

# 基于 Shiny 框架的特定场地地下基桩承载可靠性分析平台

吴兴征<sup>1</sup>

(1. 河北大学建筑工程学院, 保定 071002)

**摘要:** 受到土体空间变异性的影响, 同一场地的多根基桩在静载作用下, 其荷载-位移曲线具有显著差异性。本文采用两参数幂函数对各条曲线进行回归, 得到表征场地特性的参数集, 并利用正态 Copula 模型建立其双变量联合分布, 进而计算基桩承载的可靠指标。若将恒载也视为随机变量, 可构建三维联合概率密度构型进行可靠性评估。基于 R 语言 Shiny 包, 开发网页版基桩不确定性可视化分析平台, 实现从数据导入、曲线拟合到可靠性计算的全流程支持。以处理青岛航站楼工程八根大直径灌注桩的静载试验成果为例, 验证平台的有效性与实用性。

**关键词:** Shiny; 可靠指标; 基桩; 荷载-位移曲线; 可视化平台

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2025)11-064-01

**作者简介:** 吴兴征(1971-), 男, 副教授, 博士, 主要从事岩土、防洪与海岸工程等方面的科研和教学。E-mail: xingzhengwu@163.com。

本文已发表 请引用 吴兴征. 基于 Shiny 框架的特定场地地下基桩承载可靠性分析平台. 桩基工程技术进展. 中国建筑工业出版社, 2025 第十六届全国桩基工程学术会议, 2025, 70-75

## Site-specific reliability index of bearing capacity for an individual pile and its numerical implementation using R shiny

Wu Xingzheng<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Hebei University, Baoding 071002, China)

**Abstract:** Due to the spatial variability of soil properties, the load-settlement behavior of piles at the same site can differ significantly. This study applies a two-parameter power law function to fit each load-displacement curve, thereby extracting a set of site-specific regression parameters. A bivariate joint distribution of these parameters is established using a normal copula model, from which the reliability index is computed. Furthermore, by treating dead load as a random variable, a three-dimensional iso-probability density configuration is constructed to support reliability evaluation. A web-based visualization and analysis platform is developed using the Shiny package in R, enabling an integrated workflow from data input to reliability calculation. A case study involving eight large-diameter cast-in-place piles in Qingdao demonstrates the effectiveness and practicality of the platform.

**Key words:** Shiny; reliability index; pile; load-displacement curve; visualization platform

## 0 引言

垂直静载试验是评价基桩承载响应的最有效手段之一。受土体空间变异性的影响, 同一场地或建筑物下多根基桩的荷载-位移曲线存在较大差异<sup>[1]</sup>。现有基桩检测规范规定单体建筑物抽检至少三根或总桩数的百分之一<sup>[2]</sup>。若将特定场地地下多条荷载-位移曲线的回归参数集视作随机变量, 进而采用可靠性方法求解基桩承载的可靠指标。然而, 当前桩基检测仍以确定性合格判定为主, 尚缺乏对检测数据回归特征的系统建模与不确定性分析机制, 这不仅限制了检测信息的充分利用, 也导致资源的浪费。多数学者的研究针对区域内多个场地地下测试数据<sup>[3]</sup>, 而作者一直致力于针对场地水平内的测试成果进行分析<sup>[1,4-5]</sup>, 以便更好地支持后续单体建筑物的可靠性设计。

传统的可靠性分析方法, 如一阶可靠性算法 (FORM) 和 Monte Carlo (蒙特卡洛) 模拟法, 由于它们实施复杂且缺乏实用工具, 推广应用受到限制。例如, FORM 要求将极限状态函数从原始物理空间转换至独立标准正态空间<sup>[6]</sup>, 且可靠指标需在标准化空间内求解, 这一过程降低了所求问题的直观解译性。Monte Carlo 法则需要海量计算迭代, 当结构失效概率极低时尤为显著。这些技术壁垒使得桩基可靠性分析在工程实践中难以推广应用, 进而导致基于可靠性的结构设计在实际工程中仍不多见。

为克服现有可靠性分析方法的局限性, 吴兴征<sup>[7]</sup>

提出几何可靠性法, 它重点分析随机变量多维联合分布的概率密度等值构型, 从而更直观地呈现随机变量的内在不确定性。特别地, 可靠指标直接在物理空间求解, 使得随机变量的物理意义透明化。该方法较好地实现了随机环境变量与结构响应之间的解耦。但受限于实用工具的缺失, 目前针对特定场地的应用研究仍较为有限<sup>[8]</sup>。为弥补这一不足, 针对特定场地与特定建筑物下的基桩可靠性分析, 即大样本集与极少检测数据的情况作者开发了界面友好的单机版软件系统<sup>[9]</sup>供工程技术人员使用。

作为数据科学与统计计算的重要平台, R 语言及其扩展包在多领域工程计算建模中的优势已获学术界广泛认可。尤其是 R 语言 Shiny 包<sup>[10]</sup>多用于开发 Web 可视化应用程序, 实现在手机、平板、电脑等任何操作系统下运行, 无疑将推动可靠性方法的普及应用。

本文介绍作者研发的几个用户友好的基桩 Web 应用程序包<sup>[11]</sup>。这些包的发布将显著提升分析结果的可重复性, 使工程技术人员能够高效开展桩基可靠性评估。这里结合青岛某航站楼工程的八根基桩检测数据<sup>[12]</sup>, 给出可靠性分析成果, 并对其它更多场地的推广应用进行说明。

## 1 几何可靠性算法原理概要

几何可靠性方法 (Geometric Reliability Method, GRM) 是一种基于物理参数空间、以构建多维联合概率密度等值构型为核心的结构可靠性分析方法<sup>[1,7]</sup>。相较于传统的一阶可靠性方法 (FORM) 与 Monte Carlo 模拟法, GRM 无需变量空间转换或大量随机采样, 因而更为高效且直观。适用于评估具有非线性结构响应和参数不确定性的问题。这里结合基桩荷载-沉降性状的可靠性求解给出其简要原理。

### 1.1 极限状态函数构建

针对基桩正常使用极限状态 (Serviceability Limit State), 以沉降控制为目标, 构建如下极限状态函数  $g$  :

$$g = s_{\text{all}} - s(Q_{\text{app}}) \quad (1)$$

式中:  $s_{\text{all}}$  为允许沉降值 (如 40 mm);  $s(Q_{\text{app}})$  为施加荷载  $Q_{\text{app}}$  下的沉降量。

若将沉降控制问题等效为荷载控制问题, 可进一步表示为如下形式:

$$g = Q_{\text{all}}(s_{\text{all}}) - Q_{\text{app}} \quad (2)$$

### 1.2 随机变量引入

若采用幂函数对每条荷载-沉降曲线进行拟合:

$$Q = p_1 s^{p_2} \quad (3)$$

式中,  $p_1$  和  $p_2$  为回归参数。  $p_1$  表征基桩刚度或承载能力而  $p_2$  描述曲线的非线性形状。对于同一场地的多

条荷载-沉降曲线, 其拟合所得的回归参数集可视为反映基桩响应变异性的随机变量, 用以描述因土体空间变异性导致的基桩承载差异。

因而, 允许承载力写为:

$$Q_{\text{all}} = p_1 s_{\text{all}}^{p_2} \quad (4)$$

### 1.3 几何可靠指标定义

几何可靠指标  $\beta_G$  被定义为: 在超球空间中, 从原点出发逐步扩展的等概率密度超球面首次与极限状态边界相切时, 其对应的最小半径值。与传统 FORM 方法不同, 几何可靠性方法强调在物理参数空间中直接计算该指标, 从而使可靠性评估过程更具物理直观性<sup>[1]</sup>。

### 1.4 Nataf 逆变换原理

为生成物理空间中的联合概率密度等值构型, 可采用 Nataf 逆变换方法 (或更一般的 Copula 函数方法)<sup>[13]</sup>。以二维情形为例, 首先在圆形空间中构造圆轨迹:

$$\begin{cases} u_1 = \beta_G \cos(\theta) \\ u_2 = \beta_G \sin(\theta) \end{cases} \quad (5)$$

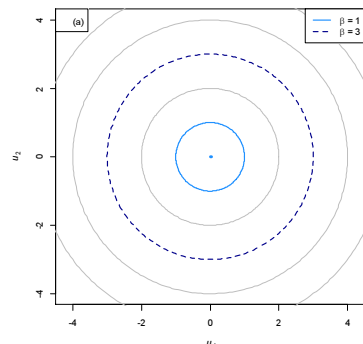
式中  $\beta_G$  为半径, 取值一般在 0 至 20 之间;  $\theta$  为倾角, 范围为 0 至  $2\pi$ 。实际工程中, 合理的  $\beta_G$  值通常介于 2 至 5 之间。

采用逆 Nataf 变换映射至物理空间 ( $p_1, p_2$ )<sup>[1]</sup>:

$$\begin{cases} p_1 = F_{p_1}^{-1}(\Phi(u_1)) \\ p_2 = F_{p_2}^{-1}(\Phi(\rho u_1 + \sqrt{1-\rho^2} u_2)) \end{cases} \quad (6)$$

式中  $F(\cdot)$  为物理空间中随机变量  $p_i$  的边缘累积分布函数,  $F^{-1}(\cdot)$  为其反函数;  $\Phi$  为标准正态分布函数;  $\rho$  为随机变量间的相关系数。

通过式(6), 可构建物理空间中联合概率密度的等值构型。若变量服从联合正态分布, 则该构型呈椭圆形。在图 1 中, 分别展示圆形空间中的圆轨迹 (图 1a) 与其在物理空间中的映射结果 (图 1b), 清晰展现了变量间相关性所引起的概率密度等值线变化特征。图 1a 中的半径  $\beta_G$  与图 1b 中的可靠指标是一一对应的。



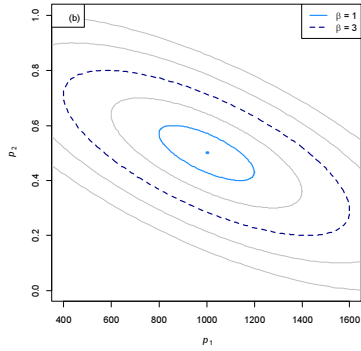


图 1 不同可靠指标下 (a) 圆形空间与 (b) 物理空间中的二维等值线

Fig. 1 Two-dimensional contours corresponding to various reliability indices in (a) circle and (b) physical spaces

### 1.5 临界等值构型搜索

由图 1b 可见，随着可靠指标  $\beta$  的增加，概率密度等值构型逐步拓展，当且仅当构型上某一点满足式 (1) 的极限状态函数，则此时的构型被定义为临界等值构型，此时的可靠指标即为代求的实际可靠指标。

为加快求解过程，可通过优化算法迭代搜索满足极限状态条件  $g = 0$  的等值构型点，获得临界概率密度等值轮廓，并给出相应的设计点。多种优化算法可用于加快这一收敛过程，比如，扩展系数法 (Extended Coefficient Method, ECM)、区间二分法 (Interval Bisection Method)、或顺序二次规划法 (Sequential Quadratic Programming, SQP)。在三维或四维空间中 (例如将恒载  $Q_d$  与活载  $Q_l$  作为独立变量引入)，可构建更高维度的联合概率等值构型。

以下以区间二分法为例，说明可靠指标的求解过程。该方法将可靠指标  $\beta$  的求解问题转化为一个带约束的优化问题：以  $\beta$  为目标函数，最小化其取值，约束条件为极限状态函数  $g(\beta) = 0$  成立。求解的目标是确定使该约束恰好成立的最小可靠指标。

该方法首先设定可靠指标的初始区间为  $[0, 20]$ ，并不断对该区间进行二分。设当前迭代区间为  $[a, b]$ ，中点为  $\beta_{mid} = (a + b) / 2$ ，在该点处计算  $g(\beta_{mid})$ ：若  $g(\beta_{mid}) > 0$ ，说明根位于左侧区间  $[a, \beta_{mid}]$ ，后续迭代继续在该区间进行；若  $g(\beta_{mid}) < 0$ ，说明根位于右侧区间  $[\beta_{mid}, b]$ ，迭代区间更新为该部分。这一过程持续进行，直至区间长度满足误差容限条件： $|b - a| < \varepsilon$ 。其中， $\varepsilon$  是用户设定的收敛精度阈值。该算法具有较快的收敛速度。当误差阈值设定为  $\varepsilon = 0.001$  时，极限状态函数的调用次数通常少于 20 次。

在上述优化算法实施过程中，给定了两类可靠指

标：其一是任意指定的可靠指标 (可增加或减小)，它与球空间下的半径直接关联，与基桩的极限状态方程没有任何关系；其二为求得的实际可靠指标，它由基桩的极限状态方程与临界概率密度等值构型联合确定。

### 1.6 几何可靠性算法优势

因上述求解可靠指标的算法在随机变量的原始物理空间中进行，且求解重点强调联合概率密度等值几何构型的演化，因此该算法亦被称为几何可靠性法<sup>[7]</sup>。

该方法在变量处理空间、可解释性与模型灵活性方面相较于传统方法具有显著优势。首先，该方法基于等值构型可靠性算法 (Contour-Based Reliability Method, CBRM)，在物理空间 (而非标准正态空间) 中构建环境等值构型 (Environmental Contour)，并通过半径搜索与极限状态函数交点的几何关系定义可靠指标。该方法不仅避免了 FORM 中因变量变换而导致的物理意义丢失问题，还增强了模型的可解释性。其次，该方法集成了多种优化搜索算法求解器，允许用户根据不同的精度与效率需求进行选择，从而提升可靠指标 ( $\beta_G$  值) 估算的效率与鲁棒性。

表 1 比较了几种典型可靠性分析方法在多个关键维度下的性能差异。

## 2 计算实施模块

为推广和应用前述几何可靠性算法，软件系统需支持桩基工程中涉及的多组单桩静载试验数据，并提供高效、交互性强的可靠性分析工具。系统包括数据预处理、曲线拟合、参数估计与可靠性分析等模块，适用于基桩承载力不确定性的评估以及参数敏感性分析。

### 2.1 Shiny 网页开发工具

Shiny 是 R 语言的一个 Web 应用开发框架<sup>[10]</sup>，通过其构建的程序可免费托管于 Shinyapps.io 平台，并可分配访问网址。用户可借助 Shiny 基于 R 语言开发界面简洁、功能强大的网页应用，实现分析功能与数据处理的无缝集成。针对单根曲线输入、多根曲线组集、临界构型与可靠指标求解、多场地地图展示等，本文开发基桩可靠性分析平台。

表 2 给出各个模块的访问链接，它们支持跨平台运行，并具备良好的可复现性。用户可按模块顺序逐步完成计算流程，也可独立使用任意模块。其中，前两个模块实施检测数据的预处理；而后两个模块均支持场地水平下的可靠性分析。模块 3 支持任意边缘分布函数与多维联合分布建模，适用于高维复杂建模场景；而模块 4 则聚焦于二维正态联合分布及其在全球

数据库中的应用分析。

## 2.2 模块 1：单条荷载-位移曲线输入

该模块允许用户上传或手动输入 TXT 或 CSV 格式的静载试验数据，其输入界面如图 2 所示。系统将自动识别加载 ( $Q$ ) 与沉降 ( $s$ ) 数据，并展示原始数据表格供用户核对。同时自动绘制荷载-沉降 ( $Q-s$ ) 曲线，以便直观检查数据质量。

表 1 各种典型可靠性分析方法的对比

Table 1 Comparison of typical reliability analysis methods

| 项目    | 几何可靠性法     | FORM   | Monte Carlo |
|-------|------------|--------|-------------|
| 变量空间  | 物理空间（直观表达） | 标准正态空间 | 原始空间        |
| 模型假设  | 适用于非线性极限状态 | 线性近似   | 无需模型假设      |
| 样本量需求 | 中等         | 中等     | 极高          |
| 可视化支持 | 轮廓清晰可视     | 不支持    | 难以解释        |
| 工程解释性 | 极佳         | 较抽象    | 中等          |

表 2 计算模块及其网络链接

Table 2 Computational modulus and their web links

| 模块编号 | 模块功能        | 网址  |
|------|-------------|---|
| 1    | 单根曲线输入      | <a href="https://xingzhengwu.shinyapps.io/singleqs/">https://xingzhengwu.shinyapps.io/singleqs/</a>             |
| 2    | 多根曲线组集      | <a href="https://xingzhengwu.shinyapps.io/multipleqs/">https://xingzhengwu.shinyapps.io/multipleqs/</a>         |
| 3    | 临界构型与可靠指标求解 | <a href="https://xingzhengwu.shinyapps.io/PileBetaGR/">https://xingzhengwu.shinyapps.io/PileBetaGR/</a>         |
| 4    | 多场地地图展示     | <a href="https://xingzhengwu.shinyapps.io/PileBetaMapper/">https://xingzhengwu.shinyapps.io/PileBetaMapper/</a> |

Step 01 Single Load vs Settlement

图 2 单条荷载-位移曲线输入界面

Fig. 2 User interface for single load-displacement curve input

## 2.3 模块 2：多条荷载-位移曲线组集

系统支持用户一次性上传特定场地下多根基桩的静载试验数据，自动识别各桩号对应的荷载-沉降

( $Q-s$ ) 数据，并在交互式界面中进行可视化呈现 (见图 3)。平台具有一定的数据格式容错能力，可快速展示所有加载曲线，辅助用户识别并修正异常数据。

## Step 02 Load vs Settlement Curve with Mult

图 3 多条荷载-位移曲线的组集界面

Fig. 3 Interface for integration of multiple load-displacement curves

## 2.4 模块 3：场地水平下基桩可靠性分析

该模块实现幂函数回归曲线绘制并计算基桩承载可靠指标，亦简称为 PileBetaGR<sup>[11]</sup>。用户可为每个变量指定均值、标准差、分布类型（如正态、对数正态等），并设置随机变量间的相关系数，从而构建多维联合概率密度的等值构型。该交互式可靠性分析模块实现从数据回归分析、可靠性建模到可靠指标输出与图形绘制。系统采用幂函数回归模型（Power law model）对单桩荷载-沉降曲线进行非线性拟合，从而提取具有工程物理意义的两个参数：尺度因子  $p_1$  和曲线斜率  $p_2$ 。这些参数用于描述不同基桩在同一场地条件下的荷载响应特性，并作为后续可靠性分析的随机变量。

采用正态 Copula (Normal copula) 模型<sup>[14]</sup>构建多个回归参数之间的联合概率分布，尤其适用于边缘分布偏离正态分布、但变量之间仍具线性相关结构的情形。该建模方式结合了边缘分布的灵活建模能力（如对数正态、Weibull、Gamma 分布等）与高维依赖结构的清晰表达，为构造环境等值构型（Environmental contour）提供技术支撑。

该模块提供四个功能子模块<sup>[11]</sup>，分别对应不同用户需求与分析深度：Demo 子模块：提供公开数据集用于方法演示与学习；YouInput 子模块：允许用户上传自有数据集，进行特定场地下可靠指标分析，如图 4 所示；3D 与 4D 子模块：考虑恒载与活载的随机性，进行多维不确定性分析与复杂系统的可靠性分析，如图 5 所示。由于回归变量的边缘概率密度分布并非服从正态，这些图形给出的临界等值构型呈现非椭圆（圆）形状。

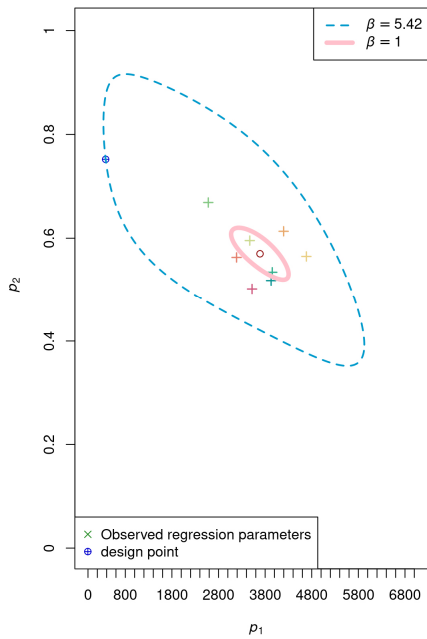


图 4 二维变量下临界联合概率密度等值构型

Fig. 4 Critical iso-probability density contour in the bivariate case

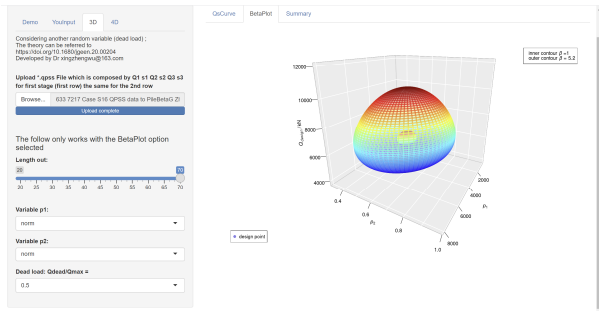


图 5 三维变量下临界联合概率密度等值构型

Fig. 5 Critical iso-probability density contour in the trivariate case

## 2.5 模块 4: 全球尺度下基桩可靠指标展示

该模块基于 Leaflet 包实现全球地图加载与显示 [15], 支持基桩检测场地的分布可视化, 故该子模块亦简称为 PileBetaMapper。可选多种曲线拟合方法 (如幂函数模型、双曲线法模型)。该模块以几何可靠性理论为基础, 融合地理信息系统与统计建模方法, 提供一种跨区域、多类型基桩荷载-沉降响应及其可靠指标的可视化分析与比较功能。

依托已建立的全球桩基静载试验数据库 (共计 1000 余根和近 50 个场地) [1], 选取每个场地的原则为其检测曲线均不少于 5 根。整合不同场地的典型荷载-沉降曲线及其拟合参数, 系统地构建基桩几何可靠指标 (Geometric Reliability Index,  $\beta_G$ ) 在全球范围内的空间分布图, 如图 6 所示。该模块采用地理标注

技术, 以交互式地图展示各测试场地的位置特征: 圆圈大小代表该场地已收录的试验数量; 圆圈颜色采用色温映射, 颜色由冷色调 (对应低  $\beta_G$  值) 渐变至暖色调 (对应高  $\beta_G$  值), 直观反映可靠指标的大小。这种基于地理编码的可视化方法, 有助于揭示可靠性空间分布特征, 支持跨地区对比分析与区域性建模。通过交互式数据可视化界面, PileBetaMapper 允许用户根据地理位置、桩型、 $\beta_G$  值或测试数量进行筛选与图层控制, 实现点击场地位置即可显示详细信息与计算实施。这便于工程技术人员对比同类型桩在不同地质条件下的响应差异。

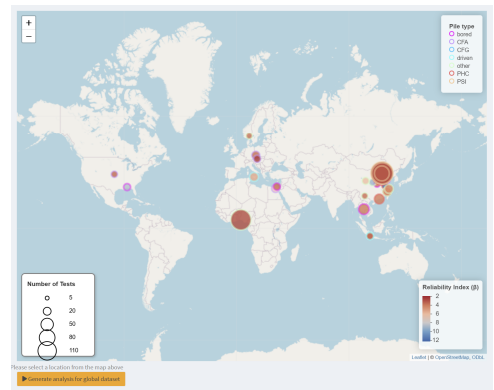


图 6 特定场地下可靠指标展示

Fig. 6 Map of site-specific reliability index

## 3 算例分析

青岛某机场航站楼地上 4 层、地下 1 层, 采用框架结构体系, 其基础形式为桩基础。为检测试验桩施工质量, 采用锚桩反力法进行了 8 根单桩静载试验, 其荷载-位移曲线如图 7 所示 [12]。施加于基桩上的荷载  $Q_{app}$  取定值, 分别为 6480kN (5 根桩) 和 5400kN (3 根桩), 均为静载检测最大施加荷载的一半, 且作为单桩承载力的特征值。

这些人工挖孔灌注桩桩径为 1.0m, 有效桩长范围为 9.8m 至 12.8m。场地土层为不均匀性泥岩, 桩端持力层为中风化泥质粉砂岩。各土层平均厚度及其侧摩阻和端摩阻参数见表 2 [12] 所列。

表 2 各层土体的层厚与摩阻力

Table 1 Depth and frictional resistance of soils in each layer

| 场地<br>地层 | 土层名称         | 层厚<br>(m) | 极限侧摩<br>阻 $q_s$<br>(kPa) | 极限端阻<br>$q_b$<br>(kPa) |
|----------|--------------|-----------|--------------------------|------------------------|
| 1        | 全风化泥<br>质粉砂岩 | 2.96      | 96                       | /                      |
| 2        | 强风化泥<br>质粉砂岩 | 3.81      | 245                      | /                      |
| 3        | 中风化泥<br>质粉砂岩 | 3.06      | 465                      | 2977                   |

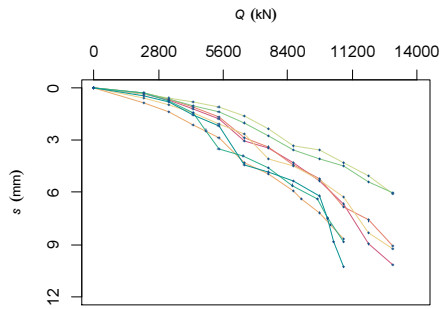


图 7 基桩的荷载-位移检测曲线

Fig. 7 Load-displacement curve of the piles

采用几何可靠性算法，依据前述具体步骤，可实现该场地相关指标的网页版计算<sup>[11]</sup>；同时亦可用基于静载试验的单机版软件 PileBetaG2.15<sup>[9]</sup>进行计算。这些工具均可展示基桩承载能力的整体评估结果，如平均安全系数及可靠指标。

表 3 列出 8 根基桩的幂函数回归系数  $p_1$ 、曲线斜率  $p_2$  及各桩的实际安全系数  $\tilde{F}_s (=Q_{all}(s_{all})/Q_{app})$ 。由此计算得到平均安全系数为 4.98。基于检测曲线的离散性，推算求出几何可靠指标为 4.83 (见图 8)。图中，内椭圆为单倍标准差椭圆，外椭圆为发散椭圆，左侧粗实线为极限状态线。

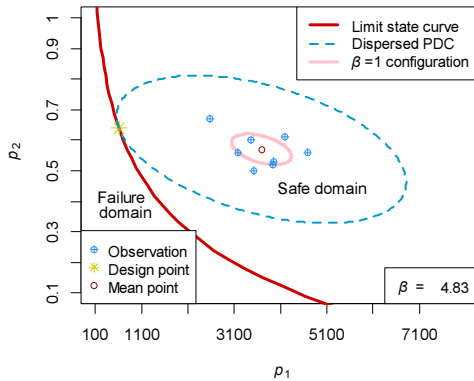


图 8 回归参数的单倍标准差椭圆和发散椭圆

Fig. 8 One standard deviation and dispersed ellipses of regression parameters

表 3 幂函数回归系数及各根桩的实际安全系数

Table 3 Regression parameters of the power law function and the factor of safety for each pile

| ID  | $p_1$   | $p_2$ | $\tilde{F}_s$ |
|-----|---------|-------|---------------|
| 1   | 3928.19 | 0.52  | 4.1           |
| 2   | 3953.14 | 0.53  | 4.38          |
| 3   | 2580.54 | 0.67  | 5.63          |
| 4   | 3470.78 | 0.6   | 4.82          |
| 5   | 4685.02 | 0.56  | 5.81          |
| 6   | 4196.77 | 0.61  | 6.23          |
| 7   | 3187.08 | 0.56  | 4.71          |
| 8   | 3519.6  | 0.5   | 4.15          |
| 均值  | 3690.14 | 0.57  | 4.98          |
| 标准差 | 647.39  | 0.05  | 0.81          |

经与全球数据库<sup>[1]</sup>中其它同类灌注桩场地的可靠指标对比分析发现，该场地可靠指标高出约 15.7%，可考虑适当调整桩长或桩径。

## 4 讨论

该软件平台采用 R 语言开发，如幂函数拟合采用 nlstools 包，边缘分布拟合采用 fitdistrplus 包，Pearson 相关系数由 cor 函数计算，区间二分法模型优化调用 NLRoot 包。尤其是作者研发的 PileBetaGR 包<sup>[11]</sup>中，给出与基桩可靠性分析相关的核心函数，如幂函数回归 ("PowerLawRegression")、二元概率密度等值构型 ("2dContour") 和临界构型及可靠指标求解 ("SolveBetaG2d")。

该平台为全面考虑基桩荷载响应特性，特别是多根桩体沉降差异性对可靠指标的影响，提供了有效的技术手段，这对完善现有桩基设计规范具有重要的实际意义。若重要建筑物采用基桩目标可靠指标为控制标准，这可有效避免因基础不均匀沉降引致上部结构开裂、高耸上部结构物倾斜等现象。应指出，尽管幂函数在多数情况下拟合良好，但其未必适用于所有类型的荷载-沉降曲线。静载试验成果可能受到现场荷载加载方式等因素影响，导致回归参数拟合存在系统或随机误差。

通过实时更新现场监测数据修正幂函数拟合参数，实现可靠指标的动态演化；该平台还可嵌入多源数据或传感监测数据，实现动态预测，并基于物联网+Shiny 平台，打造基桩施工—监测—评估一体化的数字孪生闭环体系；同时，基于大数据平台集成不同工程的可靠性谱系，能够建立跨区域的桩基设计图谱，为施工参数选择提供数据驱动的决策依据。

所引入的几何可靠指标从物理空间角度为结构可靠性提供了全新解译，与传统安全系数相比，它更具统计学意义，且为工程技术人员全面考虑多根基桩受载响应的差异性提供理论支撑。研究中采用正态 Copula 构建回归参数的联合分布，但尚未系统考虑土体空间变异性通过地层参数对回归参数传播的影响。

## 5 总结

本文以特定场地下基桩荷载-位移曲线数据为基础，围绕数据处理与可视化，给出基于 R 语言 Shiny 框架开发的基桩可靠性分析软件平台。主要结论如下：

(1) 该平台涵盖了单桩荷载-位移曲线输入、特定场地下多条曲线的组集、曲线拟合与基桩承载可靠指标计算，以及全球基桩大数据地图展示等功能，为特定场地下基桩可靠指标计算提供全新技术手段。

(2) 应用算例表明,该方法为基于小样本静载检测数据的特定场地基桩可靠性分析提供有效途径。可实现输入变量不确定性与基桩受载响应不确定性分析与评估。

(3) 桩基几何可靠指标的全球尺度空间可视化将进一步推动数据驱动的桩基设计可靠性理论在实际工程中的推广应用。

#### 参考文献:

- [1] Wu XZ, Liu H. Development of environmental contours from site-specific regression parameters of load-settlement curves for piles: the global database[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2023, **23**(9): 04023148-22.
- [2] 中国建筑科学研究院. JGJ 106—2014 建筑基桩检测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014. China Academy of Building Research. JGJ 106—2014 Technical code for testing of building pile foundations[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2014. (in Chinese))
- [3] Tang C, Phoon KK, Yuan J, Tao Y, Sun H. Variability in geotechnical performance predictions[J]. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 2025, **11**(1): 03124003.
- [4] Wu XZ, Xin JX. Geometric reliability analysis of composite foundations comprising cement-fly ash-gravel piles at site-specific scale[J]. *Journal of Testing and Evaluation*, 2021, **49**(4):2779–2799.
- [5] 吴兴征. 基于静载检测成果的基桩承载力几何可靠性分析[C]. 高文生编. 桩基工程技术进展 2021. 中国建筑工业出版社, 第十五届全国桩基工程学术会议, 2021, 284-289. (Wu XZ. Geometric reliability analysis of bearing capacity of an individual pile through static load tests[C]. in Gao, Wensheng (Ed.). *Advances in Pile Foundation Engineering Technology 2021*. China Architecture & Building Press, Proceedings of the 15th National Conference on Pile Foundation Engineering, 2021, pp. 284–289.) (in Chinese))
- [6] Low, B.K., Tang, W.H., 2007. Efficient spreadsheet algorithm for first-order reliability method. *J. Eng. Mech.* **133**(12), 1378–1387.
- [7] Wu XZ. Geometric reliability analysis applied to wave overtopping of sea defences[J]. *Ocean Engineering*, 2015, **109**:287–297.
- [8] 吴兴征, 王瑞凯, 辛军霞. 特定场地下土工构筑物的几何可靠性分析[J]. *岩土力学*, 2020, **41**(6):2070–2080. (Wu Xingzheng, Wang Ruikai, Xin Junxia. Geometric reliability analysis of geotechnical structures at a specific site[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, **41**(6):2070–2080. (in Chinese))
- [9] 吴兴征. 基桩静载数据处理与可靠性分析软件开发及应用[J]. *工程质量*, 2021, **39**(3):10–16. (Wu Xingzheng. Notes on a package for reliability analysis and data processing with the static load test of foundation piles[J]. *Construction Quality*, 2021, **39**(3):10–16. (in Chinese))
- [10] Sievert C. Interactive web-based data visualization with R, Plotly, and Shiny. New York, USA: Chapman & Hall/CRC the R series. 2020. <https://doi.org/10.1201/9780429447273>
- [11] Wu X.Z. PileBetaGR: An R-based integrative tool for predicting the geometric reliability index of piles using load-displacement curves[J]. *SoftwareX*, 2025, **30**:102123,1-7.
- [12] Zhao X, Yan N, Bai X, Sang S, Chen X, Zhang Y, Zhang M. Vertical compressive bearing performance and optimization design method of large-diameter manually-excavated rock-socketed cast-in-place piles[J]. *Scientific Reports*, 2023, **13**:14234.
- [13] Wu X.Z., Ma C.Z., Zhang J. Multivariate reliability method using the environment contour model based on C-vine copulas[J]. *Ocean Engineering*, 2024, **299**:117282-15.
- [14] Schoelzel C, Friederichs P. Multivariate non-normally distributed random variables in climate research—introduction to the copula approach[J]. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 2008, **15**:761–772.
- [15] Cheng J, Karambelkar B, Xie, Y. leaflet: create interactive web maps with the JavaScript ‘leaflet’ library[R]. R package version 2.1.1. 2022.