Ⅷ－16　石拱拱環厚の設計推定式について

九州共立大学工学部　正会員　加賀美一二三
同　○学生会員　松尾善騎

緒言　長径間スパン(高次曲線の拱環軸の場合)の石拱は，現在は力学的安定上や経済上から殆んど用いられていない。それは19世紀末葉よりの鉄筋コンクリート造，20世紀初葉よりのプレストレストコンクリート構造の実用化時代に入ったためである。しかしながらスパン10m程度以下の円曲線構造はトンネル，各種地下構造，また建築構造など欠くことのできない構造方式であり，世紀前より構造技術として建築分野に取入られ，優ぐれた構造美として利用されてきたが，漸く1860年代始めて力学的成果を得て静力学的構造設計がなされ，爾来120年の歳月を経ている。石拱の理論は拱環内の圧力線理論であり，多くの資料に基き技術面並びに理論面に寄与してきたのであるが，設計上の基礎的分野において解明されなければならないものとして，設計当初における拱環厚の推定の問題，拱環構造の設計の領域に関する力学的安定条件を満すための拱頂推力の決定についての究明であるといえる。すなわち，極めて古くしてまた新しい考察の課題であり，より確実な基礎の究明のなさるべきテーマといえる。

石拱厚の推定式についての考察　本文は石拱拱環厚について述べるものであり，図-1のような実用的円弧アーチ，3心，4心アーチおよび上下半円構造構造とみなす円形断面の場合の拱環厚，tの考察である。既発表の代表的と思われる諸式の一部を例示すると

$$\text{Perronet} \sim t=0.33+0.35l, \quad \text{Dejardin} \sim t=0.30+0.045l$$

$$\text{Trautwine} \sim t=0.138\sqrt{\rho+0.5l}+0.061, \quad \text{Desoyers} \sim t=0.15+0.176\sqrt{l}.,$$

$$\text{Rankine} \sim \left.\begin{array}{ll} \text{一般式}, & t=0.191\sqrt{r}, \\ \text{硬土中}, & t=0.191\sqrt{r^2/l} \\ \text{軟土中}, & t=0.382\sqrt{r^2/l} \end{array}\right\}$$

$$\text{Tolkmit} \sim \quad t=\frac{0.15l^2/r\,(u+p/2+r/10)}{\sigma_0-0.15l^2/r}$$

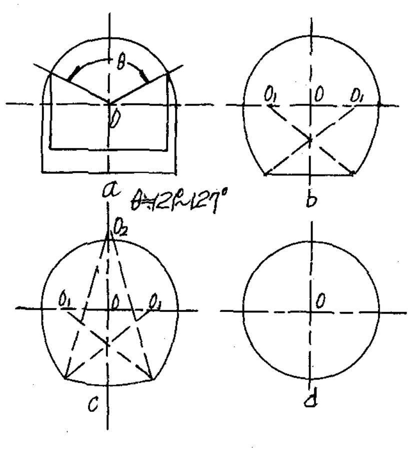

図-1 円弧アーチ，3心，4心アーチおよび円形断面拱環軸関係

上式中，l=スパン長，r=アーチ矢，ρ=拱環軸の曲率半径，p=GL上の単位面荷重，u=拱環上の土壌の荷重換算高，σ_0=拱環材料の許容応力度

大部分の式がlについての実験式，Tolkmitの式は計算結果が技術上納得できない桁違いの値となる。

いま，図えについて拱環厚の理論式の誘導について述べる。図示中の上円弧拱環軸の任意点の曲げモーメント，M_φ(1)は

$$M_\varphi=\left(1-\frac{p}{g}\right)\left(M_c-g\frac{r^2}{2}\cos^2\varphi\right) \qquad (1)$$

式中，pは土圧力度で，グランドアーチ高さをh，土壌の単位容積の重量をw，土壌の安息角(ランキン式)をφとすると　$p=wh(1-\sin\varphi)/(1+\sin\varphi)$，$g$は鉛直荷重で単位面積当り$wh$である。石拱築構が多く土壌の割合に軟弱の場合は$\varphi$が25°程度，粘土相当圧密，半硬の場合は40°程度に考えられ，したがって式中の土圧係数は0.404～0.229となり，鉛直荷重，gとの関係は $p/g\sim0.32/1$，$g=p/0.32\fallingdotseq3.1p$ の概値の関係が成りたつ。(1)式中のφがB点を頂点として切くとすれば，M_φ式中のφは0となる。ゆえに，M_φはM_Aとなり

g, p 荷重を受けた場合, 拱環軸中最大の曲げモーメント値となる。すなわち,

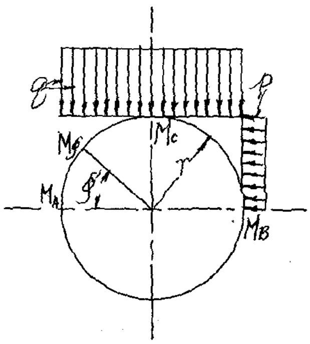

図-2 拱環に働く g, p の分布様相

$$M_A = -\left(1-\frac{p}{g}\right)\left(\frac{gr^2}{4}-\frac{gr^2}{2}\right)$$

$$\therefore M_A = \left(1-\frac{p}{g}\right)\frac{gr^2}{4} \qquad (2)$$

(2)式中の g に $3.1p$ を代入し, $r=l/2$ とすると

$$M_A = 0.131\,pl^2 \qquad (2')$$

さて, A点には断面に鉛直方向に $gl/2$ の圧縮力が働くが, この種構造材料を使用した構造に対しては合成応力度でなく, 曲げ応力度に関して考慮すればよいとの考えに基づいて設計式を求める。

一般の曲げ応力の式を考えると

$$\sigma_{ca} = M_A y/I,\quad I = \frac{t^3}{12},\quad y = \frac{t}{2}$$

$$t = \sqrt{6M_A/\sigma_{ca}} \qquad (3)$$

(3)式中の M_A に $0.131pl^2$ を代入すると

$$t = \sqrt{0.786\frac{pl^2}{\sigma_{ca}}} \qquad (4)$$

計算例;～ $l=6.0m$, $\sigma_{ca}=60kg/cm^2$ $(600000kg/m^2)$, $w=1600kg/m^3$, $h=5.5m$ の場合の t を求めると

いま, $\phi=40°$ ～ $F(\phi)=0.132$, $p=1830kg/m^2$, $\phi=30°$ ～ $F(\phi)=0.333$, $p=2930kg/m^2$, $\phi=25°$ ～ $F(\phi)=0.405$, $p=3560kg/m^2$, (4)式に諸要値を代入すると

$t=29cm$, $t=38cm$, $t=40cm$

石拱が函渠や建築構造のような場合は, 鉛直荷重のみ働くと考えて差支えない場合が多い。この場合 g を鉛直荷重とするときは M_A は $gr^2/4 = gl^2/16$ となる。この M_A を(3)式に代入すると

$$t = \sqrt{0.375\frac{gl^2}{\sigma_{ca}}} \qquad (5)$$

前計算例の諸値を(5)式に代入すると, $g=8800kg/m^2$ であるから $t=45cm$

参考のために, 既発表の式(前掲)に本例の場合を適用すると

Perronet ～ 55cm, Dejardin ～ 57cm, Desoyers ～ 58cm

Rankine ～ 硬土中; 23cm, 軟土中; 47cm, 一般の場合; 36cm

Tolkmit の式は諸値とはかけ離れた 1.0m 以上の値となり納得できない。

設計式, (4), (5) は g, p (ϕ の関数), l, σ_{ca} を要素とした理論式であり, 現場に即応した値を決定しうるものである。

結言 石拱の設計に当りまず拱環厚の推定が必要である。いままでの推定式はスパン長, l のみに関した実験式が一般であるので, その設計計算は現場要素が常数として表わされているもので思わしいものとはいえない。本文中の(4), (5)式値は Rankine の純学的考慮のもとに求めた諸値と比較するとき妥当値と考えられるので, 理論式として(4), (5)式が認められる。

参考文献;～ (1) 松原英一ヒ三 鉄筋コンクリート工学およびプレストレストコンクリート, p.134, (7)式