

天津南疆港新近吹填成陆区土体承载力 特性及其演变规律

孙科¹, 齐琦¹, 邹君鹏¹, 沈恒旭^{2*}

(1. 天津港远航矿石码头有限公司, 天津 300452; 2. 天津市北洋水运水利勘察设计院有限公司, 天津 300460)

摘要: 天津港南疆港区新近成陆区工程地质条件演变影响港口建设质量与安全。文章结合典型工程案例及港区近 10 a 开发过程中收集的数据, 通过对比堆场建设初期与使用多年后地层参数变化, 对吹填成陆区土体物理指标及地基承载力演变规律进行研究。剖析吹填土从成陆初期到使用多年后物理力学性质变化规律, 探究软土层压缩固结及矿石堆存引发的固结现象, 明确堆场地基因堆存荷载导致的固结密实从而提高地基承载力的过程与原因。分析表明, 吹填土进行地基处理后完成初期固结, 后期场地使用过程中矿石堆存荷载将促进土体进一步固结, 地基承载力随之提高。

关键词: 固结沉降; 地基承载力; 含水率; 孔隙比; 压缩模量

中图分类号: U6; U655.54; TU472 文献标志码: A 文章编号: 2095-7874(2026)04-0074-06

doi: 10.7640/zggwjs202604012

Characteristics and evolution law of soil bearing capacity in the newly reclaimed land area of Tianjin Nanjiang Port

SUN Ke¹, QI Qi¹, ZOU Jun-peng¹, SHEN Heng-xu^{2*}

(1. Tianjin Port Yuanhang Ore Terminal Co., Ltd., Tianjin 300452, China; 2. Tianjin Beiyang Water Transport and Water Conservancy Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300460, China)

Abstract: The evolution of engineering geological conditions in the newly landed area of the Nanjiang port area of Tianjin Port affects the quality and safety of port construction. Based on typical engineering cases and data collected over the past decade of port development, this paper investigates evolution law of soil physical indexes and foundation bearing capacity in the land-filled area by comparing the changes of stratigraphic parameters between the initial construction stage and after long-term use of the yard. Analyze the change law of physical and mechanical properties of the fill soil from the early stage of land formation to the use of many years, explore the consolidation and compaction phenomenon caused by the compression and consolidation of soft soil layers and ore accumulation, and clarify the consolidation and compactness caused by the gene storage load of the yard, so as to improve the bearing capacity of the foundation. The analysis shows that the initial consolidation is completed after the dredging soil is treated, and the ore storage load will promote the further consolidation of the soil during the later use of the site, and the bearing capacity will increase accordingly.

Key words: consolidation settlement; foundation bearing capacity; moisture content; porosity ratio; compression modulus

0 引言

天津港南疆港区作为我国大规模填海造陆工程的核心区域, 近 10 a 来经历了快速开发与建

设, 从滩涂海域逐渐转变为集矿石、能源等货物存储与转运功能于一体的现代化港区。随着经济飞速发展, 港口对堆场的堆存能力也提出了更高

收稿日期: 2025-10-15 修回日期: 2025-12-12

作者简介: 孙科 (1985—), 男, 河北沧州人, 高级工程师, 港口水工专业。

*通讯作者: 沈恒旭, E-mail: 1218886806@qq.com

的要求。

吹填土体在成陆初期呈现高含水率、高压缩性、低强度等不良物理力学性质,建设期间地基处理往往并不能使吹填土层完成100%固结。吹填土体在后续使用过程中,软土层受矿石堆存荷载以及港口运营中各类机械荷载、车辆荷载等多荷载共同影响持续压缩固结,工程地质性质时刻处于动态演变过程。场地地基压缩固结将直接影响地基承载力的变化,因此,深入研究南疆港区新近成陆地带工程地质演变规律对于指导堆场堆存能力提升扩容十分必要。

李海锋等^[1]及邹君鹏等^[2]结合天津港区某矿石堆场项目对“常规真空预压地基处理+运营期矿石分级压载”建设方式进行了研究,得出基于软土地基持续固结特性实现堆场堆存能力提升,具有工序简单、建设周期短、经济效益好等优势,文献中仅通过理论推导及实际应用论证了改造方案的可行性,并未讨论地质变化的规律。刘文彬等^[3]通过现场监测和数值模拟等技术方法研究吹填土施工期和长期沉降发展特性和机理。陈永辉等^[4]通过研究土体固结系数变化总结出超软土固结系数随固结应力的变化规律。学者们在吹填土和超软土方向的研究不仅为工程开展提供了理论支持,同时也丰富了相关领域的研究思路与方法。本文在现有研究的基础上运用对比分析的方法探究吹填成陆区土体处于堆存荷载作用下的物理性质和承载力的演化规律,为堆场改造扩容提供一定的理论依据。

1 后期堆载对承载力提高的理论分析

结合实际工程经验,地基土在长时间固结后其承载力往往会得到提高。沈珠江^[5]首先提出有效固结应力法,并在随后的研究中对其进一步阐明和论述。其主要理论是土体受到外力而压缩,土体压缩引起孔隙水压力增大,使得土体颗粒之间的摩擦力提高,从而增加地基土强度,地基承载力也随地基土强度增加而增加。涂园等^[6]分析了现有强度增长理论(有效应力法和有效固结压力法)的计算原理,得出有效固结压力法可以考虑土体在等向固结和不等向固结中强度增长的差异。陆腾腾^[7]分析了有效固结应力法的计算偏差。宋二祥等^[8]针对饱和黏性土在不排水条件下的总应力进行了分析,深入阐释太沙基有效应力原理,并指出应注意区分静水压和超静水压,区分含有总水压

的平衡总应力和仅含有超静水压的本构总应力。陈祖煜等^[9]提出在饱和的软土地基上修筑堤坝,由于孔隙水压力不易准确测定,需采用“ $\phi=0$ ”的总应力法进行稳定分析的解决方案。

结合邹君鹏等^[2]的分析过程与结论,根据极限平衡理论可以得到适用于黏性土和无黏性土的地基极限承载力公式:

$$P_u = \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma + c N_c + q N_q \quad (1)$$

式中: P_u 为地基承载力; γ 为土的重度; B 为基础宽度; N_γ 为宽度修正系数; c 为黏聚力; N_c 为黏聚力修正系数; q 为边载; N_q 为边载修正系数。

根据式(1)可以得出地基的极限承载力不仅与地基土的重度和强度指标(内摩擦角、黏聚力)有关,而且对于确定的建筑物,承载力还与基础尺度、形状和埋深有关。

当采用固结不排水指标验算地基承载力时,地基极限承载力公式可表示为:

$$P_u = \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma + \tau N_c + q N_q \quad (2)$$

式中: τ 为地基土体不固结不排水试验确定的抗剪强度。

在上部荷载持续作用下,地基土有效应力将得到提高,提高程度如下:

$$\Delta\tau = (\Delta\sigma - u_\sigma) \tan \varphi_{cu} \quad (3)$$

式中: $\Delta\tau$ 为增长有效应力; $\Delta\sigma$ 为增加竖向应力; u_σ 为竖向应力引起的孔隙水压力; φ_{cu} 为固结不排水试验得到的内摩擦角。

结合式(2)和式(3)可得到地基总的极限承载力为:

$$P_u = \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma + (\tau + \Delta\tau) N_c + q N_q \quad (4)$$

大面积堆载情况下,荷载分布面积较大,可以近似看作均布荷载作用下的地基承载力计算,因此式(4)中的基础宽度修正系数和边载修正系数均可以取0。 N_c 可根据李广信等^[10]提出的保守取值为 $\pi+2$,则式(4)简化为:

$$P_u = (\tau + \Delta\tau)(\pi + 2) \quad (5)$$

根据闫澍旺等^[11]提出的有效应力的增长可用固结度估算,式(3)可以表示为:

$$\Delta\tau = U \Delta\sigma \tan \varphi_{cu} \quad (6)$$

式中: U 为固结度。

则将式(6)代入式(5)可以得到:

$$P_u = (\tau + U \Delta\sigma \tan \varphi_{cu})(\pi + 2) \quad (7)$$

进一步简化式(7)可以得到式(8):

$$P_u = P_{u0} + U \Delta \sigma \tan \varphi_{cu} (\pi + 2) \quad (8)$$

式中: P_{u0} 为地基固有承载力。

根据式(8)可以通过固结度、堆载压力、固结不排水内摩擦角进行地基承载力的计算。

假设某软土地基在进行前期真空预压地基处理后固结不排水摩擦角测得为 10° , 软土厚度为 12 m , 固结系数 $C_v = 0.015\text{ m}^2/\text{s}$, 使用期间上部大面积堆载货物, 基底压力为 240 kPa 。

地基承载力增长量、固结度与时间关系曲线如图 1 所示。

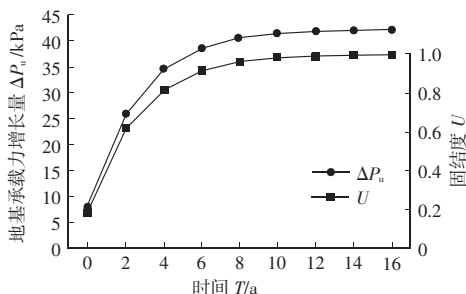


图 1 地基承载力增长量、固结度与时间关系曲线

Fig. 1 Relationship curves among foundation bearing capacity increment, degree of consolidation and time

由图 1 可知, 地基在后续使用过程中在上部荷载长期作用下, 地基固结度持续增长, 同时地基承载力增长量也随之增加, 至固结逐渐完成, 地基承载力达到该荷载下最大值。

2 南疆港区工程地质条件与成陆过程

2.1 地质背景

本次研究场地原为浅海, 后经人工吹填成陆, 并已完成真空预压地基加固处理。地层主要为全新统(Q4)和上更新统(Q3)海相、陆相及海陆交互沉积地层, 从上而下呈层状分布。地基土类型主要为粉砂、淤泥质黏土、粉质黏土。各层土总体上土质尚均匀, 从上而下土质渐好。地层参数见表 1。

表 1 堆场区域地层分布汇总表

Table 1 Summary of stratum distribution in the yard area

土层名称	层厚/m	层底标高/m	摩擦角 $\varphi/^\circ$	抗剪强度 τ/kPa	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
粉砂	2.0	0	31.80	25.64	18.80
淤泥质黏土	5.0	-5.0	5.45	16.52	17.30
粉质黏土	6.2	-11.2	10.45	53.85	18.85

2.2 成陆时间线

2002—2012 年是南疆港区重点建设时期, 吹填土厚度达 $5\sim 12\text{ m}$ 。2012 年对场地进行处理并开始建设堆场。场地已吹填至标高 $3.5\sim 7.5\text{ m}$, 吹填材料为港池疏浚土, 场地上层为吹填的淤泥, 厚度约 $5\sim 6\text{ m}$, 其下为海相沉积的淤泥质黏土及淤泥中、高压缩性软土, 平均总厚度约 20 m 。由于该软土层无法满足场地的使用要求, 因此进行以提高土体强度、减少沉降为目的的地基处理。对于高含水率、高压缩性的淤泥质土, 此堆场区域选择较为常用的真空预压法和堆载预压法进行地基处理, 其原理主要通过排除土体中饱和水, 使地基产生沉降, 提高土体的强度, 增强地基稳定性。

堆场建成后投入使用, 堆场主要用于堆存金属矿石, 最大堆载 8 t 。

3 南疆港区堆场地质演变分析

3.1 堆场沉降变化分析

结合堆场建设时设计图纸及 2021 年地形测量成果对堆场沉降情况进行分析。设计平均标高 5.000 m (高程系统为 1972 年天津市大沽高程系, 2008 年成果)。根据 2021 年《天津港远航散货码头有限公司南货场三期改造工程标高测量》成果, 堆场平均标高 4.078 m (高程系统为 1972 年天津市大沽高程系, 2019 年成果)。场地平均沉降约 0.922 m , 最大沉降约 1.21 m 。堆场沉降随时间变化见图 2, 堆场沉降分布见图 3。

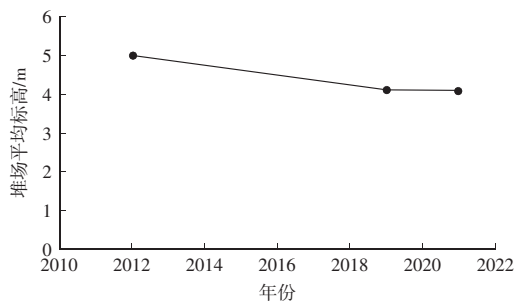


图 2 堆场沉降随时间变化图

Fig. 2 The change of yard settlement with time

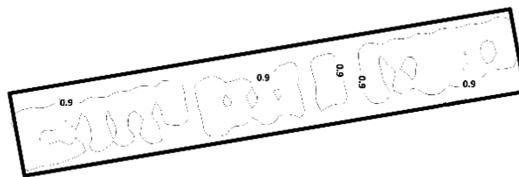


图 3 堆场沉降分布图

Fig. 3 Settlement distribution map of the yard

3.2 地层物理指标变化分析

现场分别于不同使用年限后在同一堆场的相近区域布设勘察孔,通过不同时期地层物理指标对比分析,探究堆场区域地层在荷载作用下变化规律。

1) 含水率变化分析

3个场区(S1、S2、S3)地层含水率在长期荷载作用下均出现降低的情况,如图4所示随着深度的增加含水率降低的幅度逐渐减小,在标高-8m左右不再发生变化。且如图5所示堆场在大荷载长时间作用下在标高为-8~2m范围内地层含水率持续减小。

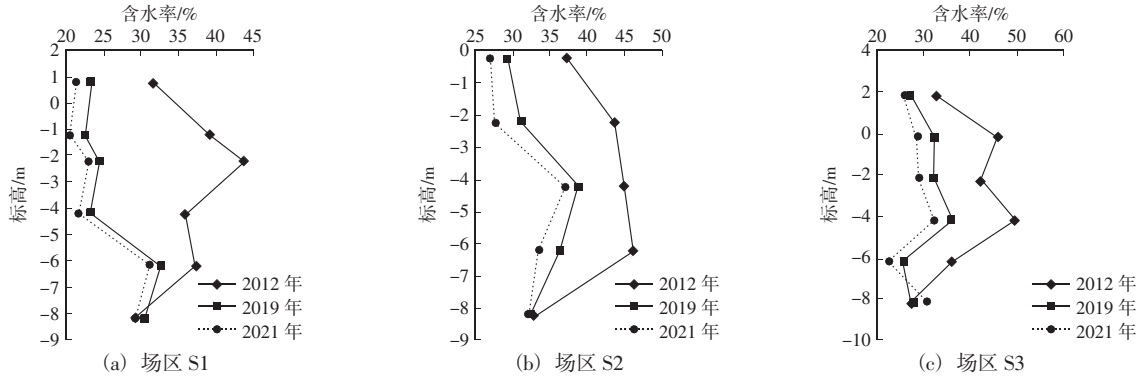


图4 不同时间含水率随深度变化趋势图

Fig. 4 Variation trend of water content with depth at different times

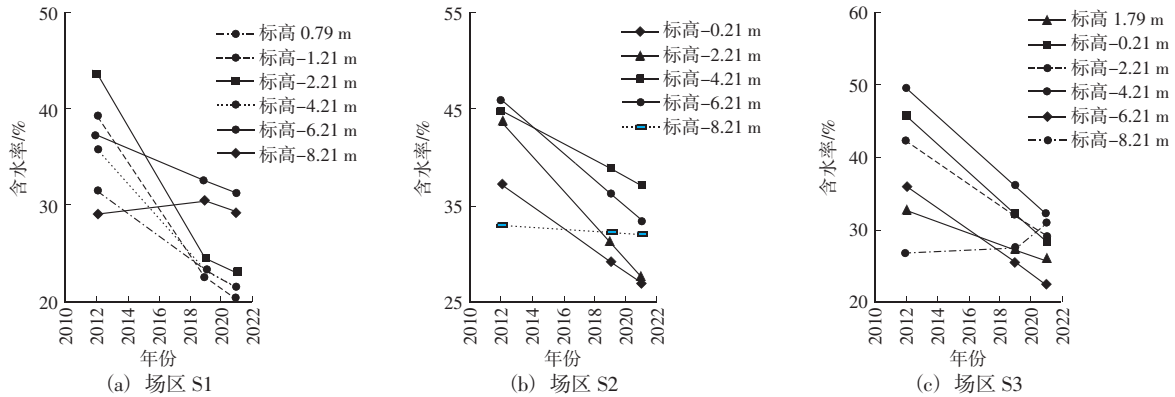


图5 不同标高处土体含水率随时间变化趋势图

Fig. 5 Variation trend diagram of soil water content with time at different elevations

2) 孔隙比变化分析

3个场区地层孔隙比在长期荷载作用下出现降低的情况,如图6所示随着深度的增加孔隙比

降低的幅度逐渐减小,在标高-8m左右基本不再变化;且如图7所示,堆场在大荷载长时间作用下在标高为-8~2m范围内地层孔隙比持续降低。

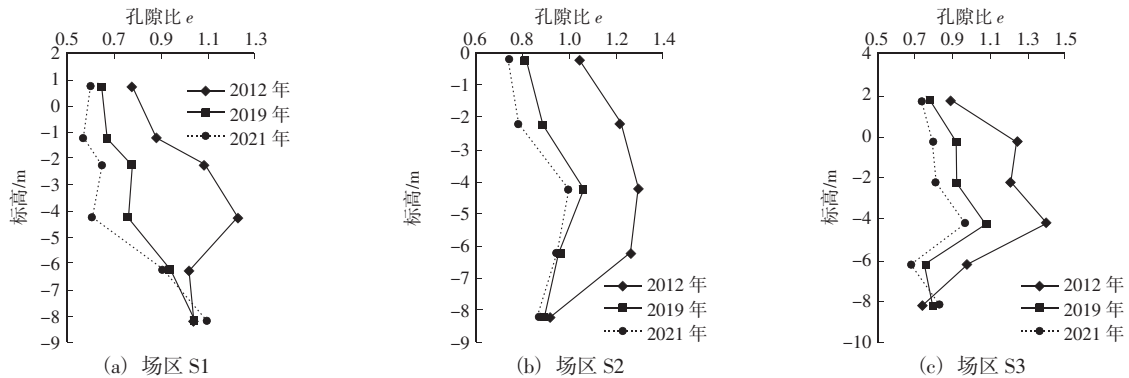


图6 不同时间孔隙比随深度变化趋势图

Fig. 6 Variation trend of pore ratio with depth at different times

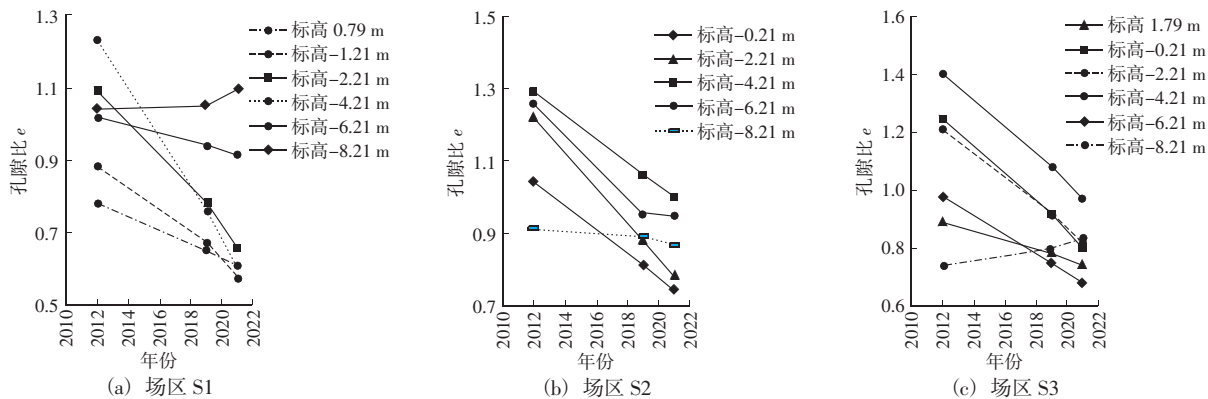


图 7 不同标高处孔隙比随时间变化趋势图

Fig. 7 Variation trend diagram of void ratio with time at different elevations

3) 压缩模量

3 个场区地层压缩模量在长期荷载作用下出现增高的情况, 如图 8 所示随着深度的增加压缩

模量增高的幅度逐渐减小, 在标高-8 m 左右基本不再变化。如图 9 所示, 堆场在大荷载长时间作用下在标高为-8~2 m 范围内地层压缩模量持续增加。

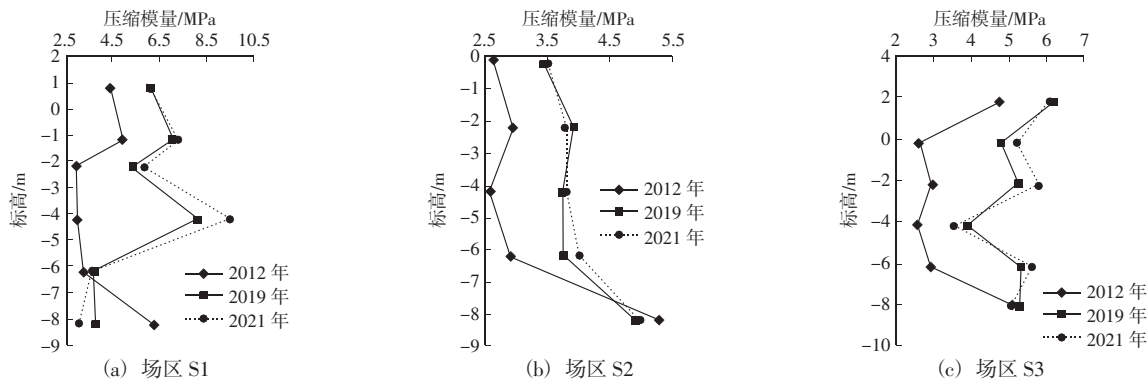


图 8 不同时间压缩模量随深度变化趋势图

Fig. 8 Variation trend diagram of compression modulus with depth at different times

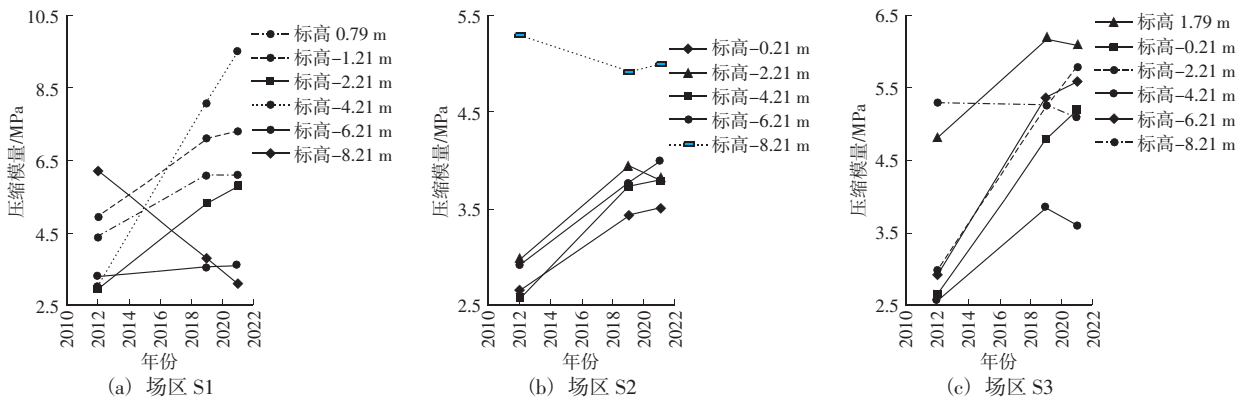


图 9 不同标高处压缩模量随时间变化趋势图

Fig. 9 Variation trend diagram of compression modulus with time at different elevations

综合上述由于场区在建设初期地基处理期间排水板打设底标高为-8 m, 所以在-8~2 m 范围内土层孔隙水可以通过排水板排出, 从而实现堆存

期间土层含水率、孔隙比及压缩模量持续改善。而-8 m 以下土层孔隙水缺少排出通道, 相应指标变化并不明显。

3.3 地基承载力变化分析

在堆场使用过程中场地长期大面积堆载矿石、矿粉等货物。长期荷载作用使得地基土承载力得到逐步提高。通过式(6)和式(8)及表1数据计算,得到堆场地基固有承载力 P_{a0} 及堆载80 kPa时完全固结后堆场地下土体承载力,见表2。通过表2可以得出堆场在荷载作用下地基承载力均得到相应提高。

表2 完全固结时地层承载力汇总表

Table 2 Summary table of stratum bearing capacity at complete consolidation

土层名称	P_{a0}/kPa	$P_a(U=100\%)/\text{kPa}$
粉砂	131.82	386.86
淤泥质黏土	84.95	124.19
粉质黏土	276.85	352.71

现场开展平板载荷试验,检测结果如图10所示,检测曲线存在明显比例界限120 kPa,极限承载力为270 kPa,因此可以得出堆场地基承载力特征值为120 kPa。试验结果印证了长期堆载能够逐步提高地基承载力。

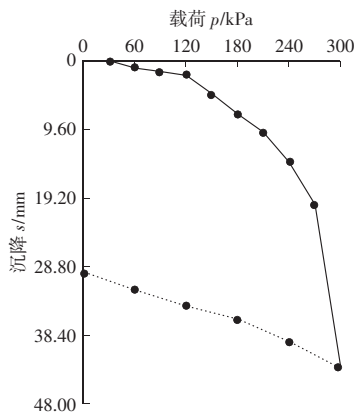


图10 现场平板载荷试验结果

Fig. 10 Field plate load test results

4 结语

南疆新近成陆地带堆场区域工程地质在完成地基处理后土体逐渐稳定,但固结尚未完全,在堆场使用前期,在荷载作用下土层继续固结,含水率降低,孔隙比减小,压缩模量增大,地基土逐渐密实,地基承载力提高。

在时间维度方面,在较长的时间中通过逐级增加荷载的方式能够促进土体中孔隙水缓慢排出,土体孔隙逐渐压密,在保证堆场使用安全的前提下增大土体压缩模量,提高地基承载力。

在空间维度方面,含水率、孔隙比、压缩模量及地基承载力变化主要发生在地表10 m范围内,而且具有随深度的增加变化幅度逐渐减小的趋势。

随着堆场投入运营,大量物料堆载产生持续荷载,促使土体中剩余孔隙水进一步排出,颗粒间接触更紧密,土体结构不断优化。经过上述过程,最终实现堆场承载力显著提高,土体力学性能增强,为堆场安全稳定运行提供坚实基础。

参考文献:

- [1] 李海锋,邹君鹏,齐琦,等.软土地基重载堆场堆存能力提升扩容技术研究与应用[R].天津:天津港远航国际矿石码头有限公司,2024.
LI Hai-feng, ZOU Jun-peng, QI Qi, et al. Research and application of capacity improvement and expansion technology for heavy-load storage yards on soft soil foundations[R]. Tianjin: Tianjin Port Yuanhang International Ore Terminal Co., Ltd., 2024.
- [2] 邹君鹏,陈少青,袁明智.基于地基承载力演变的矿石堆场扩容改造实践[J].国防交通工程与技术,2024,22(4):70-74,79.
ZOU Jun-peng, CHEN Shao-qing, YUAN Ming-zhi. Practice of ore yard expansion and renovation based on the evolution of foundation bearing capacity[J]. Defense Transportation Engineering and Technology, 2024, 22(4): 70-74, 79.
- [3] 刘文彬,李晨,寇晓强.吹填土地基长期沉降与预测技术[J].中国港湾建设,2018,38(3):1-5.
LIU Wen-bin, LI Chen, KOU Xiao-qiang. Prediction technology and long-term settlement of dredger fill foundation [J]. China Harbour Engineering, 2018, 38(3): 1-5.
- [4] 陈永辉,周建华,蔡锐,等.路堤荷载作用下考虑土体固结系数变化的软基固结规律[J].中国港湾建设,2014,34(7):23-26,33.
CHEN Yong-hui, ZHOU Jian-hua, CAI Rui, et al. Consolidation behavior of soft foundation under embankment loads by considering the change of consolidation coefficient[J]. China Harbour Engineering, 2014, 34(7): 23-26, 33.
- [5] 沈珠江.软土工程特性和软土地基设计[J].岩土工程学报,1998(1):100-111.
SHEN Zhu-jiang. Engineering properties of soft soil and design of soft soil foundations[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998(1): 100-111.
- [6] 涂园,王奎华,周建,等.有效应力法和有效固结压力法在预压地基强度计算中的应用[J].岩土力学,2020,41(2):645-654.
TU Yuan, WANG Kui-hua, ZHOU Jian, et al. Application of effective stress method and effective consolidation stress method for strength calculation in preloaded ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(2): 645-654.
- [7] 陆腾腾.有效固结应力法计算软土抗剪强度增量的偏差分析[J].河北工程大学学报(自然科学版),2018,35(2):58-61,70.
LU Teng-teng. Deviation analysis on the increment of shear

(下转第85页)