

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.02.005

考虑真空度衰减及涂抹区渗透系数变化的 真空预压固结解析解

吴跃东^{1,2}, 吴鸿昇^{1,2}, 罗如平^{1,2}, 曾垂昌^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 为更好地将理论计算应用于实际真空预压工程并指导工程实践, 假设真空度线性衰减, 建立真空预压软基径向固结方程, 得出超孔隙水压力的计算公式及固结度。研究了涂抹区渗透系数对固结的影响, 分别给出了渗透系数不变和渗透系数线性变化时地基中平均孔压和固结度的解析解, 并进行了分析。分析结果表明, 真空度衰减系数 k_1 与 k_2 、井阻比 n 及涂抹区半径与排水体半径的比值 s 越小、非扰动区与涂抹区渗透系数比 α 越趋近 s , 则真空预压效果越好。将考虑真空度线性衰减的固结度解析解和 Hansbo 解与嘉兴港真空预压地基处理的实测数据进行对比, 发现前者与实测数据更加吻合, 且考虑涂抹区渗透系数线性变化的解更符合工程实际。

关键词: 真空度线性衰减; 涂抹区; 超孔隙水压力; 固结度; 嘉兴港地基处理

中图分类号: TU447; TU411.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2016)02-0122-07

Analytical solutions for vacuum preloading consolidation considering vacuum degree attenuation and change of permeability coefficient in smear zones

WU Yuedong^{1,2}, WU Hongsheng^{1,2}, LUO Ruping^{1,2}, ZENG Chuichang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: For the purpose of application of theoretical calculation to practical vacuum preloading projects and providing guidance in practical application, an equation for soft ground consolidation in the radial direction under vacuum preloading was established by assuming that the vacuum degree attenuated linearly, and formulas for the excess pore pressure and degree of consolidation were developed. Based on study of the effects of the permeability coefficient in smear zones, analytical solutions for the average pore pressure and degree of consolidation were deduced and verified with a constant permeability coefficient and linearly changing permeability coefficient, respectively. Results of analysis show that the smaller the vacuum degree attenuation coefficients, k_1 and k_2 , the well resistance factor, n , and the radius ratio of the smear zone to drainage system, s , and the closer the ratio of the permeability coefficients of the undisturbed zone to the smear zone, α , to s , the better the effect of vacuum preloading. The analytical solutions considering the linear attenuation of the vacuum degree and Hansbo's solutions were compared with field observations of the degree of consolidation of the foundation under vacuum preloading at the Jiaxing Port. Results show that the analytical solutions are more consistent with field observations, and the solutions considering the linear change of the permeability coefficient in smear zones correspond better with engineering practices.

Key words: linear attenuation of vacuum degree; smear zone; excess pore pressure; degree of consolidation; foundation treatment at Jiaxing Port

收稿日期: 2015-04-24

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51279049); 中央高校基本科研业务费专项(2015B06014)

作者简介: 吴跃东(1969—), 男, 福建云霄人, 副教授, 博士, 主要从事岩土工程测试及软土地基处理研究。E-mail: hhuwyd@163.com

真空预压法在软土地基处理中应用广泛,且其理论研究也日趋完善。真空预压因为密封性不足、存在介质阻力等原因,竖向和径向真空度均有衰减,但目前界内对于真空预压中真空度的传递形式争议很大。赵维炳^[1]、张利平等^[2]、梅国雄等^[3]、张功新等^[4]、艾英钵等^[5-6]认为真空预压中真空度随深度的增加而衰减。董志良^[7]认为真空预压中真空度的衰减速率前期较大而后期较小。刘佳有等^[8]、沈珠江等^[9]、彭劫等^[10]提出真空度在深度方向线性衰减。Chai 等^[11]认为真空压力在竖向排水体中呈线性分布。Indraratna 等^[12-13]认同真空度在竖向排水体中竖向线性衰减,同时进一步指出其在水平向传递过程中也呈线性衰减。李宁等^[14]通过试验测得不同渗透系数下的真空压力在横向和竖向传递的衰减系数,认为真空压力沿深度方向和水平方向均为线性传递,且衰减系数的选取与土的渗透系数有关。目前,绝大多数学者在对砂井地基固结理论的研究中,通常认为扰动区的渗透系数为定值,而实际工程中,离砂井越近,受到的扰动越大,渗透系数也就越小,离砂井远的地方,受到的扰动越小,其渗透系数接近天然地基。随着真空预压的进行,土体发生固结,孔隙比减小,土体的渗透系数发生变化。卢萌盟等^[15]考虑桩体打设对桩周土体的扰动,提出了扰动后土体水平向渗透性的3种变化模式。笔者将文献[15]中桩对土体扰动的线性模型用于砂井打设对土体的扰动,以此模拟真空预压涂抹区的渗透系数变化。

1 土体固结方程建立与求解

1.1 基本假定

土体固结方程建立的假设条件为:(a)等应变条件成立,即砂井地基无侧向变形,同一水平面任意一点的垂直变形相等。(b)砂井内孔压沿径向的变化忽略不计。任意深度 z 处从土体流入砂井的水流量等于砂井向上的水流增量。(c)水平向考虑径向渗流,而不考虑环向渗流。(d)计算深度以下和径向边界以外为不透水区域。(e)除渗透系数以外,砂井及涂抹区的其他性质同天然地基。(f)真空度在水平向和竖向均呈线性衰减。

1.2 涂抹区渗透系数不变时的方程建立与求解

设真空度竖向、水平向衰减系数分别为 k_1 、 k_2 ,并且 $k_1 = 1 - k'_1$ 、 $k_2 = 1 - k'_2$ (k'_1 、 k'_2 为文献[14]中的 k_1 、 k_2)。图1为真空度竖向和水平向衰减示意图,图中 p_0 为膜下真空度, r_w 为砂井半径, R 为砂井影响区半径, r 为离砂井中心的距离, l 为砂井长度。

土中任意一点的真空度为

$$p(z, r) = p_0 \left(1 - k_1 \frac{z}{l} \right) \left(1 - k_2 \frac{r - r_w}{R - r_w} \right) \quad (1)$$

对任一深度距离砂井中心距离为 r 的任意土单元进行分析,其水力梯度 i 为

$$i = \frac{1}{\rho_w g} \frac{\partial(u - p(z, r))}{\partial r} = \frac{1}{\rho_w g} \left[\frac{\partial u}{\partial r} + p_0 \left(1 - k_1 \frac{z}{l} \right) \frac{k_2}{R - r_w} \right] \quad (2)$$

式中: ρ_w ——水的密度; u ——超孔隙水压力。

砂井径向渗流速率可用达西定律表示为

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = kiA = \frac{k}{\rho_w g} \left[\frac{\partial u}{\partial r} + p_0 \left(1 - k_1 \frac{z}{l} \right) \frac{k_2}{R - r_w} \right] 2\pi r dz \quad (3)$$

式中: Q ——土体径向渗流量; k ——渗透系数; A ——土体单元面积。

土体的体积变化率为

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \pi (R^2 - r^2) dz \quad (4)$$

式中: ε ——土体的体积应变。

$$\text{令 } \frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial V}{\partial t}, \text{ 则}$$

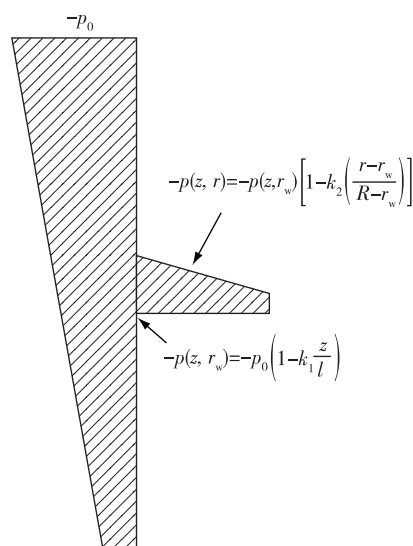


图1 真空度衰减示意图

Fig. 1 Schematic diagram of vacuum degree attenuation

$$\text{涂抹区} \quad \frac{\partial u'}{\partial r} = \frac{\rho_w g}{2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \frac{1}{k_s} \left(\frac{R^2 - r^2}{r} \right) + p_0 \left(1 - k_1 \frac{z}{l} \right) \frac{k_2}{R - r_w} \quad (5)$$

$$\text{未扰动区} \quad \frac{\partial u_h}{\partial r} = \frac{\rho_w g}{2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \frac{1}{k_h} \left(\frac{R^2 - r^2}{r} \right) + p_0 \left(1 - k_1 \frac{z}{l} \right) \frac{k_2}{R - r_w} \quad (6)$$

式中: u' 、 u_h ——涂抹区、未扰动区超孔隙水压力; k_s 、 k_h ——涂抹区、未扰动区渗透系数。

由从土体流入砂井的水流量等于砂井向上的水流增量及边界条件得

$$u'_w = p_0 \left(1 - k_1 \frac{z}{l} \right) + \frac{\rho_w g}{q_w} \frac{\pi r_w^2}{(n^2 - 1)} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \left(lz - \frac{z^2}{2} \right) \quad (7)$$

其中

$$n = \frac{R}{r_w}$$

式中: u'_w ——砂井与土体接触面处的孔隙水压力; q_w ——砂井通水能力; n ——井阻比。

对土体涂抹区积分得 $\int_{u_w}^u \partial u' = \int_{r_w}^r \frac{\rho_w g}{2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \frac{1}{k_s} \left(\frac{R^2 - r^2}{r} \right) \partial r$, 再由边界条件 $r = r_w$ 时, $u' = u'_w$ 得

$$u' = \frac{\rho_w g}{2k_s} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \left[R^2 \ln \left(\frac{r}{r_w} \right) - \frac{r^2 - r_w^2}{2} + k_s \frac{\pi r_w^2}{q_w} (n^2 - 1) \left(lz - \frac{z^2}{2} \right) \right] - p(r, z) \quad (8)$$

对未扰动区积分得 $\int_{u_s}^u \partial u_h = \int_{r_s}^r \frac{\rho_w g}{2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \frac{1}{k_h} \left(\frac{R^2 - r^2}{r} \right) \partial r$ (其中 u_s 为 $r = r_s$ 时的超孔隙水压力), 再由边界条件

$r = r_s$ 时, $u_s = u_h$ 得

$$u_h = \frac{\rho_w g}{2k_h} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \left[R^2 \ln \left(\frac{r}{r_s} \right) - \frac{r^2 - r_s^2}{2} \right] + \frac{\rho_w g}{2k_s} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \left[R^2 \ln \left(\frac{r_s}{r_w} \right) - \frac{r_s^2 - r_w^2}{2} + k_s q(z) \right] - p(r, z) \quad (9)$$

其中

$$q(z) = \frac{\pi r_w^2}{q_w} (n^2 - 1) \left(lz - \frac{z^2}{2} \right)$$

式中: r_s ——涂抹区半径。

因此, 平均负超孔隙水压力为

$$\bar{u} = \frac{\int_{r_w}^{r_s} u' 2r dr + \int_{r_s}^R u_h 2r dr}{R^2 - r_w^2} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \rho_w g \frac{R^2}{2k_h} \mu - p_0 G \quad (10)$$

其中 $\mu = \frac{n^2}{n^2 - 1} \left[\ln \left(\frac{n}{s} \right) + \frac{k_h}{k_s} \ln(s) - \frac{3}{4} \right] + \frac{s^2}{n^2 - 1} \left(1 - \frac{s^2}{4n^2} \right) + \frac{k_h}{k_s} \frac{1}{n^2 - 1} \left(\frac{s^4 - 1}{4n^2} - s^2 + 1 \right) + \frac{n^2 - 1}{n^2} \pi z (2l - z) \frac{k_s}{q_w}$

$$G = \left(1 - k_1 \frac{z}{l} \right) \frac{2 - k_2}{2} \quad s = \frac{r_s}{r_w}$$

由 $\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = -m_v \frac{\partial \bar{u}}{\partial t}$ 及式(10), 得

$$\bar{u} = p_0 G \exp \left(- \frac{8T_h}{\mu} \right) - p_0 G \quad (11)$$

其中

$$T_h = \frac{C_h t}{4R^2} = \frac{k_h t}{4R^2 m_v \rho_w g}$$

式中: m_v ——体积压缩系数; C_h ——水平向压缩指数。

由式(11)可知, k_1 、 k_2 越小, 平均负超孔隙水压力越大。

径向固结度为

$$U_r = \frac{u_0 - u_t}{u_0 - u_\infty} = \frac{p_0 G - p_0 G \exp \left(- \frac{8T_h}{\mu} \right)}{p_0 G} = 1 - \exp \left(- \frac{8T_h}{\mu} \right) \quad (12)$$

式中: u_0, u_t, u_∞ —— $t=0, t, \infty$ 时的 $\bar{u}$ 值。

由竖向平均固结度 $U_z = 1 - \sum_{M=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T_v}$ (其中 T_v 为竖向时间因数)、 $U_{rz} = 1 - (1 - U_z)(1 - U_r)$ 及式 (12), 可得地基整体平均固结度 U_{rz} 。

1.3 涂抹区渗透系数线性变化时的方程建立与求解

图2为涂抹区渗透系数变化的3种模式, 其中 k_0 为涂抹区渗透系数的最小值, 目前绝大部分固结解是基于常规模式得到。抛物线模式假设涂抹区渗透系数随抛物线变化, 非扰动区渗透系数保持不变, 为天然渗透系数, 但其表达式较复杂。线性模式假设涂抹区渗透系数随 r 线性变化, 非扰动区渗透系数保持不变, 为天然渗透系数, 渗透系数表达式为

$$f(r) = \begin{cases} k_0 \left(\frac{s-\alpha}{s-1} + \frac{\alpha-1}{s-1} \frac{r}{r_w} \right) & r_w \leq r \leq r_s \\ k_h & r_s \leq r \leq R \end{cases} \quad (13)$$

式中: α —— 未扰动区渗透系数与涂抹区渗透系数最小值之比。

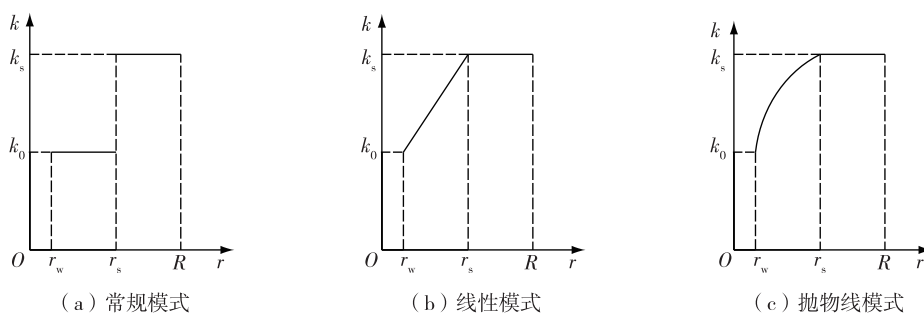


图2 渗透系数变化模式

Fig. 2 Change modes of permeability coefficient

由1.2节求得的 U_{rz} 解析式可知, 渗透系数变化仅对 U_{rz} 解析式中的参数 μ 有影响, 将式 (13) 代入式 (5), 并用与1.2节相同的解法得 u' 、 u_h 分别为

$$u' = \frac{\rho_w g R^2}{2k_h} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \alpha \left[\frac{1}{B} \ln \frac{r}{r_w} - \left(\frac{B}{A^2 n^2} - \frac{1}{B} \right) \ln \left(B + A \frac{r}{r_w} \right) + \frac{1 - \frac{r}{r_w}}{A n^2} + \frac{k_0}{R^2} q(z) \right] - p(r, z) \quad (14)$$

其中

$$A = \frac{\alpha-1}{s-1} \quad B = \frac{s-\alpha}{s-1}$$

$$u_h = \frac{\rho_w g R^2}{2k_h} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \left\{ \ln \frac{r}{s r_w} - \frac{s^2 - r^2}{2n^2 r_w^2} + \alpha \left[\ln s - \frac{s-1}{A n^2} + \left(\frac{B}{A n^2} - \frac{1}{B} \right) \ln \alpha + \frac{k_s}{R^2} q(z) \right] \right\} - p(r, z) \quad (15)$$

此时, $\bar{u} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \frac{\rho_w g R^2}{2k_h} \mu - p_0 G$ 表达式中 μ 为

$$\mu = \frac{n^2}{n^2 - 1} \left\{ \ln \frac{n}{s} - \frac{3}{4} + \frac{s^2}{n^2} \left(1 - \frac{s^2}{4n^2} \right) - \frac{\alpha}{B} \ln \frac{\alpha}{s} + \frac{\alpha B}{A^2 n^2} \left(2 - \frac{B^2}{A^2 n^2} \right) - \frac{\alpha(s-1)}{A n^2} \left[2 + \frac{1}{n^2} \left(\frac{A-B}{A} \left(\frac{1}{A} - \frac{s+1}{2} \right) - \frac{s+1}{2} - \frac{(s-1)^2}{3} \right) \right] \right\} + \frac{n^2 - 1}{n^2} \pi z (2 - z) \frac{k_0}{q_w} \quad (16)$$

由式 (14) ~ (16) 可得涂抹区渗透系数线性变化时的径向固结度 U_r 及地基整体平均固结度 U_{rz} 。

2 理论解影响因素分析

2.1 井阻比变化计算结果分析

假设 r_w 保持不变, R 变化导致 n 变化, 利用1.3节的解析解, 得到不同井阻比情况下整体固结度曲线

(图3)。由图3可知,不同井阻比会对土体固结产生影响,且影响较为明显,井阻比越小,土体固结速率越大。

2.2 涂抹区范围变化计算结果分析

涂抹区半径与竖向排水体半径之比 $s=r_s/r_w$, r_w 值由塑料排水板的型号确定, r_s 受多种因素影响, 主要与施工工艺有关。利用 U_{1z} 解析公式, 得到 s 情况下固结度曲线(图4)。由图4可以看出 s 会对固结速率产生影响, s 越小, 固结速率越大, 因此在施工打设竖向排水体时要尽量减少扰动, 这样 s 较小, 土体能较快达到固结。

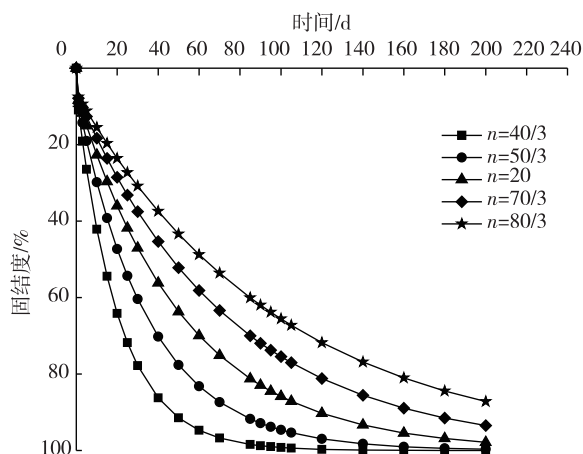


图3 不同 n 取值对土体固结的影响

Fig. 3 Impacts of different values of n on soil consolidation

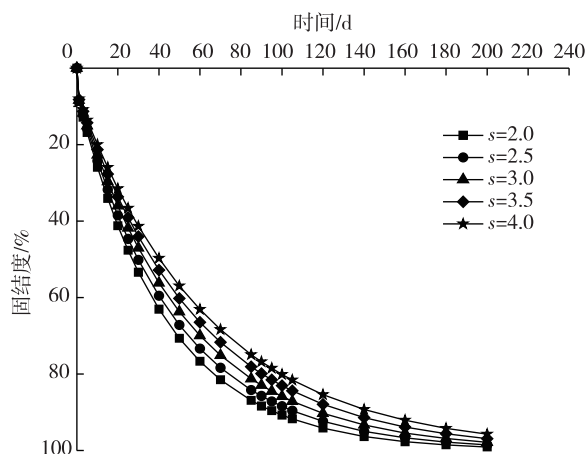


图4 不同 s 取值对土体固结的影响

Fig. 4 Impacts of different values of s on soil consolidation

2.3 涂抹比变化计算结果分析

α 的影响因素众多, 各影响因素对其值的影响目前还没有定论, 一般由现场实测值确定。利用 U_{1z} 解析解, 计算得到不同涂抹比情况下 ($\alpha=0.8s, 0.9s, 1.0s, 1.1s, 1.2s$) 固结度曲线(图5)。由图5可知, $\alpha=1.0s$ 时, 其固结速率最大。

3 理论解验证分析

3.1 工程概况

浙能嘉兴港地基处理试验段采用真空预压法加固地基, 膜下真空度平均为 -80 kPa , $r_w=3\text{ cm}$, $r_s=9\text{ cm}$, $R=60\text{ cm}$, $l=15\text{ m}$, 水平向固结系数为2倍竖向固结系数 ($C_h=2C_v=1.2\times 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$), 水平向和径向渗透系数为 $k_h=2k_v=2\times 10^{-9}\text{ m/s}$, 塑料排水板等效砂井渗透系数为 $2\times 10^{-5}\text{ m/s}$ 。根据现场实测资料, 得到真空度的监测数据如图6和图7, 可知真空度在竖向和水平向均可看作线性衰减。

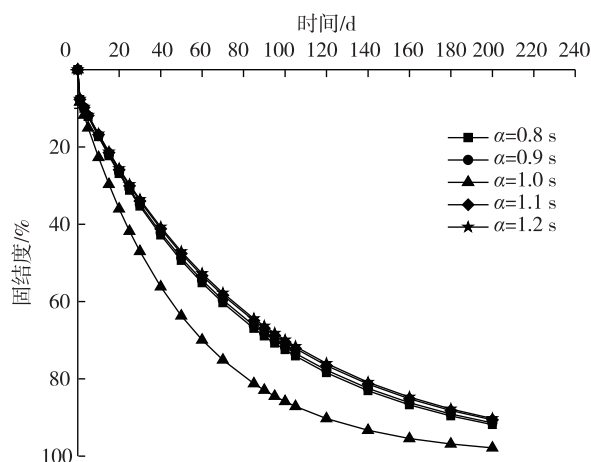


图5 不同 α 取值对土体固结的影响

Fig. 5 Impacts of different values of α on soil consolidation

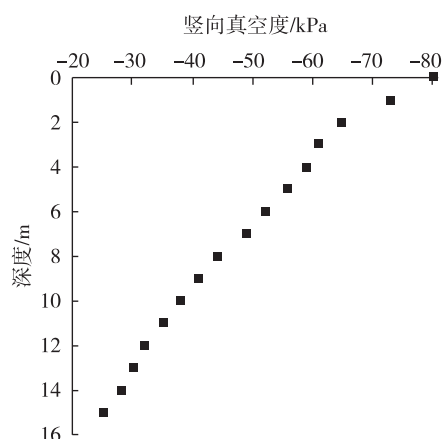


图6 排水板中真空负压实测数据

Fig. 6 Measured data of vacuum negative pressures in drainage board

3.2 理论解答分析对比

由本文的不考虑渗透系数变化的解(下文称为解法一),本文的考虑渗透系数变化的解(下文称为解法二),和 Hansbo 解^[16]与实测值进行比较,如图 8。

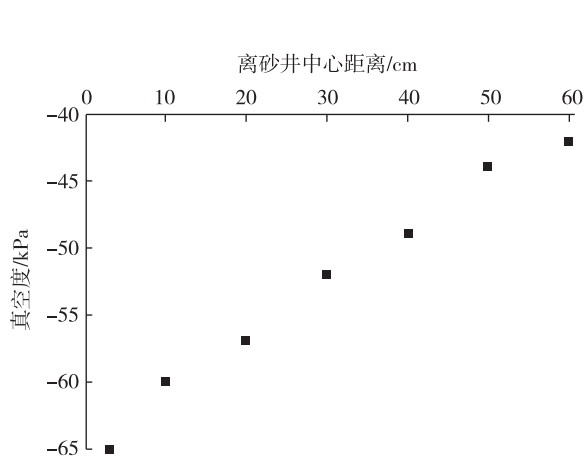


图7 深度2 m处水平向真空度

Fig. 7 Vacuum degree in horizontal direction at 2-m depth

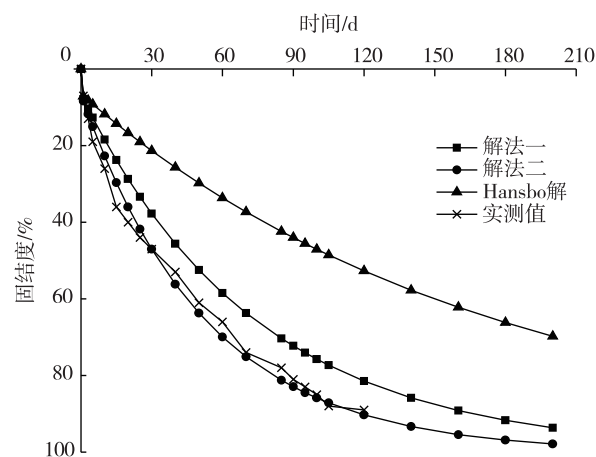


图8 本文解、Hansbo解与实测值对比

Fig. 8 Comparisons of solutions of present method and Hansbo's solutions with field observations

从图 8 可以看出 Hansbo 解计算得到固结度与实测孔压计算得到的固结度差距较大,这是因为 Hansbo 解采用的是理想砂井模型,其只能反映大致的趋势,由于理想状况与现场状况相差较大,其计算值与实测值差距较大。而本文的解法不仅考虑了真空度的水平和竖向衰减,还考虑了涂抹区渗透系数变化对解析解的影响。当 n^2 较大时,本文解法一即简化为谢康和解,通过与现场实测数据比较,可以看出,本文解法一与现场实测值的误差远小于 Hansbo 解,但与实测值也存在一定差异。我国 JGJ 79—2012《建筑地基处理技术》^[17]给出的公式形式同谢康和解,即现有规范与工程实际情况存在一定差异。本文解法二考虑涂抹区渗透系数变化,与现场实际情况更加吻合,其得到的固结度计算值与实测值吻合度较高。

为了提高真空预压的效果,在打设砂井时应尽量减小对周围土体的扰动,提高真空泵的效率,确保真空膜的质量。

4 结 论

a. 基于涂抹区渗透系数恒定的真空度线性衰减和涂抹区渗透系数改变的真空度线性衰减 2 种情况,分别得出真空预压固结解析解。并分析了各种影响因素对真空预压的影响,结果表明 k_1 与 k_2 、 n 、 s 越小, α 越趋近 s ,固结越快。

b. 通过工程实测孔压计算得到的固结度与本文固结度解析解对比,发现本文的解析解比 Hansbo 解更接近工程实际,且解法二与实测数据更加吻合。为此,对真空预压施工提出了建议:减小打设砂井时对土体的扰动、提高真空泵功率等。

参考文献:

- [1] 赵维炳. 砂井地基固结分析半解析方法的改进[J]. 岩土工程学报, 1991, 13(4): 51-58. (ZHAO Weibing. Improvement of semi-analytical method of analysis of consolidation of sand well foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1991, 13(4): 51-58. (in Chinese))
- [2] 张利平, 夏军, 胡志芳. 中国水资源状况与水资源安全问题分析[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(2): 116-120. (ZHANG Liping, XIA Jun, HU Zhifang. Situation and problem analysis of water resource security in China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(2): 116-120. (in Chinese))
- [3] 梅国雄, 徐锴, 宰金珉, 等. 真空预压加固软土地基变形机理的探讨[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1168-1172. (MEI Guoxiong, HU Kai, ZAI Jinming, et al. Deformation mechanism of soft foundation under vacuum preloading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(9): 1168-1172. (in Chinese))
- [4] 张功新, 莫海鸿, 董志良, 等. 真空预压中真空度与孔隙水压力的关系分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 1949-1952.

- (ZHANG Gongxin, MO Haihong, DONG Zhiliang, et al. Analysis of relationship between vacuity and pore-water pressure in vacuum preloading[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(12):1949-1952.(in Chinese))
- [5] 艾英钵, 施建勇, 刘加才. 真空预压加固软土地基沉降的简化计算方法[J]. 中国港湾建设, 2006(6): 3-5.(AI Yingbo, SHI Jianyong, LIU Jiakai. Simplified method to calculate settlement of soft soils consolidated with vacuum preloading method[J]. China Harbour Engineering, 2006(6):3-5.(in Chinese))
- [6] 艾英钵, 刘兵, 刘加才. 真空预压加固地基固结简化计算方法[J]. 水利水电科技进展, 2006, 25(6): 60-62.(AI Yingbo, LIU Bin, LIU Jiakai. Simplified calculation method for consolidation of soft ground improved by vacuum preloading[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, 25(6): 60-62.(in Chinese))
- [7] 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,1990.
- [8] 刘佳有, 吴正友, 席平. 国产 SPB-I 型和日本丸红 GEODRAIN-L 型塑板真空度传递性能的现场试验研究[J]. 水运工程, 1990(12): 1-8.(LIU Jiayou, WU Zhengyou, XI Ping. Field test study on transferring performance of vacuum degree with plastic drainage board homebred type SPB-I and Japanese Marubeni type GEODRAIN-L[J]. Port and Waterway Engineering, 1990(12):1-8.(in Chinese))
- [9] 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.(SHEN Zhujiang, LU Shunying. Analysis of consolidation deformation of soft ground by vacuum preloading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 8(3):7-15.(in Chinese))
- [10] 彭劫, 刘汉龙, 陈永辉. 真空-堆载联合预压法加固机理讨论[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2003, 31(5): 560-563.(PENG Jie, LIU Hanlong, CHEN Yonghui. Mechanism of foundation strengthening by vacuum-surcharge preloading method[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2003, 31(5):560-563.(in Chinese))
- [11] CHAI J C, CARTER J P, HAYASHI S. Ground deformation induced by vacuum consolidation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(12): 1552-1561.
- [12] INDRARATNA B, BAMUNAWITA C, KHABBAZ H. Numerical modeling of vacuum preloading and field applications[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2004, 41(6): 1098-1110.
- [13] 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.
- [14] 李宁, 李向凤, 吴跃东. 真空压力传递规律与渗透系数关系的试验研究[J]. 路基工程, 2011(4): 101-103.(LI Ning, LI Xiangfeng, WU Yuedong. Experimental study on the relationship between vacuum pressure transfer law and permeability coefficient[J]. Subgrade Engineering, 2011(4): 101-103.(in Chinese))
- [15] 卢萌盟, 谢康和, 张玉国, 等. 考虑土体水平渗透系数变化的复合地基固结解[J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, 42(11): 1996-2001.(LU Mengmeng, XIE Kanghe, ZHANG Yuguo, et al. Analytical solution for consolidation of composite foundation accounting for variation of soil horizontal permeability coefficient[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2009, 42(11):1996-2001.(in Chinese))
- [16] HANSBO S. Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains[C]// International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Proceeding of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Stockholm:MBS, 1981.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 79—2012 建筑地基处理技术[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.