

高等学校教材

结构设计原理

(上)

西南交通大学	黄 棠	主编
	王效通	
北方交通大学	许克宾	主审
	宋慕兰	

中国铁道出版社

1989年·北京

前 言

本书是铁道工程专业《结构设计原理》课程的教材。根据1984年铁道部高等学校铁道工程、桥梁、隧道专业教材编审委员会的意见，在1980年11月中国铁道出版社（原人民铁道出版社）出版的《结构设计原理》试用教材的基础上进行修订的。为方便使用，修订后分上、下两册出版。上册为原试用教材第一篇钢筋混凝土结构部分，下册为试用教材第二篇钢结构部分。

《结构设计原理》试用教材，自1980年出版以来，经路内各高等院校师生的使用，一致认为试用教材的内容选择是恰当的，文字叙述比较简练并便于教学，但由于有关的《规范》变动较大，新的科研成果的出现。因此，要求对原试用教材的内容进行必要的更新。本册修订后，加重了可靠度理论方面的论述，增加了部分预应力混凝土结构的计算理论等内容。并根据现场的需要，增写了混凝土及石结构部分。为便于教学，对原试用教材的章节进行了必要的调整和归并，例如将试用教材第二、三、四章归并为第二章；第五、六章归并为第三章。在修订过程中，订正了试用教材中存在的缺点和失误之处。

这次修订工作主要根据《铁路桥涵设计规范》（TBJ2—85）（简称《桥规》）、《铁路隧道设计规范》（TBJ3—85）（简称《隧规》）、《混凝土结构设计规范》等标准进行的。

本书由西南交通大学黄棠、王效通主编，北方交通大学许克宾、宋慕兰主审。参加上册修订的有西南交通大学周其刚（第一章、第二章第一节）、段立华（第二章第二节、第四章）、长沙铁道学院卢树圣（第二章第三节、第三章、第六章第二节及第五章的部分内容）、西南交通大学王效通（第五章、第四章部分内容、第六章第一节）。参加下册修订的有西南交通大学黄棠（第一、三、四章）、王效通（第二章）。参加审稿工作的还有上海铁道学院胡匡璋、江新元，长沙铁道学院王俭槐，石家庄铁道学院关书清和兰州铁道学院栗金光等同志。西南交通大学庞文焕，董春灵同志参加了修改定稿工作。

编 者

一九八八年五月

内 容 简 介

本书是高等学校铁道工程专业《结构设计原理》课程的教材，全课程教学时数为120学时。

本教材分上、下两册出版。上册为钢筋混凝土结构，下册为钢结构。本书为上册，主要介绍钢筋混凝土结构中的力学性能及受弯构件、受压构件的强度计算、裂缝和变形的计算（包括容许应力法和极限状态法）、预应力混凝土结构构件的计算。根据现场的需要，书中还介绍了混凝土与石结构、少筋混凝土结构的有关计算。

本书除作铁道工程专业的教材外，还可供土建专业师生和工程技术人员参考。

高等学校教材 结构设计原理 (上)

西南交通大学 黄 棠 王效通 主编

中国铁道出版社出版、发行

责任编辑 李云国

中国铁道出版社印刷厂印

开本：787×1092毫米 1/16 印张：15.5 字数：387 千

1989年6月 第1版 第1次印刷

印数：1—4000 册 定价：3.10 元

目 录

第一章 钢筋混凝土结构概述	1
一、钢筋混凝土的基本概念	1
二、钢筋混凝土结构发展简述	1
三、钢筋混凝土结构的优缺点及应用	2
四、钢筋混凝土材料的力学性能	3
第二章 受弯构件强度和变形计算	11
第一节 抗弯强度计算	11
一、钢筋混凝土梁式板和单跨梁的构造	11
二、受弯构件的应力阶段	13
三、抗弯强度计算的基本原理	14
四、单筋矩形截面梁	16
五、双筋矩形截面梁	27
六、T形截面梁	30
第二节 抗剪强度计算	34
一、钢筋混凝土梁中的剪应力和主拉应力	34
二、箍筋和斜筋的设计	40
三、T形梁中翼板和梁肋连接处的剪应力	49
第三节 裂缝宽度和挠度的计算	49
一、裂缝宽度的计算	49
二、受弯构件挠度的计算	57
第三章 受压构件的计算	60
第一节 轴心受压构件	60
一、箍筋柱的构造与计算	61
二、旋筋柱的构造与计算	64
第二节 偏心受压构件计算	67
一、偏心受压构件分类及截面应力状态	67
二、小偏心受压构件的计算	73
三、大偏心受压构件的计算	78
四、偏心受压构件主拉应力计算	101
第四章 极限状态法	103
第一节 钢筋混凝土结构的计算方法及可靠度	103
一、计算方法	103
二、结构可靠度简述	106
第二节 受弯构件强度计算	116

一、抗弯强度计算	116
二、抗剪强度计算	128
第三节 偏心受压构件的计算	136
一、偏心的判别及截面的复核	137
二、大偏心受压构件	138
三、小偏心受压构件	140
第五章 预应力混凝土结构	144
第一节 预应力混凝土结构基本知识	144
一、一般概念	144
二、预应力混凝土材料	148
三、预应力混凝土构件施工工艺	152
四、力筋预应力损失的计算	157
第二节 预应力混凝土受弯构件计算	169
一、弹性阶段中正应力的计算	169
二、正截面抗裂性计算	177
三、抗弯强度计算	179
四、抗剪强度计算	184
五、局部应力计算	191
六、挠度计算	193
第三节 预应力混凝土受弯构件设计	197
一、设计步骤	197
二、实 例	198
第四节 部分预应力混凝土梁	210
一、概 述	210
二、截面应力计算	212
三、变形和裂缝的计算	215
第六章 混凝土与石结构	219
第一节 混凝土与石结构	219
一、材料的主要力学性能	219
二、受压构件的计算	221
三、混凝土受弯构件的计算	226
四、局部承压计算	226
第二节 少筋混凝土结构	227
一、概 述	227
二、计算原理	227
三、计算方法	231

第一章 钢筋混凝土结构概述

一、钢筋混凝土的基本概念

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，而钢筋则是抗拉性能很好的材料。简支梁受荷载后，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。由于拉力由钢筋承受，故钢筋的位置是否正确与数量是否足够是关键性问题。这种在混凝土中配置钢筋的梁叫做钢筋混凝土梁，如图 1—1 所示。

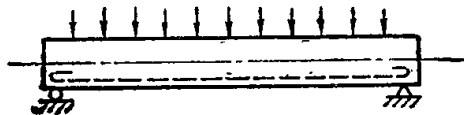


图 1—1 钢筋混凝土梁

钢筋和混凝土是两种力学性能差异很大的材料，要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之间有相当强大的粘结力。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。

混凝土浇注后，随着它的凝结，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^{-6} ，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，可将混凝土胀裂而引起更严重的锈蚀，致使钢筋混凝土结构的承载能力和耐久性都大大降低。

从试验和研究已有的钢筋混凝土结构物，证明适当密实且足够厚度的混凝土保护层，能防止钢筋锈蚀，使钢筋和混凝土能很好地共同工作。

二、钢筋混凝土结构发展简述

与石、木结构等相比较，钢筋混凝土结构是一种较新型的结构，它的历史只有一百五十年左右。

十九世纪中叶，钢筋混凝土结构开始出现，二十世纪初，许多国家通过试验逐渐制订了以容许应力法为基础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，一些科学技术发达的国家根据实验资料改用考虑塑性变形的计算方法。苏联首先改用破坏阶段法计算钢筋混凝土结构，到五十年代又改用更合理的极限状态法。近十年来北美和西欧一些国家开始进一步用失效概率原理来分析结构可靠度，我国亦按此方向改进自己的钢筋混凝土结构设计规范。

在材料生产方面，混凝土的制作工艺和炼钢技术均有很大发展。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型式。

新中国成立后，为适应大规模基建任务的需要，建成了大量钢筋混凝土结构的建筑，在设计和施工方面都积累了不少经验。目前正组织技术力量在这些实践经验和科学研究的基础上，努力使各种结构设计规范更为完善。

三、钢筋混凝土结构的优缺点及应用

(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，并要用耐热骨料来制作混凝土。

能较好地满足使用需求 可以制成尺寸很大承载能力很高的结构，不像木结构那样受天然生成材料的限制。结构整体性、抗震性和刚度也比较好。

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，采用时应注意：

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材 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，而且在模板中养护的时间长，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。我国目前力求节约钢材，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)，以及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，结构造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。在可用移动式模板施工的场所，采用整体式结构并没有多费木材的缺点，因而可能是经济合理的。

四 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，因而在工程中主要用它来承受压力。下面分别说明混凝土在不同受力情况下的强度性能，重点讨论抗压强度。

1. 抗压强度

图 1—2 中有三种试件。图 1—2(a) 是立方体试件，进行标准压力试验时，试件表面和试验机压板之间有摩擦力，阻止试件的横向变形，起着套箍的作用。在试件上下两端一定范围内，由于套箍作用和竖向压力，出现复杂的三向应力状态，最后形成角锥形的破坏面。上下两个角锥形的破坏面在二分之一高度处交会。

图 1—2(b) 是棱柱体试件，它的高宽比 $\left(\frac{h}{b}\right)$ 为 3~4，此时套箍作用影响不到中部区段，那里基本上是全截面单向均匀受压，其横向变形不受约束。因此当压力增大到一定限度时，中部区段出现纵向裂缝。压力继续增大则纵向裂缝扩展，最后导致试件破坏，棱柱体试件强度明显地低于立方体试件强度。若在立方体试件上下两面涂上润滑剂，使摩擦力几乎消失，则立方体试件中不能形成三向应力状态，而和棱柱体中部区段相似，而试验得到的强度值也与棱柱体试件接近。

图 1—2(c) 示局部承压试件，其核心柱体的横向变形不仅受套箍作用的影响，而且还受到不直接受压的外围混凝土的约束。最后破坏时外围混凝土出现纵向裂缝而劈裂，而核心柱体上下两端会形成角锥形破坏面。这种试件由于横向变形受到很大的约束，其抗压强度比棱柱体试件大得多。总的来说，混凝土试件的横向变形受约束的程度愈高，其抗压强度就愈大。规范中有立方强度 R ，棱柱体抗压强度 R_c 和局部抗压强度 R_{c1} 三种混凝土的抗压强度指标。

（1）立方强度 R 它是根据标准立方体的试件在标准条件下，养护一定时间后，在压力机上压至破坏时所得的强度极限。取这种抗压强度的试验结果作为混凝土强度的基本指标，称为立方强度 R 。标准立方体的尺寸有 $20 \times 20 \times 20\text{cm}$ 和 $15 \times 15 \times 15\text{cm}$ 。有的国家（如美国、日本）采用圆柱体作标准试件，取其抗压强度试验结果为基本指标，称为圆柱强度 f_c' 。

我国标准试件要求采用 15cm 的立方体。若采用 20cm 或 10cm 的立方体试件，则试压结果应分乘似系数 1.05 或 0.95 作为混凝土的标号。

在我国有关的规范中，均分别规定了有关混凝土的强度，例如《铁路桥涵设计规范》中，混凝土的标号为 150、200、250、300、400、500、600 号。并给出了适用范围，例如 200 号以下的混凝土用于基础、墩台等，200~400 号混凝土用于普通钢筋混凝土梁桥、楼板、樁

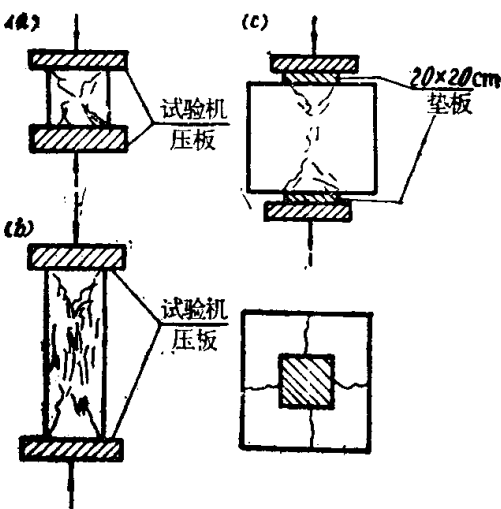


图 1—2 混凝土试件
(a) 试件 $20 \times 20 \times 20\text{cm}$, $R = 20\text{MPa}$;
(b) 试件 $20 \times 20 \times 60\text{cm}$, $R_c = 16\text{MPa}$;
(c) 试件 $60 \times 60 \times 40\text{cm}$, $R_{c1} = 48\text{MPa}$ 。

在单向正应力 σ 和剪应力 τ 同时存在时，冈岛达雄用三种标号高低不同的混凝土试件得出的结果示于图1—5，经验公式如下：

$$\frac{\tau}{R_a} = \sqrt{a + b \left(\frac{\sigma}{R_a} \right) + c \left(\frac{\sigma}{R_a} \right)^2}$$

式中常数 a 、 b 、 c 根据试验数据用统计数学决定。

5. 疲劳强度

试验指出，在多次重复荷载作用下，混凝土中的最大压应力值虽小于棱柱体强度，亦能引起破坏。这个最大压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。疲劳强度还与混凝土的最大压应力 σ_{max} 和最小压应力 σ_{min} 之比值 ρ ($=\sigma_{min}/\sigma_{max}$) 的大小有关。 ρ 值小疲劳强度小， ρ 值大则疲劳强度也大。疲劳强度还与重复加载次数 N 有关。 N 大则疲劳强度小， N 小则疲劳强度大。一般工程结构的疲劳问题是按 $N=2 \times 10^6$ 次考虑的，与此相应的混凝土疲劳强度，不论 ρ 值大小，均大于 $0.5R_a$ ，故可采用 $0.5R_a$ 。铁路桥梁设计中，混凝土抗压强度的安全系数采用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。故钢筋混凝土结构一般不作混凝土强度的疲劳验算。

6. 混凝土的变形性能

(1) 短期荷载作用下混凝土的变形性能

混凝土通常用来受压，我们着重研究受压时的变形性能。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—6所示。

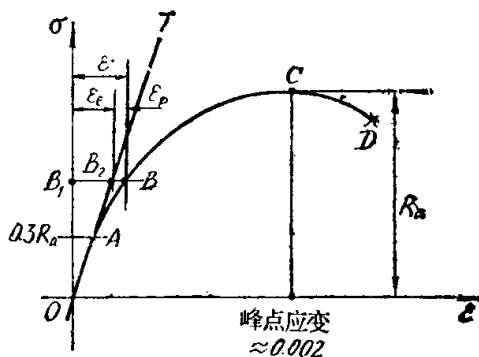


图1—6 混凝土的应力—应变曲线

混凝土并非弹性物质，它受力后的变形由弹性变形 ϵ_e 和塑性变形 ϵ_p 两部份组成。塑性变形部份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（图1—6中的 OT ）。由图1—6可见，当 $\sigma \leq 0.3R_a$ 时混凝土基本上弹性工作。在 $0.3R_a < \sigma < 0.8R_a$ 的范围内，短期荷载作用下混凝土的 $\sigma-\epsilon$ 曲线逐渐离开原点处的切线 OT ，应力 σ 愈大则发生的塑性变形也愈大。

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p$$

而

$$\frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\sigma}{\epsilon_e + \epsilon_p} = \frac{\sigma}{\epsilon_e} \left(\frac{\epsilon_e}{\epsilon_e + \epsilon_p} \right) = v \left(\frac{\sigma}{\epsilon_e} \right) = v E_e$$

式中 E_e ——混凝土的瞬时弹性模量，它就是切线 OT 的斜率， $E_e = \frac{\sigma}{\epsilon_e}$ ；

v ——弹性系数，其值随应力的增大而减小；

$\frac{\sigma}{\epsilon}$ ——混凝土的割线模量，或称变形模量，它就是割线 OB 的斜率，其值也随应力的增大而逐渐减小。

(2) 混凝土的弹性模量

《桥规》中取压应力 $\sigma = 0.5R_a$ 时的割线模量，作为混凝土受压时的弹性模量 E_a 。混凝土受拉的弹性模量很少用到，通常认为它大致等于混凝土受压时的弹性模量 E_a 。《桥规》中还给出根据混凝土标号计算 E_a 的经验公式：

设计规范》的规定。

混凝土极限强度(Mpa) 表 1—1

强度种类	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

3. 抗剪强度

目前尚未有直接测定混凝土纯剪强度的方法，在工程中，很少有混凝土受纯剪的情况。一般在受弯构件或偏心受压构件中，正应力和剪应力同时存在，因此，实际上混凝土处于复杂应力的状态下，故分析其强度有一定困难。

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，混凝土的弯曲抗剪强度大于 $2R_t$ ，而直接受剪时的抗剪强度还要大。

4. 复杂应力状态下混凝土强度

实际钢筋混凝土结构中，某一点处的混凝土应力，一般是空间应力状态。若某一轴向的主应力为零，则为平面应力状态，它们都属于复杂应力状态。

对复杂应力状态下混凝土的强度已进行过一些研究，但尚不能形成令人比较满意的理论。在定性方面，目前对各种情况下的破坏机理和强度及变形的规律，已有初步认识。在定量方面，目前已有一些经验公式，但它们的适用范围比较狭窄，彼此略有不同而均以试验结果为依据。

Kupfer等人，对混凝土构件进行双轴受力的试验。试验结果见图1—4。

图1—4中 σ_1 和 σ_2 是两个主轴方向的正应力，以压为正，以拉为负。 R_c 为混凝土棱柱体的抗压强度。图中以比值 σ_1/R_c 和 σ_2/R_c 为坐标，图中的斜线代表符合比值 $\sigma_1/\sigma_2=0.22$ 、 0.52 、…… $1/0.22$ 关系的轨迹。由图1—4可见，双轴受压试验破坏时的 σ_1 值是随加载中保持的 σ_1/σ_2 值而变的。在 σ_1/σ_2 大致为 0.5 时，出现 σ_1 的最大值。双轴受拉的情况见图中的第三象限，基本上在 σ_1 或 σ_2 接近 R_t 时发生破坏，比值 σ_1/σ_2 的影响不明显。图中第一象限（双轴受压）的关系曲线有较大的实用意义。

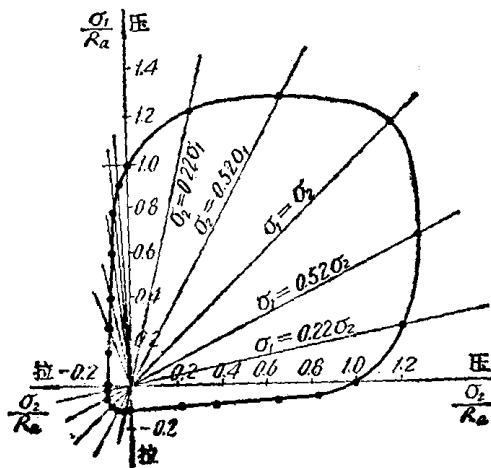


图 1—4 双轴应力作用下混凝土强度

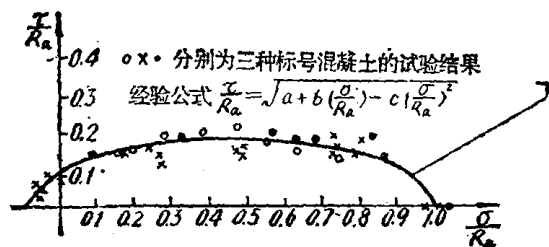


图 1—5 σ 和 τ 共同作用下混凝土的强度

在单向正应力 σ 和剪应力 τ 同时存在时, 冈岛达雄用三种标号高低不同的混凝土试件得出的结果示于图1—5, 经验公式如下:

$$\frac{\tau}{R_s} = \sqrt{a + b \left(\frac{\sigma}{R_s} \right) + c \left(\frac{\sigma}{R_s} \right)^2}$$

式中常数 a 、 b 、 c 根据试验数据用统计数学决定。

5. 疲劳强度

试验指出, 在多次重复荷载作用下, 混凝土中的最大压应力值虽小于棱柱体强度, 亦能引起破坏。这个最大压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。疲劳强度还与混凝土的最大压应力 σ_{max} 和最小压应力 σ_{min} 之比值 ρ ($=\sigma_{min}/\sigma_{max}$) 的大小有关。 ρ 值小疲劳强度小, ρ 值大则疲劳强度也大。疲劳强度还与重复加载次数 N 有关。 N 大则疲劳强度小, N 小则疲劳强度大。一般工程结构的疲劳问题是按 $N=2 \times 10^6$ 次考虑的, 与此相应的混凝土疲劳强度, 不论 ρ 值大小, 均大于 $0.5R_s$, 故可采用 $0.5R_s$ 。铁路桥梁设计中, 混凝土抗压强度的安全系数采用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。故钢筋混凝土结构一般不作混凝土强度的疲劳验算。

6. 混凝土的变形性能

(1) 短期荷载作用下混凝土的变形性能

混凝土通常用来受压, 我们着重研究受压时的变形性能。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—6所示。

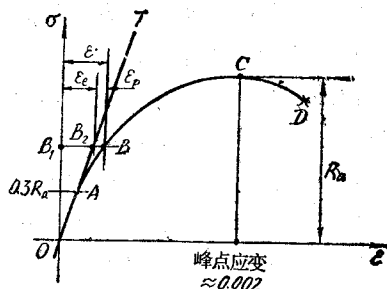


图1—6 混凝土的应力—应变曲线

混凝土并非弹性物质, 它受力后的变形由弹性变形 ϵ_e 和塑性变形 ϵ_p 两部份组成。塑性变形部份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 (图1—6中的OT)。由图1—6可见, 当 $\sigma \leq 0.3R_s$ 时混凝土基本上弹性工作。在 $0.3R_s < \sigma < 0.8R_s$ 的范围内, 短期荷载作用下混凝土的 $\sigma-\epsilon$ 曲线逐渐离开原点处的切线OT, 应力 σ 愈大则发生的塑性变形也愈大。

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p$$

而

$$\frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{\sigma}{\epsilon_e + \epsilon_p} = \frac{\sigma}{\epsilon_e} \left(\frac{\epsilon_e}{\epsilon_e + \epsilon_p} \right) = v \left(\frac{\sigma}{\epsilon_e} \right) = v E_s$$

式中 E_s ——混凝土的瞬时弹性模量, 它就是切线OT的斜率, $E_s = \frac{\sigma}{\epsilon_e}$;

v ——弹性系数, 其值随应力的增大而减小;

$\frac{\sigma}{\epsilon}$ ——混凝土的割线模量, 或称变形模量, 它就是割线OB的斜率, 其值也随应力的增大而逐渐减小。

(2) 混凝土的弹性模量

《桥规》中取压应力 $\sigma = 0.5R_s$ 时的割线模量, 作为混凝土受压时的弹性模量 E_s 。混凝土受拉的弹性模量很少用到, 通常认为它大致等于混凝土受压时的弹性模量 E_s 。《桥规》中还给出根据混凝土标号计算 E_s 的经验公式:

$$E_k = \frac{100}{2.3 + \frac{275}{R}} \text{ (GPa)}$$

式中 R ——按边长为20cm立方体测出的混凝土标号。

有时用到混凝土的切线模量，它是 $\sigma-\epsilon$ 曲线上某一点切线的斜率。当 $\sigma < 0.3R_k$ 时，切线模量和弹性模量是相同的。

混凝土弹性模量 E_k 值各规范均列表给出，表1—2为《桥规》给出的混凝土弹性模量。

混凝土受压弹性模量 (GPa)										表 1—2
混凝土标号	600	550	500	450	400	350	300	250	200	150
弹性模量 E_k	36	35.5	35	34	33	32	31	29	27	24

(3) 混凝土的极限压应变

混凝土 $\sigma-\epsilon$ 曲线上峰点处的应力值是抗压强度的一种指标，峰点处的应力值大致与混凝土的标号成比例。但峰点处的应变值几乎不随混凝土标号的提高而变化。分析结构行为时，常假定混凝土在压应变达到某个极限值时引起结构的破坏，这个极限值称为极限应变或极限变形值。混凝土标号不同，该值变化很小。分析轴心受压构件时，常取其最大应变为0.002；分析偏心受压构件或受弯构件时则常在0.003~0.0035的范围内选一个值作为极限应变。

(4) 重复荷载作用下混凝土的变形性能

分析研究钢筋混凝土结构的抗震性能或疲劳性能时，要用到重复荷载作用下混凝土的 $\sigma-\epsilon$ 曲线。

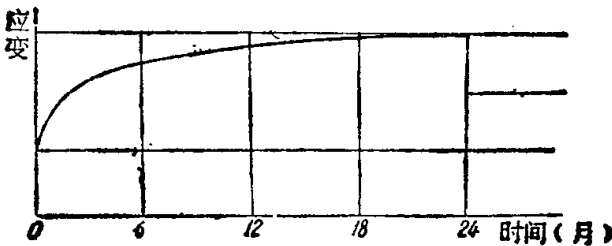


图 1—7 重复荷载作用下混凝土的 $\sigma-\epsilon$ 曲线

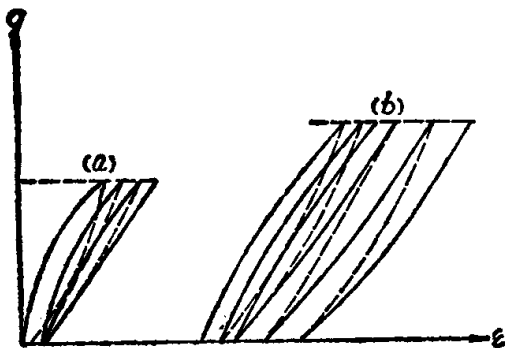


图 1—8 混凝土的徐变

图 1—7 示混凝土试件受多次重复荷载作用时，混凝土应力与应变问题的关系。每一次加载循环中，荷载由零增至最大值，然后再减到零；荷载增大时，曲线凸向应力轴，荷载减小时则曲线呈凹形。下一次加载时的凸形曲线会和这一次卸载时的凹形曲线相交。经过多次荷载循环之后，形成比较稳定的封闭曲线，称为滞回环或滞回曲线。

图 1—8 (a) 所示为加载循环中混凝土压应力值小于其耐劳极限（大致等于 $0.5R_k$ ）时的情况，随着荷载循环次数的增加，滞回环逐渐收缩，最后趋于稳定，几乎收缩成一条线。图 1—8 (b) 所示则是混凝土最大压应力值超过耐劳极限时的情况。经一定循环次数之后，滞回曲线也有一段时间相对稳定。但在循环次数加大到某个量级之后，加载时和卸载时的曲线都渐渐变成凹形，这是混凝土将要破坏的信号。在卸载后的残余变形值超过0.001

之后，如果加载时和卸载时曲线都呈凹形，则再经过不太多次循环就要发生疲劳破坏。

(5) 混凝土的徐变

混凝土在长期荷载作用下，其变形随时间的延长而增大，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份和凝胶体在混凝土受力时在孔隙中缓慢地流动有关。

当压应力不大时，混凝土的徐变与荷载作用时间关系如图 1—8 所示。开始时变形增长较快，以后逐渐变慢，经过几年才完成。徐变总量一般可达 $3 \sim 15 \times 10^{-4}$ ，即 $0.3 \sim 1.5$ mm/m。

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，以后随着龄期的延长逐渐减小；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；硬化时湿度愈小，徐变愈大。

徐变可能引起不利的结构变形，在预应力混凝土构件中引起较大的预应力损失，这是不利的方面。但徐变也有其有利的一面，例如在钢筋混凝土轴心受压构件中，徐变引起有利的内力重分布，使钢筋的压应力增大，而混凝土的压应力减小。

为了减少徐变的不利影响，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。

(6) 混凝土的收缩

不受荷载作用的混凝土在空气中结硬时，其体积会变小，这种现象称为收缩。混凝土产生收缩，主要是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，混凝土收缩量不仅与环境有关，也与时间有关。如果环境的温度和湿度都相当稳定，混凝土的收缩基本上可在两三年内完成，如图 1—9 所示。

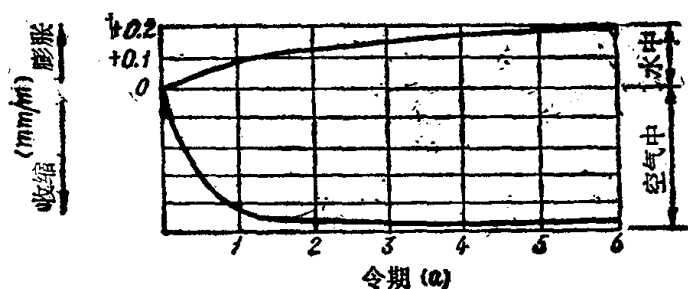


图 1—9 混凝土的收缩与膨胀

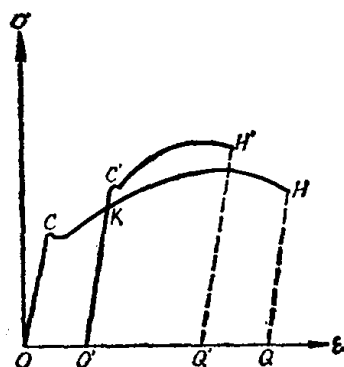


图 1—10 钢的 σ — ϵ 图

在水中结硬的混凝土，体积不但不减小，而且逐渐增大。

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；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。

工程中要想减少混凝土的收缩，应尽量减少水和水泥用量；选用坚强的骨料；注意振捣密实并改善养护条件。

在工程设计计算中，常采用的混凝土线收缩值为 0.00015，即每 m 收缩 0.15 mm。

(二) 钢筋

1. 钢筋的主要力学性能

铁路桥梁等结构中所采用A3、A5及T20MnSi等钢筋。其主要特点是 $\sigma-\epsilon$ 图上有明显的屈服台阶（亦称流幅）如图1—10中的OCHKH曲线。

钢筋中拉应力小于比例极限时其弹性模量值一般取210GPa。应力超过比例极限后，这类钢开始表现塑性，其 $\sigma-\epsilon$ 曲线由直变弯。此后不久应力达到屈服点，应变可以增大很多（可超过0.02）而应力基本不变。继续拉伸时，则进入强化阶段， $\sigma-\epsilon$ 曲线又形成上升的曲线。最后在名义应力（按试件原截面积算出的应力）达到极限强度时，试件在薄弱截面处产生颈缩现象，很快断裂。这类钢的特点是在越出屈服台阶以前发生很大的塑性变形（拉断之前的变形更大），这对于确定配筋量适当的钢筋混凝土受弯构件破坏阶段的应力图形是很重要的。

这类钢的比例极限一般很接近其屈服点，工程中常不加区别，而以屈服点为制定容许应力或计算强度的主要依据。分析中采用的基本假定是到达屈服点以前，钢筋弹性地工作。达到屈服点以后，则钢筋塑性地工作。实际上这类钢的极限强度大于屈服点的1.5倍，但越出屈服台阶之后，钢筋的塑性变形已超过结构正常使用要求所容许的限度，在工程实践中只能把强化阶段看作额外的安全储备，而不能据以进行计算。但在抗震结构设计中，按结构坏而不倒塌验算时，容许考虑利用钢筋的强化阶段。

2. 各种冷加工及其对钢筋性能的影响

冷拉 用卷扬机等设备把并未加热的钢筋拉到应力超过其屈服点不太多的程度，如图1—10中的K点，然后放松。卸荷线KO'将平行于OC，OO'为卸荷后残留的塑性变形。如果立即再加荷，则得到的 $\sigma-\epsilon$ 曲线将为O'KH。在工程中，在放松后要经过相当长一段时间才会让钢筋承受拉力，故出现如图中O'C'H'所示新的 $\sigma-\epsilon$ 曲线。这时出现新的屈服台阶，它比较短，但应力值略高于冷加工后开始卸荷时的应力值。这种现象称为时效，它使屈服点和极限强度有所提高，但这类钢的塑性和韧性则降低。

经冷拉后，全部钢筋的屈服点变得基本上相等，略高于冷拉时的控制应力，铁锈大部脱落，并且伸长5%左右。

冷拔 冷拔是将未加热的钢筋通过硬质合金钢模中直径比钢筋略小的孔眼强行拉出，迫使钢筋截面稍微减小。通常需连续拉拔几次，才能使钢筋直径变成预定的数字。钢筋经冷拔后，屈服台阶消失，极限强度提高很多，但塑性（延伸率）和韧性都大大降低，性能变得接近硬钢。

冷拔钢丝没有明显的屈服点，通常根据其 $\sigma-\epsilon$ 曲线定出残余应变为0.2%的卸载应力，作为其协定屈服点。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。

(三) 钢筋混凝土

1. 混凝土和钢筋的粘结力

(1) 粘结的作用和粘结力的组成

钢筋和混凝土之间有相当大的粘结力，是这两种材料能共同工作的必要条件。粘结力能阻止钢筋与混凝土两者间的相对滑动，能承受沿接触面上作用着的剪应力。

试验研究指出，粘结力的强弱可能在相当大的范围内变动，它主要由下列三项组成：

摩擦力 混凝土收缩后紧握钢筋，有相对滑动趋势时便有摩擦力阻止滑动。

胶着力 它是水泥浆的胶粘性所提供的。

咬合力 由于钢筋表面不平整，变形钢筋更有凹凸不平的纹和槽，混凝土便和钢筋互相咬合嵌锁而连在一起。要实现相对滑动，至少要使混凝土受力变形，滑动稍多则混凝土凸起部份将被剪断。

研究表明，胶着力非常有限，光面圆钢筋的粘结力主要来自摩擦力，变形钢筋的粘结力则主要来自咬合力。目前尚无法显著地提高胶着力和摩擦力，故提高粘结力的主要途径是用变形钢筋来提高咬合力。

(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。拔出试验是长期以来研究粘结问题的重要手段。试验时先将钢筋一端埋入混凝土中，顶住混凝土试件而用力拔露出钢筋的另一端，逐渐将力加大，直到钢筋被拔出为止（图 1—11）。若拔出钢筋所需的力为 N ，埋置长为 l 而钢筋周界 $u = \pi d$ ，则粘结应力的极限值即粘结强度为：

$$\tau = \frac{N}{ul}$$

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—11 所示。当实际最大粘结应力 τ_{max} 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 $\bar{\tau}$ 对最大粘结应力 τ_{max} 的比值 $(\bar{\tau}/\tau_{max})$ 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。为了加强光圆钢筋的粘结力，除保证一定的埋置长度外，还要在钢筋末端加弯钩。

2. 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。

3. 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。

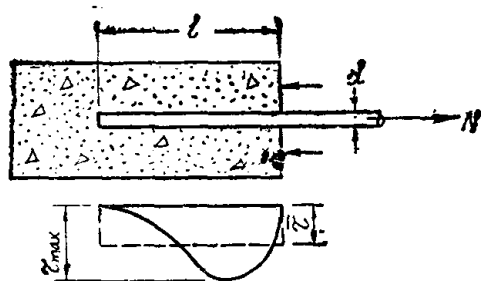


图 1—11 拔出试验

第二章 受弯构件强度和变形计算

第一节 抗弯强度计算

一、钢筋混凝土梁式板和单跨梁的构造

钢筋混凝土受弯构件主要有梁和板。梁的截面形状常见的有矩形、T形及门形。由于桥梁受到的荷载较大，一般采用T形、门形或箱形截面，其上翼缘实际上就是桥面板的组成部分。

梁通常只在其受拉区配置纵向受力钢筋，称为单筋梁。有时因梁高受限制，在受压区亦配置纵向受力钢筋，则称为双筋梁，双筋梁应用较少。

板是厚度不大的平面构件，其平面形状通常为矩形。如果板仅有两边支承(图2-1a)或四边支承而其长边 l_1 与短边 l_2 之比大于2时(图2-1b)，均称为梁式板。后者按跨长为 l_2 的梁设计。

(一) 单筋梁的钢筋构造要点

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2-2所示。

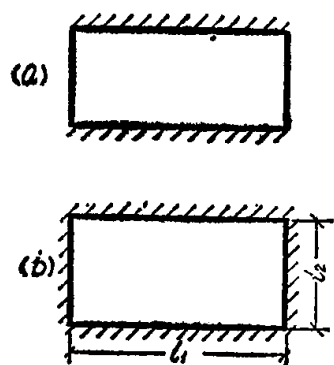


图 2-1 板的类型

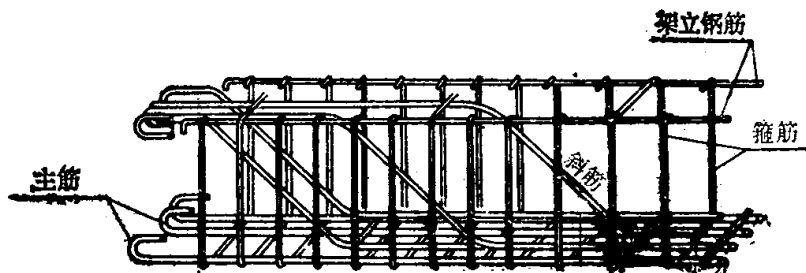


图 2-2 梁内钢筋布置

1. 纵向受力钢筋 此种钢筋平行于梁的轴线布置，一般布置在受拉区，其主要作用是承受荷载弯矩引起的拉应力，常称之为主筋，其数量由计算决定。梁内主筋可以单根布置，当单根布置有困难时，则可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直径，亦不得小于30mm。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45mm，在竖向不得小于钢筋直径或30mm（两者均须满足）。

2. 箍筋 这种钢筋垂直于梁轴线布置，其作用为：承受由剪力引起的主拉应力，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。无论根据计算需要与否，梁内均应设置箍筋。

3. 斜筋 此种钢筋通常是纵向受力钢筋弯起的斜段，故称为弯起钢筋或斜筋。它用来承受主拉应力，其数量由计算决定。

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10~14mm。

梁内主筋有的伸至支座内, 其端部应做成弯钩, 有的要弯起以提供斜筋, 有的需要接长, 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。螺纹钢筋与混凝土粘结情况较好, 通常制成直钩。半圆弯钩的内径不小于 $2.5d$, 直段不小于 $3d$ 。

2. 弯转 钢筋由构件一侧弯向另一侧时, 弯转处的圆弧半径不应太小。光面钢筋弯转半径应 $\geq 10d$, 螺纹钢筋应 $\geq 12d$ 。

3. 接头 钢筋接头常见的形式有绑扎搭接接头、对焊接头和弧焊接头, 如图 2—3 所示。

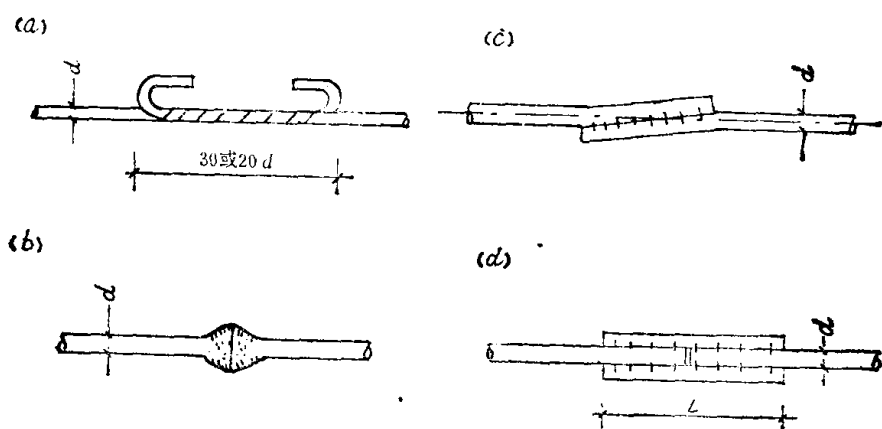


图 2—3 钢筋接头形式
(a) 绑扎接头; (b) 对焊接头; (c)、(d) 弧焊接头。

(1) 绑扎搭接接头 两根钢筋交搭一定长度并用铁丝绑扎。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 $20d$ (限于直径较小的光面钢筋)。

(2) 对焊接头 两钢筋用对焊机焊接。对接焊有电阻对接焊和闪光对接焊两种。电阻对接焊需将钢筋端部铣平, 施工困难, 且强度不高, 故较少采用。闪光对接焊质量高, 加工简单, 一般多采用。

(3) 弧焊接头 将两根钢筋稍弯折而交搭并焊连。其缺点是接头中线与钢筋中心线不重合, 使接头受弯。亦可用短角钢, 短钢筋等为拼接配件而弧焊成对接接头。

(二) 梁式板的钢筋构造要点

梁式板内的钢筋有受力钢筋和分布钢筋两种。

1. 受力钢筋 梁式板中的受力钢筋沿板的跨度方向放置在板的受拉区内, 是板内的主要受力钢筋, 其数量由计算决定。铁路桥梁道碴槽板受力钢筋的最小直径为10mm, 人行道板受力钢筋最小直径为8mm, 其间距最大为20cm。板内受力钢筋伸入支座数量每米不得少于3根, 并不得少于跨中钢筋截面的 $1/4$ 。由于板宽很大, 为方便起见, 通常取1m宽的板带进行设计。板中受力钢筋的数量以直径及间距表示, 如 $\phi 10$ 间距为20cm等。

2. 分布钢筋 板中的分布钢筋沿垂直受力钢筋的方向布置。它的作用是: 将荷载分布传递给受力钢筋; 分担混凝土收缩和温度变化引起的拉应力; 固定受力钢筋的位置。为了不