# SMW 桩在新重庆大厦支护结构中的应用

唐忠德　　周君威
（同济规划设计研究总院，上海，200092）　（同济大学地下建筑与工程系，上海，200092）

**提　要**　SMW 工法近几年在国内的工程应用正处于上升的趋势，上海到目前为止，已在一百余个基坑围护结构工程中得到应用，实践证明这是一种具有强大生命力的支护结构形式。本文通过介绍上海市新重庆大厦基坑围护结构的设计，对 SMW 工法在深基坑工程中的发展进行了研究和分析，并指出了 SMW 工法今后在工程应用中的发展方向。

## 一　SMW 工法简述

劲性水泥土复合搅拌桩支护结构(即 SMW 工法)是在水泥土搅拌桩中插入型钢或其它芯材形成的一种地下连续墙施工方法，该方法具有如下优点：(1)占用场地小：一般混凝土地下连续墙墙体加导墙宽约 1.0~1.2m，双头搅拌桩加灌注桩宽 2m 以上，而 SMW 工法一般单排为 0.65~0.85m，国产设备双头宽为 1.2m；(2)施工速度快：一般情况下施工周期可缩短 30%左右；(3)对环境污染小，无废弃泥浆；(4)施工方法简单，施工过程中对周边建筑物及地下管线影响小；(5)耗用水泥钢材少，造价低，特别是 H 型钢能够回收，成本大大降低。

SMW 工法采用进口的长螺旋多轴多组叶片的搅拌机，有桩径 650 间距 900mm 和桩径 850mm 间距 1200mm 两种；也有采用国产的双轴搅拌桩机桩径为 700mm 间距 1000mm；插入型钢有轧制工字钢、槽钢、拉森板桩，也有用钢板焊接而成的 H 型钢。桩体与型钢布置有如下几种基本形式：

(1)单排水泥土搅拌桩



隔孔设置　　全孔布置　　隔孔与全孔设置

(2)双排水泥土搅拌桩

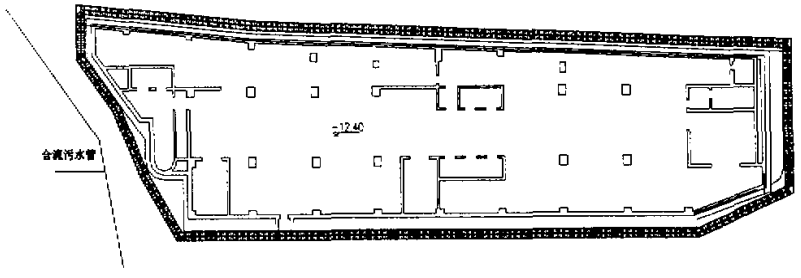


隔孔设置　　全孔布置　　隔孔与全孔设置

## 二　新重庆大厦工程概况

新重庆大厦位于上海市新疆路341号，东南侧为新疆路，北临正在改造的海宁路，西为现有国庆路与凯旋门大厦。该建筑占地面积为5300m²，建筑面积约38305m²。建筑物为地上22层、地下三层的高层建筑，基坑挖深12.4m,局部电梯井、集水井挖深为13.4～16.1m。

该基坑开挖面积约1838m²，围护挡土结构长约220延长米。基坑四周皆为道路，地下管线密集，特别是一根直径2.4m的合流污水管紧贴基坑西侧，给围护结构的施工及基坑开挖提出了相当严格的周边土体位移的控制标准。




围护结构平面布置图

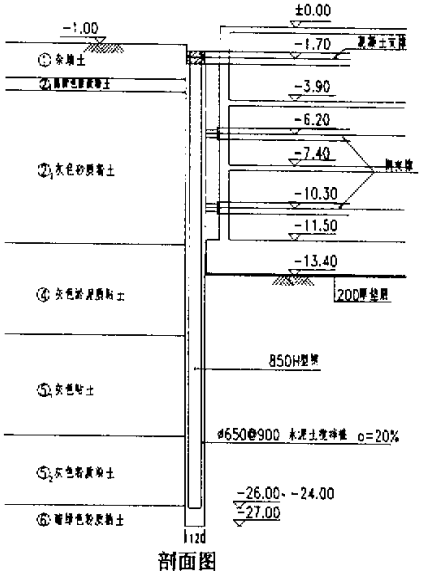
本工程地质条件列表如下所示：

| 土层编号 | 土层名称 | $\gamma$（kN/m³） | $C$（kPa） | $\Phi$（°） | 渗透系数$K_H$（cm/s） | 层底埋深（m） |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ②$_1$ | 褐黄色粘质粉土 | 18.9 | 8 | 27 | $3.45\times10^{-5}$ | 2.5～3.0 |
| ②$_2$ | 灰色砂质粉土 | 18.4 | 6.2 | 30.6 | $4.62\times10^{-5}$ | 9.6～12.4 |
| ④ | 灰色淤泥质粘土 | 17 | 14.3 | 11.4 | $6.83\times10^{-5}$ | 15～16.30 |
| ⑤$_1$ | 灰色粘土 | 17.9 | 15.7 | 12.9 | $2.43\times10^{-5}$ | 20～21.8 |
| ⑤$_2$ | 灰色粉质粘土 | 18.4 | 16.3 | 17.6 | $5.68\times10^{-5}$ | 24.5～25.4 |
| ⑥ | 暗绿色粉质粘土 | 20.0 | 36.2 | 15.4 | | 28.7～29.6 |

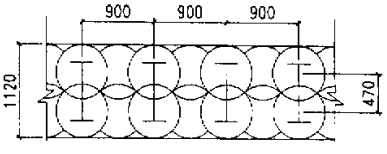
## 三　SMW 围护结构设计

新重庆大厦附近已建多幢大型建筑的深基坑围护均采用了砼地下连续墙或钻孔灌注桩挡土、水泥土搅拌桩隔水的结构形式。由于该地区地下 10m 左右以上土体为砂质粉土层，砼墙体或桩体的施工过程中极易塌方、塌孔、扩径，造成的后果是砼连续墙接缝漏水漏泥，钻孔灌注桩钻孔易斜且难以按图定位等。基坑开挖过程中均已发生了不少的问题。重则漏水漏泥，导致发生流砂，造成周边道路、铁路路基坍塌，地下管线开裂，附近房屋严重沉降开裂；轻则引起道路开裂，地下管线变形严重超标，或围护钻孔灌注桩、砼地下连续墙侵入地下室底板范围内，迫使主体结构修改设计，缩小地下室面积等。为避免以上事故的发生，业主经与围护结构设计单位多次讨论研究，修改设计方案，决定采用劲性水泥土连续搅拌墙(SMW 工法)。

SMW 工法支护结构设计按照《上海市标准基坑工程设计规程》(DBJ08-61-97)中板式支护体系中规定的要求进行设计计算。当采用薄桩体、型钢间距大时，应对二根型钢间的纯水泥土桩体水平方向进行强度计算；同时设计中为减小用钢量，一般型钢插入长度小于水泥土桩长度，其界面处应对纯水泥土桩体进行垂直方向强度验算。SMW 桩其桩体截面由型钢与水泥土组合而成，但计算截面刚度时可不考虑搅拌桩的作用，因为水泥土桩体断面虽然大，但其变形模量仅为钢材弹性模量的 0.05%～0.15%，按目前常用截面尺寸计算，在组合截面中搅拌桩刚度一般仅为型钢刚度的 2%～10%，不考虑搅拌桩刚度对位移计算影响不大。



剖面图



标准段详图

在墙体设计中，主要是对插入型钢的长度与断面进行计算。其强度与稳定计算的依据为钢结构设计规范，但应着重指出其工作状态与普通钢结构是有较大的区别的。SMW 工法中型钢全断面均嵌固在有一定强度的水泥土之中，水泥土对型钢的包裹作用提高了型钢的刚度，可起到减少位移的作用，此外水泥土也起到套箍作用，一般来讲，只要满足施工时起吊、沉放要求，在以后工作状态中不会发生腹板局部失稳现象，因此设计中在满足施工条件情况下应尽可能加大翼缘宽度与厚度，减薄腹板厚度，加大断面高度，在这方面设计的优劣

与否，将大大影响围护桩体的总造价。

本工程中水泥土搅拌桩采用日本进口 Φ650mm 三轴搅拌机并首次采用双排套打工艺，形成厚度为 1120mm 的劲性水泥土连续墙，长 26 米，水泥掺量 20%，水灰比 1:1.5。搅拌桩打入第六层土，可以形成良好的隔水帷幕。经验算，水平方向水泥土强度以及型钢底端水泥土截面强度均满足要求。

本工程设计中原考虑型钢采用 700×300×13×24 轧制 H 型钢，间距 900mm，其截面刚度为 44667kN-m²/m，抗弯强度为 1376kN-m/m，计算所得墙体最大位移为 28.0mm，已经能满足要求。由于本工程中 H 型钢不准备回收，所以可以适当减小型钢的腹板和翼缘厚度，通过加大型钢的高度来满足围护结构的强度和刚度要求。经比较型钢采用 850×300×10×20，其截面刚度为 55777 kN-m²/m，提高了 24.9%；抗弯强度为 1411kN-m/m，提高了 2.5%；墙体最大位移为 26.2mm，减小了 6.4%。而其用钢量反而从 185kg/m 下降为 158kg/m，减少了 14.6%。因此在工程中采用了后一种型钢，不仅节约了造价，围护桩体的变形也得到了一定程度的减小。挡土结构主要计算结果见下表：

| 工况 | 挖深 | 支撑轴力(kN/m) | | | | | | 挡墙内力、位移 | | 备 注 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Z1 | Z2 | Z3 | 底板 | 楼板 | 楼板 | $M_{max}$ | $Y_{max}$ | |
| | | (-0.7m) | (-5.0m) | (-8.8m) | (-10.6m) | (-6.8m) | (-3.0m) | (kN-m/m) | (mm) | |
| GK1 | 1.1m | | | | | | | 33 | 3.2 | 施工Z1 |
| GK2 | 5.3m | 128 | | | | | | 360 | 11.1 | 施工Z2 |
| GK3 | 9.1m | 30 | 393 | | | | | 524 | 20.0 | 施工Z3 |
| GK4 | 12.4m | 12 | 321 | 445 | | | | 605 | 26.2 | 浇捣垫层 |
| GK5 | 12.4m | 17 | 411 | | 399 | | | 484 | 25.6 | 拆除Z3 |
| GK6 | 12.4m | 57 | | | 329 | 419 | | 508 | 25.7 | 拆除Z2 |
| GK7 | 12.4m | | | | 337 | 367 | 102 | 505 | 25.7 | 拆除Z1 |

注：GK1：开挖至-1.1m，施工第一道圈梁及支撑Z1；

GK2：开挖至-5.3m，施工第二道圈梁及支撑Z2；

GK3：开挖至-9.1m，施工第三道圈梁及支撑Z3；

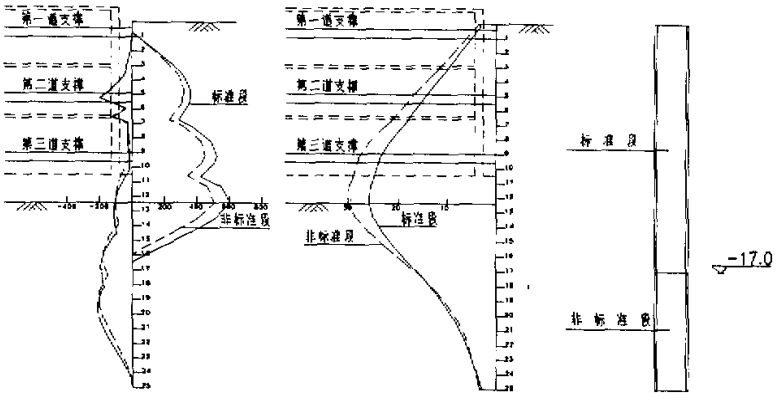
GK4：开挖至-12.4m，浇捣砼垫层；

GK5：浇捣砼底板，在底板与围护桩间设传力带，拆除Z3，施工地下三层；

GK6：在地下三层顶板处设传力带，拆除Z2，施工地下二层；

GK7：在地下二层顶板处设传力带，拆除Z1，施工地下一层。

在通常的 SMW 桩设计中，沿桩体深度范围内都是采用等厚度的型钢。但通常情况下围护结构的弯矩包络图，在基坑底面以下弯矩值均急剧下降。由于本工程中的型钢不回收，因此我们在设计中考虑型钢翼缘刚度采用变厚度，即在-17.0m 以上采用标准段(850×300×10×20H 型钢)，-17.0m 以下采用非标准段(850×300×10×10H 型钢)，即翼缘钢板减薄为 10mm。型钢的插入深度分别为 -23.0 和-25.0，1 隔 1 间隔布置。从分别按标准段和




弯矩包络图　　位移包络图　　型钢详图

非标准段计算所得到的弯矩包络图和位移包络图中可以看出，在桩体的下部，弯矩和位移的差值比较小，因此采用变厚度的型钢对围护结构的整体刚度、抗弯强度以及基坑变形影响较小，而和通长布置的 H 型钢相比，每根型钢实际可减少用钢量 0.33 吨。

## 四　经济指标分析

在围护结构设计中，在决定采用何种结构形式时，在满足了安全，现场条件容许的情况下，经济指标是一个决定性的因素，对于板式支护中支撑形式，对同一设计者而言均相同。下面针对本工程从目前应用最为广泛的钻孔灌注桩加搅拌桩围护与 SMW 工法作一比较。

1. 钻孔灌注桩加搅拌桩

常规设计中可考虑采用钻孔灌注桩挡土，双排深层搅拌桩止水。钻孔灌注桩桩径 900mm，间距 1050mm，桩长 26m；搅拌桩前排桩长 23m，后排桩长 17m，水泥掺量 13%。每延米工程量（下同）见下表：

| | | |
|---|---|---|
| 深层搅拌桩 | 28.4m³ | 水泥掺量 13% |
| 钻孔灌注桩 | 15.75m³ | 含钢量 120kg/m³ |

2. SMW 工法 A（型钢回收）

| | | |
|---|---|---|
| 深层搅拌桩 | 50.0m³ | 水泥掺量 20% |
| H 型钢 | 5.14 吨 | 700×300×13×24 |

3. SMW 工法 B（型钢不回收）

| | | |
|---|---|---|
| 深层搅拌桩 | 50.0m³ | 水泥掺量 20% |
| H 型钢 | 3.86 吨 | 850×300×10×20 |

在以上设计参数情况下，围护桩体的截面刚度后者要比前者下降 28%左右，但由于墙体变形是由坑底以下土体水平压缩变形、支撑压缩变形及墙体本身变形这三者叠加而产生，因此，最大变形量二种结构形式墙体仅相差 2～3mm 左右。但由于墙体施工时 SMW 工法对周边环境影响小，因此从总体上分析比较，SMW 工法对控制周边环境影响更为有利。

## 五 结束语

按目前 SMW 工法的各项技术指标及经济指标看，它极有可能逐步取代钻孔灌注桩加搅拌桩的围护方式，但如果要进一步发展并在超深基坑围护结构形式中取代地下连续墙则应注意以下几个方面：

1. 国产设备

国产设备搅拌叶片仅二组，叶片面积小，钻进时不喷浆，提升时再喷浆，属挤压型，对周边土体扰动大。目前，一般采用水泥浆的水灰比 0.55，搅拌后水泥土不流动，型钢难以靠自重沉放，一般需要依靠振动锤辅助沉放。为方便施工，减小对周边土体影响，目前在机械设备未进行较大改进提高的情况下，可通过从加大水泥浆水灰比角度来进行适当改善，从水泥土强度与含水量之间的相关性比较分析，在一定范围内，当水泥土含水量增加 10%，则强度下降 10%～20%左右，由于土体中自然含水量约为 500～600kg/m3，当水泥浆水灰比从 0.55 增大到 1.0，水泥土含水量只增加 15%左右，为满足强度要求，可通过增加水泥用量的方法来解决。一般水泥掺量增加 1%，则强度可增加 10%～15%。从以上分析可以看出水灰比加大则水泥用量增加，但型钢沉放难度降低，对周边环境影响也减小，因此对某一个工程项目宜综合考虑环境保护要求，机械设备费用，水泥掺量等因素确定合适水灰比，以达到最佳的安全、技术、经济指标。

从长远考虑，搅拌桩机设计扭矩要加大，搅拌桩叶片要增加，提高搅拌均匀性，加快施工速度，增加搅拌深度以扩大应用范围。为满足 SMW 全断面套打(槽段无缝搭接)的技术要求，国产设备改造必须走多轴多钻头的方向。

2. 进口设备

进口搅拌桩机施工由于搅拌头采用长螺旋多层多组叶片，叶片面积也大，因而有效搅拌长度长，同时第一次钻进时即喷浆搅拌，水泥浆水灰比大(达 1.5～2.0 左右)，其成桩原理为置换型，对周边土体扰动挤压小，搅拌后水泥土呈流动状，后插型钢在一定深度范围可依靠自重沉放，特别是多钻头全断面套打的无缝搭接工艺能取得薄壁墙高抗渗效果。

目前进口的 650 三轴钻机与 850 三轴钻机虽然有施工速度快，水泥土搅拌均匀，成桩深度深等显著优点，但由于设备投资大，从长远规划考虑应研制发展国产设备。

3. 型钢芯材

型钢芯材应根据桩体宽度、回收与否，尽可能向高断面、宽翼缘、薄腹板、钢板变厚度方向发展，降低用钢量以进一步降低工程造价。

## 参考文献

[1] 陈昌祺，陈柳娟：《上海国际会议中心地下车库围护设计》。

[2] 上海凌翌建设工程有限责任公司：《新重庆大厦 SMW 工法工艺试验报告》。