

# 土体气压劈裂的室内模型试验

章定文<sup>1</sup>, 刘松玉<sup>1</sup>, 顾沉颖<sup>2</sup>, 韩文君<sup>1</sup>

(1. 东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210096; 2. 上海隧道工程股份有限公司技术中心, 上海 200233)

**摘 要:** 气压劈裂是向岩土体中注入高压气体形成裂隙, 增加流体的流动通道, 从而提高低渗透性土体的渗透系数。通过室内模型试验探讨了土体在高压气体作用下的响应及劈裂现象。试验结果表明, 向土体中喷入高压气体会在土体中生成超静孔压, 超静孔压大小与喷气压力相关; 超静孔压较大时, 土体发生气压劈裂, 生成的裂隙又为超静孔压的快速消散提供了通道, 大部分超静孔压在裂隙闭合前消散; 随着超静孔压的消散, 裂隙随之减小, 但不会完全闭合, 留存残余微裂隙。

**关键词:** 气压劈裂; 超静孔压; 裂隙; 渗透

**中图分类号:** TU472.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-4548(2009)12-1925-05

**作者简介:** 章定文(1978-), 男, 湖南临澧人, 博士, 主要从事特殊土加固、路基工程等方面的研究。E-mail: zhangdw@seu.edu.cn。

## Model tests on pneumatic fracturing in soils

ZHANG Ding-wen<sup>1</sup>, LIU Song-yu<sup>1</sup>, GU Chen-ying<sup>2</sup>, HAN Wen-jun<sup>1</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Technology Center of Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai 200233, China)

**Abstract:** Pneumatic fracturing is the process of generation of fractures or extension of existing fractures in soils and rocks through the injection of high-pressure air into boreholes. The pneumatic fracturing has been utilized to increase the permeability of soils. A model test in laboratory is designed in this study to simulate the response of soils to the high-pressurized air. The model test results indicate that the injection of pressurized air into soil induces excess pore water pressure and also fractures the soils. The magnitude of induced excess pore water pressure is related to the pressure of the pressurized air. The fractures may function as channels for dissipation of the excess pore pressure. The fractures will close with dissipation of the excess pore pressure; however, a residual fracture is developed.

**Key words:** pneumatic fracturing; excess pore water pressure; fractures; permeability

## 0 引 言

土体劈裂是指土体在高压液体或高压气体作用下产生裂隙并发展的过程。工程上采用的劈裂技术主要有水力劈裂、气压劈裂和爆破劈裂。较前两者而言, 爆破劈裂在工程中应用较少。水力劈裂技术自1947年在美国首次试验成功以来, 已经广泛地应用于石油和天然气增产、原位地应力测试、大坝防渗、矿井突水防治、地下污染物运移、地下干热岩体热能开发等岩土工程领域<sup>[1]</sup>。国内外学者对岩土体的水力劈裂进行了深入系统的研究, 已经形成了较为成熟的水力劈裂理论。

气压劈裂技术由新泽西工学院于1988年提出, 通过向岩土体中注入高压气体形成裂隙, 增加流体的流动通道, 提高低渗透性土体的渗透系数, 进而联合其他污染土处置技术(如蒸汽浸提法、生物修改法、热

处理法), 以提高污染物的清除效益<sup>[2]</sup>。实际上, 国际上一些学者也已经注意到其它岩土工程实践中气压劈裂的客观现象, 并进行了初步观测。Larsson等<sup>[3]</sup>在石灰-水泥搅拌桩施工过程中观测到了明显的气压劈裂现象, 施工过程中灰罐的压力为350~500 kPa, 在桩体周围存在1~3条辐射状的竖向裂隙, 其宽度为10 mm左右, 长约0.5 m; Johansson<sup>[4]</sup>曾报导在石灰桩施工时, 当喷粉气压为420~450 kPa时, 引起周围土体内部的最大孔隙水压力会达到静水压力的1.5倍; Vriend<sup>[5]</sup>曾测到在离粉喷桩5.5 m处施工时的最大超静孔压达到120 kPa, 粉喷桩施工最大影响距离能达到14 m; 吴燕开<sup>[6]</sup>在粉喷桩室内模拟试验中也观测到了气压劈裂现象。沈水龙<sup>[7]</sup>报道了深层搅拌桩施工时桩周土中产

基金项目: 国家自然科学基金项目(50808046)

收稿日期: 2009-05-12

表 1 连云港海相软土的基本物理力学指标

Table 1 Basic properties of marine clay

| 含水率/% | 液限/% | 塑限/% | 塑性指数/% | 比重   | 不同粒径所占比例/% |                |           |
|-------|------|------|--------|------|------------|----------------|-----------|
|       |      |      |        |      | <0.002 mm  | 0.002~0.074 mm | >0.074 mm |
| 51.2  | 62.0 | 30.0 | 32.0   | 2.71 | 22         | 76             | 2         |

生较大的超静孔隙水压力在土体中形成裂隙, 超过 50% 的超静孔压通过裂隙迅速消散; 刘松玉<sup>[8]</sup>认识到粉喷桩施工中的气压劈裂作用, 并主动利用之, 将其转换为加快软土固结和消除施工残余气体的动力, 并发明了一种新的地基处理工法——排水粉喷桩复合地基工法 (国家发明专利号 ZL03152854.6), 该工法已经在江苏省高速公路软土地基处理中得到了成功试验应用, 具有明显的经济效益和社会效益。

尽管国内外学者已经开始关注气压劈裂问题, 并对其进行了初步研究, 取得了一些很好的研究成果, 但对土体的气压劈裂理论国内外尚缺乏深入系统的研究。本文通过室内模型试验方法对土体的气压劈裂进行探讨, 以期揭示土体气压劈裂的机理。

## 1 室内模拟试验

为了研究土体的气压劈裂机理, 采用自行研制的装置进行了室内模拟试验。下面将详细介绍试验采用土样、试验装置、试验过程以及主要试验结果。

### 1.1 土样

试验采用土样为连云港海相软土, 其基本物理力学指标试验结果见表 1。土样粒径分布采用马尔文 (Malvern) 公司生产的 Mastersizer Micro/ MicroPlus 激光衍射粒度仪测定, 试验结果见图 1。

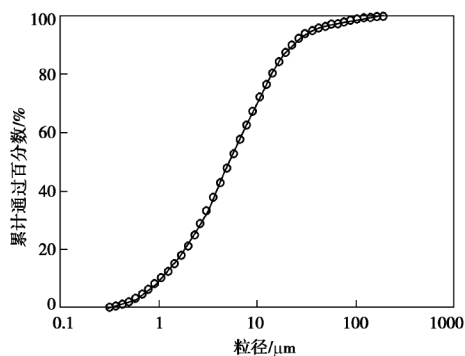
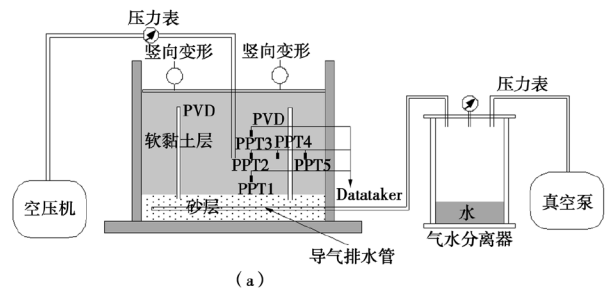


图 1 试验用海相软土的颗分试验结果

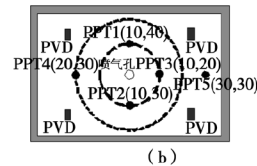
Fig. 1 Particle size distribution curve of marine clay

### 1.2 试验装置

气压劈裂室内模拟试验装置如图 2 所示。试验装置主要包括四大部分: 模型槽、真空固结系统、气压供压与控制系统及量测系统。

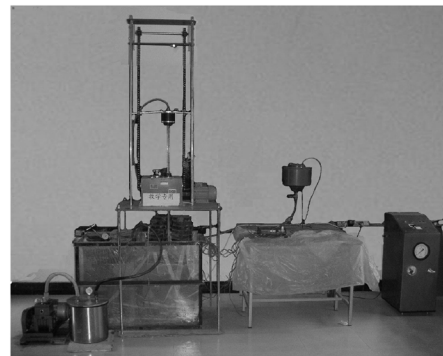


(a)



(b)

注: 括号内第一个数值表示距喷气孔中心的距离 (cm), 第二个数据表示深度 (cm)。



(c)

图 2 室内模拟装置和监测仪器埋设位置

Fig. 2 Schematic diagram of model tests and locations of instruments in the model

模型槽长 100 cm×宽 50 cm×高 75 cm。用角钢为框架, 四周以及底面采用高强度透明钢化玻璃, 玻璃接缝处用三氯甲烷和玻璃胶黏接密封。为了取得较好的密封效果, 在模型槽内先铺设两层 0.1 mm 厚的塑料膜, 将模型槽内的土样与模型槽隔绝。

真空固结系统由真空泵、气水分离装置、导气排水管和连接管等组成。导气排水管为直径 2.5 cm 的塑料管, 管内有螺旋钢丝支撑, 可承受较大的竖向压力而不会压扁。沿导管每隔 5 cm 钻有一直径约为 0.5 cm 的小洞, 导管外用土工布包裹。导气排水管通过连接管与真空泵连接。气水分离装置由高强度钢质缸体和缸盖组成, 缸盖上安装有两个阀门和一个真空表, 一个阀门连接真空泵, 另一阀门与连接管连接。

气压供压及控制系统由空气压缩机、压力控制表、

升降机、喷嘴和导管组成。空气压缩机提供高压气体, 压力控制表可以控制注入土样中的气压大小。升降机上安装插入土样内部的高压气体喷嘴, 喷口方向向下, 其直径为 4 mm, 喷头通过导管与空气压缩机相连。升降机可以调节喷头在土样中所处的深度。

监测内容包括土样在固结过程中的沉降、土样内部孔压、真空度、排出的水量以及喷气压力。在土样顶面架设位移百分表观测土体的位移, 其量程为 3 cm, 精度为 0.01 mm。孔压采用埋设在土中的不同深度和不同的位置的微型应变式孔隙水压力计测得。孔压计埋设位置见图 2。孔压计由全自动数据采集仪 Datataker 自动采集, 采集时间间隔为 1 min。真空度由真空表监测。另外, 采用电子秤直接称量气水分离器的重量, 得到排出的水量。气体压力表可以直接测量喷气压力。

### 1.3 试验过程

室内模拟试验详细步骤如下:

(1) 将连云港海相软土放入搅拌机内搅拌, 搅拌时间为 10 min, 在搅拌的过程中慢慢加水, 使得最后土样的含水率约为 1.5 倍液限。

(2) 在模型槽内先铺设两层 0.1 mm 厚的塑料膜, 铺设之前要仔细检查薄膜是否存在裂隙或孔洞。在塑料膜表面涂抹凡士林, 减少土样和塑料膜的摩擦力。在模型槽内预先注入 20 cm 厚的水防止倒入土样时产生气泡。

(3) 模型槽最下层铺设了约 5 cm 厚的粗砂层, 将导气排水管路埋设于粗砂层。粗砂层上铺设了厚度约为 5 cm 的细砂层, 并铺平, 压实。粗砂层和细砂层可以作为排水层, 同时可以防止黏土细颗粒阻塞导气排水管。

(4) 在细砂层之上填入高度为 50 cm 的重塑黏土。在土样的放入过程中, 在相应的位置 (水平分向和深度) 埋设已预先经过抽气饱和的微型孔隙水压力计。为了加速固结, 两边土样内各埋设了四根塑料排水板, 其平面布置形式见图 2。排水板底部与砂垫层相连, 高 350 mm, 宽 50 mm, 厚 4 mm。让土样静置 3 d, 排出操作中可能形成的气泡。

(5) 在土样表面铺上一层塑料薄膜, 再放上玻璃板。孔压计的导线从玻璃板边缘和模型槽间的缝隙中导出, 并与数据采集仪连接。在玻璃板上架设好位移百分表。记录孔压计和位移百分表的初始读数。

(6) 启动真空泵, 抽真空至稳定状态。真空泵可提供最大 80~90 kPa 的负压压力。

(7) 待试验土样固结完成后进行气压劈裂试验。具体试验方案见表 2。

表 2 试验方案与测试结果

Table 2 Results of fracturing tests

| 试验 | 喷气<br>时间/min | 实测喷气<br>压力/kPa | 裂隙排水期间<br>孔压消散量/kPa | 裂隙排水<br>时间/min |
|----|--------------|----------------|---------------------|----------------|
| 1  | 10           | 50             | 4.0                 | 16             |
| 2  | 10           | 100            | 7.0                 | 15             |
| 3  | 10           | 200            | 17.5                | 20             |

### 1.4 试验结果与讨论

#### (1) 超静孔隙水压力消散规律

高压气体作用下, 孔压计 PPT2 实测的超静孔压变化曲线如图 3 所示。从图 3 中可以得到两点主要结论: ①气体压力作用下, 土中超静孔压增加, 在喷气结束时达到最大值; ②超静孔压的消散可以分为两段, 刚开始时孔压迅速消散, 随后孔压消散速率明显降低。喷气初期, 高压气体的作用类似于球孔扩张, 产生超静孔压; 随着超静孔压的增大, 在土体中形成劈裂裂隙, 因此超静孔压通过裂隙快速排出, 但随之裂隙会闭合, 超静孔压消散速率也随之显著降低。

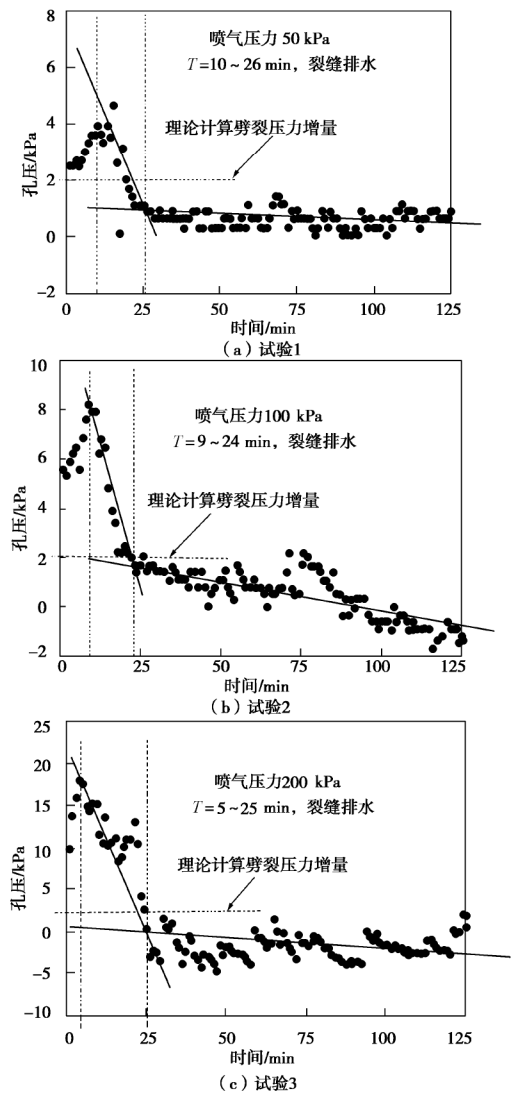


图 3 实测孔压曲线

Fig. 3 Variation of measured excess pore water pressure with time

根据以上分析,峰值后超静孔压消散曲线可以分为两个阶段,且均可用直线拟合,两条直线交点对应时刻为裂隙闭合时刻。孔压消散曲线第一阶段的起始时间和终止时间分别如图 3 中两条虚竖线所示,则两者之间的时间差为裂隙排水时间,两时刻对应的孔压差值为裂隙排水期间的孔压消散量。从表 2 中可知,裂隙排水时间为 15~20 min,通过裂隙排水期间消散的超静孔压量与喷气压力近似线性相关。

(2) 超静孔隙水压力分布规律

孔压计 2、4 和 5 均位于模型槽土中 30 cm 的深度,距喷气点的水平距离分别为 5, 20, 30 cm。三组试验中不同喷气压力值引起的最大超静孔压分布如图 4 (a)。

孔压计 1、2 和 3 距离喷气点的水平距离均为 5 cm。三组试验中不同喷气压力值引起的最大超静孔压分布如图 4 (b) 所示。由图 4 可知,喷气压力在土体中引起的超静孔压随距离喷气点水平距离的增加而减少。由于喷气点埋深为 30 cm,因此在孔压计 PPT2 处(埋深 30 cm)引起的超静孔压最大。在孔压计 PPT3 处(埋深 20 cm)引起的超静孔压大于在孔压计 PPT1 处(埋深 40 cm)引起的超静孔压,这是由于气体主要朝上渗漏的缘故。

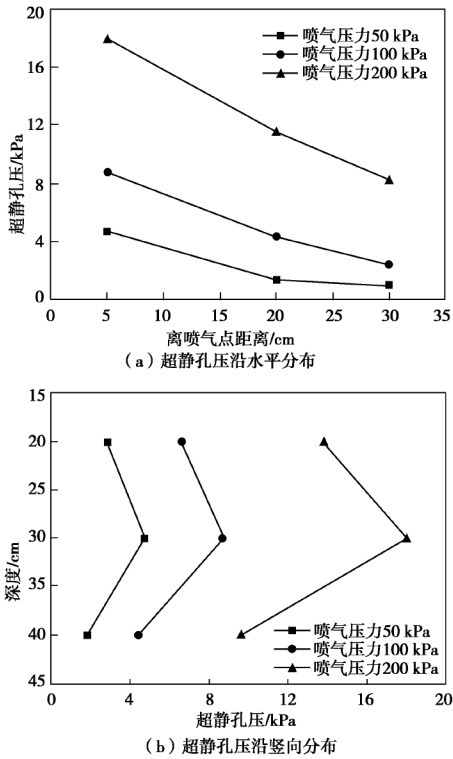


图 4 实测孔压曲线

Fig. 4 Variation of measured excess pore water pressure with time

(3) 气压劈裂起劈压力的估算

土体的气压劈裂机理有张拉破坏机理和剪切破坏机理两种,其起劈压力表达式分别为<sup>[9]</sup>

$$P_f = 2\sigma_3 + \sigma_1 \quad (\text{张拉破坏机理}) \quad (1)$$

$$P_f = (1 + \sin \varphi)\sigma_3 + c \cos \varphi \quad (\text{剪切破坏机理}) \quad (2)$$

以 PPT2 点为例,其深度为 0.3 m,土体的重度约为 18 kN/m<sup>3</sup>,计算得到  $\sigma_1 = 5.4$  kPa,取侧压力系数  $K_0 = 0.6$ ,则  $\sigma_3 = 2.7$  kPa,忽略土体的抗拉强度,根据张拉破坏机理计算的劈裂压力  $P_f = 5.4$  kPa;对饱和软土,不排水情况下  $\varphi = 0$ ,由土体含水率(60%)结合 Leroueil 公式<sup>[10]</sup> ( $c = 1/(I_L - 0.21)^2$ ,  $I_L$  为液性指数)估算的土体不排水抗剪强度为 2.0 kPa,根据剪切破坏机理计算的劈裂压力为  $P_f = 4.7$  kPa。可见,由于土体的抗剪强度较低,土体更易于发生剪切破坏机理引起的土体劈裂。

从实测超静孔压曲线可以看出,本次试验中,喷射高压气体在 PPT2 点引起的超静孔压均大于理论计算的起劈压力增量(起劈压力与小主应力的差值,  $5.8 - 3.8 = 2.0$  kPa)(见图 3),因此土体均发生了劈裂。试验实测的超静孔压消散曲线可以分为两个阶段(见图 3),两阶段的交点为裂隙闭合压力, Bjerrum 等<sup>[11]</sup>曾假定裂隙的闭合压力等于劈裂压力增量。由图 3 可知,由超静孔压曲线推算的裂隙闭合压力与上述理论计算的劈裂压力增量基本吻合,由试验推算的裂隙闭合压力略小于理论计算的劈裂压力增量。理论计算结果与实测推算结果的差异与土体的线弹性假设及土体中存在微裂隙等有关。

(4) 裂隙宽度

在试验过程中,当喷入气体时,千分表读数变大,这说明土体上移。根据 King 等<sup>[12]</sup>的研究表明,由于喷气点较浅,上覆压力较小,这种变形可以认为是土体抬升引起的,而忽略土体的竖向压缩变形,这一抬升值可以近似认为是劈裂过程中土体产生的裂隙宽度。试验过程中的数据如表 3 所示。

表 3 气压劈裂试验前后百分表读数

Table 3 Variation of the dial indicator

| 组别 | 百分比读数  |          |        | 裂隙宽度  |        |
|----|--------|----------|--------|-------|--------|
|    | 喷气前    | 喷气过程中最大值 | 喷气结束时  | 峰值/mm | 残余值/mm |
| 1  | 23.562 | 24.594   | 23.573 | 1.032 | 0.011  |
| 2  | 22.031 | 23.556   | 22.045 | 1.525 | 0.014  |
| 3  | 21.418 | 23.772   | 21.435 | 2.304 | 0.017  |

由表 3 可知,随着喷气压力的增大,裂隙的宽度变大。当喷气结束后,裂隙会逐渐缩小,但不会完全闭合,而形成残余裂隙。裂隙的存在是超静孔压快速消散的主要原因,因此,裂隙的力学效应主要表现为

增大土体的渗透系数, 但裂隙对土体渗透特性的提高效应评价方法有待进一步研究。

## 2 结 论

(1) 向土体中喷入高压气体会在土体中生成超静孔压, 超静孔压与喷气压力相关。在高压气体的作用下, 土体发生气压劈裂, 生成的裂隙显著增加了土体的渗透特性, 为超静孔压的快速消散提供了排水通道, 大部分超静孔压在裂隙闭合前消散。

(2) 随着超静孔压的消散, 裂隙随之减小, 但裂隙不会完全闭合, 留有一定的残余裂隙。本次室内试验施工参数条件下, 裂隙排水时间为 15~20 min, 通过裂隙排水期间消散的超静孔压量与喷气压力近似线性相关。

### 参考文献:

- [1] 谢兴华, 速宝玉. 裂隙岩体水力劈裂研究综述[J]. 岩土力学, 2004, **25**(2): 330 - 336. (XIE Xing-hua, SU Bao-yu. A review of fracture rock hydraulic fracturing research[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, **25**(2): 330 - 336. (in Chinese))
- [2] SUTHERSAN S S. Remediation engineering: design concepts[M]. Boca Raton: CRC Press LLC, 1999.
- [3] LARSSON S, DAHLSTROM M, NILSSON B. Uniformity of lime-cement columns for deep mixing: a field study[J]. Ground Improvement, 2005, **9**(1): 1 - 15.
- [4] JOHANSSON A W. Observation of pore pressure and soil movements during lime column installation[C]// Dry Mix Method for Deep Soil Stabilization, Stockholm, 1999, 252-258.
- [5] VRIEND C, KORT J C M, COLMORGEN E. Soil improvement at the Botlek Railway Tunnel Project Rotterdam[J]. Soft Ground Technology, 2000, ASCE, GSP(112): 472 - 483.
- [6] 吴燕开. 排水粉喷桩 (2D 工法) 加固软土地基原理与应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2005. (WU Yan-kai. Research of the mechanism and application reinforced soft soil by drain and dry jet mixing[D]. Nanjing: Southeast University, 2005. (in Chinese))
- [7] SHEN S L, MIURA N, KOGA H. Interaction mechanism between deep mixing column and surrounding clay during installation[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2003, **40**(2): 293 - 307.
- [8] 刘松玉, 杜广印, 洪振舜, 等. 排水粉喷桩加固软土地基 (2D 工法) 的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, **27**(8): 869 - 875. (LIU Song-yu, DU Guang-yin, HONG Zhen-shun, WU Yan-kai. On combined method of dry mixing with vertical drain and its practice in soft ground improvement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, **27**(8): 869 - 875. (in Chinese))
- [9] 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 Ding-wen. Pneumatic fracturing theory and design principles of a combined DJM and PVD method[D]. Nanjing: Southeast University, 2007. (in Chinese))
- [10] LEROUEIL S, TAVENAS F, LEBIHAN J P. Propriétés caractéristiques des argiles de l'est du Canada[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1983, **20**(4): 681 - 705. (LEROUEIL S, TAVENAS F, LEBIHAN J P. Properties of eastern Canada clays[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1983, **20**(4): 681 - 705. (in France))
- [11] BJERRUM L, ANDERSEN K H. In-situ measurement of later pressures in clay[C]// Proceeding of 5th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Madrid, 1972: 333 - 342.
- [12] KING T C. Mechanism of Pneumatic fracturing[D]. New Jersey: New Jersey Institute of Technology, 1993.