

新建盾构隧道下穿既有隧道剪切错台变形计算*

魏纲^{1†}, 俞国骅², 杨波¹

(1. 浙江大学城市学院 土木工程系, 浙江 杭州 310015; 2. 安徽理工大学 土木建筑学院, 安徽 淮南 232001)

摘要:采用剪切错台模型,研究新建盾构隧道正交下穿对上方既有地铁盾构隧道的影响.考虑新建隧道下穿时刀盘附加推力、盾壳摩擦力以及注浆附加压力在既有隧道轴线处产生的附加应力,将既有地铁盾构隧道简化为由剪切弹簧连接的弹性地基短梁,运用最小势能原理并采用合理的位移试函数,建立计算方程来求解既有隧道的竖向位移值、盾构环之间的错台量、环间剪切力值以及这三者随着新建隧道掘进的三维变化过程.研究表明:用剪切错台模型和最小势能原理计算得到的既有盾构隧道竖向位移值与实测值较为吻合;既有盾构隧道竖向位移最大值处的隧道错台量接近0,在竖向位移曲线的反弯点处隧道错台量和环间剪切力值最大;随着新建隧道的掘进,既有隧道的竖向位移、错台量和环间剪力值不断增大,最后趋于稳定.

关键词:新建盾构隧道;既有隧道;下穿;剪切错台;隧道纵向位移

中图分类号:TU43

文献标志码:A

Calculation of Existing Shield Tunnel Shearing Dislocation Platform Deformation Due to Undercrossing New Shield Tunnel Undercrossing

WEI Gang^{1†}, YU Guohua², YANG Bo¹

(1. Department of Civil Engineering, Zhejiang University City College, Hangzhou 310015, China;

2. Department of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: Model of shield tunnel considering the shearing dislocation was used to investigate the effect of the new shield tunnel undercrossing on existing tunnels. In light of the fact that the additional stress along the central axis of the existing tunnel was caused by the bulkhead additive thrust, the friction force between shield and soil, and grouting pressure in the process of undercrossing shield tunnel construction, the lining ring of shield tunnel was regarded as a series of short elastic foundation beams connected by shear spring. An equation was developed by the principle of minimum potential energy, and three-dimensional change process of the vertical deformation, shear force and dislocation between rings with the excavation of the new tunnel were worked out. The research shows that the vertical displacement value calculated by the proposed method combined with the shearing dislocation model and the principle of the minimum potential energy agreed well with field test data. The dislocation of the segments where the vertical

* 收稿日期:2017-08-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778576), National Natural Science Foundation of China (51778576)

作者简介:魏纲(1977-),男,浙江杭州人,浙江大学城市学院教授,博士,硕士生导师

† 通讯联系人, E-mail: weig@zucc.edu.cn

displacement is the maximum is close to 0. The maximum value of segment rings's dislocation and shearing force appears at the inflection point of vertical displacement curve. With the excavation of the new tunnel, the vertical deformation, shear force and dislocation between rings of existing tunnel increased and finally stabilized.

Key words: new shield tunnel; existing shield tunnel; undercrossing; shearing dislocation platform; longitudinal displacement

随着城市轨道交通的发展,新建盾构隧道下穿既有盾构隧道的工程越来越多.盾构隧道穿越会不可避免地引起周围土体的扰动^[1-2],导致周围土体产生位移,对既有隧道造成危害.因此研究新建盾构隧道穿越对既有隧道的影响具有重要意义.

目前,国内外关于新建隧道下穿既有隧道的研究大致可分为:理论分析法^[3-7]、现场实测法^[8-9]、数值模拟法^[10-12]和模型试验法^[13-14]等.其中在理论分析法中,文献[3]考虑了新建盾构施工产生的刀盘附加推力 q 、盾壳摩擦力 f 、同步注浆附加压力 p 及土体损失作用下所引起的既有隧道轴线处的附加应力,但其将既有隧道视为 Winkler 地基长梁,没有考虑管片之间的“接头效应”;文献[4]基于双面弹性地基梁理论与盾构隧道纵向等效连续化模型,计算了管片张开量,但没有考虑 q 、 f 、 p 的影响;文献[5]考虑了新建盾构施工产生的 q 、 f 和土体损失的作用,基于 Pasternak 地基模型得到既有隧道的位移计算公式,但没有考虑 p 的影响,且将隧道视为连续化;文献[6]基于 Kerr 地基模型,将已建隧道简化为连续的欧拉伯努利梁和铁木辛柯梁,将新建隧道对已建隧道的作用(即土体损失)简化为二维高斯分布荷载来求解既有隧道的变形,但没有考虑 q 、 f 、 p 的影响,无法计算既有隧道的三维变形;文献[7]基于 Pasternak 地基模型,将已建隧道简化为连续的欧拉伯努利梁,仅考虑土体损失来求解既有隧道的变形,没有考虑 q 、 f 、 p 的影响,无法计算既有隧道的三维变形.综上所述,现有方法均将盾构隧道视为连续体,没有考虑管片的接头效应,无法计算新建隧道下穿引起的既有隧道剪切错台变形.因此需研究能考虑管片接头效应的新建隧道下穿引起的既有盾构隧道变形计算方法.

本文考虑盾构切口附加推力 q 、盾壳摩擦力 f 、注浆附加压力 p 以及土体损失因素,计算新建隧道下穿时在既有隧道轴线处产生的附加应力;利用

“剪切错台模型”^[15],将隧道等效为一个一个由剪切弹簧连接的弹性地基短梁,运用最小势能原理计算新建隧道下穿施工引起既有盾构隧道的三维纵向变形、环间错台量以及环间剪切力.可评估新建隧道下穿时既有隧道的结构安全性和抗渗性.

1 新建隧道下穿引起的既有盾构隧道附加应力计算

1.1 建立力学模型

盾构隧道下穿的力学计算模型如图 1 所示.图中既有隧道轴线埋深为 z ,新建盾构隧道轴线埋深为 z_0 ,隧道半径为 R_s ,刀盘附加推力 q 作用于开挖面,盾壳摩擦力 f 沿盾壳分布,注浆附加压力 p 在盾构尾部沿径向分布,令作用宽度为 m_0 ,盾构切口在 xoz 平面上.

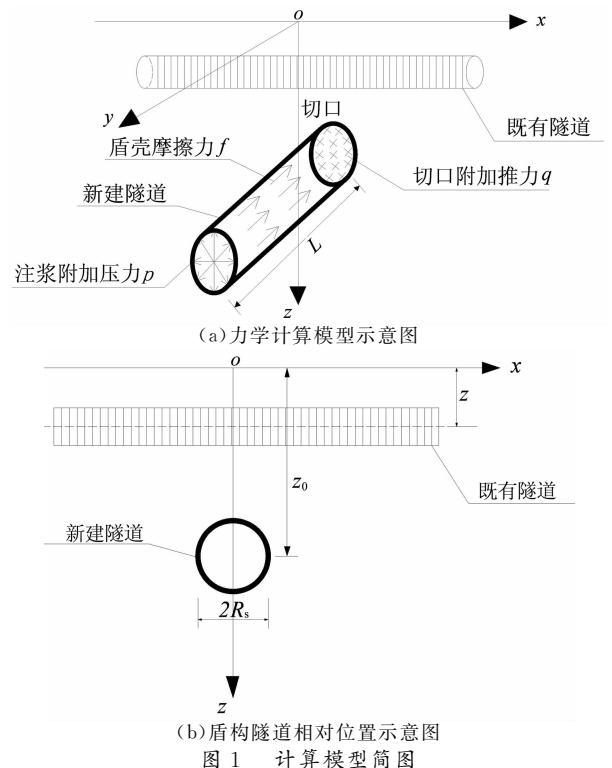


Fig. 1 Diagram of calculation model

1.2 各个分力产生的竖向附加应力

设既有盾构隧道轴线处一点坐标为 (x, y, z) , 求该点处的附加应力. 根据 Mindlin 公式进行积分求解, 可推导得到荷载 q, f, p 在既有隧道轴线处引起的竖向附加应力, 具体推导见文献[16].

1.2.1 刀盘附加推力 q 产生的竖向附加应力 σ_{z-q}

在盾构刀盘处取任一微元体 $dA = r dr d\theta$, 积分示意图见图 2. 运用 Mindlin 公式积分得到刀盘附加推力 q 在该点处产生的竖向附加应力 σ_{z-q} 为:

$$d\sigma_{z-q} = -\frac{qr dr d\theta}{8\pi(1-\nu)} \left\{ \frac{(1-2\nu)}{R_1^3} - \frac{(1-2\nu)}{R_2^3} - \frac{3(z-z_0+r\sin\theta)^2}{R_1^5} - \frac{3(3-4\nu)(z+z_0-r\sin\theta)^2}{R_2^5} + \frac{6(z_0-r\sin\theta)}{R_2^5} [z_0-r\sin\theta + (1-2\nu) \times (z+z_0-r\sin\theta) + \frac{5z(z+z_0-r\sin\theta)^2}{R_2^2}] \right\} \quad (1)$$

$$\begin{cases} R_1 = \sqrt{(x-r\cos\theta)^2 + y^2 + (z-z_0+r\sin\theta)^2} \\ R_2 = \sqrt{(x-r\cos\theta)^2 + y^2 + (z+z_0-r\sin\theta)^2} \end{cases} \quad (2)$$

$$\sigma_{z-q} = \int_0^{R_s} \int_0^{2\pi} d\sigma_{z-q}$$

式中: ν 为土的泊松比.

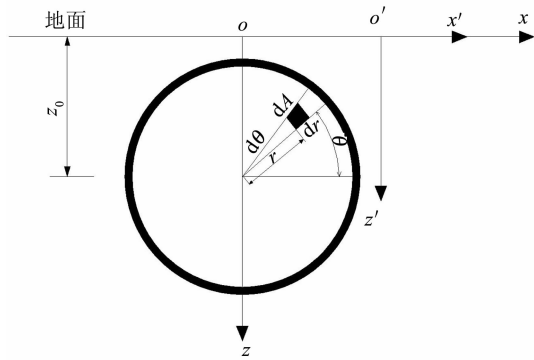


图 2 刀盘附加推力 Mindlin 解积分示意图
Fig. 2 Mindlin solution integral schematic of additional thrust of the knife plate

1.2.2 盾壳摩擦力 f 产生的竖向附加应力 σ_{z-f}

在盾壳壁上取任一微元体 $dA = R_s ds d\theta$, 积分示意图见图 3. 运用 Mindlin 公式积分得到盾壳摩擦力 f 在该点处产生的竖向附加应力 σ_{z-f} 为:

$$d\sigma_{z-f} = -\frac{fR_s ds d\theta(y-s)}{8\pi(1-\nu)} \left\{ \frac{(1-2\nu)}{R_3^3} - \frac{(1-2\nu)}{R_4^3} - \frac{3(z-z_0+R_s\sin\theta)^2}{R_3^5} - \frac{3(3-4\nu)(z+z_0-R_s\sin\theta)^2}{R_4^5} + \frac{6(z_0-R_s\sin\theta)}{R_4^5} [z_0-R_s\sin\theta + (1-2\nu) \times (z+z_0-R_s\sin\theta) + \frac{5z(z+z_0-R_s\sin\theta)^2}{R_4^2}] \right\} \quad (3)$$

$$\begin{cases} R_3 = \sqrt{(x-R_s\cos\theta)^2 + (y-s)^2 + (z-z_0+R_s\sin\theta)^2} \\ R_4 = \sqrt{(x-R_s\cos\theta)^2 + (y-s)^2 + (z+z_0-R_s\sin\theta)^2} \end{cases} \quad (4)$$

$$\sigma_{z-f} = \int_0^L \int_0^{2\pi} d\sigma_{z-f}$$

式中: L 为新建盾构机机长.

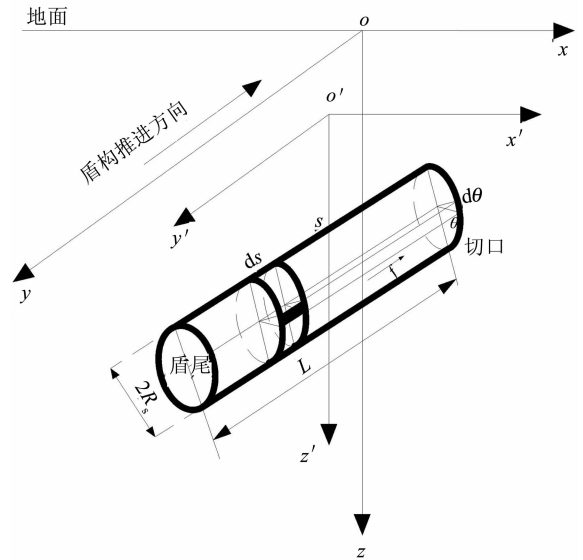


图 3 盾壳摩擦力 Mindlin 解积分示意图
Fig. 3 Mindlin solution integral schematic of friction force between shield and soil

1.2.3 注浆附加压力 p 产生的竖向附加应力 σ_{z-p1} 和 σ_{z-p2}

在盾尾注浆处取任一微元体 $dA = R_s ds d\theta$, 积分示意图见图 4. 运用 Mindlin 公式积分得到注浆附加压力竖向分力 p_1 :

$$d\sigma_{z-p1} = -\frac{pR_s \sin\theta ds d\theta}{8\pi(1-\nu)} \left[-\frac{(1-2\nu)(z-z_0+R_s\sin\theta)}{R_3^3} + \right.$$

$$\frac{(1-2\nu)(z-z_0+R_s \sin \theta)}{R_6^3} - \frac{3(z-z_0+R_s \sin \theta)^3}{R_5^3} - \frac{3(3-4\nu)z(z+z_0-R_s \sin \theta)^2}{R_6^5} + \frac{3(z_0-R_s \sin \theta)(z+z_0-R_s \sin \theta)(5z-z_0+R_s \sin \theta)}{R_6^5} - \frac{30(z_0-R_s \sin \theta)z(z+z_0-R_s \sin \theta)^3}{R_6^5} \quad (5)$$

$$\begin{cases} R_5 = \sqrt{(x-R_s \cos \theta)^2 + (y-L-s)^2 + (z-z_0+R_s \sin \theta)^2} \\ R_6 = \sqrt{(x-R_s \cos \theta)^2 + (y-L-s)^2 + (z+z_0-R_s \sin \theta)^2} \end{cases} \quad (6)$$

$$\sigma_{z-p1} = \int_0^{m_0} \int_0^{2\pi} d\sigma_{z-p1}$$

$$\left. (z+z_0-R_s \sin \theta) + \frac{5z(z+z_0-R_s \sin \theta)^2}{R_6^2} \right] \quad (7)$$

$$\sigma_{z-p2} = \int_0^{m_0} \int_0^{2\pi} d\sigma_{z-p2} \quad (8)$$

1.2.4 土体损失产生的竖向附加应力

采用魏纲^[17]基于文献[18]二维解建立的盾构法隧道统一土体移动模型三维解,得到单线盾构施工由于土体损失引起的管线平面处任一点的土体竖向位移为 U_z ,进而得到土体损失在既有隧道轴线处产生的竖向附加应力 σ_s 为:

$$\sigma_s = k' U_z \quad (9)$$

$$U_z = \frac{B\eta R_s^2}{4} \left\{ \frac{z_0-z}{x^2+(z_0-z)^2} + \frac{z_0+z}{x^2+(z_0+z)^2} - \frac{2z[x^2-(z_0+z)^2]}{[x^2+(z_0+z)^2]^2} \right\} \left(1 + \frac{y}{\sqrt{y^2+z_0}} \right) \times \exp \left\{ \frac{x^2 \ln \lambda}{(z_0+R_s)^2} + \frac{z^2 (\ln \lambda - \ln \delta)}{(z_0+d)^2} \right\} \quad (10)$$

其中: $B = \frac{4z_0[z_0+d-\sqrt{(z_0+d)^2-\eta(y)(R_s+d)^2}]}{R_s \eta(y)(R_s+d)}$

$$\delta = \frac{1}{2} - \frac{1}{\pi} \arcsin \left[\frac{2d}{R_s(1+\sqrt{1-\eta(y)})} \right]$$

$$\lambda = \frac{1}{4} - \frac{2((1-\sqrt{1-\eta(y)})}{\pi \eta(y)} \times \left[\arcsin \left(\frac{d}{R_s \sqrt{1-\eta(y)}} \right) + \sqrt{1 - \left(\frac{d}{R_s \sqrt{1-\eta(y)}} \right)^2} - 1 \right]$$

$$\eta(y) = \frac{\eta}{2} \left[1 + \frac{y}{\sqrt{y^2+z_0^2}} \right]$$

式中: k 为地基基床系数; d 为土体移动焦点到新建隧道中心点的距离; η 为最大土体损失百分率(%)。

最终得到隧道下穿引起既有隧道轴线处产生的竖向总附加应力值 σ_z 为:

$$\sigma_z = \sigma_{z-q} + \sigma_{z-f} + \sigma_{z-p1} + \sigma_{z-p2} + \sigma_s \quad (11)$$

2 基于最小势能原理计算隧道竖向变形

2.1 盾构隧道与土体相互作用分析

在分析盾构隧道与土体相互作用时,假定:将盾构隧道衬砌环视为由剪切弹簧连接的弹性地基短梁,新建隧道下穿导致隧道以环间剪切错台的方式进行变形,见图5。图中 D 为既有盾构隧道直径。相关学者^[19-20]已经验证了该模型的合理性。

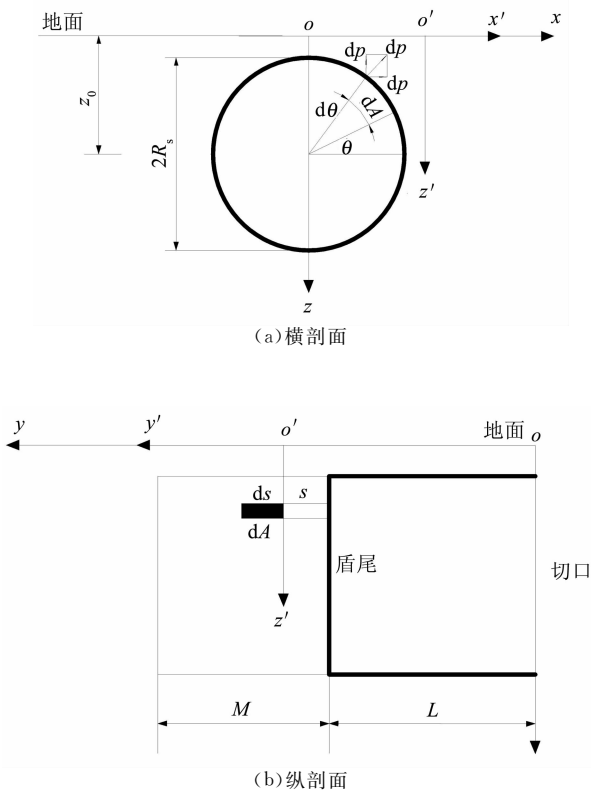


图4 盾尾注浆压力 Mindlin 解积分示意图
Fig.4 Mindlin solution integral schematic of grouting pressure

注浆附加压力水平向分力 p_2 :

$$d\sigma_{z-p2} = \frac{\rho R_s \cos \theta ds d\theta (x-R_s \cos \theta)}{8\pi(1-\nu)} \times \left\{ \frac{(1-2\nu)}{R_5^3} - \frac{(1-2\nu)}{R_6^3} - \frac{3(z-z_0+R_s \sin \theta)^2}{R_5^5} - \frac{3(3-4\nu)(z+z_0-R_s \sin \theta)^2}{R_6^5} + \frac{6(z_0-R_s \sin \theta)}{R_6^5} [z_0-R_s \sin \theta + (1-2\nu) \times \right.$$

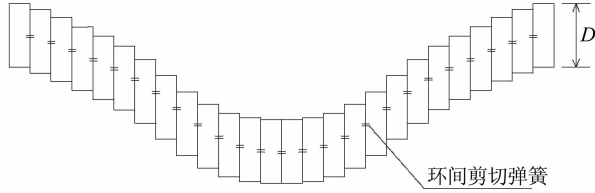


图5 盾构隧道环间错台变形示意图
Fig. 5 Schematic diagram of dislocation
of adjacent shield tunnel segments

2.2 运用能量变分法计算隧道纵向位移量

2.2.1 盾构隧道的总势能

任取盾构隧道一环进行分析,编号为 m ,其所受到的竖向荷载 F_z 为:

$$F_z = P_z(x) - kDS_z(x) - k_t(\Delta W_{z(m+1)} + \Delta W_{z(m)}) \quad (12)$$

式中: $P_z(x)$ 为附加水平荷载, $P_z(x) = D\sigma_z$; $kDS_z(x)$ 为地基抗力, k 为地基基床系数,采用 Vesic^[21]

公式计算, $k = \frac{0.65E_s}{1-\mu^2} \sqrt{\frac{E_s D^4}{E_t I_t}}$, $S_z(x)$ 为地基弹簧的位移,根据位移协调条件则 $S_z(x) = W_z(x)$,这里 $W_z(x)$ 为隧道的水平位移, E_s 为地基土的弹性模量, $E_t I_t$ 为隧道的等效抗弯刚度; k_t 为隧道的环间剪切刚度; $k_t(\Delta W_{z(m+1)} + \Delta W_{z(m)})$ 为水平环间剪切力。

根据盾构隧道每片衬砌环的受荷状况,分析计算得到盾构隧道的总势能,具体分为以下3部分:①新建隧道下穿引起临近既有盾构隧道轴线处附加荷载做功 W^p ;②盾构隧道衬砌环克服地层抗力做功 W^k ;③衬砌环克服盾构环间剪切力做功 W^s 。具体表达式可参考文献[22]。可得到新建隧道下穿引起的临近既有地铁盾构隧道的总势能为:

$$E^p = W^p + W^k + W^s \quad (13)$$

2.2.2 假设隧道衬砌环的位移函数

能量变分解法原理是假定合适的位移函数来表示盾构隧道受新建隧道影响的基本变形形状。本文假设隧道位移函数^[23]如下,并按傅里叶级数展开,隧道的竖向位移函数为:

$$W_z(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos \frac{n\pi x}{N\delta} = \{T_n(x)\} \{A\} \quad (14)$$

式中: $T_n(x) = \{1, \cos \frac{\pi x}{N\delta}, \cos \frac{2\pi x}{N\delta}, \dots, \cos \frac{n\pi x}{N\delta}\}$, δ 为既有盾构隧道环宽; A 为位移函数中的待定系数矩阵, $A = \{a_1, a_1, \dots, a_n\}^T$; n 为傅里叶级数的展

开阶数。

2.2.3 变分控制方程

基于能量变分法,将总势能 E^p 对各待定系数取极值,即:

$$\frac{\partial E^p}{\partial \xi_i} = 0, \xi_i = a_0 \dots a_n \quad (15)$$

式中: ξ_i 为矩阵 A 中的各个元素。

对式(15)求解,可得隧道竖向位移控制方程为:

$$\left\{ \sum_{m=-N}^{N-1} k_t \frac{\partial [W_z\{(m+1)\delta\} - W_z(m\delta)]}{\partial \xi_i} [T_n((m+1)\delta) - T_n(m\delta)] + \int_{-N\delta}^{N\delta} -kD \frac{\partial W_z(x)}{\partial \xi_i} \{T_n(x)\} dx \cdot \{A\} = \int_{-N\delta}^{N\delta} P_z(x) \{T_n(x)\}^T dx \right. \quad (16)$$

式中: $2N$ 为新建隧道施工既有隧道受影响的隧道衬砌环数。

将式(16)表达为矩阵形式:

$$([K_t] + [K_s]) \{A\} = \{P_z\}^T \quad (17)$$

式中: $[K_t]$ 为隧道环间刚度矩阵,且

$$[K_t] = \sum_{m=-N}^{n-1} k_t [T_n((m+1)\delta)^T - T_n(m\delta)^T] \times [T_n((m+1)\delta) - T_n(m\delta)];$$

$[K_s]$ 为土体刚度矩阵,且

$$[K_s] = kDL \begin{bmatrix} 2 & & & & \\ & 1 & & & \\ & & \ddots & & \\ & & & \ddots & \\ & & & & 1 \end{bmatrix};$$

$\{P_z\}^T$ 表示自由土体位移和隧道衬砌环的相互作用效应,具体表示为:

$$\{P_z\}^T = \int_{-N\delta}^{N\delta} P_z(x) \{T_n(x)\}^T dx \quad (18)$$

由式(16)计算可得到待定系数矩阵 A ,再代入假设的隧道位移函数 $W(x)$ 即式(14),可以得到在新建隧道开挖时引起的既有盾构隧道纵向位移值。

相邻盾构管片之间位移差值即错台量 ΔW ,其中隧道的竖向错台量为:

$$\Delta W_z = W_z[(m+1)\delta] - W_z(m) \quad (19)$$

相邻盾构管片环之间的竖向剪切力为:

$$Q_z = \{W_z[(m+1)\delta] - W_z(m\delta)\} \cdot k_t \quad (20)$$

取10阶的刚度矩阵 $[K_p]$ 和 $[K_t]$ 即可满足计算精度,以上算法通过 Matlab 编程进行数值计算。

3 工程实例验证

选取文献[6]和文献[4]中新建隧道正交下穿既

有隧道案例,计算得到既有盾构隧道竖向位移值,并且与实测隧道位移值对比,来验证本文方法的合理性和适用性.文中盾构隧道位移均指管片轴线中心的位移值.两案例基本参数见表1.

表1 两案例基本参数
Tab.1 Basic parameters of the two cases

参数	新建隧道	
	案例1	案例2
隧道轴线埋深 z_0	20.1 m	35.9 m
隧道半径 R_s	3.1 m	3.0 m
刀盘附加推力 q	200 kPa	200 kPa
盾壳摩擦力 f	150 kPa	150 kPa
注浆附加压力 p	120 kPa	120 kPa
p 作用宽度 m_0	2 m	2 m
盾构机机长 L	9 m	9 m
土体移动焦点到新建隧道中心点的距离 d	2.48 m	2.40 m
最大土体损失百分率 η	0.75%	0.75%
地基土弹性模量 E_s	16.49 MPa	20 MPa
土体泊松比 ν	0.35	0.33

参数	既有隧道	
	案例1	案例2
隧道轴线埋深 z	9.1 m	26.0 m
隧道直径 D	6.2 m	6.0 m
隧道环宽	1.2 m	1.6 m
隧道等效抗弯刚度 $E_t I_t$	$1.087 \times 10^8 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$	$1.087 \times 10^8 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$
环间剪切刚度 k_t	$4 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$	$4 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$
影响环数 N	110	115

3.1 案例1

图6为该案例采用2种方法计算得到的隧道竖向位移曲线,图中竖向位移负值代表沉降,正值代表隆起,以下同.如图6所示,本文方法与文献[6]计算得到的隧道沉降量在数值和趋势上都较为吻合,本文方法计算结果略偏大;最大沉降量分别为5.95 mm和6.17 mm,没有超过《上海市地铁沿线建筑施工保护地铁技术管理暂行规定》中规定的地铁结构最终绝对位移限值20 mm.

通过三维计算,可以得到既有隧道(0,0,0)坐标处的隧道竖向位移随着新建隧道开挖的变化过程,见图7.如图7所示:1)随着新建隧道的掘进,(0,0,0)点处的隧道沉降量最初缓慢增加;当两者水平距离小于10 m时,(0,0,0)点处沉降量快速增加;当

开挖面经过该点,掘进至 $y = -20 \text{ m}$ 处时,该点沉降量达到最大,而后略微上升,趋于平稳.2)土体损失所引起的该点沉降量最为明显.

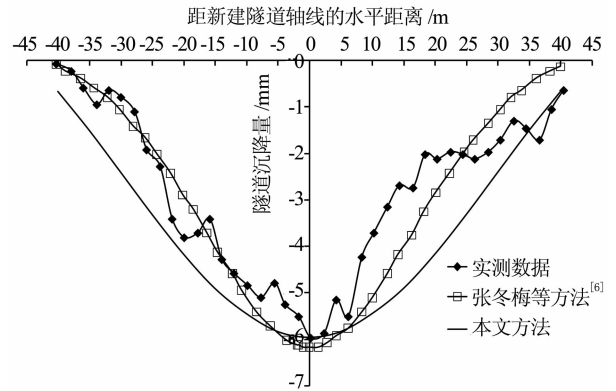


图6 $y = -20 \text{ m}$ 时既有盾构隧道沉降量比较
Fig.6 Comparison of settlements of shield tunnel when $y = -20 \text{ m}$

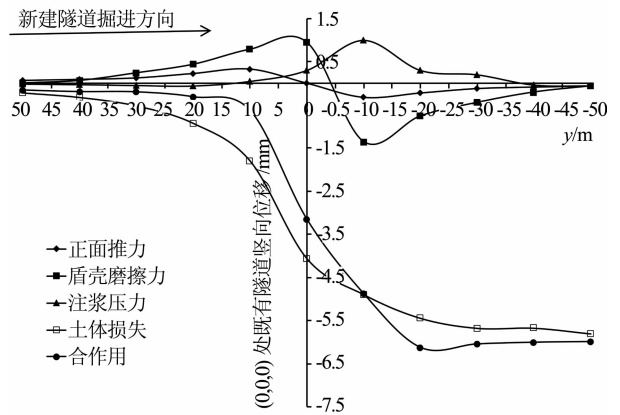


图7 既有隧道上(0,0,0)点
竖向位移随新建隧道开挖变化曲线
Fig.7 Vertical displacement of point (0,0,0) of existing tunnel with new tunnel excavation

图8为既有隧道竖向位移随新建隧道开挖变化曲线.如图8所示:随着新建隧道的掘进,既有隧道的竖向位移不断增加,开挖至 $y = -20 \text{ m}$ 以后,既有隧道沉降量趋于平稳.

本文方法相对于文献[6]方法,还能够计算得到相邻盾构环之间的错台量和环间剪切力.图9为本文方法计算得到的管片竖向错台量随新建隧道掘进的变化曲线.如图9所示:随着新建隧道的掘进,既有隧道的错台量也在不断加大,当新建隧道掘进至 $y = -20 \text{ m}$ 以后,既有隧道的错台量就趋于一个稳定值;当 $y = -20 \text{ m}$ 时,在隧道沉降曲线反弯点处的管片错台量处于最大值,达到0.36 mm.参考上

海盾构隧道错台等级划分标准^[24],该错台量的评价等级为Ⅱ级,没有超过 4 mm 的控制标准,但隧道整体结构的安全性和抗渗性均有所降低,应该加强监测;在隧道沉降量最大点处的管片错台量接近 0,表明隧道沉降量最大点附近相邻盾构环之间几乎不发生错台变形,该位置附近的管片整体发生了位移。

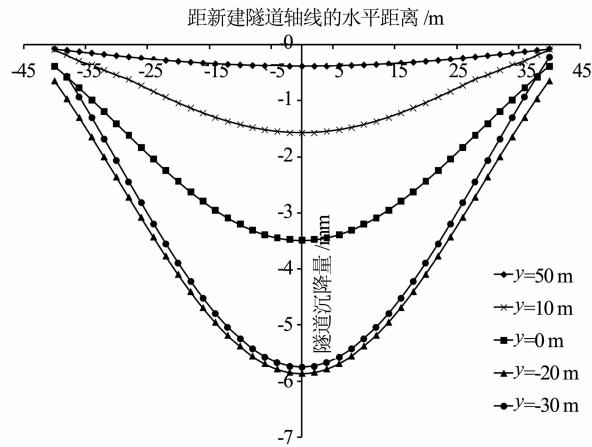


图 8 既有隧道竖向位移随新建隧道开挖变化曲线

Fig. 8 Vertical displacement of existing tunnel with new tunnel excavation

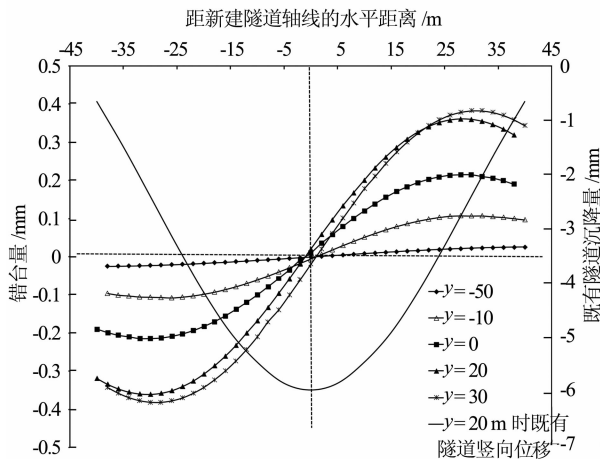


图 9 既有隧道管片错台量变化曲线

Fig. 9 Dislocation platform of existing tunnel duct pieces

图 10 为本文方法计算得到的竖向环间剪力值随新建隧道掘进的变化曲线. 如图 10 所示:盾构隧道环间剪力值的变化规律与管片错台量的变化规律相一致,隧道竖向位移最大值处的环间剪力值接近 0,说明该位置处的盾构隧道管片没有发生错动,管片之间的连接螺栓没有受力; $y = -20$ m 时,在隧道

沉降曲线反弯点处的剪力值最大,最大值为 88 kN. 本工程中相邻隧道环之间用 17 颗 M30 螺栓连接,其剪切强度极限为 665.36 kN,计算得到的最大剪力值没有超过该极限值,该盾构隧道处于安全状态。

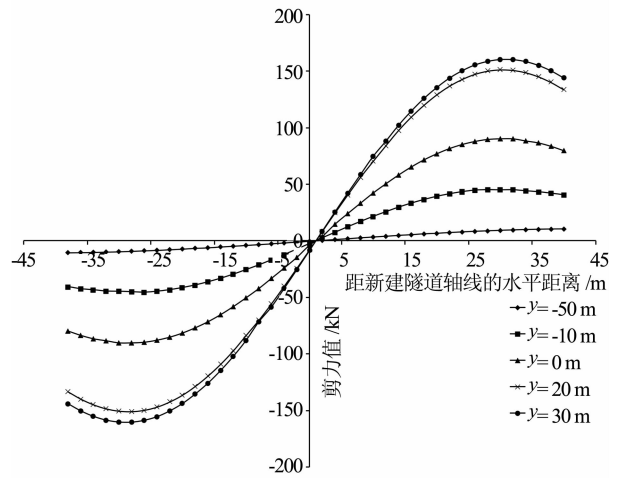


图 10 盾构隧道环间剪力值变化曲线

Fig. 10 Shearing force between shield tunnel rings

3.2 案例 2

图 11 为该案例采用 2 种方法计算得到的隧道竖向位移曲线. 如图 11 所示,本文方法与文献[4]计算得到的隧道最大沉降量分别为 2.30 mm 和 2.09 mm,没有超过《上海市地铁沿线建筑施工保护地铁技术管理暂行规定》中规定的地铁结构最终绝对位移限值 20 mm. 文献[4]计算得到的曲线在(-6 m, -4 m)和(4 m, 6 m)这两个阶段下降较快,相比于实测值明显偏小;本文方法计算得到的曲线与实测曲线拟合效果较好。

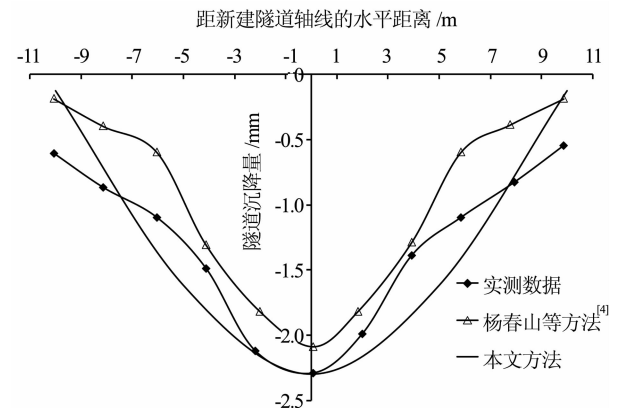


图 11 $y = -25$ m 时盾构隧道沉降量比较

Fig. 11 Comparison of settlements of shield tunnel when $y = -25$ m

本文方法相对于文献[4]方法,还能计算得到相邻盾构环之间的错台量和环间剪切力随新建隧道掘进的变化曲线,规律与案例1类似,本文不再赘述.

4 隧道竖向位移的单因素影响分析

以文献[6]中的案例作为算例,采用其案例中的各项参数作为标准工况,探究新建隧道正交下穿时,影响既有隧道竖向位移的影响因素.该工况下 $y = -20$ m.

4.1 z_0 改变对既有隧道竖向位移的影响

在标准工况下以新建隧道轴线埋深 z_0 作为控制变量,改变 z_0 的大小,分别取 $z_0 = 20.1$ m、25 m、30 m 和 35 m 这 4 种工况,来研究 z_0 改变对既有隧道竖向变形的影响规律.

图 12 为不同 z_0 值时计算得到的盾构隧道竖向位移变化曲线.如图 12 所示:1) 在新建盾构隧道作用下既有盾构隧道竖向变形曲线呈中间沉降,沉降段大致呈正态分布规律,影响范围沿既有隧道轴线方向(-40 m, 40 m);2) 随着 z_0 逐渐变大,隧道的沉降值逐渐变小,即新建隧道与既有隧道之间的垂直距离越大,既有隧道的沉降量就越小,该结论与房明等[11]文中“随着隧道间相对距离的增大位移峰值减小”相一致,所以在类似工况下施工时,如果两条隧道间距较近的情况下,需要对既有隧道做好监测与加固工作;3) 隧道影响范围中部沉降量变化大,两端变化小.隧道变形影响范围则基本不变.

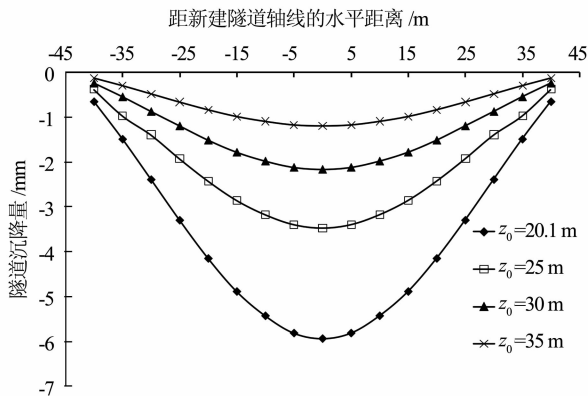


图 12 不同 z_0 时引起的盾构隧道竖向位移曲线
Fig. 12 Vertical displacement curves of shield tunnel with different values of z_0

4.2 z 改变对既有隧道竖向位移的影响

在标准工况下以既有隧道轴线埋深 z 作为控制变量,改变 z 的大小,分别取 $z = 7$ m、9.1 m、12 m 和 14 m 这 4 种工况,来研究 z 改变对既有隧道竖向变形的影响规律.

图 13 为不同 z 值时计算得到的既有隧道竖向位移曲线.如图 13 所示:1) 新建盾构隧道施工引起的既有盾构隧道竖向变形曲线呈中间沉降,沉降段大致呈正态分布规律,规律与图 12 基本一致;2) 随着 z 逐渐变大,隧道沉降值也逐渐变大,即既有隧道上部覆土厚度越大、既有隧道的沉降量就越大,该结论与房明等[11]文中“既有隧道衬砌的位移随着隧道覆土厚度的增大而增大”相一致.主要原因是覆土厚度越大、既有隧道与新建隧道越接近,新建隧道开挖引起的土体位移也就越大;3) 隧道影响范围中部沉降量变化大,两端变化小.隧道变形的影响范围则基本不变,该规律与图 12 相一致.

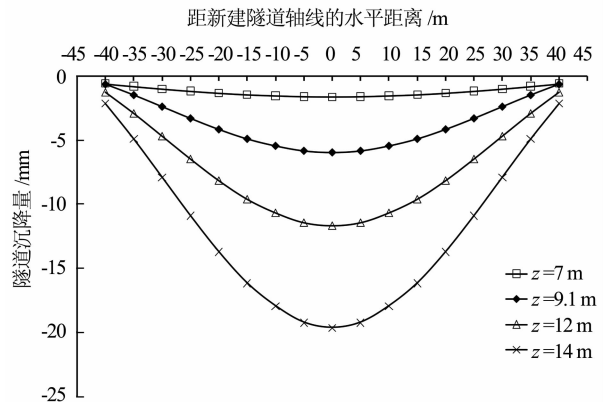


图 13 不同 z 时引起的盾构隧道竖向位移曲线
Fig. 13 Vertical displacement curves of shield tunnel with different values of z

4.3 R_s 改变对既有隧道竖向位移的影响

在标准工况下以新建隧道半径 R_s 作为控制变量,改变 R_s 的大小,分别取 $R_s = 3.1$ m、4 m、5 m 和 6 m 这 4 种工况,来研究 R_s 改变对既有隧道竖向变形的影响规律.

图 14 为不同 R_s 值时计算得到的盾构隧道竖向位移变化曲线.如图 14 所示:随着新建隧道半径的增加,既有隧道的竖向沉降量也随之增加.这是由于新建隧道的半径越大,相当于挖去的土体越多,土体应力损失越大,从而导致既有隧道变形加剧.

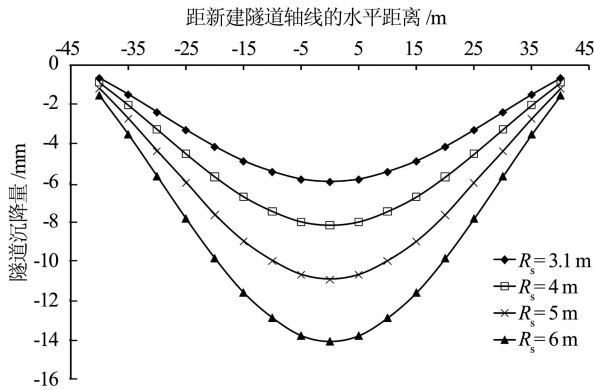


图14 不同 R_s 时引起的盾构隧道竖向位移曲线

Fig. 14 Vertical displacement curves of shield tunnel with different values of R_s

5 结 语

1) 本文方法能够计算得到由于新建盾构隧道下穿开挖引起的既有盾构隧道的三维竖向位移,以及盾构隧道环之间的错台量和环间剪切力,由此可判断既有盾构隧道结构的安全性和稳定性。

2) 随着新建隧道的掘进,既有盾构隧道纵向变形大致呈正态分布,中间大、两端小,且影响范围较大;随着新建隧道开挖,既有盾构隧道的竖向位移量、环间错台量以及环间剪力值都在不断地增大,当新建隧道穿越过既有隧道,掘进至一定距离时,这些值又趋于稳定;土体损失引起的既有隧道沉降量最为明显。

3) 新建隧道下穿既有隧道时,两隧道间距离越大时,既有盾构隧道的沉降量越小,所以当新建盾构隧道近距离下穿既有隧道时,需要对既有隧道加强监测,变形过大时应及时加固;新建盾构隧道的半径越大时,既有盾构隧道的沉降量越大。

本文仅研究了新建隧道和既有隧道正交的工况,没有探究两者斜交或平行的工况;限于篇幅,仅研究了既有隧道的竖向位移,没有研究水平位移;另外对既有盾构隧道纵向变形的安全性评估偏简单,可在本文基础上作进一步研究。

参考文献

[1] 贺志军,陈运鹏,李得建,等.纵向倾斜地表盾构隧道掌子面三维挤出破坏分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2017,44(9):128-136.
HE Z J, CHEN Y P, LI D J, *et al.* Analysis on three-dimension-

al extrusion failure of shield tunnel face with longitudinal declined ground[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(9): 128-136. (In Chinese)

- [2] 赵明华,毛韬,牛浩懿,等.上硬下软地层盾构隧道开挖面极限支护力分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2016,43(1):103-109.
ZHAO M H, MAO T, NIU H Y, *et al.* Analysis of limit supporting force of tunnel excavation face for shield machine in upper-hard lower-soft ground[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(1): 103-109. (In Chinese)
- [3] 张琼方,林存刚,丁智,等.盾构近距离下穿引起已建地铁隧道纵向变形理论研究[J].岩土力学,2015,36(增刊1):568-572.
ZHANG Q F, LIN C G, DING Z, *et al.* Theoretical analysis of vertical deformation of existing metro tunnel induced by shield tunneling under-passing in a short distance[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(S1): 568-572. (In Chinese)
- [4] 杨春山,莫海鸿,陈俊生,等.近距离下穿盾构隧道对上覆运营地铁隧道的影响研究[J].现代隧道技术,2015,52(5):145-151.
YANG C S, MO H H, CHEN J S, *et al.* Influence of the approaching construction of underlying shield tunnels on overlying metro tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(5): 145-151. (In Chinese)
- [5] 卢岱岳,王士民,何川,等.新建盾构隧道近接施工对既有隧道纵向变形影响研究[J].铁道学报,2016,38(10):108-116.
LU D Y, WANG S M, HE C, *et al.* Research on effects of adjacent construction of new shield tunnel on longitudinal deformation of existent tunnel[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(10): 108-116. (In Chinese)
- [6] 张冬梅,宗翔,黄宏伟.盾构隧道掘进引起上方已建隧道的纵向变形研究[J].岩土力学,2014,35(9):2659-2666.
ZHANG D M, ZONG X, HUANG H W. Longitudinal deformation of existing tunnel due to underlying shield tunneling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(9): 2659-2666. (In Chinese)
- [7] 白雪峰,王梦恕.双线隧道开挖对邻近隧道影响的两阶段分析方法[J].土木工程学报,2016,49(10):123-128.
BAI X F, WANG M S. A two-stage method for analyzing the effects of twin tunnel excavation on adjacent tunnels[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(10): 123-128. (In Chinese)
- [8] 白廷辉,尤旭东,李文勇.盾构超近距离穿越地铁运营隧道的保护技术[J].地下工程与隧道,2000(3):2-6.
BAI T H, YOU X D, LI W Y. Protective technology of the shield tunnelling underneath the immediate running metro tunnel[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2000(3): 2-6. (In Chinese)
- [9] 邵华,张子新.盾构近距离穿越施工对已运营隧道的扰动影响

- 分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(增刊 2): 545-549.
- SHAO H, ZHANG Z X. Analysis of disturbing effect on running subway caused by adjacent shield-driven[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(S2): 545-549. (In Chinese)
- [10] 孙永, 周顺华, 向科, 等. 近距离下穿既有隧道的盾构施工参数研究[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(1): 54-58.
- SUN Y Y, ZHOU S H, XIANG K, *et al.* Study on the construction parameters of shield tunnelling in short-distance undercrossing the existing tunnel[J]. *China Railway Science*, 2010, 31(1): 54-58. (In Chinese)
- [11] 房明, 刘镇, 周翠英, 等. 新建隧道盾构下穿施工对既有隧道影响的三维数值模拟[J]. 铁道科学与工程学报, 2011, 8(1): 67-72.
- FANG M, LIU Z, ZHOU C Y, *et al.* 3-D numerical simulation of influence of undercrossing shield construction on existing tunnel[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2011, 8(1): 67-72. (In Chinese)
- [12] 祝思然, 黄佩格, 矫伟刚, 等. 盾构近距离下穿既有地铁隧道沉降控制技术研究[J]. 隧道建设, 2016, 36(2): 234-240.
- ZHU S R, HUANG P G, JIAO W G, *et al.* Study on settlement control technologies for shield tunnel closely crossing underneath existing metro tunnel[J]. *Tunnel Construction*, 2016, 36(2): 234-240. (In Chinese)
- [13] 汪洋, 何川, 曾东洋, 等. 盾构隧道正交下穿施工对既有隧道影响的模型试验与数值模拟[J]. 铁道学报, 2010, 32(2): 79-85.
- WANG Y, HE C, ZENG D Y, *et al.* Model test and numerical simulation of influence of perpendicular undercross shield tunnel construction on existing tunnel[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2010, 32(2): 79-85. (In Chinese)
- [14] 马险峰, 何蓓, 王俊淞. 软土地区新建盾构隧道下穿越既有隧道的离心模拟研究[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(1): 79-84.
- MA X F, HE L Q, WANG J S. Centrifuge modeling on the effects of shield tunnel crossing below the existing tunnels in soft clay[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2012, 29(1): 79-84. (In Chinese)
- [15] 王如路. 上海地铁盾构隧道纵向变形分析[J]. 地下工程与隧道, 2009(4): 1-6.
- WANG R L. Longitudinal deformation analysis for Shanghai subway tunnel constructed by shield method[J]. *Underground Engineering and Tunnels*, 2009(4): 1-6. (In Chinese)
- [16] 林存刚. 盾构掘进地面隆陷及潮汐作用江底盾构隧道性状研究[D]. 杭州: 浙江大学建筑工程学院, 2014: 110-119.
- LIN C G. Research on shield tunnelling-induced ground surface heave and subsidence and behavior of underwater shield driven tunnels subject to tidal bores[D]. Hangzhou: College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, 2014: 110-119. (In Chinese)
- [17] 魏纲. 盾构法隧道施工引起的土体变形三维解[C]//第二届全国工程安全与防护学术会议论文集. 北京: 中国岩石力学与工程学会, 2010: 369-374.
- WEI G. 3-D analytical solution of ground deformation induced by shield tunneling construction[C]//Proceedings of the Second National Conference on Engineering Security and Protection. Beijing: Chinese Society for Rock Mechanics & Engineering, 2010: 369-374. (In Chinese)
- [18] 魏纲. 盾构法隧道施工引起的土体变形预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(2): 418-424.
- WEI G. Prediction of ground deformation induced by shield tunneling construction[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(2): 418-424. (In Chinese)
- [19] 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 F Y, CHU F, SONG Z, *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. (In Chinese)
- [20] SHEN S L, WU H N, CUI Y J, *et al.* Long-term settlement behavior of metro tunnels in the soft deposits of Shanghai[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, 40: 309-323.
- [21] VESIC A B. Bending of beams resting on isotropic elastic solids[J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1961, 87(2): 35-53.
- [22] 周顺华, 何超, 肖军华. 环间错台效应下基坑开挖引起临近地铁盾构隧道变形的能量计算法[J]. 中国铁道科学, 2016, 37(3): 53-60.
- ZHOU S H, HE C, XIAO J H. Energy method for calculating deformation of adjacent shield tunnels due to foundation pit excavation considering step between rings[J]. *China Railway Science*, 2016, 37(3): 53-60. (In Chinese)
- [23] 刘晓强, 梁发云, 张浩, 等. 隧道穿越引起地下管线竖向位移的能量变分分析方法[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 2): 217-222, 231.
- LIU X Q, LIANG F Y, ZHANG H, *et al.* Energy variational solution for settlement of buried pipeline induced by tunneling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(S2): 217-222, 231. (In Chinese)
- [24] 林盼达, 张冬梅, 闫静雅. 运营盾构隧道结构安全评估方法研究[J]. 隧道建设, 2015, 35(增刊 2): 43-49.
- LIN P D, ZHANG D M, YAN J Y. Study on assessment method for structural safety of operating shield-bored tunnels[J]. *Tunnel Construction*, 2015, 35(S2): 43-49. (In Chinese)