

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2022.11.036

# 水闸交通桥结构形式改变对水闸闸室受力影响分析

曹睿哲

(上海市水利工程设计研究院有限公司, 上海市 200064)

**摘要:** 水闸除险加固过程中往往会改变闸室局部结构形式,这对闸室受力会产生影响,针对很多水闸在改造加固时将正拱形交通桥改建成平板式交通桥,分析水闸交通桥结构形式改变对底板应力有很大的影响。以江苏某水闸为例,利用三维有限元软件建立拱形桥与平板桥两种情况下的水闸三维模型,分别对两种情况下的底板应力进行计算,分析比较不同形式的交通桥对反拱底板应力的影响。分析结果表明:将拱形交通桥改成平板交通桥会使水闸反拱底板拱脚处的拉应力变大,且在拱脚附近形成应力集中,从而造成底板产生裂缝。

**关键词:** 有限元;反拱底板;交通桥;应力

**中图分类号:** TV66

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-7716(2022)11-0129-04

## 0 引言

在水闸等水工建筑物中,为了节省材料并充分发挥混凝土的性能<sup>[1]</sup>,很多工程中广泛采用了反拱底板的形式。反拱底板是在地基上新建拱圈向下的反拱形结构,利用其结构特点,底板内力通过反拱结构传递至底板两侧拱脚,再与闸墩的传递至底板的内力在拱脚进行汇合,最终共同传入地基<sup>[1]</sup>。反拱底板具有较大的经济性,因此江苏、浙江、安徽等地在一些水闸中都有采用这种底板形式。采用反拱底板的水闸,其闸上交通桥的形式往往为正拱形结构<sup>[2]</sup>,反拱底板与正拱形交通桥共同构成拱形结构,可将垂直方向受到的力,传递给相邻结构<sup>[3]</sup>,故拱形结构较框架结构相比,能承受更大的内力。但随着时间的推移,很多水闸出现沉降、裂缝、混凝土脱落等病害,因此在水闸的加固改造过程中,为了方便施工,往往会用平板交通桥代替拱形交通桥,交通桥结构形式的改变将导致底板应力<sup>[4]</sup>发生变化。有的水闸将拱形桥改建成平板桥之后,底板、排架等结构均发生开裂,严重影响了整个闸室的结构。孔庆阳等结合工程实例利用有限元对反拱底板结构的应力进行了分析,而目前从交通桥结构形式改变的角度对底板应力的影响的分析还比较少。本文将结合实际工程并利用三维有限元模型<sup>[9-15]</sup>对交通桥结构形式的改变如何影响反拱底板应力进行分析研究,具有较大的实用价值。

收稿日期: 2021-07-08

作者简介: 曹睿哲(1991—),男,硕士,工程师,从事水工结构工程设计工作。

## 1 计算理论

有限元法主要分为 3 布进行处理:离散化处理、单元分析和整体分析。离散化处理是通过变分原理和分区插值,把基本支配方程转化为线性代数方程,把求解待解域内的连续场函数转化为求解有限个离散点处的场值函数。单元分析就是建立单元刚度矩阵,将单元的内力用节点位移表示。整体分析就是根据单元刚度矩阵得出总体平衡方程组并加以求解。在连续介质离散化后,取出其中任意一个结点  $i$ ,作用于结点的外荷载为  $\{P\}^i$ 。根据平衡条件,作用于结点上的合力应等于零,即在结点  $i$ ,所有相邻单元的  $i$  点结点力之和与结点荷载平衡,列出全部结点的平衡条件,得出总体平衡方程组,即:

$$[K]\{\delta\}=\{P\} \quad (1)$$

$$[K]=\sum_{e=1}^M[K]^e \quad (2)$$

式中: $[K]$ 为总体刚度矩阵,由单元刚度矩阵组合而成; $\{\delta\}$ 为全部结点的位移列向量; $\{P\}$ 为全部结点的荷载列向量,包括直接作用于结点上的集中荷载和所有分布荷载、初应力或初应变转换而成的等效结点荷载; $[K]^e$ 称为单元刚度矩阵,它的元素表示当该单元  $e$  发生一定的结点位移时所对应的结点力,单元刚度矩阵 $[K]^e$ 决定于该单元的形状、大小、方向和弹性常数,而与单元的位置无关,即不随单元或坐标轴的平移而改变。

本次模型计算中其地基土体采用摩尔库伦塑性模型,闸室结构采用线弹性模型。摩尔库伦塑性模型

是基于材料破坏时应力状态的摩尔圆提出的,破坏线是与这些摩尔圆相切的直线<sup>[15]</sup>。

$$\tau_n = C - \sigma_n \tan \varphi \quad (3)$$

$$F = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) + \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi - C \cos \varphi \quad (4)$$

其中式(3)称为摩尔库伦屈服条件,  $C$  为凝聚力,  $\varphi$  为内摩擦角,  $\tau_n$  与  $\sigma_n$  分别为破裂面上的切应力与正应力。 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  正应力由大到小排列,  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  不断轮换得到 6 个表达式, 它们在  $\pi$  平面上形成非正六边形的屈服线, 在主应力空间的屈服面是不规则的六棱锥面。摩尔库伦屈服准则假定材料的破坏和中主应力无关。

## 2 计算模型与基本荷载

### 2.1 工程概况

某水闸建于 1990 年, 闸室顺水流方向长 17.00 m, 垂直水流方向长 66.50 m。闸室共分 9 孔, 3 联布置。其中北岸通航孔单独一联, 净宽 8 m, 总宽 10.50 m。其余 8 孔为泄水孔, 分为 2 联, 每 4 孔一联, 每孔净宽 6 m, 每联总宽 28.00 m。水闸底板采用反拱结构厚 1.20 m, 边墩厚 1.50 m, 中墩厚 1.00 m。水闸设计平均流量为 258 m<sup>3</sup>/s, 最大流量为 323 m<sup>3</sup>/s, 控制流域面积 605 km<sup>2</sup>。由于原交通桥桥面破损严重, 2012 年对交通桥进行拆除重建, 翻建的交通桥, 采用平板交通桥。交通桥拆建后, 在实际运行过程中发现闸底板及交通桥均产生新增裂缝, 故本文利用三维有限元模型对交通桥结构形式的改变如何影响反拱底板应力进行分析研究。

### 2.2 计算模型

为了更好地对水闸结构内力进行分析, 本水闸有限元模型主要由闸室结构与地基共同构成。其中闸室结构由底板、闸墩、交通桥、排架及工作桥共同构成。为了更好地分析闸室与地基的共同作用, 结合相关经验<sup>[9]</sup>, 该闸地基模型的长为水闸顺水流方向长度的 3 倍, 宽为水闸垂直水流方向宽度的 3 倍, 高为水闸高度的 2 倍, 地基的边界条件近似认为其与土体是固结的<sup>[10]</sup>。本文建立两种模型: 一种是交通桥为拱形桥的水闸模型, 另一种是在各种参数都不变的情况下交通桥为板桥的水闸模型, 两种模型网格均采用标准的四节点线性四面体减缩积分单元<sup>[11]</sup>。闸室段的网格模型见图 1、图 2。

### 2.3 地基土材料性质和力学参数

该水闸的地基采用摩尔库伦本构模型进行分

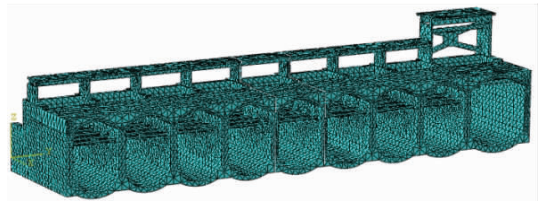


图 1 闸室结构网格模型(拱形交通桥)

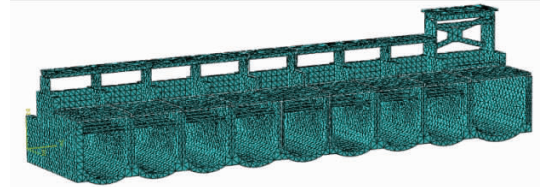


图 2 闸室结构网格模型(平板交通桥)

析<sup>[12, 13]</sup>。本次建模的地基土材料参数见表 1~ 表 3。

表 1 地基结构材料计算参数表

名称	材料名	压缩模量 /MPa	泊松比	备注
地基	轻砂壤土	12.5	0.3	不考虑地基土的自重

表 2 闸室结构材料计算参数表

部位	材料名	弹性模量 /MPa	泊松比	容重 / (kN·m <sup>-3</sup> )
底板	C20 混凝土	2.20 × 10 <sup>4</sup>	0.167	25.0
闸墩	C20 混凝土	2.20 × 10 <sup>4</sup>	0.167	25.0
工作桥	C30 混凝土	3.00 × 10 <sup>4</sup>	0.167	25.0

表 3 混凝土容许拉应力与容许压应力值表

部分	容许拉应力设计值 /MPa	容许压应力设计值 /MPa
底板	1.10	9.60

### 2.4 基本荷载

计算模型主要荷载为: 闸室自重、闸室两侧回填土的荷载、水荷载及地震荷载。

#### (1) 闸室自重

#### (2) 回填土荷载

墙后水平土压力按主动土压力进行计算<sup>[14]</sup>, 并考虑土重, 其余按边荷载考虑。

#### (3) 水荷载

水荷载由水平水压力、渗透压力及浮托力共同构成。3 种工况水位组合详见表 4。

表 4 水位组合表

工况	水位 /m		备注
	上游水位	下游水位	
设计工况	2.5	-0.5	
校核工况	2.5	-0.58	
地震工况	2.2	0.33	地震加速度值为 0.15g

#### (4) 公路荷载

根据日常使用情况, 桥梁荷载等级采用公路 II

级进行计算。

(5)地震荷载

地震荷载主要由水平地震力、地震动水压力及地震动土压力共同构成。水闸所处场地地震动峰值加速度为0.15g,本次建模考虑地震荷载的作用。

3 计算结果

3.1 各工况底板应力云图

根据上述计算模型和荷载条件,对两种模型形式进行有限元计算,选取闸室中间四孔一联的闸室进行分析研究。在各工况下的底板应力最大断面的应力云图见图3、图4。

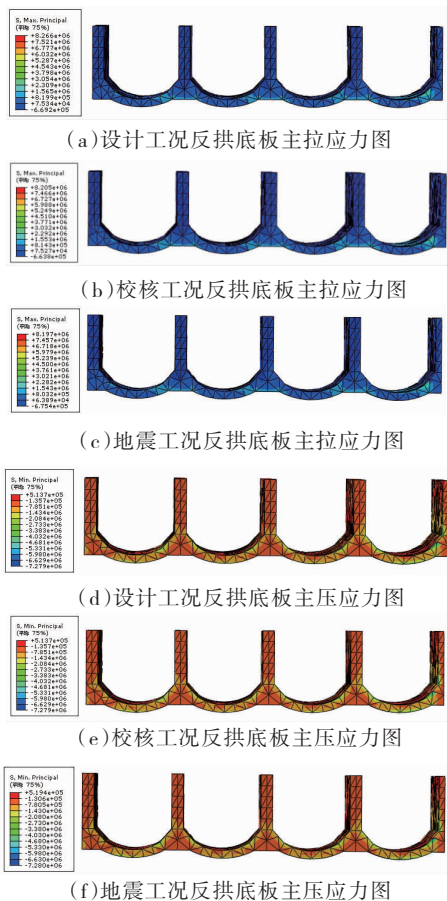


图3 反拱底板应力分布图(拱形交通桥)

拱形交通桥结构下的反拱底板最大主拉应力值在拱脚处为1.04 MPa,在拱顶处为0.82 MPa,最大值均未超出混凝土的允许拉应力值;平板交通桥结构下的反拱底板最大主拉应力值在拱脚处为1.28 MPa,在拱顶处为0.66 MPa,拱顶处的最大拉应力值超出了混凝土的允许拉应力值。

拱形交通桥结构下的反拱底板最大主压应力值在拱脚处为2.33 MPa,在拱顶处为2.05 MPa,最大值均未超过混凝土的允许压应力值;平板交通桥结构下的反拱底板最大主压应力值在拱脚处为1.41 MPa,

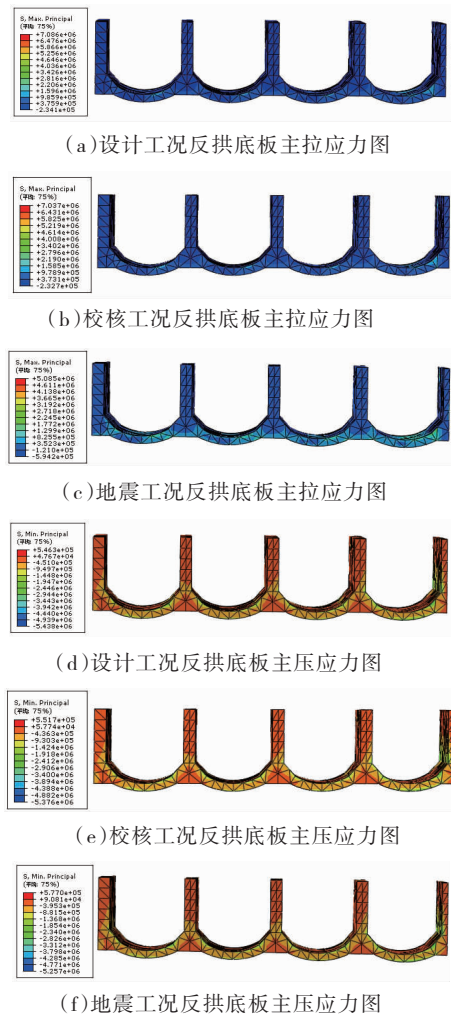


图4 反拱底板应力分布图(平板交通桥)

在拱顶处为1.22 MPa,最大值均未超过混凝土的允许压应力值。

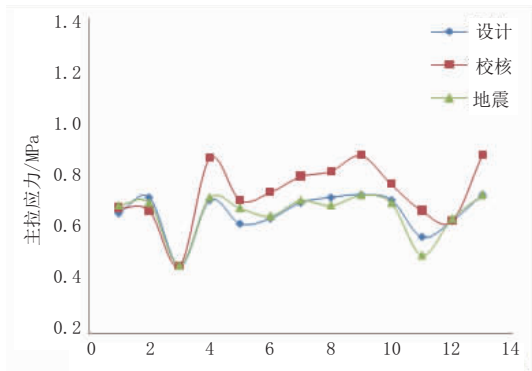
由以上各工况下的反拱底板应力云图可以看出:主压应力在交通桥结构改变以后变化值并不大,对反拱底板的压应力状态影响较小,故以下主要通过主拉应力的变化对两种模型进行进一步分析研究。

根据闸室底板的应力分布,在顺水流方向上截取最不利断面进行分析,并绘制底板垂直水流方向内力变化曲线,底板主拉应力变化曲线见图5。

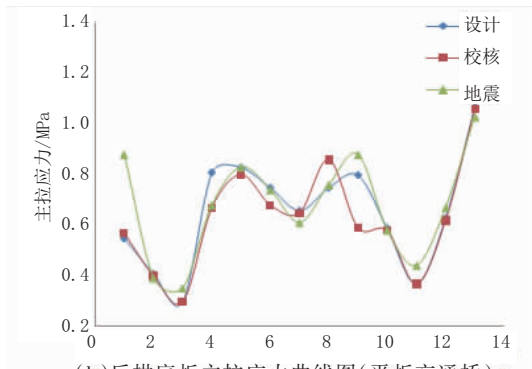
由图5可以直观并全面的看出两种模型下反拱底板在不同工况时的应力分布情况:无论交通桥采用哪一种结构形式,反拱底板的拉应力分布均是在拱顶位置较小,在拱脚位置较大,这符合反拱底板的特点。

拱形交通桥结构下的反拱底板应力曲线图起伏较小,因此应力从拱顶到拱脚变化较小;平板交通桥结构下的反拱底板应力曲线图起伏较大,因此应力从拱顶到拱脚变化较大。





(a)反拱底板主拉应力曲线图(拱形交通桥)

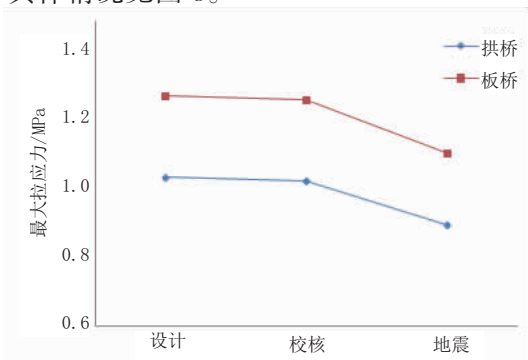


(b)反拱底板主拉应力曲线图(平板交通桥)

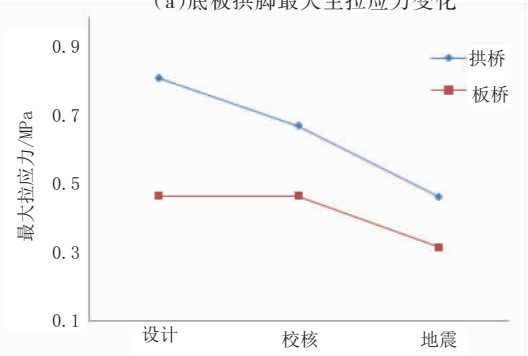
图5 反拱底板主拉应力曲线图

### 3.2 两种模型的数据比较分析

读取两种模型各工况下的拱脚、拱顶的最大主拉应力值,绘制折线图,对两种模型数据进行分析比较。具体情况见图6。



(a)底板拱脚最大主拉应力变化



(b)底板拱顶最大主拉应力变化

图6 反拱底板各工况主拉应力值比较

从图6可以看出:反拱底板的最大主拉应力值的最大值均出现在底板的拱脚处,且反拱底板的拱

脚处的主拉应力值在平板交通桥的情况下比在拱形桥的情况下大,差值最大为0.34 MPa,拱顶处的主拉应力值在平板交通桥的情况下比在拱形桥的情况下小,差值最大为0.35 MPa。

两种模型在各工况下的主拉应力值均是拱脚处的值远大于拱顶处的值,但在拱形交通桥的情况下主拉应力值从拱顶到拱脚变化较小,变化值最大为0.35 MPa,在平板交通桥的情况下主拉应力值从拱顶到拱脚变化较大,变化值最大为0.81 MPa。

## 4 结论

三维有限元软件对水闸反拱底板结构进行了应力分析。分析结果可知反拱底板的最大主拉应力值出现在底板的拱脚处,反拱底板在拱脚处会产生应力集中。反拱底板在拱形交通桥的情况下应力分布状态要优于平板交通桥的情况下应力分布状态。拱形交通桥能帮助底板有效减少部分传递到拱脚的力。将拱形交通桥改建成平板桥后,底板拱脚附近的应力集中现象加重,导致水闸底板出现新增裂缝。

本文建议,在老旧水闸结除险加固过程中,不能随意改变水闸主体的结构形式。若由于需要必须对主体结构形式进行改变时,需通过更加科学的手段,对局部结构改变后的闸室进行整体结构分析计算,以免改造后水闸产生新增病变。

### 参考文献:

- [1] 徐惠亮,邵林,王海俊,等.连续反拱底板结构水闸加固改造的有限元分析[J].排灌机械工程学报,2016(7):615-619.
- [2] 赵剑,彭芳.浅析拱形结构的力学特点[J].内蒙古石油化工,2011(2):32.
- [3] 吴新元,任宏业.上承式无推力拱形桥梁结构体系分析和比较[J].城市道桥与防洪,2015(8):31-32,39.
- [4] 袁银忠.反拱底板应力分析[J].华东水利学院学报,1980(3):34-43.
- [5] 徐刚,邵琳玉,徐莉萍.奔牛枢纽上闸首结构有限元分析[J].江苏水利,2016(4):5-9.
- [6] 萨布尼斯.结构模型和试验技术[M].北京:中国铁道出版社,1989.
- [7] SL 744—2016,水工建筑物荷载设计规范[S].
- [8] SL 191—2008,水工混凝土结构设计规范[S].
- [9] 王勖成,邵敏.有限单元法基本原理与数值方法[M].北京:清华大学出版社,1988.
- [10] 姜弘道,陈和群.有限单元法程序设计[M].北京:水利电力出版社,1989.
- [11] 王焕定,焦兆平.有限单元法基础[M].北京:高等教育出版社,2002.
- [12] 朱伯芳.有限元原理与运用[M].北京:中国水利水电出版社,1998.
- [13] 雷晓燕.有限元法[M].北京:中国铁道出版社,2000.
- [14] 傅永华.有限元分析基础[M].武汉:武汉大学出版社,2003.
- [15] 丁科.有限单元法[M].北京:北京大学出版社,2006.
- [16] Daryl L. Logan. A First Course in the Finite Element Method[M].北京:电子工业出版社,2003.
- [17] 钱家欢.土力学[M].南京:河海大学出版社,1995.