

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2011.04.012

U 形渡槽三维流固耦合体风振响应分析

刘 亮, 张 华

(河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098)

摘要:以排架 U 形渡槽为研究对象,建立三维流固耦合模型,通过自回归滑动平均(ARMA)模型模拟的脉动风,采用任意拉格朗日-欧拉(ALE)方法分析了 U 形渡槽风振动力响应.结果表明:在风荷载作用下,水体与槽壁的动力相互作用是一种复杂的非线性过程.槽内水体晃动产生的动水压力很小,但水体的存在增大了槽体的横向位移.由于水体和槽壁间的耦合动力作用,槽身内壁两侧的主应力较大.随着水深的增大,处于不同高度位置的槽壁,其主应力的增减趋势不同.

关键词:U 形渡槽;三维模型;流固耦合;ARMA 模型;风振响应

中图分类号:TV312 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2011)04-0421-05

渡槽是水利工程中一种重要的输水式建筑物,由于其具有输水能力大、造价相对较低等优点,在我国有着广泛的应用.渡槽常处于风速较大的空旷或峡谷地带,且槽身迎风面较大,渡槽结构的抗风问题较为突出.近二三十年来,我国的渡槽风毁事故比较多,但对于渡槽结构抗风问题的研究较少^[1-2].

桥梁、结构物主要受近地风的影响,即大气边界层内空气流动特性的影响^[3].近地风一般包含物理量不随时间变化的平均风和随机性很强的脉动风 2 个部分,平均风速可以通过长期的观测统计出来,而脉动风速可以用自回归滑动平均(ARMA)模型来模拟.在渡槽抗风设计中,如果静风荷载估计过小,且未考虑脉动风荷载的影响,可能会因配筋不足而导致结构抗风刚度较小.因此,渡槽结构的风振分析对于结构的抗风设计具有重要的意义.

在风荷载的作用下,槽内的水体与槽身的相互耦合作用对渡槽结构的振动将产生一定的影响^[4],因此在进行渡槽结构风振响应分析时,应考虑水体和槽身间的流固耦合作用.此外,二维渡槽模型刚化了渡槽结构^[5].为了能更真实地反映渡槽实际结构的风振动力特性,本文建立了三维有限元计算模型,并采用任意拉格朗日-欧拉(ALE)方法计算分析了 U 形排架渡槽结构流固耦合体的风振动力响应.

1 流固耦合系统基本方程

1.1 结构控制方程

在流固耦合体系中,需要将流固耦合面上的相互作用项附加到动力方程中,采用有限元方法求解的渡槽流固耦合系统横向风致振动方程^[6-7]可表示为

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = P_W(t) + P_L(t) \quad (1)$$

式中: M, C, K ——结构的质量、阻尼和刚度矩阵; $u, \dot{u}, \ddot{u}$ ——相对地面的水平位移、速度和加速度列向量; t ——时间; $P_W(t)$ ——作用在结构上的脉动风荷载向量; $P_L(t)$ ——槽内流体对槽身的作用力.

1.2 基于 ALE 描述的流固耦合方程

在 ALE 描述中,有限元的剖分是针对独立于结构和流体运动的参考坐标系进行的,网格点即为参考点,它可以在空间任意形式运动,流体域和结构域的物理量可以通过 Jacobi 行列式映射到参考坐标系上,从而可解决流固耦合面的协调问题.任意拉格朗日法中的 Navier-Stokes 流体方程^[8-10]可表示为

$$\nabla \cdot \dot{u} = 0 \quad (2)$$

收稿日期:2010-09-07

基金项目:国家自然科学基金(50709006)

作者简介:刘亮(1985—),男,安徽临泉人,硕士研究生,主要从事流固耦合及水工结构抗风研究. E-mail: lietiannx@126.com

$$\rho \ddot{u} + \rho \dot{u} \cdot \nabla \dot{u} - \nabla \cdot \tau = f - \nabla P \tag{3}$$

式中： P ——水压力； f ——体力； ρ ——流体密度； τ ——黏性应力张量。

在风荷载作用下，耦合面上槽体运动引起水体晃动，随之产生的动水压力反作用于耦合面上的槽体，影响渡槽槽体的变形和应力分布。在流固耦合界面上，流体和槽体满足位移连续性条件

$$u_f = u_s \tag{4}$$

和作用力平衡条件

$$\sigma_f \cdot n_f - \sigma_s \cdot n_s = 0 \tag{5}$$

式中： u_f, u_s ——耦合界面上流体和槽体结构的位移； σ_f, σ_s ——耦合界面上流体和槽体结构的应力； n_f, n_s ——流体和槽体结构耦合界面上的法向向量。

在自由液面上，流体的法向速度等于液面的法向速度^[11]：

$$[v(\xi, t) - \dot{x}(\xi, t)] \cdot n = 0 \quad \forall x \in \partial\Omega_{\text{free}} \tag{6}$$

式中： ξ ——自由液面上的一点； $v(\xi, t)$ ——自由液面流体的速度； $\dot{x}(\xi, t)$ ——自由液面的速度； n ——自由液面单位法向量； Ω_{free} ——自由液面。

2 脉动风的模拟

ARMA 模型可以模拟具有时间相关性和空间相关性的随机风速时程。一般的线性过程常可用差分方程表示为^[12-13]

$$X_t + \sum_{i=1}^n a_i X_{t-i} = \sum_{i=0}^m b_i \varepsilon_{t-i} \tag{7}$$

式中： X_t ——平稳随机时间序列 t 时刻的样本； X_{t-i} ——平稳随机时间序列 $t-i$ 时刻的样本； ε_{t-i} —— $t-i$ 时刻的白噪声； a_i ——自回归系数； b_i ——滑动平均系数； n ——自回归阶数； m ——滑动平均阶数。 $\{X_t\}$ 称为 n 阶自回归 m 阶滑动平均过程，记为 $\text{ARMA}(n, m)$ 。将 ARMA 模型应用于 m 个脉动风速时程模拟，则

$$U_t = \sum_{i=0}^p A_i U(t-i\Delta t) + \sum_{j=0}^q B_j X(t-j\Delta t) \tag{8}$$

式中： U_t —— t 时刻 m 阶脉动风速时程列阵； $U(t-i\Delta t)$ —— $t-i\Delta t$ 时刻 m 阶脉动风速时程列阵； $X(t-j\Delta t)$ —— $t-j\Delta t$ 时刻 m 阶正态分布的白噪声列阵； p ——自回归 (AR) 阶数； q ——滑动回归 (MA) 阶数； A_j —— $m \times m$ 阶自回归 (AR) 系数矩阵； B_j —— $m \times m$ 阶滑动回归 (MA) 系数矩阵。

取 $b_0 \equiv 1$ ，得到工程上常用的表达式

$$X_t + \sum_{i=1}^n a_i X_{t-i} = \varepsilon_t + \sum_{i=1}^m b_i \varepsilon_{t-i} \tag{9}$$

引入时移算子 B ： $B^i X_i = X_{i-1}$ ，可将式 (8) 写为

$$\Phi(B) X_t = \Theta(B) \varepsilon_t \tag{10}$$

其中

$$\Phi(B) = 1 + a_1 B + a_2 B^2 + \cdots + a_n B^n$$

$$\Theta(B) = 1 + b_1 B + b_2 B^2 + \cdots + b_m B^m$$

ARMA 模型的平稳与可逆条件分别由自回归系数和滑动平均系数决定，可由 $\Phi(B) = 0$ 和 $\Theta(B) = 0$ 的根是否全部在 B 平面单位圆之外来判断。

3 计算实例

3.1 计算模型

以 U 形排架渡槽为例，运用有限元软件 ADINA 建立三维渡槽计算模型，如图 1 所示。渡槽单跨长 10 m，支撑排架高 24 m。槽体截面尺寸为：半径 3.5 m，高 6.1 m，壁厚 0.5 m，拉杆宽 0.3 m，高 0.4 m。槽身、支撑排架的混凝土等级分别为 C50 和 C30。渡槽结构采用三维实体单元模拟，槽内水体采用三维流体单元模拟，水体的体积模量为 2.1 GPa。渡槽内壁与水体相互作用面采用流固

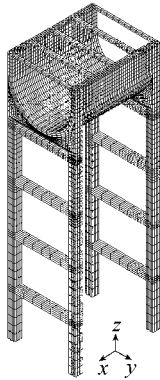


图 1 渡槽计算模型

Fig. 1 Diagram of computation model of U-shaped aqueduct

耦合边界条件,水体上表面采用自由液面边界条件,进水和出水断面采用可滑移的壁面边界模拟.为考虑邻跨渡槽的影响,将邻跨渡槽(包括水体)的一半质量附加在支撑排架的顶端.

应用 ARMA 模型在 MATLAB 平台上编制了脉动风的模拟程序,脉动风速功率谱采用 Davenport 谱,时间步长 $\Delta t = 0.1\text{ s}$,时程总长 $T = 120\text{ s}$.通过程序模拟得到迎风面不同高度位置的脉动风速.将模拟得到的脉动风速时程与相应高度位置的平均风速叠加,依据 GB 50009—2001《建筑结构荷载规范》^[14] 计算得到作用在渡槽迎风面上不同高度位置的风荷载强度样本时程.限于篇幅,仅给出作用在渡槽顶端处(距地面高度 30.1 m)的风荷载强度样本时程曲线,如图 2 所示.

3.2 风致动力性能分析

3.2.1 动水压力分析

分别取 4.0,4.5 m 2 种水深工况,计算渡槽在风荷载作用下的动水压力响应.图 3 为渡槽跨中槽壁右下角处的动水压力时程曲线,随着水深的增加,槽壁上的动水压力随之增大.在这 2 种水深工况下,跨中最大动水压力分别为 36.091 和 40.991 kPa.水深增加 12.5%,最大动水压力随之增加了 13.6%,二者增幅较为接近.这表明,在风荷载作用下,水深是决定槽壁动水压力大小的主要因素,而水体晃动对动水压力的影响很小.由动水压力时程曲线可以看出,水体与槽壁间的动力相互作用是一种复杂的非线性过程,因此渡槽结构的风振响应时程分析是必要的.

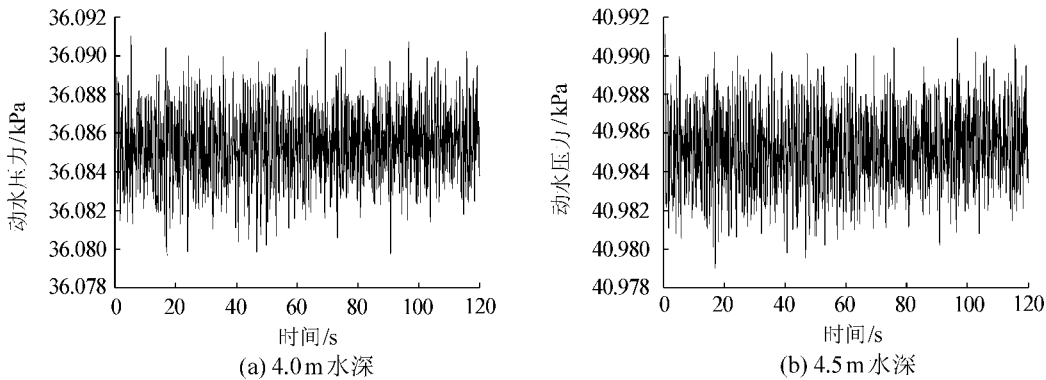


图 3 跨中动水压力时程曲线

Fig. 3 Time history curves of hydrodynamic pressure of central span

3.2.2 动位移分析

图 4 为空槽和 4.5 m 水深工况下的跨中槽顶横向位移时程曲线.由图 4 可以看出,在风荷载作用下,槽内有水和无水工况下的槽身横向位移响应的时程响应规律基本一致.在空槽,2.59,3.5,4.0,4.5 m 5 种水深工况下,渡槽跨中槽顶最大横向位移分别为 2.883,2.976,2.983,2.986,2.991 mm,槽内有水时的横向位移大于空槽时的横向位移,但随着槽内水深的增大,槽顶横向位移增幅较小.

3.2.3 动应力分析

取 3.5,4.0,4.5 m 3 种水深工况,计算渡槽在风荷载作用下的动应力响应.图 5 为渡槽在 4.0,4.5 m 水深工况下,跨中槽身截面第 1 主应力云图.在风荷载作用下,槽身外壁较大的主应力出现在其底部,由于槽内水体的晃动,槽身内壁较大的主应力则出现在其两侧.

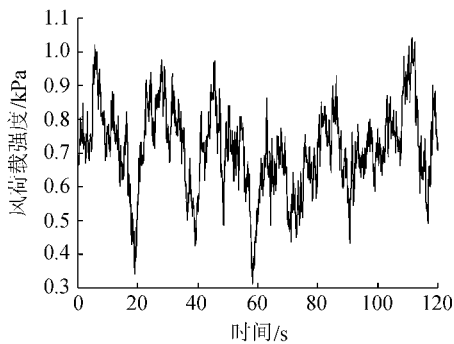


图 2 渡槽顶端处的风荷载强度样本时程曲线

Fig. 2 Time history curve of wind load strength on top of U-shaped aqueduct

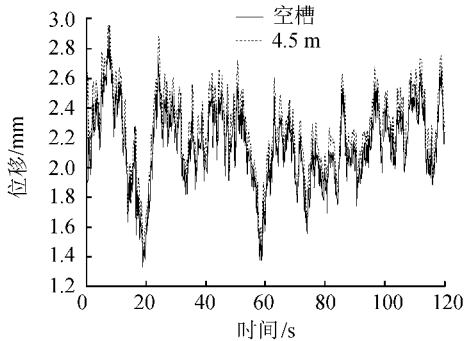


图 4 跨中槽顶横向位移时程曲线

Fig. 4 Time history curves of transversal displacement on top of U-shaped aqueduct

为进一步分析槽身内壁应力分布情况,作出渡槽在 3.5,4.0,4.5 m 3 种水深工况下,跨中槽身内壁半圆

段第 1 主应力的分布曲线,如图 6 所示.槽壁左、右两侧的主应力大致呈对称分布,在槽壁的对称部位,右侧槽壁的主应力略大于左侧槽壁的主应力.左、右侧槽壁分别在沿横槽方向的 0.88,7.12 m 处出现主应力的峰值,这两处均距槽底 2.71 m,在这高度以下的槽壁,其主应力随着水深的增大而增大;在这高度以上的槽壁,其主应力随着水深的增大而减小.

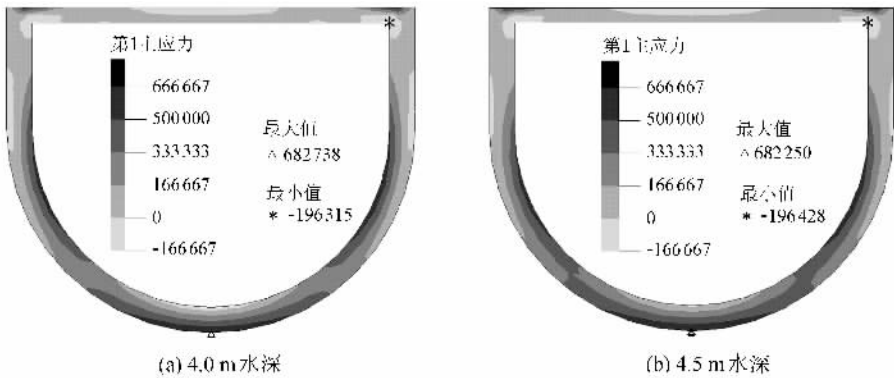


图 5 跨中槽身截面第 1 主应力云图(单位 :Pa)

Fig. 5 Cloud picture of first principal stress in middle cross-section of U-shaped aqueduct(unit :Pa)

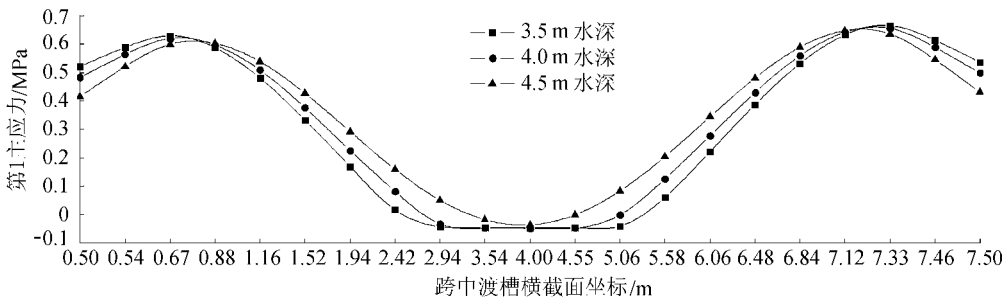


图 6 跨中槽身内壁半圆段第 1 主应力分布曲线

Fig. 6 Curves of first principal stress along half-circle inner wall of U-shaped aqueduct

4 结 论

- a. 在风荷载作用下,动水压力的大小主要取决于槽内水位的高低,水体晃动对其影响较小.在整个风振时程计算过程中,动水压力变化表现出明显的非线性,对于渡槽结构,风振响应时程分析是必要的.
- b. 渡槽槽内水体的存在增大了结构风振横向位移响应,随着水深的增大,处于不同高度位置的槽壁,其主应力的增减趋势不同.流固耦合作用改变了槽壁的应力分布,使得槽身内壁两侧的主应力较大,因此在进行渡槽结构抗风设计计算时,应考虑水体与槽壁之间的动力相互作用.

参考文献 :

[1] 李遇春,楼梦麟.排架式渡槽流-固耦合动力特性分析[J].水利学报,2000(12):31-37. (LI Yu-chun, LUO Meng-lin. Dynamic characteristics of fluid-structure interaction system for bent-type aqueduct[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000(12):31-37. (in Chinese))

[2] 李正农,楼梦麟,宋锦忠,等. U 形渡槽槽体结构风载体形系数的风洞试验研究[J]. 空气动力学学报,2002(2):233-238; 245. (LI Zheng-nong, LUO Meng-lin, SONG Jin-zhong, et al. The wind tunnel test study on wind load shap coefficient of aqueduct body structure for U shape[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2002(2):233-238 245. (in Chinese))

[3] 陈政清. 桥梁风工程[M]. 北京:人民交通出版社,2005.

[4] 王博,陈淮,徐伟,等. 考虑槽身与槽内水体流固耦合的渡槽地震反应计算[J]. 水利水电科技进展,2005,25(3):5-7;50. (WANG Bo, CHEN Huai, XU Wei, et al. Seismic response analysis of aqueducts with consideration of fluid-solid coupling[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, 25(3):5-7;50. (in Chinese))

[5] 吴轶,莫海鸿,杨春. 排架-渡槽-水三维耦合体系地震响应分析[J]. 水利学报,2005(3):280-285. (WU Yi, MO Hai-hong, YANG Chun. Seismic response of frame-supported large rectangular aqueduct-water 3-D coupling system[J]. Journal of Hydraulic Engineering,

- 2005(3): 280-285. (in Chinese))
- [6] 沈世钊,武岳.大跨度张拉结构风致动力响应研究进展[J]. 同济大学学报:自然科学版,2002,30(5): 533-538. (SHEN Shi-zhao,WU Yue. Overview of wind-induced response for large-span tension structures[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2002,30(5): 533-538. (in Chinese))
- [7] 李遇春,楼梦麟.高排架渡槽风振的计算方法[J]. 同济大学学报:自然科学版,2002,30(2): 139-145. (LI Yu-chun,LUO Meng-lin. Computing method of wind-induced vibration for tall-bent aqueduct[J]. Journal of Tongji University: Natural Science,2002,30(2): 139-145. (in Chinese))
- [8] SHIN S,LEE W I. Finite element analysis of incompressible viscous flow with moving free surface by selective volume of fluid method[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow,2000(21): 197-206.
- [9] FILIPOVIC N,MIJAILOVIC S,TSUDA A,et al. An implicit algorithm within the arbitrary Lagrangian-Eulerian formulation for solving incompressible fluid flow with large boundary motions[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,2006,195: 6347-6361.
- [10] SOULI M,ZOLESIO J P. Arbitrary Lagrangian-Eulerian and free surface methods in fluid mechanics[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,2001,191: 451-466.
- [11] HENNING B,PETER W. Arbitrary Lagrangian Eulerian finite element analysis of free surface flow[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,2000,190: 95-109.
- [12] 曾宪武,韩大建.大跨度桥梁风场模拟方法对比研究[J]. 地震工程与工程振动,2004,24(1): 135-140. (ZENG Xian-wu,HAN Da-jian. A comparative study on simulation methods for wind field long-span bridges[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2004,24(1): 135-140. (in Chinese))
- [13] 李英民,赖明,赵青. ARMA模型及参数识别技术在脉动风仿真中的应用[J]. 重庆建筑工程学院学报,1992,14(3): 17-24. (LI Ying-min,LAI Ming,ZHAO Qing. Application of ARMA model and parameter identification to simulation of pulsating wind[J]. Journal of Chongqing institute of Architectural and Engineering,1992,14(3): 17-24. (in Chinese))
- [14] GB50009—2001 建筑结构荷载规范[S].

Analysis of wind-induced vibration response of 3-D fluid-structure interaction system for U-shaped aqueduct

LIU Liang, ZHANG Hua

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The fluctuating wind speed of a U-shaped aqueduct was simulated using the auto-regressive moving average (ARMA) model. A three-dimensional fluid-structure interaction model was established. The arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) method was used to study wind-induced dynamic response of U-shaped aqueduct-water coupling systems. The results show that the interaction between the water and the aqueduct wall is remarkably nonlinear. The hydrodynamic pressure on the aqueduct wall induced by the surging wave of water in the aqueduct is very small. Under wind loading, water in the aqueduct increases the transversal displacement of aqueduct. As the dynamic coupling between the aqueduct wall and the water, the principal stresses of the left and right sides of the inner wall of aqueduct are large. The increasing or decreasing trend of the principal stress of the inner wall at different heights is different with the increase of water depth.

Key words: U-shaped aqueduct; 3-D model; fluid-structure interaction; ARMA model; wind-induced vibration response