

文章编号: 1000-7598-(2004) 10-1603-06

空间随机场模型的建立与桩基竖向 承载力的可靠度分析

刘 润¹, 闫澍旺¹, 周宏杰¹, 王金英², 狄慧敏²

(1. 天津大学 岩土工程研究所, 天津 300072; 2. 中海石油工程设计公司, 天津 300452)

摘 要: 为了研究桩基础的可靠度设计方法, 搜集和整理了大量的海洋土钻孔资料, 开发了用于地基可靠度分析的数据库系统。利用数据库强大的数理统计功能建立起土性剖面的空间随机场模型, 进而将随机场理论与可靠度理论相结合, 对渤海海域中海工结构物桩基础的稳定性进行了可靠度分析, 详细阐述了各个设计指标的变化对分项系数及可靠度指标的影响规律, 并对各指标的灵敏度进行比较分析。结果表明, 在各个设计参数中厚土层的强度指标以及设计荷载是 2 个重要的参数, 在渤海海域中应用 API 标准 (美国桩基规范) 中规定的荷载抗力系数进行设计是安全可靠的。

关 键 词: 数据库; 随机场; 荷载抗力系数设计法; 桩基础可靠度; JC 法; 灵敏度; 可靠度指标
中图分类号: TU470 **文献标识码:** A

Random field modeling and reliability analysis of vertical bearing capacity of pile foundation of ocean structures

LIU Run¹, YAN Shu-wang¹, ZHOU Hong-jie¹, WANG Jing-ying², DI Hui-min²

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Ocean Oil Engineering Co., Ltd., Tianjin 300452, China)

Abstract: Pile foundation is widely used in platform foundation. The reliability design method has been adopted worldwide. When it was introduced into China, it is pointed out that designers could refer to the standard (Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-load and resistance factor design) when the environment conditions and the design method were coincided with those in China. Otherwise, difference criterion and data should be taken according to the specified environment conditions in China. As a result, more attentions should be paid on studying the foundation design method of offshore structures. In this paper, a database management system has been established, in order to manage and analyze the data of the geotechnical properties of foundation soils. This database includes almost all the borehole logs and properties of the soils of SZ36-1 Oil Field. Based on the database, the stationarity and ergodicity of a soil profile in SZ36-1 Oil Field have been examined and a random field modeling has been established. The correlation function, correlation distance and variation reduction function of SZ36-1 Oil Field have been simulated. A calculating model for pile foundations has been established, on the basis of the established database and design experiences. As an example, reliability analysis for a pile foundation has been performed. The influence of variations of soil properties and loads on the reliability index has been analyzed, and the calculated partial factors compared with those recommended by the API (American petroleum institute) Criterion.

Key words: database; random field; LRFD; pile foundation reliability; JC method; sensitivity; probability index

1 前 言

目前, 海上平台的结构设计采用以可靠度理论为基础的设计方法, 但在地基设计方面的研究工作进展较小, 远远落后于陆地工民建和交通部门的地基可靠度设计方面的研究工作。国外对这个课题已进行了若干研究工作, 现行的美国桩基规范(API 规

范)条文中^[1, 2], 在计算桩基的竖向承载力时就采用了分项系数的形式, 而摒弃了传统的安全系数形式, 我国为了与国际接轨, 直接按国外的规范进行设计, 即采用了国外规范中规定的荷载、抗力系数进行相应的计算, 而渤海湾的风、浪、流及工程地质条件与上述区域有较大的区别, API 规范规定的安全系

数是否适合渤海油田的工程地质条件和环境荷载条件,有必要进行进一步的研究探讨。中国海洋石油天然气行业标准在引用 API 规范时明确表明:本推荐作法中的抗力和荷载系数,仅适用于安装在墨西哥湾和加利福尼亚近海域的典型桩基导管架平台。合理的系统的可靠度分析为基础来修改这些系数或开发新系数,以适用于其他类型的结构布置。由此可见,有必要对我国海域海工结构物的桩基可靠度进行研究。到目前为止,关于海工结构物桩基础可靠度的研究在我国还未见先例,本文以渤海海域为研究重点,利用收集的大量资料,展开海洋土地基可靠度研究,分析影响可靠度指标的因素,确定相应的荷载抗力系数并与 API 规范(以下简称标准)中的相应值进行比较,为我国海上桩基础可靠度设计提供分项系数的推荐值。

2 数据库系统的建立

2.1 数据库系统简介

对于海洋平台这样的新技术领域^[3],荷载和抗力系数最先是借鉴于陆地的实践,然后再根据现场经验加以修正。对土性参数的统计是进行地基可靠度研究的最基本的工作,亦是确定其概型分布进行可靠度分析和建立设计表达式的前提。通常在海上进行原型试验是不可能的,因此,正在使用中的结构物是唯一原型试验的数据来源。随着现代计算机技术的飞速发展,数据库技术的出现与不断完善,为管理、保存这些资料提供了最佳的选择。采用数据库技术管理这些钻孔资料不仅是开展海工结构物地基可靠度研究的重要前提,而且可以对今后的工程建设提供宝贵的经验,增加对我国海域海洋土土性的了解。

本文在搜集和整理了大量已有海上钻孔资料的基础上,以 Access 作为后台数据库管理系统,使用 Visual Basic 作为前台应用程序的开发工具,开发与研制了海洋工程地基可靠度分析系统(以下简称系统),该系统的指导思想是将图形管理和数据管理有机地结合起来,在实现了对地质资料数据进行维护、统计、查询等功能的同时,配合一定的图形生成功能:系统可以依据已有数据,自动绘制成钻孔平面位置图、钻孔柱状图和土层剖面图。

2.2 数据系统功能

系统具有以下功能(图1):

(1) 系统将浅基础可靠度分析与桩基础可靠度分析作为两个独立的功能模块,共享一个数据库的

信息,但可分别完成不同的工作,用户在进入系统时可对其进行选择。

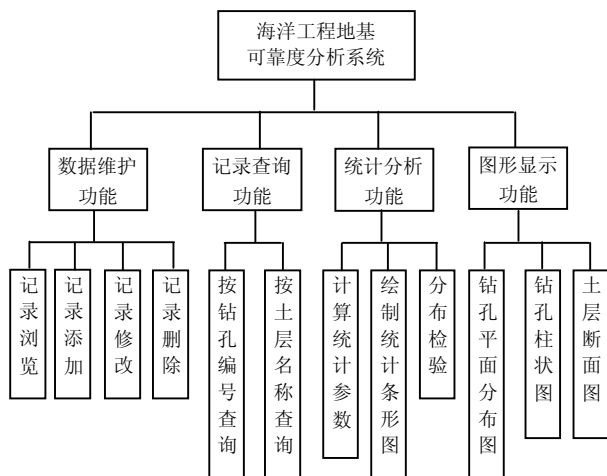


图1 系统功能框图

Fig.1 System configuration

(2) 具有对数据库进行基本操作的功能:添加、修改、查询、删除记录等;其突出特点是具有快速、简便的查询功能。在桩基础可靠度分析模块中,按照油田的分布特点将渤海湾划分成5个区块:渤西区块、渤中区块、辽东湾区块、莱州湾区块和渤海海峡区块。除了完成按孔号及土层进行查询的功能外,还提供了对数据进行分区查询的功能。

(3) 对指定土性参数在一定土层范围内进行数据统计。通过统计功能可以迅捷、准确的求出各个统计参量的平均值、标准差和变异系数。根据用户的选择筛选统计土层和统计范围,可对某一相同土层在某一范围内进行统计以确保统计结果的准确性和精度。

(4) 确定被统计数据的概型。土性参数属于哪种分布概型直接影响到将要采用的可靠度分析方法,系统对被统计数据的分布规律进行分布检验,检验结果可直接应用于可靠度分析。

(5) 系统可自动根据数据库中现有的钻孔资料绘出全部钻孔平面图,可任意选择并放大或缩小图形,可以根据用户在平面图中的选择,绘制出钻孔柱状图,可以将数个钻孔置于一张图中,绘成土层剖面图,有助于观察土层断面的分布特点,认识土性参数的空间分布特性,建立土性参数的空间随机场模型。

3 土性剖面空间随机场模型的建立

地基可靠度的研究表明,计算地基稳定的可靠度指标过小,使对应的失效概率太大,常超过10%,

设计人员难以接受。造成这种理论与实际情况背离的主要原因,除了岩土性质本身离散性较大以外,对其方差的估算方法是主要因素。与人工材料不同,由于地基中相邻两点的成因相似,矿物成分接近,土的性质既有的变异性又有一定的相关性。现在常用的数理统计方法忽略了土的自相关性,导致方差估算偏大。为了解决这个问题,美国的 Vanmarcke (1976 年)和其他一些研究者将随机场理论引入岩土可靠性分析之中,来考虑土的自相关性在概率分析中对土性的影响,实现由“点特性”到“空间平均特性”的过渡^[4-7]。但将土性剖面用空间随机场来模拟,需要有大量的数据为基础,数据库系统的建立和使用无疑对这项工作起到了重要的作用。

在随机场理论中,方差折减函数的定义如下:

$$\Gamma^2(h) = \text{Var}[Y_h(z)] / \sigma^2 \quad (1)$$

方差折减函数 $\Gamma^2(h)$ 是一个无因次比,反映的是“均值方差”与“点方差”之间的比值关系。根据随机场理论,相关距离是确定方差折减函数的一种途径:

$$\Gamma^2(h) = \begin{cases} 1, & h \leq \delta_u \\ \frac{\delta_u}{h}, & h > \delta_u \end{cases} \quad (2)$$

式中, δ_u 为相关距离,

改进的递推空间法可以在有大量数据资料的基础上,采用参数拟合的形式确定出方差折减函数和相关距离。因此本文应用数据库的强大数据处理功能完成了这一工作,这里给出一个有代表性的分析结果图。研究中发现,由于沉积作用海洋土具有不同于陆地土体的突出特点,即其土质相对均匀,土层变化较小,这一点对数据的统计工作相当有利,统计范围可以适当扩大,统计样本增多,使得统计结果更具有说服力和代表性。图 2 为 SZ36-1-12 钻孔沿深度方向 C_u 的折减函数拟合曲线图。经拟合其折减函数为 $\Gamma(i) = \sqrt{\delta_u / i \Delta z_0}$, 其中, $\delta_u = 0.96 \text{ m}$, $\Delta z_0 = 1.0 \text{ m}$ 。经过大量数据的拟合,得到被研究区域海洋土 C_u 的方差折减函数为 $\Gamma(h) = \sqrt{1.05/h}$, 在可靠度计算中只要代入相应的 h 即可得到这一层土的方差折减系数值,从而使得到的方差大为减小,变异系数明显降低,使可靠度分析与实际情况更加吻合。

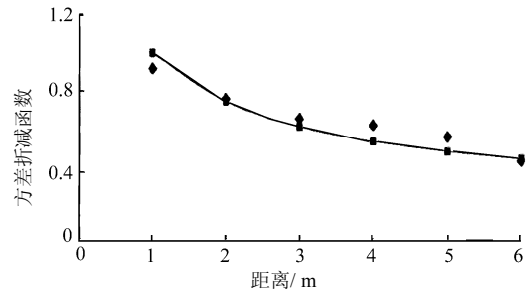


图 2 SZ36-1-12 钻孔 C_u 方差折减函数拟和曲线 ($\Delta z = 1.0 \text{ m}$)
Fig.2 Variation reduction function curve of C_u for SZ36-1-12 borehole

4 桩基础竖向稳定性的可靠度分析方法

4.1 可靠度的分析方法

使用目前被广泛采用的改进一次二阶矩法 (JC 法), 这也是《标准》所采用的方法。为确定荷载和抗力分项系数而采用的可靠性模型是以可靠度指标 β 为基础的, 其中荷载和抗力的不确定性是用均值和变异系数来描述的。 β 定义过程如下^[8]: 首先建立包括各有关基本变量的极限状态方程:

$$Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0. \quad (3)$$

式中 $Z = g(\cdot)$ 称为结构的“功能函数”。 $X_i (i=1, 2, \dots, n)$ 称为“基本变量”, 包括各类荷载、桩身强度和地基土的物理力学指标等。

可靠度指标为

$$\beta = \mu_z / \sigma_z \quad (4)$$

式中 μ_z, σ_z 分别为 Z 的平均值和标准差。

失效概率可由下式计算:

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\beta} \exp(-\frac{u^2}{2}) du \quad (5)$$

式中 $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布。

以 P_f 度量可靠性具有明确的物理意义, 但是计算 P_f 数学上比较复杂, 因而采用可靠度指标 β 代替 P_f 来具体度量结构可靠性。因为 β 与 P_f 具有数值上的对应关系和相对应的物理意义。从 β 的定义式可知, β 直接与基本变量的平均值和标准差有关, 而且, 还可考虑基本变量的概率分布类型。这就是说 β 已概括了各有关基本变量的统计特性, 可较全面地反映各种影响因素的变异性。这是传统的安全系数所不能做到的。此外, β 是从结构功能函数 Z 出发, 综合地考虑了荷载和抗力变异性对结构可靠度的影响, 这与现行设计方法只是在设计取值上部分和独立的考虑各种基本变量的变异性有实质上的区别。

4.2 计算参数灵敏度

若极限状态方程由多个相互独立的正态随机变量（或可以变换成正态分布的随机变量）组成，则此方程可以理解为由这些随机变量构成的空间坐标系统中的一个曲面，这个空间曲面把空间分成可靠区和失效区两部分，这个曲面被称为极限状态面。可靠度指标 β 是坐标原点 O 到极限状态面的最短距离，也就是验算点处沿极限状态曲面的切平面法线方向到原点 O 的长度。它所在切平面的法线对各坐标轴的方向余弦反映了各随机变量的重要性，即灵敏度。也就是说，法线对某坐标轴的方向余弦绝对值越大，这个随机变量就越重要，它的微小改变能引起可靠度指标的显著变化。

因此，灵敏度反应了随机变量的重要程度，在设计中必须对那些具有较大灵敏度的参量给与足够的重视，从而提高设计的准确性和效率。

5 海洋平台桩基础竖向稳定性的可靠度分析

5.1 计算数据

渤海某油田中心平台，桩直径为 1.371 6 m，设计插入深度为 75 m，穿过 11 个土层。在极限条件下作用在桩上的竖向载荷最大为 25.000 MN，为正态分布，变异系数 $V_P=0.25$ 。利用研制的数据库系统和随机场理论，将统计的点方差进行折减，经过处理后，点方差转变为空间平均方差，数值大大减小。统计结果见表 1。数据库分析表明，土的强度指标服从正态分布。

表 1 土层指标统计结果
Table 1 Statistic results of soil properties

土层 编号	起点标高 /m	终点标高 /m	天然重度 /kN·m ⁻³	δ /(°)	V_δ	c /kPa	V_c
1	0	1.7	18.0	0	0	26.3	0.29
2	1.7	3.8	18.5	17.5	0.14	0	0
3	3.8	5.7	18.7	27.5	0.09	0	0
4	5.7	13.3	18.9	0	0	53.3	0.28
5	13.3	16	18.9	26.7	0.09	0	0
6	16	20.5	19.0	0	0	64.4	0.28
7	20.5	40.7	19.3	29.7	0.16	0	0
8	40.7	57.2	19.5	0	0	104.1	0.26
9	57.2	61.7	20.0	25.0	0.15	0	0
10	61.7	69.1	19.8	0	0	151.6	0.28
11	69.1	75	19.8	28.3	0.13	0	0

注： δ 、 V_δ 分别为土和桩壁之间摩擦角的平均值及其变异系数； c 、 V_c 分别为土的不排水抗剪强度及其变异系数。

5.2 竖向承载力的可靠度分析

5.2.1 极限状态方程

单桩竖向极限承载力计算公式由《标准》中的

式 (G.4-1) 给出：

$$Q_D = Q_f + Q_p = \sum f_i A_{si} + q A_p \quad (6)$$

式中 Q_D 为桩的竖向极限承载力 (kN)； Q_f 为表面摩擦阻力 (kN)； Q_p 为端部总承载力 (kN)； f_i 为第 i 层土的单位侧摩阻力 (kPa)； A_{si} 为第 i 层土中桩侧表面积 (m²)； q 为单位桩端承载力 (kPa)； A_p 为桩端总面积 (m²)。

轴向承载桩的极限状态方程可表示为

$$Z = Q_D - P = \sum (f_i A_{si}) + q A_p - P \quad (7)$$

式中 P 为竖向荷载 (kN)。

5.2.2 桩基础竖向承载力的可靠度分析结果

利用 JC 法编制可靠度计算程序，可计算出桩基础竖向承载力的可靠度指标，分项系数等结果。算例的计算结果表明：桩总的竖向承载力为 39.803 MN，其中，桩侧摩阻力为 31.34 MN，桩端承载力为 84.390 MN。安全系数为 4.0，可靠度指标为 6.5，失效概率为 6.5×10^{-11} 。荷载的设计值为 40.885 MN，分项系数为 2.15，方向余弦为 -0.71，其它结果见表 2（符号意义同前）。

表 2 计算结果
Table 2 Calculation results

变量名	设计值	分项系数	灵敏度	变量名	设计值	分项系数	灵敏度
δ_1	0	0	0	C_1	26.1	0.994	0.003
δ_2	17.5	0.999	0.001	C_2	0	0	0
δ_3	27.4	0.998	0.003	C_3	0	0	0
δ_4	0	0	0	C_4	48.7	0.913	0.048
δ_5	26.5	0.993	0.012	C_5	0	0	0
δ_6	0	0	0	C_6	59.3	0.921	0.043
δ_7	19.1	0.644	0.343	C_7	0	0	0
δ_8	0	0	0	C_8	53.6	0.515	0.288
δ_9	22.0	0.88	0.124	C_9	0	0	0
δ_{10}	0	0	0	C_{10}	95.9	0.632	0.202
δ_{11}	23.5	0.831	0.2	C_{11}	0	0	0
δ_b	17.7	0.627	0.442	C_b	0	0	0

从计算结果可以看出，位于桩身上部的土层，桩侧摩阻力都得到了充分的发挥，表现为其分项系数接近 1.0。随着桩入土深度的增加，其穿越土层的承载力得到不同程度的发挥，土层承载力的分项系数总体呈减小趋势。桩端为砂层，强度分项系数为 0.627，说明桩端土层承载力没有充分发挥，桩端部的承载力约占桩总承载力的 21%。

从灵敏度分析可知，第 7 层和第 9 层的土和桩壁之间摩擦角、第 8 层和第 10 层的不排水抗剪强度、还有桩端所在土层的外摩擦角、灵敏度较大。这是由于这几层土较厚，产生的阻力在总摩阻力中所占的比例大，因此，在设计中对于厚度较大的土

层, 钻孔资料应该尽量详细、准确, 此外由分析可知, 荷载的灵敏度最大, 说明荷载对承载力分析影响最大, 尤其要重视。

为了研究各随机变量变化对计算结果的影响, 本文分别固定荷载平均值, 荷载变异系数和土层承载力变异系数进行分析如下:

(1) 首先只改变竖向荷载平均值, 其它参数值按表 1 取值, 可得可靠度指标、安全系数和分项系数的变化如图 3 和图 4 所示。根据式 (6) 计算得, 地基竖向极限承载力为 75.9 MN。图 4 给出了当桩端沉入到 75 m 时, 可靠度指标及安全系数随荷载均值增加的变化规律, 由图中可见, 当荷载平均值趋近于地基极限承载力时, 可靠度指标和安全系数分别趋向于 0 和 1。观察图 4 中分项系数的变化, 当荷载平均值趋向于极限承载力时, 荷载和抗力分项系数都趋近于 1, 地基抗力逐渐得到发挥。

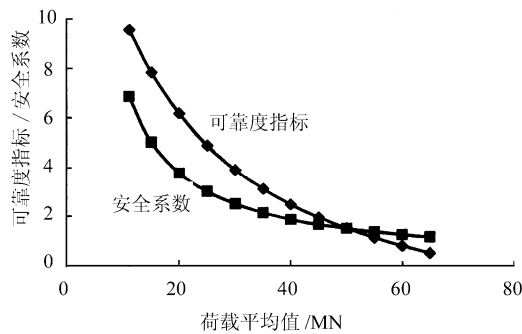


图 3 可靠度指标、安全系数随荷载平均值的变化
Fig.3 Probability index and safety factor vs. average of load

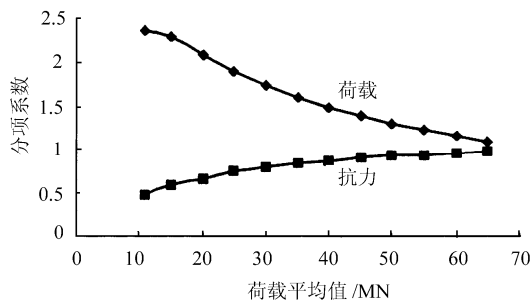


图 4 分项系数随荷载平均值的变化
Fig.4 Partial factors vs. average of load

(2) 固定土层承载力即抗力的变异系数, 使荷载 P 的变异系数从 0.1 变化到 0.7 (图 5~6)。由图 5 可知, 当荷载变异系数增大时, 可靠度指标呈下降趋势, 表明桩基竖向承载力的整体可靠度降低。从图 6 可以看出, 当荷载变异系数增加时, 抗力分项系数逐渐增大, 说明为了达到极限平衡需要动用更大的强度储备, 地基承载力得到了更大程度的发挥 (抗力分项系数的倒数具有安全系数的意义); 荷

载的分项系数也逐渐增大, 这是因为当荷载的变异性增大时, 出现较小荷载的机率增大。

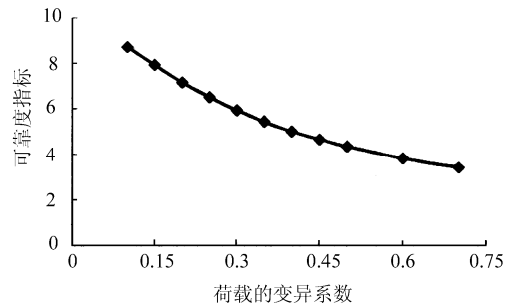


图 5 可靠度指标随荷载变异系数的变化
Fig.5 Probability index vs. variation coefficient of load

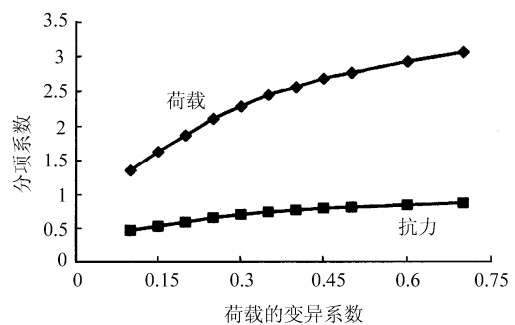


图 6 分项系数随荷载变异系数的变化
Fig.6 Partial factors vs. variation coefficient of load

(3) 当固定竖向荷载 P 的变异系数, 使土层承载力的变异系数从 0.1 到 0.7 变化时, 可靠度分析结果见图 7 和图 8。由图表明, 当土层承载力的变异系数增大, 即抗力变异性增加时, 其分项系数减小, 动用的抗力储备减少, 整体稳定性的可靠度降低, 只有靠降低设计荷载才能使极限状态方程得到满足, 即如图 8 所示, 荷载分项系数也降低。

5.3 计算结果分析

可靠度分析得到的抗力分项系数可看作满足极限状态方程时的地基竖向承载力的发挥程度, 荷载分项系数可看作满足极限状态方程时的荷载与荷载均值的比。

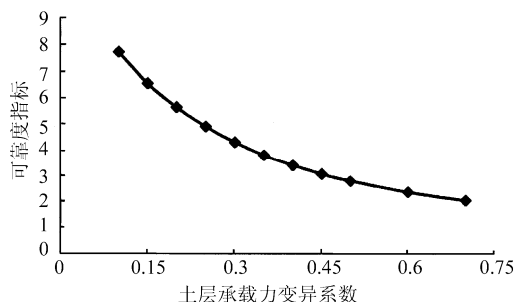


图 7 可靠度指标随承载力变异系数的变化
Fig.7 Probability index vs. variation coefficient of bearing capacity

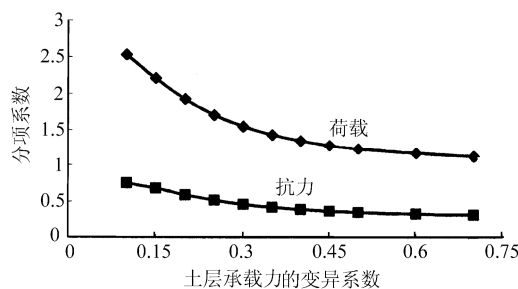


图 8 分项系数随承载力变异系数的变化
Fig.8 Partial factors vs. variation coefficients
of bearing capacity

如前面的分析结果所示,当竖向荷载的变异性增加时,可靠度分析算得的荷载分项系数增加,但必需靠地基承载能力发挥程度的增加才能满足极限状态方程,结果使整体的可靠度指标减小;当地基竖向承载力的变异性增加时,可靠度分析算得的抗力分项系数减小,但需要靠减小设计荷载才能使极限状态方程得到满足,结果也使整体的可靠度指标减小。因此,在实际设计中必须使整体的可靠度指标达到要求。灵敏度系数可以反映出影响可靠度指标 β 的各个因素的重要程度,从而指导设计工作,提高设计效率。

6 计算值校准

将由可靠度分析得到的计算结果与《标准》规定的荷载抗力分项系数进行比较,并根据《标准》中的分项系数设计法,桩基础的竖向能力应满足以下条件:

$$P_{DE} \leq \varphi_{PE} Q_D; P_{DO} \leq \varphi_{PO} Q_D \quad (8)$$

式中 Q_D 为由式(6)计算的桩端竖向极限承载力(kN); P_{DE} (或 P_{DO}) 为使用乘系数的荷载确定的极端(或操作)环境下的桩端轴向荷载; φ_{PE} 为极端环境下桩的抗力分项系数 ($\varphi_{PE}=0.8$); φ_{PO} 为操作环境下桩的抗力分项系数 ($\varphi_{PO}=0.7$)。根据《标准》C.3.1.4 条式(C.3-3),可确定在操作条件下竖向力的荷载分项系数为 1.3;在极端条件下,竖向力的荷载分项系数为 1.1。

根据本文的可靠度分析,在操作环境下桩端轴向荷载为 17.952 MN;在极端条件下,桩端轴向荷载为 18.7346 MN。桩端竖向极限承载力为 75.9 MN,可验算如下: $P_{DO}=1.3 \times 17.952=23.338$ MN, $\varphi_{PO} Q_D =$

$0.7 \times 75.9=53.130$ MN, $P_{DE}=1.1 \times 18.735=20.608$ MN, $\varphi_{PO} Q_D = 0.8 \times 75.900 = 60.720$ MN。

由验算结果可知,经可靠度分析得到的抗力和荷载满足《标准》中相应的条件,说明 API《标准》中的荷载抗力系数完全适用于我国的渤海海域。

7 结 语

(1) 本文搜集了大量的海洋土钻孔资料开发研制了“地基可靠度分析数据库系统”,实际应用表明,这一系统在地基可靠度分析中发挥了重要作用;

(2) 将土性剖面的空间随机场模型应用到海洋土桩基可靠度分析中,求得了相应的方差折减函数,完成了土性指标由点特性到空间平均特性的过渡,为开展进一步的可靠度分析奠定了基础;

(3) 建立了系统的可靠度分析方法,对海工结构物桩基础进行了可靠度分析;

(4) 在分析中对各个设计参量的灵敏度进行了计算,确定了对可靠度指标影响较大的因素是较厚层土的力学指标和设计荷载;

(5) 将可靠度分析的结果与《标准》中给出的荷载抗力分项系数进行了对比验算,证明 API《标准》中规定的荷载抗力分项系数适用于渤海海域,可以在渤海桩基设计中应用。

参 考 文 献

- [1] SY/T 10009-1996, 中国海洋石油天然气行业标准[S].
- [2] SY/T 4802-92, 中国海洋石油天然气行业标准[S].
- [3] 罗传信. 海洋桩基平台[M]. 天津: 天津大学出版社, 1988.
- [4] 郭怀志, 彭大鹏. 材料性能的随机场特性参数的验证方法[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(2): 79—83.
- [5] 闫澍旺, 贾晓黎, 郭怀志. 土性剖面随机场模型的平稳性和各态历经性验证[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(3): 1—9.
- [6] 刘润, 闫澍旺. 随机场理论在海洋结构物地基可靠度分析中的应用[J]. 天津大学学报, 2003, 36(1): 63—67.
- [7] 刘润, 闫澍旺. 海工结构物浅基础稳定性的可靠度分析[J]. 海洋工程, 2001, 19(2): 23—28.
- [8] 高大钊. 土力学可靠性原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.