

エアビームの構造性状について

河端昌也*1

梗概

エアビーム構造は膜材料を筒状に用いて気密性を確保し、内圧（内外圧力差）を与えることによって膜面に張力を発生させ形状を保つ空気膜構造の一種で、曲げ剛性、抗圧縮性を持たせることが可能な構造である。したがって軽量性、可撓性などの特長を持つ反面、構造的挙動に分かりにくい点が多い。本論文では、エアビーム構造を部材化、簡略化し、数値解析および実験を行なうことによりその基本的な構造特性を把握していく。

1. はじめに

エアビーム構造は気密性の高い膜材料で作られた筒あるいは通常の膜材料で作られた筒の内部にチューブ状のフィルムを挿入することにより気密性を保ち、その中に圧力空気を加え圧力差を与えることにより膜面に張力を発生させる。これにより膜材料固有の引張力、剪断力負担性能に加え、構造としての曲げ剛性、抗圧縮性を持たせることが可能となる。したがって軽量性や可撓性、外荷重によって変形した場合にもそれを取り除けばほぼ原形に戻るなど、他の構造材に見られない特長を持つ反面、外荷重による変形が比較的大きいことや、張力がゼロとなるような変形が生じた場合、その部分には局部的な座屈（しわ波座屈、リンクリング）が発生し荷重を負担できなくなる点、さらには膜材料の強い異方性など、考慮しなければならない問題が多い。ゆえに変形等を厳密に理論解として得ることは容易でない。したがってエアビームの構造特性を知るためには非線形解析あるいは実験が要求される。本研究ではこれらの点を踏まえながら、エアビームを部材化し単純なモデルに置換したうえで非線形解析を行ない、リンクリング発生後の挙動を含めたエアビーム構造の性状を把握することを目的とする。

2. 解析方法

解析は膜材料を直交異方性弾性体、非抗圧縮性と仮定してFig. 1のように線材置換し、幾何学的非線形性を考慮した有限要素法により行なう。

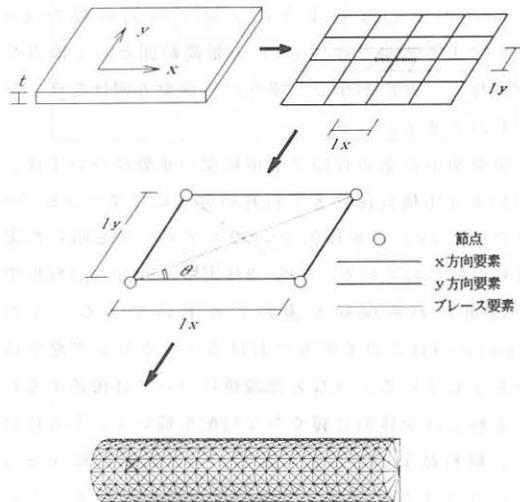


Fig. 1 膜面の線材置換

*1 横浜国立大学 大学院生

ブレース要素の剛性の評価は耐震壁の剪断変形に対する置換方法にもとづいて、

$$EA_B = \frac{G_t l_x^2}{\kappa l_x \cos^3 \theta}, (\kappa=1.0) \quad (1)$$

とする。

また内圧は膜面に対し常に垂直に作用するように、変形に従って荷重方向を更新していくが、変形に伴う容積の変化は余り大きくないと考えられるので、内圧の大きさは一定とする。

Table-1 解析諸元

タテ糸方向引張剛性	$E_t x$	65250kg/m
ヨコ糸方向引張剛性	$E_t y$	43500kg/m
剪断方向剛性	G_t	3000kg/m

(注) 剛性は膜材の厚さを乗じた値である

3. 中央集中荷重を受ける単純梁

スパン、径の異なる5種類のモデル (Table-2) について応力変形解析を行なう。なお形状および荷重の対称性を考慮して、実際の解析は全体の1/4の部分で行なう。(Fig. 2) また荷重Pは膜面に極端な凹みが生じないように、梁上端側の幅20cm (1/4モデルでは10cm) を載荷範囲として節点荷重を与え、変形が生じた場合にも荷重方向は変化しないものとする。

中央集中荷重の作用する単純梁の挙動については、昭和43年横浜国立大学石井研究室にてスパン5.0m (全長7.6m)、半径0.25mのエアビームを用いた実験が行なわれている。Fig. 3は実験、Fig. 4は解析での荷重たわみ関係を表わしたものである。またTable-3はこのモデルにおけるリンクリング発生荷重を示している。(なお理論値については後述する)

実験では全体的に緩やかな勾配を描いているのに対し、解析結果の方は低荷重域ではほぼ直線の傾向を示し、リンクリング発生と同時に大変形が始まっている。したがってビームの変形様式としては、リンクリング荷重を境にして線形領域と非線形領域に分けることができよう。また曲線の初期勾配は、内圧2000~3000kg/m²の範囲では、ほぼ一致している

Table. 2 単純梁モデル

スパン (全長)	半径	径スパン比	l_x	l_y
3.5m(5.0m)	0.25m	0.14	0.1	0.098
5.0m(7.6m)	0.15m	0.06	0.1	0.059
	0.25m	0.10	0.1	0.098
	0.35m	0.14	0.1	0.138
6.8m(10.0m)	0.25m	0.07	0.1	0.098

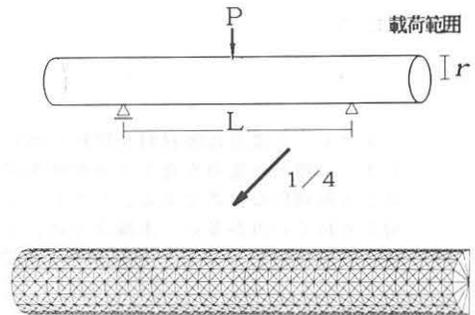


Fig. 2 単純梁のモデル化

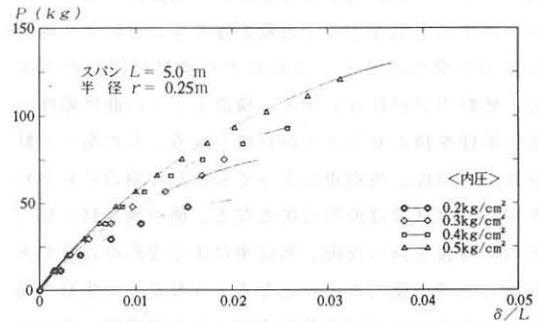


Fig. 3 荷重とたわみの関係・実験 (単純梁、中央集中荷重)

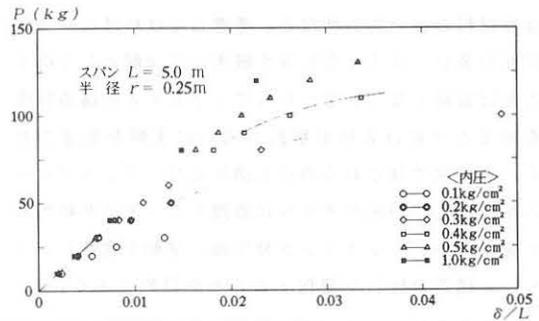


Fig. 4 荷重とたわみの関係・解析 (単純梁、中央集中荷重)

が、4000kg/m²以上では差が拡大する傾向にある。これらの原因としては、実験では同一の試験体に対して2000~5000kg/m²の内圧を与えているために径が増加し剛性が高まっていることや、解析に使用した材料定数と実験に使用した材料の定数の違い、膜材料の非線形性などが考えられる。

Fig. 5は内圧3000kg/m²の場合の変形図であるが、リンクリング発生後もすぐに崩壊するわけではなく余力を残して、内圧が高いほど余力は大きいといえよう。

Table-3 単純梁リンクリング荷重

内圧	1000	2000	3000	4000	5000	10000
実験	—	44.0	66.6	89.8	114.	—
解析	18.0	38.0	57.0	79.0	97.0	190.
理論	19.6	39.3	58.9	78.5	98.2	196.

スパン5.0m、半径0.25m

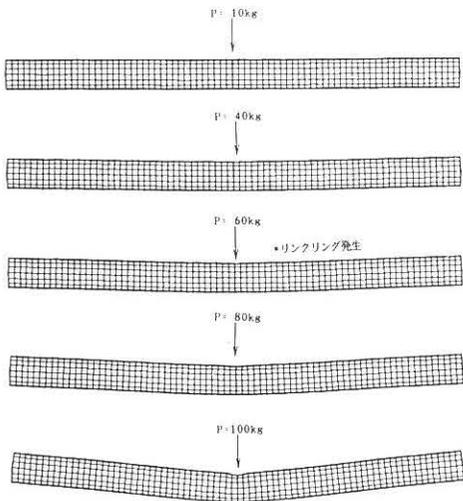


Fig. 5 単純梁の変形

(注) プレース要素は省略している

4. 先端集中荷重を受ける片持梁

単純梁の場合と同様に、スパン、径の異なる5種類のモデル (Table-4) について応力変形解析を行なう。なお形状および荷重の対称性を考慮して実際の解析は全体の1/2の部分で行なう。(Fig. 6)

Fig. 7はスパン2.5m、半径0.25mの片持梁モデルにおける荷重とたわみの関係である。曲線の傾向は単純梁の場合と同様で、こちらも内圧の違いによる初期勾配の大きな変化は見られない。Table-5にはリンクリング荷重を示す。(理論値については後述)

またFig. 8はスパン5.0m、半径0.25m、内圧3000kg/m²の片持梁モデルの変形図である。単純梁の場合に比べ、スパンに対するたわみの比が大きい。このモデルはP=17.5kgでリンクリングが発生しているが形状に大きな変化は見られず、なお余力を残している。単純梁の場合にも内圧が高いほどリンクリング発生後の余力は大きいものと考えられる。

Table. 4 片持梁解析モデル

スパン	半径	径スパン比	lx	ly
1.0m	0.25m	0.50	0.1	0.098
2.5m	0.15m	0.12	0.1	0.059
	0.25m	0.20	0.1	0.098
	0.35m	0.28	0.1	0.138
5.0m	0.25m	0.10	0.1	0.098

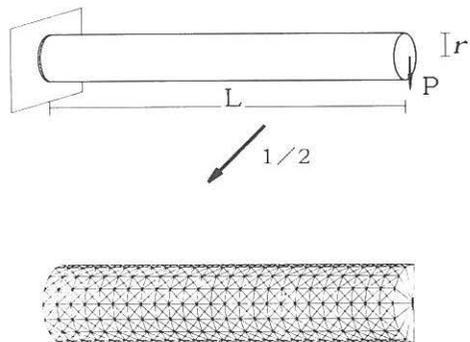


Fig. 6 片持梁のモデル化

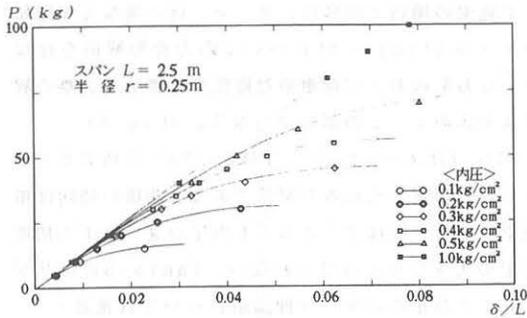


Fig. 7 荷重とたわみの関係・解析 (片持梁、先端集中荷重)

Table-5 片持梁リンクリング荷重

内圧	1000	2000	3000	4000	5000	10000
解析	11.0	21.0	31.0	42.0	51.0	102.
理論	9.8	19.6	29.5	39.3	49.1	98.

スパン2.5m、半径0.25m

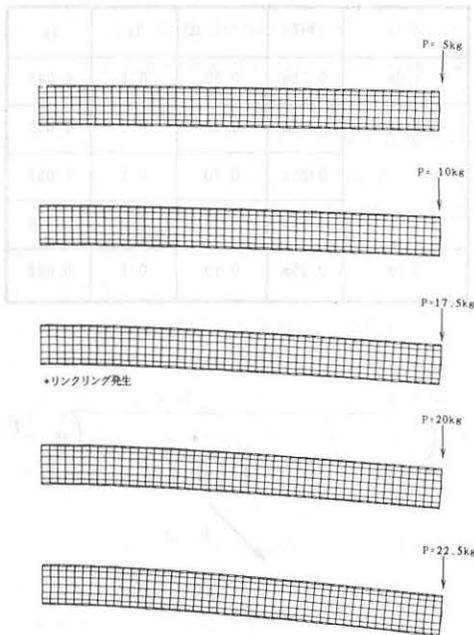


Fig. 8 片持梁の変形

(注) プレース要素は省略している

5. エアビームの構造特性

内圧が作用したエアビームは軸方向膜張力 N_x (kg/m)、円周方向膜張力 N_y (kg/m)、および剪断膜張力 N_{xy} (kg/m)

$$N_x = \frac{1}{2}Pr, N_y = Pr, N_{xy} = 0 \quad (2)$$

ただし P は内圧 (kg/m²)、 r はビームの半径 (m)

を発生させて安定する。

線形理論によれば単純梁に中央集中荷重 P が作用する場合中央部には曲げモーメント $M = 1/4Pl$ (l : スパン (m)) が作用し、ビーム上端側は膜張力が減少し、下端側は増加する。同様に片持梁に先端集中荷重 P が作用する場合にもビーム固定端側には曲げモーメント $M = Pl$ が作用し、ビーム下端側は膜張力が減少し、上端側は増加する。この時の単純梁上端、片持梁下端の膜張力は

$$N_x = \frac{1}{2}Pr - \frac{M}{Z}t = \frac{1}{2}Pr - \frac{M}{\pi r^2 t}, (Z = \pi r^2 t) \quad (3)$$

で表わされる。したがって荷重 P の増加にともない軸方向膜張力は低下していき、やがて $N_x = 0$ となって膜面にリンクリングが生じる。この時の荷重をリンクリング荷重 P_{cr} とすると

単純梁の場合

$$P_{cr} = \frac{2\pi Pr^3}{l} \quad (4)$$

片持梁の場合

$$P_{cr} = \frac{2\pi Pr^3}{l} \quad (5)$$

となる。リンクリング荷重に関する理論値、解析値は Table-3, 5 に示すとおりで、その誤差は約 5% 程度となっている。

エアビームのたわみを決定する要素として

- ① スパン
- ② 径
- ③ 見かけ剪断剛性
- ④ 材料の剪断剛性
- ⑤ 引張剛性

の 5 つが考えられる。

Table-6 各モデルの剛性 (上段: 材料剪断剛性、下段: 見かけ剪断剛性)

内圧	1000k/m ²	3000k/m ²	5000k/m ²	10000k/m ²
通常モデル	3000kg/m 125kg/m	3000kg/m 375kg/m	3000kg/m 625kg/m	3000kg/m 1250kg/m
1/2モデル	1500kg/m 125kg/m	1500kg/m 375kg/m	1500kg/m 625kg/m	1500kg/m 1250kg/m
ブレースなしモデル	0kg/m 125kg/m	0kg/m 375kg/m	0kg/m 625kg/m	0kg/m 1250kg/m

(半径 r=0.25m)

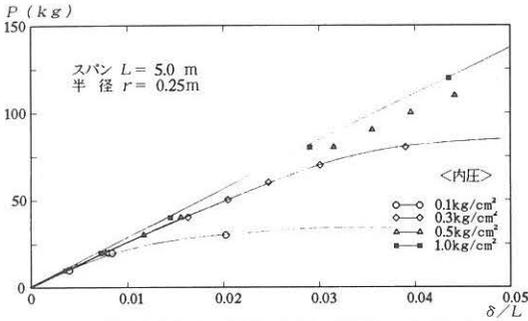


Fig. 9 荷重とたわみの関係・解析 (単純梁、中央集中荷重) 引張剛性 (1/2) モデル

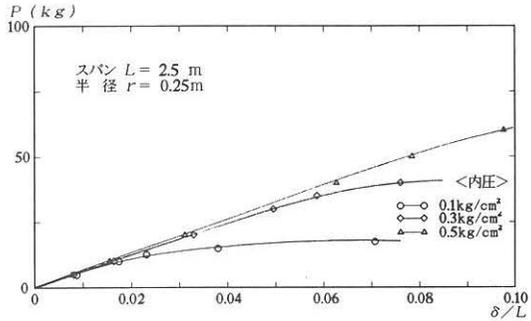


Fig. 12 荷重とたわみの関係・解析 (片持梁、先端集中荷重) 引張剛性 (1/2) モデル

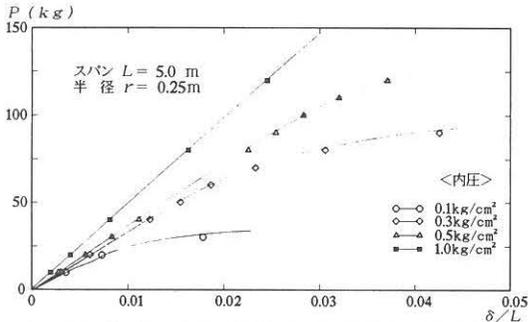


Fig. 10 荷重とたわみの関係・解析 (単純梁、中央集中荷重) 剪断剛性 (1/2) モデル

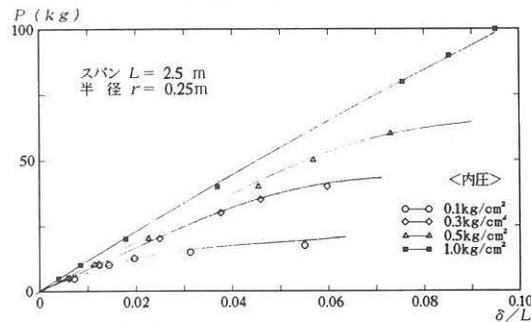


Fig. 13 荷重とたわみの関係・解析 (片持梁、先端集中荷重) 剪断剛性 (1/2) モデル

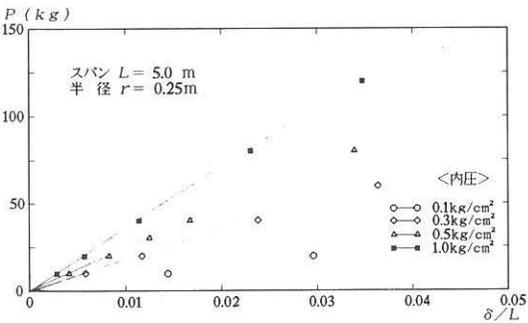


Fig. 11 荷重とたわみの関係・解析 (単純梁、中央集中荷重) ブレース要素なしモデル

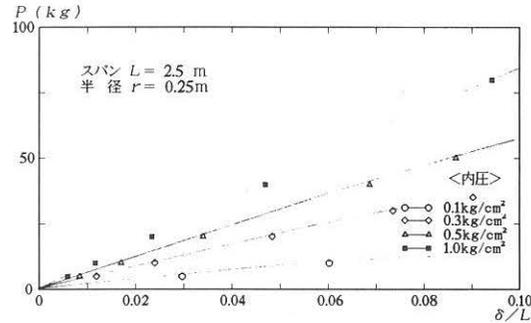


Fig. 14 荷重とたわみの関係・解析 (片持梁、先端集中荷重) ブレース要素なしモデル

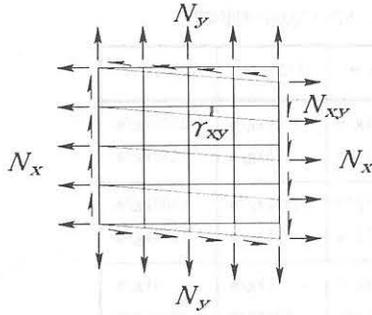


Fig. 15 平衡構造の剪断変形

見かけ剪断剛性とは、Fig. 15のような材料の剪断剛性が無い平行構造で円周、軸方向張力 N_x , N_y がすでに存在している場合、平衡状態では小さい N_{xy} に対し

$$N_{xy} = N_x \gamma_{xy} \quad (6)$$

が成立するので

$$G_t = \frac{N_{xy}}{\gamma_{xy}} = N_x = \frac{1}{2} P r \quad (7)$$

の剛性が存在する。これが見かけ剪断剛性で初期張力により決まる値である。エアビームの変形では、この見かけ剪断剛性と材料の剪断剛性の総和が構造体としての剪断剛性となって現われてくることになる。

Fig. 9~14は見かけ剪断剛性、材料の剪断剛性、引張剛性がたわみに与える効果を調べるために、各剛性が $1/2$ のモデル、ブレース要素なしモデル（材料の剪断剛性ゼロ）の荷重たわみ関係を表わしたものである。引張剛性 $1/2$ モデルでは通常モデルに比べ初期勾配が約 $1/2$ （たわみは約2倍）となっているが、内圧による初期勾配の違いは余り見られない。しかし材料の剪断剛性 $1/2$ モデルでは通常モデルに比べ全体的にたわみが増加しているうえに、内圧による初期勾配の違いが現われており材料の剪断剛性がない（ブレース要素なし）モデルでは、この傾向がさらに顕著になっている。したがって、たわみを決定する第1の要因は材料の剪断剛性と引張剛性であると言える。一方、初期張力による見かけ剪断剛性は材料の剪断剛性に比べ余り大きくないといえよう。しかし材料に剪断剛性がない場合（ブレース要素なしモデル）、剪断剛性が低い場合（剪断剛性 $1/2$ モデル）には、Table-6に示すように見かけ剪断剛性 $1/2Pr$ の影響

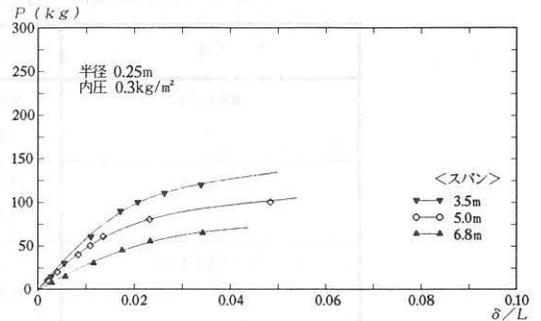


Fig. 16 荷重とたわみの関係・解析（単純梁、先端集中荷重）
スパンの違いによる比較

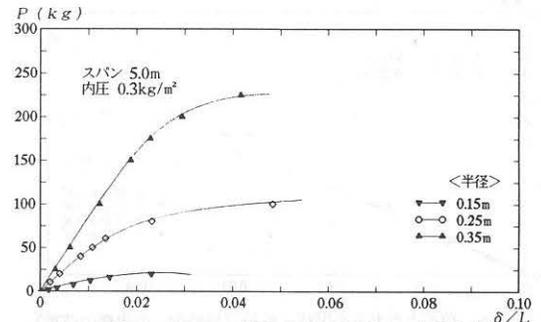


Fig. 17 荷重とたわみの関係・解析（片持梁、先端集中荷重）
径の違いによる比較

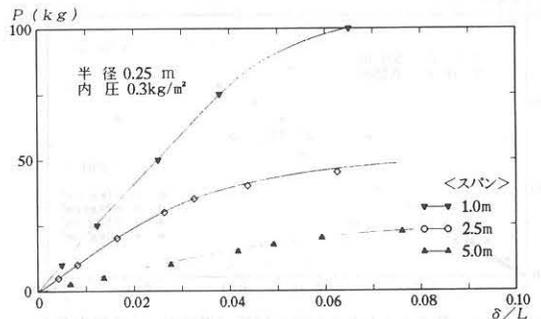


Fig. 18 荷重とたわみの関係・解析（片持梁、先端集中荷重）
スパンの違いによる比較

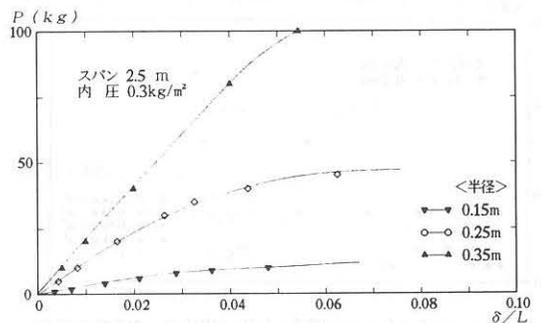


Fig. 19 荷重とたわみの関係・解析（片持梁、先端集中荷重）
径の違いによる比較

が相対的に大きく表われるため、内圧による初期勾配の相違が顕著となる。一方リンクリング発生荷重は、これらの剛性の違いに関係なく内圧により決まる。またFig. 16~19はスパン、径の影響を表わしたものである。これによればリンクリング発生前のエアビームのたわみはスパンに比例し、径の3乗に反比例する傾向にあるといえる。

5. まとめ

- ・膜材料を線材置換し有限要素法を用いた本解析法は、エアビームの力学的性状を捉えるうえで適切なものであるといえよう。
- ・エアビームの変形特性はリンクリング発生前後で大きく異なり、リンクリング荷重以下ではほぼ線形ができるが、それ以上では荷重とともに大変形が進行し非線形性が強く現われる。
- ・材料の剪断剛性が高い場合には、内圧による初期張力が荷重たわみ曲線の初期勾配に与える効果はあまり大きくないと言える。しかし材料の剪断剛性が低い場合には、初期張力によるかけ剪断剛性の効果が相対的に大きく表われ、内圧により初期勾配が大きく変化する。

・リンクリング荷重は線形理論に基づいた式(4,5)ではほぼ精確に知ることが可能で、スパンと径および内圧により決定される。特に内圧はリンクリング発生後のエアビームの余力も決定する点において重要である。

[参考文献]

- 1) 石井一夫：空気膜構造－設計と応用 工業調査会 1977
- 2) 赤坂隆、古賀義朗：片持与圧膜柱のリンクリングについて 日本航空学会誌 1968
- 3) 林毅：軽構造の理論とその応用(上)(下) 日本科学技術連盟
- 4) 齊藤公男、黒木二三夫、小林実ほか：ビーム式ニューマチック構造の力学的特性に関する基礎的研究 日本建築学会大会講演梗概集 1979
- 5) 服部正：コンピュータによる構造数値解析法 彰国社

Study on Structural Characteristics of Air-Inflated Beam

Masaya KAWABATA*1

SYNOPSIS

Air-Inflated Beam is a sort of pneumatic structures, which is stabilized by internal pressure and the tension in the membrane surface. It can carry bending moment and compression as a structure, however membrane material itself cannot carry those forces. There are several merits of flexibility and light weight, but on the other hand it is not so easy to predict the structural response.

In the paper membrane material is substituted for some cable elements and the nonlinear analysis based upon the finite element method is conducted for a simple beam and a cantilever. As a result the basic structural characteristics are grasped.

*1 Student of Master Course, Yokohama National University