

装配式預应力鋼筋混凝土 剛性系桿柔性拱桥設計問題的研究

烏魯木齊鐵路局桥梁工程队編

人民鐵道出版社

本書根据蘭州市新城黄河公路桥設計实例，介紹了裝配式預应力鋼筋混凝土剛性系杆柔性拱的特点，闡述了設計的步驟和方法，并对設計中的若干理論和存在問題提出了意見和解決办法。可供桥梁工程技術人員參考。



**裝配式預应力鋼筋混凝土
剛性系杆柔性拱桥設計問題的研究**

烏魯木齊鐵路局桥梁工程隊編

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証出

新華書店發售

人民鐵道出版社印刷廠印

書號 1667 開本 787×1092 1/32 印張 1 1/8

1960年4月第1版

1960年4月第1版第1次印刷

印數 0,001—2,700 冊

統一書號：15043·1199 定價(7) 0.17 元

目 录

前 言	1
一、設計及改变設計說明	2
二、应力分析	12
(一) 刚性系杆柔性拱的特点	12
(二) 拱軸形式及基本尺寸	16
(三) 应力分析計算步驟	17
(四) 全拱稳定性問題的探討	21
(五) 几个应力分析中的問題	26
三、构件設計的步驟及問題	31
(一) 构件設計步驟的簡單介紹	31
(二) 鋼絲束預应力的上限問題	37
(三) 对預应力損失值及超張拉措施意見	44
(四) 拱肋——鋼筋混凝土受压构件的 应力計算及加固措施	50
(五) 張拉鋼絲束时杆件中心受压的稳定性	51
(六) 关于接点短鋼絲束的預应力損失及消除 裂縫的措施	54
四、体 会	57

前 言

兰州市新城黄河公路桥，采用了苏联最新设计的装配式预应力钢筋混凝土系杆拱桥。原设计是苏联公路工程总局全苏公路设计院梯比利斯分院编制的。桥梁净跨60m，设计跨径 62.40m。桥梁载重 H-18，并以 D-80 验算。车行道宽 7m，两侧人行道宽 1.5m，拱高 13.87m。

这种系杆拱的结构形式是刚性系杆柔性拱，系杆按偏心受拉构件设计；拱肋与吊杆按受压与受拉构件设计。全部构件系预制成品，工地安装。一孔桥跨共有构件 201 块，每块构件的重量最大不超过 10 吨。建筑材料采用 500 级的钢筋混凝土，构件接头用 500 级水泥砂浆填充，并采用了别列捷里钢筋环接、螺栓及预应力钢丝束三种形式连接。预应力钢丝束用直径 5mm，强度 17,000kg/cm²（原设计）的高强度钢丝组成。采用后张法建立预应力。钢丝束的锚栓采用法拉西内式锚栓。

装配式预应力钢筋混凝土系杆拱桥的特点是：利用预应力原理，较现场就地灌注钢筋混凝土拱桥，节约大量钢材与水泥（节约钢材 30%，节约水泥 18%）。因为跨度较长，可以减少桥墩水中作业的困难。全部结构为装配式构件，在桥墩施工的同时就可以预制成品，不但能够保证工程质量，而且大大缩短工期。在长跨度钢筋混凝土桥梁的发展中，具有一定的推广价值。0002373
这种新型的桥跨结构，由于国内初次施工，曾向原设计单位了解，在国外亦无成熟施工资料可资借鉴。特别是国内建筑材料的技术条件与施工技术设计的要求尚有出入，强度 17,000kg/cm² 的钢丝在材料供应上，不能满

足施工需要。因此施工单位就目前可能供应的材料规格，对原设计进行了局部变更设计，并就原设计的应力计算和构件设计计算作了校核和分析。补充编制了设计图纸。在一系列的设计计算工作过程中对刚性系杆柔性拱的应力分析和预应力钢筋混凝土构件设计方法及理论依据，发现若干问题，曾作了一些研究与讨论，提出了一些初步意见，编成这本小册子。主要内容是介绍装配式预应力钢筋混凝土系杆拱的特点，阐述设计时的步骤和方法，并对设计中若干理论和问题提出初步意见和认识，供今后进一步研究工作的参考。文中的论点，因限于技术水平，存在缺点和错误必多，尚希读者指正。

参与本课题研究及编写本文的有唐嘉农、孙燦文、刘兆祥、罗西园、王情梅等同志。

在研究和讨论中，唐山铁道学院周启刚、周绍烈同志，兰州铁道学院周熹、陈卫屿同志等曾协助工作；并蒙唐山铁道学院张万久、钱冬生、劳远昌教授，铁道科学研究院程庆国工程师、公路勘测设计院戴竞副总工程师、大桥工程局勘测处王伟民工程师和公路科学研究院等提供了宝贵意见；特别是苏联专家捷莫非耶夫同志和纽莫斯科同志的热心指导，苏联梯比利斯公路设计分院院长A. H. 阿里莫巴拉脱维利同志多次通信解答问题；都给了我们极大的帮助，均此致谢。

一、设计及改变设计说明

本桥系根据苏联列宁铁路运输工程学院所编制的拱形装配式应力钢筋混凝土上部构造设计图（下承式净跨 60 米和 80 米）进行变更设计（见图 1a, 6）。变更设计之主要原因因为材料不能达到原设计的强度要求（钢丝采用了强度极限 $17,000\text{kg/cm}^2$, $14,000\text{kg/cm}^2$, $12,000\text{kg/cm}^2$ ），机具设

每孔上部构造块件一览表

名称	数量	名称	数量
拉程中央件	28	辅助块件 N1	4
拉程端块件 (正)	2	——— N2	4
——— (反)	2	——— N3	4
吊杆块件 1~1	4	——— N4	2
——— 2~2	4	风撑块件	6
——— 3~3	4	人行道块件 N1	52
人行道块件	16	——— N2	8
嵌板块件	45		
块件总数 185 块			

中心纵断面

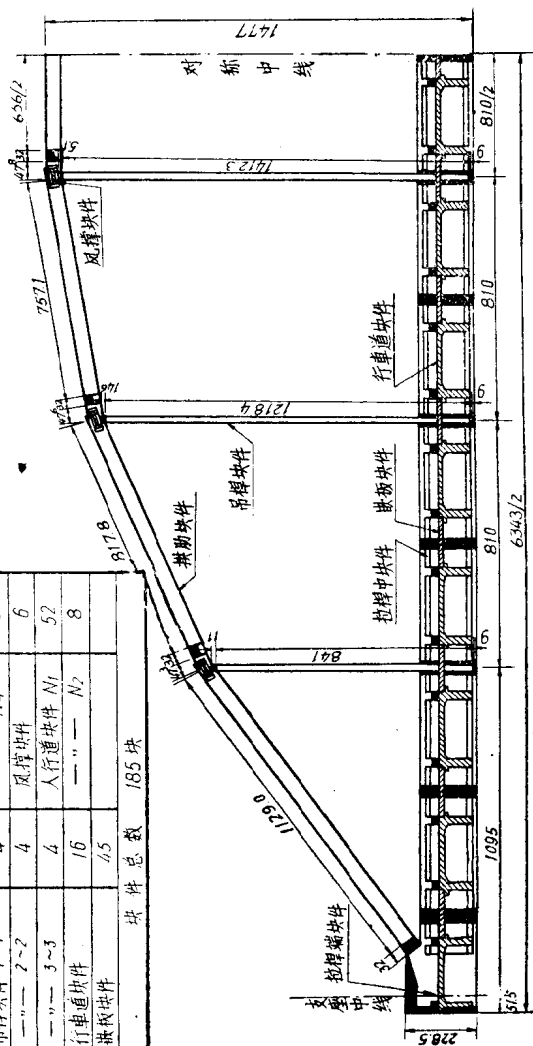


图 1a

剖面图

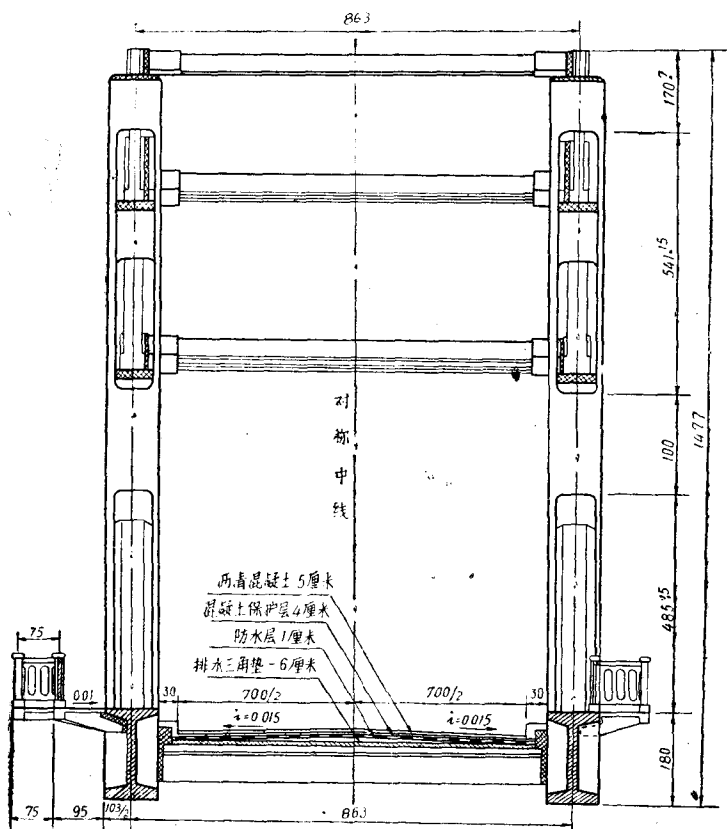


图 16

备条件的限制（只能制造60吨的双动液压千斤顶），因而变更了吊杆的锚栓设备构造；又因系杆预应力钢筋短钢筋束未经过张拉试验，而变更了锚栓的设备构造，以及在某些构造方面考虑到施工制造方面的必要，将部分结构改变而成。

原设计在技术科学硕士B. A. 史洛维斯基参与下，协同梯比利斯列宁铁路运输工程学院编制而成。在决定桥梁总尺寸时，应遵照下列设计中所用的资料。

净 跨 (m)	计算跨径 (m)	上部构造总长 (m)	墩台中心距离 (m)	建筑高度 (cm)
60.0	62.40	63.43	63.50	148

（一）技术规范

上部构造按照下列标准资料设计：

1. 苏联部长会议国家建设委员会1954年版的“建筑工程”；
2. 苏联部长会议国家建设委员会1953年版的“公路桥梁结构净孔标准（桥梁净孔）”（H-112-53）；
3. 苏联内务部公路总局1943年版的“公路桥涵设计规范”；
4. 苏联内务部公路总局1952年版的“预应力钢筋混凝土桥梁暂行设计规范”；
5. 苏联汽车运输和公路部1954年版的“公路桥涵设计规范”（设计）初版本；
6. 苏联运输工程部运输监督科学研究院预应力钢筋混凝土桥跨结构设计及制造规程（草案）。

(二) 材 料

1. 混凝土：所有上部构造块体和接头整体化混凝土，采用M-500号。

2. 水泥砂浆：灌注接头、接缝和预应力钢筋束沟槽的水泥砂浆，采用M-500号。

3. 钢筋：设计中规定采用下列种类的钢筋：CT.-3号圆钢筋（ГОСТ-380-50）；CT.-5号热轧规律变形钢筋（ГОСТ-5781-53）；高强度碳素钢丝做成的预应力钢筋（ГОСТ-7348-55）。箍筋、焊接的分部钢筋网、安装钢筋的分隔钢筋用 $\phi 8\text{mm}$ 圆钢设计。拱、人行道及系杆、吊杆和行车道的各个构件放置焊接钢筋骨架、钢筋网和分隔钢筋，这些钢筋用热轧规律变形钢制作。截面号码为12、16、22和28。

各构件和连接构件的预应力钢筋采用强度极限为17,000 kg/cm^2 、14,000 kg/cm^2 、12,000 kg/cm^2 的 $\phi 5\text{mm}$ 的钢丝，钢筋束的锚栓设备按照苏联公路勘测设计院 1956年版的“第68号通报设计，此通报内容是苏联公路科学研究院根据试验制订的选择锚栓设备型式的建议。

原设计中规定采用下列锚栓设备：法拉西内式钢筋混凝土锚栓设备，埋藏式钢锚栓设备，它的结构由运输建设部中央交通科学研究院制订；钢锚栓设备，它有平面锚栓和光面锚锥组成。

法拉西内式锚栓的混凝土规定用M-600号，而它的锚锥用M-1000号。

钢锚栓用的钢采用CT-5号。而钢锚锥的钢心用的钢是采用Y-8号。

因变更设计而采用的全苏运输建筑科学研究所拟定的可罗夫金锚栓，其钢料采用CT-3号、锚栓箱内的混凝土用

M-500級。

(三) 結構特点

1. 上部构造表面上是无推力的，它按“刚性系杆柔性拱图式，受拉构件（吊杆）、偏心受拉构件（系杆）和受弯构件（車行道风撑）采用預应力設計。

2. 上部构造的結構考虑工业制造安装式构件的要求制定，装配式构件可在工厂或在露天預制厂生产，亦可在工程对象工地生产，块件的規格予以特別注意，以便使出厂标号号碼数量（各种块体）尽可能减少。

上部构造根据工厂块件的最大重量（10 T），并考虑上部构造的結構特点，分划成单个装配式块体。工厂块体的重量，以装配式构件自到达站到工程对象工地，用总載重量10 T挂拖車的汽車运送为限，块体的界限尺寸，由可能用各节鉄路敞車运送工厂成品所决定。

3. 上部构造的系杆設計成工字截面，順跨座分划成中間块体和端块体。

在中間块体长度上，系杆的預应力鋼筋束分布在公共的矩形明沟槽內，各个鋼筋束的間隙保持最小。有了公共的明沟槽，可以：（1）使張拉鋼筋时摩擦的损失大为减少，

（2）使系杆中間块体的制造得以簡化，（3）保証沟槽被水泥砂浆密实填塞，（4）形成系杆中間块体的沟槽，不必采用屋面鉄管，（5）便于鋼筋束的堆放。

在端块体范圍內，鋼筋束在各个分散的沿沟槽內通过，暗沟槽可使錨栓設備沿系杆頂端安置，保証由張拉鋼筋产生的混凝土压应力均匀分布。

4. 吊杆因其高度不同而分为三种，由两个封閉形构成，設有工厂造預应力鋼筋束，

人行道寬采用 1.5m，設計中規定采用輔助悬吊人行道块体，其有效寬度为 0.75m，而在吊杆外形豎构件之間的淨距以及系杆頂面和接近系杆頂面的吊杆外形橫构件之間可以通行人，其全部有效寬度为 1.5m，为了繞过拱和拉杆的結合点，沿上部构造端部設計悬吊人行道，由有效寬度 1.5m 的块体組成，

5. 跨徑 60m 上部构造的車行道由 Π 形块体和嵌版組成， Π 形块体的肋有工厂造預应力鋼筋束，嵌版設在 Π 形块体之間，

6. 上部构造的拱設計成矩形和折綫形，拱与吊杆結合点的縱坐标成拋物綫形布置。每一上部构造拱高是固定的，寬度是不定的。拱块体的接头在节間內，

7. 跨徑 60m 上部构造的风撑設在拱間，設計成工字形，有工厂造預应力鋼筋束，

8. 設計中采用下列型式的装配式构件接头：

(1) 科学院院士彼列捷利式环鉤系統（拱块体相互联結用）；

(2) 螺栓系統（风撑块体和拱，人行道块体和拉杆連接用）；

(3) 預应力系統（拉杆块体之間、系杆和車行道块体，吊杆和拱块体联結用）。

系杆块体之間，系杆和吊杆的連接，利用系杆的主要受力鋼筋束，此鋼筋束通过整个上部构造上的沟槽。其余的預应力接头采用專門的高强度短鋼筋束。

(四) 实施預应力的規定

1. 上部构造的設計，采用单动70吨高压油泵千斤頂和60吨的双动液压千斤頂張拉鋼絲束。
2. 在張拉鋼筋束时应遵照控制应力和鋼筋束內力表的規定。

(五) 变更設計的内容

1. 系杆上翼緣鋼絲束采用极限强度为 $14,000 \text{ kg/cm}^2$ $\phi 5 \text{ mm}$ 鋼絲，由20根鋼絲組成的鋼絲束（原設計为由16根极限强度 $17,000 \text{ kg/cm}^2$ 的鋼絲組成鋼筋束），因鋼絲束的直徑加大而將上緣明沟槽加寬为 49 cm 。

原設計为使块体重量在10吨以內將拉杆端部划分为端块体和頂端块体。为使构件簡化及考虑到在系杆端部預留鋼絲束孔眼的准确性，將原設計两个端块合并为一个端块，其重量为11.5吨（因在現場制造，构件重量可稍增加）。

系杆端块体中的預应力蹬筋鋼絲束，采用极限强度 $14,000 \text{ kg/cm}^2 \phi 5 \text{ mm}$ 的鋼絲，水平方向蹬筋由16根鋼絲組成鋼絲束，豎向的蹬筋鋼絲束由原来的两束合并为一束，由30根鋼絲組成鋼絲束，并因豎向蹬筋在理論計算上不需斜置及易于安放控制位置，因而改变为垂直方向，在原設計資料試驗提綱中曾指出短鋼絲束預应力損失可能有过大的情况，并提出其他的方案（高强螺栓），因未經过試驗，如果預应力損失过大，則在原設計采用的法拉西內式錨栓的情况下，則无法补急，經過研究，确定將所有拉杆端块体中的預应力蹬筋鋼絲束的錨栓，改用可罗夫金錨栓，其缺点是錨头外露，影响端部外形（曾設計用限制高度的短筋鋼錨栓，因无高强度鋼料計算强度不足未予采用）。

2. 吊杆：原設計為簡化构件樣式及便利運輸，採用了三種不同長度的构件，每一吊杆由兩個构件連接而成，在端部第一個吊杆與系杆連接處，吊杆底部距明槽面有 56cm 空隙，拼裝時填塞砂漿的預應力靠短鋼絲束形成，考慮到現場製造，吊杆加長並不增加運輸困難及理論上的探討吊杆不會因加長而引起在張拉時的彎曲變形，並為解決原設計短鋼絲束與系杆下翼緣鋼絲束位置衝突不能張拉的問題，及減少每根吊杆兩個塊件連接的張拉，因而第一吊杆均改為一根整體形式，其底部與明槽相齊（即原設計自端部數起第二、三根吊杆與系杆接縫形式）。

原設計吊杆中的鋼絲束是由 32 根極限強度 $17,000 \text{ kg/cm}^2 \phi 5 \text{ mm}$ 的鋼絲組成。因採用極限強度 $12,000 \text{ kg/cm}^2$ 的 $\phi 5 \text{ mm}$ 鋼絲，鋼絲束改由 45 根鋼絲組成。如採用原設計法拉西內式錨栓，則錨栓直徑加大過多，吊杆斷面尺寸不足，鋼絲根數過多張拉後是否每根應力均勻很難預測且工地無 80 噸雙動千斤頂不能進行張拉而將錨栓改用了可羅夫金錨栓。

吊杆與拱肋連結的預應力短鋼絲束，原設計是由 32 根極限強度 $17,000 \text{ kg/cm}^2 \phi 5 \text{ mm}$ 鋼絲組成。因 60 噸雙動千斤頂張拉能力只能符合 24 根鋼絲構成的鋼絲束，故將每一連接處的两根鋼絲束（32 根鋼絲組成）改為三根鋼絲束（由 24 根鋼絲組成）。

3. 拱肋：由於原設計採用了撓曲受壓的容許應力（ $195 \times 1.1 \text{ kg/cm}^2$ ），而拱肋實際由於中心受壓產生之混凝土中的應力其中最大尚超過了中心受壓允許值（ $155 \times 1.1 \text{ kg/cm}^2$ ）8.5%，因此我們在各拱肋中設置了螺旋鋼筋，以加強拱肋的中心受壓，螺旋鋼筋是按照軸心受壓近似計算的（由於結構上的限制增加的螺旋鋼筋尚不能全部滿足應力要求）。

另外由於吊杆與拱肋的連結改用了三根鋼絲束，在拱肋

N_2 及 N_3 的节点处必須加寬至50cm（原設計該处拱寬为35cm）。

4. 行車道块件：为了避免采用預应力短鋼絲束，我們采用了原設計图中的比較方案。原設計在每个块件中設置了制造时張拉的鋼絲束四根（由32根 $\phi 5\text{mm}$ 鋼絲組成，极限强度等于 $17,000\text{ kg/cm}^2$ ）安裝时与系杆連結的鋼筋束四根（上緣由32根 $\phi 5\text{mm}$ 鋼絲組成，下緣由16根 $\phi 5\text{mm}$ 鋼絲組成，极限强度皆等于 $17,000\text{ kg/cm}^2$ ）。我們因采用极限强度等于 $14,000\text{ kg/cm}^2$ 的鋼絲，因而在制造及安裝时設計为6根鋼絲束，每根鋼絲束由24根 $\phi 5\text{mm}$ 的鋼絲組成。

5. 风撑：原設計中采用由16根 $\phi 5\text{mm}$ 极限强度等于 $17,000\text{ kg/cm}^2$ 的鋼絲組成鋼絲束，因改用极限强度 $12,000\text{ kg/cm}^2$ 的鋼絲，故將鋼絲束采用由24根 $\phi 5\text{mm}$ 的鋼絲組成。

6. 其他：兰州新城公路黃河大桥設計为5孔淨跨30m装配式預应力鋼筋混凝土梁式桥跨及一孔淨跨60m装配式預应力鋼筋混凝土系杆拱桥，为使全桥一致，栏杆式样，变形縫的式样以及排水管的裝置皆采用了与30m梁式桥跨相同的結構形式（栏杆采用了鋼筋混凝土立柱，鋼管栏杆）。

（六）安裝特点

为了防止系杆預应力鋼絲束保护层混凝土形成裂縫，必須規定在明沟槽整体化时，对上部构造临时加载。加载前应作加载图式計算，为使加载灌浆后結構承受最大荷載时在系杆明槽保护层不发生超过混凝土的允許拉应力，如加载图式不能同时满足各断面在灌浆后均不超过容許拉应力时，則需采用分別加载及分段灌浆的方法，以求保証不出現裂縫。

在安裝車行道块体时，建議将它只安裝在肋端的垫板上。这可减少肋内由車行道块体自重产生的支点弯曲力矩。

在进行人行道块体和系杆的連結工作之前，应当将整体化的表面加以修整，以便改善块体混凝土和整体化水泥灌浆的粘結。此时最好采用膨脹性水泥砂浆。

安装上部构造时应遵照安装和架設施工設計图的一切規定（安装和架設施工設計图另行設計）。

变更設計的計算与图紙是由鉄道部烏魯木齐鉄路局桥梁工程队負責編制的。

二、应力分析

（一）剛性系杆柔性拱的特点

在桥梁上部結構的設計中，如果桥面高程受到限制，桥下又必須維持一定的通航淨空，或者桥墩台基础地质条件不良，不宜建造超靜定的桥跨結構时，采用下承式的系杆拱桥是合理的。这种結構由于拱肋产生的推力，被强大的鋼筋混凝土系杆承受。桥梁支点不产生水平反力，形成无推力的拱跨，在外力分析上是一种靜定結構。这样可以避免由于桥墩台基础地质不良，或者墩台高度过大造成設計推力体系拱跨的困难。同时从节约鋼材方面來說，进一步采用装配式預应力鋼筋混凝土的系杆拱，来代替长跨度的鋼結構桥跨，也有着較大的发展前途。

就靜力計算分析，系杆拱桥基本上可以分作三种形式。主要的区别在于拱肋与系杆的截面慣性力矩不同和是否承受挠曲来决定的。

（1）剛性系杆剛性拱（如图2a）



图 2a

这是一种計算比較精确的結構形式。是 N 次超靜定結構（ $N = \text{吊杆数目} + 3$ ）。

在这种体系的結構中，由于吊杆截面較小，可以被認為柔性不担負荷載产生的撓曲。因此弯矩由拱肋和系杆来承受。而且拱肋与系杆負担弯矩的数值，是按截面慣性力矩之比值， J_a/J_s 来分配的。

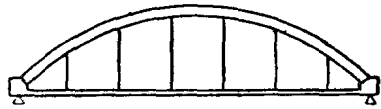


图 26

(2) 柔性系杆刚性拱 (如图26)

在这种体系中，吊杆及系杆均为柔性杆件，不負担荷載产生的撓曲。弯矩仅由拱肋来承担。严格的來說，由于荷載产生的弯矩实际上总是分配在系杆与拱肋两者之間。换言之要求两者慣性力矩之比 $J_a/J_s = \infty$ 是不可能的。不过如果系杆的剛度相对的較拱肋小的多，就可以認為系杆是柔性而不負担弯矩。苏联 Г. К. 頁夫格拉弗夫教授指出当 J_a/J_s 为 80 至 100 时，就作为柔性系杆刚性拱的体系。此时系杆仅仅承受拉力。必須指出在柔性系杆刚性拱体系中，桥面系与系杆連結处的剛度，常常会使系杆的变形影响到桥面系的应力。因此在桥面系与系杆連結的处理是一种比較重要的問題。为了消除系杆与桥面系的刚性連結产生的附加拉应力，系杆的結構，将引起一定的复杂性。

(3) 刚性系杆柔性拱 (如图2B)

本桥設計的结构形式就属于这种体系，一般也被称为兰格耳式梁。在这种体系中，由

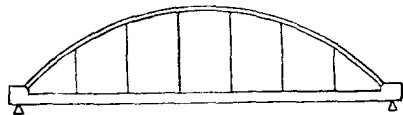


图 2B

于拱肋和吊杆的柔性不能担負撓曲，就如同多边鉸鏈一样，只承受縱向力（拱肋只承受压力，吊杆只承受拉力）。荷載产生的全部弯矩，由强大鋼筋混凝土的系杆单独承受。系杆在承受弯矩的同时，还承受由于拱肋水平推力造成的拉力。

因此系杆承受弯矩及纵向拉力的共同作用，是一种偏心受拉的杆件。

不过，无论拱肋的截面如何细巧，使拱肋的刚度尽量减小，但实际上总不能完全达到绝对的柔性概念。也就是说 J_a/J_s 实际上不可能等于零。那么刚性系杆柔性拱的定义就要依靠近似的条件来肯定。我们认为苏联貢夫格拉弗夫教授对柔性系杆刚性拱的定义可以相反的应用到刚性系杆柔性拱的结构体系，就是当 J_a/J_s 为 $\frac{1}{80}$ 至 $\frac{1}{100}$ 时由荷载产生的弯矩分配到拱肋的数值甚小，以致可以被忽略。可以作为刚性系杆柔性拱的定义。特别是系杆与桥面系（包括车行道横梁桥面板）的连接总是刚性的，那么系杆与桥面系连接成为一个刚性的加劲梁，刚度远超过系杆本身的刚度，也就是说由于荷载产生的弯矩分配到拱肋的数值，实际较按 J_a/J_s 的比值分配的数值小得多，更可以忽略不计。所以刚性系杆柔性拱的定义以 $J_a/J_s = \frac{1}{80} \sim \frac{1}{100}$ 作为论证是合适的。甚至拱肋截面略大使 J_a/J_s 稍大于 $\frac{1}{80}$ 也可以，不必作为刚性系杆刚性拱来计算。苏联梯比列斯公路设计院院长 A·H·阿里莫巴拉脫維利同志也有类似的论点。本桥设计实际的 J_a/J_s 约等于 $\frac{1}{78}$ （稍大于 $\frac{1}{80}$ ）作为刚性系杆柔性拱来分析有着足够的保证。

在这三种体系的结构形式，除了从经济价值及节约材料方面进行选择设计外，刚性系杆柔性拱体系具有它一定的优点。在河流水深不便在河中设置脚手架或拱架、就地灌注或安装的情况下，就需要采用河岸上拼装后进行拖拉架设或者采用浮运的方法，这就需要具有强大的加劲系杆。因此采用