

高等学校教材

XIANDAI YUYINGLI
HUNNINGTU LILUN
YU
YINGYONG

现代预应力混凝土 理论与应用

中南大学 卢树圣 编著

8-43

中国铁道出版社

701378-43

L82

高等学校教材

现代预应力混凝土理论与应用

中南大学	卢树圣	编著
北方交通大学	许克宾	主审

中国铁道出版社

2000年·北京

(京)新登字 063 号

内 容 简 介

本书讲述了预应力混凝土的基本概念和原理,基本构件的设计计算方法,以及近 20 年发展起来的并应用于实际工程中的“部分预应力”、“无粘结预应力”、“双预应力”、“体外预应力”、“预弯预应力”等新型预应力结构的基本特点和设计理论,对于既有预应力混凝土结构的评估和预应力加固技术也作了必要的介绍。本书全面系统地反映了预应力混凝土理论发展的现状和最新研究成果。

本书除可作为高等学校土木类各专业的本科生和研究生的教材外,也可供工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

现代预应力混凝土理论与应用/卢树圣编著. —北京:
中国铁道出版社, 2000.7
ISBN 7-113-03717-8

I. 现… II. 卢… III. 预应力混凝土
IV. TU528.571

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 20756 号

书 名: 现代预应力混凝土理论与应用

作 者: 中南大学 卢树圣

出版发行: 中国铁道出版社 (100054, 北京市宣武区右安门西街 8 号)

责任编辑: 程东海

封面设计: 李艳阳

印 刷: 北京市燕山印刷厂

开 本: 787×1092 1/16 印张: 18.25 字数: 458 千

版 本: 2000 年 7 月第 1 版 2000 年 7 月第 1 次印刷

印 数: 1—3500 册

书 号: ISBN7-113-03717-8/TU·620

定 价: 23.40 元

版权所有 盗印必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社发行部调换。

前 言

由于近 20 年来预应力混凝土结构发展很快,形成了不少新的理论和技术,开发研究出许多新型材料和张拉锚固体系,扩大了预应力技术的应用领域,建成了不少大跨度桥梁及其他新型结构,有极其丰富的内容。以往的预应力混凝土结构设计原理,没有一个系统完整的教材,仅为“结构设计原理”教材中的一章或一部分内容,而且其内容又仅限于“全预应力混凝土结构”的原理和方法,所涉及的内容较少,范围也较窄,不适应目前教学改革和学生学习的需要,也不利于学生毕业后进一步发展的要求。为改善这种状况,适应教学和学生今后工作的需要,特编写了本教材。

本书改变了传统的预应力混凝土教材内容过少、范围狭窄、比较陈旧等问题。新编教材除保留必要的传统预应力混凝土结构的基本原理和方法(如基本原理、材料、应力损失及受弯构件的设计计算方法)外,大量增加了近 20 年发展起来的广泛应用于实际工程中的“部分预应力”、“无粘结预应力”、“双预应力”、“体外预应力”、“预弯预应力”等结构的新理论、新工艺、新技术、新材料及科研、试验和工程实践的成果(如疲劳性能)。除介绍预应力混凝土新结构设计理论和方法外,还介绍了既有结构物的评估方法和采用预应力技术对既有结构物的加固。本书内容基本上覆盖了有关预应力混凝土结构的多个方面。

本书以介绍预应力混凝土构件的基本原理为主,掌握了构件的基本原理,就能自如地应用于工程实践中,也完全有能力对既有结构物进行预应力加固和处理。各种预应力结构在设计中所使用的规范虽说有所不同,但其设计原理和方法是相通的,仅在于安全度和材料指标或计算系数的取值有所不同。因此,对具体工程只要熟悉和遵循其相应的规范条款,无论对于设计和加固都不会有大的困难。

为使本书应用广泛些,在编写过程中涉及到国内土木类多种行业的设计规范和标准,其中有两种“铁路桥涵设计规范”,即现行的按容许应力法的《铁路桥涵钢筋混凝土和预应力混凝土结构设计规范》TB 10002.3—99(书中简称《铁路桥规》TB 10002.3—99),及即将颁布的以可靠度理论为基础的《铁路桥涵设计规范》(荷载和抗力系数极限状态设计法)(书中简称《铁路桥规(极)》)。

全书内容共分16章,大致可分为3个层次使用:第一至第四章为预应力混凝土的基本概念和原理及全预应力混凝土基本构件的设计计算方法,这部分内容为本(专)科学生必须学习和掌握的内容,相当于原“结构设计原理”的内容;第五至第九章为扩充部分,可作为因材施教和本科生的选修内容,也可单独开设相应的选修课;第十至第十六章为一些专题内容,有些问题仍需进一步的研究和探讨,这部分内容可作为土木专业硕士研究生的学习内容,或作为土木专业研究生的学位课程,具体情况可由教师掌握。

本书由中南大学(原长沙铁道学院)卢树圣教授编著,北方交通大学许克宾教授主审。参加编写的有:乔建东副教授(第二、三章),文雨松教授(第十五章),卢树圣教授(第一、第四~第十四章及第十六章),全书最后由卢树圣教授定稿。由于时间仓促和编写力量的限制,原计划编写的有些内容尚未能纳入,书中也难免有缺陷和错误,请读者指正。对编著本书提供资料的单位和个人,在此深表谢意。

编著者

2000年6月

第一章 预应力混凝土结构的基本原理

第一节 预应力混凝土结构的基本概念

一、概 念

钢筋混凝土结构虽早已被广泛地应用于各类工程结构,但它还存在不少缺点。众所周知,混凝土的抗拉性能很差,其极限拉应变为 $0.1 \times 10^{-3} \sim 0.15 \times 10^{-3}$, 与此相应的钢筋应力为 $20 \sim 30\text{MPa}$, 超过此值混凝土开裂。随着荷载的增加,裂缝宽度加大。一般钢筋混凝土结构的裂缝宽度不应超过 $0.2 \sim 0.3\text{mm}$, 相应的钢筋应力,对光面钢筋为 $100 \sim 250\text{MPa}$, 对变形钢筋其应力可达 $150 \sim 300\text{MPa}$ 。若超过上述限值,裂缝过宽对于钢筋的锈蚀和结构的使用寿命会有严重影响,并降低构件的刚度。因此一般钢筋混凝土构件在正常使用状态下是带裂缝工作的。可见,由于构件过早的出现裂缝和对裂缝宽度的限制,普通钢筋混凝土结构中不能有效地采用高强度钢材,相应的也就不能使用高强度混凝土。由于不能使用高强度材料,若使结构构件承受较大的荷载,必然要加大混凝土截面尺寸和使用较多的钢筋数量,构件的自重增大。随着结构跨度的增大其自重所占的比例也愈大,这就使钢筋混凝土结构的适用范围受到很大的限制。对于正常使用状态下不容许出现裂缝的结构,如压力管道、水池及贮存罐等结构,其中钢筋所受应力很小,将会造成材料的利用极不合理和浪费,甚至有时不可能实现。为使钢筋混凝土结构得到进一步发展,必须解决上述矛盾,于是人们在长期的工程实践中创造了预应力混凝土结构。

二、预应力混凝土的基本原理

所谓预应力混凝土结构就是在结构承受外荷载前,先对混凝土构件预加压力,人为地事先对结构造成一种应力状态。这种应力的分布和分布规律,与外荷载产生的应力大小和分布规律相反,使之可以抵消由于外荷载产生的全部或部分拉应力。这样由预压应力与外荷载产生的应力叠加后,根据事先预加应力的分布大小,可使结构在使用状态下不出现拉应力、或推迟裂缝的出现,或将裂缝宽度控制在一定的限度内,这就是预应力的基本原理。造成这种预应力状态,通常是靠张拉高强度钢筋,使之伸长后的钢筋锚定于混凝土中(靠锚具和粘结力)。由于混凝土构件阻止钢筋的回缩,就造成钢筋受拉、混凝土受压的预应力状态。这种预应力状态必须靠高强度钢筋来实现。混凝土由于受到高的预压应力,也必须采用高强度。因此预应力混凝土结构为使用高强度材料开辟了广阔的前景。

日常生活中利用预应力原理的例子很多。如盛水的木桶,收紧的桶箍将分散的桶条间产生一定的环向压力。桶盛水,水压引起环向拉应力,二者叠加之后桶条之间乃保留一定的压应力,故水不致于漏出。又如自行车轮的辐条,预先将其收紧承受拉应力,以抵消以后所承受的压应力;而钢圈承受收紧辐条的拉力而受压。

现用一简单示例来说明预应力的原理及其效果。

【例 1-1】 设有一矩形截面混凝土梁，其截面尺寸为 $b \times h = 0.25\text{m} \times 0.50\text{m}$ ，混凝土强度等级为 C55， $E_c = 3.65 \times 10^4 \text{MPa}$ ，抗压强度标准值 $f_{ck} = 37\text{MPa}$ ，抗拉强度标准值 $f_{ctk} = 3.3\text{MPa}$ ；采用高强度钢丝，抗拉强度标准值为 $f_{ptk} = 1570\text{MPa}$ ，抗拉强度设计值 $f_{pfd} = 1120\text{MPa}$ ，弹性模量 $E_p = 2.05 \times 10^5 \text{MPa}$ ，梁承受匀布荷载（包括自重） $q = 8\text{kN/m}$ ，计算跨度 $l = 12\text{m}$ （图 1-1）。要求确定：

（1）计算荷载作用下跨中截面下缘处混凝土的应力（其几何截面可粗略按混凝土截面计算）；

（2）若要使梁跨中截面下缘处混凝土的应力为零，在截面形心处需施加多大的预压力 N_p ？假定预应力钢丝受拉的有效预应力 $\sigma_{cp} = 800\text{MPa}$ ，求力筋的面积 A_p ，并问力筋和混凝土的最大应力各为多少？

（3）若要使梁跨中截面下缘混凝土的应力为零，在构件距截面下缘 15cm（偏心距 $e = 0.10\text{m}$ ）处施加偏心预压力 N_p ，此 N_p 应为多大？力筋的有效预应力仍为 800MPa ，求力筋的面积 A_p ，并计算力筋和混凝土的最大应力。

【解】（1）求荷载作用下梁跨中截面上、下缘混凝土的应力。

$$M = \frac{1}{8}ql^2 = \frac{1}{8} \times 8 \times 12^2 = 144\text{kN} \cdot \text{m}$$

$$I = \frac{1}{12}bh^3 = \frac{1}{12} \times 0.25 \times 0.5^3 = 0.0026\text{m}^4$$

混凝土上、下缘的应力：

$$\sigma'_c = \frac{M}{I} \cdot \frac{h}{2} = \frac{144}{0.0026} \times \frac{0.5}{2} \times \frac{1}{1000} = 13.85\text{MPa}$$

下缘混凝土的拉应力 $\sigma_c = 13.85\text{MPa}$ （图 1-1a）。而 C55 混凝土的抗拉强度的标准值 $f_{ctk} = 3.3\text{MPa}$ ，显然梁下缘混凝土早已开裂。

（2）为了使梁跨中截面下缘混凝土应力为零，在截面形心处施加了压力 N_p （图 1-1b），求 N_p 和 A_p 及 σ_p 和 σ_c 。

由于在截面形心处施加预压力，构件为中心受压，混凝土的预应力 $\sigma_{cp} = N_p/A$ 。其中 $A = b \cdot h = 0.25 \times 0.50 = 0.125\text{m}^2$ 。因为要求 $\sigma_{cp} + \sigma_c = 0$ ，故

$$\sigma_{cp} = \frac{N_p}{A} = \sigma_c$$

所需总的预应力： $N_p = A\sigma_c = 0.125 \times 10^6 / 10^3 \times 13.85 = 1731.25 \text{ (kN)}$

力筋面积： $A_p = N_p / \sigma_{cp} = 1731.25 \times 10^3 / 800 = 0.00216\text{m}^2 = 21.6\text{cm}^2$

力筋应力： $\sigma_{pmax} = \sigma_{cp} + n_p \frac{M}{I} e = 800 + 0 = 800\text{MPa}$

（因中心受压，则 $e = 0$ ）

混凝土上缘应力： $\sigma'_{cmax} = \sigma_{cp} + \sigma'_c = 13.85 + 13.85 = 27.70\text{MPa}$

混凝土下缘应力： $\sigma_{cmax} = \sigma_{cp} + \sigma_c = 13.85 - 13.85 = 0$ ，C55 的混凝土抗压强度标准值 $f_{ck} = 37\text{MPa} > \sigma'_{cmax}$

（3）在距梁截面下缘 15cm（偏心 $e = 10\text{cm}$ ）处，施加一偏心预压力 N_p ，当下缘混凝土应力 $\sigma_c = 0$ 时，求 N_p 、 A_p 及 σ_{pmax} 和 σ'_{cmax}

施加偏心预应力 N_p 时截面应力状态如图 1-1（c）所示。

预应力引起梁截面下缘混凝土预压应力 σ_{cp} 为

$$\sigma_{cp} = \frac{N_p}{A} + \frac{N_p \cdot e}{I} \cdot \frac{h}{2}$$

又 $\sigma_{cp} + \sigma_c = 0$, 而 $\sigma_c = 13.85 \text{ MPa}$ (荷载引起的拉应力)

所以
$$\sigma_{cp} = \frac{N_p}{A} + \frac{N_p \cdot e}{I} \cdot \frac{h}{2} = 13.85 \text{ MPa}$$

解得
$$N_p = \frac{13.85}{\frac{I}{A} + \frac{e}{I} \cdot \frac{h}{2}} = \frac{13.85 \times 10^3}{\frac{1}{0.125} + \frac{0.10}{0.0026} \cdot \frac{0.5}{2}} = 786 \text{ kN}$$

筋筋面积: $A_p = N_p / \sigma_{cp} = \frac{786 \times 10^3}{800} = 982.5 \text{ mm}^2 = 9.825 \text{ cm}^2$

筋筋应力: $\sigma_{pmax} = \sigma_{cp} + n_p \cdot \frac{M}{I} e = 800 + \frac{2.05 \times 10^5}{3.65 \times 10^4} \times \frac{144}{0.0026} \times 0.10 \times 10^{-3} = 831.11 \text{ MPa}$

截面上缘混凝土应力: $\sigma'_{cmax} = \sigma_{cp} + \sigma'_c = \frac{N_p}{A} - \frac{N_p \cdot e}{I} \cdot \frac{h}{2} + \frac{M}{I} \cdot \frac{h}{2} = \frac{786 \times 10^{-3}}{0.125} - \frac{786 \times 10^{-3} \times 0.10}{0.0026} \times \frac{0.5}{2} + \frac{144}{0.0076} \times \frac{0.5}{2} \times 10^{-3} = 12.58 < f_{ck}$

由例 1-1 可以说明预应力的基本原理, 从中初步得出如下几点结论:

1. 由于预加力 N_p 的作用, 引起截面的预压应力 σ_{cp} , 当预压应力值足够大时, 可使构件混凝土截面在使用荷载作用下不出现拉应力, 构件不会开裂, 混凝土的整个截面都是有效的, 故预加应力提高了构件的刚度。

2. 梁截面无论在受荷载前或受荷载后, 预应力钢筋及构件混凝土都处于高应力状态下, 因此, 预应力混凝土结构必须要采用高强度材料。

3. 预应力钢筋的偏心布置可以提高结构的抗弯能力, 在得到同样的预应力效果情况下, 预应力钢筋的面积可大为减少 [图 1-1 (c) 中的 9.825 cm^2 远小于图 1-1 (b) 中的 21.6 cm^2], 故受弯构件的预应力钢筋的布置总是偏心的。

4. 从例中可以看出, 受拉区混凝土的应力, 由于预应力钢筋造成一定大的预压应力, 在荷载作用下总应力为零, 从而提高了构件的抗裂性。这与普通钢筋混凝土结构有着本质的不同, 钢筋的作用不仅是在混凝土开裂的前提下, 代替混凝土承受拉应力, 而重要的是由它给构件施加以预压应力。

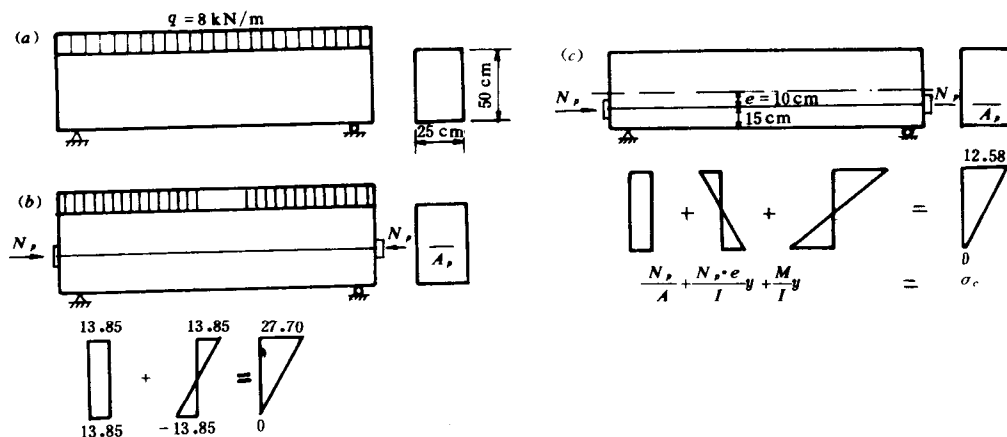


图 1-1

这里还必须指出: 由荷载引起的弯矩沿梁跨长是变化的, 跨中大而靠近端部逐渐减小

(简支梁), 为防止在不变的偏心预压力作用下, 在靠近支点处构件截面上缘会出现过大拉应力或者引起开裂, 预压力的偏心也应是变化的。因此, 通常预应力筋是曲线布置, 或部分曲线部分直线布置, 靠端部力筋逐渐弯起。这不仅减小靠近梁端部预压力引起的弯矩, 且由于一部分预应力钢筋弯起而产生竖向分力, 可以抵消由荷载引起的部分剪力, 对梁的抗剪能力也是有利的。

在现代预应力混凝土结构中, 如例 1-1 所示, 在使用荷载作用下, 构件各截面都不出现拉应力(应力为零或保持一定的压应力)的预应力混凝土, 称之为“全预应力混凝土”, 而在使用荷载作用下构件截面允许出现拉应力, 甚至允许截面有一定限度的裂缝开展的预应力混凝土, 称之为“部分预应力混凝土”。为初学者方便起见, 本书的第一~第四章主要介绍传统的“预应力混凝土结构”, 以后的几章将全面叙述有关部分预应力混凝土结构及其他专题内容。

三、预应力混凝土结构的发展简介与展望

预应力的基本原理在几世纪以前就被人们应用于生活实践中, 但直接应用于混凝土结构还是在 1886 年, 美国旧金山的一位工程师 P. H. Jackson 获得了在人造石及混凝土拱内张紧钢拉杆制作楼板的专利。1888 年德国的 C. W. F. Doebling 独立获得了在楼板受荷载前用已施加拉力的钢筋来加强混凝土的专利。此后, 欧美各国进行了各种试验研究, 但实用均未获成功。其主要原因是采用普通钢筋作为预应力钢筋, 钢筋预拉应力很低(不超过 120MPa), 由于混凝土的收缩和徐变等原因使构件缩短, 钢筋中的预拉应力值也随之降低。几个月之后, 事先给予的拉应力损失殆尽, 对混凝土的预压应力也就不复存在了。当时对于产生上述现象的原因还不清楚, 故在相当一个时期预应力混凝土未被应用于实际工程中。直到 1928 年法国的弗列西奈(E. Freyssinet)试验成功, 他找到了问题的原因, 并使预应力混凝土有了实用的可能。他采用高强度钢丝, 使其预应力值达到 1 000MPa 左右, 混凝土构件发生徐变和收缩损失之后仍存约 800MPa 的预拉应力, 足以实现其对混凝土的预压效果。此后人们对于高强度钢材, 张拉机具以及锚固方法等进行了一系列研究。1939 年弗氏发明了张拉钢丝的双作用千斤顶及钢制锥形锚具以后, 预应力混凝土便得到应用和逐步推广。

第二次世界大战时期, 欧洲缺钢, 而预应力混凝土结构可以大大节约钢材。又由于当时炼钢技术已能提供预应力混凝土结构所需要的高强度钢材, 从而使预应力混凝土结构首先在欧洲各国得到广泛地应用, 尔后才在世界范围内迅速发展起来。由于材料和技术, 以及计算理论的不断发展和进步, 为进一步发展和推广预应力混凝土结构提供了有利条件。

我国预应力混凝土结构是从新中国成立后才开始研制和逐步推广应用的。早在发展国民经济第一个五年计划期间的 1954 年, 由铁道科学研究院开始对预应力钢丝混凝土轨枕进行研制, 1955 年又对跨度为 23.8m 的后张预应力混凝土铁路桥梁研制, 于 1956 年在东陇海线跨越新沂河成功地修建了一座 28 孔跨度为 23.8m 的铁路后张预应力混凝土桥梁。1957 年在京周公路又修建了第一座跨度为 20m 的简支 T 形截面公路预应力混凝土桥梁。由于预应力混凝土结构的技术先进, 跨越能力大, 节省钢材和木料, 此后在房屋建筑及其他工程领域逐渐应用与推广。据不完全统计, 自 1956 年到 1996 年期间, 铁路上采用跨度在 40m 以下的预应力混凝土简支梁已达 30 000 余孔; 预应力轨枕达 1.2 亿多根; 公路跨度 50m 以下的桥梁预应力混凝土梁达 85% 以上; 采用预应力混凝土构件的厂房累计达 10 亿 m^2 多; 城市住房超过 30 亿 m^2 ; 预应力管道累计达 83 万 km 多。为国家节约了大量的钢材、水泥和木料, 具有巨大的经济效益。

回顾过去,展望未来,在跨入 21 世纪之际,现代预应力混凝土结构及预应力技术,将会在以下诸方面得到重视和发展。

预应力混凝土结构所用材料将会得到进一步地研究和开发更高强度、轻质、低塑、大直径、低松弛及耐腐蚀性能的材料,研制和开发价格较低的新型“纤维增强塑料”,逐步取代目前通常采用的预应力钢筋;锚具、夹具及张拉设备等也日趋大吨位化;结构配筋形式也将会更加多样化:混合配筋的部分预应力,体外配筋预应力,无粘结预应力将会得到更广泛地应用;大跨度桥梁结构及大开间房屋及高耸建筑将会进一步扩大;随着结构向大跨度、大开间发展,结构的组合形式也必将多样化;如截面为钢梁及钢桁与上下混凝土板组合的预应力结合梁结构,钢和预应力混凝土分段的复合结构;预应力桁和板及拱和梁板的组合结构;预制预应力构件和现浇结合的整合结构;以及先张构件和后张整体拼装的组合结构等。预应力结构的设计理论和方法也将会全面由按弹性理论的容许应力法逐步过渡至按塑性理论的可靠度极限状态设计方法,设计手段将会全面进入自动化;预应力施工技术和产品质量也将会更加规范化、标准化、自动化和产业化。随着科学技术的进步和大规模经济建设的需要,现代预应力技术必将应用于各种建筑领域,将会更加发挥其无比的技术优势和威力,其发展前景是极其广阔的。

四、预应力混凝土的优缺点及其应用范围

(一) 预应力混凝土结构的优缺点

与钢筋混凝土结构相比,预应力混凝土结构具有更多的优越性。

1. 提高了构件的抗裂性和刚度。对构件施加不同大小的预应力后,在使用荷载作用下可使构件不出现拉应力,构件可以不出现裂缝,或推迟构件裂缝的出现,或是把裂缝控制在一定范围之内。从而增强了结构刚度和耐久性。由于提高了结构抗裂性,可以使其应用于水池、压力管等抗渗抗裂性要求高的结构。

2. 可以节约材料和减轻结构的自重。由于预应力混凝土合理地使用了高强度钢筋和高强度混凝土,在承受同样的荷载条件下,构件截面尺寸可以大大减小。从而减轻了构件自重,节约了钢材和水泥,为建造大跨度结构提供了有利条件。

3. 提高了构件的抗剪能力。由于纵向预压应力及弯起的预应力筋的竖向分力可使荷载作用下构件的主拉应力减小,提高了构件斜截面的抗裂性。也可使截面腹板厚度减薄,有利于减轻结构自重和增大跨越能力。

4. 结构质量安全可靠。预应力混凝土,在施加预应力过程中都要经受高应力的作用,这就相当于进行了一次负荷强度检验。因此,在使用荷载作用下结构的安全性及其他使用性能更加可靠。

5. 提高了构件的耐疲劳性能。对于不允许开裂的预应力混凝土构件,在重复荷载作用下其应力变化幅度很小,提高了构件的耐劳性;容许开裂的预应力混凝土构件,只要控制裂缝宽度在限值内,其耐劳性能也可以得到保证的。所以预应力混凝土结构特别适用于承受动力荷载的铁路桥梁结构。

6. 预加应力的方法更有利于装配式混凝土结构的推广。例如,分段施工的预应力串联梁,大跨度预应力桥梁的悬臂法、顶推法施工,而且也是既有结构加固技术的有效方法。

事物总是一分为二的,预应力混凝土结构也存在其缺点。

1. 施工工艺比较复杂,对施工过程的监控和施工质量要求比较高,因而需要有一个比较

专业化的施工队伍。

2. 需要有一定的专门设备,如张拉千斤顶、油泵、压浆和量测设备,对于先张法构件必需有强大的施工台座,对于后张法需有质量较好加工精确的锚具等,因此对工程前期投资较大。

3. 构件预加应力的反拱度不易控制,由于长期预加应力的作用,所带来的混凝土徐变变形逐渐增大,对铁路桥梁造成道碴减薄,给线路养护带来困难,对公路桥梁造成桥面不平顺,使行车不够顺畅。

虽说有上述缺点,但在使用和实践过程中大都是可以设法克服的。对于较大规模的工程,采用预应力结构虽说投入一些设备,但预应力结构的跨越能力大,节省材料,可缩短工期,确保工程质量等等,总的造价仍然是经济的。由于预应力混凝土结构与其他结构相比有很大的优越性,因此它被广泛地应用于各类工程领域,并将越来越发挥其技术优势。

(二) 应用范围

由于预应力混凝土具有许多优点,目前预应力混凝土广泛地应用于桥梁、房屋建筑、水工结构、轨枕、电杆、压力管道、贮存罐、水塔等结构,而且已扩大至高层建筑、大跨、抗震结构、岩土工程、能源工程(原子能反应堆)、海洋工程等诸多领域、多种型式的铁路和公路桥梁。如1984年建成的西班牙莱昂卢纳巴里奥桥,主跨为440m(99+440+99)预应力混凝土斜拉桥;挪威1992年建成的主跨为530m的斯坎桑德(Skarn Sundet)斜拉桥;加拿大的安娜雪丝桥是跨度为465m的叠合梁斜拉桥。目前斜拉桥跨度越修越大,法国的诺曼底(NORMAND)桥,主桥为856m,中部624m为钢梁其余部分为预应力混凝土梁组合的斜拉桥。又如奥地利阿尔姆桥是采用双预应力体系的简支梁桥,其跨度达76m,而梁高仅2.5m,其跨高比 $l/h=30.3$,是迄今世界上最大跨度的简支梁。近年来大跨度预应力混凝土桥梁在国内也迅速发展起来,建造了一批创世界纪录的大跨度桥梁。如虎门大桥的辅航道桥(引桥)为跨度270m预应力连续刚构桥。跨度444m的重庆长江二桥的斜拉桥;跨度432m的铜陵公路斜拉桥;跨度414m的郟阳汉水斜拉桥;采用钢混结合桥面的跨度602m的上海杨浦斜拉桥;于70年代我国最早建造的跨度为96m的铁路预应力混凝土斜拉桥。目前正在建造芜湖长江大桥,该桥为钢桁和混凝土桥面相结合的公铁两用主跨为320m的斜拉桥,以及正在建造的主跨为500m的荆沙长江公路斜拉桥。又如已建成的168m跨的攀枝花铁路预应力混凝土连续刚构桥;南昆铁路跨度为128m,墩高100m的清水河连续刚构桥;宁波大榭岛桥面宽达28m跨海公铁两用桥(同一平面),该桥跨度为124+170+124连续双肢薄壁墩单箱双室刚构桥。在房屋建筑中的屋架、桁架、楼板、大梁、屋面板、薄壳屋盖和高层建筑的框架,以及大跨度剧院、体育馆、展览馆、车库等建筑广泛地采用预应力混凝土结构。如目前最大跨度屋架达61m,大柱网大开间结构已用到 $9\times 18\text{m}$,如北京机场建造的五层大型停车楼,柱网由 $9\times 9\text{m}$ 改为 $9\times 18\text{m}$ 后,在同样面积条件下,车位由原来的5000辆增至6000辆,在我国的高层建筑中,广州63层的国际大厦总高度为208m,自7~63层楼板全部采用无粘结预应力混凝土,大大节约了空间。采用预应力结构可以大大地改善建筑艺术造型。悬臂式建筑及倒金字塔建筑占地较少且轻巧新颖。如西德建造悬挂的高层建筑,还有预应力悬索空间结构,室内间净面积达 $270\text{m}\times 100\text{m}$ 。

预应力混凝土在其他特种结构中也有广泛的应用,如美国建造的压力容器最大容积达 $143\,000\text{m}^3$;韩国已建成五座10万t的液化天然气储罐;阿尔及利亚建成一条长800km从沙漠引水的人造河,由两根直径4m的预应力压力管组成,日输水达200万 m^3 ;加拿大1957年

在多伦多建成了目前世界最高的电视塔,高达 553m。我国上海东方明珠电视塔高达 468m,为亚州第一塔,世界第三;预应力锚杆在我国水电工程中已大量采用,如漫湾水电站为了提高边坡及坝基稳定,共用了 1 000~6 000kN 的锚杆 2 271 根,总计预加压力达 410 万 kN,预应力岩锚在梅山水库,刘家峡水坝等基础加固以及龙羊峡水电站岩壁加固中应用,取得良好的效果。其他如预应力飞机跑道,预应力码头,海上浮式工厂及海上石油开采平台等工程中亦采用。总之预应力混凝土和预应力技术在工程中的应用是极其广泛而且将会不断扩大。

第二节 预加应力的方法及锚具

一、概 述

为了使混凝土构件获得预期的预压应力效果,构件在受荷载前必须人为地给构件混凝土施加一定大小的预压应力。施加预压应力的方法很多,根据预加应力来自结构物内部或外部又可以分为两种:外部预加应力法和内部预加应力法。如果构件两端的桥台或基岩足够坚固,可在构件两端用千斤顶施加预应力形成预应力混凝土桥梁,如图 1-2 所示。

此方法可用于对混凝土路面施加预压应力,形成预应力混凝土路面结构。也曾用于水坝、干船坞、拱桥拱圈调整应力以及其他特殊场合,并取得一定效果。但通过外部千斤顶施

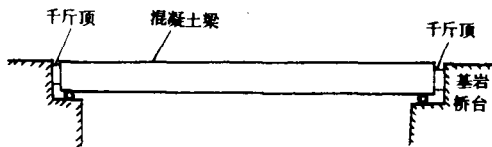


图 1-2 用千斤顶由外部直接对混凝土梁施加预压应力

加预应力使构件产生压应变一般是不变的。由于混凝土收缩和徐变随时间逐渐增大,使构件的混凝土预压应力逐渐减小,必须由千斤顶来调整予以补救,否则预应力损失可能较大,难以达到预期效果。外部预加应力的方法应用不多,而目前工程中广泛采用的还是内部预加应力的方法,即利用张拉钢筋使其伸长,靠钢筋两端锚具或与混凝土粘结以阻止钢筋回缩来给混凝土施加预应力的方法。

内部预应力方法又因结构的外形的不同而分为环向(径向)预加预应力方法和线预加预应力方法。环向预加预应力方法主要是对圆形结构施加预压应力,其力筋是连续的环境绕在构件的外面,如水池、水管及油罐、液化天然气罐等。线预加预应力主要是对梁板框架等直形结构施加预应力,其力筋的布置可以是直线的,也可以是曲线的。

对于预应力钢筋的张拉主要有如下几种方法:用千斤顶的机械方法张拉预应力筋;利用热胀冷缩的电热法张拉;用膨胀水泥的化学方法等。对预应力混凝土结构施加应力方法更重要的一种分类方法按构件的生产程序来分,即根据张拉力筋和浇注构件混凝土程序的先后不同而分为先张法和后张法两类。它们在计算上也是有差别的。

二、先 张 法

所谓先张法是指在生产预应力混凝土构件时,先张拉预应力钢筋然后浇注构件混凝土的方法。施工顺序是:先在台座(或模板)上按设计要求张拉预应力钢筋,并用锚具将其临时的锚固于台座(或模板)上,然后在台座间立模浇筑混凝土,待混凝土达到一定强度(通常不低于设计强度的 70%)后,放松被张拉的钢筋,让已与混凝土粘结的钢筋回缩。通过钢筋

和混凝土之间的粘结作用，使构件混凝土获得必要的预压应力（图 1-3）。

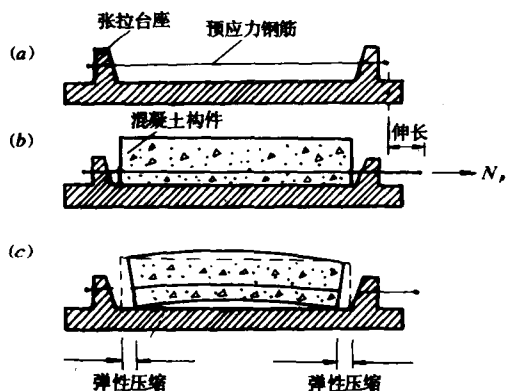


图 1-3 先张法工艺流程示意图

- (a) 钢筋就位，准备张拉；(b) 张拉钢筋，并临时锚固于台座上，立模浇注混凝土，并养护结硬；
(c) 放松钢筋，钢筋回缩，形成预应力混凝土构件。

先张法制预应力构件所用的预应力钢筋，一般用高强度钢丝，直径较小的钢绞线和小直径的冷拉粗钢筋等，以获得较强粘结自锚性能。

除利用台座张拉钢筋制先张构件外，工业化生产采用钢模作为先张法制预应力构件的张拉台座，即按设计位置在钢模上布置预应力钢筋并张拉，使伸长的钢筋临时锚固于钢模上，此后浇注构件混凝土，将浇好的构件连同钢模一起在震动台上振捣之后放到蒸汽养护池内养护，待混凝土达到要求的强度后切断钢筋以获得预应力混凝土构件。如预应力混凝土轨枕和预应力电杆就是按这种方法生产的。

先张制预应力混凝土构件除需千斤顶等张拉设备之外，还必须有固定被张拉钢筋的台座（或模板），台座受力很大，设计台座时要充分地考虑到有足够的强度，刚度和稳定性，此外还需临时的锚、夹具等，因此初期投资较大，若采用工厂化成批生产仍然是经济的，其产品的质量也可以得到保证。

先张法制预应力混凝土构件多是对较小构件，如板、小梁、枕轨及电杆等，铁路上也有用先张台座生产 16m 小跨度桥梁等结构。而大型构件或需直接在现场就地浇筑预应力结构通常采用后张法生产。

三、后 张 法

后张法制预应力混凝土构件，是先浇注构件混凝土，待混凝土养护结硬达到预期强度后，再在构件上张拉预应力钢筋的方法。后张法制预应力混凝土构件其工序是：先立构件模板，放置构造钢筋骨架，并在模板中用制孔器形成预留孔道（用橡皮胶管或波纹管），然后再浇注构件混凝土，等混凝土达到一定强度（不低于 70% 的设计强度），将事先准备好的预应力钢筋（或钢束）穿入孔道。在构件一端用锚具将预应力筋固定，另一端将张拉千斤顶支承于混凝土构件上张拉钢筋，边张拉钢筋构件边被压缩使混凝土获得预压应力，当力筋张拉到设计值即将张拉端力筋用锚具锚固于构件上，此时可以移去张拉千斤顶。钢筋张拉锚固后从压浆孔中对孔道压注水泥浆，以保护钢筋免于锈蚀，同时使预应力钢筋同混凝土构件结成整体，最后将构件两端锚具用混凝土堵住，以防其锈蚀（图 1-4）。

后张制预应力结构，预应力筋多是曲线布置，这对抗弯和抗剪都是有利的。后张法工序较多，但它不需要专门的张拉台座，适用现场制造较大的构件及一些特殊要求的构件，还可以适用组合式构件。往往可将大型构件分块制造运到工地拼接后穿入钢筋，然后张拉钢筋并锚固形成整体。后张法也广泛地应用于大跨度结构的悬臂施工中，使大跨度结构的施工方法提高到一个新的水平。

由上可知，预应力混凝土构件的施工工艺不同，建立的预应力方法也不同：先张法是靠钢筋和混凝土的粘结力来传递和保持预加应力；而后张法主要是靠特制的锚具来传递和保持预加应力，因此，后张构件锚具是一个传力的重要部件。

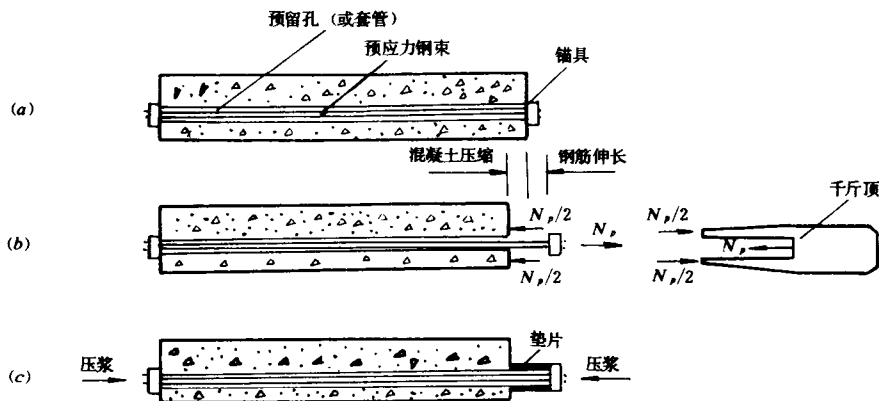


图 1-4 后张法工艺流程示意图

- (a) 浇注构件混凝土，并预留孔道；(b) 穿入钢束，一端锚固，
张拉端以混凝土构件作支承用千斤顶张拉钢束；
(c) 用锚具将钢束锚固，并向孔道中压水泥浆。

四、先张法构件的预应力传递粘结应力

先张法构件，钢筋的张拉力通常是靠两种材料间的粘结力传给混凝土，即主要靠粘结力锚固。因而，其预应力筋宜采用直径较细的钢丝、钢绞线或螺纹钢筋，有时将光面钢丝的表面刻痕或压成波纹状，以增加力筋同混凝土之间的粘结力。因此，当力筋两端无专门的锚具时，放松钢筋后，在力筋的每端各有一段传递长度完成此锚固功能。存在于这些端部传递长度的粘结应力状况根本不同于沿梁中间部分的状况。在中间各点，粘结应力是由于外部剪力或由于裂缝的存在而产生，在没有裂缝和没有剪力的位置，粘结应力为零。在端部锚固范围内，粘结应力紧随着传递而产生。力筋中的应力自外露端的零值向内逐渐增大至混凝土内某一距离处达到有效预应力为止。这一段距离称之为传力长度。而这段长度中粘结应力称之为预应力传递粘结应力。

预应力传递粘结应力的本质完全不同于剪力或裂缝所引起的挠曲粘结应力。沿梁中间各点，粘结力主要靠钢筋和混凝土间的胶结力和钢筋表面的机械咬合力来抵抗。而在端部锚固处，先张力筋在传力瞬间几乎总要滑移并缩入混凝土。这一滑动破坏了传递长度内的大部分胶结力和机械咬合力，而这种传递粘结力主要靠钢筋和混凝土间的摩擦力来承受。图 1-5(a)为一先张法

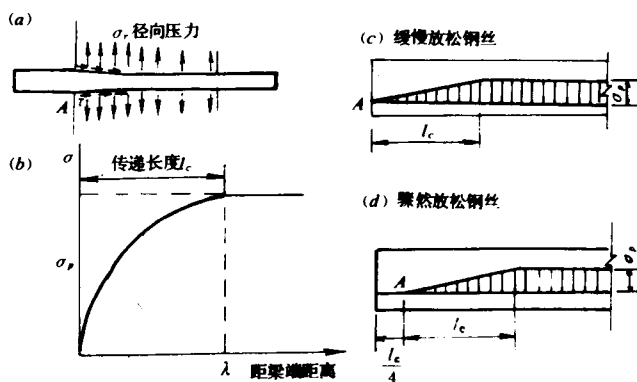


图 1-5 在先张构件端部的预应力传递

- (a) 放松钢筋后力筋回缩，在传递长度范围内钢筋直径变化，且产生径向压力；
(b) 在传递长度内应力的变化曲线；(c) 缓慢放松力筋的应力分布；
(d) 骤然放松力筋的应力分布。

构件端部一段长度，传力锚固后，力筋端 A 处的应力为零，其直径将恢复到未张拉时的粗细，

而在传递长度的内端，力筋中有很大的预拉应力（有效预应力值），其直径必按泊松比而减小。这样，在传递长度自内向外力筋的直径即有逐渐变粗的现象，从而产生对周围混凝土的径向压力，由此而产生的摩阻力即能用来传递力筋和混凝土之间的应力。在此传递长度内产生一种类似楔的作用。图 1-5(b) 为在传递长度内力筋的应力变化情况；为便于计算可按图 1-5(c)、(d) 的直线变化规律；图 1-5(c) 为力筋缓慢放松情况；图 1-5(d) 为力筋骤然放松情况，对于骤然放松情况应力零点取为端部内 $0.25l_c$ 的位置。

由图 1-5(a) 取出一段 dx 长度钢丝的脱离体，根据侧向扩张的假定，Hoyer 导出确定传递长度的公式为

$$l_c = \frac{d}{2\mu} (1 + \nu_c) \left(\frac{n_p}{\nu_p} - \frac{\sigma_p}{E_c} \right) \frac{\sigma_{cp}}{2\sigma_p - \sigma_{cp}} \quad (1-1)$$

式中 ν_c ——混凝土的泊松比；

ν_p ——预应力筋的泊松比；

$$n_p = E_p / E_c$$

E_p ——力筋的弹性模量；

E_c ——混凝土弹性模量；

σ_p ——力筋的初始张拉应力；

σ_{cp} ——力筋的有效预应力；

μ ——钢和混凝土之间的摩擦系数；

d ——力筋的直径。

若将式 (1-1) 括号中及应力值代入时，可得

$$l_c = \alpha \cdot \frac{d}{\mu} \quad (1-2)$$

其中 α 为常数，取决于材料物理特性及预应力值，由式 (1-2) 可知，预应力的传递长度与力筋的直径成正比而与摩擦系数成反比，由式 (1-1) 也可以看出传递长度受很多因素影响，这些因素是钢筋类型（如钢丝、钢绞线、变形钢筋）、钢筋直径、钢筋应力大小，混凝土强度等级，力筋放松方式（逐渐或骤然的），钢筋周围混凝土的固结和稠度，混凝土保护层的尺寸大小，甚至加载的类型（静力、重复或冲击性等）等等。虽然如此，但还是一致认为：钢筋尺寸较大，预应力值较高及混凝土级别较低，则传递长度较长。钢绞线除具有摩擦力之外，尚有机械咬合力，因此其传递长度可比同样直径的钢筋为短。

由于影响预应力筋传递长度的因素较多，通常利用试验的方法来确定。表 1-1 为国内有关规范规定的预应力钢筋的传递长度数值。

表 1-1 预应力钢筋的传递长度 l_c (mm)

钢筋种类	混凝土强度等级		
	C30	C40	$\geq C60$
刻痕钢丝直径 $d \leq 5\text{mm}$, $\sigma_{cp} = 1000\text{MPa}$	$100d$	$65d$	$50d$
钢绞线直径 $d = 9 \sim 15\text{mm}$	$85d$	$70d$	$70d$
冷拔低碳钢丝，直径 $d = 3 \sim 5\text{mm}$	$90d$	$85d$	$80d$

注：(1) 确定预应力传递长度 l_c 时，表中混凝土强度等级应按放张时混凝土的立方体抗压强度确定；

(2) 当采用骤然放松预应力钢筋的施工工艺时， l_c 的起点应从距离构件末端 $0.25l_c$ 处开始计算。

五、后张预应力锚固体系

所谓预应力锚固体系（亦称张拉体系）主要指预应力钢筋的张拉和锚固方法，以及一些构造和操作细节。由于采用的力筋形式和张拉方法的不同，国内外形成了上百种锚固体系，且各公司都有自己的专利。近 20 年随着预应力技术应用的扩大，预应力锚固体系有很多新的发展，以往采用对于钢丝和钢丝束的预应力锚固体系较多，而近年来钢绞线的应用越来越广泛，因此，对钢绞线的锚固体系种类繁多，有单根张拉的单孔锚具，有多根张拉的多孔锚具，更有数十根分单元或整束张拉的重型锚具等，以下具体介绍对锚具要求和常用实例。

（一）对锚具的要求

前已述及，先张法制预应力构件，其预应力钢筋是临时固定于台座或钢模上，需要锚具和夹具；后张法制预应力构件，其预应力筋必须靠锚具传递压力，并将力筋永久锚定于构件上。因此，锚具是保证预应力混凝土结构安全可靠工作的技术关键部件。为此，无论在设计、制造或选用锚具时，应满足以下要求：

1. 受力安全可靠；
2. 引起的预应力损失较小；
3. 构造简单、制作方便、价格便宜；
4. 张拉锚固简便、传力迅速等。

（二）锚具类型

锚具的类型繁多，其分类又是多种多样的，但按其传力锚固的受力原理，可归纳为三类：

1. 楔紧式锚固。这种锚具主要是靠摩擦阻和挤压传力，如夹片式和锥形锚具，这种锚具可锚固钢丝也可锚固钢绞线（图 1-6、图 1-7 所示）。

2. 支承式锚固。它是依靠承压锚固的锚具，这种锚具多用于粗钢筋的螺丝端杆式锚及锚固较多钢丝的墩头锚（图 1-8）。

3. 粘结力锚固。这类锚固一种是先张法中靠混凝土和钢筋的粘结力锚固，另一种是在后张法中将力筋束一端作成散状的锥形或环形同混凝土结成较大的块体形成固定端锚具埋在构件混凝土中（图 1-11、图 1-12）。

对于不同型式的锚具，需要有不同的张拉机具（千斤顶）与之配套使用。因此，在预应力混凝土结构的设计和施工中必须注意锚具同张拉机具的选择，二者要配套考虑。

（三）国内桥梁及房屋结构常用的几种锚具

1. 钢制锥形锚

钢制锥形锚（亦称弗氏锚），主要用于钢丝束的锚固（近年来也发展到可锚钢绞线），它由锚圈和锚塞（称物锥销）两部分组成。锥形锚是通过张拉钢丝时顶压锚塞，把预应力钢丝（或钢绞线）楔紧在锚圈和锚塞之间，是借助于两者之间的摩擦阻力锚固的，在锚固时利用钢丝的回缩力带动锚塞向锚圈内滑进，使钢丝进一步被挤紧（图 1-6）。此时锚圈承受很大的横向（径向）张力（一般约等于钢丝张拉力的 4 倍），因此对锚圈的设计和制造应引起足够的重视。对于锚塞的承载力，一般应不低于钢束的极限张拉力，或不低于钢束张拉控制力的 1.5 倍，可以用压力机试验确定。此外，对锚具的材质、尺寸、加工质量等均应严格的检验，以确保安全。锚具生产厂家，应有国家有关部门颁发的生产许可证。目前在铁路或公路桥梁工程中常采用的是锚固 18 ϕ 5 及 24 ϕ 5 钢丝束两种锥形锚，并配有三作用千斤顶张拉。所谓三作用即指张拉、顶塞和退楔（即将钢丝卡位千斤顶外壳上的楔子自动退下）三种功能，这种张拉体系主

要张拉钢丝束，又称为拉丝体系。图 1-7 为常用锥形锚的构造图，锚塞用 45 号优质碳素结构钢，经热处理制成，其硬度应不低于所锚钢丝硬度，否则容易滑丝，一般硬度为洛氏硬度 HRC55-58 单位，以便顶塞后，锚塞齿纹能稍微压入钢丝表面，以获得可靠锚固。锚圈用 5 号或 45 号钢冷作旋制而成，不作淬火处理，并应抽取一定数量的产品进行探伤检验，锚圈内孔壁表面硬度应比钢丝表面略低。

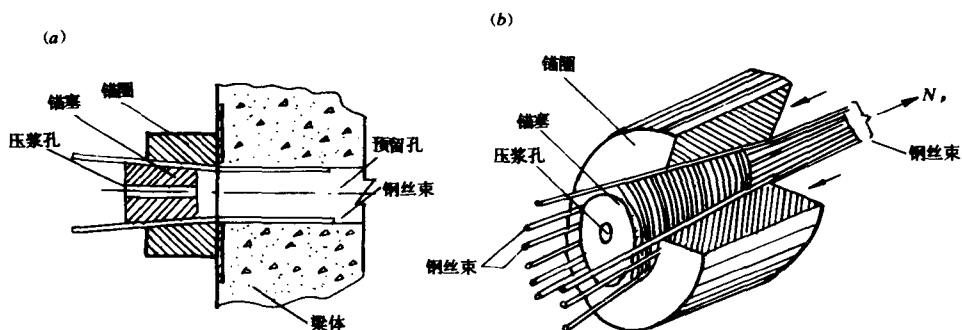


图 1-6 锥形锚具

这种锚具锚固方便，尺寸较小，便于在梁体上布置；但由于顶塞内缩量，则预应力损失较大。

2. 镦头锚具

镦头锚多用于锚固钢丝束，也可用于锚固较小直径的钢筋束。钢丝的多少和锚具的尺寸

根据设计张拉力的大小而定，每个锚具可以同时锚固几根到 100 多根钢丝的钢丝束，其张拉力可达到 10 000kN 以上。这种张拉体系在国际上叫做 BBRV 体系，是 1949 年由瑞士工程师研制成功的，这种锚具既可以用于张拉端也可用于固定端。

镦头锚分固定端锚和张拉端锚，固定端锚主要是锚板、锚板上有许多孔眼，钢丝穿入孔眼中，用专门的镦头机将钢丝头镦粗。钢丝张拉时靠镦头支承于锚板上，锚板支承于梁端；张拉端锚由锚杯和锚圈（螺帽）及垫板组成，锚杯中有许多孔眼以穿过钢丝，并

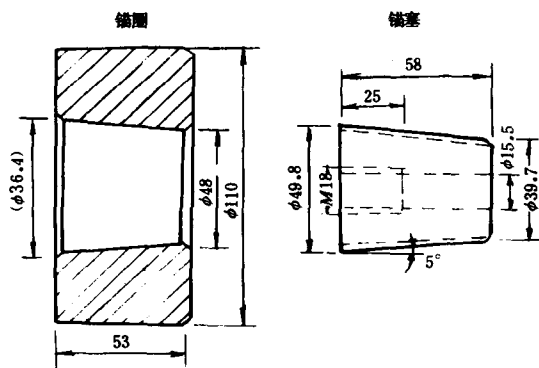


图 1-7 锥形锚具构造

用镦头机将钢丝头镦粗，锚杯的外圈车有螺纹套上锚圈（螺帽），锚杯内周壁内螺纹可与张拉千斤顶螺杆连接。千斤顶支承于梁端进行张拉，拉至吨位后拧紧锚圈，即可卸去千斤顶，靠锚圈传力于垫块和梁体（图 1-8）。

镦头锚不会出现滑丝现象，应力损失较小，镦头工艺操作简便，施工方便。但它对钢丝下料长度要求精确，误差不得超过 1/3 000。否则张拉时各钢丝受力不均匀易引起个别钢丝断丝。

3. 夹片式锚具

夹片式锚具种类很多，有锚单根钢绞线的套筒式锚具（图 1-9）。锚具有楔形夹片和锚环两部分组成，楔形夹片一般用三片（外面有锥体坡度，夹片开有直缝或斜缝），也有用两片或