

文章编号:1671-6833(2009)04-0128-05

# 大型单墩渡槽流固耦合动力分析

徐建国, 王 博, 陈 淮, 徐 伟

(郑州大学 水利与环境工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘 要:** 基于所建立的考虑流固耦合渡槽梁段单元动力分析模型, 对单墩渡槽结构振动特性和在地震波下的地震响应进行计算分析. 该模型综合考虑了渡槽横向、竖向、纵向、自由扭转和约束扭转变形、以及槽内水体与渡槽槽身的流固动力相互作用的影响. 计算结果表明流体和槽身的横向动力相互作用对渡槽的横向低频振动影响较大, 对横向高频影响较小. 动力分析模型的正确性和可靠性说明该模型是考虑渡槽内水体流固耦合的实用的动力分析模型, 计算结果可为大型渡槽抗震设计提供参考.

**关键词:** 单墩渡槽; 流固耦合; 自振频率; 地震响应

**中图分类号:** TV 312

**文献标识码:** A

## 0 引言

渡槽结构是一种特殊的薄壁结构输水建筑物, 其上部水体的质量往往大于槽体本身的质量, 这对于渡槽的抗震是极为不利的. 以往在进行渡槽结构分析计算时, 通常是将渡槽槽身看成实心杆件进行简化计算, 没有考虑渡槽薄壁结构的弯扭耦合变形、约束扭转变形及横向流-固动力相互作用的影响, 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而忽略了流体-结构的横向动力相互作用影响, 从而造成了较大的计算误差; 流-固动力相互作用问题是一个较复杂的问题, 有些学者研究了流体的非线性晃动<sup>[1-3]</sup>, 但也基本限于二维平面分析, 没有进行大型渡槽的三维空间分析计算. 笔者在综合考虑渡槽薄壁结构特性的基础上, 建立了考虑槽体-水体流固耦合的渡槽薄壁结构空间动力分析模型. 为了验证模型求解的收敛性和正确性, 以南水北调工程某大型渡槽的单跨进行动力模态分析和多工况下的地震时程响应计算, 以证明本文模型计算结果的正确性.

## 1 渡槽结构动力分析模型的建立

### 1.1 考虑渡槽槽内水体的附联水等效质量及等效刚度

按照豪斯纳尔 (Housner) 理论<sup>[4-5]</sup> 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项及对流压力项. 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, 且质量块距底板的距离  $h_0$  为

$$\left\{ \begin{aligned} M_{PR}^0 &= ah\rho \frac{\text{th} \frac{\sqrt{3}a}{2h}}{\frac{\sqrt{3}a}{2h}}; \\ h_0 &= \frac{3h}{8} + \frac{h}{2} \left( \frac{\text{th} \frac{\sqrt{3}a}{2h}}{\frac{\sqrt{3}a}{2h}} - 1 \right) \end{aligned} \right. \quad (1)$$

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. 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  $h_n$  分别为

$$M_{PR}^n = \frac{a}{n} h\rho \left( \frac{\sqrt{10}a}{12hn} \text{th} \left( \frac{\sqrt{10}hn}{a} \right) \right), \quad (n=1, 3, 5, \dots) \quad (2)$$

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

收稿日期: 2009-03-03; 修订日期: 2009-07-16

基金项目: 河南省自然科学基金资助项目 (82300440070); 河南省科技攻关项目 (0624450009)

作者简介: 徐建国 (1966-) 男, 河南孟津人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事水工结构抗震等方面的研究, E-mail:

Jianguoxu@zzu.edu.cn.

$$h_n = h \left( 1 - \frac{\operatorname{ch} \frac{\sqrt{10} h n}{a} - 2}{\sqrt{10} h n \operatorname{sh} \frac{\sqrt{10} h n}{a}} \right), (n = 1, 3, 5, \dots) \quad (4)$$

根据计算分析<sup>[4]</sup>,取前几阶对流谐振力即可得到满意结果。

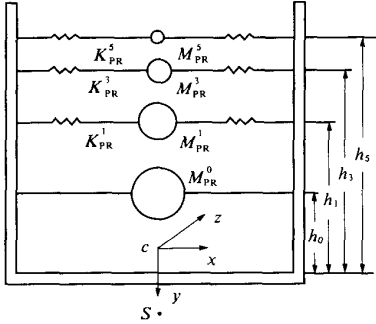


图 1 渡槽横截面水体等效示意图  
Fig. 1 Aqueduct cross section

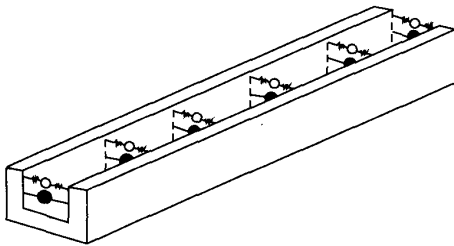


图 2 水体等效弹簧—质量系统离散分布示意图  
Fig. 2 Dissociation of water equivalent spring-mass system

### 1.2 渡槽薄壁结构考虑流固耦合作用的空间动力分析模型

渡槽结构空间动力计算可采用梁段有限元法<sup>[5-6]</sup>,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,图中  $S$  为截面扭转中心,空间坐标原点取在形心  $c$ 。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  $S$  的扭转移位  $\phi$ ,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,因考虑渡槽截面的约束扭转,结点位移应包括扭转角  $\phi$  沿单元长度的变化率,故梁段单元的横向水平位移  $u$ 、竖向位移  $v$ 、

扭转角  $\phi$  的形函数  $[N(z)]$  取为 3 次 *Hermite* 多项式,纵向位移形函数  $[N_1(z)]$  及等效弹簧—质量系统的横向位移形函数  $[N_2(z)]$  均取为 1 次多项式。

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

采用势能驻值原理<sup>[5-7]</sup>推导渡槽薄壁梁段单元的刚度矩阵  $[K]^e$ 。

由弹性系统动力学不变值原理<sup>[5-7]</sup>,导出渡槽薄壁梁段单元质量矩阵  $[M]^e$ 。

$$[K]^e = \begin{bmatrix} [K_u]^e + [K_{u,u}]^{PR} & 0 & 0 & 0 & [K_{u,u1}]^{PR} & [K_{u,u3}]^{PR} & [K_{u,u5}]^{PR} \\ 0 & [K_v]^e & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & [K_w]^e & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & [K_\phi]^e + [K_{\omega}]^e & 0 & 0 & 0 \\ [K_{w1,u}]^{PR} & 0 & 0 & 0 & [K_{w1,u1}]^{PR} & 0 & 0 \\ [K_{w3,u}]^{PR} & 0 & 0 & 0 & 0 & [K_{w3,u3}]^{PR} & 0 \\ [K_{w5,u}]^{PR} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & [K_{w5,u5}]^{PR} \end{bmatrix}$$
$$[M]^e = \begin{bmatrix} [M_{u,u}]^e & 0 & 0 & [M_{u,\phi}]^e & 0 & 0 & 0 \\ 0 & [M_{v,v}]^e & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & [M_{w,w}]^e & 0 & 0 & 0 & 0 \\ [M_{\phi,u}]^e & 0 & 0 & [M_{\phi,\phi}]^e & [M_{\phi,u1}]^{PR} & [M_{\phi,u3}]^{PR} & [M_{\phi,u5}]^{PR} \\ 0 & 0 & 0 & [M_{u1,\phi}]^{PR} & [M_{u1,u1}]^{PR} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & [M_{u3,\phi}]^{PR} & 0 & [M_{u3,u3}]^{PR} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & [M_{u5,\phi}]^{PR} & 0 & 0 & [M_{u5,u5}]^{PR} \end{bmatrix}$$

采用瑞利阻尼假定确定单元阻尼矩阵:

$$[C] = \alpha_0 [M] + \alpha_1 [K].$$

式中:  $\alpha_0$ 、 $\alpha_1$  可由下式确定:

$$\alpha_0 = \frac{2\omega_1\omega_2(\xi_1\omega_2 - \xi_2\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2}, \alpha_1 = \frac{2(\xi_2\omega_2 - \xi_1\omega_1)}{\omega_2^2 - \omega_1^2}.$$

式中:  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  为结构第一、第二阶圆频率;  $\xi_1$ 、 $\xi_2$  为相应振型阻尼比。

组集渡槽槽身、支架、盆式橡胶支座等单元特性矩阵可得渡槽总体刚度矩阵、质量矩阵和阻尼矩阵,求解渡槽在地震荷载作用下的时程动力响应方程为:

$$M\{\ddot{u}\} + C\{\dot{u}\} + K\{u\} = -M(I)\ddot{u}_g \quad (5)$$

式中:  $M$ 、 $C$ 、 $K$  分别为渡槽结构整体质量阵、整体阻尼阵、整体刚度阵;  $\{\ddot{u}\}$ 、 $\{\dot{u}\}$  和  $\{u\}$  分别为渡槽系统相对于地面的加速度、速度和位移列阵。

### 2 单墩渡槽自振频率计算

现从南水北调工程某高墩渡槽设计方案中切取一典型墩进行分析计算,如图 3 所示。为了便于同分析解比较,将渡槽支架简化为一单墩弹性悬臂梁来研究流体横向晃动对渡槽横向自振频率的

影响. 设槽内水深为  $H$ , 槽内壁宽为  $a$ , 单墩高为  $L$ , 横向抗弯刚度为  $EI$ , 横截面面积为  $A$ , 流体为无旋的、不可压缩理想液体, 其在固定于槽身的坐标系  $xoz$  下的运动方程及边界条件为:

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (x, z) \in \Omega \quad (6)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} \Big|_{x=0, a} = 0 \quad (7)$$

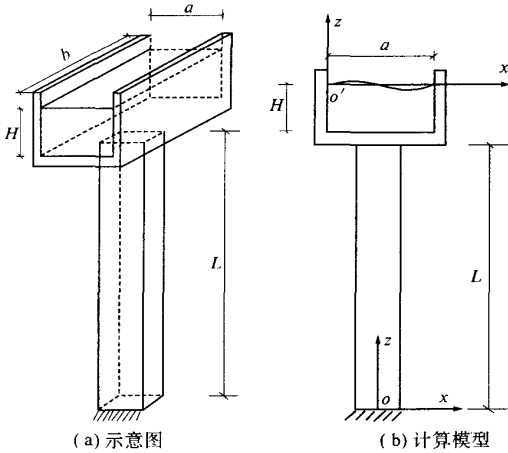


图 3 单墩渡槽示意图和计算模型

Fig. 3 Single pier aqueduct and calculation model

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{z=-H} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} \Big|_{z=0} = \frac{\partial h}{\partial t} \Big|_{z=0} \quad (9)$$

$$\left( \frac{\partial \phi}{\partial t} + gh \right) \Big|_{z=0} + x \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \Big|_{z=L} = 0 \quad (10)$$

液体内的动水压力为:

$$p = -\rho_w \frac{\partial \phi}{\partial t} - x \rho_w \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \Big|_{z=L} \quad (11)$$

设流体的速度势函数为

$$\phi(x, z, t) = i\omega \phi(x, z) \exp(i\omega t) = i\omega X(x) Z(z) \exp(i\omega t) \quad (12)$$

设墩体位移函数

$$u(z, t) = Y(z) \exp(i\omega t) \quad (13)$$

将式(12)带入式(6), 得

$$\frac{d^2 X(x)}{dx^2} Z(z) + X(x) \frac{d^2 Z(z)}{dz^2} = 0,$$

$$\text{则} \begin{cases} \frac{d^2 X(x)}{dx^2} + k^2 X(x) = 0 \\ \frac{d^2 Z(z)}{dz^2} - k^2 Z(z) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$\text{故} \quad X(x) = C_1 \cos kx + C_2 \sin kx \quad (15)$$

$$Z(z) = C_3 e^{kz} + C_4 e^{-kz} \quad (16)$$

由边界条件式(7)、(8), 可得到流体的速度势函

数为:

$$\phi(x, z, t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n i\omega \cos \frac{n\pi x}{a} \cosh \frac{n\pi(z+H)}{a} \exp(i\omega t) \quad (17)$$

系数  $A_n$  由边界条件式(9)、(10)确定, 经计算可得到:

$$\phi(x, z, t) = \left[ -\frac{a}{2} Y(L) + \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{4a\omega^2 Y(L) \cos \frac{n\pi x}{a} \cosh \frac{n\pi(z+H)}{a}}{\pi^2 n^2 \left( \omega^2 \cosh \frac{n\pi H}{a} - g \frac{n\pi}{a} \sinh \frac{n\pi H}{a} \right)} \right] \cdot i\omega \exp(i\omega t).$$

槽内流体动水压力表达式:

$$p = \rho_w \left[ -\frac{a}{2} Y(L) + \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{4a\omega^2 Y(L) \cos \frac{n\pi x}{a} \cosh \frac{n\pi(z+H)}{a}}{\pi^2 n^2 \left( \omega^2 \cosh \frac{n\pi H}{a} - g \frac{n\pi}{a} \sinh \frac{n\pi H}{a} \right)} \right] \cdot \omega^2 \exp(i\omega t) + \rho_w x Y(L) \omega^2 \exp(i\omega t)$$

渡槽墩体的振型函数为

$$Y(z) = C_1 \cosh \beta z + C_2 \sinh \beta z + C_3 \cos \beta z + C_4 \sin \beta z.$$

边界条件为

$$\begin{aligned} -EI \frac{\partial^3 u}{\partial z^3} \Big|_{z=L} &= -\int_{-H}^0 b p \Big|_{x=0} dz + \int_{-H}^0 b p \Big|_{x=a} dz - \\ &m_t \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \Big|_{z=L} + r_c \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right) \Big|_{z=L} \right]; \\ EI \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \Big|_{z=L} &= \int_{-H}^0 b p \Big|_{x=a} (H+z) dz - \int_{-H}^0 b p \Big|_{x=0} \\ &(H+z) dz + \int_0^a b p \Big|_{z=-H} \left( x - \frac{a}{2} \right) dx - \\ &J_A \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right) \Big|_{z=L} - m_t r_c \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \Big|_{z=L}. \end{aligned}$$

振型函数系数  $C_1, C_2, C_3, C_4$  可由边界条件确定.

### 3 单墩渡槽横向地震响应

设槽内水深为  $H$ , 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  $M$  作用<sup>[4]</sup>. 其强迫振动微分方程为

$$\ddot{q}_i(t) + \omega_i^2 q_i(t) = \frac{1}{\int_0^L \rho A(z) \phi_i^2 dz} \left[ -\ddot{u}_g(t) \int_0^L \rho \cdot \rho A(z) \phi_i dz + S \phi_i(l) + M \frac{\partial \phi_i(l)}{\partial z} \right].$$

令  $L\{q_i(t)\} = Q_i(p)$ , 并对上式两端进行拉普拉斯变换, 得

$$Q_i(p) =$$

$$-L\{\ddot{u}_g(t)\} \int_0^L \rho A(z) \phi_i dz + L\{S\} \phi_i(l) + L(M) \frac{\partial \phi_i(l)}{\partial z} \\ \int_0^L \rho A(z) \phi_i^2 dz (p^2 + \omega_i^2)$$

可根据计算精度的要求选择振型数  $n$ , 求解上式组成的联立方程组, 求出  $Q_i(p)$  后, 进行逆变换得  $q_i(t)$ , 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, 可直接采用数值积分法<sup>[8-10]</sup> (如 Wilson- $\theta$  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某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  $b = 14.0\text{ m}$ , 设计水深  $H = 3.0\text{ m}$ , 槽体质量为  $m_f = 1.68 \times 10^5\text{ kg}$ , 槽体对墩顶的转动惯量为  $J_A = 1.22 \times 10^6\text{ kg} \cdot \text{m}^2$ , 墩体横向抗弯刚度为  $EI = 15.6 \times 10^{10}\text{ N} \cdot \text{m}^2$ , 墩体横截面积为  $A = 2.5\text{ m}^2$ , 材料密度为  $\rho = 2\,500.0\text{ kg/m}^3$ , 水体密度为  $\rho_w = 1\,000.0\text{ kg/m}^3$ 。为了分析对比渡槽单墩在各种情况下的动力特性及摸态的变化, 同时也是为了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, 现将渡槽单墩在 3 种工况下的本文方法解和理论解加以对照列于表 1。(工况 1: 无槽体时单个墩体的振动频率; 工况 2: 单墩带槽无水空载的自振频率; 工况 3: 单墩带槽设计水位的自振频率)。图 5 计算比较了单墩渡槽设计水位时在简谐地震波 ( $\ddot{u}_g(t) = 10\sin 50t\text{ m/s}^2$ ) 下的本文解和分析解响应数值 (图中实线为理论解, 虚线为本文解, 横坐标单位为 s, 纵坐标单位为 m); 图 6 为渡槽有水和无水情况在 El-Centro 地震波 ( $N-S$  分量, 最大幅值调幅

到  $0.6\text{ g}$ ) 下的地震响应比较 (图中实线为有水, 虚线为无水, 横坐标单位为 s, 纵坐标单位为 m)。

从表 1 计算结果可以看出, 应用本文模型得到的计算结果在各种工况下均与解析解接近, 说明了本文所建立的渡槽结构考虑横向流固耦合动力分析模型的正确性。用本文模型及解析解求得的耦联系统的第一阶频率均为水体在槽内的自然晃动频率, 而与渡槽结构的振动无关, 即单墩渡槽的振动对水体的晃动频率影响不大; 水体的二阶以上晃动频率在耦联系统中没有出现, 说明在本算例中水体高阶晃动频率对渡槽结构振动影响不大; 比较工况 2 和工况 3 的结构同阶圆频率, 流体与槽身的横向动力相互作用对渡槽结构的横向低频振动影响较大, 对横向高频影响较小 (如第 1 阶结构横向振动频率, 考虑流固耦合时较无水时的振动频率降低 21%; 而第 5 阶仅降低 0.2%)。

由图 5 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, 从而验证了本文提出的渡槽薄壁结构考虑流固耦合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 6 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 (如图 6 所示, 在  $9.248\text{ s}$ , 设计水位时为  $0.4287\text{ m}$ ; 无水空载时为  $0.1538\text{ m}$ ), 在渡槽抗震设计时应予以重视。

表 1 各工况下单墩渡槽横向自振圆频率  
Tab.1 Transverse frequency of single pier aqueduct under cases

频率 阶次	工况 1		工况 2		工况 3		水体晃动频率
	本文解	解析解	本文解	解析解	本文解	解析解	解析解 <sup>[4]</sup>
1	19.53	19.50	8.97	9.01	2.73	2.74	2.76
2	123.31	122.23	77.86	77.97	7.09	7.10	3.94
3	346.10	342.41	191.88	192.62	75.66	74.63	4.82
4	672.76	671.02	379.72	382.80	192.15	190.18	5.56
5	1 091.75	1 109.31	695.49	704.19	378.68	376.72	6.22
6	1 601.37	1 657.18	1 128.69	1 143.31	694.93	702.94	6.82

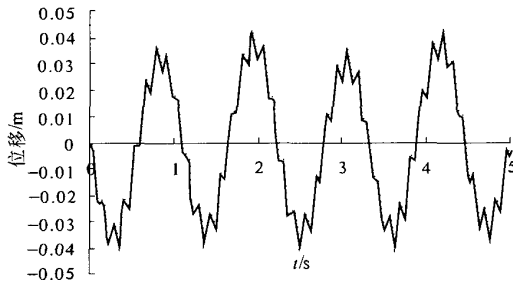


图5 渡槽设计水位时墩顶地震响应比较

Fig. 5 Seismic response comparison of top pier with water

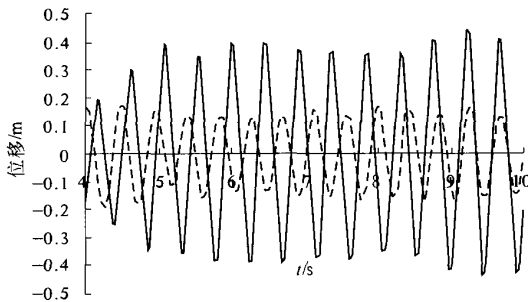


图6 渡槽无水及设计水位时墩顶地震响应比较

Fig. 6 Seismic response comparison of top pier without water

## 5 结论

本文基于所建立的考虑流固耦合渡槽梁段单元动力分析模型,对单墩渡槽结构振动特性和在地震波下的地震响应进行分析计算,借助速度势函数推导了单墩渡槽流固耦合自振频率和地震响应解析表达式。振动频率分析表明动力分析模型计算结果与理论解符合得很好,经比较单墩无水空载及设计水位两种工况下结构的同阶自振频率,

说明流体与槽身的横向动力相互作用对渡槽结构的横向低频振动影响较大,而对横向高频影响较小;经墩顶横向地震位移时程曲线对比,验证了本文模型的正确性,同时也说明槽内水体将对渡槽地震响应产生较大影响,计算结果可为大型渡槽抗震规划设计提供参考依据。

## 参考文献:

- [1] 李遇春. 渡槽中流体非线性晃动的边界元模拟[J]. 地震工程与工程振动, 2000(2): 51-56.
- [2] OKAMOTO T, KAWAHARA M. Two-dimensional sloshing analysis by Lagrangian finite element method [J]. Int J Numer Methods Fluids, 1990, 11: 453-478.
- [3] NAKAYAMA T, WASHIZU K. The boundary element method applied to the analysis of two-dimensional nonlinear sloshing problems. [J] Int J Numer Methods Eng, 1981, 17: 1631-1646.
- [4] 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.
- [5] 徐建国. 大型渡槽结构抗震分析方法及其应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2005: 20-45.
- [6] 王 博, 徐建国. 大型渡槽对多点地震输入的反应[J]. 水利学报, 2000, (9): 55-60.
- [7] 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.
- [8] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998: 56-112.
- [9] 徐士良. 常用算法程序集[M]. 第二版. 北京: 清华大学出版社, 1995: 113-117.
- [10] M. 帕兹著, 李裕澈译. 结构动力学-理论与计算[M]. 北京: 地震出版社, 1993: 56-160.
- [11] 徐建国, 陈 淮, 王 博. 连续箱梁桥力学性能分析[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2004, 25(1): 28-30.

## Dynamical Analysis of Large Scale Signal Pier Aqueduct with Fluid-structure Coupling

XU Jian-guo, WANG Bo, CHEN Huai, XU Wei

(School of Environment and Hydraulic Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** Based on the aqueduct beam element dynamic model with fluid-structure coupling, the seismic response of signal pier aqueduct under earthquake is calculated. In this model, the transverse, vertical, longitudinal deformation and restraint twist deformation, as well as the fluid-structure coupling between aqueduct and water body are all taken into consideration. It is shown the correctness of the solution. The model is practicable and the calculation results provide consults to the anti-seismic design of aqueduct.

**Key words:** signal pier aqueduct; fluid-structure coupling; vibration frequency; seismic response