

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.04.015

水闸结构抗震分析的悬臂梁振型分解反应谱法

叶志才^{1 2} 孙立国¹

(1.河海大学土木工程学院 ,江苏 南京 210098 2.宿迁市水利局 ,江苏 宿迁 223800)

摘要 :结合工程实际 ,在考虑地震动水压力作用与地基弹性影响的基础上 ,提出了空间悬臂梁水闸结构分区规则 ,导出了悬臂梁柔度计算公式 .利用该计算方法对大涧河水闸进行了抗震计算 ,得到了水闸结构的自振频率及底板应力 ,并与商业软件 MSC.MARC 的计算结果进行了比较 .结果表明 ,2 种方法的计算结果较为一致 .这说明本文提出的水闸结构抗震分析方法是合理的 ,可以应用于大中型水闸的抗震分析 .

关键词 :水闸 ;地震 ;振型分解反应谱法 ;悬臂梁柔度 ;地基弹性

中图分类号 :TV312 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2009)04-0437-04

关于强震区水闸结构的抗震分析 ,设计者通常采用考虑了动力放大的拟静力法^[1] .但 DL5073—2000《水工建筑物抗震设计规范》^[2]明确规定 ,对于设计烈度为 8 度和 9 度的 1 级和 2 级水闸或地基为液化土的 1 级和 2 级水闸 ,应采用动力法进行地震动态分析计算 .动力法常采用按振型分解的反应谱方法^[3] .虽然悬臂梁振型分解反应谱法的理论已较为成熟 ,但对于水闸来说 ,各水平条块质量及面荷载的大小与作用位置、各高程计算截面的几何性质等基本数据的计算工作量大 ,只把水闸各部位的质量简化为两三个质点^[4] ,这种简化过于粗糙 .为寻求一种合理的又容易在计算机上实现的算法 ,本文首先基于重力坝悬臂梁振型分解反应谱法^[5] ,在考虑地震动水压力作用与地基弹性影响的基础上 ,提出了空间悬臂梁水闸结构分区规则 ,导出了悬臂梁柔度计算公式 ,然后利用所提出的方法计算了大涧河水闸在 7 度地震作用下的自振频率和底板应力 ,并将该计算结果与商业软件 MSC.MARC 的计算结果进行了比较 .

1 水闸结构悬臂梁振型分解反应谱法

1.1 悬臂梁柔度矩阵

在进行水闸的悬臂梁法地震动力分析时 ,考虑闸体受水平向地震作用 ,闸体柔度矩阵元素可表示为

$$\delta_{ij} = \int_0^{y_j} \left[\frac{\bar{M}_i \bar{M}_j}{EJ} + \frac{c \bar{Q}_i \bar{Q}_j}{GF} \right] dy \tag{1}$$

式中 : E 、 G ——水闸的弹性模量和剪切模量 ; $\bar{M}_i$ 、 $\bar{Q}_i$ ——在结点 i 水平方向作用单位力时闸体截面内所产生的弯矩和剪力 ; $\bar{M}_j$ 、 $\bar{Q}_j$ ——在结点 j 水平方向作用单位力时闸体截面内所产生的弯矩和剪力 ; J 、 F ——截面的惯性矩和截面积 ; c ——截面剪切影响系数 ,对于水闸结构 ,截面多为矩形 ,取 $c = 1.2$.

通过式 (1) 可以推导出悬臂梁空间柔度矩阵 .由于悬臂梁计算的精度有限 ,数值积分可采用梯形积分公式 .将整个水闸沿高度分成 $N - 1$ 段 ,结点号自下至上为 $1, \dots, N$,结点 1 固定于基础面上 .沿闸高方向结点按不等间距划分 ,取 z 轴向上 ,则悬臂梁空间柔度矩阵 K^{-1} 计算公式为

$$\begin{cases} \delta_{m1} = \delta_{1m} = 0 & (m = 1, 2, \dots, 2N) \\ \delta_{m2} = \delta_{2m} = 0 & (m = 1, 2, \dots, 2N) \\ \delta_{mn} = \delta_{nm} \approx \sum_{s=1}^j h_s \left[\frac{h_{is} h_{js}}{EJ_{xs}} + \frac{c_s}{GF_{xs}} \right] & (m = 2i - 1, i = 2, 3, \dots, N; n = 2i - 1, j = 2, 3, \dots, i) \\ \delta_{mn} = \delta_{nm} \approx \sum_{s=1}^j h_s \left[\frac{h_{is} h_{js}}{EJ_{ys}} + \frac{c_s}{GF_{ys}} \right] & (m = 2i, i = 2, 3, \dots, N; n = 2i, j = 2, 3, \dots, i) \end{cases} \tag{2}$$

收稿日期 :2008-08-25
基金项目 :国家自然科学基金(50779011) ;国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2007CB714104) ;江苏省水利厅计划项目(2005027)
作者简介 :叶志才(1964—) ,江苏宿迁人 ,高级工程师 ,博士研究生 ,主要从事工程结构抗震与工程管理研究 .

$$\begin{cases} \delta_{mn} = 0 & (m = 3, 5, 7, \dots, 2N-1; n = 4, 6, 8, \dots, 2N) \\ \delta_{mn} = 0 & (m = 4, 6, 8, \dots, 2N; n = 3, 5, 7, \dots, 2N-1) \end{cases} \quad (3)$$

其中 $h_{is} = z_i - z_s$ $h_{js} = z_j - z_s$ $h_s = \begin{cases} 0.5(z_{s+1} - z_s) & (s = 1) \\ 0.5(z_s - z_{s-1}) & (s = j) \\ 0.5(z_{s+1} - z_{s-1}) & (1 < s < j) \end{cases}$

式中: J_{xs}, F_{xs} —— s 结点沿 x 轴的截面惯性矩和截面积; J_{ys}, F_{ys} —— s 结点沿 y 轴的截面惯性矩和截面积; c_s —— s 结点截面剪切影响系数; z_i, z_j, z_s —— i, j 和 s 结点所对应的高度。

1.2 地基变形计算

地基变形对闸身应力影响很大,设计中必须加以考虑。目前国内大多采用 F. Vogt 概化地基模型进行地基变形计算^[6]。在地震荷载作用下,基础底面将发生 6 种变位(图 1)(a) x 方向变位 Δ_x (b) y 方向变位 Δ_y (c) 垂直基础的法向变位 Δ_z (d) 绕 x 轴的转角 θ_x (e) 绕 y 轴的转角 θ_y (f) 绕垂直轴的转角 θ_z 。

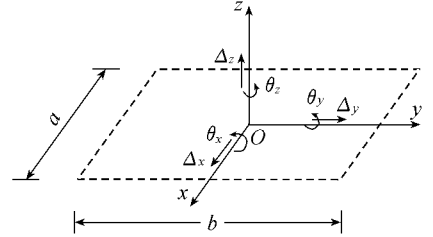


图 1 计算水闸地基变位的当量矩形图
Fig. 1 Equivalent rectangle of sluice foundation deflection

假定地基为均匀、各向同性的半无限弹性体,在均匀受力面($a \times b$)的单位宽度上作用单位力或力矩时,该受力面所产生的平均变位即变位系数为

$$\begin{cases} \Delta_x = K_1/E_f & \Delta_y = K_2/E_f & \Delta_z = K_3/E_f \\ \theta_x = K_4/(E_f b^2) & \theta_y = K_5/(E_f a^2) & \theta_z = K_6/(E_f ab) \end{cases} \quad (4)$$

式中: E_f ——地基的弹性模量; b ——水闸宽度; a ——水闸底板顺河向宽度; $K_1, \dots, K_6$ ——基础常数。分析发现,地基变位对悬臂梁柔度矩阵元素产生影响的为 $\Delta_x, \Delta_y, \theta_x, \theta_y$ 4 项,因此考虑水闸对地基的整体水平位移和转动的影响,只需要在式(2)中增加对应项的影响,即:

$$1 \text{ 行和 } 3 \text{ 行柔度系数分别加上 } K_1/(E_f b) + K_4(z_i - z_1)(z_j - z_1)/(E_f b a^2) \quad (5)$$

$$2 \text{ 行和 } 4 \text{ 行柔度系数分别加上 } K_2/(E_f a) + K_4(z_i - z_1)(z_j - z_1)/(E_f a b^2) \quad (6)$$

1.3 动水压力附加质量

采用附加质量矩阵考虑坝-水动力相互作用。水深 h 处地震动水压力 $p_w(h)$ 的计算可采用 Westergaard 公式^[7]

$$p_w(h) = \frac{7}{8} a_h \rho_w \sqrt{H_0 h} \quad (7)$$

式中: a_h ——水平向设计地震加速度代表值,7 度地震取 $0.1g$; ρ_w ——水体质量密度标准值; H_0 ——水深。对于动水压力的作用方向主要是顺河向的,所以水深 h 处 i 结点的坝面附加质量为

$$m_{wi} = p_w(h) A_i / a_h \quad (8)$$

式中 A_i 为 i 结点以下的等效面积。由 m_{wi} 可形成动水压力附加质量矩阵 M_w 。

1.4 悬臂梁自由振动方程及其解法

不考虑外荷载和阻尼时,悬臂梁的自由振动方程^[7]为

$$M\ddot{\phi} + K\phi = 0 \quad (9)$$

式中: M ——集中质量矩阵; K ——悬臂梁刚度矩阵; ϕ ——振型列阵。设自由振动时,结构各质点均作简谐振动且振动频率和初相位角相同,只是振幅不同,则方程(9)可化为广义特征方程

$$(K - \omega^2 M)\phi = 0 \quad (10)$$

式中 ω 为自振圆频率,对应的自振周期为 $T = 2\pi/\omega$ 。在实际问题中,往往只需要求出若干个最低阶频率和相应振型,一般采用以迭代法为基础的直接滤频法求解。将方程(10)改写为

$$K^{-1}M\phi = \omega^{-2}\phi \quad (11)$$

式中 K^{-1} 为悬臂梁柔度矩阵。利用三维高斯积分法计算六面体的质量与重心坐标,确定各水平条块的总质量与重心坐标,将每一条块的总质量分解成作用在上、下断面的 2 个分量,可形成悬臂梁质量矩阵 $M_{2N \times 2N}$,其主对角元素 $m_{2i-1, 2i-1} = m_{2i, 2i}$ ($i = 1, 2, \dots, N$) 表示对应层面的集中质量。假设水平条块上游垂直面受单位动水压力作用,则其合力分解在上、下截面处的分量即为该条块贡献给上、下计算截面的垂直向等效面积,可用于计算动水压力附加质量。面荷载计算的基本单元为,受法向线性分布荷载作用的直线段。直线段的等

效集中荷载和作用位置的计算采用一维高斯求积法,可以考虑变厚度情况.考虑的面荷载有水压力、扬压力
和泥沙压力.对于泥沙压力,先用浮密度按法向分布荷载计算并将其等效为水平集中力,然后乘以主动土压
力系数即可.

1.5 悬臂梁自由振动的地震响应

在多自由度系统的动力分析中, x 方向的位移向量可以写成 x 方向振型的线性叠加形式, y 方向的位移
向量可以写成 y 方向振型的线性叠加形式,即

$$\boldsymbol{x} = \sum_{i=1}^n X_i \boldsymbol{\phi}_{2i-1} \qquad \boldsymbol{y} = \sum_{i=1}^n Y_i \boldsymbol{\phi}_{2i} \tag{12}$$

利用振型正交性可求出振型参与系数,即

$$\eta_{x,i} = \frac{\sum_{k=1}^n m_{2k-1} \phi_{2k-1,i}}{\left(\sum_{k=1}^{2n} m_k \phi_{k,i}^2\right)} \qquad \eta_{y,i} = \frac{\sum_{k=1}^n m_{2k} \phi_{2k,i}}{\left(\sum_{k=1}^{2n} m_k \phi_{k,i}^2\right)} \tag{13}$$

$$X_i = -\frac{\eta_{x,i}}{\omega_{2i-1}} \int_0^t \ddot{x}_g(\tau) \sin \omega_{2i-1}(t-\tau) \mathrm{d}\tau \qquad Y_i = -\frac{\eta_{y,i}}{\omega_{2i}} \int_0^t \ddot{y}_g(\tau) \sin \omega_{2i}(t-\tau) \mathrm{d}\tau \qquad (i=1,2,\dots,N) \tag{14}$$

式中 $\ddot{x}_g(t)$ 、 $\ddot{y}_g(t)$ 分别是 t 时刻沿 x 、 y 方向的地面加速度.将用直接滤频法所求的前几阶频率代入式(14)求
出对应频率下的振型响应 X_i 或 Y_i 后,就可以由式(12)求得系统的相对位移响应.

用反应谱法求解多自由度系统在地震荷载下的响应时,必须先求出各阶振型的地震荷载,然后按静力法
求得结构的其他动力响应,对各截面上的各振型荷载采用平方和开平方(SRSS)的方法进行组合,求得总响
应^[8]. j 层面的集中质量 m_j 在第 i 阶振型中的地震荷载为

$$\begin{cases} F_{x_{ji}}|_{\max} = m_j \eta_{x,i} \phi_{2j-1,i} \beta_i a_h \\ F_{y_{ji}}|_{\max} = m_j \eta_{y,i} \phi_{2j,i} \beta_i a_h \end{cases} \qquad (i=1,3,5,\dots; j=1,2,\dots,N) \tag{15}$$

式中 β_i 为第 i 阶振型的动力系数.根据 i 阶振型的自振周期,由动力系数反应谱曲线确定^[9-10].

2 大涧河水闸抗震分析

基于上述原理,利用笔者研制的程序对大涧河水闸进行抗震计算.为了验证该计算结果的合理性,利用
商业软件 MSC.MARC 对其进行有限元计算分析.

2.1 工程概况

大涧河闸以排涝为主,同时兼有防洪和蓄水功能.排涝设计流量为 $198.4\text{ m}^3/\text{s}$.工程所在地区为 7 度地震
区,地基土质主要为亚黏土.设计底板高程为 5.0 m ,允许渗径系数,按黏土、无滤层情况取 4.0.根据地质勘探
资料,底板下地基土的内摩擦角 φ 和黏聚力 c 分别取 13.5° 和 23 kPa .水位组合:上游 9.3 m ,下游 9.15 m .

2.2 计算分析

根据大涧河水闸结构的特点,在悬臂梁振型分解反应谱法的计算中,将整个体系分为 14 个集中质量点
(图 2),其中启闭机室 1 个质量点,排架 4 个质量点,交通桥 1 个质量点,闸墩 5 个质量点,底板 3 个质量点.
在空间有限元计算中,将启闭机室和启闭机以刚性质量点的方式绑定在排架顶部,将交通桥以刚性质量点的
方式绑定在闸墩顶部,如图 3 所示.

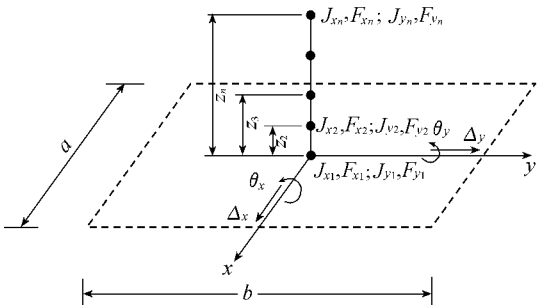


图 2 水闸的悬臂梁计算模型

Fig. 2 Cantilever model of sluices

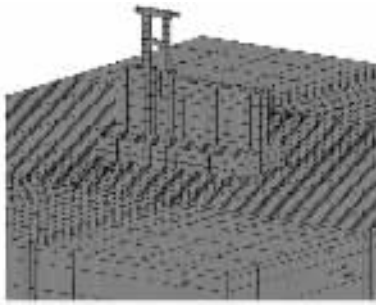


图 3 水闸的有限元计算模型

Fig. 3 FEM model of sluices

悬臂梁法和有限元法计算得到的前几阶振型的水闸自振频率如表 1 所示.从表 1 可以看出 (a) 2 种方法得到的自振频率基本一致,悬臂梁法得到的自振频率略大于有限元法得到的自振频率,这是由于悬臂梁法对结构施加了较多约束的缘故.(b)有限元法得到了 3 阶和 4 阶振型的自振频率,而悬臂梁法没有得到,这是因为有限元法考虑了地震竖向和扭转的影响.从计算结果发现,3 阶振型以竖向自振动为主,4 阶振型以扭转为主.

为了检验本文方法和程序的正确性,还对正常水位下静载+规范谱和静载-规范谱情况下的上下游闸底板的应力进行了对比,如表 2 所示.对比结果表明,2 种方法得到的应力基本一致,计算结果满足规范要求.

3 结 语

本文在重力坝悬臂梁振型分解反应谱法的基础上,提出了空间的水闸悬臂梁振型分解反应谱法计算的具体公式,并研制了相应的分析程序.模型既考虑了水闸结构悬臂梁分区规则,还考虑了地震的动水压力和地基弹性的影响.利用该模型对大涧河水闸结构进行抗震分析得到的结果,与相同工况下商业软件的有限元结果一致性较好,表明该方法可以较好地应用于大中型水闸的抗震分析.

参考文献:

[1] 郭诚谦. 混凝土面板堆石坝顶结构设计及拟静力法的抗震分析 [J]. 水利水电技术, 2008, 36(5): 26-29.
[2] DL5073—2000, 水工建筑物抗震设计规范 [S].
[3] 杨惠华. 规范反应谱理论介绍 [J]. 广东土木与建筑, 2008, 4(4): 23-26.
[4] 林志文. 关于水闸的地震动态分析计算 [J]. 水利技术监督, 2004, 6(6): 58-59.
[5] 刘国明. 古田溪一级重力坝悬臂梁振型分解反应谱法抗震计算 [J]. 水力发电学报, 2004, 23(6): 31-35.
[6] 左东启, 王世夏, 林益才. 水工建筑物 [M]. 南京: 河海大学出版社, 1995.
[7] 钟菊芳, 吴胜兴, 胡晓, 等. 新疆克孜尔坝址设定地震研究 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2005, 33(4): 413-417.
[8] 杜成斌, 黄承泉, 朱岳明. 百色水利枢纽进水塔结构抗震分析研究 [J]. 红水河, 2002, 21(2): 31-35.
[9] 杜成斌, 赵光恒. 拱坝地震响应的动力控制研究 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2000, 28(1): 109-112.
[10] 牛志国, 李同春, 王亚莉. 基于水工设计反应谱的人工地震波合成 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2007, 35(3): 262-266.

Cantilever mode response spectrum method for seismic analysis of sluice structures

YE Zhi-cai^{1, 2}, SUN Li-guo¹

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;
2. Suqian Water Authority, Suqian 223800, China)

Abstract : Based on practical engineering experience, zoning principles for spatial cantilever-based sluice structures are put forward with consideration of the effects of seismic hydrodynamic pressure and foundation elasticity. A formula for cantilever flexibility is proposed. The seismic response of Dajianhe Sluice was calculated using this method. The natural vibration frequencies of the sluice structure and the stress on the bottom plate were obtained and compared with the results calculated with the commercial software MSC. Marc. The results show that the two models agree well, and the present method is feasible and can be applied in the seismic analysis of medium-size and large sluices.

Key words : sluice ; earthquake ; mode response spectrum method ; cantilever flexibility ; foundation elasticity

表 1 正常水位下水闸的自振频率

方 法	不同振型时的自振频率						
	1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶	7 阶
悬臂梁法	3.12	3.73			6.82	7.85	13.06
有限元法	3.01	3.69	5.36	5.65	6.68	7.34	11.95

表 2 地震荷载下水闸的上下游底板应力

方 法	静载+规范谱		静载-规范谱	
	上游闸底板 应力/kPa	下游闸底板 应力/kPa	上游闸底板 应力/kPa	下游闸底板 应力/kPa
悬臂梁法	196.03	299.79	175.51	193.59
有限元法	156.60	313.10	174.00	216.00