

编者按：本期特邀的答疑嘉宾为魏宜龄先生。他毕业于唐山铁道学院（今西南交通大学），研究生，高级工程师；现任广东三和管桩有限公司总工程师。多年从事混凝土与水泥制品技术和研究工作。参与“预应力高强混凝土管桩耐久性的研究”和“免压蒸高耐久性PHC管桩的研制”的课题研究，并分别获得中国建材联合会建材类科技进步二等奖与广东省科技进步三等奖。参编国家标准《先张法预应力混凝土管桩》（GB13476-2009）、《钻芯检测离心高强混凝土抗压强度试验方法》（GB/T19496-2004）、国家图集《预应力混凝土管桩》（10G409）等的制定修订工作。2008年荣获建材行业劳动模范称号。



何谓PHC管桩的“免蒸压工艺技术”？

先张法预应力高强混凝土管桩（又称PHC管桩）在生产或制作过程中，为了加快模具周转，并且保证混凝土强度在比较短的时间内达到设计强度要求，一般会采用两次蒸养工艺，即常压蒸汽养护工艺和高压蒸汽养护工艺。常压蒸汽养护工艺的作用是使管桩混凝土强度达到不低于45MPa的放张强度要求，高压蒸汽养护工艺（又称压蒸工艺）的作用是使经过放张脱模的管桩混凝土在较短时间内（一般不超过12小时）达到设计要求的混凝土强度等级（C80）。

与其他水泥制品相比，PHC管桩的能耗比较大，突出表现在管桩混凝土生产的蒸汽养护工艺上。因此，工程技术人员想到能否取消压蒸工艺，从而减少能耗、降低成本（包括购置高压釜设备成本）？在此背景下，免蒸压工艺技术应运而生。

免蒸压工艺技术不是简单地取消压蒸工序，而是整体蒸汽养护工艺系统中的一个环节，要全面考虑。其具体技术要求是：在常压蒸汽养护后脱模一天管桩混凝土强度达到80MPa左右，三天强度达到管桩混凝土设计强度等级（C80），满足管桩产品出厂要求。同时还要保证管桩混凝土后期强度的正常增长。这个技术要求就是希望尽量保留压蒸工艺使管桩混凝土早强的特点，又不会对整个生产线做较大调整。那么，如何实现免蒸压工艺技术要求呢？这是免蒸压工艺技术的关键。要实现管桩混凝土在较短时间内达到设计强度，保证后期强度基本不回缩，一般要从原材料

优选、混凝土配合比优化设计、对常压蒸汽养护工艺调整，以及认真加强脱模后管桩混凝土的养护等方面着手解决。特别是，要在混凝土配合比优化设计上下功夫，或选用专用水泥，或选择合适的矿物掺和料，或采用高效减水的外加剂，或研制专用掺和料等，总之需要做大量的试验验证工作。当然，在实际操作上也可以根据具体情况，做相应调整，如适当延长达到混凝土设计强度等级（C80）的养护时间等。

如何分析管桩基础中的管桩所处的环境呢？

管桩基础通常解释为由沉入土（岩）层中的管桩和连接于桩顶的承台共同组成的建（构）筑

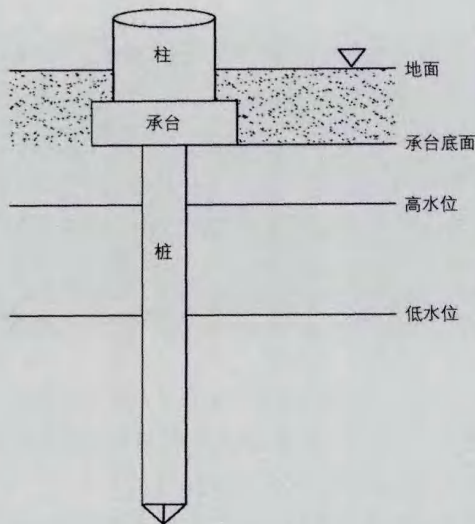


图1 管桩所处环境示意图

物基础,其作用是“承上启下”。在工业与民用建筑中,管桩基础多为低桩承台,主要承受竖向荷载。因此,管桩桩身所处环境是处于地下水(土)中,桩身一部分处于地下水位以下的,一部分处于地下水位变化范围的,还有一部分是处于地下水位以上至承台底面之间的。而承台底面至地面范围并不涉及管桩,如图1所示。

本人认为,处于地下水位以下的管桩应按长期浸水状态分析;处于地下水位变动范围的管桩应按湿润状态分析,不应视为干湿交替环境(干湿交替是指混凝土表面经常交替接触到大气和水的的环境条件);而处于地下水位以上至承台底面之间的管桩环境应按地基土腐蚀条件分析与评价。

另外,按照GB50046-2008《工业建筑防腐设计规范》第4.9.3条规定:“桩承台的埋深不应小于2.5m,当承台埋深小于2.5m时,桩身处于2.5m以上部位宜加强防护”。本条文规定是根据调查地面介质渗漏的深度一般为地面下1.5m~2.0m,而且在此范围内受环境影响较大而提出的。因此,从基础设施可靠性要求高的特点考虑,处于地下水位以上至承台底面之间的管桩环境,可以按干湿交替环境分析。一般来说,地面以下一定深度的岩土温度、湿度变化很小,相比地表环境条件要好得多。

近期看到有的《管桩基础技术规程》(地方工程建设标准)规定:当桩的水平承载力由水平位移控制,且缺少单桩水平荷载试验资料时,单桩水平承载力特征值的计算公式中管桩桩身换算截面受拉边缘的截面模量 $W_0 = \frac{\pi d}{32} [d^2 + 2(a_E - 1)\rho_g \cdot d_0^2] - \frac{\pi d_1^3}{32}$, 该公式正确吗?

该公式在引用过程中忽视了管桩环形截面的特征,导致套用错误。现将管桩桩身换算截面受拉边缘的截面模量公式表述如下:

设管桩外径为D,内径为d,预应力钢筋总面积为 A_p ,其分布圆直径为 D_p ,则管桩混凝土截面积

$$A_c = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}; \text{ 惯性矩 } I = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64}, \text{ 如图2.}$$

现将位于 D_p 位置的预应力钢筋换算成混凝土圆环,令其外径为 D_1 ,内径为 d_1 ,壁厚为 t ,如图3。

$$\text{则其换算截面积为 } (a_E - 1)A_p, \text{ 式中 } a_E = \frac{E_p}{E_c},$$

即预应力钢筋弹性模量与混凝土弹性模量之比。

$$\text{其惯性矩 } I' = \frac{\pi(D_1^4 - d_1^4)}{64};$$

由于 $D_1 = d_p + t, d_1 = d_p - t$,且:

$$\frac{\pi(D_1^2 - d_1^2)}{4} = (a_E - 1)A_p;$$

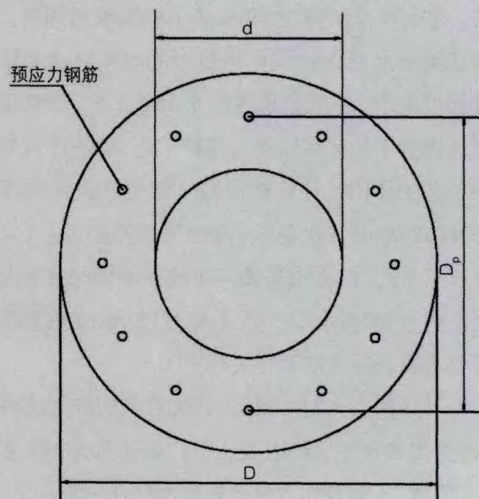


图2 管桩断面结构示意图

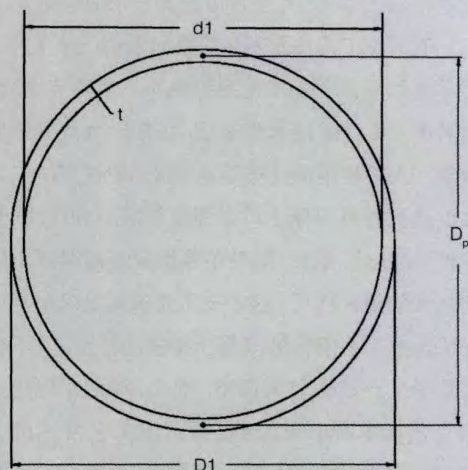


图3 预应力钢筋换算成混凝土截面示意图

$$\begin{aligned} \text{所以, } I' &= \frac{\pi(D_1^4 - d_1^4)}{64} \\ &= \frac{\pi(D_1^2 - d_1^2)}{4} \times \frac{(D_1^2 + d_1^2)}{16} \\ &= (a_E - 1)A_p \times \frac{(D_1^2 + d_1^2)}{16} \end{aligned}$$

而 $D_1^2 + d_1^2 = (d_p + t)^2 - (d_p - t)^2 = 2(d_p^2 + t^2)$, t^2 为二阶微量, 可忽略不计, 且 $d_p = D_p$, 则 $D_1^2 + d_1^2 = 2D_p^2$, 因此,

$$I' = (a_E - 1)A_p \times \frac{D_p^2}{8};$$

所以, 管桩桩身换算截面惯性矩:

$$I_0 = I + I' = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64} + (a_E - 1)A_p \times \frac{D_p^2}{8};$$

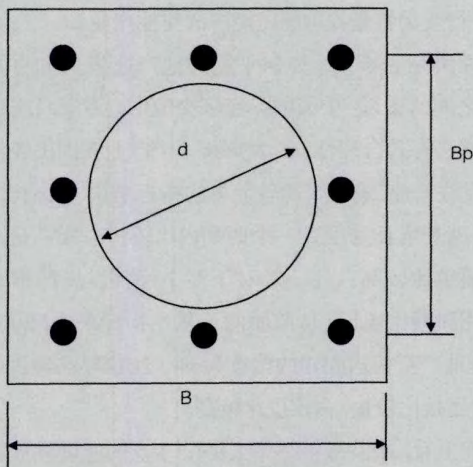


图4 空心方桩截面结构示意图

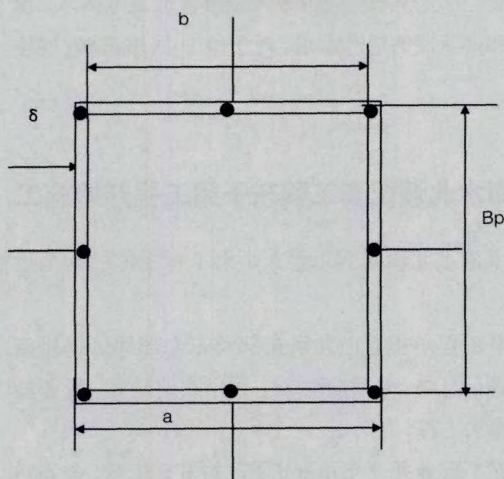


图5 预应力钢筋换算成混凝土截面示意图

管桩桩身换算截面受拉边缘的截面模量:

$$W_0 = \frac{I_0}{D/2} = \frac{\pi}{32} \left(D^3 - \frac{d^4}{D} \right) + \frac{(a_E - 1)A_p D_p^2}{4D}$$

另外, 顺便将空心方桩桩身换算截面受拉边缘的截面模量公式做一演绎。

设空心方桩边长为 B , 空心直径为 d , 预应力钢筋总面积为 A_p , 其正方形分布边长为 B_p , 如图4所示。

$$\text{则, 空心方桩混凝土截面积: } A_c = B^2 - \frac{\pi d^2}{4}$$

$$\text{惯性矩: } I = \frac{B^4}{12} - \frac{\pi d^4}{64};$$

现将位于 B_p 位置的预应力钢筋换算成混凝土薄壁空心正方形, 如图5所示。

令其外边长为 a , 壁厚为 δ , 内边长为 b ,

则其换算截面积为: $(a_E - 1) \cdot A_p$

式中 $a_E = \frac{E_p}{E_c}$ 即预应力钢筋弹性模量与混凝土弹性模量之比。

$$\text{其惯性矩: } I' = \frac{a^4 - b^4}{12},$$

$$\text{由于 } a = B_p + \delta \quad b = B_p - \delta \text{ 且 } a^2 - b^2 = (a_E - 1)A_p$$

$$\text{所以: } I' = \frac{(a^2 - b^2)(a^2 + b^2)}{12} = \frac{(a_E - 1)A_p}{12} (a^2 + b^2);$$

$$\text{而 } (a^2 + b^2) = (B_p + \delta)^2 + (B_p - \delta)^2 = 2(B_p^2 + \delta^2)$$

δ^2 为二阶微量, 可忽略不计; 则 $a^2 + b^2 = 2B_p^2$

$$\text{因此, } I' = \frac{(a_E - 1)A_p}{12} \cdot 2B_p^2 = \frac{(a_E - 1)A_p \cdot B_p^2}{6}$$

这样, 空心方桩桩身换算截面惯性矩:

$$I_0 = I + I' = \left(\frac{B^4}{12} - \frac{\pi d^4}{64} \right) + \frac{(a_E - 1)A_p \cdot B_p^2}{6}$$

空心方桩桩身换算截面受拉边缘的截面模量:

$$W_0 = \frac{I_0}{\frac{B}{2}} = \left(\frac{B^3}{6} - \frac{\pi d^4}{32B} \right) + \frac{(a_E - 1)A_p \cdot B_p^2}{3B}$$

以上论证如有不妥之处, 敬请指正。