

文章编号: 1000-4750(2004)06-0197-06

渡槽结构考虑流固耦合的横向地震响应研究

徐建国¹, * 陈 淮², 王 博²

(1. 大连理工大学土木工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 郑州大学土木工程学院, 河南 郑州 450002)

摘 要: 渡槽结构是一种薄壁杆件结构, 有其自身特点, 依据符拉索夫(Vlasov)及豪斯纳尔(Housner)理论建立考虑槽内水体流固耦合的渡槽薄壁结构空间地震响应分析模型, 该模型综合考虑了渡槽横向、竖向、纵向、自由扭转、约束扭转变形以及槽内水体对槽身的流-固相互作用等。由能量原理推导给出了渡槽薄壁梁段单元刚度矩阵及质量矩阵, 建立了渡槽结构无水空载及槽内有水时横向地震响应计算方程。利用该模型对某单墩渡槽进行了多工况地震时程响应计算, 经与解析解比较, 证明模型的正确性, 同时说明在地震荷载作用下, 渡槽在无水空载及设计水位时的横向位移有所变化。模型计算简单易行, 是考虑槽内水体流固耦合作用的渡槽薄壁结构实用的地震响应分析模型。

关键词: 渡槽; 地震; 时程响应; 流固耦合; 建模

中图分类号: TV312 文献标识码: A

TRANSVERSE SEISMIC RESPONSE OF AQUEDUCTS WITH FLUID-STRUCTURE COUPLING

XU Jian-guo¹, * CHEN Huai², WANG Bo²

(1. College of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. College of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: Aqueduct is a kind of thin-walled bar structures. Based on the theory of Vlasov and Housner, a seismic response analysis model of thin-walled space aqueduct with fluid-structure coupling is established in this paper. In this model, transverse deformation, vertical deformation, longitudinal deformation, free torsion deformation, constrained torsion deformation and fluid-structure coupling between aqueduct and water body are all taken into consideration. The element stiffness matrix and the mass matrix of the thin-walled beam portion of aqueduct are derived by energy principle and the transverse seismic response equations are established without water or with design level water in aqueduct, respectively. Using the model, the seismic time-history responses of a single-pier aqueduct are calculated, and the model is verified through the comparison with analytical solution. Moreover, it is found that the seismic responses are different in the two cases of no water and design level water. The model is shown to be simple and practical for aqueduct's seismic response analysis with fluid-structure coupling.

Key words: aqueduct; earthquake; time-history response; fluid-structure coupling; modeling

收稿日期: 2003-05-11; 修改日期: 2003-09-28

基金项目: 河南省高校杰出科研人才创新工程资助项目(2003KYCX011), 河南省科技攻关资助项目(0224370025)

作者简介: 徐建国(1965), 男, 河南孟津人, 讲师, 博士生, 主要从事工程力学、水工结构方面的研究;

*陈 淮(1962), 男, 河南淮阳人, 教授, 博士, 主要从事工程结构抗震、结构动力学等方面的研究(E-mail: chenhuai@zzu.edu.cn);

王 博(1956), 男, 河南商丘人, 教授, 博士, 主要从事水工结构抗震方面的研究

1 引言

我国的南水北调工程是为了解决全国水资源分布不均而兴建的大型水利工程,目前南水北调东线工程已开工,中线工程也即将开工,而渡槽是该工程中的重要组成部分。为了确保渡槽尤其是穿越地震区的大型渡槽的安全,必须对渡槽的抗震性能进行分析计算,这就要求正确建立渡槽动力分析模型,以往的计算模型通常是将渡槽槽身看成实心杆件进行简化计算,而没有考虑到渡槽薄壁结构的弯扭耦合变形等特点以及流-固耦合问题,有的研究即使考虑了水体的影响,也往往只是将水体的质量固结于槽身上而忽略了流体-结构的动力相互作用影响,从而造成较大的计算误差。本文在综合考虑渡槽薄壁结构特性的基础上,建立了带附联水质量的渡槽薄壁结构空间地震响应分析模型,并应用该模型计算了南水北调水利工程某大型渡槽的横向地震时程响应,计算结果说明:渡槽槽内水质量对渡槽的横向地震响应有较大影响,在渡槽抗震设计时应予以重视。

2 渡槽结构抗震计算动力分析模型的建立

2.1 考虑渡槽槽内水体的附联水等效质量及等效刚度

在横向地震作用下,渡槽槽内流体与槽身的相互作用力可分为液动压力 S 以及倾覆力矩 M [1]

$$S = -2\rho \left(\sum_{n=1,3,\dots} \ddot{q}_n(t) \frac{b_n a}{n\pi} \tanh \frac{n\pi h}{a} + \frac{ah}{2} \ddot{x}_0(t) \right) \quad (1)$$

$$M = -\rho a h^2 \left\{ \frac{\ddot{x}_0(t)}{2} + \frac{2a}{\pi^2 h^2} \sum_{n=1,3,\dots} \frac{b_n \ddot{q}_n(t)}{n^2} \left[\frac{n\pi h}{a} \tanh \frac{n\pi h}{a} + \frac{1}{\cosh \frac{n\pi h}{a}} - 1 \right] \right\} - \rho a^3 \left(\frac{\ddot{x}_0(t)}{12} + \sum_{n=1,3,\dots} \frac{2b_n \ddot{q}_n(t)}{n^2 \pi^2 a} \frac{1}{\cosh \frac{n\pi h}{a}} \right) \quad (2)$$

式中, ρ 为水的质量密度, h 为槽内水深, a 为槽内壁宽度, $\ddot{x}_0(t)$ 为槽身横向加速度时程。

按照豪斯纳尔(Housner)理论[1]的简化模型,在横向地震荷载作用下,流体与槽身的相互作用力包括脉动压力及对流压力。脉动压力所产生的对渡槽侧壁的作用力为

$$S^0 = 2\rho \ddot{x}_0(t) \frac{h^2}{3} \text{th} \left(\frac{3a}{2h} \right) \quad (3)$$

脉动压力的作用可用固定于槽体的质量块 M_{PR}^0 来等效替代

$$M_{PR}^0 = ah\rho \frac{3a}{2h} \quad (4)$$

而质量块 M_{PR}^0 距底板的距离 h_0 为

$$h_0 = \frac{3h}{8} + \frac{h}{2} \left(\frac{2h}{3a} - 1 \right) \quad (5)$$

对流压力可看成流体的奇数阶振动对槽体的作用力,由于各阶对流压力 $S_n (n=1,3,5,\dots)$ 均为与液体振动圆频率有关的谐振力,故可将这些谐振力作用等效为一系列的弹簧-质量系统(如图 1 所示)。以流体的第 n 阶对流谐振力为例,其等效质量 M_{PR}^n 、等效弹簧刚度 K_{PR}^n 以及距底板的距离 z_c^n 分别为

$$M_{PR}^n = \frac{a}{n} h\rho \left(\frac{10a}{12hn} \text{th} \left(\frac{10hn}{a} \right) \right) \quad (n=1,3,5,\dots) \quad (6)$$

$$K_{PR}^n = M_{PR}^n \omega_n^2 = M_{PR}^n \frac{10gn}{a} \text{th} \left(\frac{10hn}{a} \right) = \frac{5}{6} \rho a g h^2 \left(\frac{10hn}{a} \right) \quad (n=1,3,5,\dots) \quad (7)$$

$$h_n = h \left(1 - \frac{ch}{a} \frac{10hn}{sh} - \frac{2}{10hn} \right) \quad (n=1,3,5,\dots) \quad (8)$$

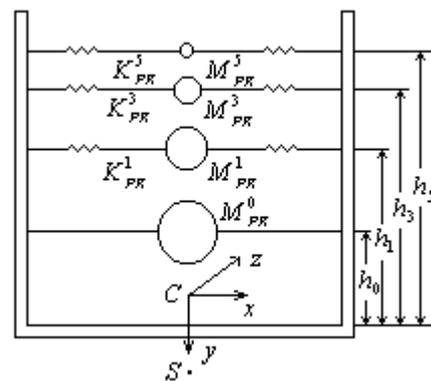


图 1 渡槽横截面示意图

Fig.1 Aqueduct cross section

根据计算分析[1],取前几阶对流谐振力即可取得满意结果。

2.2 渡槽考虑流固耦合的动力分析模型

渡槽结构空间动力计算采用梁段有限元法,其基本思想是将渡槽沿跨长划分为若干薄壁梁段单

元,其横截面示意图如图 1 所示,根据符拉索夫理论,渡槽在受力变形过程中,其横截面的形状始终保持不变,横截面的位移为沿 x 轴(坐标原点取在形心 c)的横向位移 u 、沿 y 轴的竖向位移 v 、沿 z 轴的纵向位移 w 以及绕扭转中心 S 的扭转位移 ϕ ,若只取 3 阶对流谐振力等效弹簧—质量系统来研究,则 M_{PR}^1 、 M_{PR}^3 、 M_{PR}^5 的横向位移分别为 u_{r1} 、 u_{r3} 、 u_{r5} 。每个梁段单元有 2 个结点,每个结点有 10 个自由度: u_i 、 u'_i 、 v_i 、 v'_i 、 w_i 、 ϕ_i 、 ϕ'_i 、 u_{r1i} 、 u_{r3i} 、 u_{r5i} 。由于考虑截面的约束扭转变形,则结点位移应包括扭转角 ϕ_i 沿单元长度的变化率。单元结点的横向、竖向、纵向、扭转及等效质量横向位移列阵分别为

$$\{u\}^e = [u_i \quad u'_i \quad u_j \quad u'_j]^T, \{v\}^e = [v_i \quad v'_i \quad v_j \quad v'_j]^T, \\ \{w\}^e = [w_i \quad w_j]^T, \{\phi\}^e = [\phi_i \quad \phi'_i \quad \phi_j \quad \phi'_j]^T, \\ \{u_r\} = [u_{r1i} \quad u_{r3i} \quad u_{r5i} \quad u_{r1j} \quad u_{r3j} \quad u_{r5j}]^T。$$

$$[K]^e = \begin{bmatrix} [K_u]^e + [K_{u,u}]^{PR} & 0 & 0 & 0 & [K_{u,ur1}]^{PR} & [K_{u,ur3}]^{PR} & [K_{u,ur5}]^{PR} \\ 0 & [K_v]^e & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & [K_w]^e & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & [K_\phi]^e + [K_\omega]^e & 0 & 0 & 0 \\ [K_{ur1,u}]^{PR} & 0 & 0 & 0 & [K_{ur1,ur1}]^{PR} & 0 & 0 \\ [K_{ur3,u}]^{PR} & 0 & 0 & 0 & 0 & [K_{ur3,ur3}]^{PR} & 0 \\ [K_{ur5,u}]^{PR} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & [K_{ur5,ur5}]^{PR} \end{bmatrix} \quad (9)$$

由于渡槽横截面水平轴不对称,故在横向振动过程中,渡槽横向弯曲振动与扭转振动将相互耦合,同时水体的横向振动也将与槽身的横向振动相互耦合。本文推导单元质量矩阵的思路是:首先求出渡槽结构各部分在振动过程中的惯性力虚功,然后再由弹性系统动力学总势能不变值原理^[2],导出渡槽薄壁梁段单元质量矩阵 $[M]^e$ 。

惯性力虚功的一阶变分为

$$\delta U_{mi} = \delta U_{mil} + \delta U_{miw} + \delta U_{miu} + \delta U_{mis} \\ = \int_l m_{11} \ddot{u} \delta u dz + \int_l m_{13} (\ddot{u} \delta \phi + \ddot{\phi} \delta u) dz + \int_l m_{22} \ddot{v} \delta v dz \\ + \int_l m_{33} \ddot{\phi} \delta \phi dz + \int_l m_{44} \ddot{w} \delta w dz + \int_l m_{55} \ddot{u}_{r1} \delta u_{r1} dz \\ + \int_l m_{35} (\ddot{u}_{r1} \delta \phi + \ddot{\phi} \delta u_{r1}) dz + \int_l m_{66} \ddot{u}_{r3} \delta u_{r3} dz \\ + \int_l m_{36} (\ddot{u}_{r3} \delta \phi + \ddot{\phi} \delta u_{r3}) dz \\ + \int_l m_{77} \ddot{u}_{r5} \delta u_{r5} dz + \int_l m_{37} (\ddot{u}_{r5} \delta \phi + \ddot{\phi} \delta u_{r5}) dz$$

式中,

$$m_{11} = 2m_l + 2m_w + m_u + M_{PR}^0 ;$$

采用势能驻值原理推导渡槽薄壁梁段单元刚度矩阵 $[K]^e$ 。梁段单元的弹性应变能包括横向弯曲应变能、竖向弯曲应变能、纵向变形应变能、自由扭转应变能、约束扭转应变能以及附联水等效弹簧应变能组成

$$U_l = U_{lbi} + U_{vbi} + U_{wbi} + U_{\phi i} + U_{\omega i} + U_{uri} \\ = \frac{1}{2} \left[\int_l EI_{yi} (u'')^2 dz + \int_l EI_{xi} (v'')^2 dz + \int_l EA_i (w')^2 dz \right. \\ \left. + \int_l GJ_{Ki} (\phi')^2 dz + \int_l GJ_{\omega i} (\phi'')^2 dz \right. \\ \left. + \int_l K_{PR}^1 (u_{r1} - u)^2 dz + \int_l K_{PR}^3 (u_{r3} - u)^2 dz \right. \\ \left. + \int_l K_{PR}^5 (u_{r5} - u)^2 dz \right]$$

对上式进行一阶变分,将单元内任一点位移与结点位移的关系式代入,经整理后可得考虑附联水质量的渡槽薄壁梁段单元刚度矩阵:

$$m_{22} = m_{44} \\ = 2m_l + 2m_w + m_u + M_{PR}^0 + M_{PR}^1 + M_{PR}^3 + M_{PR}^5 ; \\ m_{13} = 2(y_K + h)m_l + (2y_K + h)m_w \\ + y_K m_u + M_{PR}^0 (y_K + h_0) ; \\ m_{33} = 2(y_K + h)^2 m_l + \frac{1}{6} (b_1^2 + b_1 b_2 + b_2^2) m_l \\ + 2(y_K^2 + y_K h + \frac{1}{3} h^2) m_w + \frac{1}{2} B^2 m_w + y_K^2 m_u ; \\ + \frac{1}{12} B^2 m_u + (y_K + h_0)^2 M_{PR}^0 + (y_K + h_1)^2 M_{PR}^1 \\ + (y_K + h_3)^2 M_{PR}^3 + (y_K + h_5)^2 M_{PR}^5 \\ m_{55} = M_{PR}^1 ; m_{66} = M_{PR}^3 ; m_{77} = M_{PR}^5 ; \\ m_{35} = (y_K + h_1) M_{PR}^1 ; m_{36} = (y_K + h_3) M_{PR}^3 ; \\ m_{37} = (y_K + h_5) M_{PR}^5。$$

其中, m_l 是单位长度单侧上翼缘板质量; m_w 是单位长度单边腹板质量; m_u 是单位长度底板质量; b_1 是两翼缘板内侧两点间距; b_2 是两翼缘板外侧两点间距。

将单元内任一点位移与结点位移关系式代入,经整理后可得渡槽薄壁梁段单元质量矩阵为

$$[M]^e = \begin{bmatrix} [M_{u,u}]^e & 0 & 0 & [M_{u,\phi}]^e & 0 & 0 & 0 \\ 0 & [M_{v,v}]^e & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & [M_{w,w}]^e & 0 & 0 & 0 & 0 \\ [M_{\phi,u}]^e & 0 & 0 & [M_{\phi,\phi}]^e & [M_{\phi,ur1}]^{PR} & [M_{\phi,ur3}]^{PR} & [M_{\phi,ur5}]^{PR} \\ 0 & 0 & 0 & [M_{ur1,\phi}]^{PR} & [M_{ur1,ur1}]^{PR} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & [M_{ur3,\phi}]^{PR} & 0 & [M_{ur3,ur3}]^{PR} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & [M_{ur5,\phi}]^{PR} & 0 & 0 & [M_{ur5,ur5}]^{PR} \end{bmatrix} \quad (10)$$

渡槽槽身阻尼矩阵采用粘滞阻尼理论计算,根据瑞利阻尼假定,渡槽槽身梁段单元阻尼矩阵 $[C]^e$

$$[C]^e = 2\xi\omega_1[M]^e \quad (11)$$

式中, ξ 是渡槽槽身阻尼比, ω_1 是渡槽整体结构横向第 1 阶自振圆频率。

渡槽系统是由槽身-墩体组成,划分渡槽单元和墩体梁单元,组集各单元特性矩阵可得渡槽系统总体刚度矩阵、质量矩阵和阻尼矩阵,由此可得渡槽系统在地震作用下的动力方程为

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{I\}\ddot{u}_g \quad (12)$$

3 单墩渡槽横向地震响应研究

为了研究单墩渡槽在地震荷载作用下的横向时程响应,现切取一连续渡槽中的典型单墩带一段渡槽槽身作为分析对象,其横截面示意图如图 2 所示。设墩体底部固结于刚性地面上,由于上部渡槽侧壁的弹性振动对水体的横向晃动影响甚微^[3],故可假设槽身为刚性体,且渡槽内纵向输水对渡槽的横向振动没有影响,渡槽横截面为矩形。本文分槽内无水 and 槽内有水 2 种工况进行渡槽横向地震时程响应计算。

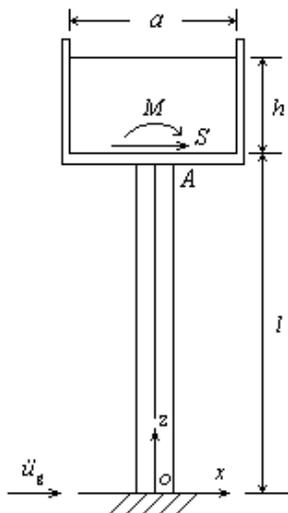


图 2 单墩渡槽示意图

Fig.2 Single-pier aqueduct

3.1 渡槽无水空载

当渡槽内无水时,可将渡槽单墩结构视为一自由端带有集中质量和转动惯量的悬臂梁,设单墩高为 l , 横向抗弯刚度为 EI , 横截面面积为 A , 槽身的质量为 m_f , 槽身对悬臂梁顶点 A 的转动惯量为 J_A , $\ddot{u}_g(t)$ 为地震加速度时程。不计阻尼时,渡槽单墩在横向地震荷载作用下的运动微分方程为^[4,5,6]

$$EI \frac{\partial^4 u}{\partial z^4} + \rho A(z) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -\rho A(z) \ddot{u}_g(t) \quad z \in [0, l] \quad (13)$$

令

$$u(z, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i(z) q_i(t) \quad (14)$$

而

$$\begin{aligned} \phi_i(z) &= (\sin a_i z - \sinh a_i z) + (\cos a_i z - \cosh a_i z) \\ \omega_i^2 J_A (\cos a_i l - \cosh a_i l) + EI a_i (\sin a_i l + \sinh a_i l) &= 0 \\ \omega_i^2 J_A (\sin a_i l + \sinh a_i l) - EI a_i (\cos a_i l + \cosh a_i l) &= 0 \end{aligned} \quad (15)$$

在式(13)两端同乘以 $\phi_j(z)$ 并对 z 沿整个梁长度积分,考虑振型正交性,得

$$\ddot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = -\ddot{u}_g(t) \frac{\int_0^L \rho A(z) \phi_i dz}{\int_0^L \rho A(z) \phi_i^2 dz} \quad (16)$$

解微分方程式(16)并代入式(14)即可求得墩顶横向位移 $u(l, t)$ 时程。需要指出的是:当地震加速度时程 $\ddot{u}_g(t)$ 有显示表达式时,式(16)可采用 Duhamel 积分法求解;而当 $\ddot{u}_g(t)$ 为离散地震加速度时程时,可采用 Wilson- θ 数值法求解。

3.2 渡槽内设计水位

设槽内水深为 H , 其它参数同 3.1。在横向地震荷载作用下,渡槽受到的动水压力 S 及倾覆力矩 M 按式(1)、(2)计算。则其强迫振动微分方程为

$$\begin{aligned} \ddot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) &= \frac{1}{\int_0^L \rho A(z) \phi_i^2 dz} [-\ddot{u}_g(t) \int_0^L \rho A(z) \phi_i dz + S \phi_i(l) + M \frac{\partial \phi_i(l)}{\partial z}] \end{aligned} \quad (17)$$

把式(1)、(2)代入式(17),但应注意式(1)、(2)中的地

震加速度应为 $\ddot{x}_0(t) = [\ddot{u}_g(t) + \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i(l)\dot{q}_i(t)]$

令 $L\{q_i(t)\} = Q_i(p)$, 并对式(17)两端进行拉普拉斯变换得

$$Q_i(p) = -L\{\ddot{u}_g(t)\} \int_0^L \rho A(z)\phi_i dz + L\{S\}\phi_i(l) + L\{M\} \frac{\partial \phi_i(l)}{\partial z} = \int_0^L \rho A(z)\phi_i^2 dz (p^2 + \omega_i^2) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (18)$$

可根据计算精度的要求选择振型数 n (取前 3 阶即可得到满意精度^[11]), 求解式(18)组成的联立方程组, 求出 $Q_i(p)$ 后, 进行逆变换得 $q_i(t)$, 回代式(14)可得墩顶横向位移 $u(l, t)$ 时程。需要指出的是, 此处进行拉普拉斯变换的目的是便于本文模型与理论解进行对比, 而在大型、多跨渡槽地震时程计算时^[7], 可直接采用数值积分法(如 wilson- θ 法等), 而不需进行拉氏变换。

4 计算实例

选取南水北调中线工程关帝庙渡槽设计方案中一典型墩进行分析计算。墩高 $l = 30.0 \text{ m}$, 渡槽内壁宽度 $a = 4.0 \text{ m}$, 渡槽沿轴线长度取为 $b = 1.4518 \text{ m}$, 设计水深 $h = 3.0 \text{ m}$, 槽体质量为 $m_f = 3.6 \times 10^4 \text{ kg}$, 槽体对墩顶的转动惯量为 $J_A = 9.6 \times 10^4 \text{ kgm}^2$, 墩体横向抗弯刚度为 $EI = 15.6 \times 10^{10} \text{ Nm}^2$, 墩体横截面面积为 $A = 2.5 \text{ m}^2$, 材料密度为 $\rho = 2500.0 \text{ kg/m}^3$, 水体密度为 $\rho_w = 1000.0 \text{ kg/m}^3$ 。为了分析对比单墩渡槽在无水空载及设计水位 2 种情况下的横向地震位移变化, 同时也验证本文提出的考虑槽内水体流固耦合的渡槽动力分析模型的正确性, 现将单墩渡槽在这 2 种工况下的地震位移响应本文方法解和解析解(或数值解)加以绘图比较。工况 1(无水空载)时地震加速度时程输入 El-Centro 地震波($N-S$ 分量, 最大幅值调幅到 $1g$), 输出墩顶横向位移对比图如图 3 所示(系列 1 为数值解, 系列 2 为本文解); 工况 2(设计水位)时, 为使积分变换简单, 地震加速度时程输入简谐波($\ddot{u}_g(t) = 10 \sin 50t \text{ m/s}^2$), 输出墩顶横向位移对比图如图 4 所示(系列 1 为解析解, 系列 2 为本文解); 工况 3(无水空载与设计水位)时地震加速度时程输入同工况 1, 用本文方法计算输出墩顶横向位移对比图如图 5 所示(系列 1 为设计水位, 系列 2 为无水空载, 图 3~5 横坐标单位为秒; 纵坐标单位为米)。

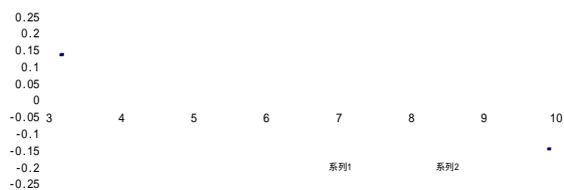


图 3 渡槽无水空载时墩顶地震响应比较

Fig.3 Seismic response comparison at top pier of aqueduct without water



图 4 渡槽设计水位时墩顶地震响应比较

Fig.4 Seismic response comparison at top pier of aqueduct with design water level

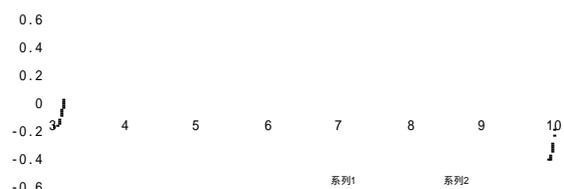


图 5 渡槽无水空载及设计水位时墩顶地震响应比较

Fig.5 Seismic response comparison at top pier between aqueduct without water and design water level

由图 3、图 4 渡槽墩顶横向地震位移时程曲线对比可以看出, 本文解与解析解计算结果符合较好(如图 4, 最大值误差在 4.192s, 解析解为 0.0402m; 本文解为 0.0388m), 从而验证了本文提出的渡槽薄壁结构考虑流固耦合抗震计算动力分析模型的正确性。需要指出的是, 本文模型的建立简单方便, 在求解大型多跨渡槽时可采用数值解而不需进行积分变换, 求解简便; 同时在求解多跨大型渡槽考虑流固耦合地震动力响应时, 可对渡槽进行有限元划分, 因此用本文模型较容易建模计算, 比采用空间块体单元进行计算耗费机时少, 此种工况若用解析解则不能求得地震位移时程响应值。另外, 通过图 5 渡槽无水空载及设计水位时墩顶地震响应比较可以看出, 渡槽槽内水体的流固耦合作用对渡槽的横向地震响应有较大影响^[8,9,10](如图 5, 在设计水位时为 0.4287m; 无水空载时为 0.1538m), 在

渡槽抗震设计时应予以重视。

5 结论

(1) 本文应用符拉索夫及豪斯纳尔理论,建立了考虑渡槽流固耦合的渡槽薄壁结构空间地震响应分析模型,并推导给出渡槽薄壁梁段单元刚度矩阵、质量矩阵和阻尼矩阵。

(2) 推导并计算给出了单墩渡槽无水空载以及槽内有水时的地震时程响应计算公式,用以验证本文模型的正确性。

(3) 经渡槽单墩无水空载、单墩设计水位 2 种工况下的结构横向地震时程响应的计算比较,证明了本文所采用的流固耦合模型的正确性。针对需要考虑流固耦合的大型、多跨渡槽薄壁结构,在求解地震时程响应时,应用本文模型将是方便的。

(4) 在对渡槽进行结构抗震计算时,是否考虑渡槽槽内水体与槽身的流固耦合作用对渡槽的横向地震响应有较大影响,因此在渡槽抗震设计时应考虑流固相互作用问题。

参考文献:

- [1] 居荣初, 曾心传. 弹性结构与液体的耦联振动理论[M]. 北京: 地震出版社, 1983. 115-154.
Ju Rongchu, Zeng Xinchuan. Coupled vibration theory for elastic structure and fluid [M]. Beijing: Seismological Press, 1983. 115-154. (in Chinese)
- [2] 曾庆元. 弹性系统动力学总势能不变值原理[J]. 华中理工大学学报, 2000, 28(1): 1-3.
Zeng Qingyuan. The principle of total potential energy with stationary value in elastic system dynamics [J].

- Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2000, 28(1): 1-3. (in Chinese)
- [3] 李遇春. 大型高墩渡槽横向地震反应分析[J]. 武汉水利电力大学学报, 1999, (3): 43-46.
Li Yuchun. Analysis of transverse seismic responses of large scale tall-pier aqueduct [J]. Journal of Wuhan University of Water Conservancy and Hydropower, 1999, (3): 43-46. (in Chinese)
- [4] Clough R W, Penzien J. Dynamics of structures [M]. New York: McGraw-Hill, Inc, 1993. 204-215.
- [5] 俞载道. 结构动力学基础[M]. 上海: 同济大学出版社, 1987. 149-174.
Yu Zaidao. Fundamentals of structural dynamics [M]. Shanghai: Tongji University Press, 1987. 149-174. (in Chinese)
- [6] 王文亮. 结构动力学[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1993. 251-262.
Wang Wenliang. Dynamics of structures [M]. Shanghai: Fudan University Press, 1993. 251-262. (in Chinese)
- [7] Yuchun Li, Menglin Lou. Evaluation of vertical seismic response for a large-scale beam-supported aqueduct [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2003, 32: 1-14.
- [8] Okamoto T, Kawahara M. Two-dimensional sloshing analysis by lagrangian finite element method [J]. Int. J. Numer. Methods Fluids, 1990, 11: 456-477.
- [9] Chen W, haroun M A, Liu F. Large amplitude liquid sloshing in seismically excited tanks [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1996, 25: 653-669.
- [10] A M I Sweedan, A A EI Damatty. Experimental identifiycation of the vibration modes of liquid-filled conical tanks and validation of a numerical model [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2003, 32: 1407-1430.

郑 重 声 明

自 2004 年第 1 期本刊封面做如下更新:

- 根据国家规范汉字的有关规定, 刊名改为现在的简化字《工程力学》
- 刊徽改为现在的图案, 寓意为: 逆时针转 90° 可视为《工程力学》的缩写“工力”; 顺时针转 90° 可视为英文字母 E, 转 180° 可视为英文字母 M, EM 是 Engineering Mechanics 的缩写; 正面一眼看去一个“工”字横卧在山颠亦可想象为工程实践相对于力学理论总是第一位的。寓意不过是隐含的表达意向而已, 仁者见仁, 智者见智, 取其简洁明快罢了。