

紧邻运营盾构隧道施工微扰动控制分析与实践

王 刚

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 随着我国城市地下空间开发日益密集, 紧邻运营盾构施工成为普遍难题。盾构隧道作为柔性结构, 在软土地区极易受周边施工扰动影响, 变形控制要求高。针对盾构隧道上方施工的常见保护措施, 分析了零加载法、隔离法、门式转换法及快挖快填法的适用条件与局限性, 指出实际工程中存在零加载难以实现、地质扰动不确定性、相对位置关系复杂及施工过程控制困难等关键问题。结合上海沿海软土区域某工程实例, 对运营盾构隧道上方开槽卸载与道路加载两种工况进行了理论分析与实践验证。工程实践表明, 理论分析需结合工程实际情况做进一步分析, 否则仍有可能得到不准确的结论, 且同时需加强施工期自动化监测与信息化施工, 以便即使调整应对措施。研究成果可为类似软土地区盾构隧道微扰动控制工程提供参考。

关键词: 盾构隧道; 微扰动控制; 运营期保护; 软土地区; 门式结构; 自动化监测

中图分类号: U455

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)05-0369-05

Analysis and Practice of Micro-Disturbance Control in Construction Adjacent Operational Shield Tunnel Projects

WANG Gang

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: With the increasingly intensive development of urban underground space in China, the construction adjacent to operational shield tunnels has become a common challenge. As flexible structures, the shield tunnels are particularly susceptible to disturbance from adjacent construction activities in soft soil areas, necessitating stringent deformation control requirements. Aiming at the common protection measures for construction above shield tunnels, the applicability and limitations of the zero-loading method, isolation method, portal frame transfer method and rapid excavation-backfill method are analyzed. It is pointed out that in actual engineering, there are key problems such as the difficulty in achieving zero loading, the uncertainty of geological disturbances, the complexity of relative positional relationships, and the difficulty in controlling the construction process. Combined with an engineering case in a coastal soft soil area in Shanghai, the theoretical analysis and practical verification are conducted for two working conditions of trenching unloading and road loading above an operational shield tunnel. The engineering practice demonstrates that the theoretical analysis needs to be further conducted in combination with the actual situation of the project; otherwise, the inaccurate conclusions may still be drawn. Additionally, it is necessary to enhance the automated monitoring and information-based construction during the construction period so as to adjust the response measures in a timely manner. The research findings can provide a reference for micro-disturbance control projects of shield tunnels in similar soft soil areas.

Keywords: shield tunnel; micro-disturbance control; operation-period protection; soft soil area; portal frame structure; automated monitoring

1 研究背景

随着我国城市建设进程不断推进, 地下空间开发日益密集化, 常常遇到需紧邻轨道交通施工的难题, 由于大直径轨道交通通常采取盾构施工方式, 属

于一种柔性结构, 当土质情况较软时, 极易受到周边施工作业的扰动影响。以上海地区为例, 截至2025年12月, 上海地铁共运营21条线路(含磁浮线), 设站523座, 总运营里程达906 km, 中心城区几乎每2 km就会遇到存在相邻地铁车站或区间的情况。另一方面, 在城市更新大背景下, 周边环境简单的工程逐渐变少, 而越来越多的情况是密集城市、紧邻敏感建构筑物、深层地下空间开发等形式的工程, 环境保

收稿日期: 2026-03-05

作者简介: 王刚(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事结构、岩土工程设计工作。

护要求很高,施工难度较大。其中,当遇到附近有运行盾构区间或地铁车站时,如何降低对盾构隧道的影响是工程中常遇到的重要问题。

针对盾构区间隧道的保护措施,通常有几个思路,如采取零加载法、隔离措施、采取门式结构转换传力荷载、采取快挖快填规避扰动时空效应等。朱合华等人^[5]从盾构与土体相互作用的机理出发,结合工程案例深入探讨了微扰动施工的关键技术;尹富秋^[2]结合上海北横通道工程穿越地铁4号线的案例,介绍了超大直径盾构隧道穿越已建运行轨道交通的微扰动控制经验。在运行盾构隧道上方开挖卸载方面,常规做法是先进行理论分析,然后根据实际情况、工程经验再选取合适的措施。杨天星等人^[6]通过在长江隧道上方开挖管廊基坑的工程实践,分析了隧道正上方卸载开挖对盾构隧道的影响及控制做法。

同时,施工过程中的精细化控制对运行盾构的保护至关重要。刘家骥^[9]从施工控制角度,通过紧邻运营地铁的换乘车站拓建案例,分析了施工过程微扰动控制的常用做法。除此以外,严密的监测手段在紧邻运行盾构隧道附近施工的项目中必不可少。周钊^[8]以基坑为例,详细分析了再地铁隧道附近开挖进坑的微扰动控制和监测可视化的手段,对实际工程有一定借鉴意义。近年来,各种智能化手段被越来越多运用到施工控制、施工装备中,使得施工过程中捕捉数据、实时反馈的能力越来越高,也对复杂地下环境施工的微扰动控制带来了许多新机遇,形成了不少可供参考的工程经验^[11-12]。

2 盾构区间隧道保护常用措施

2.1 零加载法

在盾构隧道上方的施工作业,如开挖渠道或堆载加高,可通过调整上部土体的重度,实现最终完工后的覆土荷载与初始状态基本相同,从而实现零加载的目的。比较常用在上部加高标高修道路的情况,通过计算,可换填一部分原状土,并换填成更厚的轻质填土,如EPS、轻质流态土等材料,使换填后的厚层轻质土层与换填前的较薄原状土层荷载相同,如此一来,盾构上方的覆土荷载即未发生变化,从而实现永久工况下对盾构无影响的效果,见图1。

2.2 隔离法

隔离法一般用在在盾构上方、侧方或斜上方的情况,若相邻工程与隧道水平距离在保护范围要求



图1 零加载示意图

内(一般要求50 m范围内严格保护),则可以通过实施盾构周边土体加固改良、侧边施打隔离桩等方式加以保护,从而将相邻工程施工的环境扰动控制在隔离体以外,实现对盾构隧道保护的目,见图2。该思路在很多紧邻运营盾构施工的项目中较为普遍采用^[13,15]。

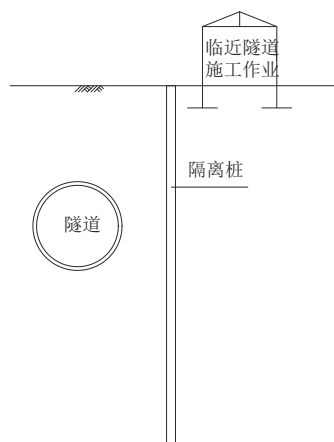


图2 隔离法示意图(侧边施打隔离桩)

2.3 门式转换法

当隧道上部永久荷载发生较大幅度变化时,可采用门式转换的方式,将盾构隧道上浮或下沉的趋势转移至“桩板门式结构体系”中,当转换体系形成后,无论在上部加载还是卸载,均可将实现对盾构的影响可控,见图3。

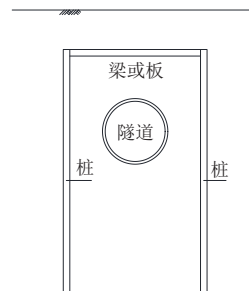


图3 门式转换法示意图

2.4 快挖快填法

该方案一般用于小型的埋管或临时小范围的施工工况。当隧道上部需要新增开槽埋管时,开挖深度有时候相对比较深,仅按开槽深度和盾构覆土厚度比较卸载比,可能会超过盾构承受能力,但由于管道沟槽宽度一般较窄,这种短暂的影响不会立即影响到下方的盾构隧道,若能快速埋管快速回填,必要

时采取分幅施工,精细化控制,也可以降低对盾构隧道的扰动影响。

3 存在的问题

(1) 零加载往往难以实现

盾构隧道上方的恒载、活载受多方面因素制约,若隧道埋深较深,短暂、少量的土层厚度变化、施工期间活荷载对盾构的影响相对较小,这种情况可以尽量做到零加载。然而,当盾构隧道埋深较浅,施工期间或最终永久使用工况下,上方的土层厚度变化较大,即使采用不同重度的回填料进行换填也无法做到零加载,则必须考虑荷载变化对盾构隧道的影响。

(2)地质情况对受扰动程度影响难以确定

在软土地区,盾构隧道完工后相当于悬浮在土层中,周边土体的刚度变化极易造成盾构隧道偏移,需仔细制定注浆方案,否则效果可能适得其反^[14]。若采用高压旋喷、MJS等土体加固改良工艺,在实施这些喷浆施工,尤其是喷浆方向面朝隧道时,隧道可能会发生明显位移,严重时,该位移可能会超过隧道允许变形,反而造成隧道渗漏、裂缝等问题。

(3) 相对位置关系需针对性分析

隧道上方的土体、建构筑物、管道施工等因素受工程需要而各有不同,总的来说,有荷载增大和荷载减小两种情况。在上海的工程经验表明,隧道上方卸土影响更加明显,呈现“影响大而快”的特点,而隧道上方加载的影响相对小一点,但影响时间长,往往经过数月后方才收敛稳定。

(4) 施工过程中的控制不可忽略

工程施工期间的施工方案对隧道的临时影响也不可忽略,例如临时开挖基坑、临时道路等短暂的荷载变化也可能造成隧道较大位移,这种位移即使在上部荷载复原后也难以恢复,这种情况则要求上部施工速度加快,必要时需要采取分段施工、分期抢工、掺早强剂浇筑混凝土、超前回填养护混凝土等方案。

4 微扰动控制措施与工程案例

(1) 已建隧道上方开槽卸载

所选的工程案例位于上海沿海软土区域,根据总体布局设计,需要在已建的一根捷运盾构隧道上方开挖一条临时排水渠,排水渠使用时间5~8年,盾构隧道直径6 m,原上部覆土厚度约10 m,排水渠为

梯形断面,深度约 4.2 m,卸载比达到 40% 以上,临时排水渠与隧道平、剖面位置关系见图 4、图 5。该捷运盾构隧道在施工期间需保证使用,变形控制要求为 10 mm。

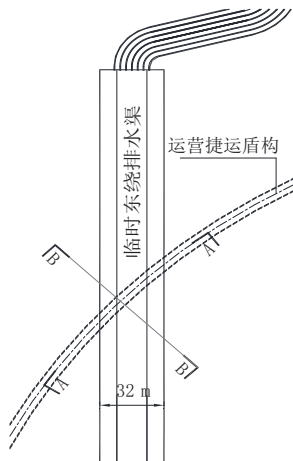


图4 某上穿浅埋运行盾构隧道的水渠平面图

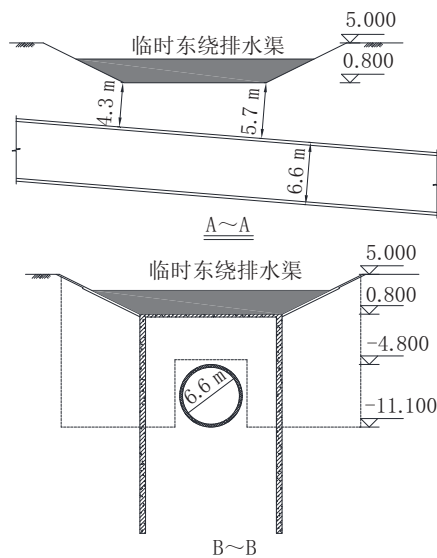


图5 某上穿浅埋运行盾构隧道的水渠剖面图

设计阶段,对排水渠上部卸载开挖的影响进行了分析,因卸载比较大,故直接采取了“桩+梁板”的门字型结构骑跨在盾构隧道两侧,且对盾构隧道与排水渠交叉的节点上部、两侧的土体进行全范围MJS加固,施工时考虑分阶段实施,每一步均小范围开挖至设计标高,然后浇筑桩跨之间的梁板,待反压受力体系达到强度后,再进行下一幅开挖,如此往复共5幅,最后形成整体的“门字型”反压体系。在MIDAS GTS中对该方案进行了分工况建模分析,因每一步开挖面较小,且盾构因上部卸载产生的上浮趋势通过土体、桩和梁板反压结构体系进行有效传递,故最终的盾构变形可以有效控制下来,初步分析,最终工况下的盾构上浮值仅4.4 mm,见图6至图8。

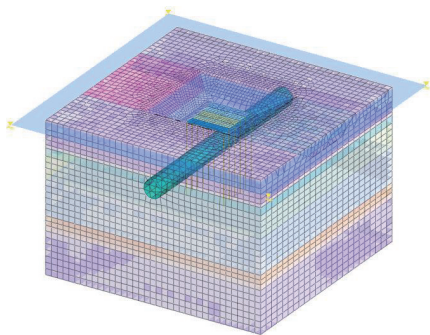


图6 MIDAS模型分析盾构上方卸土影响

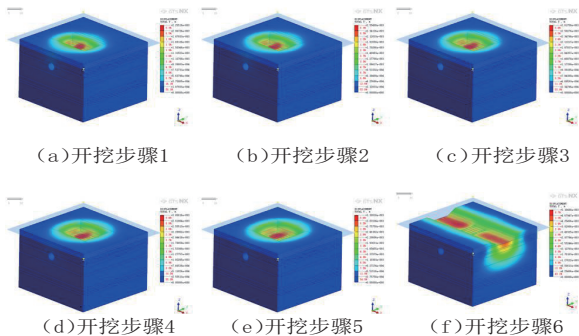


图7 盾构上方卸土影响工况分析过程

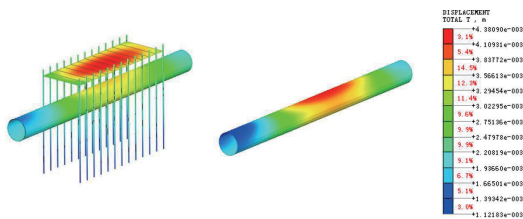


图8 盾构上方卸土影响工况分析结果

设计方案中,对运行中的盾构隧道内部设置了全站仪全自动化监测,实时捕捉隧道变形情况,反馈施工阶段对隧道的影响,见图9。

而实际施工时,盾构隧道所受的影响比理论分析更加明显。在MJS施工阶段发现,当MJS喷浆方向面朝隧道时,隧道发生了较大位移,迅速超过了4 mm,虽未超过隧道的允许位移值,但仍有不可忽

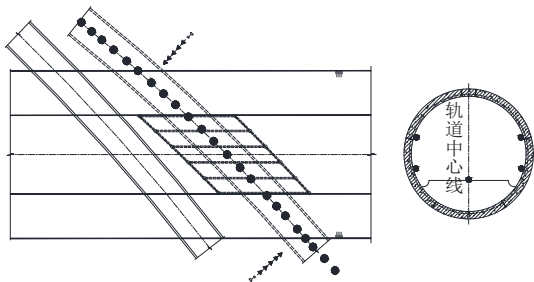


图9 盾构隧道自动化监测布置方案

略的影响。故建设团队迅速调整了土体加固方案,将隧道两侧的MJS喷浆方式全部调整为半喷,摆喷方向背对隧道,有效降低了土体注浆施工对隧道的影响。

随后,在开挖阶段,监测数据与理论计算确有较大差异,尽管施工期间采取了缓慢加载,甚至在开挖后临时堆重,但隧道变形仍然超过了预警值。最终,隧道与水渠交叉点中部最大上浮位移达到了25 mm左右,位移收敛稳定经过的时间长达1.5年左右(其中前半年位移迅速涨到20 mm后,随后变形仍缓慢发展,但逐步收敛),最终监测点的变形值见图10。所幸的是,由于隧道长距离范围均处于上海沿海极软的土层内,虽在施工期间相比理论计算显得更加敏感,但软弱的土层环境使得隧道在纵向的变形相对比较顺滑,并未在卸载区域形成突变,隧道整体的变形呈现均匀渐变的形态。因此盾构隧道管片之间并未发生渗漏、接缝张开、管片裂缝等不良情况,也未影响内部轨道交通的正常运营。对照相关文献也会发现类似结论,如张鑫海等人^[10]研究的盾构隧道上方开挖基坑时,若考虑纵向变形影响,也会形成一段渐变隆起的盾构变形效应,如果控制得当,也可以在盾构发生大变形的情况下,最大限度减小对隧道服役性能的影响。

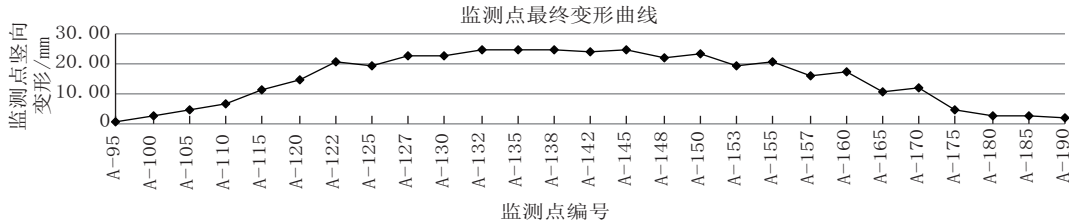


图10 盾构隧道自动化监测最终收敛值

项目完工后,笔者对监测数据和理论计算不一致的情况作了分析,认为有几点原因:隧道所处地层为沿海滩涂地区,成陆时间相对于内陆地区较晚,深层土体可能存在欠固结情况,使得土体在扰动后的变形发展更快;由于工期紧张,门字型结构的抗拔桩、反压梁板结构并未充分等待养护时间,且大跨度

的反压结构体系本身有不可忽略的弹性变形,该部分变形量最终也会叠加到土体和隧道变形中,使得隧道整体变形超过了理论值。

(2)已建隧道上方道路加载

仍为上述工程,另有一处需在已建道路上方加载实施一条道路,由于隧道未提出零加载的要求,故

设计时先对常规填料的填土进行了理论分析。仍采用 MIDAS 建模分析, 见图 11, 理论分析的隧道变形量大约为 10.3 mm, 基本满足盾构的变形控制要求。工程实施后, 监测数据在逐步发展大约半年后收敛稳定, 变形量与理论值大致相当。

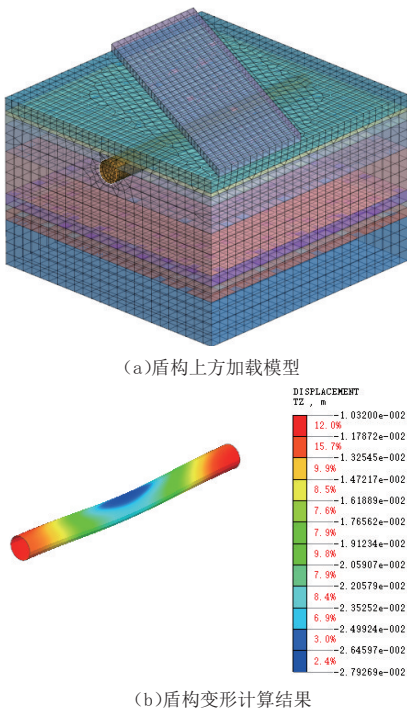


图 11 盾构隧道上部纯加载案例分析

5 结论与展望

软土地区的盾构隧道极易受周边临近工程施工的影响。上海地区是我国华东区域非常典型的软土地区, 而上海东部沿江、沿海等成陆时间最晚的区域, 土层情况更需引起足够的注意。近年来, 上海全域都建设了大量的地下交通隧道, 包括各种地铁、市域铁、城市道路、高速公路等, 这些在软土层中建设的隧道以盾构形式为主, 而盾构隧道作为一种柔性的管片拼装结构, 也非常容易收到周边相邻工程的影响。根据上海地方标准《城市轨道交通结构安全保护技术标准》(DG/TJ08-2434—2023) 规定, 地下车站与隧道外边线外侧 50m 范围均为盾构隧道的保护范围, 只要平面落在这个范围的其他工程, 均需严格

考虑对隧道的影响, 且变形需控制在允许值之内。

然而, 地下工程是一个具有很多不确定性的工程形式, 受到土的性质、建构筑物结构形式、相邻工程相对关系、隧道保护方案、施工过程控制等很多方面因素制约, 很难一概而论地得出通用性的做法, 甚至即便作出严密的理论分析, 最终工程效果也未必与理论分析相一致。但是, 随着诸如此类的工程案例不断积累, 工程中形成了一些行之有效的做法、一些有待改善提高的地方, 仍然对今后的项目有重要的借鉴意义。

参考文献:

[1] DG/TJ08-2434—2023 城市轨道交通结构安全保护技术标准[S].
[2] 尹富秋. 超大直径盾构穿越运营地铁隧道风险分析与微扰动控制措施[J]. 城市道桥与防洪, 2024(10): 214-216; 248.
[3] 马玉刚, 陈华斌, 俞建君. 大面积土体加卸载对基坑与邻近隧道变形的影响研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37(2): 44-49; 104.
[4] 邢卓航. 电力隧道顶管法施工上跨既有地铁施工扰动机制与控制技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2023.
[5] 朱合华, 丁文其, 乔亚飞, 等. 盾构隧道微扰动施工控制技术体系及其应用[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(11): 1983-1993.
[6] 杨卫星, 官天培, 刘长庚, 等. 管廊基坑开挖对既有长江隧道变形的影响[J]. 土木工程与管理学报, 2020, 37(2): 87-92.
[7] 周钊. 基坑开挖地铁隧道微扰动控制及监测可视化[D]. 南京: 东南大学, 2020.
[8] 李瑶. 基坑卸载与顶管施工影响的近接地铁隧道变形特征与控制方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2022.
[9] 刘家骥. 紧邻既有运营地铁的换乘车站微扰动扩建技术研究[J]. 应用研究, 2024(10): 1673-1678.
[10] 张鑫海, 魏纲, 林心蓓. 考虑纵向变形影响的基坑下方盾构隧道横向受力变化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(11): 2351-2364.
[11] 茅昕钰. 紧邻地铁隧道的超深桩基微扰动清障关键技术[J]. 上海建设科技, 2025(5): 23-27.
[12] 韩天然. 盾构隧道结构空间多尺度变形信息智能感知与大变形控制[D]. 南京: 东南大学, 2022.
[13] 刘贵安. 紧邻运营地铁隧道微扰动拔桩施工技术研究及应用[J]. 应用与研究, 2025, 48(2): 183-186.
[14] 赵帅, 张东明, 邵华, 等. 盾构隧道微扰动注浆对土体强度和衬砌横向收敛的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2022, 50(8): 1145-1153.
[15] 万颖君, 王法鑫, 朱晓珍, 等. 盾构隧道加固体微扰动控制效果分析与优化研究[J]. 建筑施工, 2025, 47(4): 505-511.