

港珠澳大桥岛隧工程

论文集

卷Ⅲ
▼

中交港珠澳大桥岛隧工程项目总经理部

科学出版社



港珠澳大桥岛隧工程

论文集

卷Ⅲ
▼

中交港珠澳大桥岛隧工程项目总经理部

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是在港珠澳大桥建设过程中建设团队结合理论设计、思考、实践实施而编写的论文的集锦,本卷为地基基础、测量监测和管理方面内容,合计 67 篇论文。

本书可供从事桥梁道路工程设计、施工、测量、监测等专业人员参考,也可供高等院校交通工程、桥梁工程、道路工程等专业师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

港珠澳大桥岛隧工程论文集. 卷 III/中交港珠澳大桥岛隧工程项目总经理部编. —北京:科学出版社,2019.1

ISBN 978-7-03-059978-0

I. ①港… II. ①中… III. ①跨海峡桥—桥梁工程—文集②水下隧道—隧道工程—文集 IV. ①U4-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 287735 号

责任编辑:郭勇斌 欧晓娟 / 责任校对:郑金红
责任印制:张克忠 / 封面设计:黄华斌

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 1 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2019 年 1 月第一次印刷 印张:30

字数:698 000

定价:198.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

“港珠澳大桥岛隧工程论文集”编委会

主 任 林 鸣

副 主 任 刘 晓 东 尹 海 卿 刘 亚 平

编 审 委 员 (以 姓 氏 笔 画 排 序):

王 强 孔 令 磊 冯 颖 慧 刘 海 青

杨 绍 斌 吴 凤 亮 何 波 张 宝 兰

陈 伟 彬 陈 良 志 陈 林 林 巍

罗 冬 岳 远 征 周 光 强 孟 凡 利

赵 辉 高 潮 高 纪 兵 黄 维 民

宿 发 强 梁 桁 梁 杰 忠 屠 柳 青

董 政 谢 臣 伟 樊 建 华

序 言

港珠澳大桥东连香港、西接珠海、澳门，是集桥、岛、隧为一体的超大型跨海通道，是我国继三峡工程、青藏铁路、南水北调、西气东输、京沪高速铁路之后又一重大基础设施项目。其中，岛隧工程是大桥的控制性工程，包括一条长 6.7 km 的沉管隧道和两座各 10 万 m² 的外海人工岛，采用设计施工总承包模式，由中国交通建设股份有限公司联合体承建。

沉管工法是一项综合了水工工程、地下工程、隧道工程的复合性技术，实施难度和风险非常大，因而在隧道建设中应用不多。到目前为止，全世界建成的沉管隧道只有一百多条，主要集中在美国、日本、欧洲等发达国家及地区。中国的沉管隧道建设起步较晚，在 20 世纪 90 年代初才建设了第一条沉管隧道，截至 2010 年，全国也只在内河、江湖中修建过十多条沉管隧道，长度也是几百米级的。

深埋海底、长达 6.7 km 的外海沉管隧道，放眼全球，都是令人望而生畏的难题：岛隧工程结合、软土地基不均匀沉降控制、超大管节预制、外海条件管节浮运和沉放、深水深槽条件管节对接、结构与接头的水密、最终接头等技术难题都是具有世界级挑战性的。

七年建设征程，岛隧工程建设团队攻坚克难、创新实践，完成了 100 多项试验研究，申报并取得超过 400 项技术专利，开创了公路沉管隧道“最长、最大跨径、最大埋深、最大体量”四项世界纪录，取得了大直径深插钢圆筒快速成岛新技术、半刚性沉管新结构、整体式主动止水最终接头新方案、复合地基加组合基床隧道基础新形式等多项创新成果；攻克了曲线段沉管工厂法预制、外海沉管安装等多项新技术。这些创新成果是本工程项目一线科技人员聪明才智与实践探索的结晶。

2011~2017 年，4000 名岛隧建设者七年如一日，坚守七年、奉献七年，确保了港珠澳大桥主体工程顺利交工验收。现将项目建设过程中编写及发表的论文约 400 篇进行梳理汇总，形成了论文集共四卷，呈现给同行和专家学者，以供参考。由于水平有限，本书难免有错误、遗漏及理解偏颇之处，还望读者不吝赐教，以便鞭策我们不断探索和提升，全体编写人员对此深表感谢。

最后，衷心感谢各级领导和同仁对港珠澳大桥岛隧工程的支持、关心与帮助！

中国交通建设股份有限公司联合体
港珠澳大桥岛隧工程项目总经理部

2018 年 11 月

目 录

序言

地 基 基 础

海上挤密砂桩工法及其在港珠澳大桥岛隧工程的应用	林 鸣 梁 桁 刘晓东 等 (3)
港珠澳大桥东人工岛工程深厚软基处理综合技术	孙洪春 张 焕 (15)
水下挤密砂桩在沉管隧道基础工程中的应用探讨	何洪涛 林佑高 李建宇 等 (23)
国内水下软土地基加固专用挤密砂桩船的现状、应用及发展趋势	刘 璐 马振江 (34)
挤密砂桩船海上施工工艺及质量管理	孔令磊 李 立 刘国娜 (40)
水下挤密砂桩施工技术与加固地基特性分析	朱胜利 喻志发 李立新 等 (47)
外海挤密砂桩复合地基水下堆载预压加固效果监测及分析	张怡戈 王 娟 (55)
Immersed Tunnel Foundation on Marine Clay Improved by Sand Compaction Piles	Hongtao He Yougao Lin Jianyu Li et al. (62)
Improvement of Off-Shore Immersed Tunnel Foundations in Soft Ground by Composite Foundation Methods	Hongtao He Yougao Lin Jianyu Li (78)
港珠澳大桥沉管隧道地基基础堆载预压位移沉降监测技术	曹新海 张海丰 蒋 健 (88)
外海人工岛深厚软土地基超深塑料排水板施工技术	孙洪春 姚辉博 张 焕 (93)
“金雄”轮定深开挖工艺在港珠澳大桥岛隧工程基槽开挖中的运用	林镇定 朱淋淋 (98)
海底天然气管线邻近水域疏浚施工工艺	何 波 陈松波 (105)
港珠澳大桥沉管隧道基槽的回淤控制	曹湘波 陈 林 何 波 (110)
港珠澳大桥岛隧工程沉管隧道基槽开挖及清淤施工的质量控制	张 琦 朱淋淋 (119)

港珠澳大桥沉管隧道深基槽回淤监测与分析	郑 伟 (125)
外海沉管隧道回淤监测及防淤清淤技术	宋来中 (131)
HYPACKTIN 模型在港珠澳大桥岛隧工程冲淤监测中的应用	
.....	张 琦 潘 满 (137)
已安沉管尾端钢封门前清淤施工风险防范	朱淋淋 何 波 (143)
溜管抛石精度控制技术以及在港珠澳大桥隧道基础施工中的应用	
.....	梁天戈 伍绍博 苏怀平 (149)
深水域基床抛石夯实工艺及设备的开发与应用	
.....	孟凡利 孔令磊 张怡戈 等 (155)
深水域基床抛石夯实施工测量控制系统的开发与应用	
.....	刘 明 沈家海 冀 晋 (164)
抛石夯实设备节能技术在港珠澳大桥中的应用	李亚军 丰贯凌 王喜才 (178)
液压振动锤夯实块石基床效果验证与分析	冀 晋 张怡戈 靳 胜 (185)
港珠澳大桥沉管碎石垫层铺设船(平台)抛石整平总体方案选型	
.....	杨秀礼 邵曼华 徐 杰 (194)
韩国釜山沉管隧道基础铺设整平施工关键技术	张学俊 魏红波 张建军 (200)
自升式抛石整平平台三大系统的关键技术	王铮东 (209)
深水碎石整平平台整平精度分析	王学军 王 乐 尹 刚 (220)
支撑式平台整平船桩腿拔桩力计算	冯海暴 曲俐俐 魏红波 (228)
碎石基床整平船桩腿齿条修补工艺	
.....	李家林 朱春峰 林祥标 等 (235)
沉管密闭腔抬升方法的构想与实践	
.....	林 鸣 梁 桁 林 巍 等 (240)
港珠澳大桥预制沉管基础后注浆混凝土研究与应用	
.....	林 鸣 汪华文 屠柳青 等 (250)

测 量 监 测

港珠澳大桥西人工岛施工测量控制网测设技术	沈家海 刘 明 刘保永 (259)
海中测量平台的建造与应用	张 超 成益品 (265)
港珠澳大桥岛隧工程东西人工岛精密跨海高程传递测量	成益品 张 超 (270)
徕卡 GNSS 用于外海域跨海工程高程传递测量方法研究	刘兆权 (275)
光学测微法跨河水准测量应用及精度分析	徐 良 孙阳阳 (281)

天宝 TSC3 手簿与徕卡 TS30 全站仪在跨海三角高程测量中的应用	张建军 张 超 刘兆权 等 (287)
短距离二等三角高程测量在港珠澳大桥跨海水准测量中的应用	金廷文 钱健龙 (292)
外海超长沉管隧道精密贯通测量设计与实践	成益品 孙阳阳 高应东 (297)
港珠澳大桥沉管隧道导线布设方法研究	李冠青 黄声享 (304)
港珠澳大桥沉管隧道贯通误差预计	李冠青 黄声享 (309)
陀螺方位角加测数量及位置	张秀振 张 超 刘兆权 (316)
测量塔定位系统在港珠澳大桥沉管安装中的应用	成益品 (322)
平面拟合模型在大型构件安装中的应用	何元甲 冯 伟 曾庆喜 (327)
RTK 三维多波束水深测量在港珠澳大桥岛隧工程中的应用	潘 满 何 波 (331)
GPS-RTK 三维水下地形测量的应用与误差分析	郑 伟 李 炜 (337)
基于多波束测深的海底基床监测与分析	孙阳阳 徐 良 张建军 等 (344)
多波束测深精度评估	刘兆权 (349)
超长塑料排水板在倾斜较大的钢圆筒中的测量方法	沈永兴 张 奎 (358)
港珠澳大桥岛隧工程 GNSS 数据电离层延迟分析	张秀振 李冠青 (364)
港珠澳大桥沉管隧道施工监测系统	李哈汀 胥新伟 高 潮 等 (370)

管 理

超级工程必须坚持自主创新	林 鸣 (379)
建设超大型工程的标准化之路	林 鸣 (384)
6S 管理在港珠澳大桥建设中的引入和实践	黄 涛 张 洪 (387)
水下隧道设计施工总承包模式研究	张志刚 林 巍 刘洪洲 (391)
从人机料法环测分析重大工程项目的质量控制	孟凡利 刘亚平 (400)
PDCA 循环在沉管舾装质量管理中的应用	陈 虢 刘忠鹏 (407)
港珠澳大桥岛隧工程通航安全保障研究	李金峰 陈 伟 (414)
港珠澳大桥航道区沉管施工安全措施	范铁锐 李 瀚 郑秀磊 (420)
基于工作积分制的施工企业安全奖惩模式	乔 明 张家昌 (426)
港珠澳大桥岛隧工程施工中的中华白海豚保护措施	陈 伟 郑 轶 孟庆龙 (434)
港珠澳大桥东人工岛施工环保技术	沈永兴 (438)

工程项目管理中的人文管理与团队协作	傅秀萍 (446)
信息化为超级工程建设保驾护航	陈志军 申启杰 黄育波 (451)
跨海交通工程的数码相机摄影技术	林巍 黄喆 伍绍博 等 (454)
预埋件存放及使用的规范化管理	唐艳 张天阳 朱成 (463)

地基基础



海上挤密砂桩工法及其在港珠澳大桥岛隧工程的应用*

林 鸣, 梁 桁, 刘晓东, 李建宇

(中交股份联合体港珠澳大桥岛隧工程项目总经理部, 珠海)

摘 要: 针对海上挤密砂桩这一新型软基加固工法, 本文依托港珠澳大桥岛隧工程对其原理和特点进行介绍。本文总结现场挤密砂桩荷载板试验的相关成果, 介绍了海上挤密砂桩应用在不同构筑物时的设计原理、计算方法及布置方案; 分析目前国内海上挤密砂桩的施工能力, 归纳总结了海上挤密砂桩的施工效率和相应的质量控制管理措施, 为此工法的推广及应用提供依据。

关键词: 港珠澳大桥; 岛隧工程; 挤密砂桩; 试验; 设计; 施工; 质量

1 港珠澳大桥岛隧工程概况

港珠澳大桥跨越珠江口伶仃洋海域, 是连接香港、珠海及澳门的大型跨海通道。大桥工程包括海中桥隧主体工程, 香港、澳门、珠海三地口岸及连接线工程, 海中桥隧主体工程全长约 29.6 km, 采用桥隧组合方式, 岛隧工程是大桥的控制性工程^[1], 包括两个长度为 625 m 的隧道人工岛及 5664 m 长的海中沉管隧道, 岛隧工程是当今世界同类工程综合技术难度最大的工程之一。

岛隧工程平均水位+0.54 m, 原海床面标高-8.0~-10.0 m, 主要分布四大土层, 第一层淤泥、淤泥质黏土, 厚度 3.5~25.4 m, 标贯击数<1; 第二层黏土, 厚度 0.6~10.5 m, 标贯击数约 12.5; 第三层黏土、粉质黏土, 厚度 0.9~39.3 m, 标贯击数为 12.9~24.4; 第四层为密实砂层。不论是人工岛填筑还是沉管隧道斜坡段的基础, 即便经过局部开挖换填, 仍需对厚度达 10~20 m 的高压缩性软土进行加固处理。

东人工岛、西人工岛采用深插式钢圆筒形成止水型岛壁结构, 岛壁外设抛石斜坡堤, 采用低置换率挤密砂桩复合地基基础, 岛内采用降水联合堆载预压加固软土地基。

沉管隧道共分为 33 节依次为 E1、E2、E3、…、E32、E33, 标准管节长度 180 m, 其中 E7~E29 管节基础为天然地基, E1~E6 及 E30~E33 管节下软土层较厚需进行处理, 为控制沉降并实现隧道地基刚度的平顺过渡, 这些区域采用高置换率挤密砂桩复合地基。

* 本文曾刊登于《中国港湾建设》2012 年第 8 期。

为适应工程区域严格的环保要求，岛隧工程地基处理采用了挤密砂桩这种环保的软基处理方法，本文主要介绍挤密砂桩复合地基在岛隧工程不同区段的设计与施工。本工程共投入 7 条砂桩船，图 1 为正在作业的砂桩 6 号，图 2、图 3 为低置换率和高置换率挤密砂桩的分布范围，图 4、图 5 为低置换率和高置换率挤密砂桩典型断面图。



图 1 砂桩 6 号

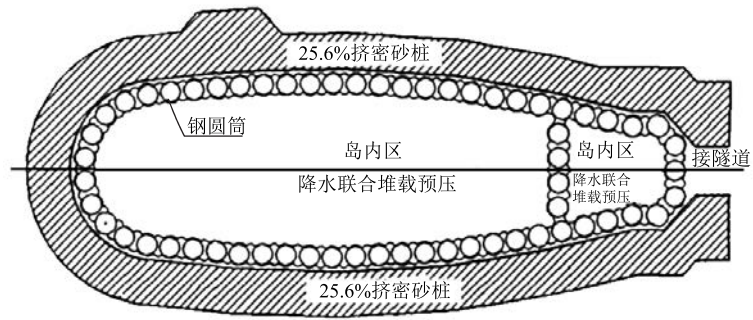


图 2 低置换率挤密砂桩布置

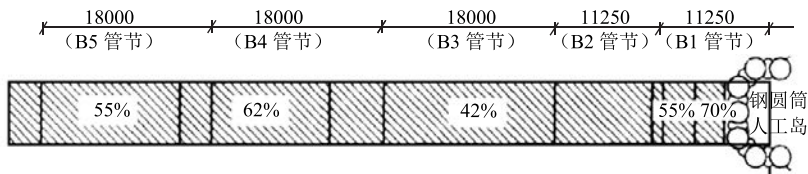


图 3 高置换率挤密砂桩布置 (单位: cm)

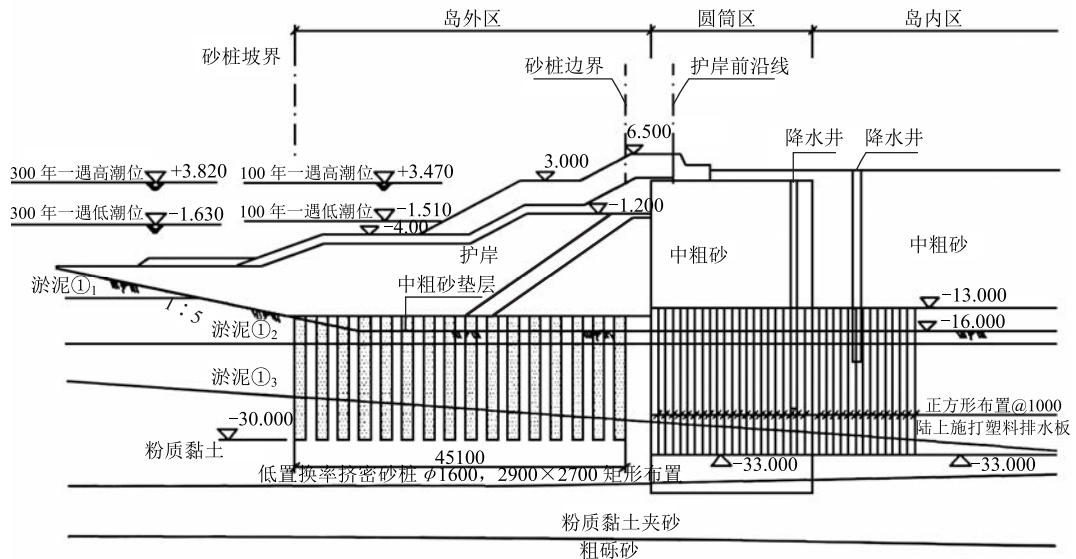


图 4 低置换率挤密砂桩断面示意图

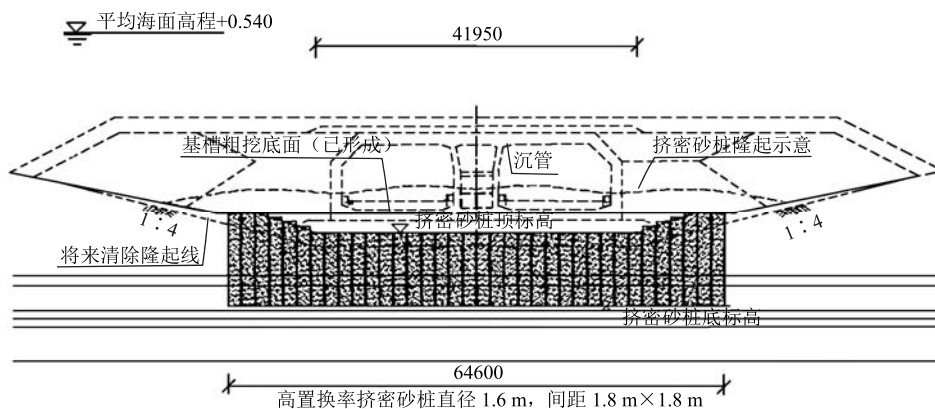


图5 高置换率挤密砂桩断面示意图

2 挤密砂桩加固原理及特点

2.1 加固机理

挤密砂桩（SCP）不同于陆上一般采用的砂桩，它的原理是在软基上用振动锤把套管沉入到要求的深度，填入中粗砂并向下挤压使砂桩扩径，使其周围地基发生侧向挤压而使地基密实的一种加固方法^[2,3]。对松散砂土地基，SCP的主要作用是成桩时对周围砂层产生挤密作用及振密作用；对软弱黏土地基，SCP的作用主要是置换和排水作用，一般高置换率SCP考虑置换作用，低置换率SCP只考虑排水固结作用，其作用形式与置换率的关系见图6。实施SCP可通过高强度砂桩与软弱地基形成复合地基，使之对上部荷载的承载力增强，包括排水效果在内的地基整体刚度增加，滑动阻力增加，沉降减少，侧向流动减少。

2.2 挤密砂桩工法特点

1) 施工作业区域广。砂桩船不仅可在内河及近海区域作业，也可进入条件恶劣的外海区域，目前岛隧工程在外海已成功完成了6000多根挤密砂桩。

2) 桩径大、成桩长。挤密砂桩套管一般0.8~1.0 m，在淤泥中可形成最大2.0 m的桩径，通过调节桩架可实现最深70 m桩长。

3) 砂桩自动化程度高，施工速度快。

4) 先进的GPS，打桩定位准确。

5) 快速提高承载力及消除沉降。形成高置换率挤密砂桩（岛隧工程中最大置换率达到70%），快速提高地基承载力。在超大气压反复冲击作用下，桩体密实度高（标贯击数可达20~45），地基整体沉降小。

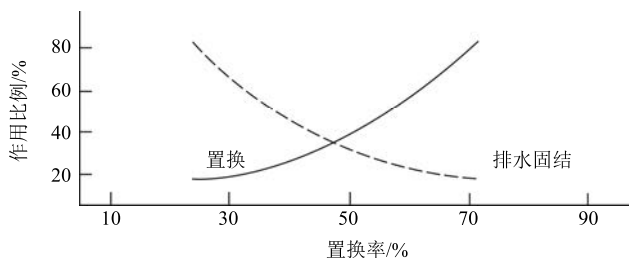


图 6 作用比例与置换率的关系

- 6) 消除不均匀沉降。挤密砂桩形成的柔性桩复合地基，有利于消除不均匀沉降。
- 7) 加速软土排水固结速度。挤密砂桩桩径大，桩间距小，排水距离短，排水固结速度快。
- 8) 挤密砂桩用料环保无污染。

3 港珠澳大桥岛隧工程 SCP 设计

3.1 低置换率挤密砂桩设计

为保证钢圆筒外侧抛石斜坡堤在施工期及使用期稳定，斜坡堤基础设置低置换率挤密砂桩，见图 4。

3.1.1 设计思路

设计流程见图 7，通过试算抛石斜坡堤施工期及使用期稳定所需置换率为 25%。通过典型试验确定 SCP 桩径为 1600 mm（桩管 $\phi 1000$ mm）。桩间距宜根据施工船配备的套管间距确定，套管悬挂间距为 5.4 m，桩间距设置为 2.7 m \times 2.9 m，其中 2.7 m 由施工船套管间距决定，2.9 m 可通过调整船位确定，实际 SCP 置换率为 25.6%。

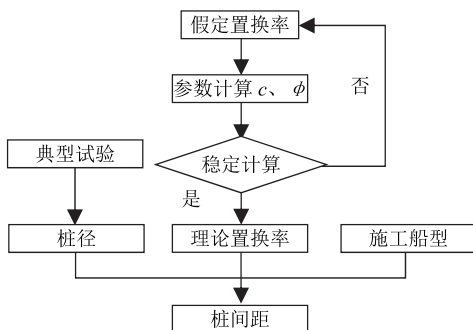


图 7 设计流程图

3.1.2 稳定计算

(1) 施工期稳定计算

土层采用快剪指标，只考虑挤密砂桩的置换作用，不考虑海侧护岸结构施工过程中的地基土强度增长，复合土体综合强度指标采用面积比法计算。

(2) 使用期稳定计算

使用Ⅰ期：使用前期，钢圆筒仍然存在，假设圆弧不经过圆筒。砂桩处理区土层及岛内排水板处理部分的土层采用固快指标，其他均采用快剪指标。

使用Ⅱ期：使用后期，圆筒腐蚀、变薄，即假设圆筒不存在，在这种情况下，砂桩处理区及圆筒以下土层在荷载作用下已经固结，其范围内均采用固快指标。

(3) 稳定计算结果

施工期安全系数，简单条分法（天津地基计算系统） ≥ 1.0 ；使用期安全系数，BISHOP法为 1.3~1.5；简单条分法（天津地基计算系统）为 1.1~1.3。

3.2 高置换率挤密砂桩设计

沉管隧道基础沉降要求严格，差异沉降不宜大于 0.1%，地基处理方式须采用能有效控制沉降且容错性高的地基处理手段，高置换率挤密砂桩是理想的地基加固方法。靠近西人工岛的 E1~E6 管节及靠近东人工岛的 E30~E33 管节基础软土层较厚，且荷载变化较大，为减少沉管管节残余沉降及差异沉降，在 E1~E6 及 E30~E33 管节设置高置换率挤密砂桩，见图 5。

3.2.1 设计思路

设计流程见图 8。

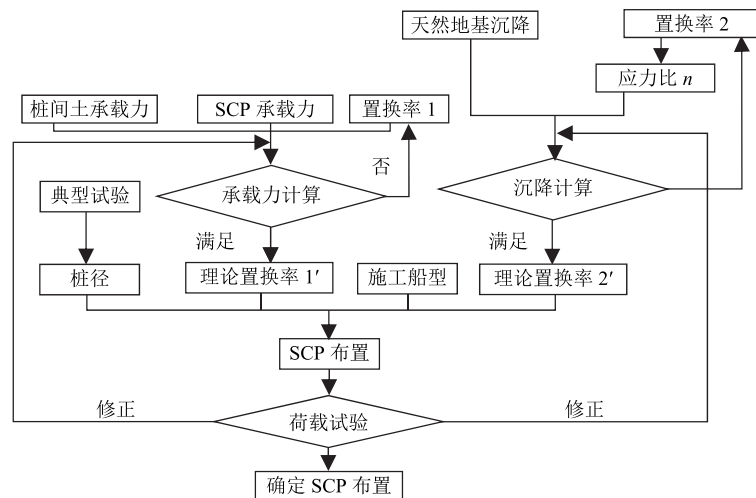


图 8 设计流程图

3.2.2 高置换率挤密砂桩设计方案

根据管节基础附加荷载将挤密砂桩地基处理方式分为挤密砂桩+堆载预压及单独挤密砂桩两种方式。附加荷载 ≥ 0 区段施打挤密砂桩后进行水上堆载，砂桩起到排水及置换的双重作用；附加荷载 ≤ 0 区段只设置高置换率挤密砂桩，仅考虑其置换作用。

(1) 挤密砂桩+堆载预压（附加荷载 ≥ 0 区段）

根据荷载及软土层厚度的变化，共设置 70%、55%及 42%三种置换率的挤密砂桩，挤密砂桩直径及间距见表 1。

表 1 挤密砂桩参数

置换率/%	直径/m	布置形式
70	1.7	正方形布置，1.8m×1.8m
55	1.5	正方形布置，1.8m×1.8m
42	1.6	正方形布置，2.2m×2.2m

(2) 单独挤密砂桩（附加荷载 ≤ 0 区段）

随着沉埋深加大，地基土所受附加荷载 ≤ 0 ，堆载对软土加固效果不明显。根据荷载及软土层厚度的变化，挤密砂桩布置见表 2。

表 2 挤密砂桩参数

置换率/%	直径/m	布置形式
62	1.6	正方形布置，1.8m×1.8m
55	1.5	正方形布置，1.8m×1.8m

承载力及沉降计算与挤密砂桩+堆载预压区段相似，承载力计算时采用快剪指标。

3.2.3 高置换率挤密砂桩设计计算

(1) 承载力计算

本文同时采用理论和半经验半理论方法进行承载力计算。

1) 利用桩、土承载力复合法，复合地基承载力可根据桩体承载力及桩间土承载力叠加确定：

$$f_{\text{spk}} = mf_{\text{pk}} + (1 - m)f_{\text{sk}} \quad (1)$$

式中， f_{spk} ——复合地基承载力特征值，kPa；

f_{pk} ——桩体承载力特征值，kPa；

f_{sk} ——堆载预压区按处理后桩间土承载力特征值，kPa；

m ——桩土面积置换率。

2) 利用综合物理力学性能指标法, Terzaghi 地基承载力计算公式:

$$f_u = \frac{1}{2} \gamma b N_\gamma + \gamma_0 d N_q + c_k N_c \quad (2)$$

式中, f_u ——地基极限承载力, kPa;

c_k ——基底下—倍基础宽度的深度范围内土的黏聚力标准值, kPa;

γ_0 ——基础底面以上土的加权平均重度, 地下水位以下取浮重度, kN/m³;

d ——基础埋置深度, m;

γ ——基础底面以下土的重度, 地下水位以下取浮重度, kN/m³;

b ——基础宽度, m;

N_γ , N_q , N_c ——地基的承载力系数, 由复合地基的内摩擦角和黏聚力标准值采用相应公式计算。

3) 日本挤密砂桩复合地基承载力计算, 根据日本挤密砂桩设计与施工手册^[3], 挤密砂桩复合地基承载力 f_a 为

$$f_a = m f_{as} + (1 - m) f_{ac} \quad (3)$$

其中黏土地基承载力

$$f_{ac} = \frac{1}{F_s} \cdot c \cdot N_c \quad (4)$$

其中砂土地基承载力

$$f_{as} = \frac{1}{F_s} \cdot \frac{1}{2} \cdot b \cdot \gamma_s \cdot N_\gamma \quad (5)$$

式中, f_a ——挤密砂桩复合地基承载力容许值, kPa;

f_{as} ——砂土地基承载力容许值, kPa;

f_{ac} ——黏土地基承载力容许值, kPa;

m ——桩土面积置换率;

b ——基础宽度, m;

γ_s ——砂的重度, kN/m³;

N_γ ——砂地基的承载力系数, 由图 9 查取;

N_c ——黏土地基的承载力系数, 由图 9 查取;

c ——黏土的黏聚力, kPa;

F_s ——安全系数。

地基承载力计算结果表明: 三种方法承载力计算结果相近。

(2) 沉降计算

考虑挤密砂桩复合地基的应力折减效应, 复合地基的沉降 s 按式 (6) 计算: