

渤海湾地基土随机场特性及可靠度分析

Random field model and reliability analysis of foundation soil in Bohai gulf

刘 润, 闫澍旺

(天津大学 建工学院岩土工程研究所, 天津 300072)

摘 要: 阐述了随机场理论在进行海洋结构物地基可靠度分析中的作用。利用渤海油田在多年开发和建设中积累的大量工程地质资料, 开发研制了“海洋土地基可靠度分析系统”。运用该系统的强大数理统计和分析功能, 综合理论和实测数据建立起渤海海域海洋土竖直和水平向土性剖面的齐次正态随机场模型, 计算得到土性指标的方差折减函数, 进而在可靠度分析中运用强度指标的空间平均方差进行可靠度分析, 强度指标折减前后的可靠度分析结果表明随机场理论的应用对可靠度分析起到了重要的作用, 经过折减的土性指标的变异系数明显较小, 从而使可靠度分析的结果接近工程实际。

关键词: 数据库; 随机场; 方差折减函数; 可靠度

中图分类号: TU 470. 2

文献标识码: A

文章编号: 1000- 4548(2004) 04- 0464- 04

作者简介: 刘 润(1974-), 女, 岩土工程博士, 现任天津大学副教授, 主要从事岩土工程方面的教学和科研工作。

LIU Run, YAN Shu-wang

(The Institute of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The theory of random field plays an important role in reliability analysis of ocean structure foundations. To establish the random theory model, a large amount of soil data are required. In this paper, a database management system has been built up to manage and analyze the data of the geotechnical properties of foundation soils. Almost all information of soil properties in the existing oil fields in Bohai has been collected and included in the database. Based on the established database, the stationarity and ergodicity of soil profiles in this area have been examined and a random field has been modeled. The correlation function, correlation distance and variation of reduction function have been studied. The developed method may give guidance to introduce the reliability theory into soil foundations design of ocean structures.

Key words: database; random field; variation reduction function; reliability index

0 引 言*

近年来, 我国渤海陆续发现了若干个储量丰富的大油田, 油田的开发工作正在迅猛展开。海洋平台, 作为海上油气开采的重要设施, 经受的海况条件多变, 工程地质和地形地貌复杂, 因此其地基基础的设计参数存在着相当大的不确定性。传统的工作应力设计法将外荷载产生的应力与允许应力相比较, 得出安全系数, 这种方法不能考虑荷载与地基土的变异性^[1]。我国在海洋平台的设计中采用 API 规范, 这一规范是美国石油学会根据墨西哥湾和加利福尼亚海域的环境荷载和工程地质条件, 以可靠度分析方法为基础制定的^[2], 以荷载和抗力的分项系数代替传统的安全系数, 可以合理地考虑荷载和地基土物理力学性质的不确定性。我国为了与国际接轨直接采用了这一规范, 但我国海域的风、浪、流及工程地质条件与上述区域有较大的区别, 因此应根据我国海域的环境条件数据, 确定地基基础可靠度设计中的参数和分项系数, 从而为设计提供依据, 进而达到优化设计的目的。为达到这一目的, 需要对随机场理论和可靠度计算方法进行深入的研究。

到目前为止, 国内外对于地基可靠度规范的制定

和执行情况进展缓慢甚至停滞不前。其主要原因是计算的地基稳定的可靠指标过小, 使对应的失效概率太大, 为设计人员难以接受。研究表明, 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) 和其他一些研究者, 将随机场理论引入岩土可靠度分析之中, 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^[3]。

无论是空间随机场模型的建立, 还是开展地基可靠度研究都要以大量的实测数据为基础, 本文广泛地收集了渤海油田建设中积累的大量工程勘察资料, 建立起具有强大数理统计功能和图形显示功能的“海洋工程地基可靠度分析系统”, 应用现代化的信息管理技

* 收稿日期: 2003- 06- 17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50379034); 第三十三批中国博士后科学基金项目; 2001 年国家博士点基金项目

术支持随机场理论的研究和可靠度分析工作的深化,将研究得到的相关函数与方差折减函数,应用到可靠度分析中,使可靠度理论体系和分析方法更加完善,从而为随机场的建立和获得可靠度设计中适用于我国海域环境条件的荷载抗力分项系数提供了有力的支持。

1 数据的采集与数据库系统的建立

1.1 数据的采集及分析

对海洋土进行随机场理论模拟分析,进而开展可靠度研究,必须以大量的实测数据为基础,数据的采集、录入、整理、分析是一项相当繁杂且重要的工作。海洋结构物的地基可靠度研究不同于其它结构物,在海上进行原位试验是相当困难的,因此已有的工程勘察资料是唯一的数据来源,这些数据无论对于今后的参考设计还是对于可靠度分析都是相当珍贵的。

在渤海油田建设中积累了大量的地质勘察资料,但这些资料都是以文字的方式存档,并且散落在各个相关部门,给资料的查询和分析带来了困难,降低了对这些资料的利用率,在此次研究中,采用地理信息系统开发和研制数据库,在数据的采集和整理上做了大量的工作,使数据库中包括了渤海湾中各油田建设中积累的工程地质资料,地理信息系统的开发和研制,本身就具有重要的工程价值,同时也是建立随机场模型和可靠度分析方法的基础。

1.2 数据库系统的主要功能

结合随机场理论和可靠度研究的需要,数据库系统除具有对钻孔资料进行快速录入、整理、归档、保存功能外,还有以下几个突出特点:

(1) 分区、分层查询与统计功能。根据渤海湾中现有油田的分布特性,将收集到的资料划分为五个区块:锦州区块,绥中区块,曹妃甸区块,蓬莱区块和歧口区块。结合随机场和可靠度分析的需要,可应用相关的随机场平稳性和各态历经性检验方法^[3,4]对预检验数据进行计算并给出检验结果,并可通过曲线拟合的方法确定土性指标的相关函数和相关距离。

(2) 根据数据库中的现有资料绘制地质剖面图和钻孔柱状图,以图形的方式直观地显示土层的分布特点与变化趋势。

(3) 根据分区、分层的统计结果,分析各土性参数的分布规律和概型,系统可运用正态分布、对数正态分布和极值 I 型分布对被统计的数据进行分布检验。

(4) 将统计结果直接输入 JC 法^[5]的可靠度分析程序中,进行相应的可靠度计算。

采用这一系统,资料管理严密,查询、统计简便快

速,可节约大量的人力、物力,提高准确性。可准确地完成对土性指标、相关函数和方差折减函数的拟合,为建立海洋土土性剖面的空间随机场模型和进行可靠度分析奠定基础。

2 建立土性剖面的空间随机场模型

2.1 方差折减函数

根据随机场理论,“点特性” $Y(z)$ 的变异性是由标准差 $\sigma (= D[Y(z)])$ 来度量的,“空间平均特性” $Y_h(z)$ 的变异性是由标准差 $D[Y_h(z)]$ 来度量。用于平均的长度 h 越大,在做空间平均运算中将会抵消的 $Y(z)$ 的波动也越大,这样,用于平均的长度增大时,将使“空间平均特性”的标准差 $D[Y_h(z)]$ 减小。 $D[Y_h(z)]$ 和 σ 的无因次比为:

$$\Gamma(h) = \frac{D[Y_h(z)]}{\sigma^2} \quad (1)$$

由式(1)可知:当 $h = 0$ 时,“空间平均特性” $Y_h(z)$ 刚好是一点的“点特性” $Y(z)$,于是 $\Gamma(0) = 1$;当 h 较大时,函数 $\Gamma(h)$ 反映了“空间平均特性”的标准差 $D[Y_h(z)]$ 相对于“点特性”的均方根 σ 的衰减,因而称之为“均方根衰减因子”。均方根衰减因子的平方 $\Gamma^2(h)$ 叫做方差折减函数,由式(1)得

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

方差折减函数反映了用于平均的尺寸增大时,“空间平均特性”的方差的衰减。因而,只要确定出方差折减函数 $\Gamma^2(h)$,就可以利用公式 $\text{Var}[Y_h(z)] = \sigma^2 \Gamma^2(h)$,由“点特性”的方差求出“空间平均特性”的方差,合理地实现点方差的折减。

2.2 相关函数

事实上,土性随机场的这种“空间平均特性”的方差随着用于平均的长度的增加而逐渐衰减的特性,是由于空间各点土性间的相关性造成的。如果每一点的土性都与其它点相互独立,那么也就不会呈现出“空间平均特性”的方差衰减现象了。也就是说,土性的方差衰减现象是与其相关性有关的,那么反映在理论上,方差折减函数与相关函数之间也必定存在着一定的关系,即

$$\Gamma^2(h) = \frac{\text{Var}[Y_h(z)]}{\sigma^2} = \frac{2}{h} \int_0^h \left(1 - \frac{\Delta z}{h}\right) \rho(\Delta z) d(\Delta z), \quad (3)$$

式(3)中 $\rho(\Delta z)$ 为标准相关函数,它反映了土体的性质在点与点之间的相关性规律。

2.3 相关距离

求解相关距离是确定方差折减函数的途径。由方差折减函数的定义式(2)可见,方差折减函数 $\Gamma^2(h)$ 是

一个无因次量,反映的是“均值方差”与“点方差”之间的比值关系。可以想象,用于平均的长度越大,做空间平均运算中将会抵消的 $Y(z)$ 的波动也越大。对于充分大的 h , 有下面的近似公式:

$$h\Gamma^2(h) \approx \delta_u \quad \text{或} \quad \Gamma^2(h) \approx \frac{\delta_u}{h}. \quad (4)$$

因而方差折减函数可采用如下形式:

$$\Gamma^2(h) = \begin{cases} 1 & (h \leq \delta_u), \\ \frac{\delta_u}{h} & (h \geq \delta_u). \end{cases} \quad (5)$$

土性的相关距离是土的一种基本属性,对于同一土层,有一个单一的相关距离。

2.4 相关函数表达式的确定

由于有大量的工程勘察资料支持,故应用数据库系统采用曲线拟合的方法确定相关函数表达式。典型的拟合结果如图 1。由计算结果可以看出这一区域的海洋土,其 c_u 的相关函数符合指数余弦的函数关系,即可用 $\rho(\Delta z) = e^{-b|\Delta z|} \cos \omega \Delta z$ 表达式进行拟合。经大量数据拟合可确定其参数值 $b = 0.16$, $\omega = 0.51$ 。即土层剖面中点与点之间 c_u 的相关性表现为指数余弦型,其相关规律可由上式来描述。

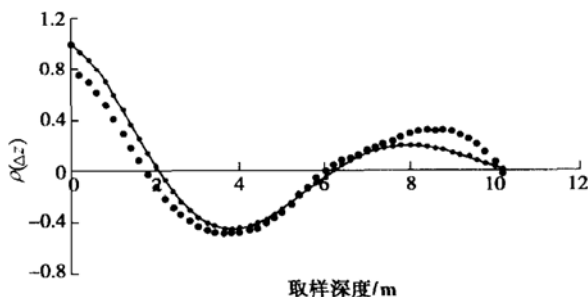


图 1 相关函数拟和曲线图

Fig. 1 Variation of correlation function

2.5 确定相关距离和方差折减函数

相关距离不仅是确定方差折减函数的一种途径,它本身也有着一定的工程实用价值,它是随机场理论具体应用于实际工程的一个非常重要的参数。它可以用于指导钻孔间距和取样间隔的大小。

借助数据库的相应功能,采用曲线拟合的方法获得相关距离和方差折减函数。图 2 为钻孔编号是 SZ36-1-12 的钻孔沿深度方向 c_u 的折减函数拟和曲线图,经拟合 $\Gamma(i) = \sqrt{\frac{\delta_u}{i \Delta z_0}}$, 其中 $\delta_u = 1.06 \text{ m}$, Δz_0

$= 1.0 \text{ m}$ 。同样地,应用数据库现有的大量数据,对不同区域的土体进行了拟合分析和比较,结果表明可取相关距离 $\delta_u \approx 1.05 \text{ m}$ 。

综合相关函数和相关距离的计算结果,可得到研

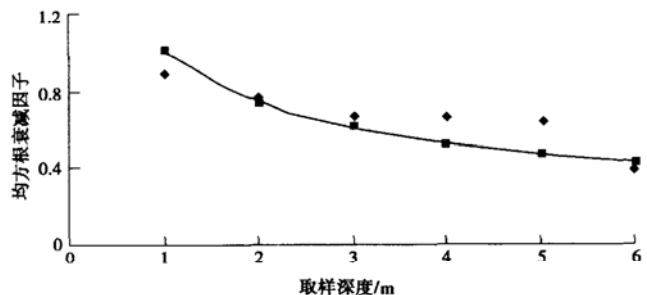


图 2 $\Gamma(i)$ 拟合曲线

Fig. 2 Variation of function $\Gamma(i)$

究的渤海区域海洋土 c_u 的方差折减函数为 $\Gamma^2(h) = 1.05/h$, 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,实现从“点方差”到“空间平均方差”的过渡,从而使土性指标的方差大为减小,变异系数明显降低。

在对海洋土进行进一步的可靠度分析中,应用求得的方差折减函数,使得土性指标的变异性得到了合理的降低,可靠度分析得到的可靠指标明显增大,接近实际情况,使可靠度分析能够顺利地进行。

3 可靠度分析

3.1 确定极限状态方程

单桩竖向极限承载力计算公式由文献[2]中的式 (G.4-1) 给出,即

$$Q_D = Q_f + Q_p = \sum f_i \cdot A_{si} + qA_p, \quad (6)$$

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(m^2); q 为单位桩端承载力(kPa); A_p 为桩端总面积(m^2)。

根据式(6),确定在可靠度分析中单桩竖向承载力的极限状态方程如下:

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

式中 P 为竖向荷载(kN)。

3.2 可靠度分析结果

应用确立的极限状态方程,采用 JC 法进行可靠度分析,分析中将方差折减函数应用于对数据的处理中。首先根据随机场理论中的相关距离确定需要进行数据处理的土层,而后将数理统计得到的土性指标的点方差应用相应的方差折减函数进行折减,表 1 是绥中区块中某井口平台桩基础的地质资料及统计结果,统计中根据该桩基的地质报告,对整个绥中地区进行了土层划分,该平台采用钢管桩基础,规格 GB72-2000 D36(泥面以下)桩的直径为 1.372 m(54 英寸),入泥深度为 80 m。

表 1 桩穿越的土层资料及相应的统计结果

Table 1 Soil properties and statistic results

土层 编号	土层 深度/m	土 类	有效容重 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	γ 的变 异系数	外摩擦 角 $\delta/(^{\circ})$	δ 的变异系数		不排水强 度 c_u/kPa	c_u 的变异系数	
						折减前	折减后		折减前	折减后
1	0.0~ 0.8	极软粘土	7.5	0.02				3.4	0.35	0.35
2	0.8~ 3.7	砂质粉土	9.5	0.02	15	0.35	0.26			
3	3.7~ 30.6	粉砂	9.6	0.01	30	0.38	0.22			
4	30.6~ 48.3	粉质粘土	9.0	0.01				120	0.45	0.26
5	48.3~ 76.7	硬粘土	9.2	0.03				220	0.41	0.27
6	76.7~ 98.0	粉砂	9.4	0.04	30	0.37	0.21			
7	98.0~ 120.5	硬粘土	9.0	0.01				200	0.38	0.2

图 3 是桩端沉入到 80 m,即以粉砂层为持力层时,可靠指标及安全系数随荷载增加的变化规律。由图可见,可靠指标和安全系数都随荷载的增加而减小。由计算可知,对应各土层强度指标均值的极限承载力为 45700 kN,随着荷载趋近此值,可靠指标和安全系数分别趋向于 0.0 和 1.0。图 3 中绘出了当不对统计的点方差进行方差折减时,可靠分析结果,此时得到的可靠指标明显减小。

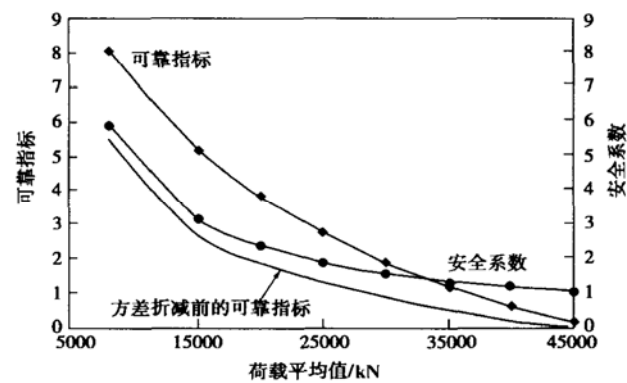


图 3 可靠指标与安全系数
随荷载均值的变化

Fig. 3 Reliability index and safety factor vs. mean load

表 2 给出了原有工作应力法的设计荷载及相应安全系数,同时将分析得到的可靠指标也列于表中。

表 2 设计计算结果

Table 2 Calculated results

环境 条件	极限承载力 /kN	最大荷载 /kN	安全 系数	对应的可 靠指标
极端	44000	14218	3.09	5.14
操作	44000	11089	3.97	6.23

由计算结果可知,采用工作应力法计算的安全系数在极端条件下和操作条件下都较大(>3),说明原设计偏于保守,相应的采用方差折减后的强度指标进行可靠分析得出的可靠指标 β 也较大,而未经方差折减得到的可靠指标较小(<3),不能反映设计的实际情况。

4 结 论

(1) 针对海洋土的工程特性及对海洋结构物地基进行可靠度分析面临的突出问题,引入随机场理论加以研究和分析,指出确定正确的方差折减函数对可靠度分析具有重要的意义。

(2) 在广泛搜集和整理渤海中现有油田钻孔资料的基础上,开发研制了“海洋工程地基可靠度分析系统”,面向整个渤海湾地区,收录了渤海中六个油田的钻孔数据,系统具有强大的数理统计功能和图形显示功能,为全面了解海洋土的分布特性,进行地基可靠度研究,提供了数据储备和技术基础。实践证明,这一系统的应用对建立土性剖面的空间随机场模型,开展可靠度研究起到了重要的作用。

(3) 应用随机场理论,确定出能描述被研究区域海洋土土性相关性的相关函数、相关距离以及可直接应用于可靠度分析的方差折减函数,实现对点方差的折减。

(4) 将随机场理论用于海洋平台桩基础竖向承载力的可靠度分析中,详细阐述了对统计指标进行方差折减的方法和步骤,对可靠度分析结果进行了对比分析,可供海洋平台设计人员采用荷载和抗力系数法设计时参考。

参考文献:

[1] 中国海洋石油天然气行业标准, SY/T 4802—92, 海上固定平台规划、设计和建造的推荐做法[S].

[2] 中国海洋石油天然气行业标准, SY/T 10009—1996, 海上固定平台规划、设计和建造的推荐做法——荷载和抗力系数设计法[S].

[3] 闫澍旺, 贾晓黎. 土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.

[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(3): 79—83.

[5] 高大钊. 土力学可靠性原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1989.