形状初期不整のあるシェル構造物の設計に関する考察

クーリングタワーの応力分布性状について*

正 会 員 加 藤 史 郎^{*1)}正 会 員 武 藤 厚^{*2)}正 会 員 村 田 賢^{*3)}正 会 員 宮 村 篤 典^{*4)}

1. 序

大規模な鉄筋コンクリートシェルの例として、一葉双曲面形状を持つクーリングタワーがある。欧米では、発電所を中心に多くの冷却塔建設が存在し、その歴史も長い。また、第2次大戦後はシェル高が100 mを超えるタワーも多く製作され、その大型化が進んでいる。

これら RC 製クーリングタワーの力学的特性に関しては多くの研究がある。その中でも座屈、振動現象のほか、初期不整が応力分布や座屈荷重に与える影響の解明は重要な課題であり、現象の探求や設計指針の提案がなされてきた。しかし、これらの研究の多くは、基礎的な現象解明に主眼が置かれていたため、扱われた初期不整は任意に仮定され、理想化されたものがほとんどである。

本論では、上記の先駆的研究の成果を受け、理想化した初期不整の応力への影響をさらに検討し、結果を無次元量表示することを試みる。同時に、より現実性の高い、一般化した初期不整を模擬し、その応力への影響を検討する手法を提示する。

ここで、形状初期不整が応力分布に与える影響を論じた既往の研究をいくつかあげることにする。Kemp and Croll^{4)~7)}、Calladine⁸⁾、それに Gupta and Al-Dabbagh⁹⁾などでは、軸対称のバンド状に仮定した初期不整が扱われている。Kemp and Croll は主に、equivalent load method を用いて初期不整を考慮した解析を行った。その結果、1973 年の Ardeer Tower の崩壊¹⁰⁾の要因として、初期不整によって誘発された過大な周方向引張応力による周方向補強筋の破断と経線方向のクラックの影響をあげ、初期不整の許容量に対する推奨式を提案した。Calladine は初期不整を有する弾性の薄肉回転シェルが静的載荷を受ける際、経線方向の曲率誤差が周方向面内応

力と経線方向曲げ応力に対して大きな影響を及ぼすと指摘した。また Gupta and Al-Dabbagh は HP クーリングタワーに対して Calladine と同様の見解を示し、さらに初期不整の幅と波高をパラメータとして応力の乱れを定量的に示した。これらの研究により、軸対称でバンド状に理想化された初期不整が応力分布に与える影響はかなり解明されたと考えられる。また、Ellinas, Kemp and Croll¹¹⁾、Kato and Yokoo¹²⁾ それに Gould and Han¹³⁾などは、非軸対称の初期不整を対象とした解析を行っている。Ellinas 他は実際のタワーの初期不整の実測値を補正し、周方向を余弦級数に展開して解析に使用した。荷重としては自重と風力を想定し、equivalent load method により解析を実行している。結論としては、初期不整による経線方向面内応力の変動は殻厚に反比例し、円周方向の曲率誤差に対しては経線方向面内応力と周方向曲げ応力が大きく影響を受けるとしている。Kato 他は周方向を Fourier 展開した有限要素法を用いて解析している。荷重は自重、地震外力、風荷重を想定しており、初期不整による応力の乱れをパラメトリックに分析している。また、Gould 他は局所的な初期不整に対し、遷移回転要素¹³⁾を用いて解析し、経線方向および周方向応力ともに、小さな局部的初期不整によっても大きな変動を示すとしている。

本論ではまず、このような理想化された初期不整の応力への影響を定量的に把握するため、系統的な解析を実行して検討する。

ところで、初期不整は本来、空間的に不規則に分布し、各施工例ごとにもその特性が変化する不確定な存在であり、その発生要因も複雑であると予想される。そのため、現実的な初期不整が構造特性に与える影響を評価するには、この不規則性を認識する必要がある。

本論では、より現実的な初期不整の特性を設計に反映させることを目的とし、初期不整を確率・統計的に取り扱い、一般化した初期不整を解析に適用するための一連の方法を示す。解析例としては、仮定された確率構造を

* 学会大会 (昭和 57 年) にて一部発表。

^{*1)} 豊橋技術科学大学 助教授・工博^{*2)} 名古屋大学 大学院生・工修^{*3)} 名城大学 講師・工博^{*4)} 名城大学 助教授・工博

(昭和 60 年 4 月 25 日原稿受理)

有する初期不整¹⁾⁻³⁾に対して、模擬初期不整のサンプルを発生し、それによる応力分布の変動を調査する。

冷却塔のような大規模シェルの設計や安全性評価に際しては、実測による初期不整の統計的特性の抽出が困難な状況を考えれば、本論で示す方法で数値実験を試み、検討することは有効であり、必要性の高い行動と考えられる。

2. 解析方法

2.1 静的解析手法¹²⁾

初期変位を含む回転殻の基本式および静的解析手法を示す。

図-1 回転シェルの幾何形状と応力

ここでは図-1(a)に示す回転シェル要素を用いた有限要素法により解析する。回転シェルに対して用いる仮定を次に示す。

- (i) 回転シェルは等方弾性体である。
- (ii) シェルの初期不整は初期変位で表示し得る。

接線方向変位を u, v 、法線方向変位を w 、また面内ひずみを $\epsilon_s, \epsilon_\theta, \epsilon_{s\theta}$ 、曲げひずみを $\chi_s, \chi_\theta, \chi_{s\theta}$ と表すと、ひずみ-変位関係式は次式で与えられる^{12), 14), 15)}。

$$\epsilon = (\epsilon_s, \epsilon_\theta, \epsilon_{s\theta}, \chi_s, \chi_\theta, \chi_{s\theta})^T \\ = L(d) + 1/2 N(d) + \bar{N}(d, d_1) \quad (1)$$

ここに d は変位 u, v, w を示し、 d_1 は u, v, w に対応する初期変位 u_1, v_1, w_1 を表す。 L は線形の微分演算子、 $N, \bar{N}$ は非線形の微分演算子である（ここでは、解析の一般性を考慮し、幾何学的非線形性をも考慮している。なお、これらの演算子については文献12を参照されたい。）。

シェルに生ずる面内応力を $N_s, N_\theta, N_{s\theta}$ 、曲げ応力を $M_s, M_\theta, M_{s\theta}$ と表し、応力-ひずみ関係式を次式のように仮定する。各応力成分と荷重の正の向きは図-1(b)に示す。

$$N_s = \frac{Et}{1-\nu^2} (\epsilon_s + \nu \epsilon_\theta), \quad N_\theta = \frac{Et}{1-\nu^2} (\epsilon_\theta + \nu \epsilon_s), \\ N_{s\theta} = \frac{Et}{1+\nu} \epsilon_{s\theta}, \quad M_s = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} (\chi_s + \nu \chi_\theta),$$

$$M_\theta = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} (\chi_\theta + \nu \chi_s), \quad M_{s\theta} = \frac{Et^3}{12(1+\nu)} \chi_{s\theta} \quad (2)$$

したがって、回転シェル全体に蓄積されるひずみエネルギー V_I は次式で与えられる。

$$V_I = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \int_s \left\{ L(d) + \frac{1}{2} N(d) + \bar{N}(d, d_1) \right\}^T \cdot H \\ \cdot \left\{ L(d) + \frac{1}{2} N(d) + \bar{N}(d, d_1) \right\} s_0 \sin \phi ds \quad (3)$$

ここに、

$$H = \begin{bmatrix} E_I & 0 \\ 0 & \frac{t^2}{12} E_I \end{bmatrix}, \\ E_I = \frac{Et}{(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2(1-\nu) \end{bmatrix} \quad (4)$$

であり、 E, ν, t はそれぞれヤング係数、ポアソン比、シェル厚を表す。

接線方向変位 u, v に対応する単位面積当りの荷重を p, q 、法線方向変位 w に対応する荷重を r とすると、外力ポテンシャル V_E は、

$$V_E = \int_0^{2\pi} d\theta \int_s \begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} s_0 \sin \phi ds \quad (5)$$

と示される。全ポテンシャルエネルギー V は、

$$V = V_I - V_E \quad (6)$$

で与えられ、全ポテンシャルエネルギー停留の原理より V を u, v, w に関して停留させることにより次式を得る。

$$\delta V = 0 \quad (7)$$

上式で表される系の支配方程式を有限要素法で離散化して解く。また同式は非線形方程式となるため、ここでは Newton-Raphson 法により解を求める。離散化の概要をつぎに示す。回転シェルの変位 (u, v, w)、初期変位 (u_1, v_1, w_1) が次式のように Fourier 展開できると仮定する。

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = \sum_{j=1}^N \begin{bmatrix} u_j(s) \cos N_j \theta \\ v_j(s) \sin N_j \theta \\ w_j(s) \cos N_j \theta \end{bmatrix}, \\ \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ w_1 \end{bmatrix} = \sum_{i=0}^M \begin{bmatrix} u_{0i}(s) \cos i \theta \\ v_{0i}(s) \sin i \theta \\ w_{0i}(s) \cos i \theta \end{bmatrix} \quad (8)$$

ここに $N_j (j=1, 2, \dots, N)$ は変位の周方向 Fourier 展開次数である。また要素内では $u_j(s), v_j(s), w_j(s)$ を、次式に示すように経線方向に3次関数で近似する。

$$u_j(s) = \beta_{1j} + \beta_{2j} \xi + \beta_{3j} \xi^2 + \beta_{4j} \xi^3 \\ v_j(s) = \beta_{5j} + \beta_{6j} \xi + \beta_{7j} \xi^2 + \beta_{8j} \xi^3$$

$$w_i(s) = \beta_{9j} + \beta_{10j}\xi + \beta_{11j}\xi^2 + \beta_{12j}\xi^3 \cdots \cdots (9)$$

$$\xi = S_e/l$$

なお、 l は要素の弧長、 S_e は要素始端からの距離である。

2.2 模擬初期不整の発生について

本論では、理想化された初期不整以外に、推定された初期不整の統計量に基づく初期不整のサンプルも解析に用いる。初期不整の統計量の推定方法は文献1～3に示す、エントロピーモデルによる手法である。なお本論では推定方法には触れず、解析において使用するサンプルの特性のみを表示する。

なお、用いる模擬初期不整のサンプルの空間分布特性は経線方向、周方向ともに複数の波数成分に渡ってスペクトルを有する構造である。本論では、発生した模擬初期不整を波数領域で濾過し、特定の範囲の成分を抽出して、それに基づく解析も実行する。その目的は、「現実の施工では、特定の範囲の波数成分の初期不整を集中的に抑制することも十分予想され、そのような状況を想定する。」ことである。初期不整のスペクトルは2次元 Fourier 変換により求めた。

$$S(f_z, f_\theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} w_i^*(z, \theta) \exp[-2\pi i(f_z \cdot z + f_\theta \cdot \theta)] dz d\theta$$

$$i = \sqrt{-1} \cdots \cdots (10)$$

$$S_u(f_z, f_\theta) = S(f_z, f_\theta) \cdot W_f(f_z, f_\theta) \cdots \cdots (11)$$

$$u w_i^*(z, \theta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} S_u(f_z, f_\theta) \exp[2\pi i(f_z \cdot z + f_\theta \cdot \theta)] df_z df_\theta \cdots \cdots (12)$$

ここに、 w_i^* : 法線方向ランダム初期変位²⁾

S : 模擬初期変位のスペクトル

S_u : 濾過後のスペクトル

W_f : フィルター関数

$u w_i^*$: 濾過後の初期変位

を示す。

3. 解析結果

3.1 理想化されたバンド状初期不整を含むタワーの応力分布

中規模の RC クーリングタワーについて、軸対称および非軸対称のバンド状初期不整を含む解析を行う。荷重としては自重のみ想定した。なお、結果を簡単に無次元

表—1 解析対象の諸数値 (軸対称初期不整)

Shells	l_0	t	R	C	R_0	R_p	ϕ_0	w_0
A-1*	6.32	0.1523, 0.2285, 0.3046	21.9	55.7	24.52	208.3	10.03	-0.3
A-2	9.48							
A-3	12.64							
B-1	6.32	0.1523, 0.2285, 0.3046	23.9	55.7	26.76	227.3	10.92	-0.3
B-2	9.48							
B-3	12.64							
C-1	6.32	0.1523, 0.2285, 0.3046	25.9	55.7	28.99	246.3	11.81	-0.3
C-2	9.48							
C-3	12.64

図—2 クーリングタワーの形状と仮定した初期不整

図—3 仮定した初期不整形形状

元量表示するために、シェルの形状や初期不整のバンド幅について系統的に解析を実行している。無次元化に際しては、Calladine による一般の回転殻に対する手法⁸⁾を適用している。

(a) 軸対称初期不整を含む解析結果

図—2, 3に、仮定した初期不整形形状の概観を示す。その仮定は次式に示すとおりである。

$$\left. \begin{aligned} u_i &= -\tilde{w}(z) \tan \phi_0 \\ v_i &= 0 \\ w_i &= \tilde{w}(z) \end{aligned} \right\} \cdots \cdots (13)$$

ただし、

$$\begin{aligned} \tilde{w}(z) &= w_0 \{1 - 3(z - z_0)^2 / l_0^2 + 2(z - z_0)^3 / l_0^3\} \quad \overline{AB} \\ \tilde{w}(z) &= w_0 \{3(z - z_0 + l_0)^2 / l_0^2 - 2(z - z_0 + l_0)^3 / l_0^3\} \quad \overline{BC} \end{aligned} \cdots \cdots (14)$$

ここに、図—2において w' は次式に示すものである。

$$w' = [w_0 \sqrt{1 + \tan^2 \phi_0}] \cdots \cdots (15)$$

表—1には、解析に用いた初期不整とシェルの値を示した。

次に、ここで用いる無次元化量を示す。これは N_θ および M_s を対象としている。その理由としては、軸対称

初期不整の影響は N_θ と M_s に対して支配的であることによる。これは Kemp and Croll らによっても明らかにされている。

$$n = \frac{|(N_\theta - N_{\theta 0})/N_{s0}|}{|w_0/l_0|} \left/ \left(\frac{R_0}{l_0 \cos \phi_0} \right) \right\} \dots\dots (16)$$

$$m = \left| \frac{M_s - M_{s0}}{N_{s0} \cdot w_0} \right|$$

上式の n , m を、次式に示す ξ に対して表示する。

$$\xi = \sqrt{t \cdot R_0 / l_0^2} \dots\dots (17)$$

ここに、(16) 式中の N_θ , M_s は初期不整を含むシエルの $z=z_0$ におけるフープ応力および経線方向曲げ応力であり、 $N_{\theta 0}$, M_{s0} , N_{s0} 等は完全形状シエルの $z=z_0$ における各応力を示す。なお、(16) 式中の $1/\left(\frac{1}{l_0 \cos \phi_0} \frac{w_0}{l_0}\right)$ は、

図—4 面内応力分布 (A-1)

図—5 曲げモーメントの分布 (A-1)

図—6 M_s , N_θ の無次元量表示 (軸対称初期不整)

表—2 解析対象の諸数値 (非軸対称初期不整)

Shells	t	l_0	R	C	R_0	ϕ_0	w_0	N	$\sqrt{\frac{E \cdot R_0}{l_0^2}}$	l/l_0
Type-2 ($n_i=2$)	D-1	0.0788	6.32					5	0.220	6.09
	D-2	0.1523							0.306	6.09
	D-3	0.3299							0.450	6.09
	D-4	0.3154							0.220	3.05
Type-4 ($n_i=4$)	E-1	0.0788	21.9	55.7	24.52	10.03	-0.30	6	0.220	3.05
	E-2-5							5	0.306	3.05
	E-2-6	0.1523						6	0.306	3.05
	E-2-7							7	0.306	3.05
	E-3	0.3299						6	0.450	3.05
	E-4	0.0825						7	0.450	6.09

図—7 B-B 断面における、仮定した初期不整 (非軸対称)

初期不整による経線方向の曲率変化の度合を示し、Calladine⁸⁾ に示されたものである。 ξ は円筒シエルの場合に有効な無次元量で Gupta⁹⁾ に示されている。

図—4, 5 には、応力分布性状の一例を示し、図—6 には無次元化表示の結果を掲げる。

(b) 非軸対称初期不整を含む解析結果

図—2 および 7 に、仮定した初期不整形状を示し、表—2 には解析に用いたシェルと初期不整に関する値を示す。ここで試みる無次元量表示も、(a) の軸対称初期不整に対するものと同じであるが、さらに、周方向の曲率変化を示すパラメータとして l/l_0 を考慮した (図—7 を参照)。

解析に使用した初期不整の周方向 Fourier 展開次数 n_i は 2 および 4 であり、それぞれについての解析結果を図—8~11, 図—12~15 に示す。また、無次元量表示の結果は図—16 に掲げる。なお、仮定した初期不整は次式に示すものであり、 $\tilde{w}$, w' は (14), (15) 式で示したものと同様である。

$$\left. \begin{aligned} u_i &= -\tilde{w}(z) \tan \phi_0 \cos n_i \theta \\ v_i &= 0 \\ w_i &= \tilde{w}(z) \cos n_i \theta \end{aligned} \right\} \dots\dots (18)$$

なお、表—2 中の N は、解析に用いた周方向展開の項

図—8 面内応力分布 (N_s , N_θ , D-2) 図—9 曲げモーメントの分布 (M_s , M_θ , D-2)

図—10 面内応力分布 (D-2)

図—11 曲げモーメント分布 (D-2)

図—12 面内応力分布 (E-2-6)

図—13 曲げモーメント分布 (E-2-6)

図—14 面内応力分布 (E-2-6)

図—15 曲げモーメント分布 (E-2-6)

図—16 M_s , N_θ の無次元量表示 (非軸対称初期不整)

く、Calladine の方法を利用すると、軸対称初期不整の応力への影響を簡単に無次元量表示することが可能である。これは、実際の設計に際しても有効な資料となり得ると考えられる。

(ii) 非軸対称初期不整の影響は N_θ , M_s , M_θ に対して大きく、とくに初期不整の振幅が最大の位置では複雑な応力状態を示す。無次元量表示については、初期不整の展開次数 $n_i=4$ の方が $n_i=2$ に対するよりも、とくに m の値が上昇することが示されたが、 l/l_0 をパラメータとしても、簡単な図上表示はできなかった。

なお、以上の解析においては初期不整の最大値 w_0 は

数である。

上記の解析結果より、バンド状の軸対称および非軸対称初期不整を含むタワーの応力分布特性について検討する。

(i) 軸対称初期不整の影響は N_θ , M_s に対して大き

常に一定 ($w_0 = -0.3 \text{ m}$) としているが、これは Kato and Yokoo¹²⁾ において、同一の絶対値 $|w_0|$ を持っていれば、(19) 式に示す値が、 w_0 の符号によらずほぼ等しくなり、また $|N_0 - N_{s0}|$ 、 $|M_s - M_{s0}|$ と $|w_0|$ の間にはかなりの近似度で線形とみなせる関係にある事が示されていることによる ($w_0 = -0.3 \text{ m}$ の値は、本例では、殻厚程度の値を設定したことによる)。

$$\hat{n} = \left| \frac{(N_0 - N_{s0})/N_{s0}}{w_0/l_0} \right|, \quad \hat{m} = \left| \frac{M_s - M_{s0}}{N_{s0} \cdot w_0} \right| \quad \dots\dots\dots (19)$$

なお、解析に必要な項数については、 $n_i = 2, 4$ についてそれぞれ、 $N = 5, 6$ で十分な解が得られたことを付け加えておく。

3.2 不規則な初期不整を含むタワーの応力分布

図一17(a) に示す完全形状を持つタワーに対して、模擬初期不整を用い、荷重としては自重を想定した静的解析の結果について示す。なお、3.1 においては、殻厚をパラメータとしているため、殻厚はシェル内で一定としたが、ここでは実際に近いモデルを扱うために、図一17(b) に示すように設定している。

解析に用いる初期不整は、2.2 で述べたようにエントロピーモデルより得られた確率構造を基に発生したサンプルである。また、初期不整は法線方向初期変位 w_i のみと仮定した。

エントロピーモデルを用いて発生する模擬初期不整のサンプルはシェル全域にわたり初期変位の振幅が存在するが、本論においては、シェル高の中心付近の 30 m 以内のみを解析に使用する。これは以下の理由による。(i) 初期不整を全域で考慮することは数値計算上不利である。(ii) 全域を考慮しなくても、比較的大きな領域の初期不整を取り扱えば、応力分布の乱れを大略把握することが可能と思われる。(iii) 3.1 に示した理想化されたバンド状初期不整による結果との比較を行う。したがって、本解析例では発生した模擬初期不整に対し、図一18 に示す重みを乗じて用いている。

図一17 解析対象の完全形状

図一18 初期不整の重み関数

表一3 発生した模擬初期不整の特性 (5 サンプル, 単位; cm)

filter		F0	F1	F2	F3	F4
sample no.						
01	max.	19.8	9.4	10.5	22.6	15.0
	r.m.s.	7.7	5.8	5.1	5.9	5.0
02	max.	29.2	13.7	15.5	22.9	18.9
	r.m.s.	8.1	6.0	5.4	6.7	4.5
03	max.	29.3	13.7	15.6	15.7	22.1
	r.m.s.	9.0	6.7	5.9	5.0	7.4
04	max.	31.3	15.2	16.0	11.6	20.4
	r.m.s.	6.9	5.3	4.4	4.1	5.4
05	max.	34.1	13.9	20.2	11.5	25.8
	r.m.s.	7.6	5.1	5.6	4.5	6.1

図一19 フィルター $W_F(f_z, f_\theta)$

図一20 模擬初期不整の周方向展開係数

図一21 解析に用いるサンプルのスペクトル構造

次に、初期変位に関する波数領域でのフィルター W_F の特性を示す。TYPE F0 のフィルターは、発生したサンプルに図一18 に示した cosine 型の重みを乗じた初期変位のスペクトルに対し、振幅の大きな範囲をほとんど含むものである。

以上のような操作を加えた初期変位の特性を、5 サンプルについて表一3 に掲げる。

数値解析例で用いたのは、No.1 のサンプルである。

図—22 解析に用いるサンプルの概観

表—4 仮定した境界条件

at lower end (z=0)	$u=0, \quad \frac{\partial u}{\partial s} \neq 0$	at upper end (z=H)	FREE
for each N_i	$v=0, \quad \frac{\partial v}{\partial s} \neq 0$	for each N_i	
	$w=0, \quad \frac{\partial w}{\partial s} = 0$		

表—5 解析に用いた周方向展開次数

for imperfections	$i = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6$	$M=6$
for displacements	$N_j = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12$	$N=13$ in eq. (8)

次に、このサンプルの中央位置における周方向余弦展開係数 (TYPE ; F 0) を図—20 に、またそのスペクトル構造を図—21 に示す。概観は図—22 に表示する。

また、仮定した境界条件を表—4 に示し、用いた初期不整および静的解析時に仮定した変位の周方向 Fourier 展開次数を表—5 に掲げる。

解析結果の詳細は TYPE F 0 の初期不整についてのみ示す。主要な応力成分である N_s , N_θ , M_s および $N_{s\theta}$ を図—23～26 では各断面について示し、図—27～30 には全体の分布状況を示す。

シェル下端での応力が、3.1 に示す結果と (特に M_s について) 異なっているのは、3.2 の解析では図—17(b) に示すように、実物に近い殻厚を用いるために両端で殻厚を変化させていることによる。

参考のために、3.1 に示した無次元量表示に対して、模擬初期不整についても $t=t_0$, $l_0=l_z/2$ とし、 w_0 として最大初期変位振幅をとった値を図—16 に表す。

次に、初期不整のスペクトル特性による応力の乱れの変化を示す。ここでは (20), (21) 式に示す値を F 0～F 4 のタイプについて求めた結果を図—31 に示す。

$$P = \left[\frac{1}{n_\theta n_z} \sum_{i=1}^{n_\theta} \sum_{j=1}^{n_z} \langle |N_s(z_j, \theta_i) - N_{s0}(z_j, \theta_i)|^2 \rangle \right]^{1/2} \quad \dots\dots\dots (20)$$

$$Q = \max_i \cdot ||N_s(z_j, \theta_i) - N_{s0}(z_j, \theta_i)|| \quad \dots\dots\dots (21)$$

$${}_N P = P / P(\text{TYPE ; F 0})$$

図—23 初期不整を含むタワーの
応力 N_s 図—24 初期不整を含むタワーの
応力 N_θ 図—25 初期不整を含むタワーの応力 $N_{s\theta}$ 図—26 初期不整を含むタワーの応力 M_s

$${}_N Q = Q / Q(\text{TYPE ; F 0})$$

$$(n_\theta = 37, n_z = 54)$$

N_{s0} : 完全形状の応力 (他の成分についても同様)

以上、模擬初期不整を含むタワーの応力分布の試算例を掲げた。その結果について以下に考察する。

(i) すべての応力成分が高さ方向、周方向共にについて比較的複雑に乱れている。

(ii) $N_{s\theta}$ を見ると、 $n_i = 4, 5$ 付近の初期不整成分のみが卓越するかなのような周方向分布を示している。これは、用いたサンプルのピークが $n_i = 2$ に存在することを考えると、高次の初期不整成分が応力に与える影響も重

図-27 応力分布状況 (N_s)

図-28 応力分布状況 (N_θ)

図-29 応力分布状況 ($N_{s\theta}$)

図-30 応力分布状況 (M_s)

図-31 初期不整のスペクトル特性が応力の乱れに与える影響

要であると言えよう。この点については、さらに殻厚等との関連を含めて検討の必要があろう。

(iii) 模擬初期不整による応力の乱れを 3.1 に示した無次元量で表示すると、初期不整のスペクトル構造によってもかなり変動を示し、理想化された初期不整に対する値を大幅に上回る値を示すものも存在した。このことより、複雑な初期不整による影響については前述の無次元量表示のような簡単な表示は困難であり、その試みは危険であると言えよう。

(iv) 初期不整のスペクトル特性が応力分布へ与える影響をみると、広領域に渡って振幅を有する TYPE F0 よりも、特定の f_z の領域に限定した F1, F2 に対する方が N_θ , M_s については大きな応力の乱れを呈している。用いた初期不整の振幅の最大値が F1, F2 に対しては F0 の約 1/2 と小さく、シェル面における r. m. s. 値も小さいことを考えると、次のことが言えよう。すなわち、不規則で複数の波数成分を持つ初期不整が応力へ与える影響は複雑で、応力成分によっては必ずしも、応力の乱れの程度が初期不整のスペクトルの領域の広さや、振幅の大きさに依存しないと言える。これは、現実的な初期不整の推定の重要性を示唆し、施工管理に際し

ては、各測点ごとに振幅を中心とした初期不整の管理については十分な注意を要すると言えよう。

(v) 本解析例で用いた初期不整の重み W_T の影響と思われる乱れが、特に N_s , N_θ について大きく表れており、本来は全域で初期不整を考慮して解析することが望ましい。

なお、以上のすべての数値解析において仮定した材料定数は、単位容積重量 $\gamma=2.4$ (tf/m³)、ヤング係数 $E=2.1 \times 10^6$ (tf/m²)、ポアソン比 $\nu=0.16$ である。

4. 結 び

大規模シェル構造物の設計において重要な因子である形状初期不整の取り扱いに関して、初期不整が自重を受けるクーリングタワーの応力分布に与える影響の解析により検討した。

まず、従来の研究の中心であった理想化したバンド状初期不整による解析をパラメトリックに実行した結果について述べる。軸対称初期不整に関しては、その応力への影響の簡単な表示ができ、定量的把握が可能であることを示した。これは重要な設計資料と成り得ると考えられる。しかし、非軸対称のものについてはまだ簡単な表示は困難である。

次に、初期不整を一般化してより現実に近い特性を推定して解析に利用した結果をみる。全体的に比較的複雑な応力分布を呈し、単一の初期不整成分を仮定した解析では予想できないような応力分布を示すことが認められた。このことより、多くの成分を有する現実の初期不整を単一の成分のみに理想化して取り扱うことは注意を要し、設計時等の検討においては現実的な初期不整が欠かせないと思われる。

ところで、本論で示した数値例は、模擬初期不整に対しては一例にすぎず、したがって以下の点でまだ明確ではない。

- (i) どのような初期不整の分布が危険であるか。
- (ii) 危険な初期不整の生起する可能性の検討。
- (iii) 危険な初期不整の防止方法の検討。

次に、具体的な設計において初期不整を考慮する場合を考えると、本論で示すような手法に基づいて多数の模擬初期不整を発生し、その標本中で平均的な振幅を持つものや、最大の振幅を有するサンプルを用いて解析を実行することは有益であると思われる。また、例えば殻厚の検討を行う際に、設定した殻厚に対して予想される初期不整の特性を推定し、その構造特性への影響を予測するといった、一連の敏感度を調査することも重要な意味を持つと思われる。それと同時に、先に示したように、理想化された初期不整について、その影響を簡単に図上で確認できることも有益であると考えられる。

このような状況を考えると、今後より現実に近い初期不整の推定は重要な課題であると考えられる。また、安全性の評価に際しては、応力分布をはじめ、座屈荷重等への影響を統計的に評価、検討することも必要となろう。

謝 辞

本研究において、御指導を頂いた名古屋大学教授・松岡 理博士、有益な御討議を頂いた名古屋大学教授・坂本 順博士に厚く謝意を表します。

また、計算は豊橋技術科学大学計算機センター・MELCÔM-800Ⅲおよび名古屋大学大型計算機センター・FACÔM-M 382によって行い、その一部は昭和59年度文部省科学研究費一般C（代表者・加藤史郎）によることを付記します。

参考文献

- 1) Kato, S., Miyamura, A. and Murata, M. : Geometric Imperfections and Buckling in Cooling Tower Shells, Proc. of the 2nd International Conference on Natural Draught Cooling Towers (IASS-RUB), Sept. 1984, pp. 264~277
- 2) 加藤史郎, 武藤 厚, 村田 賢, 宮村篤典: 回転殻の初

期不整のエントロピーモデルによる統計的解析(クーリングタワー型シェルの形状初期不整の推定), 建築学会論文報告集, 昭和60年9月, No. 355

- 3) 加藤史郎, 村田 賢, 武藤 厚, 宮村篤典: 回転殻の初期不整に対するエントロピーモデルによる統計的解析—クーリングタワーの初期不整—, 昭和59年日本建築学会大会梗概集, pp. 2563~2564
- 4) Kemp, K. O. and Croll J. G. A. : The Role of Geometric Imperfections in the Collapse of a Cooling Tower, The Structural Engineer, Vol. 54, No. 1, Jan, 1976, pp. 33~37.
- 5) Croll, J. G. A., Kaleli, F. and Kemp, K. O. and Munro, J. : A Simplified approach to the Analysis of Geometrically Imperfect Cooling Tower Shells, Engineering Structures, Vol. 1, Jan., 1979, pp. 92~99.
- 6) Croll, J. G. A. and Kemp, K. O. : Specifying Tolerance Limits for Meridional Imperfections in Cooling Towers, J. of the American Concrete Institute, Vol. 76, No. 1, Jan., 1979, pp. 139~158.
- 7) Croll, J. G. A., Kaleli, F. and Kemp, K. O. : Meridionally Imperfect Cooling Towers, J. of the Engineering Mechanics Division, A. S. C. E., Vol. 105, No. EM5, Oct., 1979, pp. 761~777.
- 8) Calladine, C. R. : Structural Consequences of Small Imperfections in Elastic Thin Shells of Revolution, Int. J. of Solids Structure, Vol. 8, 1972, pp. 679~697.
- 9) Al-Dabbagh, A. and Gupta, A. K. : Meridional Imperfection in Cooling Tower Design, J. of the Structural Division, A. S. C. E., Vol. 105, No. ST6, June, 1979, pp. 1089~1102.
- 10) Report of the Committee of Industry into the Collapse of the Cooling Tower at Ardeer Nylon Works, 27th, Sept., 1973, Imperial Chemical Industries Limited Petrochemicals Division.
- 11) Ellinas, C. P., Croll, J. G. A. and Kemp, K. O. : Cooling Towers with Circumferential Imperfections, J. of the Structural Division, A. S. C. E., Vol. 106, No. ST12, Dec., 1980, pp. 2405~2423.
- 12) Kato, S. and Yokoo, Y. : Effects of Geometric Imperfections on Stress Distributions in Cooling Towers, Engineering Structures, Vol. 2, July, 1980, pp. 150~156.
- 13) Gould, P. L., Han, K. J. and Tong, G. S. : Analysis of Hyperbolic Cooling Towers with Local Imperfections, Proc. of the 2. International Symposium, I. A. S. S., Natural Draught Cooling Towers, Springer-Verlag, 1984, pp. 397~411.
- 14) Koiter, W. T. : On the Nonlinear Theory of Thin Elastic Shells, Proc. Koninkl. Ned. Akad. van wetenschappen, Amsterdam, Series B, 69, 1966, pp. 1~54.
- 15) Matsuoka, O. : An approximate theory of thin shells, Proc. I. A. S. S. Symp., Non-classical shell problems, Warsaw, 1963, pp. 219~237.

SYNOPSIS

UDC : 624.074.43

TOWARD THE DESIGN OF LARGE ROTATIONAL SHELLS WITH IMPERFECTIONS

Effects of imperfections on the stress distributions of cooling tower shells

by Dr. **SHIRO KATO**, Associate Prof. of Toyohashi Univ. of Technology, **ATSUSHI MUTOH**, Graduate Student of Nagoya University, Dr. **MASARU MURATA**, Lecturer of Meijo Univ., and Dr. **ATSUNORI MIYAMURA**, Associate Prof. of Meijo Univ., Members of A. I. J.

A useful method to investigate the effects of random imperfections on the stress distributions of shells is presented. The quantitative effects of the idealized band imperfections are also shown with non-dimensional expressions.

In the numerical examples, several samples of geometric imperfections in cooling towers are generated based on the newly proposed scheme by Maximum Entropy Criteria, and the simulated samples are used to investigate the effects of random imperfections on the stress distributions in the towers. The calculations of the static stresses are carried out for the self weight, taking the Ardeer Tower as an example.