

石灰固化黄土土水特征及软化本构模型

梁志超^{1,2}, 张爱军^{3,4}, 任文渊⁴, 程浩文⁵, 李莎¹, 党斌^{1,2}, 米文静¹

(1. 商洛学院 城乡规划与建筑工程学院, 陕西 商洛 726000;

2. 商洛市特种与新型建筑材料研究中心, 陕西 商洛 726000; 3. 西京学院

土木工程学院, 陕西 西安 710000; 4. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,

陕西 杨凌 712100; 5. 陕西理工大学 土木工程与建筑学院, 陕西 汉中 723000)

摘要: [目的] 研究非饱和灰土垫层的持水特性和强度特性, 揭示不同石灰掺量对其吸力和强度的影响规律, 为黄土建筑物基础和路基的施工和理论研究提供指导和参考。[方法] 通过室内土水特征试验和非饱和三轴试验研究石灰固化非饱和黄土土水特征、非饱和强度及软化本构模型。其中, 设置 4 个石灰掺量, 分别为 0, 3%, 6%, 9%, 揭示石灰掺量对基质吸力的影响规律; 设置基质吸力为 0, 50, 100 和 200 kPa, 探究基质吸力对其强度的影响。[结果] ① 石灰掺量越大, 基质吸力越强。② 构建了考虑石灰掺量影响的土水特征模型, 该模型能准确描述石灰固化黄土的土水特征; 通过引入损伤变量建立能够描述石灰固化黄土软化型的非线性模型。③ 固化土的黏聚力和内摩擦角随石灰掺量的增大而增大; 石灰掺量为 9% 时, 基质吸力增大, 石灰固化黄土的黏聚力逐渐增大, 内摩擦角变化很小。[结论] 石灰掺量对固化黄土土水特征的影响较大。非线性模型能够准确描述石灰固化土的应力-应变关系曲线, 且模拟结果较好。

关键词: 非饱和; 石灰垫层; 土水特征; 强度特性; 软化模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)02-0023-09

中图分类号: TU432, TU441

文献参数: 梁志超, 张爱军, 任文渊, 等. 石灰固化黄土土水特征及软化本构模型[J]. 水土保持通报, 2026, 46(2): 23-31. Liang Zhichao, Zhang Aijun, Ren Wenyuan, et al. Soil-water characteristics and softening constitutive model of lime-stabilized loess [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(2): 23-31.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.02.030

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.02.030

Soil-water characteristics and softening constitutive model of lime-stabilized loess

Liang Zhichao^{1,2}, Zhang Aijun^{3,4}, Ren Wenyuan⁴, Cheng Haowen⁵, Li Sha¹, Dang Bin^{1,2}, Mi Wenjing¹

(1. School of Urban and Rural Planning and Architectural Engineering, Shangluo University, Shangluo,

Shaanxi 726000, China; 2. Shaanxi Special and New Type Building Materials Research Center of Shangluo

City, Shangluo, Shaanxi 726000, China; 3. School of Civil Engineering, Xijing University, Xi'an, Shaanxi 710000,

China; 4. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100,

China; 5. School of Civil Engineering and Architecture, Shaanxi University of Technology, Hanzhong, Shaanxi 723000, China)

Abstract: [Objective] The water-holding characteristics and strength characteristics of unsaturated lime-stabilized loess cushion layers were investigated, and the influence of different lime contents on its matric suction and strength was revealed, in order to provide guidance and reference for the construction and theoretical research of loess building foundations and subgrades. [Methods] Laboratory soil-water characteristic tests and unsaturated triaxial tests were conducted to study the soil-water characteristics, unsaturated strength, and softening constitutive model of lime-stabilized unsaturated loess. Four lime contents (0, 3%, 6%, and 9%) were set to reveal the influence of lime content on matric suction. The matric suction was set at 0, 50, 100 kPa, and 200 kPa, respectively, to explore its influence on strength. [Results] ① Matric suction increased with increasing lime content. ② A soil-water characteristic model considering the influence of lime content was proposed, and this model could accurately describe the soil-water characteristics of lime-stabilized loess. A nonlinear model capable of

收稿日期: 2025-04-23

修回日期: 2025-11-03

采用日期: 2025-11-09

资助项目: 2025 年商洛学院校级博士基金“水-盐-热作用下伊型黄土的冻结及流变演化规律研究”(25SKY014)

第一作者: 梁志超(1993—), 男(汉族), 博士, 宁夏中宁县人, 讲师, 主要从事黄土、固化土试验及理论研究。Email: 13186055201@163.com。

通信作者: 张爱军(1964—), 男(汉族), 博士, 山西阳高县人, 教授, 主要从事非饱和黄土力学及其工程应用研究。Email: zaj@nwafu.edu.cn。

describing the softening behavior of lime-stabilized loess was established by introducing a damage variable. ③ The cohesion and internal friction angle of the stabilized soil increased as the lime content increased. When the lime content was 9%, with the increase of matric suction, the cohesion of the lime-stabilized loess gradually increased, while the change in the internal friction angle was very small. [Conclusion] The lime content on the soil-water characteristics of stabilized loess has a significant influence. Additionally, the nonlinear model can accurately describe the stress-strain curve of lime-stabilized soil, yielding relatively good results.

Keywords: unsaturated; lime cushion layer; soil-water characteristics; strength characteristics; softening model

石灰作为一种常用的化学改性剂用来处理工程性质较差的土壤,经常被用于路基、建筑物地基及渠道工程上。主要机理是通过土和石灰的物理化学反应,如絮凝作用、离子交换作用、碳酸化作用、水化放热反应和火山灰反应来改变土壤的颗粒组成及结构,提高其强度、刚度和水稳性^[1-4]。灰土层经常用来提高路基及地基的承载力或用来消除黄土的湿陷性。由于地下水位的变化、降雨和蒸发等外界环境的作用,灰土层往往处于非饱和状态。正是因为气相的存在,使得石灰固化黄土的持水特性和力学特性更具复杂性和特殊性。

在预测灰土的抗剪强度、变形强度和渗透特性时,基质吸力与含水率之间的关系(持水特征曲线)是影响灰土水-力特性的重要影响因素。对于灰土持水特性的研究表明,石灰的加入导致了土体内快速的水化反应和阳离子交换,使得土壤颗粒相互之间絮凝,并形成更大的团聚体^[5-6],随着火山灰的进一步反应,形成的胶凝化合物包裹在团聚体的表面,导致孔隙大小和孔隙连通通道减小,进而影响土体的持水能力,导致土体的进气值增大,持水能力增强^[7]。国内外在固化土的持水能力方面研究较多,Ying Zi等^[7]研究发现,养护龄期较大的灰土具有更高的基质吸力;Liang Zhichao等^[8]对灰土进行了土水特征试验,得到了相同的结果。桑进等^[9]采用压力板法、滤纸法和蒸汽平衡法对水泥固化土进行了研究,发现随着水泥掺量的增加,土体的持水能力提高。在土水特征曲线模型(soil water characteristic curve model, SWCCM)方面,李彪等^[10]建立了干湿循环下可反映孔隙结构作用的土水特征曲线模型;翟钱等^[11]针对“墨水瓶”效应和“雨滴”效应,建立了考虑滞后性的土水特征模型及计算公式;张爱军等^[12]构建了统一的土水特征模型,能够描述不同高易溶盐伊犁黄土的持水特征;蔡国庆等^[13-14]建立了能真实反映土体孔隙特征的SWCCM。同时,研究了干湿循环下红黏土的全吸力范围内的SWCCM。但针对固化土,尤其是石灰掺量对固化黄土的持水特性影响

的研究却鲜有报道。灰土的持水特性对预测灰土层的强度、变形和渗透特性至关重要。

对于灰土强度特性的研究,大部分集中在石灰固化土的无侧限抗压强度^[15]、刚度^[16]、剪切强度^[17]及压缩特性等^[18]方面。Ying Zi等^[19]对石灰改性盐渍土进行了系统深入的研究,得到石灰固化盐渍土的小应变剪切模量(G_{max}),结果表明,石灰处理后的盐渍土 G_{max} 随着养护龄期的增大而增大,而未经石灰处理的试样破坏严重;李丽华等^[20]采用椰壳纤维加筋石灰土,发现灰土的破坏形式由脆性变为塑性;周葆春等^[21]对石灰固化膨胀土进行了研究,结果表明石灰能显著提高膨胀土的强度,且无论是饱和或非饱和状态下,灰土的破坏形式均为脆性破坏。以上针对石灰固化土的研究主要是以含水率为研究主线,对于非饱和状态下的固化黄土,以吸力为应力变量的变形强度特性有待深入研究。

高压实度和石灰的固化作用,使得石灰固化黄土在三轴剪切下呈现软化现象。针对此类破坏形式,选取适宜且较简单的模型描述其力学特性十分关键。Duncan-Chang双曲线模型^[22]是可以描述硬化的模型,其模型简单,参数明确,但不能描述软化型曲线。针对这种问题,不少学者也提出了指数模型、复合指数模型、复合指数-双曲线模型,但是这些模型仍不能描述软化剪胀型曲线。而软化型的指数形式和驼峰曲线形式在拟合软化型曲线时具有缺陷,针对强软化型应力-应变曲线拟合效果较差。复合幂-指数非线性模型^[23]可以描述软化型曲线,但其参数物理意义不明确,且参数较多。目前,基于损伤的模型有弹塑性损伤模型、细观损伤模型和动力损伤模型等可以描述软化剪胀型曲线^[24]。然而,这些模型通常过于复杂,参数过多且使用难度大,很难适用于实际工程中。为了简化这种类型,应该考虑一种能够反映石灰固化黄土非线性软化模型。

本研究以基质吸力为应力变量,研究石灰固化黄土的土水特征,提出引入石灰掺量因子的土水特征模型。分析石灰固化黄土的非饱和三轴剪切特

性,揭示石灰掺量对固化黄土非饱和强度的影响规律。通过引入损伤变量,建立考虑基质吸力的石灰固化黄土的软化本构模型。研究结果为湿陷性黄土地区路基及地基的施工和理论研究提供指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

(1) 试验材料。试验所用黄土取自陕西省富平县,深度为3 m左右。天然黄土含水率为15.2%~16.1%,干密度为1.28~1.35 g/cm³,液限和塑限分别为28.6%和18.0%。颗分试验结果表明,所用黄土为粉质黏土。通过室内轻型击实试验,得到石灰掺量为0.9%(二八灰土)的黄土和固化黄土的最大干密度分别为1.72 g/cm³和1.65 g/cm³,最优含水率分别为16.5%和22.0%。石灰掺量为石灰质量与干土质量之比。石灰采用一级钙质熟石灰粉,氧化钙含量为72.12%。

(2) 试样制备与方法。将石灰与过2 mm筛的干土拌匀,按设计的含水率加水拌匀,静置24 h,随后在温度为20℃的恒温恒湿环境下养护7 d,石灰与黄土的混合方法见文献[21]。本研究采用2种方法测量土体基质吸力:①当基质吸力小于500 kPa时,采用

非饱和土固结仪进行测量,得到每级增湿含水率对应的基质吸力值。所用仪器为改装后的FGJ-20型非饱和土固结仪(图1a),改装后的非饱和土固结仪和常规固结仪的不同之处在于,增加了可以精确控制水量和压力的有压无压管,增湿装置由40 mm和4 mm的内外高强度玻璃管和气压导管组成。通过加载气压进行增湿,可实现在有压的情况下对试样进行精确的增湿。在无应力下,设置含水率梯度为2%^[25],将每级所增湿的水量转换为增湿管的刻度值,在吸力稳定后向试样中增湿,测得每级含水率下的吸力。②当吸力大于500 kPa时,采用滤纸法测定每级含水率下的基质吸力。

控制吸力的三轴剪切试验采用江苏溧阳永昌出厂的FSY-10型应力应变控制非饱和土三轴仪(图1b)。根据土水特征曲线,测得每个压实度下吸力0,50,100,200 kPa所对应的含水率。为了缩短平衡吸力的时间,在试验前,制样含水率取每个吸力下对应的含水率。采用固结排水剪切试验,其中等向固结过程中,保持吸力不变,待试样的体变读数及排水读数达到稳定标准之后[稳定的标准为0.012 cm³/(2 h)]进行剪切;常规剪切阶段,轴向应力采用应变式,剪切速率为0.016 mm/min^[25]。

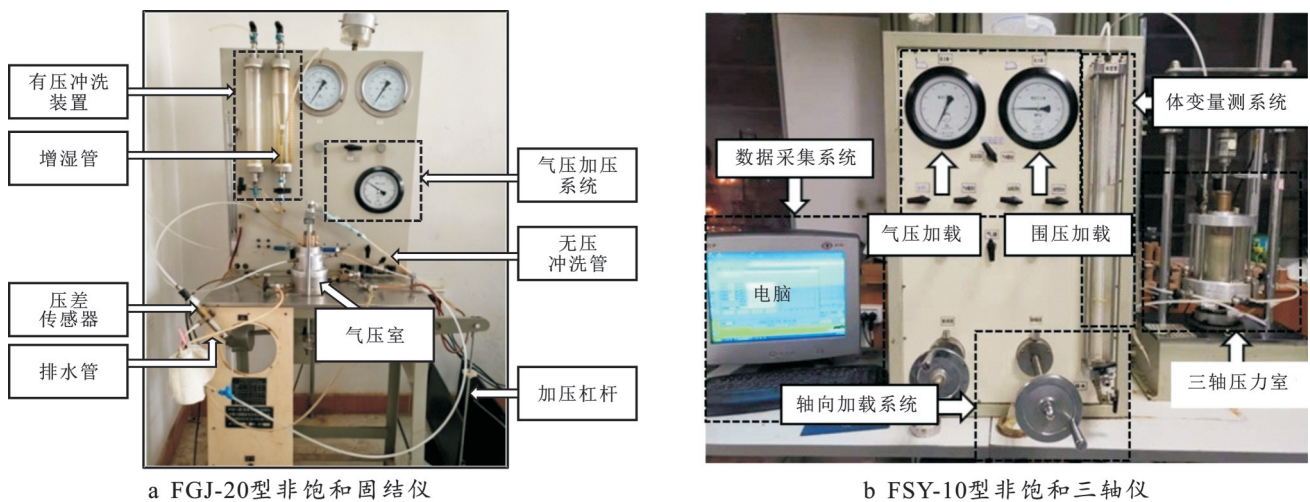


图1 非饱和固结仪和三轴仪

Fig.1 Unsaturation consolidation apparatus and triaxial apparatus

1.2 试验方案

(1) 土水特征试验的组数与工况。研究石灰掺量对黄土土水特征的影响规律时,土样压实度 $K=95\%$,石灰掺量(M)为0,3%,6%,9%($M=0$ 的黄土称为压实黄土,将 $M=9\%$ 的黄土称为石灰固化黄土),共计40个试样。

(2) 控制吸力三轴剪切试验的组数与工况。研

究石灰掺量对非饱和黄土强度影响时,压实度设计为95%,设计4个石灰掺量,分别为0,3%,6%和9%,基质吸力为100 kPa,净围压为50,100,200,300 kPa,共计16个试样。

研究吸力对石灰固化黄土强度影响时,设计压实度为95%,石灰掺量为9%,基质吸力为0,50,100和200 kPa,共计16个试样。

2 结果与分析

2.1 石灰掺量对固化黄土土水特征的影响

石灰掺量对非饱和黄土的土水特征曲线有一定影响(图2)。灰土的曲线位于压实黄土上方,不同石灰掺量的变化趋势基本相同,整体分为3段:边界效应区、过渡区和残余区。相同体积含水率下,随着石灰掺量增大,基质吸力增大,相应的进气值也增大。原因是土体内部经过物理、化学作用之后,土颗粒之间发生了团聚作用,构成了凝胶团聚结构^[25],使得土体内部孔隙通道减小,在相同情况下,石灰掺量越大,胶结作用越强,导致土体持水能力增强。

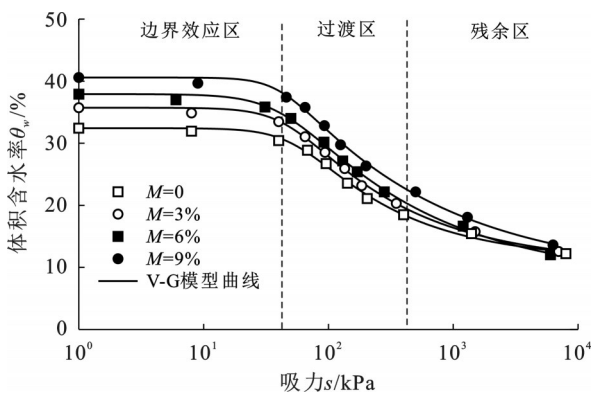


图2 不同石灰掺量非饱和黄土的土水特征曲线
Fig.2 Soil water characteristic curve of unsaturated loess with different lime contents

采用 Van Genuchten (1980) (V-G)^[26] 模型拟合不同石灰掺量的土水特征曲线,拟合公式如下:

$$\theta_w = \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + \left(\frac{s}{a}\right)^n\right)^m} + \theta_r \quad (1)$$

式中: θ_w 为体积含水率(%); θ_r 为残余体积含水率(%); θ_s 为饱和体积含水率(%); s 为基质吸力(kPa); a, n, m 为拟合参数, $m=1-1/n$ 。

V-G 模型拟合不同石灰掺量的土水特征曲线表明(表1),不同石灰掺量处理的 R^2 都在 0.99 以上,拟合效果较好。从图3可以看出,拟合参数 a 和石灰掺量之间呈线性关系,且拟合效果较好。

表1 不同石灰掺量灰土 V-G 模型参数
Table 1 V-G model parameters of lime-stabilized soil with different lime contents

M/%	a	n	m	θ_r /%	R^2
0	56.32	2.52	0.22	11.03	0.995
3	48.99	2.53	0.19	10.41	0.997
6	44.99	2.29	0.18	7.80	0.997
9	42.27	2.26	0.12	8.35	0.996

注: M 为石灰掺量; a, n, m 为拟合参数; θ_r 为残余含水率, R^2 为决定系数。下同。

将拟合参数 $a=cM+d$ 代入公式(1)中,得到考虑石灰掺量和含水率耦合作用的石灰固化黄土的土水特征曲线模型,如公式(2)所示,其中 θ_s 和 M 之间呈线性关系, c 和 d 分别为图1中直线的斜率和截距。从图4可以看出,由公式(2)得到的土水特征曲线能很好地描述不同石灰掺量的持水特性。

$$\theta_w = \frac{\theta_s - \theta_r}{\left\{1 + \left[s/(cM + d)\right]^n\right\}^m} + \theta_r \quad (2)$$

式中: $\theta_s=0.8893M+32.363$, $\theta_r=9.40\%$, $c=-1.5384$, $d=55.072$, $n=2.4$, $m=0.17$ 。

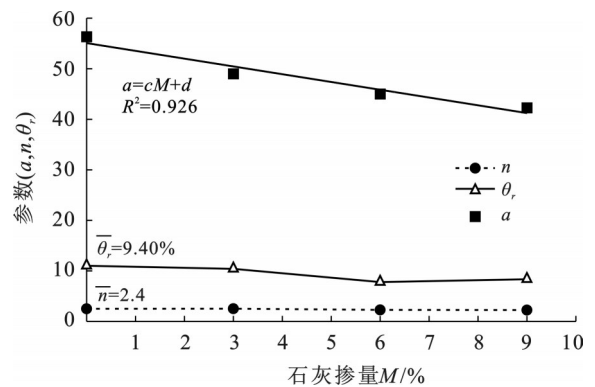


图3 V-G 模型参数与石灰掺量的拟合关系曲线
Fig.3 Fitting relationship curves between V-G model parameters and lime contents

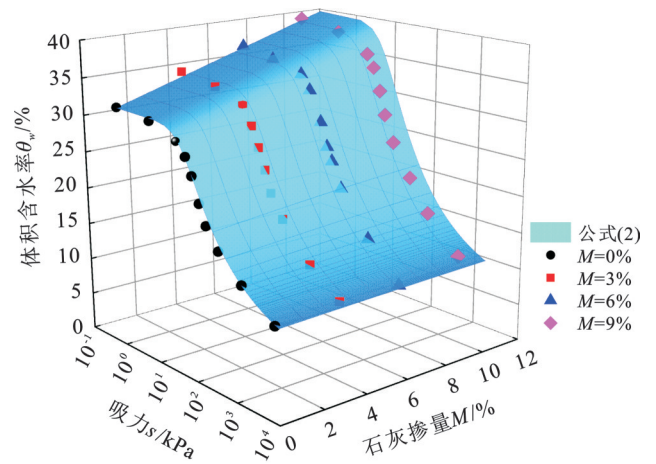


图4 不同石灰掺量下土水特征曲线拟合结果
Fig.4 Fitting results of soil-water characteristic curves with different lime contents

运用公式(2)对文献[25]和文献[7]中石灰掺量为2%和6%的固化土的土水特征曲线进行拟合。由于研究石灰掺量的土水特征结果不多,故仅对石灰掺量为2%和6%的模型进行了验证(图5)。对比本研究提出的考虑石灰掺量的土水特征模型和文献中的试验结果,发现拟合效果较好($R^2>0.92$),也充

分说明利用公式(2)拟合考虑石灰掺量的土水特征曲线是合理且准确的。

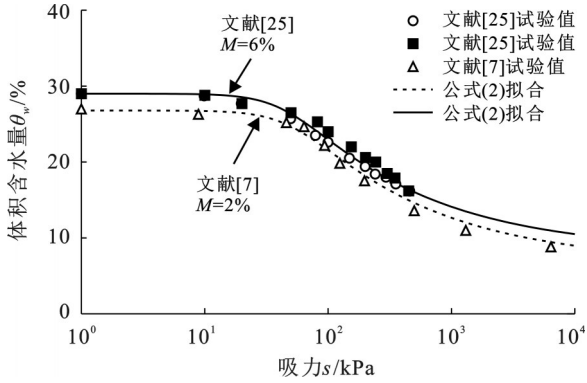


图5 石灰掺量2%和6%下公式(2)的验证结果
Fig.5 Verification results of equation (2) with lime contents of 2% and 6%

2.2 不同石灰掺量固化非饱和黄土强度特性

不同石灰掺量的石灰固化黄土应力-应变曲线呈现不同的软硬程度(图6)。压实黄土在低围压50 kPa和100 kPa时,呈弱软化型,且呈先剪缩后剪胀的趋势,高围压下应力-应变呈弱硬化型,且呈剪缩趋势。随着石灰的加入,当石灰掺量为3%时,低围压下,软化型逐渐增强。当石灰掺量达到6%~9%时,在4种围压下,应力-应变关系曲线几乎都呈强软化型,呈先剪缩后剪胀趋势。随着石灰掺量的增加,石灰固化黄土的破坏形式由鼓胀型向脆性破坏型转化。

根据应力-应变曲线,得到不同石灰掺量下灰土的抗剪强度参数。相同石灰掺量的一组试验结果都落在一条直线上。掺入石灰后,固化黄土的强度显著提高(图7a),黏聚力和内摩擦角与石灰掺量之间均呈线性关系(图7b)。黏聚力随着石灰掺量的增大而增大,且加入石灰3%后黏聚力增大最为显著,石灰固化黄土较压实黄土黏聚力提高2倍左右。同时,随着石灰掺量增加,内摩擦角有略微增大的趋势,石灰掺量在0%~9%时,内摩擦角变化范围在3°以内。

3 石灰固化黄土软化剪胀模型

3.1 模型介绍

石灰固化黄土的破坏过程可以分为2部分,即弹性段和塑性破坏段。通常认为破坏阶段没有体积变化,根据连续损伤力学理论^[27],初始的应力-应变关系如下:

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 = E \epsilon_1 (1 - D) \quad (3)$$

式中: q 为轴向偏应力(kPa); σ_1 为第一主应力(kPa); σ_3 为围压(kPa); ϵ_1 为轴向应变(%); E 为弹性模量(kPa); D 为损伤变量,范围为0~1,当 $D=0$ 时,石灰

固化黄土没有破坏,当 $D=1$ 时,石灰固化黄土已经完全破坏。

从公式(3)可以看出,当 $\sigma_1 - \sigma_3 = 0$ (即 $D=1$)时,不能反映残余偏应力。然而,不同吸力下的石灰固化黄土应力-应变曲线都有明显的残余阶段(图6a)。为了更加准确的描述残余段,根据文献[28],将公式(3)进一步改进为考虑残余强度的形式,公式如下:

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 = E \epsilon_1 (1 - D) + q_R D \quad (4)$$

式中: q_R 为残余偏应力(kPa)。其中不同净围压(σ_3)下 q , E , ϵ_1 , q_R 均与吸力有关。因此,公式(4)进一步改写为考虑吸力的形式。

$$q_i = (\sigma_1 - \sigma_3)_i = E_i \epsilon_{1,i} (1 - D) + q_{R,i} D \quad (5)$$

式中: i 为不同吸力,本研究控制吸力为0,50,100,200 kPa。损伤变量(D)描述微观结构变化导致的裂缝、损伤及破坏,通常表达为基于Weibull分布的一个函数,公式为

$$D = 1 - \exp \left[- \left(\frac{\epsilon_{1,i}}{\epsilon_{0,i}} \right)^{m_i} \right] \quad (6)$$

式中: $\epsilon_{0,i}$ 和 m_i 是Weibull分布的参数。

将公式(6)代入公式(5)中,得到考虑吸力的石灰固化黄土软化型应力-应变的最终模型,公式如下:

$$q_i = E_i \epsilon_{1,i} \exp \left[- \left(\frac{\epsilon_{1,i}}{\epsilon_{0,i}} \right)^{m_i} \right] + q_{R,i} \left\{ 1 - \exp \left[- \left(\frac{\epsilon_{1,i}}{\epsilon_{0,i}} \right)^{m_i} \right] \right\} \quad (7)$$

3.2 模型参数求解及分析

公式(7)中,软化型应力-应变模型参数有4个,分别为 E_i , $q_{R,i}$, $\epsilon_{0,i}$ 和 m_i 。其中,轴向应变在1%内,应力-应变的斜率可以被近似看作是初始模量^[28-30],其表达式为

$$E_i = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon} = \frac{\sigma_{1.0\%,i} - \sigma_{0,i}}{\epsilon_{1.0\%,i} - \epsilon_{0,i}} \quad (8)$$

式中: $\Delta \sigma$ 和 $\Delta \epsilon$ 分别为应力增量和应变增量; $\sigma_{1.0\%,i}$ 为不同吸力试样在应变为1.0%处的应力。

残余强度 $q_{R,i}$ 取应变15%处的偏应力。考虑到应力-应变曲线峰值处斜率为0,因此,公式(8)对 $\epsilon_{1,i}$ 求导,将峰值点($\epsilon_{1,p}$, q_p)代入导函数中,得到 ϵ_0 和 m ,计算公式为

$$m_i = - \frac{E_i \epsilon_{1,p,i}}{\left(\ln \frac{q_{p,i} - q_{R,i}}{E_i \epsilon_{1,p,i} - q_{R,i}} \right) (E_i \epsilon_{1,p,i} - q_{R,i})} \quad (9)$$

$$\epsilon_{0,i} = \left(\frac{E_i m_i \epsilon_{1,p,i}^{m_i} - q_{R,i} m_i \epsilon_{1,p,i}^{m_i - 1}}{E_i} \right)^{\frac{1}{m_i}} \quad (10)$$

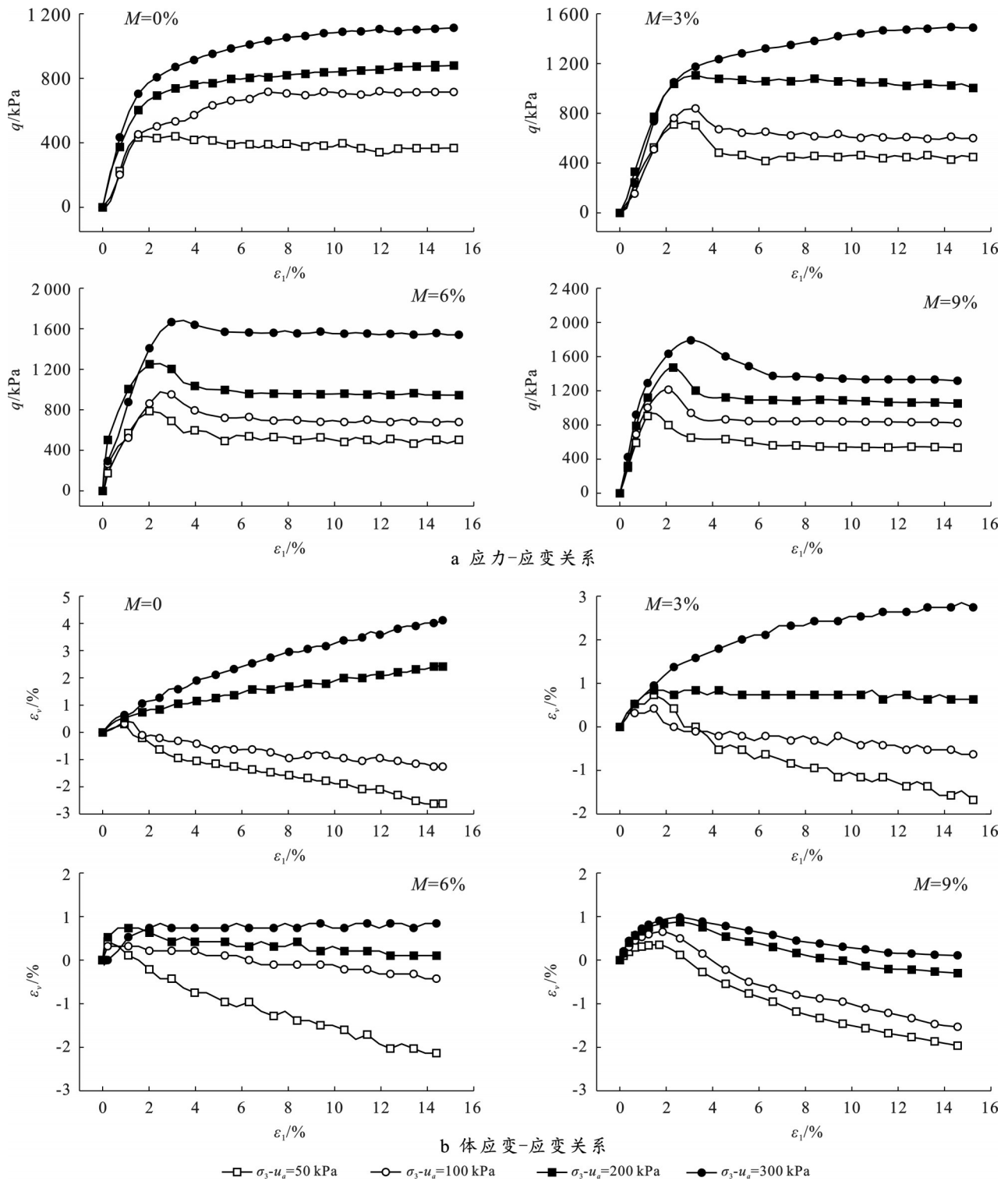


图 6 不同石灰掺量固化黄土的应力-应变关系曲线

研究表明,不同吸力下的石灰固化黄土的应力-应变关系曲线均呈不同程度的软化型,且模型预测效果较好(图 8)。从试验值得到不同吸力下的抗剪强度指标,由图 9 可以看出,黏聚力随着基质吸力的增大而增大,内摩擦角略有增加,但变化范围很小,在 1°~2° 之间。

图 10 表明,弹性模量(E)和残余强度(q_R)均随吸力和围压的增大而增大。在净围压为 50, 100, 200, 300 kPa 下,饱和石灰固化黄土吸力为 200 kPa 时,弹性模量分别增加 65.8%, 50.2%, 35.2% 和 46.3%。同时,残余强度分别增加 44.2%, 41.7%, 55.0% 和 48.8%。

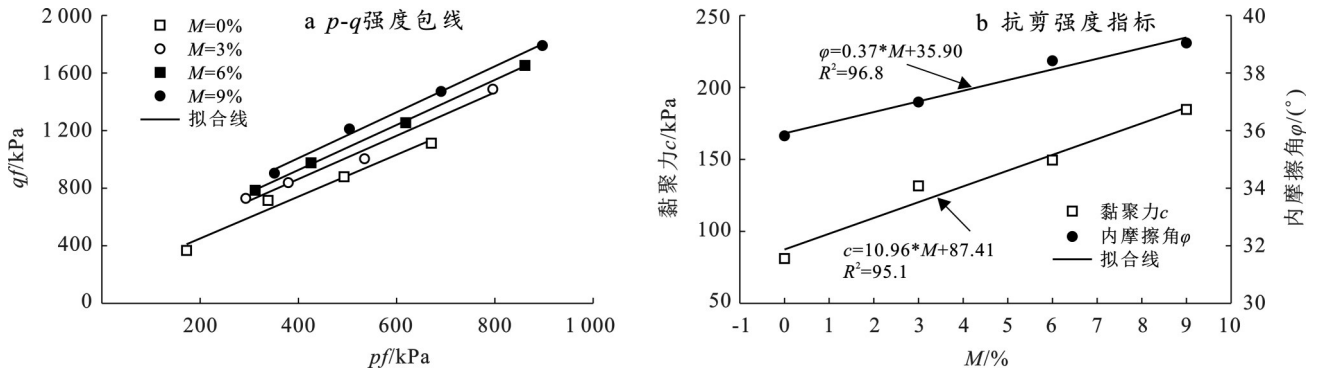


图 7 不同石灰掺量固化黄土的 p - q 强度包线及抗剪强度指标

Fig.7 p - q strength envelopes and shear strength indicators of stabilized loess with different lime contents

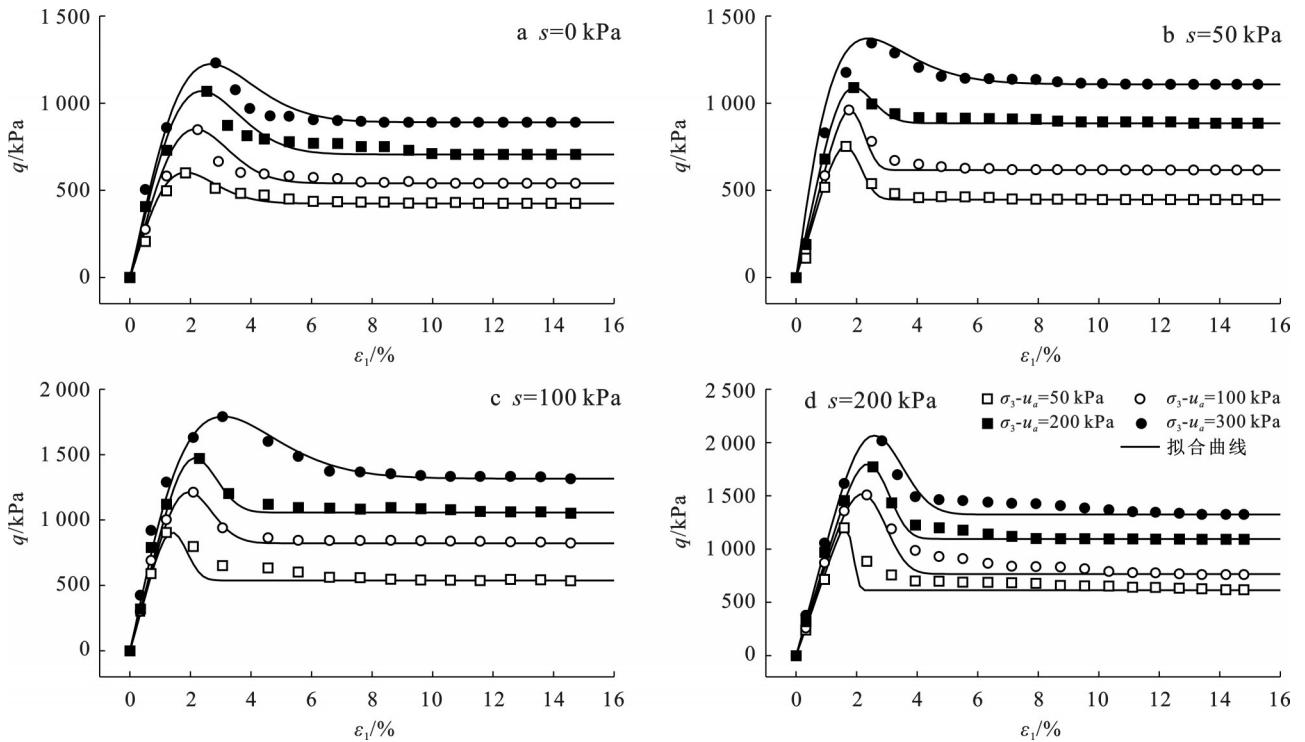


图 8 不同吸力下石灰固化黄土及软化模型曲线

Fig.8 Stress-strain relationship curves of lime-modified loess and softening model under different suctions

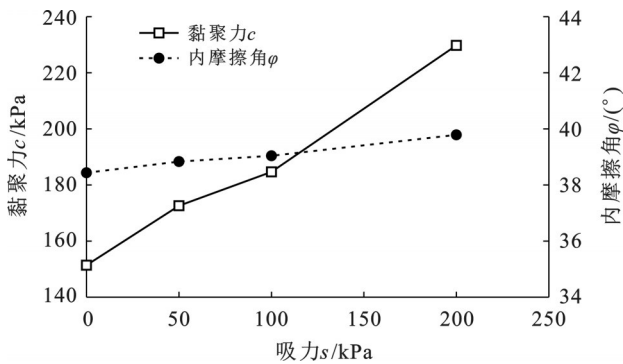


图 9 不同吸力下石灰固化黄土的抗剪强度指标

Fig.9 Shear strength parameters of lime-modified loess under different suction conditions

不同围压下参数 $\epsilon_{0,i}$ 与吸力呈线性关系,且随着吸力增大而增大。参数 m_i 随围压的增大而线性减

小,随吸力的增大呈增大趋势,但是其拟合度并不高 ($R^2 > 0.604$), 主要是因为试验点的数量较少。同时,通过对参数 m_i 的敏感度分析可知,参数 m_i 主要影响应力-应变的形状和峰值。从图 8 拟合曲线可以看出,随着 m_i 的减小,应力-应变曲线更趋于光滑,峰值更大。充分说明石灰固化黄土剪胀模型更适合描述围压较小的试样,这与固化土的实际工程受力情况更相符合。

4 结论

(1) 随着石灰掺量增大,固化黄土的基质吸力增大,持水能力增强。同时,引入石灰掺量因子的土水特征模型可以较好地描述石灰固化黄土的土水特征。

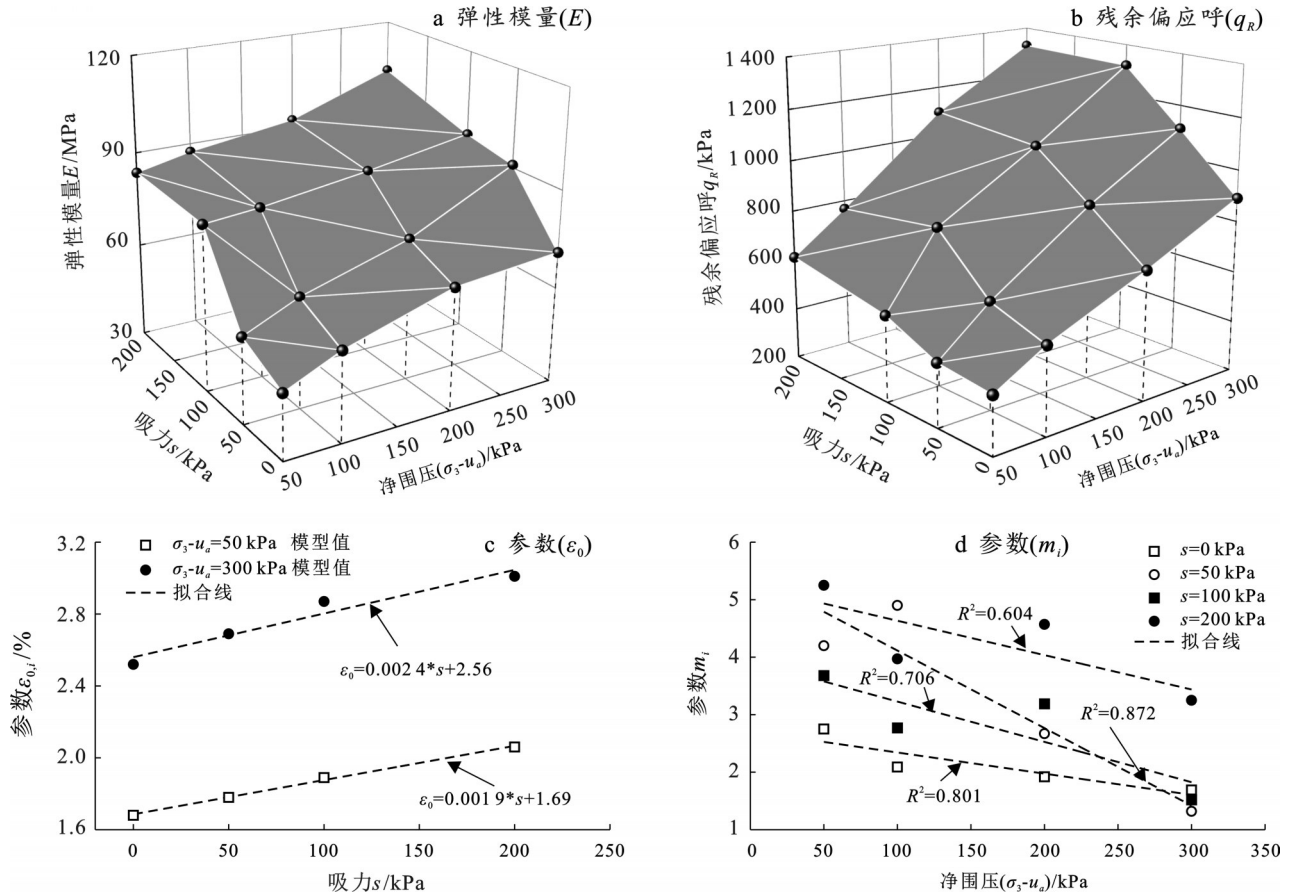


图 10 不同基质吸力及围压下石灰固化黄土软化模型参数

Fig.10 Modelling parameters of lime-modified loess and softening model under different suction and confining pressure

(2) 灰土的应力-应变关系呈现不同程度的软化型,表现为先减缩后剪胀。相同吸力下,随着石灰掺量的增加,灰土黏聚力和内摩擦角均增大。对于石灰固化黄土,吸力越大,黏聚力越大,内摩擦角变化较小。

(3) 引入损伤变量,建立了能够准确描述石灰固化黄土应变软化的本构模型,模型参数 E 和 q_R 均随吸力和围压的增大而增大。不同围压下,应变参数 ϵ_0 与吸力呈线性关系,随吸力增大而增大;参数 m 随吸力的增大呈增大趋势。

建立的修正持水模型和软化模型可为灰土垫层的渗透、强度和变形数值计算提供理论依据,但其缺点是模型参数依赖于室内非饱和土试验,工作量较大,耗时较长。

参考文献 (References)

[1] Tang A M, Vu M N, Cui Y J. Effects of the maximum soil aggregates size and cyclic wetting-drying on the stiffness of a lime-treated clayey soil [J]. Géotechnique, 2011,61(5):421-429.
 [2] 梁志超,任文渊,李双村,等.冻融和易溶盐对石灰固化伊犁黄土强度及水稳性的影响[J].材料导报,2025,39(6):148-155.
 Liang Zhichao, Ren Wenyan, Li Shuangcun, et al.

Effect of soluble salt and freeze-thaw cycle on strength deterioration and water stability of lime-treated Ili loess [J]. Materials Reports, 2025,39(6):148-155.
 [3] 孔元元,谢柏涵,王清,等.冻融循环作用下固化盐渍土的强度增长机理规律及损伤模型验证[J/OL].(2025-02-25).长江科学院院报,2025:1-8. https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx? filename=CJKB20250224006&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.
 Kong Yuanyuan, Xie Baihan, Wang Qing, et al. The strength growth mechanism and damage model verification of solidified saline soil under freeze-thaw cycles [J/OL]. (2025-02-25). Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2025: 1-8. https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx? filename=CJKB20250224006&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ.
 [4] 吴军,张金生,谈云志,等.磷石膏-矿渣-石灰固化底泥力学性能及微观机理[J].应用基础与工程科学学报,2024,32(5):1360-1373.
 Wu Jun, Zhang Jinsheng, Tan Yunzhi, et al. Mechanical properties and microscopic mechanism of phosphogypsum-slag-lime solidified sediment [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2024,32(5):1360-1373.
 [5] 程佳,赵相卿,金兰,等.石灰桩处理岛状多年冻土地基现场试验研究[J].铁道工程学报,2019,36(1):17-20.

- Cheng Jia, Zhao Xiangqing, Jin Lan, et al. Field test study on lime pile to treat foundation in island-shaped frozen soil [J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2019, 36(1):17-20.
- [6] 柴寿喜,田萌萌,魏丽,等.石灰粉煤灰固化硫酸盐渍土的水稳定性与微观结构特征[J].*工程地质学报*, 2024, 32(2):430-439.
- Chai Shouxi, Tian Mengmeng, Wei Li, et al. The water stability and microstructure indices of sulphate saline soil stabilized with lime and fly ash [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2024, 32(2):430-439.
- [7] Ying Zi, Cui Yujun, Benahmed N, et al. Changes in microstructure and water retention property of a lime-treated saline soil during curing [J]. *Acta Geotechnica*, 2022, 17(1):319-326.
- [8] Liang Zhichao, Zhang Aijun, Ren Wenyuan, et al. Investigating the curing time effect on water retention property and microstructure of lime-treated Ili loess [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2023, 82(7):241.
- [9] 桑进,刘文化,张洪勇,等.全吸力范围内固化土的土-水特征曲线试验研究[J].*岩石力学与工程学报*, 2023, 42(S1):3842-3850.
- Sang Jin, Liu Wenhua, Zhang Hongyong, et al. Experimental study on soil-water characteristic curve of solidified soil in full suction range [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2023, 42(S1):3842-3850.
- [10] 李彪,刘健,刘畅,等.干湿循环作用对三峡库区消落带土体土水特性的影响研究[J].*工程地质学报*, 2025, 33(5):1969-1977.
- Li Biao, Liu Jian, Liu Chang, et al. The influence of dry-wet cycles on the soil-water characteristics of unsaturated soil in the hydro-fluctuation belt of Three Gorges Reservoir area [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2025, 33(5):1969-1977.
- [11] 翟钱,田刚,朱益瑶,等.考虑滞后性的土-水特征曲线物理-统计模型研究[J].*岩土工程学报*, 2023, 45(10):2072-2080.
- Zhai Qian, Tian Gang, Zhu Yiyao, et al. Physical-statistical model for estimation of hysteresis of soil-water characteristic curve [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(10):2072-2080.
- [12] 张爱军,王毓国,邢义川,等.伊犁黄土总吸力和基质吸力土水特征曲线拟合模型[J].*岩土工程学报*, 2019, 41(6):1040-1049.
- Zhang Aijun, Wang Yuguo, Xing Yichuan, et al. Fitting models for soil-water characteristic curve of total and matrix suctions of Yili loess [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(6):1040-1049.
- [13] 蔡国庆,韩博文,王亚南,等.双孔结构非饱和红黏土土水特征曲线模型[J].*岩土工程学报*, 2022, 44(增刊1):1-5.
- Cai Guoqing, Han Bowen, Wang Yanan, et al. Soil-water characteristic curve model of unsaturated red clay with double pore structure [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(S1):1-5.
- [14] 蔡国庆,刘祎,徐润泽,等.全吸力范围红黏土干湿循环土-水特征曲线[J].*岩土工程学报*, 2019, 41(增刊2):13-16.
- Cai Guoqing, Liu Yi, Xu Runze, et al. Soil-water characteristic curve of dry-wet cycle of red clay in full suction range [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2019, 41(S2):13-16.
- [15] Muntohar A S, Widiyanti A, Hartono E, et al. Engineering properties of silty soil stabilized with lime and rice husk ash and reinforced with waste plastic fiber [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2013, 25(9):1260-1270.
- [16] Wang Y J, Cui Y J, Tang A M, et al. Changes in thermal conductivity, suction and microstructure of a compacted lime-treated silty soil during curing[J]. *Engineering Geology*, 2016, 202:114 - 121.
- [17] Sivapullaiah P V, Sridharan A, Ramesh H N. Strength behaviour of lime-treated soils in the presence of sulphate [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2000, 37(6):1358-1367.
- [18] Vitale E, Deneele D, Paris M, et al. Multi-scale analysis and time evolution of pozzolanic activity of lime treated clays [J]. *Applied Clay Science*, 2017, 141:36-45.
- [19] Ying Zi, Cui Yujun, Benahmed N, et al. Changes of small strain shear modulus and microstructure for a lime-treated silt subjected to wetting-drying cycles [J]. *Engineering Geology*, 2021, 293:106334.
- [20] 李丽华,刘文,李玉涛,等.椰壳纤维加筋石灰改良土力学性能试验研究[J].*工程科学与技术*, 2025, 57(6):131-141.
- Li Lihua, Liu Wen, Li Yutao, et al. Experimental study on mechanical properties of coconut fiber reinforced lime improved soil mechanics [J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2025, 57(6):131-141.
- [21] 周葆春,孔令伟,郭爱国.石灰改良膨胀土的应力-应变-强度特征与本构描述[J].*岩土力学*, 2012, 33(4):999-1005.
- Zhou Baochun, Kong Lingwei, Guo Aiguo. Stress-strain-strength behaviour and constitutive description of lime-treated expansive soil [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(4):999-1005.