

地面堆载对输水隧道变形及保护措施研究

汤友生¹, 余剑波^{2,3}, 鲜少华⁴

(1. 中国联合工程有限公司, 浙江 杭州 310052; 2. 湖北省城市地质工程院, 湖北 武汉 430050; 3. 湖北地矿建设工程承包集团有限公司, 湖北 武汉 430050; 4. 武汉市政工程设计研究院有限责任公司, 湖北 武汉 430023)

摘要:随着城镇化建设,工程活动常常导致既有隧道上部堆载,给隧道安全带来不利影响。文章以浙南某输水隧道为例,研究了既有浅基础输水隧道在地面新增堆载作用下的变形及保护措施。针对隧道周边环境、地层及堆载分布特点,对不同保护方案进行了分析,并利用有限元方法对隧道变形进行了模拟计算。计算结果表明:隧道保护方案可满足要求。该研究结果可为今后类似项目建设提供参考。

关键词:堆载; 浅基础; 输水隧道; 变形; 保护措施

中图分类号:TV698.2

文献标识码:A

文章编号:1673-8993(2024)12-0050-07

doi:10.13402/j.gcjs.2024.12.161

Deformation and protection schemes for water tunnel under surface surcharge

TANG Yousheng¹, SHE Jianbo^{2,3}, XIAN Shaohua⁴

(1. China United Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310052, Zhejiang, China; 2. Hubei Institute of Urban Geological Engineering, Wuhan 430050, Hubei, China; 3. Hubei Dijian Construction Co., Ltd, Wuhan 430050, Hubei, China; 4. Wuhan Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430023, Hubei, China)

Abstract: With the construction of urbanization, engineering activities often caused the surface surcharge for the existing tunnel, which adversely affects the safety of the tunnel. Taking a water conveyance tunnel in southern Zhejiang as an example, this paper studies the deformation and protection measures of the existing water conveyance tunnel with shallow foundation under the secondary loading on the ground. According to the surrounding environment, stratum and surcharge distribution characteristics of the tunnel, different protection schemes are analyzed, and the tunnel deformation is simulated by finite element method. The calculation results show that protection scheme for the tunnel can meet the requirements, and the research results can provide reference for similar project construction in the future.

Key words: secondary loading; shallow foundations; water tunnel; deformation; protection schemes

隧道由于其细长的结构特点,一般在建设时需严格控制其选线,保证其建设运营不与周边地块相冲突,但由于种种原因,在既有隧道周边新建项目也越来越多,此过程中由于堆载或卸载,将改变隧道原有应力状态,从而引起隧道纵向变形过大导致隧道结构损伤。因此需提前考虑对既有隧道的保护,以保证其安全运营的影响。

目前由于城市轨道交通的快速发展,针对堆载作用下既有隧道变形特点已有学者进行了研究:张芳等^[1],梁荣柱等^[2]着重研究了地面堆载对盾构隧道的影响,并分别通过数值及理论方法进行了分析计算,得到了不同堆载距离,不同堆载位置对隧道的影响规律,为今后类似项目建设提供了思路。王涛等^[3]将隧道结构等效为处于土层中的弹性地基

收稿日期:2024-06-30

基金项目:中国联合工程有限公司重点技术开发项目(2023ZD-01)

作者简介:汤友生(1992—),男,高级工程师,从事岩土及地下结构方面的设计及研究工作。

梁, 利用 Boussinesq 解计算加(卸)载在隧道下卧土层中产生的附加应力, 基于 Winkler 模型计算隧道结构的变形。并结合工程实例, 计算隧道结构的纵向变形, 判断结构的安全性, 并用有限元进行了验证。孙华圣等^[4]通过室内模型试验及数值模型模拟验证, 系统地研究了地面堆载引起的隧道变形规律, 定量描述了地面堆载对隧道变形影响程度, 通过应力分析揭示了隧道变形机理, 可为工程实践中隧道变形预测与控制提供理论支撑。梁发云等^[5]为考察地基土成层性对既有隧道性状的影响, 对上软下硬、上硬下软两种典型层状地基中的隧道进行了参数分析。结果表明: 地基土成层特性对隧道形状影响比较大, 相比而言, 隧道下卧土层控制沉降的效果要优于隧道上覆土层。赵佳等^[6]研究了在已建成区间隧道上方实施堆载、卸载的可行性以及上部覆土最大增加量或减少量, 并结合具体案例, 针对面临的风险进行了有限元建模受力分析, 提出了相应的保护措施, 以避免隧道结构产生过大变形出现病害。而对于既有隧道变形的控制方面, 邵华等^[7]以上海某地铁区间盾构隧道为工程案例, 提出并实施了及时卸载、堵漏及碎裂修补、后采用芳纶布及钢环结构补强的隧道结构整治措施。对于外部扰动下盾构隧道影响及整治研究, 具有重要的工程实践价值。范东方等^[8]针对运营地铁隧道上方存在地表堆载、隧道两侧基坑开挖、基坑间设置连接通道近距离上跨地铁隧道的复杂工程案例, 提出了隧道周边土体门式加固并设置条形板带+抗拔桩的隧道保护方案, 并利用有限元数值模拟进行了分析验证。

本文依据工程实例, 针对地面堆载作用下既有浅基础输水隧道变形及保护措施进行研究, 根据隧道周边环境、地层及堆载分布特点, 对隧道采用不同方案的保护措施, 并通过有限元数值模拟对其变形进行验证计算, 以期可为今后类似项目建设提供参考。

1 工程概况

1.1 项目概况

项目位于浙南山区, 为城市饮水水源供水隧道, 由上游水库来水通过隧道输送至下游自来水

厂。输水隧道主要采用暗挖结合明挖法进行施工, 由上游暗挖隧洞穿越山体后, 在浅覆土段采用明挖法施工。明挖段建设时由于场地周边环境简单, 覆土较浅, 除穿越山体后约 14 m 长范围直接坐落于基岩面外, 其余明挖段基底位于耕土或碎石黏土中, 建设时仅对浅部地基进行了换填处理, 挖除了浅部填土, 并利用石渣进行换填, 隧道四周均回填 1 m 厚石渣, 输水隧道如图 1~3 所示。

工程影响范围为浅覆土明挖段, 隧道采用 C25W8 现浇钢筋混凝土结构, 隧道净尺寸为 2.1 m×2.1 m, 壁厚为 600 mm, 纵向坡率 $i = 1.6\%$, 沉降缝约 10 m 一处, 沉降缝位置采用止水铜片连接。

本工程由于区域低丘缓坡治理及周边工程建设, 现状浅覆土明挖段隧道周边环境变化较大, 场地建设完成后, 隧道上部覆土厚度由原先不足 1 m, 最大增加约 7~8 m, 且该输水隧道作为城市主供水管道, 工程建设期无法停止运营。因此需对隧道进行保护, 避免隧道安全运营受到影响。

1.2 工程及水文地质

拟建场地原始地貌属低丘缓坡区及山前斜坡, 地形起伏大, 地下水位较低, 输水隧道及周边道路建设时进行了部分整平。场地土层分布情况如下, 土层参数如表 1 所示。

①耕土: 灰褐色, 稍密-中密, 干燥。层厚为 0.5~1.0 m。

⑧2 含碎石黏性土: 中密, 湿, 碎石质量分数约为 50%~60%, 大小为 2~20 cm, 大者大于 30 cm, 棱角状-次棱角状, 强-中风化状, 黏性土质量分数为 20%~30%, 余为砂质充填。层厚为 0.70~4.90 m, 层顶标高 49.21~65.83 m。

⑩2 强风化砂岩: 紫红色, 稍密-中密, 饱和, 岩石均已风化成砂土状, 局部夹有少量的强风化残留碎块。层厚为 0.70~3.60 m, 层顶标高为 49.84~67.74 m。

⑩3 中风化砂岩: 中厚层构造, 岩芯较破碎-较完整, 以块状为主, 局部由粉砂岩和砂砾岩等组成, 韵律层明显, 其中砾石粒径 0.2~1.0 cm。单轴饱和抗压强度为 10.6~58.9 MPa, 岩石坚硬程度为软岩-坚硬岩, 岩体基本质量等级属Ⅳ类。

表 1 土层参数

土层	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	内聚力/ kPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)	变形模 量/MPa	地基土承载 力特征值/kPa
①	19	5	25	—	—
⑧2	20	5	30	10	250
⑩2	22	30	25	25	300
⑩3	26	80	45	100	1 500



图 1 隧道周边环境

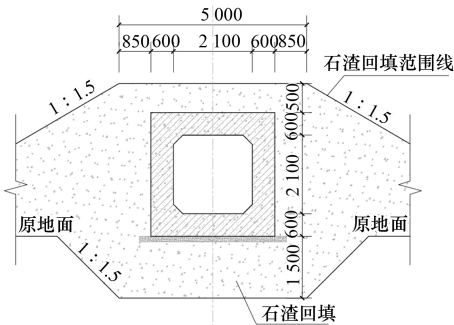


图 2 隧道横截面

mm

2 堆载对隧道变形分析

为研究堆载对隧道的影响，利用有限元软件 Midas GTS 进行三维整体结构建模，采用土层结构模型进行整体建模，按实际工况对保护方案进行模

拟计算。其中土层采用弹塑性模型，本构模型采用 Drucker-Prager 准则。首先取中段典型土层断面，按最不利情况，对未采取保护措施隧道沉降进行计算，计算结果如图 4 所示。由图 4 可以发现，由于隧道结构下部土层具有压缩性，在新增覆土作用下，隧道与下伏土层共同发生固结沉降，沉降相对均匀，隧道结构竖向沉降值已达到 73.8 mm。

由于目前缺少直接针对输水隧道变形控制标准，结合城市轨道交通结构安全保护技术规范 (CJJ/T 202—2013)^[9]，对已建成和正在修建的城市轨道交通结构的水平位移，竖向位移，径向收敛采用 20 mm 的控制值和 10 mm 的预警值，城市轨道交通结构安全保护技术规程 (DB33 T 1139—2017)^[10] 对未铺轨运营、变形较小且结构性能完好隧道结构的水平位移，竖向位移均采用 20 mm 的指标控制值，本项目隧道沉降变形已远超过该数值。可见若不采取措施，隧道极可能应变形过大而影响正常运营。因此需采取可靠保护措施，减少输水隧道沉降。

3 保护方案研究

结合本工程情况，保护措施需保证隧道结构安全性及耐久性，即一方面需保证在增加覆土后隧道结构自身满足承载力等要求，另外需控制在外荷载作用下隧道或下部地基产生过大变形，而引起结构开裂渗漏，影响其正常运营。新增覆土后，按最大覆土验算，输水隧道结构自身结构强度及裂缝均可满足要求，故保护方案更加注重对隧道变形控制。

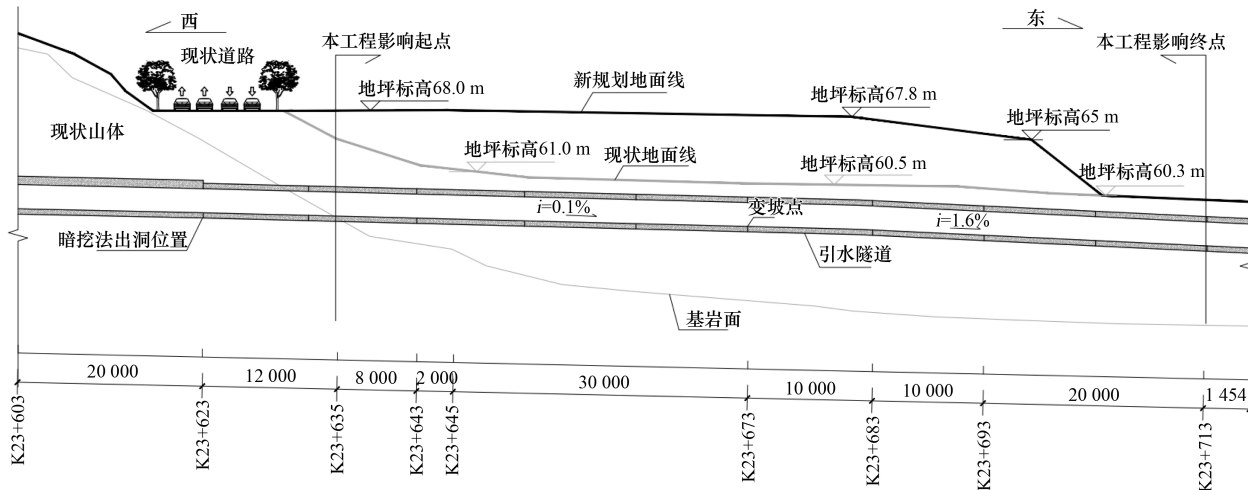


图 3 隧道纵断面

mm

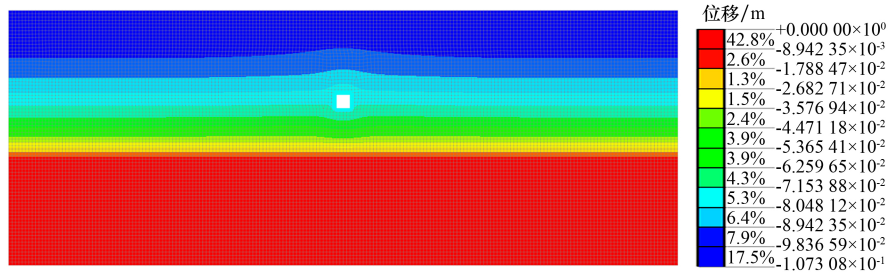


图4 隧道沉降云图(无保护措施)

由于隧道上部新增填土厚度为 7 ~ 8 m, 根据现场实际情况, 新填土将主要以周边建设过程中产生的碎石土或耕土为主, 土质条件较差, 结合已有研究^[11-12], 隧道上部大范围填土后难以形成土拱效应, 需考虑上部全部填土荷载。由于隧道下部多为碎石黏土层, 上部荷载作用下具有较大压缩性, 故在不影响输水隧道正常运营的前提下, 保护措施需避免上部新增荷载直接作用于隧道结构, 以避免隧道产生过大的沉降出现损伤断裂。结合隧道结构自身特征、下伏地层及远期地面恢复标高特点, 对不同区段隧道结构, 采用了针对性保护措施。

根据场地实际情况(图 1、3), 在隧道西段, 输水隧道由上游穿出山体及现状道路, 隧道与道路交叉位置由于场地空间狭窄, 如旋挖钻机, 高压旋喷桩和搅拌桩等大中型设备无实施工作面。且现状路基坡体已延伸至现状输水隧道顶部, 若现场大范围开挖, 产生的高陡边坡很可能影响路

基安全。

结合西段地层分布特点, 输水隧道下伏基岩面由东向西呈下倾趋势, 中风化岩层埋深较浅, 故采用袖阀管注浆地基处理 + 盖板方案: 对隧道侧面 2.5 m 范围内土层进行袖阀管注浆处理, 注浆间距 1 m × 1 m 梅花形布置, 深度进入稳定岩层 0.5 m, 处理后的复合地基利用混凝土支座结合上部 800 mm 厚盖板共同承受上部新增土压力, 如图 5 所示。注浆可提高隧道侧面土体的承载力并降低压缩性, 可以起到克服上部大面体深厚填土所导致的原地层次固结沉降危害。该方案仅需对上部浅层土层进行整平, 最大限度避免开挖而对道路路基的危害。

对输水隧道中段, 其下伏厚度较大的①耕土及⑩2 碎石黏性土, 若采用注浆方案, 则深度过大, 可靠性较低, 故考虑采用由上部盖板 + 下部桩基础组成的保护结构: 上部盖板用于隔离输水隧道上部新增附加土荷载, 防止新填覆土或上部

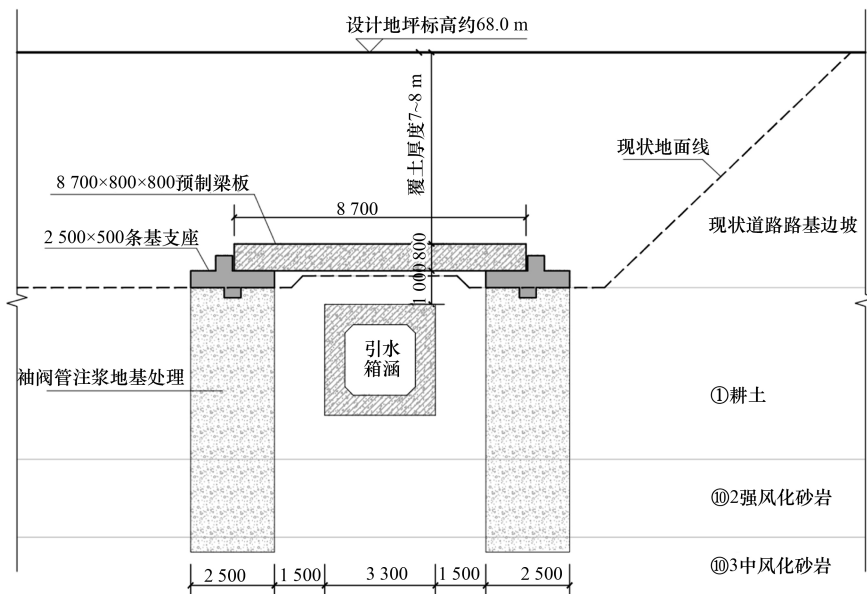


图5 西段保护方案

mm

活载直接作用在输水隧道顶部而引起隧道开裂。下部桩基础采用钻孔灌注桩,一方面可将隧道上部新增附加荷载传递至下伏基岩,从而减少隧道沉降;另外也可起到与外侧土体间的隔离作用,避免桩外新填土发生固结沉降而影响隧道地基稳定。灌注桩直径为 800 mm,桩间距为 2.8 m,净间距为 2.0 m,桩顶设置钢筋混凝土连系梁,上部保护结构采用 800 mm 厚预制混凝土板,上部保护结构与现状隧道外轮廓控制为 1.0 m 以上净空,以保留施工空间并且防止保护结构远期沉降对现状隧道的损伤,如图 6 所示。

根据场地规划设计方案,现状隧道东段远期回填后,将与侧面道路路基边坡形成斜坡,输水隧道位于坡脚处,若不采取措施,侧土压力长期作用下,可能对隧道产生侧向推移变形,从而影响了其正常使用。为了减少和消除坡体可能产生的危害,东段拟采用暗埋悬臂式钢筋混凝土挡墙对输水隧道进行保护(图 7),为了避免挡墙地基固结沉降,减少挡墙远期沉降及变形,在挡土墙底部利用注浆进行地基处理。在悬臂式挡墙及墙后压实填土变形稳定后,再进行隧道侧土体回填,从而大大减少直接作用在现状输水隧道上的水平荷载,保证隧道安全。

4 采取措施后隧道变形分析

输水隧道保护需确保结构具有足够的强度、刚度及耐久性,并满足施工、运营等要求。由于输水隧道原基础为换填石渣材料,其下伏土层均一性差且多具有压缩性,在新增荷载后,易发生沉降而导致隧道断裂,影响其运营。故需严格控制输水隧道在施工和使用期间的沉降。

由于西段隧道下伏基岩埋深较浅,隧道底部直接位于基岩上,侧面土体注浆加固后,变形由注浆体控制,理论计算满足要求。故此处,仅对中段及东段保护结构数值模拟计算。

对于中段,根据下部土层分布进行建模,安装各施工工况(图 8):1)天然地应力(位移清零);2)施作排桩和盖板;3)施加上部填土。计算结果如图 9 所示,隧道竖向沉降值约为 5.2 mm,水平位移 6.9 mm,均可满足变形控制标准。表明浅覆土明挖段隧道在新增填土后,隧道及地基土沉降值由于受到了桩+盖板结构保护作用,变形与未采取措施相比,变形大大降低。而且在隧道保护结构范围之外的区域,原地表位置沉降值达到 45.8 mm,远大于隧道沉降,表明采取保护措施后,隧道沉降控制较为显著。

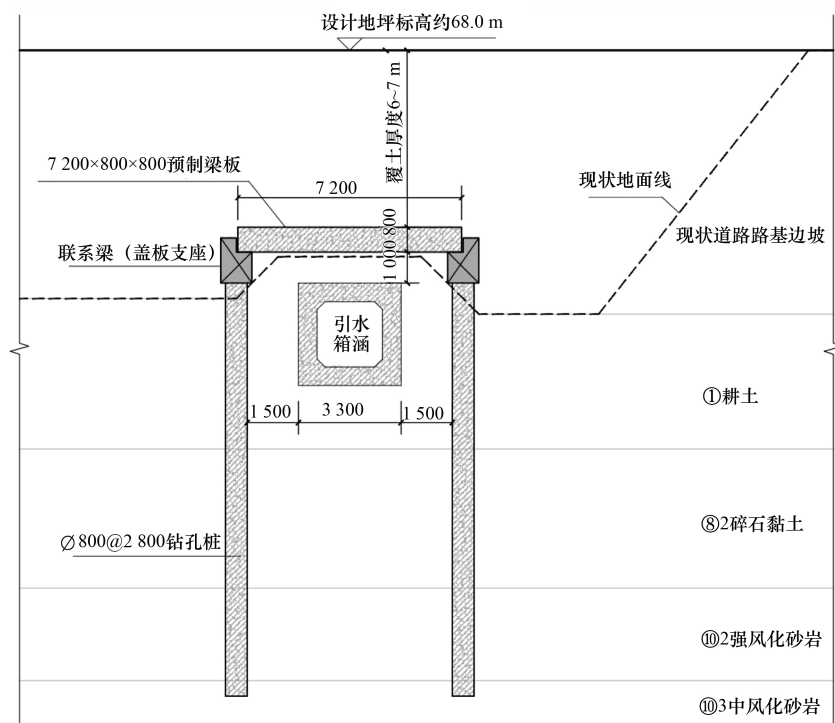


图 6 中间段保护方案

mm

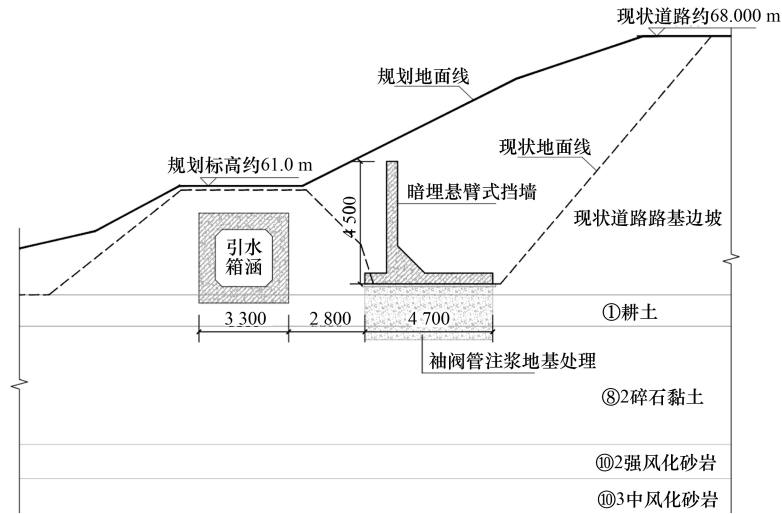
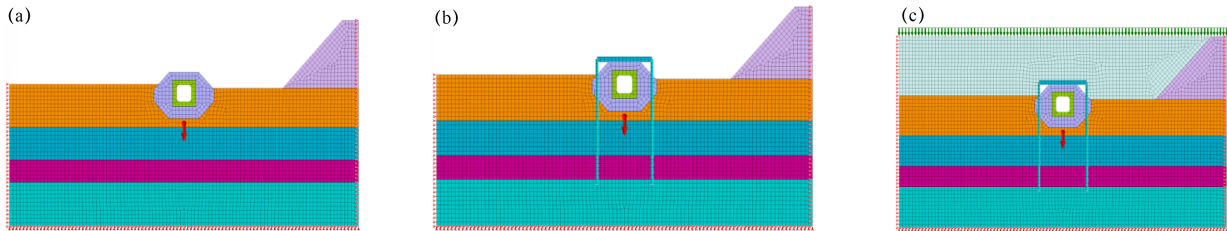


图7 东段保护方案

mm



(a) 天然地应力 (位移清零); (b) 施作排桩和盖板; (c) 施加上部填土

图8 中段计算工况

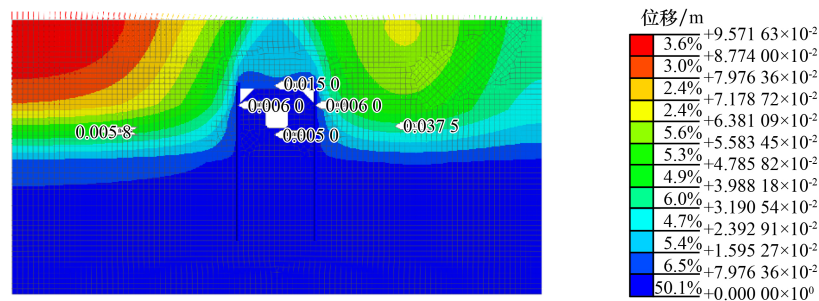


图9 中段隧道沉降云图 (保护后)

对于隧道东段暗埋挡墙方案,按照如下图10工况计算:1)初始地应力状态,地基处理;2)施工暗埋挡墙;3)墙后填土;4)墙前填土。根据图11计算结果,场地填土后,暗埋挡墙可以将新填覆土产生的变形效应控制在墙后,当最终工况下对墙前进行覆土后,墙后坡体位移达到了约19.7 mm,但隧道位移则仅约为3.2 mm,表明在暗埋挡墙作用下,现状隧道产生位移较小,远小于控制变形20 mm,满足设计要求。

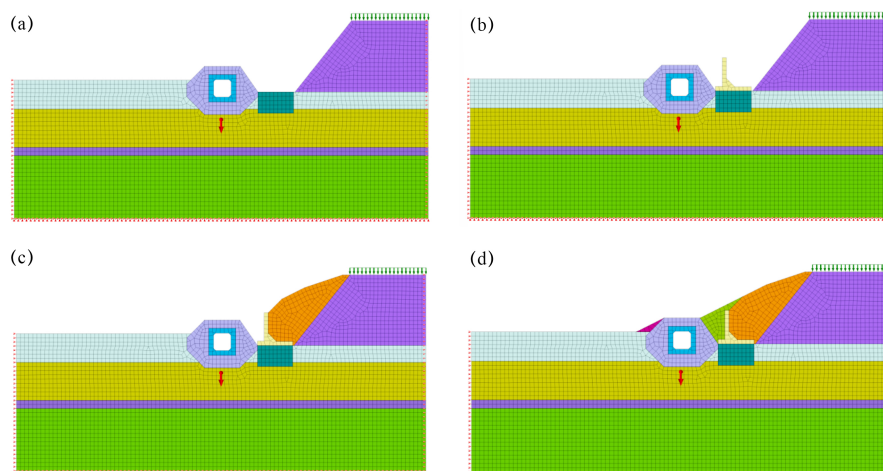
5 结论

(1) 对堆载作用下隧道结构变形及保护措施

相关研究现状进行了总结分析,运用有限元计算,对堆载作用下隧道变形进行了数值模拟,对未采取保护措施隧道结构进行分析,发现变形已经超限,表明需采用保护措施保障隧道安全。

(2) 结合项目特点,针对不同区段隧道结构下伏土层、周边环境及覆土情况,分别采用了注浆+盖板、桩+盖板及暗埋式挡墙保护措施,保证保护措施安全、合理、实施性强。

(3) 对采取保护措施后的隧道进行数值分析,计算表明,保护措施后,各项计算结果均在控制值以下,满足要求,为今后类似项目提供参考。



(a) 初始地应力状态, 地基处理; (b) 施工暗埋挡墙; (c) 墙后填土; (d) 墙前填土

图 10 东段计算工况

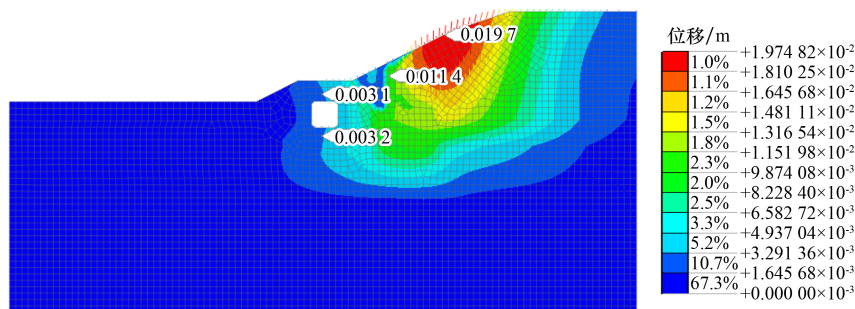


图 11 东段保护后隧道沉降云图

参考文献:

- [1] 张芳,王露露,朱云桂,等. 地面堆载作用下盾构隧道结构变形分析[J]. 科学技术与工程,2023,23(8): 3474-3481.
- [2] 梁荣柱,王理想,李忠超,等. 地表堆载对既有盾构隧道纵向变形影响[J]. 建筑科学与工程学报,2023,40(3):130-141.
- [3] 王涛,李浩,徐日庆. 上方大面积加(卸)载引起盾构隧道的变形分析[J]. 现代交通技术,2008(3): 29-31.
- [4] 孙华圣,周涛,董云,等. 地面堆载对下方已建隧道变形影响分析[J]. 地下空间与工程学报,2019,15(增刊2):900-907,913.
- [5] 梁发云,袁强,李家平,等. 堆载作用下土体分层特性对地铁隧道纵向变形的影响研究[J]. 岩土工程学报,2020,42(1):63-71.
- [6] 赵佳,刘祖运. 已建区间隧道上方堆载、卸载影响分析[J]. 北方交通,2019(7):92-94.
- [7] 邵华,黄宏伟,张东明,等. 突发堆载引起软土地铁盾构隧道大变形整治研究[J]. 岩土工程学报,2016,38(6):1036-1043.
- [8] 范东方,孙文昊,胡威东. 复杂环境条件下地铁隧道保护方案探讨[J]. 地下空间与工程学报,2019,15(增刊2):861-870.
- [9] 城市轨道交通结构安全保护技术规范:CJJ/T 202—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [10] 城市轨道交通结构安全保护技术规程:DB33 T 1139—2017[S]. 杭州:浙江工商大学出版社,2017.
- [11] 赖士谦. 超厚回填土大跨明洞衬砌结构成拱效应分析[J]. 公路,2018,63(3):286-290.
- [12] 曹继伟,范鹤,刘斌. 高填土涵洞土压力分布及影响因素研究[J]. 公路,2011(12):109-114.