

磚石混凝土公路拱橋 計算範例

蘇聯 Я. С. 槐恩 著
中央交通部公路總局譯

一九五三年
人民交通出版社

著 者 原 序

戰後我國偉大的建設運動中，最近在磚石橋工程方面已經大為進步，根據黨和政府的決定；在祖國的領土內應修建新的公路網，在這些公路中將建築各種構造物，其中包括混凝土橋及磚石橋等。

城市建設地區也進行着巨大的工程，在個別情況下也規定建築磚石及混凝土橋梁。

現在感覺到必須出版教學目的用的磚石橋設計實例一書，在這個實例中必須有系統的及詳細的分析磚石橋拱圈，墩台及拱架的計算方法。在現有的技術書籍中僅能找到關於這些問題的一般智識，因此在進行設計時感到某些困難，事情的困難也就在這裏，即是技術規程和技術標準中個別機關在某些問題上有不同的解釋及不同的定額，此外，最近又出現了一系列的關於拱圈計算的新的建議，而這些建議在文獻上還沒有得到充份的發展，特別是關於拱圈的應力調整法方面。

研究計算實例的最好的方法乃是把個別地區中的算例的具體數字加以分析，同時附帶說明對其他規定情況應如何處理，鑑於這個總的方針，本書的構成如下。基本的算例是屬於實腔式拱上構造的公路石拱橋的，而在附註及變更方案中對其他型式的磚石及混凝土的公路橋和城市橋的計算加以說明。

應該指出；全仗我們蘇維埃學者們的努力研究，磚石及混凝土橋的設計和計算在最近數十年中獲得了巨大的寶貴的成就。

蘇聯科學院院士彼里格里氏（Г. П. Передерный）是磚石橋基本著作的作者，他擬定了拱圈的近似計算法，提出了不考慮土工拉應力的拱斷面驗算方法以及做了磚石橋受地震作用的研究工作。

蘇聯吉魯吉亞科學研究院院士沙夫里耶夫氏（К. С. Завриев）校正了用斯特拉生奈氏表值計算拱圈的方法，提出了用液壓頂重器調整拱斷面應力的新穎的方案，擬定出動力原理的地震論及拱圈和墩台受制動力和地震力作用的實際計算方法，在橋樑工程中用輕質的，低號碼

混凝土做拱圈的卓越的功績也是屬於他的，採用這個方法不但顯著減低了混凝土拱圈中的溫度應力，尤其減輕了它的設計工作，用輕質混凝土做橋拱乃是蘇聯工程師思想的傑作。

莫洛左夫(П. С. Морозов)講師擬出他自己的無鉸橋拱計算法並提出藉虛構載重修正拱軸綫而調整拱圈主要斷面應力的方法。

卡丘林(В. К. Качурин)教授研究了新的拱圈計算法，他的著作使這個領域大大地前進了一步，他修正了對於計算的實踐中最有利的(最先由格里禾舍氏(Н. Г. Кривошеин)提出的)基本體系(由無鉸拱變為三拱鉸)的選擇方法，並提出了較國外學者更為完美的，靈活的拱圈厚度變化法則。

普羅塔索夫(К. Г. Протасов)及魯特尼夫(В. И. Руднев)兩教授研究了拱型的合理選擇問題。

費齡(А. П. Филин)講師擬定了合理設計橋拱的特殊方法(是求得合理拱軸及合理拱斷變化法則的綜合方法，是任何型式的拱圈計算的通用方法，在拱圈計算中並考到慮材料的塑性)。

蘇聯的教授們如格里哥里耶夫(В. В. Григорьев)舒雪夫(П. В. Щусев)，依夫格拉福夫(Г. К. Евграфов)，米特羅波爾斯克(Н. М. Митропольский)等也參加了磚石、混凝土橋樑方面的最寶貴的工作。

這些未盡枚舉的我國學者的成就說明了蘇聯橋樑工程在磚石及混凝土橋計算方法的重要意義。

雖然蘇聯的學者在磚石橋的計算方面有了巨大的成就，然而我們祖國的橋樑工程中在公路的磚石橋建築方面還是很少。

同時如所週知，磚石橋有一系列的完整的優點，例如：最大的耐久性，對載重的增長不敏感，養護費用不大，又有衡偉的建築美及天然美。

在蘇聯共產黨的進步人類的偉大導師斯大林領導下執行着的斯大林五年計劃的勝利完成，保證了建立機械化施工的强大基礎。

採用廣泛的機械操作和斯達哈諾夫工作法可以大大地減低建築磚石橋工程中的繁重性，因此；可以大大普及於城市 and 山區 的橋樑工程中。

無鋼筋的混凝土拱橋還應該更廣泛的應用，它無須鋼筋的耗費，而

全部的施工過程可以大大的機械化。

本書全部內容係照現行的技術標準撰述並反映上列我國學者擬定的磚石及混凝土橋最新的計算原則。

計算是按照 1948 年蘇聯內務部公路總局出版的“鋼筋混凝土，鋼料，混凝土及磚石的公路構造物設計規程”編寫的，在必要的情况下，對公路總局的標準做了有理由的放棄，並用其他機關的技術規程中的標準資料（蘇聯鐵道部技術規程，公用事業部技術規程，俄羅斯蘇維埃公路總局技術規程）做了比照和引證，因此說明了一系列的標準問題；例如磚石及混凝土橋剔除拉力層的計算問題等。

在第一章中介紹了當全部力量，包括制動力及地震慣性力作用下的拱圈計算實例，而地震載重的計算是按沙夫里耶夫院士的方法進行的。

在第二章中用具體的算計例說明各種拱斷面應力調整方法（如液壓頂重器法，虛構載重法，設置中心或偏心臨時鉸法以及三角縫法）。

在第三章中敘述橋墩台的計算實例，包括受地震的，受單向推力作用的和基礎在基土中受彈性固着的計算。

在第四章中提到拱架的計算及拆架工作的實施，同時做出拱架施工抬高度計算的及拱架卸落圖編繪的實例。

本書最後在附錄中介紹了斯特拉生奈——沙夫里耶夫氏的計算數值表和一系列設計用的定額及其他資料。

本書是打算給高級工業學校的學生用的，但在一定程度內也可供設計工作的參考。

作者向審查原稿時曾提出寶貴意見的工學博士基希曼（Е. Е. Гибшман）教授，工學博士加爾姆可夫（Н. Я. Калмыков）教授，工學碩士得未特里耶夫（А. Д. Дмитриев）講師以及繕製插圖時曾親切協助的格羅托夫（Б. А. Глотов）工程師致以深切的謝意。

目 錄

第一章 無鉸拱計算

第 一 節	基本資料	1
第 二 節	求拱曲度的變數	4
第 三 節	求拱圈的幾何數字	6
第 四 節	受靜載重的拱圈計算	9
第 五 節	受溫度影響的拱圈計算	13
第 六 節	受垂直活載重的拱圈計算	17
第 七 節	考慮圬工拉應力的拱斷面應力驗算	27
第 八 節	受履帶車載重的拱圈計算	57
第 九 節	減低拱斷面拉應力的方法	40
第 十 節	不考慮圬工拉應力的拱斷面應力驗算	42
第 十 一 節	受地震影響的拱圈計算	44
第 十 二 節	受制動力的拱圈計算	50
第 十 三 節	受風載重的拱圈計算	51
第 十 四 節	受全部載重共同作用拱脚斷面應力驗算	53
第 十 五 節	對墩台水平移動的拱圈計算	55

第二章 拱斷面應力調整

第 十 六 節	用液壓頂重器作拱斷面應力調整	57
第 十 七 節	用虛構載重法作拱斷面應力調整	65
第 十 八 節	用臨時鉸調整拱斷面應力	81
第 十 九 節	用三角縫法或稱預設縫口法作拱斷面應力調整	89

第三章 墩台計算

第 二 十 節	等跨徑的橋墩計算	95
第 二 十 一 節	不等跨徑的橋墩計算	111
第 二 十 二 節	受單向推力作用的橋墩計算	112

第二十三節	受風載重作用的橋墩計算.....	116
第二十四節	受地震影響的橋墩計算.....	119
第二十五節	考慮基礎在土壤中彈性固着的橋墩計算.....	125
第二十六節	橋台計算.....	131

第四章 拱架及施工抬高度計算

第二十七節	拱架，支架及拆架工具.....	155
第二十八節	拱架的施工抬高度計算的計算.....	173
第二十九節	拱架卸落圖的編繪.....	180
附 錄		187
摘 錄		209

橋墩築于天然基底上,設計為流綫型(按河流的情況),橋台為U字形橋台。

建橋地區——假設在北高加索，
拱圈主要尺寸(見圖 1, 2 及 3):

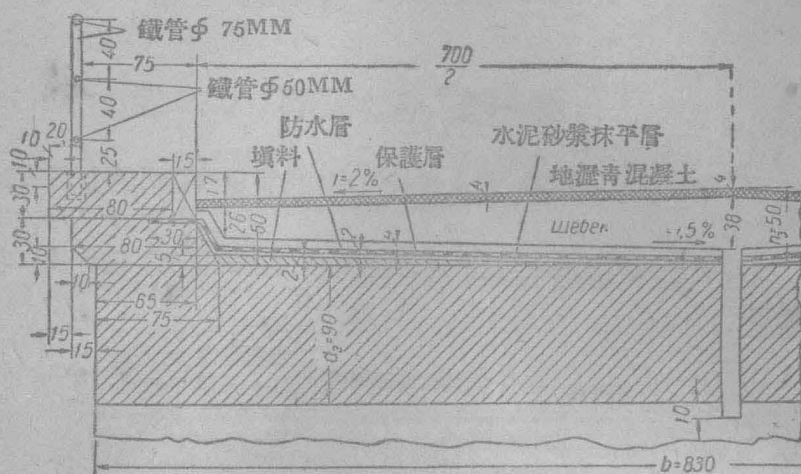


圖 2 在拱頂處 A—B 橫截面草圖

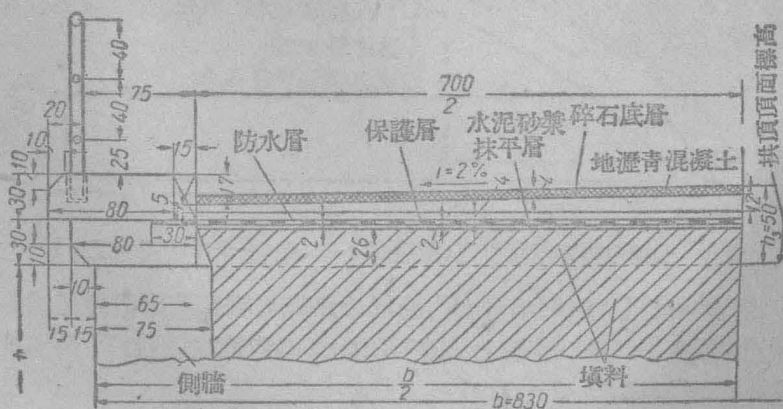


圖 3 在拱腳處 C—D 橫截面草圖

在拱腳底處拱圈淨跨徑(預定的)..... $l_0 = 24, 24 M$.

淨拱矢度(預定的)..... $f_0 = 4, 80 M$.

拱頂厚度..... $d_s = 0, 90 M$.

拱腳厚度(預定的)..... $d_{II} = 1, 20 M$.

在拱脚處拱軸切綫和水平綫的交角(預定的)

$$\dots\dots\dots \varphi_{\Pi}=40^{\circ}50'$$

$$\cos \varphi_{\Pi}=0,756$$

$$\sin \varphi_{\Pi}=0,654$$

拱圈計算跨徑:

$$l=l_0+d_{\Pi} \sin \varphi_{\Pi}=24,28+1,2 \times 0,654=25,06 M.$$

計算的拱矢度:

$$f=f_0+\frac{d_3}{2}-\frac{d_{\Pi}}{2} \cos \varphi_{\Pi}=4,80+\frac{0,90}{2}-\frac{1,20}{2} \times 0,756$$

$$=4,80 M$$

拱圈寬度..... $b=8,30 M$,

拱上構造——實腔式(塊石混凝土填充)。

拱圈材料——用方塊石砌成的漿砌塊石,石料為強度 750 kg/cm^2 的砂岩石,其單位體積重 $\gamma=2,2 \text{ T/M}^3$,用 120 號水泥砂漿砌結。

拱腔填料——塊石混凝土,組成份為 $1:5:10+20\%$ 塊石,單位體積重 $\gamma=2,0 \text{ T/M}^3$ 。

側牆砌料——用方塊石和 80 號水泥砂漿砌成的漿砌塊石。

路面材料——在碎石底層上鋪 4 cm 厚的,單層地瀝青混凝土。

防水層材料——用三層的瀝青油料,中夾二層防水料為骨幹;防水層鋪在填料的上面(如圖 1,2 及 3),填料表面預先用一層 2 cm 厚的 $1:3$ 水泥砂漿抹平。

滲入路面中的水,順着防水層及保護層流到裝置于拱頂上的鑄鐵水管排出去。因此,填充料上應具有傾斜度——縱向為 2% ,橫向 $1\frac{1}{2}\%$ 。

為了保證上述的縱向傾斜度,由路面至拱頂頂面之距離 h_3 採用 $0,5 M (h_3=0,50 M)$ 。

欄杆扶手及欄干柱用 $\phi 75 \text{ MM}$ 的鐵管,而欄杆用 2 根 $\phi 50 \text{ MM}$ 的鐵管做成。

雙層的帽石及緣石材料——用單位體積重量 $\gamma=2,4 \text{ T/M}^3$ 的,強度為 750 kg/cm^2 的砂岩石。

關於鑲面方面,拱圈側面用半細礫石,側牆用粗礫石,而帽石用半

細礫石。

拱腹面不加鑲砌，只用勾縫修飾。

附註：石質的，混凝土的及磚的城市橋和公路橋，其拱圈及拱上構造的
主要材料見附錄1。

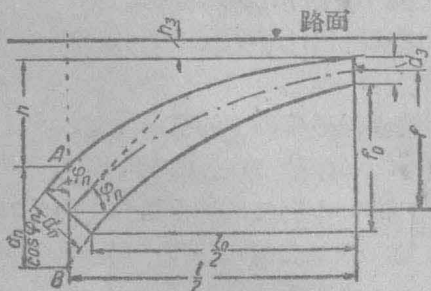
第二節 求拱曲度的變數

爲了計算便利取拱寬爲 $1M$ 。按 $1M$ 拱寬和 $1M$ 橋長計算的拱頂靜
載重爲(見圖4)：

$$g_3 = h_3 \gamma_1 + d_3 \gamma.$$

式中： $h_3 = 0.5M$ — 拱頂上的路面厚度，包括抹平層，防水層，保護
層及碎石基層；

$\gamma \cong 2 T/M^3$ — 拱頂上路面，碎石基層，保護層，防水層及抹平
層的平均單位體積重量；



$$d_3 = 0.9M;$$

$\gamma = 2.2 T/M^3$ — 漿砌方塊石拱圈的
單位體積重量，用砂岩
石砌成的。

$$g_3 = 0.5 \times 2 + 0.9 \times 2.2 = 2.98 T/M.$$

按通過拱腳中心的垂直斷
面計算的，在拱腳處順 $1M$ 橋長

圖 4

的靜載重爲：

$$g_H = h_3 \gamma_1 + h \gamma_2 + \frac{d_H}{\cos \varphi_H} \gamma,$$

式中： $h_3 = 0.5M$; $\gamma_1 = 2 T/M^3$.

h 的數值按下列公式求得：

$$h = f + \frac{d_3}{2} - \frac{d_H}{2 \cos \varphi_H} = 4.8 + \frac{0.9}{2} - \frac{1.2}{2 \times 0.756} = 4.46M;$$

$$f = 4.8M;$$

$$d_n = 1.2M;$$

$\gamma_2 = 2T/M^3$ ——填料的單位體積重量;

$$\cos \varphi_n = 0.756;$$

$\frac{d_n}{\cos \varphi_n}$ ——在垂直斷面 AB 上折算的拱腳厚度, B 點為拱腹延長綫與通過拱腳中心的垂直綫的交點。

$\gamma = 2.2T/M^3$ ——漿砌方塊石拱圈的單位體積重, 由砂岩石砌成的。

$$g_n = 0.5 \times 2 + 4.46 \times 2 + \frac{1.20}{0.756} \times 2.2 = 13.42 T/M,$$

拱曲度的變數:

$$m = \frac{g_n}{g_s} = \frac{13.42}{2.98} = 4.503,$$

附註: 當空腔式的拱上構造用跨越主拱的小拱構成的橫洞時, (圖 5), 就是說載重用橫牆傳導至主拱上時, 依照設計規程 §424 之規定, 橫牆壓力可以認為平均分佈在橫牆中距的長度上。

在這種情況下, 在拱頂處順橋長 $1M$ 的靜載重, 可以和實腔式拱上構造一樣按下式計算。

$$g_s = h_s \gamma_1 + d_s \gamma$$

而在拱腳處, 順橋長 $1M$ 的靜載重 (以公噸計) 假定按下式計算:

$$g_n = \frac{P}{2R+a} + \frac{d_n}{\cos \varphi_n} \gamma$$

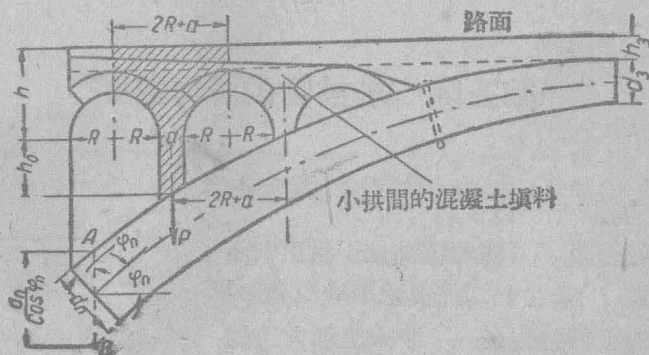


圖 5

式中: P ——靜載重的壓力, 以 T 計, 此壓力是由最高的, 即靠近主拱拱腳處的橫牆傳導到主拱上的;

d_H ——主拱在拱腳處之厚度, 以 M 計;

$2R+a$ ——橫牆中距;

γ ——主拱材料之單位體積重, 以 T/M^3 計。

按照上述情況, 拱曲度的變數為

$$m = \frac{g_H}{g_s}$$

計算的經驗指出, 按照上述近似方法以求空腔拱的變數 m , 拱軸綫往往得到相當大的誤差。

當拱的上部構造為空腔式時, 沙夫里耶夫 (K. C. Зевриев) 院士建議, 較好是用圖解法先製

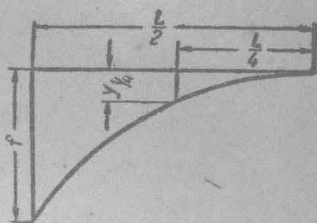


圖 6

出靜載重的壓力曲綫, 然後在跨徑 $\frac{1}{4}$ 處量取壓力曲綫的縱座標值 $y_{\frac{1}{4}}$ (圖 6) 並算出它與拱矢度之比值 $\frac{y_{\frac{1}{4}}}{f}$, 由附錄 2, 表 1 中相當於這個 $\frac{y_{\frac{1}{4}}}{f}$ 值之處, 可以找出 m 值。與這個變數 m 相當的曲綫是和構成的索綫曲綫在五個點處 (即拱頂, 二邊的跨徑 $\frac{1}{4}$ 處和拱腳處) 相符合的, 實際計算證明, 它並且和全部的其他各點充份接近于重疊。

例如: $f = 4.5M$, 圖解的壓力曲綫中量得在跨徑 $\frac{1}{4}$ 處縱座標 $y_{\frac{1}{4}} = 0.9M$, 由此算出 $\frac{y_{\frac{1}{4}}}{f} = \frac{0.9}{4.5} = 0.20$, 由附錄 2 表 1 中查出 $m = 3.500$ 同時 m 值亦可按下式求出:

$$m = \frac{1}{2} \left(\frac{f}{y_{\frac{1}{4}}} - 2 \right)^2 - 1$$

第三節 求拱圈的幾何數字

求拱軸的幾何數字

拱軸縱距 y_1 (座標原點位于拱頂斷面中心—圖 7) 及拱軸切綫與水平綫交角 φ 之值根據斯特拉生奈——沙夫里耶夫氏的數表 (附錄 2, 表 1 及表 2) 算出如表 1, 同時

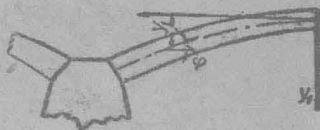


圖 7

當 $m=4.053$ 時, 表中數字是按插補法求得的。

拱軸的幾何數字表, $m=4.503$; $l=25.06M$; $f=4.8M$ 表 1

項別	數 別	拱 脚	跨 徑 $\frac{l}{4}$ 處	拱 頂	附 註
1	2	3	4	5	6
1	$10000 \frac{y_1}{f}$	10000	1882	0	從附錄 2 表 1 中, 用插補法算得一參見以次之附註
2	$y_1(CM)$	480	90	0	上項數乘以 $0.0001f$, 式中 f 一以 CM 計 $0.0001 \times 480 = 0.048$
3	$1000 \frac{l}{f} \operatorname{tg} \varphi$	5476	1651	0	由附錄 2, 表 2, 用插補法算得
4	$\operatorname{tg} \varphi$	1, 046	0, 316	0	上項數值乘以 $0.001 \frac{f}{l} =$ $0.001 \times \frac{4.8}{25.06} = 0.000191$
5	φ	$46^{\circ}20'$	$17^{\circ}30'$	0	查表得出
6	$\cos \varphi$	0, 690	0, 953	1	查表得出
7	$\sin \varphi$	0, 723	0, 301	0	查表得出

附註: 對 $m=4.503$ 的插補法舉例:

求 $a=10000 \frac{y_1}{f}$ 值

斷 面	照 附 錄 2 表 1.		當 $m=4.503$ 時 用直綫插補法
	$m_1=4.324$	$m_2=5.321$	
跨徑 $\frac{l}{4}$ 處	$a_1=1900$	$a_2=1800$	$a=1882$

$$a = a_1 - \frac{(a_1 - a_2)(m - m_1)}{m_2 - m_1} = 1900 - \frac{(1900 - 1800)(4.503 - 4.324)}{5.321 - 4.324} = 1882$$

求拱圈厚度

$$d_3 = 0.90M$$

$$\cos \varphi_{\frac{1}{4}} = 0,953 \text{ (按表1. 第6項, 跨徑 } \frac{1}{4} \text{ 處)}$$

$$\cos \varphi_n = 0,690 \text{ (按表1. 第6項, 拱腳處)}$$

拱圈厚度的變數用 $n=0.60$

附註：對於公路橋一般的採用 $n=0,50$ 或 $n=0,60$

用較小的變數 n 使拱腳處之厚度增加，使得由溫度變化及混凝土收縮而引起，在拱腳上緣處的拉應力趨於減小。

因此，對於平坦的拱圈，特別是混凝土的，空腔拱上構造的拱圈，由於上述溫度影響和混凝土收縮力的強大作用，在拱腳上緣處產生拉應力，爲了達到減低此項應力的目的，應減小變數 n 的數值，而採用 $n=0,40$ 或 $0,50$ 。

關於變數 n 對拱厚度和拱斷面拉應力的詳細影響，在以次第九節中加以說明。

在跨徑 $\frac{1}{4}$ 處的拱圈厚度：

$$d_{\frac{1}{4}} = c \frac{d_3}{\sqrt[3]{\cos \varphi_{\frac{1}{4}}}}$$

式中： $c=1.077$ ——跨徑 $\frac{1}{4}$ 處之係數，按附錄 2 表 3 當 $n=0.60$ 時查得。

$$d_{\frac{1}{4}} = 1,077 \frac{0,90}{\sqrt[3]{0,953}} = 0,97 M.$$

在拱腳處的拱圈厚度：

$$d_n = c \frac{d_3}{\sqrt[3]{\cos \varphi_n}}$$

式中： $c=1,186$ ——拱腳處之係數，按附錄 2 表 3，當 $n=0.60$ 時查得。

$$d_n = 1,186 \frac{0,90}{\sqrt[3]{0,690}} = 1,20 M.$$

即是：和預定的厚度（第一節）完全符合。

拱圈厚度整編如表 2

拱圈厚度表

表 2

d_n (拱脚處)	1.20M
$d_{\frac{1}{4}}$ (跨徑 $\frac{1}{4}$ 處)	0.97M
d_3 (拱頂處)	0.90M

附註：若是得出的拱脚厚度和預定的數字有顯着的差別，則必須以表 2 中的 d_n 及表 1 中的 $\cos \varphi_n$ 重行計算拱曲度的變數 m 和拱圈幾何數字(縱座標值 y_1 角度 φ 及厚度)一般來說，重算會使開始和結果的 d_n 及 $\cos \varphi_n$ 值得到充份準確的一致。

拱圈淨跨徑及淨拱矢度之確定

拱脚處最後的數值 $d_n = 1.20M$ 及 $\varphi_n = 46^\circ 20'$ (表 1) 求得以後，以次進行拱圈淨跨徑的確定：

$$l_0 = l - d_n \sin \varphi_n = 25.06 - 1.20 \times 0.723 = 24.2M,$$

淨拱矢度：

$$f_0 = f - \frac{d_3}{2} + \frac{d_n}{2} \cos \varphi_n = 4.8 - \frac{0.9}{2} + \frac{1.20}{2} \times 0.69 = 4.75M.$$

根據初步設計，路面標高為 $\nabla E.II. = 338.00M$ ，則拱脚底決定的標高為：

$$\nabla E.II. - d_3 - f_0 - h_3 = 338.00 - 0.9 - 4.75 - 0.5 = 331.84M,$$

求得拱圈幾何尺寸後，則可着手於拱圈計算。

第四節 受靜載重的拱圈計算

假定為絕對剛性的三鉸式拱，其不計彈性壓縮的主推力如下式：

$$Hg = \frac{k_g}{10000}, \frac{g_3 l^2}{f}$$

式中： $k_g = 1815$ ——由附錄 2，表 4，對 $m = 4.503$ 用插補法求得；

$$l = 25.06 \text{ m}; \quad f = 4.8;$$

$$g_3 = 2.98 \text{ t/m (見第 2 節)}$$

$$H_g = \frac{1815 \times 2.98 \times 25.06^2}{10000 \times 4.8} = 70.9 \text{ t}$$

因為拱軸綫是照靜載重的壓力曲綫做出來的，那末，由靜載重發生的彎曲力矩對拱圈的一切斷面均等於零，又拱圈中任一斷面上的縱向力 N_g ，可以從拱頂斷面至我們討論中的斷面間一段的拱圈中（圖 8 的斜綫部份），由平衡條件（所有力量投影為水平力）求得為：

$$N_g \cos \varphi = H_g;$$

因此
$$N_g = \frac{H_g}{\cos \varphi}$$

由彈性壓縮引起的附加推力按斯特拉生奈（Мтрасснер）氏的，並曾被沙夫里耶夫（К. С. Завриев）修正的公式為：

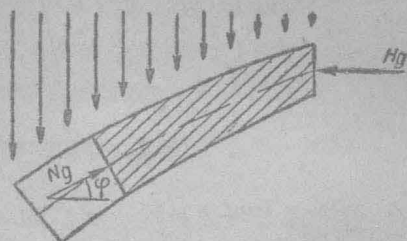


圖 8

$$\Delta H_g = -\mu_1 H_g,$$

式中係數
$$\mu_1 = \frac{1}{12 v_1 \vartheta} \cdot \frac{d_3^2}{f^2};$$

其中: $d_3 = 0.9 \text{ m}; \quad f = 4.8 \text{ m}$

係數 $v_1 = 1.03$ (附錄 2 表 5, 根據 $n = 0.6$ 及 $\frac{f}{l} = \frac{4.8}{25.06} = 0.191$

查出)

係數 $\vartheta = 0.0579$ (附錄 2 表 6, 按 $n = 0.6, m = 4.503$ 查表值用插補法求得)。

代入算出:

$$\mu_1 = \frac{1}{12 \times 1.03 \times 0.0579} \times \frac{0.9^2}{4.8^2} = 0.051,$$

$$\Delta H_g = -\mu_1 H_g = -0.051 \times 70.9 = -3.616 \text{ t}.$$

附加推力 ΔH_g 作用於拱頂斷面中心以下，距斷面中心為 r_3 (圖 9) 的彈性中心 (O) 處。