

# 考虑混凝土耐久性-地震随机性的高桩码头时变可靠度研究

周扬<sup>1,2</sup>, 李思瀚<sup>2</sup>, 庞锐<sup>1,2</sup>, 徐斌<sup>1,2</sup>, 刘明亮<sup>2</sup>

(1. 大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;

2. 大连理工大学 建设工程学院, 辽宁 大连 116024)

**摘要:** 为了研究高桩码头长期使用情况下,其结构性能出现的退化现象,利用时间相关的钢筋混凝土性能退化模型,综合考虑混凝土耐久性与地震随机性之间的相关性,结合直接概率积分(DPIM)方法对高桩码头进行随机动力分析和时变可靠度分析,获得不同运行年限下高桩码头在地震激励下的响应概率信息以及时变可靠度曲线。结果显示:随着运行年限的增加,码头上部结构的水平位移概率密度曲线(PDF)、累积分布曲线(CDF)峰值有所下降,动力可靠度随使用年限大幅下降,反映结构体系的性能退化逐渐加快,体现出钢筋混凝土退化对高桩码头地震安全性的显著影响。

**关键词:** 高桩码头;混凝土耐久性;直接概率积分(DPIM);可靠度分析;结构性能退化

中图分类号: U657.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2024)06-0098-08

## Time-dependent Reliability Analysis of High Pile Wharf Considering Concrete Durability and Seismic Randomness

ZHOU Yang<sup>1,2</sup>, LI Sihan<sup>2</sup>, PANG Rui<sup>1,2</sup>, XU Bin<sup>1,2</sup>, LIU Mingliang<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

2. School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

**Abstract:** In the process of long-term use, the structural performance of high pile wharf will inevitably degrade, which will not only affect the safety and stability, but also have serious impacts on the normal operation and economic benefits. Based on the time-dependent reinforced concrete performance degradation model, the stochastic dynamic analysis and time-varying reliability analysis are carried out by combining the direct probability integral method (DPIM), the response probability information and time-varying reliability curves under earthquake excitation under different operating years are obtained. The results show that with the increase of the operation life, the peak value of the displacement PDF and CDF of the wharf superstructure decreases, the dynamic reliability decreases sharply with the service life, and the performance degradation of the reaction structure system accelerates gradually. It shows that reinforced concrete degradation has significant influence on the safety of high pile wharf.

**Keywords:** high pile wharf; durability of concrete; direct probability integral method (DPIM); reliability analysis; structural property degradation

近年来,随着全球贸易的不断发展和国际航运的快速增长,海港码头作为货物流通的关键节点,扮演着至关重要的角色。然而,高桩码头在使用过程中会受到多种因素的影响,如材料老化、环境腐蚀、荷载变化等,这些因素都会导致码头结构的性能随时间发生变化。在此背景下,通过对高桩码头进行

时变可靠度分析,能够更为全面地评估其在长期使用过程中的安全性能与稳定性表现,从而为码头的长期运营和维护提供更为科学的指导。这种分析方法不仅考虑了码头在不同时间点的性能变化,还结合了各种不确定性因素,使得评估结果更为准确和可靠。通过时变可靠度研究,可以为码头的维护和

管理提供决策支持,确保码头在使用过程中的安全性和可靠性。

混凝土结构的耐久性是指混凝土结构在使用过程中,能够抵抗外部环境的物理、化学和生物作用,保持其原有性能和外观的能力。混凝土结构的耐久性对于建筑工程的安全性和使用寿命至关重要。牛荻涛等<sup>[1]</sup>深入探讨了混凝土钢筋的锈蚀问题,分析了由此引起的结构性能衰减及锈蚀梁的损坏行为,发展了考虑锈蚀影响的梁弯曲承载力计算模型,并进一步探究了粘结性能降低对承载力计算的影响。李镜培等<sup>[2]</sup>综合考察了混凝土的侵蚀过程、离子扩散、钢筋的锈蚀行为以及混凝土的强度与刚度损失,对海洋及近海的氯盐侵蚀环境和内陆的盐湖、盐碱地硫酸盐侵蚀环境中地下混凝土结构的耐久性进行了深入分析,揭示了损害特征及其退化过程。孙艺<sup>[3]</sup>对海洋环境下码头结构钢筋混凝土的耐久性进行了研究,修正了氯离子侵蚀扩散模型,改进了钢筋锈蚀速度模型。刘学勇等<sup>[4]</sup>在深入的分析和研究基础上,通过我国港口工程的结构特征,总结了影响性能退化的因素。杨国平等<sup>[5]</sup>认为高桩码头退化研究还应综合考虑应力水平、混凝土保护层的效果以及横向裂缝的宽度等因素。Gao等<sup>[6]</sup>基于海潮环境下混凝土的现场试验,分析了不同环境下氯离子对混凝土侵蚀深度。Chen等<sup>[7]</sup>提出了钢筋腐蚀对钢筋混凝土结构粘结强度退化影响的时变可靠性分析方法,为结构的安全性和耐久性设计提供了重要的理论依据。

在对结构进行基于性能的抗震设计以及安全评价时,结构随机动力分析十分重要,是从结构的确定性到随机性的重要过渡,选取合适的概率分析方法对结构随机动力分析具有重要意义。随着可靠度理论不断完善和发展,国内外研究者们将更先进的可靠度分析方法应用于高桩码头的评估中。这些方法能够更全面地考虑不确定性因素的影响,包括结构参数的随机性、荷载的变异性以及环境因素的时变性等。通过这些方法,可以更准确地评估高桩码头的可靠度水平,为设计和维护决策提供科学依据。近年来,李杰等<sup>[8]</sup>在概率密度演化方法的基础上开发了广义概率密度演化方法,并基于此提出了一种随机结构动力可靠度分析方法。该方法利用概率密度演化方程,专门针对结构首次超越破坏的情况,并引入特定的吸收条件。通过求解这类边界条件下的方程,并在安全域进行积分,可以精确地描述非线性随机振动分析和动力可靠度分析,从而更好地解释

和预测结构的随机动力行为<sup>[9]</sup>。陈国海和杨迪雄提出了直接概率积分法(DPIM),利用狄拉克函数平滑化,直接求解与随机系统概率密度微分方程等价的概率密度积分方程,能有效应用于静态和动态荷载作用下的线性和非线性系统<sup>[10-11]</sup>。

综上所述,本文结合环境腐蚀、材料老化和使用条件等因素,总结当前我国沿海码头结构性能退化的主要影响因素,并利用时间相关的钢筋混凝土性能退化模型,采用弹性模量折减法处理高桩码头部件的抗弯刚度退化。进一步综合考虑混凝土耐久性与地震随机性之间的相关性,结合直接概率积分方法对高桩码头进行随机动力分析和时变可靠度分析,以期能够获得不同运行年限下高桩码头结构在地震激励下的任意时刻的响应概率信息以及选定阈值的时变可靠度变化规律。

## 1 高桩码头钢筋混凝土性能退化研究

在长期使用过程中,高桩码头结构性能不可避免地会出现退化现象,这不仅影响码头的安全性和稳定性,还可能对港口的正常运营和经济效益产生严重影响。因此,深入研究高桩码头结构性能退化的因素,对于预防和治理码头结构退化、保障港口安全运营具有重要意义。高桩码头结构性能退化是一个复杂的过程,受多种因素共同作用。这些因素包括但不限于环境因素(如氯离子侵蚀、硫酸盐侵蚀、温度变化等)、材料老化(如钢材锈蚀、混凝土开裂等)、使用条件(如荷载大小、频率等)以及结构设计等。这些因素相互交织,使得码头结构的性能退化过程呈现出多样性和复杂性。

高桩码头结构构件的力学性能退化反映了钢筋混凝土结构整体性能的下降。具体来说,构件承载能力的减少与多个因素相关,包括钢筋截面积的锈蚀缩减、材料本身强度的下降,以及钢筋与混凝土之间粘结力的逐渐减弱。钢筋在海洋环境下的锈蚀过程,按照《水运工程水工建筑物检测与评估技术规范》<sup>[12]</sup>(JTS 304—2019)的分类可分为三个阶段,如图1所示。首先是锈蚀诱发阶段,从码头结构建成并暴露在海洋环境中开始,直到钢筋表面的钝化层遭到破坏。接下来是锈蚀扩展阶段,此时钢筋开始生锈,直到锈蚀膨胀导致混凝土保护层出现纵向裂缝。最后是锈蚀破坏阶段,此时保护层裂开,钢筋的锈蚀速度加快,导致结构性能大幅下降,直到构件失效。在最后阶段,锈蚀对结构的安全性影响尤为严重。这一分阶段的描述有助于更好地理解和预防钢

筋混凝土结构在海洋环境中的退化过程。

在钢筋经历锈蚀过程时,其直径会随着时间和锈蚀反应的进展而逐步减少,从而导致钢筋截面积的减小。这种截面积的变化可以用锈蚀率  $\eta$  来量化描述。在特定时间点  $t$ ,可以精确地确定钢筋在不同锈蚀水平下的截面积变化,并据此分析其对高桩码头结构性能的具体影响。任意时间钢筋的截面面积可以表示为:

$$S(t) = \frac{\pi d^2(t)}{4} \quad (1)$$

因此,钢筋的锈蚀率可以表达为:

$$\eta(t) = \frac{S_0 - S(t)}{S_0} = 1 - \frac{d^2(t)}{d_0^2} \quad (2)$$

式中: $S_0$  为钢筋的初面积,  $\text{mm}^2$ ;  $d_0$  为钢筋的初始直径,  $\text{mm}$ 。

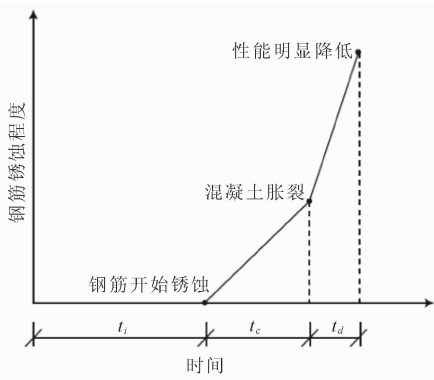


图 1 钢筋混凝土构件钢筋锈蚀过程

结合《水运工程水工建筑物检测与评估技术规范》<sup>[12]</sup> 对各锈蚀阶段的计算,可以求得在任意给定时刻  $t$  的钢筋的截面面积以及任意时刻的钢筋锈蚀率。在整个钢筋锈蚀的过程,钢筋锈蚀速率的时变规律为:

$$\lambda(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq t_i \\ k_{i,\text{load}} i_{\text{corr}} \times 0.00986(t - t_i)^{-0.29} & t_i < t < t_i + t_c \\ 0.00431 \ln(t - t_i - t_c + t_1) + 0.0131 & t_i + t_c < t \leq t_i + t_c + t_d \end{cases} \quad (3)$$

式中: $k_{i,\text{load}}$  为荷载影响系数; $i_{\text{corr}}$  为钢筋开始锈蚀时的电流密度,  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ;  $t_i$  为自混凝土浇筑完成至钢筋开始锈蚀的时间,  $\text{d}$ ;  $t_c$  为从钢筋开始锈蚀到混凝土保护层出现裂缝的时间,  $\text{d}$ ;  $t_d$  为从保护层开裂到结构性能失效的时间,  $\text{d}$ ;  $t_1$  为保证钢筋锈蚀速率在时间上的连续性而设置的相对时间点,  $\text{d}$ 。

则锈蚀钢筋直径的时变规律为:

$$d(t) = \begin{cases} d_0 & 0 \leq t \leq t_i \\ d_0 - 2 \int_{t_i}^{t-t_i} \lambda(t) dt & t_i < t < t_i + t_c \\ d_0 - 2\delta_{\text{cr}} - 2 \int_{t_i-t_c}^{t-t-t_c} \lambda(t) dt & t_i + t_c < t \leq t_i + t_c + t_d \end{cases} \quad (4)$$

式中: $d(t)$  为  $t$  时刻的钢筋直径,  $\text{mm}$ ;  $\delta_{\text{cr}}$  为钢筋临界锈蚀深度,  $\text{mm}$ 。

锈蚀钢筋的强度可以表示为:

$$f_y = k_y f_{y0} \quad (5)$$

式中: $f_y$  为钢筋锈蚀前后的屈服强度; $k_y$  为锈蚀钢筋屈服强度退化系数; $f_{y0}$  为钢筋锈蚀后的屈服强度。

沈德建等<sup>[15]</sup> 通过对海洋环境中钢筋混凝土试件的拉伸试验,研究了钢筋在海洋环境中屈服强度的退化趋势。

$$\text{I 级钢筋: } k_y = \frac{1 - 1.54\eta}{1 - \eta} \quad (6)$$

$$\text{II 级钢筋: } k_y = \frac{1 - 1.33\eta}{1 - \eta} \quad (7)$$

式中: $\eta$  为钢筋锈蚀率。

在对海洋环境中混凝土长期暴露试验及实际测量结果进行综合分析后,牛荻涛提出了一个描述混凝土强度随时间变化的退化模型<sup>[16]</sup>。

$$\begin{cases} \mu_{f_{\text{cu}}}(t) = \xi(t) \mu_{f_{\text{cu}}} \\ \sigma_{f_{\text{cu}}}(t) = \zeta(t) \sigma_{f_{\text{cu}}} \\ \xi(t) = 1.2488e^{-0.0347(\ln t - 0.3468)^2} \\ \zeta(t) = 0.0143t + 1.0624 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\mu_{f_{\text{cu}}}(t)$ 、 $\sigma_{f_{\text{cu}}}(t)$  为  $t$  时刻的混凝土立方体抗压强度的平均值与标准差; $\mu_{f_{\text{cu},0}}$ 、 $\sigma_{f_{\text{cu},0}}$  分别为混凝土 28 d 立方体抗压强度的平均值与标准差; $\xi(t)$ 、 $\zeta(t)$  为混凝土强度时变函数。

基于上述钢筋锈蚀时变模型,联立式(2)~式(7)求解,即可求得钢筋锈蚀率的时变规律,进而取得钢筋在海洋环境中屈服强度的退化趋势。基于混凝土强度退化模型,钢筋和混凝土部分的强度退化平均曲线如图 2 所示。

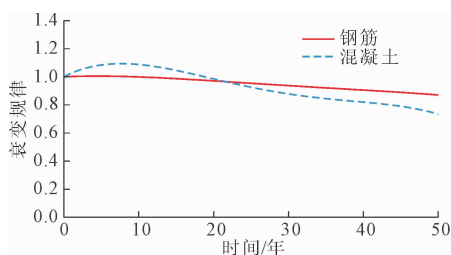


图 2 钢筋和混凝土强度随时间的变化情况

钢筋的锈蚀现象会对结构受弯构件的抗弯刚度产生不利影响,导致其逐渐退化。这种刚度的降低进而引起结构挠度的增大,当达到一定程度时,将严重影响高桩码头结构的整体适用性和安全性。吴锋等<sup>[17]</sup>对锈损钢筋混凝土结构的受弯构件在不同腐蚀水平下的抗弯刚度衰减进行了系统评估:

$$\begin{cases} \alpha = 0.464e^{-\frac{7}{0.053}} + 0.605 \\ E(t) = \alpha E_0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\alpha$ 表示抗弯刚度的退化系数; $E(t)$ 为弹性模量变化时变规律; $E_0$ 为初始弹性模量。

联立式(2)一式(4)和式(9),可以获得抗弯刚度退化系数的时变规律,研究者如刘迎<sup>[18]</sup>和 Shibata 等<sup>[19]</sup>已经证明,使用刚度退化作为衡量码头部件损伤程度的方法是有效的。使用刚度退化作为衡量码头部件损伤程度<sup>[20]</sup>,参考《水运工程水工建筑物检测与评估技术规范》<sup>[12]</sup>对结构部件的退化进行分析,本研究采用弹性模量折减法处理高桩码头部件的抗弯刚度退化,将其等效为混凝土和钢筋弹性模量的退化,如图 3 所示。

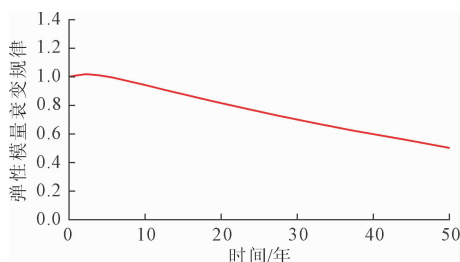


图 3 钢筋和混凝土弹性模量随时间的变化情况

## 2 高桩码头直接概率积分理论

直接概率积分法以概率守恒原理为基础,对概率密度积分方程进行直接求解,以获得各个物理量随时间的概率分布情况。概率守恒原理在动力随机系统中可分别表示为:

$$\int_{\Omega_Y} P_Y(y, t) dy = \int_{\Omega_\Theta} P_\Theta(\theta, t) d\theta \quad (10)$$

式中: $\Theta, Y$ 表示随机系统的输入随机变量和输出随机变量; $P_\Theta(\theta, t)$ 和 $P_Y(y, t)$ 表示动力随机系统中输入和输出在 $t$ 时刻的 PDF; $\Omega_\Theta$ 和 $\Omega_Y$ 分别表示输入随机变量和输出随机变量所对应的样本空间。

通过输入与输出的映射关系,可以得到任意一个分量或分量组的动力联合 PDF:

$$P_{Y_i Y_m}(y_i, y_m, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} P_\Theta(\theta) \delta[y_i - g_i(\theta, t)] \delta[y_m - g_m(\theta, t)] d\theta \quad (11)$$

式中: $[y_i, y_m]^T$ 为选定的分量组。

在求解过程中,对随机系统等式积分后,会出现狄拉克函数 $\delta$ ,同时也会出现与输入变量相同维度的积分,这大大增加了求解 PDF 的难度<sup>[21-23]</sup>。针对这一问题,直接概率积分方法将各样本点在样本空间的赋得概率替换相同维度的积分,并将狄拉克函数 $\delta$ 用连续的高斯函数代替,从而大大降低求解难度,运用 DPIM 求解系统的 PDF 为:

$$\begin{aligned} P_{Y_i}(y_i, t) &= \int_{-\infty}^{\infty} \cdots \int_{-\infty}^{\infty} P_\Theta(\theta) \delta[y_i - g_i(\theta, t)] d\theta \\ &= \sum_{q=1}^N \left\{ \delta[y_i - g_i(\theta_q, t)] \int_{\Omega_{\theta,q}} P_\Theta(\theta) d\theta \right\} \\ &= \sum_{q=1}^N \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-[y_i - g_i(\theta_q, t)]^2 / 2\sigma^2} P_q \right\} \end{aligned} \quad (12)$$

式中: $\theta_q$ 代表第 $q$ 个代表点; $\Omega_{\theta,q}$ 为第 $q$ 个代表点对应的样本空间; $N$ 为代表点总数; $P_q$ 为第 $q$ 个代表点对应的赋得概率; $\sigma$ 为光滑化参数,可以通过核密度估计的方法来确定:

$$\sigma(t) = a \cdot \min_{q=1,2,\dots,N} \left\{ \text{std} \left( g(\theta_q, t), \frac{iqr(g(\theta_q, t))}{1.34} \right) \right\} \cdot N^{-1/5} \quad (13)$$

基于上述随机动力分析方法和概率守恒原理:

$$P_q(t) = P_{q,f}(t) + P_{q,s}(t) \quad (14)$$

式中: $P_{q,f}$ 代表失效概率; $P_{q,s}$ 代表有效概率。

失效概率可以表示为:

$$P_{q,f}(t) = P_q(t) \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\left[\frac{z-g(\theta_q, t)}{2\sigma^2}\right]^2} dz \quad (15)$$

基于吸收条件法,即进入失效域的代表点无法返回安全域,失效概率无法向后传递,将失效概率吸收为零,即:

$$\begin{cases} P_{q,f}(t) = 0 \\ z \in \Omega_{z,f} = \{z | g(\theta_q, t_i) \leq 0\} \end{cases} \quad (16)$$

这时, $t_{i+1}$ 瞬间的剩余代表点赋得概率可用前一时刻的有效概率替代:

$$\begin{aligned} P_q(t_{i+1}) &= P_{q,s}(t_i) = \\ &= P_q(t_i) \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\left[\frac{z-g(\theta_q, t)}{2\sigma^2}\right]^2} dz, i = 1, 2, \dots, N_i \end{aligned} \quad (17)$$

因此,安全域的 PDF 可通过 PDIE 平滑形式求解:

$$\hat{P}_{z,s}(z, t) = \sum_{q=1}^N \left\{ \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\left[\frac{z-g(\theta_q, t)}{2\sigma^2}\right]^2} P_q(t) \right\} \quad (18)$$

结合直接概率积分方法,便可得到动力结构的时变可靠度:

$$P_s(t) = Pr[Z > 0] = \int_0^{\infty} P_{z,s}(z,t) dz = \sum_{j=1}^{n'} \hat{P}_{z,s}(z,t) \Delta z \quad (19)$$

式中:  $Z$  为性能函数,  $Z = Y - \bar{Y}$ ,  $\bar{Y}$  为阈值。

### 3 高桩码头随机动力分析和可靠度分析

#### 3.1 工程概况及数值模型建立

图 4 为某实际高桩码头的码头断面图, 桩身编号从近海侧开始分别为 A1、A2、B、C、D、E、F、G、H1、H2、I 和 J, 土层从上至下依次为淤泥质粉质黏土、黏土和粉质黏土, 每根桩的倾斜度如图 4 所示。选择高桩码头某个分段的典型断面为研究对象, 该断面最大高程为 5.2 m, 码头前沿设计泥面高程为 -17.5 m。码头面板宽度为 55.8 m。桩台下部有桩基 12 根, 采用  $\phi 1200$  mm 预应力混凝土组合管桩, 每根桩基长约 76.0 m。

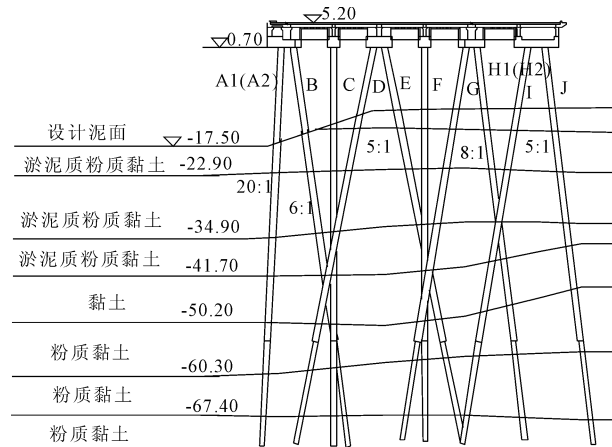


图 4 码头断面图

本文中的有限元模型的土体参数按照实际工程地质勘察资料确定。码头结构采用 C30 混凝土, 依据《水运工程混凝土结构设计规范》<sup>[24]</sup> (JTS 151—2011) 取值。根据土体压缩模量估计出土体的弹性模量<sup>[25-27]</sup>:

$$E = K \times E_s \quad (21)$$

$$K = \frac{\sqrt{(c + 2\rho\sqrt{h}\tan\varphi)/1000}}{\mu^3} \quad (22)$$

式中:  $E$  为土体的弹性模量;  $K$  为修正系数;  $E_s$  为土体的压缩模量;  $c$  为土的黏聚力;  $\rho$  为对应土的密度;  $\varphi$  为土的内摩擦角;  $h$  为土的埋深;  $\mu$  为土的泊松比。

模型主要包括上部面板、桩基和下部土体三部分。上部结构中面板采用板单元模拟, 桩基采用桩

单元模拟, 土体采用实体单元。结构采用线弹性本构模型, 土体采用 Mohr-Coulomb 模型, 材料参数如表 1 所示。

表 1 材料参数

名称	密度 $\rho$ /( $g \cdot cm^{-3}$ )	弹性模 量 $E/MPa$	泊松 比 $\mu$	黏聚力 $c/kPa$	内摩擦 角 $\varphi/(^\circ)$
桩	2.50	30000	0.25	—	—
承台	2.50	30000	0.30	—	—
淤泥	1.72	12.5	0.30	12	7.6
淤泥质 粉质黏土	1.78	18.0	0.40	14	8.6
黏土	1.84	18.6	0.40	24	11.5
粉质黏土	1.76	26.0	0.40	14	11.0
基岩	2.00	30000	0.25	—	—

码头分段设计长度为 84 m, 各个斜桩斜度分别为 20:1、6:1、5:1 和 8:1, 扭角为 45°, 考虑到第 2 泊位各排桩基布置情况基本一致, 故选取中部某一排码头结构段来进行数值模拟建模, 参考实际勘测资料, 将模型土体材料分区如图 5 所示: 土层结构从上至下依次为淤泥土、淤泥质粉质黏土、黏土、粉质黏土和基岩。模型尺寸底部宽度取 250 m, 高度取 90 m。在该模型中采用的直径为 1.2 m 的预应力混凝土组合管桩, 桩长度约为 76 m, 土体计算宽度取为 12 m。土体采用位移边界条件为底部方向为固定约束, 顶部自由, 其余方向为法向固定约束。

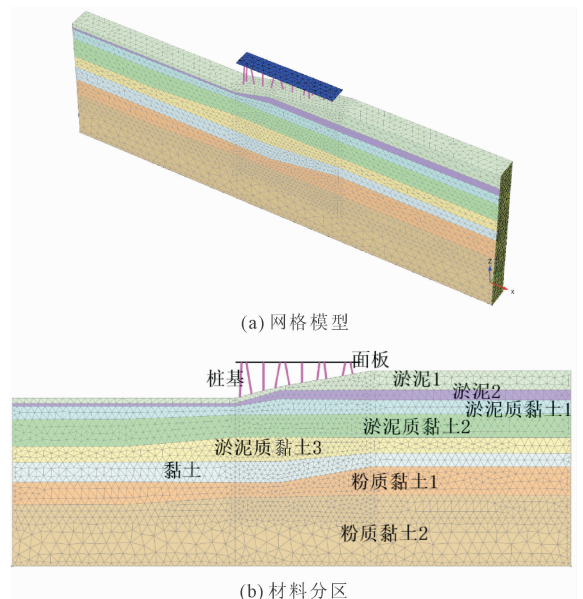


图 5 有限元模型

本文采用 Deodatis<sup>[28]</sup> 的 Clough-Penzien 改进谱

描述非平稳地震动过程,采用刘章军等<sup>[29-30]</sup>提出的非平稳过程的谱表示模拟方法生成非平稳随机地震动:

$$f(t) = \sum_{k=1}^N \sqrt{2S_{f_0}(t, \omega) \Delta\omega} [\cos(\omega_k t) X_k + \sin(\omega_k t) Y_k] \quad (23)$$

式中: $S_{f_0}(t, \omega)$ 为谱密度函数; $\Delta\omega = (\omega_u - \omega_l)$ 为频率增量; $\omega_k = \omega_l + k(\omega_u - \omega_l)/N$ 为离散角频率; $\omega_u$ 为截止频率上限; $\omega_l$ 为截止频率下限; $N$ 为频率离散点数; $X_k, Y_k$ 为满足特定标准条件的正交随机变量。

依据华罗庚的数论选点法<sup>[31]</sup>,生成了144个地震动样本,代表性样本的时程曲线如图6所示,平均反应谱及均值、标准差与规范谱的比较如图7所示。

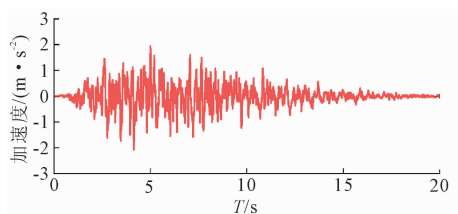


图6 地震动加速度时程样本曲线

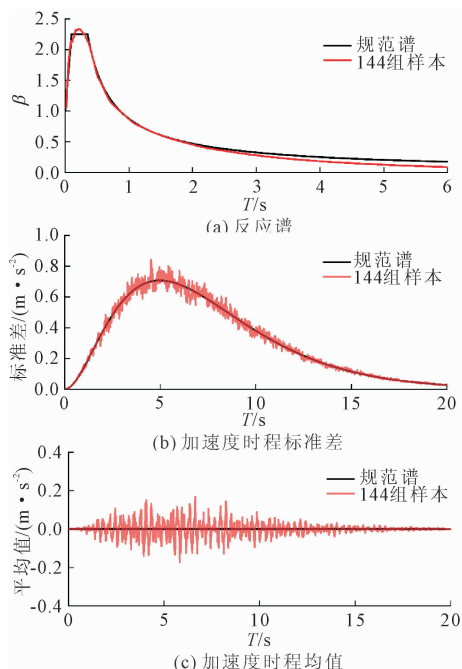


图7 生成的随机地震动样本与目标比较

### 3.2 计算结果与分析

图8—图10展示了在0.1g峰值加速度的随机地震影响下,高桩码头面板水平位移概率密度分布随运行年限变化的情况。分析表明,随着使用年限延长,概率密度函数峰值有所下降,其等值线宽度增

加,反映出结构性能的逐渐退化。这一变化导致在地震作用下,码头面板位移的幅度变大,离散程度加剧。

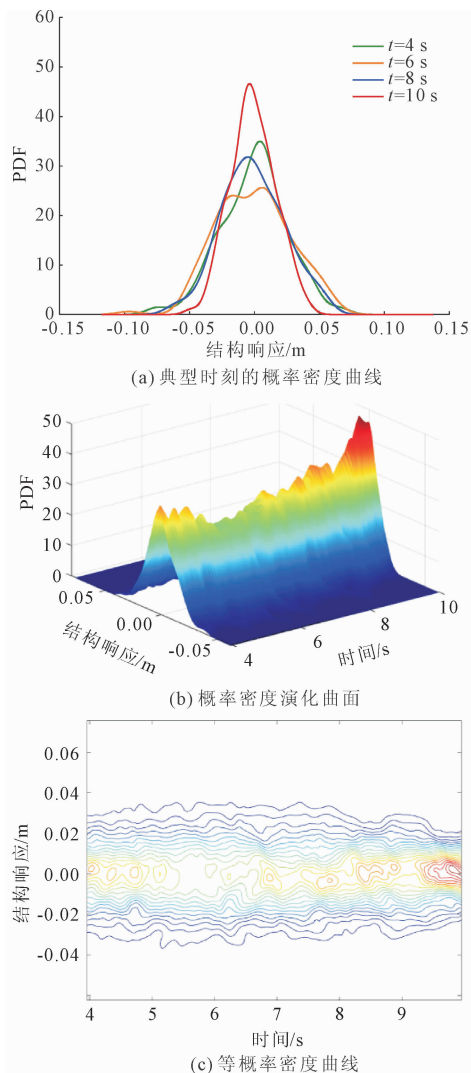


图8 运行第1年结构水平位移的地震响应概率信息

图11和图12展示了在0.1g峰值加速度的随机地震影响下,高桩码头面板水平位移的累积分布函数(CDF)和可靠度随运行年限变化的情况。从CDF曲线可以观察到,随着使用年限增加,运行20年后和运行第一年的累积分布函数曲线基本重合,说明20年内结构的混凝土性能退化尚不明显,而运行50年后曲线逐渐向两边延伸,这表明结构钢筋混凝土的性能退化逐渐加快,使得面板水平位移的不断增大,进而对结构的安全性产生显著影响。

根据多年的试验和监测经验,对于沿海高桩墩结构,最大水平位移多为0.03 m~0.06 m<sup>[32]</sup>。在考虑混凝土性能退化和0.1g峰值加速度的地震动共同作用下,以面板水平位移0.04 m为阈值,高桩码

头运行 1 年、20 年和 50 年后的面板水平位移的动力可靠度在 10 s 时分别约为 93%、91% 和 76%。而在水平位移 0.03 m 为阈值时,同一时间点的动力可靠度分别降至约 67%、62% 和 41%。

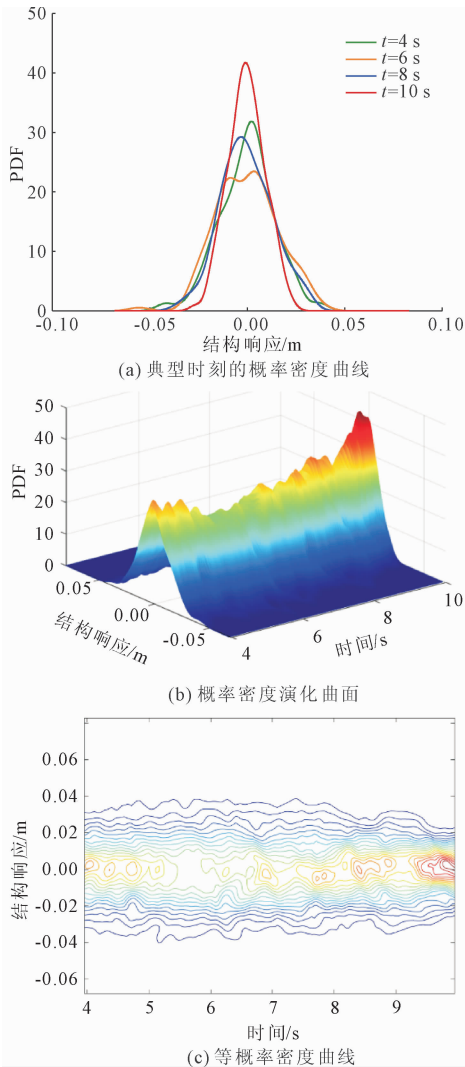


图 9 运行第 20 年结构水平位移的地震响应概率信息

## 4 结 论

本文通过分析钢筋混凝土结构随使用年限增长的退化情况,并以高桩码头上部结构面板的水平位移作为评估指标,综合考虑地震随机性和混凝土耐久性之间的相关性,并结合直接概率积分法对高桩码头进行随机动力分析和时变可靠度分析,得出以下结论:

(1) 在综合考虑混凝土耐久性退化和地震随机性作用下,结合直接概率积分法,获得不同运行年限下高桩码头结构在地震激励下的任意时刻的响应概率信息。

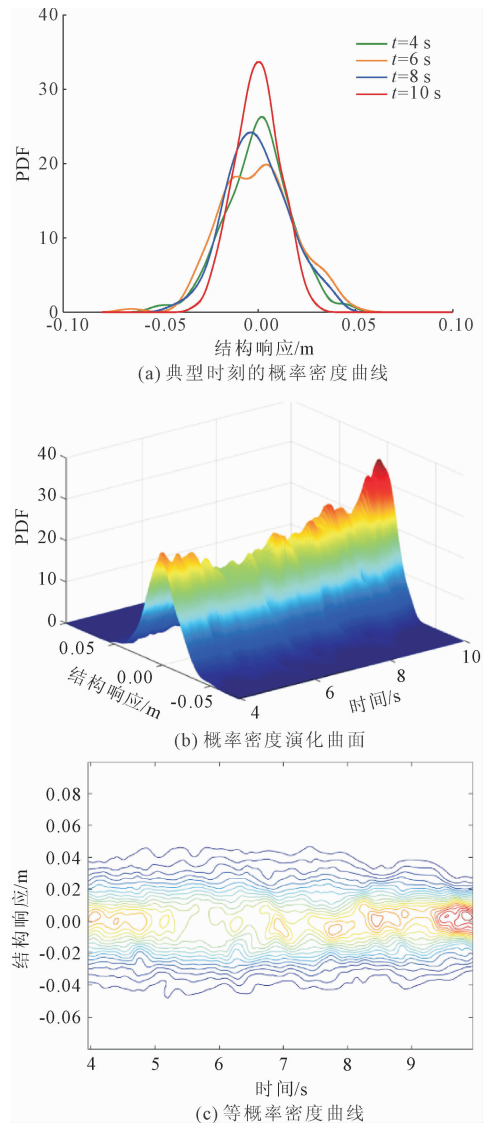


图 10 运行第 50 年结构水平位移的地震响应概率信息

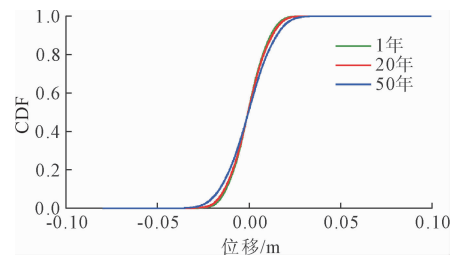


图 11 不同运行年限下结构的水平位移累积分布函数曲线

(2) 随着使用年限延长,概率密度函数峰值有所下降,等值线宽度增加,码头面板位移的幅度变大,分布也更加分散,反映出结构性能的逐渐退化。

(3) 在考虑混凝土性能退化和  $0.1g$  峰值加速度的地震动共同作用下,选定阈值,高桩码头面板水平位移的动力可靠度随运行时间增加逐渐下降,运

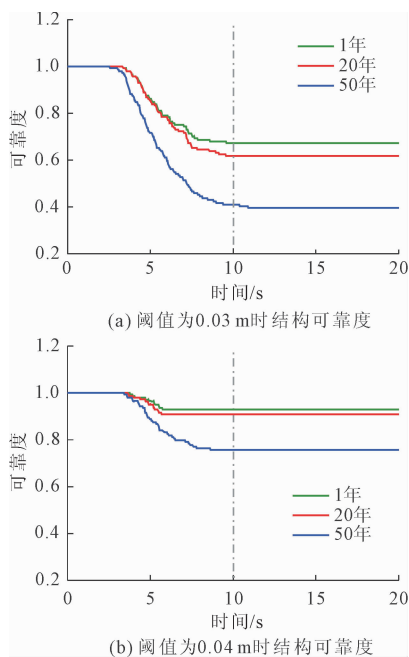


图12 不同运行年限下结构的水平位移可靠度曲线

行50年时可靠度出现大幅下降,反映出钢筋混凝土的性能退化逐渐加快。

#### 参考文献:

[1] 牛荻涛,卢梅,王庆霖. 锈蚀钢筋混凝土梁正截面受弯承载力计算方法研究[J]. 建筑结构,2002,32(10):14-17.

[2] 李镜培,李林,陈浩华,等. 腐蚀环境中混凝土桩基耐久性研究进展[J]. 哈尔滨工业大学学报,2017,49(12):1-15.

[3] 孙艺. 海洋环境下高桩码头耐久性分析方法研究[D]. 天津:天津大学,2006.

[4] 刘学勇,杨国平. 港口工程钢筋混凝土结构性能退化的影响因素[J]. 中国港湾建设,2015,35(6):41-45.

[5] 杨国平,贡金鑫,吴锋,等. 港口工程钢筋混凝土结构性能退化模型研究[J]. 水运工程,2015(2):60-65.

[6] Gao Yanhong, Zhang Junzhi, Zhang Shan, et al. Probability distribution of convection zone depth of chloride in concrete in a marine tidal environment[J]. Construction and Building Materials, 2017,140:485-495.

[7] Chen Huapeng, Nepal J. Stochastic modelling and lifecycle performance assessment of bond strength of corroded reinforcement in concrete [J]. Structural Engineering and Mechanics, 2015,54(2):319-336.

[8] 李杰,陈建兵. 随机结构动力反应分析的概率密度演化方法[J]. 力学学报,2003,35(4):437-442.

[9] 陈建兵,李杰. 基于概率密度演化方法的随机结构可靠度分析[J]. 计算力学学报,2004,21(3):285-290.

[10] Chen Guohai, Yang Dixiong. A unified analysis framework of static and dynamic structural reliabilities based on direct probability integral method [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021,158:107783.

[11] Chen Guohai, Yang Dixiong. Direct probability integral method for stochastic response analysis of static and dynamic structural systems[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2019,357:112612.

[12] 水运工程水工建筑物检测与评估技术规范:JTS 304—2019[S]. 北京:人民交通出版社,2019.

[13] Al-Sulaimani G J, Kaleemullah M, Basunbul I A, et al. Influence of corrosion and cracking on bond behavior and strength of reinforced concrete members [J]. ACI Structural Journal, 1990,87(2):220-231.

[14] 何世钦. 氯离子环境下钢筋混凝土构件耐久性性能试验研究[D]. 大连:大连理工大学,2004.

[15] 沈德建,吴胜兴. 海水浪溅下混凝土中锈蚀钢筋性能试验研究及仿真分析[J]. 工业建筑,2005,35(3):58-62.

[16] 牛荻涛. 海洋环境下混凝土强度的经时变化模型[J]. 西安建筑科技大学学报,1995,27(1):49-52.

[17] 吴锋. 港口工程高桩码头结构性能退化研究[D]. 上海:上海交通大学,2015.

[18] 刘迎. 码头结构刚度性能退化研究[J]. 中国水运,2015,15(9):278-280.

[19] Shibata A, Sozen M A. The substitute structure method for seismic design in reinforced concrete[J]. Journal of Structure Division, ASCE, 1976,102(1):1-18.

[20] 李盼盼. 高桩码头结构性能退化状态下的整体安全性研究[D]. 南京:东南大学,2020.

[21] Falsone G, Settineri D. Explicit solutions for the response probability density function of linear systems subjected to random static loads [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2013,33:86-94.

[22] Falsone G, Settineri D. Explicit solutions for the response probability density function of nonlinear transformations of static random inputs[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2013,33:79-85.

[23] Falsone G, Settineri D. On the application of the probability transformation method for the analysis of discretized structures with uncertain properties[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2014,35:44-51.

[24] 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.

[25] 胡周洲. 基于PLAXIS 3D的低桩承台码头的数值分析[J]. 绿色科技,2022,24(8):252-255.

由图8可知,当初期衬砌渗透系数较高时,地下水更容易通过衬砌材料渗透到隧洞内部,从而产生较大的渗流量。相反,当初期衬砌渗透系数逐渐减小时,地下水通过衬砌的渗透通道逐渐变窄,渗透难度增加,因此衬砌的渗流量也会逐渐降低。当岩体与初期衬砌渗透系数比值  $n_2$  达到 1 000 时,此时渗流量为  $0.39 \text{ m}^3/\text{d}$ ,降低约 24%。相较于灌浆层,初期衬砌的厚度通常较小,这意味着初期衬砌的防水性能相对较弱,其渗透系数对渗流量的影响也相对较小。这是因为较薄的衬砌层即使渗透系数有所降低,其阻隔地下水的功能也相对有限。相比之下,灌浆层通常具有较大的厚度和更好的防水性能,因此其渗透系数的变化对渗流量的影响更为显著。

## 4 结 论

(1) 随着灌浆层厚度增大或灌浆层和初衬层渗透系数降低,作用于二次衬砌的外水压力减小;作用于初衬、二衬的外水压力随二衬渗透系数的降低而逐步增大。

(2) 衬砌渗流量随着灌浆层厚度增加或初衬渗透系数的减少而减少。相较初期衬砌,固结灌浆对衬砌渗流量的调控更显著。

(3) 灌浆层厚度增加到一定程度后,衬砌外水压力和渗流量的降幅会趋于平缓,灌浆层厚度的无限增加或灌浆层渗透系数的无限降低并不会使渗流量降为零,因此工程中为考虑建设成本及工程安全,在综合考虑灌浆工艺及水灰比等参数的基础上,应合理选取灌浆层厚度和渗透系数。

## 参考文献:

- [1] 侯新文,李常锁,郑婷婷,等. 基于围岩及灌浆圈非均质性的外水压力计算[J]. 煤炭学报,2015,40(3):534-540.
- [2] 谢小帅,谢兴华,王小东,等. 隔水层对深埋隧洞衬砌外水压力的影响研究[J]. 岩土工程学报,2020,42(S2):146-150.
- [3] 高 鑫. 高外水压力下水工隧洞设计理念的初步探讨[J]. 珠江水运,2020(23):19-20.
- [4] 黄 威,孙 云,张建平,等. 深埋隧洞高外水压力研究进展[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2023,45(5):1-11.
- [5] 谢小帅. 珠江三角洲水资源配置工程深埋引水隧洞衬砌外水压力分析[J]. 广东水利水电,2023(4):17-20.
- [6] 朱成伟,应宏伟,龚晓南. 任意埋深水下隧道渗流场解析[J]. 岩土工程学报,2017,39(11):1984-1991.
- [7] 王克忠,倪绍虎,吴 慧. 深部隧洞裂隙围岩渗透特性及衬砌外水压力变化规律[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(1):168-176.
- [8] 肖欣宏,王 静,谢小帅,等. 复杂岩溶地区引水隧洞衬砌外水压力研究[J]. 水利水运工程学报,2018(5):82-88.
- [9] 于 丽,方 霖,董宇苍,等. 基于围岩渗透影响范围的隧道外水压力计算方法模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(10):2288-2298.
- [10] 杨赐金,崔 忠,崔 炜,等. 水工隧洞的外水压力计算和控制[J]. 水利规划与设计,2022(7):59-61,118.
- [11] 张治国,汪嘉程,赵其华,等. 富水山岭地区邻近补水断层隧道结构上的水头分布解析求解[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(S2):3378-3394.
- [12] 杜雷功. 高外水压力下深埋隧洞衬砌与围岩联合承载设计研究[J]. 水利水电技术,2019,50(8):106-109.

(上接第 105 页)

- [26] 李圃林. 土体弹性模量在基坑工程有限元计算中的应用研究[J]. 绿色科技,2014(10):237-239.
- [27] 李荣庆,侯永为. 考虑泥沙淤积影响的高桩码头三维有限元分析[J]. 水运工程,2016(10):95-99.
- [28] Deodatis G. Non-stationary stochastic vector processes; seismic ground motion applications [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 1996,11(3):149-167.
- [29] 刘章军,曾 波,吴林强. 非平稳地震动过程模拟的谱表示-随机函数方法[J]. 振动工程学报,2015,28(3):411-417.
- [30] 李 杰,刘章军. 基于标准正交基的随机过程展开法[J]. 同济大学学报(自然科学版),2006,34(10):1279-1283.
- [31] Hua Lookeng, Wang Yuan. Applications of number theory to numerical analysis[M]. Springer Science & Business Media, 2012.
- [32] Zhu Pengrui, Liu Hongbiao, Sun Xiping. Research on the construction of health monitoring system and evaluation technology of coastal high pile wharf[J]. Journal of Civil Engineering and Urban Planning, 2023,5(8):29-39.