



修建石拱橋先進經驗

1956年全國鐵路先進生產者代表會議選編

人民鐵道出版社

修建石拱桥先進經驗

1956年全國鐵路先進生產者代表會議選編

人民鐵道出版社出版

(北京市霞公府十七號)

北京市書刊出版營業許可證出字第壹零號

人民鐵道出版社發行

人民鐵道出版社印刷廠印刷

(北京市建國門外七聖廟)

一九五六年六月初版第一次印刷

平裝印1—6,000冊

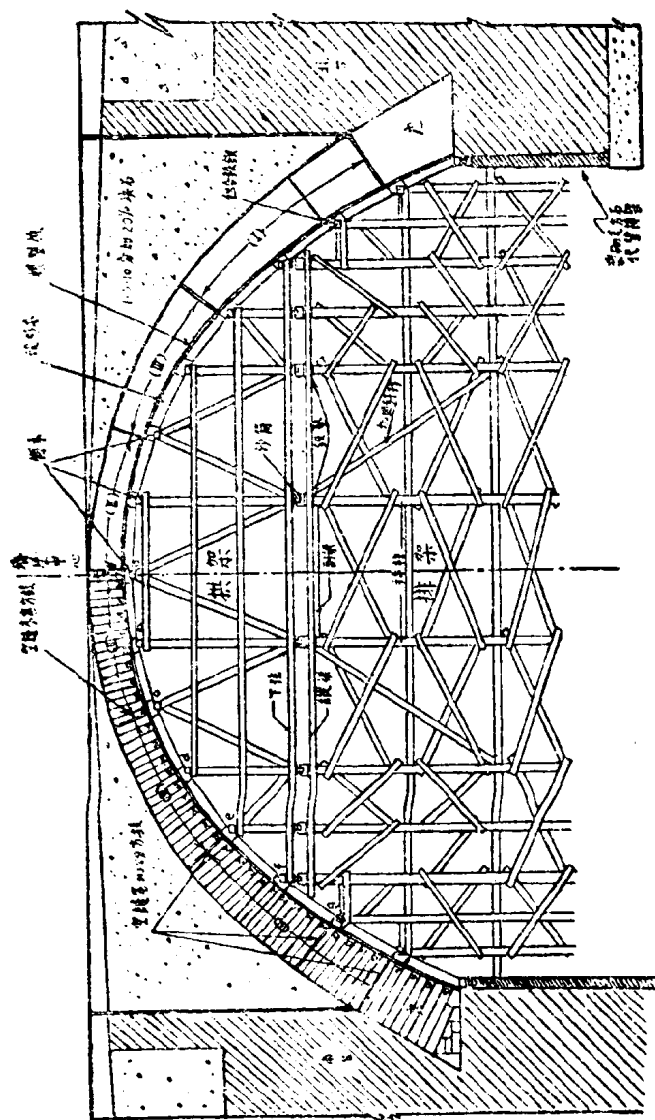
書號：548 開本：787×1092_{1/2} 印張：5 插頁2 17千字定價(9)0.15元

修建石拱桥先進經驗

在山岳地区修建铁路，就近如有可供利用的石料，同时对施工工期及成本影响不大时，採用石砌拱桥，可以就地取材，節約鋼材与水泥，是我們應該積極採用的措施。解放以來，在各新建鉄路上曾建了一些石砌拱桥，其中跨度最大者达 36 公尺，如石太綫上湖桥。一般跨度則在18到25公尺之間。在一定程度上，貫徹了就地取材的原則。今后在大規模修建鉄路中，仍应結合具体情况，適当地採用石砌拱桥，以便節約水泥、鋼料等主要建筑材料。

在修建成渝鉄路时，由於缺乏施工經驗，石砌拱桥及拱涵發生裂紋者甚多，影响質量。宝成綫修建一开始，党即号召坚决消滅这一缺点。在一系列的石拱桥砌筑实践过程中，第二工程局工程师吳成三同志和工程师張浩、李炳章、王玉如等及第四工程局石工領工員樊选、李賀荣等同志在一起，在党組織的領導下，对如何消滅石拱桥、石拱涵裂紋問題進行鑽研，學習苏联先進經驗，改進了施工方法，終於總結出一个石拱桥砌筑的先進方法：在拱脚处預留空縫，共分六段10道縫，以鉄棍代三角架，又改進以灰漿塊代鉄棍，保證了石拱砌后不裂，並節省了工料。用这个方法砌成了24座大石拱桥，均無裂紋，通車后情况良好。

以后开始採用鋼拱架，由於它与木拱架的变形不同，吳成三同志又和朱晴瀾、張浩、刘谷建等同志共同研究，作出一个用鋼拱架砌筑拱圈的分段留縫方法。使用这个方法做了 8 孔拱桥，均無裂紋發生。



圖一 老舊薄1-25M石拱橋木拱架排架示意图

現在將該項施工經驗中的主要部份分四段介紹如下，作為今後修建石拱橋涵施工的參考。

一、拱架與排架

寶成綫南段修建長跨度石拱橋四十餘孔，所用拱架分為木拱架與鋼拱架兩種，其性質各不相同，茲分述如下：

（一）木拱架

拱橋暫架以沙筒為界，顯然分為兩部份，以上稱為拱架，以下稱為排架（圖一）。

（1）排架基礎的選擇

在砌拱時，最怕排架發生顯著的沉陷，排架基礎的沉陷，最大不得超過5公厘。普通所選擇的基礎形式如下：

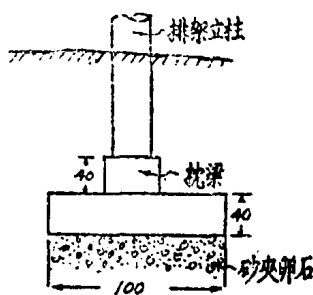
（a）石質基礎

寶成路修建的長跨度石拱橋，有5座排架直接放在石層上，其辦法是將石質鑿成約60公分直徑的圓坑，內放排架的柱子，並用140級混凝土嵌緊，這樣的排架基礎估算其沉陷為零。

（b）枕梁式基礎

基礎土壤為緊密的沙夾卵石，可用枕梁式基礎，即將緊密夾沙卵石土壤砌一層或二層料石，上置枕梁，枕梁上豎立排架的柱子，沙夾卵石土壤之沉陷可依照實際荷重試驗紀錄估計之。（平汝河長跨度石拱橋其排架即採用枕梁式基礎。）

枕梁式基礎如附圖（圖二）。



圖二 枕梁式基礎示意

如上述柱子承重14噸，採1×1公尺見方基腳，其土壤承載

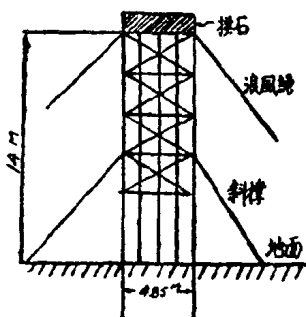
能力 = $\frac{14}{1 \times 1} = 14$ 噸/平方公尺。根據寶成綫大批沙夾卵石荷重試驗的經驗，用40×40公分試鉞平均沉陷約為2公厘，實用基礎較試鉞為大，我們認為應以3公厘估計之。枕梁式基礎絕不能受水冲刷，避免冲刷的辦法可利用改溝或作圍堰。

(c) 樁基

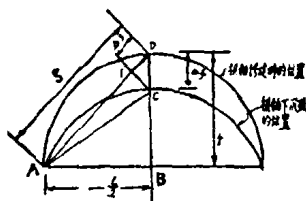
軟質土壤可採用樁基，其沉陷須以靜載試驗紀錄估計之，如工期緊迫，沖擊試驗已合乎要求，沙質土壤可估計為3公厘，軟質土壤可估計為5公厘。

(2) 拱架排架的側向穩定

拱架高了因風力等種種關係，側向穩定常感不足，如老窖溝石拱橋架子高達14公尺，據當地農民談，風力甚大、尤其在洪水期間，倒灌洪水位在起拱綫以上，水的浮力和沖力均不利於側向之穩定。參照蘇聯「橋梁建築」一書在排架上加斜撐，拱架上加浪風繩三道如附圖（圖三）。



圖三



圖四

(3) 預加高度

拱軸的形式為拱橋的關鍵，如果發生偏差，拱圈應力便與設計不符。但拱石本身及拱架木料均為彈性體，如加荷量便有

變形發生，必須能正確計算各種下沉量，預加於原設計之拱軸上，俟拱橋完工拱架拆除，使拱軸之位置恰與設計符合，對保證大石拱橋之質量關係甚大。茲將預加高度之計算及預加拱度的方法分述如下：

(a) 預加高度之計算

(i) 拱圈因死重的下沉量

$$\Delta f = - \frac{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + f^2}{f} \left(\frac{6}{E}\right) = \delta_D \quad (\text{圖四})$$

式中： L ——拱橋跨度 (cm)

E ——拱圈石砌圬工的係數 = $60,000 \text{ kg/cm}^2$

6 ——拱圈圬工因死重所產生的平均壓力 (kg/cm^2)，
可在設計文件中查出

f ——拱矢高度 (m)

例如：七里河石拱橋 $L = 18\text{m} = 1800\text{cm}$ ， $f = 6\text{m} = 600\text{cm}$ ，

$$6 = \frac{7.41 + 3.51 + 3.96 + 8.24}{4} = 5.78 \text{ kg/cm}^2 \quad (\text{圖五})$$

代入上式得

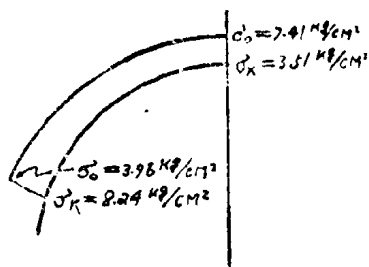
$$\delta_D = 0.19\text{cm} = 1.9\text{mm}。$$

(ii) 拱圈因溫度降低的下
沉量

溫度下降，拱軸縮短，拱

$$\text{頂下沉 } S_t = - \frac{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + f^2}{f} \times$$

$$\times [\alpha(t_2 - t_1)]$$



圖五

式中： L 、 f 與上同

t_2 = 利尖时平均温度

t_1 = 一年中的平均温度

α = 拱石圬工的膨胀系数 = 0.000008

例如：七里河石拱桥利尖时平均温度 $t_2 = +25^{\circ}\text{C}$ ，

$t_1 = +10^{\circ}\text{C}$

$$\begin{aligned} \text{代入上式, } \delta_t &= \frac{(900)^2 + 600^2}{600} \times 0.000008(25 - 10) \\ &= 0.23\text{cm} = 2.3\text{mm}. \end{aligned}$$

为了减少这项下沉，最好选利尖之温度与每年平均温度接近者。

(iii) 拱架及排架的下沉量

拱架支架的下沉量可分为弹性下沉、非弹性下沉、沙筒下沉和基础下沉四种，分述如下：

① 弹性下沉

$$\delta_t = \sum \frac{\sigma l}{E}$$

σ = 各立柱内之应力 (kg/cm^2)

l = 立柱之长度 (cm)

E = 立柱的弹性系数，木料用 $80,000\text{kg}/\text{cm}^2$ 。

由附图（图六）中量得 $AB = 5.2$ 公尺（架排主柱），

$BC = 5.0$ 公尺（拱架主柱）

设 $\sigma_{ab} = \sigma_{bc} = 8\text{kg}/\text{cm}^2$

代入得

$$\delta_t = \frac{8 \times 500}{80,000} + \frac{8 \times 520}{80,000} = 0.1\text{cm} = 1\text{mm}$$

② 非弹性下沉

根据苏联经验公式为

$$\delta_2 = 3K + 2K_1$$

K = 木料与木料接头数目。

K_1 = 木料与金属接头数目。

例如七里河桥拱架： $K=9$ ， $K_1=1$

代入上式得

$$\delta_2 = 3 \times 9 + 2 \times 1 = 29 \text{ mm}$$

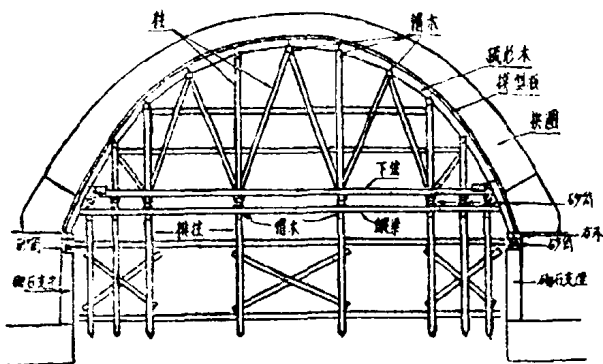


圖 六

③ 沙筒內河沙壓縮

根据河沙压力大小而定，一般为4~6公厘，七里河桥沙筒压力在20噸以內。

$$\delta_3 = 4 \text{ mm}$$

④ 基礎下沉

七里河桥排架基礎为坚石並打混凝土，压力很小，下沉不計。

$$\delta_4 = 0$$

排架的下沉总量 $\delta_L = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4 = 1 + 29 + 4 = 34 \text{ mm}$

預加高度总計 $\Delta = \delta_D + \delta_T + \delta_L = 1.9 + 2.3 + 34 = 38.2 \text{ mm}$

工地实用35公厘，实际拱頂下沉量=30公厘（排架抄平結果不包括温度下降在內）相差極微，理論与实际是符合的。

茲將已作的一部份石拱桥預加高度及拱頂实际下沉列表如下（表一）。

宝成綫南段長跨度石拱桥預加高度及实际沉陷表 （表一）

桥 名	孔 别 及 度	拱頂預加高度	拱頂实际沉陷	偏 差	备 考
七里河石拱桥	跨度 18m	35 mm	30 mm	5 mm	排架在石層上
龍洞石拱桥	第1孔 15m	35 mm	29 mm	6 mm	“
“ ”	第2孔 15m	35 mm	29 mm	6 mm	“
斑竹園石拱桥	跨度 15m				“
平汝河石拱桥	中孔 18m	35 mm	34 mm	1 mm	宝成綫沙夾卵石基礎的排架同為沙夾卵石基礎排架但土質較中孔緊得多
	南孔 18m	35 mm	24 mm	11 mm	
	北孔 18m	35 mm	24 mm	11 mm	
迁福河桥	跨度 15m	35 mm	29 mm	6 mm	排架在石層上
老甯溝桥	跨度 25m	35 mm	30 mm	5 mm	“ ”

由表中可以看出以平汝河桥偏差为最小，足以說明依苏联的先進經驗去作是成功的保證。又木料接头下沉为3公厘，拱架施工細則亦有此項規定。苏联書上規定2~3公厘者。我們的看法是接头的下沉大小，与拱架工作情况有关，可根据現場情况自行掌握。如七里河桥因有木工領工員，拱架工作細致，取 $K=2.5$ 公厘，則預加拱度=33.7公厘，与实际下沉30公厘更为接近。

（二）鋼拱架

（1）鋼拱架的構造

宝成綫上所用的鋼拱架，是由軋制的工字梁所作成的三鉸拱（圖七），結構簡單，並且經濟，为苏联工程师所創造。拱架是个直綫形的工字梁所作成的多边形，其接头使用螺栓，其上

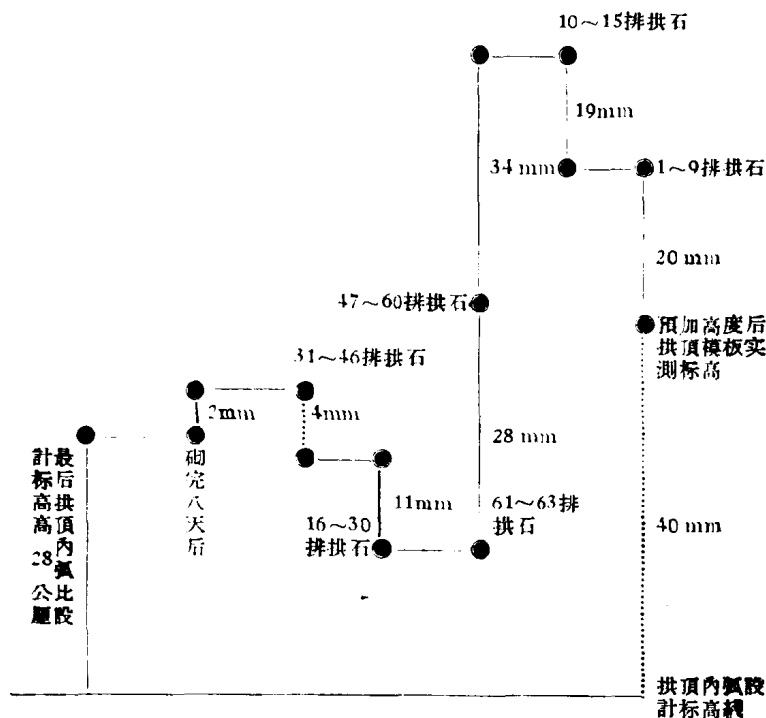
面的曲綫形狀則用弧形木作成。

(2) 鋼拱架的預加高度可在標準圖上查出，這裡不多講。

(三) 鋼拱架與木拱架的比較。

鋼拱架與木拱架的主要不同處在於：

(1) 鋼拱架的彈性變形遠較木拱架的彈性變形大，如老窖溝 1—25 公尺石拱橋（圖一）用的木拱架，拱圈砌築過程中，砌築 I、III、段拱石時（圖一）拱頂無顯著起伏。金家河 4—25 公尺石拱橋用的是鋼拱架，在砌築過程中拱頂起伏波動甚大，拱頂首先上升 39mm，接着下降 62mm，以後又上升 15mm，砌完 9 天後又下沉 2mm。（圖八）



实际安砌拱頂左右 5 排拱石中，拱頂下沉根据抄平紀錄四孔的平均值为

$$35.5\text{mm} = \left(-\frac{29 + 40 + 28 + 45}{4} \right), \text{根据此公式 } \Delta v = \sum \frac{M_m \Delta S}{EI}$$

計算結果为 37mm。

很相近似，这一点在初次使用鋼拱架时是未考慮到的。

(2) 因温度影响所產生的变形鋼拱架远較木拱架为大。

老窖溝 1—25 公尺石拱桥(圖一)用的木拱架，拱圈合攏在炎熱的六月間，拱架因温度影响未產生顯著变形，而急道溝 3—25 公尺石拱桥用的是鋼拱架，拱圈合攏在七月間，合攏时气温为 18°C ，翌日中午气温达 34°C ，三孔砌好的拱圈均在拱頂附近發生裂紋，后想出种种措施，才完滿的封頂。在气温 37°C 下曾測量鋼軌温度約为 $+50^{\circ}\text{C}$ ，这可以說明鋼拱架的内部温度远較气温为高，而拱体本身温度，通常又小於气温，膨脹不一，因而發生裂紋。

为何初次在金家河使用鋼拱架拱頂未產生这项裂紋呢？原因是金家河石拱桥的拱圈合攏是在元月間，合攏时的气温为 $+7^{\circ}\text{C}$ ，当日的气温变化为 $+10^{\circ}\text{C} \sim 2^{\circ}\text{C}$ ，相差甚微。

(3) 鋼拱架可倒用多次，总的算起來較木拱架經濟，簡單，特別適用於河流湍急的長跨度石拱桥。

二、拱圈砌筑

(一) 用木拱架砌筑拱圈的分段办法

(1) 圬工規程上分为十一段的办法

七里河、迁福河兩桥根据这个办法分段砌筑，自下而上，兩边对称進行，如圖九所示，当 I II III IV V 砌完后，即砌筑 VI 段，但不刹尖，拱圈砌完三晝夜后再進行填塞空縫，空縫用

1:1的水泥沙漿，填塞完畢后即進行利尖。

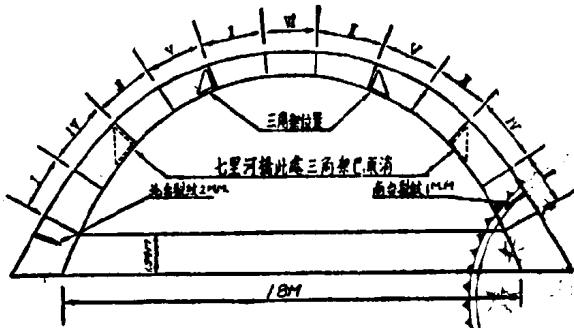


圖 九

(2) 砌筑拱圈中所發生的現象

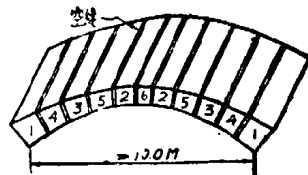
七里河桥拱圈砌筑到Ⅲ段20排拱石时，發現南北台拱座与第Ⅰ段拱圈接合附近灰縫發生裂紋（南台裂縫寬1公厘，北台裂縫2公厘），兩处裂紋均系拱背較寬，向拱腹方面逐漸減小，拱腹看不見裂紋。当用水泥沙漿抹平，作观察紀錄，第二天观察，北台未繼續开裂，南台微有变动，再以灰漿抹平。第三天又作观察，南北台灰縫均無变动。迁福河桥在同样部位發生裂紋兩处（各寬約0.5公厘），用灰漿重新勾縫，未再开裂。

(3) 發生裂紋的原因

由於第一段与拱座連在一起，拱架支点随拱石重量增加而下沉，Ⅰ段也随之下沉。Ⅰ段与拱座既連成一体，如一懸臂梁，在力率大处即發生最大張力，致使灰縫裂开。

(4) 消滅裂紋办法

苏联1949年出版的「桥梁建筑」一書，載有30公尺跨度拱桥分段办法以及灰縫位置，如附圖（圖十

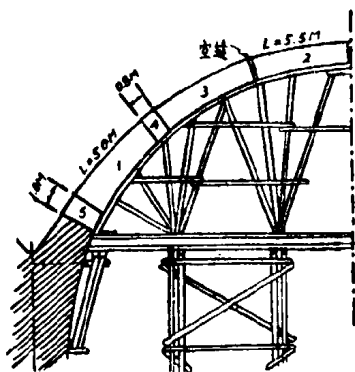


圖十 分段办法及空縫部位

一) 是医治裂缝的良法。恰在拱座处留一段最后安砌，空缝均留在节点。平汝河等桥修建时，即根据此项新办法在拱脚处预留空缝，根本消灭了裂纹，胜利地完成任务。在宝成线拱桥史上前进一步，为今后修建大拱桥增强了信心。

(5) 进一步革新，节省大量铁棍，并简化了施工过程

平汝河等桥拱脚处预留空缝，已经取得成功，但分节仍觉太多，每孔约需铁棍140根，在砌筑Ⅱ、Ⅴ两节时，三角架须逐渐拆除，至为困难，工程进行迟缓。



圖十一 30M 跨度石拱桥拱
石安砌程序

老窑沟石拱桥跨径为25公尺，这样长的跨度不用调整应力的办法，在我国还是第一座。尤其是在六月间起拱，在保证质量前提下赶到洪水期前头更加重要。技术人员和工人一道想办法，以革新精神来完成这个光荣任务。

(a) 拱圈分成六段，预留空缝10道。

从图12可以看出分段砌筑程序及空缝位置。其特点：

① 空缝位置恰在拱架的节点，因为节点强度较大，拱架变形成为一条折线，节点即为转折点，最容易使拱圈发生裂纹。故在节点处预留空缝，以前所建各桥均对这点重视不够。

② Ⅱ、Ⅲ两段长度均为1.3公尺，Ⅰ段长度为6.5公尺，但中间加了一道空缝。

(b) 不用三角架

根据计算，第二段拱圈切线分力小于拱石与模板间的摩擦

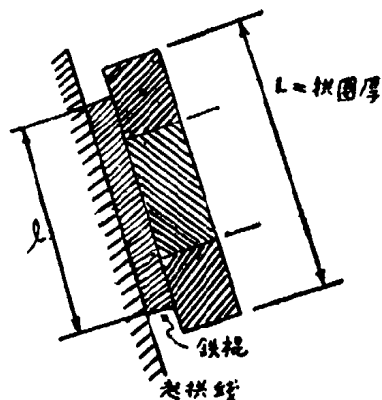
力，無滑动趋势，故可不用三角架。除省去三角架的材料及木工約50工天外，並簡化了安砌过程，估計可提前砌拱工期3天。但为了保險起見，在砌筑Ⅱ段时用木板稍撑一下，在砌筑Ⅲ段时一次拆除。

(c) 省去大量鉄棍

分六段砌筑办法，每拱有空縫10道，較以前少用4道。第1、2道空縫因無应力存在，根本不用鉄棍。第3、4、5各道空縫根据計算，鉄棍应力最大的地方是第5道，每公尺寬拱圈上墊以3公分寬的鉄棍2根，其应力僅約29公斤/平方公分，很安全。因此，鉄棍的寬度可以減为1.5公分。原來一道空縫用3公分寬的鉄棍14根，今代以1.5公分者14根，折合为7根，总计有42根寬为1.5公分的鉄棍即可敷用，節省鉄棍約75%，为了利用寬3公分的鉄棍存料，全桥仍節省鉄棍40%。

(d) 鉄棍長度減短

放置鉄棍的目的，主要是为了拱架走动时，拱圈圪工本身可以鉄棍为軸，略为轉动，鉄棍長了反容易阻碍拱圈的轉动。因此，其長度以能支持全部拱石一致的圍繞鉄棍發生轉动即可，如附圖（圖十三）。



圖十三

部拱石一致的圍繞鉄棍發生轉动即可，如附圖（圖十三）。

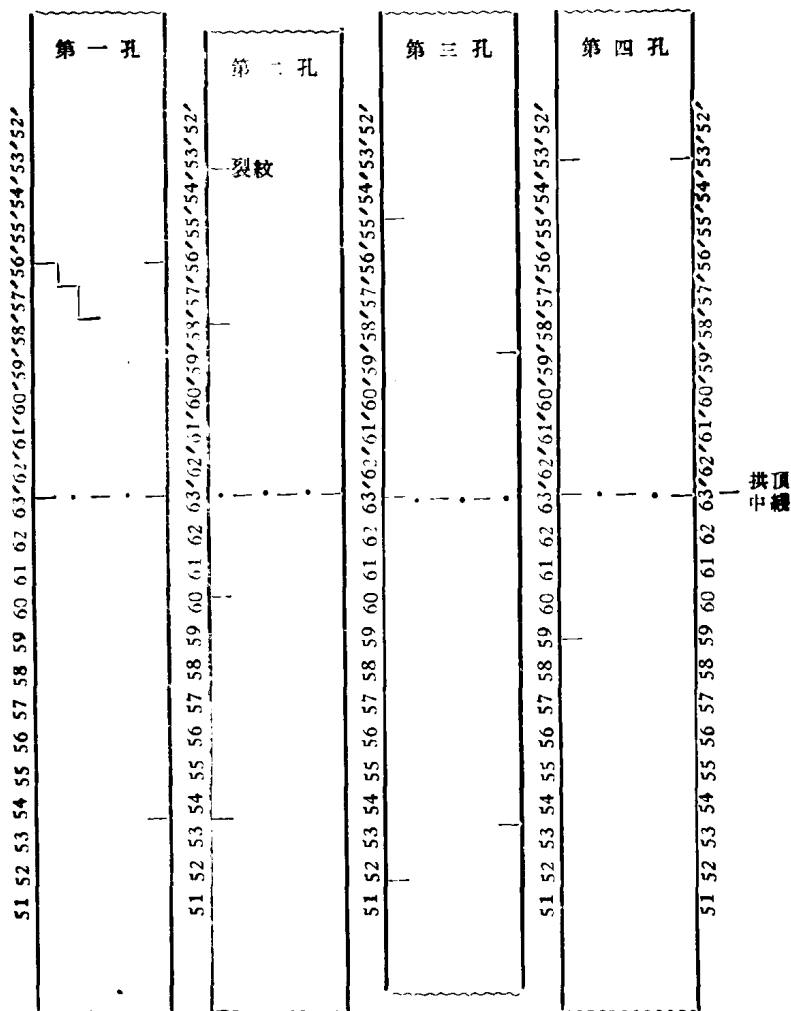
鉄棍長度可短於拱圈厚度，一般根据拱石块数決定之，

$l = \frac{70L}{100}$ 就够了，这样所用鉄棍共可節省85%左右。

(6) 拱脚加空縫后以及全拱分为6段砌筑的考驗

自平汝河3—18公尺石拱桥开始拱脚处預留空縫后，自老

密溝 1—25 公尺石拱桥开始，全拱分为 6 段，預留空縫 10 道，
复不用三角架，先后建成 10 公尺石拱桥 5 孔，12 公尺石拱桥 2
孔，15 公尺石拱桥 9 孔，18 公尺石拱桥 6 孔，20 公尺石拱桥 1



圖十四 拱圈頂部展平面圖及裂紋部位示意圖

孔、25公尺石拱桥1孔，共計24孔，經過檢查，在施工过程中以及通車以后，均無裂紋發生。

(二) 用鋼拱架砌筑拱圈的分段办法

(1) 全拱分为6段預留空縫16道

根据金家河4—25公尺石拱桥初次使用鋼拱架的修建經驗，知道鋼拱架的特点为彈性变形特大，在施工过程中最容易發生裂紋（圖十四），又根据急道溝3—25公尺石拱桥封頂第二天突然在刹尖石兩側發現裂紋，知道鋼拱架受温度影响膨脹很大。在接着修建梅松溝等一系列大石拱桥中，全拱仍分6段砌筑，仍不用三角架，但在適當的地点增加了空縫（圖十五）。各种跨徑的拱桥使用鋼拱架的分段砌筑及預留空縫部位一併列表如下（表二），所有鋼拱架節点均預留空縫，並在容易發生裂紋部位虽非節点亦設置空縫。

表二

跨 徑 (公尺)	拱度	各 段 長 度 (公尺)			空縫部位（数字表示拱石排数）
		I	II	III	
25	$\frac{1}{3}$	7.9	3.7	3.4	起拱綫, 7-8, 20-21, 33-34, 40-41, 47-84, 54-55, 刹尖石兩側
22	$\frac{1}{3}$	6.2	3.5	3.4	起拱綫, 12-13, 26-27, 33-34, 40-41, 47-48, 刹尖石兩側
18	$\frac{1}{4}$	5.4	3.0	2.4	起拱綫, 11-12, 18-19, 26-27, 33-34, 刹尖石兩側
15	$\frac{1}{3}$	3.2	2.6	3.2	起拱綫, 6-7, 13-14, 20-21, 26-27, 31-32, 36-37
12	$\frac{1}{3}$	2.4	1.7	3.0	起拱綫, 10-11, 16-17, 22-23, 刹尖石兩側
10	$\frac{1}{3}$	2.0	1.8	2.5	起拱綫, 8-9, 18-19, 刹尖石兩側