



# 广西航运枢纽工程卵砾石层岩土 物理力学参数取值<sup>\*</sup>

韦世贵

(广西交通设计集团有限公司, 广西 南宁 530029)

**摘要:** 影响岩土工程参数选取的因素很多, 在水电、航运枢纽工程涉及的问题更为复杂, 常规的试验方法得到的指标往往不能反映真实环境条件。通过对那吉航运枢纽、鱼梁航运枢纽、老口航运枢纽在竖井、基坑等进行现场直剪、荷载试验等原位测试, 并对现场取原状样进行室内试验, 获取卵砾石层的物理力学参数取值基础资料, 采用 FRWS 软件对  $m$  值进行反演分析。结果表明, 卵砾石层的垂直基床系数、水平基床系数随着卵砾石层密实程度的增加而增加; 依靠荷载试验得到的圆砾层基床系数比规范给出的经验值偏大, 但也在合理范围之内; 反演得出的  $m$  值, 比规范中非岩石地基  $m$  的经验值小, 鉴于规范中主要为桩基的  $m$  值, 故最终结果以反演分析结果为准。

**关键词:** 岩土参数; 原位测试; 回归分析; 荷载试验; 反演分析

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)07-0180-08

## Value of rock and soil physical and mechanical parameters of gravel layer in Guangxi shipping hub project

WEI Shigui

(Guangxi Communications Design Group Co., Ltd., Nanning 530029, China)

**Abstract:** There are many factors affecting the selection of geotechnical engineering parameters, and the problems involved in hydropower and shipping hub projects are more complex. The indexes obtained by conventional test methods often cannot reflect the real environmental conditions. In this paper, in-situ tests of the direct shear test and load test in Naji shipping hub, Yuliang shipping hub and Laokou shipping hub are carried out in the vertical shaft, foundation pit etc, and original samples are taken from the site for laboratory tests to obtain the basic data of the physical and mechanical parameters of gravel layer. FRWS software is used for back analysis of  $m$  values. The results show that the vertical and horizontal subgrade coefficients of cobble layer increase with the increase of cobble layer density. The subgrade coefficients of gravel bed obtained by load test are larger than the empirical values given in the code, but the values are within the reasonable range. The  $m$  values obtained by back analysis are smaller than the empirical values of  $m$  in the code which belong to the empirical value of pile foundation. So the final results shall be subject to the back analysis results.

**Keywords:** geotechnical parameter; in-situ test; regression analysis; load test; back analysis

目前, 对于航运枢纽工程的岩土物理力学参数取值通常采用 2 种方法: 1) 现场取样进行室内

试验, 并对试验结果采用不同的方法进行统计, 从而获取岩土物理力学参数; 2) 在现场通过开挖

收稿日期: 2022-09-31

\*基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52268062)

作者简介: 韦世贵 (1979—), 男, 高级工程师, 从事岩土工程勘察设计与研究。

竖井、基坑等开展现场试验从而获取岩土物理力学参数。第 2 种方法受现场条件的限制, 在勘察前期不易执行, 费用高; 第 1 种方法较易执行, 也是目前通常使用的方法, 但影响岩土工程参数选取的因素很多, 有岩土层的类别、成因、地质特征、工程特点以及地区经验、勘察人员的水平等, 在水电、航运枢纽工程涉及的问题更为复杂, 主要反映在航运枢纽工程设计中必须对船闸、挡水坝闸、水电站等工程的地基抗滑稳定、地基应力与变形、开挖边坡稳定等问题进行计算分析<sup>[1]</sup>。常规的试验方法得到的指标往往不能反映真实环境条件, 如何通过各种试验, 采用不同的统计方法获得准确、可靠的地质参数, 为方案设计、施工等提供地质依据, 成为重大技术课题。

在岩土参数相关性研究方面, 国内外学者做了大量的工作, 如 Collotta 等<sup>[2]</sup>提出了黏性土的残余摩擦角、级配和物理指标特性的相关关系; 张广文等<sup>[3]</sup>对全国 95 个已建土石坝工程各种土料指标进行概率统计分析; 翟静阳等<sup>[4]</sup>根据湖南地区的土工试验资料, 研究黏性土的力学指标与物理指标的变异性及其相关关系; 王建秀等<sup>[5]</sup>分析残坡积黏性土各物理力学性质之间的相关性; 吴礼年等<sup>[6]</sup>对合肥地区具有代表性的 616 个黏性土试样的试验结果进行分析, 建立土性指标的线性方程; 赖天文等<sup>[7]</sup>分析神延铁路陕北段黄土的物理、力学性质指标的变异性及相关性。

本文通过对那吉航运枢纽、鱼梁航运枢纽、老口航运枢纽在竖井、基坑等开展现场直剪、荷载试验等原位测试, 并对现场取原状样进行室内试验, 获取卵砾石层的物理力学参数取值基础资料, 并采用 FRWS v9.0 对  $m$  值进行反演分析, 从而获取卵砾石层的岩土参数, 为类似工程提供借鉴和参考。

## 1 岩土参数传统统计方法

传统数理统计方法的一般步骤包括: 异常数据的取舍、数据自相关性检验、最小样本数检验、

统计分析计算等。根据 GB 50021—2001(2009 年版)《岩土工程勘察规范》<sup>[8]</sup>第 14.2 条, 对岩土层指标分别进行统计。在统计过程中, 岩土层指标数据的粗差剔除原则上采用 3 倍标准差法, 个别数据由于岩土层的不均匀性或为夹层而造成数据离散性明显较大的, 予以剔除。

## 2 岩土参数样本数据的来源

岩土参数样本数据的来源主要有 2 个方面: 1) 收集的以往勘察数据资料, 其样本数据量大, 体现了该地区岩土参数的经验积累, 能反映岩土参数的地域性特点; 2) 通过工程地质原位测试获得的数据资料, 其样本数据有限, 在进行统计分析时, 可能会出现由于试验数据不足引起的统计参数的偏差。

## 3 卵砾石层物理力学参数取值研究

### 3.1 卵砾石层物理力学参数试验

通过对那吉、鱼梁、老口 3 个航运枢纽工程的卵砾石层取样后进行室内试验, 以鱼梁枢纽为例, 卵砾石层颗粒分析曲线见图 1。可以看出, 样品物质组成主要以粒径 2~20 mm 的圆砾为主, 其占样品总质量的 35.2%~62.7%, 卵石含量占样品总质量的 3.8%~32.3%, 大于 2 mm 的颗粒超过土总质量的 50%, 粒径小于 2 mm 颗粒含量占土样总质量的 20.2%~41.4%。

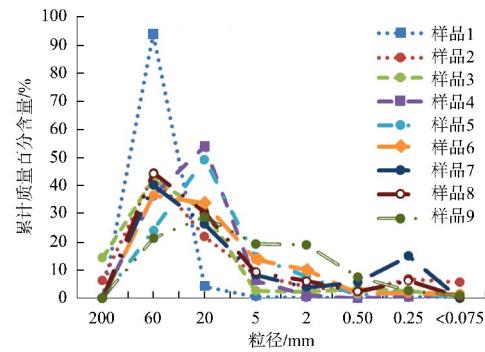


图 1 鱼梁枢纽卵砾石层颗粒分析曲线

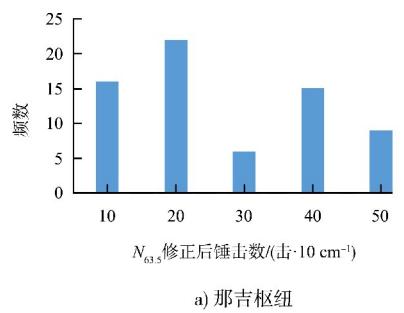
### 3.2 重型动力触探试验结果分析

在基坑内开展直剪及垂直、水平荷载试验, 相应的点位进行重型圆锥动力触探, 试验区域卵

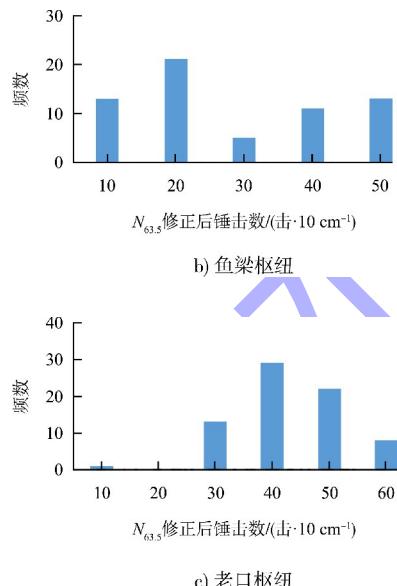
砾石层密实程度为稍密-密实。对卵砾石的锤击数进行统计分析得出卵砾石层圆锥动力触探试验成果, 见表 1。经杆长修正后卵砾石层锤击数频率分布直方图见图 2。

表 1 卵砾石层重型动力触探试验结果

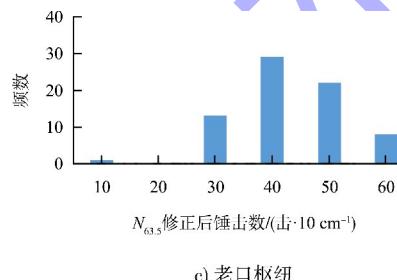
枢纽名称	样本总数/个	统计个数/个	锤击数/(击·10 cm <sup>-1</sup> )			变异系数	
			最大值	最小值	平均值		
那吉	101	94	49.0	1.0	17.2	4.6	0.63
鱼梁	74	67	50.0	6.3	24.7	14.9	0.60
老口	84	73	60.0	3.4	37.2	11.3	0.30



a) 那吉枢纽



b) 鱼梁枢纽



c) 老口枢纽

图 2 卵砾石层重型动力触探频率分布直方图

### 3.3 卵砾石层直接剪切试验结果分析

卵砾石层直接剪切试验结果见表 2, 代表性测点的法向应力与剪切应力曲线见图 3。由表 2 可看出, 卵砾石层黏聚力介于 0~0.3 kPa, 内摩擦角介于 26.8°~37.2°。

表 2 卵砾石层直接剪切试验结果表

枢纽名称	测点编号	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	密实程度
那吉枢纽	JK1~3	0.2	27.9	稍密
	JK4~6	0.0	30.5	中密
鱼梁枢纽	SJ1~3	0.0	26.8	中密
	SJ4~6	0.3	28.7	密实
老口枢纽	TK1~3	0.0	37.2	密实

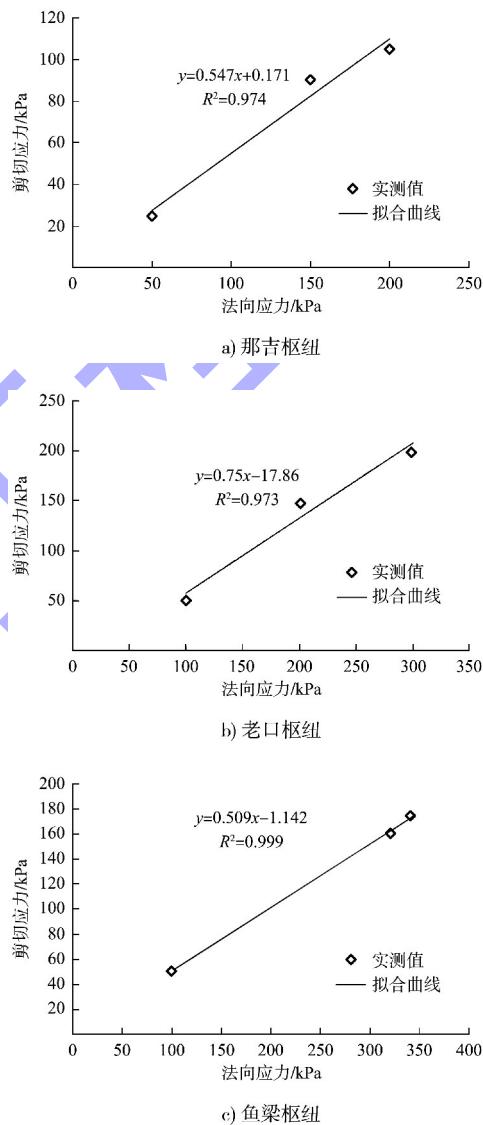


图 3 代表性测点的法向应力-剪切应力曲线

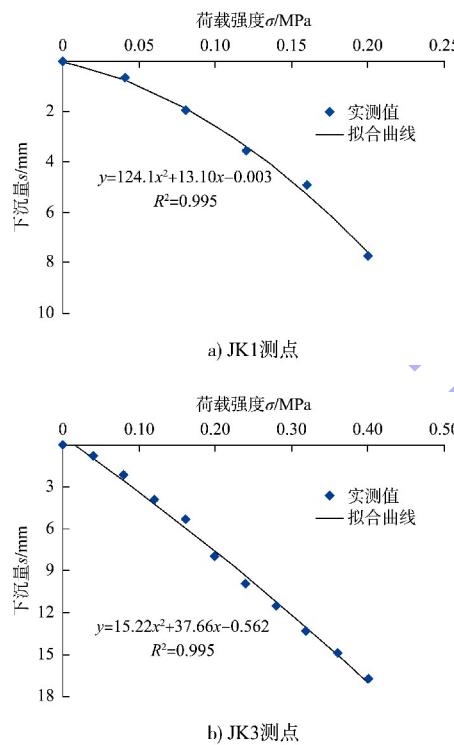
### 3.4 卵砾石层垂直荷载试验结果分析

在上述重型动力触探及直剪试验现场相应的位置进行垂直荷载试验, 得出卵砾石层垂直荷载试验结果, 对  $\sigma-s$  (荷载-沉降) 关系曲线进行拟合, 回归分析后得到垂直基床系数  $K_v$ , 见表 3;

那吉枢纽代表性测点的  $\sigma-s$  关系曲线见图 4。由表 3 可看出, 卵砾石层平均垂直基床系数为 37.7~98.6 MPa/m, 平均值为 70.0 MPa/m, 且整体上垂直基床系数随卵砾石层密实程度的增加而增加。

表 3 卵砾石层垂直基床系数

枢纽名称	测点编号	$K_v / (\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1})$	$K_v$ 平均值 / ( $\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$ )	密实程度
那吉枢纽	JK1~3	32.8~42.5	37.7	稍密
	JK4~6	51.6~65.1	56.6	中密
鱼梁枢纽	SJ1~3	70.2~83.4	74.7	中密
	SJ4~6	92.7~108.8	98.6	密实
老口枢纽	TK1~3	76.2~86.4	82.4	密实

图 4 那吉枢纽代表性测点垂直荷载试验  $\sigma-s$  关系曲线

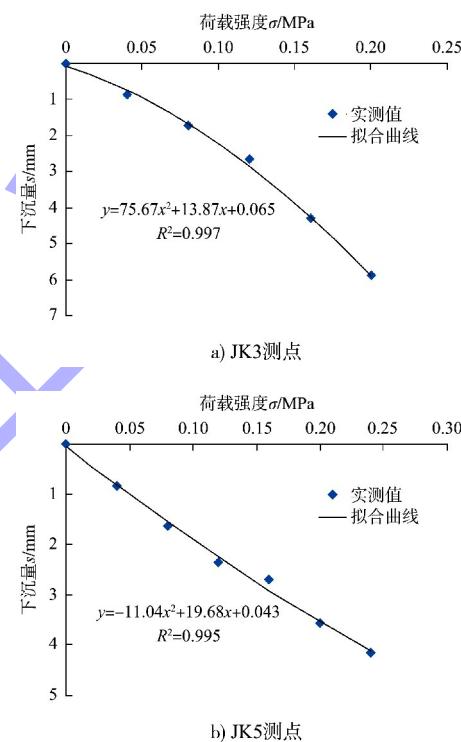
### 3.5 卵砾石层水平荷载试验结果分析

在上述重型动力触探及直剪试验相应的位置进行水平荷载试验, 得出卵砾石层水平荷载试验结果。对  $\sigma-s$  关系曲线进行拟合, 回归分析后得到水平基床系数  $K_h$ , 见表 4; 那吉枢纽代表性测点  $\sigma-s$  关系曲线见 5。由表 4 可以看出, 卵砾石层水平基床系数为 44.9~95.1 MPa/m, 平均值为 60.2 MPa/m, 且整体上基床系数随卵砾石层密实程度的增加而增加。且对比表 3、4 可发现, 荷载试验得到的圆砾层基床系数比 GB 50307—2012《城

市轨道交通岩土工程勘察规范》<sup>[9]</sup>附录 H 中给出基床系数经验值偏大, 但其值在合理范围之内。

表 4 卵砾石层水平基床系数

枢纽名称	测点编号	$K_h / (\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1})$	$K_h$ 平均值 / ( $\text{MPa} \cdot \text{m}^{-1}$ )	密实程度
那吉枢纽	JK1~3	46.7~48.8	47.8	稍密
	JK4~6	49.7~51.1	50.2	中密
鱼梁枢纽	SJ1~3	44.9~47.7	46.1	中密
	SJ4~6	77.9~95.1	89.2	密实
老口枢纽	TK1~3	59.6~72.2	67.9	密实

图 5 那吉枢纽代表性测点水平荷载试验  $\sigma-s$  关系曲线

### 3.6 卵砾石层 $m$ 值的反演分析

#### 3.6.1 反演分析内容

当基床系数  $K$  值随着深度的增大而增大, 且随深度  $z$  线性增长, 即  $K=mz$ , 其中  $m$  为抗力系数的比例系数。 $m$  值是基坑支护设计中重要参数, 它的大小影响到坑底地层反力的大小和围护桩的内力, 因此, 合理地确定此参数的大小至关重要。

#### 3.6.2 计算方法

1) 计算原理为: ①收集整理单位宽度弹性模量  $E$ 、单位宽度的惯性矩  $I$  及支撑结构的应力及变形参数。②将单位宽度离散成为  $N$  个单元, 这时

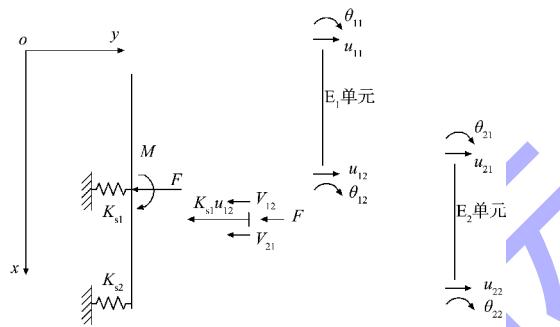
将产生  $N+1$  个节点。③计算每个单元的刚度矩阵，

由《结构力学》<sup>[10]</sup>可知，单元刚度矩阵为：

$$\mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： $L$  为单元的长度。

④组装整体刚度矩阵  $\mathbf{K}$ ，即将各单元刚度矩阵按照顺序首尾相加。在此以简单的两单元梁为例，见图 6。为了简化计算，把每一单元压力荷载(图 6 左侧)分解为两个单元梁，即  $E_1$ 、 $E_2$  单元<sup>[11]</sup>。



注： $K_{s1}$ 、 $K_{s2}$  为 2 个土弹簧的刚度； $F$  为节点荷载； $V_{12}$ 、 $V_{21}$  分别为  $E_1$  单元底、 $E_2$  单元顶的弯矩剪力； $M$  为弯矩； $\theta_{11}$ 、 $\theta_{12}$ 、 $\theta_{21}$ 、 $\theta_{22}$  分别为  $E_1$  单元顶、底、 $E_2$  单元顶、底的转角； $u_{11}$ 、 $u_{12}$ 、 $u_{21}$ 、 $u_{22}$  为  $E_1$  单元顶、底、 $E_2$  单元顶、底的位移。

图 6 两单元梁计算简图

对于  $E_1$  单元有：

$$\begin{bmatrix} V_{11} \\ M_{11} \\ V_{12} \\ M_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{11} \\ \theta_{11} \\ u_{12} \\ \theta_{12} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中： $V_{11}$  为  $E_1$  单元顶的弯矩剪力； $M_{11}$ 、 $M_{12}$  分别为  $E_1$  单元顶、底弯矩。

对于  $E_2$  单元有：

$$\begin{bmatrix} V_{21} \\ M_{21} \\ V_{22} \\ M_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{21} \\ \theta_{21} \\ u_{22} \\ \theta_{22} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中： $V_{22}$  为  $E_2$  单元底的弯矩剪力； $M_{21}$ 、 $M_{22}$  分别为  $E_2$  单元顶、底弯矩。

梁在节点处要保持连续，不发生断裂，必定有  $u_{12}=u_{21}$ 、 $\theta_{12}=\theta_{21}$ ，将式(2)(3)合并可得：

$$\begin{bmatrix} V_{11} \\ M_{11} \\ V_{12}+V_{21} \\ M_{12}+M_{21} \\ V_{22} \\ M_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & 0 \\ \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & 0 \\ -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{12EI}{L^3} \times 2 & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & \frac{4EI}{L} \times 2 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ 0 & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{11} \\ \theta_{11} \\ u_{12}(u_{21}) \\ \theta_{12}(\theta_{21}) \\ u_{22} \\ \theta_{22} \end{bmatrix} \quad (4)$$

⑤形成节点荷载列阵  $\mathbf{F}$ , 考虑荷载列阵, 在节点附近取长度很小的一微段, 将  $V_{12}$  和  $V_{21}$  反向作用在该微段上, 作用在此微段梁上还有节点荷载  $F$  和弹簧的力  $K_{s1}u_{12}$ , 四者应平衡, 则有:

$$V_{12} + V_{21} = -F - K_{s1}u_{12} \quad (5)$$

$$\text{同理有: } M_{12} + M_{21} = -M \quad (6)$$

在最后一个节点处有:

$$V_{22} = -K_{s2}u_{22} \quad (V_{11} = 0, M_{22} = 0) \quad (7)$$

将以上值代入荷载列阵, 合并同类项得:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -F \\ M \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & 0 \\ \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & 0 \\ -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{12EI}{L^3} \times 2 + K_{s1} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & \frac{4EI}{L} \times 2 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ 0 & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{12EI}{L^3} + K_{s2} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{11} \\ \theta_{11} \\ u_{12}(u_{21}) \\ \theta_{12}(\theta_{21}) \\ u_{22} \\ \theta_{22} \end{bmatrix} \quad (8)$$

这就是总体刚度方程  $\mathbf{F} = \mathbf{KD}$ , 则求各节点的位移方程为:

$$\mathbf{D} = \mathbf{K}^{-1}\mathbf{F} \quad (9)$$

差平方和函数为:

$$f = \sum_{i=1}^n [u_{i,j} - u'_{i,j}]^2 \quad (10)$$

目标函数<sup>[12]</sup>为:

$$g = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n [u_{i,j} - u'_{i,j}]^2 \quad (11)$$

式中:  $m$  为工况数;  $n$  为测点总数;  $u_{i,j}$  为测点  $i$  在工况  $j$  的水平位移计算值;  $u'_{i,j}$  为测点  $i$  在工况  $j$  的水平位移实测值。

采用上述方法对实测的位移值与计算的位移值进行拟合, 当二者一致时认为所用的  $m$  值即为实际的  $m$  值。

2) 计算步骤为: ①资料收集。收集那吉、鱼梁、老口枢纽施工开挖过程中的坝址、闸室、厂房等动态监测数据、勘察资料、围护结构的设计图纸及变形监测数据, 对卵砾石层  $m$  值进行反演

分析。②计算模型的概化。选取拟反演的位移监测点, 对坝址、闸室、厂房的基坑开挖过程及横向支撑加载过程进行分析, 对比勘察资料找出相应点位的地层信息, 分析整理基坑位移监测资料, 找出相应开挖过程的水平位移曲线。③计算模型的建立。完成上述资料收集及分析工作之后, 将所得土层数据及设计数据录入同济启明星深基坑支挡结构分析计算软件 FRWS v9.0 对模型进行反演分析。

### 3.6.3 反演分析结果

为了反演分析各枢纽工程卵砾石层的  $m$  值, 根据收集的那吉、鱼梁、老口枢纽围护结构的资料及各个基坑的监测资料, 通过对围护结构进行概化得出支护结构计算断面图。在基坑开挖和主体结构施工过程中, 对墙体水平变形及支撑结构的内力进行全程监控, 通过对这些数据整理作为反演分析的第一手资料。以老口枢纽工程 1#闸室为例, 揭示的地层有粉土层、卵砾石层及古近系泥岩层等, 卵砾石层厚度比较大, 且富水性比较

强, 水量丰富, 老口枢纽工程 1#闸室  $m$  值反演计算支护结构概化图见图 7。

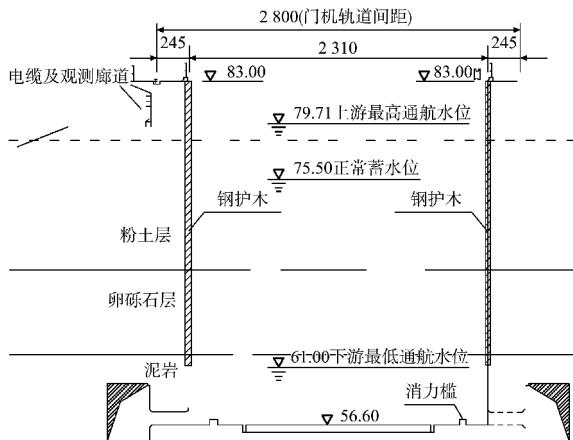


图 7 老口航运枢纽 1#闸室结构计算断面  
(尺寸: mm; 高程: m)

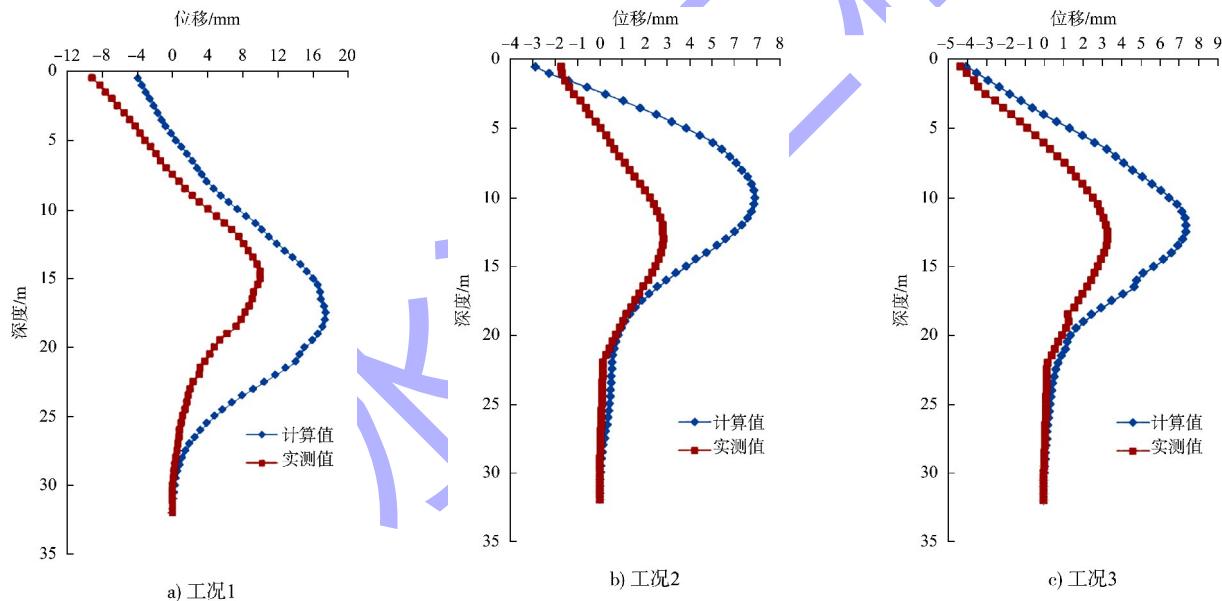


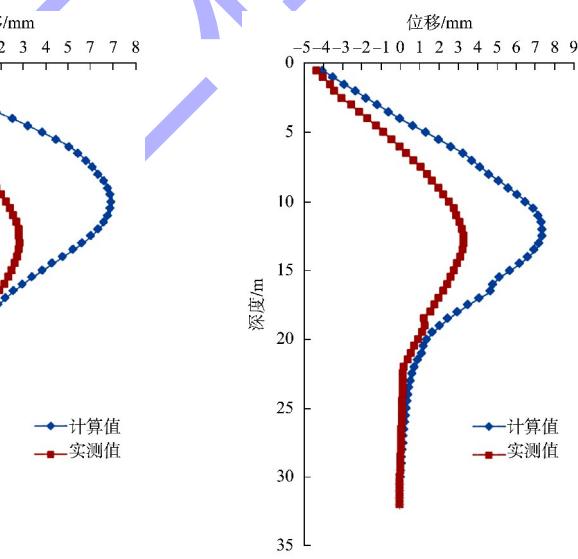
图 8 位移计算值与实测值对比曲线

#### 4 卵砾石层力学参数值

通过利用室内试验、现场原位试验对那吉、鱼梁、老口枢纽卵砾石层基本的物理力学参数进行测试, 收集相关的岩土工程勘察报告的物理力学参数进行统计分析, 并将上述结果进行对比分析, 将所得土层数据及设计数据录入同济启明星深基坑支撑结构分析计算软件 FRWS v9.0 对模型进行反演分析, 采用弹性地基梁法对卵砾石层基

通过对上述支护结构计算断面及相应的资料进行分析总结, 反演分析对象的基础资料为: 1#闸室总开挖深度 26.4 m, 粉土、卵砾石、泥岩的  $m$  值分别为 3~8、7~15、10~20 MN/m<sup>4</sup>。

对 1#闸室监测点采集的数据进行反演分析时, 共分为 3 种工况, 其中第 1~3 工况分别对应开挖 7.0、7.5、8.5 m, 将计算得到的位移绘制成曲线与实测得到的曲线进行比较, 见图 8。通过反演得到的 1#闸室粉土、卵砾石、泥岩层  $m$  值分别为 7.5、14.2、16.8 MN/m<sup>4</sup>。反演得出的  $m$  值, 比 JTG 3363—2019《公路桥涵地基与基础设计规范》<sup>[13]</sup> 的表 L.0.2-1 桩非岩石地基  $m$  的经验值小, 鉴于规范中主要为桩基的  $m$  值, 故最终结果以反演分析结果为准。



床系数的  $m$  值进行反演, 综合上述结果得出那吉、鱼梁、老口枢纽卵砾石层物理力学参数建议值见表 5。

表 5 卵砾石层物理力学参数建议值

密实程度	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	$K_h/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1})$	$K_v/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{-1})$	$m/(\text{MN}\cdot\text{m}^{-4})$
稍密	0~1.0	28~30	15~45	15~50	12~14
中密	0~2.0	30~34	25~55	25~70	14~17
密实	0~5.0	34~37	55~90	60~95	17~20

## 5 结语

1) 从卵砾石层垂直载荷试验结果分析, 卵砾石层平均垂直基床系数为  $37.7 \sim 98.6 \text{ MPa/m}$ , 平均值为  $70.0 \text{ MPa/m}$ , 且整体上垂直基床系数随着卵砾石层密实程度的增加而增加; 从卵砾石层水平载荷试验结果分析, 卵砾石层水平基床系数为  $44.9 \sim 95.1 \text{ MPa/m}$ , 平均值为  $60.2 \text{ MPa/m}$ , 且整体上水平基床系数随着卵砾石层密实程度的增加而增加。

2) 荷载试验得到的圆砾层基床系数比《城市轨道交通岩土工程勘察规范》给出基床系数的经验值偏大, 但其值在合理范围之内。

3) 反演得出的  $m$  值, 比《公路桥涵地基与基础设计规范》非岩石地基  $m$  的经验值小, 鉴于规范中主要为桩基的  $m$  值, 故最终结果以反演分析结果为准。

## 参考文献:

- [1] 米德才, 陈宏明, 罗继勇, 等. 广西航运枢纽工程建设中的极软岩研究[J]. 工程地质学报, 2006(2): 200-205.
- [2] COLLOTTA T, CANTONI R, PAVESI U, et al. A correlation between residual friction angle, gradation and the index properties of cohesive soils[J]. Géotechnique, 1989, 39(2): 343-346.
- [3] 张广文, 刘令瑶. 土石坝筑坝材料基本参数概率统计与相关分析[J]. 水利水电技术, 1994(9): 12-16.
- [4] 翟静阳, 冷伍明. 粘性土物理力学指标的变异性及相互关系[J]. 铁道建筑技术, 2001(1): 49-51.
- [5] 王建秀, 杨立中, 何静. 碳酸岩分布区残坡积粘性土物理力学参数相关性分析[J]. 工程勘察, 2001(4): 1-4.
- [6] 吴礼年, 谢巧勤, 方玉友. 合肥地区粘性土物理力学指标的相关性分析[J]. 水文地质工程地质, 2002(4): 43-45.
- [7] 赖天文, 何斌. 黄土物理力学性质指标的变异性及相关性分析[J]. 兰州铁道学院学报(自然科学版), 2003, 22(6): 110-112.
- [8] 建设综合勘察研究设计院. 岩土工程勘察规范: GB 50021—2001(2009年版)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [9] 北京城建勘测设计研究院有限责任公司. 城市轨道交通岩土工程勘察规范: GB 50307—2012[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- [10] 重庆大学结构力学教学团队. 结构力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2020.
- [11] 徐晶鑫. 非对称荷载单层对撑式基坑支护体系计算方法研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
- [12] 杨敏, 熊巨华, 冯又全. 基坑工程中的位移反分析技术与应用[J]. 工业建筑, 1998, 28(9): 1-6.
- [13] 中交公路规划设计院有限公司. 公路桥涵地基与基础设计规范: JTG 3363—2019[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2019.

(本文编辑 王璁)

(上接第 173 页)

## 参考文献:

- [1] 刘学著, 雷路平, 叶雅思, 等. 广东省北江航道局连江 10 座航运枢纽安全鉴定项目各枢纽现状调查分析报告、安全检测报告、安全评价报告及安全复核报告[R]. 长沙: 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 2016.
- [2] 水利部太湖流域管理局, 江苏省水利厅. 水闸安全评价导则: SL 214—2015[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2015.
- [3] 刘学著, 雷路平, 叶雅思, 等. 连江航运枢纽应急处置工程施工图设计文件(界滩、花溪、较剪陂、蓑衣滩、架桥石枢纽)[R]. 长沙: 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 2017.
- [4] 吴澎, 于忠涛, 罗业辉. 连江航运枢纽安全隐患处置方案

- 研究报告[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2018.
- [5] 水利部水利水电规划设计总院, 上海勘察设计研究院. 水利水电工程合理使用年限及耐久性设计规范: SL 654—2014[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- [6] 吴澎, 于忠涛, 罗业辉. 连江航运枢纽拆除方案研究报告[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2021.
- [7] 广东省交通运输厅. 广东省航道发展规划(2020—2035)[R]. 广州: 广东省交通运输厅, 2020.
- [8] 吴澎, 于忠涛, 罗业辉. 连江航道渠化水库淹没及移民安置初步规划专题报告[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2018.

(本文编辑 王传瑜)