

DOI: 10.11779/CJGE2018S2038

宽级配砾质土防渗性能研究

史 新¹, 庞 康², 李 旭^{*1}, 王新奇³

(1. 北京交通大学城市地下工程教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082;
3. 黄河勘测规划设计有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要: 宽级配砾质土是一种性能良好的防渗料, 然而土体的细粒含量、细粒物理特性、击实功以及颗粒级配等多种因素均对其渗透系数有很大的影响。针对以上因素对宽级配土的渗透系数影响因素展开试验研究。采用不同细粒含量、不同种类细粒部分以及不同级配的宽级配砾质土进行室内变水头渗透试验, 探究这些因素对渗透系数的影响规律。试验结果表明: 宽级配砾质土的渗透系数随着细粒含量的升高先迅速降低后趋于平稳; 随着细粒料液限和塑性指数的增加, 宽级配砾质土的渗透系数逐渐降低; 以粉质黏土和黏土为细粒料的宽级配砾质土的渗透系数均随击实功的增加呈指数函数形式下降; 粗粒料级配连续性越好, 宽级配砾质土渗透系数越低。根据大坝心墙渗透系数小于 1×10^{-5} cm/s 的防渗要求, 提出了以界限含水率和细粒料百分比为控制指标的宽级配土防渗料的控制标准。

关键词: 宽级配砾质土; 最优含水率; 击实功; 界限含水率; 渗透系数; 防渗标准

中图分类号: TU411 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2018)S2-0189-05

作者简介: 史 新 (1993-) 男, 硕士研究生, 主要从事大坝路基防渗料的基本性质研究工作。E-mail: 16121095@bjtu.edu.cn。

Hydraulic conductivity of widely-graded gravelly soils

SHI Xin¹, PANG Kang², LI Xu¹, WANG Xin-qi³

(1. Key Laboratory of Urban Underground Engineering of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Beijing Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100082, China; 3. The Yellow River Survey & Design Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The widely-graded gravelly soil has the potential to serve as an excellent anti-seepage material. However, the content of fine particles, properties of fines, compactive effort and grain-size distribution of coarse materials have great influence on the hydraulic conductivity of the widely-graded gravelly soils. Laboratory experiments are conducted to study the effect of above factors. The hydraulic conductivities of soils with different fines, coarse grains and mix ratios are measured using the variable water head permeability tests. The test results demonstrate that the permeability coefficient of the widely-graded gravelly soils decreases rapidly when the content of fines increases from 0 to 40%, and tends to be stable under higher value. The permeability coefficient decreases with the increase of liquid limit and plasticity index of fines. The permeability coefficient of silt and clay decreases exponentially with the increase of compactive effort. The continuity of the gradation of coarse materials can help to reduce the permeability of soils. According to the requirements of permeability of the core of earth dams, i.e., less than 1×10^{-5} cm/s, the necessary mix ratio and properties of fines are proposed when the widely-graded gravelly soil is used as an anti-seepage material.

Key words: widely-graded gravelly soil; optimum water content; compactive effort; limit water content; hydraulic conductivity; seepage control standard

0 引言

岩土体的防渗需求广泛存在于土木工程的各个领域。传统防渗材料主要包括两类: 黏土和土工膜。土工膜防渗性能好, 但成本高, 并且一旦破损将失去防渗效果且无法修复^[1]。黏土自然经济, 但强度低, 且容易沉降、变形、开裂^[2], 一旦黏土层变形过大, 其

防渗性能将大大降低, 甚至危及结构安全。近年来, 宽级配砾质土防渗层在理论和应用方面都获得了长足

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51479001, 41471052); 国家重点研发计划项目课题 (2017YFC0404803)

收稿日期: 2018-07-22

*通讯作者 (E-mail: cexuli2012@163.com)

的发展,宽级配砾质土已多次成功应用于土石坝工程,代替黏土作为土石坝心墙防渗料取得了良好的防渗效果^[3-5]。在土石坝工程中,利用宽级配砾质土较低的饱和渗透系数进行防渗,作为心墙防渗料,宽级配砾质土要求级配良好,并且需搭配合理的反滤层,其饱和渗透系数应满足小于 $1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 的设计要求。具有一定黏粒含量的宽级配砾质土已被证明是一种工程性能良好,经济实用的防渗材料。保华富^[6]通过室外试验证明当大于 5 mm 粒径砾石含量小于 50%且细粒含量大于 10%时,宽级配砾质土渗透系数能够满足土石坝心墙防渗要求。余挺^[7]认为当天然宽级配砾质土细粒含量偏少、防渗与抗渗性能不能满足要求时,采用剔除粗颗粒调整宽级配砾质土级配、改善其性能是行之有效的措施。另外宽级配砾质土的干燥收缩量比黏土小^[8],而模量高于黏土,在避免干燥开裂和减少工后沉降两个方面,都优于黏土。

综上所述,宽级配砾质土在强度和变形性能方面要远远优于黏土和土工膜,用宽级配砾质土取代黏土或土工膜进行防渗在经济上、工程性能方面都有巨大的优势和广阔的应用前景。保华富^[6]的控制标准过于粗略,不一定在所有情况下都能满足防渗要求,因此,很有必要探究更为合理可靠的宽级配砾质土防渗控制标准。

对于土体的渗透系数来说,细粒部分通常起着决定性的作用。例如著名的哈增公式,指明土体渗透系数和 d_{10} 密切相关。因此,细粒含量应该是渗透系数控制的关键。本文针对宽级配砾质土饱和渗透系数的影响因素进行试验研究,考察了土体的细粒含量、细粒物理特性、击实功以及颗粒级配对其防渗性能的影响。

1 宽级配砾质土最优含水率的计算模型

在用宽级配砾质土作为防渗层时一般都需要对其进行压实。为了节约成本和保证防渗效果,一般选择在最优含水率下进行压实。采用不同细粒含量的宽级配砾质土进行试验,级配设计如表 1 所示,其击实曲线如图 1 所示(由标准轻型击实试验得到)。

表 1 级配设计表

Table 1 Grain size distributions

粒径/mm	A	B	C	D	E	F	G
5	100	100	100	100	100	100	—
2	40	50	55	65	75	80	100
1	30	40	45	55	65	75	95
0.5	25	30	40	50	60	70	90
0.075	10	20	30	40	50	60	80
0.025	6	12	18	24	30	36	48
0.01	0.8	1.6	2.4	3.2	4	4.8	6.4

对于粗细混合料来说,其持水能力主要由细粒料

决定。砂土和黏土混合料达到最优含水率时,其饱和度应该在 0.75~0.9 之间,土体基质吸力应该稍高于混合料进气值。在理想情况下,考虑砂土和黏土的土水特征曲线,此基质吸力和砂土残余值相当,砂土持水能力和其残余含水率接近。同时,此基质吸力也应略高于黏土进气值,黏土持水能力接近其最优含水率。因此对于粗细混合料,其最优含水率将会由细粒土的最优含水率和粗粒土的残余含水率共同决定,从而可以采用以下公式估算其最优含水率:

$$\omega_{\text{opt}} = \omega_1 \cdot \eta + \omega_2 \cdot (1 - \eta) \quad (1)$$

式中: ω_1 为细粒组的最优含水率, ω_2 为砂砾的残余含水率, η 为细粒含量。由图 1 试验结果得到的最优含水率与细粒含量的关系反演分析可得: $\omega_1 = 20.5\%$, $\omega_2 = 5.4\%$, 这和实测的数据一致(实测的细粒组最优含水率 ω_1 为 20.6%, 砂砾的残余含水率在 4%~6% 范围内)。因此,式 1 的估算模型符合物理机理并且应用效果良好。

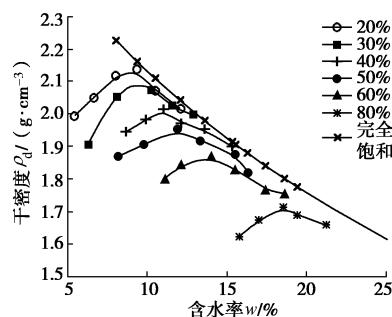


图 1 各级配宽级配砾质土 ρ_d - w 关系曲线

Fig. 1 Compaction curves for gravel soils

2 宽级配砾质土渗流试验方案及方法

细粒含量、细粒物理特性、压实度以及颗粒级配都对渗透系数有较大影响,因此针对以上因素分别设计试验进行研究。

为研究细粒含量对宽级配砾质土渗透系数的影响,分别以粉质黏土和膨润土作为细粒料,掺入不同质量比(0%~90%)的粗粒进行试验,试验结果见图 2。为研究细粒物理特性对宽级配砾质土渗透系数的影响,采用 5 种不同的细粒料(如表 2 所示)进行试验。在 5 种细粒土中分别掺入 0%, 60%, 70% 的粗砂(粒径为 1~2 mm)进行试验,试验结果见表 3。为研究击实功对宽级配砾质土渗透系数的影响,分别对纯细粒土和宽级配砾质土采用 7、14、21、28 击/层(分别对应单位体积击实功 296.1, 592.2, 888.3, 1184.4 kJ/m³)的击实功击实土样,并测量土样的渗透系数。为研究粗粒级配对宽级配砾质土渗透系数的影响,采用 5 种土作为细粒部分,分别掺入 70% 的连续级配的

粗粒土和 1~2 mm 粗砂, 分析粗粒部分级配对混合土饱和渗透系数的影响, 其试验结果如表 4 所示。

试验中的所有土样在式 1 的最优含水率下, 采用相同的击实功 (592.2 kJ/m³) 击实获得, 土样为直径 61.8 mm、高度 40 mm 的圆柱形试样, 采用变水头渗透试验测量饱和土样的渗透系数。试验中采用的细粒料共有 5 种, 其基本物理性质如表 2 所示。采用的粗粒料有粗砂 (粒径为 1~2 mm) 和级配连续的粗粒土 (级配如表 1 所示)。

表 2 细粒料的物理参数一览表

Table 2 Physical properties of fines

细粒料	最大干密度 / (g·cm ⁻³)	最优含水率/%	液限 / %	塑限 / %	颗粒相对密度
风化土	1.31	0.33	50.2	28.3	2.72
红黏土	1.48	0.32	67.5	32.5	2.74
高岭土	1.52	0.24	33.5	22.8	2.68
粉质黏土	1.75	0.18	25.7	17.7	2.70
低液限粉土	1.89	0.15	27.8	15.0	2.75

3 宽级配砾质土防渗性能影响分析

3.1 细粒含量影响分析

由图 2 可知, 当采用粉质黏土为细粒料时, 细粒含量从 10% 增加到 40% 时, 渗透系数减小十分迅速, 在 40% 附近达到最小值, 随后平缓增加。渗透系数出现上述变化的原因是当细粒含量低于 40% 时, 随着细粒含量的增加, 宽级配砾质土由骨架孔隙结构向骨架密实结构过渡, 细粒含量越多, 宽级配砾质土的孔隙比维持在较高的水平, 且细粒含量越多, 孔隙的孔径会减小, 渗流路径会变得迂回曲折, 这些变化会影响渗流速度, 使渗透系数降低。当细粒含量大于 40% 时, 渗透系数略有增加, 这是因为此时宽级配砾质土为密实悬浮结构^[9], 随着细粒含量的增加, 击实变得越发困难, 孔隙率在不断增加, 当宽级配砾质土处于密实悬浮结构时, 粗骨料不会形成骨架, 仅起着减小有效渗透面积的作用, 所以当细粒增加、粗粒减少时, 土

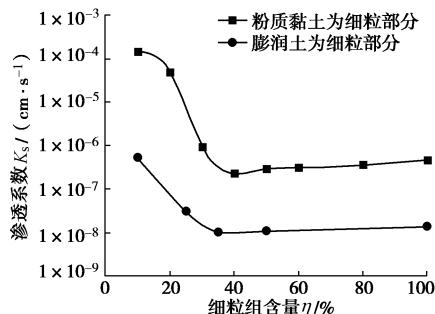


图 2 渗透系数与细粒含量关系曲线

Fig. 2 Relationship between hydraulic conductivity and fines

体渗透系数会有所增加, 但增长幅度不大。同时可以发现当细粒部分为粉质黏土时, 10% 的细粒含量无法保证土体渗透系数小于 $1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 的设计要求。因此保华富^[6]提出的控制标准过于粗略, 并不精确。

类似地, 将膨润土和表 1 中对应级配的粗粒土按照质量比混合, 与粉质黏土作为细粒料时相似, 当膨润土含量超过 30% 左右后, 渗透系数趋于稳定, 与纯细粒土的渗透系数接近。

3.2 细粒物理特性影响分析

塑限和液限反映了黏性土中弱结合水 (扩散层) 开始产生直到弱结合水膜达到最大值的含水率变化过程^[10]。从理论上来说, 细粒土的液塑限越高, 表明其吸附水的能力越强, 因此渗透水流在土体孔隙间的流动受到的黏滞效应越明显, 因而渗透系数就越小。

表 3 不同细粒成分混合土渗透试验结果

Table 3 Results of permeability of soils mixed with various fines

细粒料	纯细粒土	掺 60%粗砂	掺 70%粗砂
风化土	3.7×10^{-7}	4.6×10^{-7}	4.5×10^{-5}
红黏土	1.6×10^{-7}	2.3×10^{-7}	1.1×10^{-6}
高岭土	4.1×10^{-7}	6.5×10^{-5}	2.0×10^{-4}
粉质黏土	4.8×10^{-5}	5.0×10^{-5}	1.6×10^{-4}
低液限粉土	3.6×10^{-7}	6.9×10^{-5}	2.5×10^{-4}

渗透系数和细粒料液塑限之间的关系如图 3 和图 4 所示。总体而言, 随着细粒土液限和塑性指数的提高, 土体的渗透系数呈下降趋势。对纯细粒土来说, 液限在 25 到 30 这个区间段下降最快, 塑性指数从 8 到 11 这个区间段下降最快, 幅度均接近两个数量级, 之后均呈现缓慢下降并逐渐平稳。对于掺入 60% 和 70% 粗砂的宽级配砾质土, 随着细粒土液限和塑性指数的增加, 土体的渗透系数越来越小。因此在工程实践中, 为了降低混合土的渗透系数, 应选用液限和塑性指数更大的细粒土作为防渗料。同时可以发现对于细粒部分是粉土或者粉质黏土时, 混合土渗透系数可能达不到 $1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 的防渗要求。

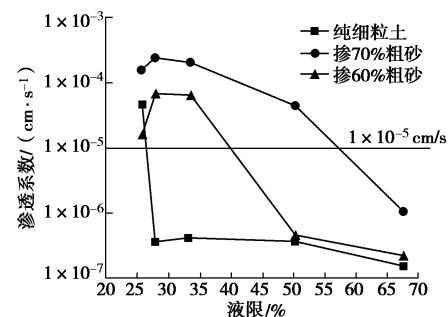


图 3 土体液限与渗透系数的关系

Fig. 3 Relation between liquid limit and permeability

3.3 击实功影响分析

(1) 击实功对纯细粒土渗透系数的影响

不同击实功条件下的纯红粒土渗透系数如图 5 所示, 当击实功达到一定值如 14 击/层时, 提高击实功对纯细粒土的渗透系数影响不大。可能的原因是: 对于纯细粒土, 当击实功达到一定数值, 土体中大孔隙消失殆尽, 土体颗粒之间的距离接近于双电层的厚度^[11]。由于双电层的斥力作用, 难以进一步的压实, 因此土体孔隙结构、压实度趋于稳定, 相应的渗透系数也趋于稳定。

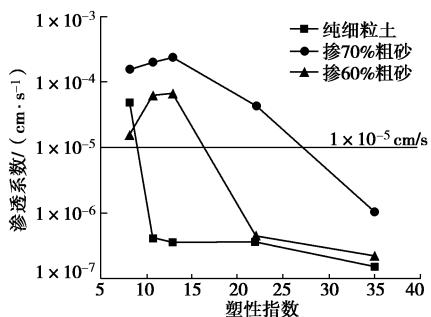


图 4 土体塑性指数与渗透系数的关系

Fig. 4 Relation between plastic limit and permeability

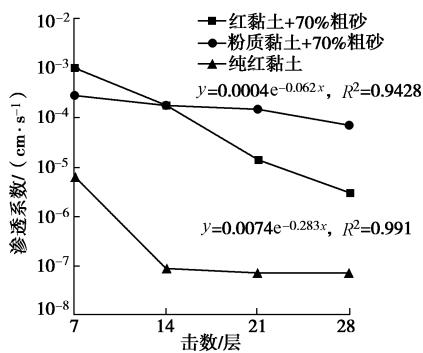


图 5 渗透系数与击实功的关系

Fig. 5 Relationship between permeability coefficient and compactive effort

(2) 击实功对宽级配砾质土渗透系数的影响

不同击实功用下的宽级配砾质土饱和渗透系数试验结果如图 5 所示。对于宽级配砾质土来说, 增加击实功, 土体的压实度增加, 其孔隙比减小, 因而渗透系数变小^[12]。采用指数函数对试验结果进行拟合, 拟合表达式如图 5 中所示。由图 5 可知, 随着击实功的增加, 宽级配砾质土的渗透系数先迅速下降, 当击实功到达一定值后土体达到一定压实度, 渗透系数变化逐渐变缓。同时通过对比可以发现击实功对于细粒部分为黏土的宽级配砾质土远比细粒部分为粉土的宽级配砾质土影响要大。因此, 在工程实践中, 对于土石坝心墙所用的宽级配砾质土应尽量选择黏土作为细粒土, 同时选用合适的击实功进行击实, 这样既能达到很好的防渗效果, 也能有效的降低工程成本。

3.4 粗粒级配影响分析

土的级配对土体渗透性有很大的影响^[13]。对于由 1~2 mm 粗砂和细粒料混合得到的宽级配土, 其土体级配实际是间断的。在其他条件相同的条件下, 级配良好的土相比于级配不良的土, 其孔隙比和孔隙直径都会更小, 因此渗透系数更小。表 4 的试验结果表明: 除红黏土外, 采用其他 4 种细粒料时, 连续级配混合土的渗透系数比间断级配混合土的渗透系数小接近两个数量级, 这充分说明宽级配砾质土粗粒部分的级配对其渗透性能有很大的影响。从微观上来说, 在相同的击实功用下, 连续级配土经过击实, 细颗粒更加饱满地填充于粗颗粒的孔隙中, 土体能达到更大的密实度, 所以防渗性能更好。对于以红黏土为细粒部分的宽级配砾质土来说, 粗粒级配对渗透系数影响不大的主要原因在于: 试验所选的红黏土为广西桂林地区的红黏土, 该地区的红黏土的矿物组成中含有少量的蒙脱石^[14]。由于蒙脱石具有遇水膨胀的性质, 粗粒部分为间断级配对应的土样, 因为含有蒙脱石矿物的红黏土发生膨胀, 因此能够填补间断级配造成的孔隙, 从而使土样比较密实, 最终的渗透系数与连续级配混合土相近。

表 4 粗粒级配与渗透系数的关系

Table 4 Permeability affected by continuity of coarse grains

细粒部分	渗透系数/(cm·s⁻¹)	
	间断级配粗粒	连续级配粗粒
风化土	5.0×10^{-5}	4.0×10^{-7}
红黏土	1.1×10^{-6}	3.9×10^{-6}
高岭土	2.0×10^{-4}	1.2×10^{-6}
粉质黏土	1.6×10^{-4}	1.9×10^{-6}
低液限粉土	2.5×10^{-4}	2.5×10^{-6}

4 宽级配砾质土防渗料设计标准初探

根据以上试验结果和分析可知, 宽级配防渗料对细粒含量有一定要求, 至少要达到 25%~35% 才能满足大坝心墙抗渗要求 ($k_s < 1 \times 10^{-5}$ cm/s), 保华富^[6]论文总结的 10% 细粒含量控制标准并不充分, 可能需要很高的压实功。另外宽级配土中的细粒土液塑限与渗透系数存在很大的关系, 初步得到如表 5 所示, 以细粒土含量及液塑限为标准的宽级配防渗料的级配选用标准。

表 5 土石坝心墙防渗料控制标准建议

Table 5 Recommended values of core materials for earth dam

防渗标准	纯细粒土	掺 40% 细粒的宽级配土	掺 30% 细粒的宽级配土
液限	$w_L > 26\%$	$w_L > 39.6\%$	$w_L > 58\%$
塑性指数	$I_p > 8.8$	$I_p > 16.1$	$I_p > 27.4$

5 结 论

本文的试验研究结果表明:

(1) 宽级配砾质土的细粒含量在30%~40%时, 其防渗性能最佳。当细粒含量 η 小于30%时, 随着 η 的增大, 渗透系数迅速减小, 当细粒含量 η 大于30%时, 渗透系数趋于稳定。

(2) 细粒料的物理特性对宽级配砾质土的防渗性能存在着深刻影响。随着细粒料的液限和塑性指数的增大, 宽级配砾质土渗透系数逐渐下降。为满足土石坝心墙防渗要求, 对纯细粒土来说, 液限应大于26%, 塑性指数应大于8.8; 对掺60%粗砂的宽级配砾质土来说, 液限应大于39.6%, 塑性指数应大于16.1; 对掺70%粗砂的宽级配砾质土来说, 液限应大于58, 塑性指数应大于27.4。

(3) 随着击实功的增加, 宽级配砾质土的渗透系数呈指数函数形式下降。

(4) 粗粒料的连续性对宽级配土的渗透特性也有很大影响, 粗粒料级配连续时的渗透系数可以达到不连续时的1/100。

参考文献:

- [1] FOX P J, ROSS J D, SURA J M, et al. Geomembrane damage due to static and cyclic shearing over gravelly sand[J]. Geosynthetics International, 2011, **18**(5): 272–279.
- [2] DJARWADI D, SURYOLELONO K B, SUHENDRO B, et al. Selection of soils as clay core embankment materials for rock fill dams to resist hydraulic fracturing[J]. Procedia Engineering, 2014, **95**: 489–497.
- [3] 刑新元. 砾石土在瀑布沟大坝工程中的应用[J]. 东北水利水电, 2009, **27**(3): 59–62. (XING Xin-yuan. Application of gravelly soil in Pubugou dam[J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 2009, **27**(3): 59–62. (in Chinese))
- [4] 屈智炯. 宽级配砾质土在土石坝防渗体中的应用及其渗流控制的进展[J]. 水电站设计, 1992(3): 46–53. (QU Zhi-jiong. Application of wide graded gravelly soil in impervious body of earth rock dam and progress of seepage control[J]. Hydropower Station Design, 1992(3): 46–53. (in Chinese))
- [5] 刘忠, 朱俊高, 乔瑞社, 等. 水泥砾质土渗透特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(增刊 1): 101–105. (LIU Zhong, ZHU Jun-gao, QIAO Rui-she, et al. Permeability characteristics of cement-gravel soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(S1): 101–105. (in Chinese))
- [6] 保华富, 尹志伟. 砾质土作为土石坝防渗体的研究[J]. 岩土工程技术, 1999(4): 34–38. (BAO Hua-fu, YIN Zhi-wei. Study on gravelly soil as impervious body of earth rock dam[J]. Geotechnical Technology, 1999(4): 34–38. (in Chinese))
- [7] 余挺. 宽级配砾质土防渗料在高土石坝上的应用[J]. 水电站设计, 2003, **19**(3): 15–17. (YU Ting. Application of wide graded gravelly soil impervious material in high earth rockfill dam[J]. Hydropower Station Design, 2003, **19**(3): 15–17. (in Chinese))
- [8] TAKERI A, SARAKI Y, TATSUOKA F, et al. Strength and deformation characteristics of cement-mixed gravelly soil in multiple-step triaxial compression[J]. Soils & Foundations, 2012, **52**(1): 126–145.
- [9] 陈志波, 朱俊高, 王强. 宽级配砾质土压实特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, **3**(30): 436–447. (CHEN Zhi-bo, ZHU Jun-gao, WANG Qiang. Compaction property of wide grading gravelly soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, **3**(30): 436–447. (in Chinese))
- [10] 廖义玲, 朱立军. 贵州碳酸盐岩红土[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 2004. (LIAO Yi-ling, ZHU Li-jun. Red clay of carbonate rocks in Guizhou[M]. Guiyang: Guizhou People's Publishing House, 2004. (in Chinese))
- [11] 赵成刚, 白冰, 王运霞. 土力学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 北京交通大学出版社, 2009. (ZHAO Cheng-gang, BAI Bing, WANG Yun-xia. Principle of soil mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, Beijing Jiaotong University Press, 2009. (in Chinese))
- [12] WOOD M, MAEDE K. Changing grading of soil: effect on critical states[J]. ActaGeotechnica, 2007, **3**(1): 3–14.
- [13] OLA S A. Permeability of three compacted tropical soils[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology & Hydrogeology, 1980, **13**(2): 87–95.
- [14] 韦复才. 桂林红黏土的物质组成及其工程地质性质特征[J]. 江西师范大学学报(自然版), 2005, **29**(5): 460–464. (WEI Fu-cai. Material compositions and engineering geological properites of Guilin red soil[J]. Journal of Jiangxi Normal University (Natural Science), 2005, **29**(5): 460–464. (in Chinese))

(本文责编 赵小如)