维普资讯 http://www.cqvip.com

第 20 卷 第 2 期 岩 土 工 程 学 报 Vol.20 No.2
1998 年 3 月 Chinese Journal of Geotechnical Engineering Mar., 1998

用汉森公式确定地基承载力的可靠度分析

Reliability analysis of bearing capacity of foundation determined by Hansen formula

熊启东 高大钊
(同济大学地下建筑与工程系,上海,200092)

文 摘 运用结构可靠度理论,同时结合一个工程实例,对用汉森公式确定的地基稳定极限状态方程进行了较为全面的可靠度分析。并对抗剪指标 c、φ 随机变量的敏感性以及可靠度指标和安全系数之间的关系作了进一步的探讨。

关键词 地基承载力,极限状态,敏感性,可靠度指标.
中图法分类号 TU 431

作者简介 熊启东,男,1972 年生,硕士,现在同济大学攻读博士学位。主要从事岩土工程可靠性研究工作和上海规范修订工作。

Xiong Qidong Gao Dazhao

(Tongji university, Shanghai 200092)

Abstract In this paper, structural reliability theory is used to analyse the reliability of ultimate limit states of foundation by means of a engineering project . Further research is also carried out on sensitivity of parameters of shear strength c, φ and relationship between index of reliability and safety factor.

Key words bearing capacity of foundation, ultimate limit state, sensitivity, index of reliability.

1 前 言

目前在工程设计中采用的安全系数法,是将影响地基承载力的各种参数,按经验取值,考虑到这些参数可能的变异对安全性的影响,在强度计算中取用一个总的安全系数,因此属于定值设计法的范畴[1]。虽然定值设计法是经过长期实践证明的一种有效设计方法,但这种方法最大的缺点是没有考虑实际存在的不确定性(包括荷载效应和抗力等不确定性)的影响。所以在实际工程中,地基稳定分析按定值法算出的安全系数是足够的,但在实际运用时却发生了失稳现象。可靠度理论是建立在概率统计基础上,考虑了影响地基稳定的各随机变量的变异性,并用严格的概率来度量其安全度,因此用可靠度理论对地基稳定进行分析更符合实际。

2 地基稳定极限状态方程

在进行可靠度分析前,首先要确立极限状态方程。以综合变量表示的地基稳定极限状态方程可写为

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

式中 f_u 为地基承载力;S 为作用于基础底面的总荷载效应,等于恒载效应与活载效应之和,即

$$S = S_G + S_Q \tag{2}$$

计算地基承载力 f_u 的公式比较多,本文建议采用汉森公式。对于条形基础,可表示为以下形式:

$$f_u = \frac{1}{2}N_\gamma \gamma B + N_q \gamma_0 D + N_c c \tag{3}$$

式中 B 为基础宽度(m);D 为基础埋深(m);γ 为基础底面以下土的重度,水下用浮重度(kN/m^3);γ_0 为基础底面以上各土层的加权平均重度,水下用浮重度(kN/m^3);c 为粘聚力(kN/m^2);N_γ, N_q, N_c 为承载力系数,都是内摩擦角 φ(°)的函数。

将式(2),式(3)代入式(1),可得

$$Z = \frac{1}{2}N_\gamma \gamma B + N_q \gamma_0 D + N_c c - S_G - S_Q = 0 \tag{4}$$

或

$$Z = g(B, D, \gamma, \gamma_0, c, \varphi, S_G, S_Q) = 0 \tag{5}$$

式(5)中所有参数可分为三类:

第一类为几何尺寸 B,D,由于基础宽度 B 和深度 D 一般都能事先确定,施工后变异性很小,可视为常量。

第二类为土性指标,包括土重度 γ,γ_0 和抗剪指标 c、φ。考虑到土重度的变异性较抗剪指标要小得多,为简便起见,把土重度当作常量看待。而仅把抗剪指标视为随机变量,并假定其服从正态分布。

第三类为荷载效应,按《建筑结构设计统一标准》[2]的规定:恒载效应 S_G 服从正态分布,变异系数 $\delta_G = 0.07$,活载效应 S_Q 服从极值 Ⅰ 型分布,本文假定其变异系数 $\delta_Q = 0.29$。

这样,式(5)所含基本变量的数目仅有四个,分别为 c,φ,S_G,S_Q。以这些基本变量表示的极限状态方程可写成如下形式:

维普资讯 http://www.cqvip.com

$$f(c,\varphi) - S_G - S_Q = 0 \tag{6}$$

3 总安全系数下地基稳定的可靠度计算

总安全系数下地基承载力的实用表达式可写为

$$\mu_G + \mu_Q = \frac{1}{K}\mu_{fu} \tag{7}$$

式中 μ_G 为恒载效应均值;μ_Q 为活载效应均值;μ_{fu} 为由 c,φ 均值代入汉森公式求出的地基承载力均值,即 $\mu_{fu} = f(\mu_c,\mu_\varphi)$;$K$ 为总安全系数。

考虑荷载效应比值 $\rho = \mu_Q/\mu_G$,代入式(7)可以确定 μ_G、μ_Q,即

$$\mu_G = \frac{\mu_{fu}}{(1+\rho)K} \tag{8}$$

$$\mu_Q = \frac{\rho\mu_{fu}}{(1+\rho)K} \tag{9}$$

在地基土抗剪指标的均值和变异系数已知的条件下,可由式(8),式(9)得到荷载效应均值,而荷载效应的变异系数已事先规定。这样,在极限状态方程式(6)中各基本变量的统计参数都确定了,总安全系数下地基稳定的可靠度指标也可以相应求出。

本文计算可靠度指标采用结构可靠度理论中提出的 JC 法。JC 法由于考虑了极限状态方程中各基本变量的实际概率分布,且将功能函数在验算点处泰勒展开并使之线性化。因而它是一种精度较高、比较方便的可靠度计算方法。该法已为国际安全度联合委员会(JCSS)所采用。

4 实例计算及一些规律性的研究

4.1 实例计算

工程概况:某住宅楼基础为条基,基础宽度 B = 2m,埋深 D = 2m,地质勘察查明地基持力层为褐黄色粉质粘土,其重度 γ = 18.2kN/m^3,上覆 1.2m 厚的素填土,重度为 γ_1 = 19.5kN/m^3。持力层土的抗剪指标统计参数如下:μ_c = 11.0kPa,δ_c = 0.21,μ_φ = 22°,δ_φ = 0.09。

用汉森公式计算地基承载力均值 μ_{fu}

$$\mu_{fu} = f(\mu_c,\mu_\varphi) = \frac{1}{2}N_\gamma\gamma B + N_q\gamma_0 D + N_c\mu_c$$

式中 γ_0 的值由基底以上各土层的重度加权平均而得,$\gamma_0 = (1.2\times19.5 + 0.8\times18.2)/2.0 = 19.0\text{kN/m}^3$,将其它参数值代入上式得

$$\mu_{fu} = 0.5\times4.13\times18.2\times2 + 7.82\times19.0\times2 + 16.88\times11 = 558.2\text{kPa}$$

若取总安全系数 K = 2.0,并假定荷载效应比值 ρ = 0.5,则由式(8)、(9)可求恒载效应均值 μ_G 和活载效应均值 μ_Q

$$\mu_G = \frac{\mu_{fu}}{(1+\rho)K} = \frac{558.2}{(1+0.5)\times2.0} = 186.0\text{kPa}$$

$$\mu_Q = \frac{\rho\mu_{fu}}{(1+\rho)K} = \frac{0.5\times558.2}{(1+0.5)\times2.0} = 93.0\text{kPa}$$

而 δ_G,δ_Q 已事先规定,即 δ_G = 0.07,δ_Q = 0.29。这样,极限状态方程中各基本变量的统计参数都全部确定了。将其输入按 JC 法编制的可靠度计算程序,迭代几次,最后得到该住宅楼地基稳定的可靠度指标值 β = 3.012,失效概率为 P_f = 0.13%。

4.2 一些规律性的研究

(1) c,φ 变异系数对 β 的影响

以上面的工程实例来研究,当 c 或 φ 的变异系数变化而其它参量不变时,β 随之变化。比如,固定 δ_c = 0.25 不变,当 δ_φ 由 0.15 减少至 0.05 时,β 值由 2.076 增加到 3.684;固定 δ_φ = 0.15 不变,当 δ_c 由 0.25 减少至 0.15 时,β 值由 2.076 增加到 2.147。图 1 为一组 $\delta_\varphi-\beta$,$\delta_C-\beta$ 关系曲线。从图上可以发现,地基稳定可靠度指标 β 受 c,φ 变异系数影响的程度不一样,其中 δ_φ 比 δ_c 要敏感得多。

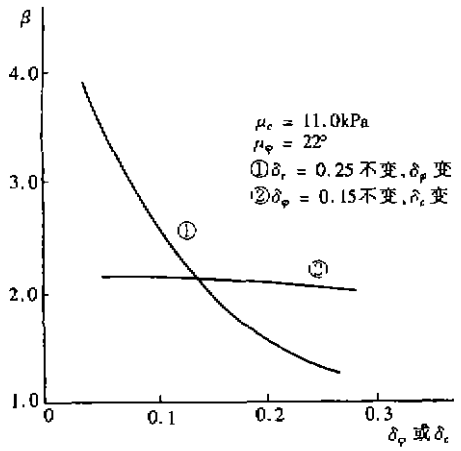


图 1 $\delta_\varphi-\beta$、$\delta_c-\beta$ 关系曲线

Fig.1 Relation between δ_φ and β, δ_c and β

(2) c,φ 均值对 β 的影响

当其它参量不变,而仅 c、φ 的均值发生变化时,β 将随之变化。固定 μ_φ = 22°,当 μ_c 由 11.0kPa 增至 17.0kPa,β 值从 2.076 增加到 2.100;固定 μ_c = 11.0kPa,当 μ_φ 由 22° 增至 28° 时,β 值从 2.076 减小到 1.554。图 2 为一组 $\mu_\varphi-\beta$,$\mu_c-\beta$ 关系曲线。由上述分析可知,地基稳定的可靠度指标 β 受 c,φ 均值影响的程度也不一样,其中 μ_φ 很敏感,而 μ_c 变化对 β 的影响不大。

(3) c,φ 分布类型对 β 的影响

对前面工程实例中抗剪指标 c、φ 按不同分布类型进行可靠度计算,结果见表 1。

从表 1 的结果看,当 c,φ 均服从正态分布时对应的

维普资讯 http://www.cqvip.com

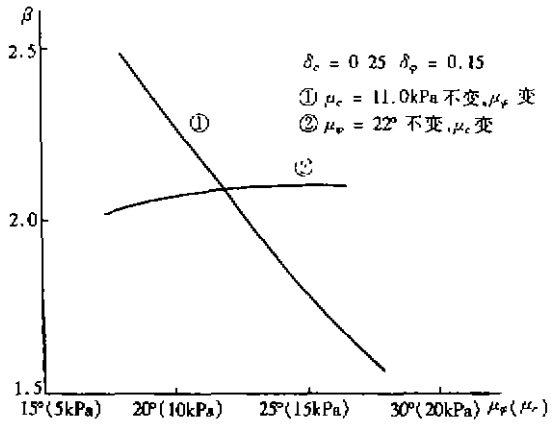


图 2　$\mu_\varphi - \beta, \mu_c - \beta$ 关系曲线

Fig.2　Relation between μ_φ and β, μ_c and β

可靠度指标 β 值最小。可见，假定抗剪指标 c, φ 的概型为正态分布，得到的地基稳定可靠度是偏于安全的。

表 1　c, φ 不同概率分布下的可靠度指标 β 值比较

Table 1　Comparision of reliability index β under different probabilistic distribution of c, φ

c,φ 概率分布	正　态	对数正态	极值 I 型
可靠度指标 β	3.012	3.160	3.518

(4) 可靠度指标 β 与安全系数 K 的关系

讨论 β 与 K 的关系，不能不牵涉到极限状态方程中各随机变量的统计参数。这是因为，当 K 一定时，如果随机变量的统计参数发生变化，则 β 也随之改变。图 3 给出了 c, φ 均值一定，不同变异系数下的 $K - \beta$ 关系曲线，从图上可见，在 K 一定的条件下，δ_c, δ_φ 增大，β 值减小；图 4 给出了 c, φ 变异系数一定，均值不同时的 $K - \beta$ 关系曲线，由图可知，当 K 一定时，β 值随 μ_c, μ_φ 的增大而减小。这就是说，在随机变量的统计参数不确定的情况下，传统的安全系数设 φ 计法不能准确地反映地基稳定的安全度，所以在实际工程中，有时安全系数是足够的，但在实际运用时却发生了失稳的现象。另外，从图 3 及图 4 的 $K - \beta$ 关系曲线来看，在 c, φ 统计参数一定的条件下，β 值随 K 的增大而增大，且近似成抛物线性的关系。这一点很容易从式(8)及式(9)中得到说明：当 K 增大时，荷载效应均值会减小，因而 β 将随之增大。

5　结　　论

(1) 本文采用的 JC 法，原理简便，计算收敛快。实践证明，该法是一种比较实用的可靠度分析方法。

(2) 抗剪指标 c, φ 的统计参数对地基稳定可靠度指标 β 的影响程度不一样，其中 δ_φ 较 δ_c 敏感，μ_φ 较 μ_c 敏感。

(3) 抗剪指标 c, φ 的概型对地基稳定可靠度指标 β 影响比较显著，当 c, φ 服从正态分布时，β 值最小。

(4) 当安全系数 K 一定时，可靠度指标 β 与极限状态方程中各随机变量的统计参数密切相关。而在抗剪指标 c, φ 统计参数一定的条件下，β 随 K 的增大近似成抛物线型递增。

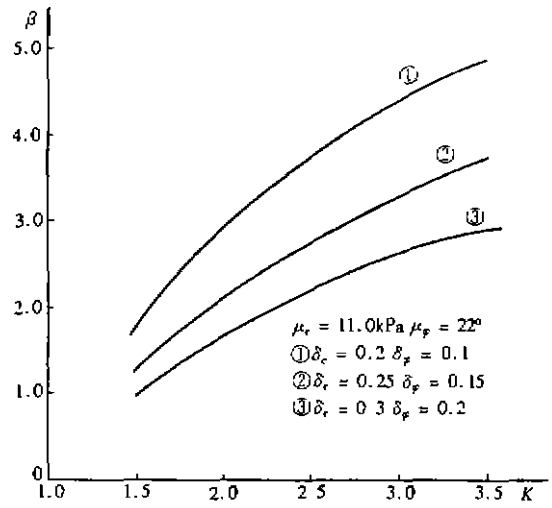


图 3　c, φ 均值一定，不同变异系数下 $K - \beta$ 关系曲线

Fig.3　Relation between K and β with constant mean valne and different coefficient of variance of c, φ.

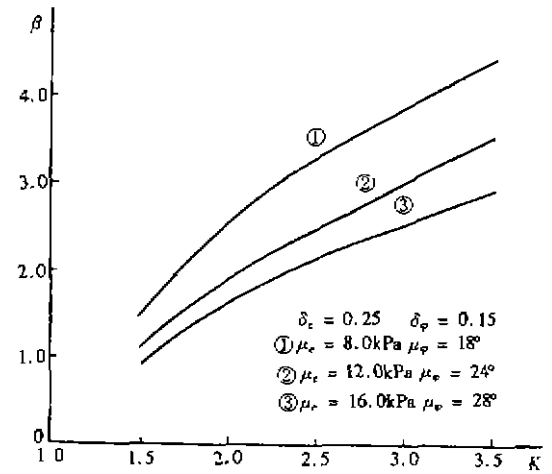


图 4　c, φ 变异系数一定，不同均值下 $K - \beta$ 关系曲线

Fig.4　Relation between K and β with constant coefficient of variance and different mean value of c, φ.

参 考 文 献

1　赵国藩，曹居易，张宽权．工程结构可靠度．北京：水利电力出版社，1984.17～19.

2　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，1984.41～60.