

综合管廊地基加固与远期盾构隧道修建的相互影响分析

黄晓滨¹,王润炜^{1,2}

[1.悉地(苏州)勘察设计顾问有限公司,江苏 苏州 215123; 2.浙江大学建筑工程学院,浙江 杭州 310058]

摘要:随着地铁盾构隧道、城市隧道、城市地下综合管廊等的大量修建,新建隧道下穿/上跨既有隧道及其相互影响已成为隧道工程重点研究的内容之一。对于既有隧道,以往的研究主要集中在城市隧道或盾构隧道。城市地下综合管廊具有埋深浅、宽度小、壁厚薄的特点。因此,当其被双线盾构隧道下穿时,既有隧道结构的内力、地表沉降等也必然不同。基于汾湖站(苏州南站)综合管廊工程,采用 MIDAS GTS NX 软件建立了三维有限元模型,分析了管廊地基加固对远期地铁盾构隧道修建的影响及其相互作用,以地基加固长度和上下隧道净距作为变量,考虑了盾构机的掘进压、千斤顶推力和管片间的界面。研究结果表明:对于该工程项目,若远期盾构隧道下穿综合管廊,管廊地基加固对管片的内力无明显影响;当双线盾构隧道下穿后,较短长度的地基加固会增大既有管廊的轴力(拉力);对于初始阶段地表沉降,地基加固均增大了 X 向(垂直管廊方向)、Y 向(平行管廊方向)的沉降值,但显著减小了盾构隧道下穿后地表的隆起值。

关键词:地下综合管廊;地基加固;盾构隧道;数值模拟

中图分类号: TU99;U45

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)03-0092-06

0 引言

城市地下综合管廊集成各类工程管线,包括电力、通信、燃气、供热、供水、排水等。综合管廊不仅避免了城市道路的频繁挖掘,而且使管线的维护更加便捷,是绿色、低碳、可持续性发展市政工程。但这也使得地下空间的规划、设计、建造及运维更加复杂。

新建隧道可能要穿越(包括重叠穿越和交叉穿越)各种既有隧道,甚至在部分工况下,新建隧道不得不选择与既有隧道近接。南京地铁1号线盾构隧道下穿玄武湖隧道,其最小净距仅为1.004 m^[1]。数值模拟是应对实际工程问题使用最广泛的方法。奚灵智等^[2]采用 FLAC3D 软件研究了软土地区上部既有城市隧道地基加固对下侧地铁盾构隧道修建的影响,上下侧隧道存在750 m 长的平行重叠段,且最小净距为3.4 m。Lin 等^[3]依托长沙地铁2号线与4号线,采用 Plaxis 3D 软件研究了新建双隧道对既有双线隧道的影响,分析了既有隧道的变形特性、地表沉降、斜交角度的影响等。房明等^[4]采用 Midas GTS NX

软件分析了盾构顶进力、盾尾注浆、千斤顶推力、斜交角度对既有隧道沉降的影响。Avgerinos 等^[5]通过数值模拟研究了开挖面位置对既有隧道的影响。张孟喜等^[6]依托佛莞城际铁路盾构隧道工程,采用 Abaqus 软件获取了注浆压力的合理取值,以及控制既有隧道变形。

与普通矩形城市隧道相比,管廊埋深较浅(本项目管廊标准段深度为4~7 m,项目详见后文工程简介),结构宽度较小(本项目管廊单仓标准段外宽为2.8 m),而双向六车道的普通城市隧道宽度在30 m 左右,结构壁厚也较小(本目标标准段壁厚为0.3 m,约为普通城市隧道的1/4)。因此,当盾构隧道穿越时,管廊的内力与地表沉降必然与城市隧道有所区别。然而,当前对隧道穿越管廊的研究较少。

本文建立了双线盾构隧道与管廊垂直近接的三维模型,考虑了盾构机的掘进压和千斤顶推力及管片间的界面,分别从盾构管片内力、管廊结构内力和地表竖向位移的角度,以地基加固长度和上下隧道近接距离为变量,研究了地基加固对上下侧隧道的作用。

1 工程简介

汾湖站(苏州南站)位于苏州市吴江区,是沪苏湖高速铁路和通苏嘉甬高速铁路的交汇站,两条高速铁

收稿日期:2023-10-20

作者简介:黄晓滨(1966—),男,本科,高级工程师,主要从事桥梁与隧道设计工作。

路均为高架段,车站及高架目前处于在建状态。在车站周围计划建设一条地下综合管廊,并且在远期,汾湖站将与地铁对接。由于车站周围三侧均存在计划建设管廊,且管廊距车站较近,可能与远期地铁盾构隧道爬升段近接。因此,在进行综合管廊基坑围护设计时,可适当考虑远期地铁盾构隧道修建。

2 模型建立

采用 MIDAS GTS NX 软件进行有限元数值模拟分析,采用地层结构法进行计算。图 1 为地层与管廊、地基加固、盾构隧道的位置关系图。为减小边界效应的影响,盾构隧道的左右边界和下边界与相邻侧隧道的净距均大于 3 倍隧道外径。模型地层尺寸为 36 m×100 m×53.5 m(*X*×*Y*×*Z*)。综合管廊与地铁盾构隧道可能交汇点的地层参数见表 1,数据取自勘察报告。其中,地下水位标高 1.6 m(深度 1.95 m)。在模型中,地层土采用 Drucker-Prager(D-P)本构模

型,建立 3D 实体单元。与 Mohr-Coulomb 屈服准则相比,D-P 屈服准则不仅考虑了第一主应力和第三主应力,还考虑了中主应力和静水压力的影响。其屈服函数如式(1)^[7]所示:

$$F = \sqrt{J_2} - \alpha I_1 - \kappa = 0 \tag{1}$$

式中:*I*₁ 为应力张量第一不变量;*J*₂ 为偏应力张量第二不变量; α 、 κ 为与岩土材料相关的常数。 α 与 κ 统称为 D-P 条件。

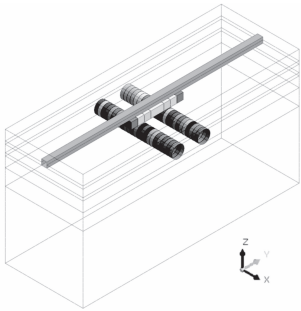


图 1 数值模型

表 1 地层参数

地层编号及名称	层底高程 / m	分层厚度 / m	黏聚力 <i>c</i> / kPa	内摩擦角 φ / (°)	压缩模量 <i>E</i> _s / kPa	泊松比 μ	容重 γ / (kN·m ⁻³)	饱和容重 / γ_{sat} (kN·m ⁻³)
① ₁ 素填土	-1.10	4.65	10	10	5 530	0.35	18.59	18.69
③ 淤泥质粉质黏土	-2.20	1.10	15.1	8.12	3 080	0.42	17.31	17.43
④ 黏土	-5.80	3.60	54.2	15.7	8 880	0.25	19.65	19.74
⑤ 粉质黏土	-7.10	1.30	29.6	14.07	5 410	0.35	18.64	18.76
⑥ _A 粉土夹粉质黏土	-11.80	4.70	10.4	22.55	9 500	0.35	18.76	18.83
⑥ 粉质黏土夹粉土	-19.20	7.40	27.1	16.03	6 000	0.35	18.72	18.82

模拟的混凝土结构主要为管廊和盾构隧道,参数见表 2。管廊混凝土采用弹性本构,建立 2D 板单元,管廊壁厚 0.3 m。盾构隧道管片混凝土同样采用弹性本构,建立 2D 板单元。盾构管片采用地铁隧道常规管片尺寸:管片外径 6 m,环宽 1.5 m,壁厚 0.3 m。模型中建立了 24 环管片。在模型中考虑了盾构隧道

开挖的特点,模拟了盾构机掘进压[200 kPa,见图 2(a)]、千斤顶推力[5 000 kPa,见图 2(b)]及管片混凝土界面[见图 2(c)]。开挖时,南线隧道先行掘进,按两环(3 m)为一次掘进。待南线隧道 24 环管片安装完成后,北线隧道随即进行开挖。

水泥土搅拌桩地基加固为本模型主要的研究对

表 2 结构参数

项目	本构类型	结构	弹性模量 / kPa	泊松比	容重 / (kN·m ⁻³)	单元类型	厚度 / m
管廊 C40 防水混凝土	弹性	√	3.25×10 ⁷	0.2	24	2D 板单元	0.3
管片 C50	弹性	√	3.45×10 ⁷	0.2	24	2D 板单元	0.3
水泥土搅拌桩地基加固	弹性	—	8.6×10 ⁴	0.3	22	3D 实体	—

象,地基加固尺寸为本模型的变量。由于管廊结构外宽 2.8 m,开挖时基坑两侧各外放 1 m,因此地基加固宽度为 4.8 m。并且由于管廊结构的持力层为黏土,土质较好,因此地基加固仅 3 m。于是,地基加固长度为数值模拟的主要变量。地基加固长度示意图如图 3 所示,长度分别为 6 m、12 m、18 m 和 24 m。

3 数据分析

3.1 管片内力

南线、北线隧道 24 环管片安装完成成为数值模拟的最终阶段。该阶段管片内力如图 4 所示。从图中可以看出:(1)对于管片轴力,地基加固对 *X* 轴方向轴

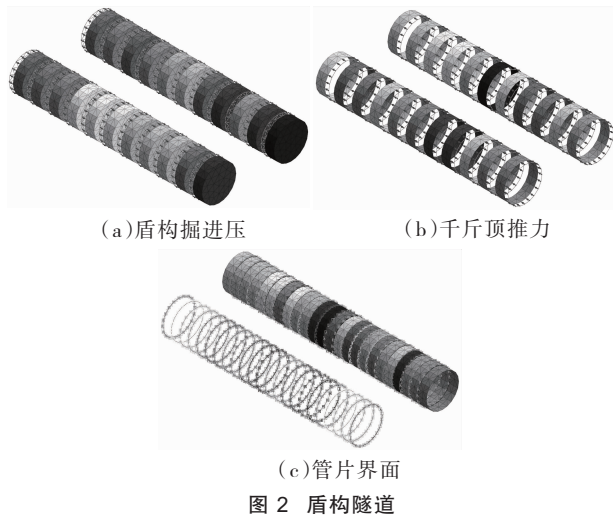


图2 盾构隧道

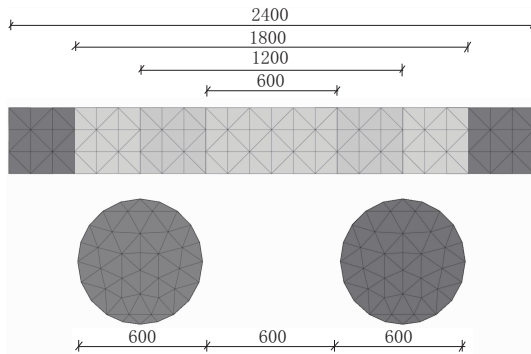


图3 地基加固长度示意图(单位:cm)

力无明显作用,对 Y 轴方向轴力的影响稍显明显。与无加固方案相比,12 m加固方案管片最大压力增大5.7 kN(0.223%),而这样的内力差别可忽略不计。(2)对于弯矩和剪力,地基加固的作用依然不明显。与无加固方案相比,弯矩的最大差值仅为0.697 kN·m(0.69%),剪力的最大差值为2.373 kN(1.5%)。

因此,管廊地基加固对盾构隧道管片受力的影响基本可以忽略不计。

3.2 上部管廊内力

3.2.1 不同加固长度

管廊修建完成时为管廊结构受力的初始阶段,盾构隧道24环管片安装完成成为管廊结构受力的最终阶段。当盾构隧道与地基加固土体净距为1 m时,管廊结构两阶段的内力最值如图5所示。从图中可以看出:

(1)对于初始阶段的轴力,地基加固的影响较大。对于无加固方案,轴力均为压力,而地基加固产生的不均匀沉降使管廊顶部出现拉力,且加固长度越大,拉力越大。与6 m加固方案相比,24 m加固方案产生的最大拉力增大了47.83 kN(约21倍)。对于 Y 轴方向的压力(沿管廊纵向),各方案与无加固方案基本

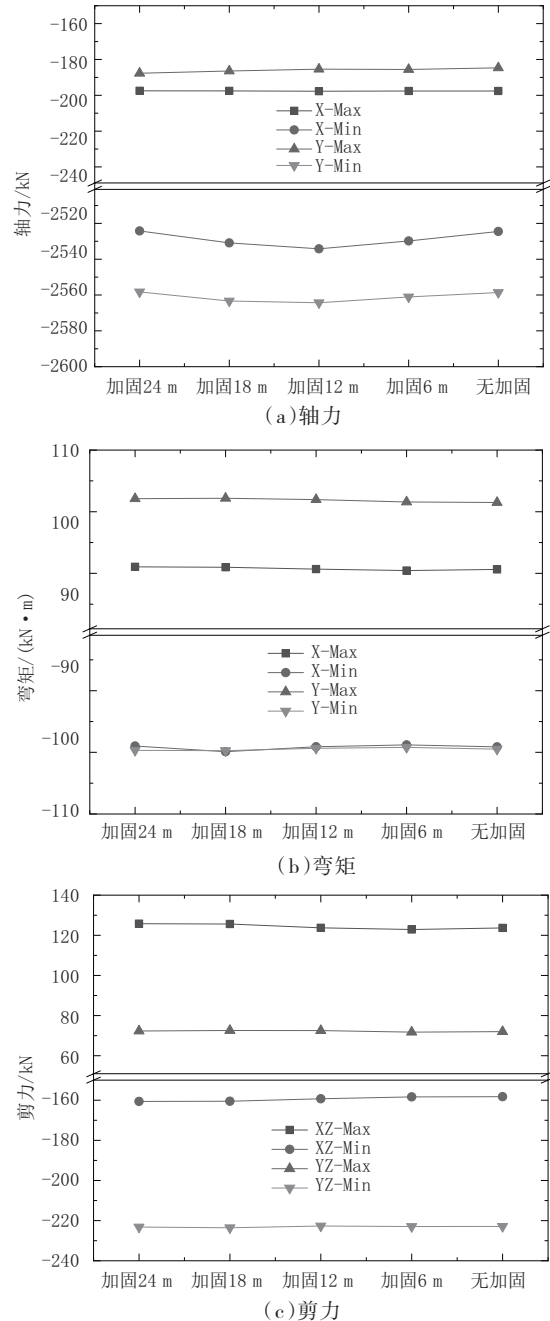


图4 盾构隧道管片内力(注:板单元内力均为单位长度所受内力。下同)

一致。对于 X 轴方向的压力(垂直管廊方向),当地基加固超过12 m后,其压力值逐渐增大。

(2)对于最终阶段的轴力,地基加固的作用更加明显。对于结构所受的拉力,6 m加固方案最大,其 X 轴方向的轴力为919.98 kN。与未加固方案相比,6 m加固方案 X 向、 Y 向分别增加了51.26 kN(5.9%)、33.08 kN(4.1%)。随着加固长度逐渐增大,结构所受拉力逐渐减小,24 m加固方案 X 向、 Y 向分别减少了32.24 kN(3.7%)、9.34 kN(1.16%)。

(3)对于结构所受的弯矩和剪力,由于绝对值均较小,故不进一步分析。

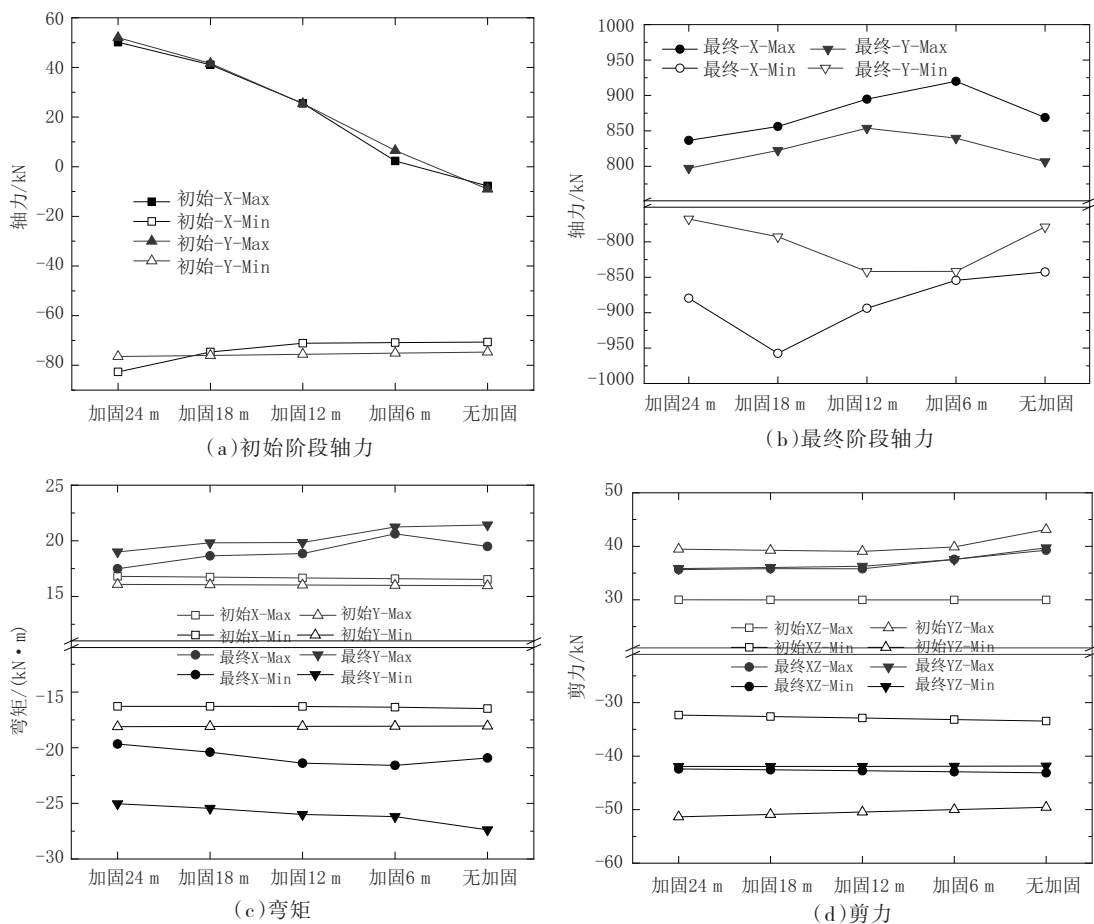


图5 管廊内力

3.2.2 上下隧道不同净距

地基加固与上下隧道净距对管廊受力的影响如图6所示。从图中可以看出:(1)6 m加固方案显著加大了轴力(拉力)和弯矩。相比无加固方案,按净距从小到大,轴力(拉力)分别增大了51.26 kN(5.9%)、

41.9 kN(5.5%)、39.11 kN(5.5%)。(2)从轴力的角度看,仅24 m加固方案略微改善了结构的受力,6 m加固方案和18 m加固方案均显著增大了结构的受力。(3)对于剪力,各加固方案均明显改善了结构的受力。

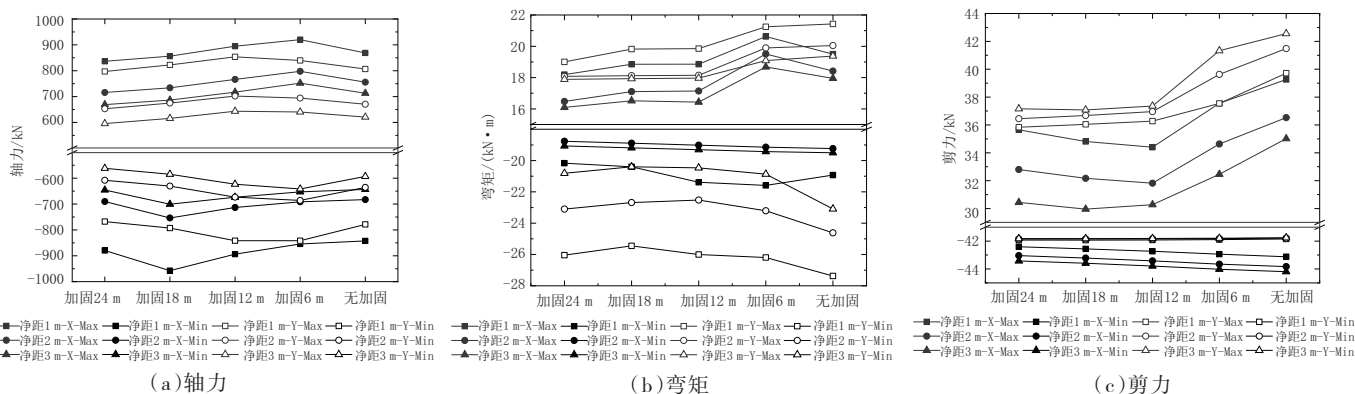


图6 管廊内力

3.3 地表竖向位移

土体竖向位移如图7所示,选取地表中心线研究地基加固对地表沉降的影响。值得注意的是,在GTS中,位移的数据仅适用于定性分析。

X方向、Y方向的地表沉降曲线如图8、图9所示。从图中可以看出:(1)在初始阶段,地基加固显

著减小了地表沉降,且加固长度越大,地表沉降越小。(2)在最终阶段,由于盾构掘进的顶推,地表产生了较大的隆起。除6 m加固方案在Y向的数值,其余加固方案均产生了较大的作用。(3)对于位移差(初始阶段与最终阶段位移的差值),在X向(-2.5,10)范围内,各地基加固方案产生的位移均大于无加固

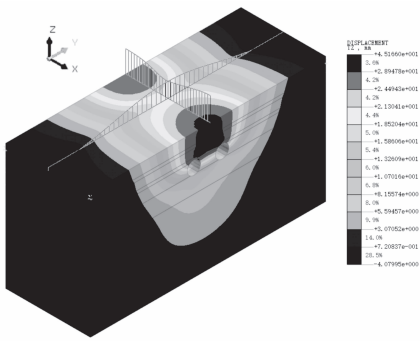
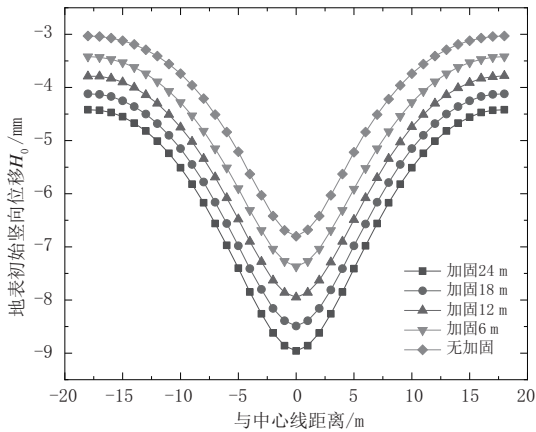
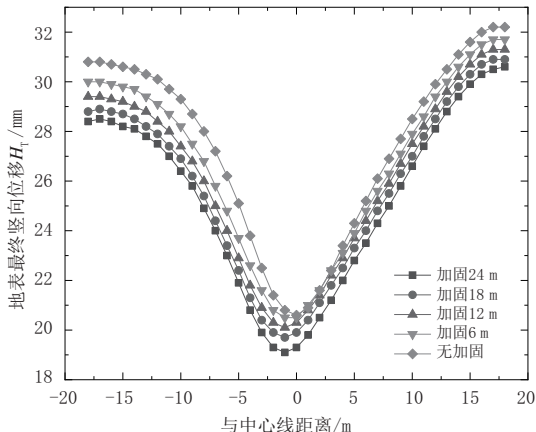


图7 土体位移及地表中心线示意图

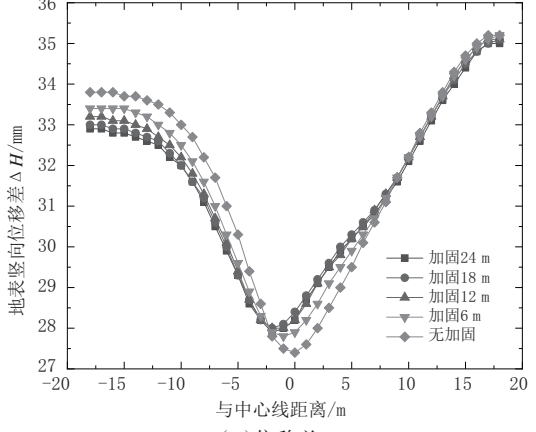
方案。在Y向,无加固方案产生的位移差最小。



(a)初始阶段

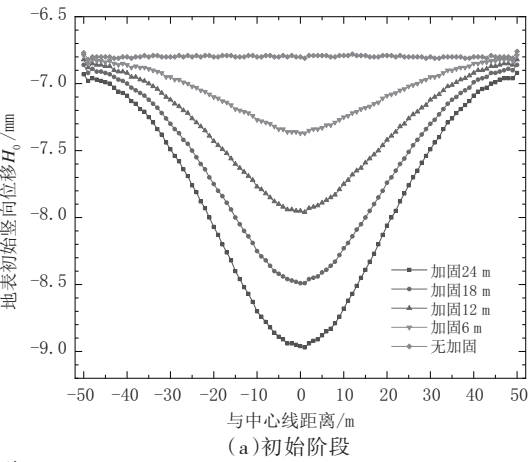


(b)最终阶段

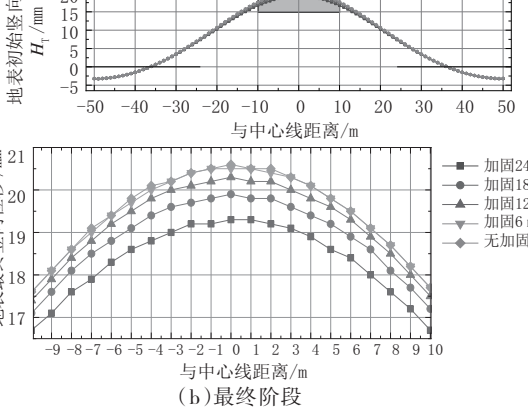


(c)位移差

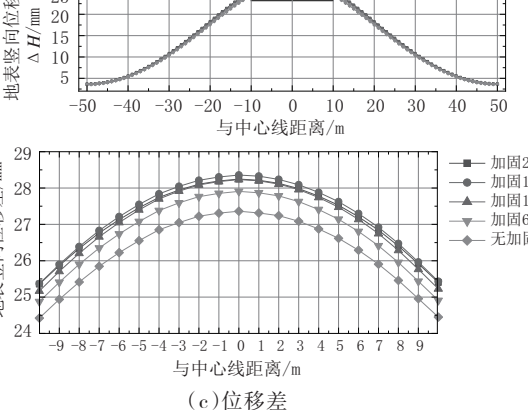
图8 地表竖向位移(X向/垂直管廊方向)



(a)初始阶段



(b)最终阶段



(c)位移差

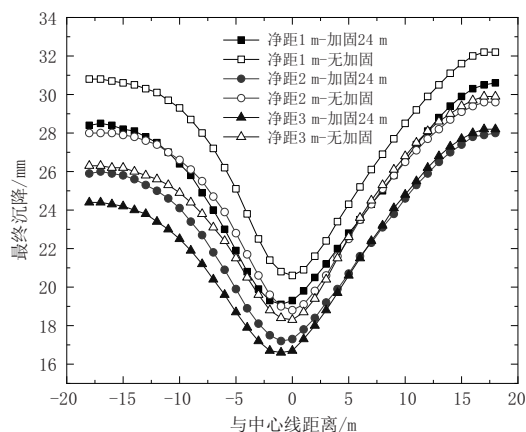
图9 地表竖向位移(Y向/平行管廊方向)

地基加固与上下隧道净距对地表沉降的影响如图10所示。从图中可以看出:(1)24 m地基加固作用较为明显,在Y向,其影响半径约为35 m,即约3倍长度范围内。

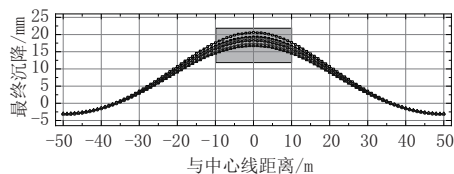
4 结论

城市地下综合管廊具有埋深浅、结构宽度和壁厚均较小的特点。本文通过采用数值模拟的方式,研究了管廊地基加固与远期双线盾构隧道修建的相互作用,得出以下结论。

(1)在本项目中,上部土层较好,管廊的持力层



(a)垂直管廊方向(X轴方向)



(b)平行管廊方向(Y轴方向)

图 10 地表竖向位移

为黏土,上部覆土较薄(约3 m),土压较小,管廊地基加固对远期盾构隧道修建无明显影响。

(2)远期地铁盾构隧道修建与地基加固对上部管

廊结构内力和地表位移存在一定的影响。其中,24 m加固方案[加固两端分别超出盾构隧道3 m(0.5倍盾构隧道外径)]改善了结构的受力与地表位移。

(3)较短长度的地基加固方案,虽然减小了地表沉降,但加大了管廊结构的轴力(拉力),不推荐采用。

通过上述研究,本项目将管廊某节点处原13 m加固长度增加到了24 m,远期地铁盾构线位选择时可酌情考虑。

参考文献:

- [1] 张志强,何川.南京地铁区间盾构隧道“下穿”玄武湖公路隧道施工的关键技术研究[J].岩土力学,2005(11):20-25.
- [2] 奚灵智,高文杰,杨宇.地铁重叠下穿既有隧道软土地基加固参数研究[J].建筑技术开发,2020,47(23):158-161.
- [3] LIN X, CHEN R, WU H, et al. Deformation behaviors of existing tunnels caused by shield tunneling undercrossing with oblique angle [J].Tunnelling and Underground Space Technology,2019(89):78-90.
- [4] 房明,周翠英,刘镇.交叉隧道盾构施工参数与交叉角度对既有隧道的沉降影响研究[J].工程力学,2011,28(12):133-138.
- [5] AVGERINOS V, POTTS D M, STANDING J R. Numerical investigation of the effects of tunnelling on existing tunnels [J]. Géotechnique,2017,67(9):808-822.
- [6] 张孟喜,张靖,吴应明,等.全风化岩层中双线盾构上穿近邻地铁隧道影响分析[J].土木工程学报,2019,52(9):100-108.
- [7] 张学言,闫澍旺.岩土塑性力学基础[M].天津:天津大学出版社,2004.

(上接第91页)

卡必去之地。将地域文化与桥梁美学设计相融合,更是让景观桥梁成为城市文化和历史记忆的载体,给人们提供了极大的情绪价值。

桥梁设计师在进行景观桥梁设计时,需要深入了解当地文化,融合地域元素,强调故事性和象征意义。通过将景观桥梁与地域文化融合,不仅可以增强桥梁的艺术价值,更重要的是将桥梁变成一个代表地域文化的象征,让人们在使用和欣赏桥梁时感受到对地域传统和历史的尊重和认同。这样的桥梁设计不仅美观,还有助于传承和弘扬当地的文化遗产。

参考文献:

- [1] 邓文中.桥梁形态与美学[J].Engineering,2018,4(2):221-242.
- [2] 梁艳,何畏,唐茂林.桥梁美学2019年度研究进展[J].土木与环境工程学报(中英文),2021,42(5):213-222.
- [3] 唐寰澄.桥梁美的哲学[M].北京:中国铁道出版社,2000.
- [4] 黄泽斌,肖雅丹,王奇文,等.城市景观桥梁群地域性美学研究[J].中外建筑,2022(10):40-45.
- [5] 王毅力,易辉,刘海涛.城市桥梁的景观创新性研究与实践运用[J].重庆建筑,2022(增刊1):396-399.
- [6] 顾卫国.城市桥梁景观设计中地域文化符号的构建——以淮安盐河大桥为例[J].南京艺术学院学报:美术与设计,2016(6):196-199.
- [7] 朱尔玉,刘磊.桥梁文化与美学[M].北京:北京交通大学出版社,2019.
- [8] 项海帆.桥梁概念设计[M].北京:人民交通出版社,2011.