

盾构上跨复合岩土层既有隧道管片力学分析

周经纬¹, 黄戡¹, 刘峥嵘², 孙逸玮¹, 王栋¹, 邱郎¹

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 湖南省衡永高速公路建设开发有限公司, 湖南 衡阳 421600)

摘 要: 目前, 地铁隧道采用盾构法施工趋于常态化, 但传统荷载体系在复合岩土层中盾构隧道上跨既有隧道管片的受力计算中还存在一定局限性。为解决该问题, 本研究通过修正惯用法与梁-弹簧模型的优缺点, 提出了关于盾构上跨复合岩土层既有隧道管片的荷载体系与计算方法, 并依托长沙地铁4号线圭塘站区间隧道工程, 采用有限元模型对比分析了梁-弹簧模型与本方法结果。研究结果表明: 穿越盾构后, 既有隧道竖向位移趋势明显, 盾构隧道管片位移引起拱顶与拱底的地层被动抗力不可忽略。梁-弹簧模型夸大了盾构隧道拱底处的主动土压力, 未考虑到下部岩层对盾构隧道管片切向变形抑制较弱, 且其对切向弹簧的设置不合理。本方法更符合复合岩土层中盾构隧道上跨既有隧道管片的受力情况, 该结论可为类似工程提供参考。

关键词: 盾构隧道; 盾构上跨; 复合岩土层; 梁-弹簧模型; 地层被动抗力

中图分类号: U45

文献标志码: A

Analysis of segment mechanics characteristics of shield tunnel over-spanning existing tunnel in composite rock-soil layer

ZHOU Jingwei¹, HUANG Kan¹, LIU Zhengrong², SUN Yiwei¹, WANG Dong¹, QIU Lang¹

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Hunan Hengyong Highway Construction and Development Co., Ltd., Hengyang 421600, China)

Abstract: At present, the shield construction of metro tunnels tends to be normal. However, there are some limitations in using traditional load system to calculate the force of shield tunnel in composite rock-soil layer. This study proposes the load system and calculation method of the existing tunnel segment of the shield up-span composite rock-soil layer by analyzing the advantages and disadvantages of the modified conventional method and the beam-spring model. Based on the section tunnel project of Guitang Station of Changsha Metro Line 4, the results of the beam-spring model and the proposed method are compared and analyzed by establishing the finite element model. The results show that after crossing the shield, the vertical displacement trend of the existing tunnel is obvious, and the passive resistance of the stratum at the top and bottom of the arch caused by the segment displacement of the shield tunnel cannot be ignored. The beam-spring model exaggerates the active earth pressure at the arch bottom of the shield tunnel, and does not consider that the lower rock stratum has weak inhibition on the tangential deformation of the shield tunnel segment, and its setting of the tangential spring is unreasonable. The proposed method is more in line with the stress condition of the segment of the shield tunnel in the composite rock and soil layer, which can provide a reference for similar projects.

Key words: shield tunnel; shield penetration; composite rock-soil layer; beam-spring model; passive ground resistance

收稿日期: 2021-01-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52078060); 湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ4606); 湖南省教育厅科学研究重点项目(18A127); 长沙理工大学“双一流”科学研究国际合作拓展项目(2018IC19); 长沙理工大学土木工程优势特色重点学科创新性项目(18ZDXK05)

作者简介: 周经纬(1997—), 男, 长沙理工大学研究生。

近年来,中国不断推进城镇化建设,促进了地铁建设发展,盾构隧道的使用愈发常态化,地铁换乘站相较于普通地铁站的结构更复杂,埋深更大,还会发生盾构隧道穿越既有隧道的情况^[1-4]。中国不同地区的地质情况不同,换乘站盾构隧道处于复合岩土层范围的情况时常发生。当隧道管片同时处于两种或两种以上性质悬殊的地层中,两者的受力情况区别较大。当这两种情况同时发生时,处于复合岩土层的既有隧道会出现不同程度的沉降、扭转,并出现裂缝。因此,研究盾构穿越复合岩土层后隧道管片的力学特性与变形形态非常有必要。张治国等^[5]建立多层基地连续弹性分析方法,分析了层状地基中新建隧道开挖对旧隧道的影响。张孟喜等^[6]依托广州地铁七号线工程,采用数值模拟与现场监测的方法,解决了全风化岩层中盾构掘进时注浆压力取值与既有隧道变形控制的问题。周济民等^[7]依托狮子洋水下盾构隧道工程,总结了实际工程中管片受外荷载引起内力变化的规律,分析了复合地层中盾构隧道管片内力的分布形态。

盾构穿越对既有隧道的影响和复合地层中盾构隧道管片内力的分布已有丰富的研究成果,但对于复合岩土层中新建盾构隧道上跨既有隧道管片的荷载体系与计算方法仍存争议。本研究分析惯用法与梁-弹簧模型的优点并修正其不足,提出关于复合岩土层中盾构隧道上跨既有隧道管片的荷载体系与计算方法,并将新方法与梁-弹簧模型进行对比。

1 传统计算方法

1.1 主要计算方法

目前,中国盾构隧道管片结构的计算方法主要分为有限元法与荷载-结构法。有限元法可分为二维平面分析与三维空间分析。荷载结构法根据盾构隧道管片接头刚度的不同而采用不同的计算方法。当管片接头刚度与本体刚度相同时,采用惯用法与修正惯用法;当管片接头刚度为0时,采用多铰圆环法;当管片接头刚度需要考虑环向刚度与纵向刚度时,采用梁-弹簧模型。各方法对比见表1。

其中,修正惯用法与梁-弹簧模型能反映大部分情况下结构的实际受力情况,但在计算复合岩土层盾构上跨既有隧道管片的结构受力时,仍存在一定局限性。

表1 各计算方法对比

Table 1 Comparison of calculation methods

项目	基本假定与计算体系	适用范围
惯用法	认为盾构隧道衬砌管片相邻环之间错缝拼装,可近似假定为均质刚性圆环,将垂直方向地层抗力设为均布荷载,水平方向地层抗力设为等腰三角形分布荷载	当盾构隧道管片采用相邻环错缝拼装且隧道所处地层条件较为接近时,可使用该方法,但对于管片接头处铰接部分欠考虑
修正惯用法	相比惯用法,引入了弯曲刚度有效率 η 与弯矩提高率 ζ ,考虑了管片接头处铰接部分,以及相邻管片之间力的传递与重新分配	当盾构隧道管片采用相邻环错缝拼装且隧道所处地层条件较为接近时可使用该方法
多铰圆环法	假定盾构隧道管片衬砌接头处为完全铰接的自由圆环,但多铰圆环结构具有不稳定性	当盾构隧道管片接头处刚度为0,且隧道所处地层围岩状态良好时可使用该方法
梁-弹簧模型	考虑了盾构隧道管片接头处铰的部分,以及相邻管片之间错峰拼装效果,一般根据Winkler假定计算	当盾构隧道管片需要考虑环向刚度与纵向刚度,且采用相邻管片错峰拼装时可使用该方法

1.2 修正惯用法

修正惯用法由日本学者提出,其荷载模式如图1所示。该方法将隧道管片结构与土体之间复杂的相互作用简化为侧向地层抗力与拱底反力,极大缩短了计算时间。其中, q_{w_1} 为衬砌圆环顶部位置的侧向水压力; q_{w_2} 为衬砌圆环底部位置的侧向水压力。在处理拱底反力时,假设拱底反力与土层位移无关,将拱底主动土压力与被动抗力简化为拱底反力,计算时只需满足垂直方向上力的平衡条件即可。

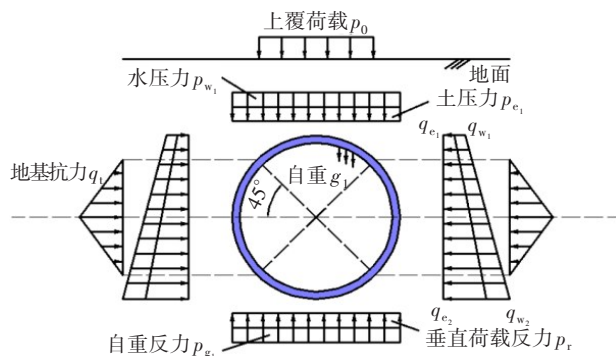


图1 修正惯用法荷载体系

Fig. 1 Modified routine load system

修正惯用法部分主动土压力与地基抗力的计算如下:

1) 侧向土压力

拱顶侧向土压力 q_{e_1} 为:

$$q_{e_1} = P_{e_1} \times \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi_1}{2}) - 2C_1 \times \tan(45^\circ - \frac{\varphi_1}{2}) \quad (1)$$

拱底侧向土压力 q_{e_2} 为:

$$q_{e_2} = q_{e_1} + 2R_0 \times \gamma \times \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi_1}{2}) \quad (2)$$

式中: R_0 为衬砌圆环外半径; P_{e_1} 代表上覆土压力; γ 为盾构隧道上覆土加权平均重度; φ_1 为盾构隧道上覆土加权平均内摩擦角; C_1 为盾构隧道上覆土加权平均黏聚力。

2) 侧向地基抗力

盾构隧道衬砌圆环水平中心线处的变形量为:

$$y = \frac{(2P_{e_1} - q_{e_1} - q_{e_2} + \pi g)R_0^4}{24(\eta S_B + 0.045kR_0^4)} \quad (3)$$

盾构隧道衬砌圆环水平中心线处的地基抗力 q_t 为:

$$q_t = k \times y \quad (4)$$

式中: η 为折减系数; S_B 为衬砌圆环抗弯刚度, $S_B = EI$, E 为衬砌圆环弹性模量, I 为衬砌圆环截面惯性矩; k 为衬砌圆环侧向地层地基反力系数。

根据修正惯用法计算原理与公式可知,修正惯用法可应用于均一软土地层或均一硬土地层,但应用于复合岩土层中的盾构隧道上跨既有隧道的管片受力计算时,存在以下问题:

1) 拱顶被动抗力处理

张晓清等^[8]研究发现,在盾构上跨时,既有隧道隆起趋势明显;在盾构下穿时,既有隧道下沉趋势明显。此时,修正惯用法过于简化盾构隧道管片顶部的受力情况,夸大了上部土体的主动土压力,只考虑了上覆荷载、土压力和水压力,忽略了管片位移引起的土体被动抗力,这与实际情况不符。

2) 侧向土压力处理

修正惯用法在处理侧向土压力时,将其分为主动土压力与被动抗力两个部分。根据复合岩土层实测围岩压力分布情况可知,下部岩层的围岩压力值明显小于上部软土层的,且下部岩层的围岩压力分布特征与上部软土层的区别较大^[9-12]。这与两者物理性质差异较大有关,上部软土层强度小,变形快,但下部岩层围岩强度高,自稳能力强,侧向主动土压力在软土层与岩层交界处存在突变减小,而由

位移引起的被动抗力在该交界处则存在突变增大。

3) 拱底反力处理

盾构隧道开挖后,下部土体的主动土压力作用在隧道底部,由管片自重与上部荷载引起的被动抗力在一定时效后发生作用。修正惯用法将主动土压力与被动抗力简化为拱底反力,在计算时取垂直方向的平衡力,这一做法夸大了下部土体的主动压力,忽略了被动抗力。对于复合岩土层,下部岩层围岩强度高,自稳能力强,足以抵消部分主动土压力,这种条件下修正惯用法并不能体现管片真实的受力情况。

1.3 梁-弹簧模型

梁-弹簧模型利用地基弹簧模拟荷载,将盾构隧道管片看成置于弹性地基上的圆弧梁,其荷载模式如图2所示。梁-弹簧模型各部分的主动土压力计算方法与修正惯用法类似,两者主要区别在于地层被动抗力的计算。

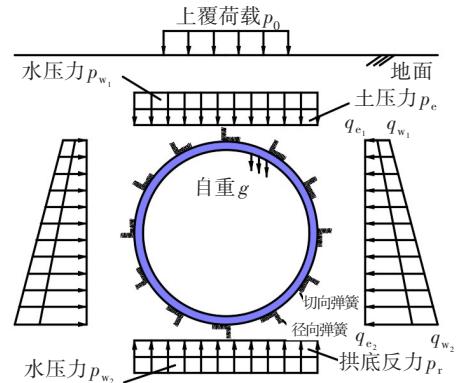


图2 梁-弹簧模型荷载体系

Fig. 2 Beam-spring model load system

梁-弹簧模型应用于复合岩土层中盾构隧道上跨既有隧道管片的受力计算时,存在以下问题:

1) 侧向土压力处理

梁-弹簧模型在计算侧向土压力时,盾构管片处于两层土中,采用加权平均的方法计算主动土压力。在上部软土层与下部岩层的交界处,主动土压力存在突变,加权平均方法却无法体现力的突变这一特点,这与修正惯用法处理侧向土压力时存在的问题类似。

2) 岩层被动抗力处理

被动抗力分为径向与切向两个方向,在上部软土层中,软土强度小,变形快,能够较好地贴合管片衬砌迎水面,对管片径向变形与切向变形有着较好的抑制作用,故采用径向变形弹簧与切向变形弹簧

来模拟实际情况。在下部岩层中,岩层围岩强度高,变形速度慢,在盾构开挖注浆达到一定强度之前,管片已经完成径向位移,切向弹簧的设置与实际情况不符。

综上所述,传统的修正惯用法与梁-弹簧模型虽在简化计算方面有优势,但应用于复合岩土层中盾构隧道上跨既有隧道的管片受力计算时仍存在许多不足,因此,建立适合该情况的荷载模式与计算方法是必要的。

2 修正计算方法

依据地下建筑结构^[9],提出盾构隧道管片圆环内力计算方法,隧道管片所受荷载如图3所示。其中, q_{w3} 为位于土层的衬砌圆环与岩层交界处的由岩层提供的侧向水压力; q_{w4} 为衬砌圆环处于岩层底部位置的侧向水压力。

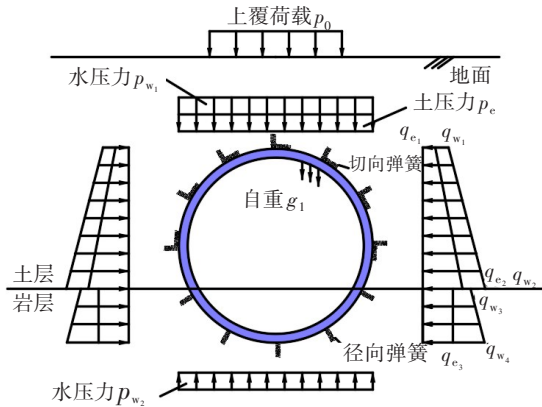


图3 本方法荷载体系

Fig. 3 The load system proposed in this paper

本方法各部分荷载具体计算如下:

1) 既有隧道上方竖向主动土压力

新建隧道替代了原位置处的土体,如图4所示。既有隧道上方竖向土压力的计算表达式为:

$$P_{e1} = k + h_2 \times \gamma \quad (5)$$

式中: P_{e1} 为上覆土压力,kN/m²; h_2 为既有隧道拱顶至新建隧道底部的竖直距离,m; k 为新建隧道的基底反力,kN/m²。

其中,

$$k = g_2 + \gamma \times \left[h_1 + D \left(1 - \frac{\pi}{4} \right) \right] + p_0 \quad (6)$$

$$g_2 = \pi t \gamma_c \quad (7)$$

式中: g_2 为新建隧道自重,kN/m²; h_1 为新建隧道埋

深,m; D 为新建隧道直径,m; P_0 为上覆荷载,kN/m²; t 为新建隧道管片厚度,m; γ_c 为钢筋混凝土重度,kN/m³。

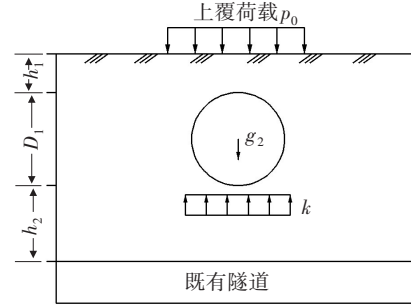


图4 土压力计算示意

Fig. 4 Diagram of earth pressure calculation

2) 侧向主动土压力

拱顶侧向主动土压力 q_{e1} 与土层交界处侧向主动土压力 q_{e2} 按照朗肯主动土压力公式进行计算:

$$q_{e1} = P_{e1} \times \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi_1}{2}) - 2C \times \tan(45^\circ - \frac{\varphi_1}{2}) \quad (8)$$

$$q_{e2} = P_{e2} \times \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi_1}{2}) - 2C \times \tan(45^\circ - \frac{\varphi_1}{2}) \quad (9)$$

依据浅埋岩层荷载理论^[10],下部岩层侧向主动土压力可简化为均布力进行计算:

$$q_{e3} = P_{e2} \times \tan^2(45^\circ - \frac{\varphi_2}{2}) \quad (10)$$

式中: P_{e2} 为上部软土层与下部岩层交界处竖向土压力,kN/m²; φ_1 为上部软土层内摩擦角,(°); φ_2 为下部岩层内摩擦角,(°); C 为上部软土层黏聚力,kPa。

3) 拱底主动土压力

由于下部岩层围岩强度高,自稳能力强,自身能够承担两侧竖直压力产生的侧压力,因此不考虑拱底主动土压力。

4) 土层被动抗力

上部软土层强度小,变形速度快,能够较好地贴合盾构隧道管片,握裹作用明显,所以采用径向弹簧与切向弹簧表示软土层被动抗力。下部岩层围岩强度高,变形速度慢,在盾构开挖注浆达到一定强度之前,管片已经完成径向位移。因此,只设置径向弹簧,不设切向弹簧。

考虑不同地层的物理性质差异较大,应该按照不同地层抗力系数来设置不同参数的弹簧。

根据朱合华等^[11]研究,取直梁-弹簧模型进行

计算,如图5所示。

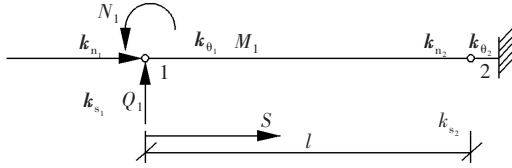


图5 直梁-弹簧模型节点力

Fig. 5 Straight beam-spring model nodal force

其中,弹簧轴向、剪切、转动效应分别以轴向刚度 k_n 、剪切刚度 k_s 和转动刚度 k_0 来描述。固定结点2,结点1受轴力 N_1 、剪力 Q_1 和弯矩 M_1 的作用,系统应变余能 U 为:

$$U = \frac{1}{2} \int_0^l \frac{M^2}{EI} ds + \frac{1}{2} \int_0^l \frac{N^2}{EA} ds + \frac{1}{2} \int_0^l \frac{\mu Q^2}{GA} ds + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \left(\frac{M^2}{k_{0_i}} + \frac{N^2}{k_{n_i}} + \frac{Q^2}{k_{s_i}} \right) \Big|_0^l \quad (11)$$

式中: $N=N_1$; $Q=Q_1$; $M=M_1-Qs$, s 为梁上的某点与结点1距离; E 为梁的弹性模量; G 为梁的剪切模量; μ 为梁的泊松比; I 为梁的惯性矩; A 为梁的横截面面积; l 为梁的长度。

基于卡氏第二定律,结点1的位移与力的关系式为:

$$\delta_1 = \begin{bmatrix} a_1 & 0 & 0 \\ 0 & b_1 & d_1 \\ 0 & d_1 & c_1 \end{bmatrix} = F_1 \quad (12)$$

$$\text{式中: } a_1 = \frac{l}{EA} + \frac{1}{k_{n_1}} + \frac{1}{k_{n_2}}; b_1 = \frac{l^3}{3EI} + \frac{1}{k_{s_1}} + \frac{1}{k_{s_2}} + \frac{l^2}{k_{0_2}}; c_1 = \frac{l}{EI} + \frac{1}{k_{0_1}} + \frac{1}{k_{0_2}}; d_1 = -\frac{l^2}{2EI} - \frac{l}{k_{0_2}}; \delta_1 \text{为结点1的位移矩阵;} F_1 \text{为结点1的力矩阵。}$$

对式(22)求逆矩阵,得:

$$F_1 = k_{11} \delta_1 \quad (13)$$

$$\text{式中: } k_{11} = \begin{bmatrix} \frac{1}{a_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{c_1}{g_1} & -\frac{d_1}{g_1} \\ 0 & -\frac{d_1}{g_1} & \frac{b_1}{g_1} \end{bmatrix}; g_1 = b_1 c_1 - d_1^2$$

由静力平衡关系,得:

$$F_2 = k_{21} \delta_1 \quad (14)$$

$$\text{式中: } k_{21} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & l & -1 \end{bmatrix} k_{11}; F_2 \text{为结点2力矩阵。}$$

再将结点1固定,同理可得:

$$F_2 = k_{22} \delta_2 \quad (15)$$

$$F_1 = k_{12} \delta_2 \quad (16)$$

$$\text{式中: } k_{22} = \begin{bmatrix} \frac{1}{a_2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{c_2}{g_2} & -\frac{d_2}{g_2} \\ 0 & -\frac{d_2}{g_2} & \frac{b_2}{g_2} \end{bmatrix}; a_2 = a_1; b_2 = \frac{l^3}{3EI} + \frac{1}{k_{s_1}} + \frac{1}{k_{s_2}} + \frac{l^2}{k_{0_1}}; c_2 = c_1; d_2 = \frac{l^2}{2EI} + \frac{l}{k_{0_1}}; \delta_2 \text{为结点2的位移矩阵;} k_{12} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & l & -1 \end{bmatrix}^{-1} k_{22}。$$

最终得到直梁-弹簧模型结点的力与结点的位移之间的关系:

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

5) 水压力和既有隧道自重

① 竖向水压力:

$$p_{w_1} = \gamma_w \cdot H_{w_1} \quad (18)$$

$$p_{w_2} = \gamma_w \cdot H_{w_3} \quad (19)$$

② 侧向水压力:

$$q_{w_1} = \gamma_w \cdot (H_{w_1} + \frac{\delta}{2}) \quad (20)$$

$$q_{w_2} = q_{w_3} = \gamma_w \cdot (H_{w_2} + \frac{\delta}{2}) \quad (21)$$

$$q_{w_3} = \gamma_w \cdot (H_{w_3} + \frac{\delta}{2}) \quad (22)$$

③ 既有隧道管片自重:

$$g = \gamma_c \cdot \delta \quad (23)$$

式中: p_{w_1} 为拱顶竖向水压力, kN/m^2 ; p_{w_2} 为拱底竖向水压力, kN/m^2 ; γ_w 为水的重度, kN/m^3 ; H_{w_1} 为地下水位线与既有隧道拱顶水平线距离, m ; H_{w_2} 为地下水位线与地层分界线的距离, m ; H_{w_3} 为地下水位线与拱底水平线距离, m ; δ 为既有隧道管片的厚度, m 。

3 工程案例验证

3.1 工程背景

本文以长沙地铁5号线与地铁4号线的换乘站圭塘站区间的隧道复合岩土层断面为例,断面里程桩号为DK26+975。在该断面处盾构隧道穿越了由可塑硬塑粉质黏土、强风化砾岩构成的复合岩土层,地下水位埋藏深度1.50 m,既有隧道埋深约18.00 m,后建上跨隧道埋深约12.00 m,两隧道呈90°交叉,断面地质剖面如图6所示,位置关系如图7所示,地层物理力学参数见表2。

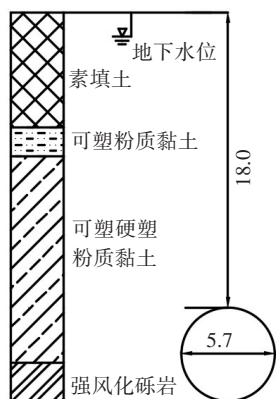


图6 断面地质剖面图(单位:m)

Fig. 6 The section geological profile(unit:m)

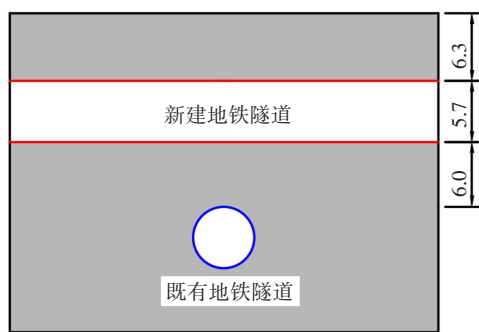


图7 既有隧道与新建隧道位置关系(单位:m)

Fig. 7 Position relationship between existing tunnels and new tunnels(unit:m)

表2 地层参数表

Table 2 Physico-mechanical parameters of two tested sections

地层	地层厚度/ m	天然重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	变形模量/ MPa	静止侧压力 系数	基床系数/ ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1}$)
素填土	7.0	19.8	9.15	7	4.38	—	—
可塑粉质黏土	1.8	19.4	22.36	12	6.98	0.55	7.1
可塑硬塑粉质黏土	12.5	18.5	17.84	18	7.61	0.62	11.5
强风化砾岩	2.4	23.9	—	45	1.49	0.30	75.0

3.2 有限元模型建立

管片衬砌采用各向同性弹性本构模型模拟,单元类型采取1D梁单元,材料为C50混凝土,弹性模量为34.5 GPa,容重为26 kN/m^3 ,泊松比为0.2,截面为实心矩形。上部软土层与下部岩层地基弹簧均采用曲面弹簧的模拟,上部软土层地基反力系数取为 1.15×10^4 kN/m^3 ,弹性模量取为7.69 MPa,下部岩层地基反力系数取为 7.50×10^4 kN/m^3 ,弹性模量取为53.83 MPa。考虑到实际管片结构衬砌与土层接触情况^[12-14],地基弹簧设为仅在受压时生效。管片衬砌有限元模型如图8所示。

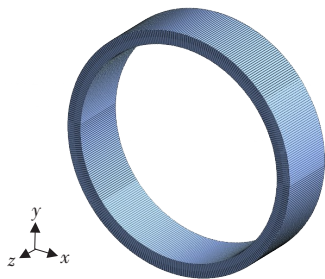


图8 管片衬砌有限元模型

Fig. 8 Finite element model model of segment lining

3.3 结果对比

修正惯用法在处理拱顶土压力与拱底反力时,将围岩压力简化为主动土压力,可在均一地层时简化计算量,但新建盾构上跨后,既有隧道隆起趋势明显^[7],地层变形产生的被动抗力不可忽略。修正惯用法在这种工况下参考意义不大,因此,本研究对比了梁-弹簧模型和提出的新方法荷载体系。根据梁-弹簧模型和荷载体系计算方法,分别对模型施加荷载。

1) 结构变形分析

盾构隧道管片变形如图9所示。根据传统梁-弹簧模型计算,得到盾构隧道管片拱底向上位移1.88 mm,而本研究所提方法计算得到拱底向下位移为3.12 mm。实际工程中,盾构隧道管片衬砌结构拱底受到的主要是由管片结构变形挤压岩土层时产生的地层被动抗力,而非下部岩土层提供的主动土压力。该隧道断面埋深为18.00 m,属于深埋隧道,且下部岩土层基床系数较大,拱底向下位移为3.12 mm,更符合实测数据与施工现场经验。

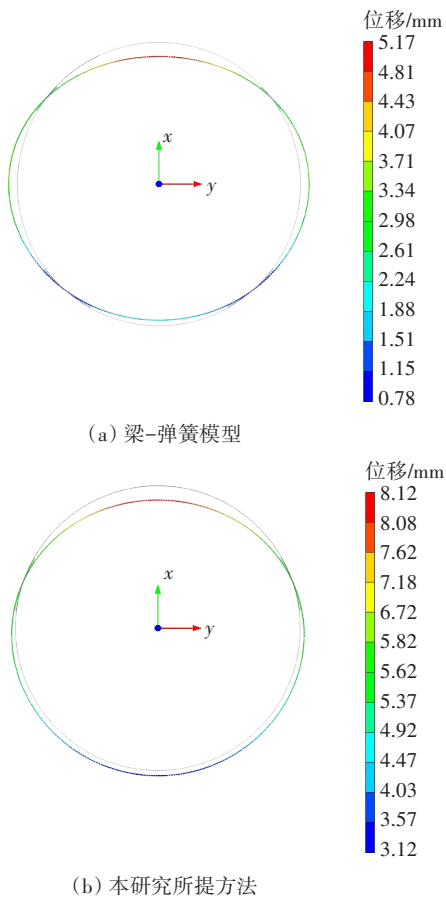


图9 盾构隧道管片变形

Fig. 9 Shield tunnel segment deformation

2) 结构内力分析

盾构隧道管片弯矩对比如图10所示。从图10可以看出,梁-弹簧模型与本方法计算得到的弯矩最大差值出现在拱底 270° 处,最大差值为 $89.38 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。在拱底的 $240^\circ\sim 300^\circ$ 范围内,两者弯矩的平均差值为 $60.81 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。在两侧的 $134^\circ\sim 237^\circ$ 范围内,二者的平均差值为 $33.28 \text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

盾构隧道管片轴力对比如图11所示。从图11可以看出,梁-弹簧模型与本研究所提方法计算得到的轴力最大差值出现在拱底 270° 处,最大差值为 350.15 kN 。在拱底 $240^\circ\sim 300^\circ$ 范围内,二者轴力的平均差值为 310.14 kN 。在拱底 $144^\circ\sim 198^\circ$ 范围内,二者轴力的平均差值为 23.49 kN 。

当盾构隧道管片处于上部软土层范围时,梁-弹簧模型与本方法计算得到的弯矩、轴力分布规律相似。其中:梁-弹簧模型计算得到的拱底处弯矩大于本方法计算结果;梁-弹簧模型计算得到的拱底处轴力大于本方法计算结果。但在上部软土层与下部岩层交界处,梁-弹簧模型与本方法计算得到的结果开始出现差异,

通过分析可知:①当盾构隧道管片处于下部岩层范围时,由于岩层基床系数较大,盾构隧道管片拱底处受到的主动土压力几乎为零,这主要是受到隧道结构位移引起的地层被动抗力的影响,且传统梁-弹簧法过分夸大了拱底处主动土压力,因此计算得到拱底处的弯矩较大。②下部岩层围岩强度高,变形速度慢,在盾构开挖注浆达到一定强度之前,管片已经完成径向位移,本方法只设置径向弹簧,不设切向弹簧,计算得到的轴力结果与实际情况更为接近。

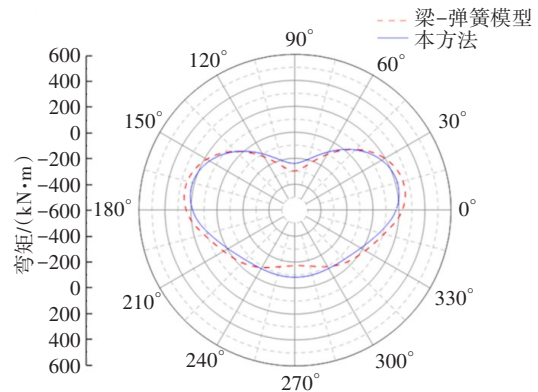


图10 盾构隧道管片弯矩对比

Fig. 10 Comparison of bending moments of shield tunnel segments

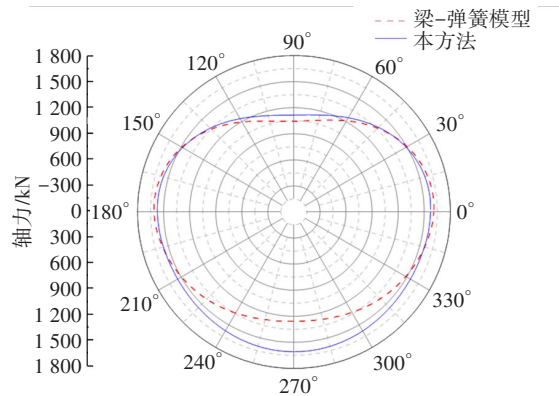


图11 盾构隧道管片轴力对比

Fig. 11 Comparison of axial force of shield tunnel segments

4 结论

本研究针对盾构隧道上跨复合岩土层的情况,探究了既有隧道管片的荷载模式与计算方法,对比分析惯用法、修正惯用法、多铰圆环法和梁-弹簧模型计算方法的优点与局限性,并提出盾构上跨复合岩土层情况下既有隧道管片的受力计算方法。采

用MIDAS GTS NX有限元软件,建立既有隧道管片有限元模型,以长沙地铁4号线圭塘站区间的隧道工程为例,对比各方法下管片的变形与受力,得出以下结论:

1) 既有隧道管片采用修正惯用法与梁-弹簧模型进行受力计算时存在的局限:①修正惯用法仅考虑了两侧地层抗力,而盾构穿越后,既有隧道竖向位移趋势明显,盾构隧道管片位移引起拱顶与拱底地层的被动抗力不可忽略。②梁-弹簧模型夸大了盾构隧道拱底处受到的主动土压力,未考虑到下部岩层对盾构隧道管片切向变形抑制较弱的情况。

2) 本研究提出的新方法主要考虑了:①新建隧道替代了原位置处土体,导致既有隧道上部竖向压力减小,引起既有隧道管片形心的上浮趋势。②复合岩土层中上部软土层与下部岩层产生的主动土压力与被动抗力区别较大,对两者需采用不同计算方法。

3) 建立有限元模型,对比了梁-弹簧模型与本研究新方法计算得到的管片变形与受力结果,可知梁-弹簧模型较新方法计算得到拱底处的变形与弯矩偏大,拱底处的轴力偏小。本研究所提方法更符合盾构穿越复合岩土层既有隧道管片的受力情况,可为类似工程提供参考。

参考文献(References):

- [1] LEI M F, LIN D Y, HUANG Q Y, et al. Research on the construction risk control technology of shield tunnel underneath an operational railway in sand pebble formation: a case study [J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2020, 24 (10): 1558-1572.
- [2] CLARKE J A, LAEFER D F. Evaluation of risk assessment procedures for buildings adjacent to tunnelling works [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, 40: 333-342.
- [3] DING L Y, ZHANG L M, WU X G, et al. Safety management in tunnel construction: case study of Wuhan metro construction in China [J]. *Safety Science*, 2014, 62: 8-15.
- [4] LI X G, YUAN D J. Development of the safety control framework for shield tunneling in close proximity to the operational subway tunnels: case studies in mainland China [J]. *Springer Plus*, 2016, 5(1): 1-44.
- [5] 张治国, 黄茂松, 王卫东. 层状地基中隧道开挖对临近既有隧道的影响分析 [J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(4): 600-608.
ZHANG Zhiguo, HUANG Maosong, WANG Weidong. Analysis on response of existing tunnels due to adjacent tunneling in multi-layered soils [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(4): 600-608.
- [6] 张孟喜, 张靖, 吴应明, 等. 全风化岩层中双线盾构上穿邻近地铁隧道影响分析 [J]. *土木工程学报*, 2019, 52(9): 100-108.
ZHANG Mengxi, ZHANG Jing, WU Yingming, et al. Analysis of double-line shield tunnel over-crossing subway tunnel in completely weathered rock formation [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(9): 100-108.
- [7] 周济民, 何川, 肖明清, 等. 狮子洋水下盾构隧道衬砌结构受力的现场测试与计算分析 [J]. *铁道学报*, 2012, 34(7): 115-121.
ZHOU Jimin, HE Chuan, XIAO Mingqing, et al. Field test and numerical simulation of mechanics of segment lining of shiziyang underwater shield tunnel [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2012, 34(7): 115-121.
- [8] 张晓清, 张孟喜, 李林, 等. 多线叠交盾构隧道近距离穿越施工扰动机制研究 [J]. *岩土力学*, 2017, 38(4): 1133-1140.
ZHANG Xiaoqing, ZHANG Mengxi, LI Lin, et al. Mechanism of approaching construction disturbance caused by multi-line overlapped shield tunnelling [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(4): 1133-1140.
- [9] 朱合华. 地下建筑结构 [M]. 3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016: 233-278.
ZHU Hehua. *Underground building structure* [M]. 3rd edition. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016: 233-278.
- [10] 李志业, 曾艳华. 地下结构设计原理与方法 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2003: 178-181.
LI Zhiye, ZENG Yanhua. *Principle and method of underground structure design* [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2003: 178-181.
- [11] 朱合华, 陶履彬. 盾构隧道衬砌结构受力分析的梁-弹簧系统模型 [J]. *岩土力学*, 1998, 19(2): 26-32.
ZHU Hehua, TAO Lyubin. Study on two beam-spring models for the numerical analysis of segments in shield tunnel [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1998, 19(2): 26-32.
- [12] 梁敏飞, 张哲, 李策, 等. 盾构隧道双层衬砌结构三维力学分析模型及验证 [J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(5): (下转第99页)

- YOU Huangyang, XU Lunhui. Optimization on signal timing for preventing urban isolated intersection which contains short sections from overflowing [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2014, 34(1): 147-152.
- [9] 李伟. 短连线交叉口信号配时优化[J]. 公路, 2017, 62(1): 164-168.
- LI Wei. Optimization of signal timing for short line intersection[J]. Highway, 2017, 62(1): 164-168.
- [10] 杨晓芳, 芮丽丽. 基于车流无缝衔接的短连线交叉口协调控制方法[J]. 系统工程, 2010, 28(11): 116-122.
- YANG Xiaofang, RUI Lili. Control of coordination of short-linked intersections based on the seamless connection [J]. Systems Engineering, 2010, 28(11): 116-122.
- [11] 肖秀春, 徐建闽. 近距离相邻交叉口信号协调控制模型研究[J]. 公路与汽运, 2011(1): 56-59.
- XIAO Xiuchun, XU Jianmin. Research on signal coordination control model of adjacent intersections [J]. Highways & Automotive Applications, 2011(1): 56-59.
- (责任编辑:李脉;校对:罗容;英文编辑:刘至真)

(上接第75页)

- reinforcement method of rock pillars in soft rock small clear distance tunnels[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(2): 373-379.
- [13] 扈萍, 马梁, 李萌, 王君鹏, 张西文. 小净距隧道后行洞开挖对先行洞的变形影响[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2022, 36(3): 246-251, 272.
- HU Ping, MA Liang, LI Meng, WANG Junpeng, ZHANG Xiwen. The influence of the excavation of the trailing hole of the small clear distance tunnel on the deformation of the leading hole [J/OL]. Journal of Jinan University (Natural Science Edition), 2022(3): 246-251, 272.
- (责任编辑:李脉;校对:罗容;英文编辑:李岳林)

(上接第90页)

- 892-899.
- LIANG Minfei, ZHANG Zhe, LI Ce, et al. Three-dimensional mechanical analysis model and verification of shield tunnels with double-layer linings [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(5): 892-899.
- [13] 黄戡, 詹艳云, 马启昂, 等. 基于正交设计的IV, V级围岩相似材料[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2018, 15(1): 92-97.
- HUANG Kan, ZHAN Yanyun, MA Qi'ang, et al. Similar materials of IV, V grade rock based on orthogonal design [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2018, 15(1): 92-97.
- [14] 邓衍, 刘辉, 刘耀坤, 等. 安平隧道顶端溶洞对其围岩稳定性的影响[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(1): 82-86.
- DENG Yan, LIU Hui, LIU Yaokun, et al. The influence of hidden Karst cave at the top of Anping tunnel on the stability of surrounding rock in Karst area [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(1): 82-86.
- (责任编辑:罗容;校对:李脉;英文编辑:刘至真)