

DOI: 10.3969/j.issn.1004-4701.2016.01.08

杨志敏, 熊文超, 曾凡斌, 李东, 曹明, 王强, 等. 基于 COMSOL 的三角形渗流仪数值模拟[J]. 江西水利学报, 2016, 42(1): 42-46.

收稿日期: 2015-11-13

(江西省水利科学研究院, 江西 南昌 330029)

摘要: 为研究三角形渗流仪在水槽中的水流特性, 采用 COMSOL 软件建立三角形渗流仪的三维模型, 模拟水流在河床界面上的分布情况。结果表明, 三角形渗流仪在水槽中的水流特性与河床地形、渗透系数、河床糙率等因素密切相关。通过改变河床地形、渗透系数、河床糙率等因素, 研究其对三角形渗流仪在水槽中的水流特性的影响。结果表明, 三角形渗流仪在水槽中的水流特性与河床地形、渗透系数、河床糙率等因素密切相关。通过改变河床地形、渗透系数、河床糙率等因素, 研究其对三角形渗流仪在水槽中的水流特性的影响。

关键词: 三角形渗流仪; 数值模拟; 水流特性; 河床地形; 渗透系数; 河床糙率

中图分类号: TV698.1+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-4701(2016)01-0036-05

0

地表水和地下水的水量交换已成为水生生态系统研究中的一个热点问题^[1],通过测量研究区域的潜流量来分析潜流区的交换强度,已逐渐成为研究潜流交换的重要手段,渗流仪装置为直接测量河床界面上的水交换量提供了简单有效的方法^[2-3]。但实验时 also 需综合考虑渗流仪装置的结构对局部地表水流态及地下水流动场变化的影响,从而使测量结果能较为真实的反映潜流区的交换强度。因此,研究渗流仪装置结构对测量结果的影响会对改善装置结构、提高测量精度起到一定的借鉴作用。鉴于当前对渗流仪测量潜流量影响研究尚不多见,本文采用数值模拟的方法,分别对特定的三角形形状的渗流仪在水槽的实验进行二维和三维数值模拟,研究了不同来水速度条件下、测量区放置与不放置渗流仪时,河床界面压力分布和潜流量的大小并分析对比了二者差异,从而获得了一些有益结论。

1 数值模拟

1.1 模型尺寸

渗流仪多为圆桶状,但易产生绕流现象,从而对其周围河床产生冲刷^[4],影响实验结果。本研究将渗流仪设定为三角形形状,此形状渗流仪能较好的减少绕流

现象,其插入河床部分的尺寸为 25 cm×25 cm,插入深度为 8 cm,上部分为三角形房屋状结构,高为 6 cm,其结构尺寸如图 1 所示。水槽尺寸为 5.00 m×0.40 m×1.20 m,实验砂为中值粒径为 1.04 mm 的石英砂,其中实验河床设置成沙坡地形,坡高设定为 0.20 m,坡长为 1.40 m,坡高与坡长比为 1/7,研究表明,此形态的河床真实存在于自然河流中^[5],实验中的渗流仪安置在沙坡下游处。

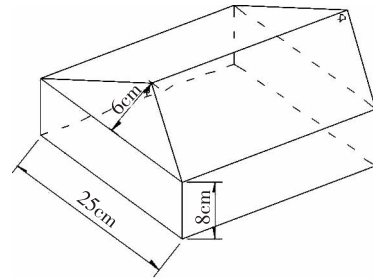


图 1 渗流仪结构

1.2 模型边界与求解

模型求解采用半耦合求解模式,即先用 Fluent 流体力学软件^[6]求解由雷诺平均 N-S 方程与 k- ω 两方程构成的地表水运动湍流模型,获取稳定水流条件下河床界面压力数据。其中,水体上边界为压力入口边界,左边界为流速入口边界,右边界为压力出口边界,水沙界面作为不透水边界;在计算地下水运动模型中,将通过求解地表水模型获得的水沙界面的压力作为模型上边界,而模型的左、右及下边界设为不透水边界,地下

水模型采用 COMSOL Multiphysics 进行求解^[7]。

此外,由于河床上渗流仪的存在,它一方面影响了渗流仪外部附近区域的压力分布;另一方面,对于其内部区域的压力值无法获取。因而本文在地下水的模拟过程中,上边界压力值的选取包括两部分:①渗流仪区域以外部分取该工况下的计算总压力值;②渗流仪内部区域用相同流速情况下,无装置存在时该区域的计算压力值替代,其上边界压力取值示意图如图 2 所示。

1.3 计算工况

本次模拟分为 A 和 B 两种工况。其中, A 工况为无渗流仪装置工况, B 工况为存在渗流仪装置工况,且渗流仪位置为距离沙坡 1.00 m 处。每种工况分为四种子工况,分别为 A1、A2、A3、A4 和 B1、B2、B3、B4,其对应的进口流速分别为 0.05 m/s、0.15 m/s、0.30 m/s 和 1.0 m/s。

2 数值模拟

2.1 河床界面压力对比

(1)无渗流仪装置存在时二维与三维压力对比。当

计算达到稳定后,提取河床界面上的总压力数据,并选取在宽度方向上 3 个剖面的压力分布,与二维模拟结果相对比,其中由于三维几何模型在宽度 z 方向上是对称的,因此本文选取的剖面分别为 z=0.05 m、z=0.10 m 和 z=0.20 m。图 3 和图 4 分别为工况 A1 和 A2 所对应的 3 个剖面上河床界面上的总压力与二维模拟结果的对比图。

从这两种工况的模拟结果来看,当无渗流仪装置时,三维河床界面上的总压力分布规律同二维模拟结果基本一致。从其数值大小来看,在沙坡上游区域内的河床界面上的压力和二维模拟的结果比较相近,而在沙坡下游区域,A1 和 A2 工况都出现了一定程度的增大,但其增大的幅度均不大。以 A1 工况为例 3 个剖面上的压力较二维模拟结果最多增加了约 0.8 cm; 而仅从三维模拟结果来看,两种工况下的 3 个剖面上的压力也均有差异,但都相差较小,同样以 A1 工况为例,两者之间最大相差了 0.46 cm,约为 12.65%,这说明在无渗流仪装置时的三维水槽中,仅仅只用二维模型来进行模拟是不够准确的,因为这种差异的存在意味着宽

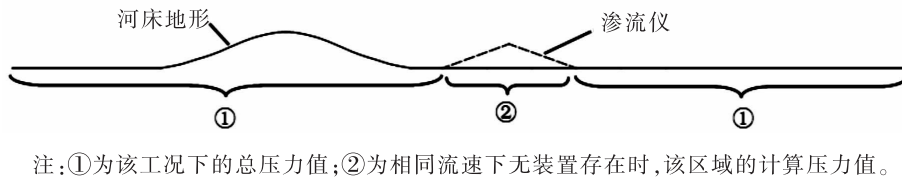


图 2 上边界取值示意图

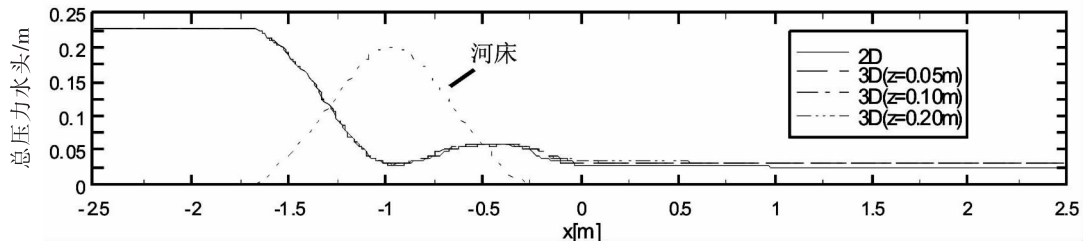


图 3 工况 A1 时河床界面上的总压力水头对比

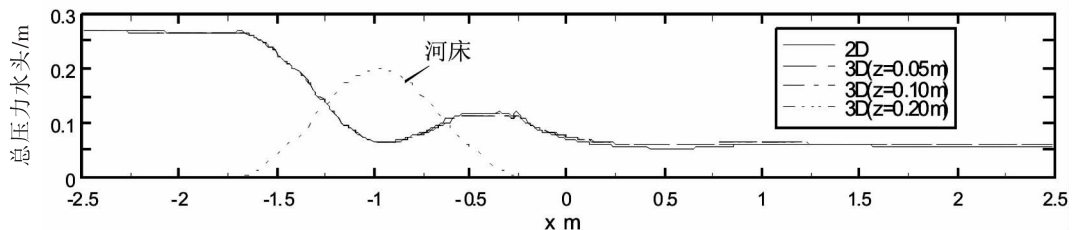


图 4 工况 A2 时河床界面上的总压力水头对比

度(z 方向)上存在压力梯度,表明在三维水槽中,在宽度方向上也存在水流运动,而这在二维模拟过程中是无法反应出来的。

(2)有无渗流仪装置时的三维压力对比。选取 B1、B4 工况的河床界面上的压力分布与 A1、A4 所对应河床界面上的压力分布相对比,结果如图 5 和图 6 所示。

比较图 5 和图 6 中 4 种工况下的河床界面压力分布可以看出:(1)在不同地表流速条件下,河床界面上的压力分布明显不同,当流速增加较大时,河床界面上的压力大大提高,而河床界面上的压力作为本文潜流交换的唯一驱动力,再次表明流速的改变将对潜流交换强度有重要影响;(2)相比于无渗流仪装置时,当插入装置后,装置小范围区域内的压力变化较明显,而其它区域无明显变化,说明整体而言三角形渗流仪对水流形态破坏不大,可满足测量要求。另外,在放置装置后,在装置的上游局部区域内压力有所增大,其中在低流速 0.05 m/s 条件下,无渗流仪时测量区左侧附近压力值约为 310 Pa,有渗流仪时增加到 357 Pa 左右,变化率为 15.2%;而在高流速 1 m/s 条件下,测量区附近压力值从无渗流仪到放置渗流仪时的增量约为 708 Pa,变化率为 48.8%,这表明放置渗流仪会对局部流态产生一定影响,且流速越大,这种影响作用越明显。

2.2 各区域潜流量的对比

本次模拟选取河床下游 B、C 和 D 区域进行潜流量计算分析对比,其对应的位置分别为距离沙坡位置

1.0 m、1.5 m 和 2.0 m。

(1)无渗流仪装置存在时的潜流量对比。分别对水沙界面上各区域的流速进行积分,获得各自区域内的潜流交换量,并与二维计算结果相对比。图 7 为不同流速情况下,二维和三维模拟的各区域的潜流量对比。

由图 7 可以看出,当无渗流仪存在时,二维和三维模拟的潜流量的变化规律一致,说明在无渗流仪装置时,二维模拟可以反映出实际潜流交换强度的变化情况。此外,比较图 7 中的图①、图②和图③可以看出,B、C 和 D 区域的潜流量均逐渐减小,说明在一定流速范围内,沙坡下游河床区域内的水量交换沿着河床往下游逐渐越小;当流速达到 1 m/s 时,本文再对 C 和 D 区域中间某区域 e 处求解获得潜流量,其二维和三维模拟值分别为 4.01 L/h 和 4.4 L/h,可以看出,B 区域的潜流量比 C 区域的小,呈现先增大后减小的变化规律,这是由于 B 区域潜流量减小的缘故,这表明当流速增大到一定值时,沙坡下游局部区域的潜流量随着流速增大呈现递减趋势,这是由于沙坡下游区域的水流下降区域范围已向下游扩伸,B 区域处已有部分水流向下,导致净流量减小的结果。此外,4 种工况下的潜流量均为正值,表明在该模型试验条件下,当来水流速在 0.05 ~ 1 m/s 时,沙坡下游区域均由地下水向地表水补给,从整体看来,二维模拟的潜流量较三维偏大,当流速为 0.15 m/s 左右时,两者计算结果较为接近,表明在特定流速条件下可以进行二维模拟。

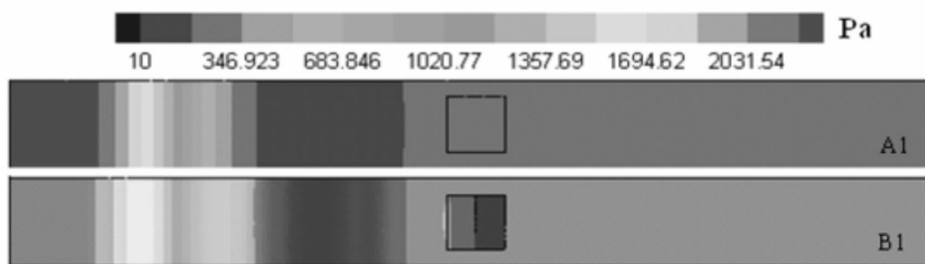


图 5 A1 和 B1 河床界面压力分布对比

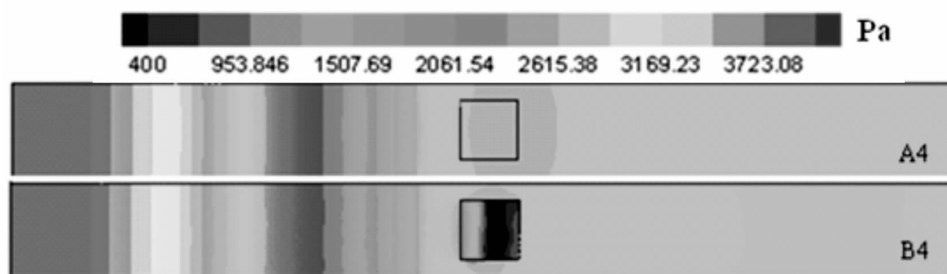


图 6 A4 和 B4 河床界面压力分布对比

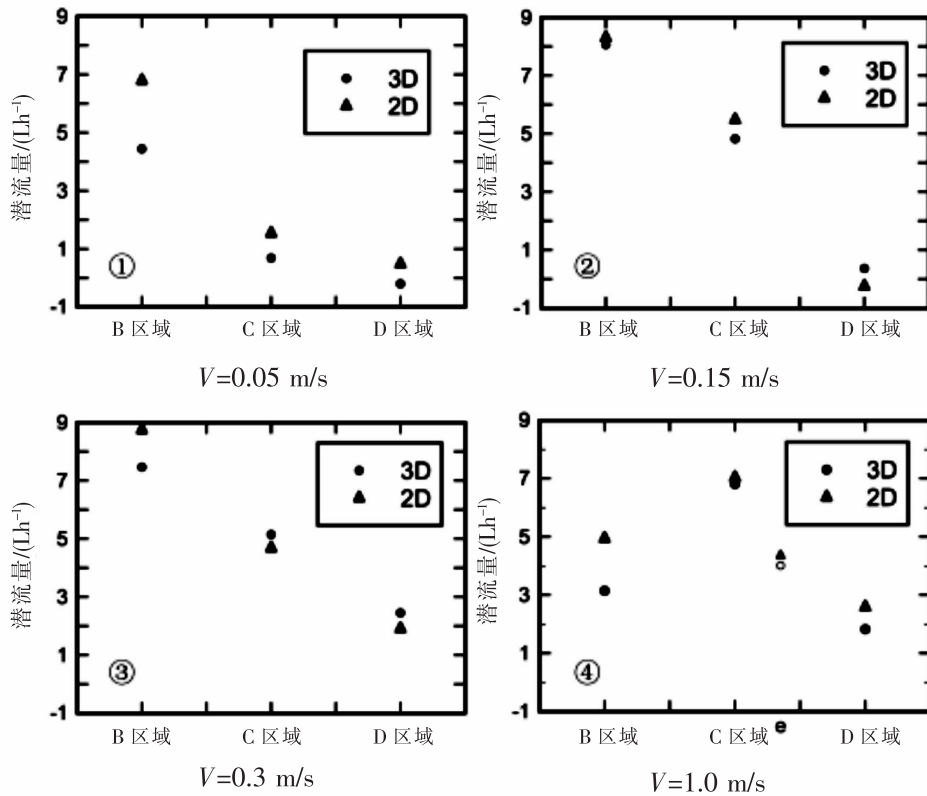


图 7 无装置时二维和三维对应的潜流量对比

(2)有渗流仪装置存在时的潜流量对比。对有装置存在时进行三维模拟,模型边界及潜流量计算方法同二维模拟一致,通过此次计算并与二维计算结果相比较。图 8 为不同流速情况下,二维模拟和三维模拟的各区域的潜流量对比图。

从图 8 可以看出,当存在装置时,二维和三维模拟的各区域的潜流量表现出明显不相同的变化规律,其中在 B 区域的潜流量变化较大,而 C 区域和 D 区域的潜流量变化规律较为一致,而从数值的变化上来看,各种流速工况下,二维和三维模拟在放置渗流仪位置的 B 区域的潜流量相差较明显,且基本都表现出了相反的潜流方向:当流速逐渐增大时,二维模拟表现为从地下水向地表水补给,三维表现为从地表水向地下水补给,且在流速为 0.3 m/s 左右时达到平衡,而 C 区域和 D 区域的潜流量均较为接近,这一方面表明了装置的存在所带来的影响较大,另一方面说明当水槽中存在渗流仪装置时,二维模拟和三维模拟的结果存在较大的差异性,简单的用二维模拟来对渗流仪实验在河床界面上的潜流量进行量化是不适宜的。此外,相比于图 8 中的图②和图③,图①和图④中 B 区域的潜流量相差

明显较大,说明在地表流速较小或较大时,此形状的渗流仪装置所带来的影响会更明显,因此对于特定的渗流仪装置应选择合适的地表水流进行试验。

3 结论

本文采用半耦合的模拟方法对渗流仪在水槽中的实验进行了二维和三维数值模拟,此模拟方法的不足在于无法真实有效的反映出地表水和地下水之间的相互作用,因而由此模拟获得潜流量值也需进行一定的率定,而仅从河床界面压力分布及各区域潜流量的变化规律方面,其主要结论有:(1)当无渗流仪存在时,二维模拟得到的河床界面压力的分布规律与三维模拟结果相近,但数值上后者比前者更能准确地反映出河床界面上的压力分布特性,表明在垂直水流方向上也存在一定的水流运动;(2)随着地表水流速的增大,河床界面上的总压力也会随之增大,且渗流仪的存在会对其所在位置的局部流态产生一定影响,且流速越大,这种影响作用越明显;(3)无渗流仪时,二维模拟的潜流量同三维模拟的变化规律一致,但整体而言前者较后

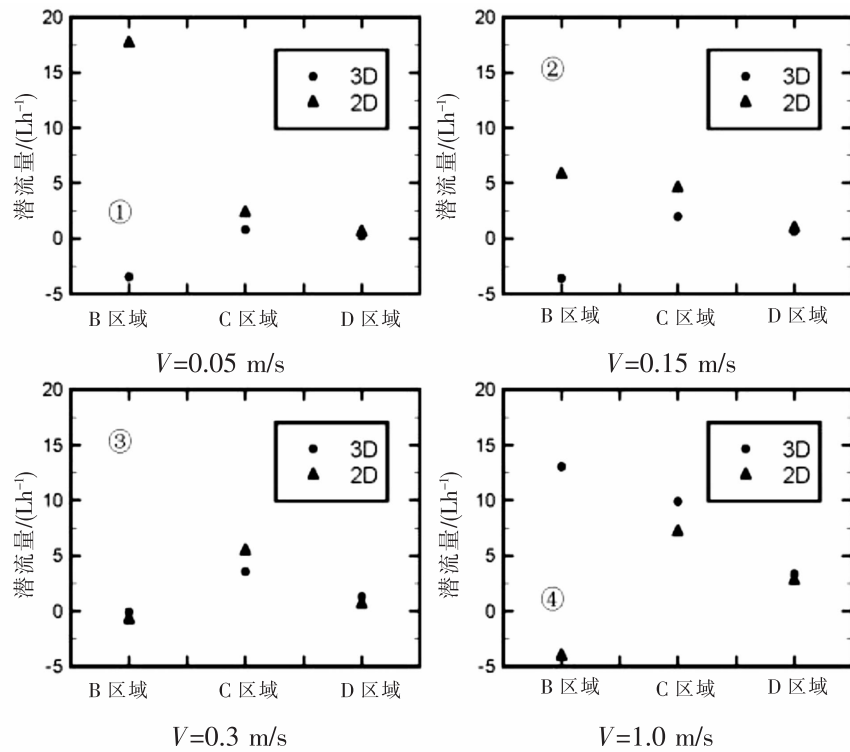


图 8 二维和三维对应的潜流量对比

者偏大,而当渗流仪存在时,两者在渗流仪所在区域的潜流量的变化规律相差较大。此外,在特定地形条件下,地表水流速跟潜流量并不呈正相关关系,当流速过大时,潜流量反而会随之减小。

参考文献:

[1] 袁兴中,罗固源.溪流生态系统潜流带生态学研究概述[N].生态学报, 2003,23(5):1~8.
 [2] BELANGER T, MONTGOMERY M. Seepage meter errors [J]. Limnology and Oceanography, 1992, 37(8): 1787~1795.
 [3] SHAW R, PREPAS E. Groundwater-lake interactions: I. Accuracy of seepage meter estimates of lake seepage [J]. Journal of Hydrology, 1990,

119(1): 105~120.
 [4] ZAMORA C. Estimating Water Fluxes Across the Sediment - Water Interface in the Lower Merced River, California [R]. Geological Survey (US), 2008.
 [5] CARDENAS M B, WILSON J, ZLOTNIK V A. Impact of heterogeneity, bed forms, and stream curvature on subchannel hyporheic exchange [J]. Water Resources Research, 2004, 40(8):
 [6] Blazek J. Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications: Principles and Applications[M]. Elsevier, 2001.
 [7] Comsol A B. COMSOL Multiphysics Modeling Guide (Version 3.2)[J]. Stockholm, Sweden: COMSOL AB, 2005.

2D and 3D numerical comparative study on the influence of seepage meter

CHEN Bin, WU Nianhua, LV Hui

江西南昌省水利科学研究所, 南昌 330029, 中国

Abstract: By using the basic theory of hydraulics and groundwater simulation software COMSOL, the pressure distribution at riverbed and the changing rule of regional undercurrent flux, which under different conditions of water flow, with and without seepage meter in the measuring zone, was studied using 2D and 3D numerical simulation respectively. The result shows that 3D simulation can more accurately reflect the pressure distribution on riverbed, and that the quicker the surface water flow rate, the greater influence the seepage meter has on the local flow pattern. It also shows that in specific terrain condition, surface water velocity is not positively correlated with the undercurrent flux.

Key words: Seepage meter; Numerical simulation; Pressure distribution; Undercurrent flux