

建筑结构工程系列丛书

王济川 王玉倩 编著

# 结构可靠性 鉴定与试验诊断

湖南大学出版社

# 结构可靠性鉴定与试验诊断

王济川 王玉倩 编著



湖南大学出版社

2004年·长沙

图书在版编目(CIP)数据

结构可靠性鉴定与试验诊断/王济川,王玉倩编著.

—长沙:湖南大学出版社,2003.12

ISBN 7-81053-711-3

I. 结... II. ①王... ②王... III. 建筑结构—  
结构可靠性 IV. TU311.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 101922 号

结构可靠性鉴定与试验诊断

Jiegou Kekaoxing Jianding yu Shiyan Zhenduan

王济川 王玉倩 编著

- 
- |                               |                 |
|-------------------------------|-----------------|
| <input type="checkbox"/> 责任编辑 | 卢 宇             |
| <input type="checkbox"/> 特约编辑 | 夏文生             |
| <input type="checkbox"/> 封面设计 | 张 敏             |
| <input type="checkbox"/> 出版发行 | 湖南大学出版社         |
|                               | 社址 长沙市岳麓山       |
|                               | 电话 0731-8821691 |
|                               | 邮编 410082       |
|                               | 0731-8821593    |
| <input type="checkbox"/> 经 销  | 湖南省新华书店         |
| <input type="checkbox"/> 印 装  | 长沙环境保护学校印刷厂     |
- 

- |                             |                          |                                            |    |                             |       |
|-----------------------------|--------------------------|--------------------------------------------|----|-----------------------------|-------|
| <input type="checkbox"/> 开本 | 787×1092 16 开            | <input type="checkbox"/> 印张                | 16 | <input type="checkbox"/> 字数 | 410 千 |
| <input type="checkbox"/> 版次 | 2004 年 4 月第 1 版          | <input type="checkbox"/> 2004 年 4 月第 1 次印刷 |    |                             |       |
| <input type="checkbox"/> 印数 | 1~3 000 册                |                                            |    |                             |       |
| <input type="checkbox"/> 书号 | ISBN 7-81053-711-3/TU·23 |                                            |    |                             |       |
| <input type="checkbox"/> 定价 | 28.00 元                  |                                            |    |                             |       |
- 

(湖南大学版图书凡有印装差错,请向承印厂调换)

# 前 言

随着我国基本建设的不断发展,在建筑工程的设计、施工、装修和使用中,难免会出现各种矛盾和问题,而其中工程事故往往是屡见不鲜和亟待预防和解决的问题。

建筑工程的质量检验、结构试验诊断以及结构可靠性鉴定,都是以证实建筑物的安全程度和能否正常使用的可靠程度为目的而开展的。诊断过程中所涉及的相关因素很多,如设计与施工质量、地质条件、使用环境以及工程造价等等。可以说,结构诊断、鉴定工作确是一项综合性强,技术检测难度大的工作。

为了揭示建设阶段可能发生的设计疏忽和施工失误,使用阶段可能出现的自然和人为灾害以及由于环境侵蚀、材料老化、使用不当产生的各种累积损伤等综合反应所造成的结构性能退化和安全性、适用性降低,使用寿命缩短的来龙去脉,应合理和科学地开展对策研究、检测诊断方法研究和理论研究。对现存结构的作用效应、结构抗力及相互关系,在检测、试验诊断的基础上作出科学的分析和鉴定,并对结构加固、补强、维修和改造进行论证,以达到优化的效果。

本书针对地基基础、主体结构设计和施工以及使用等方面的工程事故表现,特别是结构随服役时间的增长所发生的老化损伤表现和规律进行论述为主,密切结合国家和行业的有关标准,如结构试验方法标准、检测鉴定标准和加固规范要求等作为依据,做到理论分析准确,检测鉴定方法科学。

根据已有的经验和教训可知,旧房、危房检测和鉴定以及工程事故的诊断和处理,具有复杂性和危险性,并具有可能造成连锁效应和事故扩展的特点,由此,在处理方法、处理时间、处理工艺以及设计和施工中都有诸多难点。这就要求在从事这一工作中不但应有高度的责任心、严格执行规范和标准,而且对检测、鉴定人员的资格和技术水准应作出相应的要求和规定。

本书由王济川、王玉倩编著,麦伟梁、吴学锋参加了该书中相关章节的检测、鉴定和试验诊断工作。

由于编著水平有限,不妥之处,敬请读者批评指正。

王济川

王玉倩

2003年8月

# 目 次

## 第1章 概 论

- 1.1 结构可靠性试验诊断的发展和事故实例 ..... (1)
- 1.2 结构可靠性控制尺度 ..... (3)
- 1.3 结构可靠性鉴定的基本方法 ..... (6)
- 1.4 结构可靠性鉴定的基本原则 ..... (8)
- 1.5 结构可靠性鉴定的程序和标准 ..... (10)
- 1.6 结构承受作用的调查 ..... (12)

## 第2章 地基基础的检测与鉴定

- 2.1 概述 ..... (15)
- 2.2 地基基础常见缺陷和事故原因分析 ..... (20)
- 2.3 地基承载力的检测与评定 ..... (29)
- 2.4 地基土的原位静载荷试验检测 ..... (37)
- 2.5 单桩静载荷试验检测 ..... (43)
- 2.6 基桩低应变动力检测 ..... (50)
- 2.7 地基基础的鉴定 ..... (58)

## 第3章 混凝土结构的检测与鉴定

- 3.1 混凝土结构的损伤调查与强度检测方法 ..... (64)
- 3.2 混凝土受压构件的原位应力测定 ..... (76)
- 3.3 混凝土结构的裂缝检查与原因分析 ..... (79)
- 3.4 混凝土结构的鉴定 ..... (91)

## 第4章 砌体结构的检测与鉴定

- 4.1 砌体结构的损伤调查与强度检测方法 ..... (102)
- 4.2 砌体结构的裂缝检测与原因分析 ..... (115)
- 4.3 砌体结构的鉴定 ..... (131)

## 第5章 钢结构的检测与鉴定

- 5.1 概述 ..... (141)
- 5.2 钢结构损伤调查与分析 ..... (143)
- 5.3 钢材的强度检测与结构探伤 ..... (148)
- 5.4 钢结构的鉴定 ..... (150)

## 第6章 结构静载试验诊断原理和方法

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| 6.1 试验诊断原理和方法 .....      | (155) |
| 6.2 诊断试验荷载和加载方法 .....    | (169) |
| 6.3 一般结构的静载诊断试验 .....    | (174) |
| 6.4 静载诊断试验资料的整理和分析 ..... | (185) |

## 第7章 结构动载试验诊断原理和方法

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| 7.1 概述 .....                 | (200) |
| 7.2 动载特性的试验测定 .....          | (201) |
| 7.3 结构动力特性的试验测定 .....        | (204) |
| 7.4 结构动力反应的试验测定 .....        | (211) |
| 7.5 结构疲劳试验 .....             | (215) |
| 7.6 动载试验诊断资料的分析 and 处理 ..... | (218) |

## 第8章 混凝土结构耐久性调查、检测与评定

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| 8.1 概述 .....              | (230) |
| 8.2 混凝土结构耐久性评定准则和方法 ..... | (231) |
| 8.3 混凝土结构使用条件调查 .....     | (233) |
| 8.4 混凝土结构耐久性检测 .....      | (235) |
| 8.5 混凝土结构耐久性等级评定 .....    | (239) |

# 第 1 章 概 论

## 1.1 结构可靠性试验诊断的发展和事故实例

建筑结构可靠性鉴定的目的是通过检测手段或结构试验诊断分析,按结构设计规范和相应标准的要求,评估其可靠程度和继续使用的寿命。

建筑结构设计的基本要求,是以最经济的手段,使结构物在预定的使用期限内,能完好具备预定的各种功能。而这种预定的各种功能,正是作为可靠性鉴定依据的基准条件。

结构设计方法与试验方法、鉴定方法的演变与发展,不仅与结构类型、结构材料的发展、结构科研的成果累积有关,而且还承受着结构物的自然老化、损伤和各种灾害的影响。这样,在建筑工程实践中,迫使人们去研究结构的失效状态、失效特征,从而不断发展设计方法、试验检测方法以及鉴定方法的领域和范围。

下面我们从几个实例来说明这一历史事实。

1767 年,法国科学家容格密里用简支木梁沿中性轴上横断面开槽,塞入硬木块作受弯承载力试验,证明了跨中截面上翼缘受压、下翼缘受拉,中间有 1 中性层,从而结束了由伽利略提出并持续了 100 多年的关于材料截面应力分布状态的争论,使材料力学中受弯构件截面应力分布计算公式在 19 世纪 40 年代得以确立,并在工程上广泛应用。

1744 年,欧拉在专著《曲线的变分法》中,用最小位能原理导出弹性直杆的临界荷载公式,建立了柱的压强理论,但当时人们还没有认识到欧拉公式的意义。到 19 世纪后期,钢结构已被广泛采用,但不断出现事故。如在塞士兰铁路的奎得河桥、德国美茵州法兰克福附近的尼德河桥等都出现了压杆失稳事故,这才使人们重新认识到欧拉提出压杆稳定理论和公式的重要性,而把压杆稳定要求条件列入了结构安全校核所必须进行的内容。

1824 年英国人阿斯普丁取得了波特兰水泥的专利。1850 年开始大量生产水泥,这是形成混凝土的主要材料,在土木工程中得到广泛应用。20 世纪初发表了水灰比学说,初步奠定了混凝土强度理论基础。

1825 年,纳维建立了土木工程中结构设计的容许应力分析法;19 世纪末里特尔等人提出极限平衡概念;1922 年,英国人戴孙提出按破损阶段的强度计算方法,为土木工程的设计理论打下了基础。

钢筋混凝土结构的开裂,不仅有损美观,而且会造成重大的破坏事故。1980 年 5 月 21 日,西柏林会议厅的马鞍形壳顶突然倒塌是一个典型的事故实例。这幢建筑物于 1957 年建成,跨度 30 m,从一对支座上伸出两条斜拱、两个拱墩座之间的跨距为 78.1 m,拱由箱形截面构成,整个斜拱形成受压破坏。斜拱之间是用悬索支承的薄壳屋面,混凝土厚约 70 mm。经专家分析后认为,破坏的起因是拱与壳交接处屋面裂缝扩展,不断渗水使钢筋锈蚀,悬索断裂而引起倒塌,见图 1-1 所示。值得注意的是,当它建成不久,一些建筑和结构专家就曾指出它存在问题。1960 年,柯特·西格尔在他所著《现代建筑的结构与造型》一书中就指出,由于建筑师片面追求形式,结构受力不合理,并指出屋盖在不对称荷载作用下会很不稳定,提出了四

五种修改方案,可惜均未被采纳,终于在 23 年后倒塌,被真知者不幸而言中。

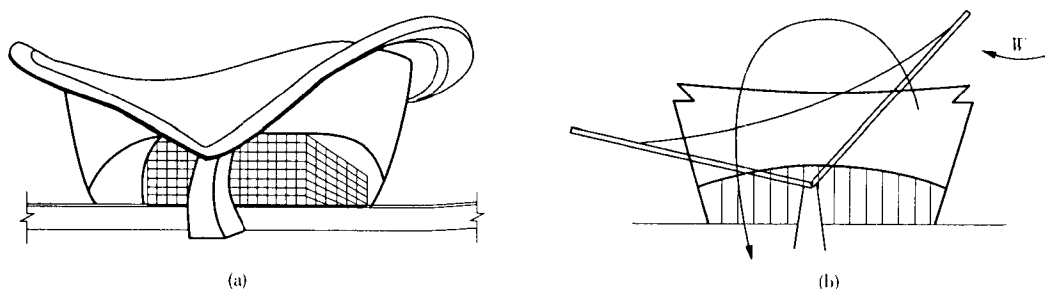


图 1-1 西柏林会议厅屋顶倒塌的受力分析

(a) 西柏林会议厅的马鞍形屋顶造型 (b) 在不对称荷载作用下失稳倒塌

结构物的特殊破坏形式,会引起设计方法和设计依据概念上的发展。如 1968 年 5 月 16 日,伦敦坎宁镇 1 幢装配式大板结构的公寓,因家用煤气爆炸而引起连锁性倒塌。1972 年 7 月 18 日,香港宝城大厦因山坡残积土软化而滑动被冲毁倒塌,造成 120 人死亡。这些事故当时引起了世界工程界的注意。因此,现在不少国家规定除验算承载能力与正常使用极限状态之外,还须验算“条件极限状态”来考虑偶然作用力,如爆炸力、冲击力等。

在我国现代结构工程中,破坏事故推动设计理论、试验检测原理和可靠性鉴定方法的发展更是不乏其例。

20 世纪 60 年代杭州某钢铁厂,大面积采用钢筋混凝土拱形屋架而发生倒塌的事故,推动了单层工业厂房屋盖系统空间工作特征和节点构造设计等一系列问题的研究和改进。

1966 年至 1976 年间,我国发生过 10 余次 7 级以上大地震,且集中在东经  $98^{\circ}$  以东的人口稠密地区,据统计死亡近 30 万人。其中,唐山地震发生在城市地区,一次死亡 24 万人,损失极为严重。这些使结构工程界对我国的地震设防条文规定作了重新考虑,推动了我国结构抗震设计理论和模拟试验分析方法的全面研究与发展。1974 年 7 月 20 日,上海某工厂升板结构工程中因群柱失稳造成倒塌,在分析成因总结经验教训的同时,直接推动了对升板柱群柱稳定设计计算理论的研究,这一成果又成为我国《升板设计与施工暂行规定》的主要内容之一,同时保证了此后数百万平方米的升板工程不再受群柱失稳问题的困扰,顺利地建成了大量的升板结构工程。

现实生活中,由于种种原因,常发生忽视结构设计理论、不按现行设计标准或规程办事、施工中不按设计要求办事、不执行施工规范等造成的工程事故。广东某县建 1 栋 7 层旅馆,采用钢筋混凝土框架结构,独立式基础,坐落于有淤泥层的稻田上,埋深仅 0.8 m。因不均匀沉降和结构安全度不足,建成后不久即整体倒塌。又如湖南某县一办公大楼,建于湖岸边,以地形定柱子高度,水面平台上为横墙承重的 3 层砖混结构,水面平台下为支承砖柱,并用混合砂浆砌筑置于水中。该大楼建成交付使用前坍塌。还有湖南某县,建一 8 m 高挡土墙,设计坡度为 1:0.2。施工单位当作土方开挖坡度开挖,造成土方坍塌,当场死亡 7 人。

近年来,随着经济形势的改善,农村大量自行建房,从结构设计和可靠性控制条件、施工质量、构造处理上看,不合理的地方很多。城市和工业建设中,则技术力量不足,技术立法和技术管理跟不上发展需要,也造成不少事故。因此,普及和提高结构设计理论、推广检测知识和可靠性鉴定理论及技术,是当务之急。

从以上历史事实看出,失败的教训、工程事故反应特征和规律,不仅对验证理论、发展理论

起着重要作用,而且对正确选择研究方法、检测试验技术、鉴定方法等都起着重要作用,可以这样说,科学的发展往往是以技术(包括检测试验技术)的突破为转机的。所以,结构理论的发展与结构检测技术、试验原理、试验技术的发展是紧密相联的。

## 1.2 结构可靠性控制尺度

在规定的的时间和条件下,工程结构完成预定功能的概率,是工程结构的可靠概率度量。工程结构的可靠性,是指在规定的的时间和条件下,工程结构具有的满足预期的安全性、适用性和耐久性等功能的能力。由于影响可靠性的各种因素存在着不定性,如荷载、材料性能的变异,计算模型不完善,制作质量的差异等,而且这些影响因素都是随机的,因此工程结构完成预定功能的能力只能用概率度量。故此,结构能够完成预定功能的概率,称可靠概率;不能完成预定功能的概率称失效概率。工程结构设计的目的,是力求最佳的经济效益,将失效概率限制在人们实践所能接受的适当程度上,失效概率越小,可靠度越大,两者是互补的。

工程结构的失效标准和各种结构的安全等级划分,各种作用效应和结构抗力的变异性的分析,概率模型和极限状态设计方法的选择,工程结构材料和构件的质量控制与试验检测方法等,都是工程结构可靠度分析和计算的依据。

### 1.2.1 安全系数

工程结构的可靠度习称安全度。传统的安全度定义是:“结构安全度是指在正常设计、施工和使用的情况下,结构物对抵抗各种影响安全的不利因素所必需的安全储备的大小。”这个定义指出了结构所处的条件必须是“正常的”,这里所指的各种不利因素,事实上是对不定性的承认,但最后规定 1 个一定值的安全储备,所以,仍然摆脱不了定值设计法的范畴。

由于设计方法日益完善,计算内容相当繁杂,往往给人们一种错觉,似乎只要在设计中采用了某一给定的安全系数,结构就百分之百的可靠了。实际上,与结构安全度有关的各种荷载效应与承载能力等参数都不是定值,按定值法规定的定值安全系数,只不过是工程经验上和常识上对安全度的解释,而不是从定量的角度去规定或计算的结构安全度。

早期,对工程结构的建造,不倒不垮就认为安全可靠。后经过经验积累,进一步按结构构件的尺寸比例规定结构安全度,这一阶段主要依靠工匠们代代相传的经验进行营造活动,这是历史上的直接经验控制工程结构安全度尺度的阶段。17 世纪,材料力学兴起和发展,使结构设计进入弹性力学分析时期,从而开始采用容许应力设计法,以凭经验判断的单一安全系数来度量结构的安全度。到 20 世纪 30 年代,由于对结构材料与结构破坏性能的研究逐步深入,在结构设计上考虑结构的破坏阶段工作状况,随之出现了破坏强度设计法。实际上仍采用凭经验判断的单一荷载系数度量结构的安全度。人们认为安全系数  $K$  可表达为:

$$\text{安全系数} = \frac{\text{极限抗力}}{\text{使用荷载}},$$

$$\text{或者} \quad K = \frac{R}{S} \leq [K]. \quad (1-1)$$

但  $R$  与  $S$  的选定是人为经验确定的,  $[K]$  也是经验值。

随着工程实践的积累,人们自然考虑到应选用  $R$  的平均值和  $S$  的平均值,并把结构安全度明确为两大要素:

①结构抗力  $R$  和荷载效应  $S$  的取值,由单一值改用平均值,分别为  $R_p$  和  $S_p$ 。

②允许的安全度指标取值,也由单一值取用平均值,称为中心安全系数  $K_p$ 。

$$\text{中心安全系数} = \frac{\text{平均抗力}}{\text{平均荷载}},$$

或

$$K_p = \frac{\mu_R}{\mu_S} = \frac{R_p}{S_p}。$$

这种方法是最初的统计方法,可称为一阶矩法,即只考虑平均值或一阶矩这个最简单的统计特征。中心安全系数最明显的缺点是没能很好地考虑荷载和抗力的变异性,同样的中心安全系数,其实际上的失效概率差距是很大的。这就使工程结构安全度控制进入“半概率法”阶段。

20 世纪 50 年代后期,前苏联学者提出了极限状态设计法,用多系数——超载系数、材料的均值系数、工作条件系数代替单一安全系数度量结构的安全度,并订入国家规范。接着,欧洲一些国家也采用了类似方法,并相互作了改进。实际应用中,对荷载和抗力进行统计,最初全部用正态分布去拟合它们的实际分布,不仅得到平均值,而且得到了均方差,即二次矩。这时,既可以用单一系数表达,也可以用多系数表达,称标准安全系数,其系数表达式为:

$$\text{标准安全系数} = \frac{\text{标准抗力或设计抗力}}{\text{标准荷载或设计荷载}},$$

或

$$K_b = \frac{R_b}{S_b}。 \quad (1-2)$$

这里的  $R_b$  和  $S_b$  分别由  $R_p$  和  $S_p$  减去或加上均方差  $\sigma_R$  或  $\sigma_S$  的若干倍而得到,这就在一定程度上考虑了它们的变异性。

半概率法对安全度的两个要素—— $R$  和  $S$  的取值上,应用了概率论的方法,考虑了二次矩,因而在一定程度上反映了荷载与抗力的变异性,然而,它仍不能与破坏概率相联系,  $[K]$  值的确定仍然是经验的,故属于半概率法范畴。半概率法的表达式可以归纳为:

$$K_b + (\mu_S + \gamma_S \cdot \sigma_S) \leq \mu_R - \gamma_R \cdot \sigma_R, \quad (1-3)$$

式中:  $\mu_S$  为荷载效应标准平均值;  $\mu_R$  为材料强度平均值;  $\sigma_S$  为荷载效应标准差;  $\sigma_R$  为材料强度标准差。  $\mu_S$ 、 $\mu_R$ 、 $\sigma_S$ 、 $\sigma_R$  都是概率的,但  $K_b$  仍是经验的。这里设计取值与均值间分别相差  $\gamma_S$  倍  $\sigma_S$  及  $\gamma_R$  倍  $\sigma_R$ 。

### 1.2.2 失效概率

安全度与失效概率之间是有相关关系的。各国学者都努力使结构安全性理论更全面的转移到概率理论的基础上。1969 年美国学者柯涅尔(C. A. Cornell)从实用角度改进和发展了失效概率与安全特征的关系,提出了以  $\beta$  值为衡量结构安全性的统一数量指标,称为“可靠指标”,又称为 Cornell 系数,并将  $\beta$  与失效概率  $P_f$  直接建立联系。鉴于真实失效概率与结构安全性相联系,必须确定作用效应与结构抗力的真实分布,这在实际中是极为复杂的,所以柯涅尔提出的一套方法是,在分别确定影响失效概率的各单项组成部分的变异性以后,再将它们组合起来估计总的失效概率。由于在各种计算方法中,数据的不完整性和近似性,因此无法计算真实的失效概率,但却可以用来“校准”现行规范中各项孤立的计算方法的“理论上的失效概率”,从而衡量它们的安全度水平,并加以相互比较。

下面介绍一次二阶矩概率法的基本原理。结构按极限状态设计时,可以建立包括各有关基本变量  $x$  的极限状态方程:

$$Z = g(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) = 0, \quad (1-4)$$

式中:  $Z$  称为结构功能函数。当仅包括  $S$  和  $R$  两个基本变量时,则式(1-4)变为:

$$Z = g(S, R) = R - S = 0, \quad (1-5)$$

当基本变量满足极限状态方程式(1-5)时,则结构达到极限状态,按概率理论,结构的失效概率  $P_f$  为:

$$P_f = P(Z < 0) = P[(R - S) < 0]. \quad (1-6)$$

式(1-6)中的结构功能函数  $Z$  的概率分布不易求得,因为  $R$  和  $S$  都是许多随机因素的函数,虽然用卷积分方法或多重积分方法可以计算,但难以实用。一次二阶矩法并不要求推导随机变量函数的全分布,只需计算其一阶原点矩(平均值)和二阶中心矩(方差),在计算过程中还可将非线性结构功能函数( $Z$ )取一次近似,这样就能比较简单地估算工程结构可靠度中的失效概率  $P_f$ 。任何随机变量的平均值和标准差皆容易求得,当  $Z = R - S$  时,其

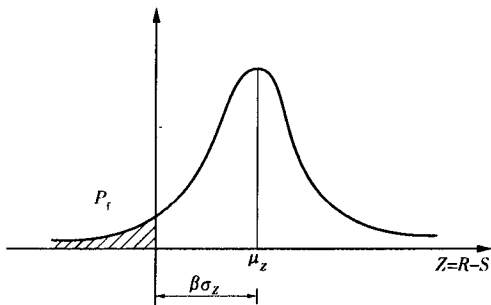


图 1-2 结构功能函数  $Z$  的概率分布曲线

$$\left. \begin{aligned} \mu_Z &= \mu_R - \mu_S, \\ \sigma_Z &= \sqrt{\sigma_R^2 - \sigma_S^2} \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

设  $Z$  为任意分布,如图 1-2 所示。阴影面积为失效概率  $P_f = P(Z < 0)$ ,无阴影面积为可靠概率,即可靠度  $P_s = (1 - P_f)$ 。

用结构功能函数  $Z$  的标准差  $\sigma_Z$  去度量  $Z = 0$  到  $\mu_Z$  这段距离,可得出反映可靠概率大小的系数  $\beta$ ,则  $\beta \cdot \sigma_Z = \mu_Z$ ,由此得:

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 - \sigma_S^2}}, \quad (1-8)$$

在随机变量  $Z$  的分布一定的条件下, $\beta$  与  $P_f$  的关系是对应的。如  $\beta$  增大则  $P_f$  减小,即结构可靠度增大;若  $\beta$  减小则  $P_f$  增大,结构可靠度减小。因此,式(1-8)中的  $\beta$  被称为可靠指标。

若  $R, S$  皆为正态分布的变量,则  $Z$  也为正态分布的变量,其  $\beta$  与  $P_f$  的关系如下式所示:

$$P_f = \Phi\left(-\frac{\mu_Z}{\sigma_Z}\right) = \Phi(-\beta), \quad (1-9)$$

$$\text{或} \quad \beta = \Phi^{-1}(1 - P_f).$$

式中: $\Phi(-\beta)$  为标准正态分布函数, $\Phi^{-1}(1 - P_f)$  为标准正态分布函数的反函数; $P_f$  为失效概率,一般可从正态分布表中查得。 $\beta$  与  $P_f$  的对应关系见表 1-1 所示。

当已知两个正态基本变量的统计参数(平均值与标准差)后,即可按公式直接求出  $\beta$  和  $P_f$  值。这些基本概念也适用于多个正态和非正态的基本变量情况,但对非正态随机变量,需要进行当量正态化处理。

当以一次二阶矩概率法估算工程结构可靠度时,可靠指标直接和基本变量的平均值和标准差有关。故此法基本概括了各有关变量的统计特性,比较全面地反映了各种影响因素的变异性,这是传统的用安全系数来评价工程结构安全度的方法所不能做到的。同时,可靠指标是从功能函数求解的,综合地考虑了结构上的荷载和结构本身抗力的变异性对结构可靠度的影

表 1-1 结构构件的目标可靠指标  $\beta$  及相应的  $P_f$  值

| 破坏类型 |         | 安全等级                  |                      |                      |
|------|---------|-----------------------|----------------------|----------------------|
|      |         | 一级                    | 二级                   | 三级                   |
| 延性   | $\beta$ | 3.7                   | 3.2                  | 2.7                  |
|      | $P_f$   | $1.0 \times 10^{-4}$  | $6.8 \times 10^{-4}$ | $34 \times 10^{-4}$  |
| 脆性   | $\beta$ | 4.2                   | 3.7                  | 3.2                  |
|      | $P_f$   | $0.13 \times 10^{-4}$ | $1.0 \times 10^{-4}$ | $6.8 \times 10^{-4}$ |

响,这与半概率法是有实质区别的。

影响结构安全性的诸因素,其实都是可变的非定值,从概率论和数理统计的观点看,分析结构安全性的各有关参数,如荷载、材料强度、几何尺寸、计算精度都是非定值,且都带有随机性,都应当用随机变量或随机过程来加工描述。使结构在预定条件下和预定时间内完成功能的这一“事件”,既不是必然事件,也不是不可能事件,而是一个随机事件,因此,结构安全与否用失效概率来度量是最科学的方法。

若能对整个结构采用精确的概率分析,对各种基本变量分别采用随机变量或随机过程的概率模型来描述,求得结构的失效概率直接度量安全性,这就是全概率法。然而由于荷载与抗力的信息都不足,所以在工程结构中完全采用理想的全概率法尚有困难,这主要表现在以下几方面。①设计中应取多大的失效概率作为设计目标,即目标可靠指标如何定?目标可靠指标定高了,结构安全可靠,但工程造价就高;目标可靠指标定低了,工程造价低些,但结构不可靠,相应的维修费用亦会增加。因此确定建筑结构目标可靠指标是一件极为重要的工作。②直接根据目标可靠指标进行工程结构设计,目前还有困难,主要是有关统计资料还不完善,设计人员也不熟悉。③需选用一种设计表达式,既反映目标可靠指标要求,又要使式中各项系数,如荷载分项系数、荷载组合值系数以及材料分项系数等,尽可能达到目标可靠指标的统计分布规律,这也是比较困难的。

### 1.3 结构可靠性鉴定的基本方法

结构可靠性鉴定的基本方法主要有经验法、实用鉴定法和可靠概率鉴定法。

#### 1.3.1 经验鉴定法

经验鉴定法主要以原设计规范或规程为依据,按个人目视观察及规范定值计算结果来评定结构与实际差异的一种经验评定法。

此法特点是荷载计算以实际调查为准,材料强度取值一般按经验评定,图纸规定的材质数据仅作参考,对原设计中采用的规范依据、理论公式、计算图形,主要看是否与实际结构工作状态相符;否则,应按实际状况进行修改。

经验法一般不使用检测设备和仪器,主要凭个人经验,受个人主观因素的影响较大。例如,某一建筑物顶层墙体部位发生裂缝,材料专家可能判定为建筑材料因干缩或温度作用引起的,属于材料问题;结构专家可能判定为荷载作用下结构抗力不足,属结构受力问题;地基专家可能判定为地基基础沉降作用引起,属地基基础问题;结构检测专家则可能判定为墙体材料内部缺陷作用引起,属内部隐患问题。不同专业特长的鉴定人员很容易受个人专业特长的制约,可能导致判断错误。但这种鉴定方法鉴定程序少,花费人力物力少,所以,受力简单、传力路线明确、较易分析的一般性建筑物和构筑物的鉴定,经验鉴定法是一种可行的鉴定方法。经验鉴定法的鉴定程序框图如图 1-3,各步分述于后。

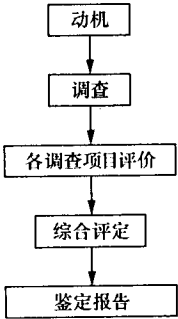


图 1-3 鉴定程序框图

其一为动机,一般由建筑物的管理或使用单位提出,主要指使用中发现问题、建筑物的主要损伤、缺陷表现,或使用方因变更使用要求而提供的条件等。

其二为调查,作现场视察,对使用人员作必要的采访,核实“动机”中提出的有关问题的成

因和发展过程,以避免失误。

其三为各调查项目的评价,由各项目调查者对调查结果作出评价。有时调查人员也是评价人。

其四为综合评定,一般由调查人员也是鉴定评定人员作出,所以综合鉴定结论不易做到集思广益。

其五为鉴定报告,一般由调查人编写。

从以上可以看出,经验鉴定法的鉴定程序主要是以个人作用为前提的。调查过于简单,缺乏准确数据,故在工程处理上多数偏于保守。但传统的经验鉴定法在工程实践中不断发展,经验在不断丰富,若结合进行一定的测试、观察和验证,便可大大提高鉴定工作的可靠程度。

### 1.3.2 实用鉴定法

实用鉴定法是在经验鉴定法的基础上发展起来的,它克服了经验鉴定法的缺点,十分重视检测手段和测试技术,对于结构材料强度等有关力学参数,一定采用实测值并经统计分析后才用于结构的分析计算。在各项结果的评定中,均以原设计规范的控制条件为标准,经讨论分析后提出综合性鉴定结论和对策建议。

实用鉴定法在逐步调查、分析损害成因的基础上,列出受鉴定建筑物的调查项目、检测内容和结构试验方法的要求,建立完整描述建筑物状况的模式和表格。一般要经过两次以上的调查分析,逐项检测和试验,逐项评价,综合评定等程序,给出一个比较准确的鉴定结论。

实用鉴定法的特点是荷载计算以实际调查的统计分析为准,结构材料强度取值以实测结果为依据,对原设计计算采用的规范依据、理论公式和计算图形等均加以分析,为判断其与实际结构差异程度,还应做一定的构件试验或结构试验加以验证,其结果的分析要集体讨论或研究,充分发挥调查检测人员的个人专长,以求比较准确获得各种资料和数据,在做好单项评价的基础上,再集体研究作出鉴定结论。因此,实用鉴定法十分强调检测手段和试验数据。实用鉴定法的实施程序如图1-4所示。

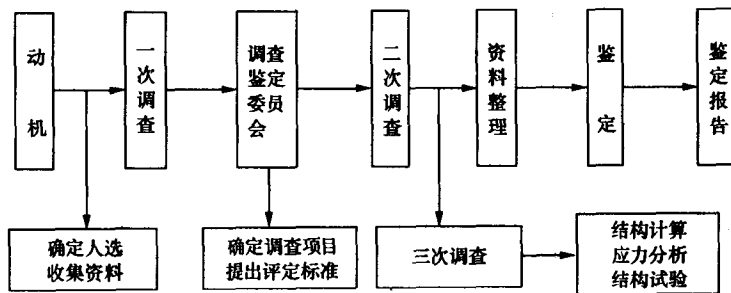


图1-4 实用鉴定法实施程序框图

实用鉴定法在实施中的每一步骤都存在着反馈过程。调查、检验和试验项目的选择和确定均应有预见性,做到“心中有数”。执行中应注意其方便和可能,有些检测项目在分析中是重要的,但在实施中可能是不现实的或测试相当困难且花费太大,这就要采取另外的方法去处理。即要重视可行性。在调查、检验和综合评定中,重点做好以下三方面的工作。

(1) 结构或构件计算,以第一、第二次调查确定的数据,按原设计依据的规范要求进行分析计算,判断结构抗力的可靠程度。当建筑物建设时间过早,是按旧规范进行设计的,也应该按新规范标准校核。若需要加固、补强的话,也应按新规范标准执行。

(2) 整体结构解析评定,应按工程力学的方法探求鉴定建筑物的结构实际工作状态,包括

静力作用状态和动力作用状态,再用有限元法作应力或变形分析,或根据地震反应参数作建筑物地震反应谱分析等。

(3) 结构或构件试验,可在现场进行,也可取样在试验室进行,对整体结构或某些特殊构件,也可采用模型试验。

### 1.3.3 可靠概率鉴定法

运用概率论和数理统计原理,采用非定值统计规律对建筑物的可靠度进行鉴定的一种方法,称可靠概率鉴定法,又称可靠度鉴定法。

人们认识到,建筑物的作用效应  $S$ ,结构抗力  $R$  以及影响建筑物的诸因素并非固定不变,而是在一定范围内波动的随机变量,按现有规程、规范进行结构分析和应力计算属定值法范围,用定值法的恒定值去评定已有建筑物的随机变量的不定性影响,显然是不合理的。

概率法用概率的概念分析已有建筑物的可靠度,找出建筑物在正常使用条件下和预期的使用期限内发生破坏或失效的概率,确定其使用寿命。建筑物的结构抗力  $R$  和作用效应  $S$  之间,存在如下关系:

$$R \geq S, \quad (1-9)$$

当  $R > S$  时,结构处于安全状态;

当  $R = S$  时,结构处于极限状态;

当  $R < S$  时,结构处于失效状态。

若用  $P_f$  表示失效概率,  $P_s$  表示保证概率,则两者属于互补关系,即

$$P_s + P_f = 1. \quad (1-10)$$

只要能计算出  $P_f$ ,便可得到保证概率,得到建筑物的保证度。

概率法在理论上是完善的,但目前离实用还有距离。困难在于结构物的不定性,这种不定性来自结构材料强度的差异和计算模型与实际工作状态之间的差异。减少材料强度的离散性,提高理论计算的精确性,是提高和控制结构物可靠度的主要途径。其次,根据校准试验的比较分析,各类结构构件的可靠性指标不一致,如在砌体结构中,轴压偏高,而偏压和受剪偏低。在结构工程的实际施工中,质量不稳定,可靠性指标多数偏低。所以,落实可靠的质量控制措施是十分必要的。

目前概率法的实际应用仅止于近似概率法,从概率分布曲线和形态,用“均方差”度量并找出“安全指标”。根据调查资料,目前国外各承建集团在对已有建筑物可靠度的安全指标测算中,方法和程序各异,并对外保密,可以肯定,在这方面今后必将有一个很大的发展。

我国建筑物的可靠性鉴定任务十分繁重,目前所采用的鉴定方法大致处于经验鉴定法和实用鉴定法之间的状态。由于历史原因,已有建筑物的有关图纸和资料可能保存不全,而且我国国家基本建设管理、科研机构和实施机构(即科研机构、设计单位、施工公司)三者完全分离,增加了检验和鉴定工作的艰巨性和复杂性。大力发展实用鉴定法和可靠度鉴定方法的研究,开发新的测试技术和设备,尽快提高已有建筑物可靠性鉴定的质量和速度是十分重要的工作。

## 1.4 结构可靠性鉴定的基本原则

根据《建筑结构设计统一标准》的规定,计算结构可靠度时采用的设计基准期为 50 年。设计人员在设计时,虽然考虑了诸多因素,但这些考虑与实际使用中发生的情况总是有一定差距的。建筑物在使用中会遭遇到各种偶然事件而受到破坏,如地基的不均匀沉降,结构的温度变

形、疲劳作用以及一些工程事故和工业事故等。这些往往都是随机因素,难以在设计中考虑周全,一旦使用中发生这类问题,将危及结构的安全,因此迫切需要进行结构检测与试验,进行可靠性鉴定。

#### 1.4.1 鉴定的必要性

一般而言,当建筑物遇到下列情况之一时,则需进行可靠性鉴定。

- (1) 建筑物经过长期使用,不同程度地发生了老化。
- (2) 由于某种原因发生连接损伤或锚固性破坏以及整体或局部失稳等。
- (3) 建筑物发生异常变形、开裂等。
- (4) 由于工艺改革、使用条件发生了变化而需要重新鉴定。
- (5) 一些具有特殊用途的重要性建筑物需要定期检查、鉴定。
- (6) 建筑物受地震、火灾、台风、爆炸等突发性的外加荷载作用而造成损坏的损坏程度鉴定等。

我国 20 世纪 50 年代前建造的建筑物,有相当一部分超过预定的设计基准期,已严重老化。50 年代后,特别是 1958 年以后建造的建筑物,包括民用住宅、工业厂房、公共建筑等,虽未超过使用年限,但其中不少已发生了上面所提到的有关问题,有一部分已成“危房”,无法继续使用。1980 年以后,经济发展迅速,技术立法、技术管理和水平跟不上,严重事故时有发生,有些虽未发生倒塌事故,但留下了许多隐患,应该看到这种危险性,及早解决这类潜伏的隐患。解决的办法是建立各种法规,发展结构非破损检测技术,进行可靠性鉴定工作,在此基础上,及时地采取补强、加固和处理措施。

#### 1.4.2 鉴定原则

房屋结构可靠性鉴定规程和标准在制定中,主要遵循如下原则。

(1) 以结构的安全性为主,充分满足结构在规定的使用条件下和规定的使用期限内的可靠性要求,同时兼顾其适用性和耐久性,以此为原则制定分项分级标准和单元综合评定等级。

对耐久性的评估,是以被鉴定结构物的目标使用年限为准。在评定中需根据结构材料和结构性能、使用环境与条件的检测结果,结合工程经验进行综合判断。

(2) 承载能力、材料强度和结构安全度等方面的取值,应采用以概率论为基础的可靠性理论来决定。

结构的鉴定评级是根据我国建筑结构现行设计规范的结构安全度水平,用不同的可靠指标来确定的。A 级(a 级)标准,为规范设计标准,而最低标准 D 级(d 级)的确定,则是根据《工业厂房可靠性鉴定标准》的相应原则,国内大量的工程事故的经验总结和通过对有关专家的调查后,得出分级指标进行评定。

(3) 在建筑结构综合评定中引用了“传力树”概念。从学科上看,整个结构体系的评定属于“系统工程”的研究内容,其问题的实质极为复杂。目前,从结构设计标准讲,仅在构件的可靠度上有所解决,而体系的可靠度正处在研究阶段。从目前实际情况出发并考虑今后的发展,引入了“传力树”概念。

“传力树”定义为:由基本构件和非基本构件组成的传力系统。树表示构件与系统失效之间的逻辑关系。基本构件是指当其本身失效时导致传力树中其他构件失效的构件;非基本构件是指其本身失效是孤立事件,它的失效不会导致其他主要构件失效。

“传力树”定义有如下特点:

- ① 以传力为特征,符合建筑结构计算单元承重结构体系的受力、传力特点。系统的可靠性

分析中,最受关注的是系统发生失效状态或故障状态的概率和原因。建筑结构类型可以不同,但每一类型中的结构构件都要受力和传力,按照传力路线进行传力跟踪追寻力传到何处。哪个结构构件或节点发生故障,层层跟踪可找出导致系统失效所有可能的直接原因和间接原因,所以,以“传力”为特征的“传力树”符合建筑结构的传力、受力特点。

②将传力系统形象化,清晰地显示出“树”中各个部分所处地位及作用。

③用逻辑推理关系,表示了构件之间、构件与系统之间的内在联系。构件之间的逻辑由基本构件和非基本构件的定义给出,构件与系统失效之间的逻辑关系是按照各种构件在系统中的不同地位和作用用“树”来表示,从而表达出构件之间,构件与系统失效之间的内在联系。

(4) 统一鉴定程序和检查要点。这是分析综合国内外有关资料和有关模式,结合国内工程检查和鉴定经验,从繁就简归纳整理提出的结论性条文,既为可靠性鉴定提供了统一的程序和标准,亦为日常技术管理提供了科学依据。

(5) 结构的可靠性鉴定分为“子项”、“项目”、“单元”三个层次的评定,每个层次又各分为四个级别。在具体工程实践中层次可能更多,为避免过于复杂和便于掌握运用,将其简化。执行中“项目”评定是作为结构是否应该进行处理的依据,“单元”评定则可作为管理部门进行科学管理的主要依据。

(6) 鉴于不同结构的可靠性鉴定的特殊性和复杂性,应在大原则下统一,在具体执行中给予鉴定人员一定的回旋余地,因此,必须对鉴定单位和鉴定人员的资质提出具体要求,以保证鉴定质量。

1.5 结构可靠性鉴定的程序和标准

1.5.1 可靠性鉴定的基本程序

建(构)筑物的可靠性鉴定程序如图 1-5 所示,依次分述于后。

1. 目的和范围

目的和范围是指鉴定合同所规定的鉴定目的和范围。根据建(构)筑物的使用情况和需要,一般有两种鉴定要求:一种情况是结构已有不同程度的破损、老化,要求维持短期使用(3~5 年),希望通过鉴定及必要的加固处理,给定一个更新改造的准备期,以后可能报废或另作他用。对这种情况,应在确保安全的条件下,尽量不停产,照常使用,以取得较好的经济效益。另一种情况是结合扩建、改造或使用条件的变更,要求继续长期使用(10 年以上),希望扩建、改造、鉴定、加固同步进行。

两种情况中,对前者,可以在国家规范标准的允许范围内,在鉴定处理上适当放宽;对后者,在处理上应从严,即原则上加固改造后的结构功能应达到现行规范标准的要求。

2. 初步调查

初步调查主要包括如下几方面:

(1) 查阅原设计图或竣工图,历次维修、改建及加固设计图,历次结构检查观测资料和工程地质资料,水文资料等。

(2) 了解原始施工状况,查阅施工记录及质量保证资料,重点核实材料代用、设计变更、施

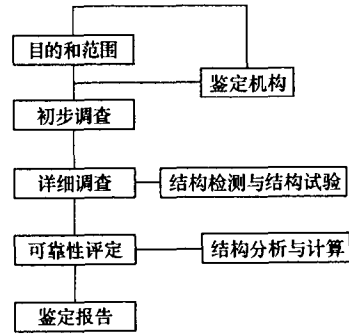


图 1-5 鉴定程序框图

工事故处理以及竣工验收文件等。

(3) 现场调查。主要针对使用状况、周围建筑物的相互影响和相互作用,以及使用历史等进行调查,并与原设计作初步核对。

(4) 根据已有资料,对有问题的结构或部位,作尺寸或外观检查,对存在的问题作初步分析。

(5) 在初步调查的基础上,制订详细调查计划,重点是制订检测计划或试验大纲。

3. 详细调查

详细调查包括如下方面:

(1) 结构布置、支撑系统、结构构件及连接构造的检查。

(2) 地基基础应检查其对上部结构的影响和反应,当调查发现问题,应分析原因,必要时应开挖检查或进行试验检验。

(3) 结构上的作用的调查分析、作用效应分析及作用效应组合,必要时应作实测统计。

(4) 结构材料性能的检测与分析,结构几何参数的实测,结构构件的计算分析,必要时应进行现场实测或结构试验。

(5) 房屋结构功能、结构构造、结构附件与配件的检查。

4. 可靠性评定

结构的可靠性鉴定评级,通常按子项、项目、单元三个层次四个等级进行,见表 1-2 所示。

表 1-2 可靠性鉴定评级层次及等级划分表

| 层 次   | 评 定 单 元     | 项 目 或 组 合 项 目 |           | 子 项                    |
|-------|-------------|---------------|-----------|------------------------|
| 等 级   | 一、二、三、四     | A、B、C、D       |           | a、b、c、d                |
| 范围与内容 | 评 定 单 元     | 结构布置和支撑系统     | 结构布置和支撑布置 |                        |
|       |             |               | 支撑系统长细比   | 支撑杆件长细比                |
|       | 承 重 结 构 系 统 | 地 基 基 础       | 地 基       |                        |
|       |             |               | 基础        | 按结构类别,同相应结构的子项         |
|       |             |               | 桩和桩基      | 桩、桩基                   |
|       |             |               | 斜坡稳定      |                        |
|       |             | 混凝土结构         |           | 承载能力、构造和连接、裂缝、变形       |
|       |             | 砌体结构          |           | 承载能力、构造和连接、变形裂缝、变形     |
|       |             | 钢结构           |           | 承载能力与构造和连接、变形、偏差       |
|       | 围 护 结 构 系 统 | 使用功能          |           | 屋面系统、墙体及门窗、地下防水设施、防护设备 |
|       |             | 承重结构          |           | 按结构类别,同相应结构的子项         |

1.5.2 可靠性鉴定的评级分级标准

结构的可靠性鉴定不同于结构设计。结构设计是根据建(构)筑物当时的主客观条件设计结构,按图施工,按设计要求使用。各种结构参数由设计者根据设计规范的规定取用,施工质量用施工验收规范检验是否合格,使用中要求按设计限定参数使用。

结构鉴定是在已建成、已具有使用历史,各种结构参数已经客观存在的条件下,要求鉴定者采用可靠的方法确定结构上的作用、作用效应、结构抗力以及作用效应与抗力之间的可靠性关系。鉴定中对所有结构参数都进行实测是困难的,从解决问题上看也并非完全必要。因此,