

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.05.018

排水管道瞬变流的SWMM模拟能力研究

周 领, 陆燕清

(河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘 要: 暴雨洪水管理模型(SWMM)在城市雨洪管理中发挥了重要作用,但对其模拟排水管道瞬变流的能力研究较少。针对排水管道中有压水力瞬变情况,以经典特征线法为参照,对SWMM的模拟能力进行了分析及改进。计算结果发现,原SWMM模型对排水管道快速有压瞬变流的模拟能力较差。为此,提出了“设置虚拟节点、修改Preissmann狭缝宽度”的改进方法,可有效提高SWMM模拟瞬变流的计算精度;同时,进一步分析了空间步长、波速、管段管径比、CFL稳定性条件、收敛精度及节点最小表面积等关键参数对模拟准确度、稳定性、计算效率的影响,并给出了建议取值范围。

关键词: 暴雨洪水管理模型(SWMM); 排水管道; 瞬变流; Preissmann狭缝法

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)05-0108-08

SWMM Simulation Capability for Transient Flow in Drainage Pipe

ZHOU Ling, LU Yan-qing

(College of Water Conservancy & Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Storm water management model (SWMM) plays an important role in urban stormwater management. However, its capability to simulate transient flow in drainage pipes is seldom investigated. The simulation capability of SWMM in drainage pipes with pressurized hydraulic transient was analyzed and improved by taking the classic method of characteristics as a reference. The original SWMM had poor capability to simulate rapid pressurized transient flow in drainage pipes. Therefore, the modified method of setting virtual nodes and modifying the width of the Preissmann slot was introduced, which could effectively improve the numerical accuracy of SWMM for transient flow simulation. Moreover, the effects of key parameters such as space step, wave velocity, ratio of pipe length and diameter, CFL rules, convergence accuracy and minimum node surface area on simulation accuracy, stability and calculation efficiency were further analyzed, and the recommended value ranges were proposed.

Key words: storm water management model (SWMM); drainage pipe; transient flow; Preissmann slot method

暴雨洪水管理模型(SWMM)因具有通用性、完整性、灵活性、高拟合精度等优势^[1],被广泛应用于城市雨洪管理、排水系统分析和设计、低影响开发效

果评估、水文水质模拟等领域^[2-3]。其中,对于研究较为欠缺的排水管道流动模拟部分,SWMM模型适用于单管满流率小于0.7~0.8的明流工况,可以满

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51679066、51839008); 霍英东教育基金会青年教师基金资助项目(161068)

通信作者: 周领 E-mail: zlhhu@hhu.edu.cn

足多数雨洪模拟需求。但如遇强降雨、突关阀门或闸门等情况,城市排水管道会短时间快速注水,从明流转为明满流,并可能出现高压瞬变流现象,这种特殊工况会对管道系统造成较大危害^[4],也是SWMM模拟能力有待验证之处。

目前,SWMM模型主要用于模拟城市排水系统管网溢流点、排口流量等参数,从而预估暴雨后的溢流积水量^[5-7];但是,其缺乏对管道瞬变流动过程中压力幅值、瞬态压力分布等的模拟能力,难以预警瞬变流工况的特殊危害。另外,在排水管道数值模拟研究中,已有成果对混合流 Preissmann 狭缝法(PSM算法)的求解格式进行了分析和改进。国内,耿艳芬^[8]在分析排水管一维明满流时,利用并改进了 Preissmann 四点隐式差分法;喻海军等^[9]在排水管网混合流数值模拟中,指出了 PSM 算法的优缺点;但都未能与 SWMM 模型结合。国外相关研究主要集中在混合流算法^[10-11],对排水管道不同流态的模拟方法进行了改进。Ferrerri 等^[12]针对平缓明满过渡流进行分析,发现 SWMM 中 PSM 的模拟能力仅能保持整体误差在 20% 以内。Ridgway 等^[13]针对管道涌波,对比以 PSM 为核心算法的 SWMM 和多个模型,指出了合理选择管道分段和 CFL 稳定条件对模拟的重要性;Pachaly 等^[14]分别针对快速入流和简单非恒定流,对比 SWMM 模型的中拓展迁移模块法(EXTRAN算法),进一步提出了结合 PSM 算法的模拟改进建议。然而,对排水管道瞬变流的 SWMM 模拟能力还需要进一步检验和改进。

鉴于此,笔者针对城市排水管道中快速有压瞬变流现象,以经典特征线法(MOC)模拟结果作为参照,对 SWMM 的模拟能力进行了检验分析。提出并采用“设置虚拟节点、修改 Preissmann 狭缝宽度”改进方法,以提高 SWMM 的模拟能力,并详细计算分析了空间步长、波速、CFL 稳定性条件、时空离散度、管段管径比、收敛精度及节点最小表面积等关键参数对模拟准确度、稳定性、计算效率的影响,同时给出了建议取值范围。

1 SWMM 模型

1.1 控制方程

针对排水管道瞬变流,采用 SWMM 模型中水力学模块的动态波法,其控制方程为完全圣维南方程组,由管渠非恒定自由表面流的质量和动量守恒推

导而来:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (2)$$

式中: S_f 为摩阻坡度,代表单位长度水头损失; Q 为流量; H 为水头; A 为过水断面面积; x 为流向距离; t 为时间; g 为重力加速度。

S_f 可用曼宁公式进行计算:

$$S_f = \frac{n^2 V |V|}{R^{\frac{4}{3}}} \quad (3)$$

式中: n 为曼宁系数; V 为管道流速; R 为水力半径。

动态波分析需给出初始时刻所有节点水头和管段流量作为初始条件集,且以排放口节点水头和特定节点外部进流量作为基本边界条件。另外对于压力管道,可在有压时使用 Hazen-Williams 或 Darcy-Weisbach 公式计算摩擦损失,无压时继续使用曼宁公式。

1.2 有压流算法

SWMM 模型定义有压流工况是与节点相连的管渠均为满流,或节点水位超过相连最高管渠的内顶,并在新版的动态波模拟选项中提供了 EXTRAN 和 PSM 两种算法。PSM 在整体模拟性能上具有较大优越性,无需在所有时间步长给出激波前沿,因而该算法简练,并且相比 EXTRAN 更适用于密闭管道的瞬变流模拟,因而被选为本研究的核心算法。

PSM 属于混合流激波捕捉法的典型代表,基本原理是采用明流方程统一求解无压流和有压流,将有压管的测压水头和水击波速(即有压流波速)分别类比于明渠的水位和水面波波速。如图 1 所示,假设在有压管道顶端装一个具有无限高度的窄缝,且缝宽与水击波速相关。

$$B = g \frac{A}{c^2} \quad (4)$$

式中: B 为缝宽; A 为过水断面面积; c 为有压流波速,在模拟应用时是和管道物理性质有关的已知参数。

缝隙十分狭窄而不影响管道湿周、过水面积及系统连续方程;在 SWMM 模型中,认为水深大于 1.78 倍最大管径处的缝宽等于 0.01 倍最大管径。但 Hodges 等^[11]指出,模型中设置单一狭缝获得的有

压流波速远小于真实水面波波速,不利于实际管流模拟,因而本研究模拟不同波速时对源代码中狭缝宽度结合式(4)进行了相应的修改。另外,考虑到水面宽度突变可能损害数值稳定性,有研究者对管道98.5%高度和狭缝底部间采用了抛物线过渡,但这种过渡措施的作用存在一定争议,因此本研究舍弃了源代码的缝宽过渡修正部分。



图1 PSM原理示意

Fig.1 Schematic diagram of PSM principle

1.3 数值稳定性

为保证数值稳定性,SWMM分析了系统的总体流量连续性误差和五个流量不稳定性指数(FII)最高的管段,并在模型报告文件中给出了具体值。此外,SWMM模型还可对时间步长 Δt 进行调控,本研究针对瞬变流工况选择了Courant-Friedrichs-Lewy (CFL)条件。

$$\Delta t \leq Cr \frac{\Delta x}{|V| + \sqrt{gA/B}} \quad (5)$$

式中: Cr 为库朗德数; Δx 为管段长度; B 为自由表面宽度,有压流时等同于狭缝宽度,此时可利用管渠全满深度代替式(5)中的 A/B 。

其中,若 $Cr < 1$ 易导致求解过程受到扩散性或分散性的影响;若 $Cr \gg 1$ 将无法捕捉快速出现的瞬态特征。CFL条件同时适用于明流和有压流,但对显示迭代过程要求更为严格,对于SWMM5模型中的隐式迭代则可允许 Cr 适当大于1。

1.4 代码修改及编译

SWMM模型源代码包括7个头文件和43个C代码文件,用户可根据需求进行相应开发。为研究不同PSM缝宽对应不同有压波速时的模拟情况,需利用模型dwflow.c源代码文件的getSlotWidth函数,对其中缝宽相对于管道截面的最大宽度值结合式(4)进行修改。

为了调用修改后的代码,需经过一定的编译,

其方式分为:①Windows和Linux下独立控制台应用程序CLE;②Windows动态链接库DLL;③共享对象库SOL。本研究采取了Windows下的CLE方式。

2 SWMM模拟排水管道瞬变流的能力分析

针对排水管道中有压水力瞬变情况(见图2),以经典特征线法作为参照,对SWMM的模拟能力进行了分析及改进。如图2所示,在水库-管道-阀门系统中,上游水头 H_r 保持30 m,管长 L 为1 000 m,管径 D 和管壁曼宁系数 n 按实际排水管分别取为1 m和0.017,初始流速 V_0 为0.1 m/s和1 m/s,阀门流量系数为0.004 12;阀门瞬间关闭以形成瞬变流动。管道有压状态通过设置均匀间距虚拟节点进行观测,如图3(b)所示,节点需预留超载深度值以显示水头变化情况,同时需在模拟选项设置中选择动力波模拟并保留惯性项。

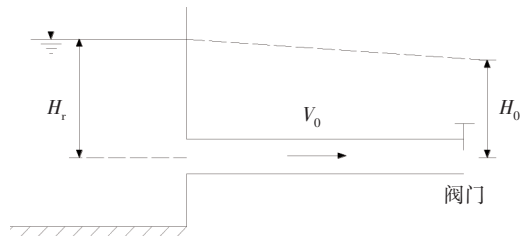


图2 水库-管道-阀门系统示意

Fig.2 Diagram of reservoir-pipe-valve system

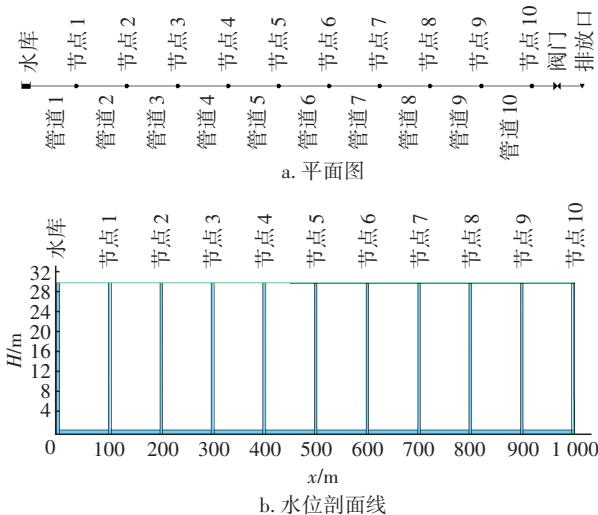


图3 SWMM模型概化图(以 $dx=100$ m为例)

Fig.3 Generalization diagram of SWMM model (taking $dx=100$ m as an example)

在计算中,包含管段离散度 $dx=1$ 、10、50、100、500、1 000 m,其中 $dx=1$ 000 m即原SWMM管道不分段情况;波速 $c=27.76$ 、277.57、500、750、1 000 m/s,

其中 $c=27.76\text{ m/s}$ 即原 SWMM 模拟波速;管径 $D=0.3, 0.6, 1, 2\text{ m}$;库朗德数 $Cr=0.5, 0.8, 1, 1.5, 2$ 。

2.1 评价方法

本研究以特征线法(管道瞬变流计算的经典准确方法)计算结果作为参照,从周期、峰值、衰减情况对 SWMM 模拟的准确度进行分析,从运行报告文件中的总体流量连续性误差、管段流量不稳定性指数(FII)对模拟的稳定性进行分析,从运行结果文件中的计算运行时间对计算效率进行分析。

关键参数的敏感性分析,整体以控制变量的形式设置不同模拟工况,并进一步计算均方根误差 σ 、灵敏度 S 和扰动率 α_i ,分析参数对模拟的影响。

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n |X_{\text{测}} - X_{\text{实}}|^2}{n-1}} \tag{6}$$

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(Y_{i+1} - Y_i)/Y_0}{(P_{i+1} - P_i)/100} \tag{7}$$

$$\alpha_i = \frac{Y_i - Y_0}{Y_0} \tag{8}$$

式中: $X_{\text{测}}$ 为测量数据,此处为 SWMM 模拟水头变化值; $X_{\text{实}}$ 为实验数据,此处为 MOC 模拟水头变化值; n 为测点数; Y_0 为基准输出结果; Y_i 为参数第 i 次变化时的输出; P_i 为参数相对于基准输入的百分比变化量。

2.2 原 SWMM 模拟能力分析

图 4 对应于原 SWMM 模拟情况,以 $V_0=1\text{ m/s}$ 为例,设置不同均匀间距的虚拟节点 $dx=1, 10, 100, 500, 1\,000\text{ m}$ 进行模拟分析。从图 4 可见,利用 SWMM 原设置,即 $dx=1\,000\text{ m}$ 组别,对排水管瞬变流模拟能力较差,基本无法模拟出水击波的周期、幅值及衰减情况;若设置虚拟节点,可较大改善峰值的准确度,但周期偏差仍较大;节点间距越小,峰值偏差越小,而周期基本同等程度偏离于 MOC 模拟曲线。SWMM 模型相对于 MOC 的整体曲线偏离度(或准确度)见表 1。

误差分析中,不划分管段峰值偏差较大的原因主要是,SWMM 在每个时间步长中,在整个管道的长度上对水击波峰进行了数值平均^[13]。设置节点后周期幅值仍有差距的原因,一是 SWMM 中 Sjöberg 修正项的影响导致从式(4)推导的模拟波速有所偏差,对模拟周期影响较大;二是 SWMM 中通过控制规则来实现关阀,实际最快关阀时间默认等同最小

演算时间步长,与 MOC 计算中的瞬间关阀略有差异。

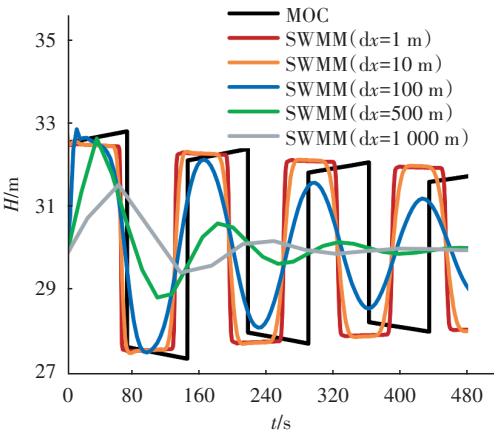


图 4 原 SWMM 模型与 MOC 闸门处水头模拟曲线对比
Fig.4 Comparison of head simulation curve between original SWMM model and MOC at gate

表 1 主要工况的均方根误差 σ

Tab.1 Root mean square error σ in main working conditions

$c/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	Cr	σ						
		$dx=1\text{ m}$	$dx/D=10/0.3$	$dx/D=10/0.6$	$dx/D=10/1$	$dx/D=10/2$	$dx=100\text{ m}$	$dx=1\,000\text{ m}$
27.76	1	1.229	1.787	1.295	1.162	1.087	0.904	1.017
277.57	1	0.175			0.333		0.670	1.059
500	0.5	0.502			0.509	0.508		
	1	0.503	1.234	1.134	0.542	0.512	0.687	0.985
	2	0.534			0.640	0.564		
1 000	1	1.341			1.265		1.016	0.985

2.3 改进的 SWMM 模拟能力及参数分析

2.3.1 准确度分析

图 5 为修改 PSM 狭缝宽度后的模拟情况,初步设置 $Cr=1, D=1\text{ m}$,对比 SWMM 在设置虚拟节点前后、不同空间步长 dx 及波速 c 的模拟情况。对比图 4 和图 5 并结合表 1 可见,修改缝宽可较大程度提高模拟准确度,使水头在波峰、周期、衰减情况上同时得到较好模拟,均方差从整体大于 1 缩减到小于 1。

对于空间步长 dx 的影响,主要见图 5(a), dx 取值越小则幅值和衰减偏差越小,模拟结果整体越准确,且 1 m 与 10 m 组别的模拟差别很小;不同 dx 模拟周期与 MOC 结果基本一致。其中原因与设置虚拟节点相同,因为 SWMM 有压波模拟需对控制方程进行离散求解,当 dx 即离散求解单元越小时,以单元平均值表示的水头值越接近实际,模拟越准确,

但计算时间也随之增加。

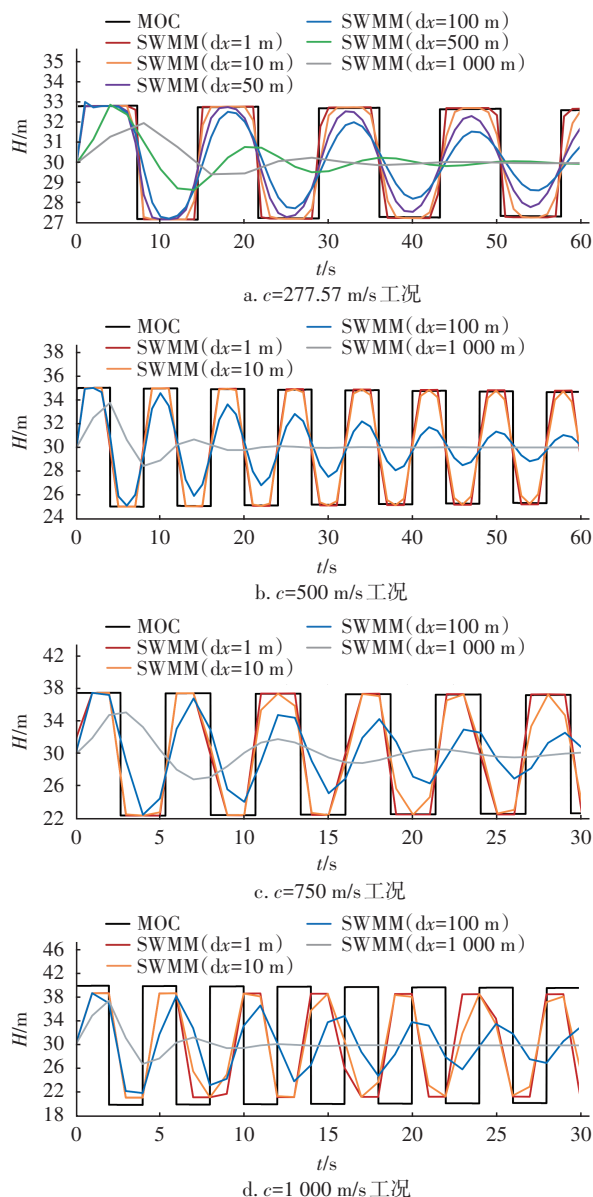


图5 不同空间步长 dx 和波速 c 下闸门处水头模拟对比

Fig.5 Comparison of head simulation at gate with different spatial step size dx and wave velocity c

对于波速 c 的影响,整体上为低波速模拟不准确,高波速模拟不稳定,中间波速模拟较好。原模型中 $c=27.76$ m/s时模拟偏差最大; $c=277.57\sim 750$ m/s时周期、幅值、衰减情况模拟均较好; $c=1\,000$ m/s时,模拟效果不佳,且此时曲线不规则波动明显。另外,波速越大,峰值两侧衰减越明显。误差主要由PSM算法导致,低速波模拟需取较大缝宽,在局部增加较大虚拟库容,引起局部的不连续性;高速波模拟需取极小缝宽,造成水面宽度突变,降低了

模拟的稳定性。

图6以模拟效果和计算效率均较好的 $dx=10$ m、 $c=500$ m/s组别为例,取 $D=0.3$ 、 0.6 、 1 、 2 m,进一步分析不同 dx/D 对SWMM模拟的影响。其中 $D=1$ m和 $D=0.3$ m分别为城市排水管径的一般值和最小值。从图6中可见, dx/D 越小则模拟结果越准确,反之则模拟误差越大;且其对准确度影响较大,当 D 缩小为 0.6 m时, dx/D 仅扩大 1.67 倍,但幅值和周期偏差了约 30% 。其原因与图5对 dx 的分析一致,另外对于 dx/D 的选取可在后续实验给出更具普适性的优化公式。

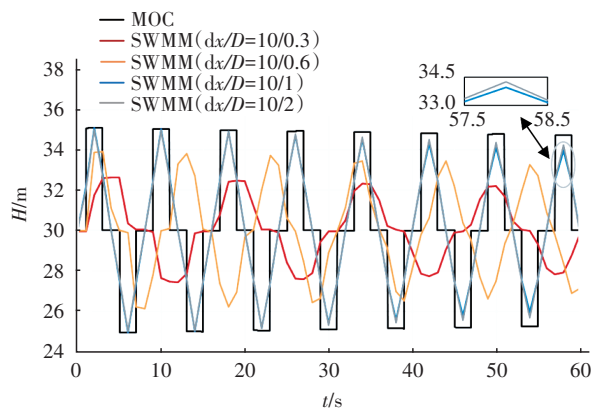


图6 不同 dx/D 下管道中点处水头变化模拟对比

Fig.6 Comparison of head simulation at pipeline midpoint under different dx/D

图7在上述波形对比图分析的基础上,进一步计算了均方差 σ 和灵敏度 S ,结果发现,参数 c 、 dx 、 Cr 和 dx/D 对SWMM的模拟准确度均有较大影响。其中,有压波速 c 对准确度的影响最大, dx 的影响程度相对最小。

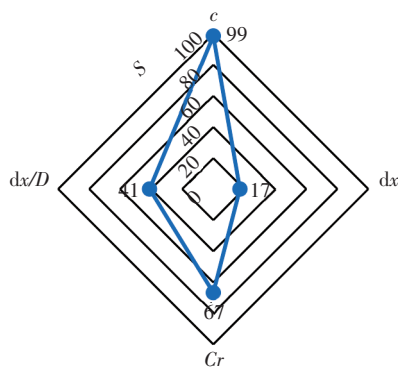


图7 各参数对模拟准确度的灵敏度

Fig.7 Sensitivity of various parameters to simulation accuracy

2.3.2 稳定性分析

① 稳定性 Cr 条件检验

图 8 选取不同 dx 和 D ,以 $Cr=1$ 作为基准点,分析 Cr 对模拟准确度的扰动影响;图 9 以 $dx=10\text{ m}$ 、 $c=500\text{ m/s}$ 工况为例,设置 $Cr=0.5$ 、 0.8 、 1 、 1.5 、 2 ,对比 MOC 水头变化曲线。从图 9 可见, Cr 越小则模拟准确度越高,但对周期基本无影响。具体而言, $Cr=1$ 虽满足了稳定性要求,但峰值衰减较快; $Cr<1$ 时,周期、峰值和衰减与 MOC 的吻合度更高,对应于图 8 的 Cr 扰动为负值时准确度扰动率为正; $Cr>1$ 时,峰值在前两个周期内偏差较小,但之后逐渐增大,对应于图 8 的 Cr 扰动为正值时准确度扰动率略低于 0。由此可得,CFL 条件可基本保证模拟的准确度和稳定性,但实际可选取 Cr 适当小于 1 以优化模拟效果。

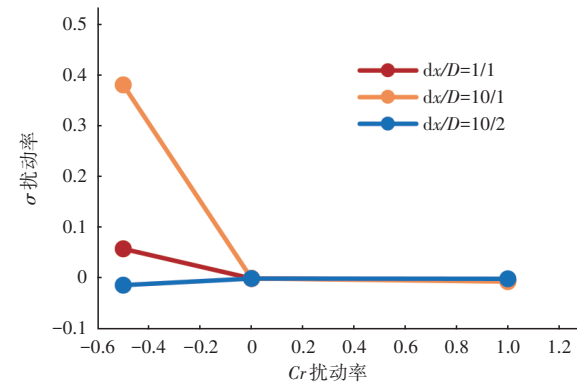


图 8 Cr 扰动对模拟结果的影响

Fig.8 Influence of Cr disturbance on simulation results

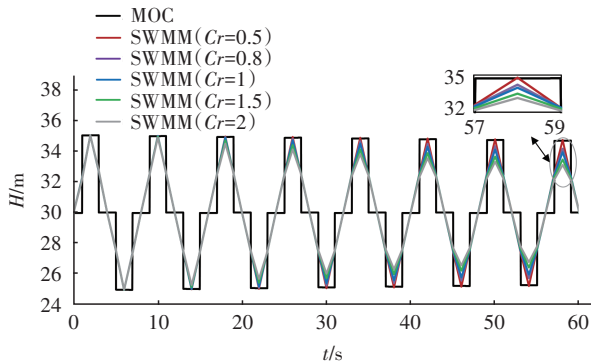


图 9 不同 Cr 下管道中点处水头模拟对比

Fig.9 Comparison of head simulation at midpoint of pipeline with different Cr

② 稳定性影响参数分析

在监测稳定性指标维持数值模拟稳定性的过程中,最小时间步长、收敛精度(即容差)、最小节点

表面积(MNSA)是较为关键的参数:

a. 最小时间步长以 CFL 条件为优先调控准则,但需同时调整后两者,选取较大迭代次数为 15、容差为 $10^5\sim10^6$ 、MNSA 为 $10^{-5}\sim10^{-3}\text{ m}^2$ 。

b. 容差取值越小,则模拟结果越准确,但是容易导致单步演算不收敛率越大,使得计算时间稍长;另外,容差对模拟的影响在前期较小,但在后期会出现容差越小、水头衰减越快、变化曲线变光滑的现象。

c. MNSA 的设置会产生一定的虚拟库容,其可以帮助维持 PSM 狭缝处的局部水体平衡,维持模拟稳定性,但也会引起一定计算误差,因而同时影响了模拟结果的稳定性和准确度。在本研究的实验条件下,MNSA 取值越小,模拟精度越高;若 MNSA 过大,则无法模拟相应的有压波速,且水头衰减很快;另外其对计算时长基本无影响。

2.3.3 计算效率分析

计算效率以工况运行所需 CPU 计算时间为指标,且所有工况设定为控制 2 min 内管内水流平稳后瞬间关阀,总模拟时长为 10 min。表 2 对主要工况的计算时间进行了汇总,其中,计算时间小于最小报告时间步长(1 s)时系统报告显示为 0 s,未研究的工况以“—”表示。

表 2 主要工况计算时间统计

Tab.2 Calculation time statistics of main working conditions

$c/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	Cr	计算时间/s						
		$dx=1\text{ m}$	$dx/D=10/0.3$	$dx/D=10/0.6$	$dx/D=10/1$	$dx/D=10/2$	$dx=100\text{ m}$	$dx=1\ 000\text{ m}$
27.76	1	13	0	0	0	0	0	0
277.57	1	763	—	—	22	—	0	0
500	0.5	2 217	57	56	57	55	—	—
	1	1 521	36	44	49	46	0	0
	2	1 373	49	41	42	44	—	—
1 000	0.5	3 898	—	—	109	—	—	—
	1	3 714	—	—	60	—	0	0
	2	881	—	—	63	—	—	—

图 10 进一步计算了各参数对计算时间的灵敏度 S 。结合表 2 和图 10 可以看出, dx 和 Cr 越小、 c 越大(对应缝宽设置越窄),则计算时间越长; dx 对计算效率的影响最大, Cr 影响较小,管段管径比 dx/D 则基本无影响。

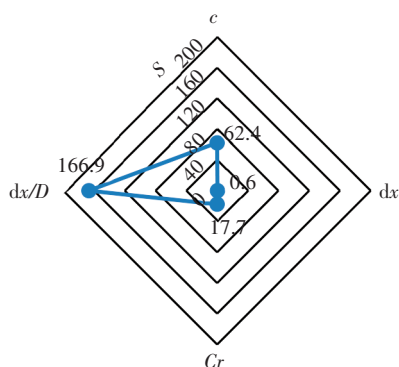


图10 各参数对计算时间的灵敏度

Fig.10 Sensitivity of various parameters to calculation time

本研究提出的改进方法虽会在一定程度上降低计算效率,但可有效提高计算准确性和稳定性,可适当选取参数(虚拟节点数、缝宽等)来提高计算模型的综合性能。例如,当 $dx=10\text{ m}$ 时,模型计算准确性明显高于 $dx>50\text{ m}$ 时,接近于 $dx=1\text{ m}$ 时的计算精度,但计算效率远高于 $dx=1\text{ m}$ 时;在 $dx=10\text{ m}$ 基础上,为了提高计算结果稳定性,建议采用中间波速($c=278\sim 750\text{ m/s}$)选取缝宽;通常上述虚拟节点数、缝宽的选取,在适当降低计算效率时,可明显提高计算准确性和稳定性。

3 结论

针对排水管道中有压水力瞬变情况,以经典特征线法计算结果作为参照,对SWMM的模拟能力进行了分析及改进。计算结果发现,原SWMM模型对排水管道快速有压瞬变流的模拟能力较差。为此提出并采用“设置虚拟节点、修改Preissmann狭缝宽度”改进方法,可有效提高SWMM模拟瞬变流的计算精度。

进一步研究分析了空间步长、波速、管段管径比、CFL稳定性条件、收敛精度及节点最小表面积等关键参数对模拟准确度、稳定性、计算效率的影响,并给出了建议取值范围。在计算准确度方面,空间步长及管段管径比越小、取中间波速($c=278\sim 750\text{ m/s}$)及库朗德数适当小于1,模拟越准确。在计算稳定性方面,通过CFL条件调整时间步长可基本满足模拟的稳定性,但库朗德数适当小于1时模拟效果更精确且稳定;另外稳定性受收敛精度、最小节点表面积的影响,针对本研究中的算例建议取值范围分别为 $10^5\sim 10^6$ 和 $10^{-5}\sim 10^{-3}\text{ m}^2$ 。在计算效率方面,

受模拟波速 c 及时空离散度 dt 、 dx 影响较大,离散越细、波速越大,计算时间越长;收敛精度设置有较小影响;当兼顾准确度、稳定性及计算效率时,推荐以 $dx=10\text{ m}$ 即 $dx/D=10/1$ 的方式设置虚拟节点,对应中间波速($c=278\sim 750\text{ m/s}$)修改缝宽,可使模型的综合性能有较大提高。

参考文献:

- [1] 康得军,孙健,匡帅,等.暴雨洪水管理模型(SWMM)研究应用及发展趋势[J].净水技术,2019,38(3):45-50.
KANG Dejun, SUN Jian, KUANG Shuai, et al. Development trend and application of storm water management model (SWMM) [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(3): 45-50 (in Chinese).
- [2] 陈虹,李家科,李亚娇,等.暴雨洪水管理模型SWMM的研究及应用进展[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2015,43(12):225-234.
CHEN Hong, LI Jiake, LI Yajiao, et al. Progress on research and application of storm water management model (SWMM) [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2015, 43(12): 225-234 (in Chinese).
- [3] 刘硕敏,吴荣芳,刘灿灿,等.海绵校园建设中重力流生态滤池的管理问题与对策[J].排灌机械工程学报,2020,38(3):261-265.
LIU Shuomin, WU Rongfang, LIU Cancan, et al. Management problems and countermeasures of gravity flow ecological filter in sponge campus construction [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(3): 261-265 (in Chinese).
- [4] 卢坤铭,周领,刘静.水流冲击多段滞留气团的三维数值模拟研究[J].排灌机械工程学报,2021,39(3):264-269.
LU Kunming, ZHOU Ling, LIU Jing, et al. Three-dimensional numerical simulation of water flow impacting multiple entrapped air pockets [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(3): 264-269 (in Chinese).
- [5] 卢茜,周冠南,李良松,等.基于SWMM的城市排涝措施研究及应用[J].水利水电技术,2019,50(7):13-21.
LU Xi, ZHOU Guannan, LI Liangsong, et al. Research on urban drainage measures and application based on SWMM [J]. Water Resources and Hydropower

- Engineering, 2019, 50(7): 13-21 (in Chinese).
- [6] 赵靓芳,莫耀钧,杜至力,等. 基于SWMM的城市河道闸阀优化控制的排水防涝模型研究——以猎德涌流域为例[J]. 中国农村水利水电, 2019(9): 171-176.
- ZHAO Liangfang, MO Yaojun, DU Zhili, *et al.* Research on the simulation model of urban drainage and flood control under the optimization control of gate based on SWMM — taking Liede River basin as an example [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019 (9): 171-176 (in Chinese).
- [7] 陈明辉,黄培培,吴非,等. 基于SWMM的城市排水管网承载力评价与优化研究[J]. 测绘通报, 2014(3): 54-57.
- CHEN Minghui, HUANG Peipei, WU Fei, *et al.* The carrying capacity evaluation and optimization research of urban drainage network based on SWMM [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014 (3): 54-57 (in Chinese).
- [8] 耿艳芬. 城市雨洪的水动力耦合模型研究[D]. 大连:大连理工大学, 2006.
- GENG Yanfen. A Coupled Hydraulic Numerical Models on the Urban Rain Flood [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006 (in Chinese).
- [9] 喻海军,范玉燕,穆杰,等. 城市排水管网混合流数值模拟研究进展[J]. 水电能源科学, 2020, 38(4): 95-99.
- YU Haijun, FAN Yuyan, MU Jie, *et al.* Research progress and perspective of numerical simulation of mixed flow in urban drainage system [J]. Water Resources and Power, 2020, 38 (4): 95-99 (in Chinese).
- [10] MALEKPOUR A, KARNEY B W. Spurious numerical oscillations in the Preissmann slot method: origin and suppression [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 142(3): 04015060.
- [11] HODGES B R. An artificial compressibility method for 1D simulation of open-channel and pressurized-pipe flow [J]. Water, 2020, 12(6): 1727.
- [12] FERRERI G B, FRENI G, TOMASELLI P. Ability of Preissmann slot scheme to simulate smooth pressurisation transient in sewers [J]. Water Science and Technology, 2010, 62(8): 1848-1858.
- [13] RIDGWAY K E, KUMPULA G. Surge modeling in sewers using alternative hydraulic software programs [J]. Journal of Water Management Modeling, 2008. DOI: 10.14796/JWMM.R228-10.
- [14] PACHALY R L, VASCONCELOS J G, ALLASIA D G, *et al.* Comparing SWMM 5.1 calculation alternatives to represent unsteady stormwater sewer flows [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 146(7): 4020046.
- 作者简介:**周领(1985-),男,安徽凤阳人,博士,教授,主要研究方向为输排水工程水力学、城市水力学。
- E-mail:** zllhu@hhu.edu.cn
- 收稿日期:**2020-10-05
- 修回日期:**2020-10-26

(编辑:刘贵春)

珍惜资源,保护环境,建设美丽中国