

EPS颗粒含量对混合土渗透性的影响*

叶文¹, 黄林冲²

1. 中山大学智能工程学院, 广东 广州 510006
2. 中山大学航空航天学院, 广东 深圳 518107

摘要: 为了研究聚苯乙烯(EPS)颗粒含量对混合土渗透性的影响, 利用常水头渗透仪测定河源石英砂、福建标准砂与EPS颗粒的混合土在EPS颗粒质量分数分别为0、0.2%、0.4%、0.6%、0.8%和1%共六种掺量下的渗透系数。提出图像处理方法, 用于计算颗粒的粒径分布; 基于柯森-卡门渗透公式, 拟合无因次参数 C_0 与EPS颗粒含量之间的关系; 基于泊肃叶定律, 建立渗透物理模型。研究表明, 混合土中EPS颗粒对混合土的不均匀系数和曲率系数的影响很小; 随着EPS颗粒含量的增大, 混合土的密度及孔隙率均减小; 颗粒的形态对孔隙率具有较大的影响; 混合土的渗透系数随EPS颗粒含量的增加呈二次函数变化, 河源石英砂混合土的渗透性高于福建标准砂混合土; 由于颗粒形态的不同, 产生的水头损失也将不同, 引入叠合系数对这部分损失进行描述, 通过拟合证实叠合系数与EPS颗粒含量呈线性变化。

关键词: 轻量土; EPS含量; 渗透系数; 柯森-卡门渗透公式; 叠合系数

中图分类号: TU43 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2021)06-0015-09

Effect of EPS particle content on permeability of mixed soil

YE Wen¹, HUANG Linchong²

1. School of Intelligent Systems Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China
2. School of Aeronautics and Astronautics, Sun Yat-sen University, Shenzhen 518107, China

Abstract: In order to study the effect of EPS particle content on the permeability coefficient of mixed soil, the permeability coefficient of the mixed soil of Heyuan quartz sand, Fujian standard sand, and EPS particles were measured with a normal water head permeameter at six kinds of blending amounts: 0, 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8% and 1%. To obtain a more accurate particle size distribution and average particle size of mixed soil, image processing methods and average particle size calculation methods are proposed. Based on the Coson-Carmen permeability formula, the relationship between the dimensionless parameters C_0 and EPS particle content are fitted. Based on Poiseuille's law, a physical model of infiltration is established. The research results show that the EPS particles in the mixed soil have little effect on the heterogeneity coefficient and curvature coefficient of the mixed soil; as the EPS particle content increases, the density and porosity of the mixed soil decrease; the shape of the particles has a significant effect on the porosity; the permeability coefficient of the mixed soil changes quadratically with the increase of the EPS particle content. The permeability of the Heyuan quartz sand mixed soil is higher than that of the Fujian standard sand mixed soil. Due to the different particle

* 收稿日期: 2020-02-19 录用日期: 2020-03-24 网络首发日期: 2021-01-11
基金项目: 广州市产学研协同创新重大专项(201704020139); 深圳市自然科学基金面上项目(JCYJ20190807162401662); 深圳市2020年可持续发展科技专项(KCXFZ202002011008532)
作者简介: 叶文(1993年生), 男; 研究方向: 岩土工程; E-mail: yewen6@mail2.sysu.edu.cn
通信作者: 黄林冲(1981年生), 男; 研究方向: 岩土工程; E-mail: hlinch@mail.sysu.edu.cn

forms, the head loss will also be produced differently, the superposition coefficient is introduced to describe this part of loss. It is confirmed by fitting that the superposition coefficient and the content of EPS particles change linearly.

Key words: light-weight soil; EPS weight fraction; permeability; Cozeny-Karman equation; superposition coefficient

轻量土具有材料环保、质量轻和可调节土体密度等优点, 因此被广泛应用于路基工程、桥梁工程和海堤工程等领域^[1-4]。根据填充材料的不同, 有发泡聚苯乙烯 EPS (expanded polystyrene) 混合轻量土、发泡颗粒混合轻量土、气泡混合轻量土、次生材料混合轻量土四类^[5], 其中 EPS 混合轻量土的应用最为广泛。

众多学者针对轻量土的物理及力学性能展开了一系列的研究。在土体材料方面, 研究表明: EPS 颗粒与砂土、黄土、淤泥和棉秆纤维等材料混合后的轻量土具有良好的强度和稳定性^[3, 6-8]; 在物理力学特性方面, 主要是通过试验研究轻量土的性质, 如: 通过击实试验确定轻量土最优含水率和最大干密度^[9]; 通过室内动三轴试验研究轻量土的动强度参数^[10]; 通过无侧限抗压强度试验研究轻量土的密度、强度和变形特性^[11]; 在 EPS 颗粒掺量方面, 研究表明: 轻量土的动强度、抗压强度、弹性模量、抗剪强度、黏聚力、内摩擦角、最大循环应力比、初始压缩模量等随 EPS 颗粒掺入比的增大而减小^[12-18]。以上研究表明, 轻量土的力学性质与砂土类型及 EPS 颗粒含量密切相关。

在某些工程中, 如海绵城市建设, 不仅仅要考虑轻量土的力学性质, 还应考虑轻量土的渗透性。在一般情况下, 轻量土的强度和渗透性两者关系相互矛盾, 当土体孔隙率越大, 对应的渗透性也越大, 但是强度也变得更低。轻量土渗透性的主要影响因素有土体密实度、土颗粒的自身性质等。由于 EPS 颗粒的质量相对较轻, 且具有较强的伸缩性, 因此可通过控制 EPS 颗粒含量来改变土体密实度。目前, 研究 EPS 颗粒含量对轻量土渗透性的影响主要是将 EPS 颗粒、土颗粒和水泥混合、固结后研究其相关性质^[19-20]。研究表明, 对渗透性影响最大的是 EPS 颗粒含量, 其次是水泥的掺量。但是, EPS 颗粒含量对混合土渗透性影响规律的研究尚显不足。本文通过河源石英砂、福建标准砂与 EPS 颗粒进行混合组成混合土, 进行河源石英砂和标准砂在不同 EPS 颗粒含量情况下的渗透性

试验, 研究 EPS 颗粒对于混合土的物理性质及渗透性的影响。

1 试验材料及步骤

1.1 试验材料

本次试验选择的福建标准砂(以下简称标准砂)来自厦门艾思欧标准砂有限公司生产的中国 ISO 标准砂, 多为黄褐色, 二氧化硅质量分数为 96% 以上。河源石英砂(以下简称石英砂)来自广东省河源市(以下简称石英砂), 为天然石英砂, 主要呈乳白色或无色半透明状, 二氧化硅质量分数在 99% 以上, EPS 颗粒的主要成分是聚苯乙烯树脂, 多为圆球形, 质量较轻。砂土颗粒及 EPS 颗粒如图 1 所示。

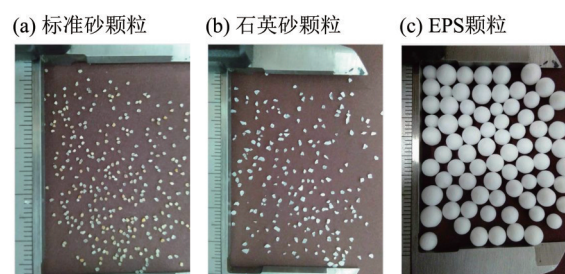


图 1 砂土及 EPS 颗粒

Fig. 1 Sand and EPS particles

试验前, 采用筛径为 0.25 mm 和 1.0 mm 的标准筛对石英砂和标准砂进行初步筛分, 筛分后采用图像法测量石英砂、标准砂及 EPS 颗粒粒径, 用排水法测量颗粒的密度。砂土和 EPS 颗粒的基本物理参数见表 1 所示。

1.2 级配曲线及物理参数

颗粒形状是砂土的重要性质之一, 不同的颗

表 1 砂土和 EPS 颗粒的基本物理性质

Table 1 Basic physical properties of sand and EPS particles

类型	粒径/mm	密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
福建标准砂	0.20 ~ 1.2	2.55
河源石英砂	0.20 ~ 1.8	2.46
EPS 颗粒	4.0 ~ 6.0	0.015 8

粒形态影响颗粒间的排列方式, 而颗粒的排列方式是影响砂土密度的主要原因之一。本次试验随机选择少量石英砂、标准砂和EPS颗粒进行电镜扫描, 观察砂土的颗粒形态。试验选用台式JSM-6010LA型电镜, 分辨率5.0 μm。砂土颗粒电镜图如图2所示, 由图可以看出, 虽然石英砂和标准砂的主要成分都是二氧化硅, 但是颗粒形态存在较大的区别。石英砂颗粒形状较不规则, 颗粒为长条形和薄片状, 表面凹凸不平, 存在明显的棱角, 且颗粒大小差距明显。而标准砂颗粒形状较为圆润, 颗粒大小均匀, 颗粒表面棱角较少。EPS颗粒近似为圆球形, 表面不存在棱角却存在微小的孔隙, 因此受压的时候存在变形现象。

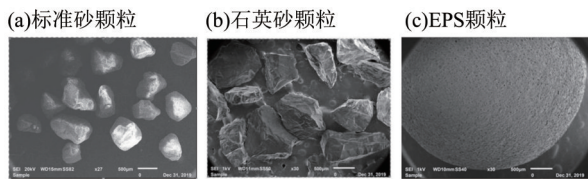


图2 砂土颗粒电镜图

Fig. 2 Electron micrograph of sand particles

对于室内试验, 最常用的粒径统计方法是筛分法, 其主要原理是用筛孔尺寸不同的筛对砂进行筛选, 通过控制筛孔尺寸得到某一粒径等级的砂土, 然后进行计算。筛分法具有设备及操作简单、试验材料较易获得等优点。但对于石英砂这种具有长条形颗粒, 使用筛分法得到的级配曲线会存在较大的误差, 且筛分法对不规则颗粒的筛分具有随机性, 对颗粒的不同方向进行筛分, 得出的结果也不同。对于渗透试验, 粒径的分布情

况将影响混凝土的孔隙比, 对试验结果产生较大的影响。对于颗粒材料, 由于颗粒的几何形状不规则, 因此不能单一用直径这一概念描述颗粒的尺寸, 需将颗粒等效为与颗粒同体积的球形颗粒进行描述, 这个球形的直径即为等效直径。为了能得到较为准确的颗粒粒径分布情况, 本次试验采用图像处理方法对粒径进行统计, 从而得到粒度分布情况。图像法的具体步骤如下:

(1) 随机选择5组标准砂、石英砂和EPS颗粒, 将砂土颗粒平铺在纸上, 为增加颗粒的对比度, 本次试验选择砂纸作为背景。并将直尺放在砂纸的两个边缘, 用于图像矫正和测量尺寸, 并用相机拍摄图片, 如图3(a)所示。

(2) 使用Fiji软件的测量功能, 测量图片长和宽, 得到图片的计算尺寸, 并换算成以mm为单位, 如图3(b)所示。根据计算尺寸和实际尺寸的关系, 确定图像的放大倍数, 根据放大倍数进行图像矫正。

(3) 使用Fiji软件中的二值化功能, 将目标图形二值化, 然后选择计算区域, 根据计算区域并选择软件中提取面积的功能选项, 根据等效投影面积原理得到目标区域各个颗粒的面积并导出, 如图3(c)所示。

(4) 将导出的颗粒面积除以放大倍数, 得到颗粒的实际面积, 根据实际面积, 换算成等面积的圆, 这个圆的直径就是颗粒的等效粒径。

(5) 重新选取试样, 重复步骤(1)~(4)。

试验总共选取标准砂颗粒样本1 334个、石英砂颗粒样本1 156个、EPS颗粒样本409个。

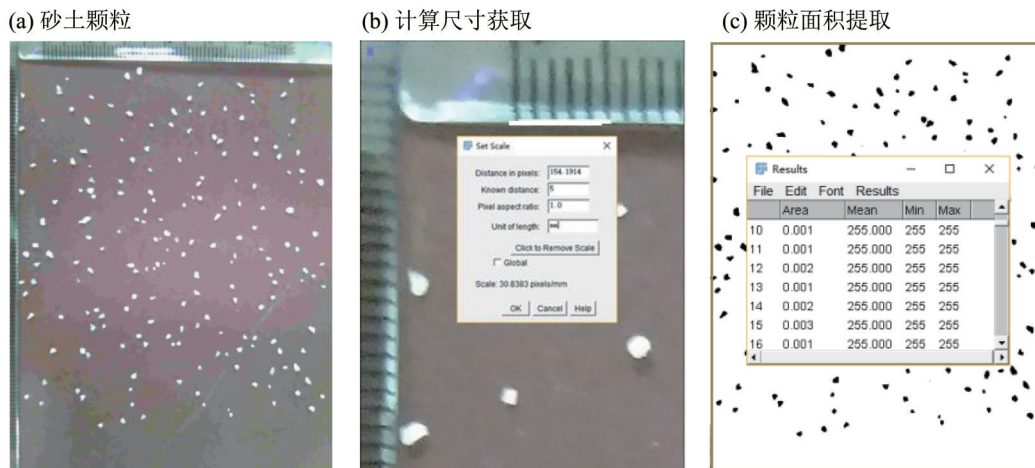


图3 等效粒径计算

Fig. 3 Calculation of equivalent particle size

根据图像法得到的粒径统计信息, 绘制颗粒级配曲线, 如图 4 所示。

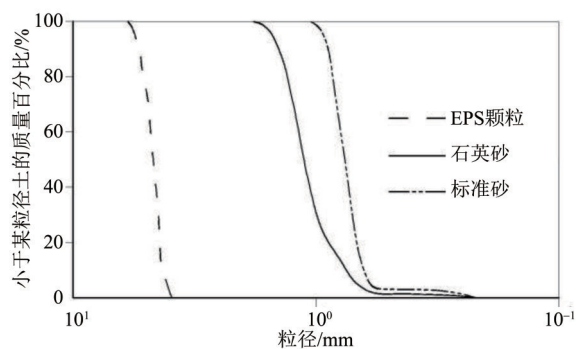


图 4 颗粒级配曲线

Fig. 4 Particle gradation curve

1.3 试验步骤

渗透试验按照《土工试验规程》^[21]设计。实验采用南京土壤仪器厂有限公司生产的 TST-70 型常水头渗透仪。

因渗透仪所能容纳的试样质量并不确定, 因此每次试验都制备总质量为 3 000 g 的 EPS 颗粒混合土。试验时, 先按设计的配比分别计算好所需砂土和 EPS 颗粒质量, 并用电子称称取相应的质量, 精确至 0.01 g。由于 EPS 颗粒质量很轻, 很难充分搅拌均匀, 且装样时颗粒易集中于试样上方, 因此在试样中加入 500 mL 水, 并充分搅拌均匀, 制成混合土, 如图 5 所示。试样采用分层制样法制得, 每次称取 400 g 混合颗粒倒入圆筒内, 为防止击实时受力不均匀, 在混合土上部覆盖上薄铁片, 并用击实器(内径 $\phi 61.8$ mm)击实 5 次, 击实完

成后取下铁片和击实器。最后一层装样后用刮刀刮去多余部分, 使混合土保存在测压管上方 4 cm 处。为防止混合土被冲刷导致颗粒流失, 在混合土上方铺上 2 cm 厚的粒径为 3~4 mm 的石英砂颗粒作为缓冲层。调节测压管水位高度, 进行渗透试验并测量渗透系数。



图 5 砂土-EPS 混合颗粒

Fig. 5 Sand-EPS mixed particles

为消除温度影响, 每次试验时分别测量进水口和出水口处的水温, 取平均值作为试验温度, 试验后计算试验温度下的渗透系数, 按照换算关系统一修正为 20℃ 水温时的渗透系数。试验结束后将剩余部分晾干, 称量剩余 EPS 颗粒和砂土颗粒余量。每次试验重复 3 次, 并求平均值。

根据剩余的 EPS 颗粒、石英砂、标准砂的质量, 计算实际用于试验的颗粒质量。并由颗粒密度, 计算标准砂混合土、石英砂混合土的 EPS 颗粒体积百分比、相对密度、孔隙比, 如表 2 所示。

表 2 混合土 EPS 颗粒体积百分比、相对密度和孔隙比

Table 2 EPS particle volume ratio, relative density and porosity ratio of mixed soil

EPS 颗粒质量百分比/%	标准砂			石英砂		
	EPS 颗粒体积百分比/%	相对密度 G_w	孔隙比	EPS 颗粒体积百分比/%	相对密度 G_w	孔隙比
0	0	1.26	1.03	0	1.19	1.14
0.2	24.36	1.08	0.79	24.04	1.03	0.88
0.4	39.14	1.00	0.56	39.90	0.88	0.75
0.6	49.50	0.86	0.50	49.26	0.77	0.70
0.8	56.62	0.76	0.48	56.61	0.70	0.59
1.0	62.50	0.67	0.47	64.33	0.67	0.52

1.4 混合土物理参数

在对砂土的粒度分析中, 不均匀系数反映颗粒粒度的范围, 曲率系数反映了土的粒径级配累

计曲线的斜率是否连续, 平均粒径反映了混合土几何尺寸的尺度。不均匀系数和曲率系数的计算方法为: 用孔径为 0.25、0.3、0.5、0.6 和

1.0 mm 的标准筛对石英砂和标准砂混合土进行筛分, 并计算出过筛累积质量, 然后算出质量比在 10%、30% 和 60% 时土的质量, 根据筛分数据找出对应的质量在哪两个筛孔之间, 最后用插值法确定质量比在 10%、30% 和 60% 时对应的粒径, 即 d_{10} 、 d_{30} 和 d_{60} 。不均匀系数 C_u 和曲率系数 C_c 定义为

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}, \quad (1)$$

$$C_c = \frac{d_{30} \cdot d_{30}}{d_{60} \cdot d_{10}}, \quad (2)$$

计算得到混合土的不均匀系数、曲率系数、平均粒径如表 3 所示。

表 3 混合土的不均匀系数、曲率系数、等效粒径

Table 3 Unevenness coefficient, curvature coefficient and equivalent particle size of mixed soil

EPS 颗粒质量百分比/%	标准砂			石英砂		
	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	平均粒径 d_e /mm	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	平均粒径 d_e /mm
0	1.281	1.031	0.528	1.578	1.115	0.615
0.2	1.281	1.031	0.531	1.579	1.116	0.621
0.4	1.282	1.031	0.535	1.579	1.116	0.628
0.6	1.282	1.031	0.538	1.579	1.116	0.634
0.8	1.282	1.031	0.541	1.580	1.117	0.641
1.0	1.283	1.030	0.544	1.590	1.117	0.651

2 结果与分析

根据达西定律

$$k_{20} = \frac{QL}{Aht}, \quad (3)$$

其中 A 为过水断面面积, k_{20} 为渗透系数, Q 为时间 t 内的渗透水量, L 为两侧压孔中心间的试样高度, h 为平均水位差。根据公式 (3), 计算得到不同 EPS 颗粒含量 (w) 下混合土的渗透系数 (渗透系数均为 20 °C 时的渗透系数) 如表 4 所示。

表 4 不同 EPS 颗粒含量下混合土的渗透系数
Table 4 Permeability coefficient of mixed soil with different EPS particle content

EPS 颗粒质量百分比/%	标准砂 / ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	石英砂 / ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
0	0.119	0.352
0.2	0.094	0.337
0.4	0.070	0.256
0.6	0.090	0.271
0.8	0.108	0.293
1.0	0.165	0.367

2.1 EPS 颗粒含量对砂土物理性质的影响

轻量土重要的特点是减轻土体材料的质量, 减轻质量最主要的措施是改变 EPS 颗粒的含量。但是, 改变混合土中 EPS 颗粒含量的同时也改变了混

合土的物理性质。因此, 需要研究 EPS 颗粒与砂土混合后土体的密度、孔隙率等物理性质的变化情况。

图 6 为 EPS 颗粒质量百分比与混合土密度的关系。由图可知, 混合土密度随 EPS 颗粒含量的增加线性减小, 混合土中 EPS 颗粒的质量百分比每增加 0.1%, 密度减小约 6%。由于 EPS 颗粒具有极其小的颗粒密度, 仅为 0.0158 g/cm^3 , 是纯砂土堆积密度的 0.6% 左右。因此, EPS 颗粒在混合土中最主要的作用是降低土体密度。而石英砂和标准砂对混合土密度的影响差异性较小, 同 EPS 颗粒含量下, 二者对应的混合土密度差距在 5% 以内。

图 7 为 EPS 颗粒占比与混合土孔隙率的变化情况。由图可知, 混合土孔隙率随 EPS 含量的增加逐

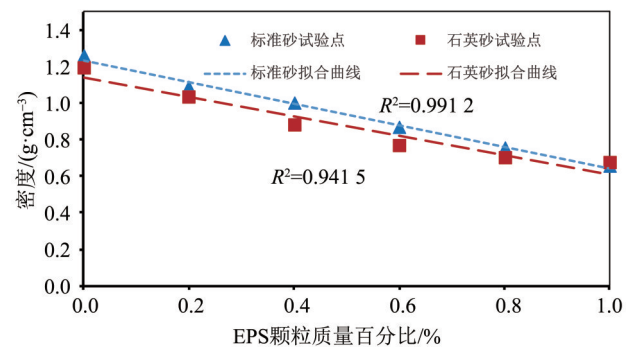


图 6 EPS 颗粒质量百分比与密度的关系

Fig. 6 Relationship between mass ratio of EPS particles and sample density

渐减小,但变化规律有较大的不同。石英砂混合土的孔隙率随EPS颗粒含量的增加近似呈线性减小, EPS颗粒含量每增加0.1%,石英砂的孔隙率减小0.8%。而对于标准砂混合土,混合土的孔隙率随EPS颗粒含量的增加呈二次函数关系变化,当EPS颗粒含量的体积占比达到50%后,混合土的孔隙率增长变得较为缓慢。因此,混合土随EPS颗粒含量的变化情况与其内部砂土的性质密切相关,其砂土颗粒尺寸较为均匀、形状较圆润时,混合土的孔隙率与EPS颗粒含量近似呈二次函数变化;当砂土颗粒形状较不规则时,孔隙率近似为线性变化。所以, EPS颗粒对土体密度降低是有一定范围的。对于某些砂土,当EPS颗粒的体积占比达到50% (即质量比为0.6%)后, EPS颗粒含量的提高对孔隙率的影响将变得很小。

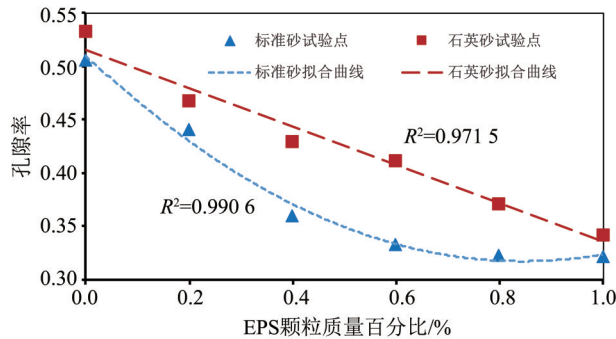


图7 EPS颗粒质量百分比与混合土孔隙率的关系

Fig. 7 Relationship between EPS particle mass ratio and sample porosity

结合表3可得,不同EPS颗粒含量的石英砂混合土和标准砂混合土的不均匀系数和曲率系数差距很小,可忽略不计;而平均粒径随EPS颗粒含量的增加缓慢增大。因此,影响混合土密度和孔隙率的最重要的参数是混合土的平均粒径。

2.2 EPS颗粒含量对渗透系数的影响

由前一节的分析可知, EPS颗粒的含量将改变混合土的孔隙率,而砂土的渗透系数与孔隙率密切相关。本节通过拟合渗透系数与EPS颗粒含量的函数关系,研究EPS颗粒对渗透系数的影响。

2.2.1 EPS颗粒含量与渗透系数的关系 根据表4,绘制混合土渗透系数与EPS颗粒含量的关系曲线,如图8所示。由图可以看出,混合土的渗透系数与EPS颗粒含量密切相关,随着EPS颗粒的增多,石英砂混合土和标准砂混合土的渗透系数均

先减小后增大,即呈二次函数规律变化。在相同的EPS颗粒含量下,石英砂的渗透率比标准砂大3~10倍。对比石英砂混合土及标准砂混合土,两者渗透率的不同主要与内部砂土的颗粒形状有关。石英砂颗粒相比于标准砂颗粒,颗粒更加不规则,导致石英砂颗粒间存在的孔隙比标准砂颗粒间多,因此渗透系数也就更大。

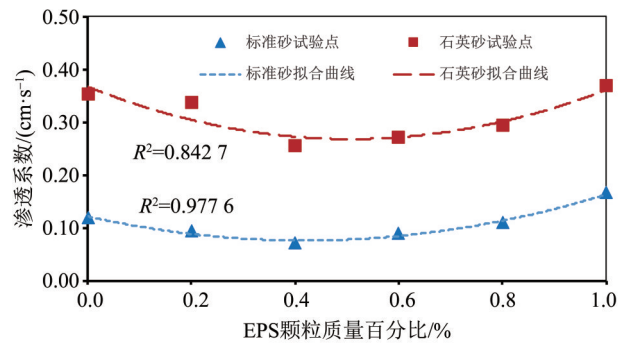


图8 EPS颗粒质量百分比与渗透系数的关系

Fig. 8 Relationship between the mass ratio of EPS particles and the permeability coefficient

由上可知, EPS颗粒含量与混合土渗透系数密切相关,采用柯森-卡门^[22]渗透公式进行进一步的研究。柯森-卡门渗透公式为

$$K = C_0 \frac{n^3}{(1-n)^2} d_e^2, \quad (4)$$

其中 K 为渗透系数, C_0 为无因次参数, n 为孔隙率, d_e 为平均粒径。由式(4)得参数 C_0 为

$$C_0 = K \frac{(1-n)^2}{n^3} \frac{1}{d_e^2}. \quad (5)$$

由表4及公式(5),得无因次参数 C_0 与EPS颗粒含量的关系如图9所示。若EPS颗粒质量百分比为 $x\%$, C_0 与标准砂、石英砂混合土EPS颗粒含量的拟合方程式分别为

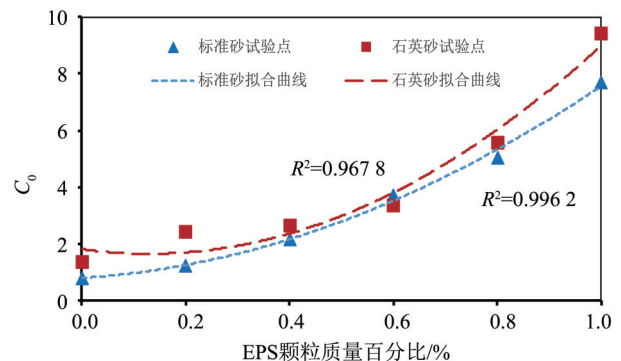


图9 C_0 与EPS颗粒质量百分比的关系

Fig. 9 Relationship between C_0 and EPS particles mass ratio

$$C_0 = 9.7118x^2 - 2.5285x + 1.8185 (R^2 = 0.9678), \quad (6)$$

$$C_0 = 5.6225x^2 + 1.1511x + 0.8011 (R^2 = 0.9962). \quad (7)$$

由图 9 可以看出, 参数 C_0 随 EPS 颗粒含量近似成二次函数关系增长, 且随着 EPS 颗粒含量的增加而增大, 标准砂混合土对应的 C_0 值均小于石英砂混合土。由拟合结果可知, 河源石英砂混合土、标准砂混合土的 C_0 值较为接近, 渗透性系数不同主要是由混合土平均粒径及孔隙率造成的。

2.2.2 渗透系数模型计算 根据砂土的渗透性理论, 土体的渗透特性主要取决于砂土内部的孔隙体积特征和颗粒表面积特征。为了从微观角度分析土体的渗透特性, 将土体内部抽象为等效渗透管, 每根渗透管由 EPS 颗粒和砂土颗粒组成, 如图 10 所示。

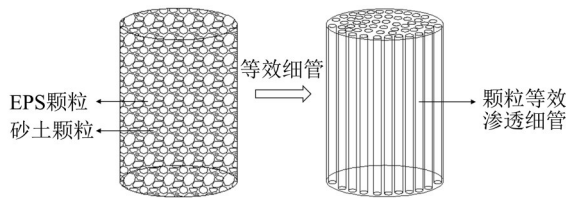


图 10 土体渗透通道抽象示意图

Fig. 10 Abstract schematic diagram of soil infiltration channels

设所取土柱混合土的高为 L , 半径为 r_s , 孔隙率为 n , 等效细管个数为 N , 每根等效细管的半径为 r_0 , 土柱过水面积上的平均流速为 V_s , 则根据土柱的总面积与细管面积之间的关系可得

$$n\pi r_s^2 = N\pi r_0^2. \quad (8)$$

根据泊肃叶定律^[23], 每根细管内部的平均流速为

$$V = \frac{gJ}{8\nu} r_0^2, \quad (9)$$

式中 V 为每根细管断面平均流速, g 为重力加速度, J 为水力坡降, ν 为运动粘度。

设土体颗粒的平均直径为 d_e , 土颗粒数为 N_e , 则有

$$\rho_d \pi r_s^2 L = \frac{\pi}{6} d_e^3 \rho_s N_e, \quad (10)$$

式中 ρ_d 为土体干密度, ρ_s 为土颗粒密度。

砂土颗粒数量占比远多于 EPS 颗粒, 因此颗粒间的接触形式主要为 EPS 颗粒-砂土颗粒和砂土颗粒-砂土颗粒, 如图 11 所示。

由于颗粒间紧密地接触在一起, 颗粒间存在

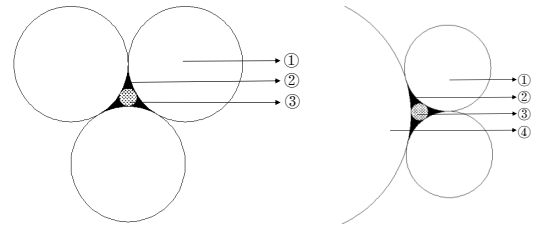


图 11 颗粒接触形式

①—砂土颗粒; ②—粘滞静止液体; ③—等效渗透细管水流; ④—EPS 颗粒

Fig. 11 Particle contact form

很小的缝隙, 由于水的滞留作用使得这一部分产生水头损失。此外, 将水流路径抽象为直管对渗透系数也存在折减作用。因此, 引入叠合系数 ξ 表示这一部分损失。设等效细管的总面积为 S_e , 土体颗粒的总面积为 S_s , 则

$$S_e = \xi S_s, \quad (11)$$

展开, 得

$$2\pi r_0 L N = \pi d_e^2 N_e \xi. \quad (12)$$

根据达西定律

$$V_s = KJ, \quad (13)$$

每根细管的平均流速与土柱过水面积上的平均流速之间有

$$V_s = nV. \quad (14)$$

联立式 (8) ~ (15), 得渗透系数

$$K = C_1 \frac{1}{\xi^2} \frac{n^3}{(1-n)^2} d_e^2, \quad (15)$$

其中 $C_1 = \frac{g}{72\nu}$, 为常量。

2.2.3 叠合系数与 EPS 颗粒含量的关系 根据公式 (4) 和 (15), C_0 和叠合系数 ξ 有

$$C_0 = C_1 \frac{1}{\xi^2}. \quad (16)$$

根据公式 (5)~(16), 计算得出叠合系数 ξ 随 EPS 颗粒质量百分比的变化如图 12 所示。

由图 12, 混合土中叠合系数随 EPS 颗粒含量的增加线性减少。根据分析可知, 砂土颗粒-砂土颗粒这类接触形式中的粘滞静止液体大于 EPS 颗粒-砂土颗粒这一接触形式, 即砂土颗粒-砂土颗粒具有更大的水头损失。因此随着 EPS 颗粒含量的增加, 混合土中 EPS 颗粒-砂土颗粒这一接触形式也增多, 水头损失减小, 抽象等效细管的管径增大, 导致叠合系数减小。砂土颗粒形状对叠合系数在 EPS 颗粒含量较少时影响较大, 随 EPS 颗粒含量的增多影响减小。

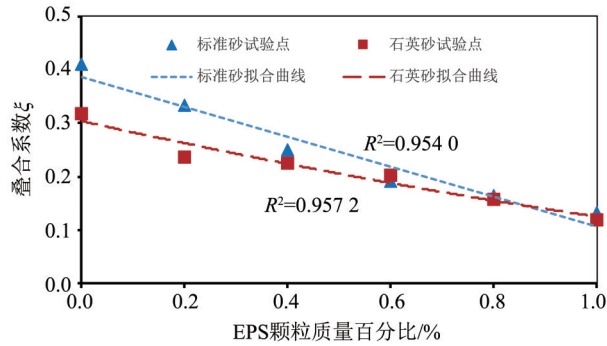


图 12 EPS 颗粒质量百分比与叠合系数的关系

Fig. 12 Relationship between EPS particle mass ratio and superposition coefficient

3 结论

本文对不同 EPS 颗粒含量的石英砂混合土和标准砂混合土进行渗透试验研究,并结合柯森-卡门渗透公式,研究 EPS 颗粒含量对渗透性的影响,得出以下结论:

1) EPS 颗粒的密度仅为纯砂质量的 0.6%。对于混合土, EPS 颗粒的质量每增加 0.1%, 密度减小约 6%; 当 EPS 颗粒的质量占比为 0.6% 时, 体积占比将达到 50%, 极大地提高了混合土的填充性能。

2) EPS 颗粒混合土的孔隙率随 EPS 颗粒含量的变化情况与内部砂土的颗粒性质密切相关。颗粒尺寸较为均匀、形状较圆润时, 孔隙率与 EPS 颗粒含量近似呈二次函数变化; 对于颗粒较不规则时, 近似为线性变化。对于标准砂混合土, 当 EPS 颗粒的体积占比达到 50% 时, 对孔隙率的影响将

变得很小。

3) 根据柯森-卡门渗透公式, 研究发现: 无因次参数 C_0 与 EPS 颗粒含量之间近似成二次函数关系增长, 且随着 EPS 颗粒含量的增加而增大。标准砂混合土对应的 C_0 值均小于石英砂混合土、但差异不明显, 因此不同材料混合土渗透性系数的差异主要是由混合土平均粒径及孔隙率造成的。

4) 通过等效细管模型, 研究发现: 混合土中叠合系数随 EPS 颗粒含量的增加线性减少。这主要是由于颗粒间的主导接触形式发生变化导致的。随着 EPS 颗粒含量的增加, 混合土中 EPS 颗粒-砂土颗粒这一接触形式也增多, 水头损失减小, 抽象等效细管的管径增大, 导致叠合系数减小。砂土颗粒形状对叠合系数在 EPS 颗粒含量较少时影响较大, 随 EPS 颗粒含量的增多影响减小。

5) 混合土的渗透系数随 EPS 颗粒含量的增多呈二次函数变化的主要原因是: 当 EPS 颗粒含量较少时, 颗粒间占主导的接触形式是砂土颗粒-砂土颗粒, 此时叠合系数较大, 水头损失大, 渗透系数的主要影响因素是混合土的孔隙率。随着孔隙率的减少, 混合土允许通过的水量也较少, 导致渗透系数随 EPS 颗粒含量的增加而降低; 当混合土中 EPS 颗粒质量占比增多至 0.6% 时, EPS 颗粒的体积占比将达到 50%, 此后孔隙率的变化将很小, 而混合土占主导的接触形式是 EPS 颗粒-砂土颗粒, 此时叠合系数成为影响渗透系数的主要因素。随 EPS 颗粒含量的增大, 叠合系数减小, 水头损失也减小, 混合土体允许流过的水增加, 导致渗透系数增大。

参考文献:

- [1] 付小建, 何明胜, 眭小龙, 等. 聚苯乙烯轻质混合土配合比优化设计[J]. 新型建筑材料, 2011, 38(12): 42-44.
- [2] DU Q, LI M, YANG P, et al. Study on the laws of soil pressures on buttressed retaining walls of foamed light-weight soil embankments [C]// The 2nd International Conference on Information Technology and Industrial Automation (ICITIA), 2017.
- [3] 杨涛, 张爱军, 米文静, 等. 棉秆纤维轻质土配合比设计研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(9): 146-154.
- [4] 蒋学. 建筑用砂混合轻质土在路桥过渡段中的应用研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012.
- [5] 侯天顺, 徐光黎. EPS 粒径对轻质土抗剪强度的影响规律[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(10): 1634-1641.
- [6] 王超, 高洪梅, 王志华, 等. EPS 混合土处理桥台软土地基模型试验[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2017, 39(6): 118-123.
- [7] 杨涛. 湿陷性黄土地区海绵城市路基换填轻质土配比研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2019.
- [8] 冯永, 裴玉斌. EPS 淤泥混合土龄期对其强度影响的变化规律研究[J]. 科教导刊, 2014(4): 183-184.
- [9] 杨凯旋, 侯天顺. 击实试验类型对 EPS 颗粒轻质土击实特性的影响规律[J]. 岩土力学, 2020(6): 1-12.
- [10] 董理, 侯天顺, 骆亚生. 聚苯乙烯(EPS)颗粒混合轻质土的动强度参数研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(5): 139-145+154.
- [11] 裴振伟, 侯天顺, 骆亚生. EPS 颗粒混合轻质土无侧

- 限抗压强度特性试验研究[J]. 工程地质学报, 2018, 26(6): 1454-1462.
- [12] 董理. 动荷载下EPS颗粒混合轻量土的动强度特性试验研究[D]. 咸阳:西北农林科技大学, 2018.
- [13] LEE K H, YANG K H, MUN J H, et al. Effect of sand content on the workability and mechanical properties of concrete using bottom ash and dredged soil-based artificial lightweight aggregates[J]. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2019, 13(1):1-13.
- [14] LI H, SUN J, LI B. Analysis on the mechanical and fatigue properties of foamed lightweight Soil [C]// *The 2nd International Conference on Civil, Transportation and Environmental Engineering (ICCTE)*, 2017.
- [15] JAMSHIDI C R, KARIMPOUR F M, POURGHAF-FAR M S, et al. An investigation on the geotechnical properties of sand-EPS mixture using large oedometer apparatus[J]. *Construction & Building Materials*, 2016 (113): 773-782.
- [16] 侯天顺. 淤泥发泡颗粒混合轻量土力学性质的试验研究[D]. 北京:中国地质大学, 2008.
- [17] KIM T H, KANG G C, PARK L K. Development and mechanical strength properties of a new lightweight soil [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72 (4) : 1109-1116.
- [18] 姜健, 张敏, 俞宏. 无侧限抗压强度与轻量土配比参数的非线性回归分析研究[J]. 浙江水利水电专科学校学报, 2007(4): 5-7.
- [19] 刘汉龙, 董金梅, 周云东, 等. 聚苯乙烯轻质混合土应力-应变特性分析[J]. 岩土工程学报, 2004(5): 579-583.
- [20] 朱云华. 聚苯乙烯轻质混合土渗透特性试验研究[J]. 工程勘察, 2007(10): 17-20.
- [21] 中华人民共和国行业标准编写组. SL237-1999 土工试验规程[S]. 北京:中国水利水电出版社, 1999.
- [22] 苏立君, 张宜健, 王铁行. 不同粒径级砂土渗透特性试验研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(5): 1289-1294.
- [23] 曹志翔, 王媛, 赵素华, 等. 粗粒土渗透系数计算模型及试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38 (Suppl. 2): 3701-3708.

(责任编辑 王海蓉)