

引水隧道下穿铁路站场施工方案分析

张征亮

(江西省交通设计研究院有限责任公司, 江西 南昌 330025)

摘要:为明确隧道下穿铁路站场时最佳预加固方案,基于数值模拟,分析了超前小导管与超超前管棚两种超前预加固措施效果。结果表明:随着支护刚度的增加,地表沉降、拱顶沉降等不断减小。管棚支护刚度较大,注浆后能形成梁拱效应,有效改善围岩应力状态,控制围岩变形,可作为隧道下穿铁路轨道时超前支护推荐方案。

关键词:数值模拟;预加固;地表沉降;梁拱效应

中图分类号:TV672+.1

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2023)06-0172-04

0 引言

随着城市公共基础设施不断发展与完善,地下结构下穿铁路及铁路站场的工程案例也越来越多^[1-3],地下结构施工引起既有火车轨道沉降是面临的首要问题。根据以往工程案例,地下结构下穿火车轨道施工风险高、轨道沉降变形控制要求严,受到业界重视。为此,一批学者根据具体工程项目就地下结构开挖对站场既有结构影响进行了系列研究,并取得了诸多经验和研究成果,如陶勇虎等^[4]以贵阳市轨道交通1号线火车站站—沙冲路站暗挖区间隧道为研究对象,就地铁暗挖隧道下穿火车站场施工安全性进行了评估;徐干成等^[5]以北京地铁14号线永定门外大街站盾构区间隧道为对象,就注浆加固对控制沉降效果进行了研究;王效文^[6]对苏州轨道交通2#线盾构与站场的交叉施工方案比较进行了研究。

基于以往研究,本文依托某山洪防治及生态补水工程下穿火车站场为对象,采用MIDAS-GTS对隧道超前预加固效果进行研究,以期对相似工程案例提供参考。

1 隧道下穿轨道变形机理分析

隧道在下穿铁路轨道施工前,铁路轨道路基已完成工后沉降,铁轨、路基以及围岩处于应力平衡状态^[7]。隧道施工过程中,破坏了周边地层环境原有的应力平衡场,将引起隧道拱顶围岩产生向隧道净空的变形,使得拱顶围岩形成一个松动圈,由隧道拱顶

扩散至地表,引起铁路路基产生沉降变形。若沉降不均匀,则进而造成轨道枕木倾斜,对铁轨产生附加应力及变形^[8]。差异沉降越大,铁轨产生的附加应力及变形亦更大,当其超过结构容许值,将影响列车的安全运行。上述过程可总结为:铁路路基稳定→新建隧道下穿施工,打破原有应力平衡→下穿区围岩应力进行重分布,拱顶围岩产生向隧道净空的沉降,形成围岩松动圈→不断扩展至地表,路基不均匀沉降→铁轨产生变形及附加应力。隧道下穿轨道开挖过程中产生的地层沉降,在向上拓展的过程中,会逐渐减弱,即:隧道掘进时,拱顶产生向隧道净空沉降变形,该沉降逐渐向路基扩展产生不均匀沉降,引起铁轨产生变形及附加应力^[9],其发展路径如图1所示。

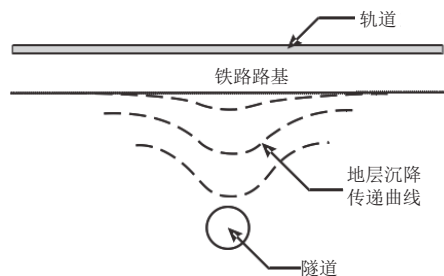


图1 地层沉降传递曲线示意

总结以往的工程案例,隧道下穿掘进时拱顶围岩沉降是造成地表沉降的主要原因。所以,为减小隧道施工对轨道的影响,可通过减小隧道拱顶围岩竖向变形来达到。

2 工程概况

如图2所示,该项目位于福州市闽江下游鼓山镇魁岐村,鼓山山麓与闽江一级阶地交接处,属丘陵区及河流冲积阶地地区。丘陵区,相对高差约50m,自然坡度25°~45°。山体多呈V字形及马鞍状,山上植

收稿日期:2022-06-26

作者简介:张征亮(1986—),男,硕士,工程师,从事桥隧设计工作。

被发育,多为灌木、杉木等。冲积阶地区,地形平坦开阔,主要下穿福马铁路货运站,江滨大道魁岐高架桥、台江港务公司平台等,交通非常便利。

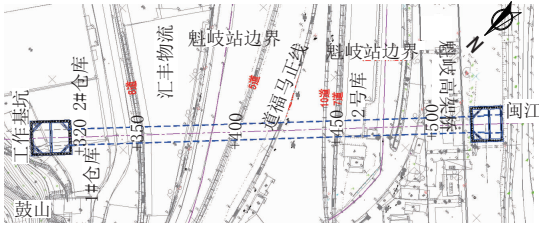


图 2 隧道平面位置图

隧道下穿鼓山至东迅储运仓库后山,再向北依次下穿东迅 2 号仓库及魁岐站内 8 道、汇丰物流 2 号仓库、站内 5 道,福马正线、站内货物堆场,站内 10 道、7 道,及魁岐站内 2 号库,再下穿台江港务公司原大门后由魁岐高架桥第 20 号、第 21 号桥墩之间下穿过,并于台江港务公司两码头空隙间穿出后入闽江。

隧道直径为 8 m,衬砌结构采用复合式衬砌,初期支护采用 C25 喷射混凝土,内设工字钢钢架,二衬采用 60 cm 厚钢筋混凝土结构。靠鼓山侧设置一个 15 m × 13 m 工作坑,靠闽江侧设置一个 15 m × 15 m 的明挖工作坑。

场地内地层结构较为简单,按其形成时代及成因自新至老分别为第四系全新统长乐组冲海积层(Q^{4m+al})、第四系残坡积层(Q^{el+dl})及燕山早期侵入的花岗岩($\gamma_3^{(3)b}$)。

3 超前支护方案

3.1 超前小导管加固

超前小导管加固是以导管为骨架,对隧道拱顶一定范围内的软弱围岩进行注浆,提高其强度,水泥与围岩胶结成有一定承载能力的弧形拱圈,以承担隧道施工产生的围岩松动压力,有效避免因施工引起围岩变形过大而产生的坍塌现象。超前小导管沿开挖外轮廓以一定的外插角打入围岩,通过注浆起到一定的加固和预支护作用。

3.2 超前大管棚

如图 3 所示,管棚采用 $\Phi 180$ 单排超前长管棚两端对打,管棚环向间距 30 cm。搭接长度不小于 3 m,钢管与隧道轴线外插角成 $1^\circ \sim 2^\circ$,管壁四周钻 $\Phi 15$ mm 压浆孔。

通过管棚注浆加固,使得拱圈上部围岩与管棚形成“梁拱效应”,从而提升围岩承载能力,减小拱顶沉降。

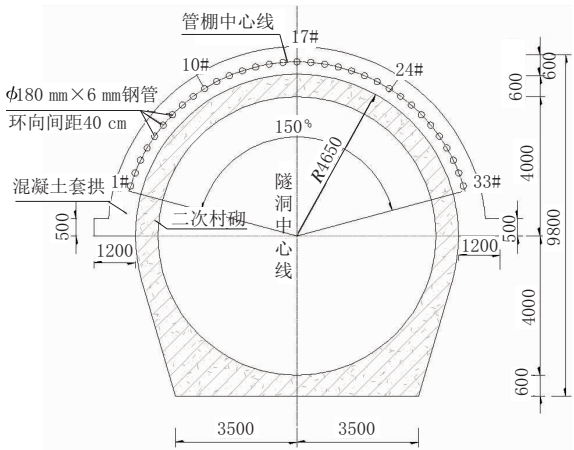


图 3 管棚正面布置图(单位:mm)

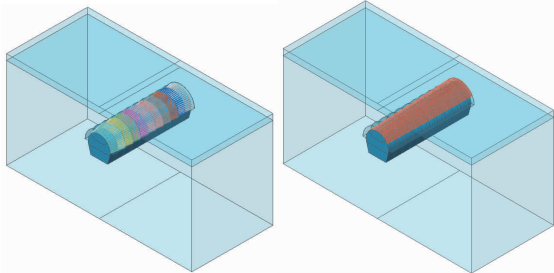
3.3 加固效果数值分析

3.3.1 计算模型及参数选取

本隧道采用三台阶法施工,利用 MIDAS-GTS 软件进行开挖模拟。根据隧道开挖影响范围,左右及底部边界取 5 倍的洞径,纵向取 60 m 进行模拟。围岩本构模型采用莫尔-库仑模型,初期支护、二衬及临时支护采用弹性模型。采用三种计算工况:

- 工况一:无超前支护措施;
- 工况二:超前小导管支护;
- 工况三:超前大管棚支护;

计算模型如图 4(a)和(b)所示。



(a)超前小导支护计算模型 (b)超前大管棚支护计算模型

图 4 计算模型

隧道所在地层围岩力学参数根据相应地勘报告取得。各材料物理力学参数见表 1。

3.3.2 围岩竖向位移分析

通过采用有限元软件分别建立采用小导管和超前管棚的支护后,对比各超前支护对地表控制沉降的效果。各工况竖向位移云图分别如图 5 至图 7 所示。

通过上述竖向位移云图可得出最大变形值见表 2。

通过计算结果可知:(1)地表沉降变形工况二较工况一减小 30%;工况三较工况一减小 61%,较工况二减小 43%。(2)拱顶沉降工况二较工况一减小 40%;工况三较工况一减小 74%,较工况二减小 57%。(3)底部隆起工况二较工况一减小 28%;超工况三较工

表 1 围岩与衬砌力学指标

材料名称	弹性模量 /Pa	泊松比	密度 / (kg·m ⁻³)	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / (°)
人工填土	12 × 10 ⁶	0.37	1 700	16	16
中砂	50 × 10 ⁶	0.27	2 100	0	24
强风化花岗岩	1.2 × 10 ⁹	0.30	2 100	30	25
碎块状强风化千枚岩	1.8 × 10 ⁹	0.30	2 200	32	25
初期支护 (25 cm)	200 × 10 ⁹	0.20	2 300	—	—
二次衬砌	31 × 10 ⁹	0.26	2 500	—	—
临时支护 (20 cm)	24 × 10 ⁹	0.20	7 850	—	—

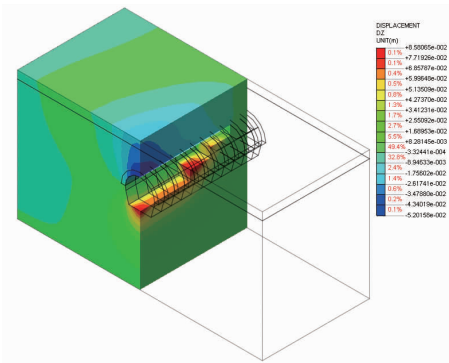


图 5 无预支护措施施工步竖向位移云图

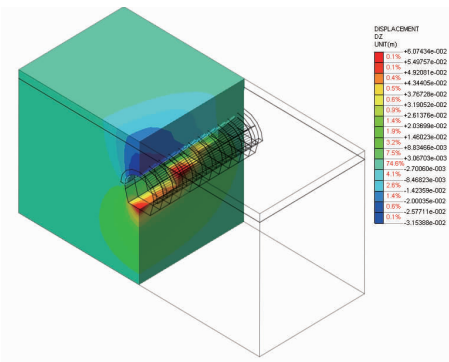


图 6 超前小导管支护施工步竖向位移云图

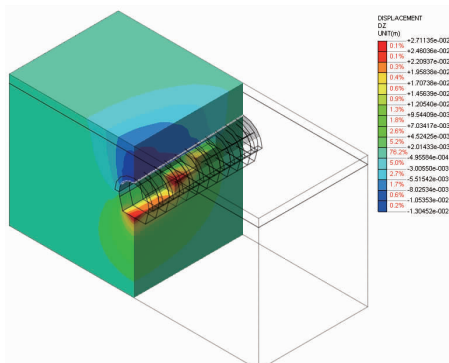


图 7 施加管棚预支护施工步竖向位移云图

况一减小 68%,较工况二减小 55%。可见,超前支护刚度越大,注浆后隧道拱部围岩形成的“梁拱效应”越显著,改善围岩应力状态越好,越能有效控制围岩变形。因此,本项目在下穿施工中推荐超前长管棚注

表 2 围岩变形

单位:mm

支护方案	地表竖向变	拱顶竖向变形	拱底隆起
工况一	11.8	52.2	85.1
工况二	8.2	31.3	60.7
工况三	4.6	13.4	27.1

浆加固作为预加固措施。

4 施工安全保证措施及监测

4.1 施工安全保证措施

(1)股道加固

在隧道拱顶采用超前长管棚进行注浆加固的同时,为进一步避免隧道开挖对列车正常运营产生影响,从技术经济、适用性等方面进行比较,并结合工程现场实际情况,采用 D 便梁对线路进行加固。

在对隧道上方的铁路股道进行加固时,先施工挖孔桩,再架设便梁、抬梁,最后进行隧道施工。隧道正上方轨道采用 D24 型钢便梁,而线路两侧采用 D16 型便梁加固,即(16+24+16)D 型便梁加固布置形式,具体加固方案如图 8 所示。

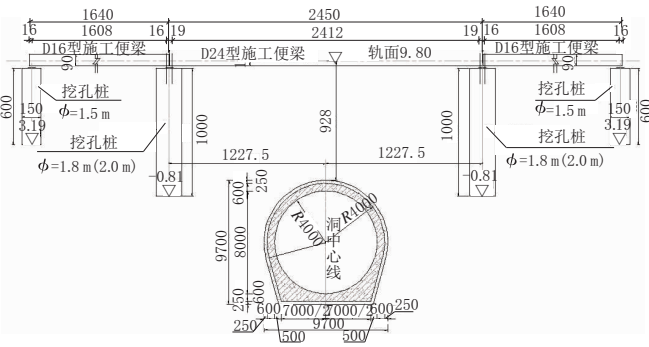


图 8 线路加固立面图(单位:cm)

(2)采用三台阶法分部开挖,严格控制开挖步距,减小开挖产生的沉降;围岩较差时可增设临时仰拱。临时仰拱宜设为弧形,各步施工封闭成环。

(3)加强监控量测,根据监测结果优化施工方案。

(4)及时施作二衬混凝土。当衬砌施工完成后,应通过预埋注浆孔注浆,确保二衬背后拱部不留空隙。

(5)为确保列车行车运营安全,隧道施工期间,列车行车速度限制为 45 km/h。且列车通过时不得进行爆破作业。

(6)隧道开挖采用光面爆破,以减少扰动,减小地表沉降。隧道开挖进尺不宜过大,应根据监测数据实时优化爆破参数及相关工艺。

(7)为确保衬砌对围岩的支护效果,衬砌超挖后应回填密实,并与衬砌同时进行。墙脚以上 1 m 范围

内和拱部的超挖应用同级混凝土回填;隧底超挖部分应用与隧底结构同级混凝土回填。

(8)施工前、中、后应采用地下水监测系统对地下水的水压、渗漏水量、地表水流失状况、隧道上方含水层压力、水质等进行监测,弄清地下水连通情况,以便调整设计。

4.2 监控量测

隧道下穿站场 5 条股道,且暗挖隧道断面较大,围岩条件较差,在施工过程中将不可避免地会对既有构(筑)物造成影响。在施工过程中可能产生地表塌陷之处设置观测点,地表下沉观测点按普通水准基点埋设。并在预计破裂面以外 3~5 倍洞径处设水准基点,作为各观测点高程测量的基准,从而测出各观测点的下沉量,具体监测断面位置如图 9 所示。

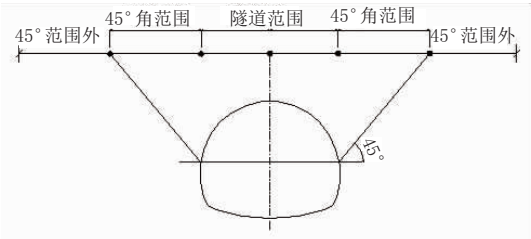


图 9 地表沉降监测断面位置示意图(前视图)

铁路路基沉降监测点基础采用 30 cm × 30 cm × 30 cm C15 混凝土基础,埋入 Φ20 mm 的钢筋,钢筋外套 A100 mmPVC 管,钢筋顶端高于 PVC 管 10 mm,如下图 10、图 11 所示。

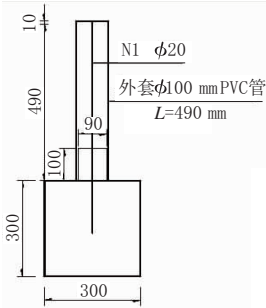


图 10 C15 混凝土观测桩侧面图

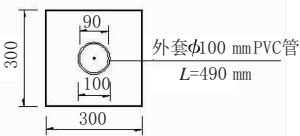


图 11 C15 混凝土观测桩平面图(单位:mm)

铁路轨道静态几何尺寸容许偏差见表 4。

表 4 铁路轨道静态几何尺寸容许偏差管理值 单位:mm

项目	轨距	左右线轨道高差及沉降
货场线	+9,-4	8

隧道浅埋、下穿建筑物地段,当拱顶下沉、水平收敛监测速率达 5 mm/d 或位移累计达 100 mm 时,

应暂停施工,并及时分析原因,优化支护参数及施工工艺。

4.3 路基沉降槽监测

为了实时掌握隧道下穿火车站站场段对既有铁路沉降的影响,分析路基的竖向沉降,选取断面监测隧道从开挖至二次衬砌施工完毕整个过程中路基竖向沉降,路基沉降槽变化如图 12 所示。

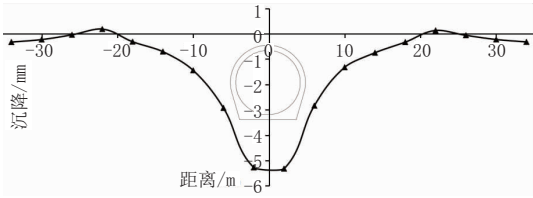


图 12 路基沉降槽监测结果

由图 12 可知,隧道下穿站场施工过程中,路基沉降槽分布近似正态分布曲线,与 Peck 提出的地表沉降槽基本一致。影响范围为隧道中线左右侧 20 m 左右范围,最大沉降值为 5.3 mm,从数值上来看,由于隧道开挖的“空间与时间效应”,监测值大于数值模拟值。

5 结论与建议

本文运用数值模拟计算对比分析了隧道下穿铁路站场时采用超前小导管和超前长管棚预加固措施,得出了不同预加固措施下地表沉降控制效果,得到以下结论与建议:

(1)随着超前支护刚度的增加,地表沉降、拱顶沉降等不断减小。超前长管棚支护刚度大,注浆后隧道拱部围岩形成的“梁拱效应”显著,改善围岩应力状态好,能有效控制围岩变形。

(2)下穿站场浅埋暗挖段不宜采用小导管进行超前预支护。首先超前支护加固范围较小,超前预加固会受到地面列车、交通等荷载冲击,易发生失稳;其次由于小导管加固形成的加固圈刚度小,施工过程中容易在外力作用下发生坍塌,造成不良影响,鉴于施工期间不能影响过往列车的行驶及站内交通。

(3)为确保列车行车运营安全,隧道施工期间,列车行车速度限制为 45 km/h。且列车通过时不得进行爆破作业。同时加强监测,根据监测结果优化施工方案。

参考文献:

[1] 张俊龙.地铁区间隧道下穿某火车站设计与研究[J].土工基础,2012,26(3): 57.
[2] 严开荣,李俊伟,宋书显.盾构隧道下穿火车站站场风险控制研究[J].地下空间与工程学报,2012,6(8):1328-1332.

(下转第 225 页)

加权平均方法仅是对数值的平均,掩盖了子指标之间的差异性。例如,钢箱梁的评估中,加权平均定其状态等级为 2 类;但实综合评估方法表明,子指标主要分布于 1 类和 3 类状态下。直接加权平均方法容易造成对较差子指标状况的忽视。

多级模糊综合评价方法和 D-S 证据推理评定方法对桥梁各部件及全桥整体综合状态评估分布基本相近。两种评估方法下,全桥最终评估结果的可信度分散且数值较低。因此,养护单位需要及时关注子部件的情况。

4.2 全桥状态可信度

从二级指标推理到全桥最终状态连续推理的过程,可直接对加权平均得到的一级指标进行得到分信息的融合,从而得到全桥状态等级可信度分布,具体如图 5 所示。

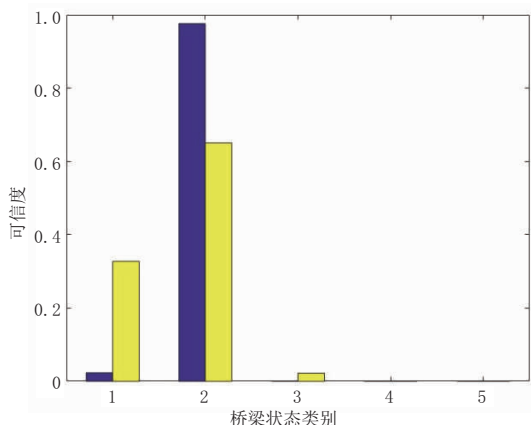


图 5 一级指标加权数据融合的全桥等级可信度分布

全桥状态的可信度分布主要集中在二类,其中 D-S 证据理论更加明显。实际年检报告中评定此桥梁状态为二类。可见 D-S 证据理论方法比模糊证据理论更为接近实际情况。

进一步地,直接从加权数据推得的全桥状态丢失了桥梁可能处于三类状态的信息;而从二级指标逐层推理得到的全桥结果,更能保留更多有效信息,并在可信度分散的情况下有针对性的逐层向下找到评级较低的子指标,这更加体现出传统加权方法的不足。

5 结 论

本文为解决传统加权平均方法掩盖子指标差异性的缺陷,引入模糊综合评判方法,利用新的模糊合成算子,将主因素突出和加权平均两种模型的合成算子进行结合;引入 D-S 证据理论方法,将不确定度分配作为另一种权重的表现形式,得到不确定度的概率分配指派,从而计算时减小不同证据之间的冲突情况。可以得出以下结论:

(1) D-S 证据推理评定方法更能体现子指标之间的差异性,保留更多准确的评估信息。

(2) 多级模糊综合评价方法和 D-S 证据推理评定方法对桥梁各部件及全桥综合状态评估结果相接近。

(3) 当子部件安全状态可信度分散时,管理人员应及时检查子指标的实际状况。

参考文献:

- [1] 王永平,张宝银,张树仁. 桥梁使用性能模糊评估专家系统[J]. 中国公路学报,1996(2):62-67.
- [2] 刘小玲. 多源信息融合技术在钢结构斜拉桥状态评估中的应用研究[D]. 南京:东南大学,2017.
- [3] 王维康. 基于层次分析法和模糊理论的矮塔斜拉桥状态综合评估[D]. 西安:长安大学,2014.
- [4] 张婷,翟明玉,张海滨,等. 基于不确定性推理的变电站拓扑错误辨识[J]. 电力系统自动化,2014(6):49-54.

(上接第 175 页)

- [3] 洪开荣. 盾构隧道穿越广州火车站站场的设计与施工[J]. 现代隧道技术,2002,39(6):34-37.
- [4] 陶勇虎,饶军应,熊鹏,等. 地铁暗挖隧道下穿既有火车站站场施工方案安全性评估[J]. 隧道与地下工程灾害防治,2020,2(4):74-82.
- [5] 徐干成,李成学,王后裕,等. 地铁盾构隧道下穿京津城际高速铁路影响分析[J]. 岩土力学,2009,30(增 2):269-273.
- [6] 王效文. 盾构隧道下穿火车站站场保护方案的探讨[J]. 现代交通技

术,2009(6):72-74.

- [7] 蒋红光. 高速铁路板式轨道结构-路基动力相互作用及累积沉降研究[D]. 杭州:浙江大学,2014.
- [8] 张强. 开挖卸荷下既有地铁隧道的竖向变形及其控制研究[D]. 北京:北京交通大学,2012.
- [9] 郑钦文. 浅埋暗挖黄土隧道下穿火车站场区变形控制技术研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2017.