

苏州河河口水闸渗流场数值分析

王 蓬¹,何刚强² 季永兴²

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 上海市水务工程设计研究院, 上海 200063)

摘要 建立苏州河河口水闸工程的渗流分析模型,按正向挡水和反向挡潮两种工况进行苏州河河口水闸工程的渗流计算,对各工况下水闸底板的扬压力、区域各点的水头和水力坡降、水闸结构的总体渗流规律等进行分析研究。数值分析结果表明,各水闸的渗流是稳定的,闸底板渗流扬压力分布符合一般规律。

关键词 有限单元法;渗流;数值分析;水闸工程;苏州河河口

中图分类号:TV66;TV139.14 文献标识码:A 文章编号:1006-7647(2007)S1-0040-04

在水利及地下隧道工程建设中,渗流问题是重要的研究课题,由于渗透介质的各向异性以及渗透区域边界形状及边界条件的复杂性,该问题的求解十分困难。实际工程一般采用近似而实用的流网法和改进阻力系数法,对于复杂的地基采用电拟试验或数值计算方法。苏州河河口水闸工程采用液压水下卧倒门,单孔净宽 100 m,工程满足防御黄浦江苏州河口千年一遇的高潮位的要求,具有双向挡水功能,其正向挡水设计挡水水位差 3.76 m,反向挡水设计挡潮水位差 3.26 m。水闸主要建筑物包括:闸墩(兼启闭机房)、基础钢管桩、底板、防渗体、上下游护坦等。苏州河河口水闸工程基础坐落在淤泥质黏土上,基础防渗处理尤为重要。由于水闸采用沉井与桩基础结构形式,上下游的防汛墙或翼墙采用板桩形式,因此只要沉井与防汛墙或翼墙的板桩连接好,闸墩的绕渗径大于 45 m,其水力坡降为 0.084,远小于临界水力坡降 0.25。所以,工程的防渗设计主要是研究闸底板的基础防渗问题。

为确保工程安全,设计考虑采用改进阻力系数法和有限元数值分析方法研究水闸的渗流问题。建立饱和-非饱和非稳定渗流模型,借助于有限元软件对区域渗流进行分析评价,研究地下水位的运动变化规律,为工程提供实际的指导意义。

1 防渗体结构

基础防渗系统初拟定 3 个方案进行比较。方案 1:仿照原吴淞路闸桥设计方案,设置“双堵双导”的

防渗体系。采用钢板桩与钢盖板连接,形成封闭体,在板桩以外护坦底部设置反滤体。方案 2:考虑全透水结构,即底板及上下游设置全反滤体,双层软体排土工布上铺设级配块石,防止由于渗流带走土体。方案 3:在方案 1 的基础上,在钢板桩内侧加注浆防渗帷幕。对上述 3 个方案综合分析比较,并考虑到工程的重要性,为安全起见采用方案 3 作为工程的水下防渗体结构方案。

防渗体结构根据水下施工的特点,打入拉森钢板桩作为垂直防渗(桩尖高程 - 13.5 m),同时为增加钢板桩的刚度,每隔 5 个钢板桩打入直径为 60 cm 的定位钢管桩(桩尖高程 - 24.5 m)。为了能使钢板桩、钢管桩、钢质沉井相互连接良好,在钢管桩的两侧、钢质沉井的一侧焊导槽。防渗钢板桩、防渗钢管桩与底板的止水铜片通过钢盖板下浇筑压浆混凝土连接,水下混凝土达到一定强度后,沿防渗钢板桩两侧在预埋的 $\varnothing 150$ 注浆管中采用高压喷射注浆工艺对土体进行处理,形成沿防渗钢板桩连续的防渗体系,注浆体底标高 - 13.5 m,见图 1。

中墩设有沉井和钢围堰,沉井底标高与防渗板桩一致,所以利用沉井和钢围堰直接防渗。钢围堰水下切割要求与上部混凝土盖梁衔接。为防止底板侧向滑移,同时利用中墩分担部分水平力,减小底板对底轴的变形影响,在中墩钢围堰内设置限位墩,底板就位后在钢围堰与底板间浇注水下不分散混凝土,在沉井与钢围堰外侧对土体同时进行注浆加固。

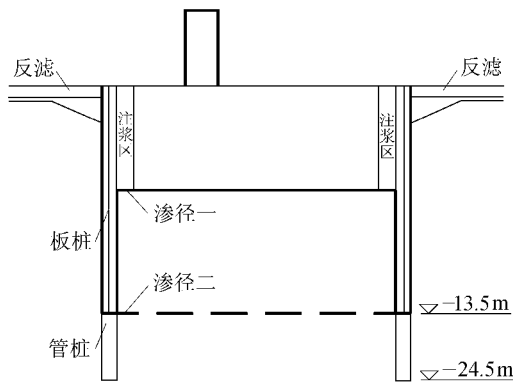


图1 防渗体结构及计算渗径示意图

2 渗流场模型建立

有限元分析方法是一种先进有效的数值模拟法,用于渗流分析计算时可部分替代模型试验,结构物和地基形状不太复杂时精度相对较高,具有成本低、时间短、可方便模拟多种外部条件的特点。采用有限元分析必须充分调查和了解现场情况,查明建筑物和地基的形状、材料种类、性质和物理力学参数,关键步骤是建立计算模型、选用计算参数和确定边界条件。

2.1 模型建立

计算模型应准确模拟建筑物和地基现状,坡面形状和材料内部分界线必须界定准确,根据材料的种类、性质划分计算区域。计算中,将底板与防渗钢板桩作为完全不透水材料,根据地质勘察资料将计算范围内的各土层作为已知渗透系数的透水材料,从而得到简化的计算模型示意图,如图2所示。

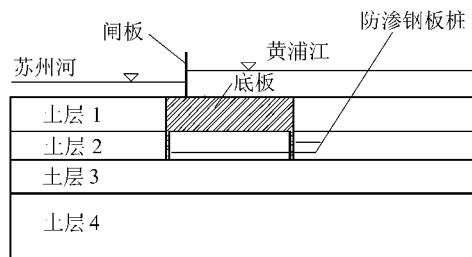


图2 计算模型示意图

以竖直向上为 y 轴的正向,河道轴线指向黄浦江方向为 x 轴的正向,采用四结点四边形单元模拟土体,得到二维网格剖分,共计 4 244 个单元,4 354 个结点。其中防渗墙与底板区域的网格剖分如图3所示。

2.2 渗流微分方程与定解条件

当渗透方向与坐标方向一致时,饱和-非饱和渗流满足如下微分方程:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + Q = \frac{\partial \Theta}{\partial t} \quad (1)$$

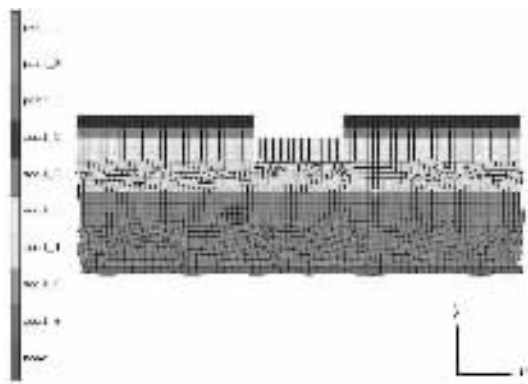


图3 底板附近区域网格剖分

式中: H 为总水头; k_x 为 x 方向渗透系数; k_y 为 y 方向渗透系数; k_z 为 z 方向渗透系数; Θ 为体积含水量; t 为时间。

饱和-非饱和渗流微分方程的定解条件由初始条件与边界条件构成。边界条件通常包括有水头边界条件、流量边界条件以及自由和溢出面这4类。

2.3 渗流计算有限元方程

对渗流控制方程应用伽辽金加权残值法得到式(2):

$$\int_v (B^T C B) dv H + \int_v (\lambda N^T N) dv H t = \int_A (q N^T N) dA \quad (2)$$

令单元特征矩阵 $K = \int_v (B^T C B) dv$, 单元质量矩阵 $M = \int_v (\lambda N^T N) dv$, 单元流量矩阵 $Q = \int_A (q N^T N) dA$, 则式(2)转化为:

$$KH + MHt = Q \quad (3)$$

式(3)即为渗流分析有限元单元方程。

2.4 边界条件

计算区域沿水流方向取 192 m,上表面取至河床表面标高 - 2.35 m,下表面取至高程 - 132 m。整个边界的尺寸足以消除边界效应对计算结果的影响。河床表面及侧面边界上的水头已知,防渗钢板桩表面、底板底面及计算区域的底面作为不透水边界。

2.5 计算参数

计算参数的准确取值是模型数值分析的关键,应根据现场试验统计分析,合理选用地质勘察报告^[5]的推荐值。根据地质勘察报告,各土层水平方向与竖直方向的渗透系数如表1所示。

3 防渗计算与分析

3.1 模拟工况

在有限元计算中,选取两种控制工况作为计算工况:反向挡潮工况(苏州河水位 2.50 m,黄浦江水

位 6.26 m ,水位差 3.76 m)和正向挡水工况(苏州河水位 3.50 m ,黄浦江水位 0.24 m ,水位差 3.26 m)。

表 1 各土层的渗透系数			cm/s
土 层	水平方向 渗透系数	竖直方向 渗透系数	
灰色黏质粉土(土层 1)	3.16×10^{-5}	1.05×10^{-5}	
灰色砂质粉土(土层 2)	7.08×10^{-5}	3.05×10^{-5}	
灰色淤泥质黏土(土层 3)	1.05×10^{-6}	4.99×10^{-7}	
灰色黏土(土层 4)	1.07×10^{-6}	1.37×10^{-7}	
灰色粉质黏土夹粉土(土层 5)	4.90×10^{-6}	1.97×10^{-6}	
灰色粉质黏土(土层 6)	4.90×10^{-6}	1.97×10^{-6}	
灰色粉质黏土(土层 7)	4.90×10^{-6}	1.97×10^{-6}	
灰色砾砂(土层 8)	1.00×10^{-2}	1.00×10^{-2}	

3.2 计算结果

计算反向挡潮和正向挡水这两种工况下的水闸闸底板的渗流扬压力 ,见图 4 图中 L 表示两侧防渗桩内壁之间的距离 , x 表示底板地面各点与苏州河侧防渗桩内壁的距离 ,1 m 水柱等于 9.8 kPa。

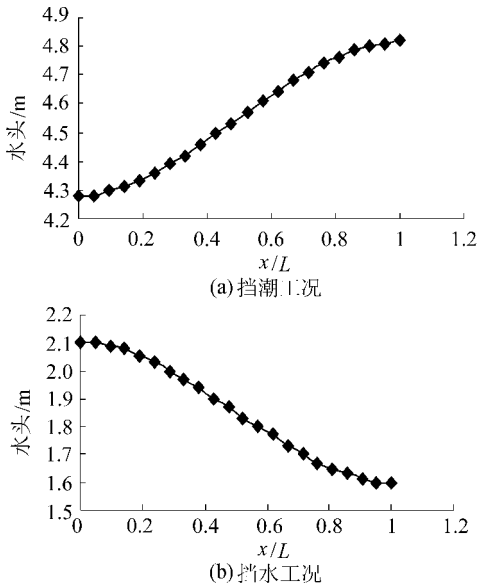


图 4 闸底板底面水头分布曲线

反向挡潮工况时 ,作用在闸底板底面的最大水头值为 4.82 m ,最小水头值为 4.28 m ;正向挡水工况时 ,作用在底板底面的最大水头值为 2.10 m ,最小水头值为 1.60 m。同时给出这两种工况下的水力坡降图(图 5 ~ 6)。

反向挡潮工况时 ,最大出渗坡降为 0.003 5 ;正向挡水工况时 ,最大出渗坡降为 0.003 1。

3.3 结果分析

地下渗流分析是影响水工建筑物安全性的主要因素。本文的渗流计算分析表明 ,各水闸的渗流是稳定的 ,闸底板上的渗流场压力分布符合一般水闸闸底的渗流流场的分布规律 ,未见有阻碍闸基渗流安全的异常或畸变情况。因水闸基底轮廓布置简单 ,在各种工况下 ,闸底水力坡降线基本为线性分

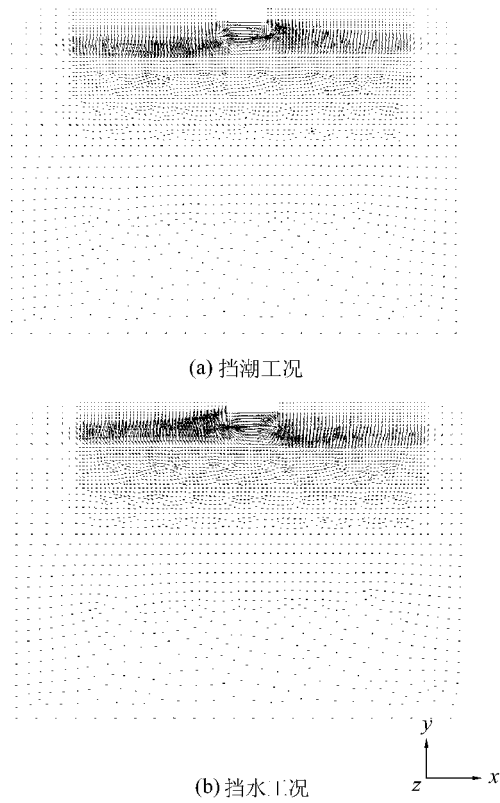


图 5 计算区域水力坡降矢量图

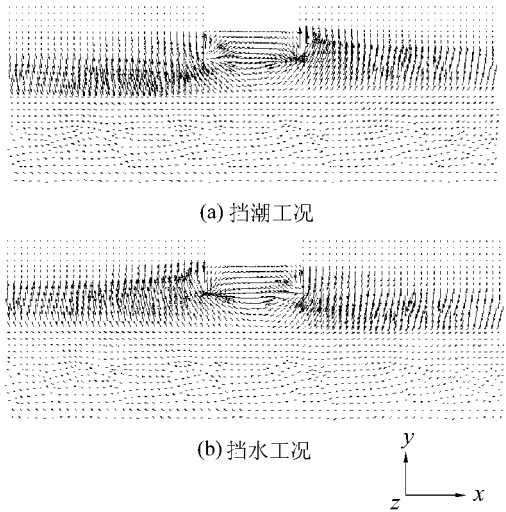


图 6 闸底板附近区域水力坡降矢量图

布。由于饱和-非饱和模型考虑了非饱和区的基质吸力的作用 ,增加了水头损失 ,压力降低 ,在水闸下游侧的压力等值线要较饱和渗流计算得到的压力等值线偏低。饱和-非饱和渗流计算得到的等压线分布 ,从由饱和区到非饱和区压力由正值变为负值 ,其交界面为零等压线 ,即为浸润线。饱和-非饱和渗流模型不但反映了饱和区渗流水运动情况 ,也反映了非饱和区渗流情况 ,从理论上讲 ,它使渗流数值模拟更符合实际情况。

4 结 论

在水闸的设计和运行管理中,渗流数值计算非常重要。水闸设计时,通过渗流计算可以检验水闸的初选形状与尺寸,进行合理的土料布置与水闸防渗布置;在运行管理中,由于水闸渗流条件不断改变,也需要通过渗流计算来核算闸体的稳定性,以及确定渗漏损失和合理的防渗措施。因此,关于渗流问题的数值计算具有很大的实际意义。渗流计算的目的是为整个水闸工程的设计、施工、校核提供依据。通过与安全检查成果和渗流监测资料的对比,可检验计算模型、参数取值和计算成果的合理性,为今后类似工程的渗流计算提供参照。从本文分析结果可以看出,渗

流计算达到了既定目的,成果基本合理。

参考文献:

[1] 钱家欢,殷宗泽.土工原理与计算[M].北京:中国水利水电出版社,1996.
[2] 侯俊平,郭炜.有限元计算方法在大坝渗流分析中的应用[J].武汉大学学报:工学版,2003(5):63-66.
[3] 梁清香.有限元与 marc 实现[M].北京:机械工业出版社,2005.
[4] 朱学愚,谢春红,钱孝星.非饱和流动问题的 SUPG 有限元法[J].水利学报,1994(6):37-42.
[5] 上海海洋地质调查局地质勘察工程公司.苏州河河口水闸工程地质勘察报告[R].上海:上海市水务工程设计院,2003.

(收稿日期 2007-01-15 编辑 骆超)

(上接第 31 页)

表 1 沉井就位实测偏差 m

位置	北边墩		位置	南边墩	
	X	Y		X	Y
a	+0.109	+0.114	e	+0.113	-0.188
b	+0.077	+0.111	f	+0.086	-0.016
c	+0.112	+0.086	g	+0.266	-0.014
d	+0.028	+0.124	h	+0.225	-0.183

注:X 方向为顺苏州河方向,向东为“+”;Y 方向为垂直苏州河方向,向北为“+”。

的特点,在国内和国际尚属首例。许多结构为非标准结构,验收标准在已有规范中未有明确规定,工程施工如采用单一的水利工程施工质量检验评定标准,既不合适也不全面。同时,工程施工还受周边环境、环境保护及不断航、不断水施工条件等多种因素的影响,许多施工措施与常规不同,对施工质量的影响程度不同,质量验收标准应有所区别。根据工程特定的施工条件、结构功能要求提出具体的控制标准非常必要。

分析现有规范的要求和不断航、不断水等施工条件,结合结构功能要求提出顺水流与垂直水流方向沉井沉放允许偏差的不同控制标准,在垂直水流向沉井水平位移允许偏差向岸侧为 200 mm,向河侧为零,符合功能要求,也能进行施工控制,施工措施能达到提出的控制标准,可为今后大型特殊水利、港口等工程的建设提供参考。

参考文献:

[1] 刘方治.大型沉井的纠偏[J].铁道建筑技术,2003(2):40-41.
[2] 施进中.浅谈沉井工程在软土层中的施工[J].岩土工程界,2003(7):43-44.
[3] 房桢.沉井倾斜纠偏[J].水运工程,2000(6):39-41.

[4] 交通部第一公路工程总公司.公路施工手册:桥涵(上册)[M].北京:人民交通出版社,2000.
[5] DGJ 08—90—2000,水利工程质量检验评定标准(试行)[S].
[6] SL 27—91,水闸施工规范[S].
[7] DGJ 08—11—1999,地基基础设计规范[S].
[8] GBJ 141—90,给水排水构筑物施工及验收规范[S].
[9] JTJ 071—98,公路工程质量检验评定标准[S].

(收稿日期 2007-01-15 编辑 骆超)

· 简讯 ·

水科学创新高级论坛在南京隆重开幕

2007 年 4 月 9 日,由水利部科学技术委员会、中国水利学会、南京水利科学研究院、江苏省水利厅、河海大学、水文水资源与水利工程科学国家重点实验室联合举办的“水科学创新高级论坛”在南京隆重开幕。本次论坛的主题是:贯彻落实《国家中长期科学和技术发展纲要(2006~2020)》,研讨、交流新时期水利工作全局性和基础性的重大科学技术问题,加强水利科技自主创新,促进创新人才的培养和创新能力建设,破解水科学领域发展中的难题,推进产学研结合,更好地服务于国家经济社会发展。参加论坛的有水利部汪恕诚部长、胡四一副部长、刘宁总工程师,江苏省黄莉新副省长,陈志恺、马洪琪、周君亮等十余位中国科学院、中国工程院院士,国务院南水北调建设委员会办公室和中国三峡总公司的代表,水利部有关司局、相关流域机构等部门的领导,以及中国水利学会、中国水力发电学会、中国水利水电科学研究院、长江科学院、黄河水利科学研究院、清华大学、武汉大学等单位的领导和专家、科技人员代表 300 余人。

(本刊编辑部供稿)