

文章编号: 0451- 0712(2003)11- 0056- 05

中图分类号: TU 472 33

文献标识码: A

袋装砂井处理软土地基中砂井间距计算方法探讨

彭 勇¹, 史玉金²

(1. 同济大学交通工程学院 上海市 200092; 2. 上海市地质调查研究院 上海市 200072)

摘 要: 基于砂井地基固结理论的基础, 建立了关于袋装砂井地基的 3 个非理想因素的非理想综合参数, 利用解析方法, 提出了用图表法来计算袋装砂井的间距值, 制出了理想井与非理想井井径比用表, 并用此方法对广东西部沿海高速公路新会段软基处理段的袋装砂井间距进行了计算, 得出了既经济又合理的间距值。

关键词: 软土地基; 袋装砂井; 间距; 计算方法; 非理想综合参数

国内外在大量采用袋装砂井排水固结法处理软土地基的过程中, 越来越清楚地认识到, 袋装砂井间距是影响砂井地基固结速率的主要因素, 它的确定直接关系着经费预算和施工期确定的合理性。目前关于砂井地基的固结理论国内外都做了深入的研究, 但对于袋装砂井间距的计算还没有一套完整的方法。50 多年来, 砂井地基的固结理论有了很大的发展, 计算机的出现和应用, 使得砂井地基的固结分析又从解析法发展到差分法, 甚至产生了不再局限于仅考虑单口砂井的有限元法。然而简单实用的解析法, 特别是等应变条件下的解析理论, 仍然在实际砂井工程中应用最广。此外, 由于袋装砂井长细比大、井本身排水能力有限以及砂井施工对井周围的扰动, 由此产生的井阻和涂抹作用等影响着地基的固结速率。因此, 包括井阻和涂抹作用等在内的非理想井排水固结理论的研究和应用已势在必行。

1 等应变条件下非理想井的排水固结理论

非理想井排水固结数学模型:

竖井(打穿软土层)地基在瞬时加荷及巴隆(Barron)等应变条件下, 考虑井阻作用、涂抹作用(涂抹区土渗透性和压缩性与原状土不同)以及径向组合渗流的固结微分方程如下。

$$\frac{k_v}{\gamma_w} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} + \frac{k_s}{\gamma_w} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \bar{u}_s}{\partial r} \right) = \frac{1}{E_c} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \quad r_w \leq r \leq r_s$$

$$\frac{k_v}{\gamma_w} \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} + \frac{k_h}{\gamma_w} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \bar{u}_s}{\partial r} \right) = \frac{1}{E_c} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \quad r_s \leq r \leq r_c$$

由此可得到竖井地基任意时刻 t 深度 z 之固结度 U_{rz} 及整个软土层之平均固结度 $\bar{U}_{rz}$:

$$U_{rz} = 1 - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{M} \sin \frac{M}{H} z e^{-\beta_m^2 t}$$

$$\bar{U}_{rz} = 1 - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-\beta_m^2 t}$$

$$M = \frac{2m-1}{2} \pi, \quad m = 1, 2, 3, \dots$$

用这种模型计算出的固结度不仅能考虑井阻作用和由于涂抹区土体渗透性低于原状土而对固结产生的影响, 还能考虑由于涂抹区土体压缩性不同于原状土而对固结产生的影响, 因而是等应变条件下迄今对井阻和涂抹作用考虑最全面的竖井排水固结理论。

2 袋装砂井地基的非理想综合参数的提出

在实际的工程计算中, 当计算软土地基某深度处的固结度时, 可用下面的近似计算公式:

$$\bar{U}_{rz} = 1 - e^{-F t_h}$$

$F = F_n + F_s + F_r - F_m$, 为一综合参数, 其中 F_n 反

映了井径比 n 的影响, $F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$;

F_s 反映了涂抹、扰动的影响, $F_s = \left(\frac{k_h}{k_s} - 1 \right) \ln s$; F_r 反

映了井阻的影响, $F_r = \pi G = \frac{\pi^2 H^2}{4} \frac{k_h}{q_w}$, 其中, $q_w =$

收稿日期: 2003- 07- 10

$k_w A_w = k_w \pi d_w^2 / 4$, 为竖井通水量; F_m 反映了水动力条件的影响, 因为 F_m 有利于固结排水, 故上式中要带上负号。

可以把综合参数 F 写成: $F = F_n + \xi$, $\xi = F_s + F_r - F_m$ 。如果 F_s, F_r 值越大, F_m 值越小, 则 ξ 值越大, 竖井地基固结就越慢。反之, 地基固结就越快。因此随着 ξ 的增大, 竖井的非理想性就越显著, 亦即 ξ 表征了竖井的非理想性, 本文把它称之为非理想综合参数。

显然, 当 $F_s = F_r = F_m = 0$, 即不存在涂抹、井阻和水动力条件的影响, $\xi = 0$, $\overline{U_r} = 1 - e^{-\frac{8}{F_n} T_h}$, 即为理想井固结度计算公式。如果不考虑水动力条件的影响, 即 $F_m = 0$, 则 $\overline{U_r} = 1 - e^{-\frac{8}{F} T_h}$, 即是等应变条件下汉斯(Hansbo)的非理想井固结度近似计算公式。

在不考虑水动力条件时, 非理想综合参数 ξ 按下式计算:

$$\xi = \left(\frac{k_h}{k_s} - 1 \right) \cdot \ln s + \pi \cdot \frac{k_h}{k_w} \left(\frac{H}{d_w} \right)^2$$

在其它条件都相同的条件下, 非理想综合参数能反映它对袋装砂井地基设计中井径比的影响。非理想综合参数越大, 对于给定的固结度和施工期限, 袋装砂井井径比越小(图 1); 如果砂井直径一定, 则间距就越小。

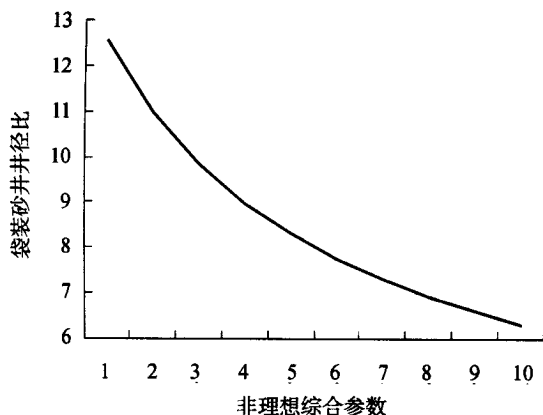


图 1 非理想数与井径比的关系

因此, 利用非理想综合参数, 可以方便非理想井的设计, 制作出非理想井与理想井的对比表, 从而使理想井的设计更为简捷。据统计, 京珠高速公路灵山软基试验段的袋装砂井非理想综合参数为 6.21, 而宁波、温州两机场的分别为 7.2 和 7.6。由此足见袋装砂井非理想性的显著以及在实际工程中考虑竖井非理想性的必要。

3 袋装砂井间距的计算

理论上, 袋装砂井排水固结法的设计是通过试

算法来确定袋装砂井间距的, 计算过程非常复杂。而在实际工程中, 很少有人采取这种方法, 只是利用经验来确定间距。利用袋装砂井地基的非理想综合参数, 制出理想井与非理想井相对应的井径比表, 从而可查出非理想袋装砂井间距值, 此法既方便又好用。制表过程如下。

(1) 理想井井径比用表。

袋装砂井地基的径向固结时间因子:

$$T_h = c_h t / d_e^2$$

式中的 $d_e = n \cdot d_w$, 为砂井的有效影响范围, 根据袋装砂井不同的排列方式, d_e 有不同的取值。对于等边三角形排列的砂井, $d_e = 1.050a$; 对于正方形排列的砂井, $d_e = 1.128a$, 式中的 a 为袋装砂井的间距。

由此, 可把 T_h 写为:

$$T_h = c_h t / (n^2 d_w^2)$$

令 $T_w = c_h t / d_w^2$, 则:

$$T_h = T_w / n^2$$

则理想井实用的地基固结度计算式可写为:

$$\overline{U_{rz}} = 1 - e^{-\frac{8}{n_i^2 F_{ni}} \cdot T_w}$$

非理想井实用的地基固结度计算式可写为:

$$\overline{U_{rz}} = 1 - e^{-\frac{8}{F_n + \xi} \cdot \frac{1}{n^2} \cdot T_w}$$

式中: n_i 和 n 分别是理想井和非理想井的井径

比, $F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$ 。

根据上式, 可制出理想井条件下, 不同固结度在不同井径比下所对应的固结速率 T_w , 见表 1。表中的 $T_w = c_h t / (100 d_w^2)$ 。

(2) 非理想井井径比用表。

由于理想井与非理想井所要求的固结度相同, 则:

$$1 - e^{-\frac{8}{n_i^2 F_{ni}} \cdot T_w} = 1 - e^{-\frac{8}{F_n + \xi} \cdot \frac{1}{n^2} \cdot T_w}$$

由此可得出:

$$n_i^2 F_{ni} = n^2 F_n + n^2 \xi$$

根据上式, 制出在不同的非理想综合参数条件下, 理想井和非理想井的井径比对应表, 见表 2。表 1、表 2 就是非理想井地基袋装砂井间距的设计用表, 根据地基土的固结系数 c_h, c_v , 竖向排水距离 H , 竖井直径 d_w 及与非理想综合参数 ξ 有关的参数 k_h/k_w (或 $k_h/q_w, s$) 以及加荷历时 t , 确定出砂井间距, 使该砂井地基平均固结度在指定时刻达到要求值。

(3) 计算非理想袋装砂井间距的详细步骤如下。

表 1 理想井井径比设计用表

		$\overline{U_{rz}}/\%$							
		60	65	70	75	80	85	90	95
		T_w							
n_i	10	0.178	0.204	0.234	0.269	0.312	0.368	0.447	0.581
	11	0.228	0.262	0.300	0.346	0.401	0.473	0.574	0.747
	12	0.286	0.328	0.376	0.433	0.503	0.592	0.719	0.934
	13	0.351	0.403	0.462	0.532	0.617	0.727	0.883	1.149
	14	0.424	0.486	0.557	0.642	0.745	0.878	1.066	1.386
	15	0.505	0.578	0.663	0.763	0.886	1.045	1.268	1.650
	16	0.593	0.679	0.779	0.897	1.042	1.228	1.490	1.939
	17	0.690	0.790	0.906	1.043	1.211	1.428	1.733	2.254
	18	0.794	0.910	1.044	1.202	1.395	1.645	1.996	2.597
	19	0.907	1.040	1.192	1.373	1.594	1.879	2.280	2.966
	20	1.029	1.179	1.352	1.557	1.807	2.130	2.585	3.364
	21	1.159	1.328	1.523	1.753	2.036	2.340	2.912	3.790
	22	1.298	1.487	1.705	1.963	2.280	2.687	3.261	4.243
	23	1.445	1.656	1.900	2.187	2.539	2.993	3.632	4.725
	24	1.602	1.835	2.105	2.424	2.814	3.317	4.025	5.237
	25	1.767	2.025	2.322	2.674	3.104	3.659	4.441	5.778
	26	1.942	2.225	2.552	2.938	3.411	4.021	4.880	6.349
	27	2.126	2.435	2.793	3.216	3.734	4.401	5.342	6.950
	28	2.319	2.657	3.047	3.508	4.073	4.801	5.827	7.581
	29	2.521	2.889	3.313	3.814	4.428	5.220	6.335	8.243
	30	2.733	3.131	3.591	4.135	4.800	5.658	6.868	8.953
	31	2.954	3.385	3.882	4.470	5.190	6.117	7.424	9.659
	32	3.185	3.649	4.185	4.819	5.595	6.595	8.004	10.414
	33	3.426	3.925	4.501	5.183	6.017	7.093	8.609	11.200
	34	3.676	4.212	4.830	5.562	6.457	7.611	9.238	12.018
	35	3.936	4.510	5.172	5.955	6.914	8.149	9.891	12.869
	36	4.206	4.819	5.527	6.364	7.388	8.708	10.570	13.751
	37	4.486	5.140	5.894	6.787	7.879	9.288	11.273	14.666
	38	4.776	5.472	6.275	7.225	8.389	9.888	12.001	15.614
	39	5.076	5.815	6.669	7.679	8.915	10.509	12.755	16.595
	40	5.386	6.171	7.077	8.148	9.460	11.151	13.534	17.608

注: 若所查对象不在表中, 可用插值法算出。

表 2 非理想井井径比设计用表

		ξ										
		0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		n										
n_i	10	8.944	8.135	6.974	6.176	5.589	5.136	7.774	4.476	4.227	4.013	3.829
	11	9.884	9.022	7.773	6.905	6.262	5.764	5.364	5.035	4.757	4.520	4.314
	12	10.825	9.910	8.574	7.637	6.940	6.397	5.959	5.598	5.293	5.032	4.805
	13	11.767	10.800	9.377	8.373	7.621	7.033	6.559	6.165	5.833	5.548	5.300
	14	12.709	11.691	10.183	9.112	8.306	7.674	7.162	6.737	6.378	6.069	5.800
	15	13.652	12.583	10.991	9.853	8.994	8.317	7.769	7.312	6.926	6.593	6.303
	16	14.595	13.477	11.801	10.597	9.685	8.964	8.379	7.891	7.477	7.120	6.809
	17	15.539	14.371	12.612	11.343	10.378	9.614	8.992	8.473	8.031	7.651	7.319
	18	16.488	15.266	13.426	12.092	11.074	10.267	9.608	9.057	8.589	8.185	7.831
	19	17.428	16.162	14.241	12.843	11.773	10.922	10.226	9.645	9.149	8.721	8.346
	20	18.374	17.059	15.058	13.596	12.473	11.580	10.848	10.235	9.712	9.260	8.864
	21	19.319	17.957	15.876	14.350	13.176	12.239	11.471	10.827	10.277	9.802	9.385
	22	20.266	18.856	16.695	15.106	13.881	12.901	12.097	11.422	10.845	10.345	9.907
	23	21.212	19.755	17.516	15.864	14.588	13.565	12.725	12.018	11.415	10.891	10.432
	24	22.159	20.656	18.338	16.624	15.296	14.231	13.355	12.617	11.987	11.440	10.959
	25	23.106	21.556	19.161	17.385	16.006	14.899	13.986	13.218	12.561	11.990	11.488
	26	24.054	22.458	19.985	18.147	16.718	15.568	14.620	13.821	13.136	12.542	12.019
	27	25.002	23.360	20.810	18.911	17.431	16.239	15.255	14.425	13.714	13.095	12.552
	28	25.950	24.263	21.637	19.676	18.146	16.912	15.892	15.031	14.293	13.651	13.086
	29	26.899	25.166	22.464	20.442	18.862	17.586	16.531	15.639	14.874	14.208	13.622
	30	27.848	26.070	23.292	21.209	19.579	18.262	17.170	16.248	15.456	14.767	14.160
	31	28.797	26.974	24.121	21.978	20.298	18.939	17.812	16.859	16.040	15.327	14.700
	32	29.747	27.880	24.951	22.747	21.018	19.617	18.455	17.471	16.625	15.889	15.240
	33	30.697	28.785	25.782	23.518	21.739	20.297	19.099	18.085	17.212	16.452	15.782
	34	31.647	29.690	26.613	24.289	22.461	20.977	19.744	18.700	17.800	17.016	16.325
	35	32.597	30.597	27.446	25.062	23.184	21.659	20.391	19.316	18.390	17.582	16.870
	36	33.547	31.504	28.279	25.835	23.909	22.342	21.093	19.933	18.980	18.149	17.146
	37	34.498	32.411	29.112	26.610	24.634	23.027	21.688	20.552	19.572	18.717	17.963
	38	35.499	33.318	29.947	27.385	25.360	23.712	22.338	21.171	20.165	19.287	18.511
	39	36.400	34.226	30.782	28.161	26.088	24.398	22.989	21.792	20.759	19.857	19.061
	40	30.352	35.135	31.618	28.938	26.816	25.086	23.642	22.414	21.355	20.429	19.611

注: 若所查对象不在表中, 可用插值法算出。

计算 $T_w = c_h t / (100 d_w^2)$; 计算袋装砂井地基非理想数 ξ 根据 T_w 和地基要求的平均固结度 U_{ra} 查表 1, 求得按理想井设计所需的井径比 n_i ; 根据 ξ 和 n_i 查表 2, 求得实际(即非理想井)的井径比 n ; 求袋装砂井间距 a 并取整。

上面的设计方法是针对在瞬时加荷条件下的袋装砂井间距的计算, 方法简便实用, 可以在实际工程中使用。

4 工程实例

本文以搜集到的实际资料为基础, 采用上述袋装砂井间距的计算方法计算出广东西部沿海高速公路新会段某软基处理试验段的袋装砂井间距值, 并与施工中所用的间距值做出对比, 进而验证上述方法。

4.1 工程概况

广东省西部沿海高速公路是广东省“九五”计划的重点建设工程项目, 它对促进珠江三角洲地区和西部沿海地区的经济发展起着重要的作用。新会段工程全长 18.856 km, 其中有 4 km 的软基处理工程段。

本文所取试验段位于新会市境内, 属珠江三角洲河网地区, 是典型的软土地基, 含水量高(一般在 50% ~ 100%), 压缩性高(压缩系数 $> 1.5 \text{ MPa}^{-1}$), 强度低(天然状态十字板抗剪强度 $C_u < 15 \text{ kPa}$)。

此试验段某断面的软基处理方式: 50 cm 厚的砂垫层, 双层土工布, 再后打设直径为 7 cm 的砂井, 长 1 000 cm, 正三角形布置。

施工当中所用的袋装砂井间距为一经验值 1 m, 打设袋装砂井的机具成孔直径为 10.5 cm, 袋装砂井内砂料的渗透系数为 10^{-2} cm/s 。袋装砂井打设后, 其周围扰动土的渗透系数为 $2.5 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 。施工设计要求地基固结度在 15 个月后达到 90%。

4.2 袋装砂井间距计算

依据上面的资料, 下面用本文提出的方法来计算袋装砂井间距值。

取地基土固结系数 $c_h = 1.53 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$, 固结历时 $t = 425 \text{ d}$, 袋装砂井直径 $d_w = 7 \text{ cm}$, 长度 $H = 10 \text{ m}$, 地基土渗透系数 $k_h = 1.134 \times 10^{-6} \text{ cm/s}$, 砂料渗透系数 $k_w = 0.018 \text{ cm/s}$, 扰动土渗透系数 k_s 为 $2.5 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$, 涂抹区直径 d_s 取 2 倍的机具直径 21 cm。

(1) 地基土的固结速率, $T_w = c_h \times t / (100 \times d_w^2) = 11.467$;

(2) 地基土的非理想数 $\xi = (\frac{k_h}{k_s} - 1) \ln \frac{d_s}{d_w} + \pi \frac{k_h}{k_w}$

$$(\frac{H}{d_w})^2 = 7.924;$$

(3) 根据固结速率 T_w 和地基要求固结度 90% 查表 1 得理想井的井径比 n_i 值, $n_i = 37.265$;

(4) 根据所得的理想井的井径比和非理想数 ξ 查表 2 求非理想井的井径比, $\xi = 7, n = 20.716, \xi = 8, n = 19.943$, 与 $\xi = 7.924$ 相应的 n 值为, $n = 20.716 - (20.716 - 19.943) \times (7.924 - 7) / (8 - 7) = 20.002$;

(5) 所求的正三角形布置的袋装砂井的间距值为, $a = 20.002 \times 7 / 1.05 = 133 \text{ cm} = 1.33 \text{ m}$ 。施工中可取 1.3 m

4.3 结果分析

以上方法所算得的袋装砂井间距为 1.3 m, 相对于实际工程中用的 1.0 m, 既可以满足地基强度要求, 又可以节省施工经费。

实际施工中所用的间距为 1.0 m, 则在 $25 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 范围内所需的袋装砂井数量为 2 628 根。设打设每根袋装砂井所需费用为 1, 则间距为 1.0 m 时, 利用袋装砂井处理 $25 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 范围的软基所需费用为 $C_1 = 2 628$ 。而间距为 1.3 m 时, 处理同一范围的软基所需袋装砂井数量为 1 578 根, 处理费用为 $C_2 = 1 578$, $(C_1 - C_2) \times 100 / C_1 = 40\%$ 。因此利用本文的袋装砂井间距计算方法进行砂井地基设计, 可以大大节省施工经费。

5 结论

(1) 本文从非理想井的三维轴对称理论出发, 建立了井阻作用、涂抹作用和水动力条件 3 个非理想因素的非理想综合参数 ξ 。它的大小可以反映砂井地基非理想性的显著与否。

(2) 利用袋装砂井地基的非理想综合参数, 本文制出了理想井与非理想井的井径比对应表, 根据给出的袋装砂井地基参数, 查表求得袋装砂井间距值, 既方便又实用。

(3) 以广东西部沿海高速公路新会段的软基段为例, 用本文的 2 种袋装砂井间距计算方法进行砂井间距的计算, 得出间距值为 1.3 m。袋装砂井所需费用项比施工所用值 1.0 m 节省费用 40%。

参考文献

[1] 曾国熙教授科技论文选集编委会 曾国熙教授科技论

文章编号: 0451- 0712(2003)11- 0061- 04

中图分类号: U 416. 217. 04

文献标识码: B

SB S 改性沥青 Superpave 施工工艺分析

潘 健

(江苏省苏州市公路管理处 苏州市 215007)

摘 要: 结合苏州至杭州某高速公路工程实践, 介绍了 Superpave-13 改性沥青混凝土路面上面层的施工工艺和关键工序质量控制要点。分别阐述了改性沥青施工中原材料控制, 混合料的拌和、运输、摊铺、碾压等关键工序施工工艺和质量控制要点。

关键词: SBS 改性沥青; 高性能路面; Superpave; 施工; 工艺

1987~ 1992 年, 美国耗资 1.5 亿美元进行了战略公路研究计划 (SHRP), 其中沥青部分 Superpave 耗资占 1/3, 约 5 千万美元。SHRP 计划结束后, 在美国联邦公路局 (FHWA) 的大力推广下, 美国大部分州已开始修建 Superpave 路面, 2001 年用 Superpave 方法施工的沥青混合料占总量的 82%。

国内也逐渐开始在高速公路中推广 Superpave

路面结构。2000 年, 江苏省在淮江高速公路淮阴连接线上修筑了 7 km 长的试验路。2001 年江苏省分别在连徐高速公路修建 6 km, 宁宿徐高速公路修建 4 km 主体工程, 试验路采用三层 Superpave 结构形式。

苏州至杭州某高速公路全段三层路面结构均采用了 Superpave。下面层采用 7.5 cm 的 Superpave-25, 中面层采用 6.0 cm 的 Superpave-19, 上面层采

收稿日期: 2003- 07- 22

文选集[C] 中国建筑工业出版社, 1997.

[2] 谢康和, 曾国熙 砂井地基优化设计[J] 土木工程学报, 1989, 22(2).

[3] 叶书麟 地基处理[M] 中国建筑工业出版社, 1988

[4] 魏汝龙 软粘土的强度和变形[M] 人民交通出版社, 1987.

Discussion About Calculation Method of Sand Wick Space in Soft Foundation Treatment

PENG Yong¹ SHI Yu-jin²

(1. School of Transportation and Traffic Engineering, Tongji U., Shanghai 200092, China;

2. Shanghai Institute of Geological Survey, Shanghai 200072, China)

Abstract: On the basis of on the consolidation theory of sand drain foundation, nonideal combined parameters of well resistance, smear action and hydraulic condition are created. The chart method to calculate sand-wick space is prt forward by analytic method in this paper. Taking the soft foundation treatment test part in Xinhui Section in west coastal expressway in Guangdong Province as an example, the economical and reasonable well spacing using the above method are calculated.

Key words: soft soil foundation ; sand-wick ; space; calculation method; non-ideal combined parameter