

ICS 点击此处添加 ICS 号

CCS 点击此处添加 CCS 号

团 体 标 准

T/CIN XXX—XXX

港口码头结构整体安全可靠评估规范 高桩码头

Reliability assessment guide for overall safety of wharf structure –
High piled wharf

(征求意见稿)

202X – XX – XX 发布

202X – XX – XX 实施

中国航海学会 发布

目 次

前言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 评估工作流程	2
5 评估前准备工作	3
6 高桩码头结构整体极限承载力计算	4
7 高桩码头结构整体安全可靠性评估	6
附录 A （资料性）考虑结构损伤的高桩码头整体数值仿真建模方法	8
附录 B （资料性）常用的分布检验方法	10
附录 C （资料性）验算点法计算可靠指标	13
参考文献	14

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中国航海学会提出并归口。

本文件起草单位：交通运输部天津水运工程科学研究所、宁波舟山港股份有限公司、浙江省海港投资运营集团有限公司、宁波镇海港埠有限公司、宁波舟山港股份有限公司北仑矿石码头分公司、浙江省交通运输科学研究院。

本文件主要起草人：薛润泽、任建乔、虞剑英、尹纪龙、周朝丰、李越松、吴青青、张干、袁海立、王宏锋、郭尚、陈世俊、袁良智、朱伟。

港口码头结构整体安全可靠性评估规范 高桩码头

1 范围

本文件规定了针对高桩码头的结构整体安全可靠性评估工作流程、评估前准备工作、整体极限承载力计算、高桩码头结构整体安全可靠性评估等内容。

本文件适用于高桩码头结构整体安全可靠性评估，其他桩基结构的安全可靠性评估可参照使用。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 50158	港口工程结构可靠性设计统一标准
GB 50292	民用建筑可靠性鉴定标准
JTS 304	水运工程水工建筑物检测与评估技术规范
JTS 310	港口设施维护技术规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

码头检测 wharf detection

为确定码头安全现状，采用相应的仪器、设备和专用工具对结构的变形、损坏及劣化程度等项目进行检查与测试的一系列活动。

[来源：JTS 304—2019，2.0.1，有修改]

3.2

安全性评估 safety assessment

码头结构在正常使用条件下应具备保持必要的整体稳定性的能力，为判断码头结构在未来使用中的能否具备上述能力而开展的一系列活动。

3.3

极限状态 limit state

在施工和使用过程中，结构以可靠（安全、适用、耐久）或失效这两种状态存在。整个结构或结构的一部分超过某一特定状态就不能实现设计规定的某一功能要求时，此特定状态为该功能的极限状态。

[来源：GB 50158—2010，2.0.8，有修改]

3.4

整体安全可靠性评估 reliability assessment for global safety of wharf

将高桩码头结构整体作为研究对象，按照各个随机变量的概率分布、统计参数、反映结构某一功能的极限状态方程求取结构的整体失效概率，计算其极限承载能力的可靠指标，从而评估高桩码头的整体安全状态。

4 评估工作流程

4.1 高桩码头整体安全可靠性评估工作主要包括评估前准备工作、整体承载力可靠指标计算与评估分级两大部分，工作流程见图 1。

4.2 评估前准备工作主要是收集相关资料，明确高桩码头现状安全评估所需的各项参数，包括但不限于材料性能及几何尺寸参数取值、结构损伤状态。当现有资料不足以全面反映码头结构现状时，应通过第三方专业机构开展结构专项检测工作，补齐相关参数。

4.3 整体承载力可靠指标计算与评估分级主要包括数值仿真建模、整体极限承载力样本计算、样本数据清洗、样本概率分布假设检验及参数估计、可靠指标计算、整体安全可靠性评估分级。

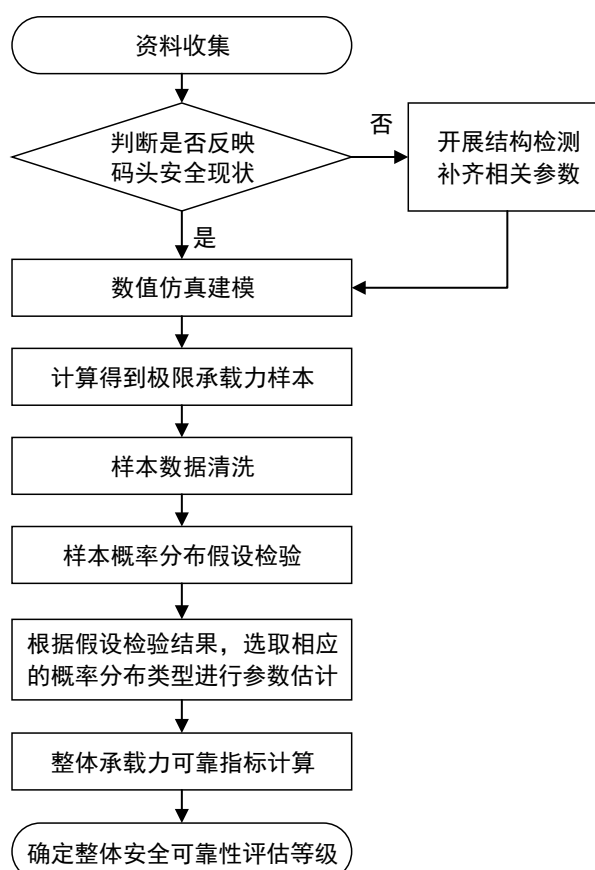


图1 基于可靠度的高桩码头结构整体安全可靠性评估流程

5 评估前准备工作

5.1 资料收集

5.1.1 资料收集应包括原勘察设计资料、运营维护资料、检测资料等。具体需要收集的资料可根据实际情况选定。

5.1.2 对安全可靠评估有较大影响的资料（如地质勘察、平面图、结构构造和配筋、港池水深图、码头底面水深图等）缺失时，应进行专项勘察、测绘及检测工作。

5.1.3 当在役结构服役时长达到或超过设计使用年限，或建筑物使用条件发生变化，或建筑物出现影响安全和使用的非正常变形、变位、裂缝、破损和耐久性损伤等，或建筑物因地震、台风等重大自然灾害或船舶超限撞击等偶发事故致损时，需要通过检测获得码头现状资料。

5.1.4 评估前应明确以下参数。

- a) 码头荷载作用：设备荷载、堆货荷载、车辆荷载、人群荷载、船舶荷载、冰荷载、流荷载、波浪荷载等。
- b) 结构材料参数：钢筋密度、钢筋屈服强度、钢筋初始模量、混凝土密度、混凝土抗压强度等。
- c) 岸坡土体参数：典型地质剖面与各地层土体的物理力学性质指标。
- d) 码头结构尺寸：码头面板厚度、梁截面宽、梁截面高、桩径等，以及接岸结构截面尺寸。
- e) 岸坡几何尺寸：港池水深、典型位置的岸坡断面等。

5.2 材料性能及几何尺寸参数取值

5.2.1 钢筋混凝土材料性能的标准值应通过对标准试件的试验确定。材料性能参数应采用近期的码头检测资料，外观质量良好的码头也可沿用原设计资料。

5.2.2 岸坡土体性能的标准值应通过原位测试和室内试验来确定。地基土体性能参数应采用近期的码头检测资料，未发生明显冲淤的码头也可沿用原设计资料。

5.2.3 材料性能概率分布及其统计参数可参考表 1 取值。

表1 材料性能概率分布及其统计参数

类型	平均值/标准值	变异系数	概率分布类型
钢筋密度	1.00	0.025	正态分布
钢筋屈服强度	1.09	0.060	正态分布
钢筋初始模量	1.00	0.100	正态分布
混凝土密度	1.00	0.025	正态分布
混凝土抗压强度	0.88	0.100	正态分布
土体密度	1.00	0.03	正态分布

5.2.4 结构几何尺寸应采用近期的码头检测资料，外观质量良好的码头也可沿用原设计资料。结构几何尺寸概率分布及其统计参数可参考表 2 取值。

表2 材料性能概率分布及其统计参数

类型	平均值/标准值	变异系数	概率分布类型
横、纵梁截面宽	1.00	0.010	正态分布
横、纵梁截面高	1.00	0.015	正态分布
桩径	1.00	0.010	正态分布
面板厚度	1.00	0.015	正态分布

5.3 结构损伤状态

5.3.1 应该考虑结构损伤状态对于结构整体安全可靠性的影响。

5.3.2 影响高桩码头结构整体安全可靠性的损伤类型主要为码头构件严重开裂、钢筋锈蚀等。码头构

件严重开裂可通过面积折减法或刚度折减法模拟，钢筋锈蚀可通过刚度折减法模拟。

6 高桩码头结构整体极限承载力计算

6.1 数值仿真建模

6.1.1 码头结构整体极限承载力宜采用数值仿真方法进行批量计算，计算流程图见图 2。

6.1.2 数值仿真建模应满足计算精度与计算效率要求，考虑结构损伤的高桩码头整体数值仿真建模技术要点可参照附录 A。

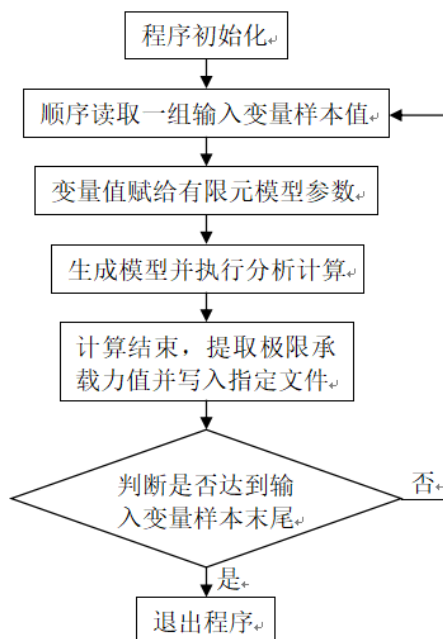


图2 数值仿真计算流程图

6.2 极限承载力样本

6.2.1 当基于材料性能和结构几何尺寸的概率分布类型和统计参数，通过拉丁超立方抽样等抽样方法形成输入变量样本。输入变量的样本容量宜不小于 400。根据输入样本值，经数值仿真计算得到极限承载力样本值。

6.2.2 进行数值仿真分析时，以下两种判别方法均可作为结构达到极限承载状态的标志：

- a) 荷载-位移曲线斜率发生突变；
- b) 结构总体刚度矩阵奇异或迭代分析不收敛。

6.2.3 根据荷载作用下的高桩码头结构数模计算结果，拟合特征点荷载-位移曲线。可按照式（1）拟合：

$$S = k^P - 1 \dots\dots\dots (1)$$

式中：

- S ——结构水平位移；
 P ——水平荷载；
 k ——拟合系数。

6.2.4 根据式（1）的拟合结果，绘制 S - $\lg P$ 曲线，取 S - $\lg P$ 曲线出现明显拐点处所对应的荷载为高桩码头结构极限承载力，相应位移即为结构达到极限状态时特征点的限定位移值。

6.2.5 当高桩码头结构特征点的荷载-位移曲线拐点不明显时，取数值仿真分析过程中结构总体刚度矩阵奇异或迭代分析不收敛时所对应的荷载值、位移值，作为高桩码头结构极限承载力、结构达到极限状

态时特征点的限定位移值。

6.3 样本数据清洗

6.3.1 模型中各基本变量均取标准值时，称该工况为标准工况。计算标准工况得到的极限承载力值称为极限承载力标准值。根据数模计算结果得到样本值应根据需要进行修正、无量纲化和剔除异常值。

6.3.2 当采用 6.2.3、6.2.4 确定高桩码头结构极限承载力的样本值时，应按照式（2）对极限承载力样本值进行修正：

$$R' = k_x \cdot R \dots\dots\dots (2)$$

$$k_x = \frac{R_k^1}{R_k^2} \dots\dots\dots (3)$$

式中：

R' ——样本修正值；

R ——样本值。

k_x ——修正系数；

x ——工况编号；

R_k^1 ——标准工况下按照 6.2.3、6.2.4 提取的极限承载力标准值；

R_k^2 ——标准工况下按照 6.2.5 提取的极限承载力标准值。

6.3.3 当按照 6.2.5 确定高桩码头结构极限承载力的样本值时，不需修正。

6.3.4 应对极限承载力样本值进行无量纲化处理，计算方法如下：

$$\alpha_R = \frac{R}{R_k} \dots\dots\dots (4)$$

式中：

α_R ——无量纲化后的样本值；

R ——极限承载力样本值（如有修正，则为样本修正值）；

R_k ——极限承载力标准值。

6.3.5 应对无量纲化后的极限承载力样本值进行异常值的剔除处理，可按如下步骤操作：

a) 样本 X_i ($i=1, 2, \dots, n$) 的平均值 \bar{x} 、残余误差 v_i 以及标准偏差 S 按式（5）至式（7）计算：

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \dots\dots\dots (5)$$

$$v_i = x_i - \bar{x} (i=1, 2, \dots, n) \dots\dots\dots (6)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n v_i^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n(n-1)}} \dots\dots\dots (7)$$

b) 对异常值进行剔除，残余误差按式（8）计算，异常值按照式（9）进行判定：

$$|v_d| = x_d - \bar{x} (1 \leq d \leq n) \dots\dots\dots (8)$$

$$|v_d| > 3S \dots\dots\dots (9)$$

c) 在后续分析中予以保留的样本值 x_i 应符合如下条件：

$$\bar{x} - 3S < x_i < \bar{x} + 3S \dots\dots\dots (10)$$

6.4 参数估计

6.4.1 应对剔除异常值之后的样本数据进行概率分布假设检验，常用方法参见附录 B。其一般步骤如

下:

- a) 根据具体问题的要求, 建立原假设 H_0 和备择假设 H_1 ;
- b) 选择合适的检验统计量;
- c) 选定置信度 α , 确定拒绝域 ω ;
- d) 根据样本值计算统计量值;
- e) 根据小概率原理, 使用概率反证法进行统计推断。如果统计量值落在拒绝域内, 则拒绝原假设 H_0 , 而接受备择假设 H_1 ; 如果落在非拒绝域, 则接受原假设 H_0 ; 如果落在拒绝域与非拒绝域的边界, 则怀疑原假设 H_0 , 宜建立新的假设并重复上述步骤。

6.4.2 在高桩码头结构整体极限承载力的概率分布类型已知的情况下, 可采用极大似然法、最小二乘法等方法对极限承载力样本的统计参数进行估计。

6.4.3 对于满足正态分布的样本 $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, 按照极大似然估计法用式(11)和式(12)计算 μ 与 σ^2 :

$$\mu = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \dots\dots\dots (11)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \dots\dots\dots (12)$$

7 高桩码头结构整体安全可靠评估

7.1 功能函数

7.1.1 建立反映高桩码头安全度的功能函数, 其表达式如下:

$$Z = R - S \dots\dots\dots (13)$$

式中:

R ——高桩码头结构整体极限承载力;

S ——作用在高桩码头结构上的荷载组合效应。

7.1.2 $Z > 0$ 表示结构处于可靠状态, $Z < 0$ 表示结构处于失效状态, $Z = 0$ 表示结构处于极限状态。

7.2 结构失效概率

7.2.1 高桩码头结构整体承载力的功能函数 Z 与 n 个基本随机变量 X_1, X_2, \dots, X_n 有关, 则结构的失效概率可按式(14)计算:

$$p_f = P(Z < 0) = \iiint_{Z < 0} \dots \int f_X(X_1, X_2, \dots, X_n) dX_1 dX_2 \dots dX_n \dots\dots\dots (14)$$

式中:

X_1, X_2, \dots, X_n ——结构的基本随机变量;

$f_X(X_1, X_2, \dots, X_n)$ ——基本随机变量对应的概率密度函数。

7.2.2 若这些随机变量 X_1, X_2, \dots, X_n 相互独立, 则有

$$p_f = P(Z < 0) = \iiint_{Z < 0} \dots \int f_{X_1}(X_1) f_{X_2}(X_2) \dots f_{X_n}(X_n) dX_1 dX_2 \dots dX_n \dots\dots\dots (15)$$

7.3 可靠指标

7.3.1 当高桩码头结构整体承载力的功能函数 Z 服从正态分布时, 其平均值和标准差分别表示为 μ_z 、 σ_z , 则结构失效概率可按式(16)计算:

$$p_f = \int_{-\infty}^0 f_z(z) dz = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left[-\frac{(z - \mu_z)^2}{2\sigma_z^2}\right] dz \dots\dots\dots (16)$$

7.3.2 当结构处于极限状态($Z=0$)时, 结构失效概率及可靠指标可按式(17)、式(18)计算:

$$P_f = \int_{-\infty}^{\frac{\mu_z}{\sigma_z}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{t^2}{2}\right] dz = \phi\left(-\frac{\mu_z}{\sigma_z}\right) = \phi(-\beta) \dots\dots\dots (17)$$

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} \dots\dots\dots (18)$$

式中：

ϕ ——服从标准正态分布的分布函数；

β ——结构可靠指标，为无因次系数，结构失效概率存在一一对应关系。

7.3.3 当高桩码头结构整体承载力的功能函数 Z 不一定服从正态分布时，应通过迭代方式计算结构可靠指标。计算结构可靠指标的方法主要包括验算点法、二次二阶矩法、蒙特卡罗法等。其中，验算点法计算可靠指标的过程参见附录 C。

7.3.4 可靠指标应利用各损伤工况下结构极限承载力的标准值和统计参数计算。

7.3.5 在缺乏统计资料的情况下，可利用各损伤工况下结构极限承载力的标准值和无损伤工况下结构极限承载力的统计参数近似计算可靠指标。

7.4 整体安全可靠性评估分级标准及处理要求

7.4.1 以高桩码头整体承载力的目标可靠指标及失效概率为基础，建立在役高桩码头结构整体安全状态分级标准及处理要求，见表 3。

表3 高桩码头结构整体安全可靠性评估分级标准及处理要求

等级	A	B	C	D
分级标准	$\beta/\gamma_0 \geq 3.5$	$3.5 > \beta/\gamma_0 \geq 3.25$	$3.25 > \beta/\gamma_0 \geq 3.0$	$3.0 > \beta/\gamma_0$
处理要求	不必采取措施	宜加强检测，视情况采取维护措施	及时进行修复、补强，视条件和要求恢复到 A 级或 B 级标准	立即进行修复、补强，视条件和要求恢复到 B 级标准或报废。
注： γ_0 为结构重要性系数，取值根据结构安全等级选取为：一级： $\gamma_0=1.1$ ，二级： $\gamma_0=1.0$ ，三级： $\gamma_0=0.9$ 。				

附录 A

(资料性)

考虑结构损伤的高桩码头整体数值仿真建模方法

A.1 建模原则

A.1.1 高桩码头整体安全可靠性评估应考虑结构损伤等对于结构整体承载力的影响。

A.1.2 当桩土相互作用对于码头结构承载力影响显著时，数值仿真模型中码头结构与岸坡土体均宜采用实体单元，模型计算域包括码头结构及岸坡土体。

A.1.3 当桩土作用对于码头结构承载力无显著影响时，可根据假想嵌固原则将数值仿真模型中桩土相互作用简化为土弹簧，模型计算域不再考虑岸坡土体。

A.2 模型计算域与边界

A.2.1 码头结构计算域宜根据码头典型荷载类型，按以下原则确定：

- a) 对于堆货荷载等沿整个码头均布的荷载，取单个排架；
- b) 对于门机荷载等空间非对称荷载，取5个以上排架宽度或单个结构段。

A.2.2 岸坡土体计算域宜满足以下要求：

- a) 海侧边界至码头前沿距离不少于2~3倍桩基入土深度；
- b) 陆侧边界至码头后沿或接岸结构的距离不少于2~3倍桩基入土深度；
- c) 码头桩端至底边界距离不少于1.5倍桩基入土深度；
- d) 左、右侧边界与码头结构计算域保持一致。

A.2.3 模型边界条件可按以下方式设置：

- a) 计算土域的上表面设为自由边界；
- b) 计算土域的海侧、陆侧边界均设为固定边界或限制水平位移边界；
- c) 计算土域的左、右侧边界均设为对称边界；
- d) 码头结构计算域包括单个结构段时，左、右侧边界设为自由边界，只包含部分排架时，左、右侧边界设为对称边界。

A.3 模型材料与单元

A.3.1 钢筋混凝土材料宜考虑混凝土中加强钢筋以及材料的拉裂和压溃现象，并选取相应的材料本构及单元类型。

A.3.2 地基土材料宜考虑塑性、蠕变、膨胀、应力刚化、大变形、大应变等因素，并选取相应的材料本构及单元类型。

A.4 桩土作用模拟

A.4.1 数值仿真模型中码头结构与岸坡土体均采用实体单元时，宜按照以下方式模拟桩土作用：

- a) 采用接触单元模拟基桩与土之间的相对滑动与分离，并对桩和土体同时划分单元进行计算；
- b) 接触单元中，将码头基桩结构面作为刚性目标面，将土体面作为柔性接触面；
- c) 接触单元中，切向接触关系采用库仑摩擦本构模型，法向接触关系采用拉格朗日乘子方法。

A.4.2 数值仿真模型中仅码头结构采用实体单元时，桩土相互作用简化为土弹簧，可按照弹性地基梁法计算弹簧刚度系数。

A.5 结构损伤模拟

A.5.1 采用面积折减法模拟结构损伤时，可直接根据码头构件开裂尺寸，相应地减小损伤部位截面尺寸。针对直桩、梁和叉桩损伤的高桩码头有限元模型示意图如图1所示。

A.5.2 采用面刚度折减法模拟结构损伤时，可根据损伤构件承载特点，按照截面抗弯等效或者截面抗压等效原则，对损伤部位单元属性进行折减换算。

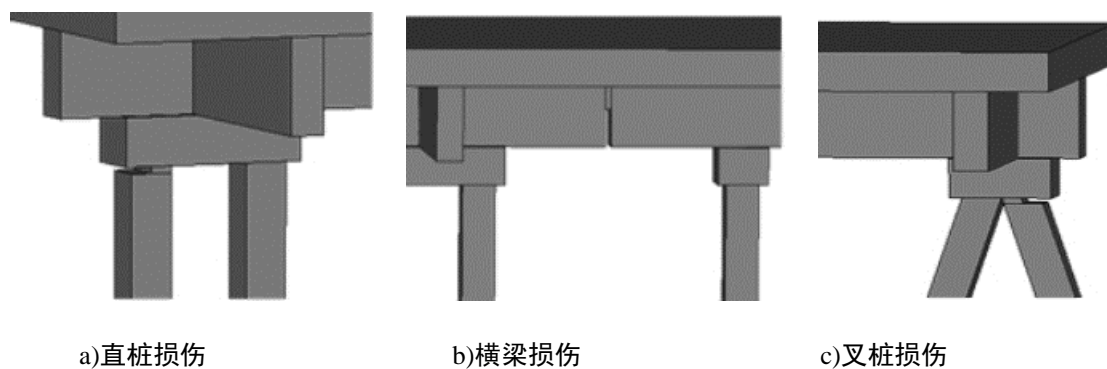


图1 高桩码头结构损伤数值仿真模拟

附录 B

(资料性)

常用的分布检验方法

B.1 分布检验方法

针对样本指定分布的假设检验的方法主要有 χ^2 拟合优度检验、K-S检验、Lilliefors检验、C-M检验、A-D检验、Jarque-Beran检验、d'Agostino检验。

B.2 χ^2 拟合优度检验

B.2.1 χ^2 拟合优度检验利用检验统计量 χ^2 的大小来度量样本与指定分布的拟合程度， χ^2 的数值越小，拟合程度越好。

B.2.2 检验统计量 χ^2 可按照式 (B.1) 计算：

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^K \frac{(f_i - F_i)^2}{F_i} \dots\dots\dots (B.1)$$

式中：

- K ——分组的区间个数；
- f_i ——第*i*个区间的样本值的实际频数；
- F_i ——第*i*个区间的理论频数。

B.3 K-S检验

B.3.1 K-S检验通过对比检验统计量KS与K-S检验的临界值来判断原假设是否成立。

B.3.2 在指定置信度 α 下，判别准则为：

- a) 当检验统计量KS小于临界值时，不拒绝接受原假设；
- b) 当检验统计量KS大于临界值时，拒绝接受原假设。

B.3.3 对样本容量为*n*的变量*x*，在假定分布下，检验统计量KS可按照式 (B.2) 计算：

$$KS = \max(|F_n(x) - G(x)|) \dots\dots\dots (B.2)$$

式中：

- $F_n(x)$ ——通过待检验的子样得到经验分布函数；
- $G(x)$ ——原假设的指定分布函数。

B.4 Lilliefors检验

B.4.1 Lilliefors检验适用于总体均值和方差等参数未知的情况。

B.4.2 Lilliefors检验采用样本均值 \bar{x} 和标准差*s*代替总体的均值 μ 和标准差 σ ，然后进行K-S检验。该法也可在小样本条件下进行使用。

B.5 C-M检验

B.5.1 C-M检验通过对比检验统计量 W_n^2 与相应的检验临界值 $W_{n,\alpha}^2$ 来判断原假设是否成立。

B.5.2 在指定置信度 α 下，由C-M法检测临界值表查得 $W_{n,\alpha}^2$ 值，与检验统计量 W_n^2 相比较，判定准则为：

- a) 当 $W_n^2 < W_{n,\alpha}^2$ 时，不拒绝接受原假设；
- b) 当 $W_n^2 > W_{n,\alpha}^2$ 时，拒绝接受原假设。

B.5.3 对样本容量为*n*的变量*x*，在假定分布下，检验统计量 W_n^2 可按照式 (B.3) 计算：

$$W^2 = \sum_{i=1}^n [F(x_i) - (2i-1)/(2n)]^2 + \frac{1}{12n} \dots\dots\dots (B.3)$$

式中:

- n ——样本容量;
- $F(x_i)$ ——理论概率;
- $(2i-1)/2n$ ——经验概率。

B.6 A-D检验

B.6.1 A-D检验法通过对比检验统计量 A_n^2 与相应的检验临界值 $A_{n,\alpha}^2$ 来判断原假设是否成立。

B.6.2 在指定置信度 α 下,由A-D法检测临界值表可查得 $A_{n,\alpha}^2$ 值,与 A_n^2 相比较,判定准则为:

- a) 当 $A_n^2 < A_{n,\alpha}^2$ 时,不拒绝接受原假设;
- b) 当 $A_n^2 > A_{n,\alpha}^2$ 时,拒绝接受原假设。

B.6.3 对样本容量为 n 的变量 x ,在假定分布下,检验统计量 A_n^2 可按照式(B.4)计算:

$$A_n^2 = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i-1) \{ \ln F(x_i) + \ln [1 - F(x_{n+1-i})] \} \dots\dots\dots (B.4)$$

式中:

- n ——样本容量;
- $F(x_i)$ ——理论概率。

B.7 Jarque-Beran检验

B.7.1 Jarque-Beran检验方法基于峰度与偏度联合检验样本是否服从正态分布,通过对比检验统计量 JB 与相应的检验临界值比较来判断原假设是否成立。

B.7.2 检验统计量 JB 可按照下式(B.5)计算:

$$JB = \frac{n}{6} \left[s^2 + \frac{(k-3)^2}{4} \right] \dots\dots\dots (B.5)$$

式中:

- n ——样本容量;
- s ——样本偏度;
- k ——样本峰度。

B.8 d'Agostino检验法

B.8.1 d'Agostino检验法适合样本数 $n > 50$ 的随机变量的正态性检验。

B.8.2 d'Agostino采用随机模拟法得到 Y 的分位数表,在给定显著性水平 α 后,使用统计量 Y 进行检验,检验的拒绝域为 $\{Y \leq Y_{\alpha/2} \text{ 或 } Y \geq Y_{1-\alpha/2}\}$ 。

B.8.3 检验统计量 Y 可按照式(B.6)、式(B.7)计算:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n (i - \frac{n+1}{2}) X_{(i)}}{n^{3/2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}} \dots\dots\dots (B.6)$$

$$Y = \frac{(D - 0.28209479)\sqrt{n}}{0.02998598} \dots\dots\dots (B.7)$$

式中: n ——样本容量。

附录 C

(资料性)

验算点法计算可靠指标

C.1 确定初始验算点, 一般可采用样本均值作为初始验算点:

$$x^{*(0)} = (\mu_{x_1}, \mu_{x_2}, \dots, \mu_{x_n}) \dots\dots\dots (C.1)$$

C.2 通过当量正态化将不服从正态分布的随机变量 X_i 等效为正态随机变量 X'_i , 按式 (C.2)、式 (C.3) 计算:

$$\mu_{x'_i} = x_i^* - \phi^{-1} [F(x_i^*)] \sigma_{x'_i} \quad (i=1, 2, \dots, n) \dots\dots\dots (C.2)$$

$$\sigma_{x'_i} = \frac{\varphi \{ \phi^{-1} [F(x_i^*)] \}}{f_{x_i}(x_i^*)} \quad (i=1, 2, \dots, n) \dots\dots\dots (C.3)$$

式中:

 $x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*$ ——基本变量的验算点坐标值; $\mu_{x'_i}, \sigma_{x'_i}$ ——第 i 当量正态化变量的平均值和标准差; $f_{x_i}(\cdot), F(\cdot)$ ——第 i 个变量的概率密度函数和概率分布函数; $\varphi(\cdot), \phi^{-1}(\cdot)$ ——标准正态随机变量的概率密度函数和概率分布函数的反函数。

C.3 将功能函数在验算点处进行泰勒级数展开, 并保留一次项:

$$Z_L = g(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) + \sum_{i=1}^n \left. \frac{\partial g}{\partial X_i} \right|_p (X'_i - x_i^*) \dots\dots\dots (C.4)$$

C.4 计算基于整体极限承载力的高桩码头可靠指标:

$$\beta = \frac{g(x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*) + \sum_{i=1}^n \left. \frac{\partial g}{\partial X_i} \right|_p (\mu_{x'_i} - x_i^*)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left. \frac{\partial g}{\partial X_i} \right|_p \left. \frac{\partial g}{\partial X_j} \right|_p \rho_{x'_i x'_j} \sigma_{x'_i} \sigma_{x'_j}}} \dots\dots\dots (C.5)$$

式中: $\rho_{x'_i x'_j}$ ——第 i 个和第 j 个当量正态化变量间的相关系数, 可取为第 i 个和第 j 个变量间的相关系数。

C.5 计算灵敏度系数和新的验算点坐标:

$$\alpha_{x'_i} = \frac{\sum_{i=1}^n \left. \frac{\partial g}{\partial X_i} \right|_p \rho_{x'_i x'_j} \sigma_{x'_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left. \frac{\partial g}{\partial X_i} \right|_p \left. \frac{\partial g}{\partial X_j} \right|_p \rho_{x'_i x'_j} \sigma_{x'_i} \sigma_{x'_j}}} \quad (i=1, 2, \dots, n) \dots\dots (C.6)$$

$$x_i^* = \mu_{x'_i} + \beta \alpha_{x'_i} \sigma_{x'_i} \quad (i=1, 2, \dots, n) \dots\dots\dots (C.7)$$

C.6 根据新的验算点坐标重复上述操作, 直到两次计算的可靠指标达到允许误差, 结束整个计算过程。

参 考 文 献

- [1] JTS 147 水运工程地基设计规范
- [2] JTS 151 水运工程混凝土结构设计规范
- [3] JTS 167 码头结构设计规范
- [4] JTS 235 水运工程水工建筑物原型观测技术规范
- [5] 孙熙平, 张勇, 郑锋勇, 等. 高桩码头基桩竖向承载力原型试验研究[J]. 岩土力学, 2014.
- [6] 李姐. 基于极限承载力的在役高桩码头整体安全度分析方法研究[D]. 天津大学, 2015.