

连拱隧道下穿既有高速公路管幕法施工技术研究

姚 军¹,汪 鑫²,赵国光²

(1.陕西省交通规划设计研究院有限公司,陕西 西安 710065; 2.西安工业大学建筑工程学院,陕西 西安 710021)

摘 要:新建隧道下穿城市既有道路,当埋深较浅时,上部道路很容易因沉降过大而导致路面结构开裂,甚至破坏等问题,因此研究隧道的施工技术是非常必要的。以西安市开元路至建元路下穿通道项目为依托,在连拱隧道施工过程中采用有限元软件模拟管幕法支护对隧道结构、围岩稳定性及上部道路路面沉降的影响。主要结论如下:(1)新建连拱隧道围岩竖向最大位移为 7.4 mm,满足规范要求,隧道结构安全可靠;(2)采用管幕法施工时,路面沉降最大值仅为 4.39 mm,说明管幕法开挖连拱隧道下穿既有城市道路是可行的;(3)采用管幕法施工隧道二衬最小安全系数为 2.05,大于规范最小安全系数,衬砌结构安全可靠。综上所述,采用管幕法作为超前支护措施,连拱隧道下穿既有城市道路对上部路面影响较小,施工安全风险较低。

关键词:连拱隧道;下穿;既有道路;浅埋暗挖;管幕;路面沉降;数值模拟

中图分类号:U455

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2023)12-0127-05

0 引 言

近年来,随着我国城市建设的迅猛发展,许多发达城市修建地下工程的情况越来越多,开挖隧道难免对既有建筑物造成影响。由于新建隧道在下穿既有道路过程中,极易引起地表下沉、路面结构开裂,甚至导致道路发生失稳坍塌等事故,从而带来隧道施工进度慢及施工安全等问题^[1]。

在城市中新建隧道,通常埋深较浅、邻近建筑物多,施工难度较大^[2]。因此,选择较为合理的施工方法是非常重要的。目前,城市隧道常用的开挖方法有盾构法、管棚法、管幕法等^[3-5]。许多学者对上述隧道开挖方法进行了大量研究。例如王金华等^[6]对上软下硬地层盾构隧道下穿高速公路施工对路面的变形影响进行了研究,采用 FLAC 3D 模拟了不同施工参数对路面的变形影响规律,并得出对于上软下硬地铁隧道盾构下穿高速公路时,增加土仓压力和注浆层厚度可以减少路面变形。赵金鹏等^[7]采用数值计算和现场监测方法研究了管棚的支护效果,发现管棚能在一定程度上控制围岩的变形,但主要效果还是防止围岩过度变形造成坍塌,并提出了施作长管棚需要预留 1 倍洞径的起始端,才能更好地发挥长管棚的支护效果。余建^[8]通过数值模拟,研究了管棚

支护在浅埋暗挖隧道过程中纵向及环向的变形及应力影响,并得出长管棚超前支护能控制隧道变形,减少沉降,也能有效减少后续施工对已完成工程的扰动,且管棚覆盖范围对支护作用的充分发挥有较大影响。赵笑鹏^[9]结合工程实例论述了软土地层工况下,使用管幕支护的各种风险项目,如管幕顶进精度、MTS 加固地内压力控制等,并提出了相应的防范措施。杨巳期^[10]为确定小口径锁扣式管幕在大断面超浅埋暗挖山岭隧道中的适用性,通过有限元分析得到小口径锁扣式管幕在大断面超浅埋暗挖隧道施工中作为超前支护,可有效控制隧道拱顶围岩变形及地表沉降。唐琨杰等^[11]研究了锁扣管幕超前支护在连拱隧道近距离下穿地铁 U 型槽中的应用,通过对暗挖下穿 U 型槽进行动态模拟,得到有无锁扣管幕超前支护时 U 型槽的变形特征曲线,对比分析下穿过程中 U 型槽的变化规律。

从上述研究可知,在城市中修建隧道下穿既有道路常用管棚法、管幕法进行支护。因此,本文根据实际工程情况,选择管幕暗挖法进行施工,并采用有限元法模拟隧道开挖过程及对围岩和支护结构稳定性影响,分析了管幕法连拱隧道开挖对上部道路的影响。

1 工程概况

开元路—建元路通道工程为双向四车道,全长 1 466.317 m。全线划分 11 个结构段落,其中 ZK0+585~ZK0+796 为暗挖连拱隧道段,下穿西铜高速和西安绕城高速,长度为 211 m,埋深为 13~17 m,支

收稿日期:2023-02-09

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2023-JC-YB-327);陕西省教育厅服务地方专项计划项目(22JC040)

作者简介:姚军(1979—),男,本科,高级工程师,主要从事桥梁与隧道工程研究工作。



图1 项目地理位置

护顶面至高速公路路面最小距离为 5 m,线路位置关系如图 1 所示。连拱隧道开挖断面为 192.8 m^2 ,属于特大断面隧道,建筑界限净高为 5.0 m,净宽为 20.25 m,岩性为黄土状土、细砂、中砂,且围岩级别为 VI 级,无自稳能力。

1.1 施工难点

新建下穿隧道顶部覆盖层为人工填土,其结构松散,自稳性差,基坑开挖过程中极易坍塌,且厚度仅有 5m 左右。隧道两侧多为黄土状土、细砂、中砂。围岩等级为 IV 级,无自稳能力。其中,黄土状土因受绿化带长期浇水下渗影响,土体中含水量较高,土体强度降低。基坑开挖水平卸载产生应力释放,土体容易失去平衡,造成蠕变、蠕滑等变形。另外,细砂、中砂的承载能力特征值分别仅有 250 kPa、300 kPa,开挖时容易发生失稳变形。此外,新建隧道位于繁华市区城市主干道下方,且上方为一级公路,因此隧道周围建筑较为重要且地下管线交错纵横,新建隧道施工时对周围岩层产生扰动是无法避免的。当地层变形超过一定值时,会对既有道路及地下管线的正常使用造成影响,所以控制围岩变形和道路沉降是本工程的难点。

1.2 超前支护方法

目前隧道超前支护的方法主要有管幕法、管棚法、超前锚杆法等。其中,管幕法由于自身结构的刚度较大,可近似看作一个刚体^[12],适用于软弱地层和特殊困难地段,如砂土地层、断层破碎带,浅埋大偏压等围岩,对地表沉降有严格要求的工程。锁扣管幕采用螺旋出土套管跟进工艺施工,可有效减少地层扰动、控制沉降^[13],在保障后续隧道施工质量、施工效率及安全性方面十分可靠,且在整个施工过程中噪声低、污染小,在地铁暗挖通道特别是周边环境复杂的情况下有比较明显的优势。由于管幕支护可以解决新建隧道埋深浅、围岩岩性差等问题,因此选

用管幕法开挖该连拱隧道是较为合理的。

管幕工法也叫排管顶进法^[14],其施工原理是在暗挖隧道外周先用顶管法设置钢管,形成封闭的钢管幕,再在钢管幕的围护下开挖隧道的施工技术。该工艺在暗挖隧道进出口之间,利用小型顶管机顶进钢管到土体中,各单管间依靠锁口在钢管侧面相接形成管排,并在锁口空隙注入水泥浆形成超前支护,管幕钢管采用螺旋出土顶管管幕施工工法^[15]。

1.3 施工参数和工序

暗挖结构施工管幕时,根据施工工艺和设备参数自行设置临时顶推后背,管幕施工时必须保证直线。另外,管幕应密贴初期支护施作。本设计考虑管幕施工引起的误差,按 10 cm 距离考虑。管幕采用 Q235 螺旋焊接钢管,直径为 $\phi 402$,壁厚 10 mm,沿暗挖隧道外轮廓线布设。钢管两侧设 6.3/4 cm 不等边角钢锁口。管幕钢管内灌注 C30 无收缩免振捣混凝土,并利用端头 2 m 管幕设置回浆孔对管间锁口进行充填注浆。注浆量按 20% 填充率计列,设计水灰比 1:1,注浆压和配合比通过现场试验确定。

全线典型断面设置 85 根管幕,单段最长跨度 120 m,管幕累计总长 31 635 m。暗挖段主体结构最大开挖跨度为 27.7 m,最大开挖高度 9.5 m,采用 CRD 中导洞法暗挖施工。图 2 为 CRD 法施工工序图,连拱隧道具体施工工序为:中导洞开挖→中导洞初期支护→浇筑中墙回填中墙两侧导洞→主洞先行导洞上部开挖→主洞先行导洞上部初期支护→主洞先行导洞下部开挖→主洞先行导洞下部初期支护→主洞上部开挖→主洞上部初期支护→主洞下部开挖→主洞下部初期支护→拆除临时支护→及时浇筑左(右)洞仰拱二衬→全断面模筑左(右)洞二次衬砌。

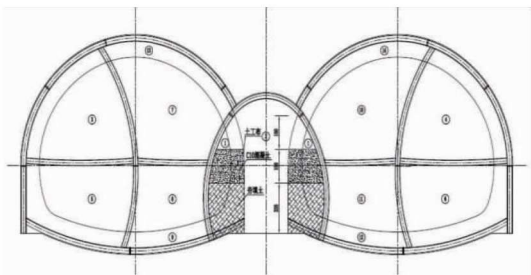


图2 CRD 工法施工顺序示意图

2 施工模拟

许多工程无法采用实验来模拟工程问题,而数值模拟软件可以模拟相对复杂的过程,为解决工程问题带来了便利。在数学模型上进行的数值模拟研

究具有研究周期短、安全、投入少等优点,已经成为现代科研必不可少的工具。数值模拟实际上可以理解

2.1 参数选取

连拱隧道下穿高速路基段落自上而下地层依次为路基填土、填筑土、黄土、细砂、中砂。隧道结构顶

2.2 模型构建

对于几何形状和围岩初始地应力场、地质条件都比较复杂的地下工程,必须考虑围岩的材料非线性特征和施工过程对隧道围岩稳定性的影响,通常采用数值仿真分析。本项目采用有限元法进行计算,利用 MIDAS 公司的岩土有限元分析软件 GTS NX 进行建模。利用地层结构法建立模型,旨在分析暗挖下穿隧道对上部道路变形的影响。

表 1 通道地质参数

层序	地层名称	层厚 /m	天然重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 $E/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	泊松比 ν	强度指标	
						黏聚力 /kPa	内摩擦角 $/(^{\circ})$
1	路基填土	2.0	22.0	25 000	0.28	30.0	45.0
2	填筑土	1.0	18.0	7 000	0.32	23.3	20.4
3	黄土	4.5	18.5	5 000	0.30	24.6	20.6
4	细砂	1.5	18.0	20 000	0.29	0.0	20.0
5	中砂	39.0	19.0	15 000	0.28	0.0	28.0
6	水平注浆	—	22.0	35 000	0.25	50.0	35.0
7	基底注浆	—	22.0	40 000	0.25	80.0	40.0

模型采用地层 - 结构模型,如图 3 所示,采用四面体单元划分。其中,土层采用实体单元,衬砌采用板单元模拟。整体土层模型底部固定约束,四周水平向约束。模型尺寸 140 m × 120 m × 50 m,土体及路基用三维实体单元模拟,采用硬化土本构模型。衬砌用板单元模拟,板厚 0.75 m,C40 混凝土,采用弹性本构模型,上方高速公路荷载取公路 - I 级,非涉路区段堆积荷载取 10 kN/m。



图 3 模型整体示意图

通过数值模拟计算了开挖全过程路基沉降的结果,并以定义的施工步骤逐步输出结果。连拱隧道结构模型如图 4 所示。采用施工阶段分析模拟,本项目隧道埋深约 12.5 m,隧道模拟 120 m,每次进尺 1 m。整体网格单元采用四面体单元,单元数 99 438 个。根据每次进尺 1 m,共计 120 m。计算出每一次开挖

结果值,计算分 120 步结果进行输出。依次对开挖 1 至开挖 120 步的路基沉降值进行结果提取。通过分步结果总结暗挖隧道下穿施工对路基的动态影响。

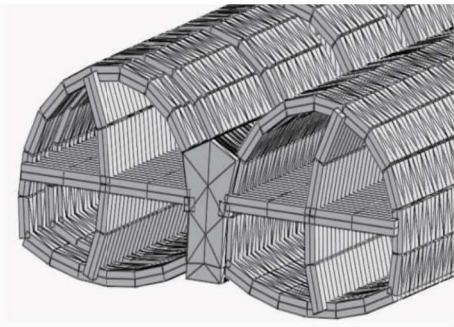


图 4 连拱隧道结构模型示意图

2.3 施工过程模拟

根据连拱隧道开挖施工的实际步骤,定义其分步施工工况:初始应力(位移清零)→交通荷载(位移清零)→大管棚施作→全断面水平注浆→中导洞上台阶开挖→中导洞下台阶开挖 + 中导洞初支 + 基底注浆→中墙浇筑 + 中导洞回填→左洞左上开挖 + 初支→左洞左下开挖 + 初支 + 左洞左侧基底注浆→左洞右上开挖 + 初支→左洞右下开挖 + 初支 + 基底注浆→左洞全断面二衬浇筑→右洞右上开挖 + 初支→右洞右下开挖 + 初支 + 右洞右侧基底注浆→右洞左上开挖 + 初支→右洞左下开挖 + 初支 + 基底注浆→右洞全断面施作二衬。

3 数值模拟结果分析

由于管幕法开挖连拱隧道会引起围岩变形、应力重分布,以及路面发生沉降变形等问题。因此,根据数值模拟计算结果,从连拱隧道围岩位移、衬砌结构、上部路面沉降等方面进行分析。

3.1 隧道围岩位移分析

图5为隧道开挖后围岩的竖向位移图。由图5可知,隧道开挖后,中导洞拱顶地面的沉降最大,最大沉降量为7.9 mm。离中导洞拱顶越远,沉降值越小,左洞拱顶地面沉降量为5.1 mm,右洞拱顶地面沉降量为5.3 mm。路面地表沉降小于控制值10 mm,满足相关规范要求。

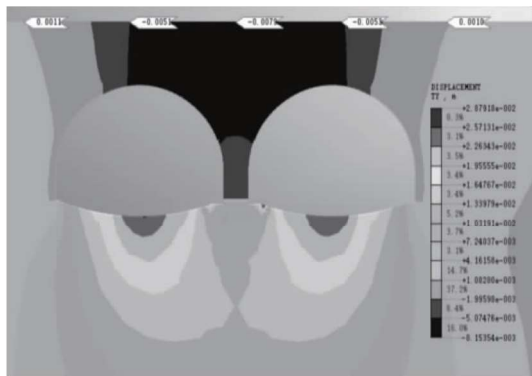


图5 隧道开挖后围岩竖向位移图

3.2 二次衬砌结构分析

由于隧道二次衬砌承受了很大部分围岩压力,为了保证隧道在施工过程中结构的安全,采用荷载结构法对连拱隧道暗挖结构进行了验算。计算模型的衬砌单位编号如图6所示。图7和图8是二次衬砌结构的轴力图 and 弯矩图。

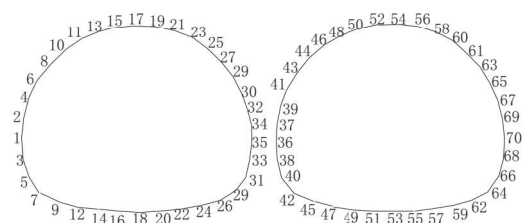


图6 计算模型衬砌单位编号



图7 二次衬砌混凝土轴力图

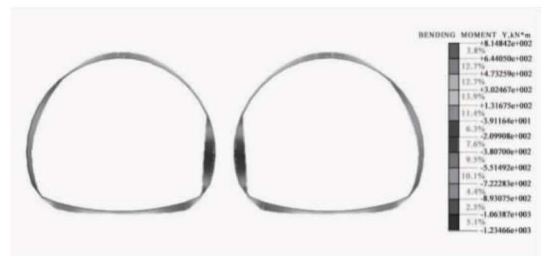


图8 二次衬砌混凝土弯矩图

从图7可知,整个衬砌所受轴力均为负值,表明整个衬砌结构全断面呈受压状态,最大轴力发生的位置是连拱隧道的拱顶处,成对称分布,且最大轴力为-741.724 kN。

从图8可知,在实测荷载作用下,最大负弯矩发生在连拱隧道二次衬砌结构拱脚内侧处,为1 234.66 kN·m。此外,两侧拱腰处也发生了较大的负弯矩。最大正弯矩发生在拱顶和仰拱两侧,达到了814.842 kN·m。

根据图7、图8中轴力和弯矩情况,按图6中衬砌单元编号,根据《公路隧道设计规范》(JTG 3370.1—2018)计算衬砌截面的安全系数。表2呈现了相对较小的安全系数。

表2 连拱暗挖隧道衬砌单元安全系数

单元号	衬砌厚度/m	弯矩/(kN·m)	轴力/kN	安全系数
5	0.75	-1 150.6	1 829.5	2.31
10	0.75	-1 150.6	1 823.3	2.30
17	0.75	629.0	1 114.7	2.05
26	0.75	629.0	1 116.3	2.05
52	0.75	-668.7	1 375.1	2.30

根据表2所示计算结果,可知二次衬砌最小安全系数为2.05,二次衬砌结构的强度安全系数大于《公路隧道设计规范》(JTG 3370.1—2018)中表9.2.4-2中规定的最小强度安全系数2.0。因此,该连拱暗挖隧道衬砌结构安全可靠。

3.3 既有道路路面沉降分析

图9为既有路面最终沉降云图。当连拱隧道暗洞开挖至104 m时,绕城高速路面沉降变形达到最大值4.39 mm,随后变形趋于稳定。图10为绕城高速路面沉降变形值随隧道开挖进度的变化曲线图。由该曲线图可知,隧道开挖前20 m对路面沉降的影响较小,仅为0.3 mm。当隧道从20 m处继续开挖至80 m处,路面沉降有明显增大的趋势,并且沉降速率较快。当隧道继续开挖,路面沉降变形越来越小,直到隧道开挖至104 m时,路面沉降变形基本趋于稳定,证明管幕法施工对上部道路沉降影响较小。

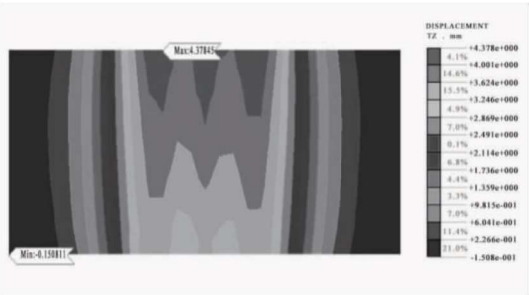


图 9 开挖至 104 m 时路面表面沉降云图

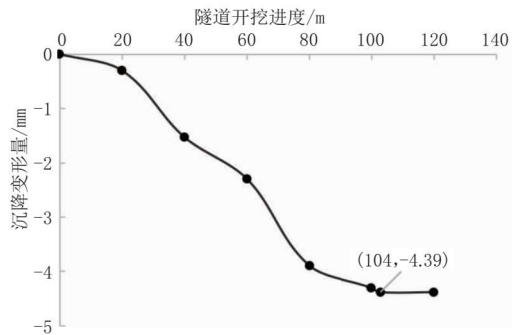


图 10 隧道施工引起的路面沉降曲线图

4 施工风险监测与应急预案

4.1 施工监测项目

在本工程中,首先进行隧道围岩动态的监控量测和上部道路的沉降监测,利用量测结果调整设计支护参数,指导施工以便及时采取措施防止事故发生。监测项目如下:

(1)隧道监控量测:及时进行掌子面地质观测,采用精密水准仪和周边收敛计进行拱顶下沉观测和围岩周边收敛量测。

(2)沉降监测:由于本项目新建隧道下穿既有道路,且隧道埋深较浅,还应对既有道路、连拱隧道洞口浅埋段、周边建筑物进行沉降监测。在下穿区轴线上间隔 5~10 m 设置监测断面,左右 30 m 范围内每 2~5 m 对称设置监测点。上述量测结果应及时分析反馈指导施工。

4.2 施工应急预案

由于新建隧道穿越黄土状土层,埋深较浅,容易发生因沉降过大而导致路面结构开裂,甚至隧道坍塌等问题。因此,当隧道发生坍塌事故时,应组建包括项目经理及现场技术人员在内的紧急救援小组。同时立即向当地的医疗机构请求救援。如有声波生命探测器等设备,应立即调用配合此次救援行动。另外,发生坍塌事故应有足够的营救设备,如挖掘机、通风机、大小管棚、照明设备、输氧管(150 m 以上)、步话机(不少于 5 台)、手镐、铁锹。所有参与救援的

人员应当服从统一的指挥,切勿盲目救援,以免产生更大的损失。

5 结 论

本文以西安市开元路至建元路通道下穿既有高速公路为依托,对管幕法施工技术进行了研究,并采用数值模拟分析了管幕法施工对上部路面的影响,得到以下主要结论。

(1)结合依托工程提出了连拱隧道下穿既有道路管幕法施工成套技术,有效解决了隧道结构及围岩稳定性和既有路面沉降控制问题。

(2)采用数值模拟分析了围岩竖向位移、二次衬砌的轴力及弯矩和既有路面沉降变形等。计算结果表明,采用管幕法施工可保障本工程浅覆地层大断面隧道暗挖施工中上部运营高速公路的安全,是一种较为可靠、安全、高效的地下结构施工方案。

参考文献:

[1] 邓祥辉,夏道洪,王睿,等.关林子隧道下穿既有道路爆破振动影响[J].兰州理工大学学报,2020,46(6): 119-124.

[2] 张顶立,李鹏飞,侯艳娟,等.城市隧道开挖对地表建筑群的影响分析及对策[J].岩土工程学报,2010,32(2): 296-302.

[3] 赵方彬.盾构法修建地铁隧道的技术现状与展望[J].工程建设与设计,2018(20): 191-192.

[4] 英旭.浅覆地层过街通道小管棚法施工技术[J].施工技术,2005(6): 24-26.

[5] 李耀良,张云海,李伟强.软土地区管幕法工艺研究与应用[J].地下空间与工程学报,2011,7(5): 962-967.

[6] 王金华,徐长节,王玉林,等.盾构近距离侧穿桥梁及下穿公路变形规律与控制技术研究[J].公路,2023(1): 405-411.

[7] 赵金鹏,谭忠盛,梁文广,等.超浅埋大跨隧道管棚支护机理及效果分析[J].土木工程学报,2021,54(S1): 87-96,120.

[8] 余建.大跨径浅埋暗挖隧道管棚支护施工变形研究[J].安徽建筑,2019,26(4): 133-134,160.

[9] 赵笑鹏.饱和软土地层管幕暗挖法施工风险及对策研究[J].隧道建设(中英文),2020,40(10): 15-33.

[10] 杨巳期.小口径锁扣式管幕在大断面超浅埋暗挖隧道中的应用[J].福建交通科技,2022(3): 84-87.

[11] 唐琨杰,徐泽鑫,邱军领,等.基于锁扣管幕超前支护的连拱隧道近距下穿地铁 U 型槽变形特征分析[J].公路,2022,67(4): 355-363.

[12] 沈桂平,曹文宏,杨俊龙,等.管幕法综述[J].岩土工程界,2006(2): 27-29.

[13] 董征,胡谦.锁扣管幕支护暗挖施工新技术在浅埋地下通道施工中的应用[J].施工技术,2017,46(S1): 1272-1275.

[14] 谭坚钊.小口径锁扣管幕超前支护施工技术创新应用[J].绿色环保建材,2020(3): 178-179.

[15] 谢海涛.小口径锁扣管幕工法在地铁通道施工中的应用技术[J].城市建筑,2022,19(4): 192-195.