

預应力混凝土結構

張樹平 編著

上海科學技術出版社

預应力混凝土結構

張樹平 編著

上海科學技術出版社

內 容 提 要

本书对預应力混凝土結構簡明的作出了有系統的介绍。内容包括：一般概念，預加应力的方法及錨固型式，材料的力学特性，构件的計算，以及混凝土收縮和徐变的計算五个部分；并对預应力混凝土結構按极限状态的計算也作了扼要的說明。

預 应 力 混 凝 土 結 構

張 樹 平 編 著

*

上海科学技术出版社出版

(上海南京西路2004号)

上海市書刊出版業營業登記許可証出 093 号

上海劳动印刷厂印刷，新华書店上海发行所总經銷

*

开本 860×1168 1/32 印張 5 字數 110,000

1959年5月第1版·1959年5月第1次印刷

印數 1-8,000

統一書号：15119·1272

定价：(十二) 0.72 元

序

由于普通钢筋混凝土技术在某些意义上已不适应于现代建筑事业的需要，因此预应力混凝土技术得到了充分的发展。这主要是由于普通钢筋混凝土在技术上如何满足某些大跨度、重型以及对抗裂性具有特殊要求的结构的制造；如何合理地应用近代高强度建筑材料——混凝土和钢材，以及在经济意义上如何降低结构物的成本等方面受到一定限制的缘故。然而预应力混凝土技术正具备了可以满足上述要求的优点，这就促使预应力混凝土技术获得迅速发展的重要因素。

基于上述理由，预应力混凝土技术在今后的建筑事业中肯定有着更其广阔的发展前途。因此面临着我国第二个五年计划中大规模工程建设的巨大任务，每一土建工作者怎样去学习和掌握预应力混凝土技术以及使它更广泛更有效地应用于工程建设实践中，这将是我們迫切的任务。

目前，国内对于预应力混凝土技术这门新的学科尚在萌芽阶段。因此无论在理论或实践知识方面都很缺乏。这就需要每一土建工作者去发挥出自己更多的努力。在这种观点下，编者不量力地写了这本册子，以期对从事于学习这门新技术的同志们有所帮助。

在编写过程中，除了得到波兰别涅克博士 (Maciej Bieniek) 提供的资料外，另蒙建筑科学研究院胡德炊、同济大学侯学渊及冶金建筑科学研究院张善明三位同志对原稿尽心校阅，特此表示衷心的感谢。

由于編者业务水平有限,謬誤之处在所难免,尙希讀者惠予指正,是幸。

張樹平謹識

一九五八年八月

目 录

序

第一章 預应力混凝土結構的一般概念	1
(一) 預应力混凝土的需要及原理	1
(二) 預应力混凝土結構的优点	2
(三) 預应力混凝土結構的分类	3
(四) 預应力混凝土結構的应用範圍	5
第二章 預加应力的方法、錨固型式及其在工程中的应用	7
(一) 先張法結構的系統	7
(二) 連續配筋結構的系統	16
(三) 后張法有粘結力的結構的系統	17
(四) 后張法无粘結力的結構的系統	38
(五) 各种不同結構系統的比較	40
第三章 材料、力学性質及其他	43
(一) 混凝土	43
(1) 混凝土的選擇	43
(2) 彈性模数	44
(3) 收縮	47
(4) 徐变	48
(5) 疲劳	51
(二) 鋼筋	52
(1) 鋼筋的選擇	52
(2) 蠕变	54
(3) 疲劳	57
(三) 預应力筋与构件混凝土間的粘結力	58
1. 先張法构件中的粘結力	58
(1) 預应力傳遞长度及其对先張法构件的意义	59
(2) 預应力傳遞粘結应力与弯曲粘結应力	64
(3) 影响粘結力的因素	65

(4) 提高粘結力的方法·····	66
2. 后張法构件中的粘結力·····	67
(1) 粘結力对后張法构件的意义·····	67
(2) 影响孔道灌浆质量的因素及提高粘結力的方法·····	68
3. 粘結力的計算·····	69
第四章 預应力混凝土构件的計算 ·····	72
(一) 对于計算有关的一些問題·····	72
(二) 中心受拉构件的計算·····	73
(三) 受弯构件的計算·····	81
1. 应力計算·····	82
2. 强度和抗裂性計算·····	93
3. 主应力計算·····	97
4. 在使用条件下受弯构件断面内应力的計算·····	100
5. 构件的設計·····	103
(四) 偏心受压及受拉构件的計算·····	108
第五章 混凝土收縮和徐变的計算 ·····	111
(一) 混凝土的收縮和徐变对普通鋼筋混凝土結構的影响·····	111
(1) 混凝土的徐变对构件內力的影响·····	111
(2) 混凝土的徐变对双鉸拱的影响·····	114
(3) 混凝土收縮与徐变間的相互影响·····	117
(4) 具有鋼拉杆的双鉸框架或双鉸拱在靜荷載作用下由于混凝土的收縮和徐变对拉杆內力的影响·····	120
(5) 混凝土的收縮和徐变对中心受压构件中的应力的影响·····	123
(二) 混凝土的收縮和徐变对預应力混凝土結構中預应力的影响·····	125
(1) 預应力筋与混凝土間具有粘結力的中心受拉构件·····	125
(2) 預应力筋与混凝土間具有粘結力的受弯构件——預应力筋为一排鋼弦或鋼絲束·····	128
(3) 預应力筋与混凝土間无粘結力的受弯构件——具有一排預应力筋的受弯构件·····	132
附录 預应力混凝土結構按极限状态的計算 ·····	142
符号 ·····	150
主要参考文献 ·····	152

第一章 預应力混凝土 結構的一般概念

(一) 預应力混凝土的需要及原理

普通鋼筋混凝土結構及其技術，在廣大的建築工程中應用已久。但由於近年來建築技術及高強度建築材料（混凝土和鋼）的迅速發展，因此就使這種技術已不足適應於近代建築事業的要求。於是，促使人們有必要去研究一種新的技術，以期解決在普通鋼筋混凝土結構中所存在的問題。

眾所周知，由於混凝土的抗拉強度遠較其抗压強度為低，所以要在受有拉力的混凝土中安置鋼筋。然而，普通鋼筋混凝土結構仍有着它的缺點，即是當混凝土的受拉應變達到 $0.0001 \sim 0.0015$ 時混凝土即出現第一批裂縫，相應於這種應變時的鋼筋應力僅為 $210 \sim 315$ 公斤/平方公分（假定鋼筋彈性模數 $E_s = 2.1 \times 10^6$ ）。實際上普通鋼筋混凝土結構在一般使用情況下（鋼筋內的應力為 1250 公斤/平方公分）鋼筋的受拉應變早就超過了上述混凝土最大拉伸率的 $3 \sim 6$ 倍（這時混凝土內開展的毛細裂縫的寬度，在一般使用情況下被認為是許可的）。由於在使用條件下混凝土中存在的裂縫的寬度有所限制，這樣受拉鋼筋所能利用的強度相應地受到了限制；換言之，即使採用高強度鋼筋，其強度仍不能得到利用（為了合理地利用鋼筋強度，在普通鋼筋混凝土結構中所採用的鋼筋的屈服極限各國都有一個限制的數值，如英國為 2400 公斤/平方公分；美國為 2000 公斤/平方公分；歐洲一般為 $2200 \sim 2400$ 公斤/平方公分）。在這種情況下雖然可以採用較高標號的混凝土，

但其拉伸率也不过在很小程度上提高；因此，在普通鋼筋混凝土結構中就没有采用高强度材料（混凝土和鋼）的必要。由此，普通鋼筋混凝土結構技术与高强度材料的发展間存在了矛盾；显然，阻碍了高强度材料的应用与发展。

但在另一方面，利用高强度材料制造結構是有利的，因为材料价格的增長要比其本身强度的增長为慢。

为了寻求解决上述存在的矛盾，近年来发展了一种在混凝土中預加应力的方法。这种方法的出现，从而有可能使两种高强度材料（混凝土和鋼）制成一种結構，它在使用条件下混凝土和鋼筋能協調地共同工作并發揮其最大的材料强度。

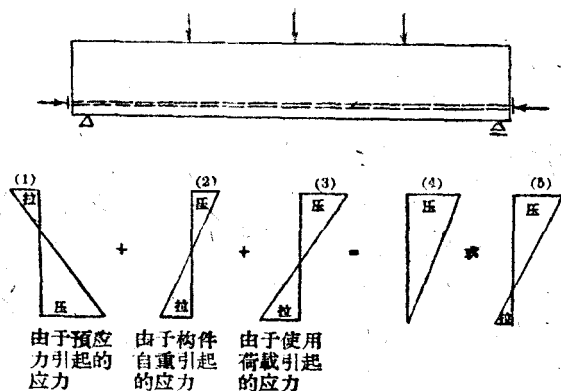


图 1

所謂“預加应力”即是在外界使用荷載作用前，用人为方法在构件受拉区域内施加預压应力，这种压应力的儲藏以便抵消由于使用荷載作用下产生这一区域内的拉应力，使这一区域在使用条件下不产生拉应力或产生小于混凝土抗拉强度极限的拉应力（图1）。这就可以保証在使用条件下混凝土中不会有裂縫的出现。

（二）預应力混凝土結構的优点

預应力混凝土結構較之普通鋼筋混凝土結構具有下列优点：

(1) **提高抗裂性和剛度** 由于构件受拉区混凝土內預压应力的存在,保证了混凝土不会过早地出現裂縫,甚至不出現裂縫。这就提高了构件的抗裂性。并且,由于这种預压应力作用的结果,还使构件(受弯、偏心受压和偏心受拉)产生与使用荷载作用下相反的撓曲,因此也提高了构件的剛度。构件抗裂性和剛度的提高,提供了制造大跨度(或大型的)結構的可能条件。

(2) **节省材料** 由于預应力技术的发明,因此有可能合理地应用高强度材料,这就大大地节省了結構的材料用量(混凝土达40~60%,鋼筋达60%)。其次,正如上述,由于大跨度結構制造的可能,这就可以应用預应力混凝土結構去代替鋼結構,同样可以节省大量鋼材;在目前我国缺乏鋼材的情况下,它就有更其重大的意义。

(3) **耐久性** 构件抗裂性的提高,减少了大气或化学性侵蚀的可能,这就延长了构件使用的寿命。

(4) **生产工厂化** 預应力混凝土結構可以在工厂內大批制造,然后运至工地安装。即使是大型結構,也同样可以在工厂內制成分部构件,待运至工地再行拼装。这正符合于今后“生产工厂化”建筑技术的发展方向。

(三) 預应力混凝土結構的分类

由于預应力技术不断迅速发展,要得到完善明确的分类较为困难,尤其是这种和那种分类相互牽連交錯,不同情况更具有不同的分类。因此只能就一般情况給予类别上的叙述。

根据鋼筋施加預应力的时间,基本上可把所有預应力混凝土結構分成两种类型:

(1) **在混凝土澆灌前張拉鋼筋的結構(通称先張法結構)** 此类結構是在混凝土澆灌前張拉鋼筋。鋼筋張拉后临时固定在傳力架上,然后澆灌混凝土。待混凝土硬化后将預应力筋自傳力架上

截断。此时借預应力筋与混凝土間的粘結力將鋼筋內的預应力傳至混凝土上。

(2) 在混凝土硬化后張拉鋼筋的結構(通称后張法結構) 此类結構是在混凝土硬化后張拉鋼筋。張拉时鋼筋受拉而混凝土即受压。鋼筋內的預应力是借設置在鋼筋兩端的錨固裝置傳遞至混凝土上。

通常小尺寸的結構都采用第一类;較大尺寸的結構都采用第二类。

为了使預应力混凝土結構的分类更为簡明具体,根据其构造及錨固方法可以进一步分为四种类型:

- (1) 先張法結構;
- (2) 后張法有粘結力的結構;
- (3) 后張法无粘結力的結構;
- (4) 連續配筋結構。

先張法結構的概念仍如前述。后張法有粘結力与无粘結力两种結構的区別是在于当鋼筋張拉完毕后在預应力筋^①孔道內灌注与不灌注水泥漿而已。显然后者鋼筋与构件混凝土間不存在粘結作用。在通常情況下(孔道內灌注水泥漿沒有困难时),孔道內总灌以水泥漿。一般后張法无粘結力的結構的預应力筋是布置在构件混凝土体之外的。

連續配筋結構,它又可以分成下列两种:

- 1) 以具有預应力的鋼絲連續纏繞在模板的銷釘上,然后澆灌混凝土的。待混凝土硬化后将鋼絲截断,借粘結力傳遞預应力至构件混凝土上(若以施加預应力的時間来分,則属于先張法类型)。
- 2) 以具有預应力的鋼絲連續纏繞于預先制好的混凝土(或鋼筋混凝土)芯体上,并用噴射法在預应力鋼絲外面加一保护层(若以施加預应力的時間来分,則属于后張法类型)。

① 預应力筋为預应力鋼筋、預应力鋼絲、預应力鋼絲束或預应力鋼絲繩的通称。

如果根据鋼筋預加应力的方法,則又有“机械張拉法”、“热張法”、“膨脹混凝土法”的区别。

“机械張拉法”是通常用得最多的一种張拉鋼筋的方法。它所采用的一些張拉设备,为千斤頂(油压或水压)、螺栓和金属夹具等。

“热張法”系用加热鋼筋的方法張拉鋼筋。它的方法是将表面涂有涂料(硫磺或易熔金属)的鋼筋搗置在构件混凝土中。鋼筋两端置有螺帽并外露于构件两端。待混凝土硬化后,用通过强电流的方法加热鋼筋,使之受热伸长至所需长度,随后拧紧两端螺帽使鋼筋锚固在构件两端。鋼筋冷却收縮时即在内部产生了拉应力,同时混凝土亦受到了压应力。由于鋼筋表面涂有涂料,此种涂料受热后溶解,因此鋼筋虽搗置在已硬化的混凝土中,但仍可自由伸长。

“膨脹混凝土法”是应用了一种由特殊材料所組成的膨脹混凝土。鋼筋搗入此种混凝土后无需預加应力。由于此种混凝土在硬化过程中体积会逐渐膨脹,因此所搗入之鋼筋随着膨脹,这就使得鋼筋内产生了拉应力,而混凝土同时产生了压应力。

此外,根据构件内預加应力的程度又有“全部預加应力”和“部分預加应力”的区别。

全部預加应力的结构,它在使用荷載作用下,构件混凝土内不产生拉应力(混凝土保持在压縮状态中)。

、部分預加应力的结构,它在使用荷載作用下,构件混凝土中容許产生拉应力,甚至临时(在最不利荷載組合作用下)或永久的毛发裂縫。后者只容許应用在沒有高温、湿气或化学性侵蝕作用的气候条件下。

(四) 預应力混凝土结构的应用范围

預应力混凝土结构最宜应用于中心受拉、受弯、偏心受拉或大

偏心受压的构件，因在这些构件的截面內受有較大的拉应力。对于中心受压或小偏心受压构件，除非是为了在安装运输时保証构件不出現裂縫或为了提高其对縱向弯曲的抵抗能力而应用外，否則是不宜采用的。

目前預应力混凝土結構已广泛应用在工业或民用建筑結構以及桥梁、軌枕、电綫杆、管、桩、水池等特殊結構中。

第二章 預加應力的方法、錨固型式 及其在工程中的應用

由于預應力混凝土結構較之普通鋼筋混凝土結構有着很多優點，因此近年來在預應力技術方面有着迅速發展。尤其在它的經濟性和節省鋼材這一點上，更無疑地它將代替普通鋼筋混凝土結構和某些鋼結構的位置。為了使預應力混凝土結構無論在製造和使用方面更趨合理和經濟，因此在預加應力的方法及其錨固型式的設計方面不斷有着進一步的研究和改進；合理的方法不但使構件的成本低廉及生產方便，並且還保證構件在使用過程中的安全。目前，在預加應力的方法及錨固型式方面已多至一、二百種。現就其一般在工程實踐中較為常用及較為典型的方法及錨固型式作簡單的介紹。

(一) 先張法結構的系統

已如前述，此類結構在混凝土澆灌前張拉鋼筋（或鋼絲）並臨時固定在傳力架上。一般在混凝土強度達到為齡期 28 天立方體強度的 70% 時即行放鬆（自傳力架上用鋸或氧氣將鋼筋或鋼絲割斷）張拉鋼筋。由於此類結構是依靠鋼筋（或鋼絲）與混凝土間的粘結力來傳遞預應力，因此往往需要採用較高標號（不小於 300 號）的混凝土和直徑較細的鋼絲或具有變形表面的鋼筋來保證足夠的粘結作用。根據較多的資料說明，當採用直徑小於 3 公厘的高強度鋼絲時，鋼絲在混凝土中具有較好的自錨作用。但當鋼絲的直徑較粗時（如 3~7 公厘之間），為了使其與混凝土具有良好的粘結作用，可採用在其表面刻痕的方法（使鋼絲表面增加機械阻抗的機

机械加工处理)。一般把这种細鋼絲組合的結構称之为“鋼弦混凝土結構”。同样,在先張法結構中也有采用表面呈規律变形的大直徑鋼筋作为預应力筋;这种鋼筋的直徑已有到达 40 公厘的。實踐証明它同样具有良好的粘結作用。有时为了更为可靠起見,在鋼筋两端采用附加的錨固来增加与混凝土間的粘結力。

当应用細鋼絲作为預应力筋时,往往会需要数量很多的鋼絲。这就会造成鋼絲布置不下的困难而不得不增加混凝土的断面。为了解决这种困难,現时采用了一种鋼絞綫,它是由数根单独鋼絲扭結而成。組成鋼絞綫的鋼絲数量一般为 2 根或 3 根,目前甚至有 7 根的。这种鋼絞綫由于扭結作用在每一根鋼絲内引起了应力,如果不經過一种“应力消除”处理它,将会减低鋼絲原有的强度。但在另一方面鋼絞綫与混凝土間能造成很好的粘結关系,以及能够承受較大的荷載,这些优点是单根鋼絲所沒有的。

在鋼弦混凝土結構中,为了不使鋼絲有銹断的危險,一般不宜采用直徑小于 1.8 公厘的鋼絲。

鋼絲的直徑愈小,其强度愈高。目前国外生产出的鋼絲强度已到达了 25000 公斤/平方公分。

制造先張法結構的方法,一般都采用“台座法”;但也有采用单独模板的制造方法。

所謂“台座法”系应用一只張拉台座。台座一端將預应力筋用特別的夹具固定,在另一端設有一套張拉設備来張拉預应力筋。預应力筋內的反力系作用在兩側的鋼筋混凝土台座上。所需制造的构件即在兩側台座間成長綫排列,故此法也叫做“長綫法”。

图 2-a 所示的台座,系制造鋼弦混凝土結構用的。鋼絲在台座一端用夹具固定后在另端張拉。鋼絲在張拉端先用預拉器(图 8)以不大的拉力拉紧鋼絲并同样錨固在夹具內,然后利用千斤頂并通过金属横梁及拉杆將全部鋼絲一次張拉至所需的預应力值,拧紧錨固螺母,这样鋼絲內的預应力就得到保証。然后澆灌混凝土。

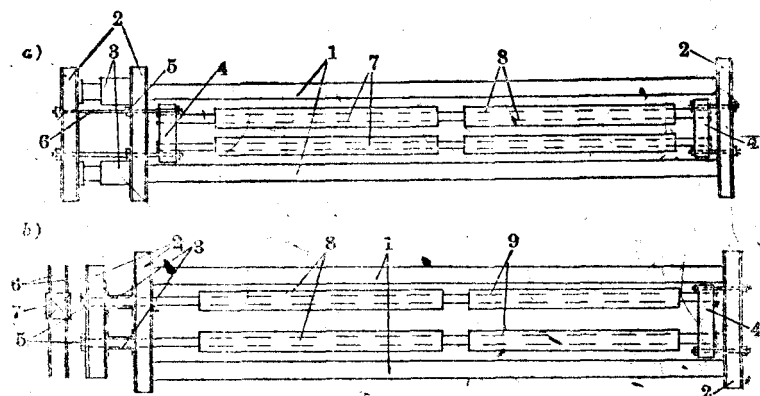


图 2 制造先張法結構的張拉台座

- a) 1—鋼筋混凝土台座；2—金屬橫梁；3—千斤頂；4—夾具；5—錨固螺母；
6—金屬拉杆；7—模板；8—預應力筋(鋼絲)。
- b) 1—鋼筋混凝土台座；2—金屬橫梁；3—金屬壓杆(調整橫梁位置用)；
4—固定端夾具；5—張拉端夾具；6—軌軌；7—張拉小車；8—模板；
9—預應力筋(鋼絲或鋼筋)。

待混凝土硬化至适当强度，放松鋼絲，这时鋼絲內的預应力借粘結力傳遞至构件混凝土上。

图 2-b 同样为制造先張法結構用的台座。惟其預应力筋的張拉采用可移动的張拉小車。張拉小車一般由千斤頂(液压或油压)和油压表組成。張拉小車的种类不一。这种方法一般应用在張拉大直徑鋼筋时为多。鋼筋是一次張拉至所需預应力值的。

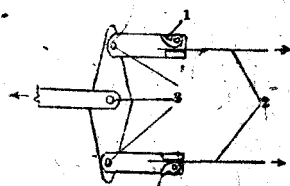


图 3

- 1—帶齿的偏心輪；2—所需預拉的鋼絲；3—鉸。

台座的长度一般均在 100 公尺左右，亦有长达 150 公尺的。台座的寬度可达 4 公尺。因此每一台座可平行排列几行长綫，每一长綫又可布置若干构件。这很适宜于工厂的大量生产。

台座應該設計得尽可能地长。这不但可以在同一時間制造較多构件，并且还具有这样的一些优点：1) 各鋼絲間的应力比較均

勻；2)由于鋼絲在夹具內滑动所引起的应力損失可以减小；3)兩端所留下的短截廢鋼絲可以减少。

当采用台座法制造构件时，一般为了能尽早地放松預应力筋（即自傳力架上割断）以加快模板及台座的使用率，因此采用蒸汽养护。通常是在构件混凝土澆灌后潮湿条件下先养护几小时（2小时以上）然后通以蒸汽。蒸汽养护的时间約十几小时。一般在一昼夜中完成自張拉鋼筋至混凝土养护結束的所有工序，这样在第二天即可开始新构件的生产。

蒸汽养护所引起預应力筋內应力的損失是为一个缺点。

制造先張法結構的另一方法是采用单独的模板。这种方法在工厂和工地均可应用。模板可以由金属材料（一般为鋼板）或钢筋混凝土做成（图4）。构件內預应力筋中的反力系直接由模板承受。

制造先張法結構时临时錨固預应力筋（鋼絲或鋼筋）用的各种夹具如图5、图6、图7及图8所示。其中图5为一种錨固鋼絲

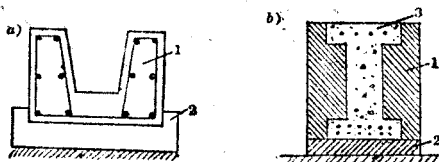


图4 单独式模板

a) 1—钢筋混凝土模板；2—底座。

b) 1—金属模板；2—底座；3—所制造的构件。

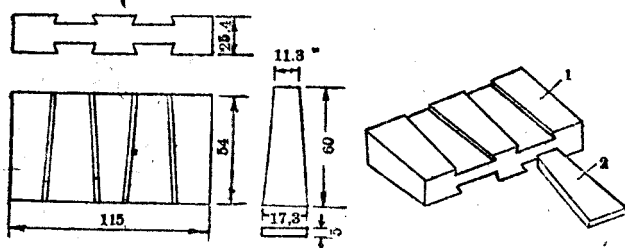


图5 三明治板

1—锚板；2—锚楔。