

碎石土高压渗透特性研究

李伟 张嘉沧

沈阳建筑大学土木工程学院

DOI:10.12238/bd.v8i2.4136

[摘要] 随着水资源的开发利用和筑坝技术的提升,越来越多的超高水坝被建成并投入使用。人们常采用在高土石坝心墙防渗料中加入碎石的方法,在对其渗透性影响较小的前提下,增强其压缩性及强度。以往对碎石土渗透特性研究的试验通常是在普通应力状态下,但其在工程中的实际状态与理论上的状态并不完全符合。所以本文依托于高压三轴试验系统,对碎石土在高围压环境下的渗透特性进行试验分析。研究了相同渗透压下,围压与渗透系数的关系。试验结果表明在渗透压不变的情况下,渗透系数随着围压的增大而减小,并且符合指数函数关系。

[关键词] 碎石土; 高压三轴试验; 渗透系数; 高围压

中图分类号: TL51 **文献标识码:** A

Experimental Study on High Pressure Permeability Characteristics of Gravel Soil

Wei Li* Jialun Zhang

School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University

[Abstract] With the development and utilization of water resources and the improvement of damming technique, more and more high earth-rockfill dam have been built and put into use. The method of adding gravel to the core wall material of high earth-rock dam is often used to enhance its compressibility and strength under the premise of little effect on its permeability. The current study of gravel-soil permeability is conducted under the usual stress state. However, the actual state of gravel-soil in engineering is not completely consistent with the theoretical state. Therefore, relying on the high pressure triaxial test system, this paper analyzes the permeability of gravel-soil under high confining pressure environment. A series of penetration tests are performed under high cell pressures to research the relationship between osmotic pressure and permeability coefficient under the same high cell pressure, the correlation between cell pressure and permeability coefficient under the same osmotic pressure, the relationship between gravel-soil grain composition, fine-grained soil content and permeability coefficient under the same cell pressure and osmotic pressure. The results show that when the osmotic pressure is constant, the permeability coefficient decreases with the increase of cell pressure and the relationship between cell pressure and permeability coefficient filed the exponential function.

[Key words] gravel-soil; high pressure triaxial test; permeability coefficient; High cell pressure

我国目前各类水库大坝众多,其中土石坝占90%以上。前苏联的努列克水利枢纽始建于1961年,坝高达到300m,国内的大渡河双江口水利枢纽作为砾石土心墙堆石坝,坝高更是达到了314m。《岩土工程勘察规范》中将粒径大于2mm的颗粒含量超过全重50%的土定义为碎石土。这种土含有粒径大于5mm的粗粒和小于5mm的细粒,同时具备粗粒土和细粒土的特点,强度高,压缩性低,透水性小。所以为了可以在不影响渗透性的情况下减少高土石坝心墙的压缩性,人们常在其防渗料土中掺入碎石,形成碎石土。王寿根^[1]等通过大量室内试验,验证了碾磨水电站大坝采用碎石土做心墙防渗料的可行性。刘杰^[2]等通过对瀑布沟砾石土的试验判定,小于5mm的颗粒

含量大于35%、小于1mm的颗粒含量大于18%的砾石土即可作为高土石坝的防渗体使用。李鹏^[3]采用花岗岩破碎料对双江口特高心墙堆石坝的防渗土料进行改良。付伟^[4]等认为印尼Jatigede大坝的碎石土防渗心墙料的制备是大坝安全的核心。常利营^[5]等采用ABAQUS有限元软件预测了两河口心墙堆石坝中碎石土粗粒含量对其的影响,为心墙土料分区利用提供了参考。

大量试验表明,在不同应力状态下,孔隙介质的渗透特性会有明显的不同。Tomlison^[6]等研究粗粒土管涌破坏时发现,粗粒土渗透稳定性随围压的增大而减小。王凤波^[7]等为探究围压与混凝土渗透性之间的关系,对混凝土进行了高压渗透试验,试验

结果表明，随着围压增大，混凝土的渗透系数减小，并且围压和渗透系数呈非线性关系。Zoback^[8]等对渥太华砂和花岗岩破碎颗粒进行了高压条件下的渗透特性分析，结果表明高围压会使其渗透性发生改变。Geoffrey^[9]认为渗透系数随围压的变化而发生变化的原因是土骨架和水所受的作用力不同，使土骨架坍塌，进而影响了渗透系数。

综上所述，围压的升高会对孔隙介质的渗透特性造成一定影响，当碎石土在实际工程中作为高土石坝心墙的防渗料使用时，会令其处在一个高围压的环境中。以往对碎石土的渗透特性研究都是在通常应力状态下，因此对碎石土进行高围压下渗透特性的试验研究具有较强的理论和现实意义。本文依托于高压三轴试验系统，对重塑碎石土进行不同围压下的室内渗透试验，从而总结出围压对碎石土渗透性的影响。

1 试验仪器与设计

1.1 高压三轴试验系统简介

本试验应用的高压三轴试验系统由英国GDS公司开发，可以测算出岩石土体在不同应力条件下的力学性能和渗透特性。本系统由VIS荷载架、三轴压力室、围压和反压控制部件、计算机、压力室升降系统五部分组成。

虚拟无限刚度荷载架（VIS荷载架）对于特定试样尺寸，轴向加载系统可以表现出无限刚度的性质。VIS荷载架可以通过数显操控板设置目标压力、加载速度，从而控制底座升降。GDS公司生产的三轴压力室适用于高压试验条件，由于本试验系统中用到的压力室是使用荷载架来加载轴向荷载的，所以也称之为被动压力室。围压和反压控制部件通过充水和排水来对试样加载和卸载目标围压和反压。本试验系统由基于Windows系统的计算机和GDSLAB软件进行控制。运用GDSLAB软件可实现试验前期试样尺寸和类型的设置、试验过程中轴向荷载和围压、反压的设置以及试验后数据的观察分析与保存。

1.2 试验设计

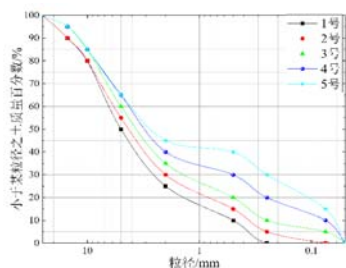


图1 颗粒级配曲线

本试验选用天然河砂作为试验材料，由于天然碎石土物理性质无法控制，所以试验开始前利用标准筛，将烘干的河砂筛分为7组不同粒径范围的砂土，用于后期重塑碎石土试样。根据土工试验标准，在110℃恒温下，对砂样进行8h的烘干，待砂土自然冷却1h后，对材料进行筛分。作为决定土的性质的一项重要指标，土的颗粒级配分析方法包括筛分法和水分法，由于本试验土颗粒粒径相对较大，所以选用筛分法对颗粒级配进行分析。为使试验结果更加具有

代表性，在满足碎石土的基本定义的条件下，根据试验需求，设计出5组不同配比的试样，5组土样的颗粒级配曲线，如图1所示。

其作为评定土体渗透特性的重要指标，土的不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c ，有如下计算公式：

土的不均匀系数为 C_u

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

土的曲率系数为 C_c

$$C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} \times d_{60}}$$

式中 d_{10} 为有效粒径，表示小于该粒径的土颗粒质量占总质量的10%； d_{30} 称为中值粒径表示小于该粒径的土颗粒质量占总质量的30%； d_{60} 为控制粒径表示小于该粒径的土颗粒质量占总质量的60%；

各组试样的级配情况，见表1，由表1可见，1、2、3号试样同时满足 $C_u \geq 5$ 且 $C_c = 1 \sim 3$ 的条件，所以1、2、3号试样为级配良好的土。4、5号试样曲率系数小于1，不能同时满足上述的两个条件，即为级配不良的土。

表1 试样级配

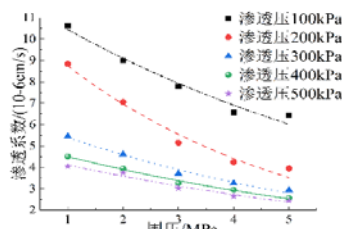
试样编号	有效粒径 d_{10}	中值粒径 d_{30}	控制粒径 d_{60}	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	级配情况
1	0.500	2.608	6.261	12.52	2.17	良好
2	0.345	2.000	5.726	16.60	2.02	良好
3	0.250	1.497	5.000	20.00	1.79	良好
4	0.075	0.500	4.265	56.86	0.78	不良
5	0.032	0.250	4.172	130.38	0.47	不良

2 试验结果分析

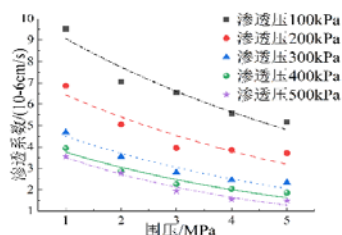
针对围压与碎石土渗透性关系这一问题，本试验在渗透压不变的情况下，分析其在1MPa、2MPa、3MPa、4MPa、5MPa时的渗透系数可知，在渗透压不变的情况下，渗透系数随着围压的增大而减小。采用指数函数的形式来描述土样渗透系数与围压之间的关系：

$$y = k_0 \exp(ax)$$

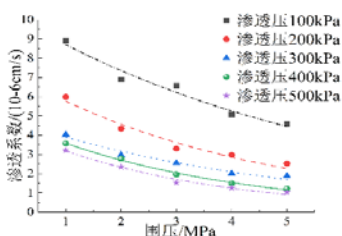
式中， y 为土样渗透系数， k_0 为初始渗透系数； a 为常数； x 为围压。



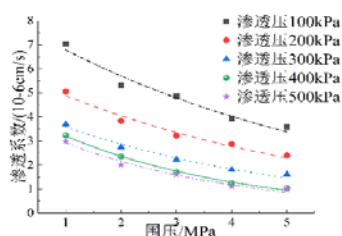
(a) 1号试样



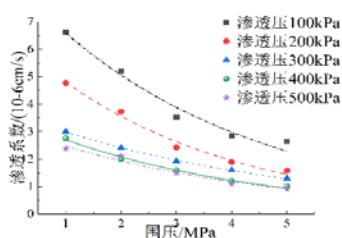
(b) 2号试样



(c) 3号试样



(d) 4号试样



(e) 5号试样

图2 围压和渗透系数的关系拟合曲线

根据试验数据可以得出试样在渗透压不同时的渗透系数与围压的拟合曲线如图2所示, 拟合优度 R^2 值接近1。

3 结论

在渗透压不变的情况下, 碎石土的渗透系数会随着试验围压的增大而减小。碎石土渗透系数与围压拟合结果成功, 即碎石土在高围压条件下的渗透系数与围压呈负指数关系。产生此种规律的原因是由于碎石土内部土颗粒形成的土骨架随着围压的增大, 相当于在土体外部施加约束力, 约束力造成了土骨架结构的改变, 骨架之间孔隙体积变小, 从而影响了其抗渗性能。

参考文献

[1]王寿根. 碾磧水电站大坝碎石土防渗料工程特性及土料设计[J]. 中国工程科学, 2004, (07): 88-93.
 [2]刘杰, 谢定松. 砾石土渗透稳定特性试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(09): 2632-2638.
 [3]李鹏. 双江口水电站特高心墙堆石坝建设关键技术研究[J]. 水电与新能源, 2020, 34(02): 1-9.
 [4]付伟, 丁显庚, 任明海. 印尼Jatigede大坝碎石土心墙料拌制设备的改进及工艺创新[J]. 四川水力发电, 2022, 41(5): 18-20+48.
 [5]常利营, 叶发明, 陈群. 砾石土粗粒含量对高土石坝稳定渗流的影响[J]. 水利水电工程学报, 2021, (04): 61-67.
 [6]Tomlinson S S, Vaid P Y. Seepage forces and confining pressure effects on piping erosion[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(1).
 [7]王凤波, 宋汉周, 曹朝雷. 围压作用下混凝土渗透性初步研究[J]. 人民长江, 2011, 42(24): 58-60+72.
 [8]Zoback D M, Byerlee D J. Effect of high-pressure deformation on permeability of Ottawa Sand[J]. GeoScienceWorld, 1976, 60(9).
 [9]Blight E G. Unsaturated Soil Mechanics in Geotechnical Practice[M]. Taylor and Francis; CRC Press: 2013-07-16.

作者简介:

李伟(1968—), 男, 蒙古族, 辽宁沈阳人, 博士, 硕士研究生导师, 从事岩土工程方面的教学与研究工作。