



非杆件大体积混凝土结构内力及配筋计算合理性分析

王勤振, 刘海民, 冯 超

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 针对非杆件大体积混凝土结构设计领域, 以柳江红花水利枢纽复线船闸混合式闸室边墩墙为例, 对传统手算法、有限元法关于内力及配筋计算进行对比分析。结果表明, 有限元应力积分法求弯矩适用于传统杆件结构, 闸室边墩墙作为非杆件体系大体积混凝土结构, 截面高度大, 受压区范围占比大, 中性轴偏向受拉区, 按应力积分法求弯矩, 弯矩值偏大; 传统手算法与有限元应力积分法计算内力, 按矩形截面偏心受压构件正截面受压承载力进行配筋计算, 所需受拉钢筋量多, 不经济; 有限元弹性应力图形法分析受拉区混凝土拉应力, 产生的拉力完全由受拉钢筋承担, 按非杆件体系钢筋混凝土结构配筋计算原则, 实际配置受拉钢筋量合理、经济。

关键词: 非杆件; 大体积混凝土; 内力及配筋计算; 合理性

中图分类号: U 641.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)10-0295-05

Rationality analysis of internal force and reinforcement calculation of non-member mass concrete structure

WANG Qin-zhen, LIU Hai-min, FENG Chao

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: Aiming at the field of non-member mass concrete structure design, we take the side pier wall of compound lock chamber of the second lock for Honghua water control project in Liujiang as an example, compare and analyze the traditional hand calculation method and finite element method about internal force and reinforcement calculation. The results show that the finite element stress integral method is suitable for calculating the bending moment of the traditional member structure. As a mass concrete structure of non-member system, the side pier wall of lock chamber has a large section height and a large proportion of the compression area, and the neutral axis is inclined to the tension area. The bending moment calculated by stress integral method is too large. The traditional hand calculation method and the finite element stress integral method are used to calculate the internal force, and the reinforcement requires a large number of tensile reinforcements and is not economical when calculating by the compression bearing capacity of the normal section of the eccentric compression member with rectangular section. The tensile stress of concrete in the tension area analyzed by the finite element elastic stress graph method is completely borne by the tensile reinforcement. According to the reinforcement calculation principle of non-member system reinforced concrete structure, the actual amount of tensile reinforcement is reasonable and economical.

Keywords: non-member; mass concrete; internal force and reinforcement calculation; rationality

经典结构力学主要研究由杆件组成的体系, 包括梁、柱、桁架等。广义结构力学除了研究可

变形的杆件体系外, 还包括可变形的连续体, 如在水工建筑物中, 某些形状复杂结构(如大坝孔

口、预应力闸墩、蜗壳与尾水管、船闸闸首底板等), 这些结构无法简化为一般杆件体系通过结构力学求解内力^[1], 只能按弹性理论的方法求解应力, 统称为非杆件体系结构。非杆件体系钢筋混凝土结构是指无法按杆件体系结构力学方法求得截面内力的钢筋混凝土结构^[2]。

通航船闸运行稳定可靠, 技术相对成熟, 通过能力大, 建设和后期维护成本较低, 成为过坝通航建筑物的主要形式而得到广泛应用, 并朝着大规模、高水头方向发展^[3]。

我国西南山区河流水头差较大, 地质条件较好, 建基面普遍为中风化岩基, 闸室结构选型考虑利用当地地质条件, 常采用分离式、混合式等闸室墙结构形式。闸室墙属于大体积混凝土, 为非杆件体系结构。

高水头混合式闸室结构是未来山区内河闸室结构形式的主流, 为确保设计过程中采用的计算方法准确和可靠、结构设计合理、节约投资, 本文结合工程实例, 对非杆件大体积混凝土结构内力及配筋计算方法进行对比分析, 综合考虑安全、经济等因素, 选取合理的内力及配筋计算方法, 为类似工程设计提供参考。

1 闸室边墩墙内力及配筋计算分析

1.1 工程概况

广西柳江红花水利枢纽工程等别为 I 等, 主要建筑物级别为 2 级, 拟建红花二线船闸与已建一线船闸轴线间距为 120 m, 有效尺度为 280 m×34 m×5.8 m(有效长度×闸室净宽×槛上水深)。设计代表船型为 2 000 t 货船、一顶 2×2 000 t 船队, 兼顾 3 000 吨级货船。船闸主体建基面均位于中风化岩体内, 岩质坚硬、岩体完整性较好, 最大水头差为 18 m, 为高水头船闸。闸室墙结构形式主要为混合式, 即上部为重力式, 下部为衬砌式, 结构断面见图 1。其中上部重力式闸室墙墙高 23.2 m, 底宽 17.5 m, 墙后回填石渣; 下部衬砌墙墙高 15.8 m, 底宽 3.0 m。

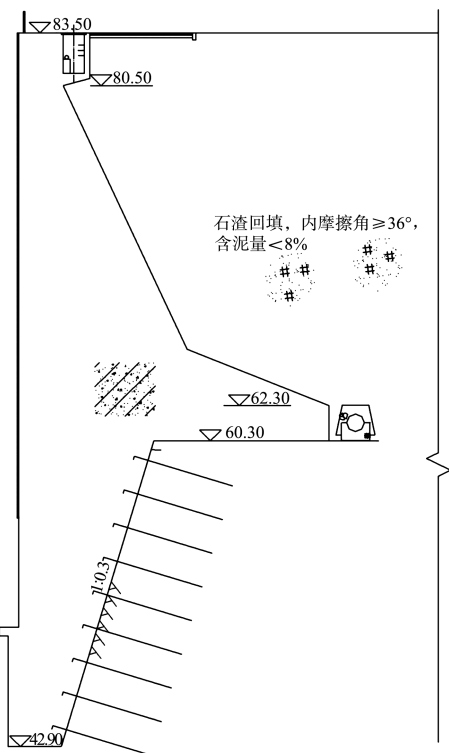


图 1 闸室墙结构断面 (单位: m)

1.2 传统手算法内力及配筋计算

根据《水工混凝土结构设计规范》^[4] 矩形截面偏心受压构件正截面受压承载力配筋计算原则:

$$KN \leq f_c b x + f_y' A_s' - \sigma_s A_s \quad (1)$$

$$KN e \leq f_c b x \left(h_0 - \frac{x}{2} \right) + f_y' A_s' (h_0 - \alpha_s') \quad (2)$$

$$e = \eta e_0 + \frac{h}{2} - \alpha_s \quad (3)$$

式中: K 为承载力安全系数; A_s 、 A_s' 分别为配置在远离、靠近轴向压力一侧纵向钢筋截面面积; N 为轴向压力设计值; f_c 为混凝土轴心抗压强度设计值; f_y' 为钢筋抗压强度设计值; b 为结构截面宽度; e 为轴向压力作用点至受拉边或受压较小边纵向钢筋合力点之间的距离; e_0 为轴向压力对截面重心的偏心距; η 为偏心距增大系数; σ_s 为受拉或受压较小边纵向钢筋应力; α_s 为受拉或受压较小边纵向钢筋合力点至截面近边缘距离; α_s' 为受压较大边纵向钢筋合力点至截面近边缘距离; x 为受压区计算高度; h 、 h_0 为截面高度、截面有效高度。

计算截面见图 2, 传统手算法内力及配筋计算如

下: 轴向压力标准值 3.724 MN, 设计值 4.469 MN, 承载力安全系数 K 取 1.25, 合力矩设计值为 10.109 MN·m, 为满足式(1)~(3), 假定 $\sigma_s=f_y$, 为大偏心受压构件, 计算受压区高度为 $x=469\text{ mm}$, 相对受压区高度 ξ 为 0.06, 相对界限受压区高度 ξ_b 为 0.52, 则 $\xi<\xi_b$, 为大偏心受压构件, 假定成立。实配 $A_s=1\,570.80\text{ mm}^2$, 直径 20 mm 的 HRB400 钢筋, 间距 200 mm 的单层布置。

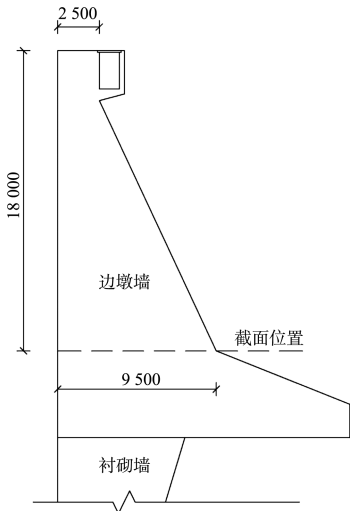


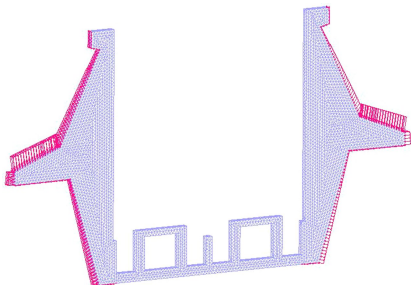
图 2 边墩墙 (单位: mm)

厚度大于 2.5 m 墩墙配筋率, 依据《水工混凝土结构设计规范》, 墩墙为大偏心受压构件时, 受拉钢筋最小截面面积可按规范公式计算, 满足配筋率时所需最小受拉钢筋面积 $A_s=7\,786.13\text{ mm}^2$ 。 $e_0/h_0\leqslant 0.55$, 可不进行裂缝验算。最终实配 $A_s=8\,210.03\text{ mm}^2$, 直径 28 mm 的 HRB400 钢筋, 间距 150 mm, 双层布置。

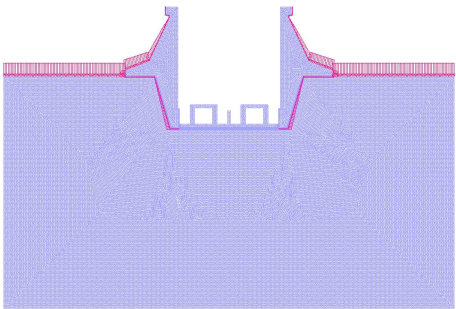
1.3 有限元法内力及配筋计算

1.3.1 有限元模型

用 ADINA 有限元软件建立闸室墙结构有限元模型, 见图 3。



a) 闸室墙



b) 整体

图 3 有限元模型

有限元模型采用单延米模型, 混凝土材料采用各向同性弹性体 3D-solid 单元进行模拟, 本构关系采用广义 Hooke 定律^[5]; 墙后回填土采用施加静止土压力方法进行模拟; 地基土体作为一个整体, 采用各向同性弹性体 3D-solid 单元进行模拟。有限元模型中考虑闸室墙结构与地基之间相互摩擦作用, 摩擦系数取 0.5。模型中各种材料的物理参数见表 1。

表 1 各种材料物理参数

材料	弹性模量/GPa	密度/(t·m ⁻³)	泊松比
混凝土	28	2.5	0.17
地基岩体	3	1.0(水下密度)	0.28

1.3.2 有限元内力及配筋计算

1) 应力积分法。利用横截面的应力值直接计算弯矩:

$$M=\sum_{i=1}^n\sigma_iA_iL_i\tag{4}$$

式中: σ_i 为单元 i 的形心对应的法向应力; A_i 为单元 i 表面的面积; L_i 为单元 i 的形心到截面中性轴的距离。

混合式闸室边墩墙尺寸及计算截面位置见图 2。各种计算工况下, 选取闸室边墩墙内力计算控制工况为检修工况。检修工况下, 边墩墙竖向 (z 向) 应力分布及计算截面应力云图见图 4。

采用 ADIAN 有限元切截面应力积分, 计算截面弯矩。定义切截面位置; 定义一个模型点积分, 进一步定义截面积分, 弯矩将由该截面应力积分求得; 根据需求的内力种类和方向来定义积分表达式。

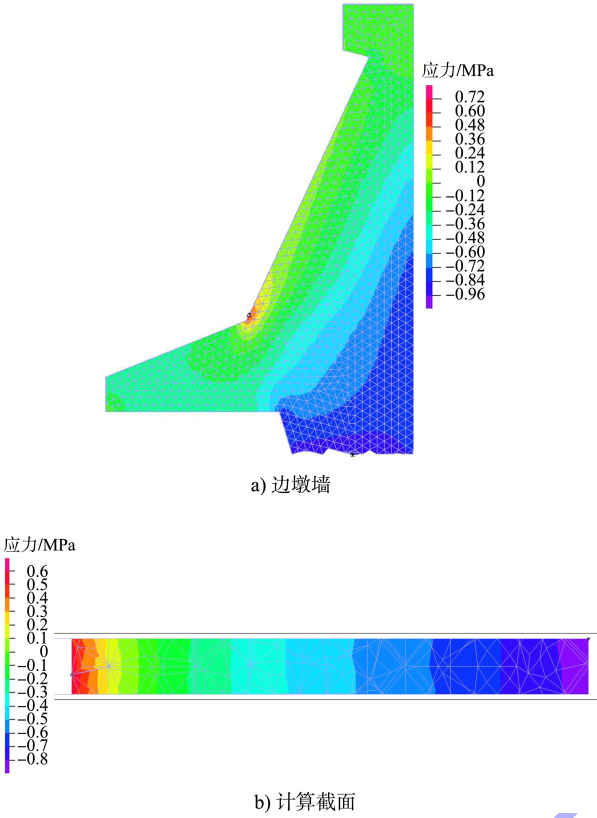


图 4 边墩墙和计算截面竖向应力云图

检修工况下，有限元计算截面弯矩标准值为 17.241 MN·m（中性轴偏向受拉区），设计值为 20.689 MN·m；同时计算截面轴向压力标准值为 3.708 MN，设计值为 4.450 MN。

根据《水工混凝土结构设计规范》矩形截面偏心受压构件正截面受压承载力配筋计算原则，承载力安全系数 K 取 1.25，为满足式(1)~(3)，假定 $\sigma_s=f_y$ ，为大偏心受压构件，计算受压区高度 $x=467\text{ mm}$ ，相对受压区高度 ξ 为 0.05，相对界限受压区高度 ξ_b 为 0.52， $\xi<\xi_b$ ，为大偏心受压构件，以上假定成立。实配 $A_s=1\,570.80\text{ mm}^2$ ，直径 20 mm 的 HRB400 钢筋，间距 200 mm，单层布置。

厚度大于 2.5 m 墩墙配筋率，依据《水工混凝土结构设计规范》，墩墙为大偏心受压构件时，受拉钢筋最小截面面积可按规范公式进行计算，满足配筋率所需最小受拉钢筋面积 $A_s=9\,397.07\text{ mm}^2$ 。 $e_0/h_0\leq 0.55$ ，可不进行裂缝验算。最终实配 $A_s=10\,723.30\text{ mm}^2$ ，直径 32 mm 的 HRB400 钢筋，间距 150 mm，双层布置。

2) 弹性应力图形法。根据《水工混凝土结构设计规范》非杆件体系钢筋混凝土结构配筋计算原则，按应力图形法进行配筋计算：

$$A_s \geq \frac{KT}{f_y} \tag{5}$$

$$T = \omega b \tag{6}$$

式中： A_s 为实配钢筋截面面积； K 为承载力安全系数； T 为由钢筋承担的拉力设计值； ω 为截面主拉应力在配筋方向投影图形的总面积扣除其中拉应力值小于 $0.45f_t$ 的图形面积，但扣除部分的面积(图 5 阴影部分)不宜超过总面积 30%，其中 f_t 为混凝土轴心抗拉强度设计值； f_y 为钢筋抗拉强度设计值； b 为结构截面宽度。

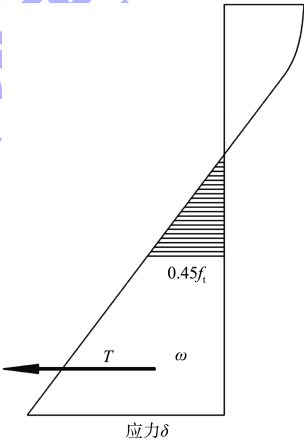


图 5 弹性应力图形法

检修工况下，混合式闸室边墩墙主拉应力在配筋方向投影图形的总面积见图 6。

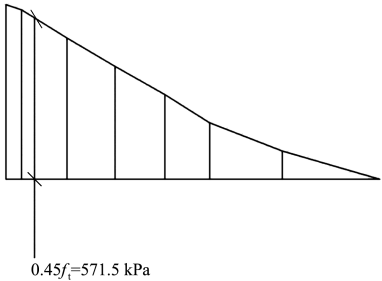


图 6 主拉应力在配筋方向投影面积

经计算，拉力标准值为 259.467 kN，有限元计算截面轴向压力标准值为 3.708 MN，有限元计算截面轴向压力设计值为 4.450 MN。

为满足式(5)，所需钢筋截面面积 $A_s=$

1 081.11 mm², 实配 $A_s = 1\,570.80\text{ mm}^2$ 的直径 20 mm 的 HRB400 钢筋, 间距 200 mm, 单层布置。

按照非杆件开展裂缝计算, $\sigma_{sk} \leq \alpha_{sl} f_{yk}$ (其中 σ_{sk} 为按荷载标准值计算得出的受拉钢筋应力; α_{sl} 为综合影响系数, 取 0.6; f_{yk} 为受拉钢筋抗拉强度标准值), $\sigma_{sk} = 79.29\text{ MPa}$; $\alpha_{sl} f_{yk} = 240\text{ MPa}$, 满足裂缝要求。

有限元计算截面应力云图读取受压区范围 $x = 8\,155\text{ mm}$, 相对受压区高度 ξ 为 0.87, 相对界限受压区高度 ξ_b 为 0.52, $\xi > \xi_b$, 为小偏心受压

构件。

厚度大于 2.5 m 墩墙配筋率, 依据《水工混凝土结构设计规范》, 墩墙为小偏心受压构件时, 受拉钢筋最小截面面积可按规范公式计算, 满足配筋率所需最小受拉钢筋面积 $A_s = 2\,570.91\text{ mm}^2$ 。最终实配 $A_s = 3\,272.49\text{ mm}^2$, 直径 25 mm 的 HRB400 钢筋, 间距 150 mm, 单层布置。

2 3 种计算方法对比分析

3 种计算方法对比分析见表 2。

表 2 闸室边墩墙内力及配筋计算方法对比分析

传统手算法	应力积分法	弹性应力图形法
1) 计算闸室边墩墙弯矩值(合力矩)及轴向压力, 根据《水工混凝土结构设计规范》矩形截面偏心受压构件正截面受压承载力进行配筋计算, 同时满足厚度大于 2.5 m 墩墙配筋率要求, 所需受拉钢筋面积为 8 210.30 mm ² , 直径 28 mm 的 HRB400 钢筋, 间距 150 mm, 双层布置。 2) 配筋计算假定墩墙为大偏心受压构件, 通过计算假定合理, 为满足厚度大于 2.5 m 墩墙配筋率的要求, 实配受拉钢筋量较多, 不经济。	1) 结合横截面应力分布, 采用应力积分法计算横截面弯矩值(合力矩)及轴向压力。根据《水工混凝土结构设计规范》矩形截面偏心受压构件正截面受压承载力进行配筋计算, 同时满足厚度大于 2.5 m 墩墙配筋率要求, 所需受拉钢筋面积为 10 723.30 mm ² , 直径 32 mm 的 HRB400 钢筋, 间距 150 mm, 双层布置。 2) 闸室边墩墙作为非杆件体系大体积混凝土结构, 截面宽度大, 为 9.5 m, 其中受压区范围占比大, 为 80%, 中性轴偏向受拉区, 按应力积分求弯矩, 弯矩值偏大, 内力计算不合理。 3) 配筋计算假定墩墙为大偏心受压构件, 通过计算假定合理, 为满足厚度大于 2.5 m 墩墙配筋率要求, 实配受拉钢筋量多, 不经济。	1) 结合横截面应力分布绘制主拉应力弹性应力图形。根据《水工混凝土结构设计规范》非杆件体系钢筋混凝土结构配筋计算原则, 分析扣除应力值小于 0.45 f_t 的图形面积, 计算钢筋承担的拉力值, 计算所需受拉钢筋面积, 同时满足厚度大于 2.5 m 墩墙配筋率要求, 所需受拉钢筋面积为 3 272.49 mm ² , 直径 25 mm 的 HRB400 钢筋, 间距 150 mm, 单层布置。 2) 闸室边墩墙作为非杆件体系大体积混凝土结构, 截面宽度大, 结合应力分布情况, 重点分析拉应力的弹性应力图形, 受拉钢筋完全承担弹性应力区拉力, 内力计算方法合理。 3) 配筋计算, 通过有限元读取受压区范围, 分析墩墙为小偏心受压构件, 为满足厚度大于 2.5 m 墩墙配筋率要求, 实配受拉钢筋量较合理、经济。

3 结论

- 1) 有限元应力积分法求弯矩适用于传统杆件结构。闸室边墩墙作为非杆件体系大体积混凝土结构, 截面高度大, 受压区范围占比大, 中性轴偏向受拉区, 按应力积分法求弯矩, 弯矩值偏大。
- 2) 对应非杆件体系大体积混凝土结构, 有限元弹性应力图形法分析受拉区混凝土拉应力, 产生的拉力值完全由受拉钢筋承担, 方法合理、可靠。
- 3) 传统手算法与有限元应力积分法计算内力, 根据《水工混凝土结构设计规范》矩形截面偏心受压构件正截面受压承载力配筋计算原则, 为满足厚度大于 2.5 m 墩墙配筋率要求, 实配受拉钢筋量多, 不经济。
- 4) 有限元弹性应力图形法计算内力, 根据《水工混凝土结构设计规范》的非杆件体系钢筋混凝土结构配筋计算原则, 为满足厚度大于 2.5 m 墩墙

配筋率要求, 实配受拉钢筋量合理、经济。

参考文献:

[1] 孟影,汪基伟,冷飞.水工混凝土结构设计规范应力图
形法配筋计算的比较[J].水利水电科技进展, 2014,
34(2): 31-35.

[2] 李艳龙.有限元法在非杆件体系水工钢混结构配筋中
应用研究[J].水利科技与经济, 2017, 23(1): 26-28.

[3] 杨忠超,陈明栋,杨斌,等.高水头船闸闸室消能工消能
效果实验研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),
2010, 29(3): 461-465.

[4] 王鹏,卜丁.某船闸工程船闸闸室结构优化设计[J].水
运工程, 2012(9): 142-144.

[5] 水利部长江水利委员会长江勘测规划设计研究院.水
工混凝土结构设计规范: SL 191—2008[S].北京: 中国
水利水电出版社, 2008.