

粗粒土渗透系数影响因素试验研究

王俊杰, 卢孝志, 邱珍锋, 梁 越

(重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

摘要: 粗粒土的渗透系数大小与土体类型、物质成分、颗粒级配、颗粒形状、密实度等因素相关。通过室内试验研究了土体颗粒形状、颗粒级配和试样密实度对粗粒土渗透系数的影响。采用正交法设计了9组常水头渗透试验, 通过对试验结果进行极差及方差分析, 确定了渗透系数随3种影响因素的变化情况。试验结果表明, 渗透系数随颗粒级配特征值 d_{20} 和曲率系数的增大而增大, 随干密度的增大而减小, 随颗粒球形度的增大而减小。

关键词: 粗粒土; 渗透系数; 颗粒级配; 干密度; 颗粒形状

中图分类号: TU411.4

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2013)06-0016-05

多孔介质可定义为: 复杂孔隙体中骨架由固体承担, 流体可以在相互连通的孔隙中流动的物质空间^[1]。粗粒土是典型的多孔介质。J. 贝尔^[2]在多孔介质流体运动学中写道: 固结物质孔隙率主要取决于胶结度; 而非固结物质的孔隙率主要受颗粒形状、粒径分布和排列方式的影响。渗透系数, 也叫做水力传导系数, 被定义为单位水力梯度作用下通过的单位流量, 反映流体通过孔隙骨架的能力。朱崇辉、王万杰等^[3-4]研究了粗粒土以及河床沉积物的颗粒级配与渗透系数的关系, 指出粗粒土的渗透系数与能够代表颗粒级配特征的不均匀系数之间存在较大的联系, 得出了渗透系数与粒径不均匀系数之间的经验公式; 王铁行、李小伟等^[5-6]研究了不同干密度对非饱和黏土和人工处理的非饱和黄土渗透系数的影响, 得出密实黄土的渗透系数受密度的变化影响较大, 给出干密度与非饱和黄土渗透系数的关系表达式; F. G. Tickell 等^[7]研究了颗粒的棱角性与圆度对渗透系数的影响, 指出颗粒的棱角性越大, 渗透系数越大。可见, 土体的渗透性与土体类型、物质成分、颗粒级配、颗粒形状、密实度等许多因素相关。

本文通过设计正交试验, 研究颗粒形状、颗粒级配以及试样干密度3种因素对粗粒土渗透系数的影响, 分析3种因素对渗透系数的影响程度。

1 正交试验设计

1.1 试验土料

选取3种试验土料, 分别为泥岩破碎颗粒料、卵石料和卵石破碎料。其中, 泥岩取自重庆三叠系上统须家河组地层, 弱风化, 紫红色; 卵石取自枯水季河滩, 球形度较好。各试验土料均按图1所示的3种颗粒级配曲线配制。由图可知, 各试验土料颗粒级配指标不均匀系数 $C_u \geq 5$, 曲率系数 C_c 在1~3之间, 均属级配良好的土体。

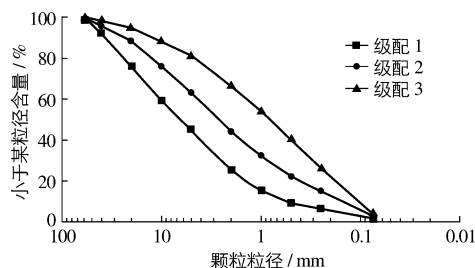


图1 试验土料级配曲线

Fig. 1 Gradation curves of testing materials

收稿日期: 2013-04-29

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划资助课题(2012BAB05B04); 重庆市基础与前沿研究计划项目(cstc2013jcyjA30009; cstc2013jcyjA30006)

作者简介: 王俊杰(1973-), 男, 甘肃陇西人, 教授, 主要从事岩土工程和水利工程相关研究。

E-mail: wangjunjiehu@163.com 通信作者: 卢孝志(E-mail: luxiaozhi@126.com)

1.2 正交试验方案

粗粒土渗透系数受多种因素的影响,如土体类型、物质成分、颗粒级配、颗粒形状、密实度等. 本文仅研究颗粒形状、颗粒级配和干密度 3 种因素的影响,每种因素设计 3 个水平. 若通过控制变量法,考虑所有的因素组合情况,则共有 27 种试验组合. 若采用正交方法设计试验,共需 9 种试验组合(表 1).

表 1 正交试验方案
Tab. 1 Orthogonal test schemes

试验编号	因 素			试验编号	因 素		
	形 状	级 配	干 密 度		形 状	级 配	干 密 度
1	1(卵石)	1(级配 1)	1(1.90 g/cm ³)	6	2	3	1
2	1	2(级配 2)	2(1.95 g/cm ³)	7	3(泥岩)	1	3
3	1	3(级配 3)	3(2.00 g/cm ³)	8	3	2	1
4	2(破碎卵石)	1	2	9	3	3	2
5	2	2	3				

2 试验仪器及试验方法

本试验采用自制渗透仪器,该仪器外部形状为长方体,内部试样尺寸为 200 mm×200 mm×400 mm. 采用常水头饱和法进行试样饱和,为保证土体结构在饱和过程中不受破坏,饱和水头不宜超出试样高度,本文中取 20 mm 的水头为饱和水头. 试验过程中,试验压力水头由氮气源提供,氮气源经过两级压力调节阀调节,经水气交换罐,可以准确控制输出压力水头,输出水头满足试验精度要求.

具体试验步骤如下:(1)将渗透仪水平放置,检查渗透仪上下进出水口是否与外界连通,防止堵塞;(2)将所需要的试验土料按图 1 中的级配取样,加水拌匀并密封;(3)将配好的土样分 3 次填装进渗透仪中,每次填装完成后用击实仪击实,击实完成后表面打毛避免土体分层;(4)制样完成后,加上密封橡胶圈合盖;采用对称法拧紧螺丝,同时将渗透仪立起;(5)打开渗透仪过水阀门,采用常水头法饱和试样;(6)饱和完成后,从 3 kPa 开始,每次增加 1 kPa 逐级加压;(7)每隔 2 min 记录出水质量、孔压传感器数值,重复操作,直至试样破坏.

3 试验结果及分析

3.1 试验结果

按正交试验方案表进行试验,共计 9 组,每组试验均安排 3 组平行试验,记录每组试验时水温 T ,算出对应的平均渗透系数 k_T 并将其换算成水温 20℃ 时渗透系数 k_{20} ,所得结果见表 2.

表 2 正交试验渗透系数
Tab. 2 Permeability coefficients of orthogonal tests

编号	$k_T/(cm \cdot s^{-1})$	$T/^\circ C$	η_t/η_{20}	$k_{20}/(cm \cdot s^{-1})$	编号	$k_T/(cm \cdot s^{-1})$	$T/^\circ C$	η_t/η_{20}	$k_{20}/(cm \cdot s^{-1})$
1	1.297 0	9.0	1.320	1.712 0	6	0.017 0	10.5	1.297	0.022 0
2	0.059 0	9.2	1.326	0.078 2	7	0.093 0	11.3	1.250	0.116 3
3	0.005 0	9.3	1.323	0.006 6	8	0.035 0	10.8	1.268	0.044 4
4	0.744 0	10.0	1.360	1.011 8	9	0.002 0	10.0	1.360	0.002 7
5	0.077 0	11.0	1.261	0.097 1					

3.2 试验结果分析

对试验结果进行处理,通过极差分析,找出各因素对渗透系数影响大小的主次顺序,分清主要因素和次要因素;通过方差分析,将极差分析中由试验误差引起的数据波动和由试验因素改变引起的数据波动区分开,同时考察作用因素的显著性水平. 极差分析和方差分析见表 3 和 4.

表 3 极差分析
Tab. 3 Range analysis

试验编号 及参数	因素				渗透系数
	形状 A	级配 B	干密度 C	空列	$k_{20}/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
1	1	1	1	1	1.712 0
2	1	2	2	2	0.078 2
3	1	3	3	3	0.006 6
4	2	1	2	3	1.011 8
5	2	2	3	1	0.097 1
6	2	3	1	2	0.022 0
7	3	1	3	2	0.116 3
8	3	2	1	3	0.044 4
9	3	3	2	1	0.002 7
K_{j1}	1.796 9	2.840 1	1.778 5	0.216 5	
K_{j2}	1.131 0	0.219 7	1.092 8	1.062 9	
K_{j3}	0.163 4	0.031 4	0.220 0	1.811 9	
$\bar{K}_{j1}$	0.599 0	0.946 7	0.592 8	0.072 2	$K=3.091\ 2$
$\bar{K}_{j2}$	0.377 0	0.073 2	0.364 3	0.354 3	$P=1.061\ 7$
$\bar{K}_{j3}$	0.054 5	0.010 5	0.073 3	0.604 0	$Q=3.986\ 5$
Q_j	1.511 5	2.705 2	1.468 5	1.486 5	
S_j^2	0.449 8	1.643 5	0.406 8	0.424 7	
极 差	0.544 5	0.936 3	0.519 5	0.282 1	$S_T^2=2.924\ 7$

注: K_{j1} 表示*j*列水平1试验值之和; $\bar{K}_{j1}$ 表示对应*K_{j1}*的均值; S_j^2 表示*j*列离差平方和; S_T^2 总离差平方和。

表 4 方差分析
Tab. 4 Variance analysis

方差来源	离差平方和	自由度	均方差	<i>F</i> 值	<i>F</i> 临界值	显著性
形状	0.449 8	2	0.224 8	1.058 9		—
级配	1.643 5	2	0.821 7	3.869 4	$F_{0.25}(2,2)=3$	*
干密度	0.406 8	2	0.203 3	0.957 6	$F_{0.10}(2,2)=9$	—
误差	0.424 7	2	0.212 3		$F_{0.05}(2,2)=19$	
总和	2.924 7	8				

分别选取形状、级配、干密度三因素的 $\bar{K}_{j1}$, $\bar{K}_{j2}$ 和 $\bar{K}_{j3}$ 值作出关于各因素 1,2,3 水平的曲线(图 2)。

由图 2 可见,水平由 1 变至 3 的过程中,形状、级配、干密度关于渗透系数均递减;通过极差分析表可以得出,对于多孔介质水平渗透系数影响程度由主到次分别为颗粒级配、颗粒形状、干密度,即级配对于水平渗透系数的影响最大,干密度和颗粒形状对渗透特性的影响相差不大,影响程度紧随级配之后。由图 2 可知,当选择级配 1、干密度为 1.90 g/cm³ 的天然卵石时,对应渗透系数最大;当选择级配 3,干密度为 2.00 g/cm³ 的泥岩,对应渗透系数最小。所得结果与周中^[8]等人对于土石混合体的渗透研究所得结果相一致,即级配对于渗透系数的影响程度最大。

通过方差分析计算可知,离差平方和中主要离差来自于级配,形状和干密度所产生的离差和误差离差相差均很小,故多孔介质水平渗透系数研究的试验结果的不同是由试验因素不同引起,即试验结果的不同并非来源于试验误差而是来自于试验因素改变;由方差分析表可知,3 种因素对渗透系数的影响程度由大到小

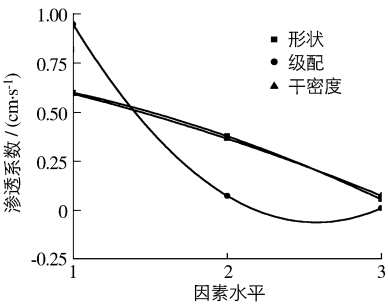


图 2 各因素与渗透系数关系曲线
Fig. 2 Relationships between permeability coefficient and different factors

排列依次为:颗粒级配、颗粒形状、干密度,即级配对于多孔介质水平渗透特性的影响程度较显著,颗粒形状和干密度对渗透特性影响相差不大,均不显著,该结果与极差分析表中所得结果相同。

4 渗透系数影响因素分析

4.1 颗粒级配的影响

自法国工程师达西得出无黏性土的渗透公式达西定律以来,渗透系数 K 的研究一直备受广大学者关注。朱崇辉、王万杰^[3-4]等人指出,渗透系数和土料的级配有关,同时由于等效粒径 d_{20} 与其他特征粒径相比^[9],能更好地反映颗粒大小,土的不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 与颗粒的级配有关,曲率系数 C_c 重在反映颗粒级配的曲线特性,而不均匀系数 C_u 重在反映颗粒的离散程度,故本文选用曲率系数 C_c 和 d_{20} 来代表颗粒的级配和大小,3种级配的粒径特征值如下:级配1: $d_{20}=1.50\text{ mm}$, $C_c=1.44$, $k_T=0.946\text{ 7 cm/s}$;级配2: $d_{20}=0.43\text{ mm}$, $C_c=1.25$, $k_T=0.073\text{ 2 cm/s}$;级配3: $d_{20}=0.20\text{ mm}$, $C_c=1.03$, $k_T=0.010\text{ 5 cm/s}$ 。

可见,渗透系数随等效粒径 d_{20} 和曲率系数 C_c 的增大而增大;同时,拟合渗透系数与 $f(d_{20}, C_c) = d_{20}^2 C_c$ 的关系曲线可得, R^2 为 0.996 3 接近于 1,与周中^[8]等人给出的渗透系数与级配关系的线性表示相一致,验证了该公式的可靠性。

4.2 干密度的影响

根据试验分析中的极差分析和方差分析可知,干密度相对于级配而言,对渗透系数的影响较小,但仍有一定影响;干密度逐渐增大的过程中,渗透系数随着干密度的增大而减少,即试样越密实,其渗透系数越小。

4.3 颗粒形状的影响

张家发等^[1]指出颗粒形状对多孔介质的渗透特性及规律的可能影响因素,并指出量化颗粒形状的几种方法,其中通过圆度误差评定方法选取更能准确反映颗粒形状^[10]。

本文采用球形度作为量化指标,球形度定义为颗粒最小外接圆和最大内切圆直径之比。由定义可知,球形度越小,颗粒形状越接近圆形;球形度越大,颗粒形状越不接近圆、越不规则;标准圆的球形度为 1。在本试验中,以卵石为例,首先获得各个粒径组的卵石图像,从而获得颗粒轮廓图形,得出各图形中球形度并取均值以代表在此粒径范围内的球形度,然后根据级配中各粒径组比例,从而获得该级配下球形度^[11](实际操作中发现卵石各粒径组的球形度相差很小)。依次确定卵石料、卵石破碎料和泥岩破碎料的球形度指标为:1.50, 1.68 和 1.74;对应的渗透系数分别为 0.599 0, 0.377 0 和 0.054 5 cm/s。

可见随着球形度逐渐增大,其对应的渗透系数随之逐渐减小,即颗粒越圆,其渗透系数越大;颗粒越不规则,其渗透系数越小。

5 结 语

通过试验研究渗透系数与级配、颗粒形状以及干密度的关系,得出以下结论:

(1)粗粒土的渗透系数与土体颗粒级配、颗粒形状和干密度等密切相关,相关性由强至弱依次为颗粒级配、颗粒形状、干密度。

(2)粗粒土的渗透系数与 d_{20} 和曲率系数 C_c 均成正相关性,与干密度、颗粒球形度成负相关性,由于本文未考虑相同干密度条件下渗透系数的变化情况,从而忽略了材料自身比重不同的影响,这方面的问题可在今后继续进行研究。

参 考 文 献:

- [1] 张家发,焦赳赳. 颗粒形状对多孔介质孔隙特征和渗流规律影响研究的探讨[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(3): 39-44. (ZHANG Jia-fa, JIAO Jiu-jiu. Influence of grain shape on characteristics of pores and seepage in porous media[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(3): 39-44. (in Chinese))

- [2] J 贝尔. 多孔介质流体运动学[M]. 李竞生, 陈崇希, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983. (BEAR J. Dynamics of fluids in porous media[M]. Translated by LI Jing-sheng, CHEN Chong-xi. Beijing: China Architecture & Building Press, 1983. (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-ming, 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] 王万杰, 束龙仓, 王志华. 河床沉积物渗透系数试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2007(2): 136-138. (WANG Wan-jie, SU Long-cang, WANG Zhi-hua. Experimental study of permeability coefficient of streambed sediment[J]. China Rural Water and Hydropower, 2007(2): 136-138. (in Chinese))
- [5] 王铁行, 卢靖, 张建锋. 考虑干密度影响的人工压实非饱和黄土渗透系数的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(11): 2364-2368. (WANG Tie-hang, LU Jing, ZHANG Jian-feng. Experimental study on permeability coefficient of artificially compacted unsaturated loess considering influence of density[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(11): 2364-2368. (in Chinese))
- [6] 李小伟, 王世梅, 黄净萍. 密度对非饱和粘土渗透系数的影响研究[J]. 西北地震学报, 2011, 33(增刊1): 214-217. (LI Xiao-wei, WANG Shi-mei, HUANG Jing-ping. Influence of density on permeability coefficient of unsaturated soil[J]. Northwestern Seismological Journal, 2011, 33(Suppl1): 214-217. (in Chinese))
- [7] TICKELL F G, HIATT W N. Effect of angularity of grain on porosity and permeability of unconsolidated sands[J]. AAPG Bulletin, 1938, 22(9): 1272-1274.
- [8] 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))
- [9] 刘杰. 混凝土面板坝碎石垫层料最佳级配试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2001(4): 1-7. (LIU Jie. Experimental study of optimum gradation of crushed stone cushion for concrete-face rockfill dam[J]. Hydro-Science and Engineering, 2001(4): 1-7. (in Chinese))
- [10] 范淑果, 郝宏伟, 杜皓. 选择圆度误差评定方法的体会[J]. 计量与测试技术, 2009, 36(10): 28-30. (FAN Shu-guo, HAO Hong-wei, DU Hao. Impressions on choosing evaluating method of roundness error[J]. Metrology & Measurement Technique, 2009, 36(10): 28-30. (in Chinese))
- [11] 刘清秉, 项伟, M. Budhu, 等. 砂土颗粒形状量化及其对力学指标的影响分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊1): 190-197. (LIU Qing-bing, XIANG Wei, BUDHU M, et al. A study of particle shape quantification and effect on mechanical property of sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Suppl1): 190-197. (in Chinese))

Experimental studies on influence factors of permeability coefficients of coarse-grained soil

WANG Jun-jie, LU Xiao-zhi, QIU Zhen-feng, LIANG Yue

(National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: The permeability coefficients of coarse-grained soil are closely related to soil types, material composition, grain composition, particle shapes and density. Based on laboratory tests, the effects of particle shapes, grain composition and density on the permeability coefficients of the coarse-grained soil have been studied. In order to analyze these influencing factors, nine groups of constant head experiments are designed by use of orthogonal test approaches. The influences of three factors on the permeability coefficients of the coarse-grained soil are determined by range analysis and variance analysis. Research results show that the permeability coefficients are increased with increasing of grain composition characteristic value d_{20} and increasing of curvature coefficient C_c , and decreased with increasing of dry density and increasing of sphericity.

Key words: coarse-grained soil; permeability coefficients; grain composition; dry density; particle shape