

城门洞断面有压隧洞流速分布的数值模拟

张青青,胡 明,王雅莉

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:为了研究城门洞断面有压隧洞的流速分布规律,采用流体数值计算方法和雷诺应力模型对城门洞断面有压隧洞水流进行三维数值模拟,分析城门洞断面形式、雷诺数及水力半径等对城门洞断面有压隧洞流速分布的影响。计算结果表明:普通城门洞断面的流速分布比非普通城门洞断面的均匀;断面最大流速出现在 $0.6H \sim 0.7H$ 处;普通城门洞断面有压隧洞流速分布均匀的条件是系数 ε 为 0.25,此时流速分布为对数分布。

关键词:有压隧洞;城门洞断面;流速分布;水力半径;雷诺数

中图分类号:TV131.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)02-0016-06

Numerical simulation of velocity distribution pattern of city gate-shaped section of pressured tunnel//ZHANG Qingqing, HU Ming, WANG Yali (*College of Water Conservancy and Hydropower Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: In order to study the velocity distribution pattern of a city gate-shaped section of a pressured tunnel, three-dimensional numerical simulation was conducted of the flow of a city gate-shaped section of a pressured tunnel using the numerical calculation method and Reynolds stress model. The influence of the shape of the tunnel section, Reynolds number, and hydraulic radius on the velocity distribution pattern in the city gate-shaped section of the pressured tunnel are analyzed. The calculation results show that the velocity distribution of an ordinary city gate-shaped section of a pressured tunnel is more uniform than that of a non-ordinary city gate-shaped section of a pressured tunnel, and the position of maximum velocity is $0.6H \sim 0.7H$. The condition that makes the velocity distribution of the city gate-shaped section of the pressured tunnel uniform is that $\varepsilon=0.25$, which is when the velocity distribution starts showing logarithmic distribution.

Key words: pressured tunnel; city gate-shaped section; velocity distribution; hydraulic radius; Reynolds number

目前圆形断面有压隧洞的流速分布研究比较成熟,圆形断面隧洞的流速分布有层流的抛物线分布和紊流的对数分布,后者比前者均匀得多,关于圆形断面有压隧洞的流速分布有较多的经验公式和相关理论,并在工程实际中得以运用^[1]。对于城门洞断面明流或明满流隧洞的研究大多是关于正常水深、临界水深及收缩水深的计算,计算方法有图解法、试算法、近似计算公式法等^[2-4],而关于城门洞断面有压隧洞的流速分布规律的研究几乎没有。流速分布规律的研究涉及水头损失的计算,目前设计中计算城门洞断面有压隧洞水头损失时常采用圆形断面隧洞的计算公式,误差较大,有些水流现象还难以解释。由于隧洞中实际流速较大,流体受到壁面的粗糙程度的影响很小,几乎可以忽略不计,故本文的数值模拟只考虑雷诺数、断面形式和水力半径对城门洞断面有压隧洞流速分布的影响。

1 理论分析

N-S 方程描述了作用于液体任意给定区域力的动态平衡,方程的解依赖于流体的性质,也取决于所研究区域的边界条件,边界渐变过程越平顺,水力条件就越好。城门洞断面顶拱圆心角 θ 为 180° 时,顶拱与垂直边墙相切,水流平顺,流速分布较均匀,此时顶拱半径 R 为城门洞断面宽度 B 的 0.5 倍。当隧洞的坡降、壁面粗糙率和断面流量一定时,过水断面面积最小时的断面为水力最佳断面,此时水力条件最好,断面湿周 χ 最小^[1]。 θ 为 180° 的城门洞断面隧洞通过有压流时, χ 可由式(1)计算:

$$\chi = 2h + B + 3.14R \geq 2\sqrt{2hB} + 1.57B \quad (1)$$

式中: h 为垂直边墙高度。由式(1)可知,当且仅当 $2h=B$ 时,式(1)取等号,故 $h=0.5B$ 时, χ 最小。

城门洞断面分为普通城门洞断面和非普通城门洞断面,当城门洞断面垂直边墙高度 h 等于顶拱半径 R 且顶拱圆心角 θ 等于 180° 时称为普通城门洞断面^[2],普通城门洞断面有压隧洞的流速分布比非普通城门洞断面有压隧洞的均匀。对于普通城门洞断面有压隧洞,当流速分布均匀时,根据普朗特混合长度理论在紊流核心区得到的紊流切应力公式可知:雷诺数 Re 较大时,附加切应力比黏性切应力大得多,可以忽略黏性切应力的影响,认为紊流切应力就等于附加切应力,紊流切应力公式通过变形得到紊流流速分布公式^[1,5-6]为

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln z + C \tag{2}$$

式中: u 为断面流速; u_* 为摩阻流速; z 为断面流速点距离断面底部的高度; C 为常数; κ 为卡门常数,取 $0.36 \sim 0.40$ ^[7]。

设 $u_{\max}$ 为断面最大流速, β 为 z 与断面高度 H 的比值,取 $0 \sim 1.0$,将边界条件 $z=\beta H$ 、 $u=u_{\max}$ 代入式(2),导出普通城门洞断面有压隧洞的流速分布公式为

$$u = u_{\max} + \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{\beta H} \tag{3}$$

由无滑移边界条件可知:当 $z=H$ 时, $u=0$ 。将无滑移边界条件代入式(3)可得

$$\frac{u_{\max}}{u_*} = - \frac{\ln \beta}{\kappa} \tag{4}$$

设断面流速 u 与平均流速 u_{av} 之差为 Δu , Δu 越小,断面流速分布越均匀。 Δu 与最大流速 $u_{\max}$ 的比值为

$$\frac{\Delta u}{u_{\max}} = \frac{u_{\max} + \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{z}{\beta H} - u_{av}}{u_{\max}} \tag{5}$$

假设断面流速分布均匀,令 $\Delta u=0$, $\gamma=u_{\max}/u_{av}$ 。由式(4)和式(5)可以推导出 $z=\beta^{\frac{1}{\gamma}} H$,将 z 无量纲化, uz/u_{av} 具有雷诺数的性质^[6]。由式(5)推导出城门洞断面有压隧洞流速分布均匀时的水力半径 d 为

$$d = - \kappa \gamma \beta^{\frac{2\gamma-1}{\gamma}} \frac{H}{\ln \beta} \tag{6}$$

水力半径综合反映了过水断面的几何特征,水力半径越大,过流条件越好,流速分布越均匀。式(6)中 β 越小,城门洞断面有压隧洞流速分布均匀时的水力半径越大。参照圆管水力半径定义,普通城门洞断面水力半径 $d=0.25H$,令 $\varepsilon = -\kappa \gamma \beta^{\frac{2\gamma-1}{\gamma}} / \ln \beta$,则普通城门洞断面有压隧洞流速分布均匀时应满足 $\varepsilon=0.25$ 。

2 模型建立

a. 物理模型。物理模型为长 500 m 的城门洞断面有压隧洞,如图 1(a)所示。为了分析比较水力

半径和断面形式对流速分布的影响,分别选取 3 组断面进行分析,第 1 组断面为水力半径逐渐增大的非普通城门洞断面,分别为断面 1、断面 4、断面 6;第 2 组断面为水力半径逐渐增大的普通城门洞断面,分别为断面 2、断面 3、断面 5、断面 7、断面 8;第 3 组断面是两组水力半径相同的非普通城门洞断面和普通城门洞断面,分别为断面 6 和断面 7,断面 1 和断面 2,各计算断面几何尺寸如表 1 所示,断面形式如图 1(b)所示。

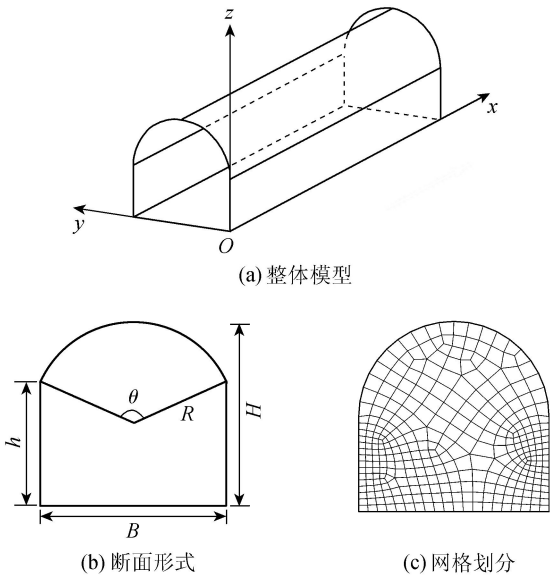


图 1 城门洞断面有压隧洞示意图

表 1 计算断面几何尺寸 m

断面	H	h	R	B	d
1	4.800	2.700	2.100	4.200	1.128
2	4.512	2.256	2.256	4.512	1.128
3	4.700	2.350	2.350	4.700	1.175
4	4.750	2.400	2.350	4.700	1.180
5	5.800	2.900	2.900	5.800	1.450
6	5.094	3.549	3.000	5.196	1.500
7	6.000	3.000	3.000	6.000	1.500
8	6.500	3.250	3.250	6.500	1.625

b. 数值模型。流速分布规律是流体运动的基本规律,它反映了流体运动的基本要素之间的关系,以雷诺方程为紊流的基本方程式,采用基于 SIMPLE 算法的三维定常流数值模拟,选用不可压流动或微可压流动的分离式求解器,用隐式方案进行控制方程的线性化,计算时速按绝对速度处理,不计重力的影响。入流边界采用流速进口,假设出口边界上流动已充分发展^[8],采用出流边界条件,出口边界上各物理量在流动方向上无梯度变化。固壁边界采用无滑移条件,粗糙影响程度由标准壁面函数确定,整个计算区域采用六面体非结构化网格^[9],如图 1(c)所示。

入流边界断面各节点流速相等,为了消除入流边界各网格节点流速相等的影响,需找出水流充分

发展的断面,以此作为计算断面比较符合实际。沿着水流方向,每 50 m 取一断面分析流态,当 $x>350$ m 时,水流流态趋于稳定,故取水流流态较稳定的 $x=450$ m 处的断面作为计算断面。城门洞断面雷诺数计算公式为 $Re=u_{av}d/\nu$ (ν 为水的运动黏滞系数,常温下 $\nu=0.897\times10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}^{[1]}$)。隧洞中实际水流多为紊流,雷诺数均较大,分析断面流速分布时,参照圆管雷诺数分别取 1.31×10^4 、 6.55×10^5 、 2.62×10^6 、 4.585×10^6 ,对各断面进行分析。

3 模型验证

为了验证数值模型的可靠性,将计算值与试验值作对比。选取与试验相同的边界条件进行数值模拟: $H=0.367$ m, $h=0.284$ m, $R=0.17$ m, $d=0.0923$ m, $\theta=118.15^\circ$, $Q=0.06264\text{ m}^3/\text{s}$, $Re=5.91\times10^4$,试验资料为城门洞对称断面流速值,计算值与试验值的对比如图 2 所示。采用无滑移条件,数值计算和试验中的断面拱顶和底面流速为零。试验的流速分布规律与数值模拟的流速分布规律吻合,计算值与试验值的误差约为 0.66%,说明数值模拟计算结果是可靠的。

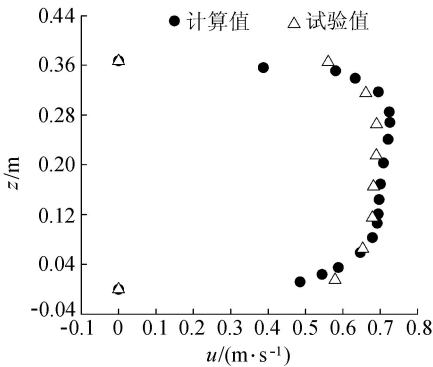


图 2 对称断面流速分布的计算值与试验值

4 断面流速分布规律

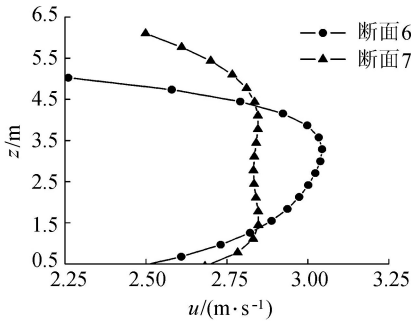
4.1 断面形式的影响

为了探究城门洞断面形式对流速分布规律的影响,取 $Re=4.585\times10^6$,以相同水力半径的非普通城门洞断面(断面 6、断面 1)和普通城门洞断面(断面 7、断面 2)为例,对流速沿 z 向和 y 向的分布进行分析比较,如图 3 和图 4 所示。由图 3 可以看出,无论是在对称断面上还是近侧壁面上,普通城门洞断面流速沿 z 向的分布都比非普通城门洞断面的均匀。

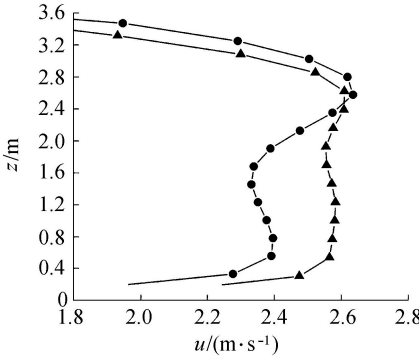
图 4 为几种断面形式流速在 $z=h$ 、 $z=h/2$ 、 $z=h/4$ 等位置上沿 y 向的分布比较。从图 4 可以看出,在 $z=h/2$ 的位置上流速分布最均匀,普通城门洞断面流速沿 y 向的分布要比非普通城门洞断面的均匀。

4.2 雷诺数的影响

图 5、图 6 分别为非普通城门洞断面(断面 1)和

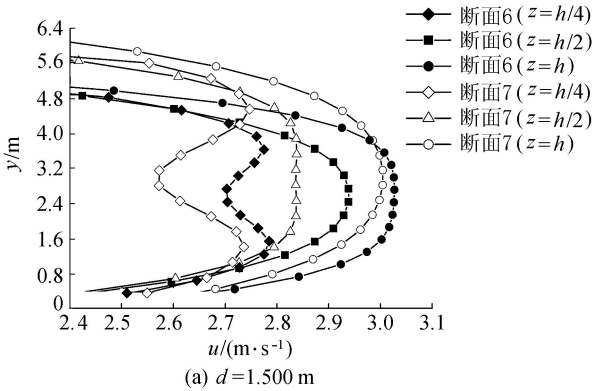


(a) 对称断面

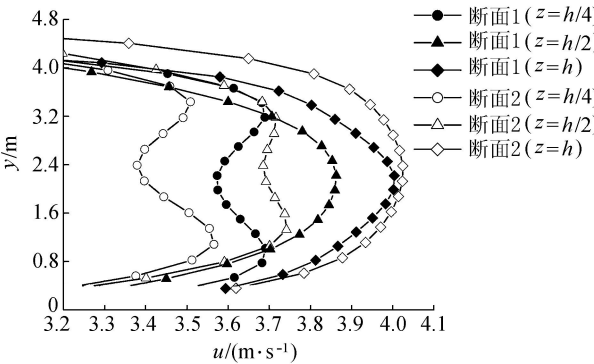


(b) 近侧壁面

图 3 不同断面形式流速沿 z 向的分布



(a) $d=1.500$ m



(b) $d=1.128$ m

图 4 不同断面形式流速沿 y 向的分布

普通城门洞断面(断面 2)在不同雷诺数时在近侧壁面($y/B=0.05$)和对称面($y/B=0.5$)上流速沿 z 向的分布比较^[10]。由图 5 可见,雷诺数较小时,非普通城门洞断面和普通城门洞断面在近侧壁面上流速沿 z 向的分布均接近于对数分布;随着雷诺数的增大,流速分布越来越不均匀,且比对称断面上流速沿

z 向的分布更不均匀。 $d=1.128\text{ m}$ 的非普通城门洞断面在近侧壁面上流速沿 z 向的分布由对数分布向高次多项式(可近似为 5 次多项式)分布发展,如图 5(a) 所示;而 $d=1.128\text{ m}$ 的普通城门洞断面在近侧壁面上流速沿 z 向的分布由对数分布向抛物线分布发展,如图 5(b) 所示。

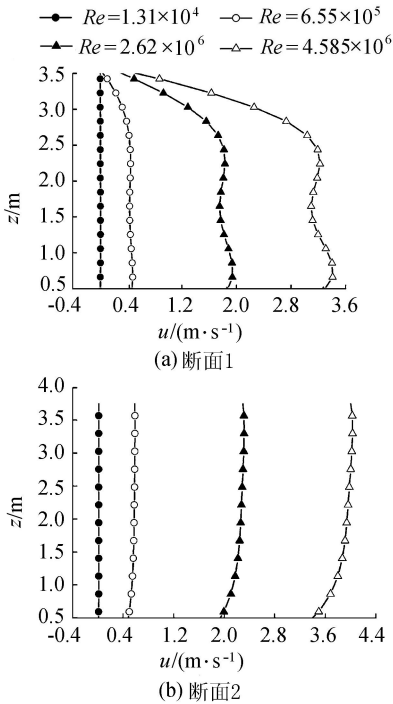


图 5 不同雷诺数时近侧壁面上流速沿 z 向的分布

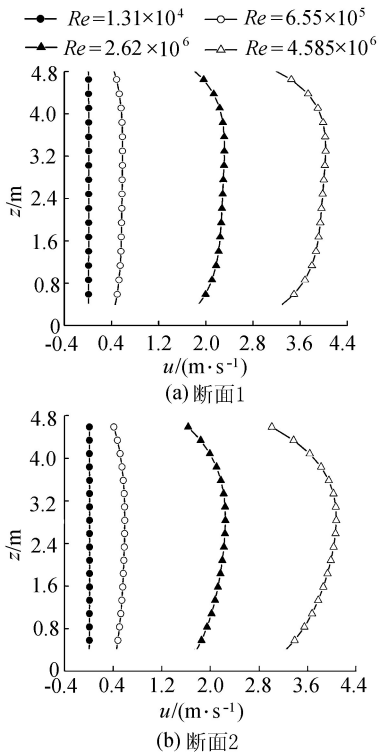


图 6 不同雷诺数时对称断面上流速沿 z 向的分布

由图 6 可见,当雷诺数较小时,非普通城门洞断面和普通城门洞断面在对称断面上流速沿 z 向的分

布都较均匀;随着雷诺数的增大,流速分布越来越不均匀,且向抛物线发展,曲率半径也越来越小,但比近壁面上流速沿 z 向的分布均匀得多。水力半径相同的非普通城门洞断面和普通城门洞断面在对称断面上流速沿 z 向的分布均近似满足对数分布,且由对数分布向抛物线分布发展,但前者的发展比后者慢。

由图 5、图 6 可以看出,当 $Re \leq 6.55 \times 10^5$ 时,普通城门洞断面和非普通城门洞断面流速沿 z 向的分布相差不大;当雷诺数 $Re \geq 2.62 \times 10^6$ 时,普通城门洞断面流速沿 z 向的分布要比非普通城门洞断面均匀得多,即使非普通城门洞断面在对称断面上流速沿 z 向的分布比普通城门洞断面稍均匀,但总体上看,雷诺数相同时普通城门洞断面流速沿 z 向的分布要比非普通城门洞断面均匀。

4.3 水力半径的影响

8 个计算断面水力半径的大小关系为 $d_1 = d_2 < d_3 < d_4 < d_5 < d_6 = d_7 < d_8$, 取 $Re = 4.585 \times 10^6$, 对水力半径逐渐增大的两组断面进行比较分析。图 7(a) 中断面 4 在对称断面上流速沿 z 的向分布最不均匀,断面 1 的流速分布相对均匀。可以看出:雷诺数相同时,随着水力半径的增大,非普通城门洞断面在对称断面上流速沿 z 向的分布越来越均匀,且流速分布由高次多项式分布向抛物线分布发展。图 7(b) 中由于断面 2 和断面 3 的水力半径相差不大,两断面在对称断面上的流速分布几乎重合,断面 5 和断

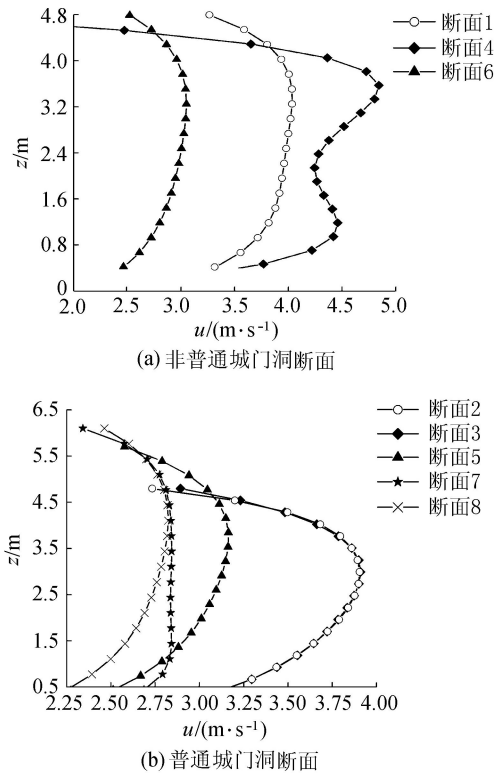


图 7 不同水力半径时对称断面上流速沿 z 向的分布

面 8 在对称断面上的流速分布都不如断面 7 均匀。随着水力半径的增大,普通城门洞断面在对称断面上流速沿 z 向的分布也是由不均匀变为均匀。

4.4 流速点位置的影响

图 8 为断面 7 在 $z=h/4$ 、 $z=h/2$ 、 $z=h$ 等不同流速点位置时流速沿 y 向的分布比较。在同一断面的同一位置,随着雷诺数的增大,流速沿 y 向的分布越来越不均匀;当雷诺数相同、 $z=h/2$ 时,流速沿 y 向的分布最均匀,且满足对数分布, z 值越小,流速分布越不均匀,且流速分布逐渐由对数分布向多项式分布发展。

图 9 为 $Re=4.585\times10^6$ 、 $z=h/2$ 时非普通城门洞断面(断面 1、4、6)和普通城门洞断面(断面 2、3、5、7、8)流速沿 y 向的分布比较。从图 9(a)可以看出,非普通城门洞断面流速沿 y 向的分布接近抛物线分布,随着水力半径的逐渐增大,流速分布越来越不均匀,且抛物线曲率半径逐渐减小;由图 9(b)看出,断面 7 的流速分布最均匀,断面 2、3、5、8 的流速分布满足 5 次多项式分布,同时随着水力半径的增大,普通城门洞断面流速沿 y 向的分布由不均匀向均匀发展,然后再由均匀向不均匀发展。

5 最大流速和平均流速分布规律

表 2 为对称断面上沿 z 方向最大流速 u_{max} 出现

的位置。从表 2 可以看出, $d\neq1.500\text{m}$ 时,城门洞断面最大流速出现在 $0.6H\sim0.7H$ 处; $d=1.500\text{m}$ 时,普通城门洞断面最大流速出现的位置较低,为 $0.48H$ 。雷诺数不同,最大流速出现的位置基本相同,即同一断面上最大流出现的位置与雷诺数大小无关,只与断面形式和水力半径有关。另外, $d=1.500\text{m}$ 时,普通城门洞断面的 ε 值与 0.25 最接近,故该断面的流速分布相对于其他断面的要均匀,这与图形分析结果相吻合。

表 3 为最大流速 u_{max} 、最小流速 u_{min} 与平均流速 u_{av} 之间的关系,其中 $n=u_{min}/u_{av}$ 。从表 3 中可以看出:非普通城门洞断面的流速比值差 $\gamma-n$ 要大于普通城门洞断面的,流速比值差也可以反映断面流速分布的不均匀程度,比值差越小,断面流速分布越均匀,由此可以看出普通城门洞断面流速分布比非普通城门洞断面流速分布要均匀。

6 结 论

- a. 就断面形式而言,普通城门洞断面的流速分布比非普通城门洞断面均匀。
- b. 当雷诺数较小时,普通城门洞断面和非普通城门洞断面的流速分布都较均匀;随着雷诺数的增大,流速分布越来越不均匀,且向抛物线发展,但普通城门洞断面的流速分布要比非普通城门洞断面均匀得多。

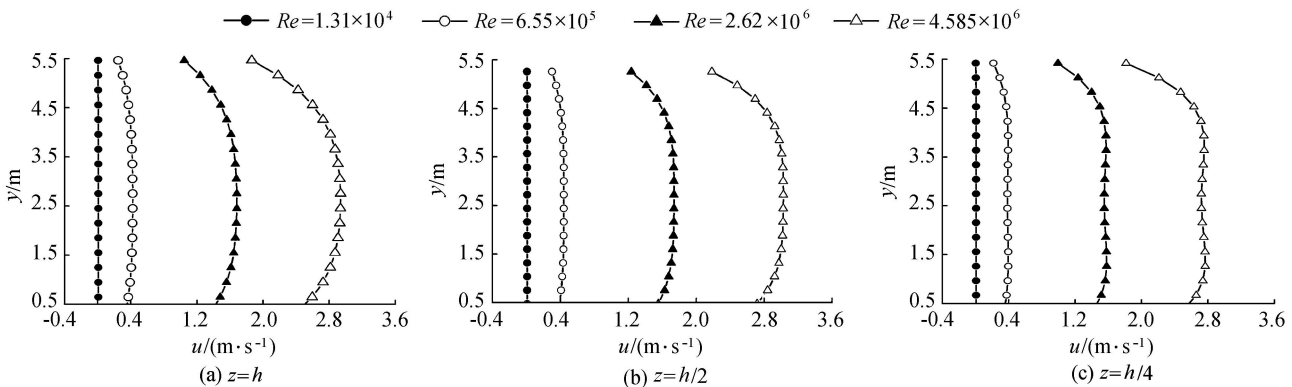


图 8 不同流速点位置流速沿 y 向分布

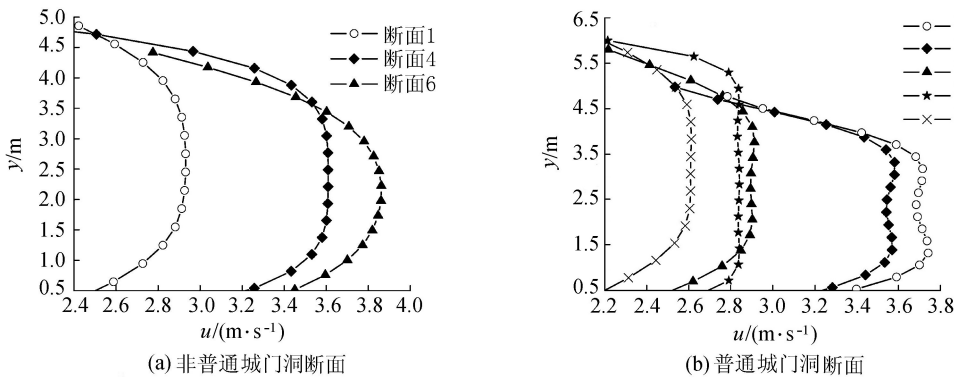


图 9 相同流速点位置流速沿 y 向的分布

表 2 断面最大流速出现的位置

断面	d/m	z_1	ε_1	z_2	ε_2	z_3	ε_3	z_4	ε_4
1	1.128	0.66H	0.660	0.66H	0.675	0.66H	0.658	0.66H	0.667
2	1.128	0.63H	0.545	0.63H	0.554	0.63H	0.550	0.63H	0.548
3	1.175	0.63H	0.546	0.63H	0.555	0.63H	0.550	0.63H	0.548
4	1.180	0.60H	0.488	0.70H	0.851	0.70H	0.842	0.70H	0.839
5	1.450	0.63H	0.541	0.63H	0.536	0.63H	0.549	0.63H	0.548
6	1.500	0.60H	0.480	0.60H	0.488	0.66H	0.666	0.66H	0.663
7	1.500	0.48H	0.252	0.48H	0.258	0.48H	0.254	0.48H	0.253
8	1.625	0.63H	0.545	0.63H	0.541	0.63H	0.550	0.63 H	0.548

注:下标 1、2、3、4 分别表示雷诺数为 1.31×10^4 、 6.55×10^5 、 2.62×10^6 、 4.585×10^6 时的相应值,表 3 同。

表 3 断面最大流速、最小流速与平均流速之间的关系

断面	γ_1	n_1	γ_1-n_1	γ_2	n_2	γ_2-n_2	γ_3	n_3	γ_3-n_3	γ_4	n_4	γ_4-n_4
1	1.21	0.48	0.73	1.25	0.57	0.67	1.20	0.54	0.67	1.22	0.62	0.61
2	1.15	0.51	0.64	1.18	0.62	0.56	1.16	0.64	0.52	1.16	0.65	0.50
3	1.15	0.51	0.64	1.18	0.62	0.56	1.16	0.64	0.52	1.16	0.66	0.50
4	1.24	0.56	0.68	1.26	0.70	0.56	1.24	0.73	0.52	1.24	0.74	0.50
5	1.13	0.49	0.65	1.12	0.56	0.56	1.16	0.64	0.53	1.16	0.64	0.51
6	1.20	0.50	0.70	1.24	0.62	0.62	1.22	0.53	0.69	1.22	0.64	0.58
7	1.14	0.50	0.64	1.21	0.67	0.56	1.17	0.64	0.52	1.16	0.65	0.51
8	1.15	0.52	0.62	1.13	0.58	0.56	1.16	0.62	0.54	1.16	0.62	0.54

c. 随着水力半径的增大,普通城门洞断面和普通城门洞断面的流速分布都是由不均匀变为均匀;当 $d=1.500\text{ m}$ 时,普通城门洞断面的 ε 值与 0.25 最接近,故该断面的流速分布相对于其他断面的要均匀。

d. 在同一断面的同一位置,雷诺数越大,流速分布越不均匀;当雷诺数相同时, z 值越小,流速分布越不均匀,且流速分布逐渐由对数分布向多项式分布发展。

e. 城门洞断面最大流速出现在 $0.6H\sim0.7H$ 处,且同一断面上最大流出现的位置与雷诺数大小无关,只与断面形式和水力半径有关。

参考文献:

[1] 赵振兴,何建京. 水力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2008.

[2] 张宽地,吕宏兴,王光谦,等. 普通城门洞形隧洞正常水深的直接计算方法[J]. 农业工程学报,2009,25(11): 8-12. (ZHANG Kuandi, LÜ Hongxing, WANG Guangqian, et al. Direct calculation method for normal depth of arched section tunnel[J]. Transactions of The CSAE,2009,25(11):8-12. (in Chinese))

[3] 赵延风,宋松柏,孟秦倩. 普通城门洞形断面临界水深的近似计算方法[J]. 长江科学院院报,2008,25(4): 14-16. (ZHAO Yanfeng, SONG Songbai, MENG Qinqian. Approximate method calculating critical water depth in common city-opening shaped cross-section[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2008,25(4): 14-16. (in Chinese))

[4] 赵延风,宋松柏,孟秦倩. 城门洞形断面收缩水深的近

似计算公式[J]. 节水灌溉,2007(8):22-23. (ZHAO Yanfeng, SONG Songbai, MENG Qinqian. Approximate method calculating contraction water depth in common city-opening shaped cross-section [J]. Water Saving Irrigation,2007(8):22-23. (in Chinese))

[5] 暨朝颂. 完全发展的管流中紊流速度分布函数研究[J]. 中国矿山工程,2007,36(3):48-50. (JI Chaosong. Study on the distribution function of turbulent velocity in fully developed pipe flow[J]. China Mining Engineering, 2007,36(3):48-50. (in Chinese))

[6] 窦国仁. 论河流紊动与流速分布[J]. 水利学报,1959(5):49-65. (DOU Guoren. Theory of river turbulence and velocity distribution [J]. Journal of Water Hydraulic Engineering,1959(5):49-65. (in Chinese))

[7] PERRY A E, SCHEFIELD W M, JOUBERT P M. Rough wall turbulent boundary layers [J]. Journal of Fluid Mechanics,1969,37(2):383-386.

[8] 江山,张京伟,吴崇健,等. 基于 FLUEN 的 90 °圆形弯管内部流场分析[J]. 中国舰船研究,2008,3(1):37-41. (JIANG Shan, ZHANG Jingwei, WU Chonjian, et al. Flow field analysis in 90° round bend based on FLUENT [J]. Study on Chinese Ships, 2008,3(1):37-41. (in Chinese))

[9] 王福军. 计算流体动力学分析:CFD 软件原理与应用 [M]. 北京. 清华大学出版社. 2004.

[10] 卢金友,詹义正,赵根生,等. 河道中受侧壁影响的断面流速分布规律研究[J]. 水利学报,2012,43(6):645-658. (LU Jinyou, ZHAN Yizheng, ZHAO Gensheng, et al. Study on velocity of flow distributing rule on section affected by walls in the river [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2012,43(6):645-658. (in Chinese))

(收稿日期:2013-03-05 编辑:周红梅)