

钢筋混凝土结构中混凝土 强度评定与无破损检测法

Gangjin Hunningtu Jiegouzhong
Hunningtu Qiangdu Pingding Yu
Wuposun Jiancefa

[苏联] Б.Б.乌日波利亚维丘斯 著
戚立德 徐风云 译

人 民 交 通 出 版 社

钢筋混凝土结构中混凝土 强度评定与无破损检测法

Gangjin Hunningtu Jiegouzhong
Hunningtu Qiangdu Pingding Yu
Wuposun Jiancefa

[苏联] Б.Б.乌日波利亚维丘斯 著
戚立德 徐风云 译

人 民 交 通 出 版 社

(京)新登字091号

内 容 提 要

本书研究钢筋混凝土结构中混凝土强度现有的无破损检测方法,推荐以各种相关关系式为基础的许多新的综合方法,并提出这些新综合方法的理论根据,列举评定混凝土强度和结构承载能力的方法,考虑应用无破损试验的设计方法,引述了推荐的各种研究方法的概率论证。

本书可供建筑工程师、工艺师、设计师、建筑专业大专院校高年级生、研究生和科学工作者使用。

неразрушающие методы контроля и оценки прочности
бетона в железобетонных конструкциях

Б.Б. Ужполявичюс

Вильнюс «МОКСЛАС», 1982

钢筋混凝土结构中混凝土强度评定与无破损检测法

戚立德、徐风云 译

徐风云、戚立德 校

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街10号)

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

人民交通出版社印刷厂印刷

开本: 850×1168 $\frac{1}{2}$ 印张: 7.125 字数: 184千

1991年11月 第1版

1991年11月 第1版 第1次印刷

印数: 0001—4000册 定价: 9.05元

ISBN 7-114-01142-3

TU·00019

目 录

前言

概论	1
----	---

第一章 概率论和数理统计的基本原理	11
-------------------	----

1.1 引论	11
--------	----

1.2 随机事件	12
----------	----

1.3 随机事件的概率	15
-------------	----

1.4 概率的几种特性	17
-------------	----

1.5 随机变数及其分布	19
--------------	----

1.6 正态分布	23
----------	----

1.7 随机变数的数值特征。力矩	32
------------------	----

1.8 随机变数的多维分布	37
---------------	----

1.8.1 二维随机变数	38
--------------	----

1.8.2 多维随机变数	44
--------------	----

1.9 两个随机变数的和与差的分布	46
-------------------	----

1.10 函数的数值特征	48
--------------	----

1.11 观察抽样方法	51
-------------	----

1.12 总体参数的评定	56
--------------	----

第二章 关于间接测定混凝土强度的综合方法的理论	75
-------------------------	----

2.1 引言	75
--------	----

2.2 物理-力学特征之间相互关系的理论分析	77
------------------------	----

2.2.1 非均质物体的强度	78
----------------	----

2.2.2 非均质物体的弹性	83
----------------	----

2.2.3 强度与弹性之间的关系	90
------------------	----

2.3 抽选关系实验研究所需的特征	93
-------------------	----

第三章 混凝土物理—力学特征之间相关关系的研究	95
-------------------------	----

3.1	确定特征的方法	95
3.2	抽样研究关系式的相关模型	97
3.3	研究关系式的方法	103
3.3.1	对偶相关关系式	104
3.3.2	多因素相关关系式	106
3.3.3	由于数据测量和组合的不准确性所需考虑 的系统误差	108
3.4	相关关系式的研究	113
3.4.1	对偶关系式	113
3.4.2	多因素关系式	118
3.5	随机关系式分析的机械化	123
第四章	间接确定装配式构件的混凝土强度时 的系统误差	125
4.1	引论	125
4.2	试验研究方法	125
4.3	检测立方体强度与真实强度关系的对比	130
4.4	检测立方体和结构混凝土物理—力学特征 的多因素相关性	134
第五章	回弹杆法间接测定混凝土强度	138
5.1	回弹硬度	139
5.2	确定综合硬度特征的研究方法	140
5.2.1	硬度仪的构造和确定综合硬度特征 的研究方法	141
5.2.2	确定综合硬度特征的理论	146
5.3	间接确定的混凝土强度的精确性	149
5.3.1	确定不同成分的混凝土强度	149
5.3.2	钢筋混凝土结构制造厂对混凝土强度 的检测	151
第六章	钢筋混凝土结构抗力可靠性的设计	157
6.1	引论	157

6.2	基本概念	159
6.3	设计可靠度	163
6.4	内力和抗力的数值特征	168
6.4.1	内力的数值特征	168
6.4.2	抗力的数值特征	171
第七章 钢筋混凝土结构中的混凝土强度		
	的间接检测和评定	174
7.1	钢筋混凝土结构抗力的评定方法	174
7.2	结构抗力的检测方法	177
7.3	结构抗力的检测和评定	180
7.4	钢筋混凝土结构的混凝土强度间接检测 和估计	187
7.4.1	引论	187
7.4.2	检测细节的研究	190
7.4.3	在检测结构物抗力时混凝土强度的评定	192
第八章 设计钢筋混凝土结构物时考虑内力和		
	抗力不确定性的综合方法	195
8.1	设计时结构物抗力和内力不确定性的修正	195
8.2	装配式结构物的设计与选择	200
附录		204
参考文献		208

概 论

以专门制作检测试件的试验为根据的结构物混凝土力学特征的传统测定方法的缺点之一，是试件混凝土与结构中的混凝土的灌筑、捣实和硬化条件，具有不可避免的差别。甚至混凝土制品的尺寸对捣实条件和硬化湿温状态都有很大的影响，所以只能力求这些条件达到某种程度的接近。传统方法的重大缺点，还在于不能揭示混凝土力学特征值在钢筋混凝土结构物各部位中的分布。这样，用通用方法来检测结构的混凝土力学特征，在很大程度上是有条件性的。我们只能由它来估计混凝土混合物的性质。还得指出，在必须测定已投入使用的结构物的混凝土力学特征时，一般没有检查用试件。

传统方法的上述缺点使人们对直接在结构物中检测混凝土物理力学特征的方法越来越感兴趣。在这一趋向中，混凝土强度间接（无破损）确定方法的研究和拟定，占有重要的地位。

首批开始应用的混凝土强度间接检测方法，以压入值或弹回值所确定的硬度测量为基础。由于所用的仪器简单，测量效率高，这些方法直到今天还在施工中广泛应用。

近年来，研究成功了新的所谓无线电技术试验法，并已获得实际应用，它使直接在钢筋混凝土结构中测定混凝土物理力学特征的可能性得到扩大。这些方法，在地球物理学方面广泛用于研究沉积岩石——石油和煤气储集层。能适应生产条件的有：超声波脉冲法，利用渗入核辐射体的方法（例如，伽玛放射法，中子法，等等），电测量法（例如，阻抗法），无线电波法，等等。地球物理学家在对地壳做地球物理试验时还用超声脉冲法来模拟爆炸声波。

对于钢筋混凝土制品混凝土性能的研究，基本上只有超声波

脉冲法和掺入核辐射法获得了实际应用〔18,28,30,40,44,57,和其它〕。毫无疑问,在研究混凝土的物理力学方面,地球物理学家所使用的其它方法也是有前途的,人们正期待着把它推广应用于建筑工程中。

就其结构和物理力学特征而言,混凝土与沉积岩石的区别很小。甚至可以把它视为人工沉积岩。这些物理力学特征诸如:孔隙率、裂隙性、弹性和强度,对地球物理学家与对建筑师一样重要。因此,在完善仪器和研究方法方面,地球物理学家和建筑师都要做出自己的贡献。

混凝土强度间接测定法的精确度,主要取决于材料强度与用直接测量法确定的物理力学特征之间的相互关系的密合程度。这是基本要求,与此相应的示例是许多研究工作者所研究的混凝土强度与弹性模量之间的相互关系。把混凝土抗压强度与混凝土弹性模量联系起来的乌奥克尔、格拉夫等人的经验关系式已为人们所周知。但是,长期未能利用这些关系式来检测钢筋混凝土结构中的混凝土强度,原因是由于缺乏相应的制品混凝土弹性模量测定方法。

近年来,由于试验时应用了超声波脉冲法和射电测量法,方出现了确定制品混凝土弹性常数的可能性。例如,可以利用已知的弹性理论表达式来计算混凝土动弹性模量:

$$\epsilon_n = \gamma c^2 \frac{(1 + \mu_n)(1 - 2\mu_n)}{1 - \mu_n} \quad (0.1)$$

式中: ϵ_n ——动弹性模量, γ ——容重; c ——纵向弹性波在无限介质中的传播速度, μ_n ——泊松系数。在按(0.1)计算弹性模量时,特征 c 和 μ_n 借助于超声波脉冲技术确定。制品中的混凝土容重,可以用射电测量法确定〔27,30,40,62,76,和其它〕。

c 值很难测定。从公式(0.1)可以看出,为了确定弹性常数 ϵ_n ,除了特征 c 外,更须测量 μ_n 和 γ 。这要求使用别的补充仪器,因而使测量变得复杂化。此外,特征 c 本身亦与混凝土强度有密切关系。这就导致把研究工作主要集中于按超声波脉冲速度来间

接确定混凝土强度可能性的研究。

关于这个问题，研究工作者们众说不一。有的著者偏颇地认为，在测定混凝土强度时，可以仅以混凝土强度与超声波脉冲传播速度之间的经验关系式亦即以关系式 $R = R(c)$ 为基础。其他意见则正好相反。他们指出，特征 c 对于这种目的的不合理性。

对经验（规定程序）关系式 $R = R(c)$ 所进行的深入的实验研究表明〔27, 40, 62等〕，影响它特征的因素有：集料的数量，矿物成分和粒度，水泥种类，混凝土混合物的制备和捣实方法，混凝土的老化，龄期和湿度条件，等等。仅在确定的个别情况下，例如，影响 $R = R(c)$ 回归线参数的上述诸因素中，仅有1~2个因素发生变化而其余的变化很小时，才能观察到相当密切并能满足实际要求的经验关系式 $R = R(c)$ 。

以此为出发点，来确定按超声波脉冲速度检测混凝土强度的可能性。材料强度的间接检测，应以专为预定的检测条件而确定的个别随机关系式 $R = R(c)$ 为基础。关系式的密合程度及由此间接确定的混凝土强度的准确性，都与混凝土混合物成分的稳定性、工艺条件的固定性和混凝土在试验时的状态有关。

按此见解建立了当前最普及且已批量生产的结构物混凝土强度检测方法。根据这一方法，对一定龄期的混凝土，按照检测用立方试件的试验数据，分析出经验关系式 $R = R(c)$ 。影响关系式 $R = R(c)$ 性质的上述因素的变动，建议在长期随机抽选生产性混凝土试件时考虑。根据检测用试件，同时测量混凝土强度和纵向弹性波速度，测得数据用最小平方法确定 $R = R(c)$ 回归线。确定结构混凝土强度的准确性，按经验关系式的密合程度来评定。

对于检测混凝土强度的真实条件而言，混凝土成分、拌和料和捣实条件的某些波动，以及在试验时混凝土温度和湿度的变化，是一些特征因素。混凝土强度间接检测的准确度，与这些特征因素的变化程度有关。根据不同著者的资料，在生产条件中，按超声波脉冲速度检测的相对均方根误差在7~16%范围内。也就是说，置信概率为95%的材料强度测定精度在 ± 14 到 $\pm 32\%$ 范

围内波动〔18,27,32,62和其它〕。

采用超声波传播速度来检测强度的巨大障碍，是必须为所检测的每一种混凝土配合比以及所确定的检测条件确定特别的经验关系式 $R = R(c)$ 。因此，很多研究人员自然地趋向于确定一个一般的（通用的）可以用于各种检测条件的关系式 $R = R(c)$ 。如果在从相应的总集合中抽选混凝土试件时能遵守必要的规定，例如，单对重混凝土来说，确定这样的关系式原则上是可能的。然而，在这种情况下，通用关系式的密合程度及与此相关的混凝土强度确定的相对误差，将以百分之几十来计算，这会使该关系式失去实际应用的可能性。

可以引用图0.1〔32〕上的曲线图来证明这一点，说明混凝土粗颗粒集料的矿物成分变动对关系式 $R = R(c)$ 的影响，正如看到的那样，当只是粗颗粒集料的矿物成分发生变化时，对平均曲线的可能偏差，就达到 $\pm 40\cdots 50\%$ 或更大。其他著者也得出了类似的结论。

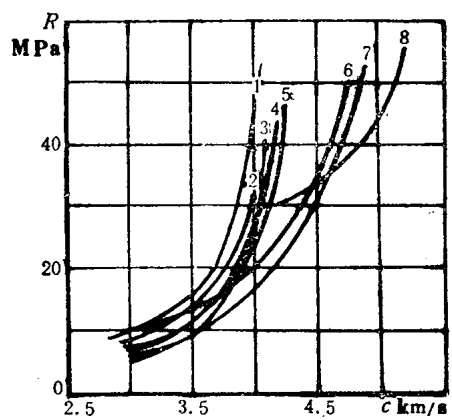


图0.1 几种不同产地的碎石混凝土和砾石混凝土的关系式 $R = R(c)$ ；
1-砂岩；2-软石灰石；3-砾石；4、5-两个产地的花岗岩；6-白云石；7-阿
佛尼托维石灰石；8-硬质白云石

除了上述试验研究结果之外，还发现有认为可能按特征值 c

来预测混凝土强度的其它著作，建议从一般关系式 $R = R(c)$ 出发，而且还毫无根据地提出了很高的确定精度。

近年来，许多著者的研究，不论是经验性的还是理论性的，都证实了根据一个特征（这里也包括根据超声波脉冲速度）来间接确定混凝土强度的有限的可能性和低精确度。混凝土强度受到复杂的物理力学性质的综合制约。能够完全代替这种综合的通用特征是不存在的。

在论证间接确定混凝土强度应用综合特征方面提供研究成果的有：H.A.克雷洛夫[40,41]，B.A.拉齐申科[44,45]，Ю.С.乌尔茹莫采夫[90,91]，С.И.诺金[57]，Г.Я.波契托维克[52]，Ю.М.列申斯基，М.А.诺夫戈罗德斯基[56]及其他学者。在利用综合特征间接确定混凝土强度方面提出独创性建议的外国著者有：П.П.克列依格尔[102]，Л.布鲁纳尔斯基[16]，P.德诺斯和И.夫埃克奥阿鲁[27,99]，А.加兰[22]及其他学者。

应该提出，近来对综合法表现了很大的兴趣。提出并分析了各种方法，由于不同的著者对某些新的术语和概念所持的解释不同，因此，有时甚至很难弄清楚所提出的方法的实质。为了对比各种方法和更便于进行分析，我们尝试划分出各著作的主要方面。按我们的观点，有三方面著作。

第一方面著作的特点是利用在混凝土强度 R 与某些综合指标 A 之间的对偶随机关系式， A 由按无破损法确定的特征值 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_R$ 组成：

$$R = R(A); \quad A = (X_1, X_2, X_3, \dots, X_R).$$

通常以理论论证为基础来选择特征 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_R$ ，并确定它们之间相互联系的数字形式。

在第二方面的著作中，主要利用混凝土强度与按无破损法确定的特征综合之间的多因素经验关系式

$$R = R(X_1, X_2, X_3, \dots, X_R,)$$

所抽选的特征以及多因素关系式的形式，根据试验资料利用数理统计方法构成。

第三方面著作,主要以利用双参数经验关系式($\bar{R} = R(x_1, x_2)$ [27, 98及其它]或者三参数经验关系式 $\bar{R} = R(X_1, X_2)$ [98]的回归线为基础。未考虑到的因素(例如,混凝土的硬化条件、龄期、湿度、成分及其它)对这一关系式的回归线参数的影响,借助于修正系数系统或者诺模图来考虑。

在间接确定混凝土强度时,由于混凝土构成的不匀质性及连续性的破坏和内应力的存在,使得采用这些特征(已在第一方面著作中所提到的)的理论论证问题大为复杂,因此,在解决这一问题时,借助各种流变模式[44, 51, 91等]来模拟荷载作用下混凝土使用性能的现象观察方法(见§2.1)不是偶然的。在以固体强度与固体的其它物理力学特征之间的相互关系为基础来解决这一问题时,也利用了其它方法[40, 41及其它],如尝试用考虑混凝土构成和“骨架”性质来获得这一关系(这些建议的分析见§22和§23)。

第二方面著作建立在利用专门的数学统计方法来研究混凝土强度与综合特征[22, 81, 101, 102及其它]之间的多因素经验关系式的基础上。这样,就利用了多因素相关分析法来研究混凝土强度与纵向超声波速度及它的衰减率和容重之间的相互关系,并也用来估计这一关系[81, 101]的密合程度。这种分析方法亦用于研究混凝土强度及纵向超声波速度和它的衰减率[22]之间的相互关系,但是,在我们看来,相关分析、特别是关系式的密合程度,在此未必合理,因为从所描述实验方法中可以看出,试验资料不属于相关模型而属于回归模型。下面将指出,应用相关模式的不连续性,会十分频繁地遇到。

不准备详细研究第三方面的著作,仅在此指出,在采用这些著作中所建议的方法时,不可能获得在间接确定混凝土强度时所容许的完全的统计评定误差。此外,采用修正系数系统和诺模图,不可避免地要简化个别因素的影响,这就降低了这些方法所确定的强度的精确性。

如上所述,混凝土强度无破损确定方法,建立在随机关系(对偶关系或多因素关系)基础上。这一关系的参数,其中包括

关系的密合程度，决定着强度预测的精确性，众所周知，与许多因素相关。不能认为可以接受下列情况：即某些利用无破损方法的实际建议中，在间接测定混凝土强度时，不去涉及诸方法的精确度的估计问题。混凝土强度的检测方法，如果它不规定各种具体情况下的精确度，那么它们就未必是合理的，在经济上也未必是有益的。众所周知，所能达到的精确度与混凝土的检测条件（成分、硬化条件、湿度、龄期、温度、等的变化）有关系，它的变化范围可能相当大。还要考虑到，无破损试验方法的精确度已由标准文件定出，这些方法的评定取得了重大意义。

多因素经验关系式密合程度的评定方法尚缺乏理论根据，这就抑制了混凝土强度综合确定法的实际应用。

为了间接确定混凝土强度而采用的经验关系式的密合度，有时借助相关系数来评定。必须指出，这个系数仅在相关关系中才有意义。相关关系在从总体中随机抽选试样和可比拟特征分布时可能出现。间接检测混凝土强度时应用的经验关系式，往往是回归关系式，而利用相关系数来评定这些关系式的密合度就失去了意义。出现这类误差是因为对由有关试验资料确定的经验关系式采用了相关关系式这一不准确的术语，所以造成了对关系式的不正确解释。

一些著者在评定混凝土强度综合检测法的精确性时，未考虑无破损法测定的各个特征之间的相关性。

可以借助于众所周知的三参数直线相关关系式的相关系数表达式，来证明所测量的各特征之间的相互关系对强度测定精确性参数的影响：

$$r_{1 \cdot 2 \cdot 3}^2 = \frac{r_{1 \cdot 2}^2 + r_{1 \cdot 3}^2 - 2r_{1 \cdot 2} \cdot r_{1 \cdot 3} \cdot r_{2 \cdot 3}}{1 - r_{2 \cdot 3}^2}, \quad (0.2)$$

式中： $r_{1 \cdot 2 \cdot 3}$ —特征 1（在我们的情况下为混凝土强度）和特征 2 与 3（用 2 种无破损方法测得的混凝土特征）的多因素相关系数； $r_{1 \cdot 2}$ 和 $r_{1 \cdot 3}$ —特征 1 相应于特征 2 与 3 的对偶相关系数； $r_{2 \cdot 3}$ —表征 2 与 3 之间的相互关系。

借助于表达式(0.2)可以查明特征 2 与 3 之间的关系对多因素相关系数 $r_{1 \cdot 2 \cdot 3}$ 值的影响。

如果 $r_{2 \cdot 3} = 0$ (各特征之间没有关系), 系数 $r_{1 \cdot 2 \cdot 3}$ 取得最大值:

$$r_{1 \cdot 2 \cdot 3}^2 = r_{1 \cdot 2}^2 + r_{1 \cdot 3}^2$$

在特征 2 和 3 之间的相互关系增强下, 而系数 $r_{2 \cdot 3}$ 的绝对值接近 1 时, 系数 $r_{1 \cdot 2 \cdot 3}$ 的值减小。应当指出, 在这种场合下, 始终遵守 $r_{2 \cdot 3} \leq 1.0$ 的条件。如果提出 $r_{2 \cdot 3} = 1.0$, 这就意味着特征 2 和 3 相等。

这时, 综合间接确定混凝土强度的各特征之间的相互关系, 对强度与这些特征的多因素关系的密合度有相当大的影响。在确定预计的混凝土强度的精确度时, 没有理由忽视这种关系。

流行着这样一种意见: 增加综合特征的数目, 有助于提高强度确定的准确度。这并非总是如此。在利用综合指标时, 混凝土强度的信息数量, 不仅与特征的数量有关。而且与综合中所出现的各特征之间的连系形式有关。如所指出, 相互关系形式在个别情况下可以用理论论证, 但是, 由于非匀质材料强度的论理论证的复杂性, 而且不可避免地要把它概括成一个简单的公式以便简化分析, 所以选择的强度与综合指标之间的相互关系式, 必须经受实验检查。鉴于必须采用专门的实验方法和专门处理实验资料, 所以不是所有的综合特征的效果以及各著者建议的关系式的连系形式的效果都得到证实。这个问题是值得注意的, 因为在间接确定混凝土强度时, 附加特征的实际利用存在着相当大的困难, 而且不是在所有情况下都被证明有效。

我们的观点是, 研究多因素关系式并包括这些关系式的密合程度, 最便利的方法是以利用多因素相关分析为基础, 同时遵守确定相关 (名副其实的) 经验关系式的相应方法。利用在数理统计学方面已研制成功的高功能分析设备的可能性, 使这种方法具有无可辩驳的优越性。

从上述文献中的分析可以得出, 为了确定结构中的混凝土强度, 在实践中广泛应用的方法是只利用按无破损方法测得的一个

特征，或者是超声波速度，或者是回弹速度，等等。也有利用射电测量法评定制品混凝土容重的资料。其它特征，例如，超声波衰减，暂在试验室条件下确定。由于缺乏取得不同形状和尺寸的混凝土制品中的超声波衰减对比值的方法，所以不可能应用这个特征来间接检测结构的混凝土强度。但是，已积累的实验资料及某些理论研究工作表明，按一个特征确定混凝土强度的方法的有限可能性。只有按混凝土的综合物理力学性质来预计才能达到足够的精确度。但是，还没有对生产配制的重混凝土的物理力学特征之间的多因素关系进行更详细的研究；这种研究的目的是为了拟定更准确的更通用的方法，以便直接确定结构中的混凝土强度。在间接确定强度时，还缺乏有关多因素关系式的可能性（准确性和通用性）方面的资料。

在一定程度上，只有根据混凝土强度与无破损确定的特征之间的关系的理论分析，同时根据应用多因素关系式经验分析的独特数学方法，才有可能全面研究这些经验关系式的性质。

这里适当说明，混凝土强度与纵向弹性波传播速度的关系，也表现为多因素关系〔40,41及其它〕。所指出的情况可以部分地说明前面指出的关于各著者按特征 C 确定强度时所得精确度资料的差别，以及缺乏关于按这一特征确定混凝土强度的可能性的严格而且明确的指示。在揭示关系式 $R = R(c)$ 的可能性时，所使用的双回归分析方法，有时不能给出正确的答案。只有根据多因素相关分析，才能足够完整地揭示这一关系的性质。

在利用按检测立方试件的试验数据制定的经验关系式来评定（直接在结构中）间接确定混凝土强度方法的准确度时，产生了如果结构物的混凝土和检测立方试件的混凝土的物理力学特征不同，则可能出现系统误差的问题。实验研究表明，在按超声波速度测定混凝土强度时，这种误差对于采用箱模施工法制成的结构能达到百分之几十。为了避免这个误差，同时也为了测定误差的值，应该根据直接从结构中取出的混凝土试件的试验资料来建立经验关系式。

缺乏按照无破损试验数据评定制品的的基本方法，阻碍了混凝土强度间接试验方法的推广应用。如果说装配式钢筋混凝土构件中的混凝土强度的评定方法已在文献[37,46,78,100及其它]中作了分析，那么还有待于进行结构抗力（强度、刚性和抗裂性）评定的研究。

但是，阻碍无破损试验方法应用的还不只是因为缺乏结构抗力的基本评定方法。多年的经验指出，没有经济刺激，无破损试验方法也不可能广泛应用。关于应用间接试验方法能获得最大经济效益的探索，使我们意识到必须研制按无破损试验的抗力来选择钢筋混凝土结构的制备方法，同时研制考虑无破损试验的构件设计方法。

按照以上所述，本书直接在结构中应用现有的、创造更准确更通用的间接测定混凝土强度的综合方法的可能性研究方面，进行了理论研究和实验研究。着重注意了混凝土强度评定方法的论证，以及钢筋混凝土结构的强度、刚性和抗裂性评定方法的论证。也叙述了考虑应用无破损试验方法的设计原则。