

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021112023101982

文章编号:1674-599X(2023)05-0064-10

引用格式:贺炜,胡彬,王晓佳,等.塑料排水板处理近海软土地基的沉降量分析[J].交通科学与工程,2023,39(5):64-73.

Citation: HE Wei, HU bin, WANG Xiaojia, et al. Settlement analysis of offshore soft soil foundation treated by PVD[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(5): 64-73.

塑料排水板处理近海软土地基的沉降量分析

贺炜¹, 胡彬¹, 王晓佳², 尹平保¹

(1. 长沙理工大学土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 保利长大工程有限公司, 广东 广州 511430)

摘要:为研究塑料排水板预压对沉降的影响,以深中通道伶仃洋大桥西锚碇人工筑岛工程为例,采用三维有限元数值模拟和蒙特卡洛法分析岛体的沉降量,探讨经过塑料排水板预压处理后的软土地基固结沉降变化规律和工后沉降的可靠性。研究表明:运用固结度等效原则处理的塑料排水板法,能够有效地模拟软基固结沉降的变化;随着塑料排水板间距的减小或通水量的增加,预压期吹填软基的固结沉降速率会增大;改变塑料排水板的间距或通水量对软基的最终固结沉降量影响较小;运用蒙特卡洛法对软基工后沉降进行可靠性分析,发现当渗透率变异系数大于0.5时,对工后沉降的预测影响较大。该结论可为相关工程提供参考与借鉴。

关键词:软土地基;塑料排水板;数值模拟;监测分析;可靠性分析

中图分类号:TU47

文献标志码:A

Settlement analysis of offshore soft soil foundation treated by PVD

HE Wei¹, HU Bin¹, WANG Xiaojia², YIN Pingbao¹

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2. Poly Changda Engineering, Co., Ltd., Guangdong 511430, China)

Abstract: In order to study the influence of plastic drainage board pre-pressure on settlement, take the deep China channel Lingdingyang bridge west anchor artificial island project as an example, use three-dimensional finite element numerical simulation and Monte Carlo method to analyze the settlement of the island, to explore the pre-pressure treatment of plastic drainage board after the rule of change of soft ground consolidation settlement and the reliability of settlement after work. The results of the study show that: the plastic drainage board method using the principle of consolidation equivalence can effectively simulate the changes of soft foundation consolidation and settlement; with the decrease of the spacing of the plastic drainage board or the increase of the water throughput, the rate of consolidation and settlement of the blowing soft foundation in the pre-compression period will increase; the change of the spacing of the plastic drainage board or the amount of water throughput has a small effect on the final amount of consolidation and settlement of the soft foundation; the use of the Monte Carlo method of the reliability of the soft foundation settlement after work. The reliability of post-construction settlement of soft foundation by Monte Carlo method is analyzed, and it is found that when the coefficient of variation of infiltration rate is greater than 0.5, the prediction of post-construction settlement is more affected. The conclusion can provide reference for related projects.

Key words: soft soil foundation ; prefabricated vertical drain ; numerical simulation ; monitoring analysis ; reliability analysis

收稿日期:2021-11-20

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(51478051)

作者简介:贺炜(1982—),男,长沙理工大学教授,博士。E-mail:wadeho@csust.edu.cn

软土地基的沉降分析一直是岩土工程中的重难点问题^[1-5]。为避免在荷载作用下软土地基产生过量的工后沉降,采用塑料排水板对软土地基进行预压是一种广泛使用的有效方法。由于软土的复杂性和不确定性,沉降量的理论分析难以获得准确的结果。因此,对软土地基的沉降量进行数值模拟分析、监测数据对比和可靠性分析是非常有必要的。

目前,许多学者对塑料排水板预压处理软土地基进行了多方面的研究。朱森林^[6]通过对潮汕机场大面积深厚软土的研究,发现采用塑料排水板作为竖向排水通道的堆载预压技术可以较好地解决沉降变形问题。刘爱民等^[7]比较了整体式塑料排水板与普通塑料排水板的加固效果,发现在新吹填的淤泥和流泥等超软土地基中,前者由于适当提高了滤膜的等效孔径,加固效果更好。黄建华等^[8]对经过塑料排水板堆载预压处理的某变电站软基进行分析,得出在考虑涂抹和井阻作用影响下的固结度更符合实际情况的结论。谢非等^[9]进行堆载预压塑料排水板软基处理研究时,利用监测数据,科学合理指导了施工。李少和等^[10]通过对某四面环海工程的软基进行实测和理论计算预测,得出了在饱和黏土中主要发生主、次固结沉降的结论。黄朝焯等^[11]基于等应变假设,类比于砂井地基固结理论,推导了排水板地基固结的解析解,并通过有限元软件验证了其合理性。张甲峰等^[12]采用有限元分析软件与监测数据对比,发现利用塑料排水板对超大面积深厚软基进行堆载处理时,有必要考虑沉降中的软土蠕变。董超强等^[13]针对某超软土地基,分别采用有限元软件中的排水线模型和Chai简化模型对塑料排水板进行模拟计算,并与监测数据进行比较,验证了等效系数方法的可靠性。在预测工后沉降方面,多以结合监测数据的方法为主,如浅岗法、Asaoka法、双曲线法、三点法、星野法和指数曲线法等。

在固结沉降的分析中,采用有限元模拟和监测对比,还应考虑土体参数的不确定性对预测工后沉降的影响,但实际工程中考虑这种影响的研究鲜见,有必要深入开展研究。本研究以深中通道伶仃洋大桥西锚碇人工岛软基处理为工程背景,拟利用有限元软件对施工期的固结沉降进行模拟分析,并

与监测数据作对比,分析塑料排水板预压对沉降的影响。在考虑土体参数具有不确定性的基础上,分析渗透率对工后沉降预测的影响程度,得到的结论可为类似工程提供相关经验。

1 工程概况

深中通道(深圳至中山跨江通道)伶仃洋大桥西锚碇人工岛位于伶仃洋上。该区域的土体主要由淤泥、粉质黏土、粗砂、淤泥质粉质黏土和风化花岗岩组成。

在进行西锚碇施工之前,需要修筑人工岛来避免水下施工。其步骤如下:

1) 采用深层水泥搅拌(deep cement mix, DCM)桩和土工管袋围堰形成外沿岛体。

2) 在岛体内部打设塑料排水板,吹填厚约5.6 m的中粗砂,形成整个岛体。

吹填的中粗砂不仅起到水平垫层的作用,还可以作为预压荷载(约为121.5 kPa)。

西锚碇人工岛岛体结构及地基处理的情况如图1所示。

2 人工岛固结沉降理论和数值模拟

2.1 塑料排水板处理软基固结沉降计算理论

塑料排水板预压已经作为一种成熟的软基处理方法,被广泛运用于各种大型工程建设中^[14-16]。它通过缩短渗透性低的软基的排水路径,并施加预压来加速土体固结,从而达到强度增长的目的。

典型的塑料排水板(prefabricated vertical drain, PVD)地基处理计算固结模型如图2所示^[11]。其中, L 为塑料排水板的计算长度; b 、 δ 分别为塑料排水板截面宽度和厚度; r_e 为塑料排水板有效排水直径。在土体固结过程中,塑料排水板周围形成了一个半径为 r_e 的涂抹区。固结度用式(1)计算^[17]:

$$U_r = 1 - \alpha e^{-\beta t} \quad (1)$$

式中: U_r 为地基土径向固结度;

α 、 β 为参数;

t 为固结时间。

考虑井阻和涂抹效应, α 取1, β 由式(2)计算:

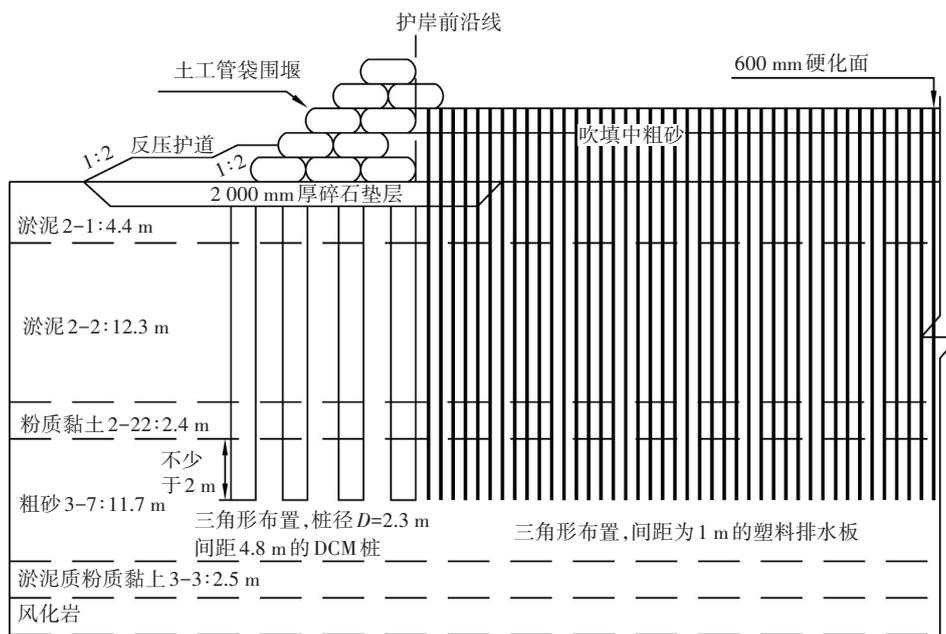


图1 人工岛岛体结构及地基处理示意

Fig. 1 Illustration of island structure and foundation treatment

$$\beta = \frac{8C_h}{(F_n + N_w)d_e^2} \quad (2)$$

式中: d_e 为塑料排水板有效排水直径 $2r_e$;

C_h 为土层水平向固结系数, 可由式(7)计算;

F_n 、 N_w 为参数, 可由式(3)和(5)计算。

$$F_n = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln n - \frac{3n^2 - 1}{4n^2} \quad (3)$$

式中: n 为井径比, 等于 d_e/d_w 。

d_w 为塑料排水板当量换算直径, 由式(4)计算。

$$d_w = \frac{2(b + \delta)}{\pi} \quad (4)$$

式中: b 、 δ 取值见文献[18]。

$$N_w = \left(\frac{k_h}{k_s} - 1 \right) \ln s + \pi \frac{k_h}{k_w} \left(\frac{L}{d_w} \right)^2 \quad (5)$$

式中: k_s 为涂抹区土的渗透率, 取值见[19];

k_h 为土层水平向渗透系数;

s 为涂抹区直径 $d_s=2r_s$ 与 d_w 之比, 可取 2.0~3.0;

k_w 为排水体渗透率。

其中, k_w 可由式(6)计算:

$$k_w = \frac{q_w}{\pi d_w^2/4} \quad (6)$$

式中: q_w 为塑料排水板纵向通水量^[17]。

$$C_h = \frac{k_h(1 + e)}{ar_w} \quad (7)$$

式中: e 为天然孔隙比;

a 为压缩系数;

r_w 为水的重度。

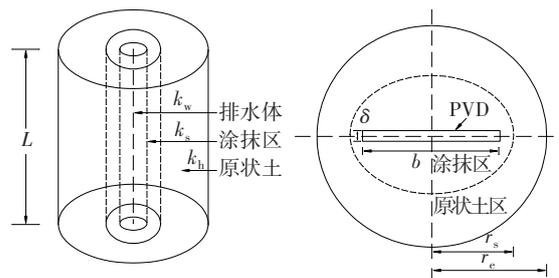


图2 PVD地基处理固结模型示意

Fig. 2 Illustration of consolidation model of soil treated using PVD

当等边三角形排列时, $d_e=1.05l$; 当正方形排列时, $d_e=1.13l$ 。其中, l 为塑料排水板间距。

最终沉降量按式(8)计算^[20]:

$$S = \frac{C_e}{1 + e_0} H \lg R_{oc} + \frac{C_c}{1 + e_0} H \lg \frac{p}{p_c} \quad (8)$$

式中: C_c 为压缩指数;

C_c 为再压缩指数;
 H 为土层厚度;
 R_{oc} 为超固结比(over-consolidation ratio, OCR);
 p_c 为先期固结应力;
 p 为施加荷载后的有效应力;
 e_0 为初始孔隙比,可通过 $e-lgp$ 曲线获得。

工后沉降按照式(9)计算:

$$S_p = S - S_t \quad (9)$$

式中: S_t 为施工完成时的沉降, $S_t=S \times U_t$ 。

2.2 计算模型理论分析

针对塑料排水板预压地基的建模问题,有两种常用的处理方法:

1) 利用软件自带的排水单元进行塑料排水板模拟。如:使用Plaxis软件中的排水线来模拟塑料排水板。

2) 利用等效原则来处理塑料排水板地基。如:运用砂井固结理论分析,将塑料排水板等效简化为砂墙模型,或根据固结度等效原则简化为天然地基^[12-13,21-26]。

本研究以不规则的椭圆形人工岛为工程背景。在地基处理过程中,需要打入上万根塑料排水板。考虑到采用排水单元或砂墙进行三维模拟会降低计算效率。因此,利用固结度等效原则,运用砂井固结理论分析,将塑料排水板地基等效简化为竖向渗透率 k_{ve} 较大的天然地基^[22-23],其计算式如下:

$$k_{ve} = k_v + \frac{2.67h^2}{d_e^2 \mu} k_h \quad (10)$$

式中: k_v 为土层竖向渗透率;

h 为每层土体塑料排水板打设深度。

$$\text{其中, } \mu = \ln n - \frac{3}{4} + \left(\frac{k_h}{k_s} - 1 \right) \ln s + \pi \frac{2L^2 k_h}{3q_w}$$

L 为塑料排水板计算长度。

在淤泥2-1、淤泥2-2和粉质黏土2-22的塑料排水板处理区域, μ 值分别为2.506、2.653、5.132,将这些值代入式(10),可以算出塑料排水板处理区域的等效渗透率。各土层渗透率以及通过该理论计算出的塑料排水板处理区域的等效渗透率见表1。

表1 土层渗透率及等效渗透率

Table 1 Soil permeability coefficient and equivalent permeability coefficient

土层名称	$k_h / (m \cdot d^{-1})$	$k_v / (m \cdot d^{-1})$	$k_{ver} / (m \cdot d^{-1})$
淤泥2-1	0.000 622	0.000 467	0.012 105
淤泥2-2	0.000 691	0.000 501	0.056 334
粉质黏土2-22	0.010 152	0.008 199	0.031 479
粗砂3-7	5.300 000	5.300 000	-
淤泥质粉质黏土3-3	0.000 484	0.000 338	-
碎块状强风化花岗岩6-12-2	0.220 000	0.220 000	-
块状中风化花岗岩6-13-1	0.220 000	0.220 000	-
中风化花岗岩6-13	0.220 000	0.220 000	-
吹填砂	1.000 000	1.000 000	-

2.3 计算模型建立及参数设置

采用Midas GTS有限元软件对西锚碇人工岛进行模拟,整个人工岛模型呈不规则椭圆形。建模时,采用岩土工程领域广泛应用的摩尔-库伦本构模型。该模型的主要参数包括弹性模量 E 、泊松比 ν 、容重 γ 、黏聚力 c 和内摩擦角 φ 。根据深中通道伶仃航道桥工程的地质勘察报告,确定模型参数,见表2。人工岛模型如图3所示。其中,塑料排水板处理区域等效竖向渗透率见表1。

表2 土层参数设置表

Table 2 Parameter setting table of soil layer and structure

土层名称	E / kPa	ν	$\gamma / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	c / kPa	$\varphi / (^\circ)$
淤泥2-1	4 750	0.35	15.8	5.3	3.1
淤泥2-2	4 850	0.35	16.1	6.3	3.8
粉质黏土2-22	14 825	0.30	19.6	13.5	10.5
粗砂3-7	76 700	0.30	20.4	8.4	31.7
淤泥质粉质黏土3-3	14 680	0.30	18.0	16.7	6.3
碎块状强风化花岗岩6-12-2	1 100 000	0.30	26.0	300.0	30.0
块状中风化花岗岩6-13-1	11 000 000	0.27	27.4	500.0	36.0
中风化花岗岩6-13	15 000 000	0.25	27.4	1 000	41.0
吹填砂	250 000	0.30	18.0	0.0	30.0

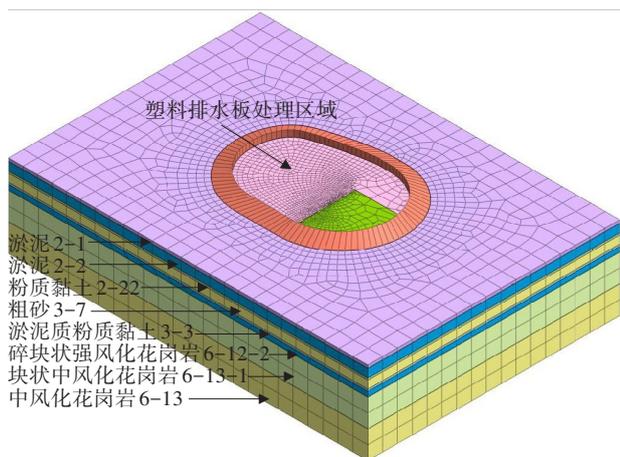


图3 人工岛模型示意

Fig. 3 Artificial island model

模型计算工况与实际工程的吹填工况大致相同,具体的计算工况见表3。

在进行固结沉降计算模拟时,主要模拟吹填预压期的沉降变化。因此,前4道工序总共设置为1 d,吹填第一层工序设置为60 d,吹填第二层工序设置为40 d,空置期工序设置为200 d;再对塑料排水板堆载预压处理的软土地基固结沉降量进行研究。

表3 施工模拟步骤

Table 3 Construction simulation steps

工序	施工情况
1	考虑土层的初始地应力,进行位移清零。
2	DCM桩施工
3	土工管袋围堰施工
4	塑料排水板施工
5	吹填第一层
6	吹填第二层
7	空置期

2.4 数值模拟结果与监测结果对比

人工岛岛体内部塑料排水板的处理范围不包括拌和楼和料仓区。在人工岛布置了MDB2和MDB3两个观测点,监测人工岛塑料排水板处理范围的地表沉降情况,如图4所示。地表沉降监测结果和模拟结果如图5所示。

从图5可以看出,监测点MDB2和MDB3的地表沉降监测值与数值模拟得到的地表沉降量相近,且变化趋势相似。这表明数值模拟结果能够较好地反映实际工程中地表沉降的变化情况。从图5还可以看出,在打设塑料排水板后,吹填预压期的固结沉降发展较快,这表明在吹填预压作用下,塑料排水板效果明显,符合实际工程情况。然后,在吹填预压期,数值模拟曲线的沉降速率小于监测曲线的沉降速率,这可能是因为在实际工程中加入了少许砂桩进行处理,加速了土体排水固结。

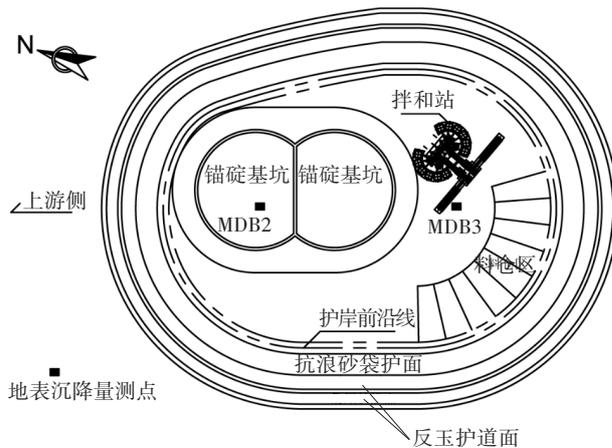


图4 岛体平面示意

Fig. 4 Plane schematic of the island

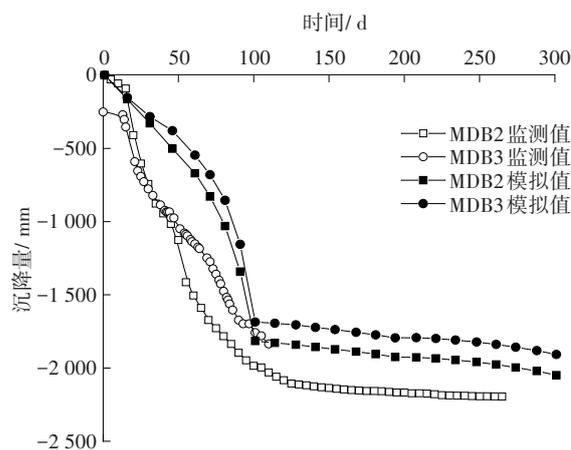


图5 地表沉降量监测与模拟值变化曲线

Fig. 5 Surface subsidence monitoring and simulation curve

3 影响因素分析

3.1 影响因素分析方案

塑料排水板的打设间距和通水量影响软土地基的处理效果。为探讨这些因素对人工岛固结沉降的影响,在该工程的基础上,制定一个影响因素

分析方案,并进行建模分析。分析方案见表4。在进行分析时,以某一因素(打设间距或通水量)作为变量,其他因素不变,而其他因素为弹性模量 E 、泊松比 ν 、容重 γ 、黏聚力 c 和内摩擦角 φ 。

表4 固结沉降的影响因素

Table 4 Scheme of parameters analysis

打设间距/m	通水量/($\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
0.5、1.0、1.5	40、50、60

3.2 塑料排水板打设间距的影响

对塑料排水板设置不同的打设间距,并统计不同打设间距下岛体中部位置的地表沉降变化曲线,如图6所示。

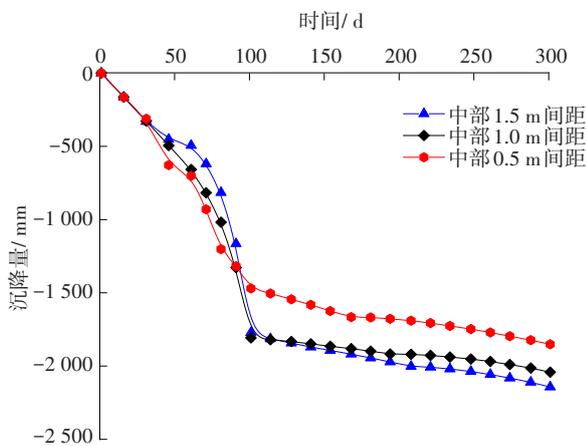


图6 不同打设间距下岛体中部地表沉降变化曲线

Fig. 6 Variation curve of surface settlement in the middle of island under different spacing

从图6可以看出,随着塑料排水板的间距逐渐减小,吹填预压期的沉降量逐渐增大,表明减小塑料排水板的间距会增大固结沉降量。当塑料排水板间距从1.5 m减小至1.0 m时,吹填预压期的沉降量差值大于塑料排水板间距由1.0 m减小至0.5 m的沉降量差值,表明当间距低于1.0 m时,固结沉降量虽然变大,但固结沉降速率逐渐变小。当塑料排水板间距改变时,吹填预压期固结沉降量可相差300 mm以上,表明塑料排水板间距的改变对固结沉降速率的影响显著。从图6还可以看出,最终固结沉降量的变化较稳定,但吹填结束后,塑料排水板间距为0.5 m的最终沉降量发展较慢。这是因为排水板间距过密,可能对土层产生了较大扰动,影响后续的固结沉降。塑料排水板间距过大,会影响吹填预压期的固结速率;塑料排水板间距过小,可能会对土层产生较大扰动,影响吹填后的固结沉降。因此,

在实际工程选择时,宜选择约1.0 m的塑料排水板间距。

3.3 塑料排水板通水量的影响

塑料排水板通水量对人工岛体固结沉降的影响如图7所示。

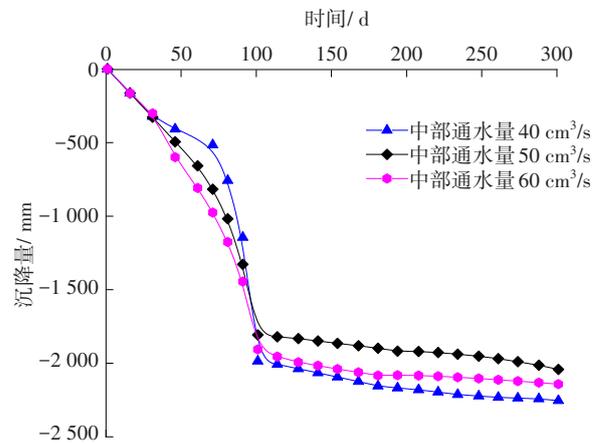


图7 不同通水量下岛体中部地表沉降变化曲线

Fig. 7 Variation curve of surface subsidence in the middle of island under different water flow

从图7可以看出,随着塑料排水板通水量的增加,吹填预压期固结沉降量逐渐上升,表明在塑料排水板预压处理固结沉降中,增大通水量能提高固结速率。与通水量从 $50 \text{ cm}^3/\text{s}$ 增大到 $60 \text{ cm}^3/\text{s}$ 的固结速率相比,当通水量从 $40 \text{ cm}^3/\text{s}$ 增大至 $50 \text{ cm}^3/\text{s}$ 时,固结速率增加显著,表明当通水量大于 $50 \text{ cm}^3/\text{s}$ 时,继续增大通水量,对提高固结速率的作用变小。在空置期,固结总沉降量并没有太大变化,表明塑料排水板通水量的增加对固结总沉降量的影响不显著。在不考虑材料造价的前提下,选择塑料排水板时通水量应越大越好,但也须根据具体工程实际情况综合考虑,本工程选择通水量为 $50 \text{ cm}^3/\text{s}$ 的塑料排水板进行软土地基处理。

4 渗透率对预测工后沉降的影响

工后沉降是软土地基沉降量分析中的重点之一。在软土地基中,由于土体渗透率等土性参数存在不确定性,无论是数值模拟,还是理论计算,都无法准确量化土性参数对预测工后沉降的影响。因此,本研究结合固结沉降理论和蒙特卡洛法,利用编程软件探讨了渗透率的不确定性对预测工后沉降的影响程度。

根据伶仃航道桥工程地质勘查报告,淤泥2-1渗透率的平均值为 0.72×10^{-6} cm/s,淤泥2-2渗透率平均值为 0.47×10^{-6} cm/s。为了满足该实际工程,假设淤泥层渗透率的变化范围为 $0.40 \times 10^{-6} \sim 0.80 \times 10^{-6}$ cm/s。根据文献[27]和勘查报告统计出的淤泥层渗透率变异系数,将渗透率变异系数的取值范围设置为0.500 ~ 0.900。

当渗透率符合对数正态分布变化时,不同渗透率均值 μ_k 和相同渗透率的变异系数 K_{cov} (coefficient of variation, COV)为0.7时的工后沉降情况如图8所示。理论计算出的工后沉降量(箭头指向的值)也叠加在图中,以便与工后沉降量直方图进行比较。

从图8可以看出,当渗透率符合对数正态分布时,工后沉降也近似服从对数正态分布。工后沉降在一个较大的范围内波动,多分布在工后沉降的右侧,这表明当 μ_k 大于0.50时,会显著影响工后沉降的预测。

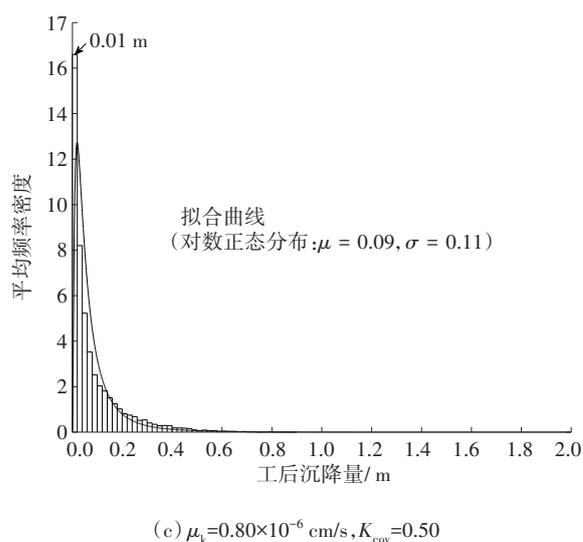
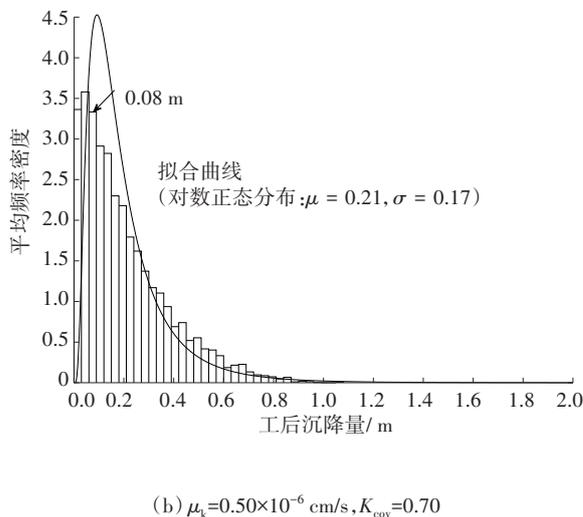
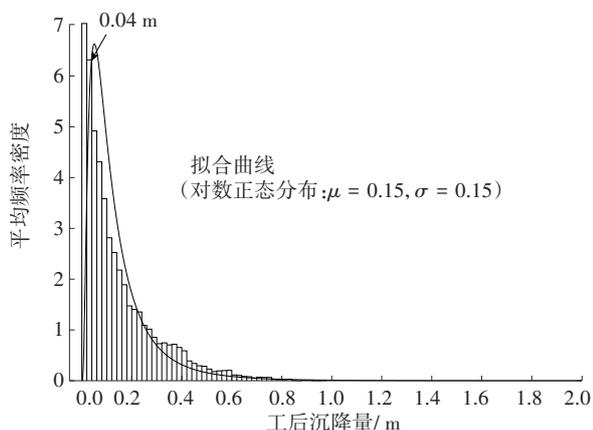
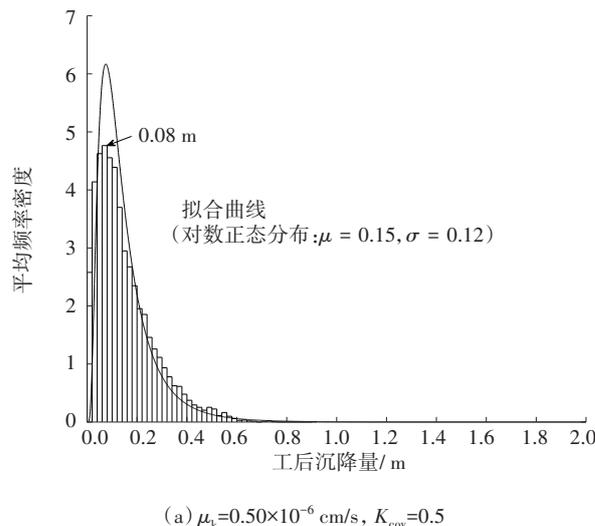
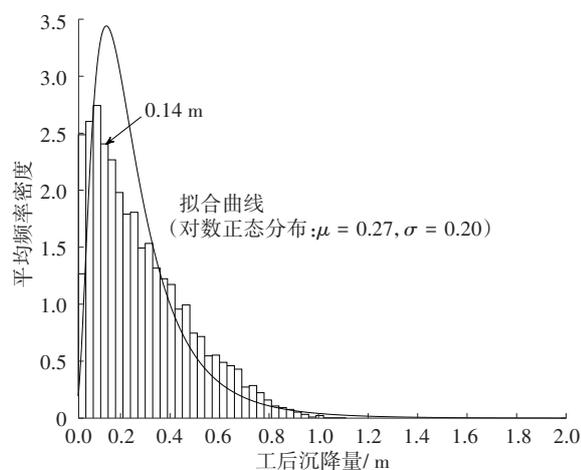


图8 不同渗透率均值下的工后沉降量直方图

Fig. 8 Post-construction settlement histogram under different μ_k

相同渗透率均值为 0.5×10^{-6} cm/s时,不同渗透率变异系数对工后沉降的影响如图9所示。



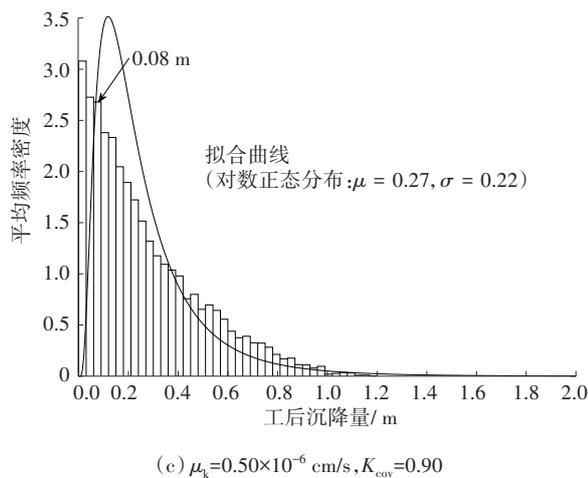


图9 不同渗透率变异系数下的工后沉降量直方图

Fig. 9 Post-construction settlement histogram under different K_{cov}

从图9可以看出,随着渗透率的增大,工后沉降预测的范围逐渐增大,并且工后沉降的预测值逐渐向右偏移。这表明渗透率的变化对工后沉降的预测具有显著影响。

5 结论

以深中通道西锚碇人工岛为工程背景,采用数值模拟的方法,对岛体固结沉降进行模拟计算。通过影响因素分析和可靠性分析,得出以下结论:

1) 采用固结度等效原则的塑料排水板预压软土地基的数值模拟,是处理软土地基的数值模拟计算中的有效方法之一。既可以较好地模拟固结沉降,也可以避免塑料排水板数量过多使模型复杂化的问题。

2) 塑料排水板的间距和通水量均会影响软土地基固结沉降速率。塑料排水板间距越小,固结沉降速率越大,但对土层的扰动也会变大。因此,应根据实际工程选择适宜的排水间距。在无其他因素限制的情况下,宜选择通水量较大的塑料排水板,因为通水量越大,固结沉降速率越大。但改变塑料排水板的间距和通水量对最终的固结沉降量影响不大。

3) 运用Matlab GPT计算固结沉降量,并假设渗透率符合对数正态分布。当 μ_k 变化范围为 $0.4 \times 10^{-6} \sim 0.8 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$, K_{cov} 变化范围为 $0.5 \sim 0.9$ 时,利用蒙特卡洛法模拟渗透率的变异系数分析对工后沉降的影响。计算结果表明,渗透率的变异系数分

析对工后沉降的预测结果具有显著影响。

参考文献(References):

- [1] 沈卓恒,阮世强.软土地层路基工后沉降预测及控制研究[J].交通科学与工程,2020,36(4):17-21. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.04.003.
SHEN Zhuoheng, RUAN Shiqiang. Study on prediction and control of post-construction settlement of subgrade in the soft soil layer [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36 (4) : 17-21. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.04.003.
- [2] 赵利平,龙骁鹏,黄筱云.水泥土搅拌桩复合地基沉降分析[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2020,17(3):30-36,70.
ZHAO Liping, LONG Xiaopeng, HUANG Xiaoyun. Settlement analysis of composite foundation of soil-cement mixing pile [J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2020, 17 (3): 30-36, 70.
- [3] 李文勇,张浩,关宏信等.软土地基中预应力管桩荷载-沉降曲线计算[J].交通科学与工程,2021,37(3):17-21. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.03.003.
LI Wenyong, ZHANG Hao, GUAN Hongxin, et al. Calculation of load-settlement curve of prestressed pipe pile in soft soil foundation [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(3): 17-21.
- [4] 曾伟,曹锋.高速公路CFG桩复合地基振动成型法试验研究[J].交通科学与工程,2020,36(4):22-27. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.04.004.
ZENG Wei, CAO Feng. Experimental study on vibration forming of CFG pile composite foundation in expressway [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36 (4) : 22-27. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.04.004.
- [5] 潘易鑫,罗洁,龚维亮,等.海相区深厚软基轻质路堤变形数值分析[J].交通科学与工程,2020,36(1):20-25. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.01.004.
PAN Yixin, LUO Jie, GONG Weiliang, et al. Numerical analysis of the deformation of deep soft foundation light embankment in marine area [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36 (1) : 20-25. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.01.004.
- [6] 朱森林.堆载预压技术在潮汕机场大面积深厚软土地

- 基处理中的应用[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(9): 43-46. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5485.2014.09.008.
- ZHU Senlin. Application of preloading method to the treatment of large-scale deep soft soil foundation of Chaoshan Airport[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2014, 31(9): 43-46. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5485.2014.09.008.
- [7] 刘爱民, 梁爱华, 尹长权. 整体式塑料排水板与普通塑料排水板加固效果对比试验[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增刊1): 130-133.
- LIU Aimin, LIANG Aihua, YIN Changquan. Comparative tests on reinforcement effects of integral and ordinary plastic drainage boards[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38 (sup 1): 130-133.
- [8] 黄建华, 张建勋, 陈国周, 等. 饱和软土地基堆载预压排水固结沉降特性研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2011, 28(6): 87-93. DOI: 10.15958/j.cnki.gdxzb.2011.06.015.
- HUANG Jianhua, ZHANG Jianxun, CHEN Guozhou, et al. Analysis of consolidation settlement effects in saturated soft-soil improved by preloading combined with plastic drains [J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2011, 28(6): 87-93. DOI: 10.15958/j.cnki.gdxzb.2011.06.015.
- [9] 谢非, 肖策, 王占东, 等. 塑料排水板堆载预压法在软基处理中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(增刊1): 1542-1548.
- XIE Fei, XIAO Ce, WANG Zhandong, et al. Application of plastic dewatering board of preloading method in soft subgrade treatment[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(sup 1): 1542-1548.
- [10] 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.
- LI Shaohe, HUANG Man, LIN Qunxian. Soft foundation settlement measurement and theoretical calculation analysis using stack preloading method treatment [J]. Bulletin of Science and Technology, 2015, 31(9): 93-96, 111. DOI: 10.13774/j.cnki.kjtb.2015.09.021.
- [11] 黄朝焯, 方咏来, 曾甯. 塑料排水板处理地基固结特性研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(2): 99-103, 119. DOI: 10.11988/ckyyb.20161075.
- HUANG Chaoxuan, FANG Yonglai, ZENG Zeng. Consolidation characteristics of foundation treated by prefabricated vertical drains[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(2): 99-103, 119. DOI: 10.11988/ckyyb.20161075.
- [12] 张甲峰, 钱建固, 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(增刊2): 892-896.
- ZHANG Jiafeng, QIAN Jiangu, ZHANG Heqing, et al. Numerical analysis of oversized deep soft foundation improved by plastic drainage plates combined with surcharge preloading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(sup 2): 892-896.
- [13] 董超强, 苗雨, 钱志创. 塑料排水板处理超软土地基的数值模拟分析[J]. 土木工程与管理学报, 2018, 35(1): 110-116. DOI: 10.13579/j.cnki.2095-0985.2018.01.018.
- DONG Chaoqiang, MIAO Yu, QIAN Zhichuang. Numerical simulation analysis of plastic drainage plate to treat super-soft ground[J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2018, 35(1): 110-116. DOI: 10.13579/j.cnki.2095-0985.2018.01.018.
- [14] INDRARATNA B, RUJIKIATKAMJORN C, EWERS B, et al. Class a prediction of the behavior of soft estuarine soil foundation stabilized by short vertical drains beneath a rail track [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(5): 686-696. DOI: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000270.
- [15] KARIM M R, LO S C R. Estimation of the hydraulic conductivity of soils improved with vertical drains [J]. Computers and Geotechnics, 2015, 63: 299-305. DOI: 10.1016/j.compgeo.2014.10.010.
- [16] WATABE Y, SHINSHA H, YONEYA H, et al. Description of partial sandy layers of dredged clay deposit using penetration resistance in installation of prefabricated vertical drains [J]. Soils and Foundations, 2014, 54(5): 1006-1017. DOI: 10.1016/j.sandf.2014.09.006.
- [17] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 第三版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- GONG Xiaonan. Compilation Committee of Ground

- Improvement Manual. Ground improvement manual [M]. third edition. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008.
- [18] 中交天津港湾工程研究院有限公司. 水运工程塑料排水板应用技术规程: JTS 206-1—2009[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- CCCC Tianjin Harbor Engineering Research Institute Co., Ltd.. Technical specification for application of plastic drainboard for port and waterway engineering: JTS 206-1—2009 [S]. Beijing: China Communications Press, 2009.
- [19] 李玲玲. 砂井地基平面问题的变形计算和有限元分析 [D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
- LI Lingling. Deformation calculation and finite element analysis of plane problem of sand drain foundation [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.
- [20] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学 [M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2013.
- LI Guangxin, ZHANG Bingyin, YU Yuzhen. Soil mechanics [M]. 2nd edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [21] 黄飞, 祁长青, 李新发. 塑料排水板处理临江软基效果数值模拟 [J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(5): 536-541. DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.2013.05.008.
- HUANG Fei, QI Changqing, LI Xinfu. Numerical simulation of effect to treat near-river soft ground with plastic drain board [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33(5): 536-541. DOI: 10.13409/j.cnki.jdpme.2013.05.008.
- [22] 李豪, 高玉峰, 刘汉龙, 等. 真空-堆载联合预压加固软基简化计算方法 [J]. 岩土工程学报, 2003, 25(1): 58-62. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-4548.2003.01.012.
- LI Hao, GAO Yufeng, LIU Hanlong, et al. Simplified method for subsoil improved by vacuum combined with surcharge preloading [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(1): 58-62. DOI: 10.3321/j.issn: 1000-4548.2003.01.012.
- [23] CHAI J C, SHEN S L, MIURA N, et al. Simple method of modeling PVD-improved subsoil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, 127(11): 965-972. DOI: 10.1061/(asce) 1090-0241 (2001)127: 11(965).
- [24] 严洁. 塑料排水板在108国道仙海段软基处理中的应用研究 [D]. 绵阳: 西南科技大学, 2023. DOI: 10.27415/d.cnki.gxngc.2023.000073.
- YAN Jie. Application of plastic drainage board in soft foundation treatment of Xianhai section of national highway 108 application research [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2023.
- [25] 彭扬发, 周洋, 王宁波, 等. 塑料排水板地基变形的简易算法 [J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(7): 1898-1907. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.t20210851.
- PENG Yangfa, ZHOU Yang, WANG Ningbo, et al. Simple method for evaluating deformation of PVD-improved grounds [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(7): 1898-1907. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.t20210851.
- [26] 杨顺才. 滨海景观带塑料排水板施工技术与质量控制 [J]. 珠江水运, 2021(5): 96-97. DOI: 10.14125/j.cnki.zjsy.2021.05.043.
- YANG Shuncai. Construction technology and quality control of plastic drainage board in coastal landscape zone [J]. Pearl River Water Transport, 2021(5): 96-97. DOI: 10.14125/j.cnki.zjsy.2021.05.043.
- [27] DUNCAN J M. Factors of safety and reliability in geotechnical engineering [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, 126(4): 307-316. DOI: 10.1061/(asce) 1090-0241 (2000) 126: 4 (307).
- (责任编辑:罗容;校对:欧兆虎;英文编辑:杜雪明)