

文章编号:0254-0096(2015)03-0581-06

地下水源热泵井周颗粒物理阻塞 室内试验及模型研究

赵 军¹, 张程远², 刘泉声²

(1. 安徽理工大学土木建筑学院, 淮南 232001; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所国家重点实验室, 武汉 430071)

摘 要: 以水源热泵回灌过程中物理堵塞现象为研究对象,利用自行研发砂层阻塞试验系统装置模拟多孔介质中悬浮颗粒的迁移和沉积的过程,以 Al₂O₃颗粒为悬浮颗粒、玻璃珠和砾石颗粒为多孔介质作对比性试验。试验结果表明:砾石颗粒间的不均匀性为颗粒的沉积提供了“温床”,而玻璃珠颗粒粒径较单一,同时颗粒之间咬合力较小,不利于悬浮颗粒的沉积。分别给出浓度和渗透率衰减渗透模型,拟合结果表明所得到的模型对多孔介质中悬浮颗粒的迁移所引起的孔隙率降低是有效的。

关键词: 地源热泵; 悬浮颗粒; 堵塞; 实验系统; 渗透率
中图分类号: TK513.5 **文献标识码:** A

0 引 言

地下水源热泵是利用地下水进行供暖或制冷的低位热源技术,夏天利用地下低温水达到制冷的效果,冬天利用其高温水达到供暖的需求。但长期开采地下水,如果不及时回灌会引起地表沉降,从而对建筑物产生影响,因此有必要对利用后的地下水进行回灌。鉴于此,首先应对地下水回灌过程堵塞机理进行分析。颗粒进入多孔介质后,其运移方向、沉降概率受到流场、孔隙结构、颗粒与流体性质的影响,颗粒沉降后,又干扰流场,使之发生变化,定量预测渗透率变化之前,应先建立颗粒运移与沉降模型,才能估算颗粒沉降而引起的渗透率下降。

导致回灌困难的主要因素有物理堵塞、生物堵塞和化学堵塞。在国外关于细颗粒在孔隙中迁移的研究已有大量实验研究,A. Millard 等^[1],N. Massei 等^[2,3],A. Santos 等^[4]和 P. Weronski 等^[5]在化学作用下胶体颗粒的沉积做了研究,得出沉积往往发生在离子浓度较高的部分,且与胶体颗粒的尺寸有关。Stephen E. Sillima^[6,7]和 Wang Huaqing 等^[8,9]通过可视化跟踪孔隙内悬浮颗粒的运移和沉积过程,得到

悬浮颗粒在局部的沉积与颗粒粗糙程度、尺寸和流速有关。何满潮等^[10,11]对天津地热进行了详细研究,得出了井周孔隙介质渗透率衰减模型。但关于水源热泵回灌中因悬浮颗粒所引起的物理特性和机理鲜有研究。本文将重点研究物理堵塞所引起的回灌困难问题。

1 试验装置

1.1 试验系统拟解决问题

本砂层阻塞试验系统主要满足以下试验观测需要:

1) 物理性阻塞的模拟和观测,包括固体颗粒和气泡;

2) 微生物阻塞及其耦合作用的模拟和观测,包括微生物和产气耦合阻塞过程。

重点为:

1) 可实时、直接地观测砂层渗流的变化和阻塞物的空间时间变化;

2) 可自由控制阻塞物的供给;

3) 可模拟地下水源热泵砂层阻塞的回灌和回扬渗流条件。

收稿日期: 2013-07-29

基金项目: 中国博士后基金委(2014M560502); 安徽省博士后基金(2014B018); 安徽省高校省级优秀人才基金重点项目(2013SQRL140ZD); 安徽省住房城乡建设科学技术计划(2013YF-55)

通信作者: 赵 军(1982—), 男, 博士、讲师, 主要从事隧道支护及地下水源热泵回灌堵塞机理的研究。jzhao_rsm@163.com

另外,试验系统还应同时提供颗粒、气泡和微生物阻塞的耦合研究,也可单独进行每一项试验。

1.2 试验系统硬件方案

为达到上述试验观测要求,本研究采取如下硬件方案:

1) 采用有机玻璃制作薄型的可透射观测试验箱体,使用透射光学图像记录设备,配合较薄砂层或较透明的砂层颗粒。

2) 试验观测箱体采用有机玻璃(聚甲基丙稀酸甲酯 PMMA)制作,变频控制的压力泵扬程达到 50 m 即可模拟 50 m 以内的含水砂层水压力。

3) 采用高亮度白光 LED 作为观测光源,大功率白光 LED 是新近实用化的优良光源,可提供低温、高照度的理想试验环境。一方面功耗低产热少,可很好地控制试验箱体渗流区域的温度,另一方面白光光谱广、色温合适,可提供 10000 Lx 以上的高照度,有利于对光学透射成像和分析。

4) 双向恒压水泵系统模拟地下水源热泵砂层阻塞的回灌和回扬。配合 0.1 级以上的高精度质量流量计和压力变送器,可提供实时精确的渗流计算参数。

试验装置如图 1 所示,该试验系统为自行研发砂层阻塞试验系统装置。

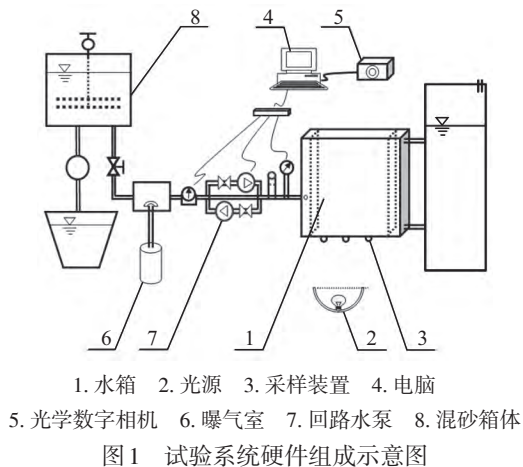


图 1 试验系统硬件组成示意图
Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

2 试验材料

试验中分别采用玻璃珠和砾石颗粒两种材料作为试验箱体中的填充材料,材料的物理特性参数如表 1 所示,砂砾颗粒通过标准筛试验后得出其颗粒级配。以武汉浅部含水层第四纪河漫滩相、湖相细粒沉积为工程研究背景,砾石颗粒取自施工现场。

表 1 材料物理特性

Table 1 The physical property materials

填充材料	颗粒尺寸/mm	平均粒径/mm	孔隙率
砾石	0.40~0.50	0.42	0.380
玻璃珠	0.45	0.45	0.367

用碱性 Al_2O_3 作为悬浮颗粒来追踪在多孔介质中的运移和沉积的过程,将事先准备好的碱性 Al_2O_3 颗粒同水充分混合后,用注射器注入试验箱体中试验过程中的流速可通过变频控制系统来平衡,采用可视化的电子流量计测量流速,本试验中速率控制在 20~200 cm/min。

采用粒度分析仪测量进口处粒度分布情况,根据大小不同的颗粒、在各角度上散射光强的变化反演出颗粒群的粒度分布数据,在试验箱体的出口处每隔 3 分钟用粒度分析仪测出粒度的变化情况,试验过程在动态跟踪监测下进行。

本试验中利用碱性 Al_2O_3 颗粒能在水中保持颗粒特性的稳定性。试验过程中仅把研究内容放在物理堵塞渗透率衰减模型上,因此忽略化学变化对颗粒的影响。

3 试验过程及结果分析

3.1 试验过程

试验前,首先调试低频控制仪和蠕动泵,然后测试连接安装后的整套仪器进行密封性能。在密封性的测试过程中,低频控制仪在最大转速下能保证试验箱体里的水无溢出现象;经过筛分后的细砾石颗粒经反复浸泡、清洗、干燥后放入试验箱体中,试验中对悬浮颗粒(碱性 Al_2O_3)采用一次性注射方式,注入量约为多孔介质孔隙率值的 2%,以保证注入的悬浮颗粒浓度不会对孔隙介质产生影响,采用自来水作为流体,不考虑离子强度对多孔介质的影响。

向上游水箱里加入一定水头的水,打开水箱阀门,此时要关闭双向恒压水泵中的一个阀门,以防止水流的逆向流动。打开变频控制器,在低速情况下让流体充满试验箱体,使多孔介质完全浸润,同时打开流量计,关闭下游水箱入口处的阀门,经一段时间(约 10 min)开启压力计和 LED 光源系统,在试验箱体的入口处注入悬浮颗粒,然后根据试验情况进行本次试验。需要特别指出的是,当试验箱体

里用砾石颗粒作为多孔介质时,砾石颗粒的放置顺序是:在试验箱体的底部加入少许水体——加入细砾石颗粒,轻轻晃动后再加入水体——加入颗粒,如此反复进行直至细砾石充满整个试验箱体。

在进行悬浮物颗粒堵塞试验前,有必要了解流体在多孔介质里的流动机理,流体在多孔介质的孔隙内流动时,水压力沿流体的流动方向发生变化,其往往是孔隙率、孔隙介质特性以及流速的函数。达西流动定律表述为水压力梯度同流体流速的关系式,如式(1)所示。

$$U = -\frac{k(\sigma)}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1)$$

式中, U ——流体流速; $k(\sigma)$ ——考虑了由于悬浮颗粒在孔隙里沉积所引起的渗透率降低,其中 σ 为颗粒在孔隙壁处沉积的浓度,当 $k(0)=1$ 时说明多孔介质中的孔隙内没有发生悬浮颗粒的沉积; μ ——流体的粘性系数,本次试验中其值为常数; $\frac{\partial p}{\partial x}$ ——水压力梯度。

图2给出了玻璃珠在截面2处不同流速下水压力同流速之间的关系。从图2可得出:在同一试验材料情况下,多孔介质截面处的水压力随流速的增加而增大,水压力与流速呈线性关系。

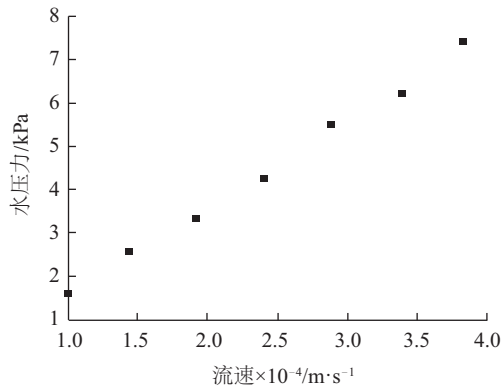


图2 玻璃珠材料水压力梯度-流速关系图

Fig. 2 The relationship of water pressure gradient with flow velocity

3.2 起始悬浮颗粒浓度对水压力的影响

随着注入箱体内悬浮颗粒浓度的不断增加,将有部分悬浮颗粒沉积在孔道内而不参与运移,这部分沉积的悬浮颗粒对水压力和渗透系数的改变起到关键作用;当水体流速达到悬浮颗粒的“临界”启动速度时,颗粒将在水体的流速下发生运移,将再

次引起“新”孔隙的堵塞,从而降低了多孔介质的渗透性,本节将对这种物理想象进行试验研究。

先以砾石颗粒作为研究对象,往试验箱体内加满砾石颗粒,注入 140 g 的碱性 Al_2O_3 颗粒,驱动变频调控仪,水体在水泵的驱使下流经多孔介质,碱性 Al_2O_3 颗粒在水体的流动作用下沿着箱体的横向流动,随着时间的推移,砾石颗粒的孔隙发生堵塞,然后加大变频仪的频率,使流体的流动速度加快,目的是使沉积在玻璃珠内的悬浮颗粒“漂浮”起来。图3给出了截面2处的水压力随时间呈现出的波动关系曲线。

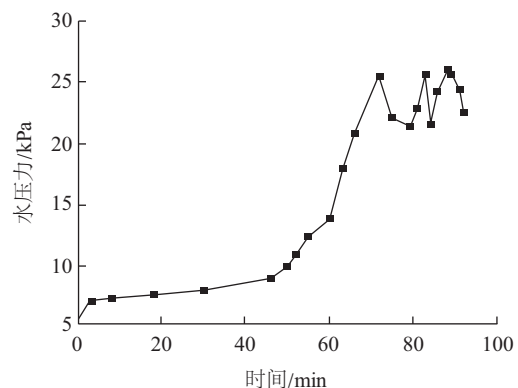


图3 起始浓度与时间关系图(砾石)

Fig. 3 The relationship of initial concentration with time (grave)

从图3可得出,开始阶段水压力的增加趋势较缓慢,说明悬浮颗粒随着流体的流动而流动,悬浮颗粒并未全堵塞住孔隙。50 min后,水压力迅速增长,说明起始沉积的悬浮颗粒达到了其启动速度,颗粒在孔隙内发生移动,随之而来的是新的堵塞,堵塞可能由桥堵、捕获或沉降在孔隙壁所引起的,因此单位截面面积的人水量减小。当时间达到70 min时,出现了水压力升高和降低的周期性现象,该过程是保持流速不变的情况下进行的。当水压力升至某一临界值时,堵塞在孔隙壁处的悬浮颗粒发生“突破”,悬浮颗粒随着流体一起运动,而此时水压力值减小,流动的悬浮颗粒继续堵塞在“新”的孔隙壁处,水压力值升高,如此反复,从而出现了图3中的水压力随时间的周期性变化关系。

为便于比较,以玻璃珠颗粒作为孔隙介质,悬浮颗粒仍是碱性 Al_2O_3 ,把悬浮颗粒注入到试验箱体内经一段时间后将有一部分悬浮颗粒沉积在玻璃珠的孔隙孔道内,然后加大流速,迫使停留在孔道

内的悬浮颗粒“漂浮”起来。水压力的动态变化关系如图4所示。

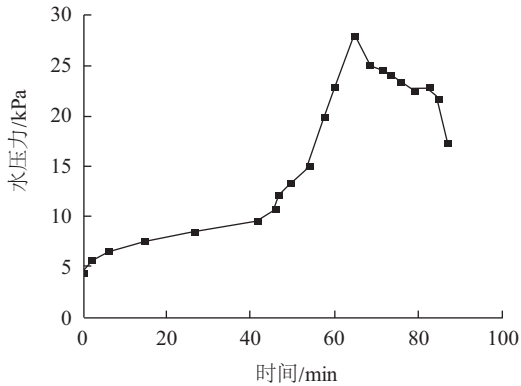


图4 起始浓度与时间关系图(玻璃珠)

Fig. 4 The relationship of initial concentration with time(glass)

从图4可看出,起始阶段水压力的增长速度比较缓慢,这个过程约持续了40 min。随后水压力的增长速度非常之快,说明悬浮颗粒堵塞在玻璃珠孔隙孔道内,颗粒并未达到其“启动”速度。70 min时,水压力瞬间减小,这是由于沉积在孔道内的悬浮颗粒的“漂浮”所导致,“漂浮”的悬浮颗粒随着流体而流出试验箱体出口处,但在观测玻璃珠颗粒时并未出现像砾石颗粒那样的周期性波动。这主要是由于玻璃珠颗粒内部孔隙分布较砾石更均匀而砾石颗粒内部有大量分布不均匀的孔隙孔道,孔隙之间具有较强的咬合力,悬浮颗粒沉积在极小的孔隙孔道内很难“漂浮”起来,还将继续沉积在孔隙孔道内,所以砾石介质内的水压力继续增大。但是当大的孔隙孔道内的悬浮颗粒“漂浮”起来时水压力才会减小,而被“漂浮”的悬浮颗粒遇到极小的孔隙孔道时再次沉积在孔隙内,水压力再次出现增加的现象,如此反复,才会出现砾石颗粒水压力的周期性变化,但这种现象在玻璃珠颗粒中是无法出现的。

4 颗粒沉积数学模型建立

4.1 浓度变化模型

模型的基本假设:

- 1) 多孔介质为各项同性,不可压缩;
- 2) 孔隙单一,且孔隙直径保持不变;
- 3) 注入的固体颗粒是不可压缩的悬浮颗粒,固体颗粒的密度不变。

取长度为 Δx ,单位面积为 A ,起始孔隙率为 n 的饱和孔隙介质体,悬浮颗粒在流体作用下流经该单元体。如图5所示。

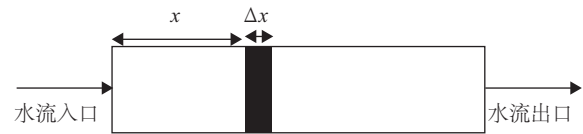


图5 模型示意图

Fig. 5 The diagram of clogging

根据质量守恒定律和连续性方程得^[12]:

$$VC_s - \left\{ VC_s + \left[\frac{\partial}{\partial x} (VC_s - D_s An \frac{\partial C_s}{\partial x}) \Delta x \right] \right\} = A \Delta x n \frac{\partial C_s}{\partial t} \quad (2)$$

式(2)简化后为:

$$-\frac{\partial}{\partial x} (VC_s - D_s An \frac{\partial C_s}{\partial x}) \Delta x = A \Delta x n \frac{\partial C_s}{\partial t} \quad (3)$$

式中, V ——流体流量, m^3/s ; C_s ——颗粒质量, kg/m^3 ; D_s ——分散系数, m^2/s 。

由于在实际工程中井体半径有限,悬浮颗粒的运移和沉积往往是仅限在井周某一特定范围内,图6给出了有限半径范围井周颗粒的沉积^[11]。

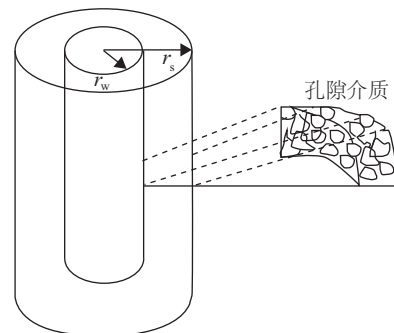


图6 井周颗粒运移示意图

Fig. 6 The grammar of particular movement

式(3)可写成式(4):

$$-\frac{\partial}{\partial r} [VC_s - 2\pi hr D_s \frac{\partial C_s}{\partial r}] = 2\pi hr n \frac{\partial C_s}{\partial t} \quad (4)$$

边界条件:

$$C_s(r, 0) = 0 \quad (5)$$

$$C_s(\infty, t) = 0 \quad (6)$$

$$C_s(r_w, t) = C_0 \quad (7)$$

结合具体的边界条件,式(4)的解析解为:

$$C_s(r, t) = C_0 \exp[\alpha(r - r_w) + \sqrt{\frac{\beta}{D_s}}(r - r_w) + 2\beta t] \quad (8)$$

式中, $\alpha = \frac{1}{2D_s} (\frac{V}{2\pi hr n} - \frac{1}{r})$, $\beta = \frac{1}{4D_s} (\frac{V}{2\pi hr n} - \frac{1}{r})^2$ 。

4.2 渗透衰减模型

P. Kechagia^[12]给出了渗透率与孔隙率的衰减模型公式：

$$\frac{K}{K_i} = \left(\frac{n}{n_i}\right)^3 \left(\frac{1-n_i}{1-n}\right)^2 \quad (9)$$

式中, K ——渗透率,是在规定的条件下,流体穿过孔隙介质的流速, m^2 , 其与渗透系数 k 的换算关系为

$$K = k \frac{\rho g}{\mu}; n_i \text{——} i \text{时刻的孔隙率。}$$

5 模型验证

式(4)和式(9)给出了悬浮颗粒在流经井周多孔介质时渗透率衰减模型的定性表达。 $D_s = \alpha L^m$, 其中 α 和 m 为经验参数,取值为 0.25 ~ 1.50; L 为孔隙介质体长度,在本次试验中,取值为 1.2 m。试验后得出具体的拟合结果如图 7 所示。从图 7 可看出,文中所给的渗透率衰减模型能较好地验证悬浮颗粒在多孔介质中迁移时所引起的孔隙率降低。模型的给出为地下水源热泵回灌工程因物理堵塞问题提供了研究方向和理论依据。

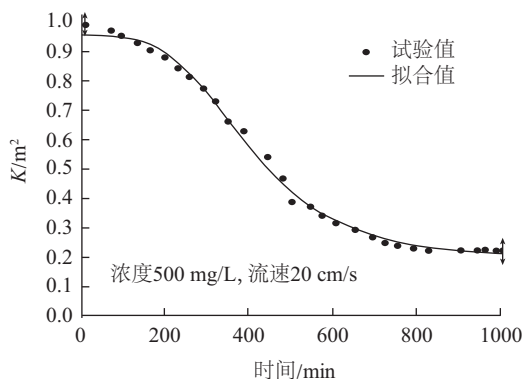


图7 试验与拟合结果对比图

Fig. 7 The grammar of different results

6 结论

利用自行研发的砂层阻塞试验系统来动态的观测砾石颗粒和玻璃珠颗粒在悬浮颗粒流经时其物理特性的变化,结论如下:

1) 对玻璃珠颗粒和砾石颗粒的对比性试验表明:砾石颗粒间的不均匀性为颗粒的沉积提供了“温床”,孔隙孔道的不连续和不均匀性有利于悬浮颗粒的沉积,进而出现了水压力与时间的周期性变化关系。而玻璃珠颗粒粒径较单一,同时颗粒之间

咬合力较小,不利于悬浮颗粒的沉积。

2) 以武汉浅部含水层第四纪河漫滩相、湖相细粒沉积为工程研究背景,对现场获取的砾石颗粒进行了渗透率衰减模型的试验,把理论试验模型同室内试验数据进行了拟合,从拟合结果可见文中给出的渗透率衰减模型可用于预测悬浮颗粒的迁移所引起的孔隙率下降规律。

[参考文献]

- [1] Millard A, Rejib A, Chijimatsu M, et al. Numerical study of the THM effects on the near-field safety of a hypothetical nuclear waste repository—BMT1 of the DECOVALEX III project. Part2: Effects of THM coupling in continuous and homogeneous rocks[J]. Int J Rock Mechanical Mine Science, 2005, 42(7): 731—744.
- [2] Massei N, Lacroix M, Wang Huaqing, et al. Transport of particulate material and dissolved tracer in a highly permeable porous medium comparison of the transfer parameters[J]. Contamin Hydrol, 2002, 57(7): 21—39.
- [3] Massei Nicolas, Lacroix Michel, Wang Huaqing, et al. Transport of particulate material and dissolved tracer in a highly permeable porous medium: Comparison of the transfer parameters[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2002, 57(5): 21—39.
- [4] Santos A, Bedrikovetsky P A. Stochastic model for particulate suspension flow in porous media[J]. Transport Porous Media, 2006, 62(6): 23—53.
- [5] Weronski P, Walz J Y, Elimelech M. Effect of depletion interactions on transport of colloidal particles in porous media[J]. Colloid Interf Science, 2003, 262(6): 372—383.
- [6] Silliman Stephen E. Particle transport through two-dimensional, saturated porous media: Influence of physical structure of the medium[J]. Journal of Hydrology, 1995, 167(7): 79—98.
- [7] Silliman Stephen E. The importance of the third dimension on transport through saturated porous media: Case study based on transport of particles[J]. Journal of Hydrology, 1996, 179(9): 181—195.
- [8] Wang Huaqing Lacroix M, Massei N, et al. Particle transport in porous medium: Determination of hydrodispersive characteristics and deposition rates[J]. C R Acad SCI Paris Science Terre Plant, 2000, 331: 97—104.

- [9] Wang Huaqing, Crampon N S. Huberson and garnier a linera graphical method for determining hydrodispersive characteristics in tracer experiments with instantaneous injection[J]. *Journal of Hydrology*, 1987, 95(3):143—154
- [10] 何满潮, 刘 斌, 姚磊华, 等. 地热水对井回灌渗流场理论研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2004, 33(3): 245—248.
- [10] He Manchao, Liu Bin, Yao Leihua, et al. Study on theory of seepage field a round geothermal production-reinfection doublets wells[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2004, 33 (3) : 245—248.
- [11] 何满潮, 刘 斌, 姚磊华, 等. 地下热水回灌过程中渗透系数研究[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2002, 32(4): 374—377.
- [11] He Manchao, Liu Bin, Yao Leihua, et al. Study on hydraulic conductivity during geothermal reinjection[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2002, 32(4): 374—377.
- [12] Kechagia P, Tsimpanogiannis I, Yortsos, Y, et al. On the upscaling of reaction-transport processes in porous media with fast or finite kinetics[J]. *Chemical Engineer*, 2002, 57(13): 2565—2577.

THE EXPERIMENTAL STUDY OF THE PARTICLES CLOGGING AND MODEL IN GSHP

Zhao Jun¹, Zhang Chengyuan², Liu Quansheng²

(1. *Anhui University of Science and Technology, Civil Engineering, Huainan 232001, China*; 2. *State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China*)

Abstract: We take the physical clogging in ground source heat pump as the subject, and use the sand clogging equipment to simulate the transportation and deposition for suspension particles in porous media, we use the glass bead and sand as the porous media respectilvely, and we use the quartz sand as the suspension particles, as the same time , we establish a mathematics model to illustrate the change of porosity, the model is useful to predict the decrease of porosity. in the end, we will use the numerical simulation to illustrate the flow velocity in different porous ,we find that in different porous the flow velocity is different, and the maximum of flow velocity is always appear in the minimum porous, but the minimum porous is apt to jam the porous.

Keywords: WHSP; suspended particle; clogging; experiment; permeability