

構造部材のシュタイナー角配置に関する研究
一面内方向における力学特性と形態創生一

建築構造研究室 4 年 10 組 42 番 藤生 竜季

Keywords
バイオミメティクス 形態創生 耐震補強
シュタイナー点 Grasshopper 幾何学配置

1. 研究の背景

近年、生物の運動や機能、形態を模倣して新しいものを創り出そうとする学問分野をバイオミメティクスとし、注目されつつある。医療、機械など様々な分野で研究が行われている。建築の分野においても、シオマネキの鋏脚が左右非対称なことから非対称性が力学性能に与える影響の研究¹⁾などが行われている。シオマネキの鋏脚の研究では、図 1 に示すような左右の梁断面積の違いと左右対称な荷重に対するたわみの関係の提示後、骨組構造部材の左右非対称性が力学性能に与える影響についての検討を行い、左右対称な設計が最適設計であるとは限らないとされている。

また、自然界に存在する形態の一つにシャボン膜の極小曲面がある。これは、シャボン膜にかかる表面張力が最小になるように膜を張る性質で、隣接したシャボン膜は互いに最小になるように結合し、その結合点は数学的にシュタイナー点と呼ばれる。シュタイナー点を幾何学的に描く方法としてメルザック法がある。図 2 の与えられた 3 点 P_1, P_2, P_3 について正三角形 P_1P_2X の外接円と直線 P_3X の交点 S がシュタイナー点となり、 $P_1S+P_2S+P_3S=P_3X$ が成り立つ。シュタイナー点を結ぶ線はいずれも 120° の角度を形成する。近年では、六角格子など様々な幾何学を用いた配置の研究²⁾が進められている。そこで、 120° の角度を形成する骨組配置(以下、「シュタイナー角配置」とする)については青木らが、「シュタイナー角配置による構造部材の力学特性に関する基礎的研究」³⁾で面外方向に対する基本的な力学特性について考察した。結果として、シュタイナー角配置はハニカムグリッドと類似の性質があり、解析結果は平均区画面積や総部材長により決定することが明らかになった。しかし、面内方向に対する力学特性はまだ検討されていない。

また、図 3 に示すような RC や鉄骨のブレースによる在来型耐震補強を既存建物に使用すると、採光性、開放感そしてデザイン性を悪化させてしまうことが課題となっている。実際に大成建設、小山らの「縦格子鋼板補強の開発」⁴⁾でも耐震補強によるデザインの悪化を耐震補強がなかなか進まない原因の一つとして挙げ、この課題を解決すべく新たな耐震補強の開発に取り組んでいる。他にも、様々な幾何学配置を用いることで新たな耐震補強の可能性を模索している研究が複数存在する。このように、より採光性や開放感、デザイン性に優れかつ耐震効果も大きい耐震補強工法が求められている。

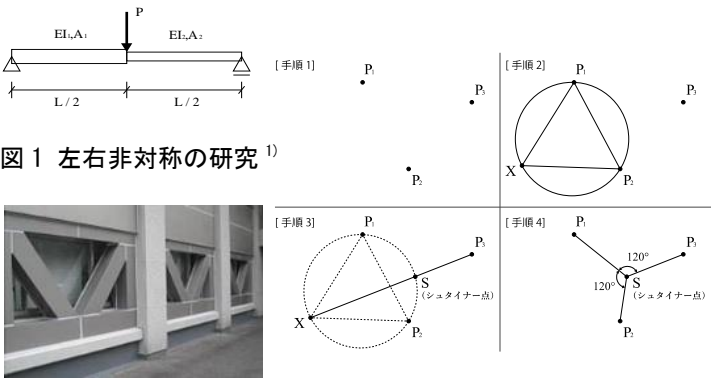


図 1 左右非対称の研究¹⁾

図 3 在来型耐震補強事例⁵⁾ 図 2 シャボン膜とシュタイナー点

2. 本研究の目的

前述の背景を踏まえ、本研究では様々な耐震補強事例との比較を通して、シュタイナー角配置の面内方向に対する力学特性を明らかにすることを目的とする。また、シュタイナー角配置創生の際の留意点を明らかにし、3 次元モデリングツール Rhinoceros 上で動作するプラグインのモデリング支援ツールである Grasshopper を用いてシュタイナー角配置創生プログラムを構築する。

3. 事例調査（既存幾何学配置耐震補強についての調査）

採光性、開放感、デザイン性等を向上させるため、様々な幾何学配置の耐震補強に関する研究^{6)~8)}がなされている。幾何学配置耐震壁・耐震補強の研究事例を表 1 に示す。また図 4,5 に研究が行われた既存幾何学配置耐震補強の一例を示す。これらの既往研究では、「形状」「荷重」、「許容変位」等をあらかじめ定め、それを達成できるように部材や部材断面を変化させ形態創生しているものがほとんどである。そのため、既存幾何学配置同士との力学的比較検討がされている既往研究は見当たらない。

表 1 幾何学配置耐震壁・耐震補強の研究事例

名前	形状	部材	研究・開発機関
はめ込み型ハニカム構造壁	正六角形	LVL (半壁補強材)	名古屋大学
UFCブロック耐震壁工法	格子+斜め格子型	UFC (超高強度繊維補強コンクリート)	戸田建設
ウェブウォール構造	斜め格子型	RC	竹中工務店
CLTエスロンブロック	蜂々型	CLT	竹中工務店
斜め格子ブレース補強 (北九州子供図書館)	斜め格子型	鋼材 (フラットバー)	構造計画研究所
鋼板補強デザインウォール	斜め格子+リブ型	鋼材 (フラットバー&度屈補強リブ)	大成建設
TGwall	斜め格子型	鋼材&強化ガラス	大成建設
TWOOD® BRACE	斜め格子	CLT&鋼板	大成建設
縦格子鋼板補強	格子型	鋼板パネル	大成建設



図 4 斜め格子型耐震補強⁹⁾

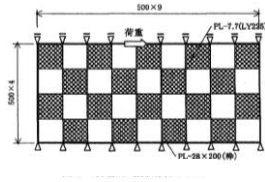


図 5 縦格子鋼板補強⁴⁾

4. 解析概要

3 章における調査結果を踏まえて、いくつかの耐震補強を汎用 CAD ソフトウェア AutoCAD、RhinoCeros で作成する。解析モデルは、中規模 RC 構造物の耐震補強を想定し、以下のように設定した。これを図 6 に示す。

- ・補強部材：材料 SN490，補強部材断面 FB:19 mm×60 mm，剛接合，同一平面内配置
- ・柱：材料 Fc21，柱断面 700mm×700mm，剛接合
- ・梁：材料 Fc21，梁断面 400mm×700mm，剛接合
- ・架構：階高 3500mm，スパン 7500mm
- ・荷重条件：荷重 500kN を節点 B に作用させる。

また、構造モデル作成プロセスを図 7 に示す。対象幾何学配置による任意の平面より、7500×3500 を切り取る。この手法にて、正六角形、斜め格子に加え、シュタイナー角配置のモデルを作成する。これらのモデルに対し、汎用解析ソフトウェア Midas iGen により数値解析を行い、平均区画面積を変数とし最大変位、最大応力度による比較検討を行う。

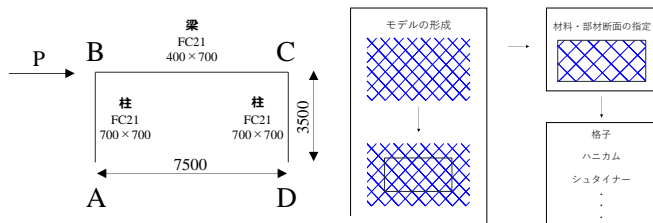


図 6 対象解析モデル

図 7 解析モデル作成プロセス

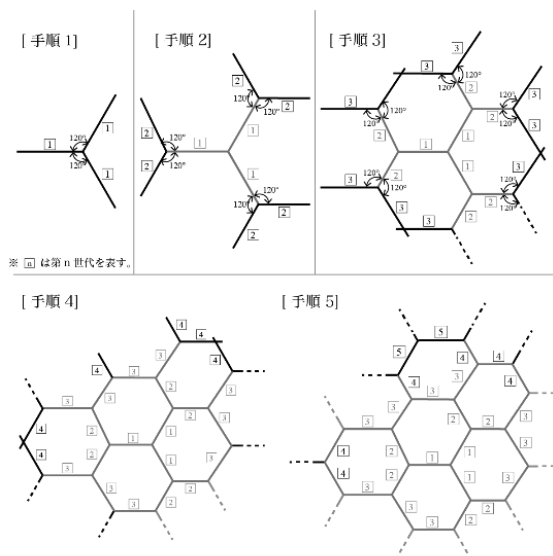


図 8 シュタイナー角配置の作図手順

5. シュタイナー角配置

5.1 区画面積変動係数の影響

シュタイナー角配置を創生する際の制約条件は、図 8 の作成手順に示すように、「部材同士が 120°で接合する」という条件のみである。そのため、制約条件を追加せずに解析モデルを作成すると、モデルにより力学特性に大きなばらつきが出てしまう可能性がある。そこで、シュタイナー角配置における六角形それぞれの区画面積のばらつきを表す区画面積変動係数を用いて、解析モデルに用いるシュタイナー角配置に制約を設ける。解析モデルとして用いる架構、7500×3500 の長方形内のすべての六角形の区画面積を求め、その面積の標準偏差を区画面積平均値で除すことで区画面積変動係数を算出する。正六角形の解析モデルに関しては、解析モデル内の六角形面積にばらつきがないことから区画面積変動係数が 0 となる。

区画面積変動係数の異なる 9 つのモデルを、4 章に従って解析し、区画面積変動係数に対する最大変位の関係を図 9 に示す。区画面積変動係数が約 0.4 (図 9 における橙色ライン) 以上になると、初期値からの水平変位 (以下、「最大変位」) のばらつきが大きくなることが確認できる。また、区画面積変動係数 0.4 以上では変位が相対的に抑えられているように見えるが、これは今回用いたモデルで偶然、非常に小さな区画面積を持つ六角形が架構の四隅に集中したことが原因であり、区画面積変動係数が大きくなると変位を抑制できるということではないと考えられる。これらのことから、本研究では、解析モデルに使用するシュタイナー角配置に区画面積変動係数が 0.4 以下という制約条件をまず設ける。

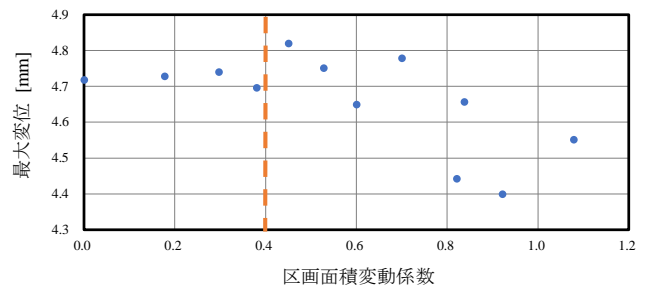


図 9 最大変位 - 区画面積変動係数

5.2 端部部材条件について

5.1 節で設定した新たな制約条件を考慮し、4 章の手順に従って解析を行った結果が図 10 の「端部条件なし」のグラフである。青木の既往研究³⁾により、シュタイナー角配置に生じる応力度や変位と平均区画面積に相関関係があることが明らかになっているためパラメーターには平均区画面積を用いている。最大変位の値に大きなばらつきはないが各最大応力度と平均区画面積の関係から、最大応力度には大きなばらつきがあることが読み取れる。これは、架構に接合する端部部材で極端に大きな応力度が生じていることが原因となっている。以上のことから、さらに端部部材にも制約条件を追加することで、最大応

力度のばらつきを抑制する。

7つの解析モデル端部部材状態と端部部材に生じる応力度を比較検討したところ、極端に大きな応力度が発生している端部部材には2つの共通点があることを確認できた。

- ・端部部材長が全体の平均部材長の1/2以下である
- ・左右端部に接合している部材が水平ではない

この2つの状態が生じないようにすることで、極端に大きな応力度が発生しないと考え、前節の区画面積変動係数に加えて、さらに2つの制約条件を端部部材に設ける。

- ・端部部材長は平均部材長の1/2以上の長さとする
- ・左右端部に接合する部材はすべて水平材とする

設定した端部部材の制約条件を考慮して解析した結果を端部部材条件なしの結果とともに図11に示す。この解析結果より、端部部材に条件を与えることで、応力度のばらつきを抑えることが出来る。

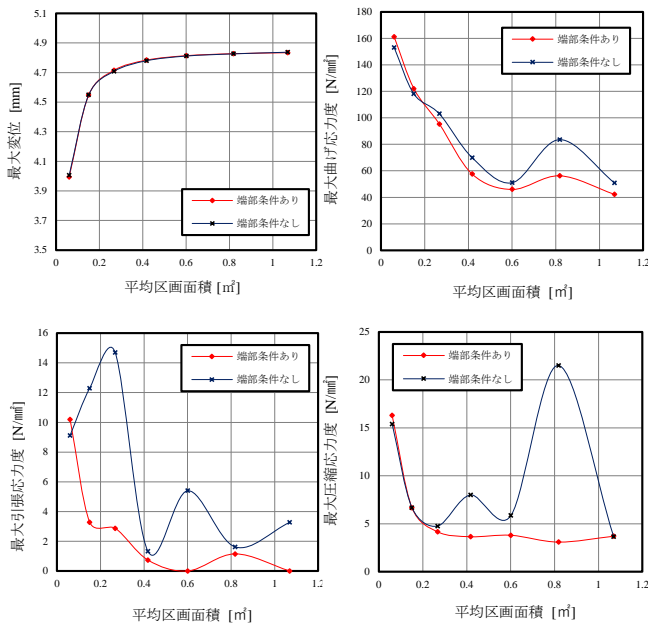


図10 シュタイナー角配置力学特性（端部条件比較）

5.3 シュタイナー角配置力学特性

図11（端部条件あり）に示すように、平均区画面積が約0m²～約0.3m²の間では、平均区画面積とともに最大変位も大きくなっていることがわかる。ただ、平均区画面積0.3m²を超えると、変位は4.8mm程度に収束していく。各最大応力度も同様の性質を示し、平均区画面積が約0.3～0.4m²のあたりで、概ね収束していくことがわかる。また、平均区画面積増加に伴い、変位は上昇するのに対し、軸力や曲げ応力度は減少していくことが図11から読み取れる。これは、シュタイナー角配置の剛性が小さく、さらに平均区画面積を変化させた際に面内剛性が大きく変化することで柱梁が負担する力が大きくなることが影響している。これらの結果より、耐震補強として効果を発揮させるためには、シュタイナー角配置の剛性を高める必要がある。

5.4 シュタイナー角配置と既存幾何学配置との比較

シュタイナー角配置と既存幾何学配置それぞれの力学特性を図12に示す。図12より、シュタイナー角配置と斜め格子の最大変位を比較すると、以下のことが分かる。

- ・斜め格子とシュタイナー角配置いずれについても、平均区画面積が増加するとそれに伴い最大変位も増加し続けるがシュタイナー角配置に関しては平均区画面積が一定値を超えると収束していく。
- ・同平均区画面積で最大変位を比較した時、2～8倍程度最大変位が異なる。

次に最大応力度で比較し、以下のことが明らかになった。

- ・平均区画面積0.3m²以下の範囲で比較すると、斜め格子は平均区画面積増加に伴い最大軸応力度が大きく、最大曲げ応力度が小さくなるが、シュタイナー角配置は反対の傾向を示す。
- ・シュタイナー角配置は斜め格子とは異なり、平均区画面積が大きくなると最大軸応力度、最大曲げ応力度ともに収束する。
- ・同平均区画面積でシュタイナー角配置の最大曲げ応力度の値は斜め格子の5～16倍程度であり、斜め格子は軸力で力に抵抗する構造であるのに対して、シュタイナー角配置は曲げにより抵抗する構造であることがわかる。

図11より正六角形とシュタイナー角配置の力学特性を比較すると、最大変位、最大応力度ともに類似した特性を示すことも明らかになった。

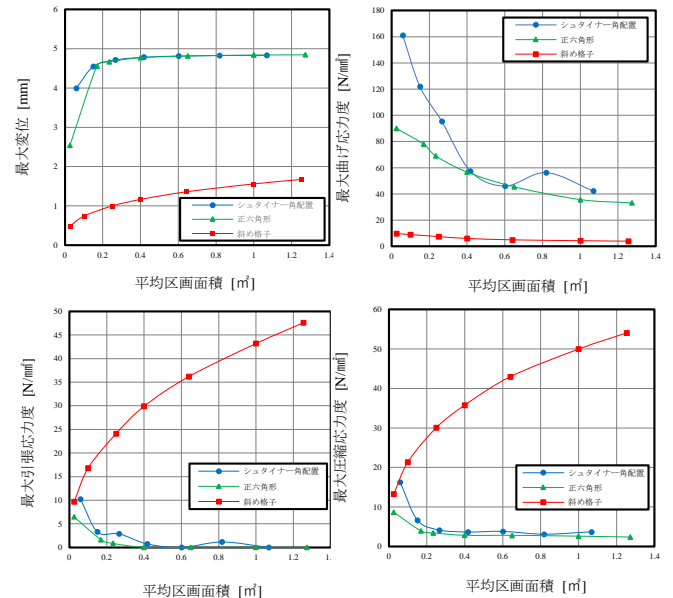


図11 シュタイナー角配置と既存幾何学配置の比較

5.5 シュタイナー角配置創生プログラム構築

シュタイナー角配置に対して特定の制約条件を設けることで、正六角形と同等の力学特性を示すことが明らかになった。しかし、解析モデルに関しては4章の創生方法でモデルをランダムに創生し、そのモデルの中から、区画面積変動係数の制約条件を満たすモデルのみを選定し、

端部部材を調整することでモデル作成をしていた。つまり、制約条件の1つである区画面積変動係数を操作し、シュタイナー角配置解析モデルを作成する手法がない状態であり、実際に設計に用いる際、条件を満たすシュタイナー角配置の創生は非常に困難である。そこで、区画面積変動係数を操作できるようなシュタイナー角配置創生方法を確立する。傾向をつかみやすくするため、部材長を最長・最短部材長を定め、均等に4分割して求めた5種類に限定し、4章で示した作図手順に従ってモデルを作成し比較検討を行う。区画面積変動係数を操作するためにまずは、「最長部材長を最短部材長で除した値（以下、「倍率」と呼ぶ。）」と「区画面積変動係数」に図12のような関係があることを明らかにした。さらに、「倍率」と「平均区画面積を最短部材長の2乗で除した値」（以下、「比例係数」と呼ぶ）に、図13の関係があることが明らかになった。

これらの性質を用いて、平均区画面積と区画面積変動係数を入力すると、その条件を満たしたシュタイナー角配置モデルが自動で作成されるプログラムをGrasshopper上でpython scriptを用いて2つのメインコンポーネントを作成することで構築した。プログラムの一部を図14に示す。プログラムにより作成されたモデルに対して端部部材条件を適応すれば、本研究で設けた制約条件を全て満たすシュタイナー角配置が創生できる。

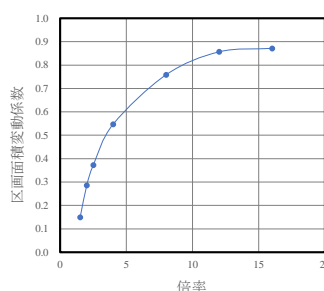


図12 倍率-区画面積変動係数

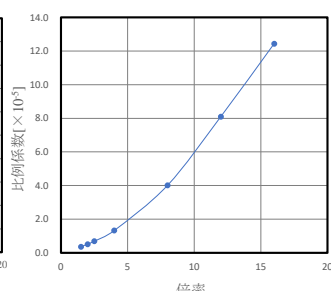


図13 倍率-比例係数

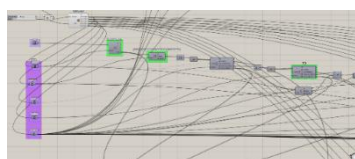


図14 Grasshopper 形態創生プログラム

6. まとめ

以下に本研究で得られた知見を示す。

- 区画面積変動係数と端部部材条件を操作することで、シュタイナー角配置力学特性の数値のばらつきを抑えることが出来る。
- シュタイナー角配置は平均区画面積を変化させると、剛性が大きく変化するため、剛性は高くないが、剛性の操作がしやすい構造である。
- 水平荷重 P (500kN) を与えた際のシュタイナー角配置の最大変位は平均区画面積が $0 \sim 1.2\text{m}^2$ の範囲で同平均

区画面積の斜め格子の約 2~8 倍程であり、耐震補強として効果を発揮させるためには、面内剛性を上げる工夫が必要。

- シュタイナー角配置は軸力ではなく、主に曲げにより力に抵抗する構造であり、斜め格子と同平均区画面積で最大曲げ応力度を比較すると、平均区画面積が $0 \sim 1.2\text{m}^2$ の範囲ではシュタイナー角配置の方が 5~16 倍大きい。
- 制約条件を与えたシュタイナー角配置と正六角形は同様の力学特性を示す。
- 「最長部材長を最短部材長で除した値」を用いることで、区画面積変動係数、平均区画面積を操作し、シュタイナー角配置を創生することが可能である。
- 今回作成したプログラムにより、シュタイナー角配置を他構造部材に応用できるか検討する際に、瞬時に大量のモデルを作成し、解析することが可能になった。

7. 今後の課題

本研究では耐震補強を想定して解析モデルを作成し、シュタイナー角配置の面内方向力学特性の検討を行った。力学特性を評価する際に利用できなかった項目もあったため、今後の課題として以下の項目が挙げられる。

- 面内方向剛性を増加させるための工夫
- 鉛直荷重（自重など）の考慮
- 接合部、部材の条件
- 座屈（面内、面外）の検討
- 端部部材条件も正確に反映させた、よりシンプルかつ自由なシュタイナー角配置構成プログラム検討
- やわらかい構造を活かして他構造部材への応用

【参考文献】

- 日本建築学会：建築形態と力学的感性，日本建築学会，pp.12-18，2014.3
- 仙場雄太，山下哲郎：六角形格子シェルの座屈特性に関する研究 その2 部材応力分布と幾何学的非線形性の弾性座屈挙動への影響，日本建築学会学術講演梗概集，pp.785-786，2012.9
- 青木麻緒：シュタイナー角配置における構造部材の力学特性に関する基礎的研究，明治大学卒業論文，2021
- 小山実，福松昌之，土本耕司，吉川裕亮：縦格子鋼板補強の開発，日本建築学会学術講演梗概集，pp.1269-1270，2008.7
- 佐藤工業株式会社：佐藤工業株式会社，<https://www.satokogyo.co.jp/technology/>，2021.7
- 成迫美奈，古川忠稔：単板積層材を用いたハニカム構造部材の性能向上に関する実験的研究：はめ込み型ハニカム構造壁の耐力試験，日本建築学会東海支部研究報告書，pp.245-248，2015.2
- 栗田慧里子，及部宏幸，朱健靚，山下哲郎：六角形格子鋼板の非弾性せん断座屈実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.923-924，2016.8
- 須藤峻介，豊田祥之，藤村太史郎：魅せる耐震改修工法に関する-考察 縦格子鋼板補強のケーススタディ，日本建築学会学術講演梗概集，pp.1415-1416，2019.7
- 構造計画研究所：構造計画研究所構造設計部門，<https://struc.kke.co.jp/works/1883/>，2021.7
- 栗田慧里子，及部宏幸，朱健靚，山下哲郎：六角形格子鋼板の非弾性せん断座屈実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.923-924，2016.8
- 須藤峻介，豊田祥之，藤村太史郎：魅せる耐震改修工法に関する-考察 縦格子鋼板補強のケーススタディ，日本建築学会学術講演梗概集，pp.1415-1416，2019.7