

文章编号: 1673-9469 (2019) 03-0026-07

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.03.006

井阻对砂井地基固结作用的影响

许天鑫^{1, 2}, 朱俊高^{1, 2}, 龚选³

(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; 3. 山西保利房地产开发有限公司, 山西 太原 030006)

摘要: 针对不同渗透系数、不同深度及不同半径砂井的地基, 分别进行了砂井地基有限元固结计算, 将考虑井阻作用的砂井地基固结有限元模拟结果与巴隆理想井固结解进行对比, 分析井阻作用对砂井地基固结的影响程度, 论证了砂井或排水板地基设计时适当考虑井阻或排水能力的必要性。研究表明: (1) 砂井的渗透系数越小, 相同时间条件下砂井地基所达到的平均固结度越小; 同样, 相同固结度条件下所需的固结时间越长, 即井阻作用越明显; 砂井处理的土层深度越大, 井阻作用的影响也更为显著; (2) 井阻作用对地基固结度及固结时间的影响不可忽视, 在有限元模拟参数条件下, 对应相同固结时间, 当理想井固结度达到 80% 时, 考虑井阻情况的固结度为 13% ~ 67%, 相对于理想井固结度的相对误差 16% ~ 83%; 对应相同固结度, 当固结度达到 80% 时, 考虑井阻情况相对于理想井的固结时间相对误差均大于 50%。

关键词: 砂井; 井阻; 有限元; 固结

中图分类号: TG472.33

文献标识码: A

Influence of Drain Resistance on Consolidation of Sand Drain Foundation

XU Tianxin^{1, 2}, ZHU Jungao^{1, 2}, GONG Xuan³

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 3. Shanxi Poly Real Estate Development Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030006, China)

Abstract: For the foundations of sand drains with different permeability coefficients, different depths and different radii, the finite element consolidation calculation of the sand drain foundation was carried out. The finite element simulation results of the consolidation of the sand drain foundation considering the drain resistance are compared with the ideal solution of the Barron ideal drain. The influence degree of drain resistance on the consolidation of sand drain foundation was analyzed, and the necessity of properly considering drain resistance or drainage capacity when designing sand drain or drainage board foundation was demonstrated. The research shows that, (1) The smaller the permeability coefficient of the sand drain is, the smaller the degree of consolidation achieved under the same time conditions will be; similarly, the longer the time required for the same consolidation degree is, the more obvious the drain resistance effect will become. And the deeper the soil reinforcement is, the more significant influence of the drain resistance effect will be; (2) The influence of drain resistance on the consolidation degree of foundation and the consolidation time of foundation can not be ignored. Under the finite element simulation parameters of this paper, corresponding to the same consolidation time, when the ideal drain consolidation degree reaches 80%, the consolidation degree considering the drain resistance

收稿日期: 2019-09-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51479052)

作者简介: 许天鑫 (1995-), 男, 浙江杭州人, 硕士研究生, 从事土体渗流等方面的研究。

is 13% ~ 67%, and the relative error relative to the ideal drain consolidation degree is 16% ~ 83%. Corresponding to the same degree of consolidation, when the degree of consolidation reaches 80%, the relative error of the consolidation time relative to the ideal drain is greater than 50%.

Key words: sand drain ; drain resistance ; finite element ; consolidation

利用排水固结法处理软土地基时,竖向排水通道常采用塑料排水板、普通砂井和袋装砂井^[1]。在砂井地基中,砂井材料的渗透性(渗透系数一般为 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ cm/s)一般远大于粘土(渗透系数一般为 $10^{-6} \sim 10^{-9}$ cm/s),砂井缩短了地基土的排水距离,加速了土层的固结^[2]。但砂井的透水能力毕竟是有限的,因此,设置砂井的软粘土地基,在固结过程中从砂井向外排出的水流将会受到一定的阻力,这一现象称为井阻作用。对塑料排水板,同样会因为不同程度的淤堵存在排水能力下降的问题,类似于井阻现象。对于考虑井阻的非理想井的径向固结理论,前人已作过大量研究。Barron^[3]首次建立了在自由应变及等应变条件下考虑井阻作用的竖井理论。Yoshikuni等人^[4]建立了更为严密的自由应变条件下考虑井阻作用的竖井理论。Hansbo^[5]得到了等应变条件考虑井阻作用的竖井地基固结理论解。王贻荪^[6]提出了自由应变条件下,考虑井阻对砂井地基固结影响的折减井径法。谢康和^[7]鉴于固结理论解析解存在的一些缺陷,提出了等应变条件下考虑井阻作用的竖井地基固结问题的精确解以及简便实用的径向平均固结度的计算式。卓文泽等^[8]提出了砂井地基平面化等效渗透系数计算方法。黄朝煊等^[9]建立了考虑漏气影响且排水体渗透系数随深度线性衰减及时间指数衰减时的真空预压地基固结解析解。张驿等^[10]引入连续排水边界条件,建立了考虑涂抹及井阻效应的解析解。可见,非理想井固结解析理论已较多,但在实际进行砂井地基设计时^[11],大多视砂井为理想井。那么,实际工程中如果不考虑井阻到底会引起多大的误差,这种误差能否被忽略,相关研究较少。研究井阻对砂井地基固结作用的影响程度,对于实际砂井地基工程设计、保证砂井地基处理达到预期效果具有重要意义。

另一方面,已有的非理想井固结解析一般都基于若干假定导出,即使Yoshikuni等人^[4]建立的被认为是目前最为严密的解析解,也有若干假定,而且,由于其解答极为复杂,实际计算时只能利用数值计算方法对固结分析中所需的各量(如平均固结度)进行计算。因此,本文对考虑砂井井阻的地基进行

有限元计算。将不同渗透系数、不同半径、不同深度条件下砂井的有限元模拟结果与双向渗流条件下的巴隆等应变轴对称固结解进行对比,分析井阻的影响效应,为砂井或排水板地基工程设计提供参考。

1 固结理论及有限元模型

1.1 砂井地基固结理论

假定砂井打穿软土层,底面为不透水边界。无论是三角形布置还是四边形布置,砂井地基固结均可简化为图1所示的单井。图中 H 为砂井深度, r_w 为砂井半径, r_e 为砂井影响区半径, k_r 、 k_v 分别为地基土的径向、竖向渗透系数(本文假定 $k_r=k_v$), k_w 为砂井渗透系数。

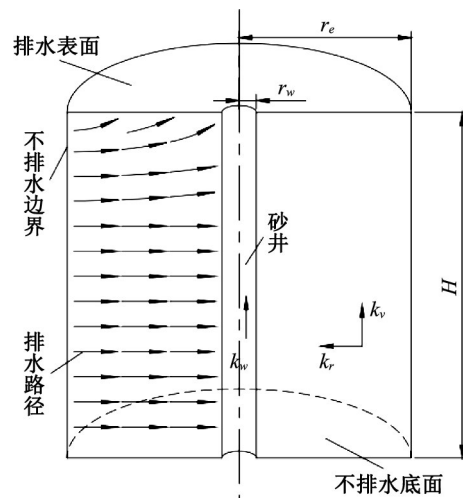


图1 砂井地基固结示意图

Fig.1 Schematic diagram of consolidation of sand drain foundation

本文采用双向渗流条件下的巴隆等应变轴对称固结解^[12]。地基平均固结度表达式为:

$$U = 1 - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-K_m t} \quad (1)$$

上式中:

$$K_m = \frac{M^2 n^2 \mu}{M^2 n^2 u + (n^2 - s^2) G} \frac{2C_{vr}}{r_e^2 \mu} + \frac{M^2 C_{vz}}{H^2}$$

$$\mu = \frac{n^2}{n^2 - s^2} \ln \frac{n}{s} - \frac{3n^2 - s^2}{4n^2} + \frac{k_r}{k_s} \frac{n^2 - s^2}{n^2} \ln s$$

$$G = \frac{2k_r H^2}{k_w r_w^2}, \quad M = \frac{(2m-1)\pi}{2} \quad (2)$$

式中: $n = r_e/r_w$ 为井径比; C_{vr} 、 C_{vz} 为地基土的径向、竖向固结系数, 本文假定两者相等; k_s 为涂抹区渗透系数, 本文不考虑涂抹作用, 假定 $k_s = k_r$, $s = 1$ 。

如果不考虑井阻的影响, 即为理想井, $k_w = \infty$,

$$G = 0, \quad K_m = \frac{2C_{vr}}{r_e^2 \mu}。$$

本文利用巴隆固结解析解计算地基土固结系数 C_v 时, 假定土体为理想弹性体, 按式 (3) 计算:

$$C_v = \frac{k}{m_v \gamma_w} = \frac{kE_s}{\gamma_w} = \frac{kE}{\left(1 - \frac{2\nu^2}{1-\nu}\right)\gamma_w} \quad (3)$$

式中: k 为地基土的渗透系数; γ_w 为水的重度, 取 10 kN/m^3 ; m_v 为体积压缩系数; E_s 为压缩模量; E 为弹性模量; ν 为泊松比。

1.2 砂井地基有限元模型

为了研究井阻作用对砂井地基固结的影响, 本文对 5 种不同的砂井渗透系数 k_w (0.001、0.005、0.01、0.05、100 cm/s)、4 种不同的砂井深度 H (2、5、8、10 m)、4 种不同的砂井半径 r_w (0.02、0.03、0.04、0.05 m) 共 80 种情况进行了有限元模拟。

其中, 砂井渗透系数取 0.001、0.005、0.01、0.05 cm/s 为模拟有井阻情况, 而 $k_w=100 \text{ cm/s}$ 为不考虑井阻情况, 即没有井阻。并且已验证当 $k_w > 100 \text{ cm/s}$ 时, 继续增大 k_w 对砂井地基固结几乎没有影响。关于砂井半径, 本文主要是考虑塑料排水板的等效半径, 因此, r_w 的取值为 0.02 ~ 0.05 m。

对图 1 所示的砂井计算模型采用 ABAQUS 软件进行有限元固结计算。取单井影响范围内土体为对象建立模型, 根据对称性取 1/4 区域进行模拟, 三维模型半径为 0.5 m, 深度根据模拟方案有 4 种情况, 各个模型砂井深度与地基土厚度相同, 地基土的径向、竖向渗透系数 k_r 、 k_v 取值为 $5 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 。砂井和地基土均采用 C3D8P 八节点六面体单元。建模过程中地基土和砂井均简化为连续介质, 并采用线弹性模型模拟^[13], 地基土的弹性模量和泊松比分别取 5 MPa 和 0.30; 砂井的弹性模量和泊松比分别取 10 MPa 和 0.35。有限元模型的边界条件: 砂井地基模型侧面边界仅允许有竖向位移, 底部边界 3 个方向位移均为 0, 模型顶面为排水边界, 其孔压为 0, 其他面均为不排水边界。初始条件: 模型中各单元

初始位移为 0, 初始孔隙比为 1.0。荷载条件: 荷载一次性在模型顶面瞬时施加, 所施加均布荷载大小为 0.1 MPa。有限元计算模型简图如图 2 所示。

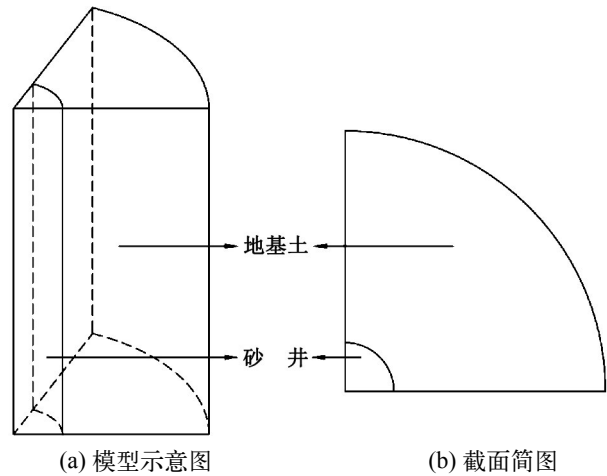


图 2 有限元计算模型简图

Fig.2 Finite element calculation model diagram

由有限元模拟结果, 整理出土层顶面圆心处经过时间 t 后的沉降量 S_t , 以及最终沉降量 S 。由式 (4) 计算地基平均固结度:

$$U = \frac{S_t}{S} \quad (4)$$

2 砂井地基中的井阻作用

2.1 有限元模拟与巴隆解的固结度比较

将有限元模拟的砂井地基固结曲线 (固结度 U 与时间因数 T_v 关系曲线) 与双向渗流条件下的巴隆等应变轴对称固结解 (考虑井阻、不考虑井阻) 进行对比。因模拟情况较多, 仅给出了 $k_w=0.001 \text{ cm/s}$, $r_w=0.02 \text{ m}$, $H=5、8 \text{ m}$ 条件下的有限元模拟与巴隆解固结度比较, 如图 3 所示。

由图 3 可以看出, 有限元模拟结果与巴隆解的固结度变化规律一致, 其中考虑井阻的有限元模拟结果与考虑井阻的巴隆解基本吻合, 且不考虑井阻的有限元模拟结果也与不考虑井阻的巴隆解相差不大。考虑到巴隆解做了多项假定, 存在错误或不足之处, 从而产生了图 3 中巴隆解与有限元模拟之间的偏差。由此可见, 本文有限元模拟具有合理性、可靠性。

2.2 井阻作用对地基固结度及固结时间的影响

井阻与砂井的实际排水能力密切相关, 而砂井的实际排水能力取决于砂井材料的渗透系数 k_w 。因

此,不同大小的渗透系数存在不同井阻作用。为研究井阻大小对固结的影响,进行了不同砂井渗透系数情况的计算。

因模拟情况较多,图4仅给出了 $r_w=0.05$, $H=2$ m和 $r_w=0.02$, $H=10$ m两种情况下不同砂井渗透系数的模拟结果(考虑井阻)与巴隆理想井(不考虑井阻)的固结度比较。

由图4可以看出,在不同砂井深度 H 、砂井半径 r_w 条件下,渗透系数对地基固结的影响程度有较大差异。在 $r_w=0.05$ m, $H=2$ m条件下,不同砂井渗透系数的固结曲线相差较小,且与理想井相差不大,井阻作用影响较小,而在 $r_w=0.02$ m, $H=10$ m条件下,不同砂井渗透系数的固结度有较大差异,且渗透系数为 0.001 cm/s的固结度与理想井相差很大,说明井阻作用对砂井地基固结的影响非常明显。

图5以 $r_w=0.03$ m为例,给出了在 $U=50\%$ 、 80% 、 90% 条件下 k_w 、 H 和固结时间 t 的关系曲线。可以看出,砂井半径 r_w 一定时,砂井渗透系数 k_w 越小,砂井深度 H 越大,达到相同固结度 U 所

需时间 t 越大。在 $U=50\%$, $H=10$ m, $k_w=0.001$ cm/s时,所需固结时间 $t=10.20$ d,是同条件下不考虑井阻作用 $t=0.57$ d的17.9倍;在 $U=80\%$, $H=10$ m, $k_w=0.001$ cm/s时,所需固结时间 $t=30.83$ d,是同条件下不考虑井阻作用 $t=1.41$ d的21.9倍;在 $U=90\%$, $H=10$ m, $k_w=0.001$ cm/s时,所需固结时间 $t=46.56$ d,是同条件下不考虑井阻作用 $t=2.06$ d的22.6倍。

为了更直观地展现井阻作用对砂井地基固结的影响程度,由不考虑井阻作用的巴隆固结解和考虑井阻作用的有限元模拟所得的平均固结度分别为 U 和 U' ,其相对偏差用固结度偏差 p_u 表示^[14]。有

$$p_u = \left| \frac{U - U'}{U} \right| \times 100\% \quad (5)$$

根据上面的表达式分别计算各条件下 $U=50\%$ 、 80% 的时间,得到相同固结度时有限元模拟砂井地基固结所能达到的平均固结度 U' ,计算相对偏差 p_u 。绘制不同 r_w 条件下的 $U=50\%$ 、 80% 时的 k_w 、 H 和 p_u 的关系曲线,见图6所示(仅给出 $r_w=0.02$ m、

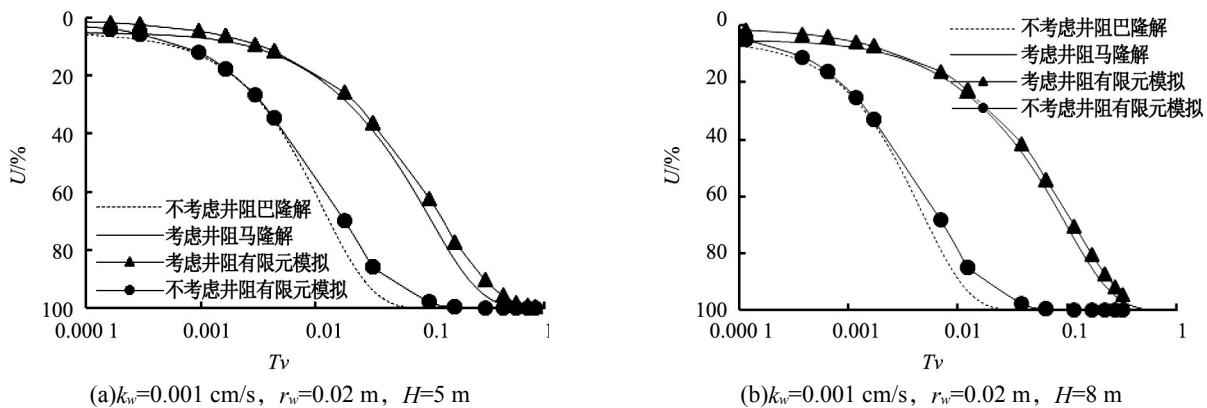


图3 有限元模拟与巴隆解固结度比较

Fig.3 Comparison of finite element simulation and Baron solution

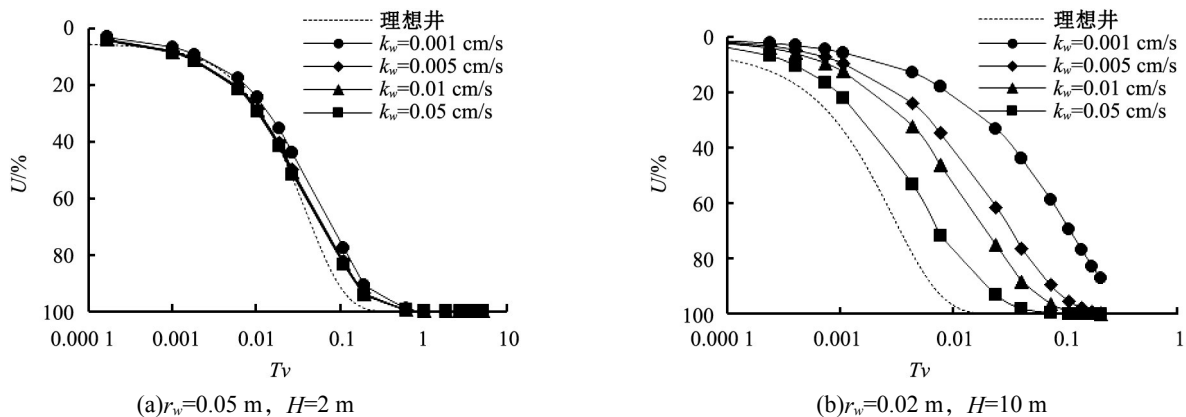
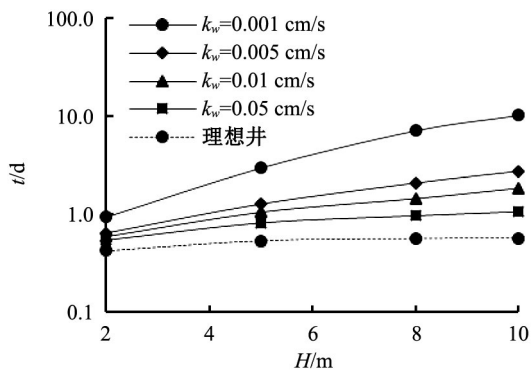
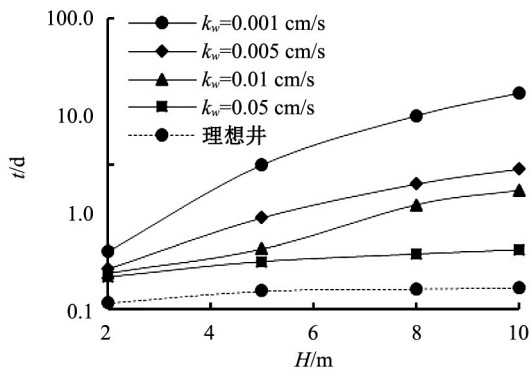
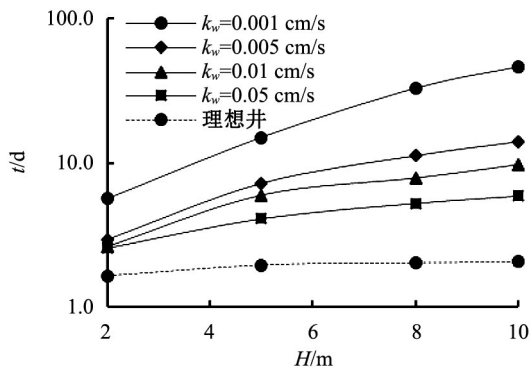


图4 不同砂井渗透系数条件下固结度比较

Fig.4 Comparison of consolidation degree under different sand drain permeability coefficients

(a) $U=50\%$, $r_w=0.03$ m(b) $U=80\%$, $r_w=0.03$ m(c) $U=90\%$, $r_w=0.03$ m图5 k_w 、 H 和 t 的关系曲线Fig.5 k_w , H , and t relationship curve

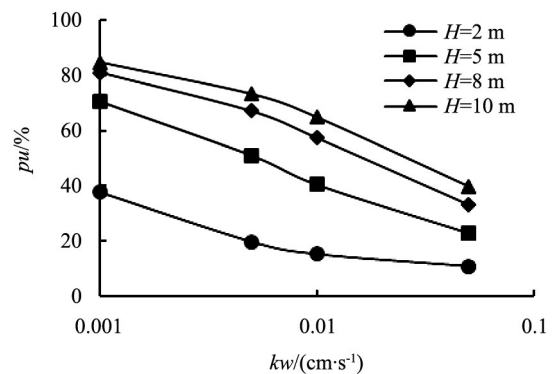
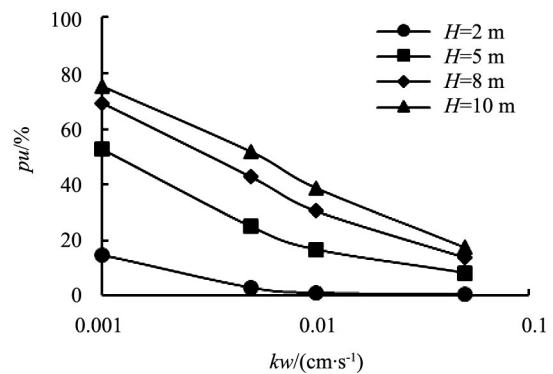
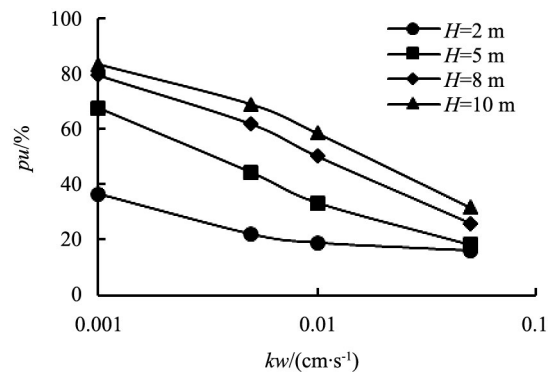
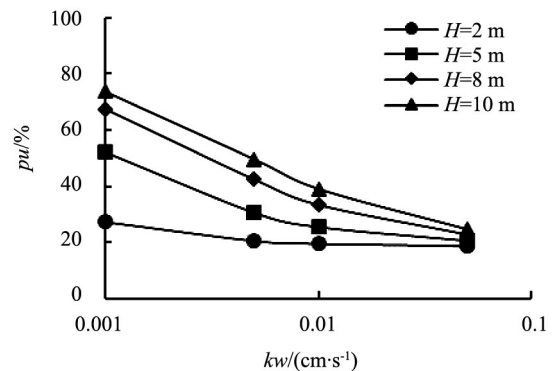
0.05 m 情况)。

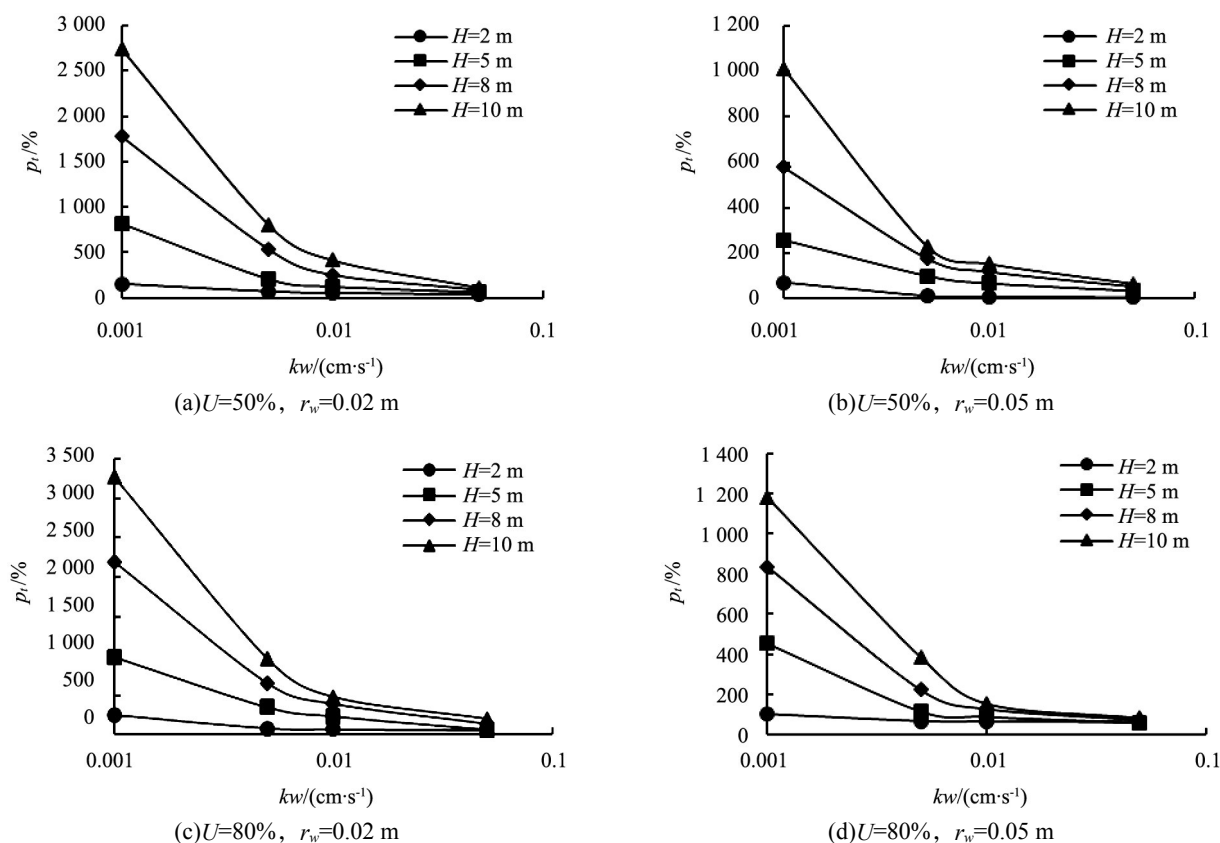
用不考虑井阻作用的巴隆固结解与有限元模拟同时达到固结度 $U=50\%$ 、 80% 时, 所需时间的偏差 p_t 来展现井阻作用对固结时间的影响^[14]。有

$$p_t = \left| \frac{t - t'}{t} \right| \times 100\% \quad (6)$$

绘制不同 r_w 条件下的 $U=50\%$ 、 80% 时的 k_w 、 H 和 p_u 的关系曲线, 见图 7 所示 (仅给出 $r_w=0.02$ m、 0.05 m 情况)。

由图 6、图 7 可以看出: 当 U 、 r_w 一定时, k_w 越小, 所产生的 p_u 、 p_t 越大, 即井阻作用越明显; 且 H 越大,

(a) $U=50\%$, $r_w=0.02$ m(b) $U=50\%$, $r_w=0.05$ m(c) $U=80\%$, $r_w=0.02$ m(d) $U=80\%$, $r_w=0.05$ m图6 k_w 、 H 和 p_u 的关系曲线Fig.6 k_w , H , and p_u relationship curve

图7 k_w 、 H 和 p_t 的关系曲线Fig.7 k_w , H , and p_t relationship curve表1 p_u , p_t 统计表Tab.1 p_u , p_t statistics table

$k_w/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$	$U/\%$	$H=2\text{ m}$		$H=5\text{ m}$		$H=8\text{ m}$		$H=10\text{ m}$	
		$p_u/\%$	$p_t/\%$	$p_u/\%$	$p_t/\%$	$p_u/\%$	$p_t/\%$	$p_u/\%$	$p_t/\%$
0.001	50	15 ~ 38	71 ~ 155	53 ~ 71	258 ~ 818	69 ~ 81	>500	75 ~ 85	>1 000
	80	27 ~ 36	102 ~ 251	52 ~ 67	453 ~ 985	67 ~ 79	>800	74 ~ 83	>1 000
0.005	50	3 ~ 20	12 ~ 72	25 ~ 51	100 ~ 206	43 ~ 67	175 ~ 532	52 ~ 73	228 ~ 800
	80	20 ~ 22	67 ~ 81	30 ~ 44	115 ~ 384	42 ~ 62	223 ~ 654	50 ~ 69	386 ~ 965
0.01	50	1 ~ 15	8 ~ 55	17 ~ 40	67 ~ 125	31 ~ 57	118 ~ 255	39 ~ 65	153 ~ 415
	80	19 ~ 20	64 ~ 67	25 ~ 33	87 ~ 232	33 ~ 50	126 ~ 392	39 ~ 58	153 ~ 481
0.05	50	0 ~ 11	5 ~ 39	8 ~ 23	34 ~ 62	14 ~ 33	53 ~ 89	17 ~ 40	65 ~ 111
	80	16 ~ 18	55 ~ 62	18 ~ 20	58 ~ 64	23 ~ 26	72 ~ 139	25 ~ 31	82 ~ 204

k_w 对 p_u 、 p_t 的影响越显著。

根据以上数据, 对各条件下的 p_u 、 p_t 进行统计, 统计结果见表1所示。

根据表1统计结果, 在本文模拟参数条件下, $U=50\%$ 时, 仅有少数情况下 p_u 小于10%, 而在 $U=80\%$ 时, p_u 均大于15%, 最大高达83%, 井阻作用对地基固结的影响较为显著, 值得我们注意及考虑; 对于地基固结时间, 在 $U=50\%$ 时, p_t 仅有少数

情况小于50%, 在 $U=80\%$ 时, p_u 均大于50%, 且有多数情况下井阻作用将使地基固结时间较理想并多出一倍以上, 这将大幅延长砂井地基的固结时间, 大大降低工效。

3 结论

1) 在本文有限元模拟参数条件下, 相比于理想

井,考虑井阻情况时砂井渗透系数越小,由井阻作用所引起的固结度偏差 p_u 、时间偏差 p_t 越大,即井阻作用越明显;且砂井处理的土层深度越大,井阻作用的影响也更为显著。

2) 井阻作用对地基固结度及固结时间的影响不可忽视,在本文有限元模拟参数条件下,对应相同固结时间,当理想井 $U=80\%$ 时,考虑井阻情况的固结度 U' 为 $13\% \sim 67\%$,相对于理想井固结度偏差 p_u 为 $16\% \sim 83\%$;对应相同固结度,当 $U=80\%$ 时,考虑井阻情况相对于理想井的时间偏差 p_t 均大于 50% 。建议在实际工程中使用渗透系数较大的砂井材料、排水能力较好的塑料排水板,尽可能地减小井阻作用对地基固结的影响,且在砂井或排水板地基设计时,寻求简单、实用、可靠的,考虑井阻作用影响的设计方法。

参考文献:

- [1] 鲁虹君. 黑龙江省季冻区软土地基处理综合评价研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2018.
- [2] 龚晓南. 地基处理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [3] BARRON R A. Consolidation of fine grained soils by drain wells[J]. Transactions ASCE, 1948, 113: 718-742.
- [4] YOSHIKUNI H, NAKANODO H. Consolidation of soils by vertical drain wells with finite permeability[J]. Soils and Foundations, 1974, 14(2): 35-46.
- [5] HANSBO S, JAMIOLKOWSKI M, KOK L. Consolidation by vertical drains[J]. Geo technique, 1981, 31(1): 45-46.
- [6] 王贻荪. 考虑砂井阻力的折减井径法[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(3): 43-51.
- [7] 谢康和. 砂井地基: 固结理论、数值分析与优化设计[D]. 杭州: 浙江大学, 1987.
- [8] 卓文泽, 周 斌. 河内 - 海防公路软基渗透性及差异沉降研究[J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2015, 32(1): 14-18.
- [9] 黄朝煊, 王正中, 方咏来. 考虑漏气及井阻非线性真空预压地基固结解析解[J]. 岩土力学, 2017, 38(9): 2574-2582.
- [10] 张 驿, 吴文兵, 梅国雄, 等. 基于连续排水边界条件的砂井地基固结解析解[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(2): 90-97.
- [11] 阮红兵, 沈才华, 徐 科, 等. 越南高速公路砂井地基处理方法优化研究[J]. 公路工程, 2014, 39(3): 56-59.
- [12] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [13] 万东阳. 真空预压竖井地基固结解析解及数值分析[D]. 郑州: 中原工学院, 2019.
- [14] 高长胜, 汪肇京, 魏汝龙. 井阻和涂抹作用在排水板地基设计中的应用[J]. 水利水运工程学报, 1999(3): 213-221.

(责任编辑 王利君)