

高等学校试用教材

结构设计原理

黄 棠 周其刚 主编

中国铁道出版社

1986年·北京

前 言

本书包括钢筋混凝土结构和钢结构两部分，是铁道工程专业结构设计原理课程的教学用书。书中第一篇介绍了钢筋混凝土结构、预应力混凝土结构及少筋混凝土结构构件的计算原理，列举各种计算实例并附有计算用的图表。第二篇介绍了钢结构各种基本构件及连接的计算原理，并列举了计算实例。

在编写中所采用的公式及有关数据，主要参考我国各部委有关规范，其中主要的有：

（1）铁路工程技术规范第二篇桥涵（人民铁道出版社 1975 年），简称《桥规》。

（2）钢筋混凝土结构设计规范 TJ10—74（中国建筑工业出版社 1974 年），简称 TJ10—74。

（3）钢结构设计规范 TJ17—74（中国建筑工业出版社 1975 年），简称 TJ17—74。

由于篇幅所限，本书中未包括混凝土结构、砖石结构及木结构。

参加编写本书第一篇的有兰州铁道学院廖鼎烈、查少君、吕平、徐若昌，长沙铁道学院卢树圣、林丕文，西南交通大学黄棠、王效通、周其刚。编写第二篇的有兰州铁道学院黄剑源、余传禧，长沙铁道学院曾庆元，西南交通大学黄棠。本书由西南交通大学黄棠、周其刚担任主编；北方交通大学担任主审，参加审稿工作的有钟用达、马宝华、陈维纯、汪美云。上海铁道学院、铁道兵工程学院也参加了审稿工作。全书最后由西南交通大学黄棠、王效通、周其刚、庞文焕修改定稿。

内 容 简 介

本书是高等院校铁道工程专业教材。

全书分两篇，每篇均包括设计原理及算例。第一篇钢筋混凝土结构部分，第一至七章介绍钢筋混凝土结构构件设计；第八章为预应力混凝土结构设计；第九章为少筋混凝土设计。第二篇钢结构部分，第十至十二章介绍钢结构的连接、檩杆件设计；第十三章为钢梁设计。

高等学校试用教材

结构设计原理

黄 棠 周其刚主编

中国铁道出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092毫米 1/32 印张：21 字数：523 千

1980年11月第1版 1986年4月第4次印刷

印数：25,501—31,500册 定价：3.30元

目 录

第一篇 钢筋混凝土结构

第一章 钢筋混凝土的基本知识	1
1—1 钢筋混凝土基本概念	1
1—2 钢筋混凝土结构发展简述	1
1—3 钢筋混凝土结构的优缺点及其在工程结构中的应用	2
1—4 钢筋混凝土材料的力学性能	3
第二章 受弯构件抗弯强度计算	8
2—1 受弯构件的应力阶段及几种计算方法	8
2—2 钢筋混凝土梁式板和单跨梁的构造	10
2—3 抗弯强度计算的基本原理	12
2—4 单筋矩形梁	14
2—5 双筋矩形梁	23
2—6 T形梁	27
第三章 受弯构件抗剪强度计算	36
3—1 钢筋混凝土梁中的剪应力和主拉应力	36
3—2 箍筋和斜筋的设计	39
3—3 T形梁中翼板和梁肋连接处的剪应力	47
第四章 受弯构件裂缝宽度和挠度的计算	48
4—1 裂缝的基本知识	48
4—2 裂缝宽度的计算	48
4—3 改善裂缝的措施	54
4—4 受弯构件挠度的计算	54
第五章 轴心受压构件	56
5—1 概述	56
5—2 轴心受压构件的截面应力状态	56
5—3 箍筋柱的构造与计算	57
5—4 旋筋柱的构造与计算	60
第六章 偏心受压构件	62
6—1 概述	62
6—2 两种偏心受压	63
6—3 纵向弯曲的考虑	65
6—4 小偏心受压构件的计算	66
6—5 大偏心受压构件的计算	69

6—6	偏心受压构件主拉应力的计算	87
-----	---------------	----

第七章	按极限状态计算法	89
-----	----------	----

7—1	概述	89
-----	----	----

7—2	钢筋混凝土结构的计算方法	90
-----	--------------	----

7—3	受弯构件抗弯强度计算	95
-----	------------	----

7—4	受弯构件抗剪强度计算	104
-----	------------	-----

7—5	偏心受压构件的计算	114
-----	-----------	-----

7—6	关于安全度问题的介绍	118
-----	------------	-----

第八章	预应力混凝土结构	125
-----	----------	-----

8—1	概述	125
-----	----	-----

8—2	预应力混凝土的材料	128
-----	-----------	-----

8—3	预应力混凝土梁施工工艺	131
-----	-------------	-----

8—4	预应力损失的估算	135
-----	----------	-----

8—5	预应力混凝土受弯构件在弹性阶段中正应力的计算	145
-----	------------------------	-----

8—6	预应力混凝土受弯构件正截面抗裂性计算	154
-----	--------------------	-----

8—7	预应力混凝土受弯构件的抗弯计算(强度计算)	157
-----	-----------------------	-----

8—8	预应力混凝土受弯构件的抗剪强度计算	161
-----	-------------------	-----

8—9	预应力混凝土受弯构件设计步骤	168
-----	----------------	-----

8—10	先张法预应力混凝土梁算例	168
------	--------------	-----

8—11	锚下局部应力	188
------	--------	-----

第九章	少筋混凝土结构	191
-----	---------	-----

9—1	概述	191
-----	----	-----

9—2	少筋混凝土结构的受力特征及计算原理	191
-----	-------------------	-----

9—3	少筋混凝土结构的计算方法	195
-----	--------------	-----

第二篇 钢 结 构

第十章	钢结构概论	204
-----	-------	-----

10—1	引言	204
------	----	-----

10—2	钢结构的优缺点及应用范围	205
------	--------------	-----

10—3	钢的工作性能	206
------	--------	-----

10—4	钢的标号、钢材及钢材的选择	212
------	---------------	-----

10—5	钢材的容许应力	217
------	---------	-----

10—6	钢的疲劳问题	219
------	--------	-----

第十一章	连接	224
------	----	-----

11—1	焊接	224
------	----	-----

11—2	机械连接	235
------	------	-----

第十二章	桁架杆件设计	258
------	--------	-----

12—1	桁架概说	258
------	------	-----

12—2	受拉杆件	264
------	------	-----

12—3	中心受压实体杆件	268
------	----------	-----

12—4	格构式中心受压构件	281
12—5	受拉兼受压杆件	288
12—6	拉弯杆件	291
12—7	压弯杆件	292
第十三章	钢梁设计	298
13—1	板梁的截面设计	298
13—2	钢梁的稳定问题和加劲肋	307
13—3	板梁拼接简介	320
13—4	箱形钢梁计算原理简介	322

第一篇 钢筋混凝土结构

第一章 钢筋混凝土的基本知识

1—1 钢筋混凝土基本概念

混凝土是一种抗压强度高而抗拉强度极低的材料，受拉时容易开裂。钢筋是抗拉性很好的材料。梁受荷载后（图 1—1），在梁的上面产生压应力，下面产生拉应力。若在梁中混凝土受拉的区域内配置钢筋承受拉力，可以充分利用混凝土的抗压强度。这种在混凝土中配有钢筋的梁叫做钢筋混凝土梁。

钢筋和混凝土是两种力学性质差异很大的材料，要使它们能联系起来并能共同工作，必须有一定的条件。这个必要的条件就是钢筋与混凝土间有相当大的粘结力。如果粘结力遭到破坏，钢筋和混凝土就不能继续共同工作了。

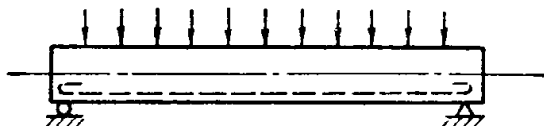


图 1—1

混凝土浇注后，随着它的凝结和硬化，体积略有收缩，所以只要在浇注时充分捣实，混凝土就能把钢筋紧紧地握裹住而使接触面上存在粘结力。当钢筋端部做成弯钩时则粘结力更大。使用表面凹凸不平的钢筋（如螺纹钢筋）时，粘结力能有效地增加。

在一般温度范围内，钢筋和混凝土的线膨胀系数大致相同：钢的线膨胀系数为 1.2×10^{-5} ，混凝土的线膨胀系数为 $1.0 \times 10^{-5} \sim 1.4 \times 10^{-5}$ 。因此，当温度变化时，钢筋与混凝土将大致同样伸缩，在钢筋混凝土梁中两者不会因接触面上粘结力的破坏而引起相对滑动。

混凝土包住钢筋后，钢筋因有良好的保护层而不致锈蚀，所以粘结力可以长期保持，使钢筋混凝土结构有良好的耐久性。但应注意，混凝土的保护层不够厚或不够密实时，钢筋可能生锈变成氧化铁，这种变化伴随着相当大的体积膨胀，常常将混凝土胀裂而引起更严重的锈蚀，使钢筋混凝土结构的承载能力和耐久性都大大降低。

从试验和研究旧有的钢筋混凝土结构物，证明适当密而足够厚度之混凝土保护层，能防止钢筋锈蚀，使钢筋和混凝土能很好地共同工作。

1—2 钢筋混凝土结构发展简述

钢筋混凝土结构与其他材料（石、木、钢）制造的结构比起来，是一种较新型的结构。

十九世纪中叶，钢筋混凝土结构开始出现，二十世纪初，很多国家都通过试验制定了本国的钢筋混凝土结构设计规范。

本世纪三十年代以来，钢筋混凝土结构发展很快，在计算理论方面，由于按容许应力法计算不能反映钢筋混凝土结构破坏前的实际工作情况，一些科学技术较发达的国家都根据实验资料改用考虑塑性变形的计算方法。在材料生产方面，混凝土工艺和炼钢技术均有很大发展的情况下，为合理利用高强度材料，目前已广泛采用预应力混凝土结构。工业化制作的装配式钢筋混凝土结构逐渐成为重要的结构形式。

我国在解放后建造了大量钢筋混凝土结构，从设计到施工均积累了丰富的经验。并在设计理论方面，根据我国的实践经验和试验研究的成果，制定了我国自己的设计规范。

1—3 钢筋混凝土结构的优缺点及其 在工程结构中的应用

一、作为制造结构的建筑材料，钢筋混凝土主要具有下列优点：

材料经济 需用的钢和水泥数量不大，砂石则可就地取材；材料来源和运输问题较易解决，结构造价较低。

耐久性 与钢木结构相比，钢筋混凝土结构更耐久，而且维修费用极小。对于露置野外的桥涵工程来说，这一点很重要。

耐火性 在火灾中钢结构会丧失承载能力，引起整个建筑物的倒塌；而钢筋混凝土结构则能经受几个小时的烈火烧灼而仍有承载能力，只是外表一层混凝土被烧坏而需修补，对于有短期内遭受火烧可能的结构来说，这一点是必要的。但一般钢筋混凝土结构不能长期经受 200°C 以上的高温；在这种情况下需设石棉或钢板的防火层，并要用耐热的骨料来制作混凝土。

能较好地满足使用要求 可以制成尺寸很大承载能力很高的结构；不象木结构那样，受天然生成材料的限制。结构的整体性、刚度和抗震性也比较好。

可模(塑)性好 整体式钢筋混凝土可以浇成各种不规则的形状，或是留出孔眼，以满足特殊要求。装配式钢筋混凝土构件也可以浇制成各种便于浇注和便于脱模而且受力性能好的形状。

二、钢筋混凝土有下列几项缺点，采用时需注意或避免：

自重大 和钢木结构相比较，钢筋混凝土结构比较笨重，故跨度大到一定程度之后，常需改用钢结构。采用预应力混凝土和高强材料，可以在这方面有相当大的改进。

需用一定数量的木材和钢料 建造钢筋混凝土结构时，其模板或支架要消耗很多木料。钢筋的重量虽不很大，但在目前钢材产量还不十分充足的情况下，有时宜考虑砖石而不用钢筋混凝土。

检查、加固、拆除都比较困难 建成的钢筋混凝土结构如果有了问题，往往难以处理。最好设计之初对此有所估计。

此外，整体式钢筋混凝土的施工要受季节的限制，而且在模板中养护时间长，影响建造的速度。装配式钢筋混凝土则需有一定数量的施工机具方能顺利施工，因此，它是否经济合算须仔细比较方能确定。

三、钢筋混凝土的应用范围极广。各种工厂房屋、仓库、公共建筑、水池、水塔、桥梁、沉箱基础、挡土墙、轨枕、隧道衬砌、电杆等均可用钢筋混凝土建造。居住房屋中的楼板和屋盖也多用钢筋混凝土结构。我国目前钢材需力求节约，通常可用钢筋混凝土结构解决问题时即不宜采用钢结构，采用砖石结构能解决问题时则不宜采用钢筋混凝土结构。

钢筋混凝土结构可以是整体式的或装配式的，它们的应用范围也不相同。形状不规则的结构及难以分割的大型结构（水池、重型设备机座等），在刚度方面要求较高的结构，均采用整体式。当结构形状规则，可由若干标准构件拼组而成时，宜采用装配式。近年来建筑工业化是主要发展方向，装配式结构发展得比较快，结构选型中一般尽量采用装配式，但在若干

场合中仍非用整体式结构不可，在另外一些场合中（例如可用移动式模板施工时）则采用整体式结构并没有多费木料等缺点，因而可能是经济合理的。在多层房屋等结构中采用装配整体式，可以节约支架和模板而又保证刚度要求，比较合适。具体选定结构类型时，应考虑使用要求和经济效果，必要时并须进行方案比较。

1—4 钢筋混凝土材料的力学性能

一、混凝土

混凝土的抗压强度很大，而抗拉和抗剪强度都很小，因而它在工程中主要承受压力。下面重点讨论抗压强度。

（一）抗压强度

抗压强度又分立方体和棱柱体抗压强度两种。

1. 立方体抗压强度 R （标号）：它是根据标准立方体的试件（ $20 \times 20 \times 20\text{cm}$ ）在标准条件下（温度 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ ，相对湿度在90%以上）养护至28天后，在压力机上压至破坏时所得的强度极限。根据立方体强度的大小，将混凝土分为若干等级，这种等级称为标号，用 R 表示。在铁路工程中，混凝土常用的标号为 150、200、250、300、400、500 和 600 号。其中 200 号以下的常用于基础、墩台和衬砌等结构，200~400 号常用于普通混凝土结构，400~600 号的则用于预应力混凝土结构。

2. 棱柱体抗压强度：它是根据高宽比 3~4 的棱柱体试件所测定的强度极限，用 R_c 表示。棱柱体强度是设计上制订各项计算强度的依据，一般来说 $R_c = (0.7 \sim 0.8R)$ ，《桥规》中采用 $R_c = 0.7R$ 。

3. 局部承压强度：在桥梁支座处，集中作用的荷载仅压在混凝土的部分表面上，这种受力情况称为局部承压。试验指出，按直接承压面积算出来的混凝土抗压强度大于全部表面布满荷载时的抗压强度即棱柱抗压强度，这是因为不直接承压的部分起套箍的作用，能提高直接受力部分的强度。试验结果得出，当承压部分的混凝土厚度大于底面积 A 的短边尺寸时，局部承压强度可由下式求得：

$$R_{c-1} = R_c \sqrt{\frac{A}{A_c}} \tag{1-1}$$

式中 R_c ——棱柱体抗压强度；
 A_c ——局部承压的混凝土面积；
 A ——局部承压时的计算底面积，一般是形心与 A_c 重合而有一边或两边以端面边缘为界（见图 1—2）。《桥规》中有详细规定。

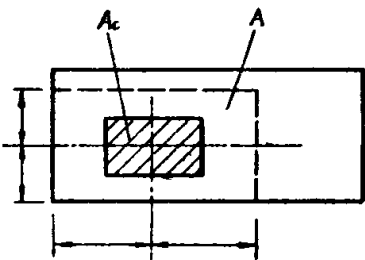


图 1—2

（二）抗拉强度

混凝土抗拉的强度很低，一般只有立方体抗压强度的 $1/6 \sim 1/20$ 。因此，只是在验算某些构件的抗裂性时，才会用到混凝土的抗拉强度值，根据试验与统计分析结果，混凝土抗拉强度 R_t 与标称 R 之间的关系：

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

《桥规》中各种标号混凝土的棱柱体强度和抗拉强度值如表 1—1 所示。

混凝土的极限强度

表 1—1

强 度 种 类	符 号	混 凝 土 标 号						
		600	500	400	300	250	200	150
抗压 (棱柱体强度)	R_c	420	350	280	210	175	140	105
抗 拉	R_t	34	30	26	21	19	16	13

(三) 抗剪强度

钢筋混凝土结构中很少有混凝土直接受剪的情况。常见的情况是梁中或偏心受压构件中，正应力和剪应力同时存在。

用精确的试验决定混凝土的抗剪强度是非常困难的。研究结果指出，混凝土弯曲受剪的抗剪强度大于 $2R_t$ ，而直接受剪时的抗剪强度还要更大。

(四) 疲劳强度

试验指出，在多次重复荷载作用下，混凝土中的最大应力值虽小于棱柱体强度，亦能引起破坏，这个最大应力值称为与破坏前应力循环次数相对应的混凝土疲劳强度。一般工程结构的疲劳问题是按 2×10^6 次考虑的，与此相应的疲劳强度可采用 $0.5R_c$ 。在铁路桥梁设计中，对混凝土受压采用的安全系数通常接近于2.5，故实际工作应力低于混凝土的疲劳强度，而不致引起危险。

(五) 混凝土的变形

混凝土的变形分两种：一种是与荷载无关的变形——混凝土本身的收缩或膨胀，它取决于周围环境的温度和湿度；另一种是荷载作用下的变形，包括弹性变形和塑性变形。

1. 混凝土的收缩 混凝土在硬化过程中，以及在干湿变化和温度变化时，都会出现体积变化。这种变化主要表现为湿胀干缩、热胀冷缩以及硬化过程的收缩。

混凝土产生收缩，主要由于水泥中凝胶体逐渐干燥引起的。凝胶体干燥一方面是由于水份不断蒸发，另一方面由于水分不断深入到水泥颗粒内部与水泥起水化作用。因此，混凝土的收缩与硬化时间、环境的湿度和温度、水泥品种、水泥用量和用水量等因素有关。试验表明：混凝土在硬化初期收缩大，后期收缩缓慢，经过一段时间逐渐趋于稳定，如图 1—3 所示。

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；高标号水泥比低标号水泥的混凝土收缩大；水泥用量多或用水量大的混凝土，其收缩量也大。

另一方面，混凝土养护得好，硬化时湿度大，则收缩量较小。因此，加强养护对减小收缩防止开裂具有重要的意义。

混凝土的收缩有利裹紧钢筋，能提高混凝土与钢筋的粘结力。但在预应力混凝土中，由于混凝土的收缩会造成钢筋中预应力的损失，故混凝土的水泥用量和水灰比不宜过大。有些构件由于内外收缩差别大，会引起翘曲或开裂，所以对纵向延伸很长的结构物如挡土墙，路面等，每隔一定距离就要设置伸缩缝。

在工程设计计算中，通常采用的混凝土线收缩值为0.00015即每米收缩0.15毫米。

2. 混凝土在短期荷载作用下的变形性能 混凝土通常用来受压，我们着重研究它受压

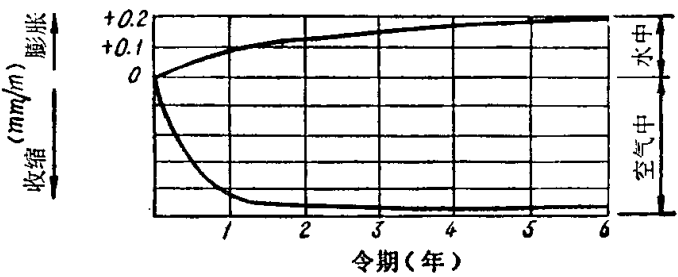


图 1—3 混凝土的膨胀与收缩

时的变形性能。试验表明，在短期荷载作用下，混凝土的应力—应变（ $\sigma-\epsilon$ ）曲线如图 1—4 所示。

由图可知，加载开始 $\sigma-\epsilon$ 图就呈曲线形，表明变形中有弹性变形 ϵ_e 和塑性变形 ϵ_p 。塑性变形部分随加荷速度的减小或随荷载作用时间的延长而增大。增快加荷速度，则塑性变形减小，加荷速度极快时，则塑性变形来不及产生， $\sigma-\epsilon$ 图成一直线，如图 1—4 中 OA 线。

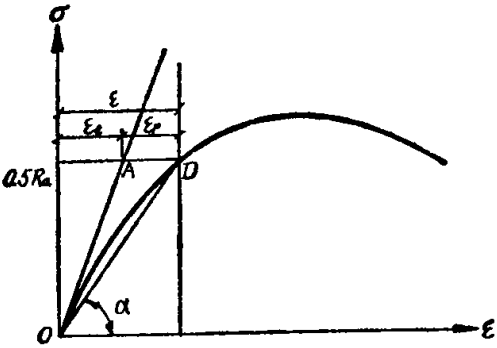


图 1—4 混凝土的 $\sigma-\epsilon$ 曲线

由于混凝土应力与应变不成直线关系，其弹性模量 E_k 不为常数，而是随着应力的增加而减小。《桥规》中规定混凝土的受压弹性模量，是以 $\sigma=0.5R_k$ 处（即图 1—4 中的 D 点）的 E_k 为准，此时 $E_k=\text{tg}\alpha$ ，相当于 OD 割线的斜率，故称割线模量。

混凝土的割线模量与其标号有关，根据试验与统计分析结果，有如下的关系：

$$E_k=\frac{1,000,000}{2.3+\frac{275}{R}}$$

《桥规》给出不同标号混凝土的受压弹性模量如表 1—2 所示。

混凝土的受压弹性模量 (kg/cm ²)							表 1—2
标 号 R	600	500	400	300	250	200	150
E_k	3.6×10^5	3.5×10^5	3.3×10^5	3.1×10^5	2.9×10^5	2.7×10^5	2.4×10^5

混凝土加载至破坏时的纵向变形称为极限变形。混凝土受压的极限变形值常在 0.002~0.004 的范围取用。

混凝土受拉时的极限变形很小，仅相当于受压极限变形的 1/15~1/20，其平均值可取 0.0001。

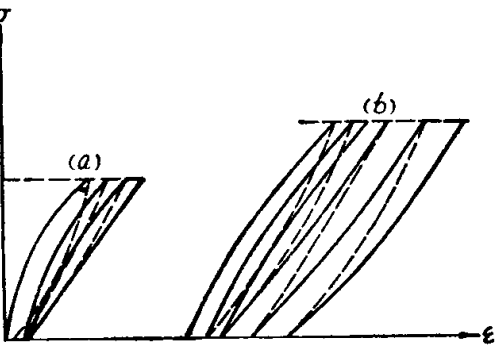


图 1—5 重复荷载作用下的 $\sigma-\epsilon$ 曲线

3. 混凝土在重复荷载作用下的变形性能

荷载的重复作用会引起 $\sigma-\epsilon$ 曲线的重大变化。若混凝土的应力不超过 $0.5R_k$ ，则 $\sigma-\epsilon$ 曲线如图 1—5 a 所示。加载时曲线成凸形，卸载时则成凹形。随着循环次数的增多，则曲线愈接近直线。若混凝土的应力超过 $0.5R_k$ ，则循环达若干次后， $\sigma-\epsilon$ 曲线转为凹形，如图 1—5 b 所示。此时混凝土开始疲劳，并最后导致破坏。

4. 混凝土的徐变 由前可知，混凝土受压时的塑性变形将随应力的增大而增加。如果混凝土在荷载长期作用下保持应力不变，则其塑性变形将随着荷载作用时间延长而不断增加，这种现象称为徐变。

混凝土发生徐变的原因很复杂，它与水泥中的残留水分和凝胶体在混凝土受力时缓慢地在孔隙中流动有关。

当应力不大时，徐变与荷载作用时间的关系如图 1—6 所示。由图可知，开始时徐变增长较快，以后逐渐减慢，经数年后逐渐趋于稳定。

混凝土的徐变与很多因素有关，其中主要的是：应力愈大徐变愈大；硬化初期徐变量大，以后随着龄期延长逐渐减小；水泥用量多，则徐变大；用水量愈多（或水灰比愈大），则徐变也愈大；硬化时的湿度愈小，徐变愈大。

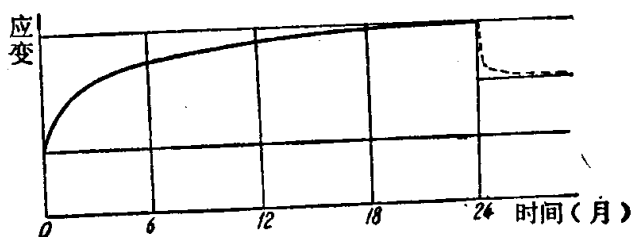


图 1—6 徐变与荷载作用时间的关系

混凝土的徐变量一般可达 $3-15 \times 10^{-4}$ ，即每米为 0.3~1.5 毫米。

混凝土的徐变通常会引起钢筋混凝土结构中应力的重分布，使钢筋中的应力增加，混凝土中的应力减少。在预应力混凝土中徐变会造成预应力损失，应当注意。

为了减少徐变引起的不利影响，在设计中应避免在长期荷载作用下出现过高的压应力；在施工中尽量避免过早承受荷载；加强震捣和养护；尽可能降低水灰比；在满足设计标号的前提下，采取措施减少水泥用量等等。

二、钢筋

（一）软钢的力学性能

铁路工程中所用的钢筋一般为 A3、A5 及 16Mn，它们都属于软钢。软钢的主要特点是 σ — ϵ 图上有明显的屈伏台阶。应力较小时工作是弹性的，弹性模量值是 2.1×10^6 公斤/厘米²，应力超过比例极限后，钢开始表现塑性， σ — ϵ 图不再是直线。此后不久就到达屈伏点，在不变的应力作用下，应变一直可以增大到 0.02 以上。应变继续增大，则钢进入自强阶段，应力又上升，最后达到强度极限，试件发生颈缩而断裂。图 1—7 中的曲线 OCH 即为软钢的 σ — ϵ 图。

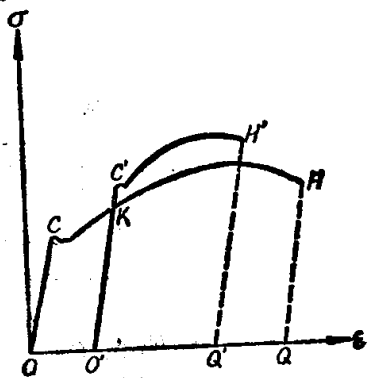


图 1—7

图 1—7 中的曲线 OCH 即为软钢的 σ — ϵ 图。

（二）各种冷加工及其对钢筋性能的影响

1. 冷拉 把钢筋在不加热的情况下拉得应力超过屈伏点，例如拉到图 1—7 中的 K 点，然后放松。卸荷线 KO' 平行于 CO 而残留永久变形 OO'。此后如立即再加载，所得 σ — ϵ 曲线为 O'KH。通常是放松后经过相当时间再重新加载，则所得到的 σ — ϵ 曲线如图 1—7 中的 O'C'H'。这表明，不仅屈伏点提高，而且强度极限也提高了，但塑性和韧性则相应降低。这种经过冷加工后，钢材的强度极限和屈伏点随着时间的延长而增大，塑性和韧性随着时间的延长而降低的现象，称为时效。

2. 冷拔 钢筋不加热而通过硬质合金钢模中比钢筋直径略小的孔眼拉出，迫使钢筋截面减小，称为冷拔。冷拔之后，钢筋的性能变得接近硬钢；屈伏台阶消失，韧性和延伸率也都大大下降，但强度则提高很多。预应力混凝土结构中广泛采用由低合金钢或低碳钢冷拔制成的高强钢丝。冷拔钢丝没有屈伏台阶，常取残余变形为 0.2% 的拉应力为协定屈伏点。

（三）钢筋的种类

在普通钢筋混凝土桥梁中，采用的钢筋种类有：3 号钢 (A3)、5 号钢 (A5) 及 16 锰钢 (16Mn) 三种。A3 是热轧光面钢筋，A5 是热轧螺纹钢筋，16Mn 是热轧人字形螺纹钢筋。

在预应力混凝土桥梁中采用碳素钢丝或钢绞线。

三、钢筋混凝土

（一）混凝土和钢筋的粘结力

1. 粘结力的组成

前面已提到过，钢筋混凝土结构中的混凝土和钢筋，是两种力学性能差异很大的材料，它们所以能够共同工作，是由于粘结力的存在而使两者不能自由地相对滑动。试验指出，粘结力的强弱在很大的范围内波动，它主要取决于下列三项作用的大小：

- （1）由于混凝土收缩时紧握钢筋而产生的摩擦力；
- （2）由于水泥浆的粘结性能而产生钢筋与混凝土间的胶着力；
- （3）由于钢筋表面不平，甚至有凸纹而产生的嵌锁作用，钢筋在滑动之前必需剪断部分混凝土。

光面钢筋的粘结力，大部分来自摩擦力，螺纹钢筋的粘结力则大部分来自嵌锁作用。胶着力和摩擦都不容易使其增大，故提高粘结力的重要方法是提高嵌锁作用。

2. 粘结力的大小和分布

一般计算和试验中，只决定粘结力的总值，不再细究其中的三项作用。通常把通过粘结传递的力，除以钢筋和混凝土接触表面的面积，得出接触面上的平均粘结应力。粘结应力的极限值用拔出试验测定。将钢筋一端埋入混凝土中，而加力于另一端直至拔出钢筋为止；若拔出钢筋所需的力为 N ，埋置长度 l 而钢筋周界 $u = \pi d$ ，则粘结应力的极限值即粘着强度为：

$$\tau = \frac{N}{u l}$$

从拔出试验得知，粘结力沿埋置长度的分布是不均匀的，如图 1—8 所示。当实际最大粘结应力达到极限值时即发生粘结破坏而钢筋滑动。埋置长度大时，平均粘结应力对最大粘结应力的比值较小，故通过拔出试验测定的粘结强度亦较小。通常规定必要的锚固长度，以保证钢筋中的应力达到屈服点时，粘结仍不破坏。为了加强光面钢筋的粘结力，除保证一定埋置长度外，还要在钢筋末端加弯钩。

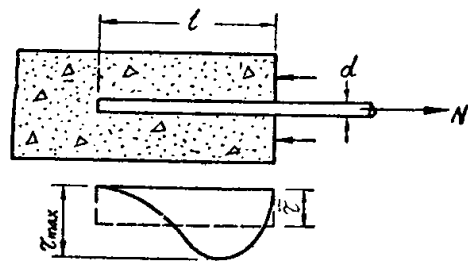


图 1—8

（二）钢筋混凝土的收缩

混凝土中有钢筋存在时，则混凝土不能自由收缩，因此钢筋混凝土的收缩变形要比混凝土小得多。混凝土收缩时，受到钢筋的阻碍，它本身受到拉力，而钢筋则受到压力。这就引起两者间的初应力。较长的钢筋混凝土结构用伸缩缝断开。

（三）钢筋混凝土的徐变

和收缩一样，钢筋的存在大大减少了混凝土的徐变。在受力的钢筋混凝土结构中，徐变将引起钢筋和混凝土应力重分布。钢筋混凝土轴心受压构件中，混凝土的徐变引起的应力重分布现象特别显著。

第二章 受弯构件抗弯强度计算

2—1 受弯构件的应力阶段及几种计算方法

钢筋混凝土受弯构件的许多实验指出，由于混凝土及钢筋在力学性质上的巨大差别，当在构件上逐渐增加荷载时，受弯的钢筋混凝土构件的应力状态，不仅在数量上有变化，且在性质方面也发生变化。

在受纯弯曲钢筋混凝土构件的某一垂直于构件轴线的截面中，根据实验的结果，当荷载不断增加时，截面应力分布经历下列几个阶段（图 2—1）。

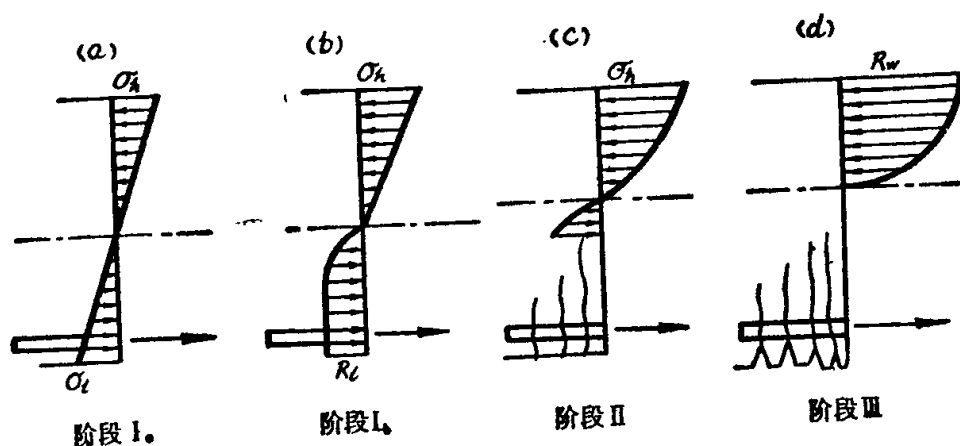


图 2—1 受弯构件的应力阶段

第 I 阶段：即混凝土开裂前大致弹性工作的阶段。荷载弯矩很小时，构件下缘处的拉应力小于混凝土抗拉极限强度 R_t ，故混凝土不裂而全部截面参加工作。这时混凝土的应变大致与应力成正比例。整个截面上的应变是沿截面高度依直线规律变化的。因混凝土受拉时的弹性模量小于受压时的弹性模量，故混凝土的应力图在中性轴以上是一条直线，在中性轴以下是另一条直线，这两条直线的斜度不同（图 2—1 a）。

第 I_a 阶段：即混凝土开裂前的临界状态。这时混凝土受拉区已显著地表现塑性，其下缘应变达到极限变形值。受拉区应力图接近矩形，大部地区的应力已达到或接近混凝土抗拉强度极限。钢筋的拉应力按下缘拉应变来估计，大约是 200~300 公斤/平方厘米左右，这对钢来说是很小的。受压区中混凝土也已表现塑性，其应力图成曲线但离直线不远（图 2—1 b）。这阶段是抗裂性计算的基础。

第 II 阶段：即受拉区混凝土开裂后的工作阶段。这时受拉区混凝土已开裂，裂缝上伸到距中性轴不远之处，但裂缝宽度很小。通常取开裂截面进行分析，认为受拉区混凝土完全不参加工作而由钢筋单独受拉，但钢筋中应力尚未到达屈服极限。受压区混凝土应力图大致是抛物线形。荷载弯矩变化时，钢筋应力大致发生成比例的变化。这阶段是按容许应力法计算的基础（图 2—1 c）。

第 III 阶段：即破坏阶段。构件破坏前材料显著地表现塑性，因此有个构件变形增大而荷

载弯矩几乎未变的阶段；一般取这个阶段的末尾，即破坏前的临界状态进行分析。随着配筋量的不同，破坏的过程也不相同。在常用配筋量范围内，受拉钢筋应力先达到屈伏点，在不变的应力下伸长，于是裂缝开展而中性轴上升，受压区缩小，最后混凝土被压碎（第七章中所述考虑塑性的计算方法以这种应力状态作为分析的基础）。破坏时受拉钢筋尚未越出屈伏台阶，故其应力仍等于屈伏极限。这时混凝土受压区应力图形实际上是某种曲线（图 2—1 d），但可按矩形应力图形计算，不致引起多大误差。这阶段是按破坏阶段法或按极限状态法计算的基础。配筋量过多，则受压混凝土被压坏时，受拉钢筋中的应力尚未达到屈伏极限。配筋量过少，则受拉钢筋越出屈伏台阶之后，受压混凝土尚未破坏，但此时构件的变形和裂缝，已过大而不能正常工作。

钢筋混凝土受弯构件的计算方法，按其所依据的应力阶段不同，分下列几种：

一、按容许应力计算法

此方法采用匀质弹性体的假定而规定适当的容许应力值，以应力的第Ⅱ阶段为依据，采用平面变形假定，并假设应力与应变成比例，故混凝土的应力图形为三角形，而在受拉区则因混凝土已开裂，应力全部由钢筋承受，另外还把钢筋换成一种假想的混凝土材料，其受拉及受压时的弹性模量，均等于混凝土受压时的弹性模量。有了上述的假定后，便可以应用材料力学中关于匀质弹性体的计算公式：

$$\sigma_{max} \leq [\sigma]$$

式中 $[\sigma]$ ——容许应力，等于材料的强度极限除以安全系数。

铁路工程中的结构物，一般按《桥规》中的有关规定进行计算，《桥规》中有关计算采用容许应力法，并对混凝土和钢筋的容许应力作了规定，如表 2—1 及表 2—2 所示。

混 凝 土 的 容 许 应 力 (kg/cm²) 表 2—1

序号	应 力 种 类	符 号	混 凝 土 标 号						
			600	500	400	300	250	200	150
1	中 心 受 力	$[\sigma_c]$	170	140	110	85	70	55	40
2	弯曲受压及偏心受压	$[\sigma_w]$	210	175	140	105	90	70	55
3	有箍筋及斜筋时的主拉应力	$[\sigma_{t-1}]$	30.5	27.0	23.5	19.0	17.0	14.5	12.0
4	无箍筋及斜筋时的主拉应力	$[\sigma_{t-2}]$	11.3	10.0	8.7	7.0	6.3	5.3	4.3
5	梁部分长度中全由混凝土承受的主拉应力	$[\sigma_{t-3}]$	5.7	5.0	4.3	3.5	3.2	2.7	2.2
6	纯 剪 应 力	$[\tau_c]$	17	15	13.0	10.5	9.5	8.0	6.5
7	光钢筋与混凝土之间的粘结力	$[c]$	14.2	12.5	10.8	8.8	7.9	6.7	5.4
8	局部承压应力 A——计算底面积 A _c ——局部承压面积	$[\sigma_{c-1}]$	$170\sqrt{\frac{A}{A_c}}$	$140\sqrt{\frac{A}{A_c}}$	$110\sqrt{\frac{A}{A_c}}$	$85\sqrt{\frac{A}{A_c}}$	$70\sqrt{\frac{A}{A_c}}$	$55\sqrt{\frac{A}{A_c}}$	$40\sqrt{\frac{A}{A_c}}$

注：① 计算主力及附加力时，第 1、2 及 8 项容许应力可提高30%。
② 对厂制及工艺符合厂制条件的构件，第 1、2 及 8 项容许应力可提高10%。
③ 当采用架桥机架梁时，第 1、2 及 8 项容许应力在主力和附加力的基础上可再提高10%。
④ 螺旋钢筋与混凝土间的粘结力按表列第 7 项的1.5倍采用。
⑤ 第 8 项中的计算底面积 A按《桥规》中的具体规定求得，但该部分的混凝土厚度应大于底面积 A 的短边尺寸。

钢 筋 的 容 许 应 力 表 2—2

钢 筋 种 类	符 号	容 许 应 力 (kg/cm ²)	
		主 力	主 力 和 附 加 力
A3钢筋	$[\sigma_s]$	1300	1600
A5钢筋	$[\sigma_s]$	1500	1900
16Mn钢筋	$[\sigma_s]$	1800	2300

注：① 16Mn钢筋如有焊接接头，当钢筋的最小应力与最大应力之比 $\rho < 0.6$ 时，应进行纵向加工。
② 当采用架桥机架梁时，钢筋的容许应力在主力及附加力的基础上可再提高10%。

二、按破坏阶段计算法

在容许应力法计算中，只考虑材料的弹性工作阶段，而实际上混凝土和钢筋都是具有塑性的材料。在按破坏阶段法计算中，不用匀质弹性体的假定，而考虑受弯构件破坏前的弹塑性工作阶段，即以应力的第Ⅲ阶段为依据。受弯构件在破坏前，弯矩最大的截面上已有不少部分表现塑性性能，故假设混凝土受压区的应力图形为矩形，拉力则全部由钢筋承受。按破坏阶段法的计算公式为：

$$KM \leq M_p$$

式中 K ——安全系数，
 M ——按荷载算出的最大弯矩值，
 M_p ——构件破坏前所能抵抗的最大弯矩值，它与构件的截面形状和材料的强度极限有关。

三、按极限状态计算法

此法所反映的应力阶段和计算应力图形与按破坏阶段计算法基本相同，但不用笼统的安全系数 K ，而是分成考虑荷载变异的荷载系数，考虑材料变异的材料强度系数，以及考虑构件工作条件的工作条件系数。
我们主要讨论铁路工程结构中各种构件的设计计算原理，因此对容许应力法计算作详细讨论，其他的计算方法只在第七章中作简单的介绍。

2—2 钢筋混凝土梁式板和单跨梁的构造

一、概述

钢筋混凝土受弯构件主要有梁和板。梁的截面形状以矩形、T形及□形比较多见。桥梁的荷载较大，一般采用T形、□形或箱形截面，其上翼缘实际上就是桥面板的构成部分。

通常只在梁的受拉区配置纵向受拉钢筋的梁，称为单筋梁。当截面高度受到限制时，可能在受压区亦配置纵向受力钢筋，这种梁称为双筋梁，其应用较少。

板的截面一般为矩形。如果板仅有两边支承（图2—2 a）或四边支承而其长边 l_1 与短边 l_2 之比 $l_1/l_2 > 2$ 时（图2—2 b），则这种板称为梁式板。

二、单跨梁的钢筋构造要点

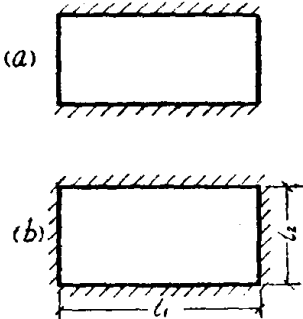


图 2—2 板的类型

(一) 钢筋的种类

梁内的钢筋，有纵向受力钢筋（亦称主钢筋）、箍筋、斜筋（亦称弯起钢筋）和架立钢筋等，如图 2—3 所示。

1. 纵向受力钢筋 这种钢筋平行于梁的轴线布置，一般布置在受拉区，其主要作用是承受外荷载引起的拉应力，故常称之为主筋，它的数量由计算决定。梁内主筋可以单根布置。当单根布置有困难时，可以两根或三根成束布置。为了便于施工，单根钢筋或束筋间的净距不得小于钢筋的直径，亦不得小于30毫米。当钢筋层数等于或多于三层时，其净距在横向不得小于1.5倍钢筋直径或45毫米，在竖向不得小于钢筋直径或30毫米（图 2—4）

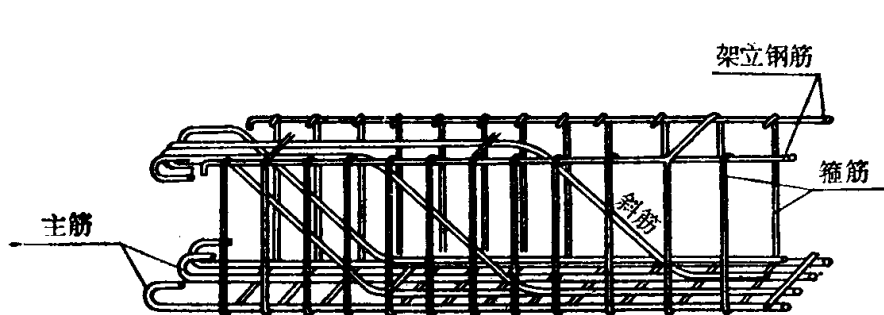


图 2—3

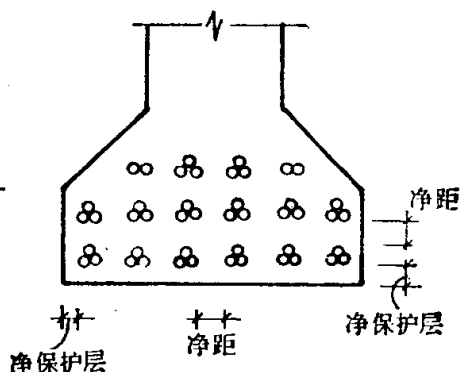


图 2—4

2. 箍筋 这种钢筋垂直于梁轴布置，其作用为：承受主拉力；固定纵向受力钢筋位置，以形成钢筋骨架；保证梁受拉区和受压区的良好联系以及保证受压钢筋的稳定性。根据计算无论需要与否，梁内均应设置箍筋。

3. 斜筋 这种钢筋通常是在靠近梁的两端将纵向受力钢筋弯起而成。它是纵筋弯起时的斜段，故称为斜筋。斜筋数量由计算决定。

4. 架立钢筋 这种钢筋是根据构造要求布置的，用来架立箍筋，以便将钢筋扎成整体骨架，架立钢筋的直径随着梁的截面大小而定，一般为10~14毫米。

(二) 钢筋的弯钩、弯转和接头

梁内主筋有的伸至支座内，其端部要做成弯钩；有的要作为斜筋弯起，有的由于钢筋长度限制而需接长。它们都必须符合构造上的要求。

1. 弯钩 为防止光面钢筋受力时发生滑动乃至从混凝土中拔出，在光面钢筋两端制成半圆弯钩（图 2—5 a）。螺旋钢筋与混凝土粘着力较好，通常制成直钩（图 2—5 b）。半圆钩的内径不小于 $2.5d$ ，直段不小于 $3d$ 。

2. 弯转 钢筋由构件一侧弯至另一侧时，在弯转处的圆弧半径不应太小，以防止该处混凝土被压碎。弯转处的圆弧半径对光面钢筋为 $10d$ ，对螺旋钢筋为 $12d$ 。

3. 接头 钢筋出厂长度有一定的限制。在实际结构中需要较长的钢筋时便会遇到钢筋的接头。比较常见的接头形式有下列几种：

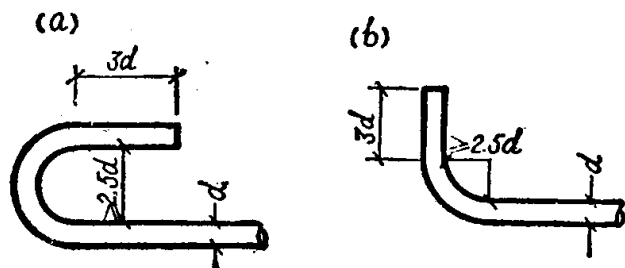


图 2—5

(1) 绑扎搭接接头 两根钢筋交搭一定长度并用钢丝绑扎（图 2—6 a），内力通过钢筋与混凝土的粘结经由混凝土传递。钢筋端部设弯钩，光面受拉钢筋的搭接长度不小于 $30d$ ，受压钢筋搭接长度不小于 $20d$ 。