

水闸抗振的一种实用分析方法

冀春楼

张敬楼

祖波

(黄委会水利科学研究院 郑州 450003) (河海大学 南京 210098) (黑龙江省水利厅 哈尔滨 150001)

摘要 依据水闸的结构特点,提出多层框架计算模型,利用温克尔地基假定,用弹簧模拟地基和两侧填土的作用;运用直接滤频法和振型叠加法计算水闸结构自振特性及地震反应。以漳山闸为实例进行横河向动力计算,计算值与实测值吻合较好。

关键词 水闸 抗振分析 杆单元 自振特性 地震反应

根据我国历次强震后的震害调查及统计资料,水闸的主要震害为底板、护坦、消力池等底部结构的裂缝;各部位伸缩张拉、错动甚至止水破坏;闸墩裂缝、翼墙倾斜、机架桥支架断裂甚至倒塌。究其原因,不外乎两个方面:①地震造成水闸地基失稳,从而引起水闸结构位移、裂缝甚至陷落或隆起;②由于地震力作用使水闸结构的强度或稳定性破坏,从而产生裂缝,倾斜甚至倒塌。本文提出的动力分析方法,可对水闸结构进行强度和稳定验算。该方法将水闸简化为多跨多层框架结构,用杆单元离散,同时利用温克尔弹性地基假定考虑了地基和两侧填土对结构的动力作用,地基和两侧填土的作用假设为弹簧支承。用直接滤频法从结构自振特性的特征方程求出几个低阶频率和相应的振型;采用振型叠加法从动力平衡方程中解出结构的动力历时反应和最大的动力反应值及加速度放大系数。以漳山闸为实例进行横河向动力计算,将计算值与实测值进行分析比较,认为用本文的方法求解水闸自振特性和地震动力反应可行、合理且简单、方便。

1 计算方法

水闸是一种复杂的空间杆块体系,其闸室结构包括支承上部结构的底板,支承闸门

及上部结构的闸墩,闸墩上机架桥及交通桥等,地基一般为土基,两侧有填土,依据水闸的实际结构性态,对横河流方向的振动,将水闸简化为多跨多层框架,运用温克尔弹性地基假定,将地基和侧向填土对结构的作用假定为弹簧支承,同时上部一些结构简化为附加质量作用,用有限元法进行计算。

1.1 动力平衡方程

动力平衡方程为

$$M\ddot{\delta} + C\dot{\delta} + K\delta = R \quad (1)$$

式中 K, C, M 分别为结构的总体劲度矩阵、阻尼矩阵和质量矩阵; $\delta, \dot{\delta}, \ddot{\delta}$ 为结构的结点位移列阵、速度列阵和加速度列阵; R 为结构的结点荷载列阵。

1.2 单元劲度矩阵

三种单元模式,有两端刚接杆单元,两端铰接杆单元,一端刚接一端铰接杆单元。

a. 两端刚接杆单元。

$$K^e = \begin{bmatrix} B_1 & 0 & 0 & -B_1 & 0 & 0 \\ 0 & 12B_3a_1 & -6B_2a_1 & 0 & -12B_3a_1 & -6B_2a_1 \\ 0 & -6B_2a_1 & B_0a_3 & 0 & 6B_2a_1 & B_0a_2 \\ -B_1 & 0 & 0 & B_1 & 0 & 0 \\ 0 & -12B_3a_1 & 6B_2a_1 & 0 & 12B_3a_1 & 6B_2a_1 \\ 0 & -6B_2a_1 & B_0a_2 & 0 & 6B_2a_1 & B_0a_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

b. 两端铰接杆单元。

$$K^e = \begin{bmatrix} B_1 & 0 & 0 & -B_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -B_1 & 0 & 0 & B_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

c. 一端刚接一端铰接杆单元。

$$K^e = \begin{bmatrix} B_1 & 0 & 0 & -B_1 & 0 & 0 \\ 0 & 3B_3\alpha_1 & -3B_2\alpha_1 & 0 & -3B_3\alpha_1 & 0 \\ 0 & -3B_2\alpha_1 & B_0 \frac{3+0.75\beta}{1+\beta} & 0 & 3B_2\alpha_1 & 0 \\ -B_1 & 0 & 0 & B_1 & 0 & 0 \\ 0 & -3B_3\alpha_1 & 3B_2\alpha_1 & 0 & 3B_3\alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(2)~(4)中, $B_0 = EI/L$; $B_1 = EA/L$; $B_2 = EI/L^2$; $B_3 = EI/L^3$; $\alpha_1 = 1/(1+\beta)$; $\alpha_2 = (2-\beta)/(1+\beta)$; $\alpha_3 = (4+\beta)/(1+\beta)$; $\beta = 12EI\lambda/GA L^2$, $\lambda = 1.2$; $G = \frac{E}{2(1+u)}$, $u = 0.16$; E 为杆单元的弹性模量; A 为截面积, I 为截面惯性矩; L 为杆单元长度。

1.3 单元质量矩阵

采用一致质量矩阵,由公式

$$M^e = \int N^T \rho_A N dx$$

推求,式中 ρ_A 为材料密度与杆单元截面积的乘积。在式(5)中用 $\bar{m} = \rho_A$ 表示,即为杆单元单位长度质量。

$$M^e = \frac{\bar{m}L}{420} \begin{bmatrix} 140 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & -22L & 0 & 54 & 13L \\ 0 & -22L & 4L^2 & 0 & -13L & -3L^2 \\ 70 & 0 & 0 & 140 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & -13L & 0 & 156 & 22L \\ 0 & 13L & -3L^2 & 0 & 22L & 4L^3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

1.4 地基和侧向填土作用

利用温克尔弹性地基假定,地基和两侧填土作用认为是弹性的,可简化为弹簧支承。

a. 地基作用简化为竖向铰接的杆单元

支承。

地基动压力与位移的关系为 $p_b = C_b Y_b$, 其中 Y_b 为底板位移, C_b 为比例常数, p_b 为地基对底板的动压力。

设底板竖向位移在铰杆单元所占权重段内是线性变化,底板宽度为 B , 某杆单元所占的长度为 L_b , 积分该区间得杆单元对底板的作用力,利用平衡原理就可得到杆单元的等效弹性模量为

$$E_{eqv} = \frac{C_b B L_b L}{A} \quad (6)$$

b. 两侧填土作用简化为水平铰接杆单元支承。

假定其弹性系数沿深度呈线性变化,侧向动土压力与位移的关系 $P_w = C_w X_w Y_w$, X_w 为侧向填土的深度, Y_w 为边墙位移, C_w 为比例系数, P_w 为填土作用侧向动土压力。

同竖向铰接杆单元一样,设侧墙水平向位移在铰接杆单元所占权重内是线性变化,积分该区间得杆单元对侧墙的作用力,利用平衡原理就可得到水平杆单元的简化等效弹性模量。

$$E_{eqH} = \frac{C_w B L_w X_w L}{A} \quad (7)$$

1.5 结构自振特性

求解结构自振特性的特征方程为

$$(K - \omega^2 M) \delta_0 = 0 \quad (8)$$

式中 ω 为自振圆频率; δ_0 为特征向量(振型向量)。

在水闸抗震分析中,一般只须求少数几个低阶频率和相应的振型,这里以逆迭代为基础的 direct frequency method,将特征方程改写为

$$\lambda \delta_0 = K^{-1} M \delta_0$$

其中 $\lambda = 1/\omega^2$, 由逆迭代法求得最大特征值(最小频率)。

将上述迭代方程修改为

$$\lambda \delta_{0j} = K^{-1} M \delta_{0j} - \frac{\sum_{i=1}^{j-1} (\lambda_i \delta_{0i}^T M \delta_{0i}) \delta_i}{\delta_{0i}^T M \delta_{0i}} \delta_i \quad (9)$$

由此方程逐步迭代即可求得所需各阶段频率

及相应的振型。

1.6 结构地震反应分析

对于线性系,采用振型叠加法求解地震反应,利用振型正交性原理将多自由度耦合的动力方程转化为按振型分解的方程。

用广义坐标表示的动力方程为

$$M_j^* \ddot{Y}_j + C_j^* \dot{Y}_j + K_j^* Y_j = R_j^* \quad (10)$$

其中, $M_j^* = \delta_{0j}^T M \delta_{0j}$

$$K_j^* = \delta_{0j}^T K \delta_{0j}$$

$$C_j^* = \delta_{0j}^T C \delta_{0j} = 2\lambda_j \omega_j M_j^*$$

$$R_j^* = \delta_{0j}^T R = -\delta_{0j}^T M \ddot{\delta}_g$$

将式(10)进一步简写为

$$Y_j + 2\lambda_j \omega_j \dot{Y}_j + \omega_j^2 Y_j = R_j^* / M_j^*$$

利用(10)式求地震反应时,直接输入地震的地面加速度历时过程,并假设地震加速度在积分时段按线性变化。用 wilson- θ 法求出各时刻各阶段振型的广义坐标 Y_j ,从而求得与各阶段振型相应的结点位移,叠加各振型的位移,即得结点的总位移 δ ,再进一步可求出结构的内力及加速度等。即

$$\text{位移} \quad \delta = \sum_{j=1}^i \delta_{0j} Y_j$$

$$\text{加速度} \quad \ddot{\delta} = \sum_{j=1}^i \delta_{0j} \ddot{Y}_j$$

$$\text{内力} \quad \sigma = \sum_{j=1}^i \sigma_{0j} Y_j$$

2 算例

作者根据上述计算方法编制了计算程

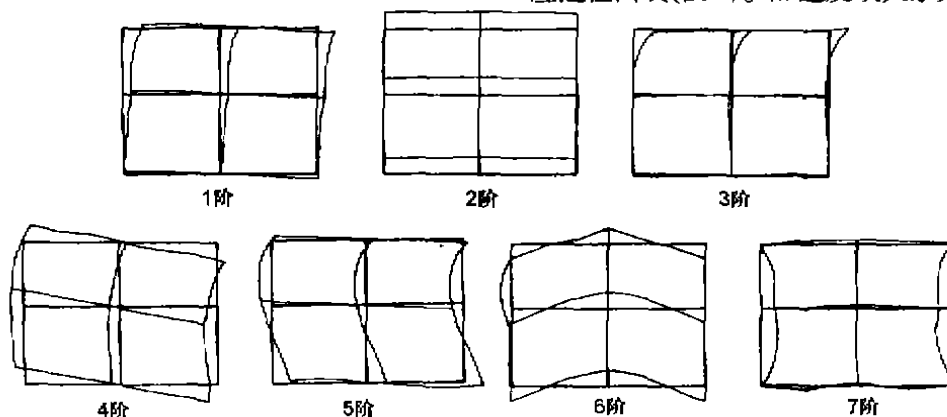


图2 水闸横河向的1~7阶振型图

序。并计算嶂山闸的结构自振特性和地震反应。采用 TAFT(EW, $a_{\max} = 175.9 \text{ cm/s}^2$)的地震波作为输出加速度历时过程线。计算参数为:混凝土弹模 $E = 2.5 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, 密度 $R = 2450 \text{ kg/m}^3$, 地基与测向填土参数 $C_w = 1.2 \times 10^7 \text{ N/m}^4$, $C_b = 8.0 \times 10^7 \text{ N/m}^3$, 计算简图见图1。

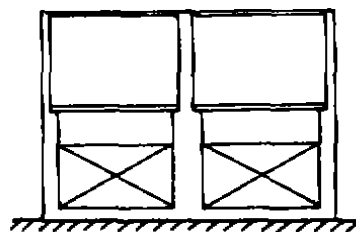


图1 水闸结构计算简图

2.1 水闸的自振特性

横河流方向的结构自振频率汇总于表1。采用本文方法计算的1阶频率 f_1 为4.15 Hz, 与薄板弯曲法 ($f_1 = 4.25 \text{ Hz}$)、模型试验 ($f_1 = 4.10 \text{ Hz}$)及原型测试 ($f_1 = 4.80 \text{ Hz}$)的结果基本上是一致的,表明本文采用的计算模型与计算方法是合理的。1~7阶振型见图2。

表1 横河流方向结构自振频率 单位:Hz

f_1	f_2	f_3	f_4	f_5	f_6	f_7
4.15	5.98	7.96	8.62	14.10	15.16	25.18

2.2 水闸结构地震反应

在地震作用下各最大反应见表2。最大反应值与薄板弯曲法计算值接近,地震反应历时过程本文仅绘出中墩支架顶点的加速度历时响应过程曲线(图3)。加速度放大系数为5.67。

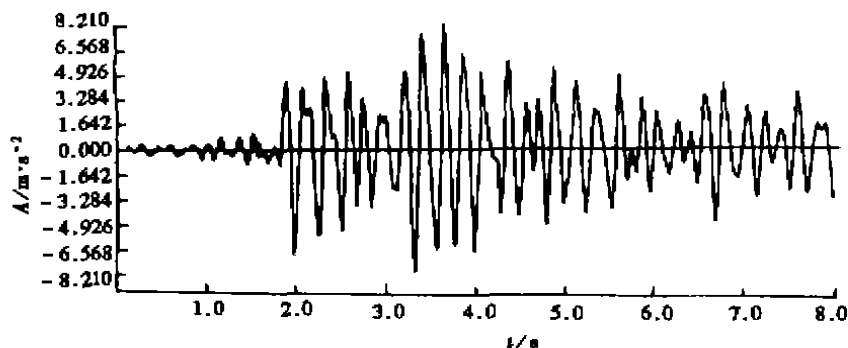


图3 工作桥支架顶端加速度反应过程线

表2 最大动力响应值

水平位移 l/cm	水平加速 度 $A/\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	轴力 P/kN	剪力 τ/kN	弯矩 $M/\text{kN}\cdot\text{m}$	加速度放 大系数
1.07	8.22	2867	3066	15910	5.67
在支架 顶各点	在中墩上 支架顶点	在两边 墩底部	在中墩 底部	在中墩 底部	在中墩上 支架顶点

3 结 论

a. 经过计算和成果分析比较,用本文方法计算水闸的横河向自振特性和地震响应力是可行、合理的。

b. 考虑地基与两侧填土作用,能求出水

闸的竖向和转动振型,利用薄板弯曲法则求不出这种振型,求自振特性时取5~7阶比较合理,本文算例按7阶计算。该方法亦可对顺河向进行抗振分析,顺河向可取某一闸墩做为脱离体,上部有关结构可作为集中质量作用。

c. 本文方法对有桩基的水闸同样适用,将桩体处理成连杆即可分析计算。

d. 方法简单,所需计算时间短,计算前后处理工作量小且可由计算机自动完成,可广泛用于水闸的抗震分析计算。

(收稿日期:1996-09-10)

1997年《水利经济》征订启事

《水利经济》是中国水利经济研究会会刊,为理论与实践相结合、普及与提高相结合的综合性学术刊物(季刊),经国家科委批准国内外公开发行人。本刊目的是在建设有中国特色社会主义的理论和党的基本路线指引下,促进水利经济研究和学术交流,宣传、普及水利经济知识,提高水利经济效益,加快水利经济发展,建设适应社会主义市场经济体制的水利经济体制及其运行机制,为发展壮大我国水利基础产业和社会主义现代化服务。本刊设有多种专栏,刊登水利经济研究报告、学术讨论、政策研究、专题探讨、调查报告、经济交流、学术讲座、问题解答、信息文摘、动态简讯等稿件。欢迎水利水电系统和社会各界有关人士惠予指导和订阅。

本刊现已开始办理1997年度征订工作,每期核收成本费2.5元(含邮费),全年10元。欢迎订阅。订阅者请通过邮局将订费汇寄南京市西康路1号河海大学《水利经济》编辑部,并将征订单第二、三联及邮书标签填写后寄回我部(征订单函索即寄),邮编号:210098。也可由银行汇寄我部,开户行:中国建设银行南京分行河海分理处。帐号:05551261001208

1997年《水资源保护》征订启事

集学术性、技术性、管理性为一体的《水资源保护》杂志系水利部水政水资源司委托河海大学环境水利科学研究所编辑出版的全国唯一有关水资源保护的杂志。本刊主要栏目包括方针政策、管理、科学研究、专题述评、调查报告、经济交流、监测、环境影响评价、综述、消息动态等。本刊适合全国水资源保护方面的科技人员和管理人员以及有关院校师生阅读。

一、本刊为季刊,每季季末出版,每期收取工本费3.00元。全年订费12.00元。

二、个人及单位均可订阅,可通过银行汇款,开户行:中国工商银行南京宁海路分理处,帐号:02114-264-02138。亦可通过邮局汇款:210098 南京西康路1号河海大学内《水资源保护》编辑部。请注明订杂志用。联系人:王海。