

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2016.05.013

张国栋, 廖爱明, 李泯蒂, 等. 碎石土渗透特性试验研究[J]. 水利水电工程学报, 2016(5): 91-95. (ZHANG Guo-dong, LIAO Ai-min, LI Min-di, et al. Model test studies on permeability of gravel soil[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(5): 91-95.)

碎石土渗透特性试验研究

张国栋^{1,2,3}, 廖爱明^{1,2,3}, 李泯蒂⁴, 邱重阳^{1,2,3}, 徐志华^{1,2,3}

(1. 三峡大学 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学 湖北长江三峡滑坡国家野外科学观测研究站, 湖北 宜昌 443002; 3. 三峡大学 湖北省地质灾害防治工程技术研究中心, 湖北 宜昌 443002; 4. 长江三峡通航管理局, 湖北 宜昌 443113)

摘要: 碎石土渗透系数是渗流分析及边(滑)坡稳定性评价等问题的关键参数。由于碎石土具有非均质性、非连续性以及影响因素多等独特性质, 研究碎石土渗透特性的困难较大。利用大型渗透仪, 试验研究了碎石含量、孔隙比和颗粒级配对碎石土渗透系数的影响规律, 分析了渗流前后颗粒级配变化及其对渗流特性的影响, 以及碎石含量、孔隙比大小对渗流前后颗粒级配变化的影响。结果表明: 碎石含量与渗透系数之间关系符合指数关系; 孔隙比与渗透系数之间的关系符合多项式拟合关系; 特征粒径、不均匀系数和曲率系数与渗透系数之间的关系符合线性拟合关系, 颗粒级配对渗透特性的影响主要是不均匀系数和特征粒径, 曲率系数影响较小; 渗流前后颗粒级配的变化与水力梯度有关。

关键词: 碎石土; 渗透系数; 颗粒级配; 水力梯度

中图分类号: TU411.4; P642.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2016)05-0091-05

碎石土是一种由砾石或碎块石与细粒(粉粒和黏粒)混合而成的特殊土体, 广泛分布于三峡库区及西南地区, 是崩滑堆积滑坡体的重要组成部分。由于含有不同大小、数量和形状的砾石或碎块石, 碎石土渗透性差异较大, 影响渗透特性的因素较多。因碎石土原样取样比较困难, 目前主要利用室内重塑样研究渗透系数的影响因素及变化规律。王俊杰等^[1]研究了颗粒形状、颗粒级配和试样密实度对碎石土渗透系数的影响。周中等^[2]通过正交试验研究了碎石含量、孔隙比和颗粒形状对渗透系数的影响。宋崇辉等^[3-5]研究了颗粒级配和颗粒形状对渗透系数的影响。徐杨等^[6]开展了渗透性现场试坑试验研究, 发现渗透系数随平均粒径与非均匀度的增大而增大。许建聪等^[7]经统计分析, 建立了碎石土含量与渗透系数的经验公式。刘文平等^[8]对三峡库区重庆段滑坡体不同碎石含量粗粒土的渗透参数进行了统计分析。

以上研究成果总体上反映了碎石土渗透系数的主要影响因素, 但对反映颗粒级配特性的不均匀系数和曲率系数对渗透系数影响的研究成果很少, 同时考虑多因素影响的研究成果也较少, 对于渗流前后颗粒级配的变化及其对渗透特性影响的研究成果则更少。因此, 碎石土渗透特性有待进一步研究。

本文利用大型渗透仪, 对三峡库区某滑坡体中的碎石土土样进行渗透特性试验研究, 分析碎石含量、孔隙比和颗粒级配对渗透系数的影响。

收稿日期: 2015-09-20

基金项目: 湖北省自然科学基金创新群体项目(2012FFA040); 湖北省科技支撑计划项目(2013BEC005, 2015BCE038)

作者简介: 张国栋(1968—), 男, 湖北宜昌人, 教授, 博士, 主要从事防灾减灾及防护工程教学科研工作。

E-mail: zgdc@ctgu.edu.cn

1 室内试验方法

1.1 大型渗透仪简介

《土工试验规程》(SL 237—1999)规定粗粒土室内渗透试验采用常水头渗透仪测试。ST30-2A 型大型渗透仪如图 1 所示,该仪器为常水头渗透仪,最大适用粒径为 60 mm,试样尺寸为 $\Phi 300 \times 300$ mm,水头 5 m。试样底部进水,其侧面有水头压力测量开关和排气三通与水位测量排管连接。试样筒的侧面每隔 10 cm 有一个水位测量开关与相应的水位测量排管连接,试样的顶部设有溢水口用于测量渗透流量,溢水压力由顶部的测量管测量。由自来水供给水流,专门的吊桶溢流控制水头压力、用绞车来调整吊桶高度改变水头压力。

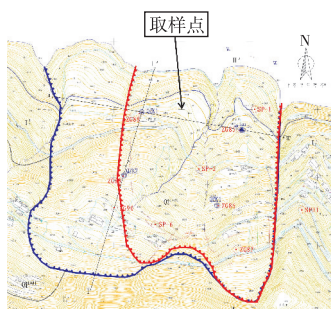


图 1 ST30-2A 型大型渗透仪

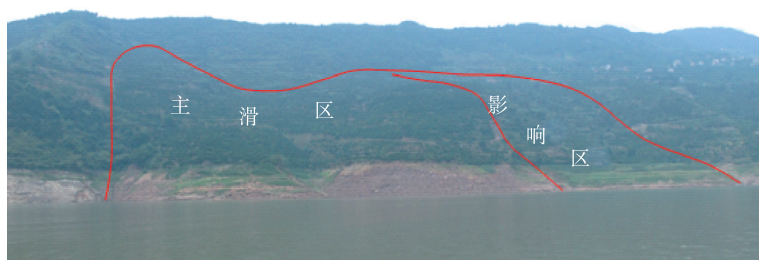
Fig. 1 ST30-2A premaster

1.2 取样及试样制作

三峡库区碎石土的含石量大都在 20%~80%^[9-10],试验取样来自三峡库区树坪滑坡高程 200 m 处(见图 2),从地面调查和钻孔揭露的情况看^[11-12],滑坡体物质主要由紫红色粉质黏土夹碎石组成,碎石成分以泥质粉砂岩为主,棱角状,直径 0.5~30 cm,该层在滑坡区高程 190 m 以上坡表广泛分布,厚 2.5~35.5 m。试验采用重塑样,试样尺寸 $\Phi 300 \times 300$ mm,试样高度 300 mm,分 6 层装样,每层 50 mm,用木锤击实,达到设计的孔隙比。刮平顶面,覆盖无纺布。再放上上透水板、密封胶绳和上压环、顶盖。拧紧顶盖和筒体的连接螺钉。为防止试验时试样向上膨胀,将上盖顶上的两个调整螺钉向下拧,通过上压环将上透水板压紧。



(a) 平面图



(b) 滑坡全貌

图 2 树坪滑坡

Fig. 2 Shuping landslide

1.3 室内试验方案设计

根据岩土工程勘察规范(GB 50021—2011),碎石土中土、石界限粒径为 2 mm。在室内试验中考虑碎石含量、孔隙比、颗粒级配对碎石土渗透特性的影响。孔隙比通过室内试验测试,每组试验(3 个试样)取其平均值。设计方案如下:

(1) 碎石含量与渗透系数关系研究。拟定孔隙比为 0.4,曲率系数 C_c 为 1.21,不均匀系数 C_u 为 30.36,研究碎石含量分别为 80%,70%,60%,50%,40%,30%,20%时碎石土的渗透特性。

(2) 孔隙比与渗透系数关系研究。碎石含量分别为 80%,60%,40%,20%时,拟定曲率系数 C_c 为 1.21,不均匀系数 C_u 为 30.36,研究含石量相同情况下不同孔隙比碎石土的渗透特性。

(3) 颗粒级配与渗透系数关系研究。拟定孔隙比为 0.4,含石量为 60%,研究不均匀系数、曲率系数和特征粒径 d_{20} 对渗透特性的影响。

2 天然碎石土基本物理力学性质

试验所取碎石土天然状态的累计粒径分布见表 1,基本物理力学参数为:天然密度 2.786 g/cm^3 ,体积质

量为 2.682, 孔隙比 0.35, 天然含水率 10.4%, 最大干密度 1.72 g/cm^3 , 饱和含水率 23.2%。以粒径 2 mm 作为土石界定粒径, 该碎石土含石量为 67.9%, 不均匀系数 C_u 为 30.36, 曲率系数 C_c 为 1.21, 综合评定该碎石土样级配良好。

表 1 天然粒度成分累计质量百分比
Tab. 1 Particle sizes of natural gravel soil

粒径 (mm)	100.0	60.0	40.0	20.0	10.0	5.0	2.0	1.0	0.5	0.25	0.1
累计质量百分比 (%)	100.0	95.8	86.3	75.7	63.3	50.4	32.1	25.5	16.3	8.8	4.6

3 试验结果分析

3.1 碎石含量与渗透系数之间关系

碎石含量与渗透系数之间关系的试验结果见图 3。从图 3 可以看出碎石含量越高, 对渗透系数的影响越大。这是因为含石量在 30% 以内, 碎石土以土体为主, 土体内部的碎石局部接触, 渗透系数缓慢增大; 碎石含量超过 30% 后, 随着碎石骨架作用的显现, 渗透系数明显增大, 当碎石含量大于 70%, 碎石骨架完全形成, 渗透系数迅速变大。碎石含量和渗透系数存在指数关系。

3.2 孔隙比与渗透系数之间关系

在碎石含量不变的情况下, 分析滑坡碎石土的孔隙比与渗透系数之间的关系。图 4 为不同碎石含量下渗透系数与孔隙比的关系。从图 4 可见, 当孔隙比从 0.30 增大到 0.45 时, 渗透系数跨越多个数量级, 孔隙比与渗透系数高度正相关。渗透系数与孔隙比的多项式拟合关系较好。

3.3 颗粒级配与渗透系数的关系

渗透系数与颗粒级配有关, 反映颗粒级配特性的参数主要有等效粒径 d_{20} , 不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 。按照上文拟定的试验方案, 得到渗透系数与等效粒径、不均匀系数及曲率系数之间的关系如图 5 所示。从试验结果可以看出, 不均匀系数 C_u 和等效粒径 d_{20} 对渗透系数影响较大 (相关系数达到 0.88 以上), 而曲率系数 C_c 影响相对较小 (相关系数仅为 0.223 8)。颗粒级配对渗透系数的影响主要是 C_u 和 d_{20} 。渗透系数与不均匀系数、曲率系数和特征粒径之间的线性拟合关系较好。

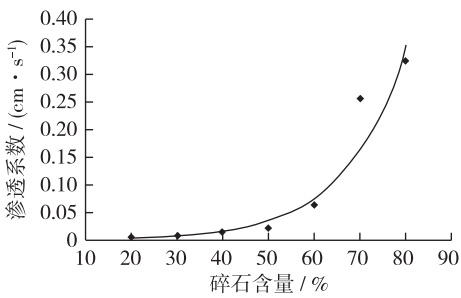


图 3 碎石含量与渗透系数关系曲线 (孔隙比 0.4)
Fig. 3 Fitting curves of gravel content and permeability coefficients (void ratio: 0.4)

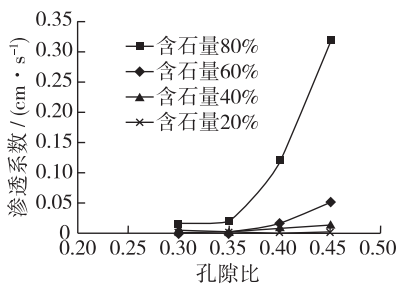


图 4 不同碎石含量情况下孔隙比和渗透系数的关系
Fig. 4 Relationships between void ratios and permeability coefficients

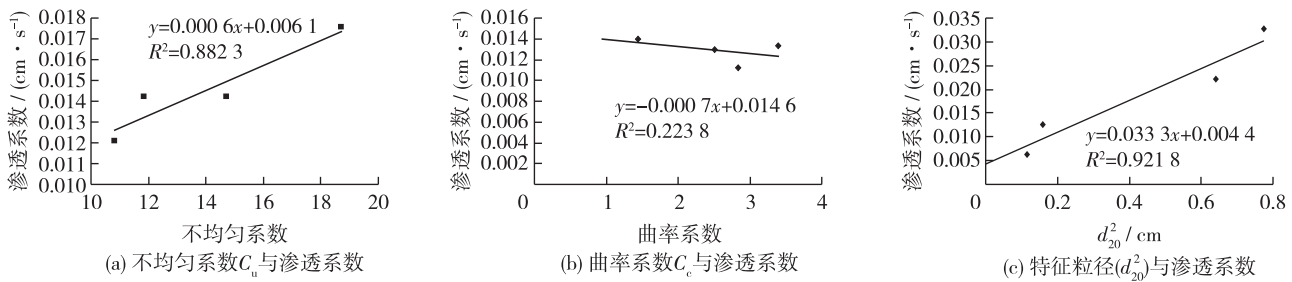


图 5 不均匀系数 C_u 、曲率系数 C_c 、特征粒径 (d_{20}^2) 与渗透系数的关系

Fig. 5 Relationships of nonuniformity, curvature, characteristic particle diameter and permeability coefficients

3.4 渗流前后颗粒级配变化分析

试验发现,当碎石含量小于 70%或孔隙比大于 0.4 时,由于粗颗粒没有完全形成骨架或土的密实度较低,骨架接触不紧密,导致细颗粒被渗流带走,渗流过程中始终伴有细颗粒的流出,渗流出来的水均是浑浊的。当碎石土较密实(孔隙比取 0.30 和 0.35 时)且碎石含量达到 70%以上时,渗透试验过程中,渗流出的水十分清澈,基本没有细粒料流失。分析认为,当碎石含量达到 70%以上时,碎石土由粗颗粒形成骨架,粗颗粒接触紧密,细颗粒填充孔隙,阻止了细颗粒的流失。

对碎石含量为 40%,孔隙比为 0.45 的试样渗出水体收集并烘干后进行筛分,其筛分结果见表 2。当水力梯度很小时,流失的主要为粒径小于 0.1 mm 和粒径为 0.10~0.25 mm 的土,质量分数分别占 68%和 23%;随着水力梯度的增大,粒径为 0.50~1.00 mm 的土开始流失,而 1.00 mm 以上粒径的土无流失现象。分析表明,碎石土的渗透系数随着水力梯度的增大和细粒土的流失而逐渐增大。

表 2 细粒土流失量

Tab. 2 Amount of fine grained soil

水力梯度	流失土的质量百分数/%				
	<0.10 mm	0.10~0.25 mm	0.25~0.50 mm	0.50~1.00 mm	1.00~2.00 mm
1	68	23	9	0	0
2	54	32	14	0	0
3	46	27	21	6	0
4	36	28	24	12	0
5	27	29	28	16	0

4 结 语

(1)通过试验研究了碎石含量、孔隙比、颗粒级配对碎石土渗透系数的影响规律,碎石含量与渗透系数关系符合指数拟合关系,孔隙比与渗透系数符合多项式拟合关系。

(2)不均匀系数 C_u 和等效粒径 d_{20} 对渗透系数影响较大,而曲率系数 C_c 影响相对较小,颗粒级配对渗透系数的影响主要是 C_u 和 d_{20} 。渗透系数与不均匀系数、曲率系数和特征粒径之间的线性拟合关系较好。

(3)渗流前后颗粒级配的变化与水力梯度有关,细粒流失主要是粒径 1.00 mm 以内的土。

参 考 文 献:

- [1] 王俊杰, 卢孝志, 邱珍锋, 等. 粗粒土渗透系数影响因素试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2013(6): 16-21. (WANG Jun-jie, LU Xiao-zhi, QIU Zhen-feng, et al. Experimental studies on influence factors of permeability coefficients of coarse-grained soil[J]. Hydro-Science and Engineering, 2013(6): 16-21. (in Chinese))
- [2] 周中, 傅鹤林, 刘宝琛, 等. 土石混合体渗透性能的正交试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1134-1138. (ZHOU Zhong, FU He-lin, LIU Bao-chen, et al. Orthogonal tests on permeability of soil-rock-mixture [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1134-1138. (in Chinese))
- [3] 朱崇辉, 刘俊民, 王增红. 粗粒土的颗粒级配对渗透系数的影响规律研究[J]. 人民黄河, 2005, 27(12): 79-81. (ZHU Chong-hui, LIU Jun-min, WANG Zeng-hong. Influence of particle size distribution of coarse grained soils on permeability coefficient[J]. Yellow River, 2005, 27(12): 79-81. (in Chinese))
- [4] 邱珍锋, 卢孝志, 伍应华. 考虑颗粒形状的粗粒土渗透特性试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(4): 102-105. (QIU Zhen-feng, LU Xiao-zhi, WU Ying-hua. Experimental research on the permeability property of coarse grained soils considering the particle shape[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(4): 102-105. (in Chinese))
- [5] 邱贤德, 阎宗岭, 刘立, 等. 堆石体粒径特征对其渗透性的影响[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 950-954. (QIU Xian-de, YAN Zong-ling, LIU Li, et al. Effect of particle-size characteristics on seepage property of rock-fill [J]. Rock and Soil

- Mechanics, 2004, 25(6): 950-954. (in Chinese))
- [6] 徐扬, 高谦, 李欣, 等. 土石混合体渗透性现场试坑试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 855-858. (XU Yang, GAO Qian, LI Xin, et al. In-situ experimental study of permeability of rock and soil aggregates[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3): 855-858. (in Chinese))
- [7] 许建聪, 尚岳全. 碎石土渗透特性对滑坡稳定性的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2264-2271. (XU Jiancong, SHANG Yue-quan. Influence of permeability of gravel soil on debris landslides stability[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11): 2264-2271. (in Chinese))
- [8] 刘文平, 张利民, 郑颖人, 等. 三峡库区重庆段滑坡体抗剪及渗透参数研究[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(2): 45-49. (LIU Wen-ping, ZHANG Li-min, ZHENG Ying-ren, et al. Investigation of shear strength and permeability parameters for landslide soils in Chongqing section of Three Gorges reservoir area[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(2): 45-49. (in Chinese))
- [9] 李泯蒂. 三峡库区滑坡碎石土渗透特性研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2014. (LI Min-di. Gravel soil infiltration characteristics research of the Three Gorges area landslides[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2014. (in Chinese))
- [10] 张志华, 张国栋, 李泯蒂. 三峡库区秭归地区某滑坡碎石土岸坡稳定性分析与防治[J]. 水电能源科学, 2014, 32(9): 131-134. (ZHANG Zhi-hua, ZHANG Guo-dong, LI Min-di. Gravel soil slope stability analysis and countermeasures in Zigui area of Three Gorges area, 2014, 32(9): 131-134. (in Chinese))
- [11] 卢书强, 易庆林, 易武, 等. 三峡库区树坪滑坡变形失稳机制分析[J]. 岩土力学, 2014, 35(4): 1123-1130. (LU Shu-qiang, YI Qing-lin, YI Wu, et al. Analysis of deformation and failure mechanism of Shuping landslide in Three Gorges area[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(4): 1123-1130. (in Chinese))
- [12] 三峡库区湖北省秭归县树坪滑坡应急调查报告[R]. 宜昌: 三峡库区地质灾害防治指挥部, 2012. (Emergency investigation report on Shuping landslide in Zigui county Hubei Province[R]. Yichang: Headquarters of the Three Gorges reservoir area geological disaster prevention and control, 2012. (in Chinese))

Model test studies on permeability of gravel soil

ZHANG Guo-dong^{1, 2, 3}, LIAO Ai-min^{1, 2, 3}, LI Min-di⁴, QIU Chong-yang^{1, 2, 3}, XU Zhi-hua^{1, 2, 3}

(1. Collaborative Innovation Center for Geo-Hazards and Eco-Environment in Three Gorges Area, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. National Field Observation and Research Station of Landslides in Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. Hubei Engineering Research Center of Geological Hazards Prevention, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 4. Three Gorges Navigation Authority, Yichang 443113, China)

Abstract: The permeability of gravel soil is a key index for analysis of seepage through gravel soil and stability of slope. The gravel soil has the unique properties of homogeneity, discontinuity and so on, and it is very difficult to study. The studies of influences of gravel content, void ratio and grain composition on the permeability coefficients of the gravel soil have been carried out using a large-size permeameter. The analysis of effects of the gravel content and void ratios on the grain composition was made in the tests of seepage. The test results show that the relationship between the gravel content and the permeability coefficients fits in with an exponential function; the relationship between the void ratios and the permeability coefficients is comformable a multinomial function; and the relationship between the grain composition and the permeability coefficients is a linear one. The effects of the grain composition on the seepage are mainly the non-uniformity coefficients and characteristic particle size, and the curvature coefficients are affected slightly. Before and after seepage through the gravel soil, the changes of the grain composition are related to the hydraulic gradients. The research results can provide an available reference for getting values of the permeability coefficients and for establishing an empirical formula.

Key words: gravel soil; permeability coefficients; grain composition; hydraulic gradient