

墩式托换用于柱基纠偏

刘 明 振

(西安建筑科技大学建工系, 710055)

文 摘 本文结合实际工程介绍了采用墩式托换进行柱基纠偏的设计施工方法, 在柱顶偏离位移量的量测中应注意的问题以及减少附加位移的工程措施。

关键词 托换墩, 纠偏, 位移。

1 前 言

柱基倾斜是工业厂房常见的工程问题之一, 以往常用桩式托换进行纠偏^[1]。本文介绍墩式托换进行纠偏的方法及其设计和施工(包括量测)中应注意的问题。

某厂原料库, 跨度 19.5m, 柱距 6.0m, 东西长 168.0m, 室内地面南高北低; 高差 2.0m。南列柱两侧有两条铁路平行柱列, 北侧铁路轨枕压在柱基北边缘上, 南侧铁路路轨距柱列轴线仅 2.5m。南列柱处地面相对标高为 2.000m, 北列柱处地面相对标高为 ± 0.000 , 基础埋深均为 2.0m, 柱顶标高 11.7m。现浇钢筋混凝土矩形基础底面分别为: 南列柱 2.3m $\times$ 3.7m; 北列柱 2.5m $\times$ 4.7m。库内设置 10t 和 15t 吊车各一台。该库建于 1972 年, 投产后发现柱身逐渐倾斜, 出现日趋严重的卡轨现象, 以至于发生吊车脱轨跌落事故。截止纠偏施工前, 柱顶最大偏离位移量已达到 120mm。经检测认为, 柱基倾斜的主要原因为: ①大面积堆载。地面长期堆放废钢铁, 荷载高达 200~350kPa; ②铁路荷载偏压作用; ③地基土浸水; ④基础施工质量欠佳, 定位不准, 问题坑没作认真处理, 留有隐患。

2 柱顶偏离位移量的测量

柱顶偏离位移量由两部分组成: 第一, 是柱底偏离位移即基础的平移量; 第二, 是柱身倾斜位移量。笔者认为, 目前对柱顶偏离位移量的测量, 多数只注意到后者, 忽视了前者。其主要原因是, 经多年使用之后, 厂房的原施工轴线标志已无从查找; 柱列的存在影响通视, 测量现有柱列的轴线存在一定的困难。事实证明, 忽视任何一部分都是不合理的, 没有可靠检测数据的纠偏施工带有一定的盲目性。表 1 的实测数据可以说明这一问题。根据本工程的使用要求, 柱顶偏离位移量不得大于 30mm, 因此在不测柱底偏离位移量的情况下所需纠偏柱数仅为 5 根, 然而满足使用要求的纠偏根数应该为表中列出的 12 根。

3 托换墩的设计

3.1 托换墩持力层的选择

场地的工程地质和水文地质条件是选择托换方式的重要依据。当地下水位埋藏较深，在基础底面以下的不大深度内存在着较密实的土层可供选为托换墩的持力层，且拟作持力层的土层到基础底面间的土层在开挖过程中有较好的稳定性时（见墩坑开挖稳定性分析），可选择墩式托换。

表 1 柱顶偏离位移量大于 30mm 的柱的各位移分量

柱号		N ₅	N ₇	N ₈	N ₁₀	N ₁₁	N ₂₁	S ₁₈	S ₂₁	S ₂₂	S ₂₆	S ₂₇	S ₂₈
偏离位移量 (mm)													
柱身倾斜位移量	偏南	26	56	26	21	40	29				38	90	72
	偏北							16	19	21			
柱底偏离位移量	偏南	18	18	16	14	16	11				20	30	6
	偏北							26	29	12			
柱顶偏离位移量	偏南	44	76	42	35	56	40				58	120	78
	偏北							42	38	33			

注：表中 N、S 分别表示北列和南列柱

该原料库位于伊河阶地上，其南北方向上的工程地质剖面如图 1 所示，其中各层土的主要物理力学性质指标列于表 2。根据上述条件，分别选用粉质粘土Ⅱ和中粗砂层作为南北两列柱基托换墩的持力层。

表 2 各土层的主要物理力学性质指标

土层编号及名称	天然密度 ρ (g/cm ³)	天然含水量 w (%)	孔隙比 e	液 限 w_l (%)	塑性指数 I_p	内摩擦角 φ (°)	内聚力 c (kPa)	标贯击数 N
①填土	1.81	19.5	0.78	28	13.0			
②粉质粘土Ⅰ	1.75	22.0	0.88	27	12.5	8~12	25	
③粉质粘土Ⅱ	1.85	22.5	0.80	29	14.0	16~18	30	
④中粗砂								13~18
⑤砂砾石								30~40

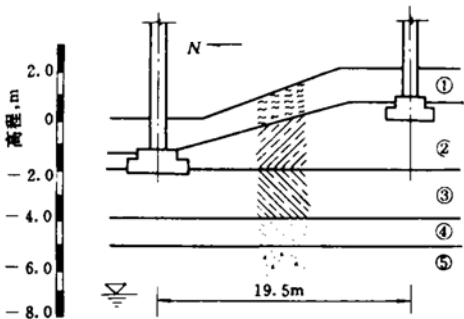


图 1 工程地质剖面

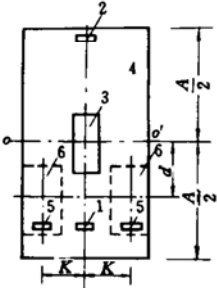


图 2 托换墩布置

1, 2. 百分表 3. 柱 4. 基础底面
5. 百分表 6. 托换墩

3.2 托换墩设计计算

由表 1 可知，本原料库各柱底偏离位移均不超过 30mm，纠偏施工只要保证柱身回到垂直位置便可满足使用要求，所以在本次纠偏设计中仅考虑在沉降量较大一侧的基础下设置托换墩，其平面布置如图 2 所示，图中 d 为托换墩底面形心到柱基底面形心轴 oo' 的距离，两

托换墩关于柱基底面的另一形心轴 y 对称设置, 托换墩位置应通过基础抗弯和抗剪验算来确定, 计算方法同钢筋混凝土基础设计。墩身高度由基础底面到墩底持力层间距离并经过墩坑稳定分析来确定。墩底面积应由下述条件决定: ①纠偏荷载与托换墩的承载能力; ②墩坑开挖条件; ③纠偏操作条件。以下给予分项说明。

(1) 纠偏荷载的估计

纠偏顶升之前, 应根据具体情况部分或全部解除柱身与其它构件的连接。在全部约束解除的条件下, 可将吊车梁、柱及基础等构件重量视为作用于基底形心处的集中力 ΣP 和力偶 ΣM , 纠偏顶升时基础受力简图如图 3 所示, 其中 F 为一个托换墩上的顶升力。顶升力 F 和地基反力为未知量, 直接求解困难, 实用上先进行简化处理, 然后根据工程经验乘以一个调整系数, 笔者的作法是:

$$F = \alpha \frac{A\Sigma P + 2\Sigma M}{2(2d + A)}, \quad \alpha = 1.2 \sim 1.3 \quad (1)$$

式中各符号的意义见图 2 及图 3; 调整系数 α 出现的原因是: ① ΣP 和 ΣM 的计算不一定可靠; ②约束解除并不十分彻底; ③基础与四周土的摩阻力及基底土的粘结作用的存在, 地基反力分布的不确定性。

对于给定的一个 d 值, 有一个对应的 F 值, 采用这一组 d, F 值对基础进行抗弯、抗剪验算, 当基础强度不能满足时, 应改变 d 值, 重新进行上述过程。这样可以得到多组满足基础强度条件的 d, F 值, 以供托换墩底面设计和墩坑开挖稳定分析选用。满足承载力条件、墩坑稳定条件和施工条件的 d, F 值才是最终选用的值。

在有些条件下, 约束难以全部解除, 如柱与屋架的连接、施工中不停产的吊车梁与柱的连接等。这时就必须考虑约束作用引起的纠偏荷载和纠偏引起的构件内力所产生的近期和长期影响。关于这种条件下的计算, 由于篇幅所限, 笔者将另文介绍。

(2) 托换墩承载力设计值的确定

在纠偏过程中托换墩提供顶升反力, 纠偏完成后作为基础的一部分, 承受一定的上部荷载。在确定其承载力时, 要保证它在顶升过程中沉降量小、稳定快, 在以后的正常使用中附加沉降小, 这就要求我们选取承载力时留有足够的储备。考虑到托换墩的高度一般都不大, 墩周土在以后的正常使用中还将承受一定的基底压力, 所以可以不计墩身与周围土的摩阻力, 同时也不计墩的自重。这时墩的承载力为

$$R_p = fA_p \quad (2)$$

式中 f 为墩底持力层的承载力; A_p 为墩底面积。根据笔者的经验

$$f = \frac{\pi(\gamma D + c \operatorname{ctg} \varphi)}{\operatorname{ctg} \varphi + \varphi - \frac{\pi}{2}} + \gamma D \quad (3)$$

式 (3) 即临塑荷载公式, 在一般的土力学书中都可查到, 式中埋深 D 应自基础底面算起。

(3) 墩坑开挖稳定性分析

在基础持力层中开挖墩坑, 削减了基础的支承面积。如果开挖过大, 可能使基础产生新的倾斜并增加施工的危险性。文献 [2, 3] 认为, 一次托换不应超过基础支承面积的 20%。笔者认为, 一次托换面积的大小与多种因素有关, 如被开挖土层的稳定性, 托换施工期间基

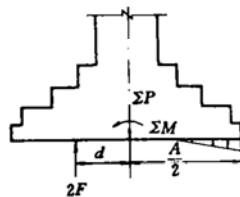


图3 计算简图

底接触压力的大小以及柱身约束的解除情况等,应视具体情况而定。一方面需要定量的分析计算,另一方面需根据施工经验进行判断。在本原料库的墩坑开挖中,曾一次试挖面积达到基础支承面积的 30%,施工仍是安全的,经测量表明,开挖没有造成新的倾斜。关于墩坑开挖稳定分析,笔者建议按下述方法进行:作为基础托换的墩坑,其横断面面积通常是不大的,其稳定性的分析属于空间课题,要考虑土的成拱作用。

a) 开挖的临界深度

直接采用 Beresantsev (1958) 的公式^[3]

$$\gamma R \frac{\sqrt{K_a}}{\lambda - 1} \left[1 - \left(\frac{R}{R_b} \right)^{\lambda - 1} \right] + q \left(\frac{R}{R_b} \right) + c \operatorname{ctg} \varphi \left[\left(\frac{R}{R_b} \right)^2 K_a - 1 \right] = 0 \quad (4)$$

式中 R 为墩坑半径,当墩坑为矩形时, R 为其长边的一半; γ 为土的密度; K_a 为朗肯主动土压力系数, $K_a = \operatorname{tg}^2 (45^\circ - \frac{\varphi}{2})$; $\lambda = 2 \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} (45^\circ + \varphi/2)$; c , φ 分别为土的内聚力及内摩擦角; q 为地面荷载。由式 (4) 解得 $\frac{R}{R_b}$ 之后,可由式 (5) 求出开挖的临界深度

$$z_{cr} = (R_b - R) / \sqrt{K_a} \quad (5)$$

墩坑开挖深度在基底范围以内和以外部分往往是不同的,其对应的地面荷载 q 也不相同,因此应分别验算。当开挖深度超过 z_{cr} 时,应采取支护措施,作用在支护上的土压力可按式 (6) 计算,式中 $R_b = R + z \sqrt{K_a}$; 深度 z 自地面算起。

$$\sigma_r = \gamma R \frac{\sqrt{K_a}}{\lambda - 1} \left[1 - \left(\frac{R}{R_b} \right)^{\lambda - 1} \right] + q \left(\frac{R}{R_b} \right) + c \operatorname{ctg} \varphi \left[\left(\frac{R}{R_b} \right)^2 K_a - 1 \right] \quad (6)$$

b) 关于地面荷载 q 的计算

基础以外的地面荷载按开挖时的实际地面荷载计算,基坑底面以下土体表面的荷载应根据开挖后的基底压力进行计算。设墩坑开挖后的基底压力沿长边 A 为直线变化,为计算方便,取地面荷载 q 等于墩坑中心线处对应的基底压力。如图 4 所示,墩坑开挖后基底支承面的面积为:

$$S = AB - 2lb \quad (7)$$

支承面中性轴到图中 x 轴的距离为

$$y = \frac{A^2 B - 2lb(2d + A)}{2(AB - 2bl)} \quad (8)$$

支承面关于自身中性轴的惯性矩为

$$J = \frac{A^3 B}{12} + AB \left(\frac{A}{2} - y \right)^2 - \frac{bl^3}{6} - 2bl \left(d + \frac{A}{2} - y \right)^2 \quad (9)$$

由材料力学公式得出基底最小压力

$$p_{\min} = \frac{\sum p}{S} - \frac{\sum M + \left(\frac{A}{2} - y \right) \sum p}{J} y \quad (10)$$

当 $p_{\min} \geq 0$ 时:

$$q = \frac{\sum p}{S} + \frac{\sum M + \left(\frac{A}{2} - y \right) \sum p}{J} \left(d + \frac{A}{2} - y \right) \quad (11)$$

当 $p_{\min} < 0$ 时,因不计地基土的抗拉作用,应考虑地基反力重分布。如图 4 所示,设地基反

力分布长度为 T , 由静力平衡条件可推得

$$\frac{B\Sigma p}{3}T^3 - B(n\Sigma p + \frac{\bar{M}}{2})T^2 + (a\Sigma p + 2bl\bar{M})T + \beta\Sigma p + bl(2d - A)\bar{M} = 0 \quad (12)$$

式中 $n = \frac{A}{2} - d + \frac{l}{2}$; $m = n - l$; $a = B - 2b$; $\bar{M} = \frac{A}{2}\Sigma p + \Sigma M$; $\alpha = Bm(A + \frac{B}{2}) + al(\frac{A}{2} + d) + Bl(A - 2d)$; $\beta = \frac{al^3}{12} - \frac{Bn^3}{3} - \frac{ABm^2}{2} - \frac{Bl}{3}(n^2 + mn + m^2) + al(\frac{l}{2} - n)(\frac{A}{2} + d)$; 其余符号同前。

由式 (12) 解得 T 后, 墩坑中心线处的地面荷载

$$q = \frac{(T - \frac{A}{2} + d)\Sigma p}{bl(A - 2d) - 2blT + \frac{B}{2}T^2} \quad (13)$$

式中符号意义同前。式 (11) 和 (13) 仅适用于柱身约束全部解除的情况。

c) 考虑滑动面重合的影响

公式 (4) 是按滑动面与水平面呈 $(45^\circ + \frac{\varphi}{2})$ 角推导出的, 当墩坑开挖深度 h 较大或墩坑间所留土柱宽度较小时, 出现 $(B - 2b) < 2htg(45^\circ - \frac{\varphi}{2})$ 的情况, 即滑动面发生交叉, 交叉线以上部分滑动面提供的抗滑力减少。为计及这一影响, 作为简化计算, 应保证

$$q \leq q_u \quad (14)$$

式中 q_u 为地基土的无侧限抗压强度。

4 测试结果分析和减少附加位移的工程措施

4.1 测试结果分析

托换墩混凝土达到预定的强度后便可进行纠偏顶升, 顶升前应在墩顶及基础顶面的图 2 所示位置设置位移百分表, 用于观测托换墩的沉降、回弹变形以及基础各部位的位移情况, 同时用经纬仪观测柱顶水平位移。图 5 所示为实测位移与顶升力 $2F$ 之间的关系。图中曲线编号 1, 2 与图 2 中对应百分表编号相同, 曲线 3 和 4 则分别为墩顶和柱顶的位移曲线。为区别约束条件, 在曲线编号后加上了“a”和“b”。对曲线 1, 2, 3 来说, 以测点上升为正。对曲线 4 则柱顶朝纠偏方向上的位移为正。图 6 是吊车梁与柱的连接方式。

从图 5 可看出, 无论约束解除与否, 柱顶水平位移与顶升力 $2F$ 之间的关系曲线均可划分为三个阶段, 即: 初始直线段 OA, 中间过渡段 AB 和大位移直线段 BC。与曲线 4a 和 4b 相对应, 曲线 1a, 2a 和 1b, 2b 也出现相应的分段。就图 5 (a) 来说, 在纠偏的初始阶段, 被顶起一侧基础的基底压力减小, 另一侧增

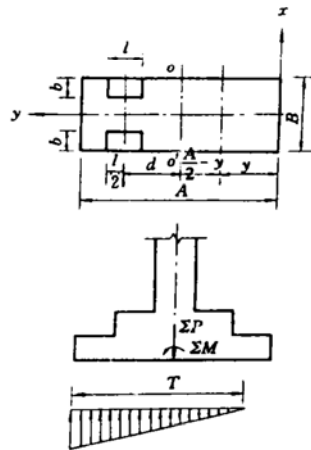


图 4 基底压力计算简图

加,减少一侧地基土卸荷回弹,增加一侧地基土加荷再压缩,无论是回弹还是再压缩,土体的应力应变关系基本上是线性的,相应阶段曲线为直线段。随着顶升位移增加,地基土的支承面积减小,基础边缘处地基土进入塑性状态,塑性区随着顶升量的增加而扩大,地基土的非线性应力应变关系导致了曲线的明显弯曲。在BC段,顶升一侧基础逐渐与地基土脱离,基础与基底土之间的粘结力以及它与周围土层间的摩阻力迅速下降,基础另一侧的支承面积进一步缩小,沉降加快,柱顶位移及顶升一侧基础的位移急剧增加,顶升力减小,托换墩发生轻微的回弹上升。

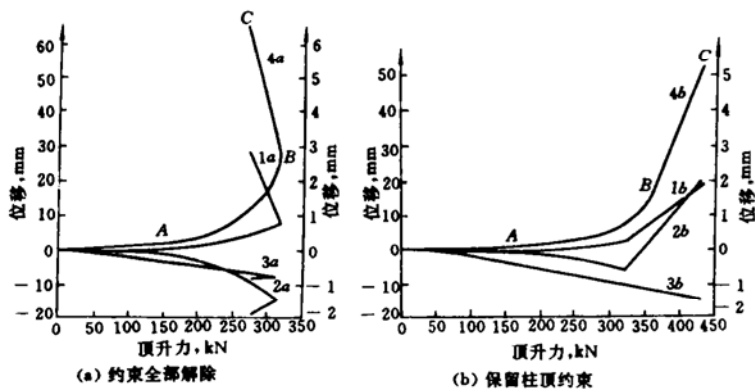


图5 测点位移与顶升力(2F)的关系

注:图中纵坐标,左侧用于曲线4a,1a,4b,1b;
右侧用于2a,3a,2b,3b。

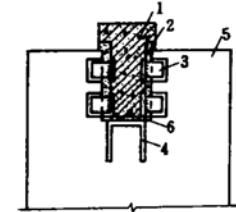


图6 柱顶与吊车梁的连接

将图5(b)与图5(a)的对应曲线相对比,可以看出,尽管柱顶吊车梁的约束存在,其曲线的初始段基本是一致的,对应测点在相同顶升力作用下的位移量十分接近,方向一致。这一事实表明,在顶升的初始阶段,柱顶约束的作用甚微,其原因可能是经过多年的使用后,吊车梁与柱间的连接已有所松动,另外柱的长期倾斜可能已使两侧吊车梁产生徐变和开裂。在纠偏顶升的第二阶段,两图的对应曲线出现明显的差异,曲线2b由下沉转为上升,这表明柱顶约束已逐步发生作用并随着柱顶位移的增加而增大。在第三阶段,测点1和2同时(不同步)上升,柱顶位移的继续增加需不断增大顶升力并表现为大致的线性关系。

4.2 减少柱顶附加位移的技术措施

纠偏顶升完成以后,由于基底压力的重分布和地基土变形的滞后性;另外由于构件混凝土的徐变和约束作用的松弛等,都会使柱顶继续产生一定的位移,笔者将其称为附加位移。表3给出本原料库在纠偏完成一周后的附加位移实测结果,其中位移方向与纠偏方向一致。

表3 柱顶附加位移实测结果

柱 号	N_5^*	N_7^*	N_8^*	N_{10}^*	N_{11}	S_{18}	S_{22}	S_{26}	S_{27}	S_{28}
附加位移(mm)	7	10	8	7	5	0	4	5	7	4

注: * 为纠偏时柱顶与吊车梁的连接没有解除

附加位移量的准确计算是困难的,在实际工程中,采取一定的措施来减小它是可行的,下面是笔者采用过的一些措施。

a) 预留位移。在纠偏顶升时,预留一定的位移量来抵消附加位移,其效果是令人满意的。一般地说,对柱身全部约束解除的柱,在柱顶可预留5mm的位移量;对不能全部解除

约束的柱, 预留量要视约束情况和纠偏引起的内力大小而定, 一般在 3~10mm 之间, 当地基土质较差时应适当扩大。

b) 注浆。注浆工作应尽快在纠偏完成后进行, 浆液浓度应尽可能加大, 以可灌注为准, 以免地基土吸水过多而软化。浆液的收缩也可能产生一定的附加位移, 简单的办法是二次补浆, 也可以加大注浆管和排气管的容量, 使管内留有足够的储备浆液来补充。

c) 快速预压。不是所有的附加位移都与纠偏方向相同, 当托换墩的安全储备不足时, 柱顶会产生与纠偏方向相反的位移。解决的方法是在纠偏顶升之前借助基础的荷载对托换墩逐个进行快速预压。

5 结 论

(1) 柱底偏离位移量是构成柱顶偏离位移量的一部分, 不可忽视对它的量测。

(2) 托换墩的设计要考虑纠偏荷载的大小, 墩的承载能力、墩坑开挖稳定条件和纠偏施工的需要。

(3) 纠偏顶升力的大小与柱的约束解除情况有关, 当约束完全解除时, 可按本文介绍的方法估算。

(4) 托换墩的承载能力可按本文的公式计算, 这样可以保证它在纠偏过程中沉降量小、稳定快, 纠偏完成后附加位移小。

(5) 一次托换面积的大小与多种因素有关。墩坑稳定分析可采用本文给出的方法。

(6) 纠偏顶升过程中, 柱顶位移与纠偏顶升力间的关系可分为三个阶段, 其中第二、第三阶段与柱身约束情况有关。

(7) 柱顶附加位移可采用本文介绍的措施来减小。

参 考 文 献

- 1 陈国政. 桩式托换柱基纠偏与顶升工程实例. 岩土工程学报, 1993, 15 (2)。
- 2 叶书麟等. 基础托换技术. 北京: 中国铁道出版社, 1991。
- 3 H. F. 温特科恩等. 基础工程手册. 钱鸿缙等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983。

Pit Underpinning Employed to Re-Align Column Footings

Liu Ming-zhen

(Xi'an University of Architecture Science and Technology)

Abstract , This paper introduces a design and construction method of pit underpinning employed to re-align column footings by means of a case record. Some issues which we should pay attention to during the measurement of column deviations, and engineering steps that we can take to reduce the extra displacement are also presented.

Key words pit underpinning, re-align, displacement.