

文章编号: 1001-4632 (2026) 04-0055-11

引用格式: 徐凌, 孔宏, 周佳迪, 等. 密贴大断面顶管施工对既有车站及反顶装置安全影响[J]. 中国铁道科学, 2026, 47(4): 55-65.

Citation: Xu Ling, Kong Hong, Zhou Jiadi, et al. Safety impact of the construction of a large-section pipe jacking channel closely adhering to an existing station and the reaction-propulsion system[J]. China Railway Science, 2026, 47(4): 55-65.

密贴大断面顶管施工对既有车站及反顶装置 安全影响

徐 凌^{1,2}, 孔 宏³, 周佳迪^{1,2}, 陈晓帆^{1,2}, 尉建兵⁴, 金 亮⁵, 刘志春⁶

1. 北京市轨道交通设计研究院有限公司, 北京 100068;
2. 北京市轨道交通工程技术研究中心, 北京 100068;
3. 北京市轨道交通建设管理有限公司, 北京 100068;
4. 北京京港地铁有限公司, 北京 100068;
5. 北京城建勘测设计研究院有限责任公司, 北京 100101;
6. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘 要: 伴随城市经济的快速发展及轨道交通网络化的持续扩张, 换乘通道建设需求激增, 同时面临地层扰动显著、造价高昂等挑战。依托北京市望京西站 1 号地下换乘通道工程, 建立精细化的三维有限元模型, 系统分析不同顶推力下的既有车站变形规律及最大顶推力下的反力架应力响应, 据此提出针对性施工控制措施, 并制定涵盖地连墙、中板及反力架的综合监测方案; 基于现场监测数据, 揭示既有车站及反顶装置的变形与应力演化规律。结果表明: 既有车站凭借较大的结构刚度并受益于后背墙对新建工程的隔离作用, 其整体水平变形数值较小, 且变形呈现“鼓肚子”特征; 在较小顶推力作用下, 水平变形增长显著, 而随着顶推力增大, 水平变形增长趋缓; 反顶装置受力体系的结构应力、焊缝抗剪及螺栓抗剪强度均满足规范要求, 但反力架斜杆与水平杆的夹角螺栓处存在明显的拉应力集中区, 构成结构受力薄弱部位需通过增设连接螺栓方案以提升体系可靠性; 增加反力架道数可有效减小水平位移, 但当架设数量达到 3 道及以上时, 位移减幅趋于平缓。

关键词: 密贴增建; 矩形顶管; 后背墙; 现场监测; 演化规律; 既有车站

中图分类号: U291 **文献标识码:** A

doi: 10.3969/j.issn.1001-4632.2026.04.04

近年来我国城市地下空间建设蓬勃发展, 城市地下空间开发连通性及系统性不断提升, 城市轨道交通正以网络化方式蔓延发展^[1]。新建工程不可避免近接既有车站结构, 可能对既有车站结构安全造成威胁。

新建结构在既有车站影响范围内增建的情况称为近接增建^[2], 既有车站周边的应力场和变形场会因近接增建的存在而改变。Zhang 等^[3-4] 基于增建基坑与既有车站空间位置关系提出了 5 种有限土体破坏模式, 并借助薄层微元法推导出有限土体土

压力理论解。王志杰等^[5] 基于板壳理论, 给出了基坑开挖卸载下既有车站侧向变形计算方法。Zhou 等^[6] 给出既有地铁站的变形特征及破坏演变过程。Han 等^[7] 针对新建深基坑上跨既有车站工程建立有限元模型, 探究上部新建深基坑对既有地下车站结构安全的影响。刘勇等^[8] 开展大比尺盾构下穿既有明挖隧道模型试验研究, 探究盾构下穿施工对既有隧道结构和地层的变形影响规律。相较于近接增建“新建工程-土体-既有车站”的传力机制而言, 密贴增建的传力机制缺少了土体的遮拦效

收稿日期: 2025-03-25; 修订日期: 2026-03-10

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFC3806701)

第一作者: 徐 凌 (1977—), 男, 江苏无锡人, 博士, 教授级高级工程师。E-mail: 94550061@qq.com

通讯作者: 陈晓帆 (1990—), 男, 山东德州人, 高级工程师。E-mail: 838343950@qq.com

应,使得既有地铁车站面临更高的风险。张旭等^[9]利用FLAC3D模拟分析了密贴下穿施工引起的既有地铁车站结构沉降变化规律。Xu等^[10]和Liu等^[11]针对零距下穿工程给出既有结构力学响应的理论支持。彭宇一^[12]针对隧道密贴下穿既有车站工程,提出了减控沉降的施工措施。

顶管非开挖技术具有对地面交通干扰小、施工安全风险低、环境影响微弱等优点,广泛应用于建设附属通道结构^[13-14]。顶管工作井作为承受主顶油缸反作用力的构筑物,顶管施工对工作井及墙后土体稳定性会造成一定的影响。闫治国等^[15]使用有限元方法分析了顶管顶进全过程中顶推力与位移的关系。刘熙媛等^[16]结合实际工程研究顶管施工中圆形工作井后背土体位移和应力的空间分布特征,进而判断后背墙的稳定。黄章君等^[17]探究了顶推反力荷载对墙后土体位移、应力以及孔隙水压力的影响。Sun等^[18-19]基于能量耗散原理,给出了后背墙墙后土体位移理论解。Bai等^[20]通过数值模拟研究顶管推力荷载大小、作用位置以及加载面积对后背土体位移的影响。夏洋洋等^[21]、Zhang等^[22]聚焦顶管工作井的新型支护结构,共同提出了一种新型型钢-高聚物复合装配式支护结构,并通过试验分析与数值模拟证实其可靠性,结果表明支护桩桩间距是影响其结构性能的主控因素。王宁等^[23]基于实际工程,分析了顶管机在工作井中多次始发顶进对后背土体位移的影响。

综上所述,现阶段针对近接增建工程对既有车站影响的研究比较充分,依托工程主要为基坑临近、上跨既有车站以及隧道下穿、上跨、侧穿既有车站等。关于密贴运营车站增建大断面顶管通道的研究与实践鲜有报道,其结构选型、施工力学行为等关键技术尚不明朗,缺乏系统研究与成功案例支撑。

基于此,以北京市望京西站1号换乘通道为研究背景,通过数值模拟及现场实测的方法探究顶管顶进过程中既有车站后背墙变形演化规律以及反力架力学特性。上述研究在保证施工安全的前提下缩短了施工周期、提高了经济效益,可为其他实际工程中换乘通道设计提供新思路。

1 工程背景

为实现北京地铁17号线和13号线的客流换乘功能,设计建造北京市望京西站1号换乘通道。该

换乘通道采用双线双洞矩形顶管法施工,顶管矩形断面尺寸为 $6.9\text{ m}\times 4.9\text{ m}$ 。17号线望京西站为地下4层车站,在望京西站负1层西侧密贴设置顶管始发井,始发井尺寸为 24 m (长) $\times 12.4\text{ m}$ (宽) $\times 10\text{ m}$ (高)。600 mm厚始发井构造墙+800 mm厚车站围护结构地下连续墙充当后背墙作用,后背墙尺寸为长9 m,高5 m。顶管施工会对既有车站的结构安全造成一定影响。换乘通道平面图如图1所示。

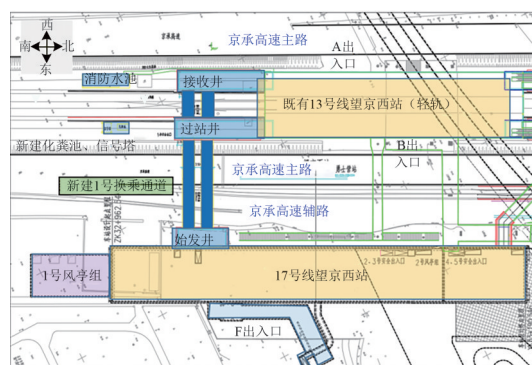
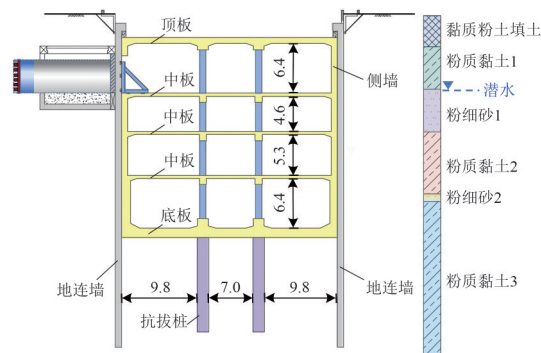


图1 换乘通道平面图

根据岩土勘察报告,1号换乘通道所处地层从上到下分别为粉质黏土层、粉细砂层。地下水类型分别为潜水、承压水和层间水,1号换乘通道顶管段通道主要穿越潜水层。图2(a)为顶管通道地质纵断面示意图。图中:自上而下依次为黏质粉土填土(4 m)、粉质黏土1(5.5 m)、粉细砂1(5.5 m)、粉质黏土2(8 m)、粉细砂2(1 m)和粉质黏土3;车站主体结构顶板厚0.8 m,中板厚0.4 m,底板厚1.2 m;围护结构采用地连墙,墙高42 m、厚0.8 m;车站下部布置抗拔桩,桩长12 m,桩径1.5 m。顶管右线顶进时,反顶装置由后背墙与反力架组成如图2(b)及图2(c)所示。反顶装置采用3道反力架体系(56b号工字钢),采用8.8级M22高强螺栓连接中板。连接板尺寸为 300 mm (长) $\times 400\text{ mm}$ (宽) $\times 16$ (厚)mm。



(a) 顶管通道地质纵断面

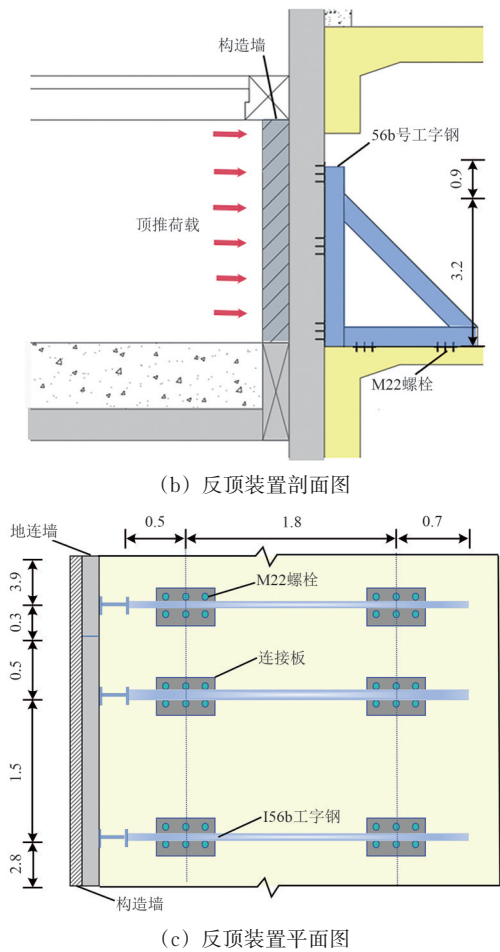


图 2 顶管通道地质纵断面示意图 (单位: m)

1号换乘通道顶管段掘进拟采用六刀盘土压平衡式矩形顶管机,外形尺寸为 $4.92\text{ m}\times 6.92\text{ m}\times 5.6\text{ m}$,本工程顶管施工主顶系统配置16个2 MN油缸,最大总推力可达32 MN。顶推力采用32 MN进行计算,顶推作用面为凹形断面,如图3所示,面积为 18.0 m^2 ,施加等效面荷载为 $1\,780\text{ kN}\cdot\text{m}^{-2}$ 。现场顶进装置与反顶装置如图4所示。

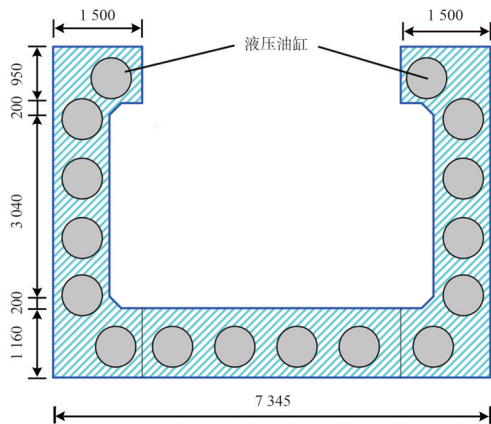


图 3 顶推作用面 (单位: mm)



图 4 密贴增建顶管通道现场图

2 既有车站安全性

2.1 有限元模型

根据实际工况利用Midas GTS NX建立三维数值模型,如图5所示。模型X方向为东西向,Y方向为南北向,X、Y和Z方向模型尺寸分别为120,125和60 m。望京西站1号换乘通道总长为73.90 m,壁厚为500 mm,管节长度为1.5 m,为方便计算,每3 m(2个管节)划分为1个施工阶段,总计25个施工阶段。模型采用固定位移边界,上边界取至地面,为自由面;4个侧面地层边界限制水平位移;下部边界限制竖向位移。地面超载取 20 kPa 。

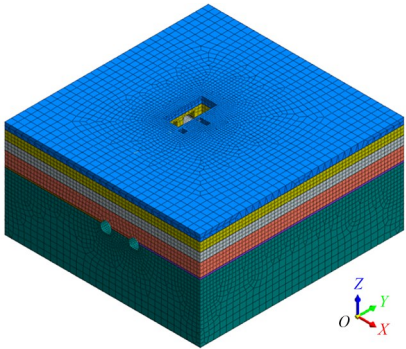


图 5 密贴增建顶管通道模型

混凝土材料采用线弹性模型,各层土体采用修正摩尔-库仑模型。外围土体、既有车站地连墙及

始发井采用三维板实体单元，车站结构、区间结构采用二维板壳单元，车站梁柱、轨道采用梁单元模拟。模型土层物理参数根据现场详勘报告选取，见

表 1。地铁车站结构尺寸按实际工程尺寸取值，结构物理力学参数见表 2。始发井构造墙后期需要破除，所以为素混凝土结构。

表 1 土层物理参数

土层名称	厚度/m	密度/(kg·m ⁻³)	压缩模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
黏质粉土填土	4.0	16.5	12.0	0.26	8	10
粉质黏土 1	5.5	19.5	5.3	0.35	27	14
粉细砂 1	5.5	20.5	25.0	0.29	0	28
粉质黏土 2	8.0	20.1	8.0	0.43	26	15
粉细砂 2	1.0	20.5	25.0	0.29	0	28
粉质黏土 3	36.0	19.8	10.8	0.26	27	15

表 2 结构物理力学参数

结构名称	材料	厚度/mm	弹性模量/GPa	泊松比	容量/(kN·m ³)	本构关系
17 号线望京西站	C40 钢筋混凝土		32.5	0.2	25	弹性
始发井构造墙	C40 素混凝土	600.0	32.5	0.2	23	弹性
顶管管节	C50 钢筋混凝土	500.0	33.5	0.2	25	弹性
反顶装置	56b 号工字钢	14.5	200.0	0.2	79	弹性

2.2 既有车站水平变形

分别选取顶推力为 8、16、24 和 32 MN，依次施加于后背墙上，计算后背墙、车站中板的水平变形。

2.2.1 后背墙

不同顶推力下后背墙位移趋势基本一致，且后背墙中心处位移值最大。以顶推力为 32 MN 时的计算结果为例展开分析。

图 6 为顶推力为 32 MN 时后背墙位移云图。由图 6 可知，后背墙角部发生沿顶推力方向的位移，中部产生沿顶推力反方向的位移，呈现“鼓肚子”特征。原因在于顶推荷载呈现凹形分布，在顶推力作用下，角部承受压应力集中，导致局部沿推力方向产生变形，而后背墙中部受两侧强约束区域的夹持效应，形成类简支梁受力模式。顶推力产生的面荷载使墙体发生弯曲变形，中部向荷载反方向发生位移，其幅值受墙体抗弯刚度控制。

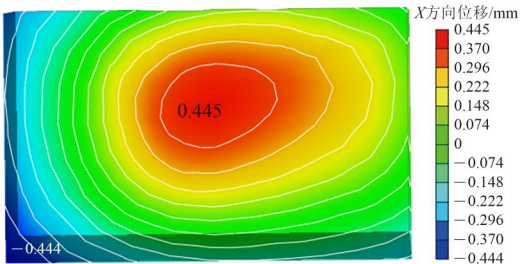


图 6 后背墙位移云图

图 7 为不同顶推力作用下后背墙中心处的水平位移变化曲线。由图 7 可知：既有车站后背墙的侧向变形量与顶推力呈显著相关性，随顶推力增大，

变形呈非线性鼓肚形分布，最大水平位移为 0.445 mm；当顶推力较小时，后背墙水平位移的增长速率更大，当顶推力持续增大后，后背墙水平位移的增长速率逐渐放缓。其力学本质为：墙体受微小扰动时，反顶装置并未产生显著力学响应，约束作用较弱，因此后背墙水平位移增长速率更大；而当顶推力持续增大，墙体与反顶装置形成的整体系统刚度提升，因此后背墙水平位移的增长速率逐渐放缓。

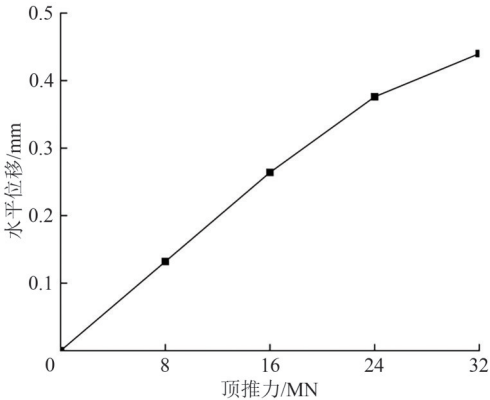


图 7 不同顶推力作用下后背墙的水平位移

2.2.2 中板

不同顶推力下车站负 1 层中板位移趋势基本一致，且中板中心处位移值最大。以顶推力为 32 MN 时的计算结果为例展开分析。

图 8 为顶推力为 32 MN 时车站负 1 层中板位移云图。由图 8 可以看出最大水平位移为 0.331 mm，发生在反力架处。

图 9 为不同顶推力下车站负 1 层中板中心处的

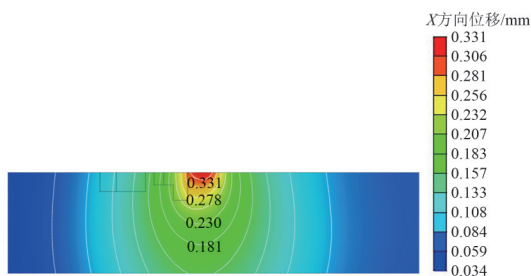


图8 车站负1层中板位移云图

水平位移曲线。由图9可知,既有车站中板水平变形的大小跟顶推力相关性显著,当顶推力很小时,后背墙变形较小,此时反力架传递的外部载荷低于螺栓预紧力,螺栓变形不显著,荷载主要由后背墙承担;随着顶推力增大,水平变形增长趋缓,此时螺栓受力超过预紧力并发生显著变形,中板转而成为主要承载体。中板变形累积加速,水平位移增速快速。由此可知,当顶推荷载较小时,可暂不设置反顶装置。

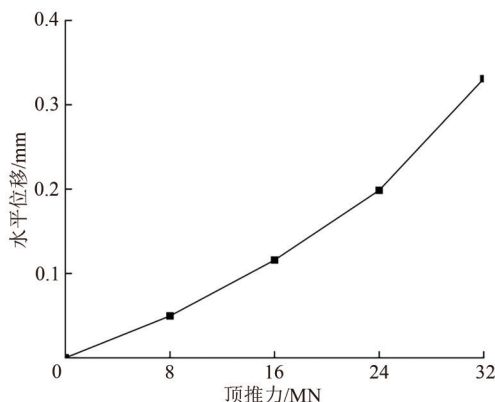


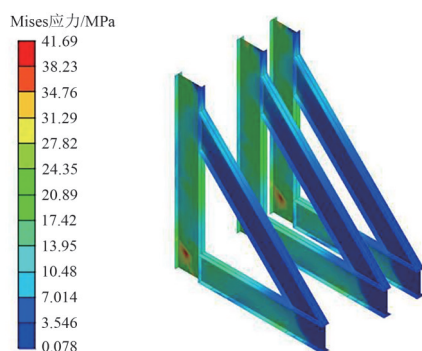
图9 不同顶推力下车站负1层中板的水平位移

3 反顶装置安全性

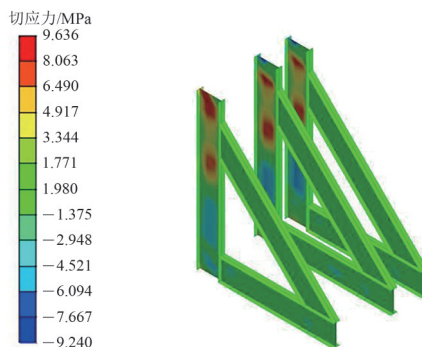
顶管右线顶进时,后背墙后方反顶装置将部分顶推力传递至地下1层中板,该受力传递过程直接影响结构稳定与施工风险控制,因此反顶装置受力体系的安全性对施工安全至关重要,且目前17号线望京西站已正式运营,需对反顶装置承载体系进行详细受力分析。选取极限顶推力32 MN,从反力架钢结构应力分析及螺栓抗剪2方面开展研究,对承载体系安全性进行计算分析。模型尺寸及参数与前文相同。

3.1 反力架钢结构应力

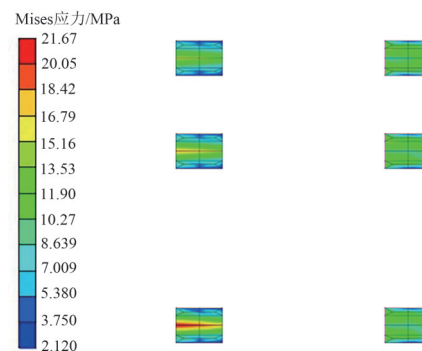
反顶装置采用3道反力架体系(56b号工字钢),根据计算结果,工字钢及连接板应力云图如图10所示。



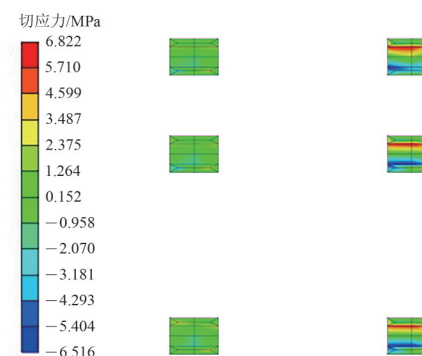
(a) 工字钢 Mises 应力



(b) 工字钢切应力



(c) 连接板 Mises 应力



(d) 连接板切应力

图10 工字钢及连接板应力云图

选取图10中3道反力架直杆交点处以及斜杆与直杆交点处的Mises应力进行分析。受顶推荷载凹形分布影响,直杆交汇节点为顶推力直接作用区

域,应力集中现象显著,因此3道反力架直杆交点处所受应力最大,其中中间反力架的最大应力为41.69 MPa。而连接板通常主要承担局部连接与传力功能,不直接承担顶推主荷载,所承受的应力较小,其最大应力为21.68 MPa,显著低于直杆交点处应力。

3.2 螺栓应力计算

每道反力架共设2处连接板,连接板与中板通过8.8级M22高强螺栓连接,根据三维应力分析,螺栓应力计算结果如图11所示。

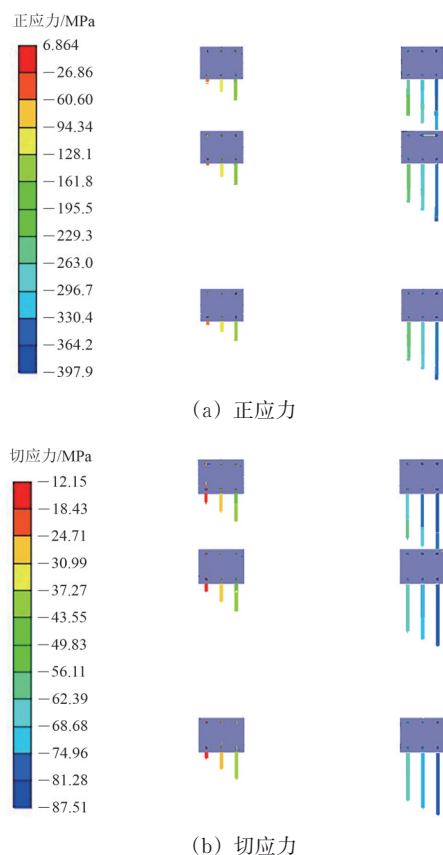


图11 螺栓应力云图

根据GB 50017—2017《钢结构设计标准》^[24],8.8级M22高强螺栓抗拉强度设计值为400 MPa,抗剪强度设计值为250 MPa。由图11计算结果可知,螺栓拉应力达398 MPa,已逼近螺栓抗拉强度设计值。这主要是由于顶推荷载呈现凹形,导致后背墙水平位移分布呈现鼓肚型。反力架顶部位于顶推荷载作用位置中部,反力架底部位于顶推荷载作用位置底部,故反力架顶、底部受力方向相背,致使水平杆与斜杆交点处发生上浮变形,形成拉应力集中区。螺栓切应力为87.5 MPa,数值相对较小。

3.3 反顶装置受力评价与控制措施

根据上述模拟结果可知,反力架结构应力及螺栓抗剪满足规范要求,但螺栓抗拉强度逼近极限控制值,因此,需采取措施以防止反力架处螺栓受拉破坏。同时,工程顶管断面尺寸为6.9 m×4.9 m的矩形断面,根据矩形顶管工艺要求,洞口围护桩需全部破除,并安装门洞内延伸轨道、门洞内限位后才能始发掘进,此过程存在塌方风险,故需要洞口加固区土体有很强的自稳能力。

经核算,将M22螺栓数由6枚增加至8枚。同时本工程顶管始发端采用深孔注浆进行加固处理。深孔注浆浆液采用水泥浆,该水泥浆应由强度等级不低于42.5级的普通硅酸盐水泥、促凝剂和水搅拌而成,水泥浆水灰比为1:1。同时,顶管施工时除严格控制顶进姿态、顶进推力和顶进速度外,还需严格落实同步注浆、二次注浆和置换泥浆工艺。顶进速度控制在5~10 mm·min⁻¹以内,推进过程中必须保证连续均衡施工,顶管施工过程中无特殊情况下不得停机搁置。

4 密贴增建顶管现场实测

本工程于2023年12月12日开始施工,2024年1月4日完成顶管施工。共计顶进49环,施工过程中最大顶推力30.8 MN,已接近最大极限顶推力32 MN。对施工过程中后背墙水平位移及反力架受力进行全过程监测,并与数值模拟结果进行对比分析。

4.1 后背墙水平位移

将顶管施工中后背墙水平位移实测数据进行整理,选取水平位移最大的监测点WY03和WY25(分别位于后背墙正中心与角部)数据,反力架水平位移监测点布置如图12所示。对顶推压力与水平位移进行拟合,结果如图13所示。图中: s 为后背墙水平位移; p 为顶推力; R^2 为拟合度。

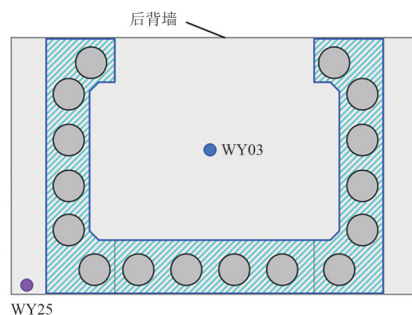


图12 后背墙水平位移测点布置

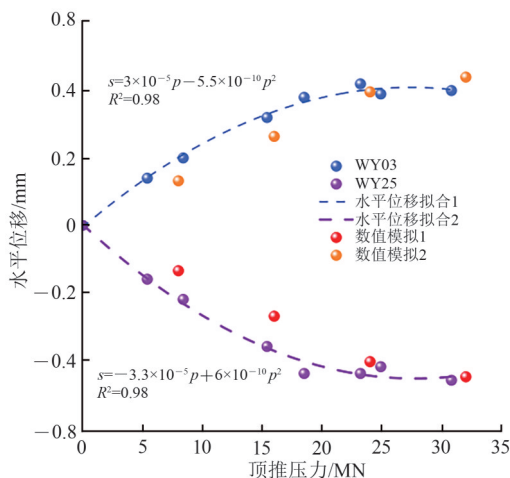


图13 后背墙水平位移

由图13可知：施工过程中后背墙最大水平位移为0.44 mm，当顶推力达到20 MN时，后背墙水平位移增长缓慢，基本保持0.4 mm左右；监测数据与数值模拟计算结果吻合良好，证明数值模拟结果合理可靠。

4.2 反力架应力

反力架应力监测点布置如图14所示。反力架钢架竖杆中部布置测点 YB01, YB04 和 YB07；反力钢架直角处布置测点 YB02, YB05 和 YB08；反力钢架斜杆与水平杆夹角处布置测点 YB03, YB06 和 YB09。

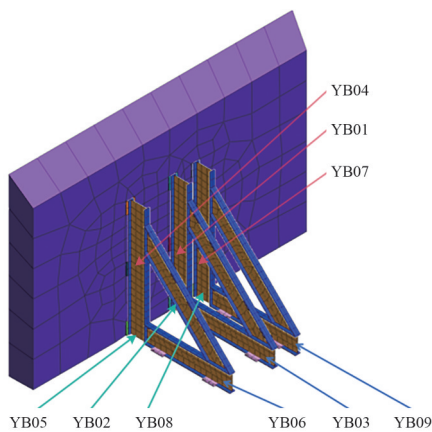


图14 反力架应力监测点

将顶管施工中反力架应力实测数据进行整理，选取各部位最大应力的监测点（YB01, YB02 和 YB03）数据，并对顶推力与反力架应力进行拟合，结果如图15所示。图中： σ 为反力架应力。

由图15可知：随着顶推力逐步增加，各杆件部位所受应力逐步增加，其中中间反力架的各部位应力大于周边2个钢架，且最大应力出现在两直杆

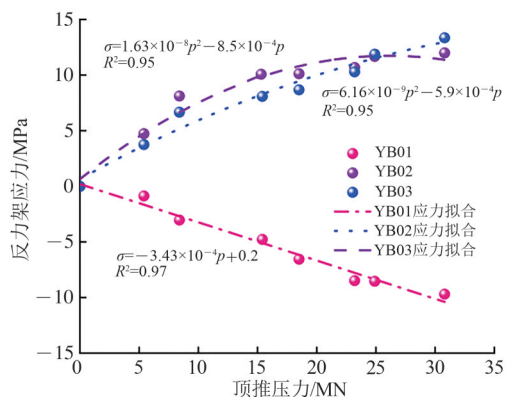
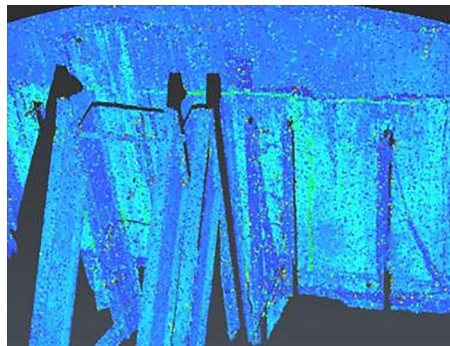


图15 反力架应力

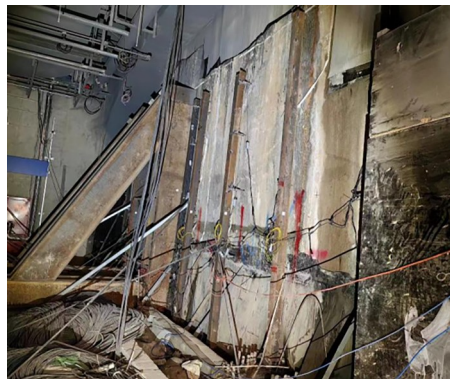
交汇节点处，这一现象与数值模拟结果较为吻合，钢架最大应力为13.1 MPa；反力架装置中中间位置反力架处于后背墙中心位置，此处位移最大，因此中间反力架各部位应力大于周边2个钢架；在斜杆与水平杆的夹角区域及直角节点处，由于结构不均匀，导致出现应力集中现象，使得最大应力出现在此处。

4.3 工程现场效果

2024年1月4日，顶管施工完成，共计49环。经三维扫描显示，右线顶推处后背墙结构、车站二次结构、反力钢架无异常。反力架三维扫描和现场照片如图16所示。



(a) 三维扫描显示



(b) 现场照片

图16 反力架

5 密贴增建顶管通道评判方法

密贴增建顶管通道的评判方法遵循“参数输入-受力计算-设备选型-抗力验算”的递进式分析思路，具体执行以下步骤。

步骤1：基础设计参数确定。根据工程实际，确定换乘通道的截面尺寸（宽度 b 、高度 h ）、埋深 H 、通道长度 L ，以及所在土层的土体物理力学参数（土体容重 γ 、黏聚力 c 、内摩擦角 φ ）。

步骤2：理论顶推力计算。采用步骤1获得的基础参数计算矩形顶管顶推力。

步骤3：核心设备选型。基于步骤2计算出的顶推力，选取合理的顶管机型号，并初步选配反顶装置。

步骤4：既有结构抗力评判与优化。对初步选取的反顶装置作用下的既有车站结构安全进行评判。若既有车站结构抵抗能力满足安全要求（如北京地标规定的水平位移限值3 mm或预警值2.1 mm），则当前方案可行；若抗力不满足，则需调整、优化反顶装置方案（如增加反力架道数），并返回步骤3重新校核，直至满足要求。

5.1 矩形顶管顶推力计算式

结合各种规范公式及矩形顶管的特殊性，大断面矩形顶管的顶推力 F 可由式（1）得出。

$$F = F_1 + F_2 \tag{1}$$

式中： F_1 为侧壁摩擦力； F_2 为掌子面迎阻力。

侧壁摩擦力、掌子面迎阻力可由式（2）、式

（3）计算得出。

$$F_1 = (F_{\text{顶}} + 2F_{\text{侧}} + F_{\text{底}}) fL \tag{2}$$

$$F_2 = 1.1K_0\gamma\left(H + \frac{2h}{3}\right)A \tag{3}$$

其中，

$$F_{\text{顶}} = \gamma Hb$$

$$F_{\text{侧}} = \gamma\left(H + \frac{h}{2}\right)h$$

$$F_{\text{底}} = \gamma Hb + G$$

式中： G 为单位长度顶管管节重力； H 为顶管管节埋深； h 为顶管管节截面高度； b 为顶管管节截面宽度； K_0 为主动土压力系数； A 为顶管管节横截面积； f 为顶管管节与土体之间的摩擦系数，取值可参考文献[25]。

5.2 密贴增建顶管通道评判方法

根据北京市出台的DB11/T 716—2019《穿越既有交通基础设施工程技术要求》^[26]，新建工程引起的既有地铁结构水平位移指标需小于3 mm。同时，以70%为第三方监测预警值，故以水平位移取2.1 mm为界限。

基于前文数值模型，采用控制变量法分别分析反力架数量、顶推力对后背墙水平位移最大值的影响，结果见表3。表中：粉色区域为后背墙水平位移最大值大于或等于3 mm；黄色区域为后背墙水平位移最大值大于或等于2.1 mm且小于3 mm；绿色区域为后背墙水平位移最大值小于2.1 mm且大于1 mm；蓝色区域为后背墙水平位移最大值小于1 mm。

表3 不同工况下后背墙水平位移最大值

mm

反力架 数量	不同顶推力下的后背墙水平位移											
	4 MN	8 MN	12 MN	16 MN	20 MN	24 MN	28 MN	32 MN	36 MN	40 MN	44 MN	48 MN
无反力架	0.1	0.2	0.4	0.7	1.1	1.5	2.1	2.7	3.1	3.8	4.2	5.1
1道	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.1	1.6	2.0	2.4	3.0	3.3	4.1
2道	0.1	0.2	0.3	0.4	0.6	0.8	1.1	1.4	1.7	2.2	2.5	3.2
3道	0.1	0.2	0.2	0.3	0.4	0.4	0.6	0.8	1.1	1.5	1.8	2.4
4道	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.6	0.9	1.2	1.5	1.9

表3中粉色区域已超过北京市标准限制，需更换调整换乘通道设计方案。黄色区域工况风险高，变形值超过预警值，必要时采用一定安全加固措施保证既有车站的安全。绿色区域工况风险可控，需对密贴周围增加监测布点以及加强监测频率。蓝色区域工况风险较小，可维持现有施工方案并加强监测频率即可。

由表3可知：后背墙水平位移随顶推力增大而非线性增长，随反力架道数增加而减小，但反力架超过3道后减幅趋缓。以32 MN为例，从无反力架到配置4道反力架，后背墙水平位移依次为2.7，2.0，1.4，0.8和0.6 mm。当反力架不少于3道时，各顶推力下位移均小于1.1 mm，远低于2.1 mm预警值。若无反力架，顶推力达28 MN时

位移已触及预警值, 36 000 kN时位移突破3 mm限值。综合来看, 配置3道反力架可在满足变形控制要求的前提下兼顾经济性。

6 结 论

本文依托北京市望京西站1号换乘通道工程, 通过数值模拟识别反力架结构的潜在风险及薄弱点并提出了相应的加固措施。基于现场实测数据, 系统分析了顶管顶进过程中既有车站后背墙变形演化规律以及反顶装置力学特性。研究得到以下结论。

(1) 既有车站主体凭借其较大刚度, 致使车站整体水平变形较小, 后背墙变形数值呈现“鼓肚子”特征, 在顶推力较小时, 水平变形增长显著, 此时外部载荷低于螺栓预紧力, 螺栓变形不显著, 荷载主要由后背墙承担, 随着顶推力进一步增大, 水平变形增长趋于平缓, 螺栓受力超过预紧力并发生显著变形, 中板成为主要承载体。

(2) 反力架受力体系的安全性分析表明, 其结构应力及螺栓抗剪强度均满足规范要求; 然而,

在斜杆与水平杆的夹角螺栓处观测到明显的拉应力集中区, 螺栓最大拉应力为398 MPa, 逼近螺栓抗拉设计强度, 为此工程的受力薄弱环节, 需通过增设连接螺栓方案以提升体系可靠性。

(3) 后背墙水平位移随顶推力增大呈非线性增长, 随反力架道数增加而减小。以32 MN为例, 无反力架时位移为2.7 mm, 增设1道、2道、3道反力架后分别降至2.0, 1.4和0.8 mm, 减幅逐步收窄; 增至4道反力架时仅再降0.2 mm至0.6 mm, 趋缓特征明显。

(4) 提出了密贴增建顶管通道评判方法, 针对相似工程, 可根据换乘通道截面尺寸大小、埋深、通道长度以及所在土层土体参数准确计算所需顶推力数值, 为评估既有车站的抵抗能力及优化反顶装置设计方案提供理论基础。

(5) 尽管提出的密贴增建顶管通道施工方法对新建换乘通道提供了新思路, 但仍然存在一定局限性, 例如, 实际工程中既有车站围护结构形式以及车站结构尺寸厚度不一有待进行系统研究。另外顶进过程中遇到风化孤石可能出现顶推力激增的问题也需进一步探究。

参 考 文 献

- [1] 雷升祥, 刘志春, 黄双林, 等. 城市地下空间网络化拓建相关研究进展[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(5): 1424-1440.
Lei Shengxiang, Liu Zhichun, Huang Shuanglin, et al. Related research progress of networked expansion of urban underground space[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2022, 18(5): 1424-1440.
- [2] 刘志春, 雷升祥, 李国良, 等. 城市地下空间网络化拓建扰动评价方法及应用[J]. 浙江大学学报(工学版), 2022, 56(7): 1363-1374.
Liu Zhichun, Lei Shengxiang, Li Guoliang, et al. Evaluation method and application of urban underground space networked expansion disturbance[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2022, 56(7): 1363-1374.
- [3] Zhang Zhenbo, Zhou Jiadi, Xu Fei, et al. Calculation method of the finite soil pressure for a new foundation pit adjacent to an existing subway station[J]. Applied Sciences, 2023, 13(3): 1994.
- [4] 张振波, 黄安, 周佳迪, 等. 基坑近接地铁车站主动土压力合力算法研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(7): 1516-1524.
Zhang Zhenbo, Huang An, Zhou Jiadi, et al. Algorithm for resultant force of active soil pressure of excavations adjacent to underground subway stations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(7): 1516-1524.
- [5] 王志杰, 周飞聪, 周平, 等. 基于强近接大型基坑单侧开挖卸载既有车站变形理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(10): 2131-2147.
Wang Zhijie, Zhou Feicong, Zhou Ping, et al. Research on deformation theory of existing stations based on single side excavation and unloading of large foundation pits with strong close connection[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(10): 2131-2147.
- [6] Zhou Feicong, Zhou Ping, Li Jinyi, et al. Deformation characteristics and failure evolution process of the existing metro station under unilateral deep excavation[J]. Engineering Failure Analysis, 2022(131): 105870.
- [7] Han Jianyong, Wang Jun, Cheng Cheng, et al. Mechanical response and parametric analysis of a deep excavation structure overlying an existing subway station: a case study of the Beijing Subway Station expansion[J]. Frontiers in Earth Science, 2023, 10: 1079837.

- [8] 刘勇,曹毅泽,吴薪柳,等.地铁盾构施工下穿既有明挖隧道模型试验研究[J].中国铁道科学,2024,45(1):110-121.
Liu Yong, Cao Yize, Wu Xinliu, et al. Model test study on metro shield construction undercrossing existing open-cut tunnel[J]. China Railway Science, 2024, 45(1): 110-121.
- [9] 张旭,张成平,韩凯航,等.隧道下穿既有地铁车站施工结构沉降控制案例研究[J].岩土工程学报,2017,39(4):759-766.
Zhang Xu, Zhang Chengping, Han Kaihang, et al. Case study of control technology of structural settlements due to tunnelling beneath a subway station[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(4): 759-766.
- [10] Xu Q, Lei S X, Zhu Y Q, et al. Investigating the influence of excavating a tunnel undercrossing an existing tunnel at zero distance[J]. PLoS One, 2024, 19(4): e0301428.
- [11] Liu X, Fang Q, Zhang D L. Mechanical responses of existing tunnel due to new tunnelling below without clearance[J]. Tunnelling and Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research, 2018, 80: 44-52.
- [12] 彭宇一.零距离暗挖下穿既有车站控沉效果研究[J].铁道工程学报,2024,41(4):96-101.
Peng Yuyi. Research on the effect of zero distance underground excavation through existing stations to control settlement[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2024, 41(4): 96-101.
- [13] 彭立敏,王哲,叶艺超,等.矩形顶管技术发展与研究现状[J].隧道建设,2015,35(1):1-8.
Peng Limin, Wang Zhe, Ye Yichao, et al. Technological development and research status of rectangular pipe jacking method[J]. Tunnel Construction, 2015, 35(1): 1-8.
- [14] 刘文俊,傅鹤林,温树杰,等.近距离下穿施工对既有矩形顶管通道的影响分析[J].铁道科学与工程学报,2016,13(9):1782-1788.
Liu Wenjun, Fu Helin, Wen Shujie, et al. Influencing analysis of construction of mining tunnel close crossing underneath the existing rectangular pipe jacking tunnel[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(9): 1782-1788.
- [15] 闫治国,朱合华,李向阳,等.顶管同步顶进工作井稳定性三维数值分析[J].岩土工程学报,2005,27(8):891-896.
Yan Zhiguo, Zhu Hehua, Li Xiangyang, et al. 3D-FEM analysis on stability of shaft with conduit jacked synchronously in two directions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(8): 891-896.
- [16] 刘熙媛,张世华,高立康,等.枝江尾矿库排水工程圆形顶管工作井后背墙及土体的应力与位移特征分析[J].隧道建设(中英文),2021,41(10):1672-1681.
Liu Xiyuan, Zhang Shihua, Gao Likang, et al. Characteristic of stress and displacement of back wall and soil of circular working shaft for pipe jacking in drainage project of Zhijiang End Mine Reservoir[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(10): 1672-1681.
- [17] 黄章君,杨艳玲,汤东桑,等.大尺寸矩形顶管始发井反力墙数值模拟与监测[J].隧道建设(中英文),2020,40(7):972-980.
Huang Zhangjun, Yang Yanling, Tang Dongsang, et al. Numerical simulation and monitoring of reaction wall of launching shaft for large rectangular pipe jacking[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(7): 972-980.
- [18] Sun Yang, Shen Shuilong, Xu Zhengliang, et al. Prediction of lateral displacement of soil behind the reaction wall caused by pipe jacking operation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research, 2014, 40: 210-217.
- [19] Sun Yang, Su Jingbo, Xia Xiaohu, et al. Numerical analysis of soil deformation behind the reaction wall of an open caisson induced by horizontal parallel pipe-jacking construction[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(12): 2008-2016.
- [20] Bai Qian, Zhao Wen, Wang Xin, et al. Influence of pipe-jacking reaction on earth pressure of back wall of pilot tunnel of subway station[J]. Sustainability, 2023, 15(2): 1033-1033.
- [21] 夏洋洋,方宏远,张超,等.顶管施工对新型复合装配式支护工作井的力学响应分析[J].岩土力学,2022,43(10):2799-2808.
Xia Yangyang, Fang Hongyuan, Zhang Chao, et al. Mechanical response analysis of pipe jacking construction to new composite assembly supporting work shaft[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(10): 2799-2808.
- [22] Zhang Chao, Zhai Wenbo, Xia Yangyang, et al. Analysis of the stability of a novel assembled working shaft support structure during pipe jacking construction: experiments and numerical simulations[J]. Engineering Failure Analysis, 2024, 162: 108418.
- [23] 王宁,高毅,于少辉,等.矩形顶管隧道群施工对后背土体扰动规律的初步研究[J].隧道建设(中英文),2019,39(3):413-420.
Wang Ning, Gao Yi, Yu Shaohui, et al. Disturbance of rectangular pipe jacking tunnel group construction on soil behind working shaft[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(3): 413-420.

- [24] GB 50017—2017 钢结构设计标准[S].
GB 50017—2017 Standard for design of steel structures[S].
- [25] 许勇,张鹏,曾聪,等.基于有效土压力的矩形顶管周摩阻力计算模型研究[J].岩土工程学报,2025,47(9):1967-1976.
Xu Yong, Zhang Peng, Zeng Cong, et al. Calculation model of frictional resistance for rectangular pipe jacking based on effective soil pressure[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025, 47(9): 1967-1976.
- [26] DB11T 716—2019 穿越既有交通基础设施工程技术要求[S].
DB11T 716—2019 Technical requirements for crossing existing road facilities[S].

Safety impact of the construction of a large-section pipe jacking channel closely adhering to an existing station and the reaction-propulsion system

Xu Ling^{1,2}, Kong Hong³, Zhou Jiadi^{1,2}, Chen Xiaofan^{1,2}, Wei Jianbing⁴,
Jin Liang⁵, Liu Zhichun⁶

(1. Beijing Rail Transit Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing 100068, China;

2. Beijing Rail Transit Engineering Technology Research Center, Beijing 100068, China;

3. Beijing MTR Construction Management Co., Ltd., Beijing 100068, China;

4. Beijing MTR Corporation Limited, Beijing 100068, China;

5. Beijing Urban Construction Exploration & Surveying Design Research Institute Co., Ltd., Beijing 100101, China;

6. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang Hebei 050043, China)

Abstract: With the rapid development of the urban economy and the continuous expansion of rail transit networks, the demand for transfer passage construction has surged, while challenges such as significant ground disturbance and high costs are increasingly prominent. Based on the No. 1 Underground Transfer Passage Project at Wangjing West Station in Beijing, a refined three-dimensional finite element model was established to systematically analyze the deformation behavior of the existing station under different jacking forces and the stress response of the reaction frame under the maximum jacking force. Targeted construction control measures were then proposed, and a comprehensive monitoring scheme covering the diaphragm wall, intermediate slab, and reaction frame was developed. Using field monitoring data, the deformation and stress evolution of the existing station and the reaction-jacking devices were revealed. The results show that, owing to its high structural stiffness and benefiting from the isolation effect of the back wall on the new construction, the existing station exhibits small overall horizontal deformation, characterized by a “bulging” pattern. Under a relatively small jacking force, the horizontal deformation increases significantly, whereas the growth slows down as the jacking force increases further. A safety analysis of the reaction-jacking system indicates that the structural stress, weld shear strength, and bolt shear strength all meet code requirements; however, an obvious tensile stress concentration zone exists at the bolts located at the intersection of the diagonal and horizontal members of the reaction frame, constituting a structurally weak point. Therefore, a scheme of adding connecting bolts is proposed to enhance system reliability. Increasing the number of reaction frames can effectively reduce horizontal displacement, but the reduction becomes marginal when three or more frames are employed.

Key words: Close fitting construction; Rectangular pipe jacking; Back wall; In-situ monitoring; Evolutionary laws; Existing station

(责任编辑 王蕴嘉)