

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2017.02.026

# 气压劈裂真空法加固软土地基设计方法及工程应用

姚宇, 黄德权

(中设设计集团股份有限公司, 南京 210001)

**摘要:** 气压劈裂真空预压法是将气压劈裂和真空预压结合起来的新的软土地基处理方法。高压气体进入土体中使其形成裂隙, 提高了低渗透土体的渗透性能, 从而加速地基沉降速率、缩短处理工期, 达到经济高效地加固深厚软基的目的。从控制沉降变形的目标出发, 提出气压劈裂真空法处理软基的设计原则、设计内容、参数取值及设计计算方法, 并应用于阜宁—建湖高速公路的软基处理工程中, 对加固后的地表沉降、深层水平位移、加固前后 CPTU 锥尖阻力等指标进行监测, 取得了较好的效果。气压劈裂真空法加固软土地基的设计方法可为推广该法的工程应用提供参考和依据。

**关键词:** 气压劈裂; 真空预压; 深厚软土; 设计方法; 加固效果

中图分类号: TU472

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2017)02-0141-06

## Design Method and Its Engineering Application on a Combined Method of Vacuum Preloading and Pneumatic Fracturing for Soft Ground Improvement

YAO Yu, HUANG Dequan

(China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210001, China)

**Abstract:** The combined method for vacuum preloading and pneumatic fracturing is a new soft earth foundation treatment. It formed a series cracks when the high pressure gas entered into soils, then the penetrating quality increased, the settlement rate was accelerated and construction times have been cut down, thus the goal of economic efficiently reinforcement of deep soft foundation been achieved. Based on the purpose of settlement deformation controlling, the design principles, design contents, parameter choice and design calculation method was put forward, by the combined method of vacuum preloading and pneumatic fracturing for soft ground improvement. After that, the method was applied to the deep soft soil improvement of Funing-Jianhu Highway, some indexes was monitored such as ground surface settlement, horizontal displacement of deep soft soil, and CPTU static point resistance and good effect was obtained. The design method can be reference basis to engineering application.

**Key words:** pneumatic fracturing; vacuum preloading; deep soft soil; design method; reinforcement effect

真空预压法自 1952 年 Kjellman 提出<sup>[1]</sup>以来, 随着抽真空的设备、密封、排水等一些技术难题的突破, 如今已广为应用<sup>[2]</sup>。然而其排水固结时间相对较长、沉降速率难稳定、工后沉降难以控制, 因此, 诸如真空联合堆载预压法<sup>[3]</sup>、真空井点降水法<sup>[4]</sup>、真空电渗法<sup>[5-6]</sup>、高真空击密法<sup>[7]</sup>、真空预压联合电动法<sup>[8]</sup>等一系列方法被提出, 并取得了良

好的应用效果。但是对于我国东南沿海工程建设中经常遇到的深厚软土, 仍不同程度存在上述问题, 加固效果不够理想。

气压劈裂技术最初应用于土壤环境修复工程中, 以提高土体的渗透性能。刘松玉等人将该技术应用到地基处理领域, 发明了气压劈裂真空预压法, 并作了大量卓有成效的研究<sup>[9-11]</sup>。

气压劈裂真空预压法是软基处理的一种新工艺, 运用到工程实践中需经过恰当的设计。而目前对其设计原则、设计方法研究甚少, 本文介绍了劈裂真空法加固软土地基的设计方法, 通过阜宁—建

收稿日期: 2016-07-04

作者简介: 姚宇(1978), 男, 江苏南京人, 高级工程师, 硕士, 主要从事高速公路勘察设计工作(e-mail) zhang@gedi.com.cn。

湖高速公路的实际应用,对加固效果进行分析,为该工法应用于工程实践提供参考和依据。

## 1 劈裂真空法的基本原理

气压劈裂真空预压法是在传统真空预压技术的基础上,增加一套气压劈裂系统,如图1所示。通过该系统向土体中注入高压气体,土体发生气压劈裂,从而产生裂隙,由这些裂隙和所打入的排水板共同组成排水体系,可加速孔隙水压力消散,提高真空荷载向深层土体的传递效率,加速软土地基处理、缩短处理工期、增加软基处理有效深度,以达到经济、高效加固深厚软土地基之目的<sup>[12]</sup>。

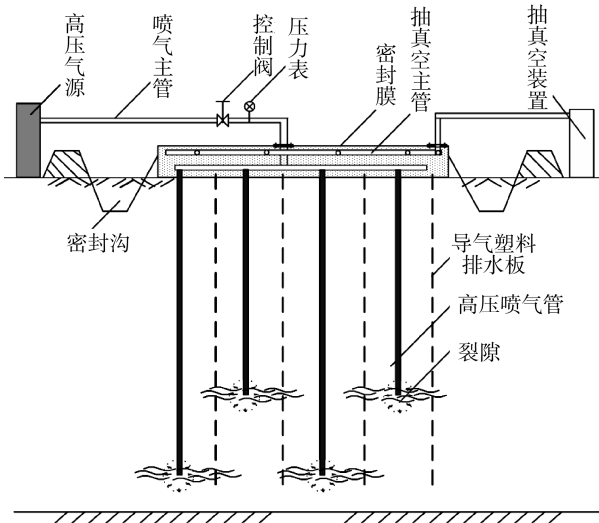


图1 气压劈裂真空预压法原理图

Fig. 1 Schematic diagram of combined method of vacuum preloading and pneumatic fracturing

## 2 气压劈裂真空法加固软土地基设计方法

气压劈裂真空预压法处理软基,主要应用于对变形要求极高的高速公路、高速铁路等,因此本文提出以沉降变形控制为目标的设计原则。设计中既需保证路堤填筑过程中的稳定性,更需控制工后沉降。其中工后沉降可联合总沉降和固结度计算确定,通过调整排水体深度、间距、预压时间和预压荷载,使其在适宜的范围内就可以满足工后沉降的要求;稳定性要求就是要确保在路堤施工过程及后续地基固结过程中荷载不超过其承载力。基于变形控制的气压劈裂真空预压法的设计参数,如表1所示。

### 2.1 加固范围及真空预压系统设计

在真空预压区内,由于真空度会向外扩散,边缘的加固效果不如中部,长方形场地的加固效果不如正方形场地。为保证预压区加固效果的均匀性,真空预压加固范围应大于拟建工程外缘所包围的范围,并且使每块预压面积尽可能大且呈正方形;当真空预压加固范围较大时,应该分区进行加固。

表1 基于变形控制的气压劈裂真空预压法设计参数

Tab. 1 Design parameters of the method basing on the deformation control

计算内容	计算参数	
沉降设计	预压荷载	
	总沉降量计算	喷气荷载
	固结计算	预压时间
稳定性验算	强度增长计算	排水体直径、间距、深度
		喷气管间距、深度
		排水体直径、间距、深度
		喷气管间距、深度

气压劈裂真空预压法由气压劈裂法和真空预压法两大部分组成。其中真空预压系统主要包括排水系统、密封系统、抽真空系统,主要涉及到的参数有:排水体的尺寸、间距、深度;预压区的面积及分块情况;真空度及固结度;地基土的变形计算;地基土的地基承载力计算。这部分设计即是常规真空排水预压法的内容,此处不再赘述。

### 2.2 气压劈裂系统设计

气压劈裂真空预压法是在常规真空排水预压法的基础上,增加了一套气压劈裂系统,因此主气压劈裂系统设计是本工法设计的关键。根据气压劈裂的原理,气压劈裂系统设计主要包括喷气管深度设计、喷气管路布置设计、输气管路形式的设计以及喷气方式选择。

#### 2.2.1 喷气管深度设计

气压劈裂真空预压法的特色在于提高深部软土的处理效果,常规真空预压一般10 m以内的处理效果还是非常理想的,在设置喷气管深度时应重点考虑深部软土。根据场地工程地质勘察报告确定软土地基的位置,尤其是深部软土的厚度,结合软土地质特性确定喷气点的深度。喷气点的不同深度的设置可以由软土层厚度确定,用式(1)计算。

$$m = \frac{h_1 - h_2}{\lambda} \quad (1)$$

式中:  $m$  为喷气管深度;  $h_1$  为深厚软土层底面高程;  $h_2$  为深厚软土层顶面高程;  $\lambda$  为气压劈裂沿深度方向影响系数, 可由理论公式确定, 经验值为 2.0~2.5。

### 2.2.2 喷气管布置形式

喷气管间距主要取决于劈裂的水平影响范围、土的固结特性和施工期限的要求。喷气管的间距, 要满足工程设计对固结度的要求。喷气管的布置形式与竖向排水体的设置相似, 排列方式有正三角形和正方形两种, 其中正三角形的更为常用。一般而言, “细而密”布置的喷气效果好。

### 2.2.3 输气管路形式

输气管路分为的支管和主管。由于考虑气压劈裂的效果, 将加固软土层厚度进行等分, 进行不同深度的喷气管的施工。因此在进行输气管路连接时, 要考虑到土体劈裂所需要的喷气压力, 必须将相同深度的喷气管连接到了同一个输气管上, 不同深度的喷气管由不同的气源提高不同的喷气压力。同时, 为了保证整个场地中气压劈裂效果, 减小劈裂的不均匀性, 将场地分块进行连接。

### 2.2.4 喷气形式

气源的选择直接关系到气压劈裂的效果。由于对场地进行了分块, 一般以一块场地中的注气为一个系统。在小块区域中, 喷气顺序为从最深注气管开始依次往浅层喷气。一轮喷气结束后, 间隔一段时间, 再进行下轮喷气。每轮喷气时间、间隔时间及整个持续时间要根据现场监测结果, 特别是砂垫层表面出气和出水情况、孔压变化等进行调整。

## 2.3 设计计算

### 2.3.1 总沉降计算

气压劈裂真空预压法引起的地基土沉降一般包括瞬时沉降、固结沉降和次固结沉降、喷气荷载引起沉降、打设竖向排水体期间产生的沉降这几部分。总沉降量可由式(2)计算:

$$S = S_x + S_d + S_c + S_s + S_p \quad (2)$$

式中:  $S$  为总沉降量;  $S_x$  为打设竖向排水体期间所产生沉降量;  $S_d$  为瞬时沉降量;  $S_c$  为地基固结沉降量;  $S_s$  为地基次固结沉降量;  $S_p$  为喷气荷载引起的沉降量。

从理论上讲, 上式计算结果将非常精确, 但是由于其中公式所需参数众多, 难以确定, 因此计算结果的精确度难以保证。根据国内外实测沉降资料

的分析结果, 得到式(3):

$$S = S_x + \psi_s S_c \quad (3)$$

式中:  $\psi_s$  为沉降计算经验系数, 可取 1.0~1.3。  $S_c$  可由考虑地基一维固结情况的固结沉降公式计算。大量统计数据表明<sup>[13-14]</sup>,  $S_x$  的占总沉降量的比例在 7.2%~34.1% 之间, 不同工程之间相差较大。考虑到打设塑料喷气管也将引起部分沉降, 本文建议该部分沉降量取总沉降量的 30%。

### 2.3.2 工后沉降计算

工后沉降可由总沉降量和固结度计算, 如式(4)和(5)式:

$$S_{\text{工后}} = S(1 - U_t) \quad (4)$$

$$U_t = 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-\beta_{tz} t} \quad (5)$$

式中:  $\beta_{tz} = \frac{8c_H}{(F + \pi G)d_c^2} + \frac{\pi^2 c_v}{4H^2}$ ;  $F = \ln \frac{n}{S} + \frac{k_H}{k_s} \ln S - \frac{3}{4}$ ;  $G$  为井阻因子;  $S$  为涂抹比, 竖向排水体涂抹后的直径  $d_s$  与竖向排水体直径  $d_w$  之比;  $n$  为井径比;  $k_w$ 、 $k_H$ 、 $k_s$  分别为竖向排水体、地基土和涂抹土层的渗透系数;  $H$  砂井的长度。

当增加气压劈裂系统后, 由于气压劈裂使得土体的渗透性得到改善, 而且这主要是水平向渗透系数的增长所致。进行固结度计算时, 应采用式(6)<sup>[15]</sup>计算气压劈裂裂隙宏观渗透系数, 代替原有的水平向渗透系数, 故平均气压劈裂对土体固结速率的增强效应。

$$\log[k_{\text{predicted}}] = 0.5 + \log \left[ \left( \frac{1}{6} \frac{\pi b^2 R}{V} \cdot \frac{G_s(1+w)\rho_w}{\rho} + \frac{G_s(1+w)\rho_w}{\rho} - 1 \right)^3 / \frac{G_s^3(1+w)\rho_w}{\rho} \cdot S^2 \left( \frac{1}{6} \frac{\pi b^2 R}{V} + 1 \right) \right] \quad (6)$$

### 2.3.3 整体稳定性验算

对高速公路而言, 工程实践对沉降控制的要求较稳定性控制的要求高, 地基处理以控制工后沉降为目标是发展的必然。以工后沉降为控制目标的设计新思路已经隐含了稳定性的要求, 因此, 气压劈裂真空预压法仅进行稳定性验算。

均质软土地基稳定分析方法一般采用圆弧法, 其抗滑稳定安全系数  $K_h$  由式(7)计算:

$$K_h = \frac{M_{\text{抗}}}{M_{\text{滑}}} \quad (7)$$

式中： $M_{抗}$ 为滑弧面上剪阻力对圆心的矩； $M_{滑}$ 为滑弧体上重量对圆心的矩。产生抗滑力矩的因素包括：路堤、地基中的竖排区和非竖排区。其中，地基中的竖排区考虑真空预压加固引起有效应力增加的影响，则抗滑力矩增量为  $\Delta M_{抗} = \sum (P_v U \tan \varphi) R$ ，其中  $P_v$  为负压渗流场引起的附加应力； $U$  为固结度。地基中的非竖排区不考虑气压劈裂真空预压的影响，此部分作安全储备之用。

### 3 工程应用

#### 3.1 工程概况

阜宁-建湖高速公路项目区域处于苏北平原，属冲击堆积平原，地势平坦，地面标高一般在 2.2~3.0 m，地貌形态简单，河流纵横成网，地下水位在地表下 1.5~2.0 m，工程地质条件复杂。路线内软土连续分布，含水量高（最高达 85.2%）、压缩性大、强度低、天然孔隙比大，压缩性高，工程性质差。针对上述特点，选择气压劈裂真空预压法对该项目东益互通 C 匝道处的软基进行处理。

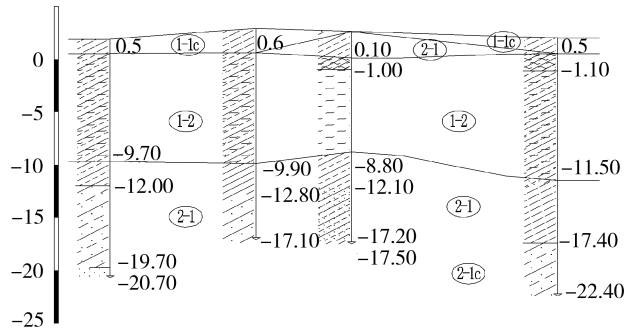


图2 阜宁-建湖高速公路东益互通 C 匝道处地质剖面图  
Fig. 2 Geological section map in Dongyi interflow Cramp of Funing-Jianhu highway

根据钻孔资料，该场地 20 m 以下分布土层依次为：1-1c 层粉土：灰黄色，很湿，稍密状态，上部为耕植土，近连续分布，厚度 1.4~1.9 m。1-2 层淤泥、淤泥质粉质粘土：灰褐色，流塑，高孔隙比，高压缩性，含少量腐殖质，局部夹粉土薄层；一般层顶埋深 1.1~5.2 m，层厚 8.9~33.4 m。1-2a 层粘土：灰黄色，可塑，高孔隙比，高压缩性，含有机质，局部夹粉砂薄层；夹于 1-2 层之间。2-1a 层粉质粘土：灰黄色，可塑，中等压缩性，局部夹粉砂薄层，局部地段揭示。2-1c 层粉土：黄色，中密~密实状态，干强度低，局部夹粉砂薄

层，局部夹粉质粘土，连续分布，局部双层分布。

#### 3.2 气压劈裂真空的现场设计

根据现场情况，设计塑料排水板三角形布置，间距 1.2 m，板长 20 m，塑料排水板在砂垫层面外露 20 cm；设计喷气管三角形布置，间距 4.8 m，由于深部软土位于 14~20 m，喷气管长分别为 14 m、16 m、18 m、20 m。管径 25 mm，壁厚 3~5 mm，为承受内压力大于 1.5 MPa 的塑料管。喷气管与塑料排水板呈嵌打形式排列，具体布置如图 3、图 4 所示。

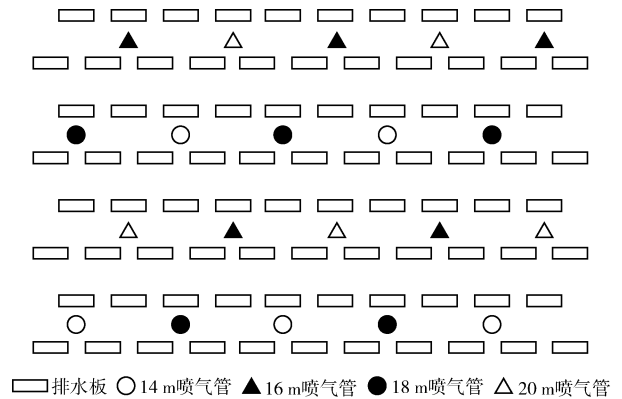


图3 喷气管与排水板平面布置图

Fig. 3 Plane arrangement chart of air ejector pipe and drainage plate

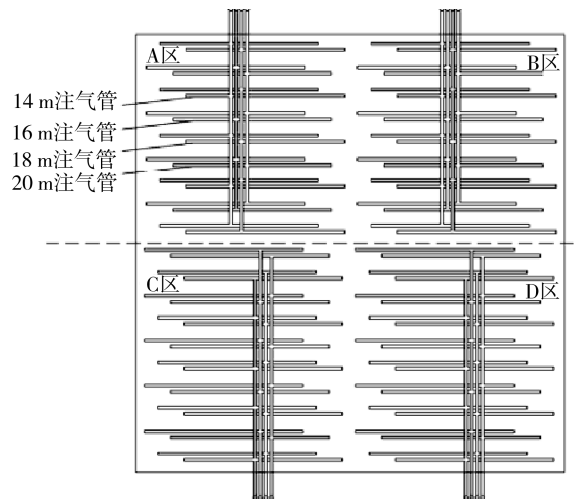


图4 喷气管路连接示意图

Fig. 4 Sketch of air ejector connection

在 20 cm 砂垫层上铺设注气系统输气管路，考虑气压劈裂的效果，将加固软土层厚度进行等分为 4 个区域，并设定不同深度的喷气管。输气管路连接时，须将相同深度的喷气管连接在同一个输气管

上。设计输气主管管径 50 mm, 支管管径 25 mm, 壁厚均为 3~5 mm, 承受内压力大于 1.5 MPa 的塑料管。

### 3.3 劈裂真空地基加固效果分析

为分析劈裂真空法加固 C 匝道处的软基处理效果, 分别对加固前后的相关指标进行监测。其中, (1) 地表沉降随时间变化规律是路堤质量控制的关键性指标, 直接反映了加固效果的好坏; (2) 对深层水平位移进行监测, 可充分了解劈裂真空法对软土地基的处理深度及效果; (3) 对加固前后的 CP-TU 锥尖阻力进行监测, 及时掌握加固土体强度的变化情况。

#### 3.3.1 地表沉降规律

如图 5 所示, 劈裂真空预压荷载作用下, 加固初期, 地表沉降发展迅速, 沉降速率较大; 到了第 20 d 左右, 沉降速率开始放缓; 一直持续到第 120 d 左右, 沉降速率开始趋于稳定。到最终卸载时, 劈裂真空预压加固地基的地表沉降最大值约为 585 mm, 平均值约为 490 mm。

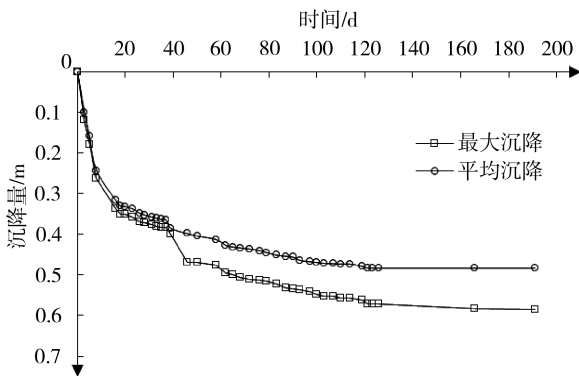


图 5 沉降随加固时间的变化曲线

Fig. 5 Graph of settlement curve varies with reinforce time

#### 3.3.2 深层水平位移观测

如图 6 所示, 抽真空期间, 最大水平位移基本都发生在地表附近; 整体上, 从浅层到深部, 水平位移呈逐渐减小的趋势。路堤荷载填筑后, 水平位移速率开始降低, 水平位移在一定程度上被限制, 加固效果较为明显。

#### 3.3.3 加固前后锥尖阻力对比

对场地加固前后分别进行了 CPTU 测试, 测试结果对比, 如图 7 所示。显然, 在 2~20 m 深度内, 加固后的锥尖阻力与加固前的锥尖阻力之差开始逐步拉开, 从 4 m 深度开始, 加固后的锥尖阻力

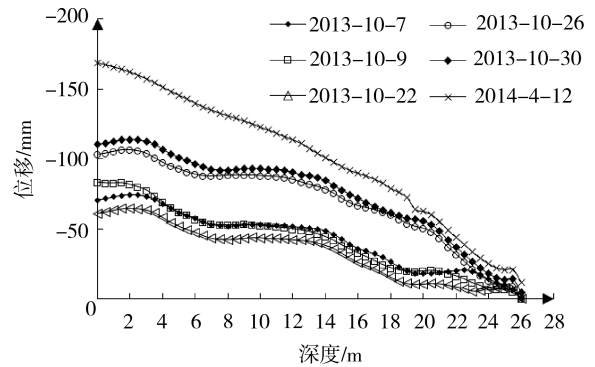


图 6 水平位移随时间变化曲线

Fig. 6 Graph of horizontal displacement varies with time

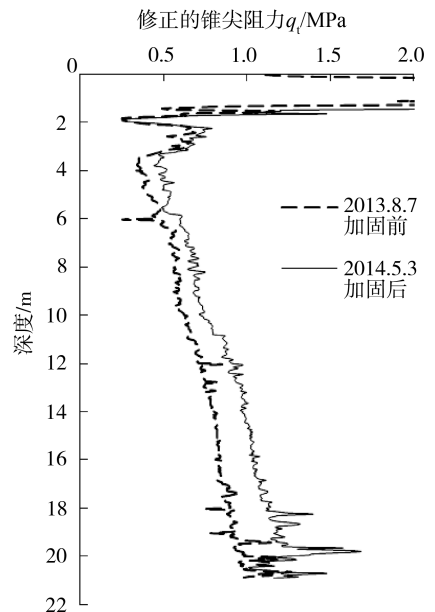


图 7 加固前后 CPTU 锥尖阻力变化情况

Fig. 7 Variation of CPTU tip resistance before & after reinforce

明显大于加固前。其中, 在深度 2~10 m 之间, 加固后锥尖阻力平均增长约 22%; 在 10~20 m 之间, 加固后锥尖阻力平均增长约 37%。

由上述监测结果可知, 劈裂真空技术可有效加固软土地基深部土体。这主要是由于高压气体使土体产生裂隙, 增加了流体流动通道, 深部土体的渗透性能由此得到增强, 土中水分及时排除, 使得超静孔隙水压力迅速消散, 加速了真空荷载向软土地基深部传递, 土体强度也得到了提高。

## 4 结论

在气压劈裂真空预压法计算理论研究的基础上, 提出基于变形控制的气压劈裂真空预压的实用

设计方法,包括:设计原则、设计内容、设计参数的取值以及设计计算方法。然后将这套方法应用于阜宁-建湖高速公路的软基处理工程中,并对加固后的地表沉降、深层水平位移和加固前后 CPTU 锥尖阻力等指标进行了监测,结果表明:

1) 气压劈裂真空预压法加固地基时,地表沉降发展迅速,沉降速率较大;到 120 d 左右,开始趋于稳定,处理时间得到有效压缩,最终工后沉降满足设计要求。

2) 常规真空预压法对浅部土体效果较好,而深部处理效果不佳。采用气压劈裂真空预压法之后,深层土体强度明显增加,水平位移降低,加固效果较为明显。

现场实测数据表明,气压劈裂真空预压法是一种快速、有效的软土地基处理新方法,且设计方法的明确,为该技术的进一步推广应用提供基础和参考。

#### 参考文献:

- [1] KJELLMAN W. Consolidation of clayey soils by atmospheric pressure [C]//Proceedings of a Conference on Soil Stabilization, Massachusetts Institute of Technology. Boston: [s. n.], 1952: 258-263.
- [2] 娄炎. 真空排水预压法加固软土技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [3] 董志良, 胡利文, 张功新. 真空及真空联合堆载预压法加固软基的机理与理论研究 [J]. 水运工程, 2005(9): 83-91. DONG Z L, HU L W, ZHANG G X. Mechanism and theoretical research on vacuum and vacuum-load consolidation of soft ground [J]. Port & Waterway Engineering, 2005(9): 83-91.
- [4] 汪中卫, 宰金璋. 真空井点降水联合等载预压在桥坡路基加固中的对比试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(15): 2579-2584. WANG Z W, ZAI J Z. Research on comparative tests of reinforcement for bridge-slope subgrade by vacuum well-point dewatering combined with equal preload [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(15): 2579-2584.
- [5] 高志义, 张美燕, 张健. 真空预压联合电渗法室内模型试验研究 [J]. 中国港湾建设, 2000(5): 58-61. GAO Z Y, ZHANG M Y, ZHANG J. Laboratory model test of vacuum preloading in combination with electro-osmotic consolidation [J]. China Harbor Engineering, 2000(5): 58-61.
- [6] 徐伟, 刘斯宏, 王柳江, 等. 真空预压联合电渗法加固软基的固结方程 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2011, 39(2): 169-175. XU W, LIU S H, WANG L J, et al. Analytical theory of soft ground consolidation under vacuum preloading combined with electro-osmosis [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2011, 39(2): 169-175.
- [7] 武亚军, 张孟喜, 徐士龙. 高真空击密法吹填土地基处理试验研究 [J]. 港工技术, 2007(1): 43-46. WU Y J, ZHANG M X, XU S L. Study on test of high vacuum compact method for reclaimed ground improvement [J]. Harbor Technique, 2007(1): 43-46.
- [8] 覃家琪, 李洪艺, 叶李胜, 等. 真空预压联合电动法加固软土的电学性质变化实验研究 [J]. 中山大学学报(自然科学版), 2014, 53(6): 112-117. QIN J Q, LI H Y, YE L S, et al. Electrical properties of consolidation of soft soil by vacuum preloading combined with electrokinetics [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2014, 53(6): 112-117.
- [9] 刘松玉, 洪振舜, 章定文. 气压劈裂真空法预压法加固软土地基操作方法 [P]. 中国专利: ZL 2005 1 0038644.0, 2007-10-3.
- [10] 章定文, 刘松玉, 顾沉颖, 等. 土体气压劈裂的室内模型试验 [J]. 岩土工程学报, 2009, 31(12): 1925-1929. ZHANG D W, LIU S Y, GU C Y, et al. Model tests on pneumatic fracturing in soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(12): 1925-1929.
- [11] 刘松玉, 韩文君, 章定文, 等. 劈裂真空法加固软土地基试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2012, 34(4): 591-599. LIU S Y, HAN W J, ZHANG D W, et al. Field pilot tests on combined method of vacuum preloading and pneumatic fracturing for soft ground improvement [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(4): 591-599.
- [12] 韩文君, 刘松玉, 章定文. 荷载作用下土体气压劈裂效果试验研究 [J]. 岩土力学, 2011, 32(7): 1951-1956. HAN W J, LIU S Y, ZHANG D W. Experimental study of pneumatic fracturing effect in soil under overburden load [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(7): 1951-1956.
- [13] 黎克强, 沈孝宇, 周洪涛. 深港西部通道大面积填海地基处理工程及其主固结沉降计算与讨论 [J]. 深圳土木与建筑, 2011, 8(2): 29-36. LI K Q, SHEN X Y, ZHOU H T. Large area reclaimed foundation treatment engineering of Hongkong-Shenzhen western Corridor and its primary consolidation settlement calculation [J]. Shenzhen Civil and Construction, 2011, 8(2): 29-36.
- [14] 李婉, 陈正汉, 董志良. 考虑地下水浸没作用的固结沉降计算方法 [J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2173-2177. LI W, CHEN Z H, DONG Z L. Computational method for consolidation settlement considering submergence due to groundwater during preloading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(10): 2173-2177.
- [15] 章定文. 气压劈裂理论与排水粉喷桩复合地基设计理论研究 [D]. 南京: 东南大学, 2007. ZHANG D W. Pneumatic fracturing theory and design principles of a combined DJM and PVD method [D]. Nanjing: Southeast University, 2007.