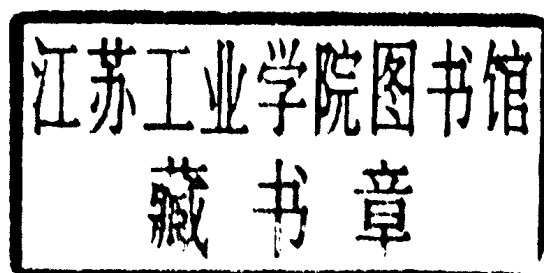


中 等 专 业 学 校 试 用 教 材

钢 筋 混 凝 土 结 构

成都铁路工程学校	李 械	合 编
天津铁路工程学校	兰嘉宏	
天津铁路工程学校	汪菊澄	主 审



中 国 铁 道 出 版 社

1995年·北京

中 等 专 业 学 校 试 用 教 材

钢 筋 混 凝 土 结 构

成都铁路工程学校	李 械	合 编
天津铁路工程学校	兰嘉宏	
天津铁路工程学校	汪菊澄	主 审

中 国 铁 道 出 版 社

1 9 9 5 年 · 北 京

(京)新登字063号

内 容 简 介

本书主要介绍钢筋混凝土及预应力混凝土结构计算的基本原理,和简支梁桥跨结构和涵洞的构造与设计计算。内容包括:绪论,受弯构件抗弯强度计算,受弯构件抗剪强度计算,钢筋混凝土受弯构件裂缝宽度,轴心受压构件,偏心受压构件,钢筋混凝土铁路简支梁桥跨,按破坏阶段法及极限状态法计算,预应力混凝土简支梁桥,涵洞。

本书是铁路中等专业学校铁道工程专业和桥梁与隧道专业的教材,也可作为从事设计与施工的有关工程技术人员参考用书。

中等专业学校试用教材

钢 筋 混 凝 土 结 构

成都铁路工程学校 李 斌
天津铁路工程学校 兰嘉宏 合编

*

中国铁道出版社出版发行

(北京市东单三条14号)

责任编辑 程东海 封面设计 翟达

北京顺义燕华印刷厂印

开本: 787×1092mm 1/16 印张: 15.5 字数: 370千

1990年9月 第1版 1995年10月 第3次印刷

印数: 7001—10500册

ISBN7-113-00841-0/TU·193 定价: 8.90元

目 录

第一章 绪 论	1
第一节 钢筋混凝土结构的基本概念	1
第二节 钢筋混凝土材料的力学性能	4
第二章 受弯构件抗弯强度计算	20
第一节 概 述	20
第二节 受弯构件截面形式	21
第三节 单跨简支梁的钢筋构造	21
第四节 梁式板的钢筋构造	25
第五节 受弯构件抗弯强度计算的基本原理	25
第六节 受弯构件抗弯强度计算（按容许应力法）	36
第三章 受弯构件抗剪强度计算（按容许应力法）	64
第一节 钢筋混凝土梁中剪应力及主拉应力	64
第二节 腹筋设计	67
第三节 T形截面梁翼板与梁肋连接处的剪应力	76
第四章 钢筋混凝土受弯构件裂缝宽度与挠度计算	78
第一节 裂缝概述	78
第二节 裂缝开展前后的应力状态	79
第三节 裂缝宽度的计算	80
第四节 改善裂缝的措施	83
第五节 钢筋混凝土受弯构件挠度计算	84
第五章 轴心受压构件	86
第一节 概 述	86
第二节 箍筋柱的构造与计算	86
第三节 螺旋筋柱的构造与计算	92
第六章 偏心受压构件	94
第一节 概 述	94
第二节 两种偏心受压	94
第三节 小偏心受压构件的计算	97
第四节 大偏心受压构件的计算	102
第五节 偏心受压构件主拉应力计算	119
第七章 钢筋混凝土铁路简支梁桥跨	121
第一节 钢筋混凝土铁路简支梁桥跨的构造	121
第二节 钢筋混凝土铁路简支梁桥跨的设计与计算	133
第八章 按破坏阶段法及极限状态法计算	140

第一节	受弯构件按破坏阶段法抗弯强度的计算	140
第二节	受弯构件按极限状态法抗弯强度计算	142
第三节	偏心受压构件按极限状态法计算	151
第九章	预应力混凝土简支梁桥	157
第一节	预应力混凝土的基本概念	157
第二节	预应力混凝土材料	160
第三节	钢筋锚固及张拉设备	162
第四节	预应力混凝土简支梁的构造和制造工艺	166
第五节	预应力损失计算	174
第六节	预应力混凝土受弯构件的计算	183
第十章	涵洞	212
第一节	概 述	212
第二节	涵洞的构造	216
第三节	利用标准图进行涵洞设计	225
第四节	整体式钢筋混凝土圆形涵洞设计实例	234

第一章 绪 论

第一节 钢筋混凝土结构的基本概念

一、钢筋混凝土结构中混凝土与钢筋受力的一般情况

钢筋混凝土结构是由钢筋与混凝土两种材料组成共同受力的结构。由于钢筋与混凝土二者的物理力学性能不同，混凝土有较强的抗压能力，而抗拉能力弱，钢筋的抗压抗拉能力都很强。为了充分利用二者的材料强度，当它们结合共同受力时，要求混凝土主要承受压应力，钢筋主要承受拉应力，以达到工程结构使用的目的。

如图 1—1(a) 所示的简支梁，当竖向荷载作用时，梁正截面中性轴以上产生压应力，中性轴以下，产生拉应力。若用素混凝土，由试验得知，在荷载作用下，受拉区边缘混凝土一旦开裂，梁瞬即脆断破坏。在正截面尺寸、跨度、混凝土强度完全相同的情况下，若在梁内受拉区配置适量的钢筋，如图 1—1(b)，在陆续增加的竖向荷载作用下，受拉区边缘混凝土开裂后，中性轴以下受拉区的拉应力主要由钢筋来承担，中性轴以上受压区的压应力仍由混凝土承担。此时竖向荷载仍可继续增加，直至受拉钢筋的应力达到屈服强度，随后荷载可略有增加，致使受压区混凝土被压碎，梁被破坏。

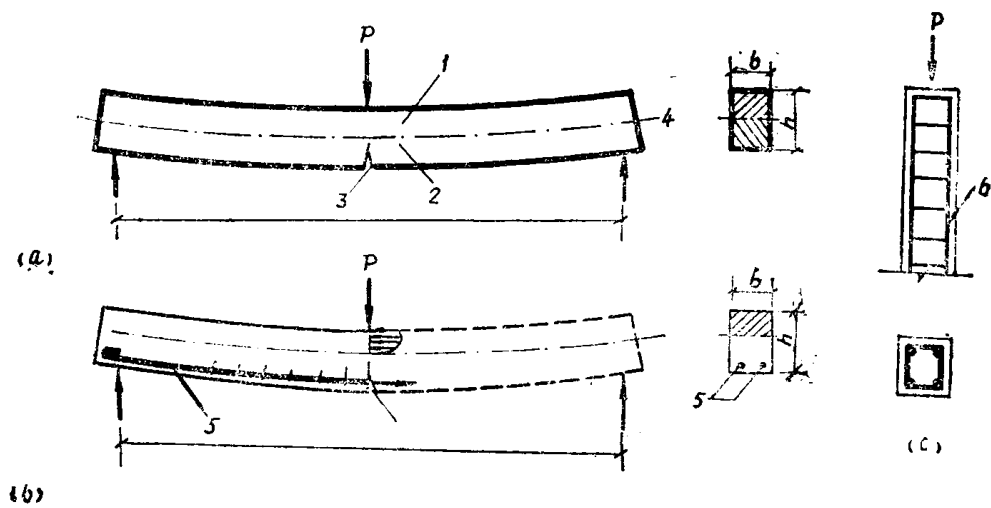


图 1—1 混凝土及钢筋混凝土结构承受荷载后情况
1 —— 受压区； 2 —— 受拉区； 3 —— 裂缝； 4 —— 中性轴； 5 —— 受拉钢筋；
6 —— 受压钢筋。

由上述试验得知，梁受拉区配置适量的钢筋，可较大幅度地提高受拉区的抗拉能力，从而使配有钢筋的混凝土简支梁的承载能力比素混凝土简支梁的承载能力提高很多。这样钢筋与混凝土两种材料的强度均得到了充分利用。

图 1—1(c) 所示，在轴心受压的混凝土柱中，配置有抗压强度较高的钢筋以协助混凝土受压，其截面尺寸，在同样的轴心压力作用下，也比用素混凝土作柱的截面尺寸小。

钢筋与混凝土的力学性能差异较大，但它们能有效地结合。在外荷载作用下，能共同工作，变形相同，这是因为：

1. 混凝土在凝结硬化过程中，体积略有收缩。若混凝土捣固密实，混凝土将紧紧地握裹着钢筋。水泥浆的胶结性能及钢筋表面的粗糙等因素，使钢筋与混凝土间产生了粘结力，这种粘结力使它们牢固地结合在一起，不能自由地相对滑动。

2. 钢筋与混凝土具有几乎相等的温度线膨胀系数。钢筋为 1.2×10^{-5} ，混凝土为 $1 \times 10^{-5} \sim 1.4 \times 10^{-5}$ 。混凝土为不良导热体，外界温度变化时，被混凝土所握裹的钢筋，无剧烈的温度变化，引起的内部温度应力差异很小，不会出现过大的相对变形和相对滑动。

3. 为保持钢筋与混凝土间有足够的粘结力，钢筋外侧的混凝土，必须有适当厚度的保护层，使混凝土对钢筋有足够的握裹能力。并使钢筋混凝土梁在竖向荷载作用下，受拉区下缘裂缝细而密。从而防止因为裂缝过宽、钢筋锈蚀降低结构的承载能力与耐久性能。

二、钢筋混凝土结构的分类

1. 按结构的受力状态和构造外形，结构可分为杆件系统和非杆件系统。杆件系统可由受弯、受拉、受压或受扭构件等相互组合而成。非杆件系统可以是空间薄壁结构或是外形复杂的大体积结构。

2. 按结构的制造方法，结构可分为整体式、装配式及装配整体式。

整体式结构，大多是结构外形不规则，而且难以分割制造。它要求整体性强，刚度大。这类结构必须现场浇筑，这些结构一般使用在工期长的施工现场，它需要有较多的模板及支撑。

装配式结构，外形规则，可由若干标准构件拼组而成。这些标准构件是在工厂预制，然后运往工地装配。采用装配式结构可使建筑事业工业化，即设计标准化、制造工厂化、安装机械化。整个施工过程不受季节的限制，施工速度快，对提高质量、节约材料大有好处。目前在建筑结构中已普遍采用，但装配式结构的接头、构造较为复杂，整体性较差，对抗渗、抗震也不利，而且必须有一定的工厂房屋、起重、装配等机械设备。

装配整体式结构是指结构内有一部分为预制的装配式构件，另一部分为现场浇筑结构。预制部分常可作为现浇部分的模板与支架，它比整体式结构有较高的工业化程度，比装配式结构有较好的整体性。如多层框架式房屋结构，多采用这种结构形式。

3. 按结构在使用荷载作用前的应力状态，结构可分为普通钢筋混凝土结构和预应力钢筋混凝土结构。预应力钢筋混凝土结构是在结构承受使用荷载作用前，预先在混凝土内施加应力，造成人为的应力状态，这些应力可全部或部分地抵消由使用荷载在混凝土中所产生的拉应力。预应力结构的抗裂性能好，承载能力较大，一般多用于跨度较大的结构。

对上述各种钢筋混凝土结构的类型，在具体选用时，应结合使用要求、施工条件及经济效益等因素，通过方案比较后再取舍。

三、钢筋混凝土结构的发展简述

钢筋混凝土在十九世纪中叶出现后，开始被用于建筑上的板、梁、拱及管道等结构。由于当时水泥及钢材的强度较低，而且钢筋混凝土的性能还不够充分了解，所以发展较缓慢。随着生产的发展，经过较长时间的实践和研究，钢筋混凝土已普遍应用于工程建设的各个领域，成为现代应用最广泛的建筑材料之一。

混凝土研究方面 主要是向高强轻质及具备某种特异性能方面发展。目前1025号的高强混凝土已用于工程建设中。各种轻质混凝土,防射线混凝土、聚合物浸渍混凝土、纤维混凝土等的广泛应用,已使大跨、高层以及具备某种特殊性能的钢筋混凝土结构的建造,逐步成为现实。

钢材、水泥生产方面 由于炼钢技术的发展,钢的技术性质,特别是强度有很大的提高。在水泥生产方面,以前水泥标号大多为325~425号,现在已经提高为525~625号,并能生产825~1025号水泥。其他如抗硫酸盐水泥、矾土水泥、大坝水泥等特种性能的水泥,都已广泛应用。由于高强度的钢筋与高标号水泥的应用,在减轻自重节约材料方面效果显著,从而使钢筋混凝土能广泛应用于大跨、重型及高层建筑结构中。

工程应用方面 因为钢材水泥工业的发展,钢筋混凝土强度的提高,由以前简单的板、梁、拱发展到大跨、重型及高层结构。混凝土结构抗拉强度弱、受拉区易发生裂缝,这对结构的承载能力和耐久性不利,限制了钢筋混凝土应用的范围。自预应力钢筋混凝土结构出现后,基本上改善了产生裂缝的问题。目前预应力钢筋混凝土结构除已代替一部分普通钢筋混凝土结构外,有代替一部分钢结构的发展趋势。

钢筋混凝土结构生产工艺方面 以前钢筋混凝土结构,由于施工量小,起重机械能力小,大多在现场浇筑。随着钢筋混凝土的广泛应用,结构设计大多采用定型化、标准化。钢筋混凝土结构可由一些标准构件组成,并可在工厂内大批生产预制,然后运往工地装配。这种工厂化生产的装配式结构,逐渐成为重要的结构形式。

设计理论方面 本世纪三十年代以前,以混凝土作为弹性体的容许应力法,应用于设计计算。但混凝土实际为弹塑性体,当截面应力增大时,其实际应力分布与容许应力法的假定不同。现在很多设计已经不采用这种方法。在本世纪三十年代后期,考虑混凝土材料的弹塑性性能,以结构破坏时的正截面应力分布状态为依据,并由荷载、材料强度的变异及整个结构的工作条件,选定结构承载能力总的安全系数 K 。计算出结构临介破坏时的内力,从而限制在使用荷载作用下所产生的内力不超过破坏时的内力除以安全系数 K ,这就是破坏阶段算法。这种方法能充分利用钢筋及混凝土两种材料的强度,截面应力分布符合实际。在五十年代提出了极限状态算法,此法以结构达到承载能力极限状态及正常使用极限状态为计算分析的依据,并用概率的观点来处理有关数据。当结构达到承载能力极限状态时,其正截面应力图形与破坏阶段法计算的应力图形基本相同,从而计算出临介破坏时的承载能力,用概率的方法求结构的安全可靠度。采用多系数分析,得到单一安全系数 K ,以保证结构的安全可靠。这样,结构安全可靠的概念比较明确。极限状态法比前两种设计计算方法合理。

四、钢筋混凝土结构的优缺点

钢筋混凝土作为建筑材料,除能合理利用钢筋及混凝土的材料力学性能外,还具有下列各项优点:

1. **用料经济** 石子及沙等粗细集料,可就地取材,钢筋水泥用量少,工程造价低。
2. **耐久性及耐火性好** 与钢木结构相比,钢筋混凝土结构耐久性及耐火性好,维修费较省。
3. **整体性好** 现浇整体式钢筋混凝土结构,可作成很大的截面尺寸及具有较高的承载能力。整体性能好,刚度大,有利于抗震及抵抗爆破冲击。

4. 可模(塑)性好 整体式现浇钢筋混凝土可按设计要求作成各种各样的形式和尺寸,特别是外形复杂的大体积结构或空间薄壳结构。对于装配式结构,也可浇制成各种便于灌注、脱模、组装且受力情况良好的各种杆件。

5. 符合于卫生要求 钢筋混凝土结构没有缝隙及空洞,虫类及鼠类难于留存。对医院、学校及民用建筑较适宜。

钢筋混凝土结构也有下述一些缺点,这些缺点在一定条件下,限制了钢筋混凝土结构的应用范围。目前对这些缺点,已有一些改善办法,但完全合理地解决这些缺点,还有待于进一步研究。

1. 自重大 在同样荷载情况下,钢筋混凝土结构较钢结构的自重大,这对大跨、高层建筑及抗震都不利。采用预加应力结构、薄壳结构、轻质混凝土及高强度材料对此有所改进。

2. 抗裂性能差 普通钢筋混凝土结构,混凝土抗拉性能弱。在正常使用荷载作用下,常带裂缝工作,这对结构的承载能力和耐久性能,都有不良影响,采用预应力结构,是改善裂缝的主要办法。

3. 施工受季节气候的限制 在冬季低温情况下,混凝土结构施工必须采取相应的技术措施,且施工时间长。条件可能时,应采用装配式结构。

第二节 钢筋混凝土材料的力学性能

一、混凝土的力学性能

混凝土是由水泥、水、粗细集料按一定配合比拌合而成。水泥与水经过水化作用形成水泥胶浆,并与沙石等粗细集料相粘结、凝结硬化成为整体的混凝土。

混凝土的力学性能是指混凝土在外力作用下抵抗破坏的能力和变形(包括与荷载无关的变形)性能,即混凝土的强度与变形。

混凝土强度包括抗压、抗拉、抗弯、抗剪和粘结强度等。其中抗压强度最大,抗拉强度最小,抗压强度是混凝土的重要力学指标。

混凝土强度值与水泥标号、水泥用量、水灰比等有很大关系。其它如粗细集料性质、级配、施工方法(人工或机械)、养护条件、龄期长短等也有影响。此外,混凝土试件形状、尺寸、试验方法、加载速度等不同,测得的强度数据也不同。因此需要规定一个标准来测定混凝土的强度。

(一) 混凝土抗压强度

1. 混凝土立方体强度(混凝土标号) R

确定混凝土抗压强度所采用的试块形状有圆柱体和立方体。按《铁路桥涵设计规范》(以后简称《桥规》),《钢筋混凝土结构设计规范》(以后简称《TJ10—74》),都以200mm立方体作为混凝土抗压强度的试件。混凝土立方体抗压强度,是按规定的标准制作方法,制成 $200 \times 200 \times 200$ mm的立方体试块,在标准条件下(温度为 $20^{\circ} \pm 3^{\circ}\text{C}$ 。相对湿度在90%以上的潮湿空气中),养护28天,并用规定的试验方法,在压力机上压至破碎时所测得的抗压极限强度值(单位为MPa)。

由混凝土立方体抗压强度的大小,将混凝土分为若干等级,即混凝土的标号。按《桥

规》，混凝土的标号可采用150、200、250、300、350、400、450、500、550及600号。例如标号为200的混凝土，其相应立方体的抗压强度为20MPa。

200号以下的混凝土（不含200号）常用于桥涵基础、墩台身及隧道衬砌。200~400号混凝土（不含400号），常用于普通钢筋混凝土结构。400号以上的混凝土常用于预应力钢筋混凝土结构。

选用混凝土的标号，应以结构的用途、受力情况及施工条件等作为依据，并通过研究分析比较而定。

2. 混凝土抗压极限强度（棱柱体强度） R_a 。

通常，混凝土受压构件的长度（或高）比其横截面尺寸大得多。所以，用棱柱体试件能更好地反映出混凝土的实际抗压能力，这是因为当试件高度增大后，试件上下接触面（在压力机上的接触面）的摩擦力对试件中部的影响逐渐减弱，混凝土抗压极限强度 R_a 随试件高度 h 与宽度 b 之比值变化。但 h/b 的比值不能太大，以免产生附加偏心，降低 R_a 值。

《桥规》对混凝土抗压极限强度 R_a 是采用 $100 \times 100 \times 300\text{mm}$ （或 400mm ）的棱柱体试件，按规定的标准方法制作，在标准条件下养护28天，并用规定的试验方法，在压力机上压至破坏时，所测得的抗压极限强度。

由国内外试验统计分析资料表明 R_a 与 R 大致成直线关系。 R_a 与 R 的比值大多在0.65~0.9之间。考虑到试件尺寸不统一及试件与实际结构受力的差异，《桥规》取

$$R_a = 0.7R \quad (1-1)$$

（二）混凝土抗拉极限强度

《桥规》对混凝土抗拉极限强度 R_t 是采用 $10 \times 10 \times 50\text{cm}$ 的试件，按规定办法制作及养护。其两端沿轴心方向埋设深度为15cm的对中螺纹钢筋（直径为16mm）。由试验机夹紧两端钢筋，使试件受拉，直至断裂，所测得的值即为抗拉极限强度。这种试验方法，一般不容易将拉力对中，对 R_t 量测有影响。目前国内外常用劈裂法来测定 R_t 。这种方法将立方体试件（或平放的圆柱体试件）通过置于试件上的横向垫条，向试件作用一条线荷载，如图1—2，在试件中间的垂直截面上，除垫条附近极小一部分外，将产生均匀的拉应力，它的方向与这个截面（破裂线面）垂直并基本上是均匀分布的。当拉应力达到极限 R_t 时，试件将对半劈裂。根据弹性理论，由式1—2间接量出 R_t 。

$$R_t = \frac{2P}{d\pi l} \quad (1-2)$$

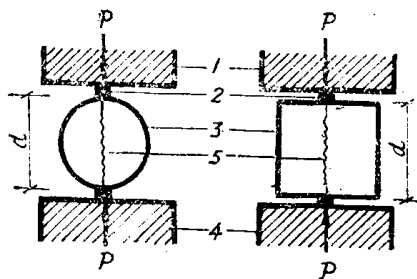
式中 P ——破坏荷载；

d ——立方体边长或圆柱体直径；

l ——圆柱体长度或立方体边长。

由劈裂法量测所得 R_t 值，一般比直接受拉法所测得的值小。试件大小与垫条尺寸对量测结果有一定影响，由于试件与垫条接触处，有应力集中，如垫条太细，应力集中影响更大，其量测值要小些。根据试件尺寸、垫条尺寸， R_t 值应乘以不同的修正系数。

混凝土抗拉极限强度 R_t ，比混凝土立方体抗压强度 R 要小得多， R_t 相当于 R 的 $1/9 \sim 1/18$ 。 R 愈大， R_t/R 的比值愈小。



(a) 用圆柱体进行劈裂试验；(b) 用立方体进行劈裂试验

图1—2 用劈裂法试验混凝土抗拉强度示意
1——压力机上压板；2——垫条；3——试件；
4——压力机下压板；5——试件破裂线。

根据试验资料的统计分析, 结合试验误差等因素, 《桥规》取

$$R_t=0.48R^{\frac{2}{3}}$$

(1-3)

对弯曲抗拉极限强度值,《桥规》确定与轴心抗拉极限强度 R_t 相同。当构件受弯临介破坏时,若用普通材料力学公式 $\sigma=\frac{M}{W}$,计算受拉区下缘混凝土最大拉应力,其值约为 R_t 的1.5~2.0倍。但此值不能说明截面应力分布的实际情况,构件临介破坏时,由于混凝土的塑性变形,其截面应力实际分布为抛物线形,材料力学的上述公式,按直线分布计算,故所得极限强度值偏离较大。

《桥规》中各种标号混凝土的棱柱体强度 R_c 及抗拉强度 R_t 值如表1-1。

混凝土的极限强度 (MPa)

表 1—1

强度 种类	符号	混 凝 土 标 号									
		600	550	500	450	400	350	300	250	200	150
抗压(棱柱体强度)	R_c	42	38.5	35	31.5	28	24.5	21	17.5	14	10.5
抗拉	R_t	3.4	3.2	3.0	2.8	2.6	2.4	2.1	1.9	1.6	1.3

(三) 混凝土抗剪极限强度

1. 直接抗剪极限强度

在结构内某一单元体上只承受有剪应力而无法向应力,此种应力状态称直接抗剪或纯剪,但在混凝土结构中很少有直接受剪的情况。通过试验以求确切的直接抗剪极限强度值是比较困难的。由已有的试验结果表明,混凝土直接抗剪强度极限值约在(0.19~0.23) R_c 之间,一般采用0.2 R_c 。

2. 弯曲抗剪极限强度

梁在竖向荷载作用下,其正截面上除产生正应力外并有竖直剪应力(纯弯段除外)。在单元体的水平面上也有水平剪应力,这些剪应力称为弯曲剪应力。要用精确的试验方法来确定弯曲剪应力的极限强度是很困难的。研究结果表明,混凝土弯曲抗剪的极限强度大于2 R_t 。

(四) 混凝土在复合应力状态下的强度

混凝土抗压、抗拉极限强度是试件在单一轴向压力或拉力作用下所测得的结果,实际结构的受力是比较复杂的。在结构某一单元体的三个相互垂直平面上,常有正应力(主应力)及剪应力作用。当三个面上剪应力都为0时,其它二个面上有正应力,称为双向受力,若三个面上都有正应力,称为三向受力。在此复合应力状态下,可求出混凝土的强度值。目前没有建立完善的破坏强度理论,根据有限的试验结果,得出一些近似的数值,作为计算的依据。因为影响破坏强度的因素很多,试验结果有时很不准确。

1. 双向受力的破坏强度

在两个相互垂直面上的主应力为压应力 σ_1 、 σ_2 ,第三方向的主应力为0,如图1-3。在第三象限内所示的破坏强度曲线,某一个方向上的受压破坏强度随另一方向上压应力的增加而增加。双向受压混凝土的强度要比单向受压强度最多可提高约27%。 R_c 为混凝土单向受压时的极限强度,双向受拉时,如图1-3,在第一象限内所示的曲线,一向抗拉强度基本上与另一向拉应力的的大小无关,即双向受拉时的混凝土强度与单向受拉强度基本一样。当

一向受拉另一向受压时，混凝土的抗压破坏强度随另一向拉应力的增加而减小，混凝土抗拉破坏强度随另一向的压应力增加而减小，如图 1—3 所示。

2. 单向应力及剪应力共同作用下的破坏强度

图 1—4 所示，当有压应力 σ 作用于单元体时，混凝土的抗剪强度 τ 有所提高，但当压应力 σ 增大至某一数后，其抗剪强度 τ 反而有所降低，由于剪应力 τ 的存在，混凝土的抗压极限强度比单轴抗压极限强度低，所以当梁或柱中出现剪应力时，将影响梁或柱中受压区混凝土的抗压强度。

3. 三向受压时的破坏强度

图 1—5 所示，混凝土的一向抗压强度 σ_1 随另两向压应力 σ_2 、 σ_3 的增大而增大，极限应变可以大大提高。

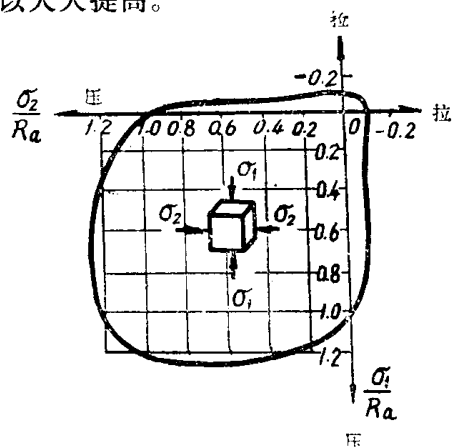


图 1—3 混凝土双向受力的破坏强度

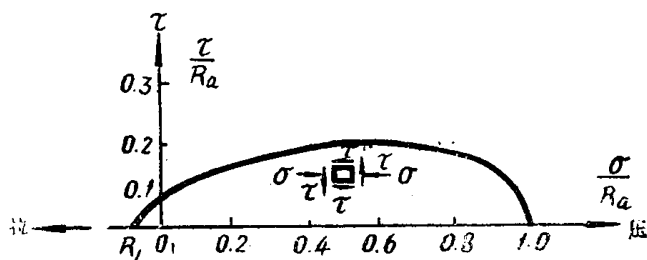


图 1—4 混凝土在单向应力及剪应力共同作用下的破坏强度

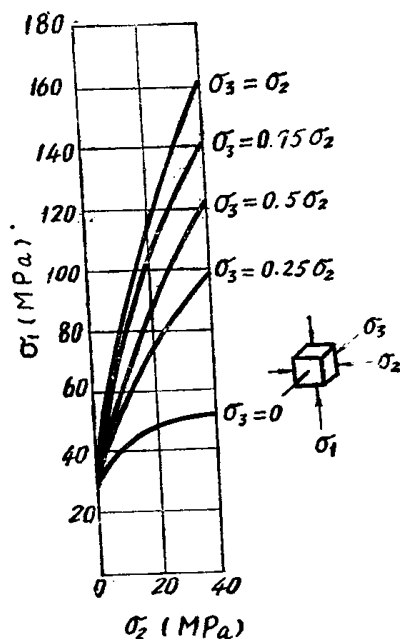


图 1—5 混凝土在三向受压时的破坏强度

(五) 混凝土的变形

混凝土的变形有两种：一是由于荷载作用下引起的变形，另一种是非荷载作用引起的变形。

1. 非荷载作用引起的变形

硬化混凝土的体积，由于所含水分的改变，化学反应，环境湿度（干缩湿胀），温度变化（热胀冷缩）引起混凝土体积收缩或膨胀，这种体积变化，对混凝土结构有不良影响。因为结构在使用过程中，常受有关的部件约束，若混凝土结构发生收缩，必将导致结构内部产生应力，变形过大，将引起结构开裂，承载能力降低，抗渗透性及耐久性也将有所降低，若混凝土结构不受其它部件约束，自由伸缩，它的伸长与缩短不会产生裂缝。

有关试验资料表明，混凝土自由收缩随硬化时间增长而增大。蒸气养护的混凝土，其收缩值比常温养护下的收缩值小。混凝土收缩如图 1—6 所示。

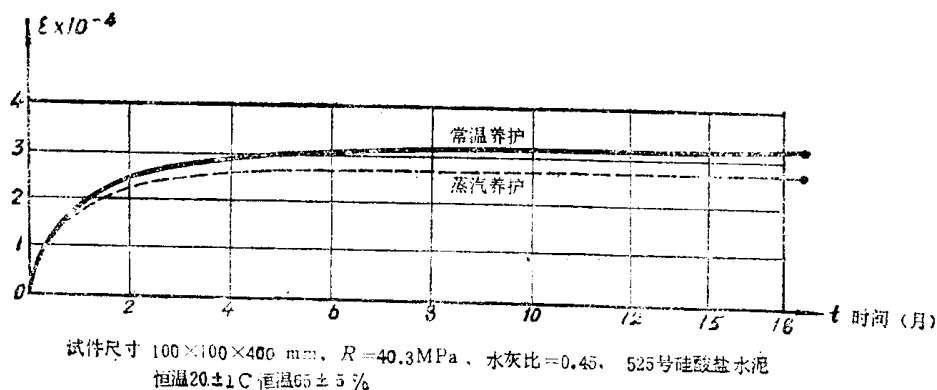


图 1—6 混凝土的收缩

在一般工程设计中, 采用混凝土线性收缩值为 $0.00015 \sim 0.0002$ 。

试验结果表明, 影响混凝土收缩值大小的因素有:

(1) 水泥品种 高标号水泥的混凝土的低标号水泥的混凝土收缩大; 矿渣或火山灰质水泥的混凝土比普通水泥的混凝土收缩大。

(2) 水泥用量 水泥用量多, 水灰比大, 收缩大。

(3) 集料性质 沙子、石子弹性模量大, 收缩小, 沙、石愈洁净, 收缩愈小。

(4) 养护条件 在凝结硬化过程中, 周围温度大, 收缩小; 水中或蒸汽养护, 收缩小。

(5) 制作方法 捣固密实或机械捣固, 收缩小。

(6) 环境湿度 湿度大, 收缩小。

(7) 构件体积与表面积比值 比值大, 收缩小。

混凝土因收缩而能紧握钢筋, 提高钢筋与混凝土间的粘结力。但在预应力结构中, 因混凝土收缩, 使预应力钢筋缩短, 造成预应力损失。有些大体积或纵长的结构物由于混凝土收缩不均, 引起翘曲或开裂。混凝土路面, 挡土墙等, 应每隔一定的距离设置伸缩缝。

2. 混凝土由于荷载作用引起的变形

混凝土通常用于承受压应力, 现着重讨论它在受压时的变形性能。混凝土的受压变形与加载方式及荷载作用持续时间有关。

(1) 混凝土在一次短期加静荷载的变形性能

以混凝土棱柱体试件作一次短期加静荷载的受压试验, 其应力应变曲线如图 1—7。由此图可以看到混凝土受压的破坏过程。

当压应力 σ 小于其极限强度 R_c 的 $0.3 \sim 0.4$ 时, 即图 1—7 所示 a 点以下, 其应力 σ 与应变 ϵ 大致成直线关系。此时混凝土内部界面裂缝及凝胶体内已有的微裂, 无明显变化, 凝胶体粘性流动小, 混凝土变形主要取决于集料及水泥石受压后的弹性变形。

当压应力接近于 $0.5R_c$ 时, 即图 1—7 所示的 b 点, 其应变较应力增长快, σ 与 ϵ 的关系为曲线, 表现出混凝土的塑性性质。此时除凝胶体粘性流动外, 混凝土中已有的微裂(包括界面裂缝)开始扩展。

随着压应力增加, 除已有的微裂扩展外并将产生新的微裂, 应变较应力增加更快。当应力继续增加时, 混凝土中微裂形成贯穿微裂。当应力达到 R_c 时, 混凝土中微裂转变为明显

的纵向裂缝，集料与水泥石间粘结破坏，试件开始出现破坏现象。此时达到的最大压应力 σ_{max} ，称为棱柱体抗压强度 R_a ，如图 1—7 所示的 c 点，其相应的应变为 ϵ_c 。

在一般的材料试验机上进行抗压试验时，当应力达到 R_a 后，试件立即破碎，呈碎性破坏特征，其应力应变曲线如图 1—7 所示的 cd 段。因为一般的材料试验机刚度较小，在加载过程中，其弹性变形较大。当试件应力达到 R_a 后，试件应力减小，试验机因荷载减小而很快回弹变形，使试件受到试验机的冲击而急速破坏。若试验机刚度较大，在加载过程中，弹性变形小，其回弹变形得以控制，试件不致立即破坏。随着试验机缓慢地卸载，试件还能承受一定的荷载。应力逐渐减小而应变却持续增加直至试件破碎，如图 1—7 上的 d' 点。相应于曲线末端的应变，称为混凝土的极限应变 ϵ_{max} 。此 ϵ_{max} 愈大，表示混凝土塑性变形的能力越大。

上面讲述的是混凝土受压的破坏过程，普通混凝土所用集料的强度一般高于硬化水泥浆的强度，混凝土的抗压强度主要决定于硬化水泥浆的强度及其与集料间的粘结强度。

影响混凝土应力应变曲线形状的因素较多，如混凝土标号较低时，曲线比较平坦，其 ϵ_{max} 较大。标号较高时，曲线上升段及下降段较陡， ϵ_{max} 较小，如图 1—8。由此说明低标号混凝土受压时，其延性比高标号混凝土好。

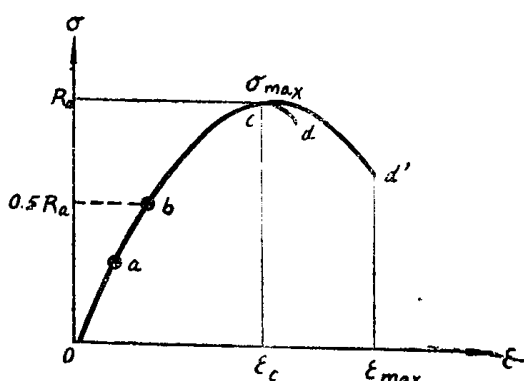


图 1—7 混凝土在一次短期加载的应力应变曲线

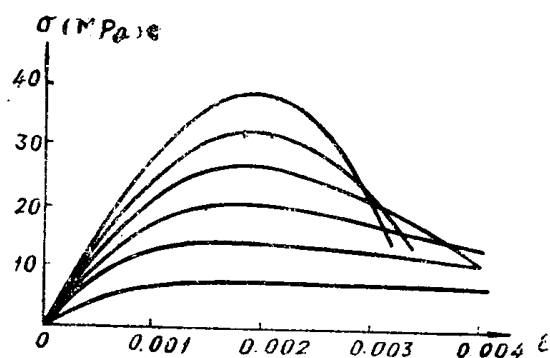


图 1—8 不同标号混凝土的应力应变曲线

同一标号的混凝土，当加载速度比较快时（即应变速度较快），最大应力值较大，相应的应变值较小。当加载速度缓慢时，最大应力值逐渐减小，相应的应变值较大。由于混凝土徐变的影响，其应力应变曲线下降段比较平缓，如图 1—9。

在混凝土试件侧向受到制约不能自由变形时，如在混凝土四周配置较密的箍筋，其应力应变下降段还可有较大的延伸， ϵ_{max} 增大较多。

由混凝土受压后的变形性能可知，混凝土并不是完全的弹性材料，而是一种弹塑性材料。如图 1—10 是混凝土一次加载卸载的应力应变曲线。当试件受压时，应力由 O 增至 A 点，应力应变曲线为 OA 。逐渐卸载，其瞬时应力应变曲线为 AB 。 ϵ'_e 为瞬时恢复应变，其后 B 点还可逐渐恢复到 B' 。 BB' 为弹性后效 ϵ''_e 。 OB' 为残余应变 ϵ'_r ，图 1—10 中的 ϵ_h 为加载由 O 至 A 时， A 点的应变。

由图 1—10 可知混凝土受压后，既产生可以恢复的弹性应变 ($\epsilon'_e + \epsilon''_e$)，又产生不可恢复的残余应变 ϵ'_r （或称塑性应变），其应力应变的比值随应力增加而减小，不完全符合虎克定律。

在图 1—7 的应力应变曲线上，其最大压应力值 R_a ，与此相应的应变值为 ϵ_c （约为 $0.0015 \sim 0.002$ ），以及临介破坏时的极限应变值 ϵ_{max} （约为 $0.002 \sim 0.006$ ，有时可至 0.008 ），

称为混凝土受压的三个特征值。

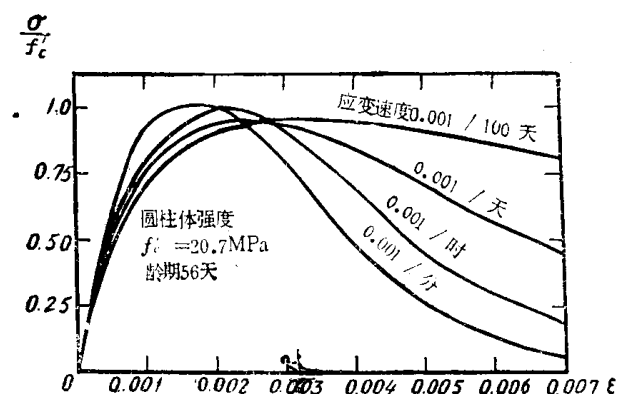


图 1—9 用各种应变速度的混凝土受压应力应变曲线

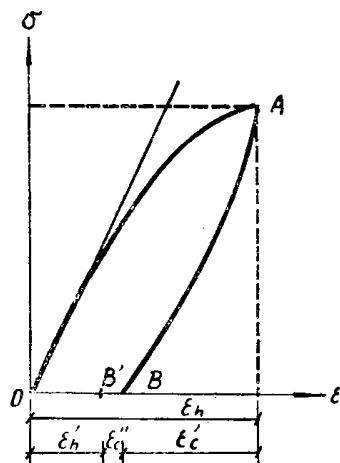


图 1—10 混凝土一次加载卸载的应力应变曲线

在钢筋混凝土学科中，一些设计计算理论分析，大多涉及应力应变关系。如在破坏阶段法计算中，对轴心受压构件，当压应力达到 R_c 时，构件将破坏，但应变还未达到极限值，而结构不能再负担更大的荷载，对受弯或偏心受压构件，受压区为非均匀受压，外缘纤维应力达到 R_c 时，其相应的应变未达极限值，此时结构还能承受更大的荷载，不会立即破坏。因为外缘纤维将最大应力给附近的纤维，使其应力减小。但当外缘纤维应变达到极限值时，结构破坏。在上述的结构设计计算时，常需明确混凝土的应变值，计算出钢筋应力及截面应力分布图形，从而得出结构的抗力。

由偏心受压构件试验表明，受压区外缘的极限应变值随外力偏心距增大而增大，其应变值在 $3 \times 10^{-3} \sim 4 \times 10^{-3}$ 之间，另外受压区外缘的极限应变还与配筋数量有关。

混凝土受拉时的应力应变曲线与受压曲线相似。但其弯曲程度不同，受拉时，弯曲程度小而突陡，其曲线顶点强度为抗拉极限强度 R_t 。在受拉极限强度的50%范围内的应力，其应力应变关系可以认为是一直线，受拉的极限应变值很小，相当于受压极限应变值的 $\frac{1}{15} \sim \frac{1}{20}$ ，一般设计计算时可取 1×10^{-4} 。

抗拉极限应变随抗拉强度增大而增大，影响极限拉应变的因素较多，如潮湿养护的混凝土比干燥存放的大20~50%；高标号水泥制作的混凝土极限拉应变较大；水泥用量不变但水灰比增大者极限拉应变小；用低弹性模量集料的混凝土或碎石粗砂拌制的混凝土极限抗拉应变也较大。

混凝土的弹性模量，在计算结构内力、温度应力等常近似地假定混凝土为弹性体，利用其弹性模量进行内力计算。但混凝土实际为弹塑性体，其应力应变关系为一曲线，应力与应变的比值随应力增加而减小。

混凝土应力应变曲线形状与标号及试验方法等因素不同而不同。同样，弹性模量也因标号及试验方法等因素不同而有不同的数值。目前各国对弹性模量测定方法还没有统一的标准，不同的规范有不同的数值。在一次短期加载应力应变曲线上的一部分，如图1—11所示，受压弹性模量有下列三种表示方法。

① 初始弹性模量（或称原点弹性模量） E_0 。

在应力应变曲线的原点O，作曲线的切线，此切线与坐标横轴的夹角 α_0 的正切值，即为初始弹性模量 E_0 。

$$E_0 = \operatorname{tg} \alpha_0$$

② 割线弹性模量 (或称变形模量) E_h

由应力应变曲线的原点 O ，至某一点应力 σ_1 处的割线，此割线与坐标横轴的夹角 α_1 的正切值，即为该 σ_1 处的割线弹性模量 E_h 。

$$E_h = \operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1}$$

③ 切线弹性模量 E_s

在曲线某一点应力 σ_1 处作一切线，其应力增量 $d\sigma_1$ 与应变增量 $d\varepsilon_1$ 之比值，即为应力 σ_1 处的切线弹性模量 E_s 。

$$E_s = \frac{d\sigma_1}{d\varepsilon_1} = \operatorname{tg} \alpha_2$$

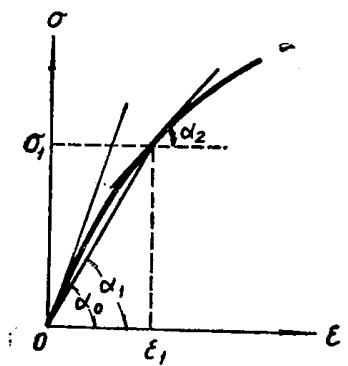


图 1—11 混凝土受压弹性模量

式中， α_2 为切线与坐标横轴的夹角。

由各种不同立方体强度的混凝土，分别由试验求出其弹性模量，再通过回归分析，求出弹性模量 E_h 与立方体强度 R 间的关系式为：

$$E_h = \frac{10^8}{2.2 + \frac{330}{R}} \quad (\text{MPa})$$

《桥规》所确定的受压弹性模量 E_h 值，是采取应力为 $0.5R_s$ 的割线模量。根据 635 个试验资料，按回归分析求出混凝土立方体强度 R 与 E_h 间的关系式为：

$$E_h = \frac{10^8}{2.3 + \frac{275}{R}}$$

《桥规》对各种标号混凝土的受压弹性模量 E_h 值的规定如表 1—2。

混凝土的受压弹模量 (GPa)

表 1—2

混凝土标号	600	550	500	450	400
弹性模量 E_h	36	35.5	35	34	33
混凝土标号	350	300	250	200	150
弹性模量 E_h	32	31	29	27	24

由试验证明，混凝土受拉弹性模量与受压弹性模量很接近，在设计计算时，可采用同一数值。

(2) 混凝土在重复荷载下的变形性能

将混凝土棱柱体试件，在多次重复荷载作用下，其应力应变曲线与一次短期加载的应力应变曲线有显著的不同。对于一次短期加载卸载时的应力应变曲线如图 1—10 所示，加载时其曲线凸向应力轴，如 OA ，由 A 点卸载至应力为 0 时，其曲线凹向应力轴如 AB ，应力应变曲线成一环状。由于混凝土为弹塑性材料，在这次加载卸载过程中，产生了不能恢复的残余变形。

取试件应力 σ_1 ，小于 $0.5R_s$ ，如图 1—12，作重复荷载试验。随着加载卸载重复次数的增加，每一次循环所产生的残余变形将逐渐减小，直至加载卸载的应力应变曲线成一直线，如图 1—12 上的 CD 。以后再多次重复加载卸载，其应力应变仍为此一直线关系。此时