

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.2165

水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透特性试验研究

王盛年¹, 高新群^{1,2}, 吴志坚¹, 惠洪雷¹, 张兴瑾¹

(1. 南京工业大学 交通运输工程学院, 江苏 南京 211816; 2. 华设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210014)

摘 要: 水泥稳定粉砂土抗渗性能受粉砂土自身渗透性能、水泥用量、水灰比等因素影响显著, 如何在提升其抗渗性能的同时降低水泥用量是提升工程经济效益的关键。通过开展不同水泥偏高岭土掺比、初始用水量、水泥偏高岭土总掺量以及养护龄期条件下的室内渗透试验, 研究了上述因素对水泥偏高岭土复合稳定粉砂土抗渗性能的影响规律, 探讨了上述因素及无侧限抗压强度与渗透系数之间的经验关系。结果表明: 水泥与偏高岭土掺比为 5:1 时, 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土抗渗性能最佳, 且该掺比不随水泥偏高岭土总掺量的改变而变化; 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数随初始用水量增加呈非线性递增, 随水泥偏高岭土总掺量增加和养护龄期发展呈先快后慢降低; 基于试验结果归纳提出了 4 个关于初始用水量、水泥偏高岭土总掺量、养护龄期和无侧限抗压强度的水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数经验模型。研究成果可为水泥稳定粉砂土抗渗性能提升提供理论参考与借鉴。

关 键 词: 粉砂土; 水泥稳定; 偏高岭土; 抗渗性能; 经验公式

中图分类号: TU 441

文献标识码: A

文章编号: 1000—7598 (2022) 11—3003—12

Permeability characteristics of cemented silty sand improved by metakaolin

WANG Sheng-nian¹, GAO Xin-qun^{1,2}, WU Zhi-jian¹, HUI Hong-lei¹, ZHANG Xing-jin¹

(1. College of Transportation Science & Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing, Jiangsu 211816, China;

2. China Design Group Co. Ltd., Nanjing, Jiangsu 210014, China)

Abstract: The impermeability of cement-stabilized silty sand is significantly affected by the permeability of itself, the dosage of cement, the water-cement ratio, and other factors. How to improve the impermeability of cement-stabilized silty sand while reducing cement dosage is the key to improving the economic benefit of the project. In this study, a series of indoor permeability tests was conducted on cement-metakaolin stabilized silty sands with different cement-metakaolin ratios, initial water consumption, total cement-metakaolin contents, and curing ages. The influence of the above factors on the impermeability of cement-metakaolin stabilized silty sands were investigated, and the empirical relationships between the permeability coefficient and these factors as well as their corresponding unconfined compressive strength were discussed. The results showed that the impermeability of cement-metakaolin stabilized silty sands achieved the optimization when the ratio of cement to metakaolin was 5:1, and this mixing ratio did not change with the total cement-metakaolin content used in silty sand stabilization. The permeability coefficient of cement-metakaolin stabilized silty sands increased nonlinearly with the initial water consumption and decreased rapidly first and then slowly with the increase of the total cement-metakaolin content and curing age. Four empirical formulas for the permeability coefficient of cement-metakaolin stabilized silty sands were summarized with respect to initial water consumption, total cement-metakaolin content, curing age, and unconfined compressive strength. The results of this study can provide a theoretical reference for improving the impermeability of cement-stabilized silty sands.

Keywords: silty sand; cement stabilization; metakaolin; impermeability; empirical formula

1 引 言

粉砂土层由于抗渗性能差、抗剪强度低等缺陷

极易引起深基坑支护、地下空间等结构工程渗水^[1-4]。当前, 工程上对粉砂土地层的处置主要是通过传统强夯或水泥稳定来提升其工程性能。然而, 传统强

收稿日期: 2021-12-23

修回日期: 2022-08-16

基金项目: 国家自然科学基金青年基金 (No. 41902282); 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项资金(重大科技示范) (No. BE2022605); 冻土工程国家重点实验室开放基金 (No. SKLFSE201809)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41902282), the Science and Technology Planning Project of Jiangsu Province (BE2022605) and the State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering (SKLFSE201809).

第一作者简介: 王盛年, 男, 1987 年生, 博士 (后), 副教授, 主要从事于特殊岩土体静动力特性及工程应用方面的研究。E-mail: shengnian.wang@njtech.edu.cn

夯不适用于高地下水位条件下粉砂土地层的加固；水泥稳定则又因粉砂土自身高透水性、地层水头差等问题可能造成水泥浆流失严重，粉砂土强度、刚度、抗渗性能提升有限^[5]。为此，工程人员不得不加大水泥用量或扩大施工范围以尽可能保障实际工程需求，而这直接导致了工程成本上浮、工期延长，经济效益降低。另外，水泥是高能耗产品，且生产过程还伴随有大量温室气体排放，对环境不友好^[6]。如何在提升水泥稳定粉砂土抗渗性能同时降低水泥用量是当前工程研究所关注的共同问题。

许多研究已指出，水泥土抗渗性能受水泥掺量、水灰比、养护龄期、土质条件等因素影响显著。Allan 等^[7]发现，采用水泥注浆可使石英砂渗透系数达到 $10^{-11} \sim 10^{-10}$ cm/s。Quang 等^[8]发现，当水泥掺量低于 8% 时，水泥稳定黏土与未固化黏土渗透系数几乎无区别，但当水泥掺量高于 8% 后，水泥稳定黏土渗透系数随水泥掺量增加将显著降低。Chew 等^[9]指出，水泥土渗透系数与水泥掺量存在某种定量关系。张雷等^[10]进一步指出，水泥稳定黏土渗透系数与掺量存在指数关系，且当水泥掺量超过 17% 时，水泥稳定黏土渗透系数相较原状黏土降低一个数量级。汤怡新等^[11]指出，水泥掺量增加可使水泥稳定砂质土渗透系数降低两个数量级以上、粉质土渗透系数降低一个数量级以上。侯永峰等^[12]发现，水泥掺量为 10% 的水泥稳定粉土可达到防渗帷幕要求，其渗透系数随养护龄期增加平缓下降。陈四利等^[13]表明，水泥稳定粉质黏土养护龄期超过 60 d 后，其渗透系数降低幅度逐渐趋缓。Zhang 等^[14]研究表明，水灰比增加会降低水泥稳定黏土抗渗性能。Li 等^[15]则表明，水灰比从 1.6 减低到 0.8，水泥砂浆渗透系数可降低一个数量级。在水泥土渗透经验模型方面，Chew 等^[9]建立了水泥土渗透系数与孔隙比间的定量表达式。Atzeni 等^[16]基于 MIP 试验数据提出了水泥浆体孔隙度模型。Yu 等^[17]基于固结理论提出了水泥土渗透系数估算公式。Li 等^[15]则指出，水泥砂浆力学性能与渗透系数呈负相关。这些研究显然均可作为水泥稳定粉砂土渗透特性认知提供有利借鉴。

另外，许多学者亦指出，使用外添加剂可在提升水泥土抗渗性能同时有效减少水泥用量。Kulanthaivel 等^[18]发现，添加纳米二氧化硅和白水泥的方式可提升黏土抗渗性能。Avcı 等^[19]指出，添加硅酸钠可显著改善水泥稳定砂土的渗透性能。Mollamahmutoglu 等^[20]指出，添加硼酸可降低水泥灌浆砂土渗透性。Zeng 等^[21]表明，纳米氧化石墨烯片的添加能显著提高水泥砂浆抗渗性能。Wang 等^[22]指出，用煤系偏

高岭土替代 3% 的水泥可提升水泥煤系偏高岭土复合稳定粉土抗渗性能。也有一些研究表明，并非所有外添加剂都有益于提升水泥稳定土的抗渗性能。Deng 等^[23]表明，聚丙烯酰胺无法显著引起水泥稳定土渗透系数变化。Luo 等^[24]则指出，纳米 Al_2O_3 添加剂无法达到降低水泥土渗透性的效果。因此，只有选择合适的外添加剂才能起到有效提升水泥土抗渗性能且降低水泥用量的目标。偏高岭土中活性成分无水硅酸铝可与水泥水化析出的氢氧化钙发生反应生成具有凝胶性质的水化钙铝黄长石和 C-S-H 凝胶，或在碱性或硫酸盐等激活剂及促硬剂的作用下以离子键和共价键为主、范德华键为辅形成类似于地壳中一些天然矿物的铝硅酸盐网络状结构，使得水泥土性能更加优越^[25-31]。然而，当前相关水泥偏高岭土复合稳定土渗透特性研究却十分有限。Deng 等^[32]研究了偏高岭土掺入有利于改善海相软土水力传导率，并建立水力传导率与孔隙度的关系；Wang 等^[22]通过室内渗透试验与微观试验表明掺入煤系偏高岭土显著改善水泥稳定粉土的抗渗性能。这些研究可为水泥偏高岭土复合稳定粉砂土研究提供有力借鉴。

本文采用偏高岭土作为提升水泥稳定粉砂土抗渗性能的外添加剂和替代品。通过开展不同水泥偏高岭土掺比、初始用水量、水泥偏高岭土总掺量以及养护龄期条件下的室内渗透试验，研究了上述因素对水泥偏高岭土复合稳定粉砂土抗渗性能的影响规律，探讨了上述因素及无侧限抗压强度与渗透系数间的经验关系。

2 材料与方法

2.1 试验材料

2.1.1 粉砂土

试验用土取自南京市浦口区长江漫滩区域某建筑深基坑粉砂土层，如图 1 所示，该粉砂土呈灰褐色，粉砂含量为 96.66%，粉粒含量为 3.34%。现场勘测结果如表 1 所示。考虑到天然粉砂土中夹杂

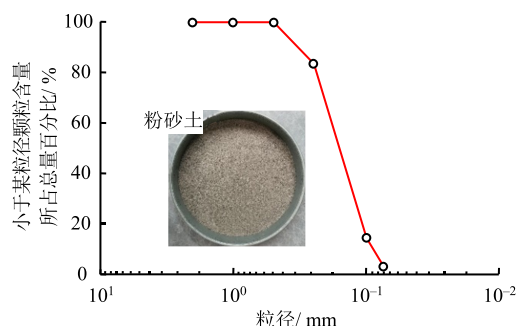


图 1 粉砂土级配曲线

Fig.1 Grading curve of silty sand

表 1 粉砂土基本物理量
Table 1 Basic physical parameters of silty sands

重度 / $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	天然 含水率 / $\%$	初始 孔隙比	垂直 渗透系数 / $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	水平 渗透系数 / $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	黏聚力 / kPa	内摩擦角 / $(^\circ)$
19.4	24.1	0.678	6.03×10^{-4}	7.77×10^{-4}	4.3	23.9

有极少量粒径大于 2 mm 的颗粒，实验室对天然粉砂土烘干过 2 mm 筛，以保证试样均一性。

2.1.2 水泥

试验所用水泥来自江西新余分宜海螺水泥有限责任公司生产的 P.O. 42.5 普通硅酸盐水泥。水泥主要成分见表 2。

表 2 水泥主要成分表
Table 2 Main components of the cement

检测项目	检测结果/ $\%$
CaO	57.4
SiO ₂	21.7
Al ₂ O ₃	7.5
Fe ₂ O ₃	2.9
MgO	1.7

2.1.3 偏高岭土

试验所用的外添加剂为河南铂润铸造材料有限公司生产的过 0.01 mm 筛的白色粉末状偏高岭土，如图 2 所示。该偏高岭土中硅铝成分总含量超 94%，其具体成分见表 3。



图 2 偏高岭土样本
Fig.2 Metakaolin powder

表 3 偏高岭土主要成分表
Table 3 Main components of the metakaolin

检测项目	检测结果/ $\%$
SiO ₂	53.0
Al ₂ O ₃	41.3
Fe ₂ O ₃	0.81
TiO ₂	1.00

2.2 试验仪器

2.2.1 水泥土渗透仪

渗透试验采用天津路达建筑仪器有限公司生

产的 TJSS-25 型渗透试验装置，如图 3 所示。该装置可同时开展 3 个水泥土试样的常水头渗透性测试，最大渗透压力为 4 MPa，精度为 0.02 MPa。测试试样形状为圆台形，试样上、下口径分别为 70 mm 和 80 mm，高为 30 mm。水泥土渗透仪柱塞泵流量为 0.16 L/min，碱式滴定管最大量程为 50 mL，精度为 0.1 mL。

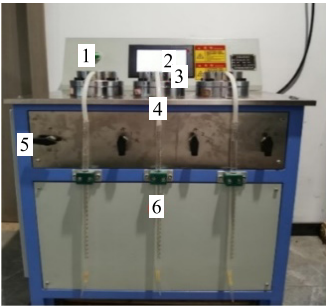


图 3 水泥土渗透仪器
Fig.3 Soil-cement infiltration apparatus

试样安装时，先擦干饱和试样表面，然后在试样侧面包裹一层热熔石蜡，快速压入渗透试模；待石蜡凝固后，将试模安装在放置有透水石的仪器台座上，即可开展不同渗透压下的渗透测试。测试前，在试样表面放置一层滤纸，以阻隔渗水中可能携带的固体颗粒。渗透压首先按每 0.5 h 增加 0.02 MPa 进行，直至渗透压达到 0.10 MPa，然后再按每 0.5 h 增加 0.10 MPa 进行，直至试样表面有水渗出，记录渗压、水温。此后，保持渗压不变，按固定间隔时间读取滴定管液面数值。时间间隔可依据试样渗透性大小选择，渗透性越好，读数时间间隔应越短，反之，则越大。水温 20 ℃ 下水泥偏高岭土复合稳定粉砂土的渗透系数可按下式计算获得：

$$k_T = \frac{V}{iAt} \tag{1}$$

$$i = \frac{100\psi}{\gamma_w h} \tag{2}$$

式中： k_T 为水温 20 ℃ 下水泥偏高岭土复合稳定粉砂土的渗透系数 (cm/s)； t 为时间间隔 (s)； A 为试样中部横截面积 (cm²)； h 为试件高度 (cm)； V 为时间间隔 t 下的渗水量 (mL)； i 为水力梯度； ψ 为渗透压 (MPa)； γ_w 为水的重度 (N/cm³)。

由于温度对水的黏滞性有重要影响，为保证试验结果的对比性，以水温 20 ℃ 作为标准温度，常温条件下水泥土渗透系数可通过下式修正获得：

$$k_{20} = k_T \times \frac{\eta_T}{\eta_{20}} \tag{3}$$

式中: k_{20} 为标准水温 20 °C 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数 (cm/s); η_T 为水温 T °C 水的动力黏滞系数 ($\text{kPa} \cdot \text{s}$); η_{20} 为水温 20 °C 水的动力黏滞系数 ($\text{kPa} \cdot \text{s}$)。

2.2.2 电子万能试验机

无侧限抗压强度试验选用微机控制电子万能试验机, 如图 4 所示, 该系统设计工作频率高达 50.0 Hz; 最大试验力为 20 kN; 试验调速范围为 0.001~500 mm/min; 速度控制精度为 $\pm 1\%$ (0.001~10 mm/min); 变形测量精度为 $\pm 0.5\%$; 恒力、恒变形、恒位移控制范围为 (0.2%~100%)FS (FS 为满量程)。



图 4 电子万能试验机

Fig.4 Electronic universal testing machine

具体测试时, 将饱和试样放置在加载台后, 将加载台缓慢上升与上压盘接触。然后通过试验机软件设置试验工况, 并将应力、应变数据置零, 运行程序开始试验。每次加载直至试样出现明显变形破坏, 手动停止加载。最后, 将仪器进行还原拆卸试样, 导出试验数据。

2.3 试验方案

本文研究目的是探究水泥偏高岭土掺比、初始用水量 (指土体固化过程中的总水量, 在实验室尺度即用水质量相比干土质量的百分比, 在工程尺度则是指天然土体含水率与按特定水灰比制备水泥偏高岭土复合浆液所需水量之和相比干土质量的百分比)、水泥偏高岭土总掺量以及养护龄期对水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透特性的影响规律及上述因素和无侧限抗压强度与渗透系数间的相关关系。因此, 渗透试验采用单一变量法开展, 即首先通过不同水泥偏高岭土掺比和初始用水量试验确定最佳水泥偏高岭土掺比和初始用水量方案, 然后以其为基础开展不同水泥偏高岭土总掺量以及养护龄期下渗透特性试验。具体试验方案包括:

2.3.1 水泥偏高岭土掺比

Wang 等^[22]表明, 当水泥和煤系偏高岭土掺比介于 6.5:1.0~4.0:1.0 时, 水泥稳定粉土可取得较为

理想的抗渗性能, 因此, 分别以水泥偏高岭土总掺量 (相对干粉砂土质量而言) 为 10%、15%、20%, 水泥偏高岭土掺比 (水泥/偏高岭土) 为 3:1、4:1、5:1、6:1 和 7:1, 开展室内渗透试验, 探讨水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透性能随水泥偏高岭土掺比的变化规律, 进而确定最佳水泥偏高岭土掺比。考虑到现行《水泥土配合比设计规程》(JGJ/T233—2011)^[33]建议水灰比在 0.5 以上。为保守起见, 文中水灰比取 0.7, 也即试样初始用水量取干粉砂土质量的 31.5%。制样完成后恒温恒湿养护 7 d。

2.3.2 初始用水量

水泥偏高岭土复合稳定粉砂土初始用水量直接影响自身孔隙结构, 从而决定其抗渗性能。因此, 分别取干土质量 27.0%、28.5%、30.0%、31.5%和 33.0%作为初始用水量, 开展室内渗透试验, 探讨初始用水量对水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透性能的影响, 以确定下一步试验初始用水量。水泥偏高岭土总掺量固定为 15%。制样完成后恒温恒湿养护 7 d。

2.3.3 水泥偏高岭土总掺量

在水泥偏高岭土掺比和初始用水量试验基础上, 分别以水泥偏高岭土总掺量为 10%、15%、20%、25%和 30%, 开展水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透试验和无侧限抗压强度试验, 探讨水泥偏高岭土总掺量对水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透性能和无侧限抗压强度的影响以及无侧限抗压强度与渗透系数间的关系。试样初始用水量依据前述试验方案测试结果确定, 制样完成后恒温恒湿养护 7 d。

2.3.4 养护龄期

固定水泥偏高岭土掺比、初始用水量和水泥偏高岭土总掺量, 其值依据前述试验方案测试结果确定。开展水泥偏高岭土复合稳定粉砂土在 3、7、14 和 28 d 养护龄期下的渗透试验, 探讨水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透特性随时间的发展规律。

2.4 试样制备

首先, 将粉砂土土样烘干、碾压以及过 2 mm 筛。然后, 根据试验方案称取相应粉砂土、水泥以及偏高岭土质量, 充分混合后加水搅拌均匀, 再将土样装入内表面涂有凡士林的圆锥形试模 (顶径为 70 mm, 底径为 80 mm, 高为 30 mm) 和圆柱形试模 (直径为 50 mm, 高为 100 mm), 将试模放入磁力振动台振动 90 s, 用刮刀刮去试模表面多余土样, 完成制样。试样制备控制在 25 min 内成型, 每种规格试样制备 6 个平行样。将试样静置于室温 20 °C ± 3 °C、相对湿度不低于 50%的环境中 24 h, 小心拆

模, 确保试件无破损、变形, 然后放入温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的水中继续养护, 直至达到目标养护龄期。选取质量偏差最小的 3 个试样开展渗透与抗压强度试验。

3 试验结果与分析

3.1 水泥偏高岭土掺比

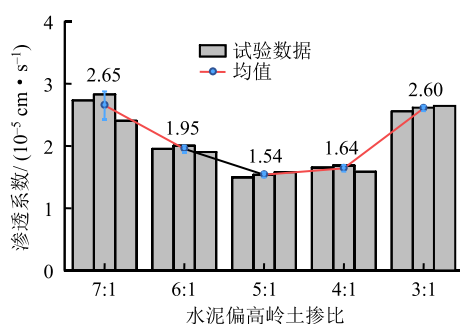
图 5 为水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数随水泥偏高岭土掺比的变化曲线。由图可知, 水泥偏高岭土总掺量 10%、15% 和 20% 下的水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数曲线均随偏高岭土相对用量增加呈先减小后增加变化。究其缘由主要是, 当水泥偏高岭土掺比大于 5:1 时, 水泥水化形成的氢氧化钙可充分与偏高岭土中的硅铝氧化物发生二次水化反应或使得偏高岭土中的硅铝氧化物在碱性

环境下发生共价聚合, 形成了更多的胶凝物质充填于孔隙, 从而有效提升了粉砂土的抗渗性能^[25, 30]; 但当水泥偏高岭土掺比大于 5:1, 甚至进一步增加后, 也即偏高岭土掺量逐渐增加后, 由于水泥偏高岭土总掺量不变, 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土中水泥掺量将相对减少。尽管水泥水化生成的氢氧化钙同样可与偏高岭土中部分的硅铝氧化物发生二次水化反应, 但水泥水化生成氢氧化钙却已远远不能满足偏高岭土中全部硅铝氧化物的水化或共价聚合, 总体上使得水泥偏高岭土所形成的凝胶物质不增反减, 因而也就不能良好地充填水泥偏高岭土复合稳定粉砂土中的孔隙, 抗渗性能因此不佳^[25, 27]。

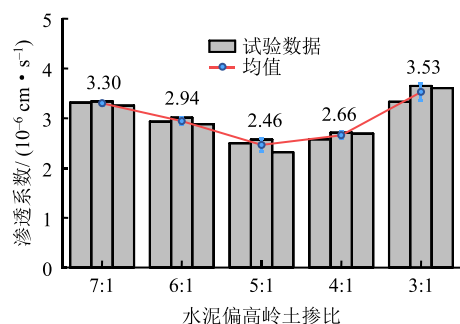
对比不同水泥偏高岭土总掺量下的试验曲线可知, 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数均在水泥偏高岭土掺比为 5:1 时获得, 其值分别为 1.54×10^{-5} 、 2.46×10^{-6} 、 1.63×10^{-6} cm/s。由此可以断定, 水泥偏高岭土掺比为 5:1 时水泥偏高岭土复合稳定粉砂土可取得最佳抗渗性能, 且该掺比关系不随水泥偏高岭土总掺量改变而变化。该结论也与 Wang 等^[22]发现的煤系水泥偏高岭土复合稳定粉土试验结果一致。

3.2 初始用水量

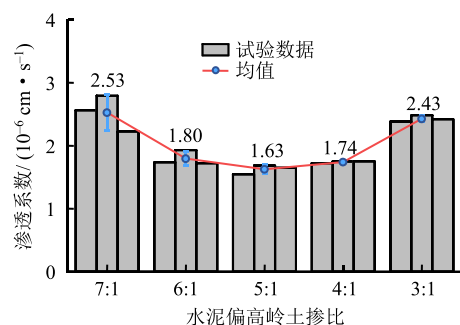
图 6 为不同初始用水量下水泥偏高岭土复合稳定粉砂土的渗透系数变化。由图可知, 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数随初始用水量增加呈非线性增加。当初始用水量由 33% 降低至 27%, 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数由 3.22×10^{-6} cm/s 降低至 0.783×10^{-6} cm/s, 抗渗性能提升一个数量级, 也即在一定范围内, 减低初始用水量可有效提高水泥偏高岭土复合稳定粉砂土抗渗能力。初始用水量为 30% 的水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数为 1.33×10^{-6} cm/s, 初始用水量为 28.5% 的水泥偏高岭



(a) 水泥偏高岭土总掺量为 10%



(b) 水泥偏高岭土总掺量为 15%



(c) 水泥偏高岭土总掺量为 20%

图 5 不同水泥偏高岭土掺比下水泥偏高岭土复合稳定粉砂土的渗透系数变化

Fig.5 Variations of the permeability coefficient of cement-metakaolin stabilized silty sands with different cement-metakaolin ratios

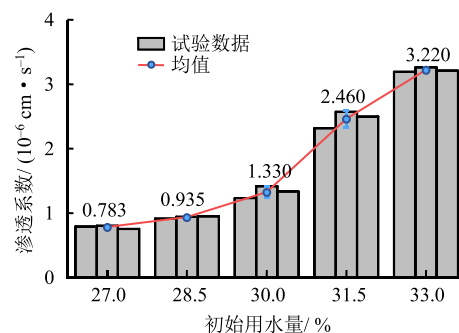


图 6 不同初始用水量下水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数变化

Fig.6 Variations of the permeability coefficient of cement-metakaolin stabilized silty sands with different initial water consumptions

土复合稳定粉砂土渗透系数为 $0.935 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$, 说明初始用水量不超过 30% 时可使水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数较易达到工程上一般要求的 $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 的标准。

图 7 为不同初始用水量下水泥偏高岭土复合稳定粉砂土的均匀拌合状态。由图可知, 当初始用水量由 27% 增至 33%, 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土

和易性明显提升。当初始用水量为 27% 时, 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土拌合相对困难, 需要更多的时间才能搅拌均匀, 但当初始用水量超过 30% 后, 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土流动性逐渐增强。然而, 由图 6 可知, 初始用水量增加对水泥偏高岭土复合稳定粉砂土抗渗性能提升不利, 因此, 综合考虑后续试验初始用水量均采用干粉砂土质量的 30%。

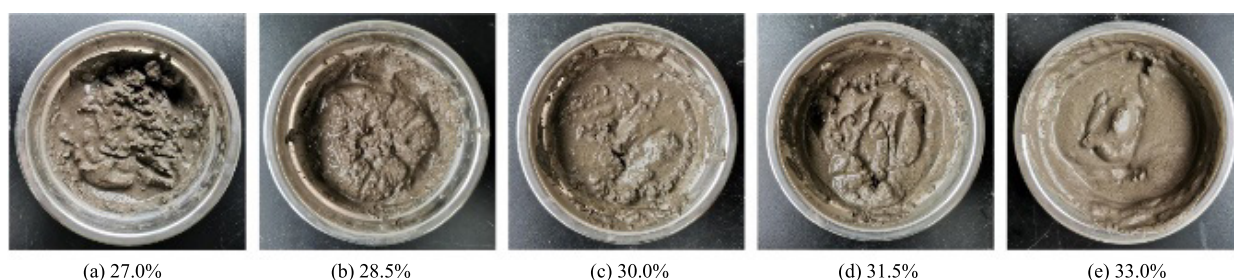


图 7 不同初始用水量下水泥偏高岭土复合稳定粉砂土拌合状态

Fig.7 Mixing status of cement-metakaolin stabilized silty sands with different initial water consumptions

3.3 水泥偏高岭土总掺量

图 8 为不同水泥偏高岭土总掺量下水泥偏高岭土复合稳定粉砂土的渗透系数变化。由图可知, 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数总体上随水泥偏高岭土总掺量增加逐渐减小。当水泥偏高岭土总掺量为 10% 时, 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数均值为 $1.26 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$, 该值不能满足工程上一般要求的 $1 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 标准; 但当水泥偏高岭土总掺量为 30% 后, 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数均值为 $0.863 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$, 相较于 10% 的情形, 抗渗性能提升两个数量级。说明增加水泥偏高岭土总掺量总体上对于提升水泥偏高岭土复合稳定粉砂土性能有利。然而, 该结果同样显示, 当水泥偏高岭土总掺量由 10% 增加至 15% (增幅 5%), 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数由 $1.26 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 减小至 $2.17 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$, 渗透系数减低约一个数量级; 当水泥偏高岭土总掺量继续增加, 由 15% 增加至 25% 后 (增幅 10%), 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数进一步降低至 $0.969 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$, 渗透系数再次降低约一个数量级, 但水泥偏高岭土总用量增幅却提高了一倍。显然, 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数尽管随水泥偏高岭土总掺量增加而降低, 但从经济性讲, 并不是使用更多的水泥偏高岭土就能达到更加可靠的抗渗性能提升。水泥偏高岭土总掺量 30% 的水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数相较 25% 情形仅降低约 10%, 更是证明了这一结论。考虑到工程中水泥土水泥用量一般不会超过 30%, 因此后续试验水泥偏高岭土总掺量采用 25%。

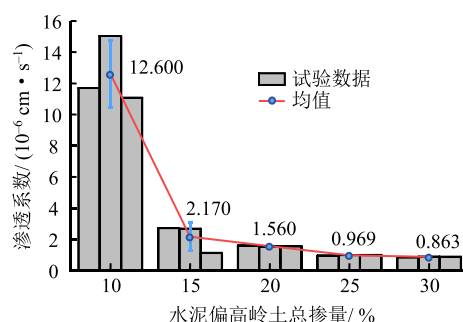


图 8 不同水泥偏高岭土总掺量下水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数变化

Fig.8 Variations of the permeability coefficient of cement-metakaolin stabilized silty sands with different cement-metakaolin contents

3.4 养护龄期影响

图 9 为不同养护龄期下水泥偏高岭土复合稳定粉砂土的渗透系数变化。由图可知, 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数总体上随养护龄期增加逐渐减低, 但降低幅度却先快后慢。当养护龄期由 3 d 增加至 7 d, 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数由 $6.64 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$ 降至 $9.69 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$, 降低一个数量级; 当养护龄期由 7 d 增加至 28 d, 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数进一步降低至 $1.36 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$, 但与 7 d 时相比, 仍处于同一数量级。说明水泥偏高岭土复合稳定粉砂土抗渗性能的快速提升主要发生在养护龄期早期, 这可能是由于偏高岭土的添加提高了水泥偏高岭土中铝氧化物的含量, 使得水泥偏高岭土复合稳定粉砂土在养护早期生成了大量的水化铝酸三钙所致。此后, 随养护

龄期发展, 水化硅酸钙产出放缓, 抗渗性能提升因此逐渐放缓。

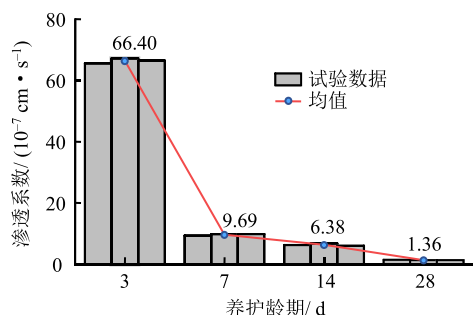


图 9 不同养护龄期下水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数变化

Fig.9 Variations of the permeability coefficient of cement-metakaolin stabilized silty sands under different curing ages

4 渗透系数经验关系

4.1 渗透系数与初始用水量间关系

由图 6 可知, 随着初始用水量由 27%增加至 33%, 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数不断增加, 这表明初始用水量增加不利于粉砂土抗渗性能提升。Zhang 等^[31]指出, 提高水胶比可有效提高水泥土中 CSH 等凝胶的产量, 从而减少土样颗粒间的大孔隙。Chiu 等^[34]指出, 初始用水量减少将降低水泥土中自由水含量, 也即减少水泥土内部自由水占据的孔隙体积, 从而增加了水泥土的抗渗能力。Li 等^[15]则表明, 水泥砂层防渗效果随初始用水量增加而减弱, 并提出了渗透系数与水灰比间的经验幂函数回归方程。显然, 水泥土初始用水量与渗透系数间存在一定内在联系。由图 6 可知, 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数总体上随初始用水量减小呈非线性下降, 因此, 提出如下关于初始用水量和土体天然含水率的渗透系数经验回归公式:

$$k = a_0(\omega_{tc} - \omega)^{b_0} + k_{p\omega} \quad (4)$$

式中: k 为渗透系数 (cm/s); ω_{tc} 为初始用水量 (%); a_0 和 b_0 为拟合参数, 与初始用水量、水泥偏高岭土总掺量对土体抗渗性能提升有关; $k_{p\omega}$ 为天然含水率下水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数 (cm/s); ω 为粉砂土天然含水率 (%)。

图 10 为采用上述经验公式拟合试验数据所得的结果。由图可知, 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数与初始用水量间具有非常好的相关性。拟合参数 a_0 和 b_0 的值分别为 0.001 6 和 2.62, $k_{p\omega}$ 为 $5.194 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 。相关系数为 0.979, 表明该经验公式可用于表述两者间的关系。

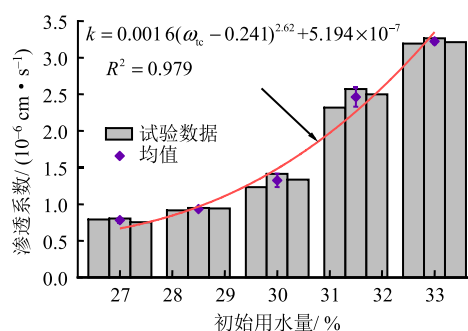


图 10 渗透系数与初始用水量间关系

Fig.10 Relationship between permeability coefficient and initial water consumption

4.2 渗透系数与水泥偏高岭土总掺量间关系

图 8 表明水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数随水泥偏高岭土总掺量增加先急后缓递减、呈非线性变化。究其原因可能是, 当水泥偏高岭土总掺量较小时, 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土内部孔隙充填程度, 特别是大孔隙的充填率, 受水泥偏高岭土水化所产生的凝胶物质质量控制; 但当水泥偏高岭土总掺量超过 25%后, 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土大孔隙充填基本结束, 水泥偏高岭土水化所产生的凝胶物质开始更多地作用于小孔隙的封闭, 因此, 随水泥偏高岭土总掺量进一步增加, 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土抗渗性能提升幅度减弱。Chew 等^[9]认为水泥土渗透系数与其自身孔隙比有关, 与水泥掺量无关。张雷等^[10]则指出水泥土渗透系数往往随水泥掺量增加而减少, 并归纳了关于水泥掺量的水泥土渗透系数经验回归方程。由图 8 可知, 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数总体上随水泥偏高岭土总掺量增加呈非线性下降。基于张雷等^[10]提出的以无理数 e 为底数的水泥土经验回归方程, 进一步改进得到水泥偏高岭土复合稳粉砂土渗透系数与水泥偏高岭土总掺量间的经验回归方程式如下:

$$k = c_0(e^{d_0 p_{tc}} - 1) + k_s \quad (5)$$

式中: p_{tc} 为水泥偏高岭土总掺量 (%); c_0 和 d_0 为拟合参数, 与初始用水量、水泥偏高岭土总掺量对土体抗渗性能提升能力相关; k_s 为土体自身渗透系数 (cm/s)。

图 11 为采用上述经验公式拟合试验数据的结果。由图可知, 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数与水泥偏高岭土总掺量间具有非常好的相关性。拟合参数 c_0 和 d_0 的值分别为 6.021×10^{-4} 和 -39.4 , k_s 为 $6.03 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ 。相关系数为 0.997, 表明该经验公式可用于表述两者间的关系。总体来看, 水泥偏高岭土总掺量增加对水泥偏高岭土复合稳定粉砂土

抗渗性能提升有利, 初始用水量增加则反之, 结合式 (5) 可知, 拟合参数 c_0 更可能地应该是水泥偏高岭土总掺量对水泥偏高岭土复合稳定粉砂土抗渗性能提升的控制量, 而拟合参数 d_0 则为初始用水量对水泥偏高岭土复合稳定粉砂土抗渗性能削弱的控制量; k_s 拟合值与现场勘测结果基本一致, 表明式 (5) 可作为进一步研究的母元函数。

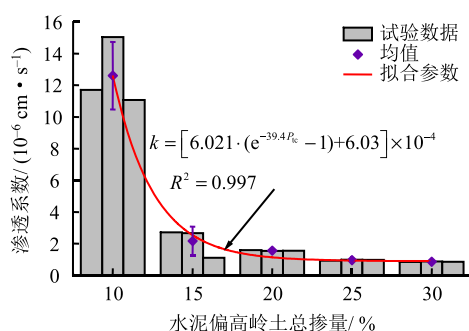


图 11 渗透系数与水泥偏高岭土总掺量间关系

Fig.11 Relationship between permeability coefficient and total cement-metakaolin content

4.3 渗透系数与初始用水量、水泥偏高岭土总掺量间关系

水泥偏高岭土复合稳定粉砂土抗渗性能受初始用水量和水泥偏高岭土总掺量共同影响。式 (4) 表明水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数与初始用水量呈正相关关系, 式 (5) 表明水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数与水泥偏高岭土总掺量呈负相关关系。综合式 (4) 与式 (5), 提出水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数与初始用水量、水泥偏高岭土总掺量间的经验公式如下:

$$k = a_{tc} e^{b_{tc} P_{tc}} (\omega_{tc} - \omega)^{c_{tc}} + k_s \quad (6)$$

式中: a_{tc} 、 b_{tc} 和 c_{tc} 为拟合参数, 与初始用水量、水泥偏高岭土总掺量对土体抗渗性能提升能力有关。

图 12 为不同初始用水量和水泥偏高岭土总掺量下的水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数变化。由图可知, 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数与初始用水量、水泥偏高岭土总掺量间具有良好的相关性。总体上, 水泥偏高岭土总掺量越少、初始用水量越大, 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土抗渗性能越差。当水泥偏高岭土总掺量从 10% 增加至 15%, 相同初始用水量下, 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土的渗透系数降低一个数量级, 但当初始用水量从 33% 降低至 27%, 相同水泥偏高岭土总掺量下,

水泥偏高岭土复合稳定粉砂土的渗透系数降低约 0.1 个数量级, 说明低水泥偏高岭土总掺量下水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数主要受控于水泥偏高岭土总掺量。当水泥偏高岭土总掺量由 15% 增加至 25%, 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数持续降低, 当初始用水量从 33% 降低至 27%, 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数同样持续降低, 说明水泥偏高岭土复合稳定粉砂土抗渗性能由水泥偏高岭土总掺量和初始用水量共同制约。当水泥偏高岭土总掺量由 25% 增加至 30% 时, 相同初始用水量下, 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数变化微小, 当初始用水量从 33% 降低至 27%, 相同水泥偏高岭土总掺量下, 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数降低约 0.1 个数量级, 说明高水泥偏高岭土掺量下水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数主要受控于初始用水量。综上所述, 当水泥偏高岭土复合稳定土建议初始用水量小于天然土层含水率时, 由于过多的自由水会引起固化土体内残留大量孔洞, 导致固化土强度、刚度、抗渗性能提升不足, 此时可通过增加水泥偏高岭土用量来减少孔洞, 以提升固化土体的强度、刚度、抗渗性能; 当水泥偏高岭土复合稳定土建议初始用水量大于天然土层含水率时, 此时天然土体相对较干, 为保障水泥偏高岭土充分水化反应以及天然土体性能提升达到要求, 需同时从水泥偏高岭土总掺量和初始用水量两方面共同控制以保证稳定土的强度、刚度及抗渗性能。

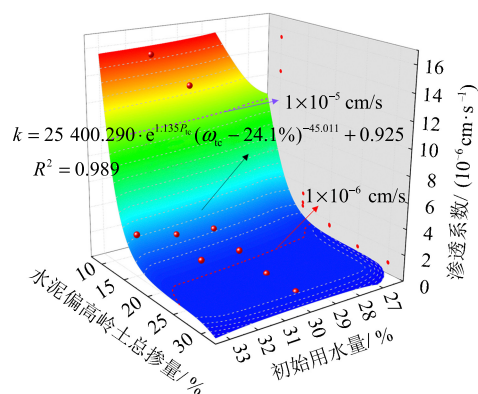


图 12 渗透系数与初始用水量、水泥偏高岭土总掺量间关系

Fig.12 Relationship between permeability coefficient and initial water consumption and cement-metakaolin content

4.4 渗透系数与养护龄期间关系

Zhang 等^[31]从宏观和微观角度分析了养护龄期对水泥土强度的影响, 并指出水泥土强度发展存在两个阶段, 即活跃区和惰性区。水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数随养护龄期发展同样存在类似

两个阶段。如图 13 所示, 养护龄期 3~7 d 下水泥偏高岭土复合稳定粉砂土抗渗性能提升应处于活跃区, 渗透系数数量级的快速下降表明养护龄期早期水泥偏高岭土复合稳定粉砂土内偏高岭土、水泥水化以及火山灰反应正在快速进行。养护龄期 7~28 d 下水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数降幅逐渐减慢, 表明水泥偏高岭土复合稳定粉砂土抗渗性能提升逐渐进入惰性区。张亭亭^[35]和陈四利^[13]等指出, 养护龄期是影响水泥土渗透系数显著变化的一个重要因素, 水泥土渗透系数随养护龄期增加呈线性减小。因此, 提出如下关于养护龄期的渗透系数经验公式:

$$k = \begin{cases} \alpha_1 T_{tc} + k_{0d}, & 0 \text{ d} < T_{tc} < 7 \text{ d} \\ \alpha_2 (T_{tc} - 7) + k_{7d}, & 7 \text{ d} \leq T_{tc} \leq 28 \text{ d} \end{cases} \quad (7)$$

式中: T_{tc} 为养护龄期 (d); α_1 和 α_2 为拟合系数, 表征龄期对水泥偏高岭土复合稳定粉砂土抗渗性能提升的影响; k_{0d} 为水泥偏高岭土复合稳定粉砂土未发生水化反应下的渗透系数 (cm/s); k_{7d} 为 7 d 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数 (cm/s)。

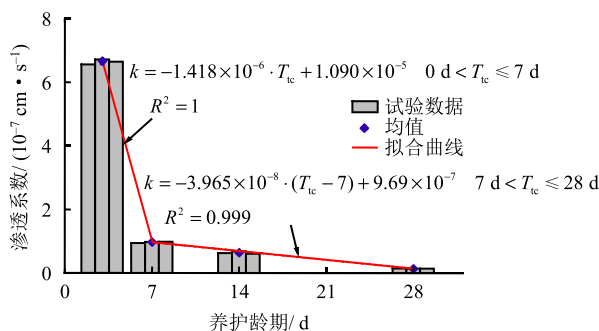


图 13 渗透系数与养护龄期间关系

Fig.13 Relationship between permeability coefficient and curing age

4.5 渗透系数与抗压强度间关系

Li^[15]、Wu^[36]等, 水泥土抗压强度提升往往伴着抗渗性能的提升, 抗压强度与渗透系数存在某种定量关系。曹智国^[37]、Zhang^[38]等一些研究人员则进一步指出, 水泥土抗压强度与水泥掺量间近似存在线性相关关系。图 14 为水泥偏高岭土掺比 5:1、初始用水量 30%、养护龄期 7 d 下的水泥偏高岭土复合稳定粉砂土无侧限抗压强度试验结果。由图可知, 当水泥偏高岭土总掺量小于 25% 时, 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土无侧限抗压强度确实随水泥偏高岭土总掺量的增加呈现线性增加关系, 但当水泥偏高岭土总掺量大于 25% 后, 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土无侧限抗压强度提升迅速放缓。这一差异

表明, 水泥偏高岭土总掺量增加并不意味着水泥偏高岭土复合稳定粉砂土强度也相应提升。水泥偏高岭土复合稳定粉砂土无侧限抗压强度与水泥偏高岭土总掺量间的关系可近似采用分段函数来表达, 即

$$q_u = \begin{cases} \mu p_{tc} + q_s, & 0 \leq p_{tc} \leq 25\% \\ q_{cu}, & 25\% < p_{tc} \leq 30\% \end{cases} \quad (8)$$

式中: q_u 为无侧限抗压强度 (kPa); μ 为与凝胶材料性能相关的参数; q_s 为土体自身无侧限抗压强度 (kPa); q_{cu} 为高水泥偏高岭土掺量下稳定土的无侧限抗压强度 (kPa), 近似取其均值代替。

Wu 等^[36]表明, 水泥土渗透系数与自身无侧限抗压强度存在负相关关系。张雷等^[10]则指出, 水泥土渗透系数可用以无理数 e 为底的指数函数来表示。联立式 (8)、(5), 消去水泥偏高岭土总掺量, 得渗透系数 k 关于无侧限抗压强度的指数函数关系:

$$k = \begin{cases} a_{tc} (e^{\frac{b_{tc} q_u - q_s}{\mu}} - 1) + k_s, & 0 \leq p_{tc} \leq 25\% \\ k_c, & 25\% < p_{tc} \leq 30\% \end{cases} \quad (9)$$

式中: k_c 为惰性区水泥土渗透系数 (cm/s)。

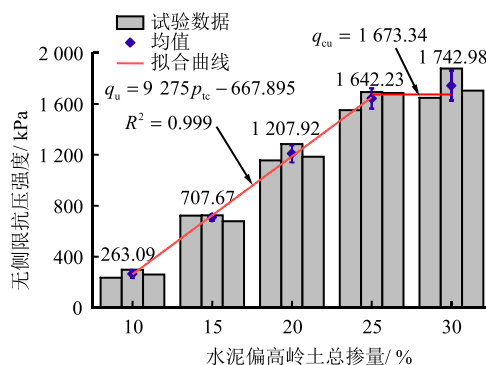


图 14 不同水泥偏高岭土总掺量下水泥偏高岭土复合稳定粉砂土无侧限抗压强度变化

Fig.14 Variations of the unconfined compressive strength of cement-metakaolin stabilized silty sands with different cement-metakaolin contents

图 15 为水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数与抗压强度关系曲线。由图可知, 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数随抗压强度增加呈非线性减小, 特别是, 当抗压强度超过一定值后, 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数降低十分有限。说明水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数也存在惰性区, 即并非是使用更多的水泥偏高岭土就能达到更加有效的抗渗性能提升。利用式 (9) 对试验数据拟合发现, 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数与无侧限抗压强度具有非常好的相关性, 可为复合

稳定土相关工程渗透系数预估提供理论参考。

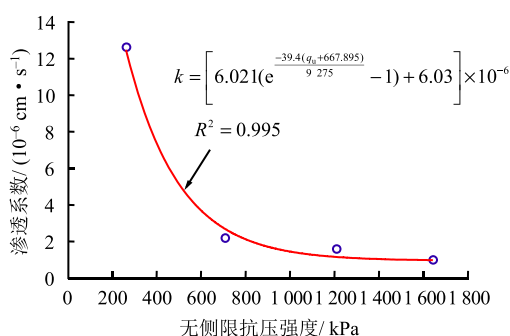


图 15 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数与无侧限抗压强度间关系

Fig.15 Relationship between permeability coefficient and unconfined compressive strength of cement-metakaolin stabilized silty sands

5 结 论

围绕水泥偏高岭土复合稳定粉砂土抗渗性能问题,开展了不同水泥偏高岭土掺比、初始用水量、水泥偏高岭土总掺量和养护龄期因素下的渗透试验,分析上述因素对水泥偏高岭土复合稳定粉砂土抗渗性能的影响规律,归纳总结了上述因素与渗透系数间的经验公式。主要结论如下:

(1) 水泥偏高岭土总掺量和初始用水量不变情况下,水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数随水泥偏高岭土掺比增大呈先减后增变化,当水泥偏高岭土掺比为 5:1 时,水泥偏高岭土复合稳定粉砂土抗渗性能达到最佳,且该掺比值不随水泥偏高岭土总掺量改变而改变。

(2) 水泥偏高岭土掺比和总掺量不变情况下,水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数随初始用水量增加呈非线性提升。初始用水量增加导致水胶比减小,同时增加了自由水蒸发残留的孔隙体积,因而使得水泥偏高岭土复合稳定粉砂土抗渗性能降低。水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数与初始用水量间非线性关系可通过幂函数来描述。

(3) 水泥偏高岭土掺比和初始用水量不变情况下,水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数随水泥偏高岭土总掺量增加呈先急后缓降低,当水泥偏高岭土总掺量超过 25%以后,水泥偏高岭土复合稳定粉砂土抗渗性能随水泥偏高岭土总掺量增加提升有限,所以从经济性讲,并不是使用更多的水泥偏高岭土就能达到更加可靠的抗渗性能提升。水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数与水泥偏高岭土总掺量间的非线性关系可通过以无理数 e 为底的指数型经验回归方程来描述。

(4) 水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数与初始用水量、水泥偏高岭土总掺量间的关系可通过一个四参数的幂指数函数来描述,与养护龄期间的关系可通过线性分段函数来描述。水泥偏高岭土复合稳定粉砂土抗渗性能在养护龄期早期提升较快,这可能是因偏高岭土中铝氧化物与水泥水化产物进一步反应形成 CSH 凝胶所致。

(5) 当水泥偏高岭土总掺量小于 25%时,水泥偏高岭土复合稳定粉砂土无侧限抗压强度随水泥偏高岭土总掺量增加呈线性增加,水泥偏高岭土复合稳定粉砂土渗透系数与水泥偏高岭土总掺量间关系可用指数型经验回归方程描述。但当水泥偏高岭土总掺量大于 25%后,水泥偏高岭土总掺量增加对水泥偏高岭土复合稳定粉砂土抗压强度和抗渗性能提升有限,可近似用均值表示。

(6) 水泥偏高岭土掺比、初始用水量、水泥偏高岭土总掺量等最佳配比参数的提出可为粉砂层注浆方案设计提供客观依据;同时,所归纳总结出的经验公式也可为粉砂层注浆方案论证与优化提供理论参考。

参 考 文 献

- [1] AFRAKOTI M T P, CHOBBASTI A J, GHADAKPOUR M, et al. Investigation of the effect of the coal wastes on the mechanical properties of the cement-treated sandy soil[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 239: 117848.
- [2] YAO K, WANG W, LI N, et al. Investigation on strength and microstructure characteristics of nano-MgO admixed with cemented soft soil[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 206: 160-168.
- [3] CHENARBONI H A, LAJEVARDI S H, MOLAABASI H, et al. The effect of zeolite and cement stabilization on the mechanical behavior of expansive soils[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 272: 121630.
- [4] 邹新军, 曹雄, 周长林. 砂土地基中受水流影响的竖向力-水平力联合受荷桩承载特性模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(6): 1855-1864.
ZHOU Xin-jun, CAO Xiong, ZHOU Chang-li, Model study on the bearing behavior of V-H combined loaded pile in sand considering the current effects[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(6): 1855-1864.
- [5] 张灿虹, 钱亚俊, 钟启明, 等. 竖向及水平向渗流作用下粉砂渗透特性研究 [J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(增刊 2): 163-167.

- ZHANG Can-hong, QIAN Yan-jun, ZHONG Qi-ming, et al. Permeability characteristics of silty sand under vertical and horizontal seepage[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2020, 42(Suppl.2): 163-167.
- [6] HU L L, HE Z. A fresh perspective on effect of metakaolin and limestone powder on sulfate resistance of cement-based materials[J]. **Construction and Building Materials**, 2020, 262: 119847.
- [7] ALLAN M L, KUKACKA L E. Permeability and microstructure of plain and polypropylene fiber reinforced grouts[J]. **Cement and Concrete Research**, 1994, 24(4): 671-681.
- [8] QUANG N D, CHAI J C. Permeability of lime-and cement-treated clayey soils[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2015, 52(9): 1221-1227.
- [9] CHEW S H, KAMRUZZAMAN A, LEE F H. Physicochemical and engineering behavior of cement treated clays[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2004, 130(7): 696-706.
- [10] 张雷, 王晓雪, 叶勇, 等. 水泥土抗渗性能室内试验研究[J]. **岩土力学**, 2006, 27(增刊 2): 1192-1196.
- ZHANG Lei, WANG Xiao-xue, YE Yong, et al. Study on anti-permeability performance of soil-cement[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(Suppl.2): 1192-1196.
- [11] 汤怡新, 刘汉龙, 朱伟. 水泥固化土工程特性试验研究[J]. **岩土工程学报**, 2000, 22(5): 549-554.
- TANG Yi-xin, LIU Han-long, ZHU Wei. Study on engineering properties of cement-stabilized soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2000, 22(5): 549-554.
- [12] 侯永峰, 龚晓南. 水泥土的渗透特性[J]. **浙江大学学报(工学版)**, 2000, 34(2): 189-193.
- HOU Yong-feng, GONG Xiao-nan. The permeability of cement-treated soil[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2000, 34(2): 189-193.
- [13] 陈四利, 杨雨林, 周辉, 等. 污水环境对水泥土渗透性能影响的试验研究[J]. **岩土力学**, 2015, 36(11): 3047-3054.
- CHEN Si-li, YANG Yu-lin, ZHOU Hui, et al. Effect of sewage environment on permeability of cemented soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(11): 3047-3054.
- [14] ZHANG C, YANG J S, OU X F, et al. Clay dosage and water/cement ratio of clay-cement grout for optimal engineering performance[J]. **Applied Clay Science**, 2018, 163: 312-318.
- [15] LI Z P, ZHANG L Z, CHU Y T, et al. Research on influence of water-cement ratio on reinforcement effect for permeation grouting in sand layer[J]. **Advances in Materials Science and Engineering**, 2020, 2020: 5329627.
- [16] ATZENI C, PIA G, SANNA U. A geometrical fractal model for the porosity and permeability of hydraulic cement pastes[J]. **Construction and Building Materials**, 2010, 24(10): 1843-1847.
- [17] YU Y Z, PU J L, UGAI K, et al. A study on the permeability of soil-cement mixture[J]. **Soils and Foundations**, 1999, 39(5): 145-149.
- [18] KULANTHAIVEL P, SOUNDARA B, VELMURUGAN S, et al. Experimental investigation on stabilization of clay soil using nano-materials and white cement[J]. **Materials Today: Proceedings**, 2021, 45: 507-511.
- [19] AVCI E, DEVECI E, GOKCE A. Effect of sodium silicate on the strength and permeability properties of ultrafine cement grouted sands[J]. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 2021, 33(8): 4021203.
- [20] MOLLAMAHMUTOGLU M, AVCI E. Strength and permeability of boric acid-tempered ultrafine cement grouted sand[J]. **Construction and Building Materials**, 2021, 284: 122812.
- [21] ZENG H Y, LAI Y M, QU S, et al. Effect of graphene oxide on permeability of cement materials: An experimental and theoretical perspective[J]. **Journal of Building Engineering**, 2021, 41: 102326.
- [22] WANG L H, LI X Y, CHENG Y, et al. Effects of coal-bearing metakaolin on the compressive strength and permeability of cemented silty soil and mechanisms[J]. **Construction and Building Materials**, 2018, 186: 174-181.
- [23] DENG Y F, LIU S Y, HUANG J A, Li K. Strength and permeability of cemented soil with PAM[C]// *Proceedings of the Fourth International Conference on Grouting and Deep Mixing*, New Orleans, Louisiana, United States: [s. n.], 2012.
- [24] LUO H L, HSIAO D H, LIN D F, et al. Cohesive soil stabilized using sewage sludge ash/cement and nano aluminum oxide[J]. **International Journal of Transportation Science and Technology**, 2012, 1(1): 83-99.
- [25] 储诚富, 李小春, 邓永锋, 等. 偏高岭土对水泥改性海相软土力学性能的影响[J]. **岩土工程学报**, 2013, 35(增刊 1): 170-174.
- CHU Cheng-fu, LI Xiao-chun, DENG Yong-feng, et al.

- Influence of metakaolin on mechanical properties of cement-modified marine soft soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2013, 35(Suppl.1): 170-174.
- [26] 邓永锋, 吴子龙, 刘松玉, 等. 地聚合物对水泥固化土强度的影响及其机理分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(3): 446-453.
- DENG Yong-feng, WU Zi-long, LIU Song-yu, et al. Influence of geopolymer on strength of cement-stabilized soils and its mechanism[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(3): 446-453.
- [27] 马冬冬, 马芹永, 黄坤, 等. 基于 NMR 的地聚合物水泥土孔隙结构与动态力学特性研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(3): 572-578.
- MA Dong-dong, MA Qin-yong, HUANG Kun, et al. Pore structure and dynamic mechanical properties of geopolymer cement soil based on nuclear magnetic resonance technique[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2021, 43(03): 572-578.
- [28] WANG L H, LI X Y, CHENG Y, et al. Effects of coal-metakaolin on the properties of cemented sandy soil and its mechanisms[J]. **Construction and Building Materials**, 2018, 166: 592-600.
- [29] WU Z L, DENG Y F, LIU S Y, et al. Strength and micro-structure evolution of compacted soils modified by admixtures of cement and metakaolin[J]. **Applied Clay Science**, 2016, 127: 44-51.
- [30] 吴子龙, 朱向阳, 邓永锋, 等. 掺入钢渣与偏高岭土水泥改性土的性能与微观机制[J]. 中国公路学报, 2017, 30(9): 18-26.
- WU Zi-long, ZHU Xiang-yang, DENG Yong-feng, et al. Behavior and micro-mechanism of cement-based modified compaction soil composed of steel slag and metakaolin[J]. **China Journal of Highway & Transport**, 2017, 30(9): 18-26.
- [31] ZHANG T W, YUE X B, DENG Y F, et al. Mechanical behaviour and micro-structure of cement-stabilised marine clay with a metakaolin agent[J]. **Construction and Building Materials**, 2014, 73: 51-57.
- [32] DENG Y F, YUE X B, LIU S Y, et al. Hydraulic conductivity of cement-stabilized marine clay with metakaolin and its correlation with pore size distribution[J]. **Engineering Geology**, 2015, 193: 146-152.
- [33] 福建省建筑科学研究院. JGJ/T 233—2011 水泥土配合比设计规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Fujian Academy of Architectural Science. JGJ/T 233—2011 Specification for mix proportion design of cement soil[S]. Beijing: China Architecture Building Press, 2011.
- [34] CHIU C F, IBRAHIM M M, HU X P, et al. Relationship between bound water content and permeability of cement-treated dredged sediment[C]//Proceedings of the 7th International Congress on Environmental Geotechnics. [S. l.]: [s. n.], 2014.
- [35] 张亭亭, 王平, 李江山, 等. 养护龄期和铅含量对磷酸镁水泥固化/稳定化铅污染土的固稳性能影响规律及微观机制[J]. 岩土力学, 2018, 39(6): 2115-2123.
- ZHANG Ting-ting, WANG Ping, LI Jiang-shan, et al. Effect of curing time and lead concentration on mechanical properties of lead-contaminated soils stabilized by magnesium phosphate cement[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(6): 2115-2123.
- [36] WU J, DENG Y F, ZHENG X P, et al. Hydraulic conductivity and strength of foamed cement-stabilized marine clay[J]. **Construction and Building Materials**, 2019, 222: 688-698.
- [37] 曹智国, 章定文. 水泥土无侧限抗压强度表征参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊 1): 3446-3454.
- CAO Zhi-guo, ZHANG Ding-wen. Key Parameters controlling unconfined compressive strength of soil-cement mixtures[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2015, 34(Suppl.1): 3446-3454.
- [38] ZHANG R J, SANTOSO A M, TAN T S, et al. Strength of high water-content marine clay stabilized by low amount of cement[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2013, 139(12): 2170-2181.