

水压作用下硫酸盐在混凝土桩中的侵蚀分布规律

姚明博^{1,2}, 李镜培^{1,2}

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 为模拟地下桩身混凝土硫酸盐侵蚀机理, 考虑水压力对硫酸盐在混凝土桩中的侵蚀分布影响, 基于达西定律, 探讨渗流速度与水压力和时间关系, 建立了水压作用下的渗透深度计算模型。依据 Fick 第二定律, 建立水压力作用下的硫酸盐在混凝土桩中的扩散侵蚀方程。采用分离变量、变量代换和积分变换得到对流侵蚀方程的解析解, 以及水压影响范围外的扩散侵蚀方程解析解。同时, 分析了水压力对渗透深度影响的敏感性, 以及水压力、水灰比、渗透深度、裂缝宽度对桩中硫酸盐质量分数分布的影响。结果表明, 随着水压力的增大, 渗透深度显著增大; 水压力作用下, 混凝土桩中的硫酸盐质量分数分布明显高于无水压作用时的硫酸盐质量分数分布; 水灰比、渗透深度、裂缝宽度对硫酸盐在混凝土桩中的质量分数分布影响显著。

关键词: 混凝土桩; 硫酸盐; 水压力; 对流侵蚀

中图分类号: TU528

文献标志码: A

convection erosion equation and diffusion erosion equation without the influence of water pressure were obtained. At the same time, the sensitivity of water pressure to penetration depth was analyzed. The effect of water pressure, water cement ratio, seepage depth, and crack width on the sulfate concentration distribution was analyzed. The results show that with the water pressure increasing the penetration depth increases significantly. Under water pressure, the concentration of sulfate in concrete is significantly higher than that of sulfate when there is no water pressure. The water-cement ratio, penetration depth and the crack width have significant effects on the concentration distribution of sulfates in concrete.

Key words: concrete pile; sulfate; water pressure; convection erosion

Distribution Behavior of Sulfate Erosion in Concrete Piles Under Water Pressure

YAO Mingbo^{1,2}, LI Jingpei^{1,2}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: To simulate the degradation mechanism of concrete piles underground exposed to sulfate attack, the effect of water pressure on sulfate erosion distribution in concrete piles was considered. Based on Darcy law, the relationship between flow velocity and water pressure and time was established. Furthermore, the penetration depth calculation model of water pressure was established. Considering the existing water pressure, a diffusion erosion equation of sulfate in concrete piles was established based on Fick's second law. Via the method of separation of variables, variable substitution and integral transformation, the analytical solution of the

处于滨海盐渍土、内陆盐湖和盐碱地的混凝土结构在外界环境的多重作用下, 混凝土劣化剥落, 严重影响混凝土结构的耐久性^[1-2]。对于地基中的混凝土桩, 地下水中硫酸盐对桩身混凝土的侵蚀往往具有隐蔽性。由于混凝土并不是一种完全密实的材料, 在地下水压力的作用下, 硫酸盐会随着孔隙液的渗透而进入混凝土, 并伴随扩散与腐蚀。因此, 地下水中硫酸盐对桩基混凝土的侵蚀是一个复杂的物理-化学耦合过程。

目前, 地下水对混凝土桩的腐蚀作用逐渐引起重视, 季常煦等^[3]发现地下混凝土结构耐久性降低甚至破坏的重要因素之一为地下水中的硫酸盐侵蚀。丁建彤等^[4]采集了硫酸盐含量很高的盐碱地下水, 用于桩基混凝土耐腐蚀试验, 发现其对桩基混凝土具有破坏作用。冷发光等^[5]全面分析了滨海盐渍土环境中自然暴露 17 年的钢筋混凝土桩的腐蚀特征, 发现混凝土桩身不同部位的破坏程度与侵蚀性

收稿日期: 2018-08-11

基金项目: 国家自然科学基金 (41772290)

第一作者: 姚明博 (1987—), 男, 博士生, 主要研究方向为桩基础耐久性。E-mail: supersonic3035@qq.com

通信作者: 李镜培 (1963—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为桩基础及岩土工程耐久性。E-mail: lijip2773@tongji.edu.cn

离子含量分布均显著不同. 李镜培等^[6]基于硫酸盐侵蚀与混凝土强度和刚度劣化的相关关系, 研究了硫酸盐侵蚀环境下不同腐蚀损伤度对桩基竖向承载特性的影响. Li 等^[7]则研究了内部混含硫酸盐的灌注桩混凝土腐蚀离子时变分布行为, 探讨了硫酸盐扩散分布的影响因素和影响规律. 上述研究对地下水中硫酸盐侵蚀基桩混凝土有了定性的认识, 但研究不够深入, 尤其是对于地下水中硫酸盐对混凝土的侵蚀机制问题, 研究不够全面.

Němeček 等^[8]和 vander Zanden 等^[9]指出, 盐离子在扩散过程中, 同时受到渗透作用或毛细作用引起的对流影响, 为此建立了盐离子在混凝土中的对流扩散方程. 然而, 已有的研究中, 针对毛细作用引起盐离子的对流扩散研究较多^[10-11], 而忽略了渗透作用下的盐离子对流扩散研究. 硫酸盐在对流扩散过程中, 还会与混凝土胶凝材料发生化学反应, 因此, 在一定的深度范围内, 硫酸盐在混凝土中的输运是对流侵蚀耦合作用的结果.

本文针对地下水硫酸盐腐蚀环境中混凝土桩基存在的对流侵蚀耦合作用问题, 考虑水压力对硫酸盐扩散侵蚀的影响, 基于达西定律, 推导出水压力作用下的渗流速度以及渗透深度. 根据渗透深度模型, 将硫酸盐在混凝土中的侵蚀过程区分为对流侵蚀耦合区和扩散侵蚀区. 分别在对流侵蚀耦合区和扩散侵蚀区建立对流侵蚀方程和扩散侵蚀方程, 通过分离变量、变量代换和积分变换法进行解析. 同时, 分析水压力作用下, 混凝土水灰比, 裂缝宽度以及渗透深度对硫酸盐质量分数分布的影响.

1 渗流速度与渗透深度

孔隙水在外界压力差作用下在多孔介质中发生定向流动, 其过程符合达西定律^[12]

$$v = -\frac{k}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1)$$

式中: v 为孔隙水流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; k 为渗透系数, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; η 为液体黏滞性系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}$; p 为水压, Pa ; x 为渗透深度.

基桩混凝土所受的水压力随位置而变化, 压力在桩与地下水或海水接触面处最大. 水分在运动过程中受到混凝土介质的阻挡, 所受压力随水的渗透深度增加而逐渐降低, 如图 1 所示.

在截面 1、2 之间的流量 ΔQ 可表示为

$$\Delta Q = Q_1 - Q_2 = A \frac{\partial v}{\partial x} dx dt \quad (2)$$

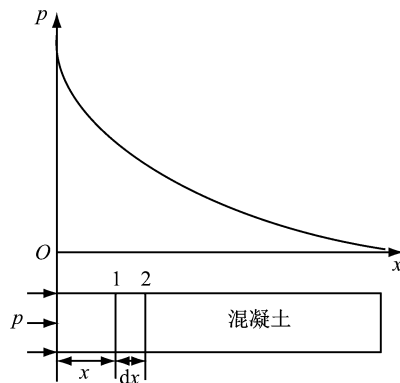


图 1 混凝土中水压变化示意图

Fig. 1 Schematic diagram of water pressure variation in concrete

式中: Q_1 为通过截面 1 的流量; Q_2 为通过截面 2 的流量; A 为水通过混凝土断面的面积; t 为时间.

体积模量 E 为

$$\frac{1}{E} = -\frac{dV}{V dp} \quad (3)$$

式中: $V = Ax$.

由式(2)和式(3)可得

$$\frac{dp}{dt} = -E \frac{dv}{dx} \quad (4)$$

式中: E 为混凝土与其内部水分综合体的体积弹性模量, 可表示为

$$\frac{1}{E} = \frac{\mu}{E_w} + \frac{1-\mu}{E_c} \quad (5)$$

式中: μ 为水与混凝土的体积比; E_c 为混凝土的体积弹性模量; E_w 为水的体积模量.

将式(1)代入式(4)得

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{kE}{\eta} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (6)$$

式(6)的边界条件和初始条件为

$$\begin{cases} p(x, 0) = 0 \\ p(0, t) = p_0; p(\infty, t) = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: p_0 为混凝土桩与地下水接触面上所受到的压力.

根据初始条件和边界条件可得^[13]

$$p(x, t) = p_0 \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{kEt/\eta}}\right) \quad (8)$$

式中: $\operatorname{erf}(\cdot)$ 为互补误差函数.

将式(8)代入式(1), 得出水压力与渗流速度的关系为

$$v(x, t) = p_0 \sqrt{k/\pi E \eta t} e^{-\frac{x^2}{4kEt}} \quad (9)$$

渗透深度为

$$L(x, t) = \int_0^t v(\tau) d\tau =$$

$$2p_0 \sqrt{\frac{kt}{\pi E \eta}} e^{-\frac{p_0^2}{4kEt}} - \frac{p_0 x}{E} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2} \sqrt{\frac{\eta}{kEt}}\right) \quad (10)$$

2 水压力作用下硫酸盐对混凝土桩的侵蚀模型

2.1 硫酸盐对流侵蚀解析

水压力作用加快了地下水渗透进入混凝土孔隙的速度,水中的硫酸盐随同地下水的渗透而发生整体迁移,引起了孔隙中硫酸盐质量分数 w 的变化,称为对流现象. 因此,处于地下水中的基桩硫酸盐侵蚀,可看成对流作用下的扩散侵蚀. 根据桩的几何对称性,考虑一维情况(沿半径 r 方向)即可满足工程应用. 由于水压力引起的盐离子对流深度有限^[14],对流区域内,可以忽略曲面扩散域对盐离子扩散的影响. 因此,水压力影响范围内,对流深度为 L ,硫酸盐进入桩身混凝土是对流和扩散耦合作用的结果, l 为对流深度与扩散深度之和,如图2所示. 水压力影响范围外,硫酸盐在质量分数梯度下扩散,符合 Fick 第二定律,如图2所示.

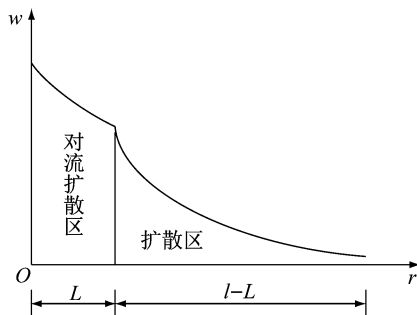


图2 硫酸盐对流扩散区和扩散区示意图

Fig.2 Schematic diagram of convection-diffusion region and diffusion region of sulfate

赵川等^[15]通过实验测定有压溶液作用下混凝土中盐离子的质量分数分布. 在压渗实验过程中,混凝土试件处于饱和状态,故毛细作用可以忽略,因此渗透作用是氯离子的主要迁移机制,而扩散作用在氯离子的迁移过程中不可忽略,从而得到水压力作用下的对流-扩散模型. 在对流区域,由于扩散域对硫酸盐扩散的影响可忽略,硫酸盐沿桩的一维径向对流侵蚀可以看成是平面域的对流扩散. 因此,考虑水压影响范围内的硫酸盐侵蚀方程可表示为

$$\frac{\partial w}{\partial t} = D \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - v \frac{\partial w}{\partial x} - Kw \quad (11)$$

式中: w 为硫酸盐在混凝土桩中的质量分数; D 为硫酸盐扩散系数; K 为硫酸盐与混凝土水化产物发生

反应的速率.

外界硫酸盐质量分数为 w_s , 桩中的硫酸盐质量分数为 w_0 . 式(11)的初始和边界条件为

$$\begin{cases} w(x, 0) = w_0, 0 < x \leq l \\ w(l, t) = w_s, t > 0 \end{cases} \quad (12)$$

暂不考虑硫酸盐与混凝土水化产物发生化学反应,即考虑对流和扩散耦合作用,初始条件和边界条件不变,式(11)和式(12)转化为

$$\frac{\partial w_1}{\partial t} = D \frac{\partial^2 w_1}{\partial x^2} - v \frac{\partial w_1}{\partial x} \quad (13)$$

式中: w_1 为硫酸盐在混凝土桩中的质量分数.

$$\begin{cases} w_1(x, 0) = w_0, 0 < x \leq l \\ w_1(0, t) = w_s, t > 0 \end{cases} \quad (14)$$

对式(13)进行分离变量,对式(14)进行边界齐次化,可得^[16]

$$\begin{aligned} w_1(x, t) = & \frac{w_s - w_0}{1 - e^{\frac{v}{D}l}} (e^{\frac{v}{D}x} - e^{\frac{v}{D}l}) - \\ & \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8D^2 n \pi (w_s - w_0)}{v^2 l^2 + 4D^2 n^2 \pi^2} e^{-\left(\frac{n^2 \pi^2 D}{l^2} + \frac{v^2}{4D}\right)t} \cdot \\ & e^{\frac{v}{D}x} \sin \frac{n \pi x}{l} \end{aligned} \quad (15)$$

对式(15)积分变换可得对流范围内的硫酸盐质量分数分布

$$\begin{aligned} w(x, t) = & \frac{w_s - w_0}{1 - e^{\frac{v}{D}l}} (e^{\frac{v}{D}x} - e^{\frac{v}{D}l}) - \\ & \sum_{n=1}^{\infty} \frac{8D^2 n \pi (w_s - w_0)}{v^2 l^2 + 4D^2 n^2 \pi^2} \left(\frac{K}{G} + \frac{G-K}{G} e^{-Gt} \right) \cdot \\ & e^{\frac{v}{D}x} \sin \frac{n \pi x}{l} \end{aligned} \quad (16)$$

其中

$$G = \frac{n^2 \pi^2 D}{l^2} + \frac{v^2}{4D} + K, 0 < x \leq L$$

式(16)即为考虑水压作用影响的硫酸盐对流侵蚀方程解析解.

2.2 硫酸盐扩散侵蚀解析

水压力作用范围外的硫酸盐输运为硫酸盐的扩散侵蚀过程,曲面扩散域的影响不可以忽略,其在混凝土桩径向的扩散侵蚀方程可表示为

$$\frac{\partial w_2}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 w_2}{\partial r^2} + r^{-1} \frac{\partial w_2}{\partial r} \right) - Kw_2 \quad (17)$$

式中: w_2 为硫酸盐在混凝土桩中的质量分数.

初始条件不变,边界条件为对流侵蚀最大深度处(计算见式(10))的硫酸盐溶液质量分数. 即

$$\begin{cases} w_2(r, 0) = w_0, L < r < l \\ w_2(L, t) = w(L, t), t > 0 \end{cases} \quad (18)$$

根据初始条件及边界条件,式(17)的解为

$$w_2 = w(L, t) + 2(w_0 - w(L, t)) \cdot$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_0(\mu_n r/b)}{\beta_n b J_1(\beta_n b)} \left(\frac{K}{D\beta_n^2 + K} + \frac{D\beta_n^2}{D\beta_n^2 + K} e^{-(D\beta_n^2 + K)t} \right) \quad (19)$$

式中: $\beta_n b$ 为 $J_0(x)=0$ 的零点, 以 $\mu_n (n=1, 2, \dots)$ 表示 $J_0(x)$ 的正零点, 则 $\beta_n = \mu_n/b, b=l-L$.

2.3 扩散系数

考虑混凝土内部孔隙率及裂缝损伤对硫酸盐扩散系数的影响^[17-19], 扩散系数可表示为

$$D = \frac{A_c D_c + A_0 D_p}{A_c + A_0} \quad (20)$$

式中: A_0 和 A_c 分别为无裂缝混凝土部分的桩面积和裂缝的面积; D 和 D_c 分别为硫酸根离子在无裂缝混凝土桩内和裂缝内的扩散系数.

裂缝宽度为 W_c , 以单位长度的混凝土桩为研究对象, 则无裂缝混凝土部分的桩面积和裂缝的面积分别为 $A_0 = \pi r_0 - W_c, A_c = W_c$. 式(20)可表示为

$$D = D_p + \frac{W_c(D_c - D_p)}{\pi r_0} \quad (21)$$

考虑孔隙填充对硫酸盐扩散系数的影响, 取 $D_p = \varphi D_0$. 其中, D_0 为孔溶液中硫酸盐扩散系数, φ 为毛细管孔隙度.

考虑裂缝对硫酸盐扩散系数的影响, 裂缝处的硫酸盐扩散系数与裂缝宽度呈现分阶段的函数关系^[20]: 以裂缝宽度 $W_{crit} = 100 \mu\text{m}$ 为临界值, 当裂缝小于临界值时, 扩散系数与裂缝宽度成二次函数关系; 超过临界值时, 扩散系数随裂缝宽度线性增长. 据此, 裂缝处的扩散系数可表示为

$$D_c = \begin{cases} \kappa W_c^2, & 0 < W_c < W_{crit} \\ \kappa W_{crit} W_c, & W_{crit} \leq W_c < 400 \mu\text{m} \end{cases} \quad (22)$$

式中: $\kappa \approx D_{free}/W_{crit} \approx 1 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; W_{crit} 为裂缝宽度临界值; D_{free} 为硫酸盐在水溶液中的扩散系数.

2.4 理论解与试验数据的对比

为验证本文方法的准确性, 制作水灰比(质量比)为 0.55 的混凝土试件, 试件尺寸为 $\Phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$, 经过标准养护后, 置于质量分数为 5% 的硫酸钠溶液中. 液面高度为 185 mm, 混凝土试件露出部分用石蜡封闭. 分别于 30 d 和 90 d 后, 将混凝土试件取出, 擦干试件表面水分, 放入 105°C 烘箱中干燥 24 h 后, 钻取混凝土试件侧面粉末, 取粉末浸出液测定混凝土试件不同深度处硫酸盐质量分数. 取样处的溶液水头深度为 100 mm, 据此得出考虑水压

力影响和不考虑水压力影响的硫酸盐质量分数分布曲线, 两种情况下的硫酸盐质量分数分布曲线比较贴近, 如图 3a 所示, 这是因为溶液水头深度较小, 水压力作用较小. 对流深度取 1 mm, 溶液渗透引起的对流作用可以忽略不计.

为进一步验证对流作用对离子扩散的影响, 文献[21]研究了混凝土桥墩在海水中浸泡 38 年后的氯离子质量分数分布, 以及毛细作用引起氯离子在混凝土桥墩表层的对流扩散. 其对流深度取为 17 mm. 本文模型计算结果与文献[21]中的试验数据、拟合曲线进行对比分析, 如图 3b 所示. 从图 3b 可以看出, 试验数据与本文模型具有较好的吻合度. 综上所述, 本文方法是正确的.

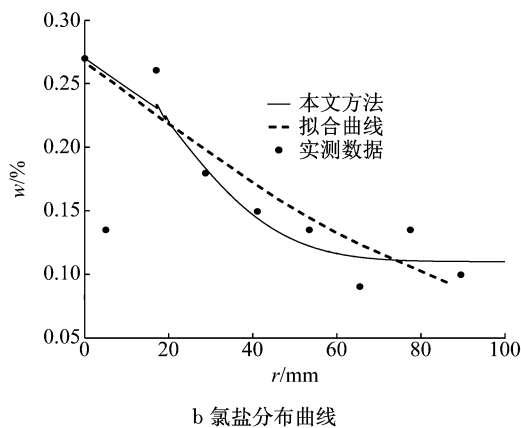
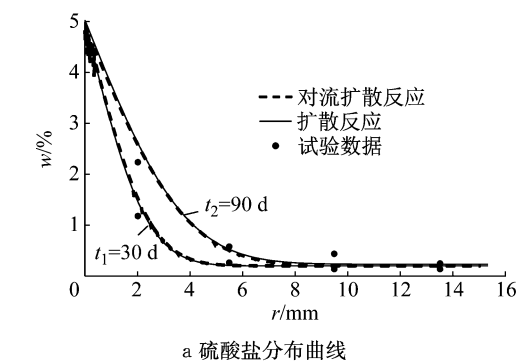


图 3 本文解析解与试验结果对比

Fig. 3 Comparison of analytical solution and experimental data

3 算例与影响因素分析

3.1 水压力与渗透深度的关系

图 4 为渗透深度在水压力作用下随时间的变化曲线. 从图 4 中可以看出, 渗透深度随时间的增加非线性增长; 同时, 随着水压力的增大, 相同时间条件

下的渗透深度也显著增大.由此可知,水压力的增加有助于地下水进入混凝土,使得地下水携带的硫酸盐等更容易侵蚀混凝土.

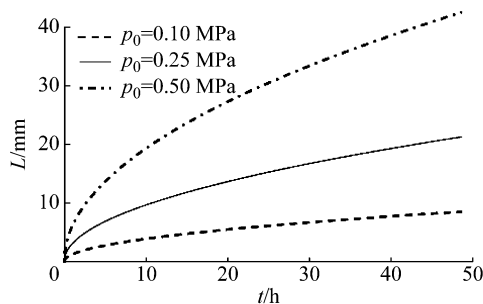


图4 水压力对渗透深度的影响

Fig.4 Effect of water pressure on penetration depth

3.2 水压力与硫酸盐对流侵蚀分布的关系

图5为水压力 $p_0=0.25$ MPa时硫酸盐在混凝土桩中对流侵蚀的分布曲线与无水压作用下的硫酸盐分布曲线.在对流侵蚀区域,在水压力作用下,溶液的渗透携带硫酸盐进入混凝土孔隙,耦合硫酸盐的扩散侵蚀,使外界环境中硫酸盐更容易侵入混凝土,导致表层混凝土中硫酸盐质量分数相较于扩散侵蚀时的硫酸盐质量分数明显更高.同时,随着计算时间的增长,水压作用对硫酸盐的扩散具有累积效应.在扩散侵蚀区域,由于对流侵蚀的边界处硫酸盐质量分数更高,硫酸盐溶液质量分数梯度更大,促进了硫酸盐的扩散,导致硫酸盐侵入的深度更深.因此,在地下水存在的情况下,水压作用对硫酸盐扩散的影响不可忽略.

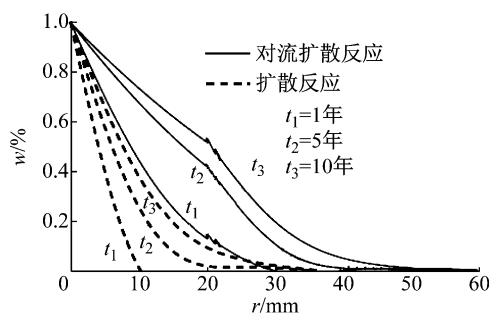


图5 对流作用下与无对流作用下的硫酸盐分布对比

Fig.5 Comparison of sulfate concentration distributions with convection and non-convection

3.3 影响因素分析

3.3.1 渗透深度影响

图6为渗透深度对硫酸盐质量分数分布的影响.从图6中可以看出,渗透深度为20 mm时混凝土中的硫酸盐质量分数分布与渗透深度为10 mm时的硫酸盐质量分数分布区别在于,10~20 mm深

度处对流作用使该深度范围的硫酸盐质量分数分布比侵蚀作用时的硫酸盐质量分数分布明显高很多,进而影响了硫酸盐在20~50 mm深度范围内的硫酸盐分布.同样,渗透深度为30 mm的硫酸盐质量分数分布比对流深度为20 mm的硫酸盐质量分数分布在20~50 mm范围内的要高.对流深度越深,硫酸盐质量分数越高;对流作用的存在加速了硫酸盐在混凝土中的输运,硫酸盐质量分数的分布与对流深度密切相关.

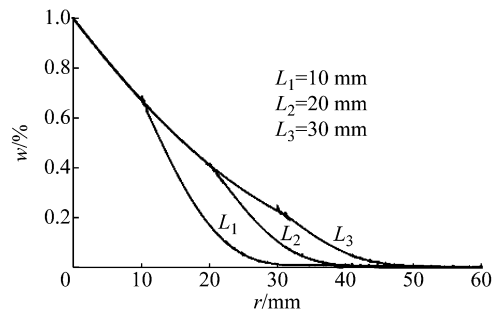


图6 渗透深度对硫酸盐质量分数分布的影响

Fig.6 Effect of penetration depth on sulfate concentration distributions

3.3.2 水灰比影响

图7为 $p_0=0.25$ MPa,对流影响深度为20 mm时,不同水灰比条件下,硫酸盐在混凝土中的质量分数分布曲线.从图7中可以看出,水灰比对硫酸盐侵蚀进入混凝土内部影响显著.在对流侵蚀区域,水灰比越大,硫酸盐在对流区域的质量分数分布越高.在20 mm深度处,水灰比分别为0.40、0.45、0.55的混凝土中的硫酸盐质量分数分别为0.14%、0.41%、0.68%,两两之间硫酸盐的质量分数差较大.对流侵蚀区的硫酸盐质量分数分布进一步影响扩散侵蚀区的硫酸盐质量分数分布.水灰比越大的混凝土,侵入的硫酸盐的质量分数分布越高,扩散深度也越深.水灰比分别为0.40、0.45、0.55时,侵蚀深度分别为30、40、50 mm.

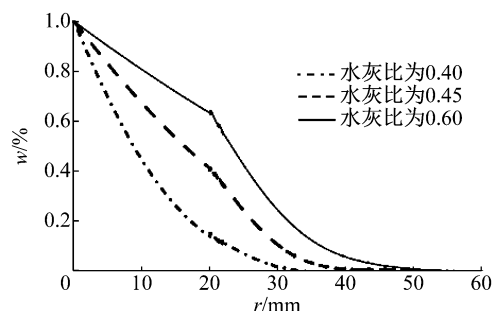


图7 混凝土水灰比对硫酸盐质量分数分布的影响

Fig.7 Effect of water cement ratio on sulfate concentration distributions

3.3.3 裂缝宽度影响

图 8 为考虑裂缝的作用下,硫酸盐在混凝土中的质量分数分布曲线.从图 8 中可以看出,在硫酸盐的对流侵蚀区域,裂缝存在时的硫酸盐质量分数分布曲线明显比不考虑裂缝影响时的硫酸盐质量分数分布高.在深度 20 mm 处,不考虑裂缝时的硫酸盐质量分数为 0.41%,考虑裂缝时的硫酸盐质量分数为 0.83%,是不考虑裂缝时的硫酸盐质量分数的 2 倍.因此,裂缝的存在显著地促进了对流区的硫酸盐扩散.同理,对流侵蚀边界处的硫酸盐质量分数进一步影响扩散侵蚀区的硫酸盐扩散,对流区域的硫酸盐质量分数更高,加速了侵蚀区硫酸盐的扩散,侵蚀的深度也更深,侵蚀深度达 60 mm,比不考虑裂缝影响时的侵蚀深度深 20 mm.

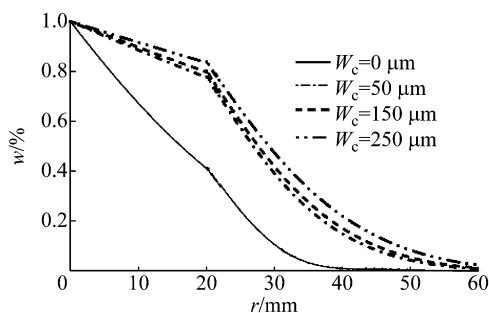


图 8 裂缝对硫酸盐质量分数分布的影响

Fig.8 Effect of crack on sulfate concentration distributions

4 结论

考虑地下水对硫酸盐侵蚀桩基混凝土的影响,解析地下水压力作用下混凝土桩中的扩散侵蚀.通过分析水压力等因素对硫酸盐在混凝土桩中的分布影响,得出以下结论:

(1) 基于达西定律建立了水压力作用下的渗透深度模型、硫酸盐扩散侵蚀模型,获得了硫酸盐在混凝土桩中的对流扩散侵蚀解析解.解析模型与实验数据对比具有很好的一致性,验证了本文模型的有效性.

(2) 水压力的存在,促进了硫酸盐在桩身混凝土中的输运,与硫酸盐的自然扩散侵蚀相比,地下水压力使混凝土表层的硫酸盐质量分数显著增加,质量分数更高.渗透深度越深,硫酸盐质量分数分布越高.

(3) 水灰比对硫酸盐的对流侵蚀影响显著.水灰比越大,硫酸盐质量分数分布越高,硫酸盐侵蚀深

度越深.微观裂缝的存在明显地促进了硫酸盐在桩身混凝土中的输运,裂缝存在时的侵蚀深度比不考虑裂缝影响时将大幅增加.

参考文献:

- [1] SCHNEIDER U, CHEN S W. The chemomechanical effect and the mechanochemical effect on high-performance concrete subjected to stress corrosion [J]. *Cement and Concrete Research*, 1998, 28(4): 509.
- [2] BASSUONI M T, NEHDI M L. Durability of self-consolidating concrete to sulfate attack under combined cyclic environments and flexural loading[J]. *Cement and Concrete Research*, 2009, 39(3): 206.
- [3] 季常煦,王信刚,王凯,等.地下工程结构混凝土的耐久性分析与研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2006, 28(8): 43.
JI Changxu, WANG Xingang, WANG Kai, *et al.* Analysis and research on durability of concrete used in underground engineering structure [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2006, 28(8): 43.
- [4] 丁建彤,宁逢伟,王奇.盐碱地下水环境中桩基混凝土耐腐蚀研究[J]. *混凝土*, 2015(6):153.
DING Jiantong, NING Fengwei, WANG Qi. Corrosion research on pile concrete in saline groundwater environments [J]. *Concrete*, 2015(6):153.
- [5] 冷发光,马孝轩,丁威,等.滨海盐渍土环境中暴露 17 年的钢筋混凝土桩耐久性分析[J]. *建筑结构*, 2011, 41(11): 148.
LENG Faguang, MA Xiaoxuan, DING Wei, *et al.* Durability analysis of RC pile exposed naturally in coastal saline soil environment for 17 years [J]. *Building Structure*, 2011, 41(11): 148.
- [6] 李镜培,李险峰,李林,等.硫酸盐侵蚀损伤劣化桩基竖向承载特性研究[J]. *上海交通大学学报*, 2016, 50(11): 1761.
LI Jingpei, LI Xianfeng, LI Lin, *et al.* Axial bearing behavior of deteriorated foundation pile under sulfate attack [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2016, 50(11): 1761.
- [7] LI J P, YAO M B, SHAO W. Diffusion-reaction model of stochastically mixed sulfate in cast-in-situ piles [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 115: 662.
- [8] NĚMEČEK J, KRUIS J, KOUDELKA T, *et al.* Simulation of chloride migration in reinforced concrete [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2018, 319: 575.
- [9] VANDER ZANDEN J J, TAHER A, ARENDS T. Modelling of water and chloride transport in concrete during yearly wetting/drying cycles [J]. *Construction and Building Materials*, 2015, 81: 120.
- [10] 金伟良,张奕,卢振勇.非饱和状态下氯离子在混凝土中的渗透机理及计算模型[J]. *硅酸盐学报*, 2008, 38(10): 1362.
JIN Weiliang, ZHANG Yi, LU Zhenyong. Mechanism and mathematic modeling of chloride permeation in concrete under unsaturated state [J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2008, 38(10): 1362.
- [11] 李春秋,李克非.干湿交替下表层混凝土中水分传输:理论、试验与模拟[J]. *硅酸盐学报*, 2010, 38(17): 1151.

(下转第 1179 页)