

酸性化学污染物的运移与腐蚀对 堤坝边坡长期稳定性的影响

张 鹏¹,李 宁^{1,2},霍润科^{1,3}

(1 西安理工大学 水利水电学院,陕西 西安 710048;2 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所,甘肃 兰州 730000;

3 西安建筑科技大学 土木工程学院,陕西 西安 710055)

[摘 要] 已建工程的长期稳定性问题直接影响着工程的服务年限与安全性。由于近年来部分水资源的水质逐步恶化,而水质的恶化对岸坡工程安全性的影响已引起人们的密切关注。研究借助多孔介质渗流方程、污染物离子交换化学作用的浓度扩散方程、酸性污染物对土体抗剪强度的损伤演化方程,建立了酸性化学污染物运移与腐蚀对堤坝边坡长期稳定性影响的数值分析方法,并运用二维有限元分析了某河道污染物排泄口附近堤坝边坡的污染物随时间运移过程与稳定安全系数随污染物迁移程度变化情况。结果表明,由于酸性污染物的腐蚀作用,使堤坝边坡的安全系数减小明显,10 年间下降了约 10%。说明在污染源附近的重要堤坝边坡的长期稳定性不容忽视,应在实际工程中加强观测、及时补强。

[关键词] 堤岸边坡;边坡稳定性;酸性污染物;化学腐蚀;溶质运移

[中图分类号] TU457

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2007)11-0230-05

Effect of transportation and corrosion of acid contamination on the long-term stability of dam slope

ZHANG Peng¹,LI Ning^{1,2},HUO Run-ke^{1,3}

(1 College of Geotechnical Engineering, Xi'an University of Technology, Shaanxi, Xi'an 710048, China; 2 State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Region Environment and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China; 3 College of Architectural Engineering, Xi'an University of Architectural Technology, Shaanxi, Xi'an 710055, China)

Abstract :Based on the seepage formula of porous medium, the diffusion formula of the concentration of solution and the damage of evolutionary process formula about the strength of soil, this paper derived the method of simulating the transportation and corrosion of acid contamination effect on the long-term stability of dam slope. Besides this paper also analyzed the process of acid contamination transportation during the time and the change of the stability of dam slope during the degree of the corrosion of acid contamination. Results indicated that the stability of dam slope decreased by ten percent due to the corrosion of acid contamination. So it should not be ignored the effect of contamination in designing dam slope.

Key words : dam slope; the stability of slope; acid contamination; contamination corrosion; solute transportation

岩土工程中强度与稳定性的时间效应,是一个不容忽视的理论与应用问题,它直接影响着重大岩

†收稿日期] 2006-12-26

[基金项目] 国家自然科学基金重点项目(50479023);高等学校博士学科点专项科研基金项目(2004070008)

[作者简介] 张 鹏(1976-),男,陕西西安人,在读博士,主要从事隧道、边坡等岩土工程研究。E-mail:dducke@163.com

土体工程的服务年限与投资效益。环境、化学因素对岩土体的长期作用使岩土体发生化学变化,进而影响岩土体的力学和渗流特性^[1-2]。而这些影响均会对堤坝边坡的稳定性产生至关重要的影响。有关这方面的研究主要涉及以下 4 个方面。

污染物在岩土介质的溶质运移过程。污染物在岩土介质中的运移过程十分复杂,包括对流、弥散、扩散等^[3]。对流问题主要反映污染物溶质随着水力梯度迁移,可按达西定律进行描述。弥散和扩散主要反映溶质浓度梯度所控制的迁移,可按 Fick 第一定律进行描述。

污染物相关离子在岩土中的化学反应。污染物在岩土介质中的运移同样受化学作用,如吸附、溶解、沉淀等化学反应的影响^[4]。粘性土对离子的吸附作用可按线性等温吸附式来描述。溶蚀、结晶沉淀作用的机理非常复杂,还未得到较好地解决。

污染物对岩土材料的宏观力学特性的影响。该领域是目前环境岩土工程研究中主要的研究方向,受到广大岩土工程研究者的关注。胡中雄等^[5]、袁建新^[6]、苏燕等^[7]、周健等^[8]、陈云敏等^[9]均根据各自所处地域的不同土性,提出了相关化学腐蚀成分对不同土类的宏观力学特性的影响。李宁等^[10-11]、冯夏庭等^[12]、王泳嘉等^[13]、汤连生等^[14]则对不同浓度酸性条件下,不同胶结性质岩样的宏观力学特性进行了研究,并从化学损伤的角度量化提出了化学腐蚀对岩体参数影响的量化公式。

污染物对岩土构筑物结构安全稳定性的影响。有关这方面研究的报道还较少,尤其是预测污染物环境下岩土构筑物结构的长期安全稳定性与工程评价。这需要将前 3 个方面的研究相互结合起来。

本文主要讨论酸性污染物对于排泄口附近的库岸、堤岸边坡长期稳定性的影响。通过借助多孔介质渗流方程、污染物离子交换化学作用的浓度扩散方程、酸性污染物对土体抗剪强度的损伤演化方程,建立了酸性化学污染物运移与腐蚀对堤坝边坡长期稳定性影响的数值分析方法,并运用二维有限元分析了某河道污染物排泄口附近,堤坝边坡的污染物随时间运移过程与稳定安全系数随污染物迁移程度变化情况,为量化分析酸性污染物对一些重要的堤岸边坡长期稳定性的影响提供了分析方法与手段,并结合算例,说明污染源附近重要的堤坝边坡的长期稳定性不容忽视。

1 含化学反应的污染物迁移方程

污染物的迁移过程首先受渗流作用的控制,同

时还受污染物中溶质对流扩散、固体颗粒与液体发生化学反应的影响。所以,整个迁移过程也是复杂的耦合过程。

本研究的求解思路是基于多孔介质的渗流理论,分析含污染物的流体在库岸、堤坝中的入渗过程;应用溶质迁移理论分析腐蚀性 H^+ 离子的迁移过程;在得到任意时刻、任意点的 H^+ 离子浓度条件下,应用化学动力损伤模型^[10-11]获得该点介质的强度参数衰减程度,最后计算堤坝边坡在衰减后的强度参数条件下的稳定安全系数。

1.1 渗流方程

渗流方程满足 Darcy 渗流公式。对于二维稳定渗流有:

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y \frac{\partial H}{\partial y}) + Q = 0. \quad (1)$$

式中: H 为总水头, k_x 、 k_y 分别为 x 方向与 y 方向的水力传导系数, Q 为边界流量, x 、 y 表示坐标轴。

对于非饱和与非稳定渗流情况,有:

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y \frac{\partial H}{\partial y}) + Q = \frac{\partial \theta}{\partial t}. \quad (2)$$

式中: θ 为体积含水量, t 为渗流时间。

体积含水量 θ 与孔隙水压力 u_w 有关,且满足

$$\partial \theta = m_w \partial u_w. \quad (3)$$

式中: m_w 为水土势系数,表征水土势曲线在不同土体含水量下的曲线斜率,如图 1 所示。

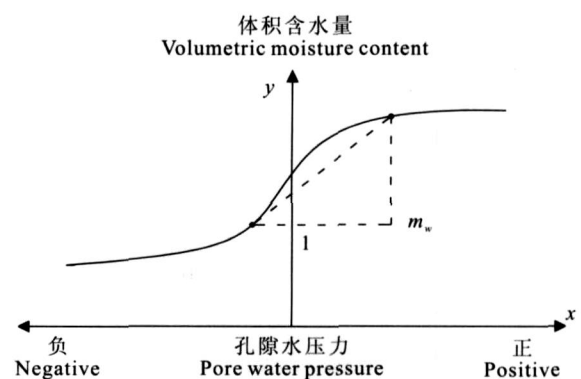


图 1 水土势系数 m_w 的确定图

Fig. 1 Potential coefficient of water and soil m_w

总水头 H 与孔隙水压力 u_w 有如下关系,即:

$$H = \frac{u_w}{\gamma_w} + Y. \quad (4)$$

式中: γ_w 为水的容重, Y 为位置水头。

因此,非饱和与非稳定渗流情况下的渗流方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x}(k_x \frac{\partial H}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(k_y \frac{\partial H}{\partial y}) + Q = m_w \gamma_w \frac{\partial H}{\partial t}. \quad (5)$$

1.2 溶质运移方程

无对流情况下的溶质运移方程为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (6)$$

式中: C 为污染物溶质的浓度, D 为污染物溶质的扩散张量, t 为迁移时间。

考虑对流情况下的溶质运移方程为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} - u_x \frac{\partial C}{\partial x} - u_y \frac{\partial C}{\partial y} \quad (7)$$

式中: u_x 、 u_y 为沿 x 、 y 方向的水流速度。

1.3 化学反应的数学表达

污染物在岩土介质的流动过程中会发生各种各样的反应,如络合和解离,吸附和解吸,溶解和沉淀,离子交换等。朱学愚等^[15]、Rubin 等^[16]将溶质运移过程中的化学反应分为均匀反应和非均匀反应,其中,非均匀反应还可以分为表面反应和古典反应两种。

化学反应对于溶质运移方程的影响,主要反映在方程的汇、源项上。酸性污染物在岩土介质中发生的化学反应主要是离子交换化学反应,即上述所提到的非均匀反应中的表面反应。所以本研究基于 Fick 第一定律^[15],推导了考虑化学离子交换浓度衰减的扩散方程。

土颗粒表面带有负电荷,而酸性污染物主要富含活性的 H^+ 离子,因此,两者之间会发生离子交换。假设岩土体单位体积骨架表面的离子交换量 F 为:

$$F = -\rho \frac{\partial s}{\partial t} \quad (8)$$

式中: ρ 为岩土颗粒的密度, s 为岩土颗粒所交换的离子浓度,负号表示离子交换量增加时溶液中离子浓度减小。

因此,考虑渗流作用和化学反应影响的扩散方程为:

$$\frac{\partial(nC)}{\partial t} = \nabla \cdot (nD \nabla C - nuC) + F \quad (9)$$

式中: n 为孔隙率, u 为污染物的平均流速, t 为时间变量, ∇ 为梯度算子。

污染物与岩土介质的化学反应往往是缓慢的,岩土介质颗粒吸附离子浓度 s 与溶质的浓度 C 最终会达到平衡,在此吸附条件下,可用 Freundlich 等温线公式表示 s 与 C 的关系为

$$s = \Phi(C) = k_d C^m \quad (10)$$

式中: k_d 、 m 为常数,由溶质种类、孔隙性质和系统其他条件决定。如果取 $m = 1$ 且为线性等温线时, k_d

称为分布系数,它是区分固相和液相浓度的表达式。

将式(10)代入式(9),可得:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\left(1 + \frac{\rho}{n} k_d \right) nC \right] = \nabla \cdot (nD \nabla C - nuC) \quad (11)$$

化简后,得:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\left(1 + \frac{\rho}{n} k_d \right) C \right] = \nabla \cdot (D \nabla C - uC) \quad (12)$$

$$\text{令} \quad R_d = 1 + \frac{\rho}{n} k_d, \quad (13)$$

因为 $R_d > 1$, 相当于把溶液的扩散系数和平均流速都缩小了 1 倍,其效果是减弱了扩散的进程,称系数 R_d 为阻滞因子。

将式(13)代入式(12)可得

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \nabla \cdot \left(\frac{D}{R_d} \nabla C - \frac{u}{R_d} C \right) \quad (14)$$

由以上的推导可知,在稳态渗流作用时,对于均质各向同性岩土介质,其二维扩散方程为:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D}{R_d} \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) - \frac{u_x}{R_d} \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{u_y}{R_d} \frac{\partial C}{\partial y} \quad (15)$$

式(15)即为考虑离子化学反应影响时溶质的扩散控制方程,它最大的优点是将化学反应造成的酸液浓度降低用阻滞因子来表达,使得方程物理概念明确,计算过程简化。

1.4 渗流与溶质迁移的耦合

由式(15)可以看到,渗流对溶质迁移的影响,不仅体现了渗流的水流速度 u 对对流项的影响,而且此时污染物溶质的扩散张量 D 也会受渗流的水流速度 u 的影响。对污染物溶质的扩散张量 D ,一般有:

$$D = \alpha^* u + D^* \quad (16)$$

式中: α^* 为分散度, u 为溶质的平均流速, D^* 为分子扩散系数。

对于稳定渗流情况下污染物迁移的求解,可以先进行渗流求解,然后在求解水流速度的基础上,再进行考虑对流与化学反应的溶质迁移方程的求解。

对于非稳定渗流情况下污染物迁移的求解,必须采用渗流方程与溶质运移迁移方程的交替求解,即先求解一步渗流方程,然后在求解相应水流速度的基础上,再进行考虑对流与化学反应的溶质迁移方程的求解;将上步求解结果作为下一步求解水头场、速度场、浓度场的初始条件,以此类推,直至达到求解的要求。

2 土体抗剪强度与溶质浓度的关系

酸性污染物对土体的腐蚀首先是破坏颗粒胶结

材料的强度,其次才会破坏土颗粒本身。土体抗剪强度主要是由土颗粒之间的胶结材料与土体结构所决定的,与土的抗压强度有很大区别。土体峰值抗剪强度表征的是土颗粒之间的胶结材料和土体结构共同发挥到极限状态下的极限强度;而土体残余强度表征的则是胶结材料破坏后,只有土体结构重组后发挥作用的强度值。基于以上分析,从对工程安全最不利的角度考虑。假定:

(1) 酸性污染物与胶结材料完全发生反应,其生成物为可溶盐,而不是仍具有一定胶结能力的其他固体生成物。

(2) 酸性污染物对土体颗粒的腐蚀相对于对其胶结物的腐蚀小得多,故可以忽略酸性污染物对土体颗粒的腐蚀。

(3) 酸性污染物的腐蚀并不影响土体的结构。

(4) 胶结材料被腐蚀后,土体强度主要受其结构的控制,即此时土体的强度为其残余强度。

设酸性污染物将胶结材料全部腐蚀为可溶盐,且可溶盐被渗透水流溶尽、带走时损伤变量 α 为 1,根据文献[10-11,17],损伤变量 α 的损伤演化方程为:

$$\alpha = \frac{d\alpha}{dt} = \frac{d \left[1 - \frac{\omega^d}{(\omega^d)_0} \right]^{2/3}}{dt} = \frac{2}{3} \left(\frac{R[H^+]^y}{(\omega^d)_0} \right)^{2/3} \cdot t^{-1/3} \quad (17)$$

式中: ω^d 为任意时刻酸性污染物中 H^+ 离子的摩尔数; $(\omega^d)_0$ 为初始时刻酸性污染物中 H^+ 离子的摩尔数; $R[H^+]^y$ 为假 y 级反应的反应速率,假 y 级反应是化学动力反应方程的一种类型。

则在酸性污染物腐蚀下的土体抗剪强度有:

$$\tilde{\sigma}_t = (1 - \alpha) \sigma_t^p + \alpha \sigma_t^r \quad (18)$$

式中: $\tilde{\sigma}_t$ 为任意浓度酸性污染物下的土体抗剪强度, σ_t^p 为无污染下土体的峰值抗剪强度, σ_t^r 为无污染下土体的残余抗剪强度。

所以,土体抗剪强度与酸性溶质浓度及时间的关系为:

$$\tilde{\sigma}_t = \left[1 - \frac{2}{3} \left(\frac{R[H^+]^y}{(\omega^d)_0} \right)^{2/3} \cdot t^{-1/3} \right] \sigma_t^p + \frac{2}{3} \left(\frac{R[H^+]^y}{(\omega^d)_0} \right)^{2/3} \cdot t^{-1/3} \cdot \sigma_t^r \quad (19)$$

3 算 例

某河道污染物排泄口附近堤岸边坡的坡比为 1:2,坡高 20 m,库水深 15 m,岸坡的渗透系数为 1×10^{-3} m/d,扩散系数为 1×10^{-4} m²/d,容重 $\gamma = 21$ kN/m³,峰值粘聚力 $c_p = 30$ kPa,峰值摩擦角 $\phi_p = 30^\circ$,残余粘聚力 $c_s = 10$ kPa,残余摩擦角 $\phi_s = 25^\circ$,酸性污染物的初始浓度为 0.1 mol/L。

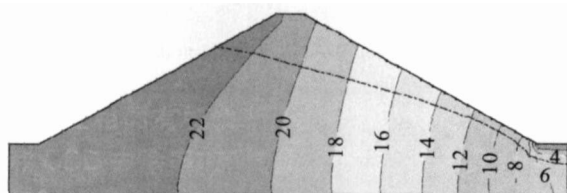


图 2 堤坝边坡在稳定渗流作用下的水力梯度场
Fig. 2 Hydraulic gradient of dam slope under seepage

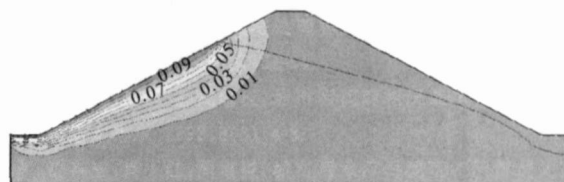


图 3 10 年时堤坝边坡在酸性污染物作用下的浓度场
Fig. 3 Solute density of the dam slope in 10 years

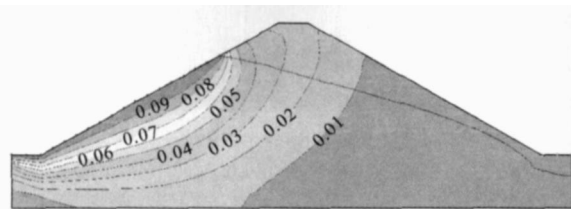


图 4 50 年时堤坝边坡在酸性污染物作用下的浓度场
Fig. 4 Solute density of the dam slope in 50 years



图 5 100 年时堤坝边坡在酸性污染物作用下的浓度场
Fig. 5 Solute density of the dam slope in 100 years

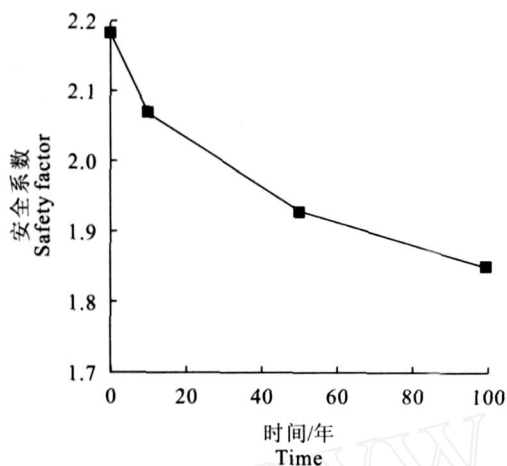


图 6 堤坝边坡的安全系数随时间的变化图

Fig. 6 Safety of dam slope during operation

图 2 给出堤坝边坡在正常库水位、稳定渗流作用下的渗流场,图 3~5 为 10,50,100 年时酸性污染物在堤坝边坡中迁移的浓度等值线图。随着运行时间的延长,酸性污染物不断向边坡深部内部入渗,浓度梯度峰面(0.01 mol/L)不断向边坡深部扩展;同时,浓度梯度随时间逐次拉开。根据式(19),可得相应浓度与时间下的土体抗剪强度。在此基础上,采用毕肖普法得到相应时间下堤坝边坡的安全系数,分别是初始状态为 2.18,10 年为 2.07,50 年为 1.93,100 年为 1.85(图 6)。这表明随着酸性污染物的迁移,化学腐蚀作用逐步降低了边坡各个部位的土体抗剪强度,使得边坡的安全系数逐年降低。从算例分析成果来看,10 年间下降了约 10%,说明在污染源附近的重要堤坝边坡的长期稳定性不容忽视,应在实际工程中加强观测、及时补强。

4 结 语

(1) 本文借助多孔介质渗流方程、污染物离子交换化学作用的浓度扩散方程、酸性污染物对土体抗剪强度的损伤演化方程,建立了酸性化学污染物运移与腐蚀对堤坝边坡长期稳定性影响的数值分析方法,为岩土工程在复杂地质环境下抗风化设计、耐久性设计提供了一种新的研究思路。

(2) 结合上述方法,运用二维有限元分析了某河道污染物排泄口附近的堤坝边坡的污染物,随时间运移过程与稳定安全系数随污染物迁移程度变化情况的工程实例。算例展示了含酸性污染物流体在堤坝边坡中的入渗过程,并结合由于酸性污染物的腐蚀作用,算出堤坝边坡的安全系数减小明显,10 年间下降了约 10%。说明在污染源附近堤坝边坡的

设计中,应将污染物的影响考虑在内,应加强对于岩土工程耐久性与抗风化设计研究。并说明在污染源附近的已建重要堤坝边坡的长期稳定性不容忽视,应在实际工程中加强观测、及时补强。

[参考文献]

- [1] Rowe R K, Caers C J, Barone F. Laboratory determination of diffusion and distribution coefficients of contaminants using undisturbed clayey soil[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1988, 25(1): 108-118.
- [2] 孙重初. 酸液对红粘土物理力学性质的影响[J]. 岩土工程学报, 1989, 11(4): 89-93.
- [3] Bear J. Hydraulics of groundwater[M]. New York: McGraw-Hill Book Co Inc, 1979.
- [4] Shackelford C D, Daniel D E. Diffusion in saturated soil. I. Background[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1991, 117(3): 467-484.
- [5] 胡中雄, 李向约, 方晓阳. 环境岩土工程概论[J]. 岩土工程学报, 1990, 12(1): 98-108.
- [6] 袁建新. 环境岩土工程问题综述[J]. 岩土力学, 1996, 17(2-3): 86-93.
- [7] 苏 燕, 周 健. 环境岩土工程研究现状与发展[J]. 岩土力学, 2004, 25(9): 1511-1514.
- [8] 周 健, 吴世明, 徐建平. 环境与岩土工程(岩土工程新进展丛书)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [9] 陈云敏, 柯 瀚. 城市生活垃圾的工程特性及填埋场的岩土工程问题[J]. 工程力学, 2005, 22(Sup.): 119-126.
- [10] 李 宁, 朱运明, 张 平, 等. 酸性环境下钙质胶结砂岩的化学损伤模型[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(4): 395-399.
- [11] Li N, Zhu Y M, Su B, et al. A chemical damage model of sandstone in acid solution[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2003(40): 243-249.
- [12] 冯夏庭, 赖户政宏. 化学环境下的岩石破裂特性——第一部分: 试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 403-407.
- [13] 王泳嘉, 冯夏庭. 化学环境下的岩石破裂特性——第二部分: 时间分形分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 551-556.
- [14] 汤连生, 张鹏程, 王思敬. 水-岩化学作用的岩石宏观力学效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 526-531.
- [15] 朱学愚, 谢春红. 地下水运移模型[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.
- [16] Rubin J, Schafer W, Herzer J. Numerical modeling of nitrate transport in a natural aquifer[C]. [S. l.]: Contamination Transport in Groundwater. A. A. Balkema Publishers, 1989: 191-198.
- [17] 朱运明. 酸性环境下砂岩强度、变形性质的实验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2001.