

有压输水管道孔板局部阻力相邻影响试验

白兆亮, 李琳

(新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要:为研究有压输水管道的局部阻力相邻影响及其对总局部水头损失大小的影响,采用模型试验方法对总局部阻力系数随相对间距的变化关系进行了试验研究。试验结果表明:当孔板相对间距 $L_s/d \geq 9$ 时,按照传统公式计算孔板产生的总局部水头损失结果与实测值最大相对误差不超过1.2%,而当 $L_s/d < 9$ 时,孔板产生的总局部水头损失的实测值远小于传统公式的计算值,最大相对误差达到197.6%;相对间距较大时,不需考虑孔板间距的影响,而相对间距较小时,孔板间存在相邻影响,并且相对间距越小影响越明显,计算总局部水头损失必须考虑局部阻力相邻影响,需用相邻影响系数对传统计算公式进行修正。

关键词:有压管道;局部水头损失;局部阻力相邻影响;相对间距;模型试验

中图分类号:TV131.61 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2015)02-0028-04

Test on local resistance adjacent influence of pressure water pipe//BAI Zhaoliang, LI Lin (College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: To study the local resistance adjacent influence of pressure pipes and its effect on the total local head loss, the relation between total local resistance coefficient and relative distance has been researched with model test method. The results showed: when the relative distance of orifice plate is equal or more than 9 ($L_s/d \geq 9$), the maximum relative error between the calculated and measured values of the total local head loss caused by orifice plate is less than 1.2%; when the relative distance of orifice plate is less than 9 ($L_s/d < 9$), the measured value is much less than the calculated value, and the maximum relative error is up to 197.6%; when the relative distance is large, it is not necessary to consider the influence of space among orifice plate; when the relative distance is small, orifice plate will influence each other with the relationship that the space more small, the influence more clear. So it is necessary to consider the local resistance adjacent influence when calculate the total local head loss and correct the calculated formula with adjacent influence coefficient.

Key words: pressure pipeline; local head loss; local resistance adjacent influence; relative distance; model test

随着经济和社会发展对水资源及区域水资源优化配置的需求逐步提高,有压输水管道被广泛应用在各类长距离、跨流域输水工程中。在这些大中型输水工程中,管路往往长达数千米乃至数百千米,管道形变件可达数百乃至数千个,因此,准确计算管道形变件产生的局部水头损失是合理进行管道水力设计、满足节能降耗设计原则的关键。

传统水力学中,局部水头损失一般的表达式为

$$h_j = \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

式中: h_j 为局部水头损失; v 为管道断面平均流速; ζ 为形变件局部阻力系数。管道中多个形变件产生的

总局部水头损失计算公式为

$$h_{j\text{总}} = \sum \zeta_i \frac{v^2}{2g} = \zeta_{\text{总}} \frac{v^2}{2g} \quad (2)$$

式中: $h_{j\text{总}}$ 为总局部水头损失; $\zeta_{\text{总}}$ 为形变件的总局部阻力系数。这种简单地按阻力叠加原则计算出的局部水头损失往往与实际情况不符^[1-2],其原因主要有两个:一是传统水力学中认为局部阻力系数 ζ 的大小仅与形变件本身有关,而与管道流态无关,而实际上 ζ 是随着流态的变化而变化的^[3-4];二是局部阻力相邻影响的问题^[5-12]。此时,若按计算手册选用未考虑相邻影响的局部阻力系数值,根据式(2)进行简单的叠加计算总局部水头损失,其结果必然出现偏差。

基金项目:新疆研究生科研创新项目(XJGR12014073);新疆水利水电工程重点学科基金(20131387970)

作者简介:白兆亮(1988—),男,山东日照人,硕士研究生,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:1050353332@qq.com

通信作者:李琳(1979—),女,山东青岛人,副教授,博士,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:lilin_xjau@163.com

早在 20 世纪 50 年代苏联学者就已提出局部阻力相邻影响的问题^[6],但我国水力计算中局部阻力相邻影响至今未得到合理的考虑。李涛等^[5,7-8]针对电厂循环水管道和通风管道中弯管形变件的 Z 型组合的局部阻力相邻影响问题进行了研究和探讨,而水利工程中有压输水管道由于多个形变件的同时存在而引起的局部阻力相邻影响问题鲜有报道。本文以孔板形变件为例,将孔板安装在有压输水管道内,通过试验量测管道内安装多个孔板时孔板的总局部阻力系数 ζ_{ie} ,并将其与总局部阻力系数的理论计算值 ζ_{ie} 进行对比,分析试验值和理论计算值产生差异的原因,探讨局部阻力相邻影响对总局部阻力系数大小的影响机理,并对局部阻力相邻影响进行量化,为合理计算有压管道的局部水头损失提供参考。

1 试验方法

1.1 试验设备

试验在新疆农业大学水力学及水工实验室完成。试验装置由供水系统、稳流箱、有机玻璃管(长度 5 m、内径 0.06 m)、用聚氯乙烯板加工而成的孔板(外径 0.06 m、内径 0.05 m)、测压管排、20°三角量水堰、排水系统组成,如图 1 所示。在有机玻璃直管上从距入口 0.6 m 处开始每隔 0.2 m 安装 1 根测压管,共计安装了 19 根测压管。有机玻璃管道必须满足长度要求,即其长度不仅应包含全部形变件影响的总长,满足正确测定沿程水头损失的相应管长,而且还应满足消除入口和出口影响的管道长度。测压管用于测量各测点的测压管水头,管道水平安装,测压管读数便是各测点的压强水头。

在进行不同雷诺数下单个孔板局部阻力系数的试验研究时,孔板布置在 9 号测压管处;在进行不同间距下两个孔板总局部阻力系数的试验研究时,1 号孔板布置在 9 号测压管处,2 号孔板根据试验方案布置在距 1 号孔板不同位置处。

1.2 测量方法

对图 1 所示的 1—1、2—2 两个断面,应用伯努利方程^[13-14]有

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + h_w \quad (3)$$

式中: p_1 、 p_2 分别为断面 1—1、2—2 的压强; v_1 、 v_2 分别为断面 1—1 和 2—2 平均流速; Z_1 、 Z_2 分别为断面 1—1、2—2 位置的水头; h_w 为总水头损失。由于本试验中有机玻璃管道水平安装即 $Z_1 = Z_2$,且管径相同即 $v_1 = v_2 = v$,有

$$h_w = \frac{p_1 - p_2}{\rho g} = h_f + h_j = h_f + \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

式中: v 为管道平均流速; h_f 、 h_j 分别为沿程水头损失和局部水头损失。

试验过程中绘制测压管水头线,沿程均匀下降段表示该管段仅有沿程水头损失,求出管段的水力坡度 J ,由于管径不变,整个管道水力坡度相同,根据 $J = h_f/L$ (L 为两断面之间的长度)计算 1—1 至 2—2 断面的沿程水头损失 h_f 。根据测压管排读出 1—1 至 2—2 的总水头损失 h_w 。根据量水堰量测出的流量,由连续方程 $Q = vA$ 计算出管道流速 v ,将其与 h_f 、 h_w 一并代入式(4),求出孔板局部阻力系数 ζ 和 $\zeta_{总}$ 。

1.3 试验步骤

1.3.1 1、2 号孔板局部阻力系数测量

由于局部阻力系数 ζ 除了与形变件的几何尺寸和结构形式有关外,还与水流流态有关^[15],因此,针对不同流态下 1、2 号孔板的局部阻力系数进行试验研究。两孔板局部阻力系数的测量方法一致:打开入口阀门,对测压管排进行排气处理,使稳流箱液面稳定,待水流稳定后记录各测压管、量水堰的读数。调整入口阀门的开度,改变流量,重复上述步骤。通过调整流量改变雷诺数,为较准确绘制局部阻力系数与雷诺数关系曲线,在 $2 \times 10^4 \sim 1.1 \times 10^5$ 的雷诺数范围内进行了多组试验。

1.3.2 1、2 号孔板不同间距时总局部阻力系数测量

对不同间距 1、2 号孔板总局部阻力系数测量时,仅测量大雷诺数,即单个孔板局部阻力系数趋于稳定时的情况,作为试验模拟的一个松弛条件,试验管内水流的雷诺数应尽可能提高,但也不必完全相同,只要高于使单个孔板局部阻力系数趋于不变时的雷诺数即可,试验采用的雷诺数在 1×10^5 以上。

改变孔板间距 L_s ,使得其相对间距 $L_s/d = 16$ 、15、14、13、12、11、10、9、8、7、6、5、4、3、2.5、2、1.5、

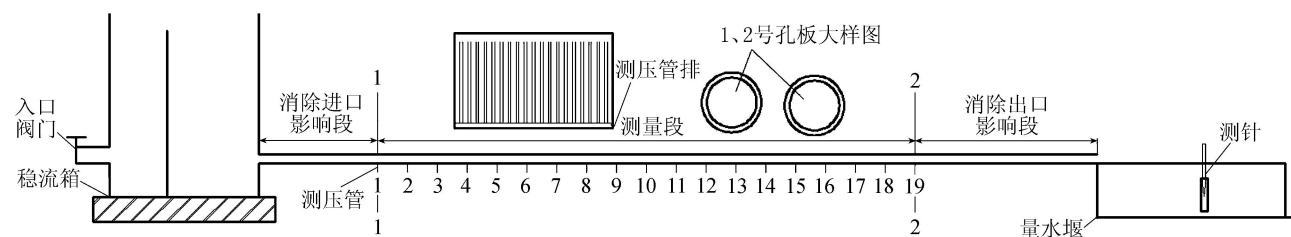


图 1 试验装置示意图

0.9、0.7、0.3、0, 共计 21 组试验, 在每种工况下, 读取测压管、量水堰的读数, 按式(4) 计算各个间距下的总局部阻力系数 ζ_{te} 。

2 试验结果及分析

2.1 1、2 号孔板局部阻力系数

图 2 为 1、2 号孔板局部阻力系数与雷诺数的关系曲线。从图 2 可以看出: 当 $Re < 1 \times 10^5$ 时, 孔板局部阻力系数随雷诺数的增大而增大, 这是由于水流流经孔板时, 水流内部结构发生急剧变化, 随着雷诺数的增加, 水流的紊动增强, 水流质点之间摩擦和碰撞加剧, 局部阻力系数增大; 当 $Re \geq 1 \times 10^5$ 时, 水流已达到充分发展的紊流状态, 雷诺数继续增大, 水流紊动不再增强, 局部阻力系数不再随雷诺数的增大而变化, 1、2 号孔板局部阻力系数变化幅度很小, 分别为 0.7%、0.6%, 可以认为孔板的局部阻力系数已经与雷诺数无关, 为一个定值, 即当 $Re \geq 1 \times 10^5$ 时, 1、2 号孔板局部阻力系数分别为 1.141 和 0.660。

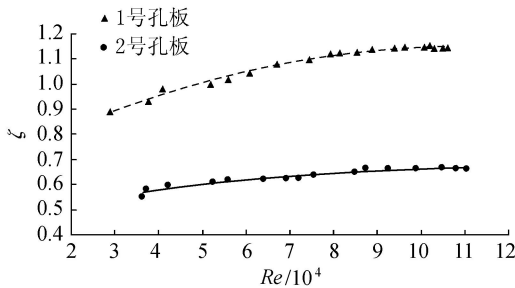


图 2 1、2 号孔板局部阻力系数与雷诺数的关系曲线

由于 1、2 号孔板的制作问题, 造成了两孔板局部阻力系数的不同, 但在研究局部阻力相邻影响的试验中, 用到总局部阻力系数的理论值与实测值, 并不关心单个孔板的局部阻力系数, 因此这种不同对局部阻力相邻影响的研究没有影响。

2.2 1、2 号孔板总局部阻力系数

表 1 和表 2 列出了 21 种间距下的两孔板总局部阻力系数实测值 ζ_{te} 及其与总局部阻力系数理论值 ζ_{tt} 的相对误差, 定义相对误差 $E = \frac{\zeta_{te} - \zeta_{tt}}{\zeta_{tt}} \times 100\%$ 。

因 $Re \geq 1 \times 10^5$ 时 1、2 号孔板局部阻力系数为恒定值 ($\zeta_1 = 1.141$, $\zeta_2 = 0.660$), 不随雷诺数的变化而变化, 传统水力学中按叠加原则计算总局部阻力系数, 因此总局部阻力系数理论值 $\zeta_{tt} = \zeta_1 + \zeta_2 = 1.801$, 为恒定值, 且与孔板相对间距无关。但从表 1 和表 2 可以看出, L_s/d 不同时, ζ_{te} 并不总是恒定值。当 $L_s/d \geq 9$ 时, ζ_{te} 基本为一恒定值, 且 $\zeta_{te} \approx \zeta_{tt}$, 其最大相对误差小于 0.22%, 表明 $L_s/d \geq 9$ 时, 1、2 号孔板形变件之间无相邻影响。当 $L_s/d < 9$ 时, ζ_{te} 为一变值, 且随着

相对间距 L_s/d 的减小而减小, 当 $L_s/d = 0.9$ 时, $\zeta_{te} \approx 0.5\zeta_{tt}$; 当 $L_s/d = 0$ 时, $\zeta_{te} \approx 0.3\zeta_{tt}$, 表明 $0 \leq L_s/d < 9$ 时, 1、2 号孔板形变件相对间距较小, 使得两孔板之间产生了相互影响, 相对间距越小, 影响越大, 孔板总局部阻力系数越小, 甚至在某些相对间距下, 总局部阻力系数小于单个孔板的局部阻力系数。显然, 总局部阻力系数也不再等于单个局部阻力系数之和, 且总局部水头损失并不一定是随孔板数的增加而增加, 其增加与否与孔板相对间距密切相关。分析其原因, 水流流经 1 号孔板时, 流动边界的形状和大小发生急剧变化, 在 1 号孔板的上、下游一定距离内, 主流与边界分离并产生漩涡区, 水流内部结构发生急剧变化, 流速分布改变, 1 号孔板产生局部水头损失是在一定影响长度内发生的, 当 2 号孔板位于 1 号孔板的影响长度范围内时, 1 号孔板之后的水流流态尚未发育完全, 水流的紊动混掺作用还不充分, 产生的局部水头损失小, 并且在进入 2 号孔板时, 由于流速分布尚未恢复, 流速分布集中, 孔口对水流的收缩率小, 导致 2 号孔板下游水流漩涡区内紊动混掺作用弱, 产生的局部水头损失小, 因此总局部阻力系数小于单个孔板局部阻力系数之和, 间距越小, 相互影响程度越大, 总局部阻力系数越小。

表 1 $L_s/d \geq 9$ 时总局部阻力系数实测值及其与理论值的相对误差

L_s/d	ζ_{te}	$E/\%$	L_s/d	ζ_{te}	$E/\%$
16	1.799	-0.11	12	1.804	0.17
15	1.802	0.06	11	1.797	-0.22
14	1.801	0.00	10	1.802	0.06
13	1.798	-0.17	9	1.803	0.13

表 2 $L_s/d < 9$ 时总局部阻力系数实测值及其与理论值的相对误差

L_s/d	ζ_{te}	$E/\%$	L_s/d	ζ_{te}	$E/\%$
8	1.790	-0.61	2	1.130	-37.31
7	1.780	-1.39	1.5	1.110	-38.53
6	1.760	-2.17	0.9	0.980	-45.64
5	1.670	-7.27	0.7	0.820	-54.47
4	1.600	-11.10	0.3	0.600	-66.69
3	1.520	-15.38	0	0.530	-70.63
2.5	1.250	-30.59			

2.3 孔板局部阻力相邻影响

为衡量 1、2 号孔板的相邻影响程度, 引入局部阻力相邻影响系数 C , 令 $C = \zeta_{te} / \zeta_{tt}$ 。根据表 1 和表 2, 可得相邻影响系数 C 与相对间距 L_s/d 的关系如图 3 所示。由图 3 可以看出, 当 $L_s/d < 9$ 时, $C < 1$; 当 $L_s/d \geq 9$ 时, $C = 1$ 。 $C < 1$ 时, 两孔板之间存在相互影响且呈抑制状态, $C = 1$ 时两者之间没有影响。

由于局部阻力相邻影响的存在, 孔板相对间距较小时, $\zeta_{tt} \neq \zeta_{te}$, 采用式(2) 计算管道局部水头损失

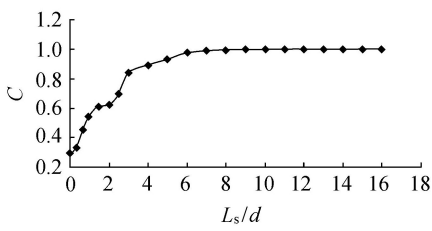


图3 相邻影响系数与相对间距的关系

与实际情况不符。应用 ζ_{te} 替换 ζ_{tt} , 将 $\zeta_{te} = C\zeta_{tt}$ 代入式(2)得

$$h_{j\text{总}} = C\zeta_{tt} \frac{v^2}{2g} \quad (5)$$

式(5)即为考虑局部阻力相邻影响时的总局部水头损失计算公式,式中相邻影响系数 C 与 Re 、 L_s/d 、孔板尺寸等因素有关。

利用图1试验装置,重新制作孔板,并测得总局部水头损失。分别应用式(2)和式(5)计算了两个孔板产生的总局部水头损失,结果见表3。表中 h_{js} 为实测总局部水头损失, h_{jit} 、 h_{jte} 分别是应用式(2)、式(5)计算得到的总局部水头损失。从表3可以看出,当 $L_s/d \geq 9$ 时,式(2)和式(5)计算结果与实测值相比,最大误差不超过1.2%,计算值与实测值间的误差主要源于 ζ_{tt} 带有一定的误差,说明孔板间无相邻影响时,可以直接应用式(2)计算局部水头损失。当 $L_s/d < 9$ 时,式(2)和式(5)计算结果不同,式(5)的计算值与实测值相比,最大相对误差为0.96%,式(2)计算结果的最大相对误差为197.6%。可见,不考虑孔板间的相邻影响,直接应用式(2)计算出的局部水头损失与实测值相比,相差甚远。因此,当孔板相对间距较小时,不能直接应用式(2)来计算总局部水头损失,应根据式(5)来计算总局部水头损失。

表3 总局部水头损失实测值和计算值比较

L_s/d	h_{js}	h_{jit}	h_{jte}	L_s/d	h_{js}	h_{jit}	h_{jte}
12	0.332	0.331	0.330	5	0.312	0.338	0.311
11	0.335	0.331	0.333	4	0.313	0.343	0.311
10	0.330	0.333	0.328	3	0.298	0.338	0.296
9	0.333	0.333	0.330	2	0.278	0.341	0.276
8	0.322	0.333	0.320	1	0.235	0.351	0.234
7	0.313	0.334	0.310	0.5	0.179	0.360	0.178
6	0.319	0.336	0.317	0	0.123	0.366	0.122

3 结论

a. 孔板局部阻力系数与雷诺数有关, $Re < 1 \times 10^5$ 时,其局部阻力系数大小随雷诺数变化而变化,在水力计算时不能视为定值;当 $Re \geq 1 \times 10^5$ 时,孔板局部阻力系数基本为一定值,不随雷诺数的变化而变化。

b. 当孔板相对间距 $L_s/d \geq 9$ 时,孔板形变件之

间无相邻影响,此时可以按式(2)准确计算孔板产生的总局部水头损失;当 $L_s/d < 9$ 时,计算局部水头损失时必须考虑局部阻力的相邻影响,采用修正后的式(5)进行计算。

c. 与传统局部阻力损失理论不同,管道内存在局部阻力相邻影响时,总局部阻力系数不再等于单个局部阻力系数之和,且总局部水头损失并不一定随孔板数增加而增加,其增加与否与孔板的相对间距密切相关。

参考文献:

- [1] 董志勇,须清华. 船闸输水系统鹅颈管段水力特性的研究[J]. 水利水运科学研究,1991,2(3):96-98. (DONG Zhiyong, XU Qinghua. Study of water delivery system for hydraulic characteristics of gooseneck section [J]. Study on the Hydro Science, 1991, 2(3): 96-98 (in Chinese))
- [2] 船闸输水廊道局部阻力系数试验研究报告[R]. 天津:天津水运工程科学研究所,1978.
- [3] 贺益英,赵懿,孙淑卿,等. 弯管局部阻力系数的试验研究[J]. 水利学报,2003,11(11):54-58. (HE Yiyong, ZHAO Yi, SUN Shuqing, et al. Experimental study on local head loss coefficient of bend in pipeline [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 11(11): 54-58. (in Chinese))
- [4] 张昕,纪昌知,姜敏,等. 相对粗糙度和雷诺数对90°弯管局部阻力系数的影响[J]. 水力发电学报,2013,32(4):88-93. (ZHANG Xin, JI Changzhi, JIANG Min, et al. Influence of relative roughness and Reynolds number on local resistance coefficient of 90°-bend pipeline [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013, 32(4): 88-93. (in Chinese))
- [5] 李涛,李安桂,周艳. 通风空调低雷诺数90°弯管阻力系数的实验与数值模拟[J]. 青岛科技大学学报,2006,27(6):527-531. (LI Tao, LI Angui, ZHOU Yan. Experimental and numerical simulation of ventilation and air conditioning low Reynolds number 90° bending resistance coefficient [J]. Journal of Qingdao University of Science, 2006, 27(6): 527-531. (in Chinese))
- [6] 依捷里奇克. 水力摩阻[M]. 黄俊,夏颂佑,译. 北京:电力工业出版社,1957.
- [7] 毛世民,贺益英,李家兴. 管道水力学研究的新成果及其应用[C]//范润保. 泄水工程与高速水流. 长春:吉林科学出版社,1996:1-19.
- [8] 贺益英,赵懿,孙淑卿,等. 输水管线中弯管局部阻力的相邻影响[J]. 水利学报,2004,35(2):17-20. (HE Yiyong, ZHAO Yi, SUN Shuqing, et al. Interaction of local loss between bends in pipe line [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(2): 17-20. (in Chinese))

(下转第42页)

- Chunning. Experimental research on the splitting tensile strength for joint surface of concrete construction joint [J]. Concrete, 2006(6):22-25. (in Chinese))
- [3] MONKS W L. Treatment of construction joints [J]. Concrete, 1974, 8(2) :28-30.
- [4] ISAO U, YOSHIDA N, MORISHITA S. Evaluation of mechanical properties of construction joint between new and old concrete under combined tensile and shear stresses [J]. Journal of the Society of Materials Science, Japan, 1998, 47 (1) :73-88.
- [5] MATTOCK A H. Cyclic shear transfer and type of interface [J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1981, 107 (10) :1945-1964.
- [6] 张卫东,王振波,朱方之. 施工缝位置对框架结构抗震性能的影响[J]. 低温建筑技术, 2007, 118(4) :46-48. (ZHANG Weidong, WANG Zhenbo, ZHU Fangzhi. Influence of position of construction joint on seismic-resistance behavior of reinforced concrete frame [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2007, 118(4) :46-48. (in Chinese))
- [7] 李通林,王艳辉. 结构面非线性剪切模型的探讨[J]. 重庆大学学报, 1990, 13(3) :54-59. (LI Tonglin, WANG Yanhui. An investigation on nonlinear shear model of discontinuity[J]. Journal of Chongqing University, 1990, 13(3) :54-59. (in Chinese))
- [8] 段云岭,刘华北. 材料非线性接缝模型[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2000, 40(8) :98-101. (DUAN Yunling, LIU Huabei. Material nonlinear joint model [J]. Journal of Tsinghua University, 2000, 40(8) :98-101. (in Chinese))
- [9] 孙吉主,施戈亮. 循环荷载作用下接触面的边界模型研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(2) :311-314. (SUN Jizhu, SHI Geliang. Bounding surface model for soil-structure interface under cyclic loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(2) :311-314. (in Chinese))
- [10] CLOUGH G W, DUNCAN J M. Finite element analysis of retaining wall behavior [J]. Journal Soil Mech & Found Engrg Div, ASCE, 1971, 97(12) :1657-1674.
- [11] BRANDT J R T. Behavior of soil-concrete interfaces [D]. Edmonton: The University of Alberta, 1985.
- [12] DESAI C S, DRUMM E C, ZAMAN M M. Cyclic testing and modeling of interfaces [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 111(6) :793-815.
- [13] DESAI C S, MA Youzhi. Modeling of joints and interface using the disturbed state concept [J]. Journal for Numerical and Analysis Methods in Geomechanics, 1992, 16:623-653.
- [14] BOULON M, NOVA R. Modeling of soil structure interface behavior; a comparison between elastoplastic and rate-type laws [J]. Computers and Geotechnics, 1990, 17 (9) : 21-46.
- [15] 李英民,于婧,夏洪流. 施工缝模型及在钢筋混凝土柱非线性分析中的应用[J]. 土木建筑与环境工程, 2011, 33(5) :1-6. (LI Yingmin, YU Jing, XIA Hongliu. Construction joint modeling and its application in nonlinear analysis of RC columns [J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2011, 33(5) : 1-6. (in Chinese))
- [16] MAZZONI S, KENNA F M, SCOTT M H, et al. Opensees users manual [R]. Berkeley: PEER, University of California, 2006.
- [17] 李英民,于婧,夏洪流. 施工缝对框架柱抗震性能影响的试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(增刊1) :81-86. (LI Yingmin, YU Jing, XIA Hongliu. Experimental research on seismic behavior of frame columns with construction joint [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 44(Sup1) :81-86. (in Chinese))
- [18] 魏春明. 现浇钢筋混凝土框架结构施工缝抗震性能 [D]. 大连:大连理工大学, 2006.
(收稿日期:2014-04-29 编辑:熊水斌)

+++++
(上接第 31 页)

- [9] MILLER D S. Internal flow system [M]. Bedford: BHRA, 1971:119-146.
- [10] 贺益英,陈惠泉,毛世民,等. 火/核电站循环水供水管道系统水力摩阻研究[R]. 北京:中国水利水电科学研究院, 2001.
- [11] JI Changzhi, ZHANG Xin, JIANG Min. Numerical simulation of influence of 90o-bend pipeline geometric shape on local head loss coefficient [C]//Internation Conference on ICMET. Singapore: IEEE, 2010:668-672. .
- [12] 火电厂供水管道系统摩阻损失试验研究[R]. 蚌埠:安徽省·水利部淮河水利委员会水利科学研究所, 1995.
- [13] 邱秀云. 水力学 [M]. 乌鲁木齐:新疆电子出版社, 2008:96-98.
- [14] 华绍曾,杨学宁. 实用流体阻力手册 [M]. 北京:国防工业出版社, 1985.
- [15] ERWIN F, IDELCHIK I E. Flow resistance; a design guide for engineers [M]. Washington: Hemisphere Publishing Corporation, 1989:225-229.
(收稿日期:2013-12-23 编辑:熊水斌)

