

シザース展開構造に着目した スクエアコアトラス構造のデザインと製作

長谷川 佑大¹・中川 駿一²・関 文夫³

¹正会員 大日本コンサルタント株式会社

(〒101-0022 東京都千代田区神田練堀町 300 番地住友不動産秋葉原駅前ビル 4F, E-mail:hasegawa_yudai@ne-con.co.jp)

²学生会員 日本大学大学院理工学研究科土木工学専攻

(〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14, Email:cssh21020@g.nihon-u.ac.jp)

³正会員 工博 日本大学理工学部土木工学科

(〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14, Email:seki.fumio@nihon-u.ac.jp)

鋼トラス構造は 19 世紀ごろから急速に普及し、様々な構造形式が展開されたが、現在では特定の構造形式に限定されている。本研究では、展開構造に着目することで、新たなトラス構造の可能性を追求した。展開構造の特徴である、“伸びる”、“縮む”という伸縮動作の中から造形発想をすることで、新しい構造デザインを実践することができた。本稿は、それらの造形的なモデルを提示し、構造的な特徴をまとめたものである。また、実例として橋長 8m 程度のプロトタイプを製作し、検証した。その一連のデザインプロセスを報告する。

キーワード: 展開構造, トラス構造, 構造システム, 構造デザイン, 造形, 伸びる, 縮む, 機構

1. 研究の背景と目的

鋼トラス構造は、19 世紀ごろから急速に普及し、様々な構造形式が展開された。トラス構造は、各部材の軸圧縮力、軸引張力により全体の荷重に抵抗する合理的な構造で、比較的にスリムな多数の部材で構成されることで、連続感、リズム感、繊細さを生みだしている。しかし現在は、比較的にシンプルで、経済性、施工性に優れるワーレントラスを代表とする特定のトラス構造に限定されており、新たな構造形式は生み出されていない。したがって本研究は、トラス構造の新たな可能性を追求することを目的とする。

以上のような背景と目的から、本研究では展開構造に着目し、構造システムの開発と造形発想を行う。以下にその研究結果を報告する。

2. 展開構造の概要

(1) 展開構造について

展開構造とは、折りたたんで収納でき、展開して使用する構造である。近年、宇宙や建築分野で構造物の大型化に伴い展開構造物の需要が高まっており、工学的に注目されている²⁾。また、展開構造は玩具や折り紙、植物の

葉や花びらなどに日常的に見ることができ、その伸縮機構が織りなす造形はプロダクトや建築のデザインで用いられている。

(2) シザース型展開構造について

シザース型展開構造とは、(図-1)のようにハサミ状に骨組みを組み合わせて構成される構造である。シザース構造の基本は 2 本の斜材が X 状に交差し、その交点で閉開可能に接続されている単位ユニットからなる。さらに隣接する単位ユニットの端部同士がジョイントによって接合されている。実用例として、建築系の仮設構造物などに対する実用例が多くみられる。

本研究ではシザース型展開構造を基本とし、研究を進める。

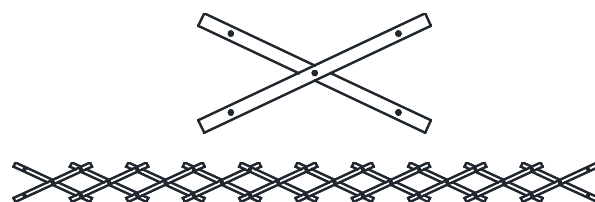


図-1 シザース構造の単位ユニット(上)と、
10 ユニット連結時(下)

3. 展開構造システムの開発と橋梁への応用

(1) 展開構造システムの開発

スチレンボード材を用いて構造模型を製作し、展開構造システムの開発を試みた。開発した全3種類の構造模型はModel A~Cとし、各々の展開、収納時の挙動を確認する。また、橋梁の主構造となりうるか検討する。以下にその結果を示す。

a) Model A

前章で紹介したシザース構造は、単位ユニットあたりの格点数が1つで斜材同士を結合しているが、Model Aは上下の斜材を2つの格点で結合した構造である（写真-1）。格点数を増やすことによって、今まで直線状のみにしか展開できなかった構造が、直線状にも曲線状にも展開することが可能となった（図-2）。橋梁として応用する際には、架橋位置の地形にあわせて、柔軟に形態を変化できることがわかる。また、この機構は補剛材を用いて、機構を拘束すれば、主構造に十分になりうるということがわかった。具体には、ユニットごとの鉛直材を補剛材で結合し、格点間に生じる空間に、変形拘束材を挿入することで構造を安定させることができる（図-3、図-4）。

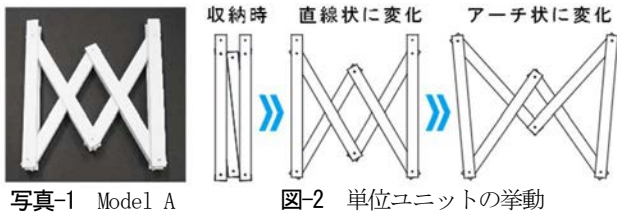


写真-1 Model A

図-2 単位ユニットの挙動

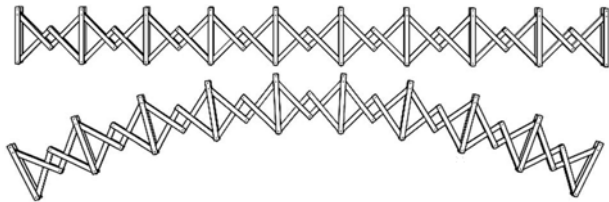


図-3 直線状の展開 (上)、円弧状の展開 (下)

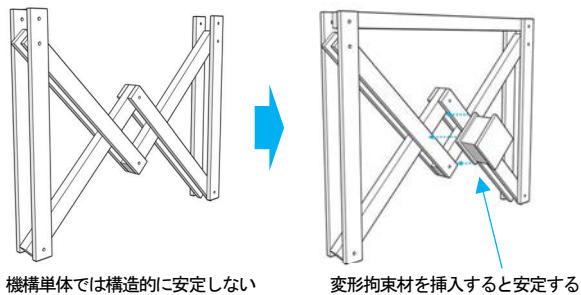


図-4 Model A の概要

b) Model B

Model Bは、上下に3つの格点を有する構造である（写真-2）。前項で紹介したModel Aは、2つの格点が展開機構に柔軟性を与え、さまざまな形態に変化することができたが、構造を安定させるのに時間を要した。それに対し、Model Bは、展開時に上部の四角形が変形を拘束し、構造を安定させることができる（図-5）。また、上部の四

角形の格点に鉛直荷重が作用すると構造がより安定する。ユニット連結時の形態は直線状となり橋梁に応用した際は、梁としての利用が望める（図-6、図-7）。



写真-2 Model B

図-5 単位ユニットの挙動

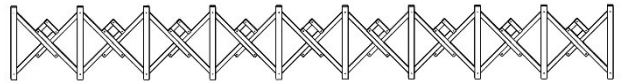


図-6 直線状の展開

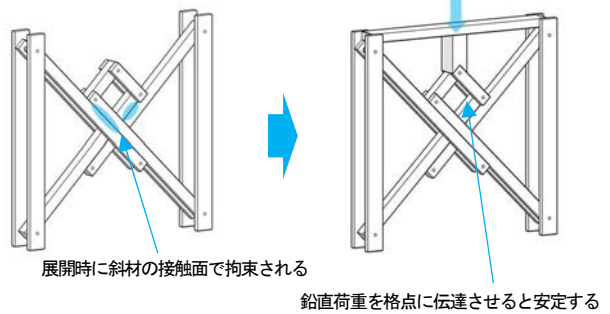


図-7 Model B の概要

c) Model C

Model Cは、上下に4つの格点を有する構造である（写真-3）。前項で紹介したModel Bと同様、展開時に上部の四角形が変形を拘束し、構造を安定させることができる（図-8）。また、上部の四角形の格点に鉛直荷重が作用すると構造がより安定する。よって、ユニット連結時の形態は直線状となり橋梁に応用した際は梁としての利用が望める（図-9、図-10）。

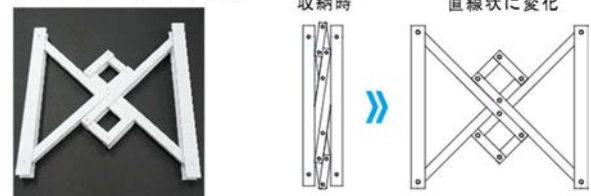


写真-3 Model C

図-8 単位ユニットの挙動

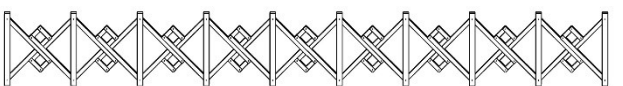


図-9 直線状の展開

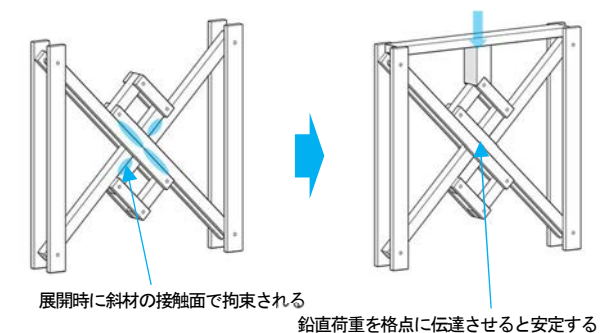


図-10 Model C の概要

(2) 橋梁への応用

前節で紹介した3種類の構造システムは、どれも補剛材を用いて構造を安定化すれば、橋梁として応用できることが分かった。それぞれの機構を、橋梁として応用する際の検討結果を以下にまとめる。

a) Model A

Model A は (図-11) のように、単位ユニットを連結し (以下、略称複数ユニット)、それを橋直方向に2対並べることで、主桁とすることができる。さらに、補剛材として上弦材と下弦材、変形拘束材を加えることで、剛性を高め、安定させることができる (図-12)。

また、Model A は、変形拘束材の形状を変え、格点間に生じる空間をコントロールすることで曲線状にも形態を柔軟に変化させることができる。例えば (図-13) のように、同じ形状の単位ユニットを連結すると円弧状のアーチ軸線を描く。そのアーチのスパンとライズの関係は、複数ユニットの連結数と、変形拘束材の形状によって決定される。さらに、単位ユニットの形状を調整すれば、放物線形や、懸垂曲線にも対応することができる。

以上の点から、Model A を橋梁に応用する際は、現地形の形状に合わせて、また、応力的な観点で形状を変えていくことができると考える。

次章において、Model A の幾何学的な挙動を整理する。

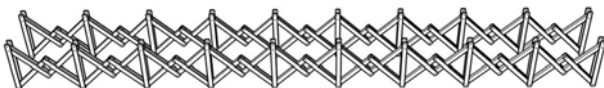


図-11 複数ユニットを2対並べ、主桁とする

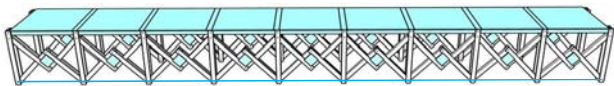


図-12 補剛材(水色に着彩)によって構造を安定させる

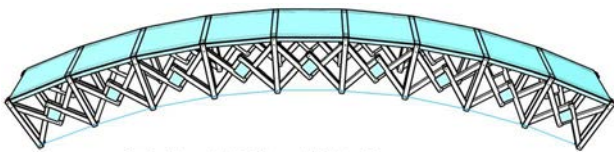


図-13 円弧状に展開した Model A

b) Model B

Model B は、前節の Model A と同様、複数ユニットを橋直方向に2対並べることで、主桁とすることができる (図-14)。Model B は展開と同時に変形が拘束されるため、上弦材と下弦材で拘束すれば、剛性を高め、安定させることができる (図-15)。前節で紹介したとおり、展開時の挙動は直線状となるため、橋梁に応用した際は、梁としての利用が望める。

Model B の利点としては、展開と同時に形態が決定されるため、構造を安定させるために補剛材を設置するために要する時間が少なく済む。そのため、架設に際しては非常に有利に働くと考えられる。

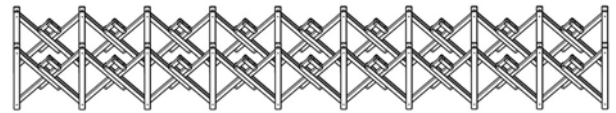


図-14 複数ユニットを2対並べ、主桁とする

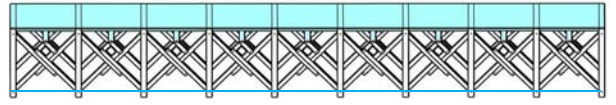


図-15 補剛材(水色に着彩)によって構造を安定させる

c) Model C

Model C は、前節の Model B と同様、複数ユニットを橋直方向に2対並べることで、主桁とすることができる (図-16)。Model C においても、展開と同時に変形が拘束されるため、上弦材と下弦材で拘束すれば、剛性を高め、安定させることができる (図-17)。前節で紹介したとおり、展開時の挙動は直線状となるため、橋梁に応用した際は、梁としての利用が望める。

Model C の利点としては、展開と同時に形態が決定されるため、構造を安定させるために補剛材を設置する時間が少なく済む。そのため、架設に際しては非常に有利に働くと考えられる。

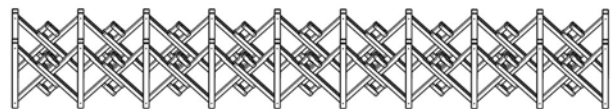


図-16 複数ユニットを2対並べ、主桁とする

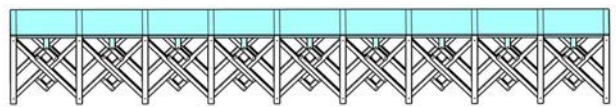


図-17 補剛材(水色に着彩)によって構造を安定させる

4. 展開構造システムの幾何学的性質と橋梁造形

(1) Model A の幾何学的性質

前節でも述べた通り、Model A は連結ユニット数と変形拘束材の形状によってスパンとライズが変化する。そのため、Model A の幾何学的な挙動を以下に示す。

記号の定義は (図-18~図-20) に示す。各片が等しい四角形を基準とし、鉛直材 $S(\text{mm})$ と斜材 $R(\text{mm})$ 、点 B、D の水平距離 $H(\text{mm})$ の値は定数とする。また、点 A、D、E は (x, y) 方向を、点 B は (x) 方向を不動点とする。

Model A は、点 B の内角 $\theta(^{\circ})$ に角度 $\gamma(^{\circ})$ を与えることで点 B は (y) 方向に $e(\text{mm})$ 偏心し、鉛直材が $\alpha(^{\circ})$ 傾くことで、点 C、F は水平に $h(\text{mm})$ 変形することがわかる。この角度 $\alpha(^{\circ})$ の傾きによって、スパン長ライズ比が変化する。変形後の鉛直材と斜材のなす角度 $\theta_c(^{\circ})$ は

$$\theta_c = \sin^{-1} \frac{(R - t) \sin(180 - 2\theta - \gamma)}{S} \quad (1)$$

と求まる。これにより、鉛直材の傾き $\alpha(^{\circ})$ が求まる。

$$\alpha = (\theta + \gamma) - \theta_c \quad (2)$$

式(2)を用いると、奇数連結ユニット n の場合のスパン長 $L_n(\text{mm})$ とライズ高さ $H_n(\text{mm})$ の算定式は

$$H_n = \sum_{i=1}^{\frac{n-1}{2}} 2R \sin \theta \cdot \sin(2\alpha \cdot i) \quad (3)$$

$$L_n = \left\{ \sum_{i=1}^{\frac{n-1}{2}} 4R \sin \theta \cdot \cos(2\alpha \cdot i) \right\} + 2R \sin \theta \quad (4)$$

と求まる。次に、偶数連結ユニット m の場合のスパン長 $L_m(\text{mm})$ とライズ高さ $H_m(\text{mm})$ の算定式は

$$H_m = \sum_{i=1}^{\frac{m}{2}} 2R \sin \theta \cdot \sin[\alpha + \{2\alpha \cdot (i - 1)\}] \quad (5)$$

$$L_m = \sum_{i=1}^{\frac{m}{2}} 4R \sin \theta \cdot \cos[\alpha + \{2\alpha \cdot (i - 1)\}] \quad (6)$$

と求めることができる。角度 θ , $\gamma(^{\circ})$ を仮定することで、式(3)_(6)よりスパンとライズを算出できる。

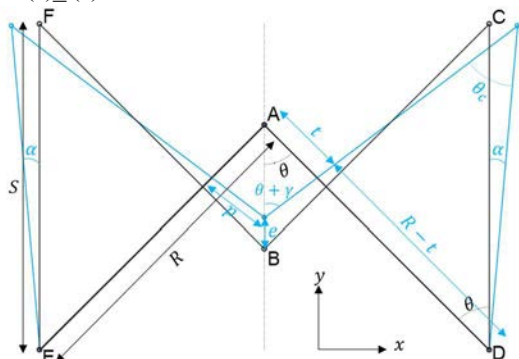


図-18 モデル A の挙動と記号の定義
(青字は変形後の形状と変数)

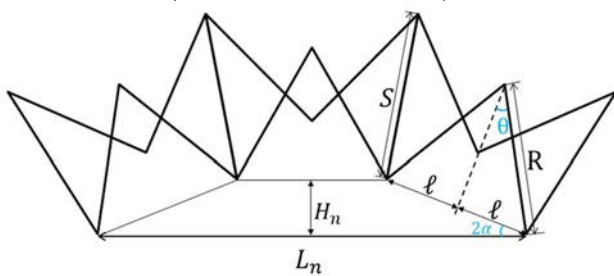


図-19 奇数連結ユニット n の記号の定義

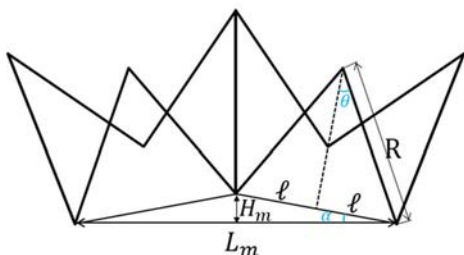


図-20 偶数連結ユニット m の記号の定義

(2) Model A のスパンとライズの関係

前節で求めた(3)-(6)式のユニット数によるスパン長とライズ高さの算定式を用いて、 $n = 9$, $m = 10$, $n = 11$ ユニットのスパン長とライズ高さを求め(図-21)に整理した。ここで、鉛直材のヒンジ間の長さは $S = 672\text{mm}$ 、斜材のヒンジ間の長さは $R = 657\text{mm}$ とする。(図-21)は横軸をスパン、縦軸をライズで表現し、 $n = 9$ ユニットは実線、 $m = 10$ ユニットは破線、 $n = 11$ ユニットは一点鎖線で示している。本構造は斜材間に生じる角度 $\theta(^{\circ})$ と点 B の角度 θ に $\gamma(^{\circ})$ を加えた $\theta + \gamma(^{\circ})$ によって形態が決定されることがわかる。よって角度 θ の違いは文字色、角度 γ の増加は記号によって差別化している。また一般的なアーチ橋は、アーチスパンライズ比が 1/5 から 1/8 程度の範囲内にあるため、図中に範囲を示している。

(図-21)をみると、どのユニット数及び角度 θ でも角度 γ が小さいと高スパン長、低ライズ高さとなることがわかる。また、角度 γ が大きい場合は低スパン、高ライズを得ることができると思われる。

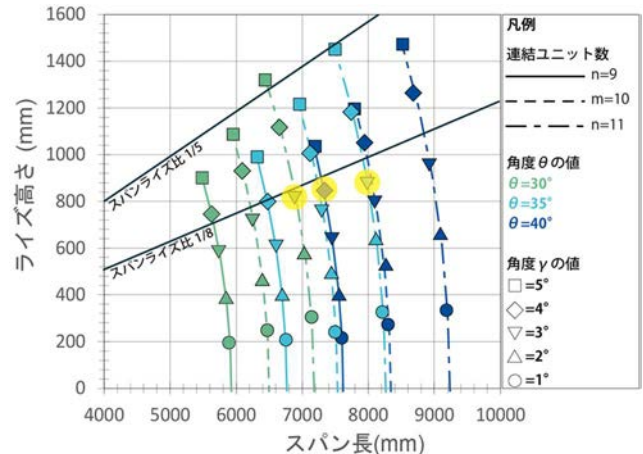


図-21 ユニット数によるスパンとライズの分布

(3) 橋梁造形の検討

CG を用いて、Perspective Drawing (以下：パース) を作成し、各モデルの造形検討をする。また、橋梁模型を製作し、スケール感と部材のおさめについて検討した。

ここでは、設計組織内での造形検討を目的としているため、形、寸法比率に関しては図法に従っているが、素材の質感、色、背景に関しては省略している³⁾。

a) 造形モデルの検討

(図-21)に黄色に着色した、3種類の造形モデルを検討する。それぞれ Model A-1 ($n = 11$, $\theta = 30^{\circ}$, $\gamma = 3^{\circ}$) (図-22~図-25), Model A-2 ($n = 11$, $\theta = 35^{\circ}$, $\gamma = 3^{\circ}$) (図-26~図-29), Model A-3 ($n = 9$, $\theta = 40^{\circ}$, $\gamma = 4^{\circ}$) (図-30~図-33) とし、視線入射角 (45° , 90°) の造形を示した。検討の結果、トラスの構成部材による視覚的な煩雑さを感じない。また、アーチとして力の流れが明快で、緊張感を感じることができる Model A-3 をプロトタイプ製作モデルとして決定した。

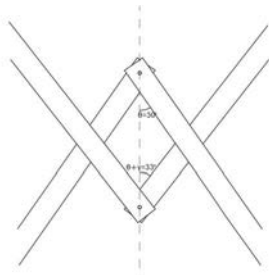


図-22 Model A-1 格点間の形状

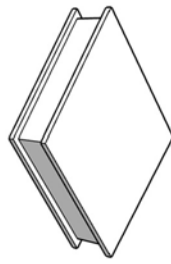


図-23 変形拘束材の形状

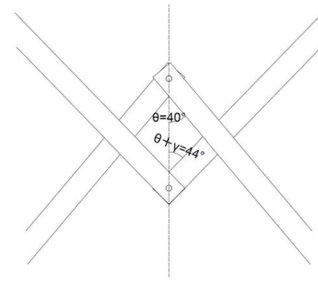


図-30 Model A-3 格点間の形状

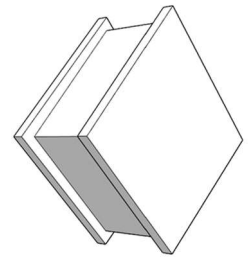


図-31 変形拘束材の形状

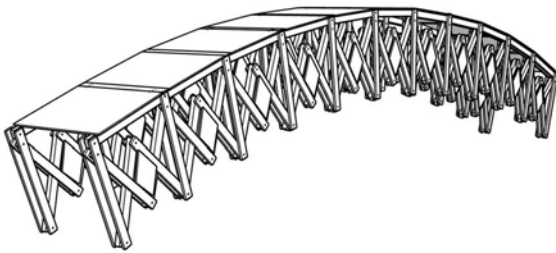


図-24 Model A-1 の外観パース(視線入射角 45°)

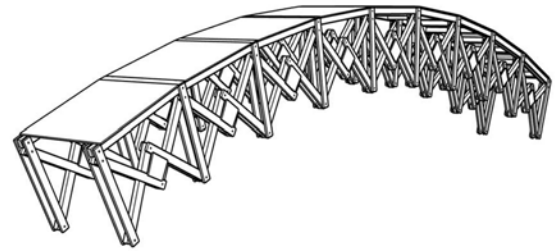


図-32 Model A-3 の外観パース(視線入射角 45°)

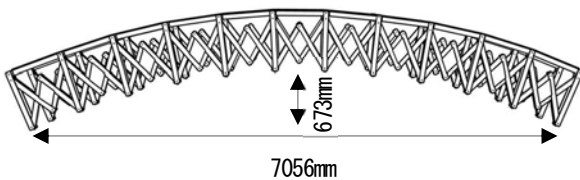


図-25 Model A-1 の外観パース(視線入射角 90°)

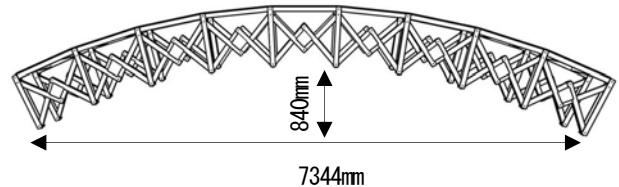


図-33 Model A-3 の外観パース(視線入射角 90°)

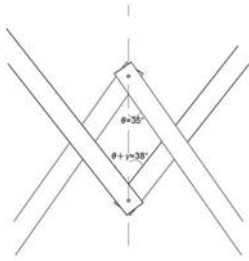


図-26 Model A-2 格点間の形状

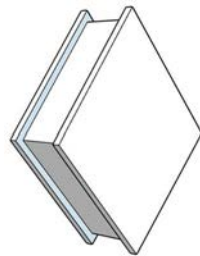


図-27 変形拘束材の形状

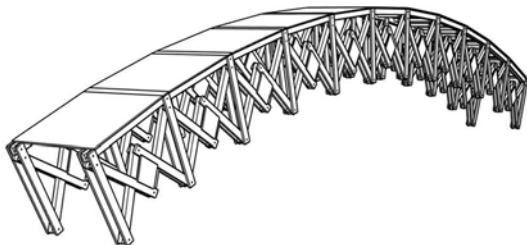


図-28 Model A-2 の外観パース(視線入射角 45°)

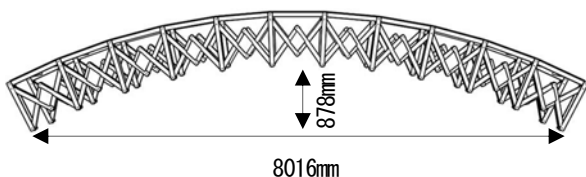


図-29 Model A-2 の外観パース(視線入射角 90°)

b) 橋梁模型による造形検討

スケール感の確認と部材のおさめを検討する目的で、スチレンボード材を用いた橋梁模型を製作した。

検討の結果、単位ユニットが連結することによる、圧迫感と、鈍重な印象が生じないことを確認した。また、(写真-4)のアーチ 1/2 点までに示すように、床版を橋直方向に張出し、フェイスラインを整えることによって、シャープな印象を得ることができると確認した⁴⁾。

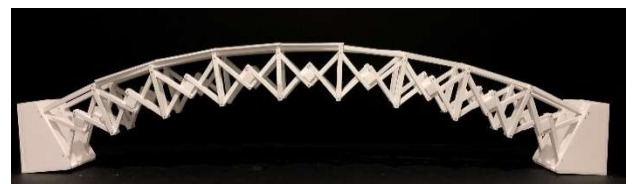


写真-4 Model A-3(視線入射角 90°)のS=1/10 模型

5. プロトタイプの製作

前章で紹介した、Model A-3($n = 9$, $\theta = 40^\circ$, $\gamma = 4^\circ$)をサンプルとして、プロトタイプを製作し、架設実験を行った。橋梁諸元等は、(表-1)に示すとおりである。主な使用材料は、製作の簡便性と軽量性を加味して、SPF 材 (Spruce-Pine-Fir 材) と構造用合板を用いた。単位ユニッ

トの寸法は(図-34, 図-35)に示すとおりである。主構造となる鉛直材と斜材は六角ボルトで接合した。また、主に軸圧縮力に抵抗する上弦材は、木材を用いて製作し、主に軸引張力に抵抗する下弦材は、ステンレスワイヤーを使用した。全9ユニットを用いた橋長8333mmの橋梁を製作することができた(写真-5)。全体一般図を(図-36)に示す。

表-1 橋梁諸元

橋名	Square Core Truss 橋
橋長	8388mm
支間長	7344mm
幅員	850mm
スパンライズ比	1/8
総重量	183.5kg
架設方法	移動式支保工
荷重	群衆荷重
使用材料	SPF 材・構造用合板

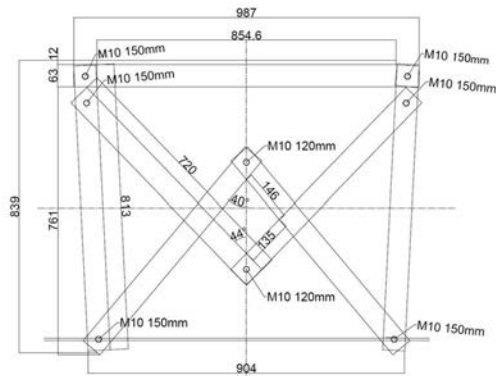


図-34 Model A-3 の単位ユニット側面図

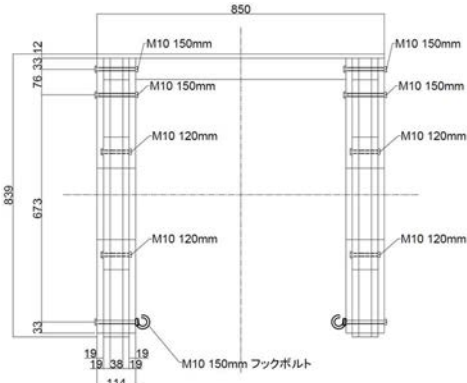


図-35 Model A-3 の断面図

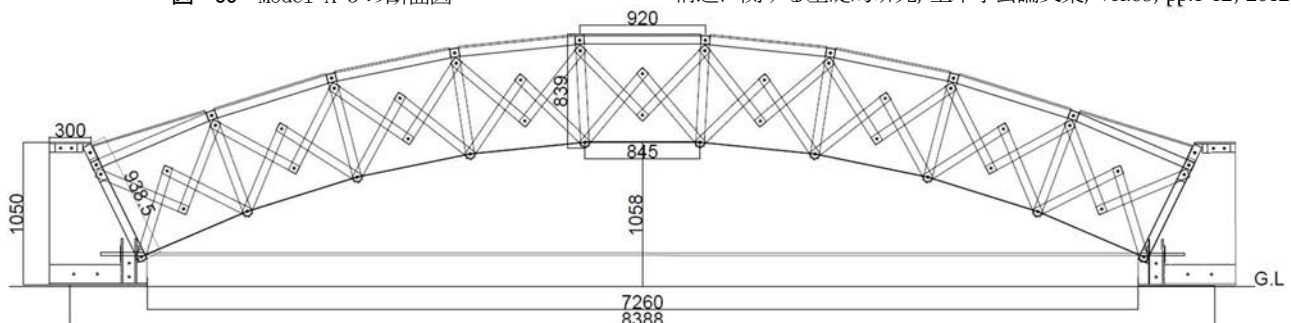


図-36 Model A-3 の全体一般図



写真-5 プロトタイプ Model A-3 (視線入射角 90°)

6. 考察とまとめ

展開構造に着目し、構造システムの開発と橋梁造形を検討したことで、新たなトラス構造の可能性を見出すことができた。第2章でも紹介したとおり、展開構造はほかにも多数あり、いまだに開発段階のため、更なる進歩が期待できる分野である。展開構造の活躍が期待できる。本稿では実例として、橋梁への応用を紹介したが、橋梁以外にも建築構造やプロダクトデザインの分野でも応用可能であると考え。今後は、技術の実装と、他分野への応用について検討を進めたい。

謝辞：本研究をまとめるにあたり、プロトタイプの製作に際しましては、日本大学理工学部土木工学科の学生の皆様に多大なるご協力を頂きました。この場を借りてあらためて感謝いたします。ありがとうございました。

参考文献

- 1) 篠原修, 天野光一ほか: 景観用語辞典, 彰国社, pp.268-283,
- 2) 青木真人, 関文夫: 折り紙工学を適用した土木構造物の造形検討とデザイン実用例, 土木学会景観・デザイン研究発表会研究講演集, No.16, pp.162-167, 2020.12
- 3) 杉山和雄: 橋の造形学, 朝倉書店, pp.1-28, 2004
- 4) 松井哲平, 佐々木葉: 新機能構造主義構造デザインの評価構造に関する基礎的研究, 土木学会論文集, Vol.68, pp.1-12, 2012