

软土地基孔隙水压力降低引起的压缩分析

莫海鸿¹, 邱青长¹, 董志良²

(1. 华南理工大学 土木工程系, 广东 广州 510640; 2. 广州四航工程技术研究院, 广东 广州 510230)

摘要: 根据土力学基本原理, 分析孔隙水压力降低引起的土体压缩方式, 并对真空预压地基的分层沉降现场实测值和理论计算值进行分析; 同时, 定量分析真空预压地基在不同深处单位压缩量。研究结果表明: (1) 若按有效应力原理水土压力分开计算、地基土体中孔隙水压力降低时, 土体竖向总应力维持不变而侧向总应力减小; (2) 土体中孔隙水压力在相对压强小于 0 的范围内降低时, 将引起土体等向压缩, 在相对压强大于 0 的范围内降低时, 将引起土体单向压缩; (3) 南沙港区的真空预压地基若其沉降按欠固结计算时, 计算值与实测值接近, 自重应力欠固结引起的沉降是抽真空期间地基总沉降主要部分; (4) 真空预压的加固深度随排水体深度增加而增大, 土层压密效果随地层深度增加而减弱, 故降低孔隙水压力法在加固软土地基中, 设计排水体深度时应考虑最佳加固深度。

关键词: 土力学; 软土地基; 孔隙水压力降低; 真空预压; 压缩; 加固深度

中图分类号: TU 471.8; U 416.1

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)增 2 - 3435 - 06

ANALYSIS OF SOIL COMPRESSION INDUCED BY PORE WATER PRESSURE DROP IN SOFT SOIL FOUNDATION

MO Haihong¹, QIU Qingchang¹, DONG Zhiliang²

(1. Department of Civil Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510640, China;

2. Guangzhou Sihang Institute of Engineering Technology, Guangzhou, Guangdong 510230, China)

Abstract: The compression modes of soil under pore water pressure drop are analyzed based on the basic principles of soil mechanics, and the layered settlements are investigated contrastively between theoretical calculation and field measurement in soft foundation improved with vacuum preloading. The unit compressions are analyzed quantitatively at different depths of soil and the following conclusions are drawn: (1) according to the analysis of the principle of effective stress, the soil pressure and the water pressure are calculated individually to arbitrary soil element, where the vertical total stress keeps constant and lateral total stress is reduced with the pore water pressure drop; (2) pore water pressure drop induces soil element isotropic compression in the range lower than local atmospheric pressure, and pore water pressure drop induces one-dimensional compression of soil element in the range greater than local atmospheric pressure; (3) the case study shows that calculated ground settlement by incomplete consolidation soil is consistent with the field measured settlement approximately in vacuum preloading project of Nansha Port, and the settlement induced by secondary consolidation of gravity is an important proportion of total ground settlement during the period of vacuum preloading; (4) the prefabricated vertical drains are installed deeper, and the improvement depth of vacuum preloading is greater, however, the effect of soil compression is smaller with depth increase in vacuum preloading project. The design of prefabricated vertical drains should consider the optimal improved depth when soft foundation is improved with the technique of

收稿日期: 2006 - 05 - 18; **修回日期:** 2006 - 06 - 21

基金项目: 华南理工大学自然科学基金资助项目(B03 - E5050960); 广州四航工程技术研究院资助项目(S2005D24)

作者简介: 莫海鸿(1955 -), 男, 博士, 1982 年毕业于武汉水利电力学院(现武汉大学)土木建筑工程专业, 现任教授、博士生导师, 主要从事岩土工程方面的教学与研究工作。E-mail: cvhhmo@scut.edu.cn

pore water pressure drop.

Key words: soil mechanics; soft soil foundation; pore water pressure drop; vacuum preloading; compression; improvement depth

1 引言

软土地基处理中的降水预压^[1]、真空预压和电渗预压均属于降低孔隙水压力法^[2]，都是根据有效应力原理，利用外力(泵、电流等)做功，降低土体中孔隙水压力相应有效应力增加，导致土体压密和强度增长。目前真空预压在工程中应用最广泛，国内真空预压施工一般采用射流泵。射流泵工作时射流腔内真空吸力引起强制对流抽出流体，导致地基中孔隙水压力降低，孔隙水压力下降值反映真空预压作用强度与效果，因此地基中孔隙水压力变化是真空预压研究和效果检测的重要内容。许多学者研究地基中的孔隙水压力下降规律^[3~6]，孔隙水压力实测数据表明，真空预压地基在排水体周围土体中孔隙水压力均能降低，其最大孔隙水压力降低值均小于一个标准大气压。由于土的自重应力随地层深度增加而增大，因此土层越深真空预压对土体压密效果必定越差。真空预压^[7]地基排水体普遍打设较深，如广州港南沙港区排水板打设一般超过 20 m。真空预压对深处土层能产生多大压缩量，目前这方面定量分析较少。至今普遍认为真空预压地基土体受球应力等向压缩，而工程地质分析原理^[8]与地下水动力学原理^[9]等专著中认为地下水水头降低可引起土体单向压缩。因此，根据土力学基本原理，分析孔隙水压力降低引起土体压缩方式和单元压缩量，通过工程实例对比分析真空预压地基分层压缩量实测值和计算值，运用单位压缩量分析真空预压地基的深层压密效果和加固深度。

2 理论分析与计算原理

2.1 孔隙水压力降低引起土体压缩分析

如图 1 所示，取地基中任意土体单元进行受力分析，设上覆荷载引起的竖向总应力为 σ_z ，静止土侧压力系数为 k_0 ，竖向有效应力和孔隙水压力分别为 σ'_z 和 u ，由有效应力原理有

$$\sigma_z = \sigma'_z + u \tag{1}$$

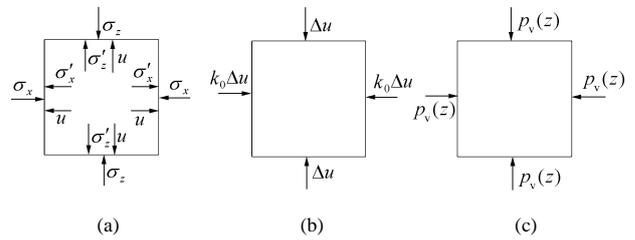


图 1 土体单元受力分析

Fig.1 Analysis of forces acting on soil elements

水压力与侧向土压力之和为总的侧压力，土体侧向总应力在孔隙水压力降低前为

$$\sigma_{x1} = \sigma'_x + u = k_0 \sigma'_z + u \tag{2}$$

当土体中孔隙水压力降低 Δu 后，竖向有效应力相应增加 Δu ，设孔隙水压力降低后土中流体压力仍大于或等于当地大气压，即 $u - \Delta u \geq 0$ 时，由于作用力和反作用力相等，即相当于作用土体单元骨架上的荷载增加 Δu ，因土体侧向变形受限制，土体只能产生单向压缩，孔隙水压力降低后土体侧向总应力为

$$\sigma_{x2} = k_0(\sigma'_z + \Delta u) + (u - \Delta u) \tag{3}$$

对于正常固结或欠固结土，有 $k_0 < 1$ ，因此比较式(2)和(3)就可知： $\sigma_{x1} > \sigma_{x2}$ ，即孔隙水压力降低过程土体竖向总应力不变、侧向总应力却是减小，土体的竖向和侧向有效应力按 k_0 比例同步增加如图 1(b)所示。

当 $u - \Delta u < 0$ 时，土体中流体压力小于当地大气压，流体存在真空或负压，此时土体单元受大气压与孔隙水压力的压差作用，相当于土体等向加载。设真空压力为地层深度 z 的函数，即流体真空度为 $p_v(z)$ ，则土体单元竖向和侧向有效应力均增加 $p_v(z)$ ，土体单元产生等向压缩如图 1(c)所示。

因此土体中孔隙水压力在相对压强大于 0 范围内降低时，将引起土体单元单向压缩；在小于当地大气压范围内降低时，将引起土体单元等向压缩；当土体中某位置孔隙水压力降低跨越相对压强 0 点时，土体的压缩方式应以相对压强 0 点分段。对于真空预压地基：抽真空前水位以上非饱和土层。在抽真空时就会形成真空，导致土体受真空压力等向

压缩；抽真空前地下水位与抽真空过程中地下水相对压强 0 压面之间的土层，土体受真空压力引起等向压缩与孔隙水压力降低引起的单向压缩共同作用；抽真过程中地下水相对压强 0 压面以下土层，土体仅受孔隙水压力降低而引起的单向压缩。孔隙水压力计读数为相对压强值，因此可用孔隙水压力计测量抽真空过程地基中孔隙水压力相对压强 0 点的变化。

2.2 单向压缩量计算

如图 2 所示为土体压缩分析示意图，考虑土体孔隙水压力在相对压强大于 0 条件下降低，即土体单向压缩，设地下水位下各土层压缩指数分别为 $C_{c1}, C_{c2}, \dots, C_{cn}$ ；各土层的饱和容重分别为 $\gamma_{sat1}, \gamma_{sat2}, \dots, \gamma_{satn}$ ；浮容重分别为 $\gamma'_1, \gamma'_2, \dots, \gamma'_n$ ；厚度分别为 h_1, h_2, \dots, h_n ；地下水位以上土层的压缩指数 C_{c0} 、天然容重为 γ_0 、厚度为 h_0 。则第 i 层土 z 深处单元土体 A 的总应力 $\sigma(z)$ 、孔隙水压力 $u(z)$ 和有效应力 $\sigma'(z)$ 分别为

$$\sigma(z) = \gamma_0 h_0 + \sum_{m=1}^{i-1} \gamma_{satm} h_m + \gamma_{sati} z \quad (4)$$

$$u(z) = \sum_{m=1}^{i-1} \gamma_w h_m + \gamma_w z \quad (5)$$

$$\sigma'(z) = \gamma_0 h_0 + \sum_{m=1}^{i-1} \gamma'_m h_m + \gamma'_i z \quad (6)$$

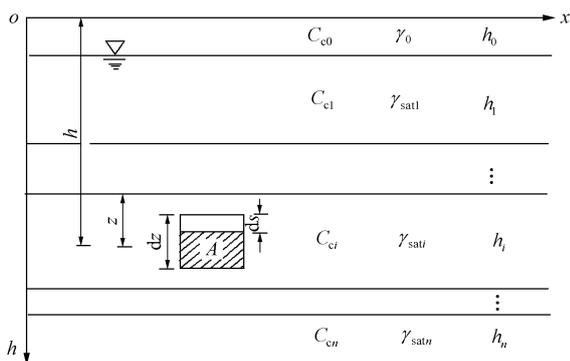


图 2 土体压缩分析示意图

Fig.2 Schematic diagram for analysis of soil compression

假定孔隙水压力降低 $\Delta u(z)$ ，由有效应力原理可知土体有效应力相应增加到 $\sigma'(z) + \Delta u(z)$ 。设初始孔隙比为 e_0 ， Δe 为孔隙水压力降低引起土体孔隙变化，用压缩指数表示单元土体压缩性。根据先期固结压力计算压缩量，则孔隙水压力降低引起正常固结和欠固结土体单元的微压缩量计算公式分别为

$$ds = \frac{C_{ci}}{1 + e_0} \lg \left(\frac{\gamma_0 h_0 + \sum_{m=1}^{i-1} \gamma'_m h_m + \gamma'_i z + \Delta u(z)}{\gamma_0 h_0 + \sum_{m=1}^{i-1} \gamma'_m h_m + \gamma'_i z} \right) dz \quad (7)$$

$$ds = \frac{C_{ci}}{1 + e_0} \lg \left(\frac{\gamma_0 h_0 + \sum_{m=1}^{i-1} \gamma'_m h_m + \gamma'_i z + \Delta u(z)}{p_c} \right) dz \quad (8)$$

式中： p_c 为先期固结压力。

对式(7)，(8)积分，可求得正常固结或欠固结地基因孔隙水压力降低产生的压缩量。

3 实例分析

3.1 地质条件和压缩试验结果

广州港南沙港区吹填陆域真空预压地基，原位土层为河相和海相交错沉积而成，试验区地层分布为：(1) 回填中细砂：层厚约 2.0 m，层顶高程+6.0 m；(2) 吹填淤泥：含水量高、流动状态、均匀性差，局部沉积有细砂和中砂；(3) 淤泥：层厚 5 m 左右，原淤泥面高程+1.0 m 左右；(4) 粉砂：层厚 2 m 左右；(5) 淤泥质黏土，夹薄层粉砂，层厚 8 m 左右；(6) 黏性土。

排水板按 1 m×1 m 正方形布置，打设深度 22 m。原位土层采取薄壁器取土，室内压缩采用高压固结仪，压缩环刀面积为 30 cm²、高 2 cm，试验荷载分别为 25, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 600, 800 和 1 200 kPa 等。土的压缩试验结果见表 1，

表 1 土的压缩试验结果

Table 1 Results of soil compression tests

土层	取样深度 /m	密度 /(g · cm ⁻³)	孔隙比 e	压缩指数 C_c	p_c /kPa
淤泥	7.0~7.5	1.61	1.72	0.55	25
淤泥	9.0~9.5	1.57	2.09	0.62	30
淤泥	10.0~10.5	1.71	1.57	0.51	30
粉砂	12.0~12.5	1.97	0.71	0.13	150
淤泥质土	14.5~15.0	1.82	1.02	0.36	80
淤泥质土	17.0~17.5	1.85	1.01	0.36	110
淤泥质土	18.5~19.0	1.85	1.01	0.43	150
黏性土	19.5~20.0	1.94	0.85	0.32	150
黏性土	22.0~22.5	1.95	0.75	0.16	170

典型软土的 e - $\lg p$ 压缩曲线见图 3，图例中数值为取样深度。由表 1 和图 3 可知：淤泥垂直切样、水平切样与重塑样三者的 e - $\lg p$ 曲线在加载过程中均近似为直线，可见淤泥具有结构强度差、严重欠固结和高压缩性；粉砂为低压缩性；淤泥质土具有弱欠固结、中等压缩性。

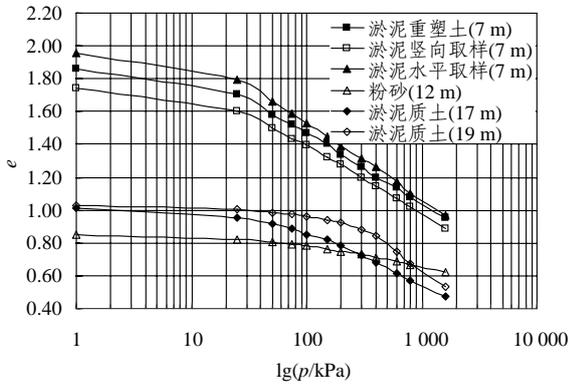


图 3 典型软土的 e - $\lg p$ 压缩曲线

Fig.3 Typical curves of e - $\lg p$ for soft soil

3.2 现场试验与结果

为研究抽真空期间土中孔隙水压力变化和分层压缩量，本试验在地基不同深度埋设 8 个孔隙水压力计传感器和 1 根安装 10 个磁环的分层沉降管。磁环及孔隙水压力传感器编号和埋深见现场试验断面剖面图，如图 4 所示。

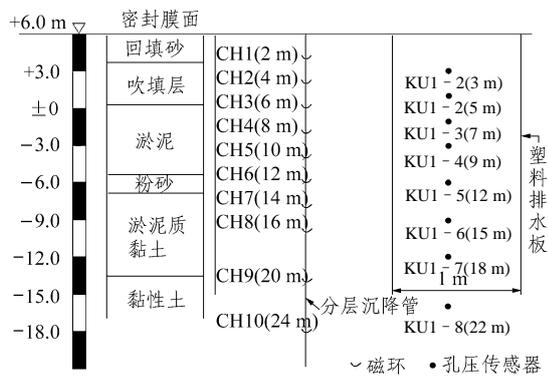


图 4 现场试验断面剖面图

Fig.4 Cross-section of in-situ testing

地基不同深度孔隙水压力值与抽真空时间曲线结果见图 5。分层压缩量与抽真空时间曲线见图 6，表示相邻磁环间土层压缩量(以 DM 表示地面)。实测砂垫层中膜下最大真空度与 3 m 深处 KU1 - 1 孔隙水压力计测出的孔隙水压力下降值基本一致。由图 5 可知，地基淤泥中的孔隙水压力下降最慢、压

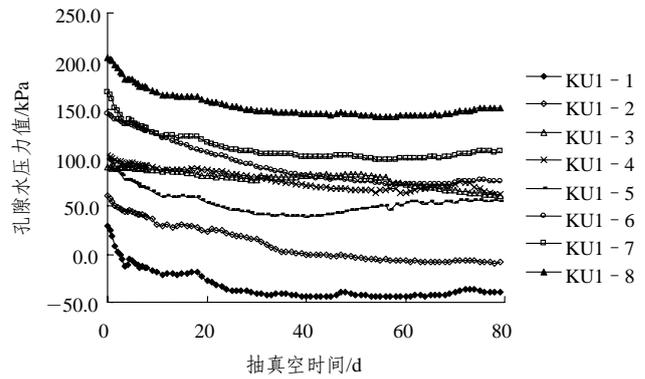


图 5 地基不同深度孔隙水压力值与抽真空时间曲线

Fig.5 Pore water pressure values vs. time at different depths of foundation

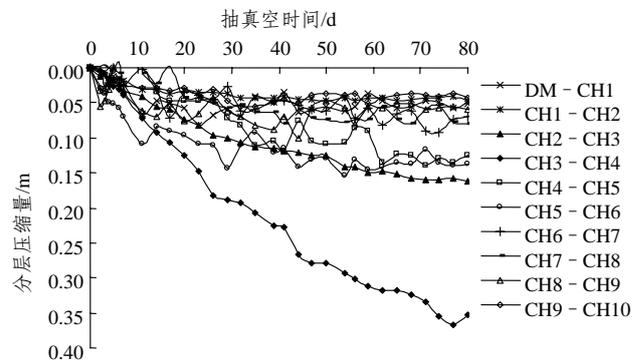


图 6 分层压缩量与抽真空时间曲线

Fig.6 Soil layer compressions vs. time of vacuum preloading

缩量最大，说明淤泥低渗透性、高压缩性和有明显固结阶段；但其他土层中孔隙水压力快速降低，以瞬时沉降为主。数值分析可得出 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 正方形布置竖向排水体地基，当土的渗透系数大于 $1 \times 10^{-6}\text{ cm/s}$ 时，排水体中水头降低引起周围土体孔隙水压力变化几天就能稳定，而在渗透系数小于 10^{-7} cm/s 的土中孔隙水压力稳定需要一段较长时间，因此夹薄层粉砂的淤泥质土水平向渗透系数大于 $1 \times 10^{-6}\text{ cm/s}$ 是导致孔隙水压力快速下降的主要原因。

3.3 地基土层压密效果分析

由图 5 可知，抽真空期间地表 6 m 以下，土中孔隙水压力均大于 0，可按单向压缩计算沉降。理论计算时取回填砂容重为 18.3 kN/m^3 ，吹填层容重为 17.5 kN/m^3 ，初始水位在地表下 0.5 m，其他参数见表 1。运用式(7)，(8)分别以正常固结和欠固结土计算磁环间土层压缩量，计算压缩量与实测压缩量比较见表 2。由表 2 可知，按欠固结计算的总压缩量与实测值比较接近，而按正常固结计算值远小

表 2 计算压缩量与实测压缩量比较

Table 2 Compression values of calculated results vs. measured results

地层深度 /m	压缩量 实测值/m	最大孔隙水压力降低值/kPa	按正常固结 计算值/m	按欠固结计 算值/m
6.0~8.0	0.357	35.0	0.060	0.207
8.0~10.0	0.129	40.2	0.057	0.203
10.0~12.0	0.133	59.0	0.044	0.099
12.0~14.0	0.066	70.5	0.036	0.046
14.0~16.0	0.073	73.8	0.047	0.095
16.0~20.0	0.065	70.7	0.085	0.105
20.0~24.0	0.048	61.3	0.034	0.047
合计	0.871		0.363	0.802

于实测值，说明真空预压期间地基自重应力欠固结引起的沉降占总沉降主要比例。

图 7 为不同深度单位压缩量，可看出淤泥中单位深度压缩量按正常固结计算偏小，由于不同深处淤泥中孔隙水压力降低差别较大，粉砂与淤泥质土层不均匀分布，而理论计算中压缩指数、孔隙水压力下降值和先期固结压力等参数只能取部分点进行测试，因此虽按欠固结土计算的总压缩量与实测值比较接近，但单位压缩量却围绕实测值波动较大，地基 18 m 以下单位压缩量的计算值与实测值逐渐吻合。可看出地基的压密效果随地层深度增加而明显减小，淤泥层单位压缩量在 10% 左右，淤泥质土的单位压缩量为 1%~5%，因此可从单位压缩量定量分析真空预压地基深层压密程度和加固深度。

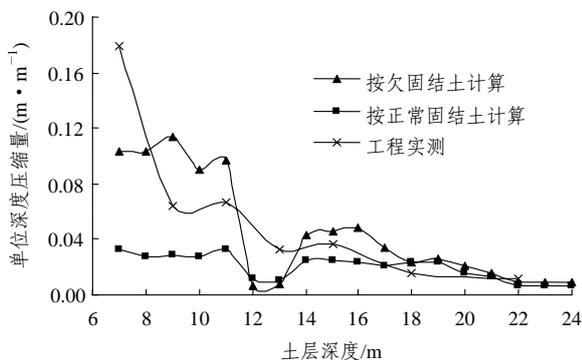


图 7 不同深度单位深度压缩量

Fig.7 Unit compression at different depths

目前一些学者对真空预压加固深度进行研究：张海霞和王保田^[10]通过在排水板 25 m 深地基中进

行检测，认为地面下 40 m 仍有加固效果；岳红宇等^[11]通过在 20 m 深袋装砂井地基进行检测，认为加固深度可达 23 m；严蕴等^[7]分析 33 和 26 m 两个排水板地基，表明 18 m 范围内土体处理效果较好；李就好^[12]通过分析长 17 m 袋装砂井地基，认为加固深度可达砂井下 2~3 m，可见真空预压地基在排水体深度都有加固效果。

理论分析结果表明，正常固结或欠固结软黏土只要有孔隙水压力降低，土体就会产生压缩，而真空预压地基孔隙水压力实测排水体周围土体中孔隙水压力均有下降，因此土体产生压密现象。但理论计算表明其单位压缩量随地层深度增加而减弱，一定深度以下真空预压加固效果对改善土的性质、提高土的抗剪强度和地表建筑物的影响都很小。该实例地表 20 m 以下单位压缩量已小于 1%，另取一般中等压缩性土均质地基分析，假设半无限地基中孔隙水压力均降低 80 kPa、压缩指数 C_c 为 0.3，理论上可估算 20 m 深度以下单位压缩量小于 2%，但 40 m 深处单位压缩量仍大于 1%，可见真空预压加固深度是不确定的，因此宜从加固地基设计要求、土层压缩性估算软土地基最佳加固深度以及从经济上综合考虑真空预压地基排水体深度设计。

4 结 语

(1) 地基土体的侧向总应力随孔隙水压力降低而减小，竖向和侧向有效应力按 k_0 比例同步增加；孔隙水压力在相对压强小于 0 范围内降低时，将引起土体等向压缩；大于 0 范围内降低时，将引起土体单向压缩，孔隙水压力降低经过相对压强 0 点，土体压缩应以相对压强 0 点分段；孔隙水压力相对压强 0 点用孔隙水压力计直接测量。

(2) 南沙港区的真空预压地基沉降若按欠固结土计算，则与现场实测基本一致，该地基自重应力欠固结沉降是抽真空期间地基总沉降的主要部分之一；沿地层不同深度的单位压缩量按欠固结计算围绕实测值上下波动，随深度增加计算值与实测值逐渐吻合。

(3) 真空预压的加固深度随排水体深度增加而增大，而压密效果随深度增加明显减小，这宜从地基设计要求、经济合理和土层压缩性来估算地

基最佳加固深度——真空预压地基的竖向排水体深度设计。

参考文献(References):

- [1] 吉随旺, 张俦元. 降水预压软基处理技术中孔隙水压力效应研究[J]. 工程地质学报, 2001, 9(4): 368 - 372.(Ji Suiwang, Zhang Zhuoyuan. Study on the effect of pore water pressure in technology of dewatering soft soil foundation treatment[J]. Journal of Engineering Geology, 2001, 9(4): 368 - 372.(in Chinese))
- [2] 高宏兴. 软土地基加固[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1990.(Gao Hongxing. Soft Foundation Treatment[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1990.(in Chinese))
- [3] 娄炎. 负压条件下软土地基的孔隙水压力[J]. 水利学报, 1988, (9): 48 - 52.(Lou Yan. Pore water pressure under negative pressure in soft foundation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988, (9): 48 - 52.(in Chinese))
- [4] 孔德金, 苗中海. 软基加固检测孔隙水压力分析[J]. 港工技术, 2000, (3): 43 - 46.(Kong Dejin, Miao Zhonghai. Analysis of the variation of pore water pressure during consolidating soft soil foundation[J]. Port Engineering Technology, 2000, (3): 43 - 46.(in Chinese))
- [5] 郑新亮, 董志良, 杨福麟. 真空联合堆载预压土体孔隙水压力变化规律的研究[J]. 水运工程, 2004, (2): 4 - 6.(Zheng Xinliang, Dong Zhiliang, Yang Fulin. A study on variation law of pore water pressure in soil reinforced by vacuum and surcharge preloading[J]. Port and Waterway Engineering, 2004, (2): 4 - 6.(in Chinese))
- [6] 朱建才, 温晓贵, 龚晓南. 真空排水预压加固软基中的孔隙水压力消散规律[J]. 水利学报, 2004, (8): 123 - 128.(Zhu Jiancai, Wen Xiaogui, Gong Xiaonan. Dissipation of pore water pressure in soft foundation reinforced by vacuum drainage preloading[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, (8): 123 - 128.(in Chinese))
- [7] 严蕴, 房震, 花剑岚. 真空堆载预压处理软基效果的室内试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2002, 30(5): 118 - 121.(Yan Yun, Fang Zhen, Hua Jianlan. Experimental study on effect of treatment of soft foundation with vacuum surcharge preloading[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2002, 30(5): 118 - 121. (in Chinese))
- [8] 张俦元, 王士天, 王兰生. 工程地质分析原理[M]. 北京: 地质出版社, 1994.(Zhang Zhuoyuan, Wang Shitian, Wang Lansheng. Principle and Analysis of Engineering Geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994.(in Chinese))
- [9] 薛禹群. 地下水动力学原理[M]. 北京: 地质出版社, 1986.(Xue Yuqun. Principle of Groundwater Hydrodynamics[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1986.(in Chinese))
- [10] 张海霞, 王保田. 真空堆载联合预压效果检验[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1 873 - 1 876.(Zhang Haixia, Wang Baotian. Effect examinations of the vacuum-mound preloading method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12): 1 873 - 1 876.(in Chinese))
- [11] 岳红宇, 王良国, 杨慧. 真空-堆载联合预压加固高速公路软基效果分析[J]. 公路交通科技, 2001, 18(1): 6 - 9.(Yue Hongyu, Wang Lianguo, Yang Hui. Analysis of strengthening effect on expressway soft foundation by vacuum preloading method[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2001, 18(1): 6 - 9.(in Chinese))
- [12] 李就好. 真空-堆载联合预压法在软基加固中的应用[J]. 岩土力学, 1999, 20(4): 58 - 62.(Li Jiuhao. Application of vacuum-heaped load combining precompression to the consolidation of soft clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 1999, 20(4): 58 - 62.(in Chinese))