

桩式托换柱基纠偏与顶升工程实例

陈国政

(中国有色金属工业总公司西安勘察院, 710054)

提 要

本文介绍了陕西省西北橡胶厂露天跨柱基, 采用桩式托换进行地基加固、柱基纠偏与顶升施工方法和效果。通过84根预压桩、14根柱基纠偏和15根柱基顶升成果分析表明: 基础受力性能好、加固效果可靠, 柱基纠偏与顶升是成功的。据试桩资料分析, 提出确定预压桩单桩容许承载力方法, 并进行了探讨。文中最后根据对比试验给出压桩阻力与间歇时间及桩顶向上反力与回弹经验关系, 这对地基加固后增加安全储备和控制建筑物不产生新的沉降, 有实际意义。

一、概 述

陕西省西北橡胶厂露天跨柱基, 跨度25.5m, 柱距6.0m, 全长132m。柱基为钢筋混凝土矩形基础, 尺寸2.0m×3.2m(D列15与16双柱基为3.0m×3.2m), 地基未作处理。轨顶标高12.3m, 柱顶标高12.0m, 有一台50kN桥式抓斗吊车, 设计时未考虑地面堆载, 实际上柱间堆放8~10m高的生产用煤, 且堆放不均匀。生产时为了减燃, 经常喷水, 不仅增加地面荷载, 而且水渗入地下后, 加大地基不均匀沉降。最大柱顶偏移7.2cm, 不均匀沉降达12.4cm, 造成吊车卡轨。曾几次调整轨道, 但仍难于行驶, 严重影响生产安全。

多年来一直没有找到解决的方法。1989年春经现场调查、工程地质勘察和对建筑物沉降观测资料分析, 最后选择桩式托换技术, 即在基础底面下先压桩, 支托住原有建筑物荷载, 然后进行纠偏和顶升复位。1990年竣工并调整轨道, 1991年元月试车重新投产, 取得了显著的技术经济效果。

表1

地基土物理力学性指标

层次	深度 (m)	土层名称	γ (kN/m ³)	w (%)	γ_d (kN/m ³)	e	w_L (%)	I_p	I_L	a_{1-2} (MPa ⁻¹)	E_s (MPa)	[R] (kPa)
I	12.0	非湿陷性黄土 (含少量姜结石)	19.7	23.6	15.8	0.72	28.5	11.56	0.70	0.30	5.63	130
II	15.6	非湿陷性黄土 (含多量姜结石)	20.4	22.3	16.7	0.61	25.0	9.85	0.75	0.11	15.15	160

二、工程地质条件

据工程地质资料,土层分布和地基土的物理力学性指标见表1。所压的桩尖均压入力学性能较好的非湿陷性土层中。地下水位位于地表下10.0m。

三、设计和施工

(一)设计概况

1. 根据沉降观测资料,经计算确定:对纠偏柱基沉降大的一侧,基底面两角设置两根桩;对顶升柱基基底面四角设置四根桩(仅双基基底为六根桩)。由承台将桩和原来的基础连接,通过桩直接传递荷载到力学性能较好的非湿陷性土层上,从而控制柱基础的沉降与倾斜。

2. 按工程要求,设计采用预制钢筋混凝土方桩。桩断面为20cm×20cm,第一节桩长分1.2和1.5m二种,其中部分1.2m桩带桩尖,锥角为60°。桩身混凝土强度为C₃₀。

3. 压桩入土深度,根据地质条件设计为12.0m,终止压力不小于300kN,即大于设计荷载1.5倍。

4. 控制基础变形不超过2.0mm。

(二)施工步骤和方法

1. 挖坑。桩位确定后开始挖长3.0~5.0m,宽1.0m深4.0~5.0m操作竖坑,然后挖洞宽0.6m,深0.6m,并逐步扩展到基础底面。

2. 挖小方坑下第一节桩。按桩距基础边尺寸要求,在操作坑底挖20cm×20cm×50cm小方坑,在小方坑中垂直放入第一节桩(带桩尖端),四周捣实后其上放置1.2m或1.5m平桩,对准中心找好垂直,用垫片垫稳进行焊接。

3. 压桩与观测。将油压千斤顶座落在桩顶钢板上,对准中心,其上端用钢板或承压钢管,然后用铁锤将钢楔打紧稳固,以基础上部荷载作反力,采用千斤顶加压,如图1与图2所示。加压时进行桩阻力与压入深度及桩阻力与原基础变形观测工作。当桩压到预定终止压力和深度停止时,经过一小时观测压力不变者认为稳定。

4. 接桩与千斤顶卸压。用千斤顶加压,当地基反力小于单桩设计荷载时,桩被一节一节压入土层中,节与节之间用电焊焊接。在加压过程中,当千斤顶安全行程达到18cm时,应立即停止加压,进行卸压回零后再压下千斤顶回原位,这样反复施压直至将桩压到预定压力为止。

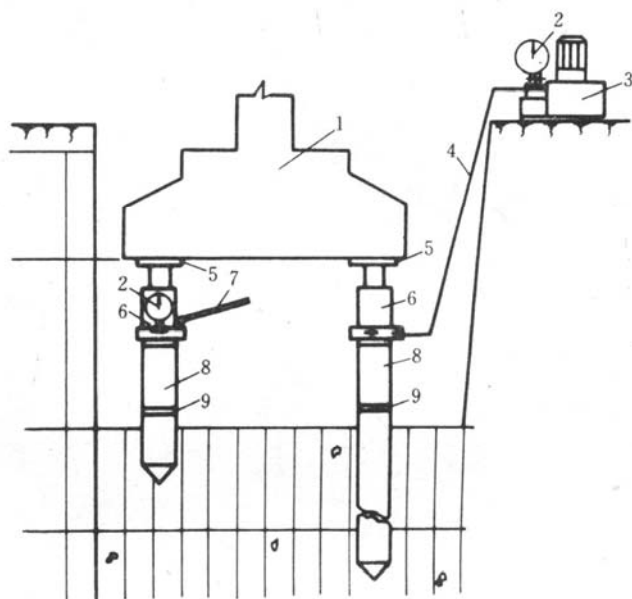
5. 单桩静载荷试验。将桩压入土层某一深度,达到设计荷载1.5倍停止,所施加的静压力称为压桩终止压力(或阻力)。由于这种阻力是一种破坏土层的极限荷载,所以该值不能作为压桩的单桩容许承载力。因为纠偏和顶升是以柱基础底面下预压桩作反力,从而向上抬高基础。为可靠地提供单桩容许承载力,并保持桩顶变形在容许沉降范围内,应采用单桩静载荷试验(简称试桩)确定。

试验方法是当压桩结束后将千斤顶置于桩顶上,并对准中心。在千斤顶上部用立柱钢管和钢垫板支承基础底面,以基础的上部荷载作反力,逐级加荷,从而对桩尖下土层施加压力。桩顶下安置两块百分表,进行观测各级荷载下沉降量。试验结束后进行卸荷,测定回弹。试

验标准等均按《JGJ4-80》规程有关规定进行^[1]。



图1 坑下压桩情景



(a) 人力坑下加压 (b) 地面电动油泵加压

- | | | |
|--------|--------|------------|
| 1 桩基础 | 4 高压胶管 | 7 加压杆 |
| 2 压力表 | 5 钢垫板 | 8 预制钢筋混凝土桩 |
| 3 电动油泵 | 6 千斤顶 | 9 桩接头焊接处 |

图2 基础底面下土层与压桩示意

6. 纠偏与顶升。在基础底面下预压桩桩顶上, 安装两开式托换支座。在托换支座间放置一台500kN主千斤顶, 两侧各放置一台320kN保护千斤顶, 如图3所示。在纠偏和顶升加荷时, 均以预压桩作反力。各桩顶主千斤顶进行同步加压, 两侧保护千斤顶紧跟。加压至将基础顶升达到要求高度和垂直度时为止。用地面与柱身上安置的百分表观测控制, 并用水准仪与经纬仪监测。

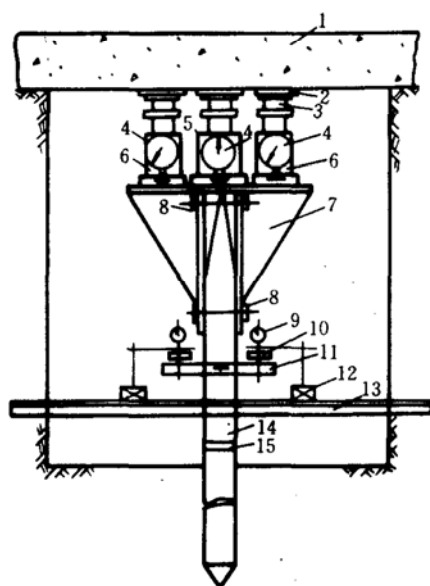
7. 托换与回弹。纠偏和顶升完毕, 将托换支座两侧保护千斤顶同步加压, 使主千斤顶降压至零撤出后, 迅速将 $\phi 159$ 钢管与钢板塞入桩顶与基础底面之间, 并用铁锤将钢楔打紧(图4), 托换完毕。这时再将托换支座两侧保护千斤顶卸荷至零, 由地面和预压桩下安置的百分表观测回弹。每隔10分钟观测一次, 回弹增量小于0.02mm时认为稳定。稳定后撤出保护千斤顶, 拆去托换支座, 并将桩顶钢管上下两端用电焊焊接牢固。

8. 操作坑回填夯实。完成桩式托换后, 由操作坑底向上用原土进行回填夯实。每层为0.2m厚, 用夯锤夯三遍, 直到夯到桩头下0.2m止。

9. 浇灌混凝土承台。在基底与桩顶下0.2m间浇灌混凝土, 并用软轴插入式振动棒振实。对顶升柱基础下四周放入钢筋笼搭接作圈梁, 中间浇灌混凝土承台, 并振动捣实。

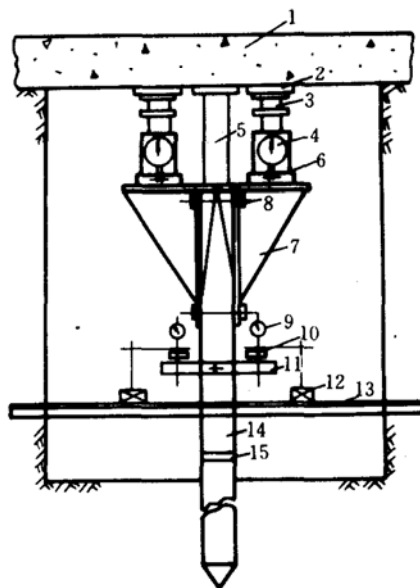
10. 压浆。浇灌混凝土承台与基底间空隙, 用灰浆泵进行压浆, 使桩和基础连接成整体。为避免浆液受空气阻塞, 应提前在承台上部设置两根空心钢管。

11. 拆模回填恢复原来地面。压浆工作结束后, 将所有模板拆除, 用原土回填, 分层夯实整平地面。



- | | | |
|--------|---------|-------------|
| 1 桩基础 | 6 保护千斤顶 | 11 表夹 |
| 2 钢垫板 | 7 托换支座 | 12 磁性表座 |
| 3 垫块 | 8 螺栓 | 13 测量横梁 |
| 4 压力表 | 9 百分表 | 14 预制钢筋混凝土桩 |
| 5 主千斤顶 | 10 调整螺丝 | 15 桩接头焊接处 |

图3 预压桩柱基顶升方法示意



- | | | |
|--------|---------|-------------|
| 1 桩基础 | 6 保护千斤顶 | 11 表夹 |
| 2 钢垫板 | 7 托换支座 | 12 磁性表座 |
| 3 垫块 | 8 螺栓 | 13 测量横梁 |
| 4 压力表 | 9 百分表 | 14 预制钢筋混凝土桩 |
| 5 托换钢管 | 10 调整螺丝 | 15 桩接头焊接处 |

图4 桩式托换与观测回弹装置

四、桩式托换成果及其分析

按照上述方法,本工程共压入84根桩,试桩5根,柱基纠偏14根,柱基顶升15根,其平面布置见图5。

(一) 压桩

绘制压桩阻力 P_s 与桩尖入土深度 H 关系曲线见图6。

由上述结果得出:

1. 桩入土深度, D 列柱基为11.20~12.15m, 平均11.72m; A 列柱基为12.10~12.90m, 平均12.59m。压桩终止压力, D 列柱基为300.0~401.3kN, 平均345.6kN; A 列柱基为350.0~437.5kN, 平均390.5kN。相比之下, D 列柱基偏小, 但场地地质条件两者相似。原因是 A 列柱基为纠偏, 只在两侧挖操作坑, 而 D 列柱基属于顶升, 在四周挖操作坑。由于卸除土自重摩阻力较大, 柱基自身反力必然减小。所以尖桩阻力稍超出上部荷载时, 柱基就有抬高现象(如 $D13$ ~ $D16$ 柱基)。表现特征为桩尖不进尺, 地层与基底分界线离开, 并有明显裂缝, 这时应立即停止压桩。

根据资料计算柱基荷载为600.0kN, 而压桩终止压力均远大于柱基上部荷载, 分别为 A 列的2.60倍, D 列的2.36倍, 平均为2.48倍, 表明已远远满足设计规范要求。

2. 压桩阻力 P_s 随桩入土深度增加而增大, 但不成比例。当桩尖进入不同土层时, 桩阻力将发生明显变化。如 D 列柱基深度11.0~12.0m以下和 A 列12.0m以下, 桩阻力由200.0kN很快增加到300.0~400.0kN, 它和通常静力触探曲线一样。这主要原因是土层厚薄以及上下土层软硬程度不同造成的。另外, 操作坑深浅还与先下第一节桩埋深、周围土捣实

程度等原因有关。

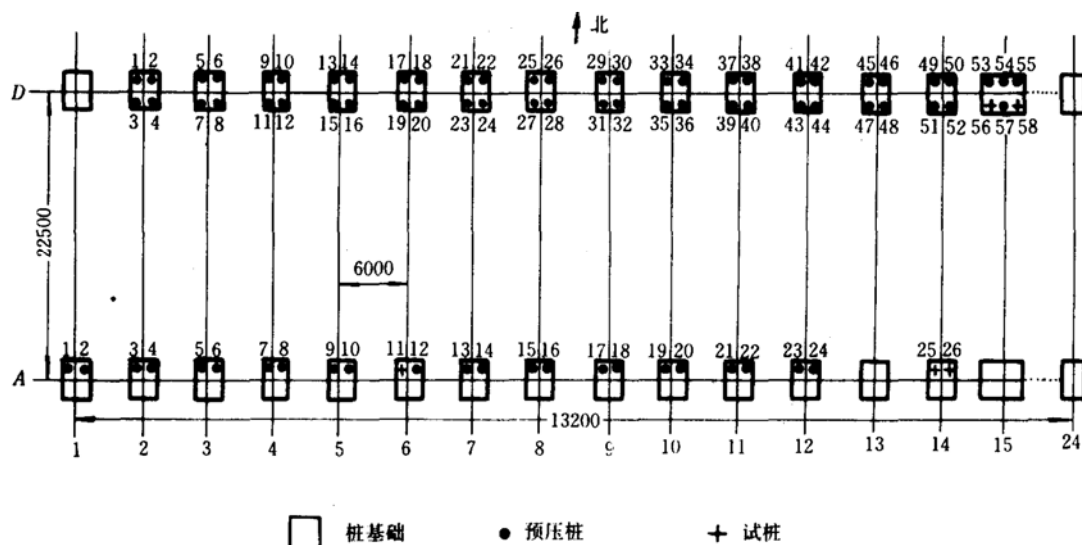
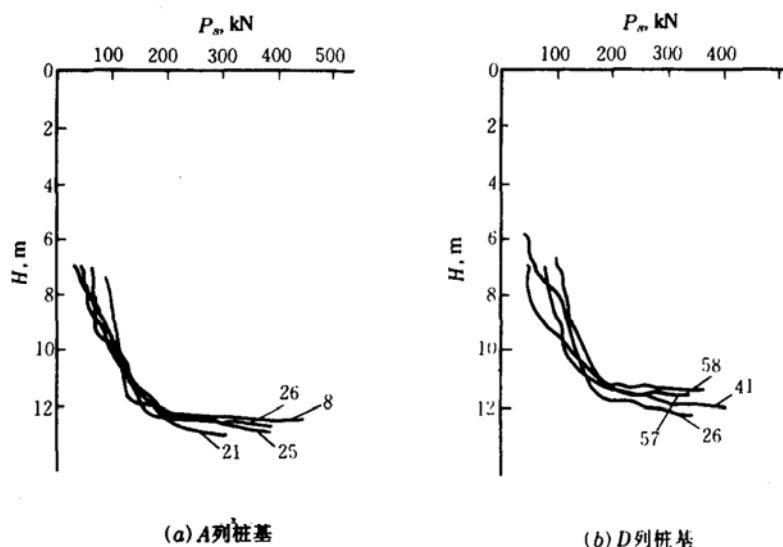


图5 西北橡胶厂露天跨桩式托换压桩柱基纠偏顶升竣工图



注: 图中数码表示桩号

图6 压桩 P_s - H 关系曲线

3. 在压桩过程详细观察基础底面情况, 均未发现有新的裂缝, 说明基础本身强度满足要求, 采用桩式托换是可行的。

4. 桩身垂直度据垂线锤观测, 产生偏差仅为4~20mm, 均小于容许偏差(桩长0.5%), 符合要求。

(二) 单桩容许承载力的确定

压桩结束后选择5根具有代表性的桩进行了试桩。P-S曲线如图7所示, 结果列入表2中。

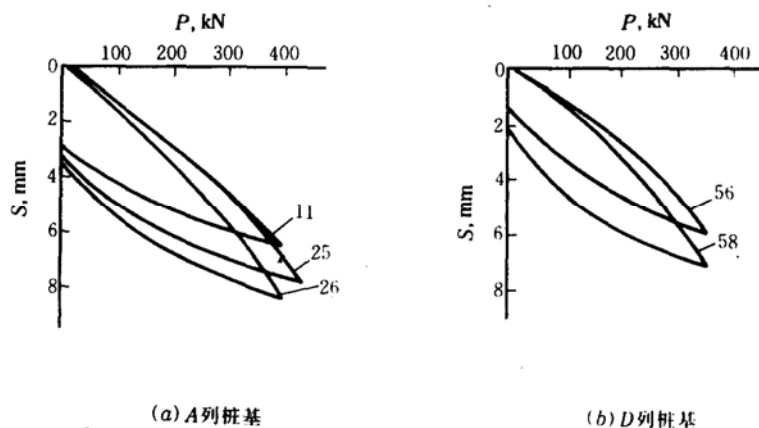
由图7可见, 曲线均未出现拐点。容许承载力的确定, 采用从强度稳定条件和变形条件双控制方法, 同时考虑到柱基纠偏和顶升是以预压桩作反力, 控制地基加固后不再产生新的

沉降这一因素, 取桩顶容许沉降 $S=3\text{mm}$ (即弹性变形范围内) 所对应荷载作为容许承载力。

由表2得知, 单桩容许承载力为170~230kN, 平均200.0kN。从安全角度出发, 取其最小算术平均值186kN作为本工程预压桩单桩容许承载力。总回弹量占总沉降量的53%~76%, 平均63.4%, 其大小变化与地基土强度及终止压力有关。

表2 试桩结果

试桩编号	试桩终止压力 P (kN)	总沉降量 S (mm)	总回弹量 $S_{\text{上}}$ (mm)	容许承载力 $P_{\text{容}}$ (kN)
A6~11	425	7.30	4.12	210
A14~25	400	6.38	3.41	210
A14~26	400	8.30	4.95	170
D15~56	350	7.00	5.02	190
D16~58	350	5.62	4.25	230



注: 图中数码表示桩号

图7 试桩 $P-S$ 曲线

(三) 纠偏与顶升

1. 纠偏。柱基纠偏结果为:

(1) 原设计 A 列柱基最大倾斜值 -35mm , D 列柱基最大倾斜值 -72mm , 偏北。经过实际纠偏后, A 列柱基倾斜值除一个最大为 $+22\text{mm}$ 外, 其余 $-2\sim+17\text{mm}$; D 列柱基纠偏后倾斜值除一个最大 -22mm 外, 其余 $-10\sim+18\text{mm}$ 。表明经过实际纠偏后柱基得到扶正。

(2) 据统计, 在28个柱基纠偏中, 达合格标准的 (倾斜值小于 $\pm 20\text{mm}$) 占93%, 超过 $\pm 20\text{mm}$ 的占7%, 超过值仅2mm, 也可认为基本合格。由此表明柱基纠偏是成功的。

(3) 柱基纠偏后出现 $\pm 20\text{mm}$ 较大数值, 这是因为在顶升托换时, 桩顶与基础之间塞入钢管与垫钢板不平整所造成。

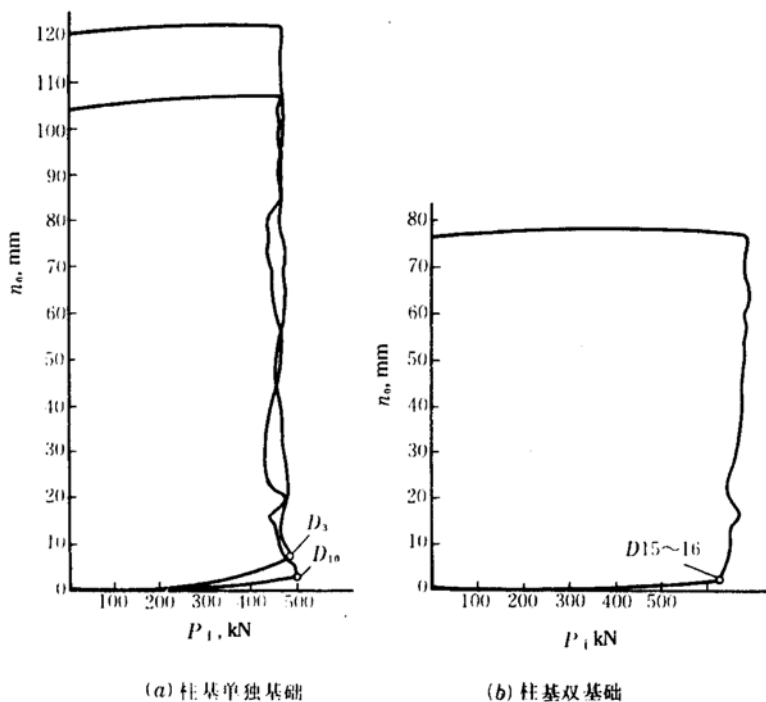
2. 顶升。从图8柱基顶升测试成果得知:

(1) 原设计柱基顶升为76~124mm, 而实测顶升量达76~120mm, 误差在 $\pm 5\text{mm}$ 以内, 完全满足规范要求 ($n_0 - n < \pm 5\text{mm}$), 证明顶升是成功的。

(2) 柱基顶起实测荷载除了一个最小为412.5kN和最大为656.3kN (双基) 外, 其余为462.5~508.0kN, 平均481.9kN, 它比计算的柱基荷载600.0kN为小。其原因是柱基周壁操

作坑除去土自重和摩擦阻力影响所造成。

(3) 试桩确定的单桩容许承载力为186kN, 实际顶升时仅用121.7kN, 相应沉降为1.3~2.0mm, 平均为1.6mm, 小于桩顶容许变形($S=3\text{mm}$)。两者相比, 试桩确定的容许承载力为实际顶升荷载的1.53倍, 这就证明 P_{s-3} 是安全可靠的。由文献[2]得知, 当压桩压到设计标高, 间歇时间 t 在10~48天内, 间歇前后的起动阻力比值 $K = \frac{P_2}{P_1}$ (P_2 为间歇后起动阻力; P_1 为间歇前起动阻力) 为1.10~1.77。



注: 图中数码表示桩基号

图8 顶升 P - n_s 关系曲线

而本工程压桩实测资料求得的 K - t 相关关系, 从6组对比试验结果清晰地显示了两组具有线性关系(图9)。经整理建立回归方程为

$$K = 0.967 + 0.0168t \quad n=6, R=0.994, S=0.03$$

而实际压桩完成后间歇时间还要长。所以压桩阻力达到1.5倍设计荷载后, 再经过一定时间休止后, 桩的承载力还有较大的增加, 一般安全度可达到2.0, 完全满足设计规范的要求。另外, 实际压桩时操作坑底以上有2.0~3.0m高, 是在四周凌空条件下进行压桩, 压完后经过回填夯实和浇灌混凝土, 还会增加桩周摩擦阻力和土自重压力, 从而又增加一定安全储备。

(四) 托换后卸荷回弹

1. 预压桩托换卸荷回弹

托换荷载为压桩终止压力90%, 它是以柱基上部荷载作反力, 卸荷后桩顶均出现向上回弹现象。托换卸荷回弹为0.84~2.80mm, 平均1.6mm。明显看出回弹值不等, 其原因是

- (1) 托换钢管上端钢板与基础底面不是同一平面, 它与钢楔的松紧程度有关;
- (2) 钢筋混凝土桩与桩头钢板在荷载作用下都会产生微小变形。因此测得的回弹并非都

是桩基土回弹, 主要是钢板垫与基础接触面不平, 受力作用后被压实所致。

通过工程实践笔者认为, 桩式托换后有效地阻止了桩顶回弹, 但还不能全部阻止, 只要将钢管与基础底面全部密贴接合, 钢板钢楔打得紧, 就可阻止桩顶回弹达80%以上。

(3) 桩顶向上反力 $P_{\uparrow}$ 与托换回弹 $S_{\uparrow}$ 的关系。根据5组试桩测得的各级荷载下回弹结果(图10), 表明桩顶向上反力 $P_{\uparrow}$ 随回弹 $S_{\uparrow}$ 增高而减小。据此建立其相关方程为:

$$S_{\uparrow} = 5.13 \cdot (0.993)^{P_{\uparrow}}$$

相关系数 $R = -0.99$, 显然, $|R|$ 接近1.0, 说明所配的相关方程具有实际意义。

本工程桩式托换测得回弹为1.6mm, 按上述经验关系估算, 桩顶向上反力达153kN。由此充分说明, 桩式托换阻止桩顶回弹越小, 桩顶向上反力就越大。它是控制随后沉降唯一有效可行的方法。

2. 柱基顶升托换后卸荷回弹

柱基顶升是以预压桩作反力, 向上抬高基础。当达到预计顶升量时, 进行托换。卸荷为零后观测到回弹 $S_{\downarrow}$ 为0.70~3.33mm, 平均1.90mm。大小不等的原因与钢板垫和基础底面接触程度相关。因此, 在柱基顶升前除尽量使托换钢板垫与基础底面全部接触外, 尚应考虑比设计顶升量多2~3mm的回弹量为宜。

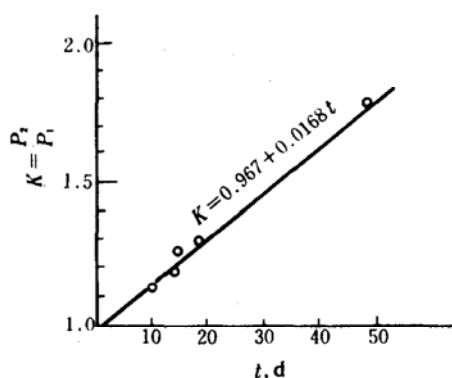


图9 t - K 相关图

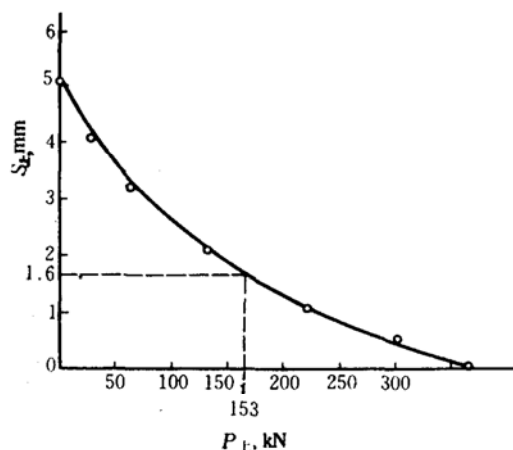


图10 $P_{\uparrow}$ - $S_{\uparrow}$ 相关曲线

(五) 压浆

顶升柱基础底面与桩顶间浇灌混凝土承台后, 均进行压浆。实际观察到浆液从溢浆口流出吸浆量为0.54~1.21m³, 表明空隙已由浆液充满。

五、结 论

1. 本工程根据建筑物结构情况和地质条件, 进行的桩式托换压桩、柱基纠偏和顶升都是成功的。托换加固后沉降稳定, 吊车行驶正常。
2. 预压桩终止压力是建筑物设计荷载的2.48倍。说明已充分满足设计规范要求。
3. 根据试桩资料, 按强度和变形双控制方法确定的单桩容许承载力 P_a , 为实际柱基顶升荷载的1.53倍。实践证明, 柱基加固后是安全可靠的。
4. 柱基础采用桩式托换, 可阻止桩顶回弹达70%以上。而桩顶向上反力可达到153kN, 从而可防止建筑物基础不再产生新的沉降, 并维持稳定。

5. 桩式托换钢板垫与基底面之间, 应尽可能全部接触, 并须将钢楔打紧, 对控制回弹更为有效。

6. 柱基顶升前, 应考虑比设计顶升量多2~3mm的回弹调整量, 得出的设计精度更高。

7. 建筑物基础因不均匀沉降造成的倾斜, 采用桩式托换加固和顶升是有效的方法。托换后地基受力性能好, 安全可靠; 且见效快, 能立即承受上部荷载, 迅速阻止建筑物基础的不均匀沉降, 及时收到地基加固效果。

本工程桩式托换技术是涂光社教授开发设计的, 并在实际工作中得到他的关心指导和大力支持, 在此深表谢意。

参 考 文 献

- [1] 工业与民用建筑灌注桩基础设计与施工规程 (JGJ4-80). 北京: 中国建筑工业出版社, 1981.
- [2] 地基处理手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988.

A Case History of Underpinning of Column Footing

Chen Guo-zheng

(Xi'an Exploration Institute of China National Nonferrous Metals Industry Corporation)

Abstract

Methods and results of foundation improvement, column base re-alignment and jacking up by pile underpinning at the Northwest Rubber Factory, Shanxi are introduced. Results of analyzing eighty-four preloaded piles, fourteen column base re-alignment and fifteen column base jacking up showed that the bearing capacity of the foundation after pile underpinning, the reinforcing effect are reliable, the column base re-alignment and jacking up are successful. It is an effective methods for foundation improvement. From result of test pile method of determining allowable bearing capacity of single preloaded pile is presented. Empirical relationships between pile pressurizing resistance and intermittent time, upward reaction and rebound of top of pile are given. This method has a practical meaning in increasing safety margin and controlling further subsidence of structures.