

## 2重膜構造物において外膜の変形で誘起される 内膜の変形現象について

南 宏和\*1  
川村 純夫\*2  
奥田 泰雄\*3  
武田 文義\*4

### 梗 概

2重膜構造物が気密性の高い内部空間を持てば、風圧力による外膜の変形に応じて内膜に変形が誘起される現象が起こる。著者らはこの現象を太鼓現象と呼び、近似的な解析を行った。解析法は外膜と内膜をそれぞれ帯状膜ユニットに単純化し、内部空間を断熱変化をする空間にモデル化した近似法である。解析の結果、内部空間が完全気密であれば内膜応力は条件によっては外膜応力に近い値になり得る事、しかし開口があり気密性が低下すると内部応力は急減することなどの特性が確認された。

#### 1. はじめに

膜構造建築物に2重膜構造様式が採用される場合がある。この様式は一般に、建物外部に面する膜面（外膜と呼ぶ）と建物内部に面する膜面（内膜と呼ぶ）とによって屋根を形成し、それら膜面の中間に内部空気層（内部空間と呼ぶ）を有する。また、この様式には空気膜構造によるものと空気圧に依存しない骨組膜構造あるいはサスペンション膜構造によるものが挙げられる。空気膜構造方式による内部空間は常時加圧され外部よりも圧力が高く維持される。このような2重膜構造様式はどちらかといえば特殊である。これに対し、恒久建築物用に一般的に採用される骨組膜構造あるいはサスペンション膜構造方式では、その内部空間は加圧されることなく常時は建物外部と同じ圧力状態にある。また、この構造形式では外膜部分と内膜部分の膜面は複数の膜パネルに分割され、それぞれ骨組材やケーブル材に定着されることが多い。本論では、これら構造方式の中で特に骨組膜構造方式を採る2重膜構造物を研究の対象とする。

さて、この種の2重膜構造物の外膜部分に突風圧力のような急に強さを増す風圧力が作用する場合を考える。いま仮に、風圧力を正圧と考えれば、外膜の分割された各膜パネル（以下、膜ユニットと呼ぶ）の面は内部空間を内膜方向に向かって変形する。この変形は内部空間の体積を減少させる。この時、もし内部空間の気密性が完全であるならば、内部空気の圧力は状態法則に従って増大しようとする。気密性が不完全であってもそれが十分に高ければ、やはり内部空気圧力は、その程度は小さく

なるが増大しようとするであろう。このように圧力の増大する内部空気は、内膜部分を構成する膜ユニットの膜を内部空間の体積を増す方向（建築内部方向と呼ぶ）に変形させようとする。このように、2重膜構造の内部空間の気密性が高い場合に、急に大きくなる風圧力を受ける外膜の変形に応じて内膜も変形する現象を太鼓現象（英訳をdrummingとする）と呼ぶことにする。そして、外膜の風圧力が正圧の場合を順方向の太鼓現象、負圧の場合を逆方向の太鼓現象と呼ぶことにする。

2重膜構造の設計では、風圧など外荷重を直接受ける外膜の強度が検討されることは当然である。内膜に関してはこれが直接に外荷重を受けないので、外膜と同様の強度の検討はなされないのが普通である。しかし内部空間の気密性が高い場合には内膜は太鼓現象で変形するのであるから、この現象によって内膜の応力の大きさがどの程度になるのかを検討しておくことが必要となるであろう。太鼓現象による内膜応力は、内部空間の気密性の高さに強く依存すると考えられる。そして気密性が完全な場合には、内膜応力は風圧力を直接受ける外膜と同様の応力状態になり得ることも条件によっては予想される。

このように、重要な太鼓現象ではあるが、著者らの知る限りこれ迄に研究報告は出されていない。そこで本論ではさしあたり、実際の風圧分布力を考慮した実構造解析を行う検討ではなく、理想化した単純な2重膜構造（風圧力も理想化して外膜部分に一樣とする）を設定し、その太鼓現象を簡易な近似的方法で解析する。そして内部空間圧力や内膜応力が、気密性の高さなど幾つかの因

\*1 大阪市立大学工学部 客員助教授、\*2 同 教授、\*3 同 助手、\*4 太陽工業（株） 開発センター

子に依存してどのような程度に生ずるのかを調査する。最後に、この調査結果を考察し、太鼓現象を考慮した膜の強度検討のための基礎的知見となる結論をまとめる。

## 2. 太鼓現象の近似解析法

2重膜構造の外膜部分と内膜部分は共に複数個の帯状の膜ユニットで構成されていると考える。外膜ユニットと内膜ユニットのその数をそれぞれ、 $n_1, n_2$ とする。内部空間の気密性を決める開口は断面積Aでその数がN個あるとする。外膜ユニットの外側、内部空間および建物内部側の初期の空気圧力は大気圧 $P_0$ と考える。建物内部側の圧力は太鼓現象途上でも変化はないとする。時刻 $t=0$ に外膜に風圧力 $P_1(t)$ が正圧として作用し始め $t=t_{1m}$ にその最大値に達するとする。この風圧力で外膜が変形し始め内

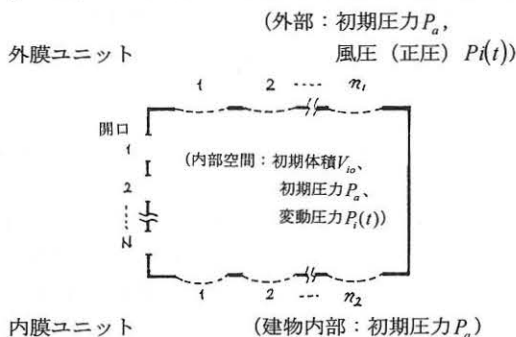


図1 解析のための2重膜構造の概念

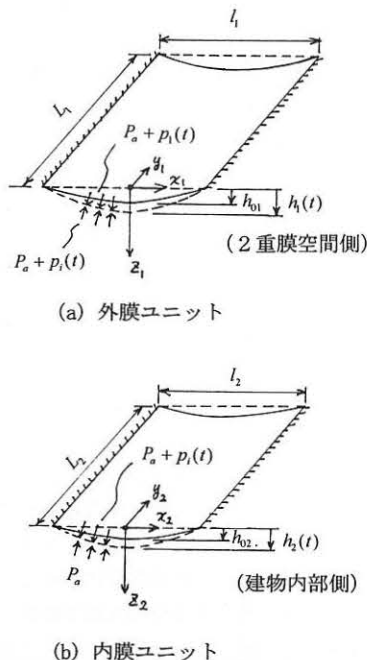


図2 膜ユニットの近似解析モデル

部空間の体積が減少しようとする。このために内部空間の圧力増加 $P_i(t)$ は $t=0$ から発生し始め、 $t=t_{2m}$ でその最大値に達するとする。この内部空間圧力増加(以後、内圧と呼ぶ)の作用によって内部空間の一部は開口から流出する一方で、内膜が変形する。内部空間の初期の体積を $V_{io}$ とする。以上の太鼓現象を起こす2重膜構造の概念図を図1に示す。帯状膜ユニットに単純化して考える外膜、内膜ユニットの近似解析モデルを図2に示す。外膜、内膜ユニットの幅はそれぞれ $l_1, l_2$ 、長さは $L_1, L_2$ 、幅方向中央部での初期たわみは図2に示した座標系の $z_1, z_2$ 軸の方向にそれぞれ $h_{01}, h_{02}$ 、そして変形時 $t$ における同方向への幅方向中央部のたわみは $h_1(t), h_2(t)$ とする。これら近似解析モデルでは、帯状膜ユニットの幅方向に現われるたわみは長さ方向に一樣であるとする。 $t=0$ で作用し始め $t=t_{1m}$ で最大値 $P_{1m}$ に達する風圧力 $P_1(t)$ は、簡単のために時間に比例して増大するとし次式で表わす。

$$P_1 = \frac{P_{1m}}{t_{1m}} t \quad (0 \leq t \leq t_{1m}) \quad (1)$$

外膜の変形で起る内圧増加 $P_i(t)$ は、(1)式の圧力作用に対応して $t=0$ から発生し始め、最大値 $P_{im}$ に達すると考える。この最大値の実際上の時刻 $t_{2m}$ は、開口がない場合(内部空間が完全気密)は $t_{1m}$ に等しいと考えられるが、開口のある場合はそうではなく $t_{2m} < t_{1m}$ となることもあり得ると推測される。そこで(1)式に対応して、 $P_i(t)$ を次式で表す。

$$P_i = \frac{P_{im}}{t_{2m}} t \quad (0 \leq t \leq t_{2m} \leq t_{1m}) \quad (2)$$

次に時刻 $t$ の時の膜の応力とたわみの式を示す。外膜と内膜について $x_1, x_2$ 軸方向に沿って膜の歪を一定と仮定しこれらをそれぞれ $\varepsilon_1(t), \varepsilon_2(t)$ 、引張弾性係数を $E_{x1}, E_{x2}$ 、応力を $T_1(t), T_2(t)$ と表す。また $y_1, y_2$ 軸方向の歪は0と仮定する。たわみ形状を放物線で近似すると次式が示される。

$$T_1 = E_{x1} \varepsilon_1 = E_{x1} \left\{ \frac{8(h_1^2(t) - h_{01}^2)}{3l_1^2 + 8h_{01}^2} \right\} \quad (3)$$

$$T_2 = E_{x2} \varepsilon_2 = E_{x2} \left\{ \frac{8(h_2^2(t) - h_{02}^2)}{3l_2^2 + 8h_{02}^2} \right\}$$

幅方向中央のたわみ $h_1(t), h_2(t)$ は、力の釣合条件から近似式として次式で表される。

$$h_1 = \left[ \frac{l_1^4}{64E_{x1}} \left\{ 3 + 8 \left( \frac{h_{01}}{l_1} \right)^2 \right\} (P_1(t) - P_i(t)) + h_{01}^3 \right]^{1/2} \quad (0 \leq t \leq t_{2m}) \quad (4)$$

$$h_2 = \left[ \frac{l_2^4}{64E_{x2}} \left\{ 3 + 8 \left( \frac{h_{02}}{l_2} \right)^2 \right\} P_i(t) + h_{02}^3 \right]^{1/2} \quad (0 \leq t \leq t_{2m})$$

(4)式のたわみにより一つの外膜ユニットの膜は内部空間体積を減少させる。この減少量を $V_1(t)$ と表す。一つの内膜ユニットの膜面の変形は逆に体積を増大させる。この量を $V_2(t)$ と表す。ここで開口があれば、内圧 $P_i$ により空気流出が起る。時刻 $t$ までの一つの開口からの流出空気量を $V_e(t)$ と表す。 $V_1, V_2$ はたわみ形状を放物線と仮定すると次式のように表される。

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{2}{3} l_1 L_1 (h(t) - h_{01}) \\ V_2 &= \frac{2}{3} l_2 L_2 (h_2(t) - h_{02}) \end{aligned} \quad (5)$$

時刻 $t$ で内部空間に流速0の点があり、この点と、開口断面で外部初期圧力 $P_a$ の点との間に気流が定常で一つの流線をもつと仮定する。ベルヌーイの定理から、開口断面の流出速度 $v(t)$ は次式で表される。 $\rho$ を気流密度とする。

$$v = \left\{ \frac{2P_i(t)}{\rho} \right\}^{1/2} \quad (6)$$

この式を用いて $V_e$ は、さしあたり流量係数を1.0と考えれば、次式で表される。

$$V_e = \frac{2A}{3} \left\{ \frac{2P_m}{\rho t_{2m}} \right\}^{1/2} t^{3/2} \quad (7)$$

さて、外膜、内膜ユニットおよび開口の個数それぞれ $n_1, n_2, N$ を考慮して、 $V_1, V_2$ および $V_e$ が各時刻 $t$ において発生する時の内部空間の状態変化を図3に示したモデルで近似する。 $t=0$ においては内部空間は圧力が $P_a$ で体積が $V_{i0}$ である。 $t=t$ においては圧力が $P_a + P_i$ となり、体積は $V_{i0}$ から $V_1$ だけ減少する一方で $V_2$ だけ増大し、さらに近似として流出空気による $V_e$ だけ増大すると考えるのである。そして状態変化は短時間で進むので断熱変化と考えると次式が成立する。

$$P_a V_{i0}^\gamma = \{P_a + P_i(t)\} \{V_{i0} - n_1 V_1(t) + n_2 V_2(t) + N V_e(t)\}^\gamma \quad (8)$$

ここに $\gamma$ は断熱指数で1.4を用いる。(8)式で $t=t_{2m}$ とし、(4)~(7)式を用いると内圧最大値 $P_{im}$ の満たすべき方程式が次のように得られる。

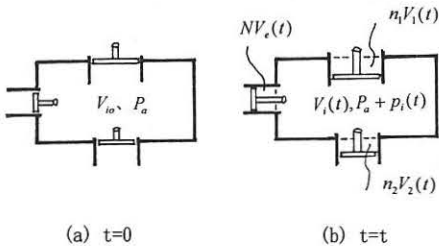


図3 内部空間状態変化モデル

$$\begin{aligned} R(P_{im}) &= (P_a + P_{im}) \left[ V_{i0} - b_1 \{ b_{11} (P_{im} - P_{im}) + h_{01}^3 \}^{1/2} \right. \\ &\quad \left. + b_2 \{ b_{22} P_{im} + h_{02}^3 \}^{1/2} + c \sqrt{P_{im} + b_0} \right]^\gamma - P_a V_{i0}^\gamma \\ &= 0 \end{aligned} \quad (9)$$

ここに

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{2}{3} n_1 l_1 L_1, & b_2 &= \frac{2}{3} n_2 l_2 L_2, \\ b_{11} &= \frac{l_1^4}{64 E_{x1}} \left\{ 3 + 8 \left( \frac{h_{01}}{l_1} \right)^2 \right\}, & b_{22} &= \frac{l_2^4}{64 E_{x2}} \left\{ 3 + 8 \left( \frac{h_{02}}{l_2} \right)^2 \right\}, \\ b_0 &= b_1 h_{01} - b_2 h_{02}, & c &= \sqrt{\frac{8}{9\rho} N A t_{im}} \end{aligned}$$

(9)式を解いて、与えられた $h_{01}, h_{02}, P_{im}$ に対する $P_{im}$ が得られる。本研究ではその解法としてニュートンの反復法を用いた。

### 3. 解析例と考察

以上の近似解析法による太鼓現象の解析対象として、図4に示す2重膜構造を想定する。図4で、この構造の上面を外膜部分、下面を内膜部分と考える。外膜部分は、 $l_1$ が5mの膜ユニット10個( $n_1=10$ )から成るとする。 $L_1$ は100mとするが、その半分50mの場合も一部でとりあげる。内膜部分も同様に、 $l_2$ が5m、 $L_2$ が100mの内膜ユニット10個( $n_2=10$ )から成るとする。初期たわみ $h_{01}, h_{02}$ はそれぞれ $l_1, l_2$ の1/20とする。外膜引張弾性定数 $E_{x1}$ を膜材料A種の横糸方向の弾性係数を参考に、これよりやや小さい値 $2 \times 10^5$  N/mと定める。内膜弾性定数 $E_{x2}$ は $E_{x1}$ と同じ場合の他に1/2と1/10の場合を取り上げる。開口は断面積AでN個あるとする。以下ではN個分の開口面積を、この内部空間全周囲面積に対する割合で定義する開口面積率 $\lambda_{op}$ で表す。風圧力最大値 $P_{im}$ を2000 N/m<sup>2</sup> (大略風速60m/secの速度圧)とする。その立ち上がり時間 $t_{im}$ は、文献1)に示された突風の立ち上がり時間の実測例を参考に、ここでは3秒および一部で6秒と定める。開口がある場合の内圧立ち上がり時間 $t_{2m}$ は $t_{im}$ と同じ場合と1/2の

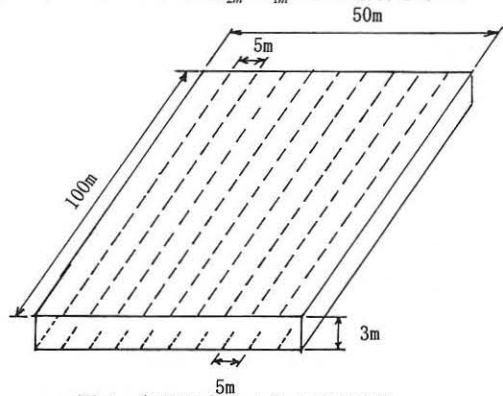
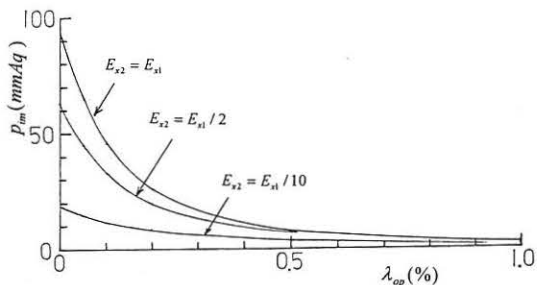
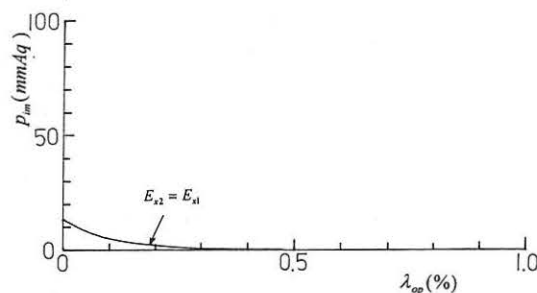


図4 解析対象とする2重膜構造



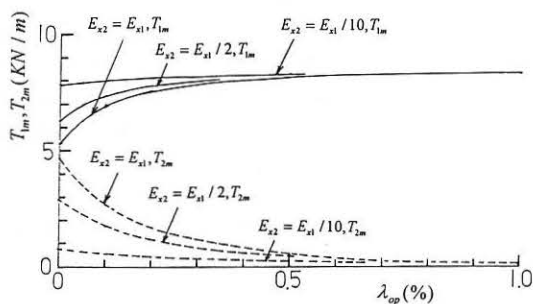
(a)  $L_1 = L_2 = 100m$



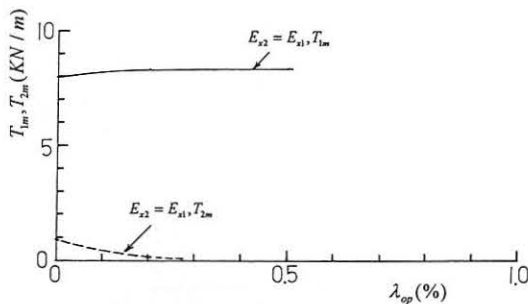
(b)  $L_1 = L_2/2 = 50m$

( $t_{1m} = t_{2m} = 3$ 秒、 $V_{i0} = 15000m^3$ )

図5 開口面積率 $\lambda_{op}$ と最大内圧 $P_{im}$



(a)  $L_1 = L_2 = 100m$

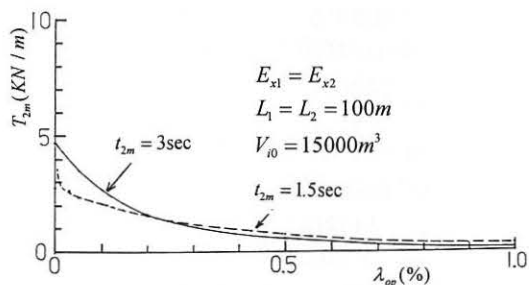


(b)  $L_1 = L_2/2 = 50m$

( $t_{1m} = t_{2m} = 3$ 秒、 $V_{i0} = 15000m^3$ )

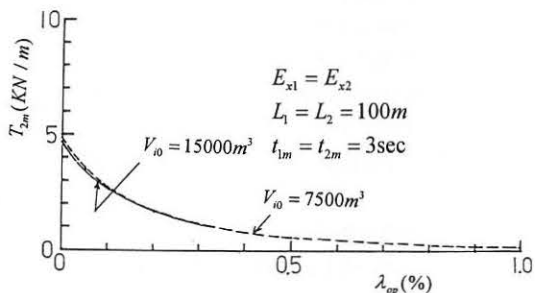
図6 開口面積率 $\lambda_{op}$ と最大膜応力

場合を取り上げる。解析結果を図5～図9に示す。図5は、 $t_{1m}$ と $t_{2m}$ が等しいと考える場合に $\lambda_{op}$ が0から大きくなる場合の最大内圧 $P_{im}$ の変化を示す。図5(a)は外膜部分全体に膜ユニットがある場合の結果で、ここでは $E_{x2}$ が $E_{x1}$ と同じ場合の他に1/2および1/10の場合を示した。同(b)は外膜部分の半分だけが膜ユニットである場合の結果である。図6(a),(b)はそれぞれ、図5(a),(b)の $P_{im}$ に対応する膜応力を示す。ここに $T_{1m}$ 、 $T_{2m}$ はそれぞれ時刻 $t_{1m}$ 、 $t_{2m}$ ( $=t_{1m}$ )の時の外膜、内膜応力である。図7は、 $t_{1m}=t_{2m}=3$ 秒の場合とその半分である $t_{2m}=0.5 \times t_{1m}=1.5$ 秒の場合(但し、 $\lambda_{op}=0$ の場合、 $t_{2m}=3$ 秒とする)の $T_{2m}$ を示



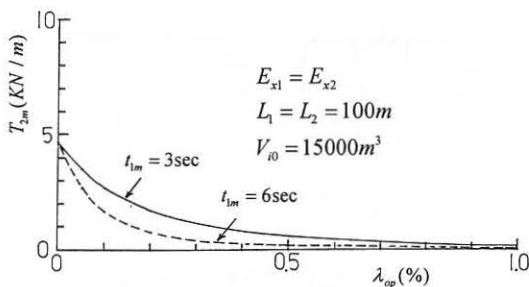
(内圧立ち上がり時間 $t_{2m}$ が風圧立ち上がり時間 $t_{1m}=3$ 秒の半分である場合との比較)

図7 開口面積率 $\lambda_{op}$ と内膜最大応力 $T_{2m}$



(内部空間体積が半分になった場合との比較)

図8 開口面積率 $\lambda_{op}$ と内膜最大応力 $T_{2m}$



(風圧立ち上がり時間 $t_{1m}$ が2倍の場合との比較)

図9 開口面積率 $\lambda_{op}$ と内膜最大応力 $T_{2m}$

す。弾性定数は外膜と内膜で同じで、外膜部分全体が外膜ユニットの場合である。図8は図6(a)の内膜応力の計算に対応するが、内部空間初期体積が半分である場合の結果である。図9は図6(a)に対応するが、風圧立ち上がり時間が6秒の場合の結果である。

以上の解析結果から、太鼓現象による内膜応力発生の特性を定性的に考察できる。図5と図6から、内膜の弾性定数の大きさが外膜と同程度であれば、内膜応力の値は開口がないすなわち完全気密の場合の外膜応力に近い値になり得ることがわかる。しかし、この程度は当然ながら、内膜弾性定数が外膜に対して小さくなると緩和される。内膜応力は開口面積の存在で急減する。本解析例では、開口面積率が0%から0.1%になると内膜応力は約57%以下に減少した。また、風圧で変形する外膜の領域が内膜の領域に対して狭くなると、内膜応力は非常に小さくなっている。開口がある場合は内圧最大時刻 $t_{2m}$ が風圧最大時刻 $t_{1m}$ より早くなることもあり得ると推測されるが、図7からこの場合は内膜応力は $t_{2m}=t_{1m}$ と考える場合よりかなり小さくとどまることがわかる。図8からは、内部空間体積の大小は内膜応力にはあまり影響しないことがわかる。さらに図9からは、風圧立ち上がり時間が長くなると内膜応力は減少することがわかる。

なお、逆方向の太鼓現象の解析結果は以上の順方向の結果とほとんど同じになることを付記する。

#### 4. 結論

2重膜構造物の太鼓現象により発生する内部空間圧力と内膜の応力の特性を調べるために、単純化した2重膜構造モデルについての近似解析を行った。とりあげたこの構造モデルの太鼓現象の特性として以下の基礎的事項が確認された。

(1) 内部空間が完全気密である場合に、内膜の弾性定数が外膜の定数に近い値の場合、内膜応力は外膜応力に近い値になり得る。しかしこのような内膜応力は、その弾性定数がより小さくなれば低下する。

(2) 開口がある場合、内圧最大時刻 $t_{2m}$ が風圧最大刻

$t_{1m}$ に同等とした場合に内膜応力は開口面積に敏感で、適当な開口面積を確保することで完全気密時の内膜応力に比べてかなり小さくなる。さらに実際上は $t_{2m}$ は $t_{1m}$ より早くなり得る場合も推測される。この場合にも、これら時刻が同じであるとする場合より内膜応力はかなり小さくなる。これらのことより、内膜応力減少のための開口の効果は非常に大きいものと考えられる。

(3) 風圧による外膜変形で起こる内部空間の体積変化が大きい程、内膜応力はより大きく生じる。

(4) 内膜変形で生じる体積変化が小さい程、内部空間圧力は、より大きくなる。これは、(1)のことを含む表現といえる。

(5) 内部空間体積の大小は、内膜応力にあまり影響しない。

(6) 風圧立ち上がり時間は内膜応力に大きく影響する。立ち上がり時間が長いほど内膜応力は小さくなる。

#### 参考文献

- 1) 石崎潑雄、桂 順治, "自然風中の模型ドームに作用する風圧について", 京都大学防災研究所年報, 第25号 B-1 (昭和56年), PP221-2310

ON PHENOMENON OF DEFORMATION OF INSIDE MEMBRANES INDUCING DUE TO DEFORMATION OF  
OUTSIDE MEMBRANES BY WIND PRESSURE IN A DOUBLE-LAYER MEMBRANE STRUCTURE

Hirokazu Minami\*1  
Sumio Kawamura\*2  
Yasuo Okuda\*3  
Fumiyoshi Takeda\*4

SYNOPSIS

If a double-layer membrane structure has an enclosing space of which the air tightness is high, deformation in the inside membrane is induced due to the deformation of outside membrane caused by wind pressure. The authors named this phenomenon "drumming" and analyzed this phenomenon. The analysis method is an approximate one which simplifies the outside and inside membranes as band-shaped membranes and considers the inner space as that of adiabatic change. From the analytical results, it was understood that the stress in the inside membrane could reach very near to stress in outside membrane when the air permeability of the inner space is zero. When the permeability increase with the existence of openings, the stress in the inside membrane decreases dramatically.

---

\*1 Guest Assoc. Prof., \*2 Prof., \*3 Res. Assoc. of Osaka City Univ., \*4 Taiyo Kogyo Corporation