

长期加卸载作用下土体累积变形特性的 试验与沉降计算研究

邓政东¹, 荣建², 顾晓强^{1*}, 周赫宸¹, 韩凯², 刘凯凯²

(1. 同济大学 地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 上海城建市政工程(集团)有限公司, 上海 200065)

摘要: 重型集装箱的长期加卸载会引起土层的累积变形, 对堆场及邻近的自动起重机轨道等设施的运营和安全造成不利影响。本文以上海洋山港自动化堆场改建工程为背景, 通过室内加卸载固结试验分析了集装箱长期加卸载作用下分层土体的变形特性, 结合应力面积法提出了基于初次加载应变的长期加卸载作用下地基沉降预测计算公式。研究表明, 不同幅值加卸载作用下不同类型土体累积变形的发展规律基本一致, 可分为快速发展、缓慢增加和趋于稳定3个阶段, 长期加卸载累积应变与初次加载应变有良好的线性关系。结合现行规范和长期加卸载作用下的沉降预测结果, 对上海洋山港自动化堆场的运营提出了建议。研究结果可为类似集装箱堆场的设计优化与施工提供理论支持和工程借鉴。

关键词: 港口堆场; 长期加卸载; 固结试验; 累积变形; 预测模型

中图分类号: TU41

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)06-0557-07

Experimental study on cumulative deformation characteristics of soil under long-term loading and unloading and calculation of settlement

DENG Zhengdong¹, RONG Jian², GU Xiaoliang^{1*}, ZHOU Hechen¹, HAN Kai², LIU Kaikai²

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Urban Construction Municipal Engineering (Group) Co., Ltd., Shanghai 200065, China)

Abstract: The long-term loading and unloading of heavy containers can cause cumulative deformation of soil layers, which has adverse effects on the operation and safety of yards and facilities such as adjacent automatic crane tracks. This paper analyzed the deformation characteristics of the storage yard at Shanghai Yangshan Port caused by containers using loading and unloading consolidation test in laboratory conditions. A long-term settlement prediction calculation formula based on the initial loading strain was proposed by combining the stress area method. The results indicate that the cumulative deformation of different types of soil under various magnitudes of loading and unloading follows a consistent development pattern, which can be divided into three stages: rapid development, gradual increase and eventual stabilization. Furthermore, a robust linear correlation exists between the long-term accumulated strain and the initial loading strain. Practical suggestions are proposed for the operation of the automated container yard at Shanghai Yangshan Port by integrating the current standards and predictions of settlement. The research findings can offer theoretical support and engineering references for the design and construction of similar projects.

Key words: port yard; long-term loading and unloading; consolidation test; cumulative deformation; prediction model

收稿日期: 2024-05-11

基金项目: 国家自然科学基金(52178344)。

作者简介: 邓政东(2001—), 男, 湖南郴州人, 硕士研究生, 主要从事岩土工程变形分析方面的研究。E-mail: 2330825@tongji.edu.cn。

*通信作者: 顾晓强(1981—), 男, 浙江桐乡人, 博士, 教授, 主要从事土的基本特性、土动力学和宏微观土力学等方面的研究。

E-mail: guxiaoqiang@tongji.edu.cn。

0 引言

上海洋山港自动化堆场运营期间,重型集装箱的进出场对场地地基的作用属于长期加卸载,会引起土层尤其是软弱土层的累积变形,影响堆场和周边建(构)筑物的正常使用和运营安全^[1-2]。如何预测堆场在长期加卸载条件下的沉降是亟待解决的关键问题。国内外学者对循环荷载条件下的土体变形进行了广泛的研究。SEED等^[3]采用不排水三轴试验研究循环荷载对黏性土的强度影响。FRANCE和SANGREY^[4]在部分排水条件下对土样进行了循环荷载试验。周建^[5]在循环荷载下开展了饱和软黏土的应变软化特性试验,得出了饱和软黏土的孔隙水压发展模型和应变软化模型。朱俊高等^[6]开展了反复加卸载的一维固结试验,研究了不同加卸载条件下土体次固结系数的变化规律。黄茂松等^[7]对上海地区的饱和软黏土进行了一系列不排水循环试验,研究了不同应力历史下饱和软黏土的不排水循环累积变形特性。杨敏等^[8]利用有限元分析反复加卸载次数与堆载中心沉降的关系,发现反复加卸载次数只会引起塑性变形的累加,与弹性

变形无关。已有研究表明,循环荷载作用次数、反复固结压力是影响长期加卸载条件下土体变形特性的重要因素^[9-12]。

以往对黏性土变形特性的研究集中在较快速的循环荷载作用下,采用不排水试验条件,但对于港口码头、工业厂房、筒仓等实际工程中的长期慢速加卸载过程(排水条件)下土体的变形特性研究较少,有待进一步深入研究。本文通过室内长期加卸载的固结试验,分析了长期加卸载作用下弹性变形与加卸载次数、加卸载累积变形与加卸载次数以及累积变形经验模型与初次加载应变的关系,并结合应力面积法提出了长期加卸载作用下基于初次加载应变的沉降预测模型,为上海洋山港自动化堆场工程的建设及安全运营提供理论支撑。

1 试验土样及试验方案

1.1 试验土样

上海洋山港自动化堆场改建工程位于上海临港,试验土样为取自上海东海大桥堆场附近的原状样,从不同深度取得3种土样OD-1、OD-2、OD-3,其基本物理性质指标见表1。

表1 土体基本物理性质指标
Table 1 Physical properties of the soil

土样	取样深度/m	土样性质	含水率 $w/\%$	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$	颗粒比重 G_s	初始孔隙比 e_0
OD-1	8.0~8.3	砂质粉土	32.5	19.6	2.70	0.93
OD-2	17.2~17.5	淤泥质黏土	46.8	17.3	2.74	1.29
OD-3	21.0~21.5	黏土	45.9	18.7	2.74	1.27

1.2 试验方案

本文堆场区域均为重箱堆场,各层地基土均为正常固结土。场地最大堆高为6层,根据《港口工程荷载规范》(JTS 144—1—2010)^[13],堆箱区地基顶部最大荷载可按60 kPa考虑。通过土中应力计算公式的计算结果并结合现场钻孔取样测得的土体竖向自重固结应力结果,可得出各深度土样对应的竖向自重应力和集装箱荷载产生的竖向附加应力。场地地层剖面及自重应力、最大荷载时附加应力分布如图1所示。

为研究在集装箱长期加卸载过程中土体的沉降特性,开展一维固结加卸载试验,试验中根据土样的自重应力确定预压荷载 p_c ,根据集装箱堆载引起的土中附加应力确定加卸载幅值 p_m 。一维固结加卸载试验工况如表2所示。

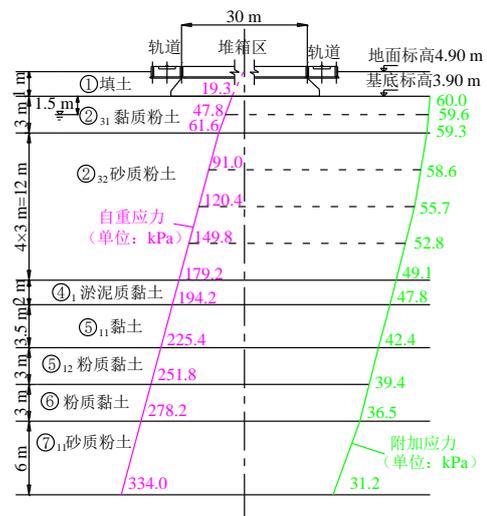


图1 场地地层剖面及自重应力、最大荷载时附加应力分布
Fig. 1 Stratigraphic profile of the site with distribution of geostatic stress and additional stress under maximum load

表 2 一维固结加卸载试验工况表

Table 2 Conditions of one-dimensional consolidation test under loading and unloading

试样 编号	预压荷载 p_c/kPa	加卸载幅值 p_m/kPa	加卸载 次数 N
OD-1-1	100	20.0	10
OD-1-2	100	40.0	15
OD-1-3	100	60.0	30
OD-2-1	180	20.0	30
OD-2-2	180	35.0	30
OD-2-3	180	50.0	30
OD-3-1	200	12.5	30
OD-3-2	200	25.0	30
OD-3-3	200	50.0	30

2 试验设备及试验步骤

试验采用杠杆式一维固结仪开展, 环刀试样内径为 61.8 mm, 高度为 20 mm, 采用百分表测试加卸载过程中的土体变形。由于试验周期较长, 环刀试样表面需覆水保证试样的饱和度。

根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019) [14], 循环加卸载的一维固结试验与常规试验步骤基本相同, 加卸载步骤和停止试验标准如下:

(1) 分级加载-卸载-再加载: 每完成一级压力的施加或卸载后开始计时, 每级压力保持 24 h 后记录百分表读数。完成一级压力测定后, 继续施加或卸载下一级压力, 直至所有测定完成。

(2) 停止试验: 当连续两次加卸载的百分表读数变化小于 1% 时, 停止试验。

3 试验成果及分析

加卸载作用下应力-应变曲线示意图如图 2 所示, 记一次加卸载过程结束后的应变为加卸载累积应变。图 3~5 分别给出了砂质粉土、淤泥质黏土和黏土土样的加卸载试验结果。

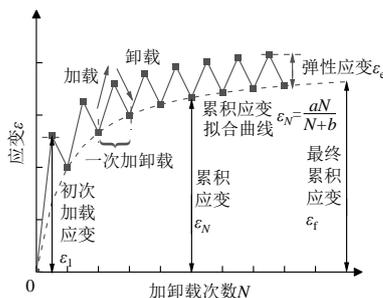


图 2 加卸载作用下应力-应变曲线示意图

Fig. 2 Stress-strain curve under loading and unloading

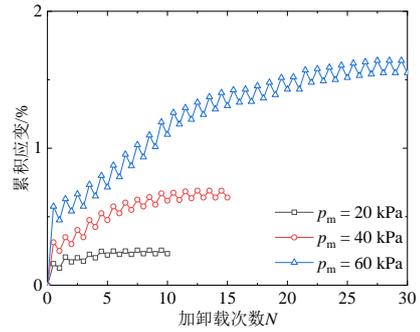


图 3 砂质粉土土样加卸载试验结果

Fig. 3 Test results of sandy silt samples

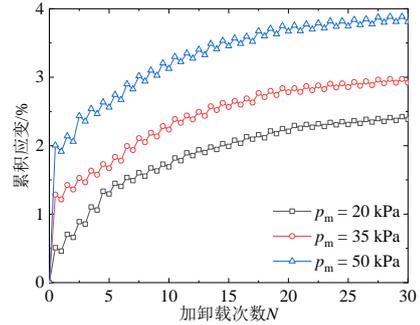


图 4 淤泥质黏土土样加卸载试验结果

Fig. 4 Test results of mucky clay samples

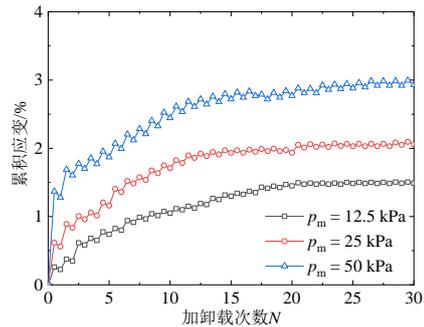


图 5 黏土土样加卸载试验结果

Fig. 5 Test results of clay samples

3.1 加卸载弹性变形与加卸载次数的关系

图 6~8 分别给出了砂质粉土、淤泥质黏土和黏土土样在一维固结加卸载试验条件下, 弹性应变与加卸载次数的关系。结果表明, 当加卸载幅值一定时, 初期的弹性应变较大。随着加卸载次数增加, 由于荷载压实作用, 弹性变形略有减小并逐渐稳定。

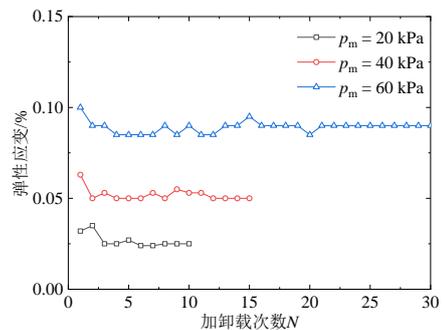


图 6 砂质粉土土样加卸载弹性应变与加卸载次数的关系

Fig. 6 Relationship between elastic strain and the number of loading and unloading cycles of sandy silt samples

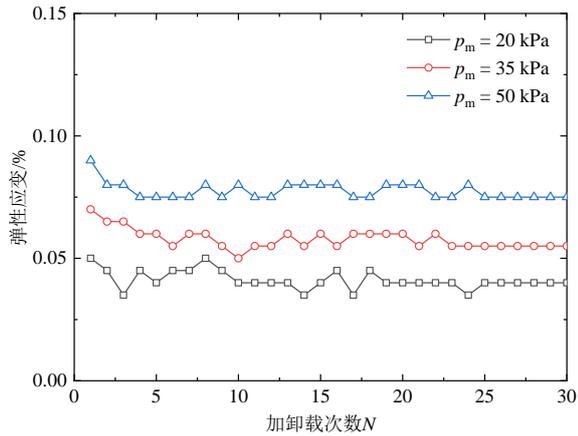


图7 淤泥质黏土土样加卸载弹性应变与加卸载次数的关系
Fig. 7 Relationship between elastic strain and the number of loading and unloading cycles of mucky clay samples

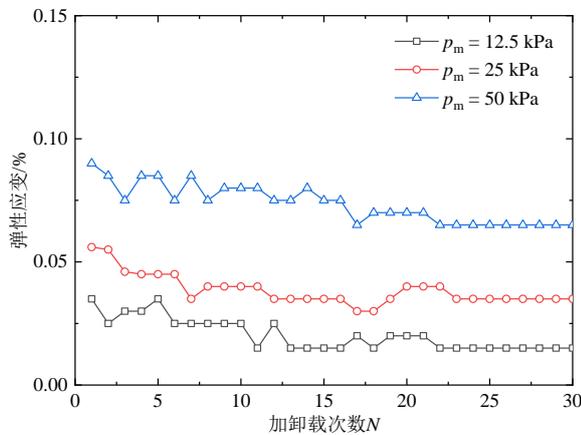


图8 黏土土样加卸载弹性应变与加卸载次数的关系
Fig. 8 Relationship between elastic strain and the number of loading and unloading cycles of clay samples

3.2 加卸载累积变形与加卸载次数的关系

图9~11分别给出了砂质粉土、淤泥质黏土和黏土土样在一维固结加卸载试验工况下累积应变与加卸载次数的关系。不同土样加卸载累积变形的发展规律基本一致，大体可分为3个阶段，即累积变形快速发展阶段、缓慢增加阶段和趋于稳定阶段。在相同荷载水平下，淤泥质黏土和黏土累积变形趋于稳定所需的加卸载次数明显大于砂质粉土。

结果表明，加卸载幅值越大，砂质粉土累积变形趋于稳定所需的加卸载次数越多，最终累积变形也越大。当砂质粉土的加卸载幅值为20 kPa、40 kPa，加卸载次数为10~15次时，累积变形已经趋于稳定，稳定时累积应变分别为0.2%和0.6%；当加卸载幅值为60 kPa、加卸载次数为30次时，累积应变为1.6%。当淤泥质黏土的加卸载幅值为20 kPa、35 kPa、50 kPa，加卸载次数为30次时，累积应变分别为2.4%、2.9%、3.8%。当黏土的加卸载幅值为12.5 kPa、25 kPa、50 kPa，加卸载次数为30次时，累积应变分别为1.5%、2.1%、2.9%。

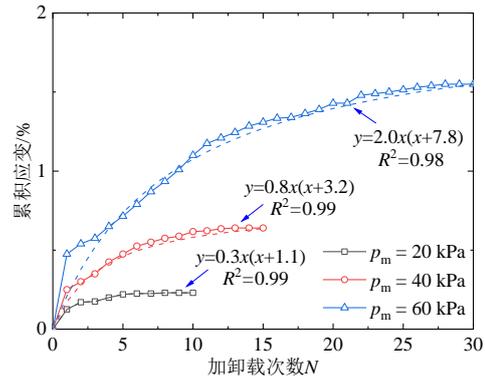


图9 砂质粉土土样加卸载累积应变与加卸载次数的关系
Fig. 9 Relationship between accumulated strain and the number of loading and unloading cycles of sandy silt samples

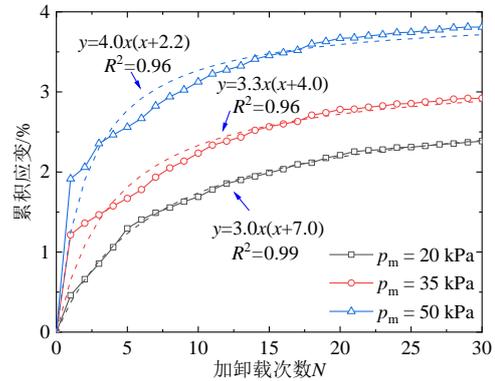


图10 淤泥质黏土土样加卸载累积应变与加卸载次数的关系
Fig. 10 Relationship between accumulated strain and the number of loading and unloading cycles of mucky clay samples

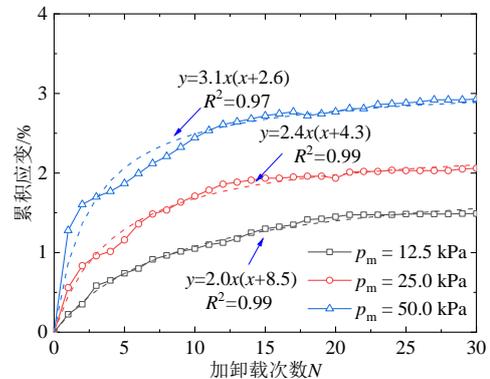


图11 黏土土样加卸载累积应变与加卸载次数的关系
Fig. 11 Relationship between accumulated strain and the number of loading and unloading cycles of clay samples

3.3 加卸载累积变形经验模型

本研究发土体在一维加卸载作用下，土体累积变形在加卸载次数较少时上升较快，而当加卸载次数较大时累积变形逐渐趋于平缓。因此，选用双曲线模型描述土体在加卸载作用下的累积变形发展规律：

$$\epsilon_N = \frac{aN}{N+b} \quad (1)$$

式中： ϵ_N 为土体累积应变； N 为加卸载次数； a 、 b 为拟合参数。拟合曲线见图9~11，拟合参数如表3所示。

表 3 双曲线模型拟合参数表

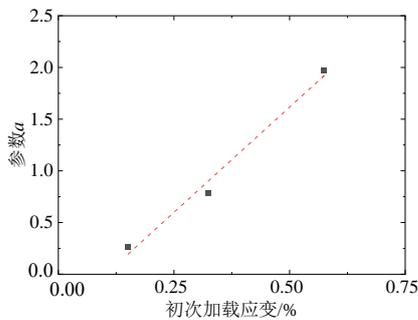
Table 3 Fitting results of the hyperbolic model

土样性质	初次加载应变/%	参数 a	参数 b	R^2
砂质粉土	0.15	0.3	1.1	0.99
	0.33	0.8	3.2	0.99
	0.58	2.0	7.8	0.98
淤泥质黏土	0.50	3.0	7.0	0.99
	1.32	3.3	4.0	0.96
黏土	2.02	4.0	2.2	0.96
	0.24	2.0	8.5	0.99
黏土	0.59	2.4	4.3	0.99
	1.37	3.1	2.6	0.97

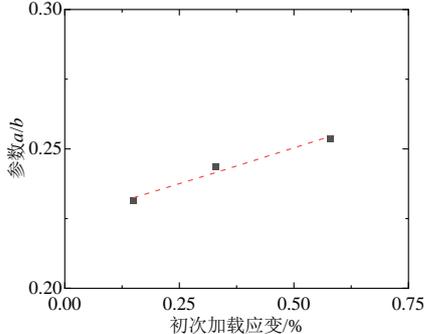
3.4 累积变形经验模型与初次加载应变的关系

加卸载作用下土体累积变形双曲线模型中的参数 a 具有最终稳定时累积变形的物理意义, 参数 a/b 反映了加卸载初期累积应变增长的速率。以往的研究表明, 加卸载作用下累积应变与初次加载应变 ϵ_1 有关^[15]。

图 12~14 分别给出了砂质粉土、淤泥质黏土和黏土的累积变形双曲线模型参数与初次加载应变 ϵ_1 的关系。结果表明, 参数 a 和参数 a/b 均与初次加载应变 ϵ_1 有良好的线性关系。因此, 本文采用不过原点的线性拟合, 3 种土样的拟合结果如表 4 所示。建议后续对上海洋山港自动化堆场实际工程进行反演分析, 根据反演结果对参数取值作进一步修正。

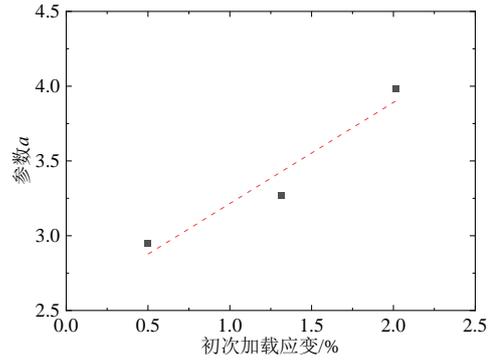


(a) 参数 a 与初次加载应变的关系

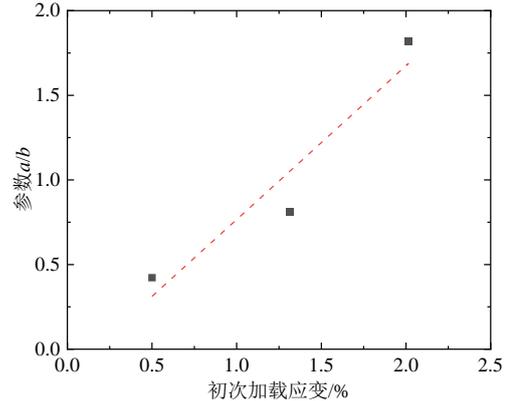


(b) 参数 a/b 与初次加载应变的关系

图 12 砂质粉土双曲线模型参数与初次加载应变的关系
Fig. 12 Relationship between hyperbolic model parameters and initial loading strain of sandy silt samples

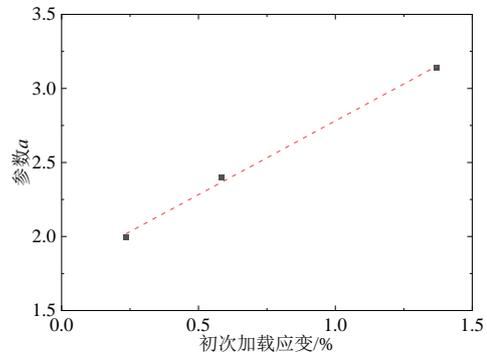


(a) 参数 a 与初次加载应变的关系

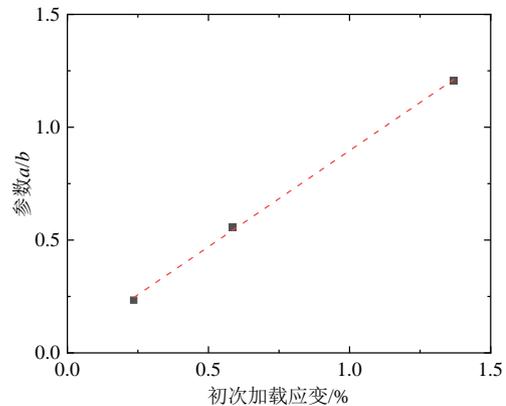


(b) 参数 a/b 与初次加载应变的关系

图 13 淤泥质黏土双曲线模型参数与初次加载应变的关系
Fig. 13 Relationship between hyperbolic model parameters and initial loading strain of mucky clay samples



(a) 参数 a 与初次加载应变的关系



(b) 参数 a/b 与初次加载应变的关系

图 14 黏土双曲线模型参数与初次加载应变的关系
Fig. 14 Relationship between hyperbolic model parameters and initial loading strain of clay samples

表4 双曲线模型参数与初次加载应变拟合结果

Table 4 Fitting results between hyperbolic model parameters and initial loading strain

土样性质	拟合结果	R^2
砂质粉土	$a = 4.1\varepsilon_1 - 0.4$	0.98
	$a/b = 0.05\varepsilon_1 + 0.22$	0.98
淤泥质黏土	$a = 0.7\varepsilon_1 + 2.5$	0.93
	$a/b = 0.85\varepsilon_1 - 0.05$	0.95
黏土	$a = 1.0\varepsilon_1 + 1.8$	0.99
	$a/b = 0.88\varepsilon_1 + 0.02$	0.99

3.5 长期加卸载沉降预测模型

为考虑长期加卸载作用下的地基沉降，将本文加卸载累积变形经验模型与应力面积法相结合，建立基于初次加载应变的长期加卸载沉降预测模型。

长期加卸载地基最终竖向变形量可按式(2)计算：

$$S_f = \psi_s \sum_{i=1}^n \varepsilon_{fi} h_i \quad (2)$$

$$\varepsilon_{fi} = \lambda_i \varepsilon_{i1} + \mu_i \quad (3)$$

式中： S_f 为最终竖向变形量，m； ψ_s 为沉降计算经

验系数； ε_{fi} 为第*i*层土的平均最终竖向累积应变； ε_{i1} 为第*i*层土的平均初次加载竖向应变； h_i 为第*i*层土层的厚度，m； λ_i 、 μ_i 为第*i*层土的最终竖向累积应变与初次加载竖向应变关系的拟合参数。

初次加载应变计算、地基变形计算深度、沉降计算经验系数取值应符合《建筑地基基础设计规范》(GB 50007—2011) [16] 的相关规定。

堆场土体分层、各层土体自重应力及最大荷载时附加应力分布见图1。由以上沉降预测模型计算堆场长期加卸载沉降，可得当长期加卸载幅值为60 kPa（堆箱6层）、沉降计算经验系数取0.7时，堆场土体变形为0.43 m，计算过程如表5所示。《港口道路与堆场设计规范》(JTS 168—2017) [17] 规定，集装箱堆场和水泥混凝土铺面沉降不宜大于0.30 m。建议上海洋山港自动化堆场工程针对堆载场地的地基进行加固，在建设及运营期间进行详细的工程影响评估和加载控制，同时实施沉降监测以确保堆场及周边建（构）筑物的长期安全性。

表5 应力面积法计算长期加卸载沉降

Table 5 Long-term settlement calculated by stress area method

分层厚度 h_i /m	压缩模量 E_{si} /MPa	初次加载应变 ε_{i1} /%	最终累积应变 ε_{fi} /%	最终累积沉降 $\psi_s \sum_{i=1}^n \varepsilon_{fi} h_i$ /mm
3.0	6.02	1.00	2.80	58.7
3.0	10.30	0.58	1.99	100.5
3.0	10.30	0.58	1.97	141.8
3.0	10.30	0.57	1.96	182.8
3.0	14.84	0.56	1.90	208.0
2.0	3.86	1.51	3.56	257.7
3.5	4.62	1.19	2.99	331.1
3.0	6.49	0.84	2.64	386.4
3.0	9.60	0.54	1.83	424.8
1.0	15.82	0.32	0.92	431.2

4 结 论

本文对洋山港自动化堆场的堆载变形进行了长期加卸载的一维固结试验，分析了长期加卸载作用下弹性变形与加卸载次数、加卸载累积变形与加卸载次数以及累积变形经验模型与初次加载应变的关系，并得出以下结论：

(1) 不同幅值加卸载作用下不同类型土体累积变形的发展规律基本一致，可分为累积变形快速发展阶段、缓慢增加阶段和趋于稳定阶段。同时，在相同加卸载幅值下，砂质粉土的累积变形远小于

黏土和淤泥质黏土。

(2) 在集装箱荷载范围内，长期加卸载作用下堆场土体累积变形与加卸载次数的关系呈双曲线型，其中反映应变初始增速、最终累积应变的两参数均与初次加载应变有较好的线性关系。

(3) 建立了一种加卸载累积变形经验模型与应力面积法相结合的堆场长期加卸载沉降计算方法。经计算，在长期加卸载幅值60 kPa作用下，堆场土体沉降达0.43 m，超过规范建议值。建议对堆载场地进行地基加固，严格控制加卸载幅值，同时实施沉降监测以确保堆场及周边建（构）筑物的长期安全性。

参考文献

- [1] STEWART D P, JEWELL R J, RANDOLPH M F. Design of piled bridge abutments on soft clay for loading from lateral soil movements[J]. *Géotechnique*, 1994, 44(2): 277-296.
- [2] TAVENAS F, MIEUSSENS C, BOURGES F. Lateral displacements in clay foundations under embankments[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1979, 16(3): 532-550.
- [3] SEED H B, CHAN C K. Clay strength under earthquake loading conditions[J]. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1966, 92(2): 53-78.
- [4] FRANCE J W, SANGREY D A. Effects of drainage in repeated loading of clays[J]. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1977, 103(7): 769-785.
- [5] 周建. 循环荷载作用下饱和软粘土特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 1998.
ZHOU Jian. Properties of saturated clay under cyclic loading[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 1998.
- [6] 朱俊高, 冯志刚. 反复荷载作用下软土次固结特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2009, 31(3): 341-345.
ZHU Jungao, FENG Zhigang. Experimental study on behaviour of secondary consolidation of soft soils under repeatedly dumped loads[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(3): 341-345.
- [7] 黄茂松, 李进军, 李兴照. 饱和软粘土的不排水循环累积变形特性[J]. *岩土工程学报*, 2006, 28(7): 891-895.
HUANG Maosong, LI Jinjun, LI Xingzhao. Cumulative deformation behaviour of soft clay in cyclic undrained tests[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2006, 28(7): 891-895.
- [8] 杨敏, 周洪波, 朱碧堂. 长期重复荷载作用下土体与邻近桩基相互作用研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(6): 1083-1090.
YANG Min, ZHOU Hongbo, ZHU Bitang. Study on soil-pile interaction subjected to long-term repeated surcharge loads[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(6): 1083-1090.
- [9] 周建, 龚晓南, 李剑强. 循环荷载作用下饱和软粘土特性试验研究[J]. *工业建筑*, 2000, 30(11): 43-47, 4.
ZHOU Jian, GONG Xiaonan, LI Jianqiang. Experimental study of saturated soft clay under cyclic loading[J]. *Industrial Construction*, 2000, 30(11): 43-47, 4.
- [10] 师旭超, 孙运德, 士贺飞. 长期反复荷载作用下软黏土地基的变形特性[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2020, 42(2): 23-29.
SHI Xuchao, SUN Yunde, SHI Hefei. Deformation characteristics of soft soil foundation under long-term repeated loading[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2020, 42(2): 23-29.
- [11] 周盈. 交通循环荷载作用下软黏土长期动力特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
ZHOU Ying. Study on long-term dynamic characteristics of soft clay under cyclic traffic load[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.
- [12] 陈颖平, 黄博, 陈云敏. 循环荷载作用下软黏土不排水累积变形特性[J]. *岩土工程学报*, 2008, 30(5): 764-768.
CHEN Yingping, HUANG Bo, CHEN Yunmin. Reliability analysis of high level backfill based on chaotic optimization[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2008, 30(5): 764-768.
- [13] 中华人民共和国交通运输部. 港口工程荷载规范: JTS 144—1—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Load Code for Harbour Engineering: JTS 144—1—2010[S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家市场监督管理总局. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [15] 董焱赫. 长期循环荷载下饱和软粘土蠕变特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
DONG Yanhe. Creep behavior of saturated soft clay under long-term cyclic loading[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for Design of Building Foundation: GB 50007—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [17] 中华人民共和国交通运输部. 港口道路与堆场设计规范: JTS 168—2017[S]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Design Code of Road and Storage Yard for Port Area: JTS 168—2017[S]. Beijing: China Communications Press, 2018.