

# 基于正交试验法的水闸软土地基 参数敏感性分析

魏 炜<sup>1</sup>, 陈 坚<sup>2</sup>, 刘连建<sup>3</sup>, 徐纯霞<sup>4</sup>, 张 旭<sup>4</sup>, 茆福文<sup>2</sup>

(1. 河海大学 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 淮安市水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 淮安 223000;

3. 淮安市水利局, 江苏 淮安 223000; 4. 涟水县水利局, 江苏 淮安 223400)

**摘要:**软土地基上水闸的沉降问题历来为水利学者们所关注的热点之一, 重点关注复杂软土地基的参数变化对水闸整体沉降量的影响。以某实际水闸闸室结构为例, 借助数值仿真分析手段, 采用 Mohr-Coulomb 模型模拟复杂软土地基, 计算水闸在不同地基参数情况下的沉降量, 并基于正交试验法分析地基参数的敏感性, 为沿海地区水闸枢纽结构安全设计提供可靠依据和技术支撑。结果表明, 在较为复杂的软土地基上, 土的弹模与密度是影响水闸沉降量的重要因素。

**关键词:**软土地基; 水闸; 正交试验法; Mohr-Coulomb 模型; 敏感性

中图分类号: TV66

文献标识码: B

文章编号: 1007-7839(2021)05-0017-06

## Sensitivity analysis of sluice soft soil foundation parameters based on orthogonal test method

WEI Wei<sup>1</sup>, CHEN Jian<sup>2</sup>, LIU Lianjian<sup>3</sup>, XU Chunxia<sup>4</sup>, ZHANG Xu<sup>4</sup>, MAO Fuwen<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology - Water Resources and Hydraulic Engineering,  
Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Huai'an Water Conservancy Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Huai'an 223000, China;

3. Huai'an Water Resources Bureau, Huai'an 223000, China;

4. Lianshui Water Resources Bureau, Huai'an 223400, China)

**Abstract:** The settlement of sluice on soft soil foundation has always been one of the hot issues concerned by hydraulic scholars, especially focusing on the influence of parameter changes of complex soft soil foundation on the overall settlement of sluice. Taking an actual sluice chamber structure as an example, with the help of numerical simulation analysis methods, the Mohr-Coulomb model was used to simulate complex soft soil foundations, the settlement of the sluices under different foundation parameters was calculated, and the sensitivity of foundation parameters was analyzed based on the orthogonal test method, which could provide reliable basis and technical support for the structural safety design of sluice hubs in coastal areas. The results showed that the elastic modulus and density of the soil on the complex soft soil foundation were the important factors affecting the settlement of sluice.

**Key words:** soft soil foundation; sluice; orthogonal test method; Mohr-Coulomb model; sensitivity

收稿日期: 2020-11-20

基金项目: 江苏省水利科技项目(2019008)

作者简介: 魏炜(1993—), 男, 博士研究生, 主要从事水工结构研究。E-mail: 286052993@qq.com

## 1 研究背景

近年来,我国沿海地区水闸建设频繁,这些地区多为软土地基,土层性质复杂且土质松软,其地基承载力一般有所欠缺,容易引起闸室整体位移与不均匀沉降。当不均匀沉降过大时,就会对闸室整体造成影响,其危害主要表现为闸堤连接段或闸室与上下游翼墙连接段产生错位、裂缝,止水拉裂,防渗失效,最终导致出现闸基渗透或侧向绕渗破坏,闸室结构出现裂缝<sup>[1-2]</sup>。因此,在水闸工程建设中,对闸室沉降问题的研究很有必要。

针对上述现象,很多学者提出了自己的想法与理论。其方向主要分为两种,一是改变水闸建筑物的刚度和体型以适应地基变形的均匀性,如韩政元<sup>[3]</sup>以新疆乌苏市车排子中型灌区石桥干渠松软地基分水闸建设为例,分析了软弱地基上节制分水闸整体结构的稳定性;王璇等<sup>[4]</sup>以开敞式水闸为例,采用图形处理软件(SGR)计算了多种地基下的水闸结构内力;崔朕铭等<sup>[5]</sup>利用 ANSYS 软件的优化模块进行寻优搜索,以总造价最低为目标函数,得到了一定条件下的水闸整体结构优化设计方案;其二是通过在软弱地基进行处理来增加地基强度,使其能够满足水闸正常运行的要求,保证水闸的安全与正常使用。如涂雄生<sup>[6]</sup>提出在软土地基的水闸地基处理中采用水泥粉煤灰碎石桩法(CFG)使复合软土地基承载力调高,变形减小;纪中庭<sup>[7]</sup>利用沉降控制复合桩增加了软土基水闸施工的稳定性和安全性。截至目前,尽管软土地基上水闸的建设理论与方法已经日渐完善,但是导致水闸变形沉降的因素仍然需要进一步分析,尤其是在某些复杂的软土地基环境下<sup>[8-9]</sup>。本文利用数值仿真模拟了真实水闸的受力情况,并基于正交试验法分析了复杂软土地基上水闸的地基参数对水闸沉降量大小的敏感性。

## 2 正交试验方法

传统的参数敏感性分析大多采用单因素分析法,即指选定一个指标值,使其中一个参数变化,同时假定其他参数保持不变,通过比较基准指标值随参数变化曲线来直观反映各参数的敏感性大小。这种方法虽然方便,却不适用于多参数情况,正交试验法是研究多因素多水平的一种设计方法,其本身来源于 Galois 理论,通过挑选部分有代表性的水平组合进行试验并对结果进行分析找出最优的水

平组合<sup>[10-11]</sup>。由于正交表具有均衡分散性和整齐可比性的构造原则,因此,按照此方法设计的试验次数少,并且能反映事物的客观规律,具有较高的计算效率。

### 2.1 正交试验表

正交试验法核心是用正交试验表作为基本工具进行分析,在正交试验中把所考察的结果称为指标,把对试验指标可能有影响的参数称为因素,把每个因素在试验中要比较的具体试验条件称为水平。正交表表示如下

$$L_n(t^c)(i=1,2,\dots,n) \quad (1)$$

式中: $L$  为正交表的代号; $n$  为总共试验次数; $t$  为因素的水平数; $c$  为正交表列数,即可以安排的最多的因素个数。正交表是正交试验设计的关键,它必须满足以下两个条件:每一列(因素)的不同水平在试验中出现的次数相同,以保证其均匀性;任意两列(因素)的不同水平组合组成的数对在试验中出现的次数相同,以保证试验点分布的均匀性。只有满足这两个条件,才能方便、全面的反映试验结果。表 1 所示为  $L_9(3^4)$  4 因素、3 水平的正交表。

表 1  $L_9(3^4)$  正交表

试验号	1	2	3	4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

### 2.2 正交试验结果分析方法

按照正交表设计的试验进行分析,计算各试验的指标值,根据试验结果判断各因素对指标影响的敏感性大小。本文采用极差分析法对正交试验结果数据进行分析。其基本原理如下:

设  $A, B$  分别表示试验中的不同因素; $t$  为因素的水平数; $A_i$  表示因素  $A$  的第  $i$  个水平值,  $i=1, 2,$

$\cdots, t; X_{ij}$  表示因素  $j$  的第  $i$  个水平值,  $i = 1, 2, \cdots, n$ ;  $j = A, B, \cdots$ 。在  $X_{ij}$  下进行  $n$  次试验得到  $n$  个试验结果  $Y_k, k = 1, 2, \cdots, n$ 。

计算统计参数为:

$$K_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n Y_k - \bar{Y} \quad (2)$$

式中:  $K_{ij}$  为因素  $j$  在  $i$  水平下各次试验结果平均值;  $n$  为因素  $j$  在  $i$  水平下的试验次数;  $Y_k$  为第  $k$  个试验指标值;  $\bar{Y}$  为所有试验结果的平均值。

极差法分析因素敏感性的评价标准是各因素的极差值  $R_j$ , 其定义为该因素各水平下计算的统计参数  $K_{ij}$  的最大值与最小值的差值。计算公式为:

$$R_j = \max\{K_{1j}, K_{2j}, \cdots\} - \min\{K_{1j}, K_{2j}, \cdots\} \quad (3)$$

极差值  $R_j$  越大, 表明该因素的水平改变对试验指标的影响越大, 即该因素的敏感性越大; 相反, 极差值  $R_j$  越小, 因素的敏感性越小。

### 3 水闸沉降量算例分析

以东南沿海某水闸枢纽为例, 该水闸建立在软土地基上, 包括 1 座孔径 23 m 的节制闸和双主横梁弧形钢闸门, 设计总流量为  $32.10 \text{ m}^3/\text{s}$ , 共布置 2 台轴伸式贯流水轮机组, 对称布置在节制闸两侧。水闸、电站采用整底板结构, 底板总宽 43.40 m, 顺水流向长 32.40 m。闸室周围地基土材料多样且复杂, 包括淤泥质土、粉质黏土和重粉质沙壤土等。

#### 3.1 有限元模型

根据水闸所处的地形以及地质条件, 建立水闸枢纽三维有限元模型, 如图 1 所示, 闸室周围土体为半无限大, 在计算时, 在上、下游方向取至水闸上、下游连接段边界到闸基端部处, 包括整个闸室底板; 在顺河向方向各取约 1 倍水闸长度的土体

(约 60 m); 在横河向各取约 1 倍水闸宽度范围(约 60 m)的土体; 在深度方向闸室向下取约 2.5 倍水闸高度范围(约 37 m)的土体。方案有限元模型坐标系取为: 0 点设在水闸铺盖右侧上游高程零点,  $x$  轴沿河流方向指向下游,  $y$  轴在横河向方向由南岸指向北岸,  $z$  轴垂直指向上方, 采用 Hypermesh 有限元剖分软件进行剖分, 模型(主要为六面体单元)总数为 108 905 个, 结点总数为 128 140 个。建模时根据计算需要, 对模型范围进行局部调整。

#### 3.2 计算参数

计算时, 水闸材料按线弹性材料考虑, 取材料密度  $\rho_d = 2500 \text{ kg/m}^3$ , 弹性模量分别取  $E = 28 \text{ GPa}$  (C25) 和  $E = 30 \text{ GPa}$  (C30) (默认模型的减胀角和等效塑性应变为 0), 地基土层采用 Mohr-Coulomb 本构模型。计算所考虑的荷载中, 水荷载取运行期校核工况, 上游水位 9.5 m, 下游水位 2.04 m; 底轴下卧闸门所受上游水推力按作用于底轴上的等效节点力施加; 节制闸两侧地基范围施加相应闸段的等效面力; 闸基的渗透力按面力考虑, 给闸底板施加扬压力; 桩土间默认不发生滑动。在有限元计算区域边界约束中, 考虑到模型模拟的范围已足够大, 故假定模型周边不存在水平位移, 采用水平连杆连接, 模型底部的岩石地基采用固结约束。

#### 3.3 试验设计

正交试验设计步骤如下:

(1) 选取试验指标。根据参数敏感性分析中试验指标的选取原则, 考虑到桩土结构在自重和水荷载作用下, 沉降变形对水闸的影响较大, 因此, 选择多个点的变形沉降量  $H_n$  ( $n = 1, 2, \cdots, 5$ ) 作为参数敏感性分析的主要试验指标, 其中各沉降点位置如图 2 所示。

(2) 确定试验因素和因素水平。本文以水闸枢

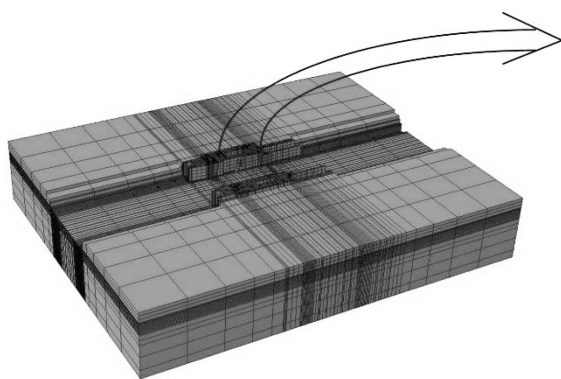


图1 东南沿海某水闸模型

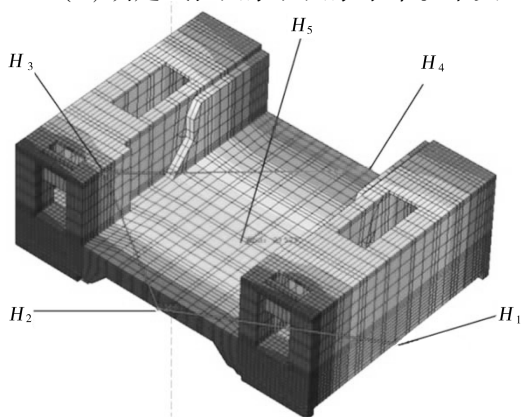


图2 闸室模型沉降点

组变形沉降量作为敏感性分析的研究对象,以室内试验参数为基础,在敏感性分析中每个计算参数按正负 20% 的增减量作为 3 个试验水平,选择 Mohr - Coulomb 模型中的  $\rho$ 、 $E$ 、 $c$ 、 $\varphi$  总共 4 个参数进行敏感性分析。软土地基各土层计算参数、参数敏感性分析的试验因素和各因素水平如表 2 所示。

(3) 选择正交表设计试验。假定模型中各参数之间无交互作用,根据试验因素个数和因素水平数,选择  $L_9(3^4)$  正交表安排试验,将试验因素随机

分配到表 3 中前 4 列,将正交表中每个元素按其对应的因素和水平替换成相应的设计参数值,即得到软土地基参数敏感性分析的正交试验表,表中每一行对应因素水平组合即为一个试验方案,将试验指标各点变形沉降量  $H_n$  ( $n = 1, 2 \cdots 5$ ) 列在正交试验表的后 5 列。

按表 3 所示  $L_9(3^4)$  正交试验表,计算每种方案下的试验指标  $H_n$  ( $n = 1, 2 \cdots 5$ ),计算结果列在表 3 中。

表 2 回填土材料参数及实验因素

材料	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$E/\text{Pa}$	$\varphi$	$c$	增减量/%
回填土 1	1476	27060000	9.6	12000	20
回填土 2	1230	22550000	8	10000	0
回填土 3	984	18040000	6.4	8000	-20
淤泥质土 1	1476	27060000	9.6	12000	20
淤泥质土 2	1230	22550000	8	10000	0
淤泥质土 3	984	18040000	6.4	8000	-20
粉质黏土 1	1800	38580000	20.4	57000	20
粉质黏土 2	1500	32150000	17	47500	0
粉质黏土 3	1200	25720000	13.6	38000	-20
重粉质沙壤土 1	1812	55980000	28.56	8400	20
重粉质沙壤土 2	1510	46650000	23.8	7000	0
重粉质沙壤土 3	1208	37320000	19.04	5600	-20

表 3 正交表设计试验

试验号	1	2	3	4	$H_1/\text{mm}$	$H_2/\text{mm}$	$H_3/\text{mm}$	$H_4/\text{mm}$	$H_5/\text{mm}$
1	1	1	1	1	88.0	96.4	88.0	78.7	86.6
2	1	2	2	2	107.6	117.3	107.6	96.1	105.8
3	1	3	3	3	140.0	150.1	140.2	124.8	136.6
4	2	1	2	3	77.4	83.6	77.4	70.9	76.4
5	2	2	3	1	92.8	100.1	92.8	84.2	91.3
6	2	3	1	2	111.1	121.7	111.1	101.8	110.9
7	3	1	3	2	68.1	72.3	68.2	61.7	66.1
8	3	2	1	3	77.7	84.5	77.7	71.0	77.0
9	3	3	2	1	96.7	105.0	96.7	87.7	95.6

3.4 结果分析

计算结果分析, 对表 3 中各指标  $H_1$ 、 $H_2$ 、 $H_3$ 、 $H_4$ 、 $H_5$  (各点沉降值) 的影响因素进行极差分析并填入表 4 ~ 8 中。结果显示, 各因素对指标  $H$  (沉降值) 的敏感性由大到小依次为:  $E > \rho > \varphi > c$ 。对试验指标  $H_n$  ( $n=1, 2 \cdots 5$ ) 的极差分析结果进行整理, 按照各因素对试验指标的极差值大小绘制极差值柱状图, 如图 3 所示。

表 4  $H_1$  位置闸室沉降量

$H_d$	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$E/\text{Pa}$	$\varphi$	$c$
$K_1$	111.8	77.8	92.2	92.5
$K_2$	93.7	92.7	93.9	95.6
$K_3$	80.8	115.9	100.3	98.3
$R_{j1}$	31.0	38.1	8.1	5.9

表 5  $H_2$  位置闸室沉降量

$H_d$	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$E/\text{Pa}$	$\varphi$	$c$
$K_1$	121.3	84.1	100.9	100.5
$K_2$	101.8	100.6	102.0	103.8
$K_3$	87.3	125.6	107.5	106.1
$R_{j2}$	34.0	41.5	6.6	5.6

表 6  $H_3$  位置闸室沉降量

$H_d$	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$E/\text{Pa}$	$\varphi$	$c$
$K_1$	111.9	77.8	92.3	92.5
$K_2$	93.8	92.7	93.9	95.6
$K_3$	80.9	116.0	100.4	98.4
$R_{j3}$	31.1	38.1	8.1	5.9

表 7  $H_4$  位置闸室沉降量

$H_d$	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$E/\text{Pa}$	$\varphi$	$c$
$K_1$	99.9	70.4	83.8	83.5
$K_2$	85.6	83.8	84.9	86.5
$K_3$	73.5	104.7	90.2	88.9
$R_{j4}$	26.4	34.3	6.4	5.4

表 8  $H_5$  位置闸室沉降量

$H_d$	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$E/\text{Pa}$	$\varphi$	$c$
$K_1$	109.7	76.4	91.5	91.2
$K_2$	92.8	91.4	92.6	94.3
$K_3$	79.6	114.4	98.0	96.7
$R_{j5}$	30.1	38.0	6.5	5.5

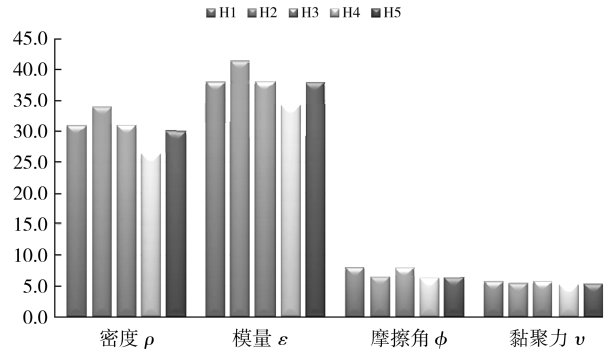


图 3 各试验指标的极差值大小绘制极差值柱状图

极差最大的因素为敏感性最大的因素, 对试验指标的影响也最大, 因此, 可以根据图中各参数的极差值大小判断其对各试验指标的敏感性大小。整体来看, 参数  $E$  和  $\rho$  对于闸室整体位移的影响大, 其中  $E$  的敏感性最大, 其次是  $\rho$ ; 参数  $\varphi$  和  $c$  对闸室整体位移影响较小, 敏感性不如参数  $E$  和  $\rho$ 。

4 结 论

本文基于正交试验法, 进行了复杂软土地基上水闸沉降变形的参数敏感性计算, 研究了 Mohr - Coulomb 模型中各计算参数对水闸整体沉降变形的敏感性, 研究结果表明: Mohr - Coulomb 分析模型中参数  $E$ 、 $\rho$  对计算结果影响显著, 参数敏感性高; 而参数  $\varphi$ 、 $c$  对计算结果影响较小, 参数敏感性较低。因此, 在复杂软土地基上水闸的参数反演分析中, 可以重点考虑这些敏感性高的参数取值, 不仅能够大大减少反演计算量, 还能提高反演分析的效率, 保证反演结果的正确性。本文的研究成果可以为复杂软土地基上水闸的沉降变形计算提供一定的参考。

参考文献:

[1] BJERRUM L. Problems of soil mechanics and construction on soft clays[C]//Proc. the 8th International Conference SMFE. Moscow:[s. n.], 1973:111-159.

- [2] BISHOP AW. The strength of soils as engineering materials[J]. Geotechnique, 1966, 16:91-128.
- [3] 韩正元. 松软地基节制分水闸整体结构稳定性模拟分析[J]. 水利科技与经济, 2016, 22(7):52-54.
- [4] 王璇, 胡为平. 软土地基上水闸结构内力分析比较[J]. 中州煤炭, 2016(2):80-83.
- [5] 崔朕铭, 蔡新, 黄海田, 等. 软土地基上水闸整体结构优化设计[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(1):86-89.
- [6] 涂雄生. CFG 桩法在软土地基水闸闸基处理中的应用研究[J]. 小水电, 2020(3):24-26.
- [7] 纪中庭. 水闸设计中沉降控制复合桩基应用[J]. 水利天地, 2017, 3(7):84-86.
- [8] 陈仲颐, 周景星, 王洪瑾. 土力学[M]. 北京:清华大学出版社, 1997.
- [9] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 2 版. 北京:中国水利水电出版社, 1996.
- [10] 郭小刚, 杨尚. 基于正交设计法的刚性桩复合地基模型参数敏感性分析[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2015, 37(3):15-20.
- [11] 李炎隆, 李守义, 丁占峰, 等. 基于正交试验法的邓肯-张 E-B 模型参数敏感性分析研究[J]. 水利学报, 2013, 44(7):873-879.

(上接第 12 页)

#### 参考文献:

- [1] FAO. Statistical databases[DB/OL]. [2019-01-23] <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
- [2] 国家统计局. 国家数据[DB/OL]. [2019-01-23] <http://data.stats.gov.cn/search.htm?s=%E7%A8%BB%E8%B0%B7%E4%BA%A7%E9%87%8F>.
- [3] CANFIELD D E, GLAZER A N, FALKOWSKI P G. The evolution and future of earth's nitrogen cycle[J]. Science, 2010, 330(6001):192-196.
- [4] 冯涛, 杨京平, 施宏鑫, 等. 高肥力稻田不同施氮水平下的氮肥效应和几种氮肥利用率的研究[J]. 浙江大学学报:农业与生命科学版, 2006, 32(1):60-64.
- [5] YAN X Y, TI C P, VITOUSEK P, et al. Fertilizer nitrogen recovery efficiencies in crop production systems of China with and without consideration of the residual effect of nitrogen[J]. Environmental Research Letters, 2014, 9(9):1-9.
- [6] ZHAO X, ZHOU Y, MIN J, et al. Nitrogen runoff dominates water nitrogen pollution from rice-wheat rotation in the Taihu Lake region of China[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2012, 156(4):1-11.
- [7] 袁凤英, 朱孔杰, 李秀芹, 等. 浅谈含氨基酸水溶肥的应用[J]. 山东化工, 2015, 44(14):111-112, 115.
- [8] 贾娟, 李硕, 高夕彤, 等. 氨基酸水溶肥与菌剂配施对松花菜生长及土壤生态特征的作用效果[J]. 河北农业大学学报, 2018, 41(1):17-23.
- [9] 王兰天. 含氨基酸水溶肥料在玉米和白菜上的应用效果研究[J]. 河南科学, 2013, 31(7):972-974.
- [10] Zhu Z., Zhang F. G., Wang C., et al. Treating fermentative residues as liquid fertilizer and its efficacy on the tomato growth[J]. Scientia Horticulturae, 2013, 164:492-498.
- [11] 许会会, 陈光, 王春夏, 等. 含氨基酸水溶肥对葡萄产量与质量及经济效益的影响[J]. 现代农业科技, 2018(24):57, 60.
- [12] 陈锐浩. 肥水灌溉技术在水稻上的应用研究[D]. 广州:华南农业大学, 2016.