

DOI: 10.11779/CJGE201711019

连云港港区深厚淤泥地基筑堤数值分析

占鑫杰^{1,2}, 高长胜^{1,2}, 朱群峰^{1,2}, 杨守华^{1,2}, 张凌^{1,2}, 庞彬^{1,2}

(1. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210029; 2. 水文水资源与水利工程国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 连云港徐圩港区淤泥层深厚, 土质条件差, 拟在淤泥地基上修筑斜坡堤。准确开展筑堤后地基固结预测分析, 可优化设计, 并为港区后期建设提供技术支撑。采用能较好反映超软淤泥性质的修正剑桥模型, 模拟斜坡堤分级施工过程, 采用不同涂抹效应参数进行计算, 通过与实测结果对比以确定海上排水板施工的合理涂抹参数。计算结果表明, 当涂抹区半径比 $s=5$, 渗透系数降低比 $k_h/k_s=5$ 时, 原位监测结果与数值模拟结果吻合较好。要满足油气管廊基础对工后沉降的要求, 应保障排水板施工质量, 同时堤身预压时间不低于 13 个月。

关键词: 斜坡堤; 地基固结变形; 数值模拟; 反分析; 修正剑桥模型

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2017)11-2109-07

作者简介: 占鑫杰(1986-), 男, 工程师, 主要从事软基处理、基础工程和环境岩土研究工作。E-mail: xjzhan@nhri.cn。

Numerical analysis of breakwater construction on soft clay in harbor area of Lianyungang Port

ZHAN Xin-jie^{1,2}, GAO Chang-sheng^{1,2}, ZHU Qun-feng^{1,2}, YANG Shou-hua^{1,2}, ZHANG Ling^{1,2}, PANG Bin^{1,2}

(1. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China 2. State Key Laboratory of

Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China)

Abstract: The ground in Xuwei harbor area of Lianyungang Port is the deep soft clay, and its engineering property is poor. On the soft ground the breakwater is proposed to be constructed. Predicting the consolidation settlement of the ground of the breakwater accurately can give a design optimization and provide technical support for the harbor construction. The modified Cam-clay model is used as the constitutive model for soils, and the staged-construction of the breakwater is simulated. A systematic parametric study is conducted, and the results are back-calculated to determine the extent and permeability of smear zone with respect to installation of offshore PVDs. The numerical results reveal that when the extent ratio is 5 and the permeability ratio k_h/k_s is 5, the in-situ observed results agree well with the numerical ones. In order to meet the requirements of the post-construction settlement of oil pipeline foundation, the construction quality of PVDs should be controlled, and the preloading time of the breakwater should be more than 13 months.

Key words: breakwater; consolidation settlement of ground; numerical simulation; back calculation; modified Cam-clay model

0 引言

连云港徐圩港区 30 万吨级深水航道是江苏省重点建设工程。斜坡堤是形成港区的前提, 是建设的起步工程。徐圩港区淤泥土质条件差, 地基处理难度大, 这给斜坡堤施工和安全带来不利。针对上述要求和特点, 在初步设计阶段, 设计单位和专家提出采用可多点铺开施工, 少用开山石料, 确保工期的“塑料排水板+砂被+抛石混合式斜坡堤”结构方案: 即首先在海底淤泥层表面插设塑料排水板、铺设砂被, 随后在砂被层表面分级抛石建设斜坡堤, 最后在斜坡堤表面建设油气管廊基础。在工程推进过程中必须充分考虑斜坡堤建设技术难点和功能使用要求: 堤身为分步施工, 其加载期约为 3~4 个月; 油气管廊基础对工后沉降有

严格要求。

结合现场监测资料, 准确开展筑堤后地基固结分析, 可优化设计并为港区后续建设提供技术支撑。地基固结分析可采用解析和数值模拟方法。随着计算机技术发展, 数值方法逐步应用于复杂的模拟计算。针对斜坡堤堤身加载问题, 数值模拟软件可计算地基应力场、变形场等, 并可开展多参数分析^[1]。

排水板在插板过程中会扰动周围淤泥土层, 扰动区内土体渗透系数降低, 进而影响土层固结过程^[2]。描述扰动涂抹效应的参数包括涂抹区半径 r_s 和涂抹区

基金项目: 南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费重点基金项目 (Y315003, Y316004, Y316006)

收稿日期: 2016-10-11

渗透系数 k_s 。从 20 世纪 90 年代开始, 部分研究者采用室内试验手段来模拟插板过程中的扰动效应, 进而对土体涂抹区半径和渗透系数变化进行评估^[3-8], 然而室内试验动力因素较难还原现场施工, 室内试验手段获得的涂抹参数可能与现场条件有一定差异。同期部分学者采用反分析来确定排水板插板后的涂抹参数^[2, 9-11]。然而不同研究者得到的涂抹参数有一定差异, 这可能与现场施工因素、土质条件不同有一定关系。地基处理手册^[2]指出土体扰动程度取决于多种因素, 包括土体初始状态、套管形状、大小和设置方式等。斜坡堤筑堤过程中排水板施工为海上作业, 其施工扰动作用比陆域大^[12]。

目前针对不进行软基处理的江河堤防填筑控制的研究有部分报道^[13-14], 而对“塑料排水板+砂被+抛石混合式斜坡堤”结构方案的数值模拟研究报道较少, 特别是考虑排水板施工扰动作用对斜坡堤地基固结特性影响规律的研究未见报道。

本文采用能较好反映超软淤泥性质的修正剑桥模型, 模拟斜坡堤分级施工过程; 采用不同涂抹效应参数进行反分析, 通过对比确定海上排水板施工涂抹参数。在此基础上研究油气管廊基础建设后的变形特征, 以确定斜坡堤堤身预压时间, 为港区后续建设提供技术支持。

1 斜坡堤及地基

1.1 斜坡堤结构形式

连云港 30 万吨级航道二期工程斜坡堤结构形式根据使用功能、工程地质、造价、工期要求以及当地筑堤经验, 经综合比选, 确定两种堤体形式: 爆破挤淤堤和排水板+砂被+抛石斜坡堤, 本文主要介绍抛石斜坡堤。

斜坡堤断面如图 1 所示, 堤顶宽 4.5 m, 堤内、外侧标高 2.5~2.0 m 处设置镇压平台, 平台宽度 15 m; 内坡坡度为 1:1.5, 外坡上坡坡度为 1:1.5, 下坡坡度为 1:2。地基采用排水板和砂被袋处理, 砂被袋体采用机织布加筋充填袋。塑料排水板间距两侧 1.2 m,

中间 1 m, 按正方形布置。排水板插设深度穿透软土层, 板头露出砂被不小于 0.20 m。

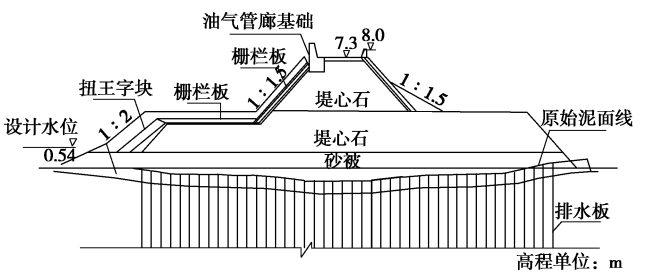


图 1 斜坡堤断面示意图

Fig. 1 Section of breakwater

堤身采用开山石、块石混合结构。外坡采用四脚空心方块+栅栏板+扭王字块护面。护底采用抛石结构, 防浪墙采用灌砌块石结构。

1.2 地基土层性质

根据连云港港 30 万吨级航道二期工程地质勘察报告^[15], 斜坡堤地基不同土层基本物理力学性质指标如表 1 所示。地基共分为 5 层, 分别为淤泥, 黏土-1、黏土-2、粉土、黏土-3, 对应深度分别为-2.5~-13.5 m, -13.5~-18.5 m, -18.5~-21.5 m, -21.5~-24.5 m, -24.5~-28.5 m。从表 1 可知, 地基主要加固层为淤泥层。

2 数值模拟步骤

2.1 数值模拟软件

数值模拟软件采用 FLAC^{2D}。斜坡堤地基固结过程是三维问题, 因此需将排水板转换为“砂墙”后方可开展平面应变分析^[16]。FLAC^{2D} 软件采用二维显式差分法, 具有如下特性: ①采用“混合离散法”来模拟材料塑性破坏和塑性流动; ②即使模拟静态系统, 也采用动态运动方程进行求解, 这使得 Flac 模拟物理上的不稳定过程不存在数学障碍; ③采用显式差分法求解微分方程。每一时步计算所需内存很小。在大变形问题求解过程中, 由于每一时步变形很小, 因此可采用小变形本构关系, 将各时步变形叠加, 这使得大变形求解过程与小变形问题一致。

表 1 地基不同土层的物理力学性质

Table 1 Physical and mechanical properties of soil strata

土层 编号	土层	高程 /m	含水率 w/%	孔隙比 e	重度 γ_{sat} /($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	渗透系数 $k/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	有效内摩 擦角 $\varphi'/(^\circ)$	压缩指数 C_c
1	淤泥	-2.5~-13.5	62.4	1.6	16.5	1×10^{-7}	12	0.48
2	黏土-1	-13.5~-18.5	26.0	0.715	19.7	6.7×10^{-6}	25	0.13
3	黏土-2	-18.5~-21.5	26.0	0.715	19.8	1.7×10^{-6}	25	0.116
4	粉土	-21.5~-24.5	23.0	0.633	19.6	3×10^{-4}	30	0.086
5	黏土-3	-24.5~-28.5	24.5	0.756	18.5	8.7×10^{-6}	25	0.146

2.2 数值模拟流程

数值计算流程主要包括以下步骤：①生成计算网格；②土体分层及材料赋值；③施加初始应力场及边界条件；④初始应力场平衡；⑤排水板及涂抹区模拟；⑥分级激活单元来描述斜坡堤施工过程；⑦固结过程计算。

2.2.1 分析模型及网格划分

由于斜坡堤结构海侧和陆侧基本对称，因此取海侧一半进行计算，可大幅提高计算效率。斜坡地基土层共 5 层（见表 1）；数值计算模型中将淤泥层分为两层（如图 2 所示），因此各土层：①（淤泥，-2.5 m~-8 m）；②（淤泥，-8 m~-13.5 m）；③（黏土-1，-13.5 m~-18.5 m）；④（黏土-2，-18.5 m~-21.5 m）；⑤（粉土，-21.5 m~-24.5 m）；⑥（黏土-3，-24.5 m~-28.5 m）。

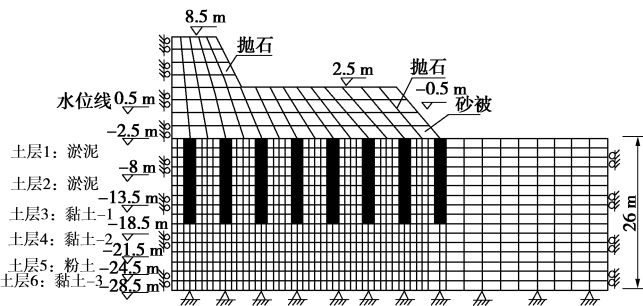


图 2 斜坡堤及地基模型网格划分示意图

Fig. 2 Grid model for breakwater and underlying soil strata

2.2.2 土层本构模型及赋值

地基主要压缩层为淤泥，因此土体本构模型采用描述软土特性的修正剑桥模型。土层⑤为粉土层（见图 2），但不是压缩层，对最终结果影响较小，因此地基土层本构模型均采用修正剑桥模型。

抛石堤和砂被层作为主要加载层，采用莫尔-库仑模型来描述。

（1）地基基本参数赋值

计算程序中修正剑桥模型包含如下参数：破坏线斜率 M 、压缩指数 λ 、回弹指数 κ 、泊松比 ν 、初始比体积 mv_1 、先期固结应力 p_c 、最大体积模量 $K_{max}^{[1, 17]}$ ，以上参数根据土层物理学性质指标（见表 1）换算得到。

a) M 值

土层破坏线斜率 M 值与有效内摩擦角 φ' 关系如下：

$$M = \frac{6 \sin \varphi'}{3 - \sin \varphi'} \quad (1)$$

根据表 1 不同土层有效内摩擦角 φ' 可计算土层破坏线斜率 M 。

b) λ 值

根据表 1 不同土层压缩指数 C_c ，按下式可计算不同土层 λ 值：

$$\lambda = C_c / \ln 10 \quad (2)$$

c) κ 值

根据软土层推荐值^[17]，取 0.2λ 。

d) 泊松比 ν 值

淤泥层泊松比取 0.35，其它土层泊松比取 0.25。

e) 初始比体积 mv_1

根据土层单元应力、含水率和颗粒相对密度进行计算。

f) 先期固结应力 p_c

土层各单元先期固结应力按正常固结，根据土体重度和深度计算。

g) 最大体积模量 K_{max}

根据 Flac 程序计算稳定性要求，最大体积模量 K_{max} 应高于土层体积模量 K 值的 100 倍。

根据以上分析，不同土层修正剑桥模型计算参数如表 2 所示。

表 2 数值程序中地基不同土层修正剑桥模型参数

Table 2 Parameters of modified Cam-clay model for soil strata in numerical code

土层	M	λ	κ	ν	K_{max}/MPa	mv_1
1	0.567	0.208	0.042	0.35	16	3.4489
2	0.567	0.208	0.042	0.35	16	3.4489
3	0.984	0.056	0.011	0.25	16	1.9700
4	0.984	0.050	0.010	0.25	80	1.9572
5	1.200	0.037	0.007	0.25	400	1.8152
6	0.984	0.063	0.013	0.25	400	1.9950

（2）抛石堤和砂被层参数赋值

抛石和砂被层采用莫尔-库仑模型描述，模型参数包括剪切模量 G 、体积模量 K 、黏聚力 c 和内摩擦角 φ' 。根据工程地质手册和已有文献[18, 19]，以上参数数值如表 3 所示。

表 3 砂被和抛石层莫尔-库仑模型参数

Table 3 Parameters of Mohr-Coulomb model for sand blanket and excavating rocks

堤身	体积模量/MPa	剪切模量/MPa	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	密度/(kg·m ⁻³)
砂被层	15.0	10.0	5	30	1800
抛石层	55.6	41.7	100	40	2000

注：根据图 2，水位以下砂被和抛石层采用浮重度。

2.2.3 边界条件及初始应力场施加

模型施加的边界条件（见图 2）如下：左右边界水平向固定，底边界双向固定。同时施加初始应力场

和孔压场,土层单元初始孔压根据静水压力得到。

2.2.4 排水板模拟

如图3所示,塑料排水板采用节点孔压固定法进行模拟^[20]:在斜坡堤堆载和土体固结过程中均固定排水板节点静水压力值。排水板周围涂抹区模拟是通过降低涂抹区土体渗透系数来实现。

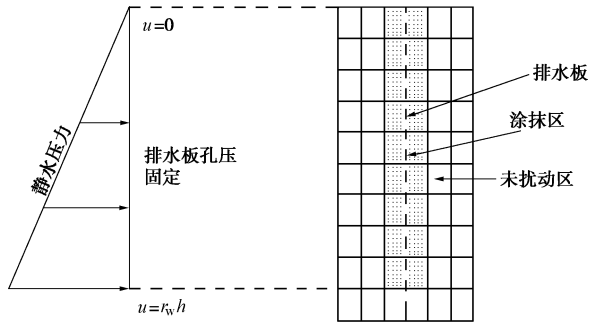


图3 排水板模拟

Fig. 3 Simulation of prefabricated vertical drain

2.2.5 平面应变等效方法

如图4所示,排水板地基(图4(a))转换为平面应变问题来处理,是把原来沿斜坡堤纵向按正方形布置的排水板转换成纵向连续砂墙(图4(b)),砂墙地基按照平面应变问题来处理。为保证地基整体固结度不变,砂墙地基各土层的渗透系数进行相应修正,具体公式如下^[16]:

$$\frac{k_{h,ps}}{k_{h,ax}} = \frac{\alpha + \frac{k_{h,ps}}{k_{s,ps}}(\beta) + \theta}{\left[\ln\left(\frac{n}{s}\right) + \frac{k_{h,ax}}{k_{s,ax}} \ln s - 0.75 + \pi \frac{2k_{h,ax}}{3q_w} l_2 \right]}, \quad (3)$$

其中,

$$\alpha = \frac{2(n-s)^3}{3n^2(n-1)}, \quad (4)$$

$$\beta = \frac{2(s-1)}{n^2(n-1)} \left[n(n-s-1) + \frac{1}{3}(s^2+s+1) \right], \quad (5)$$

$$\theta = \frac{4k_{h,ps}}{3Bq_{w,ps}} \left(1 - \frac{1}{n} \right) l^2. \quad (6)$$

式中 n 为砂井地基井径比 ($n=r_e/r_w$); s 为涂抹区半径与砂井半径之比 ($s=r_s/r_w$); $k_{h,ps}$ 为平面应变砂墙地基未涂抹区土体渗透系数; $k_{h,ax}$ 为三维砂井地基未涂抹区土体渗透系数; $k_{s,ps}$ 为平面应变砂墙地基涂抹区土体渗透系数; B 为砂墙间距; q_w 为排水板通水量; l 为排水板长度; $k_{h,ps}/k_{s,ps}$ 为平面应变未涂抹区渗透系数与涂抹区渗透系数之比 (其值等于 $k_{h,ax}/k_{s,ax}$)。

2.2.6 堤身分级堆载施加

首先将堤身设置为空单元。通过分级激活砂被和抛石单元来实现斜坡堤堤身加载。斜坡堤堤身加载与时间对应关系如图5所示。

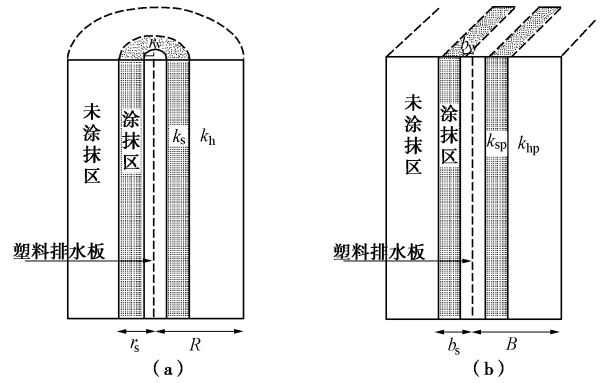


图4 轴对称和平面应变计算单元的转换

Fig. 4 Conversion of axisymmetric calculation unit to plane strain

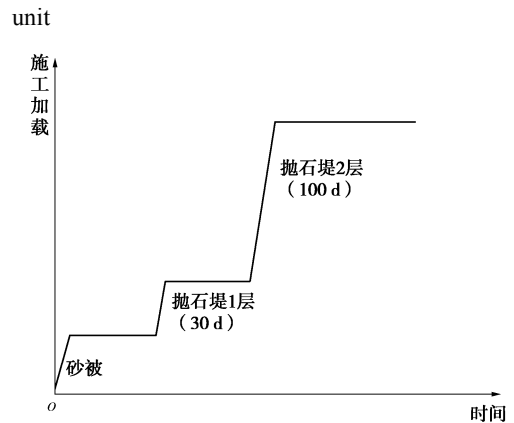


图5 斜坡堤分级堆载示意图

Fig. 5 Staged loading of breakwater body

Flac 程序中砂被及斜坡堤堤身分级堆载后的模型网格如图6所示。

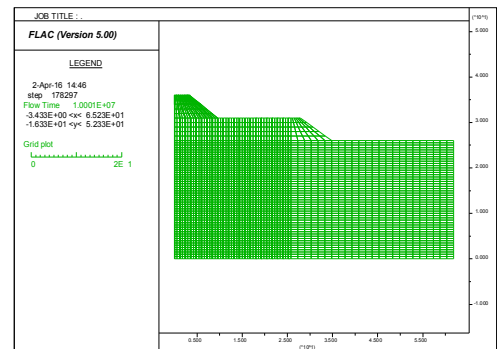


图6 斜坡堤分步堆载过程的模型网格

Fig. 6 Grid model for breakwater after staged loading

2.2.7 固结计算

分别采用不同涂抹区井径比 s ($r_s/r_w=2\sim5$), 涂抹区渗透系数降低比 k_h/k_s ($2\sim5$) 进行反分析, 将数值模拟结果 (淤泥层表面沉降) 与实测结果进行对比, 以确定合理涂抹参数。在此基础上, 分析油气管廊基础建设后的工后沉降。

3 模拟结果分析

3.1 表面沉降随涂抹参数变化规律

淤泥地基表面沉降随 k_h/k_s 变化规律如图 7 所示。从图中可知, 涂抹区半径比 $s=2, 3, 4, 5$ 时, 4 组曲线变化规律基本一致。 $k_h/k_s=2$ 时, 淤泥地基中心沉降较快稳定; 当涂抹区渗透系数减小 (k_h/k_s 从 2 增至 5 时), 淤泥地基表面沉降速率逐渐放缓。

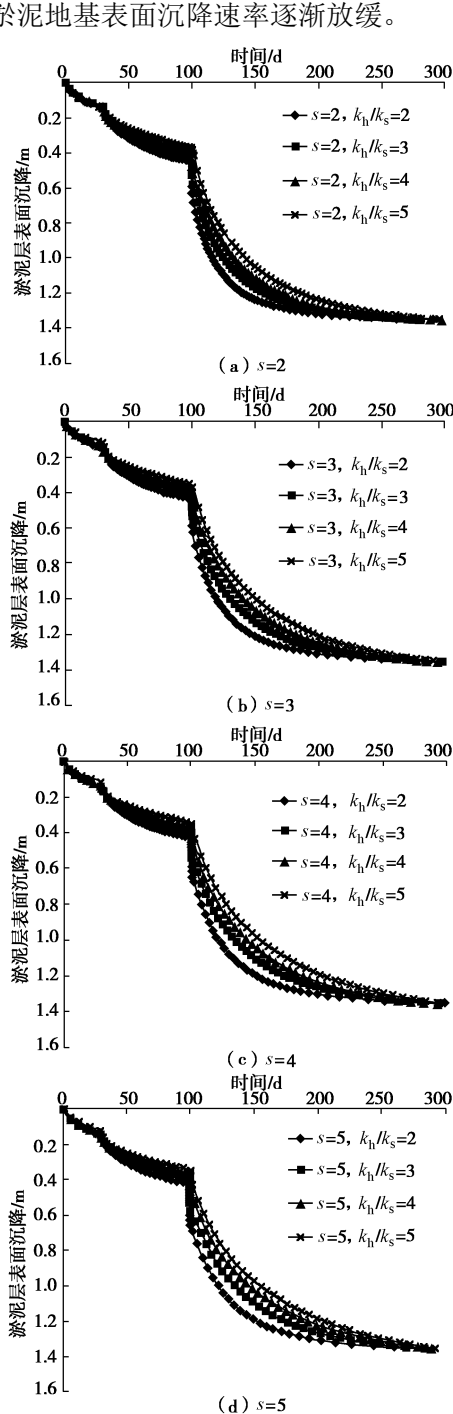


图 7 淤泥地基表面沉降随 k_h/k_s 值变化规律 ($s=2, 3, 4, 5$)
Fig. 7 Change of surface settlement of soft clay layer with value of k_h/k_s ($s=2, 3, 4, 5$)

淤泥地基表面沉降随 s ($s=r_s/r_w$) 变化规律如图 8 所示。从图中可知, $k_h/k_s=2, 3, 4, 5$ 时, 4 组曲线变化规律基本一致。当土层涂抹区渗透系数不变, 随涂抹区半径增大 (s 增大), 淤泥地基中心沉降速率逐渐放缓。对比图 7, 8 可知, 淤泥地基中心沉降速率受土

层涂抹区渗透系数的影响更为敏感, 这与 Bergado 等^[9]对试验路堤沉降速率受涂抹参数 k_h/k_s 影响更为敏感的结论一致。图 7, 8 计算结果变化趋势符合现有砂井固结理论认识, 进一步验证数值程序的正确性。

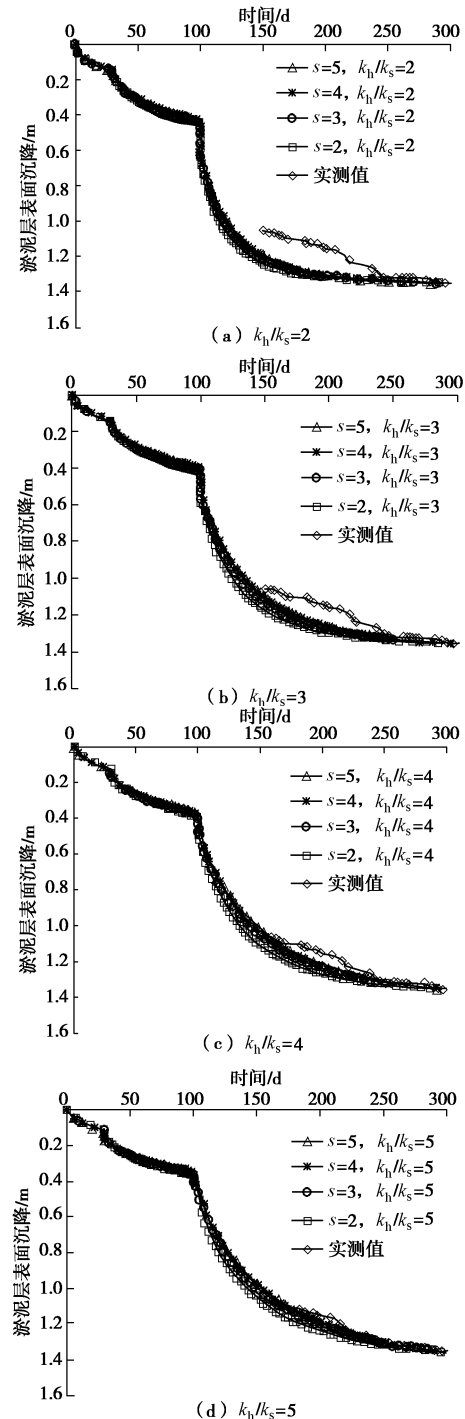


图 8 淤泥地基表面沉降随 s 值变化规律 ($k_h/k_s=2, 3, 4, 5$)
Fig. 8 Change of surface settlement of soft clay layer with versus of s ($k_h/k_s=2, 3, 4, 5$)

3.2 数值模拟与实测结果对比

由于斜坡堤堤身部分在海水中, 现场沉降监测是在堤身施工到一定高度后才开展的。而数值模拟中 0 d 对应于砂被层堆载时间 (见图 5); 根据施工记录, 现场沉降监测开始时间对应于数值模拟中 150 d, 因此监

测起点沉降对应于数值模拟中一定时间的沉降值。

斜坡堤表面沉降数值模拟结果与实测结果对比 ($s=2, 3, 4, 5; k_h/k_s=2, 3, 4, 5$) 如图 8 所示。从图中可知: 当 $k_h/k_s=2$ 时, 数值模拟结果与实测曲线有较大差异, 计算表面沉降速率明显小于实测沉降速率。随 k_h/k_s 值增大, 数值模拟结果与实测沉降曲线接近 (见图 8 (d))。对数值模拟结果和实测沉降进行相关性分析, 得到相关系数如表 4 所示。从表中可以发现: 当 $k_h/k_s=5, s=5$ 时, 数值模拟结果和实测结果相关性最高 (相关系数为 0.977)。据此可确定斜坡堤淤泥地基涂抹参数为: $k_h/k_s=5, s=5$ 。

表 4 数值模拟与实测结果相关系数

Table 4 Correlation coefficients of numerical results and measured results

s	$k_h/k_s=5$	$k_h/k_s=4$	$k_h/k_s=3$	$k_h/k_s=2$
5	0.977	0.969	0.954	0.928
4	0.974	0.964	0.952	0.925
3	0.971	0.962	0.949	0.920
2	0.963	0.956	0.936	0.914

根据确定的涂抹区参数 ($k_h/k_s=5, s=5$), 采用数值模拟程序计算斜坡堤分层沉降(深度 4.5 m 和 6.5 m) 如图 9 所示。从图中可知, 数值模拟分层沉降曲线(4.5, 6.5 m) 与实测沉降曲线基本吻合。

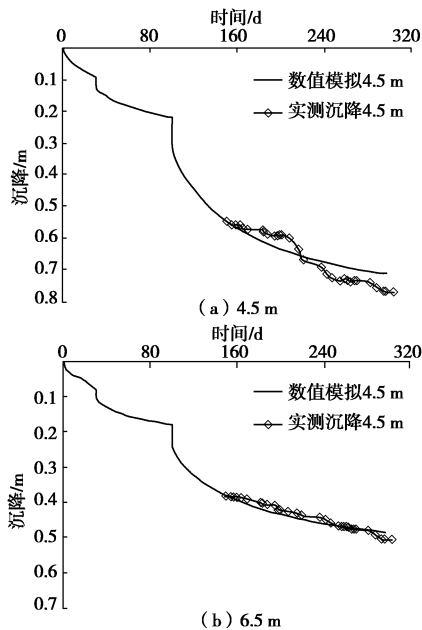


图 9 斜坡堤淤泥地基分层沉降数值模拟结果与实测结果对比
Fig. 9 Comparison between numerical and measured results of layered settlement of soft clay under breakwater

3.3 预压时间确定

油气管廊基础 (见图 1) 在斜坡堤表面建设, 基础部分嵌入斜坡堤, 附加荷载不大, 因此管廊基础建设后的工后沉降可从管廊基础位置堤体表面沉降曲线得到。

根据数值模拟结果得到油气管廊基础沉降与时间

关系如图 10 所示。管廊基础处堤体在 100 d 时开始堆载, 因此图 10 中沉降曲线的起始时间为 100 d。当堤身预压时间控制为 13 个月 (390 d) 时, 管廊基础的工后沉降为 2 cm, 满足使用要求。

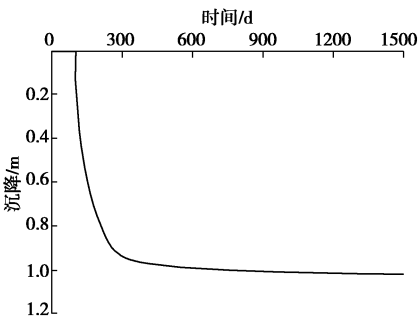


图 10 油气管廊基础沉降与时间关系
Fig. 10 Relationship between settlement of oil pipeline foundation and time

因此要控制油气管廊基础建设后的工后沉降, 需合理控制堤身预压时间和排水板施工质量。

4 结 论

连云港徐圩港区淤泥土层深厚, 土质条件差, 拟在淤泥地基上建设斜坡堤。斜坡堤地基采用塑料排水板和砂被处理, 砂被表面抛填开山石形成堤身, 后期在斜坡堤表面建设油气管廊基础。准确开展筑堤后地基固结分析, 可优化设计, 并为港区后期建设提供重要技术支撑。由于海上排水板插板过程会扰动土体产生涂抹区, 影响地基固结速率, 因此固结分析应予以考虑。本文通过分层激活单元模拟斜坡堤堤身分级施工过程, 对淤泥地基排水固结特性进行分析计算。随后采用不同涂抹特性参数进行反分析, 通过与原位监测结果对比来确定合理涂抹参数。在此基础上计算油气管廊基础建设后的工后沉降, 并确定堤身预压时间。总结本文工作, 得到以下 3 点结论。

- (1) 淤泥层地基沉降变形随着斜坡堤堤身荷载分级施加呈现出明显的分段特征。当淤泥地基涂抹区渗透系数减小, 涂抹半径增大时, 斜坡堤地基固结沉降速率变缓。斜坡堤沉降速率受土层涂抹区渗透系数的影响更为敏感。
- (2) 当涂抹区井径比 $s (r_s/r_w) = 5$, 渗透系数降低比 $k_h/k_s=5$ 时, 斜坡堤现场监测结果 (表面沉降、分层沉降) 与数值模拟结果吻合较好。
- (3) 要控制油气管廊基础建设后的工后沉降, 应保证排水板施工质量, 同时斜坡堤堤身预压时间不低于 13 个月。

参考文献:

[1] Itasca Consulting Group, Inc. FLAC—Fast lagrangian analysis

- of continua Version 6.0 User's Manual[M]. Minneapolis: Itasca, 2008.
- [2] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008: 69 - 114. (GONG Xiao-nan. Manual for ground treatment[M]. 3rd ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008: 69 - 114. (in Chinese))
- [3] INDRARATNA B, REDANA I W. Laboratory determination of smear zone due to vertical drain installation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1998, **124**(2): 180 - 184.
- [4] SHARMA J, XIAO, D. Determination of smear zone around vertical drains[C]// Proceedings of the Soft Ground Technology, Noordwijkerhout. Netherlands, 2000: 270 - 279.
- [5] HIRD C C, MOSELEY V J. Model study of seepage in smear zones around vertical drains in layered soil[J]. Géotechnique, 2000, **50**(1): 89 - 97.
- [6] SATHANANTHAN I, INDRARATNA B. Laboratory evaluation of smear zone and correlation between permeability and moisture content[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, **132**(7): 942 - 945.
- [7] SHIN D H, LEE C, LEE J S, LEE W. Detection of smear zone using micro-cone and electrical resistance probe[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, **46**(6): 719 - 726.
- [8] GHANDEHARIOON A, INDRARATNA B, RUJIKIATKAMJORN C. Laboratory and finite-element investigation of soil disturbance associated with the installation of mandrel-driven prefabricated vertical drains[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, **138**(3): 295 - 308.
- [9] BERGADO D T, MUKHERJEE K, ALFAROA M C, et al. Prediction of vertical-band-drain performance by the finite-element method[J]. Geotextiles and Geomembranes, 1993, **12**(6): 567 - 586.
- [10] CHAI J C, MIURA N. Investigation of factors affecting vertical drain behavior[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, **125**(3): 216 - 226.
- [11] SAOWAPAKPIBOON J, BERGADO D T, YOUWAI S, et al. Measured and predicted performance of prefabricated vertical drains (PVDs) with and without vacuum preloading[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2010, **28**(1): 1 - 11.
- [12] 连云港港务工程公司. 连云港港 30 万吨级航道二期工程 (302-ZB 标段) 施工总结[R]. 连云港: 连云港港务工程公司, 2015: 1 - 21. (Lianyungang Harbour Engineering Company. Construction summary for phase 2 reclamation dike of 300000 DWT waterway in Lianyungang port[R]. Lianyungang: Lianyungang Harbour Engineering Company, 2015: 1 - 21. (in Chinese))
- [13] 孔纲强, 张 弛. 填筑速率对软基上堤防沉降影响的现场试验与数值模拟[J]. 岩土力学, 2014, **35**(增刊 2): 343 - 349. (KONG Gang-qiang, ZHANG Chi. Field test and numerical simulation of deformation characteristics of embankment on soft ground under different filling speeds[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(S2): 343 - 349. (in Chinese))
- [14] 蔡珊珊, 苏怀智, 肖 峰, 等. 考虑堤基堤身相互作用的软土堤防数值模拟[J]. 人民黄河, 2015, **37**(3): 44 - 48. (CAI Shan-shan, SU Huai-zhi, XIAO Feng, et al. Numerical simulation on soft soil embankment considering interaction between the dike and its foundation[J]. Yellow River, 2015, **37**(3): 44 - 48. (in Chinese))
- [15] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司. 连云港港 30 万吨级航道二期工程 (围堤工程) 工程地质勘察报告[R]. 上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 2012: 1 - 10. (Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co, Ltd. Engineering geological survey report for phase 2 reclamation dike of 300000 DWT waterway in Lianyungang port[R]. Shanghai: Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd, 2012: 1 - 10. (in Chinese))
- [16] INDRARATNA B, RUJIKIATKAMJORN C, SATHANANTHAN I. Analytical and numerical solutions for a single vertical drain including the effects of vacuum preloading[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2005, **42**(4): 994 - 1014.
- [17] WOOD D M. Soil behaviour and critical state soil mechanics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [18] 工程地质手册编委会. 工程地质手册[M]. 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007. (Editorial Board of Engineering Geology Handbook. Handbook for engineering geology[M]. 4th ed. Beijing: China Architecture and Building Press, 2007. (in Chinese))
- [19] 王 洋. 防波堤地基的变形与稳定研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014. (WANG Yang. Researches on deformation and stabilization of the breakwater foundation[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014. (in Chinese))
- [20] PARSA-PAJOUH A, FATAHI B, VINCENT P, et al. Analyzing consolidation data to predict smear zone characteristics induced by vertical drain installation for soft soil improvement[J]. Geomechanics and Engineering, 2014, **7**(1): 105 - 131.