

排水粉喷桩复合地基固结计算方法的探讨

陈 蕾, 刘松玉, 洪振舜

(东南大学交通学院岩土工程研究所, 江苏 南京 210096)

摘 要: 针对排水粉喷桩复合地基这种新型工法, 建立了相应的简化固结分析模型; 同时为考虑下卧层与加固区的孔压连续问题, 将加固区模型一维等效, 采用双层地基模型进行编程计算。两种模型得到的超静孔压消散规律, 固结度增长规律以及沉降历时曲线均与现场实际情况相一致, 验证了本文提出的加固区模型的适用性以及双层地基方法在排水粉喷桩复合地基固结计算中的可行性。

关键词: 排水粉喷桩法; 固结; 超孔隙水压力; 双层地基

中图分类号: TU470

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2007)02-0198-06

作者简介: 陈 蕾(1981-), 女, 博士研究生, 主要从事地基处理研究。E-mail: clove_ch@163.com。

Study of consolidation calculation of soft ground improved by dry jet mixing combined with vertical drain method

CHEN Lei, LIU Song-vu, HONG Zhen-shun

(Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: DJM (Dry Jet Mixing) combined with PVD (Plastic Vertical Drain) method was a new soft ground improvement method (2D method). A simplified consolidation calculation model of the ground improved by 2D method was presented, and the formulas of excess pore water pressure and consolidation degree were derived. Taking as double layer ground composed of composite ground and underlying layer, a consolidation calculation program based on consolidation theory was compiled for 2D method. which could represent the continuity of pore water pressure between the two layers. The comparison between the calculated results and the filed measured data showed that the calculated excess pore water pressure, the consolidation degree and the settlement-time relationship were consistent with those of field data respectively.

Key words: 2D method; consolidation; excess pore water pressure; double-layered ground

0 引 言

排水粉喷桩复合地基法(2D method)是一种新型地基处理工法^[1-2]。该法基本原理是利用粉喷桩与竖向排水体(文中采用塑料排水板)联合加固软基,在发挥粉喷桩复合地基已有优势的同时,竖向排水体的存在使粉喷桩施工以及上部加载过程中产生的超孔隙水压力能更快的消散,即加快桩间土体的固结速率。因此与常规粉喷桩复合地基相比,该工法在满足路堤稳定性和工后沉降的设计要求的前提下,可增大粉喷桩的桩间距,从而节省工程造价,具有明显的工程实用价值。

排水粉喷桩复合地基在荷载传递规律上与常规粉喷桩复合地基相类似,外部荷载由粉喷桩和地基土共同来承担;地基土分担的荷载使土体发生固结,强度提高,从而使桩土间的荷载传递规律以及整个地基的变形特征发生重分布。为此,文献[3]曾指出,研究复

合地基固结是研究复合地基加固机理的重要内容之一。作为一种新型的加固技术,研究排水粉喷桩的固结特性意义重大,本文建立了适于排水粉喷桩复合地基固结计算的简化模型并验证了该模型的合理性。

1 加固区固结模型的建立

排水粉喷桩复合地基作为一种组合型的复合地基,对其进行固结研究的关键是如何在现有的排水板地基、粉喷桩复合地基固结分析模型的基础上,提出一种适合于排水粉喷桩复合地基计算的实用模型。

传统的排水板固结问题是将排水板等效为竖井地基,建立轴对称单井模型来分析。竖井固结理论中经典的有 Barron^[4]单层理想井理论; Hansbo^[5]发展了 Barron 的理论,得到了考虑涂抹区的压缩性和井阻作

用的近似解; 谢康和^[6]、TANG Xiao-wu^[7-8]进一步发展了竖井地基等应变固结理论, 给出了柱坐标系下径向二维固结方程解。需要说明的是, 以上理论都假定地基上的外部荷载全部由地基土体承担, 即不考虑竖井的刚度。

然而对于本文的排水粉喷桩复合地基来说, 它不仅具有排水通道来加快固结, 在受力机理上, 粉喷桩的存在使其具有明显的复合地基特征, 因此本质上仍属复合地基的固结问题。目前国内外关于复合地基的固结研究较少, 且多数都是对碎石桩、砂桩等强透水桩的研究^[9-11], 对于粉喷桩这类弱透水桩复合地基的固结研究较少。浙江大学首先对搅拌桩复合地基固结特性开展研究^[12-13]; 谢康和等^[3,14]在等应变假定下, 得到了强、弱排水桩复合地基均可用的固结计算通式, 韩杰^[9]的碎石桩和郑俊杰^[10]的石灰桩复合地基固结理论都是该解的特例, 而对于搅拌桩复合地基的解答实际上仅是对复合地基刚度进行等效的一维均质地基的固结。另外, 徐洋^[15]不考虑桩体的固结, 基于Biot固结理论, 建立了考虑桩土相互作用、变形协调问题的复合地基的基本方程和边界条件, 并在Laplace和Hankel变换域内得到了解析表达式, 但因其问题和编程等的复杂性, 未获得合理的数值反演结果。

基于以上现状, 本文结合现有的粉喷桩和排水板的固结理论研究成果, 提出了排水粉喷桩复合地基的固结研究模型。

1.1 基本特点、计算简图和基本假定

(1) 基本特点

相对于天然土体来说, 粉喷桩桩体具有较大刚度, 但属于弱透水性材料; 排水板具有较好的透水性, 但其竖向刚度效应可以忽略。粉喷桩和排水板间距均较大, 面积置换率较小。

(2) 计算简图

固结方程的建立包括3个部分: 平衡条件、应力应变关系以及渗流连续条件, 本文将排水粉喷桩复合地基简化成图1所示模型。考虑平衡方程时, 认为排水板的模量与天然土体相同, 建立粉喷桩与天然土体的平衡方程, 进而得到地基应力应变关系; 考虑渗流连续条件时, 认为粉喷桩是不透水体, 且刚好位于单根排水板有效作用区域的边界上(如图2阴影部分所示), 从而可以简化为单根砂井地基的固结方程; 最后两者连立, 得到整个复合地基的固结解答。

(3) 基本假定

基本假定为: ①桩完全打穿软土层; ②地基中无侧向变形; ③不考虑粉喷桩桩体的固结问题, 假定同一深度处桩体与土体竖向变形相等; ④不考虑粉喷桩施工对周围土体强度和透水特性的扰动影响; ⑤排水

板及其涂抹区压缩模量与天然地基相同; ⑥加荷瞬时土体所受荷载全部由孔隙水承担; ⑦其他假定同Terzaghi一维固结理论^[16]。

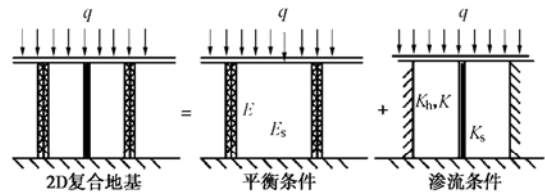


图1 排水粉喷桩复合地基简化剖面图

Fig. 1 Simplified profile of 2D composite foundation

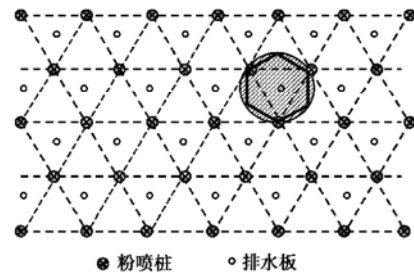


图2 排水粉喷桩复合地基平面布置图

Fig. 2 Arrangement of 2D composite foundation

1.2 基本方程与求解条件

(1) 平衡条件及应力-应变关系

考虑桩体刚度, 建立复合地基平衡条件:

$$m\bar{\sigma}_p + m(s_p^2 - 1)\bar{\sigma}_{sp} + m'\bar{\sigma}_w + m'(s_w^2 - 1)\bar{\sigma}_{sw} + (1 - ms_p^2 - m's_w^2)\bar{\sigma}_s = q, \quad (1)$$

由假定③得

$$\frac{\bar{\sigma}_s - \bar{u}_s}{E_s} = \frac{\bar{\sigma}_w - \bar{u}_w}{E_w} = \frac{\bar{\sigma}_{sw} - \bar{u}_{sw}}{E_{sw}} = \frac{\bar{\sigma}_{sp} - \bar{u}_{sp}}{E_{sp}} = \frac{\bar{\sigma}_p}{E_p} = \varepsilon_z = \varepsilon_v. \quad (2)$$

式中 $\bar{\sigma}_s$, $\bar{u}_s$, $\bar{\sigma}_w$, $\bar{u}_w$, $\bar{\sigma}_{sw}$, $\bar{u}_{sw}$, $\bar{\sigma}_{sp}$, $\bar{u}_{sp}$ 分别为土体、排水板、排水板涂抹区、粉喷桩扰动区任一深度的平均总应力和平均孔压; $\bar{\sigma}_p$ 为粉喷桩中任一深度的平均总应力; q 为均布填土荷载; E_s , E_w , E_{sw} , E_p , E_{sp} 分别为天然土体、排水板、排水板涂抹区、粉喷桩、粉喷桩扰动区的压缩模量; ε_z , ε_v 为地基中任意一点的竖应变和体积应变; m , m' 是粉喷桩和排水板的面积置换率; s_p , s_w 分别为粉喷桩和排水板的扰动区半径与其本身半径对应的比值, $s_p = r_{sp}/r_p$, $s_w = r_{sw}/r_w$, r_{sp} , r_p , r_{sw} , r_w 分别为粉喷桩扰动区、粉喷桩、排水板涂抹区、排水板的半径。由于塑料排水板为条带状, 需将其换算成相当直径的圆柱体, 目前较为常用的是日本构尾新一郎的公式:

$$d_w = 2(b + \delta)\alpha / \pi, \quad (3)$$

式中, d_w 为塑料排水板等效直径, α 换算系数, 通常取 0.6~0.9, δ , b 分别为塑料板的厚度和宽度。关于排水板涂抹区的大小, 如果没有相关试验数据来确定,

可以近似取 $d_s = 3d_w$ (d_s 为涂抹区直径) [17]。

根据式 (1)、(2) 可以得到:

$$\varepsilon_v = \frac{q - \bar{u}}{E_c}, \quad \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = -\frac{1}{E_c} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \quad (4)$$

式中, E_c , $\bar{u}$ 是地基的复合压缩模量和任一深度的平均孔压, 由假定④, ⑤得

$$E_{sp} = E_w = E_{sw} = E_s \quad (5)$$

$$E_c = mE_p + (1-m)E_s = [1+m(N-1)]E_s \quad (6)$$

式中, $N = E_p / E_s$, 令 $\alpha_E = 1 + m(N-1)$, 则有

$$E_c = \alpha_E E_s \quad (7)$$

$$\bar{u}_{sp} = \bar{u}_s, \quad \bar{u}_w = 0 \quad (8)$$

$$\bar{u} = m'(s_w^2 - 1)\bar{u}_{sw} + (1-m-m's_w^2)\bar{u}_s \quad (9)$$

(2) 渗流连续条件

目前排水板地基的固结计算仍采用竖井地基固结理论, 竖井(打穿软土层)地基在瞬时加荷及 Barron 等应变条件下, 考虑井阻、涂抹作用以及径、竖向组合渗流的固结微分方程如下[6]:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{k_v}{\gamma_w} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} - \frac{k_s}{\gamma_w} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_{sw}}{\partial r} \right) &= \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \quad (r_w \leq r \leq r_{sw}), \\ -\frac{k_v}{\gamma_w} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} - \frac{k_h}{\gamma_w} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u_s}{\partial r} \right) &= \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \quad (r_{sw} \leq r \leq r_c), \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中, k_h , k_v 是天然土层的竖向、径向渗透系数, k_s 是排水板涂抹区土体的渗透系数, r_c 代表单个排水板有效影响区半径。

(3) 求解条件

求解条件(即边界及初始条件)为: ① $z = 0: u_s =$

$$u_{sw} = 0; \quad ② \quad z = h_1: \frac{\partial u_s}{\partial z} = \frac{\partial u_{sw}}{\partial z} = 0; \quad ③ \quad r = r_w: \frac{\partial^2 u_{sw}}{\partial z^2} =$$

$$-\frac{2k_s}{\gamma_w k_w} \frac{\partial u_{sw}}{\partial r}; \quad ④ \quad r = r_s: u_s = u_{sw}; k_s \frac{\partial u_{sw}}{\partial r} = k_h \frac{\partial u_s}{\partial r}; \quad ⑤$$

$$r = r_c: \frac{\partial u_s}{\partial r} = 0; \quad ⑥ \quad t = 0: \bar{u} = u_0 = q_{s0}。其中 q_{s0} 为土体$$

承担的荷载值, 根据假定③及式 (5) 可知 $q_{s0} = q / \alpha_E$ 。

1.3 解答

将方程 (4)、(10) 联立, 即可求得固结解答。与谢康和[6]竖井固结方程相比可发现, 排水粉喷桩复合地基固结方程仅在求解应力应变关系时将排水粉喷桩复合模量 E_c 取代了原天然地基模量 E_s (或考虑涂抹区模量变化的 E'_s), 其它条件并未改变, 考虑到 E_c , E_s , E'_s 都为常数, 不影响求解的过程, 故具体求解时可参考谢的解答, 仅对部分参数进行修正, 最后得到

$$u_{sw} = u_0 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{F_a + D} \left[\frac{k_h}{k_s} \left(\ln \frac{r}{r_w} - \frac{r^2 - r_w^2}{2r_c^2} \right) + D \right] \cdot \frac{2}{M} \sin \frac{Mz}{H_1} e^{-\beta_m t} \quad (11a)$$

$$u_s = u_0 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{F_a + D} \left[\left(\ln \frac{r}{r_s} - \frac{r^2 - r_s^2}{2r_c^2} \right) + \frac{k_h}{k_s} \left(\ln s - \frac{s^2 - 1}{2n^2} \right) + D \right] \cdot \frac{2}{M} \sin \frac{Mz}{H_1} e^{-\beta_m t} \quad (11b)$$

由图 2 可近似认为粉喷桩刚好在单个排水板的有效作用范围边界上, 所以 $\bar{u}$ 又可以近似表达为

$$\bar{u} = \frac{1}{\pi(r_c^2 - r_w^2)} \left[\int_{r_w}^{r_c} 2\pi r u_{sw} dr + \int_{r_c}^{r_s} 2\pi r u_s dr \right] \quad (12)$$

将式 (11a)、(11b) 代入式 (12) 可得

$$\bar{u} = u_0 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{M} \sin \frac{Mz}{H_1} e^{-\beta_m t} \quad (13)$$

在假定初始孔压为均匀分布的前提下, 根据平均孔压, 得到任意时刻整个土层的平均固结度:

$$\bar{U}_{tz} = 1 - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-\beta_m t} \quad (14)$$

$$\text{式中 } \beta_m = \left[\frac{M^2 c_v}{H_1^2} + \frac{8c_h}{(F_a + D)d_c^2} \right] \alpha_E; \quad D = \frac{8G(n^2 - 1)}{M^2 n^2};$$

G 即为考虑井阻效应的因子, $G = \frac{k_h}{k_w} \left(\frac{H_1}{d_w} \right)^2$; F_a 为考虑排水板涂抹效应的因子,

$$F_a = \left(\ln \frac{n}{s_w} + \frac{k_h}{k_s} \ln s_w - \frac{3}{4} \right) \frac{n^2}{n^2 - 1} + \frac{s_w^2}{n^2 - 1} \cdot$$

$$\left(1 - \frac{k_h}{k_s} \right) \left(1 - \frac{s_w^2}{4n^2} \right) + \frac{k_h}{k_s} \frac{1}{n^2 - 1} \left(1 - \frac{1}{4n^2} \right); \quad (15)$$

$$M = \frac{2m-1}{2} \pi \quad (m=1, 2, \dots); \quad n = r_c / r_w \text{ 为井径比; } c_v,$$

c_h 为天然土体的竖向和径向固结系数, $c_h = E_s k_h / \gamma_w$, $c_v = E_s k_v / \gamma_w$; H_1 为加固区厚度; γ_w 为水的重度。

式 (14) 与砂井(排水板)地基解答相比主要在于固结时间因子 β_m 的不同, β_m 通过 α_E 来表征粉喷桩对固结的影响。 α_E 与粉喷桩的面积置换率 m 和桩土模量比 N 有关, 因粉喷桩的桩体模量要远大于天然土体的模量, 由式 (5) 可知 α_E 往往大于 1 ($\alpha_E = 1$ 时为排水板地基), 即排水粉喷桩复合地基的固结时间因子大于常规排水板地基的固结时间因子。这就说明排水粉喷桩复合地基与常规排水板地基相比, 由于具有复合地基的特性, 能更快的加速桩间土体的固结, 且随着 α_E 的增大, 固结速率也相应增大。当然实际工程计算中, 桩土模量比的取值有一定的范围, 当桩体模量很大时, 则演变为桩基问题, 假定③桩土等应变条件不再成立, 本文结论则不适用, 故不能通过无限加大桩体模量的手段来提高地基的固结时间因子。

对于普通的粉喷桩复合地基, 不考虑土体径向排水, 则 $\beta_m = (M^2 c_v / H_1^2) \alpha_E$ 。同排水粉喷桩复合地基类似, α_E 表征了粉喷桩对天然地基土固结的影响,

$\alpha_E > 1$, 即粉喷桩复合地基的固结时间因子大于天然地基的固结时间因子。因而这里也同时验证了与天然地基相比, 常规的粉喷桩复合地基同样能加快固结, 这与实际工程中的观测结论是相一致的。

2 下卧层简化的整体固结模型

对于复合地基来说, 下卧层的沉降往往不可忽略。因此固结计算时, 不仅要考虑加固区, 更要重视下卧地基的固结特性, 这样才能更全面地分析整个复合地基的固结规律。为简化计算, 本文在研究初期取下卧层顶面为排水面, 采用传统的 Terzaghi^[16]一维固结理论对下卧层进行固结计算, 其中竖向排水距离的确定采用谢康和^[18]的改进方法。在求取整个复合地基的固结度时, 采用 Hart^[19]等首先提出的按加固区以及下卧层厚度进行加权平均的方法。

3 双层地基法整体固结模型

上文下卧层的固结计算方法简便易行, 但具体计算时取下卧层顶面(加固区底面)为透水面, 即该水平面上孔隙水压力恒为零, 这与加固区计算得到的该处的孔压不相连续, 具有明显的间断性^[20], 与实际情况存在误差, 影响计算精度。

因此本文将排水粉喷桩加固区三维固结实行一维固结等效换算, 与下卧层一起按双层地基一维固结理论^[18]进行编程计算, 以克服上面简化方法的不足。

在进行加固区等效时, 参考文献[21]砂井处理区一维等效方法, 根据固结度相等的假设, 由式(14), 以及一维 Terzaghi 固结度计算公式可以得到

$$\left[\frac{M^2 c_v}{H_1^2} + \frac{8c_h}{(F_a + D)d_c^2} \right] \alpha_E = \frac{M^2 c_v'}{H_1^2}, \quad (16)$$

转换后为

$$c_v' = \left[c_v + \frac{8H_1^2 c_h}{(F_a + D)d_c^2 M^2} \right] \alpha_E \approx \left[c_v + \frac{32H_1^2 c_h}{(F_a + D)d_c^2 \pi^2} \right] \alpha_E, \quad (17)$$

式中, c_v' 即为等效后的加固区竖向固结系数。

4 计算实例

4.1 计算参数

为验证理论推导公式、简化整体算法和双层地基法在排水粉喷桩复合地基中的适用性, 本文在某高速公路路段进行了排水粉喷桩试验, 取现场土性资料、施工资料计算, 并与实测资料比较。表 1~3 为该地区主要的物理力学指标和粉喷桩、排水板的施工参数。

表 1 软土主要物理力学指标

Table 1 Physico-mechanical properties of soil at test site

分层	层厚 /m	w /%	e_0	γ /(kN·m ⁻³)	E_s /MPa	渗透系数 /(10 ⁻⁷ cm·s ⁻¹)	
						K_h	k_v
加固区	0~13	62.1	1.62	15.8	1.92	4.4	2.2
下卧层	13~28	25.8	0.69	19.3	5.19	4.4	

表 2 粉喷桩参数指标

Table 2 Physico-mechanical properties of DJM column

桩长 /m	桩径 /cm	桩间距 /m	喷灰量 /(kg·m ⁻¹)	压缩模量 E_p /MPa
13	50	2.2	75	150

表 3 排水板参数指标

Table 3 Properties of PVD

板长 /m	板间距 /m	芯板厚度 /mm	芯板宽度 /mm	渗透系数 /(cm·s ⁻¹)
13	2.2	4.0±0.2	100±2	$\geq 5 \times 10^{-3}$

4.2 计算结果

上文加固区、下卧层的固结理论计算公式都假设荷载为一次瞬间施加。实际工程中, 荷载总是分级逐渐施加的, 因此这里采用改进的 Terzaghi 法^[22]对不同时期的固结度加以修正, 假定每一级荷载增量所引起的固结过程是单独进行的, 和上一级或下一级荷载增量所引起的固结无关, 得到结果如下。

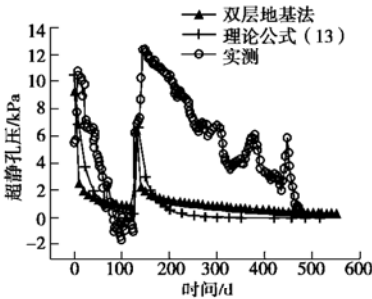


图 3 超静孔压消散曲线(2.5 m 处)

Fig. 3 Variation of the measured and calculated excess pore pressure with time

(1) 孔压

图 3 是 2.5 m 深度处式(11)、双层地基法计算以及现场实测得到的超静孔压消散曲线, 其中现场孔压计的埋设位置在两根排水板之间, 而理论值则取该土层的平均孔压。结果表明, 两种理论方法得到的孔压非常接近, 并与实测孔压消散规律相似; 理论计算的孔压值低于实测值, 原因之一是本文采用的初始孔压, 高估了粉喷桩在地基中刚度的发挥程度, 实际土体承担的荷载比 q_{s0} 大; 加载完成后理论计算的固结速率更快, 原因是本文虽然考虑了井阻和涂抹, 但是没有考虑排水板的通水量随时间的衰减, 另外排水粉喷桩复合地基中, 排水板的间距往往大于常规排水板地基的

间距,也会高估排水板的排水效果;实际工程中排水板的排水速率要比理想中的排水板慢。

(2) 固结度

根据上文的方法,分别计算加固区、下卧层平均固结度随时间的增长规律曲线(图4,5)。另外本文采用 Asaoka 法^[23]由现场实测沉降预测得到整个复合地基的最终沉降量,通过实测沉降与该最终沉降的比值推算了地基的整体固结度发展规律,与两种理论方法得到的整体固结度进行了比较(如图6)。

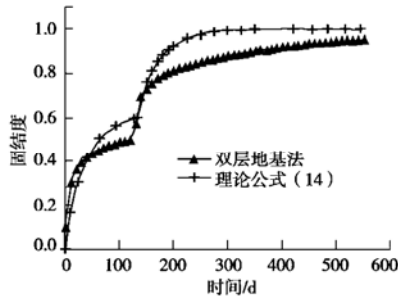


图4 加固区固结度随时间的增长曲线

Fig. 4 Variation of consolidation degree of the improved foundation

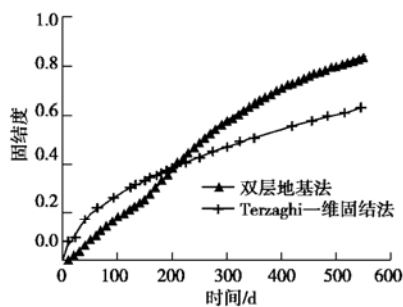


图5 下卧层固结度随时间的增长曲线

Fig. 5 Variation of consolidation degree of the underlying layer

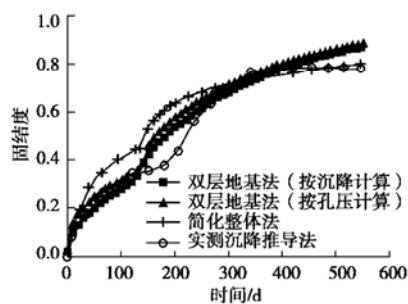


图6 整体固结度随时间的增长曲线

Fig. 6 Variation of consolidation degree of the composite foundation

图4,5显示加固区的固结速率要明显快于下卧层,这与现有复合地基固结研究规律是一致的。同一时刻,双层地基法加固区计算结果稍低于式(14),而下卧层的固结度在后期则比 Terzaghi 一维固结计算结果提高更快。这是由于双层地基法考虑了加固区、下卧层孔压的连续性,上下土层之间形成的孔压差更利于孔压的消散,故下卧层固结度提高更快,而同时下卧土层

中的孔隙水向加固区迁移,延缓了加固区孔压的消散,所以固结过程也相应放慢。

由于两种方法在加固区、下卧层固结度的大小关系正好相反,所以最后两种方法得到的整体固结度规律接近。现场试验段在各级加载完成后存在沉降滞后现象,表现为由实测沉降推算的固结度增长也滞后,但随之很快提高;与理论计算规律一致。总体而言,本文提出的加固区固结计算模型,以及据此等效得到的双层地基模型均可基本模拟排水粉喷桩复合地基的固结增长规律;而从机理上来说,双层地基法考虑了上下土层固结度增长的连续性,因此更能反映实际工程中加固区、下卧层以及整个地基的固结特性。

5 结 论

针对排水粉喷桩复合地基这种新型地基处理工法,提出了相应的加固区固结理论计算模型;对下卧层采用 Terzaghi 一维固结理论简化计算,得到地基整体的固结简化计算模型;考虑下卧层、加固区孔压的连续性,将加固区模型一维等效,采用双层地基模型进行整体固结计算。两种计算方法得到的超静孔压消散规律,固结度增长规律以及沉降历时曲线与现场实际情况吻合较好;验证了模型的适用性。

参考文献:

- [1] 刘松玉,杜广印,洪振舜,吴燕开. 排水粉喷桩加固软土地基(2D 工法)的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(8): 870 - 875. (LIU Song-yu, DU Guang-yin, HONG Zhen-shun, WU Yan-kai. One combined method of dry mixing with vertical drain and its practice in soft ground improvement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(8): 870 - 875. (in Chinese))
- [2] 吴燕开. 排水粉喷桩(2D 工法)加固软土地基原理与应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2005. (WU Yan-kai. Research of the mechanism and application reinforced soft soil by drain and dry jet mixing[D]. Nanjing: Southeast University, 2005. (in Chinese))
- [3] 谢康和. 复合地基固结理论研究现状与发展[J]. 地基处理, 1993, 4(3): 1 - 14. (XIE Kang-he. Present situation and development of consolidation theory of composite ground[J]. Ground Improvement, 1993, 4(3): 1 - 14. (in Chinese))
- [4] BARRON R A. Consolidation of fine grained soils by drain wells [J]. Transactions of ASCE, 1948, 113: 718 - 742.
- [5] HANSBO S. Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains[C]// Proc 10th ICSMFE, Stockholm, 1981: 677 - 682.
- [6] XIE K H, ZHU X R, PAN Q Y, ZENG G X. Recent studies on

- the smear action of vertical drains[C]// Proc of Int Conference on Geotechnical Eng. and Earthquake Resistant Technology in Soft Areas, 1993: 92 - 99.
- [7] TANG X W ONITSUKA K. Rigorous solutions of vertical drains considering radial and vertical flow under equal condition[C]// 31st Annual Conference of Japanese Geotechnical Society, 1996: 633 - 634.
- [8] TANG X W. A study for consolidation of ground with vertical drain system [D]. Japan: Saga University, 1998.
- [9] 韩 杰, 叶书麟. 考虑井阻和涂抹作用碎石桩复合地基固结度计算[C]// 第三届全国地基处理学术讨论会论文集. 杭州: 浙江大学出版社, 1992: 351 - 358. (HAN Jie, YE Shu-lin. Calculation for consolidation degree of gravel-pile composite foundation considering well resistance and smearing[C]// Proceedings of the 3rd Chinese Conference on Soil Improvement. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1992: 351 - 358. (in Chinese))
- [10] 郑俊杰, 刘志刚, 吴世明. 石灰桩复合地基的固结分析[J]. 华中理工大学学报, 2000, **28**(5): 111 - 113. (ZHENG Jun-jie, LIU Zhi-gang, WU Shi-ming. Consolidation analysis of composite ground with lime-flyash pile[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2000, **28**(5): 111 - 113. (in Chinese))
- [11] 王瑞春. 竖井地基和散体材料桩复合地基固结解析研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2001. (WANG Rui-chun. Analytical studies on the consolidation of soft clay ground improved by vertical drains or granular columns[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001. (in Chinese))
- [12] 谢康和, 潘秋元, 施淑群, 张曙光. 一种计算搅拌桩复合地基固结沉降的方法[C]// 第二届全国岩石力学数值计算与模型实验学术研讨会论文集. 上海: 同济大学出版社, 1990: 395 - 400. (XIE K H, PAN Q Y, SHI S Q, ZHANG S G. A calculation of the consolidation settlement of mixing-pile composite foundation [C]// Proceedings of the 2nd Chinese Conference on Numerical Simulation and Model Experiment of Rock Mechanics. Shanghai: Tongji University Press, 1990: 395 - 400. (in Chinese))
- [13] 谢康和, 刘一林, 潘秋元, 龚晓南. 搅拌桩复合地基变形分析微机程序开发与应用[C]// 全国土木工程青年科技工作者计算机应用研讨会论文集. 南京: 东南大学出版社, 1991. (XIE K H, LIU Y L, PAN Q Y, GONG X N. Development and application of deformation analysis program of mixing-pile composite foundation[C]// Proceedings of Chinese Conference on Computer Application by Young Researchers of Civil Engineering, Nanjing: Southeast University Press, 1991. (in Chinese))
- [14] XIE K H, GEO P, XIE X Y. Consolidation theory for soft clays reinforced by cement or granular columns[J]. Computer Method and Advances in Geomechanics, 2001: 1263 - 1268.
- [15] 徐 洋. 复合地基固结与变形的计算理论及数值分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2004. (XU Yang. Computational theory and numerical analysis for consolidation and deformation of composite foundation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese))
- [16] TERZAGHI K. Theoretical Soil Mechanics[M]. New York: John Wiley and Sons, 1943.
- [17] CHAI J C, MIURA N. Investigation of factors affecting vertical drain behavior[J]. Geotech and Geoenviron Engrg, ASCE, 1999, **125**(3): 216 - 226.
- [18] 谢康和. 双层地基一维固结理论与应用[J]. 岩土工程学报, 1994, **16**(5): 24 - 35. (XIE Kang-he. Theory of one dimensional consolidation of double-layered ground and its applications[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1994, **16**(5): 24 - 35. (in Chinese))
- [19] HART E G, KONDNER R L, BOYER W C. Analysis for partially penetrating sand drains[J]. Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, Proceedings of ASCE, 1958, **1812**: 1 - 15.
- [20] 郝玉龙, 陈云敏, 王 军. 深厚软土未打穿砂井超载预压地基孔隙水压力消散规律分析[J]. 中国公路学报, 2002, **15**(2): 36 - 39. (HAO Yu-long, CHEN Yun-min, WANG Jun. Consolidation analysis for partially penetrating sand drain ground preloaded by surcharge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, **15**(2): 36 - 39. (in Chinese))
- [21] 陈根媛. 多层地基的一维固结计算方法与砂井地基计算的改进建议[J]. 水利水运科学研究, 1984, **5**(2): 1 - 3. (CHEN Gen-yuan. One-dimensional consolidation of layered systems and a suggestion for improving calculation of sand-drained subsoil[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Research Institute, 1984, **5**(2): 1 - 3. (in Chinese))
- [22] 《地基处理手册》编写委员会. 地基处理手册[M]. 第二版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000: 78 - 79. (The Compiling Committee of the Handbook of Foundation Yreatment. The handbook of foundation treatment [M]. 2nd edition. Beijing: China Architecture and Building Press, 2000: 78 - 79. (in Chinese))
- [23] LIU Song-yu, JING Fei. Settlement prediction of embankments with stage construction on soft ground [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(2): 228 - 232.