



重力式码头地基承载力的调整系数研究*

杨若辰¹, 李成凤¹, 刘润¹, 陈际丰²

(1. 天津大学, 水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300072;

2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 蠕变会使地基土体强度参数发生改变, 为定量分析蠕变作用对重力式码头承载可靠度的影响, 基于海洋原状土三轴蠕变试验结果, 建立了土体强度参数均值及变异系数时变模型。采用随机有限元法研究蠕变作用下重力式码头承载时变可靠度, 并分析土体强度参数变异系数及相关距离对承载可靠度的影响, 提出了考虑地基土体蠕变作用的抗力分项系数的调整系数。研究表明: 蠕变作用下, 土体黏聚力均值下降但变异系数增加, 内摩擦角均值下降且变异系数减小。当采用恒定的抗力分项系数时, 码头承载可靠度下降, 需对抗力分项系数进行调整以维持相同安全水平。抗力分项系数的调整系数大小与地基土体参数初始变异系数、相关距离及规定安全等级有关, 总体表现为随着初始抗力分项系数的增加而降低。

关键词: 重力式码头; 蠕变特性; 承载时变可靠度; 抗力分项系数的调整系数

中图分类号: U656.1+1; TU443

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)11-0212-13

Adjustment coefficient of bearing capacity of gravity wharf foundation

YANG Ruochen¹, LI Chengfeng¹, LIU Run¹, CHEN Jifeng²

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: Creep can cause changes in the strength parameters of foundation soil. To quantitatively analyze the impact of creep on the bearing reliability of gravity wharf, a time-varying model for the mean value and variation coefficient of soil strength parameters is established based on the results of triaxial creep test of marine undisturbed soil. The time-varying reliability of gravity wharf bearing under creep action is studied by using the stochastic finite element method, and the influence of variation coefficients of soil strength parameters and related distances on the bearing reliability is analyzed. Adjustment coefficient of resistance partial coefficient considering the creep effect of foundation soil is proposed. The research results show that under the action of creep, the average cohesion of soil decreases but the coefficient of variation increases, and the average internal friction angle decreases while the coefficient of variation decreases. When a constant partial resistance coefficient is used, the load bearing reliability of the terminal decreases, and the partial resistance factor needs to be adjusted to maintain the same safety level. The adjustment coefficient of resistance partial coefficient is related to the initial variation coefficient of the foundation soil parameters, the relevant distance and the specified safety level. Overall, it decreases with the increase of the partial resistance coefficient.

Keywords: gravity wharf; creep characteristics; time-varying reliability; adjustment coefficient of resistance partial coefficient

收稿日期: 2025-02-20

*基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB2603000)

作者简介: 杨若辰(1998—), 男, 博士研究生, 研究方向为海洋土力学。

重力式码头作为港口工程中广泛应用的结构形式, 其承载性能直接关系到港口设施的安全和长期稳定。码头地基土体因受沉积环境、应力历史等因素的影响, 具有显著的空间变异性^[1]。为量化地基土体空间变异性对工程风险的影响, 研究人员引入了土体随机场理论, 结合概率模型建立了岩土工程领域的可靠度分析方法^[2-4]。现有码头设计通常在计算参数恒定条件下对地基承载力进行验算^[5-6], 实际工程中, 土体在长期荷载作用下会因蠕变效应发生不可逆的变形累积, 导致土体强度参数随时间退化^[7], 这一动态过程对重力式码头承载可靠度的影响尚未得到充分研究, 因此研究地基蠕变作用下重力式码头承载特性时变可靠度具有重要意义。

国内外学者对空间变异土体中地基承载力可靠度开展了相关研究。祁小辉等^[8]、严柏杨等^[9]采用随机有限元法对空间变异土体中条形基础承载力进行了可靠度分析; Fenton 等^[10]、Cho 等^[11]考虑了抗剪强度指标的互相关性、变异系数、水平及垂直相关距离对浅基础失效概率的影响, 结果表明强度指标的互相关性对基础承载力影响较小, 强度指标的变异系数及相关距离是影响承载能力的重要因素; Li 等^[12]研究了土体不排水抗剪强度的空间变异性对不同埋深条形基础的破坏机制和极限承载力的影响; Wu 等^[13]、Shen 等^[14]研究空间变异土体中不排水抗剪强度非平稳特征对浅基础承载力的影响, 并进行了承载力的概率分析。上述内容对非均质土体中浅基础地基承载力进行了较为系统的研究, 为重力式码头承载可靠度分析提供了支撑, 但以上研究均未考虑蠕变对土体强度参数造成的影响。

针对上述问题, 本研究基于海洋原状土三轴蠕变试验结果, 建立了蠕变作用下土体强度参数时变模型, 并采用随机有限元法分析蠕变作用下重力式码头承载时变可靠度, 提出了考虑地基土

体蠕变作用下不同年限抗力分项系数的调整系数, 研究内容可为重力式码头安全评估与工程设计提供参考。

1 土体强度参数时变模型

地基土体强度参数均值及变异系数是进行港口码头可靠度设计的关键参数。土体在蠕变作用下应力-应变具有明显的时间相关性, 对天津地区多个海洋原状土样开展三轴蠕变试验, 用以定量描述蠕变作用下土体强度参数均值及变异系数时变规律。试验土体具有较高含水率和较高压缩性, 属淤泥质粉质黏土, 土体参数均值见表 1。

表 1 海洋原状土物性指标及力学参数
Tab. 1 Physical property indicators and mechanical parameters of undisturbed marine soil

比重 G_s	天然含水率 $w/\%$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 I_p	孔隙比 e	压缩模量 E_s/MPa
2.75	36.73	32.48	18.44	14.03	1.00	3.36

试验结果表明, Singh-Mitchell 模型^[15]可较好地描述土体蠕变过程中应力-应变-时间三者间的关系。Singh-Mitchell 模型的一般形式为:

$$\varepsilon = B e^{\beta D_i} \left(\frac{t}{t_1} \right)^\lambda \quad (1)$$

式中: ε 为轴向应变; t 为加载时间; t_1 为单位时间(如 1 h 或 1 d); D_i 为偏应力水平(施加偏应力与破坏偏应力的比值); B 、 β 、 λ 为模型参数。

通过对式(1)进行改写可得到式(2):

$$D_i = \left[\ln \frac{\varepsilon}{B} - \lambda \ln \left(\frac{t}{t_1} \right) \right] / \beta \quad (2)$$

取轴向应变 $\varepsilon = 15\%$ ^[16] 作为长期强度破坏标准, 可得到偏应力水平与时间曲线。通过 3 个不同围压下偏应力可得到土体抗剪强度指标的时变规律。地基土体空间范围内多个样本可得到黏聚力均值 c_{mean} 、内摩擦角均值 φ_{mean} 、黏聚力变异系数 V_c 与内摩擦角变异系数 V_φ 的时变规律。土体强度参数均值及变异系数时变规律可采用指数型函数进行描述, 见图 1、2。

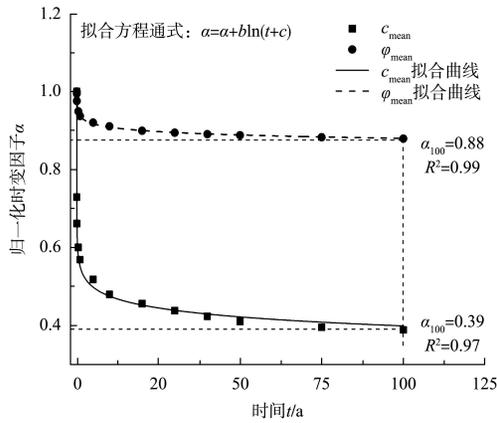


图 1 强度参数均值与时间曲线

Fig. 1 Curve of average intensity parameter and time

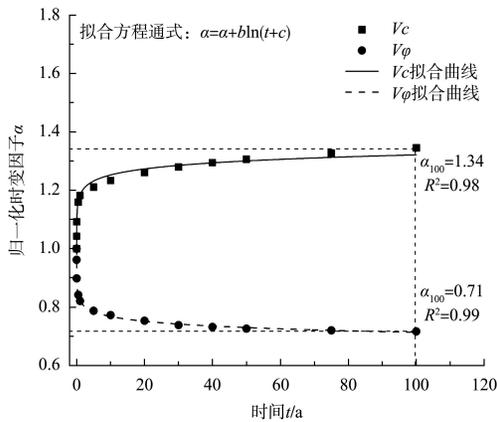


图 2 强度参数变异系数与时间曲线

Fig. 2 Curve of variation coefficient of intensity parameter and time

由图 1 和 2 可知，在蠕变作用下，土体黏聚力均值及内摩擦角均值不断衰减，其中黏聚力均值衰减更为显著。同时土体蠕变作用会使黏聚力变异系数增加，内摩擦角变异系数降低，图 1 和 2 中土体强度均值和变异系数时变模型见式(3)和(4)：

$$\begin{cases} c_{\text{mean}}(t) = c_{0,\text{mean}} [0.552\ 08 - 0.033\ 13 \ln(t + 0.000\ 12)] \\ \varphi_{\text{mean}}(t) = \varphi_{0,\text{mean}} [0.937\ 58 - 0.012\ 49 \ln(t + 0.007\ 40)] \end{cases} \quad (3)$$

式中： $c_{\text{mean}}(t)$ 、 $\varphi_{\text{mean}}(t)$ 分别为不同时刻 t 下黏聚力、内摩擦角均值； $c_{0,\text{mean}}$ 、 $\varphi_{0,\text{mean}}$ 分别为初始时刻下黏聚力均值及内摩擦角均值； t 为蠕变时间，a。

$$\begin{cases} V_c(t) = V_{c,0} [1.183\ 94 + 0.029\ 84 \ln(t + 0.002\ 77)] \\ V_\varphi(t) = V_{\varphi,0} [0.822\ 44 - 0.023\ 58 \ln(t + 0.000\ 52)] \end{cases} \quad (4)$$

式中： $V_c(t)$ 、 $V_\varphi(t)$ 为不同时刻 t 下黏聚力及内摩擦角变异系数； $V_{c,0}$ 、 $V_{\varphi,0}$ 为初始时刻下黏聚力及内摩擦角变异系数。

2 随机有限元分析方法

2.1 有限元模型建立

参照唐山港曹妃甸港区实际工程案例，采用 Abaqus 软件建立重力式码头-抛石基床-地基有限元模型。重力式码头为沉箱结构，计算面宽度 B_e 为 30.0 m。为便于分析计算，地基土体简化为单层土体，不考虑波浪力及系缆力的影响。混凝土采用线弹性模型，土体采用摩尔-库仑准则。重力式码头断面见图 3，有限元模型网格划分见图 4，模型材料参数见表 2。

模型采用二维平面应变单元进行计算，网格类型为 CPE4，为兼顾模型计算精度与计算效率，对码头结构下方土体网格进行加密处理。在进行随机有限元分析时，地基土体网格尺寸不应大于土体参数在各方向的相关距离。地基土体网格水平方向最小尺寸为 2 m，最大尺寸为 5 m，竖直方向最小尺寸为 0.4 m，最大尺寸为 0.8 m。地基土两侧固定水平位移和转角，底部为固定约束。地基土体在沉箱横向两侧延伸 7 倍结构宽度，纵向深度达 6 倍结构宽度，可以忽略边界效应对计算的影响^[17]。土体模型各取沉箱结构模型宽度的 5 倍，结构以下土体高度取为沉箱结构高度的 5 倍。地基与土体切向为罚接触，法向为硬接触，在码头底部耦合参考点 RP 。通过对参考点施加竖向位移确定地基承载力。参考点反力-位移曲线拐点不明显，GB 50007—2011《建筑地基基础设计规范》^[18]中指出，地基承载力可由载荷试验、规范计算等方法综合确定。因此，研究将与 JTS 147—2017《水运工程地基设计规范》^[19] 计算得出的承载力 F_k 相对应的竖向位移作为终止条件。

表 2 模型参数

Tab. 2 Model parameters

结构类别	材料属性	密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	杨氏模量 E/MPa	泊松比 μ	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
沉箱	C35 混凝土(水上部分)	2 500	30 000	0.25	-	-
	C35 混凝土(水下部分)	1 500	30 000	0.25	-	-
沉箱填料	粉细砂	900	30	0.30	0	30
墙前回填土	粉细砂	900	30	0.30	0	30
墙后回填土	块石	1 100	50	0.25	0	45
	粉细砂	900	30	0.30	0	30
抛石基床	块石	1 100	50	0.25	0	45
地基土	粉质黏土	800	30	0.45	13.0	20.7

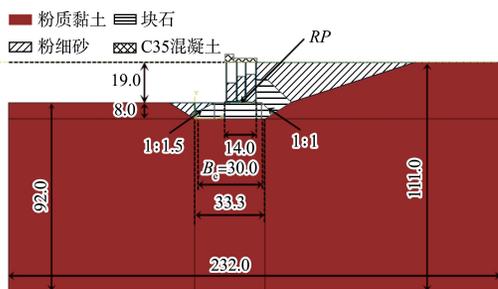


图 3 重力式码头断面 (单位: m)

Fig. 3 Cross-section of gravity wharf (unit: m)

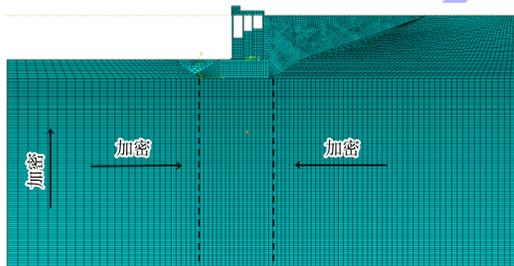


图 4 有限元模型网格划分

Fig. 4 Grid division of finite element model

2.2 随机场生成与导入

在确定性模型的基础上导入地基土体随机场, 从而实现随机有限元分析。土体随机场是在土体参数随机分布的基础上考虑任意空间位置上两点的相关性。土体参数的随机分布可通过分布形式、均值及变异系数进行描述, 任意空间位置上两点土体参数的相关性可采用自相关函数进行描述。对数正态分布具有非负性, 可较好地表示实际工程中土体参数分布情况。指数余弦型自相关函数

在土体参数样本曲线全范围内具有较好的拟合性能, 在现场数据统计时得到广泛应用^[20-21], 其二维自相关函数见式(5):

$$\rho(\tau_x, \tau_y) = \exp\left[-\left(\frac{\tau_x}{\theta_h} + \frac{\tau_y}{\theta_v}\right)\right] \cos\left(\frac{\tau_x}{\theta_h}\right) \cos\left(\frac{\tau_y}{\theta_v}\right) \quad (5)$$

式中: ρ 为空间位置上任意两点土体参数的自相关系数; τ_x 为空间位置上任意两点水平向距离; τ_y 为空间位置上任意两点竖直向距离; θ_h 为水平相关距离; θ_v 为竖直相关距离。

研究选用乔列斯基中心点法生成土体参数随机场, 具有计算简便、易于实现^[22]的优点, 基本思路为: 采用拉丁超立方抽样生成独立标准正态随机样本矩阵 ξ ; 对自相关系数矩阵 A 进行乔列斯基分解, $L_2 L_2^T = A$, 得到下三角矩阵 L_2 , $H_i^D(x, y) = \xi L_2$ 为标准正态随机场; 对标准正态随机场 $H_i^D(x, y)$ 取指数, 可得到对数正态随机场, 见下式:

$$H_i(x, y) = \exp[\mu_{lni} + \sigma_{lni} \cdot H_i^D(x, y)] \quad (6)$$

式中: $H_i(x, y)$ 为对数正态随机场; $H_i^D(x, y)$ 为标准正态随机场; σ_{lni} 和 μ_{lni} 分别为相应正态变量 $\ln i$ 的标准差和均值。

将模型中单元视为独立元素, 通过提取模型中节点坐标与单元编号, 将生成的土体参数随机场赋值至各单元, 并通过程序实现计算文件的批量提交与计算结果的批量提取, 土体强度参数的一次随机场生成见图 5。

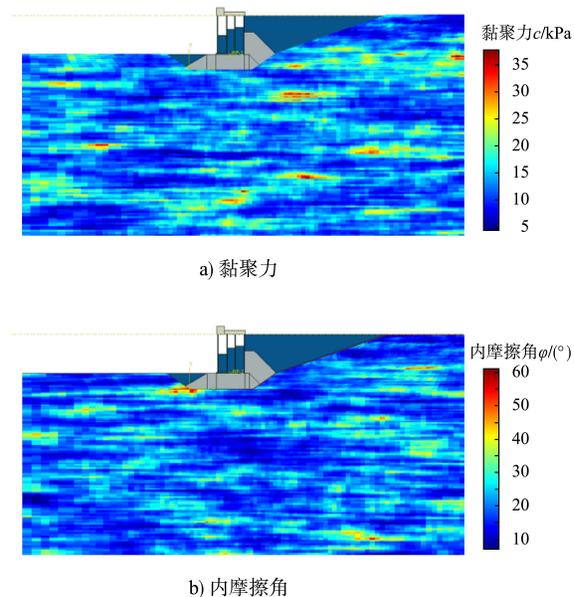


图 5 土体强度参数随机场
Fig. 5 Random field of soil strength parameters

3 承载特性时变可靠度研究

3.1 计算工况与分析方法

土体参数的变异系数及自相关距离呈现出显著的地域差异性。国内外学者^[23-26]对土体参数的变异系数及相关距离进行了大量分析统计,研究表明,土体黏聚力及内摩擦角的变异系数一般为 0.2~0.4,水平向相关距离和竖直向相关距离一般分别为 10.0~50.0 m 和 1.0~5.0 m,水平向相关距离一般比竖直向相关距离大一个量级。此外,朱红霞认为土体参数的自相关距离是土体的固有属性,不同土体参数应具有相同的自相关距离。综上考虑,本研究为分析土体强度参数变异性及自相关距离对重力式码头承载特性时变可靠度的影响,共设置 13 组计算工况,见表 3。

表 3 计算工况
Tab. 3 Calculation working conditions

编号	黏聚力变异系数 V_c	内摩擦角变异系数 V_ϕ	黏聚力均值 μ_c /kPa	内摩擦角均值 μ_ϕ /($^\circ$)	分布形式	水平向相关距离 θ_h /m	竖直向相关距离 θ_v /m	相关函数类型
1	0.2	0.2				30	3	
2	0.2	0.3				30	3	
3	0.2	0.4				30	3	
4	0.3	0.2				30	3	
5	0.3	0.3				30	3	
6	0.3	0.4			对数	30	3	
7	0.4	0.2	13.0	20.7	正态	30	3	指数
8	0.4	0.3			分布	30	3	余弦型
9	0.4	0.4				30	3	
10	0.3	0.3				10	1	
11	0.3	0.3				20	2	
12	0.3	0.3				40	4	
13	0.3	0.3				50	5	

采用拉丁超立方方法进行抽样模拟,相较于传统的蒙特卡洛法,拉丁超立方方法具有更高的计算效率,基于随机有限元方法进行地基承载力分析,通常以承载力均值和标准差的收敛性作为模拟终止的判断依据^[27]。在本研究中,模拟 500 次后承载力均值及标准差趋于稳定,模型次数取 500 次。计算工

况 5 的承载力均值/标准差与模拟次数曲线见图 6。

采用动态可靠度指标法进行时变可靠度分析,具有意义明确、便于应用的优点,其基本原理为对系统在服役期内进行离散,采用功能函数随机过程在不同时刻下的设计参数计算可靠度,最终得到系统可靠度的时变规律。

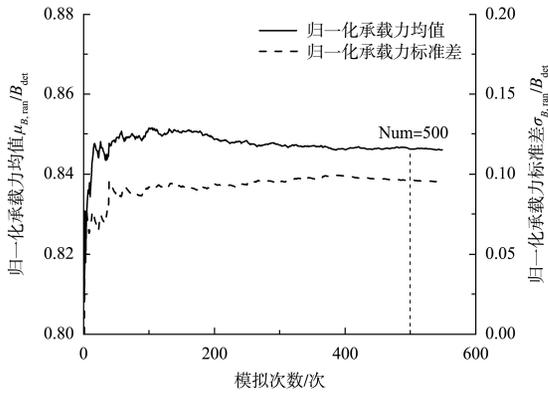


图 6 承载力均值/标准差与模拟次数曲线

Fig. 6 Mean/standard deviation of bearing capacity and simulation times curve

将随机模型中地基承载力小于确定性模型地基承载力定义为失效^[28], 可得到失效概率表达式为:

$$P_f = P(Z = B_{ran} - B_{det} < 0) = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta) \quad (7)$$

式中: P_f 为失效概率; P 为概率; Z 表示功能函数; B_{ran} 为随机模型中的地基承载力, kPa; B_{det} 为确定性模型中的地基承载力, kPa; Φ 为标准正态分布函数; β 为可靠度指标。

在 JTS 147—2017《水运工程地基设计规范》中, 抗力分项系数 γ_R 的设置一定程度反映了地基土体非均匀分布所引起的承载力不确定性, 失效概率 P_f 随着抗力分项系数 γ_R 的增加而减小, 随机模型地基承载力呈对数正态分布时, 表示方式为:

$$P_f = P(B_{ran} < B_{det} / \gamma_R) = \Phi \left[\frac{\ln(B_{det} / \gamma_R) - \mu_{\ln B_{ran}}}{\sigma_{\ln B_{ran}}} \right] \quad (8)$$

式中: γ_R 为抗力分项系数; $\mu_{\ln B_{ran}}$ 为随机模型中地基承载力对数均值, kPa; $\sigma_{\ln B_{ran}}$ 为随机模型中地基承载力对数标准差, kPa。

在进行承载时变可靠度分析时, 假设土体参数相关距离为土体固有属性, 不随土体蠕变作用发生改变, 土体强度参数均值及变异系数采用时变模型进行计算, 在重力式码头服役期 100 a 内取 7 个时刻, 分别为 0、1、5、10、20、50 和 100 a, 对 2.1 节中每个工况下的 7 个时间分别进行 500 次拉丁超立方抽样模拟, 得到各工况下考虑地基土体蠕变作用的重力式码头承载特性时变可靠度。

3.2 强度参数变异性对时变可靠度的影响

考虑地基土体非均质分布时, 承载力结果具有随机性, 其分布结果较为符合对数正态分布。在时间 $t=0$ a 时, 计算工况 5 承载力频率分布见图 7。在工况 5 中, 非均质土体承载力均值约为确定性地基土体承载力的 0.85 倍, 并且非均质土体承载力约有 93.6% 的概率低于确定性地基土体承载力。

不同土体参数变异系数下地基承载力均值分布见图 8。地基承载力均值及分布集中程度随着黏聚力变异系数和内摩擦角变异系数的增加而降低, 内摩擦角变异系数影响占主导作用, 黏聚力变异系数的影响较小。

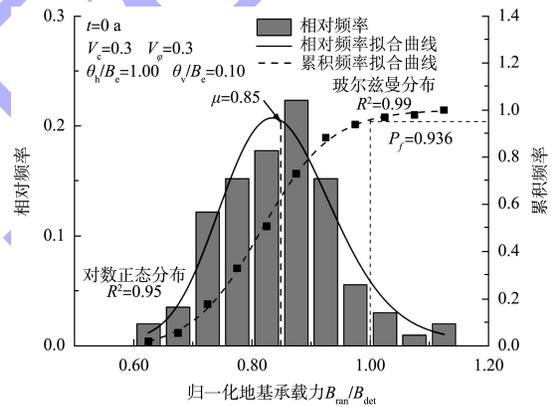


图 7 承载力频率分布

Fig. 7 Frequency distribution of bearing capacity

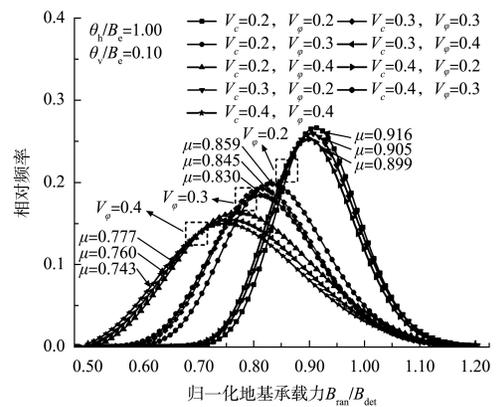


图 8 不同土体参数变异系数下承载力分布

Fig. 8 Distribution of bearing capacity under different variation coefficients of soil parameters

设置分项系数 γ_R 使失效概率降低至允许范围内。失效概率与抗力分项系数见图 9。随着抗力分项系数的增加，失效概率逐步下降。黏聚力及内摩擦角变异系数越大，失效概率与抗力分项系数曲线越平缓，内摩擦角变异系数影响较显著，与图 8 中结果相同。

在港口工程设计中，根据安全等级要求可确定相应的目标可靠度。其中安全等级一级、二级和三级对应的目标可靠度 β 分别为 4.00 ($P_f=3.17 \times 10^{-5}$)、3.50 ($P_f=2.33 \times 10^{-4}$) 和 3.00 ($P_f=1.35 \times 10^{-3}$)。在时间 $t=0$ a 时工程许可可靠度对应的抗力分项系数见图 10。

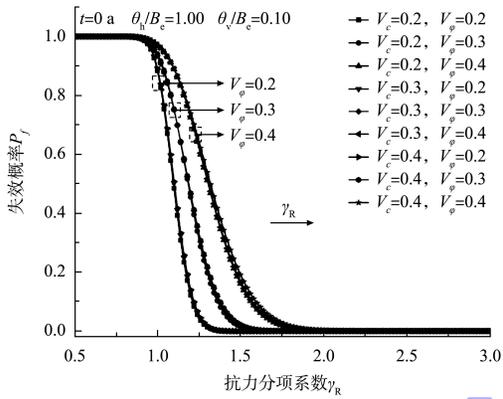


图 9 不同变异系数下失效概率与抗力分项系数曲线
Fig. 9 Curve of failure probability and resistance partial coefficients under different variation coefficients

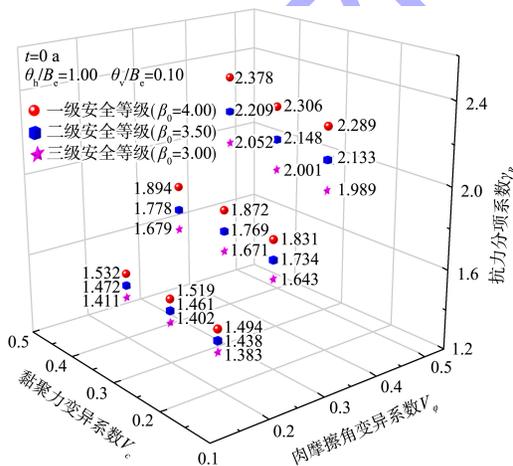


图 10 不同变异系数下抗力分项系数
Fig. 10 Resistance partial coefficients under different variation coefficients

由图 10 可知，在相同目标可靠度下，抗力分项系数随黏聚力及内摩擦角变异系数的增加而增

加。这是因为黏聚力及内摩擦角变异系数的增加会使地基土体具有更大的不确定性，需要更大的安全冗余来维持相同的安全水平。随着安全等级的提高，目标可靠度增加，在相同情况下需要更高的抗力分项系数。黏聚力和内摩擦角变异系数越大时，不同等级的目标可靠度对应的抗力分项系数差距越明显。

在码头长期服役过程中，地基土体的蠕变作用会使土体参数均值和变异系数具有时变性，采用土体参数时变模型计算各工况不同时间下失效概率，其中工况 5 不同时间下失效概率与抗力分项系数曲线见图 11，可靠度时变规律见图 12。

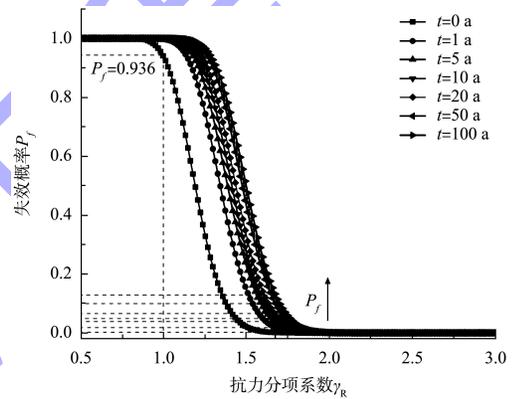


图 11 不同时间下失效概率与抗力分项系数曲线
Fig. 11 Curve of failure probability and resistance partial coefficients at different time

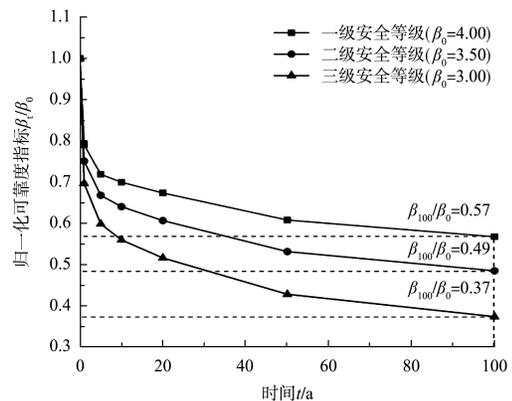


图 12 可靠度时变规律
Fig. 12 Time-varying rule of reliability

由图 11 可知，随着时间的推移，失效概率与抗力分项系数曲线向右侧移动。若仍取 $t=0$ a 时的抗力分项系数则失效概率会增加，从而无法满足工程安全性要求。由图 12 可知，不同安全等级

下, 可靠度随时间的增加而降低, 降低速率呈现出先快后慢的变化规律。并且随着安全等级的提高, 相同时间下可靠度的衰减幅度有所下降。这是因为更高的安全等级对 $t=0$ a 时的初始可靠度有着更高的要求, 考虑了更多地基土体可能出现的情况, 当地基土体随时间发生变化时, 不同时间下的可靠度相较于初始可靠度变化的敏感性更低, 从而拥有更低的衰减幅度。

在长期蠕变作用下工程可靠度具有显著的时间变异性, 为维持相同的安全水平, 需对抗力分项系数按照设计年限进行调整。不同土体参数变异系数下抗力分项系数的调整系数 m_s 见图 13。由图可知, 调整系数随设计年限呈先快后慢的变化规律, 并且随着黏聚力及内摩擦角变异系数的增加而变大, 内摩擦角变异系数对调整系数的影响更为显著。更大的土体参数变异系数带来的不确定性更强, 在初始时刻需要更大的抗力分项系数来满足安全需要, 在土体参数发生变化时, 所需调整的幅值会较小。同时, 内摩擦角的变化对地基承载力的影响更为显著, 而黏聚力的变化对地基承载力的影响相对较小, 因此相较于内摩擦角, 黏聚力变异系数的变化对调整系数的影响更小。

为分析土体参数变异系数对不同安全等级下调整系数的影响, 选取工况 1、4、9 绘制不同变异系数下各安全等级调整系数时变曲线, 见图 14。由图可知, 随着安全等级的提高, 调整系数逐渐下降, 并且在更高的土体参数变异系数下各安全等级调整系数的差距更为明显。更高的安全等级能够应对更多的土体情况, 从而需要更小的调整

系数。同时, 随着土体参数变异系数的增加, 土体失效概率与抗力分项系数曲线趋于平缓, 从而各安全等级下调整系数的差距被放大。土体参数不同变异系数下抗力分项系数的设计年限调整系数见表 4。

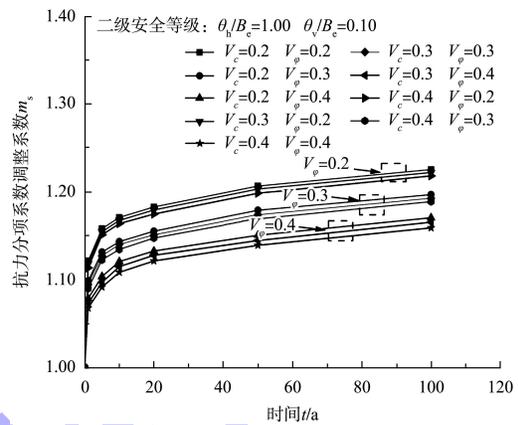


图 13 不同土体参数变异系数下调整系数

Fig. 13 Adjustment coefficients under different variation coefficients of soil parameters

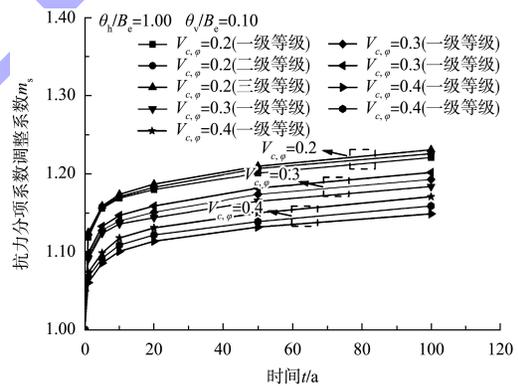


图 14 不同变异系数下各安全等级调整系数

Fig. 14 Adjustment coefficients for each safety level under different variation coefficients

表 4 土体参数不同变异系数下抗力分项系数的设计年限调整系数

Tab. 4 Design life adjustment coefficients of resistance partial coefficients under different variation coefficients of soil parameters

黏聚力变异系数 V_c	内摩擦角变异系数 V_ϕ	安全等级	调整系数						
			设计年限 0 a	设计年限 1 a	设计年限 5 a	设计年限 10 a	设计年限 20 a	设计年限 50 a	设计年限 100 a
0.2	0.2	一级	1.000	1.119	1.156	1.169	1.180	1.201	1.221
		二级	1.000	1.122	1.158	1.171	1.183	1.207	1.226
		三级	1.000	1.125	1.159	1.174	1.187	1.210	1.231
0.2	0.3	一级	1.000	1.094	1.128	1.140	1.149	1.169	1.188
		二级	1.000	1.099	1.132	1.144	1.155	1.179	1.197
		三级	1.000	1.103	1.136	1.152	1.164	1.188	1.206

续表4

黏聚力变异系数 V_c	内摩擦角变异系数 V_ϕ	安全等级	调整系数						
			设计年限 0 a	设计年限 1 a	设计年限 5 a	设计年限 10 a	设计年限 20 a	设计年限 50 a	设计年限 100 a
0.2	0.4	一级	1.000	1.073	1.097	1.113	1.125	1.144	1.160
		二级	1.000	1.079	1.104	1.121	1.133	1.151	1.171
		三级	1.000	1.085	1.111	1.129	1.142	1.161	1.183
0.3	0.2	一级	1.000	1.115	1.153	1.166	1.176	1.196	1.216
		二级	1.000	1.118	1.155	1.168	1.180	1.203	1.222
		三级	1.000	1.120	1.157	1.170	1.183	1.206	1.227
0.3	0.3	一级	1.000	1.091	1.124	1.136	1.144	1.165	1.184
		二级	1.000	1.095	1.128	1.140	1.151	1.174	1.193
		三级	1.000	1.099	1.133	1.147	1.159	1.182	1.202
0.3	0.4	一级	1.000	1.069	1.092	1.106	1.119	1.138	1.157
		二级	1.000	1.074	1.097	1.115	1.128	1.145	1.166
		三级	1.000	1.081	1.105	1.124	1.136	1.156	1.178
0.4	0.2	一级	1.000	1.111	1.148	1.162	1.173	1.183	1.213
		二级	1.000	1.114	1.151	1.164	1.175	1.199	1.218
		三级	1.000	1.118	1.153	1.167	1.180	1.203	1.222
0.4	0.3	一级	1.000	1.086	1.118	1.129	1.140	1.162	1.179
		二级	1.000	1.090	1.123	1.135	1.148	1.169	1.189
		三级	1.000	1.093	1.127	1.143	1.156	1.177	1.197
0.4	0.4	一级	1.000	1.061	1.086	1.101	1.114	1.132	1.149
		二级	1.000	1.068	1.092	1.109	1.122	1.139	1.159
		三级	1.000	1.074	1.099	1.118	1.131	1.150	1.171

注：表中抗力分项系数调整系数 m_s 为各工况下相较于 $t=0$ a 的抗力分项系数 γ_R 的变化值；土体强度参数的水平相关距离 θ_h 为 30.0 m，竖直相关距离 θ_v 为 3.0 m。

3.3 强度参数相关距离对时变可靠度的影响

不同相关距离下 $t=0$ a 时地基承载力分布见图 15。由图可知，不同相关距离下地基承载力均值基本相同，但承载力分布的离散性区别较大。总体表现为随着相关距离的增大，承载力分布越分散，这与 Shen 等研究结果相同。可能由于当相关距离较大时，每个随机场土体趋于恒定，而相关距离较小时每个随机场土体趋于随机分布，导致每个随机场的地基土体的平均强度更为相近，表现为不同随机场地基承载力的计算结果更为接近。

不同相关距离下失效概率-抗力分项系数曲线见图 16。由图可知，随着相关距离的增加，失效概率与抗力分项系数曲线呈现出以曲线中心为圆点的逆时针旋转趋势，同时失效概率与抗力分项系数曲线趋于平缓，这与图 15 中承载力分布现象相吻合。

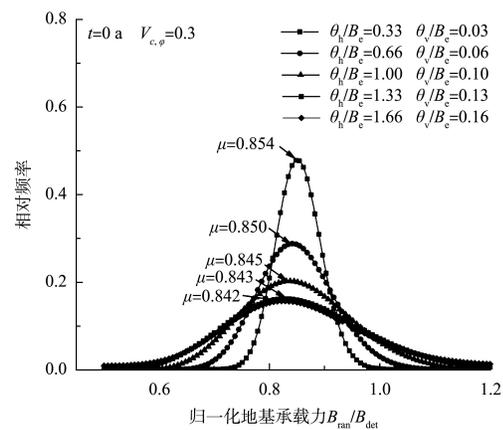


图 15 不同土体参数相关距离下承载力分布
Fig. 15 Bearing capacity distribution under correlation distances of different soil parameters

在时间 $t=0$ a 时不同参数相关距离下允许可靠度所对应的抗力分项系数见图 17。由图可知，随着相关距离的增加，在满足相同可靠度要求时需要更大的抗力分项系数。这是因为在进行可靠度分析时，相关距离的增加会使对点方差的折减

程度减小, 使折减后的土体强度指标更趋向于点变异系数, 从而产生更大的不确定性。同时可以发现, 随着相关距离的增加, 各级安全等级下允许可靠度对应的抗力分项系数的差值逐渐增加。这是因为更大的相关距离使土体的承载力分布更为分散, 从而放大了各级安全等级下允许可靠度对应的抗力分项系数的差值。

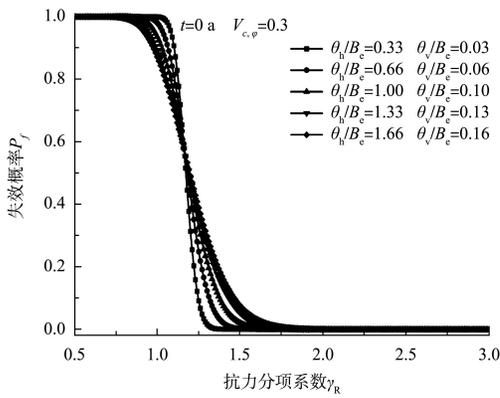


图 16 不同相关距离下失效概率与抗力分项系数曲线
Fig. 16 Curve of failure probability and resistance partial coefficients under different correlation distances

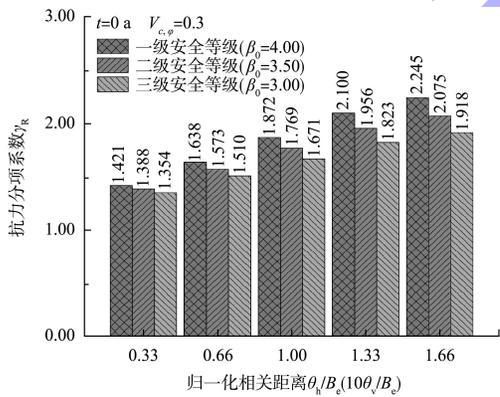


图 17 不同参数相关距离下抗力分项系数
Fig. 17 Resistance partial coefficients under different parameter correlation distances

为定量分析不同相关距离下土体蠕变作用对抗力分项系数的影响, 绘制不同土体参数相关距离下抗力分项系数调整系数与设计年限曲线见图 18。由图可知, 相同设计年限下, 抗力分项系数调整系数随相关距离的增加而减小, 并且在水平向相关距离与计算面宽度比值为 1 附近变化较为明显。这是因为相关距离的增加在进行可靠度分

析时会引起更大的不确定性, 在进行分项系数调整时, 需要更小的调整系数就可满足因土体参数改变而带来的新增不利因素。同时当相关距离相较于计算面宽度较小或较大时, 相关距离的影响会降低。

选取工况 5、10、13 绘制不同相关距离下各安全等级调整系数时变曲线, 见图 19。由图可知, 随着安全等级的提高, 抗力分项系数的调整系数降低, 并且随着相关距离的增加, 失效概率-抗力分项系数曲线趋于平缓, 相同设计年限下抗力分项系数的调整系数的差值增加。土体参数不同相关距离下抗力分项系数的设计年限调整系数见表 5。

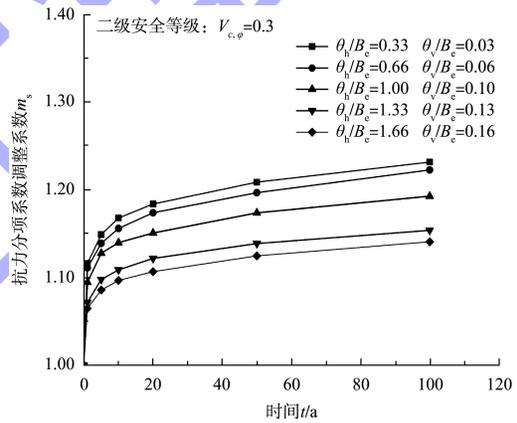


图 18 不同土体参数相关距离下调整系数
Fig. 18 Adjustment coefficients under different correlation distances of soil parameters

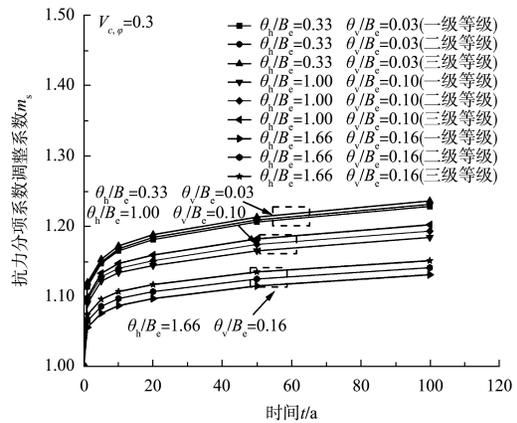


图 19 不同相关距离下各安全等级调整系数
Fig. 19 Adjustment coefficients for various safety levels under different correlation distances

表 5 土体参数不同相关距离下抗力分项系数的设计年限调整系数
 Tab. 5 Design life adjustment coefficients of resistance partial coefficients under different correlation distances of soil parameters

归一化水平 相关距离 θ_h/B_c	归一化竖直 相关距离 θ_v/B_c	安全 等级	调整系数						
			设计年限 0 a	设计年限 1 a	设计年限 5 a	设计年限 10 a	设计年限 20 a	设计年限 50 a	设计年限 100 a
0.33	0.03	一级	1.000	1.114	1.147	1.165	1.181	1.206	1.228
		二级	1.000	1.116	1.149	1.168	1.184	1.209	1.231
		三级	1.000	1.120	1.153	1.172	1.188	1.213	1.236
0.66	0.06	一级	1.000	1.107	1.135	1.151	1.169	1.192	1.218
		二级	1.000	1.111	1.139	1.156	1.174	1.197	1.223
		三级	1.000	1.115	1.144	1.161	1.179	1.202	1.228
1.00	0.10	一级	1.000	1.091	1.124	1.136	1.144	1.165	1.184
		二级	1.000	1.095	1.128	1.140	1.151	1.174	1.193
		三级	1.000	1.099	1.133	1.147	1.159	1.182	1.202
1.33	0.13	一级	1.000	1.064	1.090	1.101	1.114	1.131	1.146
		二级	1.000	1.072	1.098	1.109	1.122	1.139	1.154
		三级	1.000	1.081	1.107	1.118	1.131	1.148	1.163
1.66	0.16	一级	1.000	1.056	1.076	1.087	1.097	1.115	1.131
		二级	1.000	1.065	1.087	1.098	1.108	1.124	1.142
		三级	1.000	1.074	1.096	1.107	1.117	1.135	1.153

注：表中抗力分项系数调整系数 m_t 为各自工况下相较于 $t=0$ a 的抗力分项系数 γ_R 的变化值；土体黏聚力变异系数 V_c 为 0.3，内摩擦角变异系数 V_ϕ 为 0.3。

4 结论

1) 土体强度参数均值及变异系数在蠕变作用下具有显著的时变特性，总体表现为土体黏聚力和内摩擦角随蠕变的进行不断衰减，其中黏聚力衰减幅度更为显著，黏聚力和内摩擦角的变异系数随蠕变的进行分别呈现增加和降低的趋势。基于 Singh-Mitchell 模型建立了土体强度参数均值及变异系数的时变模型。

2) 考虑地基土体非均匀分布时，地基承载力均值低于确定性地基，并随着土体强度参数变异系数的增加而降低，承载力分布随土体强度参数变异系数的增加趋于分散，其中内摩擦角变异系数对承载力均值及分布离散性影响显著，黏聚力变异系数影响相对较小。地基土体相关距离的增加会使承载力分布趋于分散，但对承载力均值影响较小。

3) 地基土体在蠕变的影响下，码头承载可靠

度随时间不断衰减，并且随着初始目标可靠度的增加衰减幅度下降。建议通过设置不同设计年限下抗力分项系数的调整系数来抵消地基土体蠕变对可靠度造成的影响。初始时刻抗力分项系数随着土体参数的变异系数、相关距离及规定安全等级的增加而提升，抗力分项系数的调整系数随着土体参数的变异系数、相关距离及规定安全等级的增加而降低。

参考文献：

[1] PHOON K K, KULHAWY F H. Characterization of geotechnical variability [J]. Canadian geotechnical journal, 1999, 36(4): 612-624.

[2] VANMARCKE E H. Reliability of earth slopes[J]. Journal of the geotechnical engineering division, 1977, 103(11): 1247-1265.

[3] 刘润. 海工结构物地基可靠度及随机有限元分析[D]. 天津: 天津大学, 2001.

- LIU R. Reliability analysis and stochastic finite element study of offshore structure foundations [D]. Tianjin: Tianjin University, 2001.
- [4] 朱红霞. 随机场理论在地基可靠度分析中的应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- ZHU H X. Study of using random field theory in soil foundation reliability analysis [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [5] 于志安, 只红茹. 重力式码头地基承载力计算研究[J]. 水运工程, 2013(2): 142-146.
- YU Z A, ZHI H R. Calculation of foundation's bearing capacity of gravity wharf[J]. Port & waterway engineering, 2013(2): 142-146.
- [6] 方波, 符成. 中欧规范关于重力式码头地基承载力计算方法的对比[J]. 水运工程, 2018(10): 117-121, 131.
- FANG B, FU C. Comparison of calculation methods of foundation bearing capacity of gravity wharves between Eurocode 7 and Chinese Code [J]. Port & waterway engineering, 2018(10): 117-121, 131.
- [7] 吴谦. 软粘土的结合水对其次固结和长期强度的影响及机理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
- WU Q. Research on influence of bond water on secondary consolidation and long term strength of soft clay [D]. Changchun: Jilin University, 2015.
- [8] 祁小辉, 李典庆, 周创兵, 等. 考虑不排水抗剪强度空间变异性的条形基础极限承载力随机分析[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(6): 1095-1105.
- QI X H, LI D Q, ZHOU C B, et al. Stochastic analysis of ultimate bearing capacity of strip footing considering spatial variability of undrained shear strength[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2014, 36 (6): 1095-1105.
- [9] 严柏杨, 张京伍, 朱德胜, 等. 考虑土体不排水强度非平稳性对条形基础承载力影响的可靠度分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2021, 38(1): 20-25.
- YAN B Y, ZHANG J W, ZHU D S, et al. Reliability analysis of the bearing capacity of strip footings considering the non-stationary characteristic of soil undrained shear strength[J]. Journal of Hebei University of Engineering (natural science), 2021, 38(1): 20-25.
- [10] FENTON G A, GRIFFITHS D V. Bearing-capacity prediction of spatially random $c-\phi$ soils [J]. Canadian geotechnical journal, 2003, 40(1): 54-65.
- [11] CHO S E, PARK H C. Effect of spatial variability of cross-correlated soil properties on bearing capacity of strip footing[J]. International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, 2010, 34(1): 1-26.
- [12] LI J H, TIAN Y H, CASSIDY M J. Failure mechanism and bearing capacity of footings buried at various depths in spatially random soil[J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2015, 141(2): 04014099.
- [13] WU Y X, ZHOU X H, GAO Y F, et al. Bearing capacity of embedded shallow foundations in spatially random soils with linearly increasing mean undrained shear strength[J]. Computers and geotechnics, 2020, 122: 103508.
- [14] SHEN Z C, JIN D L, PAN Q J, et al. Probabilistic analysis of strip footings on spatially variable soils with linearly increasing shear strength [J]. Computers and geotechnics, 2020, 126: 103653.
- [15] SINGH A, MITCHELL J K. General stress-strain-time function for soils[J]. Journal of the soil mechanics and foundations division, 1968, 94(1): 21-46.
- [16] 王元战, 戈浩波, 吴林键. 考虑软土蠕变对强度影响的高桩码头岸坡时变可靠度分析[J]. 海洋科学, 2018, 42(9): 88-97.
- WANG Y Z, GE H B, WU L J. Time-variant reliability analysis of bank slope of open type wharf on piles considering the effect of soft soil creep on strength[J]. Marine sciences, 2018, 42(9): 88-97.
- [17] 郭林林. 深基槽重力式码头抛石基床应力和变形研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.
- GUO L L. Study on stress and deformation of the rubble-bedding foundation in deep trench for gravity quays[D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.
- [18] 建筑地基基础设计规范: GB 50007—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Code for design of building foundation: GB 50007-2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [19] 水运工程地基设计规范: JTS 147—2017[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017.
- Code for foundation design on port and waterway engineering: JTS 147-2017[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2017.

[20] 徐斌,王大通,高大钊.用相关函数法求静探曲线相关距离的讨论[J].岩土力学,1998,19(1):55-59.
XU B, WANG D T, GAO D Z. Discussion on determining relative distance of static cone penetration curves by relative function method[J]. Rock and soil mechanics, 1998, 19(1): 55-59.

[21] 闫澍旺,朱红霞,刘润.天津港土性相关距离的计算研究和统计分析[J].岩土力学,2009,30(7):2179-2185.
YAN S W, ZHU H X, LIU R. Numerical studies and statistic analyses of correlation distances of soil properties in Tianjin Port [J]. Rock and soil mechanics, 2009, 30(7): 2179-2185.

[22] 蒋水华,李典庆,周创兵,等.考虑自相关函数影响的边坡可靠度分析[J].岩土工程学报,2014,36(3):508-518.
JIANG S H, LI D Q, ZHOU C B, et al. Slope reliability analysis considering effect of autocorrelation functions[J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2014, 36(3): 508-518.

[23] 谢桂华.岩土参数随机性分析与边坡稳定可靠度研究[D].长沙:中南大学,2009.
XIE G H. Stochastic analysis of geotechnical parameters and study on stable reliability of slope [D]. Changsha: Central South University, 2009.

[24] 吴振君,葛修润,王水林.考虑地质成因的土坡可靠度分析[J].岩石力学与工程学报,2011,30(9):1904-1911.
WU Z J, GE X R, WANG S L. Reliability analysis of soil slope stability considering geologic origin [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2011, 30(9): 1904-1911.

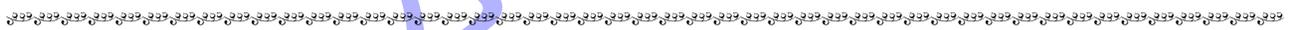
[25] CHO S E. Probabilistic assessment of slope stability that considers the spatial variability of soil properties [J]. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 2010, 136(7): 975-984.

[26] JI J, LIAO H J, LOW B K. Modeling 2-D spatial variation in slope reliability analysis using interpolated autocorrelations [J]. Computers and geotechnics, 2012, 40: 135-146.

[27] CHEN H Z, SHEN Z C, WANG L, et al. Probabilistic analysis of skirted foundations under combined loading in soils modelled by non-stationary random fields [J]. Ocean engineering, 2023, 272: 113791.

[28] ZHOU H Z, HU Q C, YU X X, et al. Quantitative bearing capacity assessment of strip footings adjacent to two-layered slopes considering spatial soil variability [J]. Acta geotechnica, 2023, 18(12): 6759-6773.

(本文编辑 赵娟)



(上接第 196 页)

[8] 曹列凯.大尺度表面流场测量技术研发与应用[D].北京:清华大学,2019.
CAO L K. Development and application of large scale surface velocimetry [D]. Beijing: Tsinghua University, 2019.

[9] 张锐娟,张建奇,杨翠.基于SURF的图像配准方法研究[J].红外与激光工程,2009,38(1):160-165.
ZHANG R J, ZHANG J Q, YANG C. Image registration approach based on SURF [J]. Infrared and laser engineering, 2009, 38(1): 160-165.

[10] HE K M, SUN J, TANG X O. Single image haze removal using dark channel prior [C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Miami: [s. n.], 2011: 2341-2353.

[11] 刘望天,陈慧莎.基于无人机技术的航空水面流速法测流系统开发及应用研究[J].广东水利水电,2021(5):33-39.
LIU W T, CHEN H S. Research on the development and application of air surface velocity measurement system based on UAV technology [J]. Guangdong water resources and hydropower, 2021 (5): 33-39.

(本文编辑 赵娟)