

PC 円環構造物の応力解析 (光弾性)

戸 塚 学*

1. ま え が き

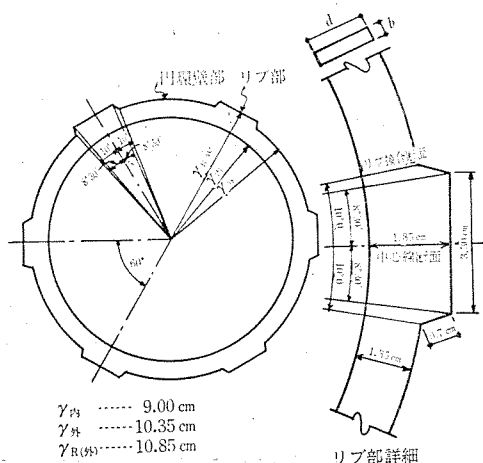
最近各国では原子力発電用動力炉がガス型炉の場合の压力容器、また、その動力炉が軽水炉などの場合にその事故発生時に核分裂生成物質、冷却剤などが外部へ放出するのを防ぐために必要な格納容器などの大型な PC 円環構造物が増加している。その理由として、原子力による発電出力が小さい初期段階ではそれらの構造物は鋼製で充分であったが、現段階のごとくその発電出力が 60~70 万 kW 以上と計画が大きくなると鋼製では溶接技術、経済性などに問題点が多く限界状態に達し、必然的に PC 化せざるを得ないのは、いまさら述べるまでのことはない。しかし、この種の構造物は厚肉条件、あるいはその形状が複雑なために内圧作用時、PS 導入時などでの応力性状、特に局所的な応力集中などについては、不明な点が多くあることは既知のとおりである。著者の所では、このような PC 円環構造物の応力解析を目的として各種の光弾性実験を行なっている。今回はその一部としてリブ付き円環平面断面について、1) 内圧作用時、2) PS 導入時、3) 内圧、PS 導入の同時作用時、の 3 段階に分け、2 次元実験により円周方向縁応力分布の性状を求め、一応の結果を得たので発表し、いくらかでも参考になれば幸いと思っている。

2. 供試体形状、実験時条件

欧州で多くみられる PS 压力容器の円環壁条件は、 d/r (d : 円環壁厚さ、 $r=1/2(r_{外}+r_{内})$ $r_{外}$, $r_{内}$...外、内半径) の比が大体 0.40 以上の厚肉円環壁となるのに対し、アメリカで多い Fully Prestressed (垂直、水平方向に PS 導入) による PC 格納容器のその条件は、 d/r 内の比が大体 0.06~0.07 の範囲での薄肉円環壁となっている。当実験の供試体は昭和 45 年度に関西電力(株)が原子力発電用構造物を対称として実験を行なった PC 円環構造物の供試体の 1/30 を目標としたので、 d/r の比は 0.14 となり一応厚肉円環壁としての制約を受け

*神奈川県工業試験所 建築材料科長

図一 供試体形状、寸法



る。供試体形状は図一に示すように、外縁に 60° 間隔でリブ部が 6 個設けてある。各寸法値は一応仕上がり目標寸法の値で、各実験時での正確な供試体の仕上がり寸法はそのつど測定して表わすことにする。また、この実験の供試体は樹脂製で当然温度変化による伸縮の影響を受けやすく、特に半径方向の寸法変化が実験結果に大きな誤差を生じせしめることになるので、供試体の常時の置き場所、寸法測定、および $(\sigma_1 - \sigma_2)$ の測定などすべての実験は 20°C の恒温室内で行なった。

3. 内圧作用時

(1) 供試体および内圧作用方法

供試体の正確な仕上がり寸法を表一に示す。材料は

表一 供試体測定寸法 (内圧作用時)

寸法	$r_{内}$ (内半径) (mm)	$r_{外}$ (外半径) (mm)	$r_{R(中)}$ (リブ外半径) (mm)	d (円環壁厚) (mm)	b (円環断面厚) (mm)
供試体	90.00	103.70	108.80	13.70	4.90
冷ばめ用円板	—	90.30	—	—	10.00

エポキシ樹脂を使用し、その諸性質は表二に示す。これらの数値の内ポアソン比は公称の値を記し、他は実験による数値を記したものである。

内圧作用方法としては同じエポキシ樹脂板による冷ば

表-2 樹脂の諸性質 (内圧作用時)

性 質	($\sigma_1 - \sigma_2$) 1 次 の応力度 (kg/cm ²)	ヤング係数 (E_c) (kg/cm ²)	ポアソン比 (ν)
エポキシ樹脂	21.00	2.50×10^4	0.40

めの方法によった。この方法とは、冷ばめ用円板の直径を供試体のそれより 0.60 mm 大きくして、冷却によって収縮させて、供試体にそう入後恒温室で一定時間放置し、元の直径の円板にすることによって一様の内圧を作用させることである。このときの内圧 (σ 圧) は 11.10 kg/cm² (後記する) の値となる。この場合、冷ばめが完了後も円板の直径を測定しその値の確認をする。

(2) 実験値の応力分布。

この応力分布を図-2 に示す。この図は内、外縁の円周方向応力と σ 圧を表わす。

a) 内縁の応力分布の性状 円環壁部での応力分布は円環壁部中央部付近では均一値 (内 σ_r) による分布となるが、リブ部への接近にしたがい減少の傾向がみられ、その近傍では 0.80 内 σ_r の値となる。リブ部ではその壁厚が大きいので当然応力も小さくなり、中心線断

図-2 内圧作用時応力分布

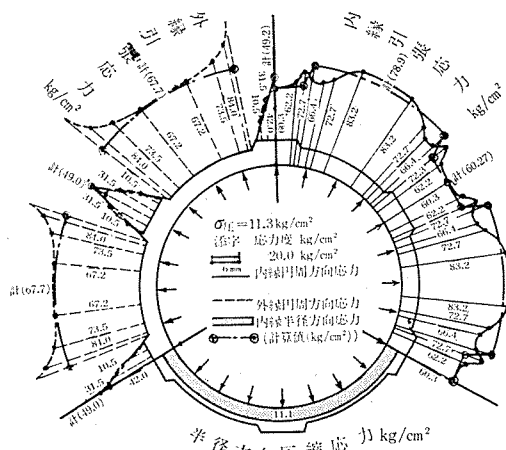
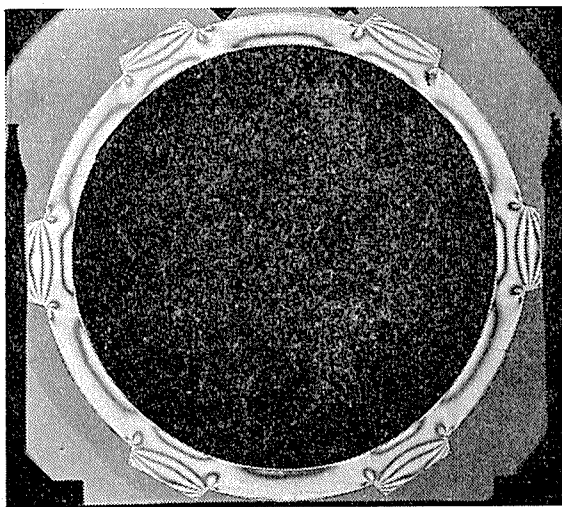


写真-1 内圧作用時 ($\sigma_1 - \sigma_2$)



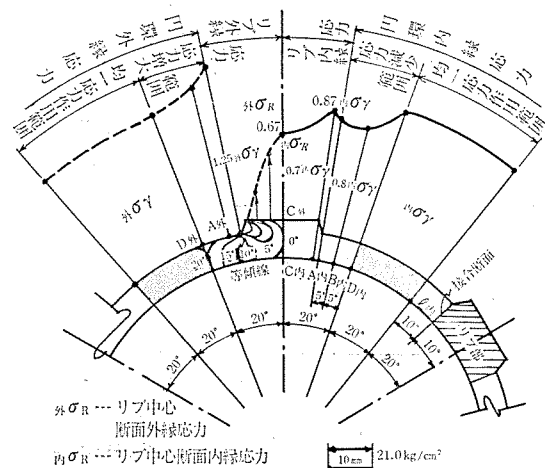
面での値 (内 σ_R) は 0.72 内 σ_r となる。この内 σ_R の値については $\frac{\text{円環壁部断面積}}{\text{リブ部壁断面積}} = 0.73$ となることから、略算的に $\frac{\text{円環壁部断面積}}{\text{リブ部壁断面積}}$ 内 $\sigma_r =$ 内 σ_R が成立するのではないと思われる実験結果となる。

b) 外縁の応力分布の性状 内縁と同じく円環壁部中央部付近では均一値 (外 σ_r) による分布となるが、リブ部近傍では今度は逆に増大する傾向がみられ、その値は 1.25 外 σ_r となる。リブ部ではその中心線断の値 (外 σ_R) が 0.67 外 σ_r となることから、このときもほぼ $\frac{\text{円環壁部断面積}}{\text{リブ部壁断面積}}$ 外 $\sigma_r =$ 外 σ_R の関係が成立つのではないと思われる。

c) リブ部および円環壁部その付近の応力分布

前記のごとくリブ部の影響によって、円環壁部の応力分布はリブ部近傍について内縁で減少、外縁で増大の性状がみられ、それらの応力分布を図-3 で詳細に表わす

図-3 内圧作用時リブ付近の応力分布



と、その範囲はリブ接合断面 A 内から D 内となる。この応力影響範囲内、影響範囲外の半径方向の各断面の力学的性質を等傾線によって考察をした。その結果、リブ部中心線断面から 20° 回転断面の範囲 (C 内 ~ D 内) での等傾線は図に示すごとく曲線状になる。このことにより当然主応力線も乱れるので、この範囲内でのリブ部、円環壁部のその各断面は、完全なる主応力面とはならない。しかし、この範囲外での各等傾線はまったく直線状になり、かつ、リブ部中心線断面を基準線として得られる各等傾線の測定角度と、それらと同位置でのその各円環壁部断面の同基準線からの回転角度とは、まったくの一致がみられる。

このことから、それらの各断面は完全なる主応力面となる。したがって、リブ部の存在による円環壁部の応力影響範囲 (内縁で減少、外縁で増大) とは、半径方向断面

報 告

が主応力面とならないリブ部接合断面から 10° の回転断面までの部分であり、この範囲の内縁の弧の長さ (l 内) は 1.55 cm であるから d との関係で l 内=1.15 d=1.00 d となる。この範囲外での各断面は主応力面となりその部分では均一応力作用範囲とみなすことができるので、円環断面全体の応力分布の性状を図-3 に示すごとく大別してみた。

(3) 計算値による応力分布

a) 円環壁部断面 この円環壁部断面の力学的性質は前記のごとく厚肉円環としての制約を受けるため、厚肉円環としての式を用いて内 σ_r 、外 σ_r の計算値を求めた。始めに冷ばめ用円板との直径差から生じる σ 圧を求める。

$$\sigma \text{ 圧} = \frac{E_c u (r^2 \text{外} - r^2 \text{内})}{r^2 \text{内} [(1-\nu) + (1+\nu) r^2 \text{外} / r^2 \text{内}]} \dots\dots (1)$$

u : 半径差 $u = 1/2(18.06 \text{ cm} - 18.00 \text{ cm}) = 0.03 \text{ cm}$, $E_c = 2.50 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$, $\nu = 0.40$ となり式 (1) によって $\sigma \text{ 圧} = 11.10 \text{ kg/cm}^2$ が得られる。この $\sigma \text{ 圧}$ の値を式 (2) に代入すると内 σ_r 、外 σ_r が算定できる。

$$\frac{\text{内} \sigma_r}{\text{外} \sigma_r} = \frac{r^2 \text{内} \sigma \text{ 圧}}{r^2 \text{外} - \text{内} r^2} \left[1 + \frac{r^2 \text{外}}{r^2 \text{内}} \right] \dots\dots\dots (2)$$

式 (2) から 内 $\sigma_r = 78.91 \text{ kg/cm}^2$, 外 $\sigma_r = 67.74 \text{ kg/cm}^2$ が得られる。

b) リブ部中心線断面 この断面についても σ 圧の値を使用し、式 (2) に準じることで算定できるものと仮定した式 (3) によって 内 σ_R 、外 σ_R を算定した。

$$\frac{\text{内} \sigma_R}{\text{外} \sigma_R} = \frac{\text{内} r^2 \sigma \text{ 圧}}{r R^2 (\text{外}) - r^2 \text{内}} \left[1 + \frac{r R^2 (\text{外})}{r^2 \text{内}} \right] \dots (3)$$

式 (3) から 内 $\sigma_R = 60.27 \text{ kg/cm}^2$, 外 $\sigma_R = 49.20 \text{ kg/cm}^2$ が得られる。

c) 実験値計算値の比較 それらの比較を表-3 に示すと、外 σ_R で 15% 程度計算値が大きくなるが、実験時でのあらゆる誤差を考慮すれば、まずはリブ部に関して式 (3) が適用できると考えられる。円環壁部について

表-3 実験値, 計算値の比較

	円環壁部		リブ部	
	内 σ_r (kg/cm ²)	外 σ_r (kg/cm ²)	内 σ_R (kg/cm ²)	外 σ_R (kg/cm ²)
実験値	83.20	67.20	60.37	42.00
計算値	78.91	67.74	60.27	47.00
実験/計算%	105	99	100	85

てはもちろん式 (2) が適用できることが確認される。この計算値による分布を円環壁部の内、外縁、リブ部の内縁については全体にそれらの値による分布、リブ部の外縁については中心線断面でその値、端部で応力度を 0

とした直線分布として 図-2 に示す。

(4) 内圧作用時縁応力分布の推定法

以上の結果により内圧作用時における当供試体のようなリブ部付き円環断面全体の応力分布を、円環壁部とリブ部との 2 つに大別して推定することができる。その推定法をまとめ 表-4 に示す。

表-4 内圧作用時円環断面全体の縁応力分布の推定法

	円環壁部				リブ部	
	内縁		外縁		内縁	外縁
	均一応力	応力減少	均一応力	応力増大		
作用範囲	中央部, 回転断面範囲 20°	リブ接合断面からの回転断面範囲 10° l 内 = 1.00 d	中央部, 回転断面範囲 20°	リブ接合断面からの回転断面範囲 10° l 内 = 1.00 d	全体	中心線断面 端部は 0
応力度	内 σ_r : 式 (2) から算定	0.80 内 σ_r (内 σ_r は式 (2))	外 σ_r : 式 (2) から算定	1.25 外 σ_r (外 σ_r は式 (2))	内 σ_R : 式 (3) から算定	外 σ_R : 式 (3) から算定

そうしてそれらの応力度を結んだ分布からほぼ実用に適用できる全体の応力分布を推定することができる。また、この場合特に問題になるのは、円環壁部外縁のリブ部近傍での応力集中の傾向があることが明確になったことである。

4. P S 導入時

(1) 供試体

この実験供試体のコンクリート部の材料としては、その製作のための機械加工によるひずみ、円周に沿った所要位置での緊張材配置 (緊張材の埋込法) によるひずみなどの発生を極力さけるために特殊な樹脂を用い、緊張材としては径 1.60 mm の鋼棒を使用した。

表-5 樹脂, 鋼棒の諸性質 (P S 導入時)

性質	($\sigma_1 - \sigma_2$) 1 次応力度 (kg/cm ²)	ヤング係数 (E_c) (kg/cm ²)	ポアソン比 (ν)	鋼棒のヤング係数 (E_s) (kg/cm ²)
樹脂	20.80	3.30×10^4	0.42	2.10×10^6

表-6 供試体測定寸法 (P S 導入時)

測定体	寸法	r 内 (mm)	r 外 (mm)	r R (外) (mm)	r _{PS} (鋼棒位置) (mm)	d (mm)	b (mm)
併試体		90.10	103.75	108.50	100.00	13.65	7.70

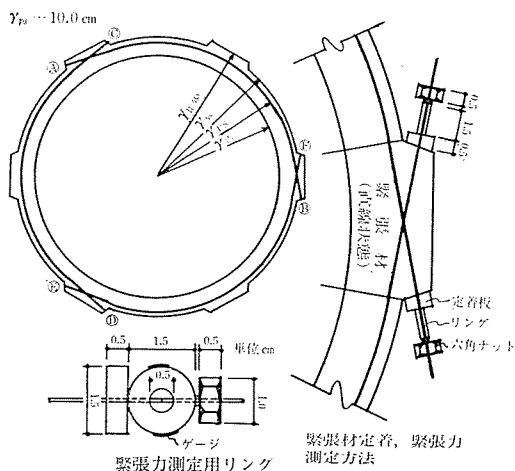
この樹脂の諸性の数値は全部実測による値である。供試体の形状、寸法などはもちろん内圧作用時のものと同じであるが、その正確な仕上がり寸法、緊張材配置などを表-6 に示す。

また、図-4 にはその緊張材の配置、定着状態などを示す。

(2) P S 導入方法

緊張材配置状態は 図-4 に示すように、円環断面を 3

図—4 緊張材配置, 緊張力測定方法



等分した 120° 範囲に 1 本の緊張材を配置した, 計 3 本の緊張材を円環断面の全面に配置し, PS 導入方法は, その緊張材に順々に 1 本ずつ緊張力を与えて行なう。緊張力作用方法としては 図—4 に示すごとく, 緊張材先端にねじを切り, 六角ナットをまわすことによつて行なうが, このときに定着板とねじとの間に緊張力測定用リングをセットすることで, 所要値の緊張力によつて PS 導入ができるようにしてある。もちろん, その測定用リングは始めに実験時と同一条件にして, 緊張力とそのときのリングのひずみとの関係のグラフを作り, いつでも所要の緊張力が得られるようになっている。当実験では, 1 本の緊張材に 30 kg の緊張力を作用させ, 両端でその値の確認をしたが, 摩擦などによつてその値の損失はまったくみられなかった。この緊張力作用順序は (A)~(E), (C)~(D), (E)~(F) とし, その PS 導入過程での供試体の変形に伴つて, 作用緊張力の値が変化しないように常にナットで調節した。前記のごとく当実験では 1 本ずつの緊張材による PS 導入を行なうので, その各緊張力作用条件時での PS 分布の変化過程の詳細な追求が, この実験での大きな目的の一つとなる。

(3) 計算値による PS 分布

この PS 導入過程ではかなりの変則的な PS 分布の作用が予想されるので, 始めに 3 本の緊張材による PS 導入時でのその値を算定し, それとの比較検討が必要と思われる。

a) 円環壁部断面 3 本の緊張材の緊張力作用によるひずみ外縁に作用する (ϵ_s) から内圧作用時と同じく u が生じ, このことによつて外縁に作用する半径方向圧縮応力 ($\sigma_{\text{圧(PS)}}$) が式 (4) から得られる。この場合 u の値は緊張材位置と, 円環壁部外縁とはその差はごく微少なので同じとみなした。

$$\sigma_{\text{圧(PS)}} = \frac{E_c u (r^2 \text{外} - r^2 \text{内})}{r^3 \text{外} [(1-\nu) + (1+\nu) r^2 \text{内} / r^2 \text{外}]} \quad (4)$$

$E_c = 3.30 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$, $\nu = 0.42$, 緊張力 30 kg のときの全緊張材収縮量 (Δl_{PS}) = $\epsilon_s l_{\text{PS}}$ (l_{PS} : 緊張材全円周), このときの全緊張材収縮によつて $u = r_{\text{PS}} - l_{\text{PS}} - \Delta l_{\text{PS}} / 2\pi = 0.008 \text{ cm}$ となり, 式 (4) によつて $\sigma_{\text{圧(PS)}} = 3.75 \text{ kg/cm}^2 \approx 3.80 \text{ kg/cm}^2$ となる。この $\sigma_{\text{圧(PS)}}$ の値を式 (5) に代入すると 内 $\sigma_r(\text{PS})$, 外 $\sigma_r(\text{PS})$ が算定できる。もちろんこれらの値は圧縮である。

$$\begin{aligned} \text{内 } \sigma_r(\text{PS}) &= \frac{r^2 \text{外} \sigma_{\text{圧(PS)}}}{r^2 \text{外} - r^2 \text{内}} \left[1 + \frac{r^2 \text{内}}{r^2 \text{外}} \right] \dots \dots (5) \\ \text{外 } \sigma_r(\text{PS}) &= \frac{r^2 \text{外} \sigma_{\text{圧(PS)}}}{r^2 \text{外} - r^2 \text{内}} \end{aligned}$$

内, 外 $\sigma_r(\text{PS})$: 円環壁部内, 外縁の PS 値
式 (5) から 内 $\sigma_r(\text{PS}) = 31.20 \text{ kg/cm}^2$, 外 $\sigma_r(\text{PS}) = 27.40 \text{ kg/cm}^2$ が得られる。

b) リブ部中心線断面 (緊張材定着なし) この断面についても $\sigma_{\text{圧(PS)}}$ の値を使用し, 略算的に式 (5) に準じた式 (6) を仮定し算定を試みた。

$$\begin{aligned} \text{内 } \sigma_{R(\text{PS})} &= \frac{r_R^2(\text{外}) \sigma_{\text{圧(PS)}}}{r_R^2(\text{外}) - r^2 \text{内}} \left[1 + \frac{r^2 \text{内}}{r_R^2 \text{内}} \right] (6) \\ \text{外 } \sigma_{R(\text{PS})} &= \frac{r_R^2(\text{外}) \sigma_{\text{圧(PS)}}}{r_R^2(\text{外}) - r^2 \text{内}} \end{aligned}$$

内, 外 $\sigma_{R(\text{PS})}$: リブ部内・外縁の PS 値。

式 (5) から 内 $\sigma_{R(\text{PS})} = 24.37 \text{ kg/cm}^2$, 外 $\sigma_{R(\text{PS})} = 20.60 \text{ kg/cm}^2$ が得られる。緊張材定着ありリブ部での算定は式 (6) に $2\sigma_{\text{圧(PS)}}$ を代入するものとする。また, 各同一断面での実験値は 内, 外 $\sigma_r(\text{PS})$, 内, 外 $\sigma_r(\text{PS})'$ の記号で表わす。

(4) 1 本の緊張材による PS 導入時 (A)~(E) 間

この応力分布は 図—5 に示すごとくかなりの変則的な分布傾向がみられる。いまこの考察を PS 導入範囲 (A)~(E) 間, 導入なしの範囲とに分けて行なう。

a) PS 導入範囲 各断面の実験値, 計算値の比較

を表—7 に示す。この表によつて円環壁内縁で計算値の 50%, 外縁で計算値の 200% ぐらいとなり, かなりの変則的な応力作用が認められる。

図—5 1 本の緊張材によるプレストレス導入時応力分布

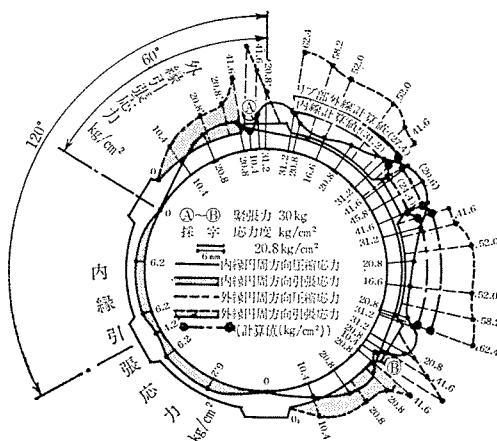


表-7 緊張材1本のPSの実験値, 計算値 (PS導入範囲)

	円環壁部				リブ部中心線断面			
	内 縁		外 縁		緊張材 定着あり		緊張材 定着なし	
	中央部 付 近 断面	リブ接 合 断面	中央部 付 近 断面	リブ接 合 断面	内縁	外縁	内縁	外縁
実験値 (kg/cm ²)	16.60	31.20	52.00	62.40	31.20	20.80	45.80	0
計算値 (kg/cm ²)	31.20	31.20	27.40	27.40	24.37	20.60	24.37	20.60
実験/計算 (%)	53	100	190	228	128	101	188	—

注: リブ接合断面は緊張材ありリブ部

いまこの変則的な実験値の応力分布の作用が正しいかどうかの確認のために、それらの各断面上におけるPS分布を直線と仮定した A_0 (内 $\sigma_{rR}(PS)$ + 外 $\sigma_{rR}(PS)$) / 2 の式 (A_0 : 壁有効断面積) より、緊張力の確認をし表-8に示すと、各断面における緊張力の確認値はその作用値より若干大きい程度であり、このことはほぼ正確な緊張力によるPS分布であると考えてよい。

表-8 緊張力の確認 (PS導入範囲)

	円環壁部	リブ部中心線断面	
	中央部付近	緊張材定着あり	緊張材定着なし
緊張力確認値 (kg)	33.30	35.40	31.50
緊張力作用値 (kg)	30.00	30.00	30.00
確認値/作用値 (%)	111	118	105

b) PS導入なしの範囲 緊張材定着のリブ部中心線断面から、60°回転断面位置にあるリブ部までの円環壁部の内縁で圧縮、外縁で引張の応力分布が作用し表-9に中央部付近のその値、また、一応計算値も示し比較をすると、外縁で0.76外 $\sigma_r(PS)$ の値の引張応力が作用し、コンクリートに非常に不利な条件となる。また、こ

表-9 PSの実験値, 計算値 (60°回転断面範囲)

	円環壁部 (中央部付近)	
	内 縁	外 縁
実験値 (kg/cm ²)	20.80	-20.80
計算値 (kg/cm ²)	31.20	27.40
実験/計算 (%)	67	76

(-: 引張り)

の部分での緊張力の確認値は0となるので、この不利な応力分布の作用が、間違いでないことを意味する。60°~120°回転断面範囲での内縁でも全体に0.21内 $\sigma_r(PS)$ の値による、引張応力分布が作用し不利な条件の1つとなる。その部分の外縁にこの応力分布に対応する圧縮応力分布が作用するが、その値が小さいので緊張材に阻害されて測定不可能であった。

c) このときの不利な条件 以上のごとくこのPS導入時には、その導入範囲の円環壁部外縁に1.90外 $\sigma_r(PS)$ の圧縮応力、導入なしの範囲の円環壁部外縁に0.76外 $\sigma_r(PS)$ の引張応力などの作用がみられ、いずれもコンクリートには非常に不利な条件となる。

(5) 2本の緊張材によるPS導入時 (A~D, C~D範囲)

応力分布を図-6に示すように、このときの分布傾向は2本の緊張材の交点から左、右60°回転断面範囲までの円環部ではかなり計算値による分布に接近することから、この円環断面全体の応力分布性状を図-7に示すよ

図-6 2本の緊張材によるプレストレス導入時応力分布

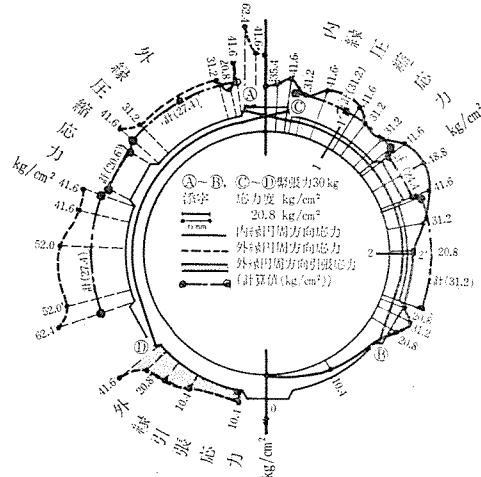
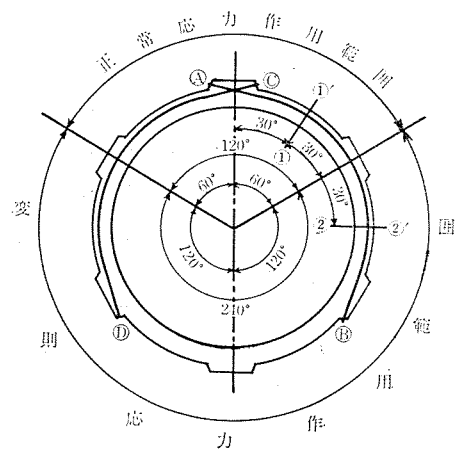


図-7 2本の緊張材によるプレストレス導入時応力分布状態の大別



うに正常、変則応力作用範囲の2つに大別して考えることにする。

a) 正常応力作用範囲 表-10に各断面のその実験値、計算値の比較を示すと、前記のごとく円環壁部中央部付近での応力度は、かなり計算値に接近してくるこ

表-10 緊張材2本のPSの実験値, 計算値 (正常範囲)

	円環壁部		リブ部中心線断面	
	内 縁	外 縁	緊張材定着あり	
	中央部 付 近	中央部 付 近	内 縁	外 縁
実験値 (kg/cm ²)	41.60	31.20	35.40	41.60
計算値 (kg/cm ²)	31.20	27.40	2 × 24.37 = 48.74	2 × 20.60 = 41.20
実験/計算 (%)	133	114	73	100

表—11 緊張力の確認 (正常範囲)

	円環壁部		リブ部中心線断面
	中央部付近		緊張材定着あり
緊張力確認値 (kg)	35.30		52.36
緊張力作用値 (kg)	30.30		$60.00 \times \cos 10^\circ = 58.00$
確認値/作用値 (%)	117		110

とが認められる。また、各断面における緊張力の確認では10~17%の差がみられるが、大体所要の緊張力の値によるPS導入時応力分布と認められる。

b) 変則応力作用範囲 この応力分布性状は、その傾向、値とも1本の緊張材によるPS導入時の緊張材定着のリブ部中心線断面から左、右60°回転断面範囲内の応力分布とほぼ一致することが認められ、したがって、コンクリートに対する不利な条件もそのときと同一になる。表—12に円環壁部中央部付近のPS値、また、その値からの緊張力の確認値を表—13に示す。

表—12 PSの実験値、計算値 (変則範囲)

	円環壁部		リブ部中心線断面	
	内 縁	外 縁	緊張材定着なし	
	中央部付近	中央部付近	内 縁	外 縁
実験値 (kg/cm ²)	20.80	52.00	48.80	0
計算値 (kg/cm ²)	31.20	27.40	24.37	20.60
実験/計算 (%)	67	190	200	—

表—13 緊張力の確認 (変則範囲)

	円環壁部		リブ部中心断面
	中央部付近		緊張材定着なし
緊張力確認値 (kg)	35.31		33.18
緊張力作用値 (kg)	30.00		30.00
確認値/作用値 (%)	117		110

以上のごとくこのときの応力分布を2つの応力作用範囲に大別して考えればその傾向、値を求めることができる。

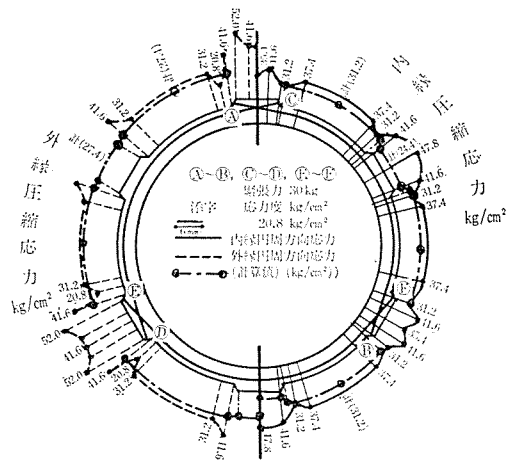
(6) 3本の緊張材によるPS導入時

このときの応力分布を図—8に示し、考察を次のごとく内縁外縁の2つに大別して行なう。

a) 内縁のPS分布 内圧作用時と同じく円環壁部中央部付近では均一値 (内 $\sigma_r'(PS)$) による分布となるがリブ部への接近とともに減少の傾向がみられ、その近傍では0.85内 $\sigma_r'(PS)$ の値となる。そのPS減少範囲はリブ接合断面から8°回転断面までの範囲であり、その内縁での弧の長さ (l 内) は1.26cmであるから、 l 内=0.92 d ≒1.00 d となり、これも内圧作用時とほぼ一致する。リブ部の中心線断面では緊張材定着ありで、大体内 $\sigma_r(PS)$ 'の値と等しく、緊張材定着なしでは1.30内 $\sigma_r(PS)$ 'となる。

b) 外縁のPS分布 この分布も図—8に示すごと

図—8 3本の緊張材によるプレストレス導入時応力分布



く円環壁部中央部付近の均一値 (外 $\sigma_r'(PS)$) による分布は緊張材定着ありリブ部への接近に伴って減少し、0.65外 $\sigma_r'(PS)$ の値となるが、緊張材定着なしのリブ部付近では1.35外 $\sigma_r'(PS)$ と逆に増大の傾向がみられる。そのPS減少、増大範囲は内縁と等しくリブ接合断面から8°回転断面までの範囲である。また、リブ部での緊張材定着ありのときには当然PS作用は認められるが、緊張材定着なしのときにはまったくPS分布は認められずこのことは特記に値する。それらのことにより内、外縁のPS減少、増大範囲は内圧作用時と等しくリブ接合断面から10°回転断面までの範囲とみなすことができる。

c) 実験値、計算値の比較 図—8には計算値による分布も示してあり、表—14には各断面におけるそれ

表—14 緊張材3本のPSの実験値、計算値

	円環壁部		リブ部中心線断面			
	内 縁	外 縁	緊張材定着あり		緊張材定着なし	
	内 $\sigma_r(PS)$	外 $\sigma_r(PS)$	内 $\sigma_R(PS)$	外 $\sigma_R(PS)$	内 $\sigma_R(PS)$	外 $\sigma_R(PS)$
実験値 (kg/cm ²)	37.40	31.20	35.40	41.60	47.80	0
計算値 (kg/cm ²)	31.20	27.40	48.80	41.20	24.40	20.60
実験/計算 (%)	120	114	75	100	196	0

らの値の比較を示す。

このことにより円環壁部の均一応力作用範囲では14~20%の差がみられるが、実験時でのあらゆる誤差を考慮すれば、まずは式(4)、(5)によるPS値が期待できると考えてよい。リブ部の緊張材定着ありの外 $\sigma_R(PS)$ は計算値とよく一致するが、内 $\sigma_R(PS)$ では25%の差がみられるが大体は式(6)がこの場合にも適用できるのではないと思われる。緊張材定着なしのときには式(6)はまったく適用できず、かつ前記のごとく外縁でまったくPS分布は認められない。また、それらの各断面での値から確認をした緊張力、作用緊張力との値の比較を、表—15に示す。この表でわかるように円環壁部、緊張

表—15 緊張力の確認（3本の緊張材によるPS導入時）

	円環壁部		リブ部中心線断面	
	中央部付近	緊張材定着あり	緊張材定着なし	緊張材定着なし
緊張力確認値 (kg)	33.30	50.00	32.50	
緊張力作用値 (kg)	30.00	58.00	30.00	
確認値/作用値 (%)	111	86	108	

材定着なしのリブ部での差は 10% 程度であり、大体所要の緊張力の値よっての PS 導入が認められると同時に、そのことはそれらの断面上での PS 分布がほぼ直線になると考えればよく、また、緊張材定着ありのリブ部においての差がみられることは、その断面上での PS 分布がパラボラ状になっていることを意味すると考えられる。

(7) PS 導入時縁応力分布の推定法

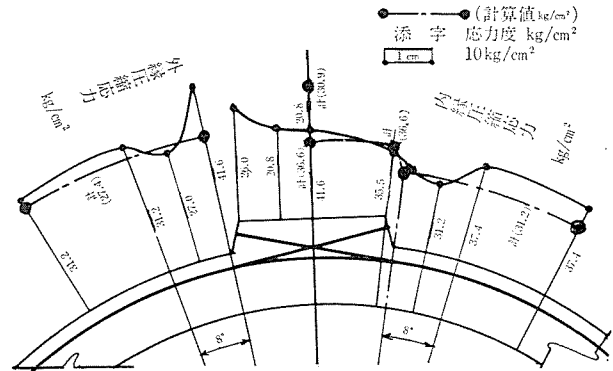
a) 3本の緊張材によるPS導入時 以上の結果からこのPS導入時の縁応力分布の推定法を円環壁部、リブ部の2つに大別してまとめ表—16に示す。

そうしてそれらの応力度を結んだ分布でこの円環断面形状についての、ほぼこのPS導入条件時の実用に適した全体のその値の推定ができる。

b) 円環断面全体にPS導入時 3本の緊張材によるPS導入時応力分布は、円環断面の一平面でのPS分布を表わすもので、実際には緊張材は60°回転角度位置あるリブ部に交互に定着され、またその円環壁縦断面での緊張材間隔は1/2dくらいと非常に接近しているため、このPS分布とこの平面を60°回転したときのPS

分布を合成したものが、本当の円環断面全体にPS導入時応力分布と考えるべきである。したがって、緊張材は円環壁部で2本、リブ部で3本の配置となる。このようにして求めたPS分布を図—9に示す。このときの緊張力は1本15kgとする。表—17で各断面の実験値、計算値の比較をすると外 $\sigma_{R(PS)}$ で30%くらいの差がみられるが、内 $\sigma_{r(PS)}$ 、外 $\sigma_r(PS)$ 、内 $\sigma_{R(PS)}$ では10~20%

図—9 円環全体プレストレス力導入時応力分布



範囲の差の程度であり、それらの値については式(5)、(6)が適用できると考えられる。また外 $\sigma_{R(PS)}$ についても緊張材定着付近の応力となるので、当然定着板の大きさなどの実験条件で変わり、このことによってこの差が生じたと思う。また実験値から確認した緊張力、作用緊張力の値などの比較を表—18に示す。それらの差は10%程度で、所要の緊張力によるPS値であるとの確認と、それらの断面上におけるPS分布は大体直線になる

表—16 3本の緊張材による円環断面全体のPS分布の推定法

	円環壁部					リブ部			
	内縁		外縁			緊張材定着あり		緊張材定着なし	
	均一応力	応力減少	均一応力	応力減少	応力増大	内縁	外縁	内縁	外縁
作用範囲	中央部回転断面範囲 20°	リブ接合断面からの回転断面範囲 10° l内=1.00d	中央部回転断面範囲 20°	緊張材定着ありリブ接合断面からの回転断面範囲 10° l内=1.00d	緊張材定着なしリブ接合断面からの回転断面範囲 10° l内=1.00d	全体	中心線断面	中心線断面	なし
応力度	内 $\sigma_{r(PS)}$ …式(5)から算定	0.85内 $\sigma_{r(PS)}$ (内 $\sigma_{r(PS)}$ は式(5))	外 $\sigma_{r(PS)}$ …式(5)から算定	0.65外 $\sigma_{r(PS)}$ (外 $\sigma_{r(PS)}$ は式(5))	1.30外 $\sigma_{r(PS)}$ (外 $\sigma_{r(PS)}$ は×(5))	2.00内 $\sigma_{R(PS)}$ (内 $\sigma_{R(PS)}$ は式(6))	2.00外 $\sigma_{R(PS)}$ (外 $\sigma_{R(PS)}$ は式(6))	2.00内 $\sigma_{R(PS)}$ (内 $\sigma_{R(PS)}$ は式(6))	なし

表—17 円環断面全体にPS導入時の実験値、計算値

	円環壁部				リブ部中心線断面	
	内縁		外縁		内 $\sigma_{R(PS)}$	外 $\sigma_{R(PS)}$
	内 $\sigma_{r(PS)}$	リブ部近傍	外 $\sigma_{r(PS)}$	リブ部近傍		
実験値 (kg/cm²)	2×37.40/2 =37.40	2×31.20/2 =31.20	2×31.20/2 =31.20	(33.30+20.80) 1/2=27.05	(35.40+47.80) 1/2=41.60	41.60/2=20.80
計算値 (kg/cm²)	2×31.20/2 =31.20	—	2×27.40/2 =27.40	—	3×24.40/2 =36.60	3×20.60/2 =30.90
実験/計算 (%)	120	—	114	—	113	68

表-18 緊張力の確認 (円環全体P S 導入時)

	円 環 壁 部	リ ブ 部
	中央部付近	中心線断面
緊張力確認値 (kg)	33.30	40.20
緊張力作用値 (kg)	30.00	58.00/2+15=44.00
確認値/作用値 (%)	111	91

と考えてよいことがわかった。このような考察結果によって円環断面全体にP S 導入時の縁応力分布の推定法をまとめ、表-19 に示す。そうしてそれらの各断面での応力度を結ぶことで、円環断面全体のP S 分布を推定することができる。

表-19 円環断面全体に P S 導入時縁応力分布の推定法

	円 環 壁 部				リ ブ 部	
	内 縁		外 縁		内 縁	外 縁
	均 一 応 力	応 力 減 少	均 一 応 力	応 力 減 少		
作用範囲	中央部回転断面範囲 20°	リブ接合断面からの 回転断面範囲 10° l内=1.00d	中央部回転断面範囲 20°	リブ接合断面からの 回転断面範囲 10° l内=1.00d	全 体	中心線断面
応 力 度	2.00内 $\sigma_r(PS)$ (内 $\sigma_r(PS)$ は式(5))	1.70内 $\sigma_r(PS)$ (内 $\sigma_r(PS)$ は式(5))	2.00外 $\sigma_r(PS)$ (外 $\sigma_r(PS)$ は式(5))	1.70外 $\sigma_r(PS)$ (外 $\sigma_r(PS)$ は式(5))	3.00内 $\sigma_R(PS)$ (内 $\sigma_R(PS)$ は式(5))	3.00外 $\sigma_R(PS)$ (外 $\sigma_R(PS)$ は式(5))

(8) P S 導入過程での応力分布の考察 (3本の緊張材)

120°範囲に分かれた3本の緊張材で当実験の順序のごとくP S を導入する方法では、1本、2本の緊張材に緊張力を作用させるときは円環壁部に大きな圧縮応力、また引張応力が作用し、コンクリートに非常に不利益条件となることは前記した。このことによって当然この方法でP S を導入する場合には、その所要緊張力を何回にも分けた小さな値の緊張力によってP S 導入を完了しなければならないことがこの実験で明確になった。いまその所要緊張力をn回に分けてP S 導入を行なう場合、そのP S 導入過程での円環壁内、外縁の中央部付近に常に作用する応力性状を実験で求めた係数を用いて考察する。次の式(7)、(8)は内縁の応力性状を表わす。

内 縁

1本の緊張材によるP S 導入時。

P S 導入なしの範囲 (60°~120° 範囲)

外 縁

1本、2本の緊張材によるP S 導入時。

P S 導入範囲

P S 導入なしの範囲

3本の緊張材によるP S 導入時

全円環壁

$$1 \text{ 回目 } \frac{1}{n} 1.90 \text{ 外 } \sigma_r(PS) \dots \dots (9)$$

$$- \frac{1}{n} 0.76 \text{ 外 } \sigma_r(PS) \dots \dots (9')$$

$$\frac{1}{n} \text{ 外 } \sigma_r(PS) \dots \dots (9'')$$

$$2 \text{ 回目 } \frac{1}{n} \text{ 外 } \sigma_r(PS) + \frac{1}{n} 1.90 \text{ 外 } \sigma_r(PS)$$

$$\frac{1}{n} \text{ 外 } \sigma_r(PS) - \frac{1}{n} 0.76 \text{ 外 } \sigma_r(PS)$$

$$\frac{2}{n} \text{ 外 } \sigma_r(PS)$$

⋮

$$\frac{(n-1)}{n} \text{ 外 } \sigma_r(PS) + \frac{1}{n} 1.90 \text{ 外 } \sigma_r(PS)$$

$$\frac{(n-1)}{n} \text{ 外 } \sigma_r(PS) - \frac{1}{n} 0.76 \text{ 外 } \sigma_r(PS)$$

⋮

$$n \text{ 回目 } = \left(1 + \frac{0.90}{n}\right) \text{ 外 } \sigma_r(PS) \dots \dots (10)$$

$$= \left(1 - \frac{1.76}{n}\right) \text{ 外 } \sigma_r(PS) \dots \dots (10')$$

$$\frac{n}{n} \text{ 外 } \sigma_r(PS) \dots \dots (10'')$$

式(8)で $1.20/n \leq 1$ 、式(10)で $1.76/n \leq 1$ になるようにnの値を決めると、そのn回目のP S 導入過程で内、外縁に引張応力は作用せず、そのためには $n=2$

$$1 \text{ 回目 } - \frac{1}{n} 0.20 \text{ 内 } \sigma_r(PS) \dots \dots (7)$$

$$2 \text{ 回目 } \frac{1}{n} \text{ 内 } \sigma_r(PS) - \frac{1}{n} 0.20 \text{ 内 } \sigma_r(PS)$$

⋮

$$n \text{ 回目 } \frac{(n-1)}{n} \text{ 内 } \sigma_r(PS) - \frac{1}{n} 0.20 \text{ 内 } \sigma_r(PS)$$

$$= \left(1 - \frac{1.20}{n}\right) \text{ 内 } \sigma_r(PS) \dots \dots (8)$$

3本の緊張材によるP S 導入時。

全円環壁

$$\frac{1}{n} \text{ 内 } \sigma_r(PS) \dots \dots (7')$$

$$\frac{2}{n} \text{ 内 } \sigma_r(PS)$$

⋮

$$\frac{n}{n} \text{ 内 } \sigma_r(PS) \dots \dots (8')$$

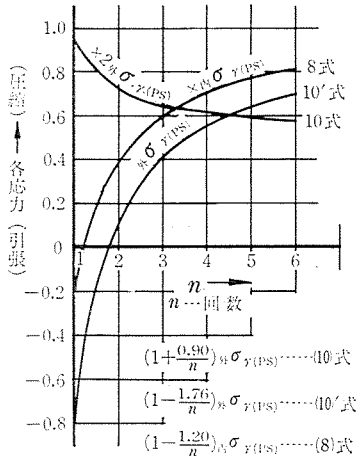
(-.....引張)

式(9)、(10)は外縁の応力性状を表わす。

とすれば充分であることがわかった。しかしそれでも外縁で $0.95 \text{ 外 } \sigma_r(PS)$ の圧縮、 $-0.38 \text{ 外 } \sigma_r(PS)$ の引張応力などのかなり大きな値の応力が作用するので注意を要す

る。いまこのPS導入過程での各式のコンクリートに不利益な応力性状について、より以上の考察を 図-10 で行なうと $n=2$ になると圧縮応力の減少、引張応力の消

図-10 導入プレストレス力/n と各応力性状



滅などによってその不利益性状は急激に減少して有利になるが、 $n=3$ 以上にしてもその応力性状についての変化はそれほど大きくないことから、あまり有利にならないと考えられる。それらのことから所要の緊張力を等分に分けてPS導入を行なうとき、その分ける回数を2~3回の範囲が一番合理的と判断できる。

5. 内圧, PS 導入の同時作用時

(1) 3本の緊張材によるPS導入時

このPS導入時に内圧を作用させた実験を行ないその応力分布を 図-11 に示す。これはPS-内圧作用時応力=PS効果の確認をするために行なったものである。このときの内圧作用時の各応力度(計算値)を表-20 に示す。

このPS効果の実験値, 計算値(図-8のPS値表-20の値)による分布の比較を 図-11 に示し, それらの値の比較を表-21 に示す。

このことによってPS-内圧作用時応力=PS効果とするのは, 当実験供試体のごときPC円環断面において成立つことが実験によって確認される。

図-11 3本の緊張材によるプレストレス導入内圧同時作用時応力分布

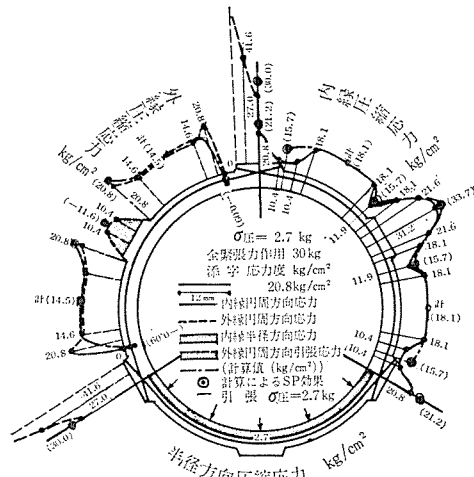


写真-2 3本の緊張材によるプレストレス導入時 ($\sigma_1 - \sigma_2$)

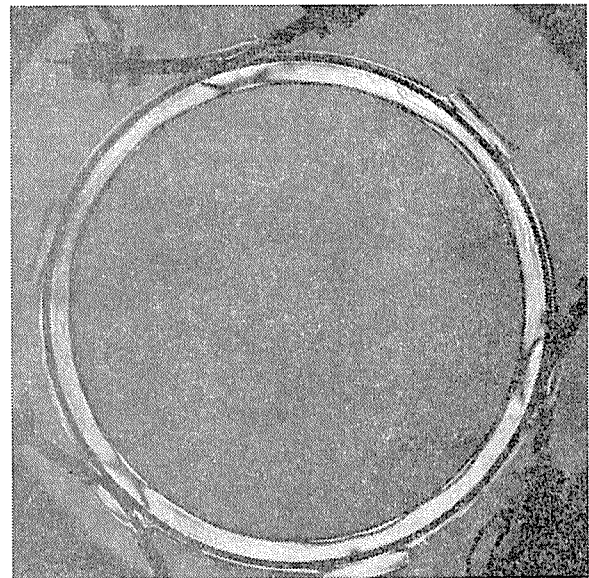


表-20 内圧作用時応力

各応力 σ 圧 kg/cm ²	円環壁部				リブ部	
	内 σ_r kg/cm ²	0.80内 σ_r kg/cm ²	外 σ_r kg/cm ²	1.25外 σ_r kg/cm ²	内 σ_R kg/cm ²	外 σ_R kg/cm ²
2.67	19.32	15.46	16.65	20.81	14.16	11.60

(2) 円環断面全体にPS導入時

断面 図-11 からの実験値による応力分布によってこ

表-21 PS効果の実験値, 計算値の比較

	円環壁部					リブ部中心線断面			
	内縁		外縁			緊張材定着あり		緊張材定着なし	
	均一応力	リブ部近傍	均一応力	リブ部近傍 (緊張材定着)	リブ接合断面 (定着なし)	内縁	外縁	内縁	外縁
	実験値 (kg/cm ²)	18.10	10.40	14.60	0	20.80	20.80	27.00	31.20
計算値 (kg/cm ²)	37.40-19.30 =18.10	31.20-15.46 =15.74	31.20-16.65 =14.55	20.80-20.81 =-0.09 (-...引張り)	41.60-20.81 =20.79	35.40-14.16 =21.24	41.60-11.60 =30.00	47.80-14.16 =33.64	0-11.60 =-11.60 (-...引張り)
実験/計算 (%)	100	66	100	≐100	100	98	90	93	90

の場合のPS効果の値を、その平面を60°回転した応力分布と合成することで求め、その応力分布を 図-12 に示し同時に各断面における計算値も示す。また、それらの値を表-22 で比較すると、リブ部近傍で若干の差がみられるが、全体には大体一致していることが認められる。

したがって、この場合のPS効果による応力(効σ)は、前記の内圧、円環断面全体にPS導入時での各応力の推定法を用いた次式によって求めることができると考えられる。

図-12 円環全体プレストレス導入、内圧同時作用時応力分布

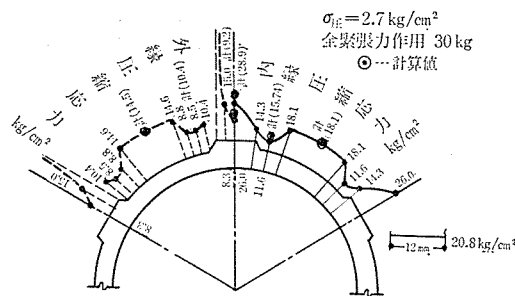


表-22 PS効果の実験値、計算値の比較(円環断面全体PS導入時)

	円環壁部				リブ部	
	内縁		外縁		内縁	外縁
	均一応力	リブ部近傍	均一応力	リブ部近傍	中心線断面	中心線断面
実験値 (kg/cm²)	18.10	(10.40+11.90) × 1/2 = 11.15	14.60	(0+17.00) × 1/2 = 8.50	(20.80+31.20) × 1/2 = 26.00	(27.00+10.40) × 1/2 = 8.30
計算値 (kg/cm²)	18.10	15.74	14.55	(20.79-0.09) × 1/2 = 10.35	(21.24+33.64) × 1/2 = 28.94	(30.00-11.60) × 1/2 = 9.20
実験/計算 (%)	100	71	100	82	90	90

円環壁部

均一応力作用範囲

リブ部近傍

リブ部中心線断面

内縁 2.00 内 $\sigma_r(PS)$ -内 σ_r =効 σ ... (11) 1.70 内 $\sigma_r(PS)$ -0.80 内 σ_r =効 σ ... (11') 3.00 内 $\sigma_r(PS)$ -内 σ_r =効 σ ... (11'')
 外縁 2.00 外 $\sigma_r(PS)$ -外 σ_r =効 σ ... (12) 1.70 外 $\sigma_r(PS)$ -1.25 内 σ_r =効 σ ... (12') 3.00 外 $\sigma_r(PS)$ -外 σ_r =効 σ ... (12'')
 (内 σ_r , 外 σ_r は式 (2), 内 σ_R , 外 σ_R は式 (3), 内 $\sigma_r(PS)$, 外 $\sigma_r(PS)$ は式 (5), 内 $\sigma_R(PS)$, 外 $\sigma_R(PS)$ は式 (6) より算定)

また、この場合の円環断面全体の各断面でのPS効果度の有利性を表-22 から、円環壁部内縁のPS効果度を基準として求め表-23 に示す。

表-23 PS効果度の比較

比較(%)	実験値						計算値					
	内縁			外縁			内縁			外縁		
	均一応力	リブ部近傍	リブ部	均一応力	リブ部近傍	リブ部	均一応力	リブ部近傍	リブ部	均一応力	リブ部近傍	リブ部
	100	62	144	80	47	46	100	86	158	80	57	51

この表によって全体的に外縁側が不利となり、特にリブ部およびその近傍のPS効果度が小さく、内圧増加に伴う破壊位置はそれらの部分付近と想定される。

6. 結果

1) 内圧作用時には外縁リブ部近傍で応力集中の傾向がみられる。

2) 当実験のごときPS導入順序では、その導入過程で、円環壁部外縁にかなり大きな引張応力が作用するので、その不利益性状を減少するために、所要緊張力値を二、三回に分けてのPS導入がよい。

3) 円環断面全体にPS導入時の各位置の応力は大*

*体厚肉円環の式で求まるが、外縁リブ部近傍でその値は減少する。したがって、効 $\sigma=1.70$ 外 $\sigma_r(PS)$ -1.25 内 σ_r とPS効果はその付近で小さくなる。

本研究について日ごろ協力をいただいている関西電力(株)技術研究所の黒岩主任研究員、伊川副主任研究員、また当所の椎野技師に感謝します。

参考文献

- 1) 原子力プラントPC構造物調査団報告書, 1970年3月, 日本原子力産業会議
- 2) 円環模型実験報告書, 1970年10月, 関西電力KK

1972.3.16・受付