第42卷第5期
2025年10月

计 算 力 学 学 报
Chinese Journal of Computational Mechanics

Vol. 42, No. 5
October 2025

DOI:10.7511/jslx20240508001

溃坝流冲击特性的B样条物质点法模拟研究

华云军[1]， 周晓敏[1,2]， 徐云卿[1]， 孙 政[*1,2]

(1.江西理工大学 土木与测绘工程学院,赣州 341000;
2.江西理工大学 河流源头水生态保护江西省重点实验室,赣州 341000)

摘 要:准确模拟溃坝的冲击特性对溃坝流灾害预测和防治具有重要意义。B样条物质点法作为物质点法的一种改进算法,有效提高了计算精度和改进了收敛性。然而,B样条物质点法基于张量网格而非欧拉背景网格进行控制方程的求解;同时,其插值形函数具有更大的影响域;因此,在求解流固耦合等接触问题时存在过早接触、接触界面不易捕捉、接触力难以计算等问题。在同一B样条物质点张量网格空间内,基于同一结点的相对速度以及单位外法线实现接触界面的准确捕捉;采用格列维尔公式(Greville Abscissa),实现接触物体的精准接触,避免过早或虚假接触;通过拉格朗日乘子法,准确判定界面接触力,构建采用流固统一描述的流固强耦合高精度接触算法,开展溃坝流体冲击刚性和弹性障碍物模拟研究,并与已有试验结果或模拟结果进行对比。结果表明,模拟所得冲击荷载及结构变形演化规律与已有试验结果/模拟结果吻合较好;对刚性障碍物,随水位高度和溃坝坡度的增大,冲击压力峰值分别呈现下凹型抛物增长和正相关指数函数增长;对弹性障碍物,冲击压力峰值随探测点高度的增大呈负相关指数函数递减。验证了基于B样条物质点法接触算法模拟溃坝流冲击问题的可行性和有效性,为模拟溃坝流冲击问题提供一种新视角。

关键词:溃坝流;冲击特性;B样条物质点法;接触算法

中图分类号:O352 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-4708(2025)05-0772-08

1 引 言

大坝工程是一项对人类社会发展起到了重要保障作用的水利工程,但同时也存在着巨大安全隐患。受全球气候变化和人类活动的影响,水库大坝溃坝事件时有发生,不仅造成了人员伤亡和财产损失,也给周边地区的生存环境造成严重破坏。如海河流域63.8特大溃坝事件,河南驻马店75.8特大溃坝事件,以及1993年青海沟后水库溃坝事件[1],以上事故都给水库下游群众造成不可挽回的损失。因此,开展溃坝流体冲击特性模拟研究对溃坝流灾害防治及重建具有重要意义。

溃坝流是一个复杂的自由表面流动问题。目前,对于溃坝流问题的研究主要有理论研究[2,3]、物理试验[4,5]、数值模拟[6,7]三类方法,由于物理试验耗费大量的人力、物力、财力,模拟周期较长,缺点较为明显;随着科技发展,数值模拟更多地应用于溃坝流问题的研究,数值方法主要包括两类,一类是有网格法,如有限差分法(FDM)[8]、有限体积法(FVM)[9]、有限元法(FEM)[10]等方法,在模拟大变形问题时会出现网格畸变而引起误差;另一类是无网格法,如光滑粒子流体动力学(SPH)[11]、无网格伽辽金法(EFG)[12]和移动粒子半隐式法(MPS)[13]。

物质点法结合了拉格朗日粒子和欧拉背景网格双重描述,既具有拉格朗日粒子型无网格算法的优势,又避免网格畸变和求解非线性对流项;在传统物质点法中,当物质点穿越背景网格边界时,会产生网格穿越误差,引起数值振荡;B样条物质点法[14]将线性插值形函数用B样条基函数替换,有效消除了网格穿越误差,提高了计算精度和收敛性。廉艳平等[15]在B样条物质点法中引入接触算

收稿日期:2024-05-08; **修改稿收到日期**:2024-06-07.
基金项目:国家自然科学基金(12262013;11902127);江西省自然科学基金杰出青年基金(20232ACB211005);江西省主要学科学术和技术带头人培养计划(20225BCJ23022)资助项目.
作者简介:孙 政*(1986-),男,博士,硕士生导师,副教授(E-mail:sunzheng@jxust.edu.cn).

引用本文:华云军,周晓敏,徐云卿,等.溃坝流冲击特性的B样条物质点法模拟研究[J].计算力学学报,2025,**42**(5):772-779.
HUA Yunjun, ZHOU Xiaomin, XU Yunqing, et al. Study on the impact characteristics of dam-break flow based on the B-spline material point method[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2025, **42**(5):772-779.

法研究了冲击侵彻问题，验证了此法在求解复杂问题时的有效性。

本文基于B样条物质点法接触算法模拟溃坝流体冲击刚性/弹性障碍物动力全过程，分析冲击压力峰值随水位高度及坡度的演化规律，并与已有实验结果进行对比[16]；同时，研究弹性障碍物结构变形和溃坝流体压力的分布规律；旨在验证B样条物质点法接触算法在模拟溃坝流流体冲击特性的可行性和有效性，以期为研究溃坝流问题提供技术支撑。

2　计算方法

2.1　B样条物质点法

相较传统物质点法，B样条物质点法采用高阶B样条基函数实现背景网格节点和物质点之间的信息映射和节点内力的求解。B样条物质点法具体算法实现过程如下。

(1)划分参数网格、将研究对象离散成一组物质点。

(2)初始化物质点的位置、质量、动量等物质信息。

(3)采用B样条基函数，在第 k 个计算时间步，将物质点上的质量和动量信息映射到节点自由度空间的节点自由度上。

$$\boldsymbol{m}_{(i,j)}^{k}=\sum_{p}\boldsymbol{m}_{p}S_{(i,j),(q,p)}(\boldsymbol{x}_{p}^{k}) \tag{5}$$

$$\boldsymbol{v}_{(i,j)}^{k}=\frac{\sum_{p}m_{p}\boldsymbol{v}_{p}^{k}S_{(i,j),(q,p)}(\boldsymbol{x}_{p}^{k})}{m_{(i,j)}^{k}} \tag{6}$$

式中 上标 k 为计算时间步，下标 p 为物质点的变量，$\boldsymbol{x}_p$ 为物质点 $\boldsymbol{p}$ 的位置矢量，m 为质量，$\boldsymbol{v}$ 为速度矢量。

(4)计算节点自由度上的内力 $\boldsymbol{f}_{(i,j)}^{\mathrm{int}}$ 和外力 $\boldsymbol{f}_{(i,j)}^{\mathrm{ext}}$ 为

$$(\boldsymbol{f}_{(i,j)}^{\mathrm{int}})^{k}=-\sum_{p}\nabla S_{(i,j),(q,p)}(\boldsymbol{x}_{p}^{k})\cdot\boldsymbol{\sigma}_{p}^{k}V_{p}^{k} \tag{7}$$

$$(\boldsymbol{f}_{(i,j)}^{\mathrm{ext}})^{k}=\sum_{p}S_{(i,j),(q,p)}(\boldsymbol{x}_{p}^{k})m_{p}^{k}\boldsymbol{b}_{p}^{k}+\sum_{p}S_{(i,j),(q,p)}(\boldsymbol{x}_{p}^{k})V_{p}^{k}\bar{\boldsymbol{t}}_{p}^{k}h^{-1} \tag{8}$$

式中 $\nabla S_{(i,j),(q,p)}$ 为B样条插值基函数的梯度，$\boldsymbol{\sigma}$ 为柯西应力张量，b 和 t 分别为体力和表面力矢量，V 为体积，h 为面力边界厚度。

(5)计算节点自由度上的加速度和速度

$$\boldsymbol{a}_{(i,j)}^{k}=\frac{(\boldsymbol{f}_{(i,j)}^{\mathrm{int}})^{k}+(\boldsymbol{f}_{(i,j)}^{\mathrm{ext}})^{k}}{m_{(i,j)}^{k}} \tag{9}$$

$$\boldsymbol{v}_{(i,j)}^{k+1}=\boldsymbol{v}_{(i,j)}^{k}+\boldsymbol{a}_{(i,j)}^{k}\Delta t \tag{10}$$

式中 $\boldsymbol{a}$ 为加速度矢量。

(6)在节点自由度空间，施加本质边界条件。

(7)将各节点自由度的加速度和速度信息通过B样条基函数映射回各物质点，得到第 $k+1$ 个时间步上物质点的速度和位置。

$$\boldsymbol{v}_{p}^{k+1}=\boldsymbol{v}_{p}^{k}+\Delta t\sum_{i}S_{(i,j),(q,p)}(\boldsymbol{x}_{p}^{k})\boldsymbol{a}_{(i,j)}^{k} \tag{11}$$

$$\boldsymbol{x}_{p}^{k+1}=\boldsymbol{x}_{p}^{k}+\Delta t\sum_{i}S_{(i,j),(q,p)}(\boldsymbol{x}_{p}^{k})\boldsymbol{v}_{(i,j)}^{k} \tag{12}$$

(8)将更新后的各物质点速度重新映射回各节点自由度上，并计算物质点第 $k+1$ 个时间步上的应变增量 $\Delta\varepsilon$ 。

$$\bar{\boldsymbol{v}}_{(i,j)}^{k+1}=\frac{\sum_{p}m_{p}\boldsymbol{v}_{p}^{k+1}S_{(i,j),(q,p)}(\boldsymbol{x}_{p}^{k})}{m_{(i,j)}^{k}} \tag{13}$$

$$\Delta\boldsymbol{\varepsilon}_{p}=\frac{\Delta t}{2}\sum_{i}\{\bar{\boldsymbol{v}}_{(i,j)}^{k+1}\nabla S_{(i,j),(q,p)}(\boldsymbol{x}_{p}^{k})+[\bar{\boldsymbol{v}}_{(i,j)}^{k+1}\nabla S_{(i,j),(q,p)}(\boldsymbol{x}_{p}^{k})]^{\mathrm{T}}\} \tag{14}$$

(9)更新物质点的密度、应力应变、位置等信息，开始下一计算步。

2.2　接触算法

考虑两个接触的物体 r 和 s，如图1所示。其中 Ω^r 和 Ω^s 分别为体 r 和体 s 的当前构型，$\boldsymbol{n}^s$ 和 $\boldsymbol{n}^r$ 是向外的单位向量，Γ^r 和 Γ^s 是边界，且 Γ^c 是接触面，在接触面处，物体 r 和 s 向外的法向单位矢量相反，即 $\boldsymbol{n}^s=-\boldsymbol{n}^r$ 。

2.2.1　接触探测准则

如图1所示，接触的两个物体满足以下不可穿透性准则。

$$\Omega^r\cap\Omega^S=\varnothing \tag{15}$$

式(15)可改写为

$$v^r\cdot\boldsymbol{n}^r+v^s\cdot\boldsymbol{n}^s\leqslant 0 \tag{16}$$

即两个物体要么保持接触，要么彼此分离。由式(16)可知，当满足该准则时，两个物体在网格节点 I 处(如图1所示)接触并可能相互穿透。当满足式(17)时，表明两个物体有穿透的可能性。

$$\sum_{i=1}^{3}(v_{iI}^{r}-v_{iI}^{r})\boldsymbol{n}_{iI}^{r}>0 \tag{17}$$

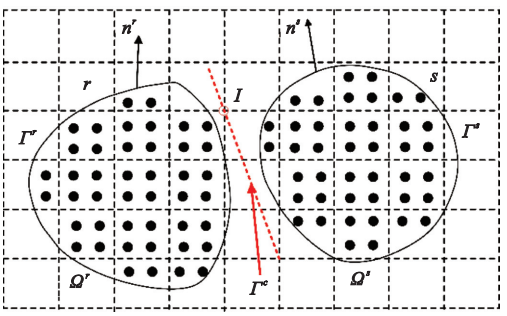

图1　两个物体的接触和离散化

Fig. 1　Discretization of the two bodies in contact

式中 $\boldsymbol{n}_{iI}^{r}$ 是物体 r 在节点 I 沿其边界的单位向外法向量。为保持接触过程中的动量守恒，$\boldsymbol{n}_{iI}^{r}$ 和 $\boldsymbol{n}_{iI}^{s}$ 必须满足共线条件。为此，首先计算物体 b 在节点 I 处的单位向外法向量 $\hat{\boldsymbol{n}}_{iI}^{r}$ 为

$$\hat{\boldsymbol{n}}_{iI}^{r}=\frac{\sum_{p=1}^{n_p^b} m_p^b N_{IP,i}}{\left|\sum_{p=1}^{n_p^b} m_p^b N_{iI,P}\right|} \tag{18}$$

两个物体的单位向外法向量可确定为两个法向量的平均值[17]，即

$$\boldsymbol{n}_{iI}^{r}=-\boldsymbol{n}_{iI}^{s}=\frac{\hat{\boldsymbol{n}}_{iI}^{r}-\hat{\boldsymbol{n}}_{iI}^{s}}{\left|\hat{\boldsymbol{n}}_{iI}^{r}-\hat{\boldsymbol{n}}_{iI}^{s}\right|} \tag{19}$$

如果物体 r 比物体 s 更硬，或者物体 r 和物体 s 的碰撞面分别为凸面和凹面，则可以确定两个物体的法向量为

$$\boldsymbol{n}_{iI}^{r}=-\boldsymbol{n}_{iI}^{s}=\hat{\boldsymbol{n}}_{iI}^{r} \tag{20}$$

在 BSMPM 架构中，式(17)给出的接触探测准则是探测接触的不可穿透性准则。仅采用式(17)可能导致接触过早发生，如图 2 所示。随着基函数增加后，这个问题变得更加明显。如以三次基函数 N_I^3 为例，其支持范围是参数单元 (d_c) 大小的四倍。在这种情况下，即使两个物体之间的实际距离(记为 D_I^{rs})等于 $4d_c$，即没有发生物理接触，也满足式(17)。需要注意的是，D_I^{rs} 为负值表明两个体之间有重叠和穿透。因此，接触发生的判据可以表示为

$$\begin{cases}(v_{iI}^{r}-v_{iI}^{s})\boldsymbol{n}_{iI}^{r}>0\\ D_I^{rs}\leqslant\lambda d_c\end{cases} \tag{21}$$

其中引入 λd_c 以考虑颗粒尺寸，当在初始参数网格单元的每个方向上放置两个物质点时，通常建议 λ 为 0.5。如图 3 所示，节点 I 处两个物体之间的距离 D_I^{rs} 为

$$D_I^{rs}=D_I^{r}+D_I^{s} \tag{22}$$

$$D_I^{b}=-\max_{p}(x_{Ip}^{b}\cdot n_I^{b}) \tag{23}$$

其中 D_I^b 为物体 b 与计算网格节点 I 之间的距离在物体 b 法向量上的投影。

$$x_{Ip}^{b}=x_p^{b}-x_I \tag{24}$$

其中 x_p^b 和 x_I 分别为粒子 p 和计算网格节点 I 的位置。

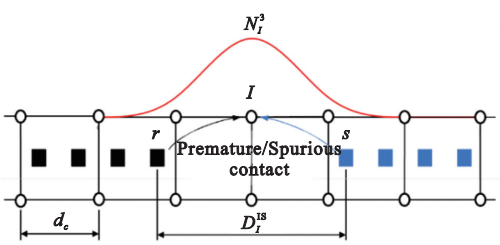

图 2 B样条物质点法插值形函数影响域

Fig. 2 Domain of influence of the interpolated shape function of the B-spline material point method

2.2.2 张量网格节点位置

B样条物质点法的接触探测是在张量网格空间进行的。然而，张量网格空间并非真实的物理网格划分，为准确判定是否接触，需要确定张量网格空间的真实空间位置。基于 Greville Abscissa 公式[18]确定张量网格空间中节点的空间位置 x_{iI}：

$$x_{iI}=\frac{1}{p}\sum_{J=1}^{p}\xi_{i,I+J} \tag{25}$$

其中下标 i 表示方向，$\xi_{i,I+J}$ 是第 $(I+J)$ 个结点的坐标分量，p 为 B 样条基函数阶次。

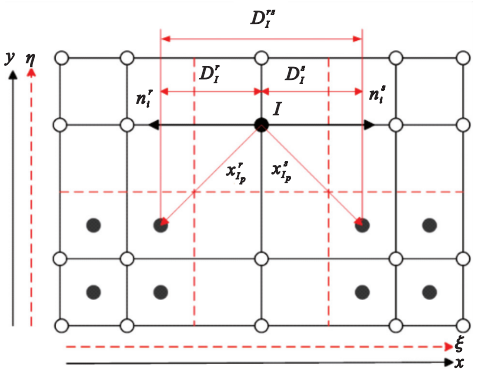

图 3 网格节点 I 处两物体实际距离计算示意图

Fig. 3 Schematic illustration of the calculation of actual distance between two bodies at grid node I

2.2.3 接触力的计算

根据牛顿第三定律，两个物体在接触节点处的接触力满足

$$f_{iI}^{r,ct}+f_{iI}^{s,ct}=0 \tag{26}$$

对于研究的问题，计算网格节点 I 处的法向接触力(记为 f_{iI}^{nor})不能为拉力，因此，其取值不大于 0。f_{iI}^{nor} 依赖于物体 b 的单位向外法线矢量，可表示为

$$f_{iI}^{nor}=f_{iI}^{b,ct}n_{iI}^{b},\ f_{iI}^{nor}\leqslant 0 \tag{27}$$

为了计算节点接触力 $f_{iI}^{b,ct,n}$，接触算法采用预估校正的方式实现。首先，在不考虑任何接触的情况下，对物体的节点动量方程进行独立积分，得到不考虑接触的试验解。如果没有满足式(21)的接触网格节点，则试验解成为最终的理论解。但是，如果存在接触节点，则这些特定网格节点处的接触力计算如下，计算网格节点 I 处物体 b 的试验动量由式(28)确定，节点的试验速度由式(29)确定。

$$\bar{p}_{iI}^{b,(n+1)/2}=p_{iI}^{b,(n-1)/2}+\Delta t^{n}f_{iI}^{b,n} \tag{28}$$

$$\bar{v}_{iI}^{b,(n+1)/2}=v_{iI}^{b,(n-1)/2}+\Delta t^{n}\frac{f_{iI}^{b,n}}{m_I^{b,n}} \tag{29}$$

然后，通过加入接触力 $f_{iI}^{b,ct,n}$ 对物体的试验解进行修正，确定为

$$p_{iI}^{b,(n+1)/2} = \bar{p}_{iI}^{b,(n+1)/2} + \Delta t^n f_{iI}^{b,ct,n} \tag{30}$$

$$v_{iI}^{b,(n+1)/2} = \bar{v}_{iI}^{b,(n+1)/2} + \Delta t^n \frac{f_{iI}^{b,ct,n}}{m_I^{b,n}} \tag{31}$$

在粘性接触情况下，节点速度必须符合连续性条件。

$$v_{iI}^{r,(n+1)/2} - v_{iI}^{s,(n+1)/2} = 0 \tag{32}$$

将式(31)代入式(32)，得到节点接触力为

$$f_{iI}^{r,ct,n} = -f_{iI}^{s,ct,n} = \frac{m_I^{r,n} m_I^{s,n}}{(m_I^{r,n} + m_I^{s,n})\Delta t^n}(\bar{v}_{iI}^{s,(n+1)/2} - \bar{v}_{iI}^{r,(n+1)/2}) \tag{33}$$

法向接触力和切向接触力可表示为

$$\begin{aligned} f_{iI}^{b,\mathrm{nor},n} &= f_{jI}^{b,ct,n} n_{jI}^{b,n} n_{iI}^{b,n} \\ f_{iI}^{b,\tan,n} &= f_{iI}^{b,ct,n} - f_{iI}^{b,\mathrm{nor},n} \end{aligned} \tag{34}$$

在滑移接触的情况下，接触面的摩擦用库仑摩擦模型来描述。根据这个模型，如果由式(34)得到的切向接触力 $\| f_{iI}^{b,\tan,n} \|$ 超过最大静摩擦力 $\mu \| f_{iI}^{b,\tan,n} \|$，会受到最大静摩擦力的约束。最后节点接触力表示为

$$f_{iI}^{b,\mathrm{ct},n} = f_{iI}^{b,\mathrm{nor},n} = \mu \| f_{iI}^{b,\mathrm{nor},n} \| \frac{f_{iI}^{b,\tan,n}}{\| f_{iI}^{b,\tan,n} \|} \tag{35}$$

式中 μ 为库仑摩擦系数。

3　溃坝流冲击刚性障碍物问题

首先开展溃坝流冲击刚性障碍物模拟研究，计算模型如图4所示，其中水箱模型的长度 L 为1610 mm，高度 D 为600 mm；H 为溃坝流模型初始水位高度；在刚性障碍物上分别取高度 h_1 =30 mm和 h_2 =80 mm两个标记点；背景网格尺寸 h =2 mm，初始溃坝坡度 θ=0°；整个溃坝模型受重力 g =−9.81 m/s^2 作用，水的密度 ρ=1000 kg/m^3，模拟过程中将左右边界、底边界以及障碍物边界均视为对称边界条件。冲击压力 P 可由式(36)计算得到；同时，将时间 t 进行无量纲化为 T^*，冲击压力 P 无量纲化为 P^*。

$$P = 5v^{0.8}(gh)^{0.6}\rho \tag{36}$$

$$T^* = t\sqrt{g/H} \tag{37}$$

$$P* = P/\rho g h \tag{38}$$

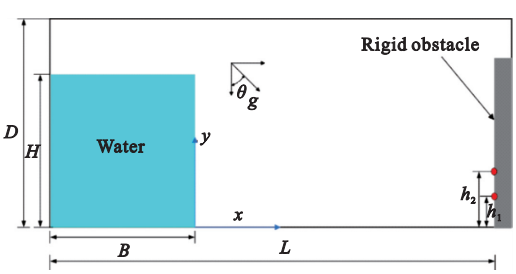

图4　初始模型及边界条件

Fig. 4　Initial model and boundary conditions

图5给出了水位高度 H =300 mm时，在不同时刻下溃坝水体自由表面及水体压力分布云图。可以看出，在 T^* =1时刻，溃坝流体开始坍塌，各分界面水体压力分布均匀，属于静水压力，在自由表面处出现两个不连续的液面；在 T^* =2时，自由表面也出现了两个不连续的液面，水体前端冲击角度变小，并且前端运动较快，后端运动较慢，水体压力分布均匀；在 T^* =3时，水体达到障碍物瞬间，水体压力集中在冲击点，自由表面不连续液面消失，整个液面分布较为光滑；在 T^* =4～6时，压力分布不均，冲击到障碍物的水体经过向上飞溅、翻转、下落等过程。

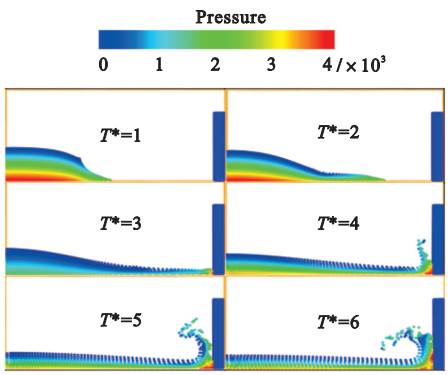

图5　水位高度 H =300mm水平冲击时，冲击压力形态演化云图

Fig. 5　Cloud diagram of impact pressure pattern evolution for horizontal impact at water level height H =300 mm

图6和图7分别比较了初始水位 H =300 mm和 H =600 mm时，标记点 h_1 =30 mm和 h_2 =80 mm处模拟和试验所得冲击压力的演化规律。可以看出，模拟结果与实验结果吻合较好；在四种不同工况下，当水流冲击到障碍物时，冲击力瞬间增至峰值，后以不完全相同的形式开始下降；从曲线走势上来看，图6(a)和图7整体趋势基本一致，在水流达到障碍物后，冲击力以开口向上的抛物线形式开始减弱；而图6(b)在达到峰值后，冲击力并未一直衰减，而是呈现出一小段锯齿状的运

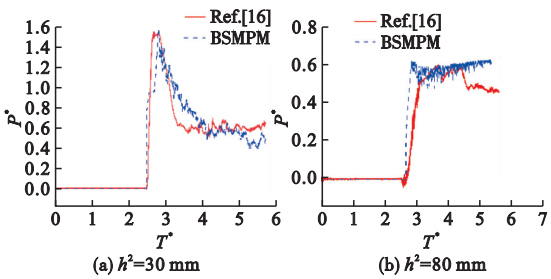

图6　水位高度 H =300 mm水平冲击下，模拟所得不同高程处 P^* 随 T^* 变化时程曲线与实验结果对比

Fig. 6　Comparison of simulated different elevation P^* versus T^* time coursecurves with experimental results for horizontal impact at water level H =300 mm.

动轨迹，说明该标记点来回受到流体的冲击，符合溃坝流冲击障碍物的冲击特性。

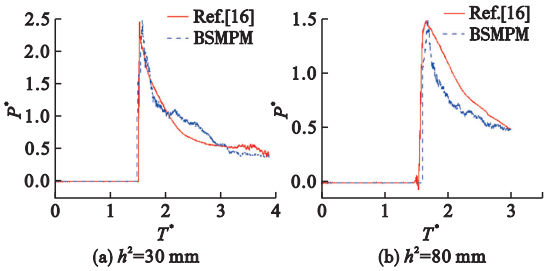

图 7 水位高度 H=600 mm 水平冲击下，模拟所得不同高程处 P^* 随 T^* 变化时程曲线与实验结果对比

Fig. 7 Comparison of simulated different elevation P^* versus T^* time course curves with experimental results for horizontal impact at water level H=600 mm.

进一步分别研究初始水位高度 H 和溃坝坡度 θ 对冲击压力的影响规律，分别如图 8 和图 9 所示。图 8 在水平冲击下，随水位高度增大，无量纲化冲击压力峰值增大，无量纲冲击压力峰值与水位高度满足下凹型抛物线增长规律；在水位高度 300～600 mm、600～900 mm、900～1200 mm 三个阶段，无量纲化冲击压力峰值增长幅度基本一致。

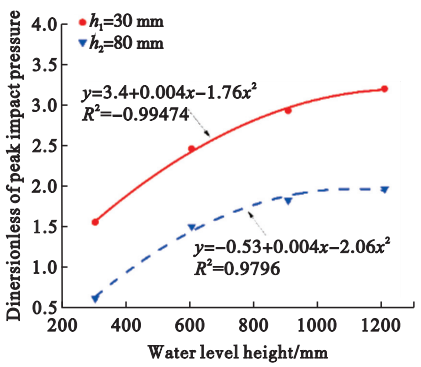

图 8 坡度为 0°时，随水位高度变化，无量纲化冲击压力峰值的拟合图

Fig. 8 Fitted plot of peak dimensionless impact pressure with water level height for a slope of 0°

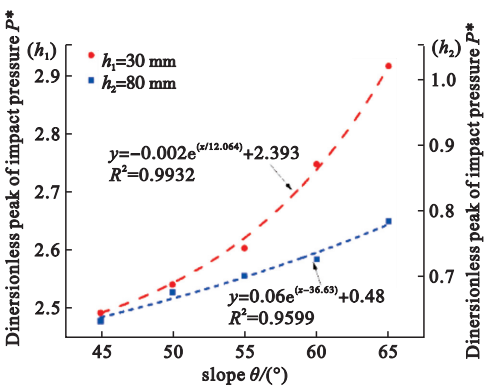

图 9 初始水位高度为 300 mm 时，随坡度变化，无量纲化冲击压力峰值的拟合图

Fig. 9 Fitted plot of the peak dimensionless impact pressure with change in slope for an initial water level height of 300 mm

图 9 在水位高度为 300 mm 时，无量纲化冲击压力峰值随溃坝坡度变化呈正相关指数函数增长规律。

4 溃坝流冲击弹性障碍物问题

基于 B 样条物质点法接触算法继续对溃坝流冲击弹性障碍物进行数值模拟，溃坝模型初始状态如图 10 所示。数值模型由两部分组成，分别是溃坝流模型和弹性障碍物模型，溃坝流模型的初始高度 H=292 mm，宽度为 L=146 mm；弹性障碍物初始模型高度 h_0=80 mm，宽度是 b_0=12 mm，压力探测标记点 h_1=20 mm，h_2=40 mm，h_3=60 mm；整个溃坝模型受重力 g=−9.8 m/s^2 作用，具体模型参数列入表 1。

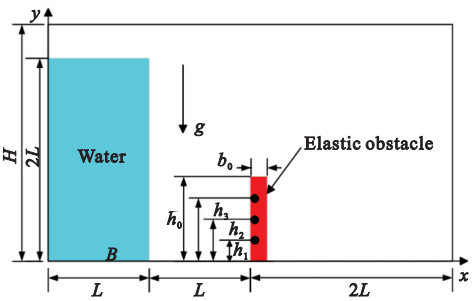

图 10 模型的几何尺寸及边界条件

Fig. 10 Model geometry and boundary conditions

表 1 模型参数及对应值

Table. 1 Model parameters and value

Parameters	Values	Parameters	Values
H	584 mm	h	2 mm×2 mm
L	146 mm	nppc	2×2
h_0	80 mm	E_1	1 MPa
b_0	12 mm	ρ_1	1000 kg·m^{-3}
g	9.81 m·s^{-2}	υ	0.0
μ	0.001 pa·s	E_2	1.4 MPa
Time step	10 μs	ρ_2	2500 kg·m^{-3}
CPU time	0.517 s	T	0.5s

注：CPU time 是每一时间步 CPU 计算时间；T 为总时间；h 为背景网格尺寸；nppc 为每个背景网格内有布置的物质点数目；E_1 为溃坝流模型杨氏模量；υ 为弹性障碍物的泊松比；E_2 为弹性障碍物杨氏模量。

在 h=1 mm，h=2 mm，h=4 mm 背景网格尺寸下，研究溃坝流流体冲击障碍物左上端 X 方向的前缘位置变化，获得在不同背景网格尺寸下弹性障碍物左上端 X 方向的前缘位置的动态演化规律。如图 11 所示，在大于 0 s 小于 0.15 s 时，溃坝流体未能触碰到障碍物，弹性障碍物未变形；在 0.15 s 左右，坍塌流体在冲击到弹性障碍物的瞬间

都存在小幅度的回弹趋势；在大于 0.2 s 小于 0.25 s时，溃坝流冲击弹性障碍物左上端前缘位置达到峰值，并且随背景网格尺寸的增大，峰值也随之增大。

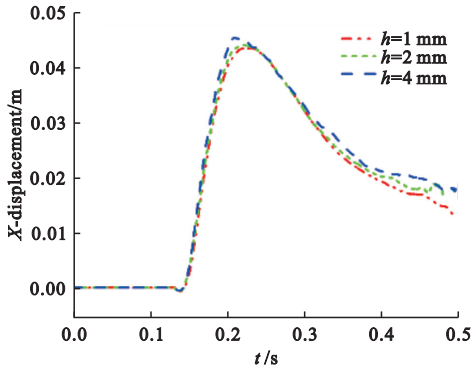

图 11　背景网格尺寸 h 为 1 mm、2 mm、4 mm 时弹性障碍物上端 X 方向前缘位置演化

Fig. 11　Evolution of the position of the leading edge in the X-direction at the upper end of the elastic obstacle for back、ground mesh sizes h of 1 mm，2 mm，and 4 mm

基于上述研究，基于B样条物质点法接触算法模拟溃坝流冲击弹性障碍物，在背景网格尺寸 $h=2$ mm 时，将模拟结果与文献[19-21]采用不同有限元方法模拟结果进行比较，从图 12 可知，整个过程可包括以下三个阶段，第一阶段大于 0 s 小于 0.15 s 时，溃坝开始坍塌，但水锋未与弹性障碍物接触；第二阶段是在大于 0.15 s 小于 0.25 s 时，此时塌陷的溃坝流体接触到弹性障碍物，弹性障碍物一直沿着水流运动方向变形，直到 $t=0.25$ s 左右，此时弹性障碍物的挠度达到最大值；第三阶段在大于 0.25 s 到小于 0.5 s 时，此阶段溃坝流体坍塌接近结束，弹性障碍物的变形逐渐恢复，水流继续向右侧壁面前进。综上所述，基于B样条物质点法接触算法分析在弹性障碍物左上端 X 方向前缘位置随时间变化与文献[19]模拟结果基本吻合。证明了B样条物质点法接触算法在模拟流固耦合问题中的可行性和准确性。

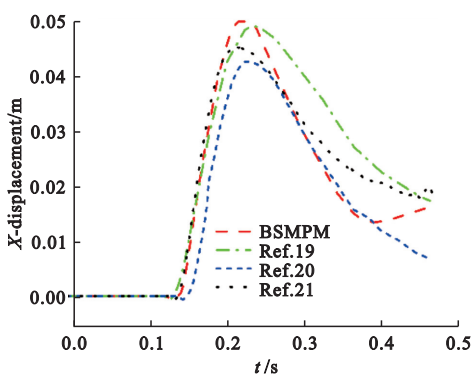

图 12　在网格尺寸 $h=2$ mm 时，不同数值方法模拟结果对比

Fig. 12　Comparison of results of different numerical simulation methods at grid size $h=2$ mm

图 13 是在背景网格尺寸 $h=2$ mm 时，左侧压力云图是 Idelsohn 等[19]采用其他数值方法模拟得到的压力云图与右侧基于B样条物质点法接触算法所得在不同时刻形态演化的对比。从图 13 可以看出，两者在不同时刻的压力轮廓基本一致，开始时刻压力分布均匀，在撞击到障碍物时液体冲击角度由向右变为向右上，少部分液体开始飞溅，最后当液体撞击到水箱边界后，液体回弹，一部分液体向上扩散，另一部分液体向下扩散，落地后回弹撞击弹性障碍物。表明基于B样条物质点法接触算法能够很好地分析溃坝流冲击弹性障碍物等问题。

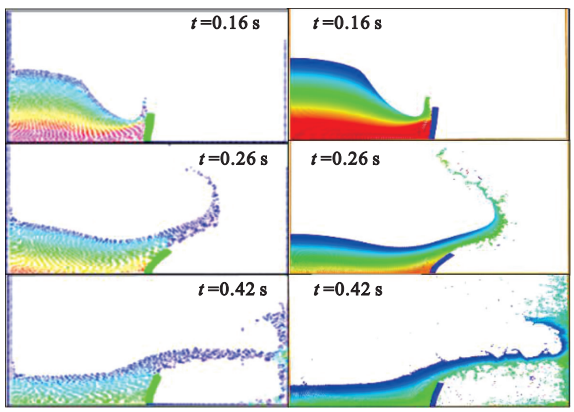

图 13　背景网格尺寸 $h=2$ mm 时不同时刻压力演化云图

Fig. 13　Pressure pattern at different moments for background grid size $h=2$ mm

图 14 模拟在 $h=2$ mm 的背景网格尺寸下，溃坝流冲击弹性障碍物不同标记点的压力变化，随着探测点高度增大，冲击压力峰值呈减弱趋势；在溃坝流冲击标记点 h_1 位置时，溃坝流冲击到障碍物的一瞬间，冲击压力迅速达到峰值，之后呈抛物线形下降趋势；而在冲击标记点 h_2、h_3 位置

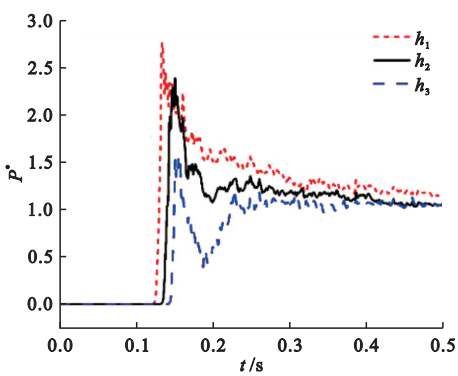

图 14　水平冲击下，模拟在 20 mm、40 mm、60 mm 冲击高程处 P^* 随 t 变化时程曲线的对比

Fig. 14　Comparison of simulated time course curves of P^* versus t at 20 mm，40 mm and 60 mm impact heights under horizontal impacts

时，在达到冲击压力峰值后，下降过程存在一个波谷段，而溃坝流冲击刚性障碍物时不存在波谷段。

图 15 是无量纲化冲击压力峰值随探测高度变化的拟合曲线，从阶段分析可知，在探测高度 20 mm到 40 mm 阶段，冲击压力递减较为缓慢，在 40 mm 到 60 mm 阶段，冲击压力衰减趋势更为明显；总体上看，随探测高度的增大，无量纲化冲击压力峰值减小，二者呈负相关指数函数递减规律。

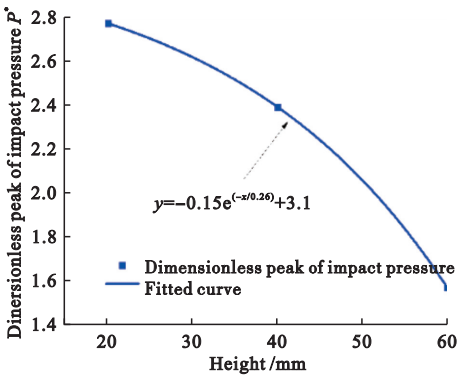

图 15 无量纲化冲击压力峰值 P^* 随冲击高度变化的拟合曲线图

Fig. 15 Fitting curve of dimensionless peak impact pressure P^* with impact height variation

5 结 论

本文基于 B 样条物质点法，采用格列维尔公式实现接触物体的精准接触，并通过拉格朗日乘子法准确判定界面接触力，模拟溃坝流冲击刚性障碍物和弹性障碍物，分析溃坝流冲击特性，得出以下结论。

(1)基于 B 样条物质点法接触算法分别对溃坝流冲击刚性障碍物和弹性障碍物进行模拟，模拟所得冲击荷载演化规律及结构变形与已有试验结果/模拟结果吻合较好。

(2)当溃坝流冲击刚性障碍物时，在水平冲击下，随初始水位高度的增大，无量纲化冲击压力峰值增大，无量纲化冲击压力峰值与水位高度变化满足下凹型抛物线增长规律；在水位高度一定时，随溃坝坡度的增大，无量纲化冲击压力峰值增大，两者满足正相关指数函数增长规律。

(3)当溃坝流冲击弹性障碍物时，在水平冲击下，弹性障碍物自由端前缘位置变化与其他数值方法模拟结果吻合较好；随着压力探测高度的增大，无量纲化冲击压力峰值减小，无量纲化冲击压力峰值与探测高度的变化呈负相关指数函数递减规律。

参考文献(References)：

[1] 盛金保，李宏恩，盛韬桢. 我国水库溃坝及其生命损失统计分析[J]. 水利水运工程学报，2023(1)：1-15. (SHENG Jinbao，LI Hongen，SHENG Taozhen. Statistical analysis of dam failure and its loss of life in China[J]. *Hydro-Science and Engineering*，2023(1)：1-15. (in Chinese))

[2] 方崇惠，方 堃. 瞬时溃坝最大流量计算新通式推导及验证[J]. 水科学进展，2012，23(5)：721-727. (FANG Chonghui，FANG Kun. Derivation and verification of a new generalized formula set for calculating maximum instantaneous dam breach discharge[J]. *Advances in Water Science*，2012，**23**(5)：721-727. (in Chinese))

[3] 张 雄，刘 岩，张 帆，等. 极端变形问题的物质点法研究进展[J]. 计算力学学报，2017，34(1)：1-16. (ZHANG Xiong，LIU Yan，ZHANG Fan，et al. Recent progress of material point method for extreme deformation problems[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*，2017，**34**(1)：1-16. (in Chinese))

[4] Kim H J，Kim J M，Kim J H，et al. Experimental study on flow kinematics and pressure characteristics of dam break flow[J]. *Ocean Engineering*，2024，**299**：117170.

[5] Garoosi F，Nicole Mellado-Cusicahua A，Shademani M，et al. Experimental and numerical investigations of dam break flow over dry and wet beds[J]. *International Journal of Mechanical Sciences*，2022，**215**：106946.

[6] Zhou X M，Sun Z. Numerical investigation of non-Newtonian power law flows using B-spline material point method[J]. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*，2021，**298**：104678.

[7] 张 雄，张 帆. 流固耦合不可压物质点法及其在晃动问题中的应用[J]. 计算力学学报，2016，**33**(4)：582-587. (ZHANG Xiong，ZHANG Fan. Fluid structure interaction incompressible material point method and its applications in sloshing problem[J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*，2016，**33**(4)：582-587. (in Chinese))

[8] Celis M A C，Wanderley J B V，Neves M A S. Numerical simulation of dam breaking and the influence of sloshing on the transfer of water between compartments[J]. *Ocean Engineering*，2017，**146**：125-139.

[9] Zheng X C，Seaid M，Pisanò F，et al. A material point/finite volume method for coupled shallow water flows and large dynamic deformations in seabeds[J]. *Computers and Geotechnics*，2023，**162**：105673.

[10] Zhang G Y，Zha R S，Wan D C. MPS-FEM coupled method for 3D dam-break flows with elastic gate structures[J]. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*，2022，**94**：171-189.

[11] 王 璐，徐 绯，杨 扬. 完全拉格朗日 SPH 在冲击问题中的改进和应用[J]. 力学学报，2022，**54**(12)：3297-3309. (WANG Lu，XU Fei，YANG Yang. Improvement of the total Lagrangian sph and its applica-

tion in impact problems[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, **54**(12): 3297-3309. (in Chinese))

[12] Wang X D, Ouyang J, Yang B X, et al. Simulating free surface flow problems using hybrid particle element free Galerkin method[J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 2012, **36**(3): 372-384.

[13] Geng C, Wang W H, Zhou Z Q. Application of an improved MPS method in simulation of dam break[J]. *Ocean Engineering*, 2023, **287**: 115779.

[14] Gan Y, Sun Z, Chen Z, et al. Enhancement of the material point method using B-spline basis functions[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2018, **113**(3): 411-431.

[15] Li L H, Lian Y P, Li M J, et al. A contact method for B-spline material point method with application in impact and penetration problems[J]. *Computational Mechanics*, 2024, **73**(6): 1351-1369.

[16] Lobovsk L, BotiaVera E, Castellana F, et al. Experimental investigation of dynamic pressure loads during dam break[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2014, **48**: 407-434.

[17] Huang P, Zhang X, Ma S, et al. Contact algorithms for the material point method in impact and penetration simulation[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2011, **85**(4): 498-517.

[18] Anderson C. Curves and surfaces in computer aided geometric design[J]. *Technometrics*, 1990, **32**(2): 229-230.

[19] Idelsohn S R, Marti J, Limache A, et al. Unified Lagrangian formulation for elastic solids and incompressible fluids: Application to fluid-structure interaction problems via the PFEM[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2008, **197**(19-20): 1762-1776.

[20] Lian Y P, Zhang X P, Liu Y P. Coupling between finite element method and material point method for problems with extreme deformation[J]. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2012, **2**(2): 021003.

[21] Walhorn E, Kölke A, Hübner B, et al. Fluid-structure coupling within a monolithic model involving free surface flows[J]. *Computers & Structures*, 2005, **83**(25-26): 2100-2111.

Study on the impact characteristics of dam-break flow based on the B-spline material point method

HUA Yunjun[1], ZHOU Xiaomin[1,2], XU Yunqing[1], SUN Zheng[*1,2]

(1. School of Civil and Surveying Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;
2. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Water Ecological Conservation at Headwater Regions, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

Abstract: Accurately simulating the impact characteristics of a dam break is of paramount significance for the prediction and mitigation of dam-break flow disasters. The B-spline material point method (BSMPM), as an improved algorithm of the material point method (MPM), effectively enhances computational accuracy and improves convergence. However, the BSMPM solves the governing equations based on a tensor grid rather than an Eulerian background grid. Moreover, its interpolation shape functions have a larger influence domain. Consequently, when solving problems involving fluid-structure coupling and contact, issues such as premature contact, difficulty in capturing contact interfaces, and challenges in calculating contact forces arise. Within the same tensor grid space of the BSMPM, accurate capture of contact interfaces is achieved based on the relative velocities and unit outward normals of the same nodes; employing the Greville Abscissa enables precise contact of contacting objects, thereby avoiding premature or spurious contact; through the Lagrange multiplier method, interface contact forces are accurately determined, thus constructing a high-precision contact algorithm for fluid-structure strongly coupled problems, facilitating research on the simulation of dam-break fluid impact with rigid and elastic obstacles, and enabling a comparison with existing experimental or simulated results. The results demonstrate that the simulated impact loads and structural deformation evolution patterns correspond well with existing experimental/simulated results. For rigid obstacles, the peak impact pressure exhibits concave parabolic growth and positive correlation exponential function growth with increasing water level and dam-break slope, respectively. For elastic obstacles, the peak impact pressure decreases exponentially with the increase in the height of the probing point. The feasibility and effectiveness of simulating dam-break flow impact problems using the BSMPM contact algorithm are validated, providing a new perspective for simulating dam-break flow impact problems.

Key words: Dam-break flow; impact pressure characterization; B-spline material point method; contact algorithm