

预应力混凝土

〔联邦德国〕 F.莱昂哈特 著

程 积 高 译

朱 振 德 校



水利电力出版社

预应力混凝土

〔联邦德国〕 F.莱昂哈特 著

程 积 高 译

朱 振 德 校

水利电力出版社

内 容 提 要

本书详细论述了预应力混凝土原理、材料、设计、施工等，特别指出了计算和施工中应注意的问题，内容丰富，取材新颖，反映了当代最新水平，是一本有价值的参考书。

本书可供土建设计、施工、科研人员及大专院校有关专业师生参考。

Spannbeton
F. Leonhardt
Springer 1980年

预应力混凝土

【联邦德国】F. 莱昂哈特著

程积高译 朱振德校

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 14.5印张 322千字

1989年3月第一版 1989年3月北京第一次印刷

印数0001—3670册 定价3.35元

ISBN 7-120-00072-1/TU·2

译 者 的 话

本书作者莱昂哈特是西德斯图加特大学大体积研究所教授，长期从事钢筋混凝土结构的设计、施工和科研、教学工作，著有《钢筋混凝土结构教程》共六册。第一册《钢筋混凝土结构设计原理》、第二册《特殊钢筋混凝土构件设计》、第三册《钢筋混凝土配筋原理》、第四册《钢筋混凝土结构裂缝与变形验算》、第五册《预应力混凝土》、第六册《钢筋混凝土桥梁建筑》。水利电力出版社已翻译出版了第二、三、四、五册，第一、六册由人民交通出版社翻译出版。

这套《钢筋混凝土结构教程》已被译成各种文字出版，在各国土木界广为流传。译者1986年在德国期间曾亲自访问过作者，并请他为中文版写一份前言，作者欣然命笔。由于这套书在我国不是依序译出，又不在同一家出版社出版，个别名词不尽统一，请读者原谅。

程积高

1987年3月

中文版前言

《钢筋混凝土结构教程》是作者斯图加特大学将近二十年教学工作的成果。这所大学曾经是颇负盛名的艾米尔·莫尔斯教授和奥托·格拉夫教授从事混凝土建筑研究和教学的场所。本教程还吸收了斯图加特许多研究所几十年的研究工作成果，并经欧洲-国际混凝土委员会学术界富有成果的讨论而丰富了内容。

此外，本教程还包括了作者五十多年来在设计和施工许多钢筋混凝土和预应力混凝土建筑物（其中有一部分是难度大而新颖的建筑物）所积累的实际经验。因此，它不但适用于学生学习，而且也有助于从事实际工作的工程师解决各种问题。

本教程已译成各种文字，并在土木界广为流传。作者对本教程全套六册译成中文表示十分欢迎，并希望它对中国同行有所帮助。在未来的几十年中，伟大的中国为了人民的幸福将进行大规模的建设，其中，混凝土建筑材料将起突出的作用。但是只有可靠地应用迄今为止的老经验、精心设计及高质量施工方面的新知识，才有可能期待建筑物具有长时间的良好性能。

技术在不停地发展，新知识在不断地出现。有些方面在中国不同于欧洲。因此，中国同行似应经常审查：是否中国在有些方面已经取得了更好的知识。

作者向中国同行致意，并祝他们在使用本教程时取得好的效果。

F. 莱昂哈特

1986年6月于斯图加特

序 言

本书是《钢筋混凝土结构教程》的第五册，专论预应力混凝土。作者参与了近三十年来预应力混凝土的发展工作，并起了决定性的作用。虽然本教程在过去几年中已有重印本，但由于近年来通过试验和实际经验对预应力混凝土的特性获得了许多新的知识，需要在这里反映出来。因此本版的内容几乎完全是新的。例如其中最主要的，人们认识到，过去为了有利于结构物的承载性能而优先采用的完全预应力带有很少量非预应力的配筋，一般并不是最有利的解决办法；采用部分预应力配筋才有利于增强结构物承受特殊应力的能力。

预应力混凝土按预应力程度（完全预应力和有限混凝土拉应力的部分预应力）分类已规定在欧洲-国际混凝土委员会（CEB/FIP）1978年出版的规范中。该规范还规定了使用性和耐久性的要求等级，其中包括了无裂缝或裂缝宽度限制方面的要求。这样，工程师就可以自由选择：或者用高的预应力程度和少的非预应力配筋，或者用低的预应力程度和多的非预应力配筋来满足规定的要求。这样就包括了全预应力和普通钢筋混凝土之间的整个范围。

遗憾的是在1979年编制的德国工业标准DIN4227中尚未采纳这个在国际上业已承认的预应力分类等级。不过，可以预料，德国规范不久也将采用这种正确的分类方法。

本书首先简要地介绍预应力的基本概念和有关预应力混凝土的定义，以及预应力混凝土的材料和构件。在粘结力方面，介绍了预应力钢筋用水泥砂浆灌浆的有价值的最新粘结性能试验结果。

借助于一些典型的试验详细论述了预应力混凝土梁的承载性能，因为在不同类型的应力作用下的承载性能对相应的断面设计和构造准则有着重要的意义。

用一些简单的实例来说明预应力程度的适度选择；比较详细地论述了各种锚固方法和高强度预应力钢筋的接头，因为这问题在技术上有一定的价值，而且这方面的知识也适用于预应力混凝土以外的范围；对预应力体系论述不多，对预应力过程的论述也局限于从事实际工作的工程师所必须掌握的范围。

为节省篇幅，作者只限于论述与非预应力钢筋混凝土承重结构不同的验算方法。对超静定结构来说，由预应力引起的内力则作了特别详细的论述，因为这对预应力钢筋的配置十分重要。

在第17章中只给出了考虑收缩和徐变影响的常用公式，而收缩和徐变的理论基础则由H.萨德教授在第23章中予以详细论述，因为实际上这方面的问题还远远没有弄清楚。在第23章中重新给出了收缩量、徐变量及相应的影响因素，因为新编DIN4227（1979年版）中给出的数值与本教程第一册给出的不一致。

虽然最小配筋率和裂缝宽度限制已在本教程的第四册中进行了详细论述，但本书仍用

目 录

译者的话

中文版前言

序言

0. 预应力混凝土结构的特殊符号	1
1. 文献和规范	2
1.1 早期预应力混凝土文献	2
1.2 较新的文献	2
1.3 规范	3
2. 原理和概念	4
2.1 预应力的原理	4
2.2 预应力混凝土的优点	6
2.3 预应力混凝土的概念	7
3. 预应力混凝土的发展简史	10
4. 材料和构件	12
4.1 混凝土	12
4.2 预应力钢筋	13
4.3 套管	25
4.4 灌浆	26
5. 粘结	27
5.1 粘结强度	27
5.2 粘结应力	31
6. 预应力混凝土梁的承载性能	33
6.1 受弯时的承载性能	33
6.2 受剪切时的承载性能	41
6.3 曲线式预应力钢筋对抗剪能力的影响	45
6.4 受扭时的承载性能	46
6.5 中心受拉时的承载性能	47
7. 预应力程度的选择	50
7.1 预应力程度的定义	50
7.2 预应力程度的判断	50
7.3 预应力程度的判断标准	52
7.4 如何选择预应力程度	56
7.5 现行规范	57
8. 预应力混凝土承重结构的防腐蚀性能	58

8.1 经验	58
8.2 预应力程度和腐蚀危险	58
8.3 防腐的若干规定	59
9. 预应力混凝土承重结构的疲劳强度和使用强度	60
10. 预应力钢筋的锚固和接头	62
10.1 粘结锚固	62
10.2 光面预应力钢丝靠曲线和摩擦在混凝土中直接锚固	66
10.3 环形锚固	68
10.4 螺杆式锚具	69
10.5 楔形锚固	71
10.6 用拉拔和挤压套管锚固	75
10.7 镦粗头锚具	76
10.8 预应力钢筋的接头和连接	77
10.9 预应力钢筋锚具的布置	80
11. 预应力体系及其选择	85
12. 张拉方法和张拉设备	88
12.1 用油压千斤顶进行张拉	88
12.2 特殊张拉方法	92
13. 滑动孔道中的预应力钢筋、摩擦及预应力筋的布置	95
13.1 引起摩擦的原因	95
13.2 摩擦系数	96
13.3 减小摩擦的措施	98
13.4 摩擦引起的预应力损失计算	100
13.5 摩擦引起的预应力变化	101
13.6 预应力筋的设置	103
14. 预加应力、张拉行程计算及后张法工艺	106
14.1 先张法	106
14.2 后张法	106
14.3 张拉过程	107
14.4 张拉行程的计算	109
14.5 后张法的灌浆	111
15. 所需验算的种类	112
15.1 所需的验算	112
15.2 关于计算假定的若干说明	113
16. 由预应力引起的内力、应力及预应力钢筋的设置	115
16.1 作用到混凝土上的预应力	115
16.2 静定梁的内力和应力	117
16.3 预应力超静定结构的内力及其对预应力钢筋位置的影响	123
17. 预应力的计算	144

17.1 静定梁所需的预应力	144
17.2 超静定梁所需的预应力	146
17.3 在预加应力时预应力钢筋的容许应力 $\sigma_{\text{ul}, \text{v}}$	147
17.4 由收缩和徐变引起的预应力损失——实用公式	147
18. 按承载能力的设计	150
18.1 无约束弯矩的受弯	150
18.2 有约束弯矩的受弯	152
18.3 无粘结受弯	153
18.4 剪力-切力	154
18.5 扭转	161
19. 使用状态的设计	163
19.1 变形的限制	163
19.2 裂缝宽度的限制	163
20. 变形和内力重分布	168
20.1 变形	168
20.2 内力重分布	168
21. 构造规则	171
22. 关于建筑施工和建筑监督的注意事项	173
23. 收缩和徐变影响	176
23.1 按1979年出版的DIN4227计算收缩量和徐变量	176
23.2 混凝土应力变化情况下的混凝土应变	181
23.3 有粘结的预应力钢筋应力下降的计算	185
23.4 由混凝土和钢筋组成的一般超静定结构系统	187
23.5 有效弹性模量法	192
23.6 由柔性和刚性钢截面组成的组合截面	198
24. 用极限荷载法验算承载能力的极限状态	207
24.1 说明	207
24.2 假定和前提	207
24.3 极限荷载法在预应力混凝土承重结构上的应用	211
参考文献	216

0. 预应力混凝土结构的特殊符号

鉴于1976年6月出版的DIN1080没有完全采用欧洲混凝土委员会编制的国际常用符号，为方便读者，有必要作一些补充。

脚标符号：

表示原因： v = 预应力

$s+k$ = 收缩和徐变

表示地点： z = 预应力钢筋或预应力钢筋束

表示时间： 0 = 时刻 $t=0$ ，即收缩和徐变之前

∞ = 时刻 $t=\infty$ ，即收缩和徐变之后

(0) = 对预应力张拉台而言

0 = 对应静定基本体系

V = 作用在混凝土上的预应力、锚固力，压力时为负

$V^{(0)}$ = 张拉台座的预应力

Z_v = 作为拉力作用于预应力钢筋的预应力

u, U = 预应力钢筋的径向力

r, R = 预应力钢筋上的摩擦力

D = 压力（永远为负）

Z = 拉力（永远为正）

$Z_{s,k}$ = 由于收缩和徐变引起的预应力损失（当预应力钢筋中的力 Z_v 减小时为负）

M_D = 使预压受拉区内的边缘压应力 $\sigma_b = 0$ 的减压力矩

M_R = 在受拉边缘引起第一道裂缝的裂缝力矩

M', Q' = 超静定结构因约束变形而引起的内力 = 约束内力

M_x = 相对于预应力钢筋重心线的截面弯矩 = $D_b l_x = M - N \cdot e$

表示变形： Δl = 张拉行程

ϵ_s^0 = 预应力钢筋的张拉台座上的伸长

$\sigma^{(0)}$ = 张拉台座内的应力

$\sigma_{b,v}$ = 由于预应力引起的混凝土应力

$\sigma_{s,v}$ = 由于预应力引起的预应力钢筋应力

$\sigma_{s,v}$ = 由于预应力引起的混凝土钢筋应力

角度： α = 预应力钢筋的设计径向角

β = 波动度 = 单位长度上预应力钢筋的径向角

$\gamma = \sum (\alpha + \beta l_x) =$ 预应力钢筋在长度 l_x 上的径向角之和

系数 $\mu =$ 预应力程度 $\frac{M_D}{M_{g+p}}$

1. 文 献 和 规 范

1.1 早期预应力混凝土文献

- Freyssinet, E.: Une Révolution dans l'art de bâtir. Les constructions précontraintes.
Travaux 25 (1941), Nov., S. 335 - 359
- Gyon, Y.: Béton précontraint. Etude théorique et expérimentale.
Paris, Editions Eyrolles, Bd. 1, Généralités, 3. Aufl., 1958. Bd. 2, Constructions hyperstatiques, 1. Aufl., 1958
- Mörsch, E.: Spannbetonträger.
Stuttgart, Wittwer, 1943
- Magnel, G.: Le béton précontraint.
Gent, Editions Fecheyr, 1948
- Leonhardt, F.: Spannbeton für die Praxis.
1. Aufl., Berlin, W. Ernst u. Sohn, 1955
- Abeles, P.W.: The principles and practice of prestressed concrete.
London, Corsby Lockwood & Son Ltd., 1949

1.2 较 新 的 文 献

- Leonhardt, F.: Spannbeton für die Praxis.
3. Aufl., Berlin, W. Ernst u. Sohn, 1973
- Guyon, Y.: Constructions en béton précontraint, Classes-Etats limites.
Paris, Editions Eyrolles, 1968
- Abeles, P.W.; Bardhan-Roy, B.K.; Tumer, F.H.:
Prestressed concrete designer's handbook.
2nd Ed., Viewpoint Publication, Wexham Springs,
Cement and Concrete Association, 1976
- Hampe, E.: Spannbeton. Lehrbuch
Berlin, VEB Verlag für Bauwesen, 1978
- Lin, T Y.: Design of prestressed concrete structures.
2nd Ed., New York, London, J. Wiley and Sons Inc., 1966
- Rüsch, H.: Stahlbeton-Spannbeton Bd. 1, Werkstoffeigenschaften
und Bemessungsverfahren.
Werner-Verlag, Düsseldorf, 1972
- Rüsch, H.; Kupfer, H.: Bemessung von Spannbetonbauteilen. Im Beton-
Kalender verschiedener Jahrgänge

1.3 规 范

- DIN 4227** Spannbeton
Teil 1. Bauteile aus Normalbeton mit beschränkter und
voller Vorspannung (Ausg. Dez. 1979)
- CEB/FIP** Mustervorschrift für Tragwerke aus Stahlbeton und
Spannbeton.
Internationale CEB/FIP Richtlinien, 3. Ausgabe 1978
- SIA 162** Schweizer Norm für die Berechnung und Ausführung von
Bauwerken aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton

2. 原理和概念

2.1 预应力的原理

由于混凝土的抗拉强度有限，所以人们早就想通过预加应力使混凝土承重结构的受拉区处于受压状态，这样在混凝土产生拉应力时才会抵消这种压应力。

图2.1表示在单跨梁上实现上述预加压力的基本过程。钢筋能滑动地安放在梁的受拉缘，其两端用螺纹、螺母和锚固板固定。当拧紧螺母张拉钢筋时，钢筋内产生的拉力作为预加应力 V 通过锚固板偏心地作用到混凝土上。假设梁没有重量，梁就会通过纵向压力 V 及预应力弯矩 $M_v = V \cdot e$ 向上弯曲；当钢筋的偏心距 $e > \frac{h}{6}$ 时，混凝土受拉缘产生很大的压应力，而其上部的受压缘则产生很小的拉应力。

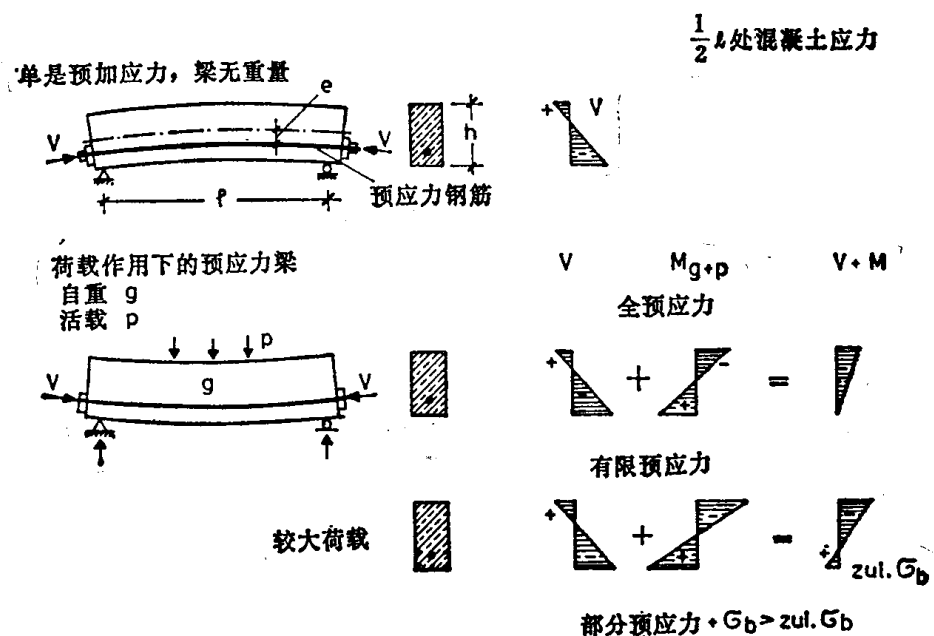


图 2.1 通过预加应力 V 产生混凝土应力 $\sigma_{b,v}$ ，此应力与荷载弯矩 M_{g+p} 引起的荷载应力 $\sigma_{b,g+p}$ 叠加，从而抵消或显著减小混凝土拉应力

如果自重和活荷载作用到梁上，由此而产生的弯曲应力 σ_{g+p} 便与预加应力 V 产生的应力 σ_v 叠加。

预应力等级可以这样选择，即在全部使用荷载作用下，“预先受压的受拉缘”的下部边缘上的应力 σ_b 等于零，这种情况叫做完全预应力。

但对承重结构的完善性能来讲，在全部使用荷载作用下，避免混凝土中产生弯曲拉应力，是不必要的。因为承重结构除了配有预应力钢筋外，一般都配有非预应力的带肋钢筋，这种钢筋可以把裂缝限制到发丝那样小，所以在全部使用荷载作用下，受拉缘的混凝土容

许产生拉应力。此时如果弯曲拉应力不超过规范中规定的极限，则叫做有限预应力；如果混凝土拉应力不受限制，并在受拉缘按容许的裂缝宽度配筋，则叫做部分预应力。

如果预应力梁的荷载增加到超过了使用荷载，则预压的受拉区一定会断裂(图2.2)。在验算承载能力时，亦即在验算极限荷载时，预应力钢筋必须与裂缝截面上的混凝土钢筋共同承受受拉区的拉力；与非预应力梁承受边缘压力一样，预应力钢筋混凝土梁必须具有足够的弯曲受压区承载能力。由此可见，钢筋混凝土梁和预应力混凝土梁的承载能力的验算，原则上是一样的。唯一的区别在于，在预应力混凝土内，预应力钢筋的一部分应变是通过预加应力产生的所谓“预应变” ϵ_v ，它并不与受拉区的混凝土共同产生应变，也不使混凝土产生裂缝；而在钢筋混凝土中，钢筋则在荷载作用下才产生应变。预应力钢筋的这种预应变提供了使用高强钢筋的可能性，没有这种预加应力，是不可能完全利用这种高强钢筋的，因为钢筋和混凝土的粘结会受到破坏，从而产生太宽的裂缝。

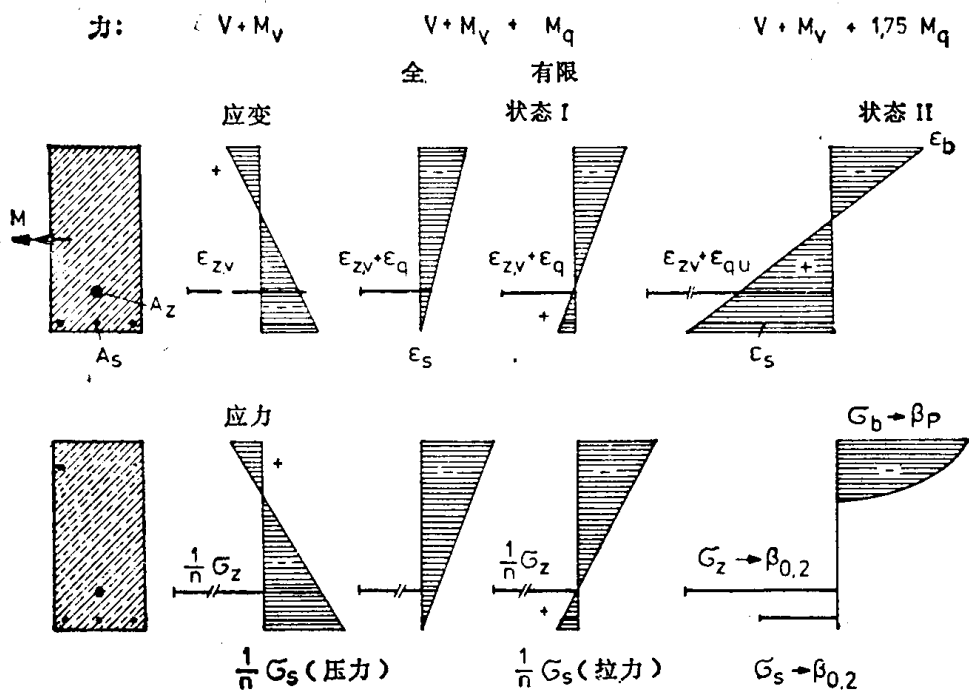


图 2.2 当预加应力 V 保持不变，在荷载增加到极限荷载具有相应 M_u 过程中，预应力梁内的应变和应力的变化

在预加应力时，钢筋产生如下的伸长：

$$\Delta l_z = \frac{\sigma_{z,v}}{E_z} l_z$$

同时由于在混凝土中产生的压应力使钢筋产生如下的缩短：

$$\Delta l_b = \frac{\sigma_{b,v}}{E_b} l_b$$

式中 $\sigma_{z,v}$ 为预应力钢筋高度内混凝土纤维应力（图 2.3）。对硬化了的混凝土预加应力时将产生一个张拉距离 $\Delta l_z + \Delta l_b$ 。

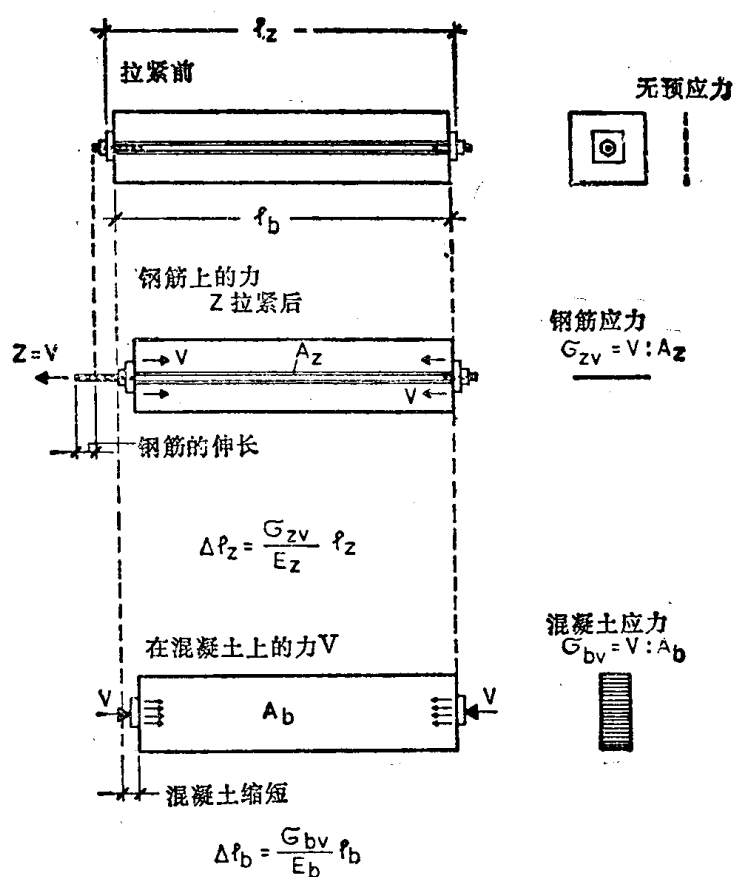


图 2.3 在混凝土中部纤维上预加应力时，由于预加应力引起的钢筋和混凝土的长度变化

在预加应力后，由于混凝土的收缩和徐变，混凝土纤维将沿预应力钢筋的方向继续随时间而缩短，从而使钢筋的预应变损失一部分。所以收缩和徐变会引起预应力损失。在时间 $t=0$ 时预加应力，当预加应力引起的混凝土应变 $-\epsilon_b$ ， v_0 越大及预应力钢筋的应变 ϵ_z ， v_0 越小时，则预应力损失越大。

由收缩和徐变引起的混凝土的收缩为 $0.4\% \sim 1\%$ ，相应于钢筋应力为 $80 \sim 200 \text{ N/mm}^2$ 。由此可见，要达到足够大的永久的预应力作用，必须用高的钢筋应力和相应的高强钢筋。对于目前常用的高强预应力钢筋来说，由收缩和徐变引起的预应力损失仍高达 $5\% \sim 20\%$ ，因此必须予以考虑。

在验算应力时，必须把预应力的时间点 t_0 同收缩和徐变缩短消失后的时间点 t_∞ 区别开来。在 t_0 时，受拉缘产生最大的压应力，受压缘产生最小的压应力，甚至可能出现拉应力；而在 t_∞ 时，受压缘产生最大的压应力，受拉缘产生最小的压应力或最大的拉应力。所以起始应力带一个脚标符号 v_0 ，永久应力则带 v_∞ ，以示区别。

2.2 预应力混凝土的优点

(1) 预应力混凝土由于有效利用高强度的钢筋和混凝土，可以作成比普通钢筋混凝土跨度大而自重较小的细长承重结构。

(2) 预应力可以改善使用性, 从而可以防止混凝土开裂, 或者至少可以把裂缝宽度限制到无害的程度。这就提高了耐久性。

(3) 变形可保持很小, 因为在使用荷载作用下即使是部分预加应力, 实际上承重结构也保持在状态I。

(4) 预应力混凝土承重结构有很高的疲劳强度, 因为即使是部分预应力, 钢筋应力的变化幅度也小, 所以远远低于疲劳强度。

(5) 预应力混凝土可以承受相当大的过载而不引起永久的损坏。只要钢筋应力保持在应变极限的0.01%以下, 超载引起的裂缝就会重新完全闭合。

2.3 预应力混凝土的概念

2.3.1 预应力钢筋

在第一次编制预应力混凝土规范DIN4227 (1949~1953年) 时把可滑动地浇入的预应力钢筋及其锚固统称为“预应力钢筋”。因此在实际中出现了“非预应力钢筋”的概念, 以示区别。

2.3.2 预应力的方法

先张法。即在混凝土硬化之前张拉钢筋, 预应力钢筋在两个固定的锚固台座之间进行张拉, 并在张拉状态下浇灌混凝土 (图2.4)。这样在钢筋和混凝土之间直接产生粘结力, 待混凝土足够硬化后, 放松预应力钢筋, 于是预应力通过粘结力或锚固体传递到混凝土上。

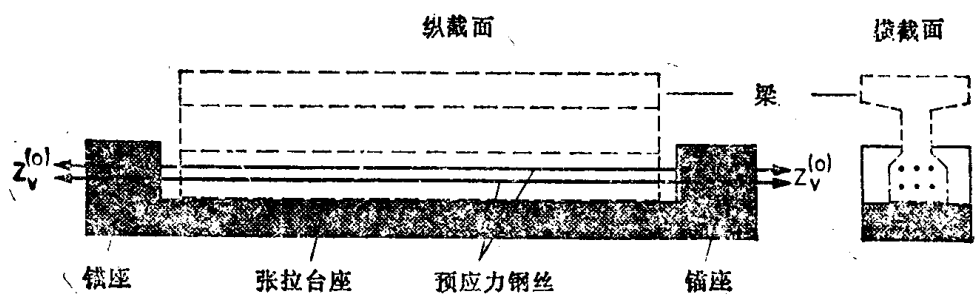


图 2.4 先张法预加应力

后张法 (图2.1)。即将钢筋松弛地放在滑动孔道或张拉孔道内, 一般放在预埋的套管内, 待混凝土硬化后在两端张拉和锚固。预加应力以后, 用水泥砂浆灌满张拉孔道, 从而产生粘结力。灌注水泥砂浆也是为了防止钢筋锈蚀。在第 6 章中将讨论其他粘结方法。

一般都用有粘结预应力钢筋的预应力混凝土。

无粘结预应力钢筋的预应力混凝土:

预应力钢筋在套管内可以保持滑动。在预加应力后形成粘结力的施工过程中, 也时常有这种情况。如果配有足够的非预应力钢筋来保证承载能力和使用性, 亦可不用粘结。但预应力钢筋在套管中必须防止锈蚀。无粘结预应力钢筋在必要时可以进行更换。

2.3.3 预应力钢筋的锚固方式

通过与混凝土的粘结力进行端部锚固，即粘结锚固。

用锚具（通常为钢板）进行端部锚固，即通过拧紧螺母，楔紧楔子而把预应力钢筋固定在构件端部。

通过浇入环、钩等实现端部锚固。

2.3.4 预应力程度

当全部使用荷载作用下在承载主方向内混凝土不产生弯曲拉应力时为全预应力。但是，预加应力在预应力钢筋锚固范围内作用所引起的拉应力、剪力或扭转引起的斜主拉应力及粘结作用引起的横向拉应力或温度梯度引起的拉应力等等，都是不可避免的，所以认为在全应力时，混凝土内不产生拉力或裂缝，是不完全可信的。

在全部使用荷载作用下，主承载方向内混凝土的拉应力不超过规定的容许值时，即称为有限预应力。

在全部使用荷载作用下，在主承载方向内（例如弯曲受拉缘内）产生的拉应力没有限制，即称为部分预应力。此时裂缝限制由非预应力钢筋来保证。

在非自承重结构时，只是为了避免伸缩缝或防止贯通裂缝才用预加应力（例如大体积水工结构），或者只是为了减少裂缝或变形才配置预应力钢筋（而不是为了考虑承载能力），则称为中等预应力或构造需要的预应力（在奥地利称为弱预应力）。

预应力程度的定义，详见第7章。

2.3.5 预应力的弹性程度

在规范中没有规定这种程度，但设计工程师必须知道。

当采用具有大延伸段的高强度预应力钢筋，且收缩和徐变引起的预应力损失很小时，则为强弹性预应力。

当用中强度的预应力钢筋时，则为弱弹性预应力。此时可能产生大的预应力损失。

当混凝土承重结构置于刚性支座（例如岩石）之间用液压千斤顶预加应力时，则作为弹性变形只是混凝土和岩石支座的缩短。这种预应力将因收缩和徐变或温度下降而几乎完全消失，所以必须考虑一种重新预加应力的可能性。

2.3.6 与变形有关的两个概念

不变形的预应力：即把预应力钢筋的位置选择成使承重结构在自重和预应力作用下不产生弯曲。

无约束的或一致的预应力：即在超静定结构时，预应力本身不会引起支座反力的变化。

2.3.7 由预应力钢筋作用到混凝土上的外力

预应力 V 一般是用油压千斤顶产生的预应力钢筋的拉力 Z ，此拉力通过锚固作为压力 V 作用到混凝土上。

在预加应力时， $t=0$ 时的预应力叫初始预应力 V_0 ，扣除了 $t=\infty$ 时混凝土收缩和徐变引起的预应力损失及必要时扣除了钢筋松弛引起的预应力损失后的预应力叫永久预应力或最终预应力。