田代 拓也

1. はじめに

1-1. 研究の背景と目的

レシプロカル構造(Reciprocal Frame,以下RFとす る)はGraham Brown によって名付けられた、梁が相 互支持して三次元で構成される構造である。軽い材な らば人力で組上げることも可能なため施工性は高いと される。しかし、その応用例は少ない。理由として、 三次元で構成される梁の角度や組み方を正確に数値化 しにくい点、施工が困難で誤差が生じやすい点が挙 げられる。また、RFを1単位として構成されるマルチ ユニットRF(以下MRFとする)の端部は柱や梁に接続 しなければならず、一般的には単純な平面幾何学に留 まっていることが多い。本研究では、筆者作成の形状 決定(Form-Finding^{注1)})・構造解析シミュレーション プログラムを通し、アーチ状端部を持つMRFの形状決 定する手法と課題を明らかにすることを目的とする。

1-2. 既往研究

ドーム状MRFの接合部剛性を考慮した構造形態につ いて、冨永らが構造解析による形態創生の研究¹⁾があ る。しかし、端部の形状を考慮したモデル化や解析に は至っていない。また、メッシュパターンを用いた MRFの自由形状の決定と施工過程について、Youssef ANASTASらが半球状MRF架構物を対象とした研究²⁾では、 端部が2次元幾何学平面に収まるMRFにしか言及して おらず、端部が3次元的なMRFのモデル化や構造解析 には至っていない。

1-3. 研究方法

本研究では、建築デザインに使われるソフトウェア RhinocerosとGrasshopper^(注2)をプラットフォームと して、端部の形状が3次元的に構成されるMRFを扱い、 中でもアーチ状端部を持つMRFの3Dモデルを形成する。

RF・MRFの概要(2章)、ポリコンメッシュを用いたRF・MRF の幾何学的形成過程(3章)を説明した後、プログラ ミングプラグインGrasshopperを用いたMRFの3Dモ



デル化を行う(4章)。次に、筆者らにより設計され た木造MRF架構物「木海月」(以下本架構)を例として、 Kangaroo2^(注3)を用いたアーチ状端部を持つMRFのFF シミュレーション(5章)を説明する。その後FFシミュ レーションによって得られた3Dモデルを構造解析プ ラグインKaramba^(注4)を通して解析(6章)し、実施施 工した本架構とコンピューター上で得られた結果を比 較することで、提案するツールの有効性を考察する(7 章)。本研究から得られた知見により、実際にMRFの 建築物を設計する際の応用を検討する(8章)。

2. RF・MRFの概要

2-1. RFの概要

RFは部材の端部が隣り合う部材に支持され、全て の部材が圧縮力のみで相互支持して成立する構造であ る。最小部材数は3本で、n本の部材でn角形の平面 を持ち、部材の重さによる圧縮力が円状に発生する。

2-2. MRFの概要

MRFはRFを組み合わせることでできた相互依存の構造で、その中でも本稿は平面状に拡張していくものと、 ヴォールト状に拡張していくものの2種類を扱う。平 面状に拡張するMRFは、RFの部材を支持していない端 部に、新たに部材を足していくことで平面状にRFは 拡張していき、平面形状が多角形のMRFとなる。ヴォー ルト状に拡張するMRFは、接線方向に最小2本の部材、 それに嚙み合わせるようにさらに2本の部材を差し込むことでアーチ状に拡張していき、ヴォールト状の MRFとなる(図2)。



3. ポリゴンメッシュを用いたRF・MRFの幾何学的形成過程

3-1. ポリゴンメッシュの定義

* リコンメッシュ(非構造格子)とは、幾何学モデリング の多面体オブジェクトの形状を定義する頂点・辺・面 の集合のことである(図3)。ポリコンメッシュで作成された オブジェクトは頂点・辺・面の異なる要素が格納され ており、頂点は座標やベクトルなどの位置、辺は2つ の頂点間の接続、面は閉じられた辺の集合を表し、特 に3Dモデリングソフト上では、面は三角形と四角形 で構成されていることが多い。

3-2. 三角形面からRF への移行

XY 平面上にある三角形の各辺の中点を支点として、 各辺を角度 α (0< α <180°)回転させた後、線同士が 重なるまで各線を延長する。次に同じ支点で、Z軸方 向に部材断面に応じた角度 β (0< β <90°)回転させ、 部材同士の接する箇所で線(以下接続線とする)を結 ぶと、3部材で構成される RFを形成することができる。

3-3. ポリゴンメッシュからMRF への移行

三角形面で行った操作を球面から求めたポリゴンメッシュでも行う(図3)。回転する支点の極座標を(r, θ , ϕ)、i番目の面を M_i とし、 M_i 各辺を面内で角度 α 回転させる。角度 β はポリゴンメッシュの曲率によって各面ごとに決定するので、角度 β_i となる。同様に、接続線の長さもポリゴンメッシュの曲率によって変化する。

4. Grasshopperを用いたMRFの3Dモデル化

4-1. Reciprocal コンポーネント

Reciprocal コンポーネント^(注5)はDaniel Pickerに よって開発された、ポリゴンメッシュからMRFに移行させる 演算処理を行い、3Dモデル化するコンポーネントで ある(図4)。ポリゴンメッシュ・角度・辺の縮尺を入力すると、 3章で示した過程をGrasshopper内で実装することが できる。また、Line | Line コンポーネントを併用す ることで、依存しあう部材の軸線上にある最も距離の 近い2点を結び、接続線を作成することができる。

4-2. MRFの3Dモデル作成過程

Reciprocal コンポーネントを用いてMRFの3Dモデル を作成する。MRFの3Dモデル作成過程を以下に示す(図 5)。3Dモデル化のシミュレーションプログラムを図 14のように組み、ポリゴンメッシュをMRFに移行させる演算 処理を行う。入力するポリゴンメッシュはRhinocerosで任 意の曲面として入力し、今回は3次元的に展開する自 由曲面を例として扱う。MRFの曲率は入力されるポリコ *ンメッシュの曲率に依存し、部材長さは各面の辺の長さに 対応する。MRFのサーフェスモデルは、得られた線モ デルに断面形状を入力することで得られる。



5. アーチ状端部を持つMRFの3Dモデル作成過程

5-1. 「木海月」架構

本架構は、筆者らによって設計されたアーチ状端部 を持つMRFの木造仮設構造物である(図6)。本架構は MRFの端部をアーチ状MRFで固定しており、3次元的に 成立するMRFとなっている。設計には主に模型で形態 を検討し、Grasshopperで3Dモデル化を行った。今回 は本架構を取り扱うことで、アーチ状端部を持つMRF の3Dモデル化の手法を提案する。

5-2. 本架構のFF シミュレーション

FFシミュレーションによって形状を近似させてい くために、本架構を基にした前提条件を設定した(図 6)。アーチ状端部を持つMRFの3Dモデルは、FFシミュ レーションで基準となるポリゴンメッシュをKangaroo2を用 いて3次元的に変形させる(図7,9)。まず、ポリゴンメ ッシュの頂点を拘束することで支点とし、各面の面積に 比例した法線方向の力をかけポリゴンメッシュを変形させ る。Reciprocalコンポーネントでモデルを作成した後、 端部をアーチ状MRFに差し易くするため、最も外側に あった24本の部材を除き、4-2の工程を踏むことでアー チ状端部を持つMRFの3Dモデルが作成できる。

FFシミュレーションによって得られた部材端部の ライズ h_1 - h_7 を、1/10の本架構の模型から実測した部 材端部のライズ H_1 - H_7 に近似するために、端部座標誤 差 x が最小になるように法線方向の力の弾性率を最適 化した(図8)。部材の端部がアーチ状MRFに設けられ た穴に差し込めるように回転角 α =146° とし、部材 長さL = 950 mmになるように調整した。モデルの部材 端部のライズ h_1 - h_7 は、 h_1 =478mm, h_2 =1058mm, h_3 =1501mm, h_4 =1741mm, h_5 =1646mm, h_6 =1284mm, h_7 =760mm となった。

5-3. ARを用いたシミュレーション

Grasshopperで扱うようなパラメーター化されたモ デルをARにすることで変化の度合いを体験すること ができる。作成した3Dモデルをブラウザ型3Dモデリ ングVectary⁴⁾でAR化し、スマートフォンを通して実 際に置かれた本架構と視覚的に比較した(図10,11)。

6. Karamba を用いた構造解析

6-1. 解析条件の設定

(1)材料特性^{注6)}と荷重条件

部材は無等級のスギの板材をCNCで切削したもので、 部材数は84本、部材同士を固定するのはKPロープ^{注7)} で、断面積は4mmである(図12)。荷重は部材の質量 に重力加速度を乗じた重量のみとし、風荷重は考慮し ないものとした。また、KPロープの重量は無視する ものとした。



(2) 接合部の条件と端部の境界条件

一般的にMRFは接合部に切欠きを施すことで部材 同士を固定するが、本架構の接合部はKPロープで節 点移動がないように固定した(図13)。接合部条件は、 部材同士を並進移動しないダミー材でつなぎ、ダミー 材上端部x軸方向の回転を拘束し、y軸z軸方向は拘 東しないものとした。下端部は木材のめり込みを考慮 する必要があるが、本架構の総重量と受圧面積から耐 力的に部材を十分固いものとして考えられたので、め り込みは無視して、全ての軸で回転を拘束した。

18本の部材端部は、アーチ状MRFに部材断面積を考 慮した穴に差し込んで固定しているので、x軸方向の 回転を拘束し、y軸z軸方向はアーチ状MRFの変形を





図 15. My モーメント図と変位図

考慮して拘束しないものとした。また、周縁部である アーチ状MRFは断面積30mm×135mmの2枚の板材を鼻 栓で固定しているため、十分に硬いものであると判断 し、解析では省略した。

6-2. 構造解析結果

解析の結果(図15)、部材には各節点で圧縮による 曲げモーメントのみが発生しており、端部に向かって 荷重が伝達されていることがわかる。変位図から、最 大変位は19.25mmとなった。MRFのアーチ状端部から 中心にかけて節点変位が増加していき、中心に最も近 い部材の端点の節点変位が最大となることが分かった。

7. 考察

FF・構造解析シミュレーションにより、指定した数 値でモデル化できた変数は、MRFの部材数・ユニット の回転角 α ・部材の断面形状・部材長さであった。モ デル上の端部のライズh₁-h₇は、本架構のアーチ状端 部のライズH₁-H₇と比較して、平均して71.64mmの差が 出た。これは3Dモデル上の各面の面積に比例した法 線方向の力による部材端部の移動と、本架構アーチ状 MRFの穴に部材を差したことによる端部の移動とが近 似出来なかったためだと考えられる。ただ、構造解析 結果から圧縮による曲げモーメントのみが部材に発生 している点は、FFシミュレーションによって成形さ れた3Dモデル化の条件は正しいと考えられる。

8. 今後の展望

本研究ではアーチ状端部を持つMRFの形状を決定 する手法検討を行ったが、いくつか課題が残るもの となった。3Dモデル上で端部の移動が任意に行えず、 本架構のアーチ状MRFによる固定に近似出来なかった。 また、モデル上の節点位置の固定がされず、本架構の 節点位置とずれがあり、より正確なモデル化には至 らなかった。プログラミングによってMRFの定式化し、 端部の移動ができるMRFの3Dモデル化、荷重の種類を

ミングの考えにのっとったモデリングエディタである。

注4)Karambaは、Clemens Preisingerらによって開発された、変数を与えた3Dモデ ルを有限要素法で解析できるGrasshopperの構造解析プラグインである。

注5)Kangaroo 3)に含まれるコンポーネント。

注6) 材料特性は7) を参考にした

注7) ポリエチレンポリエステル混撚ロープ。

【参考文献】

1) 冨永大貴, ドーム状レシプロカル構造の接合部剛性を考慮した構造形態創生, 2019 2)Youssef ANASTAS, Design-to-Construction Workflow for Cell-Based Pattern "Kangaroo Physics", https://www.food4rhino.com/app/kangaroo-physics
"Vectary", https://www.vectary.com/
"Karamba", https://www.karamba3d.com/

6)Reciprocal Frameworks:Tradition und Innovation/Tradition and Innovation ; gta Verlag, 2015

7) スギ:小国町森林組合, KP ロープ:ロープ規格表(日本工業規格)

変えた解析等の検討は今後の課題にしたい。

[【]注釈】

注1) パラメーター化された3Dモデルが、設計で与えられる条件に対して、形態を変 化させながら最適な形態になっていくこと。 注2)GrasshopperはMcneel社によって開発されたRhinocerosのビジュアルプログラ

注3)Kangaroo2はDaniel Pickerによって開発された、物理学運動シミュレーション をするGrasshopperのプラグインである。