碎石桩复合地基在船闸结构的应用

胡　皓，汤建宏
（中交水运规划设计院有限公司，北京 100007）

摘要：针对江西信江双港船闸因开挖范围受限而采用的振冲碎石桩复合地基处理方案，通过基于弹塑性本构模型的有限单元法进行数值模拟，并与实际观测数据进行对比分析，研究振冲碎石桩复合地基在船闸工程中的应用，着重分析碎石桩复合地基的沉降控制作用。通过有限元模型计算，得到复合地基的沉降量，并与现场观测数据进行对比。研究结论表明，有限单元法计算的沉降量与复合地基土体弹性模量呈线性负相关，增加复合地基土体弹性模量可有效降低沉降量；实测沉降量与采用现场平板载荷模量计算的模型较一致。

关键词：碎石桩复合地基；船闸；沉降

中图分类号：U641.3　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2025)05-0136-05

Application of stone columns composite foundation in ship lock structure

HU Hao, TANG Jianhong
(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: This study focuses on the vibro-replacement stone columns composite foundation treatment scheme adopted for the Jiangxi Xinjiang Shuanggang navigation lock due to limited excavation scope. Numerical simulations are conducted using the finite element method based on the elastoplastic constitutive model, and a comparative analysis is performed with actual observation data. The research investigates the application of vibro-replacement stone columns composite foundation in navigation lock engineering, with emphasis on analyzing the settlement control effect of the stone columns composite foundation. Through the finite element model calculations, the settlement of the composite foundation is obtained and compared with field observation data. The research conclusions indicate that the settlement calculated using the finite element method has a linear negative correlation with the elastic modulus of the composite foundation soil. Increasing the elastic modulus of the composite foundation soil can effectively reduce the settlement. The measured settlement is in good agreement with the model calculated using the field plate load modulus.

Keywords: stone columns composite foundation; ship lock; settlement

复合地基[1]指当天然地基不能满足建筑物对地基的要求时，对其进行处理形成人工地基，以满足建筑物的安全与正常使用。近年来，地基处理水平不断提高，复合地基在船闸工程中得到广泛应用[2]。振冲碎石桩复合地基在北运河甘棠船闸、哈尔滨发生渠船闸、滇池船闸等中小型船闸项目中得到广泛应用[3-5]；灌注桩或管桩复合地基在京杭运河穿黄[6]、水牛韩船闸等项目中得到了应用。对于大型船闸，合理控制沉降特别重要，其基础大多建在坚固的岩基上，少有采用复合地基的处理方式，工程经验尚不足。

江西信江双港船闸因开挖范围受限，采用了振冲碎石桩复合地基处理方案。本文结合双港船闸建设经验，采用基于弹塑性本构模型的有限单元法，将数值模拟结果与实际观测数据进行对比分析，研究中砂地层中的振冲碎石桩复合地基在船闸工程中的应用效果，并着重分析碎石桩复合地基的沉降控制作用。

收稿日期：2024-07-08

作者简介：胡皓（1992—），男，工程师，从事水工结构设计。

水运工程

1　工程概况

双港船闸位于信江下游近鄱阳湖的冲积滩地，地层分布均匀，自上而下分布有粉质黏土、淤泥质粉质黏土、中砂、局部圆砾、强风化泥岩或砂岩、中风化泥岩或泥质粉砂岩。局部地质剖面见图 1，各土层参数见表 1。

船闸主体结构的地基处理方案为振冲碎石桩方案，桩间距 2 m，桩长 4.5 m，桩径 1 m，三角形布置，范围为结构基础轮廓外扩 5 m 左右。闸室边墙结构高 21.5 m，底板厚 3.5 m，结构底宽 30.2 m，每个结构段长 20 m。船闸岸侧为半直立式支护结构，见图 2。

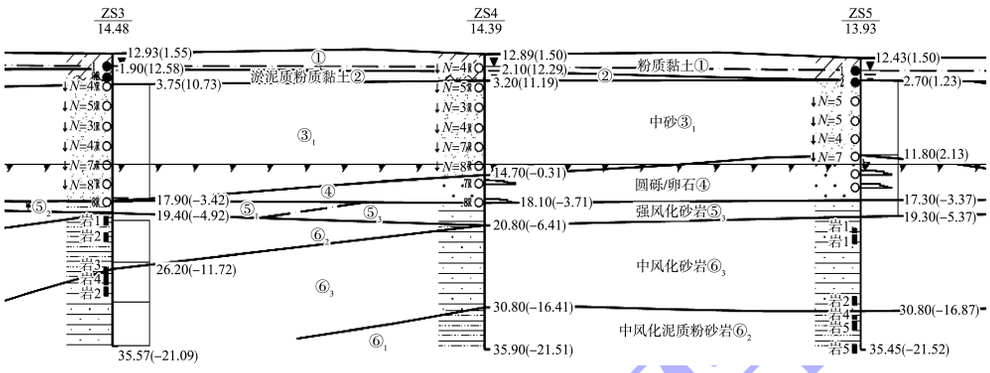


图 1　船闸地质剖面（单位：m）

Fig. 1　Geological cross-section of ship lock（unit：m）

表 1　岩土层地基承载力特征值及桩-土参数推荐值

Tab. 1　Characteristic values of foundation bearing capacity and recommended values of pile-soil parameters for rock and soil layers

岩土名称及层号	变形模量 E/MPa	承载力/kPa	抗剪断摩擦系数 f'/kPa	抗剪断黏聚力 c'/kPa	内摩擦角 ϕ/(°)	凝聚力 c/kPa
粉质黏土①	5. 10	140	–	–	13	20
淤泥质土②	2. 95	60	–	–	3	10
细中砂③$_1$	6. 00	90	–	–	28	–
圆砾④	20. 00	180	–	–	35	–
强风化砂岩⑤	150. 00	300	0. 28	70	–	–
中风化泥质粉砂岩⑥	1 000. 00	600	0. 50	150	–	–

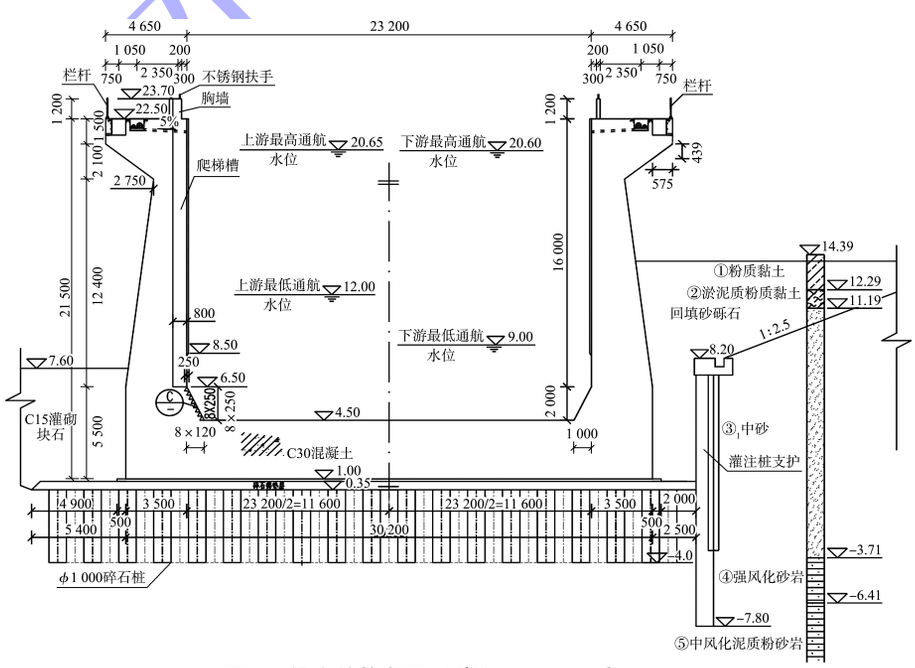


图 2　闸室结构断面（高程：m；尺寸：mm）

Fig. 2　Cross section of weir structure（elevation：m；dimension：mm）

2　有限单元计算法

2.1　计算假定

有限单元法是目前工程领域里主要的数值计算手段，在土工分析中得到愈来愈多的应用[7]。本文采用 ADINA 有限元软件模拟计算。

1）由于船闸仅岸侧填土，且考虑整体沉降最大工况为完建工况，故仅对施工期沉降进行分析，不考虑结构浇筑完成后墙后填土及水位变动的影响。

2）坝址处原状土为多年沉积土层，土体自身沉降已完成，故不考虑土体自重引起的变形。

3）因岩层压缩模量远大于地基土模量，且土层厚度较小，故不考虑附加应力在地基土体内的变化，地基土参数采用各土层沿厚度加权平均值计算公式为：

$$\overline{E}_s = \frac{\sum_{i=1}^{n} E_{sp,i} h_i}{\sum_{i=1}^{n} h_i} \tag{1}$$

式中：$\overline{E}_s$ 为地基土压缩模量加权平均值，MPa；$E_{sp,i}$ 为第 i 层土的压缩模量，MPa；h_i 为第 i 层土的土层厚度，m。

4）闸室结构采用 C30 混凝土线弹性模型。

5）岩土体采用各向同性的弹塑性模型，材料屈服采用 Mohr-Coulormb 准则。

目前，关于碎石桩地基处理设计参数的确定原则研究较少[8]，行业规范等各类实用计算方法中，复合地基沉降计算仍以工程经验为主。通常，复合地基沉降量通过分别计算加固区与下卧层的压缩量后求和得到。其中，复合地基加固区复合土层分层与天然地基相同，各复合土层的压缩模量等于该层天然地基压缩模量的 ζ 倍，ζ 为复合地基与天然地基的承载力特征值之比[9-10]。

根据 JGJ 79—2012《建筑地基处理技术规范》计算得出，复合地基承载力特征值为 183 kPa，复合地基模量取规范值 $\zeta=2$ 进行计算，并采用处理前土层参数、现场平板载荷实测值分别进行计算。各材料参数见表 2。

表 2　各材料参数

Tab. 2　Parameters of various materials

材料	E/MPa	ρ/(g·cm^{-3})	泊松比 μ	摩擦系数 f	φ/(°)	c/kPa
混凝土	30 000	2.5	0.167	–	–	–
原状土(中砂)	6	–	0.250	0.40	28	0
复合地基(规范值,$\zeta=2$)	12	–	0.250	0.45	36	0
复合地基(实测值,$\zeta=10$)	60	–	0.250	0.45	36	0
强风化砂岩	150	–	0.300	0.40	32	70
中风化泥质粉砂岩	1 000	–	0.300	0.40	50	150

2.2　计算模型

建立闸室结构段与基础的整体有限元模型，见图 3。

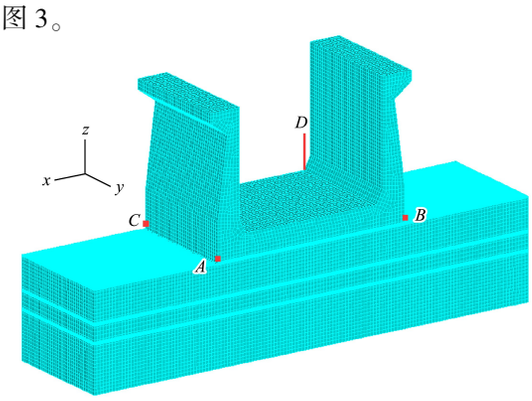


图 3　整体有限元模型

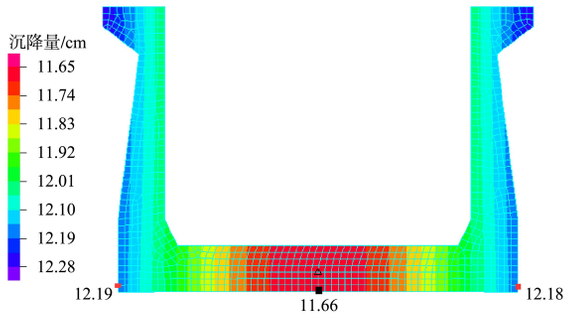
Fig. 3　Finite element model

计算整体模型中，x 为左岸方向、y 为上游方向、z 为高程。模型长度范围取单个结构段为 20 m；横向地基范围为结构段外边线外 20 m；竖向建基面以下依次为 5 m 厚复合地基土层、2.7 m 厚强风化岩层、7.3 m 厚中风化岩层。取结构 4 个角点为计算特征点。边界条件：闸室结构三向自由，地基岩体底面为全约束、侧面为法向约束。单元网格：闸室及地基岩土体以 0.5 m 间距六面体划分。

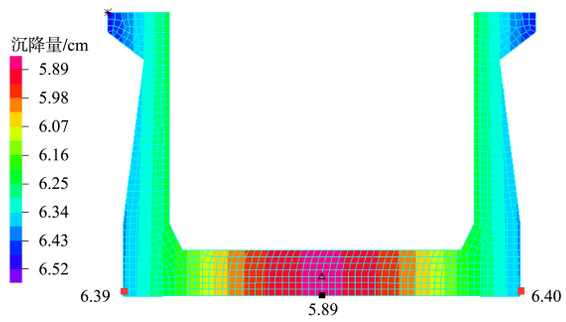
2.3　计算结果

有限元模型沉降量计算结果见图 4 和表 3。

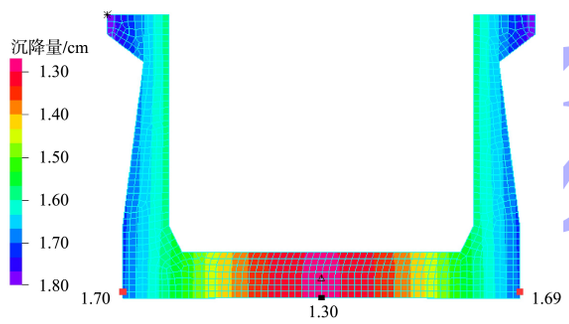
水运工程



a) 原状土(中砂)



b) 复合地基(规范值，ξ=2)



c) 复合地基(实测值，ξ=10)

图 4　有限元模型沉降量计算结果

Fig. 4　Settlement results of finite element model

表 3　各角点沉降量

Tab. 3　Settlement of each corner point

材料	各角点沉降量/cm				平均值/cm
	A	*B*	*C*	*D*	
原状土(中砂)	12.19	12.18	12.19	12.18	12.19
复合地基(规范值,$\zeta=2$)	6.39	6.40	6.39	6.40	6.40
复合地基(实测值,$\zeta=10$)	1.70	1.69	1.70	1.69	1.70

2.4　结果分析

1）由于假定岩土体为各向单一弹塑性体，各角点沉降值基本一致；2）沉降量与复合地基土体弹性模量基本呈线性负相关，复合地基模量增大比例基本等于沉降量减小比例；3）复合地基现场平板载荷试验实测模量较规范计算值大，相应得到的沉降量较小。

3　现场观测法

3.1　测量方法

每个闸室结构段底板各角点均布置 1 个位移标点，采用极坐标法测量垂直位移，测量精度±1 mm。

3.2　测量结果

选取自结构第 1 层混凝土浇筑完成至结构浇筑至顶的统计周期内，典型结构段结构观测点的累计沉降量实测值，结果见表 4。

表 4　实测沉降结果

Tab. 4　Measured settlement results

结构段	观测周期/d	各角点沉降量/cm				平均值/cm
		A	*B*	*C*	*D*	
1	168	2.70	1.50	1.20	1.10	1.63
2	224	1.60	1.40	0.40	2.20	1.40
3	231	1.40	2.30	2.40	1.80	1.98
4	210	1.60	0.70	1.20	1.50	1.25

3.3　结果分析

1）实测沉降量一定程度上受观测精度及观测误差影响；2）碎石桩复合地基施工受土层变化及施工设备等因素影响，各处施工质量不同，同一区域不同结构段的沉降量存在一定差异，同一结构段中各点沉降量也存在一定差异。

4　结论

1）本文以江西信江双港船闸工程为研究对象，探讨了振冲碎石桩复合地基在中砂地层中的应用效果，重点分析了其沉降控制作用。

2）振冲碎石桩复合地基的沉降控制效果显著。数值模拟结果表明，采用振冲碎石桩复合地基处理后，地基沉降量显著降低。原状土(中砂)的平均沉降量为 12.19 cm，而复合地基(规范值，$\zeta=2$)的平均沉降量降至 6.40 cm，复合地基(实测值，$\zeta=10$)的沉降量进一步降低至 1.70 cm。这表明复合地基的弹性模量与沉降量呈线性负相关，弹性模量越高，沉降控制效果越好。

3）现场观测数据验证了数值模拟的可靠性。

现场观测结果显示，典型结构段的平均沉降量为1.63~1.98 cm，与数值模拟结果(1.70 cm)基本吻合，验证了有限单元法在复合地基沉降分析中的适用性。同时，观测数据也反映了施工质量的不均匀性，因此施工过程中需严格控制振冲碎石桩的施工质量，以确保沉降均匀性。

4）复合地基的弹性模量对沉降控制起关键作用。研究表明，复合地基的弹性模量是影响沉降量的关键因素。实测复合地基弹性模量($\zeta=10$)显著高于规范值($\zeta=2$)，导致沉降量大幅降低。因此，在实际工程中，宜通过现场试验确定复合地基的弹性模量，以提高沉降控制的精度。

5）现场观测数据表明，同一结构段各点的沉降量存在一定差异，这与施工质量、土层变化及设备性能密切相关。因此，在实际工程中，需加强施工质量控制，确保振冲碎石桩的连续性和密实度，以实现均匀沉降。

6）双港船闸工程的成功应用表明，振冲碎石桩复合地基在中砂地层中具有良好的适用性，能够有效提高地基承载力并控制沉降，其应用可为类似工程提供参考。未来研究可进一步探讨复合地基在不同地质条件下的适用性及优化设计方法，以提升其工程应用效果。

参考文献：

[1] 龚晓南. 复合地基理论及工程应用[M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
GONG X N. Composite foundation theory and engineering application[M]. 3rd ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.

[2] 龚晓南, 杨仲轩. 地基处理新技术、新进展[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
GONG X N, YANG Z X. New technology and progress of foundation treatment[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.

[3] 尹艳青, 高宁, 于蕊. 振冲碎石桩技术在北运河甘棠船闸地基处理中的应用研究[J]. 水利建设与管理, 2023, 43(3): 80-84.
YIN Y Q, GAO N, YU R. Application of vibroflotation gravel pile technology in the foundation treatment of Gantang ship lock of North Canal[J]. Water conservancy construction and management, 2023, 43(3): 80-84.

[4] 张恒, 徐艳红. 哈尔滨北国水城水系工程发生渠船闸地基加固处理[J]. 黑龙江水利科技, 2013, 41(8): 131-133.
ZHANG H, Xu Y H. Foundation reinforcement treatment of shiplock in water diversion channel of Beiguo Shuicheng water system project in Harbin[J]. Heilongjiang science and technology of water conservancy, 2013, 41(8): 131-133.

[5] 吴泽宇. 滇池船闸、节制闸工程软基振冲加固处理[J]. 云南农业大学学报, 2001, 16(3): 213-217.
WU Z Y. Vibroflotation reinforcing treatment of soft clay foundation in the construction of navigation locks and control gates in Dianchi Lake[J]. Journal of Yunnan Agricultural University, 2001, 16(3): 213-217.

[6] 何良德, 王航, 黄挺, 等. 厚覆盖层高水头船闸闸室-省水池布置及地基处理方法[J]. 水运工程, 2022(3): 71-77.
HE L D, WANG H, HUANG T, etal. Layout of lock chamber-water saving basin and foundation treatment method of high head ship lock with thick overburden[J]. Port & waterway engineering, 2022(3): 71-77.

[7] 龚晓南, 杨仲轩. 岩土工程计算与分析[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
GONG X N, YANG Z X. Geotechnical engineering calculation and analysis[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.

[8] 李汉渤, 梁小丛, 徐雄, 等. 基于国内外规范文献对比分析的碎石桩地基处理设计参数确定[J]. 水运工程, 2022(6): 202-208.
LI H B, LIANG X C, XU X, etal. Determination of design parameters for foundation treatment of stone columns based on comparative analysis of domestic and foreign codes and reference[J]. Port & waterway engineering, 2022(6): 202-208.

[9] 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Technical code for ground treatment of buildings: JGJ 79-2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.

[10] 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.
Code for design of building foundation: GB 50007-2011[S]. Beijing: China Planning Press, 2011.

(本文编辑 王传瑜)

水运工程