

波浪影响下半无限含水层中隧道渗流场分析^①

熊 浩, 赵 凯, 陈国兴

(南京工业大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210009)

摘要:根据线性波浪引起水下土体残余孔压增长理论, 采用 Laplace 变换得到衬砌在受波浪荷载下的外水压力及渗流量, 并得到水底带衬砌隧道渗流量和衬砌周边水头解答。计算结果表明: (1) 波陡 $H/L > 0.09$ 后衬砌将要承担比静水压力引起的更大的外水压力, 土体渗透系数减小波浪对隧道外水压力和渗流量的影响反而逐渐升高, 当 $k_L = 1 \times 10^{-7}$ m/s 时, 无论是波浪还是静水压力作用下隧道的渗流量都得到有效控制; (2) 5~10 s 周期的波浪及水深 $d < L/2$ 处的水域对衬砌渗流量影响较大, 近岸水下隧道有必要考虑波浪影响。

关键词: 水底隧道; 波浪作用; 渗流场分析

中图分类号: U451

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2014)04-0919-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2014.04.0919

Analysis of Seepage Field of Underwater Tunnels in a Semi-infinite Aquifer under Wave Action

XIONG Hao, ZHAO Kai, CHEN Guo-xing

(Institute of Geotechnical Engineering, Nanjing Tech. University, Nanjing, Jiangsu 210009, China)

Abstract: The existing seepage field calculation model of underwater tunnels generally ignores the influence of waves. On the basis of the theory of linear wave-induced pressure in soil, Laplace transformation was used to obtain the lining pressure and inflow. The results indicate that when the wave steepness exceeds 0.09, the lining bears more than that when pressure is applied by still water. The lining pressure and inflow increase as the soil permeability coefficient decreases. When the lining permeability coefficient $k_L = 1 \times 10^{-7}$ m/s both the lining inflow caused by waves and still water decrease. Moreover, the lining seepage field is influenced both when the water period ranges is 5~10 s and the depth $d < L/2$. These findings are of importance when building underwater tunnels onshore.

Key words: underwater tunnels; wave action; seepage field analysis

0 引言

修建于地下水位线以下的隧道的渗流场时以堵为主, 限量排放的地下水处治方法在隧道建设中得到了极大发展^[1], 这方面已有较多研究成果。杜朝伟等^[2]推导出由围岩、注浆圈、衬砌混凝土组成的水下隧道渗流场解析解。童磊^[3]对土体采用共形映

射, 通过 Fourier 解法得到半无限空间中带衬砌隧洞渗流量和衬砌周边水头解析解答。郑波, 王建宇^[4]依据无限含水层中井理论, 推导了轴对称条件下围岩、衬砌渗透力公式, 最后通过对比分析得出衬砌渗透性对围岩渗透力的影响很大, 不能被忽略的

① 收稿日期: 2014-08-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2011CB013605); 江苏省 2014 年度普通高校研究生科研创新计划(KYZZ_0222)

作者简介: 熊 浩(1986—), 男, 江西东乡人, 博士研究生, 主要从事海底隧道抗震与安全寿命安全设计理论方面的研究。

E-mail: xionghao@njtech.edu.cn

通讯作者: 陈国兴(1963—), 男, 浙江新昌人, 教授, 主要从事土动力学与岩土地震工程方面的研究。E-mail: gxchen@njtech.edu.cn

结论。不过,水下建造的隧道不可避免地要受到波浪的影响,而关于这一点的研究却较为少见。实际上波浪在传播过程中会在水下土层中产生周期荷载。在此荷载作用下,水底土层中会产生在时间和空间上不均匀分布的孔隙水压力^[5],当水面平静后这部分残余孔隙水压力开始消散,会产生额外的渗流量。关于土体受波浪影响的研究较多见于海床。Jeng^[6]推导了一系列关于均质多孔各向同性海床受波浪作用下响应的解析解;Hua 等^[7]建立了关于非均质各向异性海床在波浪作用下的动力响应模型;Zhou 等^[8-9]通过傅里叶变换推导了关于成层海床土受波浪下的响应的解析解。通过现场观测和试验^[10-11],目前认为波浪引起海床的自由场土体响应的机制主要取决于海床中孔隙水压力的产生方式^[5]:一种是超孔隙水压力的累积,也即残余孔隙水压力;另一种是循环变化的振荡孔隙水压力,它在海床深度上存在着幅值衰减和相位迟滞。和振荡孔隙水压力相关的海床响应具有周期性(图 1)。波浪生成原因很多,风是波浪生成的重要因素,有限风区的水域一般都是风产生的风成浪。此外波浪还受水深影响,由于岸水域较浅,风力较小,作用时间短,作用距离短产生不了大浪,对近岸工程而言,5~10 s 周期的波最为常见。这种埋置在波浪频率较高的近岸浅水区域隧道将多大程度上受到波浪的影响则有必要进行研究。根据线性波浪引起水下土体残余孔压增长理论,本文采用 Laplace 变换得到衬砌在受波浪荷载下的外水压力及渗流量,并得到水底带衬砌隧道渗流量和衬砌周边水头解答,由于振荡孔压的周期性,只考虑波浪引起的残余孔压,所关注的是近岸因风而生成的波浪对水下隧道渗流场的影响。

1 计算模型的建立

计算模型如图 2(a)所示:(1)模型的建立取水底为位势零面,水深 d ,隧道中心距各介质外层的距离依次为 r_0, r_1, r_2 ,并作出如下基本假定:

(1) 土体和衬砌均为各向同性均匀连续介质,远场地下水补给充分,隧道排水不影响现有水位;

(2) 隧洞横截面为圆形,纵向上满足平面应变条件;

(3) 渗流服从 Darcy 定律,并假定排水通过衬砌均匀渗水实现,不计隧洞内侧位势水头的影响,衬砌内渗流方向主要以径向为主。

图 2(b)中所示为各接触面的压力水头, h_0 为衬砌内壁的压力水头,由于隧道排水, $h_0=0$; h_1, h_1s ,

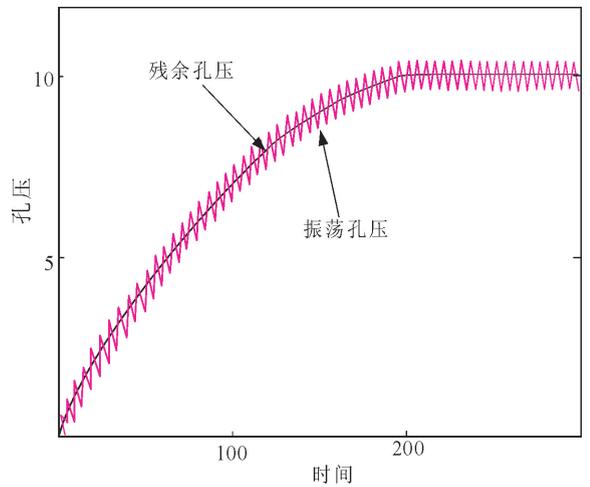


图 1 两种机制孔隙水压力概念图

Fig.1 Conceptual sketch of two different mechanisms of pore-pressure generation

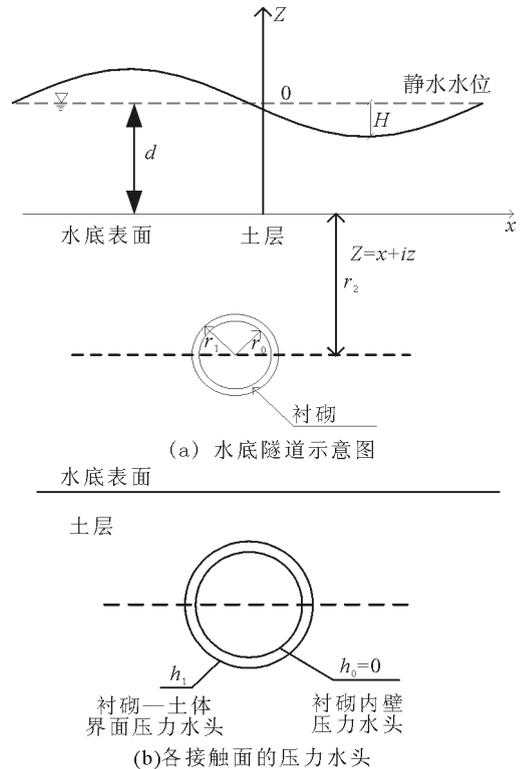


图 2 水底隧道计算模型

Fig.2 Calculation model of subwater tunnel

分别为波浪和静水压力引起的衬砌与土层界面压力水头。水底边界面上,土体承担由波浪引起的动孔隙水压力,考虑波浪-河床耦合效应,波浪在水底引起的孔压 p 为:

$$p(x, z, t) = \bar{p}(x, z, t) + \bar{p}(z, t) \quad (1)$$

\bar{p} 为一个波周期内的平均残余孔压, $\bar{p} = \frac{1}{T}$

$\int_t^{t+T} p dt$, T 为波浪周期; \bar{p} 为振荡孔隙水压力。均质各向同性均质土体中残余孔压满足一维固结方程:

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 \bar{p}}{\partial z^2} + f(z) \quad (2)$$

其中,固结系数 $c_v = \frac{2Gk_s}{\gamma_w(1-2\nu)+2(1-\nu)n\beta G}$, G 为土体剪切模量; k_s 为土层渗透系数; ν 为土体泊松比; β 为流体压缩率, 定义为:

$$\beta = \frac{1}{K_{wo}} + \frac{1-S_r}{\gamma_w d} \quad (3)$$

S_r 为饱和度; $K_{wo} = 2 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ 为纯水的弹性模量; 由于考虑饱和土, $S_r = 1$; 源项 $f(z)$ 由 Sumer 和 Fredsoe^[12] 求得:

$$f(z) = Az \exp(\lambda z) \quad (4)$$

$$A = \frac{\gamma'(1+2K_0)}{3T} \left(\frac{3p_0 \kappa}{\alpha \gamma (1+2K_0)} \right)^{1/\eta} \quad (5)$$

$\lambda = \kappa/\eta$; γ' 为浮重度; κ 为波数; H 为波浪波幅; K_0 为静止土压力系数; α, η 为经验参数, 依文献[13]取值。 p_0 为水底波压幅值:

$$p_0 = \frac{\gamma_w H}{2 \cosh(\kappa d)} \quad (6)$$

由边界及初始条件^[13]: $\bar{p}(\infty, t) = \bar{p}(z, 0) = \bar{p}(\infty, t) = 0$ 可得:

$$\begin{aligned} \bar{p} &= \frac{2A}{c_v \lambda^3} \left[1 - \left(1 + \frac{\lambda z}{2} \right) \exp(-\lambda z) \right. \\ &\left. - \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \frac{\exp(-rc_c \lambda^2 t)}{r(r+1)^2} \sin(-\sqrt{r} \lambda z) dr \right] \quad (7) \end{aligned}$$

注意到当 t 足够大时, 上式右端为零。

波陡 H/L 不能无限增大, 根据能量守恒原理波高增大到一定程度会出现碎波现象, 文献[14]中认为不出现碎波的条件是:

$$H/L \leq \frac{1}{7} \tanh\left(\frac{2\pi d}{L}\right) \quad (8)$$

(2) 土层渗流场

当波浪作用下产生的残余孔压开始消散时, 由 Darcy 定律和 Laplace 方程得到 Z 平面衬砌的渗流微分方程, 其中 ϕ_L 为衬砌内任一点压力水头:

$$\frac{\partial^2 \phi_L}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi_L}{\partial z^2} = 0 \quad (9)$$

在图 2 衬砌圆域中, 式(9)可化为极坐标下的对称形式:

$$\frac{\partial^2 \phi_L}{\partial \phi^2} + \frac{1}{\phi} \frac{\partial \phi_L}{\partial \phi} = 0 \quad (10)$$

边界条件:

$$\phi_L|_{\phi=r_1} = h_1 \quad (11)$$

解得:

$$\phi_L = \frac{h_1}{\ln(r_1/r_0)} \ln(\rho/r_1) + h_1 \quad (12)$$

对式(8)积分可得衬砌渗流量 Q_L :

$$Q_L = \kappa_L \int_0^{2\pi} \frac{\partial \phi_L}{\partial \rho} \cdot \rho d\theta = \frac{2\pi \kappa_L h_1}{\ln(r_1/r_0)} \quad (13)$$

式(5)中令 $z = r_2 - r_1$, 且 t 足够大, 可得:

$$h_1 = \frac{2A}{c_v \lambda^3} \left\{ 1 - \left[1 + \frac{\lambda(r_2 - r_1)}{2} \right] \exp[-\lambda(r_2 - r_1)] \right\} \quad (14)$$

当水面平静, 仅考虑静水压力下的渗流场推导同上, h_{1s} 未知, 但可根据层间的渗透量相等, $Q_{ss} = Q_{Ls}$ 得到, 该解答文献[3]中已给出。

$$h_{1s} = \frac{\kappa_s \ln(r_1/r_0) d}{\kappa_s \ln(r_1/r_0) - \kappa_L \ln \alpha} \quad (15)$$

$$Q_{Ls} = \frac{2\pi d \kappa_s \kappa_L}{\kappa_s \ln(r_1/r_0) - \kappa_L \ln \alpha} \quad (16)$$

其中, $\alpha = \frac{1}{r_1} (r_2 - \sqrt{r_2^2 - r_1^2})$ 。

2 计算结果

2.1 波浪对隧道衬砌的外水压力及渗流量影响

以某水下隧道的服务隧道为计算模型(图 2(a))进行结果验证分析, 隧道计算断面为圆形, 水头恒定, 波浪波幅取值应满足式(8), 波陡 H/L 取值如图 3 所示, 其余参数见表 1。

表 1 参数取值

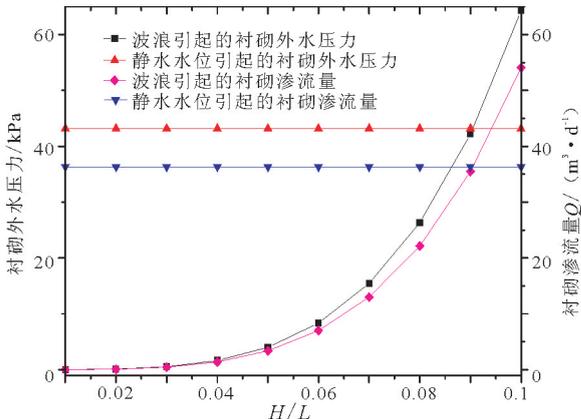
Table 1 Parameters of the numerical analysis

参数	取值
土层渗透系数 $\kappa_s / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	1×10^{-4}
衬砌渗透系数 $\kappa_L / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	1×10^{-6}
土体剪切模量 $G / (\text{N} \cdot \text{m}^{-2})$	560 000
侧向土压力系数 K_0	0.4
泊松比 ν	0.33
饱和度 S_r	1
孔隙率 n	0.46
波浪周期 T / s	10
水深 d / m	5
r_0 / m	3
r_1 / m	3.2
r_2 / m	8.2
α	0.246
η	0.25

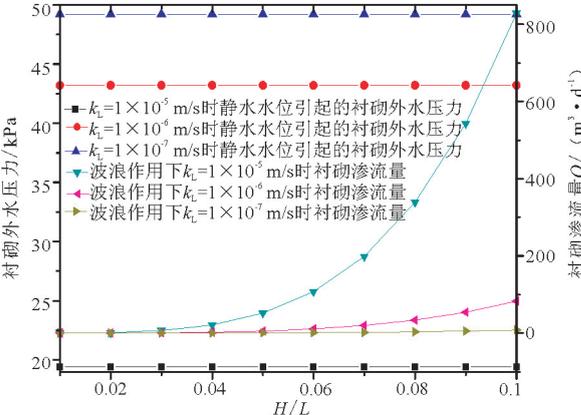
图 3(a)表明随着波陡 H/L 的增大, 由波浪引起的衬砌渗流量不断增大, 当 $H/L > 0.09$ 时波浪引起的渗流量开始超过静水压力引起的渗流量。波陡

引起的衬砌外水压力增长趋势同渗流量一致,即在 $H/L > 0.09$ 后衬砌将要承担比静水压力引起的更大的外水压力,而近岸处浅水区域传播的水波波陡更大,因此浅水区域波浪对隧道渗流场的影响有必要考虑。从式(14)可以看出波浪引起的衬砌外水压力与衬砌渗透系数无关,在图 3(b)中随着衬砌渗透系数的减小,由静水水位引起的衬砌外水压力不断加大。这是因为波浪和静水压力对衬砌外水压力的影响是两种不同的机制,波浪作用下土体的残余孔压只与本身深度有关,当隧道埋深确定后,波浪引起的衬砌外水压力已经确定,衬砌渗透系数对波浪引起的衬砌外水压力无影响。不过波浪作用下衬砌渗透系数的改变对渗流量影响较大。注意到当 $k_L = 1 \times 10^{-7}$ m/s 时,波浪幅高比衬砌渗流量的影响很小,衬砌能有效减小波浪作用下衬砌的渗流量。

影响,随着土体渗透系数的减小波浪对隧道外水压力和渗流量的影响反而逐渐升高,这是因为当土体的渗透系数更低时,由于波浪作用在土体中产生的孔压更难消散,土体残余孔压更大,结果不论是衬砌外水压力还是渗流量都较大,这和静水压力对衬砌渗流量的影响机理不同。结合图 2(b)中衬砌渗透系数对衬砌渗流量的有效控制,在水底土体渗透系数较低时,应适当减小衬砌的渗透系数以减小波浪对衬砌渗流量的影响。为进一步研究土层渗透系数较小时衬砌渗透系数对波浪作用下隧道渗流量的影响,表 1 中令 $k_s = 1 \times 10^{-5}$ m/s,衬砌渗透系数依次取 1×10^{-5} m/s、 1×10^{-6} m/s、 1×10^{-7} m/s,其余参数不变。图 5 中可以看出,当 $k_L = 1 \times 10^{-7}$ m/s 时,无论是波浪还是静水压力作用下隧道的渗流量都得到有效控制。



(a) 波浪引起隧道外水压力及渗流量



(b) 波浪作用下衬砌渗透系数对外水压力及渗流量的影响

图 3 波浪对衬砌外水压力及渗流量的影响

Fig.3 Influence of wave on lining inflow and pressure

2.2 土体渗透系数对隧道渗流场的影响

为研究波浪作用下土体渗透系数对隧道渗流场的影响,渗透系数 k_s 依次取 1×10^{-3} m/s、 1×10^{-4} m/s、 1×10^{-5} m/s,其余参数如表 1, H/L 取值不变。图 4 中可以看出土体渗透系数对衬砌渗流场的

图 4 土层渗透系数对衬砌外水压力及渗流量的影响

Fig.4 Influence of soil permeability coefficient on tunnel lining pressure and inflow

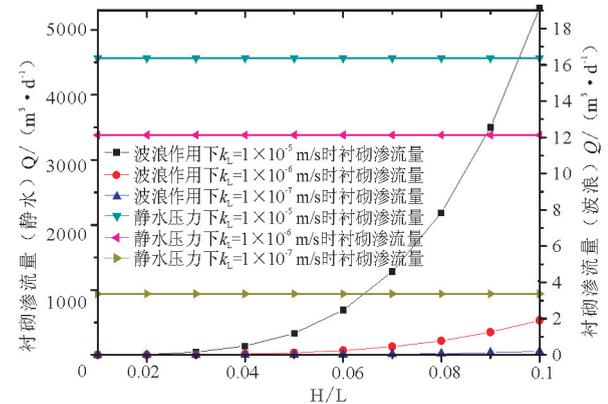


图 5 衬砌渗透系数对渗流量的影响

Fig.5 Influence of lining permeability coefficient on inflow

2.3 波浪周期对隧道渗流场的影响

波浪周期 T 分别取 6、8、10、12 s,其余参数同

表 1。图 6 中,随着波浪周期的减小衬砌的外水压力和渗流量都在增加,并且增加幅度有扩大的趋势。当波浪的周期较小时频率更大意味着土体所受波浪的循环荷载加载速率更快,孔隙水压力也增长更快,在相同时间内,不论是衬砌的外水压力还是渗透量都会相应的增大。此外,周期的增大对衬砌渗流场的影响逐渐减小,影响最大的周期范围在 6~10 s,而 5~10 s 周期的波浪对近岸工程而言最为常见,在修建近岸处水下隧道时有必要考虑波浪的影响。

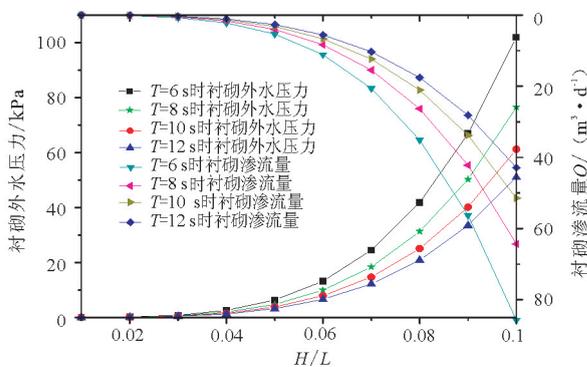


图 6 波浪周期对衬砌外水压力及渗流量的影响

Fig.6 Influence of wave period on lining pressure and inflow

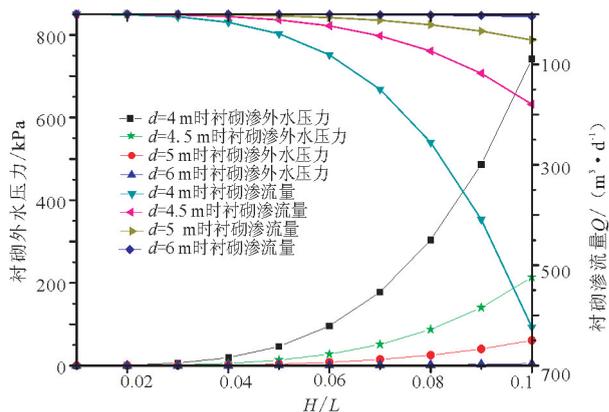


图 7 水深对衬砌外水压力及渗流量的影响

Fig.7 Influence of water depth on lining pressure and inflow

2.4 水深对隧道渗流场的影响

水深 d 依次取 4, 4.5, 5, 6 m。其余参数同表 1。图 7 可以看出波浪对隧道渗流场的影响随着水深的增加而减小,当水深增加到一定程度时波浪基本不产生影响。实际上, Airy 线性波理论^[15]中当 $d > L/2$ 时可以认为水质点已基本不动了,这在工程上

常用以作为深水波的界限,即水深超过此一值时即认为是深水波,图中在水深超过半波长(5 m)后,波浪对隧道外水压力及渗流量的影响很小,与此较为一致。

3 结论

根据线性波浪引起水下土体残余孔压增长理论,采用 Laplace 变换得到衬砌在波浪荷载下的外水压力及渗流量,并得到埋置于水下带衬砌隧道渗流量和衬砌周边水头解答。由于考虑了波浪作用下的水下环境,解答更为全面,并得出以下结论:

(1) 波陡 $H/L > 0.09$ 后衬砌将要承担比静水压力引起的更大的外水压力;波浪引起的衬砌外水压力与衬砌渗透系数无关,而静水水位引起的衬砌外水压力随衬砌渗透系数减小不断加大。随着土体渗透系数减小波浪对隧道外水压力和渗流量的影响反而逐渐升高,当 $k_L \leq 1 \times 10^{-7}$ m/s 后,波浪波陡对衬砌渗流量的影响很小,无论是波浪还是静水压力作用下隧道的渗流量都得到有效控制。

(2) 随着波浪周期的减小衬砌的外水压力和渗流量都在增加,并且增加幅度有扩大的趋势。近岸工程中有必要考虑周期介于 5~10 s 的波浪。

(3) 波浪对隧道渗流场的影响随着水深的增加而减小,当水深增加到一定程度时波浪基本不产生影响。当 $d < L/2$ 时,波浪对衬砌渗流场的影响不能忽略。

参考文献 (References)

- [1] 郑波, 王建宇, 吴剑. 海底隧道衬砌水压力折减系数估算[J]. 隧道建设, 2012, 32(4): 475-494.
ZHENG Bo, WANG Jian-yu, WU Jian. Calculation of Reduction Coefficient of Water Pressure on Underwater Tunnel Lining[J]. Tunnel Construction, 2012, 32(4): 475-494. (in Chinese)
- [2] WANG X Y, TAN Z S, WANG M S, et al. Theoretical and Experimental Study of External Water Pressure on Tunnel Lining in Controlled Drainage Under High Water Level[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2008, 23: 552-560.
- [3] 童磊, 谢康和, 卢萌盟, 等. 半无限含水层中带衬砌隧洞渗流解析研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(1): 305-309.
TONG Lei, XIE Kang-he, LU Meng-meng, et al. Analytical Study of Seepage Flow Into a Lined Tunnel in a Semi-infinite Aquifer[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(1): 305-309. (in Chinese)