

软土地区大断面矩形顶管浅覆土下穿高速 变形控制分析研究

胡文

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要:以上海市陆翔路—祁连山路贯通工程大断面矩形顶管下穿S20外环高速为背景,探讨了控制顶管浅覆土下穿高速变形的加固措施。介绍了钢管幕加固在本工程中的设计与工程实施情况,并采用三维数值仿真分析了下穿S20外环高速施工引起的变形情况,预测变形规律及结果与监测断面数据吻合性较好。工程的实施论证了采用钢管幕加固控制大断面顶管浅覆土下穿高速的可行性,可为今后软土地区类似顶管下穿高速工程提供借鉴。

关键词:类矩形顶管;钢管幕;下穿高速;数值分析

中图分类号: U455.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2021)04-0108-07

0 引言

随着城市建设规模快速向郊区扩张,打通城郊结合地带由于高速公路阻隔产生的断头路的需求越来越高。城市高速公路由于其交通流量的密集性及运输保通的重要性,往往构成制约贯通两侧道路工程方案推进的关键节点。因此,研究如何在保障高速公路安全运营的情况下,控制地下工程穿越施工对高速公路影响的意义非常重要。

选择城市交通建设过程中下穿高速公路施工方案时,需要考虑以下因素:

(1)高速交通流量大、车速高,路面变形控制要求高,在保通及安全运营需求下对下穿工法的安全性要求严格。

(2)下穿高速的道路线形开展受两侧建(构)筑物、道路接线标高及线形等现状因素影响,下穿高速断面处地道顶部覆土通常较浅。

传统的明挖工艺已无法满足下穿时高速路面保通需求,而盾构下穿对覆土要求较高,顶管法施工则具有对周边环境影响小、覆土要求适中等^[1]优点,因此顶管工艺成为了下穿高速节点中的首选方案。

本工程以上海市陆翔路—祁连山路贯通工程大断面矩形顶管下穿S20外环高速项目为背景,探究

软土地层浅覆土大断面矩形顶管下穿高速变形控制难题。本工程浅覆土顶管下穿S20外环高速可为今后软土地区类似下穿工程提供借鉴。

1 工程概况

上海市陆翔路—祁连山路贯通工程下穿地道南起朱家弄河北侧,自S20外环高速南侧入地,下穿S20外环高速和顾村公园,于镜泊湖路南侧出地面,地道全长约850 m,双向4车道。受S20外环高速道路保通要求和顾村公园环境条件限制,该区段地道下穿采用两条外轮廓尺寸9.9 m×8.15 m类矩形顶管下穿施工,两条顶管之间净距10.0 m,单向顶进长度445 m,纵坡0.3%。

本工程平面及纵断面布置见图1。

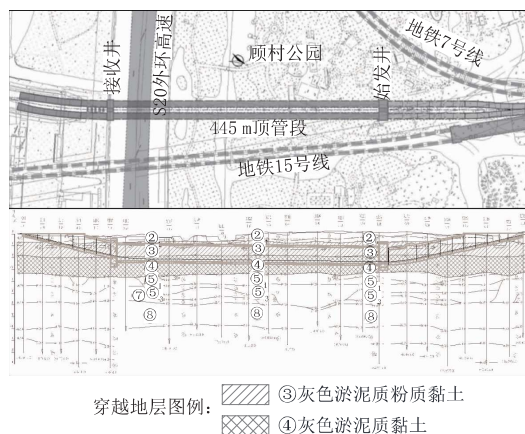


图1 工程平面及纵断面图

本工程顶管采用空间利用率高的类矩形断面,管片采用整块预制拼装,如图2所示。考虑顶管工艺的

收稿日期: 2020-11-27

作者简介: 胡文(1987—),男,硕士,工程师,国家注册土木工程师(岩土),从事地下结构工程设计与研究工作。

特殊性,为降低顶管施工对S20外环高速的持续影响,顶管从顾村公园北侧工作井始发,在S20外环高速南侧工作井接收,仅穿越时对S20外环高速有一定影响。顶管段全线覆土均较浅,最大覆土厚约6.5 m,其中下穿S20外环高速顶部覆土仅厚3.50~3.95 m。顶管地道掌子面穿越地层强度低、施工易受扰动,且下穿S20外环高速附近地下管线众多,因此施工难度及风险较高。

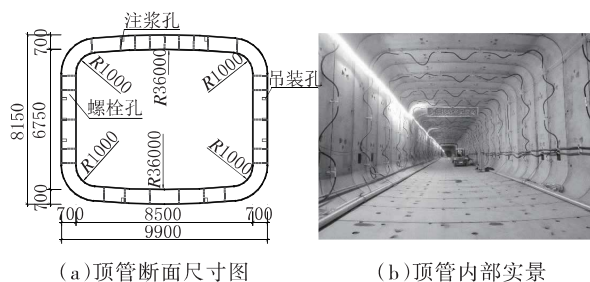


图2 类矩形顶管断面及实景图(单位:mm)

本工程顶管下穿过程中存在以下几方面难题:

(1)顶管地道横断面较大,断面尺寸9.9 m×8.15 m,超过国内已实施的最大顶管地道——郑州市下穿中州大道矩形顶管^[2]。且下穿S20外环高速区段顶管影响范围较长,若考虑S20外环高速两侧各1.5倍开挖跨度作为顶管施工影响半径,纵向范围将达70 m左右。

(2)受顶管接收井南侧道路展线限制,顶管下穿S20外环高速覆土厚度最小处仅3.50 m,约0.35倍顶管跨度,与上海地区顶管规程^[3]及以往工程经验建议的范围相差较大。

(3)顶管穿越地层差,主要为③层灰色淤泥质粉质黏土和④层灰色淤泥质黏土,局部穿越③_T层灰色黏质粉土夹层。穿越地层强度低、含水量高、渗透性差、压缩性高、灵敏度高,具触变性和流变性,施工易受扰动。

(4)S20外环高速变形控制要求严格,经与保护部门沟通,要求在路面保通的条件将地道顶管施工对路面的变形影响控制在30 mm以内。

(5)S20外环高速两侧重要管线众多,其中南侧存在1根 $\phi 1\,400$ mm给水管,北侧存在1根 $\phi 800$ mm次高压燃气管线,尚有多根通讯及电力管线。因此,本工程顶管浅覆土下穿S20外环高速风险及难度艰巨。参考以往顶管施工经验及数值方法预测,顶管施工前需采取加固措施,以确保S20外环高速及周边管线运营安全,并为顶管下穿S20外环高速时提供紧急情况下的安全保障。

2 顶管加固措施

S20外环高速是环绕上海城郊结合地带的环形城市高速公路,路面结构层厚度75 cm。S20外环高速路面交通流量密集,且重型车辆较多,运输保通重要性及安全性不言而喻。

考虑到保障S20外环高速交通运营的重要性,有必要采取保护措施来抑制顶管“背土效应”和施工扰动变形,控制顶管施工影响。而目前工程界尚无下穿S20外环高速顶管工程案例可循,因此探索可靠的顶管加固措施成为顶管下穿需要克服的突破点。

钢管幕加固在上海软土地道下穿施工中结合箱涵顶进等相似工艺施工有工程案例可循。考虑到本工程地道顶管断面大,顶管影响范围广,对S20外环高速保护要求高,本工程选择采用成熟可靠的钢管幕加固措施,为顶管下穿S20外环高速提供安全保障。

钢管幕加固是暗挖工艺中常用的一种加固措施,该方案是利用微型顶管技术在拟建的地下建筑物四周顶入钢管,然后在钢管幕的保护下结合其他暗挖工法施工。

钢管幕加固在下穿隧道保护工程中案例较多。上海中环线北虹路地道采用80根长126 m、直径970 mm的钢管幕,有效控制了长距离大断面浅覆土箱涵顶进对西郊宾馆和虹桥路的影响,是钢管幕结合箱涵顶进的典型案例^[4]。上海田林路地道下穿中环采用58根长86 m、直径800 mm的钢管幕,覆土厚度约6.3 m,实现了中环的首次下穿箱涵顶推施工^[5]。上海14号线桂桥路站渡线段则是钢管幕结合矿山法暗挖工艺在软土地区的首次试验应用^[6]。拱北隧道采用36根长255 m、直径1 620 mm的曲线钢管幕,结合冻结暗挖工艺穿越拱北口岸,代表着目前钢管幕领域所能达到的新高度^[7]。

3 钢管幕加固设计及实施

3.1 钢管幕设计

钢管幕中常用直径有800 mm、1 000 mm及1 600 mm等,本工程考虑断面规模,采用内径800 mm,壁厚12 mm钢管。管幕布置以地道结构中心线对称布置,钢管间距考虑施工偏差及刚度等因素采用1 100 mm,底部与顶管净距300 mm。

钢管幕平面以顶管接收井为起点,向北至S20外环高速北侧燃气管以北约10 m,单根钢管长度85 m。

每根钢管由13节长6 m的钢管及2节长3.5 m的钢管采用焊接等强度连接,相邻钢管接头错开。钢管幕采用地道顶管接收井作为始发井,接收井布置于S20外环高速北侧。

3.1.1 钢管幕断面布置

钢管相对顶管的布置是钢管幕布置的首要问题,本工程提出如图3所示3种方案进行比选。

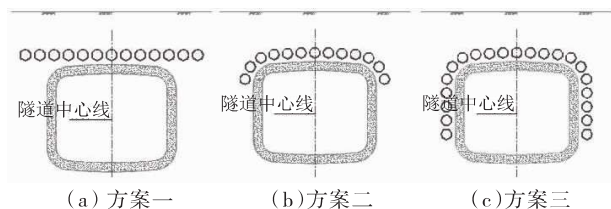


图3 钢管幕断面布置图

方案一:钢管幕水平布置于顶管顶部范围,单线13根,此方案钢管布置具有施工定位方便,对管幕始发井开洞影响小,管幕基坑开挖浅的优点。

方案二:钢管幕沿顶管轮廓布置于顶管顶部范围,单线13根,此方案钢管布置有利于顶管导向,且能使管幕形成一定的拱效应。

方案三:钢管幕沿顶管轮廓布置于顶管顶部及两侧墙范围,单线21根,控制变形效果最好,但管幕数量较多,经济性不佳。方案二、方案三均需增加管幕接收井的开挖深度,且对管幕始发井地墙的开洞影响较大。

由于浅覆土顶管施工中采用钢管幕控制S20外环高速变形的机理主要是减小顶管施工的“背土效应”,地道顶管掘进自身的导向功能完全满足顶管施工需求,因此从管幕施工便利性及经济性出发,管幕断面布置采用方案一,水平布置于顶管上方,单线13根,共计26根。

3.1.2 钢管幕锁扣取舍

钢管幕采用锁扣的作用是增强钢管幕之间的横向连接,提高施工导向作用,当锁扣空隙内注入固化剂后可形成止水帷幕。但受钢管幕施工精度影响,当顶进误差超过锁扣之间的缝隙时会引起钢管之间锁扣接头困难甚至无法闭合^[5],且增加了开洞洞口的止水难度。不设锁扣时顶管精度需求适中,可避免上述不利问题。尽管相邻钢管横向相对独立,但可通过注浆孔往相邻钢管之间注浆来提升整体刚度。

数值分析表明,本工程管幕增加锁扣后对S20外环高速变形控制能力的提升仅约10%,但给管幕顶管施工及洞口止水带来较大困难,若顶进精度未控制好时,反而会增加对周边土体的扰动,效果可能

适得其反。本工程顶管施工对管幕止水需求不高,因此采用取消锁扣的钢管幕形式。

3.2 钢管幕顶管施工

钢管幕施工采用3台DN800微型泥水平衡顶管机施工,刀盘选用对周边土体扰动小的面板形式,如图4所示。进、出洞口钢管幕止水采用压板配合止水帘布橡胶板形式。钢管幕穿越土层主要为②₁层灰黄色粉质黏土和③层灰色淤泥质粉质黏土,穿越地层强度低,施工易受扰动。钢管幕顶进过程中,通过采用变频自动控制进排泥量来控制泥水仓压力,同时优化泥浆配比、推进速度及刀盘转速,控制顶进轴线精度等施工参数,并且加强顶进期间的施工监测反馈,实现信息化施工,以此来减少S20外环高速地表沉降。



(a) DN800 微型顶管机

(b) 顶管机现场顶进

图4 钢管幕顶管机及施工顶进

钢管幕施工步骤以中轴线钢管为基准导向管,间隔2根钢管跳管施工,以减少相邻钢管幕顶进干扰影响。

单根钢管顶进完成后,及时采用水泥浆液完成泥浆置换及洞口密封施工。待全部顶管顶进完成后,采用C30自密实混凝土填充,以增加钢管幕纵向刚度。

现场掘进数据表明:钢管幕顶进过程中顶力稳步上升,未出现突变,最大顶力约43 t。顶进过程中姿态控制良好,管幕最大切口偏差不大于25 mm。顶力及切口偏差随掘进里程变化见图5,图中“S20南线、S20北线”为相对钢管幕起点位置的示意。

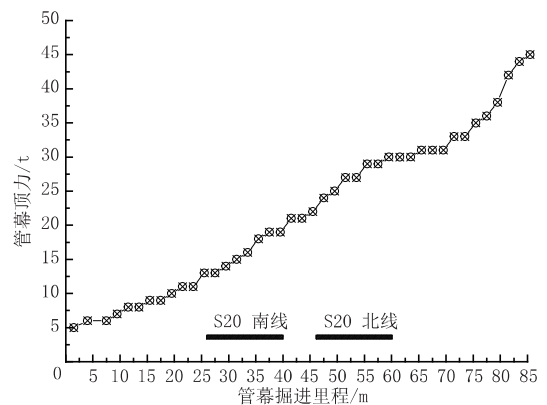
4 数值分析与监测

为分析预测钢管幕加固控制顶管施工对S20外环高速的影响,采用有限元软件Midas GTS NX进行三维数值仿真。

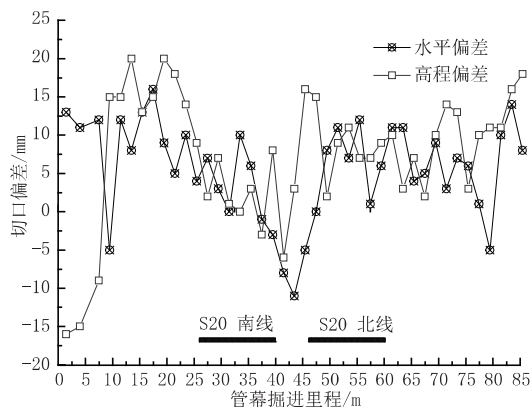
4.1 数值模型

4.1.1 模型介绍

为消除模型边界效应,数值模型横向(x)两侧从顶管外边各取4倍顶管开挖跨度;纵向(y)起点取自管幕始发井,终点取为钢管幕接收井往北延伸4倍基坑开挖深度;竖向(z)上方取自地表,下方取为顶管底向下4倍顶管开挖跨度。模型尺寸:110 m ×



(a)管幕顶力增长趋势图



(b)水平及高程切口偏差变化图

图5 顶力及切口偏差随掘进里程变化

55 m×115 m(*x*×*y*×*z*),模型节点 88 100 个,单元数 145 399 个,计算模型如图 6 所示。

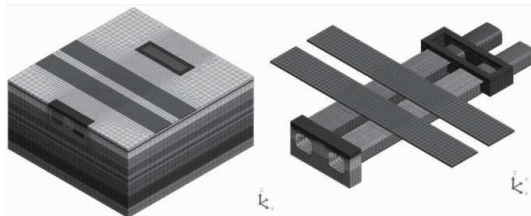


图6 下穿 S20 外环高速三维数值仿真模型

4.1.2 材料参数

地层模型采用能考虑卸荷硬化行为的修正 Mohr-Coulomb 本构模型;钢管幕及混凝土预制管片采用弹性本构模型、2D 板单元模拟,各参数取值见表 1。表中: γ 为材料重度; c 为黏聚力; φ 为内摩擦角; E_s 为弹性模量; ν 为泊松比。

4.1.3 主要数值模拟步骤

本工程数值模拟根据实际施工工序模拟,主要分析步骤如下:

- (1)自重应力平衡,地表位移清零。
- (2)钢管幕施工顶进模拟。
- (3)东线顶管逐步施工模拟。
- (4)西线顶管逐步施工模拟。

S20 外环高速地面超载按城 -A 级重型车辆荷

表 1 土层及材料数值模型参数

土层号和材料	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	E_s/MPa	ν
① ₁	18.00	10.0	15.0	4.50	0.38
② ₁	18.52	17.1	15.4	4.77	0.35
③	17.46	11.7	15.1	2.84	0.40
④	16.73	10.1	10.3	2.22	0.42
⑤ ₁	17.63	14.3	14.7	3.39	0.38
⑤ ₃	17.54	14.7	14.7	3.63	0.38
⑤ ₄	19.3	40.8	16.8	6.71	0.33
⑦	18.22	3.2	31.3	9.13	0.30
⑧ ₁	17.69	19.3	16.1	4.59	0.35
⑧ ₂₁	18.00	14.7	21.8	5.65	0.33
⑧ ₂₂	18.25	5.9	29.2	8.57	0.30
钢管幕	78.5			205 000	0.25
管片	25.0			34 500	0.20

载等效成均布荷载,考虑布置于高速地表。

4.2 数值分析预测与监测结果

本工程下穿 S20 外环高速共设置 4 个监测断面,各断面编号从南往北依次命名为 S1~S4 剖面,分别设置于 S20 上、下行高速道路南、北两侧边缘带路面结构上,每个剖面以道路中心线为基点,按 3 m 间距均匀布置 21 个测点。监测范围为顶管边缘以外 15 m,约 1.5 倍顶管开挖跨度。

根据不同施工阶段,对数值分析预测结果与监测点数据进行对比分析。

4.2.1 钢管幕施工

钢管幕施工完成后,S20 上、下行高速路面竖向变形云图如图 7 所示。

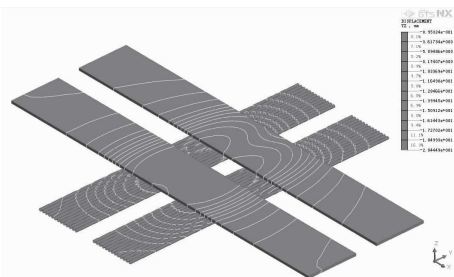


图7 钢管幕施工完成后 S20 高速路面竖向变形云图(单位:mm)

数值分析预测结果表明,钢管幕施工完成后,S20 外环高速路面变形整体呈“W”型曲线,管幕处变形较大,最大变形约 20.0 mm。主要原因是顶管施工扰动及钢管幕素混凝土填充后等效重度比原土体大所产生的自重沉降变形。

钢管幕施工完成后,各断面监测点数据与数值分析预测结果对比如图 8 所示。

由图 8 可见,数值分析预测结果与监测结果规律基本一致,除 S4 剖面西线管幕由于顶进过程中碰

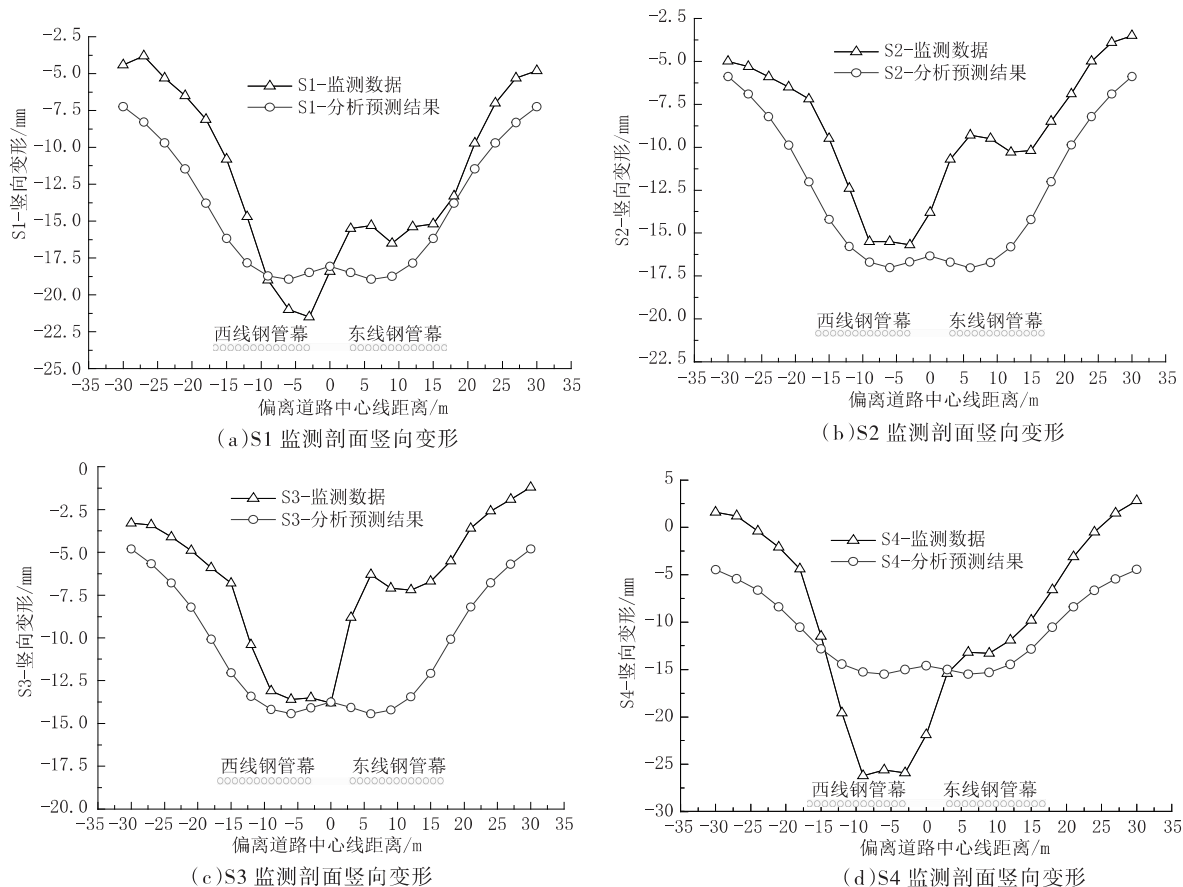


图8 钢管幕施工完成后,S1~S4监测剖面测点数值与数值分析预测结果对比图

到孤石导致监测数据存在畸变点外,其余剖面数值分析预测结果与监测数值吻合度较高。

4.2.2 东线顶管下穿 S20 外环高速

东线顶管施工完成后,S20上、下行高速路面竖向变形云图如图9所示。

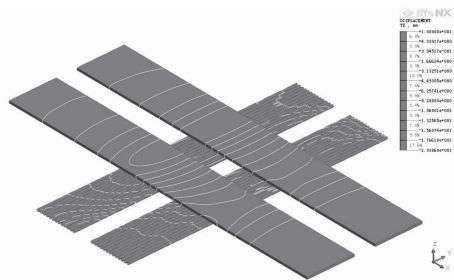


图9 东线顶管完成后 S20 高速路面竖向变形云图(单位:mm)

数值分析预测结果表明,东线顶管完成后,东线顶管区间 S20 外环高速变形整体表现为上抬,主要原因为顶管断面开挖卸荷后结构底部下方土体回弹,地表变形恢复至约 -2.5 mm。

东线顶管完成后,各断面监测点数据与数值分析预测结果对比如图10所示。

东线隧道顶管完成后,受顶管下部土体卸荷回弹影响,钢管幕亦表现为整体上抬,起点附近受到工作井结构约束,如图11所示。

4.2.3 西线顶管下穿 S20 外环高速

西线顶管完成后,S20上、下行高速路面竖向变形云图如图12所示。

数值分析预测结果表明,西线顶管完成后,西线顶管区间 S20 外环高速变形整体表现为上抬,主要原因为顶管断面掘进后重度小于开挖部分土体的重度,中央分隔带处最大地表隆起约 5.52 mm。

西线顶管完成后,各断面监测点数据与数值分析预测结果对比如图13所示。

西线隧道顶管完成后,上方钢管幕变形趋势与东线规律类似,如图14所示。

对比结果显示,数值分析预测结果与监测结果规律基本一致。数值分析预测影响范围大于实测影响范围,且由于顶管施工过程中在部分区段采取了主动控制地表变形的“打土”措施来局部抬升地面,导致实测数据存在畸变点,反映出浅覆土大断面顶管施工地表变形对施工参数的敏感性。监测数据反馈表明,东线上方地表变形曲线轮廓受西线隧道影响较小,反映出顶管施工扰动影响范围的可控性。

5 结 语

(1)对于顶管下穿高速节点,采用钢管幕加固是

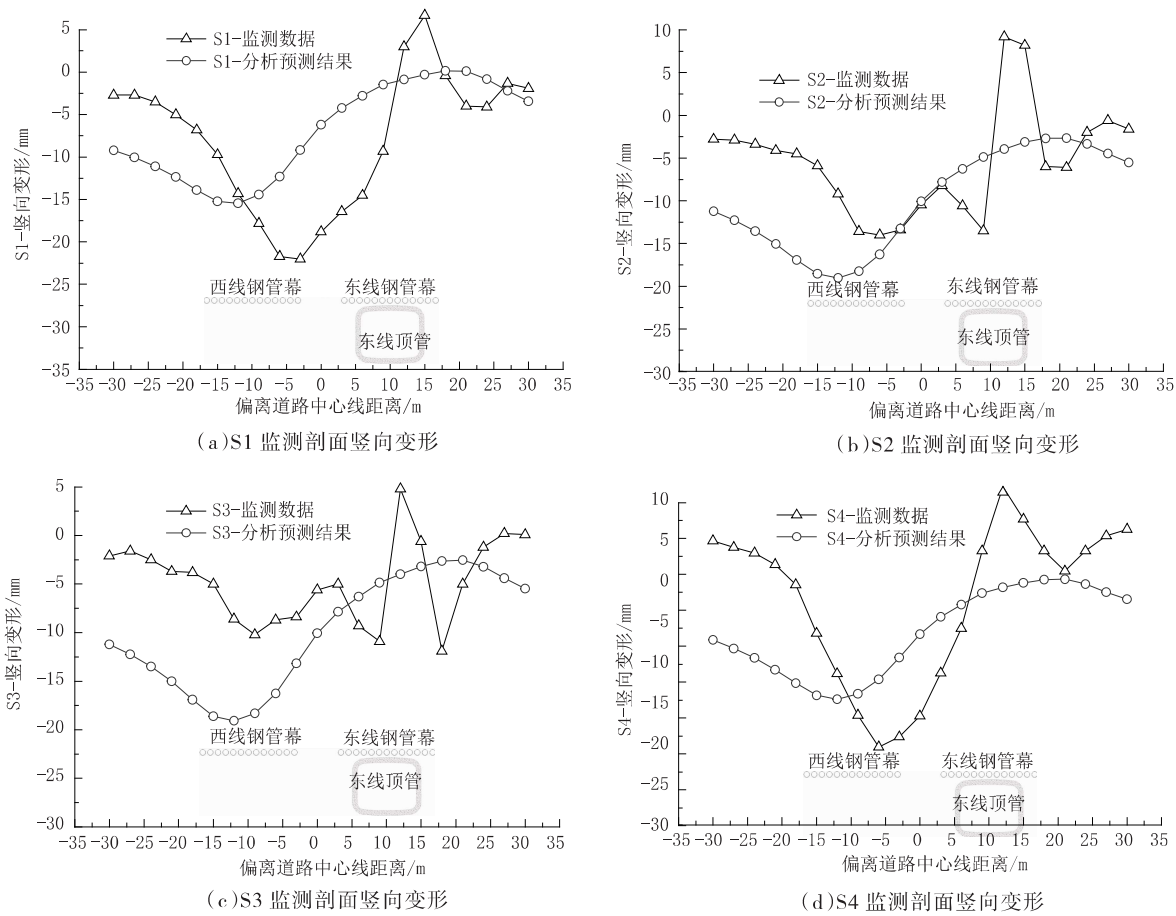


图 10 东线顶管完成后,S1~S4 监测剖面测点数值与数值分析预测结果对比图

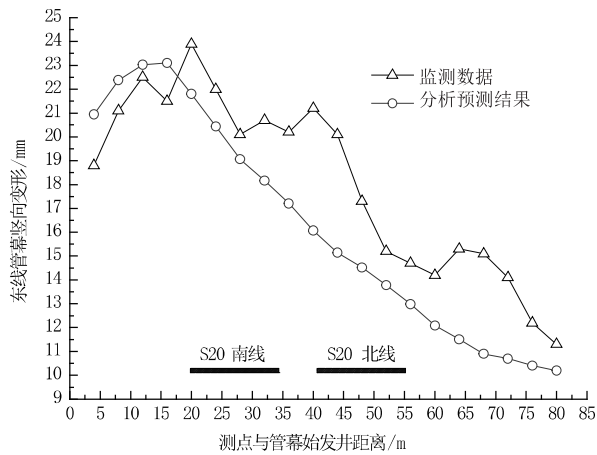


图 11 东线顶管完成后钢管幕竖向变形图

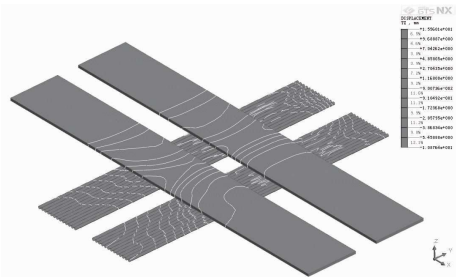


图 12 西线顶管完成后 S20 高速路面竖向变形云图(单位:mm)

一种可靠的隔离措施。钢管幕加固能将顶管施工对 S20 外环高速影响控制在 30 mm 保护控制范围之

内,能有效抑制浅覆土顶管施工引起的“背土效应”。同时由于钢管幕的隔离,能有效控制顶管施工对上覆土体的扰动,对于控制顶管工后沉降亦会产生有利作用。

(2)取消锁扣后钢管幕顶进时姿态控制良好,对周围扰动可控。钢管幕施工对 S20 外环高速路面变形影响整体呈“W”型曲线。

(3)矩形顶管地道施工完成后,路面变形整体由于顶管底部卸荷影响会有整体小幅上抬。

(4)数值分析预测结果与实测结果规律一致,监测断面预测值与实测值吻合较好,数值分析预测施工影响范围略大于实测影响范围,说明数值分析能有效预测顶管下穿施工影响。

(5)顶管施工过程中采取合适的顶进参数能有效控制施工影响幅度及范围。软土地区顶管的工后沉降影响会持续较长时间,施工过程中可采取提高掌子面压力及“打土”等措施,使地面预先隆起合适幅度,以抵消部分后期沉降值,确保高速地面变形控制在允许范围。

(6)本工程顶管地道已于 2020 年 11 月中旬顺利实现双线贯通。顶管东、西线下穿 S20 外环高速的成

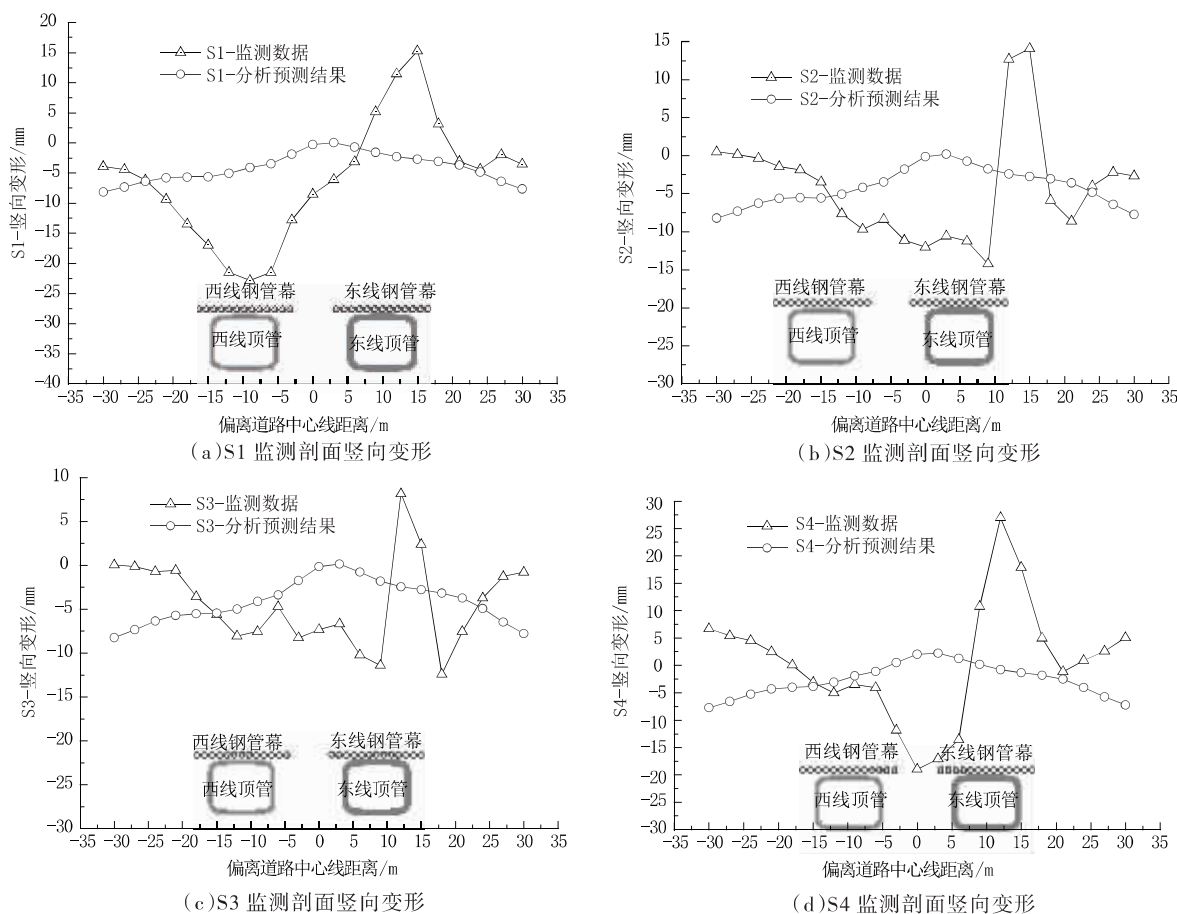


图 13 西线顶管完成后, S1~S4 监测剖面测点数值与数值分析预测结果对比图

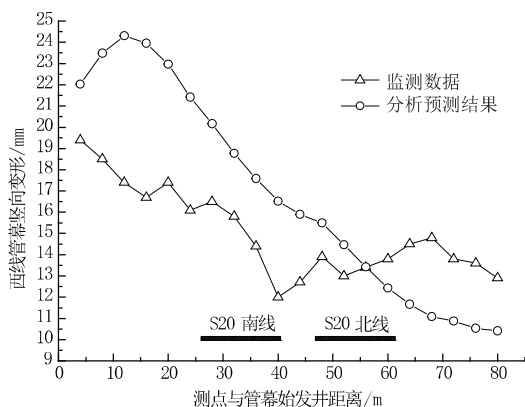


图 14 西线顶管完成后钢管幕竖向变形图

功实施, 论证了采用钢管幕加固控制大断面顶管浅覆土下穿高速的可行性, 可为今后软土地区类似顶管下穿工程提供借鉴。

参考文献:

- [1] 魏纲, 魏新江, 徐日庆. 顶管工程技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [2] 郭昊. 矩形顶管机下穿郑州市中州大道工程简介[J]. 中国市政工程, 2013(5): 53-55.
- [3] DG/T J08-2049—2016: 顶管工程施工规程[S]. 上海: 同济大学出版社, 2017.
- [4] 陈鸿. 管幕工法在北虹路地道中的应用[J]. 地下工程与隧道, 2007(1): 16-20.
- [5] 蒋晓天. 超大断面管幕箱涵施工技术[J]. 施工技术, 2019, 48(16): 102-105.
- [6] 潘伟强. 软土地区管幕群顶管施工地面沉降监测与分析[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(增刊1): 201-204.
- [7] 张鹏. 拱北隧道超大型曲线顶管管幕施工关键技术及理论研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2018.