超深基坑围护结构采用 SMW 工法双排搅拌桩的施工实践

童海东
（上海凌翌建设工程有限责任公司，200050）

叶琳昌
（上海渝龙实业股份有限公司，200070）

提　要　上海凌翌建设工程有限责任公司于 1997 年在国内首次从日本引进具有国际先进水平的 SMW 施工工法和设备，由于具有挡土、防水效果好，且能在狭小场地上安全施工，噪声和振动小，无泥浆和公害影响，以及缩短工期、造价经济等优点，在众多工程中取得良好的业绩。本文结合上海新重庆大厦 SMW 工法双排搅拌桩的施工实践，就超深基坑(>12m)中有关技术难题进行分析，并提出了相应的保证质量措施。

一　SMW 工法双排搅拌桩设计构造

1. 设计构造

新重庆大厦地处上海市闸北区内重要地段，地上为 22 层商办楼高层建筑，总建筑面积为 38305m²，地下为 3 层，深度达 12.4m(局部达到 15.1m)，围护结构长度为 220m，属一级大型深基坑。工程四周均为城市道路，地下管线众多，特别是 1 根 ϕ 2400mm 合流污水管紧贴基坑西侧(净距为 3m)，因此在围护结构施工中必须确保管线绝对安全，并对周边土体的位移、沉降及防止管道渗漏等均有严格的控制标准。

经过多种方案比较，决定采用 SMW 工法双排搅拌桩结构形式，其设计构造如图 1、图 2 所示。

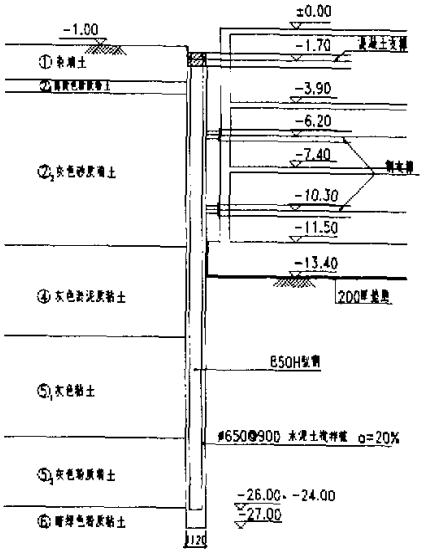


图 1　SMW 工法双排搅拌桩构造剖面

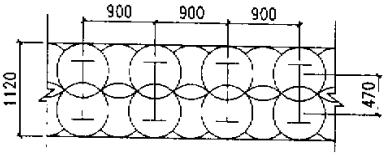


图2　墙体标准段

2. 施工技术要求

(1)围护结构搅拌桩的水泥掺量为被加固土体质量的20%，水灰比为1.5左右。

(2)围护结构搅拌桩选用日本进口三头搅拌机设备和“一喷一搅”的施工工艺。

(3)水泥土28d强度应不小于1.0MPa，渗透系数应不大于1×10^{-7}cm/s。

(4)双排搅拌桩宜先施工内侧，再施工外侧，墙体垂直度偏差不大于1%，定位误差不大于±30mm，标高误差±100mm。

(5)搅拌桩施工前必须对施工区域内地下障碍物进行探测，如有障碍物必须事先清除并回填素土。经分层压实，然后才可进行搅拌桩施工。

(6)搅拌桩须连续施工，并采用重叠搭接缝形式。两幅间隔时间不宜大于10h，并能与前一幅搅拌桩套打和水泥土的正常搅动为限。如间隔时间超过5h、但在10h以内时，则后一幅搅拌桩的20%水泥掺量，应按全断面计算。

(7)H型钢必须在搅拌桩施工完毕后3h以内插入，必要时在搅拌桩中掺入缓凝剂。

(8)搅拌桩施工时，如因机械故障、停电、停水及其他意外原因超过10h以上时，应在恢复施工时的基坑外侧，加做1~2幅ϕ650mm的单排水泥土搅拌桩。

(9)H型钢选用A3钢板制作，分成标准段与非标准段两部分，在现场焊接拼装。钢板材质以及焊缝高度、长度等，均应遵守设计图纸和有关钢结构施工规范的规定。

(10)H型钢宜插入在搅拌桩靠近基坑的内侧，定位误差应不大于±30mm，垂直偏差不宜大于1%，底标高误差应不大于±200mm。

二　保证质量的技术措施

本工程基坑围护结构具有“基坑深、构造与工艺新、技术与质量要求严和管线保护风险大”等特征。在施工中，通过试验研究，重点解决了以下几个技术难点。

1. 设备选型

SMW工法的主要优点在于它的成桩质量均匀，防水帷幕连续可靠，这与所选用的机械设备密切相关。选用日本引进的三轴搅拌机，可以满足设计提出的技术和质量要求。

上海地区近几年来SMW工法施工，搅拌桩深度均在-21m以内，而新重庆大厦的基坑围护搅拌桩深度为-27m，最深达-29m。使用DH508履带式打桩机，桩架最高极限为33m，钻孔深度仅在27m以内，无法满足该工程设计的搅拌桩深度。而采用130t爬行打桩机，其桩架高度最大为40m，可以一次安装33m长SMW钻管及动力头，搅拌桩下钻

深度可达-31m 以下。

另外，该工程基坑围护采用双排搅拌桩，内侧与外侧搅拌桩间距的定位，将是该工艺能否成功的关键。过去使用的 DH508 履带式打桩机，前进后退均不能一次移步到位，无论从钻孔的垂直轴线或水平(横向)轴线，都有偏位的可能。而 130t 爬行打桩机，前后移位是桩机本身不动，仅将桩架通过液压泵推移，因此在移位时可做到垂直度不变，而间距尺寸则通过泵管量测，精确度很高。

2. 搅拌注浆

根据设计孔深，钻机在钻孔和提升全过程中，应保持螺杆匀速转动、匀速下钻和匀速提升；同时根据下钻和提升两种不同的速度，注入不同掺量、搅拌均匀的水泥浆液，并采取高压喷气进行孔内水泥土翻搅，使水泥土搅拌桩在初凝前达到充分搅拌，确保搅拌桩的成孔质量。水泥土应做到配比准确、搅拌均匀，配比准确和搅拌均匀是控制水泥土搅拌桩质量的两大关键。

(1)控制水灰比与用水量

水灰比为 1.5，即可确定不同施工幅段中用水量。另外，在施工中除了控制水灰比以外，还应测定水泥浆液的比重，定时抽查，发现问题及时纠正。

(2)注意控制搅拌速度

根据工程实践，钻进搅拌速度与地质土层有关：对于粘性土一般在 0.5~1m/min，砂土 1~1.5m/min。而钻机提升搅拌速度一般为 1~2m/min。钻进搅拌速度比提升速度慢 1 倍左右，这是为了水泥土能够充分搅拌混合均匀，并有利于型钢的顺利插入。这里需要强调的是，提升速度不宜过快，避免出现真空负压、孔壁塌方等现象。

另外，按照 SMW 工法的施工工艺，三轴搅拌机在下钻时，注浆的水泥用量约占总数的 70%~80%，而提升时为 20%~30%。

3. 型钢起吊与插入

(1)型钢起吊

由于型钢较长，且根据受力情况采用变断面设计，因此在拼接、翻身和起吊过程中，容易产生较大弯曲变形。为此通过反复研究，在型钢端部采用铁块固定的技术措施，可有效防止型钢在起吊中因不断转动(在转动时型钢端部与地面仅有一个角支撑点)而出现的扭曲变形。

(2)型钢插入

待搅拌桩水泥土搅拌均匀又未凝固结硬之前，即用 50t 大型吊车将 H 型钢吊起，插入至设计指定位置。一般 H 型钢都靠自重插入至设计标高。本工程因采用双排搅拌桩，前后排施工时间较长，加之 H 型钢长达 26~28m(每根型钢重量为 4.2~4.5t)，仅靠型钢自重就难以插入到位。为此在型钢定位入土后，除了靠自重下插一部分深度外，尚须依靠振动锤的振动，使型钢下插至设计标高。

为了确保型钢插入后垂直偏差满足设计要求，通过反复试验与实践，最终研究出型钢“三校三插”的施工工艺流程，这是 SMW 工法在深基坑(>10m)施工中的一项重大革新(限于篇幅，本文不做详细阐述)。

SMW 工法的最大特点是能不间断施工，确保防水帷幕的连续性和可靠性。因此在施

工中，应对机械维修和故障排除有专门应急措施；对发生停电、停水和其他突发事件也要早作准备。至于一般下雨，只要有防雨措施，则不会影响水泥土搅拌桩的质量。

为了确定施工间隔的时限，我们曾在施工现场作过水泥土凝结时间的试验。在 6h 以内，水泥土尚未全部凝结，此时有利于前后两排或相邻两幅搅拌桩的咬接和套打施工；如达到 9h，此时水泥土表面已经结硬，即或可以套打施工，实质上已经影响两者之间的结合，对墙体的整体性与防水效果将产生不利影响。这一试验数据对今后施工有重要参考价值。

如 SMW 工法施工时，不能满足上述间隔时间，则应按冷缝处理。冷缝处理一般应在双排搅拌桩的外侧，再做 1~2 幅 ϕ650mm 单排水泥土搅拌桩进行搭接，增加的技术措施费用约 1.5~3 万元。根据上述情况，为防止发生意外，今后在 SMW 工法施工中，宜在水泥土中掺入缓凝剂。

三　几点体会

1. 成桩质量可靠

与国产 ϕ700mm 二轴搅拌机相比，引进的日本 ϕ650mm 三轴搅拌机一次成墙面积由 0.7 m^2 增加到 0.9 m^2，且因搅拌机的电机功率大，承受最大扭矩可达 7800kg-m，具有长螺旋搅拌叶片，因此在钻进注浆过程中，能使水泥土搅拌充分、均匀，且有良好的粘稠性和工作度(在初凝前可达到自流平)，这样不仅有利于型钢的插入，且能在水泥土紧密包裹与嵌固作用下，型钢的挡土性能将得到充分发挥。

本工程对计量、注浆、搅拌等方面进行有效控制，因此水泥土的质量有了较大的提高。从随意抽查(5 月 18 日~6 月 1 日)的 12 组试块统计，其 28 天抗压强度平均值为 2.21MPa，比东方明珠工程提高了 23.46%；且最大值(2.7MPa)与最小值(1.4MPa)之间差幅已大大缩小。当然应该指出，水泥土强度所以出现变幅较大，还与所处地层的不同土质有关。

2. 连续施工防水效果显著

由于 SMW 工法采用套孔重叠无缝连续墙体设计，就可使其墙体做到连续封闭。加上水泥掺量大(水泥掺量一般为土容重的 20%以上)，水灰比大(在 1.5~2.0 之间)，通过引进的日本多钻头长螺旋三轴搅拌机，就在设计深度的墙体范围内，水泥土都能搅拌混合均匀，不夹土块，因此它形成的水泥土连续墙具有较高的抗压、抗剪强度和较小的渗透系数，所以防水效果显著。

经过本工程试验统计分析，SMW 工法墙体渗透系数平均值为 8.19×10^{-7}cm/s，介于普通混凝土(2×10^{-4}cm/s~2×10^{-3}cm/s)与结构致密的防水混凝土(1×10^{-11}cm/s)之间，说明这种围护结构具有很好的防水效果。

3. 对周边环境影响较小

SMW 工法可在狭小的场地内施工，有利于保护原有建筑物、城市道路以及地下管线。如上海金叶大楼地处淮海路(近陕西路口)闹市区。而上海新天地广场地处卢湾区兴业路、马当路转角处，紧靠中共一大会址的旧建筑群，与今后修复原样的危旧建筑仅距 1.9m。

上述两个工程施工中，由于加强了现场管理，采用 SMW 工法，基坑开挖后，未发现土体隆起、陷塌等异常现象；劲性水泥土搅拌连续墙整体性好，无渗漏水现象，周边土体位移、沉降均控制在设计规定的允许范围之内。

本工程基坑西侧有一条 ϕ2400mm 合流污水管，距围护结构净空最小为 3m。在水泥土连续墙搅拌注浆期间，经过监测累计垂直位移为-2mm，水平位移为 0(以上测点均布置在合流污水管处)，证明 SMW 工法对周边土体变位影响甚小，这是其他基坑围护施工方法所不及的。

4. 今后研究方向

本工程采用双排搅拌桩 SMW 工法，由于型钢长达 25m 以上，因此型钢回收难度较大。在此情况下，我们一方面应持积极态度，继续研究型钢回收技术，使 SMW 工法的造价进一步降低。但从另一方面，我们也要拓展思路，从其他方面开发新的价值。

例如，由于 SMW 工法成墙精度较高，型钢间距较密，且垂直偏差较小，因此我们可以在型钢上面焊接钢筋网片，然后浇筑或喷射细石混凝土。这样可省去地下主体结构外墙的一侧模板；由于减少了外侧模板的空间，扩大了地下室建筑面积，因此可进一步降低建设成本。进一步而言，由于 SMW 工法渗透系数较小，防水性能较好，加之省去了回填土这一难以保证质量的工序，因此对提高地下防水工程的总体质量是极为有利的。

四 结 语

上海软土地区基坑围护工程实践来看，由于土质较差，地下水压力较大，在围护结构设计施工中应重视挡土与防水问题。传统的钻孔灌注桩加水泥土搅拌桩和地下连续墙，在施工中容易出现漏泥、漏砂、漏水、桩孔偏斜、槽壁坍塌等质量通病。而 SMW 工法，由于引进了日本先进的设备，经过消化研究和通过众多工程实践，证明是一种质量可靠、缩短工期并能在狭窄场地上安全施工的围护结构新工艺，与传统的钻孔灌注桩加水泥搅拌桩及地下连续墙相比，可节约造价 10%~40%，在我国沿海软土地区软弱土层及地下水位较高情况下，具有很好的发展前景。

参考文献

[1] 刘建航，侯学渊：《基坑工程手册》，北京，中国建筑工业出版社，1997。

[2] 叶珠昌：《要重视基坑围护中的防水问题》，载《中国建筑防水》，2000 年第 1 期，18~22 页。