

1 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

2 吴兴征*¹ 王瑞凯¹ 辛军霞^{2,3}

3 (1 河北大学建筑工程学院, 保定, 071002

4 2 北京市建筑工程研究院, 北京, 100039

5 3 北京市建设工程质量第一检测所有限责任公司, 北京, 100039)

6
7 摘要: 依据现行检测技术规范, 特定建筑物下基桩的静载荷检测数量往往极其有限, 只有 3
8 根及以上。由于桩周土体空间变异性的影响, 这些测试的荷载-位移曲线会表现出一定差异。
9 假如每一条测试曲线可由两个参数的幂函数回归, 从而特定建筑物下曲线间的离散性化引为
10 由回归参数的不确定性来展现。这里给出采用几何可靠性算法进行基桩承载能力评估的技
11 术。在几何可靠度指标计算中, 考虑到数据的有限性, 回归参数的边缘分布简化假定为正态
12 形式。进而其统计特性由平均值与标准差, 以及回归参数间的相关系数来表述。为说明算法
13 的合理性, 这里分别结合混凝土管桩、钻孔灌注桩、水泥粉煤灰碎石桩的检测数据, 求得特
14 定建筑物下的基桩几何可靠度指标。经计算验证, 这些指标与常规一次可靠性方法的分析成
15 果基本一致。该项评估技术可直接用于特定建筑物下基桩的可靠性分析。最终, 给出采用可
16 视化编程语言开发的软件系统, 以期更好地推广此算法。

17 关键字: 基桩; 特定建筑物; 荷载-位移; 回归参数; 几何可靠性

18 已于 2020 年 4 月 22 日被岩土力学增刊录用

19 Geometric Reliability Assessment of Foundation Piles in a Specific 20 Building Based on Small Amount of Testing Data

21 Xing Zheng Wu*¹ Rui-kai Wang¹ Jun-xia Xin^{2,3}

22 *1 College of Civil Engineering and Architecture, Hebei University, 180 East Wusi Road, Baoding, Hebei 071002, China*

23 *2 Beijing Building Construction Research Institute, Beijing 100039, China*

24 *3 Beijing Construction Engineering Quality First Testing Institute Co., Ltd., Beijing, 100039, China*

25
26 Abstract: According to current technical specifications, the number of static load tests for piles
27 under a particular building is often extremely limited, usually only 3 or higher. Due to the
28 influence of the spatial variability of the soil around the pile, the load-displacement curves of these

*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

*基金项目: 河北省自然科学基金面上项目 (No.E2019201296); 河北省高等学校科学技术研究重点项目 (ZD2018216); 一省一校专项资助 (No.801260201262)。

This work was supported by the General Program of Hebei Natural Science Foundation of China (E2019201296), the Key Project of Science and Technology Research in Colleges and Universities of Hebei Province (ZD2018216) and the Advanced Talents Incubation Program of the Hebei University (801260201262).

29 tests will demonstrate some scatterings. If each test curve is fitted by a two-parameter power law
30 function, the scatter between the curves under a specific building is transformed into the
31 uncertainty of the regression parameters. In this paper, a technique for evaluating the reliability of
32 such piles using a geometric reliability algorithm is given. Owing to the scarcity of testing data,
33 the marginal distribution of these regression parameters is assumed to be the normal form when
34 defining a geometric reliability index. Furthermore, its statistical characteristics are expressed by
35 the mean and standard deviation, and the correlation coefficient between regression parameters. In
36 order to validate the algorithm, the testing data of concrete pipe piles, augered cast-in-situ piles
37 and cement fly-ash gravel (CFG) piles are used. The geometric reliability index of these
38 foundation piles under a specific building is investigated. The reliability indexes achieved by
39 using the proposed method are consistent with the results calculated by the conventional first order
40 reliability method (FORM). This evaluation technique can be directly used for the reliability
41 analysis of foundation piles under a specific building. Finally, a software system developed using
42 a visual programming language is presented to promote this algorithm.

43
44 Keywords: pile; specific building; load displacement; regression parameters; geometric reliability
45 analysis

47 1 引言

48 基桩作为建筑物的基础性工程, 其在整个建筑物中发挥着举足轻重的作用。基桩检测是
49 核验桩体施工质量与评估其承载能力的重要和可靠手段。尤其是静力载荷试验(亦简称为静
50 载试验), 它直接测定基桩在荷载作用下的沉降或位移响应, 进而可确定单桩极限承载力,
51 在实际工程中被广泛采用。受到桩体周边地基条件的影响, 即使是同一桩型和相同加载水平
52 下, 基桩荷载-位移曲线也是有差异的^[1-4]。

53 有关曲线离散性的早期研究, 多集中在区域或者国家层面^[5-6]。为了更好地研究不同加
54 载水平或基桩几何尺寸下的响应, 学者们不得不采用了归一化处理^[5-6], 这使得工程技术人
55 员难以付诸于局部范围的实际应用中, 且归一化后曲线的回归参数牺牲了值域上的直观性
56 (亦即物理意义)。针对同一场地水平下多个单体建筑物(可称为群体建筑物), 各基桩几何
57 尺寸差异小且加载水平大体一致, 吴兴征等人^[3,7-9]提出并构建了在原始物理空间中的几何可
58 靠性分析方法。该算法由确定性的极限状态线(面)和联合概率密度等值线(面)两个几何
59 构型来定义可靠度指标, 它具有物理意义明确、计算简明、直观可视、且易于被工程技术人
60 员理解与接受。几何构型的离散化近似使得算法具有广泛的适用性, 比如非正态联合概率密
61 度分布等值线和非线性极限状态线等^[8]。这些算法特征为桩基工程的可靠性评估提供了新视
62 角。

63 然而, 对于实际工程的设计与安全核算, 技术人员更为关注特定单体建筑物下的基桩评
64 估。依据现行检测技术规范, 单体建筑物需进行总工程桩数的 1%且至少三根以上的基桩检
65 测^[10], 通常只有 3 至 6 根桩。由于受到一些因素的影响, 有时获取场地下群体建筑物的完
66 整数据集是不现实的。在如此少量数据支持的情况下, 这里提出特定建筑物下的简化几何可

67 靠性算法。以下论述中，给出几何可靠性算法的简化模型，以及输入参数的设定。为检验几
68 何可靠性简化算法的可行性，结合三种不同类型的基桩进行计算分析，并与常规一次可靠性
69 方法^[11-12]的成果进行比对。

70 2 简化几何可靠性计算模型

71 2.1 几何可靠性模型原理

72 将多条基桩荷载-位移曲线均由两参数幂函数或双曲线（前者在数学上更易于处理）进
73 行回归，进而每一个建筑物或场地下可得到一个随机向量（回归参数集）。描述这些回归参
74 数的最优联合概率密度的联结（Copula）函数可由拟合优度检验得到^[3]。二维正态分布是其
75 最为简化的函数形式。随着概率密度值的变化，将出现一簇概率密度等值线，显然，概率密
76 度值较低时其轮廓较大。这里概率密度等值线也可称为概率密度多边形或环境等值线。

77 通过比较基桩容许荷载（给定容许沉降值所对应的荷载）与基桩的施加荷载（设计荷
78 载或承载力特征值），可建立用于正常使用极限状态下可靠性分析的极限状态方程。

79 在几何可靠性算法求解中，将概率密度多边形离散为由多个顶点连接而成的几何构型，
80 尽管这是一种离散近似，但当顶点数足够多，该几何构型将无限逼近任意光滑的轮廓线。通
81 过遍历概率密度多边形上的顶点并将其代入极限状态方程中，进而判断方程的值是否大于
82 零，即给出多边形上的点是否达到临界状态。若所有顶点均不满足，对概率密度多边形进行
83 逐步扩大（即降低概率密度水平值），直至恰有其中一点满足，则遍历终止。因而，将该概
84 率密度多边形定义为发散概率密度等值线。最终，由发散等值线与单倍标准差椭圆之间的比
85 例关系求得基桩的几何可靠度指标^[7-8]。

86 针对特定建筑物中基桩检测数量较少的情况，在概率密度等值线和极限状态方程的确
87 定上可进行如下简化。

88 2.2 概率密度等值线的确定

89 首先，由于单体建筑物中基桩的检测数量过少（比如，只有 3 至 6 根），不足以进行回
90 归参数的边缘分布拟合优度检验，直接假定并采用正态分布形式，其均值和标准差由检测数
91 据确定。

92 其次，由于样本数量明显不充足，回归参数间的相关系数 ρ 可采用场地水平下的经验数
93 据。对于特定场地下的 ρ ，国内外鲜见报道。吴兴征和辛军霞在文献[9]中分别给出 6 个场
94 地下的幂函数回归参数间的 ρ ，其均值为-0.77，如表 1 所列。

95

96

表 1 场地水平下 CFG 桩单桩测试曲线回归参数间的相关系数

97

Table 1 Correlation coefficients of regression parameters of test curves for a single pile of the

98

CFG composite foundation at each site		
场地	测试数量	相关系数 ρ
AP	45	-0.77
BP	24	-0.91
CP	42	-0.87
DP	54	-0.59
EP	59	-0.89
FP	21	-0.62
平均值	\	-0.77

99

100

最终，特定建筑物中基桩荷载-位移的两个幂函数回归参数（记为 p_1 和 p_2 ）联合分布类

101

型为双变量正态分布，其联合概率密度函数可由下式给出

102

$$f(p_1, p_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2\sqrt{1-\rho^2}} e^{-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left[\frac{(p_1-\mu_1)^2}{\sigma_1^2} - \frac{2\rho(p_1-\mu_1)(p_2-\mu_2)}{\sigma_1\sigma_2} + \frac{(p_2-\mu_2)^2}{\sigma_2^2} \right]} \quad (1)$$

103

式中： μ_1 和 σ_1 分别为变量 p_1 的均值和标准差； μ_2 和 σ_2 分别为变量 p_2 的均值和标准差； ρ

104

为两个变量 p_1 和 p_2 的相关系数。应指出，一条荷载-位移曲线可得到一对回归参数 p_1 和 p_2 ，

105

而对于特定建筑物下多条荷载-位移曲线将得到多对回归参数 p_1 和 p_2 ，故这里称其为变量。

106

事实上，在物理坐标系下两变量正态分布的概率密度等值线为椭圆形状，如图 1(a)所示。随

107

着概率密度水平的降低，其等值线的轮廓逐步向外扩展。然而，在常规的一次可靠性分析法

108

中，所有变量都转化到了标准化坐标系下，概率密度等值线为圆形，如图 1(b)所示。这一标

109

准化将回归参数定义为标准正态分布，即均值为零而标准差为 1，使得回归参数的值域失去

110

了原有物理意义。

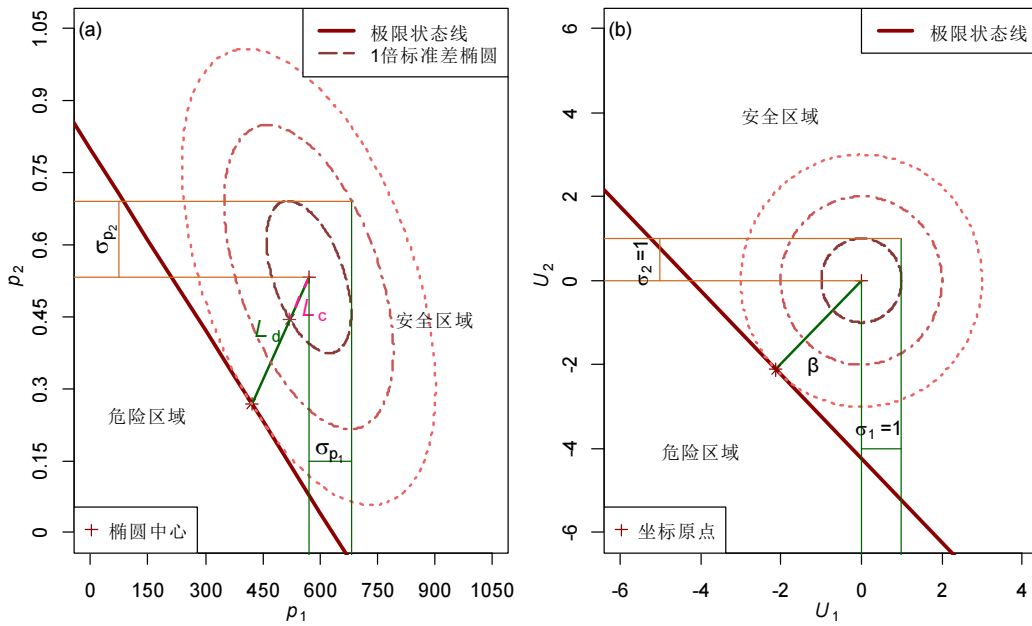


图 1 不同坐标系中几何可靠度指标计算示意

Fig.1 Illustration of the calculation of a geometric reliability index in different coordinate systems

2.3 极限状态方程的确定

对于正常使用极限状态(SLS)设计, 各种构筑物的功能函数或极限状态方程可定义为^[13]

$$g = Q_{ua} - Q_{LD} \quad (2)$$

式中: Q_{ua} 为允许荷载, 当位移 $S = 40 \text{ mm}$ 时, 可根据幂函数回归公式计算得到

$$Q_{ua} = p_1 S_a^{p_2} \quad (3)$$

式中: p_1 和 p_2 分别为幂函数回归参数值。

这里 Q_{LD} 为实际 (或设计) 荷载值。基于传统安全系数 F_s 的定义, 设计荷载值与承载能力之间的关系可写为

$$Q_{LD} = \frac{Q_{un}}{F_s} \quad (4)$$

式中: Q_{LD} 为单桩承载力特征值。 Q_{un} 为名义的承载能力, 即特定建筑物 (或特定场地) 下所有单桩的最大加载值 Q_{max} 的平均值。根据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^[10]。在文献[3]中针对国际上安全系数 F_s 设置为 3^[5] 与我国的安全系数取为 2 的情况进行了详细分析, 此不赘述。这里采用安全系数 F_s 设定为 2 进行计算。

对于基桩, 其载荷逐级增加到其最大加载值。为简化, 这里假设特定建筑物内所有桩最大加载值均一致。最大施加载荷多由上部结构的设计工程师推荐, 其值根据上部结构的特定载荷组合估算。例如, 垂直载荷可由结构的重量 (恒载或永久荷载) 和地震活动 (活载或可

131 变荷载)组成。这些数据也是桩基设计所必需的。

132 事实上,针对每一根检测基桩,根据其允许荷载(能力)和设计荷载(受荷)之间的比
133 值,可以确定性地计算出实际安全系数 \tilde{F}_s ,由下式给出:

$$134 \quad \tilde{F}_s = Q_{ua} / Q_{LD} \quad (5)$$

135 2.4 几何可靠度指标

136 由于回归参数服从双变量正态分布,其概率密度等值线为椭圆形状,如图1(a)所示。该
137 图中较小的虚线椭圆为单倍标准差椭圆,较大的实线椭圆表示刚达到极限状态线(或临界破
138 坏线)的发散概率密度等值线,二者的轮廓可以定义可靠度指标。图中左侧的粗实线为极限
139 状态线。其它线在图中均有标注(下同)。设计点与伪设计点分别被标示在大小两个椭圆上,
140 由“*”标示。这里的设计点为发散概率密度等值线与极限状态线的交点,由均值点出发至设
141 计点的连线将与单倍标准差椭圆有交点,可称为伪设计点。其中由均值点至伪设计点间的核
142 距离记为 L_c ,由均值点至设计点间的发散距离记为 L_d ,二者的比值即为几何可靠度指标:

$$143 \quad \beta_L = L_d / L_c \quad (6)$$

144 应指出,因单倍标准差和发散概率密度等值线均为椭圆,这里的距离比与Low和Tang
145 提出的椭球法中椭圆轴径比^[12]在原理上是一致的,但求解的算法和编程平台是截然不同的。
146 在常规一次可靠性分析中,可靠度指标是在n维标准化空间中由坐标原点到临界破坏面的最
147 短距离^[14],如图1(b)所示,该指标亦称为Hasofer-Lind指标。显然,标准化转换牺牲了模型
148 参数的物理意义。

149 3 特定建筑物下各类基桩的检测数据

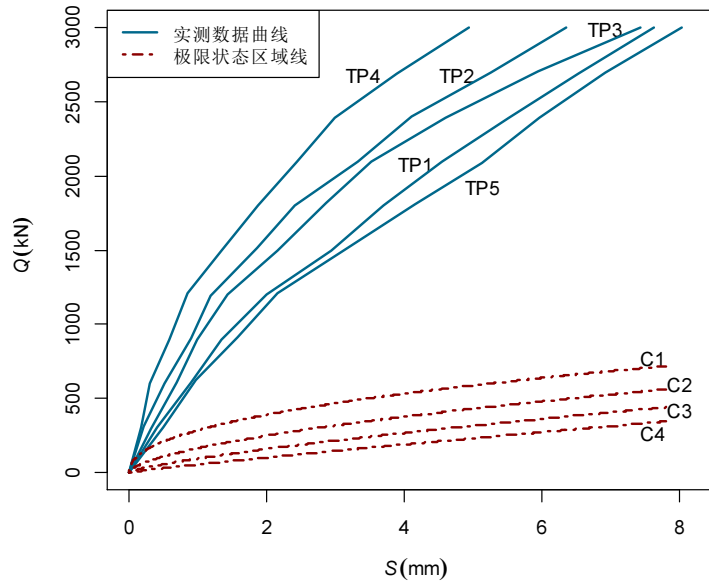
150 采用简化几何可靠性计算模型,以下结合文献中给出的单体建筑物下不同桩型的荷载-
151 位移测试曲线进行实例分析。

152 3.1 PHC管桩

153 PHC管桩(预应力高强度混凝土管桩)的荷载-位移数据源自文献[15]。该场地位于山
154 东省青岛发电厂,对其中一个单体建筑下的PHC管桩共抽取了五根进行测试,其编号为TP1、
155 TP2、TP3、TP4、和TP5。这5根桩的加载等级相同最大加载为3000kN,管桩直径均为0.55m,
156 桩身均采用C80混凝土,桩长平均值为6.8m。其桩顶荷载-位移曲线如图2所示。可见,这些
157 加载-位移曲线各不相同,且每一条测试曲线均呈非线性关系,即随着位移的增加承载力的
158 变化梯度有所减缓。随着沉降量值的增加,曲线的离散程度加大。这些曲线间的离散性是由
159 于桩身与土体间剪切强度的不确定性所致。

160 此外,图2中以点划线的形式示意出若回归参数对恰好位于极限状态线上时相应的荷载
161 -位移曲线C1、C2、C3和C4。这四条曲线基本处于失去稳定的边缘上,若实际测试中出现类
162 似的成果,现场测试工程师可以直观地给出失稳判定。

163 对比图中实测曲线与安全区域线可以看出，当荷载-位移曲线经历初始弹性阶段后，在
164 同样的沉降量值时，实际测试曲线对应的施加荷载是明显大于安全区域线的。亦即测试曲线
165 若在安全区域线上方区域，则直观地表明基桩为合格的。



166

167 图 2 特定建筑物中 PHC 管桩的荷载-位移数据

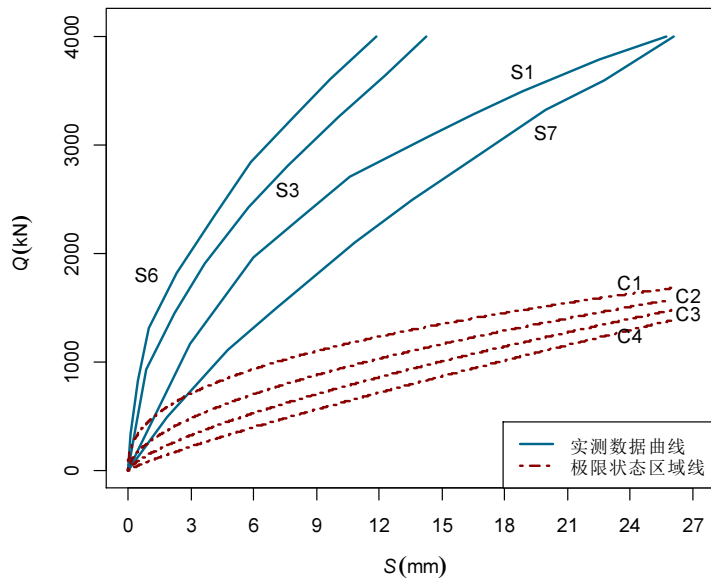
168

Fig.2 Load-displacement curves of PHC pipe piles for a specific building

169

169 3.2 钻孔灌注桩

170 钻孔灌注桩的荷载-位移数据来自文献[16-17]。在单体建筑物下共抽取了4根钻孔灌注
171 桩进行测试，其编号分别为S1、S3、S6、和S7。这些桩的加载等级相同且最大加载均为4000kN，
172 桩径均为1.5m，桩长均为12m，桩的长径比为8.0。其每根测试桩的荷载-位移曲线如图3所示。
173 可见，每一条测试曲线均呈非线性关系，且随着沉降的增加曲线离散程度增加。



174

175

图 3 特定建筑物中钻孔灌注桩的荷载-位移数据

176

Fig.3 Load-displacement curves of cast-in-situ augered piles for a specific building

177

3.3 CFG 桩单桩

178

179

180

181

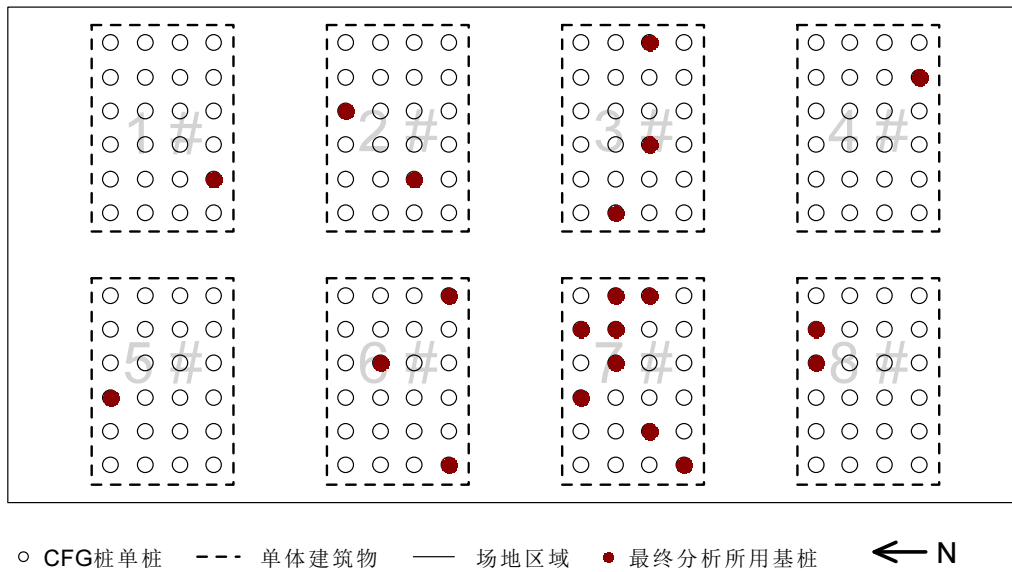
182

183

184

185

CFG 桩单桩的荷载-位移测试由北京市建设工程质量第一检测所完成。针对北京市大兴区星光影视城场地^[3,18]，共完成 21 根工程桩的测试，平均桩长 15.88m，桩径大体上均为 400mm，加载等级均分为 10 级。其中 7#单体建筑物中共抽取 8 根桩，桩长均为 16m。7#单体建筑物基桩的最大加载为 1240kN。一个场地中各个单体建筑物 CFG 桩单桩的现场布置示意如图 4 所示，图中虚线表示单体建筑物，圆圈表示基桩，实心点表示测试基桩所处的位置。图 5 给出测得的荷载-位移曲线，其中图 5(a)为该场地下所有测试数据，而图 5(b)为该场地中 7#单体建筑物下基桩的荷载-位移曲线。由图可见，无论是场地水平下还是单体建筑物下，随着位移的增大，测试曲线间的离散性均增加。



186

187

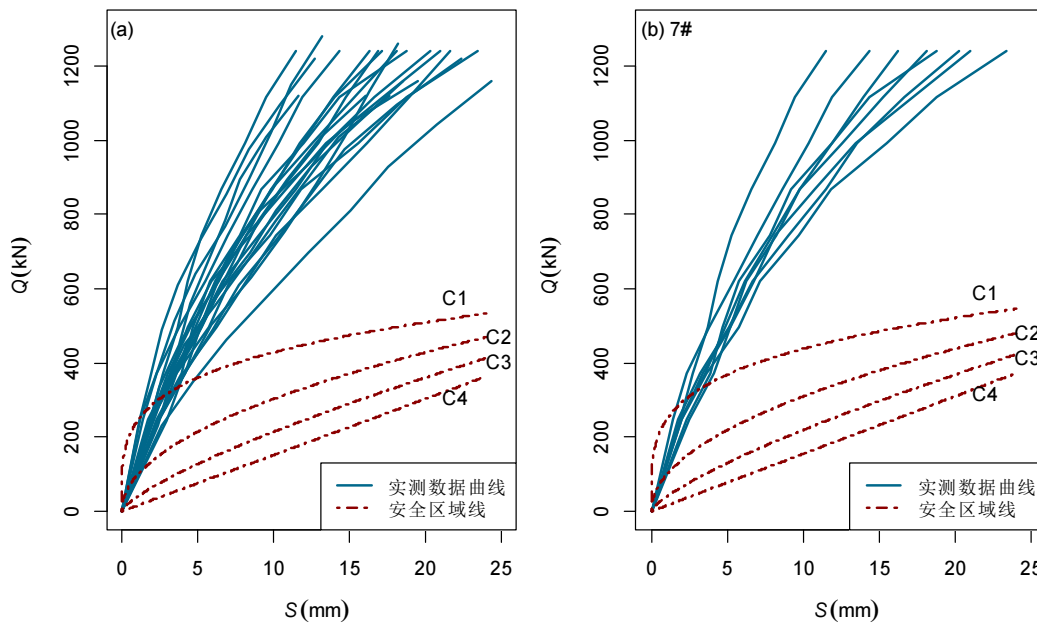
图4 一个场地中单体建筑物 CFG 桩单桩设置示意

188

Fig.4 Setting up of chosen single piles of the CFG composite foundation for each single building

189

at a site



190

191

图5 CFG 桩单桩的荷载-位移曲线：(a) 场地水平下；(b) 7#单体建筑下

192

Fig.5 Load-displacement curves of single piles of the CFG composite foundation: (a) for all

193

buildings at a site; (b) for 7# building

194

4 计算成果分析

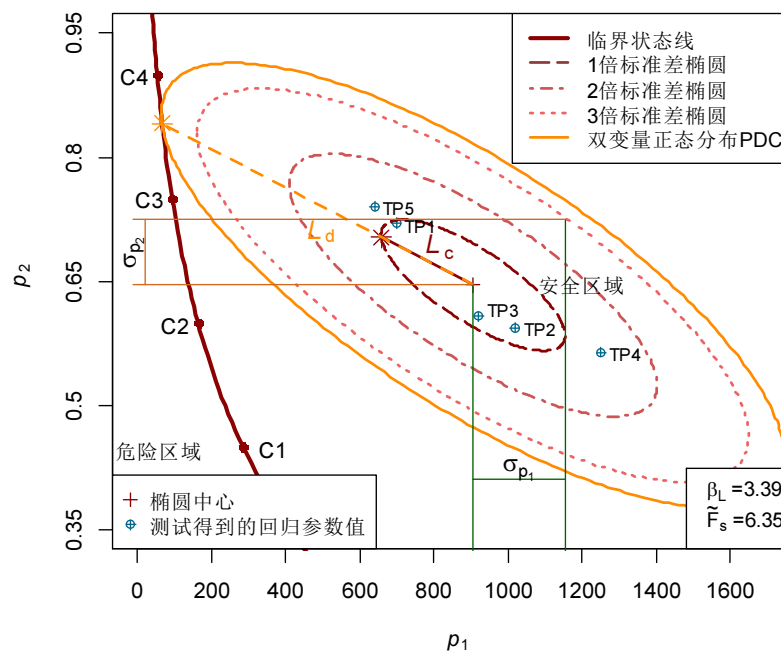
195

针对上述各类型基桩荷载-位移的测试数据，分别给出采用简化几何可靠性算法得到的

196 结果。

197 4.1 PHC 管桩

198 图 6 给出单体建筑下的 PHC 管桩采用几何方法定义的可靠度指标，为 3.39。相关系数
199 采用表 1 中的平均值 $\mu_\rho = -0.77$ 进行计算。可见，该算法中对于可靠度指标的定义是透明的，
200 且在回归参数的原始物理空间中展示。由此，工程技术人员可直观地掌握在某一特定建筑物
201 下回归参数联合分布的特征、极限状态线与桩基础安全度三者之间的联系。针对这个案例，
202 每根桩的实际安全系数可求出，进而得到特定建筑物下所有桩的实际安全系数均值（6.35）
203 与标准差（0.4），如表 2 所列。



204

图 6 PHC 桩的几何可靠度指标

205

206

Fig.6 Geometric reliability index for the PHC piles

207 4.2 钻孔灌注桩

208 图 7 给出单体建筑物下钻孔灌注桩的几何可靠度指标示意。可见，尽管在单体建筑物下
209 只抽取了 4 根钻孔灌注桩进行测试，但该简化算法也能给出相应的实际安全系数和可靠度指
210 标。这 4 根桩的实际安全系数均值为 3.1，该量值是完全可以满足规范要求。可靠度指标
211 的估计值为 1.91。就量值而言，该可靠度指标有些偏低，这是由于测试数据的离散性较大所
212 致，进而导致回归参数的单倍标准差椭圆偏大。

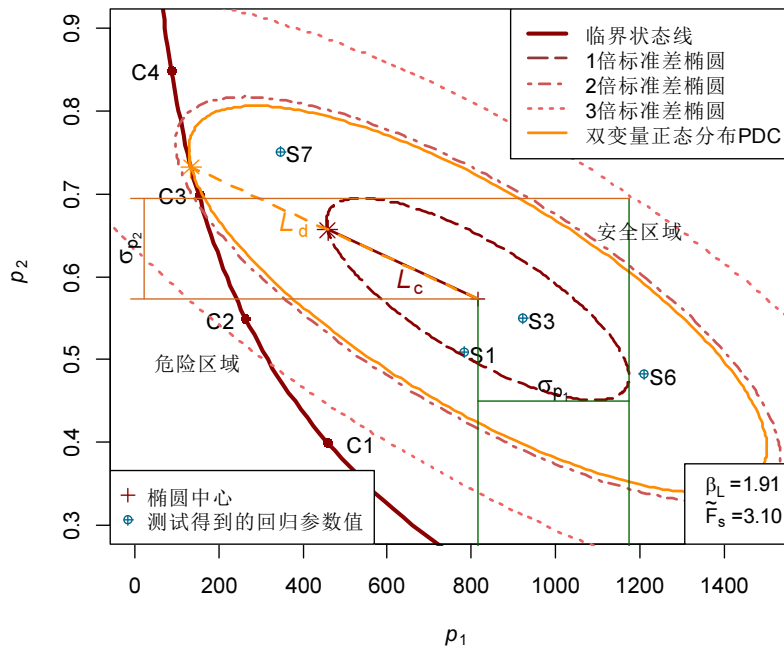
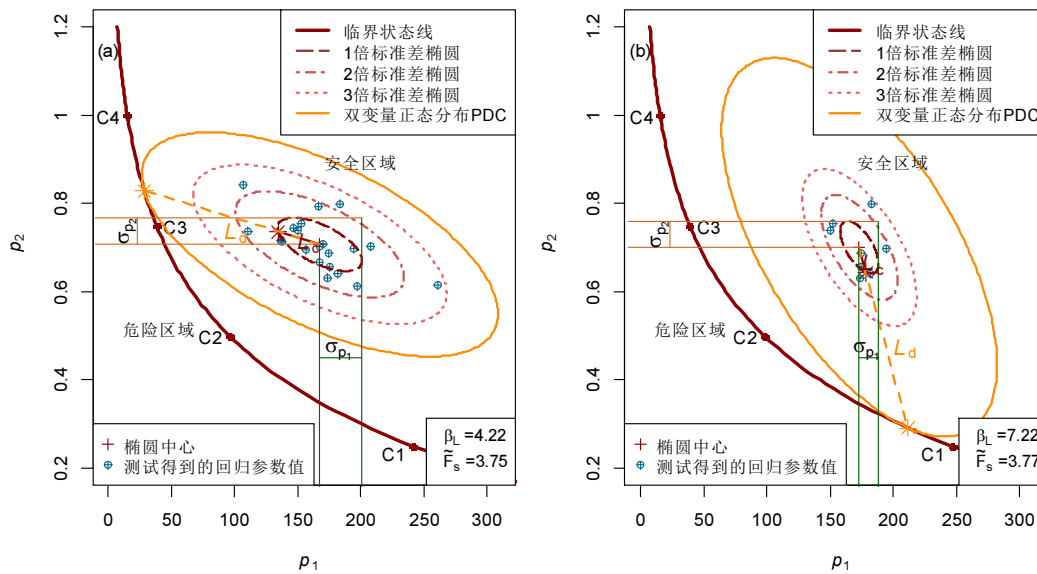


图 7 钻孔灌注桩的几何可靠度指标

Fig.7 Geometric reliability index for the cast-in-situ augered piles

4.3 CFG 桩单桩

图 8 给出 CFG 桩单桩的几何可靠度指标定义。其中，图 8(a)给出特定场地的情况，可靠度指标为 4.22，这与文献[3]中给出的计算成果基本一致。而图 8(b)给出该场地 7#单体建筑物下基桩可靠度指标，为 7.22。两种情况下的相关系数 ρ 均取为-0.62（即场地水平下的量值）。可见，由于该场地所有基桩的设计荷载值是一致的，并且采用相同的荷载-位移计算模型（幂函数模型），两种情况下构建的极限状态线无异。值得指出的是，两种情况下给出比较接近的实际安全系数值，这是由于特定场地与单体建筑物下的地基承载力特征值以及实际荷载值均相差不大所致。由于两种情况下回归参数间的统计特性（即均值和标准差）各异，进而单倍标准差椭圆和发散椭圆在轮廓均有明显不同，最终使二者得到的可靠度指标存在较大差异。因此，通过一个场地计算得到的可靠度指标并不能全面反映出该场地中特定建筑物下的基桩可靠性。为提高建筑物的安全性尚需在可靠性分析中深入剖析各单体建筑物不确定性的影响因素。



228

229 图 8 CFG 桩单桩的几何可靠度指标: (a) 特定场地下, (b) 7#特定建筑物下

230 Fig.8 Geometric reliability index for single piles of the CFG composite foundation: (a) for all
231 buildings at a site; (b) for 7# building

232 4.4 算法验证

233 采用一次可靠性法 (FORM) 对几何可靠性分析成果进行了验证。表 2 分别列出各建筑
234 物的计算成果, 可见, 两种算法给出的可靠度指标均较为接近。

235 表 2 各场地不同构筑物的相应可靠度指标

236 Table 2 Computed reliability indexes for different structures at each site

构筑物名称	建筑物	单桩承载力特征值 Q_{LD} (kN)		实际安全系数的平均值	实际安全系数的标准差	几何可靠度指标	FORM 计算的可靠度指标
		均值	标准差				
PHC 管桩	特定建筑物	1500	0	6.35	0.40	3.39	3.39
钻孔灌注桩	特定建筑物	2000	0	3.10	0.52	1.91	1.91
CFG 桩单桩	7#建筑物	620	0	3.77	0.87	7.22	7.47
	场地水平	606	25	3.75	0.74	4.22	4.21

237

238 参照我国有关设计标准^[20-21], 对重要安全等级 (I 级) 结构构件的脆性破坏要求的目标
239 可靠度指标为 4.2, 一般安全等级 (II 级) 的为 3.7。Phoon 等人^[22]建议采用 3.2 作为基础工
240 程的目标可靠度指标。根据表 2 中给出实例分析结果, CFG 桩单桩下的可靠度指标均满足

241 要求，而采用钻孔灌注桩情况下的可靠度指标明显偏低。

242 5 软件系统开发

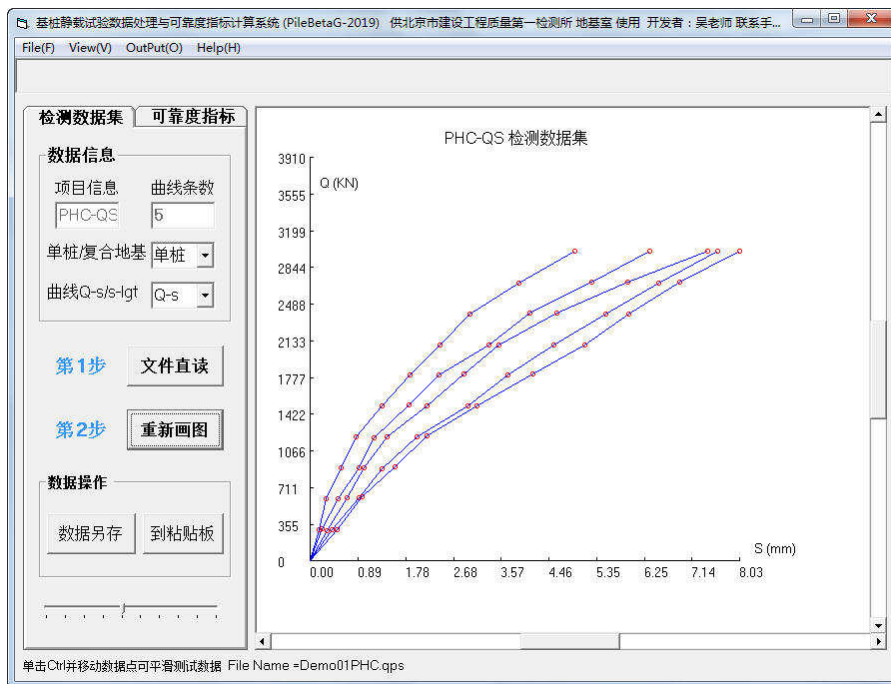
243 采用可视化编程语言 Visual Basic 6.0，将建议的简化算法原理进行封装，开发了基桩静
244 载试验数据处理与可靠度指标评估系统（PileBetaG2.15），以便推广应用。

245 5.1 系统功能模块的建立

246 根据基桩的设计要求和几何可靠度指标的计算理论，建立系统功能模块。其主要由测试
247 数据集与几何可靠度指标计算两部分组成。

248 5.2 检测数据集模块

249 图 9 给出检测数据集模块的操作界面。在数据读入时，点击第一步“文件直读”命令按钮，
250 可将单体建筑物下所有测试的基桩荷载-位移数据一次性读入。应注意该软件在读取数据时，
251 数据文件类型为“*.qps”格式，可采用记事本（notepad）等文本编辑工具打开。点击第二步“重
252 新画图”命令按钮，可绘制出由点线连接的荷载-位移曲线。进而点击“到粘贴板”按钮可将图
253 形直接粘贴到其它文档中。



254

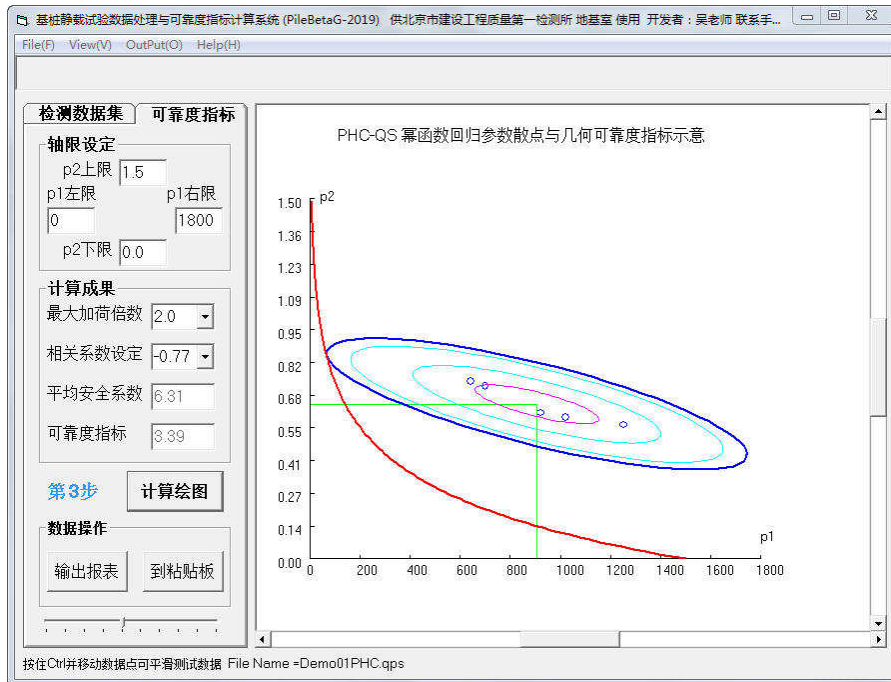
255 图 9 PileBetaG2.15 软件的检测数据集模块

256 Fig.9 Module for drawing out the test curves in the software of PileBetaG2.15

257 5.3 可靠度指标模块

258 图 10 给出可靠度指标模块的操作界面。点击第三步“计算绘图”按钮就可绘制出回归参
259 数坐标系下的表征几何可靠度指标的定义图形。软件自动计算出两个幂函数拟合参数集，并
260 绘制出单倍标准差椭圆、多倍和 β 倍标准差椭圆、以及极限状态曲线等图形。最终，给出几

261 何可靠度指标 β 和各桩的平均安全系数 \bar{F} 的计算结果。同样可通过点击“到粘贴板”按钮实现
262 图形输出。



263

264

图 10 PileBetaG2.15 软件的可靠度指标模块

265

Fig.10 Module for demonstrating of the reliability index in the software of PileBetaG2.15

266

267

结合现场实际情况，软件系统允许变动最大试验荷载倍数和回归参数间的相关系数等输入条件，比较与展示不同的分析成果。这种界面的便捷操作性使得现场工程技术人员更易于接受，加之几何可靠度指标计算的直观性，有利于助推可靠性分析技术在实际工程中的广泛应用。

268

269

6 讨论

270

271

单桩竖向抗压静载试验通常分为两类，即为设计提供依据的试验桩检测和工程桩验收检测。就检测样本数量而言，此方法更适用于后者的初步评估。这里给出的简化方法是依据极少量样本数据，且以假定回归参数服从正态分布为前提的。尽管这一假设具有一定的主观性，但也考虑到正态分布是经典统计分析中对自然界许多现象进行描述的重要分布形式^[23]。当回归参数数据足够多，拟合优度检验能够判定其服从具体的分布类型时，可采用未经简化的几何可靠性分析方法，如文献[8]所述。理论上讲，3至6个样本难以称为小样本数据，如何利用先验知识扩充数据样本值得深入研究。

272

273

274

275

276

由于岩土参数不确定性的影响，回归参数的波动性往往会较大，造成计算的可靠度指标被低估或高估。基于极少量数据得到的回归参数的均值和标准差，并不能全面反映整个建筑物下荷载-位移曲线的情况，容易出现错误评估。如何基于极少量检测数据准确评估特定建筑物下基桩承载能力的变异性，这仍将是基础工程可靠性设计中具有挑战意义的课题之一。为此，对于重要单体建筑物，适当地增加基桩检测数量，对消除统计不确定性大有裨益^[19]。

277

278

283 依据相关技术规范^[10]，工程桩验收检测主要判定基桩的抗压极限承载力是否具有两倍
284 的安全储备（即极限承载力应至少不小于承载力特征值的两倍）。更为重要的是，几何可靠
285 性方法不仅考虑检测曲线的离散性，而且给出特定建筑物下的承载力安全储备值（即可靠度
286 指标）。可见，可靠性算法不仅继承了传统安全系数的概念，同时考虑了基本设计变量的离
287 散性。况且，几何可靠性分析清晰地给出回归参数概率密度等值线与极限状态线之间的相对
288 关系。几何可靠度指标被直观地定义为距离比（即发散距离与核心距离之比），这为探究构
289 筑物的可靠性评估提供全新算法与视角。

290 应指出，本文的所有计算与绘图均在 R 语言^[24]平台下完成，具体实施算法与文献[8]中
291 的类似。当同一建筑物下加载水平不一致或者基桩尺寸有显著差异时，上述简化算法不再适
292 用。此外，本文重点强调了特定建筑物下与允许承载密切相关的两个回归参数的离散性，而
293 将荷载效应项 Q_{LD} 设定为定值，即忽略了荷载变异性的影响。如文献^[25]所讨论的，荷载变异
294 性对可靠度指标的影响较小，但类似的问题应值得进一步研究。

295 7 总结

296 针对特定建筑物下基桩荷载-位移测试成果的特点，发展了适用于特定建筑物下简化几
297 何可靠性评估算法。由于测试数据不足以对每个基桩荷载-位移曲线回归参数的边缘概率密
298 度分布进行拟合检验，引入了正态分布简化假定。由于正态分布的特点使得回归参数间的联
299 合概率密度等值线为椭圆形式。几何可靠性算法因架构于随机变量的原始空间中，基本概念
300 清晰，物理意义直观，这将会有效促进工程技术人员掌握可靠性理论。可视化软件系统
301 PileBetaG 的开发，繁杂的可靠度理论得以封装与解译，这为工程技术人员接受与推广不确
302 定性评估成为可能，也将有力推动其实用化进程。针对特定建筑物中基桩的概率评估，常规
303 一次可靠性方法的分析成果验证了几何可靠性算法的可行性。简化几何算法可充分地考虑回
304 归参数的离散性对评估结果的影响，是对传统概率设计方法的补充与完善。

305 特定建筑物下基桩的可靠度指标往往与该场地中所有建筑物下基桩的可靠度指标存在
306 差异，有必要对特定建筑物下基桩的可靠性进行单独分析。应指出，基于少量检测数据的特
307 定建筑物下基桩荷载-位移的回归参数间相关系数的给定方法尚需深入研究。

308 参考文献

- 309 [1]. Park S, Roberts LA, Misra A. Design methodology for axially loaded auger cast-in-place and
310 drilled displacement piles[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*,
311 2012, 138(12):1431–1441.
- 312 [2]. 白晓宇, 张明义, 朱磊, 王永洪, 王静静. 强风化花岗岩中嵌岩短桩承载特征原位试验
313 与有限元分析[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017, 48(2):512–524.
- 314 BAI Xiao-yu, ZHANG Ming-yi, ZHU Lei, et al. In-situ test and FEM analysis on bearing characters of
315 rock-socketed short pile for highly weathered granite[J]. *Journal of Central South University (Science and
316 Technology)*, 2017, 48(2):512-524.
- 317 [3]. 辛军霞, 吴长征, 高伟, 任国家, 马骏翔, 范磊. 基于 Copula 函数的 CFG 桩复合地基载

- 318 荷-变形曲线的概率分析[J]. 岩土力学, 2016, 37(S1):424-434.
- 319 XIN Jun-xia, WU Xing-zheng, GAO Wei, et al. Copula-based analysis of load-displacement curves of
320 cement-fly ash-gravel pile[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(Suppl.1): 424-434.
- 321 [4]. 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
322 [J]. 工程质量, 2017, 35(9):41-46.
- 323 WU Xing-zheng, WANG Rui-kai, XIN Jun-xia, et al. Probability density distribution of load deformation
324 curves of geotechnical structures at a specific site[J]. **Construction Quality**, 2017, 35(9):41-46.
- 325 [5]. Phoon KK, Kulhawy FH. Serviceability limit state reliability-based design[P]. In:
326 Reliability-based design in geotechnical engineering: Computations and applications, Taylor
327 and Francis, London, 2008, 344-383.
- 328 [6]. Dithinde M., Phoon K.K., Wet M.D., Retief J.V. Characterization of model uncertainty in the
329 static pile design formula[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*,
330 2011, 137(1):70-85.
- 331 [7]. Wu XZ. Geometric reliability analysis applied to wave overtopping of sea defences[J]. *Ocean*
332 *Engineering*, 2015, 109:287-297.
- 333 [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,
334 2020, 41(6):1-11.
- 335 WU Xing-zheng, WANG Rui-kai, XIN Jun-xia. Geometric reliability analysis of geotechnical structures at a
336 specific site[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(6):1-11.
- 337 [9]. Wu XZ, Xin JX. Probabilistic analysis of site-specific load-displacement behaviour of
338 cement-fly ash-gravel piles[J]. *Soils and Foundations*, 2019, 59(5):1613-1630.
- 339 [10]. 中国建筑科学研究院. JGJ106—2014 建筑基桩检测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出
340 版社, 2014.
- 341 China Academy of Building Research. JGJ 106—2014 Technical code for testing of building pile
342 foundations[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2014.
- 343 [11]. Baecher GB, Christian JT. Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering[M]. Wiley,
344 Chichester, UK. 2003.
- 345 [12]. Low B.K., Tang W.H. Efficient spreadsheet algorithm for first-order reliability method[J].
346 *Journal of Engineering Mechanics-ASCE*, 2007, 133(12):1378-1387.
- 347 [13]. Uzielli, M., Mayne, P.W. Serviceability limit state CPT-based design for vertically loaded
348 shallow footings on sand[J]. *Geomechanics and Geoengineering: An International Journal*,
349 2011, 6 (2):91-107.
- 350 [14]. Hasofer AA, Lind AM. Exact and invariant second moment code format[J]. *Journal of*
351 *Engineering Mechanics-ASCE*, 1974, 100(1):111-121.
- 352 [15]. Li XY, Bai XY, Zhang MY. Study on bearing capacity characteristics of rock socketed short
353 pile in weathered rock site[J]. *Journal of Engineering Research*, 2019, 7(3):76-89.

- 354 [16].Tejchman A, Gwizdala K. Comparative analysis of bearing capacity of large diameter bored
355 pile[P]. Proc., 1st Int. Conf. Deep Foundations on Bored and Auger Piles, V. Impe, ed.,
356 Balkema, Rotterdam, Ghent, 1988, 553–558.
- 357 [17].Haldar S, Babu G.L.S. Load resistance factor design of axially loaded pile based on load test
358 results[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008,
359 134:1106–1117.
- 360 [18].北京市建设工程质量第一检测所有限责任公司. 北京星光影视股份有限公司生产科研
361 基地项目 CFG 桩检测报告[R]. 北京: 北京市建设工程质量第一检测所有限责任公司,
362 2013.
- 363 Beijing Construction Engineering Quality First Testing Institute Co. Ltd. The quality testing of the CFG pile
364 foundation on the bases of the production and scientific research for Beijing Xingguang Film & TV
365 Equipment Technologies Co., Ltd [R]. 2013.
- 366 [19].吴兴征, 方有亮, 余莉, 冯震, 杜二霞. 土工试验教学中如何培养学生的不确定性思维
367 [J]. 高等建筑教育, 2019, 28(3):122–130.
- 368 WU Xing-zheng, FANG You-liang, YU Li, et al. Training undergraduates to think with uncertainty in mind
369 through soil mechanics laboratory testing modules[J]. **Journal of Architectural Education in Institutions**
370 **of Higher Learning**, 2019 28(3):122-130.
- 371 [20].建筑结构可靠性设计统一标准 GB50068-2018[S]. 中国建筑工业出版社, 2018.
- 372 Unified standard for reliability design of building structures GB50068-2018 [S]. Beijing: China Architecture
373 and Building Press, 2018.
- 374 [21].水利水电工程结构可靠度设计统一标准 GB50199-2013[S]. 中国计划出版社, 2014.
- 375 Unified design standard for reliability of hydraulic engineering structures GB50199-2013[S]. Beijing: China
376 Planning Press, 2014.
- 377 [22].Phoon KK, Kulhawy FH, Gridoriu MD. Multiple resistance factor design for shallow
378 transmission line structure foundations[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental
379 Engineering, 2003, 129(9):807–818.
- 380 [23].van Albada SJ, Robinson PA. Transformation of arbitrary distributions to the normal
381 distribution with application to EEG test–retest reliability[J]. Journal of Neuroscience
382 Methods, 2007, 161(2):205–211.
- 383 [24].R Development Core Team. R: A language and environment for statistical computing[R]. R
384 Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, ISBN: 3-900051-07-0.
385 <http://www.R-project.org>. 2013.
- 386 [25].边晓亚, 郑俊杰, 徐志军. 考虑参数和模型不确定性的基桩正常使用极限状态可靠度分
387 析[J]. 岩土力学, 2014, 35(11):3317–3322.
- 388 BIAN Xiao-ya, ZHENG Jun-jie, XU Zhi-jun. Reliability analysis of serviceability limit state of foundation
389 piles considering uncertainties of parameter and model[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014,
390 35(11):3317-3322.