

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.201700981

山区变比降河道卵砾石溯源淤积的数值模拟

雷 明,余海逖,许泽星,王协康*

(四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室,四川 成都 610065)

摘 要:山区河床组成多为宽级配卵砾石颗粒、沿程河床比降陡缓相接,受泥沙补给及水流过程影响,不同河段冲淤变化复杂多变,溯源淤积引发山洪现象频繁发生。为探究泥沙补给条件的变化对于山区河流河床冲淤变形以及水位变化的影响,作者以变坡陡比降河道为研究对象,通过计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)与离散元(discrete element method, DEM)耦合的方法对不同来水来沙条件下典型山区河道中卵砾石的溯源淤积过程进行了数值模拟,并将计算结果与室内水槽试验结果进行了比对。计算结果表明:强输沙水流由陡比降河道进入缓比降河道后,泥沙一旦在下游发生淤积,便会迅速向上游传播,进而导致河床大范围淤积抬高。溯源淤积的起始位置,发展速度以及淤积床面的厚度与上游泥沙补给强度、水流速度、颗粒粒径等因素有关,来流流量越小、泥沙补给强度越大,溯源淤积的起始位置越靠近河道上游,淤积发展速度越快,淤积床面厚度越小。泥沙淤积会导致淤积段沿程水位显著升高,在淤积锋面处,水位变动最为剧烈,水位增加明显,随着溯源淤积的继续发展,该位置处的水位会稍加回落并且趋于稳定。由此可见,山区河流泥沙补给条件的改变对于河床变形以及水沙灾害具有重大的影响,为揭示山洪泥沙灾害的致灾机理提供了理论基础。

关键词:山区性河道;泥沙补给;泥沙淤积;河床变形;CFD-DEM耦合模型

中图分类号:TV142

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2019)01-0045-07

Numerical Simulation of Retrogressive Pebble Deposition in the Changing Slope Zone of a Mountainous River

LEI Ming, YU Haiti, XU Zexing, WANG Xiekang*

(State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

Abstract: Most of the riverbeds in the mountainous area are composed of pebble sediment with a wide size distribution, and the riverbed slope changes obviously. Affected by sediment supply and water flow, the erosion and deposition processes in different river reach are complex and changeable, and the retrogressive deposition and flash flood occurs frequently. In order to analyze the influence of sediment supply on the riverbed deformation and water level change in mountainous rivers, the process of retrogressive deposition of gravels in a typical mountainous river is simulated based on the CFD-DEM coupling method, and the calculated results are compared with the flume test data. The calculation results show that once sediment is deposited in the downstream due to the slope of river bed becoming gentle, it will rapidly spread to the upstream, which will lead to a wide range of river bed rise. Besides, the initial position of deposition, the rate of deposition and the thickness of deposition are related to the concentration of sediment, the velocity of water flow and the particle size. The decrease of the flow rate and the increase of the intensity of sediment supply will result in a faster rate of the retrogressive deposition and the thinner thickness of river bed. Furthermore, the sediment deposition in the mountainous river may lead to a significant rise in the water level along the channel. In the front of the deposition, the water level increases most sharply. As the development of the retrogressive deposition, the water level at this position will fall slightly and tend to be stable. The results demonstrate that sediment supply conditions play important roles in the deformation of riverbeds and the occurrence of flow-sediment disasters in mountainous rivers. This provides a theoretical basis for revealing the mechanism of the disasters caused by flood and sediment.

Key words: mountainous river; sediment supply; sediment deposition; channel deformation; CFD-DEM coupling

收稿日期:2017-11-22

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC1502504);国家自然科学基金资助项目(51639007; 51579163)

作者简介:雷 明(1989—),男,博士生.研究方向:水力学及河流动力学. E-mail: 350214993@qq.com

* 通信联系人 E-mail: wangxiekang@scu.edu.cn

网络出版时间:2018-12-24 08:57:00

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20181220.1807.004.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

近年来,中国西南地区地震频繁发生,受地震及其次生灾害的影响,流域地表以及局部沟床附近大量的松散坡体常常会以滑坡、崩塌等形式进入河道,导致河流的泥沙补给条件发生改变,而山区河流河床比降变化显著,泥沙起动条件差异明显,极易造成泥沙在河道局部区域发生淤积,降低河道的排洪输沙能力,致使水位激增,严重威胁河道防洪安全。Lin等^[1]根据台湾陈有兰溪的长期监测结果研究发现“9·21”地震引发的大量滑坡、崩塌为河流的泥沙补给提供了充足的物质来源,导致震后输沙量有显著增加。曹叔尤等^[2]研究发现地震及其次生灾害会导致大量松散堆积体进入河道,改变河流泥沙补给条件进而引起河床适应性调整。郑媛宇等^[3]以龙溪河龙池镇河段为研究对象,通过物理概化模型试验指出泥沙对山洪灾害具有附加致灾作用,在试验中发现泥沙淤积会造成河床抬高局部水位激增,甚至会出现漫滩现象。此外,滑坡、泥石流等地质灾害的发生还会造成非连续性的泥沙补给,来沙条件的不确定性会引起山区河流形态不断调整,使河床表现出特定的结构。Hassan等^[4]通过对季节性河流的研究发现来沙条件是影响河床粗化结构的主要因素,水流因素次之,而河床结构又会对推移质运动产生重要的影响。王强等^[5]通过水槽试验指出在粗化的河床上加细沙会引起河床出现新的冲淤变化,降低河床结构强度,增大推移质输沙率。

到目前为止,对于推移质输移与河床变形计算采用的主要方法是根据连续介质模型,借助经验或半经验的泥沙输沙率公式计算出推移质运动特征以及河床的冲淤变形情况^[6-8]。然而,基于泥沙颗粒微观运动揭示推移质输移机理的研究还比较匮乏,对于颗粒微观运动行为的研究将有利于泥沙运动机理的探讨和发展便于工程上应用的宏观计算模型。离散单元法(DEM)通过固体颗粒体系的参数化模型对颗粒的运动过程进行模拟和分析^[9],它可以与不同的计算流体力学方法结合计算流固耦合问题,例如格子波尔兹曼方法(lattice-boltzmann method, LBM)、光滑粒子流体动力学方法(smoothed particle hydrodynamics, SPH)^[10-11]。利用计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)和离散元(discrete element method, DEM)相结合的方式研究推移质运动这类流固耦合问题可以在考虑固体与流体相互作用的基础上充分地发挥两种计算方法的优越性。在计算过程中DEM通过表面网格描述边界表面,进而实现了与CFD流体网格边界表面元素的点对点耦合。Gupta等^[12]基于2维CFD-DEM耦合的方法对气固流化床问题进行数值模拟,计算结果显示该方法可以比较准确地计算出流体的速度和压力分布。Chen等^[13]

对肺状导气管中颗粒的沉积情况进行了研究,通过数值计算得到了在不同级器官分支中颗粒的运动特点。以上研究很好地验证了CFD-DEM相结合的方法在解决流固耦合问题中的可行性与可靠性,但对于天然河流中带有自由表面水流的流固耦合问题的研究还比较少见^[14-15]。在众多学者研究基础上,作者基于CFD和DEM耦合的方法探究了流量、泥沙补给强度等因素对于山区河流河床变形以及水位变化的影响,为进一步揭示山区流域水沙灾害的致灾机理奠定基础。

1 计算模型

作者借助CFD-DEM耦合方法,对变坡陡比降水槽中的卵砾石溯源淤积问题进行了数值模拟。计算过程中的控制方程如下:

1) 流体运动控制方程。3维不可压缩流体运动的控制方程由连续性方程和动量方程所组成,其形式如下:

连续性方程:

$$\frac{\partial(\alpha_f \rho_f)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \mathbf{u}_f) = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_f \mathbf{u}_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \mathbf{u}_f \mathbf{u}_f) = & -\alpha_f \nabla p + \\ & \nabla \cdot (\alpha_f \boldsymbol{\tau}_f) + \alpha_f \rho_f \mathbf{g} - \mathbf{f}_{\text{drag}} \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $\mathbf{u}_f$ 为流体的运动速度, ρ_f 为流体的密度, p 为流体的压强, $\mathbf{g}$ 为重力加速度, $\boldsymbol{\tau}_f$ 为流体的应力张量, α_f 为流体的体积分, $\mathbf{f}_{\text{drag}}$ 为体平均下的颗粒受到的流体阻力。

2) 颗粒运动控制方程。颗粒的运动由平动和转动两部分所组成,根据牛顿第二定律,颗粒1的运动方程形式如下:

$$m \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = m\mathbf{g} + \mathbf{F}_{\text{drag},1} + \sum_{k=1}^n (\mathbf{f}_{n,1k} + \mathbf{f}_{t,1k}) \quad (3)$$

$$I \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} = \sum_{k=1}^n \mathbf{T}_{1k} \quad (4)$$

式(3)~(4)中: m 为颗粒1的质量; $\mathbf{u}_p$ 为颗粒1的平动速度; $\mathbf{F}_{\text{drag},1}$ 为颗粒1受到的流体作用力; $\boldsymbol{\omega}$ 为颗粒1的转动速度; I 为颗粒的转动惯量; n 为和颗粒1接触的总颗粒数; $\mathbf{f}_{t,1k}$, $\mathbf{f}_{n,1k}$ 和 $\mathbf{T}_{1k}$ 分别为颗粒1与颗粒 k 的切向碰撞力、法向碰撞力及碰撞力矩,碰撞力矩 $\mathbf{T}_{1k} = \mathbf{R}_1 \times (\mathbf{f}_{n,1k} + \mathbf{f}_{t,1k})$, 其中 $\mathbf{R}_1$ 为碰撞点到颗粒质心的距离矢量。

在计算过程中,首先CFD先进行一个时间步长的流场计算;然后,将流场信息传递给颗粒计算模块并计算相间作用力,将计算得到的相间作用力代入到颗粒的运动方程中进而可以计算出颗粒的位置和运动速度;最后,计算体积分并连同相见作用力传

递给CFD,在每个计算周期完成后,颗粒与流场间的相互作用通过在动量方程中增加源项的方法将颗粒对流体的作用力代回到流场的计算中,重新计算流场并将更新后的流场信息传递给颗粒计算模块,如此重复计算,具体的耦合流程如图1所示。CFD流场计算与DEM颗粒计算采用不同的时间步长,本研究设置的DEM计算时间步长与CFD计算时间步长之比为1:100。

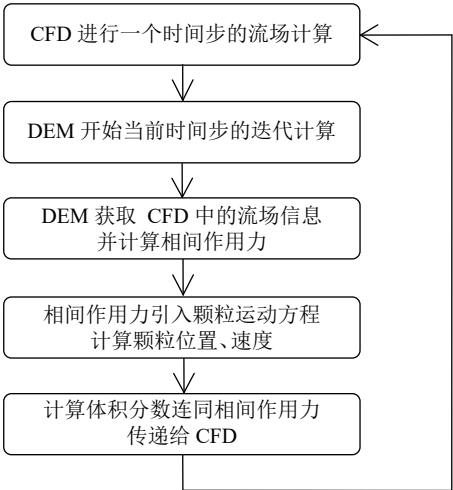


图1 CFD-DEM耦合计算流程

Fig. 1 Process of calculation about CFD-DEM coupling method

作者结合山区河流沿程比降陡缓相间的实际特点,在计算时所采用的变坡陡比降水槽如图2所示,水槽的高度与宽度分别为30 cm、20 cm,水槽由上游段和下游段两部分组成,上游段长度为3.2 m,设计坡度为5%,下游段长度为4.5 m,设计坡度为1%。计算中为了避免加沙对水流结构的影响,在水槽的入口处布置了0.6 m长的过渡区,水槽的出口设置为自由出流。为了探究泥沙补给条件的改变对于山区河流溯源淤积发展过程以及河床变形的影响,本研究设计了2种流量和4种加沙方案,泥沙的补给方式分别为等量脉冲加沙、单峰脉冲加沙和双峰脉冲加沙,每组试验中加沙总量保持恒定,加沙次数均为7次,每次加沙的时间间隔为30 s,具体的泥沙补给方案及颗粒级配见图3。本研究的计算工况见表1,在计算过程中相关参数的设置情况见表2,其中,泥沙颗粒之间的计算参数和泥沙颗粒与壁面之间的计算参数相同。

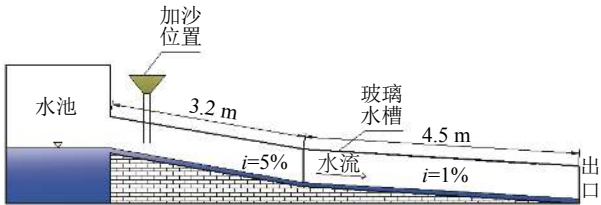
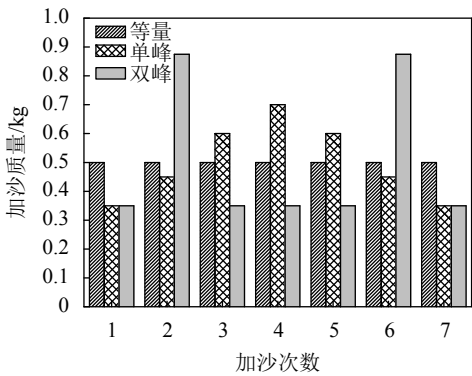
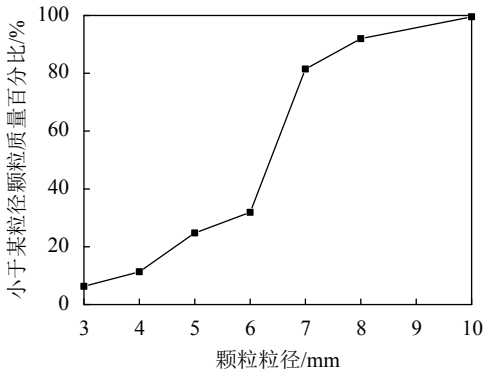


图2 变坡水槽示意图
Fig. 2 Sketch of variable slope flume



(a) 泥沙补给方案



(b) 颗粒级配

图3 泥沙补给方案及颗粒级配

Fig. 3 Sediment supply scheme and particle size distribution

表1 泥沙溯源淤积计算工况

Tab. 1 Parameters of different calculation conditions			
工况	流量/(L·s ⁻¹)	加沙方案	加沙位置
1	1.6	等量	中间
2	1.6	单峰	中间
3	1.6	双峰	中间
4	2.1	等量	中间

表2 模型中相关计算参数

Tab. 2 Parameters used for the calculation	
颗粒参数	数值
密度/(kg·m ⁻³)	2 500
泊松比	0.3
杨氏模量/(10 ⁶ N·m ⁻¹)	5
剪切模量/MPa	100
碰撞恢复系数	0.3
滑动摩擦系数	0.4
滚动摩擦系数	0.1

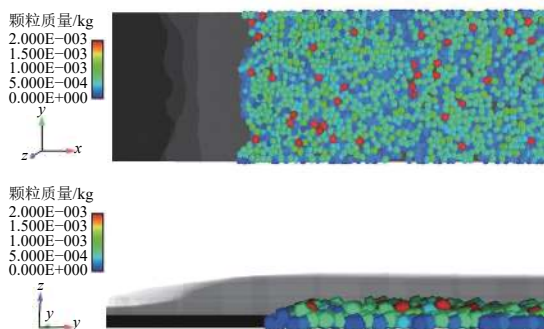
2 计算结果与分析

泥沙进入河道后,泥沙在水流的作用下会向下游输移,在5%的陡比降河段含沙水流可以稳定通

过,但是当含沙水流进入1%的缓比降河段后,在缓比降河道下游位置率先出现泥沙淤积。随着上游泥沙的持续补给,淤积迅速向上游发展,在河床淤高和局部水跃的共同影响下,会导致水位激增,甚至漫滩。因此,泥沙的运动过程是个较为复杂的流固耦合问题,泥沙的运动和落淤会对流场产生影响,而流场的改变又会直接影响颗粒的运动,多重因素的共同作用使得山区河流洪水的预报工作十分困难。为了解泥沙补给条件改变对于溯源淤积的影响,作者通过CFD-DEM耦合方法对山区河道中的卵砾石运动进行了模拟,试验与计算的对比情况如图4所示。



(a) 室内水槽试验照片



(b) 计算结果

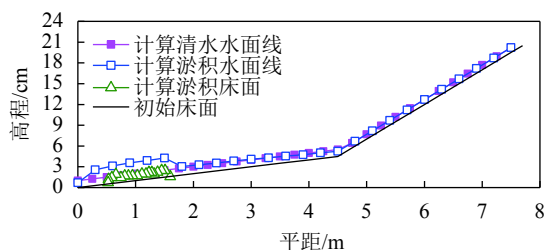
图 4 泥沙淤积的试验与计算结果对比

Fig. 4 Comparison of experimental and calculated results of sediment deposition

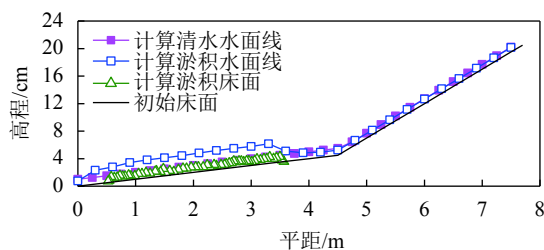
2.1 溯源淤积对沿程水位的影响

图5给出的是单峰来沙条件下河床淤积形态与沿程水位随时间(时间是从下游河道出现泥沙淤积时开始计时,平距的0点为水槽的出口,方向指向上游)变化情况,图5(a)、(b)和(c)分别对应的是2次加沙、5次加沙与7次加沙后的计算结果,从图5(c)可以发现计算结果与试验结果吻合良好。通过图5可以看出,随着时间推移,泥沙淤积会逐渐向上游发展,以平距3 m的位置为例,在淤积前锋尚未到达该位置时,该位置的水位较为稳定,与清水水位相比变化不大,当淤积前锋到达该位置时,该位置处的水位会陡

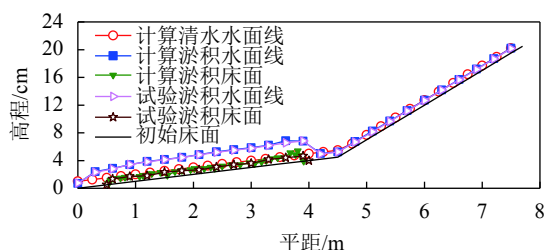
然增加,随着淤积的继续发展,该位置处的水位会稍加回落而后趋于稳定。出现这一现象主要是因为泥沙的大量落淤导致床面明显抬升,仅河床的淤积厚度就已经接近或超过清水的水深,淤积锋面处由于河床比降减小会出现明显的水跃现象,在局部水跃与床面升高的叠加作用下,该位置处的水深会显著增加,增加幅度可以达到清水水深的3倍。



(a) $t=40\text{ s}$



(b) $t=120\text{ s}$



(c) $t=190\text{ s}$

图 5 不同时刻淤积床面、初始水面及淤积水面对比

Fig. 5 Comparison of depositing bed surface, initial water surface line and siltation water surface line at different time

2.2 泥沙补给对河床变形的影响

为了探究泥沙补给条件和流量的变化对河床淤积变形的影响,图6给出了不同工况下河床淤积厚度的计算结果,其中,图6(a)是相同流量下不同来沙条件对河床淤积厚度的影响,图6(b)是相同泥沙补给条件下不同流量对于河床淤积厚度的影响。从图3(a)中可以看出:单峰来沙与双峰来沙的第1次来沙量和第7次来沙量是相同的,均为0.35 kg;第2次与第6次来沙时,双峰来沙时的沙量要明显大于单峰来沙时的沙量;第3次加沙到第5次加沙时,单峰来沙的加沙强度均大于双峰来沙的加沙强度。

通过图6(a)可以发现,在中间位置单峰来沙的淤积厚度要明显小于双峰来沙的淤积厚度,而在两侧单峰来沙的淤积厚度要大于双峰来沙的淤积厚

度。这说明在相同流量条件下, 泥沙补给强度与床面淤积厚度呈现负相关关系。这主要是因为河流是水沙与河床相互作用的产物, 而河床变形的过程是以泥沙为纽带, 水流与河床相互作用影响并向平衡状态不断调整的过程^[16]。当水流的挟沙能力低于输沙强度时, 泥沙便会落淤, 而河床结构也会发生变化进而影响水流结构。泥沙补给强度的增大将导致泥沙对水流的阻力作用增加, 水流流速降低, 为了达到动态平衡, 河床比降会进行调整, 因此河床的淤积厚度会相对减小。由图6(b)可以发现, 在来沙条件一定时, 流量的增大会导致河床淤积厚度增加。这主要是由于流量的增加导致水流流速变大, 水流中含沙浓度降低, 含沙浓度的降低使得水流受到的阻力减小, 河床比降需重新调整才能使水流速度降低以使河床达到平衡状态, 所以河床的淤积厚度会相应增大。

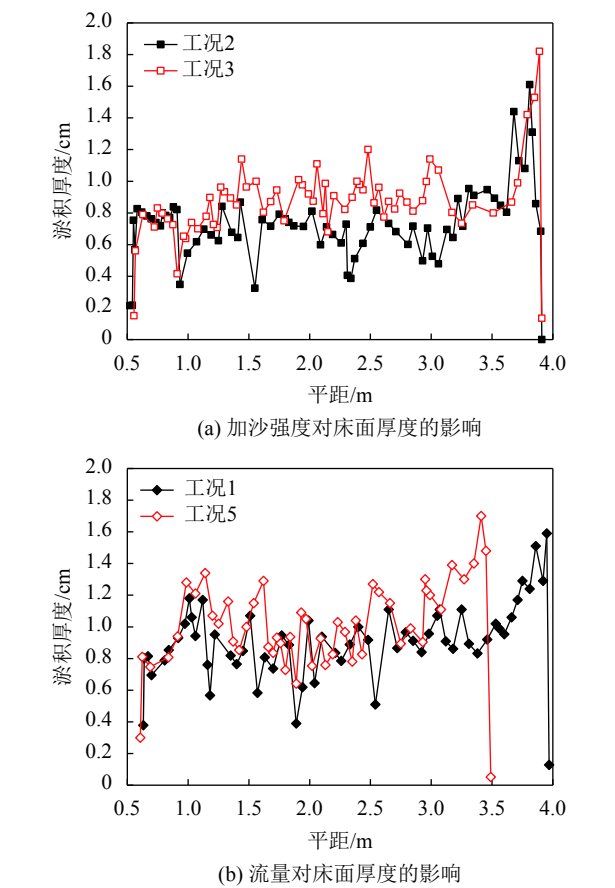


图 6 各工况下床面淤积厚度对比

Fig. 6 Comparison of sediment deposition thickness under different conditions

2.3 泥沙补给对淤积锋面发展速度的影响

淤积锋面的发展速度与来沙条件和流量存在密切的关系。图7给出了淤积前锋位置与时间的关系, 图7中的试验结果是每次加沙后淤积前锋所处的位置。

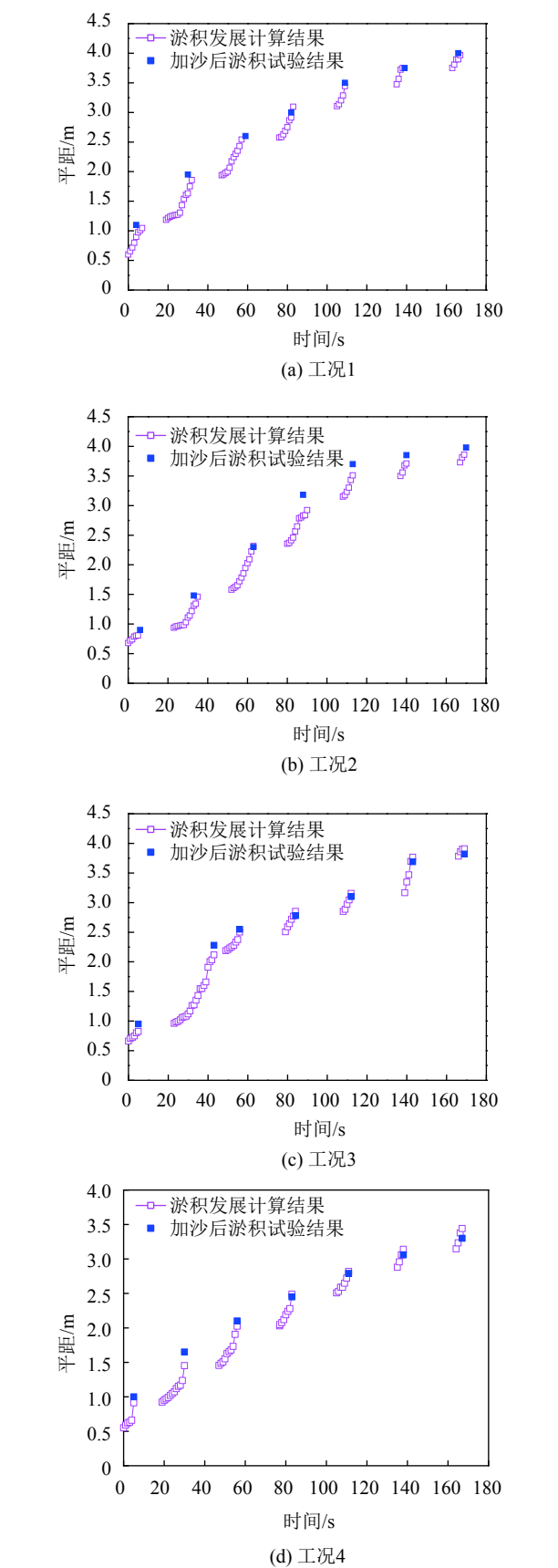


图 7 各工况下淤积发展速率

Fig. 7 Developing rates of sediment deposition under different conditions

从图7中可以发现:在泥沙补给方案相同的条件下流量越大溯源淤积的发展速度越快,淤积发展的起始位置离下游越近;流量一定时,上游来沙量越大,溯源淤积发展的速度越快,淤积发展的起始位置越靠近上游;泥沙补给条件与流量相同时,越靠近上游位置,泥沙淤积逆向发展的速度越慢。在变坡陡比降河道中,水流在通过变坡位置时会发生明显的水跃现象导致水流流速锐减,而水流的挟沙能力与流速的高次幂呈正相关关系,因此水流的输沙能力会大幅度的降低^[17]。流量的增加会导致流速变大,进而使得水流的输沙能力增加,可以将泥沙运输到更远的位置。流量的增加也会导致水流中的含沙浓度降低,在相同时间内能够落淤到床面的泥沙质量减小,进而会限制溯源淤积的发展速度。当流量一定时,上游泥沙补给量的增大会导致水流中含沙浓度增加,水流在运动过程中受到的阻力增加,水流的流速会降低,河流为了达到相对平衡状态便会调整河床比降,床面厚度降低,单位时间内来沙质量是一定的,床面厚度的降低会导致溯源淤积的发展速度增加。泥沙溯源淤积发展的过程实际上是变比降河道向单一比降演变的过程,在变坡位置附近,河床比降变化最为剧烈,为了达到相对平衡状态,离变坡位置越近,泥沙厚度越大,泥沙溯源淤积的发展速度越慢^[16]。

3 结 论

基于山区河道比降呈现上陡下缓的实际特点,作者通过CFD-DEM耦合方法对变坡陡比降水槽中卵砾石的溯源淤积过程进行了数值计算,重点研究了不同来水来沙条件下河床淤积变形发展特点以及水位变化特性,得到的主要结论如下:

1)强输沙水流通过变坡河道时,泥沙一旦在下游发生淤积,便会导致淤积快速逆行发展。受河床抬升与局部水跃的影响,淤积锋面位置的水位增加幅度最为明显,随着溯源淤积的持续发展,该位置处的水位会稍加回落。

2)溯源淤积发展的过程实际上也是水流与河床逐渐适应调整的过程,河床的淤积厚度与含沙浓度和水流强度等因素密切相关。在相同流量条件下,泥沙补给强度越大,河床的淤积厚度越小;来沙强度相同时,流量越大,河床的淤积厚度越大;流量与来沙强度一定时,离变坡位置越近,床面的淤积厚度越大。

3)泥沙淤积的起始位置与逆行发展速度与流速和水流中含沙浓度等因素有关,在相同流量条件下,泥沙补给强度的增大会导致泥沙淤积的起始位置靠近上游,淤积逆行的传播速度加快;在泥沙补给强度相同时,流量越大,溯源淤积的起始位置越靠近河道

下游,溯源淤积逆行的传播速度越慢。

参考文献:

- [1] Lin G W, Chen H, Hovius N, et al. Effects of earthquake and cyclone sequencing on landsliding and fluvial sediment transfer in a mountain catchment[J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2008, 33(9): 1354–1373.
- [2] Cao Shuyou, Liu Xingnian. Adaptive adjustment and mutation response of river bed within changing sediment supply in mountain river[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2016, 48(1): 1–7. [曹叔尤, 刘兴年. 泥沙补给变化下山区河流河床适应性调整与突变响应[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2016, 48(1): 1–7.]
- [3] Zheng Yuanyu, Wang Huifeng, Wang Haizhou, et al. Experimental study on channel response with different flow and sediment conditions in mountain river[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2017, 49(Supp1): 8–13. [郑媛予, 王慧锋, 王海周, 等. 不同来水来沙条件下山区河流的河床响应试验研究[J]. *工程科学与技术*, 2017, 49(增刊1): 8–13.]
- [4] Hassan M A, Egozi R, Parker G. Experiments on the effect of hydrograph characteristics on vertical grain sorting in gravel bed rivers[J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(9): 2286–2292.
- [5] Wang Qiang, Nie Ruihua, Fan Niannian, et al. Study on effects of incoming sediment change on river bed-form and bed load transport[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2016, 48(Supp1): 20–24. [王强, 聂锐华, 范念念, 等. 来沙条件变化对河床形态及推移质运动的影响研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2016, 48(增刊1): 20–24.]
- [6] Liu Fuqiang, Zhang Xiaolei, Mao Yu, et al. Study on scouring and deposition characteristics of typical flood processes in a reservoir based on numerical simulation of flow and sediment[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2016, 37(5): 46–50. [刘富强, 张晓雷, 毛羽, 等. 基于水沙数值模拟的某水库典型洪水过程冲淤特性研究[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(5): 46–50.]
- [7] Wang Xiaoming, Lv Suiju, Li Chunguang, et al. Three-dimensional numerical simulation of fluvial processes in Daliushu reach of Yellow River[J]. *Hydro-science and Engineering*, 2016(6): 52–60. [王晓明, 吕岁菊, 李春光, 等. 黄河大柳树河段河床演变的三维数值模拟[J]. *水利水运工程学报*, 2016(6): 52–60.]
- [8] Xiong W, Tang P, Kong B, et al. Computational simulation of live-bed bridge scour considering suspended sediment loads[J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2017, 31(5): 04017040.
- [9] Cundall P A, Stack O D L. Discrete numerical model for granular assemblies[J]. *Geotechnique*, 1979, 29(1): 47–65.

[10] Han Y,Cundall P A.LBM–DEM modelling of fluid-solid interaction in porous media[J].[International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics](#),2013,37(10): 1391–1407.

[11] Wu K,Yang D,Wright N.A coupled SPH–DEM model for fluid-structure interaction problems with free-surface flow and structural failure[J].[Computer & Structures](#),2016,177:141–161.

[12] Gupta P,Sun J,Ooi J Y.DEM–CFD simulation of a dense fluidized bed:Wall boundary and particle size effects[J].[Powder Technology](#),2016,293:37–47.

[13] Chen X L,Zhong W Q,Zhou X G.CFD–DEM simulation of particle transport and deposition in pulmonary airway[J].[Powder Technology](#),2012,228:309–318.

[14] Jing L,Kwok C Y,Leung Y F,et al.Extended CFD–DEM for free-surface flow with multi-size granules[J].[International Journal for Numerical & Analytical Methods in Geomechanics](#),2016,40(1):62–79.

[15] Sun Rui,Xiao Heng.SediFoam:A general-purpose,open-source CFD–DEM solver for particle-laden flow with emphasis on sediment transport[J].[Computers & Geosciences](#), 2016,89:207–219.

[16] Li Bin,Guo Zhixue,Chen Ridong,et al.Experimental study on sediment deposition and water level surge under high sediment concentration in variable steep slope river[J].[Journal of Sediment Research](#),2015(3):63–68.[李彬,郭志学,陈日东,等.变坡陡比降河道强输沙下泥沙淤积与水位激增的试验研究[J].[泥沙研究](#),2015(3):63–68.]

[17] Guo Qingchao.Sediment-carrying capacity in natural rivers[J].[Journal of Sediment Research](#),2006(5):45–51.[郭庆超.天然河道水流挟沙能力研究[J].[泥沙研究](#),2006(5): 45–51.]

(编辑 张 琼)

引用格式: Lei Ming,Yu Haiti,Xu Zexing,et al.Numerical simulation of retrogressive pebble deposition in the changing slope zone of a mountainous river[J].[Advanced Engineering Sciences](#),2019,51(1):45–51.[雷明,余海逖,许泽星,等.山区变比降河道卵砾石溯源淤积的数值模拟[J].[工程科学与技术](#),2019,51(1):45–51.]