水泥土搅拌桩基坑支挡结构工程实录

程鉴基
（中国科学院广州化学研究所，广州，510650）

提　要　本文通过几个典型的工程实例，充分说明水泥土搅拌桩在基坑支挡结构工程中的有效性和优越性，并总结出几条成功经验，可供同行们参考选用。

一　工程实例

1. 实例 1—清远市中外合资东皇商住楼 B 区基坑北墙水泥土搅拌桩挡土止水工程

(1)工程概况

该工程位于清远市新城 6#区凤鸣路与 107 国道交汇处的市客运站一侧。拟建商住楼 9 层，框架结构，最大单柱荷载 4000kN 左右，设置地下室一层，基坑开挖深度 4.5m，局部群桩承台开挖深度为 5.00m。基坑底板置于中细砂、局部为软土与粉土上。由于基坑北面地质条件较差，粉土较厚，淤泥流变性大，地下水又丰富，附近又有两层艺术装修的现场办公楼，无法自然放坡。而且粉土松软易产生液化、管漏、流砂、蠕变、沉陷(降)等不良现象的连锁反应，使挖孔桩挖至埋深 3.00m 时，空心桩护筒脱节，还发生小(微)型滑坡，边坡坍塌、坑内回弹隆起，造成浅基础现场办公楼前马路严重开裂，已危及安全。受澳门东皇房地产公司委托，优选采用 SJB 和 DSJ 型单头(轴)水泥土搅拌桩，在基坑边缘建造一堵挡土防水墙，以提高边坡稳定性。这样就既解决了钻孔桩、挖孔桩、钢板桩接缝防水问题，又解决了化学灌浆价格昂贵，一般业主难以承受的矛盾。预算使用普通硅酸盐水泥 372t，外加剂 7.5t，全权总承包(大包干)综合费用 38 万元，工期 30 天。

(2)水文工程地质简况

该场地位于中生代红色断陷盆地北缘，属北江冲积平原一级阶地。第四系松软土层发育，厚度 23.36~34.30m，基岩为白垩上统(K_2)红色泥岩，属软质岩石。其地层结构自上而下分：素填土、粉土、细砂、淤泥质粘土、粉土粘土、中粗砂、含卵石砾石、泥岩等。

该区地下水主要赋存于细砂、中粗砂和含卵石砾石层，以第四系潜水为主，地下水较丰富，上部地下水位埋藏较浅，深层地下水具弱承压力作用，综合地下水水位埋深 2.0~3.73m，对基坑开挖会带来诸多不利因素。

(3)土力学计算与挡土结构设计

由于水泥土搅拌桩支挡结构的很多性能类似于重力式挡土结构，故设计时按重力式考虑。水泥土搅拌桩桩体材料以 C_{40}、水泥渗入量 14%、龄期 30 天的强度作为计算值。

①主要设计力学与几何参数

水泥土的物理力学性质：

水泥挡土墙综合重度 γ_c=18.5kN / m^3

无侧限抗压强度 q_u=700kPa

抗拉强度 δ_t=105 kPa

抗剪强度 c=120kPa

内摩擦角 ϕ=20～30°

渗透系数 K=10^{-7}～10^{-6}cm / s

挡土墙基底摩擦系数 μ=0.3

挡土墙厚度 B=1.3m

挡土墙高度 H=12m

挡土墙入土深度 H_p=7.5m

水泥土挡土墙侧接触土层主要是粉土和粉质粘土，其参数是 ϕ=7°、C=14.7kPa、γ=18.5kN/m^3、应用朗肯—库仑土压力理论设计计算土压力参数。

土压力强度等于零点处距基坑面距离为：

$$Z_0=\frac{Z\cdot C}{\gamma\cdot \mathrm{tg}^2\left(45^0-\frac{\varphi}{2}\right)}=\frac{2\times 14.7}{18.5\times 0.783}=2.03\mathrm{m}$$

主动土压力强度：$\delta_{a1}=\gamma(H-Z_0)\mathrm{tg}^2(45°-\phi/2)$

=18.5×(12−2.03)×0.783=144.42(kPa)

土压力强度等于零点离基坑开挖面距离的土压力强度：

$\delta po=2\cdot C\cdot \mathrm{tg}(45°+\phi/2)$=2×14.7×1.28=37.63（kPa)

被动土压力强度：$\delta p1=\delta p0+\gamma Hp\cdot \mathrm{tg}^2(45°+\phi/2)$

=37.63+18.5×7.5×1.638=265(kPa)

水泥土挡土墙自重：$W=\gamma_{cHB}$=18.5×12×1.3=288.6(kN)

②抗倾覆稳定验算

对挡土墙零点取矩，可算得抗倾覆安全系数

$$K=\frac{\frac{1}{2}H_p^2\cdot\delta_{p0}+\frac{1}{6}H_p^2(\delta_{p1}-\delta_{p0})+\frac{1}{2}B\cdot W}{\frac{1}{6}(H\cdot Z_0)^2\cdot\delta_{a1}}$$

$$=\frac{\frac{1}{2}(7.5)^2\times 37.63+\frac{1}{6}\times(7.5)^2(265-37.63)+\frac{1}{2}\times 1.3\times 288.60}{\frac{1}{6}(12-2.03)^2\times 144.42}$$

=1.51>1.5(安全)

③抗滑动稳定性验算

抗滑动稳定性验算即是要保证在全部水平力作用下，挡墙不向坑内平移，由水平力平衡条件可算得抗滑动稳定性安全系数

$$K_n=\frac{W\cdot\mu+\frac{1}{2}H_p(\delta_{p0}+\delta_{p1})}{\frac{1}{2}\delta_{a1}(H-Z_0)}$$

$$=\frac{288.60\times0.3+\frac{1}{2}\times7.5\times(265+37.63)}{\frac{1}{2}(144.42)(12-2.03)}$$

$=1.7>1.3$(安全)

④桩身应力和墙体剪应力验算(略)

(4)水泥土搅拌桩施工工艺及技术参数

由于水泥土搅拌桩法是用特制的深层搅拌机械，将水泥浆与自然土进行强制搅拌均匀，就地形成水泥土桩墙体，从而改善土体强度，提高地基土承载力的软弱地基加固手段。特此，本工程设计主要技术参数及要求如下：

①水泥土挡土墙三排，桩心距和排距 0.4m，挡土墙长度 80.00m，共（80÷0.4）×3=600 根桩。每根桩桩长 12.00m，桩头 0.5m 空搅，累计桩长 6800m，其中实桩 6500m，空桩 300m，搅拌桩加固体积 1275.63m^3。

②选用 C_{40} 普通硅酸盐水泥掺入量 60kg/米。

③石膏粉 1.10kg/米。

④木质素磺酸钙 0.11/米。

⑤水灰比(0.4-1.0) :1。

⑥旋转速度≤50r/min。

⑦提升速度≤60cm/min。

⑧倾斜度 1.5%、偏移 0.5m。

⑨喷搅同步，2 回次搅拌成桩，即 4 单次都喷浆搅拌。

⑩成桩直径 D≥0.5m，搭接交圈厚度 10cm。

内外排(1、3)桩每间隔 1.20m(3 根桩)插一根长 4.0m 的 Φ18 钢筋。开挖路沟 1.3×1.0×80m，制作压顶板连系梁 1.3×0.3×80m（素混凝土 C20），并用 2 根纵筋和 68 根横筋把插筋点焊连接起来，构成复合式挡土墙。

单桩承载力 150kN，桩身应力 765kPa、抗拉强度 G_t=105kPa、抗剪强度 C=120kPa、渗透系数 $K=10^{-7}\sim10^{-8}$cm/s。

采用中心岛开挖方法，即先开挖中心，再往边缘扩展，尽可能利用基坑侧被动土压力协同维持桩墙稳定性，降雨时应停止开挖。

(5)施工质量效果与工程验收

在施工前，必须实行三通一平，即通路、通电、通水及平整场地，并了解施工地段地下埋设物情况，也提出预防其它项目施工意外损坏挡土桩墙事故的防范措施。

在施工过程中，随时检查施工记录，并对照预定的施工工艺。对每根桩进行质量评定，对不合格的工程桩应根据其位置、数量等具体情况，分别采取补桩或加强附近工程桩等措

施。在特殊情况下，尚应进行取样和载荷试验或开挖检验。在基槽开挖时，应检查桩位、桩数与桩头强度。如发现漏桩、桩位偏差过大与桩头强度偏低等质量事故，必须采取补救措施。当工程竣工验收合格后，应提供相关的全部资料。尔后，经过几场大雨和暴雨的严峻考验，水泥土搅拌桩支挡墙安然无恙，基坑开挖一直顺利。

2. 实例 2—广州市石井水泥厂新扩建 70 万吨厂三级泵房回水池支挡结构水泥土搅拌桩工程

(1)工程概况

广州市石井水泥厂位于市郊石井镇槎头，新扩建 70 万吨厂三级泵房回水池基底埋深-5.19m，最大挖深为基坑西墙边池底集水坑-6.19m。拟建回水池面积23.2×11.80m=273.76m^2，净空面积 22.80×11.40=259.92m^2。为确保附近建筑物和基坑的安全，又结合本场地土层结构特征，再考虑质量效果和经济效益及工期等因素，选用水泥土搅拌桩建造重力式防水挡土墙。由相邻桩搭接构成基坑帷幕墙体(约 1 万延米)，复合地基水泥土搅拌工程桩(约 2500 米)构成帷幕槽底板。如包括开挖(土方运距 1km 内)、降水、破桩头、砼垫层等，其造价 105 万元。工期 55 天(日历天)。

(2)水文工程地质条件简况

该场地与工程有关的地层结构自上而下分述如下：

①填土。由细砂及约 20%的石块、砖块组成，松散—稍密状态，层厚 1.3~1.6m。

②淤泥。含砂及腐植质，很湿，软—流塑。

③砂层。含中砂和淤泥质粉砂夹层，都含丰富潜水。

④粘土。含少量砂粒、湿，可塑，局部分布，大部分缺失。

⑤灰岩。含少量方解石脉，岩面有明显溶蚀现象，大部分有溶洞发育，洞高 3.2~4.4m 不等，连通性好，含丰富岩溶水，洞内还有粘土及砂充填物，呈半充填状态。该层埋深 12~15m，建议承载力 6500kPa。

(3)设计方案及施工措施

在软土地基中开挖基坑时，可用排列成行的壁状深层搅拌水泥土桩作坑壁支挡结构，利用致密的水泥土挡住渗透水并承受水土压力。然而，该水池长宽比大(2∶1)，最大垂直开挖深度 6.19m，场地的主要地质条件又较差，流塑状淤泥地耐力小，抗剪强度低，凝聚力(C)和内摩擦角(ϕ)值低，砂层和岩洞又含丰富地下水，基坑开挖有一定的土压力和扬水压力.

为保证基坑支挡的有效性和实用性，达到水土兼防的目的，特议定如下设计方案和施工方法。

①防水挡土帷幕墙由 5 排桩组成。其中由坑内向外第 3、4 排各空 2 根桩为一空格，相邻空格仅 1 根排桩之隔，依此类推便构成格栅状。每根桩径 500，相邻桩搭接(相切)15cm，桩心距离和排距均是 35cm，帷幕标准宽度 1.7cm，最大宽度 1.9cm。使用 PH—5A 型喷粉桩机湿喷浆法施工。

②水池净空周长 2×（22.8+11.40）=68.40m，含浇灌墙厚时周长 2×(23.20+11.80）=70.00m，再包括搅拌桩允许垂直度偏差＜1.5%时，以基坑深度 6.00m 计算，最大允许偏差值 Δ max=9cm，这时的水池周长 2×（23.38+11.98）=70.72m。从坑内向外顺序起算，第一排周长 L=2(23.63+12.23)=71.72m，桩数 205 根；第二排桩的周长 2（23.38+12.58）

=73.12m，桩数 209 根；第三排桩周长 2（24.33+12.93）=74.52m，桩数 213 条，其中实桩 71 根，空桩 142 根；第四排桩周长 2（24.68+13.28）=75.92m，桩数 217 根，其中实桩 73 根，空桩 144 根；第五排桩周长 2（25.03+13.63）=77.32m，桩数 221 根。基坑围护桩累计实桩数 780~844 根，桩长累计 9360~10128 米左右，其中空搅桩 396 米，实桩 8964~9732 米。

③深层搅拌桩长度按常规为基坑深度 2 倍，同时考虑到防水的需要，又以灰岩面为准，即桩长 12~15m 左右(含桩头空搅 0.5m)。

④搅拌桩主剂为 425#普通硅酸盐水泥，50~80kg/m，0.935t/桩，石膏粉 35kg/桩，木质素 2.35kg/桩。累计水泥 789.14~825t，石膏粉 30t，木质素 2t。

⑤水泥浆水灰比 0.50，比重 1.6 以上(泥浆比重计测定)。当龄期 28 天时，水泥土强度相当于设计的 60%~80%，标准值宜取 90 天。一般成桩 30 天可交付使用，桩身抗压强度 1kPa 以上，剪切应力 100kPa 以上，复合地基承载力>155kPa/m^2。

⑥由于桩排式围护桩可构成地下连续墙帷幕，可做地下重水池外墙(竖壁外模)，即护壁桩内壁为水池墙外模板。因而桩墙合一对搅拌桩要求较高，必须严格控制搅拌提升速度和搅拌转速及水泥用量。一般搅拌转速<50r/min，提升速度<60cm/min，水泥用量>50kg/m。

⑦因水泥加固的抗弯强度较低，第一排桩插 Φ18 螺纹钢筋 3~5m/桩，桩顶预留 0.3m 钢筋头，再在第一排的桩顶上做一个 71.72×0.3×0.5m 的连系圈梁，配 4.18 纵筋，每隔 0.5~1.0m 放置 1 个 Φ18 的 0.3×0.5m 铁箍，并点焊连接纵筋，加强各桩间的共同作用，提高整体稳定性。同时，在圈梁四大角设计桁架式钢筋混凝土角支撑各一条，以离角 3~5m 处设置为佳，并与圈梁结构连接一起。钢筋混凝土角撑规格 0.3×0.5m，4.18 纵筋，或用圆形、方形钢管做角撑，两头预埋接合板。

⑧搅拌桩成桩 7 天后，现场进行 SH 波波速试验，检测数量>2%，桩体位移偏差<50mm，桩体压缩变形量为 1~3cm，符合现行规范要求。

⑨基坑挡土墙施工完毕后，即进行坑中工程桩施工。排距 1.0m、桩距 1.5m，一般都以坑底板以上段为空搅，以免造成浪费。如桩头超深，需用护筒补浇混凝土接上来，因而最好留有一定的桩头长度余地。

⑩因场地内混合地下水位较高(埋深仅 1.0m)，局部地段搅拌桩未达到隔水层粘土或灰岩面而存在漏洞，需采取适当降水措施，如降水井、坑内抽水等，还要做好坑内排水盲沟及集水井的排水工作。

软土地区的基坑大开挖，一般分层进行，高差也不宜过大(<1.00m)，坑内土层保持均匀。机械挖土不能损坏桩体，挖出的土方又不得堆置基坑附近，也禁止车辆通行。

经开口式大开挖证实，水泥土搅拌桩(包括围护桩和复合地基工程桩)综合效果良好，既能支挡侧向土压力荷载，又能解决防渗止水的问题，达到水土合一防治的目的。

3. 实例 3—广州世界大观园夏威夷浴场、更衣室及八角亭复合地基深层搅拌桩工程

该工程位于广州市天河区东圃镇黄村的山谷之中，依山临谷，有软粘土地层分布。由于浴场挖深 1~5m，加之场内复合地基工程桩较多，地下水位较低，基坑开挖可利用自然坑壁或略放小坡，无需设置挡土止水围护桩，而池内工程桩侧留有高出坑底 0.5~1.0m 的余地，以防漏空桩头的事故发生。

根据基底所受力大小，土质变化特征而布桩和确定桩距及桩长，一般桩长 8.5~12.00m，桩径 0.5m，搅拌 2 个回次，桩头 0.5m 空搅。普通硅酸盐水泥掺入量 15%(50~60kg/m)，水灰比 1∶1~1∶1.5，置换率 0.16~0.19，外掺剂木质素磺酸钙减少剂 0.1%，生石膏粉增强剂 2%~3%，一般单桩承载力 140~160KPa，桩身应力 714kPa 左右，复合地基 90~160kPa，预计沉降量 4cm，成桩 30 天单桩承载力可达设计值的 60%70%。

经现场抽芯取样、触探及静载试验，单桩承载力可达 30t/桩，复合地基质量效果良好，浴场基坑开挖也顺利完成。

二 结 语

随着旧城改造工程的推进和新区的开发，对基坑开挖技术提出更高更严的要求，不仅要确保边坡的稳定，而且要满足变形控制的要求，以确保基坑周围建筑物、地下管线、道路等的安全。为准确估计由于开挖引起的土体和支护系统的变形，一方面依赖于成功应用有限元等现代分析工具，另一方面依赖于土的计算参数的正确性。常规的室内试验方法已不足以确定预估位移的关键参数—土的刚度，只有把室内试验与原位测试技术结合起来才能解决这个问题。

笔者经过多年来的工作实践，对水泥土搅拌桩基坑支挡墙有以下几点认识和建议：

(1)基坑围护工程是一门风险性工程。它涉及土力学、基础工程、结构力学和原位测试技术等各学科学问，可以说它又是一门系统工程。

(2)在实施地下空间开发计划时都会遇到基坑的支护问题，并要求支护结构具有足够强度和入土深度，提高其稳定性，以防止坑内土体滑坡、隆起、管涌、坍塌等不良现象的发生，确保基坑开挖安全，把对邻近建筑物及地下管线道路的影响也减少到最低限度。

(3)一般来说围护结构是由挡土墙、圈梁、支撑和立柱四个部分组成整个体系，需要充分考虑多种变化因素对土侧压力的影响，严格控制支护桩的变形。降低地下水位也是基坑围护工程的另一个重要问题。

(4)基坑中工程桩直接影响挡土墙的侧向位移，地表沉陷和基坑隆起。一般增大墙体深度能减少墙体侧向位移，有利于墙体稳定，特别是基坑中无工程桩时，能防止沿墙底的滑动。

(5)在软弱地层条件下，选择支护结构形式除满足结构强度的要求外，更应注意支护结构的稳定性问题，选择整体抗渗性能较好的支护结构放在优先考虑的地位。水泥土搅拌桩既解决非柔性排桩净间距空白缝的防水挡土问题，又可避免刚性桩(C18—C30)和半刚性半柔性桩墙(如地下连续墙)的安全过剩而造成的浪费。

(6)水泥土深层搅拌桩具有无挤土、无振动、无噪音、施工机具简便、价廉等优点。在基坑开挖工程中既挡土又止水。因而，一般基坑开挖深度≤7.00 米，建议采用水泥土搅拌桩作重力式(或半重力式)支挡围护桩墙。一般≤9 层的普通建筑物，也可用水泥土搅拌桩作工程桩基础。

(7)必须严格把好质量关，使每道工序都符合质量规范要求，上一道工序不合格绝不能转入下一道工序操作，以确保水泥土搅拌桩身连续、完整、固结，特别注意桩头的施工质量，桩顶 1~5m 段宜用慢速或多次重复搅拌重点加强为好。

(8)基坑开挖是基础工程和地下工程施工中的一个古老的传统课题。它同时又是一个综合性的岩土工程难题，既涉及土力学中典型的强度与稳定问题，又包含变形问题，同时还涉及到土与支护结构的共同作用。对这些问题的认识及其对策的研究，是随着土力学理论、分析技术、测试仪器以及施工机械、施工技术的进步而逐步提高和完善。

参考文献

[1] 程鉴基：《深层搅拌桩在基坑防水工程中的应用》，见《煤用地质与勘探》，1997。

[2] 程鉴基：《水泥深层搅拌桩加固软土地基探析》，见《第五届全国地基处理学术讨论会论文集》，北京，中国建筑工业出版社，1997。

[3] 程鉴基、钱灼南：《水泥深层搅拌桩设计与施工的讨论综述，深层搅拌法设计与施工》，北京，中国铁道出版社，1993。