应用水泥粉喷桩结合人工挖孔桩进行软土基坑围护的一种新方法

吴锁荣
（铁道部第四设计院软土地基工程公司，杭州，310017）

提　要　本文通过某基坑围护工程设计体会，结合工程特点，从方案选择思路、力学模型等入手提出采用水泥粉喷桩结合人工挖孔桩方案进行深厚软土地层深基坑围护，介绍了方案及设计要点，并提出从施工上采取措施解决两种不同性质桩型共同作用等问题。

一　工程概况

某高层建筑由四层裙楼和三栋 33 层塔楼组成，并设地下室二层，桩基设计采用大直径人工挖孔桩。地下室底板埋深约 9m，其基坑南北长约 90～115m，东西向约 80m，工程桩基在基坑开挖后进行施工。该工程西、南侧为城市主干道，东侧有厂房和一栋四层住宅，北有一待建高层建筑，其地下室与本工程相连。按建设方要求进行基坑东、南、西侧周边围护。围护方案要求：保证围护结构本身安全稳定,桩顶位移控制在允许范围内；周边建筑、地下管线、主干道路面不受基坑开挖影响；围护桩防渗止水，施工无环境污染。

围护区地层情况：①杂填土，厚 2.5～4.5m，γ=18kN/m^3，φ=15°　C=15kPa；②海积淤泥，灰色，流塑，厚 12～15.5m，γ=16.4kN/m^3，φ=3.1°，C=10.75kPa；③砂质粘土，厚 0～5m，γ=19.4kN/m^3，φ=24°，C=30kPa；西侧较厚,而南、东侧该层很薄或缺失；④强风化花岗岩,γ=22kN/m^3，φ=50°，C=200kPa，q_s=60kPa。

二　基坑围护特点与选型

根据本工程地下结构设计图、地层资料和周边环境情况，基坑围护的主要特点是：①基坑范围大、开挖深，因而内撑型方案难以采用；②地质条件很差，即主要难题是地表杂填土层下有十多米深的流塑状饱和淤泥，基坑开挖后对围护体产生的主动土压力相当大，致使围护桩整体稳定性、变形很难控制，并且对周边不利影响的距离及范围很远、很大。是决定围护成败关键性的因素；③地质条件另一特点是淤泥层底下伏岩层基本为基岩，而砂质粘土很薄或缺失，这就限制了某些桩型的选择。

本基坑工程招标采用方案、报价投标，经比较，笔者提出采用下列水泥粉喷桩结合人工挖孔灌注桩围护方案，该设计安全可靠，造价合理且以低价中标。施工前因西侧基坑围护地下发现大量障碍物，使得粉喷桩加人孔桩悬壁方案取消，后改为桩锚方案。本文主要

介绍东、南侧采用的人工挖孔桩加粉喷桩改进的重力挡墙基坑围护方案。

(1)因东南侧淤泥地层深厚，该层底基本是强中风化基岩，故普通冲钻孔桩入岩施工难，考虑工程桩型选用大直径人孔桩；而粉喷桩和人孔桩结合便于挖孔桩施工，同时也解决孔桩施工过程中掏土、流泥、施工降水等引起的地面沉降等问题，相当于孔桩施工前该周边已用粉喷桩围护了一圈，易成孔、嵌岩(可爆破作业)，工期短。

(2)本围护设计东、南侧桩顶位移标准为 10cm，允许围护体一定的变形。原考虑过桩锚方案，其优点是围护体变形小，对周边影响小。但因淤泥层厚，土压力大，需锚索提供的抗拔力很大，经试算一道不够,要设多道；加上设水泥土桩隔水挡土，故造价高工期长。而软土地区单纯采用水泥土重力式挡墙围护缺点是围护深度有限(一般不超过 6.0m)而桩顶位移量大且不易控制，尤其围护侧中部。但本方案采用粉喷桩和人孔桩组合挡墙，利用水泥土挡墙的宽度、自重和孔桩的刚度及嵌岩，加上圈梁作用，可有效控制变形。

(3)粉喷桩加人孔桩方案曾考虑用悬壁桩墙方案，但作为悬壁桩设计，主要依靠嵌入土体深度，以平衡上部地面荷载、水土压力，其插入坑底下较好土层应有足够长插入深度，这点至关重要。而本基坑东南侧淤泥层厚，入基岩浅，不具备有悬壁桩设计条件。

(4)经比选，确定人孔桩和粉喷桩组合围护方案按改进的重力式挡墙设计：①整体稳定以粉喷桩为主，因为它提供一定强度而价廉的重力式围护结构宽度和重量；②而挡墙墙身内部受力检算(截面强度和抗剪)主要靠人孔桩作用；作为挡墙中受力骨架，它有粉喷桩不可比的高抗弯、抗剪强度和刚度，尤其是基坑面上半段挡墙。③依靠人孔桩嵌岩特点增加挡墙抗滑稳定(入岩段人孔桩类似于普通重力式挡墙底的凸榫即防滑键)，并通过嵌岩的桩底抗拔增加抗倾稳定安全。(图 1)

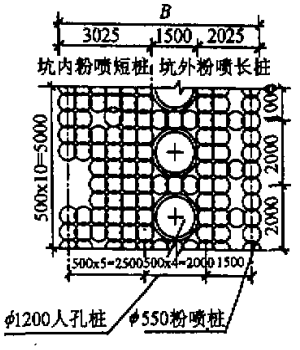


图 1　围护桩平面大样图

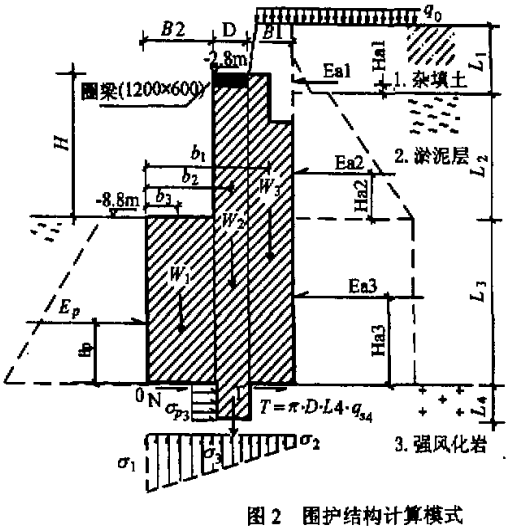


图 2　围护结构计算模式

三 计算方法要点

1. 土压力计算

土压力计算采用朗金土压力理论，水土合算，坑底下主动土压力按矩形分布；坑周地面取均布荷载 q_0；为方便计算，假设在基坑面处增加一土层分界线。求出各层主动土压力合力 E_{ai}、合力距相应本层底高度 h_{ai} ($1\leqslant i\leqslant 3$)和被动土压力合力 E_{pi}、合力距相应层底高度 h_{ai} ($i=3$)。

2. 抗倾覆验算

采用改进的重力式挡墙抗倾覆计算方法检算。通过试算，确定粉喷桩大体宽度，应使设计控制指标 $Kq\geqslant 1.1$。抗倾覆稳定计算除考虑计入人孔桩自重作用外，桩底入强风化岩

$$Kq=\frac{M_y}{M_0}=\frac{W_1\cdot b_1+W_2\cdot b_2+W_3\cdot b_3+E_{p1}\cdot h_{p1}+T\cdot b_2}{\sum_{i=1}^{3}(E_{ai}\cdot(\sum_{j=i+1}^{3}L_j+h_{ai}))}$$

段 L_4 的桩侧壁向下摩阻力合力 T 不可忽略：$T=\pi\cdot D\cdot L_4\cdot q_{s4}$ 则：

M_y 为围护体抗倾覆稳定合力矩；M_0 为围护体对墙趾倾覆合力矩；q_{s4} 为强风化基岩对孔桩向下的侧壁摩阻力；其它符号见图(1)。

3. 基底应力计算

围护体基底合力偏心距 e：C 为围护体作用于地基合力的作用点距墙趾距离；W 为

$$e=\frac{B}{2}-C \qquad C=\frac{M_y-M_0}{W} \qquad W=W_1+W_2+W_3$$

当 $e\leq\frac{B}{6}$ 时 $\sigma_{1,2}=\frac{W}{B}\left(1\pm\frac{6e}{B}\right)$ 当 $e\geq\frac{B}{6}$ 时 $\sigma_{max}=\sigma_1=\frac{2W}{3C}$ 并且 $\sigma_{max}\leq 1.2f_k$

挡墙自重合力；挡墙内外侧边基底应力 σ_1、σ_2，并检算地基承载力：

4. 抗滑移检算

参照重力式挡墙检算抗滑计算方法，并考虑孔桩嵌岩作用。桩入岩嵌固端深度不是很深，只有 2m 左右，起类似于普通挡墙凸榫基础。

f 为粉喷桩基底磨擦系数，D_j 为人孔桩桩间距为，$D_j\geqslant D+0.5$

$$K_h=\frac{E_p+\frac{\pi D^2}{4D_j}\cdot[\tau]+(B-\frac{\pi D^2}{4D_j})\cdot(\sigma_1+\sigma_2)\cdot\frac{1}{2}f}{\sum_{i=1}^{3}E_{ai}} \qquad e\leq\frac{B}{6}$$

$$K_h\frac{E_p\frac{\pi D^2}{4D_j}\cdot[\tau]+\left(3C-\frac{\pi D^2}{4D_j}\right)\cdot\sigma_{\max}\cdot\frac{1}{2}f}{\sum_{i=1}^{3}E_{ai}} \qquad e>\frac{B}{6}$$

τ 为孔桩截面砼抗剪强度，τ 取容许剪应力〔τ〕=0.9MPa(未考虑钢筋作用)

5. 不利截面检算

本围护结构系粉喷桩和人工挖孔桩两种桩型构成，按“H”型重力式挡墙设计，作为一个相互作用、协调受力的有机整体，基坑面下重力式水泥土挡墙有足够的宽度和强度及整体性，墙身危险截面应在基坑面处附近及以上，检算对象为人孔桩(未计主动区粉喷桩和圈梁作用)，设计危险截面检算取基坑面截面(A-A) 位置：

设单位长度弯矩$M_{A\text{-}A}$及集中至单桩弯矩$M_{PA\text{-}A}$为：

$$M_{A-A}=E_{a2}\cdot h_{a2}+E_{a1}\cdot(L_2+h_{a1}) \qquad M_{PA-A}=D_j\cdot M_m$$

按计算结果M_P和整个桩身弯矩受力情况,分不同桩身段计算配制不同纵向主筋量并正确布置在受拉侧集中均匀配筋，其它区按构造筋配。

四　方案要点说明

1. 水泥粉喷桩

采用“H”型重力式挡墙结构，基坑内短桩 6 排、外长桩 7 排，桩间搭接 5cm。桩径 Φ550，水泥掺量 15%，选用 425#普硅水泥，桩身设计强度 1.7MPa。原地面标高±0.0m；桩顶标高从外到内第 1～2 排-4.8m，3～7 排-2.8m ，8～13 排-8.8m；桩底-15～-18m，均进入基岩表层。坑周桩位布置格栅型，预留孔桩位置；坑底被动区加固范围内为保证粉喷桩设计效果和加固质量基本上满打，并避开工程桩位置。(图 2)

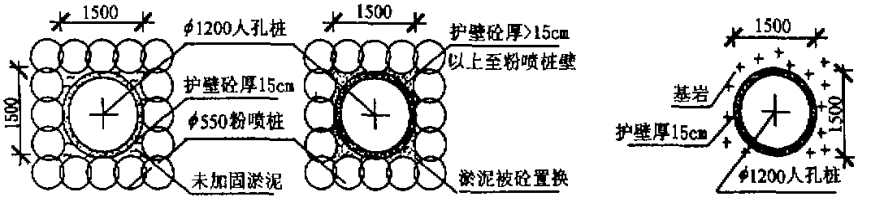
粉喷桩施工技术关键：应控制桩位准确无误，钻杆垂直；确保桩水泥用量足够、均匀，重点保证桩底（尤其是被动区桩）施工质量，特别是钻深和进灰量是否到位和喷足。

2. 人工挖孔灌注桩

人孔桩桩径 Φ1200,护壁厚 15cm，桩顶标高-2.8m，主筋与圈梁焊连,桩底均进入基岩 2m 左右。配筋设计：主筋采用 9~22 Φ28 螺纹钢，分通长筋和加强筋两种，通长筋同桩长，加强筋布置主要从基岩面至基坑面范围内，截面配筋量按孔桩计算核定，沿截面受拉区周边局部均匀配筋和集中配筋；其它受压区和不配置受力钢筋圆周区按构造规定均匀配置 Φ16 纵向通长钢筋；箍筋 Φ15@200，砼强度 C25。

针对人孔桩截面为圆形而粉喷桩所围区域近似为方形，粉喷桩和人孔桩只有四点接触，而其余空间均为未处理淤泥；因此,方案审查时专家组曾对这两种不同类型桩是否共同作用提出疑问，而此问题如未解决，方案就可能通不过。

笔者提出下列专家认可的解决办法：人孔桩护壁施工时，挖孔深至基坑面以下淤泥段长度范围内，把粉喷桩所围区域与原设计人孔桩圆形护壁外空间淤泥清除干净，用护壁砼回填捣实。由此增加的工程量甚微而效果显著，使这两种类型桩可以紧密接触、凝固并受力相互传递、共同作用。图 3 示意了不同桩深粉喷桩、孔桩、地基土等三方面接触关系。



(a) 桩顶下至坑底面上H_1桩段　(b) 坑面上至淤泥层底H_2桩段　(c) 入强风化基岩L_3桩底段

图 3

3. 圈梁

宽 1.2m 高 0.6m，纵向主筋设计两侧边各配 4 Φ25，箍筋 Φ10@200，双支箍，C25 砼。设置圈梁作用主要是使之与人孔桩共同作用，协调改善围护结构受力变形，减少重力式档墙围护体桩顶侧向水平位移，尤其控制围护体中段变形。

五　有关试验和开挖情况

1.水泥土室内配比和力学指标实验

为验证粉喷桩设计参数取值是否合理，开前取南侧地下 5 米深处淤泥扰动土样和施工同品种水泥送检，化验结果如下表 1。

实验结果显示方案选用的粉喷桩设计指标：施工水泥掺入量取 15%，桩身 28 天龄期强度 q_u=1.7MPa 及力学指标γ=17kN/m^3, C=50kPa，ϕ=25° 取值基本准确并符合实际。

表1　水泥土室内配比和力学指标实验

水泥掺入量（%）	7 天抗压强度(MPa)	14 天抗压强度(MPa)	28 天抗压强度(MPa)	7 天抗剪强度(kPa)	7 天内摩擦角（°）	有关水泥化验强度说明
12	1.6	2.0	2.4	13.0	17.5	R_3=24.3MPa
15	2.4	3.0	4.0	49.0	23.5	

2. 桩身抽芯检查试验

人孔桩施工前(工程因故停工一年多)现场对粉喷桩桩身抽芯检查三孔，并取桩身上、中、下三部位芯样送检测中心做抗压强度试验，检测结果显示桩身抗压强度标准值均超出 2.0MPa，证明工程施工质量已满足设计要求。

2.基坑开挖情况

坑内土方除表层 2~3m 杂填土外主要为饱和淤泥，土方施工难度大，采用明沟及集水坑排水，土方分两层开挖到底。开挖后坑壁干燥，基本无渗漏。

3.沉降和变形观测

开挖后三个月，周边沉降和位移观测结果显示：坑周无明显沉降变形，而梁顶最大水平位移在 7cm 左右，未超出设计允许范围，并已趋于稳定状态。

六　结语与体会

(1)本工程在深厚软土地区层采用人工挖孔桩结合水泥粉喷桩重力式挡墙围护结构方案进行大范围深基坑支护是安全可行、合理的，围护做到既无支撑又控制了坑周变形。

(2)人孔桩和粉喷桩组合重力式挡墙方案集中了这两种桩型优点：①粉喷桩提供廉价的有一定强度的重力式围护结构宽度和重量；②人孔桩作为挡墙中受力骨架，具高强度并抗弯、抗剪，尤其坑面上挡墙可不按常规水泥土挡墙内力检算求宽度，可满足周边场地窄小的基坑围护；③利用孔桩嵌岩可增加抗倾和抗滑稳定，也可减少挡墙设计总体宽度。

(3)方案中建立的重力式挡墙计算模型是符合本工程特点的，思路正确，力学概念也比

较好理解。但真正实现，关键还要靠粉喷桩施工质量必须满足设计要求；针对设计存在的人孔桩和粉喷桩这两种不同桩型共同作用等问题提出了从施工措施上加以解决的方法。另粉喷桩先行施工给孔桩成孔带来方便，避免了孔桩施工引起的流泥、地面沉降等危害。

(4)有关粉喷桩(或搅拌桩)和人孔桩结合用于基坑围护(不仅局限于本文的重力式挡墙和地层型式)这两种桩型内力作用机理及被动区用粉喷桩加固后如何折算等等还有许多问题均值得我们进一步去研究思考和解决。

参考文献

[1] 铁道部第一勘测设计院主编：《铁路工程设计技术手册(路基)》，北京，中国铁道出版社，1992。