

# 18000kN 大轴力桩基托换施工工法

(TGJGF-03·04-43)

中铁隧道集团有限公司

## 一、前言

深圳地铁国贸—老街区间百货广场大厦桩基托换工点具有托换桩多(6根)、托换轴力大(18000kN)、托换桩径大(2000mm)、地质条件差、地下水头高、托换位置深(地下三层)、使用环境复杂(中间穿越地铁,有震动影响)等几大特点,目前国内外尚无类似大轴力托换的施工经验(国外日本类似托换最大轴力8750kN,国内5900kN),为此,中铁隧道集团成立科技攻关小组,结合该工程对大轴力桩基托换技术的理论及机理、托换结构、施工工艺、托换环境评估等方面问题开展研究并取得了成功,总结该施工经验后形成本工法。

## 二、工法特点

1. 采用低高度预应力钢筋混凝土梁做托换梁,梁高度低、刚度大,解决了托换梁刚度(尺寸)问题。
2. 梁柱接头形式和保证托换过程中接头不发生滑移的构造措施解决了梁柱接头强度难题,能充分保证托换作业安全顺利。
3. 能正确设计和估算被托换柱的变形状况和柱顶结构物的刚度,掌握主动托换中荷载的分配关系,防止结构物变形超标、受损,保持结构物变形始终控制在允许范围内(顶升量和沉降量),保持托换大梁承受的荷载始终在允许范围之内。
4. 施工中监测反馈方案措施完备。
5. 能准确确定托换分级荷载大、小千斤顶自锁装置配置与使用合理可行。

## 三、适用范围

适用于20000kN以下桩式基础的大中型桩基托换工程。

## 四、工艺原理

桩基托换分为主动和被动托换。本工法为主动托换:在旧桩截桩之前,对新桩和托换结构加载,消除部分新桩和托换结构的变形,使得托换后桩和托换结构的变形限制在允许范围内。该技术应用于大轴力、结构物对变形要求严的桩基托换,其原理见图1。

## 五、施工方法

### (一)工艺流程(见图2)

### (二)施工前准备——模型试验

#### 1. 试验目的

(1)作1:4整体模型试验进一步验证检验剪跨比及实际预应力对接头滑移的影响。

(2)模拟实际托换工程中柱体轴力的转移过程,了解托换过程中荷载的分配关系、上部结构变形情况。

(3)检验梁—柱接头的抗剪滑移性能和强度,检验托换大梁的性能及构造,观测托换大梁的受力状态

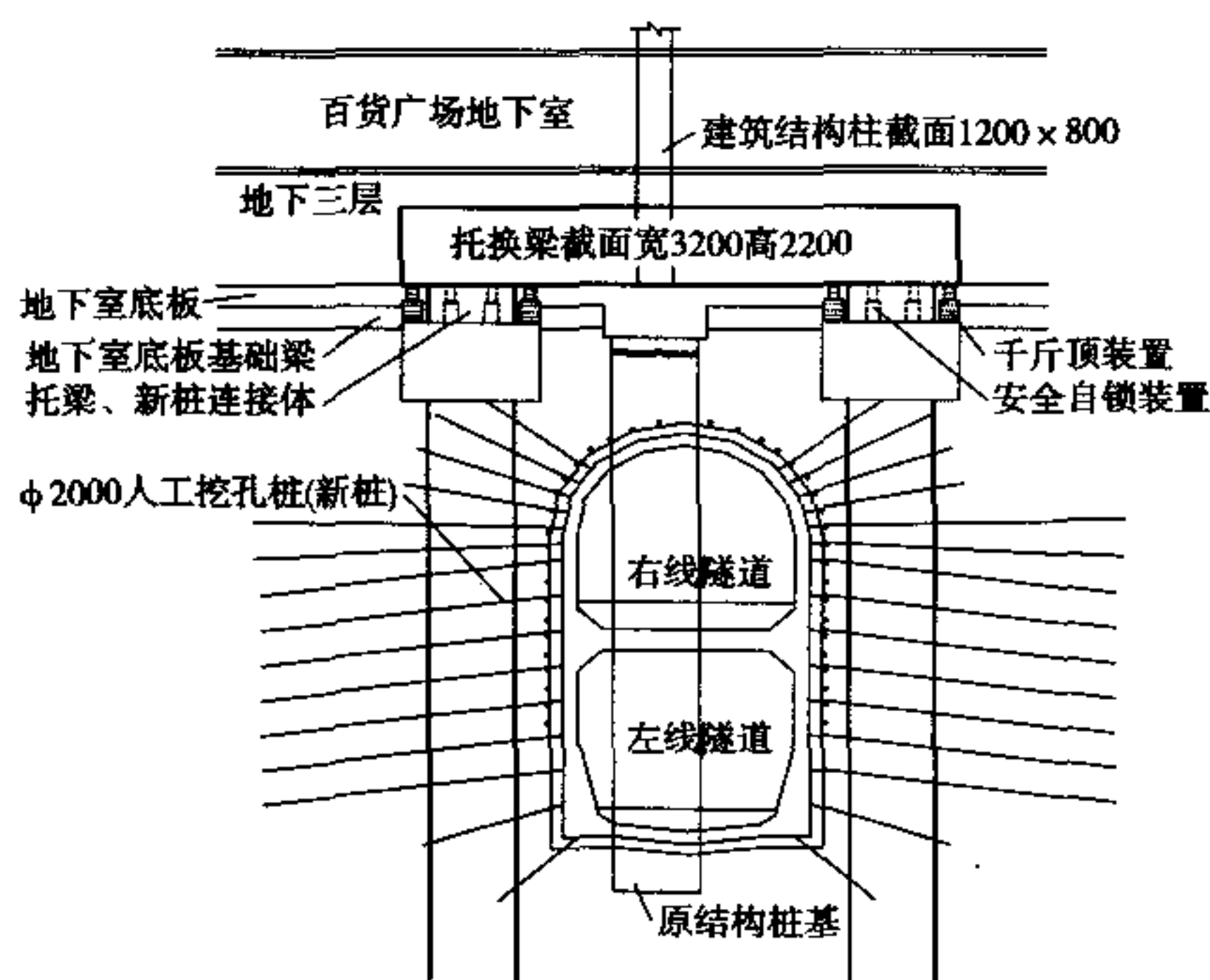


图1 百货广场桩基托换原理(单位:mm)

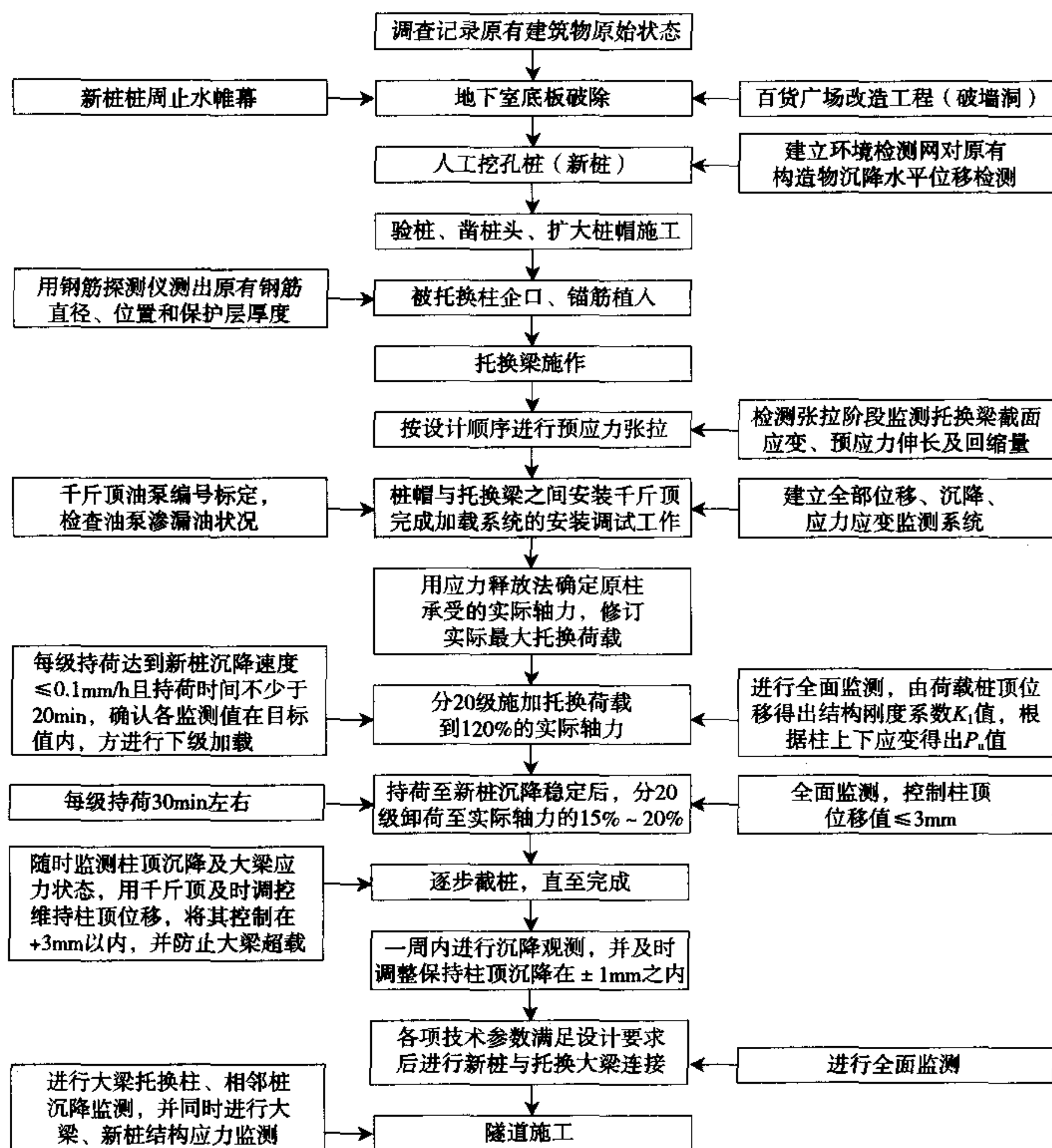


图2 桩基托换工艺流程

(强度、刚度和抗裂性)。

(4) 模拟主动托换过程和截桩过程中整体结构的反应, 掌握托换施工工艺。

(5) 检验主动托换施工的顶升系统, 演练施工队伍。

## 2. 模型试验主要结论

(1) 关于托换结构 试验表明, 百货广场 18000kN 桩基托换结构的设计具有足够的安全储备, 能够保证上部结构和托换结构本身的安全。

1/2 梁—柱接头抗剪试验结果表明在剪切条件下, 采用企口 + 锚筋 + 预应力的接头方案, 接头初始滑移安全系数  $> 1.8$ , 对应原型初始滑移荷载  $> 32400\text{kN}$ 。

1/4 整体模型试验结果表明, 在弯剪的共同作用下接头初始滑移安全系数为 1.8, 对应原型初始滑移荷载为 32320kN。预应力托换大梁的开裂安全系数为 1.5。

试验结果也表明, 梁体斜交可能造成的局部应力集中对结构没有影响; 被托换柱承受顶升荷载带来的超压也是安全的; 托换大梁两端 3 台和 2 台千斤顶与大梁接触处梁体的局部抗压能力也没有问题。

(2) 关于主动托换方案 根据试验结果可以确定采用主动托换方案是可行的。施工过程中需要对位移进行实时监测, 据此调整千斤顶的顶力, 使施工的每一步骤都要控制被托换柱的顶升和下沉位移量在  $+1 \sim -3\text{mm}$  以内。这是确保上部结构安全的关键。





原则:钢筋安装前,先测量定位,制定托换梁底模,在底模上放出普通钢筋、波纹管和预埋件分布大样,然后严格按设计及规范要求绑扎钢筋,设置预应力波纹管锚垫板及预埋件。在绑扎钢筋过程中还应严格遵循“普通钢筋让预应力筋”的原则,并保证钢筋有足够的保护层。

#### (4)托换梁模板工程

模板采用厚 20mm 夹板制作,竖向支撑用 10cm × 8cm 木方,横向支撑用[25 槽钢,穿墙螺栓收紧。

安装除要求接缝平整和不漏浆外,支撑系统应牢固,具有足够的稳定性、强度和刚度。

模板的安装顺序为先底模后侧模。

模板的几何尺寸和位置,应能保证托换梁的相关位置和结构尺寸、形状要求。

#### (5)托换梁混凝土工程

托换梁混凝土采用搅拌站制作的 C60 级商品混凝土,搅拌运输车运输,采用混凝土泵车泵送浇注。浇注时混凝土坍落度控制在  $16 \pm 2$ cm,采用插入式震动器分层振实。

#### (6)托换梁预应力施工

托换梁纵向、横向采用后张法有粘结预应力锚筋,混凝土强度达到设计值的 85% 及 7d 龄期后方能进行预应力钢筋张拉。张拉顺序为先张拉横向预应力钢筋,待其全部张拉后再张拉纵向预应力钢筋。

### 4. 千斤顶顶升(力的转换)

#### (1)同一根桩上多个千斤顶的压力同步与自锁措施

每根新桩布置 2~3 台自锁千斤顶,由一台油泵控制。各千斤顶油路并联,每顶油路和总油路均安装单向阀自锁,实现单桩上各千斤顶的压力平衡、同步与自锁,使托换梁在顶升中能够避免或减小因扭力作用而导致的侧向位移。

油泵上的溢流阀,可根据顶升力调节千斤顶的最大油压(最大顶升力),保证顶升时不会超顶。

各千斤顶油路上安装油压传感器,实现精确控制加载或卸载时的托换荷载。

每级顶升操作由指挥长统一指挥,同步操作,尽量采用小流量,使千斤顶的工作压力慢速增加,避免荷载突变导致不良后果。

#### (2)托换梁两端千斤顶同步与自锁措施

根据托换荷载及托换梁两端新桩距托换柱中心的距离,算出托换梁两端的预顶力,并将预顶力分成 15 级进行预顶。

分级加载顶升时托换梁两端分别由两个操作小组进行操作。由指挥长统一指挥,严格按分级荷载在统一规定的时间内(每级加载 2~3min)缓慢匀速地同时完成一级加载顶升,之后将千斤顶自锁。

在每级施顶过程中,连续记录监测数据和施加荷载,每施顶一级,将数据进行统计分析,得出结论后再进行下一级或者调整施顶速度。

顶升时,严格按照施工参数控制托换千斤顶的顶升力和托换梁两端的位移,各千斤顶顶升力已达到控制值而梁端位移未到位移范围值以内,或梁端位移值已到而顶升力未达到控制值时,应立即通知设计单位,以便对施工参数进行调整。

### 5. 截桩

在托换柱预顶完成,卸荷至 15%~20% 的轴力,待新桩沉降变形稳定后,开始进行截桩。

截桩采用钻石链式切割机由外到内层层剥离的施工方法,该方法的优点是震动小,安全可靠。切割位置的标高为 -7.5、-8.0m。切割共分 6~8 级,每级间隔时间约 2h;将桩水平方向切断后,两切口间的桩身混凝土用手动葫芦取出。

逐级截桩时要严密地进行连续监测,根据监测信息,适时地调整顶升系统和锁定系统,自锁千斤顶及可调自锁安全装置操作手随时待命,保证接头处的竖向位移在设计值范围内,实现荷载的可靠转换。

### 6. 监测

#### (1)新旧桩应力监测

新桩的应力状况受到桩侧土压力、摩阻力,以及隧道开挖土体扰动、单侧土摩阻力的损失等复杂因素的影响,必须进行详细监测,以确定新桩的纵向应力分布及桩侧土摩阻力的分布情况。监测方法是:在新



桩施工时每根桩从桩底到桩头均布 5 个测试断面,每个断面对称预埋 4 个钢筋计,在托换施工及隧道开挖施工过程中对新桩应力进行全程监测。

被托换柱及桩在托换大梁以上和以下的应力分别选取一个 Z 上截面和一个 Z 下截面测试,Z 上截面布置 12 个钢弦应变计,测试截面轴力、角点局部应力状态和截面的泊桑比;Z 下截面布置 4 个钢弦应变计,测试托换过程中桩(柱)上、下部分的应力分配状况,确定柱顶与桩底的刚度比,并据此调整顶升方案。

#### (2) 新桩的沉降监测

新旧桩的沉降采用静力式水准仪监测,测试精度为 0.01mm,新桩的测点布置在桩头。参考点应距被托换桩足够远,以避免地面变形产生的测试误差。此项观测可以得出旧桩的位移状况和新桩的沉降过程,通过荷载沉降曲线和沉降时程曲线预估沉降稳定的终极值。

在隧道暗挖过程中,托换新桩的水平位移也须进行监测,可采用相对位移测试方法。

#### (3) 梁—柱接头的相对滑移监测

在接头主动端和被动端分别采用 4 只位移计测试。整个托换过程都要密切关注滑移的情况,若有初始滑移发生,即应停止施工,查明原因,采取相应措施解决。

#### (4) 托换大梁的应力、挠度监测

采用应变计测试梁体最大弯矩截面的纵向应力,1 个断面布设 10 只应变计,监测预施应力阶段梁体的预压应力和托换阶段梁体的受力状态,检验梁体的抗裂性能。梁体挠度的测试,采用在梁顶两端简支刚度足够的钢梁,在钢梁与梁体之间布置 6 只百分表测试梁体的挠度。由于梁体较宽,应在梁顶两边各布置一根钢梁,共需 12 只百分表,以测出梁体的实际挠度。整个施工过程中,托换大梁的应力、挠度应控制在安全范围之内。

托换大梁梁底与桩帽之间安装 4 只百分表,用以监测加荷与卸荷过程中梁端有无扭转现象发生,以及卸荷前后安全装置的压缩变形。

#### (5) 被托换柱与邻近柱相对沉降监测

测试采用先进的静力水准式沉降仪,其精度为 0.01mm,配有自动测试模块和分析软件,能对施工全过程柱的沉降差进行全自动实时监测和信息的迅速反馈。在被托换柱及相邻柱上安装静力式水准仪。

#### (6) 检测被托换柱的实际轴力

在截桩前,通过应力释放法测试被托换桩的实际轴力。

#### (7) 邻近被托换柱的梁板附加应力监测

在托换施工及暗挖隧道施工过程中,在梁板上布置应力测点,如果结构主要受力变形敏感部位出现裂缝,则在裂缝上布置裂缝计,随时监测裂缝的发展变化。

### 六、机具设备(见表 1)

### 七、劳动组织(见表 2)

### 八、质量控制

1. 18000kN 大轴力桩基托换施工属国内首例,施工前的技术准备工作一定要做好,技术方案要合理、可行。

2. 各工序的质量控制要严格,并按《结构工程施工及验收规范》等规范、标准为依据进行验收。

3. 所有材料如钢筋、预应力筋、锚具、浆材等必须符合质量标准要求。

4. 预应力严格按设计要求及工艺技术标准施工。

5. 要保证新桩和托换梁的施工质量。

6. 托换梁与柱底等托换节点的混凝土齿槽应处理安全。

7. 严格质量检查制度,及时解决施工遇到的技术难题并开展好 QC 小组活动。

### 九、安全措施

1. 坚持施工安全第一的方针,做好防涌水、防裂、防沉降工作。

2. 施工前做好超前地质预报工作,并根据不同的地质情况,采取桩周注浆加固、超前小导管注浆等措施,确保桩孔施工安全。

表 1 机具设备

序号	机具名称	规格	数量	附 注
1	提升卷扬机	20km	1 套	竖井出渣用
2	风钻	YT28	12	钻孔
3	风镐	G10	10	挖硬土
4	空压机	20m <sup>3</sup>	1	供风
5	注浆泵	双液	2	注浆
6	潜水泵	2kW	6	抽水
7	电焊机		4	焊接
8	弯曲机		1	钢筋加工
9	钢筋切断机		1	钢筋加工
10	拌合机	JZC350	1	拌喷浆料
11	湿喷机	YK961	1	喷混凝土
12	挖掘机	0.5m <sup>3</sup>	1	装渣
13	小斗车	0.5m <sup>3</sup>	10	运渣
14	钻机	XY-2	2	注浆钻孔
15	张拉设备		2 套	预应力张拉
16	电动液压千斤顶	5000kN, 自锁	30	托换用
17	电动油泵		32	托换用
18	切割机		4	切桩用
19	监测仪器	套	2	监测用
20	反力架	自制	8	托换用
21	混凝土输送泵	HBT60	1	灌注混凝土

表 2 劳动组织

序号	工种	人数	工作内容
1	项目经理	1	现场管理
2	技术人员	10	施工技术指导
3	质检员	1	质量控制、检查
4	安检员	1	安全监督、检查
5	测量、监测人员	16	量测、监测
6	开挖工	48	挖孔、装渣出渣
7	施工管理	8	现场管理
8	混凝土工	20	混凝土灌注
9	钢筋工、预应力工	24	钢筋加工、绑扎
10	木模工	8	立模
11	钻机工	8	钻孔、注浆
12	电焊工	10	钢筋加工
13	机械司机	6	机械操作
14	机械修理工	6	机械修理
15	托换技工	8	切桩、顶升
16	普工	20	
17	电工	5	施工用电
合 计		200	

3. 托换施工及隧道施工期间,必须严格监测。

4. 截桩应分级严格控制,及时调控变形。

5. 破底板前采取止水措施,防止地下水大量涌入。

6. 新桩施工紧邻既有建筑物桩且新桩低于既有桩底 2~6m 不等,新桩施工造成既有桩底以下基层形成侧面临空,影响既有桩安全,故施工中要加强护壁,采取必要的超前支护措施。

7. 顶升前测定实际轴力,确定顶升分级荷载。千斤顶顶升时,统一指挥调度,托换梁两端需均衡同步加载,均衡顶升。

#### 十、效益分析

大轴力桩基托换施工工法解决了城区地铁施工的难题,为今后大轴力桩基托换的设计提供了理论和

实践的科学依据,为类似工程的施工提供了可供借鉴的经验,填补了国内在大轴力托换施工的空白。中隧集团采用此工法安全、快速、高效地完成深圳地铁 3C 标段桩基托换的施工任务,区间隧道成功地穿越百货广场高层建筑托换桩基群,保证了周围建筑物和地下管线的安全,受到社会各方的好评,其社会效益是不可估算的。经测算,采用大轴力桩基托换施工方案比采用绕道延长线路的方案节约土建费用约 70%,其经济效益是显著的。

### 十一、工程实例

深圳地铁一期工程线路由于受走向及最小半径( $R_{min}=300m$ )等条件限制,只能从百货广场大厦裙楼下穿越。根据楼层估算托换桩最大设计轴力约 18900kN。设计要求托换裙楼桩 6 根(桩基持力层均在隧道结构面以下基岩)。从资料检索结果看,本工程属国内外地下工程迄今为止托换位置深、轴力最大的桩基托换,托换位置工程地质条件复杂,地下水位高,加之变形控制严,环境复杂,国内外无类似工程成功经验可供借鉴,故施工难度大。

被托换桩施工参数见表 3。

表 3 被托换桩施工参数

被 托 换 桩 号	TZ24	TZ38	TZ39	TZ58	TZ59	TZ77
原估算轴力标准值/kN	10000	9680	13200	12400	15120	9600
原轴力设计估算值/kN	12500	12100	16500	15500	18900	12000
托换期间最大轴力估算值/kN	19500	18600	18800	19200	19900	16500
托换期间最小轴力估算值/kN	5612	5741	7416	7066	8126	5176
预顶力控制值/kN	6500	6500	8500	8000	10000	6500
预顶期间梁端位移/mm	2~3	3~4	3~4	2~3	2~3	2~3
预顶期间柱端位移/mm	1	1	1	1	1	1
预顶期间柱端沉降控制值/mm	-3	-3	-3	-2.5	-2	-3

根据百货广场的结构、基础形式及操作空间,百货广场桩基托换采用梁式托换结构柱的型式,托换新桩采用人工挖孔桩,整个托换工程在地下三层室内进行。

根据高层结构变形要求,裙楼桩基采用主动托换。托换时,在托换梁和新桩之间设置加载千斤顶,利用千斤顶加载使上部结构有微量顶升位移,同时使新桩的大部分沉降位移在顶升时预压完成,这样便通过主动加载实现作用在原结构桩上的荷载经托换大梁转移至新桩上,原桩(柱)顶升值和新桩沉降也得到有效控制。旧桩在开凿人工孔至托换梁底下逐步截断。截桩后暗挖隧道开挖,待其衬砌变形稳定后(此期间千斤顶装置及时调整),托换梁与新桩连接形成永久结构,托换完成。桩基托换及隧道施工全过程都实行了严格的全过程监控、量测,确保了结构安全。

中隧集团 3C 项目部采用此工法,通过技术攻关,解决了软弱地层桩基开挖支护、托换梁以及截桩、力的转换等技术难题,保证了百货广场等高层建筑物、地下管线的安全和正常使用,安全、快速、高效地完成深圳地铁 3C 标段桩基托换的施工任务,受到社会各方的好评,工程项目施工获得了圆满成功。

执笔:刘建国 潘明亮 赵春华 朱成杰