

DOI: 10.16285/j.rsm.2019.0340

基坑开挖引起的旁侧盾构隧道横向受力变化研究

魏 纲¹, 张鑫海², 林心蓓¹, 华鑫欣³

(1. 浙江大学城市学院 土木工程系, 浙江 杭州 310015; 2. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058;
3. 中铁二院华东勘察设计有限责任公司, 浙江 杭州 310004)

摘 要: 为研究运营盾构隧道附近基坑开挖对隧道管片受力的影响, 针对基坑开挖引起旁侧盾构隧道围压变化的机制进行了分析, 提出了一种能描述隧道受力-位移-再平衡过程的附加围压重分布模型, 并推导出附加围压的计算公式。采用修正惯用法计算相应围压作用下的衬砌内力。根据实际工程做算例分析, 研究基坑开挖对盾构隧道围压和内力的影响, 并进行影响因素分析。分析结果表明: 基坑开挖前隧道围压呈“钟形”分布; 当基坑开挖后, 隧道两侧的围压减小, 基坑开挖侧的围压减小量更多; 基坑开挖会使旁侧隧道正负弯矩值和正负剪力值增大, 拱顶和拱底的轴力减小; 随着基坑侧壁应力释放系数的增大, 附加围压和附加弯矩的绝对值都会增加, 而弯矩对基坑开挖卸载的响应更为明显; 埋深较浅的盾构隧道对旁侧基坑开挖的影响更敏感, 埋深较大的隧道, 尤其是埋深大于基坑开挖深度的隧道, 对旁侧基坑开挖影响的敏感度会明显降低; 随着基坑与旁侧隧道净距的增加, 基坑开挖对隧道的影响也会减小。

关 键 词: 基坑开挖; 旁侧盾构隧道; 横向受力; 围压重分布; 修正惯用法

中图分类号: U 25

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2020) 02-0635-11

Variations of transverse forces on nearby shield tunnel caused by foundation pits excavation

WEI Gang¹, ZHANG Xin-hai², LIN Xin-bei¹, HUA Xin-xin³

(1. Department of Civil Engineering, Zhejiang University City College, Hangzhou, Zhejiang 310015, China;
2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China;
3. CREEC East China Survey and Design Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310004, China)

Abstract: In order to study the influence of excavation near shield tunnels on the force of tunnel segments, the mechanism of surrounding pressure change on tunnels caused by nearby excavation is studied. A model of additional confining pressure redistribution is proposed which can describe the process of force-displacement-rebalancing of tunnels, and the calculation formula of additional confining pressure is deduced. The internal force of lining under the corresponding confining pressure is calculated by using the modified routine method. The influence of foundation pit excavation on the confining pressure and internal force of shield tunnels is studied based on the analysis of a practical engineering example, and the influencing factors are analyzed. The analysis results show that confining pressure of the tunnel before excavation presents a "bell shape" distribution. After excavation, the confining pressure on both sides of the tunnel decreases, and the confining pressure on the excavation side decreases more. The excavation of the foundation pit increases the positive and negative bending moments and the positive and negative shear forces of the nearby tunnel, and decreases the axial forces of the arch top and the arch bottom. With the increase of the stress release coefficient of the side wall of the foundation pit, both the absolute values of the additional confining pressure and of the additional bending moment will increase, and the response of bending moment to unloading of foundation pit excavation is more obvious. Shallow shield tunnel is more sensitive to the influence of the excavation of side foundation pit, and the influence of excavation of side foundation pit will decrease obviously when the burial depth of the tunnel is greater than that of the foundation pit excavation. With the increase of the distance between the foundation pit and the nearby tunnel, the influence of the foundation pit excavation on the tunnel will also be reduced.

Keywords: foundation pits excavation; nearby shield tunnel; transverse force; redistribution of confining pressure; modified routine method

收稿日期: 2019-02-13

修回日期: 2019-05-14

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51778576)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51778576).

第一作者简介: 魏纲, 男, 1977 年生, 博士, 教授, 从事地下隧道与周边环境相互影响及风险评估与控制等方面的研究。E-mail: weig@zucc.edu.cn

1 引言

随着城市轨道交通发展和地下空间开发利用,在运营盾构隧道附近进行基坑开挖的工程越来越多。如杭州地铁 2 号线人民广场站附近深基坑距离盾构隧道最近约 9.5 m^[1],上海西藏南路越江盾构隧道附近基坑最近距离为 9.7 m^[2],上海轨道交通 2 号线南京西路站—静安寺站区间南侧基坑距离盾构隧道最近 8 m^[3]。此类邻近基坑大多位于隧道旁侧,基坑侧壁的卸荷作用会通过土体传递给旁侧盾构隧道,在隧道结构上引起附加荷载,破坏管片结构的受力平衡,从而产生变形甚至损伤。为保证轨道线路运营,相关规范给出了较为严格的隧道变形控制要求^[4]。因此,研究基坑开挖对旁侧盾构隧道的影响具有重要的应用价值。

针对此类工程问题,国内外已展开了一些研究。研究方法主要可归纳为:实测数据统计分析^[5-6]、数值模拟^[7-8]、理论计算^[9-10]和离心模型试验^[11]。其中大多对基坑开挖引起的旁侧隧道纵向变形进行了研究,对于衬砌围压变化以及横向受力的研究较少。郑刚等^[7]采用二维有限元模型分析在不同围护结构变形模式和变形量的情况下,不同位置隧道的横截面位移,并进行了影响区划分。胡海英等^[8]通过数值模拟得到基坑开挖引起的隧道围压变化,并计算了管片的内力。在隧道横向受力和变形方面的研究多为数值模拟,缺乏为足尺寸盾构管片加载试验提供依据的衬砌围压变化理论解。因此,迫切需要探索基坑开挖引起隧道围压变化的理论计算方法,进而研究隧道结构的受力,为地铁隧道运营安全提供理论支持。

本文先根据基坑开挖的卸载模型,采用 Mindlin 解计算基坑开挖引起的土体附加应力,得到隧道横向附加荷载分布。再对基坑开挖引起隧道围压变化的机制进行分析研究,提出能描述隧道横向受力位移再平衡的附加围压重分布模型,并推导附加围压的计算公式。根据基坑还未施工时的正常工况荷载组合,得到隧道初始围压。再叠加本文模型得到的附加围压,得到基坑开挖后隧道的最终围压。运用曙光盾构隧道设计分析软件,采用修正惯用法计算相应围压作用下的隧道衬砌内力。根据实际工程做算例分析,研究基坑开挖对隧道衬砌围压和内力的影响。并对侧壁应力释放率、基坑与隧道间距和隧道埋深等影响因素进行分析。

2 本文方法

2.1 力学计算模型

理论计算模型如图 1 所示,在盾构隧道旁侧开挖矩形基坑,在地面基坑中心 o 处建立坐标系, x 轴和 y 轴分别垂直和平行于隧道轴线, z 轴以竖直向下为正方向。沿 y 轴方向的基坑开挖尺寸为 L ,沿 x 轴方向的基坑开挖尺寸为 B ,基坑开挖深度为 d 。隧道轴线与基坑中心的水平距离为 a ,盾构隧道外径为 D ,隧道轴线埋深为 h ,基坑围护结构至隧道的最小净距为 s ($s = a - B/2 - D/2$)。基坑底部以下围护结构插入深度为 d_0 ,基坑围护结构总高度为 H ($H = d + d_0$)。由此可得隧道轴线上任一点坐标为 (a, l, h) , l 为隧道上计算点沿 y 轴方向与基坑开挖中心的水平距离。如图 1(a)所示,基坑 4 个侧壁的编号分别为①、②、③、④。侧壁①和③平行于隧道轴线,侧壁①位于隧道旁侧。侧壁②和④垂直于隧道轴线。

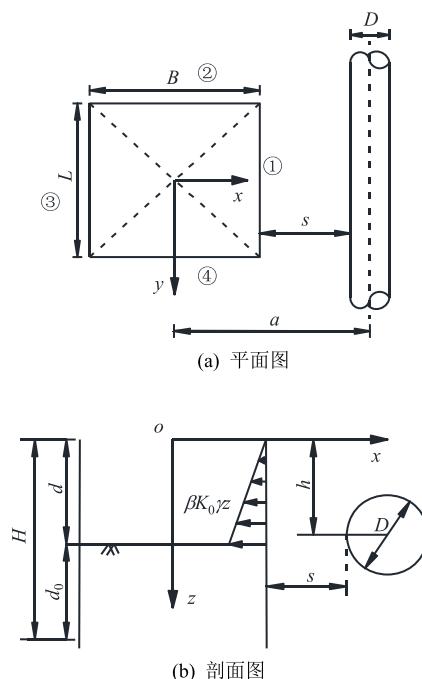


图 1 基坑与旁侧盾构隧道位置关系图

Fig.1 Schematic diagram of relationship between the excavated foundation pit and the nearby shield tunnel

采用悬臂式围护结构的基坑,围护结构需插入坑底一定深度,坑底卸载效应在围护结构的遮拦作用下无法直接作用于坑外土层。魏纲等^[12]采用残余应力法并考虑坑底围护结构侧摩阻力求得围护结构底端平面的等效荷载,再求等效荷载引起的土体附加应力。根据该方法的计算结果可知,坑底卸载作用在坑底以下围护结构的遮拦作用下对旁侧隧道的

影响较小, 相比侧壁卸载的直接作用可忽略不计。张治国等^[10]在计算基坑开挖产生的旁侧隧道附加荷载时, 将基坑所有侧壁卸载作用进行了叠加。据分析, 基坑侧壁③与隧道间隔着已挖去土体的基坑, 侧壁③的卸载作用无法传递至隧道, 故本文计算隧道附加荷载过程中仅考虑侧壁①和侧壁②、④的卸载作用。

2.2 基坑卸载引起的隧道围压变化

2.2.1 基坑侧壁卸载引起隧道的附加荷载

在计算附加荷载过程中假定不考虑隧道结构存在的影响。根据 Mindlin 应力解^[13], 在半无限弹性体中 (x_1, y_1, z_1) 处作用一沿 x 轴方向的单位力, 计算点 (x, y, z) 处产生的沿 x 方向附加应力为

$$\begin{aligned} \sigma_{xx}(x, y, z, x_1, y_1, z_1) = & \frac{(x-x_1)}{8\pi(1-\mu)} \left\{ \frac{1-2\mu}{M^3} - \frac{(1-2\mu)(5-4\mu)}{N^3} + \frac{3(3-4\mu)(x-x_1)^2}{N^5} + \right. \\ & \left. \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{N(N+z+z_1)^2} \left[3 - \frac{(x-x_1)^2(3N+z+z_1)}{N^2(N+z+z_1)} \right] + \right. \\ & \left. \frac{3(x-x_1)^2}{M^5} - \frac{6z_1}{N^5} \cdot \left[3z_1 - (3-2\mu)(z+z_1) + \frac{5(x-x_1)^2 z}{N^2} \right] \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

沿 z 方向附加应力为

$$\begin{aligned} \sigma_{zx}(x, y, z, x_1, y_1, z_1) = & \frac{(x-x_1)}{8\pi(1-\mu)} \left\{ \frac{-1+2\mu}{M^3} + \frac{1-2\mu}{N^3} + \right. \\ & \left. \frac{3(z-z_1)^2}{M^5} + \frac{3(3-4\mu)(z+z_1)^2}{N^5} - \frac{6z_1}{N^5} \left[z_1 + (1-2\mu)(z+z_1) + \frac{5z(z+z_1)^2}{N^2} \right] \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: μ 为土的泊松比;

$$M = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z-z_1)^2};$$

$$N = \sqrt{(x-x_1)^2 + (y-y_1)^2 + (z+z_1)^2}.$$

在半无限弹性体中 (x_1, y_1, z_1) 处作用一沿 y 轴方向的单位力, 计算点 (x, y, z) 处产生的沿 x 方向附加应力为

$$\begin{aligned} \sigma_{xy}(x, y, z, x_1, y_1, z_1) = & \frac{(y-y_1)}{8\pi(1-\mu)} \left\{ \frac{1-2\mu}{M^3} - \frac{(1-2\mu)(5-4\mu)}{N^3} + \frac{3(3-4\mu)(y-y_1)^2}{N^5} + \right. \\ & \left. \frac{4(1-\mu)(1-2\mu)}{N(N+z+z_1)^2} \left[3 - \frac{(y-y_1)^2(3N+z+z_1)}{N^2(N+z+z_1)} \right] + \right. \\ & \left. \frac{3(y-y_1)^2}{M^5} - \frac{6z_1}{N^5} \cdot \left[3z_1 - (3-2\mu)(z+z_1) + \frac{5(y-y_1)^2 z}{N^2} \right] \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{zy}(x, y, z, x_1, y_1, z_1) = & \frac{(y-y_1)}{8\pi(1-\mu)} \left\{ \frac{-1+2\mu}{M^3} + \frac{1-2\mu}{N^3} + \right. \\ & \left. \frac{3(z-z_1)^2}{M^5} + \frac{3(3-4\mu)(z+z_1)^2}{N^5} - \frac{6z_1}{N^5} \cdot \left[z_1 + (1-2\mu)(z+z_1) + \frac{5z(z+z_1)^2}{N^2} \right] \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

将基坑开挖的卸载效应简化为侧壁上分布向基坑内侧的水平荷载, 荷载分布规律可根据下式进行计算:

$$p = \beta K_0 \gamma z \quad (5)$$

式中: p 为基坑侧壁卸载 (kN/m^2); γ 为土的重度 (kN/m^3), 可取开挖土体的加权平均值; K_0 为静止土压力系数; β 为基坑侧壁应力释放系数, 基坑侧壁的卸载可以认为是开挖之后围护结构所受的侧向荷载和初始状态的水平静止土压力之差。周顺华等^[14]认为侧壁的应力释放全部由支撑体系平衡, 即侧壁无卸载, $\beta=0$ 。而实际基坑围护结构均会发生位移, 侧壁都有相应的卸载作用, 尤其对于基坑旁侧隧道, 卸载作用位置较近, 邻近侧壁的卸载作用是最主要的影响因素, 不可忽略。张治国等^[10]直接将全部静止土压力作为卸载, 即 $\beta=1$ 。该取值没有考虑基坑围护结构承担土压力的作用, 尤其对于有较强刚度的内支撑围护结构并不合理。实际工程中该卸载大小受地质条件、围护结构、施工技术水平等多种因素的影响, 本文在算例分析中可暂取 $\beta=50\%$, 并在下文第 4 节中根据不同的 β 取值做影响因素分析。

取编号为①的基坑侧壁微单元 ($B/2, \zeta, \eta$), 根据式 (1)、(2) 和式 (5) 进行积分计算可得到, 侧壁①卸载引起的隧道衬砌外侧的土体 x 方向和 z 方向附加应力分别为

$$\begin{aligned} \sigma_{ax1}(z, l) = & -\beta K_0 \gamma \int_0^d \int_{-L/2}^{L/2} \eta \sigma_{xx}(a-D/2, l, z, B/2, \zeta, \eta) d\zeta d\eta \quad (6) \end{aligned}$$

$$\sigma_{az1}(x, l) = -\beta K_0 \gamma \int_0^d \int_{-L/2}^{L/2} \eta \sigma_{zx}(x, l, h-D/2, B/2, \xi, \eta) d\xi d\eta \quad (7)$$

取编号为②的基坑侧壁微单元 $(\xi, -L/2, \eta)$, 根据式(3)、(4)和式(5)进行积分计算可得到, 侧壁②卸载引起的隧道衬砌外侧的土体 x 方向和 z 方向附加应力分别为

$$\sigma_{ax2}(z, l) = \beta K_0 \gamma \int_0^d \int_{-B/2}^{B/2} \eta \sigma_{xy}(a-D/2, l, z, \xi, -L/2, \eta) d\xi d\eta \quad (8)$$

$$\sigma_{az2}(x, l) = \beta K_0 \gamma \int_0^d \int_{-B/2}^{B/2} \eta \sigma_{zy}(x, l, h-D/2, \xi, -L/2, \eta) d\xi d\eta \quad (9)$$

同理可得, 侧壁④卸载引起的隧道衬砌外侧的土体 x 方向和 z 方向附加应力分别为

$$\sigma_{ax4}(z, l) = -\beta K_0 \gamma \int_0^d \int_{-B/2}^{B/2} \eta \sigma_{xy}(a-D/2, l, z, \xi, L/2, \eta) d\xi d\eta \quad (10)$$

$$\sigma_{az4}(x, l) = -\beta K_0 \gamma \int_0^d \int_{-B/2}^{B/2} \eta \sigma_{zy}(x, l, h-D/2, \xi, L/2, \eta) d\xi d\eta \quad (11)$$

将基坑 3 个侧壁卸荷效应引起的附加应力叠加, 可得到基坑开挖引起的旁侧隧道 x 方向和 z 方向附加荷载分布分别为

$$p_{ax}(z, l) = \sigma_{ax1}(z, l) + \sigma_{ax2}(z, l) + \sigma_{ax4}(z, l) \quad (12)$$

$$p_{az}(x, l) = \sigma_{az1}(x, l) + \sigma_{az2}(x, l) + \sigma_{az4}(x, l) \quad (13)$$

2.2.2 隧道位移协调过程中附加围压的重分布

基坑开挖会引起隧道的附加荷载, 作用于隧道的围压平衡被破坏, 合力作用下隧道产生位移, 隧道与土体协调变形的过程中隧道围压也同时协调重分布, 直至受力平衡, 隧道变形趋于稳定。实际这是一个同时进行的整体过程, 为便于研究, 本文将这一过程分成 3 个阶段。第 1 阶段如图 2(a)所示, 隧道的基坑开挖侧受到水平向和竖向附加荷载 p_{ax} 和 p_{az} 作用, 附加荷载的作用使得隧道的围压不平衡, 隧道会向围压较小一侧位移, 隧道轴线就产生纵向变形。横截面也就沿附加荷载作用方向产生了整体位移, 如图 2(b)所示, 第 2 阶段横截面位移过程中, 位移方向侧的土体压缩, 围压增加, 水平向和竖向附加荷载的增量分别为 $\Delta p'_{ax}$ 和 $\Delta p'_{az}$; 位移反方向侧的土体应力得到释放, 围压减小, 水平向和竖向附加荷载的增量分别为 $\Delta p''_{ax}$ 和 $\Delta p''_{az}$ 。由于隧道横截面是整体移动, 两侧的位移值相同, 所以可认为隧道两侧附加荷载增量值相同, 即 $\Delta p'_{ax} = \Delta p''_{ax}$,

$\Delta p'_{az} = \Delta p''_{az}$ 。并可将各方向上的附加荷载增量简化为矩形均布荷载。第 3 阶段当隧道变形稳定时, 如图 2(c)所示, 两侧水平向附加荷载分别为 p'_{ax} 和 p''_{ax} , 上下竖向附加荷载分别为 p'_{az} 和 p''_{az} 。隧道变形稳定时的附加荷载满足以下公式:

$$\left. \begin{aligned} p'_{ax}(z, l) &= p_{ax}(z, l) - \Delta p'_{ax} \\ p'_{az}(x, l) &= p_{az}(x, l) - \Delta p'_{az} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

$$\left. \begin{aligned} p''_{ax}(z, l) &= \Delta p''_{ax} \\ p''_{az}(x, l) &= \Delta p''_{az} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

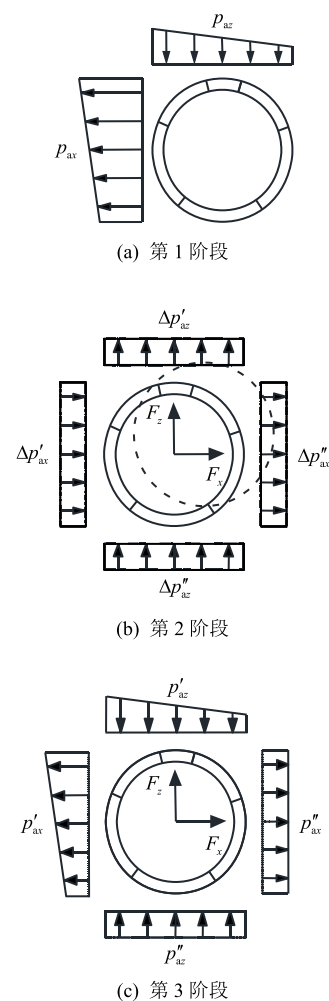


图 2 基坑开挖附加荷载作用下隧道围压重分布示意图
Fig.2 Schematic diagram of tunnel confining pressure redistribution with additional load of excavation

同时该截面的管片环还与相邻管片环之间发生错台, 并受到相邻管片环的剪切约束作用, 令沿 x 轴方向剪切力为 F_{sx} , 沿 y 轴方向剪切力为 F_{sy} 。最终各项作用力在水平向和竖向上都达到平衡, 隧道横截面位移达到稳定。由此可以得到以下等式:

$$\int_{h-D/2}^{h+D/2} p'_{ax}(z, l) dz = \int_{h-D/2}^{h+D/2} p''_{ax}(z, l) dz + F_{sx}(l) \quad (16)$$

$$\int_{h-D/2}^{h+D/2} p'_{az}(x, l) dx = \int_{h-D/2}^{h+D/2} p''_{az}(x, l) dx + F_{sz}(l) \quad (17)$$

将式(14)、(15)分别代入式(16)、(17)中, 可得

$$\int_{h-D/2}^{h+D/2} p_{ax}(z, l) dz = \int_{h-D/2}^{h+D/2} \Delta p'_{ax} dz + \int_{h-D/2}^{h+D/2} \Delta p''_{ax} dz + F_{sx}(l) \quad (18)$$

$$\int_{h-D/2}^{h+D/2} p_{az}(x, l) dx = \int_{h-D/2}^{h+D/2} \Delta p'_{az} dx + \int_{h-D/2}^{h+D/2} \Delta p''_{az} dx + F_{sz}(l) \quad (19)$$

由于各方向上的附加荷载增量简化为矩形均布荷载, 且 $\Delta p'_{ax} = \Delta p''_{ax}$, $\Delta p'_{az} = \Delta p''_{az}$, 根据式(18)、(19)可得

$$\Delta p'_{ax} = \Delta p''_{ax} = \frac{\int_{h-D/2}^{h+D/2} p_{ax}(z, l) dz - F_{sx}(l)}{2D} \quad (20)$$

$$\Delta p'_{az} = \Delta p''_{az} = \frac{\int_{h-D/2}^{h+D/2} p_{az}(x, l) dx - F_{sz}(l)}{2D} \quad (21)$$

将式(20)、(21)代入式(14)、(15)可得

$$\left. \begin{aligned} p'_{ax}(z, l) &= p_{ax}(z, l) - \frac{\int_{h-D/2}^{h+D/2} p_{ax}(z, l) dz - F_{sx}(l)}{2D} \\ p'_{az}(x, l) &= p_{az}(x, l) - \frac{\int_{h-D/2}^{h+D/2} p_{az}(x, l) dx - F_{sz}(l)}{2D} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

$$\left. \begin{aligned} p''_{ax}(z, l) &= \frac{\int_{h-D/2}^{h+D/2} p_{ax}(z, l) dz - F_{sx}(l)}{2D} \\ p''_{az}(x, l) &= \frac{\int_{h-D/2}^{h+D/2} p_{az}(x, l) dx - F_{sz}(l)}{2D} \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

同时根据附加荷载的分布可以得到变形稳定后的隧道衬砌附加围压为

$$p_{ar}(\theta, l) = \begin{cases} p''_{ax}(h - \frac{D \cos \theta}{2}, l) \sin \theta + \\ p'_{az}(a + \frac{D \sin \theta}{2}, l) \cos \theta, & 0 \leq \theta < \frac{\pi}{2} \\ p''_{ax}(h - \frac{D \cos \theta}{2}, l) \sin \theta + \\ p''_{az}(a + \frac{D \sin \theta}{2}, l) \cos \theta, & \frac{\pi}{2} \leq \theta < \pi \\ p'_{ax}(h - \frac{D \cos \theta}{2}, l) \sin \theta + \\ p'_{az}(a + \frac{D \sin \theta}{2}, l) \cos \theta, & \pi \leq \theta < \frac{3\pi}{2} \\ p'_{ax}(h - \frac{D \cos \theta}{2}, l) \sin \theta + \\ p'_{az}(a + \frac{D \sin \theta}{2}, l) \cos \theta, & \frac{3\pi}{2} \leq \theta < 2\pi \end{cases} \quad (24)$$

根据相关实测数据^[1, 15]可以发现, 隧道位移沿轴线呈正态分布, 开挖区间对应的隧道范围位移值最大。根据盾构隧道错台变形模型^[14]的研究结果表明, 纵向位移最大位置处的管片基本不发生环间错台。即理论上基坑开挖中心 ($y=0$) 对应的隧道位置处 ($l=0$), 管片环整体位移量最大, 而错台量为0。不存在环间错台引起的剪切约束力, 即 $F_{sx}(0) = F_{sy}(0) = 0$ 。代入式(22)、(23)得到隧道变形稳定后纵向位移最大处截面附加荷载的分布为

$$\left. \begin{aligned} p'_{ax}(z, 0) &= p_{ax}(z, 0) - \frac{\int_{h-D/2}^{h+D/2} p_{ax}(z, 0) dz}{2D} \\ p'_{az}(x, 0) &= p_{az}(x, 0) - \frac{\int_{h-D/2}^{h+D/2} p_{az}(x, 0) dx}{2D} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

$$\left. \begin{aligned} p''_{ax}(z, 0) &= \frac{\int_{h-D/2}^{h+D/2} p_{ax}(z, 0) dz}{2D} \\ p''_{az}(x, 0) &= \frac{\int_{h-D/2}^{h+D/2} p_{az}(x, 0) dx}{2D} \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

2.3 初始荷载及内力计算

目前国内外软弱地层中的盾构隧道衬砌设计计算还是以荷载-结构法为主, 其中修正惯用法以其受力明确、计算思路清晰和简单实用等诸多优点而被广泛地应用。惯用法和修正惯用法计算中都假设管片环是刚度均一的圆环, 修正惯用法是在惯用法的基础上引入了弯曲刚度有效率和弯矩提高率, 以衬砌环整体刚度的降低来体现管片接头对衬砌结构受力影响。

当隧道旁侧基坑还未开始施工时, 隧道承受初始的地层水土压力等荷载作用。本文考虑的隧道初始工况下的荷载组合如图3(a)所示。图中初始工况荷载组合包括: ①衬砌自重 g ; ②上覆土竖向土压力 q ; ③侧向主动土压力 p_e ; ④静水压力 p_w ; ⑤拱底反力 q_R ; ⑥各项荷载作用下管片环发生变形后侧向的土体抗力 p_k 。当基坑开挖完成后, 根据上文2.2节方法计算得到的隧道变形稳定后的隧道衬砌附加围压如图3(b)所示。

本文在初始荷载的围压基础上, 叠加以上方法计算得到基坑开挖引起的隧道计算截面附加围压, 运用曙光盾构隧道设计分析软件, 采用修正惯用法计算其内力的变化, 以研究基坑开挖对旁侧隧道受力的影响。

3 算例分析

3.1 算例工况

本文以杭州地铁2号线盾构隧道旁侧一项深基

坑工程作为实际案例。工程位于萧山区市心中路与金城路交叉口附近,隧道旁侧基坑开挖尺寸 $L=68\text{ m}$, $B=72\text{ m}$, 开挖深度 $d=15.8\text{ m}$, 地下连续墙深入地面以下 37.2 m 。隧道埋深 $h=14.3\text{ m}$, 基坑围护结构边线距离隧道最小净距 $s=9.5\text{ m}$ 。盾构隧道衬砌外径 $D=6.2\text{ m}$, 采用 C50 混凝土管片, 厚度 $t=0.35\text{ m}$, 环宽 $D_t=1.2\text{ m}$; 施工过程中靠近地铁隧道一侧坑外不降水, 地下水位埋深约为 1.02 m , 基坑开挖过程中水位波动较小, 计算中不考虑地下水位的变化。靠近地铁隧道一侧的土层分布及相应参数如表 1 所示。

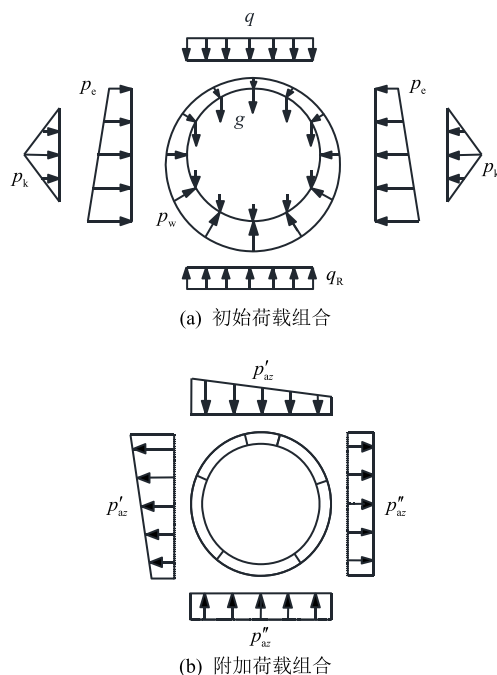


图 3 初始荷载组合与附加荷载组合示意图

Fig.3 Schematic diagram of initial load combination and additional load combination

表 1 土层分布及物理力学参数

Table 1 Soil layer distribution and physical and mechanical parameters

层号	岩土类型	厚度 / m	天然重度 / (kN · m ⁻³)	饱和重度 / (kN · m ⁻³)	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 φ / (°)
①-2	杂填土	2.2	18.7	19.0	10.0	8.0
②-1	粉质黏土	1.7	19.2	19.3	25.6	10.0
③-1	砂质粉土	4.0	18.3	18.6	3.1	25.5
③-2	砂质粉土	2.8	19.2	19.4	3.2	25.8
③-3	粉砂夹粉土	4.3	19.7	19.9	3.7	26.0
③-3 夹	砂质粉土	2.0	19.0	19.2	3.5	25.6
④-1	淤泥质粉质黏土	13.3	17.2	17.4	19.8	8.2

3.2 计算结果

在初始荷载的围压基础上叠加本文方法计算得到的基坑开挖引起的隧道计算截面附加围压, 采

用修正惯用法计算其内力的变化, 以研究基坑开挖对旁侧隧道受力的影响。

图 4 为该案例中基坑开挖前和基坑开挖后的隧道围压计算值。如图所示, 基坑开挖前隧道全周的围压呈“钟形”分布, 下部围压较上部围压更大, 主要是由于两侧土压力及水压力随深度的增加而增加。以上顶点为 0° , 顺时针方向角度增加。 $0^\circ \sim 90^\circ$ 之间围压较小, 约为 200 kPa 。 $90^\circ \sim 120^\circ$ 之间围压快速增加, 到 150° 左右围压达到最大, 约为 244.96 kPa 。隧道底部围压为 234.92 kPa 。基坑开挖前隧道左右两侧围压呈对称分布。当基坑开挖后, 隧道两侧的围压减小, 顶部和底部的围压稍有增加。

图 5 为基坑开挖引起的旁侧隧道附加围压, 即围压变化值, 以围压减小为负。如图所示, 基坑开挖引起的旁侧隧道附加围压主要呈负值, 仅顶部和底部围压有所增加, 增加量也仅为 0.96 kPa 。隧道右侧, 即基坑开挖侧的围压减小量比隧道左侧更多。这与文献[16]中通过缩尺寸室内模型试验得到的围压变化分布规律吻合。本案例中围压减小量最大为 10.03 kPa , 位于 285° 处。隧道的基坑开挖侧上部附加围压绝对值大于下部附加围压绝对值, 即基坑开挖侧隧道上部的围压减小量要较下部更大。

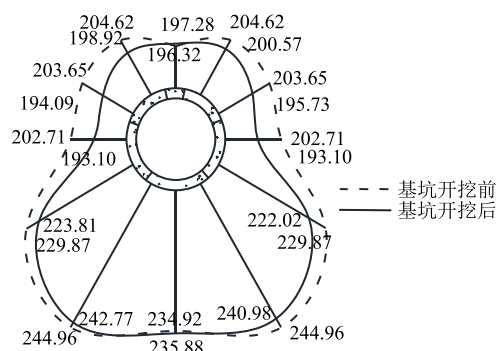


图 4 基坑开挖前后的围压对比图 (单位: kPa)

Fig.4 Comparison of confining pressures before and after excavation of foundation pit (unit: kPa)

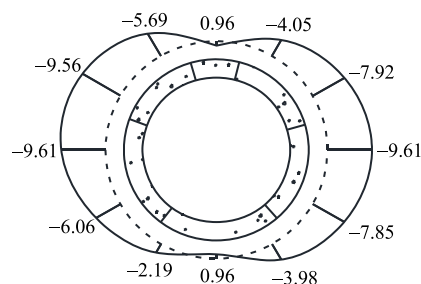


图 5 基坑开挖在旁侧盾构隧道衬砌上产生的附加围压 (单位: kPa)

Fig.5 Additional confining pressures on shield tunnel caused by nearby excavation (unit: kPa)

采用修正惯用法分别对基坑开挖前后的隧道衬砌环内力进行分析,图 6(a)~6(c)分别为弯矩、剪力和轴力的对比图,表 2 为基坑开挖前后各内力极值的对比。如图 6(a)所示,基坑开挖前后的弯矩分布规律基本一致,隧道顶部和底部的衬砌内侧受拉,呈正弯矩,衬砌拱腰部外侧受拉,呈负弯矩,两侧负弯矩区域呈对称分布。拱底正弯矩分布范围约 90° ,拱顶正弯矩范围略小于拱底,但最大弯矩值大于拱底。根据表 2 可知,基坑开挖前,在 0° 的位置处出现最大正弯矩 $77.07 \text{ kN}\cdot\text{m}$,在 77.73° 处出现最大负弯矩 $-58.21 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。基坑开挖后较基坑开挖前,无论是正弯矩还是负弯矩都增加。最大正弯矩 $108.39 \text{ kN}\cdot\text{m}$,同样位于 0° 处,较基坑开挖前增加 40.64% 。最大负弯矩 $-86.45 \text{ kN}\cdot\text{m}$,位于基坑开挖侧 278.18° 处,较基坑开挖前增加 48.51% 。

如图 6(b)所示,隧道截面上 0° 、 80° 、 18° 和 280° 附近的位置剪力存在零点。衬砌的上半部分剪力要大于下半部分。基坑开挖后较基坑开挖前,正负剪力都有增大。根据表 2 可知,基坑开挖前,最大正负剪力绝对值相同,都为 43.29 kN ,分别位于 323.18° 和 36.82° 处。基坑开挖后,最大正负剪力的位置未发生变化,剪力绝对值增大至 59.54 kN ,相比开挖前增大 37.54% 。

如图 6(c)所示,隧道衬砌轴力在拱腰处较大,顶部轴力小于底部轴力,轴力分布整体呈左右对称。根据表 2 可知,基坑开挖前后轴力最大值增加较少,最大轴力的位置从开挖前 98.18° 处略有上移至 94.09° 处。基坑开挖前 0° 位置处的轴力为 487.29 kN ,基坑开挖之后减小至 454.64 kN ,减小了 6.7% 。

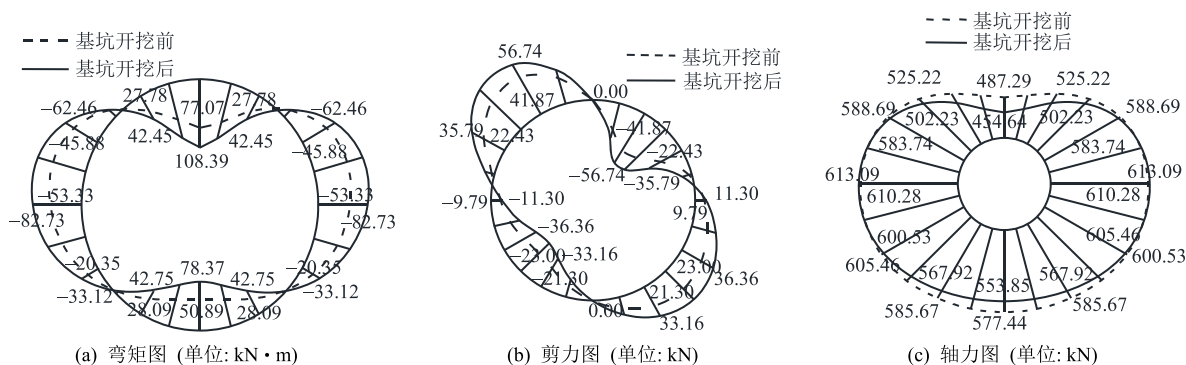


图 6 基坑开挖前后的衬砌内力对比图

Fig.6 Comparison of tunnel lining internal forces before and after excavation

表 2 基坑开挖前后的衬砌内力极值及分布位置

Table 2 Extreme values of internal forces of tunnel lining and their location before and after excavation

工况	弯矩最大值		弯矩最小值		剪力最大值		剪力最小值		轴力最大值		轴力最小值	
	数值	位置	数值	位置	数值	位置	数值	位置	数值	位置	数值	位置
	/($\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)	/($^\circ$)	/($\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$)	/($^\circ$)	/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	/($^\circ$)	/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	/($^\circ$)	/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	/($^\circ$)	/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)	/($^\circ$)
基坑开挖前	77.07	0.00	-58.21	77.73	43.29	323.18	-43.29	36.82	611.38	98.18	487.29	0.00
基坑开挖后	108.39	0.00	-86.45	278.18	59.54	323.18	-59.54	36.82	613.60	94.09	454.64	0.00

4 影响因素分析

4.1 基坑侧壁应力释放系数 β 对隧道受力的影响

部分研究中并未考虑侧壁卸载作用^[14],而实际基坑围护结构均会发生位移,侧壁处都有相应的卸载作用,尤其对于基坑旁侧隧道,邻近基坑侧壁的卸载作用影响较大,不可忽略^[12]。在研究基坑侧壁的卸载作用影响中,有将全部静止土压力作为卸载^[10],即基坑侧壁应力释放系数 $\beta=100\%$ 。也有研究中根据有限元模拟结果取 $\beta=25\%$ ^[17]。本文为研究应力释放系数 β 取值对隧道受力的影响,据此分别取

$\beta=25\%$ 、 $\beta=50\%$ 、 $\beta=75\%$ 和 $\beta=100\%$,计算得到基坑开挖引起的隧道附加围压,见图 7。

如图 7 所示,附加围压仅在顶部和底部呈正值,且数值较小,其他范围主要呈负值,即基坑开挖主要使隧道围压减小,且随着基坑侧壁应力释放系数 β 增加,基坑围压减小量增加。不同 β 附加围压最大绝对值均出现在 285° 处,即基坑开挖侧衬砌拱腰偏上的位置。应力释放系数取值分别为 $\beta=25\%$ 、 $\beta=50\%$ 、 $\beta=75\%$ 和 $\beta=100\%$ 时,附加围压最大绝对值分别为 5.01 、 10.03 、 15.04 、 20.06 kPa ,分别占基坑开挖前相应位置初始围压的 2.45% 、 4.91% 、

7.36%和 9.81%。

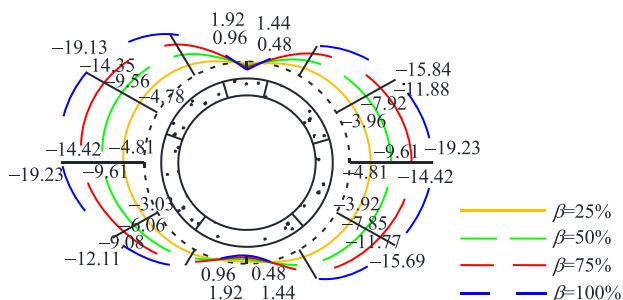


图 7 β 取不同值时基坑开挖产生的附加围压 (单位: kPa)
Fig.7 Additional confining pressures caused by excavation with different values of β (unit: kPa)

图 8 为基坑侧壁应力释放系数分别为 $\beta = 25\%$ 、 $\beta = 50\%$ 、 $\beta = 75\%$ 和 $\beta = 100\%$ 时隧道衬砌的附加弯矩对比图。除 45° 、 135° 、 225° 和 315° 附加弯矩为 0, 其他位置的正负弯矩都随着应力释放系数的增加均匀增加。且皆在 0° 处附加正弯矩最大。分别取 $\beta = 25\%$ 、 $\beta = 50\%$ 、 $\beta = 75\%$ 和 $\beta = 100\%$ 时, 附加弯矩分别为 15.66、31.32、46.98、62.64 kN·m, 分别占基坑开挖前相应位置初始弯矩的 20.32%、40.64%、60.96%和 81.28%。同时位于拱腰处的最大附加负弯矩分别为 -14.7、-29.4、-44.1、-58.8 kN·m, 分别占基坑开挖前相应位置初始弯矩的 27.56%、55.13%、82.69%和 110.26%。

由此可以看出, 基坑开挖引起的围压变化值并不大, 应力释放系数取 $\beta = 100\%$ 时, 最大附加围压也仅占初始围压的 10%以内, 然而衬砌对于围压改变的弯矩响应较为明显, 尤其是拱腰处的负弯矩变化更大, 当应力释放率仅取 25% 时, 附加负弯矩就达到了初始围压的 27.56%, 当应力释放率增加直至 $\beta = 100\%$ 时, 负弯矩增大甚至超过 100%。据分析, 基坑开挖主要使隧道两侧的围压减小, 竖向围压还有少量增加, 加剧了隧道衬砌的水平向拉伸, 竖向向压缩^[18], 致使内力增加较大。

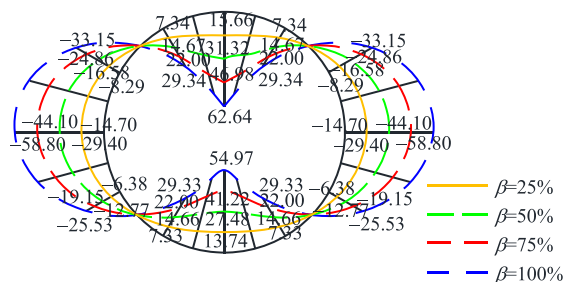


图 8 β 取不同值时基坑开挖引起的附加弯矩 (单位: kN·m)
Fig.8 Additional moments caused by excavation with different values of β (unit: kN·m)

4.2 基坑开挖对不同埋深的隧道受力的影响

取 3.1 节算例工况, 仅改变盾构隧道的埋深, 隧道埋深分别取 $h = 1/2d$ 、 $h = d$ 和 $h = 3/2d$, d 为基坑开挖深度, 算例中 $d = 15.8$ m。得到基坑开挖引起的隧道附加围压, 如图 9 所示, 当 $h = 1/2d$ 和 $h = d$ 时附加围压的分布不同, 但数值接近。当 $h = 1/2d$ 时, 附加围压绝对值最大为 10.32 kPa, 位于隧道衬砌 255° 处, 即基坑开挖侧隧道衬砌拱腰偏下的位置; 当 $h = d$ 时, 附加围压绝对值最大为 9.52 kPa, 位于隧道衬砌 285° 处, 即基坑开挖侧隧道衬砌拱腰偏上的位置。当埋深大于基坑开挖深度, $h = 3/2d$ 时, 隧道两侧附加围压的绝对值会明显减小, 附加围压绝对值最大为 5.05 kPa, 位于隧道衬砌 315° 处, 即基坑开挖侧隧道衬砌靠近拱顶的位置。

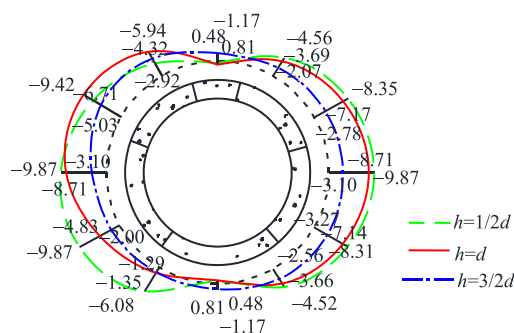


图 9 基坑开挖引起不同埋深盾构隧道的附加围压 (单位: kPa)

Fig.9 Additional confining pressures of shield tunnels with different buried depths caused by excavation (unit: kPa)

图 10 为隧道埋深分别是 $h = 1/2d$ 、 $h = d$ 和 $h = 3/2d$ 的附加弯矩对比图。当 $h = 1/2d$ 和 $h = d$ 时附加弯矩的分布较为接近, 最大附加正弯矩都位于 0° 位置处, 分别为 30.47、28.94 kN·m。 $h = 1/2d$ 时最大附加负弯矩为 -27.87 kN·m, 位于 265° 的位置。而 $h = d$ 时最大附加负弯矩为 -26.66 kN·m, 位置略偏上, 位于 275° 处。从图 10 中可以看出, 当埋深大于基坑开挖深度, $h = 3/2d$ 时, 正负附加弯矩明显减小, 且分布更加均匀, 最大附加正负弯矩分别为 6.71、-5.7 kN·m, 分别位于 0° 和 280° 处。

根据图 9 和图 10 的分析结果可以发现, 埋深较浅的隧道所受基坑开挖引起的附加荷载较大, 且弯矩变化明显。埋深较大的隧道围压变化小, 内力响应也不明显。这与文献[16]中模型试验得到的规律基本一致。故埋深较浅的盾构隧道对旁侧基坑开挖的影响更敏感, 埋深较大的隧道, 尤其是埋深大于基坑开挖深度的隧道, 对旁侧基坑开挖影响的敏感度会明显降低。

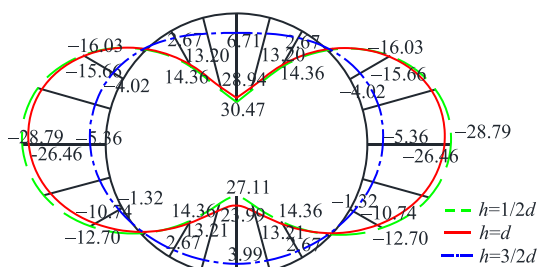


图 10 基坑开挖引起不同埋深盾构隧道的附加弯矩
(单位: $\text{kN}\cdot\text{m}$)

Fig.10 Additional moments of shield tunnels with different buried depths caused by excavation(unit: $\text{kN}\cdot\text{m}$)

4.3 基坑开挖对不同距离的旁侧隧道影响

取 3.1 节算例工况, 仅改变基坑边线与旁侧隧道的净距, 基坑边线与旁侧隧道的净距分别取 $s=1/3d$ 、 $s=2/3d$ 和 $s=d$, 基坑开挖深度 $d=15.8\text{ m}$ 。得到基坑开挖引起的隧道附加围压, 如图 11 所示, 随着基坑与旁侧隧道的净距增加, 基坑开挖引起的隧道附加围压减小。 $s=d$ 时的附加围压绝对值在各处都要小于 $s=2/3d$ 时的附加围压绝对值, 但差距较小, 主要体现在隧道靠基坑侧, 整体分布规律基本一致。当基坑与隧道的净距进一步减小到 $s=1/3d$ 时, 在衬砌基坑开挖侧的上部附加围压数值增加明显, 主要体现在 $270^\circ \sim 360^\circ$ 的范围内。当 $s=1/3d$ 时, 最大附加围压绝对值为 14.13 kPa , 占基坑开挖前相应位置初始围压的 6.94% 。

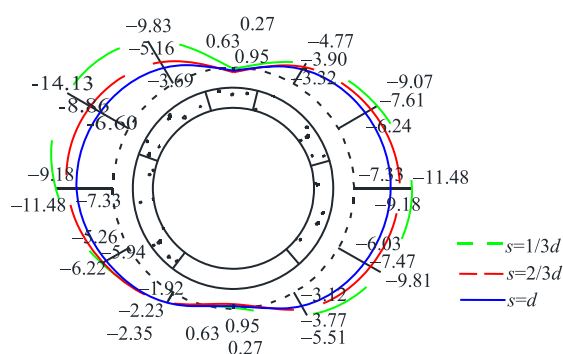


图 11 基坑开挖引起不同距离的盾构隧道附加围压
(单位: kPa)

Fig.11 Additional confining pressures of shield tunnels with different distances caused by excavation(unit: kPa)

图 12 为基坑与隧道净距分别是 $s=1/3d$ 、 $s=2/3d$ 和 $s=d$ 的附加弯矩对比图。与文献[16]中模型试验得到的规律类似, 随着隧道与基坑的距离增加, 基坑开挖引起的隧道衬砌附加正负弯矩都依次减小。净距分别取 $s=1/3d$ 、 $s=2/3d$ 和 $s=d$ 时, 最大附加正弯矩依然都位于 0° 处, 分别为 36.5 、 29.8 、 $22.96\text{ kN}\cdot\text{m}$, 分别占基坑开挖前初始弯矩的

47.36% 、 38.67% 和 29.79% 。基坑与隧道距离较近 ($s=1/3d$) 时, 最大附加负弯矩位于 275° , 衬砌基坑侧拱腰偏上的位置。 $s=2/3d$ 和 $s=d$ 时, 最大附加负弯矩位于 270° , 恰好位于衬砌基坑侧拱腰的位置。

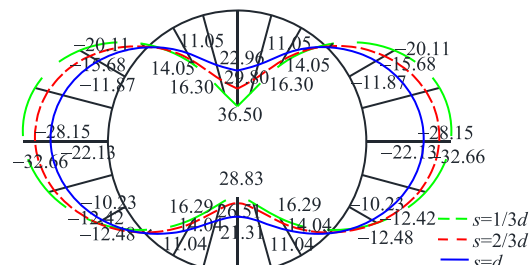


图 12 基坑开挖引起不同距离的盾构隧道附加弯矩
(单位: $\text{kN}\cdot\text{m}$)

Fig.12 Additional moments of shield tunnels with different distances caused by excavation(unit: $\text{kN}\cdot\text{m}$)

5 结 论

(1) 基坑开挖前隧道全周的围压呈左右对称的“钟形”分布。当基坑开挖后, 隧道横截面两侧的围压减小, 基坑开挖侧的围压减小量比另一侧更多, 拱腰部附近的围压减小更明显。

(2) 基坑开挖会使旁侧隧道正负弯矩值和正负剪力值增大, 拱顶和拱底的轴力减小。随着基坑侧壁应力释放系数的增大, 盾构隧道衬砌附加围压和附加弯矩的绝对值都有明显增加。弯矩对基坑开挖卸载的响应较围压的改变更为明显。

(3) 埋深较浅的盾构隧道对旁侧基坑开挖的影响更敏感, 埋深较大的隧道, 尤其是埋深大于基坑开挖深度的隧道, 对旁侧基坑开挖影响的敏感度会明显降低。随着基坑与旁侧隧道净距的增加, 基坑开挖对隧道的影响也会进一步减小。

本文得到的附加围压分布及因素影响规律与已有的室内模型试验结果一致, 验证了本文方法的可靠性。计算基坑开挖引起的隧道附加荷载时, 本文对荷载分布和土层性质进行了简化, 之后的研究中还需作进一步讨论。虽然修正惯用法具有简单实用的优点, 但内力计算精度较差, 之后还需考虑管片接头力学特性等作进一步精细化研究。

参 考 文 献

- [1] 魏纲, 厉京, 宣海力, 等. 大型深基坑开挖对旁边地铁盾构隧道影响的实测分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(3): 718-726.

- WEI Gang, LI Jing, XUAN Hai-li, et al. Monitoring data analysis on the influence of large deep foundation pit excavation on nearby metro shield tunnel[J]. **Journal of Railway Science and Engineering**, 2018, 15(3): 718-726.
- [2] 张治国, 奚晓广, 吴玲. 基坑分区开挖对邻近大直径越江隧道影响的数值模拟与现场实测分析[J]. 隧道建设, 2018, 38(9): 1480-1488.
- ZHANG Zhi-guo, XI Xiao-guang, WU Ling. Numerical simulation and site monitoring analysis of influence of division excavation of foundation pit on adjacent large-diameter river-crossing tunnel[J]. **Tunnel Construction**, 2018, 38(9): 1480-1488.
- [3] 闫静雅, 王如路. 上海软土地铁隧道沉降及横向收敛变形的原因分析及典型特征[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(4): 178-187.
- YAN Jing-ya, WANG Ru-lu. Cause analysis and typical characteristics of settlement and transverse convergence deformation of metro tunnel in soft ground in Shanghai[J]. **Journal of Natural Disasters**, 2018, 27(4): 178-187.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50911—2013 城市轨道交通工程监测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50911—2013 Code for monitoring measurement of urban rail transit engineering[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [5] 王立峰, 庞晋, 徐云福, 等. 基坑开挖对邻近运营地铁隧道影响规律研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 2004-2010.
- WANG Li-feng, PANG Jin, XU Yun-fu, et al. Influence of foundation pit excavation on adjacent metro tunnels[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(7): 2004-2010.
- [6] 郭鹏飞, 杨龙才, 周顺华, 等. 基坑开挖引起下卧隧道隆起变形的实测数据分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊 2): 613-621.
- GUO Peng-fei, YANG Long-cai, ZHOU Shun-hua, et al. Measurement data analyses of heave deformation of shield tunnels due to overlying pit excavation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Suppl.2): 613-621.
- [7] 郑刚, 杜一鸣, 刁钰, 等. 基坑开挖引起邻近既有隧道变形的影响区研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 599-612.
- ZHENG Gang, DU Yi-ming, DIAO Yu, et al. Influenced zones for deformation of existing tunnels adjacent to excavations[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(4): 599-612.
- [8] 胡海英, 张玉成, 杨光华, 等. 基坑开挖对既有地铁隧道影响的实测及数值分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(增刊 2): 431-439.
- HU Hai-ying, ZHANG Yu-cheng, YANG Guang-hua, et al. Measurement and numerical analysis of effect of excavation of foundation pits on metro tunnels[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2014, 36(Suppl.2): 431-439.
- [9] 周泽林, 陈寿根, 涂鹏, 等. 基坑开挖对邻近隧道影响的耦合分析方法[J]. 岩土力学, 2018, 39(4): 1440-1449.
- ZHOU Ze-lin, CHEN Shou-gen, TU Peng, et al. Coupling method for analyzing the influence on existing tunnel due to adjacent foundations pit excavation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(4): 1440-1449.
- [10] 张治国, 张孟喜, 王卫东. 基坑开挖对临近地铁隧道影响的两阶段分析方法[J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 2085-2092.
- ZHANG Zhi-guo, ZHANG Meng-xi, WANG Wei-dong. Two-stage method for analyzing effects on adjacent metro tunnels due to foundation pit excavation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(7): 2085-2092.
- [11] 梁发云, 褚峰, 宋著, 等. 紧邻地铁枢纽深基坑变形特性离心模型试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 657-664.
- LIANG Fa-yun, CHU Feng, SONG Zhu, et al. Centrifugal model test research on deformation behaviors of deep foundation pit adjacent to metro stations[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(3): 657-664.
- [12] 魏纲, 赵城丽. 基坑开挖引起临近地铁隧道的附加荷载计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(增刊 1): 3408-3417.
- WEI Gang, ZHAO Cheng-li. Calculation method of additional load caused by excavation of foundation pit adjacent to metro tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(Suppl.1): 3408-3417.