1) = \frac{T_1 z_1}{2} + \frac{P_a z_1}{2} - \frac{P_b r_1^2}{z_1} \quad (9)$$

$$\psi_{11}(z_1) = P_b z_1 - \frac{P_a r_1^2}{z_1} - \frac{P_b r_1^4}{z_1^3} \quad (10)$$

式中: $P_a = \frac{P_1 + P_2}{2}$, $P_b = -\frac{P_1 - P_2}{2}$ 。

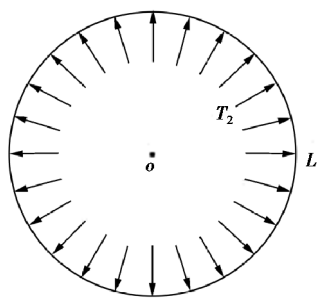


图 2 隧洞支护力作用示意图

Fig. 2 Sketch of tunnel normal pressure

1.2.2 考虑孔 2 周边法向支撑力 T_2

迭代结果为:

$$\begin{aligned} \varphi_{21}(z_1) = & \frac{P_a r_1^2}{\frac{r_2^2}{z_1 - c} + c} - \frac{P_b r_2^2}{z_1 - c} + \frac{P_b r_1^2}{(c)^2 \left(z_1 - c + \frac{r_2^2}{c} \right)} \\ & \left[\frac{\left(\frac{r_2^2}{c} \right)^3}{\left(z_1 - c + \frac{r_2^2}{c} \right)} - 3 \left(\frac{r_2^2}{c} \right)^2 \right] + \frac{P_b r_1^4}{\left(\frac{r_2^2}{z_1 - c} + c \right)^3} - \\ & \frac{P_b c r_1^2}{\left(\frac{r_2^2}{z_1 - c} + c \right)^2} + \frac{T_1 r_1^2}{\frac{r_2^2}{z_1 - c} + c} \\ \psi_{21}(z_1) = & -\frac{T_2 r_2^2}{z_1 - c} - \frac{P_a r_2^2}{z_1 - c} + \frac{P_b r_1^2}{\frac{r_2^2}{z_1 - c} + c} - \frac{P_b r_1^2 r_2^2}{(z_1 - c) z_1^2} \end{aligned} \quad (11)$$

$$- \frac{P_b r_1^2}{c} - \frac{r_2^2}{z_1 - c} \varphi_{21}'(z_1) - c \varphi_{21}'(z_1) \quad (12)$$

在经过多次相互迭代计算后,达到相应的精度要求,即可停止迭代。此时, $\varphi_1(z)$ 、 $\psi_1(z)$ 可由下式计算而得:

$$\varphi_1(z_1) = \varphi_{11}(z_1) + \varphi_{21}(z_1) \quad (13)$$

$$\psi_1(z_1) = \psi_{11}(z_1) + \psi_{21}(z_1) \quad (14)$$

2 大帽山隧道原位单侧扩挖实例计算

2.1 工程概况

大帽山隧道为单侧扩挖隧道,隧道全长 600 m,隧道洞口断面的中心埋深为 16.62 m。利用等代圆法将大帽山隧道的简化为两相切圆,其中圆心距 $c = 5.05 + 0.2812 \times \Delta d$ 。竖向、水平地应力分量分别为 $P_1 = 0.439$ MPa, $P_2 = 0.191$ MPa, $\alpha = 14^\circ$, $\kappa = 1.82$ ^[11]。

2.2 支护反力的确定

在钢拱架的中性轴附近安装有表面应变计,来监测钢拱架受力的变化。进口 ZK459+621 断面处围岩较破碎,左上钢拱架受力较大,拱架变形达到 53.4 个微应变。以 ZK459+621 断面为研究对象。

$$\Delta D = \mu \varepsilon / S \quad (15)$$

式中: ΔD 为表面位移增量值, mm; S 为传感器灵敏度。

被测点的应变值为:

$$\varepsilon = \Delta D / L \quad (16)$$

式中: L 为传感器两固定点间距, mm。

测点应力值 $\sigma = E\varepsilon$ 支护反力 T_1, T_2 根据监测数据的可得 $T_1 = T_2 = 0.149$ MPa。

2.3 拱顶下沉计算

根据施工过程进出口隧道断面的围岩变形监测数据,选取隧道中 3 个典型断面 ZK459+605、ZK459+615、ZK459+635 的拱顶下沉监测数据,3 个测点 ZK459+605、ZK459+615、ZK459+635 的拱顶累计沉降值分别为 8.0 mm, 7.6 mm, 8.3 mm。取孔 1 扩挖宽度 d 为 8.6 m,依据式(6)~(15)分别计算 $\varphi_1(z_1)$ 、 $\psi_1(z_1)$ 中各分量值,然后根据式(3)~(5)计算出在拱顶处即角度为 90° 处交替法解为 8.08 mm。

2.4 有限元分析

本例采用 abaqus 数值模拟隧道扩挖。建模思路是以符合实际的施工步骤和支护部件来对其进行模拟,考虑了既有隧道和右边已开挖完成隧道影响。根据原工程隧道扩挖的专项施工方案,以 CD 工法将隧道分为 4 个部分进行分步扩挖。

模型几何尺寸采用长宽高分别为 150 m×90 m×40 m 三维模型,网格划分如图 3 所示。各材料的具体参数如表 1。

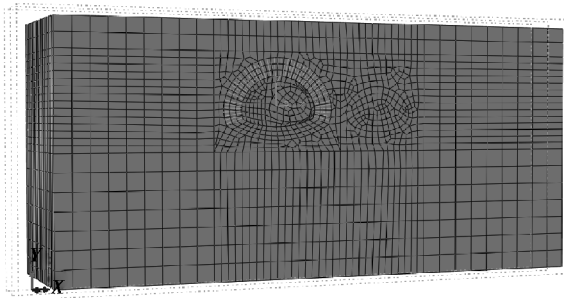


图 3 模型网格划分

Fig. 3 Mesh division of model

表 1 土体及围岩支护材料参数

Table 1 Parameters of soil and surrounding rock supporting material

材料	容重 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	泊松比 μ	弹性模量 E/GPa
土体	19.0	0.42	1.0
初期支护	23.0	0.30	26.2
临时支护	23.0	0.18	30.5
锚杆	78.0	0.30	200

在模拟中,为尽可能地还原实际施工工序,以右上、右下、左上、左下这个顺序依次开挖,每个开挖施工米数为 10 m,每个区域掘进 10 m 作为一个分析步。围岩的初期支护采用锚杆加衬砌支护,其材料参数如表 1,每个部分的支护在各个部分开挖时同步施加。扩挖完成后如图 4,竖向位移最大值为 8.337 mm。

表 2 为解析解与实测值和模拟的对比。由于理论解是从弹性力学角度出发,并且在计算过程中支护力在开挖时就计算在其中,而实际施工时衬砌与开挖有一定时间间隔,会产生较大变化,故所求位移值与实测结果存在出入。但整体而言,计算结果具有较高的精度。

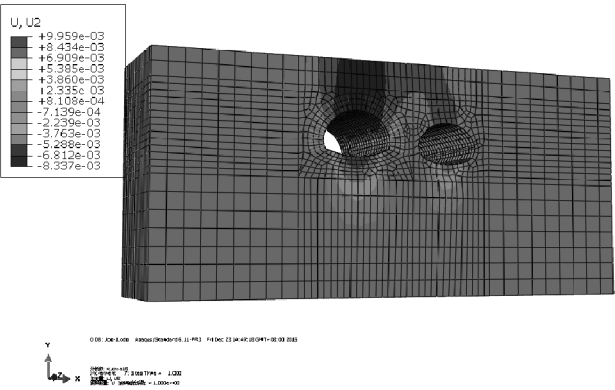


图 4 扩挖完成后竖向位移云图

Fig. 4 Vertical displacement nephogram after expanding excavation

表 2 解析法与实测值和模拟值结果对比

Table 2 Comparison of analytical method with measured and simulated values

测点桩号	计算值/mm	实测值/mm	模拟值/mm
ZK459+605	8.08	8.0	8.337
ZK459+615	8.08	7.6	8.337
ZK459+635	8.08	8.3	8.337

3 隧道单侧扩挖影响因素分析

3.1 扩挖宽度的影响

取扩挖宽度 $\Delta d = 1, 2, \dots, 10 \text{ m}$ 进行计算分析。由于隧道原位扩挖简化为两相切圆,其应力与位移为环对称分布,所以针对孔 1 和孔 2 取 120° 范围内进行计算分析。

对不同扩挖宽度下孔 1、孔 2 围岩的环向、径向、剪切应力、竖向位移及水平位移进行计算,其对应各变化曲线如图 5~图 14 所示。其中,不同扩挖宽度下孔 1、孔 2 各角度的环向、径向、切向应力如图 5~10 所示,其相应的水平、竖向位移变化曲线如图 11~14。

(1)对于环向应力(图 5~6),随着扩挖宽度的增大,孔 1 各个角度环向应力变化较小,在支护力作用下均为压应力;孔 2 的环向应力值变化逐渐地趋向平稳。

(2)对于径向应力(图 7~8),孔 1 各角度的径向应力值随扩挖宽度的增加逐渐增大,当扩挖宽度大于 4 m 后,其径向应力值增加较大;孔 2 各角度径向应力随扩挖宽度的增加不断减小。两孔在

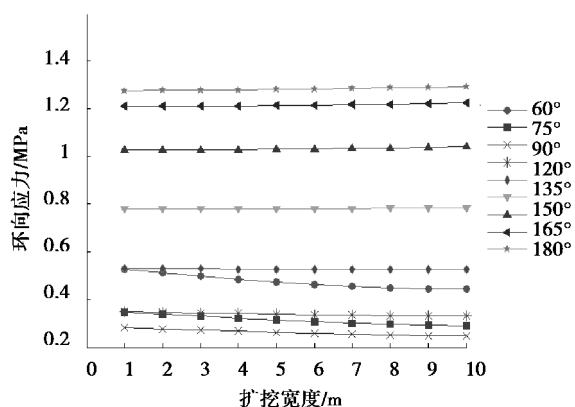


图 5 支护力作用下孔 1 环向应力变化曲线

Fig. 5 Variation of hoop stress with support force of hole 1

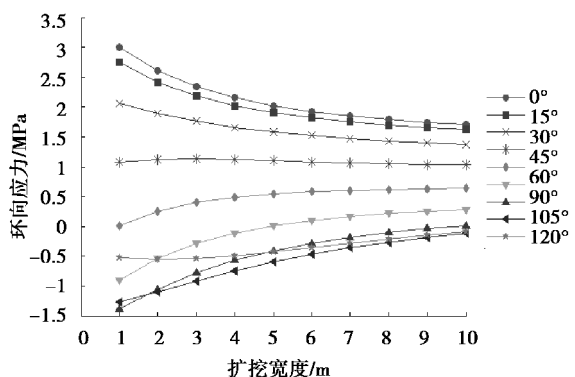


图 6 支护力作用下孔 2 环向应力变化曲线

Fig. 6 Variation of hoop stress with support force of hole 2

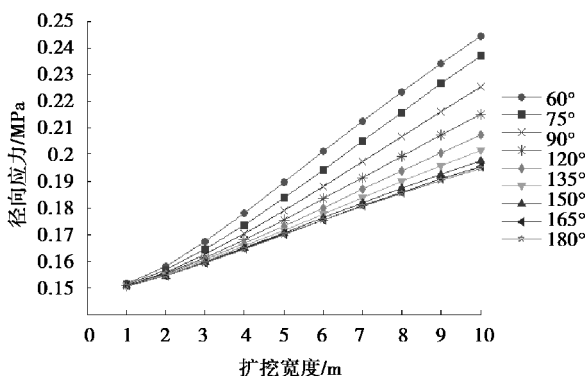


图 7 支护力作用下孔 1 径向应力变化曲线

Fig. 7 Variation of radial stress with support force of hole 1
支护力作用下均为压应力。

(3) 对于剪切应力(图 9~10),随扩挖宽度增大,孔 1 在两孔之间 60°到 90°区域的剪切应力增大明显,且当扩挖宽度越大时,应力增大速率越快。当扩挖宽度大于 4 m 后,其剪切应力值增长较为迅速,在 90°到 180°有减小趋势,但变化小。随着扩挖宽度的增加,孔 2 在 0°到 60°剪切应力值有增大趋势但变化较缓,当角度大于 60°时,其剪切应力

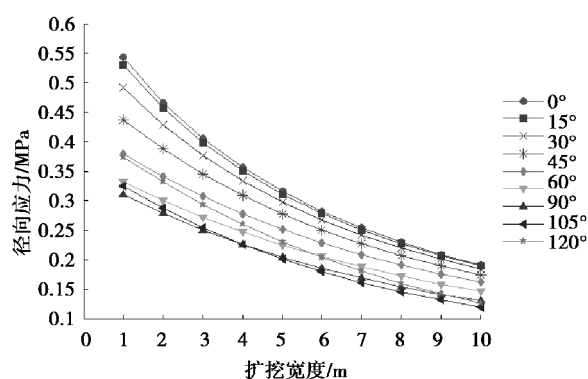


图 8 支护力作用下孔 2 径向应力变化曲线

Fig. 8 Variation of radial stress with support force of hole 2

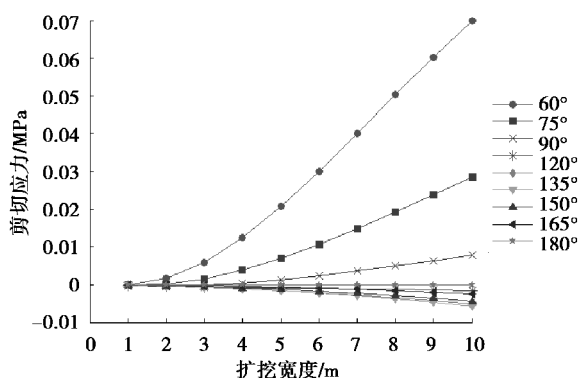


图 9 支护力作用下孔 1 剪切应力变化曲线

Fig. 9 Variation of shear stress with support force of hole 1

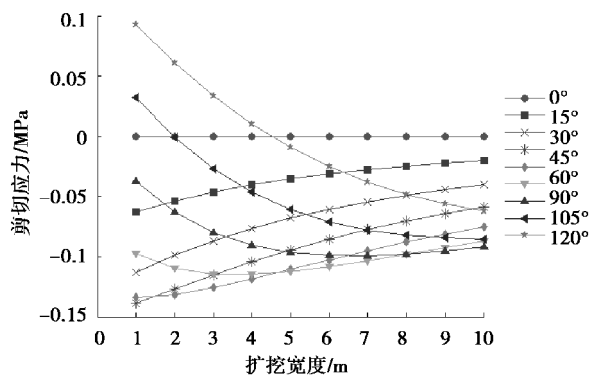


图 10 支护力作用下孔 2 剪切应力变化曲线

Fig. 10 Variation of shear stress with support force of hole 2
变化明显,表现为由正方向逐步转变为负。即在孔 1 和孔 2 之间区域,随着扩挖宽度的增加剪切应力变化较大。

(4) 对于竖向位移(图 11~12),随扩挖宽度增大,孔 1 的竖向位移变化平缓,在靠近拱顶处的位移较大;孔 2 的竖向位移逐渐增加,在越靠近相切区域处的位移变化越明显。

(5) 对于水平位移(图 13~14),随扩挖宽度的增加,孔 1、孔 2 各角度的水平位移有收敛的趋

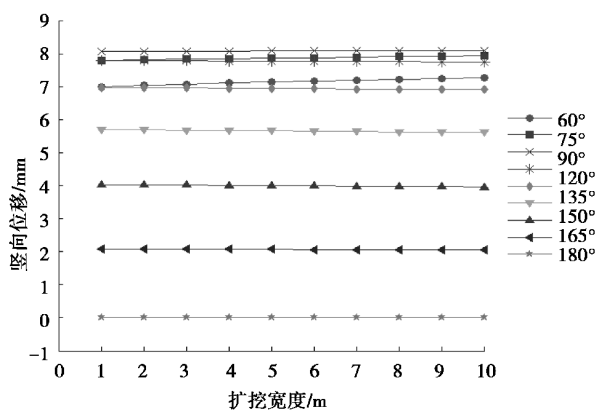


图 11 支护力作用下孔 1 竖向位移变化曲线

Fig. 11 Variation of vertical displacement with support force of hole 1

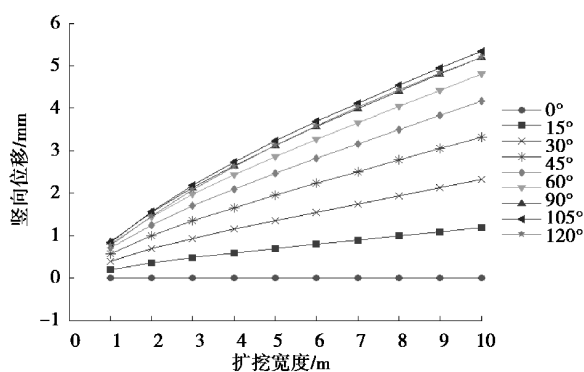


图 12 支护力作用下孔 2 竖向位移变化曲线

Fig. 12 Variation of vertical displacement with support force of hole 2

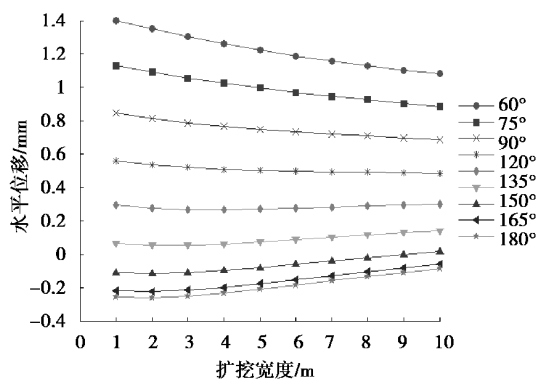


图 13 支护力作用下孔 1 水平位移变化曲线

Fig. 13 Variation of horizontal displacement with support force of hole 1

势。孔 2 的水平位移曲线在扩挖宽度为 4~5 m 处斜率较小变化较平缓。

针对大帽山实例,可考虑扩挖宽度在 4~5 m 之间,而大帽山实际需扩挖 8.6 m,故在实际施工过程中,可考虑分为两次施工进行扩挖。

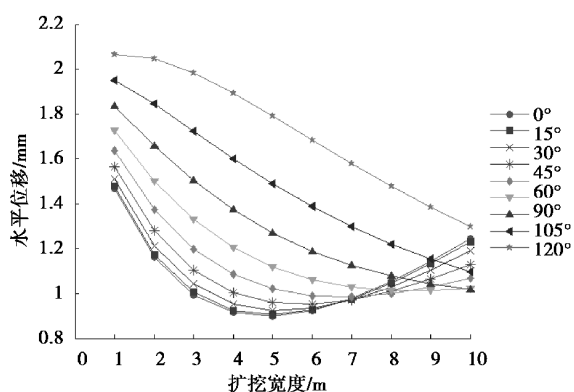


图 14 支护力作用下孔 2 水平位移变化曲线

Fig. 14 Variation of horizontal displacement with support force of hole 2

3.2 支护反力的影响

在不考虑支护反力情况下,对不同扩挖宽度下孔 1、孔 2 各角度的竖向位移及水平位移进行计算其对应各点时程变化曲线如图 15~18 所示。

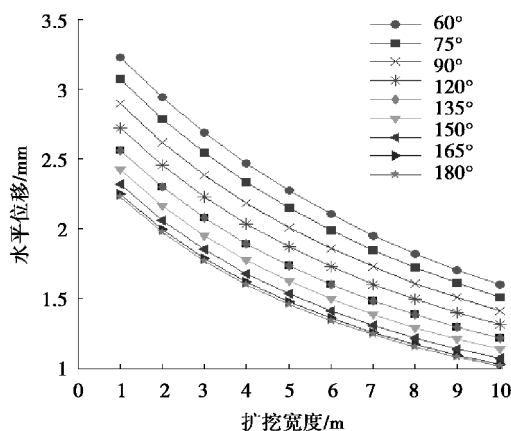


图 15 无支护力作用下孔 1 水平位移变化曲线

Fig. 15 Variation of horizontal displacement without support force of hole 1

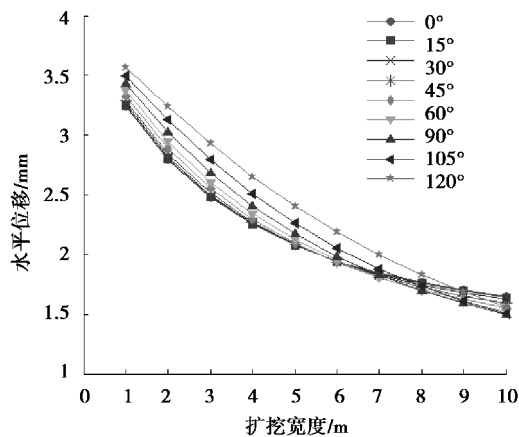


图 16 无支护力作用下孔 2 水平位移变化曲线

Fig. 16 Variation of horizontal displacement without support force of hole 2

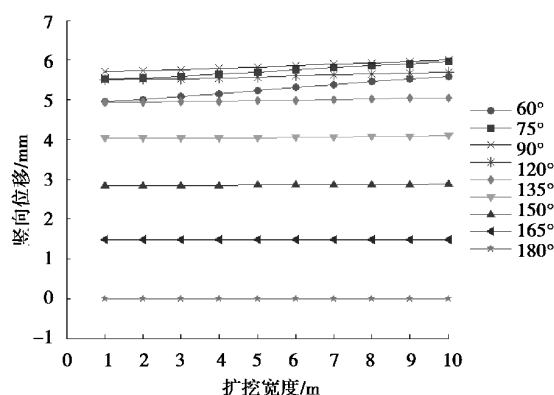


图17 无支护力作用下孔1竖向位移变化曲线

Fig. 17 Variation of vertical displacement without support force of hole 1

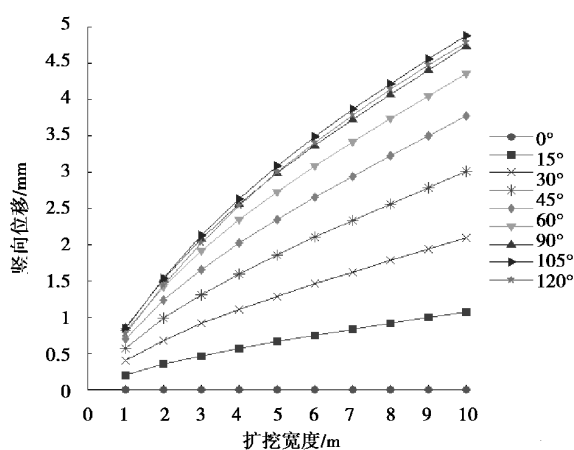


图18 无支护力作用下孔2竖向位移变化曲线

Fig. 18 Variation of vertical displacement without support force of hole 2

相较于无支护的情况,有支护力作用下,隧道扩挖水平位移变形较小且趋向于稳定,竖向位移变化较小。

4 结论

(1)利用等代圆法对隧道断面进行简化,考虑隧道衬砌的支护反力作用,结合交替法得出隧道扩挖的解析表达式,对隧道扩挖的围岩力学特性进行解析求解。结合不考虑支护力的解析解,通过与大帽山隧道原位扩挖工程典型断面的监测数据对比分析,表明考虑支护反力的作用能使交替法更加确切地的计算隧道原位扩挖的围岩力学特性,使其结果更符合实际工程情况。

(2)随着扩挖宽度的增加,既有隧道孔1和开挖部分孔2的应力值与位移值都变化较大,其中原隧道孔1在相切处即开挖施工区域的剪切应力变

化较大,既有隧道在靠近拱顶处的竖向位移较大;扩挖部分孔2的竖向位移在越靠近开挖施工区域处时变化越明显。扩挖部分孔2的环向应力在拱顶处有拉应力产生。

(3)相较于无支护的情况,有支护力作用下,隧道扩挖水平位移变形趋向于稳定,竖向位移变化较小。

(4)虽然考虑了支护力的作用,但由于实际工程的复杂性,使得计算有一些的偏差,并且由于交替法的理论解释基于弹性力学,对于围岩塑性区的理论计算仍需进一步深入研究。

参考文献 (References)

- [1] 胡居义,陈礼彪,黄伦海. 2车道隧道扩建成4车道隧道扩建形式研究[J].公路交通技术,2010(5):93-97. (Hu Juyi, Chen Libiao, Huang Lunhai. Research on expansion modes of two-lane to four-lane tunnels [J]. Technology of Highway and Transport, 2010(5):93-97. (in Chinese))
- [2] 林从谋,张在晨,郑强,等.小净距隧道原位二扩四CD工法软弱围岩稳定性及支护参数研究[J].土木工程学报,2013,46(7):124-131. (Lin Congmou, Zhang Zaichen, Zheng Qiang, et al. Study on the soft surrounding rocks stability and supporting parameters of two-to-four lane tunnel of small clear-distance by CD method [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(7):124-131. (in Chinese))
- [3] 朱根桥,林志,朱育才,等.隧道原位扩建对邻近建筑物影响评估的研究[J].岩土力学,2012,33(2):252-256. (Zhu Genqiao, Lin Zhi, Zhu Yucai, et al. Research on influences of in-situ tunnel extension project on adjacent buildings [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(2):252-256. (in Chinese))
- [4] 杨利福,陈七林,杨艳,等.金鸡山隧道拓宽方案离散元分析[J].武汉大学学报(工学版),2013,46(3):339-344. (Yang Lifu, Chen Qilin, Yang Yan, et al. Discrete element analysis of Jinjishan Tunnel extension alternative schemes [J]. Journal of Wuhan University (Engineering Edition), 2013, 46(3):339-344. (in Chinese))
- [5] 高干,刘元雪,徐光伟,等.隧道扩建爆破震动控制研究[J].地下空间与工程学报,2010,6(6):1285-1293. (Gao Gan, Liu Yuanxue, Xu Guangwei, et al. Study on the blasting vibration in tunnel extension [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2010, 6(6):1285-1293. (in Chinese))

- [6] 张路青,吕爱钟.双孔圆形洞室围岩应力分析的交替法研究[J].岩土力学与工程学报,1998,17(5):534-543. (Zhang Luqing, Lü Aizhong. Study of alternation method for stress analysis surrounding rocks of two circular holes [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(5): 534-543. (in Chinese))
- [7] 苏锋,陈福全,施有志,等.深埋双隧洞开挖的解析延拓法求解[J].岩土力学与工程学报,2012,31(2):360-373. (Su Feng, Chen Fuquan, Shi Youzhi, et al. Analytic continuation solution of deep twin-tunnels [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(2): 360-373. (in Chinese))
- [8] 吴张中,徐光黎,吴立,等.超大断面隧道侧向扩挖施工围岩力学特征研究[J].岩土工程学报,2009,32(2):172-177. (Wu Zhangzhong, Xu Guangli, Wu Li, et al. Mechanical deformation characteristics of rock mass surrounding lateral enlarging excavation of tunnels with ultra-large sections [J]. Chinese Journal of
- Geotechnical Engineering. 2009, 32(2): 172-177. (in Chinese))
- [9] 陈子荫.围岩力学分析中的解析方法[M].北京:煤炭工业出版社,1994. (Chen Ziyin. Analytical method in mechanical analysis of surrounding rock [M]. Beijing: Coal Industry Press, 1994)
- [10] 彭念.原位扩建隧道围岩力学响应机理研究[D].重庆:重庆大学,2010. (Peng Nian. Study on surrounding rock mechanical response mechanism of in-situ enlarged tunnel [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010. (in Chinese))
- [11] 张在晨.超小净距隧道原位扩建围岩变形与地表沉降预测方法研究[D].厦门:华侨大学,2014. (Zhang ZaiCheng. Predicting methods of surrounding rocks deformation and ground surface settlement of tunnel expansion in-situ with super small clear-distance [D]. Xiamen: Huaqiao University, 2014. (in Chinese))

(上接第1444页)

- [8] 中华人民共和国建设部.历史文化名城保护规划规范(GB50357-2005)[S].北京:中国建筑工业出版社,2005. (Ministry of Construction of the People's Republic of China. Code for design of road tunnel historical and cultural city conservation (GB50357-2005) [S]. Beijing: China Building and Architecture Press, 2005. (in Chinese))
- [9] 蒋正良.历史街区保护更新规划探讨——以青岛中山路区域保护更新改造总体规划为例[J].规划师,2015,31(7):110-116. (Jiang Zhengliang. Discussion on the protection and renewal planning of historic district-taking the overall plan of protected reconstruction of Zhongshan in Qingdao as an example [J]. Planners, 2015, 31(7): 110-116. (in Chinese))
- [10] 张丽君.青岛中山路历史街区的保护与开发研究[D].济南:山东大学,2008. (Zhang Lijun. On the reservation and development of Zhongshan Road historic district [D]. Jinan: Shandong University, 2008. (in Chinese))
- [11] 张平,陈志龙,黄欧龙,等.历史街区保护与地下空间开发利用模式研究[J].规划师,2011,27(10):99-101. (Zhang Ping, Chen Zhilong, Huang Oulong, et al. Historical district preservation and underground
- space development [J]. Planners, 2011, 27(10): 99-101. (in Chinese))
- [12] 赵茜,贾霆.建设地下空间实现历史风貌区可持续发展——以汉口原租界区为例[J].华中建筑,2010,28(1):114-116. (Zhao Qian, Jia Ting. Exploit underground space in order to achieve sustainable development of historic and cultural districts: taking the former Hankou's concession district for the example [J]. Huazhong Architecture, 2010, 28(1): 114-116. (in Chinese))
- [13] 都铭.街区共生型地下空间——城市历史地段的保护再生与活力激发[J].华中建筑,2013,31(3):85-90. (Du Ming. Intergrowth between underground space and urban blocks: stimulating activities in conserving urban historical precincts [J]. Huazhong Architecture, 2013, 31(3): 85-90. (in Chinese))
- [14] 张文涛.城市历史建筑及其周边区域地下空间开发利用研究——以西安碑林街区为例[D].西安:西安建筑科技大学,2014. (Zhang Wentao. Research of underground space development and utilization of urban historic district: Blocks of Beilin street [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2014. (in Chinese))