



重塑结构性海相软土力学性能三轴试验研究*

孙胤栋¹, 张恒¹, 刘亚军¹, 武科¹, 许文彬¹, 陆海军²

(1. 山东大学 土建与水利学院, 山东 济南 250021; 2. 武汉轻工大学 土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430023)

摘要: 针对重塑结构性不同结构级别力学性能缺乏准确评价的问题, 采用“水泥-盐粒”联合改性方法构建人工结构性试样, 通过控制水泥掺量(0%、2%、3%、4%、5%), 开展固结不排水三轴剪切试验, 系统分析不同结构级别下的应力-应变特性及抗剪强度演化规律。结果表明: 随水泥掺量增加, 土体峰值强度和初始刚度显著提升, 应力-应变关系由应变硬化逐渐转变为应变软化, 结构性增强促使土体从塑性向脆性演化。峰值强度与围压呈线性关系, 初始模量随围压幂函数增长并与水泥掺量线性相关。基于上述试验结果构建了融合 Duncan-Chang 模型与指数软化段的全过程应力-应变数学模型, 拟合精度高 ($R^2 > 0.99$), 可准确描述各条件下土体力学特性。研究建议实际工程中水泥掺量控制在3%~4%, 以兼顾强度提升与脆性破坏控制, 为结构性海相软土本构建模与地基加固设计提供理论支持。

关键词: 海相软土; 三轴试验; 结构性; 水泥掺量; 应力-应变模型; 峰值强度

中图分类号: U65; TU411

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)01-0234-07

Triaxial experiment on mechanical properties of remodeled structural marine soft soil

SUN Yindong¹, ZHANG Heng¹, LIU Yajun¹, WU Ke¹, XU Wenbin¹, LU Haijun²

(1. School of Civil Engineering, Shandong University, Jinan 250021, China;

2. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Light Industry University, Wuhan 430023, China)

Abstract: To address the lack of accurate evaluation methods for the mechanical properties of remolded soils with varying structural levels, this study adopts a combined cement-salt particle modification technique to prepare artificially structured specimens. Samples with different cement contents (0%, 2%, 3%, 4%, and 5%) are subjected to consolidated undrained triaxial tests to systematically investigate their stress-strain characteristics and shear strength evolution laws at different structural levels. The results show that with the increase of cement content, the peak strength and initial stiffness of the soil are significantly improved. The stress-strain curves transition from strain-hardening to strain-softening, indicating a shift from plastic to brittle behavior as structure increases. Peak strength increases linearly with confining pressure, while the initial modulus increases with the power function of the confining pressure and is linearly related to cement content. Based on the above experimental results, a comprehensive stress-strain mathematical model is constructed by integrating the Duncan-Chang model with the exponential softening stage. The model has high fitting accuracy ($R^2 > 0.99$) and can accurately describe the mechanical properties of soil under various conditions. For practical applications, a cement content of 3%–4% is recommended to balance strength enhancement and brittleness control. This work provides theoretical support for the constitutive modeling and foundation improvement of structured marine soft soil.

Keywords: marine soft soil; triaxial test; structural characteristics; cement content; stress-strain model; peak strength

收稿日期: 2025-06-12 录用日期: 2025-07-02

*基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52179106)

作者简介: 孙胤栋(2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为海洋土力学计算。

通信作者: 武科(1978—), 男, 博士, 教授, 研究方向为海洋土力学计算。E-mail: wuke@sdu.edu.cn

沿海地区广泛分布的海相软土因天然沉积环境封闭以及形成年代较短, 普遍具有高孔隙比、高含水量及低抗剪强度等特性, 在荷载作用下易产生大变形和强时效蠕变, 严重威胁港区、地铁及深基坑等工程的长期安全^[1]。尤其受生物-化学沉积与后成作用影响, 海相软土内部形成“胶结-孔隙”并存的微观结构, 使其在初始阶段表现出明显的结构性; 一旦结构被扰动破坏, 强度与刚度骤降的“脆失稳”现象更加突出, 给工程设计与施工带来极大不确定性。

针对结构性软土的成因机理和劣化规律, 国内外虽已开展大量原位或室内试验研究。孙森军等^[2]通过模拟结构性土中静力触探试验的贯入-消散全过程, 得到部分排水或不排水贯入后超静孔压消散曲线的归一化表达; 刘自闯等^[3]通过对广州南沙港区深厚层软土进行一系列试验, 研究了软土结构性和力学特性与沉积环境存在关联; 杨爱武等^[4]以天津滨海软黏土为原料土, 通过掺入少量不同含量的水泥, 人工制备出土质近似均匀、结构性有所不同的结构性软黏土, 采用真三轴试验仪, 探讨基坑开挖条件下结构性土体的三维力学特性; 朱建明等^[5]针对苏州 S1 轨道交通线在穿阳澄湖底部时所遇到的粉质黏土的结构性和力学特性, 开展室内人工制备结构性土的研究, 采用加入少量水泥和食盐构造多组结构性强弱不同的方法来模拟制备人工结构性土; 何风雨^[6]选取常泰长江大桥场区深层粉质黏土为研究对象, 通过固结试验和无侧限抗压强度试验, 着重分析原状土的压缩曲线特性, 揭示了研究区域深部结构性土层的力学强度和变形特征; 李灿等^[7]选取结构性黄土

作为代表性试验研究对象, 开展不固结不排水三轴压缩试验, 探讨了应变软化系数与养护时间的规律以及不同养护时间对试样应变软化特性的影响; Korulla 等^[8]探讨了赫兰加固土壤结构的变形与摩擦角和结构填料单位质量之间的关系; Aminzadeh 等^[9]研究了甘蔗生物炭 (0%、1%和 2%) 和丛枝菌根真菌对温室玉米种植下憎水和非憎水土壤结构的改良效果。综上所述, 综上所述, 在实验室中批量制备具有不同结构级配的人工结构性软土, 并系统研究其应力-应变特征, 是深入揭示结构性海相软土力学行为的一种有效途径。

为此, 本文选取深圳某工程海相软土作为基土, 提出“水泥-盐粒”联合改性方案, 重塑海相软土土体结构强度, 采用应力路径三轴仪, 对不同水泥掺量试样在不同围压下开展固结不排水剪切试验, 研究不同结构级别软土的应力-应变演化规律, 提出了适用于不同水泥掺量的应力-应变全过程数学模型, 为海相软土地基改良、隧道围岩加固及软土本构模型参数选取提供可靠试验依据与理论参考, 对提升沿海工程的安全储备与设计精度具有重要意义。

1 三轴试验分析方法

试验土样是取自深圳某工地海相软土的重塑土, 经过土工试验得到试样的基本物理力学指标见表 1。通过击实试验, 得到了海相软土的干密度和含水量之间的关系曲线, 见图 1。由图可知, 该海相软土试样最大干密度为 1.8 g/cm^3 , 最优含水率为 15.54%。

表 1 土的基本物理力学指标
Tab. 1 Basic physical and mechanical properties of soil

液限/ %	塑限/ %	塑性 指数/%	比重	颗粒组成/%		
				黏粒 (<0.002 mm)	粉粒 (0.002~0.020 mm)	砂粒 (0.02~2.00 mm)
63.62	37.37	26.25	2.73	18.8	58.5	22.7

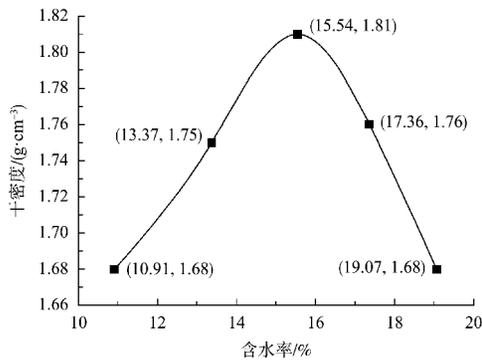


图1 击实曲线

Fig. 1 Compaction curve

1.1 结构性海相软土试样制备

海相软土是一种高液限、大孔隙和有明显结构性变形特征的结构性土，其结构性对其工程性质具有决定性影响。但是从现场取得大量未扰动结构性土样极其困难，常规重塑土又因结构破坏无法反映真实力学响应。因此，为了更好地研究海相软土的结构特性和力学特性，该研究借鉴文献[10]的结构性土制备方法开展试样制备。

研究采用“水泥-盐粒”联合改性方案，在重塑土料中掺入水泥以形成颗粒间的胶结作用，添加盐粒并溶解构建大孔隙组构分布，并控制盐粒掺量和干密度实现孔隙比调控，以匹配天然海相土的结构性、压缩性和渗透性。该制备方式不仅保留了初始结构性土样的应力状态，也使人工土样在孔隙比、含水特性及强度衰减行为上与天然海相软土更加匹配^[11-12]。主要包括以下步骤：

1) 原材料准备。将深圳某工地海相软土重塑土样作为基土，烘干后过筛，以去除杂质并控制颗粒均匀性。硅酸盐水泥作为胶结材料，粒径过0.5 mm筛食用盐作为孔隙构造材料，盐粒掺量通常为总干质量的8%，用于溶解后可形成大孔隙结构。

2) 混合与制样。按目标干密度1.8 g/cm³将基土、水泥和盐粒充分混合搅拌均匀。分5层装入制样器击实，确保每层密实度一致，随后加入适量水促使水泥初凝。

3) 盐粒溶解与孔隙形成。将装有试样的饱和

器置于流动水中渗透约1 d，等盐粒基本溶解，形成胶结与孔隙并存的微观结构。通过控制盐粒含量和渗透时间调节孔隙比，模拟海相软土的高孔隙特性。

4) 饱和与养护。对试样进行抽气饱和，随后浸入无气水中养护1 d，以保证水泥得到充分水化，总养护时间约3 d。饱和过程用来模拟海相软土的高含水量及孔隙水环境。

通过化学胶结与物理孔隙构造的结合，可人工制备具有不同结构性的海相软土，有效模拟天然土体的力学行为，为室内试验提供均质可控的试样。制作4组人工结构性土样，其配比见表2。

表2 土样制备的配比

Tab. 2 Mixing proportions for soil sample preparation

编号	土样类别	土的含量/%	水泥含量/%
1	重塑土	100	0
2	人工结构性土	98	2
3	人工结构性土	97	3
4	人工结构性土	96	4
5	人工结构性土	95	5

1.2 结构性海相软土试样三轴试验

试验仪器采用GDS(应力路径三轴试验系统)应力路径三轴仪，见图2。试验试样选取5组不同配合比(按水泥掺量与干土的质量百分比，0%、2%、3%、4%、5%，分组制备，每组试验4份相同的软土样本)，制备高度为100 mm，直径为50 mm的标准三轴试验试样，其高径比及最大粒径均符合规范要求，试验方案见表3。



图2 GDS 应力路径三轴仪

Fig. 2 GDS stress-path triaxial system

表 3 试验方案不同工况
Tab. 3 Experimental program for different working conditions

编号	水泥含量/%	围压/kPa	终止应变/%
1	0	50、100、150	
2	2	50、100、150	
3	3	50、100、150	15
4	4	50、100、150	
5	5	50、100、150	

试验步骤分为安装、饱和、固结和剪切 4 个阶段:

1) 试样安装。将试样套上橡胶膜, 置于压力室底座, 连接排水管路。

2) 饱和处理。采用反压饱和排除试样内气体, 确保完全饱和。

3) 等向固结。施加预定围压(分别为 50、100、150 kPa), 允许排水固结至孔隙水压力消散。以轴向变形速率不大于 0.01 mm/h 或孔隙水压力约等于 0 时为固结完成的标准。

4) 剪切阶段。试验加载方式采用应变控制式, 以恒定轴向应变速率施加轴向载荷, 进行固结不排水三轴剪切试验。连续记录应力-应变曲线、孔隙水压力及体积变化, 直至试样破坏, 以应变达 15% 或应力明显下降结束剪切。

5) 结束试验。卸载围压, 取出试样, 观察并记录试样的破坏形态。

2 重塑结构性海相软土力学性能分析

通过三轴试验, 得到海相软土的应力-应变关系曲线, 揭示了其在不同围压下的变形行为。每组试验在不同围压条件下的应力-应变曲线见图 3, 由图可知:

1) 第 1 组的 3 条曲线均呈现应变硬化特征, 应力随轴向应变不断增加, 直到大变形(约 15% 应变)才逐渐达到峰值且进入平台。未出现明显的峰后软化跌落, 残余强度接近峰值强度。这表明第 1 组的土样在剪切过程中变形较均匀, 未发生突出的剪切带滑移破坏。表明第 1 组试样的结构性很弱, 行为和重塑土无异, 仅表现出孔隙压密带来的抗剪强度。

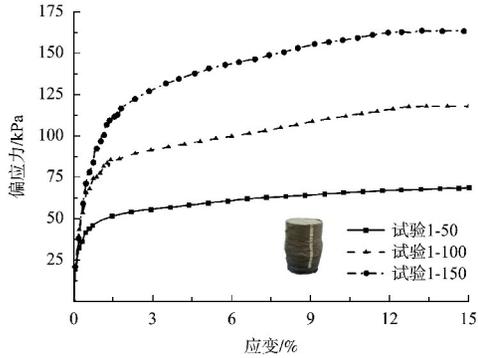
2) 相较于第 1 组, 第 2 组在高围压 150 kPa 时出现轻微的剪切软化现象: 曲线在约 3.5% 轴向应变时达到峰值, 随后应力略有下降并趋于稳定。第 2 组土样在低围压下表现出应变硬化, 在高围压下刚开始剪切即出现峰值, 脆性更强, 可能已有局部剪切带形成, 导致强度小幅下降。表明土样具有一定的结构性, 强度既来自结构又来自压密。

3) 第 3 组的 50 kPa 围压曲线在约 12% 应变出现峰值后略有下降, 表现出一定软化特性。而在 100 和 150 kPa 围压下曲线峰值出现在 14%~15% 应变附近, 基本呈应变硬化趋势, 峰后强度下降不明显。第 3 组土样在低围压下有轻微剪切软化倾向, 但围压增大后塑性变形能力提高, 剪切过程中强度持续增长直至大变形。表明第 3 组和第 2 组土样的结构性类似, 具有一定的结构性。

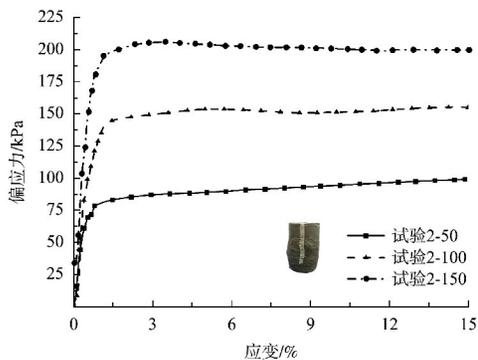
4) 第 4 组的曲线均呈现出典型的剪切软化特征。在极小应变 2% 时即达到峰值强度, 然后应力随进一步压缩明显下降。在 50 kPa 围压下约 0.9% 应变达到峰值约 151 kPa, 随后应力逐渐下降, 并在 15% 应变时降至约 125 kPa; 100 和 150 kPa 围压下也均在约 1%~2% 应变达到峰值后出现软化, 峰后残余强度相较峰值降低 10%~20%。这种行为表明第 4 组土样非常坚硬致密, 初始抗剪强度高但脆性破坏明显, 推测剪切带在峰值应变时即迅速形成并滑移, 使强度下降。表现与天然胶结型土样相似, 具有很强的结构性, 对扰动敏感, 结构破坏后性质急剧恶化。

5) 第 5 组土样强度水平最高, 在 50、100 kPa 围压下峰值偏应力分别达约 173 和 241 kPa, 且这两条曲线主要呈应变硬化趋势, 峰值出现在 14% 左右的大应变, 峰后无明显下降。然而在 150 kPa 围压下, 曲线在约 0.7% 应变时即达到峰值约 310 kPa, 随后出现一定程度软化, 应力逐渐下降至约 290 kPa 并趋于稳定。可见, 第 5 组土样在高围压下表现出脆性破坏, 而在中、低围压下仍保持较大的变形能力和硬化行为。第 5 组的强度最高, 但高围压下稳定性稍差。表现与第 4 组相似, 但第 5 组

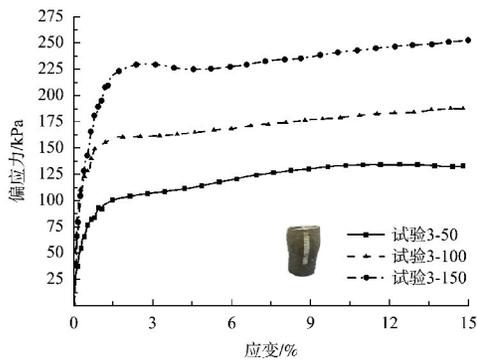
的结构性更强,说明试样的强度与变形响应主要由其结构特征所主导。



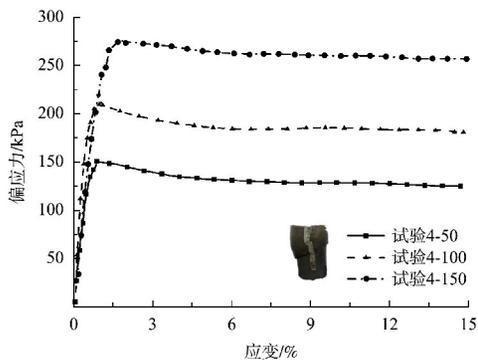
a) 第1组



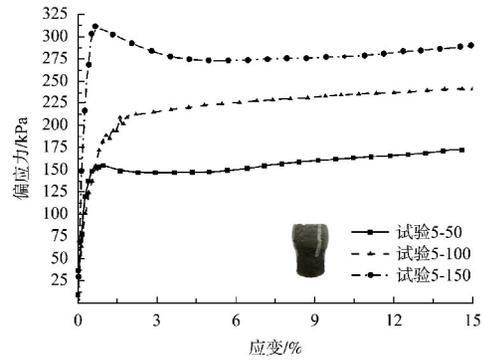
b) 第2组



c) 第3组



d) 第4组



e) 第5组

图3 偏应力($\sigma_1 \sim \sigma_3$)与轴向应变(ϵ)的关系曲线
Fig. 3 Relationship curve between deviatoric stress ($\sigma_1 - \sigma_3$) and axial strain(ϵ)

提取每组的峰值剪应力进行对比,见表4。由表可知:不同试验组的峰值强度随围压增加的增长幅度有所不同。第1、2组的峰值 q 对围压的敏感性相对较小,每增加50 kPa围压, q 增幅约45~55 kPa;而第4、5组的增长更显著,每50 kPa围压增幅约65~70 kPa。这预示着第4、5组土样具有更高的内摩擦角或黏聚力,在高围压下能发挥出更大的强度增量。

表4 峰值剪应力的对比
Tab. 4 Comparison of peak shear stresses

编号	50 kPa 围压峰值 偏应力/kPa	100 kPa 围压峰值 偏应力/kPa	150kPa 围压峰值 偏应力/kPa
1	68.66	117.86	163.50
2	99.26	155.73	206.02
3	134.56	187.75	252.59
4	151.00	212.97	276.66
5	173.27	241.16	310.35

3 结构性海相软土应力-应变关系方程

假定水泥含量 w 、围压 σ_3 ,基于表4数据,对每组 w 作线性回归,可得峰值偏应力 q_f 表达式:

$$q_f(w, \sigma_3) = m(w)\sigma_3 + k(w) \quad (1)$$

通过最小二乘拟合结果($R^2 > 0.99$)为:

$$m(w) = 0.9484 + 0.0845w \quad (2)$$

$$k(w) = 21.24 + 16.30w \quad (3)$$

式中: m 为峰值偏应力-围压关系的斜率参数; k 为截距参数。

因此, 峰值偏应力表达式可表示为:

$$q_f(w, \sigma_3) = (0.9484 + 0.0845w)\sigma_3 + (21.24 + 16.30w) \quad (4)$$

初始切线模量基于图 3 中各曲线 0%~1% 应变段的初始斜率, 可拟合 Duncan-Chang 型, 得到初始切线模量 E_i 表达式:

$$E_i(w, \sigma_3) = K\sigma_3^n(1 + \eta w) \quad (5)$$

其中回归得初始切线模量参数: $K=260$ MPa, $n=0.55$, $\eta=0.22$ 。

因此, 初始切线模量表达式可表示为:

$$E_i(w, \sigma_3) = 260\sigma_3^{0.55}(1 + 0.22w) \quad (6)$$

峰前应力-应变关系, 采用超双曲形式拟合, 可得应变 ε_a 表达式:

$$\varepsilon_a = \frac{q}{E_i(w, \sigma_3)} + \frac{q^2}{q_f(w, \sigma_3)E_i(w, \sigma_3)} \quad (7)$$

则显式偏应力-应变关系为:

$$q(\varepsilon_a, \sigma_3, w) = \frac{E_i(w, \sigma_3)\varepsilon_a}{1 + [E_i(w, \sigma_3)\varepsilon_a]/q_f(w, \sigma_3)} \quad (8)$$

当 $\varepsilon_a > \varepsilon_p(w)$ 时, 峰后软化段, 附加指数衰减与残余强度:

$$q(\varepsilon_a) = q_f(w, \sigma_3) \exp[-\beta(w)(\varepsilon_a - \varepsilon_p(w))] + q_r(w, \sigma_3) \quad (9)$$

式中: q 为偏应力; q_r 为残余偏应力; ε_p 为峰值对应的应变; β 为衰减系数。

其中, 对参数经验拟合, 可得峰值对应的轴向应变: $\varepsilon_p(w) = 0.016(1 - 0.05w)$; 峰后软化段指数衰减系数: $\beta(w) = 0.55e^{-0.30w}$; 残余强度: $q_r(w, \sigma_3) = 0.55\sigma_3 + 12w + 5$ 。

基于以上理论推导, 建立统一的重塑结构性海相软土应力-应变关系方程:

$$q(\varepsilon_a, \sigma_3, w) = \begin{cases} \frac{E_i(w, \sigma_3)\varepsilon_a}{1 + [E_i(w, \sigma_3)\varepsilon_a]/q_f(w, \sigma_3)}, \varepsilon_a \leq \varepsilon_p(w) \\ q_f(w, \sigma_3)e^{-\beta(w)[\varepsilon_a - \varepsilon_p(w)]} + q_r(w, \sigma_3), \varepsilon_a > \varepsilon_p(w) \end{cases} \quad (10)$$

根据重塑结构性海相软土的水泥含量 w 和三轴压缩试验围压 σ_3 , 由式(4)、(5)、(10)得到重塑结构性海相软土应力-应变关系方程的参数, 利用

式(8)、(10)即可获得任意应变下的偏应力 q 。

利用 Python 3.12 编写重塑结构性海相软土应力-应变关系方程计算程序, 参考表 3 中的水泥含量和围压值, 计算得到水泥含量为 0%、4% 的重塑性结构海相软土峰值偏应力, 见表 5。由表可知, 所提出的重塑结构性海相软土应力-应变关系方程计算值与试验值的差异较小, 说明所采用的计算模型能够较好地预测结构性海相软土的强度特性。

表 5 水泥含量为 0%、4% 的重塑性结构海相软土峰值偏应力

Tab. 5 Peak shear stresses of remodeled structural marine soft soil with 0% and 4% cement content

水泥含量	类别	50 kPa 围压	100 kPa 围压	150 kPa 围压
		峰值偏应力/kPa	峰值偏应力/kPa	峰值偏应力/kPa
0%	试验值	68.66	117.86	163.50
	计算值	66.22	114.67	160.59
4%	试验值	151.00	212.97	276.66
	计算值	149.36	211.15	274.84

4 结论

1) 水泥掺量对海相软土的应力-应变特性影响显著。随着水泥掺量由 0% 增加到 5%, 土体强度与刚度明显提高, 应力-应变特性由应变硬化逐渐转为具有明显峰值的应变软化, 结构性增强促使土体力学特性由塑性向脆性转变。

2) 峰值偏应力与围压线性相关, 水泥掺量增强黏聚力与摩阻力。回归分析表明峰值偏应力与围压呈良好线性关系。线性回归斜率和截距均随水泥掺量的增加而增大, 表明水泥胶结作用显著提升了土体的黏聚力和内摩擦角, 尤其在高水泥掺量 ($\geq 4\%$) 时表现更为突出。

3) 土体初始切线模量可用 Duncan-Chang 模型表征, 且随围压幂函数增长, 随水泥掺量线性增加。所建应力-应变全过程模型能够较好地反映结构性海相软土在不同水泥掺量和围压下的力学响应, 拟合精度较高, 能准确反映不同结构级别土体的本构响应特性。

4) 推荐水泥掺量控制在 3%~4%, 以兼顾强度提升与结构脆性控制。综合海相软土的强度与变形

特性,实际工程中水泥掺量宜控制在3%~4%,可兼顾土体抗剪强度提升与避免峰后软化导致的工程风险,为海相软土加固设计提供可行参数区间。

参考文献:

- [1] 林琳,廖先斌,马峰. 珠三角软土不排水剪强度与稠度指标相关性分析[J]. 水运工程, 2013(7): 62-64.
LIN L, LIAO X B, MA F. Correlation analysis on undrained shear strength and consistency index of very soft to soft clay at Pearl River Delta[J]. Port & waterway engineering, 2013(7): 62-64.
- [2] 孙森军,谢雅囡,王栋. 结构性土中静力触探孔压消散的大变形模拟[J]. 岩土力学, 2024, 45(11): 3416-3422.
SUN M J, XIE Y N, WANG D. Large deformation simulation of pore pressure dissipation during penetration of piezometer in structured soil [J]. Rock and soil mechanics, 2024, 45(11): 3416-3422.
- [3] 刘自闯,唐群艳. 广州港南沙港区深厚层软土原位测试方法[J]. 水运工程, 2024(8): 317-322.
LIU Z C, TANG Q Y. In-situ testing methods for deep soft clay in Nansha Port area of Guangzhou Port [J]. Port & waterway engineering, 2024(8): 317-322.
- [4] 杨爱武,黄俊泉,李建华. 卸荷条件下结构性软黏土三维力学特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2024, 20(3): 812-826.
YANG A W, HUANG J X, LI J H. Study on the three-dimensional mechanical properties of structural soft clay soils under unloading conditions [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2024, 20(3): 812-826.
- [5] 朱建明,刘麟,任瑞乐,等. 室内粉质黏土结构性的人工制备及其实验研究[J]. 山西建筑, 2023, 49(24): 6-9.
ZHU J M, LIU L, REN R L, et al. Artificial preparation and experimental study of indoor silty clay structure [J]. Shanxi architecture, 2023, 49(24): 6-9.
- [6] 何风雨. 深层结构性土压缩特性试验研究[J]. 土工基础, 2023, 37(4): 689-693.
HE F Y. Experimental study on compressibility of a structured soil at greater depth [J]. Soil engineering and foundation, 2023, 37(4): 689-693.
- [7] 李灿,周海清,宋强辉,等. 考虑时间效应的人工制备结构性土应变软化特性影响研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2018, 32(10): 110-115.
LI C, ZHOU H Q, SONG Q H, et al. The study on the effect of curing time on the properties of artificial structural soil strain softening considering the time effect [J]. Journal of Chongqing University of Technology (natural science), 2018, 32(10): 110-115.
- [8] KORULLA M, BEENA K S, MOURYA P K. Influence of structural fill properties on reinforced soil movements in helang landslide, India [J]. Geotechnical and geological engineering, 2024, 43(1): 49.
- [9] AMINZADEH A, DOROSTKAR V, ASGHARI H R. Soil structural stability improvement using arbuscular mycorrhizal fungi and biochar in water repellent and non-water repellent soil [J]. Soil use and management, 2025, 41(1): e70024.
- [10] 李建红,张其光,孙逊,等. 胶结和孔隙比对结构性土力学特性的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2008, 48(9): 1431-1435.
LI J H, ZHANG Q G, SUN X, et al. Effect of bonding and void ratio on the mechanical behavior of structured soil [J]. Journal of Tsinghua University (science and technology), 2008, 48(9): 1431-1435.
- [11] 刘恩龙,沈珠江. 人工制备结构性土力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 679-683.
LIU E L, SHEN Z J. Experimental study on mechanical properties of artificially structured soils [J]. Rock and soil mechanics, 2007, 28(4): 679-683.
- [12] 凌道盛,李奖,王文军,等. 人工制备土的结构性及其对应变局部化的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(9): 1689-1696.
LING D S, LI J, WANG W J, et al. Structure of artificial soils and its influence on strain localization [J]. Journal of Zhejiang University (engineering science), 2019, 53(9): 1689-1696.

(本文编辑 赵娟)