

# 港口工程结构可靠度

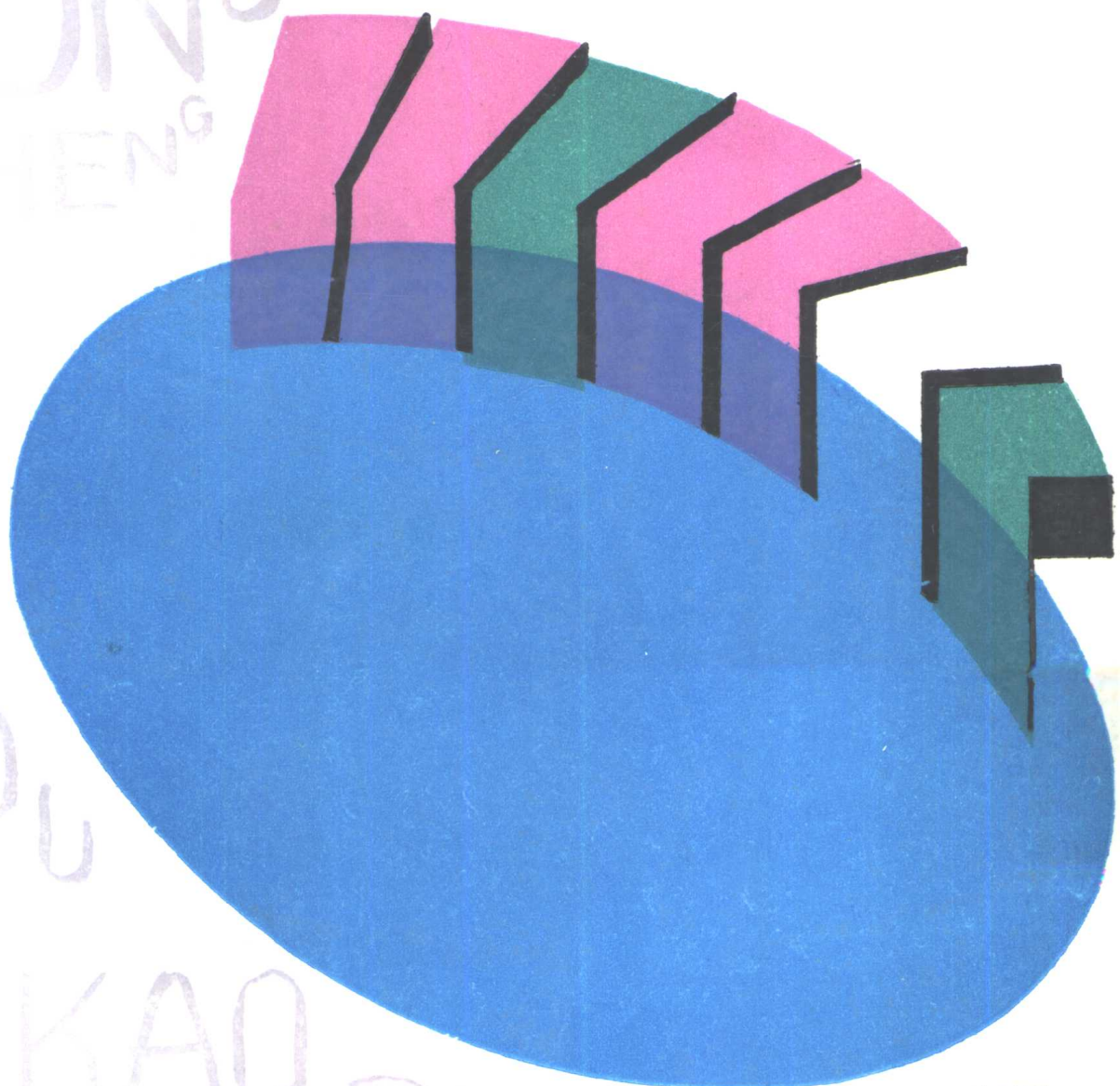
GANGKOU

GONG  
CHENG

JIE

GOU  
KOU

KAO  
DU



《港口工程结构可靠度设计统一标准》编制组

人民交通出版社

U652

9500314

# 港口工程结构可靠度

《港口工程结构可靠度设计统一标准》背景材料

《港口工程结构可靠度设计统一标准》编制组

(京)新登字091号

## 内 容 提 要

本书系为制定《港口工程结构可靠度设计统一标准》所进行的大量研究的结果总汇,不仅是理解和掌握统一标准不可缺少的资料,也是正确运用港工规范必备的文献,同时,对其他工程领域的技术、科研和教学人员,在掌握工程结构可靠度理论和新的结构设计方法方面也有极大帮助。

## 港口工程结构可靠度

《港口工程结构可靠度设计统一标准》编制组

人民交通出版社出版

本社发行

(100013北京和平里东街10号)

巨山印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 23.75 字数: 565千字

1992年8月第1版

1992年8月 第1版 第1次印刷

印数: 1000册 定价: 29.00元

ISBN7-114-01530-5

U·01029

# 序

经过近十年的工作，我部已正式编制出《港口工程结构可靠度设计统一标准》(国家标准)，即将批准，正式使用；并决定以此作为编制、修订各册港口工程结构设计规范以及有关勘测、施工规范和生产管理使用规定，共同遵守的准则。

这项工作涉及到港口工程建设和生产使用维修各个方面，我们进行了大量的调查、研究和统计分析工作，做了多方面理论联系实际的尝试，将工作成果写成这三十篇专题论文报告，现编辑出版。

今后港口工程结构设计将采用以分项系数表达的概率极限状态设计方法。这是一项新的、正在发展的基础理论，有不少问题尚需深入探讨，迫切需要通过实践与我国港口工程建设的实际相结合。广大从事港口工程的技术人员们将参与编制规范的工作，今后更要使用它以指导我们的勘测、设计、施工与生产管理和维修工作，今后港口工程教学也将逐步转为使用以可靠度理论为基础编写的教材。

我们的知识需要更新，希望这本论文集对我们学习可靠性理论有所推动和帮助，使这项技术理论进一步发展和深化，使我国未来港口工程建设进一步达到技术先进、经济合理、安全可靠、耐久适用，赶超国际水平。

交通部工程管理司

刘济舟

1992.5.23

# 目 录

〔I〕 港口工程结构可靠度设计中的几个主要问题.....	( 1 )
------------------------------	-------

## 荷 载 部 分

〔II〕 港口码头堆货荷载的统计分析.....	( 17 )
〔III〕 码头门式起重机荷载统计分析.....	( 40 )
〔IV〕 集装箱堆场箱角荷载统计分析.....	( 54 )
〔V〕 港口铁路车辆荷载的概率模型.....	( 61 )
〔VI〕 波浪力统计分析.....	( 68 )
〔VII〕 海港工程设计潮位统计分析.....	( 78 )

## 材料性能部分

〔VIII〕 港工混凝土现场试块强度的统计分析.....	( 87 )
〔IX〕 结构混凝土强度的统计分析.....	( 98 )
〔X〕 港工混凝土结构自重力的统计分析.....	( 107 )
〔XI〕 港工混凝土构件几何尺寸统计分析.....	( 118 )
〔XII〕 港工混凝土强度验收标准的研究.....	( 122 )
〔XIII〕 码头回填砂、块石的重度和摩擦角统计分析.....	( 136 )
〔XIV〕 混凝土与碎石间摩擦系数统计分析.....	( 147 )

## 可靠度分析部分

〔XV〕 港口工程结构设计基准期.....	( 157 )
〔XVI〕 钢筋混凝土构件强度可靠度分析.....	( 170 )
〔XVII〕 钢筋混凝土构件正常使用极限状态可靠度初步分析.....	( 177 )
〔XVIII〕 防波堤的可靠度.....	( 187 )
〔XIX〕 桩基承载力的可靠度.....	( 200 )
〔XX〕 沉桩时桩身拉应力统计分析及其可靠度.....	( 211 )
〔XXI〕 重力式码头抗倾抗滑稳定的可靠度分析.....	( 221 )
〔XXII〕 岸坡稳定的可靠度.....	( 231 )

## 统计方法和可靠度分析方法部分

〔XXIII〕 分项系数和组合系数确定方法.....	( 255 )
〔XXIV〕 参数未知的K-S法检验临界值分析.....	( 261 )

〔XXV〕	变量相关下的JC法 .....	( 266 )
〔XXVI〕	同时算出可靠指标和验算点的快速收敛蒙特卡罗法 .....	( 272 )
〔XXVII〕	地基土的物理性指标和抗剪强度指标统计分析 .....	( 280 )
〔XXVIII〕	关于地基土的性质指标统计问题的探讨 .....	( 294 )
〔XXIX〕	齐次随机场在分析土性指标中的应用 .....	( 301 )
〔XXX〕	标准正态分布的 $r$ 次方表 .....	( 308 )

## 附 件

附件一、国家标准《港口工程结构可靠度设计统一标准》（报批稿） .....	( 324 )
附件二、国家标准《港口工程结构可靠度设计统一标准条文说明》（报批稿） .....	( 358 )
后记 .....	( 372 )

# 〔 I 〕港口工程结构可靠度设计的几个 主要问题

## 一、前 言

《港口工程结构可靠度设计统一标准》是我国工程结构设计改革的组成部分之一。《建筑工程结构设计统一标准》已于1984年颁布，继之又完成了有关建筑结构设计规范的修订，迈出了我国工程结构设计改革重要的一步。1985年原国家计委同时下达了包括港工标准在内的五本工程结构设计统一标准的编制任务，预计于本世纪90年代我国工程结构设计将全面地从定值设计法步入概率设计法。这是一次重大的改进，对我国经济建设和结构设计科学的发展，都将产生深远影响。

现行港口工程结构设计，已有一套比较齐全的技术规范。其中与结构安全有关的，有荷载、地质勘察、海港水文、重力式码头、高桩码头、斜坡码头和浮码头、防波堤、地基、桩基、混凝土和钢筋混凝土设计、混凝土和钢筋混凝土施工、海港钢筋混凝土结构防腐蚀、海港预应力混凝土结构防腐蚀、海港工程钢结构防腐蚀、水运工程水工建筑物抗震设计等共16册。结构的设计基本是采用以破损阶段概念为特征的定值极限状态法，而钢结构则又采用容许应力法。前者的安全系数 $K$ ，后者的容许应力 $[R]$ ，都主要是根据经验确定的，而对不同结构，往往有不尽相同的经验，以致各册规范之间，不同结构之间，没有度量可靠度或安全度的统一尺度，也难以进行比较。现行港口工程技术规范设计其缺点是显而易见的。

关于港口工程结构从定值设计向概率设计过渡的必要性和可能性问题，曾经过长期的酝酿。1984年邀请港口工程设计、施工、科研、教学等方面有关专家开座谈会，1985年计委下达编制任务后交通部基本建设局召开局务会议，开办可靠度学习班，以及在陆续组成专题组的过程中，反复讨论落实，思想认识得到了统一。必要性问题较易得到解决，因为定值设计的缺点是确切无疑的，而概率设计在理论上已趋成熟，并且已经步入实用阶段。我国建筑工程结构已走在前面，国际上也有不少标准规范可资借鉴参考。关于可能性问题，讨论解决了以下几个问题：

1. 港口工程结构设计的影响因素太多，仅荷载就有数十种之多，短期内都要进行调查、测试、统计，是否可能？这是首先遇到的问题，经研究决定采取按轻重缓急，区别对待，分期解决的办法。对可靠度影响较大，又有条件解决的先解决；对可靠度影响较小，目前解决有困难的，留待以后解决。几年实践说明采取本原则的正确性，如码头面堆货荷载、门座起重机轮压、波浪力和土压力等，是码头、防波堤的主要荷载，几年来集中了较多人力，对国内海、河主要港口，大量波浪测站资料和主要砂场、石场，进行了大量的调查、测试和统计分析工作，取得了十分可贵的成果；而船舶系缆力、挤靠力和水流力等，

对结构设计可靠度的精度影响不是很大，在人力、财力上也存在一定困难，故拟先放一放，以后有条件时再解决。由于掌握了主要荷载和其他主要基本变量的统计特性和统计参数，便对编制统一标准和继之的规范修订工作奠定了较好的基础。而对一些较次要的荷载和基本变量拟仍主要依据经验或仍按定值考虑，可不影响标准规范的必要精度。如船舶系缆力，即拟仍按定值考虑，现阶段这样处理应该是可行的。

2.沿海、内河环境条件极为复杂，全面查清其设计特性，非短时间所能办到，如此求得的可靠度是否可靠？对此问题，一致的看法是全面实现概率设计，需要较长过程，需要分步骤前进。目前采用以分项系数表达的概率极限状态设计法，以后逐步向直接的概率极限状态设计过渡。现阶段这样做有很大优点：在掌握了主要基本变量的统计特性的基础上，运用可靠性理论校准了按现行规范设计的结构的可靠度水准，从而改变了长期以来可靠度不明的混沌状态；实际设计采用与现行设计相近的分项系数表达式，既便于与现行设计方法比较，也易为广大设计人员接受。统一标准规定的目标可靠指标，总体上与现行设计的可靠度水准相当，对个别不合理的有所调整，根据长期实践经验，应认为其可靠性是有保证的。今后随着统计资料的进一步充实、完善，其精度将逐步提高。

3.现行设计的很多方面依靠经验，而新方法理论化了，是否会影响实践经验的利用？其实理论和经验一直是相辅相成、互相促进的，不存在不能相容的问题。现行设计所采用的破损阶段概念和容许应力法，是在近代弹、塑理论和材料试验的基础上建立的，在科学性上，比更早的完全依靠经验设计，大大前进了一步。但是并不排斥经验，而是由于对结构分析和材料性能有了进一步认识，更便于利用经验，提高了其准确性和科学性。概率法与现行定值法的关系也将是这样。由于对主要设计基本变量的统计特性有所了解，有了结构可靠度或失效概率的量值概念，必然地也将使利用实践经验的准确性、科学性得到进一步提高。《港口工程结构可靠度设计统一标准》各专题工作一开始，即定下一条原则：不拒绝经验，随时注意发挥以往工程经验的作用。这条原则将一直继续下去。现阶段仍采用分项系数表达式，便于体现这一原则，也应是重要原因之一。

4.土的问题。其他几本统一标准都把土的问题安排在以后解决，根据先易后难的原则，这是对的。但是对于港口工程，如果土的问题不能同时解决，等于丢开了主要问题，大大降低了工作的意义。对此问题，酝酿的时间较其他问题更长些。首先是把非粘性土与粘性土分开，先成立了非粘性土的专题组，半年之后粘性土专题组才在又一次专题讨论后成立。在几年来的工作中，确实遇到了一个又一个困难，经过一次又一次反复，但最后成果还是令人比较满意的。还遗留一些工作拟在修订地基规范中继续完成。与其他材料比较，土的问题依靠经验的成分将更多一些。这是在预料之中的，现行设计也是如此，与前述原则也是一致的。

与土的问题相似，耐久性问题，或设计基准期问题，也是港口工程结构重要问题之一。这个专题组又晚一年成立，几年来也取得比较满意的成果。

《港口工程结构可靠度设计统一标准》(以下简称《统标》)条文和附录是在七个专题组工作成果的基础上，依据《工程结构可靠度设计统一标准》的总原则，并参考国内外其他有关标准规范编写而成的。为了便于理解和使用，本文拟对标准中的一些主要内容加以说明。



## 二、港口工程结构的必要功能和环境条件

### 1. 适用范围和港口工程结构内容

统一标准关于适用范围的规定是比较清楚的，不需要说明。其中关于港口工程结构的内容是这样写的：“新建、改建建筑物的整个结构，以及组成结构的构件和地基基础。”意味着除上部结构构件外，地基基础也是结构的组成部分。如认为组成整个结构的各基本单元为结构构件，也可认为地基是结构构件之一。标准中许多条中仅提构件，未同时提地基，则可理解为包括地基。

这与习惯概念有些不同，但要把包括地基在内的港口工程结构设计总原则写在一本标准中，则是必要的。国际标准(ISO2394)《结构可靠度总原则》也是这样写的。这样写既可避免许多不必要的重复，同时在概念上也是科学的。整个结构应该包括地基，否则便成了空中楼阁。尤其是港工结构，更难把地基与整个结构分开。

### 2. 港口工程结构功能和结构可靠度

统一标准明确规定港口工程结构必须满足四项功能，即：①能安全承受在使用和施工期可能出现的各种作用；②正常使用和维护下具有合适的工作性能；③在正常使用和维护下具有足够的耐久性；④在发生偶然事件情况下，结构仍能保持必需的整体稳定性。这是现行各本港口工程结构规范所没有的。按现行规范设计的工程结构也需要满足这些功能，规范条文未予明确规定，而是按惯例理应如此。从无明确规定到明确规定，是规范科学性上的一大进步。随后可靠度、设计基准期等等一系列内容，都是从此出发所做的规定。

关于结构可靠度，统一标准定义为“结构在规定的时间内，在规定的条件下，完成预定功能的概率，称为结构可靠度”。这是一个概念明确、内涵完整的科学定义，是现行规范所没有的。可靠度是具有预定功能的概率，预定功能就是指上述的四项功能，①、④项是指承载能力而言，②、③项是指正常使用而言，在标准和随之进行修订的规范中都是有具体要求的。具有预定功能的概率，使得可靠度可以度量。现行规范只规定安全系数，不规定可靠度或安全度，这是由于尚没有对可靠度或安全度进行度量的尺度。安全系数可以间接体现安全度的大小，但不同结构的安全系数是根据各自实践经验规定的，常常难以横向比较，因而也难以作为衡量安全度的统一尺度。

标准中用可靠度，而不用安全度，也是依据四项功能而确定的。安全度仅能概括①、④项承载能力的安全性，而可靠度可以概括全部四项，即①、④项的安全性和②、③项正常使用的可靠性，总称可靠度。

可靠度定义中的规定时间和规定条件，是根据结构的设计情况，对结构的预期使用条件和环境条件所做的规定，可以提高计算可靠度的准确性，使其更符合实际可能的使用条件和环境条件。

不能完成预定功能的概率，一般称为失效概率。两者的关系为：

$$P_s = 1 - P_f \quad (2-1)$$

式中： $P_s$ ——结构可靠度；

$P_f$ ——结构失效概率。

$P_s$ 或 $P_f$ 可以通过现代数学运算具体求得，只要结构设计所需要的各项基本变量的统计特

性、统计参数是符合实际的、可靠的，则据以计算的可靠度或失效概率也是可靠的。而可靠度或失效概率取用什么量值做为设计标准，则根据当前在经济上、安全上所能承受的程度或与已往工程结构进行校准而定。以可靠度做为衡量工程结构安全可靠、适用的尺度，是结构设计的一次重大技术变革，其理论意义和经济效益都是不容低估的。

### 3. 设计基准期及其他规定时间

与现行规范相比，概率极限状态设计的主要特点之一是确定结构可靠度必需依据规定的时间参数与持久设计状况相对应，按结构预期使用寿命规定的时间参数称为设计基准期。此外与其他设计状况相对应，尚需规定其他的时间参数，为与设计基准期相区别，称为与其他设计状况相对应的设计持续期。现行规范其设计所依据的基本参量按定值考虑，所以不需要此时间参数。但是有些荷载，如风、波浪等，其随时间的随机变化非常明显，在以往设计中，其设计值仍需要根据多年观测值进行统计确定。实际上港口工程的大部分荷载，都应视为随机过程，简化为按定值考虑，误差必然很大。统一标准根据不同的规定时间，确定荷载大小，无疑比现行规范基本按定值考虑，更符合实际规律。

对于港口工程结构，除设计基准期外，其他规定的持续期一般有预计施工期，以及个别工程根据特定的使用需要所考虑的其他特定持续期。如在某一段时间，有重件装卸要求的码头，此段时间即是一种特定的持续期。

统一标准规定港工混凝土结构的设计基准期或预期使用寿命为50年，是根据1987版港工规范规定的钢筋防腐措施和混凝土抗冻措施，参考国际标准以及对典型工程现场调查和取样测试结果而定。用预期使用寿命，是由于虽然采取基本相同的耐久性措施，但是各个工程结构的实际使用寿命仍将是参差不齐的。以后应积累资料，对结构的预期使用寿命，也应掌握其概率统计特性，使结构设计基准期的确定，更为科学合理。

港口工程结构在施工期间的环境条件和所受荷载是与使用期间有差别，因此施工期应作为与短暂设计状况相对应的一个特定的设计持续期，另外考虑其荷载的统计特性和确定其特征值。如防波堤建成前的码头工程设计，其可能经受的波浪力不能按预期使用寿命期间考虑，以往设计采用重现期五年一遇的波浪力作为施工期荷载，今后应以施工期为一定的持续期，按波浪力以及其他可变荷载的统计特性确定特征值。短暂设计状况的其他特定的设计持续期也应按同样原则考虑。

结构设计基准期也是一种设计持续期，且是最重要的，是设计的基本情况，其他持续期可作为设计校核情况。

## 三、概率极限状态设计基本原则

### (一) 极限状态设计

极限状态也是按前述的四项功能确定的。结构或其一部分超过某一状态就不能满足设计规定的某一功能要求时，此特定状态称为该功能的极限状态。本标准考虑两种极限状态，

---

\*此处“设计基准期”和“设计持续期”都是Design reference periods的译语。译为“设计参考时间”亦无不可；因“设计基准期”一词，在我国专用于与持久设计状况相对应已有一定时间，故区别此两个词。设计基准期和设计持续期都是可靠度计算中必需的时间参数，一个取决于结构预期使用寿命，一个取决于施工期或其他特定的使用时间。

即承载能力极限状态和正常使用极限状态。前者反映①、④项功能的极限情况，后者反映②、③项功能的极限情况。两种极限状态的具体表现特征，标准中有很清楚的规定，不需要说明。

极限状态设计不是新事物，现行规范的设计方法也是极限状态设计，与本标准采用方法的不同处在于：一个是定值极限状态设计；一个是概率极限状态设计。两种方法的极限状态方程分别为

概率极限状态方程：

$$R - S = 0 \quad (3-1)$$

式中：R——结构抗力；

S——结构作用效应。

现行设计，视R和S均为定值。其设计式为：

$$R - KS \geq 0 \quad (3-2)$$

式中：K——安全系数。

此式不能表达结构可靠度，只能用安全系数K间接表达。但因K基本是根据经验确定的，不同类结构，根据不同的经验确定K，故难以作为全面衡量的尺度。如现行港工规范混凝土受弯计算，取 $K \geq 2.5$ ，钢筋混凝土受弯计算，取 $K \geq 1.55$ ，却并不说明前者可靠度高于后者。后者，取较小的安全系数，可以保证安全；而前者，取较大的安全系数，对其安全性尚没有充分把握。因此规范中对混凝土受弯结构还规定了许多限制条件。

统一标准采用的概率极限状态设计法中R和S都是随机变量（S在很多情况都是随机过程），其设计式为

$$R - S \geq 0 \quad (3-3)$$

该式可用可靠性理论求解结构可靠度。为了使用方便，结构可靠度用指标 $\beta$ 变量。可靠指标 $\beta$ 与结构可靠度 $P_r$ 和失效概率 $P_f$ 的关系如下：

$$\beta = \Phi^{-1}(P_r) = \Phi^{-1}(1 - P_f) \quad (3-4)$$

式中： $\Phi(\cdot)$ ——标准正态分布函数。

当结构抗力R和作用效应S均服从正态分布时， $R - S$ 也服从正态分布，其可靠指标 $\beta$ 可按下列式计算：

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{(\sigma_R^2 + \sigma_S^2)^{1/2}} \quad (3-5)$$

式中： $\mu_R$ 、 $\sigma_R$ ——结构抗力的平均值和标准差；

$\mu_S$ 、 $\sigma_S$ ——作用效应的平均值和标准差。

当R和S为其他分布时，可按标准中推荐的当量正态法、蒙特卡罗法等方法，计算结构可靠指标 $\beta$ 。

可靠指标 $\beta$ 与失效概率 $P_f$ 的对应关系如表3-1所示。

表 3-1

$\beta$	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5
$P_f$	$2.3 \times 10^{-2}$	$6.2 \times 10^{-3}$	$1.4 \times 10^{-3}$	$2.3 \times 10^{-4}$	$3.1 \times 10^{-5}$	$3.4 \times 10^{-6}$

由此可见，概率法较定值法的优越性是很明显的。工程结构设计最重要的指标是可靠

度，只在有了概率极限状态设计法，才得到定量的解决。因此可以说，定值极限状态还不是真正的设计极限状态，概率极限状态才可以达到真正的设计极限状态。

两种极限状态方程式(3-1)和式(3-2)中，表达承载能力极限状态时， $R$ 为结构构件的轴压(轴心)强度、抗弯力矩、抗剪强度、地基承载力、摩阻力等等， $S$ 为荷载作用下结构的拉、压、弯、剪等内力以及滑动力、转动力矩等等。表达正常使用极限状态时， $R$ 为容许变形、容许裂缝宽度等限值， $S$ 为荷载或其他原因作用下结构产生的变形、裂缝宽度等。把容许变形、容许裂缝宽度等列入抗力一类，与以往习惯颇不一致，但可以收到表达简便、合理之效，从广义看，还是科学直观的。

式(3-1)是仅有抗力和作用效应两个变量时的极限状态表达式，在统一标准式中，还给出其一般表达式为

$$g(X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n) = 0 \quad (3-6)$$

式中的 $X_1, X_2, \dots, X_i, \dots, X_n$ 为基本变量，如作用，岩土、材料特性，几何参数，容许限值等等。抗力、作用效应是由有关基本变量构成的综合变量。在可靠度分析中式(3-1)常称为作用效应—抗力模式，现行设计即用此模式，工程概念明确，便于广大工程技术人员接受。统一标准采用以分项系数表达的概率极限状态设计法，也是采用此表达形式。

## (二)三种设计状况

统一标准规定了三种设计状况，即：

- ①持久状况，具有与结构使用寿命同样数量级的持续期；
- ②短暂状况，具有较短的持续期和高出现概率；
- ③偶然状况，一般是短持续期和低出现概率。

这三种设计状况与设计持续期的确定，极限状态设计基本变量取值，以及作用组合等均有关。现行港口工程结构设计也考虑三种设计情况，即设计情况、校核情况和特殊情况，两者内容有相同之处，也有不同之处。统一标准比现行规范的规定，更全面、更明确、更科学了。

第一种持久状况是指从结构建成至预期使用寿命完结的整个期间。持久状况，两种极限状态一般都要考虑。对于承载能力极限状态，应按整个持续期间，即预期使用寿命期间内作用的最大值概率分布考虑。对于正常使用极限状态，则不按作用的最大值考虑，因作用的最大值虽然会产生较大的结构变形或其他不利于正常使用的情况，但连续作用时间较短，对较长期的正常使用并无影响。统一标准规定对正常使用极限状态，可变作用采用频遇值和准永久值，相当于对最大值按一定比例折减。这与现行设计按“设计荷载”设计，有较大差别。

第二种短暂状况，一般是指施工期间或建成后某一可预见的特定较短期间。如有些码头在建成后一段时间(如一年)内有运输重件的要求，此要求在整个预期使用寿命期间的其他时间内不再会发生。对此设计状态的结构设计，其结构系统，作用的设计取值，受力条件，都应专门研究确定。短暂设计情况，一般可仅考虑承载能力极限状态，个别情况也需考虑短暂状态持续期间的正常使用极限状态。如施工期间对有些结构也有变形或抗裂度的要求。

第三种偶然状况，是指偶然事件出现时或出现后的极短时间。偶然状态仅考虑可能在第一种持久状态持续期间发生，但出现的概率很低。不考虑在第二种短暂状态持续期间内

发生的可能性。对于港口工程结构，按以往设计惯例，只有原作为特殊荷载的地震作用可按偶然事件考虑，但如何取值，有待在《水运工程水工建筑物抗震规范》修订工作中研究。

### (三)作用(或作用效应)组合

与前述三种设计状况相对应，统一标准规定，承载能力极限状态有三种作用(或作用效应)组合，即持久组合、短暂组合和偶然组合。现行规范也有三种组合，即设计组合、校核组合和特殊组合。两者之异同和优缺点如下：

1.持久组合与持久设计状况相对应。因为这是以结构预期使用寿命为设计基准期的，是结构的基本设计情况，故也可称为基本组合。与现行规范的设计组合比较，相同处，都是按可变作用的标准值(现行规范标准值取值主要根据经验)进行设计；不同处，主要在于如何处理两种及两种以上可变作用的相遇问题。现行设计曾有两种处理办法：第一种办法是最不利组合，即如果认为几种可变作用可能相遇，便都取最大值进行组合；第二种办法是视有些作用为校核作用，当有校核作用与设计作用相遇时认为是校核组合，比设计组合，适当降低安全系数。这两种处理办法有以下的缺点：

a.第一种处理办法表现出现行规范的显著缺点之一，即没有设计基准期的概念。如钢筋混凝土结构码头，设计基准期(预期使用寿命)为50年，各种可变作用标准值的重现期都是较长的，两种可变作用标准值相遇的概率非常小，这种最不利组合办法，必然是偏于保守的，因而也是不合理的。

b.第二种处理办法是认识到第一种办法不合理而采取的权宜之计，比第一种办法有所改进，但是安全系数降低值完全根据经验，并未考虑在设计基准期内的相遇概率。

现行规范两种处理办法并用，没有统一原则，表现了解决此重要问题的任意性，是缺乏科学根据的。

统一标准是以设计基准期为基础，按概率相遇的原则，采用Turkstra组合法。此法概念清楚，使用方便，并有较高的精度。

即一个主要的可变作用取设计基准期最大值分布，其余可变作用取任意时点(任意时点时段一般取一年)最大值分布。

即一个主导的可变作用取标准值，其余的非主导可变作用取标准值乘以组合系数 $\psi_{01}$ ， $\psi_{01}$ 小于1，通过校准、优化求得。显然这样的可变作用组合办法是比较合理的，克服了现行规范的缺点。

2.短暂组合与短暂设计状态相对应。与持久组合相比，持久组合是基本的，短暂组合是其补充和校核情况，如果前者用基本组合，后者也可以用核校组合。但与现行规范规定的校核组合有所不同，如前述现行规范把持久状况中的有些情况亦按校核组合考虑，是不合理的。统一标准则是根据不同的设计持续期和设计状况区别划分作用组合，与结构受力持续时间相一致。短暂组合中，当存在两种及两种以上可变作用时，可仍按在持久组合中所述的原则考虑，只是设计持续期不同了。

3.偶然组合与偶然设计状况相对应，考虑其可能在结构预期使用寿命期间发生，此时偶然作用以外的可变作用均应乘以作用组合系数。

对于正常使用状态，统一标准规定了长期效应组合和短期效应组合。长期效应组合中可变作用采用准永久值，短期效应组合中的可变作用采用频遇值。

作用组合是工程结构设计中的一个极其重要的问题。采用概率极限状态设计后，可以

使作用组合更加合理，更符合结构实际可能的受力情况。但是由于港口工程结构的环境条件和作用特性异常复杂，统一标准中只对作用组合做原则性规定，具体组合办法尚需根据不同结构的不同设计状况，在有关结构设计规范中具体规定。各册港口工程结构设计规范和港口工程荷载规范，在这方面待做的工作是很多的。

#### 四、基本变量的统计特性和取值方法

基本变量是极限状态方程式中所考虑的影响结构可靠度的各种可用数量表达的基本设计要素。港口工程基本变量有：各种作用（如堆货荷载、机械荷载、波浪力、土压力、结构自重等），各种材料的物理力学性能（如钢、混凝土、土石等的强度和变形模量），几何参数（如结构的尺寸、土层厚度等），计算模式的不确定性也属于基本变量。基本变量有的是随机变量，有的是随机过程。随机变量的统计规律与时间无关，或是其随时间而变异的数值与其均值相比可忽略不计，如几何参数，大部分材料的物理力学性能等属于此类。而较多的可变作用则属于与时间有关的随机过程。

对于基本变量，必须求得其统计参数和确定其概率分布，有了这些才有可能进行结构可靠度分析，建立设计表达式等。因此基本变量的统计是最基本的工作。下面仅就与港工有关的基本变量的统计规律作一简要的说明。

##### （一）随机变量的概率分布及参数估计

对于独立的随机变量可采用《统标》附录一的一、二条进行参数估计和分布假设检验。我们对与港工结构有关的一些基本变量进行了统计分析。

对于构件的尺寸，如梁、板、桩、扶壁、沉箱、保护层厚度等进行了800多件实测，量测到8500个数据，实测值与图纸标定值之比约等于1，变异系数与几何尺寸大小有关，大尺寸者较小，小尺寸者偏大，在0.002~0.02之间，但保护层变异系数较大，这些变量基本上都服从正态分布。

对于砂的内摩擦角，现行规范规定的中砂标准值为 $32^\circ$ ，经过对密实度符合码头回填情况的砂的大量实测统计，平均值大于标准值，变异系数约为0.05。

我们还对块石的休止角、块石容重、混凝土容重、打桩拉应力、各种构件（如拉、压、弯、剪、扭、桩承载力等）的计算公式不定性进行了统计，得出的统计参数分别在各专题报告中作了详细介绍。

对于由若干个随机变量组成的函数式表达的基本变量的分布参数估计方法，在附录一中第三点进行了介绍。混凝土的强度还可用附录八中所介绍的具体方法。条文第4.1.2条指出：“材料性能的不定性应由标准试件的不定性和换算系数即模型的不定性两部分构成。”所谓模型不定性即为标准试块确定的性能与工程结构材料性能的差异。我们对混凝土强度进行了大量工作，从实际工程结构中钻孔取样得出的强度与同条件的标准试块得出的强度的比值，得出模型不定性统计参数，这部分资料国内外均属罕见，在专题报告Ⅺ中详细阐明。对于混凝土的标准试块强度，我们搜集各航务工程单位数以万计的数据进行了统计分析，在专题报告之Ⅸ、XIV中有详细介绍。

当两个或两个以上随机变量相关时，其统计是个复杂问题。如粘土的内摩擦角 $\phi$ 值与粘结力C值呈负相关，国内外都没有较多的资料可参考，我们经过研究，推荐附录十的统

计方法，专题报告之XXVⅢ作了论证。

随机变量的概率分布可采用常用的假设检验方法如K—S法、 $\chi^2$ 法进行选定。

### (二) 随机过程的概率模型

港工中的可变作用如堆货荷载等是随时间变化的可变作用。因此理应用随机过程概率模型来描述。本标准主要采用平稳二项随机过程概率模型。所谓平稳过程，是指随机过程的统计特性（概率分布、分布参数）不随时间的推移而变化的过程。由于在近似概率设计法中都采用随机变量模型去描述一些基本变量，因此亦应将描述可变作用的随机过程转换为随机变量。从保证结构可靠角度出发，规定用在设计基准期内可变荷载的最大值 $Q_M$ （随机变量）去代替随机过程 $\{Q(t), 0 < t < T\}$ 。因此必须求解最大值 $Q_M$ 的分布 $F_M(X) = P(Q_M \leq X)$

$$F_M(X) = [F(X)]^m \quad (4-1)$$

式中： $m = pr$ ——在设计基准期内荷载出现的次数，

$r = \frac{T}{\tau}$ ——如 $[0, T]$ 上的时段数，

$p$ —— $Q(t) > 0$ 的概率。

为了对堆货荷载进行统计分析，从1986年4月起至1988年10月，先后在上海等11个河、海港开展了实测工作，固定实测堆场23块近三万平米，仓库实测面积两千余平米，按货物平均堆存期每5~7天观测一次，将各港口实测资料统计得截口分布 $F(X)$ 为极值I型分布，按上式可得基准期为50年的最大值概率分布 $F_M(X)$ 。若将现行荷载规范规定的标准值 $Q_K$ 代入，得其保证率为0.94。最大值 $Q_M$ 的平均值 $\mu_{Q_M}$ 与 $Q_K$ 的比值为0.78，变异系数 $\delta = 0.14$ 。按重现期计算， $Q_K$ 值相当于八百年一遇的重现值。

对铁路、门吊、船舶撞击等作用，都进行了现场实测和统计分析工作，详见专题报告。

### (三) 基本变量的取值

基本变量在设计表达式中根据不同情况采用不同代表值。作用的主要代表值是标准值。标准值是根据结构不利状态选取在设计基准期内作用最大值的某一分位值，当作用增大对结构不利时取较高的分位值，反之取较低分位值。考虑到概率设计法初次应用到港工中，为了使采用统一标准设计与以往的设计在经济指标上不至有过大的波动并照顾到习惯，港工的荷载标准值拟用现行港工荷载规定的数值。当然这些荷载的标准值不是同一分位值，肯定有的偏高，有的偏低，拟在分项系数中进行适当调整。

可变作用还有一频遇值和准永久值作为计算正常使用极限状态时的代表值。在现行规范中取荷载的标准值进行变形、裂缝计算，前面已指出，荷载的标准值是概率分布的高分位值，其它荷载的标准值一般也是较大的，显然按此值计算出的变形或裂缝值偏大，故港工规范规定的限值也比国际规范规定的值要大，这显然不是我们规定偏松。统一标准规定采用频遇值与准永久值，就可能将变形或裂缝的限值降到与国际上相当的数值，这不但合理，而且便于在国际上进行交流。

## 五、确定结构可靠指标及实用设计表达公式的建立

### (一) 以可靠指标作为可靠性的度量尺度

基本变量基本上都是随机变量或随机过程，由若干基本变量组成的表现功能的设计式，应以概率来表达，则构件功能函数出现小于零 ( $Z < 0$ ) 的概率称为该构件的失效概率  $p_f$ 。用失效概率来衡量结构的可靠性无疑是最科学的，但是由于结构的失效概率很小，千分之几、万分之几、十万分之几这样的数值显然使用起来很不方便，必须找到另一个指标，既能紧密与失效概率相关，又达到使用方便的目的，这就是标准中用到的可靠指标  $\beta$  值，下面从最简单情况入手，论证  $p_f$  与  $\beta$  之间的关系。

设功能函数仅与荷载效应  $S$  和结构抗力  $R$  两个随机变量有关， $S$  和  $R$  在统计上独立且均为正态分布，其均值和标准差别为  $\mu_R$ 、 $\mu_S$  和  $\sigma_R$ 、 $\sigma_S$ ，因此其差也是正态随机变量，并有均值  $\mu_Z = \mu_R - \mu_S$ ，标准差  $\sigma_Z = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}$ 。则  $Z$  的概率密度函数为：

$$f_z(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_Z} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{Z - \mu_Z}{\sigma_Z} \right)^2 \right] \quad (5-1)$$

$$-\infty < Z < \infty$$

其分布图如图 5-1。

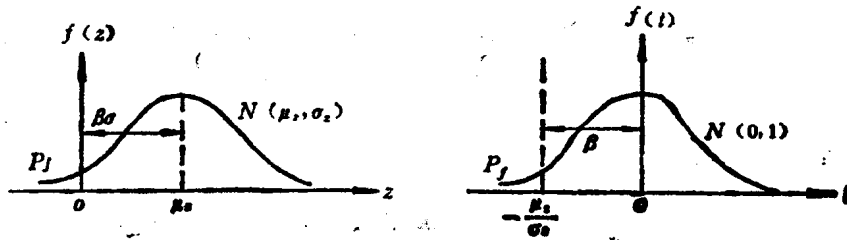


图 5-1

根据定义，结构的失效概率  $p_f$  就是图中左边小块面积  $p (Z < 0)$ ，而右边大块面积  $p (Z > 0)$  即结构的可靠度  $p_s$ ，用公式表示为：

$$p_f = P(Z < 0) = \int_{-\infty}^0 f_z(Z) dZ$$

$$= \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_Z} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{Z - \mu_Z}{\sigma_Z} \right)^2 \right] dZ \quad (5-2)$$

现将  $Z$  的正态分布  $N(\mu_Z, \sigma_Z)$  转换为标准正态分布  $N(0, 1)$ ，令  $t = \frac{Z - \mu_Z}{\sigma_Z}$ ，则  $dZ =$

$\sigma_Z dt$ ， $Z = -\infty$  时  $t = -\infty$ ， $Z = 0$  时  $t = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z}$ 。代入上式得

$$p_f = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int \exp \left( -\frac{t^2}{2} \right) dt = 1 - \Phi \left( \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} \right) \quad (5-3)$$

$$\text{如图令 } \beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (5-4)$$

$$\text{则 } p_f = 1 - \Phi(\beta) = \Phi(-\beta) \quad (5-5)$$



式中 $\Phi(\cdot)$ 为标准化正态分布函数。 $\beta$ 为一无因次系数，称为可靠指标，式(5-5)即为失效概率与可靠指标关系，其具体的对应关系，在表3-1中有常用的数值列出，这样使概率分析法达到实用阶段。

若基本变量为非正态分布，则可按附录二所列当量正态法计算，该法为国际“结构安全度联合委员会(JCSS)”推荐，简称“JC”法。

从式(5-4)还可推导出可靠指标 $\beta$ 与常用的安全系数 $K$ 的关系，由于 $K$ 是抗力和荷载效应的比值，通常所取抗力或荷载效应并非其平均值 $\mu_R$ 、 $\mu_S$ ，假定为 $R = C_R \mu_R$ ， $S = C_S \mu_S$ ，则

$$K = \frac{R}{S} = \frac{C_R \mu_R}{C_S \mu_S} = \frac{\mu_R}{C_S \mu_S} \quad (5-6)$$

将式(5-6)代入式(5-4)，得

$$\beta = \frac{CK - 1}{\sqrt{C^2 K^2 \delta_R^2 + \delta_S^2}} \quad (5-7)$$

从式可看出， $\beta$ 值不仅包含安全系数 $K$ 值，而且还包含抗力和荷载效应变异系数，同时还受基本变量概率分布的影响。因此， $K$ 值仅能反映结构的部分可靠性，而 $\beta$ 值则能较全面反映结构的可靠度。

### (二)可靠指标目标值的确定

目标可靠指标 $\beta_0$ 的选取，是结构可靠性分析中关键性问题，必须经大量比较和论证，求得安全与经济的最佳平衡。目前，确定目标可靠指标一般采用“校准法”，校准出按现行规范所设计的结构的可靠性水平，再经分析研究确定 $\beta_0$ 值。这本质上是继承现行规范结构设计可靠度水准，认为这一水准目前从总体上讲是合理的，仅局部进行调整，使所有构件的可靠度基本上达到所期望的水平，从而获得安全与经济的平衡。

我们对港工的一些构件按校准法进行了反演计算，求得隐含于现有工程结构中相应的可靠指标值。但由于某些参数统计还有待进一步工作，所得可靠指标值不够全和不十分准确，但基本能反映实际，现将其值列于表5-1。

再参考国内外资料：美国LRFD (Load and Resistance Factor Design) 规范对 $\beta$ 的建议值：

临时结构	$\beta = 2.5$
普通建筑物	$\beta = 3.0$
非常重要建筑物	$\beta = 4.5$

美国国家标准局对钢筋混凝土结构构件采用

抗弯	$\beta = 3.0$
压弯	$\beta = 3.5$
抗剪	$\beta = 3.0$

我国建筑结构设计统一标准的规定值如表5-2。

经综合研究，港工统标提出表5-3中数值作为持久状况时承载能力的目标可靠指标值，该值是适用于安全等级为二级的结构，其他等级结构需做相应调整。

### (三)设计表达式的建立

统一标准采用以分项系数表达的设计表达式。这种形式与传统方法相似，易为设计人