

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

青木 真人¹・関 文夫²

¹学生会員 日本大学理工学部理工学研究科土木工学専攻

(〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台1-8-14, E-mail:csma20001@g.nihon-u.ac.jp)

²正会員 工博 日本大学理工学部土木工学科

(〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台1-8-14, E-mail:seki.fumio@nihon-u.ac.jp)

折り紙工学は、工学デザインの観点や折り畳み性能から、様々な分野で活用されている。折り紙工学の中には高剛性を有するものや立体を形成するものがあり、土木構造デザインへの適用が検討できる。本文では、土木構造物への適用が考えられる折り方を選定し、折り紙工学の特性から線的構造物、面的構造物、立体的構造物への適用を検討する。適用性においては、折り紙部が構造の主構造となるもの、補剛材が構造体として働くが、造形的に適用できるもの2種類に分類し評価する。また、一例として橋梁への適用を検討し、木製歩道橋を作製した時のプロセスを紹介する。

キーワード: 折り紙工学, ミウラ折り, ヨシムラ折り, ミウラ折り複合チューブ構造, 筒型らせん折り

1. はじめに

現在、折り紙工学は、人工衛星に搭載された太陽電池パネルの伸縮・展開の技術やコーヒー缶の側面の凹凸に用いられている技術で、折り畳み性能や折り方によっては高剛性を発揮するという特徴を持つ。また、折ることによる陰影や、一枚のパネルで繰り返される幾何学的造形は、工学デザインの新しい手段にもなっている。一方で、折り紙工学を用いた構造分野での活用例は少なく、折り紙工学の性質である工学デザイン性、高剛性、折り畳み性能を適用すると様々な造形発想や構造的合理性が考えられる。

本文では、土木構造物で想定される線的構造物、面的構造物、立体的構造物への折り紙工学からの適用を検討するが、折り紙工学単体では変形が拘束されず構造が成立しない為、補剛材を用いるものとする。ここで、折り紙部が主構造として働くものを構造的適用、主構造は補剛材によるものを造形的適応と定義する。折り紙工学には蛇腹折りやねじり折りなど様々あるが、本研究では太陽電池パネルに用いられたミウラ折り、ミウラ折りから高剛性を高めるために研究されたミウラ折り複合チューブ構造、コーヒー缶の側面や伸縮ダンパーに用いられるヨシムラ折り、ヨシムラ折りを変形した筒型らせん折りからの適応を検討する。以下、それぞれの折り紙工学の観点から性質をまとめ、構造特性について検討を行う。

2. 折り紙工学

(1) ミウラ折り

ミウラ折りは、パネル形が四角形のもので、人工衛星の太陽電池パネルの折り畳みの技術に用いられている(写真-1, 引用: <http://spaceinfo.jaxa.jp/ja/sfu.html>, 閲覧日2020/08/31)。図-1のような展開図を山折り・谷折りで折り込むことで写真-2のような折り畳み可能な平面構造が形成できる。

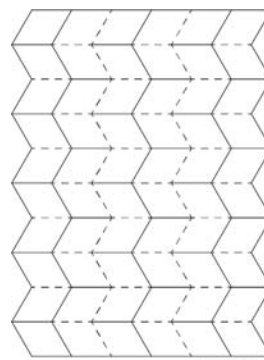


図-1 ミウラ折り展開図



写真-1 太陽電池パネル



写真-2 ミウラ折

a) 基本造形

この一般的なミウラ折りを詳細に調べていくと、パネルが平行四辺形であれば成立することが明らかとなった。つまり、図-1での縦の折れ線の角度は可変であり、横線は平行線でなくてはならない。

b)構造特性

それぞれの部材は自由に変形が可能であることから、各頂点に補剛材を設けなければ変形は拘束せれない。展開方向を固定した場合、面外方向からの外力には補剛材を設けなくても変形に抵抗するが、展開直角方向を固定した場合は面外方向からの外力には自由に変形する。

(2)ミウラ折り複合チューブ構造

ミウラ折り複合チューブ構造は、図-2のようにミウラ折りの一部を折り込み、対になるものを重ね合わせることで写真-3のようにチューブ構造を形成し、それらを組み合わせ写真-4のように複合チューブ構造にすることで、高剛性を発揮することが明らかになっている。



図-2 ミウラ折り一部展開図 写真-4 複合チューブ構造

a)基本造形

ミウラ折り複合チューブ構造は直線的に伸び縮みし、多方向へ変形しない構造より、他の形状変化が可能でないか検討を行った。前述のミウラ折りの基本造形で直線変化の要因が明らかとなったことより、平行線を放射状に変えれば弧状に伸び縮みすることが明らかになった(図-3)。また、ミウラ折りとしての特性を損なわず折り畳みが可能であると確認できた。

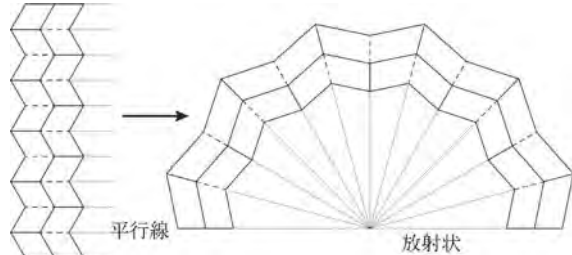


図-3 ミウラ折り放射状変更図

b)構造特性

ミウラ折り複合チューブ構造は、変位が全体に伝搬する特性を有し、ある1点を変形させると全体が変形する。その特性から折り紙部での剛性が高くなり、補剛材を多数設けなくても、数か所で変形を拘束できる構造である。

(3)ヨシムラ折り

ヨシムラ折りは、パネル形が三角形のもので、ミウラ折りを複雑にしたものである。折りの角度を調整することで、伸縮自在な筒型構造になり、変形の自由度は高いことから伸縮装置の開発に採用されている²⁾。図-4に示す断面角 θ を 120° とすると、伸縮自在な六角形筒型構造になる(写真-5,6)。

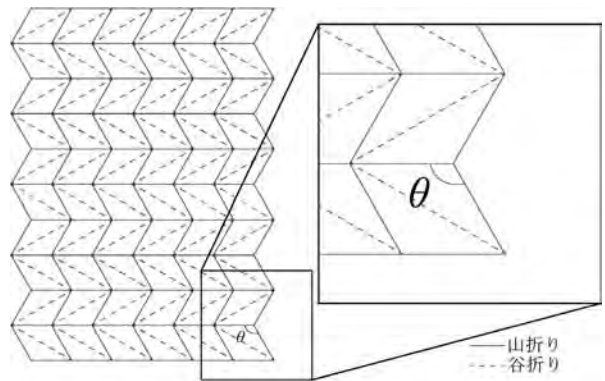


図-4 ヨシムラ折り展開図

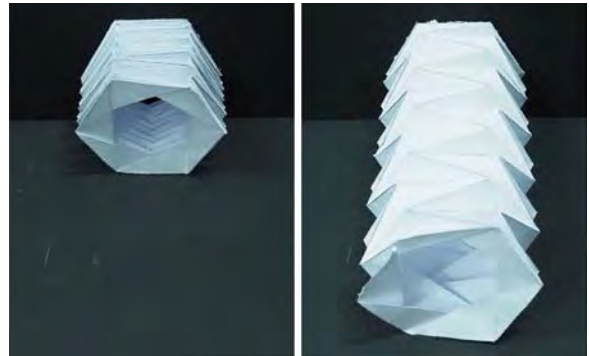


写真-5 収縮時

写真-6 展開時

a)基本造形

筒型構造以外にも、図-5のような展開図であるとして、写真-7のようになる。写真-8で示すように、展開の方向は自由自在で、直線状から、弧状まで造形が可能である。



図-5 ヨシムラ折り一部展開図

写真-7 ヨシムラ折り一部



写真-8 ヨシムラ折り一部形状変化

b) 構造特性

ヨシムラ折りは、様々な方向へ伸縮自在で、自由度の高い構造といえる。そのため、補剛材は各頂点に必要なが、すべて三角形パネルで構成されるため、展開時には、立体パネルトラス構造となる。また、伸縮方向からの外力には補剛材で外力を受け持つことになるが、軸直角（面外）方向へ外力がかかる場合には折り紙部が外力を受け持つことになる。

(4) 筒型らせん折り

ヨシムラ折りを変形させたもので、ヨシムラ折りと同様に三角形パネルを図-6のように組み合わせ山折り、谷折りで折り込むことで、写真-9のように筒型でねじれるように伸び縮みする構造となる。

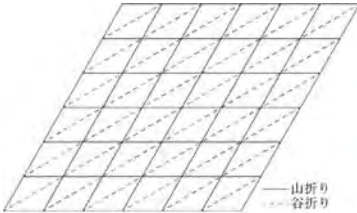


図-6 筒型らせん折り展開図 (円柱型)



写真-9 筒型らせん折り (円柱型)

a) 基本造形

展開図を、図-7のように渦巻き状に展開図を変更すると、円錐型の構造となる(写真-10)。写真-9のものと同様に回転しねじれるように伸び縮みする³⁾。



図-7 筒型らせん折り展開図 (円錐型)



写真-10 筒型らせん折り (円錐型)

b) 構造特性

筒型らせん折りは、ヨシムラ折りと同様に筒型構造であるが、ヨシムラ折りのように部分的に選定してしまうと異なる性質を示すため、筒型を形成して初めてねじれて伸び縮みする構造となる。また、ヨシムラ折りは、展開方向だけでなく様々な方向へ変形でき、自由度の高い構造であったが、筒型らせん折りは展開方向のみ変形でき、自由度の低い構造となっている。その為、面外方向からの外力には高剛性を示す。

3. 折り紙工学の適応

(1) 折り紙工学適応

前述の折り紙工学のミウラ折り、ミウラ折り複合チューブ構造、ヨシムラ折り、筒型らせん折りの観

点からの土木構造物で想定される線的、面的、立体的構造物適用性について表-1に示す。ここで表中の「-」は適用不可、折り紙部単体で構造的適用となるものは「◎」、造形的適用となるものは「○」。折り紙部だけでは成立せず、付加部材が必要、もしくは折り紙部が複数必要で構造的適用となるものは「△」、造形的適用となるものは「×」で示す。

表-1 土木構造デザインへの適用

| | | ミウラ折り | ミウラ折り 複合 チューブ構造 | ヨシムラ折り | 筒型 らせん折り |
|--------|-----|-------|-----------------------|--------|-------------|
| 線的構造物 | 鉛直 | - | ◎ | ○ | ○ |
| | 水平 | - | △ | ○ | △ |
| | 弧状 | - | ◎ | ○ | - |
| 面的構造物 | 鉛直 | ◎ | △ | × | × |
| | 水平 | ◎ | △ | - | - |
| | 弧状 | ◎ | △ | ○ | - |
| 立体的構造物 | 円柱型 | - | - | ◎ | ◎ |
| | 円錐型 | - | - | - | ◎ |

(2) 線的構造物

線的構造物は、鉛直方向に線的な橋脚や主塔、水平方向に線的な橋梁、アーチ橋のような弧状線的構造が考えられる。以下、3点について検討する。ミウラ折りは面状に展開するため、線的構造を取れないので本項においてミウラ折りは適用不可とする。

a) 鉛直方向に線的構造物

鉛直方向に線的構造物である橋脚や主塔は、軸力が主体的に作用することから、折り紙部が軸力に対し構造的に作用できるのか以下では判断する。

ミウラ折り複合チューブ構造は、断面に補剛材を数か所設けることで自立した構造物となり、展開方向からの外力に対し折り紙部が主構造となるので構造的適用となる。また、面上の節点を共有していれば線部材でも成型でき図-8のように考えられる。変位が全体に伝搬する構造体であるから、橋脚で用いると、下部でジャッキのようなもので変位を加えれば展開でき利点となる。

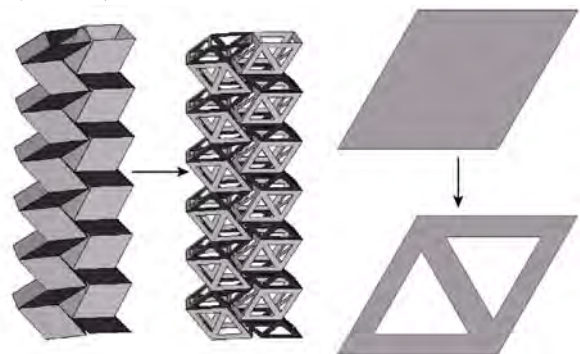


図-8 鉛直方向線的構造_複合チューブ構造適用例

ヨシムラ折りは、展開方向（鉛直方向）に対し変形しやすい構造で、補剛材を用いて変形を拘束する必要がある。各頂点に補剛材が必要となり折り紙部が主体的に構造を發揮しないため、造形的適用となる。ヨシムラ折りを利用した型枠を用いるなどして、筒内部にコンクリートを流し込むことで活用できると考えられる。

筒型らせん折りは、ヨシムラ折りと比較して自由度の低い構造体のため、補剛材は各頂点全てに必要なにならないが、展開方向（鉛直方向）に対し変形しやすい構造のため主構造としては働かず、造形的適用となる。適用例はヨシムラ折りと同様になるが、概形はねじれておりヨシムラ折りと異なる造形となる。

b) 水平方向に線的構造物

ミウラ折り複合チューブ構造は、水平方向の橋梁を考えた場合、補剛材を用いた主構造となるが、表面が凹凸な形状のため床板部は別途必要になり、形状は工夫する必要がある。適用は主構造として働くが折り紙部だけでは構造が成立しないため、付加部材が必要な構造的適用となる。

ヨシムラ折りは、自由度の高い構造体のため、直線的に水平に伸ばした状態で補剛材を設けることで成立する。補剛材が主構造として働くため、造形的適用となる。また、筒型構造でなくても性質は変わらないため、図-9のような造形とすることができる。上弦材と下弦材を各部材間に設けることで橋梁として成立させることができる。

筒型らせん折りは、ヨシムラ折りのように部分的に用いることはできず、ねじれて展開するため、ミウラ折り複合チューブ構造と同様に、床板部は別途必要になり、形状は工夫する必要がある。一方、筒型らせん折りは展開直角方向（水平方向に用いた場合は鉛直方向）からの外力には抵抗し、橋梁としては主構造として働くことになる。よって、適用は主構造として働くが折り紙部だけでは構造が成立しないため、付加部材が必要な構造的適用となる。



図-9 水平方向線的構造_ヨシムラ折り適用例

o) 弧状線の構造物

ミウラ折り複合チューブ構造は、展開図が平行線のものを用いれば直線的に展開し、放射状のものを用いれば弧状に展開することが前述により明らかとなった。よって、本項では展開図を放射状としたものにより検討する。適用例を検討すると、図-10のようになる。床板を面部材、その他の部材を線部材でつくることにより、展開し数か所に補剛材を設けるだけで完成する橋梁となる。補剛材は変形を拘束することのみに使われ、折り紙部が主構造として働くため構造的適用となる。

ヨシムラ折りは、自由度が高いことから前述の水平方向に線的構造物と同様の構造で適用でき、弧を描いた状態で補剛材を設けることで成立する（図-11）。橋梁をヨシムラ折りから適用する利点は、桁構造からアーチ構造まで施工する場面に変更することが容易で、災害の現場のような場合では臨機応変に対応でき、特に活躍すると考えられる。

筒型らせん折りは、直線的に展開し、弧上に展開できないことから、適用不可である。



図-10 弧状線の構造物_複合チューブ構造適用例



図-11 弧状線の構造物_ヨシムラ折り適用例

(3) 面的構造物

面的構造物は、鉛直方向に面的な擁壁、水平方向に面的な床板、弧状に面的な天板が想定される。以下、3点について検討する。

a) 鉛直方向に面的構造物

ミウラ折りは、展開直角方向に対し剛性が発揮される構造のため、鉛直に立てた状態で水平方向に展開することで適用できる。補剛材は変位を拘束するため用いるが、擁壁で考えられる面外方向からの外力には折り紙部が主構造として働くため、構造的適用となる。

ミウラ折り複合チューブ構造は、単体では線的に形成されるため、面的するには複数用いる必要がある。構造的には鉛直方向に線的構造物と同様で、折り紙部が主構造として働くことになる。故に適用は、折り紙部単体では成立しないことから、複数部材が必要な構造的適用となる。

ヨシムラ折りと筒型らせん折りは、どちらも筒型構造のままでは線的構造であるため、面的するには複数用いる必要がある。構造的には鉛直方向に線的構造物と同様で、折り紙部は主構造として働かず補剛材の部分が多数必要になる。故に適応は、折り紙部単体では成立しないことから、複数部材が必要な造形的適用となる。

b) 水平方向に面的構造物

ミウラ折りは、展開方向に補剛材を設けることで面外方向からの外力に抵抗する構造となることから、構造的適用となる（図-12）。床板に適用する場合、表面が凹凸な形状な構造であるため、凹凸面にコンクリートを流し込むことで、ミウラ折り部が剛性を保持し合理的な構造となる。

ミウラ折り複合チューブ構造は、鉛直方向と同様に単体では線的に形成されるため、面的するには複数用いる必要がある。構造的には水平方向に線的構造物と同様で、折り紙部が主構造として働くことになる。故に適用は、折り紙部単体では成立しないことから、複数部材が必要な構造的適用となる。

ヨシムラ折り、筒型らせん折りは線的構造であり、複数用いることで面的となるが、筒型構造であるため床板のような構造物への適用は合理的とならず、適応不可である。

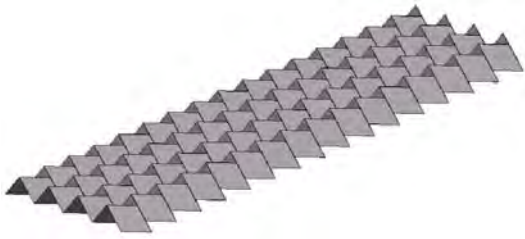


図-12 水平方向に面的構造物_ミウラ折り適用例

o) 弧状面的構造物

ミウラ折りは、展開方向のみに対し弧を描くように変形できるため、弧を描くように補剛材を設けることで天板への適用ができる(図-13)。弧の曲率は、補剛材の寸法により変えることができ、自由に形状変化が可能となる。屋根部材で考えられる死荷重のような面外方向からの外力に対し主構造として働くので、構造的適用となる。

ミウラ折り複合チューブ構造は、弧状線の構造物を複数用いることで面的に形成できる。構造的には、弧状線の構造物と同様であり、折り紙部が主構造として働くことになる。故に、適用は折り紙部が複数必要な構造的適用となる。

ヨシムラ折りは、断面角 θ を調整することで、弧状に展開できるようになる。断面角を決定すると弧の曲率は変更できず、形成できるものは1つに限られる。面外方向からの外力に対し、補剛材によって構造を保つため、造形的適用となる。

筒型らせん折りは、ヨシムラ折りのように一部を選定して弧状とすることはできず、展開方向も直線線のため、弧状面的構造物には適用不可である。



図-13 3D面的構造物_ミウラ折り適用例

(4) 立体的構造物

立体的構造物は、石油タンクのような容器型の構造物が考えられる。また、容器型の構造物は、側面が直線的な円柱型構造と、側面が二次元的な円錐型構造が考えられる。以下、2点について検討する。ミウラ折りは面状に展開し、ミウラ折り複合チューブ構造は四角形筒型構造で立体構造には適用不可であることから、ヨシムラ折りと筒型らせん折りの適用を検討する。

a) 円柱型構造物

ヨシムラ折りは、断面角 θ を調整し、パネル数を増やすことで、多角形円柱型構造とすることができる(図-14)。展開方向が鉛直方向となる為、各接点間に補剛材を設ける必要があるが、容器構造物のような容器内部である面外方向からの外力が発生する場合、剛性を持つ構造となり、構造的適用である。

筒型らせん折りは、ヨシムラ折りと同様に多角形円柱型構造とすることができる。補剛材もヨシムラ

折りと同様に各接点間で必要となるが、ヨシムラ折りよりも自由度が低いため、高剛性な構造となる。また、面外方向からの外力に剛性を発揮する構造のため、構造的適用となる。

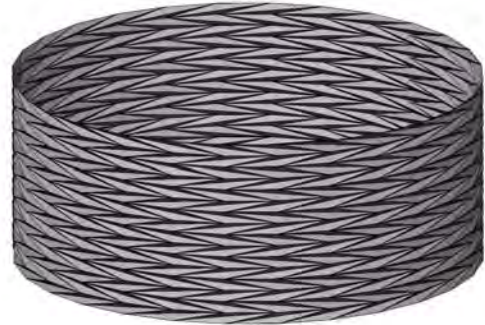


図-14 立体的構造物_ヨシムラ折り適用例

b) 円錐型構造物

ヨシムラ折りは、円錐型に折り込むことができないので、適応不可である。

筒型らせん折りは、前述で示したように円錐形に展開することが可能である。構造性質は円柱型構造と変わらないため、同様に構造的適用となる。

4. 土木構造物への折り紙工学実用例

(1) 弧状線の構造物の適用例

前述の弧状線の構造物である橋梁を対象に、ヨシムラ折りにおける適用を検討する。以下、折り紙工学を適用した橋梁設計におけるプロセスを示す。

(2) 概略形状選定

橋梁の概形は、用いるパネル形、橋軸方向から見た時のパネル数により大きく変化する。モデル1は、鈍角を持つ三角形を3つ、モデル2は直角三角形を2つ用いたものである(図-15, 16)

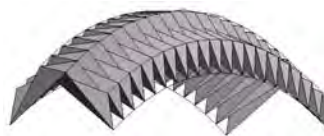


図-15 モデル1



図-16 モデル2

(3) 各部材の照査

ヨシムラ折りを細かく分析すると、回転軸A,B,Cと3つの軸が存在することが明らかとなった(図-17)。複数の軸が存在することから、展開時に挙動の異なる部材を2つに区別することができる。それらの部材を部材A、部材Bとする(図-18)。部材Aは回転軸Aを軸に回転することより展開時には水平方向へ変位し、部材Bは回転軸Bを軸に回転することにより展開時には鉛直下向きへ、部材Aとずれるようにして変位する。また、回転軸Cはライズを上げる際に機能している。部材Aは回転軸A,Cを共有しているため部材Aは重要な役割を果たしていると言える。一方、図-19のように部材Bは排除しても、ヨシ

ムラ折りの性質を損なわず、水平方向への伸び縮み、自由なライズ変更が可能となる。また、部材A,Bは同等の比率で存在するので、部材Bを排除することで重量を半分にすることができる。

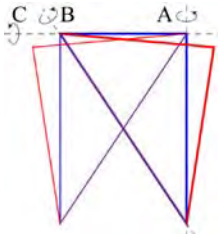


図-17 回転軸
A,B,C

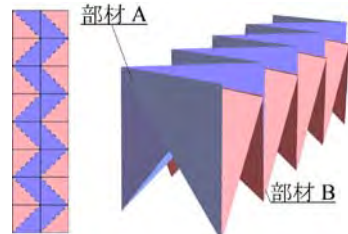


図-18 部材A,Bの展開図, 説明図

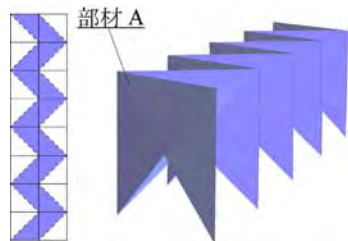


図-19 部材Aの展開図, 説明図

(4) 開口角による影響検討

開口角 θ_1 を図-20に示す角度とすると、開口角によっても橋梁の概形は左右される(図-21, 22)。開口角が大きくなるほど幅員は減少し、必要部材数も少なくなる。部材数が増加すると橋梁の死荷重増加に直結してしまう。また、幅員確保のために面部材を大きくしてしまうと、桁高も同様に増加し、桁高を抑えようとして面部材を小さくすると幅員も減少してしまうので適切な開口角の検討が必要となる。

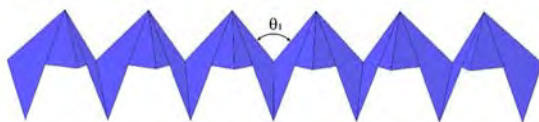


図-20 開口角 θ_1

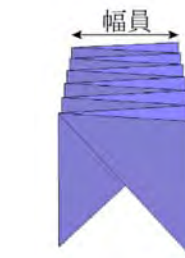


図-21 $\theta_1=30^\circ$

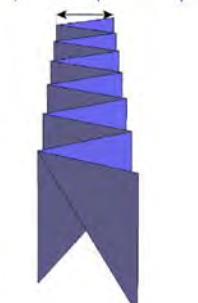


図-22 $\theta_1=90^\circ$

(5) 製作

前述項目を検討し、スパン約8mの木製歩道橋(可変式立体パネルトラス橋)を製作した(写真-11)。イベントで展示し、多くの来場者に渡ってもらい、パネルを用いた橋梁が人々を引き付けることにつながった(写真-12)。折り畳み性能から架設が容易になり、臨時的使用に適するものとなった。一方で、歩行により多少のねじれが発生し、折り紙から構造物に適用するにあたり、部材同士の接続方法からズレが生じてしまう事が考えられ、課題となった。



写真-11 可変式立体パネルトラス橋_側面形



写真-12 可変式立体パネルトラス橋_イベント利用時

5. まとめ

線的構造物、面的構造物、立体的構造物に対する折り紙工学のデザイン適用の検討を行い、土木構造物への適用の可能性を明らかにした。また、弧状線の構造物であるアーチ橋への適用をヨシムラ折りから行い、再現可能であることも確認した。

6. おわりに

折り紙工学から土木構造デザインへの適用を検討し、本研究で対象とした4種類の折り方について、それぞれの性質の違いから多くの構造物へ適用できると明らかにすることができた。折り紙工学は、本研究で取り上げた他に多数あり、未だに開発段階で更なる折り方が期待できる分野であることから、さらに土木構造デザインへの適用も期待できる。また、一例として橋梁への適用例を製作し、ねじれに見られた課題が明らかとなったことから、今後は、折り紙工学から土木構造物へ適用するに当たる課題の解決を進めたい。

参考文献

- 1) 舘知宏「剛体折紙メカニズム」日本ロボット学会誌 Vol.34 No.3, pp.184~191, 2016
- 2) 石田祥子, 内田博志, 萩原一郎「折り畳み可能な構造の非線形ばね特性を利用した防振機構」日本機械学会論文集 Vol.80, No.820(2014)
- 3) 石田祥子「数学的手法に基づいた折り畳み可能な構造の展開図創出に関する研究」東京工業大学リサーチリポトリ, 第4099号, 2014