SMW 工法在静安寺下沉式广场中的应用

王杰光　　曾德顺　　徐家豪　　吴爱华
（同济大学特种土木工程技术研究所，200092）（上海地铁二号线建设静安区指挥部，200040）

提　要　本文介绍了上海静安寺下沉式广场的工程特色，阐述了基坑开挖支护的选型与 SMW 工法的设计方法，并与工程检测结果进行了比较；对施工技术措施作了介绍，

一　前　言

SMW(Soil Mixing Wall)工法是一种新型的基坑支护技术，在日本已应用多年，有较丰富的经验；而我国于 1994 年刚开始引进该技术。近几年该工法在上海越来越得到了人们的重视，已连续在十多个重点工程中得到应用，并积累了一些经验和作了一些相应研究，同时也显露出了该工法的优越性。SMW 工法支护比深层搅拌重力式挡墙的宽度小，占用场地少，更适用于在狭窄的场地施工；它比地下连续墙施工简便，造价低，且无污染，因而尤其适用于在城市中心施工。

SMW 工法是在深层搅拌桩中按一定的间距插入型钢，型钢与搅拌桩共同形成复合墙体，搅拌桩可以起到止水帷幕的作用，而桩身全部或大部分内力可以由型钢承担；基坑工程完工后还可以抽出型钢，降低围护工程造价。但目前对 SMW 工法的设计计算理论还没有明确成熟的方法，故本文采用水泥土式排桩的设计方法，同时引用了部分新的研究成果。

二　工程概况

上海地铁二号线静安寺站五号出入口下沉式广场地下商业空间地处静安区繁华中心，北临南京西路，西靠华山路，南侧、东侧紧贴静安公园，基坑尺寸约 90×90m^2，建筑面积为 9978m^2。整个建筑物主要由南侧地下二层商业空间、中部台阶舞台、北侧地铁车站出入口下沉广场以及西侧风景、圆形音乐喷水池等人文景观构成。

该工程周边已建成的地下构筑物有：地铁静安寺车站(北侧)、110kV 主变电站(西南侧)、牵引变电站(西北角)。此外，东侧有静安公园内必须保留和保护的二排百年古树，西侧便道下有电力电缆、Φ300 上煤、Φ300 和 Φ900 雨水管线等地下管线，在基坑开挖范围内还有废弃防空洞。

整个建筑物呈不规则多边形，其中地下商业空间部分为地下二层结构，每层建筑面积约 3500m^2，五号出入口部分为露天广场，面积约 3000 m^2。

在下沉广场底板下共设 125 根钻孔灌注桩，有两种规格：Φ600 桩长为 19m 左右，

其主要作用是解决底板在传递由地铁产生的水平力过程中的扭曲问题；Φ700 桩长为 37m 左右，主要作用是与土体一起共同承担上部结构的荷重，同时由于桩的作用能明显减少地基的沉降，且减少了底板的厚度。

该工程基坑围护结构采用新工艺“SMW”搅拌桩(水泥土复合搅拌桩+H 型钢)，即Φ700 水泥土复合搅拌桩两两相交，并半位一隔一插入 50#H 型钢；根据开挖深度不同，搅拌桩长分为 18m 和 20m 两种，而型钢长分别为 16m 和 18m，布置于外层搅拌桩内；采用两道斜支撑和角撑，分别位于桩顶下 1.5m 和 5.0m，间距为分别为 3.5m 和 8.0m。由于两道支撑只能在基坑开挖过程中实施，为了提高基坑土体水平抗力，在基坑内侧 4.2～5.2m 的范围内进行土体加固，深度从-3.00m 至-11.00～-12.00m；水泥渗入比：围护 15%，内侧加固 7%，坑底加固 14%。另外，为加强整体性，在桩顶设置圈梁，为此，其它未插入 H 型钢的桩身内插入 5 根长 3.5m 的Φ14 的螺纹钢。

基坑开挖由于受周边已有地下构筑物等多种因素所限制，故采用“盆式开挖、中心岛施工方法”，即把结构底板分为十一块施工，先挖除中间部分土方，完成底板结构并达到强度后，马上在其上采用 609 钢斜撑形成支撑体系，在未形成支撑体系前完全依靠四周土坡压重来抵抗外侧主动土压力，待支撑体系形成后再进行周边施工。

为及时了解基坑开挖施工对周边已有建构筑物的影响，进行了全方位的施工监测，对基坑开挖时地表及其附近的土体变形、地下水位及地下管线的变化数据、围护结构的垂直和水平位移、支撑的受力情况等进行了监测，对异常情况及时采取相应措施，确保工程安全。

三　工程地质条件

本场地由上海市地矿勘察研究院实施工程勘察,根据其提供的工程地质勘察报告可得本场地地基土的埋藏条件及工程地质特性,各土层的主要物理力学指标见下表 1。

本场地地下水属潜水类型，其水位变化主要受控于大气降水和地面蒸发；稳定水位在地表以下 0.5～1.0m；基坑开挖涉及土层为①～③层，坑底位于③灰色淤泥质粉质粘土，该层含水量较高，孔隙较大，属高压缩性土；站区四周无污染源，地下水对混凝土无侵蚀。

四　基坑开挖支护的选择与设计

根据结构设计要求，基坑开挖深度约 7.8m～8.5m，而由于场地的限制，以及场地土体至上而下都是低强度软土、地下水位高，故基坑不可能采用放坡开挖方式；且深层搅拌重力式挡墙因占用面积大、变形大，也不宜采用；地下连续墙造价高、工期长、对环境有污染，只能作为后补方案。而近年来 SMW 工法在上海多项深基坑工程中获得了成功的应用，该法具有以下优点：搅拌桩墙体可起到止水帷幕的作用；而其中的H型钢可以承受搅拌桩墙体内的大部份拉应力，减小墙体的厚度；工程完工后H型钢可以回收，减小投资；工程无污染。因此根据造价以及对环境的污染等方面考虑，采用型钢水泥土复合搅拌桩(SMW 工法)加二道支撑进行基坑围护施工。

表 1　施工场地土层的主要物理力学指标

层序	土层名称	层厚(m)	含水量 w (%)	容重 γ (kN/m³)	孔隙比 e	压缩模量 Es(MPa)	内聚力 C(kPa)	内摩擦角 Φ(度)
1	杂填土	1.00～3.70						
2	灰黄色粉质粘土	0.7～3.0	37	18.3	1.65	3.30	12	14.3
3	灰色淤泥质粉质粘土	4.50～5.0	41.5	17.6	1.88	2.90	9	12.4
4	灰色淤泥质粘土	7.9～8.3	50.8	17.1	1.26	1.74	8.3	10
5	灰色粘土	4.8～7.8	41.2	17.8	1.83	3.01	11	9.1

为了提高作用于围护桩的被动土压力，基坑坑底四周采用水泥土搅拌桩进行地基加固，为加强围护桩的整体性，在桩顶设置钢筋混凝土圈梁。

1. 土压力计算

以基坑开挖 8.0m，围护桩长 16m 计算，由勘察资料可知，在 16m 深度范围之内，有四层土体(见图 1)，由各土层的抗剪强度指标 c、ϕ值及厚度可求出桩前桩后的主动与被对土压力(采用水土合算法)。

土层的抗剪强度指标 c、ϕ值及厚度 h_i 取以下数值：

(1)填土:: c=0,　ϕ=0 (估算值),　ρ=17kN/m³, h_1=2.0m

(2)灰黄色粉质粘土：c=12kPa　ϕ=14.3°,　ρ=18.3kN/m³, h_2=1.5m

(3)灰色淤泥质粉质粘土：c=9kPa　ϕ=12.4°,　ρ=17.6kN/m³, h_3=4.50m

(4)灰色淤泥质粘土：c=10kPa　ϕ=8.3°,　ρ=17.1kN/m³, h_4=8.0m

(5)灰色粘土：c=11kPa　ϕ=9.1°,　ρ=17.8kN/m³, h_5=6.0m

土压力采用朗肯土压力公式计算，对加固区土体采用复合强度指标，由此可求得作用于墙体上的水平荷载分布及其合力(嵌固深度为 8m，见图 2)：

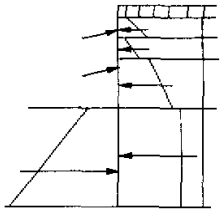


图 1　墙体受力图

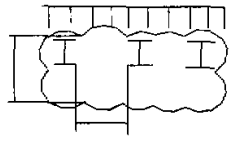


图 2　型钢在墙体中的位置

E_{ac1} = 62.14 kN/m，

E_{ac2} = 48 kN/m，

E_{ac3} = 315.63 kN/m，

E_{ac4} = 1104 kN/m 。

2. 嵌固深度

嵌固深度 h_d 按整体稳定条件采用圆弧滑动简单条分法确定：

$$\sum c_i l_i + \sum (q_0 b_i + w_i)\cos\theta_i tg\varphi_i - \gamma_k \sum (q_0 b_0 + w_i)\sin\theta_i \geq 0$$

式中，c_i, φ_i——最危险滑动面上第 i 土条滑动面上的粘聚力，内摩擦角；

l_i——第 i 土条的弧长；

b_i——第 i 土条的宽度；

γ_k——整体稳定分项系数，取 1.3；

w_i——作用于滑裂面上第 i 土条的重量，按上覆土层的饱和土重计算；

θ_i——第 i 土条弧线中点切线与水平线夹角。

经计算，嵌固深度 h_d = 8m 时，整体稳定分项系数 γ_k=1.3 时上式得以满足；同时采用下式进行基坑抗隆起安全系数的验算：

$$K_s = \frac{\gamma_2 h_d N_q + c_{sp} N_c}{\gamma_1 (h + h_d) + q_0}$$

其中，地基承载力系数 N_c,N_q 分别为：

$$N_q = tg^2(45^0 + \frac{\varphi}{2}) e^{\pi tg\varphi}$$

$$N_c = (N_q - 1)/tg\varphi$$

γ_1，γ_2——墙体外侧及坑底土体重度；

经计算得到 K_s = 1.9。满足要求。

3. 支护结构内力及变形

(1)斜撑内力及位移

采用二道支撑，支点分别为围护桩顶以下 1.5m 和 5.0m，水平向间距为 3.5m。

采用弹性支点法，可以求得支撑力 T_1 和 T_2、支护结构各点内力及挠度(位移)：

T_1 = 94×3.5 = 329 kN = 32.9 吨

T_2 = 250.4×3.5 = 876.4 kN = 87.6 吨

最大弯矩约在-8.0m 处，且其值为：

M_{max} = 450 kN.m/m

最大剪力约为

V_{max} = 200 kN/m

围护桩顶水平位移： S_0 = 1.0 cm,

围护桩身最大位移： S_{max} = 9.2 cm

(1)角撑内力及位移

角撑水平向间距为 8.0m,故其支撑力为：

$$T_{10} = 94 \times 8.0 \times 1.414 = 1063\ \text{kN} = 106.3\ \text{t}$$

$$T_{20} = 250.4 \times 8.0 \times 1.414 = 2833\text{kN} = 283.3\ \text{t}$$

4. 支护结构验算

(1) H 型钢抗拉抗剪验算

假定墙体应力全部由 50#H 型钢承担，而型钢间距为 1.0m，故型钢拉应力为：

$$\sigma = \frac{M_{max}}{W} = \frac{450\text{kN}\cdot\text{m}}{18.67\times10^{-4}\,\text{m}^3} = 241\text{MPa} \quad < \quad [\sigma] = 310\text{MPa}$$

最大剪应力为：

$$\tau_{max} = \frac{VS}{I\delta} = \frac{200kN \times 1.048\times10^{-3}\,\text{m}^3}{4.667\times10^{-4}\times10\times10^{-3}\,\text{m}^5} = 44.9\text{MPa} \quad < \quad [\tau] = 145\text{MPa}$$

式中，W——为型钢截面模量；

I——为型钢截面惯性矩；

S——为型钢面积矩；

δ——为型钢腹宽。

(2) 水泥土局部抗剪抗压验算

平均主动土压力：$q_0 = 48$ kPa

则型钢与水泥土间的剪力为：

$$Q = q_0 L_2/2 = 19.2\ \text{kN/m}$$

剪应力：　$\tau = Q/B_c = 19.2/1.0 = 19.2$ kPa

水泥土抗剪强度：　$[\tau] = q_u/12 = 67\ \text{kPa} > \tau$

水泥土压应力：　$\sigma = \frac{q_0 L_2}{B_f} = \frac{48\times0.8}{0.1} = 384\text{kPa} \quad < \quad f_c = \frac{q_u}{2} = 500\text{kPa}$

式中，B_c——水泥土墙体厚度(见图 2)；

B_f——型钢翼板宽度；

L_2——型钢翼板间距离；

q_u——水泥土无侧限抗压强度；

f_c——水泥土抗压强度设计值。

满足要求。

5. 地铁车站站厅位移估算

由于基坑开挖，将对牵引变电站及地铁站站墙体产生影响，要求由此而产生的位移不大于 1cm。

站厅地下连续墙深 26m，站体埋深 15m，基坑开挖 8.0m。视站体及地下连续墙为重力式当墙，对墙顶施加 270KN/m 的支撑，用“m”法可求得墙顶位移为 0.8cm，小于容许

值。

6. 剪力墙代替斜支撑验算

由于主体结构局部区域梁、板较密集，斜支撑对施工造成了困难。对此提出了采用剪力墙代替斜支撑的想法，即在底板浇注完成后，紧接着浇注该区域的钢筋混凝土外墙，此墙达到强度后既可拆除斜支撑，便于内部结构梁、板施工。

剪力墙在墙底部受最大剪应力和弯矩作用，其值经计算为：

$$\tau_{max}= 890\ kPa/m,\quad M_{max}= 538\ kN.m/m$$

剪力墙厚 700，钢筋保护层厚 15，垂向钢筋为Φ32@100。钢筋抗剪强度取为 145 MPa，抗拉强度取为 210 MPa,混凝土抗剪强度取为 1.1 MPa,则墙体所能承受的最大剪应力和弯矩分别为：

$$[\tau]= 2330\ kPa/m > \tau_{max}\quad [M]=1130\ kN.m/m > M_{max}$$

采用弹性理论可求得墙顶位移为：1.87 cm ，满足要求。

7. 采用一道支撑设想的可能性探讨

由于支撑不仅对结构施工造成影响，且使工程造价上升，因此应尽可能减少支撑道数。故有必要探讨本工程采用一道支撑的可行性。

设支点位于围护桩顶面下 3.0m，采用单支点板桩墙支护设计理论，可求得支点力 T_c:

$$T_c \approx 400\ kN/m$$

若支护间距仍为 3.5m，则支护力为

$$T = 400\times 3.5 = 1400\ (kN)= 140\ (吨)$$

最大弯矩作用点在基坑面附近，其值为

$$M_{max}= 1067\ kN.m/m$$

50#型钢所受应力为

$$\sigma = \frac{M_{max}}{W} = \frac{1067}{18.67\times 10^{-4}} = 572MP_a > [\sigma]=310\ MPa$$

即型钢应力过大。

因此，为抵抗过高的应力，必须增加搅拌桩墙体内的型钢数量。

其桩身最大位移为：25cm 。

五　工程施工概况

1. 基坑支护结构施工

基坑支护结构的施工包括，SMW 桩基坑围护及隔水帷幕施工，深层搅拌对基坑内侧及坑底局部范围的地基加固施工，原车站地下墙与围护桩的搭接。

主要技术措施：

(1)严格按图纸确定深层搅拌桩桩位，孔位误差不大于 5cm；搅拌桩机垂直度误差不大于 1%；桩底标高误差不大于 10cm。

(2)H 型钢的定位设备准确固定在导墙上，并校正其水平和垂直度，其垂直度误差不

大于 1%，同时保证 H 型钢为直线形状。

(3)对不插入 H 型钢的搅拌桩，在其桩顶 3.6cm 的范围内插入 5 根 Φ14 螺纹钢。

(4)保证在 6 小时以内完成搭接桩的施工，直至全部搅拌桩施工完毕。

(5)采用钻孔抽芯方法对成桩质量进行检验，要求桩龄期为 28 天时，q_u=0.8-1.0Mpa

(6)原车站地下墙与围护桩的搭接采用双液分层注浆方法施工，每一节点处布置 2 只注浆孔，注浆孔深度与围护桩深度相同，注浆量为 100 升/米，浆液配比为 1:0.55 加 0.03 陶土粉及中性水玻璃，水泥浆：水玻璃(体积比)=1：(0.8~1.2)

2. 井点降水

采用深井加真空降水方法，即在深井中用真空集水，水泵抽水。基坑内共设 30 根深井井点，井点滤井底标高为-12m(相对标高)，井管直径 ϕ250，成孔孔径为 ϕ650。在基坑开挖前已提前降水 2 周，地下水位已降至开挖面以下 6 米。

3. 中心岛开挖范围

由于进行盆式开挖、中心岛施工时无支撑体系，围护外侧土压力需依靠围护结构和内侧土压来承担；同时内侧边坡的稳定也直接影响到基坑的安全。因此需要确定中心岛的开挖范围。

根据规范要求，放坡开挖坡角线至围护的距离为 $L \geq 2.5H$, H=8.0m,故取 L=20m,采用条分法对边坡稳定性进行计算，可得其稳定安全系数 F_s= 1.3。因此，中心岛的开挖范围取为 50×50m^2。

4. 基坑开挖

基坑围护设计采用两道支撑，但支撑体系是在基坑开挖后才能实现，为了保证基坑开挖时，外围土体的变形尽可能的小，支护起到应有的作用，故应采用合理的开挖施工顺序。本工程采取分块、分阶段进行土方开挖、底板施工。根据结构特点和场地的实际情况，共分十一块进行施工。

施工流程：施工放样→凿除内导墙→圈梁施工→第一道砼圈梁、砼围檩施工→边坡开挖、砼护坡→中间土方开挖→中间底板施工→撑第一道斜撑→边坡开挖→第二道围图施工，撑第二道斜撑→边坡开挖→边坡底板施工。

技术措施：对已形成的边坡土堤进行砼护坡施工，对未能及时砼护坡的坡面采取临时塑料玻膜覆盖，以防止雨水侵入、土体干裂等不稳定因素对基坑安全造成威胁；在砼边坡坡面、平台上设置引流点、排水槽，并在每侧坡底设宽 30m 深 30cm 排水沟，间隔 30m 左右设一只集水井 60cm×60cm×80cm；雨季时，将潜水泵放入集水井内进行抽水，以保证坑内不积水，集水井采用砖墙砌筑。

5. 工程效果

基坑开挖后，围护连续墙面无渗漏水现象，仅在与地下连续墙接缝处有局部漏点；墙体变形小，无破坏现象；基坑边坡处于稳定状态，对周围环境的影响也得到了成功的控制；对于 H 型钢的回收率达到了 99%，创造了良好的经济效益。

六　工程监测

本工程对围护结构的墙体位移、支撑轴力、静安寺地铁车站站厅内墙体平面位移等九个项目进行了监测。主要监测成果如下：

(1)位移主要监测成果：

部位	最大值（cm）	深度(m)
东侧	7.934	7.5
南侧	7.964	6
西侧	5.454	11

(2)支撑轴力：

第一道钢支撑轴力为 20～62t；

第二道钢支撑轴力为 45～95t。

(3)静安寺站厅内地下连续墙平面位移最大值为 7.6mm.

根据前面的理论计算，围护结构墙体的位移为：顶面 1.0cm，墙身最大值 9.2cm；而实测值为顶面 0～5mm，墙身最大值 5.45～7.96cm，计算值与实测值基本一致。对于支护力，理论值第一道钢支撑为 33t，第二道钢支撑为 87.6t；而实测值分别为 20～62t 和 45～95t，这也表明计算值与实测值是一致的。对于站厅内地下连续墙，其平面位移实测值为 7.6mm，与理论计算值 8mm 非常接近。

七　结束语

“SMW”工法用于深基坑围护结构，虽然它的设计、施工理论还没有完善，但该工法在本工程的成功应用，再次证明了目前采用的设计、施工理论是可行的。“SMW”工法的方便、快速、经济和无污染性改变了以往工程施工对周围优美环境的影响，因此，它在城市建设中具有广阔的应用前景。希望本文对今后工程的设计与施工具有积极的推动作用。

参考文献

[1]《建筑基坑支护技术规程》JGJ120-99，中国建筑工业出版社，1999。

[2] 龚晓南等：《深基坑工程设计施工手册》，中国建筑工业出版社，1998。

[3] 黄强：《深基坑支护结构实用内力计算手册》，中国建筑工业出版社，1995。

[4] 蔚希成：《支挡结构设计手册》，中国建筑工业出版社，1995。

[5]《上海建筑基坑支护技术规程》。

[6] 夏明耀等：《地下工程设计施工手册》，中国建筑工业出版社，1999。