

侵蚀性环境水形成与 地下水运动特征的关系研究*

巫锡勇 王 鹰 罗 健

(西南交通大学 成都)

提 要 侵蚀性环境水的形成及其侵蚀能力不仅与岩石组分密切相关,而且与地下水在岩层中的运动特征有关。地下水的渗透速度影响着其与岩石的反应速度,而地质构造、岩层厚度、岩石破碎程度及地下水的补给状况等则是影响地下水运动的重要因素。本文就地下水在岩层中的运动过程、反应过程及影响因素进行了分析研究,通过对乐所 2 号隧道混凝土腐蚀状况的分析,弄清了工程建筑物周围地质状况及地下水运动规律,对混凝土腐蚀机理研究、腐蚀程度评价有着重要的意义。

关键词 侵蚀性环境水 地质状况 地下水运动

中图分类号 P641.2 TU 503

Study of Relationship between Formation of Corrosive Environment Water and Movement Characteristics of Groundwater

Wu Xiyong Wang Ying Luo Jian

(Dept. of Environmental Science and Geological Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract The formation of corrosive environment water has not only close relationship with rock composition but relates directly also to movement characteristics of groundwater. Infiltration velocity of groundwater influences its reaction rates with rocks. Geological structure, strata depth, rupture degree and supply of groundwater are major influence factors. This paper analyses the movement of groundwater and its reaction process with rocks. Through studies on concrete corrosion in Lesuo No. 2 tunnel, the authors conclude that a good understanding geological conditions and movement of groundwater is helpful to studies on corrosion mechanism and evaluation of corrosion degree.

Keywords corrosive environment water; geological condition; movement of groundwater

工程建筑物中材料的劣化变质将直接影响到工程的稳定性,而材料的劣化变质与侵蚀性环境水形成有关。侵蚀性环境水的形成受到工程建筑周围地质状况的控制,地下水在岩石中的

* 国家自然科学基金课题“酸性环境水水化硅酸盐风化的热力学分析”部分内容(No. 4890156)

收修改稿日期:1998-03-16 巫锡勇 男 1963 年出生 讲师(在职博士生) 西南交通大学环地系 邮编:610031

作用、运动将直接影响到环境水的侵蚀能力。由于地下水在地层中的运动速度影响着其与岩石的反应速度,因而地下水的运动特征对侵蚀性环境水的形成十分重要。而地质构造、岩层厚度、岩石破碎程度、地下水的补给状况及地下水的运动特征对建筑材料腐蚀机理的研究、腐蚀程度的评价有着重要的意义。

乐所2号隧道位于曲靖—喜鹊乐支线,全长476 m。该隧道处于含黄铁矿岩层的不良地层中,长期受到酸性环境水侵蚀,造成隧道混凝土严重腐蚀。在对乐所2号隧道进行地质状况调查的基础上,对其所处地层特征及混凝土腐蚀状况进行了分析与讨论。

1 地下水在岩石中的运动^[1]

地下水运动的通道是岩石的孔隙和裂隙,地下水在岩石中的运动状况,会因岩层产状、裂隙发育状况及相应水势的不同在各方向上有所改变。

一般情况下,地下水在岩石中的运动符合达西定律,即渗流的流量 Q 与水头损失 $(H_1 - H_2)$ 成正比,与渗流通过的长度 L 成反比

$$Q = K\omega \frac{H_1 - H_2}{L} = -K\omega \frac{dH}{dL} \quad (1)$$

式中, K 为渗流系数, m/d; ω 为水流所经过的横断面积, m^2 。断面的平均流速 v 为

$$v = -K \frac{dH}{dL} \quad (2)$$

$$K = \frac{eY}{\mu} \quad (3)$$

式中, e 为多孔介质的渗透性系数,与多孔介质的粒径、形状及孔隙分布状况有关, m^2 ; Y 为流体的容重, N/m^3 ; μ 为流体动力粘性系数, $N \cdot s/m^2$ 。

由此可见,水在岩石中的运动速度受到水头高度、岩层厚度、岩石破碎程度、水溶液动力粘性系数等因素的影响。岩石越破碎、水头高度越大,运动速度 v 越大,随着岩层厚度的增加,运动速度将逐渐变小。此外,岩层产状的变化也会影响到运动速度。

2 水溶液在岩石中的水动力弥散^[2~4]

水溶液在多孔介质中运动时,将与介质发生作用,使水中溶质的含量随时间和空间而变化,这些作用包括:分子扩散、机械弥散、悬浮物和乳状物的机械过滤、水稀释、物理和化学吸附、气体逸出、固体岩石被溶解或从水中沉淀,这些作用使地下水在渗透介质的运移过程中,逐渐改变自己的浓度和成分,某些组分在运移过程中可以完全或部分地从水中消失,而某些组分可能增加或由于化学反应而生成新的物质,有的组分则不增加也不减少。

地下水的动力弥散是由分子扩散和机械弥散两种作用构成。

(1) 分子扩散

分子扩散是物理化学作用的结果,是由于液体中浓度差(浓度梯度)的物理-化学势引起的。

水溶液在岩石内的扩散可按菲克(Fick)第一定律进行计算。Fick第一定律叙述为:介质的

扩散速度 $\frac{\partial N}{\partial t}$ (即单位时间通过 A 面积的溶质分子数) 是与面积和介质浓度梯度 $\frac{\partial n}{\partial x}$ 成正比

$$\frac{\partial N}{\partial t} = - D_s A \frac{\partial n}{\partial x} \quad (4)$$

式中, D_s ——多孔介质中的分子扩散系数, 负号是扩散系数与浓度增加方向相反; n ——介质的浓度; x ——深度。

若介质的体积为 V , 则式(4)可变为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \frac{N}{V}}{\partial t} &= - \frac{D_s A}{V} \cdot \frac{\partial n}{\partial x} \\ \text{即} \quad \frac{\partial n}{\partial t} &= - \frac{D_s A}{V} \cdot \frac{\partial n}{\partial x} \end{aligned} \quad (5)$$

对于岩石内, 在 Δx 区段(图1), 按 Fick 定律可计算出单位时间分子数的增量

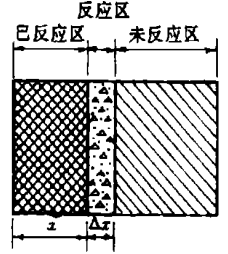


图 1

$$\begin{aligned} \partial N &= dN|_x - dN|_{x+\Delta x} - K \cdot A \cdot \Delta x \cdot dt = \\ &A \left[D_s \left(\frac{\partial n}{\partial x} \Big|_x + \Delta x - \frac{\partial n}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x} \right) - K \right] \cdot dt \\ \partial n &= \frac{\partial N}{A \cdot \Delta x} = \left[D_s \frac{\frac{\partial n}{\partial x} \Big|_x + \Delta x - \frac{\partial n}{\partial x} \Big|_{x+\Delta x}}{\Delta x} - K \right] dt \end{aligned}$$

当 $\Delta x \rightarrow 0$ 可得扩散方程

$$\frac{\partial n}{\partial t} = D_s \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} - K \quad (6)$$

式中, K ——岩石吸收介质的速度, 即反应速度。

若岩石内所增加的溶质分子数与介质体积溶质分子数相同时, 由式(5)、式(6)可得方程

$$D_s \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} + \frac{D_s A}{V} \cdot \frac{\partial n}{\partial x} - K = 0 \quad (7)$$

于是得到

$$n = C_1 + C_2 e^{-\frac{VK}{D_s A} x} \quad (8)$$

C_1, C_2 为常数, 可由初始条件、边界条件确定。由式(8)可以看出, 介质浓度随介质与岩石作用深度的增加而不断发生变化, 需指出的是, 当液体介质流经岩石时, 并不是所有的介质都与岩石发生了作用, 通常情况下, 介质作用的体积 V 小于介质的流量 Q , 因此, 液体介质流经岩石后所测得的溶液浓度比式(8)计算出的浓度要小, 是其作用部分的浓度得到了稀释。

(2) 机械弥散

两种不同浓度液体的分界面处, 除了由于分子扩散引起弥散外, 因液体质点在渗透过程中速度的不同, 也会引起弥散。溶质随渗透溶液一同迁移时速度不均产生的弥散现象即为机械弥散

$$J_h = - D_h \frac{\partial n}{\partial x} \quad (9)$$

式中, J_h 为机械弥散通量, 指单位时间内通过单位截面的物质的质量; D_h 为机械弥散系数。

在多孔介质中渗透时, 溶质在水中的分子扩散系数 D_s 一般小于在重力水中的分子扩散系

数, 分子扩散通量表示为

$$J_d = - D_s \frac{\partial n}{\partial x} \tag{10}$$

式中, D_s 为多孔介质中的分子扩散系数。

当水在多孔介质中渗透时, 分子扩散与机械弥散是同时起作用的, 将这两项作用迭加, 所引起的弥散通量 J 为

$$J = - (D_h + D_s) \frac{\partial n}{\partial x} = - D \frac{\partial n}{\partial x} \tag{11}$$

式中, D 为水动力弥散系数, m^2/s 。

需要指出的是, 弥散系数一般通过试验确定。它与介质的含水率有关, 是含水率的函数。在饱和条件下分子扩散系数 D_s 可由下式确定

$$D_s = \tau \cdot D_d \tag{12}$$

式中, τ ——多孔介质的孔隙通道弯曲系数(无量纲)。对于较为松散的介质, 其值在 0.56 ~ 0.8 之间; D_d 值取决于溶质的种类、浓度和温度。在 25 °C 时, 一些主要离子如 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 H^+ 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等的 D_d 值可取 $1 \times 10^{-9} \sim 2 \times 10^{-9} m^2/s$ 。

机械弥散系数 D_h 可由下式确定(Rumer, 1962)。

$$D_h = a \cdot v^m \tag{13}$$

式中, m 为经验常数, 其值在 1 ~ 2 之间, 与介质的特性有关, 对于各向同性粒状介质, $m = 1$; a 为弥散度, 它受垂直和水平渗透系数的影响, 并随非均匀程度的增大而变大。 v 为地下水实际流速。

对于非饱和状态下, 弥散系数的确定则要复杂得多, 可参考文献[2]。

研究表明, 见图 2(vd/D_s 称为 Peclet 数, d 为多孔介质的平均粒径), 当地下水渗透速度稍大时, 机械弥散在水动力弥散中起主导作用, 当地下水渗透速度很小时, 分子扩散的作用就会变得显著。从图 2 可知, 当 $D_h/D_s < 1$ 时, 以分子扩散为主; $D_h/D_s = 1 \sim 10$ 时, 为过渡区域; 当 $D_h/D_s > 10$ 时, 机械弥散占主导作用。其临界速度可由式(13)和式(12)的比值算出。

此外, 地下水在渗透过程中, 由于产生各种物理、化学和生物作用, 使得物质迁移与其周围地下水运动产生差异, 也即反应速度与渗透速度存在差异, 出现前者比后者滞后的现象。

由上述分析可以看出, 地下水的运动特征将直接影响到其与岩石作用的效果, 因此, 处于含不良地层中的工程建筑物, 弄清其周围的地质状况及地下水的运动特征十分重要。

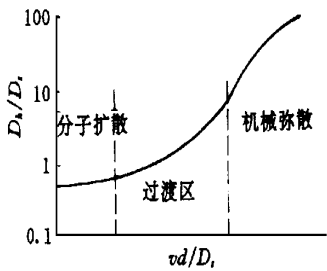


图 2 机械弥散和分子扩散对水动力弥散的相对影响

3 对乐所 2 号隧道混凝土腐蚀状况的分析

3.1 乐所 2 号隧道概况

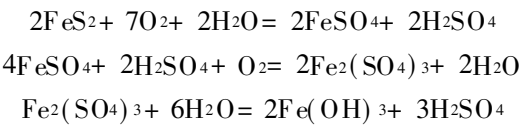
乐所 2 号隧道为直墙式混凝土衬砌, 碎石道床, 单侧沟排水(位于右侧)。隧道穿过下侏罗统和上三迭统地层, 最大埋深约 55 m, 位于隧道距进口 250 m 处。隧道区围岩由下列几部分

构成:

- (1) 砂粘土夹少量碎砾石, 中密可塑, 覆盖进口端山体表层。
- (2) 隧道直接接触地层为砂岩偶夹泥岩(J₁₁)、中厚层砂岩(J₁₁) 和砂岩泥岩互层(T_{3h}), 岩层产状 33°~35°; 裂隙极发育。距进口 200~305 m 间, 有一层含黄铁矿微粒泥岩。
- (3) 出口端 96 m 范围内, 覆盖土厚 3~4 m 左右, 由砂粘土、砂(两者相混, 分布不均)、泥炭(含腐烂植物茎根, 有机质>50%) 构成。
- 由于该隧道岩层受构造运动的影响, 隧道围岩较为破碎, 见图 3, 线路穿过向斜转折端, 因而隧道围岩的节理、裂隙发育。

3.2 砂岩夹泥岩带的特性

由于此带内有含黄铁矿微粒泥岩, 当地下水通过含黄铁矿微粒泥岩后, 地下水的物理化学特征变化较大, 形成 pH 值很低的地下水。这是硫化矿物氧化成硫酸盐, 而硫酸盐进一步溶解的结果。其反应方程可表示为



有关含黄铁矿泥岩的特性, 室内试验分析结果如表 1、表 2。

围岩中黄铁矿泥岩化学成分分析结果/ %

表 1

项目	SiO ₂	Al ₂ O ₃	S(SO ₃)	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	CO ₂
分析结果	63.70	17.40	3.12	0.14	1.02	3.13	0.11	0.36

含黄铁矿泥岩浸泡(静态)试验结果

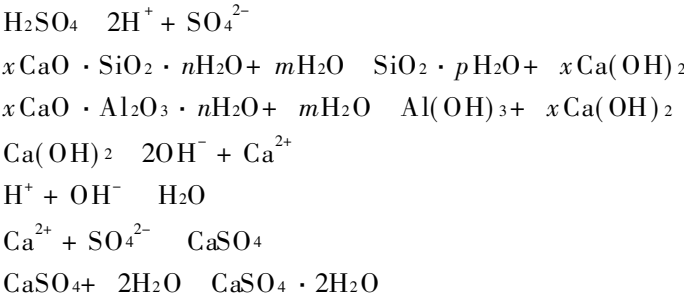
表 2

项目	pH	SiO ₂ /mg·L ⁻¹	SO ₄ ²⁺ /mg·L ⁻¹	Ca ²⁺ +Mg ²⁺ /mg·L ⁻¹	Al ³⁺ /mg·L ⁻¹
分析结果	2.77	20	388	22.56	140

注: 浸泡时间约 35 天。

- (1) 硫(S) 的含量极高, 远远超过了地壳、土壤中的平均组成 0.06%~0.07%。
- (2) Si, Al, Fe, Ca, Mg, K, Na 等元素的含量属正常值, 在克拉克数以下。
- (3) pH 很低, 表现出 2.77 的强酸性。

由以上分析结果可以推测, 当混凝土接触该酸性环境水时, 混凝土中的水化硅酸钙、氢氧化钙, C₃AH₆、C₄AH_n 等矿物与硫酸型酸性水作用时, 其过程可由下列反应方程表示^[6]



由此可见, 其作用的最后产物为石膏(CaSO₄·2H₂O), 其次为含水二氧化硅(SiO₂·pH₂O), 无定型氢氧化铝(Al(OH)₃), 反应生成物中的 SiO₂·pH₂O、Al(OH)₃ 可形成凝胶物

随水溶液流失。而造成混凝土结构的破坏,使强度降低。

3.3 乐所 2 号隧道混凝土腐蚀状况分析

对隧道混凝土具侵蚀作用的侵蚀性酸性水主要来自含硫化矿物(主要为黄铁矿)的不良地层,这是由于硫化矿物经长期氧化、水解的结果。

地下水在含硫化矿物地层的渗透过程中,具侵蚀性环境水的侵蚀能力(pH 值的大小)与地层中含硫化矿物的含量、岩石性质、岩层厚度(水流方向的距离),岩石破碎程度、地下水补给状况及地下水径流条件等有关。虽然硫化矿物氧化、水解反应方程式在特定条件下,其化学反应速度是一定的,但岩石性质以及硫化矿物含量从某种意义上讲会影响其反应速度,从而影响酸性水的侵蚀能力。当地下水在岩石中渗透时,渗透速度也将影响反应速度,渗透速度较大,则以机械弥散为主,反应速度相对变小,所形成的酸性水侵蚀力变弱,反之,则酸性水侵蚀能力变强。另一方面,由于滞后现象的存在,使反应速度和渗透速度存在差异,通常反应速度小于渗透速度。因此,当岩石中裂隙连通性较好时,水流可迅速从岩石中流出,水介质来不及与岩石发生充分作用,仅有很少部分与硫化矿物发生了反应,从而酸性环境水的侵蚀能力相对变弱,反之,则酸性侵蚀水侵蚀能力增强,此外,随着地下水在岩石中渗透距离的加长(含硫化矿物地层),侵蚀能力也将逐渐增强。

对于乐所 2 号隧道,它所经过的不良地层位于距进口 200~350 m 之间的含黄铁矿微粒泥岩,产状 33°~35°;因受构造运动的影响,该地层处于向斜转折端,因而张裂隙发育,加上泥岩上覆下伏的中厚层石英砂岩风化程度高,透水性能很强,使地表水可渗入含硫化物地层,其中一部分沿岩层倾斜面方向流动,这部分水沿岩层面流速相对较快,所形成酸性水侵蚀能力较弱,故在距进口 0~200 m 范围内,混凝土呈现轻弱腐蚀或基本无腐;而另一部分水则沿着裂隙向下渗透,虽岩层渗流条件较好,但水势不大,故分子扩散作用较为显著,形成的酸性水侵蚀性增强。因此,隧道混凝土腐蚀集中于 200~350 m 之间。由于隧道埋深较浅,水头高度较小,故水流流速较小,酸性水渗入混凝土后不能渗出混凝土表面,使混凝土腐蚀多表现为裂开,鼓胀,成块掉下,而内部腐蚀物已呈豆渣状,随时间的推移腐蚀继续向混凝土内发展。乐所 2 号隧道混凝土腐蚀状况见图 4。

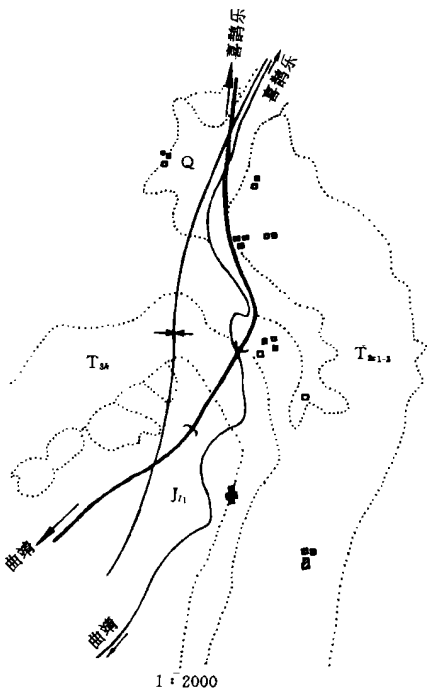


图 3 乐所二号隧道地质平面图

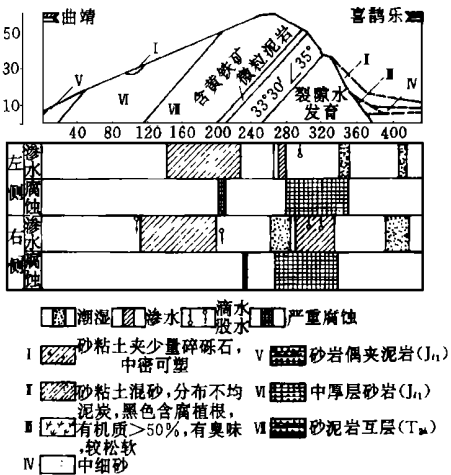


图 4 乐所二号隧道工程地质特征及混凝土腐蚀分布图

乐所 2 号隧道混凝土腐蚀集中于 200~350 m 之间。由于隧道埋深较浅,水头高度较小,故水流流速较小,酸性水渗入混凝土后不能渗出混凝土表面,使混凝土腐蚀多表现为裂开,鼓胀,成块掉下,而内部腐蚀物已呈豆渣状,随时间的推移腐蚀继续向混凝土内发展。乐所 2 号隧道混凝土腐蚀状况见图 4。

4 结束语

从以上分析可以看出,酸性环境水的形成,不仅与地下水所经过的地层、岩石中硫化矿物的含量有关,而且地下水的水动力特征也决定着环境水的侵蚀性。地质构造特征、岩性、岩石破碎状况、岩层厚度、水头高度等影响着地下水的动力特征,水动力特征的不同,将影响地下水与含硫化矿物地层作用的效果,从而影响着酸性水的侵蚀能力。当地下水的流速过大时,水动力弥散作用中以机械弥散为主,而且滞后现象的存在,使地下水与硫化矿物不能充分作用,所形成的酸性水的侵蚀性相对减弱。

当酸性水渗入混凝土后,其腐蚀与混凝土质量有关外,水在混凝土中运动特征同样显得非常重要,如排水条件好,则腐蚀程度减弱,相反,如排水条件差,水在混凝土中运动十分缓慢,分子扩散显著,酸性水将与混凝土充分作用,造成腐蚀强烈。

5 参考文献

- 1 西南交通大学,哈尔滨建筑工程学院. 水力学. 北京: 人民教育出版社, 1979
- 2 刘兆昌, 张兰生. 地下水系统的污染与控制. 北京: 中国环境科学出版社, 1991
- 3 吴福元, 杜强. 弥散度在地质学中的应用及其评述. 长春地质学院学报, 1992, (1)
- 4 赵勇胜. 弥散度及其在地下水污染模型中的应用. 长春地质学院学报, 1992, (2)
- 5 金松寿. 化学动力学. 上海: 上海科技出版社, 1959
- 6 罗健等. 酸性环境水水化硅酸盐风化的热力学分析. 国家自然科学基金项目研究报告, No. 4890156, 成都: 西南交通大学, 1992

(责任编辑 张武美)

《铁道科技名词》出版 全路科技名词统一

铁道部标准计量研究所 全国科学技术名词审定委员会铁道分会秘书 韶能仁

《铁道科技名词》是由铁道科学名词审定委员会(简称铁道名词委,经全国科学技术名词审定委员会授权成立,作为它的五十多个分委员会之一而进行工作)在广泛征求路内外专家学者意见基础上审定编纂而成,其审定公布的名词具有权威性和约束力,全国科研、教学、生产、经营,以及新闻出版等各部门,均应遵照使用。

这次审定的铁道科技名词有如下特点:

1. 名词统一的工作范围广。它不仅是行业内的统一,也不仅是国内大陆行业内的统一,还要尽量考虑港、澳、台及世界上其它汉语地区的统一。

2. 系统协调的程度深。过去,国家标准中科技名词打架现象时有发生,矛盾难以处理,又没有一个高层次的权威性专门机构来解决。这次审定的铁道科技名词对各专业间名词统一和重复设置等问题,均在统筹规划和综合平衡中得到解决。此外,通过全国名词委还与其它学科的名词委进行更深一层的协调。