

真空预压地基沉降计算方法研究

李 宁¹ 李向凤² 刘 坚³

(1, 江苏省交通科学研究院股份有限公司, 江苏南京 210017; 2, 中国水电建设集团路桥工程有限公司, 北京 100048; 3, 河海大学岩土工程研究所, 江苏南京 210098)

【摘 要】 采用单井地基等效圆内真空压力的平均值等效代替群井地基内部真空压力的平均值推求在 K_0 固结条件下地基沉降计算方法。在原有考虑土体侧向变形(非 K_0 固结)的地基沉降计算方法的基础上对体积应变修正系数进行了新的考虑与分析, 提出平均体积应变系数的概念, 认为考虑侧向位移的固结沉降应采用平均体积应变系数对公式进行修正。进行有限元计算分析, 将理论计算值、有限元计算值、实测值三者进行比较分析, 认为计算值合理、可靠。采用真空预压沉降计算方法进行沉降预测较为合理便捷, 对真空预压设计有一定的指导和借鉴作用。

【关键词】 真空预压法; 简化计算; 地基沉降; K_0 固结; 非 K_0 固结; 体积应变修正系数

【中图分类号】 TV 447

【文献标识码】 A

doi: 10. 3969/j. issn. 1007-2993. 2011. 02. 008

Research on Simplified Method to Calculate Foundation Settlement with Vacuum Preloading Method

Li Ning Li Xiang feng Liu Jian

(1. Jiangsu Transportation Research Institute Co., Ltd, Nanjing 210017, Jiang su, China;
2. Sinohydro Road Bridge Engineering Co., Ltd, Beijing 100048, China;
3. Geo-technical Research Institute of Hohai University, Nanjing 210098, Jiang su China)

【Abstract】 The average of vacuum pressure using the equivalent circle of single well foundation, instead of the average of vacuum pressure of mul ti-boreholes, was applied to specify the method to calculate foundation settlement under k_0 consolidation condition. Founding on the advanced method considering soil lateral displacement to calculate foundation settlement, the paper took new consideration and analysis with the modify coefficient in volumetric strain, and specified the concepts upon the coefficient of average volume stress, also firmly believed that the consolidation settlement considering soil lateral displacement should modify formula by applying the method of average volume strain. Proceeding from finite element analysis, this paper made a comparison between the result of theory analysis, FEM calculation and surveillance. And the result was reasonable and reliable. It was more Reasonable and convenient to apply the method to forecast foundation settlement and it can be a reference to the generalization and application of the designs of vacuum preloading method.

【Key words】 vacuum preloading method; simplified calculation; foundation settlement; confined consolidation; consolidation of non-confined; the correction factor of volumetric strain

0 引 言

目前工程中,真空预压设计计算的简便方法仍远远不能满足一定的精度要求。从现有的设计计算方法来看,大致可以分为两类:一种是以轴对称固结理论为基础的解析解法,如 Barron 解、Hansbo 解、曾国熙解、董志良解等;另一种是以太沙基固结理论或比奥固结理论作为基础的数值解法,如有限元法、边界元法、差分法等^[1]。

与堆载预压引起的土体侧向挤出不同,真空预压在于考虑抽真空预压引起的土体收缩,计算沉降时需乘以一个修正系数,这也是规范中提倡的方法。《公路软土地基路堤设计与施工技术规范》(JTJ017—96)规定

修正系数可据现场沉降观测资料在 1.1—1.7 较大范围内选用;《港口工程地基规范》(JTJ250—98)则更为简单,只作了按地区经验选取修正值的原則规定。显然,这些规定在实际应用中存在一定的随意性,难以准确地选取沉降修正系数^[2]。

1 K_0 固结条件下真空预压地基沉降计算方法

根据固结度等效原则,可以得出与砂井等效的竖向渗透系数,将砂井地基简化成渗透系数较大的天然层状地基进行计算^[3]。李豪等^[4]对单层砂井地基进行了简化,并根据单层砂井地基的简化结果推导出多层砂井地基的简化计算方法。

用等向压缩模量来代替压缩模量。其计算公式见式(1)和式(2)。

$$s_{vc} = \sum_{i=1}^n \frac{e_{0i} - e'_{1i}}{1 + e_{0i}} h_i \quad (1)$$

$$s_{vc} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{E_{ai}} \frac{\bar{P}_{z_i} + \bar{P}_{z_{i-1}}}{2} h_i \quad (2)$$

式中: s_{vc} 为按分层总和法计算出的由负压渗流场决定的地基变形量; e_{0i} 为第 i 层中土自重压力所对应的孔隙比,由室内固结试验所得孔隙比 e 和固结压力 p 关系曲线查得; e'_{1i} 为第 i 层中土自重压力和由负压渗流场引起的等向附加压力之和所对应的孔隙比; h_i 为第 i 层土层厚度; $\frac{\bar{P}_{z_i} + \bar{P}_{z_{i-1}}}{2}$ 为第 i 层土层平均等效真空压力; E_{ai} 为第 i 层土相应于其应力状态的等向压缩模量。

假设每个排水井的影响范围化作一个等面积的圆来求解见图1,等效圆的直径 d_e ,与排水井间距 l 的

关系如下:等边三角形排列时: $d_e = \sqrt{\frac{2\sqrt{3}}{\pi}} l = 1.050l$

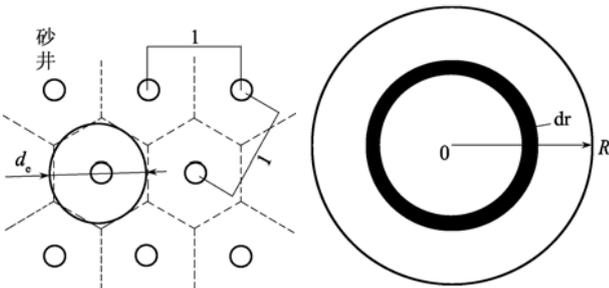


图1 单井简化图

图2 微圆积分图

则认为,真空度从砂井向土体中传递时,在水平方向为线性传递^[5](见图2),可推求单井地基等效圆内真空压力的平均值 \bar{P} 等效代替群井地基内部真空压力的平均值:

$$\bar{P} = \frac{\int_0^R 2\pi r \cdot (P_0 + Kr) dr}{\pi R^2} \quad (3)$$

式中: \bar{P} 为地基平均真空压力; K 为传递系数,针对不同土体分别以试验所得 K 代替; P_0 为砂井中真空压力。

2 非 K_0 固结条件下真空预压地基沉降计算方法

土体是土颗粒,水和气组成的混合物。对于饱和土体而言,土体主要由土颗粒和水组成。土体在固结过程中排出孔隙水,进而引起体积的变化,土体的体积变形主要发生在该过程中。司开普顿和比伦^[6]提出了在固结沉降中考虑侧向变形影响的计算方法。因此,二维应力状态下体变修

正系数 m_{sv} 的求解可以由司开普顿和比伦的半经验方法^[7]来解决这一问题,由此方法推求竖向矩形均布荷载下考虑侧向变形的地基沉降计算公式,大体如下:

K_0 固结作用下固结状态下,地基土的体积应为

$$\epsilon_{lv} = m_v \Delta u_{1v} \quad (4)$$

式中: m_v 为土的体积压缩系数; Δu_{1v} 为固结状态下的初始孔隙水压力。

根据 D. J. Henkel^[8] 的初始孔隙水压力表达式

$$\Delta u_{K_0} = \beta \frac{1+2K_0}{3} \Delta \sigma_{1K_0} + \alpha \frac{\sqrt{2}}{3} (1-K_0) \Delta \sigma_{1K_0} \quad (5)$$

式中: K_0 为土的静止侧压力系数; $\Delta \sigma_{1K_0}$ 为 K_0 固结状态下的竖向附加应力; β 为对应平均压应力的 Henkel 孔隙水压力系数,对于饱和软粘土, $\beta=1$; α 为对应平均偏应力的 Henkel 孔隙水压力系数。式中: A 为 Skempton 孔隙水压力系数,取 1.14^[9]。则:

$$\Delta u_{K_0} = \Delta \sigma_{1K_0} \left[\frac{1+2K_0}{3} + (1-K_0) \left(A - \frac{1}{3} \right) \right] \quad (6)$$

非 K_0 固结作用下固结状态,真空预压时,地基土的体积应变可由下式表示:

$$\epsilon_{vv} = m_v \Delta u_v \quad (7)$$

式中: Δu_v 为真空预压地基土的初始孔隙水压力由于真空预压时,地基土中的附加应力为球应力,故其孔隙水压力可以表示为:

$$\Delta u_v = \Delta \sigma_{1v} \quad (8)$$

其中: $\Delta \sigma_{1v}$ 为真空预压地基集中竖向附加应力。

根据式(4),式(7),可得真空预压体积应变修正系数:

$$m_{vs}^v = \frac{\epsilon_{vv}}{\epsilon_{vK_0}} = \frac{m_v \Delta u_v}{m_v \Delta u_{K_0}} = \frac{\Delta u_v}{\Delta u_{K_0}} \quad (9)$$

根据式(6)式(8)

$$m_{vs}^v = \frac{\Delta \sigma_{1v}}{\Delta \sigma_{1K_0}} \cdot \frac{1}{\left[\frac{1+2K_0}{3} + (1-K_0) \left(A - \frac{1}{3} \right) \right]} \quad (10)$$

其中: $\Delta \sigma_{1v}$ 一沿加固深度的变化取决于真空压力不同程度的衰减; $\Delta \sigma_{1K_0}$ 一在 K_0 固结状态下的矩形均布荷载竖向附加应力沿深度的变化; $\Delta \sigma_{1v}$ 、 $\Delta \sigma_{1K_0}$ 一均是关于土层深度的函数。

2.1 对 $\Delta \sigma_{1v}$ 的求解:

负压代替竖向附加应力,在 H 深处:

$$\Delta \sigma_{1v} = 80 - \tan \alpha \cdot H \quad (11)$$

式中: $\tan \alpha$ 为负压沿深度变化的曲线的斜率。

2.2 对 $\Delta \sigma_{1K_0}$ 的求解:

矩形面积上均布荷载 P 在 M 点引起的竖向附

加应力 σ_z 为^[10]:

$$\sigma_z = \iint_{\Delta} d\sigma_z = \frac{3Pz^3}{2\pi} \int_0^L \int_0^B \frac{1}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}} dx dy = \frac{P}{2\pi} \left[\frac{LBz(L^2 + B^2 + 2z^2)}{(L^2 + z^2)(B^2 + z^2)\sqrt{L^2 + B^2 + z^2}} + \arctan \frac{LB}{z\sqrt{L^2 + B^2 + z^2}} \right] \quad (12)$$

对 σ_z 进行曲线拟合(取矩形路基的中心点):

$$\begin{cases} \Delta\sigma_{1K_0} = 83.55 + 0.8874h - 0.0662h^2 - 0.0012h^3 \\ \quad (-36.00 < h < -3.26) \\ \Delta\sigma_{1K_0} = 79.92 - 0.15h - 0.08h^2 \\ \quad (-3.26 < h < 0) \end{cases} \quad (13)$$

文献^[11]等认为体积应变系数 m_{vs}^v 是定值,通过本文分析发现 m_{vs}^v 为地基深度 h 的函数,提出平均体积应变系数 $\overline{m_{vs}^v}$ 的概念,认为考虑侧向位移的固结沉降应采用平均体积应变系数对公式进行修正。

3 工程算例

在理论推导基础上,本文以申嘉湖杭高速公路湖州段 K33+820~K33+850 试验区为例进行计算,以验证公式的合理性。试验段软土层较厚,最厚为 31 m。从土的物理力学性质指标来看,该软土层含水量高(最高值 $\omega=48.1\%$)、液塑性指标大(最大值 $I_L=1.59$ 、 $I_p=17.8\%$)、压缩性高(α_v 最高达 1.122 MPa^{-1})、渗透性差、强度低,属性质较差的淤泥。试验段的软土属于含水量高、压缩性高、强度

低、渗透性差、中高灵敏性的软弱地基。由于土体的粘性大、抗剪能力低、稳定性差,完成固结需要的时间长,而且试验段为桥头路段,对工后沉降要求较高,在这样地基条件下修建高速公路必需进行有效的加固处理。本路段软基设计方案为塑料排水板加真空-堆载联合预压。

试验加固区长度 $L=30 \text{ m}$,宽度 $B=36 \text{ m}$,塑料排水板打设深度 $H=12 \text{ m}$ 。土体参数由试验所得(见表 1)。

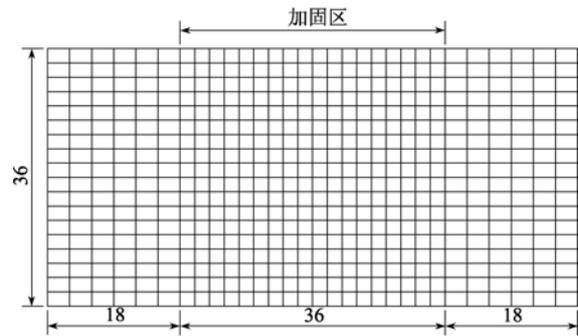


图3 有限元计算网格

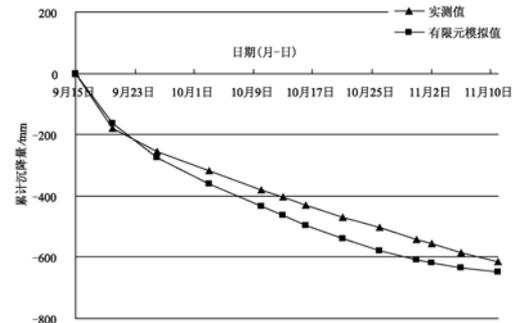


图4 实测和计算沉降

表1 不考虑地基侧向变形地基沉降量计算数据表

土层	μ	K_0	E_s	E_a	$k/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	$\overline{P_0}/\text{kPa}$	\overline{P}/kPa	H_i/m	S_i/m	$\sum S_i/\text{m}$
填土 I (0-2 m)	0.35	0.26	6.12	16.69	-8.20	63	58.9	2	0.254	
粉质粘土(2-4 m)	0.36	0.26	5.33	15.51	-15.86	53	45.1	2	0.212	0.7651
淤泥(4-8 m)	0.41	0.29	5.01	21.84	-15.86	40	32.1	4	0.211	
亚粘土(8-10 m)	0.37	0.27	5.27	16.22	-15.86	28	20.1	2	0.089	

表2 考虑地基侧向变形地基沉降量计算数据表

类别	A	K_0	$\overline{m_{vs}^v}$	\overline{s}/mm	$\overline{\delta_c}/\text{mm}$	m_d	S/mm
参数值	1.14	0.5	0.923	28	616.2	53.1	0.954 31 674.12

表3 简化计算方法的比较

类别	K_0 固结		非 K_0 固结	
	本文算法值	实测值	有限元模拟值	本文算法值
沉降值/mm	765.1	616.2	649.4	674.12

通过对实测值、有限元计算值和本文算法值比较(见表 3)发现,本文算法值和实测值误差在 9%,与有限元模拟值误差在 4%,误差相对较小,认为公式合理、可靠。

本文算法计算的是真空预压下地基最终沉降量,而实测值为真空预压完成时的沉降。该试验段在真空预压后期进行了真空-堆载联合预压,在堆载后的一段时间内仍然会存在小部分沉降,故认为单

纯由真空预压引起的路基最终沉降值应略大于实测值。由以上分析可知,若继续进行真空预压处理,现场实测值将会更加接近于本文算法值。

4 结 论

本文对真空预压计算方法进行分析研究,得到主要结论如下:

1)在不考虑土体侧向变形条件下(K_0 固结),推求单井地基等效圆内真空压力的平均值等效代替群井地基内部真空压力的平均值,提出 K_0 固结条件下真空预压简化计算方法。

2)通过本文分析:在非 K_0 固结条件下,体积应变修正系数为地基深度 h 的函数,提出平均体积应变系数的概念,认为考虑侧向位移的固结沉降应采用平均体积应变系数对公式进行修正。

3)在原有考虑土体侧向变形(非 K_0 固结)的地基沉降计算方法的基础上,对体积应变修正系数进行研究分析,提出了非 K_0 固结条件下真空预压简化计算方法。

4)进行有限元计算分析,将本文方法算法值、有限元计算值、实测值三者进行比较分析,认为本文计算值合理、可靠。采用本文真空预压沉降计算方法进行沉降预测较为适用便捷,对真空预压设计有一定的指导和借鉴作用。

化计算方法研究[D]. 南京:河海大学,2003.

- [2] 蒋华忠. 由侧向变形引起的路基沉降室内试验和计算方法研究 [D]. 南京:河海大学,2007.
- [3] Chai C, Shen S L, Miura N, et al, Simple method of modeling PVD-Improved subsoil [J], J Geotech and Geoenviron Engrg, ASCE, 2001, 127(11): 965-972.
- [4] 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.
- [5] 李 宁. 真空预压机理试验研究及简化计算[D]. 南京:河海大学,2009.
- [6] 金耀华. 考虑侧向变形的沉降计算方法研究[D]. 扬州:扬州大学,2006.
- [7] Skempton A. W. et. al. A contribution to the settlement analysis of foundations on clay. Geotechnique, 1957, 7
- [8] D. J. Henkel. The Relationships Between the Strength, Pore-Water Pressure, and Volume-Change Characteristics of Saturated Clays. Geotechnique, 1959,
- [9] 刘伏成. 路堤软基沉降预测方法研究 [D]. 武汉:武汉理工大学,2004.
- [10] 松岡元著, 罗 汀、姚仰平编译. 土力学[M]. 中国水利水电出版社,2001.
- [11] 麦远俭、刘成云. 软基预压加固中的体积应变、侧向位移与沉降修正[J], 水运工程, 2001, 331(8): 7-11.

参 考 文 献

收稿日期:2011-01-24

- [1] 李 豪. 真空——堆载联合预压加固软基机理及简