

PC 円形構造物のひずみ測定

—神戸摩耶埠頭の水工構造物—

岡 田 清*
西 林 新 蔵**

1. まえがき

プレストレスト コンクリートの発展とともに、従来利用されてきた橋梁、まくらぎ、矢板、床版などの直線部材だけでなく、円形の構造物に PC の特長を生かした設計が近年さかんに行なわれている。たとえば、化学薬品の処理槽、セメントサイロ、水道タンク、石油タンク、粉体の貯蔵、港湾の仮護岸、防波堤などの各方面に広範囲に利用されている。

これら PC 構造物ではいずれも内部から外方に向かう圧力（内圧）が作用するので、壁体にはフープテンションが生じ、鉛直方向には曲げモーメントによる曲げ引張力が生ずる。円形 PC 構造物では予想される外力に対して十分安全とするため円周方向にプレストレスを導入し、またプレストレッシングの際、大きい曲げ引張力が生ずる場合および鉛直方向に大きい曲げが生ずる場合には、鉛直方向にもプレストレスを導入して引張力が生じないようにする。

PC タンクの円周方向にプレストレスを与える方法を大別するとつぎのとおりである。

(1) PC 鋼線がコンクリート壁の中にケーブルの形で埋め込まれ、円周の適当な位置に配置された垂直のピラスターで定着する方法

(2) PC 鋼線をコンクリートの外壁に巻きつける方法

(1) はフレシネーによって考案された工法で、壁断面全体にプレストレスが導入される。(2) にはアメリカのプレロード方式¹⁾、スイスの BBRV 方式などがあるが、いずれもタンクの円周に沿って移動する自走式の特殊な機械によって PC 鋼線を一定の引張力で巻きつけるもので、壁の円周に沿って巻きつけられた PC 鋼線を保護するためセメントガンによってモルタル（ペースト）を吹付ける。この方法ではプレストレスが均等に導入され、また吹付けモルタルの上さらに PC 鋼線を 2 重、3 重に巻きつけることができるので (1) の工法よりも大きいプレストレスを導入しうる。

* 正員 工博 京都大学教授 工学部土木工学教室

** 正員 工修 京都大学助教授 工学部土木工学教室

本文では、現在、運輸省神戸港工事事務所において施工中の摩耶埠頭に使用された仮護岸用 PC タンクおよび第 5 防波堤用 PC タンクに実施されたプレストレスの導入状況について述べる。

2. PC タンクの設計、製作およびひずみ測定方法

(1) 設 計

a) 仮護岸用 PC タンク このタンク（底板はないので実際はパイプに属するものであるが、現場での呼称にしたがい以下タンクという）は整地された捨石基礎上に設置し、タンクの内部には中埋土砂を填充し、上

図-1 仮護岸用 PC タンクの形状寸法

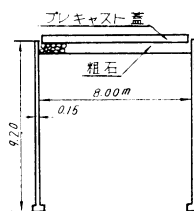


図-2 仮護岸用 PC タンク鋼線配置および鋼線緊張順序

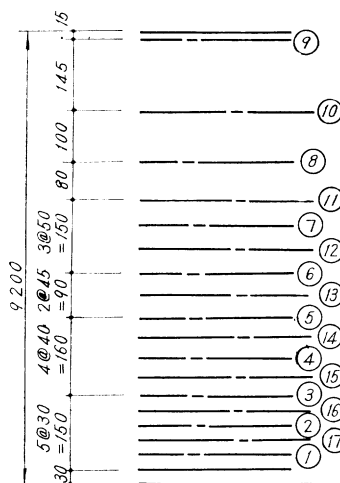
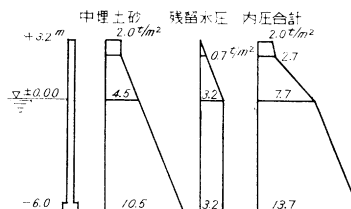


図-3 仮護岸用 PC タンクの設計内圧



部にはプレキャストのコンクリート蓋を置いて完成する。設計に際し考慮された外力としては、中埋土圧、残留水圧などである。タンクの形状寸法、鋼線配置および緊張順序、土圧と残留水圧の作用状態を 図-1, 2, 3 に示す。

b) 防波堤用 PC タンク このタンクはいわゆる三建式圧入工法によって下段用タンクを圧入し、その上に上段用タンクを載せ、中埋土砂を填充し一連の防波堤を完成するもので、日本材料試験協会 PC 委員会資料 22-3²⁾ に紹介されている。タンクの設計に際してはつぎのような考慮がはらわれた。

① PC 鋼線緊張時：円周方向 PC 鋼線緊張にともなう鉛直方向の曲げモーメントに対しては特に注意がはらわれた。フレシネー方式においては PC 鋼線の摩擦による引張応力度の減少を少なくするため、円周を 6 等分しその等分点にピラスターを設け PC 鋼線を定着した。

② PC 鋼線緊張後：コンクリートのクリープ、乾燥収縮、鋼線のリラクゼーションなどによる応力の損出は約 15% と仮定する。

③ 沈設時：タンク壁体 および 上部鋼製蓋に一様に 13 t/m^2 の水圧が作用するものと仮定する。

④ 沈設後および地震時：図-4 に示すような外力を仮定する。タンクの形状、寸法、フレシネー方式の上、下段タンクのケーブル配置、緊張順序および沈設後の状況を 図-5, 6 に示す。

図-4 防波堤用 PC タンクの設計荷重 (土圧+水圧)

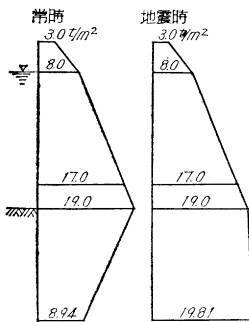


図-5 防波堤用 PC タンク

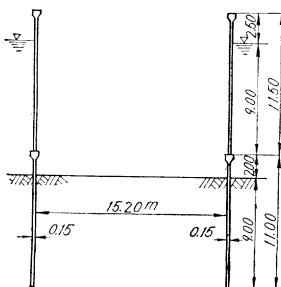
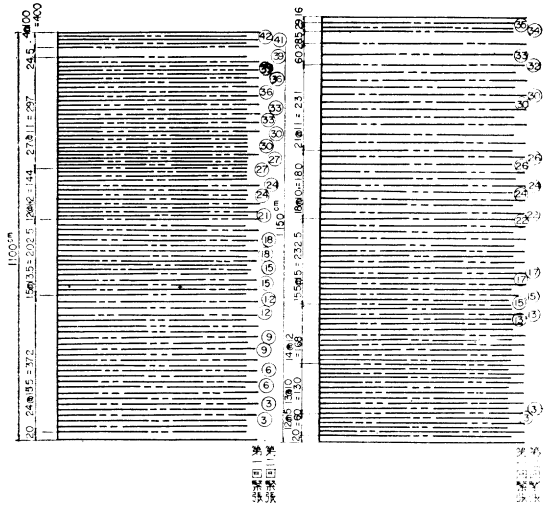


図-6 防波堤用 PC タンクのケーブル配置図および緊張順序 (フレシネー方式) ○印測定 PC ケーブル番号
下段タンク 上段タンク



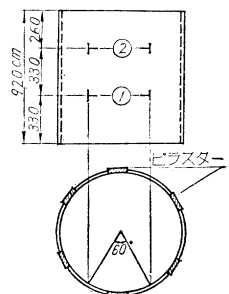
(2) 製作および PC 鋼線の緊張

タンクのコンクリート打設は、仮護岸用 PC タンクは普通の打継ぎ法、また防波堤用タンクは工期の短縮と打継ぎ目をなくする目的からスライディング工法によっている。プレストレスの導入法は、仮護岸用はフレシネー方式、防波堤用はフレシネーおよびプレロード方式が採用された。フレシネー方式の PC 鋼線 1 ケーブルあたりの緊張力は 23400 kg 、緊張方法は最下端より 1 本おきに緊張し、最上端のケーブル緊張が終ると、仮護岸用では上端から、防波堤用では下端から残りのケーブルを同様に緊張した。プレロード方式ではワインディングマシンに設置されたダイスを通して PC 鋼線を引抜き (105 kg/mm^2 , 有効応力: 約 80 kg/mm^2)、プレストレスを連続的に導入することができ、このときフレシネー方式で問題となるような PC 鋼線の摩擦によるプレストレスの減退を考慮する必要はない¹⁾。

(3) ひずみの測定方法

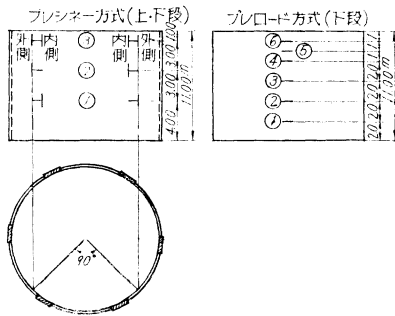
PC タンクのひずみはいずれもカールソン型ひずみ計 (CS-10 D: 共和電業社製) を使用した。

図-7 仮護岸用カールソン型ひずみ計設置位置 (鉛直方向計器は壁断面の外側に設置)



a) フレシネー方式 ひずみ計の設置位置を仮護岸用は 図-7、防波堤用は 図-8 に示す。後者では上段下段用とも計器設置位置は同じである。これらの計器のうち円周方向に設置されたものによってプレストレスの導入状況を、また鉛直方向に設置された計器によって PC 鋼線緊張時に生ずる曲げモーメント

図-8 防波堤用カールソン型ひずみ計設置位置



によるひずみ測定を目的とした。測定は仮護岸用では1ケーブルごとに、防波堤用では3~10ケーブルごとに実施した。

h) フレロード方式 ワインディングマシンによるプレストレスの導入状況を明確にするため、計器は円周方向のみに設置した(図8)。実際のプレストレス導入状況は、フレシネー方式と異なり動的であるが、ワインディングマシンの上昇速度が小さいので測定は静的に約10cm上昇ごとに行なった。

3. PCタンクの理論解^{3), 4), 5), 6), 7), 8)}

(1) 円形構造物の一般解

タンクに限らず、パイプ、円筒シェルなどの中空円形断面を有する構造物の一般解は、S. Timoshenko や W. Flügge などの円筒シェルの理論を利用して解くことができる。ここではタンク壁体にプレストレスを導入したときの一般解を述べる。

タンクの壁のたわみはポアソン比を無視すると、弾性支承上にある曲げ剛度が一定のはりとして外力が作用した場合のたわみを求める式と同じ形になることが知られている(図-9参照)。

記号

- w : 円形構造物の壁のたわみ
- N_φ : 円周方向の軸力
- M_x : 鉛直方向の曲げモーメント
- Q_x : 鉛直方向と垂直な断面に作用するせん断力
- P_z : 外力
- a : 円形構造物の半径
- d : 円形構造物の壁厚
- ν : ポアソン比
- E : コンクリートの弾性係数
- D : 曲げ剛度

$$D = \frac{Ed^3}{12(1-\nu^2)} \dots \dots \dots (1)$$

$$\beta^4 = \frac{Ed}{4a^2D} = \frac{3(1-\nu^2)}{a^2d^2} \dots \dots \dots (2)$$

弾性支承上のはりのたわみ微分方程式および、その一般解はつぎのとおりである。

$$\frac{d^4w}{dx^4} + 4\beta^4w = \frac{P_z}{D} \dots \dots \dots (3)$$

$$w = e^{\beta x}(c_1 \cos \beta x + c_2 \sin \beta x) + e^{-\beta x}(c_3 \cos \beta x + c_4 \sin \beta x) + f(x) \dots \dots (4)$$

ここで $f(x)$ は式(3)の特解、 c_1, c_2, c_3, c_4 は円形構造物の端部の条件によって定まる積分定数である。実測したPCタンクはいずれも下端自由である。タンクの高さ h 、半径 a に比して壁厚が非常に小さいとき $c_1 = c_2 = 0$ 、またプレストレス導入の場合は、 $f(x) = 0$ とすることができるので式(4)はつぎのように書き改められる。

$$w = e^{\beta x}(c_3 \cos \beta x + c_4 \sin \beta x) \dots \dots \dots (5)$$

したがって

$$N_\varphi = -\frac{w}{a}Ed = -\frac{Ed}{a} \cdot [e^{\beta x}(c_3 \cos \beta x + c_4 \sin \beta x)] \dots \dots \dots (6)$$

$$M_x = -D \frac{d^2w}{dx^2} = -2D\beta^2 \cdot [e^{\beta x}(c_3 \cos \beta x - c_4 \sin \beta x)] \dots \dots \dots (7)$$

この弾性支承上のはりを解く場合、曲げ剛度 D が一定であれば荷重が作用する範囲とはりが有限長であるか、無限長であるかが問題となる。 βl が大であれば曲げモーメントは荷重点より遠ざかると急激に減少する。したがってはりを無限長、有限長と考えるかは βl の値に関係し、一般に $\beta l > 2.5$ の場合には無限長のはりと考えてもよいようである^{9), 10)}。無限長の場合の荷重の状態および $\beta \cdot x$ の値による計算式を一括して表-1に示す。

4. 測定結果とその考察

(1) プレストレスの導入

プレストレスの導入状況について理論値と実測値を比較する。理論値の計算では、仮護岸用ではプレストレスの導入量が少なく、したがってPC鋼線の間隔が粗であるので1ケーブルごとにこれを重中荷重として計算した。防波堤用のフレシネー方式では、計算を簡単にするためPC鋼線の緊張力を等分布荷重に換算して用いたが、鋼線間隔が変化するとこの等分布荷重の値も異なる。間隔が同一のとき換算等分布荷重はつぎのとおりである。

$$p = \frac{P \cdot N}{a \cdot l} \dots \dots \dots (8)$$

ここで、 p : 換算等分布荷重、 P : PCケーブル1本の

図-9

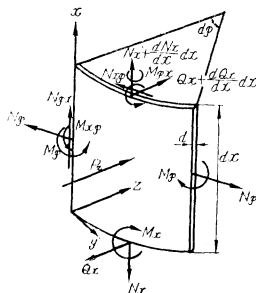
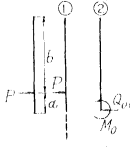
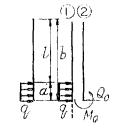
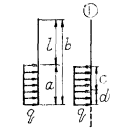
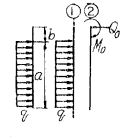
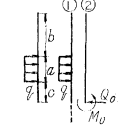
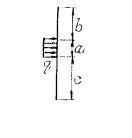


表-1 荷重の状態および βx の値による計算式

荷重の状態	βx の値	①の状態を使用する式	②の状態を使用する式	備考
(1) 	$a\beta < 2.5$ $b\beta > 2.5$	$N_p = \frac{a\beta b}{2} e^{-\beta x} (\cos \beta x + \sin \beta x)$(10) $M_x = \frac{P}{4\beta} e^{-\beta x} (\cos \beta x - \sin \beta x)$(11)	M_n : (11) $Q_0 = -\frac{P}{2} e^{-\beta x} \cos \beta x$(12) N_p : (8) M_x : (9)	$a\beta > 2.5$ $b\beta < 2.5$ のとき 上端に M_0, Q_0 を考慮する
(2) 	$a\beta < 2.5$ $b\beta > 2.5$	荷重部分 N_p(13) M_x(14) 荷重部分以外 N_p : (16) M_x : (17)	$M_0 = \frac{q}{4\beta^2} e^{-\beta a} \sin \beta a$ $Q_0 = \frac{-q}{4\beta} [e^{-\beta a} (\sin \beta a - \cos \beta a) - 1]$ $N_p = -2a\beta [\beta e^{-\beta x} M_0 (\sin \beta x - \cos \beta x) - e^{-\beta x} Q_0 \cos \beta x]$(8) $M_x = -\frac{1}{\beta} Q_0 e^{-\beta x} \sin \beta x + e^{-\beta x} M_0 \cdot [\sin \beta x + \cos \beta x]$(9)	
(3) 	$a\beta > 2.5$ $b\beta > 2.5$ $c\beta > 2.5$ $d\beta < 2.5$	荷重部分 $N_p = -\frac{qa}{2} [2 - e^{-\beta c} \cos \beta c - e^{-\beta d} \cos \beta d]$(13) $M_x = \frac{q}{4\beta^2} [e^{-\beta c} \sin \beta c + e^{-\beta d} \sin \beta d]$(14) 荷重部分以外 $N_p = -\frac{qa}{2} [e^{-\beta c} \cos \beta c - e^{-\beta b} \cos \beta b]$(16) $M_x = -\frac{q}{4\beta^2} [e^{-\beta b} \sin \beta b - e^{-\beta c} \sin \beta c]$(17)		
(4) 	$a\beta > 2.5$ $b\beta < 2.5$	荷重の状態, (3) と同じ	荷重の状態, (2) と同じ	
(5) 	$a\beta < 2.5$ $b\beta > 2.5$ $c\beta < 2.5$	荷重の状態, (2) と同じ	荷重の状態, (2) と同じ	$b\beta < 2.5$ のとき上端に M_0, Q_0 を考慮する
(6) 	$a\beta < 2.5$ $b\beta > 2.5$ $c\beta > 2.5$	荷重の状態, (2) と同じ	$b\beta, c\beta < 2.5$ のとき 上, 下端に M_0, Q_0 $b\beta < 2.5$ のとき 上端に M_0, Q_0 $c\beta < 2.5$ のとき 下端に M_n, Q_0	

緊張力, a : タンクの半径, l : 同一ピッチで緊張される距離, N : PCケーブルの本数, である。なお, フレクサー方式の場合 1 ケーブルの初期緊張力は 23 400 kg であるが, PC鋼線を弯曲させながら緊張すると非常に大きい角変化の結果, 摩擦による引張応力度の減少はいちじるしいものとなる。したがって前述したとおり, 円周を 6 等分して定着点を 6 カ所設け, 引張応力度の減少をなるべく小さくしている。円周を 6 等分したときの減少率は約 $0.86^{10)}$ となるので, 計算に用いた 1 ケーブルあたりの理論緊張力は 20 100 kg である。

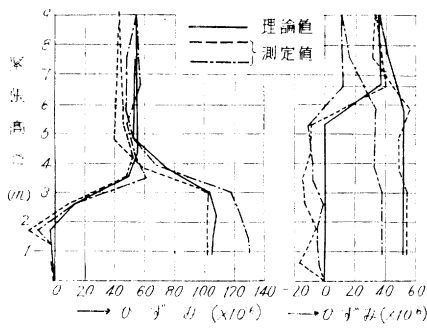
プレロード方式による PCタンクでは鋼線の間隔がほぼ一様であるので, 全断面に等しい荷重が作用するとして計算した。

(2) 仮護岸用 PC タンク

このタンクは前述したとおり, プレストレスの導入量が少なく PCケーブルの間隔(図-2 参照, 30~145 cm 間隔)であるので, 1 ケーブルごとに測定を実施した。測定結果を 図-10 に示す。

測定値を考察すると, 与えられた PCケーブルの間隔と緊張力から計算した理論値と比較的よく合っている。

図-10 仮護岸用ケーブル緊張によるひずみ



最終的には、設計上タンク上端で 10 kg/cm^2 、下端で 70 kg/cm^2 のプレストレスを導入することになっているので、プレストレスの分布が三角分布形に導入するものとして換算すると、測点①で約 50 kg/cm^2 、測点②で 27 kg/cm^2 となるが、実際には 35 kg/cm^2 、 14 kg/cm^2 の応力しか導入されていないことになる（ただし、コンクリートの静弾性係数を $300\,000 \text{ kg/cm}^2$ と仮定）。すなわち設計で要求されている応力を導入するためには鋼線間隔をさらに密にする必要があったように考えられる。

(3) 防波堤用 PC タンク

a) フレシネー方式 ひずみの理論値および実測値の一例を図-11, 12 に、応力分布の一例を図-13 に示す。これらより下段タンクでは下端から 4 m, 7 m, 10 m の位置において、第 1 回緊張で $50, 70, 75 \text{ kg/cm}^2$ 、全緊張作業終了時 $100, 130, 135 \text{ kg/cm}^2$ 以上の応力が導入

図-11 下段タンク第 1 回緊張時のひずみ発生状況 (フレシネー方式)

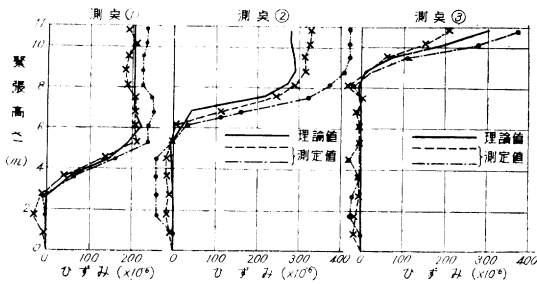
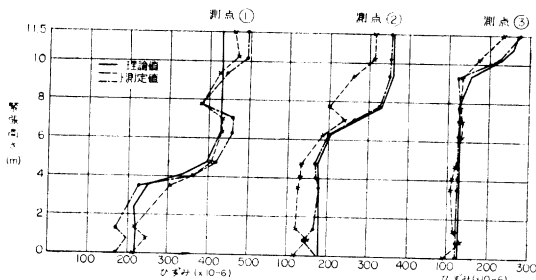


図-12 上段タンク第 2 回緊張時のひずみ発生状況 (フレシネー方式)



されており、その分布形も設計条件をはほぼ満足している。測定値と理論値を比較すると第 1 回緊張中はよく合っているが、第 2 回緊張では測定値のほうが若干大きくでている。

上段タンクでは全緊張終了時、下端で約 110 kg/cm^2 、上端で 60 kg/cm^2 の応力が導入され、設計条件を満足し、かつ理論値ともよく一致している。なお、フレシネーの場合コンクリートの静弾性係数を $250\,000 \text{ kg/cm}^2$ と仮定した。

b) プレロード方式 下端用タンクのみについて測定を実施した。緊張端を壁底から 1 m ごとにとって各測点位置における円周方向の軸力から導入プレストレスを計算した（コンクリートの静弾性係数を $300\,000 \text{ kg/cm}^2$ と仮定）。第 1 回緊張、第 2 回緊張（壁底から 4 m 以上の部分を 2 重巻きにするとき）におけるひずみ分布を図-14~17 に示す。これらを考察すると測定値は理論値とかなりよく一致し、設計条件も満足している。応力分布は下端： 70 kg/cm^2 、下端から 4 m： 110 kg/cm^2 、上端： 140 kg/cm^2 以上で、フレシネー方式よりもプレストレスの導入量がやや多いようである。またプレストレスの導入が非常にスムーズに行なわれていることがわ

図-13 下段タンク第 1 回緊張時の応力分布

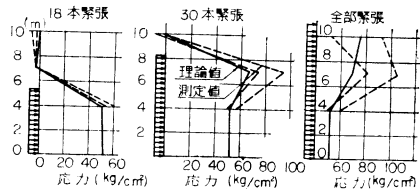


図-14 プレロード方式、第 1 層緊張時のひずみ発生状況 (実線：理論値)

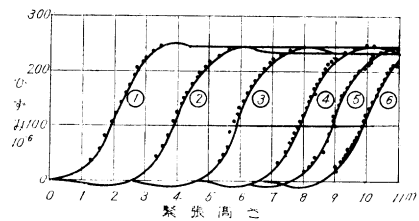


図-15 プレロード方式、第 2 層緊張時のひずみ発生状況 (実線：理論値)

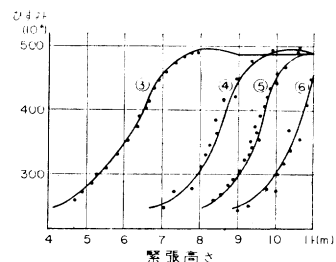


図-16 プレロード方式、第2層緊張時の応力分布

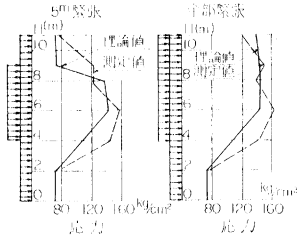
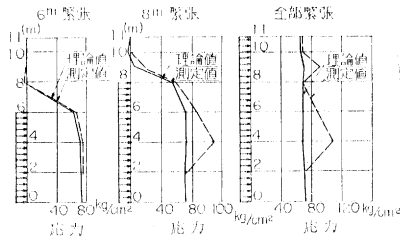


図-17 プレロード方式、第1層緊張時の応力分布



かる。

(4) PC 鋼線緊張による鉛直方向のひずみ

PCタンクの壁体にプレストレスを導入したとき、鉛直方向に曲げモーメントを生じプレストレスの大きさいかによってはこの曲げモーメントはかなり大きい値となって、壁面に水平方向のひびわれを生ずるおそれがある。鉛直方向のひずみ測定はフレシネー方式のみについて実施した。この形式では前述したとおりPC鋼線を段階的に間隔を変えて配置されているので、換算等分布荷重も階段状になる。これら種々の荷重に対しては、円周方向軸力の計算の場合と同じく1度に曲げモーメントを計算することができないので、荷重1種類ごとに求めようとする点の曲げモーメントを計算し、それらを重ね合わせる必要がある。また下端、上端に生ずる曲げモーメント、せん断力は端部自由の条件を満たすため除去する必要があるのも N_p の計算の場合と同じである。図-18、19に曲げモーメント分布の若干例を示す。曲げモーメントによって生ずるひずみに円周方向の軸力の影響を加えるとPCケーブル緊張直後の鉛直方向の理論ひずみが計算される。曲げモーメントによる応力はあまり大きい値ではなく、円周方向軸力の影響のほうがはるかに大きい。実測ひずみは理論値よりもやや小さくなったが、これは鉛直方向にそう入された鉄筋が有効に作用している

図-18 下段タンク第1回緊張時の鉛直方向曲げモーメント

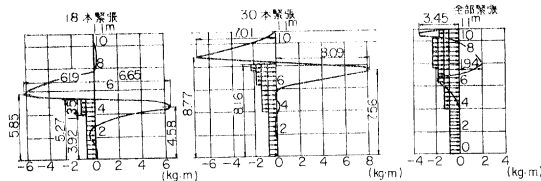
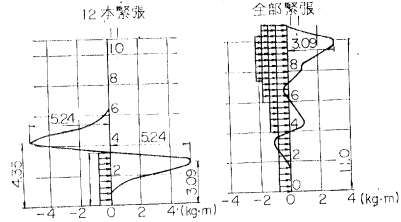


図-19 下段タンク第2回緊張時の鉛直方向の曲げモーメント



ためであろう。

5. 結 語

両形式を通じて、全般的にPC鋼線緊張によるプレストレスの導入力は設計条件をほぼ満足し、測定値は理論値ともかなりよく一致している。ケーブルを緊張した位置あるいはその近傍において最も大きいプレストレスが導入され、離れた位置のケーブル緊張によってはあまり影響されない。その影響長は仮護岸用で150cm、防波堤用で200cm以内で、これはいずれも $l \leq 25/\beta$ に相当する。

鉛直方向に生ずる応力は計算上かなり大きくなるが、実測ひずみは理論値の約1/2である。ただ緊張作業の進行中に曲げモーメントが正となる場合は相当大きい引張応力となるが、これも一時的な2次応力であって、緊張作業が進むと大きい引張応力の生ずる位置が次第に移動する。しかも等分布なプレストレスが壁全体に導入できれば、曲げによる応力が消失し、円周方向の軸力による2次応力のみが残ることになる。これらの点については設計上さらに検討すべき問題であると考えられる。

両形式を実測から得られた結果をもとにして比較するとつぎのとおりである。

フレシネー方式：上下一様でないプレストレスを導入するときには何段階も鋼線の間隔を変化させる。したがって計算が非常に複雑になる。弾性変形によるプレストレスの減退を、設計上どのように考慮するか問題となる。摩擦によるPC鋼線の引張応力度の減少を少なくするため、定着点を多く設ければそれだけ緊張作業に要する時間、人件費がかさむことになる。連続してプレストレスを導入することはできないが、プレロード方式の場合のように特殊な機械を必要としないし、緊張作業は比較的、簡単かつ定着も容易に行なうことができる。

プレロード方式：緊張作業が連続して行なわれるためプレストレスの導入がスムーズかつ確実である。設計上から考えると全壁面に等分布荷重が作用すると仮定できるので、設計が非常に簡単である。PC鋼線の摩擦による引張応力の減退がないので過分の引張力を鋼線に与える必要はないし、ピラスターを設ける必要もない。2重巻きあるいはそれ以上のワインディングによって必要なだけのプレストレスを導入することができ、しかも全

緊張作業を1人のドライバーによって行なうことができる。フレッシュ方式では施工できないような大きい直径のタンクにプレストレスを導入するような場合、その特徴を大に発揮することができると考えられる。

本論文は円形構造物にプレストレスを導入した際に測定したひずみに対し若干の考察を加えたものであるが、今後この結果が、この種PC円形構造物の設計、施工を行なう際の資料となりうれば幸いである。防波堤用PCタンクについては圧入時、土圧作用時のひずみ測定を継続している。

本測定にあたりご協力いただいた前運輸省神戸港工事事務所長 橋本恒夫氏をはじめ所員各位ならびに大学院学生 山田昌昭君、山本第四郎君および建設省 豊田高司君に感謝の意を表する次第である。

なお、本論文は土木学会第16回、第17回年次学術講演会で発表したものをとりまとめたものである。

参 考 文 献

1) 本村又左衛門：プレロードタンクの設計，セメント・コンクリート，土木学会関西支部，昭和36年11月。

2) 第三港湾建設局：プレストレスコンクリートタンクの新しい利用方法について，日本材料試験協会PC委員会資料 22-3，昭和36年11月。
 3) Davis, J.D. : The Analysis of Cylindrical Tank Walls, Civil Eng. & Public Works, Vol. 54 No. 631, 632, 634.
 4) Crom, J.M. : Design of Prestressed Tanks, A.S.C. E. Transaction, Nov, 1958.
 5) Curtis, A.R. : Design of longitudinal cable in circumferentially wound prestressed concrete tanks, Magazine of Concrete Research, March 1954.
 6) Timosenko, S. : Theory of plates and Shells, Mc-Graw-Hill.
 7) Flügge, W. : Stresses in Shells, Springer-Verlag, Berlin 1960.
 8) Hayashi, K. : Theorie des Trägers auf Elastischer Unterlage, Berlin 1921.
 9) Crachnell, D.W. & Knight, W.A. : The analysis of Prestressed concrete statically indeterminate Structures A symposium on Prestressed Concrete statically indeterminate structure, 24~25, Sept 1951.
 10) 猪股俊司：プレストレスコンクリートの設計および施工，技報堂。

(1962. 11. 12・受付)

土の締固め

—主として道路土工に関連して—

技報堂全書57

工学博士 久野悟郎 著
 建設省土木研究所千葉支所土質研究室長

土の締固めという技術は道路に関してあるのみではなく、もちろん本家であるアースダムはじめ河川堤防、鉄道、飛行場などあらゆる土の構造物の築造に必要なものである。本書は主として道路盛土に関する事項が多くなっているが、試験法に関する部分は共通的なものなので、今迄のように多くの本を調べる手数が省けると共に、すぐ役立つ好書として推薦できる書。

B 6判 320頁 定価 650円

コンクリート橋

工博 横道英雄 著
 B 5判・定価 2,500円

道路工学

片平信貴 著
 B 5判・定価 1,800円

図書目録送呈

東京都港区赤坂溜池5 振替東京10 Tel. 481-8581

技 報 堂