

新建综合管廊下穿既有管道最小安全埋深解析求解方法及工法优化

王浩爽¹, 陈云娟^{2,3}, 李波¹, 段鸿杰^{2,3}, 高庆峰¹, 刘效智^{2,3}

(1. 中铁十四局集团第二工程有限公司, 山东 泰安 271000;

2. 山东建筑大学 建筑结构加固改造与地下空间工程教育部重点实验室, 山东 济南 250101;

3. 山东建筑大学 土木工程学院, 山东 济南 250101)

摘要:为探索新建综合管廊下穿既有管道的施工风险范围, 针对北京某新建管廊下穿既有管道工程, 基于 M-C 准则和修正的鲁宾涅特方程提出了新建管廊下穿既有管道最小安全埋深解析求解方法。基于该最小安全埋深建立 FLAC^{3D} 数值模型, 模拟分析该管廊下穿既有管道的塑性区分布特征及管廊位移场、应力场分布规律, 明确下穿施工风险段并对其进行工法优化。结果表明: 以新建管廊和既有管道塑性区贯通临界值作为判断标准, 得到的下穿既有管道最小安全埋深解析理论值与数值模拟结果相吻合; 下穿既有管道处 2 倍管道半径范围内为下穿风险段, 相较于上下台阶法, 该区段采用交叉中隔墙(CRD)法施工时, 管廊拱顶最大沉降控制率可达 65.3%; 在工法转换段, CRD 法临时支撑端部有应力集中现象, 临时支撑可承受较大的形变压力从而有效控制地层沉降, 施工时应加强保护, 确保施工安全。

关键词:综合管廊; 下穿施工; 最小安全埋深; 施工风险段; 工法优化

中图分类号: U455

文献标志码: A

Analytical solution and construction method optimization of minimum safe buried depth of new comprehensive pipe gallery passing under existing pipelines

WANG Haoshuang¹, CHEN Yunjuan^{2,3}, LI Bo¹, DUAN Hongjie^{2,3}, GAO Qingfeng¹, LIU Xiaozhi^{2,3}

(1. China Railway 14th Bureau Group 2nd Engineering Co., Ltd., Tai'an 271000, China;

2. Key Laboratory of Building Structural Retrofitting and Underground Space Engineering of Ministry of Education, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China;

3. School of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan 250101, China)

Abstract: To investigate the construction risk ranges of new comprehensive pipe galleries passing underneath existing pipelines, this study proposed a theoretical method for determining the minimum safe buried depth of the existing pipelines and its analytical solution by using the M-C criterion and a modified Rubnet equation with a new comprehensive pipe gallery passing underneath existing pipeline project in Beijing as an example. Based on the theoretically calculated minimum safe buried depth, a FLAC^{3D} numerical model was established to simulate and analyze the distribution characteristics of the plastic zone and the laws of the displacement and stress fields within the pipe gallery. The risk sections of the pipeline construction were clarified and the construction method was optimized. The results indicate that the proposed analytical solution for the minimum safe buried depth aligns with

收稿日期: 2024-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(42172310); 泰山学者工程专项经费资助项目(tsqn202408226)

作者简介: 王浩爽(1988—), 男, 辽宁营口人, 工程师, 主要从事隧道工程、水利水电等方面的研究。

陈云娟(1984—), 女, 山东潍坊人, 研究员, 博士, 主要从事岩土工程、城市地下空间稳定性等方面的研究。

E-mail: chenyunjuan@sdjzu.edu.cn

the critical penetration value between the new pipe gallery and the plastic zone of the existing pipeline's plastic zone, showing consistency with numerical simulation results. The section within twice the radius of the existing pipeline is identified as the risk zone for underpass construction. Compared with the double-step method, the cross diaphragm (CRD) method achieves a maximum settlement control rate of 65.3% for the arch roof in this section. However, in the section where construction methods change, stress concentration occurs at the end of the temporary supports in the CRD method. To effectively control ground settlement, the temporary supports have to bear great deformation pressure, which necessitates strengthened protection during construction to ensure safety.

Key words: comprehensive pipe gallery; underpass construction; minimum safe buried depth; construction risk section; construction method optimization

城市经济的快速发展带动了城市地下空间的不断发展,地下综合管廊的建设能够减少道路重复开挖,保证城市交通畅通。然而,因受到地下既有构筑物、复杂地层等条件的制约,如何确保新建综合管廊的施工安全并维持既有构筑物稳定,已成为近年来城市地下综合管廊建设工程研究的热点问题。

目前,国内外学者在新建工程下穿既有隧道、管线等结构稳定性和地层沉降等方面取得了一定的进展。Chakeri 等^[1]通过建立三维有限元模型研究了 Tehran 市新建隧道垂直下穿既有有线,发现上部既有线的沉降迅速发展。Boonyarak 等^[2]为研究新建隧道下穿既有隧道的影响范围,采用考虑应变刚度的塑性本构模型进行三维数值模拟,给出并讨论了新建隧道开挖对既有隧道的影响区。Yang 等^[3]依托西安某实际工程,通过数值模拟研究了综合管廊施工对不同埋深和净距的既有双上下线地铁隧道变形特性的影响,得出了隧道的安全埋深和净距。可文海等^[4]将 Loganathan 公式与 Pasternak 模型相结合,研究了盾构隧道下穿施工时的管-土相互作用。张治国等^[5]基于 Winkler 地基模型及新提出的土体自由位移场分析方法将该位移场作用于地下管线,提出了施工诱发邻近管线变形的计算方法并进行了实际工程对比验证。徐强等^[6]利用 Peck 公式和随机介质理论之间的参数关系,提出一种预测隧道下穿施工引起的既有隧道及地层变形的新模型并进行了工程验证。周中等^[7]采用遗传算法(genetic algorithm, GA)对双向长短期记忆网络(bi-directional long short-term memory, Bi-LSTM)结构进行参数优化,构建了 GA-Bi-LSTM 既有隧道沉降预测模型,训练和测试发现该模型具有较好的可靠性和实用性。王剑晨等^[8]通过对既有隧道实测变形数据进行拟合,结合经验参数修正公式与 Peck 公式,提出一种简便、快捷的预测方法,分析北京地区新建隧道下穿既有隧道的施工影响,并验证了该预测方法的有效性。王晓鹏等^[9]针对隧道下穿高压给水管道工程,结合施工经验进行控制专项设计,并分析了爆破振动对管道的影响。曾铁梅等^[10]基于 Pair-Copula 贝叶斯模型提出一种盾构隧道下穿既有有线施工风险评价方法,并准确地评估了下穿施工过程中两者之间的相互作用风险。韩焯等^[11]为预测新建隧道下穿既有有线时产生的沉降影响,基于刚度修正法提出一种简便分析方法,为该类型下穿施工的风险预测及评估提供了新思路。

以上研究成果对理解和进一步研究城市新建综合管廊下穿既有管道具有一定的指导意义。但已有研究主要针对新建隧道下穿施工时既有线的沉降变形,在确定的下穿安全距离情况下进行的分析和预测,没有考虑在下穿的最小安全距离情况下地层沉降特征及隧道变形影响,且没有对下穿的风险范围段进行工法优化分析。本研究依托北京某新建综合管廊下穿既有管道工程,考虑新建管廊和既有管道之间塑性区的临界贯通状态,基于 M-C 准则和修正的鲁宾涅特方程^[12]提出新建管廊下穿既有管道最小安全埋深的解析求解方法,并结合 FLAC^{3D} 有限差分软件建立三维数值仿真模型,研究最小安全距离下穿施工引起的地层沉降,确定下穿施工风险范围,分析管廊下穿全过程的施工力学特征,进而对基于最小安全埋深条件下的施工工法进行了优化,为综合管廊顺利施工提供指导。

1 工程概况

北京市某新建综合管廊分离段工程与地下道路主线并行后,自西向东下穿一条既有排水管道,向北连接电力支管廊、水信支管廊,向南连接既有电力支管廊。分离管廊为暗挖标准段施工,暗挖管廊采用浅埋暗挖法原理设计、台阶法施工;衬砌为复合式衬砌结构,采用拱顶直墙形式,以小导管作为超前支护,喷射混凝土、

钢筋网、钢拱架格栅为初期支护,二次衬砌采用模板拼装现浇,在初期支护与二次衬砌之间设置防水层。管廊结构内轮廓面积 31.63 m^2 ,净宽 5.12 m ,净高 6.60 m ,初期支护和二次衬砌厚度分别为 30 和 45 cm 。

如图 1 所示,该新建综合管廊施工段与既有管道的分布走向在空间中成垂直关系,既有管道的内径为 2.0 m ,壁厚 20 cm ,埋设深度为 4.8 m ,管道为实际挖深标高。因排水管道管径尺寸较大,新建管廊下穿施工过程中存在一定的施工风险。人工钻探勘察成果显示,该综合管廊标准段位于地下水位以上,沿线地层主要为黏性土与粉土层互沉积为主。各土层物理力学指标如表 1 所示。

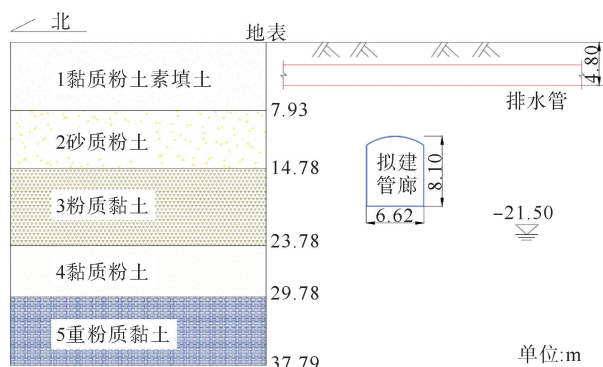


图 1 管廊与排水管空间相对位置关系及地层分布

Fig. 1 Spatial relative position relationship and stratum distribution between pipe gallery and drainage pipe

表 1 土层物理力学指标

Table 1 Physical and mechanical indexes of soil layer

编号	土层性质	弹性模量/MPa	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/MPa	内摩擦角/($^{\circ}$)	泊松比	侧压力系数
1	黏质粉土素填土	15	1 950	6	23	0.20	0.25
2	砂质粉土	16	1 980	10	25	0.25	0.33
3	粉质黏土	21	2 000	21	23	0.25	0.33
4	黏质粉土	23	1 980	16	27	0.25	0.33
5	重粉质黏土	25	2 000	32	30	0.30	0.43

2 新建管廊下穿既有管道理论最小安全埋深解析求解方法

土体在管廊开挖之前可认为处于弹性变形状态,管廊开挖后,其周围土体的应力因开挖产生重分布,造成土体内部发生应力集中现象,力学性质上表现为剪应力增加。该过程中,随着剪应力增加,土体中的某一区域内应力达到极限平衡状态后即形成塑性区。施工过程中管廊土层塑性区的变化对管廊结构的稳定性有重要影响,而对管廊土层塑性区形态和范围产生影响的因素主要有土层的黏聚力、内摩擦角、主应力大小和方向、管廊半径等。为反映土层应力对既有管道和开挖管廊塑性区分布特征的影响,将既有管道和开挖管廊塑性区问题利用叠加原理求解。如图 2 所示,将土体的弹性应力状态进行分解,得到轴对称土体弹性应力状态和反对称土体弹性应力状态。

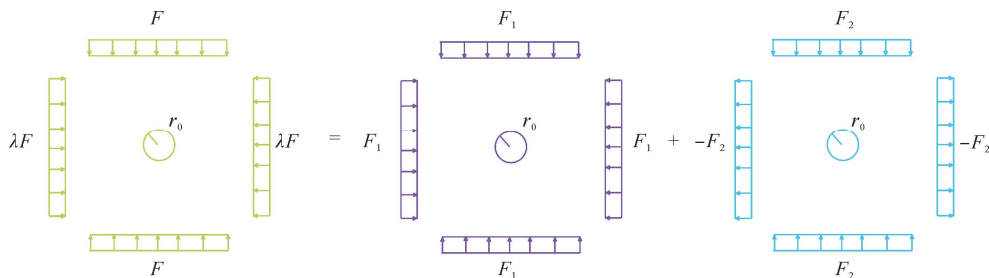


图 2 叠加原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of superposition principle

$$F = F_1 + F_2, \quad (1)$$

$$\lambda F = F_1 - F_2. \quad (2)$$

式中: F 为开挖圆巷的竖向荷载, N ; λ 为侧压力系数; F_1 和 F_2 为按叠加原理的分解力, N 。

假定土体为弹塑性体, 基于修正的鲁宾涅特方程^[12]求解既有管道和开挖管廊土体塑性区半径, 既有管道和新建管廊塑性区半径分别按式(3)、(4)计算。

$$R_d = r_0 \left\{ \frac{[P_0(1+\lambda) + 2c \cot \varphi](1 - \sin \varphi)}{2P_s + 2c \cot \varphi} \right\}^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \times \left\{ 1 + \frac{P_0(1-\lambda)(1 - \sin \varphi) \cos 2\theta}{[P_0(1+\lambda) + 2c \cot \varphi] \sin \varphi} \right\}. \quad (3)$$

式中: R_d 为既有管道塑性区半径, m ; r_0 为既有管道半径, m ; P_0 为既有管道处土体自重应力, kPa ; P_s 为支护反力, kPa ; c 为土体黏聚力, MPa ; φ 为土体内摩擦角, $(^\circ)$; θ 为管廊极角, $(^\circ)$ 。

$$R_L = r \left\{ \frac{[P(1+\lambda) + 2c \cot \varphi'](1 - \sin \varphi')}{2P_s + 2c \cot \varphi'} \right\}^{\frac{1 - \sin \varphi'}{2 \sin \varphi'}} \times \left\{ 1 + \frac{P(1-\lambda)(1 - \sin \varphi') \cos 2\theta}{[P(1+\lambda) + 2c \cot \varphi'] \sin \varphi'} \right\}. \quad (4)$$

式中: R_L 为新建管廊塑性区半径, m ; r 为管廊等效半径, m ; P 为管廊位置处土体自重应力, kPa ; φ' 为开挖扰动下土体内摩擦角, $(^\circ)$; $\varphi' = (1-D)\varphi$, D 为动态扰动因子^[13], D 取经验值 $0.01 \sim 0.4$ 。

考虑管廊截面尺寸和形状因素影响, 利用截面外接圆面积和内接圆面积平均值, 采用面积等效原理对新建管廊等效半径进行修正, 计算见式(5)。

$$r = \sqrt{\frac{S_w + S_n}{2\pi}}. \quad (5)$$

式中: S_w 为管廊外接圆面积, m^2 ; S_n 为管廊内接圆面积, m^2 。

管廊位置处土体原始自重应力与开挖深度有关, 开挖管廊处土体原始自重应力按式(6)计算:

$$P = \gamma(h + H) = P_0 + \gamma H. \quad (6)$$

式中: γ 为土体的天然重度, kN/m^3 , 成层土取加权平均值; h 为既有管道埋深, m ; H 为既有管道到新建管廊的最小垂直距离, m 。

为防止新建管廊开挖过程中管廊塑性区和上部既有管道塑性区连通发生土体的整体塌陷破坏, 要求管廊与既有管道的最小垂直距离 H 不小于两者塑性区半径之和, 如图 3 所示。

新建管廊与既有管道最小安全距离 H 的解析解可表达为:

$$H = R_d + R_L - r_0 - r = r_0 \left\{ \frac{[P_0(1+\lambda) + 2c \cot \varphi](1 - \sin \varphi)}{2P_s + 2c \cot \varphi} \right\}^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}} \times \left\{ 1 + \frac{P_0(1-\lambda)(1 - \sin \varphi) \cos 2\theta}{[P_0(1+\lambda) + 2c \cot \varphi] \sin \varphi} \right\} + \sqrt{\frac{S_w + S_n}{2\pi}} \times \left\{ \frac{[(P_0 + \gamma H)(1+\lambda) + 2c \cot \varphi'](1 - \sin \varphi')}{2P_s + 2c \cot \varphi'} \right\}^{\frac{1 - \sin \varphi'}{2 \sin \varphi'}} \times \left\{ 1 + \frac{(P_0 + \gamma H)(1-\lambda)(1 - \sin \varphi') \cos 2\theta}{[(P_0 + \gamma H)(1+\lambda) + 2c \cot \varphi'] \sin \varphi'} \right\} - r_0 - \sqrt{\frac{S_w + S_n}{2\pi}}. \quad (7)$$

基于新建管廊下穿既有管道理论最小安全埋深解析解, 对北京某新建管廊下穿既有管道实际工程进行计算。既有排水管道半径 $r_0 = 1.2 \text{ m}$, 管廊外接圆面积 $S_w = 75.12 \text{ m}^2$, 管廊内接圆面积 $S_n = 20.59 \text{ m}^2$, 计算管廊等效半径 $r = 3.9 \text{ m}$ 。根据工程地质条件、施工方法以及模拟计算所需要的精度, 扰动因子 D 取 0.1 , 换算得 $R_d = 2.96 \text{ m}$, $R_L = (0.722H + 6.342)^{0.881} \text{ m}$, 土体参数按实际土层参数取值, 代入式(7)求得该新建管廊与既有排水管最小安全距离 $H = 5.83 \text{ m}$ 。

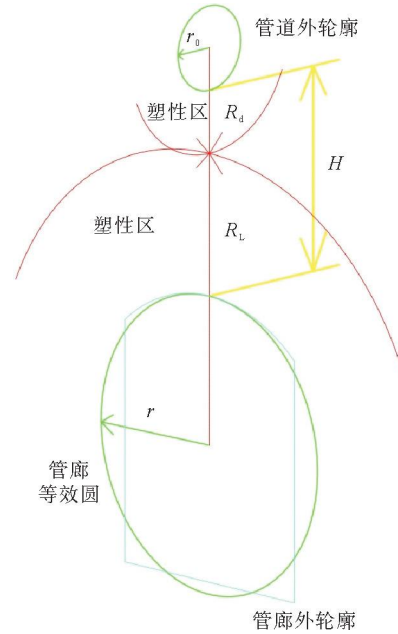


图 3 既有管道与管廊塑性区贯通简化示意图

Fig. 3 Simplified schematic diagram of plastic zone connection between existing pipeline and pipe gallery

3 基于最小安全埋深的数值模型建立与理论验证

3.1 三维数值仿真模型建立

基于解析求解方法获得的管廊与既有管道最小安全距离,采用 Rhino 建模完成后导入 FLAC^{3D} 有限差分软件,建立管廊标准段三维数值仿真模型,如图 4 所示。模型的左右边界约束 x 方向位移,前后边界约束 y 方向位移, z 方向只约束下边界。数值模型尺寸长 66.62 m×宽 25.00 m×高 37.78 m,管廊横断面的中轴线为模型的中轴线。为简化建模,土层视为水平土层,共有 5 层,从下到上分别为重粉质黏土层 8.00 m,黏质粉土层 6.00 m,粉质黏土层 9.00 m,砂质粉土层 6.85 m 和黏质粉土素填土层 7.93 m。为满足计算需要,模型共计 536 671 个网格单元,设置超前小导管 648 根。

模型计算分析时,基于 FLAC^{3D} 的桩单元(Pile)模拟超前小导管,此模拟可实现超前小导管的梁效应,还能反映超前小导管与注浆土层的相互作用,超前小导管长度 2.15 m。初期支护和二次衬砌采用实体单元(Zone)建立,考虑钢拱架格栅和混凝土的共同作用,依据式(8)用等效原理进行折减计算,初期支护混凝土的弹性模量用钢拱架格栅的弹性模量予以折算^[14],有

$$E_c = E_0 + \frac{E_s A_s}{A_c} \quad (8)$$

式中: E_c 、 E_s 、 E_0 分别为等效混凝土弹性模量、型钢弹性模量和混凝土弹性模量, GPa; A_s 、 A_c 分别为型钢、混凝土的横截面积, m^2 。

二次衬砌主要考虑钢筋混凝土的作用,钢筋混凝土因其配筋率的要求,按其钢筋横截面与混凝土横截面之比换算弹性模量,取钢筋混凝土的弹性模量为 1.1 倍的素混凝土弹性模量进行计算。初期支护和二次衬砌使用的材料及其物理力学参数如表 2 所示。

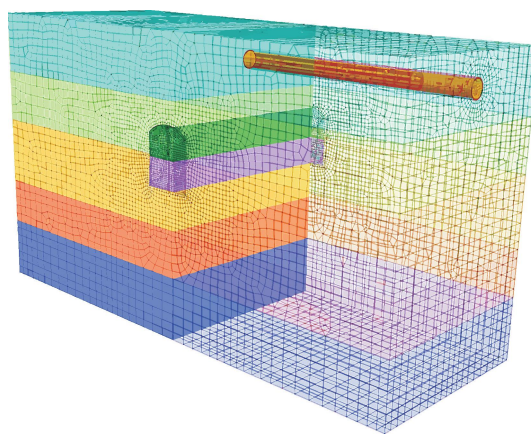


图 4 综合管廊三维数值计算模型图

Fig. 4 Three-dimensional numerical calculation model of utility tunnel

表 2 支护结构物理力学计算参数

Table 2 Physical and mechanical calculation parameters of supporting structure

支护结构	材料	弹性模量/MPa	密度/($kg \cdot m^{-3}$)	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	泊松比
初期支护	C22 钢拱架+C25 混凝土	30	2 300	3.0	50	0.20
二次衬砌	钢筋混凝土(HRB400+C35)	35	2 400	3.2	55	0.25

3.2 管廊下穿既有管道最小安全距离验证

考虑到新建管廊与既有管道之间土层的稳定性,主要对新建管廊与既有管道之间的安全距离展开研究。根据程小虎^[15]基于试验规律和剪切破坏理论提出的黏土地层深埋直墙拱形隧道破裂区理论模型,管廊下穿既有管道时,既有管道与管廊之间土层的破坏特征基本符合剪切破坏理论,当开挖管廊周围土体中的某一点剪应力增大到土体抗剪强度时,即可认为已经处于剪切破坏状态。因此,可将剪切破坏理论引入新建管廊与既有管道之间土体破坏机理分析。基于最小安全埋深建立的三维数值仿真模型,土体破坏准则选取 Mohr-Coloumm 本构模型,该模型能很好地反映岩土类材料的抗压强度及不同工法施工对土体变形的敏感性,同时可以反映土体的塑性破坏特征。

初始地层应力达到平衡后,将既有管道的内腔设为空模型,管道衬砌结构设为 C20 混凝土,再次使地层应力达到平衡。在此基础上,依据修正的鲁宾涅特方程理论,赋值新建管廊区域为空模型,模拟管廊开挖完成后的地层状态。

为确保管廊开挖过程中上部土体不会发生塌陷破坏,参考 GB 50911—2013《城市轨道交通工程监测技术规范》^[16]第 9.2.3 项标准,以新建管廊拱顶竖向位移不大于 4 mm 作为控制标准来确定塑性区范围。如图 5 所示,以新建管廊与既有管道之间的塑性区是否贯通作为数值模拟验证理论最小安全埋深解析解准确性的判断依据。经过模拟计算,新建管廊与既有管道之间的塑性区基本处于临界贯通状态,模拟结果与理论计算结果吻合较好,验证了理论计算的最小安全埋深的准确性。

4 新建管廊下穿既有管道工法优化设计

4.1 下穿既有管道的施工风险范围确定

根据实用性计算准则,假设各土层为均质、连续、各向同性介质,采用 Mohr-Coulomb 本构模型进行计算。依据现场实际情况采用上下台阶法施工模拟,模拟开挖流程如图 6 所示,施工步骤简单,由上至下,分两次开挖,台阶 1→台阶 2,管廊初期支护依据开挖流程设立,开挖每 5 m 为一个进尺。

上下台阶法开挖会对管廊上方土体造成“卸荷”作用,从而引起上方土体沉降;对于下方土体同样产生“卸荷”作用,引起下方土体上拱。管廊开挖及初支施工完成后的沉降云图如图 6 所示。

由图 6 及整个动态模拟过程可知,上下台阶法施工过程中,上台阶施工引起周围土体的沉降值较小,由于上台阶开挖的时空影响,会使得周围土体在下台阶施工时沉降迅速增大,待施工完成后土体沉降才趋于稳定。上下台阶法施工引起的拱顶位置土体沉降和底板位置拱起最为明显。与此同时,既有管道位置下方一定范围内的土体沉降明显变大,管廊拱顶土体最大沉降可达 49 mm,初始进尺底板位置累积上拱位移可达 86 mm。

提取新建管廊拱顶外侧土体沉降变化曲线,确定既有管道对新建管廊上方土体的沉降影响范围。管廊拱顶外侧土体沉降变化曲线如图 7 所示,沿管廊纵向土体沉降曲线整体呈“V”字型,越靠近既有管道位置沉降变化越大。在开挖进尺 9~17 m 范围内沉降变化较大,沉降值均超过 20 mm^[16],即下穿管道处 2 倍管道半径范围内为上下台阶法下穿施工风险较大区段。

上下台阶法施工时,上下部开挖有一定程度的干扰,尤其开挖下部时会影响到上部结构的稳定性,须严格控制下部土体开挖量。在理论最小安全埋深情况下进行上下台阶法施工,风险性必然会升高。因此,考虑到上下台阶法施工时管廊上部既有管道引起的土体沉降较大,为降低施工对管廊上部土体及既有管道的扰动敏感度并保证施工安全,在既有管道的影响风险区段内进行工法优化,采用交叉中隔墙(cross diaphragm, CRD)法施工。

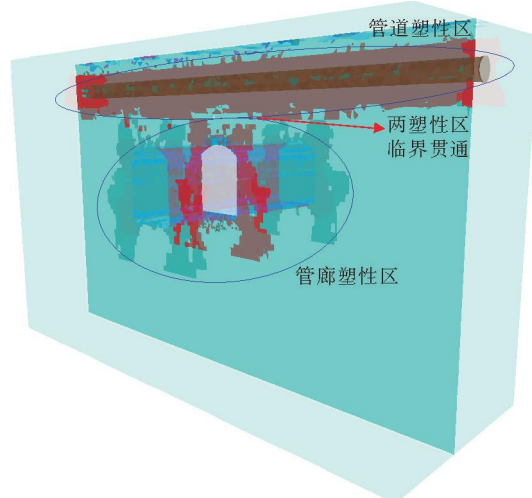


图 5 既有管道与新建管廊塑性区分布图

Fig. 5 Plastic zone distribution map of existing pipelines and new pipe gallery

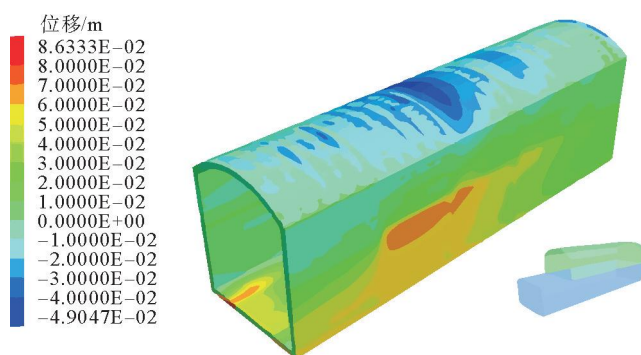


图 6 台阶法管廊沉降变形分布云图

Fig. 6 Distribution cloud diagram of settlement deformation of step method pipe gallery

4.2 下穿风险段工法优化分析

对下穿风险段采用CRD法进行施工模拟,在施工过程中严格遵循“管超前、严注浆、短进尺、强支护、紧封闭、勤量测”的施工原则^[17],施工步骤如下。

1) 超前小导管注浆加固。

2) 注浆加固支护稳定后,新建管廊开挖步骤如图8中所示。由上至下,分4次开挖,即左上洞1→右上洞2→左下洞3→右下洞4,管廊初期支护及临时支撑依据开挖流程设立,开挖进尺因需要改为4 m。

3) 掌子面开挖完成后拆除内部临时支撑,自下而上施作二次衬砌。

FLAC^{3D} 计算分为8步进行,依次为:平衡初始地应力场;赋值既有管道内腔空模型及管道衬砌结构为C20混凝土后,再次平衡地层应力;超前小导管注浆加固;左上洞1土体开挖及初期支护施作;右上洞2土体开挖及初期支护施作;左下洞3土体开挖及初期支护施作;右下洞4土体开挖及初期支护施作;二次衬砌施作。其中,模型计算的初始应力场仅考虑周围土体的重力作用,施加土体自重应力后模型应力平衡到系统默认值后,即认为初始应力场模拟完成。CRD法施工管廊开挖完成后的沉降云图如图9所示。

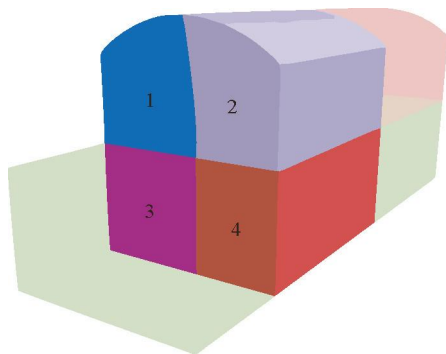


图8 CRD法开挖流程

Fig. 8 Excavation process of CRD method

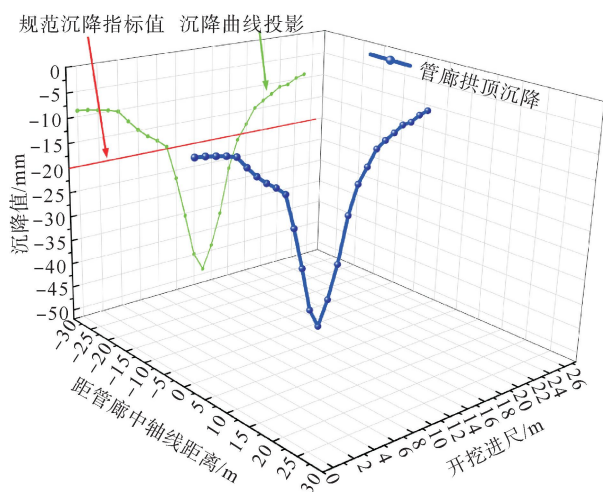


图7 台阶法管廊纵向拱顶沉降变形

Fig. 7 Longitudinal vault settlement deformation of step method pipe gallery

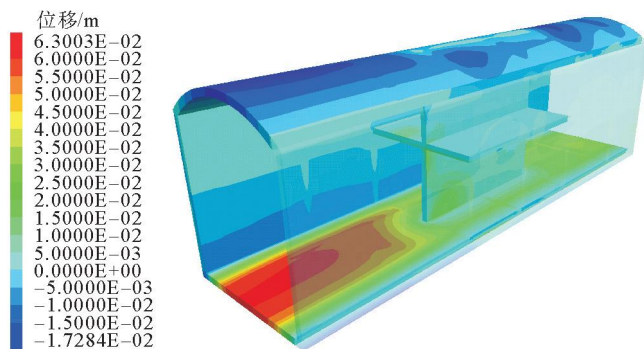


图9 CRD法管廊沉降变形分布云图

Fig. 9 Distribution cloud map of the settlement deformation of CRD method pipe gallery

由图9可见,新建管廊下穿风险段采用CRD法施工时,施工全过程中管廊周围土体累积沉降较小。因CRD法有内部临时支撑,管廊拱顶沉降明显变小,且最大沉降位置由原来的管廊拱顶向开挖左上洞和右上洞拱顶转移,最大沉降可达17 mm。同时,下穿风险段的底板拱起位移也因内部临时支撑而明显变小,下穿风险段前,底板最大拱起位移可达63 mm;下穿风险段后,底板拱起位移控制在30~35 mm。

管廊拱顶沉降及CRD法开挖左上洞和右上洞拱顶沉降如图10所示。从图10可以看出,沿管廊纵向,管廊拱顶沉降曲线及CRD法开挖左上洞和右上洞拱顶沉降曲线整体均呈“Δ”字型。在开挖进尺9~17 m下穿风险段内采用CRD法施工后,管廊上方土体沉降明显小于上下台阶法施工土体沉降,拱顶土体整体沉降控制在3~18 mm,比原上下台阶法拱顶最大沉降处沉降量减少了32 mm。定义原工法和现工法的沉降量差值与原工法沉降量的比值为沉降控制率,计算沉降控制率可达65.3%。

可见,新建管廊下穿风险段采用 CRD 法施工可有效控制上方土体沉降。CRD 法施工时将原来台阶法的大跨度变为左右洞的小跨度,使得各洞开挖施作支护封闭成环的时间缩短,因此每部分开挖引起的土体扰动相较于上下台阶法要小得多,施工过程中支护结构能快速形成稳定性良好的受力状态。同时,相较于上下台阶法,CRD 法内部临时支撑对整个环向侧壁的支护结构起到了增大刚度的作用,可有效控制整体结构的变形。

4.3 工法转化处应力变化分析

上下台阶法的管廊初期支护最大主应力分布云图如图 11 所示。通过图 11 可看出,台阶法开挖后管廊整体基本处于受压状态,拱角和墙脚处出现应力集中现象,最大主应力的最大值为 1.43 MPa,位于管廊墙脚处。下穿风险段采用 CRD 法施工后的管廊初期支护最大主应力分布云图如图 12 所示。管廊拱角和墙脚处仍有应力集中现象,其值与上下台阶法相比无明显变化;而 CRD 法内部临时支撑与管廊初期支护连接处的应力集中现象较为明显,该处最大主应力的最大值可达 4.72 MPa。

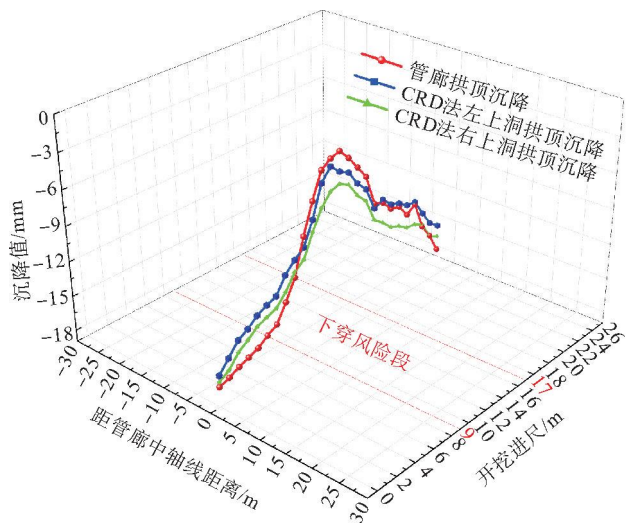


图 10 CRD 法管廊纵向拱顶不同位置处沉降变形

Fig. 10 Settlement deformation at different positions of longitudinal vault of CRD pipe gallery

管廊拱角和墙脚处仍有应力集中现象,其值与上下台阶法相比无明显变化;而 CRD 法内部临时支撑与管廊初期支护连接处的应力集中现象较为明显,该处最大主应力的最大值可达 4.72 MPa。

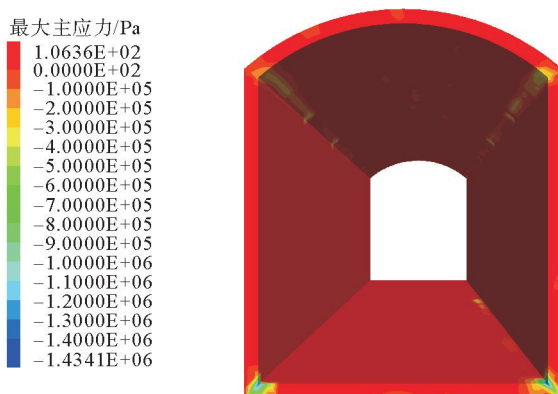


图 11 台阶法管廊最大主应力分布云图

Fig. 11 Maximum principal stress distribution cloud diagram of step method pipe gallery

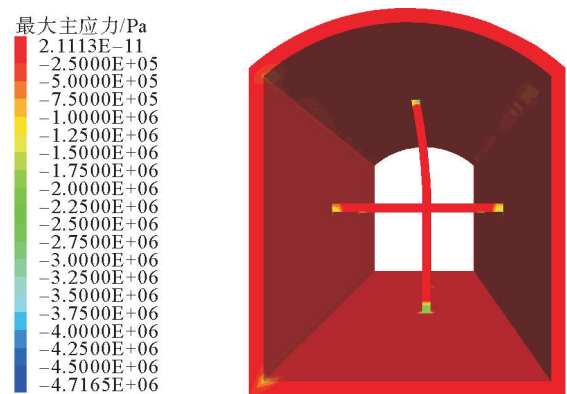


图 12 CRD 法管廊最大主应力分布云图

Fig. 12 Maximum principal stress distribution cloud diagram of CRD pipe gallery

如图 13 所示,台阶法管廊初期支护最小主应力均为压应力。拱角和墙脚处出现应力集中现象,墙脚处压应力最大,达到 10.50 MPa;边墙、拱顶及底板处均不超过 7.00 MPa;底板部位压应力最小,其值均未超过 C25 喷射混凝土的弯曲抗压强度设计值 13.5 MPa^[18]。

如图 14 所示,当下穿风险段采用 CRD 法施工后,新建管廊初期支护最小主应力分布规律与台阶法基本一致,也表现为压应力,拱角和墙脚处出现应力集中现象。然而,CRD 法内部临时支撑与管廊初期支护连接处出现了明显的应力集中现象,特别在竖向临时支撑两端承担了较大的压应力,最大达到 32.21 MPa;而管廊边墙、拱顶及底板承担的压应力一般不超过 7.50 MPa,相较于台阶法增幅较小。

以上分析表明,下穿风险段 CRD 法施工出现的较大压应力对于临时支护来说是一个不可忽视的问题。CRD 法由于每一步支护封闭成环时间较短,使得地层应力得不到有效释放,地层位移变化较小。CRD 法施工能有效控制地层沉降是因为临时支撑承受了较大的形变压力。而上下台阶法施工主要考虑地层自身稳定

性,开挖使得地层应力得到有效释放,地层位移变化较大。因此,加强新建管廊初期支护特别是CRD法中的竖向临时支撑,是保证下穿风险段施工安全的重要措施。

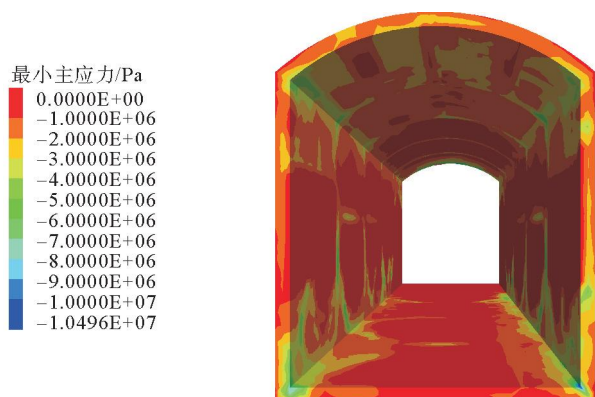


图 13 台阶法管廊最小主应力分布云图

Fig. 13 Minimum principal stress distribution cloud diagram of step method pipe gallery

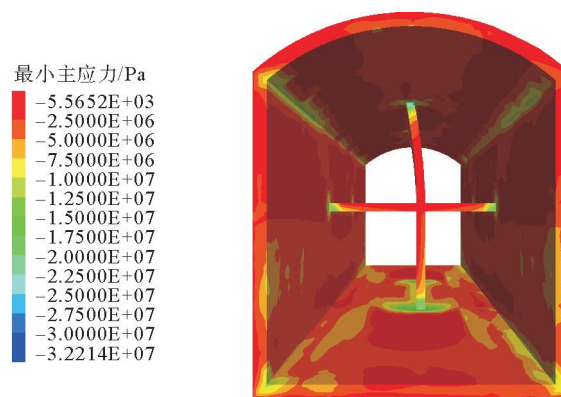


图 14 CRD 法管廊最小主应力分布云图

Fig. 14 Minimum principal stress distribution cloud diagram of CRD pipe gallery

5 结论

通过提出的新建综合管廊下穿既有管道最小安全埋深解析求解方法建立三维数值仿真模型,并结合实际工程进行了验证,在最小安全埋深条件下开展了管廊下穿施工影响研究,得到如下结论。

1) 基于 M-C 准则和修正的鲁宾涅特方程提出新建综合管廊下穿既有管道最小安全埋深解析求解方法。采用提出的理论方法,依托北京某新建管廊下穿既有管道实际工程,利用 FLAC^{3D} 建模进行塑性区分析,通过新建管廊与既有管道之间塑性区贯通验证了该方法求得的最小安全埋深的准确性。

2) 根据新建综合管廊理论计算的最小安全埋深下穿既有管道建模分析,当采用上下台阶法施工时,下穿既有管道处 2 倍管道半径范围内管廊上部土体沉降较大,属于施工风险段。当该风险段采用 CRD 法优化施工后,原上下台阶法最大沉降处拱顶沉降减少了 32 mm,沉降控制率可达 65.3%。

3) 在工法转换段,新建管廊初期支护基本处于受压状态,临时支撑与初期支护连接处出现了明显的应力集中现象,CRD 法能有效控制地层沉降是因为临时支撑承受了较大的形变压力,施工时应加强竖向临时支撑的保护,确保施工安全。

参考文献:

- [1] CHAKERI H, HASANPOUR R, HINDISTAN M A, et al. Analysis of interaction between tunnels in soft ground by 3D numerical modeling[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2011, 70(3): 439-448.
- [2] BOONYARAK T, CHARLES WW N. Three-dimensional influence zone of new tunnel excavation crossing underneath existing tunnel[J]. Japanese Geotechnical Society Special Publication, 2016, 42(2): 1513-1518.
- [3] YANG M, LI H R, LI N, et al. Effect of subway excavation with different support pressures on existing utility tunnel in Xi'an loess[J/OL]. Advances in Civil Engineering, 2020(16). DOI:10.1155/2020/8818949.
- [4] 可文海,管凌霄,刘东海,等.盾构隧道下穿管道施工引起的管-土相互作用研究[J].岩土力学,2020,41(1):221-234.
KE Wenhai, GUAN Lingxiao, LIU Donghai, et al. Research on upper pipeline-soil interaction induced by shield tunnelling [J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(1): 221-234.
- [5] 张治国,师敏之,张成平,等.类矩形盾构隧道开挖引起邻近地下管线变形研究[J].岩石力学与工程学报,2019,38(4):852-864.
ZHANG Zhiguo, SHI Minzhi, ZHANG Chengping, et al. Research on deformation of adjacent underground pipelines caused by excavation of quasi-rectangular shields[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(4): 852-864.

- [6] 徐强,朱永全,雷升祥,等.隧道下穿施工引起既有隧道及地层变形预测的改进随机介质理论模型[J].岩土工程学报,2023,45(2):301-309.
- XU Qiang,ZHU Yongquan,LEI Shengxiang,et al. Improved stochastic medium theoretical model for predicting deformation of existing tunnels and strata caused by excavation of new undercrossing tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2023,45(2):301-309.
- [7] 周中,张俊杰,丁昊晖,等.基于GA-Bi-LSTM的盾构隧道下穿既有隧道沉降预测模型[J].岩石力学与工程学报,2023,42(1):224-234.
- ZHOU Zhong,ZHANG Junjie,DING Haohui,et al. Settlement prediction model of shield tunnel under-crossing existing tunnel based on GA-Bi-LSTM[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2023,42(1):224-234.
- [8] 王剑晨,张顶立,张成平,等.北京地区浅埋暗挖法下穿施工既有隧道变形特点及预测[J].岩石力学与工程学报,2014,33(5):947-956.
- WANG Jianchen,ZHANG Dingli,ZHANG Chengping,et al. Deformation characteristics of existing tunnels induced by excavation of new shallow tunnel in Beijing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2014,33(5):947-956.
- [9] 王晓鹏,王海亮.浅埋隧道下穿高压给水管微振动控制研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2016,35(3):61-66.
- WANG Xiaopeng,WANG Hailiang. Study on micro-vibration blasting control for shallow tunnel crossing underneath high pressure water supply pipelines[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2016,35(3):61-66.
- [10] 曾铁梅,刘茜,冯宗宝,等.基于PCBN模型盾构下穿既有隧道施工安全风险评价[J].隧道建设(中英文),2021,41(10):1692-1698.
- ZENG Tiemei,LIU Xi,FENG Zongbao,et al. Construction safety risk assessment for shield tunneling underneath existing tunnel based on Pair-Copula Bayesian network model[J]. Tunnel Construction,2021,41(10):1692-1698.
- [11] 韩煊,刘颖炜,JAMIE R S.隧道下穿既有线的案例分析与沉降分析方法[J].土木工程学报,2012,45(1):134-141.
- HAN Xuan,LIU Chengwei,JAMIE R S,et al. Structural settlement of existing tunnel caused by new tunnel excavated underneath[J]. China Civil Engineering Journal,2012,45(1):134-141.
- [12] 蔡美峰,何满潮,刘东燕.岩石力学与工程[M].2版.北京:科学出版社,2013:296-300.
- [13] 陈云娟,张鑫,郭道通,等.基于鲁宾涅特解的建筑物掏土纠倾孔周土塑性区计算[J].建筑结构学报,2018,39(2):168-173.
- CHEN Yunjuan,ZHANG Xin,GUO Daotong,et al. Calculation on surrounding soil's plastic zone in building's soil-digging incline-rectifying process based on Rubin's answer[J]. Journal of Building Structures,2018,39(2):168-173.
- [14] 郑维翰.特大跨隧道支护结构变形与承载性能研究[D].北京:北京交通大学,2019:9-11.
- ZHENG Weihuan. Study on deformation and bearing performance of supporting structure for extra large span tunnel[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2019:9-11.
- [15] 程小虎.黏性地层中深埋直墙拱形隧道的支护压力及稳定性[J].岩土工程学报,2017,39(11):2034-2042.
- CHENG Xiaohu. Earth pressure and stability of deep arch tunnel with straight wall in cohesive strata[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2017,39(11):2034-2042.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部.城市轨道交通工程监测技术规范:GB 50911—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [17] 中华人民共和国交通运输部.公路隧道设计规范:JTG D70/2—2014[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2014.

(责任编辑:吕海亮)