

考虑隧洞充水过程的衬砌裂缝宽度计算

彭守拙, 钟建文, 谷兆祺

(清华大学水利水电工程系, 北京 100084)

摘要 分析压力隧洞实际充水过程中的衬砌工作性态, 给出稳定渗流状态下的裂缝宽度方程以及考虑充水过程的衬砌裂缝宽度计算方法, 以此大体反映钢筋应力(σ_s)和裂缝宽度($2a$)的发展史, 认为其最大值与充水过程有关, 其长期稳定值与过程无关。实例计算表明, 稳定渗流、衬砌、围岩分开工作状态下的最大钢筋应力 σ_s' 及 $2a$ 值与不透水衬砌常用公式的计算值相比差别很大, 而两者联合工作时差别不大。

关键词 水工压力隧洞 充水过程 钢筋混凝土衬砌 隧洞渗流 裂缝宽度

中图分类号 TV672+.1

文献标识码 B

文章编号 1006-7647(2010)04-0067-04

Calculation of crack width of linings considering loading procedure of pressure tunnels//PENG Shou-zhuo, ZHONG Jian-wen, GU Zhao-qi (Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract : Considering the loading procedure of hydraulic pressure tunnels, the variation of working states of concrete linings was analyzed, and the formulas for the crack width under steady flows were proposed. A computational method considering the loading procedure of tunnels was presented. It could roughly reflect the development of the reinforcement stress σ_s and the crack width $2a$. The maximum values were dependent on the loading procedure, and the stable values were independent of the loading procedure. The results of an example indicate that the maximum values of the reinforcement stress σ_s' and the crack width $2a$ under independent working states of linings are much smaller than those of impervious concrete linings calculated by commonly-used formulas. However, the differences are small when the linings and surrounding rock mass work together.

Key words : hydraulic pressure tunnel ; loading procedure ; reinforced concrete lining ; steady flow in tunnel ; crack width

在水工压力隧洞钢筋混凝土衬砌的限裂设计中, 惯用的裂缝宽度计算公式是以裂缝不贯穿、衬砌不透水、衬砌与围岩联合工作为前提而导出的^[1-2], 当应用于Ⅳ类、Ⅴ类围岩中较高水头的隧洞衬砌时, 为满足限裂要求, 算得的配筋量很大, 有时大到难以施工的地步^[2]。

混凝土的抗拉强度很低, 内水压作用下, 一旦开裂, 则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的连续介质, 而成为强透水的以钢筋加强的具有贯穿性裂缝的不连续介质。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含有环向钢筋的强透水不连续介质处理, 且认为开裂前的混凝土衬砌是不透水的, 以此为基础导出稳定渗流状态下衬砌裂缝的宽度方程。

衬砌和围岩的接触状态对钢筋应力和裂缝宽度有重要影响, 文献[3]指出: “设计人员应根据情况采取必要的工程措施来保证或避免衬砌与围岩的联合工作, 对地下水位较高的圆形断面压力隧洞, 一般应

避免两者联合作用”。为此, 文献[4]提供了裂缝衬砌脱离围岩独立工作的判别式。

在隧洞充水过程中, 衬砌开裂以后便由不透水连续介质变为强透水的连续介质, 渗流状态也发生了相应的变化, 虽然围岩、混凝土、钢筋为弹性介质, 但由于衬砌结构的透水性和刚度在充水过程中(即加载过程中)发生了根本性的改变, 最大钢筋应力 σ_s' 和平均裂缝宽度 $2a$ 的求解实属非线性问题。

基于上述, 在导出衬砌裂缝的宽度方程时必须考虑衬砌、围岩的接触状态和充水过程对 σ_s' 以及 $2a$ 所产生的影响。

1 水工压力隧洞的充水试验及其衬砌工作状态的变化

水工压力隧洞投入运行前要按一定程序进行充水试验, 其目的是检验结构的安全性, 量测渗漏, 防止围岩渗透坡降猛增而导致失事。水头上升速度一般不应超过 10 m/h, 围岩较差时更要缓慢充水, 充水

至一定水位后要暂停一段时间待其渗流稳定。图 1 是国外 4 个高水头电站在不同充水阶段所测渗透流量 Q 的变化过程^[5]。从图 1 可以看出,充水初期 Q 较大,属不稳定渗流状态,15~20 h 后达到稳定渗流状态。

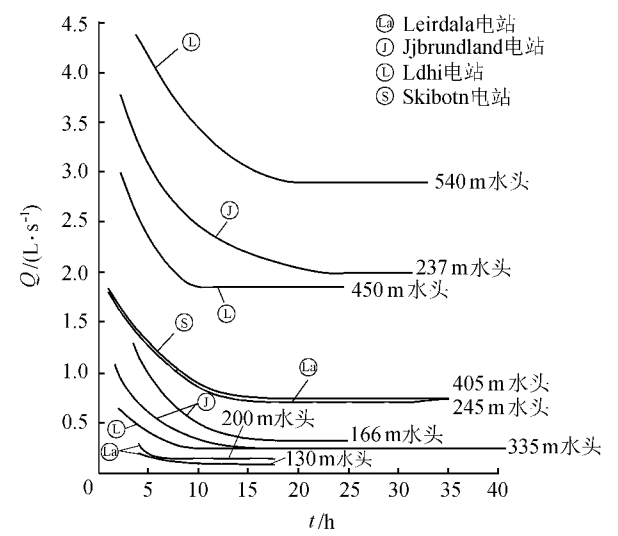


图 1 国外 4 个高水头电站的渗透流量实测过程线
图 2 为按一定程序设计的压力隧洞充水过程线。

时段 1 是升压至 p_1 及其间歇的时间,含 t_0, t_0^1, t_0^2, t_1 等 4 个时刻: $t_0 = 0$ 表示充水初始条件的时刻; t_0^1 为内水压 p_i 达到临界荷载 p_{cr} 并产生第 1 条裂缝的时刻; t_0^2 为 p_i 达到 kp_{cr} 的时刻,假定 $k = 1.05 \sim 1.2$,表示此时初次裂缝已达到稳定局面,衬砌形成 n 条裂缝,平均缝宽 $2a$ 的裂缝介质; t_1 为内水压达 p_1 并经过一段间歇时间,通过裂缝衬砌的渗流已达到稳定渗流状态并准备再次升压的时刻。

时段 2 是升压至 p_2 及其间歇的时段,含 t_1, t_1^1, t_2 等 3 个时刻: t_1 为该时段开始升压的起始时刻;

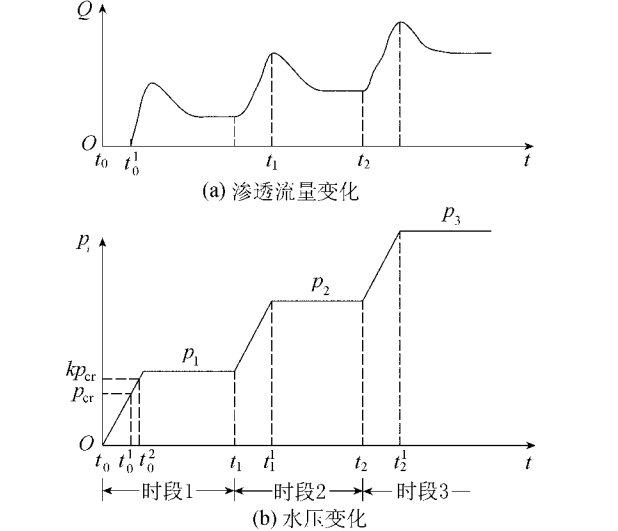


图 2 隧洞的充水过程线

t_1^1 为升压至 p_2 的时刻。经验和计算都可以说明,对于裂缝衬砌,初裂以后,不易发生第 2 次开裂,这里假定不发生再裂; t_2 为内水压达到 p_2 并经过一段间歇时间已达到相应 p_2 的稳定渗流状态后结束本段充水的时刻。

时段 3 是升压至 p_3 及其间歇的时段,其中各时段的意义类推。

图 1 及图 2 的实测资料说明衬砌在充水过程中经历了以下状态的改变 ①裂缝一旦贯穿,混凝土便由基本上不透水的多孔介质转变为透水性很强的裂隙介质;②每级升压的时段内,衬砌都要经历一个由不稳定渗流过渡到稳定渗流状态的过程,运行时的最终状态是相应工作水压的稳定渗流状态;③当衬砌处于各级水压下的稳定渗流状态工作时,可能与围岩联合工作,也可能脱开围岩独立工作。

衬砌的主要裂缝参数 σ_s' 和 $2a$ 无疑会随上述工作状态的变化而变化,最终达到一个稳定的数值。本文目的便是阐明上述裂缝发展历史的概念并给出大体上能够反映这一发展历程的裂缝参数计算的简便可行的方法。

2 稳定渗流状态下的裂缝宽度方程

2.1 衬砌的钢筋应力方程

若裂缝贯穿,衬砌围岩接触面处的半径为 r_a ,渗透压力为 p_a ,接触应力 $\sigma_r(r_a)$,考虑裂缝面上的渗压后,可以证明其最大钢筋应力为

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

其中

$$\sigma_r(r_a) = \frac{(p_i - p_a) \frac{\bar{r}}{r_a} - \alpha_1 c_p (p_a - \rho g B)}{1 + \alpha_1} \quad (2)$$

$$\alpha_1 = \frac{1 + \nu_r}{\psi} \frac{E_s}{E_r} \frac{A_s}{r_s}$$

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

$$t = \frac{R}{r_a}$$

式中: A_s 为 1 cm 洞长的配筋量(截面积), cm^2/cm ; $\bar{r}$ 为衬砌平均半径; ρ 为水的密度; B 为洞外地下水位至洞中心的距离; ν_r, E_r 分别为围岩的泊松比和弹性模量; E_s 为钢筋弹性模量; ψ 为钢筋应力不均匀系数; r_s 为钢筋半径; R 为隧洞渗流区影响半径。

式(1)即是衬砌的钢筋应力方程。它考虑了 p_a 和 $\sigma_r(r_a)$ (式(1)和式(2)的导出参见文献[4]),文献

[4] 还给出了一个衬砌与围岩接触状态的判别式,其分析表明:对于高水头软岩隧洞,因衬砌和围岩的黏结强度较小,裂缝衬砌易于脱离围岩而独立工作。实际上,接触状态是可采取工程措施加以控制的。

2.2 衬砌脱离围岩独立工作时的裂缝宽度方程

文献[2]给出了稳定渗流状态下描述衬砌工作的5个状态方程,5个方程共含5个未知量:裂缝衬砌的渗透系数 k_{cc} ,1 m洞长的渗漏流量 q (m^3/s),渗流通过衬砌的水头损失 $\Delta H_a = (p_i - p_a)/(\rho g)$, σ_s' , $2a$ 。不失一般性,以本文的式(1)代替文献[2]中的钢筋应力方程,并令式(1)中的 $\sigma_r(r_a) = 0$,联立求解5个方程,可得衬砌独立工作时 $2a$ 的表达式:

$$(2a)^4 = 12 \frac{\mu}{\rho g} \frac{0.1 \rho g \bar{r}}{E_s} \frac{100 l_f}{A_s} \psi \frac{q}{2\pi} \left(\ln \frac{r_a}{r_i} \right) l_f \times 10^{12} \tag{3}$$

式中: μ 为水的黏滞系数,10℃时 $\mu = 1.307 \times 10^{-3} \text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$, $12 \frac{\mu}{\rho g} \approx 1.6 \times 10^{-6} \text{m} \cdot \text{s}$; l_f 为平均裂缝间距,m;因 σ_s' 不大,此时可取 $\psi = 1$; r_i 为衬砌的内半径,m;式(3)中 $2a$ 以mm计。

式(3)就是衬砌独立工作的平均裂缝宽度方程。 $2a$ 取决于参数 A_s , q , l_f 。因 K_{cc} 很大, q 由洞内外水位、灌浆圈及围岩的渗透系数决定。由式(3)可知: $2a$ 与 $\sqrt[4]{q}$ 和 $\sqrt{l_f}$ 成正比, A_s 对 l_f 和 $2a$ 都有影响,加大 A_s ,减小 l_f ,式(3)能体现钢筋的限裂作用。

2.3 衬砌和围岩联合工作时的裂缝宽度方程

当衬砌和围岩联合工作时,式(1)中的 $\sigma_r(r_a) \neq 0$,这时可利用式(2)消去式(1)中的 $\sigma_r(r_a)$,联立求解5个状态方程,可得衬砌、围岩联合工作时的裂缝宽度方程:

$$(2a)^4 = \omega' k_a l_f (2a)^3 - \omega' \frac{0.1 \rho g l_f}{p_i} \cdot m_a \left(\frac{q}{2\pi} \ln \frac{r_a}{r_i} \right) \left(12 \frac{\mu}{\rho g} \right) l_f \tag{4}$$

其中

$$\begin{aligned} \omega' &= \psi \frac{p_i}{E_s} \frac{100 r_a}{A_s} \\ k_a &= \frac{\alpha_1 c_p}{1 + \alpha_1} \left(1 - \frac{p_B}{p_a} \right) \\ m_a &= k_a - \frac{\alpha_1}{1 + \alpha_1} \frac{\bar{r}}{r_a} \\ p_B &= 0.1 \rho g B \end{aligned}$$

式(4)就是衬砌围岩联合工作时的平均裂缝宽度方程。式(4)右边第1项为 $k_a p_i$ 对 $2a$ 的贡献,右边第2项代表 $m_a \Delta p_a$ 的贡献, $\Delta p_a = p_i - p_a$ 。数值分析表明:当 $p_a/p_i \geq 0.85$,式(4)右边第2项的影响可略去不计,实用上式(4)可简化为

$$2a \cong \omega' k_a l_f = \psi \frac{p_i}{E_s} \frac{100 r_a}{A_s} l_f \tag{5}$$

一般情况下, $2a$ 在0.05 mm以上, $p_a/p_i \geq 0.85$ 的条件极易满足,由于联合工作时衬砌受到围岩的约束, $2a$ 正比于 p_i 和 l_f ,反比于 A_s 。

式(3)和式(4)表明, $2a$ 只和 p_i , l_f , A_s 和 q 的最终稳定状态有关,对于裂缝衬砌而言,一般情况下不易再裂,如果只论裂缝在稳定渗流状态下的最终长期稳定开度,在初裂间距已定的情况下,式(3)、式(4)或式(5)即已足够。

3 考虑充水过程的裂缝参数计算

为了考察主要裂缝参数 σ_s' 和 $2a$ 在充水过程中的变化情况,可以模拟图2所示的充水过程计算各个时段即各级水压下 σ_s' 及 $2a$ 的发展情况。

计算时做以下假定:

a. 为便于说明,假定 $p_i \geq k p_{cr}$ 发生初裂后,不发生再裂,即 l_f 保持初裂间距不变。这个假定是否成立已有理论和方法进行证明,本文的算例已证明不会再裂,这里略去其计算和证明。

b. 当由某级荷载升压至下级荷载,例如由图2中的 p_1 升压至 p_2 时,假定升压很快,升压过程中 p_a 不变,仅 p_i 变化。于是图2中 t_1^1 时刻的 $\sigma_r(r_a) \Big|_{t_1^1}$ 及 $\sigma_s' \Big|_{t_1^1}$ 可表示为

$$\sigma_r(r_a) \Big|_{t_1^1} = \sigma_r(r_a) \Big|_{t_1} + \frac{d\sigma_r(r_a)}{dp_i} dp_i \tag{6}$$

$$\sigma_s' \Big|_{t_1^1} = \sigma_s' \Big|_{t_1} + \frac{d\sigma_s'}{dp_i} dp_i \tag{7}$$

式中: $\sigma_r(r_a) \Big|_{t_1^1}$ 为 t_1^1 时刻衬砌、围岩接触面上的接触应力; $\sigma_s' \Big|_{t_1^1}$ 为 t_1^1 时刻的最大钢筋应力,其余类推。

由式(1)(2)求出 $\frac{d\sigma_r(r_a)}{dp_i}$ 及 $\frac{d\sigma_s'}{dp_i}$ 后,可得

$$\sigma_r(r_a) \Big|_{t_1^1} = \sigma_r(r_a) \Big|_{t_1} + \frac{1}{1 + \alpha_1} \frac{\bar{r}}{r_a} (p_2 - p_1) \tag{8}$$

$$\sigma_s' \Big|_{t_1^1} = \sigma_s' \Big|_{t_1} + \frac{\bar{r}}{A_s} \frac{\alpha_1}{1 + \alpha_1} (p_2 - p_1) \tag{9}$$

其余时刻的 $\sigma_r(r_a)$ 及 σ_s' 可类似求得,利用式(8)(9)(3)或(5)再加上文献[2]所给的5个状态方程就能求出各级水压下的 σ_s' 及 $2a$,每级水压下的 σ_s' 及 $2a$ 有2个值,分别表示相应于正好达到该水压时的值和经过间歇时段后达到该级水压稳定渗流状态时的值。文献[6]给出的算例基本资料: $p_i =$

550 kPa, $r_i = 4.5$ m, $r_a = 5.1$ m, $\nu_r = 0.2$, $E_r = 3.6$ GPa, $E_s = 210$ GPa, $A_s = 0.294$ cm²/cm, $r_s = 4.55$ m, $B = 11$ m, $R/r_a = 2$, $c_p = 0.865$,配筋为 6 $\varnothing$ 25/m。

由文献[6]中算例可得 $p_{cr} = 364$ kPa,采用 $\psi = 0.5$,假定衬砌未裂穿,利用传统计算式算得相应的 $\sigma'_s = 46\ 200$ kPa。利用该文提出的弹性地基开口环法,得到 $l_f = 4.27$ m,按 7 条裂缝取整,采用 $l_f = 2\pi r_s/7 = 4.07$ m,文献[6]以裂缝未贯穿而不透水,即 $p_a = 0$ 为前提,利用文中提出的方法算得工作水压 550 kPa 作用下, $2a = 0.58$ mm。

为了说明本文提出的考虑衬砌裂穿及充水过程中裂缝参数发展史的计算方法,对上述算例做以下修改和说明:

- a. 假定 p_i 达到 $k p_{cr} = 1.2 p_{cr}$, $p_{cr} = 437$ kPa 后,形成 l_f 为 4.07 m 的 7 条裂缝,可以证明在 $p_i = 1\ 310$ kPa 的作用下,仍不再裂。
- b. 把工作水压改为 1311 kPa,按三级荷载充水,每级水压的增量为 437 kPa。
- c. 为计算 p_a 及 q ,假定围岩灌浆防渗半径 $r_g = 9.1$ m,围岩的渗透系数和灌浆围岩的渗透系数分别为 10^{-6} m/s 和 10^{-7} m/s。
- d. 假定洞外地下水位不变,高出隧洞中心 $B = 11$ m。关于 ψ ,联合工作时,采用文献[6]所给的 $\psi = 0.5$ 脱离围岩独立工作时,因钢筋应力较小而用 $\psi \approx 1.0$ 。

按上述修改,当衬砌可能脱离围岩而独立工作时 σ'_s 及 $2a$ 的发展历史见图 3 和图 4(图中的实线表示 σ'_s 和 $2a$ 随充水过程中水压的上升和间歇时段而变化的情况,其最大值是过渡性的,虚线表示各级水压达稳定渗流状态后的情况)。衬砌裂穿后,在各级水压的稳定渗流状态下,因 p_a 增加, $\sigma_r(r_a)$ 由压变拉而被释放,衬砌脱离工作而引起 σ'_s 的释放和裂缝的闭合。水压再次增加时,又引起 σ'_s 的增加和裂缝的张开。图 3、图 4 中点画线表示用不透水衬砌常用公式的计算结果^[1]。 $2a$ 用 $2a = \left(\frac{\sigma'_s}{E_s}\psi\right)l_f$ 算

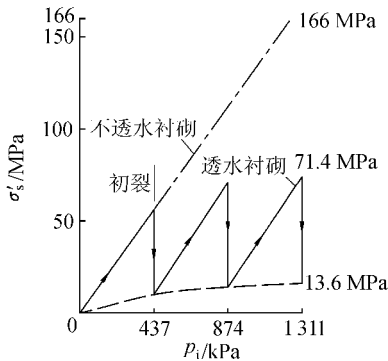


图 3 衬砌独立工作时 σ'_s 在充水过程中的变化

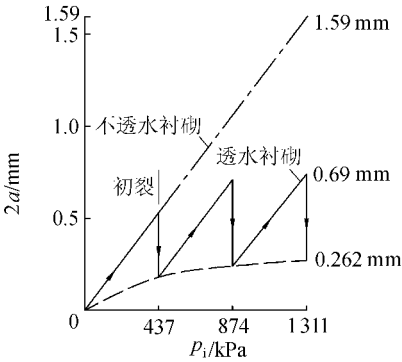


图 4 衬砌独立工作时 $2a$ 在充水过程中的变化出,两者的结果差别较大。

为了说明不同充水过程的影响,把三级充水改为二级充水,令 $p_1 = 437$ kPa, $p_2 = 1311$ kPa,仍可证明充水过程中 l_f 不变。二级充水时,相应于图 2 中 t_1 时刻的 σ'_s 由三级充水时的 69.0 MPa 跃升至 128.2 MPa, t_1 时刻的 $2a$ 也由 0.664 mm 跃升至 1.23 mm。最终时刻的长期稳定值仍为 $\sigma'_s = 13.6$ MPa, $2a = 0.262$ mm,它们与充水过程无关。

衬砌不可能脱离围岩而联合工作时, σ'_s 及 $2a$ 的发展历史示于图 5 和图 6(图中虚线表示按不透水衬砌常用公式^[1]的计算结果,实线表示考虑衬砌裂穿和充水过程的计算结果)。联合工作情况下,2 种计算方法的结果差别不大。

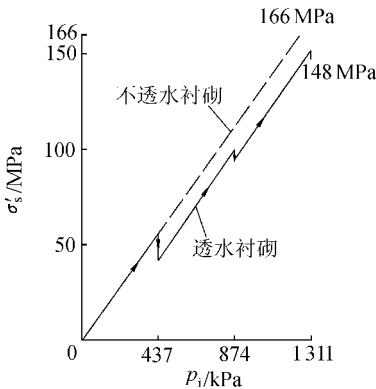


图 5 衬砌、围岩联合工作时 σ'_s 在充水过程中的变化

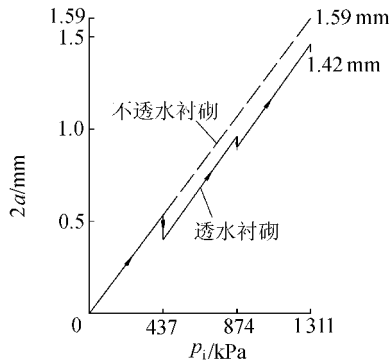


图 6 衬砌、围岩联合工作时 $2a$ 在充水过程中的变化 (下转第 75 页)

表 4 不同粒度成分及细粒质量分数下水下稳定坡角预测值

成因类型	工程部位	坡角预测值/(°)		平均值/(°)	误差/(°)
		基于分维	基于细粒质量分数		
崩坡积堆积	主沟 1 号	19.59	21.87	20.73	2.61
		18.73	23.63	21.18	0.01
		24.96	27.09	26.03	0.61
	近坝左岸	26.67	28.78	27.72	0.22
		28.85	28.51	28.68	0.34
		23.08	22.98	23.03	2.36
冰水堆积	昨日沟 3 号 (靠上游侧)	28.37	27.26	27.81	1.23
		13.69	13.48	13.58	0.03
冰缘冻融堆积	蚂蝗沟 5 号	13.75	13.76	13.76	0.31
		18.95	18.91	18.93	2.50
		14.84	13.48	14.16	0.09

应的斜率越小,相应的分维值越大。

c. 在一定范围内,根据不同松散堆积体水下坡角与其相应的粒度成分的相关分析,建立了不同松散堆积体粒度成分与水下稳定坡角的 2 个相关关系表达式。基于这 2 个表达式,可简易地测定水下松散堆积体粒度成分,即可确定相应的水下稳定坡角,

从而可快速进行坍岸范围预测。

参考文献：

[1] 胡卸文,吕小平,章璇.四川华能碛滩水电站水库蓄水后库岸边坡稳定性专题研究报告[R].成都:西南交通大学,2008.

[2] 胡卸文.无泥型软弱层带物理力学特性[M].成都:西南交通大学出版社,2002:46-51.

[3] MANDELBORT B B. The fractal geometry of nature[M]. San Francisco: Freeman,1982.

[4] 魏玉虎,胡卸文,齐光辉.分形理论在土体粒度成分特征评价中的应用[J].安徽地质,2006,16(2):120-122.

[5] 王东升,汤鸿霄,栾兆坤.分形理论及其研究方法[J].环境科学学报,2001,21(增刊):10-15.

[6] 任光明,聂德新.软弱层带夹泥粒度成分的分形研究[J].地质灾害与环境保护,1997,8(4):1-8.

[7] 易顺民,唐辉明.冻土粒度成分的分形结构特征及其意义[J].冰川冻土,1994,16(4):314-319.

[8] 刘松玉,方磊,陈浩东.论我国特殊土粒度分布的分形结构[J].岩土工程学报,1993,15(1):23-30.

(收稿日期:2009-12-25 编辑:方宇彤)

(上接第 70 页)

4 结 语

a. 从水工压力隧洞的充水实践出发,分析了隧洞衬砌在充水过程中工作状态的改变,最终将过渡到相应工作水压稳定渗流状态下或独立工作或围岩联合工作的状态。给出了这 2 种工作状态下的裂缝开度方程。

b. 给出了考虑充水过程计算裂缝参数的方法,它大体上能够反映裂缝的发展历史。钢筋应力 σ_s 和平均裂缝宽度 $2a$ 的最大值与充水过程有关,其最终的长期稳定值与充水过程无关。配筋应按充水过程中可能产生的最大钢筋应力配置。

c. 对可能的 2 种最终工作状态进行了实例计算,结果表明:稳定渗流、衬砌围岩联合工作状态下,最大钢筋应力 σ_s' 及 $2a$ 的计算值与常用不透水衬砌公式^[1]的计算值相比差别不大;稳定渗流、衬砌脱离围岩而独立工作的状态下, σ_s' 及 $2a$ 的计算值与常用不透水衬砌公式的计算值^[1]相比差别甚大,前者要小许多。设计者可以采取工程措施,保证衬砌围岩联合工作或使两者各自工作以达到使衬砌处于良

好工作状态的目。

d. 水工压力隧洞钢筋混凝土衬砌的裂缝参数计算是一个力学-水力学相互作用的复杂问题,国外有关文献甚少,国内稍多,目前的设计及计算方法尚无统一见解,也不尽完善,计算结果也不尽一致。在当前的设计施工实践中,对软岩压力隧洞衬砌的配筋很多,为了既保证安全,又节约投资,对这一问题做进一步的讨论和探究是很有意义的。

参考文献：

[1] DL/T5195—2004 水工隧洞设计规范[S].

[2] 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.

[3] 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.

[4] 彭守拙,钟建文.压力隧洞裂缝混凝土衬砌和围岩的接触条件[J].水利水电科技进展,2010,30(3):53-57.

[5] 谷兆祺.挪威水电工程经验介绍[R].Trondheim, Norway:挪威 TAPIE 公司,1985.

[6] 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.

(收稿日期:2009-07-29 编辑:方宇彤)