

水闸与地基相互作用及底板的设计

杨令强¹, 武甲庆², 秦 冰³

(1. 济南大学 土木建筑学院, 山东 济南 250022; 2. 山东省水利厅, 山东 济南 250013; 3. 山东水利设计院, 山东 济南 250013)

摘要: 传统的设计方法不能反映水闸的上部结构、底板和地基三者之间的相互作用. 本文利用子结构法来模拟三者之间的相互作用; 接触单元模拟底板和地基的相对错动、滑移; Mohr-Coulomb 准则定义点的安全系数; 剪应变脊线确定深层滑动线的位置, 进而根据强度准则求解稳定系数. 系统分析了上部结构、底板和地基刚度变化对地基的差异沉降和稳定性的影响, 给出了相关曲线, 提出了利用底板和地基刚度为函数的板土刚度比设计底板的新方法.

关 键 词: 水闸; 地基; 底板; 相互作用; 差异沉降

中图分类号: TV66:TU470.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-640X(2008)01-0053-04

Analysis on interaction between sluice and base and board design

YANG Ling-qiang¹, WU Jia-qing², QIN Bing³

(1. Department of Civil Engineering, Jinan University, Jinan 250022, China; 2. Shandong Water Resources Bureau, Jinan 250013, China; 3. Shandong Water Resources Design Institute, Jinan 250013, China)

Abstract: The interaction among the upper structure, the sluice board and the base cannot be considered by using traditional design methods. In the paper, the sub-structure method is used to calculate the interaction, contact element is employed to simulate the nonlinear behavior of interaction of sluice board and base, Mohr-Coulomb criterion is used to define the safe coefficient, and ridge of shear strain is used to find the slipping line, and then to calculate stability coefficient. The influence of stiffness of upper structure, sluice board and base is analyzed. Some valuable correlation curves have been put forward. A new design method for sluice board is finally proposed.

Key words: sluice; base; sluice board; interaction; differential settlement

水闸的底板设计对减小地基差异沉降和上部结构的变形和应力具有重要的影响. 底板下接地基, 上面支撑着闸墩、闸门、胸墙和工作桥等上部结构, 在水闸的运行过程中, 上部结构、底板和基础相互作用, 特别是底板和地基的相互作用具有明显的非线性. 传统的设计把上部结构、底板与地基三者作为彼此离散的独立构件进行力学分析. 这种计算方法虽然能满足静力平衡条件, 但没有考虑它们之间的变形连续条件, 特别是在土

收稿日期: 2007-05-18

基金项目: 济南大学博士基金资助项目(B0533)

作者简介: 杨令强(1972-), 男, 山东东阿人, 副教授, 博士, 主要从事水工结构的教学和科研工作. E-mail: yllq.tju@126.com

质不均匀情况下,计算结果与实际受力和变形情况差别甚远.根据董建国等^[1]的研究,与共同作用分析比较,传统方法计算的基础弯曲和内力过大;因忽视了基础差异沉降引起的上部结构的次应力,低估了结构的内力.采用有限单元法可以较好地解决上述问题.本文利用接触单元模拟底板与土的非线性接触特性,同时利用子结构法计算上部结构、底板和地基的相互作用,运用三维有限元程序对三者的相互作用进行了数值计算,并根据数值计算的结果提出了底板的设计方法.

1 数值计算模型

本文以山东某水闸为例,分别考虑上部结构、地基及底板的刚度变化对底板差异沉降的影响,在此基础上提出水闸底板的设计方法.分析时将由变形缝分割的三孔闸室及其基础作为研究对象(见图1),地基为粘性土,弹性模量为20 MPa,泊松比为0.35,内摩擦角为20°,凝聚力为30 kPa,粘土厚度为40 m,闸墩高度为8 m.采用Mohr-Coulomb弹塑性模型计算地基变形,水闸的底板和闸室采用线弹性模型.荷载组合为规范^[2]规定的设计洪水位基本组合,扬压力通过渗流计算确定.计算模型中土体侧边界采用简支边界,底面为固定边界,地基和底板之间设置接触单元,计算时将闸墩、胸墙及上部结构作为一个子结构,将底板及地基作为一个子结构,上部结构对底板的作用通过边界点(外点)的凝聚刚度和节点荷载来实现^[3].

1.1 接触单元

由于水闸底板与土的变形及强度特性相差较大,在外力作用下,其界面可能产生相对错动、滑移或开裂.为了模拟这些物理现象,在混凝土和土这两种性质差别很大的材料之间设置接触单元^[4].本文采用接触单元为三节点单元(见图2).这种单元实际上是一种点对线接触,不过可以用它来模拟线对线的接触,因为可以把线指定为一组节点. k 点为接触点, ij 为目标线,接触点和目标线形成接触对,单元的摩擦力 f_s 和法向力 f_n 为:

$$f_s = \begin{cases} k_t u_s^e, & \text{滑移前} \\ f'_s, & \text{滑移后} \end{cases} \quad (1)$$

$$f_n = \begin{cases} k_n v, & v < 0 \\ 0, & v > 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: k_t 为单元切向刚度; f'_s 为库仑摩擦类型的静态摩擦限值($f'_s = \mu f_n$), μ 为摩擦系数; k_n 为法向接触刚度; u_s^e 为单元的切向位移; v 为接触点对的距离.

1.2 地基屈服准则及点安全系数的定义

土体单元屈服准则的表达式采用广义应力表示的Mohr-Coulomb准则^[5].

$$\text{当 } \theta = 0^\circ \text{ 时(拉子午线)} \quad q = \frac{6 \sin \varphi}{3 + \sin \varphi} p + \frac{6 C \cos \varphi}{3 + \sin \varphi} \quad (3)$$

$$\text{当 } \theta = 60^\circ \text{ 时(压子午线)} \quad q = \frac{6 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} p + \frac{6 C \cos \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad (4)$$

式中: $p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$; $q = \sigma_1 - \sigma_3$; C 为凝聚力; φ 为内摩擦角.

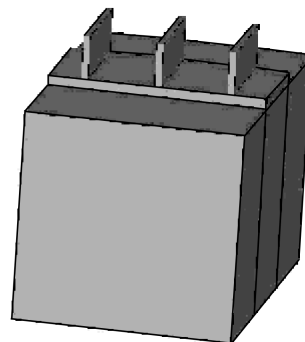


图1 计算模型示意图

Fig. 1 Model diagram

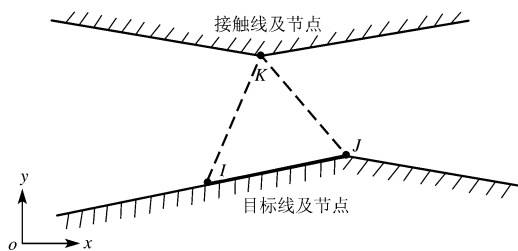


图2 接触单元示意图

Fig. 2 Sketch of contact element

$$\text{拉伸破坏的安全系数} \quad K = \frac{6p \sin \varphi}{q(3 + \sin \varphi)} \quad (5)$$

$$\text{剪切破坏的安全系数} \quad K = \frac{6p \sin \varphi}{q(3 - \sin \varphi)} \quad (6)$$

1.3 滑动面的确定及稳定系数的计算

水闸的滑动分为表层滑动和深层滑动. 取闸孔中间纵断面进行分析. 表层滑动可根据接触面单元的摩擦力和滑动力的比值确定, 即(7)式; 深层滑动可根据地基剪应变等值线的脊线求出滑裂面的位置, 然后按(8)式求稳定系数^[6,7], 水闸的稳定系数取两者的小值, 即(9)式.

$$K_b = \int_l f_s d_l / \sum p_H \quad (7)$$

$$K_s = \int_l K_i d_l / \int_l d_l \quad (8)$$

$$K = \min(K_b, K_s) \quad (9)$$

式中: K_b 为表层滑动安全系数; p_H 为水平向作用力; K_s 为深层滑动安全系数; K_i 为点的剪切安全系数; K 为水闸的稳定系数.

1.4 底板与地基间的板土刚度比

在底板的设计中, 由地基变形引起的上部结构破坏主要是差异沉降. 一旦差异沉降不符合要求, 设计者可能增大底板的厚度. 而差异沉降主要与底板的尺寸和板土的相对刚度有关, 根据筏板理论^[8], 合理的矩形底板板土刚度比的计算公式为:

$$K_{rs} = 5.57 \frac{E_r}{E_s} \frac{1 - \nu_s^2}{1 - \nu_r^2} \left(\frac{B}{L} \right)^{0.5} \left(\frac{h}{L} \right)^3 \quad (10)$$

式中: E_r, E_s 分别为底板和地基土的弹性模量; ν_r, ν_s 分别为地板和地基土的泊松比; h 为底板的厚度; B 和 L 分别为矩形底板的长和宽.

2 计算与分析

2.1 上部结构对差异沉降的影响

取底板厚度为 1.8 m, 闸孔宽度为 10 m, 当闸墩厚度从 1.0 m 变化到 1.5 m 时, 地基的差异沉降和水闸的稳定系数变化见图 3. 可见, 在地基、基础和荷载条件不变的情况下, 闸墩厚度的增大, 会增加上部结构的刚度, 减小底板的相对挠曲, 但对减小地基差异沉降的效果不明显, 水闸的抗滑稳定性基本不受影响. 因此, 用增加上部结构的刚度来减小基础的差异沉降是不可取的.

2.2 底板对差异沉降的影响

保持其他因素不变, 当底板厚度从 1.0 m 变化到 3.0 m

时, 地基的差异沉降和水闸的稳定系数变化见图 4. 可见, 当底板厚度增加时, 地基的差异沉降开始迅速减小, 但减小的幅度越来越小, 最终趋于稳定; 水闸的稳定系数随底板厚度的增加逐渐增大, 最终也趋于稳定.

保持其他因素不变, 底板混凝土等级从 C10 变化到 C50, 地基的差异沉降和水闸的稳定系数变化见图 5. 可见, 当混凝土等级提高时, 差异沉降开始迅速减小, 但减小的幅度越来越小, 最终趋于平缓; 稳定系数基本不受影响.

上述结果表明, 底板混凝土强度和厚度对地基的影响具有一致性; 混凝土强度变化会引起地基差异沉降的变化, 当混凝土强度等级超过 C30 后, 差异沉降变化明显变缓, 故可采用 C30 ~ C40 强度的混凝土, 再提高

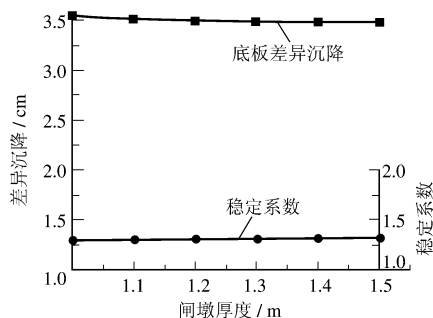


图3 闸墩厚度对水闸差异沉降的影响

Fig. 3 Effect of the pier thickness on settlement

混凝土强度等级,改善底板差异沉降的效果已不明显.

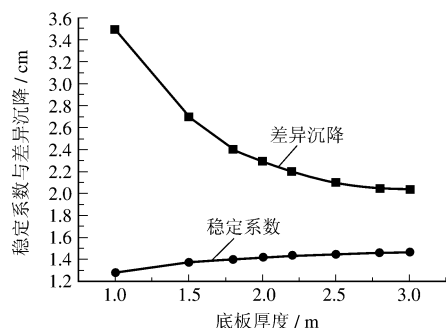


图4 底板厚度对水闸差异沉降的影响

Fig. 4 The effect of the board thickness on settlement

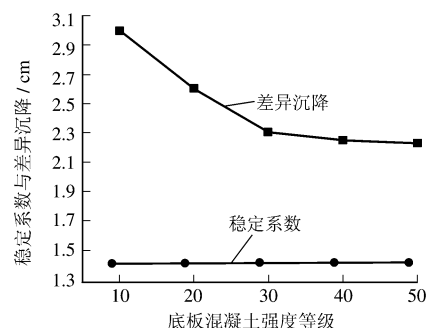


图5 底板混凝土强度对水闸差异沉降的影响

Fig. 5 Effect of concrete on settlement

2.3 地基刚度对差异沉降的影响

增大地基的弹性模量,使板土刚度比从 0.5 变化到 10.0,地基的差异沉降变化见图 6. 可见,随着板土刚度比的增大,差异沉降量迅速减小,并趋于稳定. 在进行水闸设计时,地基的弹性模量是固定的,因此,为了得到最优的底板设计,可以根据允许的地基差异沉降量,推算板土刚度比,进而根据底板的刚度确定底板的厚度.

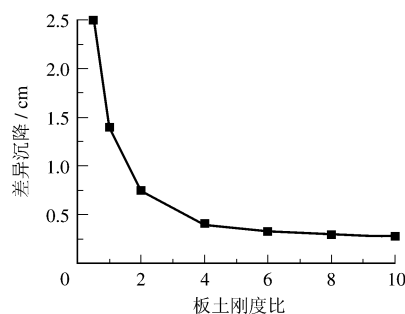


图6 板土刚度比对水闸差异沉降的影响

Fig. 6 Effect of stiffness of board-base on settlement

3 结 语

本文利用子结构法、接触单元和弹塑性非线性有限元法分析了水闸上部结构、底板和地基的相互作用,系统研究了三者刚度变化对地基的差异沉降和稳定性的影响,得到结论如下:

- (1) 上部结构对地基的差异沉降和稳定系数影响很小.
- (2) 底板厚度和混凝土强度对地基差异沉降的影响具有一致性,当混凝土强度等级超过 C30 后,强度等级对地基差异沉降的影响变小,C30 ~ C40 混凝土是底板的经济合理强度.
- (3) 在一定范围内地基的弹性模量对差异沉降影响很大,可以通过底板刚度和地基刚度表示的板土刚度比分析确定经济合理的板厚.
- (4) 利用接触单元和剪应变脊线的方法确定深层滑动线的位置,进而根据点的安全系数计算底板的稳定系数,方法简单,易于程序实现.

参 考 文 献:

- [1] 董建国,赵锡宏. 高层建筑地基基础——共同作用理论与实践[M]. 上海: 同济大学出版社, 1997: 1-6.
- [2] SL265-2001, 水闸设计规范[S].
- [3] 王勖成,邵 敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997: 186-192.
- [4] 杨令强,练继建,张社荣,等. 高拱坝水垫塘反拱底板衬砌结构的非线性静力分析[J]. 水利学报, 2002, (9): 77-82.
- [5] 俞茂宏. 工程强度理论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [6] 张光斗,王光伦. 水工建筑物(下)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1991: 61-75.
- [7] 杨令强,马 静,刘景华,等. CSG 材料与土体材料联合筑坝仿真研究[J]. 中国农村水利水电, 2007, (4): 87-91.
- [8] Horikoshi K, Randolph M F. On the definition of raft-soil stiffness ratio for rectangular raft[J]. *Geotechnique*, 1997, 47(5): 1055-1061.