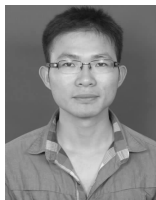


· 地基与基础 ·



真空预压排水板有效真空压力变化规律*

林志强

(福建省建筑科学研究院 福建省绿色建筑技术重点实验室, 福建 福州 350025)

摘要: 针对竖向排水板中有效真空压力分布模式存在的争议, 基于流体力学相关理论对真空度和负压概念加以分析, 指出排水板中孔隙水压力的变化量便是有效真空压力大小。通过计算排水板中孔隙水的总势能, 并利用水具有趋向于更低能量状态的趋势原理, 分析了孔隙水的运动机制及流动全过程, 进而得到有效真空压力变化规律。研究表明, 排水板中有效真空压力变化规律与初始地下水位、膜下真空度及排水板变形量紧密相关; 有效真空压力的简化分布模式为折线形, 转折点在初始地下水位线交汇处; 在地下水位线以上时, 有效真空压力变化大, 衰减梯度达 10 kPa/m; 在地下水位线以下时, 有效真空压力基本保持不变; 排水板变形量越大, 排水阻力越大, 如果出现折管现象, 可能导致膜下真空压力无法向下传递。

关键词: 真空预压; 土水势; 孔隙水压力; 初始地下水位; 排水板变形

中图分类号: TU 46

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)07-0161-06

Changing rules of pore water pressure in drain board under vacuum preloading

LIN Zhi-qiang

(Fujian Key Laboratory of Green Building Technology, Fujian Academy of Building Research, Fuzhou 350025, China)

Abstract: Aiming at the argument of vacuum transmission in drain board under vacuum preloading, this paper analyzes the concept of vacuum and negative pore water pressure under the theory of fluid mechanics, and points out that the real reason of soft soil drainage and consolidation is the decrease of pore water pressure in the drain board. The total potential of pore water in the key position of drain board is calculated by the theory of fluid mechanics. Then the action mechanism and flow process of pore water pressure is analyzed based on the lowest energy principle. So the changing rules of pore water pressure in the drain board are obtained. The results show that: 1) the changing rules of pore water pressure in the drain board relates closely to the ground water level, vacuum degree under membrane and drainage board deformation; 2) in the drain board, the simplified distribution pattern of pore water pressure reduction is a broken line, and the line's turning point is located in the ground water level; 3) the pore water pressure reduction changes a lot above the ground water level, and the attenuation rate is 10 kPa/m. But the pore water pressure reduction remains unchanged below the ground water level; 4) the more deformation of drainage board occurs, the more resistance of drainage is. When the drain board breaks, the vacuum load under membrane can not transmit to the deep ground.

Keywords: vacuum preloading; soil water potential; pore water pressure; initial ground water level; deformation of drain board

真空预压是加固软土地基最有效的方法之一, 广泛应用于高速公路、港口、围海造陆及房屋建

筑等地基加固工程。经国内学者过去几十年的研究, 真空预压加固机理、真空预压排水固结理论

收稿日期: 2014-11-04

*基金项目: 福建省科技计划重点项目 (2012Y0020); 福建省科技计划重点项目 (2013H0016)

作者简介: 林志强 (1986—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事软土地基处理及基坑工程等方面的勘察设计、研究工作。

已基本清楚,在实际工程应用中也积累了大量宝贵的经验,形成系统成套技术^[1-2]。但真空排水预压法在实际工程应用中仍有不少问题存在较大争议,如真空度传递规律、有效加固深度、地下水位升降、不同软基深度强度增长差异等^[3-7]。实际上,在竖向排水体与其四周土体形成的孔隙水压力差(有效真空压力)作用下地基软土开始发生排水、固结。从本质上说,真空预压作用使排水板与其四周土体形成能量差,软土地基开始发生排水、固结,从而达到提高软土强度的目的。相同条件下,竖向排水体及其四周软土的孔压差越大,形成的水力梯度也越大,软基排水效果越好,土体强度增长越显著。因此,透彻地分析软基土体强度增长情况关键在于搞清真空预压软基土中、竖向排水板中的孔隙水压力变化规律。首先要搞清排水板中孔隙水压力变化规律,进而可得到软基中孔隙水压力的变化规律。许多专家、学者采用真空度传递或者负压传递的理论对相关问题展开研究,得到了许多成果^[3,8-9]。但真空度和负压在概念上仍有些模糊,研究成果之间差异往往较大。

在真空度或负压传递规律方面的研究仍存在较大分歧,主要原因是系统研究真空预压中孔隙水运动的一般性理论较少。许多学者采用现场试验、室内试验进行研究,但因现场仪器监测数据不够可靠准确、室内试验过于理想化及真空荷载传递本身具有的隐蔽性、复杂性,导致研究成果之间差异很大。实际上,土中孔隙水的流动是一种流体运动,也遵从能量守恒定律,故可根据流体力学有关理论对真空预压加固机理展开系统的一般性理论分析。

本文根据流体力学对液体真空度、负压的定义,对目前真空度现场监测存在的问题进行分析、澄清,解释现场淤泥中无法测得真空度的原因。指出软基是在孔压差作用下排水、固结,从而达到土体加固目的,而非真空度。基于流体力学有关理论,着重分析了竖向排水板中孔隙水运动机制及流动全过程,进而得到排水板中有效真空压力变化规律。

1 真空度及负压辨析

根据流体力学对真空度的定义,真空度是指流体在该点的绝对压强小于当地大气压强的数值^[10]。若真空度描述的对象是气体,真空度大小代表的是气体分子的稀薄程度,分子密度越小,气压越小,真空度越大;若真空度描述对象是液体,例如水,真空度大小代表的是某点水压小于当地大气压强的数值,当水压大于当地大气压强时,这点没有真空度。对于有真空度存在的点,该点相对压强(相对大气压而言的)为负值,故有时真空度也称负压。所以真空度和负压在流体力学上的概念是相同的,描述的对象既可以是液体也可以是气体。

1.1 真空预压单井模型的真空度分析

真空预压单井模型见图1,假设膜下真空度为80 kPa,初始地下水位埋深2 m,软基土体为正常固结黏土,A点位于软基表面,B点在地下水位线上,C、D点分别位于地下水位线以下4 m、8 m,竖向排水通道长15 m。

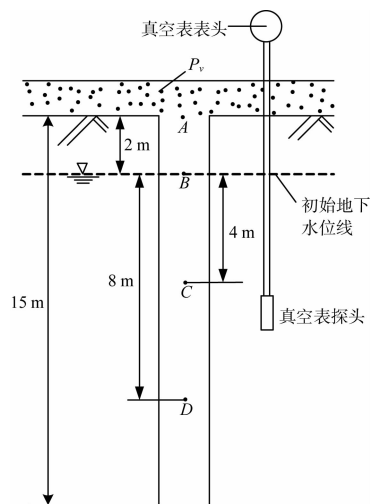


图1 真空预压单井模型

假设当地大气压为标准大气压,膜下真空度瞬间加载。根据流体力学对真空度的定义,计算加载瞬间排水板中A、B、C、D点的真空度 p_A 、 p_B 、 p_C 、 p_D :

$$\begin{cases} p_A = p_v \\ p_B = p_v - \rho gh_B \\ p_C = p_v - \rho gh_C \\ p_D = p_v - \rho gh_D \end{cases} \quad (1)$$

h_B 、 h_C 、 h_D 分别为 B 、 C 、 D 点到初始地下水位的高度。计算得： $P_A = 80$ kPa， $P_B = 80$ kPa， $P_C = 40$ kPa， $P_D = 0$ 。由式(1)可见，在 D 点以下软基深度已经不存在真空度，如果此时用真空表测量 D 点以下软基深度的真空度，真空度大小必然是 0。但在真空预压实际工程中，仍有不少学者将真空表探头埋设在不同深度淤泥中监测真空度大小，推测真空度的传递深度，再研究真空度传递规律。这种做法是不可取的，因为在地下水位 8 m 处已经不存在真空度了，一般情况下是无法测到真空度的。

关于不少工程测到了不同深度淤泥中真空度，分析如下：预压前，真空表软管（与真空表已连接）事先埋设在淤泥中一定深度，介于两排水板之间（图 1）；由于软管与四周土中孔隙水存在能量差，孔隙水势必开始流向软管中，软管水位开始上升，软管中气压上升，直到软管与四周土中孔隙水能量平衡为止；真空预压开始后，软管四周孔隙水压力逐渐减小，直到形成真空度后，真空表才会出现读数。比如在 C 位置要形成真空度，孔隙水压力需要下降 40 kPa 后才有，此时才可以看到真空表读数，显然这个读数已经没有意义了。

因此，淤泥中真空度监测项目没有必要，一般是量测不到真空度。即使有些工程可以测得真空度，所得数据通常是不准确的，无实际意义。

1.2 排水固结的实质

通过以上分析可知，当膜下真空度为 80 kPa 时，地下水位线以下 8 m 就没有真空度了，也就是说真空度传递最大深度只到地下水位以下 8 m。但这不能说明有效加固深度只到地下水位以下 8 m。大量工程实践表明，真空预压有效加固深度可达 20 m 以上，远超真空度传递深度，说明真空度传递深度并不决定有效加固深度。

事实上，土中水发生渗流的主导因素是土体中孔隙水的能量局部不平衡。地基软土排水固结的实质是竖向排水板与其四周饱和软土之间存在孔隙水压力差，孔隙水压力差的大小即为有效真空压力。在孔压差的作用下，软土中孔隙水向竖

向排水体渗流，土体固结，从而提高软土强度。故深入研究排水板中孔隙水压力的变化规律是研究软基加固效果最首要的任务。

2 排水板中有效真空压力变化规律

为更准确、清晰地说明排水板中有效真空压力变化规律，以一般实际工程为分析算例进行说明。如图 2 所示，假设软基黏土为正常固结黏土，以地下水位线为重力势参照面，地下水位深 2 m，排水板打设深度 15 m，图中箭头方向表示土中水的大致渗流方向。土中水能量主要包括重力势、压力势、荷载势，分别用 φ_g 、 φ_p 、 φ_N 表示，则土中水的总能量 $\varphi = \varphi_g + \varphi_p + \varphi_N$ 。由于软黏土渗透系数很小，土中水的渗流速度也很小，数量级在 10^{-3} 以下，故土中水的总能量可不计流速势。

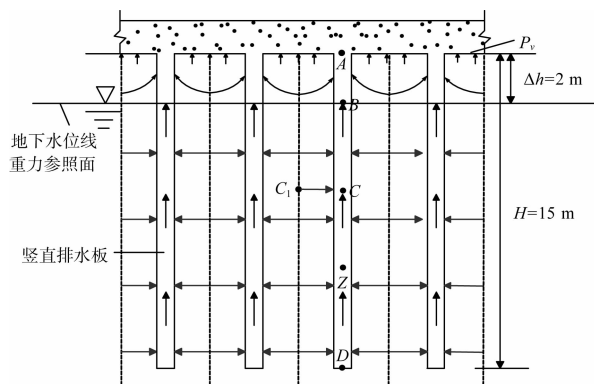


图 2 真空预压软基剖面

2.1 孔隙水渗流过程分析

预压前，图 2 所示的排水板中水面线与地下水位线重合，则排水板 A 、 B 、 C 、 D 这 4 点总势能可分别表示为：

$$\begin{cases} \varphi_A = \varphi_g + \varphi_p + \varphi_N \\ \varphi_B = \varphi_C = \varphi_D \end{cases} \quad (2)$$

得到 $\varphi_A = 2$ m， $\varphi_B = \varphi_C = \varphi_D = 0$ ，所以 φ_A 最大，根据水有趋向于最低能量状态的趋势这一规律，排水板 B 、 C 、 D 位置的孔隙水不能流向 A 位置， A 位置的孔隙水也不能流向 B 位置，因为土体本身具有一定阻力作用。

预压加载瞬间，假设真空荷载一次施加，膜下真空度 p_v 为 80 kPa，则荷载势 $\varphi_v = -p_v/\rho g = -8$ m，此时 A 点总势能迅速下降 8 m， B 、 C 、 D

这3点也因水面上大气压下降 80 kPa, 总势能也下降 8 m, 排水板中 4 点总势能可分别表示为:

$$\begin{cases} \varphi_A = \varphi_g + \varphi_p + \varphi_N \\ \varphi_B = \varphi_C = \varphi_D \end{cases} \quad (3)$$

计算得 $\varphi_A = 6 \text{ m}$, $\varphi_B = \varphi_C = \varphi_D = -8 \text{ m}$, 所以 φ_A 最大。同理, 根据水有趋向于最低能量状态的趋势这一规律, B 、 C 、 D 处的自由水不能自发流向 A 处, 但由于排水板中孔隙水总势能下降了 8 m, 四周软土中孔隙水压力不变、总势能没有变, 造成排水板与土中孔隙水形成能量差, 即孔压差。四周土中孔隙水开始向排水板渗流, 排水板中水面升高直到 A 位置, 再经砂垫层排出膜外。

排水板中孔隙水渗流过程可分为 4 个阶段:

1) 抽真空前, 排水板 B 、 C 、 D 位置总势能低于 A 位置, 孔隙水没有流动; 2) 真空预压瞬间, 真空度为 80 kPa, 排水板 A 、 B 、 C 、 D 这 4 点的总势能都下降 8 m, 四周土中空隙水总势能不变, 造成排水板中孔隙水与土中孔隙水存在势能差, 软基开始渗流; 3) 真空预压过程中, 排水板 B 、 C 、 D 位置总势能仍低于 A 位置, 孔隙水不能自发向 A 位置流动, 但由于四周土中孔隙水不断向排水板汇入, 使排水板水位不断抬高, 排水板 B 、 C 、 D 位置孔隙水压不断加大, 总势能也相应增大; 4) 排水板中水面不断抬高, 直到砂垫层后处于相对稳定, 孔隙水经砂垫层排水膜外, 排水板中孔隙水压力不再变化, 四周土中水不断向排水板中汇流, 软基不断排水、固结, 最终提高土体强度。

2.2 孔隙水渗流过程的水头损失

排水板中孔隙水不断往砂垫层渗流, 渗流路径过程中势必会有能量损失, 损失的这部分能量称为总水头损失 h_w 。总水头损失等于沿程水头损失 h_f 与局部水头损失 h_j 二者之和。此时排水板中孔隙水 Z 渗流到 A 位置的总水头损失可表示为:

$$h_{w(Z \rightarrow A)} = h_{f(Z \rightarrow A)} + h_{j(Z \rightarrow A)} \quad (3)$$

根据流体力学水头损失的计算公式, 可得排水板中孔隙水渗流单位长度沿程水头损失为:

$$dh_f = \lambda \frac{dz}{4R} \cdot \frac{v^2(z)}{2g} \quad (4)$$

单个局部水头损失为:

$$h_j = \xi(z) \frac{v^2(z)}{2g} \quad (5)$$

分别对式(4)、(5)积分并相加得到位置 $Z \rightarrow A$ 的总水头损失为:

$$h_{w(Z \rightarrow A)} = h_f + h_j = \int_0^Z \frac{\lambda}{4R} \frac{v^2(z)}{2g} dz + \sum_{i=1}^n \xi_i(z) \frac{v_i^2(z)}{2g} \quad (6)$$

式中: R 为排水板截面水力半径; λ 为沿程阻力系数; $v(z)$ 为排水板某深度 z 处水的流速; $\xi_i(z)$ 为排水板某深度 z 位置第 i 个局部水头损失系数; $v_i(z)$ 为排水板某深度 z 位置第 i 个局部水的流速; Z 为排水板深度; n 为所有局部水头损失个数。

根据流体力学理论, 一般认为局部水头损失系数远大于沿程水头损失系数。下面简单绘出两种常见的排水板变形简图(图3), 即弯管、折管局部水头损失。根据文献[10], 弯管局部水头损失系数 ζ_1 计算式为:

$$\zeta_1 = 0.946 \sin^2 \frac{\theta}{2} + 2.05 \sin^4 \frac{\theta}{2} \quad (7)$$

折管局部水头损失系数 ζ_2 计算式为:

$$\zeta_2 = [0.131 + 0.163 2(d/\rho)^{7/2}] \left(\frac{\theta}{90^\circ} \right)^{1/2} \quad (8)$$

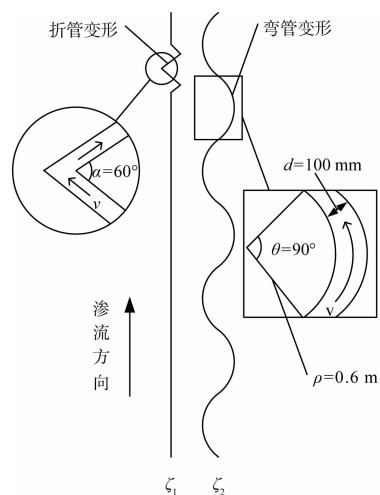


图3 常见排水板变形

根据以上计算式分别计算它们相应的局部水头损失系数, 得 $\zeta_1 = 1.86$ 、 $\zeta_2 = 0.131$, $\zeta_1 \gg \zeta_2$, 相关计算参数取值见图3。说明折管的局部水头损失远高于弯管的局部水头损失, 特别是在软基表面硬壳层易出现折管现象, 工程上应避免。可见, 排水板变形不仅影响地基实际有效加固深度, 还造成有效真空压力损失, 其中应特别注意表面硬壳层的折管局部水头损失, 必要时应采取相应的工程措施。

综上, 排水板孔隙水渗流的总水头损失主要跟排水板的弯折程度、渗流速度等有关。

2.3 孔隙水压力变化规律分析

为分析排水中孔隙水压力变化情况, 需要分别得到真空预压前后排水板中孔隙水压力的分布情况。预压前, 排水板中孔隙水压力分布见图4a), 地下水位以上的孔隙水压力为0, 地下水位以下的孔隙水压力沿软基深度向下以10 kPa/m速率直线递增; 预压后, 排水板内水面升至砂垫层, 膜下真空度为80 kPa, 此时排水板孔隙水压力分布见图4b), 软基表面孔隙水压力为-80 kPa, 沿软基深度向下以10 kPa/m速率直线递增。根据真空预压前后排水板中孔隙水压力变化情况可得到排水板中孔隙水压力变化量分布规律, 排水板中孔隙水压力变化量分布为折线型, 转折点在与地下水位线交汇处。排水板中孔隙水压力变化量即为有效真空压力。

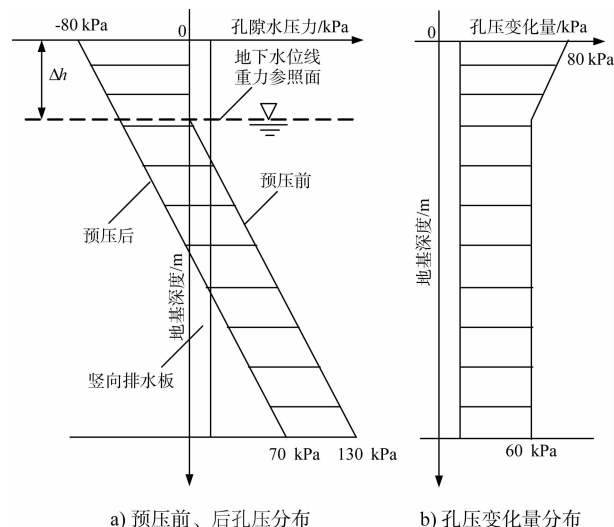


图4 排水板中孔隙水压力的分布

2.4 有效真空压力分布模式对比

有效真空压力(孔压变化量)在竖向排水板及地基土中的传递是复杂的, 涉及到的影响因素很多, 如膜下真空度、井阻作用、涂抹作用、渗透系数、初始地下水位及起始固结度等。对于排水板中的有效真空压力, 不同学者采用不同的名词描述, 如真空度、负压、孔隙水压力变化等。正是由于有效真空压力传递的复杂性, 许多学者先后提出有效真空压力在竖向排水板的不同分布模式, 不同学者提出的有效真空压力分布模式相差较大。

彭劼等^[11]根据真空-堆载联合预压现场试验及孔压、沉降测试结果, 对真空-堆载联合预压法加固机理中一些有争议的问题进行了讨论, 得到现场孔压差沿排水板分布: 孔压差沿排水板深度直线递减, 排水板顶部孔压差约为78 kPa, 排水板底端孔压差约为15 kPa; 岑仰润^[3]采用现场孔压实测资料和现场实测沉降资料反分析得到竖向排水板有效真空压力的分布模式, 认为有效真空压力沿排水板中的分布基本是均布的, 其值一般为膜下真空度的50%左右, 但未深入分析真空度损失的原因; 韩雪峰等^[12]把孔隙水压力作为主要研究对象进行了水下真空预压现场试验监测, 认为水下真空预压过程中, 超静孔隙水压力分布不均匀, 水平方向中心位置负压减小较快、边缘较慢, 在同一位置, 随深度增加, 负压减小幅度变慢; 朱群峰等^[9]通过现场试验对低位真空预压密封特性和真空度传递特性进行了研究, 认为真空度在新吹填淤泥中传递损失明显大于天然淤泥, 试验中新吹填淤泥中真空度沿深度衰减平均值达13 kPa/m, 天然淤泥中真空度沿深度衰减平均值为6 kPa/m。

因现场仪器监测数据不够可靠准确、现场试验的局限性及有效真空压力本身具有的隐蔽性、复杂性, 导致真空预压加固机理研究成果之间差异很大。本文采用流体力学有关理论对真空预压加固机理展开系统的一般性理论分析, 对前人研究成果做了一些总结, 并与本文的有效真空压力分布模式进行对比(图5)。

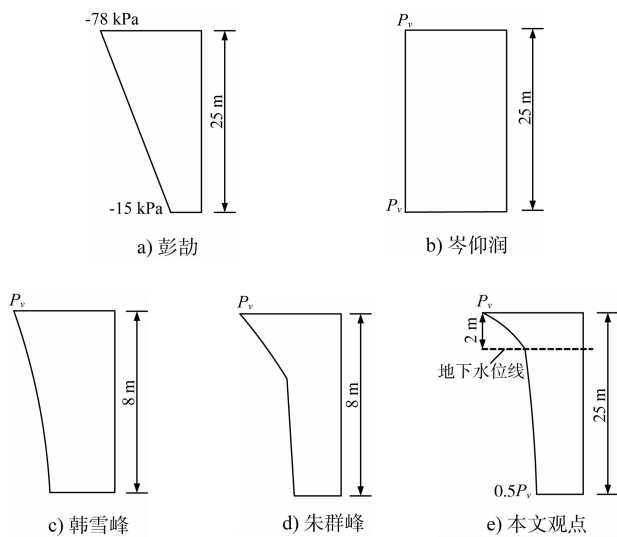


图5 排水板中几种不同的有效真空压力分布模式对比^[3,9,11-12]

3 结论

本文基于流体力学相关理论对真空预压中使用的“真空度”或者“负压”的概念进行了澄清,指出排水板中孔隙水压力降低是软基排水固结的真正原因。基于能量的角度,利用土中水必须遵循趋向于更低能量状态趋势规律的运动机制,研究分析了有效真空压力在排水板中的分布模式,并将所得有效真空压力分布模式与前人研究成果进行对比,得到如下结论:

1) 真空度和负压在流体力学上的概念是相同的,描述的对象既可以是液体也可以是气体。对于正常固结软黏土,初始地下水位线以下采用真空表测得的真空度没有实际意义,一般在地下水位线以下8 m处测不到真空度,建议实际工程中取消淤泥中真空度的监测项目。

2) 真空预压饱和软土排水固结的实质是竖向排水板与四周饱和软土中存在孔隙水压力差,即竖向排水板与四周饱和软土中存在能量差。排水板中有效真空压力等于预压前后排水板中的孔压差。

3) 排水板中孔隙水的水头损失主要有沿程水头损失、局部水头损失,其中局部水头损失大于沿程水头损失,折管局部水头损失大于弯管局部水头损失。软基表面硬壳层易出现排水板折管现象,是有效真空荷载压力损失的主要影响因素。

表面硬壳层沉降过大,应考虑折管局部水头损失的影响,并采取相应有效工程措施。

4) 排水板有效真空荷载分布模式跟初始地下水位、膜下真空度及排水板弯折程度紧密相关。不考虑水头损失时,板中有效真空荷载分布模式为折线形,转折点在地下水位线交汇处;地下水位线以上有效真空荷载衰减速率达10 kPa/m,地下水位以下有效真空荷载基本保持不变。

参考文献:

- [1] 高志义. 真空预压法的机理分析[J]. 岩土工程学报, 1989(4): 45-56.
- [2] 姜炎. 真空排水预压加固软土技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.
- [3] 岑仰润. 真空预压加固地基的试验及理论研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [4] 闫澍旺, 侯晋芳, 程栋栋. 真空预压有效加固深度的探讨[J]. 水利学报, 2007(7): 774-778.
- [5] 明经平, 赵维炳. 真空预压中地下水位变化的研究[J]. 水运工程, 2005(1): 1-6.
- [6] 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(4): 591-599.
- [7] Mesri G, Khan A Q. Ground improvement using vacuum loading together with vertical drains [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(6): 680-689.
- [8] 朱建才, 温晓贵, 龚晓南, 等. 真空排水预压法中真空度分布的影响因素分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003(11): 1 399-1 401.
- [9] 朱群峰, 高长胜, 杨守华, 等. 超软淤泥地基处理中真空度传递特性研究[J]. 岩土工程学报, 2010(9): 1 429-1 433.
- [10] 吴持恭. 水力学(上册)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [11] 彭劼, 汉龙, 陈永辉. 真空-堆载联合预压法加固机理讨论[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2003(5): 560-563.
- [12] 韩雪峰, 邝国麟, 谭国焕, 等. 水下真空预压过程中孔隙水压力变化规律研究[J]. 岩土工程学报, 2008(5): 658-662.

(本文编辑 武亚庆)