

鐵路勘測設計技術資料

# 預应力鋼筋混凝土桁架的研究

В·И·哥聶道夫斯基

著

М·П·达倪罗夫斯基



人民鐵道出版社

本書包括三篇譯自蘇聯哈鮑羅夫斯基鐵道運輸工程研究所文集的論文，對預應力鉗桁架的設計計算和製造工藝等問題提出了許多見解，具體地說明： $l=46\text{m}$ 的桁架初步設計，製造工藝、施工方法和對安裝應力的考慮；桁架的初步計算方法；節點剛性對應力狀態的影響和計算方法。

本書是設計預應力鉗桁架的很好資料，可供結構設計和研究人員參考。



鐵路勘测設計技術資料

預應力鋼筋混凝土桁架的研究

В. И. Гнедовский М. П. Даниловский

賈雲葵 程達鈞 譯

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証出字第010號

新華書店發行

人民鐵道出版社印刷廠印

書號1666 開本 $787 \times 1092$  1/32 印張11 1/2 插頁1 字數

1960年4月第1版

1960年4月第1版第1次印刷

印數0,001—3,500冊

統一書號：15043·1198 定價(8) 0.19元

## 目 录

|                                    |    |
|------------------------------------|----|
| 在桥梁结构中采用預应力鋼筋混凝土空腹桁架的問題及其解决方法..... | 2  |
| 鋼筋混凝土空腹桁架的初步計算.....                | 26 |
| 节点刚性对預应力鋼筋混凝土桁架应力状态的影响...          | 33 |

## 在桥梁結構中采用預应力鋼筋混凝土 空腹桁架的問題及其解决方法

苏联格魯吉亞共和国科学和技术功勋活动家

教授 В.И. 哥聶道夫斯基

在桥梁建筑中，如所周知，鋼筋混凝土空腹桁架在桥梁結構中曾被应用过，但由于使用上存在着一系列的缺点，后来就不用了。近来科学界的思想又重新轉至空腹桁架上来，因为在鋼筋混凝土結構的領域內，新的方向是力求以装配式結構来代替整体式結構。

在桥梁上装配式鋼筋混凝土与整体式鋼筋混凝土相比之优点，別利傑利院士曾作过評價。在別利傑利院士的领导下，列宁格勒科学研究院曾拟定了各种装配式的鋼筋混凝土結構，其中也包括了空腹鋼筋混凝土桁架。

應該指出，列宁格勒科学研究院的鋼筋混凝土桁架，在构造上比以前所做的有了改进，但是，其主要的缺点仍未消除——在拉力杆件中可能出现裂縫。

除此而外，采用別利傑利院士所建議的鋼筋扣环接头，必定要在工地灌注，因而引起了要进行湿润工作，及随后使混凝土硬化的养护工作。

关于和裂縫斗争的問題引起了学者和研究人員的注意。在这方面應該指出苏联学者和专家——技术科学博士 К.К. 雅克布逊教授、技术科学博士 В.И. 穆拉什夫教授、技术科学副博士 О.Я. 別尔哥及其他学者等作了許多理論工作。

与裂缝作斗争在普通钢筋混凝土结构是一个很严重的问题，根本解决的办法只有采用钢筋和混凝土预加应力的条件才可解决。

### 问题解决的基本方向

在钢筋混凝土空腹桁架中，应用预应力的尝试还在1936年中央建筑科学研究院（ЦНИПС）就曾做过。

在空腹桁架中部份采用预应力的例子在К·В·薩哈諾夫斯基教授和И·Л·哥里节普拉德的论文集中以及交通部桥梁工程总局（ШПКБ）的初步设计中都可以看到。

在1949年作者曾提出以预应力钢筋混凝土空腹桁架的型式来解决，和奠定新式合理结构形式这一重要问题，这样便消除了普通钢筋混凝土桁架的缺点。

按后来中央科学研究院（ЦНИПС）的设计，实腹梁与空腹桁架材料的消耗差别不多。

因此在跨度不大时梁与桁架相抗衡。

为了在钢筋和混凝土中预加应力，最合理的桁架形式是有斜杆的、有斜杆和副斜杆的及双斜杆的（图1）。

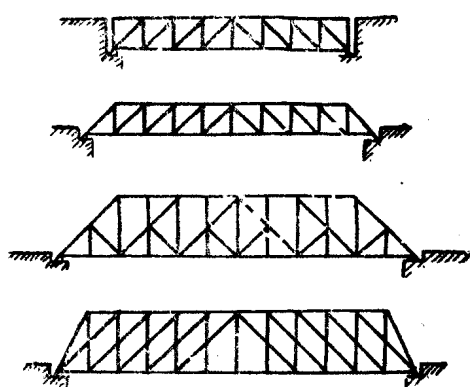


图 1

### 拟定桥跨结构

为了阐明采用预应力钢筋混凝土桁架的适用性，曾拟定

了一些結構，其跨度及橋面位置各有不同——上承、下承或穿越式等。這些研究包括了很多跨度：上承——由33~66m，下承——由45~87.6m，這些跨度都是最常用於近代金屬桁架橋的。

在這些結構中，橋跨結構可裝配性及鐵路車輛運送的可能性均適應結構的特點，與現有起重機的能力亦是相適應的。

鋼筋混凝土空腹桁架橋跨結構的構造可以分成下列型式：

(1) 整體式，在工場或工廠製造，並以整孔運送的型式運至工地。

(2) 塊件式，為平面或立體的大塊體，這些塊體可以用鐵路車輛運送，並將為數不多的接頭用灌注成整體的方法在工地裝配起來。

(3) 裝配式，由獨立杆件組成，在腳手架上拼裝，並在拼裝完畢後需要將接頭灌注成為整體。

橋跨結構裝配構造型式的選擇及其製造方法，是與跨度大小、橋面位置、按限界條件的運送特點及起重機能力等緊密相關的。

當人行道部份製造成裝配式懸臂的情況下，上承橋跨結構可以整孔運送 ( $l = 23m$ ) 或大塊體——立體的或平面的塊體運送 ( $l = 45m, 55m$ )。跨度更大時用裝配式杆件。下承穿越式橋跨結構 ( $l = 33.6m$ ) 的桁架，以單片桁架的形式運送 (平面塊)，而橋面系是由橋版和縱、橫梁所組成的大塊體，並用特殊的方法和主桁相連，這種方法能允許起重機從豎直方向落下塊體，並在裝配時允許起重機可沿已裝好的部份上移動。

在下承式設有上平面連接系的橋跨結構中，同樣的，橋

面系装配可能性也可被保证。

上承式预应力钢筋混凝土空腹桁架桥跨曾设计了跨度为22.8、23.0、33.6、34.0、45.0、55.0、55.3、66m的九种设计(图2a)。

下承穿越式桥跨结构,设计了跨度为33.6m(无上平连接系)和55、66、87.6m(有上平连接系)的设计,其中跨度为55m和66m的各设计了带副斜杆式的和双斜杆式的桁架

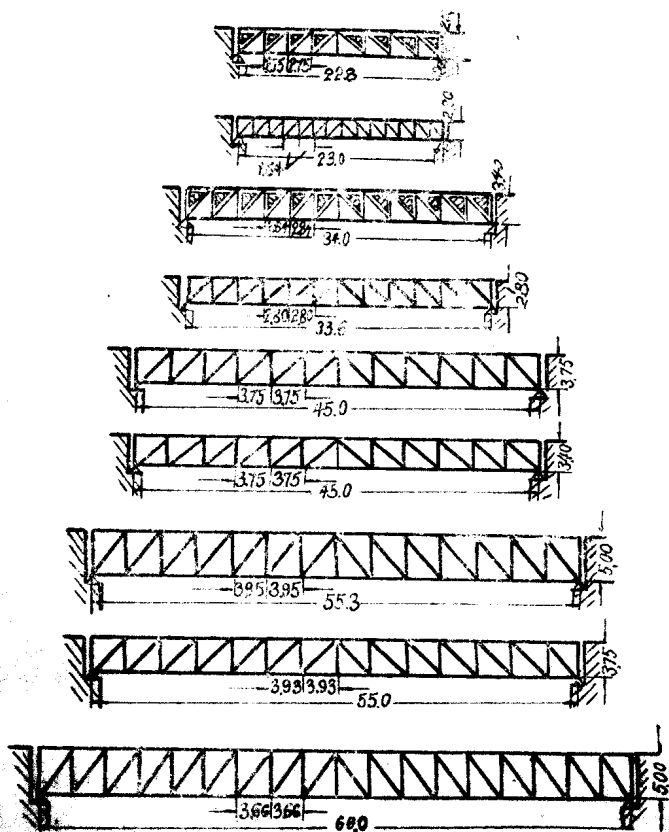


图 2a

(图26)。

在所拟定的设计中活载用  $H7$  或  $H8$ ，混凝土标号 400~600，预应力钢筋用高强度钢丝，其极限强度为  $10000 \sim 12000 \text{ kg/cm}^2$ ，其余钢筋为 3 号钢，JK 钢或热轧 5 号螺纹钢，总共做了 18 个初步设计，其中有明桥面的也有道碴桥面的，跨度为  $45 \text{ m}$  者作成在横截面中的桁数为可变的（4 桁或 2 桁）。

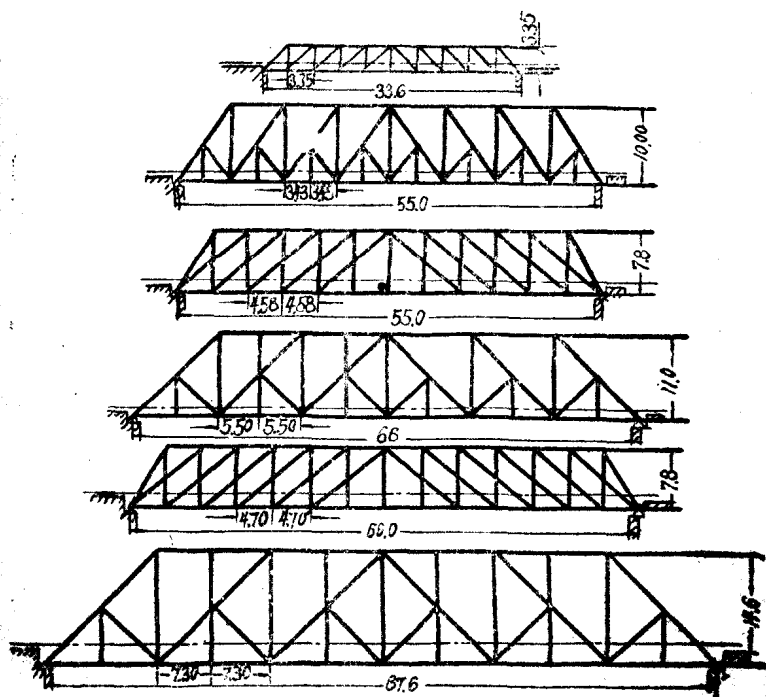


图 26

预应力钢筋混凝土桁架与最常用的大中跨度杆件装配的钢桥比较过，也与推力结构（拱圈、拱肋、系拱）做过比较。

对于拱桥结构还应比较墩台的圬工，因为拱桥结构的墩台比梁桥结构的墩台要消费更多的圬工；可是这点未曾考虑，因之在用预应力钢筋混凝土空腹桁架来代替拱桥时，此点就变为额外的节约了。系拱是例外的，因其墩台与梁式桥者相同。

跨度为45m的桥跨结构初步设计结果

45m预应力钢筋混凝土桁架结构，在1950年由作者完成设计，其中采用了钢筋束，钢筋束外裹以油纸并用热瀝青涂复之，以防其与混凝土粘着。

这个桥跨结构后来因为钢筋束采用了套管，并改变了桁架杆件的截面，增加钢筋束的强度，和根据张拉千斤顶外形尺寸而作的另外一种布置等使结构本身得到了改善。

桁架草图，节间布置，横截面中的桁数和块体数目，均保持不变。

理论高度  $h$  由3.75m减少到3.45m（图3），即与钢桁梁相比（ $H=6m$ ）减少了40%， $\frac{h}{l}=\frac{1}{13}$ ，活载重以  $H7$  代替  $H8$  级，混凝土标号为500，在压力杆件中以5号变截面螺纹钢来代替3号钢，其屈服点为  $3500kg/cm^2$ ，预应力冷拔钢丝极限强度  $R=12000kg/cm^2$ ，水平连接钢筋箍筋及架设钢筋均采用3号钢。

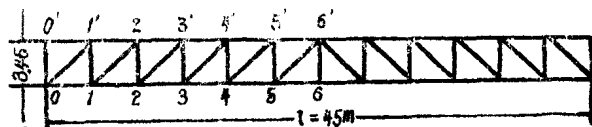


图 3

桥跨结构的计算和构造根据符合 ЦНИИС 的技术规程草案（技术科学副博士 Е·А·托洛茨基著）和 ТУМП-47（1948 年）进行。桥跨构造见图4。

桥跨在横截面上由四片桁架所組成，上面用桥版将桁架连接起来，下面用水平連結系的橫撑連接，桥版厚15cm，寬4.0m，道碴层厚0.5m，人行道是用角鋼木板栏杆所做成的可拆式悬臂。桥版沿桥跨中綫的縱向縫分为两个部份，每部分寬为2.0m，在上弦节点处用薄壁隔版将其连接起来（上弦为T形截面）。

在跨度中央桁架上下緣均設置接头——上緣采用鋸接鋼筋，連結系的橫撑鋼筋采用Г·П·別利傑利院士所建議的扣环接头，而下緣接头則按作者的构造（图5）——为一对鋼接板，及由螺栓3和套管2所組成的螺栓套，套管可保証自鋼接板將力很好傳至混凝土上。套管和螺栓之間用高强度水泥漿填充，沿着套管端部放入环形鉄垫圈，每豎行將套管用鋼筋連接起来。为了更好的將力傳至受拉杆件混凝土起見，还設置了鋼筋網7和水平鋼筋5。图5中4为鋼筋束，6为他的錨錠。

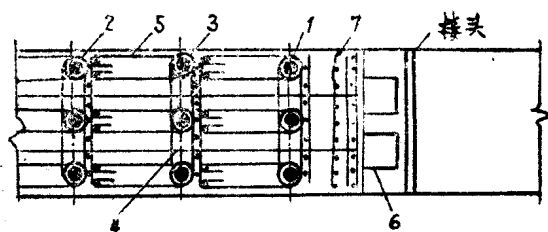


图 5

由运输工程部科学研究所做的用普通和預应力鋼筋混凝土所做成的受拉杆件接头模型試驗的結果良好。

对于鋼板錨和錨栓最好用高强度鋼，而其余的构件中則用3号鋼。

对应用装配式鋼筋混凝土結構，接头的重要成就是不需要在建桥地点灌注混凝土。

这种接头形式也可用在装配式预应力钢筋混凝土空腹桁架中腹杆与弦杆的连接。

在接头处仅仅有锚锭所占据的一段长度上未预施应力，但这并不要紧，因为力将由金属钣来承受。金属钣必须涂油及用普通方法喷上混凝土以防锈蚀。

上翼缘（图4）为等高的，连同版在内为  $60\text{cm}$ ，肋宽  $43\text{cm}$ ，版的横向配以  $12\text{mm}$  直径的钢筋。

上翼缘中版和肋都有纵向钢筋，沿翼缘布有直径  $6\text{mm}$  的钢筋，其间距为  $20\text{cm}$ 。

桁架腹杆——竖杆和斜杆为等宽  $43\text{cm}$ ，而在正面上厚度是变化的，桁架腹杆截面在横方向是扩大的，其目的是为了减小节点刚性的影响。斜杆截面由  $30 \times 43\text{cm}$  变到  $15 \times 43\text{cm}$ ，而钢筋由 8 根直径  $24\text{mm}$  变到 8 根直径  $18\text{mm}$ 。竖杆中的预应力钢筋有两根钢丝束，该钢丝束由不同数量的直径  $5\text{mm}$  钢丝所组成，每束由 40 根变到 20 根。

变截面的下弦杆，在中央的六个节间都是相同的截面为  $46 \times 70\text{cm}$ ，两个端节间长度内为  $46 \times 20\text{cm}$ 。离开支座的第一个节间，下弦杆截面高度是变化的。此处将钢丝束布置成扇形，以保证其张拉的可能。

下弦钢筋由 8 束 48 根  $5\text{mm}$  钢丝组成，其中两根钢束断在第三节间，其余钢束则直通至支点。

用作者建议的中间放置锚碇的方法，根据计算力的变化来减少钢筋面积（图6—7）。

在中间锚碇内锚固可切断的钢丝，有中间锚碇  $N2$  和两端锚碇  $N3$ 、 $N1$  的钢丝束示意图见图。



图 6

中間錨碁由鋼杯4所組成（圖7），鋼束中的鋼絲5穿過鋼杯底的鑽孔，並錨固于鋼杯中。于鋼杯之底焊有管7，使鋼束中的長鋼絲穿過此管，錨固于錨碁N1、N3上（見圖6）。

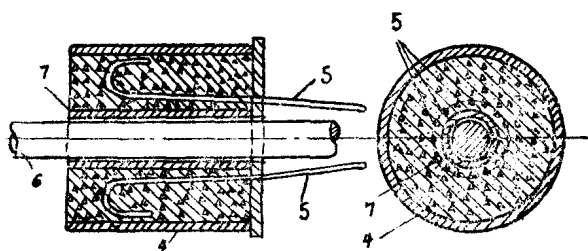


圖 7

下弦鋼絲束用鐵筋捆紮起來，除此而外，在縱向還設有直徑 $12\text{mm}$ 的鐵筋，目的在於將所有鋼筋固定在一个不變的鋼骨架上。

張拉的鋼絲束置放在直徑 $60\text{mm}$ ，厚 $0.4\text{mm}$ 的鐵皮管中，這套管上帶有三通管，當鋼筋張拉完畢以後從三通管壓入水泥沙漿，這樣便保證了鋼筋與合之間可靠的粘着力。這是由ЦНИИС對預应力鉛梁的實驗所証實到的。

由於鋼絲束在中間設置了錨碁，在工作性質上可與鋼桁架弦杆截面相似，在鋼桁架中弦杆截面是隨力在各節間不同而變化着的。

節點的加寬是壓縮得很小的，在其周邊放置鋼筋，斜杆的直鋼筋一直伸到上下弦節點上，并用鐵筋捆紮之。

圖8示出 $l=45\text{m}$ 橋跨結構的透視圖，從其中可以很清楚的看到，桁架杆件在橫的方向是擴大的，在桁架平面內是柔性的。

橋跨結構的主要特點是：

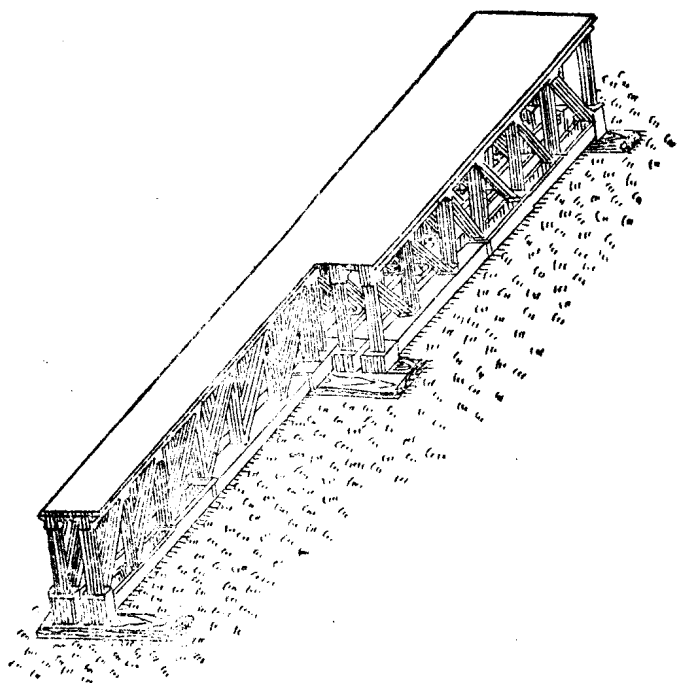
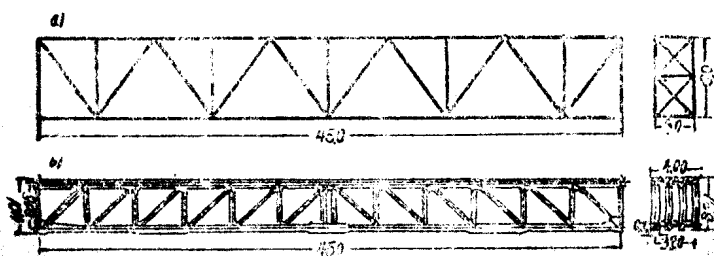


图 8

1. 建筑高度不大—— $4.01m$ ，連同道碴为 $4.5m$ ，而同样跨度的鋼梁則为 $7.27m$ （图9）。



a. 鋼桥；b 預应力鉗桥跨

图 9

2. 共有四个块件（图8），需要用接头在工地连接。

3. 一个块件重  $98t$ ，因此需采用强大的起重机 ГЭК-120型。

4. 合体积  $151m^3$ ，钢筋重  $30.88t$ ，每立方合中钢筋耗費  $206$  公斤，为  $2.6\%$ ，因此钢筋不多，灌注混凝土并不困难。

按鋼料种类鋼筋有：

|               |                |
|---------------|----------------|
| 九3和九5         | 19804kg        |
| 九23BC         | 11072kg(35.8%) |
| 九3（套管、垫圈、支承板） | 13580kg        |
| 計             | 44456kg        |

一立方合中鋼的总耗費量为  $295kg$ 。

在最初的设计中合体积为  $189.13m^3$ ，合数量减少了  $38.0m^3$ ，这是由于改善了结构的构造和将活載重降到  $II 7$  級之故。

5. 与同跨度的鋼桥比較，节省了大量鋼料，因为在鋼桥中需要  $117.05t$ ，而在鋼筋混凝土桥跨則为  $44.65t$ ，节省为

$$\frac{117.05 - 44.46}{117.05} \times 100 = 62\%$$

桥跨的剛度是足够的，因为按  $B \cdot K \cdot$  卡秋林教授計算撓度的公式，撓度为  $f = 2.36cm$ ，即  $\frac{f}{l} = \frac{2.36}{4500} = \frac{1}{1900} l$ ，大大的小于允許值。

### 安装应力的研究和桥跨施工方法的依据

桥跨结构的特征是在桁架弦杆豎杆中，将鋼筋和合預加应力，因此就必须研究桁架制造的工艺过程。在制造过程中桁架杆件的附加安装应力可完全不算，或适当的考虑。

在斜杆中設置临时接头来消除其安装应力（图13）。当

桁架預应力杆件張拉完后（下弦杆、豎杆），將接头处的鋼筋鋸起，然后澆灌斜杆接头的混凝土。

至于豎杆和弦杆，还需要研究多大的安装应力才不致引起不良的影响。

(a) 張拉桁架下弦杆鋼絲束时豎杆安装应力的决定。首先假定先拉下弦的鋼筋束，因此豎杆中的鋼筋和混凝土还未建立預应力，在这种情况下，桁架下弦节点发生了位移， $\Delta d$ 。自块件中部向两端逐渐加大（图10），相应为  $\Delta d$ ， $2\Delta d$  ...

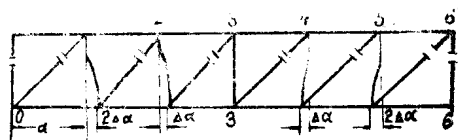


图 10

$$\Delta d = \frac{\sigma_K^M d}{E_F} \dots \dots \dots (1)$$

式中  $d$ ——节間长度，等于  $375\text{cm}$ ； $\sigma_K^M$ ——合安装应力，等于  $217\text{kg/cm}^2$ （500号合）， $E_F=410000\text{kg/cm}^2$ 。将此值代入得

$$\Delta d = \frac{217 \times 375}{410000} = 0.2\text{cm}。$$

在張拉下弦鋼筋束时，弦杆将被压缩，必引起豎杆成一S形的挠曲，豎杆端部对弦杆講是刚性固定的。

为了决定下弦杆压缩对豎杆的影响，我們取如下的受力图形（图11）考虑豎杆半长的挠曲，如同长度为  $y$ ，固定于弦杆內的悬臂梁一样，并承受荷载  $p$ ，挠度  $f$  可按公式来决定：

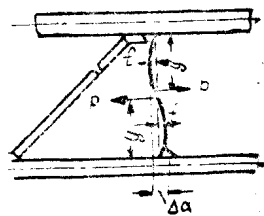


图 11

$$f = \frac{P y^3}{3 E_B J_{np}}$$

或 
$$P = \frac{3 f E_B J_{np}}{y^3}$$

对于豎杆 1—1,  $\Delta d_1 = 2\Delta d = 0.4 \text{ cm}$ ,  $f = 1/2 \Delta d_1 = 0.2 \text{ cm}$ 。

豎杆中具有 4 个  $\Phi 12$  的普通鋼筋和两束 44 根 5 毫米的預应力鋼絲, 此时鋼束置放于套管中还未具有安装应力。

普通鋼筋面积为  $F'_{L1} = 2.26 \text{ cm}^2$ , 豎杆截面换算慣性力矩 (图 12):

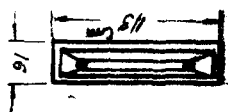


图 12

$$J_{np} = \frac{43 \times 16^3}{12} + 2 \times 10 \times 2.26 \times 4.4^2 = 15520 \text{ cm}^4$$

在此种情况下

$$P = \frac{3 \times 0.2 \times 410000 \times 15520}{142.5^3} = 1320 \text{ kg}$$

豎杆固定处撓曲力矩  $M = Py = 1320 \times 142.5 = 188,000 \text{ kg/cm}$

$$\text{合应力 } \sigma_B = \pm \frac{M}{W_{np}} = \frac{188000 \times 8}{15520} = \pm 97 \text{ kg/cm}^2,$$

这样大的安装应力是不允許的。

豎杆 2—2 安装应力将减少一半, 即  $\sigma_B = \pm 48.5 \text{ kg/cm}^2$ , 同样这个应力也是不允許的。

至于豎杆 0—0' 的应力可达到  $\sigma_0 = 1.5 \times 97 = 146 \text{ kg/cm}^2$ , 用增加鋼筋数量和增大截面慣性矩都不能降低附加安装应力, 因为同时也增大了  $P$  力和撓曲力矩。

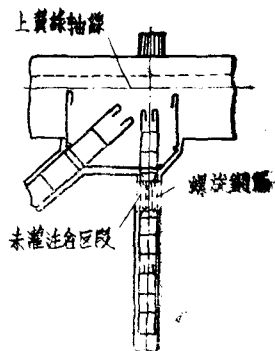


图 13

如果在豎杆中預留長為  $20\text{cm}$  的一段不澆注合，此段中一下弦和豎杆各伸來  $30d$  長的不予加應力的鋼筋（圖13），則可以解決上述問題。

鋼絲束放在套管內，並且連續穿過豎杆全長和桁架翼緣。當這樣解決問題時，鋼筋的柔性可保證節點的相應位移，因之弦杆中鋼絲束的應力對豎杆不致有不良的影響。弦杆鋼束張拉以後，貫注豎杆余留的一段合。當其凝固結硬後，再張拉豎杆中的鋼絲束。

（6）當張拉豎杆鋼絲束時弦杆安裝應力的決定。在張拉豎杆鋼絲束時，兩個弦杆將承受撓曲（圖14），所以就需要研究在張拉豎杆鋼束時對弦杆所引起的應力。

當豎杆鋼束可張拉的時候，下弦杆的合已經建立了安裝應力，因此張拉豎杆鋼束時和隨之而引起的下弦杆撓曲，必然增加了下部纖維的壓應力，而減少了上部纖維的壓應力，至於上弦杆當張拉豎杆鋼束時也引起了撓曲，並相應的引起了合和鋼筋的應力。假如僅張拉一個豎杆的一對鋼束，則可以認為，僅有相鄰的兩個節間上、下弦杆承受撓曲，這個撓度  $f_1$ 、 $f_2$  將與弦杆剛性成反比例，而豎杆的總縮短長度為  $\Delta h_{cm}$ （圖14）。

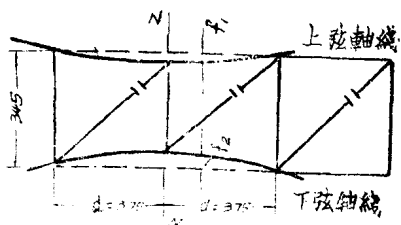


圖 14

$$\Delta h_{cm} = f_1 + f_2 \dots \dots \dots (3)$$

$$f_1 = \frac{\Delta h_{cm} J_{np}^u}{E_B J_{np}^a + J_{np}^u} = \frac{0.151 J_{np}^u}{J_{np}^a + J_{np}^u} \dots \dots \dots (4)$$

$J_{np}^a J_{np}^u$  為弦杆截面換算慣矩。

$$\Delta h_{cm} = \frac{\sigma_a^u h_{cm}}{E_a}, \quad h_{cm} = 345 - 59.6 \approx 285\text{cm}。$$