



基于疏水改性黏土的疏水心墙料力学-抗渗性能 协演规律试验研究

吴珺华¹, 黄源杰¹, 付芳远¹, 王伟², 王东星³, 仇文岗⁴

(1. 南昌航空大学土木与交通学院, 南昌 330063; 2. 绍兴文理学院土木工程学院, 浙江 绍兴 312000; 3. 武汉大学土木建筑工程学院, 武汉 430072; 4. 重庆大学山区土木工程安全与韧性国家重点实验室, 重庆 400045)

摘要:针对土石坝防渗心墙材料力学与抗渗性能难以协同提升的技术瓶颈, 采用十八烷基伯胺(十八胺)对黏土进行疏水化改性, 将改性后的疏水黏土与标准砂按不同土石比和初始含水率的要求混合制备成疏水心墙料。采用不固结不排水剪切试验测定其抗剪强度参数, 同时采用滴水穿透时间法测定其滴水穿透时间, 系统探究不同含水率与土石比对疏水心墙料力学-抗渗性能的影响规律。结果表明: 土石比的提升增加了砂-黏土界面形成的优先渗流通道, 显著弱化了疏水特性; 含水率对疏水等级的影响呈现单峰响应规律, 随着含水率的增大, 滴水穿透时间先增后减, 存在最优抗渗临界阈值; 土石比和含水率的增大均能增强峰值剪应力, 符合莫尔-库伦强度准则; 黏聚力受疏水黏土含量与含水率协同影响显著, 粗粒料的增加会导致颗粒间的黏结作用被削弱, 但黏聚力受含水率的变化更为敏感; 内摩擦角在土石比大于5%后趋于稳定, 而含水率对其影响不大。

关键词:疏水心墙料; 十八烷基伯胺; 疏水性; 抗剪强度; 抗渗性能

中图分类号:TV641 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(XXXX)XX-0001-09

Experimental study on mechanical-impermeability synergistic behavior of hydrophobic modified clay core wall materials

WU Junhua¹, HUANG Yuanjie¹, FU Fangyuan¹, WANG Wei², WANG Dongxing³,
ZHANG Wengang⁴

(1. College of Civil Engineering and Transportation, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Shaoxing University, Shaoxing 312000, Zhejiang, P. R. China; 3. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, P. R. China; 4. State Key Laboratory of Safety and Resilience of Civil Engineering in Mountain Area, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

收稿日期:2025-09-06

基金项目:国家自然科学基金(52478325、52578428); 重庆市自然科学基金创新发展联合基金(CSTB2022NSCO-LZX0001); 贺兰山岩画遗址保护项目(H20240863); 湖北省自然科学基金杰出青年项目(2024AFA051)

作者简介:吴珺华(1985-), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土体性质改良与工程加固研究, E-mail: wjhnchu0791@126.com。
仇文岗(通信作者), 男, 博士, 教授, 博士生导师, E-mail: zhangwg@cqu.edu.cn。

Received: 2025-09-06

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No. 52478325, 52578428); Chongqing Natural Science Foundation Innovation and Development Joint Fund (No. CSTB2022NSCO-LZX0001); Helan Mountain Rock Art Site Conservation Project (No. H20240863); Hubei Provincial Natural Science Foundation for Distinguished Young Scholars (No. 2024AFA051).

Author brief: WU Junhua (1985-), PhD, professor, main research interests: improvement of geomaterial properties and engineering reinforcement, E-mail: wjhnchu0791@126.com.

ZHANG Wengang (corresponding author), PhD, professor, doctoral supervisor, E-mail: zhangwg@cqu.edu.cn.

Abstract: Addressing the technical challenge of synergistically enhancing the mechanical and impermeability properties of core wall materials for earth-rock dams, hydrophobic clay was prepared by modifying clay with octadecylamine (ODA). This modified hydrophobic clay was mixed with standard sand according to specified soil-to-rock ratios and initial water contents to form a hydrophobic core material. Unconsolidated undrained (UU) shear tests were conducted to determine the shear strength parameters, while the water drop penetration time (WDPT) method was employed to measure the WDPT, systematically investigating the influence of water content and soil-to-rock ratio on the mechanical and impermeability properties of the hydrophobic core material. The results indicated that an increase in the soil-to-rock ratio promoted the formation of preferential seepage channels at the sand-clay interface, significantly weakening the hydrophobic characteristics. The effect of water content on the hydrophobicity grade exhibited a unimodal response pattern: the WDPT initially increased and then decreased with rising water content, revealing an optimal critical threshold for impermeability. Both increasing the soil-to-rock ratio and water content enhanced the peak shear stress, consistent with the Mohr-Coulomb strength criterion. Cohesion was significantly influenced by the combined effect of hydrophobic clay content and water content; an increase in coarse-grained material weakened the interparticle bonding, but cohesion was more sensitive to changes in water content. The internal friction angle stabilized when the soil-to-rock ratio exceeded 5% and was largely unaffected by water content.

Keywords: hydrophobic core wall materials; octadecylamine; hydrophobicity; shear strength; anti-seepage performance

随着土石坝的快速发展,其类型与结构日益多样化^[1]。工程实践表明,采用砾质土或掺砾土作为心墙防渗料具有显著优势,已成为当前主流技术方向^[2-5]。然而,堤坝渗漏问题仍对工程安全构成严重威胁,据统计,全球约 65% 的大坝事故与渗漏破坏直接相关^[6-8]。诸多学者围绕心墙料性能优化开展了大量研究工作,探讨了含水率^[9]、温度^[10]、饱和度^[11]及冻融循环^[12]对心墙料力学特性的作用机制,认为水分变化是导致心墙料性能劣化的主要因素。心墙料中掺砾能有效提升抗剪强度,学者们开展了掺砾量^[13]、砾状形态^[14]及砾径比例^[15]对心墙体抗剪强度的试验研究,发现掺砾量在 35%~70% 区间能显著改善力学性能,尤其是动载作用下的强度有所增大^[16],但抗渗性能明显削弱。有学者采用添加石灰^[17]、相变材料^[18]和固化剂^[19]来改善心墙料的抗冻性及耐久性,但发现抗渗性能降低且力学性能弱化,难以兼顾防渗与结构稳定性需求。传统掺砾或外加剂改良主要依赖物理填充或胶结作用,未能从降低水分渗透力的角度提升心墙体抗渗性^[20]。因此,如何有效控制心墙料“力学-抗渗”性能协同调控,在提升心墙料抗渗性能的同时保证抗剪强度不衰减,降低渗漏导致的溃坝风险,成为高土石坝设计的关键问题。

近年来,针对土壤疏水化及其性质引起广泛关注。疏水土在自然界普遍存在^[21-23],在农业土壤领域,因其易引发优先流^[24]和水土流失^[25]而被列为不良土,但其优良抗渗性应用于工程防渗的潜力尚未

被充分认知。笔者前期开展了大量的土体疏水化及工程性质研究,取得了一系列研究成果^[26-29]。若通过技术手段调控将土体疏水化,提升土体抗渗性,并与砂砾相结合形成兼具“力学-抗渗”需求的新的心墙料,可为工程防渗提供新的思路。据此,首先采用十八烷基伯胺(十八胺)对黏土进行疏水化处理,结合标准砂调控土石比以制备改性疏水心墙料。在此基础上,开展疏水心墙料的疏水等级和抗剪强度测定,系统研究含水率和土石比对试样抗渗与力学性能的影响规律,揭示疏水改性对心墙料“力学-抗渗性能”提升机制,为土石坝心墙料设计提供兼具抗渗高效性与力学稳定性的新思路。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验用土取自某工程现场,过 2 mm 筛干燥备用。相对密度为 2.74,最大干密度为 1.46 g/cm³,最优含水率为 19.7%,液限为 41.5%,塑限为 20.8%,塑性指数为 20.7,定义为黏土。其中,粒径小于 0.002 mm 的颗粒质量占总质量的 18.46%,粒径为 0.002~0.02 mm 的颗粒质量占总质量的 41.67%,粒径大于 0.02 mm 的颗粒质量占总质量的 39.87%。采用 XRD 测定壤土主要物质组成,其衍射图谱如图 1 所示,主要矿物有石英(34.0%)、赤铁矿(6.3%)、铁氧化物(9.4%)、高岭石(10.2%)、三水铝矿(24.3%)和白云母(15.7%)。采用场发射扫描电镜对壤土进行微观形态测定,典型结构如

图 2 所示。

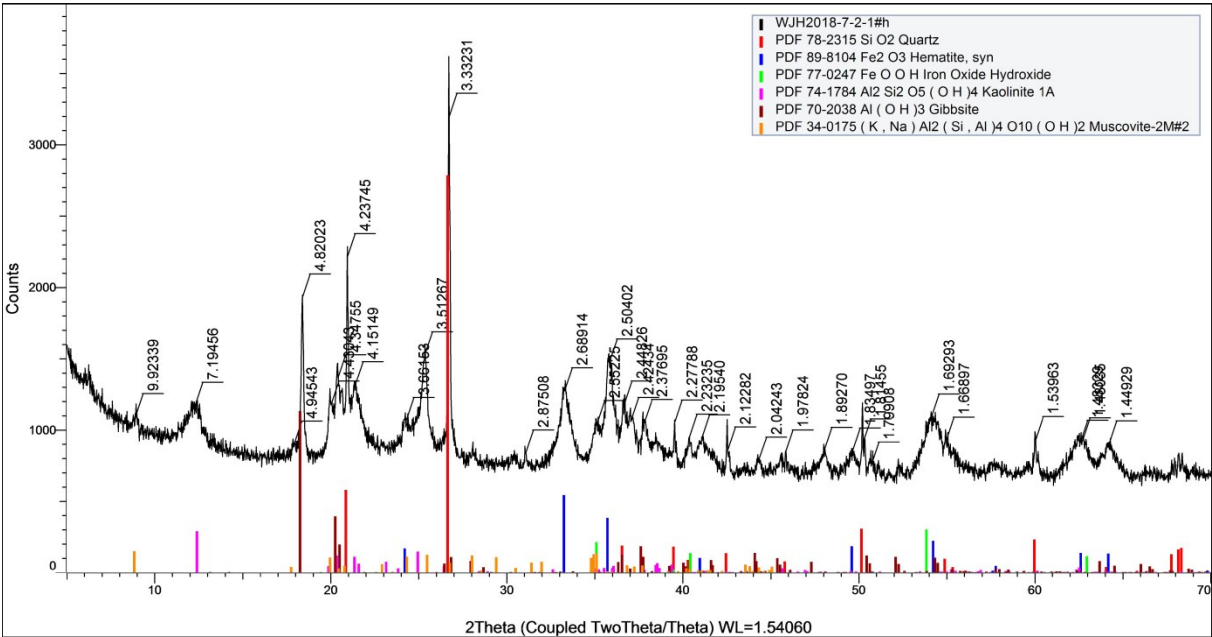


图 1 壤土衍射图谱及主要矿物成分
Fig.1 XRD pattern and mineral composition of loam

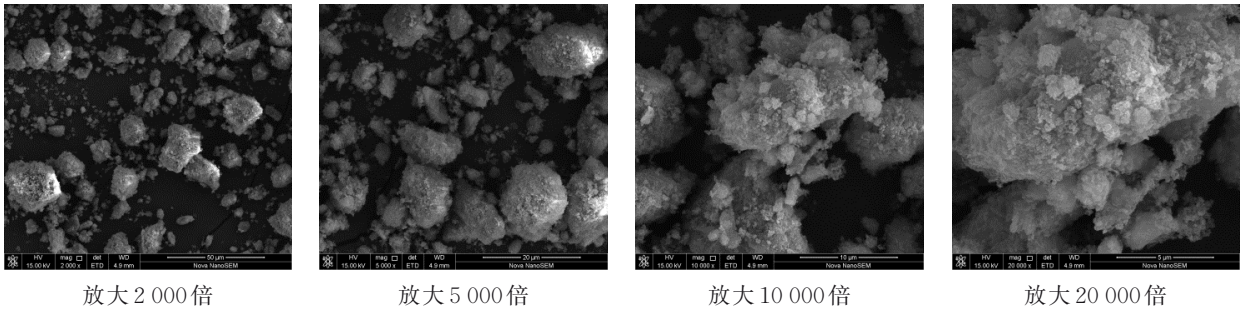


图 2 壤土颗粒表面形貌(扫描电镜)
Fig.2 Surface morphology of loam particles (SEM)

试验用砂为厦门艾思欧标准砂有限公司生产的中国 ISO 标准砂,相对密度为 2.72,其中粒径为 1.0~2.0 mm、0.5~1.0 mm 和 0.08~0.5 mm 均占比为 33.3%。

疏水剂为十八烷基伯胺(十八胺;化学式: $C_{18}H_{39}N$),属于阳离子型表面活性剂,通过其胺基

(-NH₂)吸附在黏土颗粒表面,其长链烷基(-C₁₈H₃₇)向外排列,形成一层疏水性单分子膜,从而降低黏土颗粒表面自由能,提升疏水性。

基于前期研究成果,将十八胺与黏土按质量为 0.6%(十八胺:黏土=6g:1000 g)混合均匀,参照文献[29]的步骤制备疏水黏土,具体过程如图 3 所示。

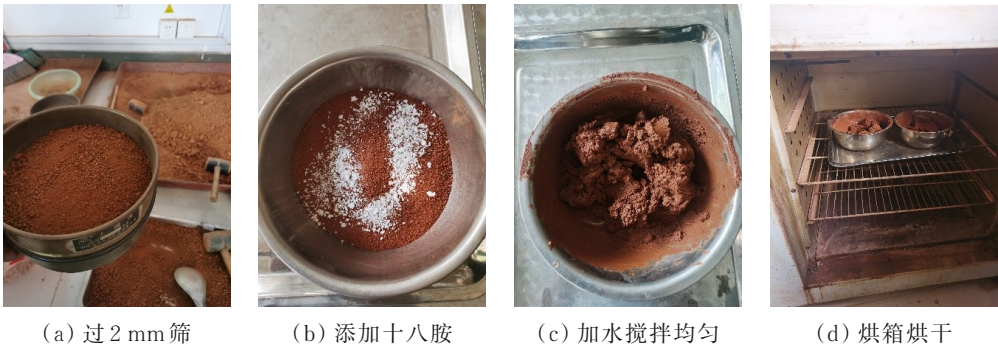


图 3 疏水黏土制备流程
Fig.3 Preparation process of hydrophobic clay

1.2 试验操作

疏水性能试验采用滴水穿透时间法进行^[29]:采用标准滴定管,控制水滴体积为 80 μL ,滴落高度为 10 mm,试样为饼型结构(厚 5 mm,直径 80 mm)。为减少试样不均匀等带来的误差,在试样表面选取 3 点(间距 4 cm)测定滴水穿透时间,取其平均值作为最终结果。相应的疏水度评价标准见表 1。

表 1 疏水等级标准-滴水穿透时间法

Table 1 Severity ratings for soil water repellency by WDPT

入渗时间	疏水等级
$t \leq 5 \text{ s}$	无
$5 \text{ s} < t \leq 60 \text{ s}$	轻微
$60 \text{ s} < t \leq 600 \text{ s}$	中等
$600 \text{ s} < t \leq 3\,600 \text{ s}$	严重
$t > 3\,600 \text{ s}$	极度

抗剪强度试验采用 ZJ 型应变控制式四联直剪仪进行(图 4),试验数据可自动采集。试样为标准环刀试样(直径 61.8 mm、高 20 mm),干密度为 1.31 g/cm^3 ,分别施加 100、200、300、400 kPa 法向压力,剪切速率为 0.8 mm/min,6 min 内完成剪切。试验步骤参照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)进行。



图 4 ZJ 型应变控制式四联直剪仪

Fig. 4 Strain-controlled four-unit direct shear apparatus (Model ZJ)

1.3 试验方案

基于前期研究成果,设计 4 组不同含水率和 4 组不同土石比的正交试验,共计 16 组,分别开展疏水性能和抗剪强度试验,其中土石比是指普通砂与疏水黏土的质量比,按百分比计数。具体方案见表 2。

表 2 不同含水率、土石比正交试验方案

Table 2 Orthogonal experimental design of various water contents and soil-to-rock ratios

水平	含水率/%	土石比/%
水平 1	0	0
水平 2	5	5
水平 3	15	25
水平 4	10	15

2 试验结果与分析

2.1 疏水心墙料疏水等级

2.1.1 土石比

图 5 为含水率为 5% 时不同土石比的试样疏水效果。由图 5 可以看出,水滴能呈较浑圆形态保持在试样表面。不同试样的滴水穿透时间与土石比关系如图 6 所示。由图 6 可以看出,滴水穿透时间随土石比增加呈显著递减趋势。土石比从 0% 增至 15% 时,滴水穿透时间减少了 784 s,表明土石比是控制滴水穿透时间的关键参数,尤其当土石比超过 10% 后,降速明显加快,这与孔隙结构的非线性变化有关。砂粒作为亲水性骨料与疏水黏土形成不连续界面,形成更多大孔隙和连通通道,导致水分沿砂粒优先渗流,且土石比越大,优先入渗通道越多,最终导致滴水穿透时间缩短。

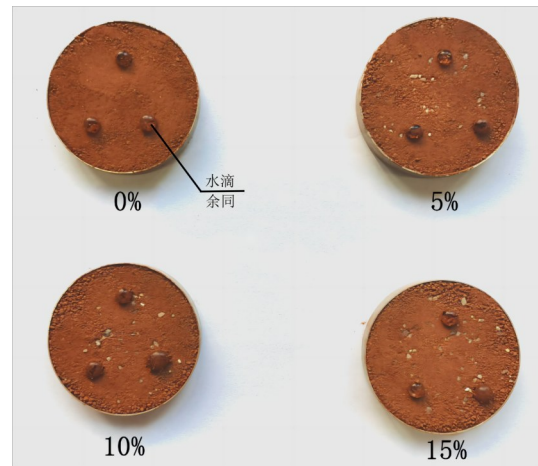
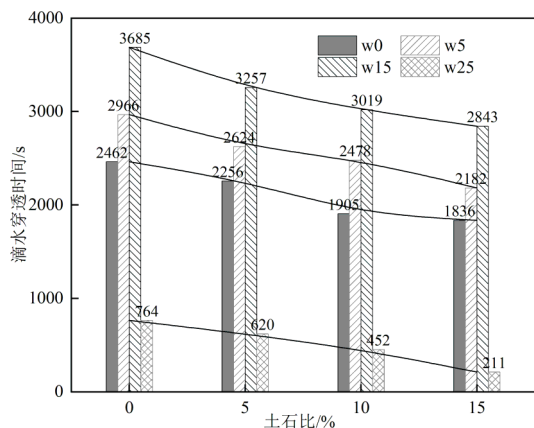


图 5 不同土石比滴水效果(含水率 5%)

Fig.5 Droplet infiltration effects of different soil-to-rock ratios (water content = 5%)

2.1.2 含水率

图 7 为不同含水率的试样疏水效果,滴水穿透时间与含水率关系如图 8 所示。为了方便对比,单独增加了 10%、20% 和 30% 三种含水率的试样测试结果。可以看出,滴水穿透时间随含水率变化呈现显著的单峰形分布特征。在含水率 0~10% 区间,穿透时间由初始值 2 462 s 上升至 4 216 s,达到极值后转为快速下降趋势;当含水率超过 20% 时,



注:w0、w5、w15、w25分别表示含水率为0%、5%、15%、25%。

图6 试样滴水穿透时间与土石比关系

Fig.6 Relationship between water drop penetration time (WDPT) and soil-to-rock ratio

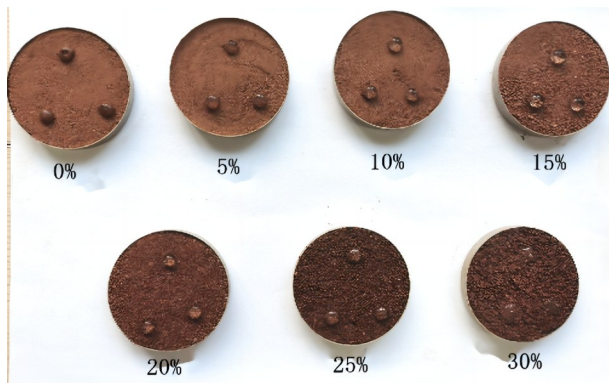


图7 不同含水率滴水效果(土石比0%)

Fig.7 Droplet infiltration effects of different water contents (soil-to-rock ratio=0%)

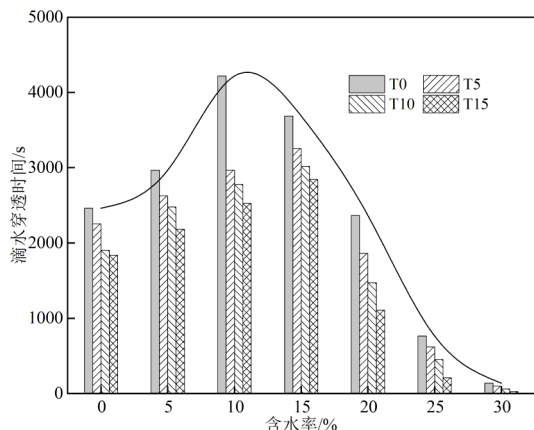


图8 试样滴水穿透时间与含水率关系(T5表示土石比为5%,其余类同)

Fig.8 Relationship between wdpt and water content (t5 denotes a soil-to-rock ratio of 5%, and so on)

穿透时间进入陡降阶段,最终在30%含水率时降至139 s。这种非单调变化规律揭示了土体渗透性能对含水率的敏感性响应机制。穿透时间在含水率达到10%左右后出现转折,并随含水率增至20%而持续急剧下降,故认为土体疏水结构稳定性的含

水率临界阈值为10%,表明疏水土体的最优抗渗性能存在含水率调控窗口。在低含水率条件下($<10\%$),土壤颗粒间范德华力与毛细作用形成不稳定黏结,导致滴水穿透过程呈现明显的滞后效应。当含水率接近临界阈值时,土体孔隙中形成连续水膜,有效降低渗透阻力,此时土体表现出较优抗渗透性能。超过临界含水率后,过多水分产生的润滑效应显著增强,土体孔隙内部水分通道被贯穿,水分在重力作用下形成优势流通道,导致穿透时间明显减小。试验结果揭示了含水率调控可作为增强疏水土体抗渗性能的一个潜在方向,对渗流灾害防治具有重要指导价值:在边坡工程领域,建议将疏水土体含水率控制在临界含水率区间以增强抗渗性能;在农业灌溉领域,需避免疏水土体含水率过高以防止水土流失。

2.2 疏水心墙料抗剪强度

图9为不同土石比、含水率条件下试样峰值剪应力与法向压力关系。由图9可以看出,不同土石比和含水率条件下,试样法向压力与峰值剪应力均呈近似线性增长关系,土石比和含水率的增大对试样峰值剪应力均起到强化作用:当土石比从0%增至15%时,在相同法向压力(300 kPa)和含水率(5%)条件下,峰值剪应力从329 kPa跃升至572 kPa。法向压力的增大增强了土体颗粒间的有效接触应力,促使摩擦阻力呈比例提升,尤其是针对土石混合物,这种效应更为显著。当含水率从5%增至25%时,在相同法向压力(300 kPa)和土石比(5%)条件下,峰值剪应力从430 kPa跃升至588 kPa。

采用莫尔-库伦强度准则获得不同条件下试样的抗剪强度指标 c 和 φ 。图10为不同土石比和含水率下试样抗剪强度指标等值图。

2.2.1 黏聚力

图10(a)为黏聚力与含水率、土石比的关系等值图。可以看出,黏聚力受含水率与土石比的共同作用呈现典型的非线性特征。从等值线形态上看,黏聚力高值出现在图形左上区域,表明当土体中细粒含量较高且处于较湿润状态时,颗粒间的黏结作用较为明显。随着土石比的增大和含水率的降低,粗粒料占比升高,黏聚力等值线呈衰减趋势,低值出现在图形右下区域。这表明,粗粒料的增加会导致颗粒间的黏结作用被削弱,但黏聚力受含水率的变化更为敏感。工程应用时,需通过控制含水率波动范围和粗骨料占比来保证土体黏聚力满足工程要求。

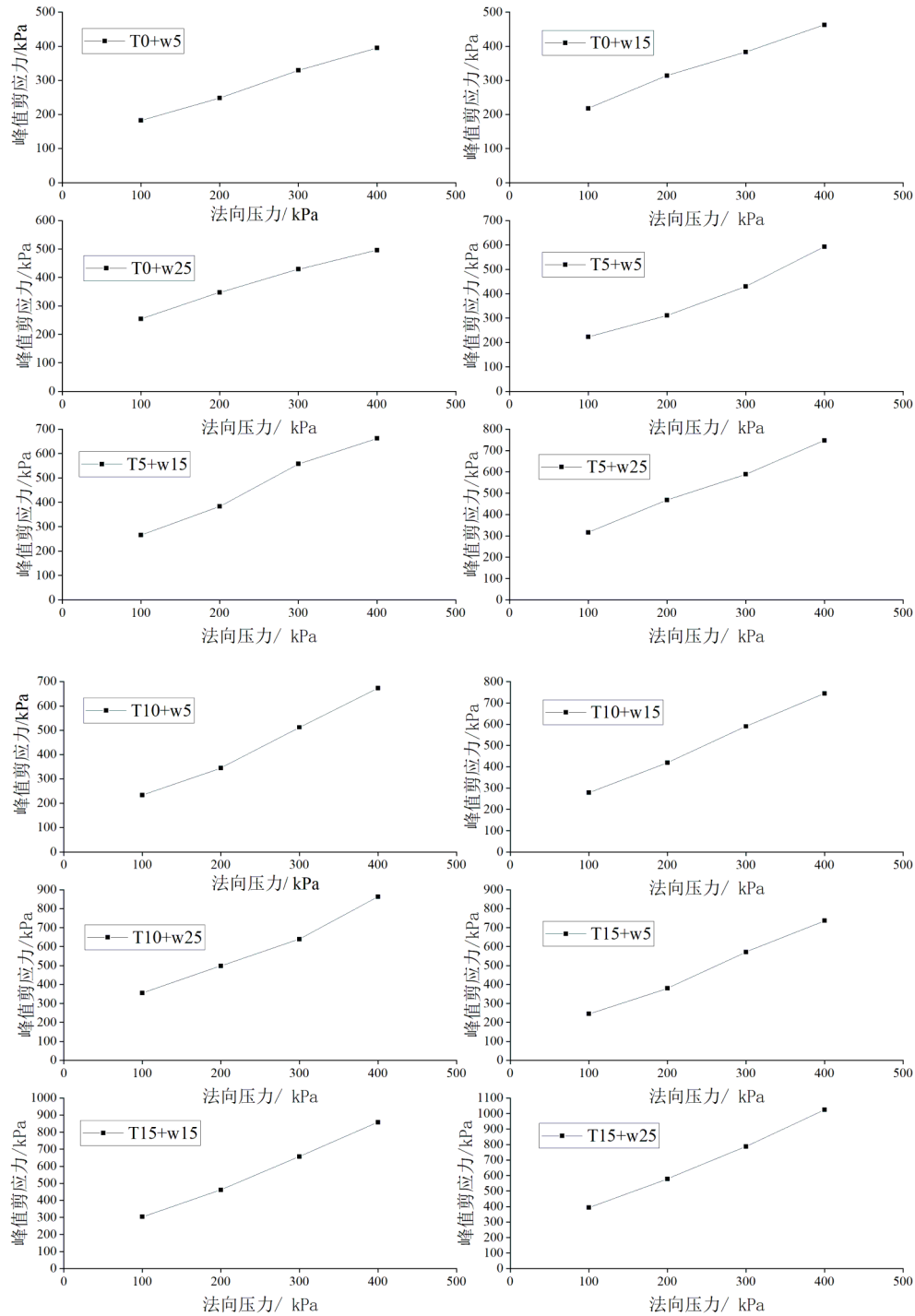


图9 不同土石比、含水率条件下试样峰值剪应力与法向压力关系

Fig.9 Relationship between peak shear stress and normal pressure under various soil-to-rock ratios and water contents

2.2.2 内摩擦角

图10(b)为内摩擦角与含水率、土石比的关系等值图。可以看出,内摩擦角受含水率与土石比的共同作用呈现多阶段非线性演变规律。从等值线形态上看,当土石比低于5%时,土石比的改变对内摩擦角影响较大;当土石比超过5%时,土石比的改变对内摩擦角影响不明显。土石比不变时,不同土石比范围内的等值线沿纵轴方向近似呈平缓分布,表明含水率的变化对试样内摩擦角的影响较小,粗

颗粒骨架形成的摩擦咬合作用起主导作用。随着土石比的增大,内摩擦角等值线逐渐表现为倾斜形态,表明粗颗粒越多时,水分的增加对颗粒间摩擦效应削弱得越明显,导致内摩擦角有所减小。

3 讨论

试验结果表明,采用疏水黏土制备的心墙料抗渗性有显著提升,力学性能亦能满足工程要求。从工程应用场景来看,心墙作为承受高水头和复杂应

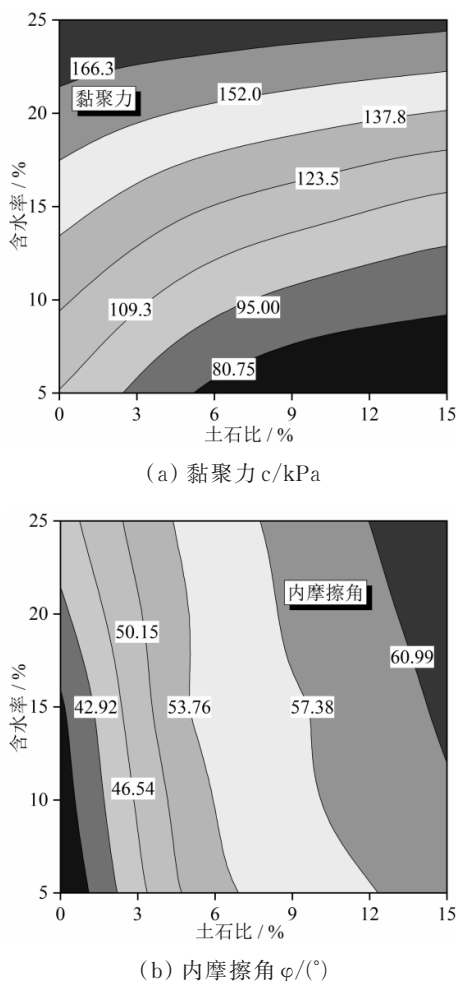


图 10 试样抗剪强度指标与含水率、土石比的关系

Fig.10 Relationships Between Shear Strength Parameters and Water Content/soil-to-rock Ratio

力环境的工程结构,其性能的时效性至关重要。在长期渗流、干湿循环、化学溶蚀等作用下,十八胺疏水化黏土的疏水效果如何变化值得深入研究。本研究集中于疏水心墙料短期性能的变化规律,其长期耐久性(如干湿循环、高压长期渗流下的稳定性)是未来研究的关键和工程应用前必须解决的问题。

研究表明,十八胺改性黏土的疏水效果及其对抗剪强度的增强作用与含水率密切相关^[29]。在含水率较低时,十八胺未能充分覆盖土颗粒表面,疏水改性效果有限,因此对抗剪强度的影响并不显著。随着含水率提高至最优区间,十八胺在颗粒表面的覆盖程度增大,逐渐形成更为连续、稳定的疏水膜,从而增强颗粒间的“疏水缔合”效应,产生了附加黏聚力。该附加黏聚力有效抵消了含水率上升对传统黏聚力的削弱作用,导致疏水改性黏土的抗剪强度随含水率增加呈现上升趋势。

将室内试验结果直接推广到复杂的实际工程中,仍需要开展诸多研究。本研究是在无围压、无附加应力的条件下开展的,实际边坡中的土体处于

复杂应力状态,有效应力会影响孔隙结构和渗透性。此外,本研究采用自上而下的滴水穿透试验模式,与实际降雨入渗形成的水分运移过程在路径上具有相似性,但其边界条件和时间尺度不同。因此,在实际应用中需考虑应力路径、边界条件和时间效应的影响。

4 结论

采用疏水黏土与标准砂混合制备成疏水心墙料,开展了不同含水率和土石比条件下的疏水等级测定和抗剪强度测试试验。主要结论如下:

1) 疏水化心墙料的抗渗性能受土石比与含水率的协同作用调控,其疏水等级表现出明显的孔隙结构-水分敏感性。随着土石比增大,亲水性砂粒骨料与疏水性黏土间形成不连续界面,促使孔隙连通性提高和优势渗流路径的发育,导致水力穿透时间缩短。含水率对疏水等级的影响呈单峰型响应规律:随含水率上升,抗渗性能先增强后减弱,滴水穿透时间对应出现峰值,表明存在最优抗渗含水率临界值。当含水率处于该临界值附近时,心墙料可达到最佳抗渗状态。

2) 疏水心墙料的黏聚力与内摩擦角对含水率及土石比的响应行为具有明显差异。当细粒含量较高且含水率较大时,颗粒间黏结作用增强,黏聚力显著提升;而粗粒料的增加则会削弱颗粒间黏结,导致黏聚力降低,且该参数对含水率变化更为敏感。土石比在低于5%时对内摩擦角影响较为显著;超过5%后,其变化对内摩擦角的影响趋于稳定。相比之下,含水率的变化对内摩擦角的影响较小。

3) 将土石比控制在 $\leq 10\%$ 、含水率控制在 $10\% \sim 15\%$ 范围内,可使疏水心墙料同时具备优异的抗渗性能与力学性能。

参考文献

- [1] 陈生水. 高土石坝变形破坏过程预测理论和防控技术创新[J]. 岩土工程学报, 2022, 44(7): 1211-1219.
CHEN S S. Innovations in prediction theories and prevention technologies for deformation-induced failure process of high earth and rockfill dams [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, 44(7): 1211-1219. (in Chinese)
- [2] 邓刚, 丁勇, 张延亿, 等. 土质心墙土石坝沿革及体型和材料发展历程的回顾[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2021, 19(4): 411-423.
DENG G, DING Y, ZHANG Y Y, et al. Evolution of earth core embankment dams along with the develop-

- ment of configuration and materials [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2021, 19(4): 411-423. (in Chinese)
- [3] 王艳芳, 王奇峰, 王泽生. 糯扎渡水电站心墙堆石坝坝料技术指标及试验检测方法[J]. 西北水电, 2012(增刊 2): 52-57.
WANG Y F, WANG Q F, WANG Z S. Technical indicators and test inspection methods of materials for rock fill dam with cutoff wall, nuozhadu hydropower project [J]. Northwest Water Power, 2012(Sup 2): 52-57. (in Chinese)
- [4] 吉恩跃, 陈生水, 朱俊高, 等. 不同掺砾量下砾石土抗拉强度试验研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(7): 1339-1344.
JI E Y, CHEN S S, ZHU J G, et al. Experimental research on tensile strength of gravelly soil under different gravel contents [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(7): 1339-1344. (in Chinese)
- [5] MA H Q, CHI F D. Major technologies for safe construction of high earth-rockfill dams [J]. Engineering, 2016, 2(4): 498-509.
- [6] JIANG X G, ZHU Z Y, CHEN H Y, et al. Natural dam failure in slope failure mode triggered by seepage [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2020, 11(1): 698-723.
- [7] 马治中. 水利工程中土质堤坝渗漏的原因及对策研究[J]. 石油化工建设, 2021, 43(5): 134-135.
MA Z Z. Study on the causes and countermeasures of soil dam leakage in water conservancy projects [J]. Petroleum and Chemical Construction, 2021, 43(5): 134-135. (in Chinese)
- [8] 李兵. 沥青混凝土心墙土石坝渗漏分析以及修复研究[J]. 陕西水利, 2021(6): 28-30, 33.
LI B. Study on leakage analysis and repair of asphalt concrete core earth-rock dam [J]. Shaanxi Water Resources, 2021(6): 28-30, 33. (in Chinese)
- [9] 董金玉, 赵亚文. 不同含水率下高低液塑限红黏土抗剪强度特性研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(3): 84-87.
DONG J Y, ZHAO Y W. Study on shear strength of high and low liquid plastic limit red clay with different water contents [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power, 2018, 39(3): 84-87. (in Chinese)
- [10] YAVARI N, TANG A M, PEREIRA J M, et al. Effect of temperature on the shear strength of soils and the soil-structure interface [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(7): 1186-1194.
- [11] WU Y K. Study on the mechanical properties of clayey core material [M]//Multi-physics Coupling Analysis of Clayey Core Wall of High Earth-Rockfill Dam. Singapore: Springer Singapore, 2018: 31-41.
- [12] YU Y Y, LIU E L, YU Q H, et al. Effects of freeze-thaw cycles on the mechanical properties of the core-wall contact clay of a dam [J]. International Journal of Civil Engineering, 2022, 20(7): 779-791.
- [13] 孙莉萍, 齐俊修. 不同掺砾量心墙料渗透及压缩试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2016, 35(5): 97-102.
SUN L P, QI J X. Study of penetration test and compression test on core material of different gravel amounts [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2016, 35(5): 97-102. (in Chinese)
- [14] YAO Y S, LI J, NI J J, et al. Effects of gravel content and shape on shear behaviour of soil-to-rock mixture: Experiment and DEM modelling [J]. Computers and Geotechnics, 2022, 141: 104476.
- [15] CHEN C H, CHEN S S, MEI S A, et al. An improved large-scale stress-controlled apparatus for long-term seepage study of coarse-grained cohesive soils [J]. Sensors, 2021, 21(18): 6280.
- [16] ZHENG D H, TANG L S, WANG Y X, et al. Dynamic stress accumulation effects on soil strength under cyclic loading [J]. Soils and Foundations, 2022, 62(4): 101164.
- [17] GUO J, JIA L, WEI Z Q, et al. Mechanical properties estimation of lime stabilized loess applied in various engineering fields [J]. Construction and Building Materials, 2023, 393: 132130.
- [18] LIU D H, WANG Y L, LIANG J Y. Potential applications of phase change materials to extend the winter construction time of earth-rock dam in cold regions [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 33(8): 04021194.
- [19] LIU D H, DAI H J, ZHANG Z. Mechanical properties and damming behaviors of gravelly solidified soil for earth-rock dam core wall [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(6): 1964-1973.
- [20] 刘杰, 谢定松. 我国土石坝渗流控制理论发展现状[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(5): 714-718.
LIU J, XIE D S. Advances of earth-rock dam seepage control theory in China [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(5): 714-718. (in Chinese)
- [21] 杨邦杰, Blackwell P. S., Nicholson D. F.. 斥水土壤中的水热运动规律与数值模型[J]. 土壤学报, 1996, 33(4): 351-359.
YANG B J, BLACKWELL P S, NICHOLSON D F. Modeling heat and water movement in a waterrepellent sandy soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 1996, 33(4): 351-359.
- [22] MAO J F, NIEROP K G J, DEKKER S C, et al. Understanding the mechanisms of soil water repellency

- from nanoscale to ecosystem scale: a review [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(1): 171-185.
- [23] SÁNDOR R, IOVINO M, LICHNER L, et al. Impact of climate, soil properties and grassland cover on soil water repellency [J]. *Geoderma*, 2021, 383: 114780.
- [24] LI Y, YAO N, TANG D X, et al. Soil water repellency decreases summer maize growth [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2019, 266/267: 1-11.
- [25] MÜLLER K, MASON K, STROZZI A G, et al. Runoff and nutrient loss from a water-repellent soil [J]. *Geoderma*, 2018, 322: 28-37.
- [26] 吴珺华, 周晓宇, 林辉, 等. 不同斥水剂作用下土壤斥水度测定及其变化规律[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(17): 109-115.
- WU J H, ZHOU X Y, LIN H, et al. Hydrophobic degree measurement and its changes in soils modified by different hydrophobic agents [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(17): 109-115. (in Chinese)
- [27] 吴珺华, 匡唐亮, 付芳远, 等. 不同溶质作用下斥水土抗剪强度变化规律试验研究[J]. *南昌航空大学学报(自然科学版)*, 2022, 36(2): 58-62, 71.
- WU J H, KUANG T L, FU F Y, et al. Experimental study on variation of shear strength of water-repellent soil soaked with different solutes [J]. *Journal of Nanchang Hangkong University (Natural Sciences)*, 2022, 36(2): 58-62, 71. (in Chinese)
- [28] 吴珺华, 林辉, 周晓宇, 等. 斥水剂作用下非饱和土壤抗剪强度测定及其变化规律[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(6): 123-129.
- WU J H, LIN H, ZHOU X Y, et al. Measurement of shear strength and its change in unsaturated soils modified by hydrophobic agent [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(6): 123-129. (in Chinese)
- [29] 吴珺华, 林辉, 刘嘉铭, 等. 十八胺化学改性下壤土的斥水性与入渗性能研究[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(13): 122-128.
- WU J H, LIN H, LIU J M, et al. Hydrophobicity and infiltration properties of loam chemically modified by octadecylamine [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(13): 122-128. (in Chinese)

(编辑 XXX)