

真空预压有限元计算方法研究

陈小丹¹,李建平²,赵维炳³

(1.广东省水利水电科学研究院,广东 广州 510610;2.杭州杭千高速公路发展有限公司,浙江 杭州 310007;
3.南京水利科学研究院土工研究所,江苏 南京 210024)

摘要 为进一步了解真空预压的加固机理,对真空预压时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.在有限元计算中,将殷宗泽的双屈服面模型与修正的考马拉-黄模型相结合,并改进了边界条件和初始条件的处理方法,考虑了砂井阻力的影响.工程实例表明,该分析计算方法考虑了土体的剪胀性、剪缩性和黏弹塑性,可以较好地模拟真空度在砂井和地基土中的传递规律.

关键词 真空预压法 加固机理 有限元 本构模型 等效方法

中图分类号:TU472.3 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2005)04-0455-04

真空预压法属排水固结法,一般采用砂井地基理论计算真空预压的固结度.计算方法有解析解法、数值解法和半解析法 3 种^[1].

虽然数值解法在工程上应用较多,但用于计算负压条件下的固结问题相对较少.文献[2,3]在计算时把砂井直接作为砂墙,令砂垫层和砂墙在初始时刻同时达到负的真空压力.文献[4]按砂墙间距放大系数的平方倍放大地基土的渗透系数,根据实测结果假设砂墙孔压.笔者认为,砂墙的间距宜根据等效变换公式导出,且计算时宜考虑砂井阻力的影响.计算中,砂井作为计算单元来处理,可以较好地模拟真空度在砂井和地基土中的传递规律.如根据实测结果假定砂井孔压,则须有实测数据,而孔压特别是负压条件下的孔压一般很难准确获得.此外,等效变换后,实际中的砂井地基和计算中的砂墙地基孔压一般是不相等的.因此,实测孔压难以作为已知条件直接应用于有限元计算.

本文研究了真空预压法的机理,推导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.在此基础上,建立了砂井地基与砂墙地基的等效变换关系.在平面应变有限元计算中,改进了边界条件和初始条件的处理方法,并考虑了砂井阻力、土体的剪胀性、剪缩性和黏弹塑性,从而较好地模拟了软基的真空预压加固情况.最后,通过一工程实例证明了本文所采用的分析计算方法的合理性.

1 真空预压机理

1.1 水位变化

根据太沙基有效应力原理,有
$$\sigma = \sigma' + u \tag{1}$$

式中: σ ——总应力; σ' ——有效应力; u ——孔压.

微分式(1)得
$$d\sigma' = d\sigma - du \tag{2}$$

对于真空预压,由于总应力不变,因此增加的有效应力 $d\sigma'$ 等于减少的孔压 du . 土体孔压中包含了大气压力,即
$$u = \rho_w gz + p_a \tag{3}$$

式中: ρ_w ——水的密度; z ——水位; p_a ——大气压强; g ——重力加速度.

真空预压时,在加固区内,地表是密封的,降低的只是大气压强 p_a ,地下水位 z 不会下降.在加固区外,大气压强是固定的,地下水位可能会降低^[5].

1.2 边界影响

由于加固边界的水位可能会降低,并会透气、透水,影响加固区的密封性,因此,边界的存在将会影响真

空预压加固的效果. 加固区的形状系数定义为 $\alpha = A/L_b$ (4)
式中: A ——加固区的面积; L_b ——加固区的边界周长. 根据经验, α 越大, 加固效果越好; 反之, α 越小, 加固效果越差. 因此, 方形区域的加固效果优于狭长区域的加固效果.

在真空预压中, 砂井起着排水作用和传递真空度的作用, 真空度的传递主要取决于砂井的阻力, 因此, 真空预压的加固深度主要受砂井阻力的影响, 计算中必须充分考虑该影响因素^[5].

2 砂井地基的平面应变等效方法

对于砂井地基, 常规计算中一般将其简化成单井地基. 本文在文献[6]的基础上建立了考虑井阻和涂抹的砂墙地基定解方程, 导出了砂墙地基的平均固结度表达式^[7]. 令砂墙地基的平均固结度与砂井地基的平均固结度相等, 则得到砂井地基和砂墙地基的等效变换公式

$$\begin{aligned} k_{xp} &= D_x k_{ra} & k_{zp} &= D_z k_{za} & (5) \\ D_x &= \frac{4(n_p - s_p)(1 + \nu)L^2}{9n_p \mu_a - \gamma} & D_z &= \frac{2(1 + \nu)}{3} & (6) \\ \gamma &= 12\beta L^2(1 + \nu)(n_p - s_p)(s_p - 1) + \frac{6H^2 L^2}{(\rho_w g)^2 M^2} \frac{k_{ra}}{k_w} [3(n^2 - s^2) + n^2(1 + \nu)(1 - L)] \\ \beta &= M^2/H^2 = (2m - 1)^2 \pi^2 / (4H^2) \\ \mu_a &= \frac{n^2}{n^2 - s^2} \ln \frac{n}{s} - \frac{3n^2 - s^2}{4n^2} + \frac{k_{ra}}{k_s} \frac{n^2 - s^2}{n^2} \ln s \\ M &= \frac{(2m - 1)\pi}{2} \quad (m = 1, 2, 3, \dots) & n_p &= B/r_{wp} & s_p &= r_{sp}/r_{wp} \end{aligned}$$

式中: k_{xp}, k_{zp} ——砂墙地基的水平向和竖向渗透系数; k_{ra}, k_{za} ——砂井地基的水平向和竖向渗透系数; D_x, D_z ——水平向和竖向渗透系数的调整系数; L ——砂井间距放大系数, $L = B/r_e$; k_w ——砂墙的渗透系数; k_s ——砂井涂抹区的渗透系数; B ——砂墙间距的一半; H ——砂墙打设深度; r_e ——砂井的单井有效排水区半径; n ——砂井的井径比, 即 $n = r_e/r_{wa}$; r_{wa} ——砂井半径; s ——涂抹半径 r_s 与砂井半径 r_{wa} 之比, $s = r_s/r_{wa}$; ρ_w ——水的密度; g ——重力加速度; ν ——泊松比.

可见, 将砂井地基等效成砂墙地基, 只要调整砂墙地基的渗透系数即可. 为了消除井阻影响, 可使 $\frac{6H^2 L^2}{(\rho_w g)^2 M^2} \frac{k_{ra}}{k_w} [3(n^2 - s^2) + n^2(1 + \nu)(1 - L)] = 0$, 从而可得 $L = \left(4 + \nu - 3 \frac{s^2}{n^2}\right) / (1 + \nu)$.

因 n 一般较大, s^2/n^2 较小, 可忽略不计. 此时, $L = (4 + \nu) / (1 + \nu)$, ν 值在 $0 \sim 0.5$ 之间, 因此 L 的值在 $3 \sim 4$ 之间变化. 如果 L 小于该值, 则计算出的 D_x 偏大, 会导致砂墙地基的固结比砂井地基的固结快; 相反, 如果 L 大于该值, 则计算出的 D_x 偏小, 会导致砂墙地基的固结比砂井地基的固结慢.

3 有限元模型

3.1 平面应变比奥固结公式

从对真空预压机理的分析可知, 加固区内的地下水位不会降低, 因此加固区内的土体可以根据饱和土的固结理论进行分析计算.

根据平面应变比奥固结理论, 当用增量法进行求解时, 有限元总体方程可以表示为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \bar{K} & K' \\ K'^T & \tilde{K} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\delta \\ \beta \end{Bmatrix} &= \begin{Bmatrix} \Delta R \\ 0 \end{Bmatrix} & (7) \\ \Delta R &= R - R_t \end{aligned}$$

式中: $\bar{K}, K', K'^T, \tilde{K}$ ——劲度系数矩阵; $\Delta\delta, \beta$ ——位移增量和超静孔压值; R ——外荷载所对应的结点等效荷载; R_t —— $t - \Delta t$ 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.

3.2 Goodman 单元

在计算区域内, 如果存在 2 种性质差别较大的材料, 则在这 2 种材料之间宜设置接触面单元. 接触面单元可以选用 Goodman 单元^[1]. 各接触面单元的劲度矩阵, 与一般二维单元一样, 可按结点平衡条件叠加到总

的劲度矩阵上.

3.3 初始条件和边界条件

假定真空预压前各单元结点的超静孔隙水压力和初始位移为零,即

$$\{\beta_0\} = \{0\}$$

(8)

$$\{\delta_0\} = \{0\}$$

(9)

式中 $\{\beta_0\}$ 和 $\{\delta_0\}$ 为初始时刻,即 $t = 0$ 时结点的超静孔隙水压力和位移值.

真空预压时,砂垫层中所有结点的孔隙水压力为负的真空压力,砂垫层以外的地基表面孔隙水压力为 0,其他边界孔压均未知.地基表面为自由变形,并令地基的侧限边界受水平向约束、底边界受垂直向约束.

4 本构模型

描述土体的本构模型较多,其中殷宗泽的双屈服面模型^[8]是一种多重屈服面模型.该模型参数确定比较简单,能较全面地反映土体的多种特性(如剪缩性和剪胀性等),实用性也较强.修正的考马拉-黄模型^[1]是一种黏弹塑性模型,它可以综合反映土体的弹性和黏弹塑性等.

笔者将殷宗泽的椭圆-抛物双屈服面模型和修正的考马拉-黄模型相结合,得到了一种能综合反映土体剪胀性、剪缩性、弹性、黏弹性和黏塑性等多种特性的模型.

5 工程实例

5.1 软基处理方案简介

深圳河二期治理工程,采用真空预压法加固岸坡软土地基,由塑料排水板构成竖向排水体系.该工程加固区的一侧为永久道路,采用水泥搅拌桩进行防护处理.塑料排水板处理区宽为 26.6 m,间距为 1.2 m,正方形布置.塑料排水板打设至底部砂层以上 0.5 m 处.

5.2 有限元计算分析

土层分布如下:0 ~ 9 m 为淤泥,9 ~ 17 m 为淤泥质黏土,以下为中粗砂.真空度经过 20 d 从 0 上升至 - 80 kPa.将塑料排水板等效成砂墙,并把它们剖分成单元.搅拌桩与土层之间设置接触面单元.计算参数取值见表 1 和表 2.

表 1 土层计算参数

Table 1 Parameters of soil strata for calculation

土层和搅拌桩	a	G_0^*/MPa	n_1	M_1	M_2	h	t_1	ν	$k_x/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	$k_y/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	η_e	K_p	G_2^*/MPa	n_2
淤 泥	0.17	0.9	0.93	0.90	0.82	67.9	9.6	0.3	2.5×10^{-7}	2.5×10^{-7}	5.18	1.94×10^4	9	1.24
淤泥质黏土	0.18	1.3	0.87	1.04	1.00	30.0	10.0	0.3	2.5×10^{-7}	2.5×10^{-7}	6.00	2.00×10^4	12	1.24
砂 层	0.30	10.0	0.65	1.40	1.20	120.0	10.0	0.3	1.0×10^{-3}	1.0×10^{-3}	0	1.00×10^9	300	1.00
搅拌桩	0.30	90.0	0.65	1.50	1.30	150.0	10.0	0.3	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-8}	0	1.00×10^9	300	1.00

注: $a, G_0^*, G_2^*, n_1, n_2, M_1, M_2, h, t_1, \nu, \eta_e, K_p$ 为模型参数,由三轴排水剪试验和流变三轴试验确定^[1].其他参数含义同前.

a. 地表沉降.加固区中心点表面沉降随时间的变化如图 1 所示.由图 1 可知,计算曲线基本上与实测曲线相吻合,考虑黏弹塑性时计算结果与实测值更加接近.

b. 水平位移. $t = 56\text{ d}$ 时,左边测斜管的实测和计算水平位移如图 2 所示.由图 2 可知:修正后的实测值和计算值比较接近,地面水平位移吻合较好.有搅拌桩时土体侧向位移有所减小.

表 2 接触面计算参数

Table 2 Parameters of contact surface

接触面	$\delta/(\text{^\circ})$	c/kPa	R_f	K_1	n
软土与搅拌桩	25	10	0.60	1000	0.6
其他土层与搅拌桩	35	0	0.65	4000	0.7

注: δ 和 c 分别为接触面上材料的摩擦角和黏聚力; K_1, n 和 R_f 为非线性指标,由试验确定^[1].

6 结 论

a. 真空预压时,加固区的地下水位并没有降低,加固区以外的地下水位则可能降低,应重视边界对真空预压的影响.

b. 真空预压的有效加固深度主要取决于井阻和土体的渗透系数,考虑砂井阻力可以较好地模拟真空中在砂井和地基土中的传递规律.

c. 将砂井地基等效成砂墙地基,可以大大降低计算工作量,当砂井间距的放大系数取一定值时,可以消除井阻的影响.但须注意,对某一点而言,2种地基中的孔压并不相等.

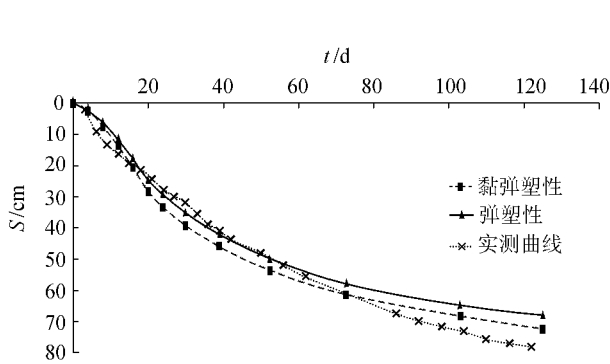


图1 加固区中心点沉降 S 随时间 t 的变化
Fig.1 Settlement curve for center point
of consolidation area

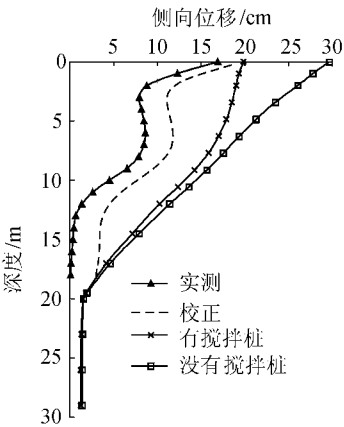


图2 左边侧向位移比较 ($t = 56$ d)
Fig.2 Comparison of lateral displacements at left side

参考文献：

[1] 赵维炳,施建勇.软土固结与流变[M].南京:河海大学出版社,1996.62—76,196—197,240—242,292—299.
[2] 阎澍旺,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,(2):35—44.
[3] 林丰,陈环.真空和堆载作用下砂井地基固结的边界元分析[J].岩土工程学报,1987,9(4):13—22.
[4] 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,(3):7—15.
[5] 陈小丹,赵维炳,周智勇.真空预压法加固软基的特性和机理探讨[J].路基工程,2005,(3):1—4.
[6] 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.
[7] 陈小丹,赵维炳.考虑井阻和涂抹的砂井地基平面应变等效方法分析[J].岩土力学学报,2005,25(4):567—571.
[8] 殷宗泽.一个土体的双屈服面应力-应变模型[J].岩土工程学报,1988,10(4):64—71.

Finite element method for vacuum preloading

CHEN Xiao-dan¹, LI Jian-ping², ZHAO Wei-bing³

- (1. Research Institute of Water Resources and Hydropower of Guangdong Province, Guangzhou 510610, China ;
2. Hangqian Expressway Corporation Ltd., Hangzhou 310007, China ;
3. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract :An analysis was made on the variation of groundwater level under vacuum preloading and the influence of boundaries on the effect of consolidation for further understanding the mechanism of consolidation by means of vacuum preloading, and a formula for calculation of the degree of consolidation of sand-wall foundation was derived with the factors of sand-drain resistance, smearing, bi-directional seepage, and deformation taken into account. During the finite element calculation, the double-yield surface model, presented by Yin Zongze, was combined with the modified Komamura-Huang model, and the methods for dealing with the boundary condition and initial condition were improved. Practice shows that, with consideration of dilatancy, contraction, and viscoplasticity of soil, the present method can well simulate the transfer of the vacuum degree in sand-drain and foundation soil.

Key words :vacuum preloading method ; mechanism of consolidation ; finite element ; constitutive model ; equivalent method