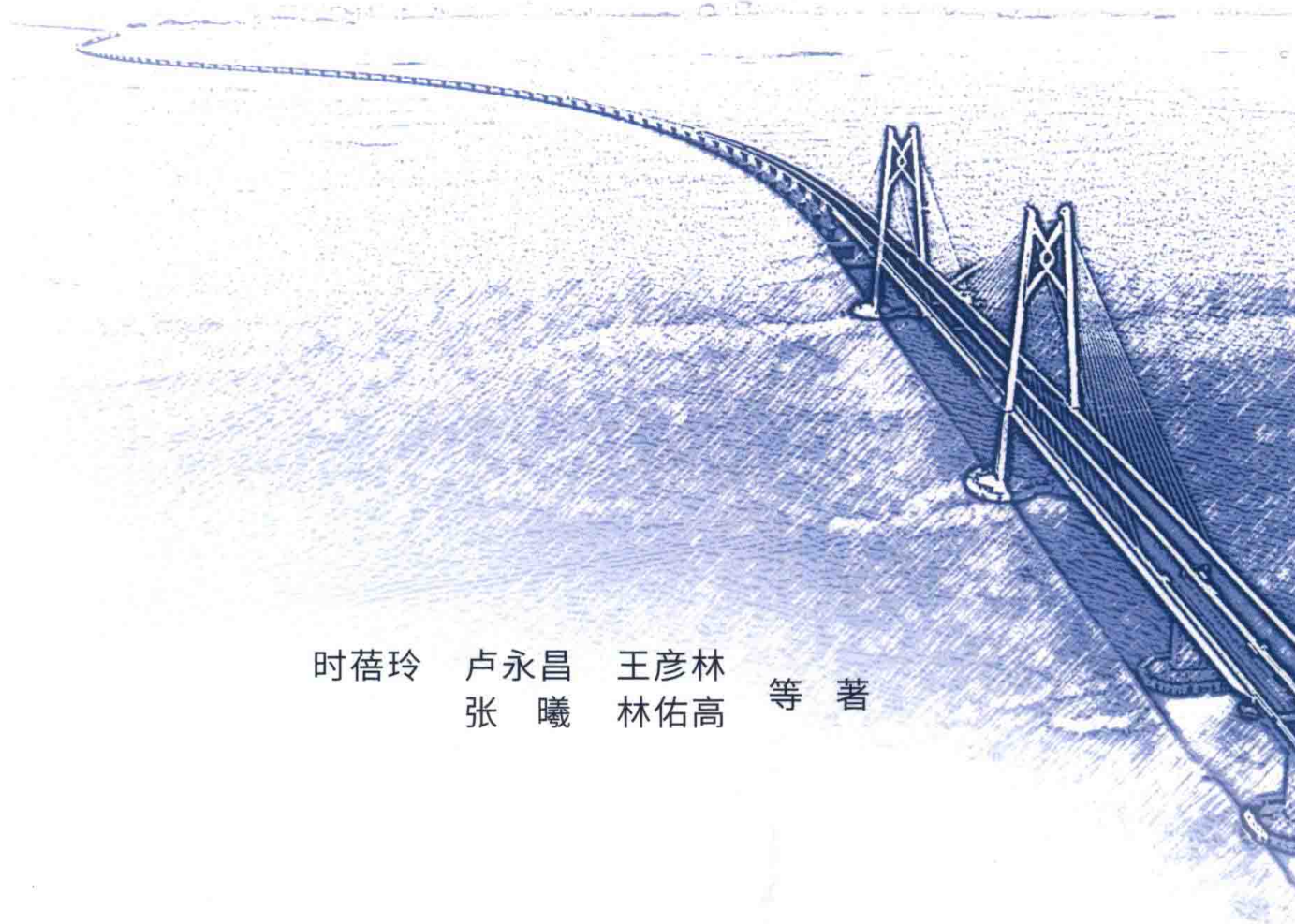




“十三五”国家重点图书出版规划项目  
交通运输科技丛书·公路基础设施建设与养护  
港珠澳大桥跨海集群工程建设关键技术与创新成果书系  
国家科技支撑计划资助项目(2011BAG07B02)

# 水下挤密砂桩技术 及其在外海人工岛工程中的应用

Marine Sand Compaction Pile Technology and Its Application in  
Offshore Artificial Island Projects



时蓓玲 卢永昌 王彦林 等著  
张曦 林佑高



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十三五”国家重点图书出版规划项目  
交通运输科技丛书·公路基础设施建设与养护  
港珠澳大桥跨海集群工程建设关键技术与创新成果书系  
国家科技支撑计划资助项目(2011BAG07B02)

# 水下挤密砂桩技术 及其在外海人工岛工程中的应用

Marine Sand Compaction Pile Technology and Its Application in  
Offshore Artificial Island Projects

时蓓玲 卢永昌 王彦林 等著  
张曦 林佑高



人民交通出版社股份有限公司  
China Communications Press Co., Ltd.

## 图书在版编目(CIP)数据

水下挤密砂桩技术及其在外海人工岛工程中的应用 / 时蓓玲等著. — 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2018.3

ISBN 978-7-114-14614-5

I. ①水… II. ①时… III. ①打桩工程—挤密加固—水下基础—研究 IV. ①TU753.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 057788 号

“十三五”国家重点图书出版规划项目

交通运输科技丛书·公路基础设施建设与养护

港珠澳大桥跨海集群工程建设关键技术与创新成果书系

国家科技支撑计划资助项目(2011BAG07B02)

书 名: 水下挤密砂桩技术及其在外海人工岛工程中的应用

著 者: 时蓓玲 卢永昌 王彦林 张 曦 林佑高 等

责任编辑: 周 宇 王景景 等

责任校对: 赵媛媛

责任印制: 张 凯

出版发行: 人民交通出版社股份有限公司

地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010)59757973

总 经 销: 人民交通出版社股份有限公司发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京雅昌艺术印刷有限公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 11.75

字 数: 234 千

版 次: 2018 年 3 月 第 1 版

印 次: 2018 年 3 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-14614-5

定 价: 80.00 元

(有印刷、装订质量问题的图书,由本公司负责调换)

# 交通运输科技丛书编审委员会

(委员排名不分先后)

顾问：陈 健 周 伟 成 平 姜明宝

主任：庞 松

副主任：洪晓枫 袁 鹏

委员：石宝林 张劲泉 赵之忠 关昌余 张华庆

郑健龙 沙爱民 唐伯明 孙玉清 费维军

王 炜 孙立军 蒋树屏 韩 敏 张喜刚

吴 澎 刘怀汉 汪双杰 廖朝华 金 凌

李爱民 曹 迪 田俊峰 苏权科 严云福

# 港珠澳大桥跨海集群工程建设关键技术与创新成果书系

## 编审委员会

顾 问：冯正霖  
主 任：周海涛  
副 主 任：袁 鹏 朱永灵

执行总编：苏权科

副 总 编：徐国平 时蓓玲 孟凡超 王胜年 柴 瑞

委 员：(按专业分组)

岛隧工程：	孙 钧	钱七虎	郑颖人	徐 光	王汝凯
	李永盛	陈韶章	刘千伟	麦远俭	白植悌
	林 鸣	杨光华	贺维国	陈 鸿	
桥梁工程：	项海帆	王景全	杨盛福	凤懋润	侯金龙
	陈冠雄	史永吉	李守善	邵长宇	张喜刚
	张起森	丁小军	章登精		
结构耐久性：	孙 伟	缪昌文	潘德强	邵新鹏	水中和
	丁建彤				
建设管理：	张劲泉	李爱民	钟建驰	曹文宏	万焕通
	牟学东	王富民	郑顺潮	林 强	胡 明
	李春风	汪水银			

# 《水下挤密砂桩技术及其在外海人工岛工程中的应用》

## 编 写 组

组    长：时蓓玲  卢永昌  王彦林  
副 组 长：张  曦  林佑高  
编写人员：马险峰  刘  璐  马振江  刘进生  刘  滨  
          蒋伟康  邓清鹏  陆梅兴  熊文峰  徐明贤  
          卢益峰  李  靖  蒋  健  吴心怡  朱俊毅  
          王孝健  何藺芥  张晨龙  闫  禹  杨卫国

# 总 序

## General Preface

科技是国家强盛之基,创新是民族进步之魂。中华民族正处在全面建成小康社会的决胜阶段,比以往任何时候都更加需要强大的科技创新力量。党的十八大以来,以习近平同志为总书记的党中央作出了实施创新驱动发展战略的重大部署。党的十八届五中全会提出必须牢固树立并切实贯彻创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念,进一步发挥科技创新在全面创新中的引领作用。在最近召开的全国科技创新大会上,习近平总书记指出要在我国发展新的历史起点上,把科技创新摆在更加重要的位置,吹响了建设世界科技强国的号角。大会强调,实现“两个一百年”奋斗目标,实现中华民族伟大复兴的中国梦,必须坚持走中国特色自主创新道路,面向世界科技前沿、面向经济主战场、面向国家重大需求。这是党中央综合分析国内外大势、立足我国发展全局提出的重大战略目标和战略部署,为加快推进我国科技创新指明了战略方向。

科技创新为我国交通运输事业发展提供了不竭的动力。交通运输部党组坚决贯彻落实中央战略部署,将科技创新摆在交通运输现代化建设全局的突出位置,坚持面向需求、面向世界、面向未来,把智慧交通建设作为主战场,深入实施创新驱动发展战略,以科技创新引领交通运输的全面创新。通过全行业广大科研工作者长期不懈的努力,交通运输科技创新取得了重大进展与突出成效,在黄金水道能力提升、跨海集群工程建设、沥青路面新材料、智能化水面溢油处置、饱和潜水成套技术等方面取得了一系列具有国际领先水平的重大成果,培养了一批高素质的科技创新人才,支撑了行业持续快速发展。同时,通过科技示范工程、科技成果推广计划、专项行动计划、科技成果推广目录等,推广应用了千余项科研成果,有力促进了科研向现实生产力转化。组织出版“交通运输建设科技丛书”,是推进科技成果公开、加强科技成果推广应用的一项重要举措。“十二五”期间,该丛书共出版72册,全部列入“十二五”国家重点图书出版规划项目,其中12册获得国家出版基金支

持,6册获中华优秀出版物奖图书提名奖,行业影响力和社会知名度不断扩大,逐渐成为交通运输高端学术交流和科技成果公开的重要平台。

“十三五”时期,交通运输改革发展任务更加艰巨繁重,政策制定、基础设施建设、运输管理等领域更加迫切需要科技创新提供有力支撑。为适应形势变化的需要,在以往工作的基础上,我们将组织出版“交通运输科技丛书”,其覆盖内容由建设技术扩展到交通运输科学技术各领域,汇集交通运输行业高水平的学术专著,及时集中展示交通运输重大科技成果,将对提升交通运输决策管理水平、促进高层次学术交流、技术传播和专业人才培养发挥积极作用。

当前,全党全国各族人民正在为全面建成小康社会、实现中华民族伟大复兴的中国梦而团结奋斗。交通运输肩负着经济社会发展先行官的政治使命和重大任务,并力争在第二个百年目标实现之前建成世界交通强国,我们迫切需要以科技创新推动转型升级。创新的事业呼唤创新的人才。希望广大科技工作者牢牢抓住科技创新的重要历史机遇,紧密结合交通运输发展的中心任务,锐意进取、锐意创新,以科技创新的丰硕成果为建设综合交通、智慧交通、绿色交通、平安交通贡献新的更大的力量!

杨志亮

2016年6月24日

# 序

## Preface

2003年,港珠澳大桥工程研究启动。2009年,为应对由美国次贷危机引发的全球金融危机,保持粤、港、澳三地经济社会稳定,中央政府决定加快推进港珠澳大桥建设。港珠澳大桥跨越珠江口伶仃洋海域,东接香港特别行政区,西接广东省珠海市和澳门特别行政区,是“一国两制”框架下粤、港、澳三地合作建设的重大交通基础设施工程。港珠澳大桥建设规模宏大,建设条件复杂,工程技术难度、生态保护要求很高。

2010年9月,由科技部支持立项的“十二五”国家科技支撑计划“港珠澳大桥跨海集群工程建设关键技术与示范”项目启动实施。国家科技支撑计划,以重大公益技术及产业共性技术研究开发与应用示范为重点,结合重大工程建设和重大装备开发,加强集成创新和引进消化吸收再创新,重点解决涉及全局性、跨行业、跨地区的重大技术问题,着力攻克一批关键技术,突破瓶颈制约,提升产业竞争力,为我国经济社会协调发展提供支撑。

港珠澳大桥国家科技支撑计划项目共设五个课题,包含隧道、人工岛、桥梁、混凝土结构耐久性和建设管理等方面的研究内容,既是港珠澳大桥在建设过程中急需解决的技术难题,又是交通运输行业建设未来发展需要突破的技术瓶颈,其研究成果不但能为港珠澳大桥建设提供技术支撑,还可为规划研究中的深圳至中山通道、渤海湾通道、琼州海峡通道等重大工程提供技术储备。

2015年底,国家科技支撑计划项目顺利通过了科技部验收。在此基础上,港珠澳大桥管理局结合生产实践,进一步组织相关研究单位对以国家科技支撑计划项目为主的研究成果进行了深化梳理,总结形成了“港珠澳大桥跨海集群工程建设关键技术与创新成果书系”。书系被纳入了“交通运输科技丛书”,由人民交通出版社股份有限公司组织出版,以期更好地面向读者,进一步推进科技成果公开,进一步加强科技成果交流。

值此书系出版之际,祝愿广大交通运输科技工作者和建设者秉承优良传统,按照党的十八大报告“科技创新是提高社会生产力和综合国力的战略支撑,必须摆在国家发展全局的核心位置”的要求,努力提高科技创新能力,努力推进交通运输行业转型升级,为实现“人便于行、货畅其流”的梦想,为实现中华民族伟大复兴而努力!

港珠澳大桥国家科技支撑计划项目领导小组组长  
本书系编审委员会主任



2016年9月

# 前 言

## Foreword

随着我国交通基础设施建设的发展,外海工程越来越多,其中水下地基加固是外海工程的关键节点和一大难题。为了克服外海的水深条件和波流条件,需要在地基加固技术上不断创新。水下挤密砂桩作为地基加固新技术,非常适合外海工程的需求,尽管在国内的起步时间不长,但发展迅速。特别是港珠澳大桥工程建设中,经过一系列技术攻关和实践探索,水下挤密砂桩获得了极大成功。将该项技术的最新进展进行系统、全面的总结,有利于此项新技术的推广,使广大工程技术人员获得一个详细了解此项技术及其在工程中应用效果的机会。

挤密砂桩地基加固技术源自日本,已成功应用于多项跨海通道与港口码头工程,形成了一套完整的设计与施工技术。我国对挤密砂桩技术的研发始于2004年,在交通运输部的领导下,中交第三航务工程局有限公司于2006年通过自主创新成功研制出第一代国产化挤密砂桩施工船,并于2008年成功将其应用于洋山深水港三期工程工作船码头,从而向大规模推广迈出了坚实的一步。

水下挤密砂桩技术的研发成功为我国交通基础设施建设提供了一种全新的水下地基加固手段。港珠澳大桥岛隧工程因人工岛与隧道工程建设的需要,成为国内目前使用挤密砂桩最多的工程项目。依托国家科技支撑计划课题“港珠澳大桥跨海集群工程建设关键技术研究及示范”,编写组在该工程建设中对水下挤密砂桩技术开展了全面、深入的探索和实践,研究建立了完整的设计计算方法、施工技术、施工装备以及质量检测技术。具体包括:

一、针对港珠澳大桥工程的需求和自然环境,设计了多种置换率的挤密砂桩复合地基,在水下挤密砂桩设计领域进行了一次全面的实践,并取得了非常好的效果。

二、通过自主创新研制了具有完全自主知识产权的水下挤密砂桩成套施工设备和控制系统,全部设备实现国产化。研制的设备和控制系统成功攻克港珠澳大



施工对策,由上海交通大学蒋伟康、邓清鹏执笔,张文正参与了重要工作。第六章介绍港珠澳大桥人工岛工程挤密砂桩的加固效果,由中交三航研究院张曦和中交四航院林佑高执笔。第七章对挤密砂桩技术今后的应用前景进行展望,并提出需要进一步研究的问题,由中交三航局时蓓玲、中交四航院林佑高执笔。

在本书编写以及科技支撑计划课题研究过程中,港珠澳大桥管理局苏权科总工程师、中国交建林鸣总工程师、中交三航局曹根祥总工程师和尹海卿副总工程师、同济大学李永盛教授、中交三航院莫景逸副总工程师给予了重要的指导,在此深表感谢。中交三航局顾巍、贺永康、陆梅兴、熊文峰、徐明贤、卢益峰、张敏赢等,中交三航研究院李靖、董念慈、吴心怡、蒋健、朱俊易、王孝健等,以及中交四航院梁桁、李建宇、王坤等均承担了重要的科研工作,同济大学何茵莽、张晨龙在本书涉及的科研工作中完成了硕士学位论文。

由于水下挤密砂桩在国内实际应用的工程还不多,尚需在今后工程实践中继续积累经验,加上作者的理论水平和实践经验有限,书中内容欠缺或疏漏之处,敬请读者批评指正。

作 者

2017年3月

# 目 录

## Contents

第1章 概述 .....	1
1.1 挤密砂桩用于水下地基加固的技术与应用现状 .....	1
1.1.1 水下挤密砂桩的基本特点 .....	1
1.1.2 挤密砂桩的应用现状 .....	3
1.2 挤密砂桩的加固机理与一般设计方法 .....	4
1.2.1 水下挤密砂桩的加固机理 .....	4
1.2.2 水下挤密砂桩的一般设计方法 .....	5
1.3 挤密砂桩的施工设备 .....	8
1.4 水下挤密砂桩在港珠澳大桥工程中的应用及研究进展 .....	10
第2章 挤密砂桩加固机理的离心模型试验研究 .....	12
2.1 试验研究的目​​的及原理 .....	12
2.1.1 试验研究的目​​的 .....	12
2.1.2 试验研究的原理 .....	14
2.2 试验设备与测量方法 .....	16
2.2.1 试验设备 .....	16
2.2.2 测量方法 .....	16
2.3 试验方案 .....	18
2.3.1 试验工况 .....	18
2.3.2 模型设计 .....	20
2.3.3 加载方法 .....	22
2.3.4 试验步骤 .....	22
2.4 离心试验结果与分析 .....	24
2.4.1 挤密砂桩单桩承载力分析 .....	24
2.4.2 挤密砂桩复合地基结果分析 .....	27
2.4.3 复合地基承载力与单桩承载力关系初探 .....	40

2.5 本章小结	42
<b>第3章 港珠澳大桥人工岛工程挤密砂桩地基加固设计</b>	<b>44</b>
3.1 概述	44
3.2 建设条件	45
3.2.1 气象	45
3.2.2 水文	45
3.2.3 地形地貌与泥沙	47
3.2.4 工程地质	47
3.3 桥隧转换人工岛挤密砂桩复合地基设计	50
3.3.1 挤密砂桩加固范围	50
3.3.2 岸壁斜坡堤低置换率挤密砂桩设计	50
3.3.3 救援码头高置换率挤密砂桩设计	57
3.4 挤密砂桩复合地基设计方法详解	67
3.4.1 水下挤密砂桩复合地基设计条件	67
3.4.2 挤密砂桩的工艺设计	67
3.4.3 泥面隆起问题及对策	69
3.4.4 碎石垫层	70
3.4.5 计算方法与参数取值	70
3.5 本章小结	76
<b>第4章 水下挤密砂桩施工技术</b>	<b>77</b>
4.1 施工设备与工艺	77
4.1.1 第二代挤密砂桩施工船的研制目标	77
4.1.2 主要设备	78
4.1.3 导门改进	80
4.1.4 砂面仪改进	81
4.2 控制系统	84
4.2.1 控制系统的组成	85
4.2.2 施工参数及系统软件	87
4.3 复杂地层中的成桩判定	100
4.3.1 研究目的	100
4.3.2 基本原理	100
4.3.3 试验研究	102
4.4 本章小结	115

第5章 水下声环境保护 .....	116
5.1 沉桩水下噪声对海洋生物的影响 .....	116
5.2 声波的产生及描述方法 .....	117
5.3 桩套管振沉辐射声的理论建模与计算 .....	119
5.3.1 桩套管振动方程 .....	119
5.3.2 沉桩辐射声压的方程 .....	120
5.3.3 水下声振耦合问题的求解 .....	121
5.4 航道环境噪声测试 .....	123
5.5 施工噪声测试 .....	125
5.6 桩套管振沉水下噪声对白海豚影响规律分析 .....	127
5.7 水下噪声管理 .....	129
5.8 本章小结 .....	129
第6章 水下挤密砂桩质量检测与加固效果分析 .....	130
6.1 质量检测 .....	130
6.1.1 标贯试验方法 .....	130
6.1.2 质量检测结果 .....	131
6.1.3 检测结果分析 .....	136
6.1.4 工程验证 .....	149
6.2 加固效果分析 .....	152
6.2.1 岸壁斜坡堤低置换率挤密砂桩复合地基加固效果 .....	152
6.2.2 救援码头高置换率挤密砂桩复合地基加固效果 .....	153
6.3 本章小结 .....	155
第7章 展望 .....	156
参考文献 .....	161
索引 .....	163

# 第 1 章 概 述

## 1.1 挤密砂桩用于水下地基加固的技术与应用现状

### 1.1.1 水下挤密砂桩的基本特点

砂桩法地基处理技术起源于 19 世纪的欧洲,最初是采用振冲的方式向地基中置入碎石,用于提高松砂的密实性,主要靠桩的挤密和施工中的振动作用使桩周围的土体密实度增大,从而使地基承载力提高,压缩性降低。随着时间的推移,此类工法进一步扩展用于加固软黏土地基。砂桩的主要作用是部分置换并与软黏土构成复合地基,加速软土的排水固结,从而增加地基土的强度,提高软基的承载力。在原有施工工艺的基础上,逐步发展出振冲密实法、振冲置换法以及沉管法的砂桩或碎石桩。而本书所指的挤密砂桩是从 20 世纪 50 年代日本研制的振动式和冲击式砂桩施工工艺开始逐渐发展起来的。该工法与其他散体桩的最大区别在于成桩过程,是利用振动或冲击荷载将钢套管打入软基中,经过有规律的反复提升和打压套管,将砂送入被加固的软弱地基(包括软黏土、松散砂土等)中,并使填入的砂桩扩径,形成挤密砂桩复合地基。与普通砂桩相比,水下挤密砂桩在施工过程中增加了挤密工艺,提高了地基土的密实度、承载能力、抗剪强度、抗液化能力等,从而达到更好的加固效果。普通砂桩(或散体桩)更适用于处理松砂、杂填土和黏粒含量不大的普通黏土,而挤密砂桩(SCP)对软黏土的适用范围要大得多。在日本,有多项工程采用挤密砂桩加固天然含水率超过 100% 的软黏土,并取得良好效果。

挤密砂桩的英文名称是 Sand Compaction Pile(简称 SCP)<sup>[1]</sup>。这里“挤密”二字指的是 Compaction,也就是对砂桩桩体的振挤密实,与振冲法散体桩对桩周土体的振挤密实作用是不一样的,尽管 SCP 用于砂性土地基加固时也有类似作用。

挤密砂桩的显著特征是通过采用一整套严格控制下的反复振动、回打扩径的特殊工艺,使压入原地基的砂量成为可控的固定量,并可以在地基中形成大直径的桩体,从而实现比较大的置换率。挤密砂桩的工艺原理如图 1-1 所示。

水下挤密砂桩的施工主要分为以下步骤:

(1)施工前准备。船舶通过 GPS 确定砂桩工位,控制系统自检设备运行状态,设置施工砂桩参数,并对 GL(套管内砂面顶高程)、SL(套管底高程)测量系统进行标定和归零。