

圆管渡槽抗震计算流体等效简化模型

李遇春¹, 余燕清¹, 王 庄²

(1. 同济大学 水利工程系, 上海 200092; 2. 江南大学 环境与土木工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘要: 提出了一个圆管渡槽内流体晃动分析的等效简化模型。将圆管渡槽内的水体假定为无黏性、无旋、可压缩及小幅晃动的流体, 横向晃动的流体可等效为一个固定质量 M_0 与一个质量-弹簧系统 (M_1, K_1) , 根据等效原则, 即实际的流体系统(采用有限元模拟)与等效模型具有相同的一阶自然晃动(振动)频率, 以及对槽身具有相同的作用效应。采用最小二乘算法, 通过数值拟合可得到等效模型中固定质量 M_0 、弹簧振子 (M_1, K_1) 及其位置的近似计算公式。应用流体等效简化模型和有限元模型分别对某一管线桥流体-结构耦合系统的自振频率与地震反应进行了计算分析, 数值算例表明两个模型的计算结果非常吻合, 验证了流体等效模型的有效性 with 适用性, 为圆管渡槽支撑结构地震反应分析提供一个简化的流体计算模型, 可为渡槽抗震研究者与结构工程师提供参考。

关键词: 圆管渡槽; 抗震计算; 等效简化模型; 流体晃动

中图分类号: TV 672 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)06-1101-04

Simplified equivalent fluid model for seismic response calculation of pipeline bridge

LI Yu chun¹, YU Yan qing¹, WANG Zhuang²

(1. Department of Hydraulic Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. College of Environmental and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: In this paper, a simplified equivalent model was proposed to analyze the sloshing fluid in the pipeline bridge. The water motion in a pipeline bridge is assumed to be inviscid, irrotational, compressible, and linear (small displacement). The transverse sloshing fluid in a pipeline bridge can be simplified as a fixed rigid mass M_0 and a mass-spring system (M_1, K_1) . According to the equivalence rule, the actual fluid (computed by the finite element model) and its equivalent model have the same the first sloshing frequency and the same effects on the pipe. The approximate analytical formulae of the fixed mass M_0 , mass-spring oscillator (M_1, K_1) , and its locations in the pipe were acquired by the least squares and curve fitting algorithms. The simplified equivalent fluid model and finite element model were used to calculate the first natural frequency and seismic response of a pipeline bridge (fluid-structure coupling system). The numerical results calculated by the two fluid models agreed well, which confirmed the validity and accuracy of the equivalent model. Therefore, the simplified model of sloshing fluid can analyze the seismic response of the support structure of pipeline bridge, which can provide reference of seismic resistance for the researchers and structural engineers.

Key words: pipeline bridge; seismic response calculation; simplified equivalent model; sloshing liquid

1 概述

我国新修订的《水工建筑物抗震设计规范》^[1]首次增加了渡槽结构抗震计算与设计的相关条文。在渡槽抗震计算中, 如何考虑渡槽内流体晃动以及与作用结构的相互作用影响是渡槽抗震计算的关键问题^[2]。渡槽抗震分析中, 水体可按势流(无旋、无黏性)考虑^[3,4], 常用的数值分析方法有: (1) 有限

元法, 可分为位移型有限元法^[5,6], 压力型有限元法^[7], ALE有限元法^[8]; (2) 边界元法^[9]; (3) 有限体积分法及有限差分法^[10]等。上部结构可按有限元法建模, 流体与槽身交接面按滑动边界条件考虑, 即: 流体与槽体表面的法向位移保持一致, 切向位移不加约束。采用数值方法可满足渡槽体系空间三向地震作用分析, 但流体数值模型以及流-固边界的处理是一件很复杂的工作, 且耗时费钱, 不便于实际工程应用。

收稿日期: 2015-01-12 修回日期: 2015-10-09 网络出版时间: 2015-11-30
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20151130.2201.058.html>
基金项目: 国家自然科学基金(51279133)
作者简介: 李遇春(1962-), 男, 湖北武汉人, 教授, 博士生导师, 主要从事结构动力学研究。E-mail: ycl2000@tongji.edu.cn

为了简化流体计算, Graham 与 Rodriguez^[11] 首先提出了液体晃动等效模型的概念, 他们将矩形容器内的液体作用等效为一个固定质量及一连串的弹簧振子。Housner^[12] 基于一个物理直观, 提出了一个更为简单的等效模型, 这个模型在土木与水利工程界得到了广泛应用。最近 Li 与 Wang^[13] 针对前述经典解答的缺陷, 提出了一个补充的精确解答, 完善了经典解答。李遇春与李明^[14] 在文献[13]的基础上, 对固定(脉冲)质量及其位置精确计算公式进行了数学拟合简化, 提出了表达简单且计算精度高的建议公式。对于其它截面形状的渡槽, 如 U 形、梯形等截面的渡槽, Li、Di 及 Gong^[15] 提出了一种半解析/半数值的方法, 得到流体等效模型的近似解。将渡槽内的流体按等效的简化模型替代后, 抗震计算中的流-固耦合动力学问题得到了大大的简化, 计算精度可满足工程设计要求。我国新的修订规范给出了矩形与“U”型渡槽中水体的(等效)简化计算方法, 然而对于另一种比较常见的圆形渡槽, 规范并未给出其流体简化的计算方法。

圆形(截面)渡槽为封闭的结构, 这种结构形式可以避免输水过程中的蒸发与污染, 这种管线结构在国外的调水工程得到了较为广泛应用^[16], 比较著名的有法国的 Saint Bachi 渡槽^[17] 等。圆形(特别是大管径)渡槽结构在未来的调水工程具有广泛应用前景。目前关于圆形渡槽(输水管线桥)的地震反应分析研究并不多见, 圆管内晃动流体的(等效)简化模型研究尚未见到文献报道。本文基于已有的研究成果, 建立圆管内晃动流体的等效力学模型, 从而建立简化的圆管渡槽抗震计算方法, 为圆管渡槽抗震设计与研究提供参考。

2 圆管内晃动流体的等效力学模型

图 1(a) 所示的单位长度内圆管内充有静止深度为 h 的水体, 其中 R 为圆形管道内径, 在构建晃动流体等效模型时, 基于以下假定: (1) 管内的水体为可压缩、无黏、无旋流体的小幅晃动流体, 水体的密度及弹性模量分别取定为: $\rho_l = 1\ 000\ \text{kg}/\text{m}^3$, $E_l = 2.067 \times 10^9\ \text{Pa}$; (2) 管道壁微小变形对流体晃动的影响忽略不计; (3) 仅考虑流体晃动的一阶晃动模态, 高阶流体晃动模态忽略不计, 对于一般的流体晃动问题, 其一阶晃动模态起主要作用, 计算中仅考虑一阶晃动模态的影响就可获得较好的计算精度。于是圆管内晃动的水体可以简化为图 1(b)

所示的固定质量(M_0)和弹簧-质量(M_1, K_1)组成的动力系统, 其中 M_0 和 h_0 分别为脉冲(固定)质量及其作用高度, M_1 和 h_1 分别为一阶对流质量及其作用高度, K_1 为弹簧刚度。

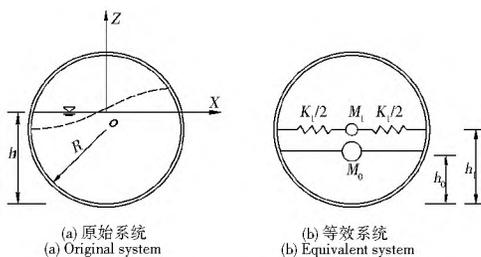


图 1 晃动流体的等效力学模型

Fig. 1 Equivalent model of sloshing fluid

根据等效原则: (1) 流体的原始系统与等效系统具有相同的自然晃动(振动)频率; (2) 流体的原始系统与等效系统在任意水平动力加速度的作用下, 对整个管道的动反力(包括合力与合力矩)相等。采用文献[15]的方法, 借助有限元程序(ANSYS code)^[15, 18]进行计算分析(关于槽内有限元模拟的细节可参见文献[15], 为节省篇幅, 本文不再赘述), 可以得到上述等效力学模型的拟合表达式为

$$\frac{\omega_1^2 D}{g} = 2.087 + 0.209 \sinh \left[4.0639 \left(\frac{h}{D} \right) - 0.333 \right] \quad (1)$$

$$\frac{M_1}{M} = -0.927 \left(\frac{h}{D} \right)^{1.217} + 0.963 \quad (2)$$

$$\frac{M_0}{M} = 1 - \left[-0.927 \left(\frac{h}{D} \right)^{1.217} + 0.963 \right] \quad (3)$$

$$K_1 = \frac{Mg}{D} \left\{ 2.087 + 0.209 \sinh \left[4.0639 \left(\frac{h}{D} \right) - 0.333 \right] \right\} \cdot \left[-0.927 \left(\frac{h}{D} \right)^{1.217} + 0.963 \right] \quad (4)$$

$$h_0 = h_1 = R \quad (5)$$

式中: ω_1 为管内流体一阶晃动圆频率; g 为重力加速度; $D = 2R$ 为管内直径; M 为管内(单位长度内)流体总质量。由于管道内流体动反力为一个汇交力系, 这个力系汇交于圆管的中心点, 所以等效模型的质量 M_0 与 M_1 的位置正好通过圆心, 即有: $h_0 = h_1 = R$ 。图 2 表示了有限元与式(1)至式(3)结果的比较, 结果显示拟合公式(1)至公式(3)具有很好的计算精度, 可满足工程计算的要求。

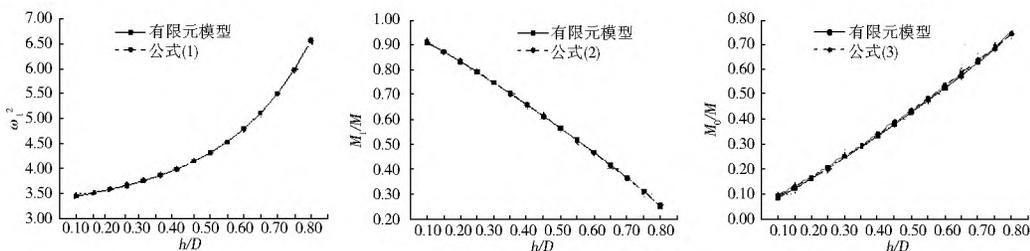


图 2 等效模型参数值与有限元结果的比较

Fig. 2 Comparison of parameter values between the equivalent model and FEM model

3 数值算例

设有一跨圆管渡槽如图 3(a) 所示, 其支撑结构为排架形式, 结构尺寸见图 3(a), 其中尺寸单位为 mm, 设管道内径 R 为 3 000 mm, 渡槽跨度为 24 m, 管道内充液深度为 3 600 mm,

管壁厚为 300 mm, 管道结构钢筋混凝土材料密度为 2 500 kg/m^3 , 杨氏模量 $3.0 \times 10^{10}\ \text{Pa}$, 泊松比为 0.167。图 3(b) 所示为圆管渡槽有限元计算模型, 其中水体采用 FLUID80 单元, 水体密度为 1 000 kg/m^3 , 水体与管道壁之间的界面视为滑移边界条件, 即流体和管道壁之间的法向相对位移强制为零,

而释放二者之间的切向相对位移,约束水体两端面纵向位移。管道壁及支撑结构分别采用 Shell181 和 Beam4 单元。图 3(c) 所示为圆管渡槽等效力学计算模型,其中管道内全部

水体沿长度方向分成 24 等分,每一等分(长度为 1 m)以固定质量(M_0, h_0)和质量-弹簧(M_1, K_1, h_1)系统替代,其中固定质量采用 Mass21 单元,弹簧采用 Combin14 单元。

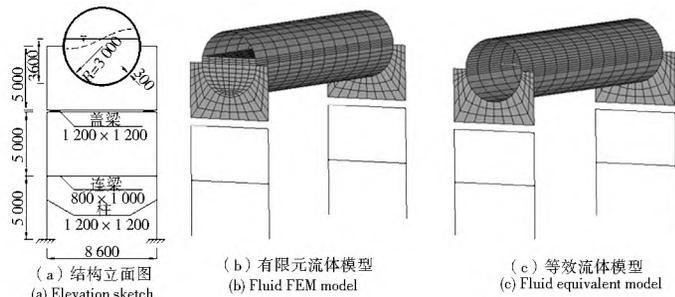


图 3 圆管渡槽结构计算模型

Fig. 3 Calculation model of the pipeline bridge structure

由拟合简化计算公式(1)得到流体一阶晃动频率为 ω_1^2 , 由公式(2)和(3)分别得到 M_1/M 和 M_0/M , 以及相应的一阶对流质量 M_1 和脉冲质量 M_0 。由公式(4)得到弹簧刚度 K_1 , 同时由公式(5)分别得到对流质量作用高度 h_1 和脉冲质量作用高度 h_0 。管线桥数值算例中具体计算参数见表 1。

首先对包含流体的结构系统进行模态分析,两个系统(图 3(b)与图 3(c))得到的第一阶自振频率分别为 $f_1 = 2.481\text{ Hz}$ 和 $f_1 = 2.486\text{ Hz}$, 两者的相对误差仅为 0.201%, 具

有高度的一致性。

其次对包含流体的结构系统进行地震反应分析,地震输入波选取 El Cent ro(N-S)波,加速度峰值调整为 0.350 m/s^2 ,地震波输入时长为 10 s。图 4 为盖梁和连梁端部处水平位移时程响应曲线,等效模型和有限元模型计算得到的反应曲线吻合很好。表 2 表示了盖梁与连梁端部水平位移最大值,两者最大相对误差盖梁为 4.666%,连梁为 6.211%,等效模型的计算结果满足工程精度的要求。

表 1 圆管渡槽算例流体等效模型计算参数

Tab.1 Calculation parameters of the equivalent fluid model

参数	h/D	$\omega_1^2/(\text{rad}^2 \cdot \text{s}^{-2})$	M_0/M	M_1/M	M_0/kg	M_1/kg	$K_1(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	h_0/m	h_1/m
参数值	0.60	4.793	0.533	0.467	9 447.640	8 264.547	39 615.175	3.0	3.0

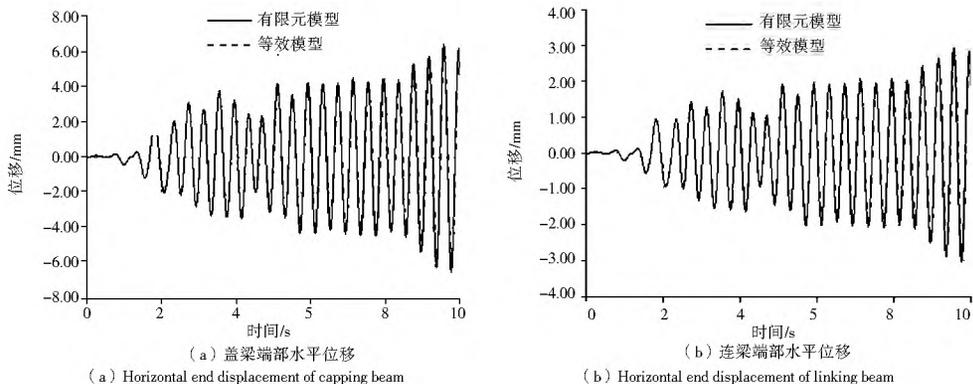


图 4 盖梁与连梁端部水平位移时程响应

Fig. 4 Time history responses of horizontal displacements of the capping and linking beams

表 2 盖梁与连梁端部水平位移最大值

Tab.2 Maximum horizontal displacements of the capping and linking beams

部位	X 正向位移最大值			X 负向位移最大值		
	有限元模型结果/mm	等效模型结果/mm	误差(%)	有限元模型结果/mm	等效模型结果/mm	误差(%)
盖梁端部	6.430	6.130	4.666	6.071	6.143	1.186
连梁端部	2.982	2.843	4.661	3.027	2.839	6.211

图 5 为盖梁和连梁端部弯矩时程响应曲线,等效模型和有限元模型计算得到的曲线吻合很好。表 3 显示了盖梁与连梁端部弯矩最大值,两者最大误差:盖梁为 6.222%,连梁为 6.221%,计算结果误差满足工程精度的要求。

由于排架支撑结构刚度较小,在地震作用(或风荷载作用)下容易发生破坏,地震作用(或风荷载)可能成为支撑结构的控制性荷载,所以结构的地震反应分析对于排架支撑结

构而言尤为重要。

需要说明的是:管道截面动弯矩及动剪力是抗震设计所需的荷载,等效简化模型实际上就是动水压力的积分结果,在抗震计算中,采用等效模型后无须再去计算动水压力,动水压力对管道结构的整体动力效应已经自动算出,只要等效模型不要划分得太粗,动水压力对管道截面的动弯矩及剪力就可以较精确地获得。

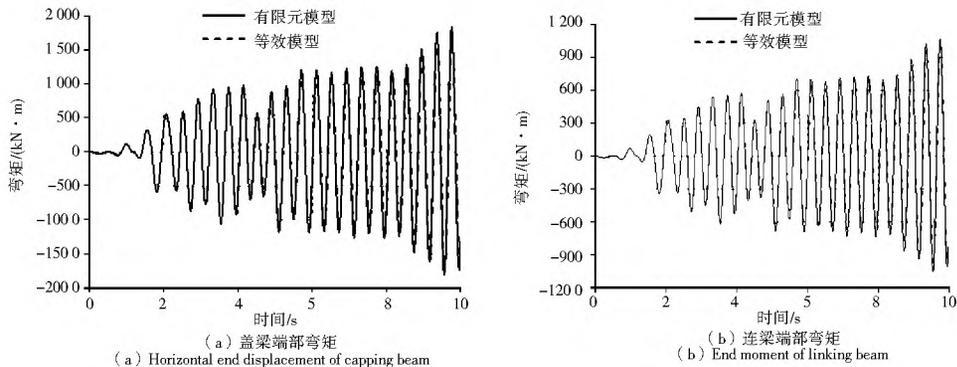


图 5 盖梁与连梁端部弯矩时程响应

Fig. 5 Time-history responses of end moments of the capping and linking beams

表 3 盖梁与连梁端部弯矩最大值

Tab. 3 Maximum end moments of the capping and linking beams

部位	弯矩(M_y) 正向最大值			弯矩(M_y) 负向最大值		
	有限元模型结果/ $kN \cdot m$	等效模型结果/ $kN \cdot m$	误差(%)	有限元模型结果/ $kN \cdot m$	等效模型结果/ $kN \cdot m$	误差(%)
盖梁端部	1 836. 735	1 722. 455	6. 222	1 809. 180	1 724. 645	4. 673
连梁端部	1 070. 824	1 004. 209	6. 221	1 055. 087	1 005. 769	4. 674

4 结论

本文给出了圆管内晃动流体的等效力学模型计算公式,可大大简化圆管渡槽的抗震计算,便于工程应用。计算实例表明,流体等效简化模型与有限元模型计算结果非常吻合,验证了本文流体等效模型的可行性与有效性,本文流体等效的简化公式可用于圆管渡槽结构的地震反应分析。

参考文献(References):

[1] 中国水利水电科学研究院. 水工建筑物抗震设计规范[S]. (征求意见稿, 2012) (China Institute of Water Resources and Hydropower Research. Specifications for Seismic Design of Hydraulic Structures (Exposure draft, 2012)[S]. (in Chinese))

[2] 李遇春, 张龙. 渡槽抗震计算若干问题讨论与建议[J]. 水电能源科学, 2013, 31(11): 136-139. (LI Yurchun, ZHANG Long. Discussions and proposals for several issues on seismic resistance computation of flumes[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(11): 136-139. (in Chinese))

[3] Ibrahim R A. Liquid sloshing dynamics: theory and applications [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.

[4] Faltinsen O M, Timokha A N. Slushing[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.

[5] 李遇春, 楼梦麟. 大型渡槽抗震分析中流体的位移有限元模式[J]. 水利学报, 2003, 34(2): 93-97. (LI Yurchun, LOU Menglin. Displacement based fluid finite element for seismic resistant analysis of large scale aqueduct[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(2): 93-97. (in Chinese))

[6] Li Y, Di Q. Numerical simulation of dynamic characteristics of a cable stayed aqueduct bridge[J]. Earthquake Engineering and Engineering, 2011, 10(4): 569-579.

[7] 刘云贺, 俞茂宏, 陈厚群. 流体固体动力耦合分析的有限元法[J]. 工程力学, 2005, 22(6): 1-6. (LIU Yunhe, YU Maohong, CHEN Houqun. Finite element method for transient analysis of fluid structure coupling problem[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(6): 1-6. (in Chinese))

[8] 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. (WU Yi, MO Haihong, YANG Chun. Seismic response of frame supported large rectangular aqueduct water 3D coupling system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(3): 280-285. (in Chinese))

[9] 李遇春, 楼梦麟. 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, 20(2): 51-56. (LI Yurchun, LOU Menglin. BEM simulation of nonlinear sloshing for aqueduct fluid[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2000, 20(2): 51-56. (in Chinese))

[10] Ibrahim R A, Pilipchuk V N, Ikeda T. Recent advances in liquid sloshing dynamics[J]. Applied Mechanics Reviews, 2001, 54(2): 133-199.

[11] Graham E W, Rodriguez A M. The characteristics of fuel motion which affect airplane dynamics [J]. Journal of Applied Mechanics, 1952, 19: 81-88.

[12] Housner G W. Dynamic pressure on accelerated fluid containers[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1957, 47(1): 15-35.

[13] Li Y, Wang J. A supplementary, exact solution of an equivalent mechanical model for a sloshing fluid in a rectangular tank [J]. Journal of Fluids and Structures, 2012, 31: 147-151.

[14] 李遇春, 李明. 矩形容器中流体晃动等效模型的建议公式[J]. 地震工程与工程震动, 2013, 33(1): 111-114. (LI Yurchun, LAI Ming. Recommended formulae of equivalent model for sloshing fluid in a rectangular tank[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(1): 111-114. (in Chinese))

[15] Li Y, Di Q, Gong Y. Equivalent mechanical models of sloshing fluid in arbitrary section aqueducts[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 2012, 41: 1069-1087.

[16] Dogde C F, Pratt D L, Brovold F N et al. Pipe up J. Civil Engineering, 1999, 69(2): 40-43.

[17] 邸庆霜. 大跨径缆索支承渡槽等效静力风荷载研究 D. 上海: 同济大学, 2013. (DI Qing shuang. A research on equivalent static wind load of long span cable supported aqueduct bridges [D]. Shanghai: Tongji University, 2013. (in Chinese))

[18] Inc Swanson Analysis Systems. ANSYS Theory Manual CP. Houston, 2000.