

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.12.013

大面积分级堆载预压工况下软土地基的沉降预测分析

储诚富, 宋鸿翔, 蔡沪荣, 刘云, 王雨航

(合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:准确预测软土地基的沉降是保障软土地基工程安全的重要前提。文章首先通过理论分析将预测单级荷载作用下地基沉降的指数曲线法模型(简称单级模型)拓展为预测多级荷载作用下地基沉降的指数曲线法模型(简称多级模型),其次收集了某机场分级堆载预压联合排水板处理软土地基的沉降观测数据。最后对比分析了最小一乘法(least absolute deviation method, LADM)和目前广泛采用的最小二乘法(ordinary least square method, OLSM)拟合单级模型和多级模型对软土地基后期沉降的预测效果。研究结果表明:相对于 OLSM, LADM 拟合单级模型或多级模型时不仅能更好地反映拟合段沉降监测数据的变化规律,还能更精确地预测单级荷载或多级荷载作用下软土地基后期的沉降,并且预测误差也更加稳定。基于 OLSM 拟合时,相对于单级模型,多级模型预测地基后期沉降误差的稳定性较高。此外,相对于基于 LADM 和传统广泛采用的 OLSM 拟合单级模型对软土地基后期沉降进行预测的方法,文章所提出的基于 LADM 拟合多级模型对软土地基后期沉降进行预测的方法不仅能真实反映实际分级加载工况下软土地基沉降发展的全过程,还能更精确地预测软土地基后期的沉降,并且预测误差也更加稳定。

关键词:软土;沉降;分级堆载预压;最小一乘法(LADM)

中图分类号: TU433

文献标志码: A

文章编号: 1003-5060(2024)12-1668-07

Settlement prediction of soft soil foundation under large-area staged surcharge preloading condition

CHU Chengfu, SONG Hongxiang, CAI Hurong, LIU Yun, WANG Yuhang

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Accurately predicting the settlement of soft soil foundation is an important premise to ensure the safety of soft soil foundation engineering. Firstly, through theoretical analysis, the exponential curve method model for predicting foundation settlement under single-stage load(single-stage model) is extended to the exponential curve method model for predicting foundation settlement under multi-stage load(multi-stage model). Secondly, the settlement observation data of soft soil foundation treated by staged surcharge preloading combined with drainage board in an airport are collected. Finally, the prediction effects of least absolute deviation method(LADM) and ordinary least square method(OLSM) fitting single-stage model and multi-stage model on the later settlement of soft soil foundation are compared and analyzed. The results show that compared with OLSM, LADM fitting single-stage model or multi-stage model can not only better reflect the change law of settlement monitoring data in the fitting section, but also more accurately predict the later settlement of soft soil foundation under single-stage load or multi-stage load, and the prediction error is more stable. When fitting based on OLSM, compared with the single-stage model, the stability of error of multi-stage model in predicting the later settlement of foundation is higher. In addition, compared with the method of predicting

收稿日期:2022-04-20;修回日期:2022-05-26

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42172307)

作者简介:储诚富(1975—),男,安徽潜山人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师。

the later settlement of soft soil foundation based on LADM and the traditional widely used OLSM fitting single-stage model, the method of predicting the later settlement of soft soil foundation based on LADM fitting multi-stage model proposed in this paper can not only truly reflect the whole process of the settlement development of soft soil foundation under the actual staged loading condition, but also more accurately predict the later settlement of soft soil foundation, and the prediction error is more stable.

Key words: soft soil; settlement; staged surcharge preloading; least absolute deviation method (LADM)

软土作为我国重要的土地储备资源,在合理开发方面受到了广泛关注^[1-2]。软土具有高含水率、高压缩性、低承载力等特性^[3],建立在软土地基上的工程往往会产生过度的工后沉降,严重威胁工程安全^[4-6]。为及时有效地采取沉降控制措施,准确预测软土地基的沉降是至关重要的。

沉降预测的方法主要归纳为 3 类:解析法^[7]、数值模拟法^[8]、曲线拟合法^[9]。由于软土的诸多不良特性,解析法难以准确预测软土地基的沉降规律^[10]。由于复杂的边界和加载条件导致数值模拟法的计算量很大,因此,数值模拟法很少应用于工程实践^[11]。通过现场的观测数据并结合曲线拟合法预测软土地基的沉降是目前工程中最快捷可靠的方法^[12]。现有的曲线拟合法主要包括 Asaoka 法^[13-14]、指数曲线法^[15]、双曲线法^[16]、泊松曲线法^[17]。这些方法对于单级荷载作用下地基沉降的预测都是十分有效的,然而在实际的工程中,荷载往往是分级施加的。现有的研究一般将最后一级荷载加载完成之前的沉降观测数据全部剔除,仅拟合最后一级荷载作用下的沉降观测数据,将软土在多级荷载作用下的固结过程简化为单级荷载作用下的固结过程^[18]。简化后的模型不仅在理论上与实际工程中多级荷载作用下软土的固结过程不同,还无法完整的拟合全部的沉降观测数据^[19]。因此,文献^[20-23]对多级荷载作用下软土地基沉降的预测模型展开了广泛的研究。然而,无论是单级荷载还是多级荷载作用下,大多采用普通最小二乘法(ordinary least square method, OLSM)拟合软土地基沉降的预测模型。OLSM 通过误差的平方和最小寻找最佳的函数与之匹配^[24],在平方的作用下,增大了大误差数据在曲线拟合中的贡献^[25]。由于施工和测量误差的影响,大误差数据在沉降观测数据中被广泛发现^[26]。若采用 OLSM 拟合沉降的预测模型时极易受到这些大误差数据的影响,从而错误地估计了软土地基的沉降规律。为正确预测软土地基

的沉降规律,寻找一种更合理的拟合方式已迫在眉睫。

最小一乘法(least absolute deviation method, LADM)通过误差绝对值的和最小寻找最佳的函数与之匹配,具有直观性、稳健性的特点,能有效弥补 OLSM 拟合原理的缺陷^[27-28]。然而,由于绝对值的存在,最小一乘解的问题一直困扰着数学界并长期停滞不前^[29]。近年来,随着研究的不断深入,已有不少算法求解线性类函数的最小一乘解都是十分有效的^[30-32]。然而,非线性类函数的沉降预测模型大多十分复杂。文献^[33]提出“零误差”原理,通过不断迭代寻优寻找数据中的“零误差点”,并采用优化判别法则进行检验,从而实现了非线性类函数的最小一乘解的求解。

本文首先通过理论分析将预测单级荷载作用下地基沉降的指数曲线法模型(简称单级模型)拓展为预测多级荷载作用下地基沉降的指数曲线法模型(简称多级模型),其次收集某机场分级堆载预压联合排水板处理软土地基的沉降观测数据,最后对比分析了 LADM 和目前广泛采用的 OLSM 拟合单级模型和多级模型对软土地基后期沉降的预测效果。

1 研究理论

1.1 单级模型

假设荷载在 t_0 时刻一次瞬时施加,根据 Terzaghi 固结理论,土体在任意时刻 t 的平均固结度 U_t 可表示为^[34]:

$$U_t = 1 - A \exp(Bt_0 - Bt) \quad (1)$$

其中: A 为反映土层边界应力比的常数,在只考虑径向排水时值为 1; B 为表征地基固结快慢的参数,在 Terzaghi 固结理论中反映土的固结系数与土层厚度的平方之比。

在不考虑地基的次固结沉降量的前提下,依据实测沉降,平均固结度 U_t 可表示为:

$$U_t = (S_t - S_0) / (S_\infty - S_0) \quad (2)$$

其中: S_0 为瞬时沉降量; S_∞ 为最终沉降量; S_t 为

任意时刻 t 的沉降量。

联立式(1)、式(2),取 $A=1$,令 $C=S_{\infty}-S_0$,则任意时刻 t 的沉降量 S_t 可表示为:

$$S_t = S_0 + C[1 - \exp(Bt_0 - Bt)] \quad (3)$$

1.2 多级模型

假设各级荷载 $P_i (i=1, 2, \dots, n)$ 在 t_{i-1} 时刻一次瞬时施加,地基的沉降曲线如图 1 所示。

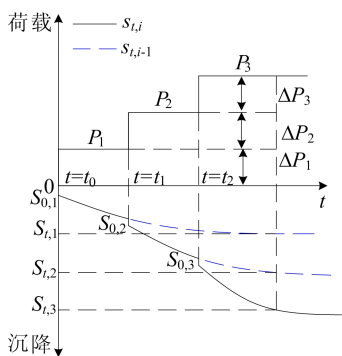


图 1 分级荷载作用下沉降拟合曲线示意图

图 1 中: $S_{t,i}$ 表示 P_i 级荷载作用下的沉降曲线; $S_{t,i-1}$ 表示 P_i 级荷载施加后前 P_{i-1} 级荷载作用下的沉降曲线。由于各级荷载增量 ΔP_i 作用下的固结过程都是独立的,与荷载增量 ΔP_{i+1} 或 ΔP_{i-1} 作用下的固结过程无关^[35]。因此,各级荷载增量 ΔP_i 所引起的沉降应按单级荷载作用下沉降的计算方法单独计算,公式为:

$$S_{t,i} - S_{t,i-1} = S_{0,i} + C_i[1 - \exp(B_i t_{i-1} - B_i t)] \quad (4)$$

其中: C_i 为第 i 级荷载增量单独作用下最终沉降量 $S_{\infty,i}$ 与瞬时沉降量 $S_{0,i}$ 的差值; B_i 为待定参数。

根据 Terzaghi 固结理论的基本假设,土体的压缩系数和渗透系数在渗流的过程中不发生改变,因而假设各级荷载增量作用下的 B 值相同。此外, n 级荷载共同作用下的沉降量 $S_{t,n}$ 应为各级荷载增量所引起的沉降增量之和。因此, $S_{t,n}$ 可以表示为:

$$S_{t,n} = \sum_{i=1}^n \{S_{0,i} + C_i[1 - \exp(Bt_{i-1} - Bt)]\} \quad (5)$$

以上单级模型和多级模型均采用了一次瞬时施加荷载的假设,然而在实际软土地基的加固过程中,荷载往往是逐渐施加的。因此,本文在实际案例分析中均基于改进 Terzaghi 法的基本假设,假设填筑荷载是在荷载填筑期的中间时刻一次瞬时施加的。需要注意的是,在分级堆载(或真空)

预压的工况下,均可采用多级模型对软土地基的沉降进行预测。

2 工程概况

某拟建于中国沿海中部的机场工程,规划面积约 2.14 km²。通过地质勘察,拟建机场区域内广泛分布厚度不均的软土,极易产生不均匀沉降和较大的整体性沉降,威胁工程安全,其中软土层的最大埋深为 5.8 m。且根据文献^[36],拟建机场的场地等级为 2 级,地基等级为 1 级。该区域地层的主要物理力学参数见表 1 所列。

采用堆载预压联合排水板对该拟建机场区域内的地基进行处理,如图 2 所示。其中塑料排水板的埋设深度为 5~8 m,间距为 1 m。上部为填土堆载,采用分级堆载的方式,最大堆载高度为 5.5 m。采用沉降观测板记录地基表面的沉降,布设间距为 50 m,观测周期为 3~5 d/次。

表 1 物理力学参数

土层名称	含水率/%	重度/(kN/m ³)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩模量/MPa
黏土	38.4	17.74	29.4	9.3	4.01
淤泥	55.8	16.42	9.0	2.7	1.99
黏土	28.4	19.12	47.2	12.6	5.19
粉质黏土	27.2	19.17	51.2	13.6	5.47

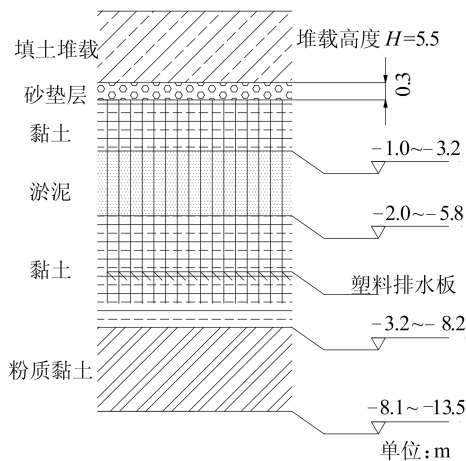


图 2 堆载预压联合排水板处理地基示意图

3 预测结果与讨论

3.1 单级模型的预测结果

以机场区域内 3 个典型沉降监测点 I、II、III 在最后一级荷载施加完成后的沉降监测数据为例,对比 OLSM 和 LADM 拟合单级模型时对单级荷载作用下软土地基后期沉降的预测效果。其

中以 195、199、204、209、214、219、224、229 d 的沉降监测数据为软土地基后期沉降的实测值,并拟合 195 d 之前的沉降实测数据,对软土地基后期(195、199、204、209、214、219、224、229 d)的沉降进行预测,结果如图 3~图 5 所示。

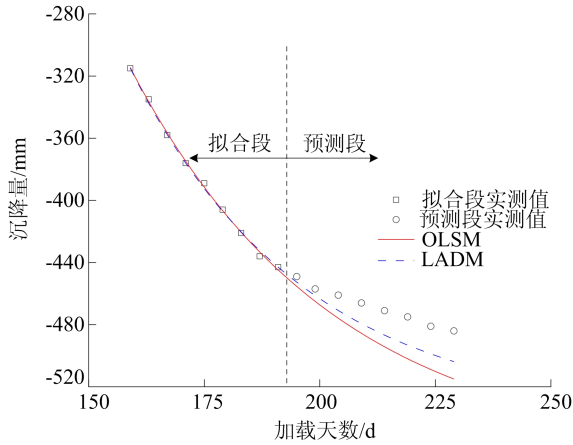


图 3 单级模型预测监测点 I 后期沉降的结果

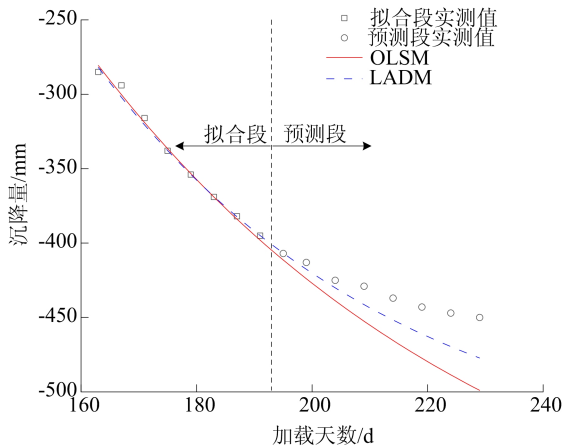


图 4 单级模型预测监测点 II 后期沉降的结果

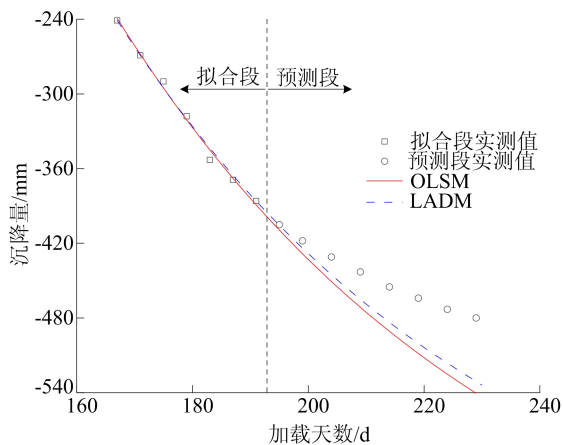


图 5 单级模型预测监测点 III 后期沉降的结果

由图 3~图 5 可知,OLSM 和 LADM 拟合单

级模型时都高估了监测点 I、II、III 后期的沉降。相对于 OLSM,LADM 拟合单级模型时对监测点 I、II、III 后期沉降的预测结果与后期沉降的实测值更加吻合。

为更清晰地评价 OLSM 和 LADM 拟合单级模型时预测软土地基后期沉降的效果,将 OLSM 和 LADM 拟合单级模型时预测监测点 I、II、III 后期沉降的误差评价指标统计结果见表 2 所列。OLSM 和 LADM 拟合单级模型时监测点 I、II、III 拟合段的误差评价指标统计结果见表 3 所列。

由表 2 可知,相对于 OLSM,LADM 拟合单级模型时预测监测点 I、II、III 后期沉降的误差绝对值的最小值分别减少了 2.75、2.29、3.82 mm,误差绝对值的最大值分别减少了 11.22、21.60、9.62 mm,平均绝对误差(mean absolute error, MAE)分别减少了 6.91、11.50、6.73 mm,平均绝对百分比误差(mean absolute percent error, MAPE)分别减少了 1.46%、2.62%、1.49%。由表 3 可知,相对于 OLSM,LADM 拟合单级模型时监测点 I、II、III 拟合段的 MAE 分别减少了 0.13、0.51、0.34 mm,MAPE 分别减少了 0.27%、0.13%、0.15%。由此可见,相对于 OLSM,LADM 拟合单级模型不仅能更好地反映拟合段沉降监测数据的变化规律,还能更精确地预测单级荷载作用下软土地基后期的沉降。

表 2 单级模型预测地基后期沉降的误差评价指标

监测点	方法	误差绝对值范围/mm	MAE/mm	MAPE/%
I	OLSM	6.37~30.99	19.98	4.23
	LADM	3.62~19.77	13.07	2.77
II	OLSM	2.57~48.85	24.59	5.59
	LADM	0.28~27.25	13.09	2.97
III	OLSM	4.38~60.48	31.94	6.95
	LADM	0.56~50.86	25.21	5.46

表 3 拟合单级模型时拟合段的误差评价指标

监测点	方法	MAE/mm	MAPE/%
I	OLSM	1.42	0.36
	LADM	1.29	0.09
II	OLSM	2.60	0.82
	LADM	2.09	0.69
III	OLSM	3.29	1.02
	LADM	2.95	0.87

从表 2 还可以看出,OLSM 拟合单级模型时预测监测点 I、II、III 后期沉降的 MAE 分别为

19.98、24.59、31.94 mm, LADM 拟合单级模型时预测监测点 I、II、III 后期沉降的 MAE 分别为 13.07、13.09、25.21 mm。由此可见, OLSM 和 LADM 拟合单级模型时预测监测点 I、II、III 后期沉降的误差均较大, 特别是 OLSM 拟合单级模型时预测地基后期沉降的误差更大。结合图 3~图 5 可知, OLSM 和 LADM 拟合单级模型时预测监测点 I、II、III 后期沉降的误差绝对值随着时间的增大而增大。其中, OLSM 拟合单级模型时预测监测点 I 后期沉降的误差绝对值随时间增大由 6.37 mm 增加至 30.99 mm, 预测监测点 II 后期沉降的误差绝对值随时间增大由 2.57 mm 增加至 48.85 mm, 预测监测点 III 后期沉降误差绝对值随时间增大由 4.38 mm 增加至 60.48 mm。而 LADM 拟合单级模型时预测监测点 I 后期沉降误差绝对值随时间增大由 3.62 mm 增加至 19.77 mm, 预测监测点 II 后期沉降的误差绝对值随时间增大由 0.28 mm 增加至 27.25 mm, 预测监测点 III 后期沉降的误差绝对值随时间的增大由 0.56 mm 增加至 50.86 mm。由此可见, OLSM 和 LADM 拟合单级模型时预测地基后期沉降的误差的稳定性较差。其中, 相对于 LADM, OLSM 拟合单级模型预测地基后期沉降的误差的稳定性更差。

单级模型仅能拟合和预测某一级荷载作用下的沉降, 在工程应用中, 通常利用单级模型拟合最后一级荷载作用下的沉降监测数据对软土地基后期的沉降进行预测。因此, 单级模型仅能反映最后一级荷载作用下的沉降规律。

综上所述, 单级模型预测软土地基后期沉降的误差较大, 并且误差的稳定性也较差。此外, 单级模型还不能反映实际分级加载工况下软土地基沉降发展的全过程。因此, 寻找一种既能反映实际分级加载工况下软土地基沉降发展的全过程, 还能更精确地预测软土地基后期的沉降, 并且预测误差也更加稳定的方法是值得进一步研究的。

3.2 多级模型的预测结果

仍以监测点 I、II、III 的沉降监测数据为例, 对比分析 OLSM 和 LADM 拟合多级模型时对多级荷载作用下软土地基后期沉降的预测效果。仍以 195、199、204、209、214、219、224、229 d 的沉降监测数据为软土地基后期沉降的实测值, 并拟合 195 d 之前的沉降实测数据, 对软土地基后期 (195、199、204、209、214、219、224、229 d) 的沉降进行预测, 结果如图 6~图 8 所示。需要说明的

是, 由于某种原因, 导致在第 4 级荷载施加期间的部分沉降监测时刻未进行沉降的测量。由图 6~图 8 可知, OLSM 拟合多级模型时明显低估了监测点 I、II、III 后期的沉降。而 LADM 拟合多级模型时对监测点 I、II、III 后期沉降的预测结果与后期沉降的实测值都较为吻合。

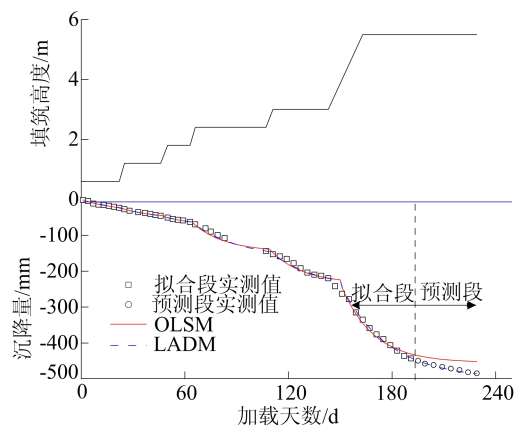


图 6 多级模型预测监测点 I 后期沉降的结果

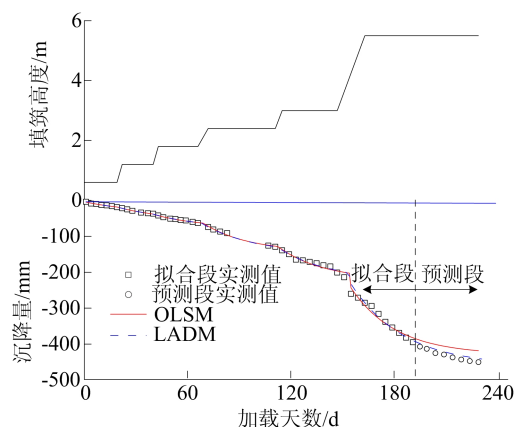


图 7 多级模型预测监测点 II 后期沉降的结果

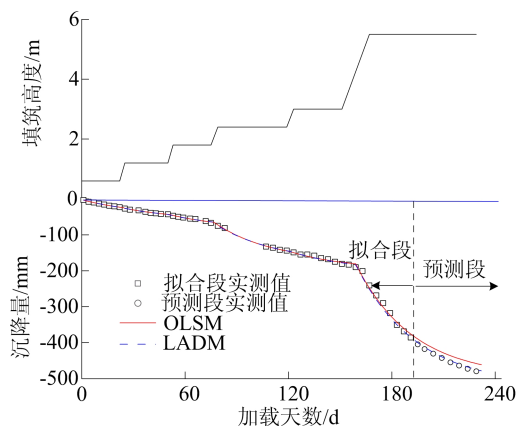


图 8 多级模型预测监测点 III 后期沉降的结果

为更清晰地评价 OLSM 和 LADM 拟合多级

模型时对软土地基后期沉降的预测效果,将 OLSM 和 LADM 拟合多级模型时预测监测点 I、II、III 后期沉降的误差评价指标见表 4 所列。OLSM 和 LADM 拟合多级模型时监测点 I、II、III 拟合段的误差评价指标见表 5 所列。由表 4 可知,相对于 OLSM, LADM 拟合多级模型预测监测点 I、II、III 后期沉降误差绝对值最小值分别减少 13.99、11.15、11.69 mm,误差绝对值的最大值分别减少了 28.91、20.78、16.47 mm, MAE 分别减少了 20.47、15.98、13.34 mm, MAPE 分别减少了 4.35%、3.67%、2.98%。由表 5 可知,相对于 OLSM, LADM 拟合多级模型时监测点 I、II、III 拟合段的 MAE 分别减少了 1.38、0.43、0.24 mm, MAPE 分别减少了 0.84%、0.48%、0.44%。综上分析可知,相对 OLSM, LADM 拟合多级模型时不仅能更好地反映拟合段沉降监测数据的变化规律,还能更精确预测多级荷载作用下软土地基后期的沉降。

从表 4 还可以看出,相对于 OLSM, LADM 拟合多级模型时预测监测点 I、II、III 后期沉降的误差绝对值的变化范围明显较小。由此可见,相对于 OLSM, LADM 拟合多级模型时预测地基后期沉降的误差的稳定性较高。

表 4 多级模型预测地基后期沉降的误差评价

监测点	方法	误差绝对值 范围/mm	MAE/ mm	MAPE/ %
I	OLSM	14.10~32.74	22.85	4.86
	LADM	0.11~3.83	2.38	0.51
II	OLSM	17.96~31.52	25.27	5.82
	LADM	6.81~10.74	9.29	2.15
III	OLSM	14.92~21.60	17.80	3.98
	LADM	3.23~5.13	4.46	1.00

表 5 拟合多级模型时拟合段的误差评价

监测点	方法	MAE/mm	MAPE/%
I	OLSM	3.98	3.66
	LADM	2.60	2.82
II	OLSM	3.55	3.08
	LADM	3.12	2.60
III	OLSM	2.94	2.56
	LADM	2.70	2.12

对比表 2 与表 4 可知,基于 OLSM 拟合时,相对于单级模型,多级模型预测监测点 I、II、III 后期沉降的误差绝对值的变化范围较小。由此可见,基于 OLSM 拟合时,相对于单级模型,多级模型预测地基后期沉降的误差的稳定性较高。此外,基于 OL-

SM 拟合时,相对于单级模型,多级模型预测监测点 I、II 后期沉降的 MAE 和 MAPE 较高,预测监测点 III 后期沉降的 MAE 和 MAPE 较低。

相对于 OLSM 和 LADM 拟合的单级模型, LADM 拟合多级模型时预测监测点 I、II、III 后期沉降的 MAE、MAPE、误差绝对值的变化范围均较小。特别是相对于 OLSM 拟合的单级模型, LADM 拟合多级模型时预测监测点 I、II、III 后期沉降的 MAE、MAPE、误差绝对值的变化范围均降低的更加明显。此外, LADM 拟合多级模型时监测点 I、II、III 拟合段的 MAE 的最大值仅为 3.12 mm。由此可见,相对于 LADM 和传统广泛采用的 OLSM 拟合单级模型对软土地基后期沉降进行预测的方法,本文所提的基于 LADM 拟合多级模型对软土地基后期沉降进行预测的方法不仅能真实反映实际分级加载工况下软土地基沉降发展的全过程,还能更精确地预测软土地基后期的沉降,并且预测误差也更加稳定。

4 结 论

本文通过理论分析将预测单级荷载作用下地基沉降的指数曲线法模型拓展为预测多级荷载作用下地基沉降的指数曲线法模型,收集了某机场分级堆载预压联合排水板处理软土地基的沉降观测数据,对比分析了 LADM 和目前广泛采用的 OLSM 拟合单级模型和多级模型对软土地基后期沉降的预测效果,得出的结论如下。

1) 相对于 OLSM, LADM 拟合单级模型或多级模型时不仅能更好地反映拟合段沉降监测数据的变化规律,还能更精确地预测单级荷载或多级荷载作用下软土地基后期的沉降,并且预测误差也更加稳定。

2) 基于 OLSM 拟合时,相对于单级模型,多级模型预测地基后期沉降的误差的稳定性较高。

3) 相对于 LADM 和传统广泛采用的 OLSM 拟合单级模型对软土地基后期沉降进行预测的方法,本文所提的基于 LADM 拟合多级模型对软土地基后期沉降进行预测的方法不仅能真实反映实际分级加载工况下软土地基沉降发展的全过程,还能更精确地预测软土地基后期的沉降,并且预测误差也更加稳定。

[参 考 文 献]

- [1] ZHAO H, INDRARATNA B, NGO T. Numerical simulation of the effect of moving loads on saturated subgrade soil

- [J]. *Computers and Geotechnics*, 2021, 131: 103930.
- [2] 冯双喜, 雷华阳. 一种基于界面的饱和软黏土弹塑性动本构模型[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(5): 901-908.
- [3] HUANG C, LI Q, WU S, et al. Application of the richards model for settlement prediction based on a bidirectional difference-weighted least-squares method[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2018, 43(10): 5057-5065.
- [4] CAI Y, CHEN Y, CAO Z, et al. A combined method to predict the long-term settlements of roads on soft soil under cyclic traffic loadings[J]. *Acta Geotechnica*, 2018, 13(5): 1215-1226.
- [5] TAN J, CUI Z D, LI Y. Study on the long-term settlement of subway tunnel in soft soil area[J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2016, 34(5): 486-492.
- [6] FENG S, LEI H. A settlement prediction model considering tidal loading and traffic loading of soft soil subgrade[J]. *Computers and Geotechnics*, 2022, 144: 104639.
- [7] BIOT M A. Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid [J]. *Journal of Applied Physics*, 1955, 26(2): 182-185.
- [8] HUANG Z, ZIOTOPOULOU K, FILZ G M. 3D numerical limiting case analyses of lateral spreading in a column-supported embankment[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2019, 145(11): 4019096.
- [9] CUI Z, REN S. Prediction of long-term settlements of subway tunnel in the soft soil area[J]. *Natural Hazards*, 2014, 74(2): 1007-1020.
- [10] 王留洋, 陈星, 陈新. 一种地基沉降计算新方法[J]. *水运工程*, 2018(10): 203-206.
- [11] ZHOU S, WANG B, SHAN Y. Review of research on high-speed railway subgrade settlement in soft soil area [J]. *Railway Engineering Science (Online)*, 2020, 28(2): 129-145.
- [12] LI G, HAN C, MEI H, et al. Application of the WNN-Based SCG optimization algorithm for predicting soft soil foundation engineering settlement[J]. *Scientific Programming*, 2021(1): 9936285.
- [13] ASAOKA A. An inverse problem approach to the prediction of multi-dimensional consolidation behavior[J]. *Journal of the Japanese Society of Soil Mechanics & Foundation Engineering*, 1984, 24(1): 49-62.
- [14] ASAOKA A. Observational procedure of settlement prediction [J]. *Soils and Foundations*, 1978, 18(4): 87-101.
- [15] 陈善雄, 王星运, 许锡昌, 等. 路基沉降预测的三点修正指数曲线法[J]. *岩土力学*, 2011, 32(11): 3355-3360.
- [16] TAN S A, CHEW S H. Comparison of the hyperbolic and Asaoka observational method of monitoring consolidation with vertical drains [J]. *Soils and Foundations*, 1996, 36(3): 31-42.
- [17] 宰金珉, 梅国雄. 全过程的沉降量预测方法研究[J]. *岩土力学*, 2000, 21(4): 322-325.
- [18] 王志亮, 黄景忠, 李永池. 沉降预测中的 Asaoka 法应用研究[J]. *岩土力学*, 2006, 27(11): 2025-2028, 2032.
- [19] 应宏伟, 黄兆江, 葛红斌, 等. 基于分级加载工况的沉降曲线拟合法及工程运用[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2021, 51(2): 300-305.
- [20] 李波, 程文亮, 项存平, 等. 大面积堆载预压处理深厚软基后沉降预测研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(增刊 2): 162-165.
- [21] 安英浩, 杨涛. 分级加荷条件下公路软基路堤沉降的预测方法[J]. *自然灾害学报*, 2007(3): 86-89.
- [22] 刘红军, 刘克伦, 何程铃. 逐级改变计算参数法在软土地基固结沉降量预测中的应用[J]. *东北林业大学学报*, 2020, 48(10): 115-119.
- [23] 叶观宝, 饶烽瑞, 张振, 等. 基于监测数据反演的软土高填方地基性能分析[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(增刊 2): 62-66.
- [24] LEVENT S, SONER C, GOKHAN G, et al. A comparative study of least squares method and least absolute deviation method for parameters estimation in length-weight relationship for white grouper [J]. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 2006, 9(15): 2919-2921.
- [25] GILONI A, SIMONOFF J S, SENGUPT B. Robust weighted LAD regression[J]. *Computational Statistics & Data Analysis*, 2006, 50(11): 3124-3140.
- [26] 曹文贵, 谭涛. 考虑数据异常及新旧程度影响有界性的地基沉降预测方法[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2020, 47(3): 37-43.
- [27] MILLER B M, KOLOSOV K S. Robust estimation based on the least absolute deviations method and kalman filter [J]. *Automation and Remote Control*, 2020, 81(11): 1994-2010.
- [28] 顾乐民. 中国石油产量历史回顾与未来趋势[J]. *石油学报*, 2016, 37(2): 280-288.
- [29] 顾乐民. 基于最小一乘准则的中国粮食产量与影响因素的相关性分析[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(11): 1-10.
- [30] FISHER W D. A note on curve fitting with minimum deviations by linear programming [J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1961, 56(294): 359-362.
- [31] CHARNES A, COOPER W W, FERGUSON R O. Optimal estimation of executive compensation by linear programming [J]. *Management Science*, 1955, 1(2): 138-153.
- [32] PORTNOY S, KOENKER R. The Gaussian hare and the Laplacian tortoise: computability of squared-error versus absolute-error estimators [J]. *Statistical Science*, 1997, 12(4): 279-296.
- [33] 顾乐民. 曲线拟合的最小一乘法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(9): 1377-1382.
- [34] 曾国熙, 杨锡令. 砂井地基沉降分析[J]. *浙江大学学报(自然科学版)*, 1959(3): 34-72.
- [35] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 94-97.
- [36] 中华人民共和国建设部. 岩土工程勘察规范: GB 50021—94[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995: 1-75.

(责任编辑 吴亮)