

伸縮性膜材を引張材とするテンセグリティ構造物「MEMBOO」の設計と施工

- 数学的理論を实践へつなぐ手法の開発 -

奥村 光城

1. はじめに

1-1. 背景と目的

膜構造は張力とせん断力にのみ耐えることができる膜材を使用して構成される構造形式^(註1)で、大空間や仮設建築などに広く活用されている。一方、テンセグリティ構造は不連続な圧縮材と連続した引張材で構成される構造形式^(註2)で、一般的な構造形式に比べ部材数が少なく軽量であるなどの利点がある。しかし、重力下での自己釣合形態の決定や構造計算が困難なことなどからいまだに広く普及するには及んでいない。通常は線材のみで構成されるテンセグリティ構造物の引張材に、面材である膜材を用いることは、テンセグリティ構造物の建築としての有用性を大きく向上させると考えられる。

本稿では、筆者らが設計・製作を行った仮設テント「MEMBOO」(以下、本架構)を事例として、膜材を引張材とするテンセグリティ構造物の設計手法を示し、施工性、構造的特性を検証する。

1-2. 設計上の課題

本稿では膜材を引張材とするテンセグリティ構造物の設計における主な課題として以下の4点に着目する。

- 1) 膜材全体への引張力の導入方法。
- 2) 膜材と圧縮材の接合方法。
- 3) 軸力導入後の形態の制御方法。
- 4) 施工方法。

1-3. 既往研究

膜材を引張材とするテンセグリティ構造物の研究として、井田¹⁾の研究があげられる。この研究では、圧縮材に竹材、引張材に無伸縮の膜材を用いた仮設茶室の製作を通して、テンセグリティ構造物の圧縮材と引張材をユニット化することによる施工性の向上について述べている。しかし試行建設においては、竹材がしなることで曲げが生じ、端部において割り箸とエポキシ樹脂で接合したボルトとの間で座屈が生じている。また、膜材は端部でハトメを用いて接合しているが、応力が増加



図1. 「MEMBOO」外観

すると破損が生じている。井田はこれら材端部の補強の必要性を述べているが、具体的な改善策の言及には至っていない。

1-4. 研究の方法

まず、2章で引張材を膜材に置換した場合の形態のパターンを示す。次に3章では、冒頭で挙げた課題への対策を軸に本架構の概要を示す。4章で試行建設における結果と考察を述べる。5章で測定試験により構造的特性を検証する。最後に6章で本研究で得られた結果をまとめ、膜材を引張材とするテンセグリティ構造の仮設建築への応用可能性を考察する。

2. 引張材の膜材への置換

2-1. 線材からなるテンセグリティのパターン

通常の線材のみから構成されるテンセグリティは圧縮材と引張材の位置関係から大きく4パターンに分けられる^(註3)。この内、本章では内部空間の確保が容易なDiamond Pattern、Zigzag Pattern、Circuit Patternの3パターンを扱うこととする(図2)。

	Diamond Pattern	Zigzag Pattern	Circuit Pattern
パターン			
特徴	1本の圧縮材から4本の引張材が接続されている。	1本の圧縮材から3本の引張材が接続されている。	連続した2本の圧縮材から4本の引張材が接続されている。

図2. 線材を用いたテンセグリティのパターン

2-2. 膜材を用いたテンセグリティのパターン

引張材を線材から膜材へ置換した場合の圧縮材と引張材の位置関係のパターンを示す(図3)。引張材の膜材への置換は、線材からなるテンセグリティにおいて線材で囲まれる面をすべて膜材に置換することで得られる。また、膜材の面材としての応用可能性を検討するため、膜材は1枚の膜面で構成することとする。

3. 「MEMBOO」について

3-1. 膜材全体への引張力の導入方法

本稿の冒頭で述べたように、テンセグリティの引張材を膜材とするとき最も課題となるのは、膜材全体に引張力を導入することである。引張材が膜材の時、

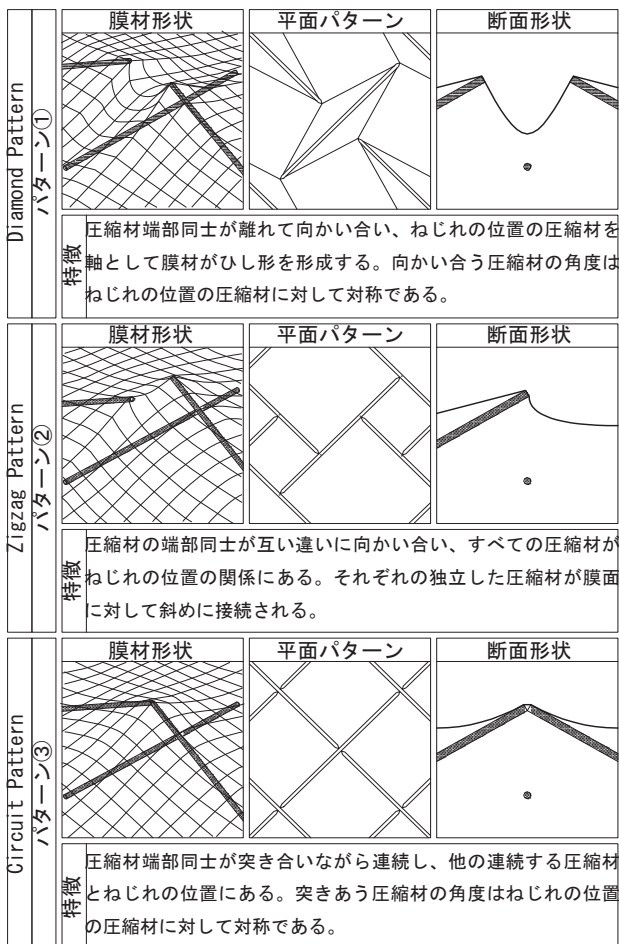


図3. 膜材を用いたテンセグリティのパターン

Diamond Patternでは節点間の距離に対して膜材のひし形部分の幅が大きいとその部分に引張力が導入されずにたわみが生じる。しかし、節点間の距離は架構の様々な条件によって変化するため、すべてのひし形部分の適切な幅を設定することは困難である。Zigzag Patternでは独立する圧縮材端部が膜面に対して斜めに接続されるため、節点付近の膜材の引張力が不均一となり、たわみを生じるおそれがある。これらの理由

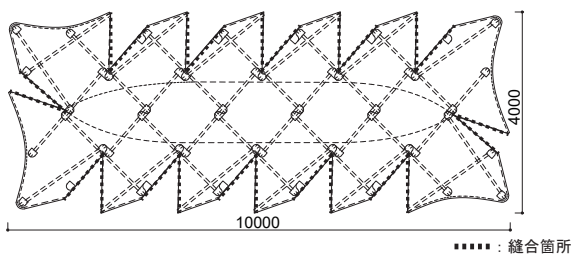


図4. 「MEMBOO」展開図

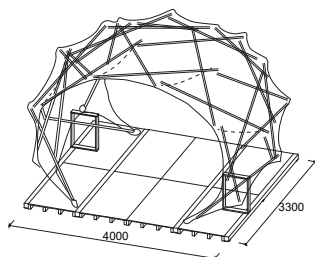


図5. 架構概要

部材名称	部材長	部材数	重量
圧縮材	2300mm	16	24.0kg
	2070mm	14	19.5kg
膜材	-	1	13.7kg
雑巾	-	60	2.0kg
架構合計			59.2kg

最大高さ 2500mm / 床面積 12.0mm²
※基礎部材は除く。

から本架構では、比較的膜材全体への引張力の導入が容易と思われるCircuit Patternを採用した。図4のような展開図から、必要箇所を縫合することで引張材として使用できる膜部材^(註4)を製作した。膜材は、架構全体への引張力の伝達を容易とするため伸縮性のあるものを使用した^(註5)。また、圧縮材には外径40mm～50mmの真竹を用いた。長さ2300mmのものを16本と、長さ2070mmのものを14本の計30本である。膜部材に圧縮材を装着することで軸力が導入される(図5)。

3-2. 圧縮材と引張材の接合方法

テンセグリティは理論上はすべての部材同士がピン接合で接続している。本架構ではピン接合に近い状態を作り出すため、圧縮材の端部を挿入するためのポケット状の接合部を製作した(図6)。ポケットは圧縮材の向きや位置関係に応じて3種類の展開図から製作した。Circuit Patternは幾何学上は圧縮材端部同士が突き合っているが施工が困難であるため、突き合う圧縮材2本の端部が互いに噛み合うように隣接する形状とした。節点付近には応力が集中すると考えられるため、ポケット部には引張強度の高い無伸縮性の膜材^(註6)を用いた。装着後の圧縮材の抜け落ちを防止するため、圧縮材の挿入後に、面ファスナーを接着した帯状の膜材部分を圧縮材に巻き付け固定した。軸力を分散させポケット部の損傷を防ぐため、圧縮材の端部に厚手の布地を巻き付け、養生テープで固定した。

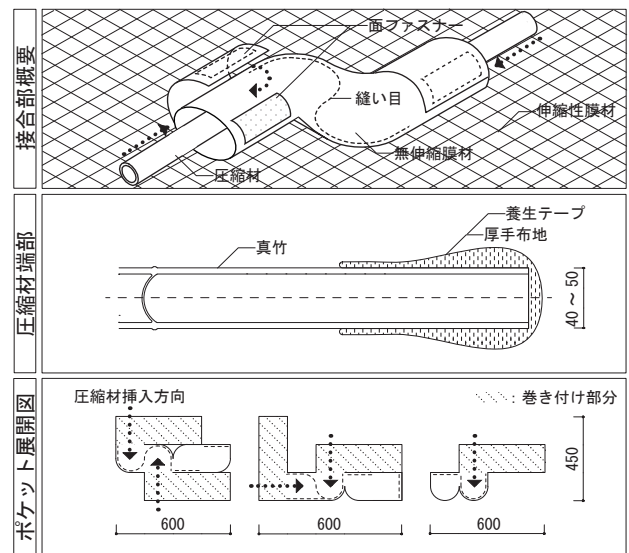


図6. 接合部詳細

3-3. 軸力導入後の形態の制御

軸力導入後の形態を制御するため、本架構を設置する土台となる基礎を製作した(図7)。基礎架構は8枚のパネルからなる木製デッキと大引きをボルトで連結することで成立する。本架構の固定は、出来るだけピン接合に近い状態を作り出すために、大引きに固定し

たアイナットに足となる4本の材端部をロープで括り付ける方法をとった。さらに、架構全体が自重により沈むことへの対策として、アイナットに括り付ける足に加えて他の2本の足元の材を鉛直方向に700mm持ち上げて木製のスペーサーで固定した。木製スペーサーは木製デッキにビス止めし固定した。

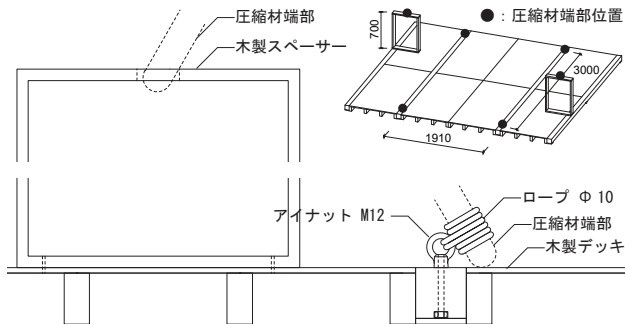


図7. 基礎詳細

4. 試行建設

4-1. 試行建設概要

本架構の施工性と安全性を検証するため、試行建設を行った。あらかじめ圧縮材と膜部材を製作し、九州大学伊都キャンパス屋外にて組み立て・設置を行った。以下に試行建設の工程を示す(図8)。

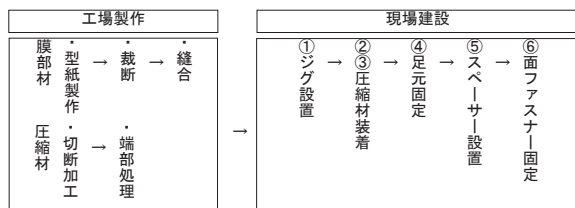


図8. 試行建設工程

4-2. 現場建設

図9の手順で建設を行った。この工程に作業員を最大10人動員した。建設は特殊な工具や機材を用いることなくすべて人力で行った。

4-3. 結果・考察

現場建設において、以下の2点の結果が得られた。

1) 手順②の架構上部の圧縮材は接合部ポケットへの挿入が比較的容易であったが、次第に架構に軸力が導入されていくことで、手順③の足元に近い下部の圧縮材の装着は人力では限界に近いほど力を要した。改善策として、接合部への装着後に圧縮材の長さが可変な仕組みの開発等が考えられる。

2) 手順⑤の足元の固定後、圧縮材の角度が平面状態から変化するため、圧縮材とポケットの向きがずれ、面ファスナーを完全に圧縮材に巻き付けることができない箇所が、特

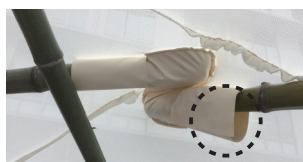


図10. 接合部ポケットのずれ

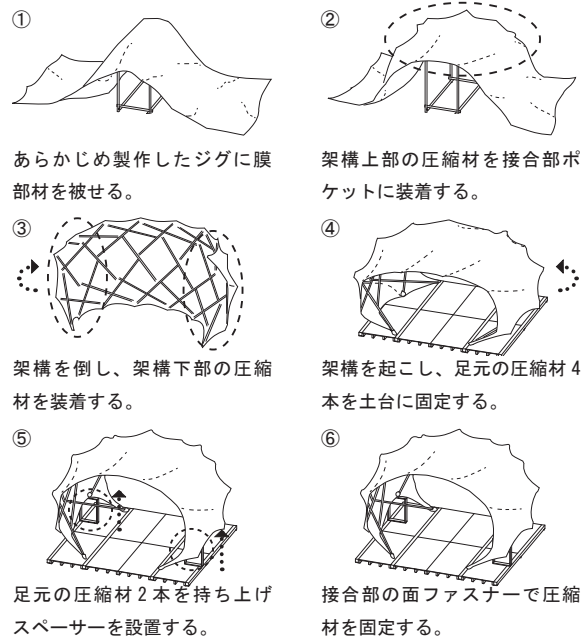


図9. 現場建設手順

に架構周縁部の接合部に多数生じた(図10)。改善策として、ポケットの向きを建上げ後の圧縮材の角度に合わせて設計すること等が考えられる。

5. 測定試験

5-1. 測定試験概要

3章の軸力導入後の形態の制御で示したように、本架構は自重により架構の高さが沈むため、足元の2本の圧縮材を持ち上げるにより高さを確保した。この時の構造的特性を把握するため、本架構の縮小模型(縮小率約42.6%)において圧縮材のひずみ測定試験を行った。圧縮材に図のように番号を振ると、本架構は5行6列のテンセグリティ構造物である(図11)。i) A6、B1、D6、E1の下端を固定した状態、ii) 本架構の節点12か所に1kg(計12kg)のおもりを下げた状態、iii) おもりを下げてA1、E6の下端を200mm持ち上げて固定した状態の3パターンにおいて測定を行った(図12)。

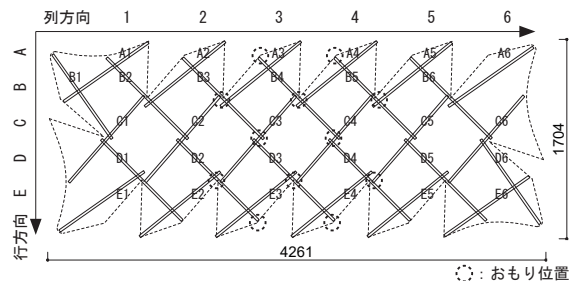


図11. 実験用架構展開図

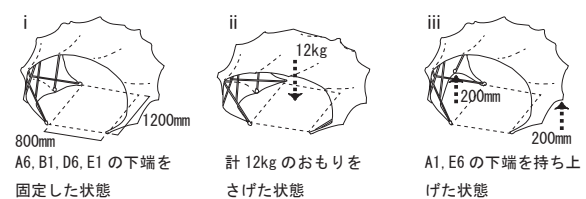


図12. 実験パターン

縮小模型の圧縮材には外径30mm、厚さ2mmのアクリル樹脂パイプを用いた。圧縮材のたわみを考慮するため、材中央の表裏にひずみゲージを貼付した(図13)。

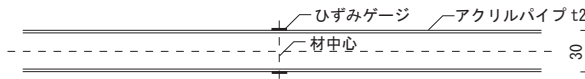


図13. 実験用圧縮材詳細

5-2. 結果・考察

測定から得られた各パターンの圧縮材の軸力を示す(図14)。圧縮材のヤング率は、同質・同断面のアクリルパイプの短柱圧縮試験を行い、3.88kN/mm²と定めた^(註7)。試験の結果、以下の4点が確認できた。ただし、A2、C1、D6は測定不良のため省いた。

- 1) 全てのパターンでB1の値が目立って小さく、パターン i で38.2N、パターン ii で34.5N、パターン iii ではマイナス値の-13.0Nであった。B1は足元の材であり、端部が土台の面に対して斜めに接しているため、材の断面に均一に軸力が働いていないことが考えられる。これに加えて、パターン iii では架構が浮き上がることでB1を引張方向に土台に固定したことも影響していることが考えられる。
- 2) パターン i の応力分布を比べると、A4とA5の平均が136.5N、2行目が142.7N、4行目が123.9N、E2とE3の平均が125.6Nで、1行目の後半列、2行目、4行目、5行目の前半列の値が大きく、3桁に達している。

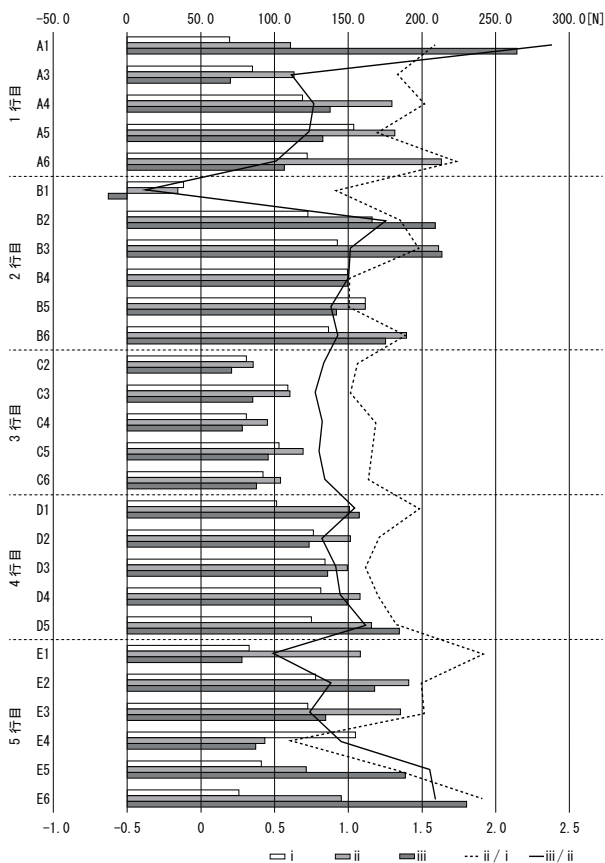


図14. 圧縮材軸力

3) B1を除くパターン i に対するパターン ii の比率を行ごとの平均で比べると、1行目が1.47倍、5行目が1.46倍と大きく、3行目が1.11倍で最小である。この結果より、自重が大きくなるほど間口周りの材の軸力の負担率が高くなることが予想される。

4) B1を除くパターン ii に対するパターン iii の比率を比べると、下端を持ち上げたA1とE6がそれぞれ2.38倍と1.58倍で最大で、E5も1.55倍と高い値を示している。一方、2行目と4行目はそれぞれ1.01倍と0.97倍でほとんど変化がなく、1行目の後半列(A3、A4、A5、A6)、3行目、5行目の前半列(E1、E2、E3、E4)はそれぞれ0.65倍、0.81倍、0.76倍と減少している。この結果より、A1とE6の下端を鉛直方向に持ち上げるとこれらの周辺の材の軸力は増加するが、他の多くの部分では減少することが確認できた。また、絶対値においてもA1が264.5Nで最大で、次いでE6が230.4Nであった。

以上より、自重の増加と足元の圧縮材(A1、E6)の持ち上げにより本架構の応力のバランスが変化することが確認できた。応力の格差を小さくするためには、架構の場所に応じて圧縮材の重量や長さを変化させるなどの対策が考えられる。

6. まとめ

本架構の設計・施工を通して、膜材を引張材とするテンセグリティ構造物の一設計手法を示した。試行建設の結果、特殊な工具を用いずに人力だけの施工可能性を示すことができたが、かなりの力を要するため、より円滑な施工には圧縮材の長さを可変とする仕組みの開発等が必要である。また、圧縮材のひずみ測定試験では、重力下での応力の挙動を確認したが、架構の重量が大きくなる場合には、応力のバランスを保つための工夫が必要である。本稿の測定試験では圧縮材のみに触れているが、膜部材の挙動も併せて分析することで課題がより明確になるとと思われる。

【註】

(註1) 2)より、石井らは膜構造を「構造体が曲げ剛性をもたないか、もしくはこれを無視することのできる部材から構成されており、外部荷重にたいして膜応力状態、すなわち膜面内の引張、圧縮およびせん断力のみでつり合っている構造物」と定義している。

(註2) 3)より、A.Pughはテンセグリティを“A tensegrity system is established when a set of discontinuous compressive components interacts with a set of continuous tensile components to define a stable volume in space”と定義している。

(註3) 3)より、A.Pughはテンセグリティを大きく分けて多面体の中心を圧縮材が通るパターン、Diamond Pattern、Zigzag Pattern、Circuit Patternの4つに分類している。

(註4) 膜材の縫合はケブラー糸を用い、家庭用ミシンで行った。引張試験により縫い目よりも先に膜材が破断することを確認した。

(註5) シェードアスール(引張強度500N/3cm以上、伸び率80%以上、引裂強度500N以上)

(註6) ウルトラマックスタイプC(引張強度タテ1568N/3cmヨコ1323N/3cm、伸び率タテ20%ヨコ30%、引裂強度タテ137Nヨコ147N)

(註7) 「JIS K 7181:2011 プラスティック-圧縮特性の求め方」参照

【参考文献】

1) 井田久遠；膜材を引張材とするテンセグリティ構造物の設計手法，2014

2) 石井一夫、安宅信行；膜構造の設計，1969

3) Anthony Pugh；An Introduction to Tensegrity, University of California, 1976