

蜘蛛の巣にみる建築的応用可能性 - 柔軟性と冗長性に注目して -

宇野研究室

4109055 堤坂 浩之

1. 研究背景及び目的

自然界の中には、淘汰を経てきた多機能なシステムが多く存在する。中でも生物の「巣」は周囲の環境に適応していて、特に蜘蛛の巣^{註1)}は、1) 周辺の環境に適応し形態を変化させても、同じ巣の機能が得られる柔軟性がある。2) 局所における欠損が全体形に影響を及ぼさずに、形態を保持する冗長性のある構造である。といった建築的応用可能性を秘めている。蜘蛛の巣の建築への適用先を考えることで、新しい建築形態を創出すると共に、その構造特性を把握することを目的とする。

2. 研究対象及び方法

2-1. 研究対象

円網の標本(図1)と参考文献^{文献1)}の図版と蜘蛛の巣の一種である円網を対象とし、それをモデル化^{註2)}した上で形態と機能を分析する。

2-2. 研究方法

- 1) 蜘蛛の巣の平面モデルを作成し、初期条件(パラメーター・周辺環境)を変化させ力学・幾何学的分析を行う。
- 2) 蜘蛛の巣・グリッドのモデルを作成し、比較する。
- 3) 建築に転用可能なモデルを評価、考察する。

3. 巣の構造・特性

巣の構造の仕組みを単純化すると、図2に示すモデルと関係式で表せる。参考文献^{文献2,3)}から得た特性を以下に示す。

- ① 巣の糸は引張材で構成される。
- ② 縦糸は横糸の10倍ほど硬いが、このことによって、(糸に作用する)最大応力が極めて低減される。
- ③ 中心から外側にいくにつれ縦糸に、横糸に働く張力が蓄積され、最大力は一番外側の縦糸に現れる。
- ④ 丈夫さを損なわずに、縦糸や横糸の本数を変更できる。
- ⑤ 少数の横糸がなくなっても丈夫さに影響を及ぼさない。

4. 巣の物性・幾何学特性の関係性

本章では蜘蛛の巣を構造モデル化したものを用いた分析を行う^{註3)}。このモデルは、ワイヤで構成され、引張力のみが働く場合で考察し、弾性は同じ素材のワイヤの断面積を変化させることで変えている。

以下では、「縦糸の本数をN本」、「横糸の本数をM本」、「横糸に対する縦糸の弾性比をK」、「横糸の欠損数をD」として表記する。

4-1. 応力と弾性比・縦糸・横糸の関係

蜘蛛の巣の平面モデルにおいて、縦糸と横糸の弾性比、縦糸および横糸の本数が、最大・最小応力に及ぼす影響を考察する。比較するうえで、「使用するワイヤの総重量」と「モデルの中心から頂点方向の引張荷重及び変位」を以下の項ごとに、それぞれに一定にしている。

4-1-1. 弾性比 (N:9, M:10, K:1~100, D:0)

正九角形の蜘蛛の巣型を用いて、Kを変化させ応力を比較した(表1)。以下のことが明らかになった。

- ・Kの増加に伴い、最大応力が減少し、かつ最小応力が増加して、全体で力を分散するようになる。
- ・Kが10程度以上になると最大応力はあまり減らなくなる。

4-1-2. 縦糸の本数 (N:5~80, M:10, K:1, 10, D:0)

正N角形の蜘蛛の巣型を用いて、Nを変化させ応力を比較した(表2)。以下のことが明らかになった。

- ・Nの増加に伴い、最大応力が減少し、最小応力が増加し、全体で力を分散するようになる。
- ・Kが1よりも10の方が、最大応力を抑えることができ、Nの増加に伴う応力の変化を抑えることができる。

4-1-3. 横糸の本数 (N:9, M:5~80, K:1, 10, D:0)

正九角形の蜘蛛の巣型を用いて、Mを変化させ応力を比較した(表3)。以下のことが明らかになった。

- ・Mの増加に伴い最大応力が増加し、最小応力が減少する。
- ・Kが1よりも10の方が、Mの増加に伴う最大応力の増加が抑えることができる。

4-1-4. 横糸の欠損時 (N:9, M:10, K:1, 10, D:0~25)

正九角形の蜘蛛の巣型を用いて、Dを変化させ応力を比較した(表4)。以下のことが明らかになった。

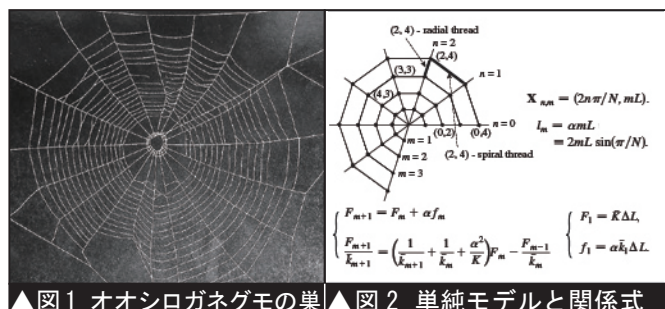
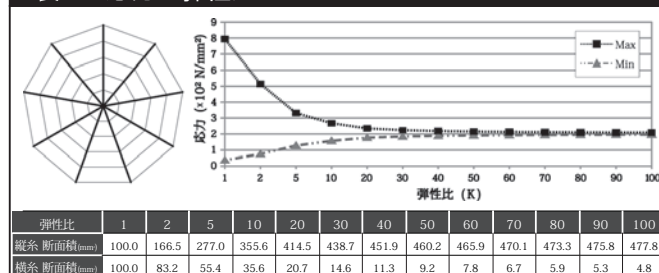
- ・Kが1のとき、Dの増加に伴い、最大応力が減少するが、縦糸が力を負担し、横糸はほとんど負担していない。
- ・Kが10のとき、Dが増加しても、最大応力にはほとんど変化は現れない。

4-2. 応力と蜘蛛の巣構造・グリッド構造の関係の分析

蜘蛛の巣状のモデルと最も単純なグリッド状のモデルを比較することで、構造形態が最大・最小応力に及ぼす影響を考察し、特性を把握する。

比較するうえで、以下の項では「モデルの中心から頂点方向の引張荷重」を一定にし、4-2-1. では「使用するワイヤの総重量」、「ワイヤによる分割面積」も一定にしている。

▼表1 応力ー弾性比



4-2-1. 正方形 (K:1, 10、D:0)

ここでは同じ矩形にワイヤで、蜘蛛の巣状とグリッド状に覆ったモデルを用いて、最大・最小応力について比較した (表 5)。以下のことが明らかになった。

- どちらの形状も K が 1 より 10 の方が、最大応力を抑えることができる。
- 蜘蛛の巣状では最小応力が増加し全体で力を分散しているが、グリッド状では最小応力がほとんど変化しないことから、力を分散せずに一部が大幅に負担している。
- 「Grid ii K=10」のみ「Web ii K=10」よりも最大・最小応力が低い。

4-2-2. 歪んだ四角形 (K:10、D:0)

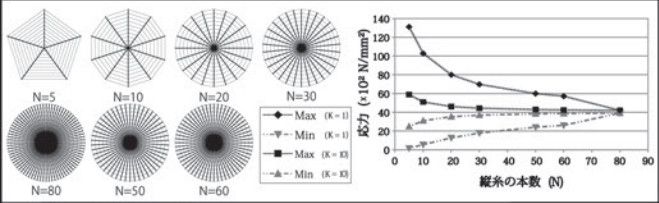
4-2-1. より、「Grid ii K=10」のみ「Web ii K=10」よりも最大・最小応力が低いという結果が出た。そこで、2つのモデルに同様に歪ませ、それぞれの最大・最小応力を比較する (表 5)。以下のことが明らかになった。

- 蜘蛛の巣状では歪みを与えても最大応力に大きな変化は生じない。
- グリッド状では歪みが大きくなるほど最大応力が増加し、部材によって応力のばらつきが大きくなる。

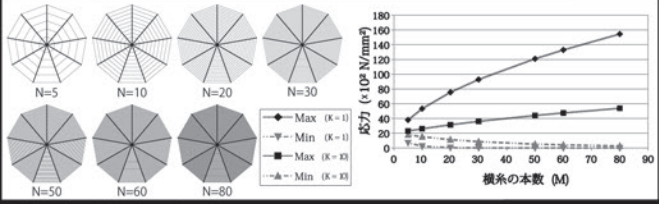
したがって、このような非対称形において、蜘蛛の巣状の方がグリッド状よりも構造的に優れている。

脚注：1) 一般的な蜘蛛の巣は生物学的には蜘蛛の「網」と呼ばれることもある。2) 縦糸を放射状の直線とし、横糸を同心円状に多角形とすることで、円網を単純化すること。3) 解析には「有限要素法 abaqus CAE」を用いている。参考文献・既往研究：1) 池田博明、谷川明男、新海明、「クモの巣と網の不思議—多様な網とクモの面白い生活」、文芸社、2003 2) Yuko Aoyanagi, Ko Okumura, 「Simple Model for the Mechanics of Spider Webs」、Phys. Rev. Lett., 2010 3) 奥村剛、「天然物質の強靱性：硬・柔の組み合わせの妙—真珠層とクモの巣を例として」、日本物理学会誌 66(2)、2011

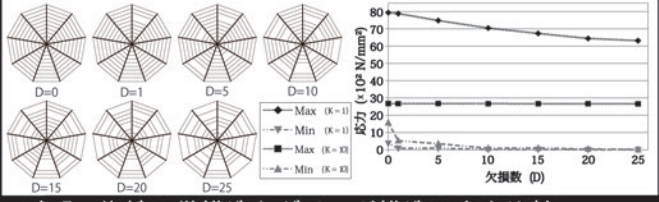
▼表 2 応力—縦糸



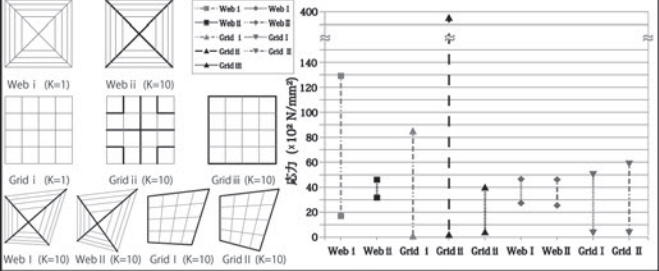
▼表 3 応力—横糸



▼表 4 応力—欠損



▼表 5 蜘蛛の巣構造とグリッド構造の応力比較



4-3. 構造特性

4-1. ~ 4-2. から蜘蛛の巣構造において、K を 10 程度以上にすることで、「最大応力が N・M にあまり依存しないこと」、「最大応力の抑制」、「バランスよく力を分散」、「複雑な形状に対応できる柔軟性」、「構造の欠損にも耐える冗長性」という機能特性があることが言える。

5. 建築への応用可能性

4. の結果を鑑みて建築への応用先別に用途と模式図を示し、応用可能性を示す。また、それらまとめたものを表 2 に示す。

6. 結論

今回の研究から以下の知見を得た。

蜘蛛の巣構造をとることで、

- 1) 弾性比を 10 程度以上にすることで、構造全体で力を分散しやすくなる。
- 2) 縦糸横糸の本数に依存せず、形態を柔軟に変化できる。
- 3) 横糸の欠損に耐えることのできる冗長性がある。
- 4) 矩形においても十分な利点を得られるが、複雑な形状になるほど、蜘蛛の巣構造の利点により発揮される。

2) ~ 4) に示したように、様々な形態に対応できる「柔軟性」と横糸の欠損に耐えられる「冗長性」が蜘蛛の巣の特性として挙げられるが、これは建築に应用可能であると考えられる。例えば「柔軟性」を利用して、周囲の環境に対応した形態をとること。「冗長性」を利用して、自由に開口部等を設けることが可能になるだろう。

▼表 2 建築への応用可能性

用途	モデル	考察
壁	自由開口	・風荷重による応力分布は平面モデルと同様になる為、非耐力壁として転用可能と考えられる。 ・横糸の欠損に対してロバストなので扉や窓といった開口部を比較的自由に設けることが出来る。
	ブレース	・水平荷重が働いた場合に、引張材で構成される蜘蛛の巣構造がブレース材の役割を担うので補強材として転用可能と考えられる。
スラブ	自由プラン	・梁や柱の位置に応じて、柔軟に形態を変化させ床を設けることが出来ると考えられる。 ・床の頂点部に応力が働くため、間柱を設ける必要が無く、プランの自由度を高めることが出来ると考えられる。
	吹抜け	・横糸の欠損に対してロバストなので、比較的自由な位置に、吹き抜けや縦動線を設けることが可能になると考えられる。
	張弦膜	・引張材であることにより張弦膜構造に転用可能。 ・ガラスのような低い引張強度の素材を使った床が可能になると考えられる。
屋根	空気膜	・空気膜構造に転用する場合、均等な力が働き、平面モデルと同様の挙動を示すことから、ドームとして大空間を覆うことが可能になると考えられる。
	屋根勾配	・平面モデルは立体モデルに自然に拡張でき、雨等を流す勾配屋根に適用可能。 ・2つの平面モデルを用いて軽量化した屋根に適用可能。 ・屋根面に自由に開口部を設けて採光を得られる。
建物と建物の間	アーケード	・蜘蛛の巣は周辺環境 (木の枝や壁等) に依存して外形を決定し、全体を支えている。 ・建築においては、「既存の建築に柔軟に対応し、商店街のアーケードのように屋根をかけること」や「建物と建物の間に屋根や連絡通路を渡すこと」はこの行為にあてはまり、転用可能である。
	渡し屋根	・リノベーションのように既存の構造体を利用して自由な面を張ることが可能になると考えられる。