

真空预压法加固软基的流固耦合数值分析

林智勇

(福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 利用数值分析方法建立了软土地基模型,采用比奥固结理论,计算分析了真空预压下的软土地基流固耦合作用;并进一步分析了真空度损耗率、密封墙、塑料排水板打设深度等因素对软基加固效果的影响。分析结果表明:在抽真空早期,地表沉降增长很快,达到一定天数后,沉降值逐渐趋于稳定;真空负压沿深度、水平方向上损耗,在加固软土外围形成一个零孔隙水压力面;真空度损耗率、塑料排水板打设深度对真空预压加固软土的效果影响很大;侧向密封墙对加固区内土体影响不大,但其限制了真空负压的侧向传递,使影响区的地基沉降大幅减小。

关键词: 真空预压法;软基加固;流固耦合;数值分析

中图分类号: TU472

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2016)04-0318-06

Fluid-structure coupling numerical analysis of soft soil reinforced by vacuum preloading method

Lin Zhiyong

(College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: A numerical model of soft soil reinforced by vacuum preloading method was established, and the fluid-structure coupling interaction of the soft soil was calculated based on Biot consolidation theory. Then the influence of vacuum loss, sealing wall and the depth of prefabricated vertical drains (PVDs) on the subsoil surface settlement was analysed. The settlement of the subsoil increased rapidly at the early days of vacuum preloading and became stable after certain days. Vacuum negative pressure lost along the vertical and horizontal directions with a zero pore water pressure surface forming in the periphery of the reinforced soft soil. The vacuum loss and the depth of the PVDs had a great effect on the settlement of the soft soil, while the lateral sealing wall exerted little influences. The sealing wall blocked the lateral transfer of the vacuum negative pressure, and reduced the subsoil settlement of the influential area.

Keywords: vacuum preloading method; soft soil reinforcement; fluid-structure coupling; numerical analysis

在我国沿海地区,软土地基分布广泛,它包括淤泥、淤泥质土、泥炭和泥炭质土等,其主要性质有含水量大、压缩性高、强度低、渗透性差、灵敏度

高、易发生塑性流变等。目前,对软土地基的使用越来越广泛,需要在使用前对软土地基进行有效的加固处理。在常规的软基加固方法中,以排水

收稿日期: 2016-06-17

基金项目: 福建省自然科学基金项目(2013J01170);福建工程学院科研发展青年基金项目(GY-Z15088);福建工程学院科研启动基金项目(GY-Z160063)

作者简介:林智勇(1982-),男,福建南靖人,讲师,博士,研究方向:岩土工程与数值分析。

固结法中的真空预压法应用最为广泛^[1]。真空预压法是指在软基表面铺设砂垫层等水平排水通道,在软土地基内打设竖向排水体(如塑料排水板、袋装砂井),并用密封膜密封,然后利用真空泵抽真空,使膜内外形成压力差,地基中的孔隙水通过排水通道发生渗流,孔隙水压力降低,有效应力提高,从而达到排水固结软土地基的目的^[2]。

目前,真空预压法的计算理论主要有太沙基固结理论、比奥固结理论等^[3-4],以比奥理论最为严密,能够反映孔隙水压力消散与土骨架变形之间的耦合关系,但多数情况均难以获得其解析解。而数值计算方法是解决比奥固结问题的一种较为有效的方法。因此,数值计算方法被大量用于比奥固结理论的求解^[1-2,5-9]。在常用的数值分析软件中,FLAC^{3D}在算法上采用“混合离散法”来模拟岩、土体的塑性流动和塑性破坏,对于模拟软土地基的流-固耦合大变形问题,较其它数值计算程序,具有很大的优势。本文将利用 FLAC^{3D} 软件,对真空预压加固下的软土地基的流-固耦合进行数值分析。

1 比奥固结理论

比奥固结理论^[4]是完善的理想土的 3 向固结理论精确解,它由一组应力-应变平衡方程和水流连续性方程组成,见式(1)、式(2)。

$$\left. \begin{aligned} \nabla^2 u_s^2 - \frac{1}{1-2\mu} \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial x} + \frac{2(1+\mu)}{E} \frac{\partial u}{\partial x} &= 0 \\ \nabla^2 v_s^2 - \frac{1}{1-2\mu} \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial y} + \frac{2(1+\mu)}{E} \frac{\partial v}{\partial y} &= 0 \\ \nabla^2 w_s^2 - \frac{1}{1-2\mu} \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial z} + \frac{2(1+\mu)}{E} \frac{\partial w}{\partial z} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$
$$\frac{k}{\gamma_w} \nabla^2 u = - \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} \quad (2)$$

式中： $\nabla^2 = \frac{\partial}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z^2}$ ； E 、 μ 分别为排水条件下的弹性模量、泊松比； u_s 、 v_s 、 w_s 分别为 x 、 y 、 z 三个方向上的位移； u 为超孔隙水压力； ε_v 为体应变； k 为渗透系数。

比奥理论将弹性理论及水流连续性条件结合起来,可以得到土的应力、应变和孔隙水压力等参量。但按比奥方程求解固结问题的精确解非常复杂,只有在少数情况下才能得解；而通过与数值计算的结合,却能方便快速地求解出该方程,较常规

求解方法优势明显。目前,常用的一些数值分析软件均嵌入了比奥固结理论,能快速有效地分析地基的渗流固结问题。为此,下文在有限差分程序 FLAC^{3D} 的平台上,采用比奥固结理论,对一地基模型固结问题进行流固耦合分析。

2 数值计算模型的建立

某高速公路修筑在软土地基上,设计断面如图 1 所示,采用真空预压法处理软基,加固宽度 60 m,塑料排水板按 1.5 m×1.5 m 正方形布置,打设深度 12 m。场地主要地层分布为：①回填砂,厚 1.5 m；②淤泥,流塑~软塑状态,厚 10.5 m,压缩性高、强度低,是地基处理的主要土层；③粉质黏土,硬塑,厚 6 m；④中~密实粉细砂,厚 9 m,强度较高,满足使用要求,不作处理。

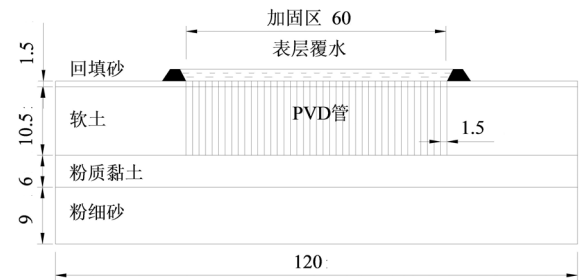


图 1 设计断面图(单位:m)

Fig.1 Tratum distribution and design section of soft soil reinforced by vacuum preloading method (unit:mm)

基于上述工程概况,利用有限差分软件 FLAC^{3D} 进行数值模拟分析。以加固区中心为对称轴,取地基土的一半断面建立数值计算模型,如图 2 所示,模型尺寸为 60 m×1.5 m×27 m,其中,

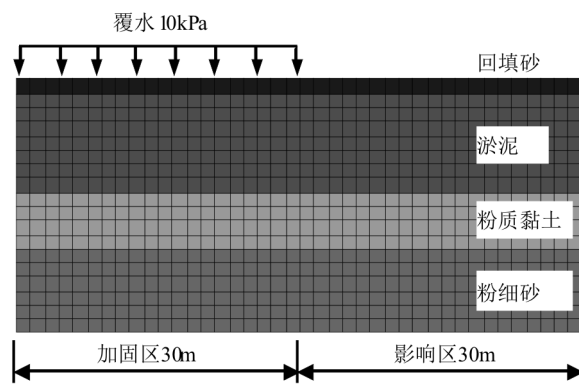


图 2 数值计算模型网格图

Fig.2 Numerical analysis model grid

计算宽度为 60 m(加固区 30 m,影响区 30 m);公路纵向上取单位 1.5 m(即一倍排水板间距);计算深度为 27 m。边界条件为:模型左右两边约束 x 方向的位移,模型前后两边约束 y 方向的位移,模型底边约束 x 、 y 、 z 方向位移,模型顶面为自由

边界。由于堆有 1 m 左右的上层覆水,计算时等效为 10 kPa 的超载,直接作用在加固区表面。各土层均采用莫尔-库仑本构模型,其物理力学参数指标如表 1 所示。

表 1 模型计算材料参数
Tab.1 Material properties used in the analysis

土层	厚度/ m	弹性模量 E / MPa	泊松 比 μ	重度 γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	粘聚力 c / kPa	内摩擦 角 $\varphi/(^{\circ})$	渗透系数 k / ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	比奥模量 M / MPa
回填砂	1.5	35	0.30	19.0	0	30	1×10^{-3}	47
淤泥	10.5	5	0.35	16.5	7	8	1×10^{-7}	6
粉质黏土	6.0	25	0.30	18.2	20	18	5×10^{-6}	33
粉细砂	9.0	35	0.30	19.0	8	33	7×10^{-4}	47

注:比奥模量取(0~20)倍土体模量;比奥系数均取 1.0。

真空预压固结是典型的流-固耦合过程,工程上抽真空的时间一般是 2~4 个月。文中模拟基于比奥固结理论进行渗流计算分析,模型采用各向同性渗流模型(渗透系数 $k_x = k_y = k_z = k$)。孔压边界条件:地表为透水边界,地下水位在地表,采用气管直排方式模拟实际抽真空,将负压逐点施加在排水板上(节点负压法),在地表的真空负压为-80 kPa,抽真空时间设置为 2 个月。为模拟涂抹、井损、排水管阻塞等的影响,根据文献[3]的建议,作为简化分析,近似假定真空负压沿深度呈线性衰减,衰减率取为 3.3 kPa/m,即至排水板底衰减了 50%;另外,在加固区与影响区之间未设置侧向密封墙。

3 数值计算结果分析

计算了真空预压加固的软土地基沉降、分层沉降、孔隙水压力等结果,并进一步讨论了真空度损耗(衰减)率、排水板打设深度、密封墙设置等因素对真空预压加固效果的影响。

3.1 地基沉降

图 3 为加固区中心地表的沉降随抽真空时间的变化,随着抽真空的延续,地基沉降逐渐增大,在抽真空早期(10 d 内),沉降增大很快,这主要是因为模拟计算时将-80 kPa 的真空负压一次性施加在表层砂上,这与实际工程的做法有些差异,在工程上,抽真空早期逐渐增大真空度,达到一定值后,将真空度稳定在该值上;抽真空 20 d 后,地基沉降的增大变缓,地基固结沉降趋于稳定。

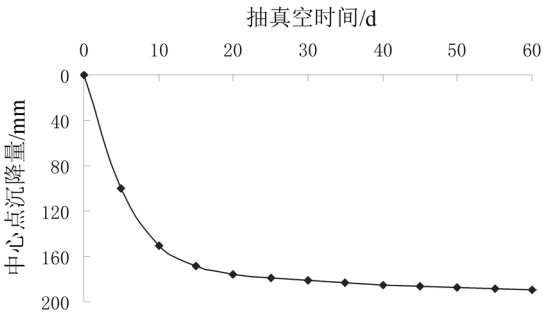


图 3 加固区中心表面沉降
Fig.3 Ground surface settlement at the center of reinforced area

图 4~6 分别为抽真空 60 d 后的地基模型沉降等值线图、地层沉降分布图、加固区中心分层沉降图。可以看出,由于真空负压的作用,在整个模型地基产生明显的沉降漏斗体,中心大,往外逐渐变小,超过一定距离后(45 m 左右)趋于稳定。其中在加固区沉降明显大于影响区,且较为均匀,集中在 160~180 mm 之间,这是因为在整个加固区内均匀布设了排水板的结果;但由于加固区与影响区之间未设密封墙体,由加固区抽真空产生的地基沉降一直延伸至整个影响区,在模型的边界上仍有较为明显的沉降,约 70 mm(图 5)。对于不同地基土层均有类似的规律,但数值要远小于地表沉降。沿深度向下,地基分层沉降逐渐变小,在塑料排水板深度范围内(淤泥层:1.5~12 m),沉降随深度减小幅度变大,达到 12.7 mm/m,而在排水板以下的粉质黏土层则较小(图 6)。

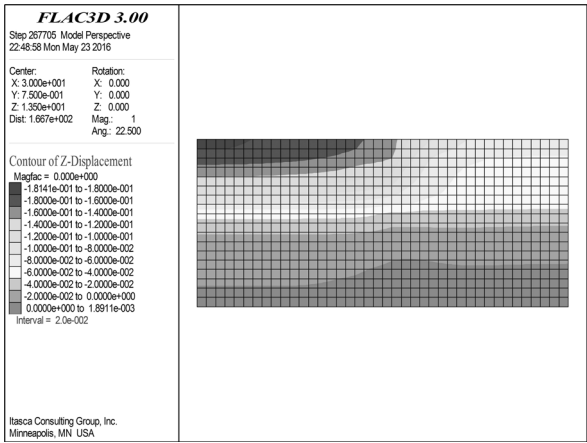


图 4 计算模型沉降等值线云图(单位:m)
Fig.4 Settlement contour nephogram of model (unit:m)

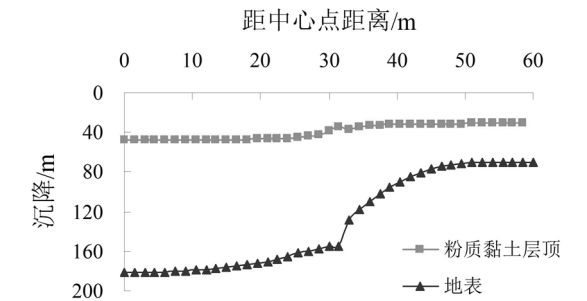


图 5 地基土层表面沉降分布
Fig.5 Distribution of surface settlement of soil layers

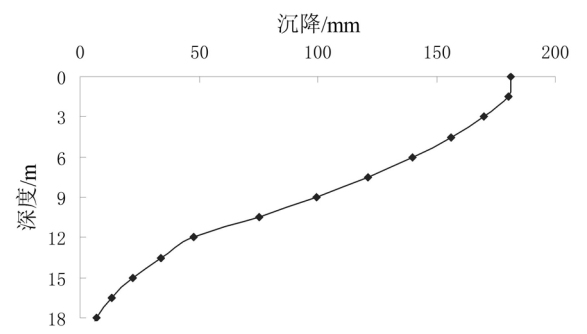


图 6 加固区中心分层沉降
Fig. 6 Distribution of settlement at the centerline of reinforced subsoil along the depth

综上分析,地基的沉降变形主要以淤泥层的排水固结为主,占了总沉降量的 74%,但下卧粉质黏土也产生近 22.5%的变形量,可见,真空预压不仅从水平上对加固区外的土体产生影响,也会沿深度向下对加固深度范围以下的地层产生

影响。

3.2 孔隙水压力分布

图 7 为真空预压 60 d 后的地基孔隙水压力分布情况,可看出,在加固区内(图中虚线框),孔隙水压力沿深度向下逐渐减小,这与预施加的真空负压分布一致,在加固区下层黏土层表面一定深度内亦产生了部分的负压,这也是使黏土层产生较大沉降的原因之一;往下则快速消散至零,并以静水压力作用为主。在加固区外侧的影响区中,由于没有设置密封墙,且表面土为砂层,使得在该层土中及其下部分淤泥也产生较大的真空负压,这也解释了在整个影响区均产生了较大的沉降量。

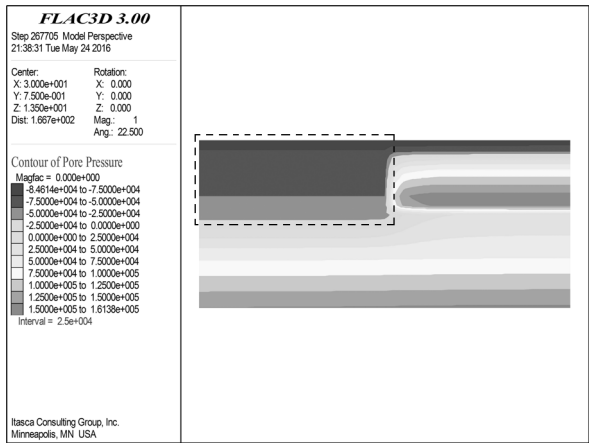


图 7 孔隙水压力分布
Fig. 7 Pore water pressure distribution

可见,真空负压沿深度、水平方向上损耗,在加固软土外围形成一个孔隙水压力零值面。在零孔隙水压面以内,包括加固区、其下部分黏土层、影响区表层土,在这些区域内的土体出现了负值的孔隙水压力,根据有效应力原理,孔隙水压力的下降,使得土体有效应力增大,从而引起地基土的沉降。

3.3 影响因素分析

3.3.1 真空度损耗(衰减)率

真空度在地基中的传递对加固的效果影响很大。大量的工程实测表明,由于涂抹、井损、排水管阻塞等因素的存在,不管是无砂真空预压,还是有砂真空预压,真空负压沿深度均存在损耗现象^[3],衰减至排水板底部的剩余真空负压在 20%~70%之间,折算衰减率在 2.5~20 kPa/m,衰减梯度每米 3%~15%;且真空度沿深度的传递多

呈现出线性衰减的规律,文献[3]的理论解答也证实了对自重固结超孔压概化为沿深度线性分布是基本合理可行的。

对此,文中对真空负压的传递假定为线性衰减,并计算了真空负压损耗率(排水板顶、底真空负压差值与顶部真空负压的比值)为0、1/3、1/2、2/3、1时对地基沉降的影响,计算结果如图8所示。可见,真空度沿深度的损耗程度对真空预压加固的影响较为明显,损耗率为0时,即真空度没有发生损耗,此时的地表沉降最大,固结效果最好;随着损耗率的增大,地表沉降逐渐变小,加固效果越来越差。而在不同的真空度损耗率下,地表的沉降分布规律相似,整体呈现出沉降漏斗状,加固区中心最大,往外逐渐减小,到达影响区外一定距离后,沉降趋于稳定。

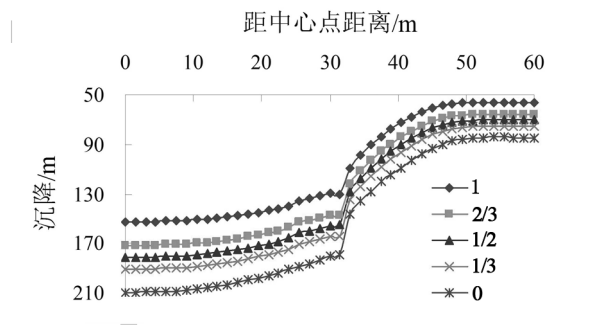


图 8 真空度损耗对地基表面沉降的影响
Fig.8 Influence of vacuum loss on the surface settlement of subsoil

3.3.2 密封墙

从前述分析中发现,在影响区内的地表也存在较大的沉降,一个重要的原因就是在加固区边界没有设置密封墙,使得在影响区中的表层砂也存在较大的真空负压,从而产生较大的沉降量。在实际工程中,为了保证加固区内的真空度及防止对周围环境的影响,常在加固区边界处打设一道侧向密封墙^[8]。文中也计算了在加固区与影响区分界面上设置有密封墙的情况,密封墙采用水泥土搅拌桩,为不透水模型,并贯穿淤泥层进入黏土层中,计算结果如图9~10所示。

可见,是否设置密封墙对加固区的沉降影响不大,但对影响区中的地表沉降的影响非常大。设置密封墙后,在加固区边界处,地表沉降发生了骤减,再往外,沉降量继续减小。这说明加固区的

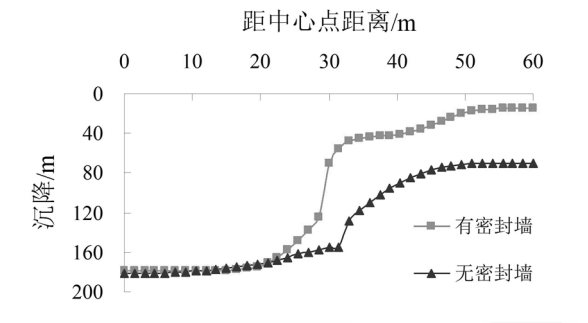


图 9 密封墙对地基表面沉降的影响
Fig.9 Influence of sealing wall on the surface settlement of subsoil

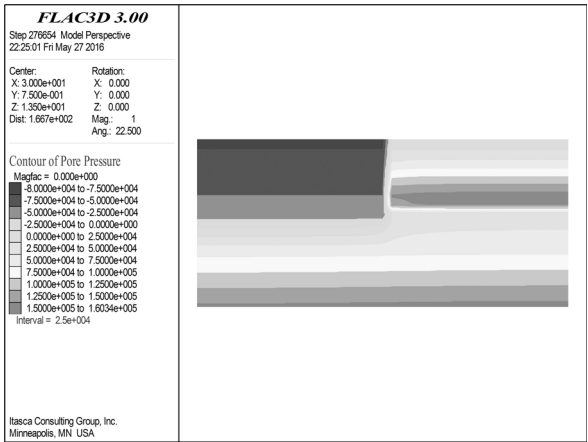


图 10 孔隙水压力分布(密封墙)
Fig. 10 Pore water pressure distribution(of the sealing wall)

真空预压几乎不再影响外侧的土体,这是因为密封墙的存在使得影响区内的空气和水不再流向加固区,也阻止了加固区中的真空负压的向外传递,如图10所示,影响区中的孔隙水压力变化不大,以静水压力作用为主,未出现负值;而在加固区内,有无密封墙对孔隙水压力影响不大(与图7比较)。

3.3.3 塑料排水板打设深度

计算了塑料排水板打设深度为1.5、7.5、10.5、12、15、18 m对地表沉降的影响,计算结果如图11所示。

可见,随着塑料排水板打设深度的增大,地表的沉降也逐渐增大,这是由于排水板打设深度的增加,增长了软土层中的排水通道,使得软土层中更多的地下水被排水,固结沉降更显著。在加固

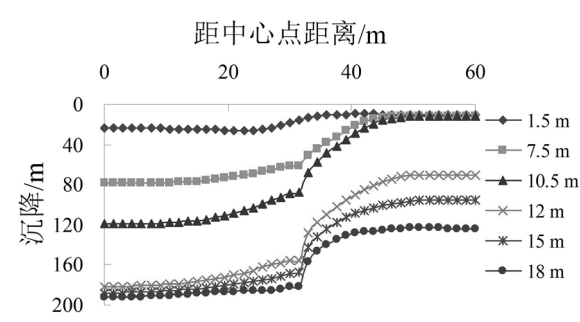


图 11 塑料排水板打设深度对地基表面沉降的影响
Fig.11 Influence of depth of PVDs on the surface settlement of subsoil

区范围内,增大排水板打设深度,对增大地表沉降尤为明显;但当排水板打设深度达到 12 m 后,即贯穿整个淤泥层,并进入下卧粉质黏土层中,在加固区范围内,地表沉降几乎不再随排水板打设深度增加而增大,反而在影响区内的地表沉降随之增加。这说明需在整个软土层内打设排水板,才

能获得最佳的加固效果,而继续增长其深度,并不会产生显著的进一步沉降,只会造成工程材料浪费。

4 结论

1)在抽真空早期,地表沉降很快,达到一定天数后,沉降值逐渐趋于稳定;真空负压沿深度、水平方向上损耗,在加固软土外围形成一个零孔隙水压力面。

2)真空度损耗率、排水板打设深度对真空预压加固软土的效果影响很大。加固软土层内真空度沿深度损耗越小,软土层的沉降越大,加固效果越好;塑料排水板打设深度越长,地表的沉降越大,但超过加固软土层厚度后,再加长排水板深度,加固效果不明显。

3)设置密封墙限制了真空负压的侧向传递,使得影响区内的孔隙水压力在抽真空前后变化不大,造成影响区内的地表沉降发生了骤减;而在加固区内,密封墙对孔隙水压力和地表沉降的影响不大。

参考文献:

[1] 诸葛爱军.真空预压加固软土地基的沉降计算与分析[D].天津:天津大学,2012.
[2] 庄妍,王晓东,崔晓艳.真空预压在有轨电车软土地基中的应用及数值模拟研究[J].岩土工程学报,2016,38(S0): 141-146.
[3] 蒋基安,陈海英,陈越,等.排水板真空度损耗的排水固结解析解[J].岩土工程学报,2016,38(3): 404-418.
[4] Biot M A. General theory of three-dimensional consolidation[J]. Journal of Applied Physics, 1941, 12(2): 155-164.
[5] 林高杰,张宁,李文彬,等.基于 FLAC3D 的吹填土真空预压数值分析[J].水道港口,2014,35(6): 623-628.
[6] 陈平山,房营光,莫海鸿,等.真空预压法加固软基三维有限元计算[J].岩土工程学报,2009,31(4): 564-570.
[7] 陈远洪,洪宝宁,龚道勇.真空预压法对周围环境影响的数值分析[J].岩土力学,2002,23(3): 382-386.
[8] 陈志钊.真空预压对邻近区域既有桩基础影响分析[D].广州:暨南大学,2015.
[9] 刘加才,赵维炳,施建勇.真空预压作用下竖井地基孔压消散研究[J].中国公路学报,2004,17(2): 37-42.

(责任编辑:陈雯)