

文章编号: 1006—2106(2009)11—0094—06

数据无线传输技术在津滨轻轨桥墩托换中的应用^{*}

卜建清^{**} 孙 宁 郭奕清

(中国铁道科学研究院, 北京 100081)

摘要: 研究目的: 在津滨轻轨桥墩托换施工过程中, 轻轨列车不能停运, 轻轨桥梁也无法加固, 采用数据无线传输技术对被托换桥墩墩顶高程等内容进行实时监测, 以确保轻轨列车运营安全和施工质量。

研究结论: 数据无线传输技术在津滨轻轨桥墩托换工程中, 监测贯穿施工全过程, 信息及时, 数据准确, 可实现实时数据采集与显示, 为各个施工工序的正常进行提供了决策依据。数据无线传输技术比有线传输优势明显, 可运用到其它工程施工监测或长期健康监测中。

关键词: 桥墩主动托换; 数据无线传输; 实时监测

中图分类号: TP274 文献标识码: A

Application of Wireless Data Transmission Technology in Underpinning Pier for Binzhou Light Rail in Tianjin

BU Jian-qing SUN Ning GUO Yi-qing

(China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Research purposes: In the course of underpinning the pier for Binzhou light rail in Tianjin, the light rail had to be open to traffic and the bridge could not be reinforced. The data wireless transmission technology was used for the real-time monitoring the elevation of the underpinned pier top to ensure the train operation safety and construction quality.

Research conclusions: The wireless data transmission technology was used for monitoring the whole construction process in the course of underpinning the pier for Binzhou Light Rail in Tianjin, obtaining the reliable data in time and realizing the data real-time collection and display to provide the basis for the decision-making for each construction process. The wireless data transmission technology is better than the wire data transmission technology and it can be used in the other construction monitoring or long-term health monitoring.

Key words: pier underpinning; wireless data transmission; real-time monitoring

1 桥墩托换工程概况

1.1 工程简介

桥墩托换工程是天津滨海新区中央大道下穿津滨轻轨既有桥梁的配套工程。在保证津滨轻轨正常运营的前提下, 采用托换结构托换 A339制动墩和 A340连接墩的基础(包括部分桥墩+承台+桩基, 托换完成

后 A339墩保留 3.38 m, A340墩保留 3.50 m), 使中央大道地道可以下穿施工。需要进行托换施工的津滨轻轨高架桥为两联三跨连续梁体系, A339墩为 25 m+25 m+20 m连续梁的制动墩, A340墩为 25 m+25 m+20 m和 20 m+20 m+20 m两联连续梁的共用墩。轻轨墩柱 2.2 m×1.4 m; 承台为 6.0 m×5.6 m×2 m; 基础为 8根直径为 0.8 m的钻孔灌注桩, 桩长 44 m和

^{*} 收稿日期: 2009—04—20

^{**} 作者简介: 卜建清, 1968年出生, 男, 教授。

45 m。托换施工涉及的两联连续梁桥位于轻轨泰达站与市民广场站间 DK 42+907.50~DK 43+037.50 范围, A339 和 A340 2 个被托换桥墩位于缓和曲线上, 左曲线半径为 446.16 m 曲线长 282.26 m 缓和曲线长 130 m; 右曲线半径为 450 m 曲线长 273.57 m 缓和曲线长 120 m 轨道结构为弹性支承块半板式无砟轨道, 无缝线路, 锁定轨温 27℃, 铺设 CHN60 型钢轨, 支承块间距为 60 m。

托换大梁采用两跨连续刚构结构, 为预应力纵横梁加顶底板体系, 纵梁断面尺寸为 1.8 m×2.0 m 跨径 218.75 m 1 和 3 横梁断面尺寸为 3.0 m×2.0 m 2 横梁断面尺寸为 3.5 m×2.0 m 横梁全长 15 m 顶底板厚均为 0.3 m 采用 C60 混凝土。托换桩为钻孔灌注摩擦桩, 采用 C35 混凝土, 两边的 6 根桩 (1、2、3、7、8、9) 单桩长 70 m 直径 1.8 m 中间的 3 根桩 (4、5、6) 单桩长 90 m 直径 2.0 m 桩上部考虑 12 m 外露^[1]。托换结构体系如图 1 所示^[2]。

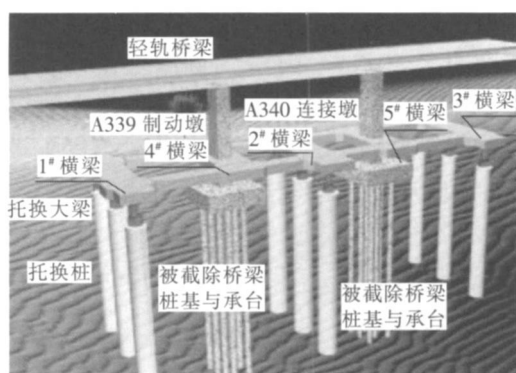


图 1 托换结构体系示意图

1.2 托换施工工艺流程

通过可行性研究与专家的多次论证, 确定的津滨轻轨桥墩主动托换施工步骤为^[3]:

第一步: 施工托换桩和各排桩间系梁。

第二步: 施工托换大梁纵梁和 1#~3# 横梁, 处理地基, 施工满堂支架并进行预压。施工托换大梁的纵梁和 1#~3# 横梁及相应部分的顶板、底板, 同时在轻轨墩柱上开企口植入钢筋, 待混凝土养护达到强度要求后, 先张拉横梁的一半预应力筋, 然后张拉纵梁预应力筋, 最后张拉 1#~3# 横梁剩余一半预应力筋。

第三步: 施工 4 和 5 横梁及相应的顶、底板, 待浇筑的混凝土养护达到强度要求后, 进行预应力筋张拉。

第四步: 拆除部分模板和支架, 在托换桩顶安装千斤顶, 给千斤顶施力, 对桥墩进行分级预顶升, 顶升力分 10 级加到 100% 托换荷载。

第五步: 分级均匀卸载至托换荷载的 85% 左右, 使被截除部分墩柱轴力保持较小的压力。用钻石绳锯

进行墩柱截除, 截除过程中需要不断调整千斤顶顶力和位移。

第六步: 逐步开挖托换梁下土体直至设计高程并施工地道箱体, 在开挖地道及箱体施工中, 根据实时监测结果, 通过调整千斤顶, 保证轻轨墩顶高程变化控制在安全范围内, 并保证托换大梁的线形。

第七步: 地道箱体施工完成后, 继续进行监测, 待确定托换桩沉降、托换结构变形稳定后, 进行托换梁和新桩的固结, 托换施工完成。

2 数据采集与无线传输原理

2.1 数据采集与无线传输原理

无线传输系统由若干个无线传感单元组成, 无线传感单元包括一个电路板、若干个接口、存储单元和发射与接收信号天线。电路板尺寸为 9 cm×6 cm 电路板由太阳能充电式 12 V 锂电池组进行供电, 且采用坚固而防水的外壳对电路板进行封装, 这样不仅可以减少对外界电源的依赖性, 还有利于环境保护。

无线传感单元自身可以实现数据采集、信号调理、存储和无线传输。按照就近原则把若干个传感器的线路接到无线传感单元, 由程序对接收单元接收的数据进行处理并统一控制, 采样频率由专门程序控制。数据接收单元与各个无线传感单元的数据传输遵从预先设定的通信协议进行, 发出的指令由数据接收单元依次传送到各个无线传感单元。各个无线传感单元再把采集到的数据传送给数据接收单元, 最后通过程序对数据进行后处理和存储, 数据存储的格式可以根据需要设置。本文采用的是 Excel 数据存储格式, 在数据存储的同时又在设计的窗口界面动态显示, 界面上不仅显示实时数据, 还显示各个指标的警戒值和控制值。为便于监测人员直观实时地分析监测指标的变化情况, 还可通过界面按钮进行系统调试和参数修改。无线传感监测系统如图 2 所示, 无线传感单元与充电太阳能板如图 3 所示。

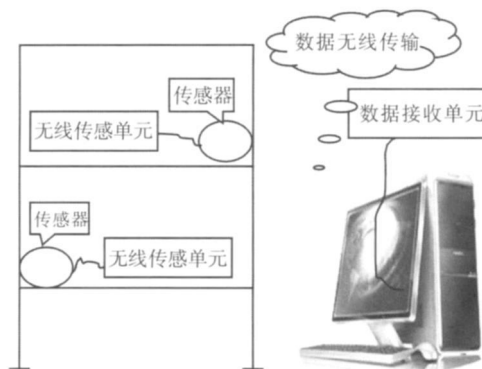


图 2 无线传感监测系统示意图

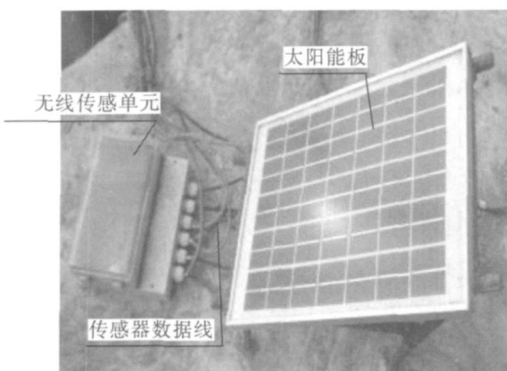


图 3 布设在托换梁上的无线传感单元与充电太阳能板

2.2 数据无线传输的优点

采用数据无线传输进行施工监测,主要有以下优点:

- (1)无线传输系统可以实现对结构受力、变形的实时监测;
- (2)减少数据电缆用量,受施工干扰小,便于实现长期监测;
- (3)可以根据施工工序和控制要求,调节采集数据的时间间隔;
- (4)减少对施工的影响,便于监测系统的维护;
- (5)保证诸多传感器数据采集的同时性;
- (6)大大减轻劳动强度,克服人工读数的误差和失误,确保数据的准确性。

3 监测方案

3.1 监测内容

3.1.1 桥墩位移监测

在托换体系施工之前,在 A337 ~ A343 7个桥墩的墩顶布设 15个静力水准仪,并在 A338 ~ A341 4个墩帽的 3个侧面布设静力水准仪,用测得的高差与距离之比表示墩顶的纵向与横向转角,以 A343墩为基准点(即认为 A343墩不受托换施工的影响),在托换桩施工、开企口植筋、张拉 4和 5横梁、预顶升、截除墩柱、荷载转换以及地道开挖等施工过程中,实时观测 A337 ~ A342 各个墩顶的竖向位移和 A338 ~ A341 4个墩顶的纵横向转角。测点布置如图 4所示。

3.1.2 托换大梁变形与应力监测

托换大梁纵梁和 1# ~ 3#横梁混凝土养护完成后,在 1#、2#、3#托换横梁的两端各布设 2个静力水准仪,分别与下部的 6个托换桩(1#、3#、4#、6#、7#、9#)相对应,并在远处设 1个基准静力水准仪,用于实时监测托换大梁张拉、预顶升、墩柱截除、荷载转换、地道施工、后期沉降稳定等阶段的托换大梁的竖向位移和托换大梁的扭转翘曲变形。

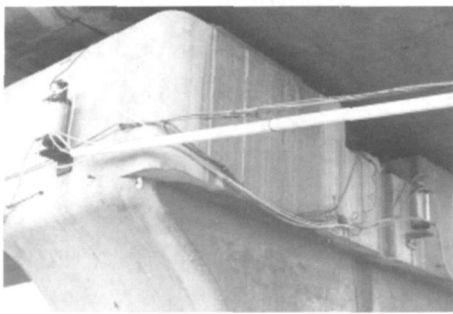


图 4 布设在墩顶的静力水准仪

在托换大梁施工过程中,在 2个纵梁与 4和 5#托换横梁连结节点最大弯矩截面、2个纵梁与 2#托换横梁连结节点截面、4和 5#托换横梁的跨中分别布设 4支钢筋计(共 32支),用于监测混凝土收缩徐变、预应力钢筋张拉、桥梁墩柱截除、荷载转换等过程中纵梁上下缘钢筋的轴力。

托换大梁纵梁和 1# ~ 3#横梁混凝土养护完成后,在距离 1#横梁中轴线约 6.0 m处的两纵梁外侧上下缘各布设 11个钢弦应变计(不同施工阶段混凝土最大应力位置会有所变化),间距 5 mm;在 2个纵梁与 4和 5#托换横梁连结节点外侧下缘分别布设 4个钢弦应变计,间距 5 mm,共 38支,用于监测混凝土收缩徐变、预应力钢筋张拉、桥梁墩柱截除、荷载转换等过程中混凝土的应力应变。钢弦应变计和钢筋计测点布设如图 5所示。

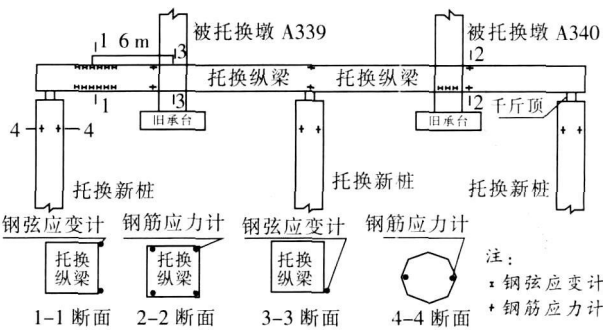


图 5 托换结构上应变计与钢筋计布设图

3.1.3 托换桩的轴力及沉降监测

在托换大梁施工完成后,对托换大梁预顶升前,在每根托换桩的顶部布设 1个静力水准仪,并在远处布设 1个基准静力水准仪,共 10个,用于监测托换桩的沉降。以便在截除墩柱、荷载转换、地道开挖和后期沉降过程中确定千斤顶的顶距及判断桩基是否沉降稳定,测点布置如图 6所示。

在托换桩施工过程中,在托换纵梁下部 6个桩身距顶部 2.0 m处,沿桥梁纵向的对角线分别布设 2个 32 mm 钢筋计,共 12个。监测各个施工阶段托换桩的

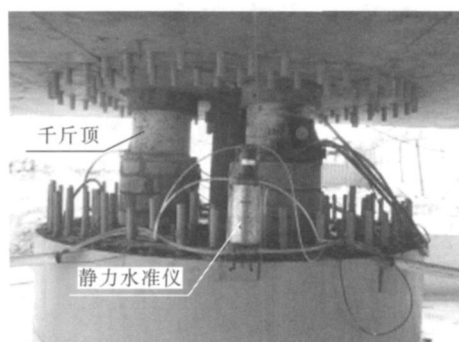


图 6 托换桩上布置的静力水准仪

轴力变化。

3.1.4 托换大梁与桥墩连结点部位应力、变形监测

在 2 个被托换墩最下层植筋中, 布置钢筋应力计, 共 8 支, 监测植入钢筋轴力在托换施工过程中的变化, 用于分析植入钢筋的受力情况, 测点布置如图 7 和图 8 所示。

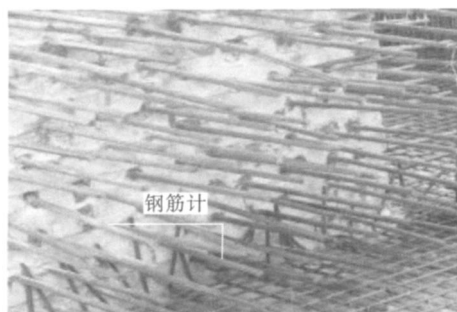


图 7 在桥墩植筋上布置的钢筋计



图 8 墩梁节点处布置的测缝计和应变计

3.2 无线传输网络

综上所述, 共布置 37 个静力水准仪、52 支钢筋应力计、54 支钢筋应变计、8 支测缝计, 共计 151 个传感器。将 151 个传感器就近且按照同类集中的原则连接到 26 个无线传感单元的各个通道, 对无线传感单元及各通道进行编号。4 类传感器均为振弦式, 只是各类传感器的频率范围有所不同。根据无线传感单元各通道连接传感器的类型通过控制软件确定各自的扫频范围, 并将各个传感器采集的频率换算成相应监测指标

的量纲, 然后存储并在窗口界面更新显示。

3.3 控制指标

为保证托换结构体系的安全施工和轻轨的安全运营, 依据铁路相关规范^[4-6]、深圳地铁百货大厦桩基托换工程^[7-8]、深圳地铁广深铁路高架桥桩基托换工程^[9]及前期模型计算结果^[10], 制定的控制标准为:

(1) 被托换桥墩墩顶竖向位移警戒值为向上 3 mm, 向下 3 mm; 控制值为向上 5 mm, 向下 5 mm; 邻近桥墩墩顶沉降差不超过 5 mm; 相邻两桥墩墩顶横向相对位移警戒值为 5 mm, 控制值为 10 mm; 相邻两桥墩墩顶纵向相对位移警戒值为 10 mm, 控制值为 24.5 mm; 桥梁沿纵向面内转角警戒值为 $3'$, 控制值为 $5'$; 桥梁横向面内转角警戒值为 $3'$, 控制值为 $5'$ 。

(2) 托换横梁与既有桥墩节点相对滑移量为零 (不计材料弹性变形)。

(3) 托换大梁施工过程中, 梁体混凝土压应力控制值为 22 MPa; 拉应力控制值为 1.5 MPa; 预顶升、墩柱截除、基坑开挖与箱体施工、托换桩—梁固结等施工阶段控制在纯受压状态, 压应力控制值为 22 MPa; 托换完成后不允许出现拉应力, 压应力控制值为 18 MPa; 托换桩压应力控制值为 13 MPa; 拉应力控制值为 0.8 MPa。

(4) 预顶升阶段每级持荷满足新桩沉降速率小于 0.1 mm/h。

(5) 固结前沉降值连续 3 个月小于 0.1 mm/月。

(6) 3 排托换桩各排的不均匀沉降差值超过 2 mm 时或每排 3 根桩沉降差值超过 1 mm 时, 需要通过千斤顶进行位移补偿。

4 监测结果

4.1 墩顶高程变化与转角

被托换桥墩墩顶高程变化与转角在托换施工各个关键工序的监测结果如表 1 所示。

由表 1 可知, 被托换的 A339 墩的顶部自墩柱被截除之后发生的竖向位移均为下沉, 最大值为 1.15 mm; 被托换的 A340 墩也是均为下沉, 最大值为 0.43 mm; 均发生在托换桩—梁固结之前, 比设定的警戒值 3.0 mm 小了很多, 施工期间 2 个桥墩的最大沉降差 0.7 mm; 在托换桩—梁固结期间由于置换千斤顶对托换大梁的高程进行了调整, A339 墩墩顶高程增加了 0.2 mm, 而 A340 墩几乎没有变化。这是施工控制不够理想的地方, 最理想的是将被托换墩因托换施工沉降的部分通过千斤顶置换环节完全弥补回来, 甚至应该再向上 1 mm 左右, 以弥补固结之后长时间发生的沉降, 使得轻轨桥梁保持良好的线形和受力状态。

表 1 各工况下墩顶高程变化与转角监测结果

工况	A339墩			A340墩		
	墩顶高程 变化量 /mm	墩顶纵向 转角 / (″)	墩顶横向 转角 / (″)	墩顶高程 变化量 /mm	墩顶纵向 转角 / (″)	墩顶横向 转角 / (″)
预顶升完成	0 65	21	12	0 57	19	8
墩柱截除完成	- 1 08	13	10	- 0 38	10	14
地道施工完成	- 1 10	22	15	- 0 40	25	21
托换桩—梁固结之前	- 1 15	18	19	- 0 43	22	21
托换桩—梁固结完成	- 0 95	19	18	- 0 42	20	17

4 2 托换梁顶高程变化与内力
托换大梁中 1[#]、2[#]、3[#]横梁高程变化在托换施工各

表 2 各工况下托换梁顶高程变化监测结果

工况	1 [#] 横梁		2 [#] 横梁		3 [#] 横梁	
	1 [#] 桩位高程 变化量 /mm	3 [#] 桩位高程 变化量 /mm	4 [#] 桩位高程 变化量 /mm	6 [#] 桩位高程 变化量 /mm	7 [#] 桩位高程 变化量 /mm	9 [#] 桩位高程 变化量 /mm
预顶升完成	7 21	4 02	4 99	4 51	6 84	6 35
墩柱截除完成	7 25	3 97	4 87	4 34	6 55	6 53
地道施工完成	7 53	4 11	5 18	4 51	6 38	6 23
托换桩—梁固结之前	7 49	4 08	5 06	4 39	6 31	6 16
托换桩—梁固结完成	7 80	4 41	4 96	4 22	6 32	6 06

由表 2可知, 2[#]、3[#]横梁两端的高程变化很接近, 而 1[#]横梁的两端高程变化相差较大, 最大差值为 3 41 mm。其原因可能是托换大梁预制满堂支架拆除之前的状态造成的, 1[#]桩位附近的地基刚度较低, 导致托换梁预制期间发生的沉降较其它位置大, 在千斤顶加载时, 向上的位移就大一些。总的来看, 托换大梁的线形很好, 没有扭转与翘曲发生。

在预顶升完成后, 托换大梁纵梁混凝土下缘最大压应力约为 14 94 MPa位于南侧纵梁西跨的跨中断面附近, 其余下缘测点应力在 7~11 MPa; 而后期的轻轨墩柱截除、地道开挖、箱体施工等阶段托换大梁的应力没有明显的变化; 直到托换桩与托换大梁固结完成后, 纵梁混凝土下缘最大压应力约为 13. 8 MPa, 位于

南侧纵梁西跨的跨中断面附近, 其余纵梁下缘测点压应力在 6 8~10 9 MPa。

在各个施工阶段, 托换大梁均没有出现拉应力, 表明其工作状态良好, 安全系数足够, 这对于结构后期工作有利。

4 3 托换大梁与被托换桥墩连结点的相对位移与植入钢筋的内力

测缝计的读数在托换施工阶段始终在 0 2 mm左右变化, 表明除了很小的弹性变形外, 托换大梁与被托换桥墩连接点在各个施工阶段始终没有发生相对滑移, 表明该节点处的强度足够, 而且新旧混凝土之间结合得很好。各工况下托换梁与被托换桥墩结点处植筋内力监测结果如表 3所示。

表 3 各工况下托换梁与被托换桥墩结点处植筋内力监测结果

工况	4 [#] 横梁与 A339墩结点处植筋内力		5 [#] 横梁与 A340墩结点处植筋内力	
	最大实测轴力 /kN	换算最大应力 /MPa	最大实测轴力 /kN	换算最大应力 /MPa
预顶升完成	- 57. 9	- 77. 7	- 55. 3	- 73. 2
墩柱截除完成	- 64. 4	- 85. 2	- 58. 2	- 77. 1
地道施工完成	- 67. 4	- 89. 2	- 63. 5	- 84. 1
托换桩—梁固结之前	- 68. 5	- 90. 6	- 66. 3	- 87. 8
托换桩—梁固结完成	- 70. 6	- 93. 4	- 68. 0	- 90. 1

由表 3可以看出, 结点处的内力在托换施工期间不断地发生变化, 其原因除由力筋张拉和轻轨墩柱截除这样的结构体系变化造成之外, 还可能与托换梁的线形变化和结构体系的内力重新分布以及混凝土收

缩、徐变、温度变化等因素有关, 但变化幅度不大。
4 4 托换桩沉降和轴力
托换桩的沉降监测结果如表 4所示; 托换桩的轴力监测结果如表 5所示。

由表 4 可知, 托换桩最大的沉降发生在中间一排桩, 最大沉降值为 2.26 mm; 最大沉降差不足 1.5 mm; 托换桩的沉降绝大部分 (70% ~ 80%) 发生在预顶升阶段, 表明截除墩柱之前先给千斤顶加载对托换桩实施预压是非常必要的, 为后期的施工控制提供了良好的条件。

表 4 各工况下托换桩沉降监测结果

工况	1 [#] 桩/mm	2 [#] 桩/mm	3 [#] 桩/mm	4 [#] 桩/mm	5 [#] 桩/mm	6 [#] 桩/mm	7 [#] 桩/mm	8 [#] 桩/mm	9 [#] 桩/mm
预顶升完成	-0.39	-0.49	-0.30	-1.80	-1.15	-1.85	-0.57	-0.59	-0.48
墩柱截除完成	-0.41	-0.52	-0.33	-1.84	-1.19	-1.88	-0.61	-0.60	-0.51
地道施工完成	-0.48	-0.59	-0.42	-1.91	-1.24	-1.94	-0.68	-0.71	-0.61
托换桩—梁固结之前	-0.55	-0.64	-0.49	-2.25	-1.55	-2.21	-0.74	-0.78	-0.67
托换桩—梁固结完成	-0.56	-0.64	-0.50	-2.26	-1.55	-2.20	-0.75	-0.79	-0.68

表 5 各工况下托换桩轴力监测结果

工况		预顶升完成	墩柱截除完成	地道施工完成	托换桩—梁固结前	托换桩—梁固结后
1 [#] 桩	实测钢筋轴力/kN	-4.6	-5.5	-5.7	-6.1	-6.3
	换算桩轴力/t	-228.6	-273.4	-283.3	-303.1	-313.1
3 [#] 桩	实测钢筋轴力/kN	-4.4	-5.1	-5.3	-6.2	-6.4
	换算桩轴力/t	-218.7	-253.5	-263.4	-308.1	-318.1
4 [#] 桩	实测钢筋轴力/kN	-8.1	-8.4	-9.0	-9.2	-9.4
	换算桩轴力/t	-497.3	-515.8	-522.6	-564.9	-577.2
6 [#] 桩	实测钢筋轴力/kN	-9.1	-8.9	-10.4	-10.3	-10.4
	换算桩轴力/t	-558.7	-546.5	-638.5	-632.4	-638.6
7 [#] 桩	实测钢筋轴力/kN	-4.4	-4.4	-5.1	-6.2	-6.4
	换算桩轴力/t	-218.7	-218.7	-253.5	-308.1	-318.1
9 [#] 桩	实测钢筋轴力/kN	-4.1	-3.9	-5.5	-6.3	-6.5
	换算桩轴力/t	-203.8	-193.8	-325.8	-313.1	-323.1

经比较可知, 表 5 中各托换桩上的轴力监测结果与千斤顶读数吻合很好, 说明监测系统的数据采集、传输、分析是可靠的, 传感器的精度和灵敏度是满足要求的。

5 结论

- (1) 数据无线传输技术在津滨轻轨桥墩托换工程中的应用非常成功, 监测贯穿施工全过程, 信息及时, 数据准确, 可实现实时数据采集与显示, 在托换施工过程中起到了“保驾护航”的作用。
- (2) 在预顶升、墩柱截除、地道开挖以及托换桩—梁固结施工阶段, 对托换大梁高程调整与千斤顶的置换过程进行实时监测, 为各施工工序的正常进行提供了决策依据和有力的保障。
- (3) 在墩柱截除之后的 8 个月期间, 定期进行数据采集与分析, 最后根据事先确定的标准判定托换桩沉降达到稳定状态, 决定进行托换大梁与托换桩固结施工。
- (4) 数据无线传输技术比有线传输具有独特的优势, 可以运用到其它工程的施工监测或长期健康监测中。

参考文献:

[1] 卜建清, 孙宁, 郭奕清. 津滨轻轨桥墩主动托换体系时变过程分析[J]. 铁道标准设计, 2009(5): 25—28

[2] 卜建清, 孙宁, 郭奕清. 津滨轻轨桥墩主动托换过程中的振动测试研究[J]. 特种结构, 2009(2): 52—59

[3] 杨福增, 卜建清, 柯在田, 等. 天津津滨轻轨桥墩主动托换信息化施工[J]. 城市道桥与防洪, 2008(7): 38—41

[4] TB0 02 1—2005 铁路桥涵设计基本规范[S].

[5] 铁用函[2004] 120号, 铁路桥梁检定规范[S].

[6] 铁科技函[2006] 747号, 既有线提速 200 km/h 技术条件(试行)[S].

[7] 涂强. 大轴力桩基托换变形控制值确定[J]. 铁道工程学报, 2008(2): 26—30

[8] 杨再道. 大轴力桩基托换施工安全监测的研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2003

[9] 金国海. 暗挖地铁穿越广深铁路桥的桩基托换施工技术[J]. 铁道建筑技术, 2004(6): 34—37

[10] 尹京. 超静定结构主动桩基托换过程模拟与控制及其工程应用[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2008