

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2011.04.010

华南某预选低中放废物处置场岩土层渗透性能综合研究

李学山¹, 易树平^{1,2}, 马海毅¹, 胡学玲¹, 任国澄¹

(1. 广东省电力设计研究院, 广东 广州 510663; 2. 北京大学水资源研究中心, 北京 100871)

摘要 采用渗水、注水、压水、抽水及室内渗透试验等多种测试方法, 对我国华南某一预选低中放废物处置场内各岩土层的渗透特性进行分层测试, 通过多种方法的综合研究得出处置场地内各岩土层的渗透系数, 并基于计算结果评价各岩土层的渗透性能, 指出区内微风化花岗岩可作为低中放废物的处置底板, 中等风化花岗岩可作为备选处置底板, 而冲积黏土则是处置单元的理想回填和覆盖材料, 强风化花岗岩、全风化花岗岩和冲积粗砂由于渗透性相对较好, 处置单元的设计和建设中应避免放射性核素渗漏到上述层位的可能性。该研究为正确获得低中放废物处置场址内岩土体的渗透性能提供了有益的借鉴。

关键词 低中放废物; 处置场地; 岩土; 渗透性; 花岗岩

中图分类号: P641.5⁺2 文献标识码: A 文章编号: 1004-6933(2011)04-0038-04

Study on permeability of rock and soil layers of a potential site in southern China for disposal of low and intermediate level radioactive waste

LI Xue-shan¹, YI Shu-ping^{1,2}, MA Hai-yi¹, HU Xue-ling¹, REN Guo-cheng¹

(1. Guangdong Electric Power Design Institute, Guangzhou 510663, China; 2. PKU Center for Water Research, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract : The permeability of the rock and soil layers of a potential site in southern China was studied through integrated use of the pit permeability test, injecting test, water pressure test, pumping test and laboratory permeability test. The values of the permeability of different rock and soil layers were calculated. The permeability for each layer and the functions of rock and soil layers for the site construction were evaluated. The results indicate that the slightly weathered granite can be used as the base rock for the disposal of low and intermediate level radioactive waste (LILW), the moderately weathered granite can be used as the backup base rock, and the alluvial silty clay can be used as the backfill materials of the disposal units. However, the disposal units should be designed and built carefully to avoid leakage of radionuclides into the strongly and completely weathered granites, and the alluvial coarse sand, because they have relatively large permeability. This study presents an effective method for obtaining the permeability of rock and soil mass of LILW disposal sites.

Key words : LILW; disposal site; rock and soil; permeability; granite

1 概 述

目前, 国际上已成功建成并运行上百个低中放废物处置场地^[1-2], 我国也分别建成甘肃玉门与广东

北龙两个并规划 5 个低中放废物处置场地^[3]。国内外半个多世纪以来的放射性废物处置经验表明, 对场区岩土体渗透性能的正确认识是处置场选址及其安全性评价的关键^[4]。

渗透系数是表征岩土体渗透性能的指示性参数^[5],是低中放废物处置场地特性评价、核素运移及环境影响评价的基础^[6-9]。然而,由于处置场址复杂的自然条件,使得单一的测试方法难以获得所有岩土层的渗透系数;同时,由于试验条件、试验点和试验段的不同,即使对同一岩土体采用相同的测试方法所求得的渗透系数差异也比较大;上述因素为正确认识放射性废物处置场地各岩土层的渗透性能形成了障碍。

基于此,笔者结合华南某预选低中放废物处置场址,针对具体自然条件分别采用多种试验方法对场址内各岩土层的渗透性能进行综合研究,以克服采用单一方法进行研究的局限性和减少所得参数的不确定性,同时为正确认识各类场址岩土渗透性能以及场址的选择和评价奠定基础。

2 场址概况

研究场址位于我国广东省。交通状况较好,具有乡道、村道等便利条件。场区地貌类型主要为剥蚀丘陵和丘间洼地地貌,地势低缓,波状起伏,山体多呈垅状。区内地形切割较浅,沟谷多呈“U”型,坡度较缓,植被发育。

区内年均降水量约 1 895 mm,年均蒸发量为 1 359 mm。场区位于流域一级支流的源头山区,上游无来水,水力条件单一。处置场址西侧出口以上汇水流域面积为 0.8 km²,有一级支流一条,二级支流共有 15 条。一级支流为东西走向,二级支流发育于一级支流两侧,呈近南北走向(图 1)。地表水流速较缓,溪沟底部岩性以砾、砂、黏土等冲积物为主。

根据前期研究资料,区内构造、节理裂隙均不发育。场址岩土层则可分为冲积粉质黏土、冲积粗砂、

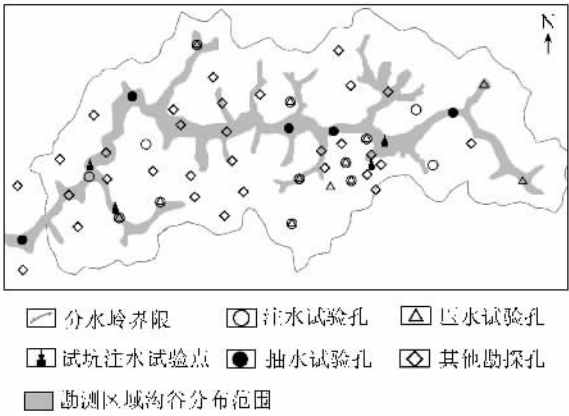


图 1 原位试验及勘探孔分布示意图
坡积粉质黏土、残积砾质黏土、全风化花岗岩、强风化花岗岩、中风化花岗岩和微风化花岗岩。由于区内研究程度较低,各岩土层的渗透性能尚待进一步研究。

3 研究方法

针对参数变化较大,单一方法存在较大不确定性的不利情况,本次研究结合实际条件,对各岩土层均采用多种测试方法来获取其渗透系数。对浅部包气带的岩土层,采用注水试验(包括试坑双环注水试验和钻孔注水试验);对沟谷地段饱和含水层,则采用抽水试验获取水文地质参数;对于岩体的透水性,在条件适合的地点采用压水试验来求取其渗透系数。冲积粗砂由于在区内呈分散的点状分布,因此结合实际条件仅开展了分层注水试验,粉质黏土由于其分布广泛且利于阻滞核素运移,因此开展了多种分层试验。另外,本次研究还从所有试验孔和勘探孔中采取了 61 件原状岩土样进行了室内渗透实验。各原位试验和钻孔的布置如图 1 所示,各岩土

表 1 岩土渗透性能测试方法和计算依据

试验名称	工作量	计算公式	说明
试坑渗水试验 ^[10]	6 组双环	$K = \frac{16.67 Qz}{F(H_0 + z + 0.5H_a)}$	冲积粉质黏土和坡积粉质黏土各 3 组
钻孔注水试验 ^[10]	11 个钻孔 30 个试验段	$K = \frac{\pi r^2}{AT_0}, A = 2\pi l / \ln \frac{ml}{r^*}$	采用降水头注水试验方法
钻孔压水试验 ^[11]	12 个钻孔 13 个试验段	$K = \frac{Q}{2\pi H L \ln \frac{L}{r_0}}$	仅在中等风化和微风化花岗岩中进行,先升压后降压共 3 个压力值共 5 个阶段
抽水试验 ^[12]	4 个土层, 4 个岩层, 3 个综合	$K = \frac{0.732 Q}{(2H - S)S} \lg \frac{R}{r}$ (单孔); $K = \frac{0.732 Q}{(2H - S_1 - S_2)S} \lg \frac{r_2}{r_1}$ (多孔)	分段抽水和全孔综合抽水。强风化带上覆各层统一概化为土层,中风化带下伏各层概化为岩层。均采用单孔稳定流完整井抽水
室内渗透试验 ^[13]	61 组岩土样	$K = \frac{QL^*}{AH^*t}, H^* = \frac{H_1 + H_2}{2}$	冲积粉质黏土取样过程中扰动较小,其余样品扰动较大

注:K 为渗透系数;Q 为渗水/抽水/注水量;H 为试验水头;H₀ 为渗水试验含水层厚度;H_a 为试验土层的毛细上升高度;z 为从试坑底算起的渗入深度;F 为渗水试验内环的底面积;r* 为钻孔注水试验套管内半径,T₀ 为注水试验特征时间,l 为注水试验段长度,L 为压水试验中的试段长度,r₀ 为压水试验钻孔半径,S、S₁、S₂ 分别为抽水试验中抽水孔、观测孔 1 和观测孔 2 的水位降,r、r₁、r₂ 分别为抽水试验中抽水孔、观测孔 1 和观测孔 2 的半径;R 为抽水试验的影响半径,A 为室内渗透试验试样的断面积,L* 为室内渗透试验中两测压孔中心间的试样高度,H* 为室内渗透试验中平均水位差,H₁ 和 H₂ 则分别为两测压孔的水位。

表 2 各岩土层渗透系数计算结果及推荐值

cm/s

定名	抽水试验	钻孔注水试验	试坑渗水试验	钻孔压水试验	室内渗透试验	推荐值
粉质黏土(冲积)		7.58×10^{-5}	$\left(\begin{matrix} 8.90 \times 10^{-6} \\ 3.10 \times 10^{-4} \end{matrix} \right)$	—	$\left(\begin{matrix} 1.42 \times 10^{-7} \\ 4.66 \times 10^{-5} \end{matrix} \right)$	5.00×10^{-6}
冲积粗砂		$\left(\begin{matrix} 1.30 \times 10^{-3} \\ 1.13 \times 10^{-2} \end{matrix} \right)$	—	—	—	6.00×10^{-3}
粉质黏土(坡积)	$\left(\begin{matrix} 9.98 \times 10^{-4} \\ 4.36 \times 10^{-3} \end{matrix} \right)$	$\left(\begin{matrix} 1.06 \times 10^{-3} \\ 4.90 \times 10^{-3} \end{matrix} \right)$	$\left(\begin{matrix} 6.89 \times 10^{-5} \\ 3.79 \times 10^{-4} \end{matrix} \right)$	—	$\left(\begin{matrix} 6.10 \times 10^{-5} \\ 2.05 \times 10^{-4} \end{matrix} \right)$	8.00×10^{-5}
砾质黏土(残积)		$\left(\begin{matrix} 7.70 \times 10^{-6} \\ 2.35 \times 10^{-3} \end{matrix} \right)$	—	—	$\left(\begin{matrix} 1.95 \times 10^{-5} \\ 4.42 \times 10^{-4} \end{matrix} \right)$	
全风化花岗岩		$\left(\begin{matrix} 3.02 \times 10^{-6} \\ 8.94 \times 10^{-3} \end{matrix} \right)$	—	—	$\left(\begin{matrix} 2.48 \times 10^{-5} \\ 1.18 \times 10^{-4} \end{matrix} \right)$	
强风化花岗岩		$\left(\begin{matrix} 2.75 \times 10^{-6} \\ 4.10 \times 10^{-3} \end{matrix} \right)$	—	—	$\left(\begin{matrix} 2.93 \times 10^{-5} \\ 4.20 \times 10^{-4} \end{matrix} \right)$	2.00×10^{-4}
中风化花岗岩	$\left(\begin{matrix} 5.90 \times 10^{-5} \\ 4.17 \times 10^{-4} \end{matrix} \right)$	—	—	$\left(\begin{matrix} 2.90 \times 10^{-5} \\ 8.50 \times 10^{-5} \end{matrix} \right)$	—	5.00×10^{-5}
微风化花岗岩		—	—	$\left(\begin{matrix} 2.00 \times 10^{-6} \\ 8.08 \times 10^{-5} \end{matrix} \right)$	—	5.00×10^{-6}

注 括号中数值较小值为计算值下限,较大值为计算值上限;—表示无该项试验。

层根据具体条件所采取的试验方法见表 1。

本次研究所采用的测试方法、工作量和计算依据如表 1 所示。在计算过程中特别注意了试验条件对计算方法的适应性,并根据现场状况及岩土样的扰动程度来对试验计算结果予以筛选和分析。

4 结果与讨论

表 2 总结了各岩土层渗透系数的计算结果。可以看出,由于试验条件、计算方法以及各试验点和试验段的具体差异,导致所求的渗透系数的误差较大,这符合野外和室内数据采集的实际情况。因此,采用单一试验方法研究各岩土层的渗透性能,必然产生较大的不确定性。然而,尽管实际计算所得的各岩土层的渗透系数变化较大,但通过对比同一岩土层的不同试验结果,并结合野外条件和一般岩土渗透系数的经验值进行具体分析,则可得出各岩土层渗透系数较为合理的推荐值及其误差范围。

抽水试验所得土层的渗透系数是场区各土层的综合渗透系数,所得岩层的渗透系数为中等风化和微风化岩体的综合渗透系数,因此不能与注水试验和压水试验所得的各岩土层渗透系数直接比较,但对于界定各岩土层渗透系数的上、下限和参考值则具有重要意义。其余各试验均是针对单一岩土层开展的,因此可通过比较分析得出其渗透系数。

粉质黏土(冲积)厚度较薄,覆于表层,因此可忽略抽水试验数据的参考意义。由试坑渗水试验、室内渗透试验(样品扰动较小)的结果可以判定该层渗透系数约为 5.00×10^{-6} cm/s。钻孔注水试验的结果可作为该层渗透系数的上限。计算结果表明该值的不确定性较大,其上下限为 ± 10 倍;另一方面,局部分布的粗砂(冲积)渗透性较强,根据抽水试验和注

水试验结果,其渗透系数推荐值为 6.00×10^{-3} cm/s,大于抽水试验(综合土层)的上限值而介于注水试验的计算值之间,该值误差较小,在 ± 2 倍之内。

粉质黏土(坡积)和砾质黏土(残积)在本次研究中分别进行了分层野外和实内试验,计算结果表明二者的渗透系数较为接近,因此可把坡积和残积层黏土定为一层。根据室内渗透试验(样品扰动较小)和试坑渗水试验计算结果,残、坡积层的渗透系数约为 8.00×10^{-5} cm/s,该值的可能误差介于 ± 5 倍之间。

本研究对全风化和强风化花岗岩的渗透系数也进行了分层测试。计算结果表明同一种测试方法所得的两种介质的渗透系数极为相近,因此可判断两种介质的渗透系数大致相当,均约为 2.00×10^{-4} cm/s。该值位于室内渗水试验和钻孔注水试验的计算值范围之内,误差为 ± 5 倍。由于不论钻孔注水还是室内渗透试验都对介质存在一定的扰动,因此该推荐值相对于实际值可能偏大,在应用过程中应予以注意。

对于中风化花岗岩,钻孔压水试验计算结果表明其渗透系数为 5.00×10^{-5} cm/s,该值的不确定性介于 ± 2 倍之内,而对于微风化花岗岩,由于抽水试验中岩层受到的扰动较大或者因为止水效果不佳,所得的计算值明显偏大,可作为渗透系数的上限。根据钻孔压水试验结果,可取 0.1 倍中风化花岗岩的渗透系数作为微风化花岗岩的推荐值,即约等于 5.00×10^{-6} cm/s,同样,该值的不确定性介于 ± 2 倍之内,可信度较高。

可见,案例场址中岩土层渗透性由强到弱的顺序为:冲积粗砂、全(强)风化花岗岩、坡(残)积黏土和微风化花岗岩、冲积黏土和微风化花岗岩。根据 GB50287—1999《水利水电工程地质勘察规范》,微风

化花岗岩和冲积黏土的渗透性为“微透水”,前者为区内基岩可作为低中放废物处置场的隔水底板,后者则可作为处置单元的回填和覆盖材料;中风化花岗岩为“弱透水”层,当微风化花岗岩埋深较大时亦可作为处置底板的备选层;强风化花岗岩、全风化花岗岩和冲积粗砂为中等透水层,应在处置场地的设计和环境评价过程中应予以重视,特别是局部分布的冲积粗砂,由于其渗透性能良好,应在处置场设计和废物处置的过程中杜绝放射性核素渗漏到该层的可能性;另外,尽管残、坡积黏土层渗透性较低,但由于其分布的不连续且厚度较薄,因此不具备作为处置场底板的条件,可作为备选的回填材料。

5 结 论

研究表明采用单一的试验方法所求得的渗透系数变化较大,容易导致较大的不确定性。采用多种方法综合研究则可有效降低所求参数的不确定性,获得较为准确的渗透参数。案例研究结果表明预选场区内微风化花岗岩和冲积黏土渗透性最低,为微透水层(渗透系数 10^{-6} cm/s 量级),可分别作为低中放废物处置场的隔水底板和回填覆盖材料;中风化花岗岩为“弱透水”层(渗透系数 10^{-5} cm/s 量级),可作为处置底板的备选层;强风化花岗岩、全风化花岗岩和冲积粗砂为中等透水层(渗透系数 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ cm/s),在处置场地的设计和建设中应避免放射性核素渗漏到该层的可能性;坡残积黏土渗透性较低(渗透系数 10^{-5} cm/s 量级),可作为备选的回填材料。本次研究为正确获取各类场地岩土层的渗透

性能提供了行之有效的借鉴方法。

参考文献：

[1] HAN K W, HEINONEN J, BONNE A. Radioactive waste disposal: global experience and challenges[J]. IAEA Bulletin, 1997, 39(1): 33.

[2] 刘平辉, 管太阳, 王勇, 等. 陆地中低放核废物地质处置的发展与现状[J]. 华东地质学院学报, 2000, 23(3): 229-234.

[3] 王驹. 中国高放废物地质处置[R]. Beijing: IAEA Training Course on Geological Disposal, 2009.

[4] IAEA. Characterization of groundwater flow for near surface disposal facilities[R]. Austria: IAEA-TECDOC-1199, 2001.

[5] 王大纯, 张人权, 史毅虹, 等. 水文地质学基础[M]. 北京: 地质出版社, 1998.

[6] HEER W, HADERMANN J. Modelling radionuclide migration field experiment[R]. Wettingen, Switzerland: Nagra Technical Report NTB 94-18, 1996.

[7] ZHENG C, BENNETT G D. Applied contaminant transport modeling[M]. 2 ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2002.

[8] 王榕树, 冯为. 放射性核素运移在地质介质中的运移研究[J]. 核化学与放射化学, 1994, 16(2): 117-121.

[9] 钱天伟, 李书绅, 武贵宾. 地下水多组分反应溶质运移模型的研究进展[J]. 水科学进展, 2002, 13(1): 116-121.

[10] SL345—2007 水利水电工程注水试验规程[S].

[11] DL/T5331-2005 水利水电工程钻孔压水试验规程[S].

[12] 薛禹群, 李同斌, 贾贵庭, 等. 地下水动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1997.

[13] SL237-014-1999 土工试验规程[S].

(收稿日期: 2011-02-22 编辑: 高渭文)

(上接第 21 页)

由最初近似圆形逐渐变为长轴方向与水流向一致的近似椭圆形。

b. 污染物在含水层中随着地下水而迁移, 在迁移过程中随着时间变化, 苯和萘的污染羽中心都在随着地下水的流向迁移, 污染范围逐渐增大。

c. 溶质运移模拟显示, 研究区最主要的污染源可能是位于 GW1 点周围的区域, 另外可能还存在多处小的污染源。

d. 污染场地的污染源不完全是点源, 而本次模拟时按照点源(有限面源)的方式作了简化处理, 降低了污染风险, 建议尽早对该污染场地的地下水进行治理, 以防污染物通过运移进入到承压含水层, 造成更大的危害。

参考文献：

[1] 王克三. 地下水污染及其监测治理问题[J]. 水文地质工程地质, 1998(5): 46-47.

[2] 郭卫星, 卢国平. 模块化三维有限差分地下水流动模型: 美国地质调查局水资源调查技术丛书之六[M]. 南京: 南京大学出版社, 1999.

[3] MC DONALD M G, HARBAUGH A W. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: U S Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations [M]. Reston, Virginia: USGS, 1988.

[4] 李国敏, 陈崇希. 空隙介质水力弥散尺度效应的分形特征及弥散度初步估计[J]. 地球科学-中国地质大学学报, 1995, 20(4): 405-409.

(收稿日期: 2010-06-03 编辑: 徐娟)