



底板预留宽缝情况下边荷载折减系数的研究

王雪军, 秦忠国

(河海大学 力学与材料学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 船闸闸室底板在施工时为了降低底板内力、避免裂缝的产生, 通常采用预留宽缝的施工方法。底板内力是随着地基不均匀沉降变形而产生的, 而地基变形过程是一个固结过程, 与时间相关, 其固结沉降速度取决于地基的渗透系数和土层的排水条件。采用 Biot 固结理论研究闸室在不同地基性质及不同加载方式下的沉降过程, 得到不同情况下的底板内力, 对比线弹性方法下的底板内力, 确定合理的边荷载折减系数。

关键词: 底板; 边荷载; 折减系数; 预留宽缝

中图分类号: TP 12

文献标志码: A

文献编号: 1002-4972(2015)01-0145-04

On side load reduction factor under floor-reserved wide seam

WANG Xue-jun, QIN Zhong-guo

(Department of Mechanics and Material College, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: During construction lock chamber floor, in order to reduce floor internal force and avoid the generation of cracks, we usually set up wide construction joints. The floor internal force is with the emergence of the foundation settlement deformation, and the foundation deformation process is a consolidation process related to time. The permeability coefficient of consolidation settlement speed depends on the foundation of drainage and soil conditions. We study the lock chamber the Biot consolidation theory in different foundation natures and the settlement process under different loading ways, and get the internal forces under different conditions. Comparing with the internal force under the method of linear elastic slab, we determine the reasonable side load reduction factor.

Keywords: floor; side load; reduction factor; reserved seam

船闸底板的应力分析是船闸设计中的重要课题, 边荷载对船闸底板的应力往往有举足轻重的影响。目前, 在边荷载作用下底板应力的计算中, 趋向于考虑地基变形的时间效应, 但这方面的一些设计规定在概念上是不明确的, 在计算应力的定量方面任意性较大, 有的计算方法需要进一步商讨。现行设计一般采用弹性地基梁法分析底板应力, 亦即认为是一个瞬时弹性问题, 只考虑地基的弹性, 而不考虑地基的固结排水因素。

对于多孔介质(砂、土)的变形、应力分析

问题, 目前最有效的分析手段是有限元数值方法, 该方法直接从问题的控制微分方程入手, 通过离散化建立问题的力学模型进而用计算机进行求解。与经验公式和简化方法相比, 有限元方法无需粗糙的概化与假设, 可以考虑复杂的边界条件。理论和实践都证明, 只要计算参数正确, 有限元解能较好地反映问题的实际情况, 其精度一般是满足工程要求的。

本分析采用 Biot 固结理论和线弹性两种方法。当预留宽缝时, 采用 Biot 固结理论方法, 考虑地

收稿日期: 2014-05-21

作者简介: 王雪军(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为计算机模拟与仿真。

基随时间缓慢沉降而对底板内力产生的影响；当不设宽缝时，采用线弹性方法，沉降瞬时完成（此为目前设计单位普遍采用的计算方法），不考虑后期沉降变化对底板内力的影响。对比两种不同方法下底板内力的差异，确定合理的边荷载折减系数。

1 Biot 固结理论

随着土体的固结，土体的压缩变形和强度逐渐增长。目前关于土的固结理论主要有太沙基固结理论和 Biot 固结理论。太沙基固结理论只有在—维情况下才是精确的。Biot 固结理论能够准确反映孔隙压力消散与土骨架变形相互关系，是目前认为计算固结问题最严格的理论。

该理论假定土体饱和、骨架线性弹性、变形微小、渗流符合达西定律土、颗粒和孔隙水均不可压缩。

在土体中取一微分体，体积力只考虑重力，则三维平衡微分方程为：

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = -\rho g \end{cases} \quad (1)$$

式中： ρ 为土的密度，应力为总应力。总应力为有效应力与孔隙压力 u 之和，且孔隙水不承受剪应力，上式可写为：

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma'_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma'_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma'_z}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial z} = -\rho g \end{cases} \quad (2)$$

利用物理方程可将式(2)中的应力用应变来表示。比奥 (Biot) 最初假定土骨架是线弹性体，服从广义虎克 (Huke) 定律。在小变形假定下，再利用几何方程将应变表示为位移，就可得出以位移和孔隙水压力表示的平衡微分方程：

$$\begin{cases} -G \nabla^2 w_x - \frac{G}{1-2\mu} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \\ -G \nabla^2 w_y - \frac{G}{1-2\mu} \cdot \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial u}{\partial y} = 0 \\ -G \nabla^2 w_z - \frac{G}{1-2\mu} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + \frac{\partial u}{\partial z} = -\rho g \end{cases} \quad (3)$$

此外，由达西定律，通过微小土体 X 、 Y 、 Z 面上的单位流量分别为：

$$\begin{cases} q_x = -\frac{K_x}{\rho_w g} \frac{\partial u}{\partial x} \\ q_y = -\frac{K_y}{\rho_w g} \frac{\partial u}{\partial y} \\ q_z = -\frac{K_z}{\rho_w g} \frac{\partial u}{\partial z} \end{cases} \quad (4)$$

式中： K_x 、 K_y 、 K_z 分别表示 3 个方向的渗透系数； ρ_w 为水的密度。

根据饱和土的连续性，单位时间单元土体的压缩量应等于流过单元体表面的流量变化之和，即

$$-\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + \frac{1}{\rho_w g} (K_x \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}) = 0 \quad (5)$$

这就是以位移和孔隙水压力表示的连续性方程。饱和土体中任一点的孔隙压力和位移随时间的变化，须同时满足平衡方程式和连续性方程式，将两式联立起来，便是比奥 (Biot) 固结方程。

2 工程实例

现有宝应船闸位于宝应县城南，连通京杭大运河和宝射河，建成于 1968 年，船闸规模为 10.4 m × 140 m × 2.5 m (口门宽度 × 闸室长 × 槛上水深)，船闸上闸首两侧连接运河东堤，下闸首设置公路桥，桥宽 7 m，贯通宝应县苏中南路。

改造后的船闸闸室净宽 23.2 m，长 180 m，沿纵向设置伸缩缝，共 10 节，每节长 18 m。闸室底板顶高程为 -3.30 m，底板底高程为 -5.80 m，由于采用分散输水系统，闸室墙结构为下部空箱 (布置廊道)、上部扶壁式结构。闸室廊道空箱尺寸为 3.0 m × 3.5 m (高 × 宽)。

2.1 船闸闸室结构有限元模型

由于闸室沿纵向分为 10 节, 每节情况相同, 故可取其中一节作为对象进行分析, 本分析取第 5 节进行分析, 用 Abaqus 有限元软件建立船闸闸室二维仿真模型^[1-5] (图 1、2)。

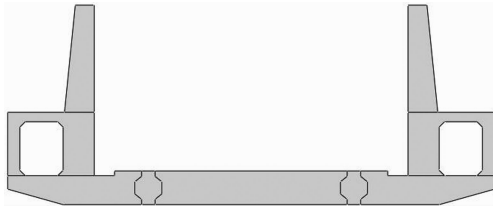


图 1 闸室模型

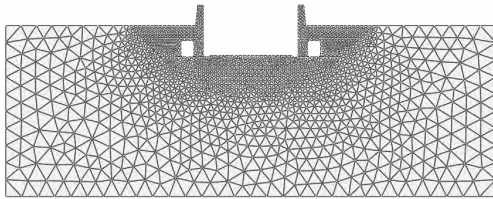


图 2 船闸模型网格

计算范围从闸室底板中心向左岸、右岸各取 2.5 倍闸室宽度 (60 m), 沿建基面向下延伸 1.3 倍闸室宽度 (30 m)。计算段地基基础、混凝土结构等均近似假定为各向同性、均匀连续的弹性体, 对回填土的材料考虑 Mohr-Coulomb 塑性本构关系, 由于交通桥设置在下闸首部位, 所以闸室段墙后填土与闸址原地面齐平, 未填至闸顶。由于是对已建工程进行改造, 地基沉降已基本完成, 所以不考虑地基自重产生的位移。地基弹性模量取 $e-p$ 曲线回弹再压缩模量, 经勘测得到地基的回弹再压缩模量为 150 MPa, 土层较为坚硬, 泊松比取 0.25。地基左右侧截断边界处横河向水平位移为零, 底部截断边界处横河向和竖向位移均为零。由于底板下面有混凝土垫层, 垫层下排水, 所以取地基顶面为排水边界 (表 1)。

表 1 材料物理力学参数

材料	密度/ ($t \cdot m^{-3}$)	弹性模量 /MPa	泊松 比	凝聚力 c'/kPa	摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	渗透系数/ 孔隙比 ($m \cdot s^{-1}$)
混凝土	2.5	28 000	0.167			
填土	1.8	10	0.300	2	25	
地基		150	0.250			5×10^{-8} 0.8

2.2 有限元分析

因为采用预留宽缝的施工方法, 即先浇筑中底板和边底板, 预留宽缝, 到工程后期再封铰。根据封铰时墙后填土的高度不同, 可以分为 4 个不同的施工工序 (图 3)。

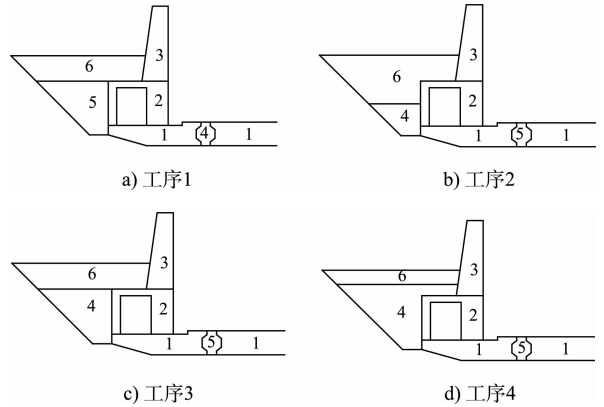
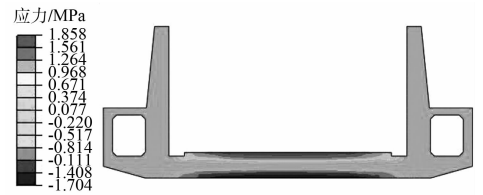


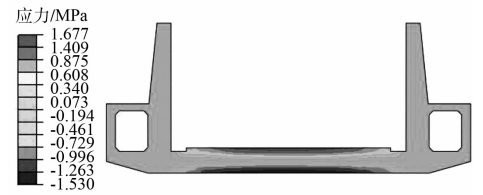
图 3 施工工序

采用 ABAQUS 中的“移除、添加”单元技术来实现有限元模型中结构构造和施工过程的模拟, 计算结果见图 4。当不预留宽缝并不考虑地基的固结排水因素时, 得到闸室的内力 (图 4e))。

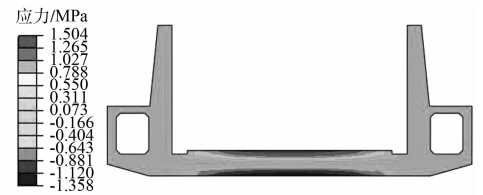
由计算结果可以看出, 当采用预留宽缝施工方法并考虑地基的固结沉降时, 底板的内力比不预留宽缝时小得多, 所以从工程的经济角度出发, 在设计时边荷载要乘以合理的折减系数。



a) 工序 1



b) 工序 2



c) 工序 3

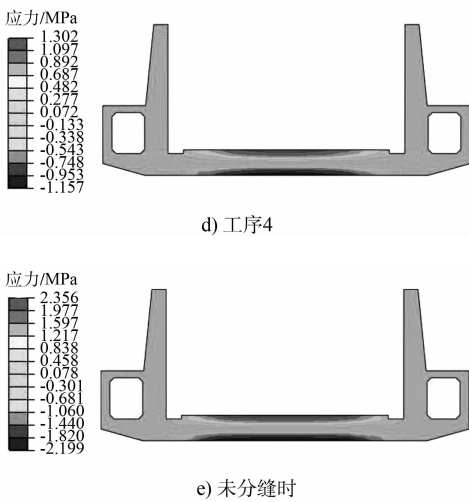


图4 闸室 X 方向正应力云图

当底板封铰前，地基沉降对底板内力影响不大，只有在封铰后，底板成为一整体，此时地基沉降成为底板内力变化的主因，所以封铰前的边荷载需要乘以折减系数。边荷载主要是由底板上部结构自重和墙后填土压力组成，都与其密度有关，为了得到边荷载折减系数的合理取值，将封铰前的上部结构和填土密度乘以同一系数，将计算结果与未分缝时的结果作对比，修改系数的取值，直到两种情况下的底板内力相当，得到合理的取值（表2）。

表2 不同施工工序下的计算结果

工序	底板最大拉应力/MPa	封铰时底板沉降量/cm	边荷载折减系数
1	1.858	1.26	0.54
2	1.677	1.47	0.46
3	1.504	1.55	0.44
4	1.302	1.66	0.43

随着封铰时墙后填土高度的增加，底板的沉降量增大，底板最大拉应力减小，对应的边荷载折减系数越小。

2.3 不同渗透系数下的边荷载折减系数

不同的渗透系数情况下的边荷载折减系数见图5。

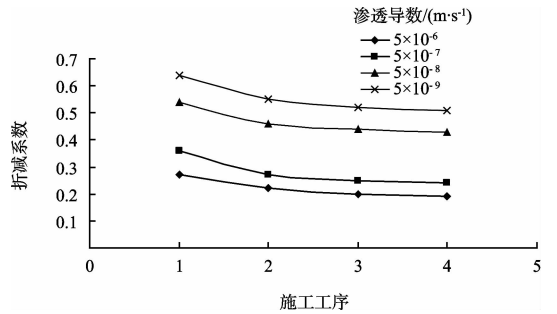


图5 折减系数与渗透系数及施工工序关系

计算结果表明，渗透系数越小固结沉降速度越慢，固结沉降慢意味着封铰时地基的沉降变形占最终沉降变形量的比例小，大部分沉降在封铰后才能完成，底板的内力将在封铰后产生，预设宽缝采用的内力计算折减系数应该取较大值。

3 结论

- 1) 当闸室底板采用预留宽缝施工方法时，设计时要考虑地基的排水固结影响。
- 2) 基于施工工序、地基的渗透系数对底板内力的影响，采用 Biot 固结理论研究不同渗透系数及封铰时墙后不同填土高度情况下的折减系数，计算结果表明：地基渗透系数越大，相应的折减系数越小；封铰时墙后的填土高度越大，相应的折减系数越小。

参考文献:

- [1] 石亦平,周玉容. ABAQUS 有限元分析实例详解[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [2] 曾攀. 有限元分析及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [3] 庄茁. ABAQUS 有限元软件 6.4 版入门指南[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [4] 庄茁. ABAQUS 非线性有限元分析与实例[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [5] 王金昌,陈页开. ABAQUS 在土木工程中的应用[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.

(本文编辑 武亚庆)