

钢架-土工材料系统预加固流塑土力学机理及参数敏感性分析

汤连生, 杜继杰, 黄家宁, 陈洋, 程子华, 丁威涯

Mechanical mechanism and parameters sensitivity analysis of the steel frame-geotextile system for the pre-reinforcement of flow plastic soil

TANG Liansheng, DU Jijie, HUANG Jianing, CHEN Yang, CHENG Zihua, and DING Weiya

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202404058>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

管道流模型参数敏感性分析及其在许家沟泉域的应用

A sensitivity analysis of conduit flow model parameters and its application to the catch area of the Xujiagou spring
武亚遵, 李彦涛, 林云, 曲鹏冲 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 68-75

斜坡浅埋水平条形锚板抗拔承载力的极限分析

A limit analysis of the ultimate pullout capacity of a shallow horizontal strip anchor plate embedded in slope
黄明华, 李盾, 李嘉成 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 116-116

退化高寒草原人工恢复植被根系及根-土复合体力学特性研究

A study of the mechanical properties of herbaceous roots and root-soil composite systems in the degraded alpine pasture artificially restored grassland
何伟鹏, 刘昌义, 周国英, 胡夏嵩, 付江涛, 卢海静, 闫聪, 杨馥铖, 李国荣 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 207-218

高强度大变形屈服锚索承载特性室内试验研究

Laboratory test on the mechanical behavior of high-strength and large-deformation yield anchor cable
杨栋, 王全成, 姜昭群 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 79-86

火烧迹地土壤根系特征及其对抗剪强度的影响

Root characteristics and its influences on shear strength in burned areas
胡卸文, 侯羿腾, 王严, 杨瀛 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 106-112

基于固结-固化复合技术对温州淤泥加固的试验研究

An experimental study of reinforcement of the Wenzhou sludge based on the consolidation and solidification composite technology
袁波, 邵吉成, 骆嘉成, 叶宏峰 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 66-74



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202404058

汤连生, 杜继杰, 黄家宁, 等. 钢架-土工材料系统预加固流塑土力学机理及参数敏感性分析 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(2): 85-93.

TANG Liansheng, DU Jijie, HUANG Jianing, et al. Mechanical mechanism and parameters sensitivity analysis of the steel frame-geotextile system for the pre-reinforcement of flow plastic soil[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(2): 85-93.

钢架-土工材料系统预加固流塑土力学机理及 参数敏感性分析

汤连生^{1,2,3,4}, 杜继杰^{2,3,4}, 黄家宁^{2,3,4}, 陈 洋^{2,3,4}, 程子华^{2,3,4}, 丁威涯¹

(1. 广州理工学院建筑工程学院, 广东 广州 510540; 2. 中山大学地球科学与工程学院, 广东 珠海 519082; 3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082; 4. 广东地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要: 在港口建设的围海造陆工程中, 吹填流塑土的预加固至关重要, 能够促进深层排水固结、提升地基承载力。针对传统填土法成本高、效率低的局限, 文章提出一种“钢架-土工材料系统”预加固工艺, 该工艺以高效、低成本及材料循环利用为显著优势。文章深入分析了该工艺的力学机理, 通过引入关键物理力学参数修正承载力公式, 揭示了预加固后极限承载力与土工材料参数的敏感性关系, 探讨了该预加固工艺的科学性。结果表明: (1) 高变形模量比的双地基结构有效分散上部荷载, 减少流塑土附加应力; (2) 土工材料在荷载作用下产生变形, 通过摩阻力和锚固效应提升流塑土承载力。预加固效果与土工材料等效抗拉强度呈线性正相关, 与极限应变呈指数负相关, 前者影响更显著。工程实践应选择抗拉强度略高的材料, 以应对施工扰动, 防止预加固失效。通过工程实例分析, 若采用传统填土法以达到该工艺相同的加固成效, 所需填土层厚度至少 9.13 m, 因此该方法具有极大的优越性和推广前景。研究结果可为流塑土插板排水施工预加固提供方案和理论指导。
关键词: 流塑土; 钢架-土工材料系统; 预加固; 极限承载力; 抗拉强度

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)02-0085-09

Mechanical mechanism and parameters sensitivity analysis of the steel frame-geotextile system for the pre-reinforcement of flow plastic soil

TANG Liansheng^{1,2,3,4}, DU Jijie^{2,3,4}, HUANG Jianing^{2,3,4}, CHEN Yang^{2,3,4}, CHENG Zihua^{2,3,4}, DING Weiya¹

(1. School of Architectural Engineering, Guangzhou Institute of Science and Technology, Guangzhou, Guangdong 510540, China; 2. School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai, Guangdong 519082, China; 3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai, Guangdong 519082, China; 4. Guangdong Provincial Key Laboratory of Mineral Resources and Geological Processes, Guangzhou, Guangdong 510275, China)

Abstract: In reclamation projects for port construction, the pre-reinforcement of flow plastic fill soils is critical for

收稿日期: 2024-04-26; 修订日期: 2024-09-08

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(42277142); 广州理工学院专项基金资助国家级培育项目(2024gjp002); 广州理工学院科研启动经费项目(2023KYQ028)

第一作者: 汤连生(1963—), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土化学力学及地基处理的相关研究。E-mail: ceestls@mail.sysu.edu.cn

promoting deep drainage consolidation and enhancing subgrade bearing capacity. To address the limitations of high-cost and low-efficiency in conventional earth fill methods, this study proposes a “steel frame-geotextile system” pre-reinforcement technology, distinguished by its high efficiency, cost-effectiveness, and material recyclability. This paper explored the mechanical mechanism of the proposed technology, introducing key physical-mechanical parameters to refine the bearing capacity formula. It elucidated the sensitivity relationship between the pre-reinforcement ultimate bearing capacity and geosynthetic parameters, and explored the scientific validity of this pre-reinforcement method. The results demonstrate that the dual foundation structure with a high modulus ratio effectively distributes the overburden load, reducing the additional stress in flowable fill soils. Geotextile, under loading, deforms and generates frictional resistance and anchoring effect, enhancing the load-bearing capacity of flow plastic soils. The pre-reinforcement effectiveness is linearly proportional to the geotextile's equivalent tensile strength and exponentially inversely related to the ultimate strain, with the former exerting a more significant influence. In engineering practice, materials with slightly higher tensile strength should be selected to withstand construction disturbances and prevent pre-reinforcement failure. In the context of the engineering example provided in this study, it is shown that if the conventional earth fill method was used to achieve the same reinforcement efficacy, the required earth fill layer thickness would need to be at least 9.13 m. This highlights the superior efficiency and vast potential for wider application of the proposed method. This study offers both a practical scheme and theoretical guidance for pre-reinforcement in the construction of flow plastic soils for drainage plates.

Keywords: flow plastic soil; steel frame-geotextile system; pre-reinforcement; ultimate bearing capacity; tensile strength

由于土地资源稀缺及港湾港口建设,吹填土技术应运而生,其被广泛用于“围海造陆”^[1-3]。随着陆地吹填不断转向水域吹填,使得吹填土具有含水率高、压缩性高、孔隙比高、灵敏度高、结构性差、固结程度低、承载力低等特点,其本质上是一种承载力极低的流塑土^[4-6]。由于流塑土所具有的极低承载力特性,对由吹填工艺生成的流塑土软基进行加固处理,以显著提升其承载能力,对于后续的工程建设尤为重要^[7-8]。考虑到流塑土的高压缩特性,在工程实践中,普遍采用插板机打设排水板加快流塑土的排水进程,使吹填的流塑土排水固结,永久性提高其承载力^[9-10],但由于流塑土的特性致使插板机无法直接进行插板工作,必须对流塑土进行预加固初步提高其极限承载力^[11],才能进行下一步插板工作。

近些年来,国内外许多学者对软基加固开展了深入的研究。在工程实践中,传统填土法通常先在软土表面铺设土工材料再进行填土,作为预加固使得插板机能进入进行插板,才能对深层地基进行排水固结提高地基承载力^[12-14]。鉴于此,众多学者探究了土工材料的力学属性对地基承载能力的具体影响。研究发现,土工材料刚度与强度的增强,促进了地基承载力的提升。当单层的土工结构无法满足工程所需的承

载力标准时,通过增加土工结构的层数,可以有效地增强地基承载能力,以满足工程需要^[15-16]。此外,填土材料厚度的增加同样被证实能够显著提高地基的承载力。

运用土工材料对软基进行加固,能够充分发挥其出色的抗拉力学性能,但在设计时也应充分考虑土工材料的抗拉强度,以防在机械荷载作用下,土工结构因拉拔行为而发生断裂,导致预加固措施失效^[17-18]。土工材料和填土层加固形成了以土工材料为界面,上下力学性能迥异的“双地基”,使得机械荷载进行了有效扩散,扩大了软土层的受力面积降低了应力,使得软基不易发生破坏,进而提高了地基的承载力^[19-20]。尽管传统填土法在软基加固领域备受青睐,然而,这一方法也存在一定的局限性。具体来说,土工材料的变形模量相对较低,在承受外部荷载时,其变形程度可能较大。当填土层的厚度不足时,这种变形可能会导致翻浆现象,甚至在极端情况下,施工机械有倾覆的风险,这不仅危及工程安全,也对施工效率构成威胁。

本文基于文献[21]提出的钢架-土工材料系统预加固流塑土的方法,揭示其提高地基承载力的力学机理,引入多参数修正地基极限承载力的计算公式,以更精确地反映预加固后的软基极限承载力。基于工

程实际,深入分析预加固后地基极限承载力对土工材料的力学参数的敏感性,并探讨该预加固方法的科学性,以期为流塑土预加固提供经济的方案和理论依据。

1 钢架-土工材料系统预加固流塑土工艺工法

鉴于传统填土法存在资源浪费、缺乏可循环利用性以及成本高昂的问题,往往在工程实施中投入大量的劳动力和物资资源,汤连生^[21]提出了一种创新的钢架-土工材料系统预加固流塑土的解决方案(图1),旨在克服传统方法的局限性,提高施工效率及经济效益。该方案具体实施步骤如下:

(1)土工材料铺设。在流塑土层的表面均匀铺设一层土工布,在土工布上进一步覆盖一层土工格栅,以增强地基的整体稳定性。

(2)钢架构建。选用若干根相同规格的钢管,先等间距平行铺设形成第一层钢管网,之后,再垂直于第一层钢管,铺设第二层钢管,保持每根钢管之间的间距与第一层相同,并进行固定连接,形成稳固的钢架结构。其能有效分散外力,保护下方的土工材料不受破坏。

(3)木板覆盖。在构建好的钢架上方铺设一定范围的木板,进一步增强结构的稳定性,确保插板机在施工过程中的平稳运行。

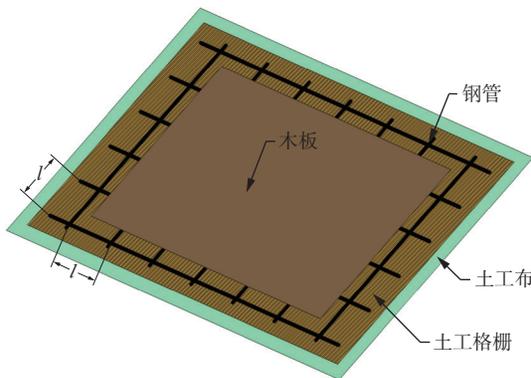


图1 钢架-土工材料系统

Fig. 1 Steel frame-geotextile system

注: l 为钢管间距。

2 钢架-土工材料系统预加固力学机理分析

2.1 钢架-土工材料系统的应力扩散作用

由于钢架-土工材料系统具有高刚度的特点,与下卧的流塑软地基的低刚度形成巨大反差,可归结为软硬复合的双层地基问题^[22-24]。这一系统,因其刚度显著超越流塑土,形成了一种厚度不大但应力扩散效应

明显的硬壳层^[25-26],有效降低下卧流塑土中的附加应力,防止下卧流塑土产生破坏,进而避免插板机发生沉陷及倾覆等安全风险。该系统的应力扩散效果,如图2所示,将作用在木板上的机械荷载简化为矩形均布荷载,则流塑土表面的应力(σ_v)可表示为^[27-28]:

$$\sigma_v = \frac{pBL}{(L + 2z \tan \theta)(B + 2z \tan \theta)} \quad (1)$$

式中: p ——钢架承受的均布荷载/kPa;

B ——钢架的长度/m;

L ——钢架的宽度/m;

z ——钢架厚度/m;

θ ——应力扩散角/(°)。

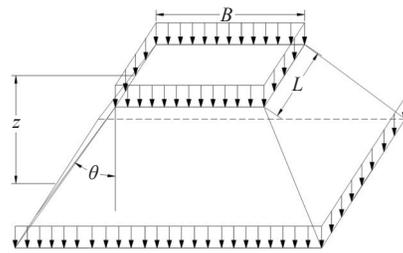


图2 钢架-土工材料系统应力扩散示意图

Fig. 2 Stress diffusion of steel frame-geotextile system

由式(1)可知,当钢架的尺寸确定时,应力扩散角 θ 越大,应力扩散效果越好,即钢架-土工材料系统的预加固效果越好,并且已有研究表明应力扩散角随着钢架与流塑土间变形模量的比值增大而增大^[29]。因此对比于传统的预加固手段,钢架的高变形模量在理论上可以代替大厚度填土层。

2.2 钢架-土工材料系统的网兜及超载效应

上部插板机的自重通过钢架向下传递时,土工材料会产生如图3所示的下凹变形,其内部会产生拉张应力(T),使得拉张应力的竖向分量抵消一部分上覆荷载,降低了流塑土的附加应力,并形成网兜效应,从而提高地基的承载能力^[30-31]。相较于传统填土法,钢架-土工材料系统能够较大发挥土工材料的抗拉强度特性。

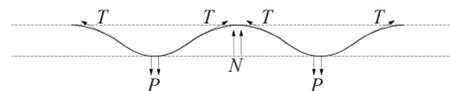


图3 网兜及超载效应示意图

Fig. 3 Net pocket and overload effect

注: P 为上覆荷载作用下钢管直接施加在流塑土上的力; N 为流塑土施加给钢架-土工材料系统的力。

另一方面,在上部荷载作用下,土工合成材料应变增大,在钢管的挤压下,呈现中间下凹、两边上凸的

波纹型结构,会对下部土体施加一个向下的压力,约束地基反力引起的地基土隆起,从而形成超载效应^[32]。由于土工合成材料有较高的抗拉强度和良好的韧性,且能紧贴于流塑土的表面,使插板机的自重荷载能均匀分散。当流塑土可能出现塑性剪切破坏时,土工材料能够阻止破坏面形成或限制破坏发展范围,有效提高地基承载力,显著增强流塑土稳定性。

2.3 钢架-土工材料系统的侧向约束及摩阻效应

在上部荷载的作用下,流塑土产生向外移动的趋势,导致钢架下方的土工材料被拉直,钢架边缘处土工材料呈现出弯曲变形,土工材料在荷载的作用下产生拉张应力,并且与流塑土之间的摩擦产生类似侧向约束的作用,这将限制地基土的侧向变形,进而提高流塑土的抗剪强度。钢架和流塑土间的土工材料受力如图 4 所示。

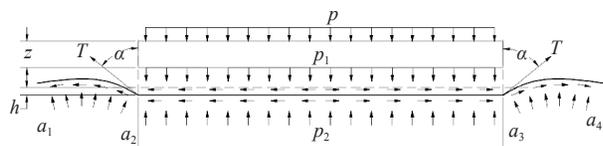


图 4 土工材料的受力情况示意图

Fig. 4 Force of geotextile

注: h 为上覆荷载作用下流塑土的沉降; α 为 T 与垂直方向的夹角; p_1 为钢架-土工材料系统的自重荷载; p_2 为流塑土对钢架-材料系统的荷载; D 为土工材料系统的布设宽度; $a_1 \sim a_4$ 为根据受力情况划分的边界点。

土工材料在上部荷载的作用下,会与钢架和下层流塑土产生位移或相对位移的趋势,在土工合成材料表面产生摩擦力,约束流塑土的变形。在 a_2a_3 段以外,土工材料上下两面所受摩擦力方向相同,或者仅受下方与流塑土间的摩擦力,在 a_2a_3 段内,土工材料上下两面受到的摩擦力方向相反,对土工材料内部张力影响较小。产生摩擦力的同时,在土工材料内部产生张力 T ,有将其从土中拉出的趋势,而图中 a_1a_2 段和 a_3a_4 段土工材料所受的摩擦力将限制其被拉出的趋势,起着锚固的作用,称为锚固段。只有锚固段提供足够的锚固力,才能有效发挥土工材料的抗拉强度,使其在受到法向应力时被拉紧,进而产生张应力。在 a_1a_2 与 a_3a_4 段未被拉出破坏的条件下,所受的摩擦力从 a_2 到 a_1 、从 a_3 到 a_4 逐渐减弱。锚固力由式(2)求得:

$$T_d = \tau_p b_1 + \tau_f b_2 \quad (2)$$

式中: T_d ——锚固力/kN;

b_1 ——土工材料铺设于钢架和地基土之间段的总锚固长度/m;

b_2 ——土工布铺设于地基土上、钢架范围以外段的总锚固长度/m;

τ_p ——单位长度上土工材料与钢架间的摩阻力/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$);

τ_f ——单位长度上土工材料与流塑土间的摩阻力/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$)。

假定土工材料能承受的最大拉力为 T_s ,因此存在如表 1 所示的几种状态。

表 1 力学状态及土工材料状态
Table 1 Mechanical state and geosynthetic state

力学状态		土工材料状态
$T_d < T_s$	$T < T_d$	相对静止
	$T > T_d$	土工材料被拉出
$T_d > T_s$	$T < T_s$	相对静止
	$T > T_s$	土工材料被拉断

在设计钢架-土工材料系统时应当充分考虑材料的抗拉强度和材料间的摩阻作用,充分发挥材料的力学性能,以免造成力学性能过剩、徒增成本。对于多层铺设的土工布和土工格栅,每一层都将产生内部张应力且提高了土工材料整体的抗拉强度,并且提供多个向上的应力分量,进而能更大程度地提高地基承载力。

3 钢架-土工材料系统预加固流塑土承载力

在钢架上铺设木板,可以使插板机的自重荷载更均匀得分布,因此可将作用在土工材料上的荷载近似视为一个矩形均布荷载。在流塑土整体呈现剪切破坏的情况下,地基极限承载力(p_u)如下所示^[33]:

$$p_u = \frac{\gamma b}{2} N_\gamma + q N_q + c N_c \quad (3)$$

式中: γ ——地基土的重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$);

b ——地基基础的宽度/m;

q ——基础旁侧荷载/kPa;

c ——地基土的黏聚力/kPa;

N_γ 、 N_q 和 N_c ——无量纲承载力系数。

根据上述分析,在上覆荷载作用下,土工材料处于拉张状态,产生部分拉力抵消了上覆荷载。此外,土工材料产生的超载效应能进一步提高地基极限承载力,为充分体现钢架-土工材料系统的加固作用,需对式(3)进行修正,得到如下修正后的地基极限承载力公式:

$$p_u = \frac{2T_m \cos \alpha}{D} + \frac{\gamma D}{2} N_\gamma + \left(\frac{T_m}{2R} + q' \right) N_q + c N_c \quad (4)$$

$$p_u = p_0 + \frac{2T_m \cos \alpha}{D} + \left(\frac{T_m}{2R} + q' \right) N_q \quad (5)$$

式中: T_m ——土工布和土工格栅总的等效抗拉强度/kPa, 一般可取土工布的抗拉强度的 2 倍, 即 $T_m = 2T_{\min}$, T_{\min} 为土工布的抗拉强度;
 R ——土工合成材料两侧地基土隆起的假想圆半径/m, 一般取 $R=3$ m, 不宜超过 5 m;
 q' ——钢架的等效均布载荷/kPa;
 p_0 ——未经加固时的地基承载力/kPa。

$(T_m/2R + q')N_q$ 为增加的旁侧荷载, $T_m/2R$ 为薄壁圆筒压力容器内压力值的一半, 代表土工材料呈圆弧状隆起部分对下部土体的限制作用, q' 表示土工材料的上覆钢架荷载形成的超载作用, 在已知地基极限承载力的基础上可通过式(5)计算。如图 4 所示, 假定在荷载作用下, 钢架端部土工材料的变形为抛物线, 则 α 存在如下定量关系:

$$\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{E}{4h} \right)^2}} \quad (6)$$

式中: E ——抛物线变形段的等效宽度/m;
 h ——土工材料的挠度/m。

在工程实践中, 满足 $h \ll E$, 即荷载作用下抛物线变形段的宽度远远大于土工材料的挠度, 它们与土工材料的极限应变(ε)间存在如下关系:

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \sqrt{1 + \left(\frac{4h}{E} \right)^2} + \frac{E}{8h} \ln \left[\frac{4h}{E} + \sqrt{1 + \left(\frac{4h}{E} \right)^2} \right] - 1 \quad (7)$$

可通过联立式(5)(6)得到 α 。

4 工程应用分析

4.1 工程概况

以大亚湾石化区 H1 地块吹填流塑软基处理工程为背景, 如图 5 所示。该地块为围海吹填造地形成的陆域, 面积逾 90 000 m², 吹填的地基土为流塑土, 厚度可达 10~15 m, 含水率达 150%。其承载力极低, 流塑土黏聚力为 1 kPa, 内摩擦角为 5°, 重度为 15 kN/m³。采用真空预压排水法处理该地块时, 插板机无法直接进场施工, 必须先对流塑土进行预加固, 形成工作区后进行下一步插板排水工作。

4.2 流塑土预加固方案

根据工期及设计要求, 加固后的流塑土需满足三台重 20 kN 的插板机同时进行插板作业。参照本文提出的方法, 为充分发挥土工材料的抗拉性能, 在整片



图 5 工程现场图

Fig. 5 Engineering field

场地上铺设一层土工布, 一层土工格栅和一层边长 50 cm 的正方形网格状钢架系统。铺设钢架的面积为 10 m×10 m, 钢管外径 5 cm, 内径 4.5 cm, 每米钢管重约 0.25 kN, 铺设钢管总长为 400 m。为均匀扩散插板机的重力, 每台插板机下铺设 3 m×3 m 的木板, 其重量相对于钢架很小, 在计算时可以忽略不计, 施工现场如图 6 所示。



图 6 插板施工现场

Fig. 6 Plug board construction site

4.3 预加固后 p_u 与 T_m 间的关系

根据流塑土的力学参数, 可知 N_y 、 N_q 和 N_c 分别为 0.51、1.64 和 7.32。由于钢架的厚度仅为 10 cm, 远远小于铺设的宽度, 为简化计算, 可认为土工材料受竖向荷载的面积为 10 m×10 m。根据式(6)可知在土工布极限应变和土工材料挠度一定的情况下, 即可解得 α 。不同 α 情况下, p_u 与 T_m 间的关系如图 7 所示。

预加固后, p_u 会随着 T_m 的增大线性增大。由于土工材料受拉状态下能充分发挥其抗拉力学性能, 因此

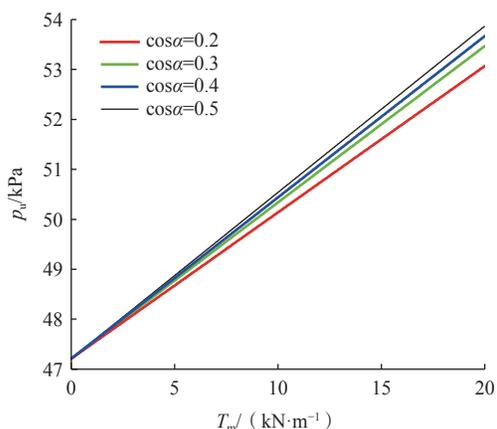


图 7 p_u 与 T_m 间的关系

Fig. 7 Relationship between p_u and T_m of geotextile

能显著提升极限承载力。对于承载力极低的软基,应当选用高抗拉强度的土工材料,增大软基的极限承载力。当土工材料充分发挥抗拉力学性能时,其处于破坏的临界条件,在人员走动或施工机具移动等外界动力扰动下,部分区域会产生应力集中,土工材料会产生断裂致使预加固失效,极易造成施工机具载头和人员伤害等事故。在工程实践中,应当充分评估施工机具和人员移动产生的应力集中,选用稍高抗拉强度的土工材料,避免预加固失效。

此外,在 T_m 相等的情况下, $\cos\alpha$ 越大, p_u 会越大,因此抛物线变形段的等效宽度与土工材料的挠度比值越小, p_u 越大。

4.4 预加固后 p_u 与 ε 间的关系

由于 ε 与抛物线变形段的等效宽度与土工材料的挠度比值存在定量关系,并且存在限定条件 $h \ll E$,因此假定 $h/E < 0.2$ 即可满足限定条件 $h \ll E$ 。另外,由于无法准确获得 ε 与 h 或 E 的关系,因此采用离散的方法进行处理,根据式(5)(6)得到不同条件下的 ε ,如表 2 所示。

通过表 2 可知, $\cos\alpha$ 仅仅与材料的极限应变有关,在土工材料抗拉强度一定的情况下,预加固软基的极限承载力仅仅与土工材料的极限应变有关。由上述分析知土工材料的抗拉强度越大,预加固后的地基极限承载力越大。以 $T_m=10$ kPa 为例,可得不同极限应变的土工材料预加固后的地基极限承载力,如图 8 所示。

预加固后的地基极限承载力会随着土工材料极限应变的增大呈现以 e 为底的指数递减关系,换言之,土工材料的变形能力越弱预加固软基的极限承载力越大,这是因为在锚固力足够大情况下,钢架下部的土工材料的挠度会更小,土工材料产生的拉力向上

表 2 不同条件下各参量间的关系

Table 2 Relationship between the parameters under different conditions

h/m	$\varepsilon/\%$	E/m	$\cos\alpha$	
0.10	0.03	0.930 452	0.918 703	
	0.04	0.802 363	0.894 954	
	0.05	0.714 641	0.872 464	
	0.06	0.649 672	0.851 539	
	0.07	0.599 021	0.831 631	
	0.08	0.558 072	0.812 783	
	0.09	0.524 060	0.794 908	
	0.15	0.03	1.395 680	0.918 703
		0.04	1.203 540	0.894 954
0.05		1.071 960	0.872 464	
0.06		0.974 508	0.851 539	
0.07		0.898 532	0.831 631	
0.08		0.831 090	0.812 783	
0.09		0.786 090	0.794 908	
0.20		0.03	1.860 900	0.918 703
		0.04	1.604 730	0.894 954
	0.05	1.428 280	0.872 464	
	0.06	1.299 340	0.851 539	
	0.07	1.198 040	0.831 631	
	0.08	1.116 140	0.812 783	
	0.09	1.048 120	0.794 908	
	0.25	0.03	2.326 130	0.918 703
		0.04	2.005 910	0.894 954
0.05		1.786 600	0.872 464	
0.06		1.624 180	0.851 539	
0.07		1.497 550	0.831 631	
0.08		1.395 180	0.812 783	
0.09		1.310 150	0.794 908	

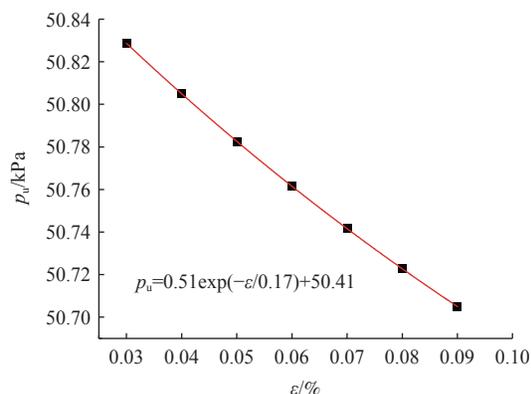


图 8 p_u 与土工材料 ε 间的关系

Fig. 8 Relationship between p_u and ε of geosynthetic

的分量会更大。不同于抗拉强度对极限承载力的明显提升,土工材料的极限应变对极限承载力的影响相对较小,通过降低土工材料的变形能力对极限承载力的提升并不明显。

4.5 钢架-土工材料系统预加固方法的科学性讨论

采用传统填土法进行预加固,与采用钢架-土工材料系统达到相同的加固效果时,填土层厚度可根据图2中的尺寸关系得到。假设插板机的占地面积为 $1\text{ m}\times 2\text{ m}$,若采用传统填土法进行预加固,插板机与填土的接触面积要小于 2 m^2 ,为简化计算在此采用插板机的占地面积进行计算。

根据袁波等^[28]的研究,双层地基中的应力扩散角存在如图9所示的关系。应力扩散角随着填土与流塑土的变形模量比呈现出先增大后趋于稳定的趋势,采用的填土变形模量越大应力扩散角越大。在此,不妨取应力扩散角为 25° ,根据式(1)可知,若采用传统填土法,填土厚度应不小于 9.13 m 才能达到本文提出工艺加固效果。在施工时,整个场地全部进行填土,不仅需要大量的填土,填土的运输及铺设也需要大量的时间,经济成本和时间成本远高于钢架-土工材料系统预加固方法。再者,钢架-土工材料系统预加固方法中除土工材料外,其他材料都可循环利用。因此钢架-土工材料系统预加固方法具有极大的优势和推广前景。

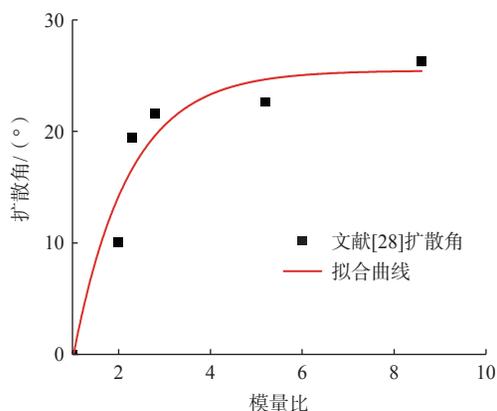


图9 应力扩散角与变形模量比间的关系

Fig. 9 Relationship between stress diffusion angle and deformation modulus ratio

5 结论

(1)钢架-土工材料系统与下方流塑土形成了双地基,使得上覆荷载有效扩散,从而降低了附加应力。上覆荷载使得土工材料产生变形充分发挥了其抗拉力学性能,约束了流塑土的隆起和软基的侧向移动,并产生锚固效应,由此增强了地基承载力。

(2)引入与钢架-土工材料系统相关的参量,提出了预加固后的地基极限承载力计算公式及方法,其能充分考虑钢架-土工材料系统力学性能。

(3)预加固后的软基极限承载力与土工材料等效抗拉强度、极限应变间分别呈现线性增函数和指数减函数关系。等效抗拉强度对极限承载力的影响较大,且远远大于极限应变对极限承载力的影响。在充分评估实际工程的情况下,应选用稍高抗拉强度的土工材料,避免外界扰动下预加固失效。

(4)在得到相同加固效果时,传统填土法的填土厚度至少为 9.13 m 。钢架-土工材料系统预加固方法相较于传统填土法在经济和时间成本控制方面具有极大的优越性,有着很大的推广前景。

参考文献 (References) :

- [1] 陈科平,任新开,贺勇,等.吹填土砂井地基离心模型试验研究[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(4):1222-1231. [CHEN Keping, REN Xinkai, HE Yong, et al. Experimental study on centrifugal model test of sand well foundation filled with dredger fill[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(4): 1222 - 1231. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 沙玲,刘鸿,王国才.真空-堆载联合预压法处理吹填土地基的大变形有限元分析[J].浙江工业大学学报,2021,49(2):140-146. [SHA Ling, LIU Hong, WANG Guocai. Finite element analysis on large deformations of dredger fill improved by combined vacuum and surcharge preloading[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2021, 49(2): 140 - 146. (in Chinese with English abstract)]
- [3] WU Yajun, XU Jiale, LU Yitian, et al. Geotechnical properties of marine dredger fill with different particle size[J]. Marine Georesources Geotechnology, 2023, 41(1): 24 - 35.
- [4] 冯双喜,雷华阳,万勇峰,等.新型辐射排水板真空预压加固效果[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(3):790-805. [FENG Shuangxi, LEI Huayang, WAN Yongfeng, et al. Ground improvement effect of prefabricated radiant drain vacuum preloading method[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(3): 790 - 805. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 贾林,张金龙,刘璐瑶,等.天津滨海地区不同年限吹填土植被恢复与土壤理化性质变异特征[J].环境工程,2021,39(6):179-186. [JIA Lin, ZHANG Jinlong, LIU Luyao, et al. Variation characteristics of vegetation restoration and soil physical and chemical

- properties of different reclamation years in Tianjin coastal area[J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(6): 179 – 186. (in Chinese with English abstract)]
- [6] YANG Aiwu, LIANG Zhenzhen, XU Guofang, et al. Study of the strength characteristics of dredger fill under the combined action of impact load and drainage[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2022, 26(12): 6032 – 6046.
- [7] 李光耀, 张振, 叶观宝, 等. 新型土体固化剂加固海底淤泥力学特性研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(5): 106 – 111. [LI Guangyao, ZHANG Zhen, YE Guanbao, et al. Mechanical characteristics of submarine silt stabilized by a novel agent[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(5): 106 – 111. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 郑若璇, 孙秀丽, 王渝, 等. 大尺寸三维电动-水力渗透协同固结淤泥能耗特性 [J]. *水文地质工程地质*, 2023, 50(1): 69 – 77. [ZHENG Ruoxuan, SUN Xiuli, WANG Yu, et al. Energy consumption in a large-scale 3D electro-osmosis-hydraulic synergism system for sludge consolidation[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(1): 69 – 77. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 王双, 严学新, 揭江, 等. 珠江三角洲平原区地面沉降影响因素分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2019, 30(5): 98 – 104. [WANG Shuang, YAN Xuexin, JIE Jiang, et al. Analysis on factors affecting ground settlement in plain area of Pearl River Delta[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2019, 30(5): 98 – 104. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 雷华阳, 王磊, 刘景锦, 等. 化学改性联合真空预压法加固吹填土试验分析 [J]. *岩土力学*, 2022, 43(4): 891 – 900. [LEI Huayang, WANG Lei, LIU Jingjin, et al. Experimental analysis of chemical modification combined with vacuum preloading method for reinforcing dredger fill[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(4): 891 – 900. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 郝传毅, 陈国靖. 硬壳层软土地基的工程特性 [J]. *中国公路学报*, 1993, 6(2): 68 – 74. [HAO Chuanyi, CHEN Guojing. Engineering features of soft subgrade with relatively hard clay shell[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 1993, 6(2): 68 – 74. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 闫澍旺, 郭炳川, 孙立强, 等. 硬壳层在吹填土真空预压中的应用 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(7): 1497 – 1503. [YAN Shuwang, GUO Bingchuan, SUN Liqiang, et al. Application of crust layer to vacuum preloading dredge fill[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(7): 1497 – 1503. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 胡继业, 余敏, 张鹏飞, 等. 港区超软吹填土层快速加固方案设计与优化 [J]. *水运工程*, 2019(1): 163 – 166. [HU Jiye, YU Min, ZHANG Pengfei, et al. Rapid reinforcement scheme design and optimization of super-soft fill soil in port area[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2019(1): 163 – 166. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 张军舰, 李鹏, 殷坤宇, 等. 基于接力排水的强夯法在滨海回填区地基处理中的试验研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(1): 117 – 125. [ZHANG Junjian, LI Peng, YIN Kunyu, et al. An experimental study of the dynamic compaction method based on relay drainage in foundation treatment of the coastal backfill area[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(1): 117 – 125. (in Chinese with English abstract)]
- [15] ALKHORSHID N R, ARAUJO G L S, PALMEIRA E M. Consolidation of soft clay foundation improved by geosynthetic-reinforced granular columns: Numerical evaluation[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2021, 13(5): 1173 – 1181.
- [16] BORGES J L, GONÇALVES M S. Jet-grout column-reinforced soft soils incorporating multilayer geosynthetic-reinforced platforms[J]. *Soils and Foundations*, 2016, 56(1): 57 – 72.
- [17] PARK J B, PARK H S, KIM D. Geosynthetic reinforcement of sand-mat layer above soft ground[J]. *Materials*, 2013, 6(11): 5314 – 5334.
- [18] YANG Shuaidong, LIAO Wei, WANG Xiaoliang, et al. Behavior of the geotextile reinforced dykes on sand-overlying-clay deposit[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1070900.
- [19] 马宾辉. 土工格室+碎石桩双向增强复合地基承载特性及沉降计算研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2011. [MA Binhui. The research on bearing characteristic and settlement of composite foundation bidirectionally reinforced by stone columns and geocell[D]. Changsha: Hunan University, 2011. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 高江平, 刘雯支, 杨继强. 基于三剪应力统一强度理论的硬壳层软土地基承载力公式 [J]. *岩土工程学报*, 2019, 41(12): 2331 – 2337. [GAO Jiangping, LIU Wenzhi, YANG Jiqiang. Formulas for bearing capacity of soft soil foundations with hard crust based on three-shear stress unified strength theory[J]. *Chinese Journal of*

- [Geotechnical Engineering](#), 2019, 41(12): 2331 – 2337. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 汤连生. 在大面积超软土地地上施工作业的方法及所用的钢架系统: CN101684649B[P]. 2012-04-18. [TANG Liansheng. The construction method and steel frame system used in large area super soft soil site: CN101684649B[P]. 2012-04-18.(in Chinese)]
- [22] 王桂香, 严盛康, 乐绍林, 等. 软土地基加固中竹网的受力与变形分析 [J]. [河北大学学报\(自然科学版\)](#), 2022, 42(4): 358 – 363. [WANG Guixiang, YAN Shengkang, LE Shaolin, et al. Stress and deformation analysis of bamboo net in soft soil foundation reinforcement[J]. [Journal of Hebei University \(Natural Science Edition\)](#), 2022, 42(4): 358 – 363. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 胡振华, 王颖, 李大勇, 等. 固化人工硬壳层双层地基承载试验及理论研究 [J]. [人民长江](#), 2020, 51(2): 147 – 152. [HU Zhenhua, WANG Ying, LI Dayong, et al. Experimental and theoretical study on bearing capacity of double artificial crust layers foundation formed by consolidation[J]. [Yangtze River](#), 2020, 51(2): 147 – 152. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 商拥辉, 商丽, 方前程, 等. 高强玻纤格栅软基加固传荷机理现场试验研究 [J]. [水文地质工程地质](#), 2016, 43(2): 93 – 98. [SHANG Yonghui, SHANG Li, FANG Qiancheng, et al. Field test study of the mechanism of reinforcing the soft foundation of high strength glass fiber grids[J]. [Hydrogeology & Engineering Geology](#), 2016, 43(2): 93 – 98. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 王颖, 王朝杰, 胡振华, 等. 就地固化表层地基承载特性现场试验研究 [J]. [土木与环境工程学报\(中英文\)](#), 2024, 46(3): 9 – 15. [WANG Ying, WANG Chaojie, HU Zhenhua, et al. Field test on bearing characteristics of surface foundation by in-situ stabilization[J]. [Journal of Civil and Environmental Engineering](#), 2024, 46(3): 9 – 15. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 郑耀林, 章荣军, 郑俊杰, 等. 絮凝-固化联合处理超高含水率吹填淤泥浆的试验研究 [J]. [岩土力学](#), 2019, 40(8): 3107 – 3114. [ZHENG Yaolin, ZHANG Rongjun, ZHENG Junjie, et al. Experimental study of flocculation-solidification combined treatment of hydraulically dredged mud at extra high-water content[J]. [Rock and Soil Mechanics](#), 2019, 40(8): 3107 – 3114. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 骆嘉成, 邵吉成. 固结-固化复合技术分层加固淤泥的试验研究 [J]. [铁道工程学报](#), 2022, 39(11): 19 – 24. [LUO Jiacheng, SHAO Jicheng. Experimental research on the layered reinforcement of sludge by consolidation and solidification composite technology[J]. [Journal of Railway Engineering Society](#), 2022, 39(11): 19 – 24. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 袁波, 邵吉成, 骆嘉成, 等. 基于固结-固化复合技术对温州淤泥加固的试验研究 [J]. [水文地质工程地质](#), 2022, 49(1): 66 – 74. [YUAN Bo, SHAO Jicheng, LUO Jiacheng, et al. An experimental study of reinforcement of the Wenzhou sludge based on the consolidation and solidification composite technology[J]. [Hydrogeology & Engineering Geology](#), 2022, 49(1): 66 – 74. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 刘毓毓, 左广洲, 陈福全. 加筋垫层应力扩散特性试验研究 [J]. [岩土力学](#), 2007, 28(5): 903 – 908. [LIU Yuchuan, ZUO Guangzhou, CHEN Fuquan. Numerical research on stress distribution of geosynthetic reinforcement layer[J]. [Rock and Soil Mechanics](#), 2007, 28(5): 903 – 908. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 卢硕. 土工格室加固路基机理及应用研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2020. [LU Shuo. Study on the mechanism and application of geocell to reinforce subgrade[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 张玲. 双向增强复合地基承载机理及其设计计算理论研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2012. [ZHANG Ling. Working mechanism of bidirectional reinforced composite foundation and its design method[D]. Changsha: Hunan University, 2012. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 丁仁伟, 董金玉, 李日运, 等. 土工合成材料加筋垫层处理软基承载力探讨 [J]. [华北水利水电学院学报](#), 2007, 28(2): 83 – 85. [DING Renwei, DONG Jinyu, LI Riyun, et al. Discussion about bearing capacity of soft ground reinforced with geosynthetics reinforcement cushion[J]. [Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power](#), 2007, 28(2): 83 – 85. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 杨光华, 廖汉阳. 筏板基础下薄层土地基承载力研究 [J]. [岩土力学](#), 2023, 44(12): 3405 – 3414. [YANG Guanghua, LIAO Hanyang. Ground bearing capacity of thin layer soil under raft foundation[J]. [Rock and Soil Mechanics](#), 2023, 44(12): 3405 – 3414. (in Chinese with English abstract)]