

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2013.03.005

渡槽地震动水压力及表达式数值研究

丁晓唐¹, 孙 健¹, 王 军²

(1. 河海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 江苏凯联建筑设计有限公司, 江苏 常州 213000)

摘要: 基于流固耦合动力分析理论, 采用数值模拟方法, 对输入波形式、上部结构槽数及下部排架高度等若干渡槽设计因素进行数值计算分析, 研究地震激励下渡槽动水压力特性。结果表明: 单、多槽侧壁动水压力分布规律基本相同, 多槽中壁动水压力数值约为侧壁的 2 倍。传统渡槽抗震计算采用 Westergaard 动水压力修正解析解, 但其仅考虑单槽槽身结构, 而数值计算结果表明排架高度对渡槽动水压力影响较大; 基于常用排架渡槽有限元模型数值计算, 拟合出包含下部排架高度参数的动水压力公式, 可供渡槽抗震设计参考。

关键词: 动水压力; 渡槽; 数值研究; 动水压力公式拟合

中图分类号: TV68 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2013)03-0218-04

Numerical investigation of hydrodynamic pressure on aqueduct and its expression under earthquake loads

DING Xiaotang¹, SUN Jian¹, WANG Jun²

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Jiangsu Kailian Architectural Design Co., Ltd., Changzhou 213000, China)

Abstract: Based on the fluid-structure interaction theory, a systematic study of the characteristics of hydrodynamic pressure acting on aqueducts under earthquake loads was conducted using the numerical simulation method and considering design factors such as the input waveforms, the number of grooves in the upper structure, and the height of the lower framework. The results show that the hydrodynamic pressure on the sidewalls of a single groove and sidewalls of multiple grooves is basically the same. The hydrodynamic pressure on the middle wall of the multiple grooves is about twice that on the sidewall. The traditional seismic calculation of aqueducts uses the Westergaard hydrodynamic pressure to modify the analytical solution, but it only takes the single-groove body structure into account, and the numerical results show that the height of the framework has significant influence on the hydrodynamic pressure on the aqueduct. Based on the numerical calculation of the commonly used finite element model for framework-supported aqueducts, a hydrodynamic pressure formula considering the height of the lower framework was obtained, which can provide a reference for seismic design of aqueducts.

Key words: hydrodynamic pressure; aqueduct; numerical investigation; hydrodynamic pressure formula fitting

渡槽是我国南水北调工程的重要输水建筑物, 槽内水体重力巨大甚至超过结构自重, 强震时水体与槽身结构之间发生动力耦合作用^[1-2], 会产生很大的动水压力^[3-4]而改变渡槽结构的动力特性及地震响应。合理确定动水压力作用, 是渡槽结构抗震设计和研究的重要内容。

水工建筑物抗震设计规范^[5]采用 Westergaard 解析式计算输(挡)水建筑在地震作用下的动水压力。Westergaard 解析式求解单面挡水结构与半无限水域耦合作用产生的动水压力, 主要应用于坝工设计。在 Westergaard 解析式的基础上, 许多学者对库水压缩性、竖向地震作用、库底淤积泥沙层、地基等对坝体动水压力的影响进行研究^[6-8]。文献[9]根据渡槽的宽高比对 Westergaard 解析式进行了修正, 但没有考虑上部结

收稿日期: 2013-01-14

基金项目: 国家自然科学基金(51279052)

作者简介: 丁晓唐(1961—), 女, 江苏南京人, 副教授, 主要从事工程结构抗震与振动控制研究。E-mail: xtding2000@sina.com

构槽数及下部排架高度等若干设计因素对动水压力的影响。本文根据流固耦合动力分析理论,利用数值模拟方法,研究地震激励下渡槽动水压力特性。

1 流固耦合有限元理论与方法

在直角坐标系中,当水体做小振幅运动时,忽略水体的黏滞性及对流影响,水体运动的基本方程为

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \tag{1}$$

其中

$$c_0 = \sqrt{K/\rho}$$

式中: c_0 ——流体声波速度; K ——流体的体积变形模量; ρ ——流体密度; p ——流场内任意一点的动水压力。

液体自由表面的边界条件:

$$p = 0 \tag{2}$$

液体与固体在接触面上的边界条件:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho \frac{\partial^2 u_n}{\partial t^2} = -\rho \ddot{u}_n \tag{3}$$

式中: n ——接触面的法向; u_n ——结构法向位移。

根据变分原理,求解 p 的问题等价于求解下列泛函的极小值问题:

$$\chi = \iiint_R \left\{ \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial p}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} p \right\} dx dy dz + \iint_S (\rho \ddot{u}_n) p ds = \min \tag{4}$$

在空间域用有限元离散,由泛函极值条件得水体方程,联合求解结构运动方程,便可求得结构的地震响应和动水压力^[10]。本文应用 ADINA 软件,采用迭代法求解渡槽与水体的耦合振动问题。

2 槽身动水压力数值计算与结果分析

2.1 计算模型与材料参数

南水北调工程渡槽多为双槽和3槽,且矩形形式居多。单槽净宽为4~7 m,宽高比约为1;下部结构有墩式和排架形式,高度为5~30 m,排架刚度相对较小,地震作用产生的动水压力较大,本文只研究排架结构渡槽情况。根据南水北调渡槽工程资料,建立常用的有限元分析模型:取单槽净宽7 m,侧墙净高7.9 m,总高9.6 m,侧壁厚0.6 m,中壁厚0.9 m;下部支撑采用混凝土排架结构。

图1为在ADINA软件Structure模块中建立的平面双槽排架结构模型,采用2-D Solid平面应变单元。槽身采用C50混凝土,弹性模量为34.5 GPa,密度为2 500 kg/m³,泊松比为0.167;排架采用C30混凝土,弹性模量为30 GPa,其他参数同槽身,并假设材料为线弹性材料。在CFD模块中建立对应的水体模型,水体采用2-D Fluid单元,计算高度为6.63 m,水面设为自由液面,底部和侧面为与槽身耦合面。考虑水体的微可压缩性,水体的体积模量为2 GPa,密度为1 000 kg/m³。

本文仅对上部槽身进行动水压力计算分析。

2.2 单槽数值解与修正解析解比较

Westergaard解析式中上游面水库为无限长、水体为理想流体时,具有直立上游面的刚性坝在水平加速度作用下的动水压力简化解析公式为^[11]

$$p = \frac{7}{8} \rho a \sqrt{hy} \tag{5}$$

文献[9]对式(5)进行修正,以求解水面为有限宽度的渡槽动水压力:

$$p = \frac{7}{8} \rho a \xi \sqrt{hy} \tag{6}$$

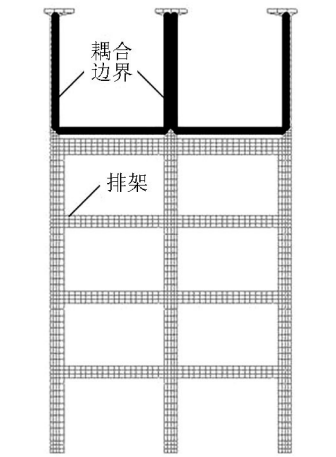


图1 排架渡槽有限元模型
Fig. 1 Finite element model of framework-supported aqueduct

式中: a ——作用的加速度幅值; h ——槽内水体高度; y ——所求动水压力点坐标,以水面为坐标原点,竖直向下为正; ξ ——依据宽高比的动水压力折减系数,本文水体的宽高比约为1,故取 $\xi=0.66$ 。

综合考虑水体与结构的自振频率及地震波的特征频率和幅值,在槽身底部横槽向输入幅值均为 0.35 g 的正弦波和 El-centro 波,计算得到单槽动水压力最大值(下文提到的动水压力最大值均指 λ 最大值, $\lambda=p/(\rho gh)$,为动水压力与静水压力的比值)见图2。

由图2可以看出,动水压力有限元解和修正解析解结果规律相同,随水深的增加而增大,最大值发生在底部,动水压力对侧壁的合力及合力矩相当^[12]。单槽在正弦波和 El-centro 波作用下的动水压力结果很接近。本文也计算了人工波输入的情况,经对比研究,选择人工波输入更为合理,以后的计算采用人工波输入。

2.3 单槽与多槽比较

由图2有限元解可以看出,双槽侧壁的动水压力略大于单槽情况,差值基本在2%以内,可见双槽另一过水槽的动力耦合响应对本过水槽侧壁的动水压力影响甚小。而双槽中壁动水压力值要比侧壁大90%左右,这是因为侧壁只有单侧受到水体作用,而中壁两侧都有动水压力作用,且一侧受水体压力,另一侧水体离开槽壁,相当于产生拉力,拉压合成作用使得中壁动水压力值约为侧壁的2倍。同条件下还计算了3槽、4槽的情况,得到与双槽一致的结论:单、多槽侧壁动水压力分布及数值基本相同,多槽中壁动水压力约为侧壁的2倍。

3 排架渡槽动水压力拟合公式

为研究排架高度对动水压力的影响,分别取排架高度为0 m,6 m,11 m,16 m,21 m,26 m,31 m 进行计算分析,排架渡槽整体有限元模型如图1(排架高度 $H=21\text{ m}$)所示。在排架底部施加横槽向人工波,得到双槽侧壁动水压力结果见表1。

表1 不同排架高度双槽侧壁动水压力最大值

Table 1 Maximum hydrodynamic pressure on sidewall of aqueduct with different framework heights

y/h	λ						
	$H=0\text{ m}$	$H=6\text{ m}$	$H=11\text{ m}$	$H=16\text{ m}$	$H=21\text{ m}$	$H=26\text{ m}$	$H=31\text{ m}$
0.00	0.018	0.018	0.023	0.034	0.049	0.049	0.015
0.05	0.076	0.091	0.113	0.140	0.152	0.152	0.058
0.10	0.112	0.131	0.163	0.203	0.216	0.216	0.082
0.15	0.132	0.156	0.195	0.244	0.262	0.262	0.101
0.20	0.145	0.173	0.217	0.274	0.297	0.297	0.115
0.25	0.153	0.185	0.233	0.297	0.325	0.325	0.127
0.30	0.163	0.192	0.245	0.313	0.348	0.348	0.137
0.35	0.169	0.195	0.253	0.326	0.365	0.365	0.145
0.40	0.171	0.199	0.258	0.334	0.379	0.379	0.151
0.45	0.174	0.203	0.261	0.339	0.391	0.391	0.157
0.50	0.177	0.206	0.263	0.344	0.400	0.398	0.161
0.55	0.179	0.207	0.263	0.350	0.408	0.404	0.164
0.60	0.181	0.207	0.264	0.354	0.413	0.407	0.167
0.65	0.181	0.206	0.264	0.358	0.417	0.410	0.169
0.70	0.180	0.205	0.262	0.360	0.420	0.411	0.171
0.75	0.180	0.204	0.260	0.362	0.422	0.412	0.171
0.80	0.179	0.202	0.258	0.363	0.423	0.412	0.171
0.85	0.178	0.201	0.256	0.363	0.423	0.412	0.172
0.90	0.178	0.200	0.254	0.363	0.424	0.412	0.172
0.95	0.179	0.199	0.253	0.362	0.424	0.411	0.172
1.00	0.178	0.198	0.253	0.362	0.424	0.412	0.172

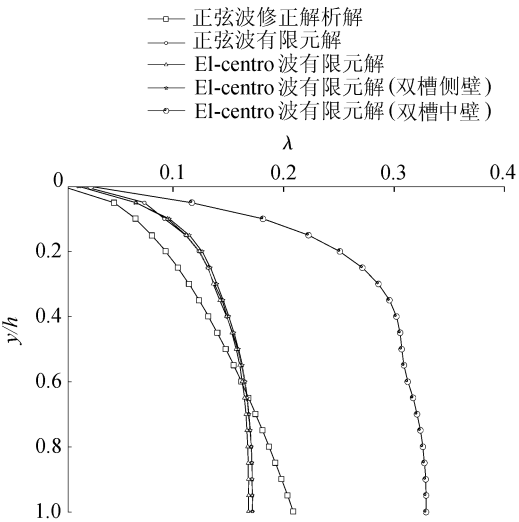


图2 不同输入波形作用下单槽、双槽动水压力最大值
Fig. 2 Maximum hydrodynamic pressure on single and double grooves under different input waveforms

由表 1 可见,随着 H 的增加,动水压力也随之增大,但不会无限增大,本文也计算了 $H=36\text{ m}$ 的情况,得到的动水压力变小;最大值有向槽壁中部上移的趋势,而解析解最大值始终位于槽底,在渡槽的抗震设计中应予以足够重视。

为便于排架渡槽抗震设计,在表 1 中 $H\leq 26\text{ m}$ 时动水压力数值计算的基础上,通过一元非线性回归(均方差均小于 0.6%),将各排架高度下的回归结果拟合成排架渡槽动水压力公式:

$$p=\frac{7}{8}\rho a \xi \zeta_H \sqrt{h} y$$

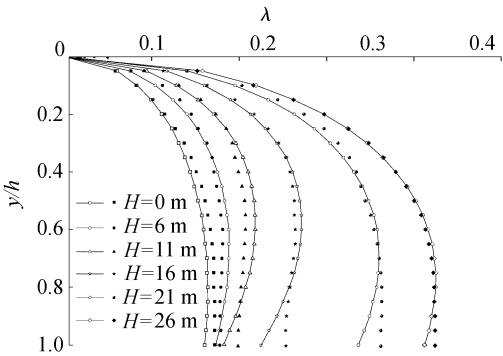
(7)

其中 $\zeta_H=1.34+0.051H^{1.17}-(0.074+0.012H-9.14\times 10^{-6}H^3)y$
式中 ζ_H 为 $H(H\leq 26\text{ m})$ 对动水压力的放大系数。

当排架高度为 6 m,11 m,16 m,21 m 和 26 m 时,槽壁中部的动水压力值比只有槽身情况时分别放大约 1.2 倍、1.4 倍、1.7 倍、2.2 倍和 2.5 倍。图 3 为拟合公式曲线(点实线)与原数值解曲线(点)的对比,误差基本在 5% 以内。当 $H>31\text{ m}$ 时,用式(7)计算得到的动水压力与数值计算的结果相差较大,式(7)只适用于 $H\leq 26\text{ m}$ 的排架渡槽动水压力计算。

4 结 论

- a. 渡槽动水压力数值计算结果与 Westergaard 解析式动水压力修正解析解规律相同,动水压力对侧壁合力及合力矩相当。
- b. 单、多槽侧壁动水压力分布及数值基本相同,多槽中壁动水压力约为侧壁的 2 倍。
- c. 下部排架高度对渡槽动水压力有很大的影响。
- d. 基于常用排架渡槽有限元模型数值计算,拟合出包含下部排架高度参数的动水压力公式,可为渡槽抗震设计提供参考。
- 图 3 不同排架高度下动水压力数值解与拟合曲线
- Fig. 3 Numerical solutions and fitted curves of hydrodynamic pressure with different framework heights



参考文献:

[1] 何建涛.大型渡槽流体与固体的动力耦合分析[D]. 西安:西安理工大学,2007.

[2] 刘广. 大型渡槽流-固耦合动力性能和地震响应研究[D]. 南京:河海大学,2011.

[3] 李遇春,楼梦麟.强震下流体对渡槽槽身的作用[J]. 水利学报,2000,31(3):46-52. (LI Yuchun,LOU Menglin. Action of fluid on aqueduct body during strong earthquake[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2000,31(3):46-52. (in Chinese))

[4] 季日臣,夏修身,陈尧隆,等. 考虑流-固耦合梁式矩形渡槽横向地震响应研究[J]. 地震学报,2007,29(3):328-334. (JI Richen,XIA Xiushen,CHEN Yaolong,et al. Transverse seismic response of beam aqueduct considering fluid-structure coupling [J]. Journal of Earthquake,2007,29(3):328-334. (in Chinese))

[5] SL 203—1997 水工建筑物抗震设计规范[S].

[6] CHOPRA A K. Earthquake analysis of concrete gravity dams including dam-water-foundation rock interaction[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics,1981,9:363-383.

[7] 杜修力,王进廷. 动水压力及其对坝体地震反应影响的研究进展[J]. 水利学报,2001,32(7):13-21. (DU Xiuli,WANG Jinting. Review of studies on the hydrodynamic pressure and its effects on the seismic response of dams[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2001,32(7):13-21. (in Chinese))

[8] TOUHEI T,OHMACHI T. A FE-BE method for dynamic analysis of dam-foundation-reservoir system in the time domain[J]. Earthquake Engng Struct Dyn,1993,22(3):195-209.

[9] 张艳红.大型渡槽抗震概论[M]. 北京:地震出版社,2004.

[10] 朱伯芳,高季章,陈祖煜,等. 拱坝设计与研究[M]. 北京:中国水利水电出版社,2002.

[11] WESTERGAARD. Water Pressures on dams during earthquakes[J]. Trans ASCE,1933,98:418-433.

[12] 王军. 动水压力特性及对渡槽抗震性能影响研究[D]. 南京:河海大学,2012.