DOI:10.11918/202501036

大面积堆载对滨海深厚软土侧移的影响

伍 民[1],邓 涛[1],刘齐建[2],张 鹏[3],陈 刚[3],刘正强[4]

(1.福州大学 土木工程学院,福州 350108;2.湖南大学 土木工程学院,长沙 410082;
3.北京市政建设集团有限责任公司,北京 100045;4.福州勘察设计研究院,福州 350000)

摘 要:依托福州可门港铁路大桥桩基工程,通过大规模单侧地面堆载及测斜试验,系统研究了滨海深厚软土在堆载宽度、高度、临近桩基承台及时间效应等因素影响下的水平侧移特性。同时,针对现场试验结果分析了堆载作用下软土内部滑移模式,引入Terzaghi地基承载力理论,提出了堆载对下伏软土地层侧移影响范围的计算方法。研究结果表明:下伏软土在不同堆载条件下内部浅表层易产生潜在滑移面,沿深度的水平侧移曲线大致呈"双折线"型分布,浅表层缓倾段的土体位移较大,埋深10 m以下陡降段的位移较小;后续堆载时地层的水平侧移或变形易迁就早期形成的滑移面,堆载宽度或高度增加后滑移面的深度基本保持不变;群桩基础对软土内部滑移面以上土体的水平侧移其遮拦作用显著,其值约为同条件下无遮拦时水平侧移量的一半;场地堆载试验中软土固结侧移值约为软土总侧移的33.5%,是滨海深厚软土侧移的重要组成部分;基于Terzaghi地基承载力理论,提出了深厚软土内部出现滑移面后堆载影响的极限水平距离和影响深度计算方法,该方法的计算结果与现场实测值基本一致。研究成果可为类似深厚软土大面积堆载工程的设计和施工提供参考。

关键词:软土工程;大面积堆载;深厚软土;侧向位移;滑移面;Terzaghi地基承载力

中图分类号:TU447 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2026)07-0188-08

Effect of large-area heap loading on lateral displacement of deep soft soil in coastal areas

Wu Min[1], Deng Tao[1], Liu Qijian[2], Zhang Peng[3], Chen Gang[3], Liu Zhengqiang[4]

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. Beijing Municipal Construction Co., Ltd., Beijing 100045, China; 4. Fuzhou Survey and Design Insititute, Fuzhou 350000, China)

Abstract: Based on the pile foundation project of the Kemen Port Railway Bridge in Fuzhou, this study systematically investigates the lateral displacement characteristics of coastal deep soft soil under the influence of factors such as heap loading width, height, proximity to the pile foundation cap, and time effects through large-scale one-sided ground loading and inclinometer tests. Additionally, an analysis of the internal slip patterns of the soft soil under loading conditions is conducted, incorporating Terzaghi's bearing capacity theory to propose a calculation method for the lateral displacement influence range of the soft soil layer resulting from the heap loading. The results indicate that the upper layers of the soft soil are prone to developing potential slip surfaces under various loading conditions, with the horizontal displacement curve along the depth exhibiting a generally "double-broken line" distribution. The displacement in the upper layer is significant, while the steep drop section below 10 meters depth shows relatively small displacement. During subsequent loading, the horizontal displacement or deformation of the soil layers tends to accommodate the earlier formed slip surfaces, resulting in the depth of these slip surfaces remaining relatively unchanged despite increases in heap loading width or height. The group pile foundation significantly mitigates the horizontal displacement of the soil mass above the slip surfaces in the soft soil, with the measured displacement being approximately half of that observed under the same conditions without obstruction. In the site loading tests, the consolidation displacement value of the soft soil accounts for approximately 33.5% of the total displacement, representing an important component of the lateral displacement in coastal deep soft soils. Based on Terzaghi's bearing capacity theory, a method for calculating the limit horizontal distance and depth of influence of loading after the formation of slip surfaces in deep soft soils is proposed, with the calculated results aligning closely with on-site measurements. This study provides valuable references for the design and construction

收稿日期:2025-01-14;**录用日期**:2025-03-04;**网络首发日期**:2025-08-12
网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250812.1705.008
基金项目:国家自然科学基金(52178331)
作者简介:伍 民(1998—),男,硕士研究生;邓 涛(1972—),男,教授,博士生导师
通信作者:邓 涛,dengtao0911@163.com

of similar large-area heap loading projects on deep soft soils.

Keywords: soft soil engineering; large-area heap loading; deep soft soil; lateral displacement; slip surface; Terzaghi's foundation bearing capacity

滩涂相软土在我国东南滨海地区广泛分布。这类土层常具有高压缩、低强度、高含水率和低渗透特征，在大规模堆载作用下易产生水平侧向位移和沉降，并对邻近建构筑基础的稳定性构成严重威胁[1-7]。为确保大面积堆载工程的安全，有效控制地层变形至关重要，因此有必要深入研究堆载对深厚软土侧移特性的影响机理及预测侧移的发展趋势，并提出经济安全的处治措施。

近年来，学者们针对大面积堆载对下伏土层变形特性及其邻近结构的影响进行了大量研究，成果丰硕[8-10]。刘毓氚等[11]通过数值模拟分析了堆载对邻近建筑物的影响，揭示了堆载作用下坡脚范围内土体出现显著沉降和侧移，导致附近建筑物开裂。白力源[12]讨论了某堆载工程的监测数据，发现地表、边桩沉降及水平位移均与堆载直接相关。王恺敏等[13]探讨了堆载下桩基的工作性状，指出在堆载逐步增大的过程中，临近桩基可出现挠曲、水平移动甚至断裂，土体沉降和侧移呈现初期缓慢、后期迅速的发展规律。李忠诚等[14]利用三维数值软件研究了大面积堆载作用下土体的侧向位移模式，并分析了土体的侧向变形规律。杨石飞[15]整理了软土地区堆载工程的实测资料，结合工程地质条件，总结了地基变形规律。朱先锋[16]以某深厚软土地区高速铁路单侧堆载为例，分析了变形与堆载的时空关系。张伟锋等[17]通过研究距堆载区中心线的水平距离与沉降增量之间的关系，认为软土地基沉降曲线在一定程度上符合对数关系。贺志勇等[18]利用 ABAQUS 探讨了堆载对地基土变形的影响，指出堆载引起的地基土侧移主要发生在软弱土层中，降低堆载高度和增大堆载间距可有效控制地基土变形。Gu 等[19]采用三维有限差分法分析了被动桩在堆载作用下的变形和应力，发现桩的侧向位移随深度的增加而急剧减小，随荷载增加而增大。此外，一些学者通过数值方法探讨了堆载对下伏地基土变形影响的空间范围。孟园英等[20]使用有限差分法程序对路堤堆载下的地基变形特征进行了研究，发现上覆荷载主要影响 1.5 倍填土宽度埋深以内的地层侧向位移，对更深部的地层影响较小。黄志华等[21]对不同地质条件和工况下堆载预压处理路基变形的影响范围进行了探讨，认为路基变形影响范围随素填土压缩模量的增大而减小，随淤泥层厚度的增加而增大。实际上，堆载作用下软土地基不仅存在明显的瞬时变形，还常表现出时效性特征。Loganathan 等[22]基于高速公路路堤填筑的监测数据指出，软土的侧向位移是渐进的长期变化过程。李双龙等[23]通过数值模型研究了软土与桩基的相互作用机制，发现随着堆载时间的增加，软土的侧向时效变形持续增大，且桩身的抵抗作用会使桩周土体的塑性区持续扩展。

综上所述可以看出，虽然现有研究成果已较为丰富，涵盖了软土地基的沉降、侧移规律及堆载对桩基变形机理的影响等方面，但这些研究大多采用常规的数值模拟方法，而基于现场实测的研究则较为欠缺。众所周知，堆载下软土侧移特征与堆载高度、宽度等施工参数密切相关，但既有研究对此问题却语焉不详，甚少关注和探讨。同时，对堆载导致软土内部滑移时滑移面的形成与扩展机理，以及软土受堆载影响的极限水平距离和深度范围也缺乏深入分析。因此，本文以福州可门港铁路大桥桩基工程为依托，通过大规模单侧地面堆载和测斜试验，利用实测数据详细分析了滨海滩涂深厚软土在堆载宽度、高度、临近桩基承台及时间效应等因素影响下的水平侧移特性。在此基础上，分析了堆载下深厚软土内部滑移模式，并提出了堆载对下伏软土地层影响范围的计算方法。本文的研究可为类似深厚软土大面积堆载工程的设计和施工提供借鉴和参考。

1　试　验

1.1　工程地质条件

试验场地位于福州可门港海积滩涂平原区，根据现场工程勘察资料，试验区地层自上而下为：①淤泥，厚度为 24 m，均质性较好，呈流动-软塑状态，饱和，以粘、粉粒为主，切面光滑，干强度中等；②全～强风化花岗岩，厚度为 5.3 m；③弱风化花岗岩。具体的土层物理力学参数如表 1 所示。

表 1　土层物理力学参数表

Tab. 1　List of physical and mechanical parameters of soil layers

土层分布	密度/(kg·m^{-3})	泊松比	压缩模量/MPa	粘聚力/kPa	摩擦角/(°)
淤泥	1 600	0.45	1.9	8.2	7.8
全～强风化花岗岩	2 000	0.30	15.0	200.0	45.0
弱风化花岗岩	2 500	0.20	10 000	400	50.0

1.2 堆载方案及测斜管布置

为了研究大面积单侧堆载下深厚软土的水平侧移特性,在试验场地预埋了测斜管,测斜管布置如图 1所示。为便于讨论,下文以测斜管 CX4、CX6、CX16 及 CX21 的实测数据为例进行深入探讨。

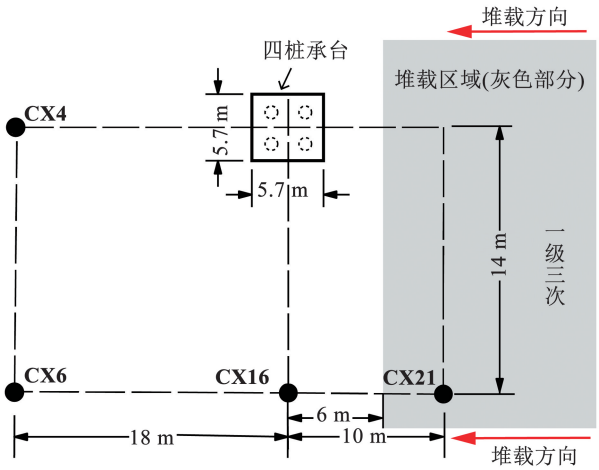


图 1 测斜管平面布置

Fig. 1 Inclinometer tube floor plan

试验现场的四桩承台尺寸为 5.7 m × 5.7 m × 2.5 m,各桩中心间距为 3.75 m,桩径为 1.25 m,桩长为 31.0 m。试验按高度共进行了两级堆载,堆载高度分别为 2.5、5 m。从距离四桩承台中心 50 m 的位置开始堆载,通过装载车从附近的取土点运至堆载区域,再由推土机推平、压实。堆载在平面上共分为 5 次,具体堆载工况详见图 2 和表 2。

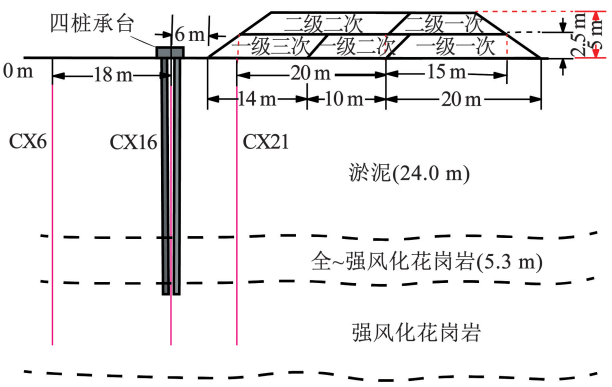


图 2 桩侧堆载剖面

Fig. 2 Pile side heap loading profile

表 2 堆载工况

Tab. 2 Heap load conditions

堆载方案	堆载体坡脚与四桩承台中心距离 S/m	堆载高度 H/m	单次堆载宽度 W/m	累积堆载宽度 W_c/m
一级一次	30	2.5	20	20
一级二次	20	2.5	10	30
一级三次	6	2.5	14	44
二级一次	30	5.0	15	15
二级二次	10	5.0	20	35

2 试验结果与分析

堆载下土体侧移特性的影响因素包括堆载体形式、群桩基础的遮拦作用、软土侧移的时间效应等,下文将对这些因素进行探讨。

2.1 堆载宽度对软土侧移的影响

图 3 为测斜管 CX16 和 CX21 在测斜管与堆载体坡脚的距离(20 m)和堆载高度(2.5 m)相同,而累积堆载宽度不同时的水平侧移曲线。从该图可以看出,不同堆载宽度下两者土体的水平侧移曲线形态大致相同,均表现为“双折线”型分布,浅表层段折线较平缓,土体的水平位移较大,深部段折线较陡峭,水平位移较小,上下两段折线约在埋深 10 m 处出现拐点,推测该深度为软土内部潜在滑移面的所在位置。此外,CX16 在累积堆载宽度达 30 m 时的浅表层最大水平位移为 132 mm,显著大于 CX21 在堆载宽度为 20 m 时的位移 88 mm,位移增幅达 47.8%。这表明,随累积堆载宽度的增加,在前期堆载的扰动下,堆载体前方下伏软土的强度会逐渐降低,持续堆载将导致土体发生更大的侧向累积位移。因此,在堆载施工过程中,为了降低对邻近构筑物稳定性的潜在影响,应尽量朝背离建构筑物的方向进行堆填。

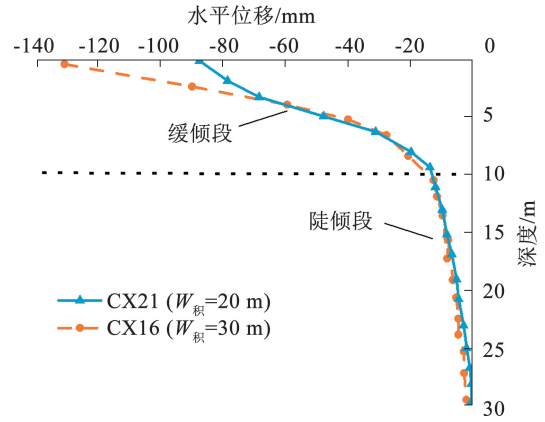


图 3 不同堆载宽度下的土体位移曲线

Fig. 3 Soil displacement curves under different load widths

测斜管 CX16 不同深度处的水平侧移与累积堆载宽度的关系曲线如图 4 所示。图 4 表明,埋深小于 10 m 的浅表层软土,在堆载初期其水平位移随着累积堆载宽度的增加而显著增加,但当堆载宽度进一步增大,其水平位移增幅逐渐减小,在堆载宽度近于软土层厚度(即淤泥层厚度,24 m)时,土体水平侧移最终趋于稳定。对于埋深小于 10 m 的土层,即潜在内部滑移面以下部位的土体,随堆载宽度的增加其变化也甚微。可以认为,堆载宽度对浅表土层

的水平位移影响较大，而对潜在滑移面下部土体的影响则较小，可以忽略。

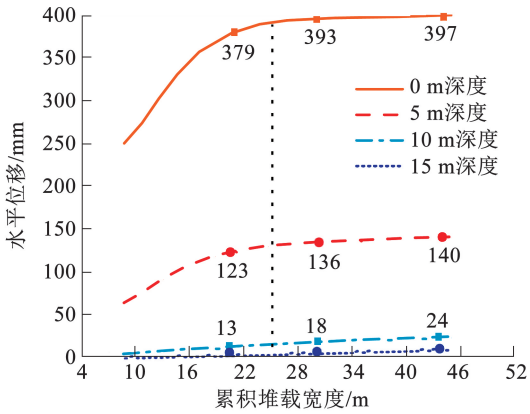


图 4　不同深度土体侧移与累积堆载宽度的关系曲线

Fig. 4　Curve of lateral movement of soil at different depths versus cumulative heap load width

2.2　堆载高度对软土侧移的影响

图 5 展示了测斜管 CX6 在一级三次和二级二次堆载下的侧向位移曲线，在这两种工况下，测斜管与堆载体坡脚之间的距离均为 24 m，堆载高度分别为 2.5 m 和 5.0 m。图 5 表明，不同堆高下的土体水平位移沿深度也大致呈“双折线”型分布，均在埋深约 10 m 处出现拐点并将位移曲线分为两段：斜率相对较小的缓倾段和斜率较大的陡倾段。埋深小于 10 m 段的水平位移显著，而大于 10 m 段的位移一般不超过 20 mm，推测该深度为堆载作用下软土内部滑移面所在位置。实测结果表明，堆高 2.5 m 下不同堆载宽度形成的内部滑移面深度为 10 m，与此相同，当堆载高度增加到 5 m 后，软土内部滑移面深度也为 10 m，这应与软土地层内部的水平侧移或变形容易迁就早期已经形成的潜在滑移面有关。在后续堆载高度增加后，受前期堆载既有扰动的影响，土层内部侧移依然沿早期的滑移面进行，故堆高增加后内部滑移面基本保持在 10 m 埋深处。此外，在堆高 2.5 m 时，土体最大水平位移为 45.7 mm，当堆载高度增至 5.0 m 时，表层最大水平位移增至 287.7 mm，约为堆高 2.5 m 时的 630%。这表明堆载高度的增加可加剧土体压缩和侧向挤出的程度，导致饱和软土发生更为显著的侧向塑性流动。因此，堆载高度越高，下伏软土的水平侧移也越大。

2.3　桩基遮拦作用对软土侧移的影响

地面堆载引起的软土层侧移在群桩基础附近产生的侧向压力主要由群桩和承台承担，因此群桩基础可以减小桩后土体的侧移，即具有一定的遮拦作用。如图 1 所示，CX4 和 CX6 与堆载体坡脚的距离相同，其中四桩基础位于 CX4 与堆载体之间，而 CX6 与堆载体之间则没有群桩遮拦，故本文拟通过比较这两根测斜管的水平侧移来探讨桩基对土体侧移的遮拦作用。

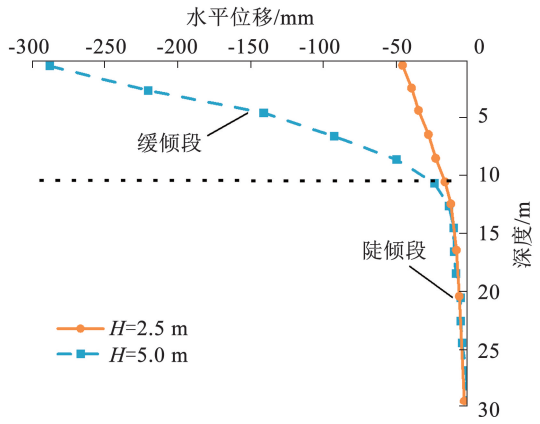


图 5　不同堆载高度下 CX6 的水平位移曲线

Fig. 5　The curve of horizontal displacement for CX6 at different load heights

图 6 为二级堆载作用下 CX4 和 CX6 的水平位移比较曲线。可以看出，不同堆载工况下的土体水平侧移曲线大致呈“双折线”型分布，也表现为浅表层缓倾段土体位移较大，埋深 10 m 以下陡降段位移较小；堆载距离和堆载高度相同时，浅表层缓倾段同一深度处 CX4 的水平位移始终显著小于 CX6 的水平位移，而陡降段因水平侧移整体较小，两者差异可忽略。这一差异表明群桩基础对深厚软土内部滑移面上部土体的水平侧移具有显著的遮拦作用，且随着堆载体逐渐靠近，桩基的遮拦效应愈加明显。

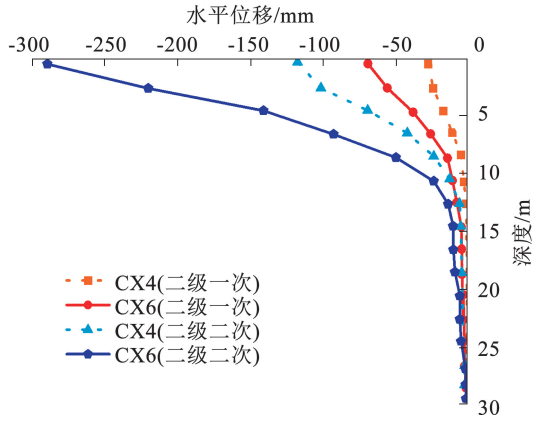


图 6　二级堆载作用下的土体位移曲线

Fig. 6　The curve of horizontal displacement under the second loading stage

桩基遮拦作用对土体水平侧移的影响如图 7 所示。图 7 中的位移增量表示某一深度位置，经过二级二次和二级一次堆载后测得的水平位移值之差；占比 α 表示 CX4 的位移增量与 CX6 的位移增量之比。由图 7 可知，测斜管水平位移增量随埋深的增加逐渐减小。在埋深小于 10 m 时，测斜管 CX4 的位移增量明显小于无桩基遮拦的 CX6 的位移增量。

在土体表层，α 仅为 0.4，意味着 CX4 的位移增量不足 CX6 的一半，表明群桩基础具有显著的遮拦效果。具体来说，试验现场的低桩承台以及桩身与土体之间的摩擦力能够有效抵抗土体的侧向位移，而桩基之间的相互作用则进一步增强了这种抵抗力，因此遮拦效应更为显著。此外，α 曲线在宏观上沿深度呈现递增的趋势，说明桩基对软土水平侧移的影响随着深度的增加而逐渐减弱。当埋深大于 10 m时，即超过内部滑移面时两测斜管的位移增量相差较小，此时 α 已超过 0.8，桩基遮拦作用的影响可以忽略不计。因此，可以认为桩基遮拦作用主要对软土内部滑移面以上土层的水平位移产生影响。在工程实践中，应合理设置隔离桩，以充分发挥其遮拦效应，从而有效减少大面积堆载对邻近结构物的影响。

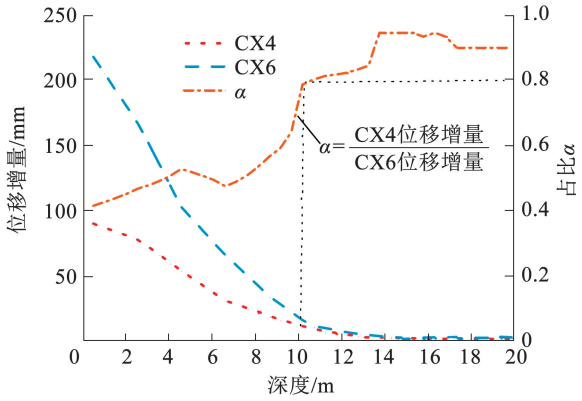


图 7 群桩遮拦作用对土体位移的影响

Fig. 7 Influence of group pile blocking on soil displacement

2.4 时间效应对软土侧移的影响

测斜管实测数据表明，土体在堆载作用下的侧向水平位移并非瞬间完成，而是在堆载结束后的一段时间内持续发生。在此过程中，土体水平侧移的速率逐渐减小，最终趋于稳定。

堆载下土体的侧向位移主要包括瞬时侧移和固结侧移两个阶段[24-25]。瞬时侧移是指堆载过程中和刚结束时土体发生的水平侧移。在这个阶段，土体迅速产生一部分位移或变形，这种位移通常在堆载施加后几乎立即出现，以弹性变形为主。而固结侧移则是堆载结束后，随着时间推移土体发生的持续侧向位移，其变形机理较为复杂，涉及土骨架的蠕变、薄膜水体的转化和压缩等因素。为便于研究，本文将每级堆载刚结束时的侧移值视为瞬时侧移，将堆载结束至土体侧移趋于稳定过程中的侧移值视为固结侧移，固结侧移值测定的时间跨度设定为堆载结束后的 3 个月内，具体测定时间依据现场实测数据予以确定。

图 8 展示了 CX6 和 CX21 在不同堆载工况下的土体表面侧移曲线。从图中可以看出，在相同堆载工况条件下，土体的瞬时侧移值均大于对应的固结侧移值。相较而言，距离堆载体更近的 CX21，其固结侧移值明显大于 CX6，这表明靠近堆载体的土体受扰动更早、更大，扰动作用时间也更长，故固结阶段的侧移也更为显著。同时，通过比较一级堆载和二级堆载的测斜管侧移值，可以发现随着堆载高度的增加，土体的固结侧移值显著增大。

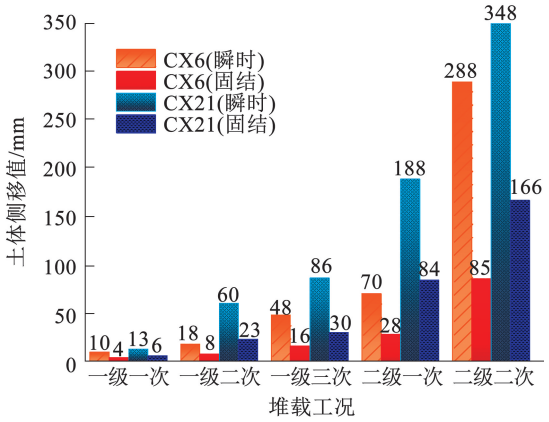


图 8 堆载工况与土体表面侧移值关系曲线

Fig. 8 Relationship between load conditions and lateral displacement of soil surface

为了准确评估软土固结侧移值在总位移中的占比，对现场测斜管实测数据进行了统计分析，得到的固结侧移特征值如表 3 所示。由表 3 可知，场地堆载试验中软土固结侧移值占软土总侧移值的平均比率达到 33.5%。这表明固结侧移是土体侧移的一个重要组成部分，在堆载结束后，应继续监测土体在固结过程中的水平侧移，以便更全面地研究软弱土体的变形特性。

表 3 固结侧移统计特征值

Tab. 3 Statistical characteristic values of the lateral shift in the consolidation phase

样本数	平均值/%	标准差/%	变异系数/%
33	33.5	11.7	34.9

3 堆载影响范围的理论解析与验证

基于前文的分析可知，地面堆载主要影响深厚软土内部滑移面以上土层的位移，软土地层所受的影响随着与堆载体距离的增加而逐渐减小。因此，大面积堆载对下伏深厚软土的作用可能存在一定的影响范围，确定其影响深度和水平距离可为大面积堆载工程的设计与施工提供重要的理论指导和实践依据。

3.1 堆载对软土影响的极限距离与深度求解

当地面堆载达到一定荷载水平时，软土层内部

的剪应力可能超过其抗剪强度，从而致使土体发生剪切破坏并形成滑移面。鉴于试验场地为深厚软土且土质较为单一，大面积地面堆载在土体中产生的附加应力分布与浅基础的荷载传递机制类似，故本文引入 Terzaghi 地基承载力理论以探讨地面堆载对软土的极限影响距离与影响深度。Terzaghi 理论假设土体呈均质状态、具有各向同性特征，且在所分析的范围内，土体的物理力学参数保持基本一致。设堆载体底面为土体与土体接触，接触面粗糙。深厚软土内部滑移面在地面以下形成，堆载宽度为 b，基于 Terzaghi 滑移面破坏模式，可建立如图 9 所示的深厚软土破坏分区模型[26]。堆载作用下土体内部的滑移面可分为 3 个区域：堆载体下方等腰三角形为楔形压密区（Ⅰ区），其三角形两边与地面夹角为土体内摩擦角 φ；过渡塑性区（Ⅱ区）的滑移面破坏模式符合对数螺旋线 $r=r_0e^{\theta\tan\varphi}$，且 B 处滑移线切线垂直向上，$AB=r_0$，C 为对数螺旋线上的某一点，θ 为 $\angle BAC$ 的角度；朗肯被动区（Ⅲ区）为一等腰三角形，其底角度数为（$\pi/4-\varphi/2$）。

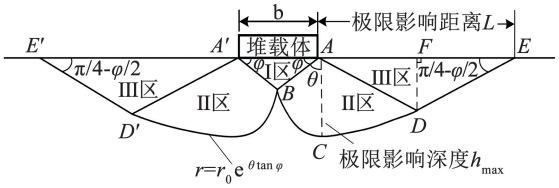


图 9　土体剪切破坏模型

Fig. 9　Soil shear failure model

由图 9 中的几何关系，可得

$$r_0=\frac{b}{2\cos\varphi} \tag{1}$$

式中：b 为堆载体的宽度，φ 为土体内摩擦角。

堆载下软土内部的极限影响深度 h_{max} 为

$$h_{max}=r_0e^{\theta\tan\varphi}\big|_{\theta=\frac{\pi}{2}-\varphi}=\frac{be^{\left(\frac{\pi}{2}-\varphi\right)\tan\varphi}}{2\cos\varphi} \tag{2}$$

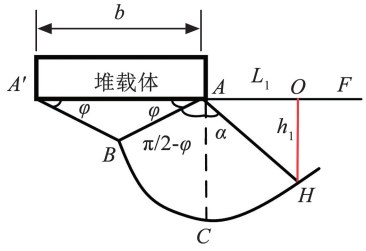
式中 e 为自然常数。

令 $AE=L$，则可以得到地面堆载对下伏软土地层的极限影响距离 L：

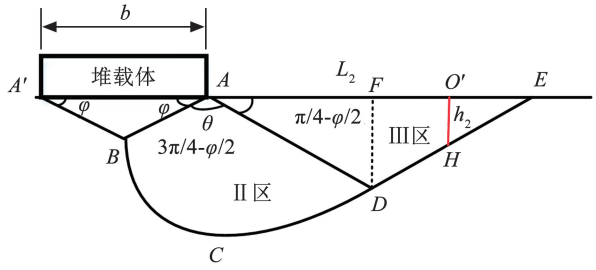
$$L=2r_0e^{\theta\tan\varphi}\big|_{\theta=\frac{3\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}}\cos\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)=\frac{b\cos\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)e^{\left(\frac{3\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)\tan\varphi}}{\cos\varphi} \tag{3}$$

由式（2）、（3）可知，地面堆载对下伏软土的极限影响深度 h_{max} 和极限影响距离 L 均与堆载宽度和软土内摩擦角有关。

要确定地面堆载对不同位置的影响深度，还需考虑测点相对于堆载体的水平位置关系。当测点 O 在 AF 之间时，堆载对土体内部的影响范围如图 10（a）所示。堆载体与测点 O 的距离为 $AO=L_1$，影响深度 h_1 与对数螺旋线交于 H，连接 AH。



(a) AF之间



(b) FE之间

图 10　不同位置的影响深度范围

Fig. 10　Influence depth range at different locations

设 $\angle CAH=\alpha$，则对数螺旋线区的角度范围为 $\angle BAH=\pi/2-\varphi+\alpha$，$\angle OAH=\pi/2-\alpha$。通过几何分析，可得堆载作用下测点 O 处土体内部的影响深度计算公式：

$$h_1=\frac{b}{2\cos\varphi}e^{\left(\frac{\pi}{2}-\varphi+\alpha\right)\tan\varphi}\cos\alpha \tag{4}$$

其中，α 由式（5）确定，代入初始参数，即可获得相应的 α 值。

$$\sin\alpha=\frac{L_1}{r_0e^{\left(\frac{\pi}{2}-\varphi+\alpha\right)\tan\varphi}} \tag{5}$$

当测点 O' 在 EF 之间时，堆载下软土内部的影响深度如图 10（b）所示。图中测点 O' 与堆载体坡脚的距离为 L_2，$\theta=3\pi/4-\varphi/2$，对数螺旋线区（Ⅱ区）中 $\angle DAF=\angle DEF=\pi/4-\varphi/2$。可得该测点位置影响深度 h_2 的计算公式：

$$h_2=(L-L_2)\tan\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right) \tag{6}$$

3.2　影响深度公式的验证

当软土内部发生滑移时，会对土层中的测斜管施加推挤作用，导致测斜管在滑移面处出现曲率突变。采用三值型圆弧插值法[27-28]对本文现场试验中测斜数据进行曲率分析，结果表明，在一级三次堆载后软土层内部形成了初始滑移面，地基已达极限承载力状态，并确定现场堆载在测斜管 CX6、CX16 和 CX21 处的影响深度分别为 10、11 m 和 11.5 m。

为便于分析,将现场试验中的堆载体近似为条形堆载体,堆载宽度 b 取为 39 m。根据室内土工试验结果,软土层的内摩擦角取 7.8°。由此,可根据式(3)计算出现场堆载对下伏软土的极限影响距离 L:

$$L=\frac{b\cos\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)e^{\left(\frac{3\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)\tan\varphi}}{\cos\varphi}=\frac{39\times\cos\left(\frac{\pi}{4}-\frac{7.8^\circ\times\pi}{360^\circ}\right)\times e^{\left(\frac{3\pi}{4}-\frac{7.8^\circ\times\pi}{360^\circ}\right)}\times\tan\frac{7.8^\circ\times\pi}{180^\circ}}{\cos\frac{7.8^\circ\times\pi}{180^\circ}}\approx 40.58\ \text{m}$$

在场地试验中,测斜管 CX16 距离堆载体边缘 $L_1=11$ m,由于 $L_1=11\ \text{m}<L/2$,可以判定该测斜管位于前文所述 AF 之间。而 CX6 距离堆载体边缘 $L_2=29\ \text{m}>L/2$,可判定该测斜管位于 FE 之间。此时,堆载的影响深度可分别由式(4)和式(6)求得

$$h_1=\frac{b}{2\cos\varphi}e^{\left(\frac{\pi}{2}-\varphi+\alpha\right)\tan\varphi}\cos\alpha\approx 11.47\ \text{m}$$

$$h_2=(L-L_2)\tan\left(\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi}{2}\right)\approx 10.10\ \text{m}$$

在完成一次三次堆载后,测斜管 CX21 与堆载体坡脚的距离为 $L_3=4$ m。根据图 9 所示的几何关系,可以确定其滑移面的破坏模式符合对数螺旋线,计算得到角度 $\theta=80.2°$。将上述条件代入式(1)以及公式 $r=r_0e^{(\theta\tan\varphi)}$ 中,可得 CX21 处的滑移面计算深度为 12.03 m。

理论计算结果表明,堆载下 CX6、CX16 和 CX21 处的软土内部影响深度分别为 10.10、11.47 m 和 12.03 m,与实测值的误差不足 5%。这说明该公式能够较为准确地计算堆载影响深度,验证了公式的正确性。同时,影响深度的计算也依赖水平极限影响距离的估算及测点水平位置在 AF 和 FE 的分区判断,可认为本文提出的深度计算公式的正确,也直接验证了水平极限影响距离的计算方法。因此将 Terzaghi 地基承载力理论应用于堆载作用下深厚软土内部滑移影响范围分析是可行的。

4 结 论

本文基于滨海深厚软土现场大面积堆载下的实测侧移数据,深入探讨了堆载宽度、高度、临近桩基承台及时间效应等因素对软土水平侧移特性的影响,针对现场试验结果,引入 Terzaghi 地基承载力理论,分析了堆载下软土内部滑移模式,并提出了堆载对下伏软土地层影响范围的计算方法。论文主要工作和获得的结论如下:

1)滨海滩涂深厚软土的现场堆载试验表明,下伏软土在不同堆载工况其水平侧移曲线均大致呈“双折线”型分布,浅表层缓倾段的水平位移较大,埋深 10 m 以下陡降段的位移较小。堆载下软土内部浅表层易产生潜在滑移面,而后续堆载时地层的水平侧移或变形易迁就早期形成的滑移面,使其在堆载宽度或高度增加后滑移面的深度基本不变,但堆载会导致土体产生更大的侧向累积位移,因此施工时应尽量朝背离建构筑物的方向进行堆填。

2)群桩基础对深厚软土内部滑移面上部土体的水平侧移具有显著的遮拦作用,与同条件下无遮拦时相比,其水平侧移量可降低一半。随着堆载体逐渐靠近,桩基的遮拦效应愈加明显。

3)堆载下软土的侧向位移由弹性的瞬时侧移和堆载结束至侧移趋于稳定的固结侧移两部分组成。场地堆载试验中软土固结侧移值占软土总侧移值的比率平均达到 33.5%,这表明固结侧移是滨海深厚软土水平侧移的重要组成部分。堆载结束后应继续监测土体在固结过程中的水平位移,以确保土体侧移可控和邻近建构筑物的安全。

参考文献

[1]杨敏, 朱碧堂, 陈福全. 堆载引起某厂房坍塌事故的初步分析[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(4): 446
Yang Min, Zhu Bitang, Chen Fuquan. Pilot study on collapse of an industrial building due to adjacent surcharge loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(4): 446

[2]吴健, 王屹峰, 刘开富, 等. 大面积堆载下地下构筑物性状研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(9):1343
Wu Jian, Wang Yifeng, Liu Kaifu, et al. Behavior of underground structures under large area loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(9): 1343

[3]张晓斌. 邻近大面积堆载作用下某厂房结构的不均匀沉降分析[D]. 天津: 天津大学, 2009
Zhang Xiaobin. The nonuniform settlement analysis for a industrial building under the adjacent large-area loading[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009

[4]郑健龙, 张军辉, 李雪峰. 软基桥头路基填筑对桥台桩的影响[J]. 中国公路学报, 2013, 26(2): 48
Zheng Jianlong, Zhang Junhui, Li Xuefeng. Effects of embankment load on piled bridge abutments on soft clay[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(2): 48

[5]邓涛, 许杰, 郑嘉勇, 等. 深厚软土中抗滑桩的修正悬臂桩计算方法[J]. 岩土力学, 2022, 43(5): 1299
Deng Tao, Xu Jie, Zheng Jiayong, et al. Modified cantilever pile method for anti-sliding pile in deep soft soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(5): 1299

[6]Bian X, Liang Y, Zhao C, et al. Centrifuge testing and numerical modeling of single pile and long-pile groups adjacent to surcharge loads in silt soil[J]. Transportation Geotechnics, 2020, 25: 100399

[7]Yang S, Jia M. Lateral response of a pile group embedded in the transversely isotropic saturated soil due to surcharge loads[J]. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2023, 155: 1082

[8]金宗川, 顾国荣, 韩黎明, 等. 大面积堆载作用下软土地基变形

特性[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 1056
Jin Zongchuan, Gu Guorong, Han Liming, et al. Deformation properties of soft subsoil under large-scale preload[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(6): 1056

[9]刘晓华, 韦彬, 唐皓, 等. 路堤荷载作用下斜坡地基侧向变形计算分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2020, 17(3): 582
Liu Xiaohua, Wei Bin, Tang Hao, et al. Calculation and analysis of lateral deformation of slope foundation under embankment load[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(3): 582

[10]Wu M, Zheng J Y, Liu Q J, et al. Calculation method of flow drag around a pile in soft soil considering Bingham fluid properties and analysis of single pile response[J]. Ocean Engineering, 2025, 317: 120031

[11]刘毓氚, 陈福全, 左广洲. 大面积堆载下软土地基的应力隔离与加固实例分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(5): 846
Liu Yuchuan, Chen Fuquan, Zuo Guangzhou. Case study of synthetic method of stress isolation and ground reinforcement to handle soft ground problem induced by adjacent surcharge load[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(5): 846

[12]白力源. 大面积堆载对周围环境影响及其控制措施研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2023
Bai Liyuan. Research on the impact of large-scale embankment loading on surrounding environment and its control measures[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2023

[13]王恺敏, 王建华, 陈锦剑, 等. 大面积堆载作用下饱和土中的桩基工作性状[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(12): 2130
Wang Kaimin, Wang Jianhua, Chen Jinjian, et al. The behavior of piles in saturated soil under surcharge loads[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40(12): 2130

[14]李忠诚, 梁志荣. 大面积堆载土体侧移模式及对邻近被动桩影响分析[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊1): 128
Li Zhongcheng, Liang Zhirong. Calculation model and numerical analysis of passive piles subjected to adjacent surcharge loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S1): 128

[15]杨石飞. 大面积土体堆载地基变形一般规律分析[J]. 上海地质, 2010, 113(1): 16
Yang Shifei. Disciplines of foundation deformation under large area earth loading[J]. Shanghai Land & Resources, 113(1): 16

[16]朱先锋. 大面积堆载引起高铁桥基变形处理对策研究[J]. 铁道建筑技术, 2015(12): 13
Zhu Xianfeng. Remedy of bridge foundation deformation caused by large-area loading on high-speed railway[J]. Railway Construction Technology, 2015(12): 13

[17]张伟锋, 陈盛原, 韦未. 堆载作用下复合软土地基的沉降规律研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(3): 729
Zhang Weifeng, Chen Shengyuan, Wei Wei. Settlement law of composite soft soil foundation under pile-loading[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2021, 29(3): 729

[18]贺志勇, 张浩然, 杨程, 等. 桥侧大面积堆土对桥梁安全性的影响[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2021, 49(7): 8
He Zhiyong, Zhang Haoran, Yang Cheng, et al. Impact of soil massively stacked in the bridge side on the safety of the bridge[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2021, 49(7): 8

[19]Gu M X, Cai X C, Fu Q, et al. Numerical analysis of passive piles under surcharge load in extensively deep soft soil[J]. Buildings, 2022, 12(11): 1988

[20]孟园英, 谭鑫, 周嘉威, 等. 路堤堆载下深厚淤泥变形特征及演化规律[J]. 公路, 2024, 69(5): 84
Meng Yuanying, Tan Xin, Zhou Jiawei, et al. Deformation characteristics and evolution law of deep silt deposition under embankment loading[J]. Highway, 2024, 69(5): 84

[21]黄志华, 问建学, 马祖遥, 等. 真空联合堆载预压处理路基变形影响范围研究[J]. 公路, 2024, 69(3): 56
Huang Zhihua, Wen Jianxue, Ma Zuyao, et al. Research on the influence range of subgrade deformation in vacuum combined preloading treatment[J]. Highway, 2024, 69(3): 56

[22]Loganathan N, Balasubramaniam A S, Bergado D T. Deformation analysis of embankments[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 119(8): 1185

[23]李双龙, 魏丽敏, 冯胜洋, 等. 基于扩展 Koppejan 模型的被动桩-软土时效性相互作用研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(9): 2602
Li Shuanglong, Wei Limin, Feng Shengyang, et al. Time-dependent interactions between passive piles and soft soils based on the extended Koppejan model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(9): 2602

[24]Wang L Z, Chen K X, Hong Y, et al. Effect of consolidation on responses of a single pile subjected to lateral soil movement[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, 52(6): 769

[25]Yang M, Shangguan S, Li W, et al. Numerical study of consolidation effect on the response of passive piles adjacent to surcharge load[J]. International Journal of Geomechanics, 2017, 17(11): 04017093

[26]赵伟封, 文军强, 冯凯, 等. 带状堆载对邻近桩基作用效应的计算方法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2019, 39(2): 100
Zhao Weifeng, Wen Junqiang, Feng Kai, et al. Calculation method of responses of pile foundation adjacent to band-shaped surcharge loads[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2019, 39(2): 100

[27]刘金龙, 朱建群, 王吉利, 等. 测斜仪在路基水平位移监测中的若干问题探讨[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2007, 22(3): 71
Liu Jinlong, Zhu Jianqun, Wang Jili, et al. Study on some issues of soil inclinometer in monitoring lateral displacement of soft soil foundation under embankment[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2007, 22(3): 71

[28]刘欣, 雷国辉, 张坤勇, 等. 通过测斜数据预判测斜管失效的分析方法研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(增刊1): 97
Liu Xin, Lei Guojun, Zhang Kunyong, et al. Study of inclinometer data analysis methods for pre-detecting of failure of an inclinometer casing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(S1): 97