

DOI: 10.3785/j.issn.2096-7195.2025.01.005

【理论研究】

利用工程泥浆制备阻隔墙回填材料的性能测试与分析

詹良通^{1,2}, 林宇杰^{1,2}, 杨海本³, 康婷³, 郑良峰³

(1. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江杭州 310058; 2. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江杭州 310058;

3. 杭州市环境集团有限公司, 浙江杭州 310000)

摘要: 为开拓工程泥浆资源化利用新途径, 选用桩基工程泥浆为防污垂直阻隔墙回填材料, 机制砂尾料(凝灰岩石粉)为改性材料, 开展系列试验与数值分析。试验结果表明: 机制砂尾料的掺入使泥浆在相同含水率下的坍落度增加, 优化了颗粒级配; 满足100~150 mm坍落度的含水率范围为48%~56%, 约1.1~1.3倍液限; 当机制砂尾料掺量从0%增大到10%时, 泥浆压缩指数降低10%, 渗透指数增大8%, 渗透系数在相同孔隙比下降低; 当掺量超过7%时, 泥浆在低应力范围内渗透系数即可达到 1×10^{-7} cm/s的防渗要求。数值分析结果表明: 低渗透性泥浆在一维条件下的自重固结发展十分缓慢; 当机制砂尾料掺量从0%增大到10%时, 泥浆最终沉降量减少10%~15%, 沉降速率在固结中后期高于未改性泥浆; 在墙体浅部区域, 机制砂尾料掺量为10%的泥浆的渗透系数能始终满足防渗需求。在工程实践中, 应严格把控材料初始渗透系数, 并需充分关注墙体浅部与底部的渗透系数变化。

关键词: 工程泥浆; 机制砂尾料; 垂直阻隔墙; 渗透; 固结; 数值分析

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2025)01-0036-07

Performance testing and analysis of construction waste slurry for cutoff wall backfill

ZHAN Liangtong^{1,2}, LIN Yujie^{1,2}, YANG Haiben³, KANG Ting³, ZHENG Liangfeng³

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China;

2. MOE Key Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, Zhejiang, China;

3. Hangzhou Environmental Group Co., Ltd., Hangzhou 310000, Zhejiang, China)

Abstract: To explore innovative ways for the reusing of construction waste slurry, a series of tests and numerical analysis were conducted using pile foundation engineering slurry as backfill for vertical cutoff walls with the addition of manufactured sand tailings (tuff powder) as modification material. The test results indicate that the addition of manufactured sand tailings could enhance the slump of the slurry at the same water content, resulting in a more uniform particle distribution. The water content range for the slump of 100-150 mm is between 48% to 56%, approximately 1.1-1.3 times the liquid limit. When the addition of manufactured sand tailings increases from 0% to 10%, the slurry's compression index decreases by 10%, the permeability index increases by 8%, and the permeability coefficient decreases. Over 7% content, the slurry's permeability coefficient could achieve the impermeable standard of 1×10^{-7} cm/s under low stress. The numerical analysis results reveal that the self-weight consolidation of low-permeability slurry under one dimensional condition is significantly slow. When the manufactured sand tailings increases from 0% to 10%, the final settlement decreases by 10%-15%, and the settlement rate in the later stages of consolidation exceeds that of the unmodified slurry. In the shallow region of the wall, the slurry with a 10% addition of manufactured sand tailings consistently meets impermeability requirements. In engineering practice, it is crucial to strictly control the initial permeability coefficient of the material and pay close attention to the changes in permeability coefficients at the shallow and bottom of the wall.

收稿日期: 2023-08-26; 修回日期: 2023-09-04; 录用日期: 2023-09-08

基金项目: 浙江省重点研发项目(2019C03107)。

作者简介: 詹良通(1972—), 男, 福建尤溪人, 博士, 教授, 主要从事环境岩土工程的研究工作。E-mail: zhanlt@zju.edu.cn。

Key words: construction waste slurry; manufactured sand tailings; vertical cutoff walls; permeability; consolidation; numerical analysis

0 引言

随着我国城市化进程向纵深推进, 城市更新成为驱动高质量发展的新抓手。与此同时, 各类土木工程建设和大量固体废弃物也给城市发展带来了新难题。其中, 工程泥浆和机制砂尾料是其中产量大且难以有效处置的固废。

工程泥浆产生于各类建(构)筑物桩基础、基坑围护结构以及泥水盾构、管网暗挖等施工过程, 通常由水、膨润土、黏性土颗粒及外加剂构成^[1-2]。工程泥浆含水率大、渗透系数低, 处理难度较大, 外运填埋不但浪费资源、占用土地, 还存在安全隐患^[3]。

机制砂因其资源优势正逐渐取代天然砂成为混凝土可持续发展的主要砂源^[4]。然而, 受到相关标准和生产工艺的限制, 机制砂的开采、生产过程会产生大量尾料, 也称石粉, 其粒径通常小于 75 μm , 多余石粉难以合理利用, 同样会占用土地资源^[5]。

近年来, 机制砂尾料作为改性材料受到了广泛关注。在混凝土中, 机制砂尾料主要通过滚珠效应、填充效应、稀释效应、成核效应和微弱的化学效应等机理发挥作用^[6-7]。在施工和易性与孔隙优化方面, 谢友均等^[8]表明机制砂尾料的“滚珠效应”能显著降低浆体的屈服应力和塑性黏度, 而屈服应力与坍落度相关^[9]; ABABNEH 等^[10]发现随着凝灰岩石粉掺量增加, 石粉-水泥基复合凝胶体系流动度提升; 田浩正等^[11]试验发现, 当石粉替代率小于 15% 时, 填充效应和成核效应使黏结砂浆内部孔向无害孔和少害孔发展。目前, 机制砂尾料在泥浆改性方面的研究相对较少。

垂直阻隔墙是用于污染场地防控和遗留简易填埋场污染修复的基本且有效的技术, 通过防渗防污性能良好的材料或结构, 可将污染土体围封后与外界环境隔离^[12]。但在以黏性土、碎石土或岩层为主的地区, 阻隔墙施工现场经常难以找到符合要求的

母土材料^[13]。因工程泥浆具有高流动性、低渗透性等特点, 若能利用工程泥浆作为阻隔墙回填材料, 并利用机制砂尾料改善其工程性能, 既能为工程泥浆与机制砂尾料的资源化利用开拓新途径, 也能缓解填埋场地下水污染问题。

为探究工程泥浆作为阻隔墙回填材料的可行性, 本文选用废弃桩基泥浆与机制砂尾料(凝灰岩石粉), 首先测定其环境土工特性, 并开展坍落度试验、一维固结试验以及 GDS 柔性壁渗透试验, 明确机制砂尾料掺量对泥浆施工和易性、压缩性与渗透性等工作性能的影响, 再利用自重作用下一维大变形固结理论编制程序, 探讨机制砂尾料掺入对泥浆固结行为的影响。

1 材料基本性质和试验方法

1.1 材料基本性质

本文试验所用桩基工程泥浆取自杭州市谢村中转码头, 经自然风干至硬塑泥饼状; 所用改性材料为机制砂尾料, 取自宁波市海曙区某采石矿场, 样品呈泥状。两种材料的环境土工参数如表 1 所示, 利用 X 射线分析技术所得元素与矿物组成分别如表 2、表 3 所示。表 1 中, 桩基工程泥浆与机制砂尾料同为低液限黏土 (CL), 两者浸出液的重金属元素含量皆低于《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)^[14] 中 IV 类水限值, 可忽略材料本身重金属含量对地下水的影响。表 2 中, 桩基工程泥浆主要元素为硅、铝, 其他元素含量较少。表 3 中, 机制砂尾料主要黏土成分为高岭石、斜绿泥石与滑石, 此外, 还含有较为罕见的蓝铜钠石 ($\text{Na}_2\text{Cu}(\text{CO}_3)_2(\text{H}_2\text{O})_3$)。机制砂所属母岩的岩矿鉴定结果为凝灰岩, 塑变玻璃屑含量为 55%, 晶屑含量为 42% 左右, 晶屑中以长石为主, 石英次之。岩矿镜与 X 射线分析结果吻合度高, 表明机制砂尾料在开采、生产过程中几乎未受污染。

表 1 阻隔墙回填材料环境土工参数

Table 1 Environmental geotechnical parameters of backfills

试样名	比重 G_s	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	液限/%	塑限/%
桩基工程泥浆	2.65	1.69	20.1	65.5	14.4	43.0	22.6
机制砂尾料	2.62	1.64	30.0	55.0	15.0	38.4	17.1
试样名	电导率/ $(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1})$	pH	Pb/ $(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	Cu/ $(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	Ni/ $(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	Fe/ $(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	Zn/ $(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$
桩基工程泥浆	108	8.1	0.7	4.5	2.1	226.5	5.5
机制砂尾料	430	8.7	60.7	1.6	痕量	527.7	4.0

表2 桩基工程泥浆元素与矿物组成

Table 2 Elemental and mineral composition of construction waste slurry from pile foundation engineering

元素组成	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	TiO ₂
含量/%	62.1	15.7	5.0	3.2	2.7	1.7	0.9	0.8
矿物组成	石英	2M型白云母	斜绿泥石	钠长石	正长石	方解石	板钛矿	金红石
含量/%	49.6	19.6	10.2	10.0	3.7	3.2	2.0	1.0

表3 机制砂尾料元素与矿物组成

Table 3 Elemental and mineral composition of manufactured sand tailings

元素组成	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaCO ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	MnO
含量/%	38.8	14.8	11.4	4.9	3.9	1.6	1.5	0.6	0.2
矿物组成	白云母	钠长石	石英	方解石	高岭石	斜绿泥石	滑石	蓝铜钠石	磷酸铝
含量/%	31.3	24.0	13.1	10.5	7.5	5.5	3.1	2.9	2.0

1.2 试验方法

基于表2和表3结果,将桩基工程泥浆与机制砂尾料分别以105℃和50℃烘干,手动研磨后过75μm筛,选筛下部分。机制砂尾料的掺量设置为0%、4%、7%、10%,将两种材料干粉拌合均匀后,按比例添加去离子水并再次拌合。各个掺量的泥浆颗粒级配曲线如图1所示,J-n表示泥浆中机制砂尾料掺量为n%,J-0曲线表明泥浆自身级配较不均匀,粒径约5μm的细粒在自然风干中随固结排水流失;机制砂尾料级配较均匀,且黏粒含量较高;随着机制砂尾料掺量增大,泥浆的级配趋于均匀,认为机制砂尾料对泥浆起到了一定的充实孔隙和填充作用^[11,15],但机制砂尾料对泥浆界限含水率影响较小。

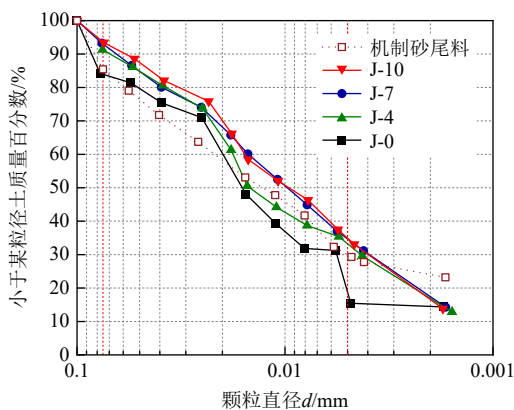


图1 不同机制砂尾料掺量泥浆颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle-size distribution curves of construction waste slurry with different manufactured sand tailing content

泥浆材料由于黏度较大,迷你坍落度筒边界效应显著,因此坍落度试验需采用标准坍落度筒(下底 $R_0=100$ mm,上底 $R_H=50$ mm,高度 $H=300$ mm),试验方法参考文献[16]。

采用单杠杆固结仪并结合特定加载方式^[17],可

测得试样在低压范围内的沉降曲线,考虑到阻隔墙实际应力范围约为0~150 kPa^[18],固结压力设置为1、2、3、4、6、8、12.5、25、50、100、200、400、800 kPa,沉降速率小于0.001 mm/h时认为固结稳定。为分析机制砂尾料掺量对压缩性能的影响,试样初始含水率设置为52%,试验中需保持试样饱和^[19]。

同时,采用气压固结仪进行对比分析,按试样坍落度达125 mm时设置初始含水率,以获取工程实际拌合时泥浆的压缩性参数,并与单杠杆固结仪结果一同为后续数值分析提供依据。最大固结压力设置为200 kPa,固结稳定条件受仪器限制为24 h。

气压固结仪可记录不同固结压力下的沉降速率曲线,渗透系数根据太沙基一维固结理论计算:

$$k = C_v m_v \gamma_w \quad (1)$$

式中: C_v 为固结系数(泰勒法), cm^2/s ; m_v 为体积压缩系数, MPa^{-1} ; γ_w 为水的重度, kN/m^3 。

刚性壁变水头渗透仪无法测得给定固结压力下的渗透系数,且提前施加固结荷载的试样在渗透过程中始终处于卸载状态,需采用GDS柔性壁渗透仪开展回填料在等向固结压力下的常水头渗透试验,试验与计算方法参照文献[20-21]。试样初始含水率、固结压力设置同气压固结仪,固结稳定条件为:当固结压力 $P < 100$ kPa时,稳定时间为48 h;当 $P \geq 100$ kPa时,稳定时间为24 h。

2 试验结果及分析

2.1 施工和易性

不同机制砂尾料掺量的泥浆坍落度与含水率关系曲线如图2所示,各试样的坍落度与含水率之间

线性关系良好, 满足试样坍落度达到 100~150 mm 的含水率为 48%~56%, 结合表 1 可知, 该含水率区间约为 1.1~1.3 倍液限。机制砂尾料掺量增大使相同含水率下试样的坍落度提高, 或泥浆获相同坍落度所需含水率降低, 认为机制砂尾料可改善泥浆的施工和易性。此外, 各拟合直线斜率差异较小, 根据坍落度理论^[9], 说明机制砂尾料对泥浆屈服应力影响较小。

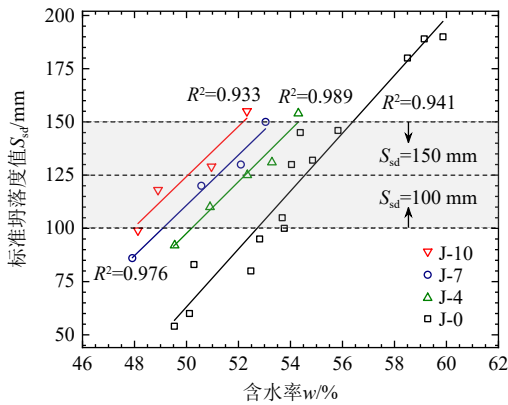


图 2 不同机制砂尾料掺量泥浆坍落度与含水率关系
Fig. 2 Relationship between slump and water content of construction waste slurry with different manufactured sand tailing content

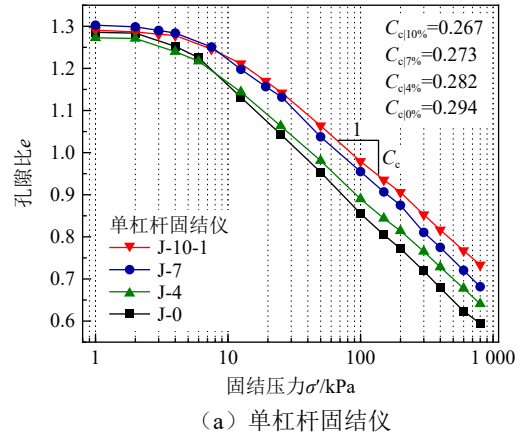
2.2 压缩特性

一维固结试验结果如图 3 所示, 单杠杆固结仪与气压固结仪的试验结果接近, 在半对数空间下, 各试样在压缩曲线后半段接近直线, 且曲线在固结压力为 12.5 kPa 附近出现拐点^[17]。机制砂尾料掺量达 10% 时, 泥浆压缩指数 C_c 减小约 10%, 压缩能力下降, 原因可能是: (1) 机制砂尾料电导率高于泥浆, 或起到固化作用; (2) 机制砂尾料的黏粒部分优化了桩基工程泥浆的颗粒级配。图 3 (b) 结果显示, 当机制砂尾料掺量达 10% 时, 由于初始含水率降低, 试验结束后孔隙比变化值减少约 15%。

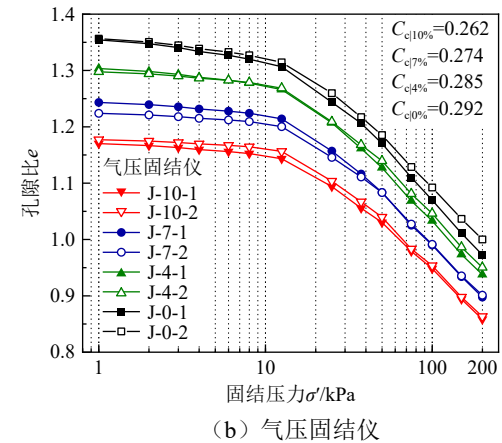
2.3 渗透特性

图 4 为利用式 (1) 反算和柔性壁渗透试验直接测得的不同机制砂尾料掺量的泥浆 k - σ 曲线, 由于 t_{90} 的准确度取决于人为求解精度, 固结试验反算的渗透系数曲线有一定离散性。提高机制砂尾料掺量后各曲线下移, 说明机制砂尾料使得泥浆初始渗透系数下降。在固结压力为 20 kPa 时, 各掺量下的泥浆渗透系数可达 1×10^{-7} cm/s 的防渗要求。结合 EVANS 等^[22] 对尺寸为 200 m \times 7 m \times 0.9 m 阻隔墙的监测结果, 阻隔墙全深度范围将长期处于低应力状态, 因此 7%、10% 掺量泥浆在固结初期即可满足实际防渗要求。此外, 当固结压力从 0 kPa 逐渐增加到 200 kPa 时, 渗透系数下降约 2 个数量级, 表

明泥浆材料的渗透性高度依赖材料的应力状态, 尤其是在低应力范围内^[22-23]。因此, 在工程实践中应格外关注低应力范围内的墙体渗透系数, 如浅部区域; 童星等^[24] 在对国内首个土-膨润土阻隔墙工程的长期监测时首次发现墙体底部的有效应力较小 (短墙) 或接近 0 kPa (长墙), 故同样需要关注墙体的底部区域。



(a) 单杠杆固结仪



(b) 气压固结仪

图 3 不同机制砂尾料掺量泥浆孔隙比与固结压力关系

Fig. 3 Relationship between void ratio and consolidation pressure of construction waste slurry with different manufactured sand tailing content

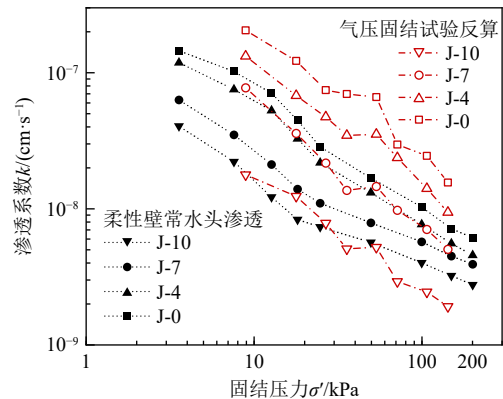


图 4 不同试验方法下泥浆固结压力与渗透系数关系

Fig. 4 Relationship of permeability coefficient and consolidation pressure of construction waste slurry under different test methods

将柔性壁渗透试验所得 $k-\sigma$ 关系与单杠杆固结试验所得 $e-\sigma$ 关系, 通过 FILZ 等^[25]提出的换算公式可得 $e-k$ 关系 (图 5)。

$$\sigma'_{\text{柔性壁}} = \frac{(1+2K_0)\sigma'_{\text{刚性壁}}}{3} \quad (2)$$

式中: K_0 为静止土压力系数。

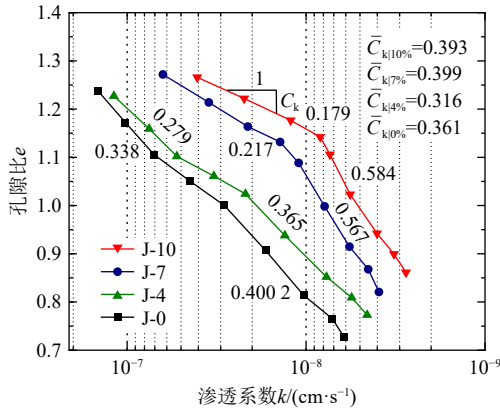


图 5 不同机制砂尾料掺量泥浆孔隙比与渗透系数关系
Fig. 5 Relationship between permeability coefficient and void ratio of construction waste slurry with different manufactured sand tailing content

当机制砂尾料的掺量为 0% 和 4% 时, $e-\log k$ 曲线呈现较好的直线关系, 与压缩指数 C_c 类似, $e-\log k$ 曲线中直线段的斜率为渗透指数 C_k ; 当机制砂尾料的掺量为 7% 和 10% 时, $e-\log k$ 曲线呈分段直线关系, 曲线存在拐点, 当孔隙比低于该拐点时, 试样的渗透性改变。泥浆的渗透指数随掺量增加发生一定程度的增大。试验发现, 柔性壁试样在试验结束后不同位置的侧向变形不同, 不完全符合理想等向固结状态, 因此, 通过换算公式 (2) 将柔性壁的 $k-\sigma$ 关系转化为 $e-k$ 关系时会存在一定误差。

3 泥浆改性对固结行为影响分析

3.1 自重作用下泥浆一维大变形固结模型

由饱和土竖向应力平衡条件、孔隙水渗流连续性条件、达西渗流定律与有效应力原理, 可得到流动坐标系下以超静孔压 u 为变量的一维大变形自重固结方程 (3), 具体推导过程可参考文献 [26], 并利用有限差分法编制求解程序。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{m_v \gamma_w} \frac{\partial}{\partial \xi} \left[k_z \frac{\partial u}{\partial \xi} \right] \quad (3)$$

式中: u 为超静孔压, $u = u(\xi, t)$; m_v 为土体积压缩系数, $m_v = -\frac{1}{(1+e)} \frac{de}{d\sigma'}$; γ_w 为水的重度; k_z 为竖向渗透非线性系数, $k_z = k_z(\xi, t)$ 。

3.2 泥浆改性前后对固结行为分析

针对以下 2 个因素, 考察机制砂尾料掺量为 0% 和 10% 时对泥浆固结行为的影响: (1) 机制砂尾料掺入后, 泥浆压缩指数降低, 渗透指数提高, 初始渗透系数降低, 设置 “*” 的参数组合; (2) 机制砂尾料掺入可降低泥浆达到相同坍塌度所需的含水率, 设置 “†” 的参数组合, 即 J-10*† 意为机制砂尾料掺量为 10% 时, 同时考察 2 个因素的影响。泥浆固结行为计算参数见表 4。

表 4 泥浆固结行为计算参数

Table 4 Calculation parameters for construction waste slurry consolidation behavior

参数	掺量/%	取值
回填深度 H/m	—	30
初始孔隙比 e_0	—	$1.35^*/1.15^\dagger$
初始有效应力 P_0/kPa	—	4
重度 $\gamma'/(kN \cdot m^{-3})$	0	16.9
	10	17.3
渗透系数 $k_0/(cm \cdot s^{-1})$	0	2×10^{-7}
	10	4×10^{-8}
泥浆压缩关系	0^*	$e = 1.35 - 0.294 \log(\sigma'/4)$
	$10^{*\dagger}$	$e = 1.35 - 0.267 \log(\sigma'/4)$
	10^\dagger	$e = 1.15 - 0.267 \log(\sigma'/4)$
泥浆渗透关系	0^*	$e = 1.35 + 0.313 \log[k/(2 \times 10^{-7})]$
	$10^{*\dagger}$	$e = 1.35 + 0.393 \log[k/(4 \times 10^{-8})]$
	10^\dagger	$e = 1.15 + 0.393 \log[k/(4 \times 10^{-8})]$

图 6 为机制砂尾料掺入前后泥浆沉降特征曲线, 包括沉降量、沉降速率与固结度。图 6 (a) 表明一维自重条件下的泥浆固结发展十分缓慢, 机制砂尾料使泥浆压缩指数 C_c 降低, 导致 J-10*† 最终沉降量比 J-0* 减少约 10%, 而使 125 mm 坍塌度对应的初始含水率降低, 导致 J-10† 最终沉降量比 J-10*† 减少约 15%; 图 6 (b) 中 J-0 与 J-10 存在交点, 是因为在固结初期, J-10 泥浆初始渗透系数比 J-0 低, 沉降速率更慢, 而在固结中后期, 渗透指数 C_k 更高使得沉降速率加快, 导致 2 种泥浆达到相同沉降量的时间不同, 但沉降收敛时间接近; 图 6 (c) 中, 沉降固结度 U_s 曲线在孔压固结度 U_p 曲线下方, 说明沉降发展速度滞后于孔压消散速度, 且 J-10 在 J-0 右侧, 表明 J-10 沉降发展始终滞后于 J-0, 符合图 6 (a) 的规律。

改性前后浅部泥浆 ($H=1m$) 渗透系数的变化规律如图 7 所示。J-0 曲线表明泥浆浅部需要较长时间

固结才能满足阻隔墙的防渗需求, 而 J-10 泥浆初始渗透系数低于 10^{-7} cm/s, 可始终满足墙体防渗需

求。因此, 若将泥浆作为阻隔墙回填材料, 必须要严格控制初始渗透系数的大小, 或对浅部加固处理。

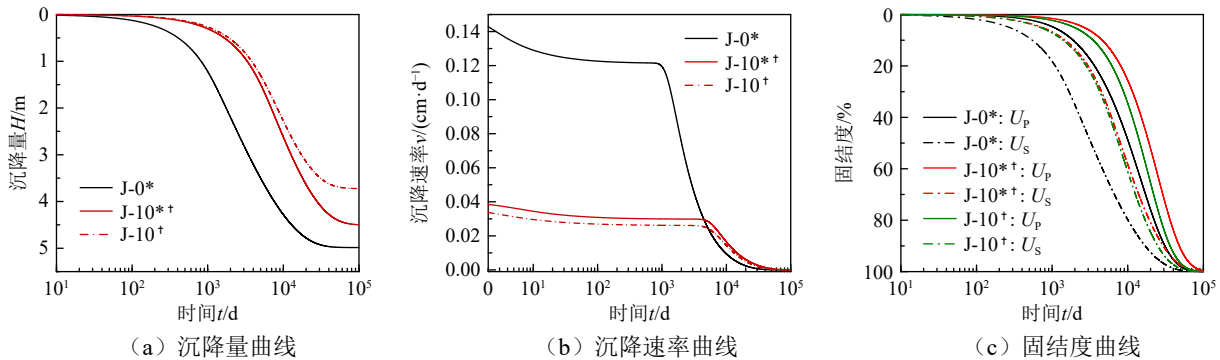


图 6 改性前后泥浆沉降特征

Fig. 6 Settlement characteristics of construction waste slurry before and after modification

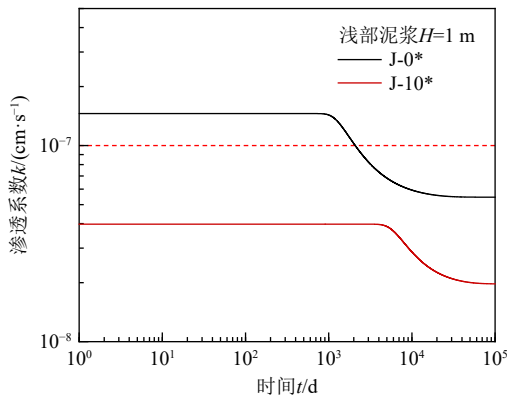


图 7 改性前后浅部泥浆渗透系数随时间变化曲线

Fig. 7 Variation of permeability coefficient of shallow construction waste slurry before and after modification

4 结 论

(1) 机制砂尾料的掺入使泥浆在相同含水率下的坍落度增加, 并优化颗粒级配, 满足坍落度 100~150 mm 范围的含水率为 48%~56%, 约为 1.1~1.3 倍液限。

(2) 机制砂尾料掺量从 0% 增大到 10% 时, 泥浆压缩指数降低 10%, 渗透指数增大 8%, 相同孔隙比下渗透系数减小。泥浆渗透系数高度依赖应力状态, 在低应力条件下, 当机制砂尾料掺量超过 7% 时, 泥浆渗透系数始终满足 1×10^{-7} cm/s 要求。

(3) 低透性泥浆在一维条件下自重固结发展十分缓慢。机制砂尾料掺量从 0% 增大到 10% 时, 泥浆最终沉降量减小 10%~15%, 沉降速率在固结中后期超过未改性的泥浆。在墙体浅部区域, 10% 掺量下的泥浆始终满足防渗要求。

因此, 在工程实践中, 应严格把控回填料的初始渗透系数, 并充分关注阻隔墙浅部与底部的渗透

系数变化。

参考文献

- [1] 房凯, 张忠苗, 刘兴旺, 等. 工程废弃泥浆污染及其防治措施研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(增刊 2): 238-241. FANG Kai, ZHANG Zhongmiao, LIU Xingwang, et al. Pollution of construction waste slurry and prevention measures[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(S2): 238-241.
- [2] 詹良通, 江文豪, 王顺玉, 等. 工程泥浆自重固结及低位真空加载过程的大型模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(增刊 1): 32-37. ZHAN Liangtong, JIANG Wenhao, WANG Shunyu, et al. Large-scale model test investigation on self-weight consolidation and low vacuum loading process of construction waste slurry[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(S1): 32-37.
- [3] 张钦喜, 陶韬, 王晓杰, 等. 钻孔灌注桩废弃泥浆处理的试验研究[J]. 水利学报, 2015, 46(增刊 1): 40-45. ZHANG Qinxì, TAO Tao, WANG Xiaojie, et al. Experimental study on treatment of waste slurry in cast-in-situ bored pile[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(S1): 40-45.
- [4] SHEN W G, LIU Y, WANG Z W, et al. Influence of manufactured sand's characteristics on its concrete performance[J]. Construction and Building Materials, 2018, 172: 574-583.
- [5] 于本田, 刘晓林, 王彦鹏, 等. 凝灰岩石粉对水泥基材料性能影响的研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(8): 2090-2097.

- YU Bentian, LIU Xiaolin, WANG Yanpeng, et al. Review on effect of tuff powder on properties of cement-based materials[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2023, 51(8): 2090–2097.
- [6] 张静. 石灰石粉复合掺合料的制备及其对混凝土性能影响的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
ZHANG Jing. The preparation and the performance in concrete of limestone powder composite admixture[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [7] BRIKI Y, ZAJAC M, HAHA M B, et al. Impact of limestone fineness on cement hydration at early age[J]. *Cement and Concrete Research*, 2021, 147: 106515.
- [8] 谢友均, 陈小波, 马昆林, 等. 粉煤灰对水泥浆体的剪切变稀和剪切增稠作用[J]. *硅酸盐学报*, 2015, 43(8): 1040–1046.
XIE Youjun, CHEN Xiaobo, MA Kunlin, et al. Effects of fly ash on shearing thinning and thickening of cement paste[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2015, 43(8): 1040–1046.
- [9] CLAYTON S, GRICE T G, BOGER D V. Analysis of the slump test for on-site yield stress measurement of mineral suspensions[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2003, 70(1–4): 3–21.
- [10] ABABNEH A, MATALKAH F. Potential use of Jordanian volcanic tuffs as supplementary cementitious materials[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2018, 8: 193–202.
- [11] 田浩正, 乔宏霞, 冯琼, 等. 石粉替代率对聚合物机制砂粘结砂浆性能及微观结构的影响研究[J]. *材料导报*, 2024, 38(6): 22050194.
TIAN Haozheng, QIAO Hongxia, FENG Qiong, et al. Effect of stone powder substitution rate on the performance and microstructure of mechanism sand polymer-bonded mortar[J]. *Materials Reports*, 2024, 38(6): 22050194.
- [12] 陈云敏. 环境土工基本理论及工程应用[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(1): 1–46.
CHEN Yunmin. A fundamental theory of environmental geotechnics and its application[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(1): 1–46.
- [13] 杨孔立. 建筑渣土-膨润土回填料防渗性能的试验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
YANG Kongli. Experimental study on water permeability of waste soil-bentonite backfill[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.
- [14] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 地下水质量标准: GB/T 14848—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Standard for Groundwater Quality: GB/T 14848—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [15] 徐浩青, 周爱兆, 姜朋明, 等. 不同砂-膨润土垂直防渗墙填筑土料的掺量研究[J]. *岩土力学*, 2019, 40(增刊 1): 424–430.
XU Haoqing, ZHOU Aizhao, JIANG Pengming, et al. Study on bentonite content of different sand-bentonite vertical cutoff wall backfill materials[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(S1): 424–430.
- [16] MALUSIS M A, EVANS J C, MCLANE M H, et al. A miniature cone for measuring the slump of soil-bentonite cutoff wall backfill[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2008, 31(5): 373–380.
- [17] HONG Z S, YIN J, CUI Y J. Compression behaviour of reconstituted soils at high initial water contents[J]. *Géotechnique*, 2010, 60(9): 691–700.
- [18] LI Y C, KE H, TONG X, et al. Consolidation behaviors of soil-bentonite slurry trench cutoff walls: a large-scale test[J]. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2016, 2(45): 1593–1596.
- [19] 张斯好, 闫子壮, 陈云敏, 等. 盐溶液侵蚀下砂-膨润土混合土化学固结行为研究[J]. *地基处理*, 2022, 4(3): 181–189.
ZHANG Siyu, YAN Zizhuang, CHEN Yunmin, et al. Study on chemical consolidation behavior of sand-bentonite mixed soil under saline solution erosion[J]. *Journal of Ground Improvement*, 2022, 4(3): 181–189.
- [20] 童星. 土-膨润土力学水力特性及其隔离墙的固结行为研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
TONG Xing. Mechanical and hydraulic properties of soil-bentonite and consolidation behavior of cutoff wall[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [21] POVAH B. Measuring hydraulic conductivity using flexible walled permeameter and ASTM method D5084[D]. San Luis Obispo: California Polytechnic State University, 2021.

