

真空预压法加固高速公路软基的有限元分析

徐立新¹, 陈云敏², 吕庆雷³, 王户容⁴

(1. 浙江省交通规划设计研究院, 浙江 杭州 310006; 2. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 300002;
3. 温州市交通局, 浙江 温州 325000; 4. 苏州富士胶片映像机器有限公司, 江苏 苏州 215011)

摘要: 根据高速公路路基的变形特点, 提出了真空-堆载联合预压法处理高速公路软基的三维 Biot 固结有限元计算模型, 将砂井按照实际尺寸划分单元, 避免了平面计算方法中砂井处理的问题, 较以往的平面数值方法更接近实际情况. 结合修正剑桥模型, 对某真空-堆载联合预压试验段进行了计算、分析, 取得了令人满意的结果.

关键词: 高速公路; 软基; Biot 固结; 三维有限元; 真空-堆载联合预压法

中图分类号: TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2004)05-0587-05

随着真空-堆载联合预压法在高速公路、港口、机场的广泛应用, 迫切需要进一步完善其计算方法. 目前, 真空预压及真空-堆载联合预压法的计算方法主要有解析法、数值算法. 陈环^[1]提出了负压作用下一维情况的太沙基固结解, 未考虑砂井的作用, 实际将真空预压处理的地基视为均质地基. 董志良^[2]在单井理论的基础上, 推导了单井在负压及正、负压联合作用下的等应变解析解. 由于解析解一般假设土体为均匀的弹性体, 固结过程中总应力不变, 所以实际应用不能令人满意, 而数值分析能够考虑土体的分层、弹塑性等特点. 沈珠江等^[3]首先用平面应变 Biot 固结有限元法对某真空预压法处理的工程进行了计算. 陈环^[1]研究了有限元和边界元在真空预压计算方面的应用. 此外还有 Bergado 等^[4,5]用平面应变 Biot 固结有限元对真空-堆载联合预压法加固高速公路软基进行了研究.

目前的真空预压数值分析方法都是基于平面应变的. 由于真空-堆载联合预压处理的地基都要打设砂井或者塑料排水板而形成砂井地基, 用平面应变简化时, 一般是调整土体或者砂井的渗透系数, 从而将三维砂井地基转化为平面应变砂墙地基, 使得计算模型和实际的受力、渗流情况有较大的区别, 因此一般仅能较好地分析表面沉降, 无法分析地基中某点的孔压, 因为无法确定其与实际工程的对应位置, 而用三维计算模型就能更真实地反映实际情况.

应用三维方法进行分析在理论上是比较完善的, 但是砂井的存在使计算比较庞大, 因此真空-堆载联合预压处理地基的三维计算方法目前尚比较少见.

本文根据高速公路路基的变形特点, 提出了真空-堆载联合预压处理高速公路软基的三维计算模型, 其简化条件较少, 仅考虑土体分层、非线性等因素, 并结合实际工程进行了计算. 将计算结果与实测数据进行比较, 得到了较满意的结论.

1 计算模型及三维 Biot 固结有限元公式

1.1 高速公路中真空-堆载联合预压处理地基的变形特点

一般真空-堆载预压处理的高速公路软基采用砂井(或塑料排水板)进行处理, 布置成梅花形或者正方形. 要考虑砂井的作用以及砂井之间土体的变形、孔压变化, 可以沿软基长度方向取一段作为分析对象, 见图 1. 这样, 其唯一的简化条件就是认为软基除了在两端外没有沿长度方向的变形.

1.2 三维 Biot 固结有限元公式

Biot 固结理论的基本公式包含平衡微分方程和连续性微分方程两部分. 对于空间问题, 土体中任一点的平衡微分方程为

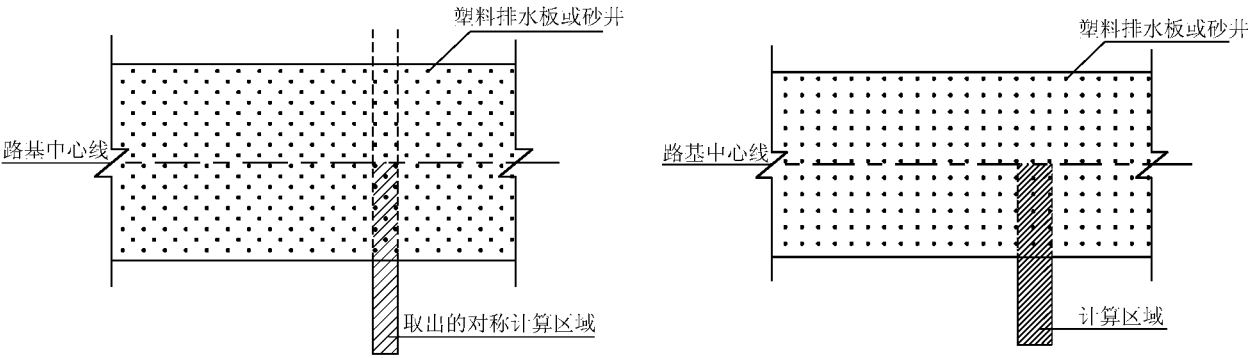


图1 计算模型

Fig.1 Sketch of calculation model

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_p}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yzx}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_p}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial \sigma_{zxx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zyx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} + \frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \end{cases} \quad (1)$$

式中： σ ——有效应力； p ——超孔隙水压力； ρ ——土体饱和密度； g ——重力加速度。

此外，由达西定律，根据饱和土的连续性，假设土体不可压缩，以及土的渗透性各向相同，将 ϵ_v 用位移表示，由微元体体积应变等于流入与流出微元体的水量之差，可得用位移和孔隙水压力表示的连续性方程

$$\frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{k}{\rho_w g} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

式中： k ——土体的渗透系数； ρ_w ——水的密度； g ——重力加速度； u, v, w ——位移。

式(1)和式(2)联立即为 Biot 固结方程。

根据 Biot 固结方程，可用伽辽金法建立固结有限元方程。采用增量格式表示，得

$$\begin{bmatrix} K_e & K_{ep} \\ K_{ep}^T & -\theta \Delta t K_p \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta \beta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta F \\ \Delta F_w \end{Bmatrix} \quad 0.5 \leq \theta \leq 1 \quad (3)$$

式中： ΔF ——等效结点荷载增量； ΔF_w ——等效结点流量增量； K_e ——弹性劲度矩阵； K_{ep} ——耦合矩阵； K_p ——渗流矩阵。 $\Delta \delta, \Delta \beta$ ——所求的未知结点位移和孔压增量。 $\Delta F, \Delta F_w, K_e$ 3 个矩阵分别由单元的 K_e 和 K_{ep} 及 K_p 累加而成。

根据上述 Biot 固结有限元格式，在平面固结有限元程序 Crisp84^[6]的基础上，采用空间 8 结点等参元，笔者将其修改为三维 Biot 固结有限元程序。

2 实例计算

2.1 计算条件

根据真空-堆载联合预压法的加固机理，可知真空荷载主要作用在地表，并经塑料排水板向下传递，使土体中的孔压与地表及排水板中的孔压存在压差而渗出发生固结。由于测量手段的局限，塑料排水板中孔压的变化规律目前尚不完全清楚，且因井阻等因素，其增长没有地表真空度迅速和明显。而塑料排水板中的孔压变化是由地表真空荷载变化引起，因此本文将地表的真空荷载作为已知边界条件，而将砂井中的孔压作为未知量处理，即将加固区地表的孔压变化值作为边界条件，堆载荷载作为一般荷载施加在加固区地表。

杭金衢高速公路的 K32+281.0~K32+417.5 为真空-堆载联合预压处理段，加固区长度为 135.5 m，宽度为 42 m。其工程地质条件为：第一层填土，厚 0.6 m，在进行真空-堆载预压处理时被挖除。第二层黏土，厚 2.0 m。第三层淤泥质黏土，厚 10.4 m。第四层淤泥质亚黏土，厚 8.6 m。第五层亚黏土，厚 1.6 m。第六层砾砂，未钻穿。在预压施工前，按照三角形排列、间距 1.2 m 打入 22 m 长的塑料排水板。计算中采用的加载曲线见图 2。

本文根据计算模型的对称性，取图 1 阴影部分为计算区域。计算区域的有限元网格及约束条件见图 3。

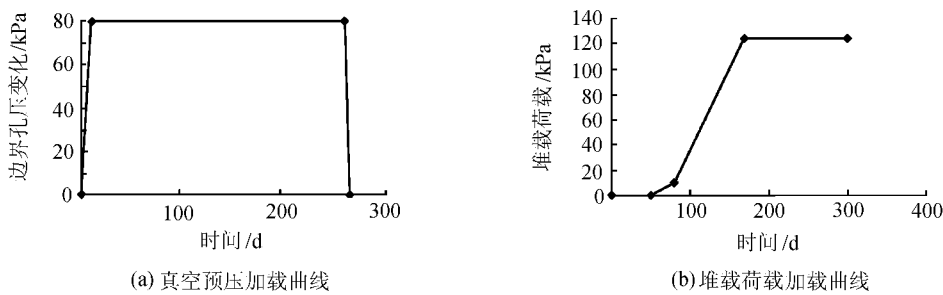


图 2 真空预压加载曲线和堆载荷载加载曲线

Fig.2 Curves of vacuum loading and surcharge loading

该计算模型共计14 400个单元,17 982个结点.其约束条件为:1、3面为Y方向约束,5、6面为X方向约束,2面为Z方向约束,4、7面代表地面,其中4面为预压处理区域,孔压按照加载曲线确定,7面是超孔压为0边界.加固区的网格划分见图4,其中黑色单元为砂井,与实际的布置及尺寸相符.计算模型采用修正剑桥模型.将加固前现场所取土进行固结及三轴等室内试验,可得各层土的修正剑桥模型参数及其他计算参数,见表1.

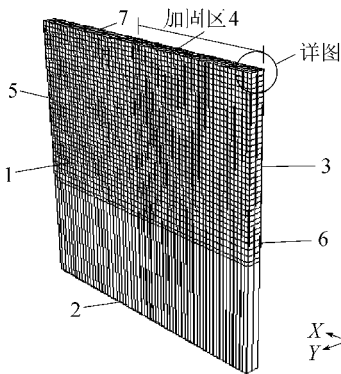


图 3 有限元网格
Fig.3 Grids of FEM

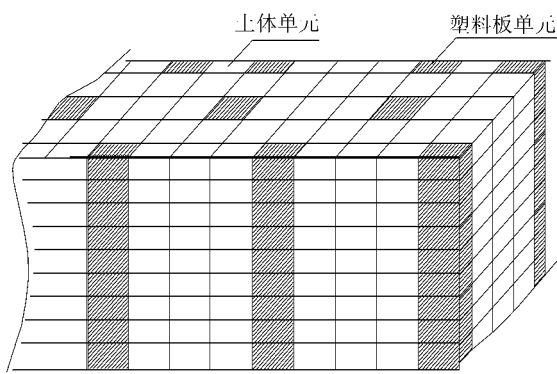


图 4 有限元划分详图
Fig.4 Detailed grids of FEM

表 1 有限元计算参数

Table 1 Calculation parameters of FEM

土体指标	λ	κ	e_{cs}	M	$k_h/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$k_v/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$
黏土	0.313	0.054	2.06	1.09	7.2×10^{-8}	2.1×10^{-8}
淤泥质黏土	0.379	0.068	2.06	1.19	5.1×10^{-8}	2.6×10^{-8}
淤泥质亚黏土	0.297	0.065	1.96	1.16	5.8×10^{-8}	2.9×10^{-8}
亚黏土	0.286	0.055	1.61	1.08	2.3×10^{-7}	1.2×10^{-7}
砂井	0.153	0.038	1.86	1.09	2.0×10^{-3}	2.0×10^{-3}

2.2 计算结果与分析

计算的表面沉降曲线见图5.计算结果与实测值在趋势上比较接近,但应用固结有限元计算真空-堆载联合预压工程在卸除真空时总会有一个明显的反弹,然而实测却几乎观测不到反弹.分析其原因,主要是因为:在真空预压过程中,会在加固区边缘形成裂缝或者比较薄弱的区域,卸除真空荷载时,横向约束解除,产生较大的横向向外变形,从而与竖向回弹抵消,而有限元对于裂缝等不连续问题无法考虑,因此出现较大的回弹.除此之外,现有的弹塑性模型、计算参数与实际情况仍有一定差距,因此不能完全模拟实际土体的应力-应变关系.

计算各个阶段的沉降及水平位移等值线见图6.从图6可以

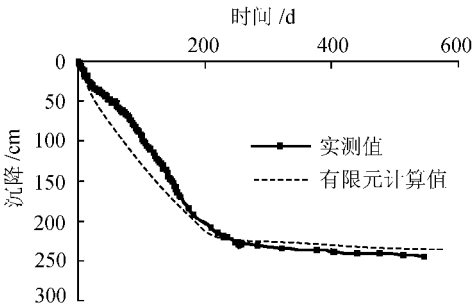


图 5 加固区中心表面沉降
Fig.5 Surface settlement of foundation
at center of consolidated region

看出,在真空预压阶段,真空预压区的沉降比较均匀,地表部分沉降在0.48 m左右,水平位移的变化规律是加固区边缘的向内水平位移最大,达到0.12 m左右,整个加固区及加固区外的土体都是向内位移的,随着距离加固区边缘越远,向内的位移值越小,说明在真空预压期间,会造成一定的向内位移,并且影响范围较广,在采用真空预压法时应该考虑其对周围环境的影响.从图6还可以看出,在真空预压区20 m深度内沉降较大,说明其加固效果主要集中在20 m左右深度以内,与实测结果比较符合.

开始堆载后,水平位移性状发生了改变,图7为堆载2 m左右时的沉降及水平位移的等值线.沉降规律基本不变并且继续增加,水平位移规律发生了改变,加固区及影响区都有向外的水平位移,浅层土体由于真空作用较强,因此总体仍然保留向内的水平位移,不过与真空预压阶段相比,位移值已经有所减小,而深层土体则受到堆载影响较大,受真空影响相对较小,从而最终是向外的位移.这与真空-堆载联合预压的现场试验结果是相符合的.

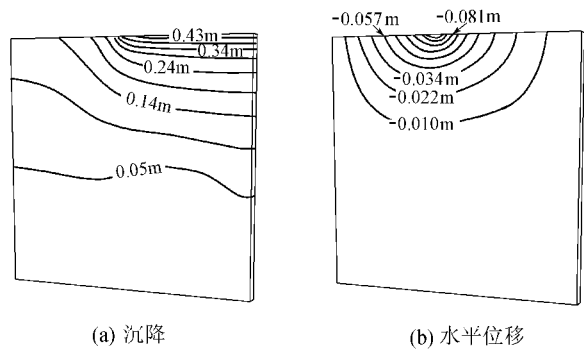


图6 真空预压2个月、堆载前的沉降及水平位移等值线
Fig.6 Contours of settlement and lateral displacement for 2 months after vacuum preloading

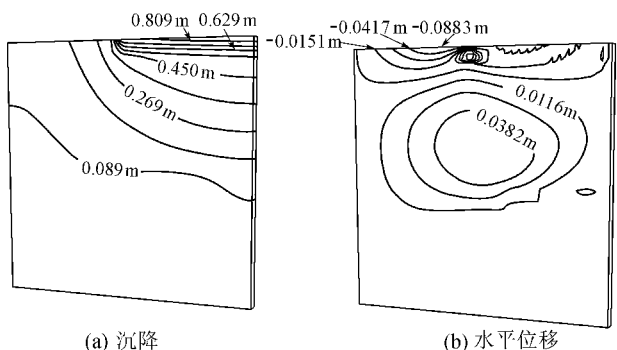


图7 堆载2 m后的沉降及水平位移等值线
Fig.7 Contours of settlement and lateral displacement after 2 m surcharge loading

图8为堆载结束时的沉降和水平位移等值线图,此时表面沉降已达1.8 m多,与实测的结果比较吻合.加固区表层仍有向内的水平位移,而周边影响区及加固区深层的水平位移都是向外的,尤其是加固区边缘,其向外位移已经达到0.24 m.计算结果说明,在真空-堆载联合预压作用下,加固区边缘首先向内水平位移,堆载后一直向外位移.如果影响区内有重要建筑,则一定要事先分析其不利影响.

图9为经过5个月的真空-堆载联合预压后的沉降及水平位移等值线,此时沉降增加,堆载引起的水平位移作用已经很小了,向外的水平位移增加很少,到卸真空前,加固区边缘水平位移为0.26 m左右.

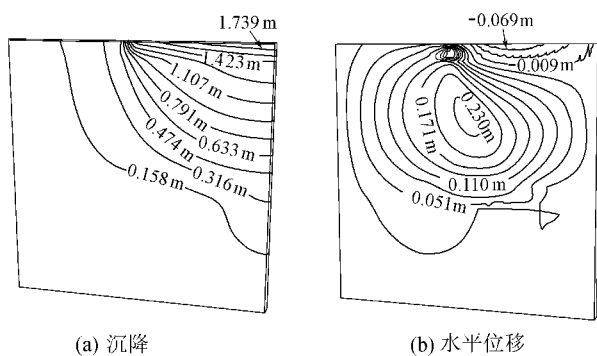


图8 堆载结束时的沉降及水平位移等值线
Fig.8 Contours of settlement and lateral displacement after completion of surcharge loading

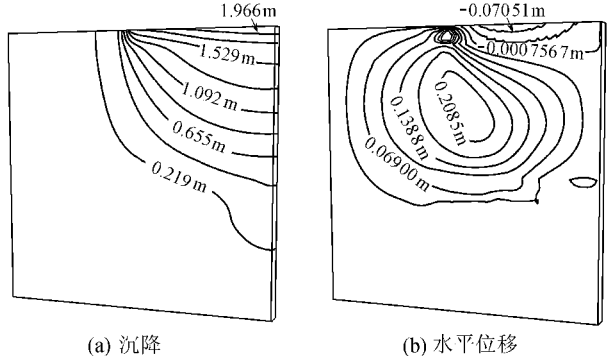


图9 卸真空后5个月的沉降及水平位移等值线
Fig.9 Contours of settlement and lateral displacement for 5 months after vacuum release

3 结 论

- a. 从本次计算结果来看,真空堆载联合预压法能在有限的工期内提高地基土的强度,消除工后沉降.
- b. 本次计算采用了修正剑桥模型,根据高速公路的变形特点提出了三维计算模型,与以往的各种方法相比,可以不必考虑转化为平面问题时带来的与实际情况不符的矛盾,较全面地考虑了各种影响因素,计算

结果与实测值较为接近.

c. 本次的孔压计算结果在加固区内与实测结果的趋势基本吻合.

参考文献：

[1] 陈环.真空预压法机理研究十年[J].港口工程 ,1991 (4) :17—25.

[2] 董志良.真空预压-塑料排水板加固软基固结理论及真空度的研究[D].南京 河海大学 ,1995.

[3] 沈珠江,陆舜英.软土地基真空排水预压的固结变形分析[J].岩土工程学报 ,1986 8(3) :7—15.

[4] BERGADO D T ,CHAI J C ,MIURA N , et al.PVD improvement of soft Bangkok clay combined vacuum and reduced sand embankment preloading[J]. Geotech Engrg J ,1998 29(2) 95—122.

[5] 吴跃东.真空-堆载联合预压法加固高速公路软基的理论研究及应用[D].南京 河海大学 ,1999.

[6] BRITTO A M ,GUNN M J.Critical state soil mechanics via finite elements[M]. New York : John Wills & Sons ,1984.62—125.

Three-dimensional Biot consolidation finite element analysis of
soft foundation of expressways improved with vacuum preloading method

XU Li-xin¹ , CHEN Yun-min² , LU Qing-lei³ , WANG Hu-rong⁴

- (1. Zhejiang Provincial Plan , Design , and Research Institute of Communications , Hangzhou 310006 , China ;
2. Research Institute of Geotechnical Engineering , Zhejiang University , Hangzhou 300002 , China ;
3. Wenzhou Communication Bureau , Wenzhou 325000 , China ;
4. Suzhou Fuji Film and Image LTD. , Suzhou 215011 , China)

Abstract :Based on the characteristics of subgrade deformation of expressways , a 3-D Biot consolidation finite element model was presented for the soft foundation of expressways improved with the vacuum-surcharge preloading method. The model discretized the PVD(prefabricated vertical drain) elements according to their actual dimensions ,avoiding the PVD simulation in 2-D FEM. The calculated result with the model was closer to the reality than that of the 2-D FEM. In combination with the modified Cambridge model , the model was applied to calculation and analysis of an experimental section consolidated with the vacuum-surcharge preloading method , and the result was satisfactory.

Key words :expressway ; soft foundation ; Biot consolidation ; 3-D finite element ; vacuum-surcharge preloading method