

振冲法处理饱和粉土地基的工后孔隙比研究

周元强¹, 徐 强², 沈锦儒¹

(1. 江苏省电力设计院, 南京 211102; 2. 江苏省电力公司 宿迁供电公司, 江苏 宿迁 223800)

摘 要: 孔隙比是评价粉土密实程度的重要指标, 研究表明饱和粉土地基的液化指数与孔隙比有关。对于振冲法处理严重液化的饱和粉土地基, 只要工后孔隙比降到 0.75 以下, 就能达到消除液化的目的。利用试验成果, 通过振冲桩施工前后土体的三相组成分析, 量化振冲碎石桩的挤密、振实功效, 推导出饱和粉土经振冲法处理后的工后孔隙比估算方法, 估算结果与实测值的误差在 $\pm 1.5\%$ 以内。利用该方法可以迅速接近最佳的桩距、桩径组合, 为节省试验费用和加快试验进度提供可靠的依据。

关 键 词: 饱和粉土; 振冲法; 液化; 工后孔隙比; 估算法

中图分类号: TU43

文献标志码: A

Study of post-treated void ratio of saturated silt subgrade treated with vibroflotation

ZHOU Yuan-qiang¹, XU Qiang², SHEN Jin-ru¹

(1. Jiangsu Province Electric Power Design Institute, Nanjing 211102, China;

2. Suqian Power Supply Company, Jiangsu Electric Power Company, Suqian, Jiangsu 223800, China)

Abstract: Void ratio is one of the most important evaluation indicator of the silt compactness; the study shows that there are certain corresponding relations between liquefaction indexes and void ratio of saturated silt subgrade treated with vibroflotation; when the post-treated void ratio drops to bellow 0.75, the liquefaction of saturated silt subgrade could be eliminated. Based on the testing result and three-phase composition analysis of soil before and after the vibroflotation, the vibration effectiveness and compaction effectiveness of vibro replacement stone column are quantified; and the estimate method of post-treated void ratio is also derived. Compared with measured values, the estimate values calculated through the estimate method have errors within $\pm 1.5\%$. Meanwhile, the estimate method of post-treated void ratio are used to rapidly approach the optimal combination of pile spacing and pile diameter, so as to provide a reliable basis for saving the cost and speeding up the progress of pile testing.

Key words: saturated silt; vibroflotation; liquefaction; post-treated void ratio; estimate method

1 引 言

振冲法分为振冲密实法和振冲置换法两类^[1-2]。一般认为振冲密实法仅适用于处理黏粒含量低于 10% 的松散中、粗砂地基^[3], 而振冲置换法更适用于处理粉土、粉质黏土等地基, 通过振冲器对土体施加置换挤密、振动密实、排水减压等效应, 达到提高地基土变形模量和承载力、降低场地液化势的目的。对于采用振冲密实法处理的砂土地基, 砂土的相对密度是评价振冲效果的重要指标^[4-5], 但它不能用来评价振冲法对饱和粉土地基的处理效果, 因此, 建立粉土孔隙比与场地液化指数间的相对关

系具有重要的意义。试验研究表明, 采用振冲置换法处理后的饱和粉土孔隙比与液化指数存在一定的关系, 通过理论推导可以得出一套简便有效的计算公式, 不必通过现场多方案的原体试验, 从各种桩距与桩径中迅速地接近最佳的桩距、桩径组合, 达到节约试验费用和加快试验进度的目的。

2 工程概况

宿迁西郊 220 kV 变电站工程(下简称西郊变工程)位于宿迁市城西, 地处 8 度地震区。地基上部土层是为饱和粉土层, 经标贯试验判别, 系严重液化等级场地。为了提高该场地饱和粉土抗液化的

能力,采用振冲置换法处理,设计前通过试验比选,确定了振冲桩的各项设计参数和施工参数^[6]。

2.1 工程地质

地基土 25 m 深度范围内自上而下的基本层序为:层①粉土;层②粉土夹粉质黏土;层③粉质黏土;层④粉质黏土;层⑤粉砂夹粉土;层⑥粉砂;层⑦粉质黏土;层⑧黏土,其中层①、层②为液化土层。地下水位埋深 1.0 m 左右,该区地震动峰值加速度为 0.30g,反应谱特征周期为 0.45 s,场地地基土地震液化等级为中等~严重。上部 10 m 的地基土主要物理指标见表 1,地质柱状图、平均层厚及碎石桩入土深度见表 2。

2.2 碎石桩的设计

试桩区内共布置了 72 根振冲碎石桩,分 3 个区,桩距分别为 2.4 m (试桩 I 区)、2.1 m (试桩 II 区)和 1.8 m (试桩 III 区)3 种,按等边三角形布桩;桩端进入层③粉质黏土层 2.0 m。预估设计桩径为 800 mm,施工桩长 9.5 m,有效桩长 8.5 m,顶部 1.0 m 高是超打部分。

2.3 振冲桩施工概况

试桩区的振冲桩经过 4 次试打,不断调整水、电、料等施工参数,最终选择了混合法的填料方案、

较低的密实电流和较短的留振时间,既达到最佳的地基处理效果,也降低了建设成本。试桩区振冲桩的施工参数见表 3。

表 1 岩土层主要物理指标

Table 1 Main physical parameters of soil layers					
层号	含水率 w/%	重度 γ (kN/m ³)	孔隙比 e	孔隙率 n	土粒相对 密度 G
①	25.9	18.2	0.910	0.476	2.76
②	29.0	18.5	0.928	0.481	2.76
③	32.0	18.2	0.984	0.496	2.74

表 2 地质柱状图及振冲碎石桩入土深度

Table 2 Geologic columnar section and vibro replacement stone column depth

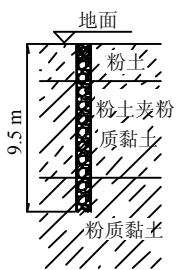
柱状图	层号	岩土名称	层厚 /m
	①	粉土	2.1
	②	粉土夹粉质黏土	5.4
	③	粉质黏土	2.5

表 3 振冲碎石桩施工参数一览表

Table 3 Construction parameters of vibro replacement stone column

地段	桩距 d	桩径 D	密实电流 I	留振时间 t	成孔水压 P	制桩水压 P_p	平均填料量 L	平均历时 T/min		
	/m	/m	/A	/s	/MPa	/MPa	/m ³	合计	单桩成孔	单桩制桩
试桩 I 区	2.40	1.0	40	≤ 10	0.4	0.1~0.2	13.8	57.5	10.8	46.7
试桩 II 区	2.10	1.0	40	≤ 10	0.4	0.1~0.2	13.8	46.6	10.0	36.6
试桩 III 区	1.80	1.0	40	≤ 10	0.4	0.1~0.2	13.9	44.0	9.1	34.9

3 振冲桩施工前后的实测值

3.1 试桩区振冲桩施工前后实测值

在振冲桩施工前后试桩区的地基土都进行了标贯试验,并计算了各地段饱和粉土地震液化指数,结果见表 4。振冲桩施工前 2 个孔饱和粉土地基的液化指数分别为 21.4 和 31.5,判为严重液化等级。3 个试桩区振冲桩施工后的液化指数均小于 5,都判为轻微液化等级,桩距愈小孔隙比愈小,消除液化程度越佳。

表 4 表明,经振冲桩施工后,层①、②的粉土孔隙比降低得十分明显,其密实度从施工前的稍密状态提高到密实状态,孔隙比的降低幅度达到 20% 左右,而层③的粉质黏土孔隙比的变化则不大,孔隙比的降低幅度只有 5% 左右,可见振冲法处理粉土地基的振、挤密效果十分显著。

表 4 试验区振冲碎石桩施工前后实测值

Table 4 Measured values of test area before and after the construction of vibroflotation

地段	层序	孔隙比		液化指数 I_{LE}			
		工前 e	工后 e'	工前 1 [#] 孔	工前 2 [#] 孔	工后 1 [#] 孔	工后 2 [#] 孔
试桩 I 区	层①	0.910	0.712				
	层②	0.928	0.742			3.55	4.15
	层③	0.984	0.954				
试桩 II 区	层①	0.910	0.694				
	层②	0.928	0.712	21.4	31.5	3.33	2.68
	层③	0.984	0.932				
试桩 III 区	层①	0.910	0.669				
	层②	0.928	0.685			0.80	0.36
	层③	0.984	0.910				

将表 4 中各层土施工后的孔隙比实测值与桩距的关系绘制成 d - e' 曲线图,如图 1 所示。由图可见,振冲桩施工后桩间土的孔隙比 e' 与振冲桩的桩距 d 之间存在一定的规律,层①~③的 d - e' 曲线几乎都

呈直线变化, 桩距愈小孔隙比愈小。3 条直线几乎相互平行, 它们的斜率非常接近。层①~③分别为 0.072、0.095 和 0.073。

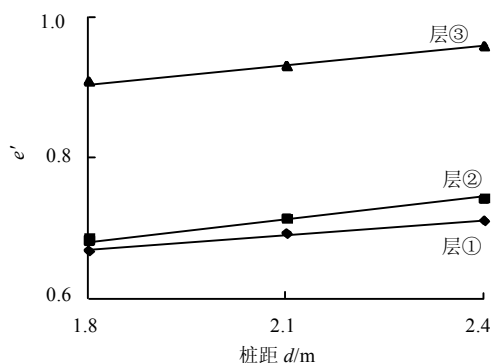


图 1 振冲法施工后孔隙比与桩距的关系曲线
Fig. 1 Curves of post-treated void ratio vs. pile spacing

3.2 孔隙比与液化指数的关系

从上述工后孔隙比 e' 实测值和计算后的液化判别可知, 凡粉土地基的密实度达到密实状态即 $e' < 0.75$ 时, 在 8 度地震区发生地震时不会产生地基液化现象 (见图 2)。若将层①、②的孔隙比按层厚折算成单一土层的孔隙比, 与对应的液化指数列于见表 5。

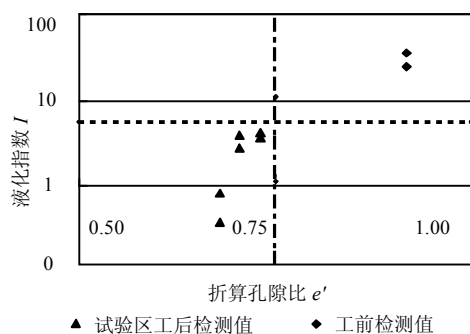


图 2 折算孔隙比与液化指数的关系

Fig. 2 Relations between converted post-treated void ratio and liquefaction index

表 5 折算单一土层的孔隙比与液化指数
Table 5 Converted post-treated void ratio and liquefaction index

土层	折算孔隙比 e'	液化指数检测值	
		1 [#] 孔	2 [#] 孔
工前	0.923	21.49	31.51
试桩 I 区	0.734	3.55	4.15
工后 试桩 II 区	0.707	3.33	2.68
试桩 III 区	0.681	0.80	0.36

图 2 中, 除右上部分的两点外其余各点都位于液化指数 $I_{LE}=5$ (图中虚线) 和 $e'=0.75$ (图中竖直的点划线) 之左下方。右上部分的两点恰恰是振冲

桩施工前的检测值, 其余各点均是工后检测值, 由此可见, 粉土地基只要其密实度达到密实状态即 $e' < 0.75$ 时, 此类地基就能抵御 8 度地震而不致发生地基液化现象 (同时考虑振冲碎石桩的排水减压效应)。

3.3 振冲法施工对粉土地基密实度的影响

振冲桩的施工既提高粉土地基的密实度, 也降低粉土地基的密实度, 最终还是提高了粉土地基的密实度。振冲法施工之所以能提高粉土地基密实度的原因包括以下 2 项: (1) 置入碎石桩, 挤实了桩间土; (2) 振冲器的振动, 振实了桩间土。

振冲法施工是先成孔后制桩, 之所以会降低粉土地基密实度的原因也有 2 项: (1) 振冲桩成孔时, 会在地基中先掏挖出一个数 10 cm 直径的孔洞, 而掏挖出来的土会被水冲走, 造成地基土粒的流失。

(2) 振冲桩施工时, 无论是成孔或制桩不停地伴有水冲, 也会使地基中的土粒流失。

若能将振冲法施工所造成的提高和降低地基土密实度的因素量化, 就可以用解析法算出桩间土的工后孔隙比。

4 振冲法施工后孔隙比的解析法

4.1 振冲法施工引起的地面震陷量

液化地基的震陷量主要决定于地基的液化程度和上部结构的荷载。在饱和粉土地基中, 受振动水冲的作用能使地基迅速液化, 虽然没有上部结构的荷载作用, 也能使粉土颗粒重新排列, 是土的自重荷载所起的作用, 可用《建筑抗震设计规范》^[7] 条文说明中的经验公式 (4.3.6-2) 来估算振冲法施工引起的地面震陷量 S_E 。

$$S_E = 0.44 \xi k S_0 (d_1^2 - d_2^2) (0.01p)^{0.6} / B \quad (1)$$

式中: p 为地震作用效应标准组合的压力值 (kPa), 其他各符号的意义及取值见规范^[7]。将土层总厚度 Z 分为 n 层, n 越大, 计算结果越准确。取第一层土 h_1 乘以重度 γ (地下水位以下为有效重度 γ') 作为荷载, 即

$$p_1 = \gamma h_1 \quad (2)$$

液化土层厚度为

$$d_1 = (Z - h_1) \quad (3)$$

因液化土层就是持力层, 故 $d_2 = 0$ 。用上式计算得到的震陷量 S_{E_1} , 再以第二层土 h_2 乘以重度 γ 作为荷载, 即

$$p_2 = \gamma h_2 \quad (4)$$

计算下面液化土层的震陷 S_{E_2}

$$d_2 = (Z - h_1 - h_2) \quad (5)$$

以此类推, 最后获得的震陷量 $S_E = \sum S_{E_i}$ 。

打桩后地面发生的震陷假定全部发生在液化土层中, 非液化土层不发生震陷 $S_{E_i} = 0$ 。以本工程为例, 层①、②为液化土层, 合计厚 7.5 m, 地下水位为 1.0 m。以桩距 2.1 m 计算其等效影响圆的直径 $D_e = 2.21$ m, 换算成方形面积的边长 $B = 0.886 \times 2.21 = 1.95$ m, 其中 $\xi = 1, k = 0.24, S_0 = 0.15$ 。

将地下水位以上的 1.0 m 分为 4 层, 地下水位以下的层①的 1.1 m 分为 3 层, 层②的 5.4 m 分为 20 层, 以一个等效影响圆的面积折算成方形基础边长 $B = 1.95$ m, 计算得到的震陷量 $S_E = \sum S_{E_i} = 371$ mm, 按层厚分配得到层①、②的震陷量分别为 104 mm 和 267 mm, 试桩 I、III 区计算得到的震陷量分别为 357 mm 和 382 mm, 与现场观察到的地面震陷量为 300 mm 以上, 基本吻合。

4.2 振冲桩施工前后土体的三相组成情况

图 3 为振冲桩施工前后单桩等效影响圆范围内土体三相组成的示意图。图中, V 为振冲前单桩等效影响圆土体总体积 (m^3); V_v 为振冲前单桩等效影响圆土体中孔隙的体积 (m^3); V_s 为振冲前单桩等效影响圆土体中土粒的体积 (m^3); V_k 为振冲桩施工成孔的体积 (m^3); V_j 为振冲桩施工制桩时挤掉土中孔隙的体积 (m^3); V_c 为振冲桩施工制桩时被水流带走的土粒体积 (m^3); V_x 为振冲桩施工时震陷的体积 (m^3)。

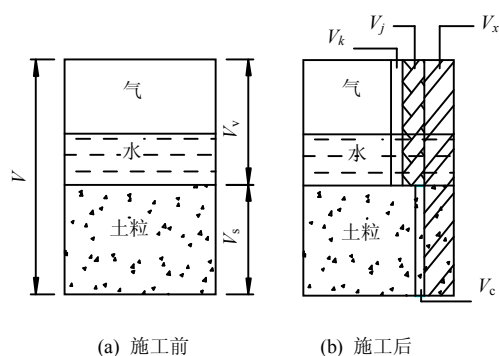


图 3 振冲桩施工前后土体三相组成示意图

Fig. 3 Three-phase composition sketch of soil before and after the construction of vibroflotation

4.2.1 振冲桩施工前土体的三相组成情况

取复合地基中的单桩等效影响圆的处理面积分析, 如图 4 所示。

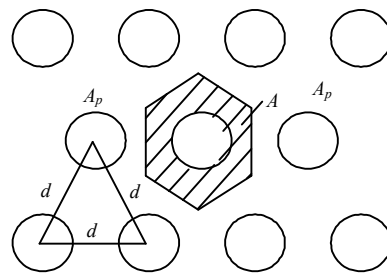


图 4 振冲桩桩位布置图

Fig. 4 Pile location layout of vibro replacement stone column

复合地基中单桩处理面积 A 为一个六边形的面积 (m^2), 通常可折算为等效影响圆来分析, 其直径为 D_e , 振冲桩的截面面积为 A_p , 振冲桩处理深度为 H , 按土层分别计算, 则打桩前单桩复合地基中每一土层的各项参数为

$$A = \pi D_e^2 / 4 \quad (6)$$

第 i 层土的总体积:

$$V_i = H_i A = \pi H_i D_e^2 / 4 \quad (7)$$

第 i 层土的孔隙体积:

$$V_{v_i} = n_i H_i A \quad (8)$$

第 i 层土的土粒体积:

$$V_{s_i} = (1 - n_i) H_i A \quad (9)$$

式中: H_i 为第 i 层土层的厚度 (m); D_e 为等效影响圆的直径 (m), $D_e = 1.05d$, d 为桩距 (m); n_i 为振冲桩施工前第 i 层地基土的孔隙率; i 为土层自上而下的序号 $i = 1, 2, \dots$ 。

4.2.2 振冲桩施工后土体的三相组成情况

施工后单桩影响圆中的总体积 V' 应是影响圆的面积 A 乘上震陷后总高度 $H - S_E$, 即

$$V' = (H - S_E) A \quad (10)$$

对第 i 层土有

第 i 层土的总体积:

$$V'_i = (H_i - S_{E_i}) A \quad (11)$$

第 i 层土中的桩体积:

$$V'_{p_i} = (H_i - S_{E_i}) A_p \quad (12)$$

第 i 层桩间土的体积:

$$V'_{s_i} = (H_i - S_{E_i}) (A - A_p) \quad (13)$$

振冲桩的截面积:

$$A = \pi d_p^2 / 4 \quad (14)$$

V_{k_i} 为第 i 层土中振冲桩成孔时振冲器扩孔所形

成孔道的体积, 与振冲器大小有关, 设

$$V_{k_i} = \lambda_1 \pi H_i d_q^2 / 4 \quad (15)$$

V_{j_i} 为第 i 层土中振冲碎石桩体挤入土中所挤掉的孔隙体积, 成孔时振冲器只到孔底以上 0.5 m 处, 因此计算最下层土的 V_{k_i} 时应将 H_i 改为 $H_i - 0.5$ 。设

$$V_{j_i} = \lambda_2 n_i \pi (H_i - S_{E_i}) (d_p^2 - \lambda_1 d_q^2) / 4 \quad (16)$$

V_{c_i} 为第 i 层土中振冲桩制桩时水流带走的土粒体积:

$$V_{c_i} = \lambda_3 (H_i - S_{E_i}) A_p \quad (17)$$

V_{x_i} 为第 i 层土中振冲桩施工时产生的震陷陷落体积

$$V_{x_i} = S_{E_i} A \quad (18)$$

式中: H_i 为第 i 层土层的厚度 (m); λ_1 为成孔的扩孔系数; d_q 为振冲器直径 (m); d_p 为振冲桩直径, (m); λ_2 为制桩时挤密系数; λ_3 为制桩时土粒流失系数。

振冲后桩间土的孔隙体积和土粒体积分别为

$$\left. \begin{aligned} V_{v_i}' &= V_{v_i} - n_i V_{k_i} - V_{j_i} - V_{x_i} \\ V_{s_i}' &= V_{s_i} - (1 - n_i) V_{k_i} - V_{c_i} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

将前面导出的式 (8)、(9)、(15)~(17) 代入式 (18), 并整理后即得振冲后桩间土中孔隙与土粒的体积:

$$\left. \begin{aligned} V_{v_i}' &= \pi D_e^2 / 4 (n_i H_i - S_{E_i}) - \lambda_2 n_i \pi (H_i - S_{E_i}) d_p^2 / 4 \\ V_{s_i}' &= (1 - n_i) (\pi H_i D_e^2 / 4 - \lambda_1 \pi H_i d_p^2 / 4) - \lambda_3 \pi (H_i - S_{E_i}) d_q^2 / 4 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

4.3 振冲法施工后桩间土孔隙比的计算

将桩间土的孔隙体积 V_{v_i}' 除以桩间土的土粒体积就可得到振冲桩施工后桩间土的孔隙比, 即

$$e' = V_{v_i}' / V_{s_i}' \quad (21)$$

$$e' = \left[\pi D_e^2 / 4 (n_i H_i - S_{E_i}) - \lambda_2 n_i \pi (H_i - S_{E_i}) d_p^2 / 4 \right] / \left[\pi H_i (1 - n_i) (D_e^2 - \lambda_1 d_p^2) / 4 - \lambda_3 \pi (H_i - S_{E_i}) d_q^2 / 4 \right] \quad (22)$$

以试桩 II 区为例, 已知各层土的厚度 $H_1 = 2.1$ m, $H_2 = 5.4$ m, $H_3 = 2.0$ m, $d = 2.1$ m, $D_e = 1.05 \times 2.1 = 2.205$ m, $A = 3.819$ m²。各层土的震陷 $S_{E_1} = 0.104$ m, $S_{E_2} = 0.267$ m, $S_{E_3} = 0$, ZCQ-30 型的振冲器直径 $d_q = 0.351$ m。各层土的孔隙率 n_i (见表 1), 计算结果和实测值见表 6。用同样的方法可计算得到试桩 I、III 区和工程桩的工后孔隙比 e' , 其结果见表 7。

表 6 II 区桩间土工后孔隙比 e' 的实测值与计算值
Table 6 Measured and calculated values of post-treated void ratio e' of soil between piles in zone II

参数	层① 粉土	层② 粉土	层③ 粉质黏土
工前孔隙比 e	0.910	0.928	0.984
工前孔隙率 n	0.476	0.481	0.496
层厚 H_i /m	2.1	5.4	2
震陷量 S_{E_i} /m	0.104	0.267	0
扩孔系数 λ_1	2.0	2.0	2.0
挤密系数 λ_2	1.0	1.0	1.0
土粒流失系数 λ_3	0.1	0.1	0.3
实测	0.694	0.712	0.932
工后 e' 计算	0.699	0.714	0.931
误差/%	0.740	0.330	-0.11

表 7 I、III 区桩间土工后 e' 的实测值与计算值
Table 7 Measured and calculated values of post-treated void ratio e' of soil between piles in zone I and III

土层	层① 粉土	层② 粉土	层③粉质黏土
震陷量 S_{E_i} /m	0.100	0.257	0
扩孔系数 λ_1	2.0	2.0	2.0
挤密系数 λ_2	1.1	1.1	1.0
土粒流失系数 λ_3	0.1	0.1	0.3
试桩 I 区 实测值	0.712	0.742	0.954
工后 e' 计算值	0.717	0.733	0.954
误差/%	0.75	-1.25	-0.93
震陷量 S_{E_i} /m	0.107	0.275	0
扩孔系数 λ_1	2.0	2.0	2.0
挤密系数 λ_2	0.9	0.9	1.0
土粒流失系数 λ_3	0.1	0.1	0.3
试桩 III 区 实测值	0.669	0.685	0.910
工后 e' 计算值	0.676	0.691	0.910
误差/%	1.06	0.87	-0.39

将实测值与计算值绘于同一图中, 可见计算值曲线与实测值曲线都紧密地吻合在一起, 如图 5 所示, 误差均在 1% 左右, 表明采用式 (22) 的结果是十分理想的。

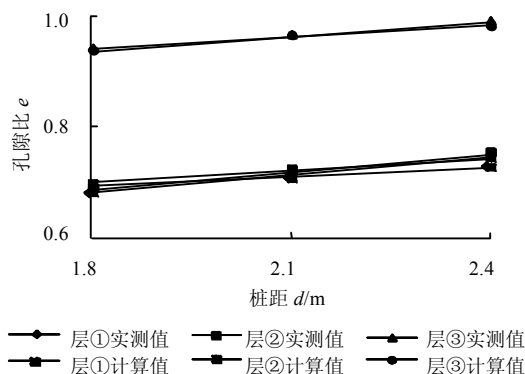


图 5 工后孔隙比 e' 实测值与计算值比较

Fig. 5 Comparison of the measured and calculated values of post-treated void ratio e'

从表 6、7 中可以看出, 计算中采用的系数 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 都有其规律性, 3 个试桩区都采用 $\lambda_1=2.0$, 符合施工的实际情况, 不论桩距为多少, ZCQ-30 型的振冲器有其固定的功率和固有的振动频率, 它在同一类的土中会扩孔到多大直径, 与桩距无关, 所以扩孔系数 λ_1 是一个恒定的常数; 土粒流失系数 λ_3 是指制桩时水流带走的土粒, 它与土质有关, 与桩距无关。制桩时黏性土土粒的流失大于粉土, 如图 6 所示。

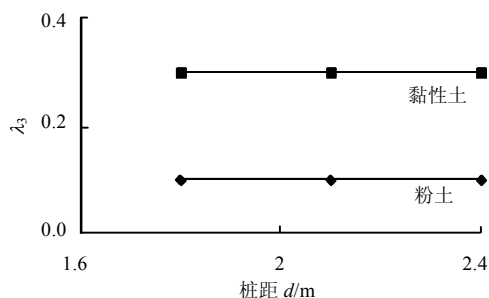


图 6 土粒流失系数 λ_3 与桩距 d 的关系曲线

Fig. 6 Relationships between soil particle loss coefficient λ_3 and pile spacing d

挤密系数 λ_2 视土质而异, 粉土中碎石桩的挤密效果与桩距有关系, 桩距大挤掉土体中的孔隙体积就多, 反之, 桩距小挤掉的孔隙体积就少些。在黏性土中的挤密系数与桩距没有多大关系, 任何桩距, λ_2 都等于 1.0, 如图 7 所示。

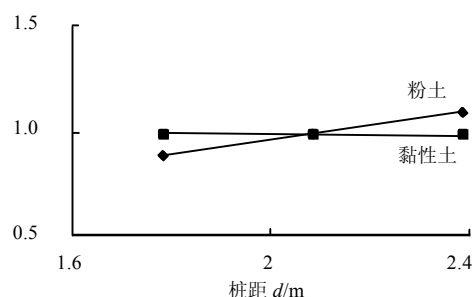


图 7 挤密系数 λ_2 与桩距 d 的关系曲线图

Fig. 7 Relationships between compaction coefficient λ_2 and pile spacing d

4.4 工后孔隙比优选桩距 d 与桩径 d_p 的组合

选择若干种桩距与桩径的组合, 利用前面推导的计算公式计算桩间土的工后孔隙比 e' , 视桩间土工后孔隙比 e' 的大小来优选合适的桩距 d 与桩径 d_p 。以试桩区的 3 种桩距及桩距为 2 m, 配以桩径 d_p 为 1.0、0.9、0.8 m, 分别计算它们工后桩间土的孔隙比 e' , 其计算结果见表 8。

将表 8 的数据绘制成桩距与后孔隙比的图形

(见图 8) 可以清晰地看到怎样的桩距 d 与桩径 d_p 组合的工后孔隙比 e' 达到了密实状态。从图中可见, 当桩径 $d_p=1.0$ m, 桩距 $d=1.8\sim 2.4$ m 时都能使桩间土工后的 $e' < 0.75$ (图中的粗横线), 达到了密实的状态; 当 $d_p=0.8$ m 时, 桩间土工后的 e' 多数都大于 0.75, 只达到中密状态; 当桩径 $d_p=0.9$ m 时, 桩间土工后的孔隙比 e' 多数能小于 0.75, 达到密实状态, 只有桩距 $d=2.4$ m 时, 层②的桩间土工后孔隙比 $e' > 0.75$, 本次工程桩的设计选择了桩径 $d_p=0.9$ m、桩距 $d=2.0$ m, 这样的桩距与桩径的组合都能保证层①、②的桩间土工后孔隙比 e' 小于 0.75, 两层土的折算孔隙比 $e' = 0.736$ 。

表 8 各种桩距、桩径组合的桩间土工后孔隙比 e' 计算值

Table 8 Calculated values of pile soil post-treated e' of a variety combination pile spacing and pile diameter

桩距 /m	土层	不同桩径 d_p (m) 的 e'		
		0.8	0.9	1.0
1.8	层①	0.736	0.715	0.676
	层②	0.752	0.731	0.691
2.0	层①	0.745	0.726	0.692
	层②	0.761	0.741	0.707
2.1	层①	0.749	0.731	0.699
	层②	0.764	0.746	0.714
2.4	层①	0.759	0.744	0.717
	层②	0.776	0.759	0.733

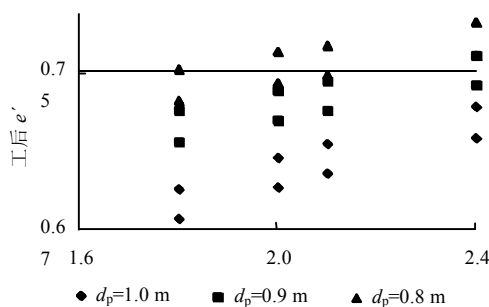


图 8 各种桩距与桩径组合的工后孔隙比 e'

Fig. 8 Post-treated void ratio e' of a variety combination pile spacing and pile diameter

工程桩施工后进行了 15 孔的标贯试验, 其中 10 孔的液化指数为 0, 5 孔的液化指数分别为 2.74、3.24、4.01、4.20 及 4.54, 15 孔的平均液化指数为 1.39。将 5 孔的液化指数和桩间土的折算孔隙比 $e' = 0.736$ 绘于图 9 中, 可见所有的点子均位于液化指数 $I_{LE}=5$ (图中虚线) 和折算孔隙比 $e' = 0.75$ (图中竖直的点划线) 之左下方, 再次证明了粉土地基的孔隙比在 0.75 以下时地基土的液化指数不会超过 5。

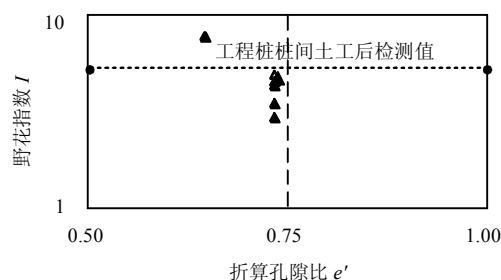


图9 工程桩桩间土工后折算孔隙比和液化指数
Fig. 9 Converted post-treated void ratio e' and liquefaction index I_{LE} of soil between engineering pile

5 结 论

(1) 地处8度地区的宿迁西郊220 kV变电站工程,采用振冲法处理饱和粉土可以提高其抗液化能力。原判为严重液化的场地地基土,经振冲法处理后其工后孔隙比 e' 都降到0.75以下,达到密实状态,大大提高了抗液化能力,液化指数大幅度减小。

(2) 饱和粉土地基的抗液化能力与土的孔隙比 e' 有一定的因果关系,原为稍密的饱和粉土经振冲法处理后桩间土的孔隙比能低于0.75,达到密实状态时,其液化指数都在5以下。同时考虑振冲碎石桩的排水减压效应,可以实现消除液化。

(3) 振冲法处理饱和粉土地基的桩间土工后孔隙比 e' 可用本文推导的式(22)估算,与实测值相比的误差均在±1.5%以内。利用式(22),不必通过现场多方案的原体试验,就可从各种桩距与桩径中,迅速地接近最佳的桩距、桩径组合,为节省试验费用和加快试验进度提供可靠的依据。

参 考 文 献

- [1] 地基处理手册编写委员. 地基处理手册(第二版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [2] 何广谏. 振冲碎石桩复合地基[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [3] 中国建筑科学研究院. JG J79—2002 建筑地基处理技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [4] 周健, 胡寅, 林晓斌, 等. 粉细砂的室内无填料振冲试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 790—795.
ZHOU Jian, HU Yin, LIN Xiao-bin, et al. Laboratory test of vibroflotation on hydraulic backfilled silty and fine sand without backfill[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(5): 790—794.
- [5] 周健, 贾敏才, 池永. 无填料振冲法加固粉细砂地基试验研究及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1350—1355.
ZHOU Jian, JIA Min-cai, CHI Yong. Vibroflotation compaction of silty sandy without additional backfill materials[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(8): 1350—1355.
- [6] 陆伟岗, 周伟, 花庆宝. 宿迁西郊变振冲法施工参数的调控思路[J]. 江苏电力设计, 2011, (2): 28—33.
LU Wei-gang, ZHOU Wei, HUA Qing-bao. Regulation method of vibroflotation construction parameter in Suqian Western suburbs[J]. *Jiangsu Electric Power Design*, 2011, (2): 28—33.
- [7] 中国建筑科学研究院. GB 50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.