建筑排水立管数值模拟的初步探讨及应用

Application and Preliminary Study on the Numerical Simulation of Building Drainage riser

陈雪宇[1]，黄晓家[2,3]，谢水波[2]，沃留杰[4]

(1.福州海峡职业技术学院,福州　350014;2.南华大学 城市建设学院,湖南　衡阳　421001;3.中国中元国际工程公司,北京　100089;4.宁波市市政公用工程安全质量监督站,浙江　宁波　315016)

CHEN Xue-yu[1], HUANG Xiao-jia[2,3], XIE Shui-bo[2], WO Liu-jie[4]

(1. Fuzhou Strait Vocation & Technological College, Fuzhou 350014, China; 2. School of Urban Construction, University of South China, Hengyang 421001, China; 3. China IPPR International Engineering Corporation, Beijing 100089, China; 4. Ningbo Municipal Engineering Safety Quality Supervision Station, Ningbo 315016, China)

【摘　要】近十多年来，计算流体动力学(CFD)已发展到完全可以分析三维粘性湍流及漩涡运动等复杂问题。它不仅作为一个研究工具，而且还作为设计工具在水利工程、土木工程、环境工程、工业制造等领域发挥作用。文章通过具体算例，探讨了计算流体力学软件 Fluent 关键参数的设置，并将数值模拟的计算结果与经典立管试验结果进行了分析比较。结果表明，Fluent 计算结果与立管试验结果在压强分布规律上完全一致。即 CFD模拟技术可以应用于建筑排水立管研究。

【Abstract】Over the past decades, the complex issues such as three-dimensional viscous turbulent and vortex motion have been completely analysed by Computational Fluid Dynamics (CFD), which is not only as research tool but design tool in hydraulic engineering, civil engineering, environmental engineering, industrial manufacturing, and so on. The key parameters setting of CFD software-Fluent was discussed through specific examples. Besides, the comparison of results about numerical simulation and classic risers test was done in this paper. It shows that the results about Fluent simulation and riser's experiment are extremely consistent in pressure distribution, that is to say, CFD technique could be applied to research on building drainage riser.

【关键词】计算流体动力学(CFD)；排水立管；数值模拟

【Key words】computational Fluid Dynamics(CFD); building drainage riser; numerical simulation

【中图分类号】TU823　　【文献标志码】A　　【文章编号】1007-9467(2011) 03-00-87-03

建筑排水系统是实现建筑物功能的重要组成部分，对居住建筑的卫生环境有着直接的影响。随着社会的飞速发展，人们对于住宅环境卫生的要求越来越高，这就要求工程设计人员对建筑排水系统内流体的运动要有更深刻的认识。但目前对排水立管流态、瞬态压强传播机理、系统内气体运动模式等问题仍不清楚。基于恒定流理论的现有方法对于这些问题的分析难以取得有效进展，需要对排水系统基础理论进一步补充发展。但通过实验和现场测试等传统研究方法资金耗费巨大，需要开辟一种新的研究方法[1]。

随着计算机技术和数值计算技术的迅速发展，计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics，简称 CFD)技术在流体数值仿真方面的应用日益广泛。本文以成熟的计算流体力学商业软件 Fluent 为平台，模拟建筑立管排水过程的两相流动，计算特定流量下不同时刻立管的压强波动和分布情况以验证运用 CFD 模拟技术研究建筑排水系统的可行性。

1　计算模型的选择

建筑内部排水管道按非满流设计，污水中含有固体杂质，管道内水流是水、气、固三种介质的复杂运动。因此立管排污过程是一个三维非稳态多相耦合流动过程。由于计算三维非稳态湍流气液固多相流相当复杂，涉及到固相就更复杂而且计算时间更长。排水管道中粪便污水含固体物，但所占排水体积少，综合考虑，简化为气液两相流。本

【作者简介】陈雪宇(1985~)，男，福建人，助教，从事建筑排水理论及现场教学与研究，(电子信箱) chenxueyu1985@163.com。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

文以伸顶通气立管为例，建立了一个包含全部流体内部边界的求解域几何模型，进行数值模拟，模型如图 1 所示，立管长 9.5m，进水横支管 0.5m，出户排水横干管 1.5m，管径为 75mm，坡度为 0.045，材质为 UPVC 塑料管。伸顶通气立管上截取压强平面位置如下表所示：

表 1　伸顶通气立管上各平面位置分布

编号	1	2	3	4	5	6	7	8
通气管段/m	9.4	9.2	9.0	8.8	8.6	8.4	7.4	6.4
编号	9	10	11	12	13	14	15	16
立管管段/m	5.4	4.4	3.4	2.4	1.6	0.8	0.4	0

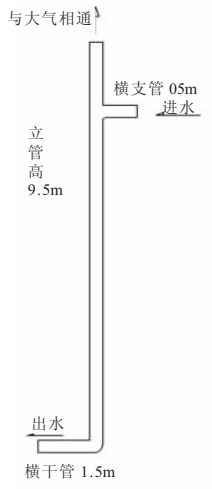


图 1　计算模型

2　数值模拟

2.1　网格划分

在数值模拟中，网格划分是否合理关系到是否能有效应用 CFD 进行流动问题分析的关键技术之一。选择合理的网格类型对求解计算时间、计算精度及求解的稳定性有重大的影响。因所涉及的求解域虽然模型尺寸大但几何形状不复杂，因此综合考虑结构、计算时间、精度及稳定性等因素，除了立管与弯管连接处采用非结构网格其他地方都采用结构网格划分。网格总数为 7 万个。

2.2　控制方程离散

Fluent 软件接收网格模型后，采用有限体积法(Finite Volume Method, FVM) 对各控制方程在空间域和时间域上进行离散。离散格式采用容易收敛的一阶迎风格式，压力速度耦合方式选适用于非稳态流动的 PISO 算法，压力插值方式采用 Body Force Weighted。湍流模型采用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型。近壁区处理采用标准壁面函数。

2.3　VOF 模型

为了能够有效地求解立管排水过程中流场内的复杂自由液面，本文采用应用广泛的多相流模型 VOF(Volume of Fluid, VOF)。在 VOF 中，各相之间界面的跟踪通过求解各相体积分数的连续方程来完成[2]。

$$\frac{\partial \alpha_w}{\partial t}+u_i\frac{\partial \alpha_w}{\partial x_i}=0$$

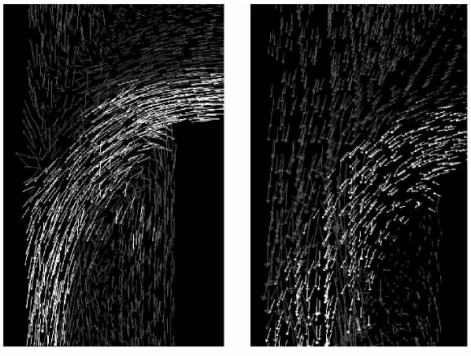
2.4　初始条件与边界条件

初始条件下，管内气流与外界大气相通，气流静止，压强为大气压。主相为气相即空气，其黏度为 1.7894×10^{-5}kg/（m·s），液相为液态水，密度和黏度分别为 998.2kg/m^3，和 1.003×10^{-3}kg/（m·s），重力加速度为 −9.81m/s^2，工作压力为大气压，参考压力点定义在立管顶部。

边界条件中，壁面条件为无滑动，表面相对粗糙度为 0.002mm；横枝管入口定义为速度入口，进水流速为 0.68m/s；伸顶通气处与大气相通为压力出口，表压为 0，方向垂直于边界，湍流强度为 5%，水力直径为 75mm；底部横干管出口为压力出口，表压为 0，方向垂直于边界，湍流强度为 10%，水力直径为 75mm。

3　计算结果分析

模拟设定横枝管进水流量为 3L/s。清水在横支管呈自由液面排水，流到立管连接处时在重力作用下形成水舌落到立管对面，在立管对面分离并绕立管作高度螺旋运动。水舌上下都有漩涡形成，且立管连接处上部因横支管排水气体向上流动，立管下部气体随水流向下运动（见图 2a）。此时立管连接处因水气聚集压强增大（见图 3）。



a　　b

图 2　排水主管横支管连接处水流图

随着排水不断进行，立管空气通过横干管被挤出，水舌上部空气开始向下运动（见图 2b）。立管内零压强点下降(见图 3～图 5）。当排水到达弯管处时，受到阻碍流速减小，挟带的气体从中析出，析出的气体向上或向横干管出口运动，此时立管底部压力有所回升（见图 6）。随着横干管排水越多，水流形成水跃充满横干管断面，从水中分离出的气体不能及时排走，在立管的下部和横干管内形成正压。立管压力稳定后沿水流方向，立管中的压力由负到正，由小到大逐渐增加，零压点靠近立管底部（见图 7）。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

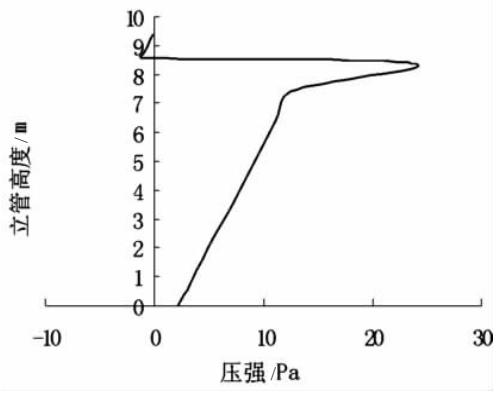


图 3　0.714s 立管压强

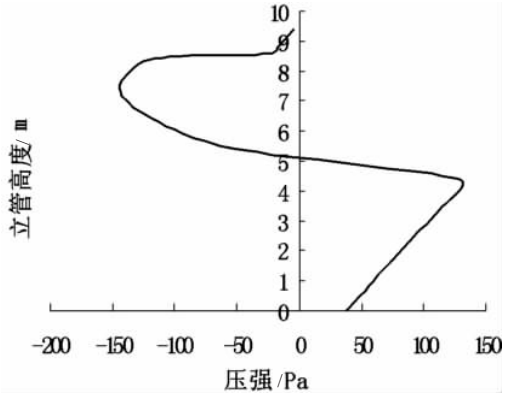


图 4　1.479s 立管压强

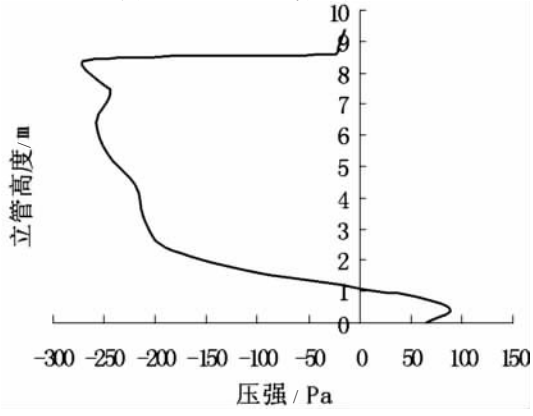


图 5　188s 立管压强

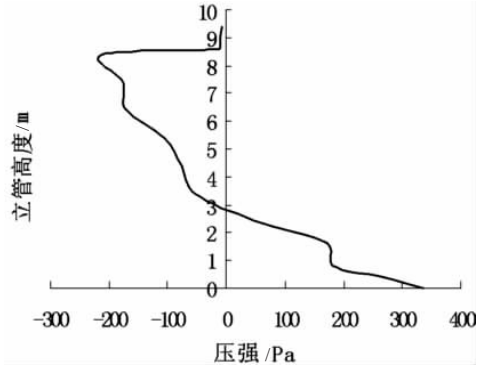


图 6　3.053s 立管压强

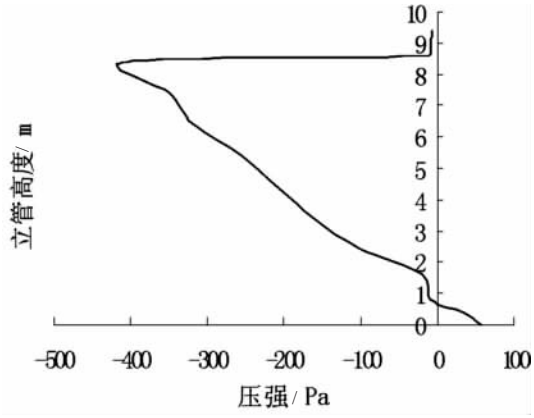


图 7　753s 立管压强

综上可以看出，用 Fluent 计算得出的立管压强分布情况与国内外正负压区理论压力曲线[3]、[4]和实验结果[5]在压力分布规律上完全一致。

4　总结

随着社会对建筑设备系统的要求越来越高，传统的设计、研究方法对于解决一些显现的问题显得比较无力，需要新的方法和工具进行研究。CFD 数值模拟技术在设计初期，可以快捷地给出流场内细节的定量描述；完全控制流体的性质，灵活地进行各种参数分析；有效地缩短设计周期，节省大量实验费用，大大降低成本，减少风险，并能得到最优的设计方案。可以确定，CFD 数值模拟技术是一种极有前途的研究方法。

同时也要看到，由于仍存在许多技术上的难题还未解决，比如对湍流的基本机理至今仍未完全弄清，也就不可能清楚和准确地描述并定量地给出各类复杂湍流流动的运动特性[6]，所以短期内，CFD 数值模拟还不可能完全取代直接试验，而是与试验和理论分析相结合来进行研究。可以展望随着 CFD 技术的不断成熟并将其应用于建筑排水的基础研究，将会有力的推动建筑给排水行业的发展。

【参考文献】

【1】陈雪宇，黄晓家，谢水波，等. 计算流体动力学（CFD）在建筑排水系统中的应用[J]. 给水排水，2009,35(11):204-208.

【2】刘儒勋，舒期望. 计算流体力学的若干新方法[M]. 北京:科学出版社，2004.

【3】王增长. 建筑给水排水工程(第五版)[M].北京:中国建筑工业出版社，2005.

【4】Wise A F E. Swaffield J A . Water,Sanitary and Waste Services for Buildings[C]. Fifth Edition. Butterworth-Heinemann , 2002.

【5】张露. 七层 PVC-U 排水立管压力对水封影响的试验研究 [D]. 长沙: 湖南大学,2008.

【6】孙智一，吴晓蓉. 计算流体力学数值模拟方法的探讨及应用[J]. 水利科技与经济,2008,14(2):126-128.

【收稿日期】2010-12-18

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net