

闫傲坤, 王俊锋, 张中善, 等. 黄土改良砂土的三轴剪切渗透试验[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(5): 1007-1015. YAN A K, WANG J F, ZHANG Z S, et al. Triaxial shear permeability test of loess-improved sand[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(5): 1007-1015. (in Chinese)

黄土改良砂土的三轴剪切渗透试验

闫傲坤^{1,3}, 王俊锋², 张中善², 杨志强², 杜鹏超², 毛海涛^{1,3}

(1. 山西农业大学城乡建设学院, 山西 晋中 030600; 2. 中建七局第一建筑有限公司, 太原 030000;
3. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830000)

摘要: 研究大方量砂土的改良, 综合考虑材料易得性、工程造价需求, 采用黏粒含量较低的黄土对砂土进行改良, 并深入探究应力场与渗流场的耦合作用, 为实际工程中类似工况提供一种相对经济而且有效的改良方法。以晋中地区砂土为研究对象, 借助应力应变控制式三轴剪切渗透试验仪, 探究黄土对砂土应力-渗流耦合关系的影响, 分析多因素耦合下砂土强度和渗透性的变化。结果表明: 在剪切过程中, 砂土的强度随含水率增大而减小, 随围压的增大而减小, 其受黄土掺量影响最大; 砂土渗透性随应力变化而变化, 渗透系数随着轴向应力的增大而减小, 且砂土渗透系数随着黄土掺量的增大出现数量级的下降。根据砂土应力-渗流耦合试验所提供的数据分析, 证明掺入当地黄土对于改善砂土性质的有效性。尽管当地黄土和黏土在黏性上有一定差异, 但其在强度、渗透性等方面的特性依旧能够取得类似的改良效果。

关键词: 砂土; 黄土掺量; 应力-渗流耦合; 强度; 渗透性

中图分类号: TV544 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0100

砂土具有天然含水率低、塑性小、水分散发快等特性, 作为建筑、公路地基时承载能力低, 易受水流冲刷和侵蚀的影响^[1-4]。工程实践中, 砂土地基因荷载和地下水渗流等多种因素作用, 受力环境复杂, 内部应力场与渗流场耦合作用显著, 进而对上部结构有较大影响^[5-8]。因此, 砂土地基的改良以及耦合作用下力学及工程特性是重要的研究课题。

砂土地基改良方面前人已做了大量研究工作, 三轴试验作为一种重要的技术手段, 为明确土体力学特性提供了重要的理论支撑。如黏性土改良方面: 张馨月^[9]发现掺入黏土后, 粉砂的最优含水率随黏土掺量增加而增加, 最大干密度则呈相反趋势; 刘彭彭^[10]研究发现土样的黏聚力呈现随黏粒含量增加而显著增大的趋势。当黏粒含量从 10% 增大到 15% 时, 黏聚力增幅明显。固化剂改良方面: 龚壁卫等^[11]研发了一种改善水泥改性土种植效果的生态基材, 较好地实现了膨胀土边坡防止降雨入渗

和水分蒸发的双重防护要求; Mola-Abasi^[12]在砂土中加入沸石后增加了剪切强度和峰值轴向应力, 水泥含量和添加沸石可以改变砂土的弹性模量; 董帅等^[13]研究表明拌和法在砂土试样中生成的碳酸钙大多起填充作用, 胶结程度较低, 而后续渗滤固化能够显著改善土体特性; 王龙威等^[14]通过纯高分子固化剂改良砂土, 在不同围压下固化剂改良土体的峰值偏应力明显增加, 土体黏聚力和内摩擦角保持递增趋势。化学灌浆及微生物改良方面: 柳圣^[15]使用微生物诱导碳酸钙沉淀改良砂土, 发现微生物处理后的砂土强度为纯砂的 4~21 倍; 周翠英等^[16]采用纳米水性黏合剂改良砂土, 发现随着黏合剂的增加, 砂土无侧限抗压强度和黏聚力增大; Jafarpour 等^[17]在对砂土进行化学灌浆时发现砂土的峰值偏应力明显增加。

使用和推广。此外, 研究往往忽略了应力场-渗流场的耦合效应, 试验结果与工程实际参数有较大

收稿日期: 2024-04-07 修回日期: 2024-07-18 网络出版时间: 2024-08-13

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240812.1411.006>

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(42207102); 山西省自然科学基金面上项目(202103021223132; 202103021224151); 山西农业大学改革高层次人才引进项目(2021XG009)

作者简介: 闫傲坤(1998—), 男, 河南省温县人, 主要从事粗粒土力学性能研究。E-mail: yanaokun98@163.com

通信作者: 毛海涛(1980—), 男, 山西省平陆县人, 博士、教授, 主要从事水利工程渗流力学方面的研究。E-mail: maohaitao1234@163.com

误差。因此,在改良砂土过程中有必要考虑多场耦合作用下土体的力学特性,为工程提供更加精确的试验参数。工程中需要改良的砂土方量往往较大,区域内品质较好的黏性土数量少,能否采用塑性指数较低的土体来改良砂土具有重要的研究意义。

因此,本文针对大方量砂土改良进行研究,结合材料的易取性、工程造价和工程实际,采用黏粒含量较低的黄土来改良砂土,并充分考虑应力场与渗流场的耦合作用,借助三轴剪切渗透试验仪系统研究改良效果,通过对比验证提出最佳方案,以期为大方量低造价的砂土改良提供有效途径和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以山西省晋中市太谷区乌马河道路工程为研究背景,该道路工程地基为 0~10 m 深的砂土,铺设管道存在难以压实、无法振捣等工程难题^[18-20],工程紧邻河道,受河道地下水影响较大,应力场与渗流场耦合作用强烈,见图 1。经综合测算,需要改良的砂土可达 100 万 m³ 以上,该区域仅有黏粒含量较低的土。

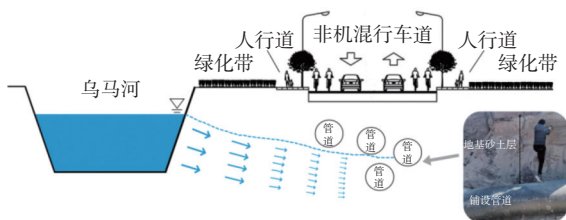


图 1 道路工程横断面图及取样点

Fig. 1 Road engineering cross-section and sampling points

砂土样品取自路基以下 0~5 m 的土层内,样品经风干、去杂、碾散后,在实验室内测量得其基本物理性质指标,见表 1。

表 1 砂样基本物理性质指标

Tab. 1 Basic physical properties of sand samples

指标	湿密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	比重 G_s	孔隙比 e	相对密实度 D_r	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c	天然含水率 $W/\%$	风干含水率 $W_o/\%$
数值	1.578	2.65	0.68	0.87	2.61	1.17	3.52	0.1

根据《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007)^[21],该黄土属于低液限黏土,其基本物理力学特性为:黄土湿密度为 1.85 g/cm³,含水率(质量分数)为 15.32%,土粒比重为 2.75,其中,砂粒占 38.9%,粉粒

占 49.85%,黏粒占 11.25%,液限为 22.32%,塑限为 13.54%,塑性指数为 8.78。砂土及黄土土样见图 2。

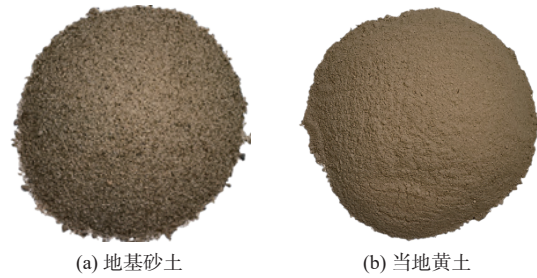


图 2 试验用土

Fig. 2 Test soil

通过室内试验所测得砂土、当地黄土颗粒级配曲线见图 3。

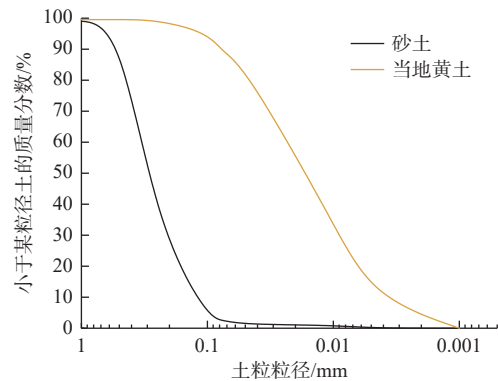


图 3 试验用砂土及当地黄土颗粒级配曲线

Fig. 3 Particle gradation curve of sand and local loess used in the test

1.2 试验方案与步骤

试验方案。试验设备采用 SLB-1 型应力应变控制式三轴剪切渗透试验仪,见图 4。控制压力、应变、渗透等参数,使土样的变形和渗透在剪切过程中同时发生,实现耦合^[22]。将试验土样压制成直径 39.1 mm、高度 80 mm 的圆柱形,使其干密度达到设计要求的 1.6 g/cm³。以黄土掺量为 5%、10%、15%、20% 为基础制定以下方案。

方案 1: 含水率为 6%、9%、12%、15%,围压为 100、200、300、400 kPa,测试不同含水率和围压组合下改良土的剪切强度和渗透系数,分析多因素作用下土体强度和渗透性变化。

方案 2: 在方案 1 的基础上,通过控制不同的主应力差(100、200、300 kPa)测试改良土的渗透系数,分析在主应力差控制下土体的渗透性变化规律。

试验步骤。①根据黄土掺量和设计含水率制备土样,采用浸水饱和法饱和,饱和后进行固结试验。

②设定目标主应力差、围压等值,控制应变速率为 0.4 mm/min。当围压上升到目标值时,打开反压阀门,进行恒水头渗透试验。

③进水及排水流量变化速率相等时,进行固结不排水 (CU) 剪切试验^[23]。

④使用公式^[24] 求解渗透系数

$$k = \frac{Q\rho_w gH}{A\Delta t\Delta p} \quad (1)$$

式中: k 为渗透系数, cm/s; Q 为 Δt 间隔的总渗量, mL; ρ_w 为水的密度, g/cm³; g 为重力加速度, N/kg; H 为初始高度减轴向位移, cm; A 为截面面积 $= (V-\Delta V)/H$, cm²; Δt 为渗流历时, s; ΔP 为渗透水压, kPa。

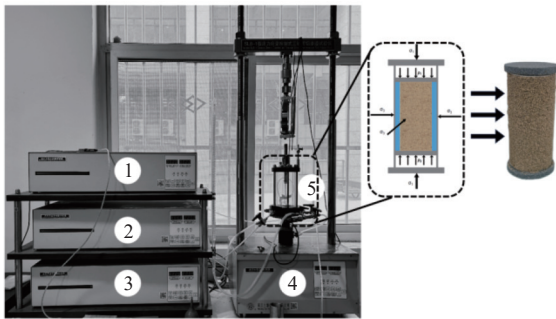


图 4 SLB-1 型应力应变控制式三轴剪切渗透试验仪及试样立体图

Fig. 4 SLB-1 stress-strain controlled triaxial shear penetration tester and three-dimensional view of the sample

2 结果与分析

2.1 强度特性分析

对不同工况下的土体试样进行剪切试验并分析其强度特性,其代表性破坏过程见图 5。

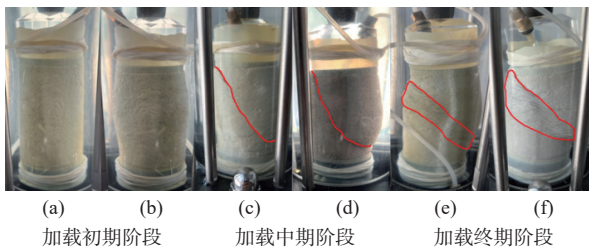


图 5 试样剪切破坏过程

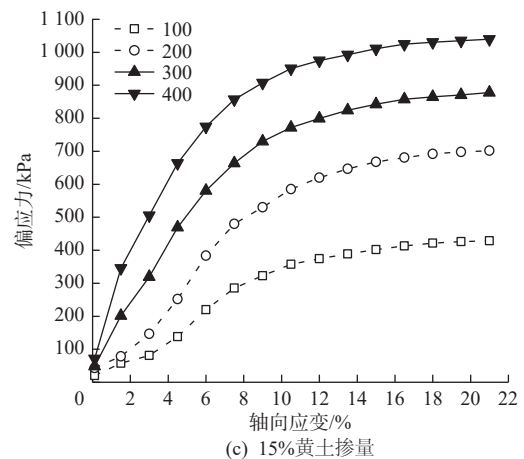
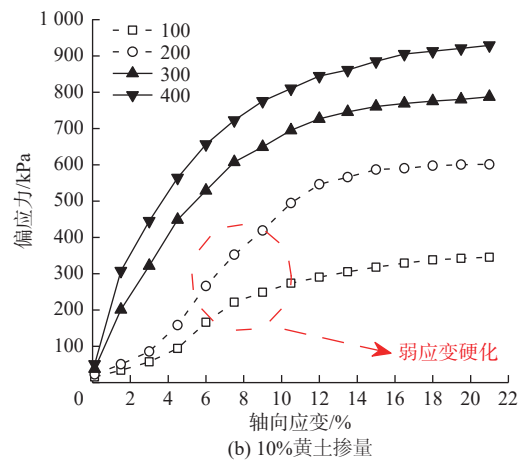
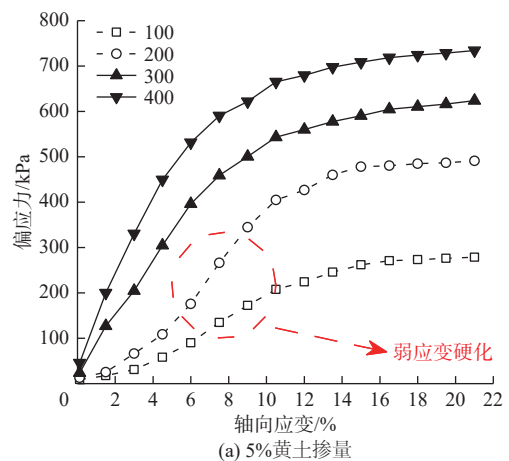
Fig. 5 Sample shear failure process

由图 5 可见:改良砂土土样在加载过程中大致呈 3 个阶段,在加载初期阶段(a)、(b),受到正应力和剪切应力的作用,试样受挤压变形产生体积变化,呈现弹性变形,且并无明显剪切带的出现;随着应力的继续增加剪切进入中期阶段(c)、(d),试样开始发生剪切,发生明显的剪切变形,并导致剪切带形成,试样逐渐进入弹性-塑性转变阶段;随着加载的

进一步增加剪切进入终期阶段(e)、(f),剪切带经历演化,发生扩展、变形加剧等现象,形成更为明显的剪切带。最终,在加载达到一定程度时,达到破坏状态,这时剪切带扩展到整个试样,导致试样整体的破坏,其中在弹性阶段具有明显的剪胀性^[25],呈现出砂性土所具有的强度破坏特性。

2.1.1 黄土掺量对砂土应力-应变的影响

控制含水率不变,测得不同围压下黄土掺量对偏应力的影响。各工况下土体偏应力与轴向应变变化规律基本相同,以含水率为 9% 为例进行分析,见图 6。



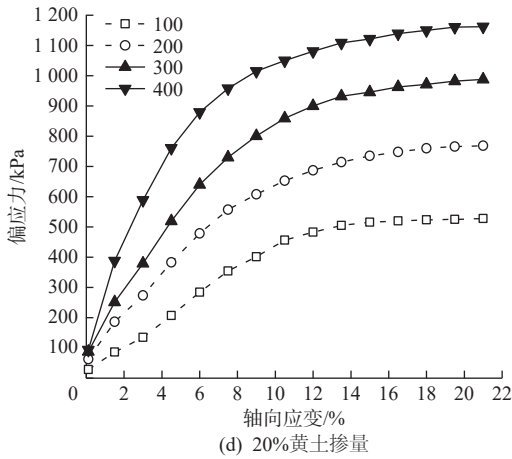


图 6 围压对砂土偏应力-轴向应变曲线
Fig. 6 Deviatoric stress-axial strain curve of sand under confining pressure

由图 6 可知, 相同黄土掺量下砂土偏应力($\sigma_1 \sim \sigma_3$)随围压(σ_3)增大而增大。黄土掺量不大于 15% 且在低围压(100、200 kPa)时, 土体表现为弱应变硬化型, 随着剪切位移增加偏应力的增长梯度较小, 土体强度随轴向应变呈缓慢上升趋势并趋于稳定, 黄土掺量为 20% 时土体弱应变硬化现象消失; 在高围压(300、400 kPa)时, 偏应力随轴向位移增大增长幅度较快。当黄土掺量为 5%, 围压为 100 kPa 时, 轴向应变由 0 至 10%, 偏应力从 0 增至 214.9 kPa, 而后偏应力仅增长了 54.6 kPa 并趋于稳定。可见黄土掺量和围压较低时, 位移变化初期的偏应力增长梯度明显低于高围压工况。此后, 随着黄土掺量的增加, 低围压下所表现出的弱应变硬化现象得到明显改善。

2.1.2 含水率对砂土应力-应变的影响

控制围压不变, 对不同黄土掺量的砂土开展不同含水率下的剪切-渗透试验。以围压 200 kPa 为例, 测得各围压下土体应力应变变化规律大致相同, 见图 7。

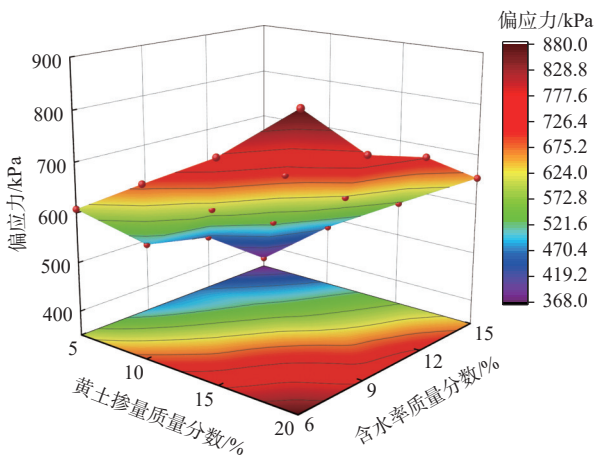


图 7 含水率及黄土掺量与峰值强度的关系
Fig. 7 Relationship between moisture content, loess content and peak intensity

由图 7 可知, 相同黄土掺量下土体峰值强度随着含水率增加而减小。例如: 黄土掺量为 5% 时, 含水率由 6% 增至 15%, 峰值强度则由 605.2 kPa 降至 368.3 kPa, 降幅为 39.14%; 同理, 黄土掺量 10%、15%、20% 时, 对应的峰值强度降幅为 30.51%、26.30%、25.70%。反之, 若含水率保持不变, 峰值强度随着黄土掺量的增加而增大。如: 含水率为 6% 时, 黄土掺量由 5% 增至 20%, 峰值强度增幅为 44.76%; 含水率为 9%、12% 和 15% 时, 增幅分别为 56.57%、57.86% 和 77.45%, 增幅显著高于含水率的影响。由此可知, 含水率和黄土掺量对土体的峰值强度的影响呈相反作用, 黄土掺量增加会使含水率对砂土强度的影响增强。

在含水率及偏应力相互关系中, 孔隙水压力 μ 发挥了重要作用, 见图 8。以黄土掺量 15% 为例, 含水率由 6% 增至 15% 时, 偏应力由 769.7 kPa 减至 467.3 kPa, 孔隙水压力则由 31.2 kPa 增至 135.5 kPa, 并最终趋于稳定, 也充分验证了有效应力与孔隙水压力的内在关系, 进而体现应力场与渗流场的耦合作用。

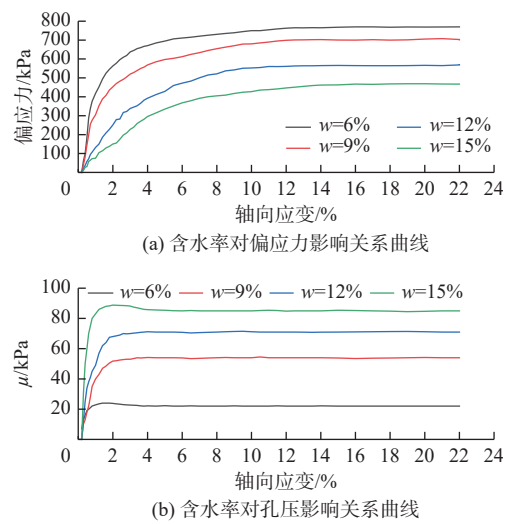


图 8 含水率对砂土孔压及偏应力影响关系曲线
Fig. 8 The relationship curve of water content on pore pressure and deviatoric stress of sand

2.2 渗透特性分析

2.2.1 黄土掺量对渗透性的影响

黄土掺量的变化影响着渗透系数随轴向应变的变化。以 9% 含水率、200 kPa 围压工况为例, 分析不同黄土掺量对砂土渗透系数的影响, 见图 9。

由图 9 可知, 渗透系数随着黄土掺量的增大而减小。黄土掺量由 5% 增至 20% 时, 渗透系数最终分别下降 0.72×10^{-2} 、 0.47×10^{-2} 、 0.11×10^{-2} cm/s; 各

黄土掺量工况下,渗透系数随着轴向应变的增加而减小并逐渐趋于稳定,黄土掺量越高土体渗透系数随轴向应变的变化越不明显,如20%黄土掺量时渗透系数随轴向位移增大趋近于水平线。由此可见,随着黄土掺量的增加,其渗透系数降幅呈现逐渐减小的趋势。

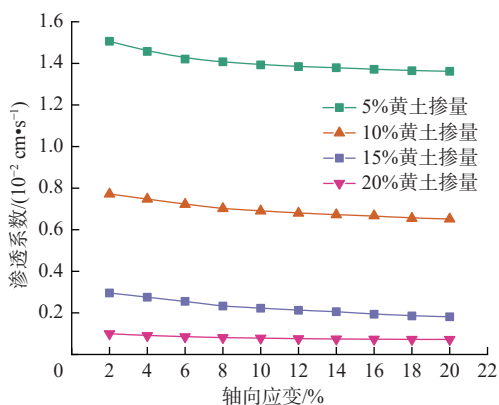


图9 不同黄土掺量对渗透系数的影响

Fig. 9 Effect of different loess content on permeability coefficient

2.2.2 剪切作用下砂土的渗透性

为厘清剪切作用下围压及含水率对砂土渗透系数的影响,控制黄土掺量不变(以5%黄土掺量为例)分析各工况下渗透系数的变化规律,见图10。

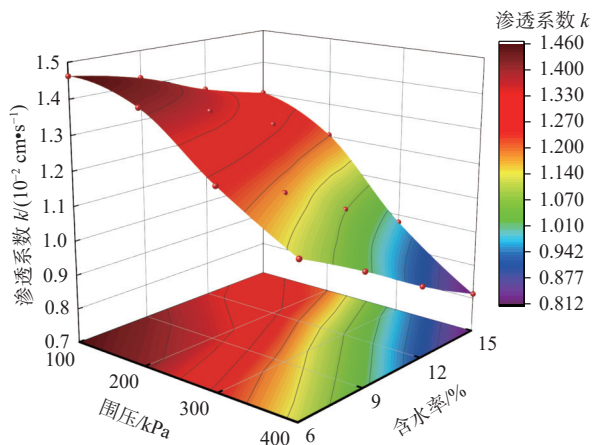


图10 围压及含水率与渗透系数的关系

Fig. 10 Relationship between confining pressure, moisture content and permeability coefficient

由图10可知:含水率6%时,围压由100 kPa增至400 kPa,土样渗透系数由 1.46×10^{-2} cm/s降至 1.12×10^{-2} cm/s,降幅为23.3%;含水率为9%、12%、15%时,渗透系数降幅分别为28.2%、32.6%、37.7%。可见,当含水率一定,渗透系数随围压增加而减小。渗透系数的降幅随着含水率的增大而增大;围压100 kPa时,含水率由6%增至15%,渗透系数降幅为10.96%。围压200、300、400 kPa对应的渗透系数降幅为14.89%、21.6%、27.68%。对比发现,围压

对渗透性影响程度高于含水率。

改良土的CU试验中,围压、轴压、含水率和渗透系数共同影响土体的有效应力改变,同时也伴随着孔隙水压力的变化见图11。

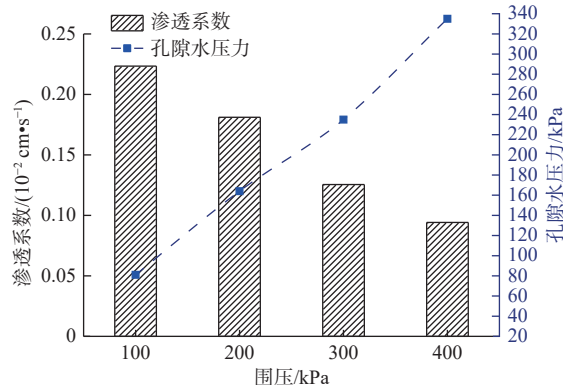


图11 围压对孔压及渗透系数影响关系

Fig. 11 Relationship diagram of the influence of confining pressure on pore pressure and permeability coefficient

图11可知:孔隙水压力随着围压的增大而增大,围压由100 kPa增至400 kPa,孔隙水压力由81.2 kPa增至335.7 kPa;渗透系数变化趋势与孔隙水压力相反^[26],随着围压增大,渗透系数由 0.22×10^{-4} m/s降至 0.094×10^{-4} m/s。由此可知,围压增大且轴压不变情况下土体竖向应力整体增大,由于固结不排水,伴随着有效应力的减小和孔隙水压力的增大,抑制了试样中水的流动性,土体整体渗透性降低。

2.2.3 含水率对渗透性的影响

控制黄土掺量、围压不变,对不同含水率土体进行剪切-渗透试验,以5%黄土掺量、200 kPa围压为例,分析渗透系数与轴向应变的关系,见图12。

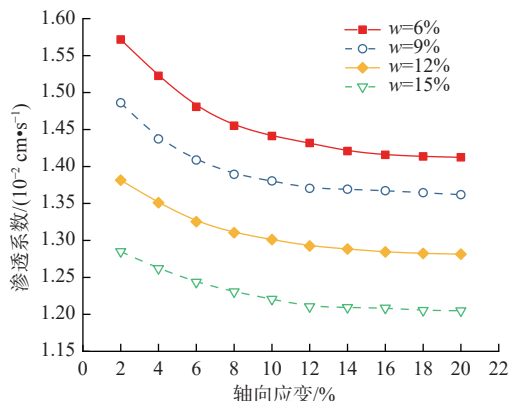


图12 含水率对砂土渗透系数影响关系曲线

Fig. 12 The relationship curve of water content on the permeability coefficient of sand

由图12可知:在不同初始含水率条件下,渗透系数随着轴向应变的变化呈现出相似的趋势。在渗透-剪切过程的早期阶段,各个含水率下的渗透性

都会有较大幅度的降低,然后这种降低趋势逐渐减缓,最终稳定下来。含水率为 6% 的砂土在轴向应变从 2% 增至 14% 时,渗透系数由 $1.57 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$ 降至 $1.43 \times 10^{-2} \text{ cm/s}$,降幅为 8.9%,随后整体趋于稳定。含水率 9%、12%、15% 工况对应的渗透系数降幅分别为 7.4%、6.5%、5.5%。此外,渗透系数随着含水率的增大整体减小,即在相同的轴向位移下含水率

越大渗透系数越小。

2.2.4 主应力差对砂土渗透性的影响

为研究主应力差控制下渗透性的变化规律,控制黄土掺量、围压不变,测得不同含水率下主应力差对渗透系数的影响。以 15% 黄土掺量、200 kPa 围压为例进行分析,见图 13。

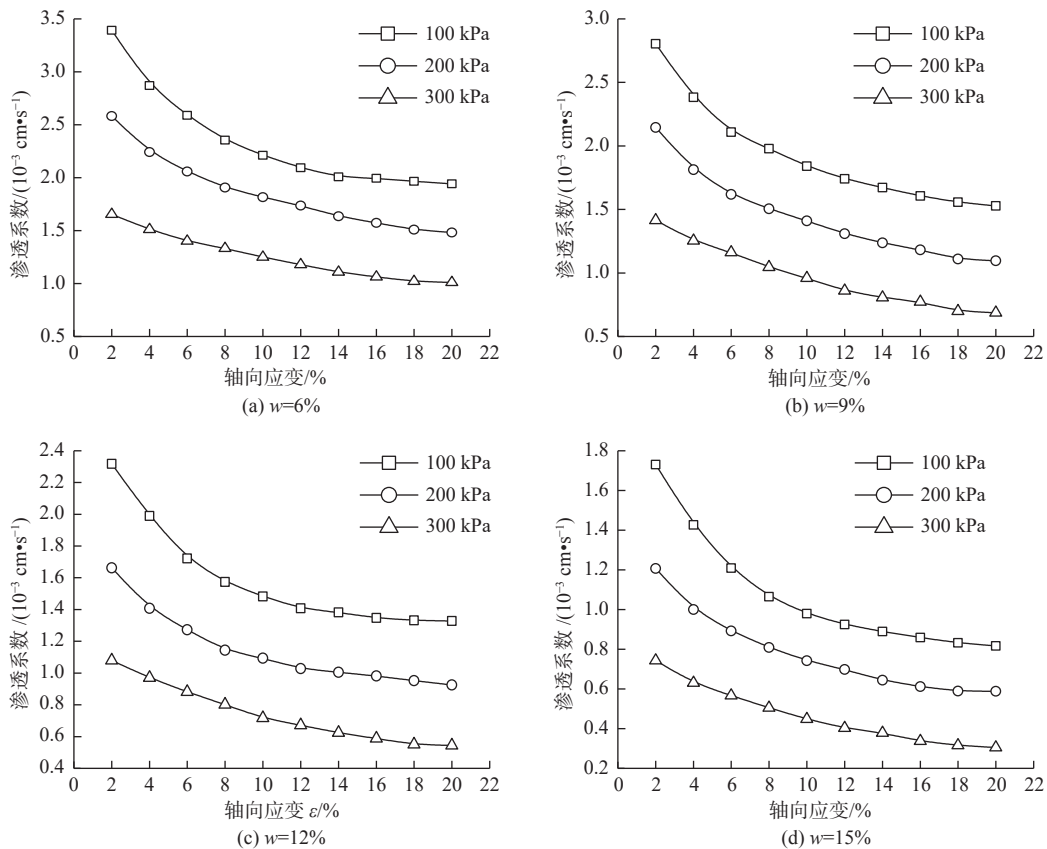


图 13 主应力差对不同含水率下砂土渗透系数的影响

Fig. 13 Effect of principal stress difference on permeability coefficient of sand at different water contents

由图 13 可知,各种主应力差控制下,不同含水率的砂土随着轴向应变的变化趋势相似,且随着主应力差增加,渗透系数明显减弱。例如:在含水率为 6% 的情况下,当主应力差从 100 kPa 增至 200 kPa 时,渗透系数从 $1.99 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 逐渐降至 $1.48 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$,下降了 25.63%;接着,当主应力差从 200 kPa 增至 300 kPa 时,渗透系数则从 $1.48 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 逐渐降至 $1.01 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$,下降了 31.76%。这说明了在相同条件下,随着主应力差的增大,砂土的渗透性将会降低。

在相同条件下,随着轴向应变的增大,砂土的渗透性也呈现下降趋势。以 6% 含水率为例:主应力差为 100 kPa 时,轴向应变由 0 增至 12% 时,渗透系数由 $3.39 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 降至 $2.09 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$,下降幅度为 38.35%,主应力差为 200、300 kPa 时,渗透系数

降幅分别为 32.95%、28.48%。因此,增加主应力差会减弱轴向应变对渗透系数的降低效果。

2.3 改良效果分析

根据《城市轨道交通设施运营监测技术规范》^[27],路基路面压实度标准,在道路工程中,涉及砂土作为基层的情况,有明确的土路基压实度要求:对于砂土作为基层,要求其压实度需保持在 95% 以上。基层压实度的测定通常通过干密度测试来评估(路基压实度=试样干密度/最大干密度)。由试验数据及压实度公式计算可得,砂土压实度数值见表 2。

由表 2 可知,随着黄土掺量的不断增加,土体压实度逐渐提高至标准值。砂土中细颗粒的填充提升了基层土的压实度,有助于避免沉降和变形,确保整个道路结构的稳定性,提高其承载能力。

表 2 土体压实度随黄土掺量的变化

Tab. 2 Changes in soil compaction degree with loess content

黄土掺量/%	试样干密度/(g·cm ⁻³)	最大干密度/(g·cm ⁻³)	路基压实度/%
0	1.635 6	1.745	94
5	1.643 9	1.752	94
10	1.692 7	1.773	95
15	1.722 1	1.796	96
20	1.752 1	1.824	96
25	1.798 4	1.871	96
30	1.832 1	1.895	97

同时,工程中引入相对密度 D_r 来确定土的密实度,即用天然孔隙比 e 与该土的最松状态孔隙比 e_{max} 和最密实状态孔隙比 e_{min} 进行对比。密实度 D_r 的评级标准为:当 $0.67 < D_r \leq 1$ 时为密实;当 $0.33 < D_r \leq 0.67$ 时为中密;当 $0 < D_r \leq 0.33$ 时为松散。

试验中随着黄土掺量由 0 增至 30%,砂土相对密实度 D_r 由 0.604 0 增大至 0.780 8。根据土的密实度评价标准来看,随着黄土掺量的增加,砂土由中密状态改为密实状态;且砂土孔隙比 0.679 9 降低至 0.635 2,按照密实度标准当 $e < 0.70$ 时,该土处于密实状态。由此可知,土体压实度、密实度指标随着黄土掺量的增加有明显改善,有利于地基土体的压实度和承载力提升。

按照土管涌性的判别准则可知:砂土不均匀系数 $C_u = 2.612 < 5$ 、细料含量 $P > 35\%$,判别其为流土型土。流土型土渗透水力比降 J 的变化范围及允许值为:变化范围 0.8~1.0,允许值 0.4~0.5。其抗渗水力比降表达式为

$$J_C = 2.2(1-n)^2(G_s - 1) \frac{d_5}{d_{20}} \quad (2)$$

式中: G_s 为土的比重; n 为土的孔隙率。

由式(2)可得计算值与试验测得值绘得关系曲线,见图 14。

随着黄土掺量的增加,土的抗渗水力比降呈上升趋势,黄土掺量增至 30% 时,抗渗水力比降增大至 1.037。这表明土体抵抗渗透变形的能力增强,抗液化能力提高。由此可知,砂土中掺入当地黄土不仅满足工程的基本水力梯度要求,同时也改善了土体的孔隙结构和抗渗性能。这种改良效果有助于减缓渗透速率,降低水分渗透引起的土体液化风险,同时在抗渗性和渗透性等方面带来积极的优化效果,进一步提升土体在工程中的可靠性和适应性。

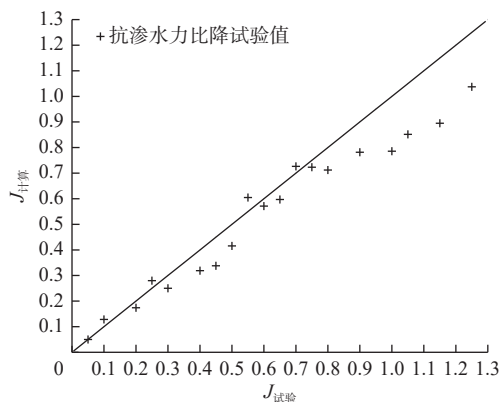


图 14 抗渗水力比降计算值与试验值关系曲线

Fig. 14 The relationship curve between the calculated value and the experimental value of the anti-seepage hydraulic pressure ratio

3 结论

砂土含水率增加导致峰值强度呈现线性下降趋势,且随着黄土掺量的增加强度下降幅度逐渐减小。随着黄土掺量的增大,砂土在低围压下所表现出的弱应变硬化现象也得到改善。由此可知,黄土掺量的增加会使得含水率、围压对砂土强度的影响增强。

围压会扩大含水率对砂土渗透性的影响,且围压对砂土渗透性影响高于含水率;而砂土渗透系数随着黄土掺量的增大而下降,其渗透系数降幅呈现逐渐减小的趋势,且减缓了渗透系数随着轴向应变变化的速率。

掺入当地黄土对改善砂土性质较为有效,尽管黏性较弱,但在强度、渗透性等特性依旧能够取得类似的改良效果,从而为实际工程中类似工况提供一种相对经济且有效的改良方法。

参考文献:

- [1] 倪剑华, 史安基, 王怀群. 粉质砂土类边坡开挖方案优化分析与应用 [J]. 水利水电技术, 2020, 51(S2): 376-379. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2020.S2.072.
- [2] 甘新龙. 浅谈工程地基土加固补强方案 [J]. 科技创新导报, 2009(13): 108. DOI: 10.16660/j.cnki.1674-098x.2009.13.087.
- [3] 张怀军. 南水北调东线穿黄河工程地基饱和砂土液化问题浅析 [J]. 南水北调与水利科技, 2006(4): 18-22. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2006.04.009.
- [4] 房志会, 孙超, 鲍硕超. 松花江干流治理工程堤防砂土动力学特性研究 [J]. 吉林建筑大学学报, 2019, 36(3): 32-36. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0185.2019.03.006.
- [5] 田谷雨, 刘素嘉, 张嘎. 地下渗漏条件下地基与隧洞响应的离心模型试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2023,

- 45(增刊 1): 226-229. DOI: [10.11779/CJGE2023S10035](https://doi.org/10.11779/CJGE2023S10035).
- [6] 刘怡美. 裂缝对隧洞结构应力与变形的影响研究 [J]. *水利科技与经济*, 2023, 29(12): 25-28. DOI: [10.3969/j.issn.1006-7175.2023.12.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-7175.2023.12.006).
- [7] 罗凯, 罗祺, 周成. 石漠化边坡及其植被板槽的地下渗漏一体化综合观测技术及应用模拟 [J]. *水利水电技术(中英文)*, 2024, 55(6): 96-105. DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2024.06.008](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2024.06.008).
- [8] 宁宝宽, 王宇暘, 陈四利. 水泥尾矿砂土的应力渗流耦合特性试验 [J]. *水文地质工程地质*, 2015, 42(4): 74-78. DOI: [10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2015.04.13](https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2015.04.13).
- [9] 张馨月. 季冻区路基改良粉砂土力学性能研究 [D]. 长春: 吉林建筑大学, 2020. DOI: [10.27714/d.cnki.gjljs.2020.000093](https://doi.org/10.27714/d.cnki.gjljs.2020.000093).
- [10] 刘彭彭. 黏粒含量对郑州地区粉砂土力学特性的影响及微观机理研究 [D]. 郑州: 中原工学院, 2020. DOI: [10.27774/d.cnki.gzygx.2020.000060](https://doi.org/10.27774/d.cnki.gzygx.2020.000060).
- [11] 龚壁卫, 许晓彤, 胡波. 引江济淮工程膨胀土地段渠坡生态处治技术 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(5): 1006-1012. DOI: [10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0096](https://doi.org/10.13476/j.cnki.nsbdkq.2023.0096).
- [12] MOLA-ABASI H. Triaxial behaviour of zeolite-cemented sand [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 2018, 173(2): 82-92. DOI: [10.1680/jgrim.18.00009](https://doi.org/10.1680/jgrim.18.00009).
- [13] 董帅, 徐国宾, 杨德锋. 微生物拌和渗滤砂土固化试验研究 [J]. *水力发电学报*, 2021, 40(12): 96-105. DOI: [10.11660/slfdx.20211209](https://doi.org/10.11660/slfdx.20211209).
- [14] 王龙威, 刘瑾, 奚灵智. 基于高分子复合材料改良砂土三轴剪切试验研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(4): 149-157. DOI: [10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201911005](https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201911005).
- [15] 柳圣. 微生物诱导碳酸钙沉淀改良砂的力学特性研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018. DOI: [10.27061/d.cnki.ghgdu.2018.000849](https://doi.org/10.27061/d.cnki.ghgdu.2018.000849).
- [16] 周翠英, 赵珊珊, 杨旭. 生态酯类材料砂土改良及工程护坡应用 [J]. *岩土力学*, 2019, 40(12): 4828-4837. DOI: [10.16285/j.rsm.2018.1991](https://doi.org/10.16285/j.rsm.2018.1991).
- [17] JAFARPOUR P, MOAYED R Z, KORDNAEIJ A. Behavior of zeolite-cement grouted sand under triaxial compression test [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2020, 12(1): 149-159. DOI: [10.1016/j.jrmge.2019.06.010](https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2019.06.010).
- [18] 廖祎来, 林寰宇, 蔡俊峰. 细颗粒含量及含水率对粉砂土抗剪强度影响研究 [J]. *路基工程*, 2022(1): 49-52. DOI: [10.13379/j.issn.1003-8825.202101027](https://doi.org/10.13379/j.issn.1003-8825.202101027).
- [19] 方明慧. 道路工程特殊路基处理技术研究及实践控制策略 [J]. *建筑技术开发*, 2019, 46(12): 161-162. DOI: [10.3969/j.issn.1001-523X.2019.12.080](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-523X.2019.12.080).
- [20] 赵小波, 黎满龙. 高速公路路基施工中水泥稳定液化砂土施工技术 [J]. *交通世界*, 2017(15): 60-61. DOI: [10.16248/j.cnki.11-3723/u.2017.15.025](https://doi.org/10.16248/j.cnki.11-3723/u.2017.15.025).
- [21] 中华人民共和国建设部. 土的工程分类标准: GB/T 50145—2007[S]. 北京: 中国计划出版社, 2007.
- [22] 许俊奎. 应力应变控制式三轴剪切渗透试验仪研制 [D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [23] 谷易, 毛海涛, 何涛. 三峡库区紫色土渗流: 应力的耦合关系 [J]. *水土保持通报*, 2023, 43(1): 44-51. DOI: [10.13961/j.cnki.stbctb.2023.01.006](https://doi.org/10.13961/j.cnki.stbctb.2023.01.006).
- [24] 梁广川. 不同因素对重庆紫色土土-水特征曲线的影响研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2020. DOI: [10.27684/d.cnki.gxndx.2020.001242](https://doi.org/10.27684/d.cnki.gxndx.2020.001242).
- [25] 王宁博, 姚仰平. 砂土特征状态线及不排水特性的初始状态分区 [J]. *岩土力学*, 2023, 44(11): 3165-3172. DOI: [10.16285/j.rsm.2023.1111](https://doi.org/10.16285/j.rsm.2023.1111).
- [26] 李广信, 李学梅. 土力学中的渗透力与超静孔隙水压力 [J]. *岩土工程界*, 2009, 12(4): 11-12.
- [27] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 城市轨道交通设施运营监测技术规范 第 4 部分: 轨道和路基: GB/T 39559.4—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.

Triaxial shear permeability test of loess-improved sand

YAN Aokun^{1,3}, WANG Junfeng², ZHANG Zhongshan², YANG Zhiqiang², DU Pengchao², MAO Haitao^{1,3}

(1. College of Urban and Rural Construction, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030600, China; 2. China Construction Seventh

Bureau First Construction Co., Ltd., Taiyuan 030000, China; 3. College of Water Conservancy and

Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830000, China)

Abstract: Studying the improvement of large volumes of sandy soil is one of the important topics in the current road engineering field. In order to comprehensively consider the availability of materials and the requirements of engineering cost, loess with a low clay content was used to improve sandy soil. This choice is based on the fact that loess is widely available in many areas and is relatively cheap, and its soil properties can also meet the needs of engineering improvement. The main purpose of this study is to deeply explore the coupling effect of stress field and seepage field. It should be noted that the volume of silt sand that needs to be improved in the project is often large,

and the amount of high-quality clay soil in the region is small. Whether it is possible to use soil with low viscosity to improve silt sand is of great research significance.

The sand in Jinzhong area was taken as the research object, and uses a stress-strain controlled triaxial shear permeability tester to explore in detail the influence of loess on the stress-seepage coupling relationship of sand. During the test, by changing variables such as the water content, confining pressure and loess content of the sand, the changes in the strength and permeability of the sand under the conditions of multi-factor coupling were systematically analyzed.

The test results show that during the shearing process, the strength of sand shows a decreasing trend as the moisture content increases. Specifically, as the moisture content increases, the friction between sand particles decreases, resulting in a decrease in its overall strength. At the same time, the strength of sand also decreases with the increase of confining pressure. This may be because as the confining pressure increases, the porosity between sand particles decreases, resulting in an increase in the binding force between particles, resulting in a decrease in the shear strength. In addition, the study also found that the strength of sand soil is most affected by the amount of loess. When the loess content increases, the strength of the sand soil increases significantly, which shows that the addition of loess has a positive effect on improving the mechanical properties of the sand soil. Test results on the permeability of sand show that it changes significantly with changes in stress. In particular, the permeability coefficient decreases with increasing axial stress. This phenomenon can be explained by the fact that the increase in axial stress further compresses the pores between sand particles, thereby reducing the channels for water flow, resulting in a decrease in permeability. More importantly, experimental data also show that the permeability coefficient of sand decreases by an order of magnitude as the loess content increases. This result shows that the addition of loess significantly improves the permeability properties of sand, making it better able to prevent leakage and water intrusion in practical engineering applications.

By analyzing the data provided by the stress-seepage coupling test of sand, the effectiveness of adding local loess to improve the properties of sand was proved. Although there are certain differences in viscosity between local loess and traditionally used clay, the results show that loess can still achieve similar improvement effects in key indicators such as strength and permeability. This provides a solid theoretical basis and practical basis for using loess to improve sand in actual engineering. In summary, this study proved the feasibility and effectiveness of using local loess to improve sand through detailed experiments and data analysis. This not only provides a reliable technical solution for engineering practice in Jinzhong, but also provides a valuable reference for sand improvement in other similar areas. It is expected that the performance changes of loess-improved sand under different stress conditions and environmental factors will be further studied to provide more comprehensive technical support for applications in the field of civil engineering.

Key words: sand; loess content; stress-seepage coupling; strength; permeability