



软土地基上施工期船闸闸首底板结构 响应预测方法研究*

沈龙清

(华设设计集团股份有限公司, 江苏南京 210014)

摘要: 针对软土地基上船闸闸首施工期结构响应预测精度低和安全预警效率差等问题, 进行多因素耦合作用下的闸首底板结构响应预测方法研究。依托某船闸的闸首实例, 采用三维有限元模型计算和响应面法, 分析相关因素影响闸首底板结构响应指标的作用机理, 构建闸首底板受荷响应预测方程并评估其预测精度。结果表明, 各因素主要通过控制复合地基强度、协调变形、荷载重分布和桩-土相互作用机制, 显著影响闸首底板的结构响应; 预测结果与有限元计算结果整体变化规律一致, 误差控制在5%以内, 基于响应面法分析的预测方法精度较高, 能够有效预测软土地基上施工期船闸闸首底板的结构响应指标。

关键词: 船闸闸首; 软土地基; 响应面法; 响应预测

中图分类号: U641.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)03-0109-07

Predictive methods for structural response of ship lock head floor slab during construction on soft soil foundations

SHEN Longqing

(China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210014, China)

Abstract: In view of the issues of low prediction accuracy for structural response and inefficient safety warning during the construction of ship lock heads on soft soil foundations, a prediction method for the structural response of the lock head slab under multi-factor coupling effects is investigated. Utilizing an actual ship lock head project as a case study, a three-dimensional finite element model (FEM) and the response surface methodology (RSM) are employed to analyze the influence mechanisms of relevant factors on the structural response indicators of the lock head floor slab. A predictive equation for the load-induced response of the lock head floor slab is established, and its prediction accuracy is evaluated. The results indicate that the influencing factors significantly affect the structural response of the lock head slab primarily by governing the composite foundation strength, coordinated deformation, load redistribution, and pile-soil interaction mechanism. The predicted results generally align with those from FEM calculations in terms of variation patterns, with prediction errors controlled within 5%. The RSM-based prediction method achieves high accuracy and can effectively predict the structural response indicators of the lock head floor slab on soft soil foundations during the construction phase.

Keywords: ship lock head; soft soil foundation; response surface methodology; response prediction

船闸是水运交通建设的关键节点, 而闸首作为船闸的重要组成部分, 其结构的安全稳定决定整个船闸能否正常工作。闸首由边墩、底板和输

水廊道等构成, 设有闸门、阀门及启闭机械等设备, 受力状态十分复杂^[1]。相关学者在闸首结构受荷响应方面做了大量研究, 如苏超等^[2]建立考

收稿日期: 2025-07-07 录用日期: 2025-08-04

*基金项目: 江苏省交通运输科技项目(2020QD28)

作者简介: 沈龙清(1998—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事水运工程设计工作。

考虑地基材料非线性的闸首-地基三维有限元模型,分析运行工况下闸首的应力分布规律及变形特点;李夫仲等^[3]采用三维非线性有限元研究东淝河船闸下闸首在不同工况下的位移和应力场;文训科等^[4]针对东风岩船闸下闸首分离式结构,建立闸首结构的力学仿真模型,分析研究闸首结构和岩体基础的位移、应力分布规律。在船闸结构的安全监测和响应预测研究方面,唐子明等^[5]基于实测数据修正得到船闸结构的数值预测模型,并应用该模型预测分析不同蓄水工况下的监测点沉降规律;丁腾腾^[6]基于某大坝船闸的历史观测数据,利用长短期记忆(long short-term memory, LSTM)网络构建船闸位移预测模型。在工程预测研究领域,响应面法作为一种结合试验设计和数学建模的优化方法,其在工程应用中能够避免大量的模型计算,减少计算成本,适合复杂工程中的结构分析,在水运工程中多有应用^[7-8]。

现阶段研究成果中,针对桩土复合地基上的闸首施工研究还较少,软土地基上的闸首结构受荷响应规律尚不明确;船闸结构响应预测研究多应用在运营维护阶段,针对船闸施工阶段,因施工环境复杂和数据获取困难,研究相对较少。因此,本文依托某船闸闸首,建立其考虑桩-土相互作用的三维有限元分析模型,研究相关因素影响船闸闸首底板结构响应指标的作用机理,探索多因素耦合作用下的软土地基上闸首底板受荷响应预测方法,旨在为船闸工程闸首结构的设计优化、施工监测和安全预警提供参考。

1 工程概况

本文依托某人字门船闸闸首,构建其三维仿真模型,模拟实际浇筑工序,进行数值计算分析,三维网格模型见图1。该闸首施工浇筑模型由主体结构、地基加固结构及地层土体等组成。闸首有效长度27.8 m、口门宽23 m,地基处理采用换填水泥土结合预应力高强混凝土(pre-stressed high-strength concrete, PHC)管桩方案,PHC管桩直径600 mm、壁厚110 mm;闸首主体结构由闸首边墩、闸首底

板、输水系统、施工宽缝和闸门门槛组成,闸首断面见图2。土层物理力学性质参数见表1。

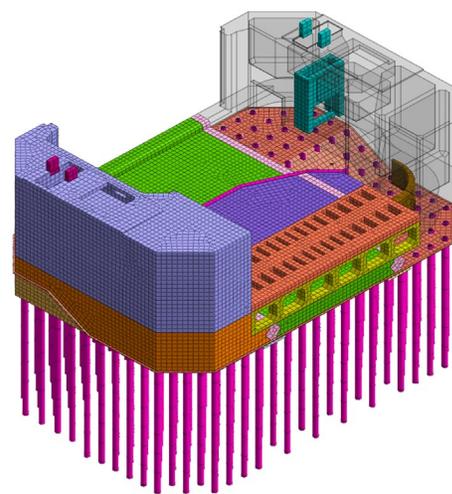


图1 闸首结构网格
Fig. 1 Structured grid of lock head structure

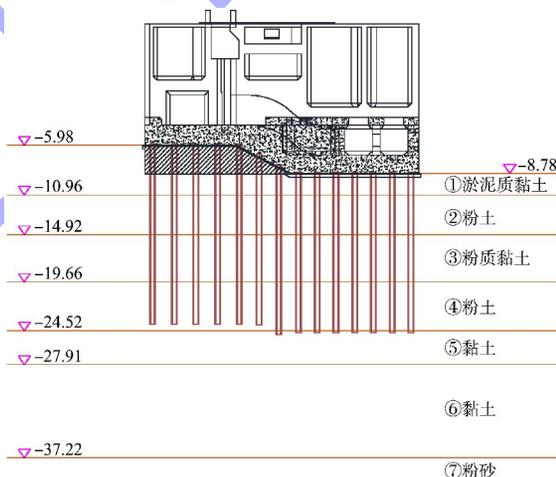


图2 闸首断面(单位:m)
Fig. 2 Cross-section of lock head (unit: m)

表1 土层物理力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of soil layers

| 土层序号 | 土层名称 | 压缩模量/ MPa | 泊松比 | 黏聚力/ kPa | 摩擦角/ (°) |
|------|-------|--------------|------|-------------|-------------|
| ① | 淤泥质黏土 | 2.31 | 0.42 | 9.8 | 2.3 |
| ② | 粉土 | 10.74 | 0.30 | 11.1 | 26.2 |
| ③ | 粉质黏土 | 4.19 | 0.30 | 17.4 | 8.8 |
| ④ | 粉土 | 10.74 | 0.30 | 11.1 | 26.2 |
| ⑤ | 黏土 | 6.84 | 0.35 | 32.1 | 11.5 |
| ⑥ | 黏土 | 4.26 | 0.42 | 17.7 | 6.9 |
| ⑦ | 粉砂 | 12.46 | 0.25 | 4.0 | 26.6 |

注:表中各土层物理力学参数来源于现场钻探、原位测试及室内试验结果;⑤、⑥层黏土状态差异较大,⑤层黏土呈可塑-硬塑状,⑥层黏土处于主体软塑、局部流塑状态。

2 船闸闸首模型构建

本文采用 Midas/GTS NX 软件进行建模分析。混凝土结构选用线弹性本构,土体选用修正莫尔-库仑破坏模型(硬化土模型)。考虑桩-土相互作用,模拟船闸闸首施工期浇筑工况,采用干地施工方案,按照基坑开挖→地基加固处理→两端底板浇筑→中间底板浇筑→闸首边墩浇筑→二期混凝土浇筑→施工宽缝浇筑的工序设置施工阶段。根据施工阶段的工作内容,闸首浇筑工况模型计算时主要考虑结构自身重力、土压力和施工均布荷载等作用。

3 施工期间首底板受荷响应的单因素影响分析

3.1 影响因素和响应指标的确定

从力学角度对闸首底板受荷响应影响因素进行分析,管桩的弹性模量直接影响复合地基的刚度,决定桩身变形和荷载传递效率;管桩直径和壁厚共同决定桩的截面惯性矩和截面积,进而决定了桩的抗弯刚度和轴向承载力,影响复合地基的承载能力;闸首底板的弹性模量决定了底板的抗弯刚度,进而影响闸首底板的应力分布;均布荷载是外部作用,直接影响闸首底板的应力应变分布和安全稳定。因此,决定选取 PHC 管桩的弹性模量 E_p 、桩径 D 、壁厚 t 、闸首底板的弹性模量 E_z 和均布荷载 F 作为主要影响因素进行分析。

闸首底板在闸首施工浇筑期,受到闸首边墩和均布荷载作用,跨中区域可能因弯矩过大而出现拉应力集中的现象,底板受拉破坏。软土地基上施工可能出现较大的不均匀沉降,闸首底板部分地区出现应力集中现象;根据圣维南原理,底板与桩基固结处因局部约束会形成应力集中区域,远离固结处的应力分布较均匀,因此,桩顶固结处的拉应力和压应力将显著高于其他区域。通过有限元模型计算,确定闸首底板最大拉应力(第一主应力 σ_1)和最大压应力(第三主应力 σ_3)主要出现在桩基与底板固结处,因此,最终选取闸首底板跨中弯矩 M 、闸首底板与桩基固结处最大拉应

力 σ_1 和最大压应力 σ_3 作为关键响应指标。

根据水运工程相关规范^[9-10]和设计经验,预应力混凝土管桩混凝土强度等级不得低于 C60,管桩的结构形状和基本尺寸应符合规定,闸首底板的混凝土强度等级一般取 C25~C45,最终确定此次响应面试验设计的参数取值区间,见表 2。

表 2 参数取值区间
Tab. 2 Parameter value range

| E_p/GPa | E_z/GPa | D/m | t/m | F/kPa |
|------------------|------------------|--------------|--------------|----------------|
| 36.0~38.0 | 28.0~33.5 | 0.60~1.20 | 0.11~0.15 | 10.0~30.0 |

3.2 单因素影响下的闸首底板结构响应分析

为了凸显不同因素影响下闸首底板结构响应指标的变化趋势,采用归一化方法将影响因素和响应指标无量纲化并映射到 $[0, 1]$ 区间内,绘制得到单因素影响的闸首底板结构响应变化曲线,见图 3。图中,各系列命名采用“影响因素”和“响应指标”符号组合方式,“影响因素”符号在前,“响应指标”符号在后,以“-”连接。

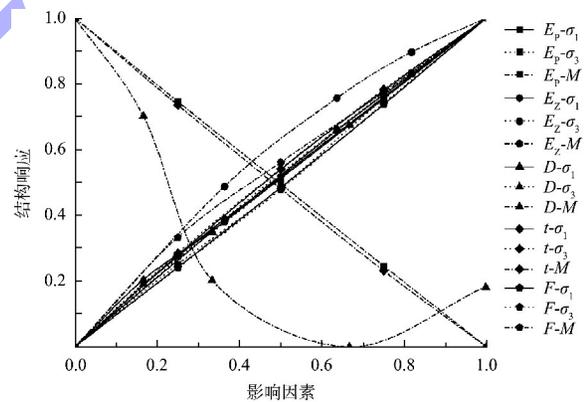


图 3 单因素影响的闸首底板结构响应变化曲线

Fig. 3 Variation curves of lock head floor slab structural response under single-factor influence

通过分析各因素影响下的结构响应变化曲线可得出以下结论。

1) PHC 管桩的弹性模量 E_p 与闸首底板的应力响应指标呈现正相关关系,与跨中弯矩呈现负相关关系。此现象符合结构力学原理,软土地基强度低且具有高压缩性,荷载主要由桩基承担, E_p 增大导致桩刚度提高,通过桩传递到深层土体

中的荷载变多，桩顶区域的局部应力增加；而桩刚度增强导致桩顶差异沉降减小，闸首底板被顶托，跨中弯矩减小。

2) 闸首底板自身的弹性模量 E_z 与应力响应指标和跨中弯矩均呈现正相关关系。此现象主要由闸首底板和软土地基间的协调变形导致。由于桩的刚度远大于软土地基，导致桩顶与桩间软土地基产生不均匀沉降，闸首底板需要自身变形进行平衡。闸首底板弹性模量越大，刚度越强，其变形协调能力就越弱，需要传递更多的内力至桩与底板固结处平衡沉降差；同时，更多弯矩集中到结构变形敏感性最强的跨中区域。因此，桩顶区域的应力和底板跨中弯矩变大。

3) 预应力混凝土管桩直径 D 递增时，闸首底板的应力响应指标相应增大，而跨中弯矩则出现先减小后增大的趋势。桩径增大导致桩基刚度增大，进一步加大桩与软土地基间的刚度差距，增强了桩对闸首底板的约束作用，应力集中效应更加明显，应力响应指标增大。在桩径增大初期，桩土相互作用中侧摩阻力为主导，地基反力分布均匀化，桩基刚度提高，有效支撑了闸首底板跨中区域，跨中弯矩显著减小；当桩径增大到一定阶段，桩土作用失衡，侧摩阻力因土体约束不足而失效，端阻力导致地基反力集中在桩端，闸首底板跨中区域支撑刚度下降，弯矩增加。

4) 预应力混凝土管桩壁厚 t 增加时，闸首底板的应力响应指标增大，而跨中弯矩减小。壁厚 t 的影响机制与桩径 D 相似，增大壁厚同样导致增大桩基刚度，增大桩与底板固结处应力集中；而对于跨中弯矩，由于壁厚增大不影响桩土间约束作用，侧摩阻力始终处于主导地位，地基反力分布均匀，因此，跨中弯矩在壁厚增大时始终减小。

5) 均布荷载 F 与应力响应指标和跨中弯矩均呈现正相关关系。 F 属于外部荷载作用，其增加必然导致通过桩基传递到地基中的荷载增加，桩与底板固结区域的应力变大。同时，均布荷载作用于闸首边墩上，位于底板两侧，其增加导致作

用在闸首底板的弯矩变大。

综上所述，施工期的闸首底板结构响应受多因素耦合影响，各因素在取值区间内主要通过控制复合地基强度、协调变形、荷载重分布和桩土相互作用机制等方式影响闸首底板的结构响应指标。

4 多因素耦合作用下的响应面预测方程

4.1 响应面预测方程建立

本文以单因素影响分析中确定的 5 个影响因素作为响应面参数，按照 Box-Behnken 中心组合设计原理抽样并设计参数组合方案，采用响应面设计工具 Design Expert 对响应指标进行拟合，建立响应面函数方程。Design Expert 是一款用于试验设计和相关分析的软件，通过其响应面分析模块，可以更准确地建立响应面方程并对方程进行检验。

通过 Design Expert，使用最小二乘法对多组方案计算得到的闸首底板最大拉应力进行回归分析，建立 σ_1 关于各参数的预测方程，为：

$$\begin{aligned} \sigma_1 = & 0.271\ 518 + 0.007\ 443E_p - 0.009\ 911E_z - \\ & 0.052\ 216D + 2.920\ 36t - 0.001\ 612F + \\ & 0.000\ 364E_pE_z + 0.000\ 833E_pD + 0.025E_pt + \\ & 0.000\ 075E_pF + 0.014\ 848E_zD + 0.086\ 364E_zt + \\ & 0.000\ 045E_zF + 1.166\ 67Dt - 0.000\ 75DF + \\ & 0.017\ 5tF - 0.000\ 125E_p^2 - 0.000\ 248E_z^2 - \\ & 0.037\ 5D^2 - 15.520\ 83t^2 + 0.000\ 015F^2 \end{aligned} \quad (1)$$

同理，闸首底板最大压应力 σ_3 的预测方程为：

$$\begin{aligned} \sigma_3 = & 3.521\ 05 - 0.096\ 547E_p - 0.092\ 946E_z - \\ & 1.014\ 92D + 30.701\ 14t + 0.009\ 506F + \\ & 0.002\ 636E_pE_z + 0.03E_pD + 0.075E_pt + \\ & 0.000\ 15E_pF + 0.108\ 182E_zD + 0.622\ 727E_zt + \\ & 0.000\ 464E_zF + 8.916\ 67Dt - 0.015\ 75DF + \\ & 0.055tF + 0.001\ 271E_p^2 - 0.001\ 584E_z^2 - \\ & 0.271\ 991D^2 - 127.656\ 25t^2 + 0.000\ 092F^2 \end{aligned} \quad (2)$$

闸首底板跨中弯矩 M 的预测方程为：

$$M = 604.79855 + 149.94384E_p + 93.68798E_z - 4543.9661D - 4095.29545t + 16.16459F - 0.797273E_pE_z - 10.33333E_pD - 52.375E_pt - 0.12625E_pF - 8.36364E_zD - 127.40909E_zt - 0.002727E_zF - 8697.91667Dt - 2.95DF - 42.15tF - 1.96104E_p^2 - 0.596612E_z^2 + 3114.2662D^2 + 33126.5625t^2 - 0.01901F^2 \quad (3)$$

4.2 响应面预测方程的检验分析

4.2.1 响应面预测方程的准确度检验

拟合得到的响应面预测方程需要对其准确度进行评估，即验证其是否通过拟合优度检验和方程总体显著性检验。拟合优度检验主要检验方程对试验数据的拟合程度，其检验指标是 R^2 ，代表拟合方程能够解释的数据变异性在数据总变异性中的比例， R^2 越大，越接近于 1，则回归方程对数据的拟合程度越好。响应面方程总体的显著性检验又称为 F 检验，是对拟合方程中各项拟合系数是否为 0 进行的检验，反映所选拟合方程形式的准确性，其判断指标是 F 值以及 F 值对应的失效概率 P (代表 F 检验中对 F 值判断出错的概率)， F 越大， P 值越小 (一般认为小于 0.05)，则 F 值检验通过。响应面预测方程准确度检验指标计算结果见表 3。

表 3 响应面预测方程准确度检验指标

Tab. 3 Response surface prediction equation accuracy validation metrics

| 响应指标 | R^2 | F 值 | P 值 |
|------------|--------|----------|---------|
| σ_1 | 0.9999 | 19600.36 | <0.0001 |
| σ_3 | 0.9999 | 18551.24 | <0.0001 |
| M | 0.9982 | 1101.34 | <0.0001 |

由表 3 可知，准确度检验中各指标预测方程的 R^2 均超过 0.9 且非常接近 1， F 检验的失效概率均小于 0.0001，表明了方程对实验数据的拟合度较高，选择的回归方程形式能够较好地反映自变量与因变量之间的相关关系，即拟合的预测方程准确度较高，能精准预测设定参数区间内的闸首底板结构响应水平。

4.2.2 影响因素的显著性检验

响应面预测方程通过了 F 检验，说明方程的形式选择准确、方程整体对因变量影响是显著的，但仍无法明确具体影响显著的参数。因此，需要进行影响因素的显著性检验，检验各参数对因变量影响的显著程度。其检验指标为方程中第 i 项系数为 0 的概率 P_i ，一般认为 $P_i \leq 0.01$ 时，该项对因变量的影响极为显著； $0.01 < P_i \leq 0.05$ 时，该项对因变量的影响显著； $P_i > 0.05$ 时，该项对因变量影响的不显著。针对影响显著程度同一等级的影响因素，根据 F_i 值大小进行影响显著程度排序， F_i 值越大，影响越显著。将各影响因素对应的 P_i 值和 F_i 值统计列出，见表 4。

表 4 响应面预测方程参数显著性检验指标

Tab. 4 Metrics for significance testing of parameters in response surface predictive equations

| 预测方程中的项 | P_i 值 | | | F_i 值 | | |
|---------|------------|------------|---------|------------|------------|---------|
| | σ_1 | σ_3 | M | σ_1 | σ_3 | M |
| E_p | <0.0001 | <0.0001 | <0.0001 | 2638.70 | 2943.53 | 225.13 |
| E_z | <0.0001 | <0.0001 | 0.0017 | 17163.77 | 14283.64 | 13.03 |
| D | <0.0001 | <0.0001 | <0.0001 | 273039.18 | 269879.97 | 8127.36 |
| t | <0.0001 | <0.0001 | <0.0001 | 71281.16 | 68606.31 | 6142.93 |
| F | <0.0001 | <0.0001 | <0.0001 | 26836.07 | 14174.24 | 96.93 |

由表 4 可知，5 项参数对闸首底板应力响应指标的影响都极为显著，但闸首底板弹性模量对弯矩指标的影响相较其他 4 项参数明显较低。根据 F_i 值得出 5 项参数对闸首底板应力响应指标的影

响显著性排序为 $D > t > F > E_z > E_p$ ，对跨中弯矩指标的影响显著性排序为 $D > t > E_p > F > E_z$ 。另外，两种指标 F_i 值存在量级差距，表明应力指标对各影响因素更为敏感。

5 施工期间首底板结构响应预测误差分析

在参数区间中进行插值，利用响应面预测方程进行闸首底板结构响应值预测，参照单因素影响分析的流程，将预测值在取值区间内归一化，绘制得到预测值的变化曲线，见图 4a)。将插值工况的有限元分析计算值与响应面方程预测值进行对比，计算两者的相对误差，不同参数影响下的误差曲线见图 4b)。

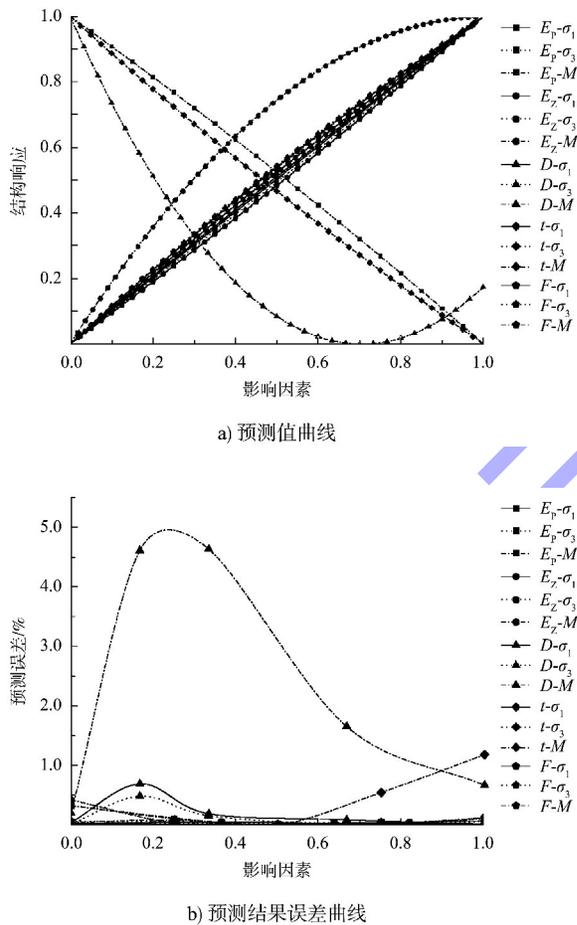


图 4 响应面方程预测值和预测结果误差曲线

Fig. 4 Curves of predicted values and prediction results error from response surface equation

由图 4a) 可看出，利用预测方程得到的闸首底板结构响应指标预测值的变化曲线与实际计算结果(图 3) 整体规律一致，但由于公式拟合的局限性，针对桩径影响跨中弯矩的非线性特征，只预测出其先减小后增大的整体趋势，未预测出减小小区间中出现的拐点；由图 4b) 可以看出，桩径影响下的闸首底板跨中弯矩的预测误差波动较大，

在取值区间内呈现出先增大后减小的变化趋势，但最大误差未超过 5%；其余参数影响下的闸首底板结构响应预测误差波动较小，在取值区间内不超过 1.5%。因此，响应面方程预测结果的误差在样本空间内处于可控状态。

综上所述，响应面预测方程能够预测样本空间内的三维有限元计算结果的整体变化趋势，且预测误差可控。因此，利用响应面分析法可以对确定区间内多参数耦合作用工况下的模型计算结果进行准确的预测。

6 结论

1) 本文基于考虑桩-土作用的三维有限元模型，结合力学理论和计算结果，分析单因素影响下闸首底板的结构响应变化曲线，揭示出各因素在取值区间内主要通过控制复合地基强度、协调变形、荷载重分布和桩土相互作用机制，显著影响闸首底板的结构响应指标。

2) 本文基于响应面法构建的多因素耦合作用的预测方程，其 R^2 、 F 值和失效概率 P 等准确度指标均满足检验要求，表明预测方程能够精确可靠地预测闸首底板的结构响应水平。

3) 本文依据预测方程各参数的 P_i 值和 F_i 值评估其影响显著性大小并排序。结果显示，各参数对应力指标的影响显著性排序为 $D > t > F > E_z > E_p$ ，对弯矩指标的影响显著性排序为 $D > t > E_p > F > E_z$ ，闸首底板的应力指标相较于弯矩指标对各影响因素更为敏感，为设计优化工作和后续监测模型修正提供参考。

4) 综合对比响应面方程预测值和实际工况有限元计算值的变化趋势和相对误差，两者变化规律基本一致，预测误差能够控制在 5% 以内，表明基于响应面方法可以有效预测软土地基上施工期船闸闸首底板的结构响应指标，为施工监测和安全预警提供借鉴。

参考文献：

[1] 聂耳清, 苏超. VB 与 TrueGRID 软件在船闸闸首三维有限元网格自动剖分中的应用[J]. 水运工程, 2009(10): 138-142.
NIE E Q, SU C. Application of VB and TrueGRID to 3D finite grid automatic mesh generation for lock head [J]. Port & waterway engineering, 2009(10): 138-142.

[2] 苏超, 陈鹏, 邓西标. 有限元法在船闸闸首结构设计中的应用[J]. 水运工程, 2015(11): 105-109.
SU C, CHEN P, DENG X B. Application of FEM for structural design of lock head [J]. Port & waterway engineering, 2015(11): 105-109.

[3] 李夫仲, 郝浩, 边峰. 基于 ABAQUS 的下闸首结构应力变形三维非线性有限元分析[J]. 水运工程, 2018(2): 111-116, 122.
LI F Z, HAO H, BIAN F. Three dimensional nonlinear finite element analysis of stress and displacement of lower lock head structure based on ABAQUS [J]. Port & waterway engineering, 2018(2): 111-116, 122.

[4] 文训科, 邓方明, 张有林. 基于 ANSYS 有限元软件的船闸下闸首结构三维非线性分析[J]. 水道港口, 2021, 42(5): 670-675, 682.
WEN X K, DENG F M, ZHANG Y L. Three dimensional nonlinear analysis of lock head structure of ship lock based on ANSYS finite element software [J]. Journal of waterway and harbor, 2021, 42(5): 670-675, 682.

[5] 唐子明, 徐瑞, 王淼, 等. 蓄水位差对沱新北船闸工程沉降影响及预测分析[J]. 水利科技与经济, 2022, 28(5): 59-63.
TANG Z M, XU R, WANG M, et al. Analysis of influence

of reservoir water level fluctuation on settlement and prediction for Shuxin north ship lock project [J]. Water conservancy science and technology and economy, 2022, 28(5): 59-63.

[6] 丁腾腾. 基于 LSTM 的船闸位移预测模型研究[J]. 现代信息科技, 2023, 7(16): 155-158.
DING T T. Research on ship lock displacement prediction model based on LSTM [J]. Modern information technology, 2023, 7(16): 155-158.

[7] 李声文, 张日向, 韩丽华. 基于 ANSYS 的高桩墩式码头可靠度分析[J]. 水道港口, 2011, 32(4): 276-280.
LI S W, ZHANG R X, HAN L H. Reliability analysis of pile pier based on ANSYS [J]. Journal of waterway and harbor, 2011, 32(4): 276-280.

[8] 刘震宇. 基于可靠度理论的内河高桩框架码头安全性分析方法研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2017.
LIU Z Y. Study on safety analysis method of inland high pile frame wharf based on reliability theory [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2017.

[9] 水运工程桩基设计规范: JTS 147-7—2022 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2022.
Code for design of pile foundation on port and waterway engineering: JTS 147-7-2022 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2022.

[10] 水运工程混凝土结构设计规范: JTS 151—2011 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
Designcode for concrete structures of port and waterway engineering: JTS 151-2011 [S]. Beijing: China Communications Press, 2011.

(本文编辑 王璁)

