

一九五六年全國鐵道科學工作會議

論文報告叢刊

(34)

預應力鋼筋混凝土橋梁 設計總結

人民鐵道出版社

前 言

1956年全国铁道科学工作会议征集了技术报告、总结、论文三百余篇。它的内容，包括铁路业务的各个方面，基本上显示着全体铁路技术人员和有关高等学校教师们几年来在科学技术方面辛勤劳动的成果。对现场实际工作有参考价值，对铁路新技术的采用和发展方向，有启示作用。为此，刊印丛刊，广泛流传，保存这一阶段内的科技文献，以推动科学研究的进一步开展。

会议以后，我们对全部文件进行一次整编工作，然后组织部内设计总局、工程总局、工厂管理局、人民铁道出版社、车务、商务、机务、车辆、工务、电务各局、铁道科学研究院、北京和唐山铁道学院、同济大学、大桥、定型、电务等设计事务所的有关专业同志对每篇内容仔细斟酌，选择其中对目前铁路业务有广泛交流意义，或是介绍铁路新技术方向和系统的经验总结，将性质相近的文件合订一册，单独发行。为了避免浪费，凡是其他刊物或是以其他方式刊印过的文件，除特殊必要外，一般都不再刊载。出版顺序根据编辑和定稿的先后，排定丛刊号码，交付印刷，並無主次之分。

苏联铁道科学代表团在会议期间曾经作过九次学术报告，我们已将文字整理，编入了丛刊。

文件中的论点，只代表作者意见，引用或采用时，还应由采用人根据具体情况选择判断。

丛刊方式还是一种尝试，我们缺少经验，希望读者提供意见，逐步地改进。

铁道部技术局

1957年2月

予应力鋼筋混凝土桥梁設計總結

鐵道部設計总局定型設計事務所

(一) 序 言

随着鐵路建設事業的發展对桥梁建筑方面也就提高了一系列的要求，其中最主要的是加速施工的問題。

關於這個問題，苏联專家 H·M·柯洛克洛夫同志曾經在報告中指出为了加快速度，降低造价，大量節約鋼材，今后不仅在小桥方面而且要在大桥和中桥方面都要广泛地採用裝配式鋼筋混凝土結構。⁽¹⁾

然而普通鋼筋混凝土結構存在了一系列的缺点，如抗裂性差不能利用高强度材料，本身重量大等。因此妨碍了它們向裝配式結構方向發展。

予应力鋼筋混凝土的特出优点即是能够在使用荷載下防止裂縫的出現，經過适当的計算甚至还可以在使用荷載作用下不出現拉应力。由此出發因而得以利用高强度的材料，結構物重量大大減輕，这样应用予应力鋼筋混凝土結構就为裝配式鋼筋混凝土結構开辟了有利的途徑；苏联有些學者建議今后裝配式鋼筋混凝土結構基本上应走予应力鋼筋混凝土結構的道路。

予应力鋼筋混凝土結構在苏联已有很大的發展，目前已修建了 160 座这种型式的铁路桥梁和 100 座以上的公路桥梁，人民民主国家和資本主义国家在这方面也有很大的發展。

我国自 1955 年开始也着手进行了予应力鋼筋混凝土铁路桥梁的計算、設計、試制和試驗工作，在鐵道科学研究院、工程总局、丰台桥梁工厂、設計总局定型和大桥設計事務所以及唐山鐵道学院等 6 个單位的合作下，目前已完成了一孔 $l_p = 11.5M$ 予应力鋼筋混凝土梁的試驗和一部分試驗工作，以及 28 孔 $l_p = 23.9M$ 的予应力鋼筋混凝土梁的制造工作，在工作过程中蒙苏联專家沙布里同志的帮助得到了苏联 1951 年的「具有强大鋼絲束的予应力鋼筋混凝土梁設計和計算指示草案」（以下簡稱指示或指示草案）和苏联交通部中央科学研究院 1952 年的 27 期通报「具有强大鋼絲束的予应力鋼筋混凝土梁的制造」二本書，初步解决了設計和施工中的一些問題，同时在施工过程中得到苏联專家佩布赫同志的具体帮助，解决了施工中的一系列困难問題，在这里我們仅向这二位專家表示感謝。

$l_p = 11.5M$ 梁及 $l_p = 23.9M$ 梁的制造获得成功，为今后在我国發展予应力鋼筋混凝土結構創造了条件，为此 1956 年起定型設計事務所將在現有的基础上根据苏联的最新資料（E·A·特罗依斯基等著「予应力鋼筋混凝土铁路桥梁」1955 年出版）开始进行 $l_p = 20$ 、24、28、32M 的 T 形予应力梁的定型設計和用於跨綫桥的几孔予应力版式梁的定型設計，鐵道科学研究院和唐山鐵道学院亦於本年度开始研究蹬筋予加应力的問題。

關於 $l_p = 11.5M$ 及 $l_p = 23.9M$ 的梁的設計是參照1953年蘇聯列寧格勒橋梁設計事務所編制的預應力梁定型設計及上述的1951年的指示而設計的，設計方法和步驟已詳載於設計通訊33及34期（鐵道部設計總局編印）和大橋設計事務所編印的「23.9M預應力梁計算例題」中，本文不再重述；僅對設計過程中的體會和設計和施工中的問題以及今後發展預應力結構中所應解決的幾個問題提出初步的意見。

（二）蘇聯的預應力鋼筋混凝土梁計算方法的特点

和普通鋼筋混凝土梁的計算理論一樣，蘇聯在預應力鋼筋混凝土梁的計算方面也表現了同樣獨特的成就，這些成就到目前為止已超過了所有資本主義國家在這方面所達到的水平。

蘇聯在普通鋼筋混凝土梁計算方面早已拋棄了多世紀以前出現的容許應力計算法而採用了先進的破損階段計算法（雖然在橋梁結構上尚未見諸應用），同時現在已在房屋結構方面採用極限設計的方法。貫徹在整個計算中的基本原則就是按照不同的危險階段而採取不同的應力分佈圖形；例如計算強度時混凝土中的壓應力採取矩形分佈的應力圖形，計算裂縫出現時混凝土中的壓應力採用三角形分佈的應力圖形，受拉區的混凝土應力則考慮其塑性影響而採用矩形分佈的應力圖形等。

在預應力結構計算方面同樣也貫徹了這個原則：例如對預應力計算，抗裂性計算及強度計算分別採用了Ⅰ階段、Ⅱ階段和Ⅲ階段的應力分佈圖形，現在僅在這三方面加以說明。

А、強度的計算：

強度象徵了使結構物破壞所需要的力量。試驗證明：在很多種結構物中當結構物接近破壞時結構物中的應力早已超過了彈性極限，因此在計算強度時還必需考慮到材料的塑性性質。

蘇聯中央建築科學院的試驗證明：在一定的配筋率之下，鋼筋混凝土梁在破壞時受壓區域的應力圖形與三次拋物線的形式相似，如以矩形分佈的應力圖形代替實際的結果在計算上所引起的誤差很小，為了簡化計算，現行的按破損階段的計算方法即以此為基礎。但為了保證混凝土的破壞和鋼筋的流限的同時達到或鋼筋的流限達到較早且保持流限的應力直至受壓區域破壞，鋼筋不應配置過多，即滿足 $S_g \leq 0.75 S_o$ 的條件。

預應力的存在僅能推遲裂縫的出現並不能影響梁的強度；即預應力的作用隨着荷載下裂縫的擴展而隨之消失，但最近英國學者所作的試驗卻說它有一些影響。

在預應力梁中採用軟鋼時，破損荷載的計算与普通鋼筋混凝土梁相同（因為其破損時符合上述的要求即受壓區早於鋼筋先行破壞），而當採用硬鋼時由於鋼筋沒有流幅故破壞一般是由於鋼筋的斷裂而在剎那間發生；此時混凝土中的應力尚未達到撓曲極限壓應力 R_u ，然而在通常的配筋率之下，梁的破壞与普通鋼筋混凝土梁的破壞基本上相同。

因此對於預應力梁的強度計算採用了和普通鋼筋混凝土梁的強度計算相同的方法。

目前蘇聯已有一些學者提出了按極限設計來計算預應力梁的強度，但尚在研究中並未見諸應用。²

指示中規定預應力梁的強度計算是以混凝土中的應力達到極限撓曲壓應力 R_u ，同時鋼

絲中的应力达到極限抗拉强度 σ_p 为基础的。如果梁的受压区域置有予应力鋼筋且其予应力值超过 3600 KГ/CM^2 ，尚需考虑其对梁的强度的影响。关于置於受压区域的予应力鋼筋中的予应力值最大应为若干，各家的意見很不一致，有認為可用 7000 KГ/CM^2 ，也有說可用 5500 KГ/CM^2 ，並且对其对强度的減弱影响也有不同的意見，值得进一步研究。^{3, 4}

这里需要說明两个問題：

1. 关于选择鋼絲的抗拉極限 σ_p 而不採用流限 σ_s 作为强度計算基础的問題。

根据苏联 ЦНИИС（全苏运输建筑科学研究所）所作的試驗証明，鋼絲沒有显著的屈服点；並且無論在动載或靜載試驗中鋼絲束或个别鋼絲均未有突然地脆性破裂的特征。

过去苏联曾顧慮到鋼絲的脆性破裂因而以鋼絲的名义流限 $0.7\sigma_p$ 作为鋼料力学性能的主要指标並以此作为計算的基础。对于这样的結構如採用安全系数为2，則相当于按 σ_p 且考虑工厂制造的安全系数为2.57，此值未免过高。

动載試驗結果說明个别鋼絲束在振动終了才逐漸失去作用，且具有与塑性破坏相似的特征，同时靜載試驗說明破坏鋼絲的力等於各个破坏鋼絲的力的总和。

因此，由於上述大量試驗的結果，奠定了採用 σ_p 來計算强度的基础。

2. 在予应力铁路桥梁中採用破坏阶段的計算方法的問題

直至目前为止普通鋼筋混凝土梁結構尚在採用容許应力的計算方法，这一方面固然是由於对处于动荷載下的鋼筋混凝土結構物研究不足，但是动荷載确实对梁的强度有些影响，动荷載的作用將使梁中裂縫过早地出現且在荷載值不变，而重复次数增加时，裂縫將繼續开展並引起新的裂縫出現，因而降低了梁的剛性和强度。⁽⁵⁾⁽⁶⁾

而予应力梁的試驗証明：由於予应力的存在以致使梁在使用时不会产生开裂現象，因而保證了梁的强度。同时虽是150万荷載週期的作用也並不影响梁的强度，破坏荷載的数值仍是随混凝土和鋼筋的强度而变，所以对予应力桥梁的强度計算在指示中及公路桥梁設計规范中均採用了与房屋建筑规范（II-148-52）相同的規定——即按破坏阶段計算。

綜上所述强度計算本身就包含了选择断面和决定鋼絲的用量（和普通鋼筋混凝土梁一样）。

B、抗裂性計算：

按照鋼筋混凝土梁的試驗結果：裂縫出現系在 I_a （也有称为 II_a ）阶段，因此指示在苏联工業建筑中央科学研究所的試驗基础上採用了如下的公式來計算抗裂性：

$$K_{\sigma} M = M_T \leq \omega_{no} (\sigma_{\theta 1} + \sigma R_p)$$

这个公式是II-148-52中採用的以B·B·米哈依洛夫教授建議的計算方法为基础的公式的簡化形式，同时考虑了后張式具有强大鋼絲束的予应力梁的施工特点——在予应力建立时套管內未曾灌漿，因而採用了 ω_{no} 而不採用 ω_n ，

$$\omega_{no} = \omega_n - \omega_{\sigma \theta 1}$$

$\omega_{\sigma \theta 1}$ = 鋼絲束孔的截面模数。

抗裂性計算时的应力圖形是混凝土受压区域为三角形，受拉区域为矩形，这是因为受压区域尚处于彈性阶段（該时混凝土中的应力应变曲線尚近於直線）而受拉区域已进入塑性状态，因而考虑了受拉混凝土的塑性性質，系数 γ 正代表了这种特征。

目前的指示对于抗裂性方面需要保持 $K_{\sigma} = 1.3$ 的安全系数，这个数值据說是缺乏試驗根据的，苏联有些学者認為該值对于后張式灌漿的結構可採用 $K_{\sigma} = 1.25$ 最近一些資料已

改用 $K_r = 1.2^{(4)}$ 。

前面說過強度計算已決定了需要的鋼絲用量，但鋼絲中的預應力需要保證一定的抗裂安全係數，鋼絲中的應力又受到鋼絲疲勞極限的限制，因此抗裂性安全係數需要得越大則鋼絲中的應力值也隨之增加，這樣由強度決定的鋼絲數量往往就不能滿足抗裂的要求（當 $K_r \geq 1.3$ 時）。

這可以近似地用下列各式來說明

$$\text{在工廠製造時 } \frac{M_r}{M_p} = \frac{K_r}{K} = \frac{1.3}{2.50 - 0.25} = \frac{1.3}{2.25} = 0.577$$

決定 M_r 的是 σ_{a1} ，決定 M_p 的是 σ_p ，考慮到動荷載的作用，包括活載及恒載產生的應力在內的鋼絲中的應力 $\sigma_{a1} + \Sigma \sigma_a \leq 0.55 \sigma_p$ ，故 σ_a 必然更較 $0.55 \sigma_p$ 為小，因此由強度算出的鋼絲數量不能保證抗裂的要求。

同時 $K_r = 1.3$ 時所得到的預應力儲備（即在全部荷載作用下預應力的殘留值）太多，根據計算這個數值往往在 20 KГ/CM^2 以上，而指示中只要求 $10 \sim 15 \text{ KГ/CM}^2$ 就夠了。

B、預應力值的計算：

對於預應力及在使用時的應力計算由於整個斷面均未出現裂縫且混凝土中的壓應力並不很高，應力應變曲線幾成直線。因此尚能利用平面假設和虎克定律按照均勻彈性體以材料力學中所述的應力計算方法求之。

由於具有強大鋼絲束的預應力梁在自重作用下和預應力建立時套管內尚未灌漿；因此在求預應力值及計算自重產生的應力時均應考慮到鋼絲束孔對斷面削弱的影響，所以指示中規定對於這種結構在計算上述的應力時應採用 F_0 ， ω_0 而不用 F_6 ， ω_6 。

目前在計算控制應力（即有效預應力加上預應力損失值）時未考慮鋼絲中蠕變（也就是鬆弛）的影響，同時對於混凝土收縮及徐變係數各家的意見很不一致，尤其對國產混凝土的性能更沒有試驗資料，這個數值對控制應力值的影響很大，需要今後在這方面加以注意。

綜上所述，蘇聯的計算方法始終貫徹了上面一開始所談到的原則，並且以大量的試驗作為理論的基礎。

關於預應力值的計算最近有人談到認為目前所採用的計算方法尚不精確；主要表現在對於斷面特性的處理方面，應該針對各種不同的情況（如收縮徐變發生時，彈性壓縮產生時的斷面情況）加以考慮。⁷

直到目前為止，各資本主義國家在這方面仍應用了容許應力計算法，僅考慮了裂縫出現階段和預應力建立階段，並根據裂縫出現階段來計算預應力值，但裂縫出現階段的計算仍是以容許應力計算法為基礎，對於預應力損失值的計算有些國家是以公式來求的，有的國家則籠統地規定一個百分數。

（三）構造上的特點

蘇聯的預應力橋梁的特點主要表現在所採用的鋼絲束形式方面，蘇聯的後張式結構大部分都採用了強大鋼絲束和堅強的錨固設備。

這樣處理的結果不僅簡化了鋼絲在梁中的佈置而且使張拉工作很快地完成。

資本主義國家所通用的弗拉辛奈和馬涅耶爾法都只能將鋼絲少量地集中，且張拉工作

需分好几次进行。

所需要的鋼絲數量凡與跨度成正比而梁梗的寬度是與跨度關係不大的，因此在大跨度橋梁中採用強大的鋼絲束不論在佈置方面和張拉方面都是有很大的優點的。

鋼絲束是靠А.П.柯羅夫金付博士所創的杯形錨碇來錨固的，這種錨碇具有很高的強度，由於其中填塞了很密實的混凝土使鋼絲束中的鋼絲能很好地錨在里面，張拉時即將張拉用的千斤頂套於其上。

除了利用杯形錨碇以外，為了節約鋼料尚採用了封閉式梨形錨碇，這種錨碇不僅可以錨固在結構物的端部，並且可以根據力矩圖的變化（因為需要的預應力大小是隨着力矩的數值而變的）錨固於跨度範圍內而不伸至梁端，這樣除了節約了鋼絲的用量以外，同時又簡化了梁端錨碇的佈置。

隨着預應力梁在蘇聯的發展，蘇聯又研究了很多錨碇的形式：如用於預應力蹬筋的低高度的錨碇，用於橫向分塊的結構的拆裝式錨碇等，同時還創造了一些強大鋼絲束的接头形式。

上述的一些錨碇均經過動荷載及靜荷載的試驗，試驗證明無論在動載及靜載作用下，錨碇均能可靠地工作，而且經過灌漿以後的鋼絲束在荷載的作用下錨碇並不承受附加的力，這說明了灌漿是可以使鋼筋束與混凝土的粘着力建立起來。

（四）設計中的缺點及施工中所發現的一些問題

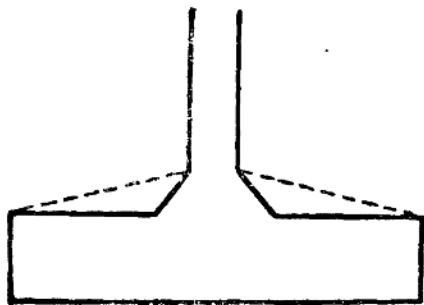
A、設計中的缺點：

$l_p = 11.5M$ 及 $l_p = 23.9M$ 的梁的形式和其中的一些結構細節是參照蘇聯1953年的圖而定的：而蘇聯圖本身也存在不少缺點。我們限於理論水平和實際經驗的不足，因循抄襲因而在設計中仍繼承了這些缺點。這些缺點有的已在施工過程中改進了，有的還需要在今後的設計中加以注意。

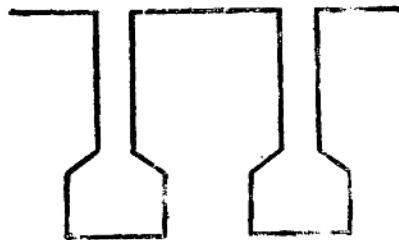
缺點主要表現在下列幾方面：

1. 斷面形式：梁的斷面形式選得不够好的主要表現在下翼緣的形式方面， $l_p = 23.9M$ 的梁的下緣做成一個平台一段斜坡（即梗腦）如圖1所示，這樣使搗固和拆模均發生一些困難，尤其是由於平台的存在易在該處模板下形成空氣塞以致在表面產生水泡，後經丰台橋梁工廠建議改成圖1虛線所示的樣子。

$l_p = 11.5M$ 的梁的下緣寬度稍嫌小了一些，以致重心偏高使下緣和上緣的應力不相協調，並且又是整孔式，下緣向兩邊突出如圖2所示，這樣使內模拆除不便。



（圖 1）



（圖 2）

2. 鋼絲束佈置方面: $l_p = 11.5M$ 梁的鋼絲束的端傾角太大, α 達 14° , 以致使張拉時的摩擦力增加, 或多或少地影響了預應力的實際值。

$l_p = 11.5M$ 及 $l_p = 23.9M$ 梁對梨狀錨碇的佈置估計不足, 梨狀錨碇的外徑很大, 達 20 cm , 佔去的空間很多, 施工時常發現它與別的鋼筋衝突。因而在施工過程中不得不改變它的形狀。

除此以外對於錨碇下的應力集中現象未予以注意, 在該處未予加強配筋, 因此在張拉過程中梨狀錨碇處發生細微裂縫。

3. 隔版的連接: $l_p = 23.9M$ 的梁採用了別利傑里式的扣絆式接頭, 這種接頭需要在梁架設好以後於接頭處灌以混凝土; 並需待混凝土凝固以後方得開放通行, 這樣既費工又耽誤行車, 現在準備將其改為銲接以致改善。

4. 鋼絲束的構造: $l_p = 11.5M$ 梁用的鋼絲束的心杆是由四根鋼絲組成的; 因此纏繞結果不易成形, 而 $l_p = 23.9M$ 梁用的鋼絲束的心杆是由三根鋼絲組成的纏繞結果易成形。

5. 截面不對稱的問題: $l_p = 23.9M$ 梁系兩片式, 每片梁的上版伸出部分並不是對稱的, 計算時未考慮這種影響, 因此在張拉完畢修梁以後, 支點變更, 至離原支點 $4.5M$ 處 (該點是根據對稱截面算出來的) 發現裂縫 (在上部); 後按不對稱斷面計算結果發現上緣拉應力值已大大超過允許數值。

B、施工中所發現的一些問題:

1. 纏繞鋼絲束: 在開始纏繞 $l_p = 11.5M$ 梁用的鋼絲束時發現纏繞出來的鋼絲束形狀很壞, 鋼絲歪扭現象嚴重, 固然一方面是該梁用的鋼絲束的心杆構造不良 (已如前述), 同時纏繞機的構造也有缺點, 因為鋼絲通過纏繞機的空心軸後進行纏繞時, 空心軸的轉動使得鋼絲由於離心力的作用而歪斜, 後在纏繞機的出口處加設一套盤, 其形式符合於每層鋼絲的形狀, 這樣也就避免了這種現象。

2. 灌注混凝土: 預應力梁的灌注要求水平分層, 由於其中鋼絲束密集, 灌注時發生了一系列的困難。 $l_p = 23.9M$ 的梁灌注時, 頭三片梁的蜂窩很多, 有一片梁有 8 個蜂窩之多, 其原因為水灰比過小和易性不良, 在搗固時震蕩不夠, 開天窗不足等, 後來採取多開天窗、改變水灰比、增加和易性才改善了這種情況。

3. 張拉鋼絲束: 原擬定先張拉至 110% 安裝應力然後降低至 100% , 並在此時墊塞墊圈, 在施工過程中發現如在 100% 時填塞墊圈很困難, 後即改在 110% 時填塞。

張拉完畢, 梁端與錨碇底之間的空隙很大原擬採用厚的鋼筋混凝土墊圈填塞大的空隙, 但填塞結果發現這種墊圈均被壓碎, 後改用鑄鐵的方得解決。

張拉過程中梁向外突出說明壓力對梁起了撓曲作用, 起初以為這種現象應避免, 後經中國科學院波蘭專家指出這是一般現象不必耽心。

梨狀錨碇處的裂縫, 後來以在該處加強配筋的方法解決。

4. 灌漿: 灌漿作業的主要目的是要保護鋼絲束免受侵蝕及建立其與混凝土的粘着力, 原定分三次灌漿, 首先用 $1:1$ (水泥比水) 的純水泥漿然後用 $2:1$ (水泥: 水) 的純水泥漿灌兩次, 但結果仍未能使灰漿充滿鉄皮套管, 後用 $4:1$ 灌情況稍有好轉。

灌漿問題曾在第二屆國際預應力會議上討論很久, 灌漿的必要性是肯定的, 如何使灌漿的結果滿意尚未得出結論, 這個問題要進一步研究。⁽⁸⁾

以上所述的設計中的缺點及施工中所發現的一些問題仅是主要方面的, 尤其是施工方面

的問題很多不能在此一一舉出，丰台桥梁工厂已作出了施工總結，在其中有詳細的敘述。

(五) 結論及今后發展中的一些問題

採用預應力鋼筋混凝土將大大地降低混凝土和鋼筋的用量，這一點是已經肯定了，但如何降低施工成本尚需進一步的研究，因為預應力結構的施工較之普通鋼筋混凝土結構需費更多的勞動力。

我國的預應力梁尚在開始發展階段，對於一些採用預應力梁的經濟指標根本沒有，因此只得引用其他國家的資料。

根據英國工廠製造預應力梁的經濟指標可如表1所示（每1 M³混凝土）。

表1

支 出 項 目	支 出 百 分 比	
	予 應 力	普 通
混凝土的成本	14	15
鋼料的成本	17	35
工資	20	14
模型及張拉裝置	14	11
運輸及安裝	20	25
總 計	85	100

由此可見可節省成本15%；意大利的資料則可節約30%，荷蘭在桥梁方面統計結果可以節約15~20%，蘇聯的資料則如表2所示。

製造成本的降低將進一步推動預應力梁的經濟性，這主要是依靠施工機械化，加速常備品的週轉率，縮短混凝土的養護期等。

預應力梁的重量較之普通鋼筋混凝土梁輕很多，這對於裝配式結構來說是一個有利的條件，同時由於避免了使用荷載下形成裂縫的可能性因而增加了梁的剛度，使預應力梁的使用期限大大地增加。

蘇聯的成本比較表（每1M³混凝土）

表2

產 品	工 資 費	材 料 成 本	附 加 費	總 計
普 通 $l_p=8.7\sim 15.8M$	6.36	58.2	35.44	100
予 應 力 $l_p=15.8\sim 26.9M$	8.97	39.3	50.10	97.37

但在目前在我國為了解決預應力梁大規模生產問題及發展問題，在這次試制和設計過程中我們感到有如下幾個問題需要急待解決：

4、材料的問題：

1. 混凝土：目前所用的混凝土是400級的（實際上28天強度達到600級）。預應力梁需要高強度的混凝土，但目前的混凝土強度雖然很高但水泥用量却是很多（每 $1M^3$ 需要500多公斤水泥），因此經濟上是有問題的。

張拉鋼絲束的時間需要由混凝土所達到的強度來決定，如果混凝土的需要強度能早日到達也就可以早日張拉，這樣也就縮短了整個產品生產過程所需要的時間。

除此以外，由於運輸及架設的要求還需要不斷地減少梁重以便向大跨度方向發展，為了達到這個目的除採用合理的形式外，還必須採用高強度的混凝土以減少斷面尺寸的方法來減輕梁重。

設想不用高標號的水泥（700~800號）要打出高強度的混凝土顯然是不經濟的。

目前干硬性混凝土已在我国的某些房屋予制構件上開始應用，這種混凝土的密實度大，水泥用量少且能在短期內達到較高的強度。如果採用干硬性混凝土並加上高熱蒸汽養護和摻加快硬劑將大大地提高生產的速度，製造成本亦將降低，同時如果與高標號水泥相配合則將製出強度很高的混凝土，一方面節省了水泥另一方面又滿足了要求。

前面已說過混凝土的收縮徐變系數影響預應力的有效值至巨。因此加強這方面的研究定出國產水泥和集料配合成的混凝土的收縮徐變系數並且想出減少這種損失的方法，將對預應力結構在我国的發展起很大的作用。

2. 鋼絲：這是我国發展預應力結構的主要問題之一，現在我們用的鋼絲是按蘇聯國定標準ГОСТ3617—47（信號鋼絲）製造的，直徑為5公厘者 $\sigma_p = 10000 \text{ KГ/CM}^2$ ，但均勻性很差且供應量不大。

和採用高標號混凝土一樣，如果採用高強度的鋼絲以加大其預應力值並與高標號的混凝土的使用相配合，可以使預應力梁的重量大大減輕，截面大大減少，為此蘇聯已生產出高強度的為預應力結構服務的冷拉鋼絲（ГОСТ7348—55），直徑為5公厘， $\sigma_p = 17000 \text{ KГ/CM}^2$ 。

用於預應力結構的鋼絲除了應具有相當高的強度指標外尚應有一定的塑性，以免在集中應力及彎折處突然破壞，延伸率正代表了這種性質，用於預應力梁或其他預應力結構中的鋼絲其延伸率最低應為若干，這個問題各家的意見很不一致；因為延伸率的提高往往伴隨着強度的降低，否則需要加工，因此影響價格至巨，有人建議最低為6%，根據蘇聯的經驗即使在連續配筋式的結構中採用延伸率為2%的鋼絲也就足可，ГОСТ7348—55規定了視鋼絲直徑而變的延伸率如下（鋼絲直徑越小，強度越高）：

$$d = 2.5 \sim 3.0 \text{ 公厘} \cdots \cdots 2\%$$

$$d = 4.0 \sim 6.0 \text{ 公厘} \cdots \cdots 3\%$$

$$d = 7.0 \sim 10.0 \text{ 公厘} \cdots \cdots 4\%$$

鋼絲的直徑越細強度雖然愈高，但所需要的數量仍然增加，因此目前的趨勢已漸走向採用較大直徑的鋼絲（7公厘）。

過去常用的是經過冷拉機械加強的鋼絲，現在西德和法國廣泛地採用了一種經過熱處理而不經冷拉機械加強的鋼絲，這種鋼絲的強度比冷拉的稍低，但低不了多少，而且價格便宜，蘇聯格沃斯捷夫教授認為這種鋼絲有推廣採用的必要。⁽⁹⁾

由於鋼絲處於高應力之下，同時提高鋼絲的控制應力值將帶來很大的經濟效果；但隨之而來的變態及應力腐蝕現象却又造成一定程度的危害。

蠕变的結果將使鋼絲中的应力降低和混凝土的收縮，徐变一样对于应力来讲都是处于不利的一面，它随着鋼絲的应力增加而增加，根据苏联多罗布柯的资料¹⁰在 $\sigma_{ax}=0.65\sigma_p \sim 0.85\sigma_p$ 之間的蠕变值如下 ($\sigma_p=11450 \text{ KГ/CM}^2$)：

σ_{ax}	σ_n (蠕变損失)
$0.65\sigma_p$	$4.05\%\sigma_p$
$0.70\sigma_p$	$5.10\%\sigma_p$
$0.80\sigma_p$	$6.74\%\sigma_p$
$0.85\sigma_p$	$9.45\%\sigma_p$

蠕变在張拉完第一小时即可完成40~60%，一晝夜可完成80~90%，其余的10~20%要1~4天才可完成。

但蠕变的損失根据多罗布柯及馬涅耶尔¹¹的意見認為可以用过渡張拉的方法使其減少。

多罗布柯的試驗表明：如果將鋼絲張拉至 $0.85\sigma_p$ ，在此拉应力下維持15分鐘，然后降至 $0.8\sigma_p$ ，此时蠕变損失在 $0.8\sigma_p$ 的应力下仅为 $1.64\%\sigma_p$ ，此值已較未过渡張拉者在同样的应力下小了3倍，如果張拉至 $0.8\sigma_p$ 維持同样的時間再降至 $0.75\sigma_p$ ，則可以減少得更多。

馬涅耶尔的試驗表明：如果將鋼絲張拉至 $0.57\sigma_p$ ，蠕变損失为 $6.84\%\sigma_p$ ，而如果張拉至 $0.63\sigma_p$ ，並在此应力下維持2分鐘再降至 $0.57\sigma_p$ ，則蠕变損失为 $2.28\%\sigma_p$ ，較未过渡張拉者小了2倍 ($\sigma_p=15100 \text{ KГ/CM}^2$)。

西德對於蠕变損失值是不加考虑的，他們是根据鋼絲的蠕变極限来选择鋼絲的控制应力值。蠕变極限是根据鋼絲中的应力达到这样的程度以致所产生的蠕变可以不計来选定的，这个程度是鋼絲在負荷后自6分鐘起至1小时止，其应变不得超过0.016%，而在1小时后至100小时止其应变不得超过0.008%。

蠕变即使在鋼絲中应力很小时也会發生，不过他們的数值異常微小而已。

格沃斯捷夫教授認為經過整直的鋼絲蠕变較大，所以他建議最好把鋼絲卷在2.5公尺的直徑的圓筒上，以便其可以自由地舒展开来不必加以整直即可应用。⁹

应力腐蝕現象在国外施工中經常遇到，第二屆国际应力會議上許多国家的代表都談到了这种現象，这种現象是鋼絲处于高应力之下而受侵蝕性介質的作用后使其結晶分裂，而导至鋼絲的漸裂；是鋼絲突然断裂的主要原因。⁹

要避免这种現象必須遵守下列条件：

- 适当地選擇好化学成份和适当加工及处理。
- 不要把鋼絲卷在直徑过小的卷筒上。
- 仔細包裝及貯藏鋼絲以免锈蝕。
- 張拉时仔細注意不要使鋼絲中有过份的集中应力。
- 張拉完畢用灌漿法將鋼絲包起来。

綜上所述目前應該解决的鋼絲方面的問題有如下几个：

a) 解决目前鋼絲的供应問題，改善目前鋼絲的質量，对現有的国产鋼絲进行蠕变試驗及其他力学性質的試驗。

б) 在現有的基础上解决新的国产高强度鋼絲品种 ($\sigma_p=17000 \text{ KГ/CM}^2$) 的生产問

題，同時在生產時要注意到盡量減小蠕變損失及應力腐蝕現象。

B、施工机具問題：

目前我國的施工方法是不能適合大量工廠製造的要求的，為了解決施工機械化的問題，首先應該根據新的生產工藝製造新的施工机具。

1. 鋼絲束作業用的机具：

鋼絲束作業是整個預應力生產過程中主要的一個作業，目前所採用的方法由於鋼絲束的構造形式不適合流水作業的生產，因此耗費了大量的勞動力。

過去鋼絲束是分成好幾層的，每一層都必須經過纏繞機纏繞，因此進行了大量的各不相關的作業。

蘇聯現在採用了 7 根鋼絲的鋼絲束，每根強大的鋼絲束可由若干根這種鋼絲束組成。

鋼絲束的形式的改變為流水作業式的生產創造了條件，為此製造了一套為這種形式的鋼絲束製造而用的機械，因而把勞動力降低到 1/10。⁴

在最近又創造了一種整直和纏繞同時進行的聯合機。⁽¹²⁾

我們應該吸收這種經驗，改變鋼絲束的構造以改善現有的施工方法。

2. 千斤頂和油泵：

隨著跨度的增加，為了集結更多的鋼絲形成更強大的鋼絲束，以及採用高強度鋼絲束的結果，必然就需要特制的錨碇和強大的千斤頂。

目前所用的千斤頂能力較小，僅 70 噸（現據說可提高至 80 噸），在更強大的鋼絲束中總的內力可能達到 150 噸，因此必須製造出強大的千斤頂以適應這種需要，同時這種千斤頂還應具有較小的尺寸以便於鋼絲束的佈置，這樣也就需要用高強度的材料來製造千斤頂。

3. 搗固混凝土的机具：

預應力梁內的鋼筋密集，同時又系水平分層灌注所費勞動力很多，同時採用干硬性混凝土的結果必然更增加灌注的困難。

為此必須廣泛地使用震蕩器和震動台以改善混凝土的灌注條件。

B、計算理論方面：

1. 蘇聯目前已開始研究在預應力結構中採用極限設計的方法，無疑地這種方法如果獲得應用必然帶來更大的經濟效果，為了與蘇聯並肩前進，我國亦應開始進行這方面的研究。

2. 前面已經說過現行的指示中未包括蠕變的損失計算，目前所得到的資料中關於蠕變損失值的估算有以下各項資料：

西德：控制應力 $<$ 蠕變極限 時 $\sigma_n = 0$

蘇聯：葉弗格拉弗夫教授及特羅依斯基等建議當 $\sigma_{ak} > 0.6\sigma_p$ 或 $\sigma_{ak} > 8000 \text{ KГ/CM}^2$ 時 $\sigma_n = 0.03\sigma_{ak}$

英國： $\sigma_{ak} > 8000 \text{ KГ/CM}^2$ 時 $\sigma_n = 0.05\sigma_{ak}$

法國：一般可取 $300 \sim 600 \text{ KГ/CM}^2$

馬涅耶爾： $\sigma_{ak} > 8000 \text{ KГ/CM}^2$ 時 $\sigma_n = 0.04\sigma_{ak}$ （作 2 分鐘過渡張拉）

瑞士： $\sigma_{ak} > 8000 \text{ KГ/CM}^2$ 時 $\sigma_n = 0.015\sigma_{ak}$

蘇聯：建議的公式 $\sigma_n = P \frac{E}{E_0} (E_0 - E) \sigma_p$

式中 $E = \sigma_{ak}$ 时的彈性模量 即 $\frac{\sigma_{ak}}{\epsilon_{ak}}$;

$E_0 = \sigma$ 为 $0.1 \sim 0.2\sigma_p$ 时的彈性模量;

$P = 1.53 \times 10^{-6} CM^2 / K^2$, 計算時可用 $1.6 \times 10^{-6} CM^2 / K^2$ 。

由此可見上述的这些数值中沒有相同之处, 主要是由於材料性能不同所致, 因此应針对我国的鋼絲作出研究結果。

3. 加强混凝土收縮、徐变值的研究, 根据不同的配合比和水灰比作出曲線以便应用。

4. 关于提高控制应力值的问题: 随着極限設計的方法被应用, 强度安全系数估計可較按破損阶段計算时减小 $15 \sim 20\%$, 但抗裂性安全系数却与此無关並不能随之降低, 这样就引起了不能滿足抗裂要求的結果, 因此不仅需要提高控制应力值同时还需要設法提高鋼絲的疲劳允許值。

根据多罗布柯的意見認為採用这种过渡張拉的方法是可以將控制应力值提高至 $0.8\sigma_p$, 在叶拂格拉拂夫教授所著的書中⁽¹³⁾已建議採用 $0.7\sigma_p$ 作为控制应力的限値。

指示草案中規定在全部荷載作用下鋼絲中的应力包括予应力在內不应超过 $0.55\sigma_p$, 这个数值是以19根鋼絲束的疲劳試驗为根据的。試驗指出鋼絲的疲劳極限約为 $0.58 \sim 0.86\sigma_p$, 平均值約 $0.60\sigma_p$ 加上适当的安全系数因而採用 $0.55\sigma_p$ 。最近苏联的資料⁽⁴⁾已提出当 $\frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}} \leq 1.10$ 时 $\sigma_{a1} + \Sigma \sigma_a \leq 0.60\sigma_p$, 如果採用高强度的鋼絲亦即可將有效予应力值加以提高, 活載所佔的影响相对減少則採用 $\sigma_{a1} + \Sigma \sigma_a \leq 0.60\sigma_p$ 是完全可能的。

因此进一步研究採用的在全部荷載作用下的允許应力是很有必要的。

Г、其他結構細节:

1. 鉄皮管: 日前在后張式予应力結構中为了防止在張拉时混凝土和鋼絲束粘結在鋼絲束外包以鉄皮管, 但是这种鉄皮管的用量相当可观, 且在灌漿以后對於恢复粘着力方面有一些阻碍, 捷克和波蘭以及一些資料主义国家採用了一种抽心的方法, 先在混凝土中留出空隙再將鋼絲束放进去, 这样不但節約了鉄皮管且改善了鋼筋和混凝土的粘着条件, 但是这样需要採用不同的千斤頂和鋼絲束。¹⁴⁾

苏联正在研究以石棉管代替鉄皮管。

为此我們也应在这方面加以研究。

2. 錨植的形式: 随着採用高强度的鋼絲的結果, 每根鋼絲的伸長量也就增加, 而梁支点的突出部分是与鋼絲束的伸長量有关, 伸長量大, 突出部分也就得加大, 这种就增加了桥墩的尺寸, 因此應該研究用一种适用于强大鋼筋束的低高度錨植以应这种需要。

上面已經說过, 苏联已創造了好几种錨植形式我們可以据此进行研究。

3. 强大鋼絲束的接头: 随着裝配式結構的發展, 不仅需要將結構物在橫向分块, 同时还需要在縱向分块。

苏联B·И·格涅道夫斯基教授建議了一种爪鎖型的强大鋼絲束的接头型式。¹⁵⁾

橫向分块可能造成兩片梁的受力不勻情况, 因此研究强大鋼絲束的接头形式以便达到縱向分块的目的是有必要的。

Д、結構形式方面:

1. 穿珠式桥跨結構。資本主义国家在公路桥梁方面採用了很多穿珠式桥跨結構, 这

种結構是許多中間留有孔的單独块，运至工地以后再用鋼絲束穿起来予加应力，苏联也进行了很多这方面的研究，存在的困难是孔眼如何对齐的問題和工地予加应力的問題。

这种結構是装配式予应力結構的一个方向。

2. 先張式桥跨結構：后張式桥跨結構存在了一些缺点，最主要是灌漿問題，因为如果灌漿不好易使鋼絲束锈蝕，先張式結構却正可免去這個問題，但需要設置傳力架，苏联研究出一种兩阶段灌注的方法和台架法来制造先張式桥梁結構，这样就解决了傳力架設置的問題且制造出 $l_p=33.6M$ 的装配式桥梁和 $l_p=52M$ 的就地灌注的悬臂梁，这也是今后我們值得採用的一种型式。

今后予应力結構的發展無疑將在我国起很大作用，我們限於理論水平和实际經驗的不足，仅能就目前所有的資料提出这些膚淺的体会和意見，尚希各位在这方面的專家給予指正。

(1956年8月3日)

参 考 文 献

1. 铁道部印發的苏联运输工程局技术局付局長柯洛克洛夫所作的报告「苏联在發展桥梁建筑技术方面的基本总结和任务」。
2. С.А. 德米特里耶夫, В.А. 卡拉圖耶夫著「予应力鋼筋混凝土結構構件按極限状态的計算」(工程建設1956年6月号)。
3. К.К. ЯКОВСОН等: 「РАСЧЁТ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА В МОСТАХ」。
4. Е.А. ТРОИЦКИЙ, Н.Н. БОГДАНОВ, Л.И. ИОСИЛЕВСКИЙ: 「ПРОЛЕТНЫЕ СТРОЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МОСТОВ ИЗ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА」(ТРАНСЖЕЛДОРИЗДАТ 1955)。
5. 格沃斯捷夫教授著「鋼筋混凝土理論的目前狀況和任务」(工程建設1956年7月号)。
6. И.А. МАТАРОВ: 「ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕЩИНО-ОБРАЗОВАНИЯ В ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ」(БЕТОН И ЖЕЛЕЗОБЕТОН 1956年3月)。
7. С.А. 德米特里耶夫: 「确定混凝土和鋼筋予应力的精确公式(建筑譯叢1956年11期)。
8. В.В. 米哈依洛夫: 「第二屆国际予应力鋼筋混凝土會議」(工程建設1956年5月号)。
9. 格沃斯捷夫教授: 「予应力鋼筋混凝土實踐中的一些問題」(建筑譯叢1956年12期)。
10. Т.М. ДОЛОБКО: 「О ПОВЫШЕНИИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК」(БЕТОН И ЖЕЛЕЗОБЕТОН 1955年3月)。
11. G. MAGNEL: 「PRESTRESSED CONCRETE」1954年。
12. Н.Е. БЛИНКОВ, Д.А. ГРИТОРЬЕВ: 「ЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ ИЗГОТОВЛЕ-

НИЕ АРМАТУРНЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ МОСТОВЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ ИЗ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОНА] (БЕТОН И ЖЕЛЕЗОБЕТОН 1956年3月)。

13. ЕВГРАФОВ: [МОСТЫ НА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГАХ] (ТРАНСЖЕЛДОРИЗДАТ 1955年)。

14. 盧謙: 「予应力钢筋混凝土結構的施工方法」 (工程建設1956年7月号)。

15. В.И.ГНЕДОВСКИЙ: [СТЫК МОЩНЫХ АРМАТУРНЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ] (ТРАНСПОРТНОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО 1955年5月)。



一九五六年全國鐵道科學工作會議
論文報告叢刊

(34)

預應力鋼筋混凝土橋梁
設計總結

一九五六年全國鐵道科學工作會議論文編審委員會編
人民鐵道出版社出版
(北京市霞公府17號)

北京市書刊出版業營業許可證出字第010號
新華書店發行
人民鐵道出版社印刷廠印
(北京市建國門外七聖廟)

書號: 823 開本: 787 × 1092_{1/16} 印張1 字數 22 千

1957年9月第1版

1957年9月第1版第1次印刷

印數 800 冊

統一書號: 15043.380 定價 (9) 0.1