



船闸闸首有限元模型 土体指标取值的离心模型试验

文曦, 邹艳春

(中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430071)

摘要:以南水北调东线工程京杭运河八里湾船闸上闸首为原型, 通过离心模型试验研究得到闸首结构在完建期工况下的结构变形以及地基反力, 并依据离心试验的缩尺模型建立闸首有限元分析模型, 采用参数反分析的方法拟定土体的弹性模量并进行有限元分析。将计算结果与离心模型试验值进行对比分析后得到土体指标在有限元软件中的最合理取值, 可为类似地质条件的工程设计提供理论参考。

关键词: 闸首; 离心模型试验; 反分析; 土体指标取值; 有限元

中图分类号: U 641.3⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)07-0135-05

Centrifugal model test of soil index value based on lock head finite element model

WEN Xi, ZOU Yan-chun

(CCCC Second Harbor Consultants Co., Ltd., Wuhan 430071, China)

Abstract: Based on Baliwan lock head project on the east route of South-to-North Water Transfer Project, we carry out a centrifugal model test and get the structural deformation and ground reaction force at the end of construction period. According to the scale model of centrifugal test established lock head, we build the finite element analysis model. Using the back analysis method we develop the soil deformation modulus values and conduct the finite element analysis. Comparing the results with those by the centrifugal model test, we get the most reasonable soil index of soil indicators in the model of finite element calculation, to provide a theoretical reference for the engineering design under the same geologic conditions.

Keywords: lock head; centrifugal model test; back analysis; soil index; finite element

《船闸水工建筑物设计规范》对船闸闸首结构的计算给定了平面简化和有限元两种分析方法^[1-2]。工程设计通常采用平面简化算法。该方法将空间问题简化为平面问题, 把土体作用等效为外荷载来处理。其优点是方法简单; 缺点是不能真实考虑闸首和土体的相互作用。

因此为了能更真实、准确地得到闸首与土体相互作用下的变形和受力状态, 须采用岩土有限元技术对其进行分析, 其中土体指标的取值是计算准确与否的关键。一般来说, 地勘报告中的土

体指标须经过修正才可以用于有限元计算, 而修正方法在规范中并无明确规定, 因此找到合适的方法确定计算所需土体指标的取值是当前亟待解决的问题。

本文采用离心模型试验方法模拟了八里湾船闸上闸首完建期工况, 得到了闸首结构的变形及基底反力; 并借助 Midas Gts 大型岩土有限元分析软件, 基于离心模型试验的概化模型建立了有限元分析模型, 将完建期有限元计算结果与模型试验相对比, 得到了有限元计算所需的土体指标取

收稿日期: 2014-11-06

作者简介: 文曦 (1982—), 男, 硕士, 工程师, 从事水运工程结构设计。

值，并分析了地勘报告中土体指标与有限元计算所需指标之间的换算关系。

1 工程概况

京杭运河八里湾船闸位于山东省泰安市东平县境内，船闸上闸首为钢筋混凝土整体式结构，平面尺寸为 28.0 m × 40.0 m（长 × 宽），底板厚 3.0 m，闸首边墩为空箱结构，边墩内布置短廊道集中输水系统^[3]。

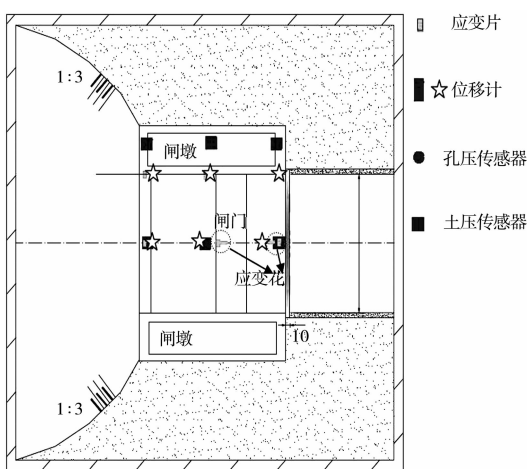
2 闸首结构离心模型试验

2.1 模型概化

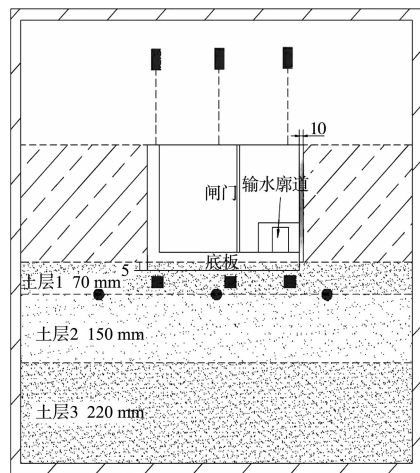
离心试验采用三维模型箱，尺寸为 1.0 m × 1.0 m × 1.0 m（长 × 宽 × 高），分 4 级加载，每一级为 20g 加速度，最终加载加速度为 80g，并在闸首结构关键位置布设位移、土压力传感器，量测最终 80g 加速度下的试验值。概化模型如图 1 所示。上闸首结构缩尺后的模型长为 500 mm，宽 350 mm，高 223 mm^[4]，土体根据压缩模量等效的原则简化为 3 层，各层厚度及相关参数指标见表 1。

表 1 概化模型的土层物理力学参数

土层	土层类别	土样类别	土层参数
1	粉质黏土	厚度 70 mm	孔隙比 0.69; 压缩系数 0.42; 干密度 1.61 g/cm ³
2	细砂	厚度 150 mm	相对密度 0.56; 饱和度 100%
3	粉质黏土	厚度 220 mm	孔隙比 0.69; 压缩系数 0.42; 干密度 1.61 g/cm ³



a) 概化模型平面



b) 概化模型断面

图 1 八里湾船闸工程概化模型及测点布置

2.2 土体模拟

因现场地基土取样困难，本试验根据地基压缩系数（或压缩模量）与原状土相似的原则，在保证土体干密度相同的条件下制备了试验土样，并根据三轴压缩试验得到了土体的各项物理力学指标，具体指标值见表 2^[3-5]。

表 2 土体指标

名称	粘聚力 c/kPa	摩擦角 φ/(°)
原状土	1.3	31.2
试验用土体	1.5	27.8

2.3 闸首结构模拟

结构物材料的选取保证结构物质以及闸首底板抗弯刚度与原型相似原则，同时考虑到相似材料选择和加工的便利性，采用铝合金材料制作结构物和闸墩，制作完成的上闸首结构（图 2）。

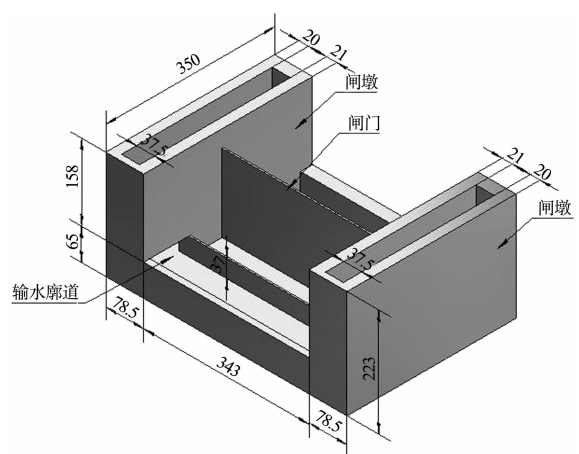


图 2 上闸首结构概化模型（单位：mm）

铝合金材料的物理力学指标为: 弹性模量 70 GPa, 密度 2.7 g/cm³, 泊松比 $\mu_m = 0.33$ 。并根据闸首底板抗弯刚度相等原则, 计算得到离心模型闸首底板厚度为 28 mm, 廊道高度为 37 mm, 闸墩高度为 158 mm。

2.4 离心试验及试验结果

将制备好的试验土样、闸首结构放入离心机中, 进行离心模型试验, 并对 80g 加速度下的闸首结构变形、基底反力等量测值进行统计, 得到如下试验结果。

1) 沉降变形。

离心模型试验位移观测点布置如图 3 所示。其中位移 4 为土体位移观测点, 在最终 80g 加速度下闸首、土体的沉降值见表 3。

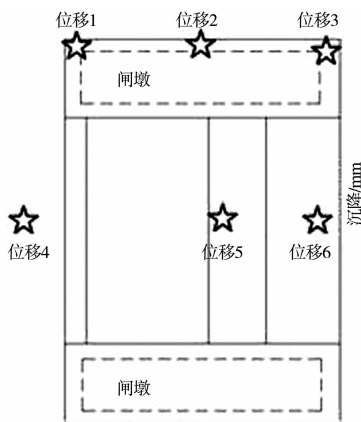


图 3 位移测点布置

表 3 结构沉降 mm

位移 1	位移 2	位移 3	位移 4	位移 5	位移 6
-7.66	-7.62	-7.51	-4.88	-7.58	-7.44

离心模型试验实测得到上闸首顶部平均沉降为 7.56 mm, 上闸首外侧土体沉降为 4.88 mm, 上闸首沉降平均值为 2.68 mm (扣除地基土固结沉降), 最大不均匀沉降小于 0.25 mm。还原成原型, 完建期上闸首的平均沉降为 214.4 mm, 最大不均匀沉降为 20 mm, 其中, 上闸首下游中心位置 (位移 6) 沉降略小, 闸墩上游点处 (位移 1) 沉降略大。

2) 地基反力。

离心模型试验地基反力采用在底板预埋土压

力盒的方式进行测量。观测点布置位置如图 4 所示, 80g 加速度下完建期地基反力如图 5 所示。

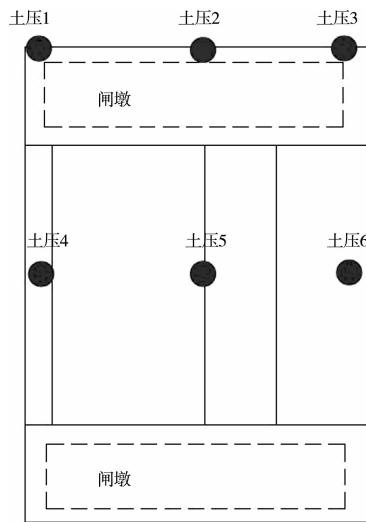


图 4 地基反力测点布置

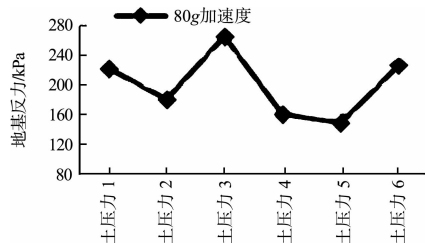


图 5 地基反力度曲线

完建期间闸首底板反力平均值为 200.8 kPa。其中: 上闸首底板下游角点位置 (土压 3) 反力值最大, 上闸首底板中心位置 (土压 5) 反力值最小。

3 参数反分析法

在反问题中地质参数的反演问题属于参数反问题, 求解问题的过程叫做反分析。反分析法的基本思想是先假定各子区域的土体指标参数为初值, 然后利用数值计算方法如有限元法等求解结构变形、应力应变的分布, 然后将所求解的变形、应力应变值与离心模型试验值进行比较, 计算它们之间的差值, 并根据差值修改各子区域内的土体指标取值并再次求解。如此反复迭代, 直至差值满足工程要求精度为止, 此时的土体指标取值即为所求得的土体指标值。

4 闸首结构有限元数值模拟

4.1 建立三维模型

依据离心模型试验概化后的结构尺寸对结构和土体建立三维模型，模拟离心模型试验在最终80g加速度下的完建工况，建立三维实体模型(图6)。

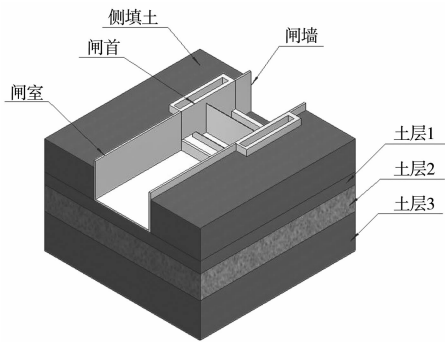


图6 三维实体概化模型

4.2 本构关系定义及材料参数

闸首、闸室结构选用弹性体模型，土体选用摩尔-库伦本构模型，并采用3D单元中的高阶单元进行网格划分，支撑边界包括模型的前后、左右及下边界。

闸首、闸室底板选用铝作为材质，土体各项指标根据三轴试验得到(如 c 、 φ)，具体指标值见表4。

表4 模型本构及物理力学指标

名称	模型类型	弹性模量/kPa	密度/($t \cdot m^{-3}$)	粘聚力/kPa	摩擦角/($^{\circ}$)
铝	弹性	7×10^7	212.0		
粉质黏土	莫尔-库伦		148.8	1.5	27.8
细砂	莫尔-库伦		120.0	1.0	30.0

表4中，粉质黏土、细砂根据三轴试验得的压缩模量分别为4 MPa和2.1 MPa，由于有限元计算中弹性模量的取值对结果影响很大，因此本文采用反分析法拟定了多组土体指标，并列举了如下4组典型计算取值，拟通过将计算得到的闸首

沉降、地基反力结果与离心模型试验值的对比，得到本项目中合理的土体指标取值。

拟定的4组土体参数指标(以下简称指标)见表5。

表5 拟定的4组土体力学指标

指标	名称	弹性模量/ ($10^4 kN \cdot m^{-2}$)	粘聚力/ ($kN \cdot m^{-2}$)	摩擦角/ ($^{\circ}$)
1	粉质黏土	0.40	1.5	27.8
	细砂	0.21	1.0	30.0
2	粉质黏土	1.20	1.5	27.8
	细砂	0.63	1.0	30.0
3	粉质黏土	2.00	1.5	27.8
	细砂	1.05	1.0	30.0
4	粉质黏土	2.75	1.5	27.8
	细砂	1.44	1.0	30.0

4.3 计算结果对比

1) 沉降变形。

选用表5中4组不同的土体指标分别进行有限元计算，并与离心模型试验测点结果进行对比，计算得到的模型沉降值如图7所示。

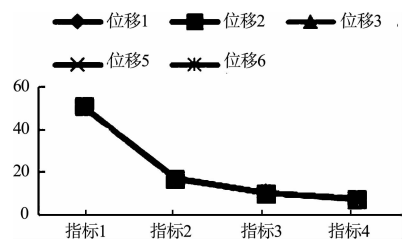


图7 土体指标-位移曲线

从图7可以看到，随着弹性模量取值的增大，闸首沉降量逐渐变小，但并非线性变化，沉降的变化幅度也随着弹性模量的增大而减小，且在同一种土体指标取值情况下，位移点1最大，位移点6最小，结构的差异(不均匀)沉降很小。

将有限元模型与离心模型试验结果进行对比分析可知：当选取土体指标4时，闸首沉降量和土体沉降量与试验结果一致。结果对比见表6。

表6 沉降分析结果对比

项目	闸首顶平均沉降	土体沉降	闸首相对沉降	闸首不均匀沉降	闸首实际沉降	闸首实际不均匀沉降
离心模型试验	7.56	4.88	2.68	0.25	214.40	20.0
有限元计算	7.58	4.54	3.04	0.22	243.20	17.6
差值/%	0.25	6.97	13.40	12.00	13.43	12.0

1) 地基反力。

地基反力的计算模式同闸首变形计算, 通过计算得到闸首结构的地基反力如图 8~10 所示。

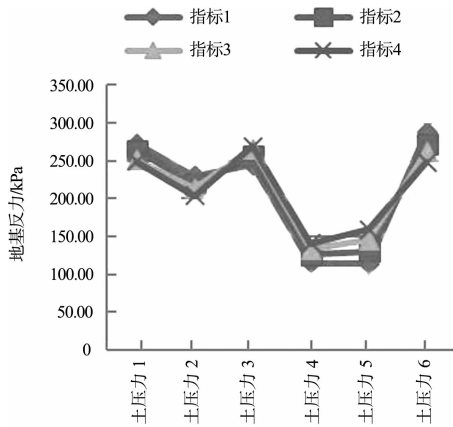


图 8 土体指标-地基反力曲线

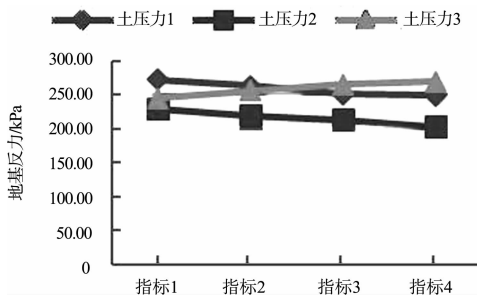


图 9 纵断面 1-3 闸首地基反力曲线

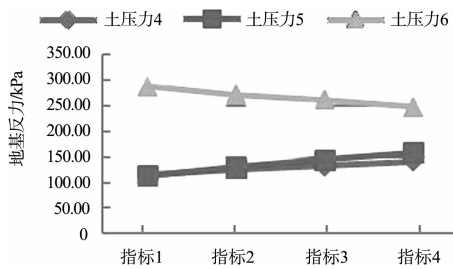


图 10 纵断面 4-6 闸首地基反力曲线

从图中可知, 弹性模量的增大对地基反力影响不大。从纵断面来看, 断面 1-3 中, 随着弹性模量的增大, 土压力 1、2 逐渐减小, 土压力 3 逐渐增大; 断面 4-6 中, 随着弹性模量的增大, 土压力 4、5 逐渐增大, 土压力 6 逐渐减小。

将有限元模型与离心模型试验结果进行对比分析可知: 当选取土体指标 4 时, 闸首地基反力与试验结果相一致。结果对比见表 7。

表 7 地基反力结果对比

土压力	离心模型试验	有限元计算	差值比例/%
1	222.3	248.6	11.8
2	180.2	203.2	12.8
3	265.4	269.3	1.5
4	160.5	141.0	12.1
5	149.2	159.1	6.6
6	227.2	247.9	9.1

4.4 结果分析

采用反分析法对 4 组典型土体指标取值下闸首结构计算结果进行分析可知: 选用土体指标 4 时, 有限元计算与离心模型试验数据的差值都在 10% 左右, 与试验值最为吻合。说明针对本工程项目, 土体指标值取指标 4 是较合理的, 同时也得到了有限元分析软件选用的土体弹性模量 E 与 E_s 土体压缩模量之间的关系式为 $E/E_s = 6.875$ 。

5 结论

- 1) 闸首沉降量随着弹性模量的增大而减小, 但并非线性变化。
- 2) 土体弹性模量取值的增大, 对闸首结构的地基反力影响不大。
- 3) 岩土体物理力学参数的选取是影响岩土有限元数值分析的重要因素, 因此在进行有限元分析前, 通过多种方法确定土体指标的取值非常重要。针对本工程, 根据分析可以得到土体弹性模量 E 取压缩模量 E_s 的 6.875 倍最为合理。
- 4) 离心模型试验, 作为一种室内试验方法, 可以很好地指导设计, 验证理论分析与数值计算的合理性和可靠性。

参考文献:

[1] JTJ 307—2001 船闸水工建筑物设计规范 [S].
 [2] JTJ 305—2001 船闸总体设计规范 [S].
 [3] 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 八里湾船闸施工图说明书[R]. 武汉: 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 2012.
 [4] JTS/T 231-7—2013 港口工程离心模型试验技术规程[S].
 [5] 中交第二航务工程勘察设计院有限公司. 船闸整体式闸首结构受力分析研究报告[R]. 武汉: 中交第二航务工程勘察设计院有限公司, 2012.

(本文编辑 郭雪珍)