

苏州大龙港泵站三维有限元结构应力分析

孙永明¹ 李同春² 牛志伟²

(1. 江苏省太湖水利规划设计研究院有限公司, 江苏 苏州 215128; 2. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 大龙港枢纽是苏州城市中心区防洪的重要工程,但由于泵站底板下卧层强度相对较低,需要对泵站结构进行分析以确定底板的受力特性。采用空间有限元分析方法,将泵房、节制闸结构简化为板梁体系,用壳单元和梁单元模拟,用三维实体单元模拟有限元地基,分析了泵闸结构在各种工况下的受力特性。结果表明,泵房底板在各工况下横河向应力基本以压应力为主,底板两侧靠近边墙中间则会出现一定程度的拉应力,完建期底板会出现较小的顺河向拉应力,但在泵站挡水后拉力区会逐渐减小。

关键词 泵站;有限元分析;大龙港水利枢纽

中图分类号:TV675 文献标识码:A 文章编号:1006-764X(2007)S2-0097-03

大龙港是苏州市城市中心区南部的主要骨干河道,北起古城区护城河,南至京杭运河,全长 3.2 km,中间与湄长江等众多河道相连,河宽 16~60 m。大龙港枢纽位于京杭运河苏州城南段的大龙港河口,由一座 12 m 节制闸和一座 20 m³/s 双向泵站组成。大龙港泵站设计总流量 20 m³/s,设计净扬程 0.88 m,选择 4 台平面 S 形轴伸泵,单泵设计流量 5 m³/s。枢纽主要功能为防洪、排涝和改善城市水环境。

根据地质勘测报告,节制闸所处土层强度较高,可作为闸底板的天然地基持力层,但泵站下卧层强度较低,应进行稳定和沉降验算。泵站所处土层强度较低,不宜作为泵站的天然地基持力层,建议采用水泥土搅拌法对地基进行加固处理,并进行稳定性分析。本文对大龙港泵站及节制闸进行空间三维有限元分析,并对泵站及闸的受力特性进行评价,为优化设计提供理论依据。

1 计算方法

泵闸结构一般由底板、边墙、隔墙及混凝土柱等结构组成,在进行有限元分析时可根据情况将其简化为板梁结构进行分析,而地基可以用有限元地基模拟。计算分析采用自编的三维有限元程序进行计算,主要采用的单元形式为空间八节点等参单元、四节点板壳单元和梁单元。其中四节点板单元的应力分量包含面内平面应力分量和卜小明等^[1-2]提出的

弯曲应力分量,因此每个节点的位移未知量在局部坐标系下为 5 个,但转换到整体坐标系下时需采用 6 个,即 3 个平移分量和 3 个转动分量。

由实体单元、板壳单元和梁单元组成的系统有限元静力分析控制方程可以表示为^[3]

$$Ku = F \tag{1}$$

式中: K 为整体坐标系下的总体刚度矩阵,由每个单元形成的局部坐标系下的刚度矩阵转换后按自由度叠加而成; u 为整体坐标系下的位移列阵; F 为整体坐标系下的荷载列阵。

由方程(1)解得位移分量后代入平面应力或弯曲应力计算方程可求得不同部位在相应局部坐标系下的平面应力和弯曲应力分量。

2 大龙港泵站有限元分析模型

大龙港泵站的 3 维有限元分析模型如图 1 所示,坐标系以竖直向上为 z 轴正向,顺河向(由运河侧指向内河侧)为 y 轴正向,横河向(由泵站指向节制闸)为 x 轴正向。地基计算范围在顺河向(沿运河侧和内河侧向外)延伸 3 倍泵房最大高度,在泵房和节制闸外侧也扩展 3 倍泵房最大高度,深度方向取 2 倍泵房最大高度。节制闸底板、闸侧边墩、泵房底板及上部结构一般为板系结构,若用常规的三维实体单元进行分析则不能反映弯曲特性,因此,本文将其简化为板梁系结构,采用三维壳单元进行模拟,在闸墩板较厚

处 采用等效刚度 ,泵房上下游侧混凝土柱采用梁单元模拟 ,地基采用有限元地基 ,用三维八结点六面体等参单元进行模拟。共剖分八结点实体单元 5 480 个 ,壳单元 1 888 个 ,梁单元 6 个 ,结点 8 502 个。

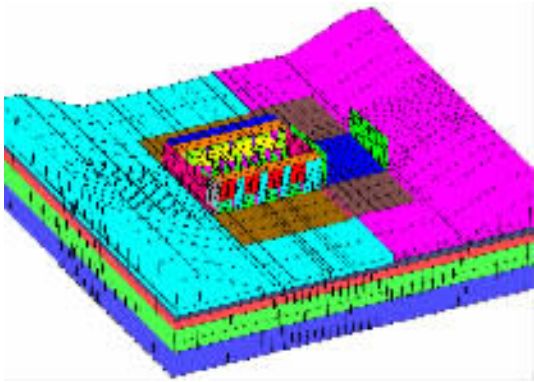


图 1 整体三维有限元模型

3 材料参数及计算工况

3.1 材料参数

上部结构均为 C20 混凝土 ,弹性模量为 25.5 GPa ,泊松比为 0.167 ,密度为 2.5 t/m³。站身底板下为深 6 m 的水泥搅拌桩基础。各土层基础资料见表 1。

表 1 地基参数

土 层	土层高程 范围 /m	变形模量 E/kPa	泊松 比	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)
②1 层土	5.3 ~ -1.9	5919.2	0.35	39	14
②2 层土	-1.9 ~ -3.5	4673.1	0.35	27	12
③层土	-3.5 ~ -5.5 -10.5 ~ -16	2990.8	0.35	18	7
③'层土	-5.5 ~ -10.5	9034.6	0.35	6	28
复合土层		19377.7	0.35	39	14

3.2 各工况水位组合和荷载组合

由于大龙港泵站是连接大龙港内河与京杭运河的枢纽工程 ,工程起调节内河与运河水位的作用 ,因此 ,有限元分析中考虑正向挡水和反向挡水 2 种情况。在每种情况中均考虑设计、校核、检修 3 种工况。另外 ,对完建期工况也进行了分析。计算工况如表 2 所示。

表 2 各工况水位组合

设计工况	方向	运河侧/m	内河侧/m	组 合
完建期	正反向	无水	无水	基本组合
设计工况(防洪)	正向	5	3.1	基本组合
设计工况(引水)	反向	2.36	3.5	基本组合
校核工况(防洪)	正向	5	2.8	特殊组合
校核工况(引水)	反向	1.89	3.8	特殊组合
检修工况(防洪)	正向	3.98	3.3	特殊组合
检修工况(引水)	反向	2.83	3.3	特殊组合

每种工况均考虑结构自重、设备及闸门自重、楼面活荷载、节制闸上部荷载、闸侧土压力、扬压力、流道水压力等 ,正向和反向挡水情况除考虑以上荷载外 ,还考虑泵闸上下游不同水位所引起的静水压力荷载。

4 成果分析

通过三维空间有限元分析 ,得到了各种工况组合下应力分布规律 ,应力值均以拉应力为正 ,压应力为负。图 2 给出了完建工况时泵房底板的应力分布。从图中可以看出 ,在完建期整个底板横河向基本处于受压状态 ,在靠近内河侧底板上出现 4 个压应力集中区 ,这主要是由于此处是压力管道支撑墩所导致的局部应力集中 ,但应力值并不大。完建期底板顺河向应力基本处于受拉状态 ,并且拉应力水平非常低 ,仅在靠近边墙中部出现相对较大的拉应力 ,其值最大仅为 350 kPa。完建期运河侧挡水面板的应力分布如图 3 所示 ,从图中可以看出应力水平都比较低 ,无论是横河向应力还是顺河向应力都在挡水面板上部出现局部拉应力。

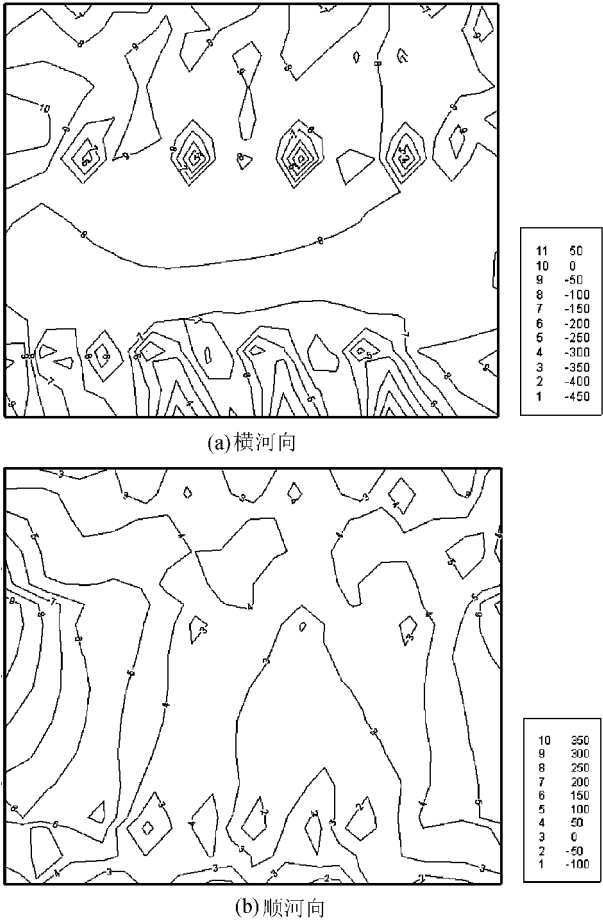


图 2 完建工况泵房底板应力分布(单位 kPa)

图 4 和图 5 给出了设计水位正向挡水时泵房底板和运河侧挡水面板的应力分布。基本组合正向挡水时底板和运河侧挡水面板的应力分布规律和完建期基本相同 ,由于泵房上下游挡水及流道水体对底板产生荷载 ,导致底板横河向压应力有所增大 ,而顺河向应力也基本表现为压应力 ,但在局部仍有较小的拉应力出现。

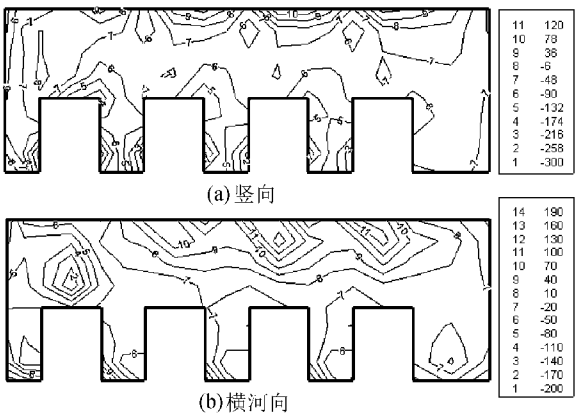


图3 完工工况泵房运河侧挡水面板应力分布(单位 kPa)

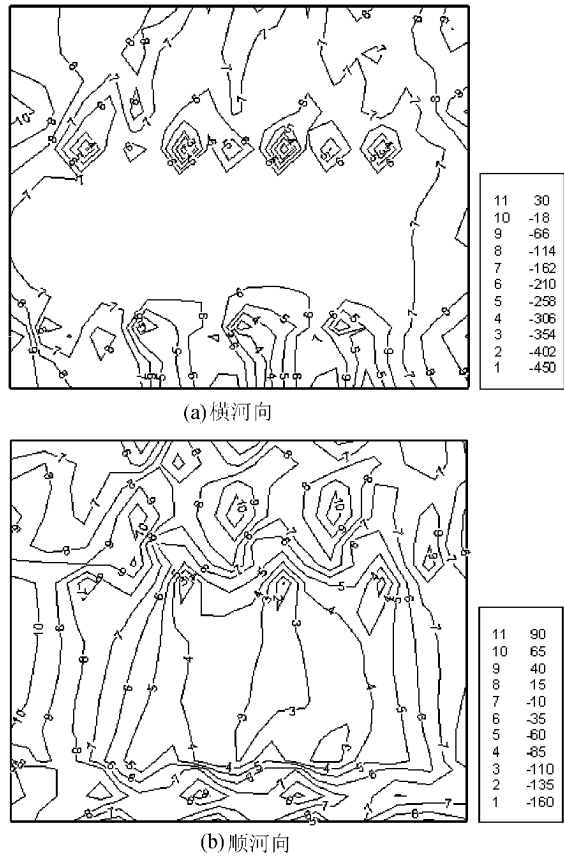


图4 基本组合正向挡水泵房底板应力分布(单位 kPa)

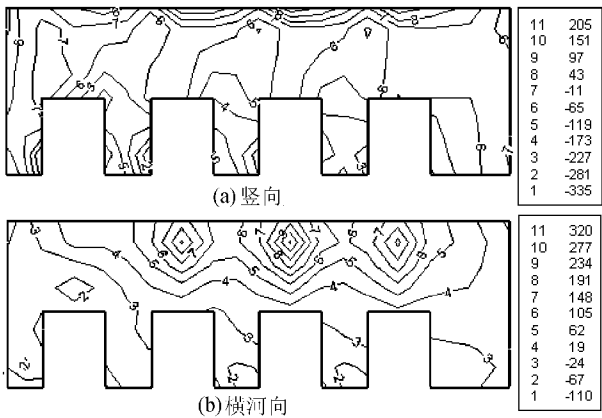


图5 基本组合正向挡水泵房运河侧挡水面板应力分布(单位 kPa)

图6和图7给出了设计水位反向挡水时泵房底板和运河侧挡水面板的应力分布。与正向挡水时相比,底板顺河向拉应力区有所增大。由于此时内河水位略高于运河水位,因此,在靠近内河侧和边墙中间顺河向应力出现拉应力。限于篇幅,特殊工况和检修工况正反向挡水时的应力分布图略。

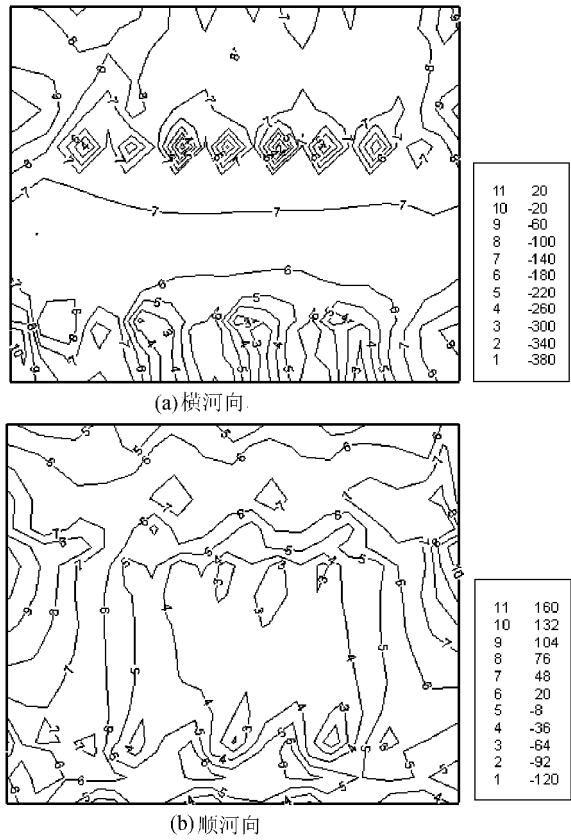


图6 基本组合反向挡水泵房底板应力分布(单位 kPa)

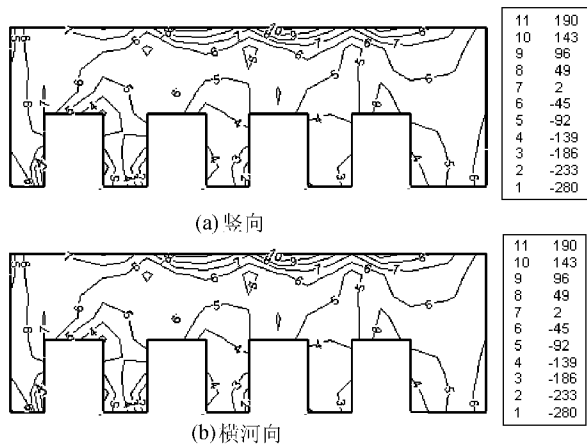


图7 基本组合反向挡水泵房运河侧挡水面板应力分布(单位 kPa)

5 结 论

通过对大龙港枢纽工况建立三维空间有限元分析,用三维实体等参单元模拟有限元地基,将上部结构简化为板梁体系,用壳单元和梁单元(下转第166页)

a. 数据预处理过程。从关系表中抽取与预测观测站相关的站点的站码,然后对于不同类型的数据分别抽取对应的历史数据(包括相关站点水位、相关站点降雨、相关站点流量),接着根据预测观测站的站码(为关键字段),将多个表中的数据进行融合汇总,形成统一的汇总数据,同时进行一些其他必要的数据库整理和转换工作,例如数字到字符型的转换、日期变换、数据筛选等,这部分工作需要根据具体的数据库情况进行设定。

b. 数据插补过程。由于实时报讯时经常出现数据不完整的情况,故在数据预处理时还要进行数据插补,为系统处理方便、简单,对水位、降雨数据采取以下补缺规则:降雨数据若没有则当作没有降雨处理,以0补缺;水位数据根据前后两天的平均值插补。

c. 模型建立过程。在数据预处理的基础上,利用 Clementine 中的历史节点,将数据构成历史数据序列,然后选择神经网络模型进行模型训练。

d. 模型评估过程。对建立好的数据模型,利用已有数据进行训练、评估打分,并和测试集中的已有数据比较,优化模型参数,可以得到分析图,对预测结果进行分析。

e. 预测过程。将相关站点的水位、降雨等实时数据应用到经评估训练得到优化参数的模型中,即可获得观测站的预测水位。

4.3 预测结果

a. 对模型的评估统计量如表 2 所示,从预测的结果可以看出,预测站点总体的水位涨落趋势以及水位的预测值准确度还是比较高的。从结果看来,预测模型能很好地逼近实际的观测量,说明预先根据经验假定的相关因素对于站点的水位影响还是比较显著的。

表 2 对所有时间点神经网络预测结果统计

统计量	统计值	统计量	统计值
最小误差	-0.396	标准差	0.059
最大误差	0.451	线性系数	0.935
平均误差	-0.002	记录数	2062
绝对误差	0.038		

b. 根据预测结果,峰值数据的预测值与实测值还是有一些差距,也是大部分预测的误差所在之处。所以,要提高峰值预测的准确度,需要能够找出产生峰值的真正原因所在,确定产生峰值的日期,根据记录日期找到当天对峰值产生影响的相关因素,整理这些可能因素的历史数据,尤其是在峰值发生当天的加报数据等。对于预测中出现的误差,可以根据数据挖掘软件的便捷性来进行实时校正,以减少误差。

5 结 语

a. 上面的预测仅做了 1 日的预测,在短期水文预报中时间步长可能会要求长一些,这就需要:①建立预测第 2 ~ N 天的模型;②对相关站的数据进行预测后,作为预测该数据的输入值。

b. 本次主要考虑相邻地区水位和地区降水对测站水位的影响,下阶段将细化流域站点影响因素,使得预测结果更加接近实测值。

c. 增加以下方法减少峰值误差:①利用加报数据;②将 1 天再分成 2 ~ 4 个时段,利用加报数据;③按线性补缺数据。

参考文献:

[1] 袁秀娟,夏军.径流中长期预报的灰色系统方法研究[J]. 武汉水利电力大学学报,1994,27(4):367-375.
[2] 王文,马骏.若干水文预报方法综述[J]. 水利水电科技进展,2005,25(1):56-60.
[3] 赵新生,赵杰吉,俊峰.浅谈数据挖掘与水文现代化[J]. 人民黄河,2005(27):28-29.
[4] 陈守煜.中长期水文预报综合分析理论模式与方法[J]. 水利学报,1997(8):15-21.
[5] 艾萍,倪伟新.我国水文数据挖掘技术研究的回顾与展望[J]. 计算机工程与应用,2003(28):13-17.

(收稿日期:2007-01-23 编辑:熊水斌)

(上接第 99 页)

进行模拟。分析了大龙港泵站在完建期、正常设计水位正向和反向挡水工况时结构的受力特性,得出了泵房底板和运河侧挡水面板在各种工况下的应力分布规律。泵房底板在各工况下横河向应力基本以压应力为主,底板两侧靠近边墙中间则会出现一定程度的拉应力。完建期底板会出较小的顺河向拉应力,但在泵站挡水后拉应力区会逐渐减小。这些结论可以为泵站优化设计提供参考作用。

参考文献:

[1] 卜小明,龙驭球.一种薄板弯曲问题的四边形位移单元[J].力学学报,1991,23(1):53-60.
[2] 卜小明,龙驭球.一种高精度的矩形板弯曲单元[J].土木工程学报,1991,24(1):17-22.
[3] 朱伯芳.有限单元法原理与运用[M].2版.北京:中国水利水电出版社,1998.

(收稿日期:2007-03-15 编辑:熊水斌)