

既有匝道桥梁桩基托换实施方案研究

黄华琪

[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:为解决某市快速路高架匝道桥下部隧道施工中桩基托换及对上部结构扰动的问题,提出一套主动体系转换的桩基托换施工方案:采用现浇预应力混凝土抱柱托换梁,并布置液压千斤顶实施两次主动顶升转换,施工过程划分为施工准备、托换梁浇筑、首次体系转换、二次体系转换与收尾五个阶段;对托换梁、系梁及桥墩-托换梁结合面开展了承载性能与变形校核,并结合有限元模拟对施工期与临时运营期内的应力、挠度及沉降响应进行了验证。项目实施完成后,全过程沉降与变形可控,施工顺序与技术措施能够有效降低对上部结构的扰动,为类似复杂条件下的桩基加固与下部空间开发提供可借鉴的实践经验。

关键词: 桩基托换;主动托换技术;承载性能校核;有限元模拟;同步顶升

中图分类号: U443.5;TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)06-0400-05

Research on Implementation Scheme for Underpinning Existing Ramp Bridge Pile Foundations

HUANG Huaqi

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

Abstract: An active system-transfer scheme for pile foundation underpinning is proposed to address the challenges of pile foundation underpinning and disturbance to the superstructure during tunnel construction beneath an existing elevated ramp bridge of an urban expressway. The prestressed concrete pouring is adopted to support the columns and replace the beams, and the hydraulic jack is arranged to carry out two active lifting transitions. The construction process is divided into five phases of construction preparation, underpinned beam pouring, first system transition, second system transition and completion. Checks of bearing capacity and deformation are conducted for the underpinned beams, tie beams, and pier-underpinned beam interfaces. Stress, deflection and settlement responses during construction and temporary operation periods are verified with finite element simulation. After the project implementation is completed, the entire process of settlement and deformation can be controlled. The construction sequence and technical measures can effectively reduce the disturbance to the superstructures, offering the practical experience for pile foundation reinforcement and subsurface space development under similar complex conditions.

Keywords: pile foundation underpinning; active underpinning technique; check of bearing capacity; finite element simulation; synchronous jacking

0 引言

桩基托换是一种通过在原有基础下增设或更换深层承载结构,以实现原基础荷载重新分配并提高整体承载力的地基加固技术。随着城市化进程加快和既有建(构)筑物荷载需求不断增加,原有浅基础或老旧桩基往往难以满足新荷载或使用功能的要求,导致沉降超限、开裂甚至出现安全隐患。桩基托换技术通过钻孔或冲孔置入新承载桩,并将原基础

上的荷载逐步转移到新桩上,达到加固、改造或整治地基的目的。相比整体拆除重建,桩基托换施工可在原结构持续使用或局部停用的条件下分步转移荷载,工期可大幅缩短且成本显著降低,并且可实现分步施工与监测^[1],有效控制沉降与变形,提升地基承载力、延长结构使用寿命。目前,桩基托换施工广泛应用于既有建筑加固、扩建改造的工程实践中^[2]。

桩基托换的施工既要保证施工方案的可行性,又要将对既有结构的扰动降至最低^[3-5]。其核心在于通过新旧承载体系之间的荷载转移,严格控制托换结构和新结构在转移过程中的变形,以确保变形量始终保持在上部结构允许的范围内^[6-8]。

收稿日期: 2025-12-16

作者简介: 黄华琪(1986—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

某市桥梁下部隧道施工,涉及将既有高架匝道桥梁桩基托换至新建隧道结构。实施方案需解决隧道沿线贯穿既有桥梁桩基础的矛盾,其关键在于最大程度减小对桥梁上部结构及路段交通的扰动,从而确保隧道顺利通行及上部桥梁结构的安全。

1 工程案例

1.1 桩基托换技术

一般而言,按照荷载转移方式不同,桩基托换技术可分为主动托换和被动托换。主动托换技术通过在新旧承载桩之间安装液压千斤顶,预先施加或调节荷载,以消除部分变形并将剩余变形控制在极小范围内,因而常用于大吨位荷载或对变形敏感的结构加固^[9];被动托换技术则不施加额外顶升力,其荷载转移完全依赖于原结构卸载和土体与结构的相互作用,变形控制较弱,因此多应用于荷载较小或变形允许度较高的工程场景。

由于基础的不均匀沉降对结构受力影响较大,因此在桩基托换施工中选用主动托换技术,通过布置液压千斤顶消除梁体变形和桩基沉降带来的影响^[10-11],保证托换过程中的结构安全与功能连续性。

1.2 桩基托换设计施工方案

整体设计施工方案见图1。

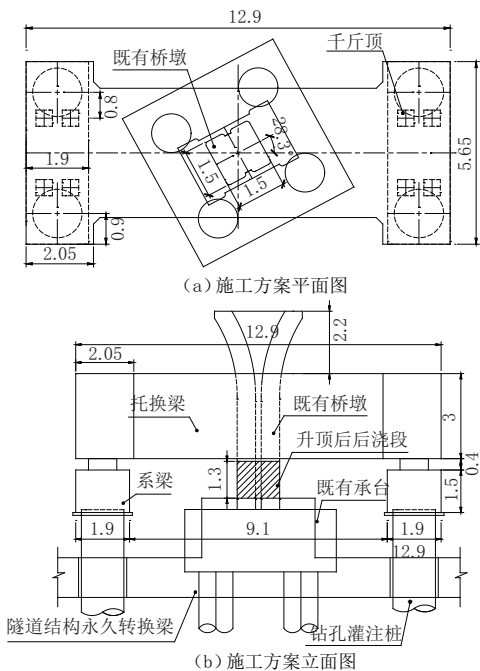


图1 设计施工方案图(单位:m)

托换梁为预应力混凝土矩形梁,主梁总长12.9 m,截面宽4 m、高3 m,采用C50混凝土浇筑,预应力筋采用高强度低松弛钢绞线,标称抗拉强度1 860 MPa,

单根公称截面面积140 mm²。系梁长度为5.65 m,截面宽1.9 m、高1.5 m,采用C40混凝土,底部配置15根直径28 mm的钢筋,箍筋为四肢箍,箍筋直径16 mm,间距100 mm。桩基由4根直径1.2 m、长62 m的钻孔灌注桩组成,采用C30水下混凝土。普通受力钢筋选用HRB400。永久转换梁采用上翻梁截面形式,截面宽4 m、高3.5 m,与隧道顶板整体浇筑,其底部预留连接段并植入既有桥墩底部主筋和箍筋。在完成顶升调平并确认后,通过底部浇筑低收缩混凝土,实现在既有桥墩与永久转换梁之间的刚性结合,确保上部荷载能够可靠传递至隧道结构,见图2。

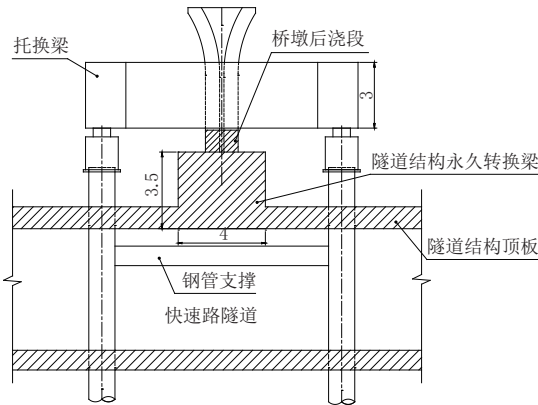


图2 永久转换梁立面示意图(单位:m)

本工程桩基托换施工涉及既有桥墩荷载传递、基坑开挖支护、隧道结构和永久转换梁协同工作等复杂边界条件。方案确定需综合考虑上部结构受力状态、施工安全与稳定性,设计施工流程可分为五个阶段,见图3。

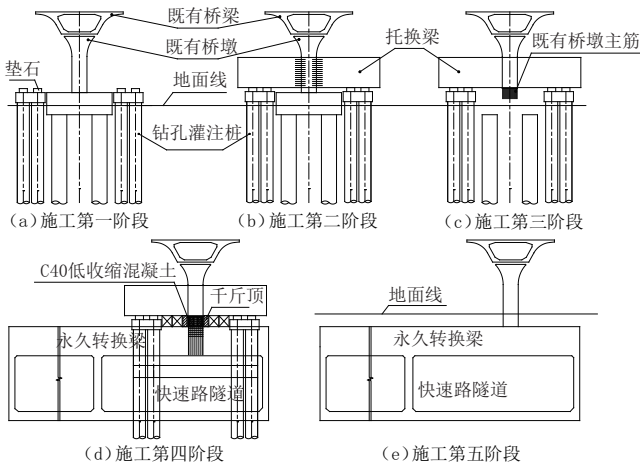


图3 施工流程阶段图

第一阶段着手施工准备工作,桩基托换前完成墩顶标高测量以确定顶升基准,并对桥墩周边进行开挖,施工钻孔灌注桩后浇筑桩顶系梁与垫石,为后续托换梁提供临时支撑;第二阶段浇筑托换梁,对既有桥墩抱箍范围内凿毛、植筋后,浇筑托换梁混凝土

土,当混凝土强度达到要求后,方可张拉第一批预应力钢束,以构建初步承载体系;第三阶段首次体系转换,沿承台顶面整体切割既有桥墩,布置并调试液压千斤顶以精准控制托换梁底反力与墩顶标高,在托换梁张拉第二批预应力束后,分步顶升托换梁至基准标高,采用钢板与楔石锁定结合面,并凿除承台及设计范围内桥墩混凝土,完成首次体系转换;第四阶段二次体系转换,基坑开挖,完成隧道及永久转换梁施工并凿毛连接面,在托换梁张拉第三批预应力束后,布置千斤顶分级同步顶升桥墩并锁定,静压待混凝土性能、沉降要求达标后,焊接预埋钢筋、绑扎箍筋并浇筑连接段,完成第二次体系转换;第五阶段完成施工,回卸千斤顶,拆除托换梁、系梁及临时支撑。

1.3 施工关键要求

施工过程中各关键环节均设定了严格的技术控制指标,以确保结构安全与变形可控。托换梁浇筑后,混凝土强度须达到设计值的95%,且养护时间不得少于10 d,方可开展第一批预应力钢束张拉。永久转换梁连接段的混凝土则要求强度与弹性模量均达到设计值的100%,且养护期不少于14 d,才能逐步回卸千斤顶完成体系切换。预应力张拉及加载过程中,每级持荷时间不低于30 min,总反力控制在11 000 kN,并需对钢板与楔石锁定情况进行复核。

墩顶标高控制决定荷载是否能够平稳转移。首次主动顶升完成后,桥墩顶高应超出基准标高3 mm以上;全过程施工及临时运营期间,须每日对墩顶标高进行监测,若其变形速率超过1 mm/d或累计沉降值超出5 mm,必须立即采取加固、回灌浆或调整预应力、千斤顶顶升等补偿措施。持续静压观测应不少于10 d,且最后3 d累计沉降不能超过1 mm,否则不能进行连接段钢筋焊接与混凝土浇筑。

隧道结构投入运营前,应持续监测桩基托换桥墩的变形情况,若累计沉降超过10 mm,应在墩顶对上部结构实施顶升,并通过调整垫石厚度来消除变形差异。

2 结构承载性能与变形计算

2.1 结构变形控制

为实现施工全过程中有效控制结构变形^[12],需对托换梁、临时桩基、永久转换梁的变形和基底的沉降四个部分提出控制要求。

托换梁的挠度控制基于理论计算,确保其在施工及运营荷载作用下保持极小变形。临时桩基置入

粉质黏土持力层后,采用桩底后注浆和主动顶升相结合的方式,补偿桩基沉降和桩体弹性压缩。永久转换梁与隧道顶板整体浇筑后,在常规使用荷载作用下的挠度需经严格验算,以保证结构整体刚度和协同性能。地基沉降通过布置桩基础和覆土回填进行约束,保证累计沉降处于允许范围。

2.2 施工及临时运营阶段结构受力与变形校核

在桩基托换施工阶段,托换梁梁体将经历从预应力张拉到顶升转换等多种非常规工况。这些环节往往导致梁体产生非常规荷载状态和变形,若不加以模拟与校核,容易出现沉降超限或局部应力集中,引发不可逆的结构损伤。因此,必须对施工过程中的梁体受力与变形进行动态模拟,及时发现潜在风险并采取支撑或调整预应力等措施加以消除,确保施工的安全性及可靠性。而到了临时运营阶段,又需对托换梁在常规荷载作用下的承载性能与应力-变形特征展开系统验算。通过极限状态校核正截面抗弯承载力与斜截面抗剪承载力^[13],确保梁体在最不利荷载组合下不发生脆性破坏;校核正、斜截面抗裂性能,控制裂缝宽度与分布,防止出现裂缝扩展或连接面失效,保证转换梁的整体性。具体而言,托换梁承载性能的计算内容包括:

(1)施工过程与临时运营阶段的梁体受力与变形评估;(2)正截面极限抗弯承载能力与斜截面极限抗剪承载能力;(3)临时运营阶段正截面与斜截面抗裂能力;(4)持久工况下混凝土压应力与主压应力;(5)桥墩-托换梁结合面抗剪能力。

系梁验算则集中于抗弯和抗剪承载能力的分析。托换梁应被视为A类预应力混凝土构件,对其承载性能的验算均依照《公路钢筋混凝土与预应力混凝土桥涵设计规范》^[14]的规定校核,荷载组合分为标准组合、频遇组合和准永久组合。

2.3 有限元模型

构的有限元分析采用MIDAS Civil软件进行。桥墩、托换梁、系梁及桩基均以基于Timoshenko梁理论的梁单元建模。该梁单元能够考虑剪切变形效应,而托换梁的长高比为4.17、系梁的长高比为3.00,属于典型短梁,其剪切变形影响显著,故Timoshenko梁单元对托换梁和系梁的模拟尤为适用。结构计算模型见图4。

为准确计算桩基托换过程中的变形情况,变形计算模型临时桩基桩长 l_{temp} 为:

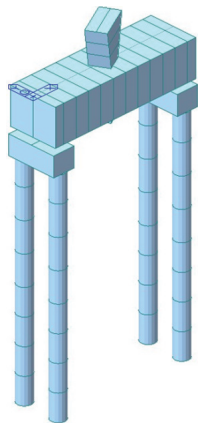


图4 结构有限元模型

$$l_{temp}=h_0+\frac{l-h_0}{2}$$

式中： h_0 为桩基自由段长度； l 为总桩长，桩底固结模拟。对于运营阶段的模拟，考虑摩阻力作用后，桩身内力可采用基于m法的反算模型计算，并将入土部分桩长按照桩径的三倍进行等效处理。

3 计算结果分析

3.1 施工过程中托换梁受力评估

在施工过程中,包括预应力张拉、托换梁顶升等关键工序所引发的托换梁受力状态的变化,均需开展系统性的验算,以确保整体结构的安全性和稳定性。在计算过程中,拉应力为正,压应力为负,结果见表1。

表1 施工阶段托换梁受力与变形计算

施工阶段	考察指标	计算结果		规范容许值
		既有桥墩处	支点处	
张拉预应力后	挠度	0.61 mm	1.33 mm	不大于20.83 mm
	顶缘应力	1.79 MPa	-2.03 MPa	不大于1.86 MPa
	底缘应力	-5.11 MPa	-1.40 MPa	不大于1.86 MPa
体系转换后	挠度	5.65 mm	5.11 mm	不大于20.83 mm
	顶缘应力	-1.46 MPa	0 MPa	不大于1.86 MPa
	底缘应力	1.46 MPa	0 MPa	不大于1.86 MPa

由表1可知,在张拉预应力后,托换梁顶缘混凝土最大应力为1.79 MPa,为规范容许值的96.24%,满足设计要求;完成体系转换后,托换梁底缘混凝土最大应力为1.46 MPa,为容许值的78.49%,同样符合规定。其他考察指标均留有充足安全裕度,可有效保障施工过程中结构的稳定和安全。

根据计算结果,桩基托换施工过程有序进行,见图5。

3.2 临时运营阶段构件承载能力评估

在临时运营阶段,也应对构件的承载性能与应

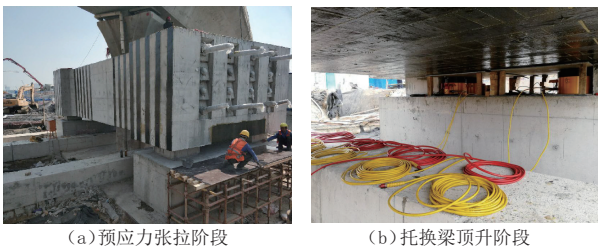


图5 桩基托换施工过程

力-变形特征进行系统校核,以验证其在长期服役工况下的结构安全性与耐久性满足规范要求。对于托换梁-桥墩结合面的抗剪能力校核,参考《公路钢筋混凝土与预应力混凝土桥涵设计规范》^[14]以及《建(构)筑物托换技术规程》^[15]的要求。托换梁承载性能计算中,拉应力为正,压应力为负,结果见表2。

表2 临时运营阶段托换梁承载性能计算

托换梁承载性能	荷载组合	计算结果	规范容许值
正截面抗弯极限承载力	承载能力极限状态	53 137 kN·m	不大于73 754 kN·m
斜截面抗剪极限承载力	抗剪能力极限状态	10 815 kN	不大于14 924 kN
正截面抗裂能力	频遇组合	-1.05 MPa	不大于1.86 MPa
	准永久组合	-1.47 MPa	不大于0 MPa
斜截面抗裂能力	频遇组合	0.34 MPa	不大于1.33 MPa
正截面抗压能力	标准组合	-5.12 MPa	不小于-16.20 MPa
主压应力截面抗压能力	标准组合	-5.28 MPa	不小于-19.44 MPa
结合面抗剪能力 ^[14]	抗剪能力极限状态	1.83 MPa	不大于6.18 MPa
结合面抗剪能力 ^[15]	抗剪能力极限状态	32 940 kN	不大于42 313.85 kN

由表2可知,托换梁正截面抗弯极限承载力为53 136.75 kN·m,为规范容许值的72.05%,斜截面抗剪极限承载力为10 815.44 kN,为规范容许值的72.47%,两者均满足规范要求。对于结合面的抗剪能力,根据设计规范^[14]和技术规程^[15]的计算结果均满足要求,后者相较于前者更加偏于保守,仅有22.15%安全裕度。其余承载性能的计算结果远未达到规范容许的阈值,留有充足的安全裕度,即临时运营阶段托换梁有充足的承载能力保证构件不会发生破坏,并防止出现裂缝扩展,保障构件的整体性。

在非顶升工况下,托换梁垫石位于桩基正上方,系梁仅承担辅助稳定作用,受力较小。系梁最不利工况为顶升阶段,千斤顶距桩基中心水平偏心0.8 m,此时系梁按梁构件模型进行抗剪和抗弯承载力的计算,结果见表3。

表3 系梁承载性能计算			
系梁承载性能	荷载组合	计算结果	规范容许值
抗弯能力	标准组合	3 800.17 kN·m	不大于4 038.67 kN·m
抗剪能力	标准组合	4 750.12 kN	不大于6 773.82 kN

由表3可知,系梁最大弯矩为3 800.17 kN·m,为规范容许值的94.09%,最大剪力为4 750.12 kN,为规范容许值的70.12%,两者均满足规范要求,不会发生弯曲或剪切破坏,能够可靠地承担各阶段的荷载作用。

4 结 语

在某市快速路工程中,为完成预应力混凝土连续梁高架桥下部隧道施工,采用了一套包含施工方案与承载性能校核的桩基托换技术。该技术通过两次主动体系转换,将既有桥墩荷载从原承台及钻孔桩基础,平稳转移至隧道结构顶部的永久转换梁,确保了荷载传递路径清晰且连续。施工中,借助千斤顶同步顶升、自平衡主动托换及全过程变形监控等精细化作业,在最终体系转换阶段,预先施加上部荷载使隧道梁变形后,再浇筑墩底连接段,从而有效消除了体系转换后墩底的弹性变形,提升了结构整体性和可靠性。承载性能的校核严格依据相关规范,对托换梁及系梁在施工与临时运营阶段的承载力、抗裂及应力状态进行了全面验证。

该方案施工顺序合理、工艺安全,变形控制指标明晰且可操作性强。桩基托换完成后,结构变形与受力状态均处于可控范围内,对上部结构影响微乎其微。需注意的是,隧道正式投入运营前后,应持续开展桥墩变形监测,以保障结构长期安全。此项工

程实践为类似复杂条件下的桩基加固与下部空间开发,提供了可借鉴的技术路径与实践经验,对推动在用桥梁与地下工程协同施工具有重要参考价值。

参考文献:

[1] 祝春生.明挖隧道下穿既有桥梁桩基托换施工技术[J].铁道建筑技术,2013(7):78-81;86.

[2] 刘宗族.有限空间桩基托换施工技术分析[J].工程与建设,2024,38(5):1082-1084.

[3] 顾晓毅.城市桥梁桩基托换设计关键技术[J].城市道桥与防洪,2020(2):81-84.

[4] 吕文达.饱和黄土区桩基托换模型试验和数值模拟[J].铁道建筑,2022,62(10):94-97.

[5] 陈子全,汪波,吴迪,等.盾构隧道穿越桥梁桩基群的桩基托换技术研究[J].现代隧道技术,2019,56(5):133-141.

[6] 刘春莹.盾构隧道桩基托换施工技术在地铁施工的应用[J].工程机械与维修,2022(2):98-99.

[7] 牛斌.超静定桥梁桩基主动托换中的顶升力控制方法[J].城市轨道交通研究,2021,24(8):218-222.

[8] 王晓鹏.地铁隧道穿越黄土地区桥梁桩基托换技术试验研究[J].铁道建筑,2021,61(1):27-30.

[9] 吴文亮,王建军,孙凡皓.二次托换技术在福州地铁紫五区间桩基托换中的应用[J].隧道建设(中英文),2018,38(7):1220-1227.

[10] 宗言海.复杂条件城市立交桥桩基托换施工技术[J].四川建筑,2010,30(2):218-219;222.

[11] 刘恒,徐世达,周凯.地铁下穿创业立交桥桩基托换施工技术研究[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2014,27(2):23-26;32.

[12] 李晓晨.桩基托换有限元仿真及应用实例分析[D].西安:长安大学,2019.

[13] 王献伟.基于桁架—拱模型的桩基托换抗剪理论及试验研究[D].西安:西安建筑科技大学,2017.

[14] JTG 3362—2018 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].

[15] CECS 295. 2011 建(构)筑物托换技术规程[S].

(上接第349页)

中的应用比较[J].水工程建设与管理,2025(7):141-143.

[6] 罗贤.钢坝闸在景观河道中的应用[J].中国水运,2022(2):95-97.

[7] 聂晓东,尉霄腾.海河流域大跨度钢坝闸设计研究[J].水利水电工程设计,2024,43:6-9.

[8] 王湛,刘旭冉,闫永生,等.河道新型拦水闸技术特点及应用进展[J].水利与建筑工程学报,2021(6):24-30.

[9] 王登赞,孟凡淇.基于MIDAS_GTS_NX的钢坝闸埋件与土建结构连接应力分析[J].水利技术监督,2021(9):46-48.

[10] 商博.某蓄水建筑物钢坝闸设计要点[J].河南水利与南水北调,2022(5):50-68.

[11] 岳杰.液压控制钢坝闸技术在大房申工程的应用[J].现代工程技术,2025,4(6):50-68.

[12] 黄宇容.钢坝闸在博罗县罗浮山旅游文化广场引水工程中的应用[J].广东水利水电,2018(5):6-8.

[13] 刘俊刚.滨州市西沙河钢坝闸工程设计研究[J].科研设计,2021(4):31-35.

[14] 马以宏.钢坝闸门止水钢板高大埋件优化安装技术[J].江苏建筑,2018(2):69-72.

[15] 刘兆楠.迷宫堰和钢坝闸组合水力特性研究[J].甘肃水利水电技术,52(4):26-28.

[16] 鲍海霞.拦河闸坝在北方河流城镇景观设计中的运用[J].水利规划与技术,2016(3):74-76.

[17] 游孟陶.大型钢坝闸在宁波象山大目湾闸桥工程中的应用[J].桥梁结构,2017(7):161-163.

[18] 徐相国.象山大目湾新城闸桥设计[J].桥梁结构,2012(11):54-57.

[19] 张金.液压升降坝在海河流域河道治理工程中的应用[J].中国水利学会,2014:924-926.