

# 桩基托换在轨道交通工程施工中的应用

周果

(中交一航局城市交通工程有限公司)

**摘要:** 为验证复杂城市地质条件下不影响既有桥梁通行完成桩基托换施工的可行性,以哈尔滨地铁 3 号线公路大桥站—河松街站区间下穿前进路高架桥 D52' 桥墩桩基托换工程为研究对象,聚焦冬季极寒环境、既有桥梁低净空条件下顶升设备精细化施工,引入液压同步顶升系统,集成压力传感器、位移传感器及 PLC 控制模块,实现顶升力分级加载与毫米级动态调节;建立“荷载-位移”双控模型,通过预顶抵消新桩位移,提出寒冷地区桩基托换的主动变形协调机制。通过工程实践成功实现盾构隧道“零中断交通”穿越既有高架桥,不仅为寒冷地区城市地下空间开发提供了可复用的技术范本,更推动了桩基托换技术向智能化、精细化方向演进,对类似复杂环境下的桩基工程施工具有重要借鉴意义。

**关键词:** 桩基托换; 寒冷地区; 沉降控制; 分级加载; 顶升施工

## 0 引言

桩基托换技术自 20 世纪末逐渐应用于轨道交通工程,国内学者围绕其设计理论与施工方法开展了系列研究。在理论层面,朱琳<sup>[1]</sup>提出基于荷载传递的托换桩布置模型,通过有限元模拟验证了托换桩间距对沉降的影响规律;刘喆<sup>[2]</sup>针对盾构隧道穿越桥梁桩基的工程案例,提出临时支顶体系的动态调节方法;在实践层面,既有研究多集中于常规地质条件,缺乏对寒冷地区复杂环境与既有交通保畅协同控制的系统性解决方案。本文通过对桩基托换施工工艺的研究,验证了该技术在复杂城市地质条件下的可行性,可为类似工程提供借鉴。

## 1 工程概况

前进路高架桥为城市快速路 A 级桥梁, D52' 桥墩位于连续梁 D49'—D54' 段,该段为三联五跨横向预应力钢筋混凝土连续梁。D52' 桥墩直径 1.5 m,高 6.5 m,采用 C30 混凝土浇筑;承台尺寸为 5.4 m×5.4 m×2 m,埋深约 2.69 m,下方布置 4 根桩径 1.2 m、桩长 33 m 的端承摩擦桩。托换桩为 6 根钻孔灌注桩,桩径 1.5 m,桩长 50 m,为端承摩擦桩。既有承台四周及下部为新承台,新承台尺寸为 15.96 m×9.27 m×3.8 m,埋深 4.49 m。新建工程与既有结构位置关系如图 1 所示。托换体系中,荷载将通过既有承台传到新承台上,再由新承台传到托换桩上,从而达到托换的目的。

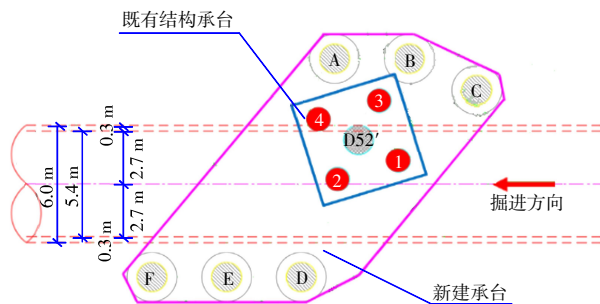


图 1 新建工程与既有结构位置关系图

## 2 施工方法

### 2.1 施工准备

施工前需完成管线调查与迁改、设备选型及场地布设。针对北方冬季低温环境,提前制定保温措施,确保钻孔桩成孔与混凝土浇筑质量。钢筋笼采用场外分节加工,结合桥下净空限制优化分节长度,并采用挤压套筒连接以规避低温焊接风险。

### 2.2 钻孔桩施工

根据施工场地及地质情况,选用反循环钻机成孔,受桥下低净空影响,提前对钻机进行设备改造,保证低净空钻进成孔,采用钠基膨润土泥浆护壁,钢筋笼分节吊装,导管法进行混凝土浇筑。根据设计要求,相邻两根桩间距为 3.75 m,临桩强度达到 70% 以上时,方可施作新桩,为保证钻孔桩连续施工,减少相邻孔口的施工影响,

钻孔桩成孔采取“跳孔施工”原则,施工顺序为: B→D→F→A→C→E,桩孔分布如图1所示。复合式后注浆在桩混凝土浇筑完成2~7 d内完成注浆,采用袖阀管法。自上而下进行注浆,最后进行桩端注浆。

### 2.3 临时支顶施工

使用挖掘机配合人工确认既有承台外边线,复核承台尺寸,测放钢管柱位置,钢管柱采用 $\phi 609 \times 16$  mm钢支撑,由5 m标准节段与0.5 m调整节组合拼接,螺栓连接。使用倒链架及叉车配合进行钢管柱安装,安装前采用M30砂浆对承台基面进行找平,严格控制钢管柱安装位置偏差及垂直度。钢管柱采用植筋加固,并浇筑800 mm $\times$ 400 mm混凝土基础。使用10 t叉车配合型钢支架(最大抬升高度6 m),将工字钢组合承托至钢管柱顶标高处,水平油顶启动,将其推至钢管柱上侧,工字钢下方钢板与钢管柱之间进行焊接加固。

钢管支撑安装完成后,在工字钢横梁上安装顶升设备,为保证顶升施工中箱梁结构安全,顶升过程控制采用计算机控制液压同步升降系统。安装的顶升设备主要有:千斤顶、限位装置、压力传感器、位移传感器及PLC数据采集系统。

1) 千斤顶:实施中每个横梁上两侧各设置3个支顶点,选用200 t液压同步千斤顶。为保证钢管支撑体系受力合理,千斤顶对称设置在钢管支撑工字钢中部。千斤顶应有自锁功能和确保千斤顶稳定的措施。

2) 限位装置:为控制顶升过程中箱梁不发生惯性位移,支点部位设置限位装置。顶升施工时,用薄钢板将箱梁与原橡胶支座位置空隙楔紧,实现箱梁顶升至设计高程受力稳定。

3) 压力传感器:顶升施工时为控制顶力状态,在每台千斤顶上部设置压力传感器,用于测试千斤顶处的压力值,压力传感器的压力量程为2 500 kN。

4) 位移传感器:顶升施工时,为测试箱梁位移,在箱梁间粘贴位移传感器,根据本工程特点,中间各布3个传感器,并在相邻(D53')墩台上方布置2个位移传感器进行数据采集及比较分析。采用应变式位移传感器,主要技术指标:量程 $\pm 5$  mm,精度1/1 000,线性度 $>0.2\%$ ,使用条件受周围环境影响不大。

5) 数据采集系统:采用PLC数据处理系统,

将千斤顶顶部的位移传感器与压力传感器接入PLC控制模块,实时采集并显示位移及压力数据;通过对比实测位移与预设控制阈值,动态调整千斤顶顶升力,实现毫米级精度闭环控制。

临时支顶属防护措施,施工过程中不对原结构施加主动顶力。基坑开挖前完成临时支顶及顶升设备安装,及时调试设备、采集初始值。基坑开挖、承台施作及受力转换过程中,顶升设备根据原结构的沉降情况实时调整,保证托换位置连续梁结构稳定。

### 2.4 基坑开挖施工

基坑围护结构采用12 m钢板桩及22a工字钢对撑,钢板桩分节错缝焊接打设。基坑降水为基坑外降水,设置6口18 m降水井,满足基坑内水位控制在开挖面以下1 m。基坑开挖深度4.7 m,采用60型小挖机配合PC200开挖,过程中对原有承台及旧桩进行凿毛处理<sup>[3]</sup>。开挖完成后,凿除灌注桩桩头至新建承台底部70 cm,在新桩桩头安装钢垫板、砂袋及模板,对承台下70 cm范围桩头回填保护,随后施作垫层。

### 2.5 承台结构施工

承台钢筋加工在场外进行,采用板车运输进场。承台钢筋施工先绑扎底层钢筋,底层主筋绑扎在分布筋下侧,既有承台植筋与主筋焊接连接;上层钢筋的分布筋位于主筋下侧。绑扎钢筋时,需在新桩位置处竖直预埋直径20 cm的薄壁铁管作为后期封桩的混凝土浇筑孔。并根据大体积混凝土施工要求,新建承台布设3道冷凝管。承台模板采用18 mm厚木胶板+60 mm $\times$ 80 mm矩形木楞,使用A48 $\times$ 3.5 mm双钢管作为主楞,通过对拉螺栓固定,模板与钢板桩之间采用间距900 mm $\times$ 900 mm钢管对顶,作为外支撑。安装模板过程中,随时用吊锤检测模板垂直度。

新建承台采用C30超流态混凝土泵送浇筑,插入式振捣器振捣,分层浇筑。混凝土浇筑完成待表面初凝后即开始通水冷却,保证混凝土内外温差不大于25℃,避免出现温度裂缝。混凝土初凝后,使用土工布覆盖洒水养护,保持混凝土表面处于湿润状态,养护时间不少于14 d。

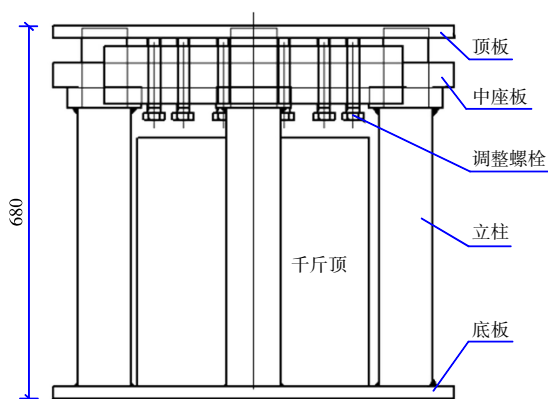
### 2.6 受力转换施工

当新建承台强度达到设计强度后,即可进行受力转换施工。受力转换时,在新桩桩头与新建承台之间安装成品支顶元件,千斤顶放于支顶元

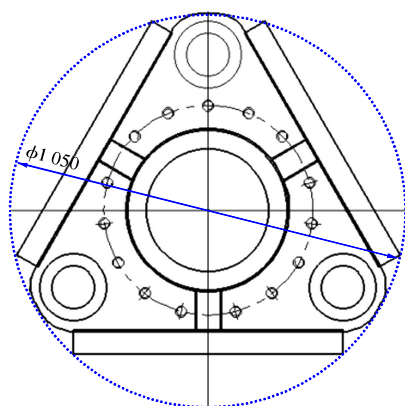
件内侧,千斤顶逐级加载,使上部结构的荷载转移到托换承台及新桩上,同时使新桩的大部分位移通过千斤顶顶升的预压来抵消,从而通过主动加载实现新桩替代原桩受力。

#### 1) 千斤顶参数及分配

基于力学计算,选用行程 200 mm 的 300 t 千斤顶,每根桩顶布置 3 组千斤顶及支顶元件。顶升过程中,通过液压同步控制系统对各组千斤顶施压,确保顶力均匀分配与顶升高度同步,从而规避新建承台倾斜风险。



(a) 支顶元件示意图



(b) 调节支座剖视图(单一元件)

图 2 成品支顶元件剖面图

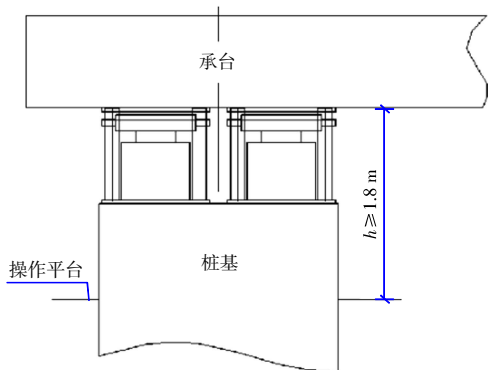


图 3 千斤顶安装示意图

#### 4) 预顶施工

根据设计要求,受力转换前对托换桥梁限载限行施工,禁止货车通行,车辆沿中间车道通行,避免偏载。在明显位置设置限载、限速标志。

预顶前,对临时支顶上侧千斤顶加载,使其处于工作状态,在顶升全过程中,该处千斤顶不施加主动荷载。临时支顶调节后,开始操作新建承台与新桩之间的千斤顶进行受力转换。首先将荷载传感器布置于每台千斤顶上侧,将设计最大

#### 2) 传感器布置

压力传感器布置在千斤顶与支顶元件之间;位移传感器布置在千斤顶侧边以及既有承台上侧。

#### 3) 千斤顶及成品元件安装

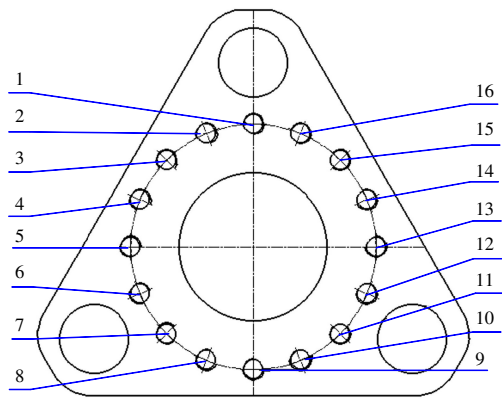
人工掏挖土体至新桩桩头完全暴露,桩头清理干净后,在每根新桩桩头处布置安装成品支顶元件,支顶元件如图 2 所示,同时安装 3 个带自锁装置的 300 t 千斤顶,千斤顶安装如图 3 所示。千斤顶施加完荷载后拧紧中间圆形法兰盘外圈的高强螺栓,使千斤顶上的力完全转移至支顶元件上。

顶升力不等分成 12 级逐步施加顶升力,前 80% 的顶力按 8 级等分进行加载,每级施加时间 20 min,第 8 级持续 120 min;后 20% 的顶力按 4 级等分进行加载,最后一级加载后持续 12 h 以上,加载至设计值后,受力转换完成。

加载时,由计算机控制每组千斤顶同步顶升,根据荷载传感器的读数判断每级施加的顶力是否满足设计要求,不符合要求时及时进行调整。加载过程中时刻监测既有承台纵向位移情况,当被托换桩上浮 1 mm 时,表明此时受力转换已经成功,无需加载至设计值。观测新桩沉降速度小于 0.1 mm/h 后,顶紧支顶元件,拆除承台下侧千斤顶。同时,同步调节临时支顶上侧千斤顶高度,保证桥面标高不变,最后将千斤顶锁死即可。

加载完成后,支顶元件螺栓循环交替旋紧。2 个人沿直径方向同时拧紧螺栓,并尽量保持同步,螺栓的拧紧顺序为:1 与 9→5 与 13→3 与 11→7 与 15→2 与 10→8 与 16→4 与 12→6 与 14,如图 4 所示。分 5 次拧紧螺栓,且扭矩不断增加。第 1

次用手直接拧，以无间隙为准，保持两板平行；第2次用测力扳手调节扭矩达 $70\text{ N}\cdot\text{m}$ 开始拧螺栓，保持两板平行；第3次、第4次重复第2次操作，扭矩力值分别为 $130\text{ N}\cdot\text{m}$ 和 $190\text{ N}\cdot\text{m}$ ；第5次拧紧至千斤顶不受力，螺栓旋紧的最终扭矩为 $200\text{ N}\cdot\text{m}$ 。受力转换完成。



注：图中数字为螺栓编号。  
图4 支顶元件分级加载锁定示意图

2.7 封桩

当千斤顶提供的荷载完全转移至成品支顶元件上时，将千斤顶卸载并取出。将新建承台预留钢筋与桩顶钢筋进行焊接处理；使用3 mm厚钢板卷成圆弧形作为封桩的模板，钢板搭接处焊接处理，及时在新桩中心位置预留直径20 cm的混

凝土浇筑孔进行封桩，封桩采用C30超流态微膨胀混凝土。

2.8 旧桩截断

待封桩混凝土强度达到设计强度后，将土体掏挖至旧桩位置，用绳锯截断并移除旧桩。最后用C15混凝土回填基坑内部，待回填至地面标高处，立即拔出钢板桩，完成桩基托换施工。

3 结语

本文系统地梳理了寒冷地区富水砂层地质条件下桩基托换的施工技术体系，通过哈尔滨地铁3号线工程实践，验证了主动托换技术在沉降控制与交通保畅中的有效性。研究表明，跳孔施工、液压同步顶升及信息化监测是保障托换安全的核心技术，其成功应用为类似工程提供了重要参考。未来研究可结合数值模拟与现场试验，优化托换荷载分配模型。此外，随着城市地下空间开发密度增大，如何实现托换施工的智能化管理与标准化，将是技术发展的重点方向。

参考文献：

[1] 朱琳. 地铁盾构隧道区间桥梁桩基托换设计[J]. 市政技术, 2015 (1): 79-82.  
[2] 刘喆. 地铁盾构隧道穿越桥梁的桩基托换研究[J]. 科学技术创新, 2017(30): 142-143.  
[3] 王文通, 张超, 陈寿根. 深圳地铁7号线彩虹桥桩基托换施工技术[J]. 四川建筑, 2017(10): 99-101, 105.