



复杂地质条件下SMW工法应用研究

姚世宏, 朱幸科

(中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230)

摘要: 结合珠海港某典型基坑支护工程实例, 分析了复杂地质条件下应用SMW工法的工艺技术要求, 根据基坑开挖过程及后期现场监测结果, 探讨了软弱土层中基坑侧壁型钢水泥搅拌桩的位移变化以及基坑外侧水位变化规律, 并据此提出了该工况下基坑侧壁的变形速率报警经验值, 从而为类似基坑支护工程提供参考价值。

关键词: 基坑支护; SMW工法; 型钢; 水泥土搅拌桩

中图分类号: U 655.54

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)03-0177-06

Application of SMW method under complicated geological conditions

YAO Shi-hong, ZHU Xing-ke

(CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China)

Abstract: Based on a typical project of foundation pit supporting in Zhuhai port, this paper analyzes the technological requirements of SMW method under complicated geological conditions, discusses the lateral displacement of steel cement treated column and groundwater level changes in soft soil-layers according to monitoring results during and after the excavation, and proposes accordingly the alarming value of wall deformation rate in experience under the condition, which can provide valuable reference for similar excavation works.

Key words: foundation pit's supporting; SMW(Soil Mixed Wall) method; steel; cement treated column

随着沿海地区工程建设的蓬勃发展, 基坑支护越来越受到人们的重视。尤其在吹填造陆区域, 土层较为软弱, 地质条件复杂, 如何选择最优的支护方案和最佳的工艺方法, 以保证后续基坑开挖及地下结构施工的安全顺利进行, 成为摆在当前科技工作人员面前的一项重要课题。SMW (Soil Mixing Wall) 型钢水泥土搅拌桩就是在不断生产实践中总结出的一套行之有效的施工工法^[1-2]。该法于1976年在日本问世, 现已在东南亚国家和美国、法国等地应用, 近几年在我国的上海、杭州、南京等长三角地区推广^[3], 然而在珠三角一带应用较少。

珠三角地区是内陆西江、北江和东江入海时

冲积沉淀而成的三角洲, 下伏软弱土层较厚, 且新近吹填造陆区域下部多为深厚淤泥层, 物理力学性质较差, 地质条件复杂, 给地下工程的安全顺利施工造成隐患, 同时也对基坑支护的工艺水平提出了更高要求。本文结合珠海港高栏港区某基坑支护工程实例, 分析了复杂地质条件下应用SMW工法的工艺技术要求, 并根据现场监测结果, 探讨了软弱土层中基坑侧壁型钢水泥搅拌桩的位移变化以及基坑外侧水位变化规律, 从而为类似基坑支护工程提供参考价值。

1 工程概况

本基坑支护工程位于珠海港高栏港区, 占地

收稿日期: 2013-06-24

作者简介: 姚世宏(1965—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地基处理及岩土工程等方面的科研、施工和技术管理工作。

面积2 326 m²，基坑支护分污泥集水池、消毒清水池两处，开挖底高程分别为0.4 m和-0.1 m，地面平均高程为4.8 m。中间预沉调节池区域开挖底高程为4.3 m，深度较浅，可不作支护（图1）。

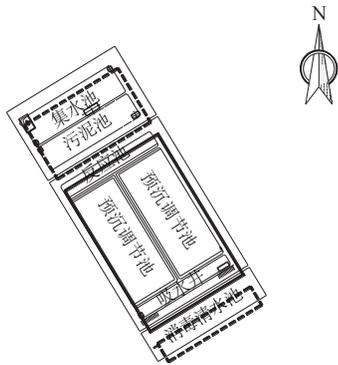


图1 基坑支护工程场地平面布置

场地工程地质条件较为复杂，下卧土层从上到下依次为：

表1 场地土层物理力学性质指标

层序	土层名称	土层埋深/m	天然密度 $\rho/(\text{t}\cdot\text{m}^{-3})$	含水率 $\omega/\%$	孔隙比 e	内聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	渗透系数 $I/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	
								水平向 k_h	垂直向 k_v
①	素填土	0~2.3	1.80	31.2	0.870			6.4×10^{-6}	6.7×10^{-6}
②	冲填土	2.3~4.5	1.90	41.9	0.731	8	21	9.7×10^{-5}	9.4×10^{-5}
③	淤泥	4.5~15.5	1.64	59.6	1.609	6	3	4.3×10^{-7}	4.5×10^{-7}

2 基坑支护方案

本工程污泥集水池、消毒清水池两处基坑开挖深度分别为4.4 m和4.9 m，无支护直立开挖安全风险高，且基坑外侧紧邻土建施工场地，范围有限，不宜采用放坡开挖。采用有支护开挖，考虑到场区地下水位较高，须设置挡土止水结构，地下连续墙、钢板桩方案适用于大型深基坑支护，造价较高^[4]，采用水泥土重力式挡墙较为经济，对周边建筑物影响较小。为便于后续基坑内部地下结构施工，可不设内支撑，利用悬臂式型钢直接嵌入水泥搅拌桩中心。经验算分析，决定在传统SMW工法基础之上，采用无内支撑水泥土搅拌桩+工字钢支护方案（图2）。

场区工程地质条件复杂，地下水位高，冲填粉细砂层含泥量较高，下伏淤泥层埋藏较浅，基坑底面即为原状淤泥层，对水泥土搅拌桩短期内成桩质量极为不利。本工程工期紧张，结合场区实际工况优化工艺施工，满足水泥搅拌桩短期强度增长要求的同时保证工字钢插设质量是应用SMW工法的重点、难点。

①0~2.3 m：素填土，褐黄色，稍湿，主要由黏性土回填而成，夹有少量花岗岩或砂岩碎石，呈松散状态。为保证后续水泥搅拌桩施工顺利进行，开工前须将场地内该土层块石清除。

②2.3~4.5 m：冲填土，灰黑色，主要成份为吹填粉细砂、淤泥，含泥量较高，呈饱和的松散状态。其中污泥集水池在后续基坑开挖过程中于西南侧4.4 m深处见到淤泥包及上覆荆笆、土工织物，对水泥搅拌桩的止水防渗造成不利影响。

③4.5~15.5 m：淤泥，黑色，芯样稍具光泽，略具腥臭味，手感滑腻，夹少量贝壳、碎屑，局部混少量粉细砂，有机质含量较高，呈饱和的流塑状态。

场区地下水较为丰富，水位埋深为1.2~2.6 m，受潮汐影响较大，主要补给来源为海水及大气降水。各土层物理力学性质指标见表1。

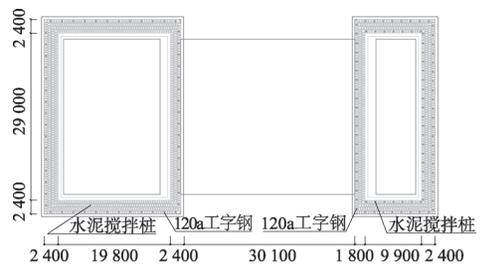


图2 基坑支护水泥搅拌桩平面布置（单位：mm）

2.1 水泥土搅拌桩

基坑支护工程水泥土搅拌桩设计桩长15 m，桩径600 mm，横向搭接200 mm（图3）。基坑内部及中部预沉调节池区域打设底板封底水泥搅拌桩。考虑到场区冲填土层含泥量较高、淤泥面较浅，且工期紧张，为保证水泥土搅拌桩短期内成桩质量，水泥采用早强型P.O42.5R普通硅酸盐水泥，掺入比20%，水灰比0.5。为保证防渗效果和支护稳定性，采用4排水泥搅拌桩进行止水支护，每排水泥搅拌桩内部桩位之间搭接200 mm，每排水泥搅拌桩之间错位搭接80 mm（图3）。中部预

沉调节池区域经加固处理后土体的整体结构性和稳定性大为增强, 故基坑靠中部土体一侧设置3排水泥搅拌桩抵挡后方土压力。

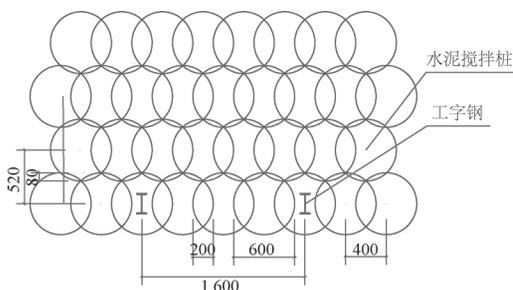


图3 基坑支护水泥土搅拌桩布设 (单位: mm)

传统SMW工法应用于深基坑支护时一般采用三轴搅拌桩机施工, 打设深度大, 工程造价高^[5]。结合本基坑工程设计开挖深度和搅拌桩桩长, 采用双轴搅拌桩机施工, 最大施打深度18 m, 钻头直径600 mm, 搭接200 mm。搭接工艺采用套打一孔法, 成桩工艺采用四喷四搅, 见图4。桩机喷搅完成一个循环后, 拔出钻头移至下一个桩位, 重复喷浆搅拌。由于首条桩喷浆搅拌仅2次, 施打时须减慢桩轴下放、上提速度, 加快钻头的搅拌速度, 保证水泥掺量且搅拌充分均匀。每排施打首根水泥搅拌桩的位置须错开一定距离, 且后续桩位与之咬合时要严格保证横向搭接和水泥掺量。

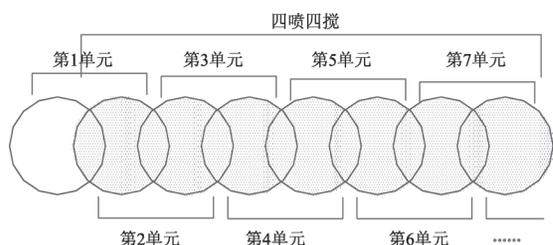


图4 水泥搅拌桩施工工艺

该工艺较传统三轴搅拌法相比, 可更好地保证整个桩墙水泥掺量的均匀性和搅拌桩桩体之间的搭接, 从而大大提高帷幕墙的密封止水性能。

2.2 工字钢插设

按照设计要求, 本工程工字钢采用国标20#工字钢, 规格I200 mm × 100 mm × 7 mm × 11.4 m-1 200 mm, 执行标准GB/T 706—2008, 以保证型钢水泥搅拌桩的整体受力性能。污泥集水池区域工字钢插设间距2.0 m, 布置在外排水泥搅拌桩; 消毒清水池区域下伏淤泥层埋藏较浅, 工字钢插设

间距1.6 m, 均匀布设在最内、最外两排水泥搅拌桩。工字钢插设深度均为12 m (图2)。插设完成后, 支护桩顶部须浇筑混凝土盖板以保证型钢水泥土搅拌桩的整体性。

为防止工字钢插设时发生侧斜而影响后续桩位的施工, 一般须待相邻2根水泥搅拌桩全部施工完成后再行插设 (图5), 现场施工时先施打内两排水泥搅拌桩, 最后施打外侧两排, 以减小工字钢插设对水泥搅拌桩施工的干扰。

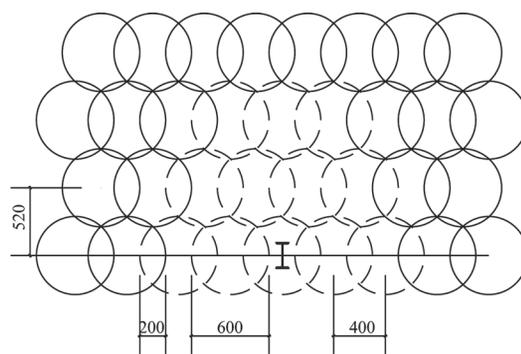


图5 虚线区域搅拌桩完成后中间可插设工字钢 (单位: mm)

工字钢插设时须对准桩位, 工字形垂直于基坑侧壁。为保证工字钢插设顺利、到位, 现场施工时须掌控插设的时间间隔。一般打设一根水泥搅拌桩的时间约为50 min, 即桩位完成后须待100 min方可施插工字钢, 水泥搅拌桩初凝期一般为120 min, 因此现场须做好各工序间的衔接, 力求工字钢在水泥搅拌桩初凝期内完成插设。

2.3 基坑开挖

水泥搅拌桩施打完毕达到28d龄期, 桩体强度满足设计要求后可进行基坑开挖作业。结合本工程地质条件和场地工况, 设计土方出运路线见图6。

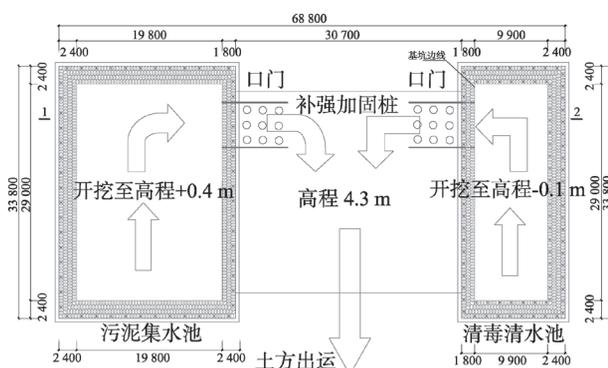


图6 污水处理间基坑开挖土方出运路线

基坑纵向分3层开挖，每层开挖深度1.0~1.5 m，见图7。

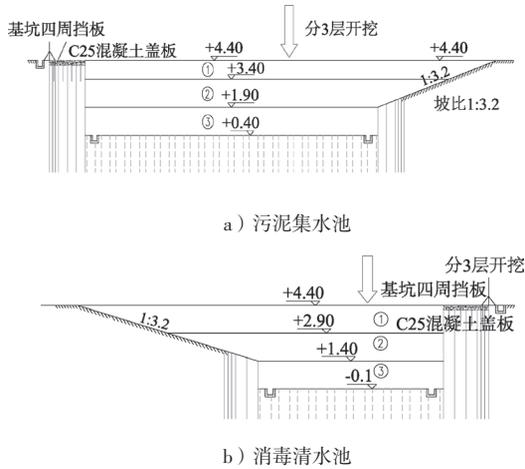


图7 污水处理间表坑开挖 1-1 剖面 (单位: m)

图8为开挖完毕后支护桩成桩效果，可以看出，上部0~1.5 m深度区域为沟槽内硬化水泥浆液，下部为搅拌桩体。结合本工程场地地质条件，2.3~4.5 m深度区域为新近吹填粉细砂层，含泥量较高，不利于水泥搅拌桩的成桩质量。4.5 m深度以下为淤泥层，有机质含量高，土质较差，水泥搅拌桩强度增长缓慢。同时在土层分界面处可见编织布、荆笆等土工材料，对围护桩的成桩连续性以及防渗止水效果均造成不利影响。



图8 基坑侧壁水泥搅拌桩成桩实体

本工程在应用SMW工法过程中严格控制水泥掺量和工字钢插设质量，采用四喷四搅、套孔搭接工艺施工，有力保证了基坑的整体结构性和稳定性。从基坑开挖断面来看，侧壁水泥搅拌桩成桩以及搭接效果较好，基坑的防渗和稳定性能良好。

3 基坑监测

为保证基坑开挖及后续地下结构施工的安全顺利进行，基坑监测工作须同步开展，通过观测数据及时反映基坑的安全状况，做到信息化管理与施工^[6]。

根据设计方案并结合现场实际，共布设深层土体水平位移观测管（测斜管）3根，编号CX1，CX2和CX3；地下水位观测管2根，编号SW1，SW2；埋设测点9个，N1~N4，S1~S4测点布置在基坑侧壁顶板的中部，N5布置在北侧建筑物混凝土承台，具体监测点位布置见图9。

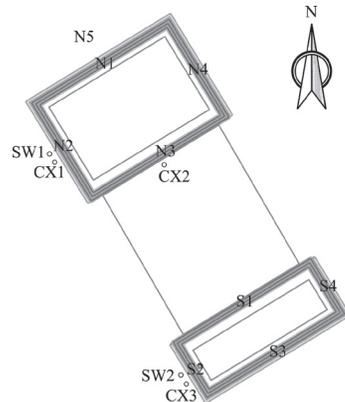
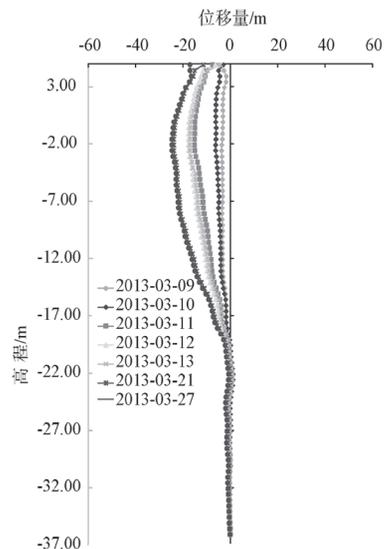


图9 监测点平面布置

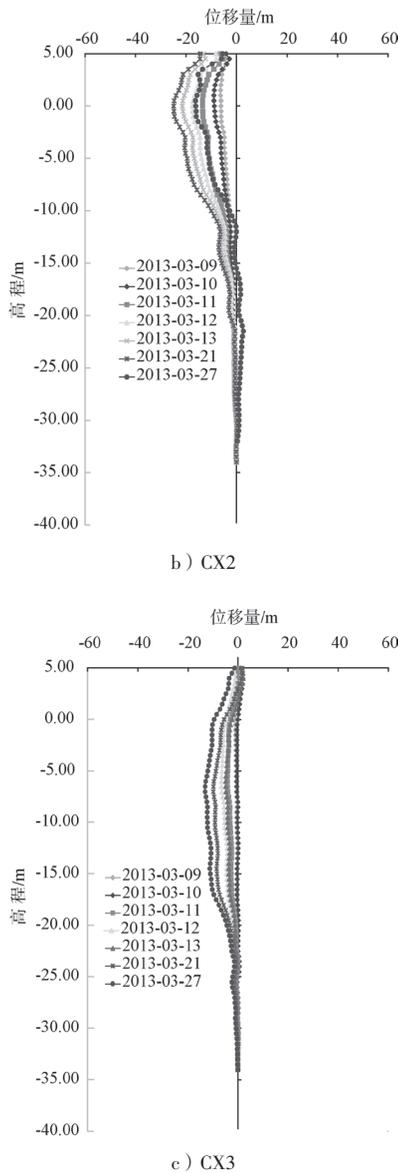
3.1 深层土体水平位移监测

本工程共埋设CX1,CX2和CX3共3根测斜管，埋深40 m，底端嵌入下卧硬土层，并于2013年3月6日首测，各测斜管不同深度处水平位移随时间变化情况见图10。

各测斜管深层水平位移速率于2013年3月11



a) CX1



注: 以指向基坑外为正。

图10 深层土体水平位移曲线

日达到最大值, 此时基坑开挖已进行至最底层。其中CX1最大水平位移速率为-9.01 mm/d, 发生在高程-1.6 m处; CX2最大水平位移速率为-5.18 mm/d, 发生在高程-4.01 m处; CX3最大水平位移速率为-3.72 mm/d, 发生在高程-6.53 m处(表2)。按照设计文件要求, 水平位移的变形速率报警值为5 mm/d, 现场及时放慢开挖速度, 土体水平位移速率于当日下午低于报警值。基坑开挖完毕后位移速率逐渐减小并趋于平缓, 表明基坑处于安全稳定的状态。

3.2 地下水位观测

场地共布设2根水位管SW1和SW2, 观测结果

表2 深层土体水平位移监测结果

时间	测点	最大水平位移速率/(mm·d ⁻¹)	高度/m
2013-03-09	CX1	-1.57	4.90
	CX2	-2.71	4.99
	CX3	-0.35	-0.53
2013-03-10	CX1	-2.96	0.40
	CX2	-2.75	0.49
	CX3	2.77	3.97
2013-03-11	CX1	-9.01	-1.60
	CX2	-5.18	-4.01
	CX3	-3.72	-6.53
2013-03-12	CX1	-3.07	-5.30
	CX2	-4.00	-0.01
	CX3	-2.44	-7.03
2013-03-13	CX1	1.95	4.90
	CX2	-4.72	4.99
	CX3	3.37	4.97
2013-03-21	CX1	-0.99	-6.10
	CX2	-0.47	-1.01
	CX3	-0.64	-7.53
2013-03-27	CX1	-0.94	4.90
	CX2	1.50	4.99
	CX3	-0.83	3.97

见表3。由监测数据可以看出, 从2013年3月6日至3月21日, SW1水位高程变化值在0~0.22 m范围内浮动, SW2水位高程变化值在0~0.04 m范围内浮动。由于场区靠近海侧, 地下水位受潮汐影响较大。此外3月24日至3月26日降特大暴雨, 导致3月27日水位管水位有所抬升。地下水位监测结果表明, 水位变化总体稳定, 基坑水泥搅拌桩止水防渗效果良好。

表3 地下水位观测结果

观测日期	水位管SW1			水位管SW2		
	管口	水位	水位	管口	水位	水位
	高程	深度	高程	高程	深度	高程
2013-03-06	5.35	0.62	4.73	5.75	2.80	2.95
2013-03-09	5.35	0.62	4.73	5.75	2.81	2.94
2013-03-10	5.35	0.64	4.71	5.75	2.81	2.94
2013-03-11	5.36	0.66	4.69	5.75	2.83	2.92
2013-03-12	5.36	0.75	4.61	5.75	2.80	2.95
2013-03-13	5.35	0.84	4.51	5.75	2.80	2.95
2013-03-21	5.35	0.81	4.54	5.75	2.84	2.91
2013-03-27	5.35	0.55	4.80	5.75	2.48	3.27

3.3 基坑侧壁顶板沉降位移监测

通过监测基坑止水帷幕桩顶板以及周边建筑

物的沉降位移,可实时反映基坑侧壁的稳定性和控制施工速度以保证基坑的安全与稳定。

本工程地表沉降位移监测采用徕卡TS06型全站仪进行,结果表明,基坑侧壁位移总体变化幅度较小,其中3月11日上午9:00观测到N1点X(北向)位移变化较大,较3月10日变化值达到26 mm(图11)。尽管可能存在较大测量误差,但可与深层土体水平位移观测结果相互印证。现场及时采取应急措施后,该测点趋于稳定,至当日下午4:30位移变化值仅为2 mm,此后连续观测数据结果表明,该测点地表位移变化幅值介于0~3 mm,处于受控状态。

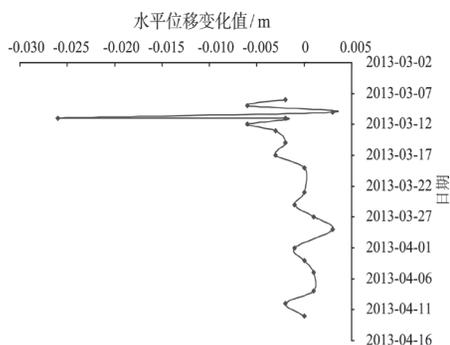


图11 N1测点水平位移变化值曲线

基坑开挖前在支护桩顶部浇筑混凝土盖板,将支护桩与型钢连成统一整体,同时可保护桩头免受雨水冲蚀破坏。开挖过程中,随着基坑内侧土压力的卸除,围护桩在后方土压力作用下,发生变形和位移。对于方形基坑,在侧壁中间位置桩体向基坑内侧偏移最大,形成张裂缝,且裂缝从基坑内一侧向外逐渐扩展;侧壁两端偏移较小,形成剪裂缝,且裂缝从基坑外一侧向内逐渐扩展。

4 结论

1)本工程场地下伏淤泥层埋藏较浅,地下水位高,地质条件复杂,应用SMW工法时设备采用双轴搅拌桩机,工艺采用四喷四搅、套孔搭接,与传统工艺相比,围护桩结构的整体性以及水泥掺入的均匀性都大为提高,同时工字钢在成桩后120 min内插设完成,严格控制插设质量,有力保证了复杂地质条件下支护结构的受力性能

和防渗效果。

2)基坑开挖及监测结果表明,基坑侧壁位移在开挖期间及后续地下结构施工期间水平位移变化值总体较小,仅开挖至底层时SW1和SW2测斜管水平位移速率分别达到9.0和5.18 mm/d,超过设计报警值5.0 mm/d,现场放慢开挖速度后位移变化速率于当天下午低于报警值,表明该场地复杂工程地质条件下应用SMW工法的支护效果较为理想。此外,为便于现场施工管理和进度控制,结合本工程实际,推荐深层土体水平位移速率经验报警值6~7 mm/d。

3)基坑开挖完成后,围护桩顶板在中间和两侧区域均不同程度出现微裂纹,中部为后方土压力作用下桩体张拉在上部顶板造成的张裂纹,且裂纹从基坑内侧向外逐渐扩展;侧壁两端偏移较小,形成剪裂纹,且裂纹从基坑外侧向内逐渐扩展。顶板微裂纹的发展反映了围护桩在运营期间的受力与变形状况,尤其结合本工程地质条件的复杂性和特殊性,可为型钢水泥土复合搅拌桩的力学性能研究提供有益参考价值。

参考文献:

- [1] 刘建航,候学渊. 基坑工程手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997.
- [2] Zhou Xisheng, Chen Yukang, Zhang Wei. Design and practice of SMW top-down construction method in deep pit[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 511-515.
- [3] 张忠苗,赵玉勃,吴世明,等. 过江隧道深基坑中SMW工法加钢支撑围护结构现场监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(6): 1 271-1 278.
- [4] 张信贵,吴恒,易念平,等. 深基坑支护工程方案推理机制与优化设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(5): 871-876.
- [5] 黄力平,陈湘生,冯开典. 基坑围护工程新技术——钻孔咬合桩[C]//第三届基坑工程学术讨论会论文集. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004: 201-205.
- [6] 王浩,覃卫民,汤华. 关于深基坑施工期监测现状的一些探讨[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(S1): 1 789-1 793.