

考虑流-固耦合梁式矩形渡槽横向 地震响应研究^{*}

季日臣^{1,2)} 夏修身¹⁾ 陈尧隆²⁾ 王 丽¹⁾

1) 中国兰州 730070 兰州交通大学土木工程学院

2) 中国西安 710048 西安理工大学水利水电学院

摘要 根据豪斯纳尔(Housner)理论,建立了考虑槽内水体与渡槽槽身流-固耦合的横向地震响应计算模型,分析了槽身断面深宽比变化对渡槽结构抗震的影响,并对某大型渡槽进行了多工况地震时程响应计算.结果表明,在地震波作用下,渡槽槽内大质量水体对渡槽的横向地震响应有较大的影响,但水体的晃荡作用有明显的 TLD 效应.若将水体视为刚体,质量全部附加到槽体上,将严重地夸大水的地震惯性力作用,且在渡槽槽身断面选择时应考虑深宽比对墩身地震响应的影响,以减小地震力.

关键词 渡槽 流-固耦合 地震响应 水体模型 TLD 效应

中图分类号: P315.9

文献标识码: A

引言

渡槽(输水桥)是连接输水渠系,跨越山川、河谷、道路的架空输水建筑物.在南水北调中、西线工程中,渡槽是一种重要的水工结构.其过水流量、水深及水荷载均很大,规模居于世界前列.大型渡槽中水量大,水体重量相当或甚至超过结构重量(季日臣,陈尧隆,2005).特别是在地震激励下,槽内大质量水体的运动会对渡槽结构的动力特性及地震响应产生重要影响.因此,流体的作用是不可避免且必须加以考虑的问题(王博,徐建国,2004;吴轶等,2005;刘云贺,2001).渡槽体系振动时,流体会伴随结构的振动而产生晃动,反过来流体的晃动又将对结构的振动产生影响,这是一个较为复杂的流体与结构相互作用问题.地震荷载不同于一般的桥梁结构,其动力特性比桥梁更复杂.例如将水体的质量固结于槽身上而忽略了流体与结构的动力相互作用影响,将造成较大的计算误差.所以,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.特别是考虑流体与结构相互作用的抗震问题亟待解决,这也正是目前我国水工设计规范尚难于回答的问题(中华人民共和国水利部,1998;中华人民共和国交通部,1999).本文通过对流-固耦合理论的研究,用等效的弹簧-质量系统来模拟流体与结构的动力相互作用.采用 ANSYS 大型通用商业软件,对大型梁式渡槽抗震分析进行有限元计算,从而得到了考虑流-固耦合大型梁式渡槽结构的自振特性、地震响应;分析了水体晃动和槽

* 国家自然科学基金项目(50279024),兰州交通大学“青蓝”人才工程基金项目(QL-05-13A)资助.

2006-10-24 收到初稿,2007-02-26 决定采用修改稿.

✦ 通讯作者. e-mail: jirichen@sohu.com

身断面深宽比对渡槽结构抗震的影响，为分析流体对结构振动的影响提供了依据，为大型梁式矩形渡槽的抗震设计提供了参考。

1 槽身中晃荡液体计算模型的简化

关于槽身中晃荡液体的力学模型，可从流体力学基本方程出发，导出液体表面的波动方程，再用有限元或有限差分求得液体的晃动力，作为作用在结构上的减震力。这种力学模型复杂且计算量很大。可从液体晃动的动力效应与力学模型的动力效应两者等效原则出发，导出一个实用的等效力学模型。使等效力学模型的固有频率、阻尼和减振力与槽身中液体运动的固有频率、阻尼和晃动力相同(居荣初，曾心传，1983. 刘云贺等，2002)。

在横向地震波作用下，渡槽槽内流体与槽身的相互作用力可分为液动压力 S 以及倾覆力矩 M

$$S = -2\rho \left[\sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \ddot{q}_n(t) \left(\frac{b_n b}{n\pi} \right) \tanh\left(\frac{n\pi h}{b}\right) + \frac{bh}{2} \ddot{x}_0(t) \right] \tag{1}$$

$$M = -\rho b h^2 \left\{ \frac{\ddot{x}_0(t)}{2} + \frac{2a}{\pi^2 h^2} \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \frac{b_n \ddot{q}_n(t)}{n^2} \left[\left(\frac{n\pi h}{b} \right) \tan\left(\frac{n\pi h}{b}\right) + \frac{1}{\cosh\left(\frac{n\pi h}{b}\right)} - 1 \right] \right\} - \rho b^3 \left[\frac{\ddot{x}_0(t)}{12} + \sum_{n=1,3,\dots}^{\infty} \left(\frac{2b_n \ddot{q}_n(t)}{n^2 \pi^2 b} \right) \frac{1}{\cosh\left(\frac{n\pi h}{b}\right)} \right] \tag{2}$$

式中， ρ 为水的质量密度， h 为槽内水深， b 为槽内壁宽度， $\ddot{x}_0(t)$ 为槽身横向加速度时程。

按照豪斯纳尔(Housner)理论的简化模型，在横向地震荷载作用下，流体与槽身的相互作用力包括脉动压力及对流压力。脉动压力所产生的对渡槽侧壁的作用力为

$$S^0 = 2\rho \ddot{x}_0(t) \frac{h^2}{\sqrt{3}} \tanh\left(\frac{\sqrt{3}b}{2h}\right) \tag{3}$$

脉动压力的作用可用随槽体同步运动的质量块 M_{PR}^0 来等效替代

$$M_{PR}^0 = b h \rho \frac{\tanh\left(\frac{\sqrt{3}b}{2h}\right)}{\left(\frac{\sqrt{3}b}{2h}\right)} \tag{4}$$

而质量块 M_{PR}^0 距底板的距离 h_0 为

$$h_0 = \frac{3h}{8} + \frac{h}{2} \left[\frac{\left(\frac{\sqrt{3}b}{2h}\right)}{\tanh\left(\frac{\sqrt{3}b}{2h}\right)} - 1 \right] \tag{5}$$

对流压力可看成流体的奇数阶振动对槽体的作用力。由于各阶对流压力 $S_n(n = 1, 3, 5, \dots)$ 均为与液体振动圆频率有关的谐振力，故可将这些谐振力作用等效为一系列的弹簧-质量系统(图1)。以流体的第 n 阶对流谐振力为例，其等效质量 M_{PR}^n 、等效弹簧刚

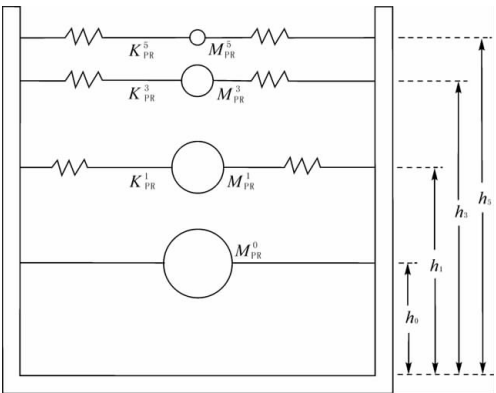


图1 渡槽流-固耦合计算简图

度 K_{PR}^n 以及距底板的距离 h_n 分别为

$$M_{PR}^n = \frac{b}{n} h \rho \left[\frac{\sqrt{10}b}{12hn} \tanh\left(\frac{\sqrt{10}hn}{b}\right) \right] \quad (n = 1, 3, 5, \dots) \tag{6}$$

$$K_{PR}^n = M_{PR}^n \omega_n^2 = M_{PR}^n \left(\frac{\sqrt{10}gn}{b} \right) \tanh\left(\frac{\sqrt{10}hn}{b}\right) = \frac{5}{6} \rho g \tanh^2\left(\frac{\sqrt{10}hn}{b}\right) \quad (n = 1, 3, 5, \dots) \tag{7}$$

$$h_n = h \left[1 - \frac{\cosh\left(\frac{\sqrt{10}hn}{b}\right) - 2}{\left(\frac{\sqrt{10}hn}{b}\right) \sinh\left(\frac{\sqrt{10}hn}{b}\right)} \right] \quad (n = 1, 3, 5, \dots) \tag{8}$$

根据计算分析,可以看出对于较高的振型,等效质量衰减很快.因此,在实际计算中,取前几阶对流谐振力即可取得满意结果.这样就把槽身中的液体分为相对静止的液体(即不晃液体)和晃动液体两部分.

2 渡槽横向水平地震作用计算模型

对于 U 型河谷中的梁式渡槽,各墩高度相差不大,渡槽结构单跨跨度相等,地基条件基本一致,其振动周期基本相等,地震动力反应也基本一致.因此,参照桥梁抗震规范(中华人民共和国交通部,1999),分析其横向水平地震反应时,可取一个单墩按平面问题处理.墩身考虑弯剪影响,暂不考虑地基变形,墩身固结于地面,槽身视为刚体,质量按一跨计算.整体系统由主系统和子系统两部分组成,主系统为墩和槽体构成,子系统则为水体.水体对槽体的压力可分为脉动压力及对流压力.脉动压力的作用可用随槽体同步运动的质量块 M_{PR}^n 来等效替代,对流压力可等效为一系列的弹簧-质量系统来模拟.

3 计算方案及材料参数

渡槽为简支结构,槽身为箱形截面,每一跨的长度为 48 m,槽身的质量为 916 800 kg,槽内水体的质量为 925 600 kg,槽身的质量和槽内水体的质量基本相等.在保持过水面积不变的情况下(即槽内水体质量不变),槽身按不同的深宽比变化,以分析槽身深宽比变化时水体晃动对大型梁式矩形渡槽横向地震反应的影响.槽墩为矩形薄壁空心柔性墩,墩高为 40 m,墩身横截面长为 4 m,宽为 2.5 m,其截面面积 A 为 6.1 m²,截面惯性矩 I 为 11.4 m⁴,混凝土的弹性模量 E 为 3.1×10⁷ kPa,混凝土的密度 ρ 为 2 500 kg/m³,泊松比

表 1 水体等效质量及作用位置

h/b	h/m	b/m	M_{PR}^1 /kg	h_0 /m	M_{PR}^2 /kg	K_{PR}^1 /kN·m ⁻¹	h_1 /m	M_{PR}^3 /kg	K_{PR}^2 /kN·m ⁻¹	h_3 /m	M_{PR}^4 /m	K_{PR}^3 /kN·m ⁻¹	h_5 /m
0.3	2.40	8.01	317 560	3.19	599 962	3 430	3.59	89 638	2 066	1.75	32 485	1 256	1.91
0.4	2.78	6.94	416 010	2.74	518 182	3 948	2.89	37 438	1 806	2.11	24 302	1 086	2.34
0.5	3.10	6.20	500 840	2.47	447 204	4 108	2.65	54 074	1 622	2.47	19 470	974	2.71
0.6	3.47	5.66	572 719	2.32	387 394	4 056	2.62	45 014	1 478	2.81	16 206	888	3.04
0.7	3.68	5.24	630 717	2.22	339 294	3 918	2.71	38 609	1 370	3.12	13 899	822	3.34
0.8	3.92	4.90	677 496	2.18	330 373	3 752	2.85	33 801	1 282	3.40	12 168	770	3.61
0.9	4.16	4.62	715 437	2.16	268 464	3 578	3.03	30 031	1 208	3.67	10 811	726	3.87
1.0	4.39	4.39	745 786	2.17	242 498	3 412	3.23	27 041	1 146	3.93	9 735	688	4.11

为 0.167, 阻尼比为 0.05. 为了分析水体晃动对大型梁式渡槽横向地震反应的影响, 分别计算了空槽和满槽两种工况. 其中满槽工况又分为不考虑水体晃动(将全部水体固结于 1/2 槽身高度处)和考虑水体晃动(用 Housner 水体模型简化)两种工况. 槽身不同的深宽比 h/b 变化下, 水体等效质量、等效弹簧刚度及作用位置见表 1. 地震动参数峰值加速度为 2 m/s^2 , 所选地震波为 El-Centro 地震波和 Northridge 地震波, 作用时间都为 20 s.

4 计算结果与分析

计算所得各种工况下渡槽的自振频率如表 2、表 3 所示. 在地震波作用下其墩顶最大位移(displacement)、墩底最大弯矩(moment)及墩底最大剪力(shear)见表 4、表 5 所示. 各种工况下的墩顶位移、墩底弯矩和墩底剪力的横向地震响应时程曲线如图 2, 3, 4 所示.

对比上述计算结果可得出以下结论:

1) 比较相同深宽比, 考虑槽内水体流-固耦合和不考虑槽内水体流-固耦合(水体固结于槽身)两种情况, 前者的墩顶最大位移、墩底最大弯矩和墩底最大剪力远小于后者, 前者的最大值只有后者的 66.1%, 65.1%和 69.0%. 说明水体对渡槽地震响应的影响是有限的. 这是因为槽内大质量水体的晃动, 起到了TLD效应, 所以不考虑槽内水体流-固耦合

表 2 渡槽中水体的横向自振频率

工况	一阶频率/Hz	二阶频率/Hz	三阶频率/Hz	四阶频率/Hz	五阶频率/Hz
$h/b=0.3$	0.269	0.433	0.540	0.626	0.700
$h/b=0.5$	0.341	0.502	0.616	0.711	0.796
$h/b=0.7$	0.382	0.547	0.670	0.774	0.865
$h/b=1.0$	0.422	0.598	0.732	0.846	0.946

表 3 渡槽横向自振频率

工况	一阶频率/Hz	二阶频率/Hz	三阶频率/Hz	四阶频率/Hz	五阶频率/Hz
空槽	0.629	7.602	22.014	47.646	66.178
$h/b=0.3$	0.516	6.319	17.487	33.629	57.949
$h/b=0.5$	0.522	6.656	19.135	35.893	59.539
$h/b=0.7$	0.517	6.695	19.325	36.197	59.762
$h/b=1.0$	0.506	6.736	19.550	36.601	60.085
不计流-固耦合	0.445	6.967	20.851	39.476	62.873

表 4 El-Centro 地震波作用下地震响应最大值

工况	空槽	$h/b=0.3$	$h/b=0.5$	$h/b=0.7$	$h/b=1.0$	不计流固耦合
墩顶最大位移/m	0.077	0.092	0.091	0.109	0.099	0.165
墩底最大弯矩/kN·m	53 137	62 405	60 528	71 578	66 742	109 916
墩底最大剪力/kN	1 495	1 681	1 645	2 003	1 793	2 903

表 5 Northridge 地震波作用下地震响应最大值

工况	空槽	$h/b=0.3$	$h/b=0.5$	$h/b=0.7$	$h/b=1.0$	不计流-固耦合
墩顶最大位移/m	0.135	0.141	0.141	0.158	0.146	0.198
墩底最大弯矩/kN·m	91 082	95 307	95 952	108 060	99 038	131 001
墩底最大剪力/kN	2 511	2 536	2 601	2 950	2 673	3 278

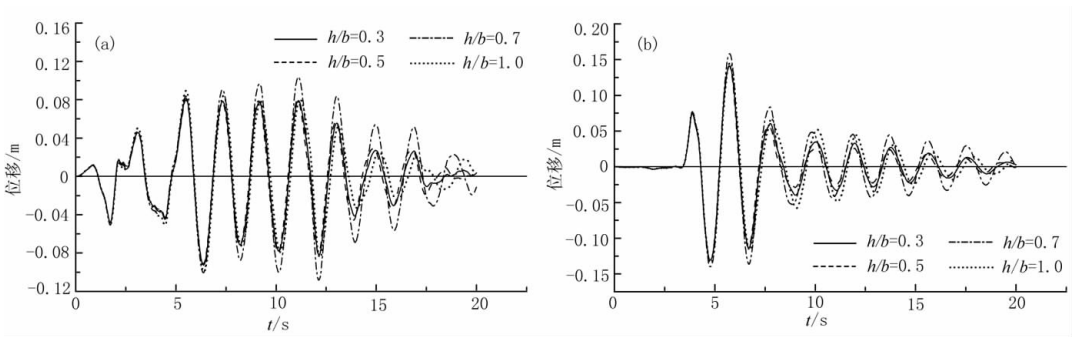


图 2 墩顶位移时程曲线. (a) El-Centro 地震波; (b) Northridge 地震波

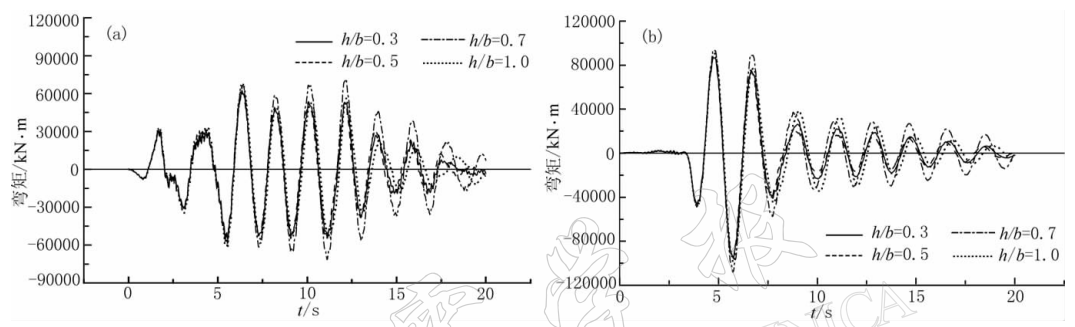


图 3 墩底弯矩时程曲线. (a) El-Centro 地震波; (b) Northridge 地震波

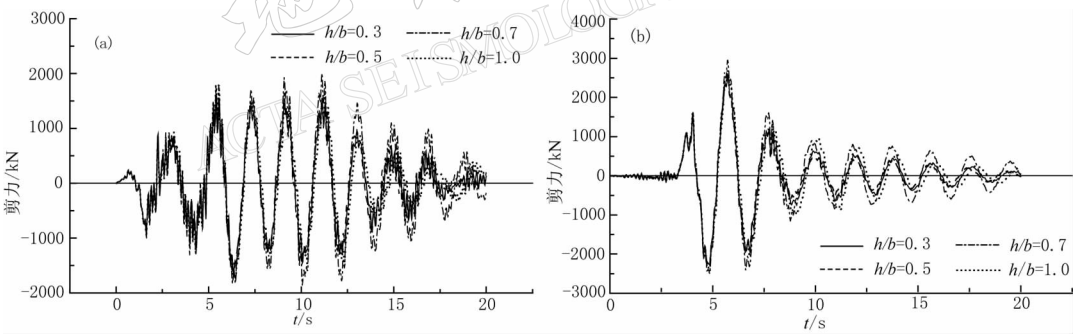


图 4 墩底剪力时程曲线. (a) El-Centro 地震波; (b) Northridge 地震波

将夸大渡槽水体的地震力，是不经济的。

2) 比较满槽(考虑槽内水体流-固耦合)和空槽两种工况的横向地震响应. 前者的墩顶位移、墩底弯矩和剪力的最大值均大于后者，其相应的最大增幅分别为 41.6%，34.7%和 34.0%。这是因为满槽时水体增大了渡槽结构的上部重量，从而使作用在渡槽上的地震作用力加大的缘故，故进行渡槽抗震分析时应考虑水体的影响。

3) 水体的自振频率比结构的自振频率小。比较空槽和满槽两种工况的自振特性，其振型没有变化。但由于渡槽充水时，质量加大，其自振频率有所减小，流-固耦合体的自振频率，接近于结构的自振频率，但大于渡槽充水不计流-固耦合工况。也说明水体对渡槽自振特性的影响是有限的。

4) 槽内水体的质量保持不变, 槽身按不同的深宽比 h/b 变化时, 渡槽的自振频率随之发生变化, 但变幅不大.

5) 槽内水体的质量保持不变, 槽身按不同的深宽比 h/b 变化时, 墩顶最大位移、墩底最大弯矩和墩底最大剪力随之发生变化. 所以, 在渡槽槽身断面选择时应考虑深宽比 h/b 对墩身地震响应的影响, 以减小渡槽墩身的地震作用.

6) 流体与槽身侧壁的流-固相互作用力, 既有脉动压力项, 同时也有对流压力项. 流体本身在槽内晃动时, 它对渡槽槽体侧壁产生变化复杂的作用力, 不能简单地将全部水体质量作为附加质量固结于槽身.

7) 由于等效质量 M_{PR}^* 、等效弹簧刚度 K_{PR}^* 以及距底板的距离 h_n 的计算表达式均为超越函数, 故当槽身断面深宽比变化时, 各等效质量在水体总质量中所占的比例、等效弹簧刚度及作用位置是不断变化的, 因而使得流体对槽身的流-固耦合作用变得较为复杂.

5 结语

本文通过对流-固耦合理论的研究, 用等效的弹簧-质量系统来模拟渡槽流体与结构的动力相互作用, 采用 ANSYS 大型通用商业软件, 对大型梁式渡槽抗震分析进行了有限元计算. 通过对某大型梁式矩形渡槽横向地震反应的计算结果表明, 槽体大质量水体的存在对渡槽的动力特性影响较大, 水体的晃动作用有明显的 TLD 效应, 能够有效地减少渡槽的地震反应. 若将水体视为刚体, 质量全部加到槽体上, 将严重地夸大水的地震惯性力作用, 是不适合的, 动力计算时必须考虑流体对渡槽结构的动力作用; 分析了槽身断面深宽比对渡槽结构抗震的影响, 当槽身按不同的深宽比变化时, 墩顶最大位移、墩底弯矩和墩底最大剪力随之发生变化, 所以, 在渡槽槽身断面深宽比选择时应考虑其对墩身地震响应的影响, 以减小渡槽墩身的地震响应.

参 考 文 献

- 季日臣, 陈尧隆. 2005. 大型多纵梁矩形渡槽结构静力计算方法研究[J]. 水力发电学报, **24**(5): 80-84.
- 居荣初, 曾心传. 1983. 弹性结构与液体的耦联振动理论[M]. 北京: 地震出版社: 88-96.
- 刘云贺. 2001. 流体-固体动力耦合理论及水利工程应用[D]: [学位论文]. 西安: 西安交通大学: 28-30.
- 刘云贺, 胡宝柱, 阎建文, 等. 2002. Housner 模型在渡槽抗震计算中的实用性[J]. 水利学报, **33**(9): 94-99.
- 王博, 徐建国. 2004. 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, **23**(5): 40-43.
- 吴轶, 莫海鸿, 杨春, 等. 2005. 排架-渡槽-水三维耦合体系地震响应分析[J]. 水利学报, **36**(3): 280-285.
- 中华人民共和国水利部. 1998. 水工建筑物抗震设计规范(SL20347)[S]. 北京: 中国水利水电出版社: 11-17.
- 中华人民共和国交通部. 1999. 公路工程抗震设计规范(JTJ004-89)[S]. 北京: 人民交通出版社: 22-38.

TRANSVERSE SEISMIC RESPONSE OF BEAM AQUEDUCT CONSIDERING FLUID-STRUCTURE COUPLING

Ji Richen^{1,2)} Xia Xiushen¹⁾ Chen Yaolong²⁾ Wang Li¹⁾

1) *School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China*

2) *School of Water Resource and Hydroelectric Engineering, Xi'an University
of Technology, Xi'an 710048, China*

Abstract: Based on the theory of Housner, the transverse seismic response of beam aqueduct considering fluid-structure coupling is established. With the variation of aqueduct cross-section ratio of depth to width, the aqueduct transverse seismic response change. The transverse seismic response of a large-scale aqueduct in several work condition are calculated. It shows that the transverse seismic response is greatly influenced by the water mass in the aqueduct, but the shaking water play a TLD role. If the whole water is appended aqueduct body, it will magnify seismic inertia action. When aqueduct cross-section is selected, the influence of ratio of depth and width to pier seismic response should be considered in order to reduce seismic action.

Key words: aqueduct; fluid-structure coupling; seismic response; water model; TLD action