软土地层基坑复合土钉墙支护工程实例分析

杜　飞　钱七虎　徐水根
(解放军理工大学工程兵工程学院，南京，210007)

提　要　通过对两个软粘土地层中复合土钉墙支护的基坑工程施工技术的总结及其变形监测数据的分析，说明在软土地层的浅基坑围护工程中应用复合土钉支护技术是可行，但须考虑开挖的时空效应、认真治水以及控制基坑变形。

近几年来，我国经济建设最活跃的东南沿海地区，如上海、福州等一些城市均出现了大量的浅基坑工程(开挖深度 $H\leqslant 7$m，主要是多层住宅的地下室、污水池以及地下车库等)。尽管她们所处的地层条件较差——以淤泥及淤泥质土为主，地下水位较高，但由于经济及安全方面原因，以往传统的基坑支护结构型式在浅基坑这一领域已无多少竞争力，而新近才发展起来的专门针对软土地层基坑的所谓“复合土钉墙挡土技术”却逐渐为人们所接受并开始广泛使用。对于这种支护加固方法，一方面，业主非常重视它带来的十分可观的经济效益；另一方面，复合土钉墙的支护、加固作用机理还在研究当中，甚至连设计计算方法也是借用于其它支护结构类型(如常规土钉和土层锚杆)。这样，工程技术人员的实际施工经验就显得非常重要而且十分必要。作者正是基于这样的考虑，在文中通过对两个工程实例的分析，说明了在软土地层中设计和施工土钉支护结构应该注意的一些问题。

一　软土地层的土钉技术

常规土钉挡墙正常工作的基本条件有三个：(1)土体能够给土钉杆体提供足够的抗拔力；(2)土体有一定的自立稳定性，以保证支护作业及时进行；(3)喷混凝土面层与土体之间有一定粘结强度。这就使它对地层有很大的依赖性，通常仅适用于地下水位较低、自立性较好地层，如我国的规范《基坑土钉支护技术规程》(CECS96：97)第 1.0.2 条规定，土钉支护适用于下列土体：有一定胶结能力和密实程度的砂土、粉土和砾石土、素填土，坚硬或硬塑的粘性土，以及风化层等。

显然，软土地基不在上述推荐地层之列。为些，我国科研及工程人员提出了专门针对软土地层进行支护、加固的复合土钉墙概念[1]——以水泥土搅拌桩等超前支护措施解决土体的自立稳定性、地下水渗流以及喷混凝土面层与土体的粘结等问题，以水平方向压密注浆和二次压力灌浆技术解决土体加固及变形控制问题，以超前支护结构的插入深度解决坑底隆起、管涌以及坑后土体深部滑移问题。就目前的应用状况来看，主要有两种结构型式：(1)搅拌桩与土钉支护联合使用如图 1(a)。一般搅拌桩的深度可达 12m～14m，强度 1.2MPa，

当相互之间搭接较好时，其侧向抗渗系数可以达到 10~6cm/sec 以上。主要用于开挖深度较大(如 H=5.5m～7m)且地下水丰富的地层；(2)钢管微桩与土钉支护联合使用如图 1(b)。一般钢管直径选用 Φ48～ Φ108 之间，间距为 500mm～800mm，并在钢管上制作出浆孔，然后在其中高压注入水泥浆以增加其侧向刚度。由于不能形成隔水帷幕，所以主要用于地下水水位较深且基坑相对较浅的围护工程中(H≤5.5m)。当基坑周围环境条件要求严格控制位移时(如周围有道路、地下管线穿过或紧邻多层建筑)，对于上述两种情况，通常将土钉支护的第二或三排土钉用加有预应力的土层锚杆取代，以使结构主动受力，最大限度地减小变形。

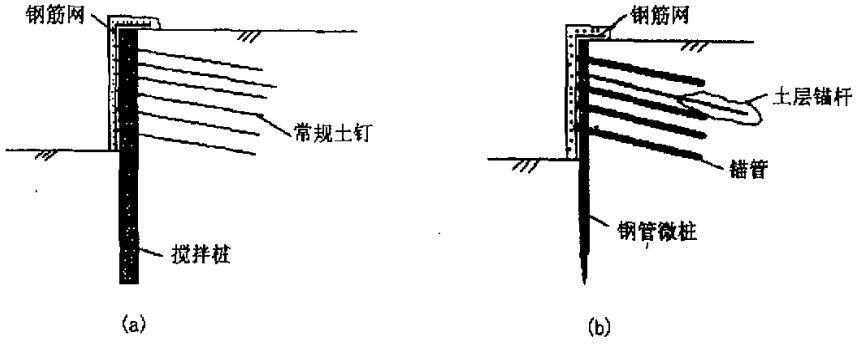


图 1　复合土钉墙的两种基本结构型式

二　复合土钉支护的工程应用分析

以下就对上述两种类型的复合土钉墙应用问题进行分析，以得出对以后工程有指导意义的结论。

1．上海市区基坑围护工程甲

(1)工程概况

该工程是一外商投资兴建的高层豪华住宅群，基坑工程由五幢高层住宅和一个高层会所的地下室、两个地下车库以及一个污水处理站组成。基坑开挖深度最深处 5.8m，最浅处为 5.2m，平均 5.5m。基坑平面呈极不规则的多边形，而且有多处内凸阳角，最长边 107.8m，总支护面积达 2100m^2。在拟建基坑的周围，有交通干道、市政管线以及多、高层办公楼和居民住宅，对基坑变形以及施工时间有严格的要求。

该场地地层分布如下：第①层为杂填土，厚度 1.2～1.5m；第②层为褐黄色粉质粘土层，厚度 1.2～2.3m，可塑，低透水性；第③层为灰色粉质粘土，厚度 2.6～3.6m，透水性较好；第④层为灰色砂质粉土夹粘质粉土，厚度 12～13.5m，透水性较好。地下水位埋深 0.5m，渗透性较小的灰色淤泥质粘土埋深为 18.2～21m。

(2)围护方案的选择及结构设计

由工程地质资料可知，基坑及围护结构都将涉及到灰色砂质粉土，这一土层极不稳定，在一定的动水压力作用下，它极有可能产生流砂和管涌，自稳性相应的也极差。所以，无

论采用何种支护结构型式，都必须考虑治水措施。若按照上海以往的做法，或者是采用灌注桩加内支撑作为主支护结构，再辅以水泥土搅拌桩作防渗隔水帷幕；或者是采用既可承载又可防渗的格构式重力挡墙。显然，这两种方法在安全和技术方面是绝对有保证的，但是，在经济效益方面是绝对浪费的，而且工期较长，可能影响后续工程的进度。经多方论证后，设计人员提出了复合土钉墙支护方案，即采用搅拌桩——土钉支护类型，并为业主所接受。据估计节约造价约 20%～30%。

围护结构设计主要考虑以下内容：①搅拌桩的设计计算——主要考虑搅拌桩三方面的作用功能，即防渗漏、抗剪切破坏以及抗坑底隆起，相应的要进行抗渗设计、搅拌桩根部的抗冲切验算以及坑底隆起稳定性验算；②复合土钉墙的整体滑移稳定性验算——认为其破坏模式如图 2 所示，滑动面应该在无抵抗力矩的锚固区以外。滑面位置(包括圆弧面的转动中心及半径)由最优化搜索算法确定[2]；③土钉的设计——主要包括确定土钉的行距和排距、长度以及单孔注浆量。其中，认为软弱地层中的土钉须发挥两方面的作用——一是加固土体形成重力式挡墙，二是承受墙后的主动土压力和静水压力，这就对它的长度有特殊要求。这里采取的解决方法是将它既作为土钉又作为土层锚杆来计算；④喷混凝土面层的强度验算——按多跨连续板验算其强度和配筋，并验算板在支座截面处的冲切强度。

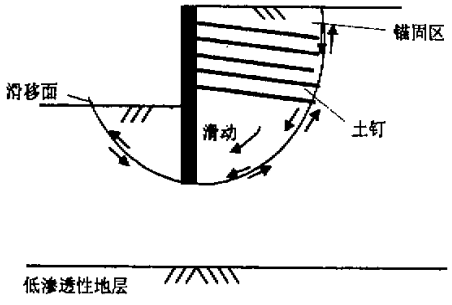


图 2　复合土钉墙深部滑稳定问题

(3)施工技术措施

复合土钉墙支护除了要有可靠的设计计算外，还要有专业的施工技术人员来实施。需注意的要点是：①基坑上部几排土钉最好用钻孔法施工，并在二或三排土钉端头施加预应力。由常规土钉支护的变形规律知道，其最大侧向位移在上部，为了控制基坑变形，就应该坚持对 1～3 排土钉以钢筋作为杆体，用钻孔法送入土中，并对二或三排土钉按预应力锚杆方法施工，待二次注浆体达到一定强度后，施加 30～50kN 预应力。其余各排土钉则可采用钢管代替钢筋，打入软土中，即采用锚管法进行施工。②按信息化反馈的方法进行施工。土钉必须是开挖一层，支护一层，在这个过程中，要时刻关注现场的监测数据走势和基坑周围的宏观变形情况，出现问题要及时反归馈到设计中去，并按新的修改方案施工。当基坑平面长边大于 30～40m 时，应该分段跳格开挖，即按先两头后中间的方法开挖支护。③注浆质量是保证土钉和锚杆抗拔力的关键。其中最主要的问题是注浆量和注浆压力。为了保证最大的注浆量一般采用二次注浆工艺。第一次为低压力灌浆，以填充钻孔周围的裂隙和孔洞；待浆液初凝后，用高压力进行第二次注浆，目的是压密周围土层，以加固土

体、提高土钉杆体与周围土层的粘结力。

(4)变形监测及分析

根据上海市标准《基坑工程设计规程》(DBJ06－61－97)，该基坑工程属二级类型，监测项目有：①围护墙水平位移；②墙顶沉降；③周围土体沉降和位移；④周围地下管线的沉降和位移。这里我们仅列出有代表性的围护墙各点沿高度方向的水平位移时程曲线来分析(如图 3、4 所示)。从图中可以看出，复合土钉墙水平位移曲线与常规土钉墙的已完

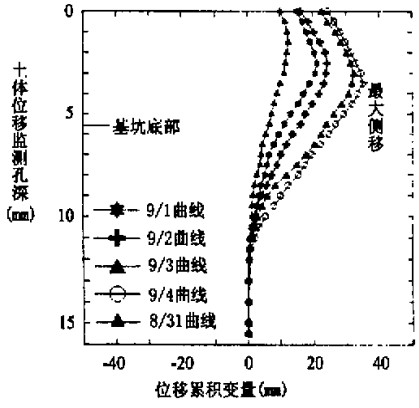


图 3　基坑工程甲 JX5 孔土体水平位移变量变化曲线图

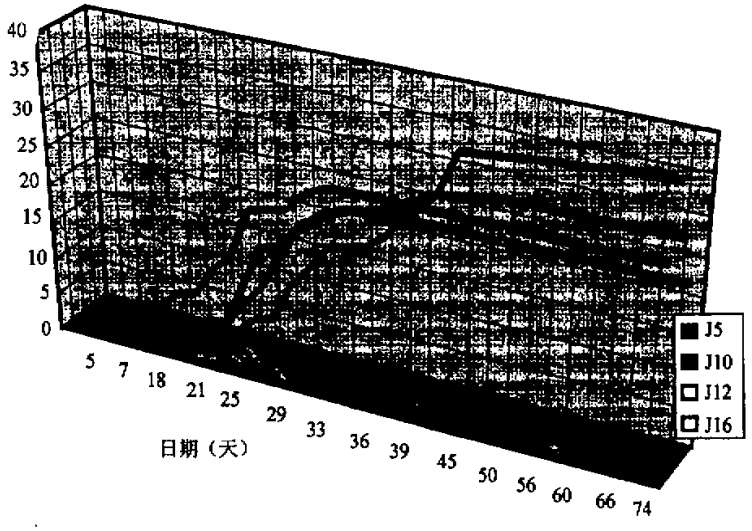


图 4　土钉墙顶 J5，J10，J12，J16 测点水平位移时程曲线

全不同；最大位移点不在墙体顶部，而是位于基坑边壁中间偏下部位，与刚性支挡结构的

侧向变形性能有点相似。同时也说明，应该重视基坑底部附近的土钉设计和施工，因为此处的土钉受力较大，也是控制侧向变形的关键部位。还可以发现，水平位移变化幅度最快地时段是土钉墙施筑的阶段，一旦测点附近的土钉设置好，喷混凝土结束，基坑边壁的侧向位移发展速率迅速减小甚至停止。就某一点的位移时程曲线来说，变化趋势基本上呈台阶跳跃型式。当土钉墙施工结束，底板素混凝土垫层浇注完毕后，边壁的侧向位移增量基本为零，累积位移变量趋于收敛，基坑已经稳定。这明显反映了时间效应对于基坑变形性能的影响。因此，为了减小这种负面效应，应尽量缩短从土层开挖到钉墙施做完成之间的时间间隔。一般是一层土挖走以后，马上进行土钉墙施工，尤其是在雨天更应如此。

2. 上海市区基坑围护工程乙

该工程是一地下车库基坑，它位于正兴建当中的高层住宅一期工程东侧，最近间距小于 7m。地下车库占地面积约 2500m^2，基坑开挖深度 4.7m，基坑东侧(418m^2)采用 1∶1 放坡外加喷射混凝土护面，其余三侧(686m^2)壁均采用复合土钉墙支护。

(1)工程地质概况及围护方案选择

该场地的地层可以简单地分为三层：①杂填土：层厚 0.7～3.2m，地下水位在地表以下 0.7～1.1m 处；②褐黄色粉质粘土及淤泥质粉质粘土，层厚 1.0～2.9m，可塑，低渗透性(K_v≤10~6cm/s)；③灰色淤泥质粉质粘土夹砂质粘土，层厚 3.4～4.1m，饱和、流塑。垂直和水平向的渗透系数均较小(K_h、K_v≤10~6cm/s)。很显然，该基坑地下水渗漏的可能性较小，不必专门采用水泥土搅拌桩隔水，但应该考虑开挖土体的自立稳定性和抗坑底隆起稳定性问题。因此，该基坑围护工程采用了复合土钉支护技术的另一种型式，即超前钢管微桩＋常规土钉墙支护：为了挖土方便，首先在基坑边进行降水，然后以较小的间距(50cm)打入垂直钢管微桩，在个别区段对钢管内进行高压注浆，以解决开挖后边坡土体的临时自立稳定问题和预先加固土体；土层开挖后，就可直接施做土钉墙。为了进一步控制位移，将第二排土钉改为加预应力的土层锚杆，并在这一高度设置通长水平槽钢圈梁连接。

(2)应用效果评价

在工程施工过程中，遇到了上海少见的多场特大暴雨，给基坑围护施工带来了很多不便，如基坑经常积水，开挖后还未来得及支护的土体易发生坍陷，由于基坑抽排水的效果不理想，坑内土体长时间浸水，无法进行下一步开挖，延误工期，甚至出现了一些险情。主要原因是在靠近已有高层建筑地下室的一侧，锚管不能按设计长度进行施工，再加上这一侧土层几乎都是回填土，未经压密，其中有大量的孔洞，土钉达不到设计的抗拔力，造成土体发生了较大的变形。在经过及时加固处理后，基坑变形明显趋于稳定，并且最终也没有对后续的地下室工程产生不良影响，围护结构施工仍基本按期完成。信息化施工的优点在这里体现得淋漓尽致。监测结果表明，围护结构最大水平位移和最大沉降量均满足环境控制的要求。

三 结 语

以上围绕软土地层中两个有代表性的复合土钉支护工程实例，从施工和变形监测两方面进行了阐述，可以发现，一个成功的复合土钉墙支护工程不仅要有科学的设计计算，更要有成熟的施工技术方法、经验以及可靠的施工监测，充分利用信息化施工技术的特点，

有时可以弥补设计上的缺陷。尤其是对于软土地层的基坑土钉工程，无论在设计计算方面，还是在施工技术方面均要考虑时空效应。具体应用方法是：对于边长较长的基坑，须采用跳挖，同时要采用岛式开挖方式，而不能采用盆式开挖。可以预期，随着对复合土钉墙支护加固机理研究的深入，它的工程应前景会更加宽广。

参考文献

[1] 徐水根，谭跃虎，石秀文：《软土地层土钉支护》，见《工程兵工程学报》，1999，14(2)92～94。

[2] 杜飞等：《基坑土钉支护技术工程应用中的若干问题分析及对策》，见《施工技术》，2000，29(1)44～46。