维普资讯 http://www.cqvip.com

第15卷 第4期
1993年 7月

岩 土 工 程 学 报
YANTU GONGCHENG XUEBAO

Vol.15, No.4
July, 1993

8-14

TU47

# 地基基础工程标准化与概率极限状态设计原则

高大钊
(同济大学，上海，200092)

文 摘 90年代地基基础工程标准化工作面临如何贯彻概率极限状态设计原则的问题。本文回顾了80年代我国地基基础领域中可靠性研究的进展；分析了地基基础概率极限状态设计不同于上部结构的四个主要特点；对于将结构工程设计可靠性分析方法引入地基设计时必须考虑的基本概念，提出了五个值得注意的问题；并对今后工作提出了若干建议。本文是在中国工程建设标准化协会地基基础委员会成立大会暨地基基础标准技术讨论会上的专题报告。

## 1.前 言

40年来，我国地基基础工程标准化体系经历了一个逐步建立与发展的过程。50年代，以借鉴前苏联规范为主在工程实践中积累经验，也有一些失败的教训；60年代初着手总结经验，编制我国自己的工程标准，这一项工作因文革而一度中断；70年代编制或修订了一批规范，包括勘察、设计与施工诸方面，有国家规范，也有地区性规范，尽管这些规范尚无法避免当时的局限性，但其基调是总结了建国后20多年的经验，反映了我国的自然条件与技术的特点，标志着我国已开始了自己的地基基础工程标准的体系；到了80年代，工程标准的编制修订工作空前活跃，经过这十年的努力，我国地基基础工程标准体系更加完善和成熟。

80年代，我国工程建设标准化工作的特点是在各类工程中开始全面地引入概率极限状态设计原则，采用分项系数描述的设计表达式，其标志是随着《建筑结构设计统一标准》的批准颁布，作为第一层次的工程结构设计统一标准和各类工程的第二层次统一标准开始编制，并部分地已深入到第三层次的各种规范的编制和修订工作中去。特别是建筑工程行业中，一大批结构设计规范都采用了概率极限状态设计原则，实现了统一标准的要求。

与这一大趋势相比，我们不能不看到，地基基础工程标准化工作面临着设计方法进步的挑战，同时也显示出缺乏标准体系的系统设计与系统指导。与上部结构相比，地基基础领域具有许多特点，给采用可靠性设计方法带来了许多特殊的困难，使可靠性设计在地基基础方面的应用比上部结构至少落后了10年。这就出现了在一定时期内地基基础设计与上部结构设计原则不相协调的现象。当然，这种现象也难以避免，但如持续过久就不合适了。紧迫的任务是如何尽快地改变这种不协调的局面，摸索出一条在地基基础工程标准中采用概率极限状态设计方法的路子。

我国地基基础方面的可靠性研究是在70年代后期开始的。当时，吴天行教授、Ingles教授先后到同济大学讲学，介绍了国际上的研究动态，引起了我国同行的注意。1983年初，郑

到稿日期：1991-11-30。

维普资讯 http://www.cqvip.com



大同教授受中国力学学会岩土力学专业委员会的委托，在同济大学召开了概率论与统计学在岩土工程的应用专题学术座谈会，1986年春在长春举行的岩土力学参数的分析与解析讨论会和1989年底在上海举行的岩土力学新分析方法讨论会上都发表了有关这一领域研究的论文，推动了学术研究的进展；在实用化研究方面，由于各类工程结构设计统一标准的编制，研究队伍迅速扩大，以纳入规范为目标的研究专题在各系统相继开展工作，在取得进展的同时也提出了许多有待探讨的问题；不少高等学校研究生学位论文选题也开始转向这一领域，进行了有益的探索。总之，10年来我国可靠性研究发展的特点是起步虽晚、发展很快，涉及的课题方面很广泛，对有些课题研究的广度与规模上可能超过国外。但在岩石方面开展研究较少；土动力学方面尚正在起步；有些方面的深度尚嫌不足；针对岩土工程的特点还没有引起足够的重视；可靠性研究与岩土力学物理机制的研究之间的紧密结合也有待加强。综观10年来的研究发展，现在的问题不是讨论在地基基础领域中要不要引入概率极限状态设计原则的问题，而是讨论如何开展这一领域中可靠性研究的问题。

## 2.地基基础概率极限状态设计的主要特点

地基基础作为建设工程的一个组成部分，在采用以概率理论为基础的可靠性设计方法时，与上部结构具有许多共同点，正是基于这些共同点才可将结构可靠度分析的一些方法与原则移植过来；但同时也必须看到，地基基础又具有一些与上部结构不完全相同的特点，必须充分研究这些特点，才能得到正确的结果。

由于工程项目的条件无法人为控制其相同，无完全重现的可能，因此工程结构的失效概率与产品的失效概率具有不同的物理意义。例如万分之一的失效概率并不意味着在一万个工程项目中将有一个失效，而只是定义为结构在规定的时间内，在规定的条件下不能完成预定功能的概率仅仅是万分之一的可能性。由于工程项目无法像产品那样进行可靠性试验来抽样预估失效概率，只能在测定控制工程性能基本变量统计参数的基础上、用数学模拟方法计算其失效概率，这种计算失效概率仅是一种潜在的可能性而无法试验验证。这些特点是工程可靠性明显区别于产品的地方，无论对上部结构或是地基基础都是一样的。因此，对上部结构失效概率的定义以及计算失效概率的方法同样也适用于地基基础。

但是，地基基础和上部结构相比又有一些明显的差别，这些差别构成了地基基础可靠性问题的特点。地基基础设计通常分为地基设计和基础结构设计两个方面，基础结构设计基本上和上部结构构件设计相同，可以按钢筋混凝土结构规范的有关规定设计；地基设计与上部结构设计不同，具有四个特点，两个物理方面的，两个几何方面的。

岩土材料不同于上部结构所用的人工材料，它是自然历史的产物，无法人为控制其组成成分和工程性质，它的性质与位置有关，反映了地质成因与年代的影响。岩土材料具有地域性的特点，各地的岩土具有不同的特点，因此地基设计所依据的参数通常是由勘察提供的，只有初步设计或不重要的工程才可采用规范推荐的一些经验值。地基设计采用可靠性设计方法时，校准法的基准并不是规范的参数表而应当是每一个工程的勘察成果。岩土材料的工程特性指标即与位置有关，具有场的效应，具有自相关的结构特性。即使对于同一地点的同一土层，由于形成一定厚度土层的时间很长，成土环境并不完全一样。两点的位置越靠近，成土环境变化越小，两点之间的性质的关系越密切；随着两点之间距离增大，这种相关性逐渐减弱，直至互不相关。这种自相关特性在人工材料中并不一定具有，结构可靠性分析中毋需考虑材料的自相关特性，但在地基可靠性分析中却不能不加以考虑。显然，岩土材料的这两

维普资讯 http://www.cqvip.com



种特性不能不从物理方面影响地基可靠性分析。

地基是一个半无限体，与通常由板梁柱组成的结构体系不同，地基内各点应力与应变的相互影响极为复杂，实用的计算方法建立在连续介质力学的基础上。无论是稳定或变形问题，求解的都是整个地基的综合反应，而不是只验算孤立的几个截面，这就使地基问题的可靠性分析极为复杂。推导地基极限承载力公式时，假定地基中分为三个区域，即主动区、被动区和过渡区，在这三个区域中滑动面的形状和位置与基础的宽度和埋深有关，又取决于土体的整体抗剪强度的平均性状；在土坡稳定分析时，所验算的最危险滑动面的形状与位置也是不仅取决于土坡的几何形状，同时又与土体抗剪强度的平均性状有关；同样在挡土墙土压力计算时，破裂面的位置同时取决于挡墙的几何尺寸、形状以及土体整体抗剪强度的平均性状。从上述的分析可知，地基设计计算体系不像梁板结构那么简单，也无法区分构件与体系，不能先解决单个构件截面验算再研究体系的可靠性，地基的可靠性分析从一开始就必须考虑半无限体这个复杂的连续介质。岩土力学所研究的对象及其计算模型也是地基可靠性分析必须考虑的一个物理因素。

在板梁柱体系中，边界条件一般比较明确，研究对象的几何尺寸是明确的；但在地基设计中，许多边界条件的处理有相当大的假定性与不确定性，有时甚至连所考虑的承载范围有多大也不明确，其边界不仅是假定的，而且随着荷载的变化或其它条件的变化而变化。例如，滑动面的形状与位置还受到下卧层软层或硬层的影响，地基压缩层的厚度随基底净压力增大而增厚等。因此，当采用随机场理论来分析时，其研究空间的确定是一个值得注意的问题。

在结构构件设计时，所验算的截面尺寸与材料试样尺寸之比并不很大；但在地基设计中，所研究范围的体积与土样体积之比非常大。例如，三轴试验土试样的体积仅为$7.9\times10^{-5}m^3$，也就是说，在$1\ m^3$土体中可采取12600个土试样。因此在通常研究的地基问题中，地基土体的体积与土试样体积之比可达几十万倍甚至几百万倍。几何尺寸方面的这一特点使地基可靠性分析时正确选用不同的估计理论变得更加重要，更为关键。

## 3.地基可靠性设计应考虑的问题

由于上述四个特点，在将结构设计可靠性分析方法引入地基设计时必须考虑一些基本概念，将方法的引用建立在正确的物理概念基础之上，而不能照抄照搬。

### 3.1 失效控制原则

在地基强度与稳定分析中，现有的方法都是建立在地基整体失稳的物理机制基础上。尽管在实际上，地基失稳是由最弱点(应力大于强度)开始，逐步发展到形成贯通的滑动面而整体失稳，有一个逐步发展的过程；但实用的计算方法都只验算已形成滑动面那个时刻的整体平衡，不管滑动面是假定的或者按极限平衡理论求得的。因此，无论是地基承载力问题，或者是土坡和土压力问题，整体失稳是失效控制的原则。我们所说的失效概率是指整体失稳的出现概率，而不是指地基中最薄弱点出现极限平衡状态的概率。显然，后者作为失效控制的失效概率大大地高于前者，这是一个必须严格区别的基本概念。

以最薄弱点出现失效作为控制的情况在岩土工程中也是有的，例如防渗结构的防渗设计中，必须控制最易出现渗漏的最薄弱环节。我们必须仔细分析所研究问题的物理机制，正确地区分失效控制原则，才不致于得到错误的结果。

### 3.2 土性指标代表性数值取值原则

维普资讯 http://www.cqvip.com



设计参数的标准值是材料性能指标的代表性数值。根据《建筑结构设计统一标准》的规定，材料强度的标准值可取其概率分布的0.05分位数确定，由下式估算：

$$f_k=\mu_f-1.645\sigma_f$$

这个公式适用于大子样的情况，对上部结构材料而言，式中的$\sigma_f$是材料强度的子样标准差，子样以全国为总体，对同一种材料抽取的。

将上述规定用于地基设计时，有两个原则的问题是必须引起注意的，不能照搬对结构材料的规定。第一个问题是目标总体的划分；第二个问题是参数估计方法的选择。

即使对于同一种土类，在全国范围内作为一个目标总体提取统计子样的做法也值得商榷。这是因为地基设计用的土性指标应当由工程勘察报告提供，所给出的统计参数反映了工程场地土性指标客观的变异性与主观因素(取样方法、样品数量不充分等)造成的不确定性。由荷载和抗力两方面的变异因素所造成的客观结果与主观要求的偏离均构成了可能的失效。由此可见，从全国范围资料统计变异系数的方法与工程设计的实际情况是不相符合的。全国性规范所提供的一些设计参数，例如地基承载力、单桩承载力等可以作为初步设计或缺乏资料时采用，但只能给出其平均趋势，而不可能也不应当给出每个工程场地这些设计参数的变异性趋势。因此计算公式中的$\sigma_f$是以场地为目标总体统计出来的，而不能以全国为目标总体来统计。

设计参数的标准值作为某一置信概率的分位数，从统计学的观点来说就是对设计参数进行估计。根据子样统计的结果进行参数估计的方法有两种，一种是预估总体平均值的置信区间，另一种是预估单个测定值的置信区间，这两种方法各适用于不同的情况，得到的结果也相差甚远。究竟采用何种方法，取决于所研究问题的性质。如果以最薄弱环节出现失效为控制依据，设计参数标准值可以用后一种估计方法来计算；但如以整体失效来控制，就应当用前一种估计方法，即控制设计的是性能指标的总体平均趋势而不是某一局部的最弱点。对于取置信下限为标准值的指标，用后一种方法的取值比前一种方法要小得多。我们以标准贯入的击数为例来说明，两种方法的置信下限公式各为

预估总体平均值置信下限

$$N_\mu=\mu_N-1.645\sigma_\mu$$

预估单个测定置信下限

$$N'=\mu_N-1.645\sigma_N$$

第一个公式中的$\sigma_\mu$是标贯击数平均值的标准差，所求得的$N_\mu$如用作为标准值表示$N$的总体平均值大于$N_\mu$的概率为95%；第二个公式中的$\sigma_N$是标贯击数的子样标准差，所求得的$N'$值表示在大量的标贯试验中，击数大于$N'$值的概率为95%。当我们用标贯击数来预估地基承载力时，所要求的是估计地基的整体强度而不是某一点的强度，此时应当用前一个公式而不应当用后一个公式。

如果子样的容量(即数据的数量)不满足大子样要求时，公式中的1.645就应当用学生氏函数的临界值$t_\alpha$值，在工程勘察中，大多数是小子样的情况。

### 3.3　可靠性分析中统计参数的取法

用一次二阶矩验算点法作地基可靠性分析时，抗力基本变量验算点坐标

$$x'=\mu_{x_i}-\beta\sigma_i\cos\theta_i$$

的表达式中$\sigma_i$究竟用子样标准差还是平均值的标准差，这也是一个值得研究的问题。

维普资讯 http://www.cqvip.com



不同的工程问题应当采用不同的指标，这也取决于我们所研究的问题是采用何种失效控制原则，与估计标准值时选用原则是完全一致的。

如何统计平均值的标准差呢？这是地基设计中需要特殊处理的问题。由于岩土性质与形成条件有关，其指标值与点的空间位置有一定的关系，在一定范围内各点土性参数之间存在着相关性。因此用随机变量理论来统计土性参数时要注意研究子样是否满足独立同分布的条件和如何确定统计目标总体的范围。采用随机场理论可能会较好地解决这个问题。

工程实践中可能推广应用的方法是随机场理论中比较简单的一种类型，即齐次随机场。它的均值$E[X(P)]$是一个与$P$点的坐标无关的常数，与按随机变量理论统计所得的结果完全是一致的；其相关函数$R(P,P')=E[(X(P)-\mu)(X(P')-\mu)]$是一个仅依赖于向量$\overrightarrow{PP'}$的函数。如果是各向同性的随机场，则相关函数仅与$PP'$的长度有关而与方向无关。一维齐次随机场在区间$[t,t+h]$上的随机积分

$$X_h(t)=\frac{1}{h}\int_t^{t+h}X(t)dt$$

这个积分称为均方积分。由于$h$和$t$都可以变化，$X_h(t)$也可看作一个随机过程。将这个概念用于地基设计中的参数统计可以这样来理解，如对于某一厚度的天然土层，当基础埋深和基底压力都未确定时，其可能的滑动面影响深度或压缩层厚度均未知，故目标总体(一维问题的深度范围)的空间及起始位置也都不能确定。一旦工程问题已经明确，埋深(相当于起始位置$t$)和影响深度或压缩层厚度(相当于空间范围$h$)都可以确定，$X_h(t)$就变为一个随机变量。可见在一定条件下，随机场问题可以转化为随机变量问题来处理。

均方积分的方差

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

式中 $\sigma^2$为子样方差，$\Gamma(h)$称为方差折减系数，对充分大的$h$，$h$与$\Gamma(h)$的乘积趋向于常数$\delta_0$。

$$h\Gamma(h)=\delta_0$$

$\delta_0$称为相关距离，是任意两个互不相关数据的最小距离，如取土间距大于或等于$\delta_0$就可保证数据之间的独立性。

则 $$\Gamma(h)=\frac{\delta_0}{h}=\frac{1}{n_0}$$

$n_0$即为在目标总体空间范围内互相独立数据的最大数目，在这条件下均方积分的方差为

$$\mathrm{Var}[X_h(t)]=\frac{\sigma^2}{n_0}$$

用随机变量理论时，平均值的方差

$$\mathrm{Var}[\mu]=\frac{\sigma^2}{n}$$

$n$为样本容量。从齐次一维随机场的特点可知均方积分与随机变量理论的均值$\mu$是相等的，即

$$X_h(t)=\mu$$

我们可以将$n_0$理解为在空间$h$中包含的不相关观察数据的等价数。如果取样点间距等于$\delta_0$，则$n=n_0$，此时就满足互相独立的条件，用两种理论所得的均值方差是一样的。如取样点间距大于$\delta_0$，则$n<n_0$，由于取样的不充分性使不确定性增大，平均值的方差增大，其增量

$$\Delta=\sigma^2\left(\frac{1}{n}-\frac{1}{n_0}\right)$$

维普资讯 http://www.cqvip.com



可靠性分析时必须考虑这个增量的影响。如取样点间距小于$\delta_0$，即$n>n_0$，超过的部分$n-n_0$对均值方差的折减不应产生作用，因为其中必有$n-n_0$对数据是相关的，不相关的数据仍只有$n_0$个。

### 3.4 可靠性指标$\beta$

可靠性指标$\beta$是用于衡量结构可靠度的一个指标，它比确定性方法的安全系数更具有可比性。从理论上说，无论是上部结构或地基基础，无论是承载力问题或土坡稳定问题，一定的$\beta$值总可与一定的失效概率相对应，用可靠性指标来描述可靠度具有一定的可比性。

作为工程设计的控制标准，用目标可靠性指标[$\beta$]来衡量时，它的取值与建筑物的安全等级有关，也与破坏特征有关。上部结构的目标可靠性指标[$\beta$]，在统一标准中已有规定，那么地基设计的目标可靠性指标该取多少呢？是和上部结构一样，还是有差别？这是一个涉及上、下部结构可靠度的匹配问题，从不同角度出发可能得到不同的结论，总之是一个值得研究的问题。

目标可靠性指标的规定是一回事，对实际工程验算得到的可靠性指标又是另一回事。根据一些报导，地基基础可靠性分析所得的$\beta$值有时很低，可能略大于2，甚至小于2。这种计算结果是否反映了实际的可靠度是一个需要慎重研究的问题，不能匆忙下结论。

首先要从可靠性分析的失效控制原则来分析，如果采用子样标准差来计算本来应当控制整体失效的问题，那肯定会得到偏小的可靠性指标；其次要研究统计的目标总体与工程计算范围的关系，如目标总体的范围远大于实际工程的影响范围，则子样变异系数肯定会增大，求得的可靠性指标并不反映实际情况；基本变量之间的相关性也会影响计算结果。负相关的指标如考虑相关性会提高$\beta$值，但正相关的指标却使$\beta$值降低。对于互相关系数比较大的情况，可采用正交变换方法在可靠性分析中考虑基本变量之间的互相关性，使计算结果更加符合实际。正交变换方法可适用于两两相关的多个基本变量相关的情况。对上述各种情况都进行了详细的校正之后，可靠性指标可能会达到符合一般规律的数量级。在排除了这些因素之后才能判断地基设计的可靠性指标与上部结构之间是否存在着根本的区别。

## 4.若干建议

鉴于地基可靠性设计具有它自身的特点，不能将现有比较成熟的上部结构可靠性分析的一些概念和方法不加区别地、简单地移植过来。要针对地基设计的特点开展一些基本问题的研究。这些研究必须从土力学的物理概念出发，正确运用概率论和统计学的原则与方法，分析土体在动、静荷载作用下的反应，对土体的性状进行概率预测，提出正确的概念与方法。

在技术贮备十分不足的条件下，要将可靠性研究的结果纳入规范，必须谨慎从事。任何方法或结论都必须在理论上站得住脚，在基本概念上与土力学的物理机制吻合，在数据上与工程经验相容。在资料不足的条件下允许采用经验处理，但必须为发展留有余地，不能将经验处理的结果作为普遍的结论来肯定。

各行业的地基基础问题各有其特殊性，编制相应的规范时应当着重加以研究，允许在具体问题上作出各自的规定。但在一些基本问题上要协调一致，不要采用不相容的原则与方法。

要将具体方法的研究建立在充分的概念研究的基础之上。从现状看，研究基本概念少，探讨具体方法多，这不利于解决技术关键问题。在可靠性研究中不同学术观点的争论，可以互相启迪，互相促进，尤其要重视不同意搞可靠性研究的意见，可以从中发现可靠度自身研

维普资讯 http://www.cqvip.com



究的不足，从而使可靠性研究建立在更加牢固的基础上。

# Stadardization of Foundation Engineering and Probabilistic Limit State Design Approach

*Gao Da-zhao*

(Tongji University, Shanghai)

## Abstract

Foundation engineering standardization based on the probabilistic limit state design approach will be carried out in the nineties. In this paper, the advance on the reliability research in foundation engineering field has been summarized. Main differences between superstructure and foundation in reliability design have been distinguished and some fundamental concepts for leading the structure reliability emalysis method into the foundation design have to be noted. At last, suggestions have been made for foundation engineering standardization。