

花岗岩裂隙中溶质运移试验研究

石云峰, 李寻, 裴妙荣, 王超梅

(东华理工大学 水资源与环境工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 花岗岩裂隙所形成的大量“通道”为地下水中各溶质运移提供条件,研究溶质在裂隙中的运移规律可为地下水污染治理、海水入侵等问题提供理论数据。本次试验使用自制花岗岩裂隙溶质运移试验设备,运用动态试验的方法,研究以 NaCl 溶液为示踪剂在花岗岩中运移规律,细致描述分析迁移时间、迁移距离、迁移方向对示踪剂在裂隙中的运移影响,并通过配线求出纵、横向弥散度,为试验提供数据支持。

关键词: 花岗岩; 裂隙介质; 溶质运移; 地下水

中图分类号: TV142.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2016)01-0222-05

Experiment on solute transport in fracture of granite rock

SHI Yunfeng, LI Xun, PEI Miaorong, WANG Chaomei

(School of Water Resources and Environmental Engineering, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: A large number of “channels” in the granite fracture provide the condition for solute transport in groundwater. The study on the transport law of solute in fracture can provide theoretical data for such problems as groundwater pollution control, water intrusion of the migration of groundwater pollution. The test used a laboratory equipment of solute transport in fractured media designed by the authors, and applied the method of dynamic test to study the migration characteristics of NaCl in fracture of granite rock. It carefully analyzed the influence of time, distance and direction of transport on the meter in fracture, and got the longitudinal and horizontal disperse coefficient which can provide data support for test.

Key words: granite rock; fractured media; solute transport; groundwater

近几十年,随着地下水污染日趋严重,人们对其关注的重点已从单纯的污染源治理扩展到污染区域中污染物运移的跟踪管控,这对于富含大量污染物的岩体介质来说,岩体内所包含的大量不规则裂隙往往会成为污染物的迁移通道。此外,海水入侵、裂隙流体对工程稳定性的影响等问题,使得裂隙中溶质迁移成为近几十年的研究热点。

对于裂隙介质中溶质迁移研究,早期关注介质大多为砂体或土体^[1-3],真正关于花岗岩裂隙溶质迁移试验的开展是在核工业发展以后,这是由于国际上对高放废料的处置较为公认的是深地质处置法^[4],而我国倾向于使用花岗岩作为高放废料处置库的地质屏障,因此研究花岗岩裂隙溶质的运移情况对高放废料的处置具有指导意义。目前,针对花岗岩裂隙溶质运移室内试验主要为吸附试验,学者

主要研究方向分为花岗岩对各类型溶质吸附程度研究与影响吸附的因素研究。如 Palágyi 等^[5-9]在 2009-2014 年期间开展大量花岗岩吸附试验,获取大量吸附数据。在影响吸附因素方面,除早期研究如花岗岩矿物性质^[10]、Eh-pH 值^[11]外,近几年对裂隙充填物、腐殖酸、胶体、微生物^[12-14]等因素的研究都有所开展。与吸附试验相比,室内动态运移试验开展较少,国内如王锦国等^[15]研究了 NaCl 在自制裂隙上的运移,刘君^[16]研究了多种核素在花岗岩裂隙运移,并通过模拟验证其合理性。而国外动态试验主要为野外大型试验,这里不再赘述。

对室内同类试验研究发现有几点不足:

(1)在采样与实验过程中,加入大量人为因素(如使用破碎、劈裂制造人为裂隙,产生大量新鲜面)。

收稿日期:2015-08-27; 修回日期:2015-10-13

基金项目:国家自然科学基金项目(D010901);江西省自然科学基金项目(20122BAB206001)

作者简介:石云峰(1989-),男,山西晋中人,在读硕士研究生,主要从事地下水科学与工程方面的研究。

通讯作者:李寻(1974-),女,江西南昌人,博士,副教授,主要从事多孔介质中溶质运移、供水安全等方面的科研与教学工作。

(2) 试验尺度较小(只是通过对比进入裂隙前后水样中各溶质含量变化,无法细致描述在裂隙中溶质迁移情况)。

(3) 多为研究纵向运移情况,对横向运移关注较少。基于以上原因,本次试验设备在制造裂隙时,并无增加大量新鲜面,通过试验方法确定花岗岩裂隙中溶质运移的纵向弥散参数与横向弥散参数,定量描述溶质在花岗岩裂隙中运移情况,最终初步探求花岗岩裂隙溶质运移的机理。

1 材料与方法

1.1 设备介绍

试验所用花岗岩密度采用排水法测定,测量结果为 3.31 g/mL;孔隙度采用称重法测定,测定结果为 0.14%。

设备示意图 1(设备示意图)所示,设备分为 3 个部分:①水位控制部分:包括上游进水箱、源水箱、下游汇水箱以及出水箱组成;②花岗岩裂隙部分:主要包括上下两个长 1.5m,宽 0.5m,高分别为 2 cm 与 2.5 cm 的花岗岩板组成;③供水部分:包括大水箱、水泵、1 个大量程流量计与 3 个小量程流量计等组成。

水通过水泵进入上游进水箱后,调节其位置即可完成水位调节,其中大量程流量计调节水泵流量,水流通过源水箱后可通过皮管进入花岗岩裂隙中,花岗岩裂隙的产生是通过两花岗岩板自然贴合,下板打磨一条长 1.5 m,宽 1 cm,深 1.5 mm 水槽模拟主裂隙(此外上、下板贴合面不做任何处理)。在上板各处打直径 3 mm 取样孔,孔位分布编号如图 1(设备示意图所示)(本次试验所考虑的主裂隙孔位有 A、B 系列孔与 C 孔共 13 孔,其中 A、B 孔为注入孔,C 孔为横向观测孔)。水在经过裂隙后进入下游汇水箱,从排水箱流出(其水位调节原理与进水箱相同),即完成一次水流循环。

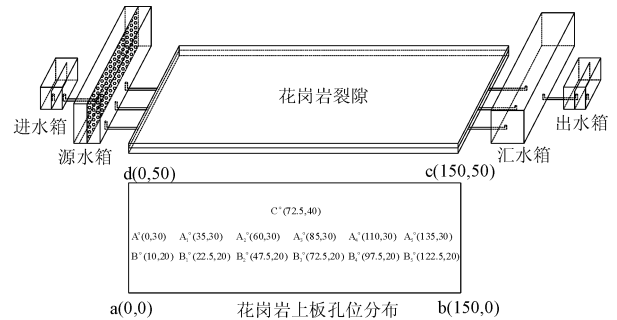


图 1 设备示意图

1.2 原理与步骤

试验根据一维稳定流二维水动力弥散理论进行,原理为:调节并保持上下游水位,待流量稳定后瞬时注入示踪剂,通过水动力弥散理论建立数学模型,对横向弥散度与纵向弥散度求解。

步骤为:首先,保证设备水平、密封的条件下,保持流量恒定,取裂隙水测背景值;然后,取样,方法为 A(B) 孔中注入示踪剂,每隔一定时间对 A₁(B₁) 孔取样一次,直到所取样品无法检测出示踪剂为止,取样结束后加大流量,冲洗 20 min。按以上步骤操作,对剩余孔位水样依次检测(注:C 孔取样时,注入孔为 A 孔);最后,对各样品保存,为减少试验误差,对所有样品在试验结束后重新检测,并按照数据绘制迁移曲线,并求出有关参数。

1.3 参数求解

原理如下^[17]:在一维水流二维水动力弥散条件下,若瞬时投入示踪剂,且忽略分子扩散时其解为:

$$C(x,y,t) = \frac{m}{4\pi nMt \sqrt{D_L D_T}} \exp\left\{-\frac{(x-ut)^2}{(4D_L t)} - \frac{y^2}{4D_T t}\right\} \quad (1)$$

式中: $C(x,y,t)$ 为在时间 t 、流场中点 (x,y) 处的示踪剂浓度值; m 为瞬时投入示踪剂的质量; M 为含水层厚度; n 为介质孔隙度(无量纲); t 为示踪剂投放的时间; D_L 、 D_T 为介质纵向、横向弥散系数; U 为地下水实际流速。

忽略分子扩散有:

$$D_L = \alpha_L u, \quad D_T = D_T u \quad (2)$$

式中: α_L 、 α_T 为介质纵向、横向弥散度。

把式(2) 代入(1) 得:

$$C(x,y,t) = \frac{m}{4\pi Mnut \sqrt{\alpha_L \alpha_T}} \exp\left\{-\frac{(x-ut)^2}{4\alpha_L ut} - \frac{y^2}{4\alpha_T ut}\right\} \quad (3)$$

若以 C_m 表示在时间 t_m 、流场中点 (x,y) 处示踪剂浓度最大值,其中 t_m 是(2) 中 $C(x,y,t)$ 取极大值所对应的时间,即

$$t_m = \frac{\alpha_L}{u} \left(\sqrt{4 + \frac{x^2}{\alpha_L^2} + \frac{y^2}{\alpha_L \alpha_T}} - 2 \right), \text{ 且引入以下无}$$

因次变量:

$$C_R = \frac{c}{c_m}, \quad T_R = \frac{ut}{\alpha_L}, \quad x_R = \frac{x}{\alpha_L}, \quad y_R = \frac{y}{\sqrt{\alpha_L} \sqrt{\alpha_T}} \text{ 与}$$

$$\text{无量纲径距: } A = \sqrt{x_R^2 + y_R^2} = \sqrt{\frac{x^2}{\alpha_L^2} + \frac{y^2}{\alpha_L \alpha_T}}$$

将上述各无因此变量引入(3),经变换有:

$$C_R(A,T_R) = \frac{k}{T_R} \exp\left[-\frac{A^2 + T_R^2}{4T_R}\right] \quad (4)$$

式中： $K = T_{Rm} \exp\left[\frac{A^2 + T_{Rm}^2}{4T_{Rm}}\right]$ ， $T_{Rm} = \frac{ut_m}{\alpha_L} = \sqrt{A^2 + 4} - 2$ ；且 C_R 是 A 、 T_R 的函数，对于给定的 A 值， K 为定值。可见在半对数坐标系中， $C_R - T_R$ 与实测的 $C_R - T$ 浓度曲线相似。通过标准曲线 $C_R - T_R$ 与实测 $C_R - T$ 拟合得不同 A 值，经变换整理后得：

$$\alpha_L = \frac{x_i}{A_i} \quad (5)$$

$$\alpha_T = \frac{y_i^2}{\alpha_L \left(A_i^2 - \frac{x_i^2}{\alpha_L^2} \right)} \quad (6)$$

式中： x_i 、 y_i 、 A_i 分别为取样孔的横坐标、纵坐标以及各取样孔实测曲线与标准曲线拟合所得 A 值。

根据各取样孔所获得的弥散曲线与标准曲线（根据公式(4) 用计算机绘制）进行配线法求水力弥散参数，求得纵向弥散度 α_L 和横向弥散度 α_T 。

2 结果与分析

2.1 时间 - 相对浓度曲线

按照试验步骤进行多次试验，根据所测数据分别绘制 A、B 系列孔位与 C 孔位时间与相对浓度关系曲线图 2（各孔浓度随时间变化）。

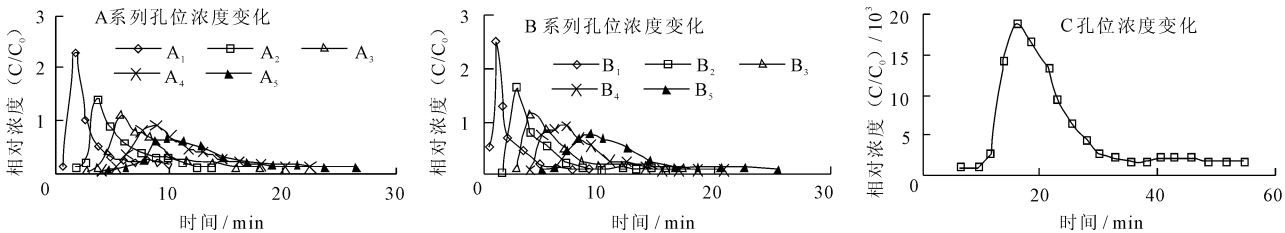


图2 各孔位浓度随时间变化

2.3 纵、横向弥散度

按上述求参数步骤，对各孔位分别求纵、横向弥散度，计算结果如下表 1（各孔弥散度结果）所示。

表 1 各孔弥散度结果					
取样孔	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅
α_L / m	0.0880	0.0881	0.0891	0.0929	0.1050
取样孔	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄	B ₅
α_L	0.0642	0.0860	0.1018	0.1077	0.09735
取样孔	C				
α_T / m	0.00037				

由图 2 可知，示踪剂随迁移距离增加，相对浓度峰值逐渐减小，峰面积增加，拖尾现象越明显。分析由于溶质在迁移时，受到包括分子扩散与机械弥散在内的水力弥散作用，一方面，扩散作用迫使浓度趋于减小（表现为浓度峰值减小），扩散晕（峰面积）增加；另一方面，溶质受到裂隙内部与基质接触面如吸附、沉淀以及离子交换等作用，延缓溶质迁移，造成拖尾现象，随迁移距离增加，阻滞作用越明显（表现为拖尾现象越明显）。此外，对比发现，在相同条件下，侧孔（C 孔）相对浓度峰值，与 A、B 孔峰值相差较大，分析造成这一现象的原因为：主裂隙宽远大于侧裂隙宽，导致溶质较难发生侧向迁移，同时隙宽较小也产生较强阻滞作用，使溶质拖尾现象更加明显。

2.2 距离 - 浓度曲线

为直观反映整个花岗岩贴合面溶质运移时，迁移距离与相对浓度情况，通过图 3 分别找出 $t = 3、5、7、10 \text{ min}$ 时，各孔的相对浓度，绘制三维曲面图，如图 3（各时刻浓度曲面分布）所示。通过图 3 可发现，溶质随迁移时间的增加，迁移距离 - 相对浓度曲线峰值越小，峰面积逐渐增加，拖尾现象越明显。分析原因为：分子扩散作用经过时间越长，扩散面积越大，造成相对浓度曲线峰值越小，峰面积逐渐增加，此外，机械弥散作用时间越长，对溶质迁移的阻滞作用越明显，造成拖尾现象愈明显。

3 结 论

本次试验使用自制花岗岩裂隙溶质运移试验设备，以 NaCl 溶液为示踪剂，细致描述其在花岗岩裂隙介质运移情况，通过分析数据发现迁移距离、迁移时间、迁移方向对迁移影响为：溶质在花岗岩裂隙迁移时，随迁移距离与时间的增加，溶质受分子扩散作用与裂隙阻滞作用影响增大，具体表现为示踪剂浓度峰值减小、扩散晕增大以及迁移曲线拖尾现象越明显；此外，由于示踪剂横向迁移时，迁移裂隙通道较小且受水流作用的影响较小，受分子扩散作用与

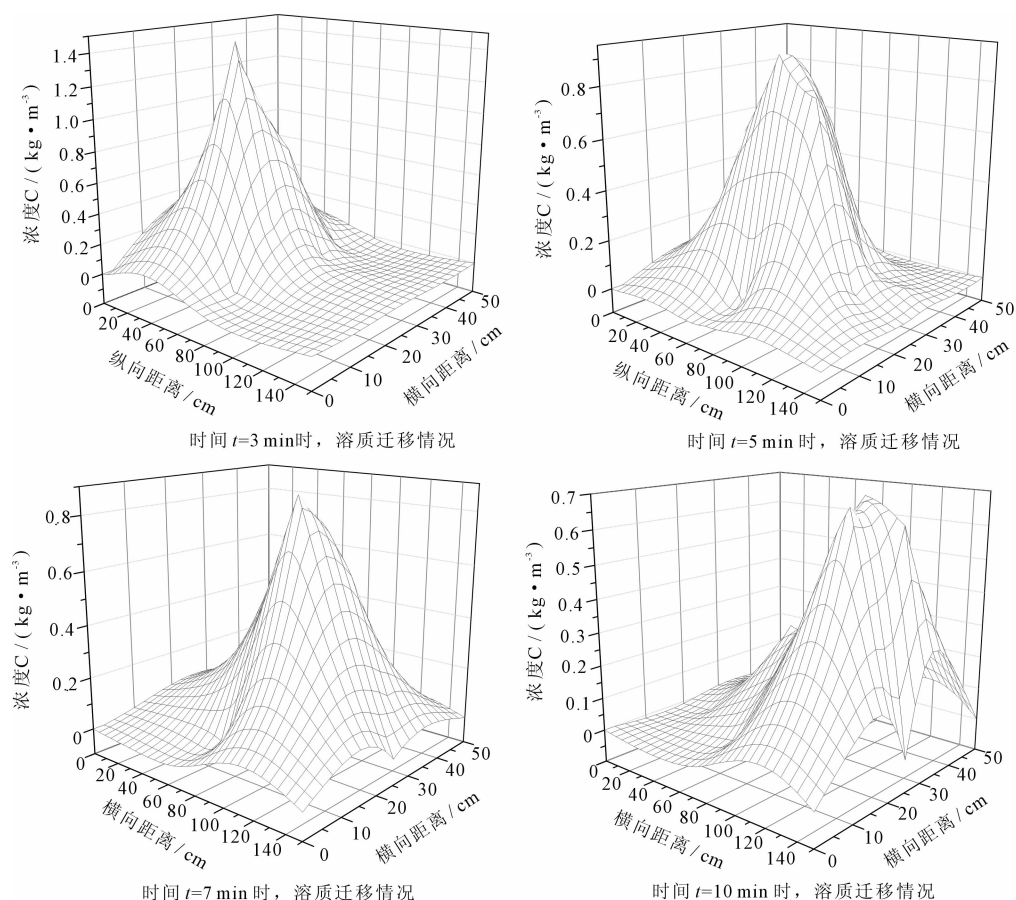


图3 各时刻溶质迁移曲面分布图

裂隙阻滞作用变大,与纵向迁移相比表现为各时刻浓度值普遍较低,迁移曲线拖尾现象更明显。最后,通过配线法求出的纵、横向弥散度分别为:0.0642 ~ 0.1050 m、0.00037 m,为本次实验提供数据支持。由于在实际情况下,裂隙大多为不规则且污染物也非单一物质,因此试验下一步研究方向可考虑研究混合示踪剂在不规则裂隙中的迁移规律,以便进一步与实际情况吻合。

参考文献:

- [1] Wendland E, Himmelsbach T. Transport simulation with stochastic aperture for a single fracture – comparison with a laboratory experiment[J]. *Advances in Water Resources*, 2002, 25(1): 19–23.
- [2] Meigs L C, Beauheim R L. Tracer tests in a fractured dolomite: 1. experimental design and observed trace recoveries [J]. *Water Resources Research*, 2001, 37 (5): 1113–1128.
- [3] Tokunaga T K, Wan Jiamin. Water film flow along fracture surfaces of porous rock [J]. *Water Resources Research*, 1997, 33(6): 1 287–1 295.
- [4] 吴晓东, 许小微. 地质屏障在高放废物处置中的初步研究[J]. *山西建筑*, 2011, 37(20): 213–214.
- [5] Palágyi Š, Vodičková H, Landa J, et al. Migration and sorption of ^{137}Cs and $^{152,154}\text{Eu}$ in crushed crystalline rocks under dynamic conditions[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2009, 279(2): 431–441.
- [6] Palágyi Š, Štamberg K, Vodičková H. Transport and sorption of ^{85}Sr and ^{125}I in crushed crystalline rocks under dynamic flow conditions[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2010, 283(3): 629–636.
- [7] Videnskú K, Palágyi Š, Štamberg K, et al. Effect of grain size on the sorption and desorption of SeO_4^{2-} and SeO_3^{2-} in columns of crushed granite and fracture infill from granitic water under dynamic conditions[J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2013, 298(1): 547–554.
- [8] Palágyi Š, Štamberg K. Transport parameters of I – and Io3 – determined in crushed granitic rock columns and groundwater system under dynamic flow conditions [J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2014, 302(1): 647–653.
- [9] Štamberg K, Palágyi Š, Videnskú K, et al. Interaction of $^3\text{H}^+$ (as HTO) and $^{36}\text{Cl}^-$ (as Na^{36}Cl) with crushed gran-

ite and corresponding fracture infill material investigated in column experiments [J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2014, 299(3): 1625 – 1633.

- [10] 贯鸿志, 张振涛, 苏锡光, 等. Am 在花岗岩中的吸附行为[J]. 核化学与放射化学, 2009, 31(3): 189 – 192.
- [11] Baik M H, Hyun S P, Hahn P S. Surface and bulk sorption of uranium(VI) onto granite rock[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2003, 256(1): 11 – 18.
- [12] 王会, 柴之芳, 王东琪. 腐殖酸与铜系金属离子相互作用的研究进展[J]. 无机化学学报, 2014, 30(1): 37 – 52.
- [13] Huber F, Kunze P, Geckeis H, et al. Sorption reversibil-

ity kinetics in the ternary system radionuclide – bentonite colloids/nanoparticles – granite fracture filling material [J]. Applied Geochemistry, 2011, 26(12): 2226 – 2237.

- [14] Kim J M, Baik M H, Jung H, et al. Reactive transport of uranium with bacteria in fractured rock: model development and sensitivity analysis[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2013, 152(8): 82 – 96.
- [15] 王锦国, 周志芳. 裂隙介质溶质运移试验研究[J]. 岩石力学与工程学报 2005, 24(5): 829 – 834.
- [16] 刘君. 放射性核素在花岗岩裂隙介质中迁移数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- [17] 陈崇希, 李国敏. 地下水溶质运移理论及模型[M]. 北京: 中国地质大学出版社, 1996.

(上接第 221 页)

通过分析可知: 锚索的布置方案是影响其抗滑稳定的重要因素, 在一定的角度范围内, 随着锚索布置的水平角度的减小, 虽在一定程度上引起施工难度的加大, 但可以增强结构的抗滑稳定性, 确保结构整体的安全。

本文所提出的方法, 是基于传统的状态(强度)设计理念, 视混凝土和地基材料为均质连续体, 以经典的弹性力学为基础, 采用的是完全弹性的计算方法。在过程设计理念的研究中用实验、理论、数值等方法对材料破坏过程进行分析, 采用的是弹塑性各向异性损伤本构关系的计算方法^[12]。但在结合面(滑动面)渐进性的破坏过程, 以及在破坏过程中的应力重分布对抗滑稳定的影响方面研究较少。对于一般类似工程抗滑稳定分析, 本文所提出的计算方法合理有效, 简单可行, 可满足其分析的需要。工程中可以由地基开挖面的具体情况, 选择适用于该复杂程度的抗滑稳定计算方法进行分析, 为工程的实际应用提供依据。

参考文献:

- [1] 周维祿, 丁恩俊. 复杂地基应力分析的有限元法[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2006, 28(5): 702 – 705, 736.
- [2] 季爱洁. 重力坝抗滑稳定分析方法概述[J]. 云南水力

发电, 2014, 30(2): 38 – 42, 142.

- [3] 潘家铮. 重力坝的设计和计算[M]. 北京: 中国工业出版社, 1965.
- [4] 林继镛. 水工建筑物[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 第 5 版, 2009: 33 – 52.
- [5] 周伟, 常晓林, 徐建强. 基于分项系数法的重力坝深层抗滑稳定分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(2): 315 – 320.
- [6] 王飞, 李同春, 胡继刚, 等. 复杂地基上重力坝深层抗滑稳定分析[J]. 人民长江, 2011, 42(Z2): 61 – 63 + 70.
- [7] 邓子谦, 张林, 陈媛, 等. 含双斜结构面重力坝坝基失稳模式及破坏机理研究[J]. 水力发电学报, 2014, 33(4): 235 – 241.
- [8] 中华人民共和国经济贸易委员会. DL5108 – 1999. 混凝土重力坝设计规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [9] 黄耀华, 廖春武, 陈兴周. 某水电站溢洪道导墙坝段有限元应力分析[J]. 水利科技与经济, 2010, 16(6): 684 – 686 + 693.
- [10] 朱双林. 重力坝深浅层抗滑稳定分析方法探讨及其工程应用[D]. 武汉: 武汉大学, 2005.
- [11] 杨冬升, 张晖, 龚常青. 基于 ANSYS 的碾压混凝土重力坝坝基面抗滑稳定安全性分析[J]. 井冈山大学学报(自然科学版) 2010, 31(4): 80 – 82 + 86.
- [12] 刘庭金. 混凝土及岩土材料破坏过程的弹塑性各向异性损伤数值模型及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(16): 2843 – 2843.