

深层搅拌桩复合地基承载力的概率分析^{*}

Probability analysis of the bearing capacity of deep mixing composite foundation

洪昌华 龚晓南 温晓贵
(浙江大学土木工程学系, 杭州, 310027)

文 摘 研究了水泥系深层搅拌桩复合地基承载力概率分析的方法, 这对复合地基的可靠性设计将起着积极的推进作用。采用面积比的公式来计算搅拌桩复合地基的极限承载力, 并通过一些实例统计了模型不确定性因子。首先通过分析确定了桩间土极限承载力以及桩体极限承载力的均值和方差, 并由此得出复合地基极限承载力的概率特性。然后根据复合地基静载试验结果用 Bayes 更新的方法得到了更为可信的水泥土搅拌桩复合地基承载力的概率特性。最后用一个实例说明了计算过程。

关键词 深层搅拌桩复合地基, 承载力, 概率分析, 贝叶斯原理

中图法分类号 TU472.3⁺6

文献标识码 A

文章编号 1000-4548(2000)03-0279-05

作者简介 洪昌华, 男, 1973年生, 浙江大学土木系岩土工程研究所博士研究生。主要从事土工织物加筋、地基处理、岩土工程可靠度方面的研究工作。

Hong Changhua Gong Xiaonan Wen Xiaogui

(Civil Engineering Department of Zhejiang University, Hangzhou, 310027)

Abstract In the paper, the probability analysis method of the bearing capacity of cement deep mixing composite foundation is investigated, which will push the developing of the reliability design method of composite foundation. The bearing capacity of cement deep mixing composite foundation is calculated using the area ratio formula, and the model uncertainty factor is also investigated through some case analysis. First, the mean and variance of the bearing capacities of the cement pile and the soil between the cement piles are ascertained after analysis, and so the probability characteristic of the composite foundation is deduced. Then more reliable probabilistic characteristic of the bearing capacity is gained using Bayes' s theorem after considering the results of the plate-loading test. Finally an example is used to illustrate the calculating process.

Key words cement deep mixing composite foundation, bearing capacity, probability analysis, Bayes theorem

1 前 言

近年来水泥系深层搅拌桩复合地基在软土地区应用越来越广泛, 并且取得了很好的社会效益。目前深层搅拌桩复合地基的设计理论有了很大的发展, 然而对复合地基的可靠度研究却开展得很少, 几乎是空白。由于复合地基的不确定性因素比天然地基和桩基更多, 这就不可避免地在设计中出现保守的倾向。因此, 除了有条件时在现场作试桩试验, 补充完善设计公式外, 还应该着眼于过去的成果, 从概率统计的观点上进行尝试, 这在工程上有很高的应用价值。在地基基础设计中采用以可靠度理论为基础的概率极限状态设计方法是大趋势。本文研究了水泥系深层搅拌桩复合地基承载力概率分析的方法, 这对复合地基的可靠性设计将起着积极的推进作用。

2 深层搅拌桩复合地基承载力计算模型

深层搅拌桩复合地基属于柔性桩复合地基, 其破

坏模式可以分为两种情况: 一种是桩间土首先破坏进而发生复合地基全面破坏; 另一种是桩体首先破坏进而引发复合地基的全面破坏^[1]。在实际工程中, 桩间土和桩体同时达到破坏是很少遇到的。大多数工程实践中, 都是桩体先破坏, 继而引起复合地基的全面破坏。深层搅拌桩复合地基承载力的计算可以采用面积比的公式进行:

$$p_c = mp_p + \lambda(1-m)p_s \quad (1)$$

式中 p_c 是复合地基的极限承载力; p_p 是搅拌桩单桩的极限承载力; p_s 是桩间土的极限承载力; m 是复合地基的面积置换率; λ 是桩间土承载力折减系数, 《建筑地基处理技术规范》JGJ 79-91 规定, λ 的取值视桩端土的软硬程度而定: 当桩端是软土时, $\lambda = 0.5 \sim 1.0$, 当桩端是硬土时, $\lambda = 0.1 \sim 0.4$, 当不考虑桩间软土的作用时, $\lambda = 0$ 。通常, 搅拌桩端都处在软土中, 设计中常取 $\lambda = 0.6$ 。

搅拌桩的极限承载力 p_p 可以按以下两种情况比较确定:

a) 用与刚性桩相似的公式按土的支承力计算;

^{*} 国家自然科学基金资助项目(No. 59679016)

到稿日期: 1999-07-09

b) 按桩身水泥土的强度计算:

$$\left. \begin{aligned} p_p &= \eta \cdot q_u \\ p_p &= \sum_{i=1}^N U_p f_i l_i + \alpha_p q_p \end{aligned} \right| \quad (2)$$

式中 q_u 是与搅拌桩身加固土配合比相同的室内加固土试块 90 d 龄期的无侧限抗压强度平均值; η 是强度折减系数; U_p 、 A_p 分别是桩周长和截面积; N 是桩长范围内土的层数; l_i 是每层土的厚度; f_i 是各土层的极限摩阻力; q_p 是桩端天然地基土的极限承载力; α 是其折减系数。

大部分工程静载试验后的开挖表明, 桩体均有被压碎的现象, 这说明桩体破坏发生在土体破坏之前, 因此按照桩身水泥土的强度来计算搅拌桩的极限承载力是合理的, 本文对桩体承载力的概率分析就是建立在这个基础上的。

JGJ 79-91 中认为, η 的取值范围为 0.35~0.50, 实际上它的取值考虑了搅拌桩承载力的安全性和水泥土强度的安全性两个方面的折减^[2]。在进行深层搅拌桩复合地基承载力的概率分析时, 需要的是承载力极限状态, 所以不应该考虑折减, η 的取值反映的应该是现场桩身强度和室内试块强度之间的差别。研究资料表明, 搅拌桩现场桩身强度是室内水泥土试块强度的 0.5~0.75 倍^[3]。

计算桩间土极限承载力的公式比较多, 本文建议采用汉森公式, 对于搅拌桩复合地基中常用的条形基础, 可以表示为如下形式:

$$p_s = cN_c + \gamma DN_q + \frac{1}{2} \gamma B N_\gamma \quad (3)$$

式中 N_c 、 N_q 、 N_γ 是承载力系数, 均为内摩擦角 φ 的函数; γ 是地基土的容重, 这里将基础底面上下的土容重看成是相同的; c 是地基土的粘聚力; B 和 D 分别是基础的宽度和埋深。

3 概率分析

在传统定值设计方法中, 所有变量都当作定值, 由此计算出的复合地基承载力 p_c 也是定值。虽然定值设计方法经过长期实践证明是一种有效的设计方法, 但它的最大缺点是没有考虑实际存在的不确定性的影响。所以, 对搅拌桩复合地基承载力进行概率分析是必要的, 也更符合实际。

对深层搅拌桩复合地基进行概率分析的目的是要获得承载力 p_c 的概率特性。这首先要确定计算模式中各个变量的概率特性。基础宽度 B 、埋深 D 的可变性很小, 计算中可以作为确定的变量。地基土 γ 、 c 、 φ 应当作为随机变量, 很多研究表明它们服从正态分

布, 并有密切的相关性。水泥土的无侧限抗压强度 q_u 也是随机变量, 文献[4]对 400 多个现场钻孔取得的试样试验表明, 它服从正态分布, 变异系数为 0.33, 室内水泥土的强度变异系数值应比这小。 q_u 的折减系数 η 是一个与工程经验和拟建工程性质密切相关的参数, 由于它的模糊性和不可控性, 本文在分析中假定它服从 [0.50, 0.75] 上的均匀分布。另外, 本文将桩间土承载力的折减系数 λ 当作常量处理, $\lambda = 0.6$ 。

式(1)是对各种因素进行高度简化后得出的一个计算公式, 是一种理想化的计算模型。因此, 为了考虑其它不确定性因素的影响, 在进行概率分析时还要考虑计算模型的不确定性, 将式(1)修正为:

$$p_c = I[m p_p + \lambda(1-m)p_s] \quad (4)$$

式中 I 是一个随机不确定因子, 等于复合地基承载力真值与计算模型式(1)之间的比值。

3.1 模型不确定性因子的概率分析

模型不确定性因子 I 等于承载力真值 Z 与承载力预测值 Y 之间的比值^[5]。复合地基承载力的真值是未知的, 只能通过其它的方法得到。通常, 复合地基静载试验的试验条件可以得到很好的控制, 因此认为静载试验得到的极限承载力 X 较好地代表了真值, 即忽略承载力量测的误差。对于不同的复合地基场地, 可以得到模型不确定性因子 I 的一个实现:

$$I_k = \frac{X_k}{Y_k} \quad (5)$$

如果获得了 I 的 k 个不同实现, 则可以统计出它的均值 μ_I 和方差 σ_I^2 。

表 1 收集了几个工程实例(包括粉体喷射和浆液搅拌), 并对模型不确定性因子进行了统计, 得出其均值为 $\mu_I = 1.255$; 标准差为 $\sigma_I = 0.077$; 相应的变异系数为 $V_I = 0.061$ 。可以发现, 这个模型是有偏的, 并且低估了搅拌桩复合地基的极限承载力; 但是就其离散程度来说, 是一个较好的预测模型。

3.2 桩间土极限承载力的概率特性

桩间土的极限承载力 p_s 是地基土参数 γ 、 c 、 φ 的函数。由于 γ 、 c 、 φ 之间的相关性较强, 所以必须考虑这种相关性的影响, 否则将会引起较大的误差。可通过将式(3)泰勒展开的方式而求得 p_s 的均值和方差:

$$\mu_{p_s} = \mu_\gamma N_c + \mu_c D N_q + \mu_\gamma B N_\gamma / 2 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{p_s}^2 &= \left(\frac{\partial p_s}{\partial \gamma}\right)^2 \sigma_\gamma^2 + \left(\frac{\partial p_s}{\partial c}\right)^2 \sigma_c^2 + \left(\frac{\partial p_s}{\partial \varphi}\right)^2 \sigma_\varphi^2 + \\ &2 \frac{\partial p_s}{\partial \gamma} \frac{\partial p_s}{\partial c} \rho_{\gamma c} \sigma_\gamma \sigma_c + 2 \frac{\partial p_s}{\partial \gamma} \frac{\partial p_s}{\partial \varphi} \rho_{\gamma \varphi} \sigma_\gamma \sigma_\varphi + \\ &2 \frac{\partial p_s}{\partial c} \frac{\partial p_s}{\partial \varphi} \rho_{c \varphi} \sigma_c \sigma_\varphi \end{aligned} \quad (7)$$

表1 模型不确定性因子 I 的统计Table 1 Statistic of model uncertainty factor I

工程名称	$m/\%$	q_u/kPa	p_s/kPa	p_s/kPa		I
				计算值	实测值	
温州水心小区柑组团 ^[1]	20.0	1350.0	90.0 ^①	211.95	257.25	1.214
南京南湖小区#4试桩 ^[2]	36.0	700.0	167.69	221.89	300.0	1.352
杭州温州路#27号住宅 ^[6]	8.75	1016.1 ^②	120.0	121.27	160.5	1.323
杭州安吉路住宅 ^[6]	11.7	1042.6 ^②	119.8	139.91	180.0	1.287
杭州油墨公司综合楼 ^[6]	14.2	1227.5 ^②	119.5	170.46	210.0	1.232
模型试验 P16 ^[7]	11.34	841.9 ^③	72.52	98.24	123.6 ^③	1.258
模型试验 P20 ^[7]	11.34	1446.1 ^④	72.52	141.07	158.2 ^④	1.121

注: ① p_s 由现场试验得出; ② q_u, p_s 由文献[6]中数据反推得到; ③ q_u, p_s 为30 d龄期时的值; ④ q_u, p_s 为60 d龄期时的值。

式中 μ, σ, ρ 分别是各个变量的均值、标准差以及变量间的相关系数; 下标表示变量名; N_c, N_q, N_γ 表示将均值 μ_φ 代入相应的公式计算得到的承载力系数值;

$$\frac{\partial p_s}{\partial \gamma} = D N_q + \frac{1}{2} B N_\gamma;$$

$$\frac{\partial p_s}{\partial c} = N_c;$$

$$\frac{\partial p_s}{\partial \varphi} = \mu_c \frac{\partial N_c}{\partial \varphi} + \mu_D \frac{\partial N_q}{\partial \varphi} + \frac{1}{2} \mu_B \frac{\partial N_\gamma}{\partial \varphi},$$

其中

$$\frac{\partial N_c}{\partial \varphi} = \frac{\partial N_q}{\partial \varphi} \cot \mu_\varphi - (N_q - 1) \csc^2 \mu_\varphi;$$

$$\frac{\partial N_q}{\partial \varphi} = N_q (\pi \sec^2 \mu_\varphi + 2 \sec \mu_\varphi);$$

$$\frac{\partial N_\gamma}{\partial \varphi} = 1.8 \left[\frac{\partial N_q}{\partial \varphi} \tan \mu_\varphi + (N_q - 1) \sec^2 \mu_\varphi \right].$$

3.3 单桩极限承载力的概率特性

如前所述, 单桩极限承载力 p_p 是两个随机变量 η 和 q_u 的乘积。 η 服从 $[0.50, 0.75]$ 上的均匀分布, 其均值 μ_η 和方差 σ_η^2 分别为 0.625, 0.00521。水泥土无侧限抗压强度 q_u 的均值和方差可以通过室内平行试验得出。所以 p_p 的均值和方差如下:

$$\mu_{p_p} = \mu_\eta \cdot \mu_{q_u} = 0.625 \mu_{q_u} \quad (8)$$

$$\sigma_{p_p}^2 = \mu_\eta^2 \sigma_{q_u}^2 + \mu_{q_u}^2 \sigma_\eta^2 + \sigma_{q_u}^2 \sigma_\eta^2 \quad (9)$$

3.4 搅拌桩复合地基极限承载力的概率特性

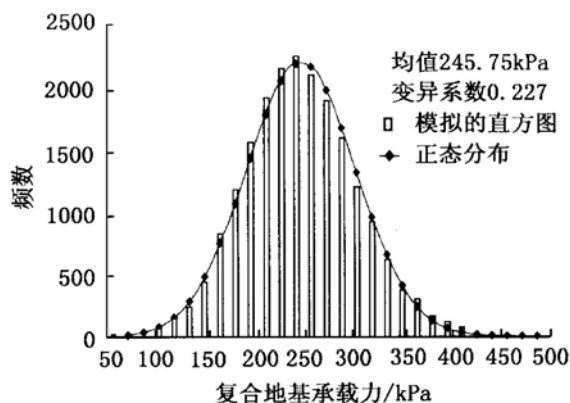
由式(4)得复合地基极限承载力 p_c 的均值和方差:

$$\mu_{p_c} = \mu_f [m \mu_{p_p} + \lambda (1 - m) \mu_{p_s}] \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{p_c}^2 = & m^2 (\mu_f^2 \sigma_{p_p}^2 + \mu_{p_p}^2 \sigma_f^2 + \sigma_{p_p}^2 \sigma_f^2) + \\ & \lambda^2 (1 - m)^2 \times (\mu_f^2 \sigma_{p_s}^2 + \mu_{p_s}^2 \sigma_f^2 + \sigma_{p_s}^2 \sigma_f^2) + \\ & 2 \lambda m (1 - m) \sigma_f^2 \mu_{p_p} \mu_{p_s} \end{aligned} \quad (11)$$

以上的分析过程中, 只使用了随机变量的二阶矩, 而不必知道每个变量的具体概率分布。由于只在求 p_s 的概率特性时进行了泰勒展开的近似, 所以式(10)~(11)是比较准确的。关键是输入的各个基本变量的概率特性误差要小。长期以来, 人们认识到不仅土工参数之间存在互相关性, 而且土工参数本身还存在自相关性。以上的推导分析考虑了参数之间的互相关性, 而参数的自相关性应在统计其空间均值的方差时加以考虑^[8]。

另外, 可以用 Monte-Carlo 方法模拟求复合地基极限承载力 p_c 的均值和方差以及概率分布, 此时需要知道各个变量的具体概率分布。本文假定 η 为均匀分布, 其余变量为正态分布情况下对 p_c 进行了 Monte-Carlo 模拟。图1所示为模拟 20 000 次所得的频数直方图以及根据模拟结果的正态分布理论曲线。

图1 Monte-Carlo 模拟的 p_c 分布Fig. 1 Distribution of Monte-Carlo simulation of p_c

由图1可知, 搅拌桩复合地基极限承载力 p_c 接近于正态分布。Monte-Carlo 模拟所用的参数: $D = 1 \text{ m}$, $B = 1.5 \text{ m}$, $\lambda = 0.6$, $m = 0.20$, $\mu_f = 1.255$, $V_f = 0.061$, $\mu_{q_u} = 1.2 \text{ MPa}$, $V_{q_u} = 0.25$, $\mu_\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$, $V_\gamma = 0.05$,

表 2 土层物理、力学性质指标

Table 2 Physical and mechanical properties of soil stratum

层次	层厚/m	土 名	含水量 /%	容 重 /(kN·m ⁻³)	孔隙比	塑性指 数	液性指 数	粘聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)
①- 2	0~ 1.5	淤泥及淤泥质填土	54	16.9	1.50	18	1.66	4.0	12.6
①- 3	1.5~ 3.0	素填土	40	18.2	1.10	20	0.85	12.0	13.5
②	未穿	淤泥质亚粘土	47	17.4	1.31	14	1.78	4.0	17.5

$\mu_c = 10 \text{ kPa}$, $V_c = 0.30$, $\mu_\varphi = 5^\circ$, $V_\varphi = 0.25$, $\rho_{\gamma_c} = 0.4$, $\rho_{\gamma_\varphi} = 0.4$, $\rho_{c_\varphi} = -0.3$ 。而用本文的上述公式可以解得 $\mu_{p_c} = 245.06 \text{ kPa}$, $V_{p_c} = 0.209$ 和 Monte-Carlo 模拟的均值很接近, 但变异系数稍小。

4 用原型试验结果进行 Bayes 更新

在深层搅拌桩复合地基的设计阶段, 一般都应进行少量的复合地基静载试验, 以便完成最终的设计。虽然因为数量较少而不能单独进行概率统计, 但若按贝叶斯原理将静载试验结果与前述的分析综合起来, 则可以获得更为满意的概率分析结果。贝叶斯原理表明, 可以通过抽样检验的方法, 将总体均值的先验分布修正为均值的后验分布。计算模型中, 笔者输入的是计算参数的均值及其方差, 因此预测的是承载力均值的一个先验分布, 而恰恰是场地复合地基承载力均值的性状决定了其承载能力及特性。

依据计算模型得到的是场地承载力 p_c 均值的一个先验分布, 它的均值为 μ_{p_c} , 方差为 $\sigma_{p_c}^2$ 。如果现场进行了 n 次静载试验, 其均值为 $\bar{p}_c$, 样本标准差为 σ , 则依据贝叶斯原理^[9]可以得到场地承载力均值的后验分布参数(均值和方差):

$$\mu'_{p_c} = \frac{\mu_{p_c} \sigma^2 + n \bar{p}_c \sigma_{p_c}^2}{\sigma^2 + n \sigma_{p_c}^2} \quad (12)$$

$$\sigma'^2_{p_c} = \frac{\sigma^2 \sigma_{p_c}^2}{\sigma^2 + n \sigma_{p_c}^2} \quad (13)$$

一般静载试验点的个数小于 3, 不足以统计其标准差 σ 。只能根据经验或以往某工程的多个静载试验结果类比得到 σ , 为了具有可比性, 对场地复合地基静载试验承载力进行统计时应用变异系数表示。对温州机场站坪扩建工程搅拌桩复合地基的 9 个试验点^[10]进行了统计, 发现其变异系数为 0.204(9 个试验点中桩长、桩径稍有不同, 严格说不是同一总体的样本), 这可以为其它工程提供参考。

如果还进行了天然地基承载力和单桩承载力的静载试验, 则同样可以对 p_s 和 p_p 进行贝叶斯更新, 具体

方法同上。并且可以用更新后 p_s 和 p_p 的概率特性来进行复合地基承载力的概率分析, 最后再用式(12)、(13)对 p_c 进行贝叶斯更新。

5 计算实例

下面以南京南湖小区[#] 4 试桩^[2]为例, 说明本文的搅拌桩复合地基承载力均值以及方差的计算方法, 以及如何用静载试验结果进行 Bayes 更新。

场地土层的物理力学性质指标如表 2 所示。面积置换率 $m = 0.36$, 桩身强度 $q_u = 700 \text{ kPa}$ 。因为第 ①层是填土, 所以地基土参数按第 ②层土计算。假定条形基础宽度 $B = 1.5 \text{ m}$, 埋深 $D = 1.0 \text{ m}$ 。由于缺乏详尽的资料, 故各个参数的变异系数均是假定的。 q_u 的变异系数为 0.25; 容重 γ , 粘聚力 c , 内摩擦角 φ 的变异系数分别为: 0.05, 0.25, 0.20。其它参数的取值如前所述。

按式(6)和式(7)可以求得桩间土极限承载力的均值和方差为 167.69 kPa, 3 581.04 kPa(相应的变异系数为 0.357)。按式(8)、(9)可以求得单桩极限承载力的均值和方差为 437.5 kPa, 12 129.77 kPa(相应的变异系数为 0.252)。按式(10)、(11)可以求得搅拌桩复合地基极限承载力的均值和方差为 278.48 kPa, 3 608.52 kPa(相应的变异系数为 0.216)。

在场上曾进行了一次复合地基静载试验, 试验得极限承载力为 300 kPa。如前述认为场地真实承载力的变异系数为 0.204, 则可按式(12)和式(13)对计算求得的搅拌桩复合地基极限承载力的概率特性进行 Bayes 更新。更新结果得搅拌桩复合地基极限承载力的后验分布参数: 均值 $\mu'_{p_c} = 289.04 \text{ kPa}$, 方差 $\sigma'^2_{p_c} = 1 837.853 \text{ kPa}$ (相应的变异系数为 0.148 3)。可见后验分布不仅修正了先验分布的均值, 而且方差大为减小, 这是一个更接近实际情况的均值的概率分布。

6 结 语

(1) 深层搅拌桩复合地基的不确定性因素比天然地基和桩基更多, 而且积累的资料相对较少, 对复合地基的可靠度研究开展得也很少。然而正由于它的不确

定性因素多, 从概率方面着手进行研究才更有其必要性。

(2) 本文分析了深层搅拌桩复合地基的承载模式, 采用水泥土的无侧限抗压强度来计算桩体承载力, 并按面积比的公式计算复合地基的极限承载力。通过收集到的一些实例, 对本预测模型的不确定性进行了分析, 发现这个预测模型是有偏的, 并且是低估了搅拌桩复合地基的承载力(模型不确定性因子的均值为 $\mu_f=1.255$); 但是就其离散程度来说, 是一个较好的模型(其变异系数为 $V_f=0.061$)。

(3) 按照面积比计算模型, 通过分析确定了桩间土和桩体极限承载力的均值和方差, 在此基础上得出复合地基极限承载力的概率特性, 并和 Monte- Carlo 模拟的结果相比较, 发现两者的计算结果相近。这说明本文的计算深层搅拌桩复合地基承载力均值和方差的方法是合理的。Monte- Carlo 模拟的结果表明, 复合地基承载力的分布可近似为正态分布。

(4) 由复合地基静载试验结果用 Bayes 更新方法得到了更可信的复合地基承载力均值后验分布的概率特性。后验分布不仅修正了先验分布的均值, 而且方差大为减小, 这是一个更接近实际情况的均值的概率分布。

参 考 文 献

1 龚晓南. 复合地基. 杭州: 浙江大学出版社, 1992

2 地基处理手册编写委员会. 地基处理手册. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988. 410~ 428

3 高宏兴. 软土地基加固. 上海: 上海科学技术出版社, 1990. 183~ 185

4 高 潮. CDM 在天津港东突堤码头地基加固工程中的应用. 见: 首届全国岩土力学与工程青年工作者学术讨论会论文集. 杭州: 浙江大学出版社, 1992. 526~ 529

5 Ronold K O, Bjerager P. Model uncertainty representation in geotechnical reliability analyses. Journal of geotechnical engineering, ASCE, 1992, **118**(3): 363~ 376

6 马海龙, 费勤发. 粉喷桩地基实验研究及设计方法. 岩土力学, 1995, **16**(3): 49~ 53

7 林琼. 水泥系搅拌桩复合地基试验研究: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 1989

8 Vanmarcke E H. Probabilistic modeling of soil profiles. Journal of geotechnical engineering, ASCE, 1977, **103**(11): 1227~ 1246

9 张广文, 刘令瑶. 确定随机变量概率分布参数的推广 Bayes 法. 岩土工程学报, 1995, **17**(3): 91~ 94

10 陈圣松, 陈胜乐, 曹玉新. 温州机场站坪扩建工程软土地基搅拌桩处理试验成果分析. 见: 浙江省第八届土力学及基础工程学术讨论会论文集. 上海: 上海交通大学出版社, 1998. 309~ 314

常见单位符号大小写混淆示例

单位名称	错误符号	标准符号
米	M	m
秒	S	s
吨	T	t
千克	Kg	kg
摩[尔]	Mol	mol
流[明]	Lm	lm
勒[克斯]	Lx	lx
帕[斯卡]	pa	Pa
摄氏度	°c	℃
电子伏	ev	eV
赫[兹]	HZ, H _z	Hz
酸碱度	PH, ph	pH

常见单位符号非标准写法示例

单位名称	非标准写法	标准符号
分	m	min
秒	sec	s
天	day	d
[小] 时	hr	h
年	y, yr	a
摩[尔]	mole	mol
焦[耳]	Joule	J
勒[克斯]	lux	lx
[细胞] 个每升	cells/ L	L ^{- 1}
转每分	rpm	r/ min
星期	wk	星期, 周
月	mo	月