

# SMW工法桩在硬土地区复杂环境基坑中的应用

张闻璟<sup>1,2</sup>

(1. 山东省鲁南地质工程勘察院, 山东 济宁 272100; 2. 山东省华鲁工程总公司, 山东 济宁 272100)

**摘要:** SMW工法桩具有施工工艺简单、经济可靠、适用性强、对环境污染小等优势。自从国外引进以来,在我国沿海软土地区运用广泛,但是在内陆硬土地区运用尚少,且规范标准、技术规程并不完善,一些要求存在争议。本文通过对鲁西南周边环境复杂的某基坑项目中SMW工法桩运用和改良的介绍,总结了在设计、施工过程中可能遇到的一些问题,并提出了相应的解决方法:在周边环境复杂、可放坡空间受限、环保要求高的中型基坑支护项目中采用该工法桩,较为经济可靠;不同软件的计算结果有所偏差,在设计阶段应选择当地认可的软件,选择合适的模型和参数进行计算,并根据经验优化计算结果;搅拌桩施工中的水泥掺量和水灰比直接影响到灰土混合物的强度、均匀性和流塑性,进而影响到型钢施工难度和质量,以及水泥土帷幕墙的止水效果,但目前硬土地区尚未形成统一的规范标准,需要根据现场实际情况试验获得最佳配比。

**关键词:** SMW工法桩;内陆硬土地区;基坑支护;计算模型;水灰比;水泥掺量

**中图分类号:** TU473.2 **文献标识码:** B **文章编号:** 2096-9686(2021)10-0110-06

## Application of SMW piles in a foundation pit project in the complex surrounding environment and the hard soil area

ZHANG Wenjing<sup>1,2</sup>

(1. Shandong Provincial Lunan Geo-engineering Exploration Institute, Jining Shandong 272100, China;

2. Shandong Provincial Hualu Engineering Corporation, Jining Shandong 272100, China)

**Abstract:** The SMW construction method has the advantages of simple construction process, economic reliability, high applicability and less environmental pollution. Since it was introduced from abroad, it has been widely used in the coastal soft soil areas of our country, but it is rarely used in the inland hard soil areas, and the standards and specifications are not well developed with some requirements remained controversial. This paper introduces the application and improvement of SMW piles in a foundation pit project in the complex surrounding environment in southwest Shandong, summarizes some problems that may be encountered in the process of design and construction, and puts forward corresponding solutions. It is more economical and reliable to use the method in the medium-sized foundation pit project where the surrounding environment is complex, the space for sloping is limited, and environmental protection requirements is strict. Since different software may lead to different calculation results in some degree, locally recognized software should be selected for the design stage with the appropriate model and parameters for calculation, and the calculation results are then optimized according to experience. The cement content and the water cement ratio for SMW piles directly affect the strength, uniformity and flow plasticity of cement-soil mixture, hence the difficulty and quality of steel construction, as well as the water sealing effect of the cement-soil curtain wall. But there is no unified standard for the hard soil area; thus, testing is necessary to obtain the optimum mixing ratio according to the actual site conditions.

**Key words:** SMW pile; inland hard soil area; foundation pit supporting; calculation model; water-cement ratio; cement content

收稿日期:2020-12-17; 修回日期:2021-03-24 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.10.015

作者简介:张闻璟,男,汉族,1986年生,部门副主任,工程师,地质学专业,硕士,从事基坑工程、破损山体治理设计及施工工作,山东省济宁市兖州区建设东路272号,47468347@qq.com。

引用格式:张闻璟.SMW工法桩在硬土地区复杂环境基坑中的应用[J].钻探工程,2021,48(10):110-115.

ZHANG Wenjing. Application of SMW piles in a foundation pit project in the complex surrounding environment and the hard soil area [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(10): 110-115.

## 0 引言

基坑支护结构的主要形式有:土钉墙、重力式水泥土墙、排桩、地下连续墙等,不同形式具有各自的适用性和特点。基坑工程作为一种综合性较强的临时性工程,与周边环境、土层状况、地下水位、季节和温度等外界条件变化息息相关,虽然支护结构的使用期限较短(一般在1年左右),但是由于各工程外界条件不尽相同,所采用的支护形式和参数要求等也会有所区别。若支护结构稳定性不足会存在一定的安全隐患,若其安全储备较大又会造成不必要的浪费,因此如何选择安全、经济、可行的支护形式是基坑设计的重点,同时也是个难点。

对于如何选择合适的支护形式,业界内的学者们各有心得:曾定帮等<sup>[1]</sup>针对某深基坑特殊情况,采取了土钉墙和桩锚的复合结构;赵慎中等<sup>[2]</sup>在某超深基坑中采用二次注浆复合土钉支护技术,取得了良好的稳定性和变形控制效果;应惠清<sup>[3]</sup>介绍了多种深基坑支护结构和施工新技术;刘文峰<sup>[4]</sup>提出了在基坑周边环境条件受限和抢险加固等情况下微型钢管桩支护结构的优越性。

SMW工法桩支护技术自20世纪末从日本引进到我国以来,在津、沪、苏、浙、闽、粤等沿海软土地区已经运用比较广泛<sup>[5-7]</sup>,因其具有施工工艺简单、经济可行<sup>[8]</sup>、适用性强、对环境污染小等优势,带来了良好的经济效益和社会效益。

由于内陆地区土质相对较好,基坑开挖中主要采用自然放坡、土钉墙(或复合土钉墙)等支护形式,开挖深度较大的项目主要采用上部自然放坡或土钉墙+下部桩锚的支护形式。但随着城市化进程的加快,基坑周边环境越加复杂,导致基坑周边可放坡的空间不足,加上对环保的监控越加严格,多种对环境污染较严重的施工工艺都无法使用,而SMW工法桩的诸多优势正好可以满足现今的需求,但这种工艺在内陆硬土地区的应用甚少,有待进一步推广。

SMW工法桩在软土地区的应用虽然比较广泛,但在应用中也存在一些问题<sup>[7]</sup>:(1)理论计算模型尚未完善,对于水泥土强度、搅拌桩与型钢之间相互作用及其协同作用机制等方面尚待进一步研究<sup>[9]</sup>;(2)施工参数没有统一标准,由于受到不同项目场地土层性质和地下水位影响较大,对于搅拌桩水灰比、水泥掺量等问题,只能通过现场试验或经验判断等方法来确定;(3)相关规范标准、技术规程资

料甚少,虽然建筑行业在2010年发布了《型钢水泥土搅拌墙技术规程》<sup>[10]</sup>,但是规程中的技术要求并不完善,例如搅拌桩的强度在实际和规范间、地区之间的差异较大,存在一定争议。

本文通过对山东西南内陆地区某项目基坑支护设计和施工情况的介绍,针对该项目的特点及SMW工法桩在硬土地区应用存在的问题,提出了SMW工法桩在内陆硬土地区的适用范围、模型选择和施工工艺参数,为以后该工艺在内陆硬土地区的运用和推广提供参考。

## 1 工程概况

### 1.1 工程简介

本项目位于山东省济宁市建设东路南侧,东御桥路西侧,周边均为民用建筑且距离较近,项目具体位置和周边建筑相对关系见图1。

对基坑边坡影响较大的既有建筑基本情况如下:光通大厦,8层,桩基础,桩底相对标高约-15.00 m;工人文化宫,4层,桩基础,桩底相对标高约-13.20 m;少陵新村,6层,筏板基础,基底相对标高约-3.60 m;公安局家属院,3~5层,筏板基础,基底相对标高约-3.00 m;广场小区,5层,条形基础,基底相对标高约-2.0 m;华夏商城,5层,条形基础,基底相对标高约-2.0 m。

### 1.2 岩土工程地质条件

拟建场区地貌属冲洪积平原,整体地势较为平坦,最大高差约1.0 m。地下水类型为第四系孔隙水,稳定水位标高约为46.0 m(自然地坪下约4.0 m),年变幅在2~5 m,补给来源主要为大气降水,排泄途径主要为人工开采、侧向径流。与基坑支护有关的主要地层情况见表1。

## 2 SMW工法桩的运用和探讨

### 2.1 工法的适用性

本项目周边环境复杂(四周为居民住宅和商业楼,对噪声、扬尘、泥浆等环保要求严格),场区内作业空间受限(拟开挖基坑边线与围挡间距为4.0 m左右,扣除预留工作面宽度0.8~2.0 m,剩余可放坡空间水平距离只剩2.0 m左右),拟开挖基坑深度约为6.50 m,故只能采用垂直开挖的支护结构。在可选用的垂直支护结构中重力式水泥土墙占用空间太大,地下连续墙成本太高,排桩施工存在较大的环境

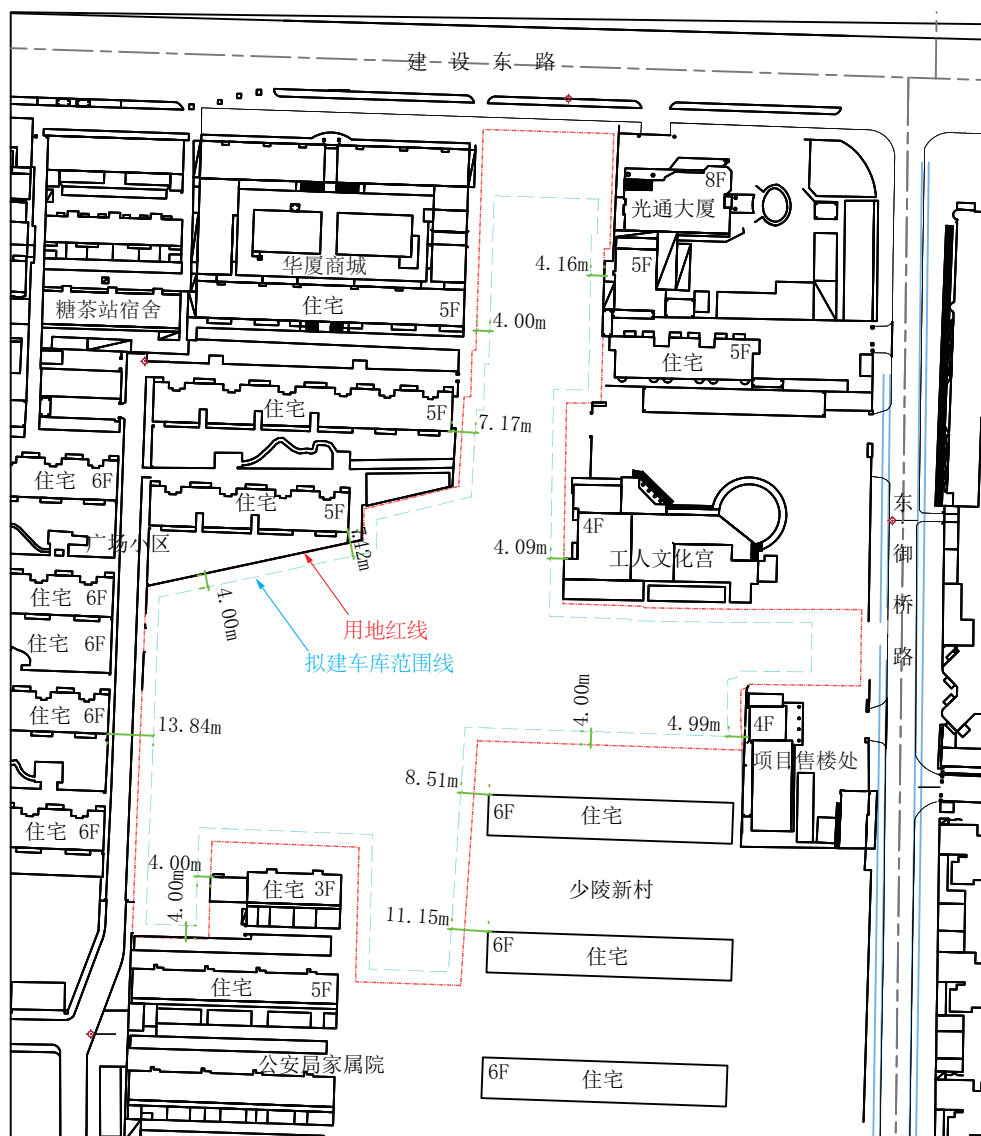


图1 本项目与其周边环境位置关系

Fig.1 Location relationship between the project and its surrounding environment

表1 各土层主要物理力学指标

Table 1 Main physical and mechanical indexes of soil layers

层号	地层名称	特征描述	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$c_k/\text{kPa}$	$\varphi_k/(\text{°})$
①	杂填土	杂色,松散,成分主要为建筑垃圾及碎砖块,为旧建筑物拆迁堆积,回填年限<5年	18.0*	5*	15*
②	素填土	灰褐色,可塑,以粉质粘土为主,局部含少量细砂,回填年限>10年	18.6	23.9	15.2
③	粉质粘土	黄褐色,可塑,含少量铁锰氧化物,局部粉质重,夹粉土薄层,切面稍有光泽,干强度及韧性中等,无摇振反应	19.0	32	16.6
④	中细砂	浅黄色,稍密,湿一饱和,主要矿物成分为长石、石英,局部含少量泥质,分选性一般,磨圆度中等	18.0	1*	31
⑤	粘土	灰黑、灰褐色,可塑,韧性及干强度高,有光泽反应,无摇震反应	18.8	40.6	10.4
⑥	粉质粘土	褐黄色,可塑,韧性及干强度中等,稍有光泽反应,无摇震反应,含少量细粒姜石	18.8	22.7	14.0
⑦	中砂	浅黄色,中密,饱和,以石英、长石为主,磨圆度一般,该层在场区普遍分布	19.0	1*	31

\*:取值为项目所在地经验取值,岩土工程勘察报告未提供相应参数

污染,均不太适用于本项目。而SMW工法桩具有在施工过程中需要作业面小、工艺简单、经济可靠、对环境污染小等特点,适宜在本项目使用。但是由于本地区尚未有SMW工法桩运用的先例,对于设计方案还是偏向保守。

根据SMW工法桩的特点,当内陆硬土地区基坑项目具有以下几个特点可考虑选用SMW工法桩作为支护结构:(1)周边居民较多,对环保要求严格;(2)可放坡空间不足,只能采用垂直支护,拟开挖深度在5~10 m之间;(3)支护工期要求的时间短。

### 2.2 计算模型选择

陈德美<sup>[7]</sup>通过理正深基坑设计软件和MIDAS/GTS的计算结果与实测结果(软粘土地区基坑)对比后发现,虽然MIDAS/GTS的计算结果和实测结果存在一定的误差,但相对理正软件还是较为理想的;而理正软件计算的桩体位移偏保守。

目前,本地区认可的模拟计算软件还是以理正深基坑设计软件为主,如何利用该软件计算出较为符合实际情况的结果是第一步需要解决的问题。经研究发现,软件中可在混凝土墙一栏里找到SMW工法桩模型,可输入不同的工艺参数并计算得出结果,但是仍存在问题:(1)模型中未考虑混凝土

搅拌桩的强度贡献;(2)《型钢水泥土搅拌墙技术规范》中要求搅拌桩直径为650 mm时,型钢最小规格为H500×200 mm,而本项目拟采用的型钢规格为HM200×150 mm(通过排桩模型计算结果得出),与该规范中差别较大;(3)软件计算的嵌固深度要求为1.3倍基坑深度,与实际不符。

如果生搬硬套地使用软件,或墨守成规地遵循规范,会给本项目带来大量的资金和工期的浪费,甚至可能由于过度支护带来一定的安全隐患。鉴于此,笔者进一步深入研究,最终确定了合理的计算模型和设计思路:以排桩模型为基础,桩身材料为H型钢,能够得到较为准确的整体稳定安全系数、嵌固深度等,而桩身材料的受力采用弹性法或经典法计算,水泥土搅拌桩采用不加筋的混凝土墙计算以作为安全储备量。

### 2.3 工艺参数确定

本项目设计采用SMW工法桩改良版的支护形式(详见图2):由于可使用的放坡空间为4.0 m,坑底预留工作面0.8 m,在基坑周围距离围挡(即用地红线)约3.0 m设置三轴搅拌桩,搅拌桩施工完毕后将H型钢以插一跳一的方式插入,因现场场地受限,不考虑H型钢的后期回收。从现有机械设备能

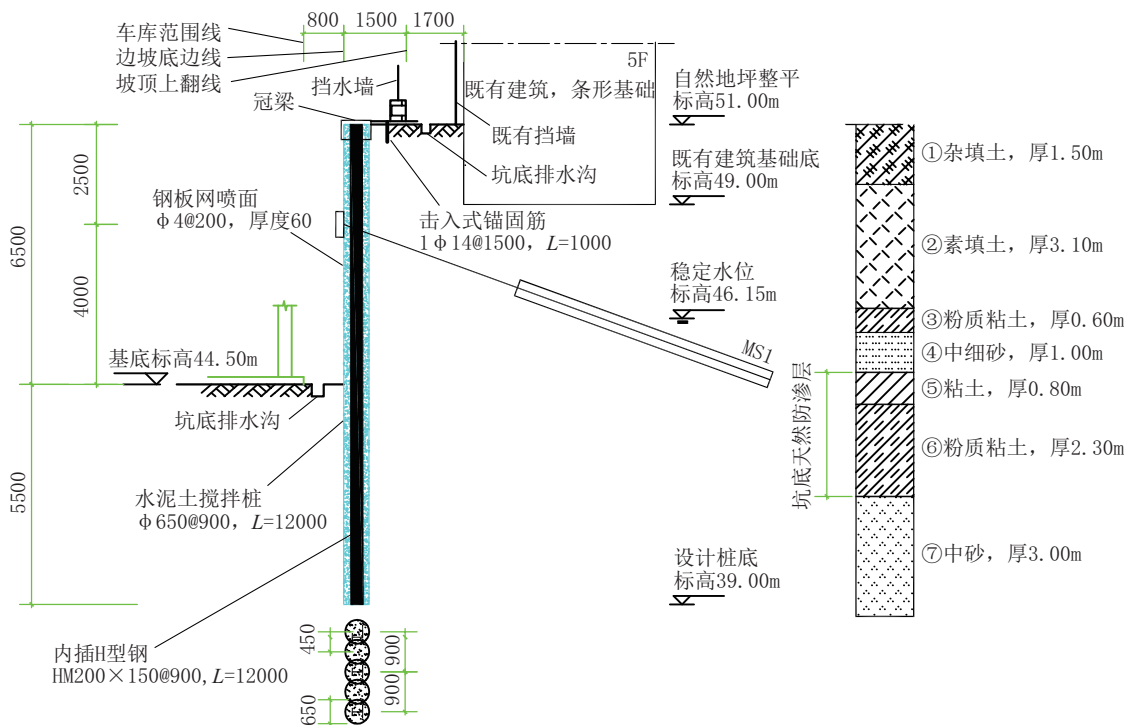


图2 最不利工况下基坑支护设计剖面

Fig.2 Profile of the foundation pit support design for the most unfavorable condition

力和施工经验上看,能够有效保证桩位、垂直度等偏差在规范允许范围内。但是如何选择合适的水灰比和水泥掺量能同时保证水泥土混合物满足强度、均匀性、流塑性等要求是施工前需解决的重要问题。

本项目在模型计算和设计要求的保守考虑,对水泥土搅拌桩强度取值定为 $\leq 0.5$  MPa,设计选用P.O 42.5普通硅酸盐水泥,水泥掺入量为土的天然质量的15%,水灰比为1.25。通过现场实验验证,取得了比较好的效果:

(1)强度。梁志荣等<sup>[11-12]</sup>对多个项目三轴水泥土搅拌桩取心结果的分析研究中发现,水泥土搅拌桩28 d取心强度值为0.41~6.4 MPa,由于取心及其后期过程中的扰动,一般来说试验结果比实际强度偏小。本项目因工期紧,无法在施工前进行相应现场强度试验或取心测试,但从现场试验段垂直开挖面情况上看,三轴水泥土搅拌桩体未出现裂缝或破损,具有一定强度,作为安全储备考虑是够用的。

(2)均匀性。与搅拌桩施工有关的土层主要为杂填土、素填土、中砂、粉质粘土、粘土。在其它工艺参数相同的条件下,各土层与水泥浆一喷一搅后混合物的均匀性是中砂最好,素填土和粉质粘土次之,粘土第三,最后为杂填土。主要受到土体颗粒大小、均匀程度、粘聚力等因素影响,特别是较硬的粘土和杂填土,通过对试验段开挖面的观察发现:粘土层多存在小粘土块,通过人工敲击表面可剥落,但未出现渗漏情况;而杂填土层多见砖块、布条、混凝土块等杂物,见有漏水或松动脱落情况。

处理办法:基底以下的粘土层对于均匀性要求不高且能保证较好的隔水性能,基底以上的土层在搅拌过程中采用一喷二搅(即下钻喷浆搅拌,上提空搅),同时适当降低粘土层位下钻或提钻速度,增加搅拌时间,可以有效保证在粘土层搅拌的均匀性;杂填土层一般位于表层,对于不厚的杂填土层建议清除,如杂填土层较厚且杂物类别较多,会严重影响搅拌均匀性,还可能给施工带来一定困难,建议在施工前进行素土换填并夯实。

(3)流塑性。土体和水泥浆搅拌后混合物的流塑性也直接影响到施工进度和质量,流性较大会使得混合物强度不足,塑性较大会使得型钢插入困难。《建筑基坑支护技术规程》<sup>[13]</sup>中要求,型钢水泥土搅拌桩水灰比为1.5~2.0,但是从现场试验结果上看,较大的水灰比出现混合物凝结时间过长、强度

降低,水泥浆液溢出量过大等情况。按水灰比1.25的搅拌效果较好、溢浆量少,且能够保证在搅拌后的2 h左右型钢尚能顺利插入,经分析应该是在搅拌过程中利用了地下水增加了一定的和易性能。

#### 2.4 施工工艺

(1)水泥浆液制备:在施工现场合适位置搭设搅拌台和水泥存储库。水泥浆液调配完成后,送入贮浆桶内备用,存放时间 $\geq 2$  h。

(2)搅拌喷浆:二搅一喷工艺是在下钻过程中搅拌喷浆,提升时空转。注浆压力为4~6 MPa,注浆流量为150~200 L/min。下钻喷浆速度 $\geq 1$  m/min,提升空转速度 $\geq 2$  m/min,在粘土层位提升速度 $\geq 1$  m/min,严格控制搅拌深度符合设计要求并统一,应停留1~2 min并持续搅拌喷浆。

(3)插入H型钢:水泥土搅拌桩施工完毕后,三轴搅拌桩机继续进行下一连续施工段作业,用机械手抓取H型钢吊于拟定桩位上方。待型钢停止晃动后,将其正对桩位中心缓慢插入到水泥土里,利用线锤校核其垂直度。利用型钢的重力自然下坠,如遇特殊情况可适当施加压力,待型钢完全插入后即可完成标高控制。

(4)冷缝处理:施工过程中难免会遇到一些情况导致停工,若停工时间 $> 24$  h,三轴搅拌桩机无法有效破碎已有一定强度的水泥土混合物,且会造成二次搅拌不均匀,容易出现孔隙和裂缝。所以一旦出现冷缝应在冷缝外侧补搅素桩。在搅拌桩达到一定强度后进行补桩,以防偏钻,保证补桩效果,素桩与搅拌桩搭接厚度约10 cm。

#### 2.5 施工效果

经现场开挖观察和测试,除表层薄层杂填土存在局部不均匀现象,其它土层未见夹石、孔洞等,均匀性符合要求;在修面过程中,挖机硬质合金齿难以刨动桩体,也可以从一定程度上证明其强度。本项目SMW工法桩施工达到了较好的支护和止水效果,现场施工效果见图3。

### 3 结论和建议

(1)在内陆硬土地区,周边环境复杂、可放坡空间受限、环保要求高的中型基坑项目采用SMW工法桩支护,相较其他支护结构具有很大的优势。但由于项目情况各不相同,在设计前需要尽可能搜集整理资料、充分了解工程特点后进行分析研究,在保



图3 现场开挖面施工效果

Fig.3 SMW piles after excavation

证安全的基础上对SMW工法桩部分工艺参数进行一定的改良,有利于提高施工效率、节约成本。

(2)三轴搅拌桩施工所用的水灰比和水泥掺量直接影响到搅拌后灰土混合物的强度、均匀性和流塑性,进而影响到施工进度和质量。由于受到土体性质和地下水等因素影响较大,在施工前应尽量通过现场试验得出合理的工艺参数取值,才能够保证施工效率和质量:表土为杂填土层的项目,薄层宜清除、厚层应换填素土并夯实;本项目土层主要为粘土和砂层,稳定地下水水位在基底标高之上,选择15%的水泥掺入量,1.25的水灰比较为适宜。若存在地下水水位较浅或承受水头压力较大的情况,对止水帷幕强度有一定要求,可适当增加水泥掺入量;若存在地下水水位较深或在施工前已实施降水的情况,可适当提高水灰比。

(3)规范规程和模型计算软件具有一定的地域性偏差,建议在正式设计和施工前,结合当地经验合理使用,有助于提高方案的合理性和适用性。

### 参考文献(References):

- [1] 曾定帮,彭振斌,彭文祥.土钉与桩锚相结合复合支护在深基坑中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2005,32(7):33-35.  
ZENG Dingbang, PENG Zhenbin, PENG Wenxiang. Application of support combined soil nail with pile anchor in a deep foundation pit [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2005, 32(7): 33-35.
- [2] 赵慎中,宋珪,江建华.二次注浆复合土钉墙在超深基坑支护中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(11):51-53.  
ZHAO Shenzhong, SONG Gui, JIANG Jianhua. Application of secondary grouting composite soil nailing wall in deep foundation pit bracing [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39(11): 51-53.
- [3] 应惠清.深基坑支护结构和施工新技术[J].施工技术,2013,42(13):1-5.  
YING Huiqing. New support structure and construction technol-

ogy of excavation engineering [J]. Construction Technology, 2013, 42(13): 1-5.

- [4] 刘文峰.微型钢管桩在基坑支护中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(10):67-71.  
LIU Wenfeng. Application of the steel pipe micro-piles in foundation pit support [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(10): 67-71.
- [5] 贺浩,龚艳霞,胡俊.SMW工法桩在荆州基坑支护中的设计与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(9):70-74,89.  
HE Hao, GONG Yanxia, HU Jun. Design and application of SMW method in foundation pit support in Jingzhou [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(9): 70-74, 89.
- [6] 谷淡平,凌同华.悬臂式型钢水泥土搅拌墙的水泥土承载比和墙顶位移分析[J].岩土力学,2019,40(5):1957-1965.  
GU Danping, LING Tonghua. Analysis of bearing ratio of cement soil and displacement at the top of wall for soil mixing wall construction method of cantilever type [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(5): 1957-1965.
- [7] 陈德美.内插H型钢水泥土搅拌桩墙在佳阳大厦基坑支护中应用与研究[D].南昌:南昌大学,2012.  
CHEN Demei. Application and research of H-shaped steel cement soil mixing pile wall in foundation pit support of Jiayang Building [D]. Nanchang: Nanchang University, 2012.
- [8] 陈国华.基坑围护结构技术方案经济性分析[J].中国市政工程,2011(2):62-64.  
CHEN Guohua. On economy analysis of technique plan for foundation pit envelop structure [J]. China Municipal Engineering, 2011(2): 62-64.
- [9] 梁志荣,李忠诚.型钢水泥土连续墙在基坑工程应用中的关键问题及新发展[J].岩土工程学报,2010,32(S1):290-296.  
LIANG Zhirong, LI Zhongcheng. Key problems and new development of soil mixed walls in excavation engineering [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 290-296.
- [10] JGJT 199—2010,型钢水泥土搅拌墙技术规程[S].  
JGJT 199—2010, Technical specification for soil mixed wall [S].
- [11] 梁志荣,李忠诚,刘江.水泥土搅拌桩取芯与取浆两种强度检测分析[J].岩土工程学报,2010,32(S1):435-439.  
LIANG Zhirong, LI Zhongcheng, LIU Jiang. Strength analysis on soil-cement mixed piles by trials of drilling core and taking soil-cement grout [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 435-439.
- [12] 梁志荣,李忠诚,刘江,等.三轴水泥土搅拌桩强度分析及试验研究[J].地下空间与工程学报,2009,5(S2):1562-1567.  
LIANG Zhirong, LI Zhongcheng, LIU Jiang, et al. Strength analysis and experimental research on soil-cement mixed pile made by triaxial stirring machine [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(S2): 1562-1567.
- [13] JGJ 120—2012,建筑基坑支护技术规程[S].  
JGJ 120—2012, Technical specification for retaining and protection of building foundation excavations [S].

(编辑 周红军)