

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202401014



长期堆载预压处理软土地基效果评价

汪智慧¹, 辛全明^{1,2}, 孔志军², 蔡奇鹏²,
余小康¹, 曹洋¹, 涂兵雄²

(1. 中国建筑东北设计研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110006;

2. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为评估某园区 10 a 长期堆载预压后, 场地后续沉降对拟建管线的影响, 通过室内试验和现场试验对堆载预压处理后的场地进行系统评价, 分别采用双曲线法与有限元法对后续沉降进行预测。结果表明: 场地堆载预压 10 a 后各土层物理力学参数明显改善, 但其中淤泥层性质相对较差, 是场地后续沉降发生的主要地层; 经过 10 a 堆载, 场地主固结沉降基本完成, 固结度达到 95.5%, 说明长期堆载预压效果较好; 对于堆载多年后的场地, 在进行后续沉降数值计算时, 采用弹性模型并选用现场试验获得的参数进行计算, 计算结果与实测数据较好吻合, 场地剩余平均沉降量在 15.4 cm 左右; 园区道路管线可采取常规预防措施。

关键词: 长期堆载预压; 固结沉降; 软土地基; 有限元法; 双曲线法

中图分类号: TU 472

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2024)02-0241-07

Evaluation of Long-Term Preloading Effects on Soft Soil Foundation

WANG Zhihui¹, XIN Quanming^{1,2}, KONG Zhijun²,
CAI Qipeng², SHE Xiaokang¹, CAO Yang¹, TU Bingxiong²

(1. China Northeast Architectural Design and Research Institute Limited Company, Shenyang 110006, China;

2. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to evaluate the effects of ground subsequent settlement on newly constructed pipeline after 10 years of long-term preloading, systematic evaluation of the site is conducted by indoor and on-site tests, and hyperbolic method and finite element method are used to predict subsequent settlement, respectively. The results show that the physical and mechanical parameters of each layer improve significantly after 10 years of preloading on the site, but the properties of the silt layer are relatively poor, which is the main stratum for subsequent settlement of the site. The main consolidation has basically completed after 10 years of preloading, with a consolidation degree of 95.5%, which indicates that the effect of long-term preloading is preferable. For the site loaded for many years, an elastic model is used for subsequent settlement numerical calculations, and parameters obtained from on-site experiments are selected for calculation, the calculation results are in

收稿日期: 2024-01-18

通信作者: 蔡奇鹏(1982-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事岩土与地下工程的研究。E-mail: cqp@hqu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52378342, 52308400); 福建省科技计划资助项目(2022Y4015); 福厦泉州国家自主创新示范区协同创新平台项目(3502ZCQXT2022002); 中建股份科技研发计划资助项目(CSCEC-2020-Z-57)

good agreement with the measured data, and the remaining average settlement of the site is about 15.4 cm. Conventional preventive measures can be taken for road pipelines in the park.

Keywords: long-term preloading; consolidation settlement; soft soil foundation; finite element method; hyperbolic method

东南沿海地区软土分布广泛,具有含水量高、土质疏松、压缩性高、抗剪强度低等缺点^[1-3]。软土作为不良地基容易出现不均匀沉降,危害上部建筑物^[4-6]。根据建设工程的特点,可采用堆载预压法、真空预压法、真空联合堆载法、强夯法、高真空击密法等方法对地基进行处理,其中,堆载预压法因施工便捷、操作简单、对各类软基都具有一定的加固效果^[7-9],受到广泛的应用。

针对软土堆载预压固结沉降,学者们进行了一系列研究。目前常采用数值模拟方法,或者 $e\text{-lg } p$ 曲线法(e 为孔隙比; p 为压力)、三点法、Asaoka 法及双曲线法等拟合方法进行沉降预测。余景良等^[10]采用 FLAC3D 软件分析了堆载预压处理软土地基的沉降规律,结合动态模糊神经网络对软土地基未来沉降进行研究。张国联等^[11]基于 ABAQUS 有限元软件建立三维塑料排水板处理软土地基分析模型。李少和等^[12]对比分析了 $e\text{-lg } p$ 曲线法、三点法、Asaoka 法及双曲线法的预测结果,结果表明以上 4 种方法均能较准确地预测地基沉降。郎向伟^[13]分析了软土地基达到堆载临界填土高度后,沉降速率控制指标、水平位移控制指标、孔隙水压力控制指标及 $\Delta h/\Delta s_i$ 控制指标的变化规律,确定了各指标控制范围。

众多研究表明,堆载预压处理地基能较好地提高承载力和稳定性,是一种效果显著的地基处理方法。因此,本文结合东南沿海某软土地基处理工程,通过现场静力触探、平板载荷、十字板剪切及室内固结压缩等试验,结合数值模拟、双曲线法及实测沉降结果,探讨 10 a 长期堆载预压对滨海软土地基的加固效果,为后续工程的设计、施工提供参考依据。

1 工程概况

选择某滨海软土地基堆载预压工程项目,场地为典型的滨海软土层。该项目主体建筑物采用桩基础且嵌固到稳定地层中,建筑物基本不受软土固结沉降的影响。配套的附属设施(如景观、挡墙)、市政管网等多位于地表或浅部地层中,受场地沉降和不均匀沉降的影响较大,并关系到后期的运营维护,需要对场地开展固结沉降评估。为获取 10 a 长期堆载预压后各土层的工程特性,现场进行了勘探钻孔,9 个勘探钻孔(1#~9#)位置,如图 1 所示。根据现场勘探揭露情况及室内土工试验结果,场地地层从上至下依次为素填土、填砂、淤泥、细砂、粉质粘土、淤泥质粘土、中砂、粉质粘土、粗砂及砾质粘性土。



图 1 10 a 长期堆载后场地勘探钻孔位置平面图

Fig. 1 Plan of drilling locations for site exploration after long-term loading in 10 years

2 地基加固效果评价

2.1 静力触探结果

9 个勘探钻孔位置上,现场静力触探试验测得的变形模量(E_s),如表 1 所示。由表 1 可知:经 10 a 堆载预压处理后,各钻孔位置主要软土层变形模量较堆载前均有提升,其中,粉质粘土的平均变形模量最大(4.4 MPa),淤泥质粘土的平均变形模量次之(3.7 MPa),淤泥的平均变形模量最小(3.3 MPa)。在 5# 和 8# 钻探孔位置上,粉质粘土和淤泥质粘土的变形模量相同且均大于淤泥的变形模量。在后期建设过程中,须重点关注淤泥层的沉降。

表 1 静力触探试验测得的变形模量
Tab. 1 Deformation modulus measured by static contact tests

土层	E_o/MPa									
	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#	堆载前
淤泥	3.1	3.1	3.4	3.4	2.4	3.1	2.8	3.1	2.8	1.9
粉质粘土	4.9	4.6	4.1	4.6	3.7	4.6	4.1	4.1	4.9	3.7
淤泥质粘土	3.7	3.7	3.7	3.7	3.7	4.1	3.1	4.1	3.1	2.4

2.2 平板载荷试验

为了检验经过 10 a 堆载预压后的地基承载力情况,现场开展了一系列的平板载荷试验,由于 1#, 5# 和 6#;2# 和 4#;7# 和 8# 钻孔地层基本一致,根据地层情况、堆载影响深度等,只对部分钻孔进行分析,平板载荷试验结果,如表 2 所示。表 2 中: f_{ak} 为地基承载力特征值; S 为最大荷载对应沉降。

由表 2 可知:堆载预压区域各钻孔位置的地基承载力均超过 100 kPa,根据附属设施承载力要求,加固后的地基承载力需达到 100 kPa,故场地满足设计要求。同时可以看到,各钻孔地层变形模量存在差异,并且相对各钻孔软土层增大,主要是砂土等分布差异影响。

表 2 平板载荷试验结果

Tab. 2 Test results of plate load

参数	1#	2#	3#	8#
f_{ak}/kPa	176	176	176	132
S/mm	2.95	3.26	4.44	4.71
E_o/MPa	32.6	29.5	21.6	15.3

2.3 十字板剪切试验

堆载预压区域各钻孔的十字板剪切试验结果,如表 3 所示。表 3 中: C_u 为不排水抗剪强度。由表 3 可知:各钻孔主要软土层不排水抗剪强度均有不同程度的增大,其中,淤泥不排水抗剪强度最大位于 4# 钻孔,最小位于 1# 钻孔,分别增大了 180.0%,100.7%;各钻孔粉质粘土的不排水剪强度差异较大,最大可相差 27.6 kPa,最大不排水剪强度位于 2# 钻孔位置,较堆载前增大了 99.2%,最小不排水剪强度位于 1# 钻孔,较堆载前增大了 31.5%。对于淤泥质粘土,最大不排水抗剪强度位于 4# 钻孔位置,为 55.7 kPa,较堆载前增大了 90.1%,最小不排水剪强度位于 1# 钻孔,较堆载前增大了 9.6%。可以看出,淤泥的不排水剪强度较堆载前变化较大,且普遍低于粉质粘土和淤泥质粘土,是后期建设过程应重点关注地层。

表 3 十字板剪切试验结果

Tab. 3 Test results of vane shear

土层	C_u/kPa							
	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	堆载前
淤泥	30.1	41.0	39.1	42.0	40.6	40.7	41.2	15.0
粉质粘土	53.8	81.4	72.0	57.5	72.0	60.2	63.5	40.9
淤泥质粘土	32.1	44.8	35.9	55.7	49.8	41.0	43.0	29.3

2.4 室内试验

孔隙比是土的重要物理性质指标,通常用来评价天然土层的密实程度,通过室内试验获得不同土层的孔隙比,如表 4 所示。

表 4 不同土层的孔隙比

Tab. 4 Pore ratios of different soil layers

土层	e				
	1#	2#	3#	8#	堆载前
淤泥	1.840	1.686	1.556	1.139	2.296
粉质粘土 1	0.874	1.426	—	0.979	1.518
淤泥质粘土	1.330	1.358	1.358	1.650	1.965
粉质粘土 2	1.088	—	1.088	1.088	1.132

由表 4 可知:经过 10 a 堆载预压,该区域固结排水进程较久,固结后各层土体的孔隙比相对较小,其中,粉质粘土 2 的孔隙比相较堆载前变化较小,说明粉质粘土 2 土层中的孔隙水含量小,堆载期间固结沉降较小。而淤泥及淤泥质粘土经过 10 a 堆载预压,孔隙比有较大的变化,但堆载预压后两个土层的孔隙比仍较大,含水量较高,表明其抗剪强度较低,压缩性较高,这与现场静力触探试验结果趋势一致。

同时,还对场地主要软土的含水率、密度及压缩模量进行测定。测得淤泥含水率、密度及压缩模量的平均值分别为 58.3%, $1.64\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,2.3 MPa;淤泥质粘土含水率、密度及压缩模量的平均值分别为

51.9%, 1.66 g · cm⁻³, 2.4 MPa; 粉质粘土含水率、密度及压缩模量的平均值分别为 28.1%, 1.88 g · cm⁻³, 6.5 MPa。软土这三项参数均较堆载前有所改善。

3 地基固结沉降研究

3.1 双曲线法地基堆载预压固结沉降计算

根据现场沉降的监测数据,采用双曲线法^[9]对最终沉降量进行预测。双曲线法是目前应用较为广泛的一种方法,最早由尼奇波罗维奇提出,其理论公式为

$$S_t = \frac{t}{a+t} \cdot S_{\infty}。$$

(1)

式(1)中: S_t 为 t 时刻的实测沉降量; S_{∞} 为地基最终沉降量; a 为经验参数。

对式(1)进行时间的求导,可得到任意时刻 t 的沉降速率为

$$\dot{S}_t = \frac{a}{(a+t)^2} S_{\infty}。$$

(2)

式(2)中: \dot{S}_t 为 t 时刻的沉降速率。

2019 年 12 月至 2021 年 7 月,3# 钻孔邻近测点的沉降监测数据,如表 5 所示。表 5 中: X, Y 表示监测点在平面上的坐标; H_1 为原高程; H_2 为现高程; S_i 为沉降量; v_a 为平均沉降速率; v_{qa} 为区域平均沉降速率。

表 5 3# 钻孔邻近测点的沉降监测数据

Tab. 5 Settlement monitoring data of adjacent measuring points of borehole 3#

监测点	Y	X	H_1	H_2	S_i/mm	$v_a/\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$	$v_{qa}/\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$
1	38 404 020.39	2 450 295.443	5.110	5.105	5	3.2	13.1
2	38 404 039.10	2 450 301.632	5.020	5.006	14	8.8	13.1
3	38 404 047.99	2 450 308.858	5.040	4.996	44	27.8	13.1
4	38 404 058.53	2 450 319.151	4.990	5.001	11	6.9	13.1
5	38 404 066.10	2 450 323.222	5.050	5.043	7	4.4	13.1
6	38 404 084.00	2 450 330.416	5.210	5.238	28	17.7	13.1
7	38 404 098.25	2 450 335.390	5.270	5.248	22	13.9	13.1
8	38 404 133.19	2 450 350.859	5.090	5.055	35	22.1	13.1
9	38 404 142.07	2 450 353.557	5.130	5.092	38	24.0	13.1
10	38 404 154.88	2 450 363.043	5.160	5.157	3	1.9	13.1

根据表 5 的沉降监测数据,推算得到 3# 钻孔位置地基的最终沉降量为 286.6 cm,经验参数 a 为 0.477 2,沉降量计算公式及沉降速率计算公式分别为

$$S_t = \frac{t}{0.477\ 2+t} \times 286.6,$$

(3)

$$\dot{S}_t = \frac{0.477\ 2}{(0.477\ 2+t)^2} \times 286.6。$$

(4)

基于双曲线法,推测该场地地基堆载预压从 2011 年 4 月($t=0$)至 2021 年 7 月的 10.2 a 期间沉降速率约为 12.0 mm · a⁻¹,位于表 5 中各点的平均沉降速率 1.9~27.8 mm · a⁻¹之间,且与区域平均沉降速率 13.1 mm · a⁻¹接近。双曲线法测得 2019 年 12 月至 2021 年 7 月的沉降量为 21.7 mm,与表 5 所有监测点位平均监测沉降量 20.7 mm 接近,因此,可采用双曲线法计算沉降量。已完成固结沉降为 273.8 cm,固结度达到 95.5%,剩余沉降量为 12.8 cm,满足设计要求。

根据双曲线法的推算结果可知,2021 年 7 月往后 20 a 的沉降量约为 8.3 cm,平均沉降速率约为 0.4 cm · a⁻¹。

3.2 拟建项目场地后续固结沉降的数值模拟研究

为进一步评估拟建项目场地的后续固结沉降,2021 年 7 月对该场地进行详细的勘察取样、土工试验和原位测试,这些测试数据为场地后续固结沉降的数值模拟计算提供了重要的计算参数。

3.2.1 本构模型的选择 描述土体应力-应变关系的本构模型主要包括线弹性模型和弹塑性模型。

弹性模型是基于广义胡克定律的模型,当应力水平较低时,弹性模型可较好地模拟岩土介质材料的性态。Roscoe 等^[14]基于应力、应变、孔隙比 3 个重要变量,建立了修正剑桥(MCC)土体本构模型,适用于正常固结和轻微超固结粘土。该模型中,方程形式简单,便于进行数值计算,且符合热力学基本原理,对应的耗散势函数形式简单且意义明确^[15]。而摩尔-库伦(Mohr-Coulomb,M-C)塑性模型主要适用于在单调载荷下颗粒状材料,在岩土工程中应用非常广泛。为了确定分析时现场土体属于弹性或弹塑性状态,采用 ABAQUS 有限元软件,分别进行弹性和弹塑性数值模拟研究,弹性分析时,模型仅采用线弹性本构模型;弹塑性分析时,根据土体不同性质分别选择弹塑性本构模型。

3.2.2 数值计算模型设置 数值计算中,取宽度为 1 m、总深度为 H 的土体进行简化计算。土体底面不排水,仅有顶面排水。数值分析过程中,选取 1#(与 5#和 6#钻孔基本一致),2#(与 4#钻孔基本一致),3#,8#(与 7#钻孔基本一致)钻孔为代表,分别建立计算模型。

采用弹性本构模型进行分析时,进一步对比了基于一维固结试验和基于原位静力触探试验获得的模量。采用一维固结试验获得压缩模量(E_s);采用原位静力触探试验获得变形模量,其他参数均保持一致。土层模型计算参数,如表 6 所示。表 6 中: H 为总深度; E_s 为压缩模量; E_o 为变形模量; ν 为泊松比; k 为渗透系数; e 为孔隙比;上标“*”表示根据前期勘察结果得到的经验值。

表 6 土层模型计算参数
Tab. 6 Calculation parameters of soil layer model

土层	H/m	E_s/MPa	E_o/MPa	ν	$k/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	e
素填土	6.3	4.3*	14.1	0.30	1.74×10^{-5}	0.830
淤泥	10.1	2.3	3.4	0.45	1.61×10^{-9}	1.556
淤泥质粘土	6.0	2.4	3.7	0.40	3.90×10^{-9}	1.358
中砂	2.4	5.0*	21.8	0.30	2.43×10^{-4}	1.000
粉质粘土	1.3	6.5	6.2	0.32	3.60×10^{-9}	1.088
粗砂	3.1	8.0*	23.7	0.30	2.90×10^{-4}	0.900*
砾质粘性土	4.0	8.0*	24.0	0.25	1.74×10^{-6}	0.734*

采用弹塑性本构模型进行分析时,粘性土采用 MCC 本构模型,其余土体采用 M-C 本构模型。M-C 模型和 MCC 模型的计算参数,如表 7 所示。表 7 中: φ 为摩擦角; ψ 为剪胀角; c 为黏聚力; λ 为对数硬化模量; κ 为对数体积模量; M 为破坏常数; e 为孔隙比;上标“*”表示根据前期勘察结果得到的经验值。

数值模拟计算的起始时间为 2021 年 7 月,选用这一时间测得的计算参数进行计算,考察其后 20 a 的地基沉降量。模型地表设为排水边界。数值模拟过程中,根据三轴剪切试验确定摩尔-库伦模型的主要参数,根据 $e-\ln p$ 曲线获得修正剑桥模型的主要参数,同时横向对比不同钻孔在相同土层、相同深度条件下的室内试验参数,从而避免由于单一指标的随机性而影响计算结果的稳定。

表 7 M-C 模型和 MCC 模型的计算参数
Tab. 7 Calculation parameters of M-C model and MCC model

土层	M-C 模型			土层	MCC 模型			
	$\varphi/(^{\circ})$	$\psi/(^{\circ})$	c/kPa		λ	κ	M	e
素填土	15.2	7.6	23.6	淤泥	0.181	0.034	0.83	1.660
中砂	25.0*	12.5*	5.0*	淤泥质粘土	0.158	0.029	0.55	1.450
粗砂	25.0*	12.5*	5.0*	粉质粘土	0.141	0.026	0.68	1.168
砾质粘性土	21.4	10.0	24.0					

3.2.3 固结沉降结果分析 以 3#钻孔为例,分别采用弹性分析和弹塑性分析进行地基沉降预测研究。3#钻孔位置堆载预压(2021 年 7 月)后 20 a 地基的沉降预测模拟曲线,如图 2 所示。图 2 中: S_a 为沉降量; t 为时间。

由图 2 可知:采用弹塑性分析预测 20 a 后地基的剩余沉降量高达 86.4 cm,远大于双曲线法计算的最终沉降量,且根据理论计算结果(表 5),随着固结度的增大,未来 20 a 区域平均沉降量不超过 26.2 cm。根据弹性分析法并采用室内试验所获得的参数,计算得到 20 a 后的地基沉降量比双曲线法的预测结果高出约 2.06 倍。当基于现场试验获得的计算参数开展弹性数值分析时,自 2021 年 7 月起未来

20 a地基沉降量为 13.6 cm,并且趋于稳定,这与双曲线法的预测剩余沉降量 12.8 cm 基本一致。

采用弹塑性模型进行场地沉降预测结果偏大,原因主要是场地经过 10 a 的堆载预压,固结度较高。当以此时作为自重固结数值模拟的起始时刻,并选取重新勘探的土体参数,在无新增堆载的情况下,土体主要发生弹性变形,因此,与弹塑性模型的计算结果有较大差异。采用现场试验获得的参数进行弹性分析更吻合,能更好地消除取样过程和土样运输过程由于扰动所带来的影响。因此,当场地固结度高时,在自重固结沉降预测模拟过程中,若无较大附加荷载或较大施工荷载干扰的情况下,选用弹性本构模型并采用现场试验获得参数的分析结果能较准确地模拟拟建项目场地的后续沉降。此外,由图 2 还可以发现,该地基堆载预压结束后的 7 a 里沉降较大,到 10 a 左右该场地地基进入稳定状态。

模拟 3# 钻孔位置堆载预压后 20 a 地基沉降随深度分布曲线,如图 3 所示。由图 3 可知:随着地基深度的增大,沉降量逐渐减小,该钻孔位置分析固结沉降的影响深度在 25 m 左右,且在深度为 6~16 m 地层的沉降量(主要是淤泥层的固结沉降)较大。因此,在后续建设过程中应重点关注淤泥层的沉降。

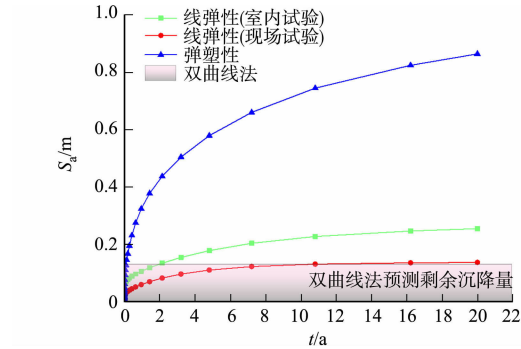


图 2 3# 钻孔位置堆载预压后 20 a 地基的沉降预测模拟曲线

Fig. 2 Simulation curves for settlement prediction of foundations in 20 years after preloading at drilling 3#

根据数值模拟计算结果可知,3# 钻孔的剩余总沉降量为 13.6 cm,未来 5 a 的沉降量约为 10.9 cm,与双曲线法的计算结果基本一致。采用相同的计算方法可得其他 4 个钻孔位置地基未来 20 a (2021 年 7 月起)的沉降模拟预测结果,如表 8 所示。由于监测数据时间、空间上的不连续,部分测线之间的数据有较大波动,以及测线范围与钻孔位置的偏差等问题,因此,监测和评估工作应成为持续细化的工作。

表 8 各钻孔位置地基未来 20 a 的沉降模拟预测结果

位置	S_a /cm			
	2 a	5 a	10 a	20 a
1# 钻孔	8.5	11.9	14.8	16.2
2# 钻孔	12.3	14.9	15.9	16.2
3# 钻孔	8.1	10.9	12.6	13.6
8# 钻孔	10.9	13.0	14.6	15.7

4 结论

根据现场试验、室内试验、数值模拟,结合理论计算对某软土地基堆载预压工程项目的固结沉降效果进行评价,得到以下 3 点结论。

1) 现场和室内试验均表明,先期堆载大部分区域经过长达 10 a 的固结,软土力学参数提升较明显,但淤泥性质仍较差,固结性较大,是后续主要关注土层。部分钻孔试验区域物理力学参数及承载力较差,场地承载力分布不均匀,应引起重视。

2) 双曲线法计算地基在评估前 10.2 a 的沉降量为 273.8 cm,固结度达到 95.5%,场地固结度高,后期仍可能发生 12.8 cm 的沉降,但对该项目附属设施的影响较小。

3) 在对后续地基固结沉降的数值模拟计算中,对比分析了弹性模型和弹塑性模型的差异,计算结果表明,弹性分析结果与项目实际情况较为一致,但须采用现场试验获得的计算参数。若场地在堆载预压 10 a 后不进行任何处理,则再经过 20 a 后 3# 钻孔位置仍将 13.6 cm 的沉降量,略大于通过双曲线法计算的沉降量(8.3 cm)。整个场地地基剩余平均沉降量约为 15.4 cm。

参考文献:

- [1] 邹育麟,李建兴. 排水板堆载预压处理软土路基原位观测试验[J]. 铁道科学与工程学报,2017,14(8):1658-1663. DOI:10.19713/j.cnki.43-1423/u.2017.08.012.
- [2] 蒋建清,曹国辉,刘热强. 排水板和砂井联合堆载预压加固海相软土地基的工作性状的现场试验[J]. 岩土力学,2015,36(增刊2):551-558. DOI:10.16285/j.rsm.2015.S2.077.
- [3] 邓礼久,金亮星,罗嘉金. 塑料排水板堆载预压法处理软基的固结效果[J]. 铁道科学与工程学报,2013,10(3):68-72. DOI:10.19713/j.cnki.43-1423/u.2013.03.014.
- [4] 刘超. 软土地区大面积回填地基地基加固方案分析研究[J]. 建筑结构,2023,53(增刊1):2984-2987. DOI:10.19701/j.jzjg.23S1238.
- [5] 杨奕. 堆载预压法处理软土地基的应用研究[J]. 建筑结构,2022,52(增刊2):2155-2157. DOI:10.19701/j.jzjg.22S2110.
- [6] 何志超,徐永福. 长江漫滩沉积软土地基处理施工灾变机制[J]. 工程地质学报,2023,31(6):2082-2092. DOI:10.13544/j.cnki.jeg.2021-0582.
- [7] 刘光庆,葛红斌,刘海旺,等. 软土地基填海机场堆载预压沉降预测分析方法[J]. 工业建筑,2022,52(1):159-164. DOI:10.13204/j.gyjzg20081106.
- [8] 张世民,何瑜琳. 堆载预压和真空堆载联合预压的比较[J]. 土木建筑与环境工程,2016,38(增刊2):74-78. DOI:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.S2.015.
- [9] 李波,程文亮,项存平,等. 大面积堆载预压处理深厚软基工后沉降预测研究[J]. 岩土工程学报,2021,43(增刊2):162-165. DOI:10.11779/CJGE2021S2039.
- [10] 余景良,吕言新,李海波. 软土地基堆载预压沉降特性及智能化预测研究[J]. 施工技术,2014,43(11):112-114. DOI:10.7672/sjgs2014110112.
- [11] 张国联,邹海文,王玉奇,等. 堆载预压处理滨海软基三维数值分析[J]. 东北大学学报(自然科学版),2017,38(12):1780-1784. DOI:10.12068/j.issn.1005-3026.2017.12.023.
- [12] 李少和,黄曼,林群仙. 堆载预压法处理软基沉降实测与理论计算分析[J]. 科技通报,2015,31(9):93-96,111. DOI:10.13774/j.cnki.kjtb.2015.09.021.
- [13] 郎向伟. 堆载预压法处理软土地基控制指标的分析[J]. 铁道建筑,2012(8):93-95. DOI:10.3969/j.issn.1003-1995.2012.08-27.
- [14] ROSCOE K H, THURAIRAJAH A, SCHOFIELD A N. Yielding of clays in states wetter than critical[J]. Géotechnique,1963,13(3):211-240. DOI:10.1680/geot.1963.13.3.211.
- [15] 李杭州,张志龙,廖红建,等. 结构性土的三维修正剑桥模型研究[J]. 岩土工程学报,2022,44(增刊1):12-16. DOI:10.11779/CJGE2022S1003.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:方德平)