

DOI :10.3880/j. issn. 1006-7647. 2010. 03. 014

压力隧洞裂缝混凝土衬砌和围岩的接触条件

彭守拙,钟建文

(清华大学水利水电工程系,北京 100084)

摘要 提出裂缝衬砌和围岩之间接触应力 $\sigma_r(r_a)$ 的表达式,并通过算例分析它的特性,结果表明, $\sigma_r(r_a)$ 随衬砌与围岩接触面 $(r=r_a)$ 处的渗透压力 p_a 的增大由压变拉,但 $\sigma_r(r_a)+p_a$ 却变化不大. 提出一定条件下衬砌脱离围岩独立工作的判别式,该式若满足,衬砌将脱离围岩独立工作,钢筋应力和裂缝宽度将大幅度减小. 算例计算结果表明,若衬砌和围岩之间的黏结强度较小,裂缝衬砌很容易脱离围岩独立工作.

关键词 水工压力隧洞 裂缝衬砌 围岩 接触应力 接触条件

中图分类号 :TV672+.1 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2010)03-0053-05

Contact stress between concrete linings for cracks of pressure tunnels and surrounding rock mass//PENG Shou-zhuo, ZHONG Jian-wen(Hydraulic Engineering Department, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract : A formula to calculate the contact stress between crack linings and surrounding rock mass was presented. Its behaviors were analyzed through a case. The contact stress would transform from the pressure state into the tension one with the increase of seepage pressure on the external edge of linings. However the summation of the contact stress and seepage pressure was little. Another formula to judge whether or not the linings would independently work under certain conditions was given. If the formula was satisfied, the linings would independently work and the reinforcement stress as well as the crack width would greatly decrease. The calculated results of the case indicate that the crack linings will lose contact with the rock mass and independently work if the bond strength between the concrete linings and the surrounding rock mass is very small.

Key words : hydraulic pressure tunnel ; crack lining ; surrounding rock mass ; contact stress ; contact condition

在圆形断面水工压力隧洞的设计中,确定钢筋混凝土衬砌和围岩接触应力的通用办法是借助弹性抗力系数的概念进行分析计算^[1],该方法的优点是简单易行、操作方便.近年来,圆形断面压力隧洞衬砌和围岩接触应力研究的一个进展是把混凝土作为均匀多孔弹性介质,考虑混凝土的渗透性,利用解析法分析衬砌和围岩的相对弹性模量 E_c/E_r 、相对透水性系数 k_c/k_r 对接触应力的影响^[2-3].

文献[4]把裂缝混凝土衬砌视为由无筋裂缝介质组成的厚壁圆筒,其内部渗水压力按线性衰减,给出了接触应力的表达式,其衬砌刚度取决于混凝土弹性模量 E_c 和衬砌厚度,与钢筋无关,得到了“一经开裂马上脱开”的结论.

混凝土的抗拉强度很低,在高内水压作用下应考虑裂缝贯穿的情况,这时钢筋混凝土不再是多孔微透水介质而成为强透水的以钢筋加强的具有贯穿性裂隙的介质,其透水性和刚度发生了很大的变化,

它们都会对衬砌和围岩之间的接触应力产生根本性的影响.笔者把开裂混凝土衬砌作为具有等间距贯穿性径向裂缝并有环向钢筋的介质处理,且认为开裂前的混凝土衬砌是不透水的.

压力隧洞在运行期间形成洞外渗流场,其范围取决于洞外地下水位,即使洞外地下水位很低,洞周也会形成一个浸润饱和的自由水面^[5].一般情况下,可认为洞周渗流场是轴对称的,其半径为 R (图 1),它包含裂缝衬砌区 Ω_1 、渗流影响区 Ω_2 、非渗流影响区 Ω_3 ,

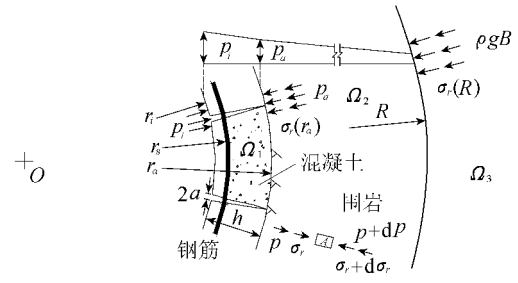


图 1 压力隧洞的渗流场范围和计算简图

可视 Ω_2 区为一透水厚壁圆筒。图中 $\rho g B$ 是 Ω_2 与 Ω_3 区交界面上的总水头, B 是洞外地下水面高出洞心 O 点的高度, $2a$ 为衬砌平均裂缝宽度, r_a 为衬砌外半径, p_i 为洞内水压, r_s 为钢筋半径, r_i 为混凝土衬砌内半径, h 为混凝土衬砌厚度。

与不透水体不同, 透水区 Ω_2 内任一点处的微小单元 A 不仅承受径向和切向的应力 (σ_r, σ_τ), 还同时承受孔隙水压力 p (假定孔隙水压力作用的有效面积系数为 1), 图 1 中没有示出 A 的切向应力和孔隙水压力。

在透水衬砌和围岩的接触面 ($r = r_a$) 处, 衬砌外缘受到接触应力 $\sigma_r(r_a)$ 和渗透压力 p_a 的作用, 某种条件下 $\sigma_r(r_a)$ 和 p_a 对衬砌和围岩的接触状态有重要影响。本文首先在围岩为均匀介质、轴对称渗流场的条件下, 求得开裂的钢筋混凝土衬砌与围岩接触应力 $\sigma_r(r_a)$ 的表达式, 然后讨论衬砌脱离围岩独立工作的条件。

1 围岩的径向位移

假定洞周灌浆区岩体的弹性模量、泊松比和渗透系数与未灌浆区岩体的相同。假定 Ω_2 区孔隙水压力梯度按对数分布。

在图 1 渗流影响区 Ω_2 的边界即 $r = r_a, r = R$ 处, 围岩分别受到 $\sigma_r(r_a), p_a, \rho g B$ 和力学边界应力 $\sigma_r(R)$ 的作用, 在 $r = r_a$ 处产生径向位移 $u_r(r_a)$, 文献 [6] 给出了 $u_r(r_a)$ 的表达式:

$$u_r(r_a) = (p_a - \rho g B) C_1 - \sigma_r(R) C_2 - [\sigma_r(R) - \sigma_r(r_a)] C_3 \tag{1}$$

系数 C_1, C_2 和 C_3 的表达式冗长, 计算稍显繁琐, 经简化后可得

$$u_r(r_a) = (p_a - \rho g B) \frac{r_a(1 + \nu_r)}{E_r} C_p + \sigma_r(r_a) \frac{r_a(1 + \nu_r)}{E_r} \tag{2}$$

其中

$$C_p = \frac{1}{2(1 - \nu_r)} \left[\frac{1 - 2\nu_r + t^2}{t^2 - 1} + 1 - 2\nu_r - \frac{\nu_r(1 - \nu_r)}{\ln t} \right] - \frac{1}{t^2 - 1} \tag{3}$$

式中: E_r 为岩体的弹性模量; ν_r 为岩体的泊松比; t 为洞周渗流场半径与衬砌外半径的比值, $t = R/r_a$ 。

C_p 值与 ν_r, t 的关系示于图 2, 图 2 表明渗流场范围对 C_p 有明显影响。

2 衬砌和围岩的接触应力

2.1 接触应力 $\sigma_r(r_a)$ 的推导

裂缝衬砌所承担的荷载见图 3。图 3 中 p_a 为衬

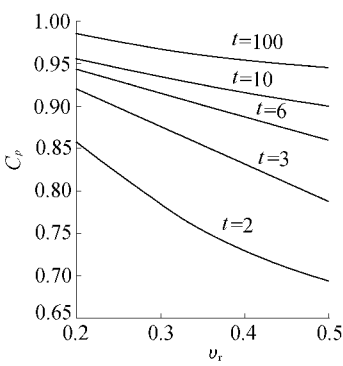


图 2 C_p 和 t, ν_r 的关系

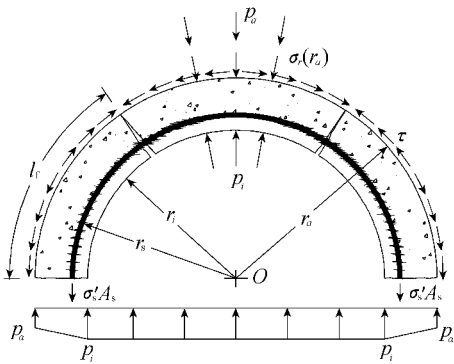


图 3 透水衬砌的静力平衡

砌与围岩接触面 ($r = r_a$) 处的渗透压力; σ_s' 为裂缝面处的最大钢筋应力; τ 为开裂时围岩对衬砌的摩擦力, 因结构近于对称, τ 较小, 此处忽略不计; A_s 为 1 cm 长洞段的钢筋面积 (即沿纵向洞轴取单位长度), 以 cm^2/cm 计。取 1 cm 长的洞段, 列出其平衡方程:

$$p_i r_i + \frac{1}{2} (p_i + p_a) (r_a - r_i) = A_s \sigma_s' + [\sigma_r(r_a) + p_a] r_a \tag{4}$$

化简式 (4) 可得

$$\sigma_s' = \frac{1}{A_s} [(p_i - p_a) \bar{r} - \sigma_r(r_a) r_a] \tag{5}$$

式中: $\bar{r}$ 为平均半径, $\bar{r} = (r_a + r_i)/2$ 。若令 $p_a = 0$, $\sigma_r(r_a)$ 等于不透水衬砌中的围岩抗力 q_r , 再令 $\bar{r} = r_i$, 式 (4) 退化为常用的 σ_s' 计算式^[1]:

$$\sigma_s' = \frac{p_i r_i}{A_s + \frac{k_0 r_s}{E_s} \psi} \tag{6}$$

式中: k_0 为单位弹性抗力系数, MPa; E_s 为钢筋弹性模量, MPa; ψ 为钢筋应力不均匀系数。

式 (6) 除未考虑 p_a 外, 也未考虑裂缝面上渗透压力的作用。

设 r_s 为钢筋中心线处的半径, $u_r(r_s)$ 为 r_s 处的径向位移, 有

$$u_r(r_s) \approx \frac{\sigma_s'}{E_s} \psi r_s \tag{7}$$

对于 III ~ V 类围岩中的压力隧洞, 可略去衬砌

混凝土的压缩量,位移协调方程可写为

u_r(r_s) ≈ u_r(r_a) (8)

将式(2)、式(6)代入式(8)并注意到式(5),可得

σ_r(r_a) = (p_i - p_a) * r̄ / r_a - α_1 * C_p * (p_a - ρgB) / (1 + α_1) (9)

其中

α_1 = (1 + ν_r * E_s / E_r) * A_s / (ψ * r_s) (10)

式(9)便是裂缝混凝土衬砌和围岩之间的接触应力表达式。其形式简单,操作方便,除了介质渗透系数的影响隐含于 p_a 以外[7],还能直观地反映其他因素的影响。式中 α_1 是个无量纲数,σ_r(r_a) 是 p_i, p_a, α_1 和 C_p 的函数,只有已知 p_a 方能确定 σ_r(r_a),而 p_a 是和衬砌平均裂缝宽 2a 相关的。

2.2 算例

为了了解 σ_r(r_a), σ_s' 随 p_a 的变化情况,计算了 2 个工程实例,算例 1 和算例 2 分别以低水头大直径、高水头小直径为特点,基本资料列于表 1。

图 4 示出算例 1 的 σ_r(r_a), σ_s' 与 p_a/p_i 的关系,

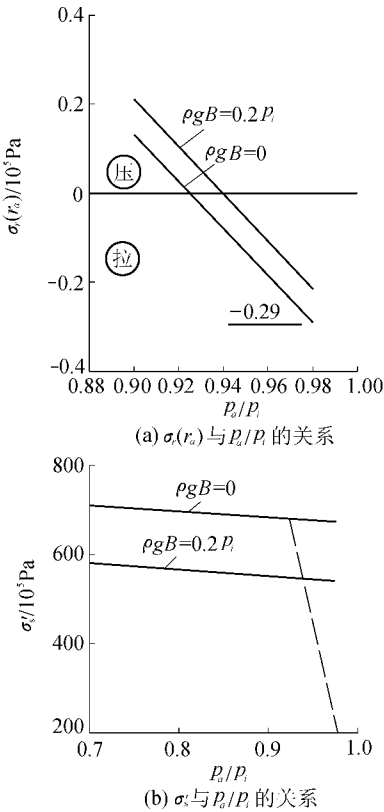


图 4 算例 1 的 σ_r(r_a)和 σ_s' 与 p_a/p_i 的关系(ψ = 0.5)

图 5 示出算例 2 的 σ_r(r_a), σ_s' 与 p_a/p_i 的关系。由图 4 和图 5 可知：

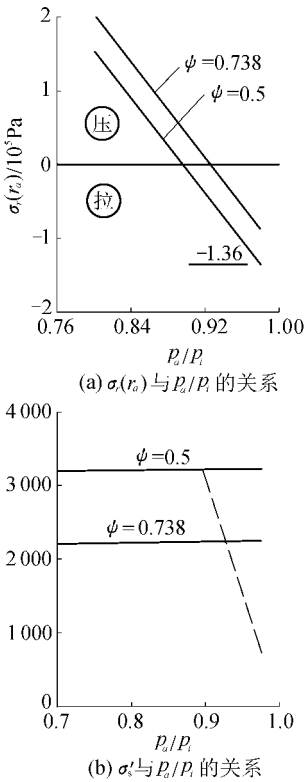


图 5 算例 2 的 σ_r(r_a)和 σ_s' 与 p_a/p_i 的关系(ρgB = 0)

a. p_a/p_i 达到某值后,σ_r(r_a)由压变拉,若接触强度为零,σ_r(r_a)会释放为零,衬砌会脱离围岩独立工作,σ_s' 会沿图 4(b)中的虚线减小,式(5)退化为

σ_s' = (p_i - p_a) * r̄ / A_s (11)

b. 若接触强度大于 σ_r(r_a),衬砌和围岩将联合工作,σ_s' 与 p_a/p_i 的关系将如图 4(b)中的实线所示,此时 σ_s' 在 p_a/p_i 的闭区间[0, 1]内变化很小。

c. 当 p_a = 0 时,σ_r(r_a)等于不透水衬砌的围岩抗力 q_t, σ_s' 为式(6)的计算值(69.8 MPa),其因式(6)未考虑缝面渗透压力而偏小。

d. p_a 增大,σ_r(r_a)减小, p_a + σ_r(r_a)随 p_a/p_i 的变化很小,对于算例 1,当 p_a/p_i = 0 ~ 0.98 时,σ_r(r_a) + p_a 为 475 ~ 510 kPa,这一特点为式(9)所决定。

e. 图 4 和图 5 还表示了 ρgB 和 ψ 对 σ_s' 及 σ_r(r_a) 的影响,并示出 σ_r(r_a)随着 p_i 的增大而增大,低水头下 σ_r(r_a)不大。

表 1 算例的基本资料

算例	p_i/10 ⁵ Pa	r_i/m	r_a/m	ν_r	E_r/GPa	E_s/GPa	ψ	A_s/(cm ² ·cm ⁻¹)	r_s/m	ρgB/p_i	t
1	5.5	4.5	5.1	0.20	3.6	210	0.500	0.294	4.55	0.200	2
2	17.5	2.0	2.4	0.32	3.0	210	0.738	0.126	2.03	0.143	10

注 算例 2 取自文献[7],算例 1 取自文献[8]。

3 衬砌和围岩的接触条件

3.1 衬砌围岩接触面上的临界渗透压力

p_a 随裂缝的发展而增大, $\sigma_r(r_a)$ 随 p_a 的增大而减小, 当 p_a/p_i 达到某值 $(p_a/p_i)_{cr}$ 时, $\sigma_r(r_a)$ 减小为零, 此后由压变拉, 相应 $\sigma_r(r_a) = 0$ 的 $(p_a/p_i)_{cr}$ 称为接触面上的临界渗透压力, 对式(9), 令 $\sigma_r(r_a) = 0$ 有

(p_a/p_i)_cr = (1 + (r_a/r) * alpha_1 * C_p * (rho * g * B / p_i)) / (1 + (r_a/r) * alpha_1 * C_p) (12)

当 $p_a/p_i > (p_a/p_i)_{cr}$ 后, $\sigma_r(r_a)$ 为拉应力。

算例 1 和算例 2 的 $(p_a/p_i)_{cr}$ 分别为 0.924 ~ 0.940 和 0.893 ~ 0.927。算例 2 的内水压有 175 m 水头, $\sigma_r(r_a)$ 可达 136 kPa 以上的拉应力。

3.2 衬砌脱开围岩单独工作的接触条件

衬砌脱开围岩独立工作的状态可用式(13)判别:

sigma_r(r_a)_0 + sigma_r(r_a) >= R_c (13)

式中: $\sigma_r(r_a)_0$ 为隧洞充水前的初始接触应力(假定充水前衬砌围岩密贴); $\sigma_r(r_a)$ 为隧洞充水过程中产生的接触应力, 由式(9)确定; R_c 为衬砌围岩接触面上的黏结强度, 以拉应力为正。

将式(9)代入式(13), 可得衬砌脱开围岩独立工作时的 $(p_a/p_i)_{cr}$ 为

(p_a/p_i)_cr >= (1 + alpha_1 * C_p * (r_a/r) * (rho * g * B / p_i) + (1 + alpha_1) * (r_a/r) * (R_c - sigma_r(r_a)_0 / p_i)) / (1 + alpha_1 * C_p * (r_a/r)) (14)

衬砌和围岩的接触条件是个复杂的问题, 原因是确定 $\sigma_r(r_a)_0$ 较为复杂, 文献[9]分析了水荷载历史对 $\sigma_r(r_a)_0$ 的影响。其次, $\sigma_r(r_a)_0$ 尚受到温度、灌浆压力、围岩作用力和是否可能产生初始缝隙诸多因素的影响。这里仅讨论 1 种简单的情况: 充水前, 衬砌围岩密贴, 两者间的黏结强度为零或者 $\sigma_r(r_a)_0 - R_c = 0$ 。此时, 只要满足式(15), 便可认为衬砌脱开围岩独立工作。

p_a/p_i >= (1 + (r_a/r) * alpha_1 * C_p * (rho * g * B / p_i)) / (1 + (r_a/r) * alpha_1 * C_p) (15)

文献[7]在算例 2 中估计岩体渗透系数 $k_r = 10^{-6}$ m/s, 灌浆圈半径 $r_g = 7.4$ m, 灌浆岩体渗透系数 $k_g = 10^{-7}$ m/s, 假定衬砌处于脱开围岩独立工作状态, 计算了不同裂缝间距 l_f 在稳定渗流状态下的 $2a$ 和 σ_s' 。一个重要的问题是衬砌开裂后, 在稳定渗流

状态下脱开围岩的假定是否成立。为此, 利用文献[7]中的状态方程(8)(10)(13)(14)和(15)计算了不同 l_f 下的 $2a$ 及相应的 p_a/p_i 值, 结果列于表 2。

表 2 算例 2 在不同 l_f 下的 $2a$ 及相应的 p_a/p_i 值

l_f / m	$2a$ / mm	$k_{cc}/$ (10^{-6} m $\cdot$ s $^{-1}$)	$q/$ (10^{-6} m 2 $\cdot$ s $^{-1}$)	$\Delta H_a/$ m	$p_a/$ p_i
2.152	0.189 0	1.967	71.30	1.051	0.994
1.076	0.133 8	1.390	71.09	1.483	0.992
0.785	0.114 3	1.189	70.97	1.731	0.990
0.580	0.098 2	1.020	70.84	2.010	0.989
0.173	0.053 6	0.556	70.05	3.650	0.979

注: k_{cc} 为衬砌的渗透系数, q 为单位洞长的渗流流量, $\Delta H_a = H_i - H_a$, $(p_a/p_i)_{cr} = 0.927$ 。

表 2 说明: 只要衬砌和围岩的黏结强度为零或者较小, 高水头压力隧洞在稳定渗流状态下, 即使在 $l_f = 0.173$ m, $2a = 0.053 6$ mm 的情况下, 式(15)也是满足的。表 2 中相应各个 $2a$ 值的 q 几乎不变, 衬砌一旦裂穿, k_{cc} 很大, 防渗效果几乎为零, 此时主要靠灌浆防渗圈防渗。

文献[8]、文献[10]及现场水压试验结果表明: 水工压力隧洞钢筋混凝土衬砌因高内水压而发生裂缝的规律性是条数较少、间距较大, 而文献[1][4][6]所定的 l_f 值很小, 其计算结果是裂缝条数 n 大于 100, 似与实际不符, 有待进一步研究, 故表 2 列出不同 l_f 值的计算结果。

4 结 论

a. 给出了接触应力 $\sigma_r(r_a)$ 的表达式(式(9))。它是确定衬砌与围岩联合作用还是脱开围岩独立工作的重要公式, 进一步可证明这 2 种工作状态所确定的钢筋应力和裂缝宽度有明显的差异。

b. 衬砌围岩的接触状态是个复杂的问题。若充水前两者密贴, 初始接触应力 $\sigma_r(r_a)_0 = 0$, 两者黏结强度 $R_c = 0$, 则充水过程中衬砌脱开围岩独立工作的条件是满足式(15)。

c. 以文献[7]中的工程实例为例, 计算了 $\sigma_r(r_a)$, σ_s' 在 p_a/p_i 的闭区间 $[0, 1]$ 内的变化情况, 说明 ① $\sigma_r(r_a)$ 随 p_a 的增大由压变拉, 可能最大拉应力值随 p_i 的增大而增大; ② 衬砌脱开围岩独立工作后, σ_s' 及 $2a$ 大幅度减小; ③ 开裂后, k_{cc} 与 $(2a)^3$ 成正比, 与 l_f 成反比。算例说明, 即使 l_f 小到 0.173 m, $2a$ 小到 0.053 6 mm, 式(15)也很容易得到满足, 因此文献[7]中“稳定渗流状态下, 裂缝衬砌独立工作”的假定一般能够成立。

参考文献:

[1] DL/T5195—2004 水工隧洞设计规范[S].

[2] SCHLEISS A J. Design of pervious pressure tunnels [J]. Water Power and Dam Construction, 1986, 38(5): 21-26.

[3] SCHLEISS A. Design criteria for pervious and unlined pressure tunnels[R]. Oslo: Underground Hydropower Plants, 1987: 22-25.

[4] 曹克明, 刘世明. 高内水压力作用下隧洞钢筋混凝土衬砌设计理论的探讨[J]. 华东水电技术, 1991(3): 1-13.

[5] 彭守拙. 水电站设计的新进展[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 259-284.

[6] SCHLEISS A J. Design of reinforced concrete linings of pressure tunnels and shafts[J]. Hydropower and Dams, 1997, 4

(3): 88-94.

[7] 彭守拙. 压力隧洞透水衬砌裂缝宽度计算的探讨[J]. 水利水电科技进展, 2009, 29(3): 46-48.

[8] 刘秀珍. 关于圆形有压水工隧洞衬砌裂缝计算的探讨[J]. 水力发电学报, 1983(3): 91-101.

[9] 张有天, 张武功, 王镭. 再论隧洞水荷载的静力计算[J]. 水利学报, 1985(3): 22-31.

[10] 潘家铮. 水工隧洞和调压室(水工隧洞部分)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.

(收稿日期: 2009-07-29 编辑: 骆超)

(上接第 46 页)

应力量级远超过材料的屈服极限, 需要对结构进行局部修改优化。

c. 涌潮冲击响应模型试验取得了闸门关键部位的位移和应力分布数据, 其结果与仿真计算值基本一致, 验证了仿真计算结果的合理性。

d. 优化修改后的闸门结构动力响应仿真计算结果显示, 在相同涌潮荷载作用下, 推荐方案最大应力集中区消失, 最大应力由 620 MPa 下降为 150 MPa, 取得了满意的抗振效果。

(上接第 49 页)

参考文献:

[1] 钱宁, 张仁, 周志德. 河床演变学[M]. 北京: 科学出版社, 1987.

[2] 陈树容. 布置于凸岸的江边村拦河闸电站引水防沙试验研究[J]. 人民珠江, 2005(4): 29-30.

[3] 张海光. 多孔拦河闸坝泄洪方案水力特性研究[J]. 水利科技, 2007(3): 37-39.

[4] 徐国宾. 弯道式引水枢纽中弯道的优化设计[J]. 泥沙研究, 1992(3): 65-69.

[5] 马有国, 周素真. 弯道环流在取水防沙中的作用[J]. 农田水利与水电, 1993(2): 34-38.

参考文献:

[1] 古华, 严根华. 水工闸门流固耦合自振特性数值分析[J]. 振动测试与诊断, 2008, 9(3): 242-246.

[2] YAN Gen-hua. Study of design techniques for dynamic safety of radial gates in hydraulic engineering [C]//Structure Engineering World Wide. San Francis: Elsevier Science Ltd., 1998.

[3] 严根华, 陈发展. 曹娥江大闸枢纽工程闸门流激振动试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2006.

[4] DL/L5039—95 水利水电工程钢闸门设计规范[S].

(收稿日期: 2009-07-13 编辑: 骆超)

[6] 郭维东, 周阳, 张云清, 等. 丁坝对弯道水流影响的分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2006, 37(4): 666-668.

[7] 周阳. 丁坝对弯道水流流态影响的试验研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2006.

[8] FAZLI M, GHODSIAN M, NEYSHABOURI S A S. Scour and flow field around a spur dike in a 90° bend [J]. International Journal of Sediment Research, 2008, 23(1): 56-68.

[9] JIA Ya-fei, STEVE S, XU Yi-chun, et al. Three-dimensional numerical simulation and analysis of flows around a submerged weir in channel bendway [J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2005, 131(8): 682-693.

[10] 徐桂英. 闸前弯道水流特性的试验研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1995, 28(3): 338-341.

(收稿日期: 2009-03-01 编辑: 高建群)

· 简讯 ·

全国第八届水文泥沙学术讨论会将在长沙召开

由中国水力发电工程学会水文泥沙专业委员会主办、中国水电工程顾问集团公司中南勘测设计研究院承办的全国第八届水文泥沙学术讨论会将于 2010 年 10 月中旬在湖南省长沙市召开。会议主要议题包括: ①水文、泥沙学术交流、工程技术经验总结; ②水文泥沙数学模型的研制与应用; ③水文、泥沙与环境影响; ④工程设计、运行中有关水文泥沙方面需帮助咨询的技术问题。 <http://www.hydropower.org.cn/info/shownews.asp?newsid=1829>。

(本刊编辑部供稿)