

# 張力材経由の荷重による座屈補剛効果についての基礎的考察

陳 坤\*1  
川口 健一\*2

## 梗 概

張力材によって補強された骨組に関する既往の研究では、外力を受ける骨組に、補剛の目的でケーブルなどの張力材を付加した構造について、その補剛効果を考察する例は多い。負圧型空気膜構造では膜やケーブルなどの張力材が気圧荷重を直接に負担する。これらの張力材は骨組に荷重を伝達するとき、骨組の座屈挙動を拘束する場合がある。

本論文では、このような荷重を伝達する張力材が座屈を補剛する効果(外力補剛効果)について調査し、数値計算スキームを提案する。Guyed tower とアーチのモデルを解析例として、外力補剛効果によって補剛された骨組の座屈挙動を考察する。さらに、モデル実験で外力補剛効果とこのスキームの有効性を実証する。

### 1. はじめに

空気膜構造には正圧型と負圧型が存在する。負圧型空気膜構造では、正圧型より基礎部分を軽量化できる可能性があり、仮設シェルター等として応用する場合に施工を簡素化できる可能性がある。

著者らは、図1の(a)と(b)に示すようにアーチ状の骨組と骨組に固定せずに被せた膜から成る2種類の単層負圧型空気膜構造を実際に作成し、負圧型空気膜構造の基礎部分は特別な重量を必要としないことを確かめた(図1(b))。一方、図1の(a)と(b)のように、大きな負圧を作用させると骨組の座屈現象が発生することを観察した。

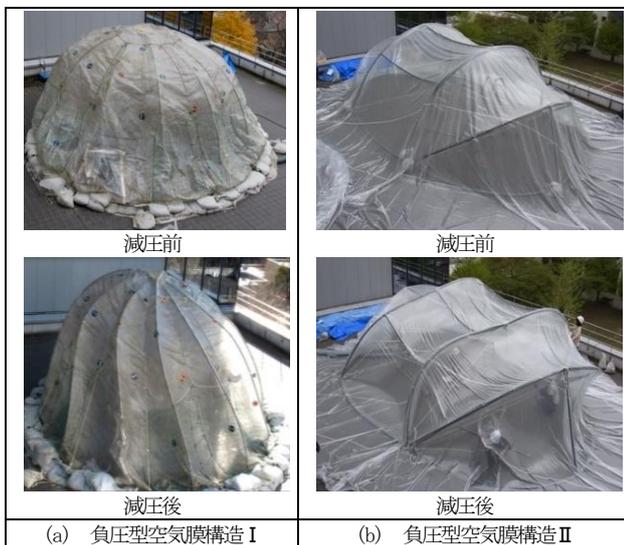


図1 負圧型空気膜構造の骨組の座屈現象

負圧型空気膜構造では、主にケーブルや膜などの張力材が外部の荷重を骨組に伝達するが、外力を伝達する張力材が骨組の座屈挙動を拘束する効果についての研究は著者らの知る限り存在しない。一方、アーチ構造は主に軸力を伝達する合理的な構造なので、これらの効果を利用すると負圧型空気膜構造の骨組などを軽量化できる可能性がある。著者らは、負

圧型空気膜構造の実験で観察された座屈挙動を、膜の伝達する荷重を直接内部の骨組に与えた場合の解析結果と比較し、座屈モードについてはよく対応することを確認した<sup>1)</sup>。本論文では、負圧型空気膜構造のように外力を受ける張力材の補剛効果について基礎的な研究を行うことを目的とする。

### 2. 外力補剛効果の概念

既往の研究には、外力を受ける骨組に、補剛の目的でケーブルなどの張力材を付加した構造について、その補剛効果を研究した例は多い<sup>2,3,9)</sup>。これらはほとんどの場合、補剛材の張力材は主に初期張力として導入されていることが多い。本論文で外力による座屈補剛効果(外力補剛効果)と区別するため、前述の既往の研究の補剛効果は既往補剛効果と呼ぶことにする。

本論文では、ケーブルなどの張力材が外部の荷重を受け、外部の荷重の増加とともに骨組の座屈を拘束する効果を調査する。

まず、アーチを例として挙げる。図2の(a)と(b)にそれぞれ既往補剛効果と外力補剛効果を示す(図2の中、 $F$ と $f$ は外部の荷重、 $T$ はケーブルの張力である)。

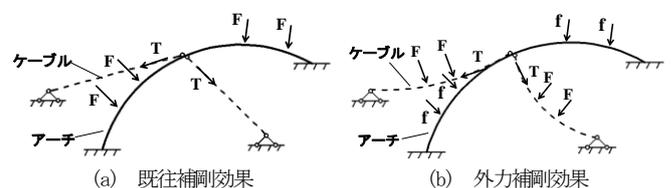


図2 アーチの補剛効果

### 3. 数値計算スキーム

外力による座屈補剛効果について調査するため、数値計算を行う。有限要素法の剛性方程式は

$$\mathbf{K} \cdot \Delta \mathbf{U} = \mathbf{F} \quad (1)$$

ここに、 $\mathbf{F} = \mathbf{P} - \mathbf{Q}$ である。 $\mathbf{P}$ は外力ベクトル、 $\mathbf{Q}$ は内力

\*1 東京大学大学院工学系研究科 建築学専攻 大学院生

\*2 東京大学大学院生産技術研究所 教授・工博

ベクトルである。

接線剛性マトリクス  $\mathbf{K}$  の逆行列  $\mathbf{K}^{-1}$  の代わりにムーア・ペンローズ一般逆行列  $\mathbf{K}^+$  を用いると、変位増分  $\Delta\mathbf{U}$  の一般解は以下の形に表される<sup>4)</sup>。

$$\Delta\mathbf{U} = \mathbf{K}^+ \mathbf{F} + [\mathbf{I} - \mathbf{K}^+ \mathbf{K}] \boldsymbol{\alpha} \quad (2)$$

$\boldsymbol{\alpha}$  は  $\mathbf{I}$  (単位マトリクス) と等しい次元の任意のベクトルである。式(2)の右辺の第1項(特解)は伸び変形を表し、第2項(余解)は伸びなし変形(剛体変形)を表す。

まず、与えられた外力を伸び変位に対応する成分  $\mathbf{f}_1$  と、伸びなし変位に対応する成分  $\mathbf{f}_2$  に分解する必要がある。

$$\mathbf{f}_1 = \mathbf{K} \mathbf{K}^+ \mathbf{F} \quad (3)$$

$$\mathbf{f}_2 = [\mathbf{I} - \mathbf{K}^+ \mathbf{K}] \mathbf{F} \quad (4)$$

のようになる。

(2)により伸びなし変位  $\Delta\mathbf{U}$  は次式に簡単に対応させることができる。

$$\Delta\mathbf{U} = \beta \mathbf{f}_2 \quad (5)$$

ここに、 $\beta$  は任意のスカラーである。

本論文の外力補剛効果の数値計算例については、張力材はケーブルと仮定する。また、ケーブルには初期張力を導入しない。図3に外力補剛効果の数値計算スキーム(枠の中は既往補剛効果の数値計算スキーム)を示す。

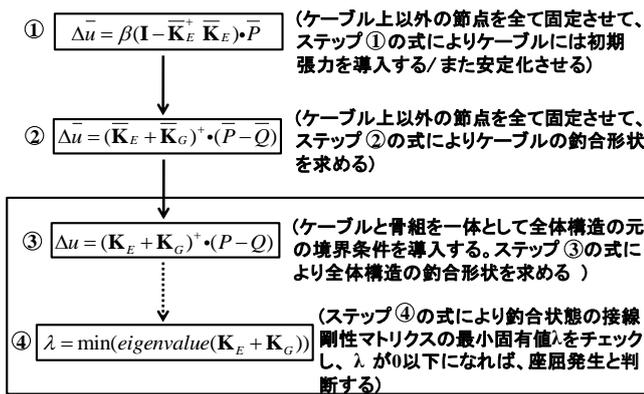


図3 外力補剛効果の数値計算スキーム

ステップ③とステップ④が既往補剛効果の数値計算スキームである。ステップ③は釣合状態に達するまでの繰り返し収束計算である。ステップ④で構造の分岐点の判断を行う。弾性保存系の安定性の判別則により構造の接線剛性マトリクスが正定値にならないと、構造が不安定になると判断する<sup>7)</sup>。数値解析には、分岐点の座屈荷重は接線剛性マトリクスの最小固有値が負になる前の正の値に対応する荷重とする。

ケーブルの初期状態を直線とする場合、初期張力を導入しない直線のケーブルは、軸方向と直交する荷重を与えると、ケーブルの節点が荷重方向に対応する弾性変位を得ることができない。そこで図3に示すスキームのステップ①の式を用いて剛体変位に相当する強制変位を導入する。その後、ケーブルの幾何剛性マトリクスでは非零の成分が生じるため、ステップ②の式を用いてケーブルの軸方向と直交する方向の弾性変位が得られ、ケーブルの釣合状態が求められる。

一方、ケーブルの初期形状を曲線とする場合、軸方向と直

交する外力を与えるとき、ケーブルが安定化状態に移動する伸び無し変位過程が発生する。その過程についてステップ①の式により計算することができる(詳細は文献4)参照)。安定状態になった曲線ケーブルの釣合形状を求める方法は直線のケーブルと同じである。

## 4. 外力補剛効果の数値解析例

### 4.1 Guyed tower のモデル

図4の(a)と(b)にケーブルが外力を受ける Guyed tower のモデルを示す(実線は柱、破線はケーブルである)。図4の(a)と(b)ではケーブルの初期形状はそれぞれ直線と曲線である。1本のケーブルを4つのトラス要素に分割し、すべてのケーブルと外力  $F_1 \sim F_4$  は軸対称に配置する。外力  $F_1 \sim F_4$  の大きさは全て  $F$  とし、 $F_1$  と  $F_2$  の方向をそれぞれ  $[0.7071, 0, -0.7071]$ 、 $[0, 0.7071, -0.7071]$  とする。 $P_c$  は外力  $F_1 \sim F_4$  から柱の節点  $D$  に伝える  $z$  方向の合力である。 $P_b$  は節点  $D$  に与える  $z$  方向の外力である。柱(DE)は6個の等長の幾何学的非線形梁要素で分割する。モデルの節点座標を表1に示す。柱の節点  $E$  は固定支持とし、ケーブルの境界は全てピン支持とする。

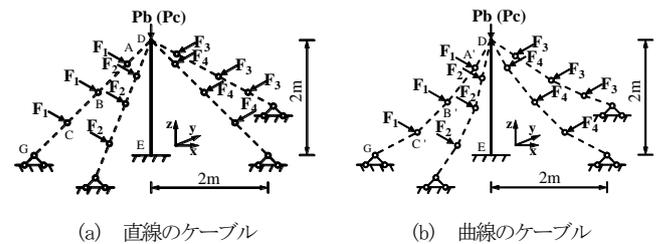


図4 外力補剛効果の guyed tower のモデル

解析モデルの材料として、柱は SS400 鋼材、ケーブルはビニロン繊維ロープとする。SS400 鋼材のヤング係数は文献 9) の実験値を参考にした。ビニロン繊維ロープの材料係数は文献 10) の Vinylon fiber(K) の実験値を参考にした。表2に解析モデルの断面情報を示す。これらの材料は、外力補剛効果を用いる負圧型空気膜構造の仮設シェルターなどを建設する場合に用いる可能性のある材料である。

表1 モデルの節点座標

	A	A'	B	B'	C	C'	D	E	G
x	-0.5	-0.35	-1	0.814	-1.5	-1.36	0	0	-2
y	0	0	0	0	0	0	0	0	0
z	1.5	1.36	1	-0.814	0.5	0.35	2	0	0

表2 解析モデルの断面情報

	ヤング係数	ポアソン比	外径	内径
柱	207GPa	0.3	20mm	14mm
ケーブル	10.8GPa	—	5mm	—

比較のため、図4のモデルを考察する前、境界が片端自由・片端固定支持と、片端ピン支持・片端固定支持とする長さ 2m の柱の分岐点の座屈荷重と座屈モードを考察する。その2つ

の境界条件に対応する座屈荷重をそれぞれ P1 と P2 とする。表 2 より、柱の断面二次モーメントを  $I=5.9682 \times 10^{-9} \text{ m}^4$  とした。P1 と P2 の分岐点の座屈荷重はそれぞれ

$$P1 = \pi^2 EI / (2l)^2 = 773.1\text{N} \quad (6)$$

$$P2 = \pi^2 EI / (0.7l)^2 = 6311.2\text{N} \quad (7)$$

と求められる。P1 と P2 に対応するモードを図 5 の(a)と(b)に示す。

図 4 の(a)と(b)のモデルについて座屈荷重を求める手順を以下のように述べる。ケーブルに与える荷重  $F_1 \sim F_4$  の大きさ F を一定の値とした上で、Pb の大きさを増加することで構造が分岐点に達し、分岐点に対応する Pb、Pc と Pcr(Pcr=Pb+Pc) の値が得られる。ここに、Pcr は座屈荷重とする。外力 F と Pb、Pc、Pcr の関係を図 6 の(a)と(b)に示す。

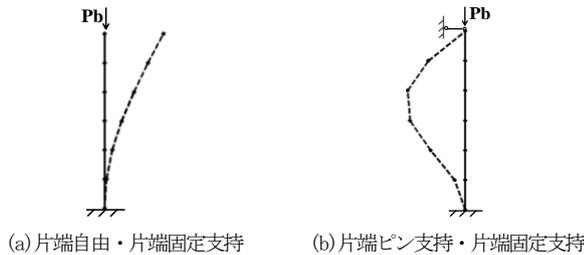
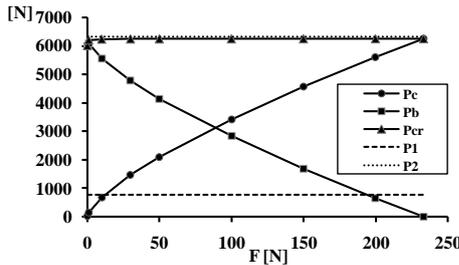
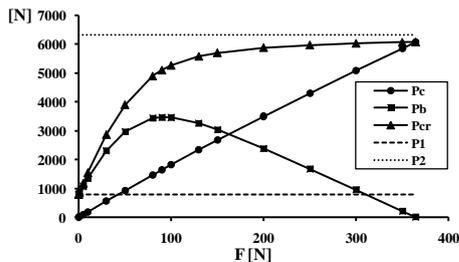


図 5 柱の分岐点の座屈モード



(a) 直線のケーブルの場合



(b) 曲線のケーブルの場合

図 6 荷重と座屈荷重の関係

ケーブルの初期形状を直線とする場合、図 6 の(a)により、外力の大きさ F の増加は、座屈荷重 Pcr に大きな影響を与えてない。F が極めて小さくても座屈荷重 Pcr は最大値に近い値を取る。外力によって座屈荷重 Pcr が増加する傾向はみられない。外力  $F_1 \sim F_4$  により生じた-z 方向の合力 Pc の増加とともに、Pb の値の傾向は迅速に降下する。

一方、ケーブルの初期形状を曲線とする場合、図 6 の(b)により、外力の大きさ F の増加とともに、座屈荷重 Pcr が非線形的に座屈荷重 P1 から座屈荷重 P2 に移っていく傾向が見られる。初期状態が曲線であるケーブルが、外力 F によりケー

ブルの座屈拘束効果をよく与えることが分かる。外力 F の増加と同時に、ケーブルから柱に伝達する-z 方向の合力 Pc と座屈荷重 Pcr も増加するが、Pc の増加量が Pcr のほうを超えたために、Pb が下がり始めたと考えられる。F が約 90N のとき、Pb が最大値 3458.4N に達する。

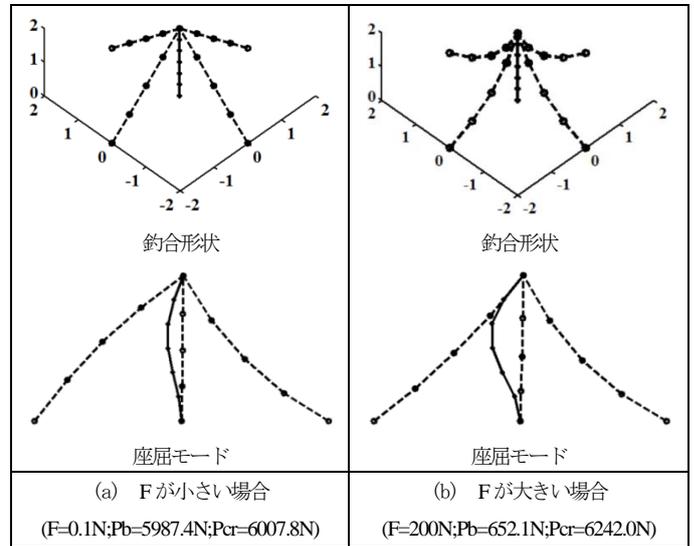


図 7 直線のケーブルの場合の分岐点の解析結果

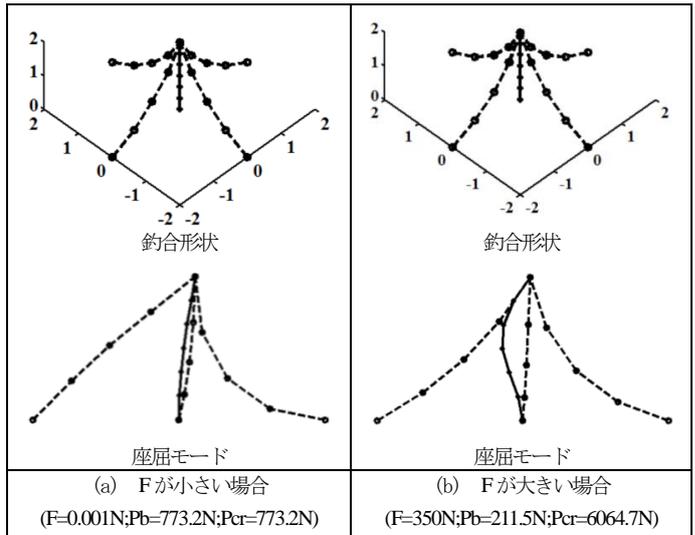


図 8 曲線のケーブルの場合の分岐点の解析結果

図 7 の(a)と(b)に直線のケーブルの場合の分岐点の解析結果を示す。F=0.1N と F=200N に対応する分岐点の座屈モードが、両方とも図(5)の(b)に示す片端ピン支持・片端固定支持された柱の分岐点に対応するモードを表す。

図 8 の(a)と(b)に曲線のケーブルの場合の解析結果を示す。図 8 の(a)に示すように F が微小である場合(F=0.001N)、座屈荷重 Pcr は 773.2N であり、P1 の 773.1N の値とほぼ同じである。同時に、図 8 の(a)に示す分岐点の座屈モードは、図 5 の(a)に示す片端自由・片端固定支持の柱の座屈モードもほぼ一致している。F が小さいとき、ケーブルが柱の座屈を拘束する効果を果たしてないと見られる。

図 8 の(b)に示すように F が大きい場合(F=350N)、座屈荷重

$P_{cr}(6064.7N)$ は $P_2(6311.2N)$ より低い。図8の(b)に示す柱の座屈モードが図5の(b)に示すモードと近い。Fが大きいつき、ケーブルが柱の自由端を拘束する役割を果たすが、完全なピン支持より拘束力が低いと考えられる。

#### 4.2 アーチのモデル

本節では外力補剛効果をアーチ構造に応用する。図9に示す直径2mの半円のアーチを、節点を圆弧方向に $15^\circ$ ごとに配置することで12個の幾何学的非線形の梁要素に分割する。

アーチの頂点にx軸に対称の2本の面外ケーブルを配置した。この2本のケーブルの初期状態を直線とし、1本のケーブルを等長の4つのトラス要素で分割する。この2本のケーブルの各節点に大きさがFである $F_1$ と $F_2$ の外力を与える。

$F_1$ と $F_2$ の方向ベクトルはそれぞれ $[0, -0.7071, -0.7071]^T$ 、 $[0, 0.7071, -0.7071]^T$ とする。

Pcは $F_1$ と $F_2$ からアーチの節点Eに伝えるz方向の合力である。Pbが直接に節点Eに与えるz方向の集中荷重である。アーチとケーブルの材料と断面情報は表2と同じとする。アーチの境界はすべて固定支持とする。2本の面外ケーブルの境界はすべてピン支持とする。

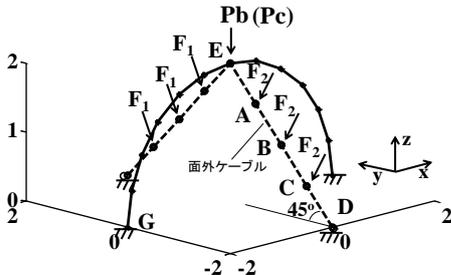


図9 外力補剛効果のアーチの計算モデル

4.1節の例と同様に、比較のため、図9のモデルを考察する。このモデルの座屈挙動を検討するため、まず図10に示す半径2mの半円アーチについて考察する。

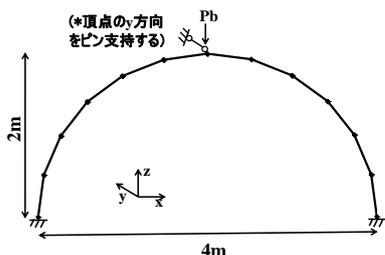


図10 アーチのみの計算モデル

アーチの頂点のy方向をピン支持で拘束しないとき、集中荷重Pbと頂点のz方向の変位関係を図11に示す。さらに、図11にアーチの頂点のy方向にピン支持で拘束したときの分岐点を"\*"に表した。アーチの頂点のy方向をピン支持で拘束しない場合と拘束する場合に対応する座屈荷重をP1とP2とすると、それぞれ $P_1=1325N$ 、 $P_2=2958N$ が得られた。

アーチのみの解析時に得られた分岐点の座屈モードを図12に示す。アーチの頂点のy方向を拘束しない場合、アーチ

は横座屈が発生した(図12(a))。アーチの頂点のy方向をピン支持で拘束すると、アーチが横捩れ座屈を起こした(図12(b))。

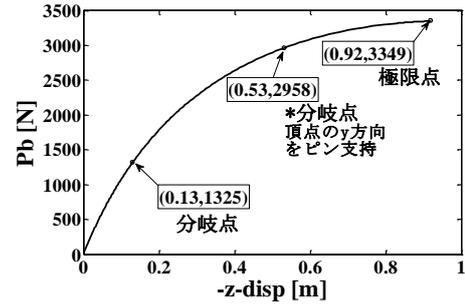
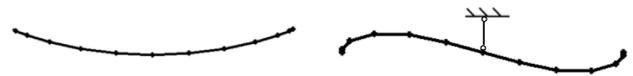


図11 アーチ頂点の荷重-変位関係

(\*はアーチの頂点のy方向にピン支持で拘束したときの計算結果である。)



(a) 頂点y方向をピン支持で拘束しない( $P_1=1325N$ ) (b) 頂点y方向をピン支持で拘束( $P_2=2958N$ )

図12 アーチの分岐点の座屈荷重と座屈モード

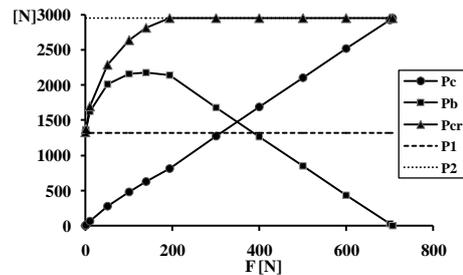


図13 荷重と座屈荷重の関係

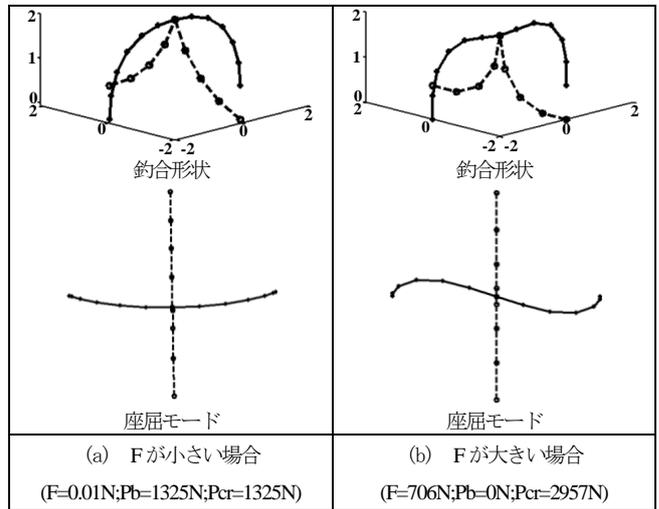


図14 外力補剛されたアーチ構造の座屈モード

4.1節と同じの手順を用いて図9に示すモデルの分岐点の座屈荷重を求める。FとPb、Pc、Pcr( $P_{cr}=P_b+P_c$ )の関係を図13に示す。図13より、外力Fの増加とともに、座屈荷重PcrがP1からP2に移る傾向が見られる。Fの値が約140Nである時、Pbが最大値2181Nとなった。Fの値が約190Nで

ある時、 $P_{cr}$  が最大値 2958N となった。2本の面外ケーブルの座屈拘束効果が外力の  $F_1$  と  $F_2$  と連携し、外力  $F_1$  と  $F_2$  による座屈拘束効果を発生していると見られる。勿論、 $F$  が大きくなると、面外ケーブルから頂点に伝える合力  $P_c$  の値が増加し、アーチに直接与える  $P_b$  が低下する。

図 14 には  $F=0.01N$  と  $F=706N$  に対応する座屈モードがそれぞれ横座屈と横振れ座屈であり、図 12 に示すアーチのみの結果と似ているものを示した。外力  $F_1$  と  $F_2$  の大きさによって、面外のケーブルは骨組に異なる拘束効果を与えた。外力  $F_1$  と  $F_2$  が大きいとき、ケーブルが柱の自由端をピン支持のように拘束する役割を果たすことが分かる。

### 5. 外力補剛効果のモデル実験

3 節と 4 節に外力補剛効果を用いる解析例を挙げたが、解析の妥当性を柱とアーチの 2 つモデル実験により検証する。柱とアーチは外径 6mm、内径 4mm の硬質塩化ビニル樹脂パイプで作った。

塩ビ製ビニル管・継手協会によると、この種類のパイプのヤング係数は 3.33GPa、ポアソン比は 0.38 である。このパイプのヤング係数は簡単な載荷実験によって求めた。1本の全長は 83.2cm であるパイプの両端をピン支持境界で固定し、30g の荷重を中心部に与えた。三回の計測により中心部の変位が 2.6cm、2.5cm、2.5cm であり、平均変位を 2.5cm とした。長さ  $l$  である両端ピンの柱の中心に垂直方向の集中荷重  $F$  を与えると、中心の垂直変位が  $\Delta u = Fl^3 / 48EI$  で表わされる。この計算式を用いて 2.82GPa のヤング係数を得た。

#### 5.1 柱のモデル実験

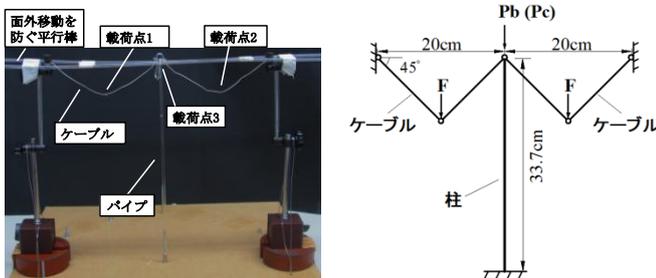


図 15 単本柱の実験装置と数値解析モデル

図 15 の(a)に示すように 1本のパイプの片端をねじで挿し込んで固定する。この境界を固定支持とみなす。パイプの自由端は 2本の面内のケーブルと繋がれている。パイプの頂点の近くに平行棒を設置し、面外方向の移動を防ぐ。

ケーブルの材質は直径 1mm のビニロン繊維ロープである。そのヤング係数の文献(10)の Vinylon fiber(K)の実験値を参考して、10.8GPa とする。実験方法は、まず載荷点 1 と載荷点 2 に同じ荷重を与え、その後、載荷点 3 に荷重を徐々に増加し、柱に座屈が発生したら止める。図 15 の(b)に数値解析モデルを示す。モデルでの柱の長さは 33.7cm である。 $P_b$  と  $P_c$  の定義は 4 節の 2 つの例と同じである。

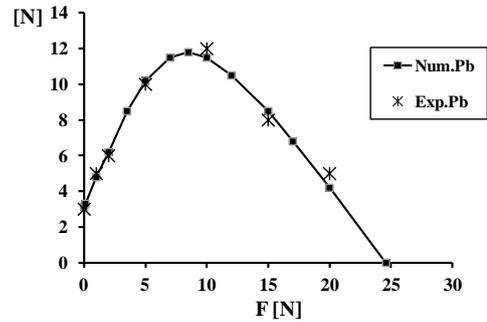


図 16 数値計算と実験の結果

実験結果	数値解析結果
<p>0.3kg</p> <p><math>F=0kg; P_b=3N</math></p>	<p><math>F=10^{-3}N; P_b=3.1N</math></p>
<p>2kg 0.5kg 2kg</p> <p><math>F=20N; P_b=5N</math></p>	<p><math>F=20N; P_b=4.2N</math></p>

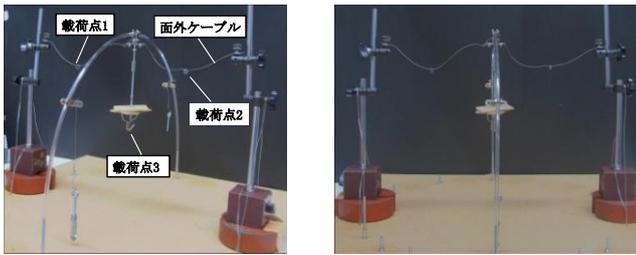
図 17 柱の座屈現象と座屈モード

図 16 に実験と数値解析の結果を示す。実験値  $P_b$  の変化は数値計算により得られた  $P_b$  の曲線によく一致することが確認できた。ケーブルに与える外力荷重  $F$  を増加することで、柱に直接与える荷重  $P_b$  に大きな影響があることがわかった。

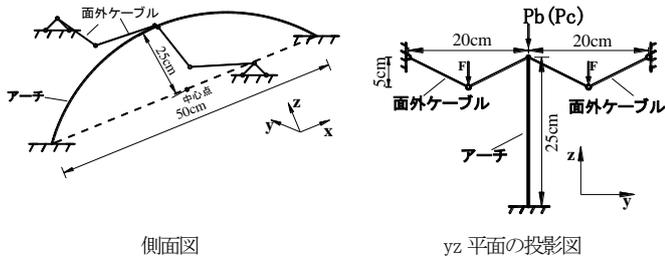
図 17 に実験の座屈現象と数値解析により得られた座屈モードを比較した。数値解析で実験現象を再現できている。外力の  $F$  が 2本の面外ケーブルに拘束効果を与えて、柱の座屈モードが変わったと考えられる。

#### 5.2 アーチのモデル実験

図 18 の(a)と(b)にそれぞれアーチの実験装置と数値解析モデルを示す。アーチの頂点は 2本の面外のケーブルと繋がれている。ケーブルは直径 0.54mm のワイヤロープを採用し、ヤング係数は文献(9)の実験値を参考して、134GPa とする。実験の載荷方法は 5.1 節の柱のモデルと同じである。



(a) 実験装置



(b) 数値解析モデル

図 18 アーチの実験装置と数値解析モデル

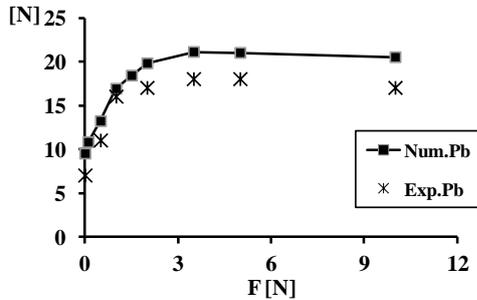


図 19 数値計算と実験の結果

実験結果	数値解析結果
<p>0.6kg</p> <p>F=0;Pb=7.0N</p>	<p>F=0.001;Pb=9.5N</p>
<p>0.5kg 1.8kg 0.5kg</p>	

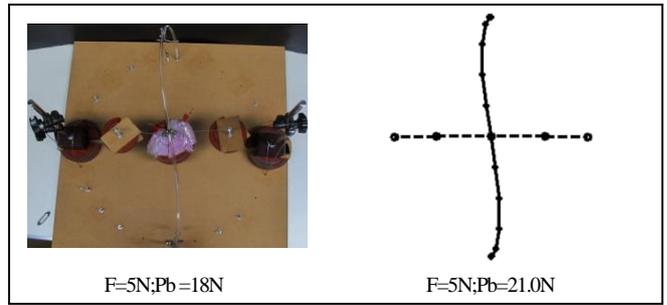


図 20 アーチの座屈現象と座屈モード

図 19 により、実験値  $P_b$  の変化傾向と数値計算により得られた  $P_b$  の曲線と似ているが、実験値  $P_b$  は計算値  $P_b$  より低い。その原因は、実験では、真っ直ぐのパイプを曲げてアーチを製作したため、アーチの初期圧縮力とモーメントが導入されたことで座屈荷重が下がった、曲げによりパイプの断面が楕円化した、などが考えられる。

さらに、図 19 により、ケーブルに与える外力荷重  $F$  を増加することで、アーチに直接与える荷重  $P_b$  に大きな影響を与えたことを再び確かめた。

図 20 に実験の座屈現象と数値解析により得られた座屈モードを比較した。実験では外力  $F$  の大きさが 0 と 5N の場合、アーチはそれぞれ横座屈と横振じれ座屈が発生した。数値解析によってこれらの現象をよく表した。

## 6. まとめ

本論文では、外部の荷重を利用する張力材に張力を導入することで骨組の座屈を拘束する外力補剛効果の概念を提案した。また、有限要素法の剛性方程式の一般解を利用した外力補剛効果の数値計算スキームを提案した。

Guyed tower とアーチの数値計算モデルを例として外力をケーブルに与えるとき、この外力の大きさによってケーブルが骨組に座屈拘束効果を与えることについて定量的な知見を得た。

さらに、柱とアーチのモデル実験で外力補剛効果によって拘束された骨組の座屈挙動を観察し、数値解析で骨組の座屈現象を確認できた。ケーブルに与える外力の影響で、ケーブルの拘束効果が変わることによって、骨組の座屈モードが移行することを確認した。

## 謝辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費挑戦的萌芽研究「アルティメート・シェルターの形態と力学性能に関する調査研究」の助成を受けている。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 陳坤, 洪文汗, 川口健一, 負圧型空気膜構造の支持骨組の座屈挙動と補強方法についての基礎的考察, 膜構造研究論文集 2011, No. 25, 2012
- 2) Xiaoming Yang, Study of the type and stability of cable-arch structure, Ph.D dissertation of xi'an university of architecture and technology in China, 2004
- 3) 日本建築学会, ラチスシェルの座屈と耐力, 丸善株式会社, 2010

- 4) 川口健一, 一般逆行列と構造工学への応用, コロナ社, 2011
- 5) J.L.Meek, Hoon Swee Tan, Geometrically nonlinear analysis of space frames by an incremental iterative technique, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 47, pp. 261-282, 1984
- 6) John Argyris, An excursion into large rotations, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 32, pp. 85-155, 1982
- 7) 藤井文夫, 大崎純, 池田清宏, 構造と材料の分岐力学, コロナ社, 2011
- 8) 久田俊明, 野口裕久, 非線形有限要素法の基礎と応用, 丸善株式会社, 1995
- 9) 呉明児, 小松宏年, 佐々木睦朗, ケーブルにより補剛されたアーチに関する実験的研究, *日本建築学会構造系論文集*, No. 584, pp. 87-94, 2004
- 10) 関島謙蔵, 川上清陸など, 連続繊維ロープの性能評価 (第 2 報), *関東学院大学工学総合研究所報* 36, pp. 11-20, 2008

## Fundamental Study on Stiffening Effect of Tensioned Components under Load

Kun CHEN<sup>\*1)</sup>

Ken'ichi KAWAGUCHI<sup>\*2)</sup>

### SYNOPSIS

In the past, tensioned components such as cables were considered as additional stiffeners to improve rigidity of skeletons, and loads were mainly directly given to skeletons. In negatively air pressurized pneumatic structures, air pressure is mainly given to membrane and cables. These tensioned components are possible to stiffen skeletons when they transmit forces to skeletons.

In this paper, a concept called external force stiffening method which utilizes tensioned components under load to stiffen skeletons and its numerical scheme are proposed. The principle of this concept is very similar as how tensioned components work in a negatively air pressurized pneumatic structure. Take numerical models of guyed tower and arches as examples, relationships of external force and buckling load are obtained. At last, model experiments are carried out to validate the validity of proposing external force stiffening method and its numerical scheme.

---

\*1) Graduate Student, Department of Engineering, the University of Tokyo, M. Eng

\*2) Professor, Institute of Industrial Science, the University of Tokyo, Dr. Eng