

级配不连续透明土可视化及渗透实验研究

陈俊, 林传倬

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2022年10月13日; 录用日期: 2022年11月23日; 发布日期: 2022年11月30日

摘要

土体内部的渗流问题较为复杂, 传统的观测方法不能很好地观测到实验的过程。随着透明土技术的发展, 利用配置与天然土体性质相近的透明土代替天然土进行实验观测成为一种新兴的技术手段。本文通过此方法设计物理实验, 建立模型, 实现对土体内部渗流等问题的可视化研究。并将实验所获得的迂曲度参数代入经典的渗透系数模型计算公式从而得到土体的渗透系数, 最后通过计算所得渗透系数之间的对比, 探索其随土体自身物理特征变化而变化的趋势和规律。

关键词

透明土, 渗透系数, 迂曲度

Visualization of Tortuosity and Experimental Study on Permeability of Graded Discontinuous Transparent Soil

Jun Chen, Chuandai Lin

College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: Oct. 13th, 2022; accepted: Nov. 23rd, 2022; published: Nov. 30th, 2022

Abstract

The seepage problem in the soil is more complex, and the traditional observation method cannot observe the experimental process well. With the development of transparent soil technology, it has become a new technical means to replace natural soil with transparent soil. In this paper, physical experiments are designed and models are established by this method to realize the visual

research on the internal seepage of soil. The tortuosity parameter obtained from the experiment is substituted into the classical calculation formula of the permeability coefficient model to obtain the permeability coefficient of the soil. Finally, through the comparison between the calculated permeability coefficients, the trend and law of its change with the physical characteristics of the soil itself are explored.

Keywords

Transparent Soil, Permeability Coefficient, Tortuosity

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

目前国内外采用透明土技术和渗流从事科学实验研究的领域已经有很多,随着透明土技术被不断应用到学术研究中来,国内外在透明土的研究上也取得了不少成就。在浅基础地基渗透和承载力研究方面, Sadek 与 Liu 利用了模型实验与光学观测方法对天然土体与透明土在相同模型条件下的实验结果进行了对比分析。在深基础及结构和土体相互作用方面, Song 等将透明土应用于离心模型实验中,对锚板在嵌入黏土过程中的锚固力损失进行了分析。Ni 等利用透明土实验技术对成桩过程中桩与桩周土的相互作用做了研究。

渗透系数 K 是综合反映土体渗透能力的一个指标,其数值的确定对渗透计算有着非常重要的意义。目前渗透系数的获取和分析也变得越来越重要,例如据相关资料显示[1][2],多数基坑安全事故是由渗透作用造成的,这与渗透系数的关系密不可分。在渗透系数研究方面, Hazen [3][4]最早给出了均质无粘性砂土渗透系数与颗粒有效粒径呈二次函数关系的经验性数学表达,拟合常数的取值根据介质的不同而有差异,有时可达3个数量级。由于将介质的结构特征和流体物理属性综合反映在一个抽象的拟合常数中,因此 Hazen 模型最初仅适合一般的工程应用[5][6]。后期的研究通过对常数项赋予更多的结构性参数表达,如根据平行毛细管道模型建立的 Kovacs [7]模型,其提供了对该常数项结构性参数的解释,从而丰富了 Hazen 模型的物理内涵。为克服 Hazen 公式的缺陷, Kozeny [8]和 Carman [9]建立了半经验半理论的 Kozeny-Carman 公式,发展出了与宏观统计参数(孔隙度、比面)和微观孔隙结构特征参数(分形维数、毛管迂曲度)表达的渗透毛细阻力模型[10]。该模型假设一簇毛管束组成的渗流通道,其渗流所产生的能量损耗来自流体流动过程,主要为克服毛管束迂回结构、表面摩擦及流体粘滞等阻力所做的功。该模型更深刻地揭露渗流过程的物理涵义,成为目前研究最深、变化形式最多、应用最广的渗流模型[11][12]。

基于特定的配置方法配制而成的透明土既有着与天然土相似的性质,又要有良好的透明性,而且稳定,不易于与其填充的混合液发生反应,也不会与示踪剂发生反应,是渗透实验中观察土体内部规律的良好材料。本文利用透明土模拟天然砾石土,并对其直接观测,通过透明土实验技术[13]设计相应的物理实验模型,实现对土体内部渗流等问题的可视化观测,从而获得直观的研究成果。同时将透明土实验所获得的实际参数与 Kozeny-Carman 公式、Kovacs 公式、Amer-Award 等模型公式相结合从而得到土体的渗透系数,最后通过计算所得渗透系数之间的对比,探索其随土体自身物理特征变化而变化的趋势和规律。

2. 渗透系数计算公式

2.1. Kovacs 公式(经典水力学公式)

Kovacs 公式是根据平直管道模型(如图 1 所示) [14]建立的, 它提供了对该常数项结构性参数的解释, 丰富了此前的 Hazen 模型的物理内涵。其计算公式为:

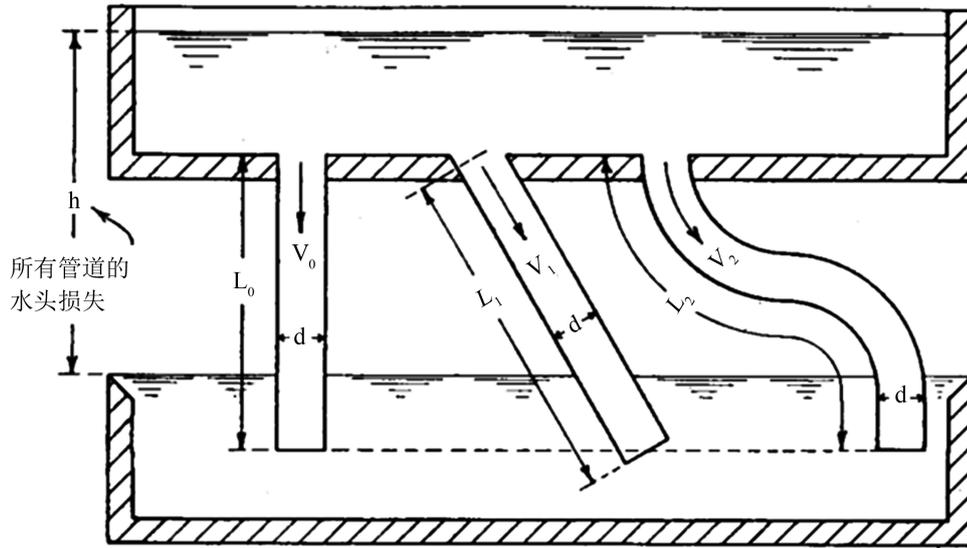


Figure 1. K-C formula bending pipe model diagram
图 1. K-C 公式弯曲管道模型图

$$K = n \left[\frac{\gamma_w}{\mu_w} \right] \left[\frac{d_0^2}{32} \right] \quad (1)$$

公式中 K 为渗透系数(cm/s), d_0 被称为最小等效孔隙粒径(mm), $d_0 = 2.67 \cdot \frac{n}{1-n} \cdot \frac{D_h}{\alpha}$, 该表达式中 n 为孔隙率, μ_w 是水的动力粘滞系数(N·s/m²), α 为土的形状系数, D_h 为等效直径(mm), $D_h = \frac{1}{\sum \frac{\Delta s_i}{D_i}}$ 其中 D_i 是第 i 级粒径区间的平均粒径(mm); Δs_i 为第 i 级粒径的重量与样本总重量之比。该公式也被称为经典水力学公式。

2.2. Amer-Award 公式

Amer、Award 等[15]考虑了土体内部孔隙和不均匀系数对渗透系数的影响, 对上述公式进行了修正, 其表达式为:

$$K = 3.5 \times 10^{-4} \frac{e^3}{1+e} \cdot \frac{\gamma_w}{\mu_w} \cdot d_{10}^{2.32} \cdot C_u^{0.6} \quad (2)$$

其中 e 为孔隙比, 由孔隙率 n 计算得出, 计算公式为 $e = \frac{n}{1-n}$, C_u 为不均匀系数 $C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$, 其中 d_{60} 为颗粒累计百分含量为 60%时对应的粒径, 也称为限制粒径; d_{10} 为颗粒累计百分含量为 10%时对应的粒径, 也称为有效粒径; 均可通过透明土的颗粒级配曲线获得。

2.3. Kozeny-Carman 公式

Kozeny 和 Carman 建立了半经验半理论的 Kozeny-Carman 公式(也可简称为 K-C 公式), 从而发展出了与宏观统计参数(孔隙度、比面)和细观孔隙结构特征参数(分形维数、毛管迂曲度)表达的渗透毛细阻力模型。该模型假设一簇毛管束组成的渗流通道, 其渗流所产生的能量损耗来自流体流动过程, 主要为克服毛管束迂回结构、表面摩擦及流体粘滞等阻力所做的功(弯曲管道模型如图 1 所示)。该公式考虑了土体内部孔隙的弯曲状况等因素因此更加具有普遍意义。其公式为

$$k = \frac{n^3}{c(1-n^2)s^2} \quad (3)$$

其中所得值 k 为渗透率, τ 为迂曲度, s 为比面(cm^3/cm^2)。 $c = 2\tau^2$, $\tau = \frac{L_e}{L_0}$, 其中 L_e 为流体在土体中的实际渗流路径长度, L_0 为土体的垂直高度。比面计算公式 $s = \frac{6 \times (1-n)}{d_i}$, n 为孔隙度, d_i 为砾石所对应直径。

吴金随等通过流体平均水力半径模型建立了迂曲度与孔隙率、渗透率、平均粒径间的函数关系, 揭示出更多的迂曲度的影响因素。其公式为

$$\tau = \sqrt{\frac{n}{2k} \frac{nD_p}{6(1-n)}} \quad (4)$$

其中 k 为渗透率(md), D_p 为平均粒径(mm), 通过下述透明土实验所得迂曲度带入式(4)并与式(5)进行循环迭代最终得到渗透率和迂曲度的最佳值。

计算 K-C 公式的渗透系数 K 公式为

$$K = k \frac{\rho g}{\mu} \quad (5)$$

其中 ρ 为流体的密度(kg/m), g 为重力加速度(m/s^2), μ 为流体的动力粘滞系数($\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$)。

实验主要采用 Kovacs 公式、Amer-Award 公式以及 K-C 公式进行渗透系数的计算, 图 2 为上述三个公式管道模型剖面展示图。

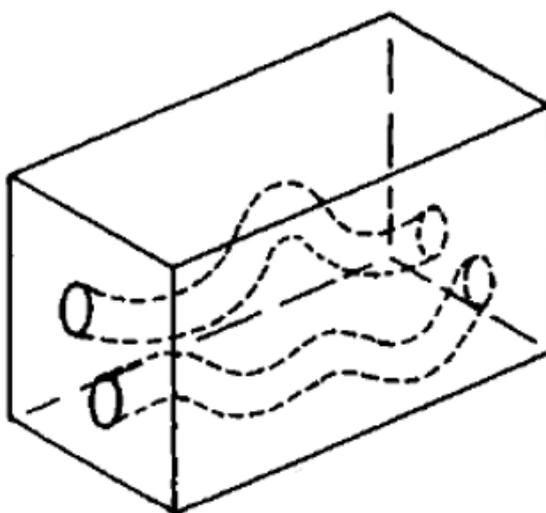


Figure 2. Formula pipe model display diagram
图 2. 公式管道模型展示图

3. 透明土渗透模拟实验

3.1. 样品制备及物理特征

透明土土骨架材料既要有天然土相似的性质, 又要有良好的透明性, 而且稳定, 不易于与其填充的混合液发生反应, 也不会与示踪剂发生反应, 材料的密度与所要研究的土的密度大致相近, 在真空除气时耐高压, 在水洗烘干中能承受一定的高温, 石英砂颗粒能回收重复利用。高纯度的熔融石英是用天然高纯度的二氧化硅经过高温熔融, 然后快速冷却而获得, 而本文所使用的熔融石英砂是从熔融经过冷却击碎后, 人工拣选透明度更高的, 纯度更好的。

本文所采用的石英砂粒径为 0.75~10 mm, 通过筛分法依次用 5 mm、2 mm、1 mm、0.5 mm、0.25 mm、0.1 mm、0.075 mm 的标准筛筛分熔融石英砂。经计算配比配置细颗粒含量 30%、32%、34% 的石英砂颗粒模拟砾石土进行渗透实验。实验用熔融石英砂颗粒粒径如图 3 所示, 实验用示踪剂及透明土溶液如图 4 所示。

土壤颗粒往往以 2 mm 的颗粒粒径作为颗粒粗细的区分粒径。本实验配制以 0.075~2 mm 粒径的透明熔融石英砂作为细颗粒和以 2~10 mm 粒径透明熔融石英砂作为粗颗粒混合构成的 9 种不同的级配不连续透明土, 将其分为三组。第一组是细颗粒粒径 0.25~0.5 mm 缺失且细颗粒含量分别为 30%、32%、34% 的透明土 A、B、C; 第二组是细颗粒粒径 0.5~1 mm 缺失且细颗粒含量分别为 30%、32%、34% 的透明土 D、E、F; 第三组是细颗粒粒径 1~2 mm 缺失且细颗粒含量分别为 30%、32%、34% 的透明土 J、H、I。实验所用透明土的颗粒级配曲线如图 5 所示, 物理特征参数见表 1。



Figure 3. Fused quartz sand particles of various sizes used in the experiment

图 3. 实验用各粒径熔融石英砂颗粒

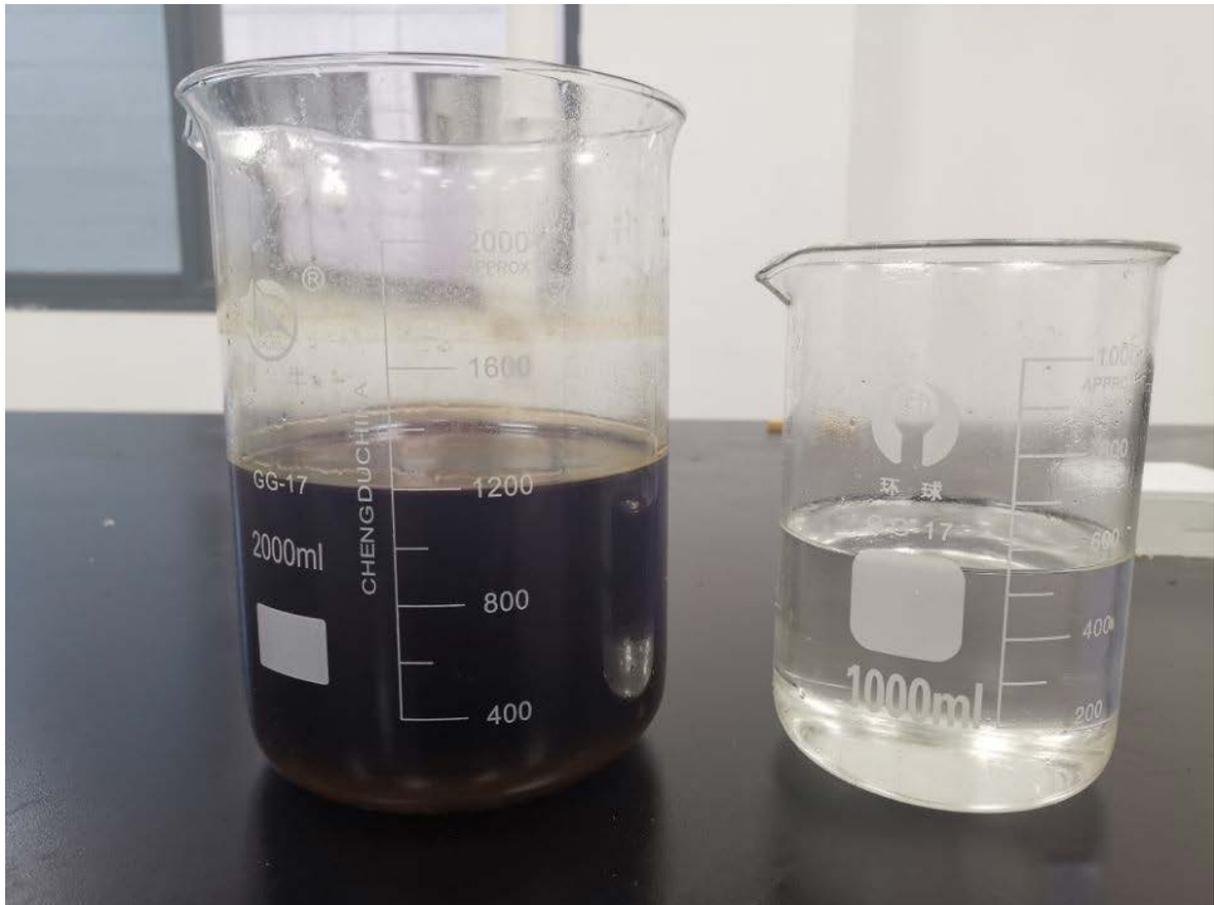


Figure 4. Potassium permanganate tracer (left) and transparent soil solution (right)

图 4. 高锰酸钾示踪剂(图左)及透明土溶液(图右)

Table 1. Physical characteristic parameters of each group of transparent soil

表 1. 各组透明土物理特征参数

土样名称	孔隙率 n	比面 s (cm ² /cm ³)	最小孔径 d_0 (cm)	不均匀系数 C_u	各类几何参数 (mm)			
					d_{10}	d_{30}	d_{60}	d_{85}
透明土 A	0.277	2.896	0.19	7.314	0.738	2	4.571	7.857
透明土 B	0.262	2.956	0.173	7.153	0.704	1.857	4.471	7.794
透明土 C	0.256	3.246	0.158	7.758	0.675	1.765	4.364	7.727
透明土 D	0.243	4.569	0.125	22.082	0.21	2	4.571	7.857
透明土 E	0.236	4.913	0.103	22.355	0.2	1.6	4.471	7.794
透明土 F	0.225	5.291	0.082	22.729	0.192	1.2	4.364	7.727
透明土 G	0.231	3.307	0.1	21.809	0.21	2	4.571	7.857
透明土 H	0.223	3.512	0.093	22.353	0.2	0.75	4.471	7.794
透明土 I	0.214	3.726	0.086	22.767	0.192	0.583	4.364	7.727

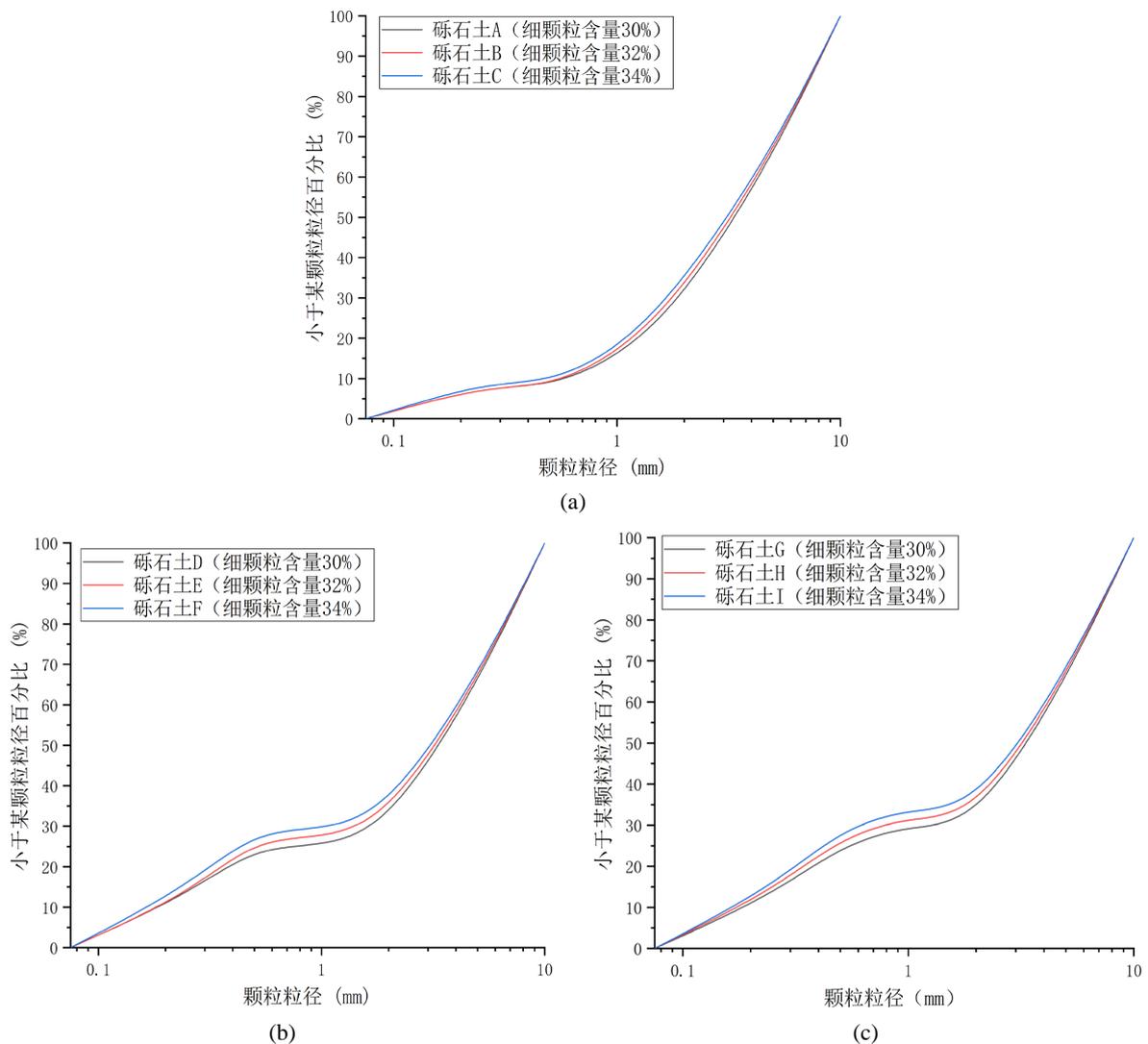


Figure 5. Gradation curve of transparent soil in each group. (a) 0.25~0.5 mm deletion group; (b) 0.5~1 mm deletion group; (c) 1~2 mm deletion group

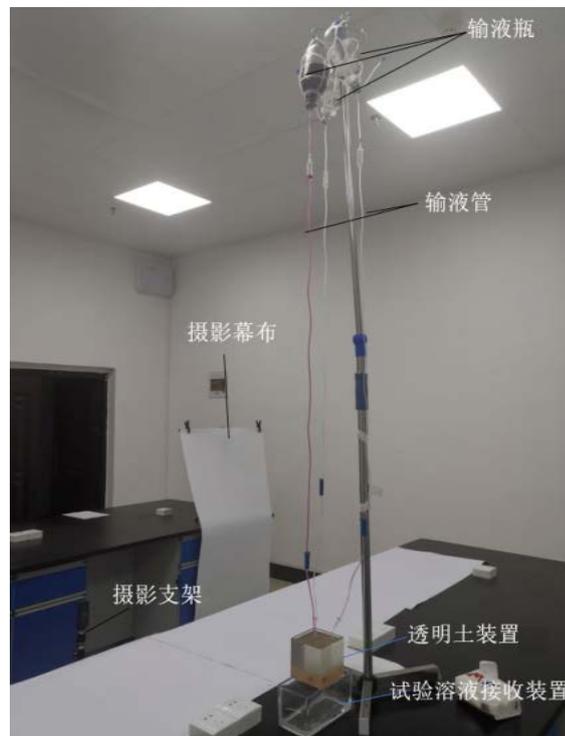
图 5. 各组透明土颗粒级配曲线图。(a) 0.25~0.5 mm 缺失组; (b) 0.5~1 mm 缺失组; (c) 1~2 mm 缺失组

3.2. 实验装置及实验过程

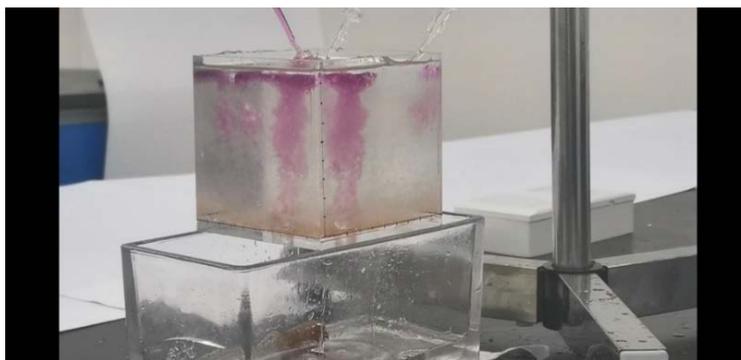
本次实验的实验装置如图 6(a)所示, 实验装置由医用输液瓶、输液管(用于控制示踪剂溶液流速及保持实验容器中透明溶液剂量不变)、透明土渗流实验置以及摄影支架、摄影幕布等部分组成。

装置主要用于透明土渗透模拟实验, 旨在通过示踪剂在透明土的流动模拟流体在土体孔隙中的运移过程, 记录并分析其渗流路径, 以用于计算水体的迂曲度。实验使用透明亚克力板加工制作而成的 10 * 10 * 10 cm 正方体容器来装载透明土。该容器的正下方中间开有一出水孔, 用于制造上下压力差迫使液体向下渗流。实验过程中通过摄影设备录像及拍照等方式直观记录高锰酸钾示踪剂在配置好的透明土孔隙中的运动轨迹, 然后运用专业建模软件 Rhino 7 对运动轨迹进行建模, 建立渗流路径的三维立体模型; 最后将建立好的模型导入工程 CAD 软件进行数据处理, 获得土体迂曲度参数, 以便下一步进行渗透系数的计算。

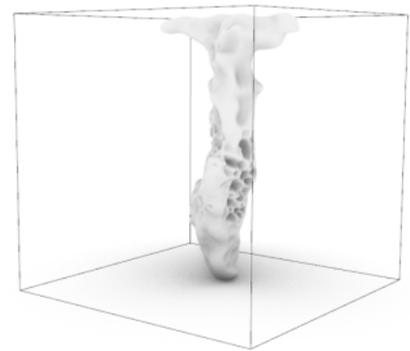
本次透明土管涌模拟实验的实验步骤如下所示:



(a)



(b)



(c)

Figure 6. Experimental devices and achievements. (a) Distribution of experimental devices; (b) Side display of devices at the end of the experiment; (c) Three dimensional model building by Rhino7 software

图 6. 实验装置及成果。(a) 实验装置分布; (b) 实验结束装置侧面展示; (c) Rhino7 软件构建三维模型

1) 首先将不同粒径的熔融石英砂按不同比例混合, 作为制备实验要求的颗粒级配土样原材料。接着将#15 白油和正十三烷按一定比例混合, 制备折射率为 1.4585 左右的实验溶液, 此折射率下的溶液最适合本次实验的观察, 最后制备高锰酸钾溶液作为示踪剂放置于输液瓶中。

2) 检查 10 * 10 * 10 cm 正方体容器是否漏液。完成后将配置好的级配透明土加入其中, 接着缓慢倒入配置的折射率为 1.4585 左右的实验溶液。一边倒入一边用玻璃棒连续搅拌, 以保证液面略高于石英砂颗粒表面, 直至两者融合而成的混合溶液充满容器。

3) 将混合溶液置于真空饱和桶中, 抽真空减少液体中的气泡。

4) 将透明土装置放置平稳并将装有示踪剂和折射率为 1.4585 左右的实验溶液的补给滴管插入融合的混合溶液中, 以此保证混合溶液的液面始终高于透明土砂砾。

5) 于三个对角方向架设摄影幕布、摄影支架及摄影装置, 一个对角方向上的设备与其他两个对角方向上设备在方向上均相差 120° , 用于记录实验过程。

6) 布置完成以后, 正式开始实验。首先拔去透明土装置下的木塞, 然后打开实验溶液补给滴管开关, 调节补给管流速, 直至装置中混合溶液液面高度保持不变。

7) 当混合溶液高度稳定后, 打开示踪剂滴管开关, 匀速缓慢的注入示踪剂, 并用摄像机录像、拍照, 直至示踪剂从下部出水口流出为止, 如图 6(b)所示。

8) 将透明土实验所获得的图像使用 Rhino 7 软件进行描图、立体化等操作处理用以建立透明土渗流路径的三维立体可视化模型, 如图 6(c)所示。

9) 将模型导入工程 CAD 对模型进行数据处理可以得示踪剂在土体孔隙中的实际渗流路径 L_e , 垂直渗流路径 L_0 。之后可运用公式 $\tau = \frac{L_e}{L_0}$ 计算土体的迂曲度 τ 作为 K-C 公式计算渗透系数的参数。

4. 实验成果展示和分析

图 7~9 为透明土实验实现对土体内部渗流轨迹可视化观测成果以及使用 Rhino7 软件处理所得的透明土渗流路径的三维立体可视化模型展示。

将模型导入工程 CAD 软件, 通过对其进行数据处理可以得示踪剂在土体孔隙中的实际渗流路径 L_e , 垂直渗流路径 L_0 。之后可运用公式 $\tau = \frac{L_e}{L_0}$ 计算土体的迂曲度 τ 。表 2 为透明土实验数据经过计算处理处理所得迂曲度参数展示。

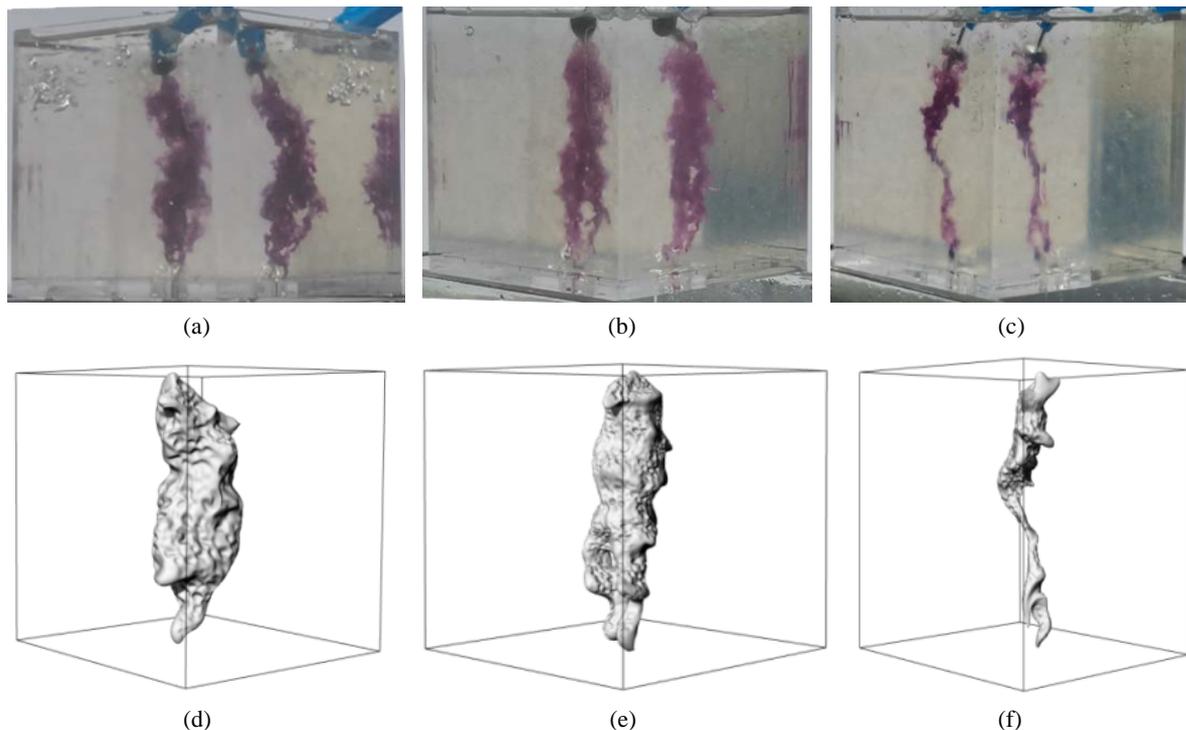


Figure 7. Experimental results and model display of 0.25~0.5 mm missing group transparent soil. (a) Observation results of transparent soil A; (a) Observation results of transparent soil A; (c) Observation results of transparent soil C; (d) Transparent soil A achievement model; (e) Transparent soil B achievement model; (f) Transparent soil C achievement model

图 7. 0.25~0.5 mm 缺失组透明土实验成果和模型展示图。(a) 透明土 A 观测结果; (a) 透明土 A 观测结果; (c) 透明土 C 观测结果; (d) 透明土 A 成果模型; (e) 透明土 B 成果模型; (f) 透明土 C 成果模型

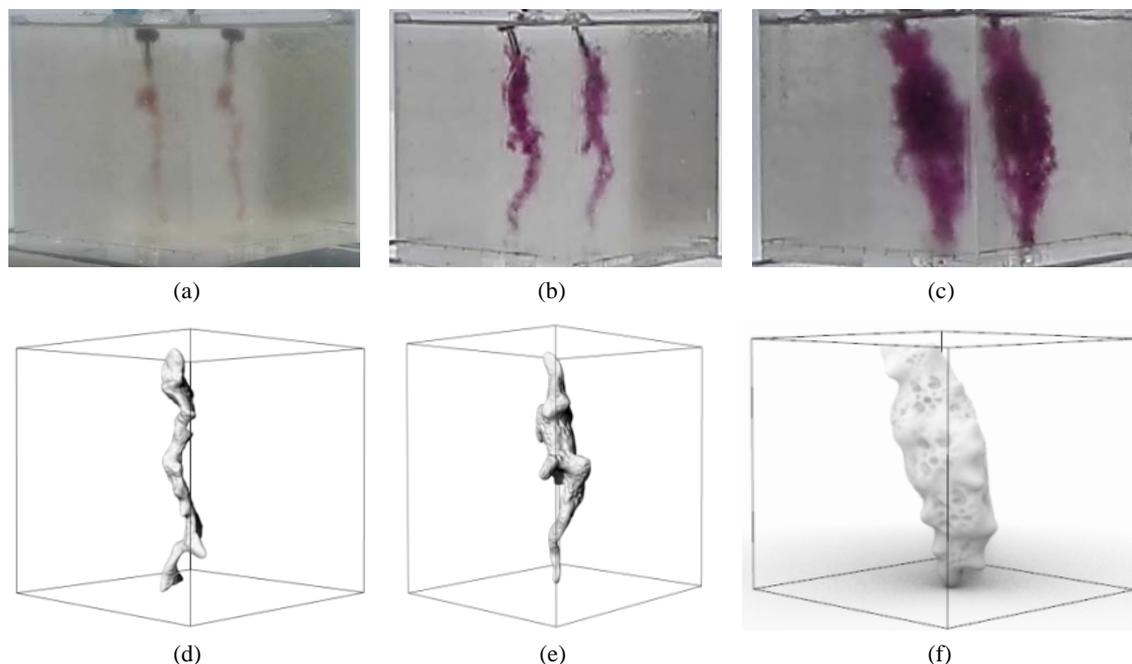


Figure 8. Experimental results and model display of 0.5~1 mm missing group transparent soil. (a) Observation results of transparent soil D; (b) Observation results of transparent soil E; (c) Observation results of transparent soil F; (d) Transparent soil D achievement model; (e) Transparent soil E achievement model; (f) Transparent soil F achievement model

图 8. 0.5~1 mm 缺失组透明土实验成果和模型展示图。(a) 透明土 D 观测结果; (b) 透明土 E 观测结果; (c) 透明土 F 观测结果; (d) 透明土 D 成果模型; (e) 透明土 E 成果模型; (f) 透明土 F 成果模型

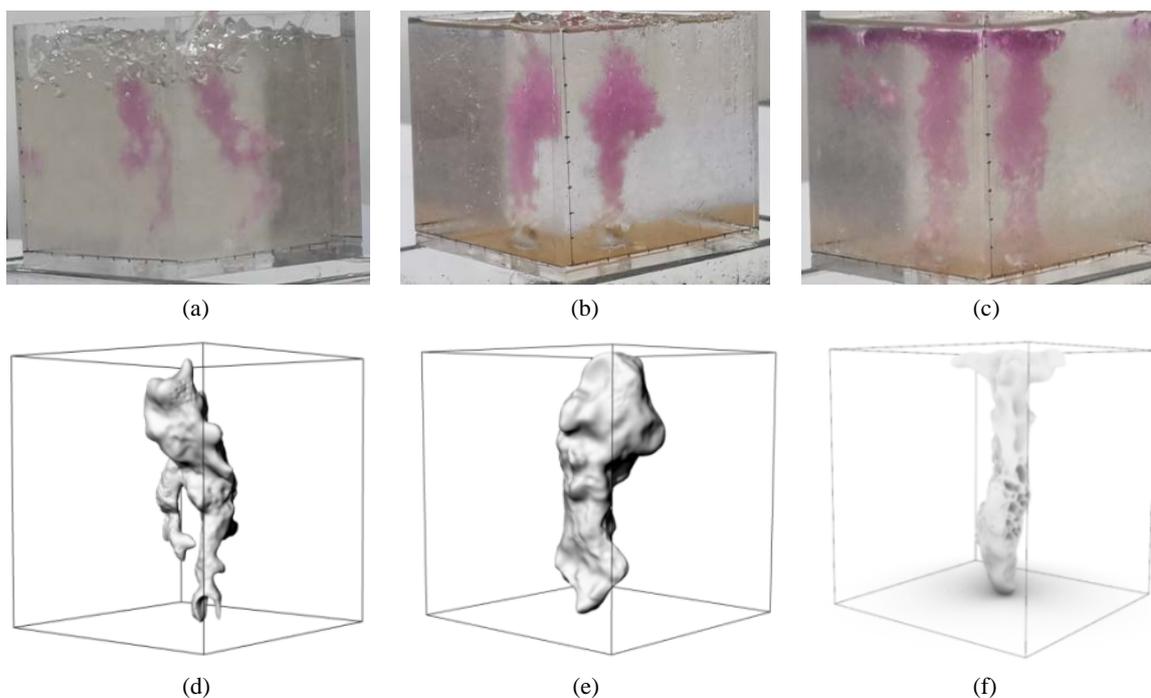


Figure 9. Experimental results and model display of 1~2 mm missing group transparent soil. (a) Observation results of transparent soil G; (b) Observation results of transparent soil H; (c) Observation results of transparent soil I; (d) transparent soil G achievement model; (e) Transparent soil H achievement model; (f) Transparent soil I achievement model

图 9. 1~2 mm 缺失组透明土实验成果和模型展示图。(a) 透明土 G 观测结果; (b) 透明土 H 观测结果; (c) 透明土 I 观测结果; (d) 透明土 G 成果模型; (e) 透明土 H 成果模型; (f) 透明土 I 成果模型

Table 2. Display table of tortuosity parameters of each group of transparent soil
表 2. 各组透明土迂曲度参数展示表

0.25~0.5 mm 缺失组		0.5~1 mm 缺失组		1~2 mm 缺失组	
透明土类型	迂曲度 τ	透明土类型	迂曲度 τ	透明土类型	迂曲度 τ
透明土 A	1.923	透明土 D	1.648	透明土 G	1.553
透明土 B	1.973	透明土 E	1.554	透明土 H	1.537
透明土 C	2.189	透明土 F	1.428	透明土 I	1.542

结合图 7~9 和表 2 分析, 在透明土细颗粒含量逐渐增加情况下, 0.25~0.5 mm 缺失系列透明土内部渗流流动范围呈现逐渐缩小现象, 土体内部迂曲度则相反呈现逐渐曲折趋 0.5~1 mm 缺失系列透明土内部渗流流动范围呈现逐渐扩大现象, 土体内部迂曲度则相反呈现逐渐平直趋势, 该现象和趋势与 0.25~0.5 mm 缺失系列透明土相反, 土体内部迂曲度变化幅度大; 1~2 mm 缺失系列透明土内部渗流流动范围变化不明显, 土体内部迂曲度变化幅度小。

5. 各组土样渗透系数公式值比较分析

将表 1 各系列透明土物理参数和表 2 各系列透明土实验参数作为 Kovacs 公式、Amer-Award 公式以及 K-C 公式计算参数使用, 代入各个公式中, 最终获得各模型公式对应渗透系数值, 如表 3~5 所示。

Table 3. Table of permeability coefficient values of each model formula of 0.25~0.5 mm missing group transparent soil
表 3. 0.25~0.5 mm 缺失组透明土各模型公式渗透系数值展示表

透明土类型	Kovacs 公式 渗透系数 k (cm/s)	Amer-Award 渗透系数 k (cm/s)	K-C 公式 渗透系数 k (cm/s)
透明土 A (细粒含量 30%)	0.207	0.359	0.572
透明土 B (细粒含量 32%)	0.157	0.336	0.442
透明土 C (细粒含量 34%)	0.119	0.296	0.380

Table 4. Table of permeability coefficient values of each model formula of 0.5~1 mm missing group transparent soil
表 4. 0.5~1 mm 缺失组透明土各模型公式渗透系数值展示表

透明土类型	Kovacs 公式 渗透系数 k (cm/s)	Amer-Award 渗透系数 k (cm/s)	K-C 公式 渗透系数 k (cm/s)
透明土 D (细粒含量 30%)	0.416	0.574	0.749
透明土 E (细粒含量 32%)	0.339	0.516	0.627
透明土 F (细粒含量 34%)	0.3	0.451	0.565

Table 5. Table of permeability coefficient values of each model formula of 1~2 mm missing group transparent soil
表 5. 1~2 mm 缺失组透明土各模型公式渗透系数值展示表

透明土类型	Kovacs 公式 渗透系数 k (cm/s)	Amer-Award 渗透系数 k (cm/s)	K-C 公式 渗透系数 k (cm/s)
透明土 G (细粒含量 30%)	0.256	0.293	0.349
透明土 H (细粒含量 32%)	0.231	0.249	0.308
透明土 I (细粒含量 34%)	0.203	0.225	0.274

通过对比表 3~5, 可知在任一颗粒含量和级配缺失下的透明土中, K-C 公式的渗透系数都最大, Amer-Award 公式次之, Kovacs 公式渗透系数最小。其次在同一颗粒粒径缺失级配透明土中, 随着细颗粒含量的增加, 渗透系数值逐渐减小。但是, 在细颗粒含量相同的情况下, 随着颗粒级配中缺失的粒径逐渐增大, 各公式的渗透系数值呈现先增大后减小的趋势。

6. 结论

本文利用透明土模拟天然砾石土, 并对其进行直接观测, 通过透明土实验技术设计相应的物理实验模型, 实现对土体内部渗流等问题的可视化观测, 从而获得直观的研究成果。通过对研究成果进行分析, 得出以下结论:

1) 通过配置与天然土性质相近的透明土, 实现了土体内部渗流的可视化, 并且通过透明土渗流现象进行建模, 将模型导入 CAD 软件进行计算得出了土体的迂曲度参数。

2) 从上文渗流模型的流动范围和迂曲度的计算结果可知, 在级配透明土中, 粒径更小的细颗粒缺失时, 渗流范围缩小, 迂曲更加曲折; 而在粒径更大的细颗粒缺失时则变化不明显。说明粒径更小的细颗粒缺失时对迂曲度的影响更大, 对土体内部渗流影响更大。

3) 将所得迂曲度参数与其他土体性质参数一起代入三个渗透系数计算公式, 可以得出在任一颗粒含量和级配缺失下的透明土中, K-C 公式的渗透系数都最大, Amer-Award 公式次之, Kovacs 公式渗透系数最小; 在同一颗粒粒径缺失级配透明土中, 随着细颗粒含量的增加, 渗透系数值逐渐减小。

4) 在细颗粒含量相同的情况下, 随着颗粒级配中缺失的粒径逐渐增大, 各公式的渗透系数值呈现先增大后减小的趋势。

参考文献

- [1] 毛昶熙, 冯玉宝, 段祥宝. 堤防设计中的非稳定渗流计算[J]. 水利学报, 2002(12): 56-62+67.
- [2] 张秀丽. 国内外大坝失事或水电站事故典型案例原因汇集[J]. 大坝与安全, 2015(1): 13-16.
- [3] Hazen, A. (2014) Some Physical Properties of Sands and Gravels, with Special Reference to Their Use in Filtration. 24th Annual Rep., Massachusetts State Board of Health, Pub. Doc. No. 34, 539-556.
- [4] Hazen, A. (1911) Discussion of Dams on sand Foundations by A. C. Koenig. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, **73**, 199-203. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0002320>
- [5] Taylor, D.W. (1948) *Fundamentals of Soil Mechanics*, Wiley, New York. <https://doi.org/10.1097/00010694-194808000-00008>
- [6] Mansur, C.L. and Kaufman, R.I. (1962) *Foundation Engineering*. McGraw-Hill, New York, 241-350.
- [7] Kovacs, G. (1981) *Seepage Hydraulics*. Elsevier Scientific, Amsterdam.
- [8] Kozeny, J. (1927) Uber kapillare leitung der wasser in boden. *Royal Academy of Science, Vienna, Proc. Class I*, **136**, 271-306.
- [9] Carman, P.C. (1938) The Determination of the Specific Surface of Powders I. *Transactions. J. Soc. Chem. Ind.*, **57**, 225-234.
- [10] 郑斌, 李菊花. 基于 Kozeny-Carman 方程的渗透率分形模型[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(1): 193-198.
- [11] Xu, P. and Yu, B. (2008) Developing a New form of Permeability and Kozeny-Carman Constant for Homogeneous Porous Media by Means of Fractal Geometry. *Advances in Water Resources*, **31**, 74-81. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2007.06.003>
- [12] Costa, A. (2006) Permeability-Porosity Relationship: A Reexamination of the Kozeny-Carman Equation Based on a Fractal Pore-Space Geometry Assumption. *Geophysical Research Letters*, **33**, L02318. <https://doi.org/10.1029/2005GL025134>
- [13] 金韦剑, 朱斌. 基于透明土孔隙介质双渗流模型试验研究[J]. 四川地质学报, 2020, 40(1): 103-106.
- [14] Bear, J. (1988) *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Dover Publications, Inc., New York.
- [15] Amer, A.M. and Award, A.A. (1974) Permeability of Cohesionless Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **100**, 1309-1316. <https://doi.org/10.1061/AJGEB6.0000134>