文章编号:1672-3031(2019)02-0090-10

U形渡槽流固耦合动力作用研究

张年煜，王海波
（中国水利水电科学研究院 工程抗震研究中心，北京 100048）

摘要：为了研究强震下渡槽的流固耦合动力作用，本文首先用VOF模型验证了渡槽内水体响应的非线性，然后通过位移有限元方法建立了U形渡槽流固耦合模型，并根据地震作用的特点构造了一组Ricker子波，分别计算了刚、柔性槽体模型的动力时程响应。计算结果表明，渡槽流固耦合动力作用的强度主要受流体晃动频率、槽体自振频率两个因素控制，当外界激励的频率接近这两个频率时，渡槽的流固耦合动力作用将变得十分显著；当激励频率达到水体晃动频率的2倍时，水体主要运动方式将由表面晃动转变为整体惯性运动；地震作用下水体动力响应的非线性可以忽略。这些现象在渡槽抗震设计中应当引起足够的关注。

关键词：渡槽；流固耦合；频率；动力响应；结构抗震
中图分类号：TV312 **文献标识码：**A **doi：**10.13244/j.cnki.jiwhr.2019.02.002

1 研究背景

渡槽作为一种重要的水工输水建筑物，在长距离调水工程中得到了广泛应用，由于渡槽结构的特点，其往往是整个调水工程中抗震安全的控制性工程[1]。因地质地形复杂、区域地震活动强烈，我国西南地区调水工程的大型高架渡槽抗震安全问题十分突出。地震荷载作用下，渡槽槽体与槽内水体间存在强烈的相互作用，并且呈现出一定的与结构振动强度相关的非线性特征。水体与槽体的动力作用导致槽体结构地震作用的增加，因此研究渡槽的流固耦合动力作用，对准确分析渡槽结构地震响应，保障渡槽结构抗震安全具有重要的工程意义。

渡槽流固耦合动力作用，即水体与槽体在动力荷载下的相互影响。通过数值模型计算与分析，国内外学者对流固耦合动力作用的影响因素进行了深入的研究。其中槽体刚度通过影响槽体的动力特性来影响流固耦合动力作用，刘云贺等[2]运用Housner和流固动力耦合方法，发现不同刚度的单墩模型的计算结果存在一定差异。截面形状和尺寸影响流体晃动的动力特性，进而对流固耦合动力作用产生影响，Kolaei等[3]通过对任意截面形状的储液罐动力模型进行计算，指出当整体重心更低、临界晃动长度越小时储液罐的滚动稳定极限越好；吴轶等[4]分析了截面深宽比变化时渡槽内的水体动力响应，发现当深宽比越小槽内水体的晃动越显著，对槽体的稳定性影响也越大。外界激励的频率是另一个影响水体晃动及作用的显著因素，Jung等[5]对二维和三维的矩形水箱施加不同频率的往复荷载，发现当激励频率与水体模态频率比为1时，水体由于剧烈的晃动将对水箱顶部造成冲击，而频率比达到2以上时，水面的晃动则迅速减弱。上述研究揭示了槽体、水体的动力特性以及外界激励的频率对流固耦合动力作用的影响，但对于渡槽结构，频域分析的研究成果还不够丰富，尤其是低频段水体动力响应的研究成果还比较少，且对水箱结构进行频域分析时，其外界激励基本都是简谐波形式，并且其频域主要是低频段，一般小于5.0 Hz，也不能很好地反映地震作用的特点。

渡槽槽体与槽内水体的流固耦合动力作用的数值计算方法主要分为等效力学模型和耦合求解两种处理方式。等效力学模型是对流体模型进行简化，将流体对固体的动力作用以附加质量或者是质量-弹簧的形式在数值模型中加以模拟，分别称为附加质量模型和等效质量—弹簧模型。其中较常用

收稿日期：2018-09-29
基金项目：国家重点研发计划项目(2016YFC0401807)
作者简介：张年煜(1994-)，硕士生，主要从事工程抗震研究。E-mail：zhangnianyu007@163.com

的是Housner模型，采用质量-弹簧方法近似计算运动流体对槽体产生的压力[6]，其作用方式如图1。现行水工建筑抗震设计规范中采用的就是Housner模型的一阶形式[7]，该模型在分析流固耦合结构的自振特性时比较准确，但用于地震响应分析时计算结果要大于强耦合模型，是一种相对保守的分析方法[8]。

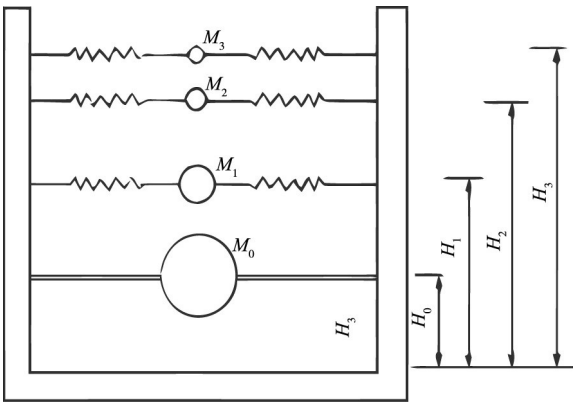

图1　Housner模型

耦合求解方法是对流体和固体分别采用精确表述的力学模型进行动力分析，进而求解流固耦合动力作用，渡槽工程上的应用主要包括位移有限元模型、边界元模型和ALE(Arbitrary Lagrangian-Eulerian)3种方法。位移有限元模型是在流体小位移的假设下，通过位移模式建立流体单元的运动方程，因此直接满足流固边界条件，该方法可用于求解流体的大幅晃动过程，其精度较高，能有效满足工程要求[9-10]；边界元方法适用于强震下任意边界的流体大幅晃动过程，其通过建立流体边界泛函来求解流体对槽体的作用力，具有单元数目少，计算量小的优点[11-12]；ALE方法中计算网格可以独立于物质和空间参照系以任意形式运动，通过规定合理的网格运动方式，就能准确地描述流固耦合界面，使槽体和流体按各自的力学模型精确地求解，从而得到更为真实的流固耦合效应，因此其适用性更广，但在实际求解过程中存在对流项震荡引起的收敛性问题，有待进一步研究[13-14]。

等效力学模型虽然计算简便，但其并不能反映流体运动的真实特征，而耦合求解的3种方法实际上是通过采取不同的手段来追踪流固耦合边界，再利用力学模型求解槽体和流体的相互作用。针对上述问题，为了研究强震下渡槽结构流固耦合动力作用的影响因素，本文依据某渡槽工程的设计方案建立刚、柔性槽体的流固耦合有限元模型，并且根据实际地震作用的特点构造包含高低频段的Ricker子波，求解渡槽流固耦合的动力响应。为了保证计算模型的精确、可靠，本文首先采用Fluent软件中的VOF模型进行流体非线性分析，然后参考文献[11]中采用的位移有限元方法，用ANSYS软件中的流体单元模块进行流固耦合模型计算，最后通过对数值计算结果进行整理和归纳，对水体动力响应随频率变化的规律及其影响因素进行分析，为渡槽抗震结构设计和渡槽减隔震设计提供依据。

2　研究方法及模型参数

2.1　研究方法

2.1.1　采用Fluent软件中的VOF模型进行流体非线性分析　VOF模型是求解自由表面问题的一种成熟而有效的数值模拟方法，在液舱晃动、大坝溢流等问题的研究中得到了广泛的运用[15-17]。VOF方法通过流体体积分数F_v来追踪液体的自由表面，流体体积分数的定义为单元中流体体积占单元总体积的比值，在气液两相流问题中，以液体为主相，$F_v=0$代表单元中无液体，$F_v=1$代表单元中充满液体，$0<F_v<1$则代表单元中部分充满液体，即代表该单元是自由表面单元。用VOF方法求解流体运动时，除了要满足流体的连续方程、运动方程和能量方程外，流体体积分数还应满足输运方程：

$$\dot{F}_v+\left(F_{vi}\right)_{,i}=0 \tag{1}$$

其中，v_i为流体在i方向的速度分量；$\dot{F}_v$为F_v对时间的导数。

2.1.2　使用ANSYS软件中的流体单元模块进行流固耦合模型计算　对于可压缩、无黏和无旋的流体，在小幅运动条件下，其体力和流体密度变化速度可以忽略，其运动方程为：

$$\dot{v}_i+\frac{1}{\rho_l}p_{,i}=0 \tag{2}$$

其声学连续性方程为：

$$\dot{p}+\rho_1 c^2 v_{k,k}=0 \tag{3}$$

式中：ρ_1 为流体密度；p 为流体压强；$v_i=\dot{u}_i$ 为流体速度分量；$c=\sqrt{\dfrac{K_1}{\rho_1}}$ 为流体中的声速，K_1 为流体的压缩模量。

将式(3)对时间积分并对 i 方向求偏导，联立式(2)可得到位移表示的流体运动方程为：

$$\ddot{u}_i=c^2 u_{k,ki} \tag{4}$$

而弹性力学中线弹性体的动力学方程为：

$$\rho_s \ddot{u}_i=\frac{3K_s}{2(1+\mu)}u_{k,ki}+Gu_{i,kk}+F_i \tag{5}$$

其中 ρ_s、K_s、G 和 μ 分别为弹性体的密度、弹性模量、剪切模量和泊松比。

对比式(4)，令式(5)中的 $G=0$，$F_i=0$，$\dfrac{3K_s}{2\rho_s(1+\mu)}=c^2$，即得到线弹性体动力学方程描述的流体运动方程，但流体的线弹性刚度矩阵如式(6)，因此剪切模量 G 不能取零，通常是取一个很小的值，在ANSYS计算程序中 $G=10^{-9}\cdot K_1$。

$$K_m=\begin{bmatrix} K_1 & K_1 & K_1 & & & \\ K_1 & K_1 & K_1 & & & \\ K_1 & K_1 & K_1 & & & \\ & & & 1/G & & \\ & & & & 1/G & \\ & & & & & 1/G \end{bmatrix} \tag{6}$$

由于运动方程中忽略了体力的作用，因此ANSYS计算程序中通过给自由表面处的流体单元作用一个竖向弹簧，用于反映液面在重力作用下的晃动。对于液面处的某一流体单元，假定其液面高度下降了 Δh，且其他单元的液面高度保持不变，根据伯努利方程，由于压差该单元将受到竖直向上的恢复力 $F_D=\rho_1 Ag\cdot\Delta h$，其中 A 为单元液表面面积，g 为重力加速度。由此可得到竖向弹簧的刚度 $k_s=\dfrac{F_D}{\Delta h}=\rho_1 Ag$。

2.2　工程实例　某调水工程的大型高架渡槽位于西南高烈度区，其槽体结构设计断面为U形，总宽度为8.30 m，内径为3.50 m，侧壁厚0.35 m，槽顶部顺槽向每隔2.5 m布置一根拉杆，拉杆的截面尺寸为0.5 m×0.5 m，该渡槽设计流量为135 m^3/s，正常使用时槽内设计水位为5.46 m。

地震作用下水体对槽体的横槽向作用显著，而顺槽向作用甚微，且槽体沿顺槽向表现出较大的刚性[18]，因此根据渡槽槽体典型设计断面建立二维流固耦合有限元模型，并沿横槽向对模型施加动力荷载，就能精确地模拟水平向地震作用下槽体与槽内水体的相互作用。

2.3　模型参数　本文计算中的Fluent流体模型和ANSYS流固耦合模型分别如图2、图3所示。

Fluent模型中单元网格尺寸为0.05 m。假定水为不可压缩流体，用Fluent中的Realizable $k-\varepsilon$ 模型封闭N-S方程中黏性项；U型槽壁为静止固壁边界条件，上部边界入口压力为1atm；激励通过Fluent UDF动力源项进行加载。

ANSYS模型中结构阻尼比取7%，按Rayleigh阻尼方法施加；根据拉杆尺寸和布置间隔，将槽体顶部拉杆的材料密度及模量均化为槽体材料的1/5；为了比较柔性槽体与刚性槽体计算结果之间的差异，本文还对刚性槽体模型进行了分析，方法是将柔性模型的槽体弹性模量提高1000倍进行近似；计算时约束槽体底部所有节点在两个方向上的自由度。两种模型的材料参数在表1中给出。

2.4　地震波与Ricker子波　本文计算中使用的人工波时程曲线如图4所示，其峰值加速度为3.58 m/s^2。

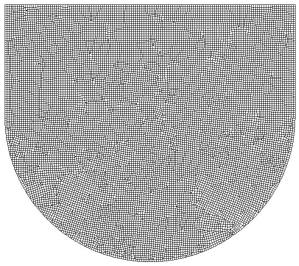

图2　Fluent流体模型

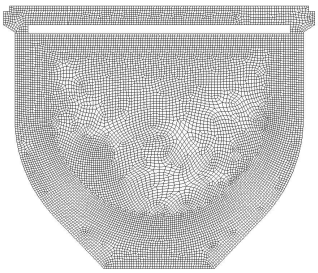

图3　ANSYS流固耦合模型

表1　计算模型材料参数

计算模型	钢筋混凝土材料密度/(kg/m³)	钢筋混凝土弹性模量/MPa	钢筋混凝土泊松比	水的密度/(kg/m³)	水的体积模量/MPa	水的动力黏性系数/(Pa·s)	表面张力系数/(N/m)
Fluent模型				1000	2.18×10^3	0.001	0.071
ANSYS模型	2400	3.4×10^4	0.2	1000	2.18×10^3		

Ricker子波是地震工程中常用的子波类型[19]，其表达式为：

$$R_w(t)=\left[1-2\left(\pi f_0 t\right)^2\right]\cdot \mathrm{e}^{-\left(\pi f_0 t\right)^2} \qquad (7)$$

其中，t为时间，s；f_0为主频，Hz。

实际地震作用受到震源机制、地震波传播路径、近场地质地形条件等多种因素影响，根据地震作用的特点，地震波中低频段的成分主要影响场地的最大位移，高频段的成分主要影响场地的最大加速度，因此可以分别通过最大位移和最大加速度控制低频段和高频段Ricker子波的峰值大小。

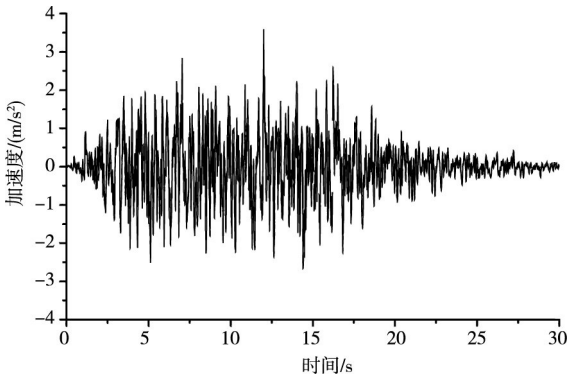

图4　人工波时程曲线

本文Ricker子波的低频段范围为0～1.3 Hz，取其最大位移值为0.30 m；高频段范围为1.3～12.0 Hz，取其最大加速度值为9.55 m/s²。对于实际地震作用而言，峰值加速度通常出现在t=0时刻之后，因此本文中取Ricker子波的低频、高频子波作用过程分别为10 s和4 s，并将其曲线向右分别平移6 s和3 s，其中第1 s用于施加静力作用。得到的Ricker子波峰值加速度如表2，时程曲线分别如图5、图6。

表2　Ricker子波峰值加速度

频率/Hz	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1.0	1.3~12.0
峰值加速度/(m/s²)	0.118	0.265	0.595	1.075	1.667	2.381	4.167	6.667	9.55

3　某U形渡槽流固耦合动力作用数值计算分析

3.1　槽体和水体模态分析　首先用ANSYS对二维模型的柔性槽体和槽内水体分别进行模态分析，以得到其基本动力特征。通过对槽体结构进行模态分析，得到无水时柔性槽体的一阶频率为f_1=6.67Hz。

槽内水体会影响到槽体结构的动力特性，将渡槽槽壁近似悬臂梁结构处理，可以通过悬臂梁自振频率公式(8)估算出设计水位时槽体的自振频率。水体刚度相比槽体钢筋混凝土可以忽略不计，因此假定流固耦合系统刚度不变，而渡槽断面的水体质量约为槽体钢筋混凝土质量的1.67倍，将其视为作用于悬臂梁上的均布质量，由此可估算出槽体的第一阶频率f'_1=4.09 Hz。

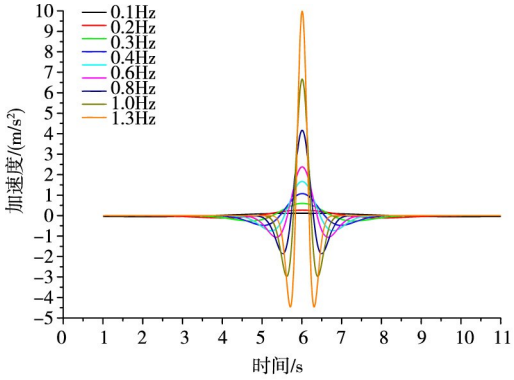

图5　低频段Ricker子波时程曲线

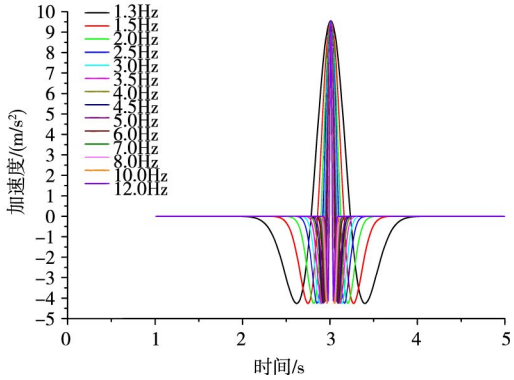

图6　高频段Ricker子波时程曲线

$$f'_1=\frac{3.516}{L^2}\sqrt{\frac{EI}{m_s+m_w}}=\frac{3.516}{L^2}\sqrt{\frac{EI}{\left(1+\frac{m_w}{m_s}\right)m_s}}=\frac{f_1}{\sqrt{\left(1+\frac{m_w}{m_s}\right)}} \tag{8}$$

式中：m_s为截面槽体质量密度；m_w为截面水体质量密度。

另外，可以根据水工建筑抗震设计规范中提供的U形渡槽水体等效弹簧刚度公式(式(9))，估算出水体的晃动频率$f_2=\omega_2/2\pi=0.31$ Hz。

$$\frac{R}{g}\omega_2^2=1.323+0.228\left[\tanh\left(1.505\frac{h}{lR}\right)\right]^{0.768}-0.105\left[\tanh\left(1.105\frac{h}{R}\right)\right]^{4.659} \tag{9}$$

3.2　Fluent流体非线性模型计算　下面通过改变横向激励的Ricker子波以及人工波的幅值，根据Fluent计算得到的水面高度变化极值和壁面动水压力极值，进行渡槽流体响应的非线性分析。在试算过程中发现，当Ricker子波以及人工波的幅值取1倍时，槽内水体已经晃出槽体之外，故认为继续增大幅值进行计算是无必要的，同时将晃出槽体的部分水体看作与槽内水体依旧存在相互作用的连续体，会使得计算偏于安全。

3.2.1　*Ricker子波激励水体响应*　设置3组不同的Ricker子波激励，幅值分别为1倍、0.75倍、0.5倍。图7、图8分别给出了低频段与高频段的水面高度变化极值曲线。从图中可以得到，当频率位于0.6～1.3 Hz之间时，1倍幅值的水面高度变化极值保持在74 cm，表明水体已经晃出槽体外，0.75倍和0.5倍激励的最大值均出现在0.5 Hz处，其大小分别为61.9和38.0 cm。3条曲线的变化规律基本一致，当频率小于0.5 Hz时，水面高度变化极值随频率增大而增大；当频率位于0.6～1.3 Hz之间时，水面高度变化极值相对保持稳定；当频率超过1.3 Hz后，水面高度变化极值急剧减小。

图9、图10分别给出了低频段与高频段的壁面动水压力极值曲线。由图中可以看出，3条曲线的变化规律一致，在低频段和高频段，壁面动水压力极值均随着频率增大而增大，当频率位于0.4～0.6 Hz之间时壁面动水压力极值增速放缓，当频率超过6 Hz之后壁面动水压力基本保持不变，3组激励的壁面动水压力极值最大值分别为22.926、17.208和11.483 kPa。

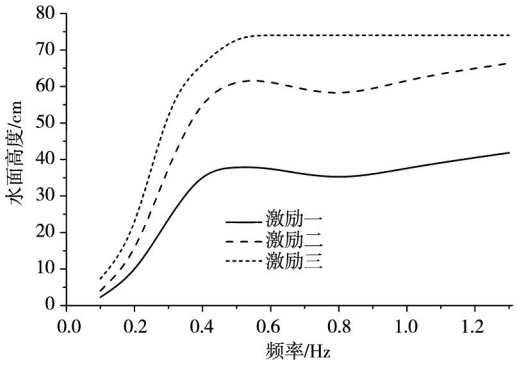

图7　Fluent低频段水面高度变化极值曲线

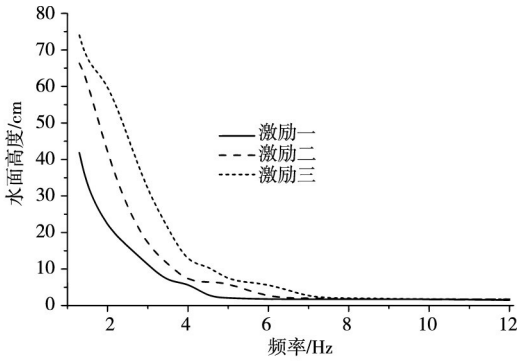

图8　Fluent高频段水面高度变化极值曲线

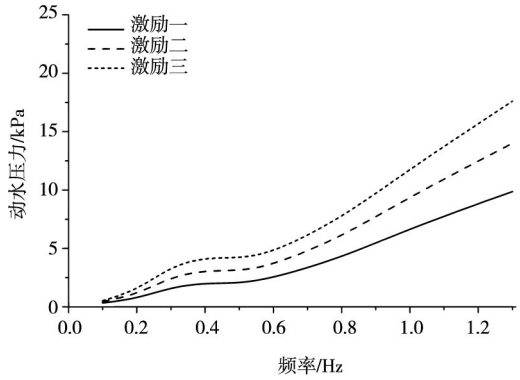

图9　Fluent低频段壁面动水压力极值曲线

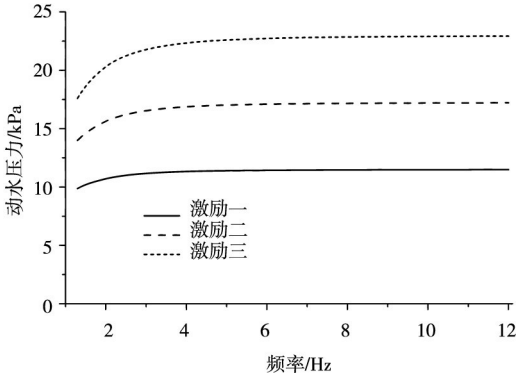

图10　Fluent高频段壁面动水压力极值曲线

根据计算结果可以得到，0.75倍激励的水面高度变化极值平均是0.5倍激励的1.66倍，表现出一定的非线性特征；低频段0.5和0.75倍子波激励下的壁面动水压力极值，平均是1倍子波激励下的0.575倍和0.800倍，表现出一定的非线性特征，即水体响应的增幅要低于激励幅值的增幅，高频段则分别为0.508倍和0.756倍，水体非线性可以忽略不计。

3.2.2　*人工波激励水体响应*　为了进一步验证渡槽内水体响应的非线性，按照1倍、0.75倍和0.5倍的幅值分别设置3组人工波激励。由于Fluent流体模型采用Euler描述，采用人工波激励时，输出的水面高度变化曲线连续性较差，故不予分析。

图11给出了1倍幅值人工波激励下壁面动水压力最大值出现位置(距槽底3.0 m)的动水压力值时程曲线。从图11可以看出，动水压力响应时程曲线除了反映人工波的一些特征外，还呈现出明显的周期性特征。对该动水压力时程曲线进行傅里叶谱分析，得到动水压力的傅里叶幅值谱如图12所示(仅给出低频段部分，高频段部分幅值均不超过400 kPa)，从图12可以得到，动水压力响应的卓越频率为0.39 Hz，与估算的水体晃动频率很接近。

3组人工波距槽底3.0 m位置的动水压力时程，其响应的卓越频率均为0.39 Hz，最大值分别为8.038、6.109和3.951 kPa，呈现出良好的线性关系。根据统计分析的结果，1倍与0.5倍、1倍与0.75倍动水压力时程曲线的线性相关系数，分别为0.995和0.951，说明人工波幅值的变化对动水压力响应过程无影响，水体在地震作用下的非线性可以忽略不计。

综合上述结果，在反映地震作用特点的Ricker子波的激励下，槽内水体响应的在低频段表现出一定的非线性，但非线性较弱，在高频段非线性则完全可以忽略；在人工波作用下，非线性也完全可以忽略。其主要原因是地震作用与单一往复作用(正弦激励等)相比，具有很强的随机性，而水体在单一往复作用下其晃动逐渐增强，非线性也随之逐渐增强的过程，在地震作用中很难得到体现。

3.3　ANSYS流固耦合模型计算　根据上述构造的不同频率的横向Ricker子波，经过计算和整理得到流固耦合模型的动力时程分析结果，本文分为以下3个部分进行分析。

3.3.1　*ANSYS刚性槽体模型与Fluent模型计算结果对比*　ANSYS流体单元计算过程中，可以通过设置一定的体系阻尼来保证计算的稳定性[11]。本文中根据结构阻尼比及计算频域范围，得到体系的阻

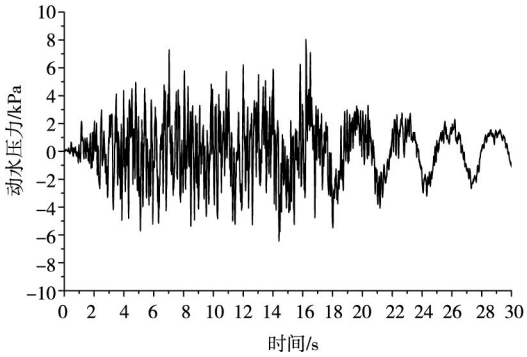

图11　Fluent人工波壁面动水压力时程曲线

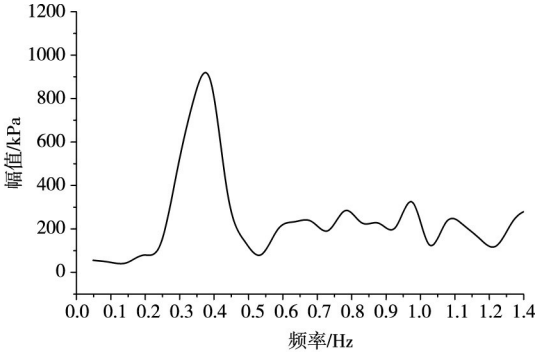

图12　Fluent动水压力傅里叶幅值谱低频段部分

尼系数 $\alpha=0.0352$ 、 $\beta=0.0069$ ，建立ANSYS刚性槽体液体阻尼模型。同时建立ANSYS刚性槽体无液体阻尼模型，即只给结构施加阻尼，而不给流体施加阻尼。对上述两种模型分别激励Ricker子波进行频域分析，并与Fluent中的结果进行比较。

图13、图14分别给出了3种模型在低频段和高频段的壁面动水压力极值曲线。从图中可以看出，在低频段3种模型的壁面动水压力极值曲线变化规律一致，其中两种ANSYS模型的计算结果较为接近，而Fluent模型的计算结果要低于ANSYS模型，当频率为0.6 Hz时相差最大，此时Fluent模型的壁面动水压力极值比ANSYS无液体阻尼模型低约37.5%；在高频段ANSYS无液体阻尼模型与Fluent模型的计算结果很接近，壁面动水压力极值随频率增大均趋于稳定，而ANSYS液体阻尼模型则不能反映这一规律，其壁面动水压力极值随频率增大逐渐减小，最后低于其他两种模型约19.3%。

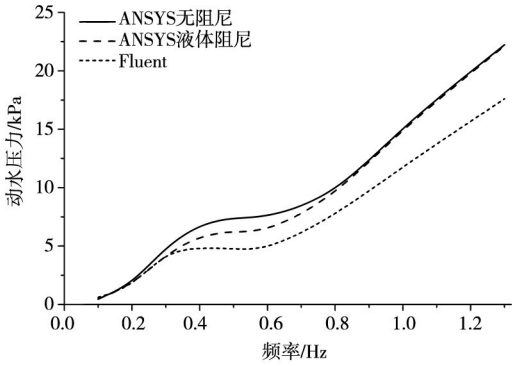

图13　低频段壁面动水压力极值曲线

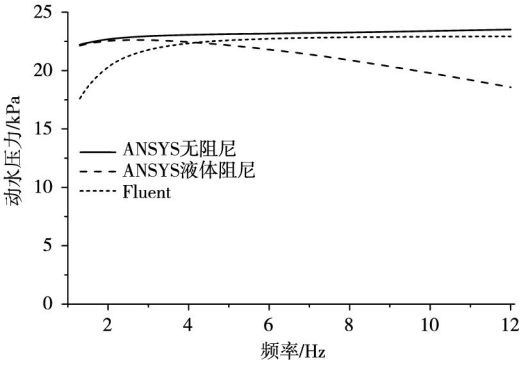

图14　高频段壁面动水压力极值曲线

该结果说明，对于本文中的ANSYS渡槽模型，由于水的压缩性和黏性均很小，液体阻尼的作用完全可以忽略，设置体系阻尼进行流固耦合计算的方法，不能充分反映流体运动的特点，而无液体阻尼模型能更好反映体系中的流固耦合相互作用，因此下文中计算使用的ANSYS模型均为无液体阻尼模型。

3.3.2　刚、柔性槽体模型水体响应对比　图15给出了低频段Ricker子波作用下的水面高度变化极值曲线。由图15可见，刚、柔性槽体模型在低频段的水面高度变化极值曲线基本吻合，其中柔性槽体模型的水面高度变化极值略高于刚性槽体模型，小于0.5 Hz时水面高度变化极值随频率增大迅速增大，0.5 Hz时达到最大值为75.6 cm，大于0.5 Hz后水面高度变化极值随频率增大缓慢减小。

图16给出了高频段Ricker子波作用下的壁面水面晃动高度变化极值曲线。由图16可见，刚、柔性槽体模型在高频段的水面高度变化极值曲线也基本吻合，水面高度变化极值随频率增大显著减小，其中柔性槽体模型的水面高度变化极值始终高于刚性槽体模型，二者在2.5 ~ 8.0 Hz之间差异最为明显。

图17给出了低频段Ricker子波作用下壁面动水压力极值曲线。由图17可见，低频段刚、柔性槽体模型的壁面动水压力极值曲线基本吻合，其中柔性槽体模型的壁面动水压力极值略高于刚性槽体模型，随着频率增大壁面动水压力极值也相应增大，1.3 Hz时的最大壁面动水压力极值为23.339

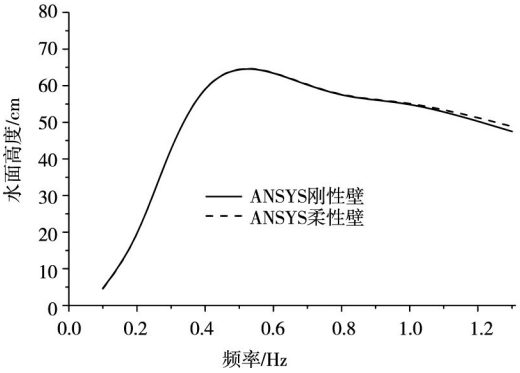

图15　ANSYS低频段水面高度变化极值曲线

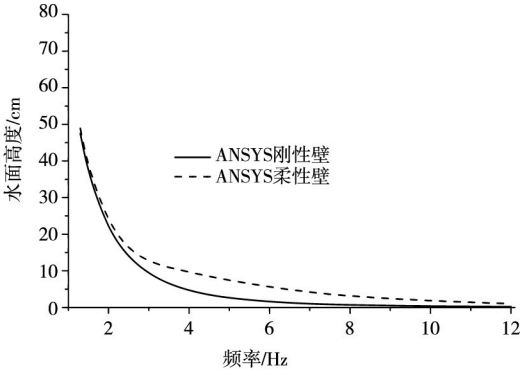

图16　ANSYS高频段水面高度变化极值曲线

kPa，当频率位于0.4～0.6 Hz之间时壁面动水压力极值增速放缓。

图18给出了高频段Ricker子波作用下壁面动水压力极值曲线。由图18可见，刚性槽体模型的壁面动水压力极值随频率增大缓慢减小，而柔性槽体模型的壁面动水压力极值随频率增大则呈现明显的先增大后减小趋势，其中柔性槽体模型的壁面动水压力极值最大值对应的卓越响应频率为3.5 Hz，大小为34.060 kPa，比3.5 Hz时刚性槽体的壁面动水压力极值高出约51%；当频率大于4.0Hz时，柔性槽体模型的壁面动水压力极值迅速减小，当频率大于7.0 Hz时，柔性槽体模型的壁面动水压力极值减小至刚性槽体模型之下，当频率大于8.0 Hz时，柔性槽体模型的壁面动水压力极值减小速度放缓，此时与刚性槽体模型的结果相比低约62%。

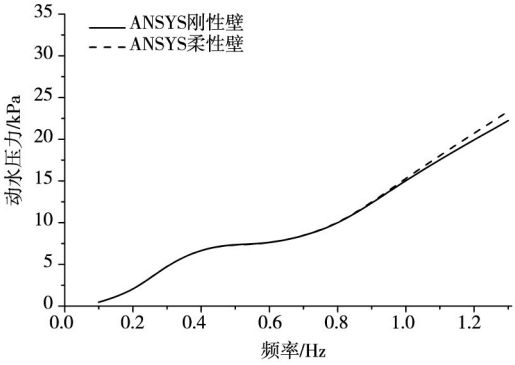

图17　ANSYS低频段壁面动水压力极值曲线

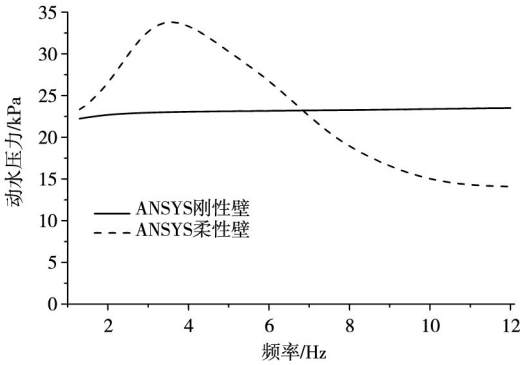

图18　ANSYS高频段壁面动水压力极值曲线

上述变化规律表明，在低频段渡槽的流固耦合动力作用主要受水体自身晃动频率的影响，由于刚、柔性槽体模型的水体晃动频率相同，因此两者在低频段的计算结果基本吻合。在高频段渡槽的流固耦合动力作用主要受到槽体自身振动频率的影响，因此当激励频率接近槽体自振频率时，柔性槽体模型的水面变化高度极值和壁面动水压力极值均高于刚性槽体模型，说明柔性槽体自身振动对水体晃动存在一定的激励作用，此时流固耦合动力作用十分显著；当频率超过槽体自振频率2倍即8.0 Hz后，柔性槽体模型的壁面动水压力极值将低于刚性槽体模型，说明此时流固耦合动力作用减弱。

3.3.3　*柔性槽体壁面动水压力沿深度分布规律*　本文在分析柔性槽体壁面动水压力沿深度分布规律时，采用的方法是当壁面出现壁面动水压力极值的时刻，沿高程每隔0.5 m提取一次壁面动水压力。

图19给出了柔性槽体模型在低频段的4个不同频率Ricker子波作用下壁面动水压力的分布情况。从图19可以看出，当频率小于0.6 Hz时，壁面处动水压力随距槽底高程增大而增大，此时壁面动水压力极值出现在水体表面的位置，当频率达到0.6 Hz后，水体表面的动水压力极值开始减小，在中间高程位置出现动水压力峰值区，当频率达到0.8 Hz时，壁面动水压力极值出现在中间峰值区。

图20给出了柔性槽体模型在高频段的壁面动水压力极值距槽底距离曲线。从图20可以看出，壁面动水压力极值距槽底距离随频率增大先增大后减小，当频率位于2.5～6.0 Hz时，壁面动水压力极

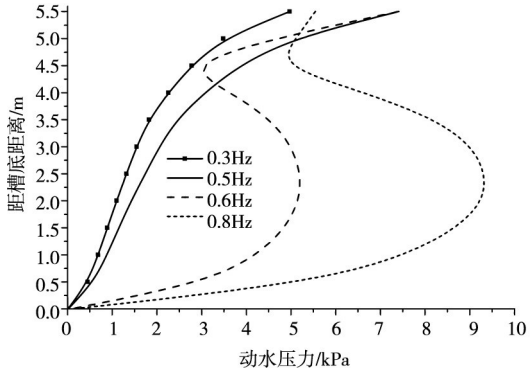

图19　频段不同频率下的壁面动水压力分布

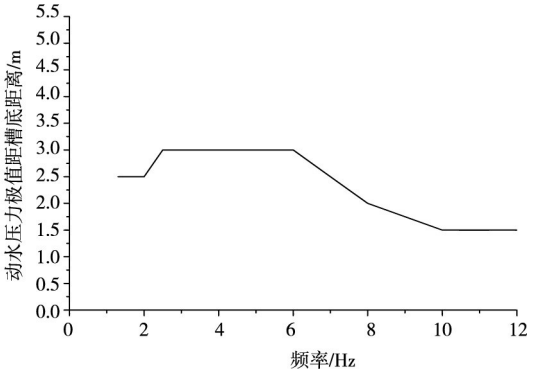

图20　高频段壁面动水压力极值距槽底距离曲线

值距槽底距离最大，为3.0 m，当频率大于10.0 Hz时，壁面动水压力极值所处距离为1.5 m。

根据得到的壁面动水压力分布规律，在低频段，当频率小于0.6 Hz即水体晃动频率的2倍时，动水压力沿高程逐渐增大，说明此时水体的运动方式以表面晃动为主，水体表面晃动对槽壁的拍击作用决定了动水压力的分布形式；当激励的频率超过水体晃动频率的2倍时，水体表面位置的动水压力减小，中间峰值区开始出现，说明此时水体的表面晃动迅速减弱，主要运动方式将逐渐转变成整体的惯性运动。高频段壁面动水压力极值所处位置的变化情况表明，当激励的频率接近槽体自振频率时，壁面动水压力极值所处位置将上升。

当激励频率接近槽体自振频率时，流固耦合动力作用增强，且壁面动水压力极值位置上升，不利于槽体抗倾覆稳定，因此在渡槽抗震设计过程中，应当关注接近槽体自振频率的频段；在低频段，虽然流固耦合动力响应通常较小，但是渡槽工程中采取的减隔震措施往往会使结构周期变长，而低频段由流体晃动导致的流固耦合作用较强，且壁面动水压力极值出现的位置接近水体表面，所以接近水体晃动频率的频段也应着重关注。水工建筑抗震设计规范中采用的Housner一阶水体模型，是在刚性槽体条件下根据流体晃动力学得到的简化模型，槽内水体作用的非线性虽然在地震作用下可以忽略，但是本文中ANSYS刚、柔性槽体模型的计算结果之间仍存在一定的差异，并且Housner模型也不能反映低频段动水压力的分布形式以及高频段壁面动水压力极值位置的变化，因此在渡槽抗震设计过程中，应以规范方法的计算结果为基础，在必要的情况下进一步开展渡槽强耦合模型的有限元计算，以确保结构安全。

4　结论

本文根据实际地震作用特点，通过最大位移和最大加速度方法构造了一组频域0.1 ~ 12 Hz的横槽向Ricker子波，建立了Fluent流体模型和刚、柔性槽体ANSYS流固耦合有限元模型，通过动力时程分析计算出结构的动力响应。根据模型计算结果及分析，可以得出以下结论：(1)根据Fluent流体模型的计算结果，由流体非线性引起的动水压力所占比例不超过6.7%，说明渡槽内的水体在地震作用下进行有限幅度的晃动时，渡槽内流体作用的非线性很小，可以忽略不计；(2)高频段子波激励下ANSYS无液体阻尼模型的计算结果与Fluent流体模型十分接近，而ANSYS液体阻尼模型的壁面动水压力极值比Fluent流体模型低19.3%，说明渡槽内水体的阻尼作用完全可以忽略；(3)从频域上分析，柔性槽体模型的水面高度变化极值为75.6 cm，对应的卓越响应频率为0.5 Hz，壁面动水压力极值为34.060 kPa，对应的卓越响应频率为3.5 Hz，说明渡槽流固耦合动力作用的强度主要受水体晃动频率和槽体自振频率控制，当子波激励的频率接近这两个频率时，流固耦合动力作用明显增强，表现为晃动加剧、动水压力增大；(4)在低频段由于水体晃动频率一致，因此刚性槽体和柔性槽体模型呈现的变化规律一致，而在高频段柔性槽体模型的壁面动水压力极值受槽体自振频率影响，其最大值比刚性槽体模型的计算结果高约51%，说明槽体刚度通过影响槽体自振频率来影响流固耦合动力作用；(5)壁面动水压力分布的形式主要受水体晃动频率控制，当激励的频率小于水体晃动频率的2倍时，流体的主要运动方式以表面晃动为主，壁面动水压力极值位置出现在表面附近，反之则以整体惯性运动为主，壁面动水压力极值位置出现在中间距离位置。高频段壁面动水压力极值出现的位置受槽体自振频率的影响，当激励的频率接近槽体自振频率时，壁面动水压力极值出现的位置向水体表面移动至距槽底3.0 m处。

参　考　文　献：

[1]　黄荐 . 大跨渡槽横向地震响应特性分析及工程应用[D] . 北京：北京工业大学，2015 .

[2]　刘云贺，胡宝柱，闫建文，等 . Housner模型在渡槽抗震计算中的适用性[J] . 水利学报，2002(9)：94 – 99 .

[3]　KOLAEI A，RAKHEJA S，RICHARD M J . Effects of tank cross-section on dynamic fluid slosh loads and roll sta-

bility of a partly-filled tank truck[J]. European Journal of Mechanics B/Fluids, 2014, 46 (7): 46-58.
[4] 吴轶, 莫海鸿, 杨春. 大型矩形渡槽-水耦合体系的动力性能分析[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24 (4): 778-782.
[5] JUNG J H, YOON H S, LEE C Y. Effect of natural frequency modes on sloshing phenomenon in a rectangular tank[J]. Int. J. Archit. Ocean Eng., 2015, 7(3): 580-594.
[6] HOUNSNER G W. Dynamic pressures on accelerated fluid containers[J]. Bulletin of the Seismological of America, 1957, 47 (1): 15-35.
[7] 中国水电水利规划设计总院. 水电工程水工建筑物抗震设计规范:NB35047-2015[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
[8] 何建涛, 刘云贺, 孙蓉莉. 附加质量模型在渡槽抗震计算中的适用性研究[J]. 西安理工大学学报, 2007, 23(1): 52 - 55.
[9] 李遇春, 楼梦麟, 周成. 大型渡槽的竖向地震效应分析[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(2): 102-107.
[10] OKAMOTO T, KAWAHARA M. Two-dimensional sloshing analysis by lagrangian finite element method[J]. Numerical Method of Fluids, 1990, 11 (5): 453-477.
[11] 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.
[12] NAKAYAMAF T, WASHIZUS K. The boundary element method applied to the analysis of two-dimensional nonlinear sloshing problems[J]. Numerical Method in Engineering, 1981, 17 (11): 1631-1646.
[13] 周骥, 张其林, 赵佳楠. ALE描述在流固耦合计算中的应用[C]//第五届全国现代结构工程学术研讨会论文. 广州, 2005.
[14] 王学. 基于ALE方法求解流固耦合问题[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2006.
[15] 刘岑凡, 杨智荣, 于哲敏, 等. 基于VOF法的球罐内液体晃荡数值模拟及载荷计算[J]. 中国特种设备安全, 2018, 34(4): 21 - 25.
[16] 田哲文, 谢鑫, 戚叶峰, 等. 基于VOF方法小型赛车燃油晃动数值仿真[J]. 汽车科技, 2016(6): 93 - 97.
[17] 关大玮, 程香菊. 基于VOF模型的溢流坝三维水流数值模拟[J]. 中国水运, 2015, 15(6): 51 - 55.
[18] 戴湘和, 陈玲玲, 吴杰芳. 南水北调中线跨黄河渡槽抗震计算研究[J]. 长江科学院院报, 2002, 19(3): 52 - 55.
[19] WANG Y H. Frequencies of the Ricker wavelet[J]. Geophysics, 2015, 80 (2): A31-A37.

Fluid-structure coupling effect of U-shaped aqueduct

ZHANG Nianyu, WANG Haibo

(*Earthquake Engineering Research Center, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100048, *China*)

Abstract: In order to study fluid-structure dynamic interaction of aqueducts under strong earthquakes, the VOF model is used to verify the nonlinearity of water response in aqueduct. A Lagrange finite element method formulated by displacement is used for fluid-structure coupling modeling of a U-shaped aqueduct. Time-history analysis of both rigid and flexible aqueduct wall is made by applying a group of Ricker waves designed with the characteristics of earthquake action. The results show that the intensity of fluid-structure coupling effect is decided by water sloshing and aqueduct wall frequencies, and the fluid-structure coupling effect becomes stronger when load frequency gets closer to them. Besides, motion mode of water changes from surface sloshing to global inertia movements when load frequency gets 2 times the water sloshing frequency and nonlinearity of fluid-structure coupling effect can be ignored under seismic influence. More attention should be paid to all these results in aqueduct seismic design.

Keywords: aqueduct; fluid-structure coupling; frequency; dynamic response; seismic-resistant

（责任编辑：王冰伟）