

文章编号: 1007-2993(2024)03-0287-07

真空预压法处理双层软土地基沉降特性 分析及预测

孙冲¹ 刘印鹏¹ 陈少青² 程林²

(1. 天津市水利工程集团有限公司, 天津 300222; 2. 天津市北洋水运水利勘察设计院有限公司, 天津 300460)

【摘要】 由人工填土层和原始海相沉积土层组成的双层软土地基不同于常规地基形式, 其沉降预测结果离散性大。天津滨海地区某工程地基为双层软土地基, 采用真空预压法进行地基处理, 通过现场监测揭示了双层软土地基沉降的特性。在沉降预测方面, 利用卷积神经网络建立了双层软土地基沉降预测模型, 并与双曲线拟合法进行比较, 研究结果显示, 该方法同样可以准确预测地基沉降变形, 满足工程建设需求。

【关键词】 双层软土地基; 真空预压; 沉降特性; 机器学习; 卷积神经网络

【中图分类号】 TU447

【文献标识码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1007-2993.2024.03.005

Analysis and Prediction of Settlement Characteristics of Double-layer Soft Soil Foundation Treated by Vacuum Preloading Method

Sun Chong¹ Liu Yinpeng¹ Chen Shaoqing² Cheng Lin²

(1. Tianjin Water Conservancy Engineering Group Co., Ltd., Tianjin 300222, China; 2. Tianjin Beiyang Survey and Design Institute of Water Transport & Water Conservancy Co., Ltd., Tianjin 300460, China)

【Abstract】 The double-layer soft soil foundation composed of artificial fill layer and original marine sedimentary soil layer is different from the conventional foundation form, and its settlement prediction results have large discreteness. The foundation of a certain project in the coastal area of Tianjin is a double-layer soft soil foundation. The vacuum preloading method was used for foundation treatment. Based on this engineering example, the settlement characteristics of the double-layer soft soil foundation were revealed through on-site monitoring. In terms of settlement prediction, a double-layer soft soil foundation settlement prediction model was established using convolutional neural networks, and compared with hyperbolic fitting method. The research results showed that this method can also accurately predict foundation settlement deformation, meeting the needs of engineering construction.

【Key words】 double-layer soft soil foundation; vacuum preloading; settlement characteristics; machine learning; convolution neural network

0 引言

沿海地区广泛采用回填土或吹填淤泥方式造陆, 在长期静置晾晒过程中, 因荷载迁移、水分蒸发、物理化学风化等因素的作用, 在地表会形成承载力略高于原始海相沉积土的软土层。大量工程实践表明, 这种人工填土形成的软土层物理性质和海相沉积土层往往存在明显的差异, 形成典型的“上生下熟”的欠固结双层软土地基^[1]。软土地基具有沉降量大、沉降周期长的特点, 若处理方法不当, 影响工程的正常施

工和后期使用。针对此类双层软土地基在工程应用中的沉降特性及发展预测开展研究有重要意义和应用前景。

国内外学者对双层地基的固结理论很早就开始了研究, Gray^[2]、Davis 等^[3] 最早对瞬时加荷情况下双层地基一维固结进行了研究并给出解析解。费涵昌等^[4] 通过有限元分析及离心机模型试验, 研究了有软弱下卧层的双层地基体系的变形特性。雷华阳等^[5] 采用改装的固结仪, 针对吹填场区特有的双层软

基金项目: 天津市水利工程集团有限公司科技项目(2022-02)

作者简介: 孙冲, 男, 1981年生, 汉族, 天津人, 高级工程师, 主要从事水利工程建设。E-mail: 95462735@qq.com

通讯作者: 陈少青, 男, 1984年生, 汉族, 湖北钟祥人, 高级工程师, 主要从事岩土工程勘察检测。E-mail: sqchen0881@163.com

黏土地基,开展了固结特性试验研究。余子焯等^[5]给出了基于连续排水边界条件的任意荷载和正弦波荷载作用下双层饱和软土地基有效应力和总沉降的解答,并将所得解答进行了退化验证。在双层地基沉降预测方面,贾敏才等^[6]以经典太沙基一维固结理论为基础,将土的室内压缩曲线用两段直线代替,推导建立了基于前期实测数据的沉降预测模型方程。王丙乾等^[7]针对由吹填淤泥及下卧海相淤泥组成的双层超软弱欠固结地基,采用概率统计方法对地基沉降进行了分析。李小刚等^[8]通过对灰色系统理论的调研,在对GM(1,1)灰色预测模型理论进行分析的基础上,结合道路地基堆载预压处理过程,探讨了模型数据样本的选取对道路双层软基沉降预测精度的影响。

目前,针对沿海地区欠固结双层软土地基在地基处理工况下的沉降特性和预测研究较少。天津滨

海地区某道路地基是由人工回填土层和海相沉积土层组成的双层软土地基,采用真空预压进行地基处理,依托此工程开展了现场原位沉降监测和室内土工试验,探讨了双层软土地基的沉降特性,总结了双层地基的沉降变形规律。同时引入机器学习的方法,采用卷积神经网络(Convolutional Neural Networks, CNN)建立了双层软土地基沉降预测模型,为此类双层软土地基沉降预测提供新思路。

1 试验概况

1.1 工程地质条件

工程场区位于天津滨海地区,场地表层为人工回填土,其下原始地层自上而下为淤泥质黏土、粉质黏土、粉土等。其中粉土层以上为海相沉积土层,具有高含水率、高压缩性、低承载力的特点,采用真空预压方式进行软基处理后可作为道路地基使用。土层物理力学参数见表1。

表1 土层物理力学参数

土层	层厚/m	w/%	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	e	w _L /%	w _p /%	I _p	I _L	a/MPa ⁻¹	E _s /MPa
人工填土	3	24.3	1.91	0.772	31.5	16.3	15.2	0.53	0.505	3.51
淤泥质黏土	6	45.4	1.76	1.267	40.7	20.1	20.6	1.22	0.772	2.85
粉质黏土	3	27.2	1.91	0.815	27.7	14.7	13.0	0.96	0.558	3.25
粉土	2	21.9	1.97	0.667	25.7	17.0	8.7	0.56	0.138	12.08

1.2 工程实施方案

本道路工程地基是在原始海相沉积土层上先人工回填土层,再通过真空预压固结排水处理形成。具体采用无砂法真空预压处理工艺,铺设钢丝软管作为水平排水通道,打设塑料排水板作为垂直排水通道,排水板按正方形布置,间距0.9m,排水板打设深度约12m,地基处理期间膜下真空压力达到85kPa。

真空预压地基处理过程中,进行地表沉降和深层土体分层沉降观测。地表沉降监测采用在场区内摆设沉降盘,利用水准仪测量的方式实现。深层土体分层沉降监测是在地基土中钻孔埋设测量导管,感应磁环按照3m的间隔套在测量导管外部,地基处理期间磁环随周边土体同步沉降,通过测量感应磁环的沉降来获取对应深度土体的沉降。深层土体分层沉降监测仪器布置示意图见图1。

2 试验结果及分析

2.1 地表及深层土体沉降数据

项目所属场地粉土层以上均属于海相沉积高压缩性土(压缩系数 $a > 0.5 MPa^{-1}$),真空预压荷载施加天数为120d,通过对地表沉降和深层土体分层沉降

进行监测,得到地表及各磁环所代表的深层土体沉降数据,地表及深层土体沉降随时间变化曲线见图2,具体沉降数据见表2。

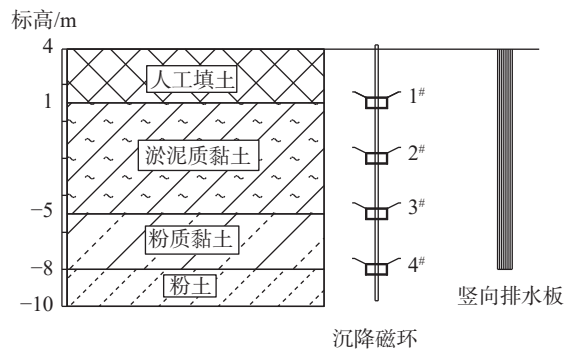


图1 深层土体分层沉降监测仪器布置示意图

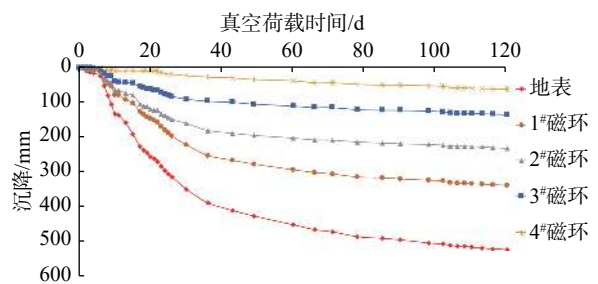


图2 地表及深层土体沉降随时间变化曲线

表2 地表及深层土体沉降量

位置	原始标高/m	沉降量/mm
地表	4.0	520
1#磁环	1.0	336
2#磁环	-2.0	231
3#磁环	-5.0	134
4#磁环	-8.0	62

根据表2数据显示,经过真空预压地基处理后地表最终沉降量为520 mm。根据本地区工程经验,单一海相沉积地层采用相同真空预压地基处理方案,整体沉降量基本可达到1 m以上,相比较之下本项目的整体沉降量要小很多。由于本项目地表存在3 m厚的人工填土,一方面,人工填土物理力学参数指标较其下原始海相沉积淤泥质黏土要优越许多,该层土体的固结压缩本身就会小;另一方面,人工填土层还可认为是人工施工形成的一层硬壳层,硬壳层对淤泥质软黏土层存在壳体效应^[9],向下传递的附加应力小。上述因素共同作用下限制了下卧软弱淤泥质黏土层的固结沉降,这一特性也有利于控制项目后期使用中的工后沉降。

表2中沉降量数值代表对应标高以下土层的沉降量,即其下土层压缩变形量之和。由此可计算地基处理深度范围内深层土体中各层土体的压缩变形量(见表3)。

表3 深层土体各土层固结变形量

土层	土层厚/mm	固结变形量/mm	占总沉降量百分比/%
人工填土	3000	184	35
淤泥质黏土	6000	202	39
粉质黏土	3000	72	14
粉土及以下		62	12

根据表3,本项目地基具有以下沉降特性:

(1)深层土体压缩变形量随深度增加不断减少。尤其是人工填土层和海相沉积粉质黏土层的土层厚度一致,且均为粉质黏土,土体物理试验和压缩试验指标也较为接近,但压缩变形量占比前者35%,后者仅14%,相差2倍以上。这主要是因为竖向排水板不仅是真空荷载向地基土深处传递的通道,还是土体固结排水的主要通道,由于真空荷载沿深度不断消散衰减、排水体弯曲变形影响通水能力以及井阻等原因,下部排水板所起效果大幅度降低。

(2)土体本身性质是决定固结变形量的关键因素。本场区地层中淤泥质黏土层土体指标最差,是本次处

理深度范围内最主要的压缩土层,固结变形量占总沉降量的39%,是地基处理中不能忽视的土层。具体来看,35%的固结沉降发生在表层3 m,74%的固结沉降发生在9 m内土层。以上特点揭示,在工程项目中竖向排水板打设深度必须涵盖主要压缩土层,但因排水板作用随深度递减,选择适宜的打设深度可优化建设成本。

2.2 沉降随时间变化趋势

地表及深层土体沉降主要发生在地基处理前全程,随着时间推移沉降量和沉降速率急速下降,在图2沉降随时间变化曲线中表现为沉降曲线斜率逐渐减小。表层及深层土体不同时间沉降量(占总沉降量比值)见表4。以地表沉降量为例,30 d时完成总沉降量的67%,60 d时完成总沉降量的86%,90 d时完成总沉降量的95%,此时的沉降影响深度恰好为竖向排水板打设深度。4#磁环代表的粉土层及以下土层的沉降速率则明显降低,更接近随时间匀速沉降变化规律,证明通过真空预压方式可以加速地基处理深度范围内土层完成固结沉降,90 d是比较经济合理的施工周期。

表4 不同加载时间下表层及深层土体沉降量及其占总沉降量比值

加载时间/d	沉降量(占比)/mm(%)				
	地表	1#磁环	2#磁环	3#磁环	4#磁环
30	347(67)	221(66)	160(69)	90(67)	23(37)
60	449(86)	292(87)	202(87)	110(82)	33(61)
90	492(95)	318(95)	218(94)	122(91)	50(81)
120	520(100)	336(100)	231(100)	134(100)	62(100)

3 沉降预测

地基处理完成交工时,若场地标高过高,需要清理移运部分地基土降低标高,若场地标高过低,则需要再次回填路基材料补齐标高,两种情况都将使工程项目产生额外的成本,因而合理预测地基处理沉降,对工程建设有重要的现实意义。常见沉降计算预测方法有理论法、曲线拟合法、数值模拟法等,但这些预测方法在实际工程使用中都有一定的局限性。太沙基固结理论建立在许多简化假设基础之上,不适用此类双层欠固结地基已成为工程界和学术界的共识;曲线拟合法是利用实测沉降曲线动态推算最终沉降量,包括双曲线法、三点法、指数曲线法等,在实际工程中应用较广,但此方法对技术人员的工程经验要求较高,否则利用曲线拟合法得到沉降量也和实际相差较大;随着有限元软件的应用与发展,数值模拟法近

年来也广泛应用于沉降预测,但该方法需要精确合理的材料参数取值,而复杂地质条件下地基土的物理力学参数很难通过土工试验精确测得,使得该方法的应用也受到了限制。

深度学习是指通过学习样本数据的内在规律和表示层次,让机器具有分析能力,在岩土工程领域已有广泛应用^[10-11]。基于卷积运算的神经网络系统其结构包含输入层、隐藏层和输出层^[12],隐藏层包含卷积层、池化层、激活函数层、全连接层等常见构筑,通过在卷积层进行了样本的特征提取和特征映射,降低了参数数量;在池化层舍去一些特征,保存最明显的特征,减少了计算量。因而,相比较其它神经网络,卷积神经网络可以更巧妙地利用较少的权重达到不错的效果。本文尝试利用卷积神经网络建立了双层软土地基沉降预测模型,并与双曲线拟合法沉降预测结果进行比对分析,以期提供一种新的双层软土地基沉降预测方法。

3.1 卷积神经网络沉降预测模型的建立

卷积神经网络利用已有的 n 组数据作为学习样本输入,归一化变换处理后代入模型,由卷积层和池化层组成的隐藏子层对参数进行训练,通过规划求解不断优化和调整原有卷积器、权重、偏置参数及池化操作,使得代价函数(平方误差)CT 的值无限趋近或等于 0,得到最优的解输出^[13]。

(1)卷积操作

准备 3 种 3×3 大小的过滤器,表示为 $w_{11}^{Fk}, w_{12}^{Fk}, \dots$ ($k=1, 2, 3$),过滤器中的数值是样本学习设定的模型参数,使用过滤器进行卷积处理,再加上偏置 b^{Fk} ,得到神经单元的集合,将其作为卷积层的一个子层,见式(1)。

$$z_{ij}^{Fk} = w_{11}^{Fk}x_{ij} + w_{12}^{Fk}x_{ij+1} + w_{13}^{Fk}x_{ij+2} + \dots + w_{33}^{Fk}x_{i+2j+2} + b^{Fk} \quad (1)$$

以 Sigmoid 函数作为激活函数,神经元的输出 a_{ij}^{Fk} 见式(2),即为卷积层输出矩阵。

$$a_{ij}^{Fk} = \frac{1}{1 + e^{-z_{ij}^{Fk}}} \quad (2)$$

(2)池化操作

卷积神经网络设置池化层来压缩卷积层信息,本文采用最大池化法,将卷积层中 2×2 个神经单元压缩为 1 个神经单元,缩减后的神经单元集合形成了池化层,池化层输出矩阵见式(3)。

$$a_{ij}^{Pk} = \max(a_{2i-12j-1}^{Fk}, a_{2i-12j}^{Fk}, a_{2i2j-1}^{Fk}, a_{2i2j}^{Fk}) \quad (3)$$

(3)输出层和代价函数 C_T 求解

在输出层准备 3 个输出单元,输出层第 n 个神经单元加权输入和输出表达形式见式(4)和式(5)。

$$z_n^O = w_{1-11}^{On}a_{11}^{P1} + w_{1-12}^{On}a_{12}^{P1} + \dots + w_{2-11}^{On}a_{11}^{P2} + w_{2-12}^{On}a_{12}^{P2} + \dots + w_{3-11}^{On}a_{11}^{P3} + w_{3-12}^{On}a_{12}^{P3} + \dots + b_n^O \quad (4)$$

$$a_n^O = \frac{1}{1 + e^{-z_n^O}} \quad (5)$$

式中: w_{k-i}^{On} 为输出层为池化层神经单元 a_{ij}^{Pk} 分配的权重; b_n^O 为偏置。

假设输出层神经单元的 3 个输出对应的正解分别为 t_1, t_2, t_3 ,平方误差 C_T 由式(6)计算。

$$C_T = \frac{1}{2} \left\{ (t_1 - a_1^O)^2 + (t_2 - a_2^O)^2 + (t_3 - a_3^O)^2 \right\} \quad (6)$$

全部学习样本数据的平方误差总和就是代价函数 C_T ,通过求解使 C_T 达到最小时的权重和偏置,即为最优参数,可将此时的模型应用于地基沉降的预测,上述卷积和池化过程见图 3。

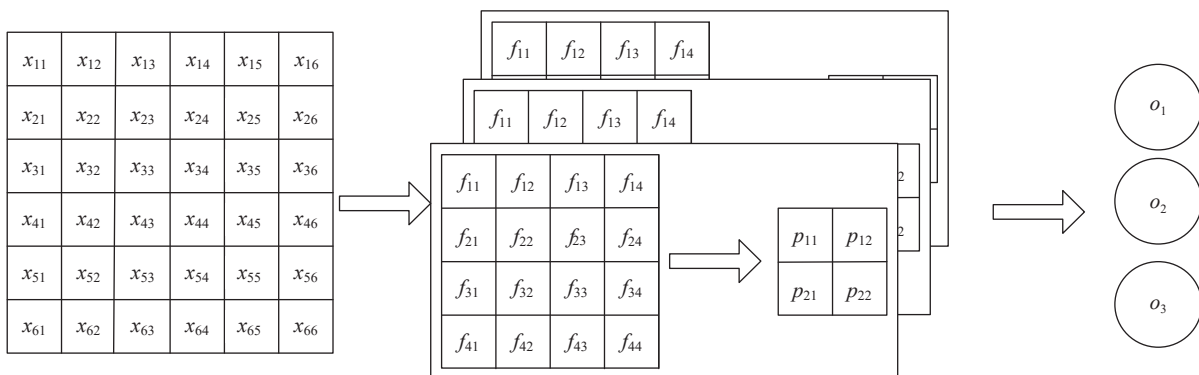


图 3 卷积和池化过程示意图

3.2 卷积神经网络模型沉降预测结果

以 4 组本地区已完工真空预压处理项目沉降数

据作为输入层,以本项目沉降数据作为输出层进行卷积神经网络训练学习,验证该模型预测双层软土地基

沉降的有效性。

按式(7)对学习样本数据进行归一化:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (7)$$

式中: x_{ij} 为第 i 个样本的第 j 个参数; x_{\max} , x_{\min} 分别

为样本合理的最大值和最小值, x_{\max} , x_{\min} 分别取 500 mm 和 0 mm。

选取前 60 d 沉降数据作为卷积神经网络学习样本, 样本数据及归一化结果见表 5。

表 5 学习样本及归一化结果数据表

时间/d	学习样本/mm					样本归一化				
	样本1	样本2	样本3	样本4	本项目	样本1	样本2	样本3	样本4	本项目
7	167	36	15	23	53	0.304	0.065	0.027	0.042	0.096
8	190	41	28	38	80	0.345	0.075	0.051	0.069	0.145
9	195	41	30	43	106	0.355	0.075	0.055	0.078	0.193
10	213	49	42	60	133	0.387	0.089	0.076	0.109	0.242
11	222	56	54	78	136	0.404	0.102	0.098	0.142	0.247
13	239	68	67	92	158	0.435	0.124	0.122	0.167	0.287
15	247	74	73	104	190	0.449	0.135	0.133	0.189	0.345
17	271	95	88	116	225	0.493	0.173	0.160	0.211	0.409
18	280	101	94	123	236	0.509	0.184	0.171	0.224	0.429
19	290	109	101	132	244	0.527	0.198	0.184	0.240	0.444
20	297	115	106	146	255	0.540	0.209	0.193	0.265	0.464
21	311	122	113	151	261	0.565	0.222	0.205	0.275	0.475
22	315	125	119	156	268	0.573	0.227	0.216	0.284	0.487
23	328	135	128	165	282	0.596	0.245	0.233	0.300	0.513
24	333	140	133	173	294	0.605	0.255	0.242	0.315	0.535
25	342	149	138	184	303	0.622	0.271	0.251	0.335	0.551
26	351	159	146	199	312	0.638	0.289	0.265	0.362	0.567
30	372	179	165	226	347	0.676	0.325	0.300	0.411	0.631
36	396	212	192	266	386	0.720	0.385	0.349	0.484	0.702
43	412	236	217	298	408	0.749	0.429	0.395	0.542	0.742
49	428	257	236	322	424	0.778	0.467	0.429	0.585	0.771
60	446	279	257	349	449	0.811	0.507	0.467	0.635	0.816

以表 5 中 4 组样本沉降数据作为输入层, 以本项目沉降数据作为输出层, 基于 3.1 节模型进行训练学习, 求解代价函数 C_T 。通过优化调整卷积过滤器、权重和偏置使 C_T 最小, 得到 $C_T=0.001$, 此时认为得到最优解, 将最优解对应的卷积器、权重和偏置参数

代入到模型中, 形成训练好的卷积神经网络。

利用训练好的卷积神经网络, 对本项目 60 ~ 120 d 的沉降数据进行预测, 同样以 4 组样本的沉降数据 (60 ~ 120 d 数据) 作为输入层, 输出层为本项目的预测沉降数据, 具体数据见表 6。

表 6 卷积神经网络预测数据表

时间/d	训练输入数据/mm				学习输出数据	
	样本1	样本2	样本3	样本4	归一化值	沉降值/mm
66	456	292	269	366	0.841	462
71	463	304	281	378	0.858	472
78	476	318	293	391	0.881	485

续表

时间/d	训练输入数据/mm				学习输出数据	
	样本1	样本2	样本3	样本4	归一化值	沉降值/mm
85	480	325	302	402	0.886	488
90	482	331	307	410	0.895	492
98	484	341	318	421	0.905	498
102	489	346	321	423	0.914	503
104	494	350	325	425	0.918	505
106	495	351	325	427	0.920	506
108	495	351	327	430	0.918	505
110	496	353	330	431	0.919	505
113	499	355	332	433	0.921	506
116	500	357	334	435	0.923	507
120	501	359	336	437	0.925	509

工程实践中,多采用曲线拟合法预测沉降,为对比其与卷积神经网络模型的预测精度,依据《吹填土地基处理技术规范》(GB/T 51064—2015)推荐的双曲线拟合法对本项目沉降进行预测^[4],为方便与卷积神经网络模型沉降数据预测数据比较,双曲线法也采用前60 d沉降数据预测60~120 d的沉降量。60~120 d实测数据与预测数据对比见表7。

表7 60~120 d 实测数据与预测数据对比表

序号	时间/d	实测值/mm	双曲线法/mm	误差/%	神经网络/mm	误差/%
1	66	463	463	0.0	462	-0.2
2	71	469	472	0.6	472	0.6
3	78	483	483	0.0	485	0.4
4	85	488	493	1.0	488	0.0
5	90	492	499	1.4	492	0.0
6	98	501	507	1.3	498	-0.6
7	102	505	511	1.2	503	-0.4
8	104	507	513	1.2	505	-0.4
9	106	509	515	1.1	506	-0.6
10	108	511	516	1.1	505	-1.2
11	110	513	518	1.0	505	-1.6
12	113	516	521	0.9	506	-1.9
13	116	518	523	0.9	507	-2.1
14	120	520	525	0.9	509	-2.1

表7数据显示,卷积神经网络模型和双曲线拟合法沉降预测误差均不大,整体误差可满足工程需求。两种方法的不同点在于,卷积神经网络模型沉降预测值普遍小于实测值,而双曲线拟合法沉降预测值均比

实测值大,且卷积神经网络模型预测误差随时间的变化逐渐变大,而双曲线拟合法没有呈现具体规律。另卷积神经网络法对近期数据(前9组)的预测误差优于双曲线拟合法,但远期数据(后5组)的预测逊于双曲线拟合法,卷积神经网络模型和双曲线拟合法在预测沉降上形成良好的互补,结合使用能提高沉降预测精度。

4 结论

(1)真空预压作用下,上硬下软双层软土地基因其上覆相对硬层的壳体效应,导致其软弱下卧层的固结沉降减少,与相同加载条件下的单一软土地基相比,总沉降量更小。

(2)真空预压地基处理全程监测数据表明,土体固结沉降主要发生在上部,35%的固结沉降发生在表层3 m厚土层中,74%的固结沉降发生在上部9 m厚土层中;固结沉降主要发生在施工周期的前半程,随着时间推移,沉降量和沉降速率急速下降,30 d时可完成总沉降量的67%,60 d时完成总沉降量的86%,90 d时完成总沉降量的95%。

(3)卷积神经网络模型和双曲线拟合法的沉降预测误差均能满足实际工程需求,前者对近期数据的预测精度优于后者,而后者对远期数据的预测精度优于前者。两者结合使用可提高沉降预测精度。

参 考 文 献

- [1] 雷华阳,任 倩,卢海滨,等. 相对厚度变化下双层软黏土地基固结特性研究[J]. 地下空间与工程学报, 2018, 14(3): 705-711.
- [2] GRAY H. Simultaneous consolidation of contiguous

- layers of unlike compressive soils[J]. ASCE, 1945, 110: 1327-1356.
- [3] DAVIS E H, RAYMOND G P. A non-linear theory of consolidation[J]. *Geotechnique*, 1965, 15(2): 161-173.
- [4] 费涵昌,王广欣. 双层地基的变形与沉降 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 1995, 23(3): 288-293.
- [5] 余子烨,翟国君,梅国雄,等. 循环荷载作用下连续排水边界双层土一维固结 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 99-105.
- [6] 贾敏才,王 磊,周 健,等. 双层地基沉降预测模型研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(6): 1176-1180, 1187.
- [7] 王丙乾,龚 镭,刘国楠. 双层超软弱欠固结地基沉降的概率分析 [J]. 岩土工程学报, 2010(8): 1241-1246.
- [8] 李小刚,张廷会. GM(1, 1) 灰色预测模型在道路软基沉降预测中的应用 [J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(1): 63-68.
- [9] 董 剑,郑晓国. 软土地基上硬壳层效应分析及其工程应用 [J]. 路基工程, 2006(4): 7-9.
- [10] 贺明侠,王连俊. 动量 BP 算法在路基沉降预测中的应用 [J]. 岩土工程技术, 2006, 20(1): 17-20, 28.
- [11] 冯 劲,高广运. 神经网络在基桩低应变完整性检测中的应用 [J]. 岩土工程技术, 2005, 19(1): 5-8.
- [12] 翟征秋,程 林,宋效第,等. 基于卷积神经网络的防坡堤施工沉降预测 [J]. 水运工程, 2021(8): 202-219.
- [13] 涌井良幸,涌井贞美. 深度学习的数学 [M]. 杨瑞龙,译. 北京:人民邮电出版社, 2019.
- [14] GB/T 51064—2015 吹填土地基处理技术规范 [S].

收稿日期: 2023-05-12