

張力安定構造を用いた伸張式橋梁のデザイン

STRUCTURAL DESIGN OF AN EXPANSION CABLE STABILIZED BRIDGE USING A PRESTRESSED SYSTEM

西山健一*、石井信行**

Kenichi NISHIYAMA, Nobuyuki ISHII

*東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻修士課程 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

**博士(工学) 山梨大学講師 工学部土木環境工学科 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

High tensile strength and flexibility are the major characteristics of cable as a structural member. Taking advantage of this *high tensile strength*, prestressed cable systems have been used for the stabilization of many kinds of structures, such as bridges, while another characteristic, *flexibility*, has been neglected. The authors propose the advantages of cable flexibility, if an expanding motion is taken into the construction process. This may lead not only to a new form of bridge, but also to the development of prefabrication technologies. First in this study, existing structures stabilized by prestressed (PS) systems are investigated and analyzed, and problems in applying a PS system to bridges are identified. Then, structures which can change their form, and construction methods making use of movability are investigated, and methods of changing structural form are related to the conditions of their construction. Finally, on the basis of these analyses, the authors suggest an expansion cable stabilized bridge using a prestressed system and outline its construction method.

Key Words: bridge, cable, prestress, movability, construction

1. はじめに

ケーブルは、①軽くて引張りに強い(単位重量当たりの引張強度が強い)②フレキシブルである(圧縮力に対しては抵抗できない)という2つの顕著な部材特性を持っている。その内「軽くて引張りに強い」という点に着目し、ケーブルにプレストレス(以下PS)を導入することによって架構を安定させる技術が多くの構造物で利用されてきた。橋梁においても、外ケーブル方式や張弦梁構造など、「桁の補強」のためにPSケーブルを用いた例は数多く見られる。

一方、「フレキシブルである」という特性からは「収納性・運搬性が高い」という施工面でのメリットが生まれてくるが、橋梁においてこのメリットを活かした事例はほとんど見られない。しかし橋梁において「引張りに強い」「収納性、運搬性が高い」という2つのケーブルの特性は「小さく収納されたケーブルを伸ばす」という「動」の操作によって結びつけることができると考えられる。

既に、建築工学や宇宙工学の分野では、開閉式の屋根構造や構造の可動性を利用した施工方法、そして宇宙構造物における展開型のマストなど、本来「静」であることが要求される構造物に対して「動」という概念を取り入れ、その構造物の形を変化させる事によって機能や施工上の要求を満たしている構造物がある。

以上のことから桁の補強という目的だけでなく、折り畳んだ構造を伸ばすという「動」の操作を施工に導入す

るためにケーブルを用いることで、新しい橋梁の形が生まれてくることが期待できる。またそれだけでなく部材の製造から全体の組立までを工場で行うという新しいプレファブリケーション技術の発展につながると筆者等は考える。

2. 目的と構成

本研究では、PSケーブルによる張力安定構造を用いた伸張式橋梁(歩道橋)のデザインと施工方法を提案することを目的とする。

研究の構成は次のようである。まず始めに、外力に対する安定性を保つためにPSを用いている構造システムについて事例調査を行い、構造システム内における「PS部材の役割・力学的特徴」及び「形態的特徴」を把握する。その後、これらの構造システムに対して圧縮部材の使われ方に着目した分類を行って、橋梁への応用性を検討する。次に、構造の可動性によってその形態が変化する構造物と可動性を利用した施工方法について、「形態の変化の仕方」と「構造物の施工条件」の2つに着目した事例調査を行い、両者の適合性の検討を行う。これらの分析をもとにして、本研究の目的であるPSケーブルによる張力安定構造を用いた伸張式橋梁のデザインと施工方法の提案をする。さらにこの提案に基づき、歩道橋を対象とした試設計を行い、構造解析によってその適用性を確認する。

3. PSを用いた構造システムの事例調査

本章では、付加的にかけられる外力に対して、PSを用いた構造システムによって、安定性を獲得している事例を対象とした文献調査を行い、「PS部材の役割と力学的特徴」「形態的特徴」の2つの観点から分析を行う。そして最後にこれらの構造システムに対し、圧縮部材の配置の仕方に着目した分類をし、橋梁（歩道橋）への適用性について検討する。

3.1 橋梁

(1) 張弦梁構造

タールオーベレアルゲン橋（ドイツ 1990年）【図-1】¹⁾

○PS部材の役割と力学的特徴

これは張弦梁構造と斜張式吊り構造を組み合わせた高架橋である。張弦梁構造におけるPS部材の役割は、曲げ材（梁）と組み合わせることによって、曲げ材にかかる曲げモーメントとせん断力を大きく減少させる一方で、高い剛性を確保するという点にある。また、自己釣合構造を形成することによって、ケーブルの張力によって生じる水平反力を梁への圧縮力として処理している点もこの構造の持つメリットとして挙げられる。【図-2】

○形態的特徴

張弦梁構造ではケーブルが外部に露出しているため、ケーブル自体をデザイン要素として用いることができる。またストラット（束材）の本数や長さ、桁部分に用いる構造（単純桁、格子桁、トラス桁など）の自由度が高いため多様なデザインが可能になる。

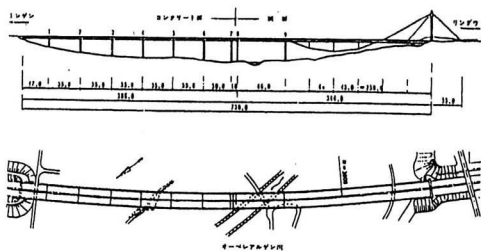


図-1 タールオーベレアルゲン橋の一般図¹⁾

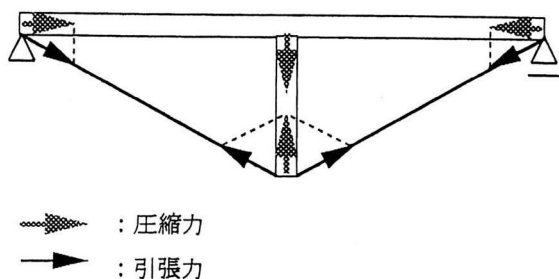


図-2 張弦梁の自己釣合構造

(2) サスペンアーチ構造

ロイヤルアルバート橋（イギリス 1859年）【写真-1】²⁾

○PS部材の役割と力学的特徴

サスペンアーチ構造は19世紀の大スパン橋梁において数多く応用されてきた。この構造におけるケーブルの役割は、アーチ構造によって生じる外向きの水平力をケーブルを用いたサスペンション構造によって生じる内向きの水平力で相殺することである。そして水平方向の自己釣合型の構造を形成することによって、外側に構造物を設けることなく合理的に安定する。【図-3】

○形態的特徴

サスペンアーチ構造はアーチ構造とサスペンション構造との組合わせであるため、独特なレンズ状の形になり、力の流れが明快に視覚化される。また構造システム内で水平方向の反力が処理されるため、外部に支持構造物（アンカブロック等）を設ける必要がない点も形態的には重要なポイントになる。

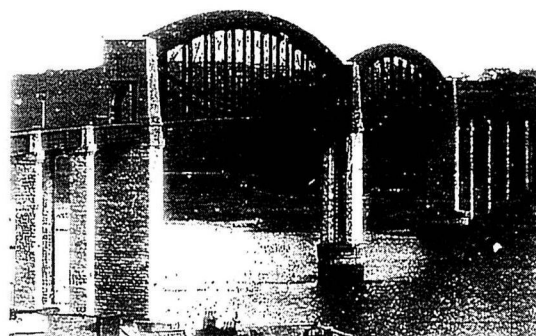


写真-1 ロイヤルアルバート橋²⁾

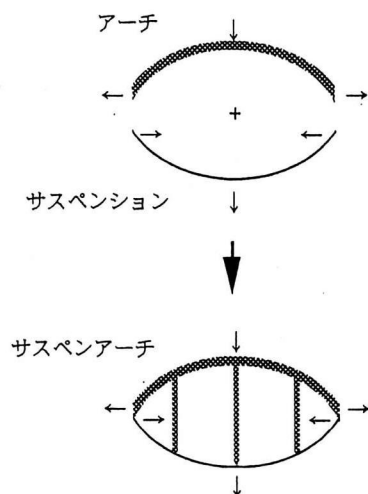


図-3 サスペンアーチ構造の概念図

3.2 建築構造物

(1) ケーブルドーム構造

ジョージアドーム（アメリカ 1992年）【写真-2】³⁾

○P S部材の役割と力学的特徴

これはB.Fullerらによって考案されたテンセグリティ構造の原理をうまく応用して、アメリカ人の構道家D.H.Geigerが開発したケーブルドーム構造である。この構造では、上下に張られた弦材の間に圧縮材が挿入され、弦材にはP Sが導入されている。そのP Sを外周部のコンプレッションリングの圧縮力として処理し、架構の安定を確保している。力学的な特徴としては、まず第一に構造全体の死荷重を低く設定できるという点が挙げられる。しかし一方で、ケーブルという柔軟な材料を用いているために、活荷重に対する変形が大きかったり、偏荷重がかかった時に非載荷面が浮き上がるといった欠点もある。

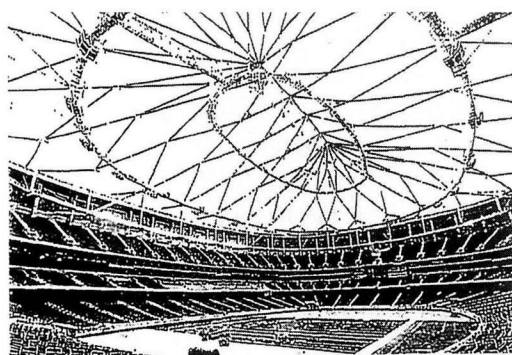


写真-2 ジョージアドーム³⁾

○形態的特徴

ケーブルドーム構造はP Sによって生じる水平方向の反力を外周部のリングで処理しているために、張弦梁やサスペンダー構造と同様、水平反力に抵抗する構造物を別に設ける必要がない。これによって建物の外部を他の用途に利用することができる。

またこの構造システムでは外周部の平面形状は、円形以外にも楕円や長円などの閉曲線にも対応が可能である。一方断面形においても、フープケーブルを用いて多段式にすることによって屋根面の天井高を変化させることができ、建物の要求に合わせた選択ができる。【図-4】

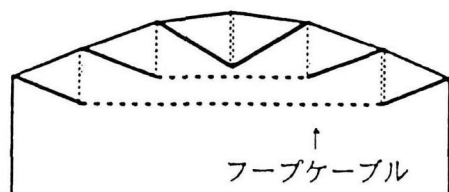


図-4 ケーブルドームの断面形

(2) ケーブルネット構造

ミュンヘンオリンピック競技場（ドイツ 1972年）【写真-3】⁴⁾

○P S部材の役割と力学的特徴

ケーブルネット構造は純粋にケーブルのみで屋根面を作る構造システムである。ドイツの構道家F.Ottoによって設計されたこのケーブル方式の膜構造の場合、ケーブルによって作られた曲面の上に膜材を張るので、膜を直接構造物材として吊り下げるメンブレイン方式の膜構造で起きるようなしわの発生や応力集中はそれ程問題にならない。しかし、ケーブルドームと同様に付加荷重に対しての変形が大きいという欠点を持つ。



写真-3 ミュンヘンオリンピック競技場⁴⁾

○形態的特徴

ケーブルネット構造によってつくられる面は、一般に「凹曲面」と呼ばれる面で、曲率が互いに逆向きの2方向にP Sが導入されている点が特徴として挙げられる。F.Ottoの研究では、この構造が支持形式や基本的な曲面の組み合わせで様々な形態を取りうることを示しており、この構造形式が極めて造形性が高いことがわかる。【図-5】⁵⁾

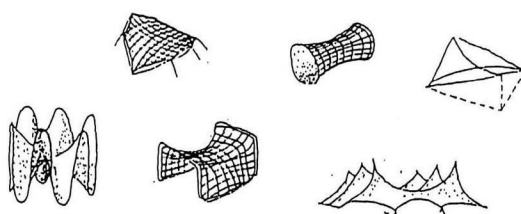


図-5 様々な形態のケーブルネット構造⁵⁾

3.3 まとめ

本研究では上で取り上げたもの以外にも、吊り床版、アーチ補強、プレーシング、空気膜構造、テンセグリティ構造などの構造システムについて同様の分析を行った。

そして、橋梁（歩道橋）への適用を考えた時に、大きな問題となる変形に影響を与えていると思われる圧縮部材の配置のされ方に着目した構造システムの分類を行い、各タイプ毎に問題点を抽出した。【表-1】

表-1 圧縮部材の配置による各ケーブル構造の分類と橋梁（歩道橋）への適用を考えた時の問題点

圧縮材の配置	模式図 圧縮材：▨ 引張材：—	ケーブルの役割とPSの必要性	構造システムの例	橋梁への適用を考えた時の問題点
無し		ケーブルの役割：大 PS：必要	・ケーブルネット	・変形が大きい。 ・偏載荷時の浮き上がり現象。 ・水平面が作りにくい。
不連続		ケーブルの役割：大 PS：必要	・テンセグリティ構造 ・ケーブルガーダー ・ケーブルドーム ・吊床版 ^{注2)}	・変形が大きい。 ・偏載荷時の浮き上がり現象。
連続 不安定 ^{注1)}		ケーブルの役割：中 PS：必要	・テンセグリティ構造 ・ブレース（トラス） ・サスペンダー	・変形がやや大きい。
連続 安定 ^{注1)}		ケーブルの役割：小 PS：必ずしも必要ではない。	・外ケーブル ・ブレース（ラーメン） ・アーチ補強 ・張弦梁	（・ケーブルの役割が小さい。）

注1：ケーブルが無くても機構的に安定な場合を「安定」、そうでない場合を「不安定」とした。

注2：吊床版構造に関しては圧縮材は連続であるが、PSケーブルの果たしている役割が大きいため「不連続」のグループに分類した。

4. 可動性によって形態が変化する構造物及び施工方法の事例調査

建築構造物・宇宙構造物では「動き」を取り入れ、形態の変化により機能・施工の条件を満足させるように設計されている構造物がある。本章ではまずこうした動く構造物を具体的に取り上げ、「形の変わり方」に着目した分析を行う。次に可動性を施工にうまく利用した施工方法を取り上げ、施工条件に着目した分析を行い、最後に「形の変わり方」のタイプ毎に施工に関する特徴について整理する。

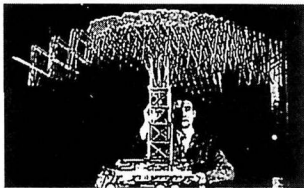
4.1 可動性によって形態が変化する構造物の事例

(1) シザーズ構造による展開トラス【写真-4】⁶⁾

これは1960年代の初頭にスペインの建築家E.P.Pineroが提案したシザーズ構造の例である。はさみの原理を応用したこの構造体は、端点と中央部分の計3箇所回転軸を持つ棒材を2本組み合わせたx型のユニットを連続させてつくったものである。この構造体はx型のユニットの任意の2点の位置によって全体の形が決まり、一度に全体が展開する（これを全体展開と呼ぶことにする。）仕組みになっている。



写真-4 シザーズ構造を用いた展開可能なトラス⁶⁾



(2) コイラブルマスト【写真-5】⁷⁾

これは「コイラブルマスト」と呼ばれる人工衛星のマストや太陽電池パドルの進展に利用されている伸縮式の構造体である。この構造は【図-6】⁸⁾のようになっており、3本の縦部材がコイル状に折り畳まれて収納されている。センターケーブルを緩めていくと、縦部材の剛性でもって自動的に伸張していく点が特徴的である。シザーズ構造による展開トラスが全体展開型の構造であったのに対し、この構造では一部分のみが展開できる（これを部分展開と呼ぶことにする。）仕組みになっている。

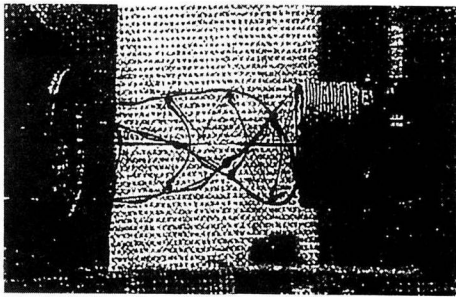


写真-5 コイラブルマスト⁷⁾

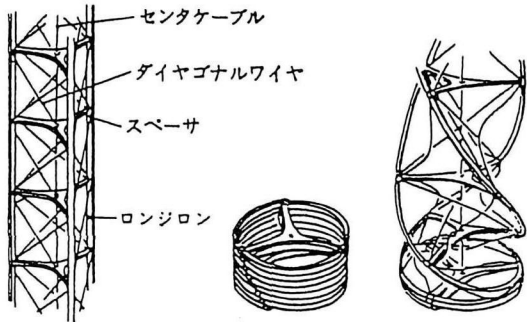


図-6 コイラブルマストの構造図⁸⁾

4.2 構造物の施工条件と可動施工方法

(1) トラベリング工法

(特定領域内での作業を避けた施工方法)

有明コロシアム（日本 1991年）【写真-6】⁹⁾

トラベリング工法は、既存構造物に手を加えないように、既存構造物がある領域の外で新しい構造物を組み立てて、その後に水平方向に移動させて完成させる工法である。既存スポーツ施設の上に新たに屋根をつくる際、「施工期間中にも既存施設を機能させたい。」という理由から既存施設の領域内に足場を建てずに施工が可能な同工法が採用された。



写真-6 有明コロシアム⁹⁾

(2) リフトアップ工法

(安全性の高い地上で作業する施工方法)

パラウサンジョルディ（スペイン 1990年）【図-7】¹⁰⁾

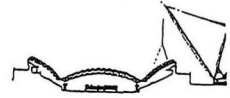
リフトアップ工法は、地上でドーム等の屋根を組み立てて、組立終了後にジャッキで押し上げたり、架設用の

ケーブルで引き上げたりする工法である。この工法では、足場を使った高所作業を大幅に減らすことができ、作業の安全性や作業効率及び精度を高めることが可能になる。

(a) ドーム中央部分の組立



(b) ドーム外周部分の組立



(c) ジャッキアップ中



(d) ジャッキアップ完了



(e) 完成



図-7 Palau Sant Jordi¹⁰⁾

4.3 まとめ

これまで取り上げた例以外にも可動性によって形態が変化する構造は開閉式の屋根や伸縮式のタワーなどに見られる。また施工方法においても、旋回式架橋方法や押し出し式架橋方法など可動性を利用した工法は他にもある。こうしたものも含めて、ここでは「形の変わり方」に着目した分類を行って、そのタイプ毎に施工に関する特徴の整理を行った。【表-2】

表-2 可動性による構造物の形態の変化のタイプとそれが適する施工条件

基本タイプ	範囲	適する施工条件	基本タイプ	範囲	適する施工条件
移動	水平面内 	・ 桁（屋根）下空間が利用できない場合。 ・ 軸方向にスペースがある場合。	膨張	鉛直面内 直線 ↓ 曲線 	・ 桁（屋根）下の地上面が利用できる場合。 ・ ライズがある構造物の組み立て。
	鉛直面内 	・ 桁（屋根）下の地上面が利用できる場合。		鉛直面内 曲線 ↓ 直線 	・ 桁（屋根）下の地上面が利用できる場合。 ・ ライズがない構造物の組み立て。
回転	水平面内 	・ 橋梁等の水平方向に伸びる線状構造物の組み立て。 ・ 軸と垂直な方向にスペースがある場合。	展開	水平面内 	・ 桁（屋根）下空間が利用できない場合。 ・ 屋根等の水平方向に広がる面状構造物の組み立て。
	鉛直面内 	・ 塔、壁等の鉛直方向に伸びる構造物の組み立て。 ・ 地上面に十分なスペースが取れる場合。		鉛直面内 	・ 壁等の鉛直方向に広がる面状構造物の組み立て。
伸張（伸縮）	水平方向 	・ 桁（屋根）下空間が利用できない場合。 ・ 橋梁等の水平方向に伸びる線状構造物の組み立て。	ずれ (伸張・膨張・展開の動きを構成) 		伸張・膨張・展開の動きを構成しているもので、適する施工条件に関しては上記の伸張・膨張・展開の項目を参照。
	鉛直方向 	・ 塔等の鉛直方向に伸びる線状構造物の組み立て。	ねじれ (伸張・膨張・展開の動きを構成) 		伸張・膨張・展開の動きを構成しているもので、適する施工条件に関しては上記の伸張・膨張・展開の項目を参照。

5. 橋梁への適用

本章では、橋梁の構造物としての性格をふまえた上で、これまでに行った「圧縮部材の配置による各ケーブル構造の分類」と「可動性による構造物の形態の変化の分類」の中から、橋梁への適用性が高いものについての考察を行う。その後にPSケーブルによる張力安定構造を用いた伸張式橋梁のデザインと架設方法を提案する。

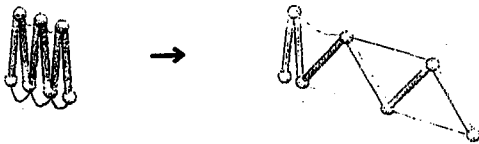
5.1 橋梁に適したPSケーブル構造と可動施工方法

橋梁の構造物としての性格を挙げてみると次のようなことが言える。①線状の構造物である。②路面がある程度水平であることが必要。③許容される変形量が小さい。④支間内の桁下空間を利用できない場合が多い。⑤現場、特に高所などの危険な場所での作業は少ない方が望ましい。

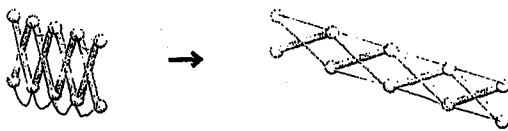
これらの事をふまえると、「圧縮部材の配置」に関しては、「PSケーブルによってシステムが安定しており、比較的安定性が高い。」という理由から「圧縮部材連続（不安定）タイプ」が張力安定構造を用いた橋梁への適用性は高いと思われる。また「可動施工の方法」に関しては、「折り畳まれたものを伸ばす方法はプレファブ性と運搬性が高く、支間内での現場作業が少ない。」という理由から「伸張タイプ」が橋梁の架設方法に適していると思われる。

そこで、ここでは圧縮部材が連続しており、なおかつ機構的な可動性によって1次元方向に伸張できる不安定構造を3タイプ（ウェーブタイプ、シザーズタイプ、ねじりタイプ）を取り上げ、各々についての特徴をまとめてみる。【図-8】

ウェーブタイプ



はさみタイプ



ねじりタイプ

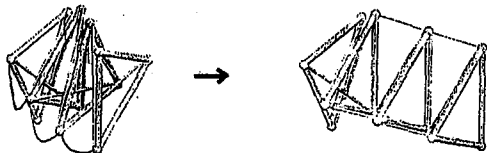


図-8 1次元方向に伸張する不安定構造

- (1) ウェーブタイプ：棒状の部材がジグザグ状に配置され、回転可能なヒンジによって接合されている。伸張の仕方は部分展開型であるため、伸張の際には伸びる部分以外の部分を固定する必要がある。
- (2) シザーズタイプ：はさみの機構を応用したもので、端部と中央部分に回転可能なヒンジが取り付けられている。伸張の仕方は全体が一度に展開する全体展開型である。
- (3) ねじりタイプ：三角柱状の骨組みが回転しながら伸張していくタイプで、各部材の節点は3次元方向に回転可能なヒンジによって構成される。伸張の仕方は部分展開型のタイプである。またある条件内ではあるが、直線以外の線形（曲線など）にも対応できると共に、折り畳まれる回転方向とは逆方向のねじれに強いという特徴を持つ。

5.2 張力安定構造を用いた伸張式のデザインと架設方法の提案

ここでは、前出の3タイプの伸張方法の中から3次元ならではの興味深い動きをする「ねじれタイプ」の伸張タイプを用いた伸張式橋梁のデザインと架設方法の提案を行う。

(1) 設計方針

本論文で提案する橋梁の設計方針を次のように設定する。

- ①部材の生産・組立を工場で行って、折り畳み状態で現場まで運搬し、先端に取り付けられたケーブルを対岸から引き寄せることによって構造体を伸張させて架橋し、最後にケーブルにPSを導入することによって安定させる。
- ②部材の配置には「圧縮部材連続（不安定）タイプ」を、伸張方法には「ねじれタイプ」を用いる。
- ③直線橋だけでなく、曲線橋への適用も視野に入れる。

(2) 問題点

「ねじれタイプ」の伸張方法を曲線橋にも適用する事を視野に入れると、架設中に歩行面となる部分が一定の方向を向くようにするため、伸張時に生じる歩行面の回転をなくしてやる必要が出てくる。

「ねじれタイプ」のモジュールを単純につなげた構造を用いると、その端部の固定の仕方と伸張の始まり方の関係から【図-9】に示されている4タイプの伸張方法が考えられる。しかし、これら4タイプの伸張方法はそれぞれに以下のような問題点を抱えている。

①端部完全固定・前部伸張【図-9 (A)】

端部が完全に固定され、前部から伸張が開始される場合、モジュール毎の伸張が進むに従って歩行面が回転してしまう。直線橋には適用が可能であるが、

曲線橋への適用を考えると、伸張中に先端部分が架橋ポイントから大きくずれた方向を向いてしまう。

②端部回転可能・前端部伸張【図-9 (B)】

端部が鉛直面内に限って回転できるようにし、前端部から伸張が開始される場合、歩行面は常に一定方向（上向き）を向いたまま架設することができるが、折り畳まれた部分全体が回転しなければならない。伸張開始時に構造全体が回転でき、なおかつ施工中の安定性を保つような端部構造を製作するのは非常に困難であり、架設には大きなデメリットとなる。

③端部完全固定・後端部伸張【図-9 (C)】

端部は完全に固定され、後端部から伸張が始まる方法を用いても、架設中の歩行面の回転は避けられるが、折り畳み部分が回転しながら前に進んで行ってしまう。つまり常に先端部に集中荷重がかかるという架設にとっては不利な状態が続いてしまう。

④端部回転可能・後端部伸張【図-9 (D)】

端部が鉛直面内に限って回転可能で、後端部から伸張が始まる場合、折り畳み部分の回転は起こらないが、その折り畳み部分が前方へ向かって進んでいくと共に、伸張が終了する後端部分の歩行面が回転してしまう。この伸張方法には架設にとってのメリットはほとんどない。

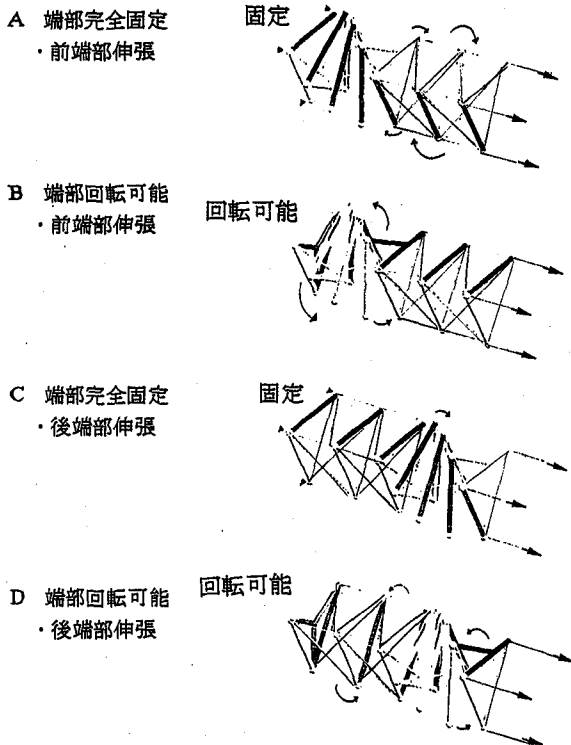


図-9 ねじりタイプを用いた伸張方法

5.3 解決案

ねじりタイプの伸張方法で生じた回転の問題点に対し、縦材をモジュール毎に独立させ、モジュールの伸張毎に歩行面の回転をなくすことで解決した。

伸張していくモジュールには【図-10】のような2枚のY字型の縦材を用いて、真ん中の回転軸を中心に回転できるようにし、完成後には一つの部材として機能するようにした。またモジュールの伸張毎に床版も倒れるような仕組みにし、伸張してゆく部分以外のモジュールが動くことを防ぐためにモジュール毎に架設用のケーブルを取り付け、1回のモジュールの伸張後に、次の架設用ケーブルがはずれるようにした。

架設の方法はまず、構造体を架橋地点の片側に固定し、先端に取り付けられたケーブルを対岸に渡す。このケーブルを引きながら上記の伸張方法を用いて伸張を行っていく。そのモジュールの伸張の様子を【図-10】に、架設の様子を【図-11】に示す。なおケーブルの取り外し方法やディテールの構造に関してはここでは議論しないことにする。

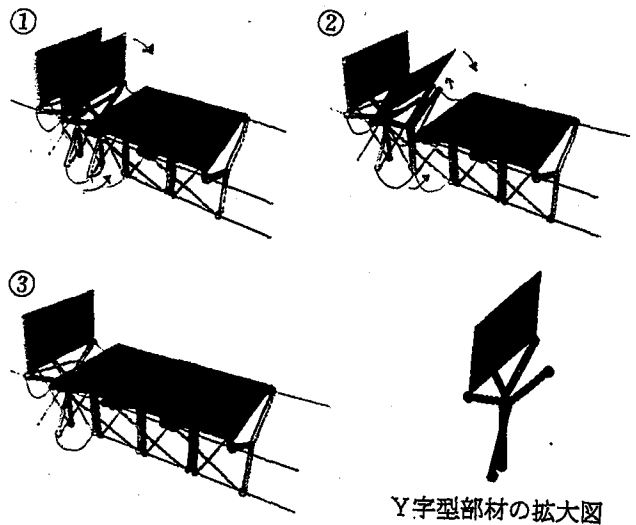


図-10 モジュールの伸張の様子

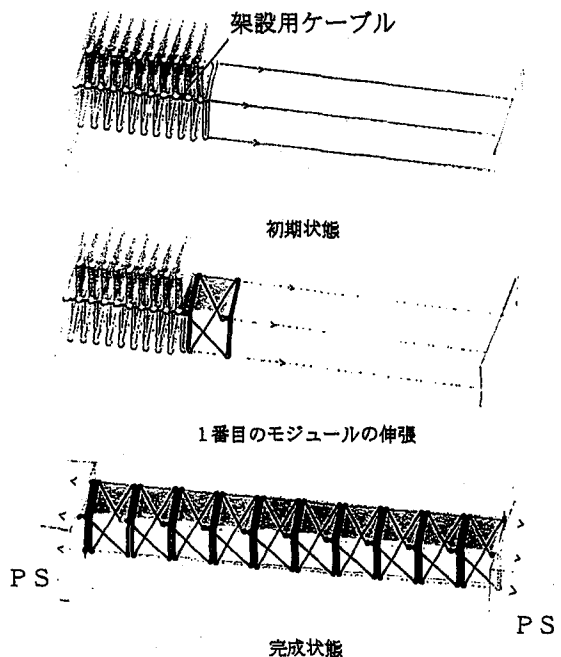


図-11 伸張式橋梁の架設の様子

5.4 試設計及び構造解析による適用性の確認

前節で提案した張力安定構造を用いた伸張式橋梁のデザインと架設方法の適用性を確認するべく、スパン30 mの直線歩道橋を対象にした試設計を行った。その試設計案を【図-12】及び【写真-7】に示す。

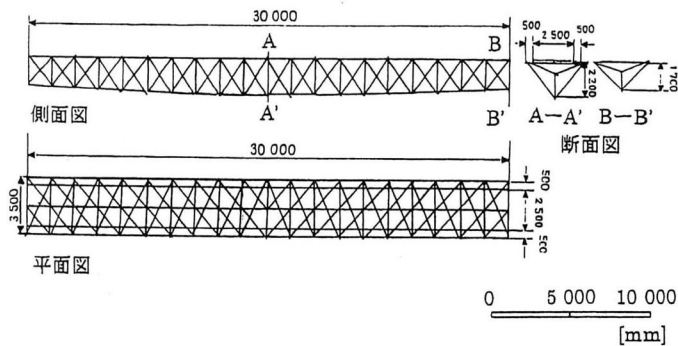


図-12 試設計案の平面図・側面図・断面図

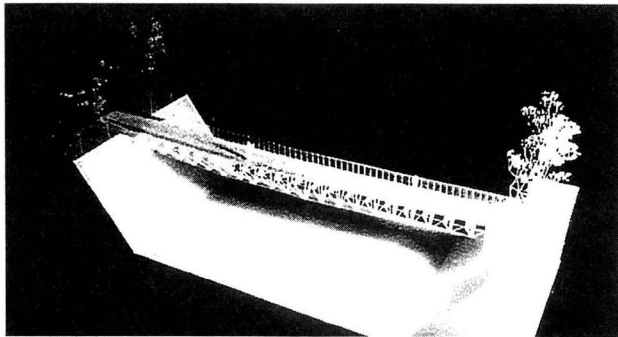


写真-7 試設計案の模型写真

また上記の直線橋に対して3次元骨組み解析プログラム「Multiframe 4D 4.06J」を用いた構造解析を行った。その結果、発生する最大応力度が材料の許容応力度以下になり、伸張式橋梁の歩道橋への適用性が確認された。この解析結果を荷重条件と共に【表-3】に示す。

表-3 試設計案の荷重条件・構造解析結果

死荷重	構造材：鋼管 総重量：3800kg 床版：木 1枚 (2.5m×1.5m×0.06m) 当たり180kg・・・20枚
活荷重	350kg/m ²
PS荷重	上弦材：12t 下弦材：140t
発生する最大応力度	約800kg/m ²
細長比を考慮した鋼管の許容応力度	約840kg/m ²
最大たわみ	約7 cm

6. 研究の成果と今後の課題

本研究の成果としては次の点が挙げられる。

- ①PSを用いた構造システムにおけるPS部材の役割と力学的特徴及び形態的特徴の把握。
- ②可動性による構造物の形態の変化の仕方とその施工条件との関係の整理。
- ③PSケーブルによる張力安定構造を用いた伸張式橋梁のデザインと施工方法の提案及び構造的課題の把握。
- ④張力安定構造を用いた伸張式橋梁の歩道橋への適用性の確認。

また今後の課題としては次の点が挙げられる。

- ①架設時の伸張過程に対する動的解析。
- ②節点などのディテールの検討。
- ③曲線橋への適用性の検討。

7. あとがき

本研究をするにあたって多大なるご意見及びご支援を下さりました、東京大学の篠原修教授、天野光一助教授をはじめとする関係者のみなさまに深くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 財団法人 海洋調査会：橋と景観 ヨーロッパ編2、1991
- 2) Martin Smith：British Railway Bridges & Viaducts, IAN ALLAN, 1994
- 3) 森拓之：五輪効果にけるアトランタ、日経アーキテクチュア92/10/12号、pp.214-226、1992
- 4) 太陽工業株式会社：膜構造建築物（パンフレット）、1995
- 5) 石井一夫：膜構造の展望1 膜構造の可能性、SD 1968年11月号、pp.37-44、1968
- 6) Tony Robbin：Engineering A New Architecture, Yale University Press, 1996
- 7) 名取通弘：研究展望 宇宙構造物の概要、土木学会論文 第410号/I-12、pp.1-16、1989.10
- 8) 三浦公亮：展開宇宙構造物の発想、日本機化学会誌 第90巻 第828号、pp.1394-1400、1987.11
- 9) 建築モード研究所：有明コロシアム、日経アーキテクチュア92/2/24号、p.121、1992
- 10) 村田真 他：空間構造、日経アーキテクチュア 89/3/6号、pp.66-99、1989

(1998年9月18日受付)