

基桩静载数据处理与可靠性分析软件开发及应用

吴兴征^{*1}

(1. 河北大学建筑工程学院, 河北, 保定, 071002)

【摘要】 基桩静载测试得到的荷载-位移曲线是对其承载性能进行评估的主要依据, 本文采用 Visual Basic 平台开发基桩静载数据常规处理与可靠性分析软件。该软件可绘制单根基桩的荷载-位移、位移-时间对数、和位移-荷载对数曲线。在组集特定建筑物下多根单桩荷载-位移检测数据的基础上, 可展示这些基桩承载能力的总体评估成果, 比如, 平均安全系数和可靠度指标。该软件不仅可用于静载常规数据处理, 也可用于基桩承载性能几何可靠性评估报告的编制。

【关键词】 基桩; 静载试验; 检测; 几何可靠性分析; 软件

该文已发表于工程质量期刊, 引用格式如下:

吴兴征. 基桩静载数据处理与可靠性分析软件开发及应用. 工程质量, 2021, 39(4):1-10.
Wu X.Z. 2021. Notes on a package for reliability analysis and data processing with the static load test of foundation piles. Construction Quality / Gongcheng zhiliang. 39(4):1-10.

欢迎加入 QQ 群下载软件: 194088381 请注明 Duyuan 基桩
或访问岩土论坛链接下载软件

<https://bbs.yantuchina.com/read.php?tid=326036>

Notes on a Package for Reliability Analysis and Data Processing with the Static Load Test of Foundation Piles

Xing Zheng Wu^{*1}

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Hebei University, 180 East Wusi Road,
Baoding, Hebei 071002, China)

Abstract: The load-displacement curves of foundation piles subjected to static tests are mainly used to evaluate their bearing capacity. In this study, a package for the reliability analysis and data processing is developed based on the programming platform of the Visual Basic. The curves of load vs displacement, displacement vs logarithm of time, and displacement vs logarithm of load are plotted for each pile. Once all load-displacement curves for multiple piles under a specific building are assembled, some computed results of bearing characteristics can be achieved, such as, an averaged factor of safety and a reliability index. The software can be used not only for routine data processing of static load tests, but also for a preparation of geometric reliability assessment reports for the bearing performance of foundation piles.

Keywords: foundation pile; static test; testing; geometric reliability analysis; software

*作者简介: 吴兴征, 男, 博士。主要从事岩土、防洪与海岸工程中不确定性模型方面的研究。E-mail: xingzhengwu@163.com

0 引言

基桩静载检测是核验桩体施工质量与评估其承载能力的重要方法之一。该测试可得到荷载-位移以及位移-时间的变化关系，且现行基桩检测规范^[1,2]要求绘制这些关系曲线，以便由允许位移值来判定基桩承载力是否满足设计要求。随着我国大型住宅社区、重大交通基础设施的日益开发，同一场地下基桩检测数量较多，人工绘制此类图形并编制检测报告，工作效率低且易于出错。

依据现行技术规范^[1]，对于缓变型荷载-位移曲线，竖向极限荷载下桩顶沉降量值若小于40mm，从而可判定该基桩的单桩抗压承载力满足设计要求。事实上，工程实践中据此判定得到单桩承载力不足的情况微乎其微，尤其是工程桩的检测。但是，即便单桩承载力满足技术要求，每年由于基桩不均匀沉降而引致的大型住宅楼宇开裂、高架运输线颠簸等现象层出不穷。如何充分利用每根基桩的检测数据，提出更为合理的承载力评估判断依据，这是当前岩土工程界亟需解决的问题。换句话说，依据某根基桩的检测数据，其承载能力安全冗余度具体如何，与该场地或该建筑物下的承载力特征值相比的安全系数大小并未交代。特别地，若考虑上部结构对桩基差异沉降的具体要求，亟需对同一建筑物下的所有检测数据进行全面而深入地分析。为此，笔者等人发展了特定场地（或建筑物）下几何可靠性算法^[3-6]，在给出每根基桩承载力安全系数的基础上，求出考虑荷载-位移响应不确定性的可靠度指标。这些算法采用 R 语言编写，尽管代码开源，但对算法使用人员需要具有编程基础，不利于算法的进一步推广。

本文基于微软面向对象程序设计语言 Visual Basic 6.0^[7]，采用模块化设计方法开发基桩静载数据处理与可靠性分析软件，拟为工程技术人员编制检测报告时进行图形绘制提供便利，并为可靠性分析技术在实际工程中推广应用提供操作平台。软件的开发将复杂的可靠性基础理论（核心函数模块）加以封装，不仅为岩土工程师理解和使用概率设计技术开辟全新途径，更会加快实现与上部建筑结构可靠性设计标准相统一。最后，结合两类工程实例说明该软件系统的有效性。

1 软件总体设计和结构

图 1 给出采用几何可靠性算法对特定场地（或建筑物）下单根与多根基桩进行分析的流程。特别地，对多根检测曲线进行组集时，首先分别完成幂函数拟合获得两个回归参数集。进而采用二维正态联合分布描述该参数集，推求单倍标准差椭圆及扩展椭圆构型，考虑设计荷载与承载力特征值间的关系给定极限状态构型。最后根据两个构型（扩展椭圆构型和极限状态构型）的接触判别得到几何可靠度指标^[5,6]。为进一步在工程实际中推广此算法，以下介绍笔者开发的交互式基桩静载数据处理与可靠性分析软件（PileBetaG2.15）。

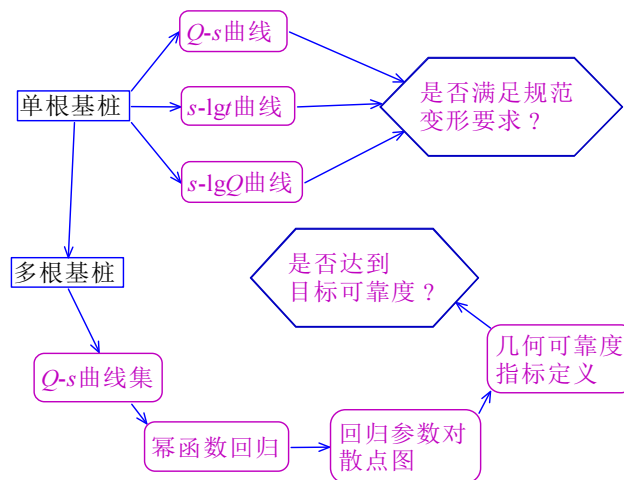


图 1 几何可靠性算法分析流程

软件主界面如图 2 所示，且提供了中英文两种显示版本。其中帮助菜单为该分析系统提供辅助功能，这方便用户清晰地了解系统的基本信息和功能选项。



图 2 系统主界面

该软件的左侧界面为控制区域，右侧图形框为实时显示区域。该软件采用模块化设计，主要包括四个模块：A) 单根数据处理、B) 多根汇总处理、C) 检测曲线集分析、与 D) 可靠度指标计算。下面对各模块功能控制区域（如图 3 所示）分别进行详细说明。

1.1 单根数据处理模块 A

针对某一基桩的测试结果，该模块可单独绘制竖向荷载 Q -位移 s 曲线，位移 s -时间对数曲线 lgt ，位移 s -荷载对数曲线 $lg Q$ 等，它们的组合也可给出。这是现行检测技术规范在出具检测报告时要求的成果。该模块还提供复合地基测试结果选项，这时荷载 Q (kN) 将被替换为压力 P (kPa)。

需要指出，测试数据可通过文件直读（第 01 步）的方式输入，包括两类文件：其一为荷载-位移数据，文件类型为 txt。其二为荷载-时间-位移数据，文件类型为 qts。这些文件类型均可通过任意文本编辑器方便地打开与编辑。

第一类文件就是两列数据，第一列为荷载 Q ，第二列为位移 s 。其数据结构如表 1 所列。

表 1 文件 txt 的数据结构

荷载 Q	位移 s
Q_1	s_1
Q_2	s_2
...	...
Q_n	s_n

第二类文件的首行为荷载 Q ，首列为时间 t ，荷载与时间构建一个矩阵 s_{mn} （其中 n 为荷

载分级数， m 为时间分量数)，对应的元素为位移值 s_j ，如表 2 所列。注意这里的位移值为当前荷载下的总量值而不是位移增量。此外，准备数据文件时不要存入卸载测试成果。

表 2 文件 qts 的数据结构

/	荷载 Q_1	荷载 Q_2	...	荷载 Q_n
时间 t_1	s_{11}	s_{12}	...	s_{1n}
时间 t_2	s_{21}	s_{22}	...	s_{2n}
...
时间 t_m	s_{m1}	s_{m2}	...	s_{mn}

文件输入后，点击重新画图（第 02 步）即可在图形显示区域绘制出相应曲线。点击到粘贴板或在图形上双击鼠标即可将图形输出到其它文档中。



图 3 各模块的界面

1.2 多根汇总处理模块 B

针对多根基桩的荷载-位移测试数据的汇总，该模块主要是为模块 C 准备与生成数据文件的。首先，它允许进行检测数据存放路径的选择，将需要组集的数据文件通过点击列出文件（第 03 步），即可查看选择的数据文件是否完备。然后，选填项目名称和输出文件名称，通过点击汇总输出（第 04 步），即可生成一个 Demo*.qps 文件。该文件类型仍可通过文本编辑器进行查看。考虑到各个工程检测单位生成的单根数据样本的格式不尽相同，这个模块的设置主要实现将特定建筑场地或建筑物下的所有测试成果进行格式化汇总。表 3 列出该 qps 文件中的数据结构。应指出，该文件为自动输出的或由人工依照其数据结构生成，比如基桩数量是由参与统计的文件个数确定，加荷级数由荷载-位移数据文件 txt 中的数据给定。应注意，本软件要求所有基桩的加荷等级尽量一致。

表 3 文件 qps 的数据结构

行数	内容							
1	项目名称	Pile-Qs						
2	基桩数量	k						
3	加荷级数	n						
4	荷载 Q_{11}	位移 s_{11}	Q_{12}	s_{12}	...	...	Q_{1k}	s_{1k}
5	荷载 Q_{21}	位移 s_{21}	Q_{22}	s_{22}	...	...	Q_{2k}	s_{2k}
6	...	...	...	...	...	...	...	...
7	荷载 Q_{n1}	位移 s_{n1}	Q_{n2}	s_{n2}	...	...	Q_{nk}	s_{nk}

1.3 检测曲线集分析模块 C

仍针对多根基桩测试数据，该模块主要实现检测曲线集的输出，其操作界面如图 3 所示。同样地，用户可通过文件直读（第 05 步）命令按钮，将 Demo*.qps 文件中的数据一次性读入。对于项目名称和曲线条数等信息，该软件会根据读入的数据自动显示。

根据国内建筑基桩检测技术规范，工程桩验收检测时加载量值不应小于设计要求的单桩承载力特征值的 2.0 倍，即安全系数取 2.0^[1]。而在国外有些规范或相关资料所取的安全系数为 3.0^[4]。在该软件中可以根据实际情况，设定最大加载倍数。依据基桩的检测成果，检测数据中的最大加载值除以设定的最大加载倍数（或安全系数）即可得到基桩的承载力特征值。

进而用户通过点击重新画图（第 06 步）命令按钮绘制出由点线连接的多条荷载-位移曲线。

1.4 可靠度指标计算模块 D

接下来的可靠度指标的计算模块是最为核心的，但繁杂的计算理论均已封装为动态链接库，用户只需要点击计算绘图（第 07 步）命令按钮即可实现。这一封装过程主要包括以下几个步骤。

(1) 软件采用非线性最小二乘法（稍后讨论）进行幂函数形式的回归，即 $Q = p_1 s^{p_2}$ ，进而得到幂函数的两个拟合参数： p_1 和 p_2 。 p_1 为比例系数（scale）， p_2 为幂指数（power），二者的值域均为非负。这里 Q 为荷载值，单位为 kN； s 为位移值，单位为 mm。若取容许位移值为 40mm，则此时相应的容许荷载 $Q_{\text{容}}$ 为 $Q = p_1 40^{p_2}$ 。

(2) 在该模块中，需要将多根基桩的拟合参数值进行汇总，并绘制得到它们的散点分布。为了使图形显示的更匀称，可自行设定 p_1 的上下限来调控图形的 x 轴的区间，通过改变 p_2 的上下限来调控图形的 y 轴的区间。

这样的话，可以关注散点图的离散特性，通常将这两个参数分别视做一个随机变量，并探究其最优边缘分布形式。为简化起见，尤其是当样本点较少时， p_1 和 p_2 均可假定服从正态分布，并令二者间的相关系数为 ρ 。进而，假定二者的联合分布服从二维正态形式，并可方便地定义二维变量的协方差矩阵。这使得该联合分布的概率密度等值线为椭圆构型。该椭圆轮廓大小取决于 p_1 和 p_2 散点的马氏距离平方，该距离平方服从卡方分布。

(3) 单倍标准差椭圆^[8]在几何可靠性算法中是一个重要的组成部分，其形状由协方差矩阵的特征值和特征向量来确定。该椭圆若定义在 $p_1 - p_2$ 坐标系下的话，将与坐标轴有一定的旋转角度，其可由 5 个参数确定。中心位置 (p_1^0, p_2^0) 、长轴 a 、短轴 b 、以及长轴 a 与坐标系 p_2 轴之间的夹角 θ 。椭圆轮廓上任意一个点满足方程：

$$\left(\frac{(p_1 - p_1^0) \sin \theta + (p_2 - p_2^0) \cos \theta}{a} \right)^2 + \left(\frac{(p_1 - p_1^0) \cos \theta - (p_2 - p_2^0) \sin \theta}{b} \right)^2 = 1 \quad (1)$$

该椭圆中心位置 (p_1^0, p_2^0) 可由各个回归参数对的坐标值进行统计得到, 即这些坐标值的平均值。当求出协方差矩阵的两个特征值和特征向量后, 较大特征值对应的特征向量代表回归点区域的主轴方向。主轴方向与图像的垂直轴之间的夹角 θ 为椭圆的倾斜角度。

(4) 确定上述协方差矩阵时, 需要给定随机变量 p_1 和 p_2 之间的相关系数 ρ , 它直接决定了椭圆的倾向。若样本集数量较少时, 无法准确得到该系数, 这时可将其设定为已有的经验数值, 如-0.77^[4]。

(5) 该软件自动绘制出回归参数坐标系下的单倍标准差椭圆、多倍和 β 倍标准差椭圆、以及极限状态曲线等图形。这些几何构型均采用了离散化节点近似表达复杂的形状, 软件设定的节点数默认值为 100。

(6) 此外, 软件还将计算出多根基桩的平均安全系数 \bar{F} 。该平均值是每根基桩实际安全系数的统计平均。针对每根基桩, 由设计荷载值(或单桩承载力特征值) Q_{LD} 与名义的承载能力 Q_m 之间的关系式 $Q_{LD} = Q_m / F_s$, 可确定性地计算出实际安全系数 \tilde{F}_s , 即

$$\tilde{F}_s = Q_m / Q_{LD} \quad [5,6]$$

2 核心函数模块

前述计算模型在面向对象的交互式开发中需要将一些核心函数转译为 Visual Basic 的解释语句, 主要涉及到如下几个函数。

2.1 非线性最小二乘法回归

这里采用非线性最小二乘法处理荷载-位移数据, 得到回归参数。在 Visual Basic 代码的开发中采用了求解非线性方程组的程序库 MINPACK^[8]。它是关于非线性平方和最小化、非线性无约束优化、和非线性方程组求解的程序包。该方法是莱文贝格-马夸特算法 (Levenberg-Marquardt algorithm) 的改进, 此算法在执行过程中通过修改参数以期达到结合高斯-牛顿算法与梯度下降法各自优点之目的, 并对两者不足之处加以完善。针对 m 个 n 元非线性方程 (m 为各方程组中未知变量的最大数目, 取为 2; n 为 1), 程序库中的函数 lmdif 可实施非线性平方和最小化。用户需要给定用于自定义函数的子程序 fcn, 结合本文的研究, 可以设定拟合方程为 $y = x_1 s^{x_2}$ 。

2.2 单倍标准差椭圆的定义

单倍标准差椭圆 (One-standard-deviational ellipse) 的定义中涉及到求解协方差矩阵的特征值和特征向量。因为协方差矩阵为对称矩阵, 可采用常见的雅可比 (Jacobi) 法求解其特征值和特征向量。

2.3 椭圆形状的概率密度等值线

其它概率密度等值线可由单倍标准差椭圆的离散节点坐标经过扩展得到, 比如两倍标准差椭圆即可将其长短轴长度由单倍时的特征值放大两倍即可。事实上, 这些椭圆标识了样本点可能落入的区域。在同一椭圆上的所有点, 其概率联合分布密度是相同的, 因此, 这些椭圆也被称为等密度椭圆。软件会依据计算得到的几何可靠度指标的大小, 自动追加整数多倍标准差椭圆, 便于工程技术人员甄别可靠度指标的量值。比如, 若可靠度指标为 3.2, 则 3 倍及以下的标准差椭圆都会被显示。若可靠度指标为 5.7, 则 5 倍及以下的标准差椭圆均被绘制。

2.4 极限状态线及几何可靠度指标

极限状态线由功能函数推求得到，它将随机变量所在区域分为安全域与失稳域。一旦扩展的椭圆与极限状态线相互接触，接触点即为设计点，此时相应于单倍特征值的扩展系数即为可靠度指标。鉴于该新技术将一次可靠性算法求解中的规划求解问题化引为两个几何构型的接触判断问题，故将求出的结果称作几何可靠度指标。针对几何可靠性算法中极限状态曲线和可靠度指标的确定方法的详细说明，可参见文献[5]，此不赘述。

3 工程案例 A---螺旋钻孔桩

以下简介该工程案例在图形显示区域的相关输出内容。

3.1 工程概况

该数据源自文献[10-11]。场地位于山东济南市，地上拟建 83 米高的 22 层办公楼，长 50m×宽 42m。其地基处理采用钢筋混凝土灌注桩，桩径均为 800mm、桩长均为 19.5m。桩周土层主要为粉质粘土（厚 3m）、粗砾石（厚 3.5m）、粉质粘土（厚 3.5m）、粗砾石（厚 5.5m）、残积土 5m，风化闪长岩 4m，强风化的闪长岩 1.7m，底层为坚硬的岩石持力层。

本场地共计完成钢筋混凝土桩常规测试数量为 3 根（编号分别为 P51、P121 和 P126），最大加载均为 9000kN。各桩相距较近，地质条件比较类似。

3.2 各模块运行成果展示

(1) 单根数据成果

针对第 P51 号基桩，图 4 给出在一个图形页面中绘制的三种基桩检测曲线，包括 $Q-s$ ， $s-lgt$ ，和 $s-lgQ$ 。当然它们也可以被分幅单独绘制。 $Q-s$ 曲线均未出现明显陡降段， $s-lgt$ 曲线尾部均无明显下弯，依据技术规范^[1,2]，上述三根测试桩的单桩竖向抗压极限承载力完全满足要求。

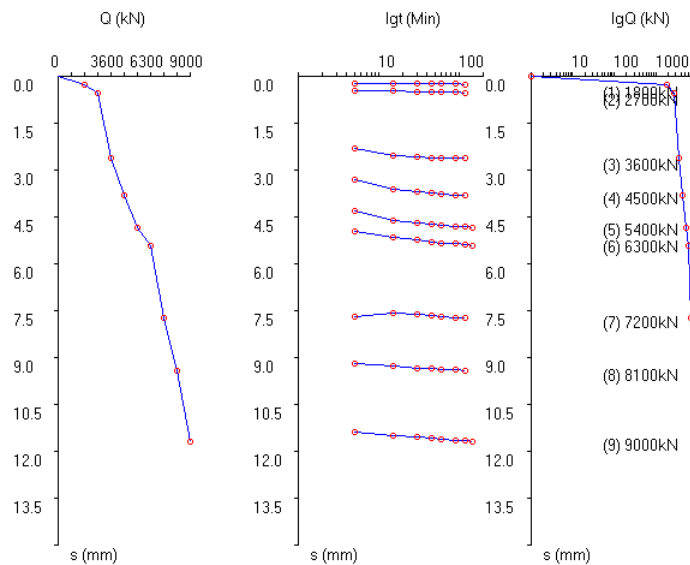


图 4 基桩检测曲线：(a) $Q-s$ ；(b) $s-lgt$ ；(c) $s-lgQ$

(2) 检测曲线集成果

针对该特定建筑物下的三根基桩的测试数据，图 5 给出绘制的三条荷载 Q -位移 s 曲线。由于受到地基条件、施工质量、检测工艺、桩底沉渣、和桩身强度等的影响，曲线具有离散性^[12]。总体而言，这三条曲线间的差异不大。

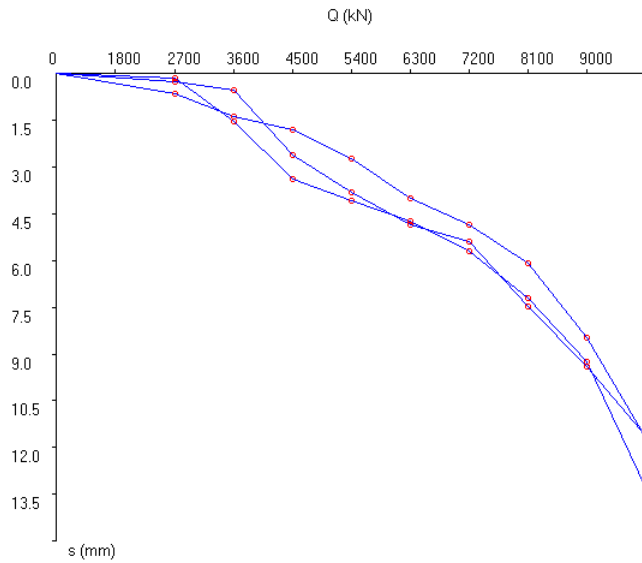


图 5 特定建筑物下检测得到的 $Q-s$ 曲线集

这些曲线回归参数对呈散点式分布，如图 6 所示。由图可见，各散点的量值基本比较接近。鉴于测试样本数太少，不足以确定回归参数间的相关系数，故采用软件默认值 (-0.77)。综合考虑这几条曲线的离散性，本软件可给出特定建筑物下的可靠度指标 β (11.61) 和平均安全系数 \bar{F} (3.79)。各参数的均值线、单倍标准差椭圆（最内层）、以及发散椭圆（最外层）和极限状态线等几何构型均在图中示意。这便于充分认识回归参数不确定性的统计量值（标准差）对可靠度指标的影响。图中也给出其它整数倍的标准差椭圆，这样，技术人员甚至可通过检算图形中椭圆个数估计出可靠度指标。

鉴于两个回归参数的变异系数相对较低，即它们的标准差较小，单倍标准差椭圆相对不大，进而计算得到的可靠度指标较高。这种情况下，上部结构发生不均匀沉降而引发裂缝或开裂的可能性较小。

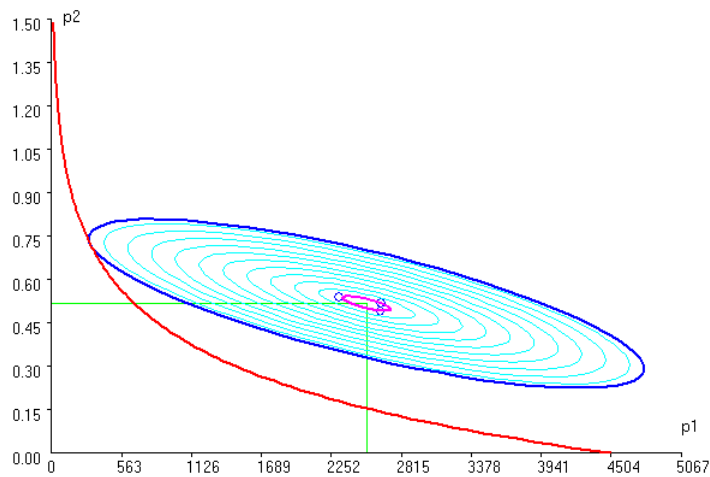


图 6 几何可靠度指标结果图

4 工程案例 B---CFG 桩复合地基

4.1 工程概况

该数据源自文献[13]。建筑场地位于河北燕郊锦绣大地小区 3 号楼，上部结构为高 24 层居住用板楼。其地基处理采用 CFG 桩复合地基，桩径均为 450mm、桩长均为 24m。场地表层为人工填土层，其下为第四系冲洪击形成的粘性土、粉土、砂土及碎石类土。共计各自完成 3 根竖向抗压单桩与复合地基静载常规试验。单桩的最大加载为 1900kN，复合地基的最大加载为 960kPa。与前述案例 A 相比较，CFG 桩单桩承载力特征值明显要小很多，尽管两个案例中上部结构的楼层数是接近的。限于篇幅，这里仅给出复合地基的成果。

4.2 各模块运行成果展示

以 YJPSI-1132 复合地基为例，测试得到的各种曲线如图 7 所示。 $P-s$ 曲线未出现明显陡降段， $s-\lg t$ 曲线未出现弯曲，沉降量亦未超过 40mm。该桩的单桩竖向抗压极限承载力可满足要求。

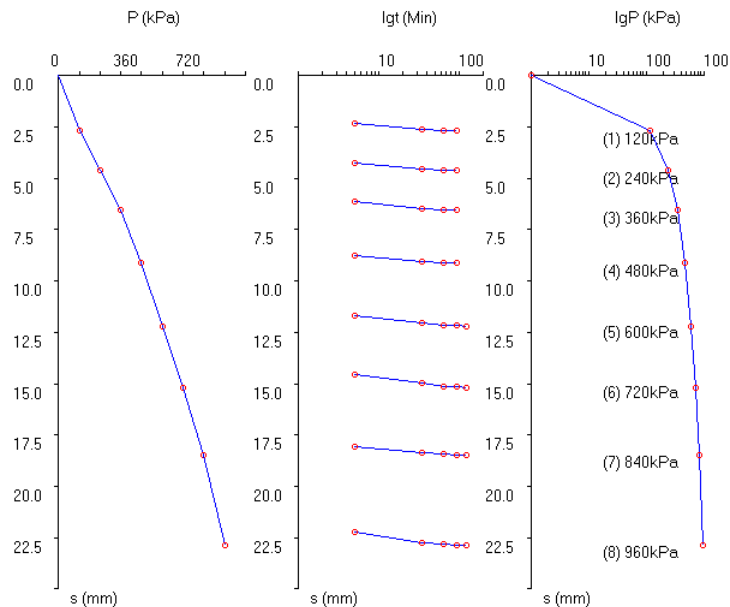


图 7 基桩检测曲线: (a) $P-s$; (b) $s-\lg t$; (c) $s-\lg P$

该建筑物下三根复合地基测得的荷载-位移响应曲线如图 8 所示。由图可见，曲线间表现出差异。

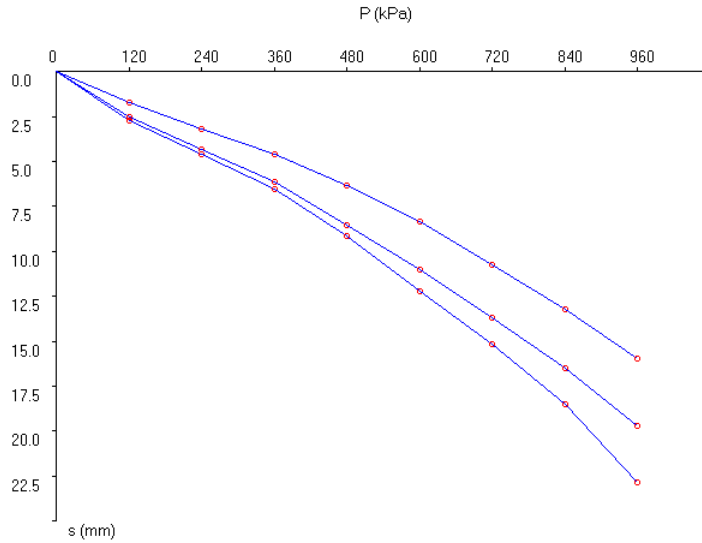


图 8 CFG 桩单桩的几何可靠度指标结果

由于曲线间的离散性相对较大，回归参数对间呈现出一定的不确定性，参见图 9。由几何可靠性算法得到的可靠度指标 β (3.95) 和平均安全系数 \bar{F} (3.82)。由于计算得到的回归参数对相应的单倍标准差椭圆较大，进而计算得到的可靠度指标量值偏低。

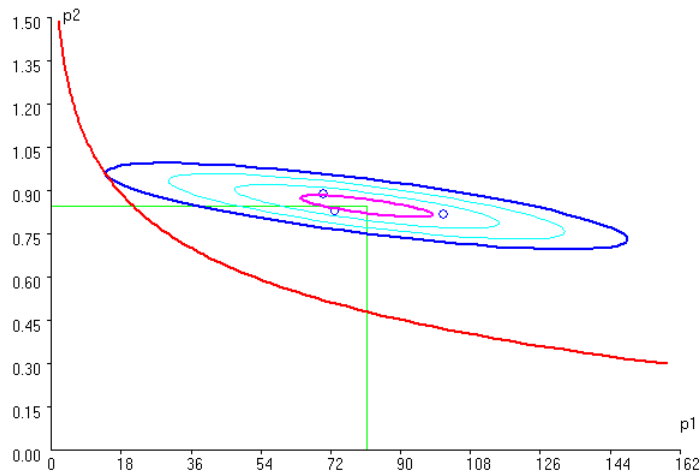


图 9 CFG 桩复合地基的几何可靠度指标结果

5 讨论

(1) 这里给出的两个工程案例涉及到最为常用的两类深基础地基处理形式，即混凝土灌注桩和 CFG 桩复合地基。可以看出，对于灌注桩而言，比例系数 p_1 量值较高，而 CFG 桩复合地基的 p_1 较低。相比而言，前者的幂指数 p_2 值较低。经过今后长期的多项工程经验的积累，这些参数的取值规律会更加明晰。

(2) 通常情况下，单根基桩的评估基于实际安全系数，即给定位移量值下的承载力与设计荷载之比值。而这里的几何可靠度指标，除考虑实际安全系数给定极限状态线以外，还全面考虑多根基桩的荷载-位移整体非线性响应特性，包括每条响应曲线的比例系数和幂指数，以及二者的统计离散性和相关性。

(3) 这里给出独栋楼宇下的分析成果, 一个大型住宅楼盘(由多栋组成)均可得到上述直观的可靠度指标, 且相互比较相当方便。通过对更多工程桩的几何可靠性评估的推广应用, 可给出各种基桩在正常使用极限状态下合理的目标可靠度指标。这为可靠性设计法融入岩土工程提供了可能。

(4) 事实上, 本文的算法对于试验桩也是适用的。比如, 若工程案例 A 中的灌注桩为试验桩的话, 依据测试成果得到如此高的可靠度指标, 可适当地减少桩长或者缩小桩径, 这将在很大程度上减少施工难度, 节省项目投入。

(5) 严格说来, 影响基桩可靠性评估成果的随机因素还包括桩周各层土体的侧摩阻力、单桩极限承载力以及上部结构荷载等, 这与前述的回归参数集可构成一个多维随机问题^[14]。与此相关的可靠性算法及其软件系统值得深入研究。

(6) 该软件在开发中力求适用于各种桩型(锚桩、灌注桩、CFG 桩复合地基、管桩)的检测数据处理, 且不论该基桩是垂直受压(即抗压桩)还是受拉(抗拔桩)。严格说来, 只要测得多根(要求三根及以上)荷载-位移响应曲线, 即可代入此软件进行计算分析。应指出, 目前该软件仅适用于回归参数服从双变量正态分布的情况, 即文献[5]给出的简化几何可靠性模型。其它双变量分布形式及多变量分布问题的软件开发仍有待进一步完善。当同等条件下检测数据量达到 20 根以上时, 可尝试采用非正态分布的几何可靠性分析^[4,6]。

6 结语

以微软的 Visual Basic 编程环境为平台, 发展了非线性回归、概率密度等值椭圆等计算程序, 开发了用于基桩静载检测成果整理的交互式数据处理与可靠性分析软件。基桩检测技术规范中要求的各种曲线图形、以及拓展的几何可靠性指标定义示意图等均被封装在可视化的应用程序模块中, 这使得可靠性分析概念明确且简单易行。该软件具有界面直观, 实用性和操作性较强。采用文件直接读入数据, 这使得该系统具有很好的可移植性。将绘制出的曲线图粘贴到可编辑的文档中, 技术人员可以在较短的时间内完成该项检测报告的编写任务, 以便提高计算效率, 可避免人为失误。通过旋挖桩和 CFG 桩复合地基两个工程案例说明了此软件的有效性与实用性。

该软件中基桩可靠度的计算方法和试验数据的分析方法符合最新的相关规范要求, 可为工程技术人员提供单体建筑物下毗连基桩的有关可靠性的精细化分析成果。几何可靠性的分析方法通过几何图形的方式直观地展现出来, 这使得可靠性分析更加透明并有利于可靠性分析在实际工程中的推广。这一新的评估方法对于指导工程设计实践与丰富可靠性分析理论等方面具有较大价值。

参考文献

- [1] 中国建筑科学研究院. 建筑基桩检测技术规范 JGJ106-2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社. 2014.
- [2] 中国建筑科学研究院. 建筑地基处理技术规范 JGJ79-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社. 2012.
- [3] Wu X.Z. Geometric reliability analysis applied to wave overtopping of sea defences[J]. Ocean Engineering, 2015, 109:287-297.
- [4] Wu X.Z. Xin J.X. 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):1-21.
- [5] 吴兴征, 王瑞凯, 辛军霞. 基于少量检测数据的特定建筑物下基桩简化几何可靠性评估[J]. 岩土力学, 2020, 41(S2):1-9.
- [6] 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.

- [7] Petroustos E. Visual Basic 6 从入门到精通[M]. 北京: 电子工业出版社, 1999.
- [8] Lefever DW. Measuring geographic concentration by means of the standard deviational ellipse[J]. American Journal of Sociology, 1926, 32(1): 88–94.
- [9] Moré JJ, Garbow BS, Hillstom KE. User guide for MINPACK-1[R]. Argonne National Labs Report ANL-80-74. Argonne. Illinois.
- [10] Zhou JL, Zhang X, Jiang H, Lyu C, Oh E. Static and dynamic load tests of shaft and base grouted concrete piles[J]. Advances in Civil Engineering, 2017, 2548020, 1–11.
- [11] Zhou JL. 2018. Performance of full scale tests of piles in different soil conditions[D]. Griffith University, PhD thesis.
- [12] 吴兴征, 王瑞凯, 辛军霞, 冯震. 特定场地下土工构筑物荷载变形曲线的概率密度分布[J]. 工程质量, 2017, 35(9):41–46.
- [13] 北京市建设工程质量第一检测是有限责任公司. 燕郊住宅区 CFG 桩单桩及复合地基静载荷试验检测报告[R]. 北京: 北京市建设工程质量第一检测是有限责任公司. 2014.
- [14] 张峰, 周峰, 王旭东. 成层地基中单桩竖向承载力鲁棒性设计[J]. 岩土力学, 2017, 38(11):3311–3318.