

軽量サンドイッチパネルを用いた剛体折り展開構造物の設計と施工方法

—「水上公園のパビリオン」を事例として—

崎元 誠

1.はじめに

1-1 研究の背景と目的

剛体折り^{註1)}とは、折線を除く平面部が弾性変形を必要とせず、折線上の回転のみで変形する折りの幾何学モデルである。剛体折りを展開構造の機構として応用することで、平坦でコンパクトな状態と立体的で剛性の高い状態を往復して変形できる仮設建築物の制作が可能である。面材を用いた展開構造物の既往研究は少ないが、繰り返し利用でき、構造体と仕上げ材が一体となった仮設建築物の有用性は高いと考えられる。

本研究では、筆者らが設計・制作を行った仮設の休憩所「水上公園のパビリオン」(以下、本架構)(図1,2)を事例とし、剛体折りを展開可能な仮設建築物に応用する設計方法の提案と検証を目的とする。

1-2 既往研究と本研究の位置づけ

剛体折り展開構造物を木質パネルで制作し、剛体折りモデルを仮設建築物へ適用する方法を探る研究を魚住¹⁾が行っている。本架構と同じくヨシムラ折り(三角形メッシュで構成された剛体折りモデル)(図3)を応用した架構は、足元を固定しない状態では形状が安定せず、試行建設の際に多くの補助パーツを必要としている。また、架構のねじれなどによって応力が集中した結果、接合部にコースレッドの破損や丁番の歪みが生じている。魚住は繰り返しの施工にも耐えられる高強度のヒンジの開発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。

従来の木材を使用した展開構造物は素材の重さゆえに接合部や施工性に課題が生じたと考え、本架構は軽量サンドイッチパネル(図4)を面材に用いて制作した。

1-3 研究の方法

まず2章では、既往研究から得られた改善点を含め、剛体折り展開構造物の設計上の課題を整理する。3章では2章で挙げた課題への対策を軸に本架構の概要を示す。4章では試行建設における結果と考察を述べる。5章では架構の加力試験およびサンドイッチパネルの材料試験を実施し、得られた結果から架構の構造的特性の考察と安全性の検証を行う。最後の6章では、本研究で得られた結果をまとめ、剛体折り展開構造物の仮設建築物への応用可能性を考察する。



図1 「水上公園のパビリオン」の外観・内観

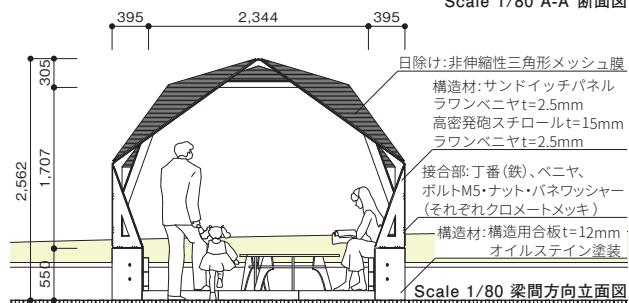
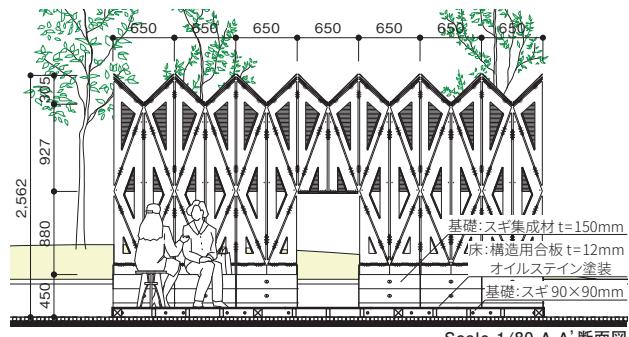
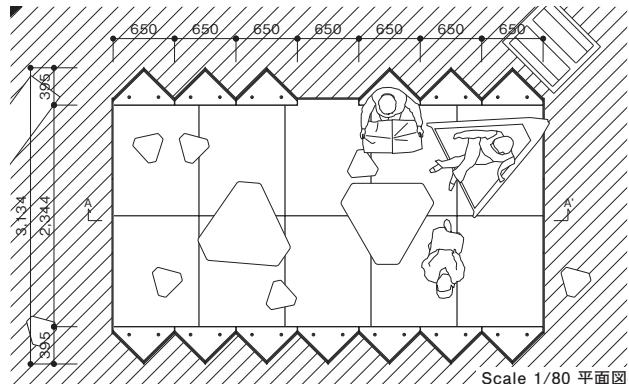


図2 本架構の平面・断面・立面図

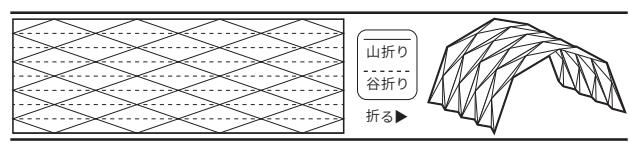


図3 ヨシムラ折り

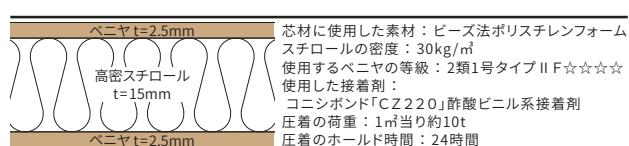


図4 軽量サンドイッチパネルの詳細

2. 剛体折り展開構造物の設計上の課題

本稿では、剛体折り展開構造物の設計における主な課題として以下の5点に着目する。

- 1) 架構形状の決定方法。まず、屋外に設置可能な強度が必要である。繰り返し展開・折りたたみが可能かつ施工が容易な構造システムであることが求められる。また同時に、本架構は小規模な仮設建築物を前提としているため、移動式クレーンや補助パーツなどを使わず、少ない人数で建ち上げられることが望ましい。
- 2) 架構の素材の選定。厚みの概念を含まない剛体折りモデルを建築に適用する際、面に剛性を持たせるために、ある程度の厚さと強度を持った素材を選定する必要がある。また、本架構は人力で建設することを前提としているため、施工時に形態をコントロールしやすいことや建設後に接合部に加わる力を少なくすることを考慮すると、素材の軽さが求められる。
- 3) 面材間の接合方法。厚みを持った剛体面の変形を可能にするために、折り曲げられた面どうしの干渉を防がなくてはならない。図5に方法を示す。また、回転可能な折り線を再現するために、建具に用いられる丁番や、自由に変形可能な布やゴムなどの素材を考えられる。材に破損や歪みが生じないように留意する。
- 4) 架構の形態の拘束方法。剛体折りは、折り変形の全過程でひずみや応力が発生しない。そのため、形態を拘束しなければ、自重などの力で変形してしまう。人力での建ち上げ後に形態を安定させるためには、架構端部に位置する面材を固定しなくてはならない^{註2)}。

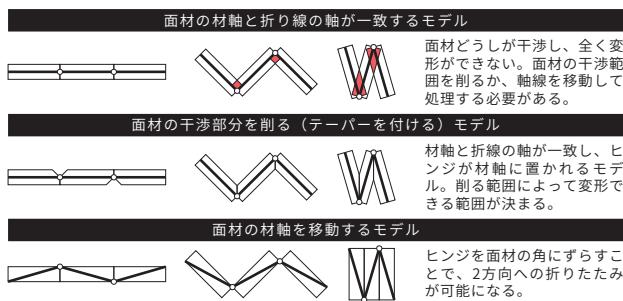


図5 面材の厚さの処理方法の分類

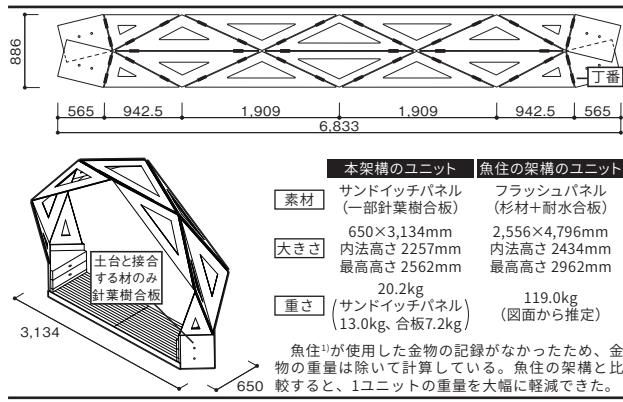


図6 ユニットの概要

3. 「水上公園のパビリオン」について

3-1 架構形状の決定

本架構は、剛体折りの基本パターンであるヨシムラ折りを応用している。ヨシムラ折りは、薄肉の円筒に上下方向からの荷重をかけた時に生じる三角形が連続した変形構造で、幾何学的に二方向への折り畳みが可能であるため、展開構造の架構をつくることができる。また、元の円筒に対して横方向からの荷重に強いことが知られており、円筒が伸びる方向に対しても、ヨシムラ折りを用いて設計したユニットを連続させていくことで、荷重への抵抗力を増していく。以上のことから、ヨシムラ折りは構造・構法の両観点から有用性があると考えられる。本架構では、図6のような展開可能なアーチ状のユニットを7組連続させ、内部の広さを確保しながら、水平荷重への抵抗力を持たせた。

ひとつのユニットは人力で形態をコントロールできる大きさ・重さで、移動式クレーンや補助パーツを使用せず少ない人数で施工可能である。

架構の面材には、上方になるにつれ大きく穴を開けている。これにより、架構の軽量化、風荷重の軽減、採光、周辺への視界の確保を行った。ユニットの荷重の2.8kg、サンディッシュパネルの17.7%を削減している。

3-2 架構の材料の選定

2章で述べたように、面材に使用する材料にはある程度の厚さと強度、軽さが求められる。そこで、15mm厚の高密発泡スチロールを2.5mm厚のラワンベニヤで挟んで圧着したサンディッシュパネルを用いた。芯材を高密スチロールにすることで軽さを担保し、材全体を厚くすることで撓みを防いでいる。また、芯材が発泡性の材料であるため断熱性を有し、空間の内部としての仕上げも兼ね得る材料であるので、仮設建築物への応用可能性があると考えられる。薄いベニヤと発泡スチロールから成るので、加工も容易である。

3-3 面材間の接合方法

面材間の接合には、架構の重量を負担でき、安定した回転運動が可能な丁番を使用した。本架構の面材への丁番の取り付けは、面材と丁番の一体的で強力な接合と美観を優先するため、面材を折り上げた際の干渉部分を削るモデルを採用した。サンディッシュパネルの高密発泡スチロール部分を溶かし、ベニヤで製作したパーツで丁番を挟んだものを差し込んで、面材の外側から全ての材に共通する位置に空けた穴を通してボルトで締め固めることで、丁番をサンディッシュパネルの材軸に固定し、引き抜けを防止した(図7)。

架構全体を軽量化したため、丁番や丁番を固定する

ボルト等も安定して取り付けられる範囲でなるべく小さくした。各辺には丁番を2つ（面材間を折り線として扱うために必要最低限の個数）取り付けている。

面材の材軸に丁番が配置した場合、面材が折り重なる方向への折り畳みが不可能となる。平坦に展開した状態で運搬した後、立体的な状態に折り上げた。

3-4 架構の形態の拘束方法

ユニット毎に建ち上げ、地面に接する面材を基礎へ緊結して形態を拘束する仕組みである。基礎には三角形平面に切断した集成材ブロックを用いて、架構の形状に対応した。架構を折り上げた時に、地面に接する面材を集成材ブロックに押し当てることで一旦自立させ、面材と集成材ブロックの共通の位置に空けた穴にボルトを通し、ナットで両者を締め固める（図8）。ボルトを用いるため材が痛まず繰り返し建設可能である。

4. 試行建設

4-1 試行建設の概要

本架構の施工性と安全性を検証するために試行建設を実施した。あらかじめ製作した部材を運搬し、福岡市天神の水上公園にて組み立て・設置を行った（図9）。

4-2 事前の製作

現場での建設の前に、工場で部材の加工と接合部の取り付けを行った。サンディッチパネルはCNC木材加工機³⁾を用いて加工し、製作時間を大幅に短縮した。

4-3 現場での建設

建設の様子を図11に示す。この工程に作業員4名を動員した。建設は重機や特殊な工具を使用せず、人力で行った。1つのユニットは最低3人で組み立てることができた（魚住の架構は最大10人動員した）。設置期間中の台風の影響で一度解体した後、再度建設した際は、ユニットをふたつ合わせたままで立ち上げた。その際は作業員5名を動員した。

4-4 結果・考察

試行建設は支障なく完了した。大部分の部材をプレファブ化することで、現場での工期を短縮することができた。ひとつのユニットは20.2kg（金物を除く）で、人力で容易に折り上げられ、上部架構と基礎の接合もスムーズに行うことができた。12日間の設置期間中面材や接合部に破損は発生しなかった。

大型バンで運搬可能なサイズにひとつのユニットを分解して現場に持ち込んだため、ユニットの作成に時間要した。本架構では、面材間の接合を材軸と折線の軸を一致させ干渉部分を削る方法で行ったが、折り線の軸移動させるモデルで設計することで施工性と可搬性を向上できると考えられる。その際は面材と丁番

の一体的な接合に留意する必要がある。また、膜材の取り付けを上部架構の立ち上げ後に行ったため、作業が難しく時間を要した。建設の手順や膜材部分の設計に改善の余地がある。サンディッチパネルはベニヤと高密発泡スチロールを圧着しているため、再利用が難しい。断熱性を必要としない場合、紙製のハニカムパネルなど再利用可能で軽量な素材の使用が望ましい。

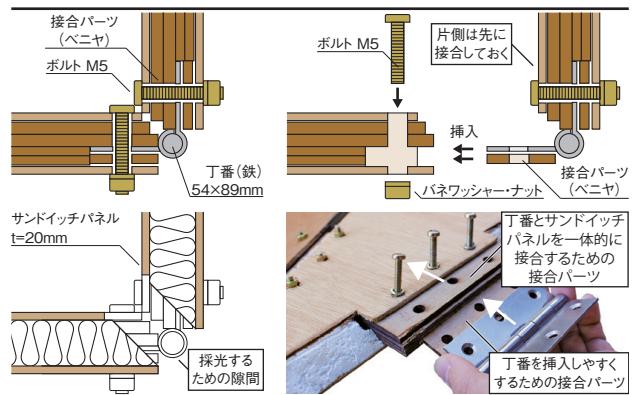


図7 面材間の接合部



図8 基礎と上部架構の連結部

面材の切り出し(CNC)	面材のテーパーカット	バリ取り・やすりかけ	接合部の取り付け	基礎・膜材の切り出し	基礎の組み立て	ユニットの組み立て(①)	立ち上げ・移動(②・③)	基礎との繋結(④)	ユニット間の接合(⑤)	膜材の取り付け(⑥)	床材の取り付け
工場での事前製作						現場での建設					

図9 試行建設の工程



図10 現場での建設の様子

5. 加力試験

5-1 試験概要

本研究では、以下の2つの構造試験を実施した。

①本架構の中央部からの鉛直加力試験

本架構で起りうる破損や倒壊の原因のひとつとして、架構中央部の面材に人間がぶら下がった場合が想定される。架構全体の剛性や壊れ方を見るために、本架構の7連ユニットのうち1ユニットを組み立て、梁中央部から鉛直下方向に加力した(図11)。加力はヒッパラーを用いて段階的に行い、反力はワイヤーとロードセル(荷重変換器)を介して反力床から取った。変位の数値は、架構中央部の材を接合している丁番に対して、床面からレーザー測定機を用いて計測した。

②サンディッチパネルの曲げ強度試験

サンディッチパネルの曲げ強度を得るために、三点曲げ試験を実施した(図12)。繊維方向がそれぞれ長辺、短辺となる試験体を各5つ試験した。

5-2 結果・考察

① 実施した3回の試験のうち全試験で、架構全体が外側に膨らむ変形を経た後、梁中央部の面材に開いた穴の端部と中央部(曲げモーメントが最大となる箇所)が破壊した(図13)。全ての試験で、音を立てながら面材が千切れるような壊れ方となった。破壊時の強度は平均的な人間1人の重量を下回った。面材の強度を上げる、または面材に開けた穴を縮小することにより架構全体の強度を向上できる。

② 試験結果を図15に示す。長辺方向が繊維方向の試験体の方が曲げ強度がやや大きかった。最大強度を迎えたとき、サンディッチパネルに目視可能な変化は見られなかった。木材は脆的に壊れる性質を持つが、高密スチロールが緩衝材となったと考えられる。曲げ試験機で可能な範囲(100mm)で最大限変形させたが、破壊には至らなかった。

本研究で用いたサンディッチパネルの対比重曲げ強度は、一般的な構造用合板を上回った(図16)。軽さが必要な建築物には有用であると考えられる。

6. まとめ

本架構の設計・施工を通して、軽量サンディッチパネルを用いた剛体折り展開構造物の一設計手法を示した。試行建設の結果、架構を軽量化したことでの移動式クレーンや補助パーツなどを使わない少人数での施工の可能性や接合部にかかる荷重の軽減方法を示せたが、分解して運搬したひとつのユニットを接合するのに時間を要したため、取り付けが容易な接合部や接合部を外さずに折り畳める機構の開発などが必要である。

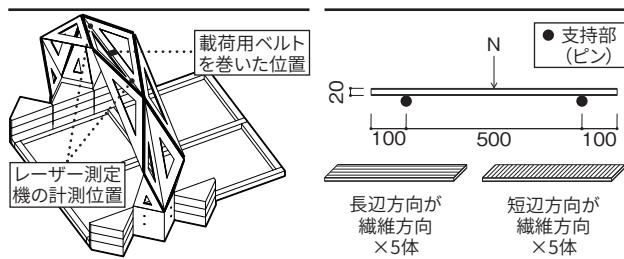


図11 架構中央の鉛直加力試験

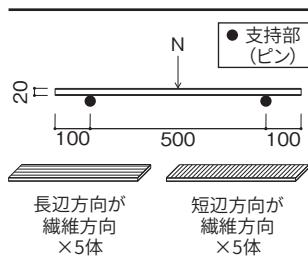


図12 曲げ強度試験概要

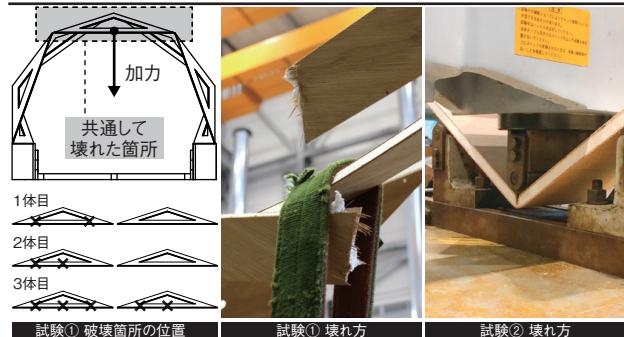


図13 破壊箇所の詳細

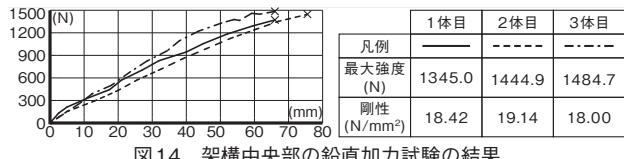


図14 架構中央部の鉛直加力試験の結果

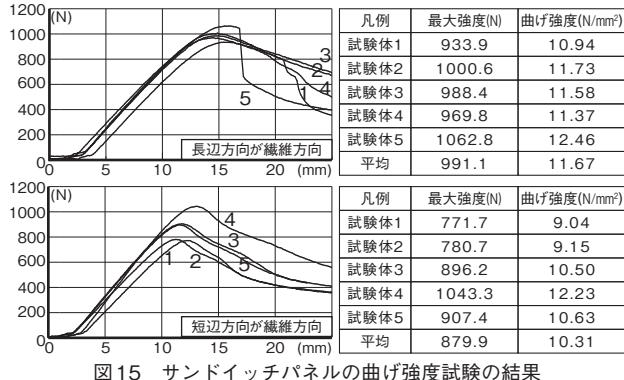


図15 サンディッチパネルの曲げ強度試験の結果

	曲げ強度(N/mm²)	比重	対比重強度(N/mm²)
サンディッチパネル (長辺方向が繊維方向)	11.67	0.187	62.41
サンディッチパネル (短辺方向が繊維方向)	10.31	0.187	55.13
ラワン構造用合板 (長辺方向が繊維方向)	24.0	0.60	40
ラワン構造用合板 (短辺方向が繊維方向)	20.0	0.60	33.33

*ラワン構造用合板はA-B-B-B等級(最高等級)、ラワン構造用合板の曲げ強度の数値は註4による。

図16 サンディッチパネルと構造用合板の比較

構造試験では、本架構のぶら下がりに対する安全性と壊れ方、サンディッチパネルの曲げ強度、加力する向きによっての壊れ方の違いを確認できた。

【註釈】

註1) 実際の折紙は変形過程において、微妙な伸び縮みや曲げを起こすが、剛体折りはそのような材質に依存した変形を無視するモデルである。

註2) ヨシムラ折りのような三角形メッシュで構築された剛体折りモデルは、3点でピン固定すると変形自由度が拘束されて静定な安定構造となる。固定された3点の位置を変更することで、開閉の動作がコントロールできる。

註3) CNC木材加工機「shopbot」を利用して、三六板から切り出しを行った。

註4) 中層・大規模木造建築物への合板利用マニュアル：日本合板工業組合連合会、18.0以上21.0未満の厚さの材

【参考文献】

1) 魚住英司；剛体折りの可搬建築物への適用可能性の研究－木質パネルを用いた仮設シェルターの事例を通して－、2013

2) 折紙の数理とその応用：野島武敏、荻原一郎編(共立出版、2012)