

1.5層スペースフレームの形態安定性とデザインの多様性についての基礎研究

小田島 大地[†]・水島 潤弥[†]・陳 沛山^{††}

A Study on Stability and Free Form Design of 1.5-Layer Space Frames

Daichi ODASHIMA[†], Junya MIZUSHIMA[†] and Pei-Shan CHEN^{††}

ABSTRACT

A 1.5-Layer space frame, which is promoted by the author, is a bar-linked structure configured with one-layer of chords and diagonal members. Unlike a conventional double layer space frame, the 1.5-Layer space frame has no lower chords, or when it is oriented upside down, no upper chords. And unlike a single layer space frame, diagonal members are mounted onto the latticed surface and efficiently strengthen it so that the entire structure can be constructed in subtle curvatures or as a plane. The present paper introduces the geometrical features of the 1.5-Layer space frame, and presents more configuration patterns to construct variations of the 1.5-Layer space frames in plane and curved forms.

Keywords: 1.5-Layer space frame, space frame, structural system, single layer space frame, double layer space frame

キーワード: 1.5層スペースフレーム、スペースフレーム、構造システム、単層スペースフレーム、複層スペースフレーム

1. 研究の背景と目的

古代建築物には優れたアイデアが隠れており、現代構造設計にとってその素晴らしいアイデアは新しい技術になる可能性もある。共同研究者の陳は、中国の国宝「清明上河図」に描かれている虹橋の構造原理を現代建築の構造設計に応用することについての研究を行っている。虹橋とは、中国北宋時代(A.D.960-1127)の都の開封(現在の河南省開封市)に造られたアーチ状の木造橋である。元朝の至元27年(A.D.1290)頃に起き

た黄河の洪水の被害により虹橋は崩壊してしまったため、「清明上河図」という画卷でしかこの橋の美しい姿を見ることができない。著者の陳及び共同研究者たちは、虹橋の構造原理、実寸法の推定、力学特性、現代構造設計への応用についての研究を行っている¹⁻⁴⁾。

上記の虹橋に関する研究の過程でLap-Beamとともに1.5層スペースフレームなどの新しい構造システムを発見した³⁻⁵⁾。1.5層スペースフレームの幾何学的な特徴は、節点は2層に配置するが、弦材は上弦、あるいは下弦しか存在しないことである。その幾何学構成の詳細については後述記載する。

1863年にヨハン・ウィルヘルム・シュベドラーは、三角形の単層構成のシュベドラードームを

平成 23 年 12 月 22 日受理

[†] 工学部 建築工学科 4 年

^{††} 工学部 土木建築工学科・大学院 教授

提案し、1875年にスパン約40m、ライズ3.9mのドームが造られた。この構造システムの実用性は、1896年にミュンヘン工科大学のオーギュスト・フェッペルが実施した実験により確認されている。その約40年後に複層スペースフレームが、アレキサンダー・グラハム・ベルの手によって誕生した⁶⁻⁸⁾。

スペースフレームが建築物に応用されたはじまりは、産業革命以降の19世紀になる。18世紀イギリスの産業革命により、製鉄技術が大幅に発達した。構造材料に鉄を用いた大空間を覆う構造物が多く造られるようになった。

これまで広く使用されているスペースフレームは上弦材、下弦材そして斜材により構成された複層スペースフレームが主流であり、その他に斜材を用いない単層スペースフレームも開発された。複層スペースフレームと比べると、本研究で提案した1.5層スペースフレームは全体的に重量を軽量化すること、デザインの自由性、自由なグリッドでの組み方、各節点に集まる部材数を少なくすることにより施工性と生産性を向上することが期待できる。例えば、1.5層スペースフレームはグリーンハウスやホールなど採光性が求められる空間において適していると考えられる。

また、単層スペースフレームは部材数こそ少ないが、斜材がなく、構造面外に変形しやすいため、曲率を持つ円筒やドーム型などの曲面構造に利用される場合が多い。これらの理由で、単層スペースフレームは平面形状の構造物には適用できない。

1.5層スペースフレームは斜材により架構面を補強することができ、大スパン平面スペースフレームを実現できる。もちろん、1.5層スペースフレームは曲面モデルも作ることが可能となるため構造デザインの新しい可能性である⁹⁾。

1.5層スペースフレームに関する既往の研究では、架構を構成する単位架構及び全体構成の方法について研究した。これまでの研究成果として三角形や六角形、四角形グリッドの平面スペースフレーム構造を創出し、静的力学解析によ

りその安定性を証明できた。また、単位架構の組み合わせを変えることによって曲面構造の構成も可能であることが検証された。しかし、これらの研究では、デザインの自由性、特に複層や単層スペースフレームでは実現困難な自由なグリッド構成についての検討を行っていない。本論では、1.5層スペースフレームの幾何学構成についての研究結果を報告し、その形態設計においてHP曲面、裁断球面、自由曲面の利用の可能性、ランダムなど自由グリッドの使用の可能性を検証する。さらに、これらの新しい形態の安定性についての分析結果を報告する。

2. 1.5層スペースフレームの形態構成原理

2.1 1.5層スペースフレームの成り立ち

「1.5層スペースフレーム」は、虹橋という古代木造橋に関する研究の過程に発見した新しい構造システムである。虹橋は、図1(a)に示すアーチ状の木造橋である。その構造原理を現代空間構造に応用する方法として、「Lap-Beam」という構造システムを提案した¹⁻⁵⁾。図1(c)はその研究過程に使用された力学解析モデルであり、その形状からスペースフレームの形態を連想できる。また、図1(d)に示すLap-Beamドームの形状は、調理用具の箆や籠に類似しているため、宋代虹橋の構造原理は、箆や籠からの発想であると推測できる。そこで、図1(b)のような籠の構造部材の材芯線を着目して観察すると、図1(e)のような立体構造物にも見え、この構造に上弦材を加えると、図1(f)に示すスペースフレームができ、これは1.5層スペースフレームの原型となっている。

スペースフレームの分類としては、単層スペースフレームと複層スペースフレームは広く知られている。本研究で発見した上記の構造形態は、節点は2層に分布しているが、節点を繋ぐ上弦材又は下弦材が存在しないスペースフレームである。本論の第2.2節における相似構造形態についての調査研究を行い、1.5層スペースフレームは新しい構造システムであることを証明する。

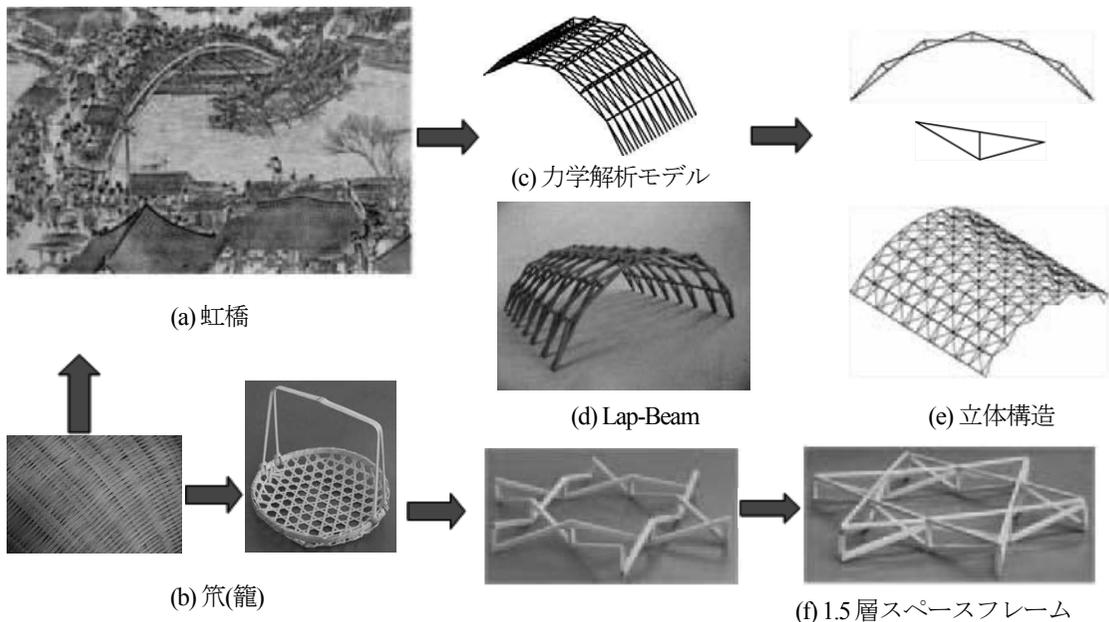


図1 1.5層スペースフレームの成り立ち

2.2 単位架構と形態創生

図2は1.5層スペースフレームを構成する上で必要となる単位架構である。図2の単位架構は棒状部材が束材を挟んで四角形を構成し、大きい角度で結んだ2本の部材は上弦材といい、比較的小さい角度で結んでいる2本の部材は斜材という。2本の上弦材の節点は上弦中央接点、2本の斜材の節点は下部中央節点という。上弦材と斜材を接合する節点は端部節点という。上弦中央節点と下部中央節点を束材で結び、一つの安定した構造体となる。

このような単位架構の上弦材は 180° で接合された場合、図2(a)のようなフラットな上弦材を持つ構造体ができる。また、上弦材に角度を設けた場合図2(b)、曲面構造部分を構成するのに利用できる。

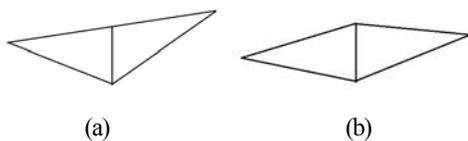


図2 最小構成単位架構

単位架構によりユニットを構成することができ、その組み方としてLap型と交差型の2種類に大別できる。単位架構の1つの端部節点(図3のA点)を他の単位架構の上部中央節点(図3のB点)と接合させた図3のようなLap型ユニットを作製できる。2つの単位架構を十字型に交差して中央に束材を共用すると、図5(a)、図6(a)に示す交差型ユニットを構成できる。これらのユニットを一定の法則で組み立てることによって、大規模1.5層スペースフレームを創生できる。

図3のLap型ユニットを組み合わせることによって三角形や六角形、四角形グリッドで構成する1.5層スペースフレームの模型を図4に示す。

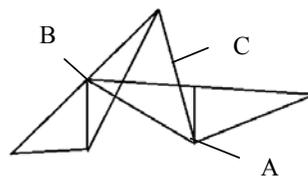


図3 Lap型ユニット

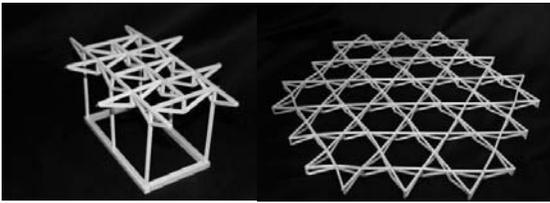


図4 構成モデル

図5(a)の交差型ユニットで構成すると平面となる。また、図6(a)のようにもう一方に角度を設けた弦材を持つ単位架構を用いたユニットでは曲面モデルを作製することができる。その詳細については、後述にする。

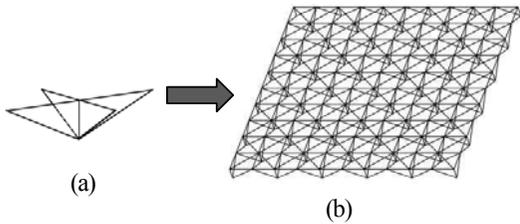


図5 平面モデル

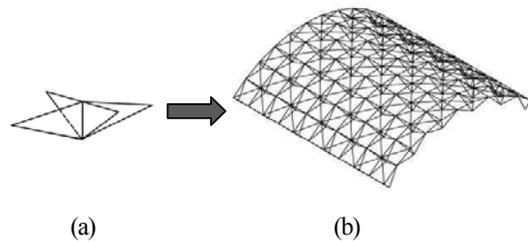


図6 曲面モデル

3. 形態安定性についての研究

3.1 安定構造の必要条件の推定例

1.5層スペースフレームの安定性の規則を詳細に調査するため、対象構造物をリンク機構として、Kutzbach-Gruebler's equation¹⁰⁾を用いて、その安定性の必要条件及び不静定次数について分析した。まず分析例を紹介する。図7に示す円筒型

モデルを例に挙げ自由度(以下DOFを呼ぶ)を算定していく。

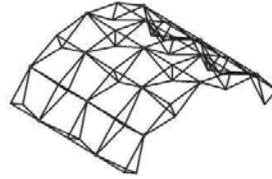


図7 円筒型モデル

Kutzbach-Gruebler's equationでは、剛体の3次元で動作をする自由度は $F=6(n-1)-\sum k(6-k)f_k$ で求められる。ここに、 n はリンク数(支持部を含む)、 k はペア(pair)の持っている自由度、 f_k はペア数、 $(6-k)$ はペアで拘束された自由度の数。ただし、1リンク(剛体)は6DOFを持つものとする。

図8のように上弦材と斜材で構成された三角形を1つの剛体とした場合リンク数は $n=59$ (支持する地面を含む)となる。図9に示すようなリンク機構は、東材を中心として2つの剛体(三角形)が互いに回転するもので、このような拘束をAタイプの拘束と称する。Aタイプの拘束は1DOF(自由回転)を持っているペアであり、 $k=1$ となる。そして、対象構造に存在するAタイプペア数は $f_1=40$ である。図10に示すBタイプ拘束ペアはピン節点であり。これは3DOFを持っており、 $k=3$ 、そのペア数は $f_3=41$ となる。

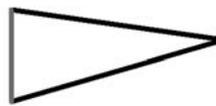


図8 剛体モデル

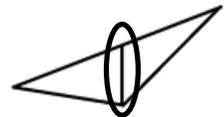


図9 Aタイプペア

その結果、Kutzbach-Gruebler's equationによる計算結果は $F=25$ となり、円筒型モデルは25DOFを持っていることが判明できる。さらに、ここからブレース材を用いて構面内のせん断変形を拘束するために、必要最小限度のブレース材を6つ配置する(図11)。ブレースはバーであり、1本当たり1つの拘束を与えるが、5DOFを持っているため

$k=5$ となり、そのペアー数は $f_3=6$ である。その結果、対象円筒型モデルの自由度は $F=25-6=19$ となる。剛体は本来6DOFを持っているので、この円筒型モデルは自立していないことが分かる。

この円筒型1.5層スペースフレームの支点を20個のピンにより支持された場合、 $k=3$ の拘束ペアー数は $f_3=20$ となり、 $F=19-60=-41$ DOFとなることが判明する。これにより、41の過剰拘束となる。当然、この過剰拘束は不静定次数になるので、対象構造物を20点ピンにより支持された場合、41次不静定構造になることを判明できる。

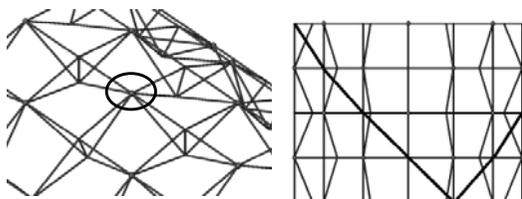


図10 Bタイプペアー

図11 水平方向による自由度を拘束する斜材の配置図

このように、1.5層スペースフレームは自立安定性を持っていないものであり、周辺縁部において梁やガダーなどを設置することによって安定化できることが必要である。Kutzbach-Gruebler's equationを用いて、1.5層スペースフレーム構造の安定性の必要条件及び不静定次数を算出することができるが、安定性の十分必要条件についての機構に対するリジッド・マトリックス解析、あるいは、力学解析を用いて検証することが必要である。

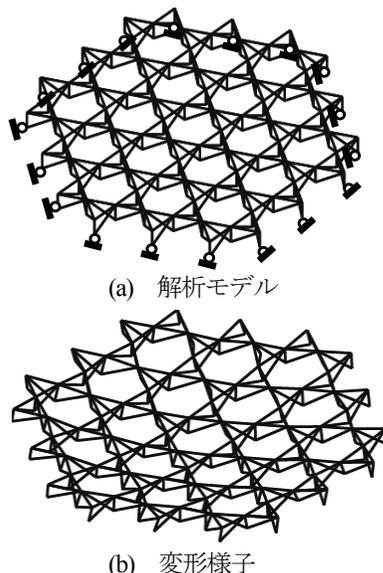
3.2 力学解析による安定性の検証

形態安定性を研究するにあたって静的力学解析を行った。当然、スペースフレームのような構造の力学解析理論では、剛性マトリックスの使用が必要である。そこで、剛性マトリックスのランクが自由度の数と等しいならば線形解析の解が存在し、構造物は安定しているものであることを証明できる。反対に、剛性マトリックスのランクが自由度の数より小さければ、剛体

で構成した構造物で変形可能な自由度（或いは瞬時不安定な自由度）が存在するので、解が存在しなく、構造は不安定であることを証明できる。

上述の原理に基づいて、数多くの1.5層スペースフレームに対して、静的力学解析を行い、その安定性を検証した。ここに、1.5層スペースフレームにおける三角形や六角形、四角形グリッドモデルの2つの解析例を紹介する。

図12のLap型ユニットの解析モデルは、三角形・六角形モデル(平面)による同じ部材断面及び同じ材料を用いた条件で解析した。モデルの節点はユニットが自転できないように拘束し、構造下層部の外周はピン支持とする。各節点に集中荷重18.0kN、部材断面積100cm²、弦材の材長は3.0m、束材の長さは1.5m、最大はスパン33.0mである。材料は鋼材と仮定し、ヤング率は 2.1×10^5 N/mm²である。解析結果は、変位のピーク値は4.26cmであり、軸力のピーク値は引張が646kN、圧縮が578kNとなる。1.5層スペースフレームを構成する部材には、軸力が働いており、変位のピーク値通用範囲内である。この解析を通して、1.5層スペースフレームは安定構造物として安定していることを証明できた。



(a) 解析モデル

(b) 変形様子

図12 Lap型ユニットの解析例

上記のLap型ユニットの解析例の他に、交差型ユニットを用いた構造に対する解析を行った。モデルの節点をピン接合、下層部の外周をピン支持とし、各節点に集中荷重18.0kN、部材断面積50cm²、上弦材の長さは3.0m、束材の長さは1.5m、最大スパンは30.0mである。材料は鋼材と仮定し、ヤング率は $2.1 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ である。解析した結果は、変位のピーク値は7.45cmであり、軸力のピーク値は引張が332kN、圧縮が473kNとなる。1.5層スペースフレームを構成する部材には、しっかり軸力が働いており、変位のピーク値通用範囲内である。この解析を通して、1.5層スペースフレームは安定構造物として安定していることを証明できた。

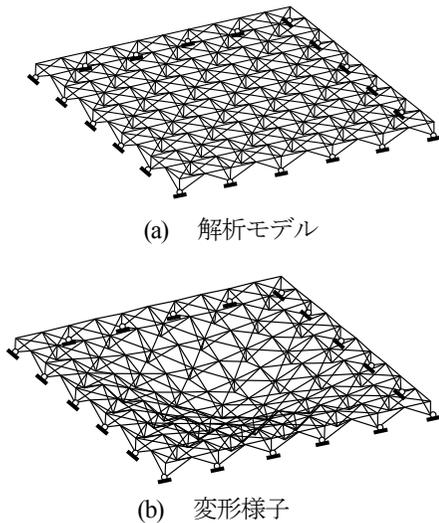


図13 交差型ユニットの解析例

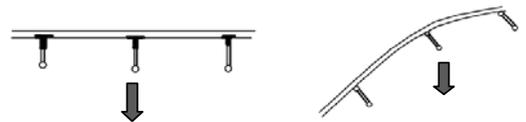
4. 実用可能な形態デザインの方法

4.1 平面及び曲面形態の構成

前述のように、1.5層スペースフレームの構成ユニットとして、Lap型ユニットと交差型ユニットの2種類の組み方を発見した。Lap型ユニットで構成された平面の1.5層スペースフレームでは、単位架構が鉛直面内に設置され、その下端部には水平方向の自由度が生じる。単位架構下端の

水平自由度を拘束するため、図3のように補助材Cを設置する方法がある。但し、この補助材の導入によって、部材数が増え、節点構造も複雑になり、構造のデザイン性も悪くなる。これゆえ、単位架構下端の水平自由度を拘束するために、上弦材と単位架構の接合部を開発する予定である。上述のような補助材を導入しない場合、単位架構の面外回転を止める接合部が必要であるが、図14(a)のように部材の鉛直荷重がユニット面内に作用する場合、単位架構が常に安定できる。また、このように水平な大空間スペースフレームの地震応答は、上下動が卓越であるので、単位架構の面外への横回転が小さいと考える。

しかし、図14(b)のような曲面構造において、単位架構が斜めに設置された場合、例え剛接合であっても、鉛直荷重は常に単位架構の面外に作用するので、節点に回転モーメントを生じる。地震時には、節点に生じる回転モーメントはより大きくなることを予測できる。そのため、下部節点と上部節点を結ぶ補助材が必要である。前述のように、補助材の導入により、部材数が増え、構造のデザイン性と合理性には消極的な面が存在する。原則としては、Lap型ユニットの平面1.5層スペースフレームには、上述のような補助材を導入しないように考えている。そして、Lap型ユニットで構成された1.5層スペースフレームは、図15のような水平構造に使用することを勧める。



補助材がなくても自重と補助材がない場合、剛接合で安定している鉛直荷重によるユニット面外の動き

(a) 平面モデル (b) 曲面モデル

図14 鉛直荷重とユニットの関係

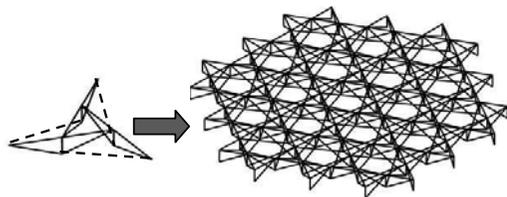


図15 三角形・六角形モデル

交差型ユニットは下部中央節点を、四方向で支えることにより動きを制限し、安定性を高めている。よって、交差型ユニットにより構成された1.5層スペースフレームは平面及び曲面構造に適用できる。複数個繋ぐことにより、四角形グリッドによる1.5層スペースフレームの平面モデル(図5(b))や円筒型モデル(図6(b))を作製できる⁵⁾。

4.2 自由形態の可能性

(1) ドーム型モデル

単層スペースフレームは1.5層スペースフレームに比べ部材の数が少ないが、曲率を持つ曲面構造にしか適用しないことが欠点となっている。これゆえ、単層スペースフレームは円筒やドーム形として利用されることが多い。単層スペースフレームの曲率が小さいほど、座屈などの問題が生じやすくなり、建設する際に高度な技術が必要となり、その安全性の確保が難しいという課題が残されている⁵⁾。

1.5層スペースフレームは単層スペースフレームに比べ、弦材を束材や斜材で支えることによ

って安定性が増し、また、そのデザインの自由性もある。図16は交差型ユニットで構成されたドーム型1.5層スペースフレームである。

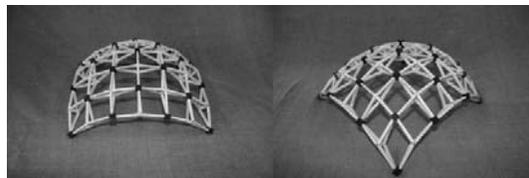


図16 ドーム型モデル

(2) 双曲放物面モデル

双曲放物面スペースフレームのグリッド分割は双方の縁部に沿って直線部材を配置することができる。主要な方式としては、直交グリッドの正方向配置、斜方向配置がある。本論では正方向配置を用いて、図17に示す1.5層スペースフレームは交差型ユニットで構成された双曲放物面モデルである。

(3) 伝統的デザインを用いるデザイン

1.5層スペースフレームの特徴の1つにデザインの自由性が挙げられる。その自由なデザイン性を用いて青森県津軽地方に古くから伝わるこぎん刺し(図18(a))をヒントに1.5層スペースフレーム(図18(b))で表現できる。

まず、こぎん刺しとは青森県津軽地方に伝わる伝統的な刺し子である。北国、津軽では綿の栽培が困難なため一般に使用される衣服の多くは麻布でできていた。こぎん刺しは「モドコ」と呼ばれる基礎模様があり、それらを組み合わせ

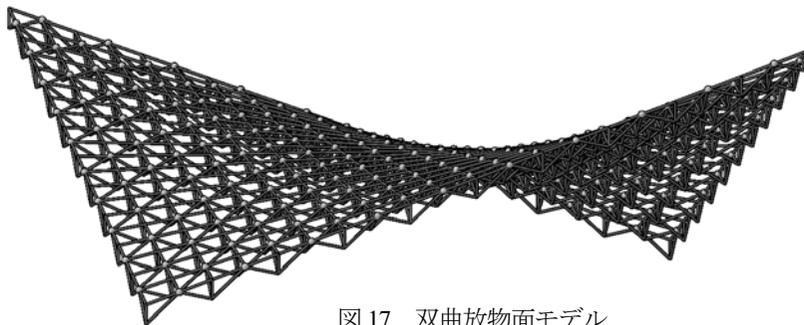
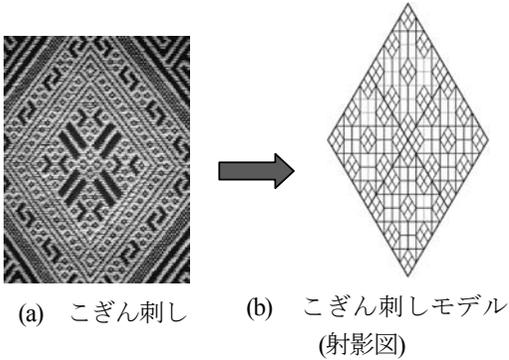


図17 双曲放物面モデル

せることによって幾何学的な模様が構成されている。1.5層スペースフレームのグリッドの模様は「モドコ」を元に1.5層スペースフレームの中に落とし込み、古くから伝わる模様を用いることで人々が馴染みやすいものができるのではないかと考え、CGを用いて図19に示すモデルを作成した。



(a) こぎん刺し (b) こぎん刺しモデル (射影図)

図18 こぎん模様を取り入れたモデル

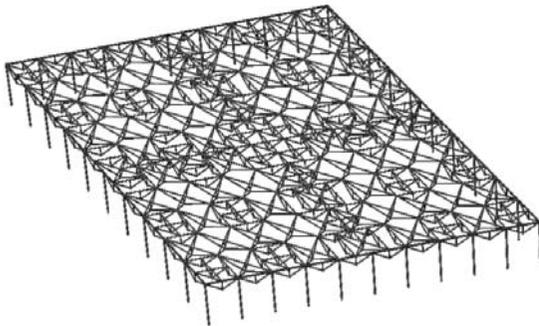
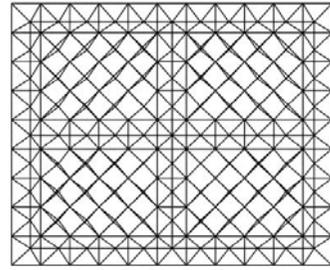


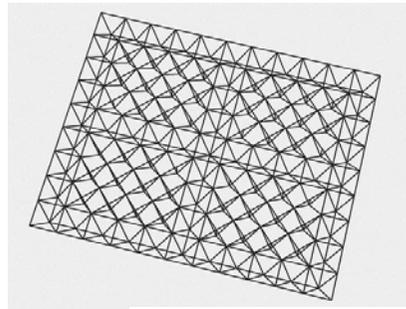
図19 こぎん刺しを取り入れた屋根の例

(4) ハイブリッド型モデル

複層スペースフレームと1.5層スペースフレームを組み合わせた構造デザインの可能性を試みた(図20)。複層スペースフレームを大スパンの梁として、大規模な格子を形成し、その間に1.5層スペースフレームをスラブのように充填することができる。1.5層スペースフレームを用いることで、より軽量的で有効的にスパンを確保することができる。



(a) 平面図



(b) 3D-CG

図20 ハイブリッド型モデル

(5) ランダム・グリッド

複層スペースフレームは1.5層スペースフレームに比べ使用する部材の数が多いため、一つの節点に沢山の部材が集まり、自由グリッドの実現が困難である。しかし、1.5層スペースフレームはデザインが優れ、自由な形態による構造体の創出が可能となる。組み方の例として、中国の窓や戸などに用いられる伝統的なデザインを取り入れた。図21に示す模型はランダムグリッドの組み方である。

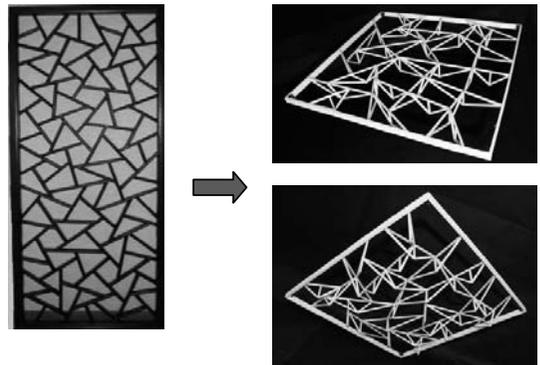


図21 中国の伝統的な格子のデザイン

5 結論

本論は1.5層スペースフレームの形態創生と構成原理について研究し、Lap型ユニットと交差型ユニットから平面および曲面構造の構成方法を提示した。1.5層スペースフレームは自立した安定構造物ではないことが判明した。しかし、支点を支持することにより安定構造物として成り立つことが検証できた。また、力学解析によりLap型ユニットおよび交差型ユニットで構成されたモデルは安定している構造物ということが証明できた。従来のスペースフレームと比べて、1.5層スペースフレームはデザインの自由性に優れ、伝統的な模様やランダムグリッドによる構造物の創生が可能である。

謝辞

本研究に携わった陳研究室の皆様に、心から感謝いたします。

参考文献

- 1) 陳沛山, 大川原恵美, 原田恵美子, 細川美穂: 宋代「虹橋」の構造原理についての研究, コロキウム構造形態の解析と創生, pp.89-94, 2007.10
- 2) PEI-SHAN CHEN, “A Study Report on an Ancient Wood Bridge Hongqiao”, Structural Engineering International, 2008.2, pp84-87.
- 3) PEI-SHAN CHEN, “A Report on the Innovation of 1.5-Layer Space Frames”, Proceeding of IABSE IASS 2011, London, 2011.Sep.
- 4) 川村 誠、陳 沛山: 日本建築学会東北支部研究報告書構造系 (73) 社会法人日本建築学会, pp57~60、2010
- 5) 川村 誠: 平成22年度八戸工業大学構造設計工学部門大学院修士学位論文
- 6) 鋼構造委員会: ケーブル・スペース構造の基礎と応用 社団法人土木学会、1999
- 7) 川口衛、松谷有彦、阿部優、川崎一雄: 建築構造のしくみ、彰国社、1990
- 8) ローランド・J・メインストン: 構造とその形態-アーチから超高層まで、彰国社、1984
- 9) Heino Engel著 JSCA関西翻訳グループ訳: ストラクチュア・システム 空間デザインと構造フォルム, 技報堂, 2006
- 10) 山田 学著 :めっちゃメカメカ, 日刊工業新聞社、pp3~5, 2011

要 旨

1.5層スペースフレームは1層の弦材と斜材で構成された立体構造物である。従来の複層スペースフレームと比べ下弦材が不要で、上下倒置した場合、上弦材が不必要である。単層スペースフレームと比べ1.5層スペースフレームは斜材により単層フレームを補強することができる。これにより、曲率の小さい曲面あるいは平面構造物に適用できる。本論文では1.5層スペースフレームの幾何学構成及び実用可能な形態デザインの多様性についての研究成果を報告する。

キーワード : 1.5層スペースフレーム、スペースフレーム、構造システム、単層スペースフレーム、複層スペースフレーム

