

QIAOLIANG DUNZHU ZHONG TUOHUAN GUANJIAN JISHU JIQI YINGYONG
LIAOCHENG DONGCHENGZAI ZUOTONG XIA



列车动荷载作用下

桥梁墩柱主动托换关键技术及其应用

卜建清 著



重庆大学出版社

<http://www.cqup.com.cn/>

014057819

U448.13
10

列车动荷载作用下桥梁墩柱 主动托换关键技术及其应用

卜建清 著



北航

C1742475

U448.13/10

重庆大学出版社

内容提要

本书以天津津滨轻轨桥梁墩柱托换工程为研究对象,在结构时变理论的指导下,对风险分析与预防措施、结构设计、施工工艺、建模计算、试验研究、监测与控制、托换完成之后轻轨桥梁评估等关键技术进行了较为系统的介绍。

天津津滨轻轨桥梁墩柱托换工程的成功实施,对采用复杂结构实现列车动荷载下桥梁结构基础托换的理论研究和实践应用具有一定的推动作用。

本书适合土木工程、工程力学等专业相关的科研人员、工程技术人员和高等院校师生参考借鉴。

图书在版编目(CIP)数据

列车动荷载作用下桥梁墩柱主动托换关键技术及其应用/卜建清著. —重庆:重庆大学出版社,2014.8

ISBN 978-7-5624-8174-4

I. ①列… II. ①卜… III. ①轻轨铁路—铁路桥—桥墩—托换施工 IV. ①U448.133.22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 094511 号

列车动荷载作用下桥梁墩柱主动托换关键技术及其应用

卜建清 著

策划编辑:林青山

责任编辑:王 伟 版式设计:王 伟

责任校对:邬小梅 责任印制:赵 晟

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:邓晓益

社址:重庆市沙坪坝区大学城西路 21 号

邮编:401331

电话:(023) 88617190 88617185(中小学)

传真:(023) 88617186 88617166

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn(营销中心)

全国新华书店经销

POD:重庆新生代彩印技术有限公司印刷

*

开本:787×1092 印张:11 字数:215千

2014 年 8 月第 1 版 2014 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5624-8174-4 定价:35.00 元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

前言

随着城市升级改造和城市化建设的推进,基础设施建设不断完善,新修建的地下结构穿越既有桥梁等结构基础所在空间的情况越来越多,鉴于地下结构物本身的重要性和既有结构使用功能的不可改变性,托换便成了最好的选择方案。桥下净空不足或桥梁标高需要作较大幅度的调整时,托换也是较好的选择。在诸多托换工程中,在复杂的地质条件和动荷载作用下的托换工程难度最大,风险也最高。

天津津滨轻轨桥梁墩柱托换工程是典型的动荷载托换,桥梁墩柱托换施工及基坑开挖与地道箱体施工对轻轨桥梁和线路以及列车运营具有一定的影响,同时上部运营轻轨列车的振动对托换施工也有影响,而且两方面的影响是相互耦合的,故在施工过程中需要兼顾轻轨桥梁与运营安全和托换工程施工质量及安全两个方面。因此,对列车动荷载作用下桥梁墩柱主动托换的关键技术进行研究,不仅具有现实意义,也具有一定的理论价值。

作者有幸参与了天津津滨轻轨桥梁墩柱托换工程的设计方案比较、施工方案论证、监测方案设计、监控标准制定、施工过程监控等工作,并在此基础上完成了博士学位论文。本书基于作者的博士学位论文和已发表的学术论文,主要介绍了托换工程风险分析与预防措施、托换结构的“时变性”与数值模拟、托换工程试验研究、托换施工过程的监测与控制以及轻轨桥梁托换后评估等内容。内容系统全面,数据翔实,而且天津津滨轻轨桥梁墩柱托换工程的托换结构体系复杂,施工环境苛刻,施工难度大、风险高,具有典型性和示范性,本书可为复杂结构托换工程和列车动荷载作用下的托换工程的设计、施工以及监控提供借鉴和参考。本书部分内容是住房和城乡建设部课题结题报告的主体,鉴定专家一致认为课题成果达到“国际先进水平”,2012年该课题研究成果被评为华夏建设科学技术二等奖和中国市政工程科学技术二等奖。

本书的选题和结构布局得到了孙宁研究员的指导和帮助。在此,谨向尊敬的孙宁研究员表示诚挚的感谢和崇高的敬意。同时,感谢中国铁道科学研究院柯在田研

究员、郭奕清高工、杨益谦研究员、尹京工程师、刘力工程师、卢耀荣研究员等人给予的帮助;在课题进行期间还得到了天津市市政工程设计研究院滨海分院黄思勇教授级高工、罗昊冲高工,石家庄铁道大学陈恩利教授、李向国教授和侯永会副教授,中铁第十八局集团公司第五工程有限公司的刘晏斌高工、王昌高工、张志安高工、蔡顺江高工、赵虎高工,新亚太工程监理公司王蓁高工,天津滨海快速交通发展有限公司运营总部安技部董月甫部长、维修部高峰高工等给予的大力支持,他们为本书的撰写提供了大量的基础数据和资料,在此向他们表示最衷心的感谢。另外,本书的出版得到了河北省高校百名优秀创新人才支持计划(Ⅱ)和河北省自然科学基金项目(E2013210104)的资助,在此对河北省教育厅和河北省自然科学基金委表示诚挚的谢意。

书中可能存在错误和不足之处,敬请读者批评指正。

卜建清
2014年3月

目 录

第1章 绪 论	1
1.1 托换技术概述	1
1.2 桩基托换技术进展	7
1.3 研究背景及主要内容	15
第2章 津滨轻轨桥墩托换工程设计与施工概况	18
2.1 设计背景与设计选择	18
2.2 设计方案	23
2.3 托换施工工艺与质量保证措施	28
第3章 托换工程风险分析与预防措施	42
3.1 风险分析的意义	42
3.2 桥墩托换工程风险源辨识	43
3.3 风险预防措施	48
3.4 风险应急方案	51
第4章 托换结构的“时变性”与数值模拟	54
4.1 托换结构的时变过程与特征	54
4.2 “时变”因素分析	58
4.3 墩-梁固结点受力与各施工阶段结构应力与变形分析	67
4.4 应对托换结构“时变性”采取的措施	73
第5章 托换工程试验研究	79
5.1 托换桩承载力试验	79
5.2 桩-梁结点承载力试验	81
5.3 轻轨列车限速试验	85
5.4 列车重复振动对混凝土强度和植筋拉拔力影响试验	96
5.5 各个施工阶段列车提速试验	98
第6章 托换施工过程的监测与控制	102
6.1 实施施工监控的必要性	102

6.2	施工监控的目的	104
6.3	施工监控的内容及测点布置	105
6.4	施工监控标准的制定	113
6.5	监测数据的采集与分析处理	120
6.6	施工监控的实施	122
6.7	施工监测的结果与分析	131
第7章	轻轨桥梁托换后评估	147
7.1	轻轨桥梁的静力学性能	147
7.2	轻轨桥梁的动力学性能	149
7.3	使用性能	157
7.4	后期运营期间的维护与管理	163
参考文献		164

第 1 章

绪 论

1.1 托换技术概述

托换技术是一种施工难度较大、费用较高、工期较长和责任性较强的特殊施工方法,是解决城市建设施工难题的一种重要手段,是一项全新的高度综合性的技术,涉及水文地质、工程地质、土力学、结构力学等多门学科,对勘察、结构设计、施工组织、监测与控制以及科学研究等都提出了很实际的要求。

托换技术的起源可追溯到古代,但是托换技术直到 20 世纪 30 年代兴建美国纽约市地下铁道时才得到迅速发展。因为在早期地下铁道的建设过程中,需要托换加固工程的数量庞大,类型多种多样,且规模也很大。近年来,世界上大型和深埋的结构物和地下铁道的大量施工,尤其是古建筑的基础加固数量巨大,对现有建筑物还需要进行改建、加层和加大使用荷载时,都需要采用托换技术^[1]。当前世界各国的托换工程数量增多,因而托换技术也有了飞跃的发展。尤其是在第二次世界大战后,在德国许多城市的扩建和改造工程中,特别是在修建地下铁道的过程中,大量采用了综合托换技术,积累了丰富的经验,取得了显著的成绩,并已将该项托换技术编入德国工业标准(DIN)^[2]。20 世纪 70 年代以来,美国、英国、法国、德国、日本、世界知识产权组织等共批准近百项有关托换技术的专利。

1.1.1 托换工程的特点

托换工程是指采用托换技术解决原有建筑物的地基需要处理和基础需要加固的工程、原有建筑物基础之下需要修建新的地下工程(包括隧道穿越既有建筑物的基础)以及原有建筑物的安全受到邻近新建工程影响等问题的工程总称。

“托换”一词是指有托有换,“托”是方法,“换”是目的,是为了对既有建筑物进行加固、纠偏、加层、扩建、移位等,过去的做法是先让被换的部分退出“工作”,然后再对

“退出工作”的部分进行改造加固。现在的托换工程不全是先托后换,而是一个广泛的概念,并且托换工程正趋向大型化和综合性方向发展^[3]。

托换工程的最显著特点就是个体差异大^[4,5],主要包括既有建筑物结构形式、荷载大小、变形控制要求(对沉降以及沉降差异的灵敏度)、施工空间大小、所处场地情况(地形、地物、地质条件、地下管线、地下水位等)、下穿结构物的要求等方面的不同。这些差异决定了托换工程的复杂性、具体性和非重复性,所以在设计、施工等过程中不可照搬照抄,只能在借鉴类似工程成功经验的基础上,具体问题具体分析。如新的托换结构取代桥梁基础(或其他建筑物)的一根或多根桩基础^[6,7],取代全部的桥梁基础(含桩基+承台)和部分桥墩^[8],取代全部的桥梁基础(含桩基+承台)和全部桥墩^[7,9],新的结构物代替既有建筑物的基础^[10]等。

1.1.2 托换结构的主要形式

1) 托换基础的主要形式

(1) 预试托换桩

预试托换桩(Pretest Pile)是由美国人 Iazarus White E 和 Edmund A Pfentis 在纽约市修建威廉街地下铁道时所发明的,并获得专利^[3]。由于对于新施工的托换桩基采取了预压措施,所以建筑物荷载作用在托换桩桩顶时不会产生新的附加沉降,对于被托换建筑物沉降要求较高时预试桩要比坑式托换、打入桩和灌注桩等方式有其独特的优点。

(2) 灌注桩

用于托换工程的灌注桩,按其成孔方式可分为螺旋钻孔灌注桩、潜水钻孔灌注桩、人工挖孔灌注桩、沉管灌注桩、冲孔灌注桩和扩底灌注桩,其中以螺旋、潜水、挖孔、沉管等灌注桩的采用较为普遍。

螺旋钻孔灌注桩适用于粘性土以及地下水位较高的情况,优点是成桩速度快;潜水钻孔灌注桩适用范围较广,单桩承载力较高,无振动,噪声小。

人工挖孔灌注桩施工用具简单,施工方便,灵活机动,工作面要求小,适合于地下水位以上或透水性弱的地质条件且桩较短的情况。

(3) 树根桩

树根桩是 20 世纪 30 年代初意大利 FONDELLE 公司的 F. LiZZi 首创的。实际上它在地基中设置的直径通常为 10~25 cm 小直径钻孔灌注桩。在托换工程中根据需要,树根桩可以是垂直的或倾斜的,也可以是单根的或成排的。由于它所形成的桩基形状如同“树根”而得名。树根桩布置成三维结构系统的网状体系者,称为网状结构树根桩,日本简称为 RRP 工法^[3]。树根桩托换施工时不改变建筑物原来的平衡,

可适用于砂性土、粘性土和岩石等各种类型的土。由于在地基的原位置上进行加固,完工后的被加固结构不会损伤原有外观,因此,国内不少加固托换工程也采用树根桩。

(4) 地下连续墙

当地铁隧道需要从既有建筑物下方穿过时,要求通过托换把既有建筑物基础向下延伸到很深的深度,同时地铁施工基坑又要求支护,而应用地下连续墙托换就可同时满足这两个要求。它既可以作为延深基础,又可兼作基坑的边墙。双轨地铁隧道穿越德国慕尼黑老议会大厦基础托换采用了地下连续墙加预应力混凝土梁的托换技术^[3]。

(5) 斜向钻孔桩

当地铁施工基坑直接紧靠既有建筑物或地铁隧道有一小部分位于建筑物的下面时,通过斜向钻孔桩组成一个向内倾斜的基坑支护墙,可在不改变现有建筑物的使用条件下实施地铁施工。德国慕尼黑地下铁道4号线的约瑟夫广场车站托换工程就采用了斜向钻孔桩托换技术^[3]。

2) 托换承重体系的主要形式

(1) 承压板

承压板方式是在既有建筑物距离下穿隧道很近的情况下经常采用的施工方法。承压板面积较大,可以补偿影响下穿隧道施工的旧桩基,所以可以在承压板的强度达到龄期后直接将影响施工的旧桩基截断,从而节省工期。但承压板不宜用于重量较大的建筑物。

(2) 预应力混凝土梁

采用双向或单向预应力混凝土梁作为托换承重结构,体系受力明确,施工相对简单,托换梁的截面可以根据托换荷载、托换梁的跨度以及预应力的的大小来协调设计。一般情况下是将托换梁体系与原结构的旧桩基础直接浇筑连接,然后施加预应力,最后采取千斤顶顶升等措施使新的托换桩基承受荷载,进而截断旧桩基础。鉴于其诸多优点,通常把预应力混凝土梁列为托换工程中的首选。

1.1.3 托换方法分类

既有建筑物基础加固托换的方法很多,可以根据托换原理、托换结构形式、托换时间、托换性质和托换荷载的转换方式等进行分类,如表1.1所示。

1.1.4 托换技术的应用条件

采用托换技术可以为城市交通设施的选线设计提供更加广阔的空间和更多的比

选方案;可以为设计人员提供开阔的思路,优化线形设计方案;可以更多地从人文环境和创造景观上给予充分考虑和创新,不但可以保护文物与环境,具有良好的社会效益,还具有重大理论意义和工程价值。在有些情况下还可以减少土地使用,对建设和谐社会和可持续发展都具有重要意义。

表 1.1 托换方法的分类

序号	分类标准	方法名称	特 点	案 例
1	托换原理	补救性托换	既有建筑物的地基不能满足承载力和变形要求,而需进行地基处理或基础加固	英国的 Winchester 大教堂
		预防性托换	既有建筑物基础下需要新修建地下工程,或因附近建造新工程而影响其安全	
		维持性托换	在新建的建筑物基础上预先设计好可设置顶升的措施,以调整后期可能出现的地基差异沉降	
2	托换结构形式	地基改良加固托换	采用灌浆、高压喷射注浆、热加固、碱液加固、硅化加固等方法	
		基础扩大托换	采用混凝土套或钢筋混凝土套将基础扩大。适合于柱基、条基等浅基础	
		坑式托换	直接在被托换建筑物下挖坑后浇筑混凝土墩。适合于地下水位较低情况的条形基础加固托换	
		桩基托换	采用石灰桩、石灰砂桩、压入桩或打入桩(混凝土预制桩、钢桩)、小直径桩(树根桩和微型桩)、锚杆静压桩、灌注桩等进行加固托换。适合于托换荷载较大时,系统受力关系明确,但施工难度最大,技术要求最高	意大利 Venice 的 Burano 钟楼的托换加固采用树根桩,深圳地铁百货广场大厦桩基托换等重要工程均采用钻孔灌注桩
		基础纠偏托换	采用基础加压、基础减压、堆载加压、锚桩加压、掏土、降水掏土、压桩掏土、浸水、顶升、纠偏等方法进行纠偏	

续表

序号	分类标准	方法名称	特 点	案 例
3	托换结构服役时间	临时性托换	为防止建筑物产生沉降或倾斜而采取的一种短时间预防性加固措施	
		永久性托换	将托换结构与原结构物固结在一起,成为结构物基础不可分割的部分	
		临时性托换和永久性托换相结合	先实施临时性托换,后来在临时性托换的基础上进一步实施永久性托换	德国慕尼黑 Karlstor、纽伦堡 Weisser 钟楼等的穿越工程
4	托换性质	加固性托换	对既有建筑物下面的基础进行一般性加固(如注浆、树根桩等)即可解决	意大利 S. Lucia 浅埋地下铁道城市大厦树根桩托换
		纠偏性托换	当既有建筑物偏离垂直位置发生倾斜或出现大的沉降而影响正常使用时所采取的托换措施。包括迫降、顶升和综合纠偏	
		整体迁移(分离)式托换	将既有建筑物与原基础完全断开,其荷载全部转移到新的基础之上	江苏省江都市供电公司原生产调度楼与南京市江南大酒店的整体平移工程
		桩(柱)分离式托换	当新的地下工程需要切穿既有建筑物基础,尤其是切穿既有建筑物的桩基础时(即既有桩基础占据了新设计地下工程的空间),或者由于托换荷载很大而一般加固托换方法满足不了要求时,需要用新的托换结构体系(通常采用桩基+托换横梁或地下连续墙+转换层等)将既有桩基础承担的荷载转移,然后再把被托换的既有桩基础(被托换的桩或柱)与原结构分离	广州地铁桩基托换工程、深圳地铁百货广场大厦桩基托换工程采用桩基+托换横梁体系,而双线地铁隧道穿越德国慕尼黑老议会大厦托换工程采用地下连续墙+预应力钢筋混凝土托换梁

续表

序号	分类标准	方法名称	特 点	案 例
5	托换荷载转换方式	被动托换	在托换结构施工完成之后,直接将原桩基础与原结构分离,将荷载直接传递到新桩。结构的变形往往难以得到有效控制,风险大。其优点是操作简单,工期短,造价相对较低。适用于小吨位和结构对变形不甚严格的情况	广州地铁穿越房屋建筑托换工程、北京音乐堂托换工程、台北地铁光华桥托换工程等
		主动托换	在原桩基础切除之前对新桩进行预压或对新桩和托换结构施加荷载,消除部分新桩和托换结构的变形,使得托换后桩和结构的变形限制在较小的范围,采用大吨位千斤顶对托换荷载分级转移,并且对上部结构物的沉降等可以进行调控。其缺点是操作复杂,持续时间长,造价高。该技术运用于大吨位、结构物对变形要求严格的情况	深圳地铁穿越百货广场大厦桩基托换工程和穿越广深铁路桩基托换工程、日本京都车站新干线桩基托换工程以及德国慕尼黑地铁双线快速地铁下穿依萨尔门建筑托换工程

在以下几种情况下,可以考虑应用托换技术解决工程问题。

①地基沉降、上部结构不稳定等因素导致结构物发生沉降或倾斜而需要加固,如广东省佛山市汾江北路与海八路交汇处的谢叠大桥 9 号桥墩因桩基础不均匀沉降导致帽梁开裂和桥面严重不平顺,采用托换技术对沉降大的桩基进行托换^[11]。南非 Guyana 某医院一座三层楼的加固^[12];莫斯科 300 多年的克里姆林宫游乐宫的基础^[13],其沉降已超过 1 m,裂缝达 40 mm 宽,采用沉入桩加固托换,用千斤顶主动调整基础的高程,最后用混凝土和粘土填充;印度某电厂高 50 m、重 3 000 t 的热回收蒸汽发生器基础发生不均匀沉降^[14],采用高强微型桩加固,加固时采用千斤顶进行高程调整;采用微型桩加固托换大型机械设备的基础^[15]。

②当在既有建筑物附近或下方开凿或挖掘施工新的结构物而对既有建筑物的安全造成威胁时,如日本东京都北区距离瞭望塔 11 m 处新施工一条 7.6 m 排水管道(覆土厚度 16.5 m),为了防止瞭望塔产生不均匀沉降而采用树根桩对其进行预防性托换^[3]。

③为了某种需要而对既有建筑物的基础或基础的主要支撑元件进行置换。

④因为构造原因而需要加深既有建筑物的基础,如在建筑物下面增建地下室等。

⑤为了提高基础承担荷载的能力而需要加宽或加强既有建筑物的基础,如意大

利'Naples 市政府办公楼加层托换^[3];为了提高桥梁的承载力,在公路桥墩承台下 7 m 范围内采用超细水泥灌浆注浆进行加固托换,7 ~ 12 m 范围内进行补强注浆^[16];建在不良地基上建筑物基础的托换加固^[17]。

⑥为了改变既有建筑物的布局而将某既有建筑物整体平移到新的地方去,如宁夏吴忠宾馆和某企业办公大楼的整体平移^[18,19]。

⑦为了在施工过程中保护临近既有建筑物的安全而进行的加固性基础托换^[20]。

⑧当既有建筑物的桩(或柱)基础进入新规划的(一般为下穿情形)结构物所用空间时,需要用新的托换结构取代既有建筑物的个别或部分桩(或柱)基础,从而为新规划设计的下穿结构物腾出足够的施工空间。在国外修建地铁过程中,由于穿越地下空间范围内有既有结构物的桩基,需要实施托换^[21~25];我国由于城市改造、基础设施建设速度的加快,近些年这种情况的托换工程越来越多^[6,8,10,26,27],其中涉及铁路桥梁桩基托换、公路(道路)桥梁基础托换、居民住宅的桩基托换、商场与音乐厅等公用建筑物的桩基托换等。

当前国内外的城市向大型化和现代化方向发展,大量高层建筑的兴建,城市人口高度集中,对交通、通讯、商业及其他人们生活设施的修建,提出了更高的要求,市区空间已越来越狭窄,向地下发展是备受青睐的选择,如建造地下铁道、商场和其他许多地下设施。这些地下建筑往往要穿越部分高层建筑或重要的历史建筑物,这就需要对原有建筑物的基础进行托换加固处理;加之古建筑所需托换的数量繁多,原有建筑物需进行改建、加层或加大使用荷载时,也需要采用托换技术,这也促进托换技术向大型化和综合性方向发展。采用托换技术不仅可以加固沉降的基础,还可以抬高调整沉降的结构物^[28],这就使得托换技术的应用领域越来越宽。

我国的托换工程数量和规模随着基本建设的发展也在不断增长,在托换技术方面,如锚杆加压纠偏、锚杆静压桩、基础减压和加强刚度法、碱液加固、浸水纠偏、掏土纠偏、千斤顶整体顶升等都有很大的创新和提高。我国的托换技术虽然起步较晚,但随着大规模基础设施的升级改造与建设,托换技术正处于蓬勃发展的时期。

1.2 桩基托换技术发展

1.2.1 桩基托换技术的关键及其进展

桩基托换是托换加固技术的一个重要分支,由于采用桩基托换技术系统受力关系明确,故适用于托换荷载较大或者沉降变形与应力要求较高的情形,但施工难度大,技术要求高。近年来在国内外的地下工程建设和地铁建设中多次遇到桩(或柱)分离式桩基托换问题,桩基托换技术涉及土木工程技术的多个方面,具有综合性强、风险性大、安全问题突出等特点。

桩基托换(指桩或柱分离式托换)的核心技术是如何将既有建筑物原桩基(或墩、柱)所承担的荷载安全地转移到由新的托换桩(或地下连续墙)和托换大梁(或预应力板)组成的新的托换结构上,要求在转移过程中及转移完成后既有建筑物的变形与应力等指标在限制允许范围内,即不影响既有建筑物的正常使用、安全性及耐久性。要实现以上目标,需要解决以下几个关键问题。

1) 设计合理的托换结构体系

①设计合理的托换桩基。文献[29]分析了摩擦桩、摩擦端承桩、端承桩和嵌岩桩的单桩竖向刚度以及考虑桩-桩共同作用、桩-土共同作用与土-土共同作用的群桩竖向刚度的计算,为托换体系中桩基础竖向刚度的计算提供了理论参考。

②设计合理的托换大梁。对于预应力托换结构而言,就是用桩基和预应力托换梁替代了原桩基,所以桩基和预应力托换梁体系的综合刚度决定了截桩以后结构的力学行为,特别是对于被动托换而言。为了尽可能减少因托换结构沉降而带来的对既有建筑物的影响,总希望托换结构的刚度越大越好,然而这是不现实的。文献[29]提出了优化设计托换梁刚度的两个原则,一是桩基和预应力托换梁的综合刚度不小于被托换桩的竖向刚度;二是在千斤顶施加荷载时,在最大估计托换荷载作用下能够保证托换梁不开裂或在剪跨比较小时抗剪强度满足要求。

③结合具体工程和条件合理确定托换结构的形式。托换结构通常首选受力明晰的梁式结构,但因托换工程的个体差异性和复杂性,也可根据工程的实际情况和控制条件,选择其余的结构类型。如广州地铁3号线广州东站对既有地铁的4根桩基进行主动托换,采用纵梁加拱式的方式,将托换结构主受力方向设为托换拱,减小了托换结构的体积,同时也减小了施工难度^[27]。

2) 托换节点的连接形式与荷载传递

托换节点指的是新的托换结构与被托换的既有桩(或墩、柱)之间的固结点,一般采用“梁抱柱”的结构形式,托换荷载由该点从既有结构传递给新的托换结构,是托换成败的关键所在。

在深圳地铁一期下穿百货广场的桩基托换工程的科学研究过程中,中国铁道科学研究院^[30,31]进行了1/4、1/2和全模型试验。得到了重要结论:固结点采用企口构造形式可以提高承载力80%以上,植入旧桩(或墩、柱)的钢筋可以提高承载力约50%,施加预应力可以有效地防止梁体裂缝,不会造成柱体棱角处的局部破坏,掌握了托换过程中托换荷载在托换结构中的分配关系及截桩过程中荷载的转换规律,并检验固结点在实际结构剪跨比情况下的抗剪强度和滑移性能、托换大梁的受力性能及构造。为制订主动托换方案(千斤顶加载、卸载及截桩和监测控制)提供了依据。

文献[32]提供了根据钢筋使用极限不超过粘结灰浆和混凝土使用条件极限的原

则,确定了植筋植入深度的计算公式。文献[33]给出了钢筋植入深度应该大于或等于5倍的植入钢筋直径的结论,大于5倍以后对提高抗剪强度没有意义。

针对深圳地铁一期下穿百货广场的桩基托换工程,文献[34]进行了用竖向吊杆对托换节点施加竖向预应力的新型预应力托换节点的试验研究,得到了该类托换节点的受力特性,为大型托换工程提供了一种安全可行的方案。文献[29]也对此作了较为翔实的阐述。

3) 截桩与荷载转移

桩基托换的核心技术是托换桩与被托换桩之间的荷载转换,切断被托换桩的最理想状态是托换大梁下被托换桩基(或墩、柱)为零应力,实际上却很难做到,但可以做到在较小荷载(受压状态而非受拉)下截桩,保证托换大梁不会因为下部桩的切除而受到突然或过大的冲击,即尽可能保持托换节点位移增量为零或略有下沉,保证托换大梁的安全。一般来说,托换荷载很难准确地计算出来,为了保证上部结构的安全,采用主动措施(千斤顶)在逐步切断被托换桩的同时,千斤顶逐渐加载,最后实现托换荷载完全从被托换桩基转移到新的托换结构。

文献[31]通过1/4模型截桩试验研究表明,截桩过程中柱体轴力逐步转移到梁端的千斤顶上,截桩完成后,轴力全部安全转移。整个过程中没有出现轴力的突变和结构的突然位移。文献[35]通过模型试验模拟了微型桩从与混凝土板连接承受初始荷载开始到施加附加荷载全过程的荷载转移机制,并给出用微型桩承受附加荷载的设计指导原则。

4) 数值模拟预测结构变化

运用有限元分析方法建立地基、桩基、托换结构、被托换结构的整体模型,模拟分析托换施工过程中荷载转移规律、相关结构(桩、梁、连接节点)应力的分布与变化规律、变形与沉降的变化规律,确定合理的应力、变形与沉降控制值,并优化施工方案。跟踪施工过程,根据实际的测试结果,对有关参数进行修正、完善,最后用于预测后续施工和长期作用下整个结构体系的应力、变形及沉降等指标的变化规律。

文献[36]应用有限元程序 Ansys 对采用主动托换技术施工的深圳百货大厦上部结构进行线弹性和非线性数值分析,确定钢筋混凝土框架结构局部沉降和顶升位移允许值。文献[37]通过大型有限元软件 Ansys 对千斤顶加载预顶升过程进行模拟,建立顶升位移与上部结构内力的关系,从而确定顶升位移的大小,用于指导托换结构的设计与施工。文献[38]采用专业软件 Midas Civil 6.7.1 对托换过程中托换体系的应力和变形进行跟踪计算分析。

由于托换结构体系与既有结构体系的混凝土浇注时间相差较多,混凝土的收缩、徐变和预应力钢筋的松弛效应会在结构体系中引起次内力,随着时间的增加发生重

分布。文献[29]讨论了长期作用下托换结构体系与既有机构体系相互作用的近似和精确分析方法。

文献[39]提出了一种预测基础托换加固后结构物沉降的方法,文献[40]介绍了一种基础托换后期沉降的简便算法,并与现场实测数据和有限元方法计算结果进行了对比,表明精度是令人满意的。

5) 监控贯穿施工全过程,实现信息化施工

对具有较高风险的托换施工进行贯穿施工全过程的监控,实现信息化施工,已经成为业内人士的共识。信息化施工包括信息采集(监测)、反馈、反分析(预测)、控制与决策等方面内容。其主要目的有两个:一方面要保证各施工阶段既有建筑物和托换结构始终处于安全状态;另一方面要及时掌握结构的应力、变形和沉降,对后期施工中结构的变形和受力进行有效的预测,及时改进施工工艺或采取可靠的措施。

文献[41]提出了信息化施工的基本思路;文献[42]介绍了深圳地铁暗挖隧道穿越广深铁路桥梁桩基托换施工的监测项目和监测结果;文献[43]介绍了信息技术在该工程中的应用;文献[44]系统地介绍了深圳地铁一期下穿百货广场的桩基托换工程测点的布置、监测频率和监测结果;文献[45]介绍了津滨轻轨桥梁墩柱主动托换信息化施工的情况,其中包括各施工阶段的监测内容、监测频率以及监测的控制指标等。

6) 精细化的施工工艺

精细化的施工工艺是完美实现设计思想和保证施工安全的决定性因素。分析主动托换施工的过程可以知道,其中最为关键的工序主要包括托换桩与托换梁的施工、托换梁与被托换桩(或墩、柱)连接点的施工、千斤顶的安装、被托换桩的切除与荷载转换、托换桩与托换梁的固结施工等。

文献[26]、[41]和[42]总结了托换梁与托换桩基施工的详细过程以及注意事项。

文献[46]给出了托换梁与被托换桩(或柱)连接点形成三向预应力(主要是竖向和横向预应力)的详细施工工艺;文献[30]和[41]也给出了托换梁与被托换桩(或柱)固结点企口、凿毛、植入销栓钢筋以及双向预应力的详细施工工艺;文献[47]介绍了为保证梁-柱受力的整体性而将梁的主筋横穿柱身然后用化学胶锚固的工艺。

文献[26]、[41]和[42]给出了托换千斤顶及临时支垫的安装工艺,文献[46]给出了可以起到水平约束作用的桩头顶升装置布置示意图。

采用千斤顶加载对托换桩预压时,文献[41]建议最大加载应控制在1.20倍的托换荷载,而文献[48]根据桩-土相互作用的工作原理分析得出的结论是最大加载应控制在1.05~1.10倍的托换荷载为宜。

文献[26]介绍了托换梁与托换桩固结点的施工工艺,在梁底和桩顶的混凝土表