

国外的預应力金屬結構

B. C. 基里洛夫 著

3
建 筑 工 程 出 版 社

內容提要 本書介紹預應力金屬橋梁和其他預應力金屬結構的基本知識。還介紹了國外的實際結構物，並說明了它們的計算方法。

本書供工程技術人員和科學工作者參考。

原本說明

書 名 ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫЕ
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ ЗА РУБЕЖОМ
編 著 者 В.С.Кириллов
出 版 者 АВТОТРАНСИЗДАТ
出版地點及年份 Москва—1956

國外的預應力金屬結構

辛家祺 譯

*

建築工程出版社出版(北京市阜成門外大街)

(北京市書刊出版業營業許可証出字第062號)

建築工程出版社印刷廠印刷·新華書店發行

書號 903 33 千字 787×1092 $\frac{1}{32}$ 印張 $1\frac{3}{8}$

1958年7月第1版 1958年7月第1次印刷

印數：1—3,060冊

*

統一書號：15040·903

定 價：(10)0.20元



目 录

序 言	2
緒 論	4
主要的結構型式和構件	7
現有的結構物举例.....	16
預应力結構的靜力計算的特点.....	26
預应力杆件的强度計算方法.....	35

序 言

苏联發展国民經济的第六个五年計劃，对建筑工作者們提出一項任务，是推广在工厂制造的結構型式，以便最大限度地降低結構物的造价，减少制造工作的劳动量和降低建筑材料的消耗量。

在金屬結構方面，可以采用高强度鋼，或創造新式的、最經濟的結構型式来达到節約的目的。

在公路桥梁工程方面，俄罗斯科学家和工程师們（根据結構的預加应力这一概念）以自己的劳动創造了新的、型式最合理的金屬桥梁。預加应力这一概念的發展，自然就使我們开始采用高强度鋼索和鋼纜，同样的，金屬結構將按照这个方向發展。

近年来，在国外出版了許多有关預应力鋼結構的著作。对于这些新的工程結構所作的理論研究，以及主要在公路桥梁方面建造这种結構的經驗都証实了此种型式結構物的合理性。可以完全肯定，在苏联預应力鋼結構將同样能得到大力的推广。

目前，苏联缺乏有关采用鋼纜来預加应力金屬結構方面的文献。这些文献使大量的建筑工作者能够熟悉鋼結構設計方面这个新的先进的方向，因而希望工程师們都能重視这本小冊子。在本書中，除了介紹国外已建成的几座預应力結構物之外，还叙述了某些普通的結構方案和設計方案。

对預应力鋼結構物的深入研究，以及主要是这些結構物的設計經驗，無疑的可引起变化，能得出关于預应力桥梁和其他結構物的最合理型式的結論。

这本小冊子供从事金屬結構設計和施工的工程师和建筑科学

工作者之用。

本書在出版之前，承蒙俄罗斯苏維埃 联邦社会主义共和国
E·E·吉布什曼教授和Г. Д.波波夫工程师給予許多珍貴的幫助，
特在此表示衷心的感謝。

緒 論

鋼結構預加应力这一概念，显然是根据鋼筋混凝土施工經驗得出来的。鋼結構預加应力是用具有高强度鋼纜，將个别的受拉構件或將整个結構預加压力，而这些鋼纜以張拉状态固定于主要結構上。因此在主要結構的構件中产生了与外部荷載所引起的应力符号相反的初应力，而鋼纜張拉后所作用的荷載就由主要結構和鋼纜共同承受。

采用預应力結構可以大大地节约金屬的总消耗量。此时，所得的經濟效果，是取决于下列两个原因：1) 由于采用了鋼纜，就能局部地用具有高度力学指标的金屬来代替一般的金屬，这样就能减少受拉構件横断面的工作面积；2) 在許多情况下，适当地配置鋼纜和把它們进行張拉(用人工分配内部应力的方法)来調整結構的内部应力，以使金屬的消耗量达到最小的限度。

大家都知道，采用高强度鋼不仅能减少金屬的总消耗量，而且能降低結構的造价。表 1 所示，为按德国实际工作資料^①所定出的建筑鋼材的各种性能，从这些資料中可以看出，如鋼的强度增加了 5—5.5 倍，其造价仅增加为 1—1.5 倍。

在苏联差不多也是这样一种比例关系。假使以 3 号鋼制成的結構造价为 1，則对桥梁結構物就可以得出下列比較指标(表 2)。

預应力鋼結構重量和造价的降低取决于基本金屬的預应力 σ_0' 的数值，以及取决于張拉前的作用力和張拉后的作用力的比值 α 。圖 1 所示为預应力杆件的金屬消耗量和造价与普通結構的金屬

① “混凝土与鋼筋混凝土” 1953 年 11 期。

表 1

鋼材標号	極限強度 公斤/平方公分	屈 服 點 公斤/平方公分	容 許 應 力 公斤/平方公分	比 值	
				容許 應力	造價
St-37	3,700	2,200	1,400	1	1
St-90	9,000	6,500	5,000	3.5	1.5
St-165	16,500	14,500	$0.55 \times 16,500 = 9,100$	6.5	1.9
St-180	18,000	—	$0.8 \times 0.55 \times 18,000 = 8,000$	5.7	3.5

表 2

鋼 材 標 号	極限強度 公斤/平方公分	屈 服 點 公斤/平方公分	容許應力 公斤/平方公分	比 值	
				容許 應力	造價
Cr. 3	3,800	2,300	1,400	1.0	1.0
Cr. HJ2	4,800	3,400	2,100	1.5	1.07
用平行鋼絲制成的鋼纜①	14,000	—	5,400	3.85	1.43
光面鋼索	12,000	—	3,100	2.20	1.45
鍍鋅鋼索	12,000	—	2,800	2.00	1.47

消耗和造價之間的比較圖。圖中主要金屬是用Cr.3号鋼制成，而鋼纜由極限強度為140公斤/平方公厘的鋼絲組成，它們造價的比值等於2。從圖中可以看出，無論在重量方面或造價方面，都可能有很大的節約。但實際上，因為只對結構的受拉構件才施加預應力，而這些構件的重量在格構式桁架中僅約占金屬全重的1/3，所以能節約的數量還是比較少。

① 用平行鋼絲制成的鋼纜造價中包括了工 地上的製造費用，如：捆結鋼纜、錨定端部等等。

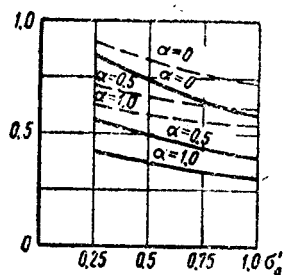
采用鋼纜做輔助杆，就使調整內力获得了很大的可能性。此时，就有可能創造能滿足現代建筑技术要求的極為經濟的結構方案。这样，鋼材的節約已不仅取决于利用了高强度鋼，而且还取决于在結構構件中內力的合理分布。

应当指出，对金屬結構預加应力比对鋼筋混凝土更为有效，因为在預应力鋼筋混凝土結構中由于混凝土的收縮和蠕变，使得鋼纜的拉力受到很大的損失，而這些問題在預应力金屬結構中是不会發生的。

但預应力金屬結構也有着自己的缺点，如必需采用高强度品种的鋼材，結構比較复杂，而主要的是增加了結構的变形性。这种变形性的增加是由于减少了結構的工作截面而引起的，这种現象在采用比較高强度的材料时是經常發生的。

季欣盖尔教授首先建議在与鋼筋混凝土板相連接的桥梁結構中采用有鋼纜的預应力金屬結構。之后，在国外有許多科学家从事于这方面的研究工作，其中首先有麦乃尔教授、沙穆艾里教授和弗利茨教授等。在这些研究工作的基础上，目前在国外已經建造了一些預应力的結構物，这些結構物我們將在下面加以介紹。

在苏联，Ю. Б. 盖达罗夫工程师在1950年提出了对金屬結構預加应力的建議。1951年技术科学碩士H. A. 斯洛汶斯基开始在公路桥梁上采用預应力金屬結構。之后，E. E. 吉布什曼教授也进行了采用預应力来加强金屬桥梁的研究工作。最近，B. M. 瓦胡尔金工程师和Г. Д. 波波夫工程师也在某些公路桥梁的設計中



圖例：

——金屬的消耗量

--- 造價

圖 1 預应力鋼結構和普通鋼結構的金屬消耗量和造價的比較表

採用了高強度鋼纜。

主要的結構型式和構件

金屬結構的預加應力，可以由單獨的受拉構件受力或由整個結構受力來實現。

在格構式桁架中，可以採用前一種方法。此時，桁架的單獨構件上（受拉弦杆、斜杆等），都可裝置有預先張拉的鋼纜（圖2）。鋼纜



圖 2 裝有預應力受拉杆件的
格構式桁架圖

在靠近安裝接點的地方就截斷了，而鋼纜中的應力借助於局部增大杆件橫截面的方法傳到主要鋼結構上。這種方法在需要加強桁架中某些單獨杆件時（如加強橋梁時）才採用。各根

單獨的預應力構件可全部在工廠中進行製造。而張拉鋼纜的工作可以在工廠中進行，也可以在現場上在安裝金屬結構的過程中進行。這種預加應力方法的優點，是鋼纜的長度比較短，而這些鋼纜也可用極限強度很高的圓截面鋼筋來代替。除此之外，桁架的各種單獨杆件的應力並不會改變結構的靜力圖形（不會引起附加的超靜定性），在某些情況下，這一點是很重要的。但這種結構的缺點在於錨接件的数量很大，因而也增加了非生產性的金屬消耗量。

可以借助於用鋼纜做成的各種外形的輔助杆^①這一方法，來

① 譯者注：輔助杆是由шпренгель翻譯來的，由於預應力鋼結構是由鋼結構加固發展過來的，而在鋼結構加固中шпренгель可譯為加勁杆，但在預應力鋼結構中顯然是不恰當的，因此暫譯為輔助杆，也就是所有的布置在結構各部的由它們來施加預應力的鋼纜或其他型式的高強度鋼的通稱。

實現全部結構預加應力。這種方法和前一種方法不同，採用這種方法時，在整個結構或部分結構裝配好之後才張拉鋼纜，因而與安裝鋼纜和張拉鋼纜有關的全部作業，都可在施工現場上進行。

輔助杆處的鋼纜的外形可以是各式各樣的。在結構方面，輔助杆處的鋼纜最簡單的布置方法，是沿結構的受拉構件作直綫形的布置(圖3)。在必要時，鋼纜的斷面可以改變，其

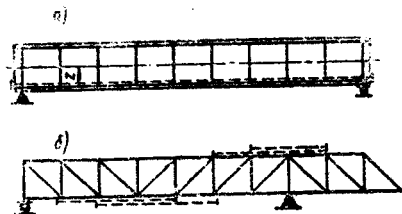


圖 3 採用直綫式輔助杆的靜定結構圖

改變的方法有兩種：1)在應力較大的部分(上弦杆見圖3b)增加這種鋼纜的數目；2)各根鋼纜互相搭接(下弦杆見圖3b)。在格構式靜定桁架中，鋼纜的這種布置方法並不會改變其他未加應力的杆件的內力，因而這時鋼材的節約只能依靠減輕沿其上布置鋼纜的構件的重量。在單跨的和伸臂的板梁中(見圖3a)，由於鋼纜的張力 Z 所產生的力矩為

$$M = Zz,$$

此力矩對上弦杆和下弦杆的主要金屬起卸載作用，這樣就增加了預應力的效果。

在連續梁結構中，直綫型鋼纜同樣也可沿拉應力區內的上弦



圖 4 採用直綫型輔助杆件的連續梁圖

杆和下弦杆布置(圖4)。

此時由於主要結構是超靜定的，張拉鋼纜將引起所有截面中(所有杆件中)內力的重分配，因而就有可能用人工來分配所有的內力。

輔助杆在靜力方面最合理的外形是多邊形的或曲綫形的。如淨空條件許可的話，則在梁式結構中的輔助杆件最好布置在桁架

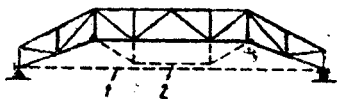


圖 5 采用多边形輔助杆件的桁架圖
1—拉杆；2—輔助杆件



圖 6 采用多边形輔助杆的
飞机庫的桁架圖

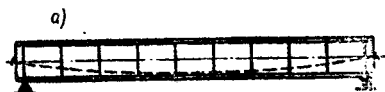


圖 7 采用曲綫形輔助杆件
的实腹梁圖

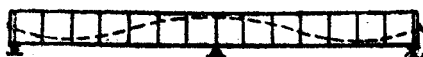


圖 8 具有曲綫型輔助杆的連續梁圖

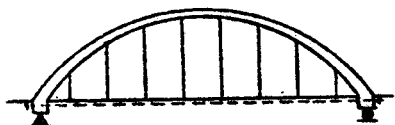


圖 9 具有鋼纜拉杆的刚性拱圖

構中，拉杆可由鋼纜制成，如圖 5 所示。在桥梁桁架中，鋼纜可以用来承受刚性拱的推力（圖 9），也可用来承受帶有刚性梁的柔性拱中的推力（圖 10）。在后一种情況下，刚性梁可完全不受推力的作用，这样就可减小刚性梁的尺寸。

的下面，將其固定于下弦的水平上（圖 5）。如沒有自由空間時（這種情況在桥梁中是常有的），則鋼纜可布置在主要結構的高度範圍內。圖 6 所示為采用布置在桁架結構高度範圍內的多边形輔助杆的飞机庫屋蓋圖。在实腹梁中，這種多边形輔助杆的兩端可沿中和軸加以固定（圖 7a），或固定在上弦水平上（圖 7b）。把這種輔助杆固定在上弦水平上時，在與鋼筋混凝土板相連接的梁中，鋼纜可錨固在板的混凝土中；這時，鋼纜將壓應力傳到板上，這樣在某種程度上就防止了混凝土產生收縮縫。在連續梁中，可根據彎矩圖沿曲綫來配置鋼纜（圖 8）。

在帶有拉杆的推力結

上述各种結構形式还远沒有挖掘尽預应力鋼結構的全部的結構方面的潜力。繼續进行进一步研究和設計，無疑地將會寻找出其他一些結構形式，这些新的結構形式对各种用途的結構物和各种靜力圖來說將更为合理。

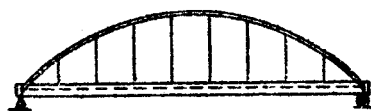


圖 10 具有鋼纜拉杆和剛性梁的
柔性拱圖

現在我們來研究一下預应力鋼結構的某些結構特点。

首先应当指出，預加拉应力格構桁架中的受拉杆件，应有足够的剛性，这个要求根据下列理由得出。

在施加預应力的过程中，当張拉鋼纜时，主要金屬杆件就受到壓縮，这时，杆件應該具有抵抗縱向弯曲的稳定性。因为杆件的安裝壓縮作用是暫时的，而且以后在外部荷載任何組合情況下，安裝壓縮作用都不再重复發生，所以可采用較小的稳定性安全系数。其次应注意到，柔性的受拉杆件总有一些下垂度，所以在使用时外力的作用下，不能立即参与工作；因此变形就增加了，接合迅速被破坏，临时荷載等的动力影响也就增大。大家都知道，苏联的技术规范規定了受拉杆件柔性的标准值，显然，这些标准值应同样适用于預应力結構。

上述各点說明了格構式桁架的預应力構件的断面通常应与普通鋼結構的一样。对格構桁架預应力構件的断面，只需提出适于配置鋼纜和鋼纜的錨接方面的附加要求。鋼纜的布置对断面重心应保持絕對对称，因为不这样的话，在張拉鋼纜时将产生很大的弯矩——即鋼結構的構件具有两个对称軸的断面，如圖11所示。对輕型桁架來說，最好采用以下几种断面型式，即：由兩根或四根角鋼組成的十字断面；由鋼管、焊接角鋼構成的封閉式断面；工字形断面（見圖11 a、б、в、г、д）。对重型桁架來說，則可采用普通的双壁

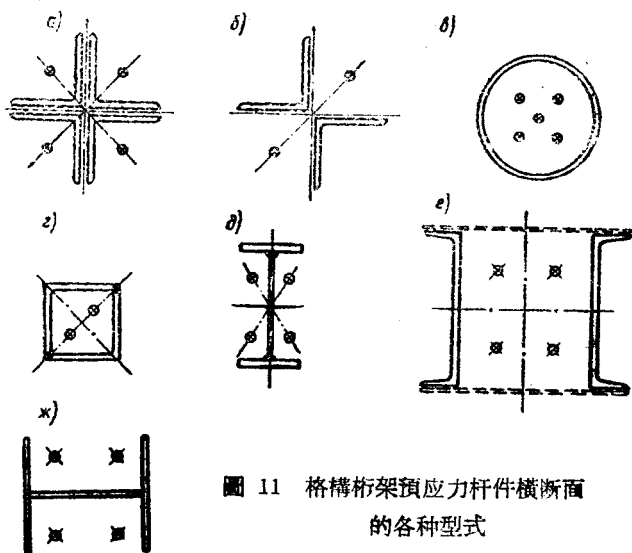


圖 11 格構桁架預应力杆件橫斷面的各種型式

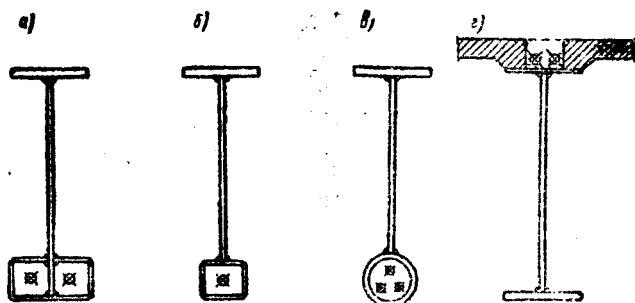


圖 12 預应力实腹梁橫斷面的各種型式

断面一即双槽鋼断面和H型断面(圖11e、ж)。在采用这些断面时,鋼纜应对称地布置;鋼纜間的距离主要是根据錨定的結構和張拉設備的淨空尺寸来决定。

在实腹梁中沿上下弦布置鋼纜时,鋼纜可配置在垂直壁的兩側(圖12a)或布置在垂直壁的下面(圖12б)。为了减少結構的勞

动量,下弦杆最好用焊接管或無縫鋼管制成(圖12a)。在受拉的上弦杆上放置有鋼筋混凝土板时(如桥梁結構),最好把鋼纜布置在上面,随后再澆灌混凝土(圖12e)。

多边形鋼纜可配置在梁的垂直壁的兩側(圖13)。此种鋼纜用加勁杆和小型的壁中支架支承在設計位置上。在鋼纜弯曲的地点为了使它們有平滑的外形,应設置圓弧形的支撐导板。导板应固定在梁的垂直壁上,以用来傳遞張拉鋼纜时所产生的摩擦力。在鋼纜的錨

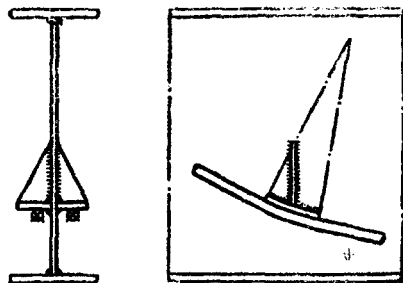


圖 13 在实腹梁中曲綫形鋼纜布置圖

定处,为了承受由鋼纜傳来的集中力主要結構应予以加强。当鋼纜沿垂直壁高度加以固定时,这点特別重要。在这个位置上,应校核垂直壁的局部稳固性,并用某种防止凸起危險的方法予以加强。

鋼纜本身的結構,取决于所采用的高强度鋼的品种。

在国外,有一种直徑在26公厘以內的圓形軌鋼,其極限强度不大于90公斤/平方公厘,屈服点最大为65公斤/平方公厘。强度更高的达到160—180公斤/平方公厘以上的鋼,只有鋼絲。大家都知道,这种鋼絲沒有流幅,它屬于一种硬鋼。国定全苏标准(ГОСТ)7345-55規定了預应力結構应采用下列品种的鋼絲(表3)。

表 3

直 徑 (公厘)	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	10.0
極限强度 (公斤/平方公厘).....	200	190	180	170	160	150	140	100
每 100 公厘的相对延伸率(%).....	2		3			4		

預应力金屬結構採用大直徑的圓鋼，顯然，只限于在個別杆件受拉的格構式桁架中才有可能。在這種情況下，高強度鋼制成的構件的長度較短，而用圓形軌鋼來制造這些構件並不會遇到什麼困難。用螺帽來固定這些構件可以使它們的錨定和張拉工作簡化。毫無疑問，由圓鋼制成的高強度構件的優點在于它的直徑較大，不易遭受突然的局部性的損壞，並且可塗以普通的油漆以防止這些構件的銹蝕。

較長的鋼纜可由高強度鋼絲做成。鋼纜可由平行的鋼絲捆扎成直角形的或圓形的鋼絲束（正如在鋼筋混凝土結構中所採用的），或可由鋼繩制成。由平行的鋼絲做成的鋼纜，所採用的鋼絲直徑為4—7公厘。鋼絲在現場上捆扎成鋼纜，所以鋼纜都是單獨的結構。用鋼絲制成的鋼纜的強度，以其彈性模數要比鋼繩稍大。這種鋼纜的主要缺點是它們不易防止銹蝕。除此之外，單獨的細鋼絲不僅在結構制造時，而且在以後的使用時都容易受到偶然的局部損傷，因此就必須把它們放置在封閉的察看不到的空筒里。

由沒有麻心的鋼繩做成的鋼纜在許多場合下使用起來更為方便。在工廠中用極限強度很大的細鋼絲（2—3公厘）制成的鋼纜，有着足夠的強度，抵抗機械損傷的能力較好，並且不易發生銹蝕。應當指出，鋼繩的彈性模數比用平行鋼絲做成的鋼纜的彈性模數要小。但是，可以採用將鋼繩在安裝之前加以張拉的方法，或在結構預加應力時可用多次地拉緊鋼纜的方法來提高彈性模數的數值。

用鋼絲制成的鋼纜的錨定，在很大程度上取決於這種鋼纜的結構和張拉的方法。

在選擇鋼纜的固定點時，應估計到鋼纜在張拉時期會產生較大的延伸。這種延伸的大小，不僅取決於鋼纜的變形，而且取決於

主要的金屬結構的變形，主要金屬結構的變形與預應力鋼筋混凝土不同，它能達到很大的數值。

平行鋼絲做成的鋼纜可依據各種楔子裝置來加以固定。當把鋼絲布置成矩形時，可採用帶有楔子的鋼板(圖14)。各根鋼絲都穿過錨定板，並固定在鋼板上，而鋼絲用功率不大的千斤頂來張拉，每次可以同時拉好幾根。這種結構可以控制應力的大小，以便均勻地張拉所有的鋼絲。

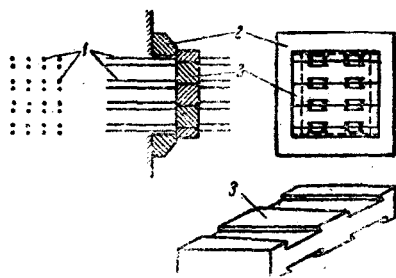


圖 14 採用鋼楔子錨定矩形的鋼絲鋼纜圖

- 1—鋼絲； 2—錨定板；
3—帶有楔子的鋼板

圖15所示為圓形鋼絲束的錨定圖。錨定件是由鐵心和兩個空心的圓筒組成，在鐵心和兩個圓筒之間放置鋼絲。在鐵心的外端有螺紋，以便旋緊固定螺帽。用千斤頂張拉鋼纜後，螺帽就緊旋在錨定板上，並把鋼絲的張拉力傳給錨定板。然後，鐵心的突出端部用氣切機切除。

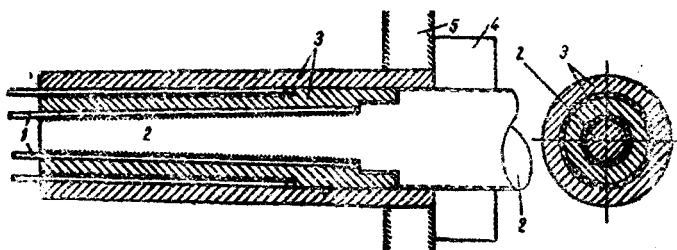


圖 15 圓形鋼絲纜用的錨定裝置圖

- 1—鋼絲； 2—鐵心； 3—空心圓筒； 4—固定螺帽； 5—錨定板

除上述的裝置之外，可澆注水泥和合金把鋼纜固定在專門的杯形件中。讀者可在有關吊橋的文獻中找到此類結構。

鋼結構設計院的Г. Д. 波波夫工程師，曾建議在某座橋梁設計中採用一種獨特的鋼纜結構和鋼纜張拉結構，這種鋼纜結構的原理如圖16所示。

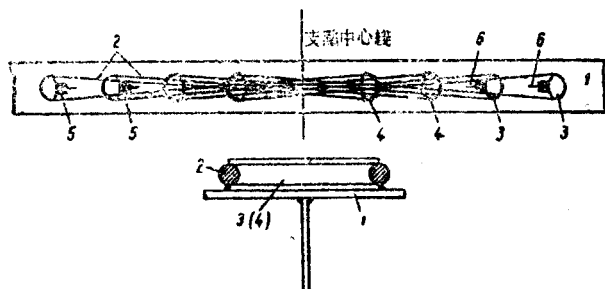


圖 16 連續橋梁中間支座上鋼纜及它們的張拉情況圖

1—上弦水平板；2—直徑為34公厘的鋼纜；3—活動支架；4—固定支架；5—千斤頂；6—千斤頂支架

在該座橋梁的設計中規定，採用在各中間交座上沿上弦設置的鋼纜來使上部結構連續主梁預加應力。在支座上一共有16根鋼纜，鋼纜的數目隨離支座的中心綫的距離而逐漸減少。每根鋼纜由90根直徑各為3公厘的極限強度為180公斤/平方公厘的平行鋼絲制成。在設計中規定，鋼纜是在專門的支架上用鋼絲逐漸纏繞而成，在這些支架上有着敷設鋼絲用的圓弧形的槽。鋼絲在手面上繞成8字形，這樣可使所有的鋼纜都差不多配置在同一水平上。在繞90圈之後，鋼絲的兩頭應相互焊接或借螺紋連接起來；錨定的方法非常簡單，因為它只需連接一根鋼絲的二端就可以了。在配置鋼纜時應使它們的長度相等。每根鋼纜的支架的一面焊在梁的上弦上，而另一面是不固定的。採用100噸的千斤頂來張拉鋼纜，