

鉄筋コンクリートサイホンの設計についての一考察

白 滝 山 二^{*}

Yamaji SHIRATAKI

A Consideration on the Design Method for Reinforced Concrete Pipes under Internal Pressure

ま え が き

近年大規模な水資源開発が行なわれるにあたり、大流量を河川の上流部から導水するケースが多くなり、それに伴って大きな断面をもつ長大水路サイホンの建設が各地で行なわれている。このような流量の大きいサイホンの場合、その内水圧が小さく、延長も短いときは、その前後の取付けあるいは施工上の観点から、箱形断面の鉄筋コンクリート構造のものが従来からよく用いられている。しかし、内水圧が大きい場合には、このような箱形断面は力学的にも、経済的にも不利であることが認められている⁽¹⁾。一方内水圧が相当大きくなると構造的に最も安全な方法として、大口径の鋼管サイホンの形式が採用され、とくに山間部などにおいて深い谷を渡るときなどには、その一部を水管橋にするなど、鋼管形式の特長を活かした方法もとられている⁽²⁾。しかし、鋼管サイホンは一般に工事費が高く、また塗装その他の維持補修にも経費を要するなど、経済的な難点がある場合が多い。以上のような諸形式に対し円形断面のいわゆる鉄筋コンクリート円筒形式のサイホンは、力学的に最も合理的で、内水圧水頭が限度をこえない範囲では、最も経済的な形式とされている。しかし我国においては、現場施工のコンクリートの漏水に対する不安感や、施工上とくに型枠、継手などの問題から、現場打ちコンクリートの円形サイホンは従来あまり施工されていなかった。しかし愛知用水の幹線水路工事が実施されるにあたり、この形式が積極的に取入れられ、スチールフォームの使用などによって施工上の難点も解決し、その有利性を実証した⁽³⁾。最近豊川用水における二川サイホンでは、内径3.10 m、延長2.8 km、最大内水圧水頭43.8 mにおよぶ長大サイホンが、慎重な事前の試験調査を行なったうえ、この形式で建設されている⁽⁴⁾。

ところで、現場打ちの鉄筋コンクリートサイホンを設計する場合、その管壁の厚さは、管体のうける外圧、内圧を考慮して定めなければならない。内圧にくらべ外圧があまり大きくないときは、まず内圧を基準にして厚さを仮定し、内外圧に対する安定を検討するのが一般である。しかしこの場合の管の厚さを定める基準について、我国においてはまだ明確な指針がなく、数多くの鉄筋コンクリートサイホンの施工経験をもつ愛知用水においても、主としてアメリカにおいて慣用されている基準を準用しているようである。また管の厚さとともに管の強度を支配する鉄筋量を設計する場合に漏水の原因となるコンクリートの引張クラックを防ぐため、鉄筋の設計応力のとり方について問題があり、この点に関する考え方も同様に経験的な基準に依存している。

そこで本論文においては、このような鉄筋コンクリート円形サイホンの設計にあたって採用されている従来の方法の妥当性を検討するとともに、内圧のみを考慮した場合の鉄筋コンクリート厚肉円筒の計算を一部簡略化し、内圧と管体に生ずる応力、あるいは管厚、鉄筋比などの関係をみちびき、内圧をうける鉄筋コンクリート管を設計する方法について若干の考察を行なったものである。

1. 鉄筋コンクリート管の内圧と 応力の関係

鉄筋コンクリート管に内圧が作用するときは、管体を構成するコンクリート円筒と、円周鉄筋との間に複雑な応力分布が予想される。しかし、ここでは計算式を簡単にするため、コンクリートの半径方向の応力およびひずみの影響を無視した場合について考える。

いま内半径 a 、外半径 b 、管の厚さ $d = b - a$ 、なるコンクリート円筒の内外周面に近接した位置に、円周鉄

^{*} 農業施設工学研究室

筋が挿入されている複鉄筋の円筒に、内圧 p が作用している場合を考える。管の単位長さ当りの内周側鉄筋量 A_s 、外周側鉄筋量を A'_s 、コンクリート断面積 $A_c = b - a$ とする。また内周面におけるコンクリートの円周方向の引張応力を σ_i 、外周側のコンクリート引張応力を σ_o 、内外周鉄筋に生ずる引張応力をそれぞれ σ_s 、 σ'_s とする。そこでコンクリートの円周方向応力 σ_c の平均を σ_m とすると、単位管長をとった場合のつり合いの条件から、

$$ap = \int_a^b \sigma_c dr + A_s \sigma_s + A'_s \sigma'_s$$

$$= (b-a) \sigma_m + A_s \sigma_s + A'_s \sigma'_s \quad \dots\dots\dots(1)$$

内圧 p をコンクリート応力によって分担する p_c と、鉄筋で分担する p_s とに分けて考える。すなわち

$$ap_c = A_c \sigma_m = (b-a) \sigma_m \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$ap_s = A_s \sigma_s + A'_s \sigma'_s \quad \dots\dots\dots(3)$$

コンクリート円筒の内外半径の比、 b/a を γ であらわすと、

$$p_c = \frac{b-a}{a} \sigma_m = (\gamma - 1) \sigma_m \quad \dots\dots\dots(4)$$

コンクリート部分に生ずる応力は、 p_c のみをうける無筋の円筒と考えて求めることができる。一般に等質の厚肉円筒の応力は、外圧を考えなければ⁽⁵⁾

$$\sigma_r = \frac{a^2 p_c}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right)$$

$$\sigma_\theta = \frac{a^2 p_c}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right)$$

ここに σ_r は半径方向の応力、 σ_θ は円周方向の応力を示す。

この解を内圧 p_c をうけるコンクリート円筒の場合に適用すれば、その内周面におけるコンクリート引張応力は

$$\sigma_i = \frac{a^2 p_c}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{a^2} \right) = \frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} p_c = \frac{\gamma^2 + 1}{\gamma^2 - 1} p_c \quad \dots\dots(5)$$

(4)式を用いれば

$$\sigma_i = \frac{\gamma^2 + 1}{\gamma^2 - 1} (\gamma - 1) \sigma_m = \frac{\gamma^2 + 1}{\gamma + 1} \sigma_m \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$\therefore \sigma_m = \frac{\gamma + 1}{\gamma^2 + 1} \sigma_i \quad \dots\dots\dots(7)$$

同様に外周面の引張応力 σ_o は

$$\sigma_o = \frac{2a^2 p_c}{b^2 - a^2} = \frac{2}{\gamma^2 - 1} p_c = \frac{2}{\gamma + 1} \sigma_m \quad \dots\dots\dots(8)$$

(7)式を用いれば、

$$\sigma_o = \frac{2}{\gamma^2 + 1} \sigma_i \quad \dots\dots\dots(9)$$

また鉄筋とコンクリートのヤング係数の比がつねに一定であるとみなし、かつ鉄筋の位置が円筒の内外周に近接しているものとすれば、近似的に

$$\sigma_s = n \sigma_i \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$\sigma'_s = n \sigma_o \quad \dots\dots\dots(11)$$

ただし、 n = 鉄筋とコンクリートのヤング係数比 = E_s/E_c

そこで

$$A_c = b - a = (\gamma - 1)a$$

$$A_s = K_1 A_c = K_1 (\gamma - 1)a$$

$$A'_s = K_2 A_c = K_2 (\gamma - 1)a$$

ここに、 K_1 、 K_2 はそれぞれ内外周鉄筋比を示す。上式を、(1)に代入して、(7)、(9)、(10)、(11)を用いれば

$$ap = (\gamma - 1)a \frac{\gamma + 1}{\gamma^2 + 1} \sigma_i + K_1 (\gamma - 1) a n \sigma_i$$

$$+ K_2 (\gamma - 1)a \frac{2n}{\gamma^2 + 1} \sigma_i$$

$$\therefore \sigma_i = \frac{(\gamma^2 + 1)p}{(\gamma - 1)(\gamma + 1 + nK_1(\gamma^2 + 1) + 2nK_2)} \quad \dots\dots\dots(12)$$

$$\sigma_o = \frac{2p}{(\gamma - 1)(\gamma + 1 + nK_1(\gamma^2 + 1) + 2nK_2)} \quad \dots\dots\dots(13)$$

$$\sigma_s = \frac{n(\gamma^2 + 1)p}{(\gamma - 1)(\gamma + 1 + nK_1(\gamma^2 + 1) + 2nK_2)} \quad \dots\dots\dots(14)$$

$$\sigma'_s = \frac{2np}{(\gamma - 1)(\gamma + 1 + nK_1(\gamma^2 + 1) + 2nK_2)} \quad \dots\dots\dots(15)$$

いま内外鉄筋の相互の比 $A'_s/A_s = K_2/K_1$ を λ とおくと

$$\sigma_i = \frac{(\gamma^2 + 1)p}{(\gamma - 1)(\gamma + 1 + n(\gamma^2 + 1 + 2\lambda)K_1)} \quad \dots\dots\dots(16)$$

となる。 σ_o 、 σ_s 、 σ'_s についても同様である。

以上のように、鉄筋コンクリートの円筒が内圧をうける場合、その円筒の寸法比すなわち内外径比 γ 、および鉄筋比によってコンクリートおよび鉄筋に生ずる応力を求めることができる。

なお鉄筋とコンクリートのヤング係数比 n の値をいかにとるかによって鉄筋とコンクリート相互間に於ける応

力分配が変わってくる。コンクリートのヤング係数はいろいろな条件で大きく異なりその一般値を示すことは困難である。藤田⁽⁶⁾によれば良質なコンクリート例えば圧縮強度 300~400 kg/cm² 程度のコンクリートでは、引張強度が 30 kg/cm² 程度であり、初期引張係数で 3~3.5 × 10⁵ kg/cm²、極限ひずみを考慮したセカント係数では 1.8~2.0 × 10⁵ kg/cm² の値が示されている。極限ひずみを基準にすれば $n = 10 \sim 11$ であるが、コンクリートの降伏点は判然としないことが多く、実用上はコンクリート引張応力が 10~20 kg/cm² のところのセカント係数 2.8~3.0 × 10⁵ kg/cm² を考えて、 $n = 7$ 程度にとれば安全側の結果が得られるであろう。しかし、この値についてはなお検討の余地があると思われる。

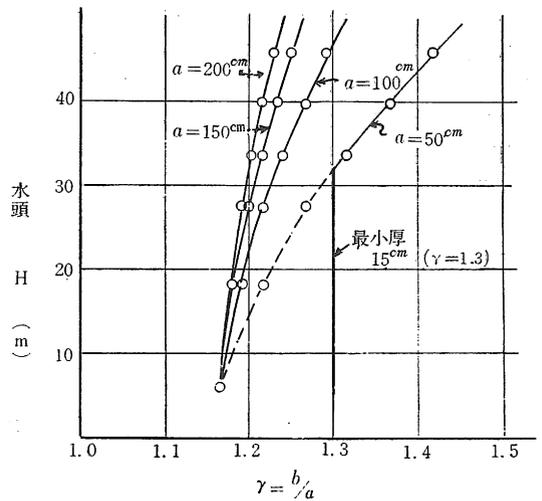
2. 管の厚さについて

内圧をうける鉄筋コンクリート管の応力がその円筒の寸法比、および鉄筋比によって求められることを示したが、とくにその管厚によって定まる寸法比が応力の値に大きく影響することが認められる。従ってサイホンの設計にあたってその管の厚さをどのようにえらぶかが重要な要件となる。この管の厚さを与える基準としては、先に述べたように我国では明確な指針がないので、主としてアメリカの開拓局における慣用設計法に準じて実施している。この慣用基準は管の厚さの標準値として、内水圧の水頭に応じ表一のような基準を示している。^{(4),(7)} すなわち管の直径の 1/12 の厚さを基礎として、そのうえで圧力水頭に応じて管厚を適宜加算した形をとっている。従って管の大小によって、内外径比 γ の値が異なる。例えば管の内半径 a の値が 50cm, 100cm, 150cm, 200cm の 4 種についてこの基準による管厚を与えた場合の γ の値を、その該当する圧力水頭に対してプロットすると図一の如くであり、管径が大きくなるに従い、寸法比 γ の値は小さくなる。内圧をうける円筒の応力は、

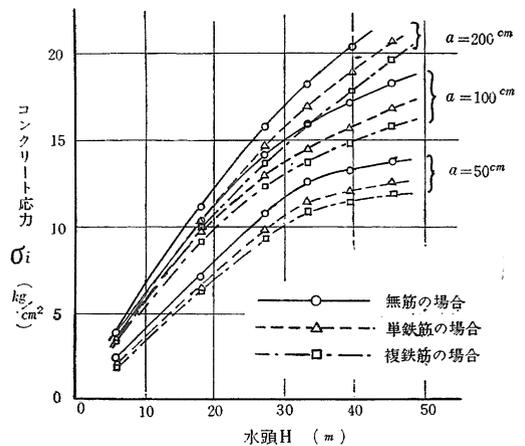
表一 管 厚 基 準

内 水 圧 水 頭		管 厚	
ft.	m.	inch.	cm.
0 ~ 40	0 ~ 12.2	$D/12(\text{min.}6'')$	$a/6(\text{min.}15\text{cm})$
40 ~ 80	12.2 ~ 24.4	$D/12 + 1$	$a/6 + 2.5$
80 ~ 100	24.4 ~ 30.5	$D/12 + 2$	$a/6 + 5.0$
100 ~ 120	30.5 ~ 36.6	$D/12 + 3$	$a/6 + 7.5$
120 ~ 140	36.6 ~ 42.7	$D/12 + 4$	$a/6 + 10.0$
140 ~	42.7 ~	$D/12 + 5$	$a/6 + 12.5$

D : 管の内直径
 a : 管の内半径



図一 従来の基準による管の寸法と水頭との関係



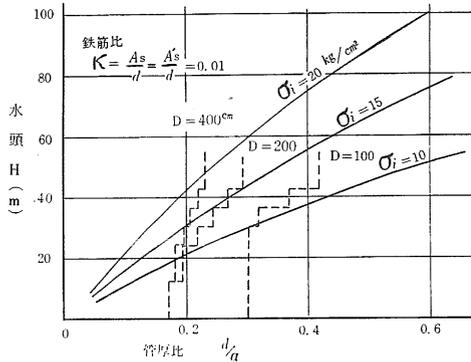
図二 従来の基準による場合の水頭とコンクリート応力との関係

γ の値に大きく関係するから、以上のような従来の方法にもとずく管厚をそのまま採用した場合は、円筒に生ずる応力の値が、管径によってそれぞれ異なるものと考えられる。そこで内半径 a が 50cm, 100cm, 200cm, の 3 種の管について、基準管厚をとり、先にみちびいた応力の計算式を用いて、無筋の場合、鉄筋比 1% の単鉄筋を内周側に配置した場合、内外周鉄筋比をそれぞれ 1% とした複鉄筋の場合について、圧力水頭と、円筒内周面のコンクリート応力との関係をもとめると図二のようになる。この図によると内径の小さい場合はコンクリート引張応力はそれほど大きくないが、管径が大きい場合は、水頭が大きくなるにつれてコンクリートの応力はかなり大きくなる。

構造設計の見地からすれば、管の大きさの如何にかか

ならず、円筒に生ずる応力が一定の範囲内にあるような管の厚さを与えることが望ましい。従って上記のような今まで慣用されている基準は、力学的に必ずしも妥当なものとはいえない。そして一般に内圧が大きい場合は管の厚さをさらに大きくとった方が、合理的なものと考えられる。

そこで一つの例として、内外周鉄筋比が共に1%の複鉄筋円筒について、内周面コンクリート応力がそれぞれ10, 15, 20kg/cm²の範囲内にあるため必要な管厚比を



図—3 コンクリート応力を考慮したときの水頭と管厚比との関係

内水圧水頭に対して求め、これを図に示すと図—3のようになる。そして従来の方法による基準値を対比するため併せて破線を示したが、これによっても圧力水頭に対する管厚の増加の割合をさらに大きくすべきことがうかがえる。

なお、鉄筋比によるコンクリート応力の変動は比較的小さいので、内圧をうける鉄筋コンクリート円筒の設計にあたってコンクリート応力を支配条件と考えれば、この図によって管厚の概略の値を推定することができるであろう。

そこで一般の場合について、コンクリート内周面の引張応力を支配条件と考え、すなわち σ_i に対してコンクリートの許容引張応力 σ_{ta} を用いて、与えられた内圧 p に対し必要な管の厚さを求める式を誘導しよう。この場合鉄筋量はあらかじめ与えられているものとする。鉄筋量をあらわす指数としては管の厚さが未知であるから、鉄筋量と内半径との比をとって考え、これを仮に鉄筋率とよぶ。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} \text{内周鉄筋率 } \mu_1 &= A_s/a \\ \text{外周鉄筋率 } \mu_2 &= A'_s/a = \lambda \mu_1 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(17)$$

一般の鉄筋比 $K_1 = A_s/d$, $K_2 = A'_s/d$ との関係は、

$$\mu_1 = K_1(\gamma - 1), \mu_2 = K_2(\gamma - 1)$$

この関係を(16)式にいれると、 $\mu_2/\mu_1 = \lambda$ であるから

$$\sigma_i = \frac{(\gamma^2 + 1)p}{\gamma^2 - 1 + n(\mu_1(\gamma^2 + 1 + 2\lambda))}$$

そこで、 $\sigma_i = \sigma_{ta}$ として、 γ について整理すると、

$$\left. \begin{aligned} \gamma &= \sqrt{\frac{(1 - n(\mu_1 - 2n(\mu_2)\sigma_{ta} + p))}{(1 + n(\mu_1)\sigma_{ta} - p)}} \\ &= \sqrt{\frac{1 - n(1 + 2\lambda)(\mu_1 + p/\sigma_{ta})}{1 + n(\mu_1 - p/\sigma_{ta})}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(18)$$

この式によって、円筒内周面のコンクリート引張応力が許容応力の範囲にあるための内外径比が求められ、管の厚さは、 $d = (-1)\alpha$ によって直ちに求めることができる。ただし、上の式は $(1 + n(\mu_1) - p/\sigma_{ta}) \leq 0$ のときは成立しないので、鉄筋量について

$$\mu_1 > \frac{1}{n} (p/\sigma_{ta} - 1) \text{ あるいは } A_s > \frac{a}{n} (p/\sigma_{ta} - 1),$$

また、 $\gamma > 1$ でなければならないので、

$$\mu_1 + \mu_2 < \frac{p}{n\sigma_{ta}} \text{ あるいは } A_s + A'_s < \frac{ap}{n\sigma_{ta}}$$

でなければならない。そしてその範囲において、鉄筋量と管の厚さの組合せはいろいろとることができるから、それらの組合せのうち最もバランスのとれた管厚と鉄筋量を定めればよい。

とくに内外周鉄筋量が等しい複鉄筋円筒では、 $A_s = A'_s$, $\mu_1 = \mu_2 = \mu$ とし、また $\lambda = 1$ として

$$\gamma = \sqrt{\frac{(1 - 3n(\mu)\sigma_{ta} + p)}{(1 + n(\mu)\sigma_{ta} - p)}} \dots\dots\dots(19)$$

ただし、

$$\frac{1}{n} (p/\sigma_{ta} - 1) < \mu < \frac{p}{2n\sigma_{ta}}$$

内周鉄筋だけの場合、 $A'_s = 0$, $\mu_2 = 0$ あるいは $\lambda = 0$ で

$$\gamma = \sqrt{\frac{(1 - n(\mu_1)\sigma_{ta} + p)}{(1 + n(\mu_1)\sigma_{ta} - p)}} \dots\dots\dots(20)$$

ただし

$$\frac{1}{n} (p/\sigma_{ta} - 1) < \mu_1 < \frac{p}{n\sigma_{ta}}$$

さらに無筋のときは $\mu_1 = \mu_2 = 0$ として

$$\gamma = \sqrt{\frac{\sigma_{ta} + p}{\sigma_{ta} - p}} \dots\dots\dots(21)$$

ただし

$$p < \sigma_{ta}$$

3. 鉄筋比について

内圧をうける鉄筋コンクリート管において鉄筋の果す役割、および管の寸法が与えられているとき、コンクリートの応力値を根拠にして鉄筋比を求める方法について考察する。

(16) 式から

$$\kappa_1 = \frac{(\gamma^2 + 1)p - (\gamma^2 - 1)\sigma_i}{(\gamma - 1)(\gamma^2 + 1 + 2\lambda)n\sigma_i}$$

$$= \frac{\gamma + 1}{(\gamma^2 + 1 + 2\lambda)\sigma_s} \left\{ \frac{\gamma^2 + 1}{\gamma^2 - 1} p - \sigma_i \right\} \dots\dots\dots(22)$$

コンクリートの応力を許容応力とすれば、 $\sigma_i = \sigma_{ta}$

$$\kappa_1 = \frac{\gamma + 1}{(\gamma^2 + 1 + 2\lambda)\sigma_s} \left\{ \frac{\gamma^2 + 1}{\gamma^2 - 1} p - \sigma_{ta} \right\}$$

$$= \frac{\gamma + 1}{(\gamma^2 + 1 + 2\lambda)n\sigma_{ta}} \left\{ \frac{\gamma^2 + 1}{\gamma^2 - 1} p - \sigma_{ta} \right\} \dots\dots\dots(23)$$

上式によって管の寸法、コンクリート許容応力が与えられたときの鉄筋比を求めることができる。

なお、これらの式において、 $[(\gamma^2 + 1)/(\gamma^2 - 1)]p$ の値は無筋円筒の場合の内周面に生ずべきコンクリート応力の値であるから、それからコンクリート許容応力の値を差引いた括弧の中の値は、鉄筋によって負担されるべき応力部分と考えることができる。一般に真直部材に単純引張力が作用したときは、コンクリート許容応力を超過した分を単に鉄筋の応力、 σ_s 、いいかえれば $n\sigma_{ta}$ で割れば所要の鉄筋比を与えるが、円筒の場合は、単に超過応力を鉄筋応力で割るだけでなく、その寸法や、内外周の鉄筋の割合に関係する係数を乗ずることが必要である。

4. 鉄筋の応力だけで内圧に対抗し、かつコンクリートの引張亀裂を防止する場合の設計法

一般に引張をうける鉄筋コンクリート部材の設計にあたって、コンクリートの引張応力を無視し、鉄筋のみで荷重に耐えるものとして設計する方法が広くおこなわれている。しかしサイホン管のように、水密を必要とする場合には、鉄筋の伸びに伴うコンクリートのひびわれを防ぐため、実際に生ずるコンクリートの応力がある限度をこえないように考えることが必要である。

このための実用的な方法として、サイホン管の設計の場合、その作用する内圧の大きさにより、計算上の鉄筋応力の値を加減する方法がおこなわれている。アメリカ

開拓局でも、先の管厚と関連して、鉄筋コンクリートサイホン管の設計の際、用いるべき鉄筋の許容応力の値を次のように、内水圧の水頭によって、てい減して用いることを示している(4)。

$$\sigma_{sa} = 16,000 - 40H \quad (\text{lb/inch}^2)$$

H : 水頭 (ft)

メートル単位であらわすと

$$\sigma_{sa} = 1,125 - 9.2H \quad (\text{kg/cm}^2) \dots\dots\dots(24)$$

H : 水頭 (m)

ところで、真直な部材に単純引張りが作用するときは次のように鉄筋応力をその鉄筋比に関連して調整することが行なわれる。いま A_c 断面を有するコンクリート部材に T なる引張力が作用するものとし、まずコンクリート応力を無視して

$$T = A_s \sigma_s = \kappa A_c \sigma_c \dots\dots\dots(25)$$

ただし κ = 鉄筋比 = A_s/A_c

次にコンクリート応力を考えると

$$T = A_s \sigma_s + A_c \sigma_c = (n\kappa + 1)A_c \sigma_c$$

以上の両者が同時に成立するためには

$$\kappa A_s \sigma_c = (n\kappa + 1)A_c \sigma_c$$

$$\therefore \sigma_s = \frac{n\kappa + 1}{\kappa} \sigma_c \dots\dots\dots(26)$$

なる関係が必要である。いいかえれば (26) 式で鉄筋量を求める場合に用いる σ_s の値は、鉄筋本来の許容応力をそのままとるだけでなく、(26) 式で $\sigma_c = \sigma_{ta}$ として得られる σ_s の値を超えないようにすることによって、コンクリートに実際生ずる応力を許容範囲内におさめようとするわけである。例えば $\sigma_{ta} = 10 \text{ kg/cm}^2$ 、 $n = 7$ と仮定し $\sigma_{sa} \leq 1,200 \text{ kg/cm}^2$ とした場合は

κ (%)	0.885	1.0	1.5	2.0
σ_s (kg/cm ²)	1,200	1,070	737	570

となり、それぞれの鉄筋比によって鉄筋応力を調整して計算すれば、鉄筋だけの計算でコンクリートの応力値も許容範囲におさまることになる。

そこでこの考え方を内圧をうける鉄筋コンクリート管に適用する。まずコンクリートの応力を無視し、鉄筋だけで内圧に対抗するものとするれば、

$$ap = A_s \sigma_s + A'_s \sigma'_s$$

いま(14)、(15)式を比較することによって

$$\frac{\sigma'_s}{\sigma_s} = \frac{2}{\gamma^2 + 1} \quad \therefore \sigma'_s = \frac{2}{\gamma^2 + 1} \sigma_s$$

$A_s/a = \mu_1$ 、 $A'_s/a = \mu_2$ 、 $\mu_2 = \lambda/\mu_1$ を用いると、

$$A_s = \frac{ap(\gamma^2+1)}{(\gamma^2+1+2\lambda)\sigma_s} \dots\dots\dots(27)$$

$$\mu_1 = \frac{p(\gamma^2+1)}{(\gamma^2+1+2\lambda)\sigma_s} \dots\dots\dots(28)$$

$$\mu_2 = \lambda \mu_1 = \frac{p\lambda(\gamma^2+1)}{(\gamma^2+1+2\lambda)\sigma_s}$$

鉄筋比であらわすと $K_1 = \mu_1/(\gamma-1)$, $K_2 = \mu_2/(\gamma-1) = \lambda K_1$

$$\therefore K_1 = \frac{p(\gamma^2+1)}{(\gamma-1)(\gamma^2+1+2\lambda)\sigma_s} \dots\dots\dots(29)$$

$$K_2 = \frac{p\lambda(\gamma^2+1)}{(\gamma-1)(\gamma^2+1+2\lambda)\sigma_s}$$

以上の(27)~(29)式がコンクリートの引張応力を無視し鉄筋だけで円周方向の引張力に対抗できるための条件をあらわす式である。この場合用いる鉄筋応力 σ_s は、鉄筋自体の許容応力 σ_{sa} の範囲内にあたるだけでなく、コンクリート応力を考慮したとき、その値がコンクリートに許す応力をこえないようにえらぶ必要がある。そこで、(16)式に(29)式を代入し、 σ_i を求めると

$$\sigma_i = \frac{(\gamma^2+1)\sigma_s p}{(\gamma^2-1)\sigma_s + n(\gamma^2+1)p} \dots\dots\dots(30)$$

この応力がコンクリートの許容応力をこえないために σ_s は如何なる値をとればよいかを求め、上式で

$$\sigma_i \leq \sigma_{ta}$$

とおいて、 σ_s について整理すると、

$$\sigma_s \leq \frac{n(\gamma^2+1)\sigma_{ta} p}{(\sigma_{ta} + p) - \gamma^2(\sigma_{ta} - p)} \dots\dots\dots(31)$$

この式が、コンクリート応力が許容応力をこえないための条件式である。そこでこの式を満足し、かつ鉄筋そのものの許容応力の範囲内にある σ_s をえらび、(27)~(29)式のいずれかを用いて鉄筋量を算出すればよい。

つぎに(30)式を変形して

$$\gamma = \sqrt{\frac{\sigma_s \sigma_i + (\sigma_s - n\sigma_i)p}{\sigma_s \sigma_i - (\sigma_s - n\sigma_i)p}} \dots\dots\dots(32)$$

この式で σ_s はコンクリート応力を無視したときの内周鉄筋の応力、 σ_i はコンクリート応力を考慮したときのコンクリート応力値を示す。従ってそれらにそれぞれの許容応力を適用し、 $\sigma_{sa}/\sigma_{ta} = m$ とおき

$$\gamma = \sqrt{\frac{\sigma_{sa} + (m-n)p}{\sigma_{sa} - (m-n)p}} \dots\dots\dots(33)$$

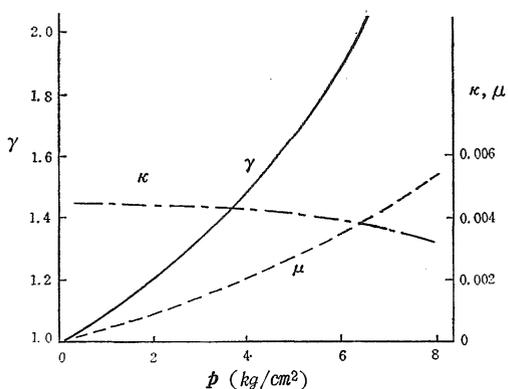


図-4 内圧と管厚および鉄筋量の関係

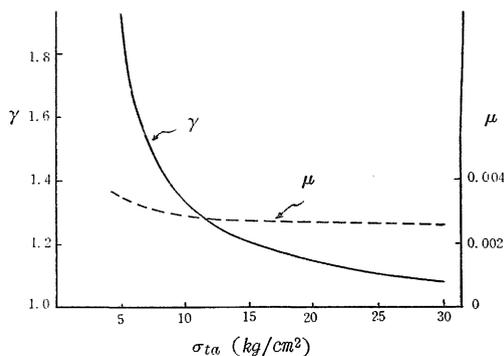


図-5 コンクリートの許容応力と管厚鉄筋量との関係

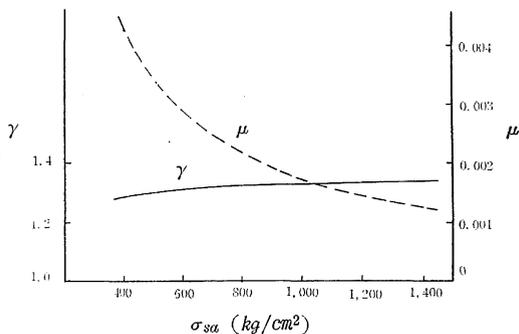


図-6 鉄筋許容応力と管厚鉄筋量との関係

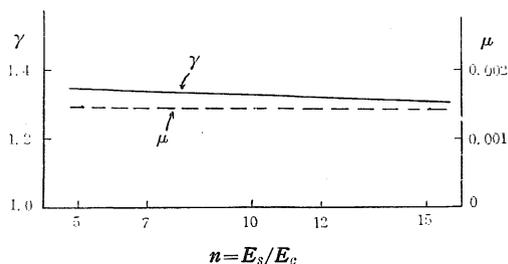


図-7 ヤング係数比と管厚および鉄筋量との関係

とすれば、上に述べたような二つの条件について、鉄筋あるいはコンクリートの応力がそれぞれの許容応力に一致するときの管の内外径比を与える。

従って実用設計法の見地から、(33)式の関係は、鉄筋コンクリート管の寸法を定める一つの根拠を示すものと考えてよいだろう。そしてこの寸法比に対応する鉄筋量は、(37)~(38)式において、それぞれ $\sigma_s = \sigma_{sa}$ とおいて求められる。これらの式における (33)式を代入すれば、

$$\mu_1 = \frac{p}{\sigma_{sa}(1+\lambda) - \lambda(m-n)p} \dots\dots\dots(34)$$

$$K_1 = \frac{\sigma_{sa} - (m-n)p + \sqrt{\sigma_{sa}^2 - (m-n)^2 p^2}}{2(m-n)(\sigma_{sa}(1+\lambda) - \lambda(m-n)p)} \dots\dots\dots(35)$$

$$A_s = \frac{ap}{\sigma_{sa}(1+\lambda) - \lambda(m-n)p} \dots\dots\dots(36)$$

$$\mu_2 = \lambda\mu_1, K_2 = \lambda K_1, A'_s = \lambda A_s \dots\dots\dots(37)$$

とあらわすこともできる。

いま計算例として、内外鉄筋量が等しい場合について $\sigma_{sa} = 1,200 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_{ta} = 10 \text{ kg/cm}^2$, $n = 7$ と仮定し、各内水圧に対する γ , K , μ の値を求めて、図-4に示す。この図でみられるように所要管厚は、内水圧の増加に伴って急激に増加するが、これに対し鉄筋比 K はあまり変化しない。しかし、鉄筋の絶対量の推移は、 μ の値の変化によって示され、コンクリート断面の増にほぼ比例して増加している。

ついで、上記のような条件のうちとくに $p = 3 \text{ kg/cm}^2$ の内圧をうける場合を例にとり、 σ_{ta} , σ_{sa} あるいは n の値を変化させた場合の管厚、鉄筋量の変化を試算した。 σ_{ta} を変化させ、ほかは上記の条件をそのままとした場合の結果を図-5に示す。しかるときは、 σ_{ta} のとり方によって、所要管厚比は著しく変化し、また鉄筋量も σ_{ta} を大きくとるにしたがって多少小さくできることが示される。これに対し、 σ_{sa} を変化させたときは、図-6で示されるが、 σ_{sa} の値を大きくとるに伴い、鉄筋量を少なくできるのは当然と考えられるが、管厚については、 σ_{sa} を大きくとった場合、僅かながらも所要管厚が大きくなる傾向がある。

また n の値の変化については、実用上の範囲ではその影響が比較的小さく、あまり問題としないでよいようである。

以上のように、内圧をうける鉄筋コンクリート管の設

計にあたっては、コンクリートの許容引張応力をいかに定めるかが、大きな問題である。鉄筋の場合は、その材料の工学的性質が比較的はっきりしており、問題は少ないが、コンクリートの場合、とくに引張りに対する力学的な性質については、明らかになっていない点が多い。従って、コンクリートの引張強度がどの程度まで信頼できるか、また引張強度の大きいコンクリートをいかにつくるかなどの点について今後の研究が望まれる。

5. む す び

水路サイホンのような、内圧をうける鉄筋コンクリート円筒について、その応力の算定方法、あるいは実用設計の考え方にもとづくところの管の厚さ、および鉄筋量の計算法について、いくつかの計算式をみちびいた。そしてそれらを用いた試算によって、従来用いられていた管厚のきめ方について検討し、一般に今までの考えよりも大きな管厚をとる方が合理的であることを示した。また、鉄筋コンクリート円筒の設計上、コンクリートの引張強度がとくに重要であることを指摘した。

なお、本報告では管体に作用する荷重として、軸対称の内圧だけを扱っており、従って自重、土圧などの影響は別個に考慮しなければならない。そのような外力に対する応力の解析方法としては、構造力学的な手法による各種の方法が示されており、それらを用いて外圧による応力が求められれば、それらと内圧による応力とを重ね合わせることにより、全体的な応力分布を求めることができるであろう。

引用文献

1. 中森憚二・白滝山二：農土研 26 (7) : 16~18, 1959
2. 高木滋：水路 4 : 23~34, 1961
3. 愛知用水公団：愛知用水技術誌，幹線水路編，1962, 名古屋 5, 138
4. 高嶺進・竹内昭八・不破昭：農土研 32 (2) ; 1~5, 1964
5. Timoshenko, S. and Goodier, J. N. : "Theory of Elasticity" McGraw-Hill, New York, 1951 p 60
6. 藤田嘉夫：土木学会論文集 133 : 35~37, 1966
7. Davis, C. V. : "Handbook of Applied Hydraulics" McGraw-Hill, New York, 1952 p 459

Summary

Monolithic reinforced concrete pipes are usually preferred for relatively large siphons within a limit of the head of internal water pressure.

In this paper, some problems are discussed to find a rational method for designing such reinforced concrete pipes, and expressions for the stresses in the cylinder shell are derived on the basis of an approximate solution for the thick walled cylinder of concrete with circumferential reinforcement.

It is customary to design the shell thickness of a cast-in-place pipe according to a conventional standard, such as suggested by Bureau of Reclamation. The numerical analyses are made to examine the propriety of above standard. The results show it is advisable to give a larger shell thickness than the standard to the pipes subjected to relatively high internal pressure.

A practical method is proposed for determining the shell thickness and reinforcement required for the concrete pipes under internal pressure. It is shown that the tensile strength of concrete is one of the most important factors in designing those pipes, and it will be desirable to investigate in detail the behaviour of concrete subjected to tensioning.