岩土力学

真空联合堆载预压软土地基侧向变形计算

吴佳应[1,2]，吴跃东[1,2]，刘 坚[1,2]，张哲成[1,2]，张文慧[1,2]

（1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室，南京 210098；
2. 河海大学 岩土工程学研究所，南京 210098）

摘 要：针对真空联合堆载预压法加固软土地基时侧向变形预测的难题，依托粤东城际铁路莲塘动车所路基工程，通过现场监测、数值模拟与理论推导相结合的方法，系统研究侧向变形演化规律并提出量化计算方法。结果表明：加固区外土体侧向位移呈" 浅层集中、深层衰减" 特征，最大值 120.22 mm（0.5 m 深度），水平影响范围 30 m，深度影响范围 8 m；堆载阶段产生向加固区外的反向位移，与真空收缩位移形成耦合效应。基于单井轴对称固结理论，考虑真空度线性衰减特性，推导了真空与堆载分别作用及耦合作用下的侧向位移解析解，建立了适用于任意时刻、任意深度的侧向变形计算方法。工程验证表明：该方法计算值与现场监测值、数值模拟值相对误差均小于 27%，能反映复合荷载下的侧向变形规律。研究成果为软土地基联合预压工程的变形控制及邻近构筑物保护提供了理论依据与技术支撑。

关键词：真空堆载联合预压；软土地基；侧向变形；解析解；计算方法

中图分类号：TU47 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-8249（2026）05-0071-08

DOI：10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.05.011

Lateral Deformation Calculation of Soft Soil Foundation under Vacuum-Surcharge Preloading

WU Jiaying[1,2], WU Yuedong[1,2], LIU Jian[1,2], ZHANG Zhecheng[1,2], ZHANG Wenhui[1,2]

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Aiming at the problem of lateral deformation prediction when reinforcing soft soil foundation by vacuum combined stacking preloading method, relying on the roadbed project of Liantang EMU of the East Guangdong Intercity Railway, the evolution law of lateral deformation is systematically studied and quantitative calculation methods are proposed through the combination of on-site monitoring, numerical simulation and theoretical derivation. The results show that the lateral displacement of the soil outside the reinforcement area is characterized by " shallow concentration and deep attenuation", with a maximum value of 120.22mm (0.5m depth), a horizontal influence range of 30m, and a depth influence range of 8m. The reverse displacement outside the reinforcement area occurs in the stacking stage, forming a coupling effect with the vacuum shrinkage displacement. Based on the axisymmetric consolidation theory of a single well, considering the linear attenuation

项目来源：国家自然科学基金资助项目（51608152）。

作者简介：吴佳应（2001—），男，硕士研究生，研究方向：岩土工程软基处理研究。

通信作者：吴跃东（1969—），男，博士，教授，研究方向：软基处理与基础工程和岩土工程测试技术。

收稿日期：2026-05-27

岩土力学

characteristics of vacuum degree, the analytical solution of lateral displacement under the action and coupling effect of vacuum and stockpile is derived, and a lateral deformation calculation method suitable for any time and depth is established. The engineering verification shows that the relative error between the calculated value of the method and the field monitoring value and the numerical simulation value is less than 27%, which can reflect the lateral deformation law under compound load. The research results provide theoretical basis and technical support for the deformation control and protection of adjacent structures in the joint precompaction project of soft soil foundation.

Key words: vacuum stacking combined preloading; soft soil foundation; lateral deformation; analytical solution; calculation methods

0 引言

真空联合堆载预压具有加载效率高、施工周期短和加固效果显著等特点，已广泛应用于港口堆场、道路及大型工业场地等软土地基处理工程。真空负压降低土体孔隙水压力并促使土体向加固区内侧收缩，堆载荷载增加总应力并可能引起土体向外挤出。两类荷载的作用方向和施加时序不同，使软土地基侧向变形呈现明显的阶段性、深度差异和空间衰减特征，并可能对邻近桩基及地下结构产生不利影响，因此有必要研究其侧向变形规律及计算方法[1-2]。

国内外学者围绕真空预压及联合堆载条件下软土地基固结与侧向变形开展了较多研究。蔡袁强[1]系统总结了吹填淤泥真空固结、土柱形成及排水体防淤堵机理；Zhang 等[2] 通过相邻现场试验对比了真空预压与等效堆载下地基沉降、侧移和孔压响应；吴跃东等[3] 考虑真空度衰减和涂抹区渗透系数变化，建立了真空预压固结解析解；黄朝煊等[4] 将漏气和井阻非线性纳入固结分析；蔡袁强等[5] 建立了考虑淤堵效应的疏浚淤泥真空固结沉降计算方法。雷华阳等[6] 从气体运移规律出发分析了增压式真空预压的加固机制；Wang 等[7] 研究了堆载速率和荷载比对联合预压效果及侧向变形的影响；Lu 等[8] 基于改进三轴试验提出了真空联合堆载地基变形预测方法；吴其长等[9] 通过模型试验与数值模拟揭示了塑料排水板地基侧向变形及其主要影响因素；刘景锦等[10] 推导了考虑涂抹、井阻、径竖向渗流和上部堆载的增压式真空预压固结解析解；崔允亮等[11] 提出了真空预压淤堵区渗透系数及厚度的计算方法；Chai 等[12] 阐明了增压作用的土体扰动、排水及淤堵缓解效应；孙宏磊等[13] 建立了考虑土柱发展过程的淤泥真空预压大应变固结模型；倪睿思等[14] 考虑非线性井阻和不同增压模式，提出了无砂增压式真空预压分析方法；Wu 等[15] 通过间歇气囊增压试验分析了疏浚淤泥的排水、沉降和加固效果；Xu 等[16] 基于应力状态演化建立了真空预压地基侧向变形预测方法。

综上，现有研究多集中于排水板单元体、加固区边界最大侧移或单一加载阶段，对真空持续作用下分级堆载全过程中侧向变形随时间、深度和水平距离的协同演化研究仍不充分，理论计算、数值模拟与现场监测在相同空间位置的对比验证亦较少，邻近桥桩的位移与内力响应有待进一步分析。依托真空联合堆载预压工程，采用现场监测、数值模拟和理论分析相结合的方法，研究侧向变形的时空演化及水平影响范围，分析邻近桥桩响应，建立软土地基侧向位移计算方法并验证其适用性，为类似工程的变形预测和周边结构防护提供参考。

1 材料与方法

1.1 工程概况

依托工程为粤东城际铁路" 一环一射线" 汕头至潮汕机场段莲塘动车所路基工程，该路段沿线分布深厚海相软土，具有含水率高、压缩性大、渗透性低、强度低等特点，必须进行加固处理方可满足高速铁路路基沉降控制要求。加固区面积 14 700 m^2（175 m×85 m），采用真空联合堆载预压方案：真空度设计值 85 kPa，堆载高度 3.6 m（填料重度 16 kN/m^3）。塑料排水板按 1 m 正方形布置，打设深度 9~12 m，排水板贯穿主要软土层，形成竖向排水通道，显著缩短孔隙水排水路径，加速固结。

场地为海相沉积平原，主要土层自上而下为：

①杂填土：层厚 0.5~4.3 m，松散不均，含少量碎石、黏性土及植物根系，工程性质差异较大，

透水性相对较强；

②淤泥：层厚 0.7～11.3 m，呈深灰 — 灰黑色流塑状态，含水率高（47.1%）、孔隙比大、渗透性极弱（3.3×10^{-7} cm/s），为典型高压缩性软土，承载力极低；

③淤泥质粉质黏土：层厚 0.3～11.9 m，流塑 — 软塑状态，压缩性较高（压缩系数 0.53 MPa^{-1}），工程性质差；

④粉质黏土：层厚 0.5～36.3 m，硬塑状态，压缩性低、强度较高，为相对稳定下卧层。场地地下水位埋深 1.0 m，属第四系孔隙潜水，水位受降雨与潮汐影响明显，水位浅、波动大，直接影响真空传递效率与固结进程。

典型物理力学指标见表 1。

由图 1 可知，CX4 位于加固区边界外 1.5 m 处；在 CX4 测点同一断面处，另设有 CX6 与 CX8 测点，这三个测点分别距离加固区边界 1.5、20 和 30 m。

表 1　土层主要物理力学指标表

Table 1　Main physical and mechanical properties of soil layers

层号	厚度/m	岩土名称	重度 /（kN/m^3）	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /（°）	垂直渗透系数 /（cm/s）	水平渗透系数 /（cm/s）	压缩系数 /MPa^{-1}	压缩模量 /MPa
1-1	0.92	杂填土	16.2	10.0	13.2	5.00×10^{-5}	5×10^{-5}	0.60	1.60
2-0	4.71	淤泥	16.8	10.9	2.3	3.30×10^{-7}	3.3×10^{-7}	2.14	1.70
3-11	11.07	淤泥质粉质黏土	17.3	15.5	3.9	3.92×10^{-6}	4.94×10^{-6}	0.53	3.65
3-43	3.30	粉质黏土	19.1	31.0	11.5	3.05×10^{-6}	4.24×10^{-6}	0.30	6.31
3-92	1.50	中砂	19.8		25.5			0.12	13.90

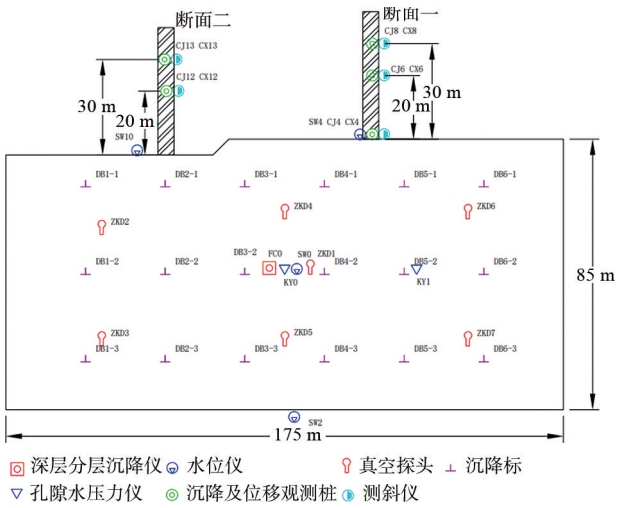
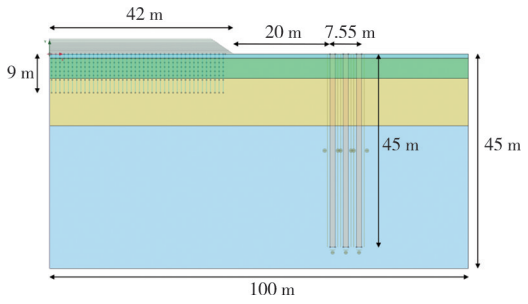


图 1　加固区监测点位布置图

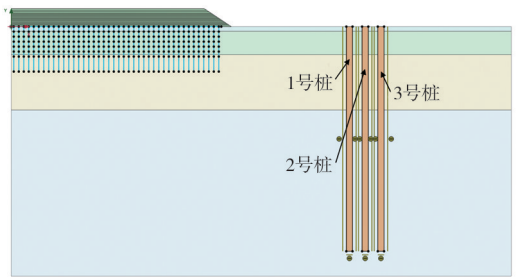
Fig. 1　Layout of monitoring points in the ground improvement area

1.2　数值模拟方法

采用 PLAXIS 2D 建立平面应变模型，尺寸 100 m×50 m，模型边界范围足够大，可有效消除边界效应对计算结果的影响，包含加固区、排水板、堆载体及 3 根桥桩（桩径 1.25 m，间距 1.9 m），平面模型如图 2 所示。土体采用莫尔-库伦本构模型，该模型参数易获取、物理意义明确，适用于软土地基固结与变形分析，参数基于室内试验与地勘报告确定（表 1）；排水板用排水线模拟，可有效模拟径向排水与真空传导特性，桥桩采用线弹性模型（弹性模量 30 GPa，泊松比 0.2）。施工过程分 7 个工况模拟：真空度上升（10 d）、真空稳定（38 d）、第一次堆载（13 d）、堆载间隔（12 d）、第二次堆载



（a）模型尺寸示意图



（b）真空、堆载结构示意图

图 2　平面模型示意图

Fig. 2　Schematic diagram of the flat model

岩土力学

(3 d)、固结稳定 (104 d)，真空预压保持全过程施加，且全过程严格按照现场施工工序分步加载，保证模拟路径与实际一致。

1.3 理论计算方法推导

1.3.1 基本假设

(1) 土体均质、完全饱和，符合小变形假定；

(2) 土颗粒与孔隙水均不可压缩；

(3) 孔隙水渗流符合达西定律，渗透系数为常数；

(4) 真空度沿竖向与径向呈线性衰减；

(5) 固结仅考虑径向与竖向渗流，排水板体积不变；

(6) 满足等应变假设，同一深度竖向应变均匀；

(7) 不考虑涂抹效应与排水板井阻作用。

1.3.2 固结解析解推导

基于单井轴对称固结理论，将复杂的三维排水固结问题简化为工程上可解的轴对称问题，大幅降低计算难度，建立真空预压径向固结控制方程：

$$\frac{\partial u_r}{\partial t}=C_h\left(\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial u_r}{\partial r}\right) \tag{1}$$

式中：u_r 为仅考虑径向渗流时的虚拟超静孔隙水压力，kPa；C_h 为水平向固结系数，m^2/d；r 为径向坐标，即从竖向排水体中心向外的距离 m。

考虑真空度线性衰减特性，在土层中随深度增加与径向距离增大逐渐衰减，是影响侧向变形的关键因素，单井单元中任一点真空压力为：

$$p(z,\ r)=p_0\left[1-(1-q_1)\frac{z}{l}\right]\left[1-(1-q_2)\frac{r-r_\omega}{R-r_\omega}\right] \tag{2}$$

式中：p_0 为膜下真空度，MPa；l 为排水体长度，m；r_ω 为排水体半径，m；R 为单井影响半径，m；q_1 为真空度沿竖向传递的衰减系数 ($0\leqslant q_1\leqslant 1$)；$q_2$ 为真空度沿径向传递的衰减系数 ($0\leqslant q_2\leqslant 1$)。

结合边界条件 ($r=R$ 时无径向渗流，$\partial u/\partial r=0$；$r=r_\omega$ 时，孔压完全消散，$u=0$；初始条件 $t=0$，$u=p(z,\ r)$)。

通过分离变量法求解：

令 $u(r,\ z,\ t)=p(z,\ r)\cdot F(r,\ t)$，代入控制方程并分离变量，$\frac{1}{F}\frac{\partial F}{\partial t}=-\frac{8C_h}{\mu R^2}=-\lambda$；

对时间积分，$F(t)=e^{-\lambda t}=e^{-\frac{8T_h}{\mu}}$。

式中：$T_h=\frac{C_h t}{4R^2}$ 为水平时间因子，μ 为井径比修正系数。

对径向方程结合边界条件求解贝塞尔函数，得到任意深度、任意时刻的超孔隙水压力均值：

$$\overline{u}=p_0Ge^{-\frac{8T_h}{\mu}}-p_0G \tag{3}$$

式中：$G=\left[1-(1-q_1)\frac{z}{l}\right]\frac{2-(1-q_2)}{2}$；$\mu=\left(\ln n-\frac{3}{4}\right)\frac{n^2}{n^2-1}+\left(1-\frac{1}{4n^2}\right)\frac{1}{n^2-1}$；$n=\frac{R}{r_\omega}$ 为井径比；$T_h=\frac{C_h t}{4R^2}$ 为时间因素。

1.3.3 侧向位移计算

基于有效应力原理与弹性本构关系，有效应力增加是土体产生侧向位移的根本原因，而真空引起的有效应力增量为 $\Delta\sigma'=-\overline{u}$，推导真空预压引起的侧向位移：

$$V_r(z,\ t)=p_0G(e^{-\frac{8T_h}{\mu}}-1)R(1-2v)/E \tag{4}$$

堆载预压引起的侧向位移采用 Barron 解析解修正：

$$V'_r(z,\ t)=u_0(1-e^{-\frac{8T_hf(z)}{\mu_b}})ER(1-v^2)/E \tag{5}$$

式中：$f(z)=\frac{e^{\beta l-\beta z}+e^{\beta z-\beta l}}{e^{\beta l}+e^{-\beta l}}$ 为深度应力修正系数；$\mu_b=\frac{n^2}{n^2-1}\ln n-\frac{3n^2-1}{4n^2}$ 为堆载固结参数；$\beta=\sqrt{\frac{2(n^2-1)}{\mu_b R^2}\frac{k}{k_\omega}}$ 为渗流特征参数。

真空与堆载耦合作用下的侧向位移为两者叠加 (考虑加载时序差异)：

$$V_{r\text{联合}}(z,\ t)=\begin{cases}V_r(z,\ t)(0\leqslant t\leqslant t')\\V_r(z,\ t)+V'_r(z,\ t-t')(t>t')\end{cases} \tag{6}$$

式中：t' 为堆载开始时间，体现真空与堆载不同步加

载的工程实际。

2　结果与讨论

2.1　侧向变形时空演化规律

2.1.1　深度分布特征

由图 3 可知，加固区外 1.5 m 处（CX4 测点）深层水平位移随深度变化显著，0.5 m 深度位移最大值 120.22 mm，8 m 深度以上位移占总位移的 89.3%，8 m 以下位移小于 5 mm。浅层位移占比极高，说明侧向变形高度集中于地表附近，是工程防护重点区域。这一规律源于真空度沿深度的线性衰减特性，3 m 深度真空度仅为表层的 36.3%，深层土体有效应力增量减小，变形效应减弱。

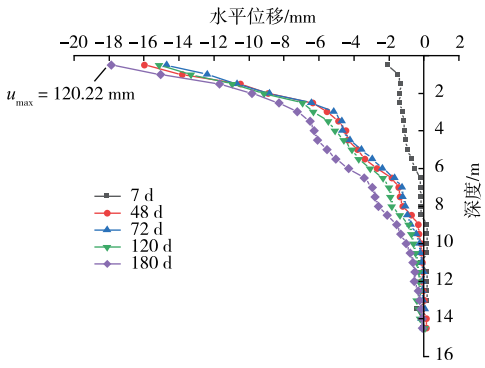


图 3　CX4 测点深层水平位移累计值变化曲线

Fig. 3　Curve of cumulative value of deep horizontal displacement of CX4 measurement point

2.1.2　时间演化特性

侧向位移随时间呈现三阶段变化：

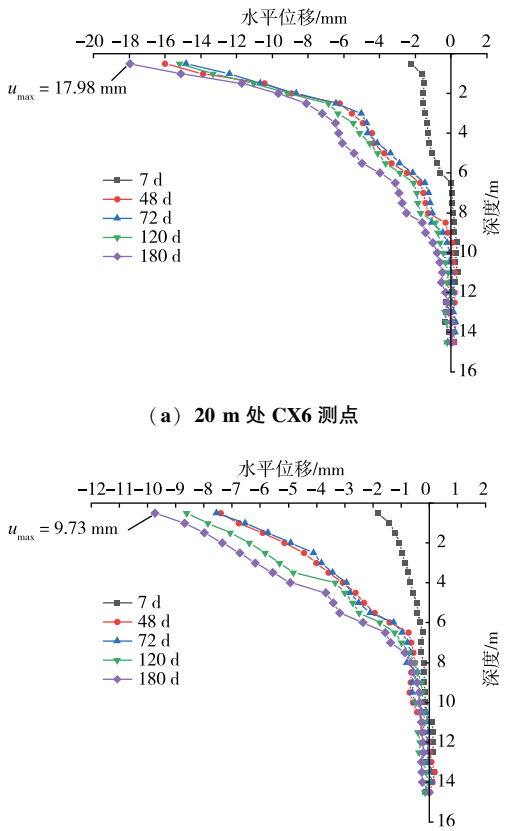
单独真空预压阶段（0～48 d）：位移快速增长，速率达 2.5 mm/d，此阶段真空负压主导，土体孔隙水压力降至 − 28.82 kPa（3 m 深度），有效应力显著提升引发收缩变形；

真空持续作用下的分级堆载阶段（48～72 d）：位移出现反向增长（向加固区外），最大反向位移 12.7 mm，因堆载增加土体总应力，产生剪切变形与挤出效应，部分抵消真空收缩位移；

真空—满载联合预压维持阶段（72～180 d）：位移增速放缓，速率降至 0.1～0.3 mm/d，土体逐渐达到固结平衡。

2.1.3　水平影响范围

由图 4 可知，与图 3 中 CX4 测点 1.5 m 处最大位移 120.22 mm 相比，20 m 处（CX6 测点）降至 17.98 mm，30 m 处（CX8 测点）仅 9.73 mm，位移随距离呈指数衰减趋势。位移衰减迅速，影响范围有限，为工程防护范围划定提供依据。以 10 mm 为影响边界控制值，确定联合预压的水平影响范围为 30 m，与数值模拟结果（32 m）基本一致．根据监测结果与数据分析可以作出影响边界结果的图形如图 5 所示。



（a）20 m 处 CX6 测点

（b）30 m 处 CX8 测点

图 4　测点深层水平位移累计值变化曲线

Fig. 4　Curve of cumulative value of deep horizontal displacement

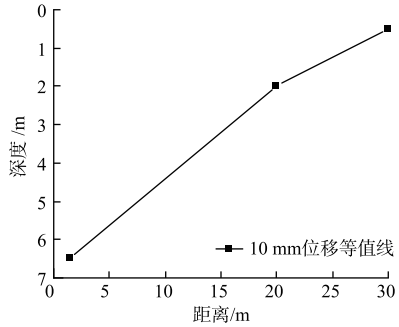


图 5　影响边界结果图

Fig. 5　Influence boundary result graph

岩土力学

2.2 数值模拟验证与拓展分析

2.2.1 模型可靠性验证

由图 6 可知，加固区土体向内收缩，外侧土体向外挤出；变形集中于浅层，随深度快速衰减，最大值约 120 mm，与实测吻合。侧向变形随距离增大显著衰减，30 m 外趋于稳定，模型可准确反映复合荷载下变形场分布规律。

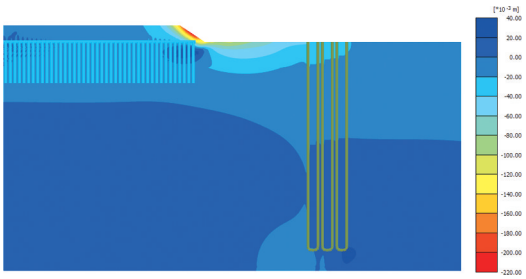
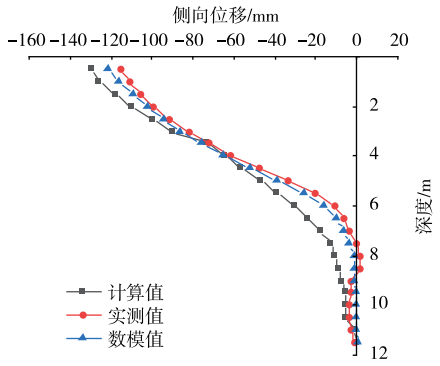


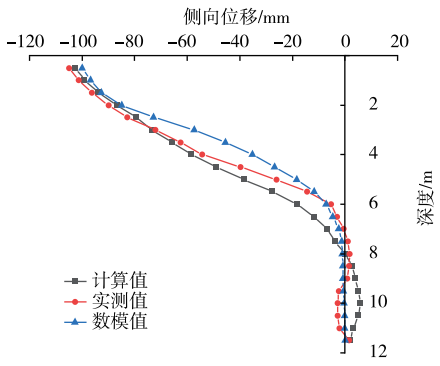
图 6 加固区最终整体侧向水平位移云图

Fig. 6 The final overall lateral horizontal displacement cloud map of the reinforcement area

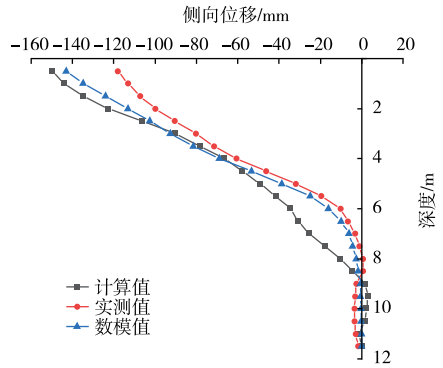
理论计算结果按深度方向每 0.5 m 设置一个计算节点，数值模拟与现场监测数据（距加固区边界 1.5 m 处 CX4）对比如图 7 所示，地表沉降相对误差



（a）工况一（48 d）



（b）工况二（72 d）



（c）工况三（180 d）

图 7 联合预压不同阶段侧向位移对比图

Fig. 7 Comparison of lateral displacement at different stages of joint preload

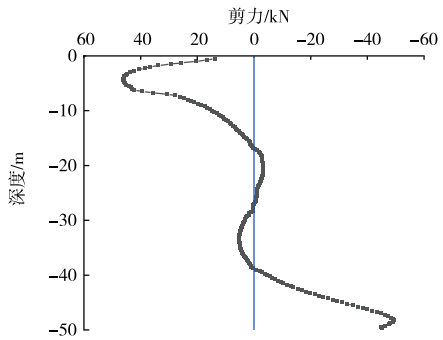
为−5.13%～6.34%，侧向位移相对误差为−2.43%～26.72%，浅层误差较大源于模型未考虑排水体加筋效应。排水板在土体中具有一定加筋作用，可限制侧向变形，使实测位移小于模拟值。整体而言，模拟结果与监测数据变化趋势高度吻合，验证了模型的合理性。

2.2.2 桩体响应规律

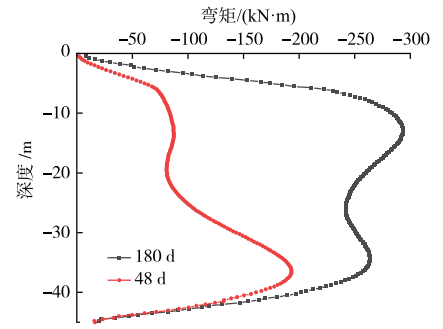
数值模拟揭示了邻近桥桩的变形与应力特征。

变形规律：1 号桩（距加固区 20 m）地表侧向变形 4.05 mm，2 号桩（23.15 m）2.72 mm，3 号桩（26.3 m）2.23 mm，距加固区越近变形越大；1 号桩对后方土体变形产生屏障作用，使 2 号桩、3 号桩变形分别减小 48.9%、64.1%，前排桩可有效阻隔位移传递，在工程中可作为防护结构使用。

应力特征：联合作用下桩身内力沿深度呈非线性分布（如图 8 所示）。以 1 号桩为例，桩身剪力正、负峰值分别为 47.00 和−50.36 kN，其中正向剪力峰值出现在深度 4.02 m 处；桩身弯矩沿深度呈明显双峰分布特征，最大负弯矩为−294.57 kN·m，出现在深度 12.80 m 处。桩身中部剪力相对较小，说明桩身剪力主要集中于浅层土体侧向变形较强区域及深部约束区域。浅部正向剪力与加固区外土体在真空作用下向内收缩有关，深部负向剪力则主要受下部土体反力及桩端约束影响。表明在真空预压与堆载联合作用下，桩身受力并非集中于浅部土层，而是在浅部剪切作用与中下部弯曲效应共同控制下形成复杂内力响应。



（a）预压完成时 1 号桩桩身剪力分布曲线图



（b）1 号桩桩身弯矩分布曲线图

图 8　桩身受力沿深度分布图

Fig. 8　Distribution of pile shaft forces with depth

2.3　计算方法验证

选取 3 个关键工况（48、72、180 d）进行计算，并与现场监测值（距加固区 1.5 m 处 CX4）、数值模拟值对比见表 2。结果表明，计算值与监测值相对误差为 12.07% ~ 26.72%，与模拟值相对误差为 2.37%~6.21%，均满足工程精度要求，能准确反映复合荷载下的侧向变形规律。

表 2　（0.5 m 深度）侧向位移计算值与实测值、模拟值对比

Table 2　（0.5 m depth）Comparison of lateral displacement calculated values with measured and simulated values

工况	检测值/mm	模拟值/mm	计算值/mm	与监测值相对误差	与模拟值相对误差
48 d	−115.4	−121.2	−129.4	12.07%	6.21%
72 d	−105.0	−100.0	−102.4	−2.43%	2.37%
180 d	−118.3	−142.2	−149.7	26.72%	4.66%

注：负值表示向加固区内位移。

3　结论

针对真空联合堆载预压下软土地基侧向变形及邻近桥桩响应问题，结合现场监测、数值模拟与理论分析，研究了侧向变形的时空演化规律、水平影响范围及桩体响应特征，并对所建立计算方法的适用性进行了验证。主要结论如下：

（1）真空联合堆载预压下软土地基侧向位移呈"浅层集中、深层衰减"特征，最大值 120.22 mm（0.5 m 深度），水平影响范围 30 m，深度影响范围 8 m；堆载阶段产生向加固区外的反向位移，与真空收缩位移形成耦合效应，位移随深度与距离均呈显著衰减规律，受控于真空度传递与附加应力扩散。

（2）侧向变形随时间呈现三阶段演化规律：真空作用阶段位移快速向加固区内发展；堆载阶段土体产生向外的反向位移，与真空收缩位移形成耦合抵消效应，可在一定程度降低整体侧向变形；稳定阶段位移增速显著放缓并逐渐趋于平稳。真空与堆载荷载作用机制相反、变形方向相反、发展时序不同，是联合预压侧向变形最突出的力学特征。

（3）基于单井轴对称固结理论，考虑真空度沿竖向与径向线性衰减，推导了超孔隙水压力解析解，并建立了可适用于任意时刻、任意深度的侧向变形解析计算方法。该方法弥补了现有经验法与数值模拟法的不足。工程实例验证表明，计算结果与现场监测、数值模拟规律一致，相对误差小于 27%，可满足工程设计精度要求。

（4）邻近桥桩的侧向变形随距加固区距离增大而明显减小，桩体变形呈现浅层向内、深层向外的特征。前排桩对后方土体与桩体具有显著的位移屏障效应，可大幅降低后排结构变形，可在工程中作为被动防护措施加以利用。桩身剪力呈两端大、中间小分布，桩身弯矩在联合荷载作用下由单峰值变为双峰值，受力模式更为复杂，设计中应重点控制中下部桩体的抗弯承载力。

（5）工程验证表明，该计算方法与现场监测值、数值模拟值相对误差均小于 27%，能准确反映复合荷载下的侧向变形规律，为工程设计提供了简易可行的量化工具。

参　考　文　献

[1]　蔡袁强. 吹填淤泥真空预压固结机理与排水体防淤堵处理技术[J]. 岩土工程学报，2021，43（2）：201-225.

[2]　Zhang Zhen，Ye Guanbo，Xu Yan. Comparative analysis on performance of vertical drain improved clay deposit under vacuum or surcharge loading [J]. Geotextiles and Geomembranes，2018，46（2）：146-154.

岩土力学

[3] 吴跃东，吴鸿昇，罗如平，等. 考虑真空度衰减及涂抹区渗透系数变化的真空预压固结解析解［J］. 河海大学学报（自然科学版），2016，44（2）：122-128.
[4] 黄朝煊，王正中，方咏来. 考虑漏气及井阻非线性的真空预压地基固结解析解［J］. 岩土力学，2017，38（9）：2574-2582.
[5] 蔡袁强，周岳富，王鹏，等. 考虑淤堵效应的疏浚淤泥真空固结沉降计算［J］. 岩土力学，2020，41（11）：3705-3713.
[6] 雷华阳，王鹏，刘旭，等. 基于气体运移规律的增压式真空预压法加固机制分析［J］. 岩土力学，2021，42（4）：943-95.
[7] Wang Jun，Gao Ziyang，Fu Hongtao，et al. Effect of surcharge loading rate and mobilized load ratio on the performance of vacuum-surcharge preloading with PVDs［J］. Geotextiles and Geomembranes，2019，47（2）：121-127.
[8] Lu Yitian，Chai Jinchun，Ding Wenqi. Predicting deformation of PVD improved deposit under vacuum and surcharge loads［J］. Geotextiles and Geomembranes，2020，48（1）：32-40.
[9] 吴其长，徐方，张期树，等. 塑料排水板地基侧向变形的模型试验与仿真分析［J］. 水文地质工程地质，2024，51（6）：113-125.
[10] 刘景锦，罗学思，雷华阳，等. 等应变条件下增压式真空预压固结解析解［J］. 岩土力学，2024，45（3）：809-821.
[11] 崔允亮，潘方然，高棫园，等. 真空预压淤堵区渗透系数的计算方法［J］. 岩土力学，2024，45（7）：2085-2093..
[12] Chai Jinchun，Qiao Yafei，Ding Wenqi，et al. Mechanism of airboosting and its effects on vacuum consolidation［J］. Geotextiles and Geomembranes，2024，52（4）：554-561.
[13] 孙宏磊，徐振恺，刘斯杰，等. 考虑土柱发展过程的淤泥真空预压大应变固结计算［J］. 岩土力学，2025，46（1）：133-146.
[14] 倪睿思，肖世国，吴兵，等. 基于非线性井阻的饱和软弱土无砂增压式真空预压分析方法［J］. 岩土力学，2025，46（7）：2160-2172.
[15] Wu Yajun，Wu Jinjin，Lu Yitian，et al. Experimental study on vacuum preloading combined with intermittent airbag pressurization for treating dredged sludge［J］. Geotextiles and Geomembranes，2025，53（1）：366-377.
[16] Xu Fang，Yang Junfang，Wu Qichang，et al. Prediction method for lateral deformation of PVD - improved ground under vacuum preloading［J］. Geotextiles and Geomembranes，2025，53（4）：1021-1034.

（上接第 70 页）

[16] 杨腾添，李恒，周冠南，等. 软弱地层敞开式 TBM 超前注浆加固技术研究［J］. 隧道建设（中英文），2021，41（5）：858-864.
[17] 毛永强，张子平，袁青，等. 隧道穿越富水破碎带涌水突泥风险评估模型研究［J］. 人民长江，2022，53（12）：88-95..
[18] 唐大雄，孙愫文. 工程岩土学［M］. 北京：地质出版社，1987.
[19] 何鹏，刘长武，王琛，等. 沉积岩单轴抗压强度与弹性模量关系研究［J］. 四川大学学报（工程科学版），2011，43（4）：7-12.
[20] 李增林，张东升，王锐，等. 大断面斜井富水砂化层段注浆改性及围岩控制技术研究［J］. 煤炭工程，2024，56（8）：38-46.
[21] 李召峰，李术才，刘人太，等. 富水破碎岩体注浆加固实验与机制研究［J］. 岩石力学与工程学报，2017，36（1）：198-207.
[22] 刘琪，张传健，颜天佑，等. 敞开式 TBM 穿越断层破碎带时岩-机作用分析——以滇中引水工程香炉山隧洞为例［J］. 人民长江，2021，52（10）：165-175.