

# 安徽横江梅林坝中墩整体结构 有限元数值仿真分析

张红叶

(盐城市建设工程质量检测中心有限公司, 江苏 盐城 224000)

**摘要:**依托于横江梅林大型水利枢纽工程,利用有限元通用软件 Abaqus,建立岩石地基+中墩结构+帆的 FEM 模型,同时采用 Tie 理论模拟了帆与中墩结构两者之间的受力关系,根据 4 种不同设计工况,计算得到整个模型的应力及位移结果,分析整个模型的受力状态及变形规律;提出结构应力较大的部位需加强配筋的建议,FEM 仿真分析的结果能够为此类复杂结构的设计及配筋方案提供技术支撑和经验参考。

**关键词:**初始地应力; Tie 理论; 中墩; 位移; 应力

中图分类号:TV212 文献标识码:B 文章编号:1007-7839(2020)06-0006-05

## Finite element numerical simulation analysis on the overall structure of middle pier of Hengjiang Meilin Dam in Anhui Province

ZHANG Hongye

(Yancheng Construction Engineering Quality Testing Center Co., Ltd., Yancheng 224000, China)

**Abstract:** Based on the large-scale Meilin water conservancy project of Hengjiang, using the general finite element software Abaqus, the FEM model of rock foundation + middle pier structure + sail was established. Meanwhile, the stress relationship between sail and middle pier structure was simulated by Tie theory. According to the four different design conditions, the stress and displacement results of the whole model were calculated, and the stress state and deformation law of the whole model were analyzed. It's suggested that the parts with large structural stress need to be reinforced, and the FEM simulation analysis results could provide scientific technical support and experience reference for the design and reinforcement scheme of such kind of complex structure.

**Key words:** initial ground stress; Tie theory; middle pier; displacement; stress

### 1 工程概况

梅林坝址位于梅林大桥下游约 2.2 km 的横江河谷,现状河谷宽约 300 m,微地貌为横江河床及河漫滩地貌,地势较为平坦,沟谷呈宽“U”字型。场地范围内地形起伏小,地貌单一。坝址岩土层自上而下主要分布为:杂填土( $Q_{4ml}$ )、粉砂( $Q_{4apl}$ )、卵石( $Q_{4apl}$ )、强风化泥质粉砂岩( $K_1h$ )、强风化砾岩

( $K_1h$ )、弱风化泥质粉砂岩( $K_1h$ )及弱风化砾岩( $K_1h$ )。

梅林坝垂直河流方向一字形布置,泄流总净宽为 180 m,共 4 孔,单孔净宽 45 m。采用底轴驱动翻板闸门蓄水,液压启闭机操作。底槛高程为 124.5 m,蓄水高程为 128 m。坝体底部设置 2.5 m×2.8 m 廊道,集管路、排水、通行、消防、通风为一体,通过布置内部楼梯沟通控制区、设备区、管

收稿日期:2020-01-14

作者简介:张红叶(1987—),女,硕士,研究方向为混凝土结构设计。E-mail:1033461990@qq.com

理区,连通两岸。墩体内部均布置启闭设备,管理、维修均在墩内操作。

## 2 计算理论及方法

### 2.1 计算理论

由于中墩上的帆承受较大的风荷载,帆和中墩结构两者之间采用 Tie 理论来构建两者之间的受力关系,在刚度数据传递上相当于两个面刚性连接,中墩顶板作为 Master 面,帆底部柱子底面作为 Slave 面,同时两者绑定区域不发生相对运动和变形,具有相同的物理量。在 FEM 模型建立时,中墩结构与帆无需网格协调,大大降低了网格剖分的难度。

### 2.2 计算方法

计算软件采用具有世界先进水平的通用有限元分析软件 ABAQUS6.10。该分析软件有强大的前、后处理和计算分析功能,并且能有效地保证计算成果精度,仿真计算采用 Abaqus/Standard 分析模块<sup>[1]</sup>。

假定岩石地基沉降完全,地基存在初始地应力,在本次仿真计算中,对岩石地基施加初始地应力<sup>[2]</sup>,真实模拟地基与中墩结构的应力分布及整体的变形规律。

地应力平衡仿真模拟步骤:①给岩石地基施加重力,使得地基产生地应力及初始沉降,导出初始地应力场、位移场;②将岩石地基的位移场以相反方向施加到岩石地基,岩石地基的沉降就会抵消,形成岩石地基的初始地应力场,更好的模拟中墩结构的应力、位移真实情况。

## 3 计算模型及参数

### 3.1 有限元计算模型

由于中墩三维结构模型非常复杂,有限元建模将岩石地基,混凝土中墩结构及帆分为 Part1 ~ Part3,然后将三者组装成最终的整体模型,详见图 1;分别对三者进行有限元的网格剖分,中墩结构中孔、洞、弧形较多,岩石地基须协调中墩结构的底板,帆的框架结构、悬挑梁之间必须相互协调,所以本文网格剖分均采用 Free Mesh 的方式,均为四面体单元,即为 3D-Sress 的四节点单位,实体单元总数为 85 699,节点数为 129 856;混凝土中墩结构为仿真分析的重点、其网格剖分较为细致,岩石地基网格由小变大向四周扩散。

本文中有限元仿真计算模型主要包括:中墩的底板、墩墙、墩墙顶板、梁、帆等主要混凝土结构,模

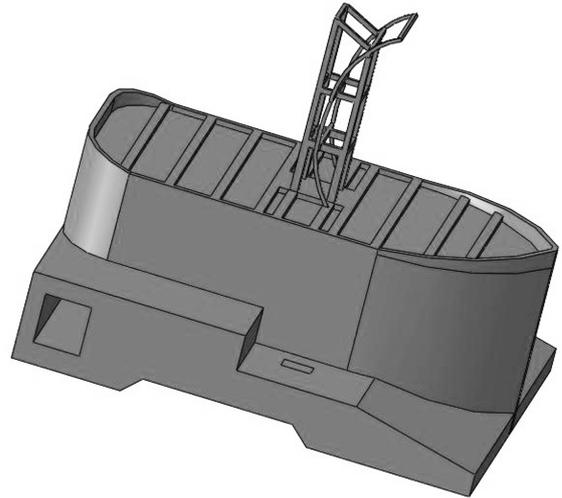


图 1 中墩结构+帆的模型图

型中精细的模拟了中墩结构中的廊道、楼梯井、吊物孔、C15 素混凝土心墙、中墩结构隔墙、整体结构下侧,四周模拟 15 m 的岩石地基,三维有限元网格模型见图 2。

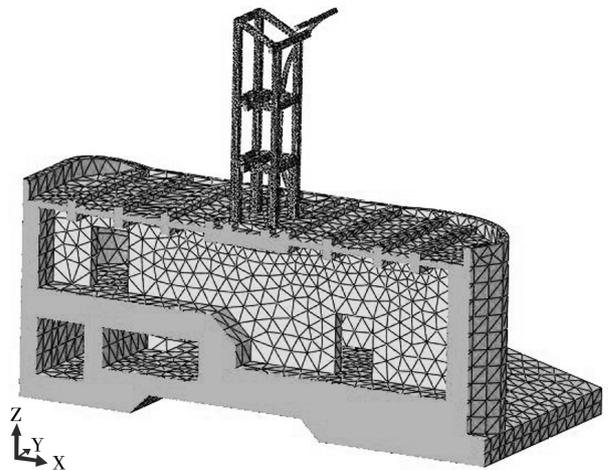


图 2 中墩结构+帆有限元网格模型图  
(地基土单元未显示)

### 3.2 边界约束条件

为了便于建模和成果整理,仿真计算中分别采用整体直角坐标系,坐标原点位于上右侧左岸中墩结构底板与岩石地基接触处的角点上,顺河向为 X 向,横河向为 Y 向,竖向为 Z 向。

中墩底板结构与岩石接触的部分假定接触较好,没有相对滑动且不因受力而脱离,地基单元与中墩混凝土单元共节点;岩石地基四周采用法向约束,即  $U_x=0$  或  $U_y=0$ ;地基地面(高程▽104.5 m)采用三向固定约束,即  $U_x=U_y=U_z=0$ ,其余地基单元的边界面均为自由边界;混凝土中墩结构面为自由边界;帆与中墩顶板结构采用 Tie 约束条件来传

递力和弯矩。

### 3.3 计算参数

#### 3.3.1 计算水位

黄山市新安江上游段(镇海桥~梅林桥)综合治理工程中的梅林坝中墩的计算特征水位详见下表 1:

表 1 中墩结构上、下游的特征水位

序号	计算水位	上游水位/m	下游水位/m	备注
1	设计洪水位	133.32	133.32	漫顶
2	正常蓄水位	128.00	125.00	

#### 3.3.2 材料计算参数

本文有限元计算模型中,假定混凝土、钢筋,岩石基础材料为均匀、连续、各向同性的线弹体,其中墩底板、墩墙、墩墙的顶板、梁的混凝土标号均为 C30。其物理力学参数见表 2。

表 2 混凝土及岩石地基有限元计算力学性能特性参数

中墩混凝土	数值	岩石地基	数值
重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	25.0	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	26.0
弹性模量 $E/\text{GPa}$	30.0	弹性模量 $E/\text{GPa}$	28.0
泊松比 $\nu$	0.167	泊松比 $\nu$	0.25
轴心抗压强度设计值/MPa	15.0	饱和抗压强度/MPa	85.0
轴心抗拉强度设计值/MPa	1.5	-	-

### 3.4 计算工况

根据混凝土中墩结构的设计工况及受力状态,选用以下 4 种工况来进行有限元计算仿真分析,分别为:

工况 1:完建期;

工况 2:正常蓄水位组合(上游水位 128 m,下游水位 125 m)+帆承受的风荷载;

工况 3:正常蓄水位组合(上游水位 128 m,下游无水)+帆承受的风荷载;

工况 4:设计洪水位(132.32 m),水淹没整个中墩结构;

### 3.5 计算荷载

根据《水工建筑物荷载设计规范》SL744—2016,施加于模型进行仿真计算的荷载如表 3 所示。

## 4 有限元仿真计算成果分析

根据 4 种不同的工况,静力计算得到中墩结构的位移、应力<sup>[3]</sup>呈现以下一些规律:(1)结构的整体结构位移较小,在帆与中墩顶板接触处的变形较大,底板、墩墙变形均较小;(2)荷载的对称,结构大致对称,横河向位移场几乎呈现对称的规律;(3)由于中墩上部帆的风荷载,使得顶板上表面与帆接触处的拉、压应力增大;(4)中墩结构的拉、压应力均在混凝土抗拉、抗压强度范围内,在以下几个位置上拉应力较大:中墩顶板中心处的梁下侧拉应力较大,闸门支座处,中墩底板与岩石地基接触处中间并靠近左右岸处、安装油缸板的下侧、廊道<sup>[4]</sup>附近、通风孔处、中墩中隔墙门洞的上部。计算成果见表 4~表 6。

综合表 4~6 汇总的计算数据分析得出,在位移方面:中墩结构整体变形较小,中墩顶板的相对竖向位移较大,墩墙的侧向、竖向位移、底板竖向位

移,不均匀沉降均较小;在应力方面:中墩的底板中部与岩石接触处、闸门支座处、设备安装下侧板、廊道附近、中墩顶板梁的下侧,中墩顶板、通风孔附近、中墩中隔墙门顶处的应力均在混凝土抗拉、抗压强度范围内,只需稍微加强配筋、排气孔的间距稍微加大即可。

## 5 结 语

本文利用有限元通用软件 Abaqus,精细的建立岩石地基+中墩结构+帆的 FEM 整体计算模型,同时采用 Tie 理论仿真了帆与中墩结构之间的接触关系,计算得到整个模型的应力及位移结果,分析整个模型的受力状态及变形规律;指出了结构应力较大的部位需加强配筋的建议,仿真分析的结果

表3 有限元计算模型荷载汇总

序号	受力名称	数值	备注
1	中墩结构+帆的自重	$g = 9.8 \text{ N/kg}$	
2	C15素混凝土的自重	$P = 2.4 \times 2 \times 9.8 = 47.04 \text{ kPa}$	由于其起到填充物的作用,将其自重( $G = M \cdot g$ )以均布力方式施加到中墩心墙的底面上
3	闸门及其门槽自重	$F = 151 \times 9.8/10 = 147.98 \text{ kN}$	未避免有限元计算应力集中现象,将集中力( $F = 151 \text{ t}$ )转化为一个均布力施加到支座底面上
4	油缸及其支座自重	$P = 20 \times 9.8 / (1.2 \times 1.36) = 120.1 \text{ kPa}$	将集中力( $F = 20 \text{ t}$ )转化为作用于油缸支座底面
5	静水压力及扬压力	$P = \gamma H$	不考虑排水设施,扬压力为上游水位到下游水位为线性递减,工况3呈梯形分布、工况4呈三角形分布
6	风荷载	$F = 0.35 \times 40.86 = 14.3 \text{ kN}$	作用于帆表面
7	流水压力	$F = 1.5 \times 3.0 \times 2.6 \times 9.8 \times 9 / (2 \times 9.8) = 52.63 \text{ kN}$	仅工况4:设计洪水位,洪水漫顶中墩

表4 中墩结构位移最大值(绝对值)汇总

方向	工况1		工况2		工况3		工况4	
	位移	位置	位移	位置	位移	位置	位移	位置
$U_1$ (X向)	0.02	中墩下游墩墙顶	0.09	中墩下游墩墙顶部	0.053	中墩上游墩墙顶部	0.129	中墩下游墩墙顶部
$U_2$ (Y向)	0.012	下游底板靠近左岸处	0.22	心墙上侧底板(左岸)	0.081	底板靠近闸门支墩(左岸)	0.195	墩墙靠近孔处(左岸)
$U_3$ (Z向)	0.20	中墩顶板与帆接触处	0.20	中墩顶板	0.228	中墩顶板	0.431	中墩顶板

表5 中墩结构压应力最大值汇总

方向	工况1		工况2		工况3		工况4	
	压应力/MPa	位置	压应力/MPa	位置	压应力/MPa	位置	压应力/MPa	位置
$S_{11}$ (X向)	-0.185	廊道顶(模型简化后)	-0.188	帆与顶板接触处	-0.209	底板下侧、油缸安装板下侧	-0.400	帆与顶板接触处
$S_{22}$ (Y向)	-0.126	帆与中墩顶板接触处	-0.199	顶板	-0.263	中墩顶板中间梁的下侧	-1.068	顶板
$S_{33}$ (Z向)	-0.496	中墩廊道处	-0.565	廊道处	-0.620	闸门支墩处	-0.793	廊道处

表 6 中墩结构拉应力最大值汇总

方向	工况 1		工况 2		工况 3		工况 4	
	拉应力/ MPa	位置	拉应力/ MPa	位置	拉应力/ MPa	位置	拉应力/ MPa	位置
$S_{11}$ (X 向)	0.153	中墩底板中心与 岩石交界处	0.175	底板下侧、油缸 安装板下侧	0.015	帆与顶板 接触处	0.288	底板下侧、油缸 安装板下侧
$S_{22}$ (Y 向)	0.084	中墩顶板中心 处梁的下侧面	0.066	中墩顶板中间 梁的下侧	0.144	顶板	0.430	中墩顶板中间 梁的下侧
$S_{33}$ (Z 向)	0.046	中墩结构顶板上 表面,底板上表面	0.037	闸门支座处	0.118	廊道处	0.734	帆与中墩 顶板接触处

能够为此类复杂结构的设计及配筋方案提供科学的技术支撑和经验参考。

#### 参考文献:

- [1] 王俊杰, 杨东辉, 周小飞. 基于 ABAQUS 软件的模拟重力坝静力分析[J]. 西部大开发(土地开发工程研究), 2016(6):69-74.
- [2] 赵廷红, 王诗玉, 王宁波. 基于 ABAQUS 的碾压混凝土重力坝三维非线性静力分析[J]. 兰州理工大学学报, 2010, 36(6):119-123.
- [3] 梁景奇, 王振华, 刘建军, 等. 基于 ABAQUS 的闸室结构有限元分析[J]. 低温建筑技术, 2014, 36(1):91-93.
- [4] 徐远杰, 楚锡华, 陈龙. 高混凝土重力坝孔口应力非线性数值模拟[J]. 计算机辅助工程, 2010(2).

(上接第 5 页)

- [7] CHEN Sheng, WU Jyh - yang. Estimating normal vectors and curvatures by centroid weights[J]. Computer Aided Geometric Design, 2004, 21(5):447-458.
- [8] JEFFREY M L. Manifolds and differential geometry [M]. New York: American Mathematical Society, 2009.
- [9] DEY T K, GIESEN J. Detecting under sampling in surface reconstruction [C]//Proceedings of the 17th ACM Symposium Computational Geometry. Berlin: Springer, 2001:257-263
- [10] GRUBESIC T H, NELSON R. UAVs and urban spatial analysis[M]. Berlin:Springer, 2019.
- [11] ALT HELMUT. Computational DiscreteMathematics [M]. Berlin:Springer, 2001.
- [12] 林虎, 石照耀, 薛梓, 等. 基于正交距离回归齿面的齿轮误差评定[J]. 光学精密工程, 2015, 23(11):3192-3199.
- [13] PAULY M, KEISER R, GROSS M. Multi - scale feature extraction on point - sampled surfaces[C]. Eurographics'03, 2003, 22(3):32-41.
- [14] ANTONICHIC A. Visibility - based feature extraction from discrete models[J]. Stony Brook, 2008(2):347-353.
- [15] STEFAN H, ALEXANDER T, ANTONIO D G, et al. Numerical investigation of roughness effects on transition on spherical capsules [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2019, 56(2):388-404.