

砂介质渗透性影响因素的试验研究

高宗军, 丁子祺, 刘久潭, 刘文悦

Experimental study on the influencing factors of permeability of sand media

GAO Zongjun, DING Ziqi, LIU Jiutan, and LIU Wenyue

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202404025>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

漳滏平原漏斗区地下水溶解性总固体演变特征研究

Evolution characteristics of total dissolved solids in the groundwater level funnel area in the Hufu piedmont plain

张希雨, 张光辉, 严明疆 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 72-81

压实黄土水分入渗规律及渗透性试验研究

An experimental study of water infiltration and hydraulic conductivity of the compacted loess

张镇飞, 倪万魁, 王熙俊, 苑康泽, 潘登丽, 刘魁 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 97-104

荷载条件下原状与重塑泥岩渗透性试验研究

An experimental study of the permeability of undisturbed and remolded mudstones under the loading condition

王炳忠, 王起才, 张戎令, 薛彦瑾, 崔晓宁, 卓彬 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 123-123

砂土地基冲击碾压加固效果影响因素的试验研究

Laboratory investigation on influencing factors of improvement effect of rolling dynamic compaction on sand

陈忠清, 朱文韬, 吕越, 黄曼, 李明东 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 128-134

利用电导率测井与压水试验联合评价岩体渗透性的方法

Method of evaluating the permeability of rock mass by the combination of packer test and flowing fluid electrical conductivity log

张必昌, 胡成, 陈刚, 张, 段丹丹 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 62-62

非均匀多孔介质等效渗透率的普适表达式

A universal expression of the equivalent permeability of heterogeneous porous media

张东, 刘晓丽, 王恩志 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 35-42



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202404025

高宗军, 丁子祺, 刘久潭, 等. 砂介质渗透性影响因素的试验研究 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(6): 8-17.

GAO Zongjun, DING Ziqi, LIU Jiutan, et al. Experimental study on the influencing factors of permeability of sand media[J].

Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(6): 8-17.

砂介质渗透性影响因素的试验研究

高宗军, 丁子祺, 刘久潭, 刘文悦

(山东科技大学地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 达西试验是砂介质渗透性能的主要确定方法。但是受到砂介质粒度与压实度、水的溶解性总固体(TDS)与水头差、试验温度等多种因素的影响, 获得的达西试验结果存在巨大差异, 给实际应用造成很大的不确定性。为探究不同条件下达西试验产生的不同结果, 在常温常压环境下, 选择不同砂介质, 开展不同温度、TDS、供排水水头差等情况下的试验。结果表明: (1)水温增高, 渗透系数增大, 渗透性越好的介质, 受温度的影响越显著; (2)TDS 增高, 渗透系数减小, 渗透性好的介质, 渗透性随 TDS 呈对数函数或指数函数变化, 即水在低 TDS 变化时引起的介质的渗透性变化剧烈, 反之亦然, 而渗透性差的介质, 渗透性随着 TDS 增高近似呈线性减小; (3)供排水水头差增加到一定值时, 渗透系数不再恒定, 临界雷诺数细砂为 0.4, 中砂为 3.3; (4)压实度越高, 渗透系数越小; (5)孔隙度相同时, 粒径越大则渗透系数越大。本试验结果将为今后渗透系数的获取、应用提供借鉴, 为地下水评价、地质灾害防治等水文地质参数选取提供依据。

关键词: 达西试验; 渗透系数; 温度; 溶解性总固体; 供排水水头差; 压实度; 砂介质粒度

中图分类号: P641.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)06-0008-10

Experimental study on the influencing factors of permeability of sand media

GAO Zongjun, DING Ziqi, LIU Jiutan, LIU Wenyue

(College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology,
Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: The Darcy test is the primary method for determining the permeability of sand media. However, factors such as particle size and compaction of the sand medium, differences between the total dissolved solids (TDS) and the head of the water, and the test temperature, leading to great differences in the results of the Darcy test, cause great uncertainty to the practical application. To explore the variability in Darcy's test results under different conditions, different sand media were selected under normal temperature and pressure, and tests were carried out considering varying temperatures, TDS, and poor water supply and drainage heads. The results show that the higher the water temperature, the higher the hydraulic conductivity, the better the permeability, and the more significant the influence of temperature. Higher TDS decreases the permeability. In media with high permeability, changes in hydraulic conductivity due to variations in TDS follow a power or exponential function, with low TDS causing drastic changes, while for poorly permeable media, hydraulic conductivity decreases linearly as TDS

收稿日期: 2024-01-08; 修订日期: 2024-03-19

投稿网址: www.swd zgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41641022)

第一作者: 高宗军(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水工环地质方面的研究。E-mail: zongjungao1964@163.com

increases. When the difference between water supply and drainage head reaches a certain value, the hydraulic conductivity is no longer constant, with the limit Reynolds number of 0.4 for fine sand and 3.3 for medium sand. The higher the degree of compaction, the smaller the hydraulic conductivity. when the porosity is the same, the larger the particle size, the greater the hydraulic conductivity. The test findings provide valuable information for the acquisition and application of hydraulic conductivity in the future, and also provide a basis for the selection of hydrogeological parameters such as groundwater evaluation and geological disaster prevention.

Keywords: Darcy's test; hydraulic conductivity; temperature; total dissolved solids; poor water supply and drainage head; degree of compaction; penetration medium particle size

岩土渗透性,是指岩土透过水或其他流体的性能^[1-4]。渗透系数也称水力传导率,是表征水在岩土中渗透性的指标^[5-7],是确定水库渗透量、进行地下水资源计算、开展溶质运移规律研究等不可或缺的重要的水文地质参数^[8],是解决绝大多数地下水流动问题的前提条件^[9-10]。1856年法国工程师达西通过试验得出达西定律(Darcy's law)^[11-14],其表达式为:

$$Q = KA \frac{H_1 - H_2}{L} = KAJ \quad (1)$$

式中: Q ——渗透流量/($\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$);

K ——渗透系数/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$);

A ——过水断面的面积/ cm^2 ;

H_1, H_2 ——上下游过水断面的水头/ cm ;

L ——上下游过水断面的距离/ cm ;

J ——水力坡度。

自然环境中渗透介质和流体千变万化,达西试验的结果与实际情况通常存在差异^[15-16]。前人已对达西试验结果影响因素做过部分研究工作。经验表明,水的状态影响着渗透系数。姜伟男等^[17]以典型砂介质为研究对象,配制不同盐度的NaCl溶液,采用室内常水头试验,定量分析盐度变化对渗透介质渗透系数的影响。众多学者^[18-22]系统研究了水力梯度对渗透系数的影响,研究表明渗透系数与水力梯度呈负相关关系。陈四利等^[23]发现水泥土和软岩的渗透系数均随着温度增加而逐步增大;水泥土在海水环境下的渗透系数大于同温度的清水环境。

砂介质状态亦对渗透系数的变化有至关重要的作用。李龙飞^[24]对不同粒径砂样及2种不同粒径按照不同的质量比混合后的砂样进行渗流试验,研究岩土颗粒粒径大小及其质量比对渗透性的影响,确定了基于渗透性的岩土粒径临界值。韩立伟等^[25]和Radford等^[26]通过试验证明了压实后渗透介质密度明显增大,渗透系数显著降低。李华等^[27]和张镇飞等^[28]对不同干密度压实黄土进行试验研究,发现渗透性曲线与基

质吸力的关系,证明了渗透系数与孔隙分布密切相关,孔隙越多渗透性越强。与此同时,丁瑜等^[29]对93组粗粒土全级配研究发现孔隙比与渗透系数呈正相关关系,且对渗透系数的影响大于其他粒径特征;相同级配的粗粒土随孔隙比变化可使渗透系数产生数量级跨越。

为了系统讨论多个因素的影响效果并进行对比研究,作者基于传统达西试验原理^[30],改进达西试验装置,通过调节供水室高度改变供排水头差,选择3种砂介质即细砂、中砂、粗砂,分别开展改变水温、溶解性总固体(total dissolved solids, TDS)、供排水头差和压实程度的试验,并对结果进行对比分析,验证中细砂的雷诺上限问题,将对今后渗透系数的获取、应用提供借鉴,为地下水评价、地质灾害防治等水文地质工作中参数选取提供依据。

1 试验装置与材料方法

1.1 达西试验仪

与传统的达西试验仪相同,试验装置包含供水、渗透、测压、排水4部分(图1),所不同的是采用了可变水头的供水装置,可较大程度地提高供排水的水头差。

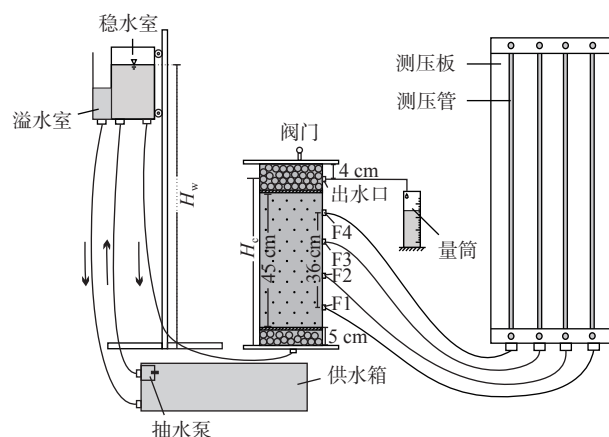


图1 达西试验装置

Fig. 1 Darcy test device

(1) 供水部分

由可垂向升降的稳水室、溢水室和含抽水泵的供水箱组成。稳水室底部与渗透圆筒底部进水口相连, 稳水室水面到渗透圆筒底部距离为稳水室水位高度(H_w)。当水泵入稳水室后, 部分水进入渗透圆筒, 多余的部分进入溢水室, 再流入供水箱, 形成循环, 以确保稳水室的水头稳定, 即保持每次试验供水的水头不变。每次试验, 均测量稳水室的高度。

(2) 渗透部分

采用有机玻璃砂柱圆筒装满砂介质, 本次试验采用 3 种不同粒径的砂。圆筒内直径 15 cm, 上部设有排气阀门, 底部设有进水口。圆筒壁侧设有出水口和间距均为 12 cm 的 4 个测压孔 F1、F2、F3、F4, 每个测压孔用胶管连接测压板上相应的测压管。

(3) 测压部分

在测压板上设置 4 条玻璃测压管, 每条测压管旁设有标尺, 下端口分别用胶管与砂柱圆筒上对应的测压孔 F1、F2、F3、F4 连接。

(4) 排水部分

包括砂柱圆筒右侧的出水口及量筒。出水口至渗透装置底部进水口之间距离为 53 cm, 称为出水口中心的水位高度(H_c), 故 $H_c=53$ cm。

出水口设有旋钮, 借此可以控制出水量。测量某时间段内出水口的流量即为观测流量(Q_c), 出水口流量除以时间即为单位时间流量, 简称渗流量(Q)。渗流量除以圆筒横截面积, 即可得出渗透流速(v)。

稳水室水位与砂柱圆筒出水口的中心水位之间的水头差, 称为供排水间的总水头差(H), 即 $H=H_w-H_c$ 。通过上下移动稳水室高度, 可调节供排水间的总水头差。

1.2 试验用砂属性

石英砂物理化学性质稳定, 渗透性良好, 故本次试验将细、中、粗 3 种粒径的石英砂作为试验材料, 用圆孔标准筛进行筛分, 分别得到 0.10 ~ 0.25 mm、0.25 ~ 0.50 mm、0.50 ~ 2.00 mm 共 3 个粒径(d)区间, 得到试验所需的 3 种砂样, 见表 1。

表 1 试验用砂介质参数

Table 1 Sand media parameters used for the test

砂介质类型	粒径/mm	一般捣实程度的质量/g
细砂	$0.10 \leq d \leq 0.25$	13 414
中砂	$0.25 < d \leq 0.50$	13 543
粗砂	$0.50 < d \leq 2.00$	13 673

1.3 试验方法

为探究不同条件下达西试验产生的不同结果, 在

常温常压下的室内实验室中, 对不同粒径的砂介质开展不同温度、TDS、供排水水头差等试验。

(1) 先将砂样用稀盐酸浸泡, 再用清水反复冲洗并烘干。装样前在砂柱顶、底部滤板上铺一层 5 cm 厚的粒径为 2 cm 的玻璃球, 覆以纱网, 防止砂样泄漏。将砂样称重后, 按照每 3 ~ 5 cm 一层均匀铺入圆筒, 直至装满渗透装置并用捣棒捣实。砂柱高度 45 cm。

(2) 确定稳水室高度, 打开抽水泵, 调节进水量, 确保稳水室呈溢水状态; 敞开圆筒顶部排气阀门, 水流入圆筒进水口后, 自下而上饱和砂样; 确认圆筒气体排净、充满水后, 关闭圆筒顶部排气阀门; 打开测压管止水夹, 去除胶管内的气泡; 观察所有测压管水位, 若在同一水平面上, 即可开始试验。

(3) 调节出水口阀门, 控制不同的出水口水量, 待稳定后, 读出测压板的水头值。

(4) 重复上述步骤, 开展多次试验, 测定出不同温度、TDS、水头差、捣实程度与砂样粒径的渗透流量及水头差。

为确保数据的可靠性, 本次试验采取以下措施。每种试验分别进行 3 次, 取平均值以减小误差; 在每次进行不同 TDS 的试验前, 先用待试验盐度的盐水反复冲洗砂柱, 并测定排出水的 TDS, 当排出水的 TDS 与试验用盐水相同时, 再进行试验。不同温度的情况不好处置, 实验室环境温度在 18 ~ 25 °C 之间, 砂柱圆筒不具有隔热功能, 因而散热效应会使得其进水口温度与出水口温度存在温度差。温度高时, 温差达到 5 ~ 8 °C, 这是本次试验不能排除的误差所在。为使进水口与出水口温度的温差最小, 采取保持进水水温稳定的情况下, 进行较长时间、最大流量排水, 当出水口温度达到稳定后, 读取流量及测压水位值, 之后逐次减小流量再进行试验。为保证数据一致性, 本次试验采用的温度值, 均为出水口温度, 特作说明。

2 试验结果与分析

本试验采用细、中、粗 3 种砂介质, 过水断面面积(A)为 176.625 cm²。因试验过程中, 4 个测压孔的压力差一直保持线性关系。故如无特指上下游过水断面距离均为 F4 与 F1 的距离, 即渗透途径(L)为 36 cm, 计算水力坡度采用的水头差(ΔH)为 F4 与 F1 对应的测压管的水头差:

$$J = \frac{\Delta H}{L} \quad (2)$$

$$K = \frac{Q}{\Delta H} = \frac{Av}{LJ} \quad (3)$$

式中: v ——渗流速度/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$);

ΔH ——水头差/cm。

2.1 水温的影响

对于某一种砂介质, 在某种试验温度时, 读取最大出水量及其对应的各个测压管的水位, 然后逐次减少出水量, 见图 2。

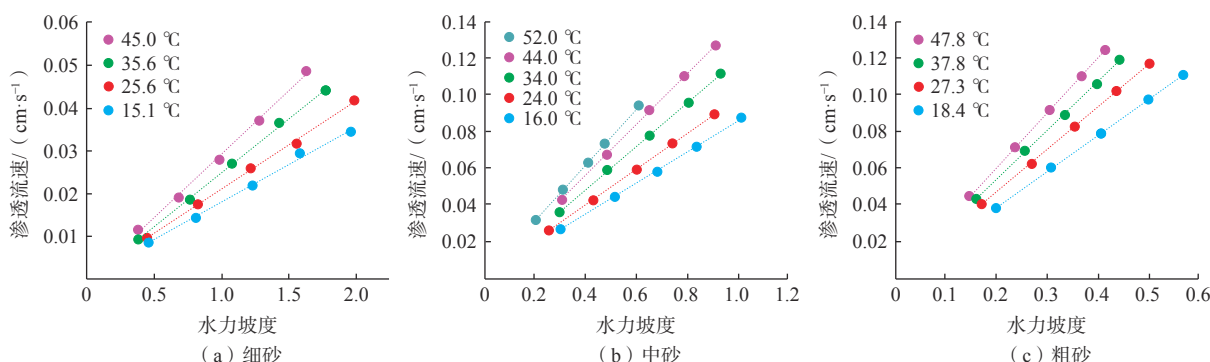


图 2 不同温度下水力坡度与渗透流速的线性关系

Fig. 2 Linear relationships between hydraulic gradient and seepage flow rate at different temperatures

可以看出, 同一温度条件下, 细、中、粗砂介质渗透流速均随水力坡度增大而升高, 且呈良好线性关系, $R^2 > 0.99$ 。由此得出, 水温升高, 可增加砂介质渗透性。这与水的黏滞性随温度升高而降低所得出的结论是一致的。图 2 中水力坡度与渗透流速的线性关系的斜率是渗透系数, 与温度的对应关系见图 3。砂介质渗透系数亦随增温而升高, 且温度变化时, 不同砂介质的渗透系数均随之发生了变化, 但变化程度不同。

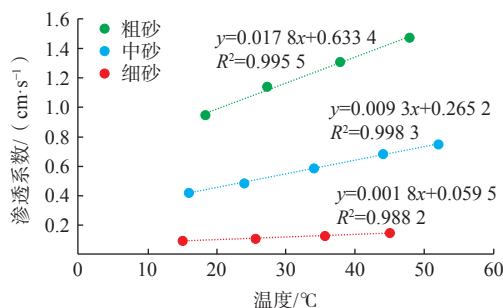


图 3 不同砂介质温度与渗透系数的线性关系

Fig. 3 Linear relationships between temperature and hydraulic conductivity of different sand media

对 3 种砂介质情况进行对比发现, 粗砂在温度升高时, 渗透系数与温度的线性关系斜率最大, 渗透系数变化最明显, 即温度对其渗透性影响最大, 温度从 18 °C 升高到 48 °C 增加了大约 0.5 cm/s 。细砂渗透系数随升温增加缓慢, 从 15 °C 升高到 45 °C 仅增加大约 0.05 cm/s 。中砂介于两者之间。

由此得出, 砂介质越粗, 渗透流速变化速率越快, 即粗砂时, 温度的影响比细砂更强烈。换言之, 渗透

性好的介质比渗透性差的介质随温度变化的趋势更为显著, 且温度在 15 ~ 60 °C 之间变化时, 渗透系数与温度的变化是线性的。

2.2 TDS 的影响

为了对比 TDS 对砂介质渗透性的影响, 本试验在常温、标准大气压下由低到高改变 TDS 浓度, 针对细、中、粗砂分别设置了 7 组不同 TDS 的水进行试验, 见图 4。

可以看出, 水力坡度越大、砂介质越粗、TDS 越小, 渗透流量越大, 水的渗透性越强, 反之亦然。不论砂介质粗细, TDS 变化对渗透流速的影响均是线性反比的, TDS 越高, 渗透流速越小。线性关系的斜率即为其渗透系数。TDS 及其对应渗透系数的关系, 见图 5。

可以看出, 每种砂的渗透系数也是随着水的 TDS 的变化而变化, 但是其变化趋势与温度的影响有差别。粗砂和中砂在 TDS 较低时引起的渗透系数的变化要大于高 TDS 的情形。

当为细砂介质时, 随 TDS 由低到高, 渗透系数近似均匀减小, TDS 从 0.346 g/L 升高至 150.4 g/L, 渗透系数从 0.1114 cm/s 降低至 0.0719 cm/s 。经回归分析, 两者呈线性相关关系, $y = -0.003x + 0.11$ (y 为渗透系数, x 为水的 TDS), $R^2 = 0.9276$ 。

当为中砂介质时, 随 TDS 的升高, 渗透系数先快速下降, 在 TDS 升高至 30 g/L 时, 渗透系数下降速度开始减小, 关系曲线趋于平缓。经回归分析, 两者呈幂函数关系 $y = 0.7151x^{-0.096}$ (y 为渗透系数, x 为水的 TDS), $R^2 > 0.99$, 说明函数关系拟合得很好。

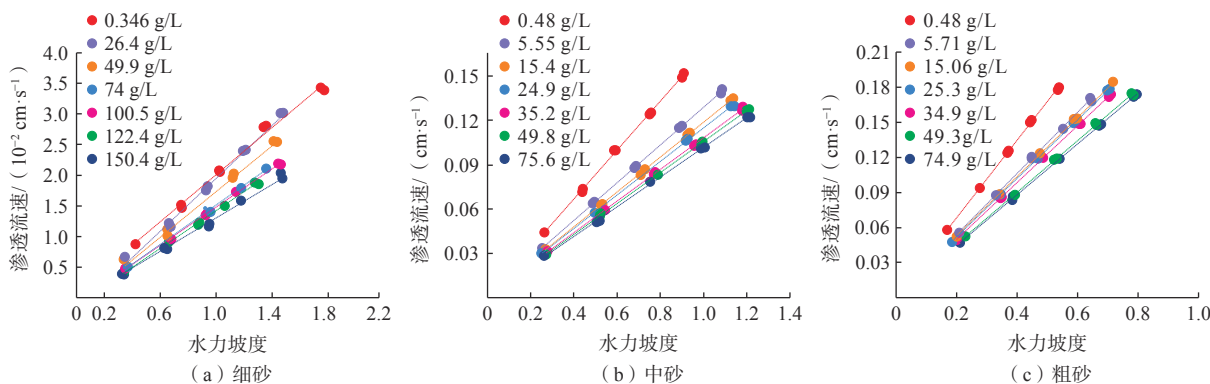


图 4 不同 TDS 水的水力坡度与渗透流速的线性关系

Fig. 4 Linear relationships between hydraulic gradient and seepage flow rate of water with different salinity

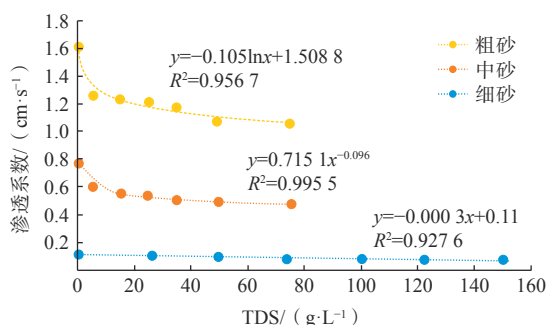


图 5 不同砂介质 TDS 与渗透系数的关系曲线

Fig. 5 Relationship curves between salinity and hydraulic conductivity in the different sand media

当为粗砂介质时,低 TDS 时,渗透系数随 TDS 的升高而下降的速度比中砂时更快,当 TDS 达到 60 g/L 时,渗透系数变化才趋于平稳,由试验数据回归分析生成的关系函数更倾向于对数函数 $y = -0.105\ln x + 1.5088$ (y 为渗透系数, x 为水的 TDS), $R^2 = 0.9567$ 。

综上, TDS 增加砂介质渗透性减弱。对于不同砂介质,渗透系数变化趋势存在差异:粗砂介质渗透性最好, TDS 变化引起的渗透性改变是非线性的,近似于对数函数,低 TDS 时更敏感,高 TDS 时趋平缓;细砂介质渗透性最差, TDS 变化对细砂介质渗透性的影响趋近于线性,渗透系数始终低于 0.2 cm/s;中砂介质的变化情况介于两者之间。

2.3 供排水水头差的影响

由上可知,水温和 TDS 都对砂介质渗透性有影响,尽管存在多种差异,但水力坡度与渗透流速之间一直存在很好的线性关系,即符合达西定律。

受到条件限制,试验中温度(出水口温度)没有超过 60 °C, TDS 保持在 150 g/L 以下,对于更高温度和更高 TDS 的情况,本次没有设计相应的试验。与之不同的是,供排水水头差的变化对渗透性改变的试验,

超出了达西定律所规定的线性范围。

前已述及,本次试验装置(图 1)的砂柱圆筒的出水口位置高度固定不变,但作为供水的稳水室是可以上下移动的,即稳水室水位和供排水间总水头差是变化的。

本次试验用水是低 TDS 的常温(室温)水,采用了与上述相同的细、中、粗 3 种砂。每次试验,均固定稳水室高度,然后通过改变出水口流量,并读取对应测压水管水位,计算水力坡度和渗透流速,两者关系见图 6。

每种砂的渗透流速亦随水力坡度的增大而增大,其中细砂变化最快,中砂变化幅度居中,粗砂最慢,变化速度比大致为 28 : 6 : 1,在未超出达西定律规定范围内呈现良好线性关系。但在细砂和中砂的关系曲线的右上端,均出现了不规则的混乱点,其渗透流速不再随着水力坡度的增大而线性增大,图 6(b)与图 6(c)分别为细、中砂渗透流速变化异常的局部放大图。在供排水水头差的变化对渗透性影响试验中,对于变化敏感的细、中砂,水头差增大到一定程度,超出了达西定律所规定的线性范围,此时再增大供排水水头差,渗透流速不再发生规律性变化,渗透系数也不再是一个常数。

2.4 压实度的影响

砂柱圆筒体积是不变的,但是人工捣实程度加重,可增加砂粒压实度。本次利用充满砂柱圆筒所需要的砂粒的质量表征压实度,显然用砂量越多,其压实度越大。细、中、粗 3 种砂质量变化与渗透系数的关系曲线,见图 7。

砂粒质量越大,压实度越高,其渗透系数越小,两者呈显著的负增长关系;砂介质越粗,线性关系中斜率的绝对值越大,反之亦然;所用砂质量相同时,砂介

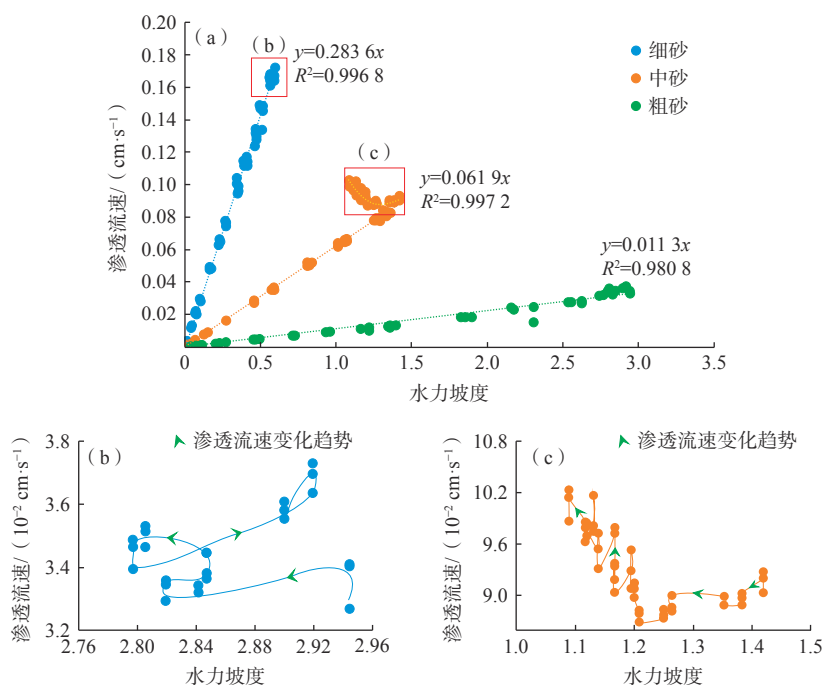


图6 不同供排水水头差条件下水力坡度与渗透流速的关系

Fig. 6 Relationships between hydraulic gradient and seepage flow rate under different water supply and drainage head differences

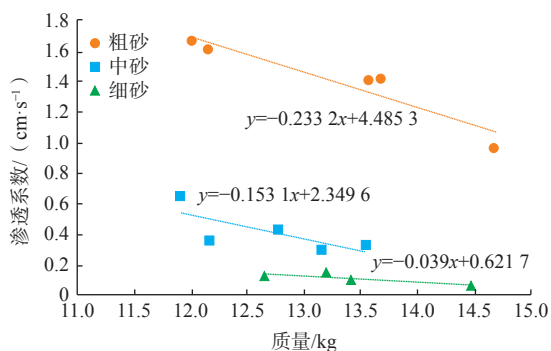


图7 不同砂介质压实度与渗透系数的线性关系

Fig. 7 Linear relationships between the degree of compaction and the hydraulic conductivity of different sand media

质越粗,介质的渗透系数越大,说明压实度相同时,粗砂的有效孔隙度比细砂大,见图8。

从微观角度分析,压实度越高,颗粒排列越紧密,孔隙及孔隙度均越小。而孔隙大小,对于砂介质滞留、释出及传输水的能力影响很大。如图8所示,孔隙边缘分布结合水层,中间为重力水。结合水一般不流动;临近结合水层的重力水,因隙壁吸引流动缓慢;越远离介质颗粒,水质点运动速度越快。对砂介质进行压实操作后,孔隙直径变小,水质点平均流速变小,渗透性变差。可以预见,当孔隙直径等于或小于结合水厚度两倍时,介质导水性能将几乎丧失,砂介质甚至出现良好的隔水性能。

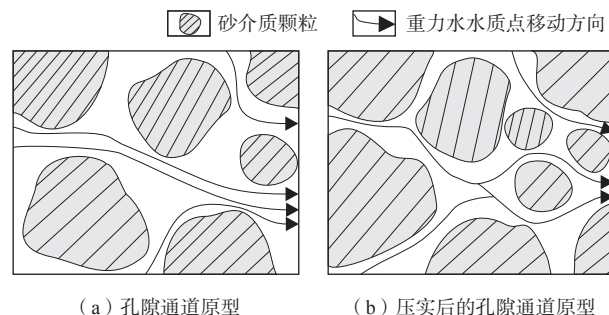


图8 水流在压实后的砂介质中的运动状态模型

Fig. 8 Model of motion state of water flow in a compacted sand medium

2.5 砂介质粒径大小的影响

根据上述对温度、水头差、TDS和砂介质压实度对渗透系数的影响分析可以看出,砂介质粒径是影响渗透性的主要因素之一,砂介质粒径越大,砂介质越粗,试验变量变化越明显。

试验所用细、中、粗3种砂样,通过圆孔标准筛,得到砂样粒径区间分别为0.10~0.25 mm、0.25~0.50 mm、0.50~2.00 mm,试验用砂量由于捣实程度不同而不同。砂样圆筒总体积为7948.125 cm³,由填充砂的质量可求出其干密度(ρ_d),利用由比重瓶法测定的各粒径区间砂土颗粒的相对密度(ρ_s),即可计算出孔隙度(n),见表2:

$$n = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \quad (4)$$

众所周知,等径颗粒砂的孔隙度只与其排列方式有关,与粒径大小无关。不等粒砂的孔隙度大小与其分选性、排列方式等多个因素有关。本次试验采用 3 个粒级的砂样,都是市场通用的分选性较好的“近等粒”砂,即可以近似地认定为等径颗粒砂样。同一种砂人工捣实强度不同,压实度不同。颗粒排列方式变化,引起的孔隙度存在 0.3~0.5 倍的差异,而渗透性却产生 2~3 倍的差异。

究其原因,应该与孔隙大小有关。孔隙度相同或相近的等径砂介质内部包含的孔隙体积相同或相近,但是砂粒间孔隙尺寸却随着粒径的增大而增大,相应孔隙数量减少,见图 9。由此看出,平均孔隙尺寸的增大,使得允许水通过的断面增大;孔隙数量的减少,使得水绕流的路程缩短;两者效应的结果,水头损失降低,单位时间的渗流量增大,渗透系数增大。

表 2 各粒径级砂介质的相关参数

Table 2 Relevant parameters of graded sand media of each particle size

砂介质类型	粒径/mm	质量/g	干密度/(g·cm ⁻³)	相对密度/(g·cm ⁻³)	孔隙度/%
细砂	0.10≤d≤0.25	12 634	1.590	2.665	40.35
		13 192	1.660		37.72
		13 414	1.688		36.67
		14 475	1.821		31.66
中砂	0.25<d≤0.50	11 914	1.499	2.657	43.58
		12 171	1.531		42.37
		12 771	1.607		39.53
		13 151	1.655		37.73
粗砂	0.50<d≤2.00	13 543	1.704	2.630	35.87
		12 005	1.510		42.57
		12 152	1.529		41.87
		13 569	1.707		35.09
		13 673	1.720		34.59
		14 673	1.846		29.81

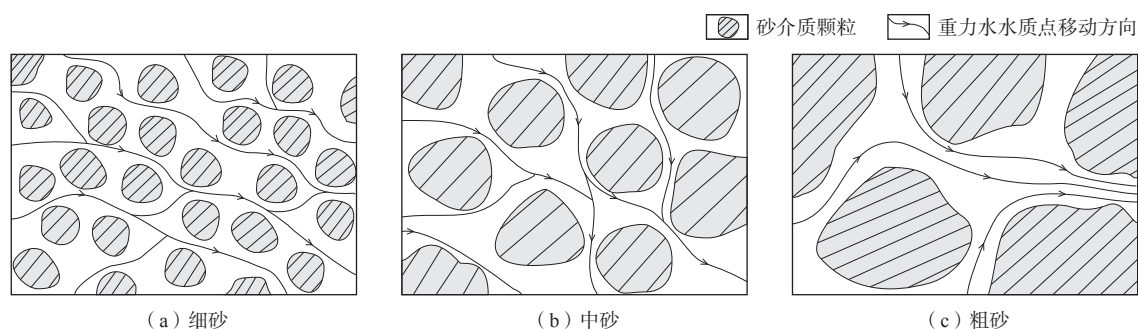


图 9 水在不同粒径砂介质中的运动状态模型

Fig. 9 Models of the water motion state in a sand medium with different particle sizes

不同孔隙度与试验测得的渗透系数,见图 10。可以看出:同一粒径,渗透系数随孔隙度增大而增大;不同粒径之间,尤其是在相同压实度情况下,孔隙度差别不大,渗透系数却显著不同,粒径越大,渗透系数明显增大。当渗透系数相同时,粒径越小,孔隙度越大,反之亦然。

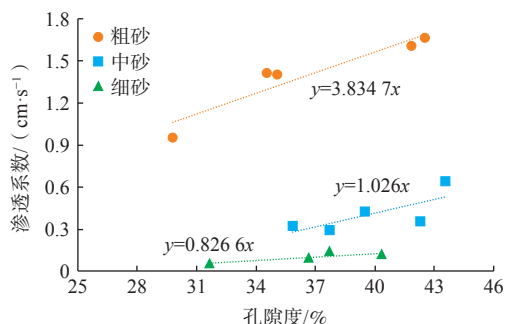


图 10 不同砂介质的渗透系数与孔隙度的线性关系

Fig. 10 Linear relationships between the hydraulic conductivity and the porosity in different sand media

3 讨论

当介质为细砂时,稳水室高度(H_w)达到 223 cm、供排水水头差(H)为 170 cm 时,测压孔 F1~F4 间水头差开始下降,水力坡度也开始下降,渗透流速先缓慢下降、而后盘桓上升。随着 H_w 继续升高、 H 继续增大,测压孔 F1~F4 间水头差出现波动,水力坡度与渗透流速随之波动,呈现不规则的螺旋式的变化,见图 6(a)。

当介质为中砂时,稳水室高度达到 193 cm、供排水水头差为 140 cm 时,测压孔 F1~F4 间水头差从 51.1 cm 开始下降,水力坡度从 1.419 4 cm/s 开始下降,但渗透流速先是波动,而后缓慢增加。当 H_w 达到 233 cm、 H 为 180 cm 时,测压孔 F1~F4 间水头差下降了 11.9 cm,渗透流速在这期间升高了 0.009 6 cm/s,达到 0.102 3 cm/s,见图 6(b)。

细、中砂的供排水水头差与相应的平均渗透系数

的关系, 见图 11。渗透系数的值在出现异常前为一常数, 数值上等于渗透流速与水力坡度的关系直线的斜率, 细砂为 $1.13 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$, 中砂为 $6.19 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 。但当供排水水头差达到一定值以后, 渗透系数的值发生

波动和变化, 总体呈现急剧增加, 其趋势依然呈现良好线性增加。也就是说, 异常出现前, 渗透系数不受供排水水头差影响; 异常出现后, 渗透系数的值随着供排水水头差的增加而增加。

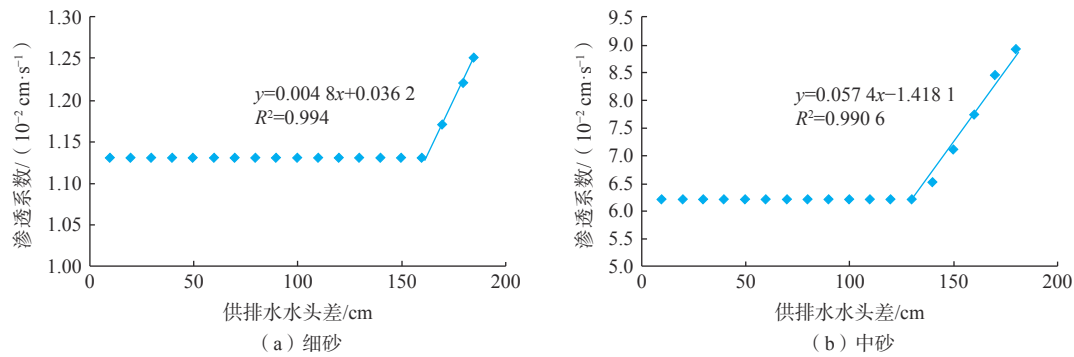


图 11 细、中砂渗透系数随供排水水头的变化
Fig. 11 Changes of the hydraulic conductivity in the fine and medium sands

通常认为, 当水流流线相互平行时, 渗流可以看作层流, 此时渗流运动规律符合达西定律, 雷诺数 Re 为小于 1~10 之间的某一数值。

本次试验用砂选用标准实验室用石英砂, 因此可将砂介质看作理想的等径圆球颗粒, 其平均粒径近似地视为圆球粒直径(D)。众所周知, 当颗粒为立方体排列时, 其最大空隙($d_{\max}$)为 $0.732D$, 其最小空隙($d_{\min}$)也达到 $0.414D$; 颗粒呈其他排列方式时, 其最大最小空隙将相应减小, 以四面体排列为最小。但是自然界里通常既不是四分体排列也不是四面体排列, 所以将平均粒径的一半($0.5D$)作为空隙的大小。雷诺数表达为:

$$Re = \frac{v\theta}{\mu} = \frac{Q\theta}{A\mu} \tag{5}$$

式中: θ ——多孔介质中颗粒的有效通过孔隙;

μ ——水的运动黏性系数/($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)。

试验中, 环境温度保持在 $18 \sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$, 水温与环境温度基本一致, 因此水的运动黏性系数取 $0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$ 。

经计算分析发现, 细砂在雷诺数 $Re \geq 0.4$ 时出现紊乱, 中砂在雷诺数 $Re \geq 3.3$ 时出现紊乱。细砂与中砂在试验中出现的异常情况, 是由于渗透流速达到了达西定律所遵循的临界条件造成的。水流从线性运动变为非线性运动, 进一步向紊流过渡。

4 结论

(1)在常压下, 随着温度升高, 砂介质渗透系数逐步增大, 且渗透性越好, 升高的速度越快。

(2)在常温常压下, 随着 TDS 增大, 砂介质渗透系

数变小。渗透性好的介质, 其渗透系数随 TDS 呈幂函数或指数函数变化, 即在低 TDS 变化时引起的介质的渗透系数的变化剧烈, 反之亦然; 而渗透性差的介质, 渗透性随着 TDS 的增高近似呈线性减小。

(3)同一种砂介质在常温条件下, 供排水水头差增大, 给予的水压能量变大, 渗透流速逐步增大, 但渗透系数增速产生波动或在某区间内保持不变。本次测定出细砂临界雷诺数为 0.4, 中砂临界雷诺数为 3.3。

(4)砂介质的粒径和压实度亦是渗透系数重要影响因素之一, 同一粒径砂介质压实度越高, 渗透系数越低, 导水性能下降; 不同粒径砂介质, 孔隙度相同时, 粒径越大渗透系数越大。

水和砂介质的状态对渗透性的影响十分复杂。本次试验研究存在一些不足: 本次试验仅涉及了 3 种粒径的砂, 其他粒径或不同粒径组合的砂的情况, 有待进一步试验验证; 本试验根据达西试验的原理, 设计采用了供水稳水室高度可变、但仍然是恒定供排水水头差的类达西试验装置, 简单直观, 但未能减少人为的误差对试验结果的影响。尤其是装置没有隔热功能, 变化温度的试验存在的误差较大, 今后可以设计更为精密的试验进一步验证。

参考文献 (References) :

[1] 伍艳, 王玮屏, 任海平, 等. 水-土作用对土体渗透系数的影响研究 [J]. 水文地质工程地质, 2011, 38(6): 39-43. [WU Yan, WANG Weiping, REN Haiping, et al. Experimental studies of coefficient of permeability of soil

- affected by water-soil interactions[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2011, 38(6): 39 – 43. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 杨博, 张虎元, 赵天宇, 等. 改性黄土渗透性与孔隙结构的依存关系 [J]. *水文地质工程地质*, 2011, 38(6): 96 – 101. [YANG Bo, ZHANG Huyuan, ZHAO Tianyu, et al. Responsibility of permeability of modified loess soil on microstructure[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2011, 38(6): 96 – 101. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 杨靖, 汪吉林. 砂性土渗流的分形特征研究 [J]. *煤田地质与勘探*, 2010, 38(2): 42 – 45. [YANG Jing, WANG Jilin. Research on fractal characteristics of permeability of sandy soil[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2010, 38(2): 42 – 45. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 赵枝艳, 张常亮, 沈伟, 等. 黄土-古土壤饱和和渗透性与孔隙分布特征关系研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2024, 51(1): 47 – 56. [ZHAO Zhiyan, ZHANG Changliang, SHEN Wei, et al. Research on the relationship between saturated permeability and pore distribution characteristics of loess-paleosol[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2024, 51(1): 47 – 56. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 贾洋, 崔素丽. Cu^{2+} 对重塑黄土饱和和渗透系数的影响研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2023, 50(3): 93 – 103. [JIA Yang, CUI Suli. Effect of Cu^{2+} on the saturated coefficient of permeability of remolded loess[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(3): 93 – 103. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 王继玲, 周维博, 孙梨梨, 等. 石川河富平地下水库渗透系数空间变异性研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2023, 50(3): 34 – 43. [WANG Jiling, ZHOU Weibo, SUN Lili, et al. Study on the spatial variability of hydraulic conductivity of underground reservoir in Fuping section of Shichuan River[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(3): 34 – 43. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 唐占君. 无黏性粗粒土在水利工程中渗透系数试验方法研究 [J]. *水利科技与经济*, 2021, 27(1): 39 – 43. [TANG Zhanjun. Study on test method of permeability coefficient of cohesionless coarse-grained soil in hydraulic engineering[J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2021, 27(1): 39 – 43. (in Chinese)]
- [8] 陈梦迪, 姜振蛟, 霍晨琛. 考虑矿层渗透系数非均质性和不确定性的砂岩型铀矿地浸采铀过程随机模拟与分析 [J]. *水文地质工程地质*, 2023, 50(2): 63 – 72. [CHEN Mengdi, JIANG Zhenjiao, HUO Chenchen. Stochastic modeling of *in situ* sandstone-type uranium leaching in response to uncertain and heterogeneous hydraulic conductivity[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(2): 63 – 72. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 王艳华, 潘争伟, 张劼, 等. 多孔连续介质渗透定律及其扩展 [J]. *赤峰学院学报(自然科学版)*, 2015, 31(7): 32 – 34. [WANG Yanhua, PAN Zhengwei, ZHANG Jie, et al. Permeability law of porous continuous medium and its extension[J]. *Journal of Chifeng University (Natural Science Edition)*, 2015, 31(7): 32 – 34. (in Chinese)]
- [10] 桂春雷, 石建省, 刘继朝, 等. 含水层渗透系数预测及不确定性分析耦合模型 [J]. *水利学报*, 2014, 45(5): 521 – 528. [GUI Chunlei, SHI Jiansheng, LIU Jichao, et al. A coupling model for aquifer hydraulic conductivity prediction and its uncertainty analysis[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(5): 521 – 528. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 丁述基. 达西及达西定律 [J]. *水文地质工程地质*, 1986, 13(3): 33 – 35. [DING Shuji. Darcy and Darcy's law[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 1986, 13(3): 33 – 35. (in Chinese)]
- [12] 张东, 刘晓丽, 王恩志. 非均匀多孔介质等效渗透率的普适表达式 [J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(4): 35 – 42. [ZHANG Dong, LIU Xiaoli, WANG Enzhi. A universal expression of the equivalent permeability of heterogeneous porous media[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(4): 35 – 42. (in Chinese with English abstract)]
- [13] FRANCIS J B. Memorandum and tables, exhibiting the results of some of Darcy's experiment on the flow of water through pipes[J]. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 1874, 2(1): 45 – 52.
- [14] LAGE J L, ANTOHE B V. Darcy's experiments and the deviation to nonlinear flow regime[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2000, 122(3): 619 – 625.
- [15] 李刚, 马佰衡, 周仰效, 等. 白洋淀湖岸带地表水与地下水垂向交换研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2021, 48(4): 48 – 54. [LI Gang, MA Baiheng, ZHOU Yangxiao, et al. A study of vertical exchange between surface water and groundwater around the banks of Baiyangdian Lake[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(4): 48 – 54. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 陈社明, 刘宏伟, 卢文喜, 等. 悬挂式防渗墙作用下非均质地层的渗流量研究——以松花江干流群力堤为例 [J]. *水文地质工程地质*, 2016, 43(4): 14 – 19. [CHEN

- Sheming, LIU Hongwei, LU Wenxi, et al. Calculation of seepage under the effect of a suspended anti-seepage wall in the heterogeneous formation, exemplified by the Qunli Dam in the Songhua River[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2016, 43(4): 14 – 19. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 姜伟男,王福刚,董维红.典型砂介质含水层渗透系数盐度效应研究[J]. *人民黄河*, 2018, 40(8): 145 – 148. [JIANG Weinan, WANG Fugang, DONG Weihong. Salinity effect of permeability coefficient of sand media aquifer[J]. *Yellow River*, 2018, 40(8): 145 – 148. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 高宗军,张福存,安永会,等.地下水分层勘查技术在地下水流系统研究中的应用[J]. *地质科技通报*, 2022, 41(1): 71 – 78. [GAO Zongjun, ZHANG Fucun, AN Yonghui, et al. Application of groundwater stratified exploration technology in groundwater flow system research[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(1): 71 – 78. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 徐德敏,黄润秋,虞修竟.高承压小水力梯度岩石渗透性测试[J]. *岩土力学*, 2010, 31(4): 1103 – 1107. [XU Demin, HUANG Runqiu, YU Xiujing. Rock permeability test under high pore water pressure and low hydraulic gradient[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(4): 1103 – 1107. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 刘凯,文章,梁杏,等.一维低渗透介质非达西渗流实验[J]. *水动力学研究与进展 A 辑*, 2013, 28(1): 81 – 87. [LIU Kai, WEN Zhang, LIANG Xing, et al. One-dimensional column test for non-Darcy flow in low permeability media[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2013, 28(1): 81 – 87. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 王福刚,张佳慧,于吉洋,等.不同水力梯度对渗透系数影响研究[J]. *实验技术与管理*, 2015, 32(6): 25 – 28. [WANG Fugang, ZHANG Jiahui, YU Jiyang, et al. Research on influence of different hydraulic gradient on hydraulic conductivity[J]. *Experimental Technology and Management*, 2015, 32(6): 25 – 28. (in Chinese with English abstract)]
- [22] EATON T T. On the importance of geological heterogeneity for flow simulation[J]. *Sedimentary Geology*, 2006, 184(3/4): 187 – 201.
- [23] 陈四利,李锋,侯芮,等.温度变化对水泥土渗透特性影响试验[J]. *沈阳工业大学学报*, 2020, 42(4): 453 – 458. [CHEN Sili, LI Feng, HOU Rui, et al. Tests on influence of temperature variation on permeability of cemented soil[J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2020, 42(4): 453 – 458. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 李龙飞.基于渗透性的岩土粒径临界值研究及其水文地质意义[D].徐州:中国矿业大学,2020. [LI Longfei. Study on critical value of rock and soil particle size based on permeability and its hydrogeological significance[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 韩立伟,信行.胶凝砂砾石渗透性能影响因素分析[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(11): 150 – 153. [HAN Liwei, XIN Hang. Analysis of factors affecting permeability of cemented sand and gravel[J]. *Water Resources and Power*, 2022, 40(11): 150 – 153. (in Chinese with English abstract)]
- [26] RADFORD B J, BRIDGE B J, DAVIS R J, et al. Changes in the properties of a vertisol and responses of wheat after compaction with harvester traffic[J]. *Soil and Tillage Research*, 2000, 54(3/4): 155 – 170.
- [27] 李华,李同录,张亚国,等.不同干密度压实黄土的非饱和渗透性曲线特征及其与孔隙分布的关系[J]. *水利学报*, 2020, 51(8): 979 – 986. [LI Hua, LI Tonglu, ZHANG Yaguo, et al. Relationship between unsaturated permeability curve and pore-size distribution of compacted loess with different dry density[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51(8): 979 – 986. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 张镇飞,倪万魁,王熙俊,等.压实黄土水分入渗规律及渗透性试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(6): 97 – 104. [ZHANG Zhenfei, NI Wankui, WANG Xijun, et al. An experimental study of water infiltration and hydraulic conductivity of the compacted loess[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(6): 97 – 104. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 丁瑜,饶云康,倪强,等.颗粒级配与孔隙比对粗粒土渗透系数的影响[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(3): 108 – 116. [DING Yu, RAO Yunkang, NI Qiang, et al. Effects of gradation and void ratio on the coefficient of permeability of coarse-grained soil[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(3): 108 – 116. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 孙蓉琳,梁杏,靳孟贵.裂隙岩体渗透系数确定方法综述[J]. *水文地质工程地质*, 2006, 33(6): 120 – 123. [SUN Ronglin, LIANG Xing, JIN Menggui. Review on determination of hydraulic conductivity of fractured rocks[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2006, 33(6): 120 – 123. (in Chinese with English abstract)]