

隧道下穿引起既有管廊竖向位移规律研究

于贵霞¹, 郭仙君², 王龙泉³, 唐小东³, 陈峰³, 姬永生⁴

(1. 江苏联合职业技术学院 无锡交通分院, 江苏 无锡 214151; 2. 扬州工业职业技术学院, 江苏 扬州 225000;

3. 中国联合工程有限公司, 杭州 310000; 4. 中国矿业大学 力学与土木工程学院 江苏省

土木工程环境灾变与结构可靠性重点实验室, 江苏 徐州 221008)

摘要: 盾构隧道下穿既有管廊施工易引起管廊竖向沉降和变形, 为控制其不利影响, 工程中常采用管廊底部注浆及减沉桩进行加固。针对双线盾构隧道下穿既有管廊工况, 研究了加固前后隧道施工引起的管廊竖向位移变化规律。分析了注浆层与减沉桩的加固机理, 考虑注浆区对地基土强度的增强作用及减沉桩对附加应力传递的影响。基于Mindlin解描述隧道开挖引起的附加应力场, 结合能量变分法推导了考虑加固条件下管廊竖向位移的理论计算公式。通过工程实例, 对理论计算结果与现场监测数据及数值模拟结果进行了对比验证, 并进一步分析了注浆加固长度 L_g 及地基抗力增强系数 k_m 对管廊沉降变形的影响。研究表明, 理论计算结果与实测及数值模拟结果吻合较好; 注浆与减沉桩加固措施能够有效减小管廊沉降变形; 随着 L_g 的增大, 管廊沉降控制效果增强, 但增幅逐渐减小; k_m 随减沉桩数量增加而增大, k_m 越大, 管廊沉降越小。工程中宜采用注浆层与减沉桩组合加固形式, 以获得更优的沉降控制效果。

关键词: 管廊沉降; 盾构下穿; 注浆层; 减沉桩; 沉降控制

中图分类号: U455.43

文献标志码: A

文章编号: 1004-3918(2026)02-0371-08

Study on Vertical Displacement Law of Existing Pipe Gallery Caused by Tunnel Underpass

YU Guixia¹, GUO Xianjun², WANG Longquan³, TANG Xiaodong³, CHEN Feng³, JI Yongsheng⁴

(1. Wuxi Transportation Branch of Jiangsu Union Technical Institute, Wuxi 214151, Jiangsu China;

2. Yangzhou Polytechnic Institute, Yangzhou 225000, Jiangsu China; 3. China United Engineering Co. Ltd., Hangzhou 310000, China;

4. Jiangsu Key Laboratory of Environmental Disaster and Structural Reliability in Civil Engineering, School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, Jiangsu China)

Abstract: Shield tunneling beneath existing utility tunnels may induce vertical settlement and deformation of the structure. To reduce adverse effects, bottom grouting and settlement reduction piles are commonly adopted for reinforcement. In this study, the vertical displacement behavior of an existing utility tunnel induced by double line shield tunneling is investigated before and after reinforcement. The reinforcement mechanisms of the grouted layer and settlement reduction piles are analyzed. The strengthening effect of the grouting zone on foundation soil and the influence of settlement reduction piles on additional stress transfer are considered. Based on the Mindlin solution

收稿日期: 2025-09-10

修回日期: 2025-11-05

接受日期: 2026-01-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51972337); 江苏高校“青蓝工程”培养对象项目资助(苏教师20242号)

作者简介: 于贵霞(1987-), 女, 讲师, 主要研究方向为土木工程

通信作者: 唐小东(1995-), 男, 工程师, 主要研究方向为土木工程, E-mail: tangxiaodong@chinacuc.com

引用格式: 于贵霞, 郭仙君, 王龙泉, 等. 隧道下穿引起既有管廊竖向位移规律研究[J]. 河南科学, 2026, 44(2): 371-378.

Yu G X, Guo X J, Wang L Q, et al. Study on vertical displacement law of existing pipe gallery caused by tunnel underpass[J]. Henan Science, 2026, 44(2): 371-378.

for additional stress caused by tunnel excavation and the energy variational method, a theoretical calculation formula for the vertical displacement of the utility tunnel under reinforced conditions is derived. An engineering case is used to compare the theoretical results with field monitoring data and numerical simulation results. Parametric analyses are further conducted to study the effects of grouting length L_g and foundation resistance enhancement coefficient k_m on tunnel settlement. The results show that the theoretical predictions agree well with measured and numerical results. Grouting and settlement reduction piles can effectively reduce vertical settlement of the utility tunnel. Increasing L_g enhances settlement control, but the improvement rate gradually decreases. The coefficient k_m increases with the number of settlement reduction piles, and a larger k_m leads to smaller settlement. In engineering practice, the combined use of a grouted layer and settlement reduction piles provides better settlement control.

Key words: pipe gallery settlement; shield underpass; grouting layer; settlement reduction piles; settlement control

0 引言

随着城市盾构隧道工程的快速发展,城市轨道交通建设规模不断扩大。截至2020年底,中国已有45个城市开通轨道交通线路,总里程达7978 km,在缓解城市交通拥堵方面发挥了重要作用^[1]。受浅层地下空间资源有限的影响,新建盾构隧道不可避免地需要在既有构筑物周围或下方施工,其中隧道下穿既有综合管廊的工况较为常见。综合管廊通常具有埋深浅、结构相对薄弱等特点,盾构施工引起的地层扰动易导致其产生竖向沉降甚至结构损伤,因此工程中往往需要在施工前对既有管廊采取预加固措施。研究预加固条件下隧道下穿引起的管廊变形规律,对保障管廊结构安全具有重要工程意义。

针对隧道下穿既有管廊问题,学者们主要采用经验公式、数值模拟、室内模型试验及理论分析方法开展研究。在经验公式方面,林子垚^[2]在Peck公式基础上考虑穿越角度和管廊刚度影响,提出了预测管廊变形的修正方法。在数值模拟方面,黄铖^[3]、林子垚^[2]分别利用ABAQUS和FLAC 3D软件研究了盾构施工对管廊内力和变形的影响。在室内模型试验方面,邹家琦^[4]通过物理模型试验分析了盾构下穿过程中管廊竖向位移的演化特征。在理论研究方面,刘平等^[5]和苗晨阳等^[6]分别基于不同力学模型推导了隧道下穿引起管廊变形的解析解。在加固效果研究方面,黄晓滨和王润炜^[7]、张树才^[8]、吉艳雷^[9]主要通过数值模拟方法分析了注浆、搅拌桩、减沉桩及其组合形式对管廊沉降的控制效果;刘慧芬等^[10]、崔允亮等^[11]结合工程实测与数值分析验证了多种加固方案的有效性。然而,现有研究仍以数值模拟和

工程经验为主,尚缺乏可用于分析加固条件下隧道下穿引起既有管廊竖向位移的理论计算方法。

基于此,本文以双线盾构隧道下穿既有管廊为研究工况,在管廊与隧道之间设置注浆加固区和减沉桩,建立隧道、管廊与加固措施的力学模型。考虑注浆区对地基土强度的增强作用及减沉桩对附加应力传递的影响,基于Mindlin解推导含加固土地层中管廊轴线处的附加应力计算公式,并结合能量变分法建立考虑减沉桩作用的管廊竖向位移理论解。通过工程实例对理论结果进行验证,并分析注浆加固长度 L_g 与地基抗力增强系数 k_m 对管廊沉降变形的影响规律。

1 计算方法

1.1 管廊底部注浆及减沉桩加固原理

图1给出了管廊在加固前后的受力模式示意。加固前,管廊底部地基抗力系数为 k ,当新建隧道近距离下穿时,隧道开挖引起的地层扰动会导致管廊产生竖向下沉变形。为控制管廊沉降,工程中常在管廊底部采用注浆与减沉桩相结合的加固方式。如图1(b)所示,管廊底部注浆形成的加固体可显著提高地基土刚度,使地基抗力系数由 k 增大至 k' ,从而增强土体对管廊的支撑作用。同时,减沉桩与注浆加固体相互连接,形成整体性较好的组合加固结构。当隧道下穿引起周围土体发生下沉时,组合加固体的竖向变形小于管廊本体;当管廊产生较大下沉趋势时,组合加固体能够向管廊提供向上的抗沉力,有效抑制管廊沉降。

参考文献[12]中对抗浮锚杆作用下结构受力模式的简化思路,在减沉桩与注浆加固体的共同作用

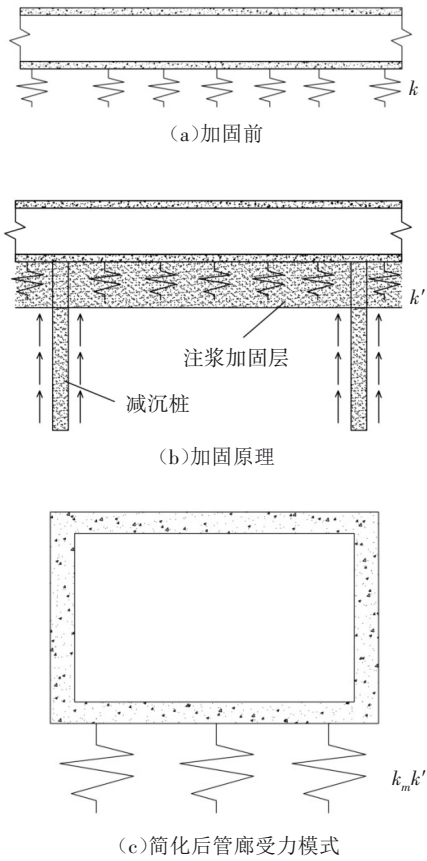


图1 注浆加固及减沉桩共同作用的管廊力学模型

Fig.1 Mechanical model of pipe gallery with the combined effect of grouting reinforcement and pile sinking reduction

下,管廊同时受到土体抗力和向上的抗沉力,且二者作用方向一致。为便于后续理论分析,可将两种作用等效合并,通过引入地基抗力增强系数 k_m 表征组合加固措施对地基抗力的整体提升效果,其简化后的管廊受力模式如图1(c)所示。

1.2 计算模型的建立

如图2所示,考虑双线盾构隧道垂直下穿既有管廊的工况。建立直角坐标系,其中 x 轴沿隧道轴线方向, y 轴沿管廊轴线方向, z 轴为竖直方向。管廊中心线位于 yo 平面内并与 y 轴平行,双线隧道与 x 轴平行,且两条隧道中心线位于管廊正下方。管廊中心埋深为 h ,断面宽度为 a ,高度为 b ;隧道分为左线隧道和右线隧道,两隧道距离中心线的水平距离为 T ,隧道中心埋深为 H ,半径为 R ;管廊底部设置注浆加固区,加固区以两隧道穿越中点对称设置,长度为 $2L_g$,厚度为 H_j ,加固区两端设置减沉桩,减沉桩长度为 H_g 。需要注意的是,图2(a)中为了便于观察管廊及隧道的相对位置,并未将注浆加固区及减沉桩标出,但实际存在。

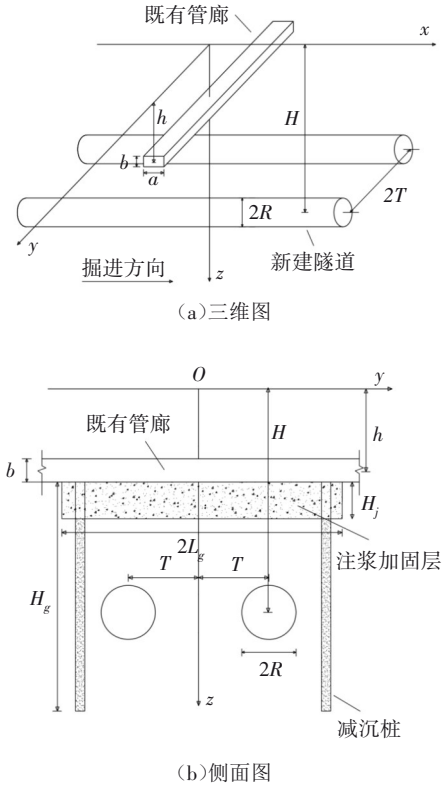


图2 计算模型图

Fig.2 Calculation model diagram

1.3 盾构隧道开挖引起的土体附加应力计算

本文主要关注盾构施工完成后作用于既有管廊轴线处的土体附加应力。已有研究^[13-14]表明,在盾构穿越完成后,最终控制管线变形的主要因素为盾构开挖引起的土体损失效应,其余施工因素对长期变形的影响相对较小。因此,本文在分析中仅考虑土体损失引起的附加应力作用。在双线盾构隧道下穿既有管廊工况下,为简化计算过程,参考文献[15]的处理思路,忽略两条隧道先后施工顺序的影响,将双线隧道的作用视为两次单线隧道开挖效应的叠加。

为了计算单线盾构开挖土体损失引起的既有管廊轴线处的附加应力分量 $\sigma_{z,s1}$,本文参照文献[16]的方法,可不考虑注浆加固及减沉桩影响时,管廊轴线处的土体竖向位移 $w_{z,s1}$ 及竖向附加应力 $\sigma_{z,s1}$ 为:

$$w_{z,s1} = \frac{B\eta(x)R^2}{2} \left\{ \frac{H-z}{y^2 + (H-z)^2} + \frac{H+z}{y^2 + (H+z)^2} - \frac{2z[y^2 - (H+z)^2]}{[y^2 + (H+z)^2]^2} \right\} \quad (1)$$

$$\exp \left[\frac{y^2 \ln \lambda}{(H+R)^2} + \frac{z^2 (\ln \lambda - \ln \delta)}{(H+d)^2} \right],$$

$$\sigma_{z,s1} = kw_{z,s1}, \quad (2)$$

式中： η_s 为隧道开挖土体损失百分率； $\eta(x)$ 为土体损失率随 x 轴变化函数； B 、 δ 、 λ 均为中间计算变量； d 为土体移动焦点到隧道中心的距离； k 为地基基床系数，可根据Vesić^[17]的公式进行计算。

由于左右线隧道关于管廊中心线对称分布，则左右线隧道土体损失作用在管廊处形成的附加荷载 $\sigma_{z,s1}$ 相等，则双线隧道引起的既有管廊处的总的土体竖向位移 $w_{z,s}$ 和附加应力 $\sigma_{z,s}$ 为：

$$w_{z,s} = 2w_{z,s1}, \tag{3}$$

$$\sigma_{z,s} = 2\sigma_{z,s1} \tag{4}$$

1.4 管廊底部注浆区和减沉桩对管廊变形影响

1.3节中计算得到的 $\sigma_{z,s}$ 为不考虑注浆加固区和减沉桩情况下既有管廊轴线处的附加应力，当管廊底部进行组合加固后，产生的主要影响包括：①管廊基底位置的土体强度将会上升，同时减沉桩与注浆加固区共同作用，增强了管廊底部的地基抗沉降能力，从而一定程度上控制管廊沉降变形；②下部盾构开挖引起的附加应力在注浆加固土中传导过程中会受到一定程度的影响。

针对管廊基底土强度的上升，通过地基基床系数 k' 体现， k' 满足：

$$k' = \frac{0.65E'_0}{D_p(1-\mu'^2)} \left(\frac{E'_0 D_p^4}{E_p I_p} \right)^{1/12}, \tag{5}$$

式中： E'_0 、 μ' 为注浆加固层与未加固层按照层厚比例计算得到的变形模量及泊松比算术均值。

考虑到减沉桩会与注浆加固区形成受力整体，从而加固管廊底部地基，但其加固机理较为复杂，较难直接利用理论解进行求解。本文参照魏纲等^[12]对抗浮锚杆作用下隧道受力模式的简化思路，将减沉桩与注浆区的加固影响简化为地基抗力系数 k' 的进一步增大，引入地基抗力增强系数 k_m ，则最终的地基抗力系数 k'' 为：

$$k'' = k_m k'. \tag{6}$$

另一方面，注浆加固的范围一般在盾构下穿的主要影响区域内，假设加固土对开挖产生附加应力的传递影响是均匀的，则注浆加固土影响下既有管廊轴线处的附加应力 σ_z 为：

$$\sigma_z = q\sigma_{z,s}. \tag{7}$$

受到注浆加固及减沉桩影响时，不考虑管廊存在情况下，管廊轴线处的土体竖向位移值 w_z 可表示为：

$$w_z = \frac{\sigma_z}{k''}. \tag{8}$$

1.5 加固作用下管廊竖向位移计算

本节通过刘晓强等^[18]提出的能量变分法求解盾构开挖引起的管廊竖向位移值。盾构开挖会导致管廊处的土体发生自由位移(w)，但因受到管廊、注浆体、减沉桩的约束，土体自由位移会减小。根据土体-管廊变形协调特点，管廊最终竖向位移(w_p)就是该处土体的竖向位移，在这一过程中，盾构下穿引起的附加应力对管廊的做功量 W_σ 将克服土体抗力做功(W_s)，并最终转化为管廊的弯曲应变能 W_t ，满足：

$$W_\sigma = W_s + W_t. \tag{9}$$

参考魏纲和张鑫海^[19]的推导过程，附加应力做功量 W_σ 可表示为：

$$W_\sigma = \int_{-l}^l \sigma_z(y) w_p(y) dy, \tag{10}$$

式中： $\sigma_z(y)$ 为沿着 y 轴方向管廊受到的附加应力值； $w_p(y)$ 为沿着 y 轴方向的管廊竖向位移值。

将管廊简化为长为 $2l$ 水平放置的梁，根据弹性力学梁理论^[18]，管廊的弯曲应变能 W_t 为：

$$W_t = \int_{-l}^l \frac{1}{2} E_p I_p \left(\frac{d^2 w_p}{dy^2} \right)^2 dy, \tag{11}$$

式中： $E_p I_p$ 为管廊抗弯刚度。

由于注浆加固区对称设置，在穿越中心左右各 L_g 的范围内，管廊底部地基土的地基抗力系数为 k'' ，两端其余区域并未进行加固，地基抗力系数仍为 k ，在求解土体抗力对管廊的做功量时，需要按照是否为加固区进行三段的分段式积分求解^[1]，对于加固区，地层抗力做功量 W_2 为：

$$W_2 = \int_{-L_g}^{L_g} \frac{1}{2} k'' (w_{z,s} - w_p)^2 dy. \tag{12}$$

左侧非加固区段内地层抗力做功 W_1 为：

$$W_1 = \int_{-l}^{-L_g} \frac{1}{2} k (w_{z,s} - w_p)^2 dy. \tag{13}$$

右侧非加固区段内地层抗力做功 W_3 为：

$$W_3 = \int_{L_g}^l \frac{1}{2} k (w_{z,s} - w_p)^2 dy. \tag{14}$$

故总的地层抗力做功 W_s 为：

$$W_s = W_1 + W_2 + W_3 = \int_{-l}^{-L_g} \frac{1}{2} k (w_{z,s} - w_p)^2 dy + \int_{-L_g}^{L_g} \frac{1}{2} k'' (w_{z,s} - w_p)^2 dy + \int_{L_g}^l \frac{1}{2} k (w_{z,s} - w_p)^2 dy. \tag{15}$$

为了求解管廊竖向位移，本文利用两个独立有限矩阵首先表示既有管廊的竖向位移 w_p ：

$$w_p = \{Y_n\}^T \{q\}, \tag{16}$$

$$\{Y_n\} = \left\{ 1, \cos \frac{\pi y}{l}, \cos \frac{2\pi y}{l}, \cos \frac{3\pi y}{l}, \dots, \cos \frac{n\pi y}{l} \right\}^T, \tag{17}$$

$$\{q\}=\{q_0,q_1,q_2,\cdots,q_n\}^T, \tag{18}$$

式中: l 为盾构开挖引起的管线沉降槽半宽度,本文取 $l=10i_p$, i_p 为沉降槽宽度,有 $i_p=K(H-h)$ 。

基于最小势能原理,式(9)等号两边分别对各待定系数求导可得:

$$\frac{\partial W_{\sigma}}{\partial q_i}=\frac{\partial W_l}{\partial q_i}+\frac{\partial W_s}{\partial q_i}, \tag{19}$$

式中: q_i 是 $\{q\}$ 中的各个元素系数。

将式(9)~(11)代入上式进一步求解,可得隧道竖向位移的控制方程为:

$$\left[\begin{aligned} &\int_{-l}^l E_p I_p \frac{\partial}{\partial q_i} \left(\frac{\partial^2 w_p}{\partial q_i^2} \right) \frac{\partial \{Y_n\}}{\partial y} dy + \int_{-l}^{L_s} k D \frac{\partial w_p}{\partial q_i} \{Y_n\} dy + \{q\}^T \\ &\int_{-L_s}^{L_s} k'' D \frac{\partial w_p}{\partial q_i} \{Y_n\} dy + \int_{L_s}^l k D \frac{\partial w_p}{\partial q_i} \{Y_n\} dy \end{aligned} \right] \\ = \int_{-l}^l \sigma_z(y) \{Y_n\}^T dy. \tag{20}$$

将式(20)表示为矩阵形式:

$$\left([K_p] + [K_{s1}] + [K_{s2}] + [K_{s3}] \right) \{q\}^T = \{S\}, \tag{21}$$

式中: $[K_p]$ 为管廊刚度矩阵; $[K_{s2}]$ 为中间加固区土体刚度矩阵; $[K_{s1}]$ 、 $[K_{s3}]$ 为左侧和右侧非加固区土体刚度矩阵; $\{S\}$ 为附加应力对管廊作用效应矩阵。

由公式(21)可得待定系数矩阵 $\{q\}^T$:

$$\{q\}^T = \left([K_p] + [K_{s1}] + [K_{s2}] + [K_{s3}] \right)^{-1} \{S\}^T. \tag{22}$$

由式(22)求得 $\{q\}^T$ 后再代入式(16)即可求得管廊竖向位移 w_p 。以上计算过程通过MATLAB编程计算,取10阶矩阵即可满足精度要求。

2 工程案例分析

2.1 工程概况

以杭富城际铁路盾构隧道下穿地下综合管廊为工程案例^[11],主要分析中心下穿段影响,工程横断面图如图3所示。盾构隧道分为左右双线,左线隧道先施工,右线隧道后施工,大致为垂直穿越。为了避免拟建盾构隧道在后期下穿施工时对上部管廊造成过大的影响,在地基底部预先采用水泥质量分数为8%的旋喷桩满堂加固,加固层厚度为4 m,并在穿越段两端分别设置两根桩径为1.0 m、桩长为17 m的减沉桩,注浆加固区域的弹性模量为200 MPa。本文涉及的计算参数整理如下: $h=6.15$ m、 $a=10.3$ m、

$b=4.6$ m、 $T=7.15$ m、 $H=21.05$ m、 $R=3.1$ m、 $L_g=14$ m、 $H_j=4$ m、 $H_g=17$ m、 $\eta_s=0.05$ 、 $E_p I_p=1.53 \times 10^9$ kN·m²、 $k_m=100$ 。涉及的地层力学参数详见表1,地层参数取盾构中心埋深上部各分层参数计算算术平均值,当缺少参数时按照经验进行取值,即 $E=22.9$ MPa、 $\mu=0.3$ 、 $E'=59.2$ MPa、 $\mu'=0.3$ 。

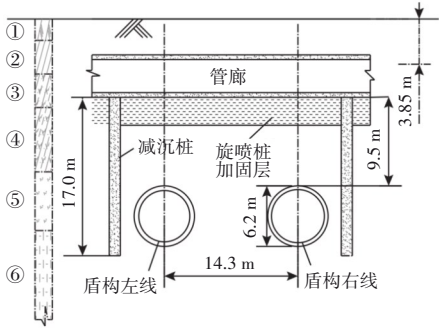


图3 工程断面图
Fig.3 Engineering section diagram

表1 土体力学参数

Tab.1 Soil mechanical parameters			
地层	层厚/m	弹性模量/MPa	泊松比
①填土	2.3	9	0.3
②黏土	3.6	9	0.3
③淤泥质粉质黏土	3.6	9	0.3
④淤泥质黏土	6.9	9	0.3
⑤圆砾	6.3	72	0.28
⑥全风化花岗岩	15.1	38.4	0.28

2.2 计算结果及可靠性分析

图4为本文计算结果与崔允亮等^[11]得到的实测数据与数值模拟结果的对比。图4(a)为未采用加固措施施工况下,本文理论计算值与数值模拟结果的对比,由图可知:①未采取加固措施下,双线隧道下穿施工后,上部管廊会发生较大的沉降变形,本文理论计算值呈现左右对称分布,中心最大沉降值为20.5 mm;②数值模拟结果显示沉降呈现左小右大的分布,造成分布趋势上存在差异是因为本文理论解析并未考虑先开挖隧道(左线)对后开挖隧道的影响,仅是采用叠加法进行初步估算;③对比两者曲线,沉降大小基本保持一致,数值模拟得到穿越中心处的沉降值为19.9 mm,与本文方法所得值仅差0.6 mm,满足计算精度要求;④两种方法得到的管廊沉降值均大于10 mm的管廊竖向位移预警值^[20],代表该工程需要采取加固措施对管廊位移进行控制。

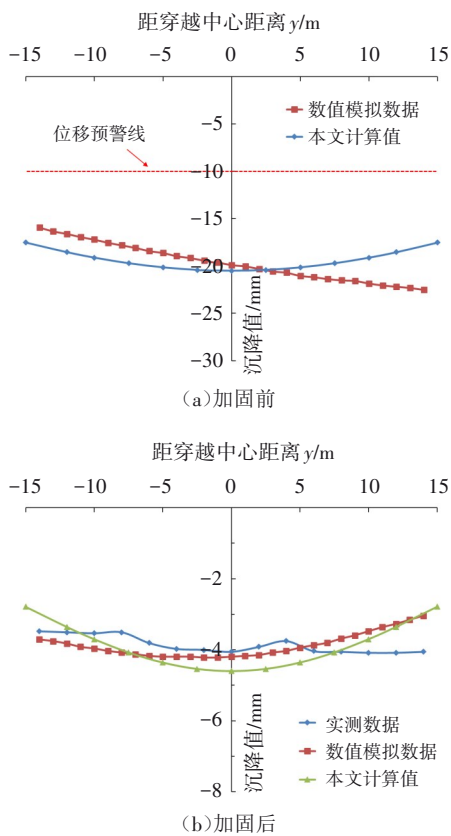


图4 加固前后各种方法得到的管廊沉降值对比

Fig.4 Comparison of settlement values of pipe galleries obtained by various methods before and after reinforcement

图4(b)为采用注浆和减沉桩加固下,理论计算值与数值模拟结果的对比,由图可知:①理论方法求得的管廊沉降曲线与实测数据及数值模拟数据曲线较为接近,曲线分布变化规律相类似,三种方法求得中心处的沉降值分别为4.6 mm、4.1 mm、4.2 mm,差值较小;②在采取注浆及减沉桩方案加固下,管廊沉降值明显减小,以理论计算值为例,中心处的沉降值由20.5 mm减小为4.6 mm,将沉降值控制在了预警线以下。

综上,本文方法在计算加固前后隧道下穿引起既有管廊的竖向位移上具备一定的准确性,可以用于初步估算隧道下穿引起的管廊位移值,便于验证穿越是否会造成管廊竖向位移超出预警值,同时也可以初步估算加固方案是否能将管廊竖向位移控制在预警值以下,对指导实际工程设计具备一定的参考价值。

3 单因素分析

3.1 注浆加固长度 L_g 对管廊沉降的影响

以3.1节中工程为依托,保持其他计算参数不

变,依次取 L_g 为5、10、15、20 m,分别计算不同 L_g 工况下隧道下穿引起的管廊竖向位移值。

如图5所示为不同注浆加固长度 L_g 下管廊沉降值对比。由图可知:①不同注浆加固长度 L_g 下,管廊沉降曲线整体均关于穿越中心呈正态分布;②随着 L_g 的增大,管廊沉降值逐渐减小,说明注浆长度的增大能提高加固效果;③当 L_g 依次为5、10、15、20 m时,管廊中心最大沉降依次为9.8、6、4.3、3.4 mm,沉降减小差值依次为3.8、1.7、0.9 mm,可见沉降减小幅度逐渐降低。

综上,虽然加大注浆加固长度 L_g 可以提高对管廊的加固效果,但控制效果的提升幅度会随着 L_g 的增大而减小,加固效率会下降,工程中不能盲目增大注浆加固长度,而应该合理地结合其他控制措施进行联合加固。

3.2 地基抗力增强系数 k_m 对管廊沉降的影响

保持其他计算参数不变,依次取 k_m 为50、100、150、200、250,分别计算不同 k_m 工况下隧道下穿引起的管廊竖向位移值。

图6为不同 k_m 下管廊沉降值对比,图中加固方

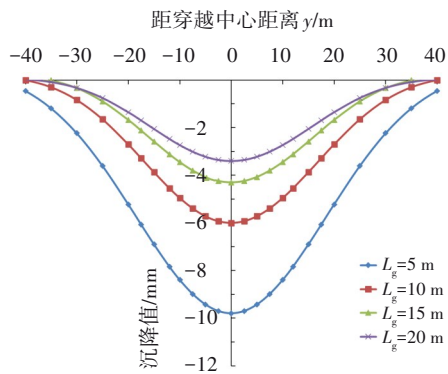


图5 不同 L_g 下管廊沉降值对比

Fig.5 Comparison of settlement values of pipe gallery under different L_g

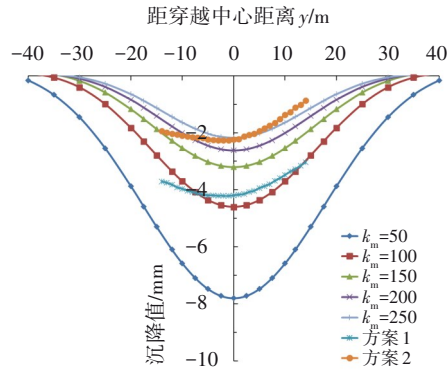


图6 不同 k_m 下管廊沉降值对比

Fig.6 Comparison of settlement values of pipe gallery under different k_m

案1和方案2的数据来源于论文[11]的数值模拟结果,其中方案1是3.1节中工程实际采用的方案,注浆层厚度为4 m,同时在注浆段两端共浇筑了4根减沉桩,方案2中注浆段厚度及长度均相同,不过减沉桩设置了8根。

由图可知:①随着的 k_m 增大,管廊沉降值逐渐降低,当 k_m 依次取50、100、150、200、250时,管廊中心最大沉降值依次为7.8、4.6、3.2、2.6、2.2 mm,减小幅度逐渐降低;②图中方案1大致与 $k_m=100$ 所对应管廊沉降曲线对应,而方案2大致与 $k_m=250$ 所对应管廊沉降曲线变化规律相接近,方案2比方案1多设置了4根减沉桩, k_m 系数由100增大为250。

综上所述,地基抗力增强系数 k_m 随着减沉桩的增多而增大,能够更有效控制管廊的沉降变形。

4 结论

1) 本文考虑了注浆加固区及减沉桩对管廊的加固作用,基于Mindlin解及能量变分法推导了隧道下穿引起的管廊竖向位移值,经过实测数据及数值模拟结果的验证与分析,本文理论方法具备一定精度。

2) 在管廊及待建隧道之间设置注浆加固层及减沉桩能够有效减小隧道下穿影响,管廊沉降变形能够得到有效控制,可根据本文方法进行穿越影响及控制方案的初步估算与设计。

3) 注浆加固长度 L_g 的增大能提高控制管廊沉降的效果,但控制效果的提升幅度会随着 L_g 的增大而减小,加固效率会下降;地基抗力增强系数 k_m 可以反映管廊与注浆加固层及减沉桩之间的作用效果, k_m 随着减沉桩的增多而增大, k_m 越大,管廊沉降越小,工程中不能盲目增大注浆加固长度,宜采用注浆层、减沉桩的组合加固形式,控制效果更佳。

本文在计算双线隧道下穿引起的既有管廊变形时采用了叠加法,分别将先行隧道和后行隧道引起的变形值相加得到总位移值,忽略了先行隧道对后行隧道开挖的影响,存在不足,有待后续进一步的改进。

参考文献:

- [1] 齐永洁. 新建地铁盾构穿越对既有隧道影响及安全控制措施研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2021.
- Qi Y J. Study on the influence of new metro shield tunneling on existing tunnels and safety control measures[D].

- Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2021.
- [2] 林子垚. 盾构隧道开挖对管廊变形扰动影响规律研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学, 2021.
- Lin Z Y. Study on the influence law of shield tunnel excavation on deformation disturbance of utility tunnel[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2021.
- [3] 黄铖. 纵坡曲线盾构隧道近距下穿既有管廊及参数分析[J]. 公路, 2024, 69(9): 443-452.
- Huang C. Gradient curve shield tunnel near-underpassing existing utility trench and parameter analysis[J]. Highway, 2024, 69(9): 443-452.
- [4] 邹家琦. 盾构下穿施工对既有管廊的变形影响分析[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2020.
- Zou J Q. Study on deformation influence of shield under-crossing construction on existing utility tunnel[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2020.
- [5] 刘平, 王洪涛, 刘泉声, 等. 基于Hoek-Brown强度参数的地铁隧道下穿既有管廊塌落上限分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2023, 31(5): 1205-1218.
- Liu P, Wang H T, Liu Q S, et al. Upper limit analysis of tunnel collapse under existing pipe gallery based on Hoek-Brown strength parameter[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2023, 31(5): 1205-1218.
- [6] 苗晨阳, 黄强兵, 苟玉轩, 等. 地裂缝场地盾构隧道下穿施工对既有管廊的影响研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(3): 155-165.
- Miao C Y, Huang Q B, Gou Y X, et al. Study on the impact of shield tunnel under-crossing at ground fissure site on existing utility tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(3): 155-165.
- [7] 黄晓滨, 王润炜. 综合管廊地基加固与远期盾构隧道修建的相互影响分析[J]. 城市道桥与防洪, 2024(3): 92-97.
- Huang X B, Wang R W. Analysis on interaction between foundation reinforcement of utility tunnel and construction of long-term shield tunnel[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2024(3): 92-97.
- [8] 张树才. 暗挖地铁隧道下穿输水管廊结构变形分析[J]. 铁道建筑, 2023, 63(3): 118-122.
- Zhang S C. Structural deformation analysis of underground subway tunnel passing through water pipe gallery[J]. Railway Engineering, 2023, 63(3): 118-122.
- [9] 吉艳雷. 四线大断面隧道浅埋暗挖下穿综合管廊保护方案研究——以广佛城际下穿华康道管廊工程为例[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(7): 1197-1205.
- Ji Y L. Protection scheme for shallow-buried fourth-track tunnel with large cross-section passing beneath a utility

- tunnel: A case study on Guangzhou-Foshan intercity passing beneath Huakang road utility tunnel[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(7): 1197-1205.
- [10] 刘慧芬,程春香,吴朵. 浅埋暗挖隧道下穿综合管廊施工技术研究[J]. 地基处理, 2021, 3(1): 76-81.
Liu H F, Cheng C X, Wu D. Research on construction technology of shallow-buried excavation tunnel undercrossing utility tunnel [J]. Journal of Ground Improvement, 2021, 3(1): 76-81.
- [11] 崔允亮,李志远,魏纲,等. 上跨拟建隧道的地下综合管廊预保护效果[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(2): 330-337.
Cui Y L, Li Z Y, Wei G, et al. Pre-protection effect of underground comprehensive pipe gallery over proposed tunnel [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2021, 55(2): 330-337.
- [12] 魏纲,赵毅,孙樵. 基坑开挖引起带抗浮锚杆的盾构隧道变形计算[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(11): 4158-4167.
Wei G, Zhao Y, Sun Q. Calculation of deformation of shield tunnels with anti-floating anchors rod caused by foundation pit excavation [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(11): 4158-4167.
- [13] 魏纲,俞国骅,杨波. 新建盾构隧道下穿既有隧道剪切错台变形计算[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2018, 45(9): 103-112.
Wei G, Yu G H, Yang B. Calculation of existing shield tunnel shearing dislocation platform deformation due to undercrossing new shield tunnel undercrossing [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(9): 103-112.
- [14] Qi Y J, Wei G, Xie Y. Method of calculating the vertical displacement and additional stress of existing tunnels under the influence of grouting rings of new tunnels [J]. Symmetry, 2020, 12(10): 1623.
- [15] 徐银锋,杨波,齐永洁,等. 复合地层中双线隧道引起的土体位移预测[J]. 低温建筑技术, 2024, 46(3): 125-130.
- Xu Y F, Yang B, Qi Y J, et al. Research on the soil displacement law caused by double line tunnel in upper soft and lower hard strata [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2024, 46(3): 125-130.
- [16] 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. 3D 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.
- [17] Vesić A B. Bending of beams resting on isotropic elastic solid [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1961, 87(2): 35-53.
- [18] 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.
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.
- [19] 魏纲,张鑫海. 基坑开挖引起下卧盾构隧道转动与错台变形计算[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(9): 2273-2284.
Wei G, Zhang X H. Calculation of rotation and shearing dislocation deformation of underlying shield tunnels due to foundation pit excavation [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(9): 2273-2284.
- [20] GB 51354—2019 城市地下综合管廊运行维护及安全技术标准[S].
GB 51354—2019 Technical standard for operation, maintenance and safety management of urban utility tunnel[S].

(编辑 许军策)