

DOI: 10.11779/CJGE2017S1006

双环注水试验装置的研制及其应用

于永堂^{1,2}, 刘争宏², 张继文², 高远¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 机械工业勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710043)

摘要: 针对现有双环注水试验装置在高渗透性土体中应用时的缺陷, 研制了一套轮换注水式双环注水试验装置。该装置由注水系统和供水系统组成, 巧妙地采用了在内环、外环中分别设置两组流量瓶向环内轮换注水, 外接水箱向注空的流量瓶中供水的结构设计, 保证了试验过程环内水头高度的稳定和连续注水。采用新研制的试验装置测试安哥拉格埃路地层(Quelo)棕红色砂土的渗透系数, 获得了满意的应用效果。试验结果表明: 安哥拉 Quelo 砂在天然状态下的渗透系数在 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ cm/s 数量级, 经压实后(重型击实试验控制, 压实系数 $\lambda \geq 0.95$)可降低 1~3 个数量级; 在同一孔隙比下, 现场双环注水试验结果高于室内变水头渗透试验结果约 0.5 个数量级。

关键词: 双环注水试验; 原位试验; 渗透系数; 安哥拉 Quelo 砂

中图分类号: TU413 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2017)S1-0027-05

作者简介: 于永堂(1983-), 男, 辽宁鞍山人, 高级工程师, 主要从事湿陷性土地基处理技术、岩土工程测试技术的开发与应用研究。E-mail: yuyongtang@126.com。

Development and application of double-ring infiltrometer

YU Yong-tang^{1,2}, LIU Zheng-hong², ZHANG Ji-wen², GAO Yuan¹

(1. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. China JK Institute of Engineering Investigation and Design Co., Ltd., Xi'an 710043, China)

Abstract: In order to overcome the deficiency of the existing double-ring infiltrometer (DRI) for the soils with high permeability, a new DRI is developed. The device is composed of water injection system and water supply system. It only requires two sets of mariotte reservoirs for both the inner and outer cylinders to which, water can be added to the empty mariotte reservoirs from the external water tank when needed without affecting the measurements. The method keeps accurate constant head for high permeability and consecutive water supply during the testing process. The new DRI is used to test the permeability coefficient of Angola brown-red Quelo sand, and satisfactory results are achieved. The test results show that the permeability coefficient of Quelo sand in the natural state is $10^{-3} \sim 10^{-2}$ cm/s orders of magnitude, and after compaction (heavy compaction standard, compacting factor $\lambda \geq 0.95$) 1~3 orders of magnitude are reduced. The result of the in-situ double-ring water infiltration test is about 0.5 orders of magnitude higher than that of the indoor variable-head permeability test under the same void ratio.

Key words: double-ring infiltrometer; in-situ test; permeability coefficient; Angola Quelo sand

0 引言

渗透性是土体重要的物理特性之一。渗透系数是用来反映土壤渗透性能的重要参数, 在研究土壤水分平衡^[1-2]、地表水入渗对地下水的补给能力^[3]、计算滑坡降雨入渗过程与稳定性^[4-5]、检测压实土体及防渗层抗渗性能^[6], 经常需要测定土层的垂向渗透性能。双环注水试验^[7-8]是一种广泛应用于野外测定土层垂向渗透系数的简易方法。目前规范^[9]中规定的方法是在内外环中各设置一个容积为 5L 的马氏流量瓶供水并保持环内水头。一方面大容量瓶的流量观测精度难以保证, 另一方面不同土体的渗透性差异很大, 试验过

程的用水量不同, 当遇到土体渗透性强, 用水量大时, 流量瓶须频繁替换, 注水量测记不便, 极易产生差错, 且难以保持环内水头稳定, 导致测试误差较大。有学者采取使用量筒向内、外环中人工注水的方法^[10], 虽然避免了频繁更换流量瓶的问题, 但是以量筒人工补水造成了内、外环中液面难以较准确维持在同一水头高度, 试验时读数不便, 测试精度很大程度取决于观测人员的熟练水平。

基金项目: 对发展中国家科技援助项目(KY201502002); 国家科技支撑计划项目(2013BAJ06B00)

收稿日期: 2016-11-28

本文在原有双环注水试验原理的基础上开发了一套新型试验装置，并在渗透较强的安哥拉格埃路地层（Quelo）棕红色砂土（简称 Quelo 砂）场地上进行了应用，获得了满意的测试效果，得到了天然状态及压实后 Quelo 砂的渗透系数。

1 双环注水试验新装置的研制

本文介绍的双环注水试验新装置是机械工业勘察设计研究院有限公司开发的专利技术^[11]。图 1 为该装置的构造示意图，图 2 为实物照片。图 2 中所采用的水箱容积为 1 m³；流量瓶采用容积为 2500 mL（实用有效注水量程为 2000 mL）、精度等级为±10 mL 的量筒；进气管、出水管及供水管采用内径 15 mm 玻璃管；注水阀门采用三通三支真空活塞；主水管、供水管采用直径为 18 mm 硅胶管；供水管路阀门采用铜球气泵阀门。

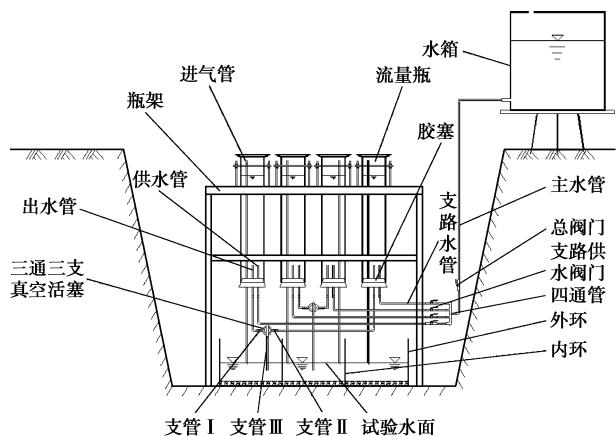


图 1 新型双环注水试验装置构造示意图

Fig. 1 Schematic diagram of new double-ring infiltrometer



图 2 新型双环注水试验装置实物照片

Fig. 2 Photo of new double-ring infiltrometer

本新型双环注水试验装置的工作原理是：在内环和外环中各设有两个流量瓶向环内轮换注水，每个流量瓶用带 3 个孔的胶塞塞住，孔中分别插入长短不等的 3 根玻璃管（管端切成斜口），分别作为进气管、出

水管和注水管。流量瓶的进气管管口设置在试验水面处，向同一环内供水的两个流量瓶的出水管与三通三支真空活塞（又称 T 形二路真空活塞）在直线上的两个支管连接，剩下一个支管的管口位于试验水面下，用于向环内注水。供水管与水箱通过水管连接，水管上设有供水阀门。当进行注水试验时，首先将三通三支真空活塞的塞芯拧至关闭位置，打开对应各流量瓶的供水阀门向流量瓶供水，当流量瓶装满水后，关闭供水阀门，通过三通三支真空活塞控制内环和外环中只有一个流量瓶向各自环内注水，同时另一个轮换注水用流量瓶处于关闭状态。当先使用的流量瓶接近注空时，迅速转换三通三支真空活塞开启方向，此时在打开轮换注水用流量瓶的同时也关闭了当前已注空的流量瓶，然后再次通过水箱、供水管路向轮换停用的流量瓶内供水，待流量瓶内注满水后待用，如此循环直至完成整个双环注水试验过程。

本新型双环注水试验装置的操作步骤如下：

(1) 试验装置组装与检漏：首先根据图 1 将水箱、主水管、四通管、支路供水阀门连接，然后将总阀门打开，关闭各支路供水阀门，检验各阀门和主水管等是否漏水。若无漏水问题，连接余下组件，然后关闭三通三支真空活塞，打开供水管阀门，向流量瓶内供水。供水完毕，转换三通三支真空活塞的开闭方向，检验余下试验装置的管路是否漏水。

(2) 试验点的试坑开挖与整平：在选定的试验地点，开挖一方形或圆形试坑至试验土层，整平坑底并尽量减少对试验土层结构的扰动。

(3) 试验装置安装至试验点：参照规范^[9]要求，在试坑中心部位将内环、外环压入坑底 5~8 cm，确保试环周边不漏水，然后在内、外环内壁黏贴钢尺，保证钢尺竖直，最后在内环、内环与外环之间铺厚度为 2~3 cm、粒径为 5~10 cm 的砾石作为缓冲层。将余下双环注水试验设备安装至试验点处，根据钢尺刻度将流量瓶进气管底端斜口上端先粗调至设计试验水面位置（一般距坑底 10 cm）。

(4) 水箱向流量瓶供水：将三通三支真空活塞的塞芯转至关闭位置，打开总阀门和支路供水阀门向流量瓶供水，供水时流量瓶中的液面不能超过其刻度范围，供水完毕，关闭支路供水阀门和总阀门。

(5) 流量瓶向环内注水：先向内环和外环中注水至试验水面，然后微调流量瓶进气管底端管口刚好至设计试验液面位置。如图 1 所示，首先将三通三支真空活塞转至 L 型水流控制位置一，此时支管 I、支管 III 与塞芯孔连通，支管 II 为关闭状态，流量瓶中的水由出水管流出，经支管 I 和支管 III 注入环内，此时内环和外环只有一个流量瓶向各自环内注水，同时另一

个轮换注水用的流量瓶处于关闭状态。当首先使用的流量瓶接近注完时, 转换三通三支真空活塞至另一 L型水流控制位置二, 此时支管Ⅱ、支管Ⅲ与塞芯孔连通, 支管Ⅰ为关闭状态, 轮换注水用流量瓶中的水由出水管流出, 经三通三支真空活塞、支管Ⅲ注入环内, 同时已注空流量瓶关闭。在试验过程中, 按规定时间记录两组流量瓶向环内注水的总体积, 得到单位时间内注水量。

(6) 再次向流量瓶供水: 对已经注空的流量瓶, 再次通过供水管路向其供水, 装满水后待用, 如此循环直至试验土层渗流稳定后, 完成注水试验。

2 工程应用

2.1 试验概况

本次将该新型双环注水试验装置应用于非洲安哥拉格埃路地层(Quelo)棕红色砂土的现场渗透试验。安哥拉 Quelo 砂广泛分布于安哥拉首都罗安达及其周边地区, 为第四系沉积层, 天然状态呈干—稍湿、松散—密实状态, 无明显层理, 主要矿物成分为石英、含氧化铁和高岭土。参照规范^[12]对安哥拉 Quelo 砂进行颗粒分析试验, 试验结果如图 3 所示。安哥拉 Quelo 砂成分中, 砂粒($2 \text{ mm} \geq d > 0.075 \text{ mm}$)、粉黏粒($0.075 \text{ mm} \geq d$)的含量范围分别为 51.4%~86.0% 和 16.8%~49.1%, 按土的工程分类标准^[13]属于粉砂。

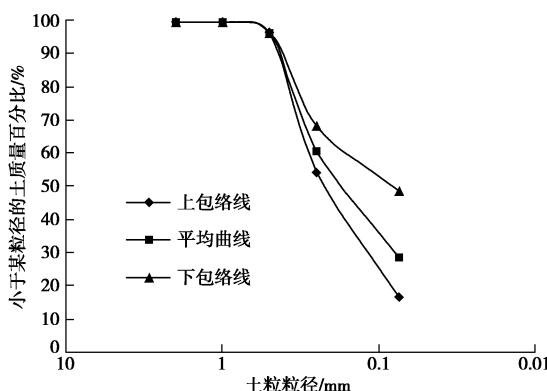


图 3 颗粒分析曲线

Fig. 3 Particle-size analysis curves

试验场地位于某大型房建项目场地内, 本次分别进行了天然土层和压实土层的现场双环注水试验, 其中在天然土层上共进行了 10 组试验(PSZ1~PSZ10), 在压实土层上共进行了 4 组试验(DC1-1、DC1-2、DC2-1 和 DC2-2)。压实土层厚为 2.5 m, 由天然土层开挖后分层回填碾压, 采用重型击实试验控制, 压实系数 $\lambda \geq 0.95$ 。此外, 还在天然土层上取土进行了室内变水头渗透试验, 与双环注水试验结果进行对比。

双环注水试验在开始阶段, 每 5 min 测量一次注

水量, 连续测量 5 次; 之后每隔 15 min 测量一次, 连续测量 2 次; 以后每隔 30 min 测量一次, 并至少测量 6 次。试验结束标准为连续 2 次观测的注入流量之差不大于最后一次注入流量的 10% 时, 取最后一次注入流量作为计算值^[9]。对于天然红砂土层, 试验结束时在试验点中心及试验点外 3~5 m 处, 各打一个比坑底深 3~4 m 的钻孔, 每间隔 20 cm 取样测试土体含水率, 确定入渗深度; 对于压实红砂层, 以试坑内环直径为一边向下开挖, 通过对土层湿润峰面的观测和含水率的测定来确定渗入深度, 最后由式(1)计算渗透系数。

$$k = \frac{16.67Qz}{F(H+z+0.5H_a)} \quad (1)$$

式(1)中: k 为渗透系数(cm/s); Q 为内环的最后一次注入流量(L/s), 经现场测定, 试验过程蒸发量极小, 故本次不考虑蒸发量对测试结果的影响; F 为内环底面积(cm^2); H 为试验水头(cm), 本次试验 $H=10 \text{ cm}$; z 为从试坑底算起的渗入深度(cm); H_a 为试验土层的毛细上升高度(cm), 粉砂中取经验值 30 cm。

2.2 新型双环注水试验装置效果及试验结果

典型试验点 PSZ7 的注水流量与时间关系($Q-t$)曲线如图 4 所示。在图 4 中, 由于试验土层的初始含水率较低, 开始阶段, 内环注入流量较快, 随时间增长, 上部土体趋向于饱和, 注入流量开始降低并逐步趋于稳定。通过对水位标尺可知, 试验过程水头波动幅度可控制在 2 mm 以内(规范^[9]要求为试验水头波动幅度不应大于 5 mm)。根据试验记录, 当浸水时间累计 5 h 时, 内环总注水量约 116990 mL, 峰值注水量约为 525 mL/min, 稳定时的注水量约为 373 mL/min; 外环总注水量约为 320293 mL, 峰值注水量约为 1437 mL/min, 稳定注水量约 1021 mL/min。由于本新型试验装置通过在内、外环中分别设置两个流量瓶轮换供水, 做到了既使在高用水量的情况下, 也不需人工补水, 保持了内环中液面水头高度稳定, 更为符合规范^[9]规定的控制要求, 从而保证了渗透系数测定的可靠性和精度。本次试验采用的流量瓶有效注水量程为 2000 mL, 考虑到流量瓶注水、供水过程、仪器操作、读数记录等过程, 约需要 30 s, 本新装置理论上可满足单位时间注入量不超过 4000 mL/min 高渗透性土体的注水试验, 若采用更大容积的高精度流量瓶, 单位时间内的注水量还可进一步提高。

本次试验土层的基本物理性质指标与渗透系数测试结果如表 1 所示。由表 1 可知, 通过双环注水试验测定的天然土层的渗透系数变化范围为 $3.28 \times 10^{-3} \sim 1.20 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$, 根据规范^[14]判定为中等渗透性; 压

实土层的渗透系数变化范围为 $6.85 \times 10^{-5} \sim 2.17 \times 10^{-4}$ cm/s, 低于天然土层 1~3 个数量级。

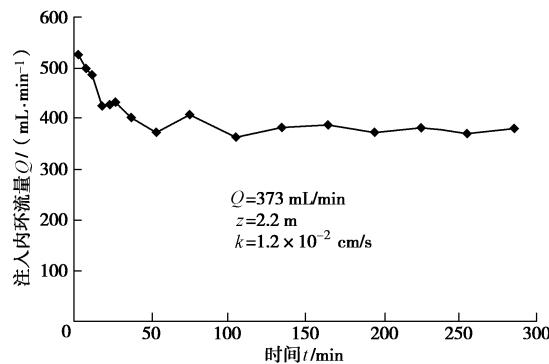


图 4 试验点 PSZ7 注水流量与时间关系曲线

Fig. 4 Relationship between injection water flow rate and time of test point PSZ7

表 1 双环注水试验结果

Table 1 Results of in-situ double-ring water injection infiltration tests

编号	取土深度/m	含水率/%	干密度/ ρ_d / $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	孔隙比 e_0	各粒组 (mm) 质量百分比/%						渗透系数 k / $(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
					—	0.50	0.25	0.075	0.075	—	
PSZ1	0.45	1.9	1.52	0.755	—	4.6	41.1	30.0	24.3	9.87×10^{-3}	
PSZ2	0.45	1.6	1.54	0.739	—	4.0	41.0	38.2	16.8	1.13×10^{-2}	
PSZ3	3.80	4.4	1.60	0.669	0.5	3.6	32.1	24.0	39.8	3.28×10^{-3}	
PSZ4	3.80	4.2	1.62	0.646	—	3.2	28.4	19.3	49.1	4.32×10^{-3}	
PSZ5	0.30	1.7	1.64	0.626	—	4.3	35.1	38.3	22.3	3.85×10^{-3}	
PSZ6	0.40	3.1	1.58	0.689	—	3.2	30.4	34.4	32.0	8.06×10^{-3}	
PSZ7	0.40	3.0	1.54	0.730	—	4.0	34.0	24.2	37.8	1.20×10^{-2}	
PSZ8	0.40	2.0	1.51	0.768	—	3.4	37.7	39.6	19.3	1.02×10^{-2}	
PSZ9	0.35	2.5	1.53	0.743	—	4.1	37.2	33.3	25.4	9.25×10^{-3}	
PSZ10	0.45	2.9	1.54	0.739	—	3.5	35.6	39.8	21.1	8.17×10^{-3}	
DC1-1	0.00	2.8	1.95	0.369	—	—	—	—	—	6.85×10^{-5}	
DC1-2	0.00	—	—	—	—	—	—	—	—	1.36×10^{-4}	
DC2-1	0.00	—	1.92	0.391	—	—	—	—	—	2.17×10^{-4}	
DC2-2	0.00	—	—	—	—	—	—	—	—	1.68×10^{-4}	

2.3 双环注水试验与室内渗透试验结果的对比

为了对比双环注水试验结果与室内渗透试验结果的差异, 在双环注水试验点临近区域取不扰动土样, 采用南-55型渗透仪, 按照《土工试验方法标准》^[12]进行室内变水头渗透试验。对同一孔隙比土样进行 2 组平行试验, 获得标准温度 20℃时天然土层的渗透系数。在测得的结果中取允许误差范围内数值, 求其平均值作为试样在该孔隙比下的平均渗透系数。

双环注水试验与室内变水头渗透试验测定的天然土层渗透系数与孔隙比关系如图 5 所示。由图 5 可知, 现场双环注水试验与室内变水头渗透试验测定的渗透系数与孔隙比的统计关系可采用对数函数拟合, 拟合公式分别如式(2)、式(3)所示。本次通过室内变水头渗透试验测定的渗透系数变化范围为 $1.30 \times 10^{-4} \sim 2.08 \times 10^{-3}$ cm/s, 根据拟合公式计算可以发现, 在同一孔隙比下低于现场双环注水试验结果约 0.5 个数量级。

2.08×10^{-3} cm/s, 根据拟合公式计算可以发现, 在同一孔隙比下低于现场双环注水试验结果约 0.5 个数量级。

$$\ln k = \frac{e_0 - 1.1545}{0.0904}, \quad (2)$$

$$\ln k = \frac{e_0 - 1.1753}{0.0787}. \quad (3)$$

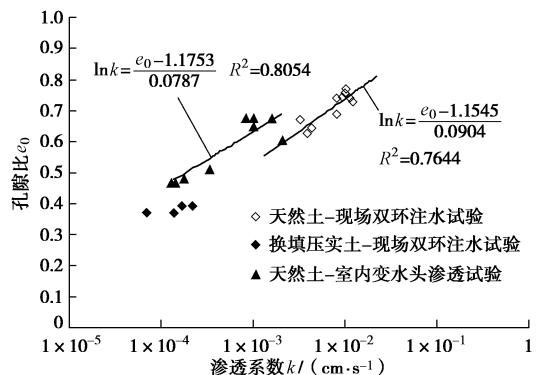


图 5 渗透系数与孔隙比关系

Fig. 5 Relationship between permeability coefficient and void ratio

3 结论

(1) 本文研发的双环注水试验新装置, 弥补了现有试验装置的缺陷, 巧妙地采用了在内环、外环中分别设置两组流量瓶向环内轮换注水, 外接水箱向注空的流量瓶供水的结构设计, 成功解决了高渗透性土体用水量大, 需人工补水, 难以维持试验水头稳定和连续供水等问题。该新装置在渗透性较强的安哥拉 Quelo 砂场地中应用时, 试验过程环内水头高度波动幅度可控制在 2 mm 内, 且注水过程连续, 数据观测直观准确, 因此渗透系数的测试结果更具说服力。

(2) 安哥拉 Quelo 砂天然土层由双环注水试验测定的渗透系数在 $10^{-3} \sim 10^{-2}$ cm/s 数量级, 由室内变水头渗透试验测定的渗透系数在 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ cm/s 数量级, 在同一孔隙比下, 双环注水试验结果高于室内变水头渗透试验约 0.5 个数量级。

参考文献:

- [1] 胡顺军, 田长彦, 宋郁东, 等. 土壤渗透系数测定与计算方法的探讨[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 68~72. (HU Shun-jun, TIAN Chang-yan, SONG Yu-dong, et al. Determination and calculation of soil permeability coefficient[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(5): 68~72. (in Chinese))
- [2] 吴钦孝, 韩冰, 李秧秧. 黄土丘陵区小流域土壤水分入渗特征研究[J]. 中国水土保持科学, 2004, 2(2): 1~3. (WU Qin-xiao, HAN Bing, LI Yang-yang. Characteristics of soil

- infiltration in Watersheds in loess hilly region[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2004, 2(2): 1 - 3. (in Chinese))
- [3] 肖长来, 张力春, 方樟, 等. 洮儿河扇形地地表水与地下水资源的转化关系[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2006, 36(2): 234 - 239. (XIAO Chang-lai, ZHANG Li-chun, FANG Zhang, et al. Research on transform relationship between surface water and ground water in Taoer river fan[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2006, 36(2): 234 - 239. (in Chinese))
- [4] 张毅, 乔良, 曾润强, 等. 基于原位双环渗水试验的堆积层滑坡入渗规律[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2014(5): 666 - 670. (ZHANG Yi, QIAO Liang, ZENG Run-qiang, et al. Rainfall infiltration on colluvial landslides based on in-situ double-ring infiltration test[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2014(5): 666 - 670. (in Chinese))
- [5] 吴火珍, 冯美果, 焦玉勇, 等. 降雨条件下堆积层滑坡体滑动机制分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊 1): 324 - 329. (WU Huo-zhen, FENG Mei-guo, JIAO Yu-yong, et al. Analysis of sliding mechanism of accumulation horizon landslide under rainfall condition[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(S1): 324 - 329. (in Chinese))
- [6] 李朝政, 张永全, 沈蓉. 心墙防渗土料原位渗透与室内渗透试验对比研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(4): 178 - 182. (LI Chao-zheng, ZHANG Yong-quan, SHEN Rong. Research on the comparison between in-situ and indoor permeability test of core impermeable soil[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2015, 13(4): 178 - 182. (in Chinese))
- [7] 华孟, 王坚. 土壤物理学[M]. 北京: 北京农业大学出版社, 1993: 106 - 120. (HUA Meng, WANG Jian. Soil physics[M]. Beijing: Beijing Agricultural University Press, 1993: 106 - 120. (in Chinese))
- [8] 梁学田. 水文学原理[M]. 北京: 水利电力出版社, 2007: 71 - 73. (LIANG Xue-tian. Principles of hydrology[M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 2007: 71 - 73. (in Chinese))
- [9] SL345—2007 水利水电工程注水试验规程[J]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007. (SL345—2007 Code of water injection test for water resources and hydropower engineering[J]. Beijing: China Water & Power Press, 2007. (in Chinese))
- [10] 陈子华, 陈蜀俊, 陈盛健, 等. 土石混合体渗透性能的试坑双环注水试验研究[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(4): 52 - 56. (CHENG Zi-hua, CHEN Shu-jun, CHENG Sheng-jian, et al. In-situ double-ring infiltration test of soil-rock mixture[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(4): 52 - 56. (in Chinese))
- [11] 于永堂, 郑建国, 张继文, 等. 一种双环注水试验装置[P]. 中国专利: ZL 2013 2 0335740.1, 2013. (YU Yong-tang, ZHENG Jian-guo, ZHANG Ji-wen, et al. A new double-ring infiltrometer[P]. Chinese patent: ZL 2013 2 0335740.1, 2013. (in Chinese))
- [12] GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999. (GB/T50123—1999 Standard for soil test method[S]. Beijing: China Planning Press, 1999. (in Chinese))
- [13] GB/T 50145—2007 土的工程分类标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2008. (GB/T 50145—2007 Standard for engineering classification of soil[S]. Beijing: China Planning Press, 2008. (in Chinese))
- [14] GB50487—2008 水利水电工程地质勘察规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009. (GB50487—2008 Code for water resources and hydropower and engineering geological investigation[S]. Beijing: China Planning Press, 2009. (in Chinese))

(本文责编 明经平)