

プレストレスト コンクリート管について

井 深 功

1. ま え が き

コンクリートを主とした管において、一般に鉄筋コンクリートでは張力を無視しているにもかかわらず、鉄筋コンクリート管では張力を考慮しなければ根本的に圧力管として成立しない矛盾もあり、なお耐圧限度、適確な継手がない等、規格管に比し多くの疑問点を残しているのであるが、横浜市水道は創設以来自然流下型式で、水源から浄水場までの距離は 40 km の長延長で、数次におよぶ拡張工事は既設路線を拡大して鉄管を敷設してきたので、大量の鉄量と工事費をこの区間に投資してきた。

導水路は途中の汚染の心配がなければ極力圧送をさけるべきで、極端に考えれば農業用水路のごとく土地を開削したものでよいのである。かかる見地から横浜市水道第 4 回拡張工事は、事実鉄量が確保できなかったことも加わり、導水路には努めてコンクリート造水路を用い、やむを得ず管路を用いなければならぬ区間には、鉄筋コンクリート管もしくは、鉄量を極力節減した管を使用した。日本のごとき鉄資材のとほしい国において鑄鉄管の使用は、はなはだ贅沢なことであると考えていた矢先、軟鋼に比して十数倍の強度を有する鋼線を用いたプレストレスト コンクリートが戦後出現し、アメリカ、フランス等では P C 管を使用し始めたので、筆者の持論に適合した管であると信じ採用した。

2. プレストレスト コンクリート管の理論

(1) 外圧による曲げ応力

外圧による曲げ応力は a) 管壁外側 Compression 内側 Tension, b) 管壁外側 Tension 内側 Compression の二とおりの場合が考えられるが、管においては明らかに管底において最大応力が働らき、この応力は前者の場合なので、前者についてのみ論ずる。

図-1 のごとき断面において、応力および変形量に次

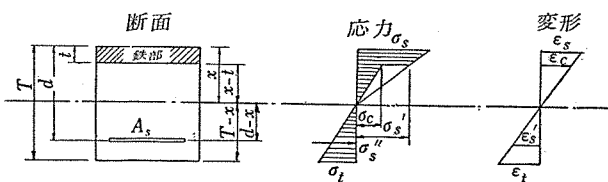


図-1

のごとく付記する。

記号

- σ_s : 鉄部縁圧応力
- σ_s' : 鉄部コンクリート部境界における鉄部圧応力
- σ_c : " コンクリート部圧応力
- σ_s'' : 引張鉄筋張応力
- σ_t : 引張側コンクリート端張応力
- ϵ_s : 荷重による σ_s に対する変形量
- ϵ_c : 鉄部コンクリート部境界における変形量
- ϵ_s' : 引張側鉄筋変形量
- ϵ_t : 引張側コンクリート端変形量

平面保持の原理および弾性係数の関係式より、

$$\frac{\epsilon_s}{x} = \frac{\epsilon_c}{x-t} = \frac{\epsilon_s'}{d-x} = \frac{\epsilon_t}{T-x} \quad (1)$$

$$\frac{\sigma_s}{\epsilon_s} = E_s, \quad \frac{\sigma_c}{\epsilon_c} = E_{cc}, \quad \frac{\sigma_t}{\epsilon_t} = E_{ct}, \quad \frac{\sigma_s''}{\epsilon_s'} = E_s \quad (2)$$

ここに E_{cc} : コンクリートの圧縮弾性係数

E_{ct} : コンクリートの引張弾性係数

E_s : 鉄部圧縮および引張弾性係数

$$E_s/E_{cc} = n, \quad E_{cc}/E_{ct} = 1/m$$

(1), (2) より

$$\sigma_c = \frac{1}{m} \times \frac{x-t}{T-x} \cdot \sigma_t \quad (3)$$

$$\sigma_s = \frac{n}{m} \cdot \frac{x}{T-x} \cdot \sigma_t \quad (4)$$

$$\sigma_s'' = \frac{n}{m} \cdot \frac{d-x}{T-x} \cdot \sigma_t \quad (5)$$

また応力図より

$$\sigma_s' = \frac{x-t}{x} \sigma_s = \frac{x-t}{T-x} \cdot \frac{n}{m} \cdot \sigma_t \quad (6)$$

中立軸 x は $\Sigma T = \Sigma C$ より求める。

$$\sigma_s'' A_s + \sigma_t (T-x) 1/2 - \sigma_s \cdot x 1/2 + \sigma_s' (x-t) 1/2 - \sigma_c (x-t) 1/2 = 0$$

(3)~(6) の値を代入して x について解けば

$$x = \frac{-(nt-t+mT+nA_s) \pm \sqrt{(nt-t+mT+nA_s)^2 + (1-m)(nt^2-t^2+mT^2+2dnA_s)}}{1-m} \quad (7)$$

抵抗モーメント $M_R = \Sigma M_{comp} + \Sigma M_{ten}$ より

$$M_{comp} = \frac{1}{3} \sigma_s x^2 - \frac{1}{3} \sigma_s' (x-t)^2 + \frac{1}{3} \sigma_c (x-t)^2$$

$$M_{ten} = \frac{1}{3} \sigma_t (T-x)^2 + A_s \sigma_s'' (d-x)$$

$$\therefore M_R = \frac{1}{3} \sigma_s x^2 - \frac{1}{3} \sigma_s' (x-t)^2 + \frac{1}{3} \sigma_c (x-t)^2 + \frac{1}{3} \sigma_t (T-x)^2 + A_s \sigma_s'' (d-x)$$

(3)~(6) 式を代入すれば

$$M_R = \frac{\sigma_t}{3(T-x)} \left\{ \frac{n}{m} x^3 - \frac{n-1}{m} (x-t)^3 + (T-x)^3 + 3 A_s (d-x)^2 \frac{m}{m} \right\} \quad (8)$$

(2) 円周方向プレストレス

記号

- $A_c(\text{cm}^2)$: 管壁 1m 当りのコンクリートライニング面積
- $A_s(\text{cm}^2)$: 管壁 1m 当りの PC 鋼線の面積
- $A_y(\text{cm}^2)$: 管壁 1m 当りのシリンダーの面積
- $D_y(\text{cm})$: シリンダー径
- $E_c(\text{kg/cm}^2)$: コンクリート弾性係数
- $E_s(\text{kg/cm}^2)$: 鋼弾性係数
- $E_{ey}(\text{kg/cm}^2)$: シリンダーの弾性限界
- $E_{es}(\text{kg/cm}^2)$: PC 鋼線弾性限界
- $n = E_s/E_c$
- $t(\text{cm})$: コアの厚み
- $t_y(\text{cm})$: シリンダーの厚み
- $f_{ci}(\text{kg/cm}^2)$: 内圧 0 時のコンクリートの圧縮応力
- $f_{yi}(\text{kg/cm}^2)$: 内圧 0 時のシリンダーの圧縮応力
- $f_{si}(\text{kg/cm}^2)$: 内圧 0 時の PC 鋼線の引張応力
- $f_{ca}(\text{kg/cm}^2)$: 任意内圧 (P_a) 時のコンクリート応力
- $f_{ya}(\text{kg/cm}^2)$: 任意内圧 (P_a) 時のシリンダー応力
- $f_{sa}(\text{kg/cm}^2)$: 任意内圧 (P_a) 時の PC 鋼線の応力
- $f_{so}(\text{kg/cm}^2)$: コンクリート シリンダー圧縮力 0 時の PC 鋼線の応力
- $f_{sg}(\text{kg/cm}^2)$: PC 鋼線巻付時の引張応力
- $f_{su}(\text{kg/cm}^2)$: PC 鋼線引張強度 (破壊応力)
- $f_{yb}(\text{kg/cm}^2)$: 管破壊圧時のシリンダー応力
- $P_o(\text{kg/cm}^2)$: コアの圧縮応力 0 になったときの内圧
- $P_w(\text{kg/cm}^2)$: 設計静水圧
- $P_a(\text{kg/cm}^2)$: 任意内水圧
- $P_h(\text{kg/cm}^2)$: 水衝圧
- $P_e(\text{kg/cm}^2)$: 弾性限界内圧 $P_e = P_o + P_h$
- $P_b(\text{kg/cm}^2)$: 破壊時の内圧

図-2 に示すごとく、いま内外圧を全然考慮せず、コンクリート シリンダーにそれぞれ f_{ci} , f_{yi} のプレストレスが与えられ、このときの PC 鋼線の応力を f_{si} とする。ついで外圧を考えず水圧を徐々に上昇せしめ P_a に至るとコンクリート シリンダーの f_{ci} , f_{yi} は減少し、残存プレストレス f_{ca} , f_{ya} となり PC 鋼線の応力は増

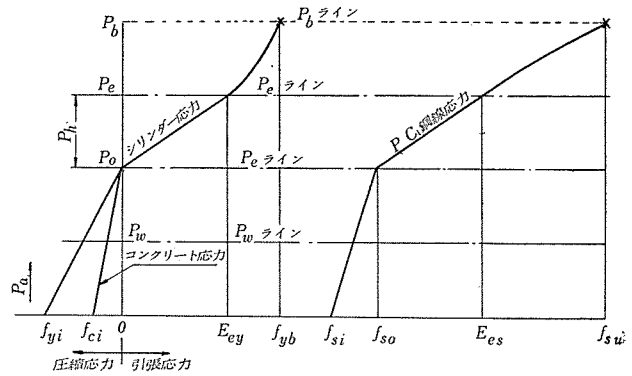


図-2 内径一応力図

大して f_{sa} となる。さらに水圧を上昇せしめると f_{ca} , f_{ya} はついに 0 となる。すなわちプレストレスは 0 である。PC 鋼線の応力 f_{sa} は f_{so} へ増大し、これのみが水圧に抵抗する。さらに水圧が増すと、コンクリートとシリンダーは引張りとなり、コンクリートの引張応力を無視すれば、シリンダーと PC 鋼線のみが抵抗して、内圧 P_e 時にはシリンダーと PC 鋼線が同時に弾性限界に達するものとする。

まず、PC 管の設計に際して最も経済的にするには次の各項を考慮しなければならない。すなわち、

a) シリンダーと PC 鋼線の応力がおおの同時弾性限界に達するようにし、このときの内圧 (設計静水圧 + 水衝圧) が、ちょうど弾性限界になるようにする。

b) 内圧が設計静水圧 (水衝圧を加えぬ) に達したとき、PC 鋼線の引張応力 f_{so} が PC 鋼線の弾性限界よりシリンダーの弾性限界をさし引いたものに等しくなるようにすると、シリンダーとコンクリートの圧縮応力は 0 となるので PC 鋼線の管長単位当りの面積が求まる。

c) シリンダー厚は、b) より求めた PC 鋼線の管長単位当りの面積を用い、a) の考えより決定できる。

d) コンクリート ライニング厚は、内圧 0 のときの f_{ci} と外圧に耐えうる厚さとしなければならない。

いま、内圧が 0 から P_o に移行するとき、すなわち P_a のとき管を構成するコンクリート、シリンダー、PC 鋼線の各部材のヒズミは相等しいので

$$\frac{f_{ca}}{E_c} = \frac{f_{ya}}{E_s} = \frac{f_{so} - f_{sa}}{E_s}$$

$$\therefore f_{sa} = f_{so} - n f_{ca} \quad (9)$$

また、内圧 P_e にてシリンダー PC 鋼線のヒズミは相等しいが、コンクリートは透水している。

$$\frac{E_{es} - f_{so}}{E_s} = \frac{E_{ey}}{E_s}$$

$$\therefore f_{so} = E_{es} - E_{ey} \quad (10)$$

(9), (10) より

$$f_{sa} = f_{so} - n f_{ca} = (E_{es} - E_{ey}) - n f_{ca} \quad (11)$$

また、内圧 P_a のとき、各部の力の釣合条件より

$$\begin{aligned} A_s f_{sa} &= 50 P_a D_y + A_c f_{ca} + A_y f_{ya} \\ &= 50 P_a D_y + A_c f_{ca} + n f_{ca} A_y \\ \therefore A_s &= \frac{50 P_a D_y + A_c f_{ca} + n A_y f_{ca}}{f_{sa}} \\ &= \frac{50 P_a D_y + f_{ca} (A_c + n A_y)}{f_{sa}} \quad (12) \end{aligned}$$

(12) に (9) を代入して

$$A_s = \frac{50 P_a D_y + f_{ca} (A_c + n A_y)}{f_{so} - n f_{ca}} \quad (13)$$

内圧が P_o から P_e に移行したとき、コンクリートは透水するが、各部材の応力は短期応力であると同時に弾性限界内にあるため、もとに復帰する。このため、静水圧、外圧並びに水衝圧を加えたとき、プレストレスが 0 になるよう設計するのは、オーバー ストロングすぎると思われるので、設計静水圧、外圧分のみを考える。

すなわち、(13) 式に $P_a \rightarrow P_w, f_{ca} \rightarrow \sigma_t$ を代入すれば

$$A_s = \frac{50 P_w D_y + \sigma_t (A_c + n A_y)}{f_{so} - n \sigma_t} \quad (14)$$

いま断面積 as をもつ PC 鋼線を用いるものとし、ピッチ p (mm) および 1 m 当りの PC 鋼線の本数は

$$N \geq \frac{A_s}{as}, \quad p = \frac{1000}{N}$$

次にシリンダーは、図-2 および設計条件 a)~d) により

$$A_y \geq \frac{50 P_n D_y - E_{ey} A_s}{E_{ey}} \quad (15)$$

$$\therefore t_y = \frac{A_y}{100}$$

内圧 0 時の力の場合条件より

$$A_c f_{ci} + A_y f_{yi} = A_s f_{si} \quad (16)$$

また内圧 P_a が 0 より P_o に上昇したときコンクリート、シリンダーの圧縮力が 0 になったとき、各部材のヒズミは等しいことより

$$\frac{f_{ci}}{E_c} = \frac{f_{so} - f_{si}}{E_s} = \frac{f_{yi}}{E_s} \quad (17)$$

(16), (17) より

$$f_{ci} = \frac{A_s f_{so}}{A_c + n(A_y + A_s)} \quad (18)$$

$$f_{si} = \frac{(A_c + n A_y) f_{so}}{A_c + n(A_y + A_s)} = f_{so} - n f_{ci} \quad (19)$$

$$f_{yi} = n f_{ci} \quad (20)$$

PC 鋼線を巻きつける応力 f_{sg} はコンクリートの収縮、クリープおよび PC 鋼線のレラクセーションを考慮

すると、 f_{sg} に巻きつけても f_{si} に変化すると考えられるので、これを $f_{s \text{ loss}}$ にて表わすと次のごとくなる。

$$f_{s \text{ loss}} = \left[0.0004 + \frac{f_{ci}}{E_c} + \frac{0.06 f_{si}}{E_s} \right] E_s \quad (21)$$

(コンクリート乾燥収縮) (コンクリートクリープ) (PC 鋼線レラクセーション)

これだけの損失があるとすれば、PC 鋼線の巻付け応力は

$$f_{sg} = f_{si} + f_{s \text{ loss}} \quad (22)$$

となる。(20) 式に各数値を代入してみると f_{si} と f_{sg} の関係式は、ほぼ次のごとくなる。すなわち、

$$f_{sg} \doteq 1.22 f_{si}$$

このときの PC 鋼線の引張力 P は

$$P = as \cdot f_{sg} \quad (23)$$

なお、図-2 により各部材と内圧との応力関係は次のごとくなる。

$$P_o = \frac{A_s f_{so}}{50 D_y} \geq P_w \quad (24)$$

$$P_e = P_o + P_h = \frac{A_s E_{es} + A_y E_{ey}}{50 D_y} \quad (25)$$

$$P_b = \frac{A_s f_{su} + A_y f_{yb}}{50 D_y} \quad (26)$$

さらにコンクリートの圧縮応力は内圧が 0 で外圧が作用したとき最大となるので、次式が満足されなければならない。

$$f_{ci} + \sigma_c \leq \sigma_{ca} \quad (27)$$

3. 実際管の設計

(1) 管の説明および設計条件

設計静水圧: $P_w = 2.6 \text{ kg/cm}^2$

管内径: $D_o = 1500 \text{ mm}$

コンクリートライニング厚: $d = 75 \text{ mm}$

モルタルコーティング厚: $d' = 20 \text{ mm}$

シリンダー径: $D_y = 1652.3 \text{ mm}$

シリンダー厚: $t = 2.3 \text{ mm}$

PC 鋼線: $\phi 3.5 \text{ mm}$, 16 mm ピッチ

ヤング率: PC 鋼線,

シリンダー $E_s = 210000 \text{ kg/cm}^2$

コンクリート $E_c = 350000 \text{ kg/cm}^2$

$$n = \frac{E_s}{E_c} = 6$$

応力: PC 鋼線 (ピアノ線 JIS G 3522 A 種 $\phi 3.5 \text{ mm}$ 相当品)

引張破断強度 17000 kg/cm^2

降伏点強度 13600 kg/cm^2

(破断強度の 80%)

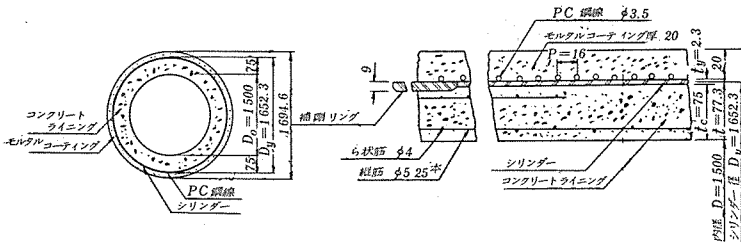


図-3 管 壁 図

弾性限界 $E_{es}=9\,500\text{ kg/cm}^2$
 コンクリート (配合 1 : 1.25 : 1.25) :
 28日圧縮強度 360 kg/cm^2
 許容圧縮応力 120 kg/cm^2 (圧縮強度の 1/3)
 シリンダー (薄鋼板規格 G 3301 第二種~第四種品)
 引張強度 $2\,800\text{ kg/cm}^2$
 弾性限界 $E_{ey}=1\,400\text{ kg/cm}^2$
 (引張強度の 80%)

(2) 外圧による曲げ応力

a) 設計荷重時に生ずる曲げモーメント 自重および土かぶり 1.2 m, 半円地盤反力支持とすれば最大応力発生点, すなわち管底における曲げモーメントは次のとおりである。

自重	土被荷重	合計
管底 $0.441\text{ wr}^2=7\,640$	$1/4\text{ pr}^2=30\,280$	$37\,920\text{ kg}\cdot\text{cm}$
発生する曲げ応力		

(7), (8) 式に $T : 7.33\text{ cm}$, $t=0.23\text{ cm}$, $d=6.73\text{ cm}$, $A_s=0.0184\text{ cm}^2/\text{cm}$, $M_R=37\,920\text{ kg}\cdot\text{cm}^2$, $m=E_{ct}/E_{cc}=0.5$, $n=E_s/E_{cc}=6$ を代入して解けば

$$x=2.72\text{ cm}$$

$$\sigma_t=26.8\text{ kg/cm}^2$$

(3) 式より

$$\sigma_c = \frac{1}{0.5} \cdot \frac{2.72-0.23}{7.73-2.72} \times 26.8 = 26.8\text{ kg/cm}^2$$

(3) 円周方向プレストレス

PC 鋼線の断面積 A_s は (14) 式に,

$$f_{so}=E_{es}-E_{ey}=9\,500-1\,400=8\,100\text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_t=26.8\text{ kg/cm}^2 \rightarrow 30\text{ kg/cm}^2, P_w=2.6\text{ kg/cm}^2,$$

$$D_y=165.23\text{ cm}, A_c=750\text{ cm}^2$$

$n=6$, $A_y=23\text{ cm}$ を代入すれば

$$A_s = \frac{50 \times 2.6 \times 165.23 + 30(750 + 6 \times 23)}{8\,100 - 6 \times 30} = 5.826\text{ cm}^2$$

PC 鋼線 $\phi 3.5\text{ mm}$ を使用すれば, 1 本当りの断面積 $as=0.0962\text{ cm}^2$, 1 m 当りの PC 鋼線の本数 N は

$$N=A_s/as=5.826/0.0962=60.56 \div 61$$

PC 鋼線のピッチ p は

$$p = \frac{1\,000}{N} = \frac{1\,000}{61} = 16.4\text{ mm}$$

ゆえに PC 鋼線 $\phi 3.5\text{ mm}$, ピッチ 16 mm, $A_s=6.013\text{ cm}^2$ とする。

管壁 1 m 当りのシリンダーの面積 A_y は (15) 式より

$$A_y \geq \frac{50 \times 5.0 \times 165.23 - 1\,400 \times 6.013}{1\,400} = 23\text{ cm}^2$$

$$\therefore t_y = \frac{A_y}{100} = 0.23\text{ cm}$$

与えられたプレストレスは (18), (19), (20) の各式より

$$f_{ci} = \frac{A_s f_{so}}{A_c + n(A_y + A_s)} = \frac{6.013 \times 8\,100}{750 + 6(23 + 6.013)} = 52.5\text{ kg/cm}^2$$

$$f_{si} = f_{so} - n f_{ci} = 8\,100 - 6 \times 52.5 = 7\,785\text{ kg/cm}^2$$

$$f_{yi} = n f_{ci} = 6 \times 52.5 = 315\text{ kg/cm}^2$$

PC 鋼線の巻付け応力は (21), (22) 式より

$$f_{sg} = f_{si} + \left[0.0004 + \frac{f_{ci}}{E_c} + \frac{0.06 f_{ci}}{E_s} \right] E_s$$

$$\div 1.22 f_{si} = 1.22 \times 7\,785 = 9\,498 \div 9\,500\text{ kg/cm}^2$$

\div 弾性限界

このときの PC 鋼線の引張力 P は (23) 式より

$$P = as f_{sg} = 0.0962 \times 9\,500 = 914 \div 920\text{ kg}$$

外圧応力 $\sigma_t=30\text{ kg/cm}^2$ を水圧に換算すれば

$$P_o - P_w = \frac{2.6 \times 30}{52.5 - 30} = 3.5\text{ kg/cm}^2$$

$$\therefore P_o = 2.6 + 3.5 = 6.1\text{ kg/cm}^2$$

すなわち内圧 6.1 kg/cm^2 が作用するとプレストレスは 0 となる。内圧 0 のときコンクリートの圧縮応力は (27) 式より

$$f_{ci} + \sigma_c = 52.5 + 30 = 82.5\text{ kg/cm}^2 < \sigma_{ca} = 120\text{ kg/cm}^2$$

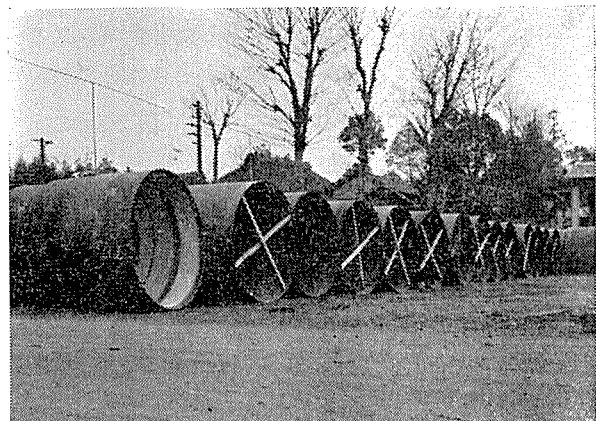


写真-1 内径 1650×4000mm, 厚さ 2.3 mm の薄鋼板製シリンダー管

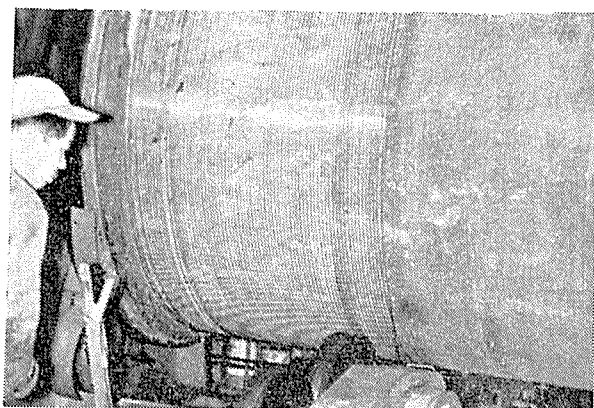


写真-2 シリンダー管にコンクリート ライニング
グ養生完了後における PC 鋼線巻付作業



写真-3 PC 管現場敷設作業



写真-4 敷設完了後の継手の電気溶接作業



溶接完了後における継手内
外面のグナイト作業

写真-5

なお、緊張時のコンクリ
ート圧縮応力 f_{cg} は

$$f_{cg} = \frac{6.013 \times 9500}{750 + 6(23 + 6.013)}$$

$$= 62 \text{ kg/cm}^2$$

$$< 120 \text{ kg/cm}^2$$

また

$$P_h = \frac{(6.013 + 23) \times 1400}{50 \times 165.23}$$

$$= 4.93 \text{ kg/cm}^2$$

$$\approx 5.0 \text{ kg/cm}^2$$

ただし

$$(f_{yD} = E_{cy} = E_{es} - f_{so})$$

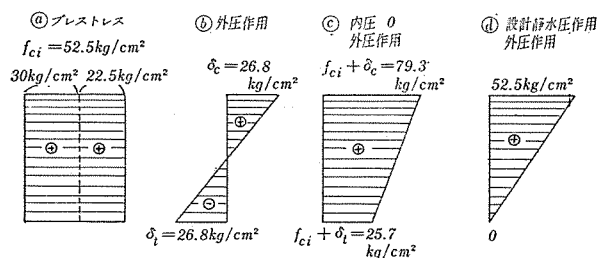


図-4 管壁（コンクリート部）応力図

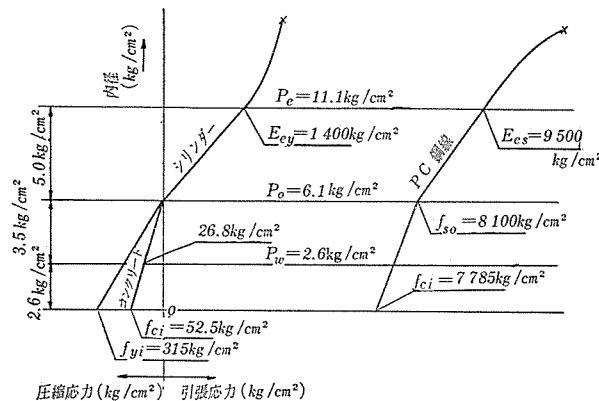
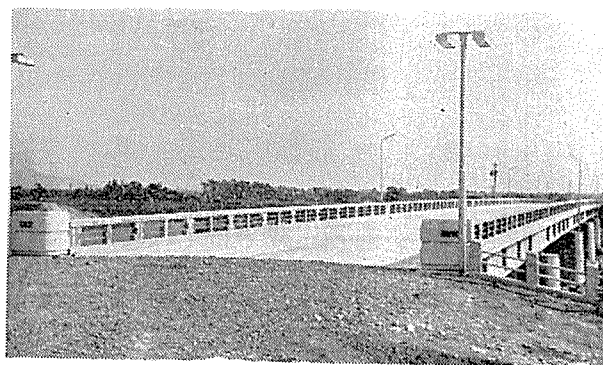


図-5 内圧と各部材の応力関係

(筆者：横浜市水道局長)

前 芝 大 橋 完 成

施 主：愛知県土木部
 施工業者：オリエンタル コンクリート株式会社
 工事場所：豊橋市前芝町
 工 期：33 年 7 月着工 34 年 3 月竣工
 橋 長：152.9 m (30.54 m, 単純支持桁 5 連)
 巾 員：8 m (T 型桁 5 本並列)
 荷 重：T-20, L-20
 橋 桁：フレッシュナー方式によるポストテンション
 グ桁 (桁高 1.45 m)
 架設方法：エレクションタワーによる釣込み



プレストレストコンクリート

設計・施工・製作

KKK

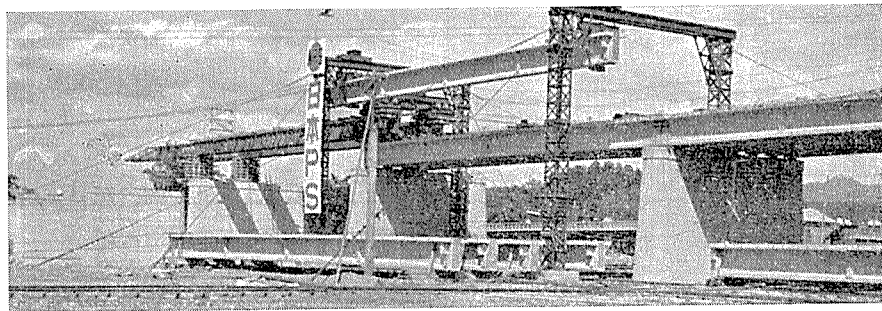
極東工業株式会社

取締役社長 藤田 定一

本社	広島市二葉ノ里	115	電(4) 8221~3
支店	岡山市上伊福		電(2) 7795
大竹工場	広島県大竹市		電大竹 607
大阪出張所	電(37)	—0950	小倉出張所 電(5)—3881
福岡出張所	電(4)	—0242	佐賀出張所 電 3776
高知出張所	電(2)	—7304	松江出張所 電 6027
高松出張所	電	4709	

NPS

ピーエスコンクリート設計施工並に製作 日本ピー・エス・コンクリート株式会社



顧問 加賀山之雄 顧問 稲浦鹿蔵 取締役社長 有馬義夫

本社	福井県敦賀市泉125号2番地	電話(敦賀) 代表 1400番
東京営業所	東京都千代田区大手町1丁目4番地(大手町ビル3階327号室)	電話 和田倉 (20) 4 5 3 0 番
大阪営業所	大阪市北区堂島上2丁目39番地	毎日産業ビル 大阪(36) 7797
名古屋営業所	名古屋市中区南呉服町2丁目18番地(呉服町ビル3階4号室)	電話 名古屋 (24) 7 5 1 6 番