维普资讯 http://www.cqvip.com

第18卷第1期
1997年3月

岩 土 力 学
Rock and Soil Mechanics

Vol. 18 No. 1
Mar. 1997

73-77

上海地区地基承载力的可靠度分析

熊启东 高大钊

(同济大学地下系,上海 200092)

TU431

文 摘 以上海地区20多个不同地段的地质资料为基础,采用JC法对汉森极限承载力公式进行了可靠度分析。其中对土性指标的统计,引入随机场理论处理其自相关的影响,在计算过程中还考虑其互相关性的影响。最后得到相应于总安全系数为2时各典型土层在不同荷载工况下的平均可靠度指标。

关键词 地基承载力;可靠度;相关性分析;敏感性分析

分类号 TU 431

1 引 言

我国岩土工程可靠性研究始于70年代末期,起步虽晚,但发展很快。目前,研究课题范围涉及土坡稳定、地基沉降、地基承载力、桩基以及土性指标统计等方面[1]。

上海地区土是典型的软粘土,多呈局部剪切破坏模式,故本文采用文献[2]推荐的汉森地基极限承载力计算公式。

本文在可靠度分析中考虑了土性同种指标间的自相关性和不同指标间的互相关性。且在指标统计中考虑自相关性时引入随机场理论;而对互相关性,则在计算过程中加以考虑。

2 极限状态方程的建立

在进行可靠度分析时,首先要确定极限状态方程及其基本变量。若以综合变量表示,则地基承载力的极限状态方程为

$$Z = R_f - S = 0 \tag{1}$$

式中 R_f 为地基极限承载力;S 为作用于地基表面的总荷载效应,它等于恒载和活载效应之和,即 $S = S_G + S_Q$。

根据文献[2]推荐的汉森公式,有

$$R_f = \frac{1}{2}N_\gamma \xi_\gamma \gamma B + N_q \xi_q \gamma_0 D + N_c \xi_c C \tag{2}$$

式中 B 为基础宽度(m);D 为基础埋深(m);γ 为基础底面以下土重度,水下用浮重度

收稿日期:1996-05-30。 熊启东,男,24岁,博士,从事岩土工程可靠性研究。

维普资讯 http://www.cqvip.com

(kN/m³)；γ_0 为基础底面以上各土层的加权平均重度，水下部分用浮重度；C 为粘聚力(kN/m²)；ξ_γ，ξ_q，ξ_c 为基础形状系数；N_γ，N_q，N_c 为承载力系数，都是内摩擦角 $\varphi(°)$ 的函数。

由此，极限状态方程(1)可改写为

$$Z = \frac{1}{2}N_\gamma\xi_\gamma\gamma B + N_q\xi_q\gamma_0 D + N_c\xi_c C - S_G - S_Q = 0 \tag{3}$$

或

$$g(B, D, \gamma, \gamma_0, C, \varphi, S_G, S_Q) = 0 \tag{4}$$

式(4)中所有参数可分为三类：第一类为几何尺寸。由于基础宽度 B 和埋深 D 一般都能事先确定，施工后变异性很小，可以忽略，因此把 B，D 作为常量看待；第二类为土性指标。包括土重度 γ，γ_0 和抗剪强度指标 C，φ。因上海地区同一土层的土重度的变异性很小，为简化起见暂不考虑，仍然把 γ，γ_0 作为常量处理。抗剪强度指标 C，φ 的变异性较大，其统计参数的取值对可靠度指标的影响较敏感，所以必须当作随机变量看待。在假定 C，φ 服从正态分布的前提下，本文运用随机场理论统计出 C，φ 空间均值的均值和标准差，以代替子样均值和标准差。至于 C，φ 的互相关性，将在计算过程中予以考虑；第三类为荷载效应。按《建筑结构设计统一标准》[5]的规定，恒载效应 S_G 服从正态分布，变异系数为 0.07。活载效应 S_Q 服从极值 I 型分布，其变异系数视简单荷载效应组合而定，如 $S_L = 0.238$(办公楼)，$S_L = 0.201$(住宅)，$S_L = 0.193$(风载)。S_G，S_Q 的均值需根据总安全系数法的设计表达式(5)确定：

$$m_{S_G} + m_{S_Q} \leqslant \frac{m_{R_f}}{K} \tag{5}$$

式中 m_{S_G} 为恒载效应均值；m_{S_Q} 为活载效应均值；m_{R_f} 为由 C，φ 均值代入汉森公式求出的地基极限承载力均值；K 为总安全系数(本文取 $K = 2$)。

假定荷载效应比值 $\rho = m_{S_Q}/m_{S_G}$，代入式(5)可得

$$m_{S_G} = \frac{m_{R_f}}{(1+\rho)K} \tag{6}$$

$$m_{S_Q} = \frac{\rho m_{R_f}}{(1+\rho)K} \tag{7}$$

有了恒载和活载效应的均值和变异系数，恒载和活载效应的标准差也可以计算出来。

在极限状态方程建立后，只要掌握基本随机变量 C，φ，S_G，S_Q 的概型、均值和标准差，就能直接用 JC 法求解可靠度指标 β。

3 抗剪强度指标间相关性的处理

3.1 自相关分析

土是自然历史的产物，地质成因条件的影响使土的性质与位置有关。为了使模拟土的性质的概率模型更符合实际，有必要引入随机场理论，把土性指标看成是随空间位置而变化的一簇随机变量，即在空间上分布的随机场。

对于统计均匀土层，土性指标 u 在某体积 V 范围内的空间均值定义为[3]

$$u_V = \frac{1}{V}\iiint_V u(x,y,z)\mathrm{d}x\mathrm{d}y\mathrm{d}z \tag{8}$$

维普资讯 http://www.cqvip.com

上海地区的土层是沉积形成的，可以认为在水平方向一定距离内，土性指标变化不大，而沿着深度方向变化较大。因此可以把土的抗剪强度指标 C,φ 看成是只沿着深度方向变化的一维随机场。相应于式(8)，它在区间 $[t,\ t+h]$ 上的空间均值为

$$u_h(t)=\frac{1}{h}\int_t^{t-h}u(t)\mathrm{d}t \tag{9}$$

在抗剪强度指标的统计中，h 相当于影响深度，t 相当于埋深，即起始位置。一旦工程问题明确，h,t 都是定值，$u_h(t)$ 就变成一个随机变量，其均值和方差如下：

$$E[u_h(t)]=\mu \tag{10}$$

$$\mathrm{Var}[u_h(t)]=\sigma^2\Gamma^2(h) \tag{11}$$

式中　μ,σ^2 为点均值和点方差；$\Gamma^2(h)$ 称为方差折减系数。Vanmarcke 提出，对充分大的 h，有下列近似公式[3]：

$$h\Gamma^2(h)=\delta_0 \tag{12}$$

δ_0 称为相关距离。在实际计算中，一般采用如下简化公式[3]：

$$\Gamma^2(h)=\begin{cases}1 & \text{当 } h<\delta_0 \text{ 时}\\ \delta_0/h & \text{当 } h\geqslant\delta_0 \text{ 时}\end{cases} \tag{13}$$

相关距离 δ_0 的计算，本文采用递推平均法。计算资料选用静力触探试验比贯入阻力 P_s 沿深度连续变化的曲线。这是因为寻求抗剪强度指标的自相关特性，需要有可以取得较多值的土工试验结果，而一般的工程勘察报告 C,φ 取样间距太大，无法提供足够的数据供分析。故为简便起见，C,φ 指标的相关距离暂且用由静探曲线求得的 P_s 的相关距离来代替。

在研究地基稳定性时，整体破坏的失效原则使我们关心的是某个空间范围内土体的空间平均特性，即 $u_h(t)$ 的均值和方差。有了点均值 μ，点方差 σ^2，相关距离 δ_0 以及影响深度 h，便可以根据式(10)、式(11)、式(13) 确定土性空间均值 $u_h(t)$ 的统计参数值。

3.2　互相关分析

本文将抗剪强度指标 C,φ 的互相关性放在可靠度计算过程中考虑。认为极限状态方程中各随机变量间两两相关(不相关的情况视为相关系数为零的特例)。设有 n 个随机变量 $X_i(i=1,2,\cdots,n)$，对应的功能函数为 $Z=g(x_1,x_2,\cdots,x_n)$，设计验算点为 $x_1^*,x_2^*,\cdots,x_n^*$，则可以推导如下公式[4]：

$$x_i^*=m_{x_i}-\eta_i\beta\sigma_{x_i} \tag{14}$$

$$\eta_i=\frac{\sum_{j=1}^{n}\left(\left.\frac{\partial g}{\partial x_j}\right|_{x^*}\cdot\sigma_{x_j}\rho_{ij}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\left(\left.\frac{\partial g}{\partial x_i}\right|_{x^*}\cdot\left.\frac{\partial g}{\partial x_j}\right|_{x^*}\cdot\sigma_{x_i}\sigma_{x_j}\rho_{ij}\right)}} \tag{15}$$

式中　m_{x_i},σ_{x_i} 分别为变量 $X_i(i=1,2,\cdots,n)$ 的均值及方差。本文选用的考虑所有变量间互相关性的方法[4]，除灵敏系数 η_i 与常规验算点 FOSM 法的灵敏系数 α_i 有所不同外，其余步骤均完全一样。

维普资讯 http://www.cqvip.com

4 地基承载力可靠度计算及成果分析

4.1 计算结果

采用国际"结构安全度联合委员会"(JCSS)推荐的JC法计算可靠度指标β。JC法考虑了极限状态方程中各基本变量的实际概率分布,将功能函数在验算点处用泰勒级数展开并使之线性化,最后求解可靠度指标。它是一种精度较高、较实用的近似概率分析方法。

文中收集了上海地区20多个不同地段的地质资料,对适于作浅基持力层的4种典型土层按不同荷载工况分别计算可靠度指标,汇总结果见表1。

表1 地基承载力可靠度指标计算结果

Table 1 Computation on reliability index of bearing capacity of foundation

土层	常遇ρ值	荷载组合 办公楼	住宅	恒十风
褐黄色粘性土 ②	0.2 0.5 1.0	3.289	3.358	3.373
灰色砂质粉土 ③	0.2 0.5 1.0	2.670	2.702	2.804
灰色淤泥质粉质粘土 ③	0.2 0.5 1.0	3.195	3.246	3.268
灰色淤泥质粘土 ④	0.2 0.5 1.0	4.342	4.466	4.498
平均值		3.374	3.443	3.486
总平均值			3.434	

4.2 成果分析

(1) 不同地段地质资料可靠度计算结果表明:地基承载力可靠度指标β与地基土抗剪强度指标C,φ的统计参数值密切相关。

(2) 可靠度指标β随荷载效应比值ρ增大而减小,这是因为活载效应的变异系数较恒载效应大的缘故,见附图。

(3) 文中对C,φ指标作了敏感性分析。从表2看,φ的变异性对地基承载力的影响较C敏感。

(4) 通过对上海地区各典型土层在不同荷载工况下β值计算结果的汇总,得到总安全系数与相当的平均可靠度指标间的粗略对应关系,即当$K=2$时,$\bar{\beta}\approx 3.45$。

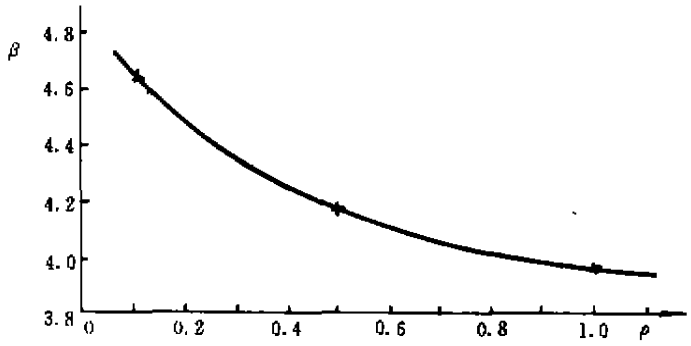
5 结 语

(1) 用JC法作地基承载力的可靠度分析,具有分析简便,运算收敛快的优点。

(2) 在进行抗剪强度指标统计时,自相关性的影响要予以考虑。尽可能准确求出各类土的相关距离,是随机场理论处理土性指标自相关性的关键。

(3) 抗剪指标互相关性不容忽视,宜在计算过程中加以考虑。

维普资讯 http://www.cqvip.com



附图　β与ρ的关系

Fig.　Variation of β with ρ

表2　C,φ敏感性比较

Table 2　Comparison of sensitivity between C and φ

变异系数	C	φ
	β值	β值
0.161	2.135	2.125
0.156	2.147	2.200
0.146	2.169	2.338
0.131	2.201	2.567
0.111	2.239	2.922
0.086	2.279	3.449
0.056	2.315	4.185
0.021	2.338	4.956

(4) 从计算得到的各土层的β与ρ的关系看,ρ对β的影响很显著,ρ越大,β越小。

(5) C,φ对β影响的敏感程度是不一样的,其中φ比C的敏感性强。

(6) 本文得到的平均可靠度指标,是从总体上继承了现有的可靠度水平,可以作为今后采用分项系数设计的校准依据。

参 考 文 献

1　高大钊. 土力学可靠性原理. 北京:中国建筑工业出版社,1989

2　上海地基规范采用概率极限状态设计方法的研究课题组. 上海软土地基承载力计算方法研究讨论稿. 上海:同济大学出版社,1993. 1～5

3　Vanmarcke E E. Probabilistic Modeling of Soil Profiles. ASCE. 1977, GT11. 1227～1246

4　包承纲,黄卫峰,张庆华. 随机场理论在重力式码头地基承载力计算中的应用. 见:工程结构可靠性全国第三届学术交流会议论文集. 南京:1992. 586～596

5　中国建筑科学研究院. 建筑结构设计统一标准(草案). 北京:中国建筑工业出版社,1983. 41～60

Reliability Analysis on Bearing Capacity of Foundation in Shanghai Region

Xiong Qidong　　*Gao Dazhao*

(Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract　In this paper, on the basis of 20 different geotecnical data in shanghai region, the JC-method is used to analyse the reliability of Hansen Ultimate Bearing Capacity Formula. Random field theory is introduced to describe the self-correlation characteristics in statistics of soil property parameters. On the other hand, the cross-correlation is considered in calculation process of reliability. Finally the average index of reliability is obtained for every typical soil layer in different load conditions when a total safety factor of 2.0 is given.

Key words　bearing capacity of foundation ; reliability ; correlation analysis ; sensitivity analysis