ケーブルと剛体構造による張力安定複合構造の実験

呉 明见*1 呂 品埼*2 半谷裕彦*3
早川洋史*4 郷田哲雄*4 許 妲音*4

梗 概

本論文では、ケーブルと剛体構造による複合構造の具体例として、「実験住宅」の 1/2 ス ケールのモデルを採用し、実験を実施した。本論文では、張力導入、自己釣り合い状態、膜張 力評価、複合構造の載荷時の挙動を調査し、解析との比較を述べる。

1.まえがき

著者等はトラス構造の安定,不安定の判別法や張力 モードの解析法等を適合方程式と釣合方程式を独立 に利用することにより,おこなってきた [1,2]。さら に,これらの基礎研究の応用として,ケーブルとポー ルによる張力安定トラス構造に関し,張力導入による 安定化,外力に対する抵抗能力の理論解析と実験,モ デル棟の建設,などを試みている [3]。

さらに、ケーブルと剛体構造による張力安定複合構 造に関し、研究課題を整理するとともに、基礎方程式 の誘導、張力導入過程の解析、静的載荷時における構 造挙動の調査、運動方程式の誘導、振動と風応答の解 析等をおこなってきた[4~9]。

張力安定複合構造は、任意の形状を持つ剛体構造と ケーブル材による複合構造である。安定化と剛性確保 のため、ケーブルによって張力を導入する。剛体構造 の形状は設計に対応して種々の形状となるため、開発 された解析法では、剛体構造の重心において自由度を 考えるのではなく、剛体構造の表面にある節点とケー ブルの両端にある節点のみに変位の自由度を許容す る定式化を行っている。

本論文では, 張力安定複合構造の構造設計を行う目 的と, 開発した解析法を検討するため「実験住宅」の 1/2 スケールのモデルに対して実験を行う。張力導入 法, 自己釣り合い状態, 膜張力評価, 複合構造の載荷 時の構造挙動を調査し, 解析との比較を行う。

2.実験モデル

本実験では、「実験住宅」の 1/2 スケールのモデル に対して実験を行う。試験体の大きさは 3.5m×2.7m である。表1に構造諸元を示す。

表1 構造名称及び諸元

名称	材料 サイズ	
中央剛体構造	STK400 ϕ 48.6 $>$ 3.2	
テンションロッド	SS400 ϕ 25	
外枠	$\mathrm{H}-125\times125\times6.5\times9$	
膜材料	A種 FGT-600	

*1 東京大学生産技術研究所 外国人協力研究員 *2 東京大学大学院 *3 東京大学生産技術研究所 教授 *4 小川テント(株)

写真1に試験体を示す。図1に試験体のデメンショ ンを示す。中央部に太い線で示した剛体構造は¢ 48.6×3.2の鋼管を溶接して構成しており、ケーブル 材は¢25のロッドである。試験体の外枠はH-125 ×125×6.5×9のH形鋼を採用している。屋根面を覆 う膜材料はA種膜材である。



写真1 試験体



図1 試験体の寸法

3. 張力導入実験

張力安定構造の安定化と剛性確保のため、初期張力 導入をおこなっている。試験体モデルの張力導入には ロッドの張力導入と膜の張力導入がある。まず、ロッ ドと剛体構造を組立て、ロッドにターンバックルで張 力を導入する。次に、膜を取付け、膜に張力を導入す る。

本実験の張力安定複合構造の自己釣り合い応力モ ードは、文献[5]の解析方法で計算すると、対称と逆 対称の2つがある。c₁を対称の自己釣合モードの張力 導入係数とし、c₂を逆対称の自己釣合モードの張力 導入係数とすると、ロッドの張力を次式で表すことが できる。

N_1		[1]		[1]
N_2	$= C_1$	1	+ c ₂	-1
N_3		1.038		1.29
N_4		1.038		-1.29
N_5		2.379		-1.422
N_6		2.379		1.422
N_7		2.245		-1.819
N_8		2.245		1.819

(1)

本実験では対称の自己釣合モードを導入するのが 目標である。つまり、張力導入過程では、c₁を大きく するにつれて、c₂を0となるように試みる。ロッド への初期張力導入には、試験体の8本のロッドに、順 番に初期張力を導入し、張力導入量をひずみ量で管理 する。設計張力量(最大ロッド張力1 ton)を導入し てから、全体を固定する。

本実験では、膜面の張力導入は、人力により取り付け、一方向境界から順番に、ボルトを締め付けることにより膜面に張力導入する。予定初期張力は200kg/mを導入し、完成形状を得る。

本実験では、ロッドの軸力と曲げモーメトを測定す るために、1個のロッドに2枚のひずみゲージを用い た。測定した二個のひずみの平均値をロッドの軸ひず みとして扱っている。

図2,図3にロッドの張力導入過程における軸力を 示す。横軸は張力導入過程である。張力導入が終わっ た時点で最大初期張力導入量はほぼ1トンになって いる。図2はロッド軸力の実験値と解析値を比較した ものである。図3に張力導入中の対称張力モード導入 量と逆対称張力モード導入量の変化を示す。



図2 ロッド張力導入における軸力



図3 ロッド張力導入における導入係数

4. 载荷実験

本実験では, 張力安定複合構造の載荷時構造挙動を 調査するために, 剛体構造の2点に鉛直方向集中載荷 を行い, ロッドの応力及び剛体構造の鉛直変位を測定 する。

荷重として、図4に示す剛体構造の節点5と6に同 一の鉛直方向集中載荷を行った。荷重はおもりをステ ップで載荷し、安定状態で測定している。おもりは全 部で12ステップで増加し、最大(二つの節点で合わ せて)ほぼ 650kgまで載荷した。荷重は荷重変換器 で測定している。剛体の鉛直変位は節点1~4の鉛直 変位として変位計で測定している。

実験と理論計算の結果を図5と図6に示す。図5に 節点1~4の変位を示し、図6にロッドの軸力を示す。

5. 膜面初期導入ひずみと応力

実験モデルの膜面には、約 200kg/m の設計初期張 力を導入する。ここでは、膜面の2 点間の変位を測定 してそのひずみを計算する。また、膜面の裁断パネル から、有限要素方法で[10]、膜面の竣工釣合状態およ び膜面の応力を解析する。

5.1 材料定数および応力リラクゼーションの推定

ここでは膜材料を線形弾性体として扱う。膜面は初 期釣合状態をしているが、膜面の応力レベルは低い、 また、タテとヨコの応力比はほぼ1:1となっている。 材料定数を求めるため、荷重比1:1の二軸引張試験 を行った。得られた膜の応力・ひずみ曲線(S-S曲線) より、応力とひずみについて最小二乗法による低応力 レベル(0~4kg/cm)の引張剛性とポアソン比を推定 している。



図4 剛体構造の載荷点(5,6)と変位測定点(1,2,3,4)







図6 ロッドの軸力

剪断剛性は,異方材料に対して独立な材料定数であ る。剪断剛性の測定には,フレーム法等の方法があり, ここでは,等方材料の剪断剛性と引張剛性の関係式を 利用して次式で近似的に決定している。

$$G = \alpha \, \frac{\overline{E}}{2(1+\overline{v})} \tag{2}$$

$$\begin{split} & \mathbb{L} \subset \mathbb{L}; \quad \overline{\mathbf{v}} = \frac{1}{2} (\mathbf{v}_x + \mathbf{v}_y), \quad \overline{E} = \frac{1}{2} (E_x + E_y), \quad \alpha \ \text{lt}^{y \notin} \overline{\mathbf{y}} \\ & - \overline{\mathbf{y}} - \overline{\mathbf{v}} \mathbf{z} \leq (0 \leq \alpha \leq 1) \ \text{o} \end{split}$$

表 2 に最小二乗法より計算した材料定数を示して いる。図7に S-S 曲線の線形化の様子を示している。

	カニナ白	コーナは	カニナ	+-
	タノカ回	ヨコ万回	ЭЛЛ	3 1 7
最小二乗法	引張剛性	引張剛性	向ポア	向ポア
	kg/cm	kg/cm	ソン比	ソン比
応力差による	220.6	98.7	0.813	0.364
歪差による	248.9	103.9	0.799	0.333
平均	234.8	101.3	0.806	0.349

表2材料定数(膜材料 FGT-600)

図8に膜張力導入過程時およびリラクゼーション 時の上弦にある4本のロッドの軸力変化を示す。膜張 力導入時にはロッドの張力が減少していることがわ かる。張力導入過程の終了後、ロッドの軸力は回復し ており、その原因は膜のリラクゼーションと考えられ る。膜の応力変化とロッドの軸力の変化は線形関係を 持つことを仮定すると、膜の応力のリラクゼーション 量を推定することができる。図8の軸力曲線より推定 すると、ほぼ 60%の応力弛緩が発生している。



図7 S-S曲線の線形化



図8 ロッド軸力の変化

5.2 膜初期導入応力の解析

膜張力導入によるロッド節点の変位を無視して膜 面の応力を計算する。膜面とロッド,膜面と剛体の接 触点は、z方向(上下方向)が固定し、x方向とy方 向が自由になっている。剪断剛性係数αとしてα=0.1 を設定する。膜面は対称であるため、1/2の膜面にた いして、三角形要素を用いた有限要素法[10]で解析す る。

膜面設計初期応力は200kg/mを導入する。ここで、 膜のリラクゼーションを考えて、2倍の設計初期応力 レベル(400kg/m)に対応するひずみ量を膜裁断図に 採用する。S-S曲線(図7)より400kg/m応力でヨコ 糸とタテ糸の初期ひずみはそれぞれほぼ2.5%と 0.5%となっている。このひずみに対応する裁断パネ ルを決定する。

5.3 膜面ひずみの測定

本実験では、膜面にほぼ 50cm の間隔に節点を設け (図 12 の 1 ~ 23 の位置), 2 点間の変位を測定し、 膜材料のひずみを計算する。

図 9 に示す膜要素でのひずみはx方向ひずみ ε_x , y方向ひずみ ε_y , および剪断力を受けたときに生じる角度変化 γ_{xy} があり、次式となる。

$\varepsilon_x = (OA - OA_0)/OA_0$	
$\varepsilon_{y} = (OB - OB_{0})/OB_{0}$	(3)
$v = \delta$	

5.4 解析と実験結果

膜リラクゼーションを考慮せずに解析した膜面初



図9 膜要素のひずみ



(a) ヨコのひずみ



(b) タテのひずみ



(c) 剪断ひずみ

図 10 膜面のひずみ(%) (解析)

期ひずみを図 10 に示す。60%の応力弛緩を考えた場 合の膜面の応力の解析結果を図 11 に示している。

膜張力導入からリラクゼーション後, 膜面変位を測 定し, 各測定点間の平均ひずみを計算する。その結果 を図 12 に示す。



図 11 膜面の応力(kg/m)(解析)

6.実験結果の考察

(1)本実験で採用した張力安定複合構造モデルの自己 釣合い応力モードは2個ある。対称の自己釣合い応力 モードを導入し、逆対称モードを避けることは本実験 の1つの目的である。実験中のロッド張力導入過程に より、2つ以上の自己釣合い応力モードある場合には、 合理的な張力導入方法が必要であることが分かった。 図2をみると、張力導入過程において、対称張力導入 モードの導入係数が徐々に増加し、逆対称張力導入モ ードの導入係数が小さくなっている。本実験における 張力導入過程は正確であることが確認された。

(2)張力導入時における軸力の実験値と解析値はほぼ 一致している。

(3)載荷実験では、節点変位の実験値と理論解析値(図 5)はほぼ一致している。荷重を増加すると上弦ロッ ドの軸力は減少し、下弦ロッドの軸力は上昇する。ロ ッド軸力の実験値と理論解析値(図6)は傾きが少し 異なっている。この一つの原因は載荷点が剛体構造と ロッドの接合部よりロッドの内側に入り偏心載荷と なっていることによる。

(4)膜の S-S 曲線より推算した低応力レベルの引張剛 性(ヨコ 101.3kg/cm,タテ 234.8kg/cm)は非常に小 さい。また,膜には、応力 400kg/m くらいのレベル で、初期リラクゼーションが 60%程度生じることが 確認できた。



(a)ヨコ方向ひずみ







(c)せん断ひずみ図 12 膜面のひずみ(実験)

(5)本実験では, 膜面の2点間の変形で膜材料のひず みを計算している。結果より, 平均的な膜の張力導 入量は設計量とほぼ一致している。しかし,部分的には(特 に, タテ方向)差が大きい。

(6)膜リラクゼーションを考えて, 膜面初期応力を計 算した。ヨコの応力はほぼ 240kg/m である。タテの 応力は設計値より大きくなっており,膜面の部分によ って,応力が 300kg/m 以上ある部分も生じている。 タテ応力の分布はヨコ応力の分布よりばらついてい る。

謝辞

実験に御協力頂いた東京大学生産技術研究所の大 矢俊治氏,島脇興助氏に深く感謝致します。

参考文献

- 田中 尚,半谷裕彦:不安定トラスの剛体変位と 安定化条件、日本建築学会構造系論文報告集,第 356号,1985年10月,p.p.35-42
- 2. 半谷裕彦, 川口健一:形態解析, 培風館, 1991
- 半谷裕彦,川口健一,小田憲史:張力安定トラス 構造の構造挙動と構造設計,東京大学生産技術研 究所報告, Vol.32, No.2, 1991
- 4. 半谷裕彦, 呉 明児:ケーブルと剛体構造による 張力安定複合構造,(その1)適合方程式と釣合方程 式,コロキウム構造形態の解析と創生講演論文集, 日本建築学会,1995年11月, p.p.117-186
- 5. 呉 明児,半谷裕彦:ケーブルと剛体構造による 張力安定複合構造,(その2)安定化と張力導入,コ

ロキウム構造形態の解析と創生講演論文集,日本 建築学会,1995年11月, p.p.187-196

- 46. 半谷裕彦, 呉 明児:ケーブルと剛体構造による 張力安定複合構造の応力・変形解析, 膜構造研究 論文集'95, 1995年12月, p.p.29-35
- Yasuhiko Hangai and Minger Wu: Analytical Method for Hybrid Structure of Truss and Rigid Structures, Proceedings of ASIA-PACIFIC Conference on Shell and Spatial Structures, Beijing China, 1996, p.p.209-216
- 半谷裕彦, 呉 明児:ケーブルと剛体構造による 張力安定複合構造の動的挙動,その1:支配方程 式と振動解析,日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿),1996.9, p.p.913-914
- 呉 明児,半谷裕彦:ケーブルと剛体構造による 張力安定複合構造の動的挙動,その2:風の応答, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿),1996.9, p.p.915-916
- 10. 坪田張二,吉田新,黒川泰嗣:裁断図をもとにした膜構造物の実初期つり合い状態の解析,日本 建築学会構造系論文報告集,No.373,昭和63年3 月,p.p.101-110
- 米田稔彦,斎藤公男等: 膜材料の剛性評価法に関 する基礎的研究,その1,その2,その3,日本 建築学会大会学術講演梗概集(近畿),1993.9, p.p.1369-1374
- 12. 小竹達也,菊嶋 誠,西川 薫:膜材のリラクゼ ーションについて、その1、その2、日本建築学 会大会学術講演梗概集(近畿),1996.9、 p.p.881-884

EXPERIMENTAL STUDIES ON HYBRID STRUCTURES OF CABLE AND RIGID STRUCTURE

Minger Wu^{*1} Pinqi Lu^{*2} Yasuhiko Hangai^{*3} Youshi Hayabawa^{*4} Tetsuo Gouda^{*4} Hendy H.Y. Shu^{*4}

SYNOPSIS

Hybrid structures which consist of membrane, cable members and rigid structures are experimentally studied in the paper. The experimental modal, with the scale of 1/2, is a roof structure of a planned house. The hybrid roof structure consists of a rigid structure and eight rods. By introducing pre-stress into the rods, the roof structure is stabilized. The roof is covered with membrane, and pre-stress is also introduced into the membrane.

In the first part of the paper, the experiment for introducing pre-stress in the rods and membrane is investigated. By measuring the strain, the self-equilibrated stresses of the rods are obtained. In the second part of the paper, load is applied to the hybrid structure with the total weight of 650kg. The displacement of the rigid structure and the stresses of the rods are measured. In the third part of the paper, the strain in the membrane is obtained by measuring the distances of two points on the membrane surface to check the stress in the membrane. The pre-stress introduced in the membrane is about 200kg/m.

In the paper, the experimental results are compared with analytical results by the method proposed by the authors, and the validity of the analytical method is shown.

*1 Visiting Research Fellow, Institute of Industrial Science, University of Tokyo

*2 Graduate Student, University of Tokyo

*3 Professor, Institute of Industrial Science, University of Tokyo

*4 Ogawa Tento Co., Ltd.