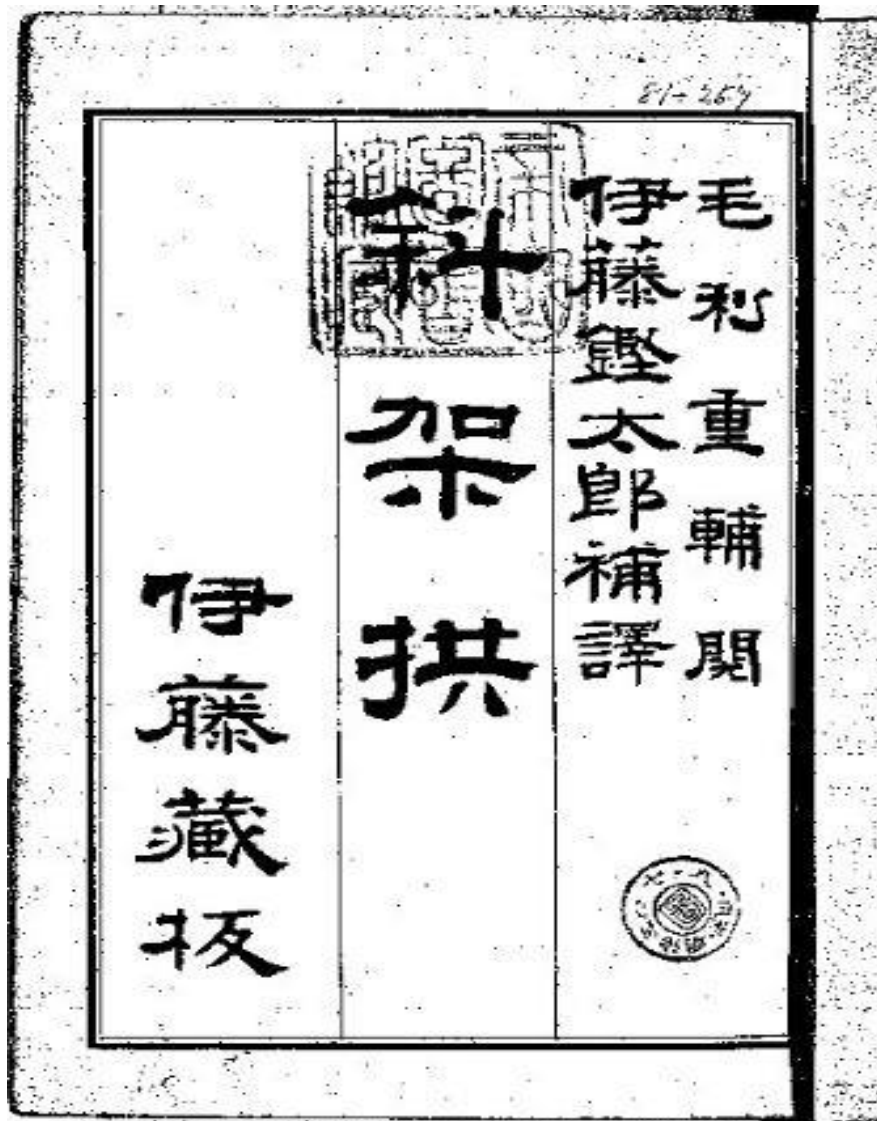


2019 年(令和元年)

「斜架拱」現代語訳



echopapaful



目 次

緒言	-----3
第1章 幾何図法を用いて原理を説く	-----4
第2章 寸法及び角度を定める公式を論じる	-----9
第3章 拱石の形状を作る方法を論じる	-----17
第4章 公式の応用	
施工実例 第1	-----24
施工実例 第2	-----29
第5章 架拱方法	-----32
第6章 製 図 法	-----33
斜架拱付録	-----35
斜架拱建築用図表の説明	-----35
図表の用法	-----35
図表	-----40



echopapaful

原著「斜架拱」は巻末に図表をまとめている。

図を見ながら本文を読むのに、これでは面倒なので、適宜、該当箇所に図表を掲示した。

文中、(※・・)は訳者の注である。

緒 言

本書はジョージ・ワットソン・バック氏が著した「オブリック・ブリッジ」を基としニコルソン氏、ハート氏等の述べたことを参考として訳したものであるけれども、原書中多々 他の註釈が無ければ直ぐにその意味を理解しがたいものがある。これらについて訳者自ら註釈を試みて、共に本書中に記載するものも少なくはない。

又、巻末にバアロー氏が著わした図表を載せている。これは繁雑な公式を用いずに専ら簡易法で解くため、公式によろうとも図表によろうとも、各自、所定の数値が得られる方法を述べた。

そのためバック氏の書中に「斜架拱はどれほどの角度まで斜めに架けることができるか」という点、 又、バウロー氏の「図表に対する論証」等はいずれも理論多く実地の所用が少ないのでこれは他日に譲り省略することとした。

明治 32 年 6 月 （※1899 年）

訳 者 記 す



斜架拱とは鉄道、道路、水路等の中心線に対し斜めに架設するアーチ橋の名称で、ここに述べようとするものは その形状は半円 あるいは欠円であり、石材あるいは煉瓦によって これを建築するものとする。

第 1 章 幾何図法を用いて原理を説く

斜架拱の形状は半円筒を斜めに切断したものであり その正面よりこれを見た時は楕円形を表すものである。普通のアーチにおける推力の方向は半円筒の軸線に直角である。それ故、石材あるいは煉瓦の接合線もまた、この軸線に完全に直交するか又は平行な直線であれば最もわかりやすいことであるが、斜架拱にあってはそうはいかない。その推力をその軸線に直角にしようとするには直角を求める場所によっておのおのその方向を異にするので一つの直線をもってこれを表すことはできない。しいてこれを求めようすると その線は螺旋形を呈している。ここにこれを求める方法を述べる。

第 1 図の ACLM は半円筒の平面を示し ABC はその正面図である。

半円周 ABC 及び線分 CL を適当な数で等分する

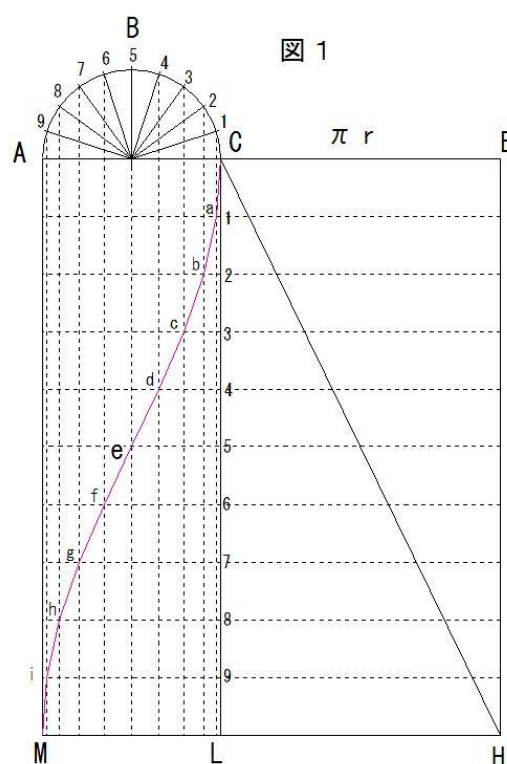
(第 1 図は 10 等分した) 曲線 ABC 内の等分点 1,2,3 等より線 CL に平行する線を引く。又 線 CL の等分点 1,2,3 等より AC に平行な線を引く。

この両線の交点を a、b、c 等とし、これらを連ぶと C e M なる螺旋曲線が得られる。

又、第 2 図において曲線 A'B'C' 及び線分 C'K をそれぞれ等分して第 1 図と同じように縦横の直線を

引き、その交点 a、b、c 等を結ぶと C'eN なる螺旋曲線を得る。この 2 螺旋曲線間 CC'NM は即ち半円筒の内弧と外弧に通じている螺旋面であり、ある角度を有する斜架拱の軸線に平行し推力に直角な曲線である。

(※推力 ; アーチの支点を外側に押し広げようとする鉛直方向の力)



第2図のC'FGK及びC'Gは第1図と同一の方法によって書いたものであるが、その長方形と対角線は半円筒の平面A'C'KNと螺旋曲線C'eNの展開図(デベロッパメント)であることは明らかである。

ここでA'Aを半円筒の厚さとすればC5Mはその内部、C'eNはその外部の螺旋曲線である。この螺旋曲線が斜架拱に使用する拱石の内外両弧における線の方角を示すものである。

第1図の方法によるかあるいは線C5Mの雛形によって半円筒内部の平面図へ螺旋状の数線を書くと第3図が得られる。即ち斜架拱の内弧(イントラース)においてその推力に直角な線の方角を示すものである。

斜架拱の内弧(イントラース)の曲線を展開図として描くと、推力に平行する線の形状を知ることができる。

即ち第4図に示すAEFGは斜架拱の平面図である。線AGの点AよりAGに直交するACを引き、次に正面図ABCを書く。ACをDまで延長する。CDは半円周ABCと同じ長さとしABCの半円周及び線CDそれぞれを適当な数で等分する。半円周ABCの等分点1、2、3等より線AGに平行な1a、2b、3c等の数線を引く。又線CDの等分点1、2、3等からもAGに平行する数線を引く。こうしてAE線内のa、b、c等の点からADに平行な線を引き、線CD内の1、2、3等の点より引いた線とa'、b'、c'等で交差させる。この点を結ぶと内弧の展開図を得る。FHも同一の方法によって求めるか或いはEDの雛形によって図を得る。

斜架拱の外弧(エキストラース)についても同一の方法で描けるのでこれは省略する。

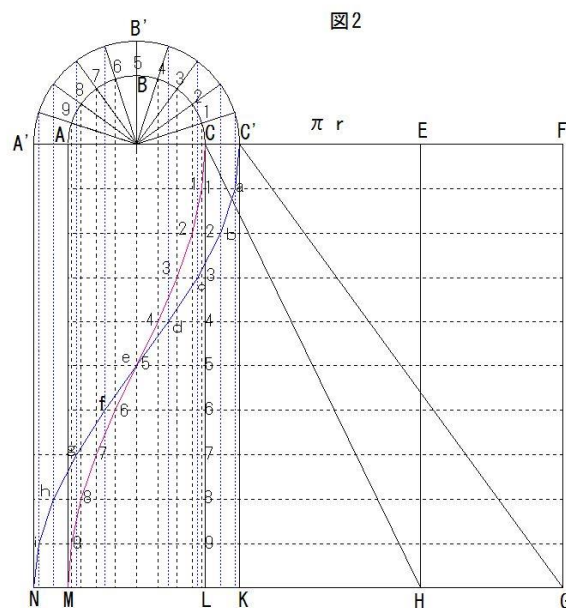
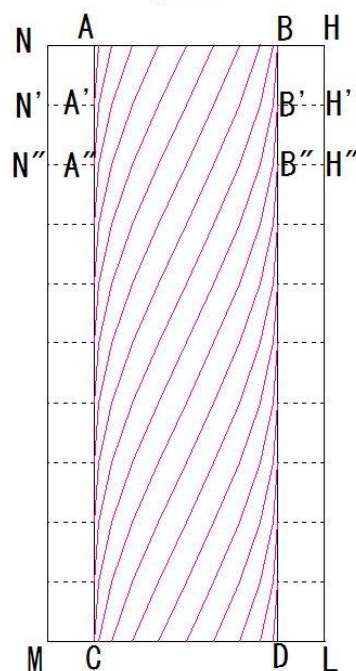


図3



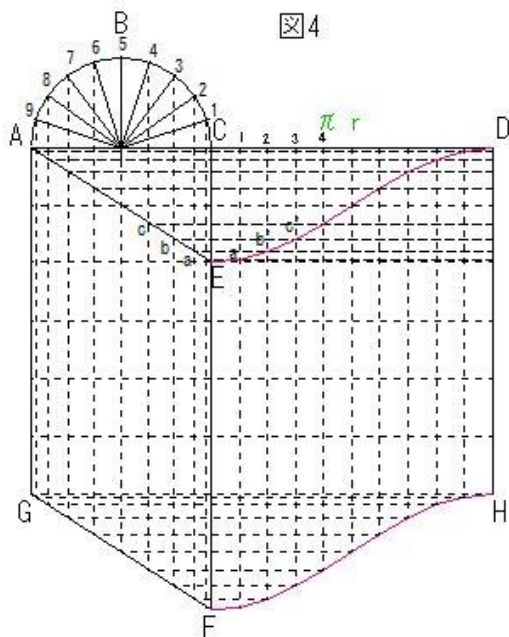


図4

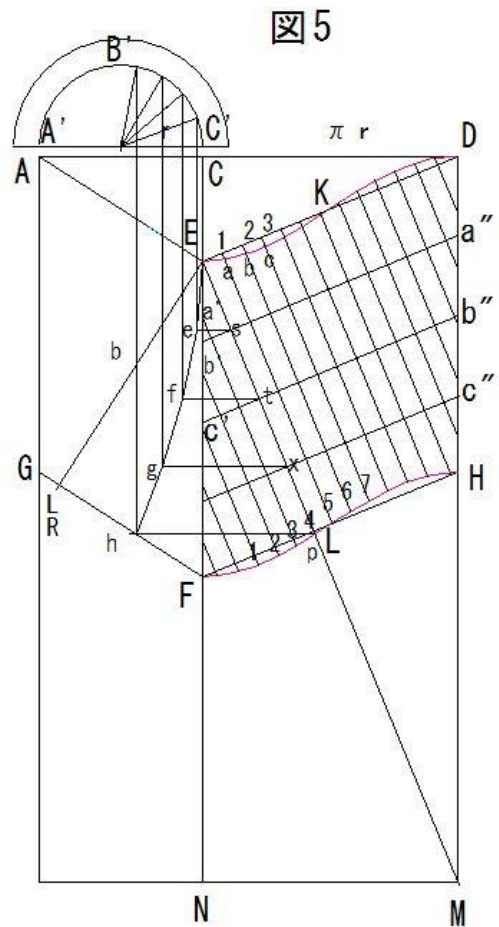


図5

斜架拱の内弧と外弧の軸線に平行し 又 直交する縦横接合線の展開図を書く方法を述べる。

即ち第 5 図で斜架拱内弧の平面を AEFG とし、AG に直交するように A'C' を引き、ここに正面図 A'B'C' を書く。FE を C' まで延長する。前述の方法により AE 及び GF の展開曲線 EKD 及び FLH を書く。

線分 ED の E 点より ED に直交する EM を引き

DH を M まで延長する。HM に直交する MN を引き EF を延長し、その交点を N とする。

このようにして得た線分 EM は第 1 図に示した線分 CH と同種のものであり斜架拱の内弧における螺旋曲線 即ち拱石の接合線を展開したものである。線分 ED を拱石一列の幅と同じ長さにして奇数に等分する（第 5 図は 13 等分した）この等分点より EM に平行な線を何本か引く。

a5、b6、c7 等はアーチ橋の前面から後面までの層状接合線（コーシングジョイント）一列の全長を示し a'3、b'2、c'1 等の数線はアーチ橋の一面より拱基（インポート）に至るが一列には足りない接合線を示している。これらの接合線はいずれも斜架拱の軸線に平行な線である。これに直角な線は平面図における AE の展開図の線分 EKD である。a、b、c 等の点より ED に平行な aa'', bb'', cc'' 等の線を引くと、斜架拱の内弧における縦横接合線 即ち拱石位置の概略を知ることができる。ここに第 1 図において示した方法の他 AEFG の平面における螺旋状の曲線を書こうとすれば A'B'C' の半円周を ED と同数の値で等分しその等分点 1、2、3 等の数点より AG に平行な数線を引く。さらに EM 或いはこれに平行な a'5、b'6 等の数線と ED に平行な aa'', bb'' 等の数線と互いに交差する数点 s、t、x、p 等を求め、この数点より ACD に平行な se、tf、xg、ph 等の数線を引き半円筒の平面における 1、

2、3等の数線と e、f、g、h 等と交差させこの点をつなぐ。このようにして Ep に等しい efgh という螺旋状の線を半円筒の平面に書くことができる。他の螺旋形の線を書くには Eegh という雛形を作り、これによってこれを書くことで大いに手数を省略できる。

以上は斜架拱の内弧における拱石接合線の展開図であるが外弧におけるものを求めるにも又この方法による。即ち第 6 図に示すように PD'H'R を外弧の展開図とする。

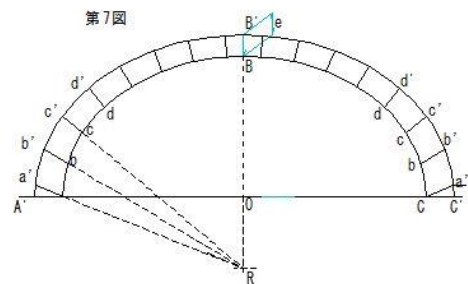
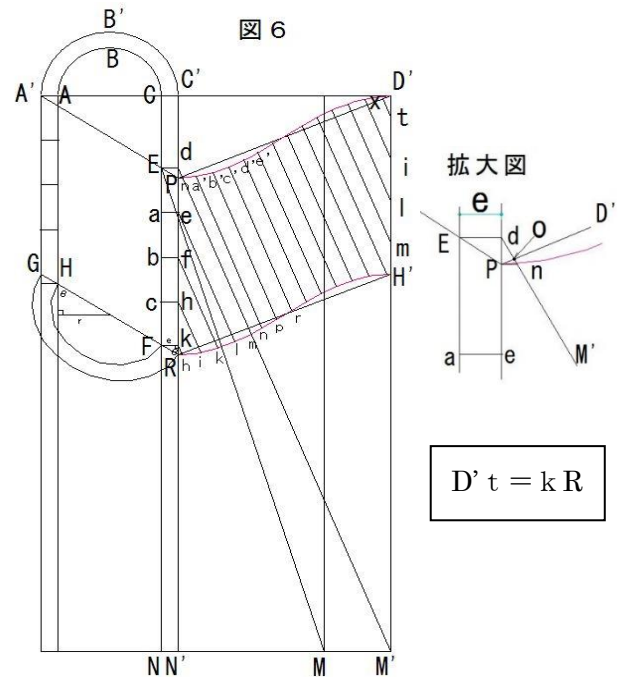
dN'は第 5 図の EN と同じ長さである。

NN'を延長して D'H'の延長線との交点を M'とする。EN 上の E、a、b、c、F 等の点より C'N'に直交する Ed、ae、bf 等を引き、d より dM'を引く。ここで dM'は外弧における拱石接合線の一つであり、第 2 図における C'G と同種のものである。e、f、h、k 等の数点より dM'に平行な eℓ、fk、hi、kh 等の数線を引き D'H'線内の D't を dR 線内の kR に等しく dM'に平行に xt を引く。こうして ox を第 5 図の ED のように同数に等分しそれら分点 1、2、3 等から dM'に平行に a'n、b'p、c'r 等の数線を引く。このようにして外弧の拱石の層状接合線が得られる。その他はすべて第 5 図で説明した方法によって知ることができるので、ここでは省略し斜架拱の正面図及びその面における拱石の接合線を求める方法を述べようと思う。

即ち第 7 図のように内側楕円の長径 AC 及びその半短径 OB を第 5 図の AE 及び OB'に等しくし、その外側における長径 A'C'及びその半短径 OB'を第 6 図の A'P 及び第 5 図の OB に円筒の厚さを加えたものに等しくして 2 個の楕円を書く。

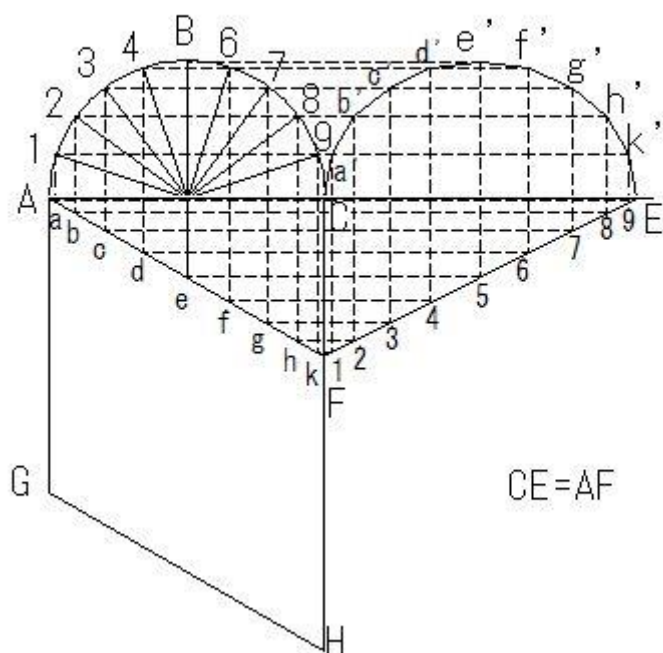
こうして斜架拱の正面図を得る。

こうして楕円の内側の Cb、bc、cd 及びその外側の c'a'、a'b'、b'c'等の距離は第 5 図の Ea'、a'b'、b'c'及び第 6 図の Pn、na'、a'b'の長さを計りこれと同一にする。こうして Ca'、bb'、cc'等を結ぶと正面における拱石の接合線となる。この接合線はそのまま直線ではなく曲線である。起拱線（スプリング）cc'に近い拱石はその上部において最も凹円形を示し二段三段と上るに従い漸々その凹形を減少し枢石（キーストーン）に至って完全に直線となるけれども現図のような縮尺の小さな図面においてはこれは明示され難い。アーチ厚が大なるものであるならば厚さを二等分して内外面の中央面を求め これを展開する。独（ひとつ）を第 6 図



斜架拱の正面図を書くには別の方法がある。第 9 図に示す通りである。AFGH を斜架拱の平面とし AG に直交に AC を引きこれに半円アーチ ABC の半円周を書き CF と結ぶ。AC を E まで延長し CE を AF と同長とし ABC なる半円周を 1、2、3 等のように随意に等分して各点より AC に直交して AF と交わる 1a、2b、3c 等の数線を引く。AF 線内にある a、b、c 等の各点より ACE に平行で FE 線で交差する a9、b8、c7 等の数線を引き FE 線内の 9、8、7 等の各点より CE に直交する数線をして半円周 ABC の 1、2、3 等の数線より ACE に平行な線と a'、b'、c' 等において交差させ この数点を結ぶ。こうして斜架拱の内弧の正面図を得ることができた。

第9义



第2章 寸法及び角度を定める公式を論じる

前章述べた方法により縮尺を大にし充分正確に斜架拱の正面数種を書くに当たり、第7図に示す通り正面における拱石の接合線（詳しく言えば接合曲線の弦である） $a'C$ 、 $b'b'$ 、 $c'c$ 等を延長すると、 R なる一点に集中することを発見した。この発見により正面図の製図をする上で非常に便利になっただけでなく、これによって不正確な図面を正すことが出来るようになった。ここに R という点及び他の重要な公式を数理によって論及するにあたり、以下の略字の意味は次の通りである。

r は 円筒の半径 即ち斜架拱の正断面の半径 第 5 図における BO

e は 円筒の厚さ 即ち拱厚 第 6 図における AA' 又 CC'

θ は 斜架角 即ち通路と拱橋との交差角 第5図における $\angle AEC$

π は 円周率

以上 4 点を既知数としこれによって以下公式を論じる。

以下第 5 図を用いる。

AC は円筒の直径即ち斜架拱正断面の直径で CD は ABC なる半円周に等しい。これを式で示すと次の通り。

$$AC=2r \quad (1)$$

$$CD = \pi r \quad (2)$$

AC, AE, CE 等の長さを求めるため三角関数を用いる (以下みなこれによる)

$$\frac{CE}{AC} = \cot \theta$$

又

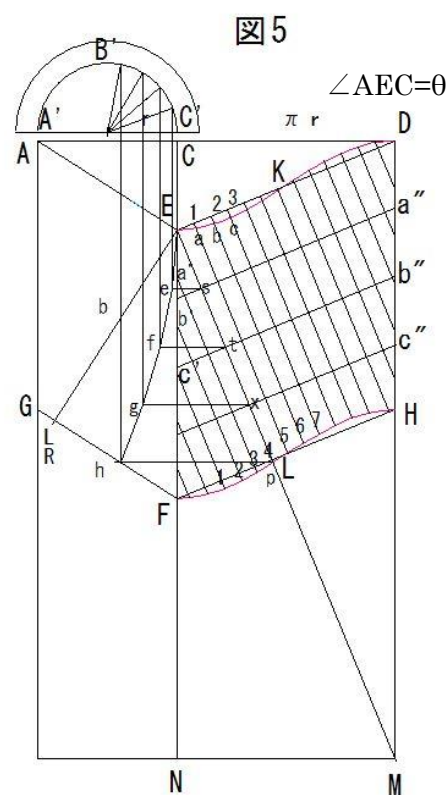
$$\frac{AE}{AC} = \operatorname{cosec} \theta$$

従って以下のようになる。

$$CE=AC \cdot \cot \theta \quad \text{or} \quad 2 r \cdot \cot \theta \quad (3)$$

$$AE = AC \cdot \operatorname{cosec} \theta \quad \text{or} \quad 2r \cdot \operatorname{cosec} \theta \quad (4)$$

$\angle MEN$ は拱基より拱石を積み初める時その内弧において拱基あるいは軸線と拱石との間に生じる角であり普通のアーチ橋にあっては直立線である。ここにこの角の正接を求めるにあたり $\angle MEN$ と $\angle CDE$ が同一であることを証明する。即ち幾何学にお



いて三角の一边を延長するとこの三角と他の一边とこの延長線とがなせる角はこれに相對する二角の和に等しいので $\angle C$ と $\angle CDE$ の和は $\angle DEN$ に等しい。ここで $\angle C$ 及び $\angle DEM$ の二角はそれぞれ直角であるので $\angle CDE$ は $\angle MEN$ に等しい。以下この角を内弧の起拱角と稱す。 $\angle MEN$ あるいは $\angle CDE$ の正接は CE/CD である。(※正接；タンジェント $\tan$) CE 及び CD に(3)及び(2)の式を代入すれば次の通りである。

$$\tan \angle MEN \quad \text{or} \quad \angle CDE = \frac{CE}{CD} = \frac{2rcot\theta}{\pi r} = \frac{cot\theta}{\pi/2} \quad (5)$$

EN の長さは通路と斜架拱の交差角が $\angle AEC$ 即ち θ の時、この半円筒の平面においてその軸線に平行な螺旋状の線を1回転させるに必要な長さである。以下これを軸線の長と稱す。ここにこの長さを求めるのに DCE の三角形と EMN の三角形とは相似形であるので幾何学の相似形三角比例を用いて次のようになる。

$$CE : CD = CD \quad \text{or} \quad MN : EN \quad EN = \frac{CD^2}{CE}$$

CE 及び CD を(3)及び(2)の式を代入すると次のようになる。

$$2rcot\theta : \pi r = \pi r : EN \quad EN = \frac{\pi r \pi r}{2rcot\theta} = \frac{\pi^2 r}{2cot\theta} \quad (6)$$

以下第6図を用いる。

$C'D'$ は半円筒の外面における半円周の長さ $A'B'C'$ に等しい。

これを式で示すと次のようになる。

$$C'D' = \pi(r+e) \quad (7)$$

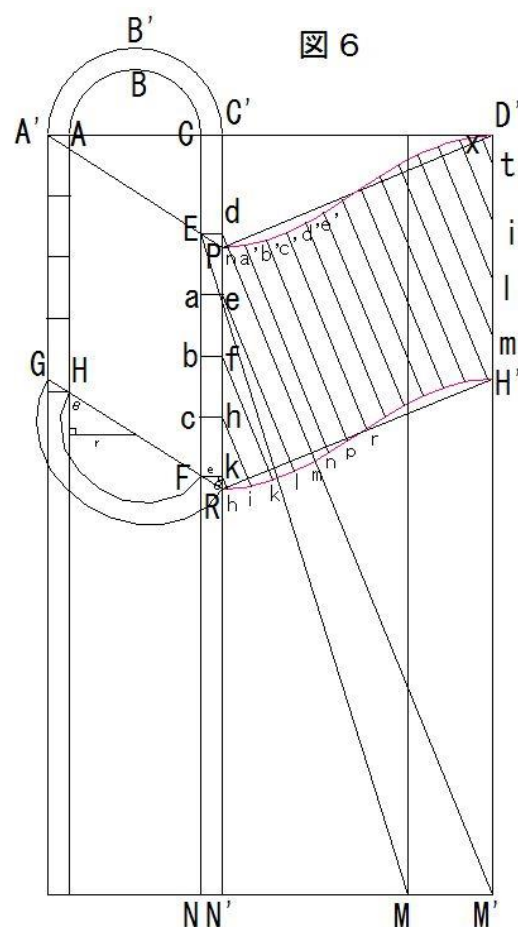
$\angle M'dN'$ は第5図の $\angle MEN$ と内外相對し同一の面より起きている。即ち拱石を積み始めるときその外弧に於いて拱基と拱石との間に生じる角である。以下この角を外弧の起拱角と呼ぶことにする。ここにこの角の正接を求めると

$$\tan \angle M'dN' = \frac{M'N'}{dN'} \quad \text{であるが}$$

その $M'N'$ 及び dN' は $C'D'$ 及び EN と同じ長さなので次のようになる。

$$\tan \angle M'dN' = \frac{C'D'}{EN}$$

$C'D'$ 及び EN に(7)及び(6)の式を代入して次式を得る。



$$\tan \angle M'dN' = \frac{C'D'}{EN} = \frac{\pi(r+e)}{\frac{\pi^2 r}{2 \cot \theta}} = \frac{\pi(r+e) 2 \cot \theta}{\pi^2 r} = \frac{\cot \theta}{\pi/2} \left(\frac{r+e}{r} \right) \quad (8)$$

ここに dP の長さを求めれば $\angle EdP$ において $\frac{dP}{Ed} = \cot \angle EPd$ 。ここで Ed は円筒の厚さ e で $\angle EdP$ は幾何学でいう一線により平行な 2 線を斜めに切ったときの説明と同じである。即ち $\angle aEP$ に等しく又 $\angle aEP$ は $\angle AEC$ と同じで $\angle EPd$ と $\angle AEC$ とは同一である。ゆえに次のようになる。

$$dP = e \cdot \cot \theta \quad (9)$$

$\angle Pd n$ の正接である Pn の長さを求めるのに相似形三角の比例関係によって次の通り。

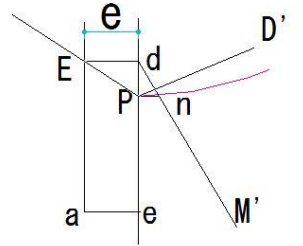
$$dN' \text{ or } EN : N'M' \text{ or } C'D' = dP : Pn \quad Pn = \frac{C'D' \times dP}{EN}$$

EN 、 $C'D'$ 、 dP 等に(6)(7)(9)等の式を代入すると次のようになる。

$$\frac{\pi^2 r}{2 \cot \theta} : \pi(r+e) = e \cdot \cot \theta : Pn$$

$$Pn = \frac{\pi(r+e)e \cdot \cot \theta}{\frac{\pi^2 r}{2 \cot \theta}} = e \cdot \cot \theta \times \frac{\cot \theta}{\pi/2} \left(\frac{r+e}{r} \right) = \frac{\cot^2 \theta}{\pi/2} \left(\frac{re + e^2}{r} \right) \dots\dots(10)$$

式 (10)



以下第 7 図を用いる。

$C'a'$ あるいは $A'a'$ は第 6 図の Pn と同一であるのでその値もまたこの式と同一である。

CO あるいは AO は第 5 図 AE の半数であるので次のようになる。

$$CO \text{ or } AO = r \cdot \operatorname{cosec} \theta \quad (11)$$

$C'C$ あるいは $A'A$ は第 6 図の EP に等しいので

$$\frac{EP}{Ed} = \operatorname{cosec} \theta \quad \text{であるので次のようになる。}$$

$$C'C \text{ or } A'A = Ed \text{ or } e \cdot \operatorname{cosec} \theta \quad (12)$$

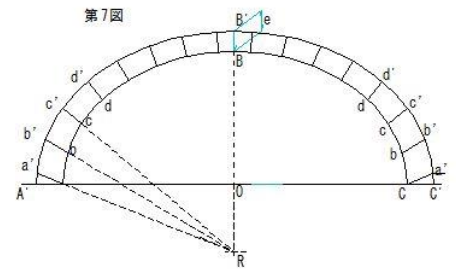
$$(\text{※注} \rightarrow CC' = A'A = Ed \cdot \operatorname{cosec} \theta = e \cdot \operatorname{cosec} \theta)$$

OR の長さを求めるために相似形三角の比例を用い次のように表される。

$$CC' : C'a' = CO : OR \quad OR = \frac{C'a' \times CO}{CC'}$$

CC' 、 $C'a'$ 、 CO 等に (12)(10)(11)等の式を代入すれば次の通り。

$$e \cdot \operatorname{cosec} \theta : \frac{\cot^2 \theta}{\pi/2} \left(\frac{re + e^2}{r} \right) = r \cdot \operatorname{cosec} \theta : OR$$



$$OR = \frac{\frac{\cot \frac{\theta}{2}}{\pi/2} \left(\frac{r+e}{r} \right) r \cdot \operatorname{cosec} \theta}{e \cdot \operatorname{cosec} \theta} = \frac{\cot \theta \times \frac{\cot \theta}{\pi/2} e \frac{r+e}{r} \times r \cdot \operatorname{cosec} \theta}{e \cdot \operatorname{cosec} \theta}$$

$$= \cot \theta \times \frac{\cot \theta}{\pi/2} \left(\frac{r+e}{r} \right) r \quad (13)$$

$$= \frac{\cot \theta}{\pi/2} \times \cot \theta \times (r+e) \quad (14)$$

(13)の式における $\frac{\cot \theta}{\pi/2} \left(\frac{r+e}{r} \right)$ は(8)式で表した通り。外弧の起拱角の正接をもって **OR** は斜架拱正断面の半径に斜架角の余接（※cot）を乗じこれに外弧における起拱角の正接※tan）を乗じたものである。外弧における起拱角 ϕ の正接は次のようになる。

$$OR = r \cdot \cot \theta \cdot \tan \phi \quad (15) \quad \left(\text{※} \tan \phi = \frac{\cot \theta}{\pi/2} \left(\frac{r+e}{r} \right) \right)$$

又、(14)の式における $\frac{\cot \theta}{\pi/2}$ は(5)の式をもって示した通りである。内弧における起拱角の正接をもって **OR** は斜架拱正断面の半径にその厚さを加えたものに斜架角の余接を乗じこれに内弧の起拱角の正接を乗じたものである。内弧の起拱角 β の正接は次のようになる。

$$OR = (r+e) \cot \theta \cdot \tan \beta \quad (16) \quad \left(\text{※} \tan \beta = \frac{\cot \theta}{\pi/2} \right)$$

以上述べた公式は斜架拱がその正断面において半円形をあらわすときに専らこれを用いる。欠円形の場合は以上の公式によらない点がある。

即ち 次に述べる。

(以下※欠円アーチ)

ここで **LM** 及び **MO** は欠円アーチの内面における縦横接合線の一部をあらわし又 **MN** は軸線の長であることは第 5 図において述べた通りである。この公式に使用する略字は次の通り。

r 半円筒の半径 即ち 円周の一部をあらわす欠円
に対する半径

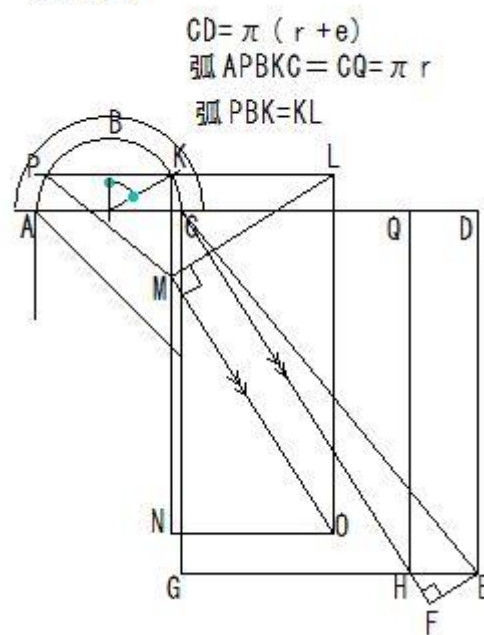
e 拱厚

c 欠円における弦の長さ 即ち アーチ橋の正径間

a 欠円の弧の長さ

 θ 斜架角

(第8圖)



KM は $c \cdot \cot \theta$ である。KL は a に等しいので欠円アーチの内弧における起拱角の正接は

KM を KL で除したものの、即ち $\frac{c}{a} \cot \theta$ である。又 MN なる軸線の長は $\angle KML$ 及び $\angle MNO$ の相似関係より次のようになる。

$$\text{KM} : \text{KL} = \text{KL} \quad \text{or} \quad \text{NO} : \text{MN}$$

これに代わって前式によると次のように表される

$$c \cdot \cot \theta : a = a : \frac{a^2}{c \cdot \cot \theta} \quad (17)$$

半円周 APBKC を描く。CQ は πr なる半円周の展開長である。CH を MO に平行に描き QH の H で交差させる。このとき CG は内弧の軸線の長さある。即ち $\angle NMO$ と $\angle GCH$ は同一であり、欠円アーチの内弧における起拱角により半円アーチがその内弧における螺旋曲線に対する軸線の長 CG を示す。次に CQ を D まで延長する。ここで CD の長さは $\pi(r+e)$ 。また QD の長さは πe である。DE を QH に平行に引き GH を E まで延長して CE を結ぶ。こうして $\angle GCE$ は外弧の起拱角に等しい。又線 CE は欠円アーチの外弧の起拱角によって半円アーチがその外弧の螺旋曲線の展開図を示すものである。こうして軸線の長 CG の値を求めるには $\angle MNO$ 及び $\angle CGH$ の相似関係により次のようになる。

$$\text{NO} : \text{MN} = \text{GH} : \text{GC}$$

これを前式に代えれば次のようになる

$$a : \frac{a^2}{c \cdot \cot \theta} = \pi r : \frac{a r \pi}{c \cdot \cot \theta} \quad (18)$$

EC を CG で除算したものは外弧の起拱角の正接に相当する。これを前式を代入しと次のよ

うになる。

$$\frac{EG}{CG} = \pi(r+e) \div \frac{a\pi}{c \cdot \cot\theta} = \frac{c \cdot \cot\theta}{a} \left(\frac{r+e}{r} \right) \quad (19)$$

上式を半円アーチの公式に応用し第 7 図における A'a' の値を求める。次の通り。

$$e \cdot \cot\theta \times \frac{c \cdot \cot\theta}{a} \left(\frac{r+e}{r} \right) = \frac{c \cdot \cot^2\theta}{a} \left(\frac{re+e^2}{r} \right) \quad (20)$$

又 第 7 図における CO の値は次のようになる。

$$e \cdot \operatorname{cosec}\theta : \frac{c \cdot \cot^2\theta}{a} \left(\frac{re+e^2}{r} \right) = r \cdot \operatorname{cosec}\theta : \frac{c \cdot \cot^2\theta}{a} (r+e) \quad (21)$$

以上の公式によって算出した数によっても直にこれを実地に使用できない。

即ち第 5 図において ED に直交する線分 EM に平行な他の接合線を求めるに及び線 EM が FH の面において都合の良い石割にあたるとは言えない。ことばを換えてこれを言い換えれば線 FP の距離内に並べる石を例えば四段半とか三段四分の三とか言う端数が生じることが多々ある。

このとき線 EM 内の P という点を左右に動かして、この端数を取り除き完全な石割とする必要がある。これより以上述べた式を直に使用できないので若干修正を行う必要がある。ここで修正に必要な式を述べるにあたり、まず拱基の長さ EF 及び内弧における起拱角の開き FP の値を求める。

以下 第 5 図を用いる。

ER を斜架拱の幅 b とし $\angle CDE$ と $\angle FEP$ とは同角でこれを β とする。又 $\angle AEC$ と $\angle EFR$ とは同角であるのでこれを θ とし三角関数（以下これを用いる）を用いる。

ER は b で $\angle EFR$ は θ に等しいのでこれを用いると次のようになる。

$$EF = b \cdot \operatorname{cosec}\theta \quad (22)$$

Fp の長さを求めるのに $\frac{Fp}{EF} = \sin\angle FEP$

ここで、EF は式(22)で表され $\angle FEP$ は β であるので

$$Fp = b \cdot \operatorname{cosec}\theta \cdot \sin\beta \quad (23)$$

ED を等分するがその総数を m とする。ED を m で除算したものはその等分数の一部とな

る。この数で Fp の長さを除算する。即ち $Fp \div \frac{ED}{m} = \frac{m \cdot Fp}{ED}$ で拱石の使用数を整数にしな

いといけない。しかしながら Fp の長さ及び m の数等の都合により Fp を $\frac{ED}{m}$ にて割り切れないことがある。これより前述の p 点を動かす必要が生じる。この点を動かすとき $\frac{ED}{2m}$ より多くてはならない。

このようにして動かした距離を示すのに h とすれば修正した Fp の長さは $Fp \pm h$ となる。
ここで直ちに $\angle Fep$ もまた増減を生じ、軸線の長、外弧の起拱角、第 7 図における OR 等も修正する必要がある。以下、修正改算を行う。

$\angle Fep$ を $\beta 2$ に言い換え修正に必要な事項を述べる。

軸線の長 EN を改算する。三角関数（以下みなこれを用いる）によって次のようになる。

$$\frac{EN}{MN} = \cot \angle MEN \quad EN = MN \cdot \cot \angle MEN$$

MN は CD と同長で $\angle MEN$ と $\angle Fep$ は $\beta 2$ であるので次のようになる。

$$EN = \pi r \cdot \cot \beta 2 \quad (24)$$

以下第 6 図を用いる。

外弧の起拱角 $\angle M'dN'$ を改算する。 $\angle M'dN'$ を ϕ を用いて表すと次の通りである。

$$\tan \phi = \frac{M'N'}{EN}$$

$M'N'$ は $C'D'$ と等しく EN は式(24)である。これを代入すると次のようになる。

$$\tan \phi = \frac{\pi(r+e)}{\pi r \cdot \cot \beta 2} = \frac{r+e}{r \cdot \cot \beta 2} = \frac{r+e}{r} \tan \beta 2 \quad (25)$$

dP は前述の通り $e \cdot \cos \theta$ である。

以下 第 7 図を用いる。

$C'a'$ は第 6 図の Pn と同一である。これを改算して $C'a'$ を求める。次のようになる。

$$\frac{Pn}{dP} = \tan \angle Pdn \text{ or } \tan \phi$$

$$Pn = dP \cdot \tan \phi$$

$$C'a' = e \cdot \cot \theta \cdot \tan \phi \quad (26)$$

OR を改算するのに三角形の相似関係により次のようになる。

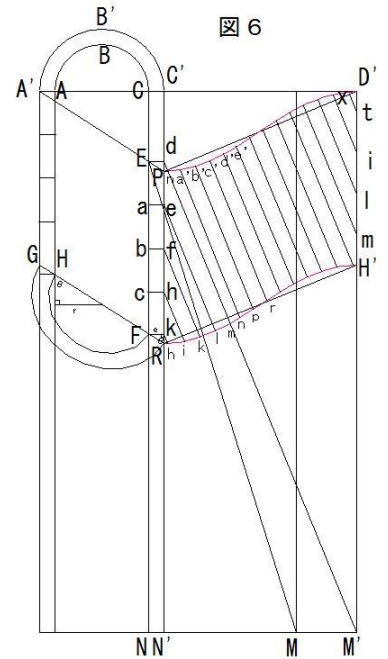
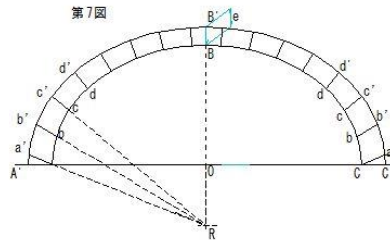
$$CC' : C'a' = CO : OR$$

前述の式を代入してこの比例の値を次のように求める。

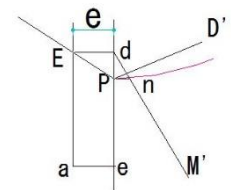
$$e \cdot \operatorname{cosec} \theta : e \cdot \cot \theta \cdot \tan \phi = r \cdot \operatorname{cosec} \theta : OR$$

$$OR = \frac{e \cdot \cot \theta \cdot \tan \phi \times r \cdot \operatorname{cosec} \theta}{e \cdot \operatorname{cosec} \theta} = r \cdot \cot \theta \cdot \tan \phi \quad (27)$$

以上述べた公式をここに再録して使用するのに便利なようにした。



式 (10)



第 5 図 $AC=2r$ (1)

$CD=\pi r$ (2)

$CE=2r \cdot \cot \theta$ (3)

$AE=2r \cdot \operatorname{cosec} \theta$ (4)

$\tan \angle MEN = \frac{\cot \theta}{\pi/2}$ (5)

$EN = \pi^2 r / 2 \cot \theta$ (6)

第 6 図 $C'D' = \pi(r+e)$ (7)

$\tan \angle M'dN' = \frac{\cot \theta}{\pi/2} \left(\frac{r+e}{r} \right)$ (8)

$dP = e \cdot \cot \theta$ (9)

$Pn = \frac{\cot^2 \theta}{\pi/2} \left(\frac{re+e^2}{r} \right)$ (10)

第 7 図 $AO = r \cdot \operatorname{cosec} \theta$ (11)

$A'A = e \cdot \operatorname{cosec} \theta$ (12)

$OR = \cot \theta \times \frac{\cot \theta}{\pi/2} \left(\frac{r+e}{r} \right) \times r$ (13)

$= \frac{\cot \theta}{\pi/2} \times \cot \theta \times (r+e)$ (14)

$= r \cdot \cot \theta \cdot \tan \phi$ (15)

$= (r+e) \cot \theta \cdot \tan \beta$ (16)

第 8 図 $MN = \frac{a^2}{c \cdot \cot \theta}$ (17)

$CG = \frac{a\pi r}{c \cdot \cot \theta}$ (18)

$\tan \angle ECG = \frac{c \cdot \cot \theta}{a} \left(\frac{r+e}{r} \right)$ (19)

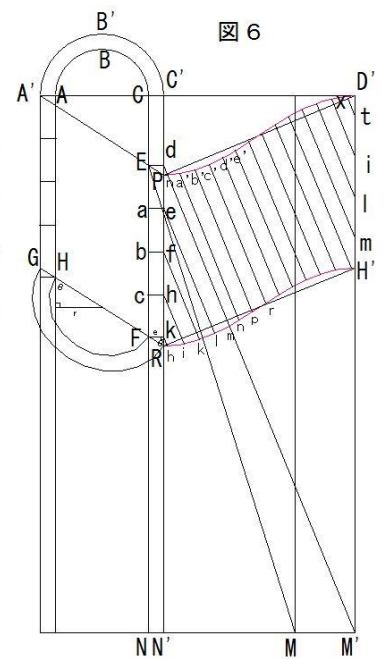
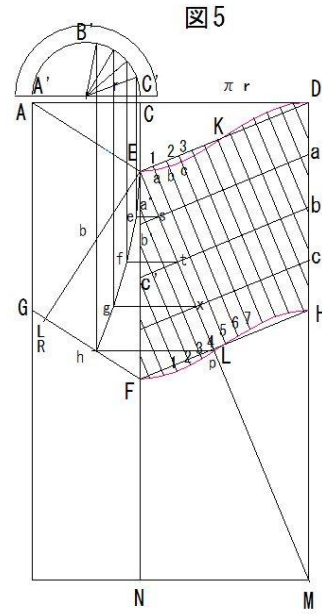
第 7 図 (欠円するとき) $A'a' = \frac{c \cdot \cot^2 \theta}{a} \left(\frac{re+e^2}{r} \right)$ (20)

同 $OR = \frac{c \cdot \cot^2 \theta}{a} (r+e)$ (21)

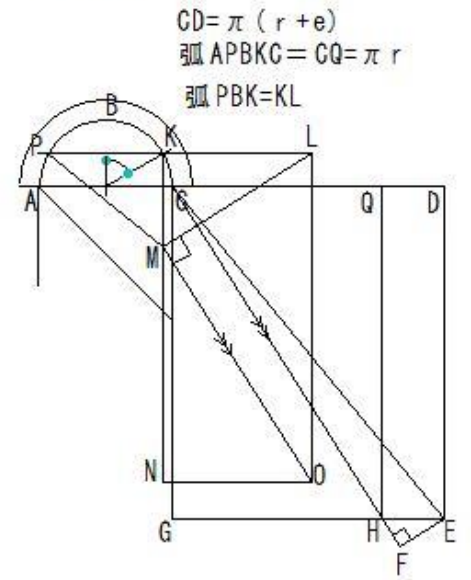
改算を行うのに必要な式

第 5 図 $EF = b \cdot \operatorname{cosec} \theta$ (22)

$Fp = b \cdot \operatorname{cosec} \theta \cdot \sin \beta$ (23)



(第 8 図)



$$EN = \pi r \cdot \cot \beta 2 \quad (24)$$

$$\tan \phi = \frac{r+e}{r} \tan \beta 2 \quad (25)$$

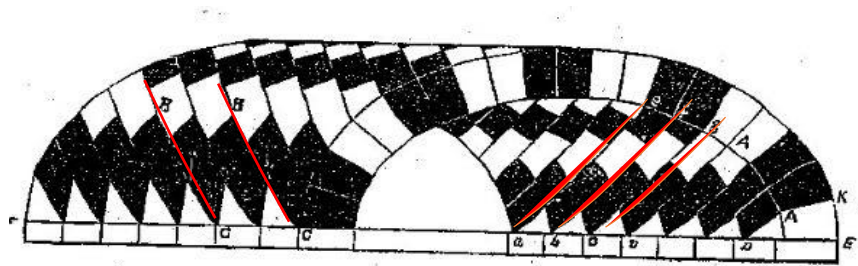
$$Pn = e \cdot \cot \theta \cdot \tan \phi \quad (26)$$

$$\text{第 7 図} \quad OR = r \cdot \cot \theta \cdot \tan \phi \quad (27)$$

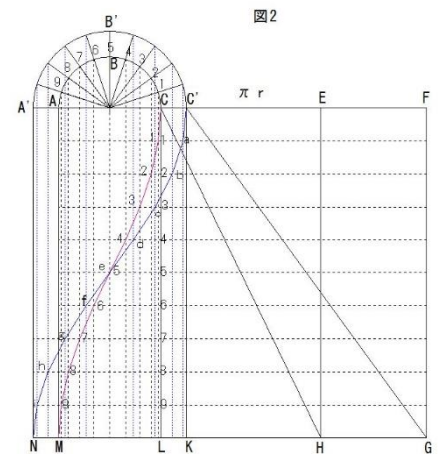
以上 有用性の高い公式について述べたのでこれからは拱石の切り方等を述べる。

第 3 章 拱石の形状を作る方法を論じる

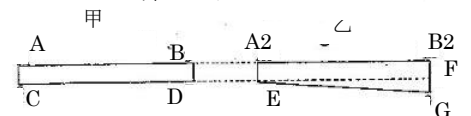
斜架拱に使用する拱石の形を作るのに最も重要なことは、斜架拱の軸線に平行な内外両弧の接合線を得ることである。



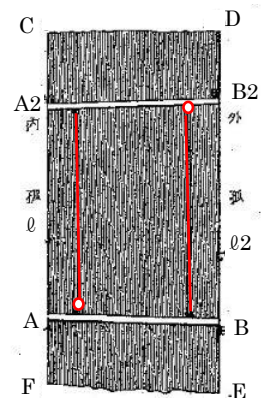
甲 図



第 10 図



第 11 図



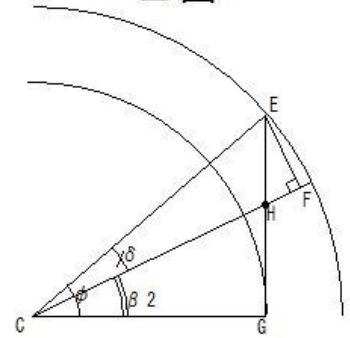
これは第 2 図において螺旋面として示した $CC'NM$ と同一のものであり、そしてその内弧において甲図の ae 、 bf 、 cg 等の線と同じである。各拱石は螺旋状の帯の一部分を構成して接合されて一体となっている。 KAD はその一部を示すもので $\angle ADE$ は内弧の起拱角、 $\angle BCF$ は外弧の起拱角と言う。 KAD の全面の形状を得るには転扭（てんじゅう）定規（ツイステイング・ルール）を使用する。この定規は第 10 図に示すように甲・乙 2 本の木片より成る。甲・乙ともにその長さ AB 、 EF は拱石の厚さ（斜架拱の厚さ）と同じにする。甲の AC 、 BD 及び乙の $A2-E$ はそれぞれ同厚とする。 $B2-F$ の一端の厚さのみ増加させてある。ここで、甲・乙 2 本をあらかじめ算出しておいた一定の距離を空けて並列に並べる。この距離間を変えぬよう a 、 b (※1)は第 11 図のように張り金のようなものにより一端を定規に固定し、他端を既に定規に付けてある輪金物につなぎ合わせるようにすると便利であり又、使用の誤りを防ぐことができる。以下、この距離を求める公式を説明する。

(※1 a,b ; 2 個の定規。既述文では甲・乙の定規のこと。

この先、丙図等で a,b という表記もされる。)

第 8 図において CH 線を内弧、CE 線を外弧における螺線の展開図とする。このとき $\angle GCH$ は内弧の起拱角、 $\angle GCE$ は外弧の起拱角である。そして $\angle ECH$ なる角は内外弧における起拱角の差であり、これがあるために弯曲を生じる。

乙図



いま乙図において CG を半径するとき、CH 及び CE は $\angle GCH$ 及び $\angle GCE$ のセコト(sec)になる。

(※ 訳者 echopapaful による注釈)

(※ $CH = CG / \cos \angle GCH = CG \cdot \sec \angle GCH$ 、
 $CE = CG / \cos \angle GCE = CG \cdot \sec \angle GCE$ 式①)

CH を F まで延長し F 点より CF に直交する FE なる線を引く。
 このとき CF を半径とすれば EF は $\angle ECF$ の tan タンジェントを用いて表される。

(※ $EF = CF \cdot \tan \angle ECF$ 式②)

又 CE を半径とすれば CF は同角の余弦 (※cos コサイン) で表される。

(※ $CF = CE \cdot \cos \angle ECF$ 式③)

上述したことは乙図で示されている。図解を検討をすること。

CH は斜架拱の内弧における接合線をあらわす。その線内において 2 本定規の距離 ℓ を取るとする。するとこれに相当する線を外弧の接合線で示す。即ちこの線を CE 線内に設けるとすればその長さは CH と CE の比で表される。

$\angle GCH$ を $\beta 2$ とし $\angle GCE$ を ϕ 、 $\angle ECH$ を δ とする。

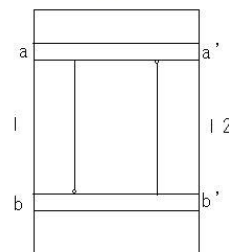
(※式①より $CH = CG \cdot \sec \angle GCH = CG \cdot \sec \beta 2$

$CE = CG \cdot \sec \angle GCE = CG \cdot \sec \phi$)

$$CH : CE = \ell : \frac{\ell \times CE}{CH}$$

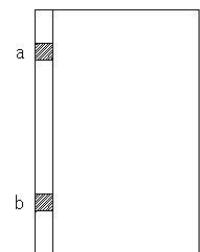
$$\sec \beta 2 : \sec \phi = \ell : \frac{\ell \times \sec \phi}{\sec \beta 2}$$

丙図



※正面図

丁図



※側面図

$\ell \times \sec\varphi / \sec\beta_2$ の値は石材を外弧の接合点に相当するまで

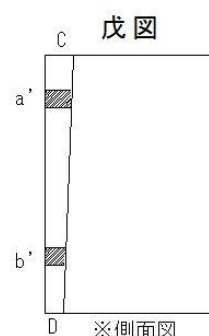
切り終わりとするときの値であるので、これを内弧の接合線と同一の平面即ち 2 本の定規の上端を水平にしたときに用いる数に変更しようとするにはこれに δ の余弦を乗じる。これを ℓ_2 とすれば次のように表される。

$$\ell_2 = \ell \times \sec\varphi \times \cos\delta / \sec\beta_2$$

上記丙図は石材の平面を表すもので、A、B を 2 本の定規とし ℓ を内弧、 ℓ_2 を外弧の長さとする。これを丁図のように側面より見たとき内弧での a、b の厚さは各々同一であるが戊図のように外弧では a' と b' の厚さは異なる。ここで

$\ell \times \sec\varphi / \sec\beta_2$ は CD の値を表し $\ell \times \sec\varphi \times \cos\delta / \sec\beta_2$ は ℓ_2 の値を示す。

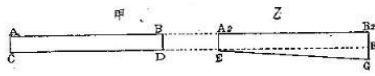
そして a' なる一端の厚さは石材一個に付き弯曲すべき数を示したもののなのでその全体、即ち第 8 図の CF なる長さにおいては EF なる長さだけ弯曲することになる。よってこの厚さを得るにはこの比によるので ℓ_2 に δ の正接を掛ける。



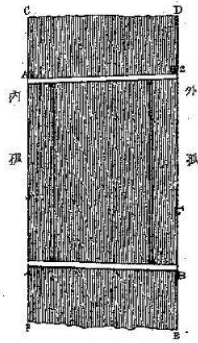
転扭定規を使用する前に ℓ 及び ℓ_2 の間隔距離及び一端の厚さ等を前に掲げた式によって計算し、そののちに第 11 図に示すように第 10 図の AB 及び A2・B2 が水平となるまでその CD 及び EG を石材に掘り込みその上部、水平となった後はこれを取り除きその深さに基づき石材の他の部分をことごとく皆 切り落とす。こうして更にこの定規をもってチェックして切り落とした面に寸分の凸凹なくいずれの部分にも定規が密着することが必要である。

弯曲の面、即ち斜架拱の軸線に平行する一面は前述のようにして得たので、次に斜架拱の内弧の形を石材に移すことを述べる。これにも次のような木形を作ることが必要である。即ち、第 12 図の a、b、c はいずれも円の中心より引いた半径で AB は内弧における円周の一部を有する線を示し BD は拱石の厚さを示す。このように AB 及び BD を連結したもの 2 個を作り第 13 図のように $\angle GCH$ の余角 $\angle CHG$ と同一とする。こうしてこれを使用すること次の通り。

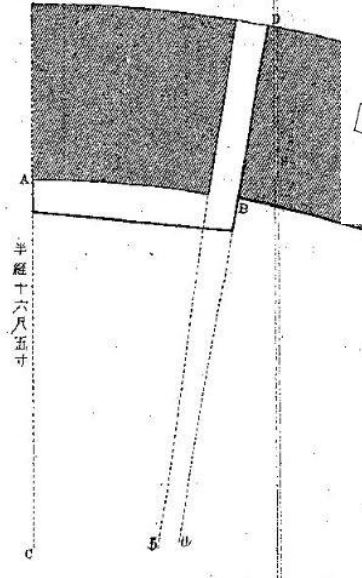
第 10 図



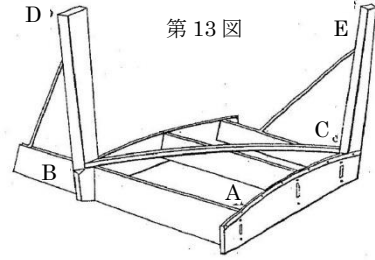
第 11 図



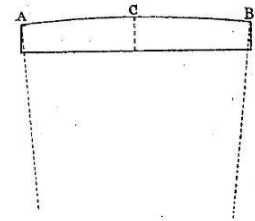
第 12 図



第 13 図



第 15 図



第 14 図の LFDM を斜架拱の内弧に相当する一個の石材を表わす。この上に ABC のように即ち第 13 図の木形を転倒して置く。そのとき CE 及び BD は既に整形した湾曲面に密着させる。

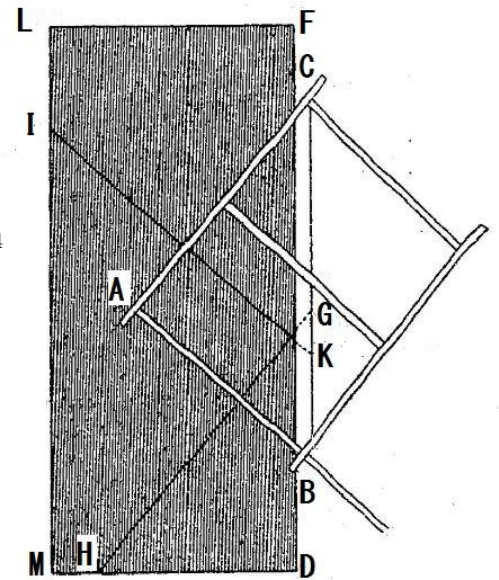
次に AB, AC に沿って石上に 2 線を刻んで掘り下げ、重子(※おもし)をのせて AB、AC を置くに、その上部を水平とし(腕木) CE、BD(※図 13)が湾曲面に密着し、いずれにおいても寸分の隙も生じないようにする。こうして第 13 図の AC と等しい第 15 図のような雛形 2 個を作り、その一つを AC に置き、他を AC に平行する GH に置く。

この GH を AC と同じように石材に切込み、AC、GH の深さに基づき他の部分を切り落とし、いずれの部分も AB に平行する直線定規を当てたときに異常のないようにする。AB は軸線に平行で AC はこれに直交する線を示す。このようにして FD の辺が決まれば、LM は FD に平行になるようにする。こうして第 13 図の木形を回転させて LM に置きその CE 及び BD に従い更に他の湾曲面を作る。

この面は 2 本の定規によって作ったものと寸分の違いのないものが得られる。

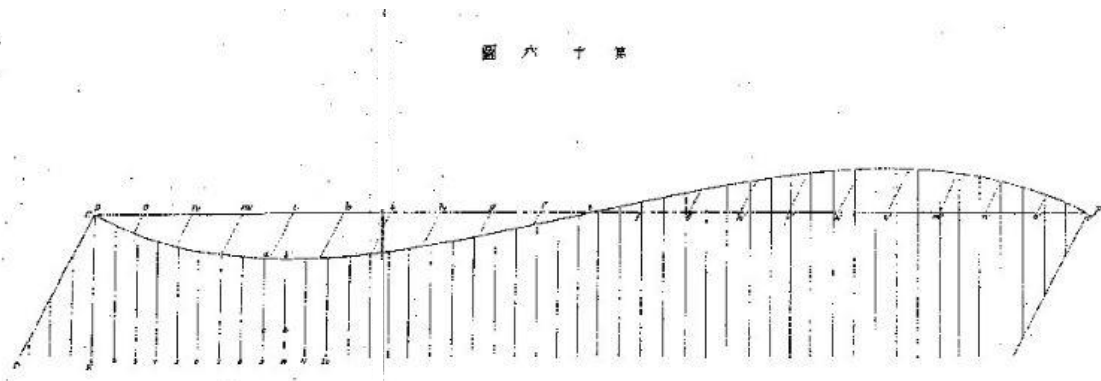
斜架拱の正面に並列すべき石材の他はその終わりを第 14 図の LF、MD 等のように直角に切落とすよう線を引いておき、湾曲面に沿った木形 CE、BD 等により他の線を引く。この

第 14 図



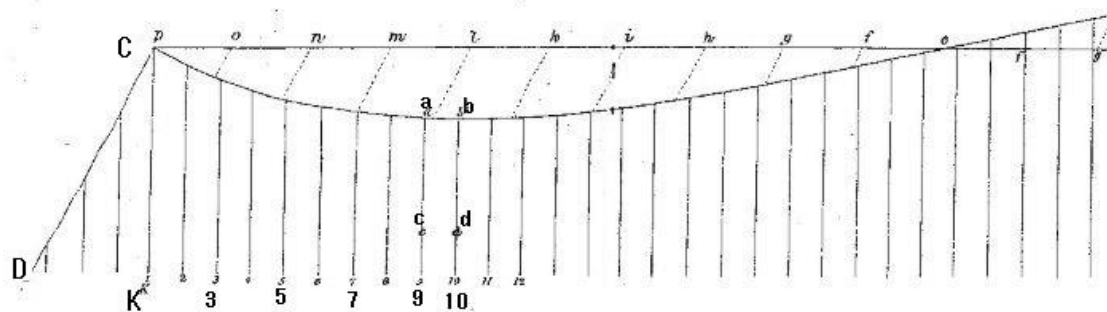
線内において不用の部分直線定規を用いて切り落としこれを接合面とする。

斜架拱の石材切り方において至難なるのは、その正面における石材の形を得ることである。この形が正しくなければ据付けに至ってやむを得ずノミ切りを要することあるが、その成績も又はなほだ宜しくはない。ここにこれを述べるにあたり第 16 図のような原形の展開図を描くことが必要である。



(※拡大図)

図 16

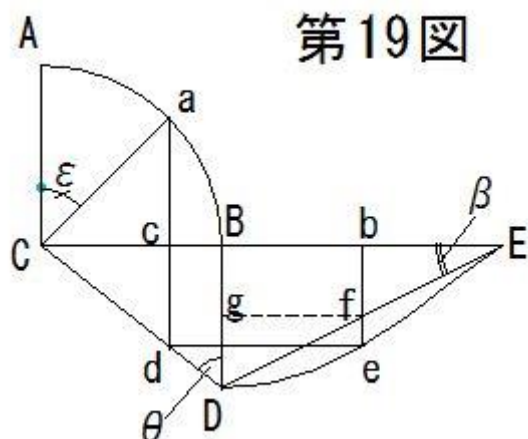


その方法は第 4 図に説明したが図面が大きいので、ここでは縦距(オフセット)によってこれを引く別法を用いる。即ち第 19 図に示す AaB は円周の $1/4$ とし $\angle BDC$ を斜架角とするとき、 DeE の曲線を書く方法を求めるのに AB 及びその展開線 BE を同数に等分する。その等分点の一つを AB においては a とし BE においては b とするとき Aa は正に Eb と同一である。こうして AC を r 、 ACa を ε 、 CDB を θ 、 BED を β とするとき三角関数を用いて fa の値を得る。以下の通りである。

$$Cc=r \cdot \sin \varepsilon \quad cd=r \cdot \sin \varepsilon \cdot \cot \theta =be$$

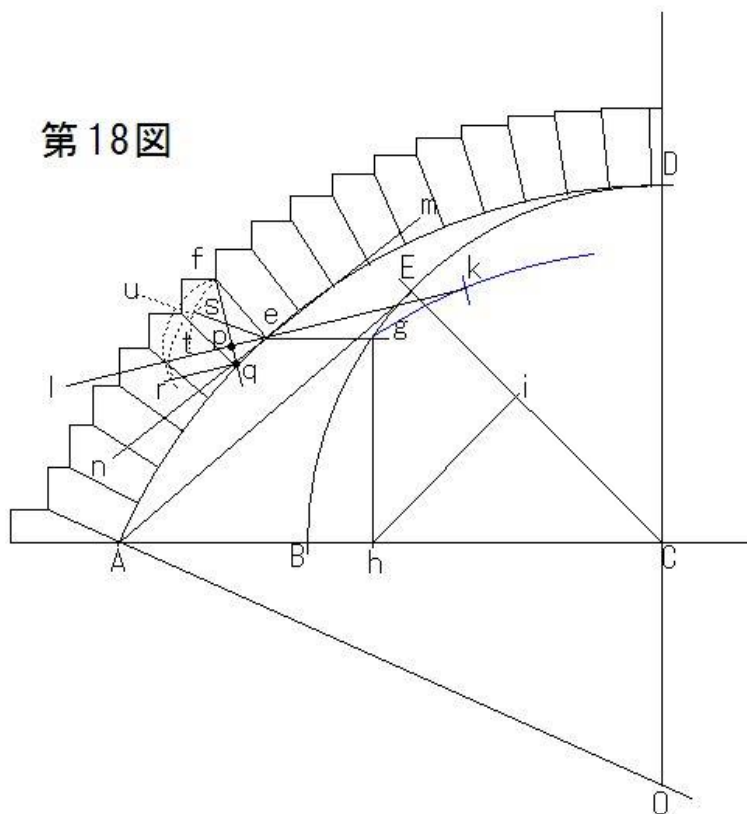
$$Eb \cdot \tan \beta =bf \quad be-bf=fe$$

AB 及び BE の各等分点によりこのようにして fe の値を求める。こうして DE を同数に等分しその等分点のおのおのより $\angle Dfe$ で $\angle BED$ 、即ち内弧の起拱角に等しく数線を引く。この線内において前式によって算出した縦距 fe の各点を連結すると DeE の曲線が得られる。この線は 1/4 円周であるが他の 1/4 もこれと同等の縦距であるから半円周を定めることができる。



上述によって第 16 図を得る。ここにこの図に示すように例えば第 9、第 10 の接合線間における拱石内弧の終点を得ようとするとき、薄い鉄板の類を用いてその形を決める。即ち長さは適当な長さで幅は拱石一列の幅と同一にする。これを ac、bd 等の線に従い abdc なる内弧の上に置きその一端を ab の曲線に等しく切断し、これを既成拱石の内弧に当てがい拱石に ab の曲線を書く。こうしてこれよりこの拱石が斜架拱の正面において表す面を得ようとするとき第 18 図を元にする。即ち原形正面図の半分を書き、ここから正面と内弧とがなす角を割り出す。この方法は以下の通り。

第18図



第 18 図の DC を斜架拱の正半径とし AC を斜径間とする。

半径 CD によって DEB なる 1/4 円を書き、接線 EA 及び半径 EC を描く。

O 点は各接合線の集中する焦点である。

e 点より AC に平行な線を引き弧 DEB との交点を g とする。eg に直角に gh を描く。h より EC に直交するを hi を描く。O 点を中心とし半径 Og で gk なる曲線を描

く。e 点を中心とし hi なる半径をもって gk を k にて切り、kel という線を引く。ここでき $\angle kef$ は正面における線 ef と内弧において軸線に平行する線との間に起こる角である。ところで第 16 図の線 ac は $\angle KCD$ なる内弧における起拱角を有するので(※図 18 の)men なる直線を引き $\angle mek$ を $\angle KCD$ と等しくする。

次に kel に直交し p において kel と交差し、q において men に終わる fpq なる直線を引き qr により kel に平行にする。

p を中心とし pf を半径とし qr 線の r において交差する fr なる曲線、並びに e を中心とし fe を半径とした fut なる曲線、及び q を中心とし qr なる半径をもって fut と u において交差する曲線のおのおのを書く。

u 点より ue を引く。 $\angle uem$ は軸線に平行な接合線の正接と正面接合線との間に生じる鈍角で $\angle uen$ は鋭角である。この men なる直線は e 点において螺旋曲線の接線で石材の長さによってこれに相当する曲度を付ける。以下のようなのである。

軸線に平行な石材の長さを第 17 図の CB とし $\angle DOK$ をその内弧における起拱角とする。

CD に直交する BA を描く。この線は第 20 図の AB と同一である。

第 20 図の Ad あるいは eB の値を求める。第 17 図における $\angle DOK$ を β とし CB を L とすれば $AB = L \cdot \sin \beta$ である。第 18 図の CD を半径とし、これにより第 20 図の ABD という弧線を引き AB を $L \cdot \sin \beta$ と等しくし AC に直交する dB を描く。こうして半円周を πr とすれば次のような比例式が得られる。

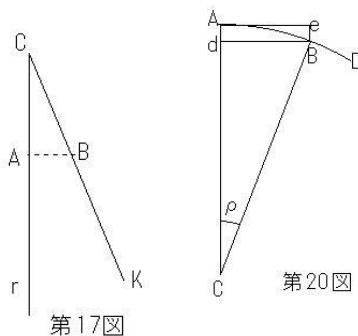
$$\pi : 180^\circ = L \cdot \sin \beta : \angle ACB$$

$\angle ACB$ を $\angle P$ とすれば次の通り。

$$Ad \text{ or } eB = r \cdot \text{versin } \angle P \quad (\text{※versin } \theta = 1 - \cos \theta)$$

このように第 18 図における ev 及び ew の長さをおのおの第 17 図の BC と同長とし vx、wy 等の長さを Ad と同一として yex を結ぶ。 $\angle xeu$ 及び $\angle uey$ は石材の鈍角及び鋭角を示す。この両角は正面の接合線と内弧における接合線との間に生じる角で最も必要なものであるので正面の各接合線においてこれを描いて雛形を作る。

拱石の形を得る手法は以上の通りである。これより実例により公式等の応用を述べる。



$$(\text{※versin } \theta = 1 - \cos \theta \quad \text{正矢という})$$

第4章 公式の応用

施工実例 第1

公道と鉄道と交差する角度が 50 度で公道を架橋するのに次のような半円アーチを設ける。
この半円アーチの寸法、角度等すべて算定すること。

既知数

正径間	33 尺	$2r$
拱橋幅	31 尺	b
拱 厚	2 尺 5 寸	e
斜架角	50 度	θ

(※原書で尺・寸と呷(フィート)、吋(インチ)が混用されている。原書通りとする。尺寸は 10 進法、呷、吋は 12 進法。)
1 尺=303.03mm
1 寸=1/10 尺

第 5 図を用い計算する。次の通り。

$$ED = \text{拱橋幅} = b = 31.000$$

$$AC = \text{正径間} = 33.000$$

$$AE = \text{斜架径間} = (4) = 2r \cdot \operatorname{cosec} \theta = 33 \times 1.3054 = 43.078$$

$$CE = \text{斜歪の長} = (3) = 2r \cdot \cot \theta = 33 \times 0.8391 = 27.690$$

$$CD = \text{半円の長} = (2) = \pi r = 3.1416 \times 16.5 = 51.836$$

$$\tan \angle CDE = \text{内弧における起拱角} = (5) = \frac{\cot \theta}{\pi/2} =$$

$$0.8390996 / 1.5708 = \tan 28^\circ 6' 37'' = \tan \beta$$

$$ED = \text{軸線に直角なる螺旋線の長さ} = \pi r \cdot \sec \beta$$

$$= 51.836 \times 1.1337324 = 58.768$$

正面における露頭拱石の数を 47 個とすれば全拱 47 列となる。従って拱石一列の幅は、

$$58.768 \div 47 = 1.25088$$

$$EF = \text{拱基の長} = (22) = b \cdot \operatorname{cosec} \theta$$

$$= 31 \times 1.3054 = 40.4674$$

$$Fp = \text{内弧における起拱角の開き} = (23) = b \cdot \operatorname{cosec} \theta \sin \beta$$

$$= 40.4674 \times 0.47117 = 19.067$$

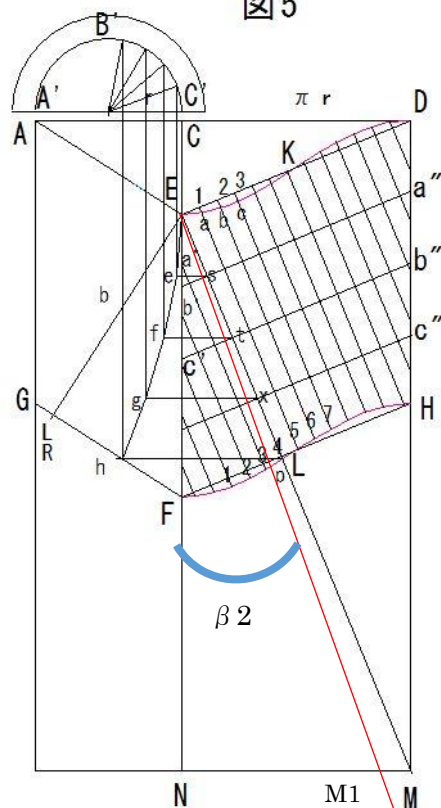
19 尺 067 という値は拱石の幅で割り切れないので 15 個とする。

すると、 $15 \times 1.25038 = 18.7557$ であるので 19 尺 067 に代えて 18 尺 7557 とする。

従って $\angle FEP$ も変更減する必要がある。よって Fp を p 点において F に向けて動かし改算する。次の通り。

$$Fp/EF = (18) = 18.7557 / 40.4674 = 0.4634767 = \sin 27^\circ 36' 42'' = \sin \beta 2$$

図 5



$$\sec \beta \ 2 = 1.1285290$$

$$\text{EN} = \text{改算後の軸線の長} = (24) = \pi r \cdot \cot \beta \cdot 2 = 51.836 \times 1.9118755 = 99.104$$

第 6 図を用いる。

$$M'N'/EN = \tan\varphi = \text{外弧における起拱角の正接} = (25) =$$

$$\pi(r+e)_{/EN} = 3.1416 \ (16.5 + 2.5) / 99.104 =$$

0.6023006

$$\tan \phi = 31^{\circ} \ 3' \ 38''$$

$$\sec \phi = 1.1673753$$

 $\delta = \text{内・外弧における起拱角の差}$

$$= 31^{\circ} \ 3' \ 38'' - 27^{\circ} \ 36' 42'' = 3^{\circ} \ 26' \ 56''$$

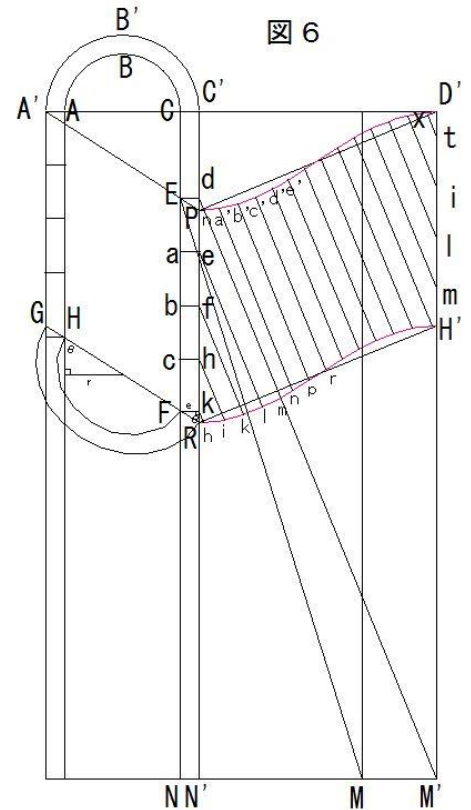
$$\tan \delta = 0.0602505$$

$$\cos \delta = 0.9981889$$

第 7 図を用いる。

$$\text{OR}=(14)=\frac{\cot^2\theta}{\pi/2}(r+e)=\frac{0.8390996^2 \times (16.5 \pm 2.5)}{1.5708}=8.5164$$

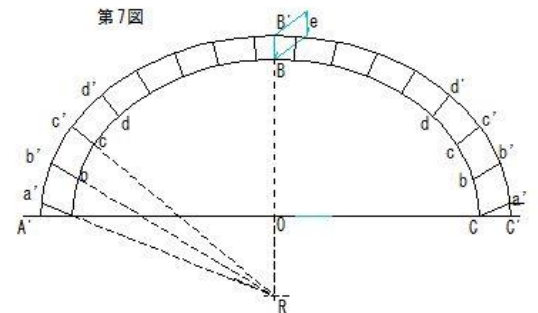
$$\text{OR}=(27)=r \cdot \cot \theta \cdot \tan \phi = 16.5 \times 0.8300996 \times 0.6023006 = 8.3389$$



以上 必要なものの計算をしたのでこれより石材の切り方に使用する転扭定規の計算を行う。この二本定規の長さは円筒の厚さ 即ち拱厚に等しく 2 尺 5 寸としその幅は適当な厚さにするがここでは 3 吋とする。こうして円弧における長さ 即ち l を 3 尺として外弧における数を算する。次の通り。(※3 尺=36 匁=36 吋)

$$\ell_2 = \ell \frac{\sec \varphi \cdot \cos \delta}{\sec \beta_2} = 36 \times \frac{1.16737 \times 0.99818}{1.12853} = 37.17 \text{ 吋}$$

$$\ell_2 \cdot \tan \delta = 37.17 \times 0.06025 = 2.24 \text{ 吋} = \text{FG} \quad (10 \text{ 図乙})$$



ゆえに外弧における長さは 37 吋 17 である。定規の終点の厚さは 3 吋に 2 吋 24 を加えた 5 吋 24 となる。拱石の内弧において軸線に平行し又 直交する線を求めるのに第 21 図に示すような薄鉄板製の三角形を用いるのが良い。その $\angle ABC$ を内弧における起拱角 $\beta 2$ とし、その一辺 AB を 24 吋とすれば、その AC は $24 \times \tan \beta 2 = 24 \times 0.523 = 12$ 吋 55 となる。

これを使用するのに第 14 図のように三角の弦を石材の一边 FD に置き 14 図の $\angle ABC$ と 21 図の $\angle ABC$ と同一なので、この点においては第 13 図の木形を使用するのと同じである。

拱基における石材の数を前に 15 個と定めたが拱基の長さを 15 に分け、これに三角形の石材を列の基底として据えることが必要である。

その内弧における形を定めるのに第 21 図のようなものを用い BC を下方に向け、B 及び C が石材の終点となる。

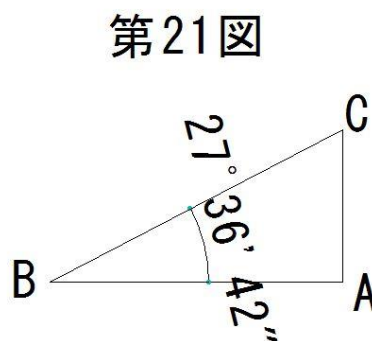
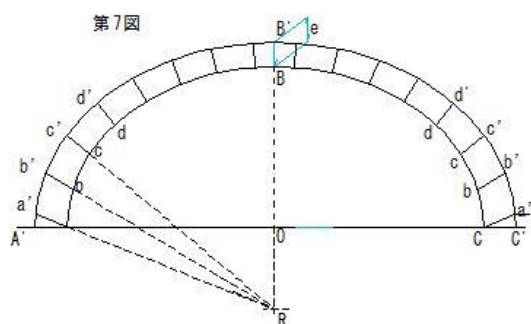
その外弧においても同じく三角形を作りこれを用いるが、この三角形を外弧における起拱角により求める。即ち AC は $24 \times \tan \phi = 24 \times 0.023 = 14$ 吋 45 となる。

この 2 個の三角形を雛形として石材を据える。すると石材の面において相当の彎曲を得ることになる。

正面における第一接合線即ち第 7 図の $A'A$ に据える石材の形を決めるには薄い鉄板の類を第 7 図の $\angle A'Aa'$ と等しく切り $A'A$ 及び Aa' の長さを算定し、これを雛形として用いる。これを算定する。次の通り。

$$AO = \frac{43.078}{2} = 21.539 \quad \frac{OR}{AO} = \frac{8.3389}{21.539} = 0.3871 = \tan \angle A'Aa'$$

$$A'A = e \cdot \operatorname{cosec} \theta = (12) = 2.5 \times 1.3034 = 3.2635$$



$$A'A \times \tan \angle A'Aa' = A'a' = 3.2035 \times 0.3871 = 1.263$$

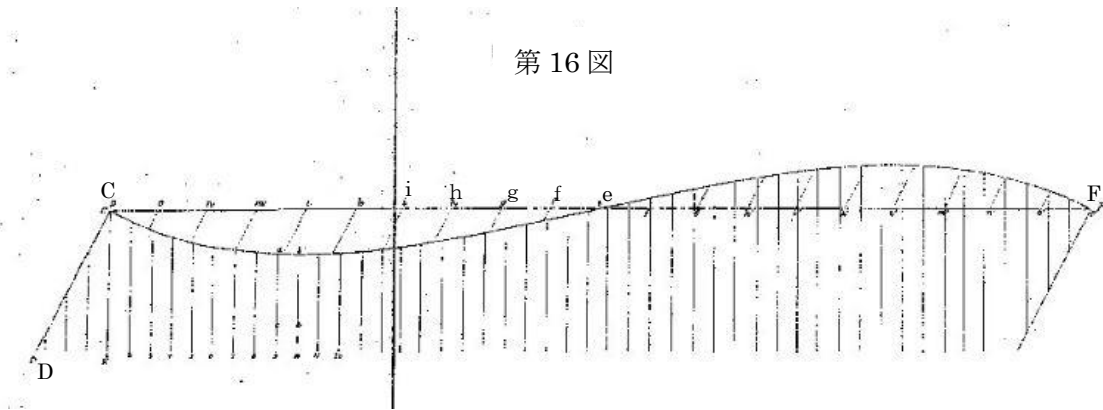
$$A'A = 3.2635$$

$$A'a' = 1.263$$

前章において斜架拱正面の展開図を描く別法を論じた。

今ここに実例によりこれを使用する方法を述べる。

第 16 図



第 16 図に示す線 CF をその展開線の終わりを連結する線分（第 5 図の線 ED に同じ）としこれに縦距を記してその展開図を描く。線 CF は 20 等分しているが、その半数即ち 1/4 円周の長さに等しい線 eC を 10 等分したものの縦距を求めれば足れる。即ち他はこれと同じであるからである。eC を 10 等分して e、f、g、h 等の点を定め、この点より DC に平行する線を引く。後に計算して得る縦距の長さはこの線内において定める。ef、fg、gh 等の長さは各 9 度の角を有する弧線の長さである。

前章に掲げた公式に基づき次表を作る。

Aca 角 或いは ε	仮数 正弦 ε	仮数 半径 $\times$ 余切 θ $\times$ 正弦 ε 又仮数 be	真数 be	真数 bf	縦距 f e 又 be - bf
9	9.1943	0.3356	2.1658 呎	1.3845 呎	0.7818 呎
18	9.4899	0.6313	4.2783	2.7690	1.5093
27	9.6570	0.7983	6.2855	4.1535	2.1320
36	9.7692	0.9105	8.1370	5.5380	2.5999
45	9.8495	0.9908	9.7900	6.9225	2.8675
54	9.9080	1.0492	11.2009	8.3070	2.8939
63	9.950	1.0912	12.3361	9.6915	2.6446
72	9.978	1.1195	13.1675	11.0760	2.0915
81	9.995	1.1359	13.6746	12.4605	1.2141
90	10.000	1.1413	13.8450	13.8450	0.000

表中第 1 欄は 1/4 円周を分割した弧線が有する角を示すもので第 19 図によるときは 90° の 10 等分 即ち 9° であるので、 9° 及びこれに 9° の追加度数を示したものである。

第 2 欄は第 1 欄の度数に対する仮数正弦。

第 3 欄は第 19 図の be に対する仮数を示すもので $\log r + \log \cdot \cot \theta$ なる値を第 2 欄の数に加えて得たものであり次のようになる。

$$\log r = \log 16.5 = 1.2174839$$

$$\log \cdot \cot \theta = \log \cdot \cot 50^\circ = 9.9238135$$

$$\log r \cdot \cot \theta = 1.4412974 \quad (1)$$

$$\log \cdot \sin \varepsilon = 9.1943324$$

$$\log r \cdot \cos \theta \cdot \sin \varepsilon = 0.3356298 \quad (2)$$

即ち(1)を第2欄に示す数の各々に加えて得る。例えば9度に対する値は上式(2)のようになる。

第4欄は第3欄に対する真数をあらわしたものの。

第5欄は次のような数理により得たものである。即ち第19図の1/4円BEを10等分した各点よりBEに直交するbeのような数線を引くと、線EDもまた等分する。これら等分点のおのおのよりBEに平行する数線を引く。BDも10等分する。ここでBDは前に計算した通り27尺69の半数13尺845であるのでBEの各等分点より引いたbfのような数線の長さは13尺845の1/10、2、3等に等しい。これより第5図を作る。第6欄は第4、第5の欄に掲げた数の差で、即ちfeという縦距の長さを示したものである。この縦距により第16図の原形にCeFという展開曲線を書くこともできる。

(※MEMO) 八線表

八表よりなる三角関数表

正弦 ; sin

余弦 ; cos

正切 ; 正接 ; tan

余切、余接 ; cot

正割 ; sec

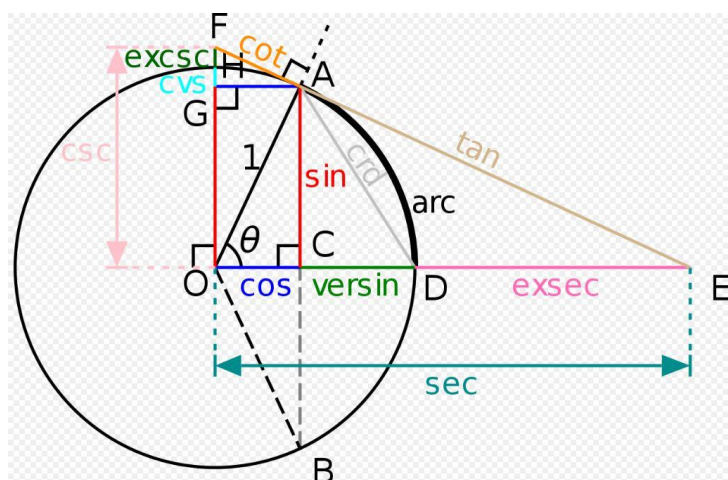
余割 ; cosec

正矢 (せいし) $= 1 - \cos \theta = \text{versin } \theta$

versed sin

余矢 (よし) $= 1 - \sin \theta = \text{CVS } \theta$

cover sin



施工実例 第 2

公道と鉄道が交差する角度が 30 度である欠円アーチを設計する。基本的な部位の寸法、角度を求める。

既知数

半円筒の半径	17 尺 32
拱 厚	3 尺
拱橋幅	31 尺
正径間	30 尺 即ち 欠円アーチの弦

以上をもって計算する。

$$\text{斜径間} = c \cdot \operatorname{cosec} \theta = 30 \times 2.0 = 60.000$$

$$\text{斜歪の長} = c \cdot \cot \theta = 30 \times 1.732 = 51.960$$

$$\begin{aligned} \text{弧線の長 即ち 欠円の長} &= \frac{15}{17.32} = 0.86606508 = \text{欠円の長 半数に対する正弦} \\ &= 60^\circ 0' 10'' \end{aligned}$$

60° 10' を 2 倍した 120° 20' が欠円全長に対する角度である。半径 1 に対するこの角度の弧の長さは 2.0944436 であるから半径 17 尺 32 に対しては次のようになる。

$$2.0944436 \times 17.32 = 36.275$$

第 8 図による。

$$\text{内弧における起拱角 } \tan \beta = \tan \angle KLM = \frac{c \cdot \cot \theta}{a} = \frac{30 \times 17.32}{36.275} = 1.43243 = 55^\circ 4' 9''$$

$$\text{軸線に直角な 螺線の長} = a \cdot \sin \beta = 36.275 \times 1.746459 = 63.352$$

平面における露頭拱石の数を 51 個とすれば全拱 51 列からなる 1 列の幅は次のようになる。

$$63.352 / 51 = 1.2422$$

$$\text{拱基の長} = b \cdot \operatorname{cosec} \theta = 31 \times 2.0 = 62.000$$

$$\text{内弧における起拱角の開き} = b \cdot \operatorname{cosec} \theta \cdot \sin \beta = 31 \times 2 \times 0.8198438 = 50.8303$$

50 呎 8303(※マ)はほとんど拱石 41 個の幅に等しい。よってこれを 41 個と定め起拱角の開きを変更する。次のようになる。

$$41 / 51 \times 63.352 = 50.930$$

50 呎 93 をもって実際の開きとする。これによって第 1 列のように他の値を改算する。

次の通り。

$$50.93 / 62 = 0.8214516 = \sin 55^\circ 13' 49'' = \sin \beta 2$$

$$\tan \beta 2 = 1.4404351$$

$$\sec \beta 2 = 1.7535243$$

$$\text{軸線の長} = a \cdot \cot \beta 2 = 36.275 \times 0.694234 = 25.183$$

$$\begin{aligned}\text{外弧における起拱角の正接} &= \tan \phi = \frac{r+e}{r} \tan \beta 2 = \frac{17.32+3}{17.32} \times 1.4404351 = 1.6899330 \\ &= \tan 59^\circ 23' 7''\end{aligned}$$

内外両弧における起拱角の差 $= \delta = 4^\circ 9' 18''$

$$\tan \delta = 0.0726257$$

$$\cos \delta = 0.9973717$$

第7図による。

$$OR = \frac{c \cdot \cot^2 \theta}{a} (r + e) = \frac{30 \times 17.32^2}{36.275} (17.32 + 3) = 50.414$$

改算したものは

$$OR = r \cdot \cot \theta \cdot \tan \phi = 17.32 \times 2 \times 1.689933 = 50.696$$

転扭定規を作るためにそのおのこの長さを拱厚と等しい3尺とし、2本の間隔を3尺6吋とすると次のようになる。(※1呎=12吋。3尺6吋=42吋)

$$\ell 2 = \ell \frac{\sec \phi \cdot \cos \delta}{\sec \beta 2} = 42 \text{ 吋} \times \frac{1.963 \times 0.997}{1.753} = 46 \text{ 吋 } 87$$

$$\ell 2 \cdot \tan \delta = 46.87 \times 0.0726 = 3 \text{ 吋 } 40$$

拱石の基底及び内弧の角度を定める三角形の雛形はその一边を24吋とすると、これに直交する一边は次の通り。

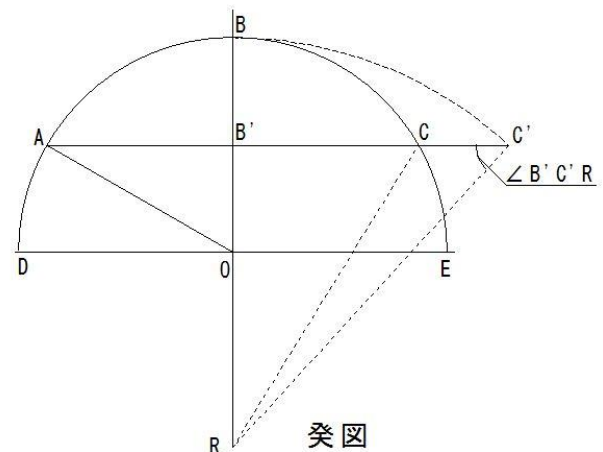
$$24 \times \tan \beta 2 = 24 \times 1.44 = 34 \text{ 吋 } 56$$

欠円アーチにおいてもその正面における第一の接合線を定めるには第1例によって示された第7図の $\angle A'Aa'$ の正接を求め他の数を計算する。しかし半円アーチのように直にそのAOをORで除すことができないので次のように考える。

癸図のOを中心としDEを直径として半円DABCEを書きAB'Cを引き、これを欠円ABCの弦とする。このとき $\angle AOB$ に対してAB'は正弦(※sin)、B'Oは余弦(※cos)、B'Bは正矢(せいし; $1 - \cos \theta$)に相当する。又ORは式(21)により計算しその長さを定める。こうしてRは正面の各接合線の集中する焦点である。

B'CでB'Rを除すとき $\angle B'CR$ の正接(※tan)を得る。ところがB'Rは右図よりORを加えBB'を減せしものにてORに半径を加えたものである。(※ $B'R = OR + OB - BB'$)

正矢を減したるものに同じ。この図は正断面



を示したものであるがこれを欠円アーチの正面に引き B'C'をもってその斜径間の半分とするときにおいても OR 及び BB'の値を変えることはないので第 7 図の∠A'Aa'を得るには OR に半径を加えたものにより正矢を減しこれを斜径間長の半分にて除算する。式をもって示すと次のようになる。

$$\tan \angle B'C'R = \frac{OR + OB - BB'}{B'C'}$$

第 1 例に示された方法によって縦距により展開曲線を描くのに次表を用いる。

Aca 角 或いは ε	仮数 正弦 ε	仮数 半径 × 余切 θ × 正弦 ε 又仮数 be	真数 be	真数 bf	縦距 f e 又 be - bf
6	9.0192	0.4963	3.1357	2.5978	0.5379
12	9.3179	0.7950	6.2371	5.1956	1.0415
18	9.490	0.9670	9.2702	7.7934※	1.4768
24	9.609	1.0864	12.2017	10.3912	1.8105
30	9.699	1.1761	14.9995	12.9890	2.0105
36	9.769	1.2463	17.6330	15.5868	2.0472
42	9.825	1.3026	20.0733	18.1846	1.8887
48	9.871	1.3482	22.2937	20.7824	1.5113
54	9.908	1.3850	24.2698	23.3802	0.8896
60	9.938	1.4146	25.9800	25.9780	0.0020
60° 0'10"	9.938	1.4146	25.9800	25.9800	0.0000

(※原書 1.7934)

第 1 欄は欠円の半分を支える 60 度 10 秒に対し、計算する上で便宜的に 10 秒を切り捨て 60° とする。この 10 秒に対する長さを斜歪の半長 25 呎 98 から減じて 25 尺 978 とするの
で 60° の 10 分の 1 即ち 6° 及びその追加数を示すものである。

$$\log r = \log 17.32 = 1.2385470$$

$$\log \cdot \cot \theta = \log 30^\circ = 10.2385906(\text{※マ})$$

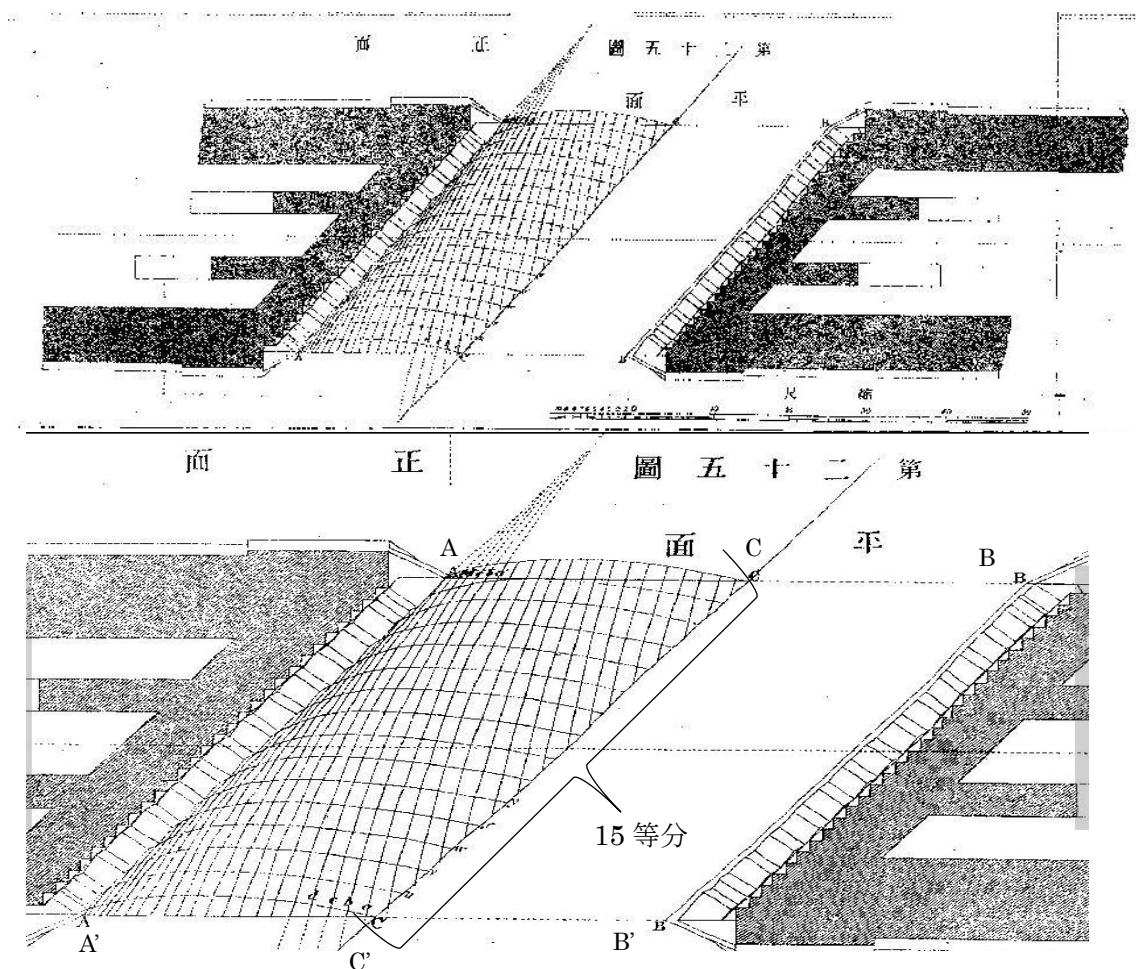
$$\log r \cdot \cot \theta = 1.4771085$$

その他すべて第 1 例と同様なので以下省略する。

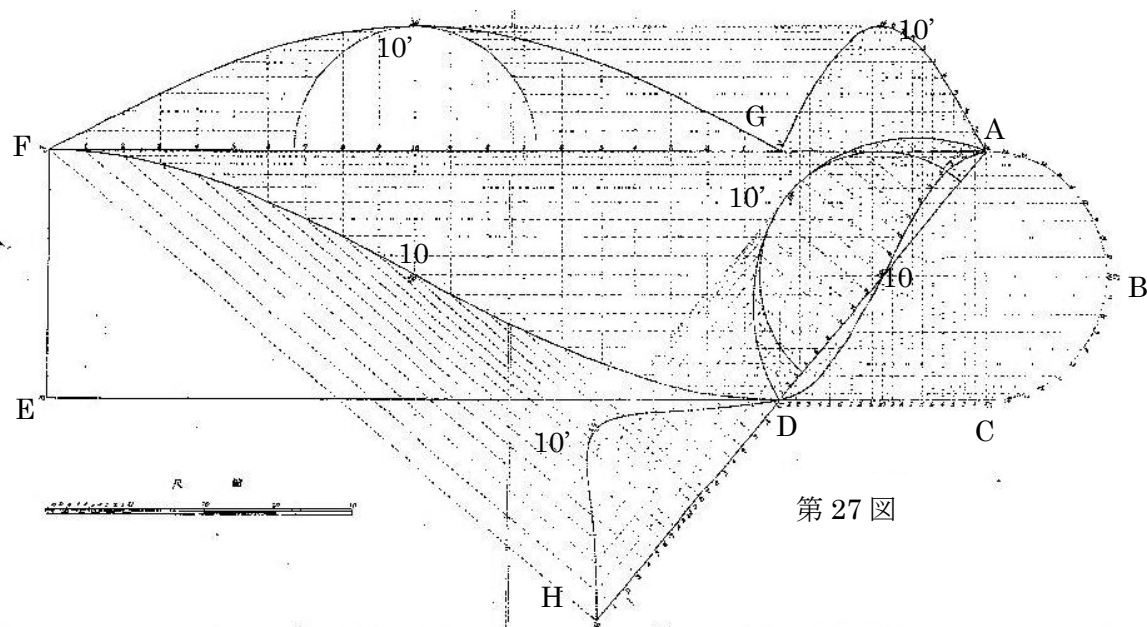
第5章 架 拱 方 法

拱石を積み立てるために内面の石材接合線の位置を明示して、これによって施工する。即ち 拱基が仕上がったあと、これに作業架台（セントレ）を組み立て 板あるいは角材でその外面を張り、ここに斜架拱内面の接合線を書く。第 25 図はこの方法により作成したものである。ここにその明細を述べる。

AB 及び A'B' は斜架拱の前面・後面に平行な線で平面図にあっては直線である。この 2 線を作業架台（セントレ）の外面に描きその中央点 CC' を求める。こうして既に石割のとき定めた拱石の列数により拱基の長及び中央線を分割する。（第 25 図は 15 等分した）こうして軸線に直角を表す曲線を書くには適当な厚さと幅を有する直線定規を作り、拱基の A より枢石（※要石）の中央点 O' に渡し、この間を使用拱石と同数に分けこれを定規にマーキングする。そして定規の一端を拱基の第一点、他端を枢石（要石）の中心点におき、この 2 点を結ぶと同時に既に定規にマーキングした拱石の分合点に従い a、b、c 等のようにこれらを作業架台（セントレ）の外面に書く。



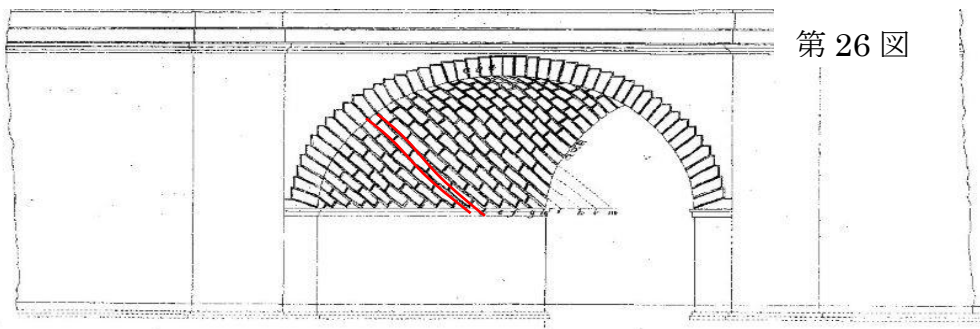
板を敷いた弧状の作業架台（ヤントレ）と切石



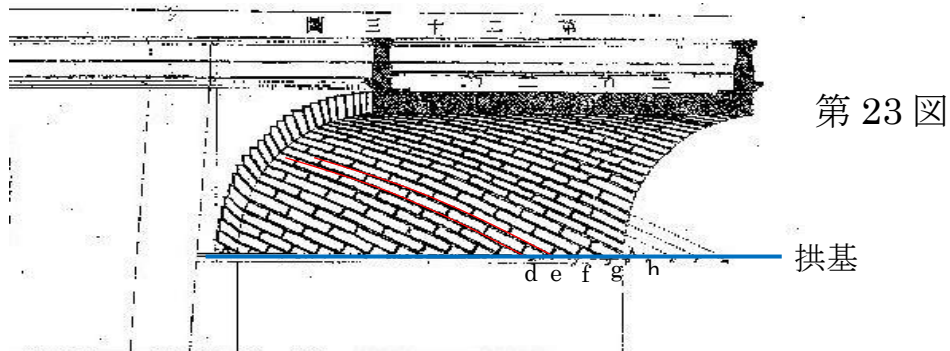
第 27 図

合線を軸線と直角な面に集めたものであるので正面を描くにあたり内弧における縦横接合線の雛形に用いる。F10'G 及び A10'G の曲線は軸線に平行して F10D 及び A10D を見たものである。第1例に述べた図面を製図するときこの雛形を次のように使用する。

第25図はその平面図にして層状接合線（コーシングジョイント）を書くのに第27図の曲線 F10D を雛形にする。この曲線の一端 F を拱基あるいはこれを延長したものの一端に置き他端 D を相対する拱基の一端に置き順次これを結ぶ。第25図はその半分を書いたものでその方法は既に第3図において示したものと同一である。又、その露頭接合線（ヘディングジョイント）は A10D なる曲線の雛形を用い前の方法と同じく、その一端 A 他端 D を拱基の一端から相対する拱基の一端に順次結んでいく。このとき、この2線の交差点はいずれにおいても直角である。即ち縦横接合線を得ることとなる。その正面の層状接合線は第27図の DH を基底として立つ曲線で、雛形を作り第26図のようにその一端 D を拱基あるいはこれを延長した分割点の一つに置き、順次これを書く。又、これに直角を示す接合線は DA を基底として立つ曲線によって雛形を作り、これによって書く。第26図を参照のこと。



円筒の軸線に平行に要石の中央より切断した縦断面図において層状接合線を書くのに第27図の F10'G の曲線を用い、その基底 FG を拱基におきその一端を第23図に示す d、e、f、g 等の点を結んでいく。その露頭接合線は G10'A によって雛形を作り基底 GA を拱基におき順次線を引いていく。第23図となる。



斜架拱付録

次に記するものはバアロー氏が論述した斜架拱で必要とする総ての寸法及び角度等を簡易的に算定する方法である。

斜架拱建築用図表の説明（※図表別紙）

斜架拱建設についてはその原理及び公式等は充分研究されたものもあるが現場において直に使用できるものは少ない。バック氏が著述したものはその理論及び実地施工法等において他に卓越するものであると評されている。しかし、その細目の寸法等は全て三角関数等によって作られた公式を用いるので現場を監督する者が三角関数等を理解できていなければ、これを使用することはできない。又、他に幾何学より種々の公式を論じたものもあるが、その説くところはなほだ繁雑であるので、これをよく読みよく理解する者は誠に少ない。ここに斜架拱の図表を著すのはこの種の繁雑性を避け単純な方法によって乗数を得られるようにし、これによって斜架角 30 度から 90 度に至る総ての寸法・雛形等が得られるようにした。この方法はみな三角関数等によって得た正弦、余弦等の値を縮尺した寸法を計ることでその値が得られるように作られている。下 3 位迄読みとれる。

転扭定規の作り方、正面及び内弧における接合線等は調整したものによらず単に理論より得た内弧の起拱角によって得るものとしたので調整する手数を省いたが、これにより実地において大きな誤差を生じることはない。

ただし、起拱石においてやや変更を必要とすることもあるので、これのみはその調整した数をも合わせて得ることができるようにした。

第 1 図の図表において lc 及び lh という 2 線においてこれに関する角度に対し D 及び F 欄においてその長さを数字で示している。又、その右方において精密な縦横線を設けたいのであればこれによって他の尺度を用い直に所要の数を読みとればよい。

図表の用法

斜架拱の正径間、拱矢、拱厚、橋幅、斜架角等を既知数として呎及びその分数により（大差なければ尺寸とする）第 1 図の図表により他の寸法を次のようにして計る。

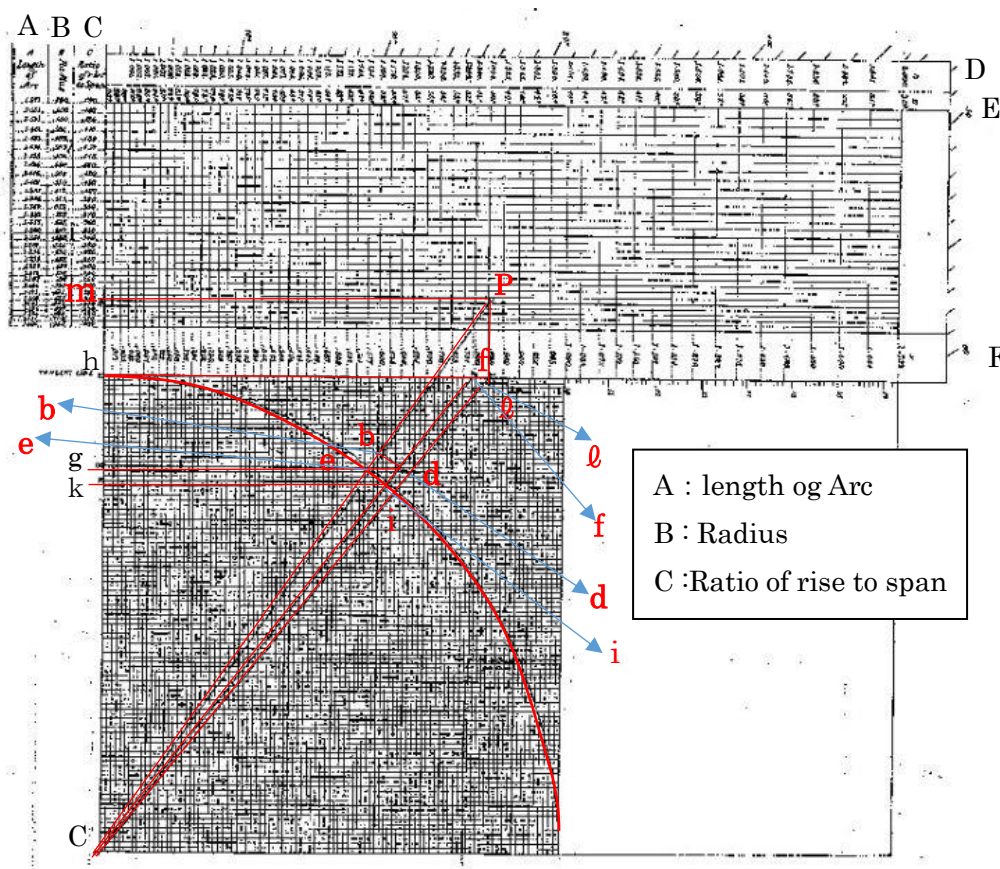
拱矢を正径間で除した数を C 欄で求める。その求めた数に対し B 欄の数値に正径間を乗じたものが斜架拱の半径である。直立欄 E は斜架角で、これに対する水平線が拱矢を正径間で除した数に対して直立線との交差を p と名づける。この p より次のようにしてその他の寸法を得る。

斜架拱の用材ことごとく皆 煉瓦であるとき p と c を結び、弧線との交点 e 点より垂線 eg

そして、次式による。

$$\text{橋幅} \times \ell_{\mathbf{c}} = \text{拱基の長}$$

斜架拱の用材が全て切石か或いはその正面のみ切石であるとき **pc** を連結して弧線の **e** 点で交差させこの点より垂線 **eg** を引き、これを **d** まで延長する。**ge** に対する **gd** の比は半径に対する半径に拱厚を加えたものの比とする。**pc** に直角な **db** を引き **d** と **c** を結び、次に **f** まで延長して、弧線と交差する **i** 点より垂線 **ik** を引く。又、**p** 点より **pℓ** を水平（※下図では縦線）に引き（※**h** の）正接線との交点を **ℓ** とする。こうして **ℓ** と **c** を結び縮尺で所要の長さを測る。



■斜架拱の正面における拱石の雛形

斜架拱の正面における拱石の正面とその内弧における面との間に生じる角度を求める。次の通りである。

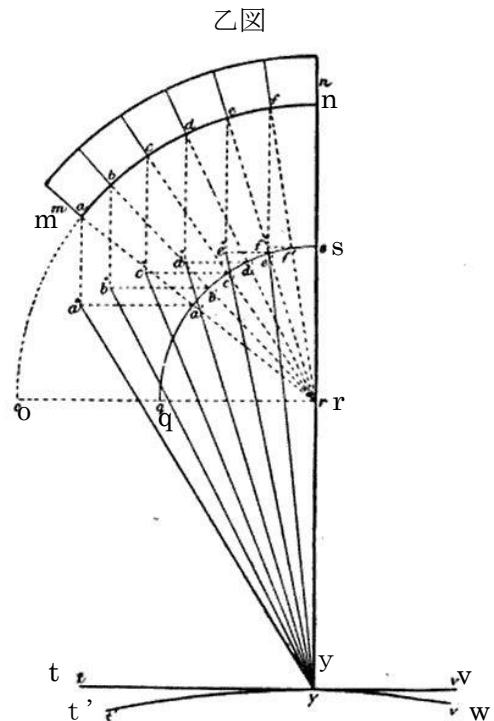
乙図の mn を斜架拱正断面の半分とし or をその半径とする。rs を半径に ki を乗じた長さとする。この長さで qs という円を書き nr を y に延長すると ry の長さは次の通りである。

$$ry = \text{半径} \times \frac{ki}{\ell h \times hf} \quad (\text{※原本 } hf \text{ でなく } fh)$$

a、b、c 等の点より中心 r に向けて数線を引くと qs という円と a'、b'、c' 等において交差する。この交点のそれぞれより水平線を引き a、b、c 等からも垂線を引き、その交点を a''、b''、c'' 等とする。この各交点と y を連結する。こうして内弧における螺旋の半径により t' y w という円を書き y 点を通して正接線 tv を引く。

y における角は即ち求める角である。

内弧の雛形を大きくして縦横交接線の展開図を描きこれを得るか或いは架拱の際、セントレ上に引いた縦横接合線よりこれを得る。



例

第 1 図の図表に示すように pc、dg 等は正径間 30 尺、拱矢 7 尺 5 寸、拱厚 2 尺、橋幅 20 尺、斜架角 50 度の斜架拱である。その所要の数を得る。次の通り。

拱矢を正径間にて除した値は $\frac{7.5}{30} = 0.250$ である。この 0.250 を C 欄で求めるとこれに対する数は 0.625 である。この 0.625 に 30 尺を乗じて 18 尺 7 寸 5 分を得る。即ち半径である。P という点を定め、前に述べた方法に従い総ての線を計る。次の通り。

$$pc = 1.430$$

$$be = 0.037$$

$$bd = 0.051$$

$$\ell h = 0.839 \quad \text{F 欄}$$

$$\ell c = 1.305 \quad \text{D 欄}$$

$$hf = 0.802 \quad \text{縦横線により直に読み取る}$$

$$ge = 0.586 \quad \text{同上}$$

$$ki = 0.624 \quad \text{同上}$$

正径間 $\times \ell c = 30 \times 1.305 = 39.15 = \text{斜径間}$
 橋幅 $\times \ell c = 20 \times 1.305 = 26.10 = \text{拱基の長}$
 正径間 $\times pc = 30 \times 1.430 = 42.90 = \text{露頭曲線の長}$
 33 個の拱石の全列とする。このとき
 $42.9 / 33 = 1.3 = \text{正しい一列の幅}$
 $1.3 / 0.586 = 2.22 = (\text{近似}) \text{起拱石の長}$
 この長によって起拱石の数を 12 個とする。このとき
 $26.10 / 12 = 2.175 = \text{正確な起拱石の長}$

■ 転扭定規

この定規 2 本の距離を内弧において 30 吋とすると、次のような値を得る。

$D \times be = 30 \times 0.037 = 1.11 = \text{外弧における増距離}$
 $D \times bd = 30 \times 0.051 = 1.53 = \text{定規の一端での厚さの増分}$
 $\text{半径} \div ge^2 = 18.75 / 0.586 \times 0.586 = 546 = \text{内弧における螺旋の半径}$
 $\text{半径} \times \ell h \times hf = 18.75 \times 0.839 \times 0.802 = 12.62 = \text{側心半径}$

■ 斜架拱の正面における拱石の雛形

$or = \text{半径} = 18.75$
 $rs = \text{半径} \times ki = 18.75 \times 0.624 = 11.7$
 $ry = (\text{半径} \times ki) \div (\ell h \times hf) = \frac{18.75 \times 0.624}{0.839 \times 0.802} = 17.38$

以上

(※原書ではこのあと、図表類が記載されているが本書では既に文脈の脇に移動させた)

