

真空 - 堆载联合预压加固吹填土地基 有限元分析法的研究

孙立强¹, 袁澍旺¹, 李伟²

(1. 天津大学建工学院岩土工程研究所, 天津 300072; 2. 天津港集团有限公司, 天津 300072)

摘要: 吹填土地基作为欠固结土, 其真空预压加固过程比较复杂, 初始条件和边界条件也比较复杂。通过对吹填土地基的形成和真空预压加固过程的分析, 对其初始孔隙水压力和真空度在排水板中的传递规律进行了研究; 在砂垫层和排水板中施加负的真空压力; 根据真空预压加固机理, 将非线性本构关系(Duncan-Chang模型)引入Biot固结理论, 综合考虑不同工程的荷载形式、初始条件和边界条件编制了通用的有限元程序, 对真空预压法地基加固进行平面应变有限元分析; 该程序实现了堆载的施加, 既能用于计算单纯的真空预压也能用于真空-堆载联合预压的有限元计算。利用提出的有限元程序分别对吹填土地基整个加固过程和正常固结土地基的真空-堆载联合预压进行了有限元分析, 计算结果与实测结果对比表明, 该方法较好地反映了实际工程沉降及孔隙水压力的发展趋势。

关键词: 真空预压; 平面有限元; 非线性弹性; 负压; 堆载; 孔隙水压力; 吹填土地基

中图分类号: TU43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2010)04-0592-08

作者简介: 孙立强(1979-)男, 山东青岛人, 博士生, 从事岩土工程软基处理研究。E-mail: slq0532@126.com。

Finite element analysis of reclaimed soil foundation consolidated by surcharge preloading combined with vacuum preloading

SUN Li-qiang¹, YAN Shu-wang¹, LI Wei²

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Tianjin Port Group Co., Tianjin 300072, China)

Abstract: The reclaimed soil foundation is consolidated, and its vacuum preloading consolidation process is very complex, so are the boundary and initial conditions. Through the analysis of the formation of the reclaimed soil foundation and its consolidation process, the initial pore water pressure and the delivery of negative vacuum pressure in the PVDs are studied. The negative vacuum pressure is applied in the sand layer and the PVDs elements. The nonlinearity constitutive relation (Duncan-Chang's model) is incorporated into the Biot's consolidation theory program. Considering different load conditions, initial conditions and boundary conditions, a general-purpose program is compiled to analyze the behavior of the soft clay consolidation by use of the plain strain FEM. The program can both calculate the vacuum preloading and the surcharge preloading combined with the vacuum preloading. Two actual projects are calculated using this program. Comparison with the field measurements indicates that the proposed method reflects the developing trend of settlement and pore water pressure of the projects.

Key words: vacuum preloading; plain strain FEM; nonlinear elasticity; negative pressure; surcharge load; pore water pressure; reclaimed soil foundation

0 引言

真空预压软基加固法以其工期短、加固效果良好以及经济等优点越来越多地应用于高速公路、港口以及围海造陆等工程中。特别是在吹填土地基加固中是一种行之有效的技术, 其设计计算理论和方法不断完善。然而大量的工程实践表明现行的真空预压固结计算结果与实测结果还存在很大的差距。迫切需要进一

步完善其计算方法。

吹填土地基是一种新造地基, 其形成过程是在原天然地基上吹填含水率较高的淤泥或淤泥质黏土泥浆, 当吹填到设计标高后(一般为4~6 m), 经过一定时间形成吹填土层, 然后在吹填土上面铺设一层粉

土, 作为真空预压施工的工作层(如图1所示)。天然地基在吹填土和填土层的重力作用下增加了一附加荷载, 使天然地基中产生超孔隙水压力。吹填土是由含水率较高的淤泥泥浆形成的, 为欠固结土, 故吹填土层中也有未消散的超孔隙水压力。

真空预压施工过程中, 在吹填土地基土体中打设排水板, 相当于在加固土体内增加了排水通道, 大大缩短了排水路径。因而吹填土地基中的超孔压在这个过程中就开始迅速消散, 产生固结沉降, 在本文中称之为插板期间沉降(插板期一般为15~20 d左右)。由现场监测数据可知, 吹填土地基插板期间沉降可以达到总沉降的1/3~1/2之间(见图8)。当施加真空荷载后, 在真空荷载作用下, 土体继续固结, 所以吹填土地基真空预压沉降由插板期间沉降和预压期间沉降两部分组成。综上所述, 吹填土地基在整个真空预压过程中是非常复杂的, 很难以准确的解析法进行分析, 只有通过有限元才能实现对整个过程的模拟。



图1 吹填土地基土层分布

Fig. 1 Soil layer distribution of the reclaimed soil foundation

目前, 真空预压及真空-堆载联合预压法的计算主要有解析法、数值计算法。文献[1]在比奥(Biot)固结理论的基础上, 采用弹性本构关系, 将排水板看成一条直线, 通过在排水板所在直线上的土体节点上施加负的真空压力实现负真空压力的施加, 对真空预压进行了有限元计算; 文献[2]采用黏弹塑性本构模型, 主要考虑了土的流变和损伤等因素, 通过将砂垫层中所有节点孔隙水压力设为负的真空压力, 土体表面各节点孔压设为0来实现负的真空压力的施加, 对真空预压进行了有限元计算; 文献[3]介绍了负压条件下软件加固的理论计算, 通过将砂垫层中所有节点孔隙水压力设为负的真空压力, 土体表面各节点孔压设为0来实现负的真空压力的施加, 考虑了土的流变和施工扰动引起的损伤, 采用平面应变有限元法进行分析。文献[4]将非线性本构关系引入到Biot固结理论有限元程序, 施加堆载荷载, 对砂井地基进行了平面有限元分析。文献[5]采用线弹性本构关系, 通过调节边界单元节点孔隙水压力为实测值来实现真空加载。文献[6]对真空预压地下水位的变化情况以及边界对加固效果的影响进行了分析, 并导出了考虑井阻和涂抹的双向渗流和变形的砂墙地基固结度计算公式, 将殷

宗泽的双曲面模型与修正的考马拉-黄模型相结合, 通过将砂垫层中所有节点孔隙水压力设为负的真空压力, 土体表面各节点孔压设为0来实现负的真空压力的施加, 对真空预压进行了有限元分析。

上述有限元分析在施加负的真空荷载时将砂垫层所有节点孔隙水压力设为负的真空压力, 地表各节点孔压为0, 其它边界孔压均为未知或是在排水板所在直线的土体节点上施加负的真空荷载, 或是将真空荷载等效成堆载荷载来处理, 以上方法对真空荷载的处理上都或多或少的进行了简化。而实际工程中负的真空压力通过砂垫层传至排水板中, 因而负真空压力的施加与实际情况存在一定的差距, 没有完全的模拟现场情况^[7-10]。以往有限元分析只考虑了正常固结土地基, 没有考虑在施加负真空压力前超孔压尚未完全消散的情况。对于吹填土地基而言, 在施加真空荷载前尚有未消散的超孔压, 直接认为初始超孔压为0是不准确的。在实际工程中, 排水板中真空度沿深度方向逐渐衰减, 这在以前的有限元分析中都很少涉及。

针对吹填土地基固结过程的特殊性和复杂性, 以往真空预压有限元分析存在着一定的局限性。本文通过现场试验总结了真空压力在排水板中的分布规律, 提出了排水板中负的真空压力沿深度的递减规律; 除了在砂垫层中施加负真空压力, 还实现了在排水板单元中施加负的真空荷载; 通过分析提出吹填土地基中未消散的超孔压是由吹填土的有效自重作用产生的, 故只需在吹填土体各节点施加有效自重即可, 这也相当于真空-堆载联合预压, 程序实现了堆载的分级施加, 能够模拟真空-堆载预压的整个过程; 在比奥(Biot)固结理论的基础上, 运用Duncan-Chang非线性弹性模型, 编制有限元程序, 并对实际工程进行有限元分析, 与现场实测结果进行比较。

1 有限元模型

1.1 平面应变比奥固结公式

根据真空预压机理和平面应变比奥固结理论^[11-13], 当用增量法进行求解时, 有限元总体方程可以表示为

$$\begin{bmatrix} \bar{k} & k' \\ k'^T & \tilde{k} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta d \\ b \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta R \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

$$\Delta R = R - R_t.$$

式中 \bar{k} , k' , k'^T , \tilde{k} 为劲度系数矩阵; Δd , b 为位移增量和超静孔压值; R 为外荷载; R_t 为 $t - \Delta t$ 时刻以前发生的位移相对应的应力所平衡了的那部分荷载。

1.2 本构模型

对于土体的有限元计算, 本构模型的选择尤为重要的, 虽然比奥(Biot)理论在方程推导时假定土骨架

是线性弹性的，但由于采用了有限单元法对其进行求解，就可以将其推广应用于非线性问题。由于土体变形具有十分明显的非线性特性，对于软土比较实用的本构模型是考虑土体的非线性特征的邓肯(Duncan-Chang)双曲线模型。该模型能很好地反映土体变形的主要规律。实际计算时，可在固结过程中对不同时刻，随着有效应力 $\{\sigma'\}$ 的变化而采用不同的力学指标 E, n ，其中泊松比 n 可依据经验取值， E 可用切线模量 E_t 代替，通过下式确定：

$$E_t = \left[1 - \frac{R_f(1-\sin j)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos j + 2\sigma_3 \sin j} \right]^2 K_i p_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n . \quad (2)$$

式中 σ_1 为最大主应力； σ_3 为最小主应力； c 为土的黏聚力； j 为土的内摩擦角； R_f 为破坏比； K_i 为加载模量系数； n 为加载模量指数； p_a 为大气绝对压强。

1.3 砂井地基平面应变等效方法

将真空预压平面问题等效成砂井地基，根据文献[14, 15]，将排水板等效成砂墙，并考虑井阻和涂抹效应，导出了砂井地基和砂墙地基的等效变换公式，

$$k_{xp} = D_x k_{xa} , \quad (3)$$

$$k_{zp} = D_z k_{za} , \quad (4)$$

$$D_x = \frac{4(n_p - s_p)(1+g)L^2}{9n_p^2 m_a - 12b(n_p - s_p)(s_p - 1)(1+g)L^2} ,$$

$$D_z = \frac{2(1+g)}{3} ,$$

$$m_a = \frac{n^2}{n^2 - s^2} \ln \frac{n}{s} - \frac{3n^2 - s^2}{4n^2} + \frac{k_{xa}(n^2 - s^2)}{k_s n^2} \ln s .$$

其中， k_{xa} 、 k_{za} 分别是砂井地基土的水平和竖向渗透系数； k_s 为涂抹区渗透系数； $L = B/g_{wa}$ 为砂井间距放大倍数（其中， B 为砂墙间距的一半； g_e 为单井有效排水半径）； $n_p = B/g_{wp}$ ， g_{wp} 为砂墙宽度的一半； $s_p = g_{sp}/g_{wp}$ ， g_{sp} 为砂墙地基涂抹区宽度一半； s 为涂抹半径 r_s 与砂井半径 r_{wa} 之比， $s = r_s/r_{wa}$ ； n 为砂井半径比， $n = r_e/r_{wa}$ ； $b = k_{xa}/k_s$ ， k_{xp} 、 k_{zp} 为有限元计算中所采用的水平向竖直向渗透系数； D_x 、 D_z 分别是水平和竖直渗透系数的调整系数。

1.4 荷载施加

预压法加固软土地基根据不同荷载形式分为真空预压、堆载预压、真空-堆载联合预压。在程序中可以同时施加堆载和真空荷载，也能单纯的施加真空荷载或堆载。真空预压法，是抽真空使土体产生孔隙压力差，这一过程是负压产生的超静水压力向作用于土骨架上的有效应力的转化，并无外荷载作用，因此结点外荷载向量 $\{R\}=0$ 。在计算真空-堆载联合预压时，除了真空荷载外，还有土体上面的堆载，此时结点外荷载向量 $\{R\}$ 为堆载压力值。

吹填土地基为欠固结土地基，抽真空前有未消散的超孔压。而在解比奥方程中，孔隙水压力与外荷载的关系在平衡方程中得到了反映，它不像太沙基方程须由外荷载推求出初始孔隙压力再行消散，因此没有孔隙压力初始条件的要求。一般在进行真空预压前，土中的孔隙水压力已经完全消散，土体的自重固结也基本完成。但对于吹填土地基在加固前在很大程度上还存在未消散超孔压，所以要考虑这部分超孔压产生的固结沉降，此时就需要将这部分超孔压转换成荷载施加在土体上。设该超孔隙水压力值为 $\{b_0\}$ ，由平衡方程

$$[\bar{K}]\{\bar{d}\} + [\bar{K}']\{\bar{b}\} = \{R\} ,$$

$$\text{可得, } [\bar{K}]\{\bar{d}\} + [\bar{K}']\{\bar{b}_t - b_0\} = \{R\} ,$$

$$\text{故 } [\bar{K}]\{\bar{d}\} + [\bar{K}']\{\bar{b}_t\} = \{R\} + \{R_0\} ,$$

$$\text{其中 } \{R_0\} = [\bar{K}']\{\bar{b}_0\} .$$

从上式可知，相当于荷载 $\{R_0\}$ 的作用引起超孔压 $\{b_0\}$ ，故在计算时要在土体节点上施加这部分荷载（ $\{R_0\}$ 由吹填土的有效自重和填土的自重产生，每层土的荷载大小如图 2 所示）。

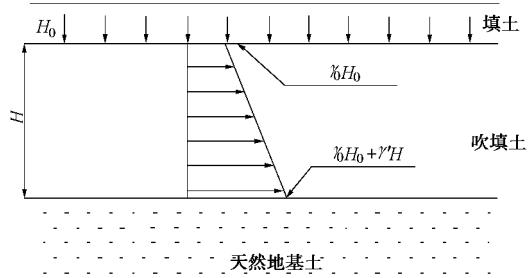


图 2 吹填土地基插板前地基附加荷载简图

Fig. 2 Surcharge load of reclaimed soil foundation before installing PVDs

此时初始超孔压条件变为 $\{b_0\}=0$ 。因此吹填土地基真空预压的荷载由 $\{R_0\}$ 和负的真空荷载组成。吹填土地基预压从插板开始的整个过程相当于真空-堆载联合预压。对于正常固结土的真空预压而言荷载只有负的真空荷载。

正常固结土地基的真空-堆载联合预压法地基加固的荷载是由施加在地基上的堆载和负真空荷载组成。

1.5 真空度传递规律

在以往真空预压有限元分析中，负的真空压力都施加在砂垫层节点或将排水板视为直线，施加在排水板所在直线的土体节点上。本文将负的真空压力施加在砂垫层和排水板单元中，由于排水板存在一定的井阻作用，因此，真空度沿深度方向传递的过程中必然会产生一定的损失，使土体深部的真空度小于膜下真空度，并且排水板中真空度的稳定需要一个时间过程。

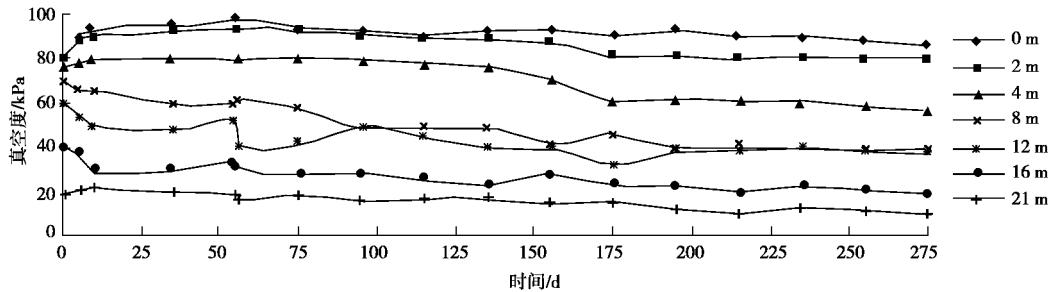


图 3 真空度在排水板中的传递规律

Fig. 3 Delivery of vacuum degree in PVDs

文献[16]通过试验对真空度在排水体中沿深度方向分布进行了研究(试验结果见图3)。

本文在对天津港几项工程的实测排水板孔压变化曲线分析的基础上,认为该地区真空预压工程塑料排水板中稳定后的负压分布基本符合图4所示的规律。

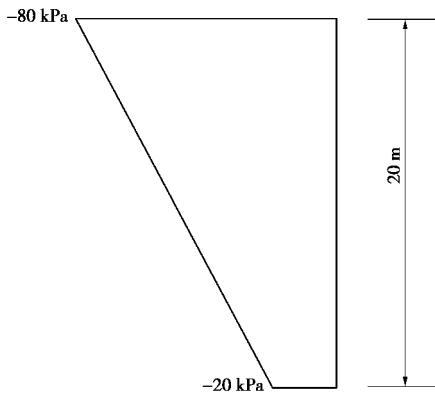


图 4 天津港真空预压工程排水板负压分布

Fig. 4 Distribution of negative pressure in PVDs of Tianjin Port vacuum preloading project

1.6 初始条件

在解比奥方程中,设大气压力 $p_a = 0$,于是有 $\{b_0\} = 0$ 即结点初始超静孔隙水压力为零。结点初始位移 $\{d_0\} = 0$ 。

1.7 边界条件

边界条件包括孔隙水边界条件和位移边界条件。按平面问题计算时,边界条件的确定如图5所示。除上表面外其他边界按不透水边界计算,孔隙水应力为

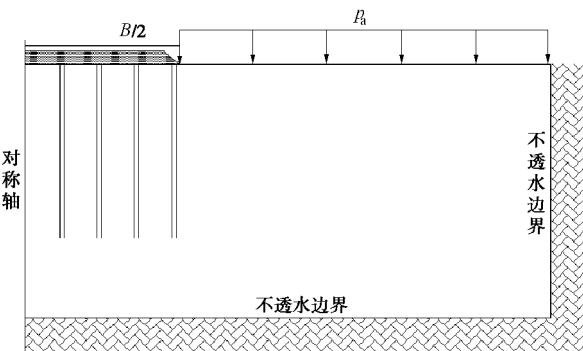


图 5 边界条件示意图

Fig. 5 Boundary conditions

未知数。地表面为自由边界;对称轴处因为对称性,只有水平向约束;其他边界由于取得离加固区较远,因此可以取全约束。

2 工程实例 1

利用本文有限元程序分别对吹填土地基真空预压和正常固结土地基的真空-堆载联合预压进行了有限元计算。

2.1 工程 1 概况

本工程为天津港南疆某通用散货泊位堆场项目,需加固场地面积为 $94 \text{ m} \times 311 \text{ m}$,加固区域泥面以下属第四纪全新世海相沉积与河口相冲积地层,表层为港区挖泥吹填造陆而成,属典型的超软土地基。工程插板深度为 20 m,插板间距为 1.0 m,满载预压 110 d,抽真空后膜下砂垫层中平均真空度为 80 kPa。用Duncan-Chang 模型计算时,需输入相应的 Duncan-Chang 模型参数 c, j, R_f, K_i, n, p_a ,其中 c, j, R_f, K_i, n 均可由原状土的室内三轴排水剪切试验确定,在缺少实验资料的情况下,可按文献[17]中所述选取。本文对加固前进行现场钻孔取土并进行室内三轴试验,根据实验结果,加固区土层计算参数和Duncan-Chang 模型参数如表 1 所示。

2.2 计算模型

模型计算深度取 30 m,加固区计算宽度取短边实际宽度 94 m 的一半即 47 m,另从加固区边缘外延 106 m 作为影响区,用于研究真空预压的影响范围。考虑到从地表往下前 4 层土的厚度为 17 m,而插板深度为 20 m,为了输入参数的方便,在模型中将第五层土体再细划分两个土层,故模型竖向共分 6 个土层,横向以排水板(砂墙)为分界线,模拟工程实际中的插板布置,以 1.0 m 为间距,排水板等效为 60 mm 直径砂井,涂抹直径取为 100 mm,模型简图如图 6 所示。

本工程模拟整个现场施工过程,从插板开始计算,插板期间为 20 d,插板期间吹填土地基在有效自重作用下迅速产生固结沉降,现场实测的插板期间的沉降量可到达总沉降量的 $1/3 \sim 1/2$ 之间^[18](见图 8)。对于吹填土地基真空预压有限元分析,荷载施加分两个阶

表 1 土层计算参数和 Duncan-Chang 模型参数

Table 1 Parameters of soil strata for calculation and Duncan-Chang's model

土层名称	c /kPa	j $/(^{\circ})$	m	E /kPa	g /(kN·m ⁻³)	渗透系数/(cm·s ⁻¹)	模量系数 k_x	模量系数 k_z	模量 指数 n	破坏 比 R_f	大气压 /kPa
淤泥质黏土及淤泥	12	0.50	0.32	2600	17.2	2.82×10^{-7}	2.73×10^{-7}	95	0.701	0.80	101.3
淤质黏土	18	0.50	0.35	3200	18.0	3.11×10^{-7}	3.10×10^{-7}	95	0.701	0.80	101.3
淤泥	10	0.36	0.35	2600	17.0	1.12×10^{-7}	1.03×10^{-7}	95	0.701	0.80	101.3
淤泥质黏土	15	0.45	0.35	2700	17.4	5.23×10^{-7}	5.13×10^{-7}	95	0.701	0.80	101.3
粉质黏土	32	0.51	0.30	5100	19.3	1.16×10^6	1.02×10^6	300	0.40	0.80	101.3
排水板	0	0.50	0.25	3000	12.0	0.001	0.001	500	0.40	0.50	101.3
涂抹区	18	0.46	0.26	2500	18.0	5.30×10^{-9}	5.03×10^{-9}	150	0.701	0.80	101.3

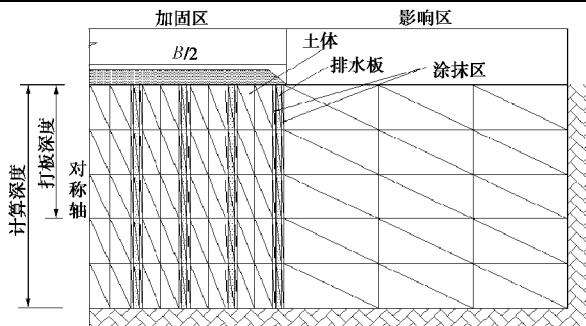


图 6 有限元模型简图

Fig. 6 FEM model

段：第一阶段在前 20 d 的插板期，这个过程没有真空荷载，只将吹填土的有效自重和填土的自重作为外荷载施加在吹填土层节点上，相当于施加一个堆载作用（吹填土地基每层土体荷载的施加如图 2 所示）。第二阶段从 20 d 开始施加真空荷载，此时土体在真空荷载和等效堆载的共同作用下开始新第二阶段固结，荷载施加过程如图 7 所示。

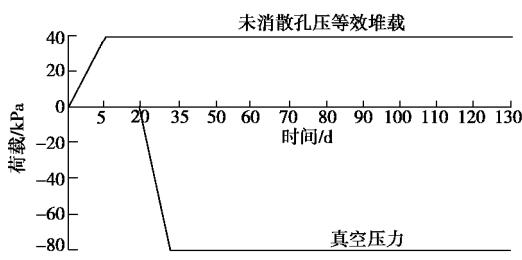


图 7 吹填土地基真空预压整个荷载施加过程

Fig. 7 Whole loading process of vacuum preloading of reclaimed soil foundation



图 8 吹填土地基插板期间沉降

Fig. 8 Settlement during installing PVDs

2.3 沉降计算

对工程分别利用线弹性模型和 Duncan-Chang 非

线性弹性模型进行了有限元计算。根据有限元计算结果，加固中心点表面沉降计算值和现场实测值随时间变化曲线，如图 9 所示。现场施工过程中，监测了插板期间的总沉降量，中心点表面插板期间实测总沉降量为 94 cm，在施加真空荷载后，每 10 d 读一个数据，因此现场实测值随时间变化曲线是从 20 d 开始，然后加上插板期间实测值做出现场沉降实测值随时间变化曲线。由图 9 的由限元计算值可知，吹填土地基整个真空预压过程的沉降由两部分组成：前 20 d 的插板期间沉降和 20 d 后的真空预压期间沉降。有限元计算曲线很清楚的反映了现场施工的实际情况。通过与现场实测数据的比较，Duncan-Chang 非线性弹性有限元计算比的沉降随时间变化线弹性模型更好的反映了吹填土真空预压整个施工过程的固结情况。由图 9 有限元计算曲线和实测曲线比较可知，本文提出的 Duncan-Chang 非线性弹性有限元分析方法能够较好的模拟现场施工过程，计算结果与现场实测数据基本吻合。

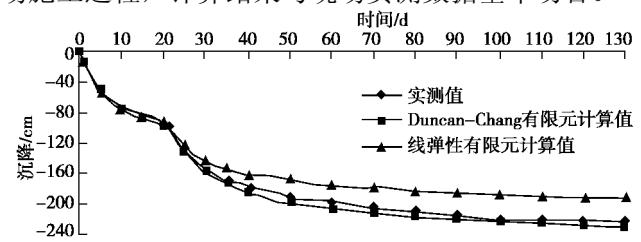


图 9 沉降-时间关系曲线

Fig. 9 Settlement-time curves

2.4 孔压计算

根据有限元计算结果，分别将加固区中心点以下 -1, -8, -17 m 处的孔压绘制孔压随时间的变化曲线，如图 10~12 所示。根据计算结果，在前 20 d 的时间内，在有效自重作用下开始消散，通过孔压消散图可以看出，在较浅的土层超孔压基本消散完毕。而在较深处孔压值明显大于静水压力值，说明在施加真空荷载前还有一部分超静孔压没有消散。在施加负的真空压力后，在外荷载和真空荷载作用下孔隙水压力继续消散，最终在负的真空压力作用下达到负值。由图 10~12 可以发现，在 -1 m 深处，负的孔隙水压力基本达到 -80 kPa，等于膜下真空度，随着深度的加深，最终的负孔压在数值上减小至 -20 kPa 左右，跟本文提

出的排水板中的真空度变化规律相似。经过上述分析, 孔压有限元计算结果与现场实测数据比较吻合。

3 工程实例 2

3.1 工程概况

本工程为天津港某工程加固区, 需加固场地面积为 $30\text{ m} \times 80\text{ m}$, 加固区域泥面以下属第四纪全新世海相沉积与河口相冲积地层, 属典型的软土地基。工程

插板深度为 20 m, 插板间距为 1.0 m, 满载预压 185 d, 抽真空后膜下砂垫层中平均真空度为 80 kPa。堆载为 40 kPa, 分两级施加。根据加固前室内三轴试验结果, 加固区土层计算参数和 Duncan-Chang 模型参数如表 2 所示。本工程为真空-堆载联合预压。

3.2 荷载的施加

本工程为真空-堆载联合预压法软基加固, 整个

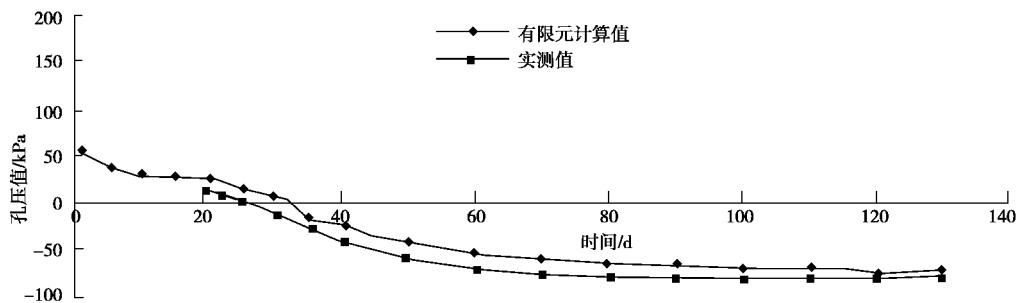


图 10 -1 m 处孔压随时间变化曲线

Fig. 10 Pore pressure-time curves at depth -1 m

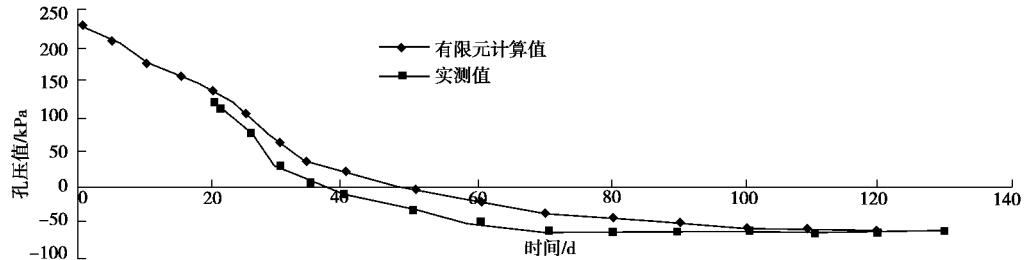


图 11 -8 m 处孔压随时间变化曲线

Fig. 11 Pore pressure-time curves at depth -8 m

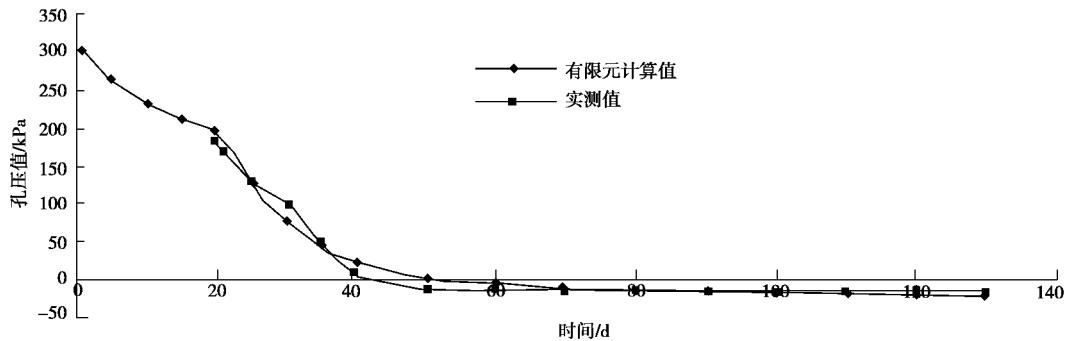


图 12 -17 m 处孔压随时间变化曲线

Fig. 12 Pore pressure-time curves at depth -17 m

表 2 土层计算参数和 Duncan-Chang 模型参数

Table 2 Parameters of soil strata for calculation and Duncan-Chang's model

土层名称	c /kPa	j /(°)	m	E /kPa	g /(kN · m ⁻³)	渗透系数/(cm · s ⁻¹)	模量系数 K	模量 指数 n	破坏 比 R_f	大气压 /kPa
淤泥质黏土及淤泥	12	0.50	0.32	2600	17.2	2.82×10^{-7}	2.73×10^{-7}	95	0.701	0.80
淤质黏土	18	0.50	0.35	3200	18.0	3.11×10^{-7}	3.10×10^{-7}	95	0.701	0.80
淤泥	10	0.36	0.35	2600	17.0	1.12×10^{-7}	1.03×10^{-7}	95	0.701	0.80
淤泥质黏土	15	0.45	0.35	2700	17.4	5.23×10^{-7}	5.13×10^{-7}	95	0.701	0.80
粉质黏土	32	0.51	0.30	5100	19.3	1.16×10^{-6}	1.02×10^{-6}	300	0.400	0.80
排水板	0	0.50	0.25	3000	12.0	0.001	0.001	500	0.400	0.50
涂抹区	18	0.46	0.26	2500	18.0	5.30×10^{-9}	5.03×10^{-9}	150	0.701	0.80

过程荷载的施加为：第一步：施加真空荷载；第二步：加固 50 d 后施加第一级堆载，堆载值为 15 kPa。第三步：加固 130 d 后施加第二级堆载，堆载值为 25 kPa，总共施加堆载 40 kPa。荷载施加过程如图 13 所示：

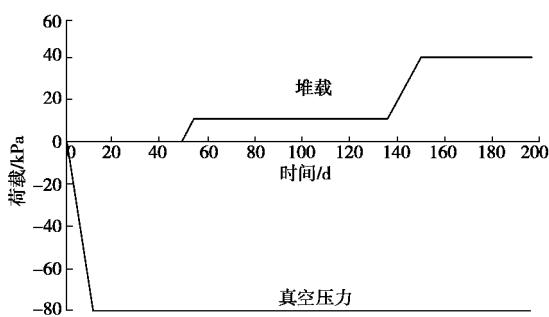


图 13 真空 - 堆载联合预压荷载施加

Fig. 13 Loading of surcharge preloading combined with vacuum preloading

3.3 计算结果

本文分别对加固中心地表以下 0, 3.8, 7.0, 10.5, 14.5 m 处的沉降进行了计算，根据有限元计算结果，加固中心点不同深度沉降计算值随时间变化曲线如图 14 实线所示。图 14 中虚线为现场沉降实测值随时间变化曲线。通过对有限元计算的沉降随时间变化曲线与现场实测的沉降随时间变化曲线比较可知，本文提出的有限元分析方法能够较好的模拟现场施工过程，计算结果与现场实测数据基本吻合。

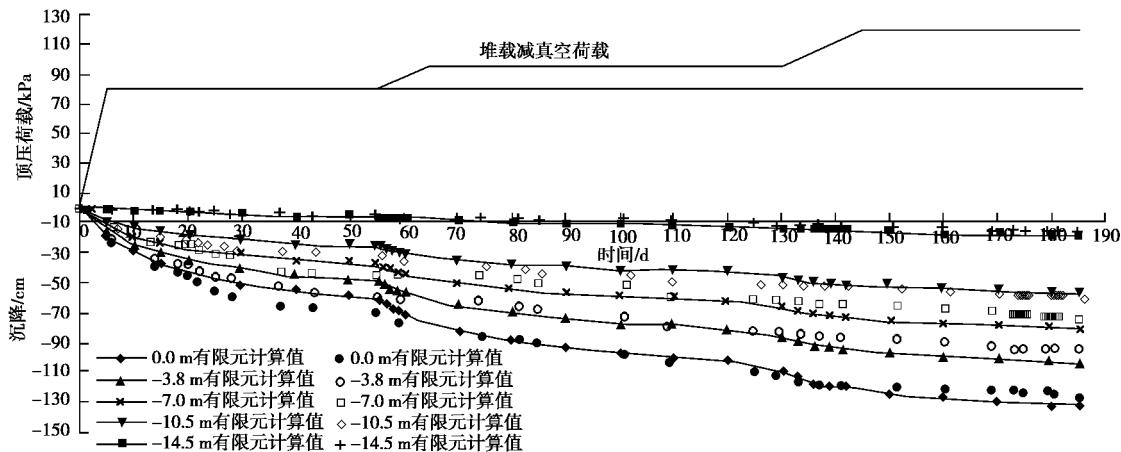


图 14 真空 - 堆载联合预压沉降随时间变化曲线

Fig. 14 Settlement-time curves of surcharge preloading combined with vacuum preloading

参考文献:

- [1] 朱继伟, 闫澍旺, 孙万禾. 真空预压侧向变形影响因素的研究[J]. 水运工程, 2004(1): 16 - 20. (ZHU Ji-wei, YAN Shu-wang, SUN Wan-he. A study on factors affecting lateral deformation of vacuum preloading[J]. Port & Waterway Engineering, 2004(1): 16 - 20. (in Chinese))

4 结 论

本文通过分析吹填土地基的形成过程、在加固过程中的受荷情况，编制了能够模拟整个加固过程的有限元程序。利用文中所述的计算理论和计算程序，对实际工程进行了计算，通过对实际工程的沉降、孔压的计算值和实测值的比较可以得出以下结论：

(1) 在有限元分析中采用 Duncan-Chang 非线性弹性本构模型能够较好的模拟实际工程。

(2) 在砂垫层和排水板单元中施加负的真空压力，排水板中真空度沿深度按照本文所述规律施加，负的真空压力的这种施加方法与实际情况比较吻合。

(3) 在施加真空荷载前有尚未完全消散超孔压的情况下，将这部分超孔压转换成堆载，采用真空—堆载联合预压的分析方法，计算结果与实际固结过程相符。

(4) 通过对工程 2 的真空 - 堆载联合预压的有限元计算结果和现场实测值的比较可知，在有限元程序中通过给定外载向量 $\{R\}$ 值，可以用于计算软土地基真空—堆载联合预压的工程问题。

本文所描述的程序考虑了荷载、初始条件、边界条件的通用性，可以根据工程实际情况，较好的模拟工程的整个施工过程，模拟结果与实测值比较吻合。

- [2] 余湘娟, 吴跃东, 赵维炳. 真空预压法对加固区边界影响的研究[J]. 水力学报, 2002(9): 123 - 128. (YU Shu-juan, WU Yue-dong, ZHAO Wei-bing. Effect of vacuum preloading method on boundary of consolidated soft foundation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(9): 123 - 128. (in Chinese))
- [3] 吴跃东, 余湘娟, 殷宗泽. 负压条件下考虑土体损伤和流

- 变的有限元分析[J]. 岩土力学, 2002(23): 137–141. (WU Yue-dong, YU Shu-juan, YIN Zong-ze. Analysis of soft foundation in considering rheologic behavior and damage under the negative pressure condition by FEM[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002(23): 137 – 141. (in Chinese))
- [4] 魏丽敏, 何群, 孙愚男. 沙井地基非线性有限元分析[J]. 公路交通科技, 2005(22): 39 – 43. (WEI Li-min, HE Qun, SUN Yu-nan. Nonlinear elasticity finite element analysis for sand drain subgrade[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005(22): 39 – 43. (in Chinese))
- [5] 雷鸣, 王星华, 聂重军. 有限元计算真空荷载处理软基沉降的建议[J]. 路基工程, 2007(4): 86 – 87. (LEI Ming, WANG Xing-hua, NIE Chong-jun. The suggestion of vacuum FE calculation method in the settlement of the soft soil[J]. Subgrade Engineering, 2007(4): 86 – 87. (in Chinese))
- [6] 陈小丹, 李建平, 赵维炳. 真空预压有限元计算方法研究[J]. 河海大学学报, 2005(33): 455 – 458. (CHEN Xiao-dan, LI Jian-ping, ZHAO Wei-bing. The study of FEM of vacuum preloading calculation[J]. Journal of Hohai University, 2005(33): 455 – 458. (in Chinese))
- [7] 陈兰云, 朱建才. 真空预压影响区安全措施有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(24): 52 – 55. (CHEN Lan-yun, ZHU Jian-cai. Finite element analysis of safety measures for affected soft ground area by vacuum preloading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(24): 52 – 55. (in Chinese))
- [8] 王劲, 陈晓平. 真空预压对周边地基变形影响的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(增2): 5490 – 5494. (WANG Jin, CHEN Xiao-ping. Study on influence vacuum preloading method on surrounding environment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005(S2): 5490 – 5494. (in Chinese))
- [9] 陈环, 鲍秀清. 负压条件下土的固结有效应力[J]. 岩土工程学报, 1984(9): 15 – 17. (CHEN Huan, BAO Xiu-qing. Consolidation effective stress in soil under the negative pressure condition[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1984(9): 15 – 17. (in Chinese))
- [10] 闫澍旺, 陈环. 用真空加固软土地基的机制与计算方法[J]. 岩土工程学报, 1986(3): 65 – 68. (YAN Shu-wang, CHEN Huan. Mechanism and calculation method of vacuum stabilization of soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986(3): 65 – 68. (in Chinese))
- [11] 闫澍旺, 陈环. 真空预压法的机理及有限元分析[J]. 中国港湾建设, 1985(4): 65 – 68. (YAN Shu-wang, CHEN Huan. The mechanism and FE analysis of the vacuum preloading[J]. China Harbour Engineering, 1985(4): 65 – 68. (in Chinese))
- [12] 陈环. 真空预压加固软土地基的机理研究[C]// 天津真空预压加固软土地基论文汇编, 1986. (CHEN Huan. Study of mechanism of soft foundation consolidation with vacuum preloading[C]// Tianjin Papers of Soft Soil Consolidation with Vacuum Preloading, 1986. (in Chinese))
- [13] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1995. (QIAN Jia-huan, YIN Zong-ze. Geotechnics principle and calculation[M]. Beijing: China Water Power Press, 1995. (in Chinese))
- [14] 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. (ZHAO Wei-bing, CHEN Yong-Hui, GONG You-ping. A methodology for modeling Sand-drain ground in plain strain analysis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998(6): 53 – 57. (in Chinese))
- [15] 彭勘, 刘汉龙, 陈永辉. 真空-堆载联合预压法软基对周围环境的影响[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 656 – 659. (PENG Jie, LIU Han-long, CHEN Yong-hui. Effects of combined vacuum surcharge preloading to surrounding environment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(5): 656 – 659. (in Chinese))
- [16] 赵常洲. 高速公路软基真空-堆载联合预压机理及数值模拟[D]. 北京: 中国地质大学, 2008. (ZHAO Chang-zhou. Mechanism of vacuum combined with surcharge preloading on highway soft clay and its numerical simulation[J]. Beijing: China University of Geosciences, 2008. (in Chinese))
- [17] 郑颖人, 沈珠江, 龚晓南. 岩土塑性力学原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 182 – 183. (ZHENG Ying-ren, SHEN Zhu-jiang, GONG Xiao-nan. Principles of rock and soil mechanics plasticity[M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2002: 182 – 183. (in Chinese))
- [18] 闫澍旺, 朱平, 刘润. 真空预压法加固软土地基的效果观测分析[J]. 水利学报, 2004(3): 87 – 92. (YAN Shu-wang, ZHU Ping, LIU Run. Case study on consolidation of soft foundation by means of vacuum preloading[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(3): 87 – 92. (in Chinese))