平面から曲面に変形可能なレシプロカル・フレーム構造物の設計と施工法について

－木質仮設建築物「木羽」を事例として－

白石　尚也

1.　はじめに

1.1　研究の目的

レシプロカル・フレーム(Reciprocal Frame[注1)], 以下、RFとする)とは構成部材の相互依存により成立する構造システムである。古くから屋根架構などに利用されてきたが、三次元に接続する梁の角度や組み方を数値化しにくく、設計段階での正確な形状の把握が困難なため、現代の構法の導入とともに構造体として利用されることは減少した。一方でコンピューテーショナルデザインツールの普及により、RFは再び注目されるようになったが、部分的な利用や単純な形態の架構にとどまり、より自由な形態を実現するための設計や施工法の提案は少ない。本稿ではより自由な曲面形態のRFを実現化するため、部材の弾性変形を利用することで平面から曲面に変形可能なRFの設計及び施工法を提案する。事例として筆者らが製作した木質仮設構造物「木羽」(以下、本架構とする)を挙げ(図1)、実現化の過程でディテールや施工性を検証し、その課題点を明らかにすることを目的とする。

2. 調査研究

2.1 RFの幾何学特性

RFは梁材が中央に多角形を作るように閉じて接続し、互いに支え合うことで成り立つ構造システムである。RFは短小部材の組み合わせで空間を閉じることができるが、梁の接合角度の把握が難しく、仕口に複雑な加工が必要となる場合が多い。それに加えて、三次元的な梁の組み方も難しく、設計される構造体は単純な幾何学形態にとどまっている。また、立体的な構造にするためには、架構全体で閉じた構造にする必要があり、開口部の確保が困難である。[2)]

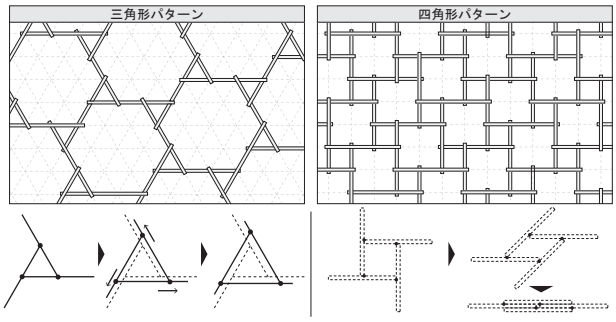

図2.　三角形・四角形パターンのMRFとSRFの変形

図1.　変形前(左)と変形後(右)の仮設構造物「木羽」

2.2 RFの変形可能性

変形可能なRFが実現することで、以下のようなRFデザインの発展の可能性が挙げられる。①プレユニット化による現場組立・撤去などの施工の簡易化。②より自由な形態の実現。RFの変形可能性については、鳥巣による先行研究[3)]がある。一般的にRFで用いられることの多い三角形のSRF[注2)]と四角形のSRFを拡張して構成された梁組について述べられている(図2)。ここでは節点の回転や滑動によるRFの変形可能性が示されているが、具体的な設計手法や施工法について述べられておらず、1/1スケールでの構造体の実現化には至っていない。また、本稿で提案する手法では部材の弾性変形を利用することで、平面の組立から立体的な形態をつくり出すことができるため、三次元状に梁を組む複雑な施工を回避できる可能性がある。

3.　手法：測地線を用いた変形可能なRFグリッド

本稿では平面から曲面へ変形可能なRFの設計及び施工法を提案する。変形可能な構造体に関する既往研究として、測地線グリッドを利用したStefan Pillweinらによる Elastic Geodesic Grids(以下、EGGとする)が挙げられる。[4)] ここでは、設計者によって規定された平面と曲面(以下、設計曲面)に対して、可逆的に変形可能な測地線グリッドを配置する手法が提案されており、構造体の端点を引っ張ることで節点が滑動し、平面から曲面に変形する(図3)。グリッドを構成する全ての部材が2軸のいずれかに平行な場

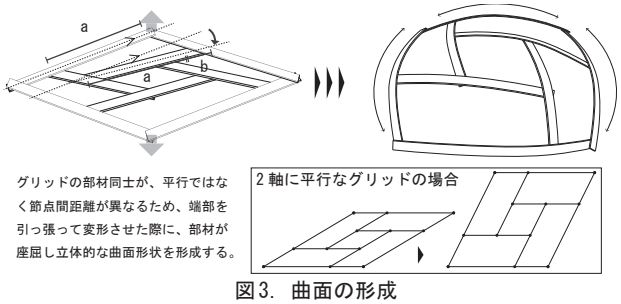

図3.　曲面の形成

合、それぞれの部材長さと節点の位置関係は一定に保たれ、変形時の部材と節点は常に同一平面上に存在する。EGG ではグリッドを構成する部材が 2 軸に平行ではなく、部材長さと節点の位置関係がそれぞれで異なるため、変形に応じて部材が座屈し立体的な曲面形態を形成する。このとき変形前後では、UV 座標系で節点座標に変位が生じている。本稿ではこれを応用し、変形可能な RF を形成する。EGG と同様の手法で得られた測地線グリッドを各節点で分割し、一定のパターンで部材を間引くことで RF グリッドを構成する（図 4)。以上のことから、本稿で提案する RF を実現するためには①曲がりやすさと強度を両立した部材②変形時の節点の変位を許容する接合部の設計が必要となる。

4. 設計

4.1 架構概要

筆者らは手法の実現化の過程でのディテールの検討や課題点の把握のため、木質仮設構造物「木羽」を設計した。本架構は主架構と周縁部材から構成され、脚部の固定板を介して土台に接合する。設計曲面は人が入れる程度の高さ有し、立体的な RF では困難となる大きな間口を確保するため、二方向に片持ちとなる形態とした。本架構の部材にはラワン合板を用い、部材加工は主に 3 軸の CNC ルーター[注3)] を使用した。

4.2 主架構と周縁部材

主架構は厚さ 4㎜ のラワン合板で製作された 10 個のユニットと 4 つの梁材を組み合わせることで構成される。閉じた四角形の SRF ユニットと 3 つの梁材で構成される開いたユニットがあり、開いたユニットは周縁部材に接続することで端部が拘束され閉じた梁組となる。梁材寸法は長さ約 378㎜ 〜 1588㎜、幅 120㎜ で、全ての材で長さが異なる。また、部材の曲がりやすさと強度を両立させるため、薄板二層の重ね梁とし、梁材の両端を接続する梁材に挟み込むことで、RF 特有の梁せいによる材軸のずれを抑制し、正負の曲率変化を再現可能なディテールとした。周縁部材は異なる厚さの幅 120㎜ の合板を 3 枚継ぎ、二層に重ねることで一辺の部材とした。土台に接合される架構脚部の 2 枚を厚さ 9㎜、建ち上げた後に片持ちとなる上端・中央の 4 枚を厚さ 5.5㎜ とした。

4.3 滑動可能な接合部

本稿で提案する手法では周縁部材上を除くすべての節点において、平面から曲面への変形前後で変位が生じる。本架構では節点の変位を実現するため、ルーズホール[注3)] と軸材を用いて各部材軸方向に滑動可能な節点接合部を設計した（図7)。滑動距離は対応する節

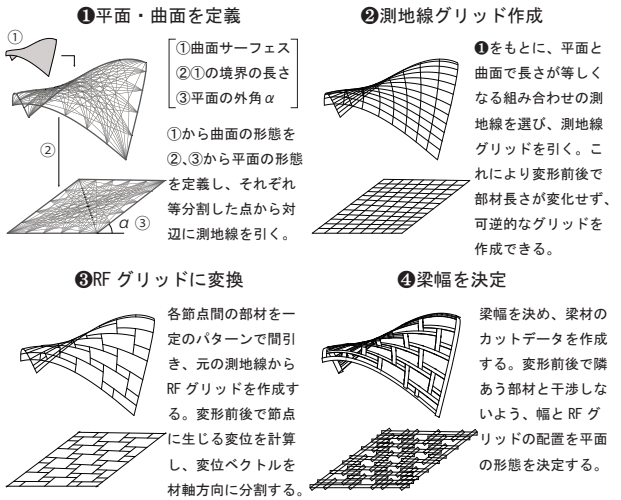

図4. 変形可能な RF グリッドの作成

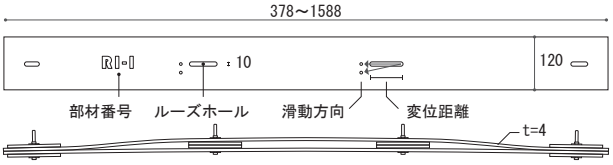

図5. 主架構梁材

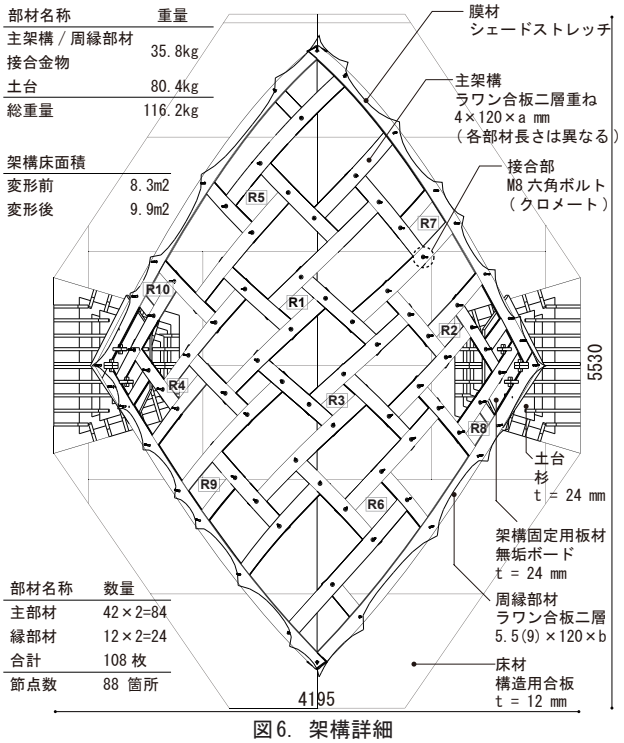

図6. 架構詳細

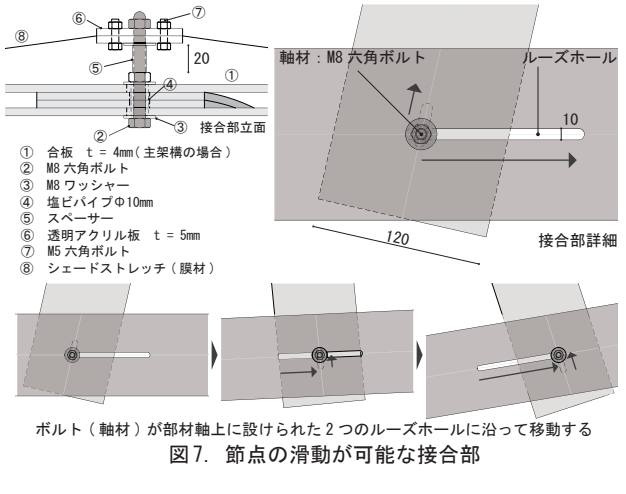

図7. 節点の滑動が可能な接合部

点の平面と曲面でのUV座標を比較し、その変位ベクトルを交差する2つの材軸方向に分割することで算出した。それぞれの節点で滑動距離が異なるため、CNCルーターを用いて梁材に直接ルーズホールを切削した。軸材はM8の六角ボルトとし、変形中のルーズホールの破壊を防ぐため、直径10mmの塩ビパイプに通した。変形時に梁材間に生じる摩擦力を軽減するため、平面で組む際はナットを緩めておき、滑動後に締め付けることで節点位置を固定することができる。

5. 試行建設

5.1 試行建設概要

設計した本架構の検証と課題点を把握するため、1/1スケールでの試行建設を行った。現場建方は作業員10名程度を動員し、九州大学伊都地区のイースト1号館1階及び、福岡県宗像市のひのさと48で行った。

5.2現場建方

現場建方は特殊な工具や重機を使用することなく全て人力で行った。架構形状を安定させるため、脚部となる下端6点の節点部のボルトをあらかじめ変形後の節点位置に穴を開けた固定板に緊結し、その固定板を土台に接合することで、架構を安定させた。建方の手順を図9に示す。

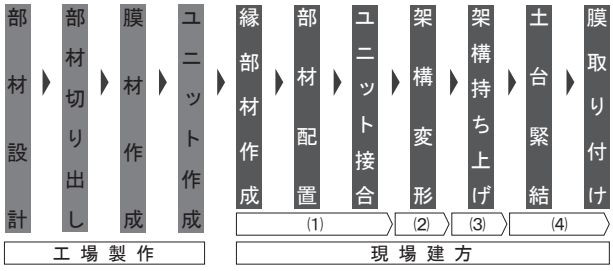

図8. 試行建設概要

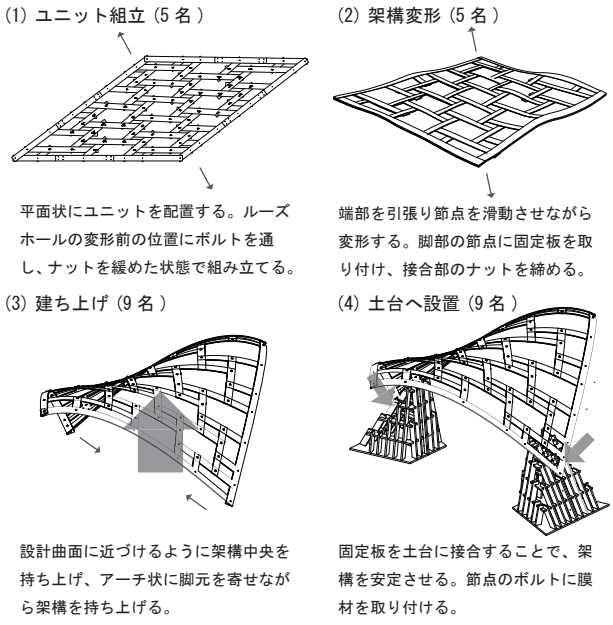

図9. 現場建方順序

5.3 結果

平面の組立には約40分、架構の変形・建ち上げには約50分を要した。展開前は各部材に曲げがかかることなく、平面状に梁材を組むことができた。また、架構全体の節点を作業員で満遍なく持ち上げ、架構端部を引張ることで5名の作業員で人力を超える力を加えることなく、架構を展開させることができたが、それと同時に設計曲面が形成されることはなく、展開後の架構は平坦で、特に周縁部材付近に局所的な湾曲がみられた。展開時の開き角度は固定板にあらかじめ開けられた穴をもとに容易に決定することができた。端部の引張のみで変形後の理想位置まで全ての節点の滑動が完了することはなかったが、架構を持ち上げた状態での滑動やボルト締めが困難なため、平坦な状態で節点の位置を固定し、建ち上げを行った。平面状に架構を組み立てた後に持ち上げることで、立体的な曲面を形成することができたため、三次元状に梁材を組み上げる複雑な作業は回避できたが、持ち上げる際にたわみが生じ、建ち上げに想定以上の人員を要した。試行建設を通して部材や接合部の大きな破壊は見られず、建ち上げ後7日間架構を屋外に設置したが、形態が大きく崩れることなく安定していた。

5.4 考察

展開と同時に設計曲面が形成されなかったことから、変形によって部材に導入される曲げよりも架構の自重によるスラストが大きいことが推察できる。架構の展開と同時に設計曲面へ変形させるには、より軽量で曲がりやすい材料の選定や吊り上げ、支保工を利用した施工が重要である。また、展開時に節点の滑動が

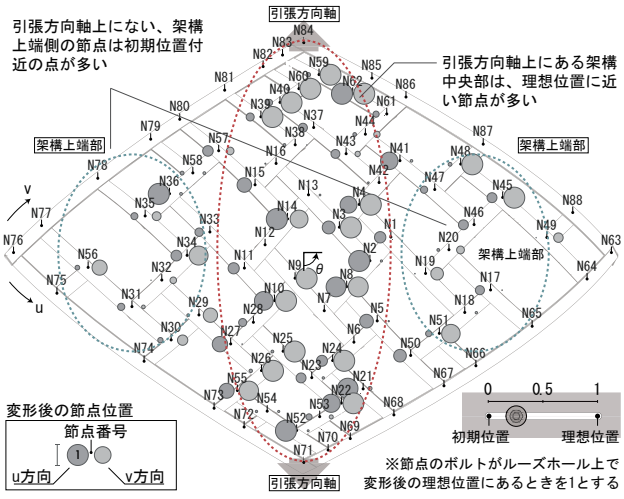

図10. 変形後のルーズホール上の各節点位置

計測箇所　節点 (N1～N62) … 62箇所 / ルーズホール … 124箇所

	節点 No.	U	V	UV 平均
引張方向軸	N1～16, N21～28, N37～44 N52～55, N59～62	0.46	0.44	0.45
架構上端	N17～20, N45～51	0.27	0.40	0.33
	N29～36, N56～58	0.26	0.39	0.33

十分に見られなかったため、展開後の節点が理想位置に対してルーズホール上のどの位置にあるかを計測した（図 10)。展開後に理想位置にあったのは 22 箇所、初期位置にあったものは 20 箇所であった。また、展開時の引張方向軸上に位置する節点と軸上にない架構上端の節点位置を比較すると、軸上は平均で 0.45、架構上端は平均で 0.33 であった。数値の差は約 0.12 と小さいが架構上端部の節点には展開時の引張力がうまく伝達されていないことが推測できる。これは展開時に架構形状の平坦化し、部材に曲げやねじれが生じることでルーズホールとの間に大きな摩擦力が生じたためだと考えられる。改善するには、梁材間に生じる摩擦力を低減する接合システムの開発し、変位が不十分な節点については手作業で滑動を行う必要がある。

5.5 節点座標測定試験

設計曲面の再現性を確認するため、本架構の節点座標の計測を行った。各節点の軸材のボルトに穴を開けた直径 40mm の測定球を差込み、その中心点を 3D レーザースキャニング機器[注 4)]で測定した。節点座標の算出方法を図 11 に示す。x-y 平面上では全体として架構中心点から外側に向かって広がるように誤差が生じていた。z 座標では、最小誤差は N66 の +0.1mm、正の最大誤差は N10 の +71.7mm、負の最大誤差は N56 で -180.6mm であった。結果から x-y 座標よりも z 座標の誤差の値が大きく、本架構の曲面形状に影響を与えていると考えられるため、z 座標をもとに設計曲面との比較を行った。正負それぞれの平均値以上の誤差計測した節点を抽出したところ（図 12)、正の誤差は架構中央部に分布しており、負の誤差は N63、N76 を除く架構上端部に分布していることが確認できた。これより設計曲面と本架構では曲面の凹凸が逆転していることが明らかとなった。これは、節点が理想位置になく十分に曲げを導入できなかったことと、本来曲率を持った設計曲面上の脚部 6 つの節点を固定板によって、同一平面上に拘束したことが原因であると考えられる。曲面形状を保つには周縁部節点を適切な座標で拘束することも重要であると考えられる。

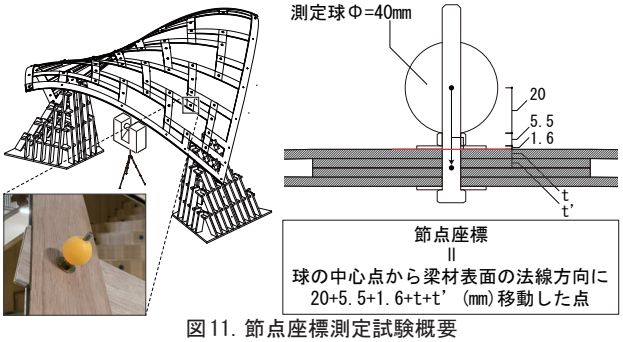

図 11. 節点座標測定試験概要

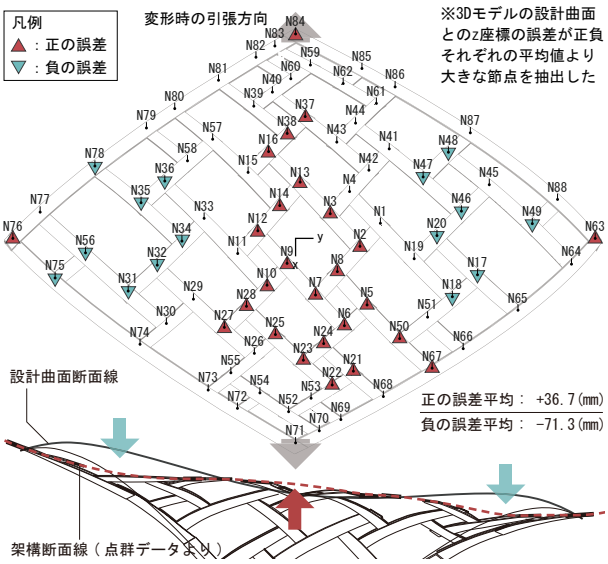

図 12. 変形後のルーズホール上の各節点位置

6. 結び

本稿では部材の弾性変形を利用して平面から曲面に変形可能な RF の設計手法及び施工法を提案した。この手法により、部材を弾性変形させることで立体的な曲面形状を持つ RF を実現することができた。また、実現化の過程で以下の課題点が明らかとなった。①架構端部を引っ張り、平面から展開することはできるが、スラストにより平坦化するため、人力のみで展開と同時に設計曲面を形成するのは困難である。②ルーズホールと軸材のボルトにより、節点の滑動が可能な接合部を実現することができたが、平坦化やそれに伴う摩擦力により全ての節点を理想位置で固定することは難しい。③本架構に見られた凹凸の反転は一例に過ぎないが、設計曲面を再現するには周縁部の拘束や節点固定を適切な位置で行う必要がある。今後の展望として、平面の状態から重機で吊り上げながら、あるいは支保工で徐々に持ち上げながら施工を行うことで、設計曲面への変形が容易となり、より大きな屋根架構や仮設建築への応用可能性が見込める。また、節点接合部に変形時に生じる摩擦力を低減し、滑動後に容易に固定できる接合システムの開発が必要である。

【注釈】

注 1) それまで名前が付けられていなかった構造的なパラダイムを記述するためにイギ リスのデザイナーである Graham Brown によって名付けられた

注 2)「Single-unit RF」の略称。RF を形態的特性から類型化した Danz らによって名付けられた。

注 2) 本稿では XYZ 軸がそれぞれ 1200mm, 2400mm, 150mm の加工範囲を持つ 3 軸のフライス加工が可能な「ShopBot」を用いた。

注 3) ボルトの接合位置を調整するための遊びとして、楕円形状に開けられた孔のこと

注 4) 節点座標測定試験には「Z+F Imager 5016」を使用した。

【参考文献】

1)Calder Danz:Reciprocal Frames, Nexorades and Lamellae:An investigation into mutually supporting structural forms,University of Wasinton,2014

2) 熊谷和：周縁部を拘束したマルチユニット・レシプロカル ・フレームのデザイン手法

3) 鳥巣茂樹：折畳み可能なレシプロカル梁組架構, 2019

4)Stefan Pillwein,Kurt Leimer,Michael Birsak,Przemyslaw Musialski:On Elastic Geodesic Grids and Their Planar to Spatial Deployment,2020