深隧调蓄系统中入流竖井内部流场的数值模拟

夏 海[1]， 王红武[1]， 胡 龙[1,2]
（1. 同济大学 环境科学与工程学院，上海 200092；2. 上海市城市建设设计研究总院＜集团＞有限公司，上海 200125）

摘 要： 入流竖井是城市深隧调蓄系统与浅层排水系统衔接的关键部件，竖井内部流场直接影响竖井的消能、控声、排气功能，进而影响深隧系统的正常运转。为此，利用 FLUENT 软件中的 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型，对跌落式入流竖井内部流场进行了数值模拟，计算了不同竖井体型和不同入口流速工况下竖井内部压力场、速度场的变化规律以及竖井的消能率。结果表明，入口流速的变化对下方渐缩管和消能管下侧的压力影响较大，低流速工况对消能管的压力较大、高流速工况对渐缩管的压力较大，入口流速的增加会导致消能管消能效果的下降；另外，适当增加消能管长度可有效提高消能效果和出水稳定性。

关键词： 深层隧道调蓄系统； 入流竖井； 入口流速； 消能率； 数值模拟
中图分类号： TU992 **文献标识码：** A **文章编号：** 1000－4602(2019)01－0123－05

Numerical Simulation of Internal Flow Field of Inflow Shaft in Deep Stormwater Storage Tunnel System

XIA Hai[1]， WANG Hong-wu[1]， HU Long[1,2]
(1. *School of Environmental Science and Engineering*, *Tongji University*, *Shanghai* 200092, *China*;
2. *Shanghai Urban Construction Design and Research Institute* ＜*Group*＞ *Co. Ltd.*, *Shanghai* 200125, *China*)

Abstract: The inflow shaft is a key component connecting the urban deep stormwater storage tunnel system with the shallow drainage system. The internal flow field of the shaft directly affects its energy dissipation, noise control and exhaust, which further affects the normal operation of the deep tunnel system. The RNG k-ε turbulence model in FLUENT software was thereby used to simulate the internal flow field of the drop-type inflow shaft, and the pressure field, velocity field and energy dissipation rate of the shaft were calculated under different shaft shape and inlet velocity. The results showed that the change of inlet velocity had a great influence on the pressure of the downward tapered tube and the downside of the energy dissipator. The pressure on the energy dissipator was higher under the condition of low velocity, while the pressure on the downward tapered tube was higher under high velocity. The increase of the inlet velocity would lead to the decrease of the energy dissipation effect. In addition, properly increasing the length of the energy dissipator could effectively improve the energy dissipation effect and the stability of the effluent.

基金项目：国家水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07304－003)； 上海市科学技术委员会科研计划项目(16DZ1202208)
通信作者：王红武 E－mail:wanghongwu@tongji.edu.cn

Key words: deep stormwater storage tunnel system; inflow shaft; inlet velocity; energy dissipation rate; numerical simulation

城市深层隧道调蓄系统,也称作深层隧道排水系统(简称深隧系统),是埋设在地下空间的大型、特大型排水隧道,主要由主隧道、入流竖井、排水泵组、通风设施和排泥设施组成,具有调蓄雨水和排水、控制合流溢流污染的功能[1]。由于深隧系统埋深较大,能有效避免与地下浅层空间排水系统以及其他地下设施的设计冲突,并且可以采用直线设计[2]。

深隧系统的应用可有效提高排水管网的截流倍数,将初期雨水存入深层隧道并输送至污水厂,进而有效控制面源污染[3]。由于深层隧道布设在地下底层,入流竖井作为连接深隧调蓄系统与浅层排水系统的部件,其内部大流量和高落差的水流往往具有很大的能量,对构筑物有着巨大的破坏性。因此,采取合理有效的消能措施,消除下泄水流的巨大能量,是城市深隧调蓄系统设计中必须考虑的问题[4]。笔者针对一种跌落式竖井,采用 FLUENT 软件对其内部流场进行了三维数值模拟研究。在研究过程中,采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型,对比了不同工况和不同体型下竖井内部的速度场、压力场和消能率,以期为深隧入流竖井的设计提供参考。

1　计算模型

1.1　入流竖井的几何模型与网格划分

入流竖井主要包括进水管、竖管和消能管这 3 部分,各部分之间通过弯头和大小管连接。构建入流竖井的几何模型,具体尺寸见图 1(此处以 4 m 长的消能管为例)。利用前处理软件 GAMBIT 进行网格划分,生成的网格为非结构化网格,网格总数为 408 488 个。

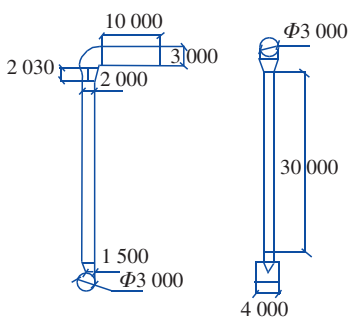


图 1　入流竖井几何尺寸示意

Fig. 1　Geometric size diagram of inflow shaft

1.2　计算参数设置

进口为速度进口,进口流速分别设为 1、1.5、2 m/s,出口为 outflow 出口。采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型进行计算,动量方程、湍动能方程和湍动能耗散率均采用一阶迎风差分格式,采用 SIMPLE 算法耦合求解压力与速度的耦合。当残差低于 10^{-3} 且出口流速不再继续变化时认为计算已收敛[5]。

2　计算结果与分析

2.1　入口流速对计算结果的影响

选取消能管长度为 4 m 的竖井模型,主要从压力场、速度场和消能率等 3 个方面分析入口流速分别为 1、1.5、2 m/s 这 3 种工况的计算结果。

2.1.1　压力场分析

竖井的中心截面在入口流速分别为 1、1.5、2 m/s 时的压力场分布如图 2 所示。可以看出,随着入口流速的增大,竖井上部弯头处的压力有小幅增大趋势;下方渐缩管和消能管下侧为压力最大区域,且受入口流速变化的影响较大。消能管下侧的压力场随着入口流速的增大有明显的下降和分层趋势,这是因为流速较大的工况在渐缩管处的能量耗散较多,压力减小较大,从而导致消能管底部压力较小。根据模拟结果,在低流速工况下,下方消能管承受的压力较大;在高流速工况下,渐缩管承受的压力较大。实际设计施工中,渐缩管和消能管内壁需要有较高的抗压、抗冲击能力。

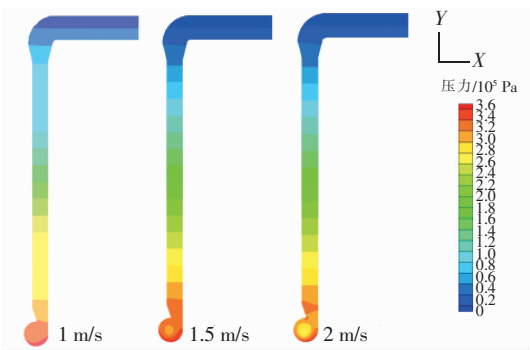


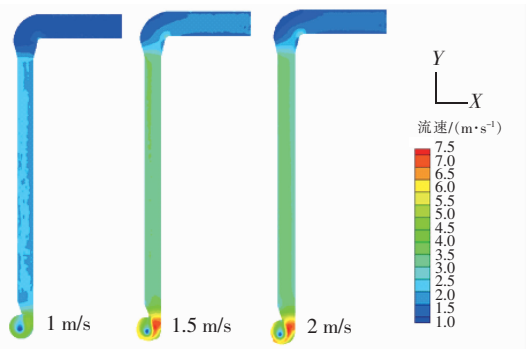
图 2　3 种入口流速下竖井内部的压力场变化

Fig. 2　Variation of pressure field in inflow shaft at three inlet velocities

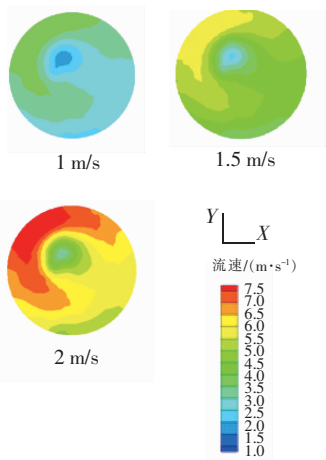
2.1.2　速度场分析

图 3 为不同入口流速下竖井内部的速度场云

图。可知,不同入口流速条件下竖井内的流速分布规律基本一致,渐缩管底部为流速最大区域,最大流速随着入口流速的增大而增大;在出口处,流速最大区域为 45°角斜上方处,流速相对于水流刚进入消能管时有较大幅度的减小。主要原因为水流在消能管内为切向流动,水流之间的作用以及水流与管壁之间的作用对水流动能的耗散起到了重要作用。



a. 中心截面的流速分布



b. 消能管出口处的流速分布

图 3　不同入口流速下竖井内部的速度场变化

Fig. 3　Variation of velocity field in inflow shaft at three inlet velocities

2.1.3　消能率分析

本研究所模拟的竖井主要利用水流从竖井跌入消能井中的翻滚流动和相互冲撞消能。表 1 为 3 种入口流速下竖井的消能率。其中速度采用模拟结果中的质量平均速度,消能率通过水头来计算,即:

$$\eta = 1 - \frac{z_1 + \frac{v_1^2}{2g}}{z_2 + \frac{v_2^2}{2g}} \tag{1}$$

式中:η 为消能率;z_1、z_2 分别为入口和出口的高程,m;v_1、v_2 分别为入口和出口的质量平均速度,m/s;g 为重力加速度,m/s^2。

表 1　不同入口流速下竖井的消能率

Tab. 1　Energy dissipation rates of inflow shaft at different inlet velocities

项　目	实际入口流速/(m·s^{-1})	出口流速/(m·s^{-1})	高度差/m	消能率/%
1#	0.91	2.69	37.55	99.0
2#	1.37	4.07	37.55	97.8
3#	1.83	5.45	37.55	96.0

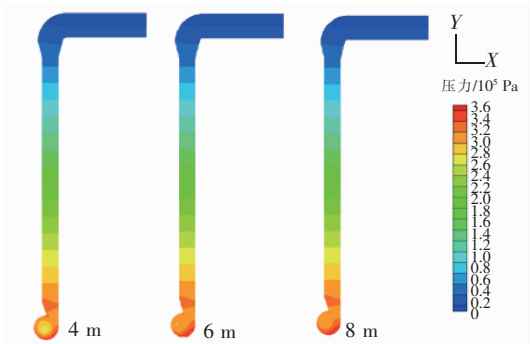
从表 1 可知,4 m 消能管的整体消能效果较好,当入口流速为 0.91 m/s 时消能率可达到 99.0%。随着入口流速的增加,竖井的消能率呈下降趋势。

2.2　消能管长度对计算结果的影响

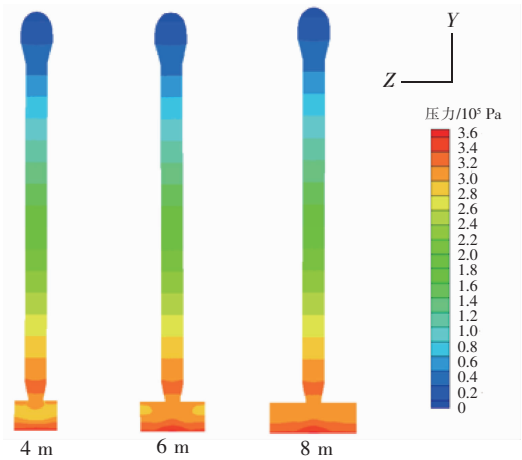
选取消能管长度分别为 4、6、8 m 的竖井模型,主要从压力场、速度场和消能率这 3 个方面,对入口流速为 2 m/s 条件下的计算结果进行分析。

2.2.1　压力场分析

不同消能管长度下竖井内部的压力场见图 4。



a. *XY* 截面



b. *YZ* 截面

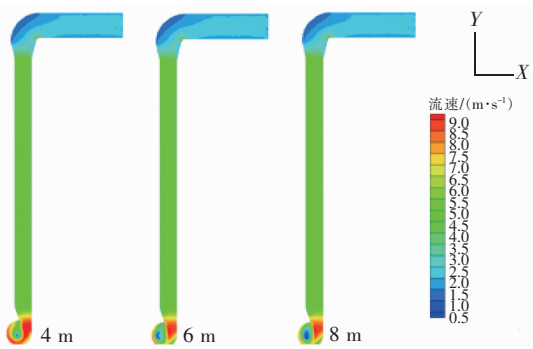
图 4　不同消能管长度下竖井内部的压力场变化

Fig. 4　Variation of pressure field in inflow shaft at different length of energy dissipator

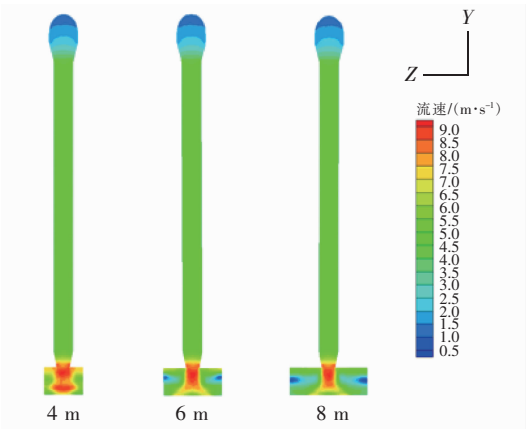
由图 4 可以看出，消能管长度的变化对于竖井 *XY* 中心截面压力场的分布影响较小，而随着消能管长度的增加，压力场分层现象减弱，压力分布更均匀，出水更加稳定。可见，在一定范围内增加竖井底部消能管长度能够提高出水稳定性。

2.2.2　速度场分析

图 5 为消能管长度分别为 4、6、8 m 时竖井内部的速度场变化。



a. *XY* 截面



b. *YZ* 截面

图 5　不同消能管长度下竖井内部的速度场变化

Fig. 5　Variation of velocity field in inflow shaft at different length of energy dissipator

由图 5 可以看出，当消能管长度从 4 m 增加到 6 m 时，进水管内的速度场趋于稳定，水流在进入消能管时的速度降低。从底部消能管的速度云图还可以看出，6 m 消能管中心截面的流速降低较 4 m 消能管的更为显著。而当消能管长度继续增加到 8 m 时，管内的速度场基本和 6 m 消能管的保持一致。在 *YZ* 截面和出口处的速度云图也符合这个趋势，当消能管长度从 4 m 增加到 6 m 时，水流在消能管内有更好、更稳定的消能效果，而进一步增加消能管长度对消能效果的提升并不明显。

2.2.3　消能率分析

模拟结果显示，在实际入口流速为 1.83 m/s、高度差为 37.55 m 的条件下，当消能管长度分别为 4、6、8 m 时，出口流速分别为 5.45、4.31、3.91 m/s，消能率分别为 96.0%、97.5%、97.9%。可以看出，该竖井体型确实有较好的消能效果，适当增加消能管的长度有利于提高竖井的消能率，但当消能管长度从 6 m 继续增加到 8 m 时对消能率的提升较少。

3　结论

①　水在竖井内流动过程中，承受负荷冲击较大的 3 个部件为竖井上方弯头、下方渐缩管以及消能管底部。入口流速的变化对下方渐缩管和消能管下侧的压力有着较大影响，鉴于此，在实际设计施工中，渐缩管和消能管内壁应该设计较高的抗压、抗冲击能力。另外，由于低流速工况对下方消能管的压力较大、高流速工况对渐缩管的压力较大，因此应分别针对不同工况对下方消能管以及渐缩管的抗冲击能力进行设计。同时，消能管长度的增加能够使出水压力场更加稳定，但是总体来说对竖井内部压力场的影响相对较小。

②　该竖井体型具有良好的消能效果，底部消能管为核心消能部件。模拟结果显示，水在消能管内呈旋流运动，即以切线方向的流动为主。入口流速的增加会导致消能管消能效果的下降，适当增加消能管长度可有效提高消能效果和出水稳定性。

参考文献：

[1]　刘家宏，夏霖，王浩，等. 城市深隧排水系统典型案例分析[J]. 科学通报，2017，62(27)：3269－3276.
Liu Jiahong, Xia Lin, Wang Hao, *et al*. Typical case analysis of deep tunnel drainage system in urban area [J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(27): 3269－3276(in Chinese).

[2]　丁留谦，王虹，李娜，等. 美国城市雨污蓄滞深隧的历史沿革及其借鉴意义[J]. 中国给水排水，2016，32(10)：35－41.
Ding Liuqian, Wang Hong, Li Na, *et al*. Evolution of deep stormwater storage tunnel projects in the United States and its reference value to China [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(10): 35－41(in Chinese).

[3]　何贞俊，王斌，杨聿，等. 市政排水系统中竖井研究及

（下转第 133 页）