

海涂围垦区土壤孔隙特征与强度特性原位试验

姜子煜¹, 王洪德³, 孙泉沁³, 潘永春³, 唐胜强¹, 余冬立^{1,3}

(1.河海大学农业科学与工程学院,南京 211100; 2.河海大学地球科学与工程学院,南京 211100;

3.河海大学水土保持学院,南京 211100)

摘要: [目的] 为探究原位状态下海涂围垦区土壤强度特性与其孔隙特征之间的关系。[方法] 以江苏省沿海滩涂不同围垦区土壤为研究对象,通过现场十字板剪切试验和CT扫描技术分析土壤结构与土壤原位抗剪强度(C_u)和灵敏度(S_t)之间的关系。[结果] 滨海(BH)和如东(RD)处 S_t 为1.3~5.4,属于中敏感(2~4)至敏感(4~8)范围,但其扰动土的 S_t 在不同深度和围垦年限下无明显变化。相比之下,东台(DT)地区扰动土的 S_t 差异显著,其各土层深度的 S_t 值均高于BH和RD,其中DT1处 S_t 最高,BH3处最低。土壤力学性质分析表明,土壤体积质量(CD)、黏粒质量分数与 C_u 呈正相关($r=0.657, 0.782, p<0.05$),而土壤孔隙度与之负相关($r=-0.529, -0.414, p<0.05$)。土壤灵敏度(S_t)与分形维数(FD)和孔隙数量(NOP)呈显著负相关($r=-0.611, p<0.05$)。在回归分析中进一步揭示 C_u 与土壤孔隙度呈负相关且 S_t 与NOP符合对数递减关系。主成分分析中第1主成分(PC1)主要由孔隙数量、分形维数和黏土质量分数主导,PC2以 C_u 和CD为主,PC3则受孔隙度和土体抗剪强度共同驱动,这些指标共同强调土壤孔隙结构和物理性质在抗剪强度评价中的重要性。[结论] 研究结果为深入理解海涂围垦区土壤特性提供科学依据,对滨海地区工程建设稳定性、边坡稳定性、土壤抗侵蚀能力评估和植物生长条件分析等研究提供重要参考,有助于推动沿海地区农业的可持续发展。

关键词: 土壤抗剪强度; 孔隙特征; CT扫描; 主成分分析

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)03-0147-07

In Situ Experimental Study on the Characteristics of Soil Pore and Strength in Coastal Reclamation Areas

JIANG Ziyu¹, WANG Hongde³, SUN Xiaoqin³, PAN Yongchun³, TANG Shengqiang¹, SHE Dongli^{1,3}

(1.College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 2.School of Earth Sciences and

Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 3.College of Soil and Water Conservation,

Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: [Objective] To explore the relationship between the characteristics of soil strength and soil pore in the tidal flat reclamation areas under in-situ conditions. [Methods] Taking the soils in different reclamation areas of the coastal tidal flats in Jiangsu Province as the research object, the relationships among soil structure, in-situ soil shear strength (C_u) and sensitivity (S_t) were analyzed through in-situ vane shear tests and CT scanning technology. [Results] The S_t values in Binhai (BH) and Rudong (RD) were between 1.3 and 5.4, falling within the range from medium sensitivity (2–4) to sensitivity (4–8). However, for the disturbed soil in these two places, the S_t values showed no significant changes under different depths and reclamation years. In contrast, the S_t values of the disturbed soil in Dongtai (DT) varied significantly. The S_t values in each soil layer were higher than those at BH and RD. Among them, the S_t value at DT1 was the highest, and the S_t value at BH3 was the

收稿日期: 2024-10-19

修回日期: 2024-12-22

录用日期: 2025-01-01

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-03-03

资助项目: 国家自然科学基金项目(42307398)

第一作者: 姜子煜(2000—),男,硕士研究生,主要从事农业水土工程研究。E-mail: jiangziyu@hhu.edu.cn

通信作者: 王洪德(1993—),男,博士,助理研究员,主要从事农业水土过程与侵蚀控制研究。E-mail: whd1993@hhu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

lowest. The analysis of soil mechanical properties indicates that there was a positive correlation between soil bulk density, clay particle content and C_u ($r=0.657$ and 0.782 , $p<0.05$), while there was a negative correlation between soil porosity and C_u ($r=-0.529$ and -0.414 , $p<0.05$). In addition, there was a significant negative correlation between soil sensitivity (S_f) and fractal dimension (FD), pore number (NOP) ($r=-0.611$, $p<0.05$). In the regression analysis, it is further revealed that there was a negative correlation between C_u and soil porosity, and St and NOP followed a logarithmic decreasing relationship. In the principal component analysis, the first principal component (PC1) was mainly dominated by the pore number, fractal dimension and clay content. PC2 was mainly composed of C_u and bulk density, and PC3 was jointly driven by soil porosity and soil shear strength. These indicators jointly highlight the importance of soil pore structure and physical properties in the evaluation of shear strength. [Conclusion] This study provides a scientific basis for an in-depth understanding of soil characteristics in coastal reclamation areas and offers important references for research on the stability of engineering construction, slope stability, evaluation of soil erosion resistance, and analysis of plant growth conditions in coastal areas, which is helpful to promote sustainable development of agriculture in coastal areas.

Keywords: soil shear strength; pore characteristics; CT scanning; principal component analysis

Received: 2024-10-19

Revised: 2024-12-22

Accepted: 2025-01-01

Online(www.cnki.net): 2025-03-03

受自然因素与人类活动等多重因素影响,海涂围垦区土壤工程性质在空间上呈较大差异。土壤抗剪强度参数作为工程中常用的重要指标^[1],与工程建设稳定性、边坡稳定性分析和土壤抗侵蚀能力紧密相关。土壤粒度分布^[2]、表面积^[3]、体积质量、含水量、基质吸力^[4]、植物根系^[5]及有机质含量^[6]等因素对土壤抗剪强度具有显著影响。已有研究^[7-10]利用土壤液塑限试验、标准贯入试验和十字板剪切试验进一步探索耕作或机械压实对土壤抗剪强度的影响。尽管前人在相关领域已取得诸多成果,现有关于土壤力学性质及其影响因素的研究多集中于黄土高原、喀斯特地区、西北地区等水蚀风蚀严重区域^[11],已有研究为理解特殊区域土壤力学行为提供重要参考,但对海涂围垦区的研究尚未完善。

江苏省海涂围垦区土壤在物理、化学、生物及人类活动的共同作用下,其基本性质发生较大变化,导致土壤抗剪强度发生变化^[12]。然而,现有研究主要聚焦在水力特征、盐分特征及生态环境问题上^[13],忽视土壤结构性质与土壤力学性质之间的关系,以及环境因素对土壤物理-力学性质的影响及其变化规律。本文采用现场十字剪切板试验与CT扫描技术相结合的方式深入探究土壤结构与十字板抗剪强度和土体灵敏度^[14]之间的关系,分析原位抗剪强度和灵敏度的影响因素,目的在于深入探究原位状态下海涂围垦区土壤强度特性与其孔隙特征之间的关系,为滨海地区工程建设稳定性评估、边坡稳定性设计、提升土壤抗侵蚀能力及优化植物生长条件等提供科学依据,助力沿海地区农业的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

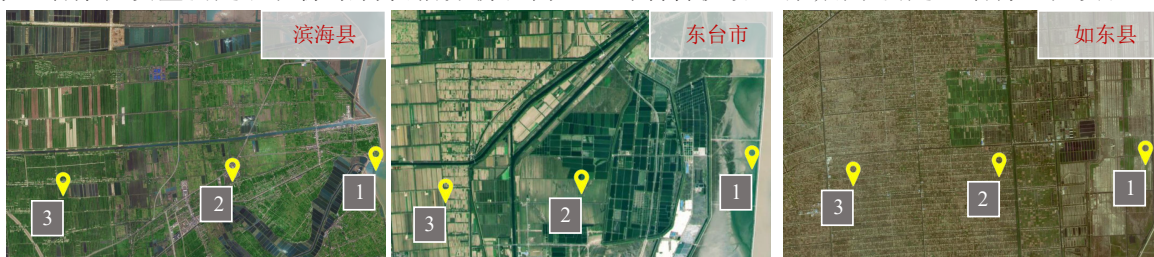
研究区位于江苏省东部沿海的南北狭长地带,地势平坦,主要由近代海相沉积物堆积而成,成陆时间较短,属于典型的淤泥质海涂滩地。试验在江苏省3个沿海围垦地区进行,包括滨海县试验区(BH)($34^{\circ}14'51''\sim 34^{\circ}15'13''N$, $120^{\circ}09'53''\sim 120^{\circ}16'36''E$),东台市试验区(DT)($32^{\circ}47'50''\sim 32^{\circ}48'38''N$, $120^{\circ}47'58''\sim 120^{\circ}57'36''E$),如东县试验区(RD)($32^{\circ}18'12''\sim 32^{\circ}19'59''N$, $121^{\circ}17'56''\sim 121^{\circ}25'52''E$)。在每个围垦地区,沿垂直于新海堤向陆面延伸方向,根据围垦年限选取3个监测点(图1)。

1.2 试验设计

在每个监测点采用十字板剪切仪在3个深度(0~20、20~40、40~60 cm)原位测量原状土抗剪强度、重塑土抗剪强度和灵敏度。同时,在每个取样点的各个深度使用直径5 cm、高度5 cm的PVC管采集原状土样进行CT扫描试验,并通过扫描图像计算土壤孔隙结构参数。

在每个研究区3个不同土层深度(0~20、20~40、40~60 cm)和3个距离海岸线约1、6、11 km的地点,作为土壤取样和原位抗剪强度试验点。在每个采样点,分别用PVC柱和切割环采集2个未扰动的土壤样品,体积均为 100 cm^3 (直径5 cm、高5 cm)。在同一采样点内混合 $5\times 100\text{ g}$ 土,采集相对均匀的扰动土样。将采集到的未受扰动和受扰动的土壤样品密封在塑料膜内,以避免土壤扰动并保持其初始水分状态。采用切割环和PVC管采集原状土样,分

别进行土壤体积质量测定和孔隙结构扫描分析。同时制备扰动土样,用于测定土壤物理性质。



注:图中各地区1、2、3分别表示3个时期的围垦区,1为2000年之后,2为1960—2000年,3为1940—1960年。

图1 原位土壤抗剪强度监测点

Fig.1 In-situ monitoring points of soil shear strength

将采集的扰动土壤样品风干后,用2 mm滤网进行筛分。用激光粒度分析仪(BetterSize Instruments)测量土壤粒径分布。采用六偏磷酸钠分散土壤样品,用过氧化氢去除有机质,用HCl去除CaCO₃,测定黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.02 mm)和砂粒(0.02~2 mm)质量分数。

1.3 抗剪强度计算

十字板剪切通过插入某一深度的十字板头,施加扭转力矩将土体剪切破坏,测得的土体抵抗产生的最大力矩,通过换算可以得到土体的现场抗剪强度^[15]。十字板头在旋转过程中产生圆柱状剪损面,假设剪损面侧面和上下面土体抗剪强度相等。在剪切过程中,原状土体所产生的最大抵抗力矩(M_u)为圆柱体侧表面的抵抗力矩和上下面的抵抗力矩之和:

$$M_u = \left(\pi D H \frac{D}{2} + \frac{\pi}{6} D^3 \right) C_u \quad (1)$$

可得原位土抗剪强度(C_u):

$$C_u = \frac{2}{\pi D^2 \left(H + \frac{D}{3} \right)} M_u \quad (2)$$

同理,可得重塑土抗剪强度(C_d):

$$C_d = \frac{2}{\pi D^2 \left(H + \frac{D}{3} \right)} M_d \quad (3)$$

土的灵敏度为原位土抗剪强度和重塑土抗剪强度比值:

$$S_i = \frac{C_u}{C_d} \quad (4)$$

式中: D 为十字板头直径,m; H 为十字板头高度m; M_u 和 M_d 分别为剪切原状土和重塑土产生的最大抵抗力矩,N/m²; C_u 和 C_d 分别为原位土和重塑土抗剪强度,kPa; S_i 为土的灵敏度,表示土壤从原状到遭受破坏后的抗剪强度降低程度。

1.4 数据处理与分析

所有数据使用Excel 2021软件进行记录与计算,

探究原状土非饱和和抗剪强度参数与土壤基本理化性质的关系。使用Origin 2024软件计算,并对数据集进行分组。文中图表采用Excel 2021和Origin 2024软件进行绘制。

图2为CT扫描土壤结构示意图。土壤中大孔隙存在较多,小孔隙较少,土壤团聚结构较少。通过CT扫描结果可以求得分形维数(FD)、孔隙率(Porosity)和孔隙数量(NOP)等土壤孔隙结构参数。

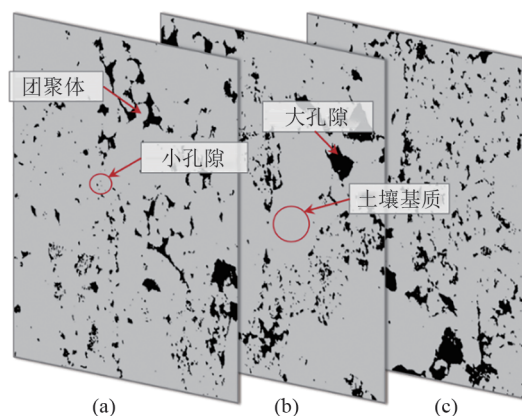


图2 东台地区土样CT扫描结果

Fig. 2 CT scanning results of soil samples in Dongtai

2 结果与分析

2.1 围垦年限对原位土壤抗剪强度影响

由表1可知,对于同一围垦区,不同土层深度的 C_u 差异较为显著,且随土层深度逐渐增加。当土层深度相同时,RD处的 C_u 变化较BH和DT处更为显著。在BH、DT和RD处 C_u 的最小值分别为15.52、21.73、19.66 kPa,最大值分别为56.91、60.02、49.15 kPa。与表层相比,BH处 C_u 随土层深度增加约53%(20~40 cm)和68%(40~60 cm),DT处 C_u 随土层深度增加约23%(20~40 cm)和43%(40~60 cm),RD处 C_u 随土层深度增加约30%(20~40 cm)和69%(40~60 cm)。其中,DT处第1条样带的 C_u 最高,而BH处第1条样带的 C_u 最低。

不同位置和土层深度下,BH处的 C_d 最高,0~20 cm为33.11 kPa,20~40 cm为34.15 kPa,40~60 cm为

37.25 kPa。在 DT 和 RD 处,不同采样点和深度的 C_d 差异不显著。DT 处 C_d 为 4.66~12.42 kPa, RD 处的 C_d 为 3.62~19.66 kPa,均低于 BH 处。除 DT1 外, 试验区 C_d 均随土层深度的增加呈缓慢增加趋势。在相同条件下, C_d 显著低于 C_u 值。

为量化 C_u 与 C_d 的差异,引入 S_i 来比较二者的差异。 S_i 受土壤位置的影响显著,而不受土层深度的影

响。 S_i 在 BH 和 RD 处变化不大,而在 DT 处变化较大, BH 和 RD 处 S_i 为 1.3~5.4,属于中敏感(2~4)至敏感(4~8)范围。不同土层深度的土壤在 DT 处 S_i 均高于 BH 处和 RD 处。BH3 处土壤的 S_i 最低,而 DT1 处土壤的 S_i 最高。 S_i 的变化反映土壤结构从未受扰动到受扰动的抗剪强度损失,可能与土壤孔隙结构和质地密切相关。

表 1 不同取样点和土层深度土壤抗剪强度及灵敏度

Table 1 Soil shear strength and sensitivity at different sampling points and depths

指标	土层深度/cm	BH1	BH2	BH3	DT1	DT2	DT3	RD1	RD2	RD3
原位土抗剪强度(C_u)/kPa	0~20	15.52	16.56	46.56	48.63	33.11	21.73	28.46	34.66	19.66
	20~40	26.90	40.87	52.77	55.36	42.43	30.01	39.84	42.43	25.35
	40~60	32.08	42.94	56.91	60.02	43.46	43.98	46.05	49.15	44.49
扰动土抗剪强度(C_d)/kPa	0~20	5.17	12.42	33.11	7.76	4.66	10.35	6.21	11.38	3.62
	20~40	8.80	11.90	34.15	8.80	6.21	11.38	9.31	14.49	12.93
	40~60	12.42	11.38	37.25	4.66	7.76	12.42	14.49	19.66	19.66
土壤灵敏度(S_i)	0~20	3.00	1.33	1.41	6.27	7.11	2.10	4.58	3.05	5.43
	20~40	3.06	3.43	1.55	6.29	6.83	2.64	4.28	2.93	1.96
	40~60	2.58	3.77	1.53	12.89	5.60	3.54	3.18	2.50	2.26

2.2 土壤原位抗剪强度影响因素

通过 Pearson 相关分析,评价原位土抗剪强度 (C_u) 与其他土体性质,特别是与土体孔隙结构性质的潜在关系。由图 3 可知, C_u 与孔隙率、分形维数 (FD)、体积质量 (BD)、 C_d 高度相关 ($p<0.05$)。 C_u 与 BD 呈显著正相关 ($p<0.05$), 相关系数为 0.657。而 C_u 与土壤孔隙度和分形维数呈显著负相关, 相关系数分别为 $-0.529(p<0.05)$ 和 $-0.414(p<0.05)$ 。 C_d 与 NOP、黏土质量分数、 C_u 和 S_i 显著相关。土壤黏粒质量分数与 C_d 相关系数最高 ($r=0.782$), 而 NOP 的相关系数较低 ($r=0.452$)。土壤孔隙度、BD、粉粒质

量分数与 C_d 无显著相关性。NOP、BD 和 C_d 与 S_i 呈显著相关 ($p<0.05$)。分形维数可以表征土壤孔隙结构特征, 且与 S_i 具有较高的相关性 ($r=-0.611$)。该关系表明, 土壤敏感性与土壤孔隙系统的复杂性高度相关。

考虑到土体抗剪强度与孔隙结构性质之间的高度相关性。通过回归分析揭示 C_u 随孔隙结构性质的变化趋势。由图 4 可知, C_u 与土壤孔隙度呈负相关, S_i 与 NOP 表现为负趋势的对数关系。孔隙数和分形维数越小, S_i 越高。说明结构性较高的土体在受到扰动后强度损失较大, 从而影响工程施工。

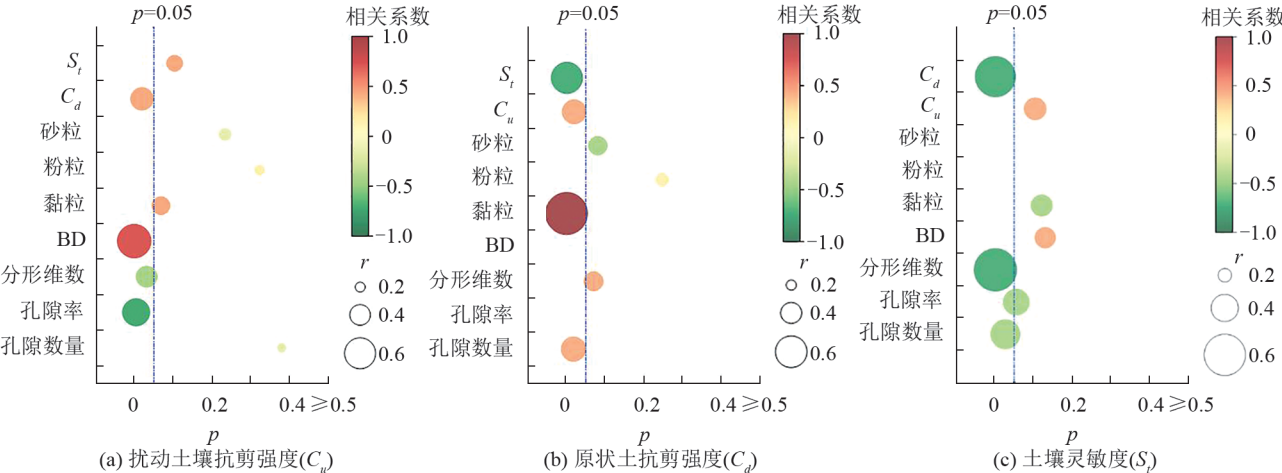


图 3 土壤原位抗剪强度与灵敏度相关性分析

Fig.3 Correlation analysis of in-situ soil shear strength and sensitivity

2.3 土壤原位抗剪强度主成分分析

由图 5 可知,主成分分析发现,特征值>1的主成分共有 3 个,累计贡献率为 81.27%。其中,第 1 主成

分(PC1)的方差贡献率为 39.36%,其次是 PC2 和 PC3,分别为 28.52% 和 13.4%。不同主成分下土壤变量的载荷存在差异。对于 PC1,土壤孔隙数量

(NOP)、分形维数(FD)和黏土的正载荷高于其他变量,反映土壤的内在结构性性质。同时,含沙量和 S_i 在PC1上表现出较高的负荷。PC2对 C_u 的载荷最大,其次为BD,说明PC2可以代表原状土的基本物

理性质和结构。孔隙度和土体抗剪强度对PC3的贡献最大。主成分分析将土壤变量分为3个主要变量,不同土壤性质对各主成分的贡献存在显著差异。

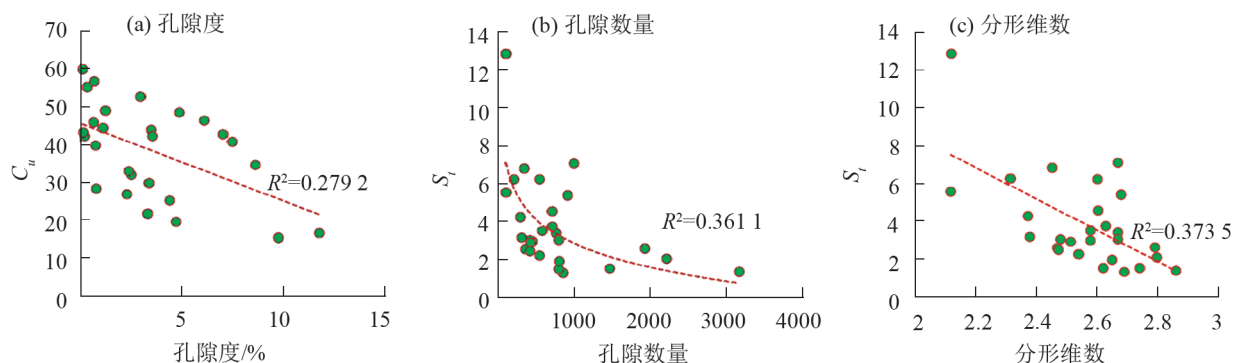
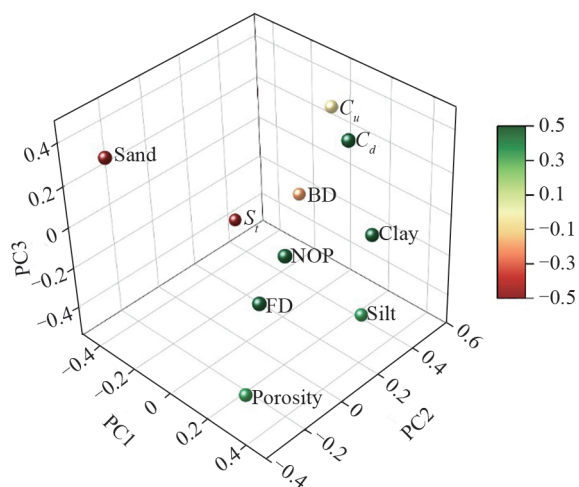


图4 土壤孔隙结构与原位抗剪强度和灵敏度回归分析

Fig.4 Regression analysis of soil pore structure, in-situ shear strength and sensitivity



注:Sand为砂砾;Clay为黏粒; C_u 为原状土抗剪强度; C_d 为扰动土抗剪强度;BD为体积质量;NOP为孔隙数量;FD为分形维数; S_i 为土壤灵敏度;Porosity为孔隙率。

图5 土壤物理性质、孔隙结构和抗剪强度的主成分分析

Fig.5 Principal component analysis of soil physical properties, pore structure, and shear strength

3 讨论

沿海地区的土壤在沉积过程中受到范德华力、库仑力、毛细力和胶结力的共同作用^[16]。当土壤细颗粒在海水中沉积时,海水中的大量阳离子吸附在颗粒表面,平衡黏土颗粒的负电荷,使得颗粒之间的距离减小,范德华引力增强^[17]。此过程促使土壤颗粒以角-面、边-面或边-边连接的方式形成土壤的蜂窝状结构,由于蜂窝状结构本身性质较为均匀,各向同性较好,土壤能够较好地承受静态荷载。然而,当土壤遭受动态荷载时,其结构容易发生坍塌,产生较大的变形。

通过对沿海地区土壤的实际观察、扫描及灵敏

度的试验,证实沿海地区土壤具有一定的蜂窝状结构,且其高灵敏度与土壤结构性性质密切相关。土壤的体积质量、黏粒质量分数和孔隙度等因素与抗剪强度密切相关。土壤体积质量与抗剪强度呈正相关,因为体积质量较大时,土壤颗粒之间的接触更加紧密,摩擦力增大,从而提高抗剪强度。黏粒质量分数与抗剪强度同样呈正相关,黏粒具有较大的比表面积和表面能,能够增加颗粒之间的黏结力,进而提高抗剪强度。试验点处连通孔隙多集中为非毛细孔隙^[18],且非毛细孔隙度与抗剪强度呈负相关,非毛细孔隙度越大,土壤颗粒之间的接触面积减小,黏结力减弱,导致抗剪强度降低^[19]。土壤灵敏度与分形维数、孔隙数均呈极显著负相关。分形维数反映土壤孔隙结构的复杂程度,分形维数越小,孔隙结构越简单,土壤灵敏度越高。孔隙数较少时,土壤结构的稳定性较差,在受到扰动后容易发生破坏,导致强度损失较大。表明土壤结构的复杂性对土壤的力学性质有显著影响,结构性较强的土体在受到扰动后强度损失更为显著。

综上所述,沿海地区土壤的蜂窝状结构及其相关的物理性质和孔隙特征,共同决定土壤的抗剪强度和灵敏度。对于理解沿海地区土壤的力学性质及在工程建设、水土流失治理等方面的应用具有重要意义。未来的研究可以进一步探讨如何通过改善土壤结构(如增加黏粒质量分数、优化非毛细孔隙分布等)来提高土壤的抗剪强度^[20]。同时,在工程设计中应充分考虑土壤的这些特性,采取相应的措施来确保工程的稳定性和安全性^[21]。例如,在沿海地区的建筑工程中,可以根据土壤的抗剪强度和灵敏度合

理设计地基和边坡,以防止土体坍塌和变形^[22]。在水土流失治理方面,可以通过改良土壤结构来增强土壤的抗侵蚀能力,保护生态环境^[23]。

4 结 论

1) 围垦区表层原位土抗剪强度显著低于深层土,而扰动土抗剪强度随深度的增加而增加,这种现象在如东地区尤为明显。不同深度和围垦年限的扰动土灵敏度在滨海和如东地区变化不大,但在东台地区差异较大。根据灵敏度划分,各围垦区土壤可划分为敏感土。

2) 土壤体积质量与原位土抗剪强度、黏粒质量分数呈较强正相关,土壤非毛管孔隙度与原位土抗剪强度呈负相关。土壤灵敏度与分形维数呈极显著负相关,与孔隙数也呈极显著负相关。

3) 主成分分析结果显示,PC1中土壤孔隙数量、分形维数和黏土质量分数贡献最大,PC2中原位土抗剪强度和容重为主要贡献因素,PC3中主要贡献为孔隙度和土体抗剪强度。这些指标突出土壤孔隙结构和物理性质在抗剪强度评价中的重要性。

参考文献:

- [1] HAVAEE S, MOSADDEGHI M R, AYOUBI S. In situ surface shear strength as affected by soil characteristics and land use in calcareous soils of central Iran[J]. *Geoderma*, 2015, 237: 137-148.
- [2] RAHARDJO H, INDRAWAN I G B, LEONG E C, et al. Effects of coarse-grained material on hydraulic properties and shear strength of top soil[J]. *Engineering Geology*, 2008, 101(3/4): 165-173.
- [3] HORN R, FLEIGE H. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2003, 73(1/2): 89-99.
- [4] ZHANG B, ZHAO Q G, HORN R, et al. Shear strength of surface soil as affected by soil bulk density and soil water content[J]. *Soil and Tillage Research*, 2001, 59(3/4): 97-106.
- [5] FATTET M, FU Y, GHESTEM M, et al. Effects of vegetation type on soil resistance to erosion: Relationship between aggregate stability and shear strength[J]. *Catena*, 2011, 87(1): 60-69.
- [6] HEMMAT A, AGHILINATEGH N, SADEGHI M. Shear strength of repacked remoulded samples of a calcareous soil as affected by long-term incorporation of three organic manures in central Iran [J]. *Biosystems Engineering*, 2010, 107(3): 251-261.
- [7] 花可可,魏朝富,任镇江. 土壤液限和抗剪强度特征值及其影响因素研究: 基于紫色土区[J]. *农机化研究*, 2011, 33(6): 105-110.
- [8] 胡增辉,李家奇,李晓昭,等. 利用标准贯入试验确定黏性土的不排水抗剪强度[J]. *地下空间与工程学报*, 2011, 7(增刊2): 1577-1582.
- [9] HU Z H, LI J Q, LI X Z, et al. Determination of undrained shear strength of clayey soils by SPT value[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2011, 7(S2): 1577-1582.
- [10] 马金莲,钟秀梅,王谦,等. 考虑孔隙特性的压实黄土抗剪强度试验研究[J]. *地震工程学报*, 2022, 44(6): 1375-1383.
- [11] MA J L, ZHONG X M, WANG Q, et al. Experimental study on the shear strength of compacted loess considering pore characteristics [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 2022, 44(6): 1375-1383.
- [12] 张力峰,韩文永,郝佳福,等. 基于十字板剪切试验的软基处理研究[J]. *土工基础*, 2023, 37(5): 821-824.
- [13] ZHANG L F, HAN W Y, HAO J F, et al. Evaluation of ground improvement using vane shear test [J]. *Soil Engineering and Foundation*, 2023, 37(5): 821-824.
- [14] ZHANG C L, WANG X S, ZOU X Y, et al. Estimation of surface shear strength of undisturbed soils in the eastern part of northern China's wind erosion area [J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 178: 1-10.
- [15] SHE D L, LIU D D, MENG J J, et al. Hydrological responses on saline-sodic soil slopes in a coastal reclamation area of China[J]. *Catena*, 2016, 144: 130-140.
- [16] 郑一鹏,余冬立,王洪德. 钠盐含量变化对海涂粉砂土工程边坡土力学性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(2): 93-97.
- [17] ZHENG Y P, SHE D L, WANG H D. Effects of sodium salt content on soil mechanical properties of silty sand on engineering soil slope in coastal reclamation area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(2): 93-97.
- [18] 柴亚昕,胡彦婷,张富,等. 基于RUSLE的祖厉河上游会师流域土壤侵蚀及敏感性分析[J]. *草原与草坪*, 2022, 42(6): 128-135.
- [19] CHAI Y X, HU Y T, ZHANG F, et al. Soil erosion and sensitivity analysis in Huishi watershed of Zuli River upper reaches based on RUSLE[J]. *Grassland and Turf*, 2022, 42(6): 128-135.
- [20] MILLER E, HALL E, WALKER L, et al. Vane shear and cone penetration resistance testing of in-situ soils[Z]. *ASTM Selected Technical Papers*, 1966.
- [21] KYOKAWA H. A double structure model for hydro-mechano-chemical behavior of expansive soils based on

- the surface phenomena of mineral crystals [J]. *Engineering Geology*, 2021, 294: e106366.
- [17] 侯涛, 徐仁扣. 胶体颗粒表面双电层之间的相互作用研究进展[J]. *土壤*, 2008, 40(3): 377-381.
- HOU Y, XU R K. Progresses on interactions between electric double layers on colloid surface[J]. *Soils*, 2008, 40(3): 377-381.
- [18] 余冬立, 韩笑, 孙泉沁, 等. 基于CT扫描的滨海土壤孔隙空间网络表征与渗流模拟[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(5): 308-315.
- SHE D L, HAN X, SUN X Q, et al. Coastal soil pore space network characterization and seepage simulation based on CT scanning [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(5): 308-315.
- [19] LI S, LI H, XU C Y, et al. Particle interaction forces induce soil particle transport during rainfall[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, 77(5): 1563-1571.
- [20] OZA H P, OZA H P. *Soil mechanics and foundation engineering*[M]. Anand: Charotar Book Stall, 1969.
- (上接第146页)
- [33] 刘晓笛. 基于SWAT模型的和田河上游气候和土地利用变化的水文效应模拟[D]. 山东 曲阜: 曲阜师范大学, 2019.
- LIU X D. Hydrological effect simulation of climate and land use change in the upper reaches of Hotan River based on SWAT model[D]. Qufu Shandong: Shangdong Qufu Normal University, 2019.
- [34] 刘桀. 黄土高原植被恢复对土壤水分的影响研究[D]. 石家庄: 河北地质大学, 2022.
- LIU C. Effects of vegetation restoration on soil moisture in Loess Plateau [D]. Shijiazhuang: Hebei GEO University, 2022.
- [35] 张宝庆, 邵蕊, 赵西宁, 等. 大规模植被恢复对黄土高原生态水文过程的影响[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2020, 28(3): 594-606.
- ZHANG B Q, SHAO R, ZHAO X N, et al. Effects of large-scale vegetation restoration on eco-hydrological processes over the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2020, 28(3): 594-606.
- [36] 姚雪玲, 傅伯杰, 吕一河. 黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因子[J]. *生态学报*, 2012, 32(16): 4961-4968.
- YAO X L, FU B J, LÜ Y H. Spatial patterns of soil moisture at transect scale in the Loess Plateau of China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(16): 4961-4968.
- [37] 陈娟, 宋乃平, 陈林, 等. 荒漠草原不同覆被类型土壤水分动态及其对降水的响应[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(6): 198-206.
- CHEN J, SONG N P, CHEN L, et al. Soil moisture dynamics and its response to precipitation in different cover types of desert steppe[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(6): 198-206.
- [21] 雷洁, 张国明, 刘连友, 等. 土壤抗剪强度测定与影响因素研究进展[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 52(4): 486-492.
- LEI J, ZHANG G M, LIU L Y, et al. Measuring soil shear strength and impact factors [J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2016, 52(4): 486-492.
- [22] 刘子振, 言志信, 凌松耀, 等. 非饱和土边坡抗剪强度的力学参数影响及灵敏度分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2012, 43(11): 4508-4513.
- LIU Z Z, YAN Z X, LING S Y, et al. Sensitivity analysis and influence of mechanical parameters on shear strength of unsaturated soil slope [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2012, 43(11): 4508-4513.
- [23] 刘定辉, 李勇. 植物根系提高土壤抗侵蚀性机理研究[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(3): 34-37.
- LIU D H, LI Y. Mechanism of plant roots improving resistance of soil to concentrated flow erosion [J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2003, 17(3): 34-37.
- [38] CAI J J, ZHOU B T, CHEN S Y, et al. Spatial and temporal variability of soil moisture and its driving factors in the northern agricultural regions of China [J]. *Water*, 2024, 16(4): e556.
- [39] 张霞, 李明星, 马柱国. 近30年全球干旱半干旱区的蒸散变化特征[J]. *大气科学*, 2018, 42(2): 251-267.
- ZHANG X, LI M X, MA Z G. Evapotranspiration variability over global arid and semi-arid regions from 1982 to 2011 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2018, 42(2): 251-267.
- [40] CRAVE A, GASCUEL-ODOUX C. The influence of topography on time and space distribution of soil surface water content [J]. *Hydrological Processes*, 1997, 11(2): 203-210.
- [41] WANKMÜLLER F P, DELVAL L, LEHMANN P, et al. Global influence of soil texture on ecosystem water limitation [J]. *Nature*, 2024, 635(8039): 631-638.
- [42] ZHOU W X, LI C J, WANG S, et al. Effects of vegetation restoration on soil properties and vegetation attributes in the arid and semi-arid regions of China [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 343: e118186.
- [43] FU Q, LI B, HOU Y, et al. Effects of land use and climate change on ecosystem services in Central Asia's arid regions: A case study in Altay Prefecture, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 607: 633-646.