大型矩型水工渡槽三维流固耦合动力分析

王清云1,张多新1,2,白新理1

(1. 华北水利水电学院 土木与交通学院,河南 郑州 450011; 2. 同济大学 土木工程学院,上海 200092)

摘要:建立了流固耦合(FSI)系统的位移-压力(u_i,p)有限元格式,给出流固耦合系统的动力特性方程;并基于 FSI系统的(u_i,p)格式建立槽体-水体-槽墩-基础-地基系统的力学模型,采用非对称模态提取法求解了4种水 深下渡槽的动力特性,计算了4种水深、2种强震作用下大型渡槽的动力响应,得到了不同水深、不同激励下渡 槽结构动力特性和动力响应的变化规律.计算结果表明,基于 FSI的(u_i,p)格式,考虑了槽体与水体的相互作 用,简化了计算模型,提高了计算精度.

关 键 词: 渡槽; 流固耦合; 位移-压力有限元; 动力分析 中图分类号: TV672.3:TV312 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-640X(2008)04-0055-06

3D dynamic analyses of fluid-solid-interaction of large-sized rectangular hydraulic aqueduct

WANG Qing-yun¹, ZHANG Duo-xin^{1,2}, BAI Xin-li¹

(1. School of Civil Engineering and Communication, North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In this paper, the FEA formulation of fluid-solid-interaction (FSI) system is established based on the formulation of displacement and pressure degree of freedom (u_i, p) , the dynamic nature property equation of FSI system is set up, and the dynamic analysis model of the large aqueduct, which includes the aqueduct body-waterpier of aqueduct-foundation-ground system based on the formation (u_i, p) of FSI system, is founded. Considering four kinds of water depth in the aqueduct, the dynamic nature properties of the aqueduct are obtained by using unsymmetic algorithm, and the dynamic response of the large aqueduct under two actions of dynamic loads is also calculated. The calculated results indicate that the FEA formulation of FSI system based on the formulation (u_i, p) , which considers the interaction between the aqueduct body and the water in the aqueduct, simplifies the calculation model with improved accuracy.

Key words: aqueduct; fluid-solid interaction (FSI); displacement-pressure FEM; dynamic analysis

作者简介:王清云(1978-),女,甘肃白银人,讲师,硕士研究生,主要从事工程结构建模与仿真研究.

E-mail: WQY@ ncwu. edu. cn

收稿日期:2008-04-15

基金项目:南水北调工程建设重大关键技术研究及应用项目(JGZXJJ2006-10)

大型渡槽动力学问题实属流固耦合的动力学问题,其重要特征是槽内水体与槽体固体两相介质的相互作用,一般流固耦合系统的特点是方程的定义域同时有流体域和固体域,未知变量既有流体变量又有固体变量,且流体域和固体域通常无法单独求解.基于此,国内学者采用Westergaard原理、Housner法、ALE法和流体位移有限元法对大型渡槽流固耦合的动力学问题进行了研究^[1-8].但笔者认为在大型渡槽动力特性和响应分析中,不仅要考虑水体对槽体的影响,还要考虑槽体变形对水体的影响,因为渡槽结构是空间薄壳结构,槽体变形会明显影响水体和槽体的相互作用.在力学模型建立过程中,假设水体为无粘、可压缩和小扰动的,水体表面为小波动,固体为线弹性,则可以简化渡槽结构动力计算模型的建立,方便工程应用.为此,本文建立了FSI系统的(*u*_i,*p*)格式,给出流固耦合系统的动力特性方程.并基于FSI系统的(*u*_i,*p*)格式建立渡槽槽体-水体-槽墩-基础-地基系统的力学模型,采用非对称模态提取法求解了渡槽的动力特性,同时计算了强震作用下大型渡槽的动力响应.

1 流固耦合系统有限元分析位移-压力格式(u_i,p)格式

流固交界面需满足运动学条件和力连续条件.其中的运动学条件为流固交界面(S_0)上的法向速度应保 持连续,即 $\frac{\partial p}{\partial n_f} + \rho_f \ddot{u} \cdot n_f = 0$,(在 S_0 界面),其中:p为流体压力; n_f 为流固交界面的法向向量; ρ_f 为流体质量 密度; \ddot{u} 为固体节点加速度向量.力连续条件为流固交界面(S_0)上的法向力应保持连续,即 $\sigma_{ij}n_{sj} = pn_{si}$,(在 S_0 界面),其中: σ_{ij} 为固体域点上的应力张量.

采用伽辽金法建立流固耦合的有限元方程,将求解域离散化并构造插值函数.对流体采用压力格式,则 流体单元内的压力分布可表示为

$$p(x,y,z,t) = Np^{e}$$
⁽¹⁾

式中:N为压力插值函数矩阵;p^e为单元的结构点压力向量.

对固体采用位移格式,则固体单元内的位移分布可表示为

$$v(x,y,z,t) = \overline{N}a^e \tag{2}$$

式中: \overline{N} 为对应结点 i的插值函数矩阵; a^e 为单元的结点位移向量.

流固耦合系统的基本方程^[9]和边界条件的加权余量的伽辽金提法,对流体域表示为

$$\int_{v_f} \left[(\delta p_{,i}) p_{,i} + \frac{1}{c_0^2 \tilde{p}} \right] \mathrm{d}V + \int_{s_f} \delta p \left(\frac{1}{g} \tilde{p} \right) \mathrm{d}S + \int_{s_0} \delta_p (\rho_f \tilde{u} \cdot n_f) \mathrm{d}S = 0$$
(3)

对固体域,假定已满足结构的位移边界条件,并考虑本构关系,则可表示为

$$\int_{v_s} \left[\delta \varepsilon_{ij} D_{ijkl} \varepsilon_{kl} - f_i + \delta u_i(\rho_s \ddot{u}_i) \right] dS - \int_{s\sigma} \delta u_i \, \overline{T}_i dS + \int_{s_0} \delta u_i(pn_{s_i}) \, dS = 0$$
⁽⁴⁾

将(1)、(2)式代人(3)、(4)式,并考虑 δp 和 δu_i 的任意性,则可得到如下流固耦合系统的有限元方程,

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{M}_{s} & \boldsymbol{0} \\ -\boldsymbol{Q}^{T} & \boldsymbol{M}_{f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{a} \\ \ddot{p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{K}_{s} & \frac{1}{\rho_{f}} \boldsymbol{Q} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{K}_{f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{s} \\ \boldsymbol{0} \end{bmatrix}$$
(5)

式中: M_s , K_s 分别为固体质量矩阵和固体刚度矩阵;Q为流固耦合矩阵; M_f , K_f 分别为流体质量矩阵和流体 刚度矩阵;a为固体结点位移向量;p为流体结点压力向量; F_s 为固体外荷载向量.

2 算例验证

以文献[10]中一个具有解析解的实例对本文用基于 FSI 系流(*u_i*,*p*)格式建立的动力特性方程进行验证. 设有一钢筋混凝土圆柱形水池,外半径 *a₀*=7.5 m,内半径 *a_i*=7.0 m,高为 10.0 m,池内全部充满水,水的

密度为1×10³ kg/m³. 钢筋混凝土剪切弹性模量 G=9×10⁹ N/m². 文献[10]解析解和本文计算解见表1. 从表 1 可见,本文的计算解和解析解相对误差最大为1%,说明该方法具有一定的可信度,能用于工程分析.

| 表1 本文计算结果与文献[10]结果的比 | 较 |
|----------------------|---|
|----------------------|---|

| Tab. 1 Comparison between the calculated results and ref. $\lfloor 10 \rfloor$ | | | | | | | | |
|--|------------|--|------------|----------|--|--|--|--|
| n | 本文计算解 | 文献[10]计算解 | 文献[10]计算解 | 相对误差/(%) | | | | |
| | f_1 / Hz | $f_2 / (\operatorname{rad} \cdot \operatorname{s}^{-1})$ | f_2 / Hz | | | | | |
| 1 | 32.75 | 193.59 | 30.8264 | 0.993 | | | | |
| 2 | 100.34 | 630.69 | 100.428 3 | 0.014 | | | | |
| 3 | 186.88 | 1180.31 | 187.947 5 | 0.090 | | | | |
| 4 | 277.17 | 1758.64 | 280.038 2 | 0.163 | | | | |

工程实例 3

3.1 工程概况

沙河渡槽是中线总干渠跨越沙河、将相河、大郎河及该处低洼地带的梁式渡槽,总长1500m,单跨长 45 m, 渡槽的设计流量为 320 m³/s, 加大流量为 380 m³/s. 设 计方案之一是双线四槽,两槽并联为一线.边墙厚60 cm,中 墙厚 80 cm, 槽顶每隔 3 m 设置断面为 0.5 m×0.5 m"横梁" 一根,底板上每隔3m设加劲横肋一道,断面及端部结构见 图 1. 支撑结构为空心薄壁重力墩,最大墩高 15 m,墩壁厚 1 m,槽墩上部宽度为21 m,下部宽度为22 m.基础采用两排 共10 根直径为1.8 m 的灌注摩擦桩. 渡槽槽体混凝土采用 C50,墩帽、薄壁槽墩、桩墩及桩身混凝土采用 C30.

由于 EL-Centro 波的频带较宽,覆盖了本课题研究对像 的主要振型,故本文选用 EL-Centro 波(N-S 分量),调幅至 0.1 g(以下记为 EL)和基于水工谱的人工地震动加速度时 程作为输入(以下记为 AS).



3.2 渡槽自振特性分析

渡槽槽体、槽墩、土体和桩基采用三维8节点等参块体单元划分,水体采用三维8节点压力单元进行有

限元离散,并在系统质量矩阵中引入相邻跨渡槽和水体的质 量,在刚度矩阵中引入支座的刚度,以 Rayleigh 阻尼考虑结 构的阻尼,建立基于 FSI 系统的 (u_i, p) 有限元格式的槽体-水体-槽墩-基础-地基系统的力学模型.采用非对称法求解 系统的动力特性方程,得到在各种流量下大型渡槽的自振特 🚆 性和主振型,自振频率与水深的变化关系曲线见图2.限于篇 幅,本文仅给出前6阶主振型(见图3).

从图 2 可见,流固耦合的相互作用对槽体的自振频率有 一定的影响,随着水深的加大,渡槽的自振频率逐渐降低,这 是由于随着水深的增加,系统质量矩阵增大的缘故.

从振动形态来看,各阶振型相互正交.第1阶振型主要 是渡槽薄壁墩的纵向弯曲振动:第2阶振型是槽体和槽墩整 体横向摆动;第3阶振型主要是槽身和槽墩绕铅直轴的扭



depth of water in aqueduct

振,因渡槽的侧墙和中墙面外刚度小,故在墙面外成两个半波的振动;第4阶振型主要是槽身绕纵轴的转动 振动,伴随着墙体的横向振动,振动呈现出一个半波;第5阶振型基本上同第4阶振形,但伴随着墙体的扭 振;第6阶振型是槽身在竖直向上下振动,同一般简支梁的第1阶振型.说明槽体的纵向刚度大,槽身和支座 连接处是渡槽较弱的地方.分析各种过水量时主振型,发现渡槽水深的变化对振动形态的影响不大,随着水 深的加大,横向振动频率比纵向振动频率变化快,主要是因为水体对渡槽槽体的纵向压力"贡献"较小的 缘故.



Fig. 3 The mode figure of large-sized rectangular hydraulic aqueduct

3.3 动力响应分析

为合理模拟地震,将调整后的 EL-Centro 波输入到横向位移自由的无质量地基单元组上,采用时程积分 计算大型矩型渡槽的动力响应,得到槽体在4种水深、2种不同激励引起的动力响应解.限于篇幅,本文仅给 出1号点(见图1)的位移响应时程曲线(位移响应为该点与地表的相对位移,以下同)(见图4)、2号点的应 力响应时程曲线(见图5)及全时域内结构响应最大值(见表2).

3.3.1 动位移响应分析

(1)对于4种水深,结构在横向激励下槽身的最大动位移均发生在跨中断面侧墙的顶部,渡槽槽身横向 位移总体呈上部大,底部小,与槽身的主振型相符.同时,跨中断面各墙顶部的横向相对位移较小,说明渡槽 结构在整体上具有较大的横向刚度;

(2)对图4所示曲线全时域搜索最大值,可得出横向位移最大值为:1.45 mm(AS_空槽)→1.14 mm(AS

_半槽)→1.24 mm(AS_设计)→1.32 mm(AS_满槽); 1.39 mm(EL_空槽)→1.02 mm(EL_半槽)→1.11 mm(EL_ 设计)→1.09 mm(EL_满槽).可见,空槽时渡槽的横向位移 最大,过水时的动位移小于空槽时.这是由于受流固耦合的 相互作用,水体吸收地震能量,致使渡槽在有水时,横向位移 比空槽小.但在过水时,随着过水量的增加,横向位移也增 加,因为随着水位的增加,渡槽结构的上部质量增大,从而使 作用在槽体上的地震作用增大;

(3)分析位移时程曲线(图4)可见,4种水深、2种激励 作用下,渡槽结构响应的最大值滞后于激励的最大值;当槽 内无水时,渡槽结构响应的最大值和激励的最大值基本 同步.





Fig. 5 Response time curves of transverse and longitudinal stress at point 2

表 2 4 种水深、2 种激励作用下全时域内渡槽结构响应最大值

Tab. 2 Maximum value of response of aqueduct under four kinds of water depth and two actions

| 响应 | SX _{max} | | | SX_{\min} | | $SY_{\rm max}$ | | | SY_{\min} | | | |
|-------|-------------------|----|-------|-------------|----|----------------|---------|----|-------------|---------|----|-------|
| 激励 | 测值/ MPa | 位置 | 时间/ s | 测值/ MPa | 结点 | 时间∕ s | 测值/ MPa | 结点 | 时间/ s | 测值/ MPa | 结点 | 时间∕ s |
| AS-空槽 | 0.59 | А | 10.24 | -0.59 | В | 10.24 | 0.23 | F | 10.36 | -0.23 | Е | 10.36 |
| EL-空槽 | 0.69 | А | 2.60 | -0.69 | В | 2.60 | 0.26 | Е | 2.60 | -0.26 | F | 2.60 |
| AS-半槽 | 0.72 | В | 10.34 | -0.72 | А | 10.34 | 0.18 | F | 10.20 | -0.18 | Е | 10.20 |
| EL-半槽 | 0.76 | А | 2.58 | -0.76 | В | 2.58 | 0.20 | Е | 2.30 | -0.20 | F | 2.30 |
| AS-设计 | 0.84 | С | 10.26 | -0.84 | D | 10.26 | 0.21 | F | 10.40 | -0.21 | Е | 10.40 |
| EL-设计 | 0.97 | С | 2.62 | -0.97 | D | 2.62 | 0.21 | Е | 2.50 | -0.21 | F | 2.50 |
| AS-满槽 | 0.85 | С | 14.10 | -0.85 | D | 14.10 | 0.22 | F | 10.42 | -0.22 | Е | 10.42 |
| EL-满槽 | 0.93 | С | 2.36 | -0.93 | D | 2.36 | 0.22 | Е | 2.52 | -0.22 | F | 2.52 |

注:A:左槽端横梁与中纵梁交界处;B:右槽端横梁与中纵梁交界处;C:左槽端横梁中底部;D:右槽端横梁中底部;E:右边墙跨中底部区域; F:左边墙跨中底部区域

3.3.2 动应力响应分析 分析表 2 中渡槽槽体横向应力 *SX*、纵向应力 *SY* 的最大值,以及这些最大值发生的位置及时间可见:

(1)整个时间历程上渡槽的横向最大拉(压)应力,发生在渡槽端部底板横肋与中纵梁交接的局部区域 内,是由应力集中引起的.槽身其它部位应力分布较均匀,应力水平也较低;

(2)整个时间历程上渡槽的纵向最大拉(压)应力,发生在渡槽两边纵梁的跨中部,支座附近有应力集中现象发生,中墙的纵向应力小于两边墙,槽底部纵向应力大于槽顶部,应力小于水重和自重引起的纵向应力;

(3)最大横向应力随着水深的增加而增大,在满槽水深时略有降低.纵向应力的最大值在半槽水深时最小,在空槽时最大,设计水深和满槽水深纵向最大应力相差不大.这说明渡槽内的水体在地震动加速度激励下,槽内水体晃动的某些频率接近于渡槽结构的某些频率,槽内水体会吸收一部分地震动能量,致使渡槽结构的动应力响应少有降低(TLD效应),但随着水深的增加,水体压力对渡槽应力的影响越来越明显,TLD效应应随之减弱;

(4)比较2种激励的计算结果,人工地震引起的动位移大于 EL-centro 波,而 EL-centro 波引起的动应力则略大于人工地震引起的,这是由于 EL-centro 波频带较宽的原因.

4 结 语

应用时程分析法对大型渡槽进行了动力响应分析,可得出如下结论:

(1)基于(*u_i*,*p*)格式的流固耦合系统有限元分析的格式,考虑了槽体与水体的相互作用,简化了计算模型,提高了计算效率和精度,可为大型渡槽及同类工程动力设计提供参考;

(2)水体对整个渡槽的动力特性和响应影响较大,在大型渡槽的动力分析中,必须考虑动水压力的影响,建立合理的连同水体在内的结构计算模型;

(3)对于大型水工渡槽,槽内水体会吸收一部分地震动能量,减小动响应,即存在TLD效应,但随着水深的加大,这种效应随之减弱;

(4)大型矩形渡槽侧墙的面外刚度较小,设计时应验算其静力稳定,确保渡槽的安全;

(5) 渡槽的横向应力在槽端的局部区域有应力集中现象,且从结构的变形图中可以看出,在横向地震作 用下,槽端部有弯扭变形.在渡槽设计中,应充分考虑止水材料的特性和构造,以防止水破坏;

(6)矩型渡槽在横向地震作用下,纵向应力的最大值出现在边纵梁的跨中区域,与水荷载作用下的纵向 应力叠加非常不利.设计时应将地震引起的纵向应力正向叠加到竖向荷载引起的纵向应力中,确保渡槽结构 强度安全;

(7) 渡槽抗震设计时, 当槽内水体较多时, 需考虑结构自振频率减小, 自振周期增大的影响.

参考文献:

- [1] 高兑现,李正农, 唐永胜, 等. 渡槽结构地震反应分析[J]. 水利发电学报, 2004, 23(5): 40-43.
- Housner G W. Dynamic Pressure on Accelerated Fluid Containers [J]. Bulletin of the Seismological of America, 1957, 47 (1): 15-35.
- [3] Housner G W. The dynamic Behavior of Water Tanks [J]. Bulletin of the Seismological of America, 1963, 53(2): 381-387.
- [4] 徐建国,陈 淮,王 博,等.考滤流固动力相互作用的大型渡槽地震响应研究[J].土木工程学报,2005,38(5):67 -73.
- [5] 张多新,王清云,白新理. 地震作用下大型渡槽动力响应分析研究[J]. 水力发电, 2008, 34(06): 51-54.
- [6] 李涛峰, 白新理, 张多新. 大型渡槽结构动力响应分析[J]. 南水北调与水利科技, 2007, 5(4): 79-82.
- [7] 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, 36(3): 280-285.
- [8] 李遇春,楼梦麟,尚 伟,等.大型渡槽抗震分析中的流体位移有限元模式[J].水利学报,2003,(2):93-97.
- [9] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京:清华大学出版社, 2003: 522-544.
- [10] 翁智远, 徐礼存. 圆柱形弹性贮液容器的自振特性分析[J]. 力学季刊, 2000, 21(1): 110-117.