

流固耦合效应下的渡槽结构动力特性分析

朱宇

(安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司, 安徽 合肥 230088)

摘要: 由于携带大量水体, 渡槽槽身的运动会引起槽内水体晃动, 而另一方面槽内水体的晃动又会反过来影响槽身的运动, 这种流体与固体相互影响的现象称为“流固耦合”现象, 对采用考虑流固耦合等效模型的渡槽结构进行动力特性分析。

关键词: 渡槽; 流固耦合; 动力特性

中图分类号: TV312

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2021)05-0087-03

0 引言

渡槽是一种重要的水工结构, 本文依托的引江济淮淠河总干渠渡槽其过水流量、水深及水荷载均很大, 规模居于世界前列。在地震的激励下, 渡槽结构会产生振动, 同时结构振动会导致水体晃动, 而大质量水体晃动又将对结构的振动产生影响, 最终反馈到渡槽结构的动力特性及地震响应上^[1-3]。渡槽的受地震激励的振动是一个较为复杂的流固耦合问题, 其动力特性和常规桥梁相比有着特殊性。然而, 由于该类结构物的特殊性, 无论是理论研究, 还是设计经验都严重缺乏, 大型渡槽的设计无所遵循, 特别是考虑水体与结构相互作用的抗震问题亟待解决。由于桥梁和渡槽在结构形式上具有很大的相似性, 桥梁的抗震研究, 对渡槽而言具有很大的直接借鉴价值。但是, 渡槽与桥梁相比, 存在大质量的水体及薄壁槽身, 在地震激励下, 其动力特性较桥梁复杂, 其横向抗震问题更为实际工程所关注。

由于动力特性分析是结构地震响应分析的基础, 所以很多人开始致力于渡槽结构动力特性的研究^[4-7]。目前直接考虑流固耦合效应的设计方法在建模和计算方面都较为繁琐, 因而难以直接应用于工程设计, 实际工程中一般采用考虑流固耦合的等效模型进行设计, 这也是现行水工建筑物抗震设计规范^[8]所要求的。本文使用了不考虑流固耦合的等效质量模型和考虑流固耦合效应的 Housner 模型两种

模型对淠河总干渠渡槽的半水、满水两种工况进行动力分析, 并对两种模型的结果进行对比分析。

1 项目概况

1.1 项目背景

淠河总干渠渡槽是引江济淮工程中的重点和难点工程, 采用双槽布置, 渡槽结构形式为桁架式梁拱组合体系, 其跨径布置为 68 m+110 m+68 m, 单槽净宽 16 m, 设计水深 4 m, 校核水深 5.05 m, 设计流量 150 m³/s。淠河总干渠渡槽上跨引江济淮工程江淮沟通段(Ⅱ级航道), 淠河总干渠本身为Ⅵ级航道, 通行 100 t 级船舶。淠河总干渠渡槽有着荷载集度大、水体荷载可变、渡槽结构抗震性能及减隔震技术要求高等特点, 为超大荷载集度通航渡槽。

本项目渡槽位于肥西境内, 基本地震动峰值加速度为 0.10g, 属于郯庐地震带。研究渡槽在地震作用下的动力响应及流-固耦合效应, 是十分必要的, 以确保结构在地震作用下受力安全, 变形可控, 满足渡槽使用的要求。

1.2 工程概况

渡槽横向采用分幅布置, 每幅渡槽结构采用自平衡的梁拱组合体系, 拱肋产生的推力由主桁下弦杆平衡, 不产生外部水平推力, 在每个桥墩处设置了竖向刚性抗震型支座。

渡槽钢结构主体横向设置两片拱式主桁, 单片桁架横向宽度为 1.5 m, 桁架中心距为 21.5 m。渡槽的槽身放置于两片主桁之间, 槽身由桁间箱型横梁及小纵梁的正交体系共同组成渡槽的底板及波折侧墙挡水板组成。渡槽鸟瞰效果见图 1。

收稿日期: 2020-12-24

作者简介: 朱宇(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁结构分析与设计工作。



图 1 漯河总干渠渡槽鸟瞰效果

2 渡槽动力特性分析

2.1 流固耦合模型

等效计算模型中最为著名的是 Housner 于 1957 年提出的弹簧振子模型^[9], 见图 2。该模型将液体晃动等效成一个固定质量和一系列通过弹簧连接的弹簧振子。

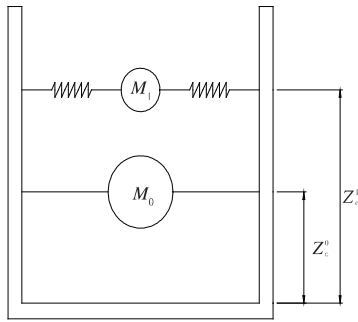


图 2 流固耦合 Housner 模型示意图

该模型物理意义明确, 便于理解, 因此在土木工程及水利工程领域都具有广泛的应用。水体对渡槽侧壁产生了脉冲压力和对流压力, 在模型中定义一组弹簧质量系统, 该系统的弹簧与侧壁相连接以反映侧壁同水体的相互作用。

2.2 脉冲压力等效质量

在 U 型渡槽中, 加在渡槽侧壁上的脉冲加速度将在水平及竖向上产生加速度分量。而在沿着槽身方向没有加速度分量。因此可视为水体被分割限制在横断面上流动, 流体可简化为平面内运动, 见图 3。

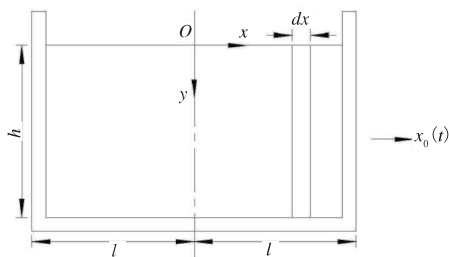


图 3 渡槽流体单元示意图

渡槽侧壁水平加速度在渡槽的一个侧壁上产生正压力, 同时在另一个相对侧壁上产生负压力, 其值

均为:

$$p^{w_0} = \sqrt{3} \rho x_0 h \left[\frac{y}{h} - \frac{1}{2} \left(\frac{y}{h} \right)^2 \right] th \left(\frac{\sqrt{3} l}{h} \right)$$

而作用于底板上的液动压力为:

$$p^{b_0} = \rho x_0 \frac{\sqrt{3} h}{2} \frac{sh \left(\frac{\sqrt{3} x}{h} \right)}{ch \left(\frac{\sqrt{3} l}{h} \right)}$$

水体对渡槽侧壁产生的压力, 相当于水体中一定比例的质量以刚性地固定在底板以上一定高度处对渡槽侧壁上所产生的压力。因此, 将脉冲压力用质点的等效质量表示, 其计算式为:

$$M_0 = M_l \frac{th \left(\frac{\sqrt{3} l}{h} \right)}{\frac{\sqrt{3} l}{h}}$$

等效质量离 U 型渡槽底板的高度应为:

$$Z_c^0 = \frac{3h}{8} \left[1 + \frac{4}{3} \frac{\left(\frac{\sqrt{3} l}{h} \right)}{th \left(\frac{\sqrt{3} l}{h} \right)} - 1 \right] \quad \#(4)$$

2.3 对流压力等效质量

当 U 型渡槽的侧壁受到地震作用时, 渡槽内的水体自身被激发而产生振荡, 会产生对流压力, 其表现为水体对渡槽侧壁和底板产生的液动压力。可将水体分成多层刚性薄膜, 同时认为水体是不可压缩的, 且每层薄膜的水平向是可以自由旋转的, 由流体运动的约束方程按基本振型振动求解可得水体总动能与势能, 经过变分运算得到刚性薄膜的平动、转动速度, 并由此得到作用在渡槽壁上的总液动压力。

渡槽壁上的液动压力可将水体作为具有质量 \$M_1\$ 的质点置于渡槽中, 假设质点以位移 \$X_1 = A_1 \sin \omega t\$ 运动, 则可求出质点对侧壁渡槽侧壁所产生的压力 \$F_1(t)\$ 和该质点的动能 \$T\$, 使渡槽中水体的动能与质点的动能相等, 可得到质点的等效质量:

$$M_1 = M_l \left(\frac{\sqrt{10} l}{6} th \frac{\sqrt{10} h}{2l} \right)$$

对流压力与渡槽侧壁之间可视为弹簧连接, 弹簧的刚度系数按下式计算:

$$K_1 = M_1 \omega_1^2 = \frac{5 \rho g l}{3} th^2 \left(\frac{\sqrt{10} h}{2l} \right)$$

综上, 水体对渡槽产生的压力, 相当于一组刚性连接的质量质点 \$M_0\$ 以及一组弹簧连接的质量质点 \$M_1\$ 组成的系统对渡槽产生的压力。

2.4 渡槽动力特性计算

计算结构动力特性时采用带桩基的有限元计算模型,计算时考虑两种工况:

- 工况 I:渡槽内水高度为校核高度的一半(2.525 m)
- 工况 II:渡槽内水高度为校核高度(5.05 m)

在计算工况 I、工况 II 时分别考虑两种不同计算模型,即不考虑流固耦合现象直接将水体等效成质量计算模型以及 Housner 简化流固耦合计算模型。

附加质量模型中水平质量集中在侧壁与底板而竖向质量集中在底板;附加质量模型渡槽槽身截面示意图图 4,Housner 模型槽身截面示意图图 5。

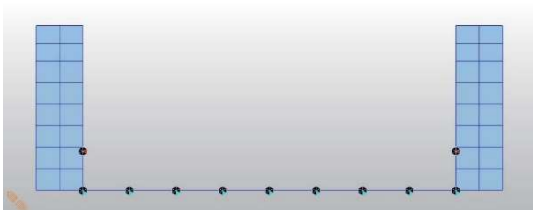


图 4 附加质量模型槽身截面示意图

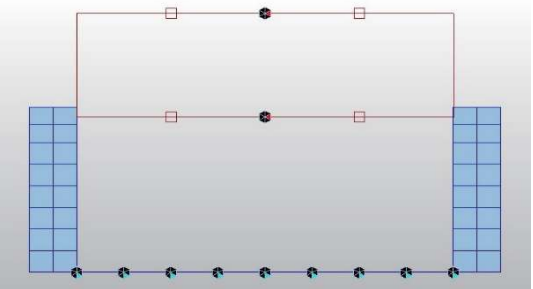


图 5 Housner 模型槽身截面示意图

采用 Housner 模型计算的动力特性除常规的结构本身动力特性以外也包括了水体振动的动力特性,这是同常规的梁、板、索单元的桥梁结构动力特性分析的最大区别。图 6~图 8 为第 II 工况下一些关键的振动模式展示。

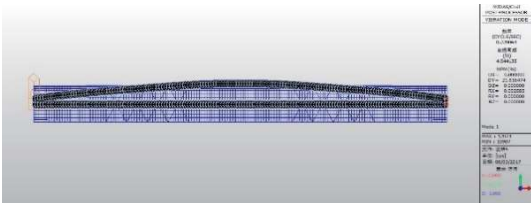


图 6 Housner 模型工况 II 第一阶水体振动模式

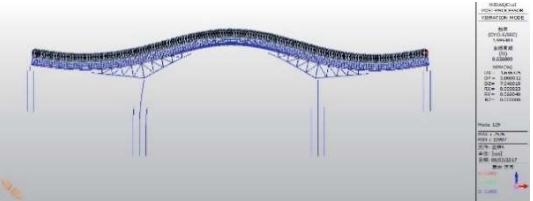


图 7 Housner 模型工况 II 第三阶整体竖弯模式

两个工况下前 10 阶动力特性的振型及对应周期见表 1,其中“H”为 Housner 模型,“附”为附加

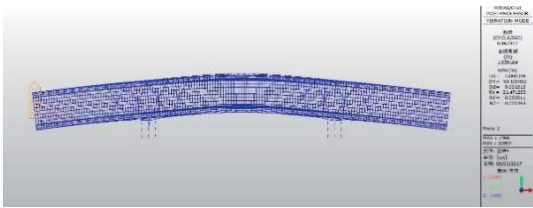


图 8 附加质量模型工况 II 第一阶整体侧弯模式质量模型。

表 1 工况 I、II 前 10 阶动力特性

序号	振型	周期 /s		
		I (H)	II (H)	II (附)
1	水体振动	5.813	4.540	—
2	一阶纵飘	0.741	0.759	0.762
3	一阶竖弯	0.488	0.585	0.593
4	一阶侧弯	0.400	0.479	0.830
5	二阶竖弯	0.273	0.336	0.357
6	三阶竖弯	0.247	0.305	0.331
7	二阶侧弯	0.230	0.282	0.416
8	四阶竖弯	—	0.234	0.244
9	三阶侧弯	0.197	0.210	0.341
10	二阶纵飘	0.199	0.199	—

由表 1 第 II 工况 Housner 模型和附加质量模型结果对比可以看出,由于渡槽内水体的存在,Housner 模型明显可以激发出水体的自振,同时水体振动影响了渡槽结构的动力特性,尤其是侧弯等横向振动。因此在进行类似渡槽等带有流体的结构动力分析时,采用 Housner 模型可以更加符合实际情况,采用附加质量模型可能会对结构抗震性能分析出错误结果。

由表 1 第 I 工况、第 II 工况 Housner 模型结果对比可以看出,渡槽内水体在半满和全满状态下,对于竖弯和侧弯的频率影响比较大,对于纵飘的频率影响比较小。这是和实际情况一致的,由于渡槽侧壁和底板的影响,水体流固耦合效应更多地反映在横向和竖向振动上。由于水体多少对主周期的影响很大,因此对渡槽进行抗震性能分析时,必须严格研究多种水深工况下地震响应,有可能出现特定水位控制设计的情况。

3 结 语

本文主要探讨了考虑流固耦合效应的 Housner 模型的计算方法,该模型将水体的晃动等效为固接质量块及通过弹簧与槽壁相连的质量块从而模拟水体对渡槽的作用。在此基础上分析了漯河总干渠渡槽的半水工况、满水工况两种工况下渡槽结构的动力特性,其中满水工况分别采用不考虑流固耦合

(下转第 107 页)

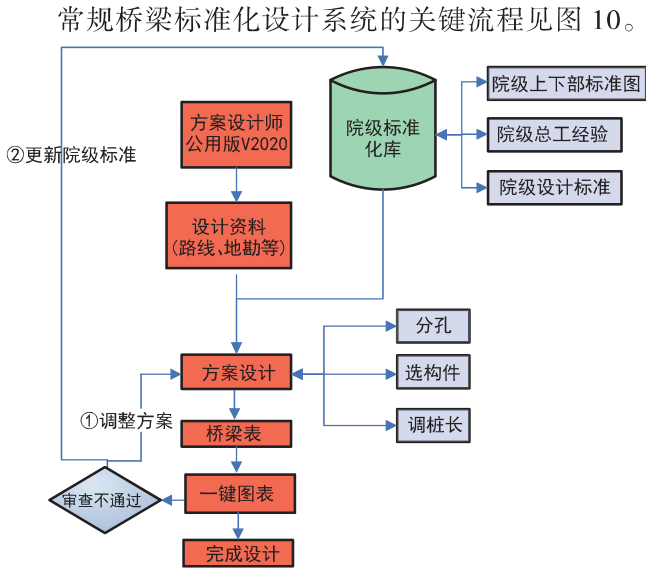


图 10 常规桥梁标准化设计系统的流程图

6 结 语

经过以上分析,结合系统在实践中效果,可以得出以下结论:

(1)在现有桥梁自动化制图软件基础上,结合各设计院的技术标准及院标准化图纸的技术积累,实现面向输入控制的标准化设计技术是完全可行的。

(2)系统在实际应用中,在设计资料、设计过程、设计成果均实现标准化,标准化设计水平、设计效率大幅提升,常规桥梁的设计重心大幅度向设计本身转移,解放工程师双手的同时,通过标准化系统提高了设计成果的质量。

(3)等宽常规桥梁作为标准化设计系统的先期有益尝试,为变宽复杂桥梁、现浇梁桥的标准化积累了基础,也为其他同类型设计院提供了标准化系统定制研发的借鉴。

参考文献:

[1] 卢卓君,袁国平,范之英.数字化设计技术的研究与应用[J].公路,2008(3):94-95.
[2] 阮雪飞,凌桂香,周宗泽.数字技术在桥梁标准化设计中的应用[J].交通科技,2014(5):52-54.
[3] 韩厚正.基于 BIM 的桥梁智能设计与自动绘图系统的研究与实践[J].道路桥梁,2016(3):17.

(上接第 89 页)

效应的附加质量模型以及考虑流固耦合效应的 Housner 模型进行计算。主要有以下结论:

(1)Housner 模型的侧弯及竖弯频率均会随渡槽内水位的增加而不断下降;

(2)附加质量模型和 Housner 模型在结构竖弯频率及纵飘频率上比较接近,说明在纵向和竖向两个方向上流固耦合效应不显著,尤其是纵向;

(3)附加质量模型和 Housner 模型在结构侧弯频率上会产生显著差异;

(4)而 Housner 模型中结构的侧弯频率可以划分为低频的水体振动和高频结构振动两部分,低频水体振动模态相当于使整个结构体系变得更加“柔性”,增加了体系的阻尼。

参考文献:

[1] 季日臣,苏小凤,严娟.水体质量对大型梁式渡槽横向抗震性能影响研究[J].地震工程学报,2013,35(3):569-574.
[2] 陈厚群.南水北调工程抗震安全性问题[J].中国水利水电科学研究院学报,2003(1):19-24.
[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(3):48-54+60.
[4] 徐建国,陈淮,王博.地震作用下大型渡槽结构动态应力计算方法研究[J].水利学报,2002(7):79-82.
[5] 白新理.大型渡槽结构优化设计、温度荷载及动力分析研究[Z].2008.
[6] 王博,徐建国.大型渡槽考虑土-结构相互作用的动力分析[J].世界地震工程,2000(3):110-115.
[7] 郑明燕.考虑 SSI 的减隔震简支桥梁(渡槽)建模及地震动力响应研究[D].北京:中国地质大学,2014.
[8] NB 35047—2015,水电工程水工建筑物抗震设计规范[S].
[9] 张盼盼.大型渡槽结构抗震计算的模型简化[D].湖南长沙:湖南大学,2011.