

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

陳坤*1
洪文汗*1
川口健一*2

梗概

負圧型空気膜構造に着目し、その支持骨組の座屈挙動について、線形座屈荷重と実大モデルの実験値との簡単な比較を行った。支持骨組はアーチ型であり、座屈拘束を目的としたロープの補剛効果についても検討している。

1 はじめに

空気膜構造には正圧型と負圧型があることが知られているが、正圧型に比べて負圧型の研究や実施例は少ない。しかし正圧型は基礎などの境界構造が宿命的に大きくなる傾向があり、仮設構造物として空気膜構造を用いる場合、軽量構造のメリットが十分に活かされない原因となっている。これに対して、負圧型は境界構造を正圧型に比べて格段に軽量化できる可能性がある。仮設建築としての空気膜構造の利用を考えた時、境界構造を簡易に軽量に済ませることができるといえるのは大きなメリットであり、検討の価値があると考えられる。

以上を踏まえ、本研究では単層の負圧空気膜構造システムの基礎的な検討を行う。負圧型空気膜構造には通常、形態を保つ反力を得るための骨組みが必要となるが、その骨組みに発生する座屈現象に関して、ロープを用いた補剛を検討する。(今後は負圧による張力膜などによる補剛効果を利用し、座屈荷重を高める可能性についても検討したい)。

本論文では、基礎的な形状として、複数の半円アーチにより支えられた半球状の負圧型空気膜構造を考えた。負圧空気膜構造の中に入れた骨組みには、圧縮力が作用するため、座屈問題について考える必要がある。本論文ではまず、線形座屈解析により、座屈荷重を比較し、さらにロープを用いて座屈補剛を行う方法について検討した。

同時に、直径約 6m の半球状の単層の負圧空気膜構造を実際に作成し、内圧を測定することで、座屈荷重を解析結果と比較した。

2 アーチによる骨組の線形座屈解析

負圧型空気膜構造を支える骨組について、簡単な線形座屈解析により、検討する。以下では、二次元単アーチモデル、三次元の単アーチモデル、三次元の複数アーチモデルの順に検討する。また、各アーチの頂点の動きをロープ(解析上はトラス要素)で拘束したモデルも設定し、挙動を比較する。

2.1 半円の二次元アーチの安定性

図 1 に、ロープにより補剛した直径 6m の半円の二次元アーチを示す。黒い実線はアーチ、破線はロープである。

有限要素法による、線形座屈解析を行い、二次元アーチの安定性とロープによる補剛効果を調べた。アーチの各節点の自由度は 3 である。平面アーチは二次元梁要素、ロープはトラス要素とした。梁要素とトラス要素の剛性マトリクスと幾何剛性マトリクスは文献「3」、文献「5」に参照した。

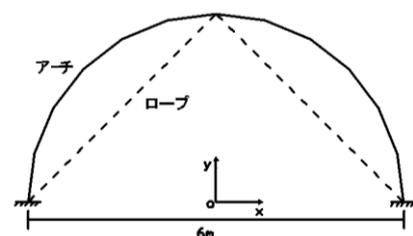


図1 二次元アーチと補剛ロープ

節点と外力の状況を図 2 に示す。アーチは 12 の梁要素なる。

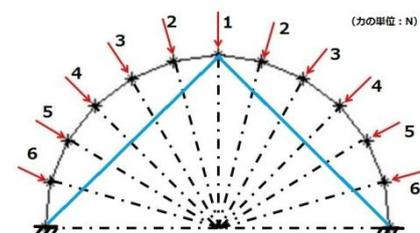


図2 二次元アーチの分割と初期外力の分布

外力は、各節点から円の中心に向かうものとする。材料は、後述の実験の材料係数と一致させるため、以下の

*1 東京大学大学院工学系研究科，建築学専攻，大学院生

*2 東京大学生産技術研究所，教授，工博

ように設定する。

1、アーチは塩ビ製パイプで組み立てる。塩ビ製パイプの断面は中空の円で、内径 2.5mm、外径 3.2mm である。塩ビ製ビニル管・継手協会により、ヤング係数は 3333MPa、ポアソン比は 0.38 とする。

2、ロープは直径 1.05mm の綿金剛打ロープである。そのヤング係数は文献「4」の Vinylon fiber(K)の実験値を採用し、10.8GPa とする。

後述の各数値解析の例は、全てこれらの材料を用いる。

式(1)の一般化固有値問題を解くことで座屈荷重・座屈モードを求める。

$$[K_{Et} + \lambda K_{Gt}] \cdot \{U\} = 0 \quad (1)$$

式中: K_{Et} 、 K_{Gt} 、 λ 、 U はそれぞれ全体構造の剛性マトリクス、幾何剛性マトリクス、座屈固有値(座屈荷重)、固有ベクトル(座屈モード)を表す。

式(1)を解くことで得られた最小の正数の λ が一次座屈荷重であり対応する固有ベクトルは一次座屈モードである。後述の λ は全て一次座屈荷重を表すものとする。

本論文中、ロープなしの場合を無補強アーチ(またはドーム)、ありの場合を補強アーチ(またはドーム)と呼ぶ。

二次元アーチの境界条件はピンである。図3と図4はそれぞれ二次元アーチの無補強と補強の一次座屈モードである。

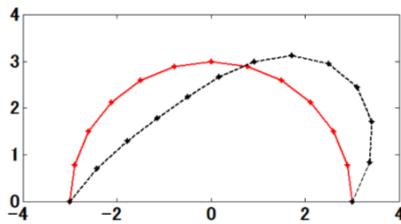


図3 無補強の二次元アーチの一次座屈モード
($\lambda = 3.44$)

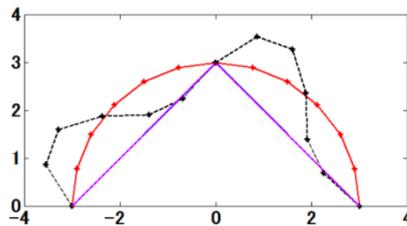


図4 補強の二次元アーチの一次座屈モード
($\lambda = 11.66$)

図3と図4を比較すると、一次座屈荷重は、ロープで補強した後、約 3.5 倍大きくなったことが分る。二次元アーチは面内しか発生しないため、ロープで面内補強をすれば、ロープの交点がピン支持点のような役割を果たし、座屈荷重を大きくすることができるようである。

2.2 半円の三次元アーチの安定性

2.1 の例と同じ大きさ、荷重、材料と境界条件の三次元アーチを考えた。

各節点の自由度を 6 である。三次元アーチの場合、ロープがあるかどうかにかかわらず、剛体変位の座屈モードが存在する。図5はその剛体変位モード(式(1)の固有値問題を解いたときに零固

有値として求められる)を表示したものである。

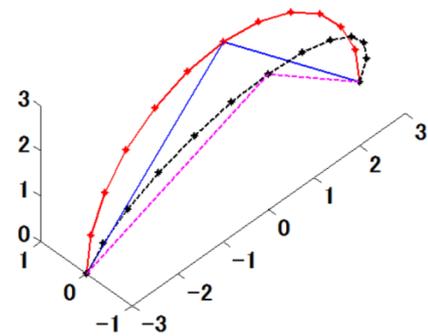


図5(a) 三次元アーチの剛性変位の側面図
($\lambda = 0$)

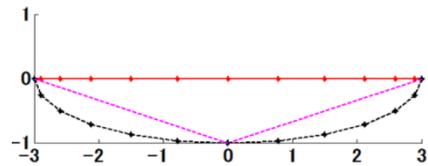


図5(b) 三次元アーチの剛性変位の平面図
($\lambda = 0$)

図6と図7はそれぞれ無補強と補強の一次座屈モードである。その2つの座屈モードはどちらも面外捩じれ座屈である。

一次座屈荷重を比べても、両者にほとんど差はなく、アーチ面にロープを取り付けることは、一次座屈荷重は約 5.75% 下回って、面外座屈に対しては効果がないことが分かった。

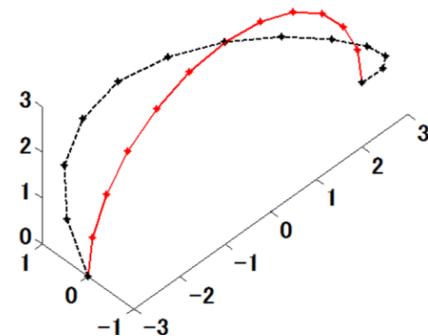


図6(a) 無補強の三次元アーチの一次座屈モードの側面図
($\lambda = 0.87$)

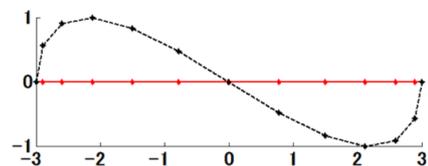


図6(b) 無補強の三次元アーチの一次座屈モードの平面図
($\lambda = 0.87$)

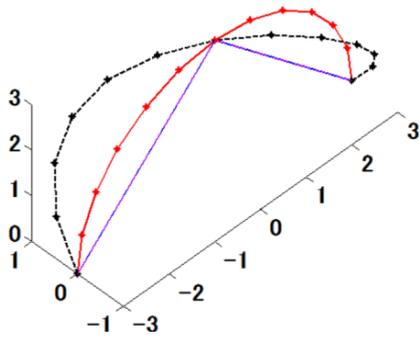


図7(a) 補強の三次元アーチの一次座屈モードの側面図
($\lambda = 0.82$)

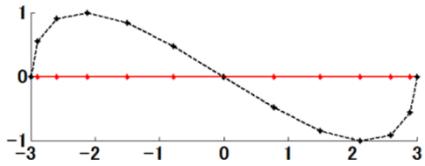


図7(b) 補強の三次元アーチの一次座屈モードの側面図
($\lambda = 0.82$)

2.3 複数の三次元のアーチによる半球なドームの安定性

本節は三次元のアーチで製作した直径6mのドームの安定性及ぶロープによる補強方法と補強効果について考察した。

図8は、型1の半球のドームである。そのタイプは、アーチは12本で、等間隔で半球の経度方向に並ぶ。ロープが境界の節点とドームの頂点と繋がれて、全部12本である。

アーチとロープの要素と分割は、2.1節の例と同じである。境界条件は全てピン支持とする。

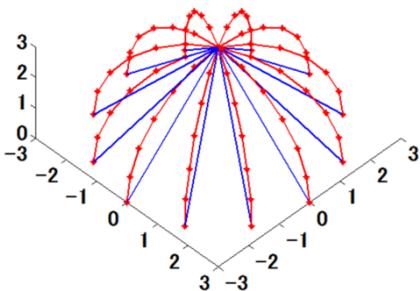


図8(a) 三次元の型1のドームの側面図

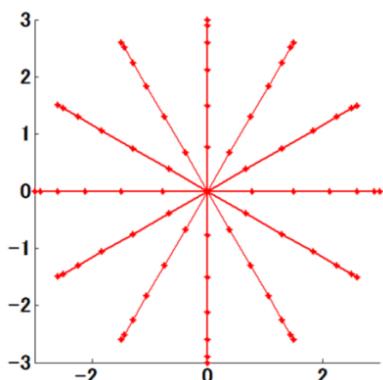


図8(b) 三次元の型1のドームの平面図

各節点の外力方向は、各節点から球の中心に向かって与える。各節点の外力の大きさは、後述する負圧空気膜構造の荷重条件を模擬するため、図9のように、モデル上の節点で囲まれた球殻の負担表面積から次のように計算する。

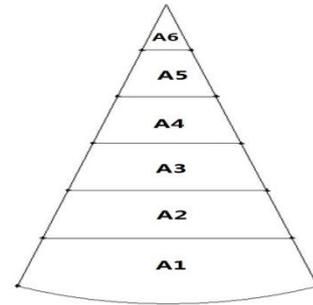


図9 投影面の計算面積

図9のA1～A6は水平面に四つまたは三つの節点に囲まれた負担面積である。外力は均等に1Paの面荷重として、A1～A6の各面積とその外力の乗積は、各面積に作用する外力として、周囲の節点に等分の値に与える。表1はA1～A6の面積である。

表1: 負担面積の計算

面積の番号	面積 (m ²)
A ₁	0.8682
A ₂	0.7112
A ₃	0.6107
A ₄	0.4686
A ₅	0.2946
A ₆	0.1005

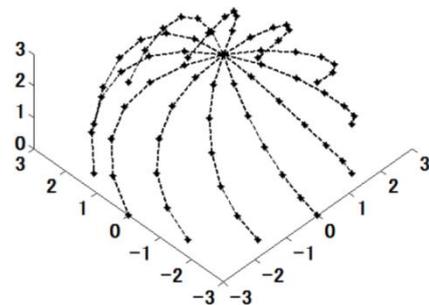


図10(a) 無補強の型1のドームの一次座屈モードの側面図
($\lambda = 8.61$)

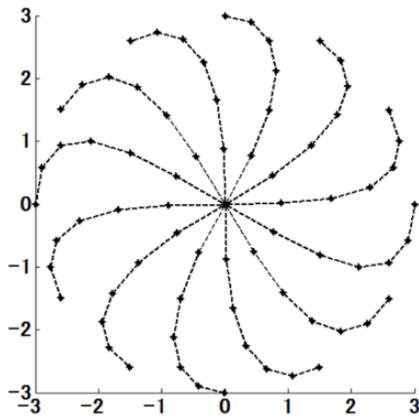


図 10(b) 無補強の型1のドームの一次座屈モードの側面図

$$(\lambda = 8.61)$$

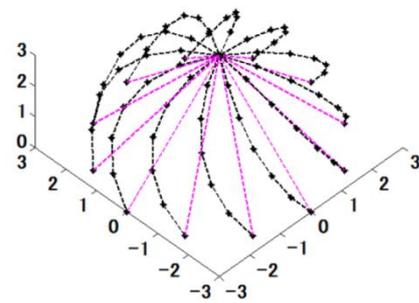


図 11(a) 補強の型1のドームの一次座屈モードの側面図

$$(\lambda = 6.10)$$

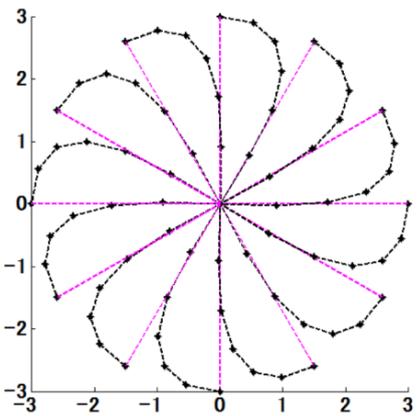


図 11(b) 補強の型1のドームの一次座屈モードの側面図

$$(\lambda = 6.10)$$

図 11 の静定計算により、ロープの軸力は+0.8832N(“+”は引っ張り力で、“-”は圧縮力である)である。

図 10 と図 11 はそれぞれ無補強と補強の型1のドームの一次座屈モードであり、どちらも捩じれ座屈のである。例 2.2 の三次元アーチの一次座屈モードと似ている。

座屈荷重(λ)をみると、補強時の座屈荷重は無補強時の 2/3 程度に低下しており、ロープの存在がかえって座屈荷重を下げている傾向があることが分かった。

次に、捩れの座屈モードを拘束する目的で、図 12 の型 2 よう

な、隣り合うアーチの間を 2 本の斜材と 1 本の水平材をブレース状に取り付ける補強する新しいロープの配置について考える。

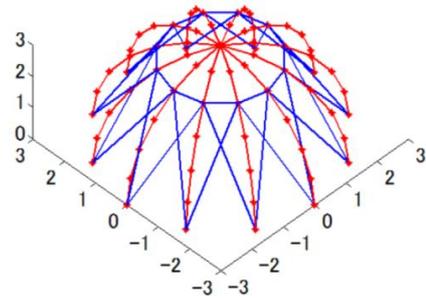


図 12(a) 三次元の型2のドームの側面図

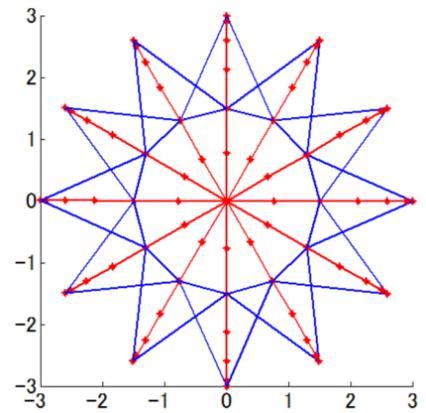


図 12(b) 三次元の型2のドームの側面図

図 12 のモデルに前述の荷重を与えたときの斜めのロープ軸力は+0.6350N、水平方向のロープ軸力は:-1.9894N であった。

線形座屈解析によって得られた一次座屈モードを図 13 に示す。図 13(b)をみると、この座屈モードが全体のねじれ座屈を表していることが分かる。

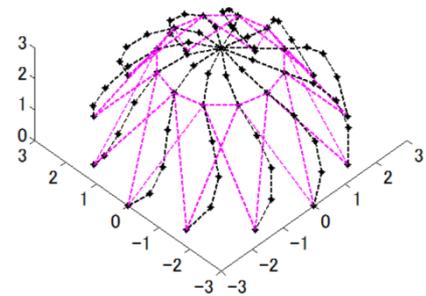


図 13(a) 型2のドームの一次座屈モードの側面図

$$(\lambda = 44.03)$$

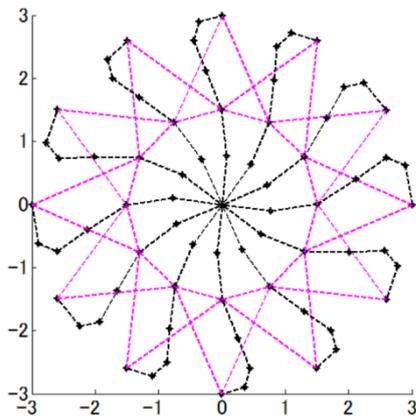


図 13(b) 型 2 のドームの一次座屈モードの平面図
($\lambda = 44.03$)

ただし、初期張力が導入されていないロープは実際には圧縮力を負担できないため、この解析結果は実現象とは異なる可能性がある。そこで、結果をより実現象に近づけるため、水平方向のロープを削除し、改めて座屈荷重と座屈モードを計算した。このときの座屈荷重および座屈モードを図 14 に示す。

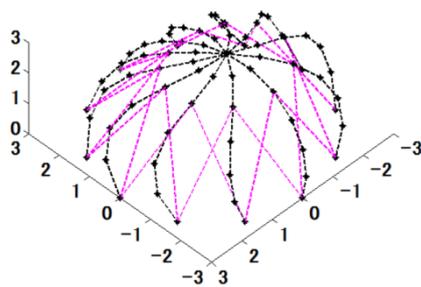


図 14(a) 型 3 のドームの一次座屈モードの側面図
($\lambda = 25.16$)

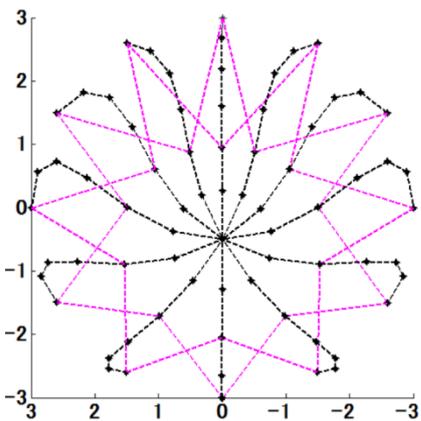


図 14(b) 型 3 のドームの一次座屈モードの平面図
($\lambda = 25.16$)

図 14 の斜めのロープの軸力は+0.8165N であった。

図 14 をみると、型 3 の一次座屈モードは並進座屈であり、この補強方法には捩じれ座屈を止める効果があったことが分かる。

座屈荷重も無補強の場合に比べて 2 倍以上になっている。
ここは、節 2 の型 1~4 のドームの結果を表 2 にまとめた。

表 2: ドームの補強方法と数値解析の結果

補強種類	ロープの設置方法	ロープの軸力 ("+" は引っ張り力で、 "-" は圧縮力である)	一次座屈荷重 (Pa)	座屈モード
型 1 (無補強)	なし	なし	8.61	捩じれ座屈
型 1	ロープは境界の節点とドームの頂点を結ぶ、計 12 本である。	+0.8832N	6.10	捩じれ座屈
型 2	隣り合うアーチの間を 2 本の斜材と 1 本の水平材をブレース状に取り付ける。	斜めのロープ軸力は: +0.6350N、 水平方向のロープ軸力は: -1.9894N であった。	44.03	並進座屈
型 3	隣り合うアーチの間を 2 本の斜材をブレース状に取り付ける。	+0.8165N	25.16	捩じれ座屈

3 半球状の単層の負圧空気膜構造の製作

負圧型空気膜構造の基本的な挙動を把握するために、2012 年 1 月に、東京大学の生産技術研究所 Ew 棟 5 階テラスで、直径 6m の半球状の負圧空気膜構造の製作実験を行った。

実験の手順は次のように述べる

1. 図 16 に示すように、骨組みを入れずに空気膜構造を完全にインフレーションして、正圧の空気膜構造を作った。
2. その正圧のドームの中で、図 17 に示す 12 本のアーチで骨組を組み立てた(ロープはまだ入れない)。
3. その後、空気膜構造内の空気を排出し負圧型へと移行させた。徐々に膜材が骨組により支持されるようになり最終的に骨組の座屈により全体的に非対称な変形が発生した。このときの骨組の座屈の臨界気圧差を測定した(図 18 の a と b)。
4. 空気膜構造を再びインフレーションし、元の半球の形状に回復させ、図 15 のようなロープをブレース状にアーチとアーチの間に設置した。その後、再び排気を行い、負圧型空気膜構造とした。骨組が座屈するまで排気を続け、座屈時の臨界気圧差を測定した(図 19 の a と b)。

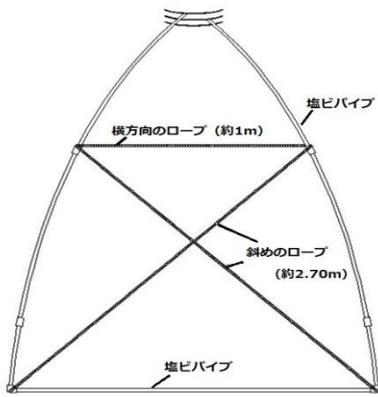


図15 交差のロープで補強の簡略図



図16 完全インフレーションした正圧の空気膜構造
(気圧差約+110Pa)



図17 骨組を入れた正圧の空気膜構造の内観
(気圧差約+110Pa)



図18(a) 無補強の骨組の座屈時の外観
(気圧差約-50Pa)



図18(b) 無補強の骨組の座屈時の内観
(気圧差約-50Pa)



図19(a) 補強された負圧の空気膜構造の外観
(気圧差約-30Pa~40Pa)



図19(b) 補強された負圧の空気膜構造の内観
(気圧差約-30Pa ~ 40Pa)



図20(a) 補強された骨組の座屈時の外観
(気圧差約-70Pa)



図 20(b) 補強された骨組みの座屈時の内観
(気圧差約70Pa)

4 実大実験と数値解析結果との比較

実験の図 18 と図 20 の結果を比較すると、今回の負圧空気膜構造は、ロープで補強することにより座屈荷重が上昇したことが分かる。

次に実験値と数値計算結果の比較を行う。

実験の図 18 と数値解析の図 10 はどちらも無補強の場合だが、これらの座屈モードはどちらも捩じれ座屈である。

図 18 の実験の座屈荷重は約50Pa で、それに対して、図 10 の一次座屈荷重は 8.61Pa で、約実験値の 17% である。

実験の図 20 により、横補強のロープが弛んでいた。そして、数値解析の図 14 の型 3 との比較するほうが妥当だと考える。図 20 の実験の座屈荷重は約70Pa で、それに対して、型 3 の一次座屈荷重は 25.16Pa で、約実験値の 35% である。

一方、図 20 と図 14 の座屈モードを比較した。図 14 に示す一次座屈モードは並進座屈であったに対して、図 20 の座屈形状は、塩ビ製パイプは片面で骨組の裏方向に凹み、局所的な座屈となって落ちた。最終形状は異なるが、途中の変形性状を比較していないため、即断はできない。今回のようなラフなモデル実験の場合には初期不整が多く存在する。実験と解析結果が一致しない一因と考えられる。また、実験の負圧空気膜構造に、アーチの間に膜があるため、これが引張力を負担し、補強材として働いている可能性も考えられるが、本報告では十分な検討を行っていないので、今後の課題としたい。

5 まとめ

本報告では、負圧型空気膜構造について、有限要素法による骨組の線形座屈解析と実大実験の結果について簡単に報告した。

1) 線形座屈数値解析の結果により、3次元アーチの形の骨組みは、面外の捩じれ座屈を発生しやすいことが分かった。また、補強ロープの設置は座屈荷重及び座屈モードに影響を与える。ロープをアーチとアーチの間に設置することで、面外の捩じれ座屈を止める効果があることが分かった。

2) 直径 6m の半球型の負圧空気膜構造を製作した。ロープによる補強がある場合とない場合、それぞれについて座屈時の内圧を測定した。隣り合うアーチの間にロープを設置する補強方法にはねじれ座屈を止める効果があることを確認した。実大実験で測定された座屈荷重は、補強／無補強に関わらず数値解析の一

次座屈荷重より高くなっている。

3) 負圧空気膜構造では、支持骨組みの座屈を考慮する必要があり、補剛ロープや膜面材による座屈拘束効果を上手に使うことによって、より軽量高剛性なシステムが可能と考えられる。それらは、今後の課題としたい。

謝辞:本研究の一部は、文部科学省科学研究費挑戦適法が研究「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」、及び東京大学生産技術研究所「展開研究」の助成を受けている。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 川口健一, 金子雅彦: 空気の分子量に着目した空気膜構造物のインフレーション解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1063-1064, 2000
- 2) 高田雅之, 川口健一: 「インフレーション構造の大変位挙動に関する研究—直径 6m 半球空気膜構造のインフレーション過程の測定—」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.909-910, 2004
- 3) 川井忠彦, 藤谷義信: 座屈問題解析, 有限要素法の基礎と応用シリーズ 11, 培風館, 1991
- 4) 関島謙蔵, 川上清隆下等: 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
- 5) 金子雅彦: 内包気体の分子数制御による空気膜構造のインフレーション解析, 東京大学修士論文, 2000
- 6) 高田雅之: 空気膜構造インフレーション過程の三次元形状測定とその数値解析手法に関する研究, 東京大学修士論文, 2004

Fundamental study on the buckling behavior and reinforcement for the skeleton supporting a negatively pressurized pneumatic structure

Kun CHEN*1)

Wenhan HONG*1)

Ken'ichi KAWAGUCHI *2)

SYNOPSIS

The advantage of negatively pressurized pneumatic structures is discussed. The buckling behavior of skeletons that support the pneumatic structures' surfaces is investigated by means of linear numerical analysis and a full-scale experiment. The configuration of the investigated skeleton is an arch. The reinforcement effect by tension members is also considered.

*1) Graduate Student, Dept. of Engineering, Univ. of Tokyo

*2) Prof, IIS, Univ. of Tokyo, Dr. Eng