

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2012.06.013

真空-堆载联合预压处理地基的沉降特性

彭 劼,何 钜,张文彬,苏 波,宋恩润,洪 雷

(河海大学土木与交通学院,江苏 南京 210098)

摘要:通过现场试验和理论分析计算,对堆载预压法和真空-堆载联合预压法 2 种方法处理相近地质条件软基的沉降特征、沉降计算理论和结果等进行了对比研究。结果表明:真空荷载能够加速地基沉降、增加地基的总沉降量,但等效真空荷载引起的沉降增量要小于真实的堆载荷载;真空-堆载联合预压下的加固区沉降比堆载预压更加均匀;将真空荷载等效为正荷载,按照分层总和法和 Hansbo 解进行真空-堆载联合预压沉降和固结计算,经修正后结果令人满意。真空-堆载联合预压计算时的沉降修正系数 m_s 小于堆载预压;真空荷载可有效地消除工后沉降。

关键词:真空-堆载联合预压;堆载预压;沉降特性;等效真空荷载;固结计算

中图分类号:TU472.33

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2012)06-0670-06

Ground settlement characteristics under vacuum and surcharge combined preloading

PENG Jie, HE Ju, ZHANG Wenbin, SU Bo, SONG Enrun, HONG Lei

(College of Civil Engineering and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Through field tests and theoretical analysis, the ground settlement characteristics, and the calculation theories and results of the surcharge preloading method and the vacuum and surcharge combined preloading method were compared when they were used to improve soft ground in similar geological conditions. The results show the following: The vacuum load can accelerate ground settlement and increase total settlement, but the settlement increment caused by an equivalent load was less than that caused by a surcharge load. The settlement of the vacuum and surcharge combined preloading area was more uniform. The vacuum could be equivalent to a positive load in the calculation of settlement and consolidation under vacuum and surcharge combined preloading, using the layering summation method and the Hansbo analytical solution. The computed results were satisfactory after correction and the settlement correction factor m_s for vacuum and surcharge combined preloading was less than that for surcharge preloading. The vacuum load could effectively reduce the post-construction settlement of ground.

Key words: vacuum and surcharge combined preloading; surcharge preloading; settlement characteristics; equivalent vacuum load; consolidation calculation

堆载预压法和真空-堆载联合预压法是 2 种常见的软基处理方法,两者都属于排水固结法,但是加固机理有所不同。

堆载预压法通过作用在软基上的荷载,使地基土中产生正的超孔隙水压力,而打入地基的塑料排水板由于渗透性强,因此孔压基本维持不变,土体和塑料排水板之间就产生了孔压差,促使土体中的孔隙水排出,从而加快土的固结速度,软基得到加固^[1]。

真空预压法则是将加固区密封后,通过抽真空使膜下以及塑料排水板中的孔压降低,而土体由于渗透性差,孔压下降缓慢,因此在土体和塑料排水板之间产生孔压差,促使土体排水固结^[1]。在真空预压法中,膜下真空度被限制在 1 个标准大气压(101.3 kPa)内(实际工程中一般为-80~-90 kPa),因此为了进一步改善

加固效果,在进行真空预压的同时在密封膜上堆载。堆载不改变塑料排水板中的孔压,只增加土体孔压,于是土体和塑料排水板之间的孔压差进一步加大,其排水速度和加固效果要优于真空预压法。

真空预压法最早由瑞典皇家地质学院 Kjellman 教授^[2]提出,20 世纪 90 年代开始出现真空-堆载联合预压法的应用。阎澎旺等^[3]认为正、负压作用下土体的固结过程基本相同。杨顺安等^[4]对真空-堆载联合预压法的基本原理进行了研究,认为该方法较堆载预压法和真空预压法可以使土体获得更好的加固效果。高志义等^[5]认为真空-堆载联合预压法可以进一步提高土体的加固效果,并且在 2 种加固方法作用下增加的有效应力可以叠加。Harvey 等^[6]以室内三轴试验模拟了真空预压、堆载预压和真空-堆载联合预压,得出了堆载预压和真空预压的沉降量差别不大,在改善土体的物理力学性质上堆载预压的效果优于真空预压等结论。Chu 等^[7]认为在相同压力下,堆载预压法对土体抗剪强度的提高要优于真空预压法。Leong^[8]提出在等效加载条件下,堆载预压比真空预压可以更好地提高土的强度。岑仰润等^[9]通过对比真空固结试验和加载固结试验的结果,认为在固结状态相同的情况下,真空固结和加载固结的基本性状一致。

虽然对堆载预压法以及真空-堆载联合预压法的研究已经很多,但通过试验手段同时对真空-堆载联合预压地基与堆载预压地基的变形特性进行对比研究、总结的文献尚不多见。本文基于现场试验,研究堆载预压法和真空-堆载联合预压法处理相近地质条件软基时的沉降特性,并对 2 种方法的沉降及固结度计算方法进行了讨论和对比。

1 现场试验概况

1.1 工程概况及地质剖面

中山新隆至江门四村高速公路(简称中江高速公路)是珠江三角洲地区高速公路网的重要组成部分,其中 K23+565.3—K23+987.8 路段的软土较厚(21~31 m),路堤填土较高(填筑高度为 6.7~7.8 m)。因此在该路段内分别采用堆载预压法和真空-堆载联合预压法进行软基处理。

2 种方法的处理范围、相应的部分施工参数及研究断面如表 1 所示。由于研究断面较多,为简便起见,分别以堆 1 断面、堆 2 断面、真 1 断面、真 2 断面表示 K23+597 断面、K23+655 断面、K23+720 断面、K23+880 断面。

表 1 各断面的施工参数
Table 1 Construction parameters for different cross-sections

断面	桩号范围	处理方案	排水体方案	排水体参数/m		砂垫层厚度/m	填筑高度/m
				间距	长度		
堆 1	K23+565.3—K32+629.6	堆载预压	梅花形布置袋装砂井	1.2	21	0.6	6.7
堆 2	K23+629.6—K32+681.0	堆载预压	梅花形布置袋装砂井	1.3	21	0.6	7.1
真 1	K23+681.0—K32+756.0	真空-堆载联合预压	梅花形布置塑料排水板	1.3	31	0.8	8.1
真 2	K23+831.0—K23+923.5	真空-堆载联合预压	梅花形布置袋装砂井	1.3	21	0.8	8.6

1.2 加载条件及断面监测位置

图 1 为各断面荷载曲线,真 1、真 2 断面的真空荷载基本一致,堆载部分有所不同但区别不大,真空-堆载联合预压区的堆载速度快于堆载预压区。

由于第 1 级整平回填荷载(20~40 kPa)为打设塑料排水板之前填筑,填筑时间较短,因此监测从塑料排水板打设之后开始。断面的沉降监测位置如图 2 所示。

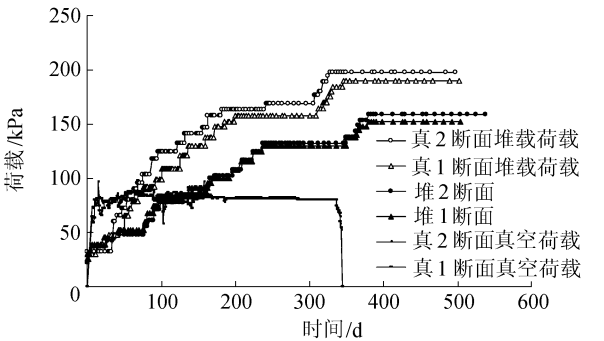


图 1 各断面荷载曲线

Fig. 1 Loading curves at different cross-sections

2 沉降特性及对比

2.1 等效真空荷载的影响

图 3 为软基 4 个断面的路基中部表面沉降量-时间曲线。如图 3 所示,堆载预压和真空-堆载联合预压地基的沉降量在荷载作用下,都是刚开始比较大,随后变缓,最后趋于稳定。

为了研究地基在堆载预压和真空-堆载联合预压下的沉降特性,对单位荷载作用下的地基沉降量进行了分析,即将沉降量除以其当时对应的荷载。

图4(a)为不考虑等效真空荷载(80 kPa),只考虑上部堆载荷载的真空-堆载联合预压区的沉降量/荷载-时间曲线。如图4(a)所示,真1、真2断面的单位堆载荷载所对应的沉降量大于单纯的堆载预压,在填筑期尤其明显,卸真空前沉降量基本稳定,此时各断面单位荷载所对应的沉降量见表2。

综合图4(a)和表2可以看出,在最后一级堆载施加前,真空-堆载联合预压区的单位堆载沉降量明显大于预压堆载区,其超过幅度为16%~26%。因此可以认为:真空荷载虽然在机理上并不等同于堆载荷载,只是改变了地基中的孔压边界条件,但是相较于堆载预压,真空荷载的介入会使地基的总沉降量增加。

但是,当施加最后一级堆载(真1断面堆载增量为22 kPa,真2断面堆载增量为32 kPa)时,在填筑期,真1、真2断面的单位荷载沉降量逐渐降低。该部分堆载结束后,真空荷载立刻卸除,因此真1、真2断面的单位荷载沉降量未来得及进一步增大,而是与堆载预压区趋向一致。

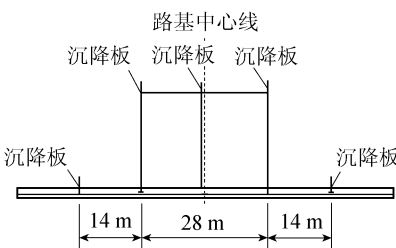


图2 断面沉降量监测点
Fig. 2 Settlement monitoring points

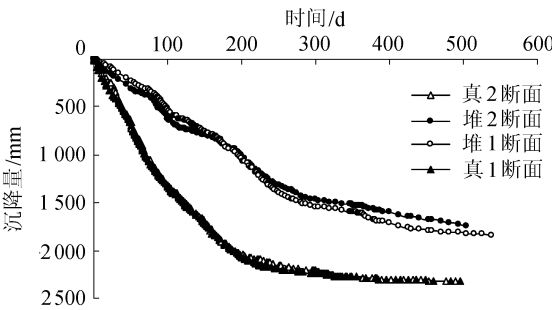


图3 各断面路基中部表面沉降曲线
Fig. 3 Settlement curves at different cross-sections of soft ground

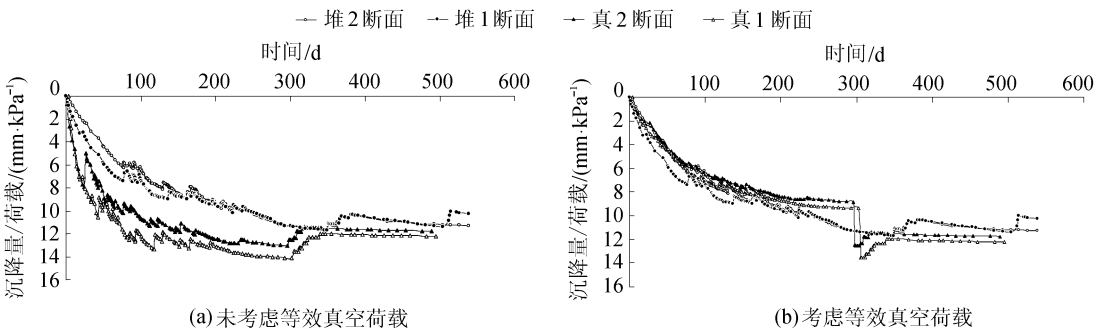


图4 沉降量/荷载-时间曲线
Fig. 4 Settlement/loading vs. time

表2 各断面荷载与沉降量关系

断面	最终沉降量/ mm	堆载荷载/ kPa	最后一级荷载施加前单位荷载沉降量/(mm·kPa ⁻¹)		单位荷载沉降最终值/(mm·kPa ⁻¹)	
			未考虑等效真空荷载	考虑等效真空荷载	未考虑等效真空荷载	考虑等效真空荷载
堆1	1790	152.4	11.4	11.4	11.4	11.4
堆2	1834	162.4	11.2	11.2	11.2	11.2
真1	2730	189.7	14.1	9.4	12.2	12.2
真2	2658	197.5	13.1	8.9	11.7	11.7

如果将真空荷载等效为80 kPa的正荷载计入总荷载中,则得到的各断面沉降量/荷载-时间曲线如图4(b)所示。各断面真空卸载时以及卸真空后再加堆载并稳定后的沉降量/荷载值如表2所示。图4(b)及表2表明等效真空荷载和真实的堆载荷载有区别,真空荷载能够增加地基总沉降量,但是单位等效真空荷载引起的沉降量小于真实的单位堆载荷载引起的沉降量。

2.2 沉降均匀性

将每个断面5个监测点的最终沉降量分别除以该断面中点的最终沉降量,可以得到归一化之后的断面沉降比例图(图5)。从图5可以看出,真空-堆载联合预压区的路肩处沉降量和堆载预压区很接近,但是坡脚处的沉降比例明显大于堆载预压区,其超出幅度为8%~18%,表明真空-堆载联合预压区的沉降量比堆

载预压区要更加均匀。

3 沉降量及固结度计算

3.1 计算理论

沉降量计算按照 $e-p$ 曲线分层总和法计算,见文献[10]。
固结度的计算则是基于轴对称等应变的 Hansbo 解^[11],在一级或多级等速加载条件下,当固结时间为 t 时,对应总荷载的地基平均固结度 $\bar{U}_t$ 可按下式计算^[12]:

$$\bar{U}_t = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\dot{q}_i}{\sum \Delta p} \left[(T_i - T_{i-1}) - \frac{\alpha}{\beta} e^{-\beta t} (e^{\beta T_i} - e^{\beta T_{i-1}}) \right] \quad (1)$$

式中: $\bar{U}_t$ —— t 时刻地基的平均固结度; $\dot{q}_i$ ——第*i*级荷载的加载速率,kPa/d; $\sum \Delta p$ ——各级荷载的累加值,kPa; T_{i-1}, T_i ——第*i*级荷载加载的起始和终止时刻(从零点起算),d,当计算第*i*级荷载加载过程中某时刻*t*的固结度时, T_i 改为*t*; α, β ——参数,根据地基土排水固结条件确定,可参考文献[12]。

当考虑涂抹和井阻效应、竖井穿透受压土层时,取

$$\alpha = \frac{8}{\pi^2} \quad \beta = \frac{8c_h}{F d_e^2} + \frac{\pi^2 c_v}{4H^2} \quad (2)$$

其中

$$F = F_n + F_s + F_r \quad F_n = \ln(n) - \frac{3}{4} \quad (n \geq 15)$$

$$F_s = \left[\frac{k_h}{k_s} - 1 \right] \ln s \quad F_r = \frac{\pi^2 L^2}{4} \frac{k_h}{q_w} \quad n = \frac{d_e}{d_w}$$

式中: n —井径比; d_e ——竖井的有效排水直径,等边三角形排列 $d_e=1.05l$,正方形排列 $d_e=1.13l$, l 为竖井间距; d_w ——竖井直径; s ——涂抹区直径 d_s 与 d_w 的比值,可取 $s=2.0 \sim 3.0$; c_h ——土的水平向排水固结系数, cm^2/s ; c_v ——土的竖向排水固结系数, cm^2/s ; H ——土层竖向排水距离, cm ; k_h ——地基土的水平向渗透系数, cm/s ; k_s ——涂抹区的渗透系数, cm/s ; q_w ——塑料排水板或砂井通水能力, cm^3/s ; L ——排水中贯穿受压土层的最大竖向排水距离。

对排水竖井未穿透受压土层的地基,则用式(1)计算竖井范围土层的平均固结度和竖井底面以下受压土层的平均固结度。

Indraratna 等^[13]认为竖井纵向通水量小于 $400 \text{ m}^3/\text{a}$ 时应并对井阻效应加以考虑,Holtz 等^[14]建议当竖井纵向通水量大于 $150 \text{ m}^3/\text{a}$ 时,井阻效应可忽略不计,研究中所用的塑料排水板通水量指标为 $40 \text{ cm}^3/\text{s}$ (侧向压力为 350 kPa 时),即 $1261 \text{ m}^3/\text{a}$,远大于 Holtz 等^[14]的建议值,因此本文在计算中不考虑井阻的影响。

3.2 计算参数

按照《中江高速公路沿线地质勘查报告》提供的参数,可得到与本文研究相关的各土层参数,见表 3。

表 3 沉降量计算所需的参数

Table 3 Calculation parameters of settlement

土层	密度 $\rho_0/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	初始孔隙比 e_0	竖向固结系数 $C_v/(10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	水平向固结系数 $C_h/(10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	压缩系数 a_v / MPa^{-1}	涂抹系数 F
耕植土	1800	1.056	8.60	31.00	0.350	4.176
贝壳、蚝壳层	1840	1.001	30.40	103.00	0.150	4.992
淤泥质黏土	1800	1.271	2.07	4.20	0.921	4.024
淤泥	1780	1.623	1.35	4.90	1.570	3.843
粉土	1820	1.056	40.00	42.00	0.150	5.264
黏土	1850	1.172	3.50	9.20	0.560	4.149
淤泥质黏土	1820	1.280	2.90	8.60	0.621	3.844
卵石、砾石	1860	0.901	386.00	403.00	0.100	14.513

真空荷载被等效为正荷载,乘以沉降修正系数 m_s 后,得到的计算沉降量曲线如图 6 所示,计算值与实测值的吻合度较高。堆 1、堆 2、真 1、真 2 断面的修正系数 m_s 分别为 1.50,1.40,1.19,1.10。堆载预压区的沉降修正系数要大于真空-堆载联合预压区,这个结论与文献[12]是一致的。

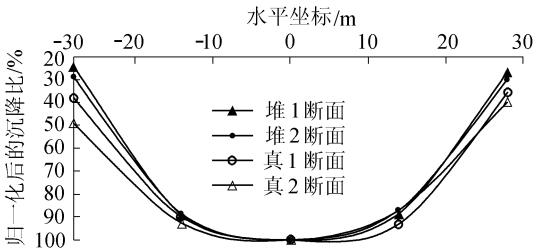


图 5 路肩和坡脚平均沉降量与中点沉降量的比值
Fig. 5 Ratios of average settlement of shoulder and foot of slope to settlement at center of cross-sections

4 讨 论

4.1 真空-堆载联合预压的适用性

4 个断面设计填筑高度以及实际填筑高度等数据见表 4,其中实际填筑高度等于沉降量与设计填筑高度之和。由于缺乏工后沉降量监测数据,因此仅考虑施工期间的沉降情况。

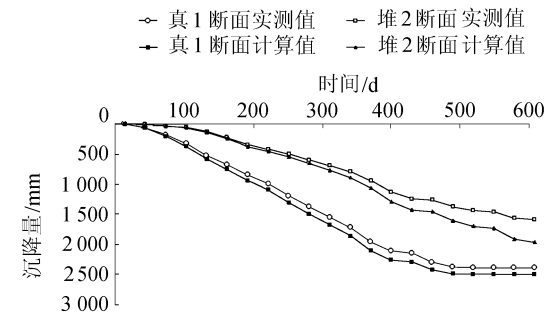


图 6 各断面计算与实测沉降量曲线
Fig. 6 Calculated settlement curves at different cross-sections of soft ground

表 4 各断面填筑高度及沉降量

Table 4 Embankment heights and settlement at different cross-sections of soft ground mm

断面	设计填筑高度	实际填筑高度	沉降量
堆 1	6 700	8 422	1 722
堆 2	7 100	8 934	1 834
真 1	8 100	10 417	2 317
真 2	8 600	10 919	2 319

表 5 真 1、真 2 断面堆载方案计算结果

Table 5 Results of surcharging program for cross-sections k23+720 and k23+880 mm

断面	设计填筑高度	实际填筑高度	沉降量	工期结束时未完成的主固结沉降量
真 1	8 100	10 140	2 040	30
真 2	8 600	10 750	2 150	150

如果将真 1、真 2 断面采用堆载预压方案,仍然填筑至相同的设计高度,塑料排水板深度和间距、工期等其他参数均不改变,参照 3.2 计算参数中各断面修正系数,真 1 断面的 m_s 取为 1.49,真 2 断面的 m_s 取为 1.40。通过分层总和法计算可得到堆载预压方案沉降量等数据,见表 5。

从表 5 可知,真 1、真 2 断面如果采用堆载预压方案,相对于真空-堆载联合预压方案,真 1 断面可少填 399 mm 堆载,施工期结束时沉降量减少 277 mm;真 2 断面可少填 21 mm 堆载,但是施工期结束时主固结沉降量还有 150 mm 未完成。即真 1 断面采用堆载预压方案也可达到设计要求,且填筑量减少;真 2 断面工后沉降量较大,不宜采用堆载预压方案。

由此可看出,真空-堆载联合预压法主要适用于堆载较高、堆载速度要求较快的场地(真 2 断面)。真空荷载的介入,可以有效地消除工后沉降量,其主要从以下 2 个方面起作用:(a) 作为 1 种等效超载,可使施工期间地基总沉降量增加,卸除后减少工后沉降量;(b) 可使堆载速度不受限制,在相同的施工期内,可尽快堆载使满载预压期相对延长。

4.2 卸真空后的反弹

理论上卸真空时应有反弹,如图 7 所示,考虑地基为正常固结土的情况,将真空荷载考虑为等效正荷载,用 $e-\lg p$ 曲线描述地基沉降量,则堆载和真空等效荷载施加后的地基土最终压缩量为图 7 中对应的 C 点。图 7 中,A 点为加载前的初始状态, p_0 为初始地基应力, e_0 为初始孔隙比, Δp_{sur} 为堆载大小, Δe_{sur} 为堆载引起的孔隙比变化, Δp_{vac} 为等效真空荷载大小, Δe_{vac} 为等效真空荷载引起的孔隙比变化。则卸除真空荷载时,土体孔隙比应沿着 CD 线回弹。

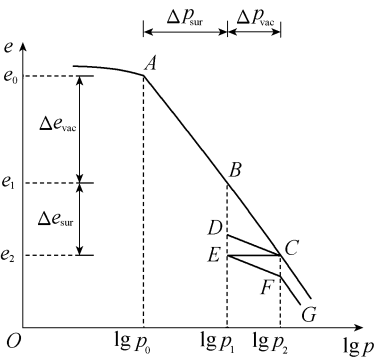


图 7 正常固结土的 $e-\lg p$ 曲线
Fig. 7 $e-\lg p$ curve of normally consolidated soils

一般土体的回弹指数 $C_s = (0.1 \sim 0.2) C_c$, C_c 为土体压缩指数。真 1、真 2 断面卸真空时荷载增量是 -80 kPa,假定 $C_s = 0.1 C_c$,可估算出回弹量为 46 ~ 50 mm,然而现场监测数据表明没有回弹。文献中也有类似现象的报道。

这是因为真空荷载的作用机理完全不同于堆载,虽然在地基沉降量计算时可将其等效为堆载,但是卸真

空时却不能视为堆载卸载。在 e - $\lg p$ 图上,真空荷载卸除时,土体孔隙比沿着 CE 线变化,即等效真空荷载卸除,土体孔隙比维持不变。真空卸除后如再施加堆载荷载,则土体孔隙比将沿着 EF 线发展,即先经历超固结压缩阶段,到达 F 点后再沿着 FG 发展, FG 线最终与 AC 线相交于 $0.42e_0$ 处。

5 结 论

- a. 真空荷载与堆载联合作用,不仅能够加速地基沉降,而且也能够增加地基的总沉降量,但是真空荷载引起的沉降增量要小于堆载荷载。
- b. 路肩处的沉降量,真空-堆载联合预压区和堆载预压区很接近;坡脚处沉降比值,真空-堆载联合预压区则超过堆载预压区 $8\% \sim 18\%$,即真空-堆载联合预压作用下的沉降比堆载预压作用下的沉降更加均匀。
- c. 计算时可将真空荷载等效为正荷载,按照分层总和法和 Hansbo 解进行真空-堆载联合预压沉降量和固结计算,其沉降修正系数 m_s 小于堆载预压的沉降系数。真空荷载不同于真实的堆载荷载,卸真空的回弹量可忽略不计。
- d. 由于真空荷载作为一种等效超载,可使施工期间地基总沉降量增加,且抽真空导致的地基内缩使堆载速度不受限制,可尽快堆载使满载预压期相对延长,因此真空荷载的介入,可有效地消除工后沉降。

参考文献:

[1] 《地基处理手册》(第二版)编写委员会. 地基处理手册[M]. 2 版. 北京:中国建筑工业出版社,2000:69-99.

[2] KJELLMAN W. Consolidation of clay by heart of atmosphere pressure[C]//Proceedings of the Conference on Soil Stabilization. Boston:Massachusetts Institute of Technology,1952:258-263.

[3] 阎澎湃,陈环. 用真空加固软土地基的机制与计算方法[J]. 岩土工程学报,1986,8(2):17-20. (YAN Shuwang, CHEN Huan. Mechanism and calculation methods of vacuum stabilization of soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1986,8(2):17-20. (in Chinese))

[4] 杨顺安,吴建中. 真空联合堆载预压法作用机理及应用[J]. 地质科技情报,2000,19(3):32-35. (YANG Shun'an, WU Jianzhong. Mechanism of vacuum and embankment preloading and its application[J]. Geological Science and Technology Information,2000,19(3):32-35. (in Chinese))

[5] 高志义,张美燕,刘立钰,等. 真空预压加固的离心模型实验研究[J]. 中国港湾建设,1988(1):21-25. (GAO Zhiyi, ZHANG Meiyang, LIU Liyu, et al. Centrifugal model test on vacuum reinforcement[J]. China Harbor Engineering,1988(1):21-25. (in Chinese))

[6] HARVEY A, JUDITH F. Vacuum drainage to accelerate submarine consolidation at Chek Lap Kok, Hong Kong[J]. Ground Engineering,1997(6):34-36.

[7] CHU J, YAN S W, YANG H. Soil improvement by vacuum preloading method for oil storage station. Geotechnique[J]. 2000,50(6):34-36.

[8] LEONG E C. Soil Improvement by surcharge and vacuum preloading[J]. Geotechnique,2000(5):601-605.

[9] 岑仰润,龚晓南,温晓贵. 真空排水预压工程中孔压实测资料的分析与应用[J]. 浙江大学学报:工学版,2003,37(1):16-18. (CEN Yangrun, GONG Xiaonan, WEN Xiaogui. Analysis of field test data on pore pressure in vacuum drainage preloading [J]. Journal of Zhejiang University:Engineering Science,2003,37(1):16-18. (in Chinese))

[10] 卢廷浩. 土力学[M]. 2 版. 南京:河海大学出版社,2005:126-141.

[11] HANSBO S. Consolidation of fine grained soil by prefabricated drains[C]//Proceedings of 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Stockholm:International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1981:677-682.

[12] JGJ 79—2002 建筑地基处理技术规范[S].

[13] INDRARATNA B, REDANA I W. Laboratory determination of smear zone due to vertical drain installation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,1998,124(2):180-184.

[14] HOLTZ R D, JAMIOLKOWSKI M B, LANCELLOTTA R, et al. Behavior of bent prefabricated vertical drains[C]//Proceedings of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Balkema:Rio de Janeiro,1989:1657-1660.