

文章编号: 1005-0523(2023)06-0032-07



水泥-水玻璃改良粉质黏土渗透性能与微观机理研究

胡扬扬¹, 刘银芳², 苏德垠², 郭易盟¹, 朱碧堂¹, 胡椿华¹

(1. 华东交通大学江西省地下空间技术开发工程研究中心, 江西 南昌 330013;

2. 福建岩土工程勘察研究院有限公司, 福建 福州 350001)

摘要: 针对南昌典型粉质黏土, 制备了不同水泥及水玻璃掺量配比下的改良粉质黏土, 通过对试样开展室内渗透试验、扫描电镜(SEM)与X射线衍射(XRD)测试, 着重探讨了水泥掺量、水玻璃掺量、养护龄期对粉质黏土抗渗性能的影响规律。结果表明: 改良粉质黏土的渗透系数在养护龄期7~14 d下降速度3倍高于14~28 d; 随着水泥掺量的不断增加, 改良粉质黏土的渗透系数不断下降且下降速率逐步变小; 水玻璃掺量的增加可明显减小改良粉质黏土的渗透系数; 水泥-水玻璃可协同作用提高粉质黏土的抗渗性, 且掺量配比存在最优值24%水泥+6%水玻璃; 相较于单掺水泥改良粉质黏土, 水玻璃的掺入并未改变水化产物主要物相组成, 而是促进水化反应进行, 提高了C-S-H凝胶和C-A-S-H钙矾石等水化产物产量, 大大减少了土颗粒间的孔、裂隙数量。

关键词: 粉质黏土; 水泥-水玻璃; 微观机理; 渗透

中图分类号: TU58; [U25]

文献标志码: A

本文引用格式: 胡扬扬, 刘银芳, 苏德垠, 等. 水泥-水玻璃改良粉质黏土渗透性能与微观机理研究[J]. 华东交通大学学报, 2023, 40(6): 32-38.

DOI: 10.16749/j.cnki.jecjtu.20230508.013

Study on Permeability and Microscopic Mechanism of Cement-Water Glass Improved Silty Clay

Hu Yangyang¹, Liu Yinfang², Su Deyin², Guo Yimeng¹, Zhu Bitang¹, Hu Chunhua¹

(1. Jiangxi Key Laboratory of Geotechnical Infrastructure Safety and Control, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Fujian Geotechnical Engineering Investigation and Research Institute Co., LTD., Fuzhou 350001, China)

Abstract: In this paper, the effects of cement content, water glass content and curing age on the impermeability performance of silty clay were discussed by indoor penetration test, scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD) test on the typical silty clay in Nanchang. The results showed that the permeability coefficient of improved silty clay decreased at a rate of 3 orders of magnitude higher than that of 14~28 d at a curing age of 7~14 d. With the continuous increase of cement content, the permeability coefficient of improved silty clay decreased and the decline rate gradually decreased. The increase of water glass content can significantly reduce the permeability coefficient of improved silty clay. Cement-water glass can synergistically improve the impermeability of silty clay, and the optimal ratio of 24% cement + 6% water glass has an optimal dosage. Compared with the improved silty clay with single cement, the incorporation of water glass does not change the main phase composition of the hydration product, but promotes the hydration reaction, and increases the yield of hydration products such as C-S-H gel and C-A-S-H calcium vanadate, and greatly reduced the number of pores and frac-

收稿日期: 2023-02-17

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(4197229); 国家自然科学基金委重点国际合作研究项目(5202010500)

tures between soil particles.

Key words: silty clay; cement–water glass; microscopic mechanism; infiltration

Citation format: HU Y Y, LIU Y F, SU D Y, et al. Study on permeability and microscopic mechanism of cement–water glass improved silty clay[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(6): 32–38.

许多研究已经指出,水泥土抗渗性能受水泥掺入比、水灰比、养护龄期、外掺剂等因素影响显著。在经过诸多室内试验的验证,从水泥土渗透性影响机理出发,提出了诸多宝贵的观点。陈四利等^[1]指出水泥土抗渗能力与其中钙镁离子含量联系紧密;余帆等^[2]发现萘系减水剂的加入可促进水化产物的分布更为均匀;李怡锋等^[3]提出水泥土中黏土含量对渗透性的影响大于养护龄期;庞文台等^[4]指出石灰的加入可激发粉煤灰的火山灰作用,生成水化硅酸钙填充孔隙。夏正兵^[5]指出水泥土的渗透系数和酸碱度存在负相关关系,并且与水泥含量及龄期呈正相关关系。在对外掺剂的研究中,不少学者发现,水玻璃能与水泥浆液中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成具有一定强度的硅酸钙水合物(CSH)凝胶,收紧水泥土的多孔结构,提高抗渗性^[6-7]。这些研究显然都可以为水泥-水玻璃改良粉质黏土渗透性提供有力凭证。

另外,许多学者通过 SEM、XRD 等微观试验研究分析不同水泥掺量、不同掺料影响下水泥土内部的微观结构,并指出其影响机理。李新民^[8]发现偏高岭土掺入后形成的水化产物可联结土颗粒并填充于孔隙。吴子龙等^[9]发现外掺剂的加入,不能改变水泥改性土中的水化产物类型,但可以改变水化产物的包裹形式和数量,合适的掺入比,可改变试样的微观结构和孔径分布。陈峰等^[10]通过实验研究指出铁镍渣粉的掺入能促进生成 Ca/Si 水化物,减小水泥土的孔隙率,增强抗渗性。申向东等^[11]指出水泥掺量增加和养护龄期提高均可使渗透系数持续减小。曹净等^[12]结合扫描电镜和能谱分析了胡敏酸对水泥

土试样强度的影响机理。杨康辉等^[13]发现合适的外掺剂可促进钙矾石的生成数量、长径比,更好的修复微裂缝,填充骨架,提高改良土体抗渗性能。Kulkarni 等^[14]指出影响渗透率的因素顺序为岩石含量>胶结度>岩石尺寸>Talbot 指数(描述不同粒度砂的质量百分比)。Horpibulsuk 等^[15]经过试验得出水泥含量可控制阳离子交换过程引起的黏土颗粒的飞散。这些研究可以为水泥-水玻璃改良粉质黏土微观机理分析提供有力借鉴。

1 材料及方法

1.1 试验原材料

1) 试验用土。试验用土取自南昌地铁 4 号线七里站出站口基坑。该粉质黏土呈黄褐色,经室内试验测得其物理力学指标如表 1 所示。考虑现场所取粉质黏土中存在较大砾石,实验室将所取土样放入烘箱,保持温度 105 ℃烘干 8 h 以上,待土样完全干燥、碾压后,过 5 mm 筛以保证试样均一。

2) 试验用主固化剂。水泥(cement,C)为普通硅酸盐水泥(P.O42.5),主要化学成分见表 2。

3) 试验用外掺剂。水玻璃(water glass, WG),硅酸钠水溶液,呈无色半透明黏稠状,模数 2.23,无毒无害。

4) 试验其余用材。为了增加制样时浆液流动性,帮助试块成型,故添加砂和萘系减水剂。试验用砂为南昌市天然河砂,细度模数为 3.32,同样烘干后待用;试验用萘系减水剂为高分子离子型表面活性剂,褐色粉末状。

表 1 试验土样的物理参数
Tab.1 Physical parameters of the test soil samples

Item	Water content/ %	Wet density/ (g/cm ³)	Porosity ratio	Liquidity index	Compression factor/ MPa	Compression modulus/ MPa	Cohesion/ kPa	Angle of internal friction/ (°)
Silty clay	12	1.801	0.801	0.309	0.284	6.373	34.680	20.529

表 2 水泥主要化学成分
Tab.2 Main chemical composition of cement

Item	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₄	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	LO
Ingredients/%	59.68	20.35	5.87	4.81	3.67	2.13	2.4

1.2 试验方法

本文研究目的是探究不同水泥掺量 w_c (16%, 20%, 24%, 28%), 不同水玻璃掺量 w_{wg} (2%, 4%, 6%, 8%), 以及不同养护龄期 (7, 14, 28 d) 对粉质黏土渗透性能影响。控制基本参变量一致, 详见表 3, 萘系减水剂和砂的掺量均为水泥占比。设置 2 因素 (水泥掺量、水玻璃掺量) 4 水平的全面试验, 分别检测 7, 14, 28 d 的渗透系数。为了方便表述, 材料均采用英文缩写方式, 如 16%C+2%WG 代表 16% 水泥+2% 水玻璃复合改良粉质黏土。方案设计共制作 48 组试验组和 1 组基准对照组 (24%C), 每组设置 3 个平行试件。

表 3 基本参变量
Tab.3 Baseline ratio

Item	Soil samples	Cement slurry		
	Water content	Water-cement ratio	Naphthalene water reduce	Sand doping rate
Dosage level	12%	1.5%	1.5%	20%

试件制作时, 根据《水泥土配合比设计规程》(JGJ55—2011) 的规定, 按方案设计先加入定量干土与水泥搅拌充分, 同时将萘系减水剂及水玻璃分别溶于水中搅拌充分后, 先将萘系减水剂溶液倒入水泥土混合干料中, 搅拌充分后, 再将水玻璃溶液倒入, 充分搅拌至均匀后得到拌合物, 此过程用水量严格按照设计用水量执行。搅拌结束后, 将拌合物装入截头圆锥形金属试模 (上口内径为 70 mm, 下口内径为 80 mm, 高度为 30 mm), 待试样制作完成后, 在 (20±5) °C 的环境下静置 48 h 后拆模, 水中养护至相应龄期后, 采用 TJSS-25 水泥土渗透系数测定仪测试改良粉质黏土试件渗透系数。试件养护及试验设备如图 2 所示。测试时第一级压力设置为 0.02 MPa, 每 10 min 以 0.02 MPa 等级逐级施加压力至 0.1 MPa, 以后以同样的时间间隔按 0.1 MPa 的加压幅度递增, 最后一级压力加至水泥土试件表面有水渗出, 标定并记录此时的渗压 (p)、水温, 后续

保持恒定压力 (p) 下固定间隔时间测定水泥土渗出的水量, 当试件表面有水均匀渗出时, 开始读数和记录; 时间间隔可根据水泥土试件表面的渗水量多少确定; 渗水量稳定后, 试验可以结束。

水泥土渗透系数 k_T 按下式计算

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

$$i = \frac{p}{100\gamma_w h}$$

式中: k_T 为水温 T °C 时水泥土渗透系数, cm/s; t 为时间间隔, s; A 为试件中部横截面积, cm²; h 为渗径, 即试件高度, cm; V 为经过时间渗出的水量, mL; i 为水力梯度; p 为施加的渗透压力, MPa; γ_w 为水的重度, N/cm³, 取 0.009 8 N/cm³。

采用扫描电子显微镜 (SEM) 对改良粉质黏土的微观结构特性以及内部微观形貌进行观测和分析; 采用多功能 X 射线衍射仪定量分析出改良粉质黏土试块中的各组分的含量。

2 结果与分析

2.1 水泥掺量影响

图 1 反应了 28 d 龄期下水泥掺量对 C-WG 改良粉质黏土渗透系数影响规律, 由图可知, 渗透系数随着水泥掺量增加而减小, 下降速率在水泥掺量为 24% 时出现拐点, 下降幅度由急变缓。以图 1(a) 为例, 水泥掺量从 16% 增加至 24% 时, C-WG 改良粉质黏土的渗透系数相比下降了 25.7%, 而从 24% 增至 28% 时, 渗透系数相比下降了 2.9%。究其原因主要是随着水泥掺量的增加, 加剧了水泥与粉质黏土中的自由水的水化反应, 提高了氢氧化钙、硅铝酸钙等水化产物含量, 而氢氧化钙可再次与粉质黏土中的硅铝氧化物在碱环境下发生共价聚合, 形成更多的胶凝物填充土中孔隙, 有效提升 C-WG 改良粉质黏土的抗渗性能; 随着水泥掺量的增大、初始用土量不变的情况下, 虽然可以持续发生水化反应, 但随着土中硅铝氧化物含量逐步消耗, 不足以支持水化产物继续转化成胶凝物, 渗透系数下降放缓。

2.2 水玻璃掺量影响

图 2 反应了 28 d 龄期下 C-WG 改良粉质黏土渗透系数与水玻璃掺量之间呈负相关关系, 以图 2(a) 为例, 当水玻璃掺量从 2% 增加至 8%, C-WG 改良粉质黏土的渗透系数降低了 34.5%。分析可知, 随着水玻璃掺量增大, 水玻璃与黏土中高价金属离子

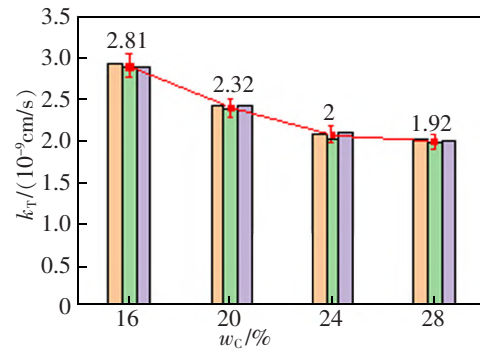
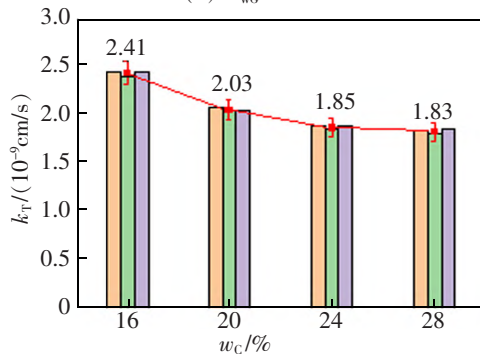
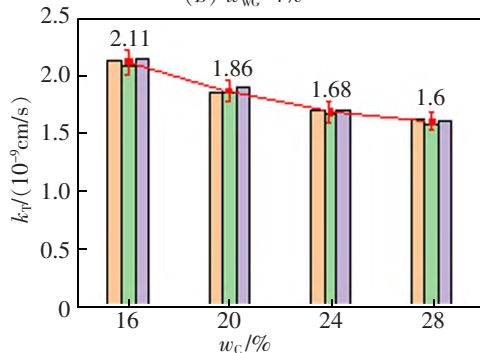
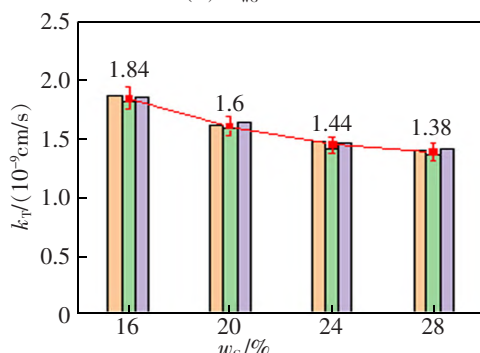
(a) $w_{WG}=2\%$ (b) $w_{WG}=4\%$ (c) $w_{WG}=6\%$ (d) $w_{WG}=8\%$

图1 水泥掺量对 C-WG 改良粉质黏土渗透特性的影响

Fig.1 Effect of cement content on permeability characteristics of C-WG improved silty clay

或 pH 值小于 9 的孔隙水接触,生成硅酸钙或硅胶颗粒,堵塞土体颗粒间隙,从而降低了 C-WG 改良粉质黏土的渗透系数。图 1 图 2 中黄色条柱,绿色条

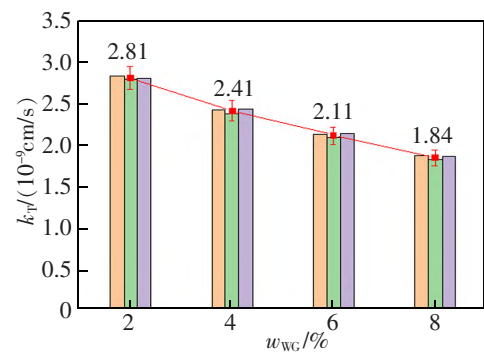
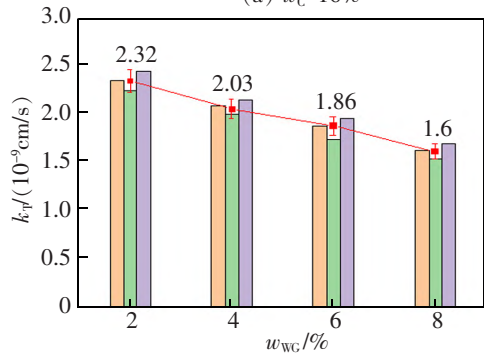
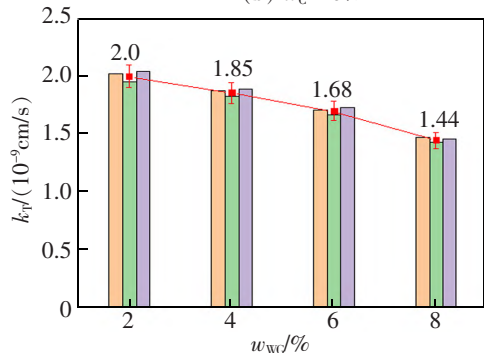
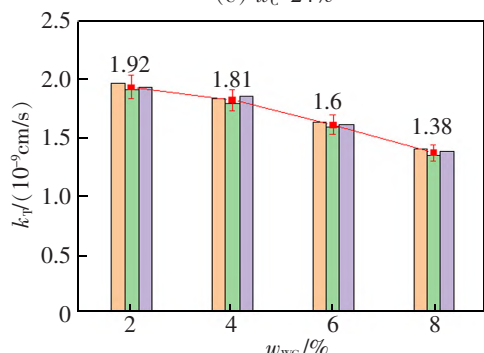
(a) $w_C=16\%$ (b) $w_C=20\%$ (c) $w_C=24\%$ (d) $w_C=28\%$

图2 C-WG 改良粉质黏土渗透系数与水玻璃掺量的关系

Fig.2 Relationship between permeability coefficient of C-WG improved silty clay and water glass content

柱,紫色条柱分别表示第 1 次,第 2 次,第 3 次试验。

2.3 水泥、水玻璃掺量协同作用

图 3 反应了水玻璃与水泥协同改良粉质黏土

的渗透系数变化规律。由图 3 可知,C-GW 改良粉质黏土渗透系数与水玻璃掺量、水泥掺量之间有着良好的相关性,说明两者可以协同作用改良粉质黏土的抗渗性。当水泥掺量从 16%增至 24%,水玻璃掺量从 2%增至 6%,渗透系数下降速率明显优于高掺量。综上所述,虽然水泥及水玻璃能够促进 C-GW 改良粉质黏土中水化产物的产生,但是由于初始用土量有限,导致水化反应后期土中硅铝氧化物不足以继续支持水化产物共价聚合转化成胶凝物质填补孔隙。在固定基本水灰比的情况下,水泥-水玻璃的掺量配比为 24%C+6%WG 时,可以最大限度发挥掺量的性能且完全析出水化产物结晶,达到填充孔隙降低渗透系数的目的同时,节约经济成本。

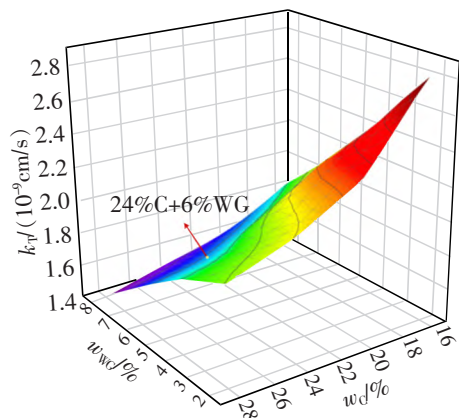
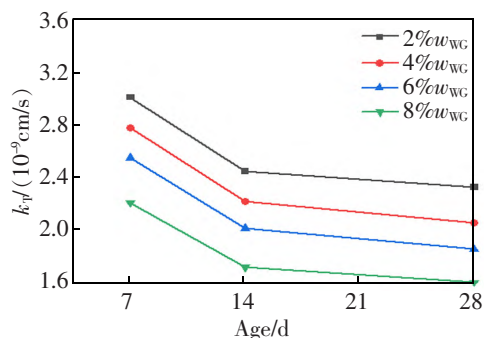
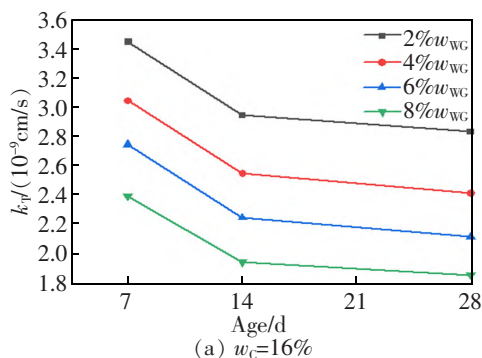


图 3 渗透系数与水玻璃掺量、水泥掺量间关系

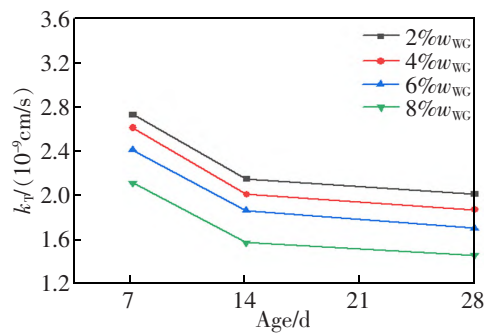
Fig.3 Relationship between permeability coefficient and water glass content and cement content

2.4 养护龄期影响

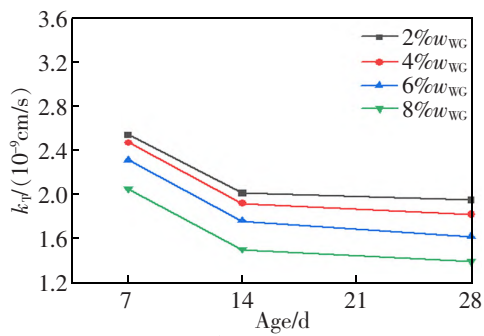
图 4 反应了养护龄期与 C-WG 改良粉质黏土的渗透系数之间的规律关系。如图所示,随着养护龄期的增长,渗透系数呈不断降低的趋势,以 24%C+6%WG 为例,当养护龄期由 7 d 增长至 14 d 时,C-WG 改良粉质黏土的渗透系数降低了 14.5%;而



(b) $w_c=20\%$



(c) $w_c=24\%$



(d) $w_c=28\%$

图 4 水泥固化土渗透系数与养护龄期的关系

Fig.4 Relationship between permeability coefficient of cement cured soil and curing age

14 d 增长至 28 d 时,渗透系数仅降低了 3.7%。可见在养护初期,水化反应较为剧烈,水化产物产出较快,渗透系数减小速度较快,而随着时间的不断发展,水化反应变缓,渗透系数下降趋势变小,且趋于平稳。

3 微观机理分析

3.1 XRD 分析

图 5 是对 28 d 龄期下的基准组以及 20%C+4%WG 组,24%C+6%WG 组进行 X 射线衍射图谱,从图 5 可以看出,水泥-水玻璃的协同作用可促进粉质黏土的水化反应并生成包括氢氧化钙 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 水化硅酸钙 $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 和钙矾石 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ 等在内的典型水化产物。对比基准

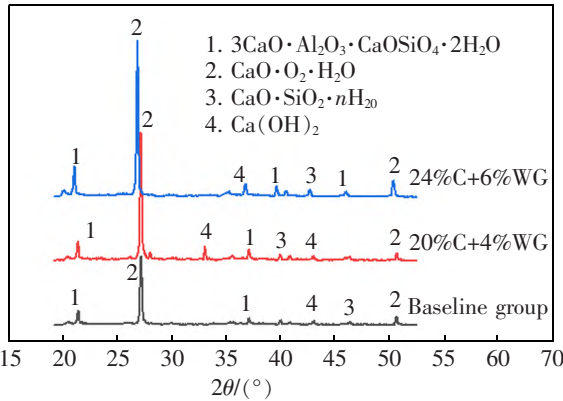


图 5 C-WG 改良粉质黏土的 XRD 衍射图谱

Fig.5 XRD diffraction pattern of C-WG modified silty clay

组,24%C+6%WG 组水化产物结晶类型更多、结晶含量更高。

表 4 为 X 射线衍射图谱在经过 MDI Jade 软件分析及 RIR 定量计算后各改良粉质黏土中各结晶成分的相对含量表。从表中可以清楚的得知,水泥-水玻璃的复合掺入,会降低土中 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 MgO 等成分含量,尤其是 Al_2O_3 的变化最为明显,从 14%分别降至 8%和 2%;同时促进氢氧化钙 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、水化硅酸钙 $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$ 、钙矾石 $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ 等主要水化产物的生成,且 24%C+6%WG 组生成的水化产物含量显然高于基准组,尤其是 24%C+6%WG 组生成的钙矾石高于基准组 7%。由此可知,水玻璃的掺入可有效促进氢氧化钙、水化硅酸钙和钙矾石等主要水化产物的生成,营造碱性环境促进水化产物转化成胶凝物并进一步提高水泥土的抗渗能力。

表 4 主要物质成分的质量分数

Tab.4 The mass fraction of the main substance component

Material composition	Type of specimen		
	In situ soil	Baseline group	24%C+6%WG group
SiO_2	47%	52%	45%
Fe_2O_3	15%	11%	6%
Al_2O_3	14%	8%	2%
MgO	7%	3%	1%
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	—	2%	5%
$\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$	—	4%	6%
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$	—	5%	12%

3.2 SEM 分析

图 6 是原位土样、基准组(24%C)以及 24%C+6%WG 改良粉质黏土的 SEM 电镜扫描照片。图 6(a)

中清晰可见原位土试样中土颗粒与土颗粒之间,土颗粒与矿物成分之间的孔隙和缝隙分布杂乱无章,抗渗性相对较低。图 6(b)可以看出,土颗粒和矿物质之间黏聚在一起形成凝块状团,颗粒之间的孔隙由黏土矿物填充,水化反应产生的片状 C-H 晶体使得土颗粒之间连接成板状结构,土颗粒表面被绝大部分胶结构物质覆盖,颗粒间形成长而粗的六方体棱柱状 C-A-S-H 钙矾石晶体,土体骨架更为完整,但土颗粒之间依然存在较多的孔隙。图 6(c)可见,大量絮状 C-S-H 凝胶存在于土颗粒周围,形成整体镶嵌的块状结构,孔隙孔径和数量已明显优于基准组,网状的 C-S-H 凝胶将大块状的结构胶结连接成整体,短而粗的 C-A-S-H 钙矾石晶体起着交叉支撑和填充孔隙的双重作用。对比之下,发现 24%C+6%

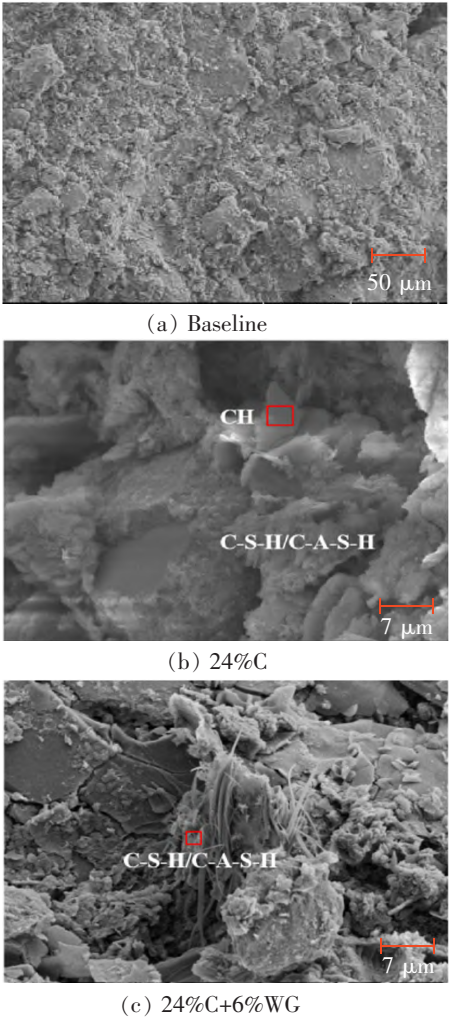


图 6 原位土样、24%C 及 24%C+6%WG 改良粉质黏土的 SEM 照片

Fig.6 SEM photos of control group, baseline group and 24% C+6% WG group

WG 组结构的整体性和密实性均相较基准组更佳,这也与渗透试验的结论相互印证,即水泥及水玻璃可协同作用,相互促进对粉质黏土抗渗性的改良。

4 结论

1) 水泥和水玻璃均可以较大程度的影响 C-WG 改良粉质黏土的渗透系数,并且掺量与渗透系数之间基本呈负相关性。

2) 水泥和水玻璃可协同改良粉质黏土的渗透性能,但对于水泥-水玻璃的配比有着明显的敏感性。基于室内试验数据和分析,确定水泥-水玻璃的最佳改良配比为 24%C+6%WG。

3) 结合 SEM 及 XRD 测试结果表明固化剂的加入并没有改变水泥土的水化产物主要物相组成,而是促进水化反应,提高了 C-S-H 凝胶和 C-A-S-H 钙矾石晶体等水化产物的生成量,填充了土骨架孔、裂隙,提高粉质黏土的微观结构稳定性,使结构更加密实,提高了水泥土的抗渗性。24%C+6%WG 组相较基准组有明显的变化,形成了更多的 C-A-S-H 钙矾石等水化产物及胶凝物,验证了水泥掺量 24%,水玻璃掺量 6%的配比下对粉质黏土改良效果相对更佳。

参考文献:

- [1] 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 S L, YANG Y L, ZHOU H, et al. Effect of sewage environment on permeability of cemented soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(11): 3047-3054.
- [2] 余帆,黄煜镔,孙大权. 石灰土和水泥土的减水剂改性效果[J]. 建筑材料学报,2017,20(2):283-287.
YU F, HUANG Y B, SUN D Q. Modification effect of lime soil and cement soil by water-reducing agent[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(2): 283-287.
- [3] 李怡锋,罗云飞,王贤虎,等. 黏土含量对再生骨料水泥土早期强度及抗渗性能的影响[J]. 建筑结构,2022,52(S1):1515-1522.
LI Y F, LUO Y F, WANG X H, et al. Effects of clay content on early strength and impermeability of recycled aggregate cement soil[J]. Building Structure, 2022, 52(S1): 1515-1522.
- [4] 庞文台,申向东. 复合水泥土抗渗性能的实验研究[J]. 硅酸盐通报,2012,31(6):1617-1620.
PANG W T, SHEN X D. Study on impervious performance of cement-soil[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2012, 31(6): 1617-1620.
- [5] 夏正兵. 水泥土渗透系数影响因素的试验研究[J]. 四川建筑科学研究,2018,44(3):68-71.
XIA Z B. The experimental study on permeability coefficient of cement soil with influencing factors[J]. Sichuan Building Science, 2018, 44(3): 68-71.
- [6] KRIZAN D, ZIVANOVIC B. Effects of dosage and modulus of water glass on early hydration of alkali-slag cements[J]. Cement & Concrete Research, 2002, 32(8): 1181-1188.
- [7] LI S, ZHANG J, LI Z, et al. Investigation and practical application of a new cementitious anti-washout grouting material[J]. Construction and Building Materials, 2019, 224(10): 66-77.
- [8] 李新明,路广远,张浩扬. 石灰偏高岭土改良粉砂土强度

特性与微观机理[J]. 建筑材料学报,2021,24(3):648-655.

- LI X M, LU G Y, ZHANG H Y. Strength characteristics and micro-mechanism of lime-metakaolin modified silty soil[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(3): 648-655.
- [9] 吴子龙,朱向阳,邓永锋. 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 Z L, ZHU X Y, DENG Y F. Behavior and micro-mechanism of cement-based modified compaction soil composed of steel slag and metakaolin[J]. China Journal Highway Transport, 2017, 30(9): 18-26.
- [10] 陈峰,童生豪,赖文涛. 海水环境下镍铁渣粉水泥土的抗渗性能[J]. 建筑材料学报,2022,25(11):1190-1194.
CHEN F, TONG S H, LAI W T. Impermeability of cement soil mixed with ferronickel slag powder in seawater environment[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(11): 1190-1194.
- [11] 申向东,曹雅娴,周丽萍. 水泥复合土本构模型的试验研究[J]. 土木建筑与环境工程,2011(S1):88-90.
SHEN X D, CAO Y X, ZHOU L P. An experimental study on constitutive model of composite cement soil[J]. Journal of Civil, Architecture & Environmental Engineering, 2011(S1): 88-90.
- [12] 曹净,李松坡,刘海明. 胡敏酸对水泥土强度的影响及机理[J]. 安全与环境学报,2021,21(6):2571-2576.
CAO J, LI S P, LIU H M. Effect and mechanism of humic acid on strength of cement soil[J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(6): 2571-2576.
- [13] 杨康辉,欧忠文,肖寒冰. CCCW 对硫铝酸盐水泥固化土强度的影响[J]. 后勤工程学院学报,2016,32(1):82-87.
YANG K H, OU Z W, XIAO H B. Influence of CCCW on strength of sulphur aluminate cement solidified soil [J]. Journal of Logistical Engineering University, 2016, 32(1): 82-87.
- [14] KULKARNI S B, KIRAN K, HAZAREE C. Statistical nature of concrete[J]. The Indian Concrete Journal, 2020(12): 64-74.
- [15] HORPIBULSUK S, RACHAN R, RAKSACHON Y. Role of fly ahs on strength and microstructure development in blended cement stabilized silty clay[J]. Soils & Foundations, 2011, 49(1): 85-98.



第一作者:胡扬扬(1997—),男,硕士研究生,研究方向为岩土工程基坑支护。E-mail:1519975046@qq.com。



通信作者:朱碧堂(1974—),男,教授,博士生导师,研究方向为地下空间技术开发。E-mail:btangzh@hotmail.com。

(责任编辑:姜红贵)