



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2506876

引用格式: 刘红位, 蓝富发, 冯嵩, 等. 百慕大草对弱膨胀土强度特性的影响[J]. 科学技术与工程, 2026, 26(26): 11417-11427.

Liu Hongwei, Lan Fufa, Feng Song, et al. Effects of bermuda grass on strength characteristics of weakly expansive soil[J]. Science Technology and Engineering, 2026, 26(26): 11417-11427.

百慕大草对弱膨胀土强度特性的影响

刘红位^{1,2}, 蓝富发¹, 冯嵩^{3*}, 简文彬^{1,2}, 庄铭泽¹

(1. 福州大学紫金地质与矿业学院, 福州 350108; 2. 福建省地质工程勘察院自然资源部丘陵山地地质灾害防治重点实验室和福建省地质灾害重点实验室, 福州 350002; 3. 福州大学土木工程学院, 福州 350108)

摘 要 膨胀土分布广泛, 具有失水干缩、吸水膨胀的特性。植物因其环境友好等特点常用于提高土体的工程特性。探究植物对弱膨胀土抗压与抗剪强度特性及其影响规律是利用植物治理膨胀土的基础。以弱膨胀土和百慕大草为研究对象, 通过无侧限抗压强度试验与非饱和直剪试验, 探究种植密度、垂直压力、吸力等因素对弱膨胀土强度的影响。百慕大草的种植密度为 25、40、50 g/m², 分别简称 P25 组、P40 组和 P50 组。试验结果表明: 植物提高弱膨胀土的无侧限抗压强度, 土体含水量越高植物对土体强度的影响越显著, 其中 P50 组较于裸土组, 在含水率 27.5%、32.5% 和 37.5% 时, 抗压强度分别提高了 11.5%、17.3% 和 25.2%。植物显著提高弱膨胀土的有效黏聚力(c')及非饱和内摩擦角(φ_b), 其中, P25(含根量 0.98 kg/m³)组、P40(含根量 1.25 kg/m³)组与 P50(含根量 1.49 kg/m³)组的有效黏聚力分别是裸土组的 1.15、1.42、1.54 倍。随着吸力的提高植物组 φ_b 值趋于稳定, 约为裸土组的 1.5 倍。植物削弱了剪切过程中弱膨胀土的体变。随着吸力提高, 弱膨胀土从剪缩逐渐向剪胀发展, 植物种植密度越大, 土体的体变也越小。

关键词 弱膨胀土; 百慕大草; 吸力; 抗剪强度; 体变

中图分类号 TU432; **文献标志码** A

Effects of Bermuda Grass on Strength Characteristics of Weakly Expansive Soil

LIU Hong-wei^{1,2}, LAN Fu-fa¹, FENG Song^{3*}, JIAN Wen-bin^{1,2}, ZHUANG Ming-ze¹

(1. Zijin School of Geology and Mining, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Key Laboratory of Geohazard Prevention of Hilly Mountains, Ministry of Natural Resources and Fujian Key Laboratory of Geohazard Prevention, Geological Engineering Survey in Fujian Province, Fuzhou 350002, China; 3. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

[Abstract] Expansive soil, characterized by swelling upon water absorption and shrinkage upon drying, is widely distributed. Plants are often used to enhance the engineering properties of soil due to their environmental friendliness. Investigating the effects of vegetation on the compressive and shear strength characteristics of weakly expansive soil is fundamental to the application of plants in treating expansive soil. The effects of Bermuda grass on the strength properties of weakly expansive soil were systematically investigated. Specifically, unconfined compressive strength tests and unsaturated direct shear tests were conducted to explore the effects of factors such as planting density, vertical pressure, and suction on the strength of weakly expansive soil. Bermuda grass was planted at densities of 25 g/m², 40 g/m², and 50 g/m², corresponding to groups P25, P40, and P50, respectively. The test results show as follows. Plants enhance the unconfined compressive strength of weakly expansive soil, with this strengthening effect becoming more pronounced as soil water content increases. For instance, compared with the bare soil, the P50 group exhibits compressive strength increases of 11.5%, 17.3%, and 25.2% at water contents of 27.5%, 32.5%, and 37.5%, respectively. Plants significantly increase the effective cohesion (c') and the unsaturated friction angle (φ_b) of weakly expansive soil. The effective cohesion values of groups P25 (root content: 0.98 kg/m³), P40 (root content: 1.25 kg/m³), and P50 (root content: 1.49 kg/m³) are 1.15, 1.42, and 1.54 times that of the bare soil group, respectively. With increasing suction, the φ_b values of the planted groups stabilize at approximately 1.5 times that of the bare soil. Plants mitigate the volume changes in weakly expansive soil during shearing. As suction increases, the soil behavior transitions from shear contraction to dilation, with higher planting densities resulting in progressively smaller volumetric change.

[Keywords] weakly expansive soil; Bermuda grass; suction; shear strength; volume deformation

收稿日期: 2025-09-25; 修订日期: 2026-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(42177120, 52178320, U2005205); 福建省自然科学基金(2025J09023)

第一作者: 刘红位(1987—), 女, 汉族, 重庆人, 博士, 副教授, 博士研究生导师。研究方向: 环境岩土工程。E-mail: hliuan@connect.ust.hk。

* 通信作者: 冯嵩(1986—), 男, 汉族, 福州长乐人, 博士, 研究员, 博士研究生导师。研究方向: 环境岩土工程。E-mail: sfengaa@connect.ust.hk。

投稿网址: www.stae.com.cn

膨胀土分布在全球 60 多个国家和地区。其中,中国是膨胀土分布最广的国家之一,20 多个省区发现膨胀土,面积近 60 万 km^2 ^[1]。由于建设用地稀缺,在不良土壤条件下开展工程建设已经成为一种普遍现象,因此,对膨胀土强度的研究就显得尤为重要。膨胀土是一种特殊的土,主要由亲水性矿物蒙脱石和伊利石组成^[2],而这些黏土矿物具有较小粒度、较大比表面积以及高阳离子交换量等特点,使得膨胀土在施工过程中会产生较大的变形,从而引起建筑结构的不均匀沉降和裂缝,全球每年由膨胀土造成的经济损失多达数十亿美元^[3]。

膨胀土是一种常见的非饱和土,在工程实践当中常处于非饱和状态,其强度主要受含水率、干密度以及干湿循环等因素影响^[4],Yilmaz 等^[5]通过对不同水质影响下的膨胀土进行自由溶胀试验和膨胀压力试验,发现水分中的电解质浓度,盐浓度以及水分和黏土之间的阳离子交换会降低黏土的膨胀潜力,因此膨胀土中的水分也是影响膨胀土强度的重要因素之一。大部分膨胀土处于非饱和状态,非饱和土的抗剪强度是岩土工程设计中所需要的主要力学指标之一^[6]。膨胀土强度和刚度随着吸力的增大,呈现非线性趋势增加,并且其强度可能与吸力引起的剪切阻力及密度的增加有关^[7]。欧阳森等^[8]发现植物根系通过与土体形成根-土复合体实现荷载分担与颗粒锁定——浅细根在土体中穿插、缠绕,当复合体受剪或面临滑移风险时,根-土界面会产生由净法向应力及界面基质吸力、张力吸力共同构成的剪阻力,限制土颗粒位移。Ye 等^[9]通过非饱和剪切试验发现随着吸力的增加,膨胀土的黏聚力明显增大,而内摩擦角几乎保持不变。目前,国内外对于如何提高膨胀土的强度已经进行了大量研究,主要方法有物理改良和化学改良等^[10-13]。常用的改良材料大多是化学合成纤维,但是化学合成材料会对生态环境产生一定程度的破坏,带来新的环境问题^[14]。为了降低成本和保护当地生态环境,部分地区采取种植植物的方式进行改良。植物不仅通过根系加筋作用来加强土体强度,还通过蒸腾作用降低孔隙水压力,干燥条件下植物水力效应更为显著^[15]。同时,植物也可以通过根-土摩擦,将土体所受的剪应力转化为根系所受的拉应力,从而增强土体抗剪强度。Ma 等^[16]对掺入狗牙根的黏土进行了无侧限抗压和直剪试验,发现根-土复合体的强度随含根量增加而提高,达到最佳含根量后保持不变。但目前大部分研究以重塑的根-土复合体作为研究对象,重塑样无法体现根-土复合体的真实特性。刘小文等^[17]探讨了基质吸力与非

饱和黏土抗剪强度的关系,发现含水量对非饱和和黏土基质吸力影响显著;大量的试验研究证明,受基质吸力的影响,同种土的非饱和状态下的抗剪强度大于饱和状态下的抗剪强度^[18];膨胀土原状样和压实样的剪胀势随吸力增加而增大,非饱和土膨胀量随吸力增大而增大并趋于稳定值,在相同吸力下,膨胀量随净竖向压力增大而减小^[19]。目前,基质吸力对含根膨胀土力学特性的影响研究较少且其相互机理尚不明确。因此,研究吸力和植物对非饱和膨胀土抗剪强度的影响,揭示植物对膨胀土强度的影响机理,对治理膨胀土有重要的理论意义和工程应用价值。

因此,现开展一系列室内试验,研究含水率和百慕大的种植密度对弱膨胀土无侧限抗压强度的影响,探究吸力-植物对弱膨胀土抗剪强度的影响规律,以揭示吸力-植物对弱膨胀土体变特征的作用机理。

1 试验材料与方案

1.1 试验材料和植物

研究所用土为取自福建,土样呈黄白色,其基本物理特性指标如表 1 所示,根据《膨胀土地区建筑技术规范》(GB 50112—2013),试验土样为弱膨胀土^[20]。试验土样风干后过 2 mm 筛,去除石头与草根等杂质,置于 105 ℃烘箱中烘干至恒重。烘干后的土均匀喷洒无气水至土体最优含水量(27.5%),湿土过 2 mm 筛后放入密封容器中至少 24 h 使其水分平衡。

采用的植物为百慕大草,百慕大草是暖季广泛使用的多年生牧草和草坪草,是在全球范围内广泛分布的重要禾本科植物之一。常见于东南亚、中国香港、印度以及美国部分亚热带地区,并且具有较强的耐旱性。百慕大草具有较强的环境适应能力,

表 1 试验用土的基本物理指标
Table 1 Index properties of the test soil

物理性质	数值
比重	2.7
最优含水量/%	27.5
最大干密度/($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1.5
液限/%	45.1
塑限/%	28
塑性指数	17.1
砂粒(0.075~2 mm)	49.2
粉粒(0.002~0.075 mm)	20.1
黏粒(<0.002 mm)	30.7
自由膨胀率/%	59
阳离子交换量/($\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$)	207.4

广泛分布于各种自然环境中,如草地、林地等^[21]。

1.2 试验方案和步骤

1.2.1 盆栽试验

盆栽为直径 300 mm,高 300 mm 圆形铁桶,如图 1 所示。百慕大草的播种密度为 25、40、50 g/m²。压实土样前先在盆栽内壁均匀涂抹一层凡士林,避免侧壁形成优势流。盆栽底部先铺设一层 150 mm 碎石排水层,然后在碎石上覆盖一层土工布,防止细粒土流失。土层厚度为 150 mm,压实度为 90%,分 5 层压实,每次压实前对前一次压实后的土体进行拉毛,控制每层厚度为 30 mm。压实完毕后,利用 2 mm 筛网均匀播撒百慕大草种并上覆 5 mm 厚细土^[22]。所有试样放置在相同的养护环境中养护 47 d,温度范围在 23 ~ 33 ℃,相对湿度 70% ± 5%。为保障百慕大草生长,在养护期间,每天对所有盆栽均匀喷水 160 g 保持土体含水率。

为探究不同种植密度百慕大草生长的情况,试验过程中,观测百慕大草籽的发芽情况,记录其发芽率。同时,采用 Image J (2023) 图像分析软件,每天测定盆栽表面绿色覆盖度(植被像素占比)。养护期满后,用剪刀沿土壤表面剪断草茎,在盆栽的不同位置选取 3 个植株密度相近的区域作为取样点。取样前在环刀(Φ61.8 mm × 20 mm)及三瓣膜和取样器内壁均匀涂抹一层凡士林,垂直压入土体

至刃口低于土表 10 mm。具体试验流程如图 1 所示。

每次取样后取部分三瓣膜周围土样进行含水率测定,计算含水率。获得含根土试样植物特征参数如图 2 所示。

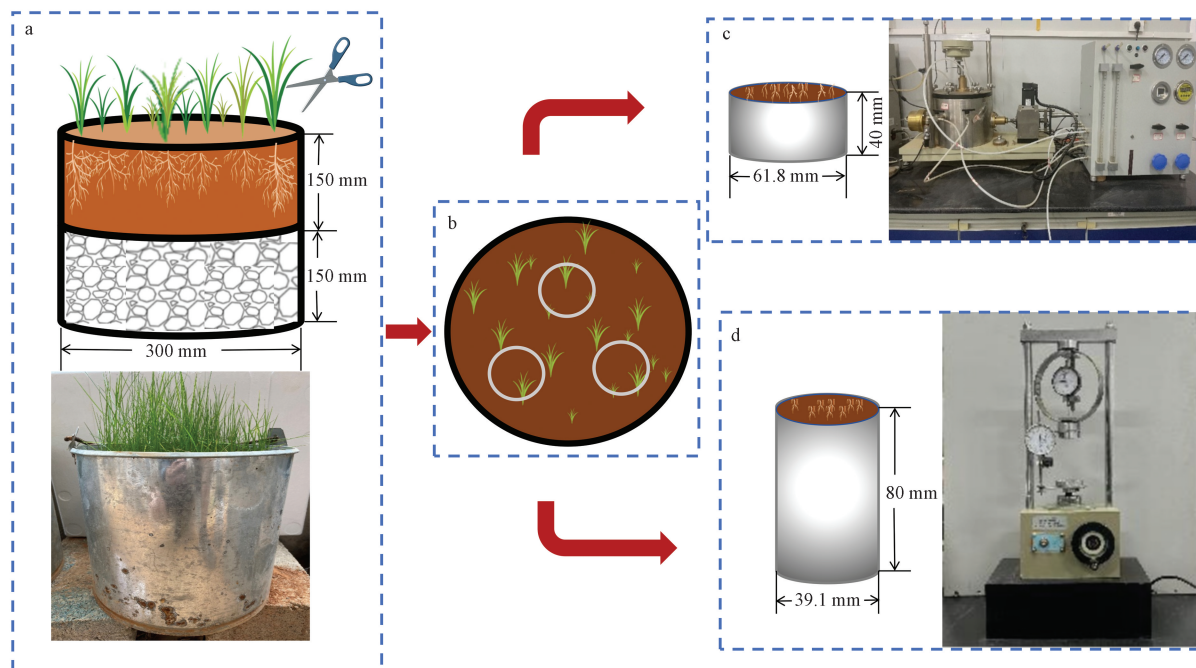
1.2.2 无侧限试验

试验依据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)开展无侧限抗压试验与非饱和土直剪试验^[23],所有试验均设置 3 组平行试验,数据统计采用 SPSS 24 进行单因素方差分析(one-way analysis of variance, ANOVA),通过 Tukey's HSD 检验($\alpha = 0.05$)判定组间差异显著性,最终数据以平均值呈现。采用 YYW-2 型无侧限压力仪(南京土壤仪器厂有限公司),加载速率为 1 mm/min,研究含水率和百慕大草对弱膨胀土无侧限抗压强度的影响,如表 2 所示。无侧限抗压强度试验具体试验步骤如下。

当轴向应变 $\varepsilon_1 < 3\%$ 时,记录每 0.5% 应变的位移读数数和测力计读数;当轴向应变 ε_1 超过 3% 以后,记录每 1% 应变的测力计读数和位移读数。若无出现峰值或读数不稳定时,轴向应变达到 20% 后停止试验。无侧限抗压强度取峰值轴向应力或者轴向应变为 20% 对应的轴向应力。

轴向应力计算公式为

$$\sigma = \frac{C_{\text{测}} R}{A_a} \times 10 \quad (1)$$



a 为盆栽示意图; b 为取样点示意图; c 为环刀样; d 为无侧限土样

图 1 试验流程图

Fig. 1 Experimental flow chart

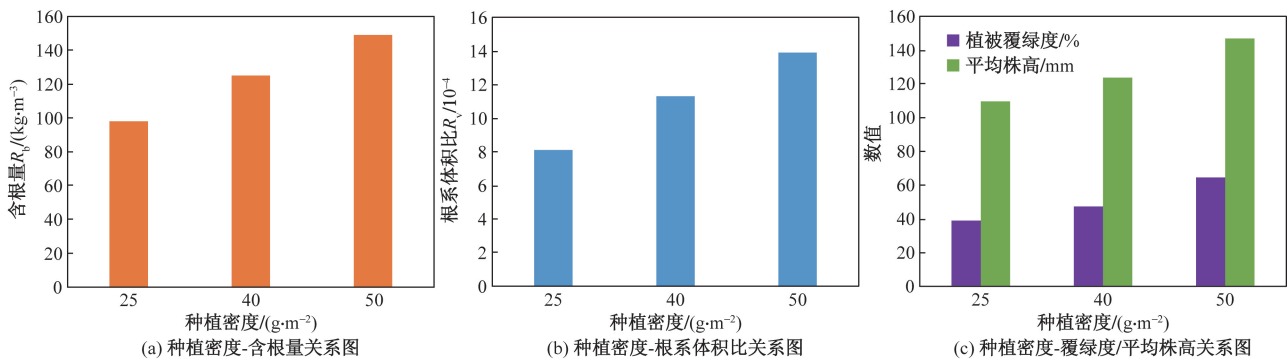


图2 含根土试样植物特征参数

Fig. 2 Plant characteristic parameters of planted soil samples

表2 含根土试样无侧限抗压强度试验方案

Table 2 Unconfined compressive strength test scheme for soil samples containing roots

试验组	种植密度/ $(\text{g}\cdot\text{m}^{-2})$	质量含水率 $w/\%$
裸土组	0	17.5
		22.5
		27.5
		32.5
		37.5
P25 组	25	27.5
		32.5
		37.5
P40 组	40	27.5
		32.5
		37.5
P50 组	50	27.5
		32.5
		37.5

式(1)中: σ 为轴向应力, kPa ; $C_{\text{测}}$ 为测力计率定系数, $\text{N}/0.01\text{ mm}$; R 为测力计读数, 0.01 mm ; A_a 为试样剪切时的面积, cm^2 。

$$A_a = \frac{A_0}{1 - 0.01\varepsilon_1} \tag{2}$$

式(2)中: ε_1 为轴向应变, $\%$; A_0 为试样剪切时的面积, cm^2 , 该试验试样面积为 11.34 cm^2 。

1.2.3 非饱和直剪试验

采用 ZFY-1A 型非饱和土直剪仪(南京土壤仪器厂有限公司),含根土试样采用尺寸为高 40 mm , 内径为 61.8 mm 的环刀配合取土器从盆栽中取得。环刀样垂直盆栽表面,配合取土器压入土层中,用铲子,削土刀切取相应体积的含根土试样。非饱和土直剪的剪切速率为 $0.02\text{ mm}/\text{min}$ [24],控制最大剪切位移为 6 mm ,采用轴平移技术来控制吸力,利用压力差实现目标吸力的稳定控制,研究百慕大草对弱膨胀土抗剪强度的影响。试验包括饱和组和非饱和组,分别控制不同的垂直压力和吸力,如表3所示。非饱和土抗剪强度公式 [25] 如式(3)所示。

表3 非饱和土直剪试验方案

Table 3 Scheme of direct shear test for unsaturated soil

试验组	吸力 s/kPa	垂直压力 p/kPa
饱和组 (裸土组、P25 组、 P40 组和 P50 组)	0	25
	0	50
	0	100
	0	200
	25	50
非饱和组 (裸土组、P25 组、 P40 组和 P50 组)	50	50
	100	50
	200	50
	200	50

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi_b \tag{3}$$

式(3)中: c' 为有效黏聚力; φ' 为有效内摩擦角; u_a 、 u_w 分别为孔隙气压、孔隙水压; $\sigma - u_a$ 为净正应力; φ_b 为土体非饱和抗剪强度随吸力而变化的斜率,也被称为与吸力相关的内摩擦角。

所有试验结束后,采用薄壁活塞取土器(直径 39 mm)压入土中取得圆柱体试样,用清水缓慢清洗土样以获取百慕大草根系,测得不同试验组根密度 [26]。

2 结果与讨论

2.1 不同含水率下百慕大草对弱膨胀土无侧限抗压强度的影响

不同含水率影响下弱膨胀土的轴向应力与轴向应变曲线[图3(a)],可以发现随着含水率的增加,裸土组的无侧限抗压强度先增加后减小。在含水率较低的条件,提高含水量有利于提高土体的无侧限抗压强度。然而,当含水率超过最优含水率(27.5%)时,无侧限抗压强度随着含水率增大而减小。这可能是因为含水率持续提高,土样中过大的孔隙水压力削弱了土颗粒之间的相互作用,降低了无侧限抗压强度。表明含水率过低或过高都会降低弱膨胀土的无侧限抗压强度 [27],峰值无侧限抗压强度出现在最优含水率 27.5% 附近。

不同含水率影响下含根土试样的轴向应力与

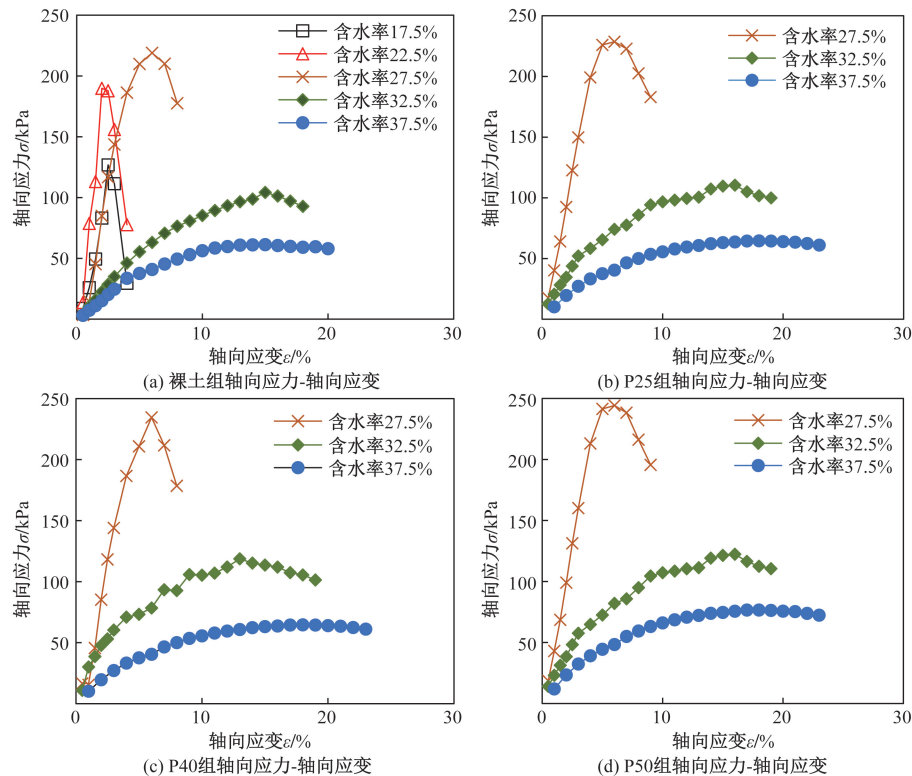


图3 不同含水率影响下含根土试样轴向应力-轴向应变关系曲线

Fig. 3 Relationship curves between axial stress and axial strain of soil samples with roots under different water contents

轴向应变的关系曲线,如图3(b)~图3(d)所示。含根土试样的轴向应力-轴向应变也与裸土类似,随着含水率增加,峰值轴向应力对应的轴向应变也在增加,并且含水率37.5%的试样出现明显的应变强化现象。取曲线上峰值轴向应力作为土样的无侧限抗压强度 q_u ,不同含水率影响下含根土试样无侧限抗压强度与种植密度关系如图4所示。随着含水率的增加,含根土试样无侧限抗压强度不断减小。其中,P25组含水率为37.5%时的无侧限抗压强度相比于含水率为27.5%时的无侧限抗压强度降低了71.7%。膨胀土的强度基础依赖于亲水性黏土矿物(蒙脱石)颗粒间的黏聚力与内摩擦力,当水渗入土颗粒内部,亲水矿物与之反应,降低了颗粒自身的强度。一方面,最优含水率时,土颗粒表面结合水膜厚度适中(以强结合水为主),颗粒间通过范德华力、静电引力形成稳定联结^[28];当含水率过高时,弱结合水比例骤增,水膜厚度超过颗粒间分子引力的作用范围(通常 $>10^{-9}$ m),导致颗粒间的分子作用力急剧减弱,黏聚力大幅下降。另一方面,黏土颗粒表面带负电,其周围双电层(扩散层)随含水率升高而扩张(阳离子浓度降低),颗粒间静电斥力超过引力,促使原本团聚的颗粒分散、分离,进一步瓦解颗粒间的“机械咬合”与“化学联结”,内摩

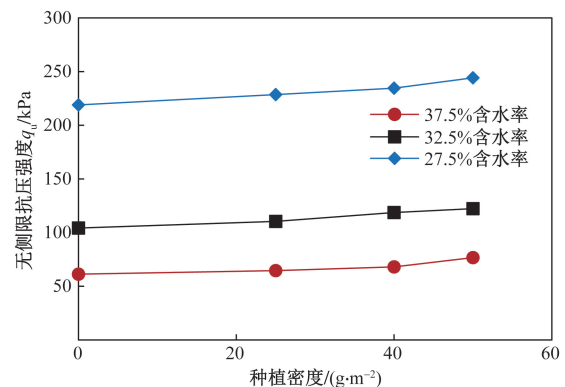


图4 不同含水率影响下无侧限抗压强度与种植密度关系曲线

Fig. 4 Relationship curve between unconfined compressive strength and planting density under different moisture contents

擦力(与内摩擦角 φ 相关)随之弱化,并最终造成峰值压力减小^[29]。

随着种植密度以及含根量增加,百慕大草进一步提高了弱膨胀土的无侧限抗压强度,以最优含水率27.5%为例,P25组、P40组和P50组无侧限抗压强度比裸土组提高了4.4%、7.1%和11.5%。而当含水率为37.5%时,P25组、P40组和P50组无侧限抗压强度比裸土组提高了5.4%、11.0%和25.2%。当含水率增加时,百慕大草根系对土壤无

侧限抗压强度的影响增大。含水率增大,水渗入土颗粒内部,土体强度降低,但根系在膨胀土中形成纤维网络,当土体受轴向压力时,根系通过与土颗粒的摩擦力将部分应力传递至自身,利用根系较高的抗拉强度分担荷载,减少土体内部应力集中。根系通过密集的须根网络将土颗粒锁定,提高土体的有效内摩擦角(φ'),增强了土体强度。

2.2 不同垂直压力下百慕大草对饱和弱膨胀土抗剪强度的影响

裸土和含根土的有效黏聚力和有效内摩擦角如图5所示。研究发现含根土试样的有效黏聚力明显大于裸土组,并且随着种植密度以及含根量的增加而增大。P25组、P40组、P50组较于裸土组有效黏聚力提高了14.7%、42.2%、54.3%。种植密度在25~40 g/m²,种植密度的增加对有效黏聚力的提高幅度更大。然而,含根土与裸土组的有效内摩擦角几乎一致,植物对有效内摩擦角的影响则不显著。这可能是因为百慕大草根系较小,对土体主要起到胶结和团聚的作用^[30],可以提高有效黏聚力,对有效内摩擦角影响较小。并且含根量越大,根系越多,根系网络越发达,有效黏聚力提高幅度越大^[31]。

不同垂直压力影响下(25、50、100、200 kPa)可以发现,在同一垂直压力水平,随着种植密度以及含根量增加,弱膨胀土的抗剪强度得到提高。百慕大草对弱膨胀土抗剪强度的提高效果,随着垂直压力增加而不断减弱。百慕大草对弱膨胀土抗剪强度的提高,除了与百慕大草根系通过自身强度对土体的加固作用有关外,还可能与根系阻止土体在剪切过程中微裂缝的产生有关^[32]。

剪切过程中土体的竖向位移与剪切位移关系曲线如图6所示。随着垂直压力提高,裸土组和含根土组竖向位移都呈现减小的趋势。其中,当垂直

压力从25 kPa增加到50 kPa时,裸土组最大竖向位移只减小了9.0%。在相同垂直压力条件下,含根土试样的竖向位移小于裸土试样,随着种植密度(含根量)增加,竖向位移变小。其中,垂直压力为25 kPa时,P25组最大竖向位移是裸土组的80.1%,而P50组最大竖向位移仅为裸土组的57.9%。高垂直压力条件下,当垂直压力从100 kPa增加到200 kPa时,裸土组最大竖向位移减小了77.9%。在相同垂直压力100 kPa条件下,P25组最大竖向位移仅也裸土组的78.1%,而P40组和P50组最大竖向位移仅为裸土组的73.5%和65.0%。这表明垂直压力和种植密度的增加都可以减小饱和试样在剪切过程中的体积变化,但从变化趋势来看,在低垂直压力条件下,百慕大草的影响更显著。可见,在工程实践中,植物对浅层土体稳定性有积极的作用。而在高垂直压力条件下,百慕大草的影响降低。百慕大草可以限制弱膨胀土在剪切过程中的竖向位移,可能与根系本身的抗拉强度以及根系与土壤颗粒之间产生的摩擦力有关^[33]。含根量越大,根系与土壤颗粒之间的摩擦力就越大,土体结构更为稳定,具有更强的抵抗变形的能力。而垂直压力是通过压密土体,同样使得土体结构变得稳定,减小剪切过程中的竖向位移。

2.3 不同吸力条件下百慕大草对弱膨胀土抗剪强度的影响

不同吸力条件下(0、25、50、100、200 kPa)裸土组和含根土组的剪应力与剪切位移的关系曲线如图7所示。在0~200 kPa吸力范围内,裸土试样和含根土试样都表现出应变强化的特性,也就是剪应力随着剪切位移增加而增加,逐渐趋于稳定。相同剪切位移条件下弱膨胀土的剪应力随着吸力增加而增大。吸力较低时,弱膨胀土含水率和饱和度较高,减小了土颗粒间的摩擦咬合作用^[34],土体抵抗剪切变形的能力下降。所以在低吸力条件下弱膨胀土剪应力较小,并随着吸力增加而增大。

图8为 φ_b 与吸力的关系图,裸土组 φ_b 随着吸力的增大呈先增大后减小的趋势,第一阶段吸力增加,土中的水分减少,原本由水填充的孔隙逐渐被空气占据;第二阶段,吸力增加,土中的水分减少,土体失水收缩,产生大量孔隙,大孔隙因裂隙贯通,孔隙结构遭到破坏,水分分布不均,导致毛细力传递路径断裂,粒径间有效接触下降,进而导致 φ_b 减小^[35]。

在相同吸力情况下,含根土试样的 φ_b 的减小幅度小于裸土试样,并且 φ_b 都大于裸土的值,以吸力75 kPa为例,植物组的 φ_b 约为裸土组的1.5倍。这

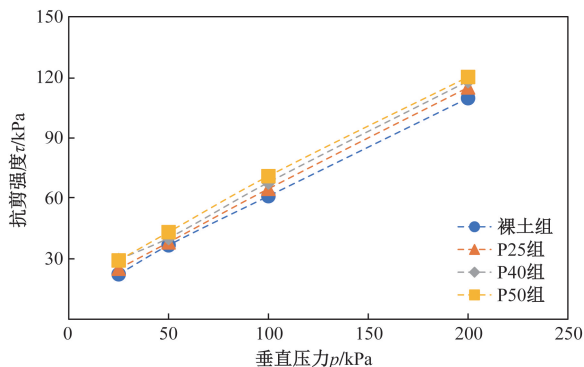


图5 饱和组抗剪强度-垂直压力关系曲线

Fig. 5 Relationship curve of saturated group shear strength-vertical pressure

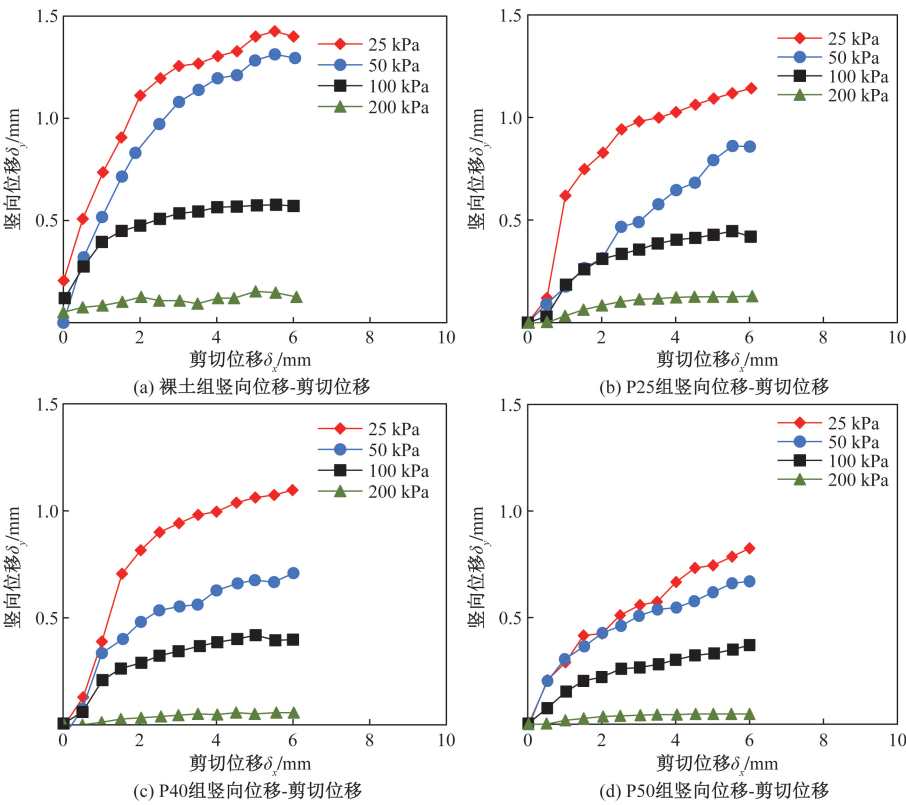


图 6 不同垂直压力影响下饱和试样竖向位移-剪切位移关系曲线

Fig. 6 Relationship curves of vertical displacement and shear displacement of saturated specimens under different vertical pressures

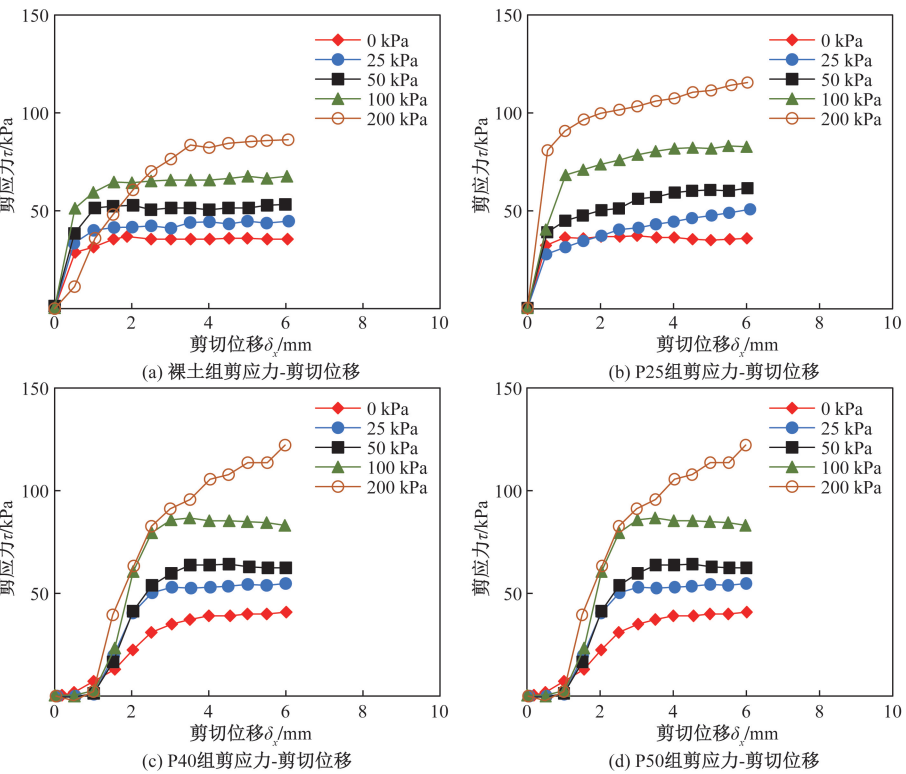
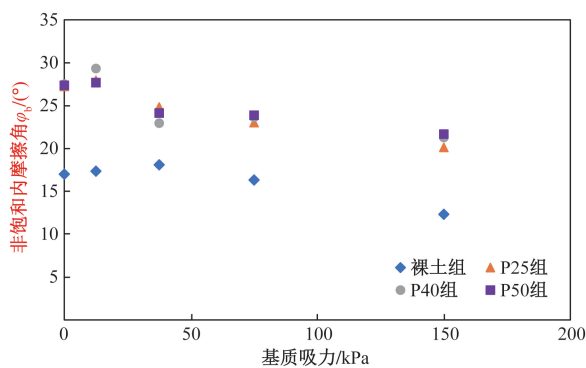


图 7 不同吸力影响下剪应力-剪切位移关系曲线

Fig. 7 Relationship curves of shear stress and shear displacement under different suction

图8 非饱和组 φ_b 与吸力关系图Fig. 8 Relationship between unsaturated shear strength parameter φ_b and suction

可能与百慕大草根系填充了土样中的大孔隙体积,使得土体结构更加稳定有关。此外,P25组、P40组和P50组之间 φ_b 没有显著差异。这一结果暗示了,当根系密度达到一定阈值(1 kg/m^3)后,根系密度这一因素对 φ_b 的影响降低。在吸力和百慕大草两种因素协同作用下,植物组保持了较大的 φ_b ,试样表现出更强的抵抗剪切破坏的能力。非饱和抗剪强度、吸力与含根量关系如图9所示。从图9中可以发现含根土试样和裸土试样的抗剪强度都是随着吸力增加而提高,但增长幅度逐渐降低,裸土组从吸力0 kPa条件变化到100 kPa条件,抗剪强度提高了83.5%,此阶段土体孔隙中填充大量自由水,水膜较厚,颗粒间润滑作用强、有效接触压力低,抗剪强度低^[36]。随着吸力增加,自由水和毛细水快速从大孔隙、中孔隙中排出,土颗粒间的“水膜隔离效应”减弱,颗粒直接接触面积增大,有效应力显著提升。同时,毛细水表面张力形成的“毛细黏结力”快速增强,进一步强化颗粒间联结,共同推动抗剪强度大幅增长。水分排出过程中,土体因孔隙减少而发生明显压密,颗粒排列更紧密,抵抗剪切变形的“骨架支撑能力”快速提升,为抗剪强度的大幅增长提供了结构基础^[37]。而从吸力100 kPa条件变化到200 kPa条件,抗剪强度只提高了27.6%。主要原因是土体含水量降低,即使吸力增加,土体也难以进一步压密(颗粒排列已接近紧密状态),强度增长依赖吸附水膜变化的微弱作用,增幅降低。

在相同吸力条件下,含根土试样抗剪强度大于裸土试样,且随着种植密度以及含根量增加,抗剪强度越大。其中以吸力为100 kPa为例,P25组与裸土组相比,抗剪强度提高了23.0%,P40组与裸土组相比,抗剪强度提高了28.9%,P50组比裸土抗剪强度提高了34.0%。其主要原因是百慕大草根系可

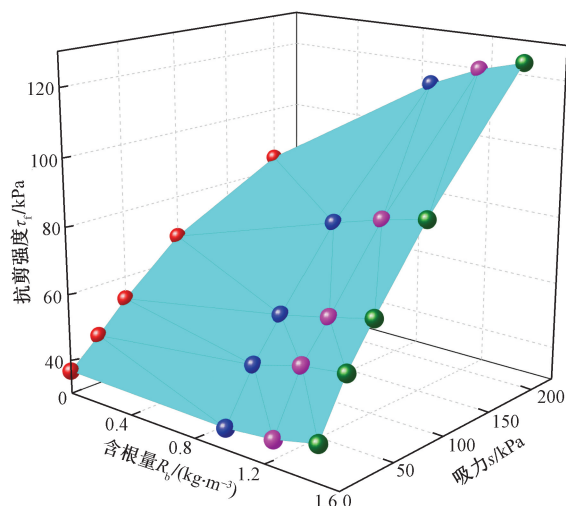


图9 非饱和组抗剪强度-吸力-根系密度关系图

Fig. 9 Relationship diagram of unsaturated group's shear strength-suction-root density

以减小土样中的大孔隙,使土颗粒更紧密地结合在一起,增强土颗粒之间的结合力^[38],提高了非饱和弱膨胀土的抗剪强度。比较吸力以及百慕大草对非饱和弱膨胀土强度的影响程度,可以看出在较低吸力条件下(0 kPa和25 kPa),吸力对弱膨胀土抗剪强度的提高幅度大于百慕大草的提高幅度;而在中吸力条件下(200 kPa),百慕大草对弱膨胀土抗剪强度的提高幅度超过了吸力。吸力从25 kPa提高到50 kPa,弱膨胀土抗剪强度提高了19.1%。与垂直压力从25 kPa提高到50 kPa对弱膨胀土抗剪强度的提高幅度57.6%相比,可以看出垂直压力对弱膨胀土抗剪强度的提高幅度超过吸力。

2.4 不同吸力条件下百慕大草对弱膨胀土体变的影响

不同吸力影响下竖向位移与剪切位移关系,如图10所示,其中,剪缩为正,剪胀为负。所有试验组在较低吸力条件(0 kPa和25 kPa)下出现剪缩现象,即竖向位移在剪切过程中减小。当吸力从0 kPa提高到25 kPa的时候,弱膨胀土剪缩量减小了52.6%,略大于百慕大草对弱膨胀土最大剪缩量的减小幅度。说明吸力对弱膨胀土剪切过程中竖向位移变化的影响超过了百慕大草对竖向位移的影响。吸力从25 kPa提高到100 kPa,裸土组竖向位移减小了95.3%。

提高吸力(200 kPa),土体呈现出剪胀现象,即竖向位移在剪切过程中增大^[39]。但是植物组的剪胀体变显著小于裸土,且种植密度越大,体变越小。其中,P50是裸土的43.9%。

这可能是因为百慕大草根系本身具有一定的抗拉强度,当土体受到剪应力作用时,根系可以削

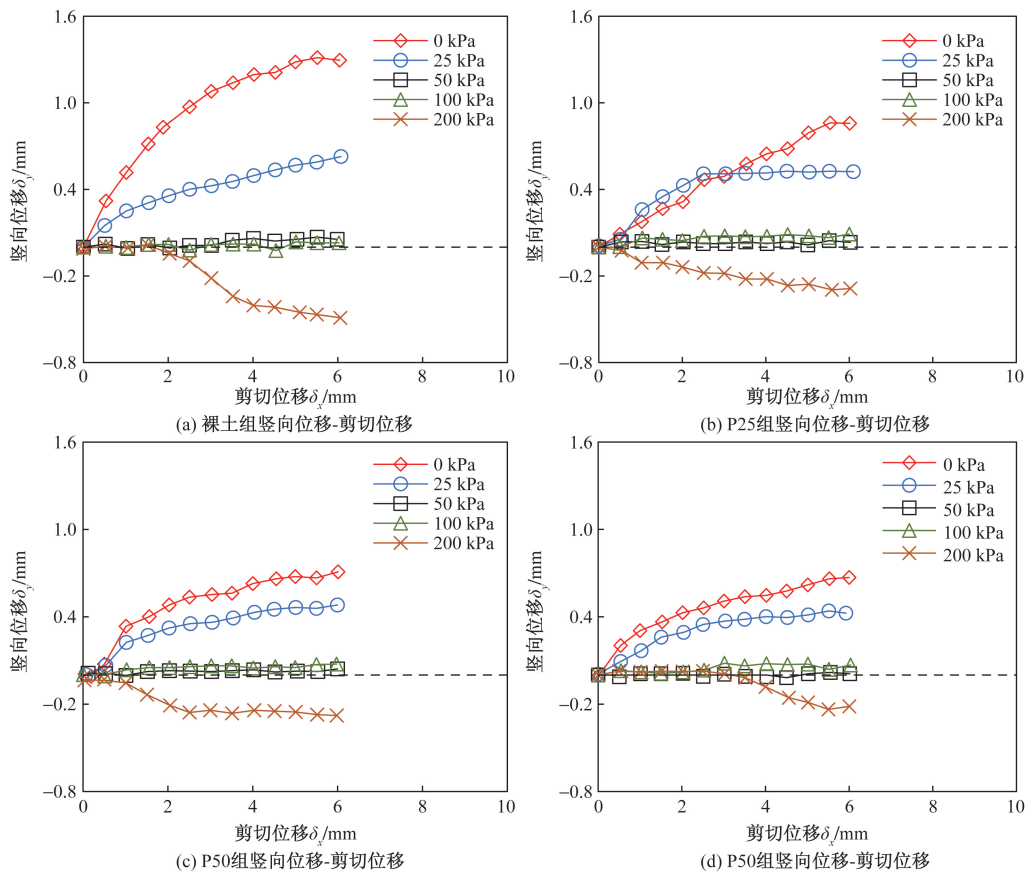


图 10 不同吸力影响下竖向位移-剪切位移关系曲线

Fig. 10 Relationship curves between vertical displacement and shear displacement under different suction

弱部分作用力,减小土体的体积变化;也有可能是因为百慕大草根系减小了土体中的大孔隙,使得含根土试样在剪切过程中可发生的体积变化相较于裸土试样减小了。总体上,百慕大草减少弱膨胀土剪切过程中竖向位移的变化,在工程建设当中有利于提高基础设施的稳定性。

3 结论

通过盆栽试验和一系列室内试验,系统探究了百慕大草根系、含水率、吸力对弱膨胀土强度特性的影响,得出如下结论。

(1)随着含水率增加,弱膨胀土无侧限抗压强度先增加后减小。含根弱膨胀土的无侧限抗压强度亦随着种植密度增加而增强,其中 P25 组、P40 组、P50 组较于裸土提高了 4.4%、7.1%、11.5%。

(2)植物显著提高弱膨胀土的有效黏聚力(c'),其中,P25(含根量 0.98 kg/m^3)组、P40(含根量 1.25 kg/m^3)组、P50(含根量 1.49 kg/m^3)组的有效黏聚力分别是裸土组的 1.15、1.42、1.54 倍。植物亦能够显著提高土体非饱和和内摩擦角(φ_b),随着吸力的提高植物组 φ_b 值趋于稳定,其值约为裸土的 1.5 倍。但是,当根系密度达到一定阈值(1 kg/m^3)

后,根系密度这一因素对 φ_b 的影响降低。

(3)植物降低了剪切过程中弱膨胀土体的体变,且种植密度越大作用越显著。饱和状态条件,P25 组、P40 组、P50 组的体变分别是裸土的 64.7%、54.8%、51.0%。随着吸力增加,土体的剪切变形呈现出由剪缩向剪胀过渡的变化规律。

参考文献

- [1] Shi B, Jiang H T, Liu Z B, et al. Engineering geological characteristics of expansive soils in China[J]. Engineering Geology, 2002, 67(1): 63-71.
- [2] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程地质勘察规范: JTG C20—2011[S], 北京: 人民交通出版社, 2011.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Code for highway engineering geological investigation: JTG C20—2011[S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [3] Puppala A J, Pedarla A. Innovative ground improvement techniques for expansive soils[J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2017, 2(1): 1-15.
- [4] Xiao J, Yang H P, Zhang J H, et al. Properties of drained shear strength of expansive soil considering low stresses and its influencing factors[J]. International Journal of Civil Engineering, 2018, 16(10): 1389-1398.
- [5] Yilmaz I, Marschalko M. The effect of different types of water on

- the swelling behaviour of expansive clays[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2014, 73(4): 1049-1062.
- [6] Zhai Q, Rahardjo H, Satyanaga A, et al. Estimation of unsaturated shear strength from soil-water characteristic curve [J]. Acta Geotechnica, 2019, 14(6): 1977-1990.
- [7] Blatz J A, Graham J, Chandler N A. Influence of suction on the strength and stiffness of compacted sand-bentonite [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(5): 1005-1015.
- [8] 欧阳森, 蓝日彦, 张红日, 等. 考虑界面吸力的根-土界面剪切强度模型及影响因素研究[J]. 中国公路学报, 2025, 38(1): 108-118.
Ouyang Miao, Lan Riyan, Zhang Hongri, et al. Shear-strength model of root-soil interface considering interfacial suction and its influencing factor [J]. China Journal of Highway and Transport, 2025, 38(1): 108-118.
- [9] Ye W M, Zhang Y W, Chen B, et al. Shear strength of an unsaturated weakly expansive soil [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2010, 2(2): 155-161.
- [10] Ouyang M, Zhang H R, Wang G Y, et al. Influence of Xanthan gum on the engineering properties and microstructure of expansive soils[J]. Frontiers in Materials, 2025, 12: 1598601.
- [11] 张军辉, 陈莎莎, 顾凡, 等. 工业废弃料在路基改良中的应用综述[J]. 中国公路学报, 2023, 36(10): 1-16.
Zhang Junhui, Chen Shasha, Gu Fan. Industrial waste materials utilized in subgrade modification: a review [J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(10): 1-16.
- [12] 许英姿, 黄政棋, 颜日葵, 等. 碎石改良膨胀土模型试验研究 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(19): 8145-8151.
Xu Yingzi, Huang Zhengqi, Yan Rikui, et al. Model experimental study on expansive soil improved by gravel [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(19): 8145-8151.
- [13] 张雁, 何钢华, 余朋里. 纤维煤矸石改良膨胀土强度特性及邓肯-张模型参数 [J]. 科学技术与工程, 2022, 22(21): 9260-9267.
Zhang Yan, He Ganghua, Yu Pengli. Strength characteristics and Duncan-Chang model parameters of expansive soil improved by fiber coal gangue [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(21): 9260-9267.
- [14] 胡斌, 王新刚, 连宝琴. 纤维类材料改善膨胀土工程性能的适用性探讨[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(S2): 615-618.
Hu Bin, Wang Xingang, Lian Baoqin. Applicability exploration of improving engineering properties of expansive soil with fiber materials [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S2): 615-618.
- [15] Feng S, Liu H W, Ng C. Analytical analysis of the mechanical and hydrological effects of vegetation on shallow slope stability [J]. Computers and Geotechnics, 2020, 118: 103335.
- [16] Ma Q, Wu N Z, Xiao H L, et al. Effect of Bermuda grass root on mechanical properties of soil under dry-wet cycles [J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(9): 1-15.
- [17] 刘小文, 常立君, 胡小荣. 非饱和红土基质吸力与含水率及密度关系试验研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3302-3306.
Liu Xiaowen, Chang Lijun, Hu Xiaorong. Experimental research of matric suction with water content and dry density of unsaturated laterite [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(11): 3302-3306.
- [18] Cokco E, Tilgen H P. Shear strength-suction relationship of compacted Ankara clay [J]. Applied Clay Science, 2010, 49(4): 400-404.
- [19] 郭利娜, 戴成龙, 赵翊. 不同基质吸力的非饱和粉质粘土剪胀特性试验研究 [J]. 工程勘察, 2022, 50(9): 20-24.
Guo Lina, Dai Chenglong, Zhao Yi. Experimental study on dilatancy of unsaturated silty clay with different matric suction [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2022, 50(9): 20-24.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 膨胀土地区建筑技术规范: GB 50112—2013 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical code for building in expansive soil regions: GB50112—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [21] Leung K A, Garg A, Coo L J, et al. Effects of the roots of *Cynodon dactylon* and *Schefflera heptaphylla* on water infiltration rate and soil hydraulic conductivity [J]. Hydrological Processes, 2015, 29(15): 3342-3354.
- [22] Cheng Q, Gu Y D, Tang C S, et al. Desiccation cracking behaviour of a vegetated soil incorporating planting density [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2024, 61(1): 165-173.
- [23] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Soil test method standard: GB/ T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [24] 程磊. 植物根系加固边坡作用试验研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
Chen Lei. Experimental study on slope reinforcement by plant roots [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [25] Fredlund D G, Morgenstern N R, Widger R A. The shear strength of unsaturated soils [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1978, 15(3): 313-321.
- [26] Ma J Y, Li Z B, Sun B Y, et al. Mechanism and modeling of different plant root effects on soil detachment rate [J]. Catena, 2022, 212: 106109.
- [27] 李永志, 王世明, 邹建文, 等. 膨胀性泥岩抗剪强度与含水率相关性机理 [J]. 科学技术与工程, 2021, 21(7): 2857-2864.
Li Yongzhi, Wang Shiming, Zou Jianwen, et al. Correlation research between shear strength and moisture content of swelling mudstone [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(7): 2857-2864.
- [28] 李佳荣. “PAM-膨润土-电场”耦合作用下的土壤水运动 [D]. 重庆: 西南大学, 2022.
Li Jiashen. Soil water movement under “PAM-bentonite-electric field” coupling effect [D]. Chongqing: Southwest University, 2022.
- [29] 郭月亭, 李志红, 刘爱荣, 等. 表面疏水性促进煤系黏土矿物沉降的机理及试验研究 [J]. 煤炭转化, 2023, 46(3): 100-107.
Guo Yueting, Li Zhihong, Liu Airong, et al. Mechanism and experimental study of surface hydrophobic modification promoting settlement of coal measure clay minerals [J]. Coal Conversion, 2023, 46(3): 100-107.
- [30] 李珍玉, 欧阳森, 肖宏彬, 等. 基于根系构型的调控提高植物

- 边坡根系固土能力[J]. 岩土力学, 2021, 42(12): 3271-3280, 3290.
- Li Zhenyu, Ouyang Miao, Xiao Hongbin, et al. Improvement of slope soil consolidation capacity of plant root system based on regulation of root architecture[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(12): 3271-3280, 3290.
- [31] Zhang S, Xiong D H, Wu H, et al. Effects of the root morphological characteristics of different herbaceous species on soil shear strength and soil anti-scourability in the dry-hot valley region of south-western China[J]. Soil Research, 2020, 58(2): 189-189.
- [32] 刘建平, 周花玉, 何天奎, 等. 含根量对根-土石复合体的抗剪强度影响试验初探——以垂丝海棠为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(S1): 3618-3628.
- Liu Jianping, Zhou Huayu, He Tiankui, et al. Experimental study on the influence of root content on the shear strength of root-soil-rock composite: taking *Malus halliana* Koehne as an example[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(S1): 3618-3628.
- [33] 骆丕昭, 王云琦, 李通, 等. 基于三轴 UU 试验的土体含水率对根土复合体强度特性的影响[J]. 水土保持学报, 2023, 37(6): 153-160.
- Luo Pizhao, Wang Yuqi, Li Tong, et al. Effect of soil moisture content on strength characteristics of root-soil complex based on triaxial UU test[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(6): 153-160.
- [34] 罗晓倩, 孔令伟, 鄢俊彪, 等. 不同饱和度下膨胀土原位孔内剪切试验及强度响应特征[J]. 岩土力学, 2024, 45(1): 153-163.
- Luo Xiaoqian, Kong Lingwei, Yan Junbiao, et al. *In-situ* borehole shear test and shear strength response characteristics of expansive soil under different saturations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(1): 153-163.
- [35] 马俊宏. 宁明地区格构梁防护膨胀土边坡稳定性分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- Ma Junhong. Stability analysis of expansive soil slopes protected by lattice beam in Ningming Area[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.
- [36] Yildiz A. Assessment of plant-induced suction and its effects on the shear strength of rooted soils[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering, 2019, 172(6): 507-519.
- [37] 邵生俊, 陶虎, 许萍. 黄土结构性力学特性研究与应用的探讨[J]. 岩土力学, 2011, 32(S2): 42-50.
- Shao Shengjun, Tao Hu, Xu Ping. Discussion on research of mechanical characteristics of loess considering structural behavior and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 42-50.
- [38] Amiri E, Emami H, Mosaddeghi R M, et al. Shear strength of an unsaturated loam soil as affected by vetiver and polyacrylamide[J]. Soil Tillage Research, 2019, 194: 104331.
- [39] 詹良通, 吴宏伟. 吸力对非饱和膨胀土抗剪强度及剪胀特性的影响[J]. 岩土工程学报, 2007(1): 82-87.
- Zhan Liangtong, Wu Hongwei. Effect of suction on shear strength and dilatancy of an unsaturated expansive clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007(1): 82-87.