

吹填软基固结沉降数值分析及参数反演*

杨永强¹, 徐超^{1,2}, 杨阳¹

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092;
2. 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

摘要: 结合宝钢滩涂围垦区域道路工程, 采用 Plaxis 软件, 考虑实际工况, 模拟了塑料排水板堆载预压的施工过程, 从数值模拟角度分析了大面积吹填软基的固结沉降特征。对比分析各类工后沉降预测模型, 结合规范法推荐的沉降计算公式和太沙基一维固结理论, 对土层相关参数进行了反演分析。结果表明: 吹填软基沉降主要发生于预压期, 采用 Asaoka 法可获得较高精度的软基沉降值; 反分析表明, 因软土结构受扰动, 勘察报告给出的压缩模量偏小、固结系数偏大, 导致沉降理论计算值偏大和数值模拟结果呈现“前快后慢”的特征。

关键词: 塑料排水板堆载预压; 数值模拟; 固结沉降; 反演分析

中图分类号: U416.1 文献标志码: A 文章编号: 0529-6579(2015)05-0155-06

Numerical Analysis of Reclaimed Foundation Consolidation and Settlement and Back-Analysis of the Soil Parameters

YANG Yongqiang¹, XU Chao^{1,2}, YANG Yang¹

(1. Department of geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Considering the actual conditions of the road engineering in Baosteel tidal-flat enclosure region, the finite element software Plaxis is carried out to simulate the construction process of the PVDs with preloading. And consolidation and settlement characteristics of the large-area reclaimed soft soil foundations are analyzed from a numerical perspective. A comparative analysis of post-construction settlement models is made to evaluate their effects. Combining the specification with one-dimensional consolidation theory, a back-analysis of the soil parameters is performed. The results show that the principal settlement occurs in the preloading period. Asaoka prediction model has the highest accuracy in the site. The back analysis shows that the smaller compression modulus and consolidation coefficient of the soil due to structural disturbance are the reasons of higher theoretical calculation value of subsidence and “fast begin to slow after” of the numerical simulation.

Key words: preloading with PVDs; numerical simulation; consolidation settlement; back-analysis

随着我国沿海城市经济建设事业的快速发展, 对土地资源的需求也日益迫切, 利用滩涂和围海造地的工程, 因其显著的经济效益而被逐渐推

广^[1-2]。而修建于吹填软基上的道路、机场跑道等工程设施, 工后沉降除考虑吹填土本身的固结沉降外, 尚应考虑在吹填荷载及工程荷载作用下软基的

* 收稿日期: 2014-12-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41272293)

作者简介: 杨永强(1990年生), 男; 研究方向: 地基处理; 通讯作者: 徐超; E-mail: c_axu@tongji.edu.cn

沉降变形^[3]。因此,吹填软土地基固结沉降是一个重要的土工问题,已越来越受到工程界和学术界的重视^[4-5]。

目前对软基的沉降变形计算理论和试验手段已有较多的研究成果^[6]。然而由于受各种不确定因素、试验模型尺度以及理论计算假设条件的限制,理论及试验计算结果与实测值之间往往存在着较大的差距,对大面积深厚吹填区域可借鉴的经验仍然较少。如何较为准确地认识吹填软基固结沉降过程,从而预测工后沉降,尽可能降低工后沉降或差异沉降过大导致的损失,成为制约吹填软基上工程建设的重要课题。

大面积吹填区域,受地基处理有效深度的限制,工后沉降不可忽视。宝钢滩涂圈围区域道路及桥梁工程位于大面积吹填滩涂圈围区域内,人工填土平均厚度达 8~10 m,场地大面积填土引起的地面沉降问题不可忽视。开展大面积深厚吹填砂地基沉降固结特性及计算方法的研究,不仅对宝钢滩涂圈围区域道路交工验收和今后的正常营运具有重要的意义,并且对今后类似区域的工程建设具有一定参考价值。

对大面积吹填区域,塑料排水板堆载预压是较为常用的方法之一^[7]。朱向荣等^[8]通过实测数据分析了堆载预压加固软土地基的效果,从应力-应变的角度研究了软土地基固结特性。徐兴华等^[3]基于现场实测资料分析认为,大面积吹填土固结沉降过程较为复杂,其工后沉降主要由下卧原始地基固结沉降引起。

本文结合宝钢滩涂圈围区域道路工程堆载预压监测结果,采用大型有限元软件 Plaxis,依据实际工况模拟塑料排水板堆载预压的分步实施过程,分析吹填软基的固结特性,依据现场实测沉降结果,预测工后沉降,反演计算有关土性参数,揭示了理论计算结果与实测结果差异的原因,得到了一些有益的结论。研究成果可为大面积吹填区域机场、道路等工程实践活动提供一定的参考。

1 工程概况

宝钢滩涂圈围区域道路及桥梁工程位于上海市宝山区宝山钢铁股份有限公司宝钢分公司厂区内滩涂新近圈围区域内。本次新建道路包括经五北支路、经五延路和纬七路及其向东延伸部分(图1)。

道路软基采用塑料排水板堆载预压方法进行处

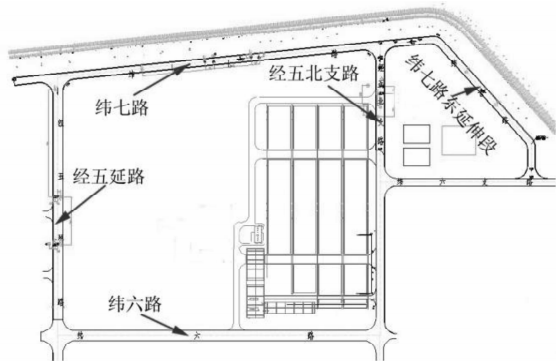


图 1 道路概况图

Fig. 1 General survey of roads

设深度 24 m,板底标高约为 -19.2 m,打穿第④层;考虑到场地吹填土颗粒为粉细砂,渗透系数较大,因而不另设水平排水砂垫层,利用①₁₋₂层冲填砂层进行水平排水。本工程的施工荷载采用场地附近堆放的杂质土,分级进行加载。根据设计要求,堆载后经五北支路与经五延路标高达 7.0 m,纬七路堆载后标高达 8.0 m。以纬七路为例,其加载历程及填土高度如图 2 所示。

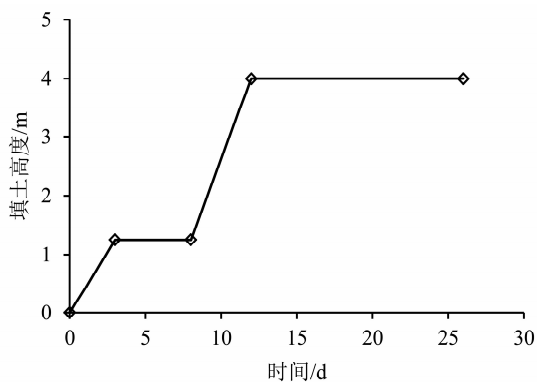


图 2 填土历时曲线

Fig. 2 Variation of filling of embankment construction with time

2 固结特性数值分析

堆载沿道路延伸属条形荷载,可以使用平面应变模型进行二维有限元计算。塑料排水板按正方形布置,在进行平面二维计算时,按赵维炳提出的排水板简化方法做二维等效砂墙处理^[9]。

2.1 材料模型

地基土有限元分析计算参数见表 1,主要参数来自勘察报告及补充室内试验结果。

表 1 各土层计算参数¹⁾

Table 1 Parameters of soil

Mohr-Coulomb 模型参数					
地层	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	弹性模量/kPa	泊松比 ν	
填土	5.0	25.0	12 000	0.27	
① ₁	10.0	10.0	3 463	0.30	
① ₂	4.0	29.5	3 350	0.30	
Hardening-Soil 模型参数					
地层	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	m	C_c	e_{int}
③ ₃	9.0	31.0	1.0	0.335	1.202
④	11.0	25.0	1.0	0.447	1.666
⑤ ₁	21.0	19.5	1.0	0.269	0.894

1) 土层标号均为上海市统编地层

对于杂填土和堆载填土采用 Mohr-Coulomb 模型，是一种理想弹塑性模型，包括 5 个力学参数，杨氏模量 E ，泊松比 ν ，内摩擦角 φ ，内聚力 c ，以及剪胀角 ψ 。对于粘土层，采用 Hardening-Soil 模型，是一种改进的岩土行为模型，包括三轴加载刚度 E_{50} 、三轴卸载刚度 E_{ur} 和固结仪加载刚度 E_{oed} 等 3 个参数，也可采用压缩指数 C_c 、回弹指数 C_s 和初始孔隙比 e_{int} 参数代替。

2.2 计算模型

取纬七路 C3 沉降标所在断面进行分析。地基模型堆载区域（即路面宽度）取 20 m，水平影响区域为 50 m，计算深度取至地表下 30.2 m，边界条件定义为标准固定边界，地下水位取 1.5 m，填土堆载施工过程按图 2，几何模型如图 3。

2.3 结果分析

图 4 为沉降云图，显示软基最大沉降为 533 mm，与实测结果 570.3 mm 非常接近，图 5 为数值模拟与现场监测数据对比曲线，可见数值模型和实测结果较为一致。以上均说明了模型选择的合理性。

结合图 2 及图 5 分析不难发现，路堤填筑施工期间，随堆荷载施加，软基发生快速沉降，曲线较陡；满载时，已完成较大部分沉降，到监测截止固结度达 92%。这部分沉降主要由上部吹填砂土及砂质粉土等完成，虽然荷载作用时间不长，但砂土良好的排水条件，使其在荷载作用后，快速排水压密，完成固结沉降。满载后，随着时间推移，超静孔隙水压力消散，沉降曲线趋于稳定。此外，可以看出对于新近吹填软土地基，受较厚粘土层发育影响，地表沉降大，采用塑料排水板堆载预压的处理方式，所需要的固结时间较长。

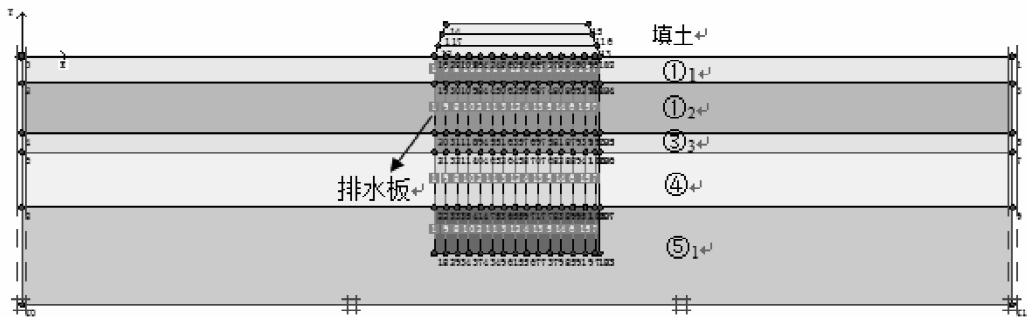


图 3 纬七路数值模型

Fig. 3 Numerical model of Weiqi road

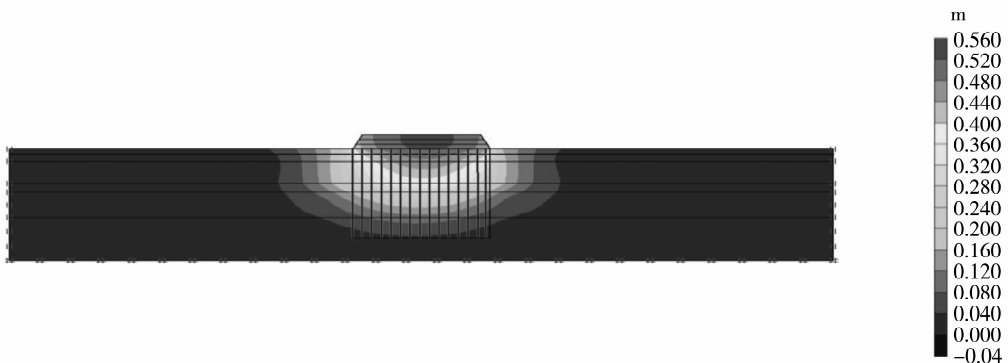


图 4 纬七路沉降云图

Fig. 4 Deformation cloud chart of Weiqi road

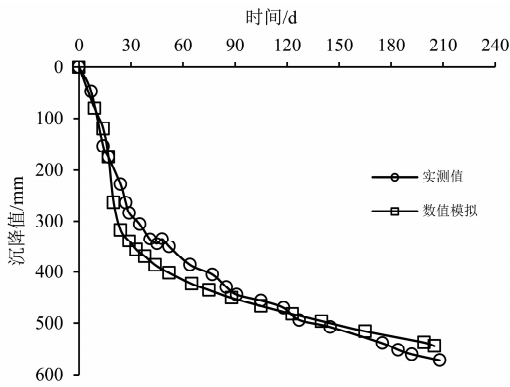


图5 纬七路沉降-时间曲线

Fig. 5 Settlement-time relationship of Weiqi road

此外,对比分析数值模拟结果与监测结果不难发现,数值模拟计算沉降值相对实测值,表现为“前快后慢”,即前期数值结果沉降速率大于实测沉降速率,曲线较陡,后期数值结果沉降速率小于实测沉降速率。这主要是因土体排水固结过程中,土体因逐渐压密,渗透系数及压缩系数降低,排水固结条件发生改变,导致相比于设定好初始土体参数的数值计算结果,表现为沉降发展历时长,整体速率较为平均。

图6为C3沉降标分层沉降监测和数值计算结果(注:18.5 m处因磁环埋置未达到预期位置,所测结果没有参考价值)。分析图6可知,在塑料排水板超载预压下,同一深度处,地基土压缩量随时间逐渐增大,但沉降速率逐渐降低。从地基沉降特性上看,分层沉降最大的位置应发生在固结压缩模量小的软土层中,Plaxis计算值和实测值都在这方面有较好的反映。由图中数据可见,①₁₋₂吹填土、第③₃淤泥质粉质粘土层与第④淤泥质粘土层

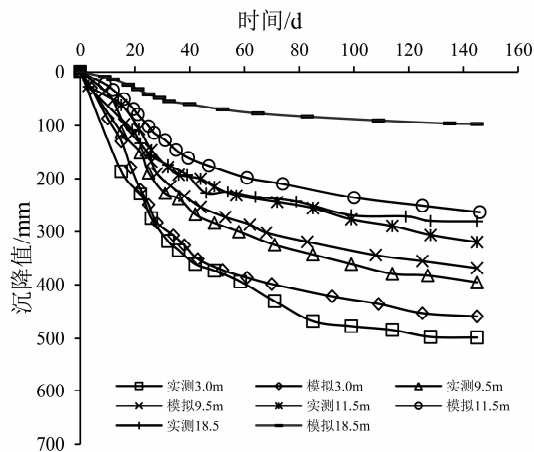


图6 纬七路分层沉降-时间曲线

Fig. 6 Layered settlement-time relationship Weiqi road

压缩量分别为103.5, 77.6和166.7 mm,共计347.8 mm。此外,不难发现,浅部土层沉降速率明显大于深部土层,这也解释了前期随荷载施加软基快速发生固结沉降的现象。

进一步对比分析数值结果与实测结果发现,应用Plaxis计算的路基分层沉降值与实测值较为接近,在堆载期,各分层沉降随时间呈迅速增长,约40天后,沉降速率明显变慢,预压120天后,沉降曲线趋于平缓。对比不同深度的沉降曲线可知,各部分深层沉降沿深度逐渐减小。此外,不难发现,中、浅部同一分层Plaxis计算值略小于实测值。

3 工后沉降预测及参数反演

3.1 沉降预测模型

由于路基土层的复杂性,影响沉降的因素很多。各因素相互关联,使得理论沉降计算方法很难全面考虑各种因素的影响。实测的沉降值可以反映各种影响因素的综合作用,更加接近真实值,故利用沉降实测数据来推算路基的沉降量具有很强的说服力,目前主要有经验公式法、Asaoka法和灰色系统法等。

实际上,工后沉降预测是一个比较复杂的高度非线性土体变形问题,常采用显式函数对工后沉降进行回归分析,提取函数的拟合参数,预测工后总沉降^[10]。本文选用工程实践中常用的双曲线法、指数曲线法、三点法、Asaoka法4种常见方法,对纬七路的地表总沉降进行拟合分析,其结果见表2。

表2 回归模型及结果¹⁾

Table 2 Regressive models and results

模型	数学表达式	预测值 mm	工后沉降 mm
双曲线	$S_t = t / (\alpha + \beta t)$	623.4	53.1
指数曲线	$S_t = S_\infty - \alpha \exp(-\beta t)$	669.2	98.9
三点法	$S_t = L / (1 + A \exp(-Bt))$	636.5	66.2
Asaoka法	$S_t = S_\infty - (S_\infty - S_0) \exp(-t/a_1)$	608.4	38.1
分层沉降法	$S = \sum_{j=1}^n \frac{P_0}{E_j} (z_j \alpha_j - z_{j-1} \alpha_{j-1})$	707.0	136.7

1) 相关方法详见文献[6,11]

监测截止时沉降监测量为570.3 mm,结合预测结果,得到工后沉降量均小于300 mm,满足设计要求,证明了该地基处置方法的有效性。

上述方法中Asaoka法预测结果与实际最为接近,指数曲线预测结果和分层沉降法计算值偏大;

这主要是因在指数曲线法推算过程中，沉降衰减速率保持不变，导致计算沉降发展比实际沉降发展快，其次间隔时间 Δt 取值受人为主观因素影响较大，取值较大时，计算结果才较稳定，而间隔时间较小时计算结果误差较大；分层沉降法假定地基土为线弹性体，未考虑土体的侧向变形、土的非线性特性及土层间的相互作用等影响因素，且所使用的地基土参数如压缩模量和固结系数也与实际情况有出入。而 Asaoka 法则是根据太沙基单向固结理论建立的方法，在应用时，通过反复选择时间间隔，平滑处理曲线，可获得理想结果。

3.2 参数反演

由上面分析可知，理论计算与实测值存在一定差异，若能借助前期观测数据，反演土层相关参数，更为准确的预测工后沉降，则对大面积吹填区道路软基工后沉降预测具有重要的现实意义。

考虑到 Asaoka 法等沉降预测方面各参数缺少明确的物理意义，本文采用位移反分析法对地基土层参数进行反分析。软基沉降量计算采用《建筑地基基础设计规范》所推荐方法，引入沉降系数对分层总和法计算结果进行修正，如下：

$$S = \psi_s \sum_{j=1}^n \frac{P_0}{E_{sj}} (z_j \bar{\alpha}_j - z_{j-1} \bar{\alpha}_{j-1}) \quad (1)$$

基于太沙基一维固结理论的固结度及某时刻沉降量计算，如下：

$$U = 1 - \frac{\int_0^H u(z, t) dz}{\int_0^H \sigma(z) dz} = 1 - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T_v} \quad (2)$$

$$S_i = US \quad (3)$$

以沉降计算值与实测值的绝对误差建立目标函数 J ：

$$J = \sum_{i=1}^N (S_i - S_i^*)^2 \quad (4)$$

具体反演过程如下：

- 1) 根据勘察资料和相关室内试验结果确定地基土初始的固结系数和压缩模量。
- 2) 根据地基各土层的固结系数、压缩模量，结合式(1) - (3) 计算各土层在各个实测时刻的沉降值。
- 3) 根据式(4)和分层沉降现场资料对地基各土层的压缩模量和固结系数进行反演。
- 4) 根据各土层反演所得参数，重复(2)和(3)步直到前后两次反演所得参数的最大差值小于某一容许值，作为迭代收敛标准。
- 5) 根据地基各土层反演所得的压缩模量和固结系数，对宝钢吹填区域道路后续工程建设提供参考。

以纬七路和经五路为例，由其第④层实测沉降资料，获得 30 组 (s, t) 数据用作反分析，根据前述步骤，编制 Matlab 程序，反演结果见表 3。

表 3 反演结果

Table 3 Results of back analysis

地层	压缩模量/MPa		固结系数/ (cm ² · s ⁻¹)		计算沉降/mm		实测沉降/mm
	勘察报告	反分析	勘察报告	反分析	勘察报告	反分析	
纬七路④淤泥质粘土层	3.0	3.38	0.007 14	0.003 26	221.4	196.5	191.5
经五延路④淤泥粘土层	3.0	3.22	0.007 14	0.003 87	145.2	135.3	126.4

由表 3 不难发现，由于勘察报告中所提供的压缩模量值偏小，导致理论计算沉降大于实测沉降，解释了由现场实测资料推算的最终沉降量比理论计算结果偏小的原因。进一步，结合太沙基一维固结理论，将反算的固结系数带入公式(3)得到沉降历时曲线(见图 7)。

由图 7 不难发现，经过反演分析获得模量及固结系数后，采用太沙基一维固结理论沉降计算结果与实测值较为接近，且沉降随时间发展曲线也更符合一个定值，因此计算结果必然出现差异。对此，规范中采用沉降修正系数对理论计算结果进行修正，

合实际情况。而由于勘察报告提供的模量偏小及固结系数偏大，导致实际理论计算中同一时刻沉降量偏大且沉降发展速率较大，与实测曲线差别较大。此外，不难解释，数值模拟结果出现“前快后慢”的特点主要是因偏大的固结系数，导致土层在预压初期即完成大部分沉降有关。

值得一提的是，吹填软基固结沉降过程中，压缩模量和固结系数是变化的，然而便于工程应用和简化，理论计算中所采用的压缩模量和固结系数是但沉降修正系数的选择却受人为主观因素影响较大。然而，反分析结果表明，即便采用相关的沉降修正系

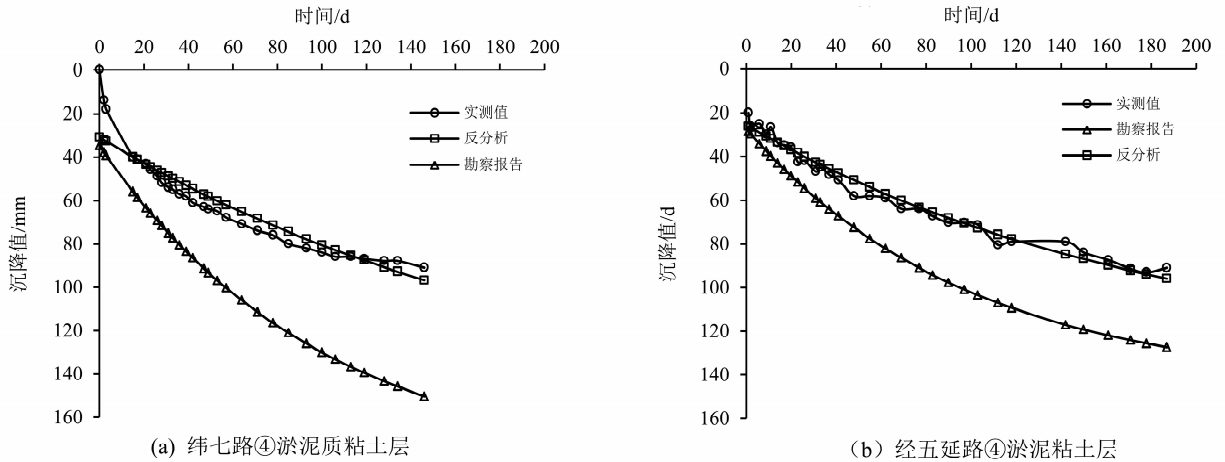


图 7 反演结果对比曲线

Fig. 7 Comparative curves of back analysis

数, 沉降理论计算结果与实测沉降过程值仍然存在差异。因此, 下一步工作应放在如何修正勘察报告给出参数, 使得理论计算结果更接近实际。

实际上, 软粘土天然状态下存在结构性, 勘察过程中不可避免的扰动原有土体结构, 使得土体强度降低, 因此所获得的压缩模量偏小。而固结系数与土体渗透性及初始孔隙比成正比, 与压缩系数成反比, 扰动后的土体, 压缩系数增大, 渗透性降低, 因此固结系数变小。

本次反分析由于分层沉降数据的不完整和失效, 可选进反分析的数据较少, 仅对某一主要压缩层进行分析, 因此未能获得反分析参数修正后沉降数值计算结果。

4 结 论

本文结合宝钢滩涂围区区域道路工程实践, 对大面积吹填道路软基固结沉降特征进行了分析, 并对土层相关参数进行了反演, 得到如下结论。

1) 可采用 Plaxis 软件对吹填软基沉降固结特性进行分析, 计算沉降与分层沉降与实测值较为一致, 即吹填软基固结沉降主要发生于堆载期, 且随深度增加土层压缩量逐渐降低。

2) 常规曲线沉降预测模型在预测工后沉降方面, 虽然精度受人为影响因素, 且物理意义不明确, 但基于实测资料仍能获得较理想结果, 分析表明 Asaoka 法模型在本场地预测精度最高。

3) 反分析表明, 因软土结构受扰动, 勘察结果给出的压缩模量偏小、固结系数偏大, 这导致理论计算沉降值偏大, 及数值模拟结果呈现“前快后慢”的特征。

参考文献:

- [1] 吕子鑫, 张福海, 王保田, 等. 塑料排水板在吹填土地基沉降控制中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(5): 116-119.
- [2] 龚镭, 余文天. 新吹填淤泥的工程性质变化特性研究[J]. 工程勘察, 2008(6): 23-25.
- [3] 徐兴华, 杨阳, 任非凡, 等. 吹填土区域软土固结特性[J]. 勘察科学技术, 2012(2): 12-18.
- [4] 谭昌明, 徐日庆, 周建, 等. 软黏土路基沉降的一维固结反演与预测[J]. 中国公路学报, 2002, 15(4): 14-16.
- [5] 王志亮. 软基路堤沉降预测和计算[D]. 南京: 河海大学, 2004.
- [6] 叶观宝, 高彦斌. 地基处理[M]. 3版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [7] 张甲峰, 钱建国, 张合青, 等. 塑料排水板联合超载预压处理超大面积深厚软基的数值分析[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(S2): 892-896.
- [8] 朱向荣, 李振. 舟山国家石油储备基地堆载预压加固效果分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(4): 881-886.
- [9] 赵维炳, 陈永辉, 龚友平. 平面应变有限元分析中砂井的处理方法[J]. 水利学报, 1998(6): 53-57.
- [10] CHEN Y Z, CAO H H, LI Z X. Prediction of post-construction settlement based on parameter inversion of soft soil foundation[J]. ICCTP, 2010: 3423-3428.
- [11] 中华人民共和国行业标准. JGJ 79-2012 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.