

円形 PC タンクのリブ数の決定に関する経済的考察

宮 崎 義 成*

1. ま え が き

円形 PC タンクにおいて、円周方向のプレストレスを導入する方法として現在実用に供されているものに、次の2つの方法がある。

(1) コンクリート壁体の周囲に PC 鋼線を所定の引張力をこれに与えながら、いわゆるメリーゴーランド式にまきつける方法。

(2) コンクリート壁体中に、円周方向にポストテンションケーブルを埋込み、これを壁体周辺上に設けられたリブに1本ずつ緊張定着してゆく方法。

(1) の場合は、PC 鋼線には連続的に一様のプレストレスが与えられるので、リブを設ける必要がない。

ここに問題として取り上げようとしているのは、リブを必要とする(2)の場合である。この場合リブの数を多くすることは、したがって、ケーブルの長さを短くし、ケーブル数を増加することになるので、定着装置に関する費用、緊張およびグラウチングなど、ケーブル数に比例する材料および工費の増加をきたすのみならず、リブそのものの構築費の増加をもたらす。そこでリブの数はできるだけ少ないほうが望ましいけれども、リブ数を少なくすると、ケーブル長が長くなり、また、角変化も増大するので、摩擦によるプレストレス力の減少をもたらす。よって PC タンクのリブ数にも最も合理的な数値が存在するはずである。

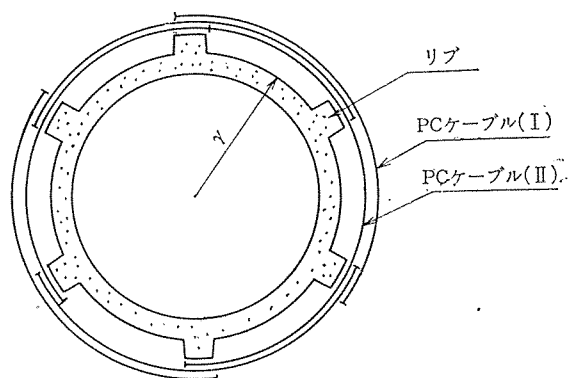
ここに筆者は、前記の PC ケーブルにおける摩擦によるプレストレスの減少と、PC ケーブルに関する工事費増減のかね合いにおいて、合理的かつ経済的なリブ数を見い出そうとするものである。

2. PC ケーブルのプレストレス力

まずリブはタンクの円周を n 等分して、その各等分点に設けられ、また、各 PC ケーブルには 図-1 に示されるように、順次に各リブより出発し、それぞれ一つおきのリブに定着されるように配置されるものとする。

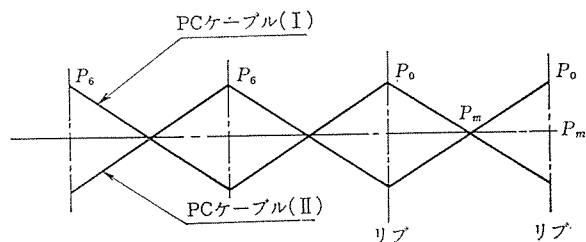
* 極東鋼弦コンクリート振興(株) 常務取締役

図-1 ケーブル配置



PC ケーブルは、それぞれ両端よりジャッキによって緊張されるものとする、円周方向のプレストレス力は摩擦損失の影響によって、各リブ点で交互に最大最小となる。タンクの円周を平面に展開してプレストレス力の分布を描くとほぼ 図-2 のごとくなることは周知のとおりであるが、平均のプレストレス力は、ケーブル1本についていえば、リブとリブの中央点におけるプレストレス力に等しくなると見なされる。

図-2 円周に沿ったプレストレスの分布



この平均プレストレス力は、設計条件によって求められる必要最小限のプレストレス力でなければならない。この平均プレストレス力を確保するためには各リブ点における最大プレストレス力をいかに定めればよいかを以下に計算する。次のような記号とする。

P_0 : リブ点の最大プレストレス力

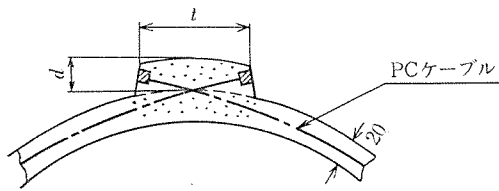
P_m : 平均プレストレス力

r : タンクの PC ケーブル位置における半径 (m)

n : リブ数

l : ケーブル長

図-3 リブ部断面



t : リブの幅 (図-3)

μ : 角摩擦係数 (1/Rad)

λ : 線摩擦係数 (1/m)

ケーブルの長さ l

$$l = \frac{2\pi r}{n} \times 2 + t = \frac{4\pi r}{n} + t \dots\dots\dots (1)$$

ケーブル端よりリブ間中央点までの長さは

$$\frac{2\pi r}{2 \times n} + \frac{t}{2} = \frac{\pi r}{n} + \frac{t}{2}$$

ケーブル端とリブ間中央点との間の角変位(ラジアン)

は

$$\frac{2\pi}{2n} = \frac{\pi}{n}$$

よって,

$$\begin{aligned} P_0 &= P_m e^{\frac{\pi}{n} \mu + \left(\frac{\pi r}{n} + \frac{t}{2}\right) \lambda} \\ &= P_m e^{\frac{\pi}{n} (\mu + r \lambda) + \frac{t}{2} \lambda} \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

それぞれのPCケーブルの種別によってリブ点で最初に引張りうる力(一般にはケーブルの引張荷重の70%と見なしてよい)が決まっているから、リブ点における必要なプレストレス力 P_0 を得るために、ケーブルを何本用いればよいかを求める。

3. PC工事費を最低とするリブ数

ここでいうPC工事費とは、PCケーブル工、緊張定着工、およびグラウト工などプレストレスのために必要な工種の各材料費と労務費の総計であって、これはPCケーブル1本ごとに固定した費用と、ケーブルの長さ按比例して増減する費用との合体によって表わされる¹⁾。

すなわち、

- C: ケーブル1本についてのPC工事費
- A: ケーブル1本に固定した工費
- B: ケーブル長1mに要する工費
- L: ケーブル長(m)

とすると、

$$C = A + BL$$

ここにAおよびBは、いずれもケーブル種別、定着装置の種別に応じて、またその時期の経済情勢によって定まる係数である。

それぞれのケーブル種別によって引張力および最初の許容引張力が異なるが、いずれにしても最初の引張力 1

t を与えるために必要なPC工事費もまた前述の式と同様の関係にあり、

$$C_1 = a + bl \dots\dots\dots (3)$$

C_1 はケーブル端位置でプレストレス力 1t を与えるために必要なPC工事費。

a および b はそれぞれ前述の A, B に対応する係数であってケーブルの種別によって決定される。筆者は先にプレレストコンクリート工業協会編のプレレストコンクリート道路橋標準積算資料(昭和43年度)を参考として、フレッシュケーブルの場合につき式(3)の a, b の数値として次の値を得た。

$$\left. \begin{aligned} 12\phi 5\text{mm ケーブルのとき} \\ C_1(\text{円}) &= 223.15 + 17.02 l(\text{m}) \\ 12\phi 7\text{mm ケーブルのとき} \\ C_1(\text{円}) &= 180.95 + 15.40 l(\text{m}) \\ 12\phi 8\text{mm ケーブルのとき} \\ C_1(\text{円}) &= 175.97 + 14.77 l(\text{m}) \end{aligned} \right\} \dots\dots (4)$$

そこで式(2)で求められるリブ点における最大プレストレス力 P_0 を与えるためのPC工事費 C_{P_0} は次式で与えられる。

$$C_{P_0} = C_1 \times P_0$$

式(2), (3)より

$$C_{P_0} = P_m e^{\frac{\pi}{n} (\mu + r \lambda) + \frac{t}{2} \lambda} \times (a + bl)$$

タンクを1周するためのケーブル数は $n/2$ 本であるから、所要プレストレス力 P_m を与えるためのPC工事費 C_n は、

$$C_n = C_{P_0} \times \frac{n}{2} = \frac{n}{2} (a + bl) P_m e^{\frac{\pi}{n} (\mu + r \lambda) + \frac{t}{2} \lambda}$$

で表わされる。式(1)を用い、

$$C_n = \frac{1}{2} \{ (a + tb)n + 4\pi r b \} P_m e^{\frac{\pi}{n} (\mu + r \lambda) + \frac{t}{2} \lambda} \dots\dots\dots (5)$$

この C_n の最小値を得るためのリブ数 n は、次式によって得られる。

$$\frac{\partial C_n}{\partial n} = 0$$

すなわち、式(5)より

$$\frac{\partial}{\partial n} \left[\{ (a + tb)n + 4\pi r b \} e^{\frac{\pi}{n} (\mu + r \lambda) + \frac{t}{2} \lambda} \right] = 0$$

$$\begin{aligned} \therefore (a + tb) e^{\frac{\pi}{n} (\mu + r \lambda) + \frac{t}{2} \lambda} - \frac{\pi}{n^2} (\mu + r \lambda) \cdot \\ \cdot \{ (a + tb)n + 4\pi r b \} e^{\frac{\pi}{n} (\mu + r \lambda) + \frac{t}{2} \lambda} = 0 \end{aligned}$$

これを整理して

$$(a + tb)n^2 - \pi(\mu + r \lambda)(a + tb)n - 4\pi^2 r b(\mu + r \lambda) = 0$$

$$\therefore n^2 - \pi(\mu + r \lambda) - \frac{4\pi^2 r b(\mu + r \lambda)}{a + tb} = 0$$

ここに

$$\frac{b}{a} = \eta \dots\dots\dots (6)$$

とおくと、

$$n^2 - \pi(\mu + r\lambda)n - \frac{4\pi^2 r(\mu + r\lambda)\eta}{1 + t\eta} = 0$$

これを解くと、

$$n = \frac{\pi(\mu + r\lambda)}{2} + \sqrt{\frac{\pi^2}{4}(\mu + r\lambda)^2 + \frac{4\pi^2 r(\mu + r\lambda)\eta}{1 + t\eta}}$$

$$\therefore n = \frac{\pi(\mu + r\lambda)}{2} \cdot \left\{ 1 + \sqrt{1 + \frac{16r\eta}{(\mu + r\lambda)(1 + t\eta)}} \right\} \dots\dots\dots (7)$$

よって、PC工事費を最小とするリブ数 (n) は、タンクの半径 (r)、摩擦係数 (μ, λ) およびケーブルの種別による工費に関する係数 (η) によって定められる。

次に一例としてフレシネーケーブルの場合について経済的リブ数を求めてみよう。

式 (4)、(6) より、η の値が求まる。

すなわち

12φ5 mm ケーブルのとき	η=0.076
12φ7 mm "	η=0.085
12φ8 mm "	η=0.084

式 (7) を観察すると、n の値は η^{1/2} に左右され、かつ η は相当小さい値であるから、各ケーブルとも、次のように定めても大した誤差はない (この場合最大誤差は 3%) ことがわかる。

いま η=0.08

$$r=10\text{ m} \quad \mu=0.3 \quad \lambda=0.004 \quad t=1.4\text{ m}$$

の場合について、n を求める。

$$\mu + r\lambda = 0.3 + 10 \times 0.004 = 0.34$$

式 (6) より、

$$n = \frac{3.14 \times 0.34}{2} \left\{ 1 + \sqrt{1 + \frac{16 \times 10 \times 0.08}{0.32 \times (1 + 1.4 \times 0.08)}} \right\} = 3.68 \div 4$$

このようにして、タンクの半径 (r) と経済的リブ数 (n) との関係を種々の摩擦係数と想定して算出したものを 図-4 に示してある。

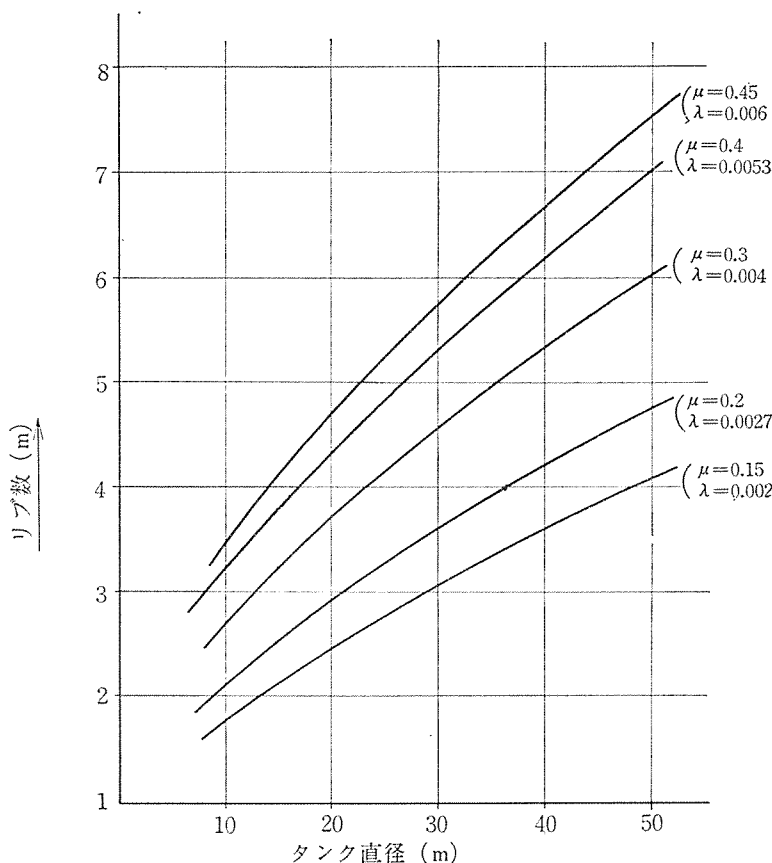
参考のため、この場合リブを 6 個とした場合と、4 個とした場合について、PC工事費を比較してみよう。

リブを 4 個としたときの PC 工事費を C₄

リブを 6 個としたときの PC 工事費を C₆

とすると、式 (5) より、

図-4 円形タンクにおける経済的なリブ数 (n)



$$C_4 = \frac{1}{2} \{ (a + tb) \times 4 + 4\pi r b \} P_m e^{-\frac{\pi}{4}(\mu + r\lambda) + \frac{\pi}{2}\lambda}$$

$$C_6 = \frac{1}{2} \{ (a + tb) \times 6 + 4\pi r b \} P_m e^{-\frac{\pi}{6}(\mu + r\lambda) + \frac{\pi}{2}\lambda}$$

$$\frac{C_6}{C_4} = \frac{(a + tb) \times 6 + 4\pi r b}{(a + tb) \times 4 + 4\pi r b} e^{\pi(\frac{1}{6} - \frac{1}{4})(\mu + r\lambda)}$$

$$= \frac{(1 + t\eta) \times 6 + 4\pi r \eta}{(1 + t\eta) \times 4 + 4\pi r \eta} e^{-\frac{\pi}{12}(\mu + r\lambda)}$$

ここで t=1.4 m η=0.08 r=10 m
μ=0.3 λ=0.004

とすると、

$$\frac{C_6}{C_4} = \frac{(1 + 1.4 \times 0.08) \times 6 + 4 \times 3.14 \times 10 \times 0.08}{(1 + 1.4 \times 0.08) \times 4 + 4 \times 3.14 \times 10 \times 0.08} e^{-\frac{3.14}{12}(0.3 + 0.04)}$$

$$= 1.19 \times 0.91 = 1.09$$

すなわち、リブを 6 個としたときは 4 個とする場合に比して、PC工事費は 9% 多くなることがわかる。

4. リブ自体の工費節減

リブ数を少なくすることは、当然のことながら、PC工事費の節減以外に、それ自体の建設費を節減するに役立つ。元来リブを構築するには比較的手間のかかるものであって、これに要する工費の要素をあげると次のようなものがある。

- 1) 円周方向のPCケーブル工
- 2) コンクリート容積の増加
- 3) 型わく
- 4) リブ中に必要なせん断力をとるための配筋
- 5) リブ部分における縦方向プレストレスの増加

以上のうち、1)の項目は前述のPC工事費に含めてその経済性を論ぜられたところであるが、1)以外の項目はリブを設けることによって増加する工費であって、その総数は無視できない。

いま簡単のため、コンクリート壁厚を20cmとし、リブの標準の大きさを図-3に示す寸法として、リブ1個の占める水平断面積のタンク水平断面積に対する比率を%で求めると表-1のようになる。

表-1 リブ1個の横断面積

		ケーブル種別	12φ5mm	12φ7mm	12φ8mm
		リブ幅 t(m)	1.4	1.45	1.5
タンク半径	5m	リブ厚 d(cm)	18	19	21
		断面比	4.0%	4.4%	5.0%
	10m	リブ厚 d(cm)	19	20	22
		断面比	2.1%	2.3%	2.6%
	20m	リブ厚 d(cm)	21	22	24
		断面比	1.6%	1.7%	2.0%

たとえば12φ7mmケーブルを用いて半径10mのタンクを建造する場合、リブ数2個のコンクリート容積は円筒部コンクリートの4.6%に相当する。このほかに前記3), 4), 5)を考慮するとおそらく円筒壁体コンク

リート工事費の10%近くに及ぶであろう。

5. むすび

リブを有するPCタンクにあっては、リブの工事費そのものも馬鹿にならないが、リブ数がPC工事費に及ぼす影響もまた大きい。前述の討論によって、ケーブルの種別とそのPC工事費を求めておけば、最も経済的なリブ数の選定が可能である。

図-4でわかるように、摩擦係数の小さいケーブルほどリブ数を減少することができるが、通常用いられている摩擦係数($\mu=0.3, \lambda=0.004$)程度の場合について、例えばフレシネーケーブル(12φ5mm, 12φ7mm, 12φ8mm)を用いる場合、経済的なリブ数は大体次のように定めてよいと考えられる。

直径 5m 以下 2個 直径 30~40m 5個
 " 5~15m 3 " " 40~50m 6 "
 " 15~30m 4 "

この数値はもちろん、経済事情の変化によって異なってくるが、ここに例示したフレシネー工法以外にあって同様の手順によって求められる。以上PCタンクの設計にあたって少しでも役立てば幸である。

文献参考

- 1) "PC tendonの種別によるPC工事費の経済性", プレストレストコンクリート Vol. 10, No. 5, pp. 74~76, 1968.12

1970.10.31・受付

PC 構造物設計図集発売について

当協会では、先に「PC構造物設計図集」の出版を企画し、本会編集、(株)技報堂発行の形で出版致しておりますのでお知らせします。

本書は、本協会誌「プレレストレスト コンクリート」の末尾に掲載致しております折込付図を、協会誌編集委員会の手により、PCの設計・施工に携わる方々のご使用に便利なように、土木編(32編)・建築編(28編)・その他4編の三部門にわけ、それぞれに写真・説明等を入れ、わかりやすく編集したものです。皆様のお手元にぜひお備え下さいませよう、おすすめ申し上げます。

体 裁 : B4判 138 ページ 活版印刷
 定 価 : 1500 円 会員特価 : 1200 円
 送 料 : 150 円

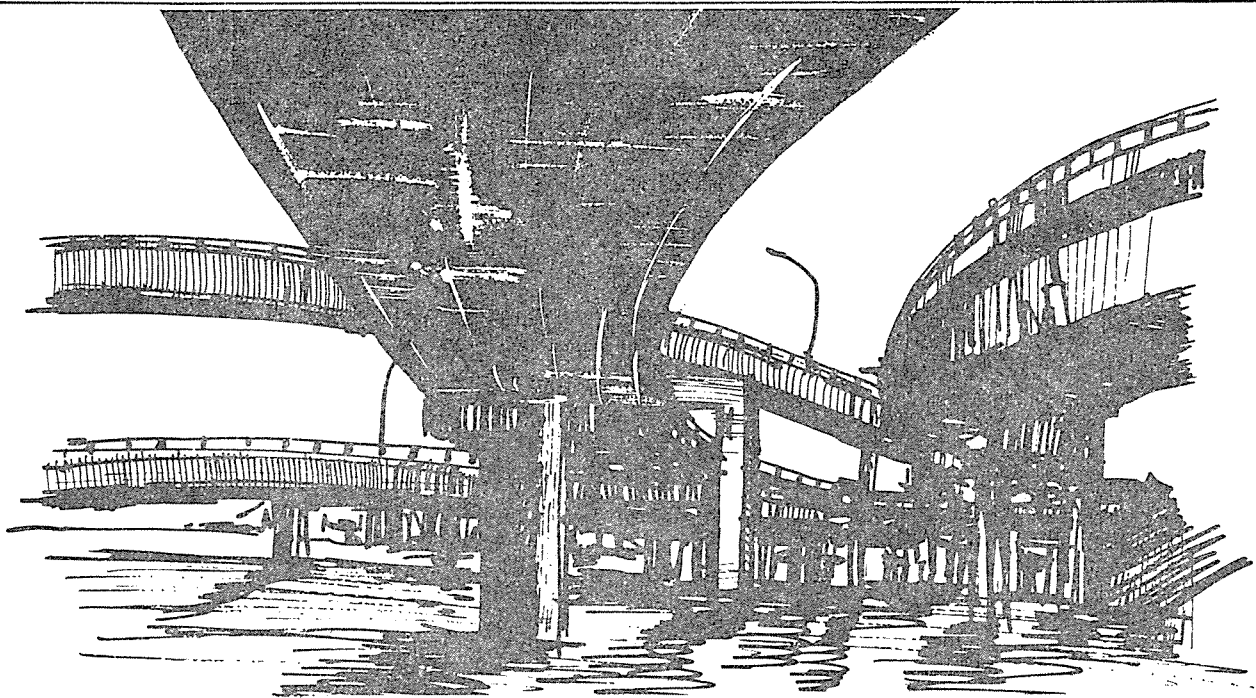
申 込 先 : 東京都中央区銀座2の14の4 銀鹿ビル3階

プレレストレスト コンクリート技術協会

TEL (541) 3595 振替 東京 62774 番 〒 104

1970年工業標準化実施

“通商産業大臣賞”受賞!



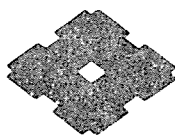
明日の土木建築工事に活躍する 住友電工の各種PC鋼材

長足の進歩と日夜躍進をつづけている建築土木業界——そのなかでPSコンクリートの占める割合は、着実に伸びています。住友電工はこのPSコンクリートの原材料である《PC鋼線・PCストランド・PC鋼棒》の研究にわが国で最初に着手しその生産をつづけてきました。

この長い経験と技術は、コンクリートとの付着性能に優れた各種のPC鋼材・異形PC鋼材を開発し、種々のPC工法や用途にもっとも適した性能を持っているPC鋼材を完成しました。

〈主要製品と用途〉

- PC鋼線・PCストランド・PC鋼棒
各種建築構造物・PC橋梁
PC枕木・PC矢板・PCヒューム管
PCタンク・PCパイル・PCスラブ類
- スミツイスト
PCパイル・PCポール
- タイロッド (STR鋼棒)
護岸工専用・岸壁整備用



PC鋼材の総合メーカー

住友電気工業株式会社

本社 大阪市東区北浜5-15 ☎541 電話 大阪(06) 203-2121(大代表)
 特殊線事業部 伊丹市昆陽字宮東1 ☎664 電話 伊丹(0727)81-5151(大代表)
 東京特殊線営業部 東京都港区芝琴平町1 ☎105 電話 東京(03) 502-1211(大代表)
 名古屋支店 名古屋市東区久屋町5-9 (住友商事名古屋ビル) ☎461 電話 名古屋(052)951-5261(大代表)
 福岡支店 福岡市天神2-12-1 (天神ビル) ☎810 電話 福岡(092)75-6031(大代表)