

# 吊橋のお話し

2017年7月

## 0. まえがき

吊橋は、多くの人が興味を持っていますし、地域のランドマークとしても親しまれています。近代的な長径間の吊橋は、一般の人が実際の設計や架設に関わることは殆んどできません。そのため、本四架橋が一段落した現在の時点で、今までの経験を継承することが途切れることに不安があります。日本の山間部は谷の深い地形が多いので、生活道路として簡易な歩道専用の吊橋が各地に見られます。これらの吊橋は、橋梁工学の知見が無くても、地元の大工さんや鍛冶屋などを含めた技術集団が工夫して架設していました。つまり、案外、身近に建設できる構造です。現在は知識産業が花盛りです。言わば不器用なインテリ集団だらけであって、自分の手で何かを作ることをしなくなりました。手に技術を持つことを選択範囲が少なく、また技術者への尊厳が失われています。日本の伝統的な大工さんが少なくなったこと、村の鍛冶屋の消滅は悲しい現実です。技術教育の目線を、もう少し大衆化したところに置くことは、結果的に、より高度な技術開発の基礎を築きます。吊橋の建設技術は、決して易しいものではありませんが、一般の人に興味を持ってもらうことを目的として、数式抜き説明をまとめました。吊橋を含め、橋梁工学、さらには土木工学全体を専門にしたいとする若い人が増えてくることを期待して、この小文をまとめました。

島田静雄

## 目 次

### 0. まえがき

#### 1. 原初的な吊橋

- 1.1 しめ縄の橋渡し
- 1.2 浮世絵から
- 1.3 切手の図柄に見る原初的な吊橋
- 1.4 藤蔓などをケーブルに使った吊橋

#### 2. 小支間の実用吊橋

- 2.1 全体の構造構成
- 2.2 ケーブルの形状と力学
- 2.3 ケーブルの構成
- 2.4 補剛桁は遊動円木の支持に似ること
- 2.5 塔の変形を考えること

- 2.6 橋軸方向水平力を吸収する構造の工夫
- 2.7 橋軸直角方向の水平変移を抑える工夫

#### 3. 補剛桁の力学

- 3.1 補剛トラスの座屈変形が頻発したこと
- 3.2 捩れ剛性には上下の横構が必要である
- 3.3 吊橋の変形と振動
- 3.4 耐風安定性に関する変形と振動
- 3.5 カルマン渦による振動
- 3.6 吊橋構造の建築構造への応用

#### 4. 終わりに

- 4.1 吊橋の解析とコンピュータの利用

# 用語索引

索引の参照番号は、章・節 です

AS工法	2.3	自励振動	3.4	フレキシブルタワー	2.5
FEM(有限要素法)	4.1	斜張橋	4.1	振り子	2.7
祖谷(いや)	1.4	振動	3.3	二見ヶ浦	1.1
歌川広重	1.2	スパイラルロープ	2.3	富士見橋	1.1
エアスピニング工法	2.3	線形代数	4.1	風琴振動	3.5
お錦橋(おきんばし)	2.1	ソケット	2.3	補剛トラス	2.1
かずら橋	1.4	素線	2.3	補剛桁	2.1
カルマン渦	3.5	タコマ吊橋	3.2	補剛吊橋	2.1
架線構造	2.1	耐風索	2.7	方杖橋	4.1
河童橋	2.1	丹下健三	3.6	マトリックス	4.1
葛飾北斎	1.2	撓み理論	2.1	無捕剛吊橋	2.1
籠渡し	1.2	弾性理論	2.1	野猿	1.2
金門橋	3.2	跳躍振動	3.3	遊動円木	2.4
切手	1.3	綱	2.3	横桁	2.2
ケーブル	2.1	坪井善勝	3.6	代々木第一体育館	3.6
ケーブル橋	2.1	縄	2.3	ランガーアーチ	4.1
懸垂曲線	1.3	バックステー	2.2	リンク構造	2.4
限界風速	3.4	パラレルストランド	2.3	ロープ	2.3
高煙突	3.5	パンタグラフ	2.1	ロープブリッジ	1.1
固有振動数	3.3	羽ばたき振動	3.4	ロッキングタワー	2.5
サグ	2.7	波動	3.3	ワイヤー	2.3
サドル	2.5	箱ヶ瀬橋	3.1	ワイヤーロープ	2.3
しめ縄	1.1	飛越の堺	1.2		

## 参照できるリンク情報

(\*1) PDF版:橋の情報と資料、中日本建設コンサルタント株式会社、技術情報  
WEB サイトは、

<http://www.nakanihon.co.jp/gijyutsu/Shimada/shimadatop.html>

# 1. 原初的な吊橋

## 1.1 しめ縄の橋渡し

橋は、二点間を結ぶ実用構造物ですが、抽象的な橋渡し・縁結びの用語としても使われます。三重県伊勢二見ヶ浦の夫婦岩を結ぶしめ縄(注連縄)は、海外ではロープブリッジとして紹介されています(図1)。しめ縄は、神社の拝殿や神式の飾り物に見られますが、稲作信仰に起源があります。二見ヶ浦のしめ縄は、海上に張られますので、年に2回ほどの張替えで維持されています。筆者は橋のデータを集めていますので、二見興玉神社の手前、境内の富士見橋を写した写真も添えました(図2)。



図1 二見ヶ浦の夫婦岩(ウイキペディア)



図2 手前は富士見橋(撮影者不詳)

## 1.2 浮世絵から

江戸末期の浮世絵、とりわけ、カラ一版の錦絵は、当時の名所や庶民の風俗を記録していますので、現代風に言えば、旅行先を紹介する絵葉書に相当します。

図3は、橋を架けることができなかった飛騨(岐阜県)の難所で、旅行者の通路にしていた籠渡し(部分)の図柄です。籠は滑車で吊り下げられ、子縄が付いていて左右の岸にいる人足が引き寄せて渡しています。現代でも、山岳地方にワイヤーケーブルを使った籠渡しが見られる場所があります。主に地域住民の物資の渡し为目的の私的な設備です。奈良県の十津川にある人カロープウェイも現代風の籠渡しで野猿と呼ばれています。観光用です。こちらは、乗っている人が自力で引き綱を引いて渡りません(図省略)。

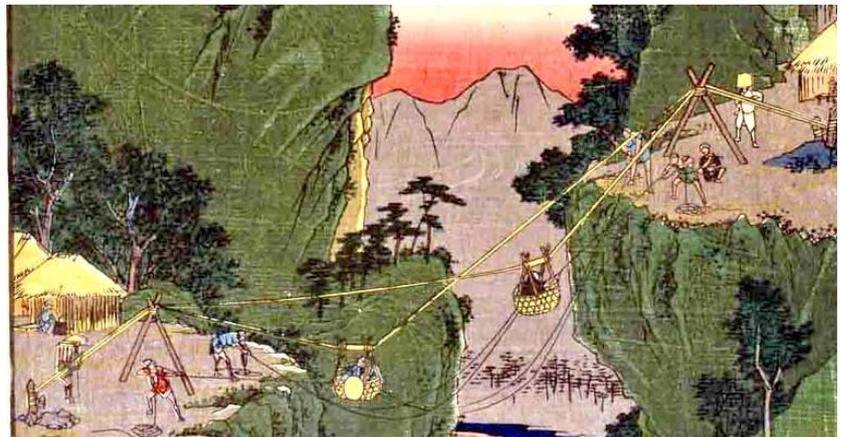


図3 歌川広重名所図会の飛騨の籠渡し(部分)

図4は北斎の描いた「つりはし」です。実際に現地に行かないで、想像を交えて描いたものですので、構造力学的にも、また実用通路があったとして見ても、非現実の図柄です。



図4 葛飾北斎の諸国名橋奇覧・飛越の塚 つりはし

### 1.3 切手の図柄に見る原初的な吊橋

図5～図8は、現代橋梁工学的に言えば、厳密には吊橋として設計されたものではなく、強いて言えばケーブル通路です。吊橋は、ケーブルが通路を吊り下げ、その二つは別系統の部材として建設します。更には、力学的な分類では、無補剛吊橋に分けます。これらの橋は、古風に見せていますが、材料には、強度の高い鋼ケーブルを使っています。ケーブル単独を張り渡した曲線は数学で言う懸垂曲線(カテナリー)であって、中間で大きく撓みます。高強度の鋼ケーブルを大きな張力で兩岸から引くことができると、歩行できる程度の曲線通路にすることができます。



図6 ベトナム発行の切手

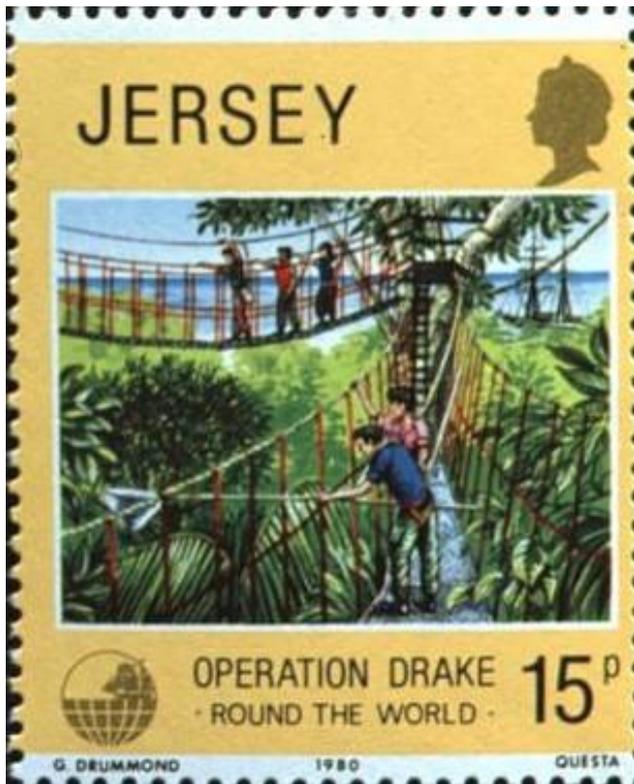


図5 イギリス海峡ジャージー島発行の切手



図7 西アフリカ コートジボワール共和国の切手



図8 中国の切手(1962)

### 1.4 藤蔓などをケーブルに使った吊橋

植物のかずら(葛)を使って架けられた徳島県祖谷(いや)のかずら橋が有名になりました(図9)。上の1.4節の例と同じように、切手の図柄にも採用されています。この架橋場所は、平家の落人部落であったことと、本四架橋現場に近いこともあって、一種の観光資源となりました。同じような橋は、徳島県内に数橋あったこと、最古の架設は1646年である、との記録があります。安全な通路にするためワイヤロープを使っていて、外見にかずらを装飾に使ったデザインになっています。図7も、現地の蔓系の材料を使ったと想像されます。

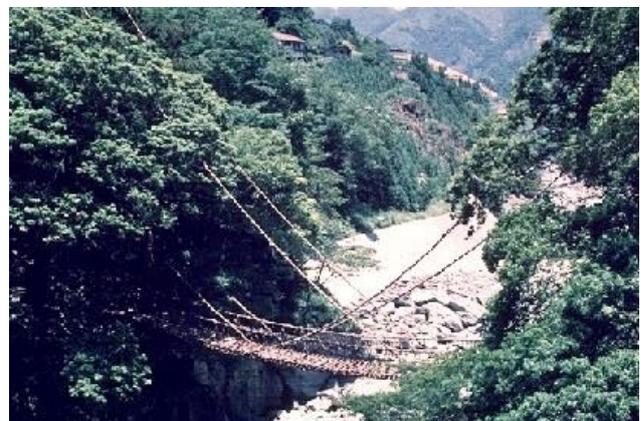


図9 徳島県祖谷(いや)のかずら橋(倉西 茂)

## 2. 小支間の実用吊橋

### 2.1 全体の構造構成

山間部の道路橋には、実用的な小支間の補剛吊橋が架けられているのを見ることがあります。木材輸送の大型車やダンプカーの通行ができますが、すれ違いはできない程度の小幅員で建設されていて、基本的な構造力学を踏まえて設計してあります。長大吊橋は撓み理論で計算しますが、中小吊橋では弾性理論を使います。両端をヒンジで支持した単純桁(または単純トラス)を、放物線ケーブルから一定間隔で下ろした吊材で吊った形式です(図10)。理論式は、吊材をすだれのように密に並べた構造を仮定します。ケーブル自体は曲げ剛性がないので、床部を支える補剛桁部に曲げ剛性を持たせることで、大型車の通行もできる吊橋として機能します。普通は補剛トラスで組みます(図11)。一方、地域の生活道路橋の性格を持たせる歩道専用の小吊橋には、安全を考えた床構造や高欄を持たせますが、普通、無補剛吊橋として設計されます(図12)。また、観光の目玉として長い支間を渡る歩道専用のケーブル橋も競われています。こちらは、板を渡しただけの通路のことも多く、やや物騒な構造です。通路の線形は、ケーブルの撓み変形に沿わせるため、水平にはなりません。前節の図5~8がそうです。もう一つ、ケーブルの使い方の例として、電化区間の鉄道の架線構造も注目したいところです。全体を吊る放物線ケーブルから、パンタグラフが当たる架線を水平に保つように吊ります。水平な架線部の端部に、張力を加える錘をぶら下げる個所を見ることができます。この水平張力は内部応力の性格を持つ力であって、ケーブル自体に曲げ剛性が無くても、曲げ変形を抑えます。実は、吊橋の数学モデルは、引張力を作用させた桁です。昔の路面電車の架線は、適当な間隔で道路を横断する、横に張ったケーブルで架線を支えていました。架線自体に上下の変位差が大きくなりますので、相対的に電車側のパンタグラフも大きくしてあります。新幹線車両のパンタグラフは、在来線のものよりも小さくなっています。

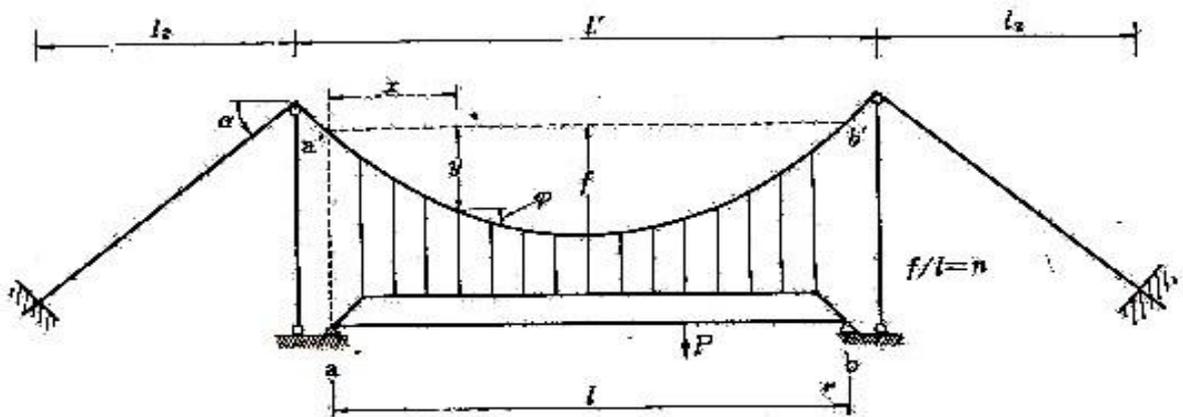


図10 単純吊橋の幾何学的形状



図11 静岡県天竜川上流、錦橋(おきんばし)ポニー形式の補剛トラスを使って重量車も通ります。耐風索を配置してあることに注目



図12 長野県上高地の河童橋(ウイキペディア)木造の、塔、床組、高欄、そして耐風索が見えます歩道専用の無補剛吊橋です

## 2.2 ケーブルの形状と力学

吊橋は、基本的に長大橋の架設に向けた橋梁形式です。小径間の吊橋は、通路用桁橋の集合を、等間隔の吊材が吊る複合構造です。図 11、図 12 では、吊材は横桁を吊り、間接的に通路の床構造を横桁間隔で支えます。現在では、補剛桁の上弦材の格点で吊ります。床構造の連続性を補うのが補剛桁(または補剛トラス)です。吊橋全長に較べて、補剛桁が華奢に見えることが、吊橋の特徴です。完成状態の単純吊橋全体のケーブル形状は、図 10 のように、中央部が放物線、左右のバックステー部が直線です。この幾何学的形状で、ケーブル全長の計算をします。吊橋本体は、活荷重を載せず、標準温度のときを基準状態と決めておきます。補剛桁本体の重量は、吊材を介してケーブルにすべて持たせ、桁には曲げ応力が作用しないように架設します。ケーブルに作用する引張力は、全体長さに沿って、すべて計算できます。したがって、ケーブル全長から、引張り応力による伸び分を引いた長さが、架設前のケーブル長です。吊橋は、外的不静定構造物です。夏・冬でケーブルに相対的な温度差があると、ケーブルの長さが伸縮し、補剛桁が曲げ変形を受け、橋桁の撓みが変化します。この大きさは、橋全体の長さの 1/1000 程度ですので、目視では殆んど分かりません。実際の吊橋で、温度変化による縦断勾配の変化を測定した報告文献を筆者は知りません。昼・夜の温度変化程度では有意な測定が難しいでしょう。夏・冬と季節を変えて測定することには知的興味がありますが、機会を選ぶことも必要ですし、興味がないと実行できない嫌いがあります。

## 2.3 ケーブルの構成

中小支間の吊橋のケーブルは、複数本の、いわゆるワイヤーロープ単位を、更に束ねて使います。ワイヤーロープは複数の子繩(ストランド)単位を縀りこんだ構造です。縀りが単純になるスパイラルロープが次善のケーブル構造です。これらのロープは、引張力が作用すると縀りが締まり、長さも幾らか伸びます。この大きさは予測できませんので、前もって引張力を作用させる現場設備を作って、不確実な歪分を除きます。最も弾性的に信頼できるロープが、素線を平行に束ねた子繩の集合(パラレルストランド)でケーブルにまとめる方法です。これらのロープは、製綱工場で製作され、ドラムに巻きつけて架設現場に輸送します。長大吊橋のケーブルは、素線をドラムに巻きつけたままで輸送し、架設現場では、素線単位で引き出して、全径間を渡します。何本かの素線単位をまとめてストランドにし、この集合でケーブルに束ねます。これは空中での工事になりますので、エアスピニング工法(Air Spinning; AS工法)と言います。ケーブルの両端は、素線をばらしてアンカー用ソケットに錫系の溶着金属を流し込んで素線を固定し、それをアンカーブロック内のフレームブロックに取り付けます。このソケットは、ケーブル全体の長さを幾らか調整できるようなフレームに取り付けて、ストランド単位での張力の調整をします。なお、日本語との対応は(素線=ワイヤー)、(縀=ロープ)、(綱=ケーブル)と当てます。

## 2.4 補剛桁は遊動円木の支持に似ること

吊橋の補剛桁を桁端部で支持する方法は、二つの構造モデルがあります。一つは、図 10 に示すように、単純支持桁の支承構造を基本とする考えです。もう一つは、桁端部を遊動円木のように支持する構造です(図 13)。どちらの場合も、支間中央で、ケーブルと補剛桁との相対的な水平移動を拘束します。補剛桁は橋軸方向の移動を考え、接続する路面に伸縮装置が必要です。標準的な吊橋の塔は、塔頂のサドルから伝わる鉛直力を支える垂直の柱です。吊材は主ケーブルから鉛直に補剛桁を吊り下げます。橋軸方向から見ると、ケーブル・吊り材・補剛トラス・塔が垂直面内に並びますので、桁端で、補剛桁と塔との間に隙間が必要です。したがって、吊橋の力学モデル(図 10)で見ると、塔頂間距離よりも補剛桁の支間が短くなります。

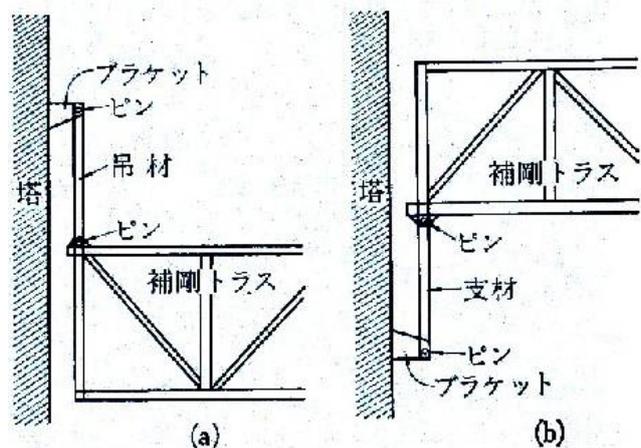


図 13 遊動円木式の桁端の支持構造

塔を通り抜けて補剛桁を連続させたいとなると、塔柱を傾斜させ、英字のAのように、塔柱下部を開かなければなりません。斜張橋は、この形式の塔構造を見ることが多くなりました。幅員が狭い吊橋は、横荷重に対する塔の倒れの安全率を上げるため、塔の基部を開くことも行われます。長大支間の吊橋の桁端は、ケーブル吊り材ではなく、塔の或る高さの個所から補剛桁端部を吊る遊動円木構造か(図 13.a)、下から支える(図 13.b)ようなリンク構造に構成します。ロッキングタワーを持つ中小吊橋では、アバット(橋台)で橋軸方向の水平移動を許す通常の支承構造で補剛桁を支え、ロッキングタワーのヒンジ支点を外側に外します。

## 2.5 塔の変形を考えると

吊橋本体の架設工事は、塔の建設から始め、主ケーブルの張り渡しまでが一段落です。ここで、図10の塔の力学モデルを見て下さい。塔頂のヒンジは、ケーブルを塔に固定する金具(サドル)を置くこと示します。塔の基部が、ヒンジになっていることに注目して下さい。したがって、塔だけを単独に自立させることはできません。ケーブルを張り渡した時点では、バックステー部も懸垂線を描き、塔頂間の長さが伸びています。塔の基部を固定した構造にすると、左右の塔頂間を広げる水平力が作用し、塔基部に曲げモーメントが発生します。塔基部にヒンジを持たせた構造を、**ロッキングタワー**と言い、中小支間の吊橋で採用されます。一方長大吊橋は、塔自体が自立できるように基部を固定構造として建設します。そうすると、塔頂のサドルの左右でケーブル張力の水平成分の差に当たる水平力が塔頂に働きます。この力に対応させる構造工夫が三種類あります。

- ① 塔の弾性変形を考える場合であって、**フレキシブルタワー**と言います。
- ② 塔頂のサドルの位置を橋軸方向にジャッキなどで移動できるようにします。
- ③ バックステー部も吊橋構造にして、見かけ上、連続吊橋にして左右のケーブル水平反力の差を小さくします。

## 2.6 橋軸方向水平力を吸収する構造の工夫

吊橋は、自重の大部分を吊り材を介して主ケーブルに伝えますので、補剛桁の支点反力と剪断力とは、同じ支間で考える単純桁よりも大幅に小さくなります。補剛桁が橋軸方向に水平移動することを拘束する方法として、支間中央で、主ケーブルの吊り金具を補剛桁に固定させるか、斜め部材(**center diagonal stay**)を設ける例を見ることができます。補剛桁の橋軸方向慣性力は、一部がケーブルに伝わり、補剛桁が左右逆対称に変形します。しかし、これだけでは水平力を取り切れないこともあります。斜張橋のように塔から斜めのケーブル(**tower stay**)を張る例があります。歴史的な長大吊橋であるニューヨークのブルックリン橋に見ることができます。日本では地震がありますので、橋軸方向に補剛桁の移動を許すことと、地震で生じる水平力を吸収させることを同時に考えます。支承の水平移動の遊間を超えて、支承と伸縮装置を破壊させないようにするため、桁端部に弾性的な拘束を工夫することがあります。このとき、支間中央で、補剛桁全重量の水平震度相当の水平力が作用したときの変位量の計算が必要です。これは、吊橋中央に対して左右独立した吊橋構造系を考え、左右のケーブル水平力に差があつて、桁が左右逆対称に変形するときの弾性エネルギーを計算すれば得られます。

## 2.7 橋軸直角方向の水平変移を抑える工夫

吊橋は、支間に対して相対的に幅員が狭いので、中小吊橋では、横方向からの風を受けて、横方向の変形、または振れが大きく出易い性質があります。振れは、もし水平変形と合わさると、言わば橋面を横にめくるような変形か、その逆の振り子のような変形になります。しかし、普通は、ケーブルが左右にありますので、遊動円木のような変位になって、振れとは連成しません(図14)。つまり、横変形と振れとは独立した力学系として計算することができます。振れに対しては、左右ケーブルの間隔のほぼ中央を通路にしますので、通路の左右の撓み差が小さく、振れ変形を抑えます。橋軸に直角で水平方向の変形は、主に補剛桁の横方向の曲げ剛性で持たせることと、振り子として働く復元力で持たせます。風荷重による応力は大きくないのですが、変形が大きく出易いので、中小吊橋では、放物線状に**耐風索(storm cable)**を張ることが効果的です。経済的です(図11、図12参照)。歩道専用の吊橋は、床構造を軽量にできますので、主ケーブルのサグも小さくできます。そうすると、水平方向の変位を抑える効果が低くなります。しかし、やや支間が大きい吊橋では耐風索を使うことができません。そのため、実験的に、補剛桁の風力抵抗係数を求めて設計荷重を決めています。

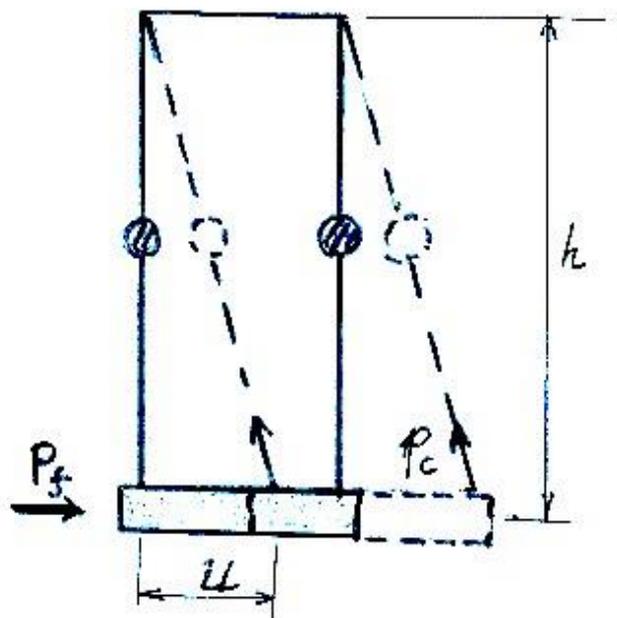


図14 振り子状の横変位

### 3. 補剛桁の力学

#### 3.1 補剛トラスの座屈変形が頻発したこと

第 2.1 節、図 11 に示した「お錦橋(1907,藤井資料 fuji09845)」は、歩道専用吊橋の構想をそのまま引き継いで、ポニー形式を補剛トラスに採用しています。放物線ケーブルが横桁を吊り、その上にトラスを組み上げています。大きな桁高を必要としない小吊橋ですので、通行車両の高さに邪魔にならないようにしたものです。大正年代まで、この形式で設計された吊橋が各地に残っています。トラス上面に横構がないポニートラス構造に特徴があります。トラス面を垂直に保つため、横桁から斜めの補助部材が使われています。ところが、自動車重量が大きくなってきたこともあって、上弦材が横方向に蛇行するような座屈変形が頻発しました。筆者が調査したのは 1969 年です。実は、橋の上で重量車が対向できない渋滞が起きて、どちらも譲らない活荷重満載状態になったときに、大きな音を立てて上弦材が座屈変形をしたそうですが、落橋の惨事にはなりません。この上弦材の補修後、耐荷力の測定をしました。上弦材の補修後、橋の入り口に荷重制限の標識が付きましたが、その後の交通マナーが格段に向上したそうです。このような経験を反映し、中小規模の吊橋の補剛トラスは、上路形式にすることが標準になりました(図 15)。なお、この吊橋では、耐風索もありません。



図 15 箱ヶ瀬橋、(福井県九頭竜ダム湖)。瀬戸大橋のテストケースにした吊橋

#### 3.2 振れ剛性の向上には上下の横構が必要である

吊橋は長大橋に適した形式です。しかし、水平変位と振れの影響を考える必要があることがタコマ吊橋の崩落事故(1940)で明らかになりました(図 16)。この落橋の様子は、ワシントン大学のファーカンソン(Farquharson)教授が 16mm ムービーで撮影し、ニュース映画でも紹介され日本でも上映されました。現在はインターネットを介して動画で見ることができます。

この落橋事故から得られた結論は、プレーとガーダーを補剛桁にすると振れ剛性を期待できないこと、補剛トラス構造にすることが提案されました。しかし、下横構を省くトラス構造、または上横構のない開いたポニートラス構造は、大きな振れ剛性が得られません。アメリカの**金門橋**(Golden Gate Bridge, 1937)は、上路の補剛トラスで建設され、当初、トラス構造の下面に横構がありませんでした。その後、下横構を増設する補強工事が行われ、擬似的に箱断面構造の補剛トラスにして、振れ剛性を改善しました。吊橋の設計では、解析し易い平面構造力学を応用していたのですが、立体的な解析が必要であることが認識されるようになりました。しかし、立体トラスとしての数値解析は、コンピュータの利用ができるようになるまで、実用になりませんでした。

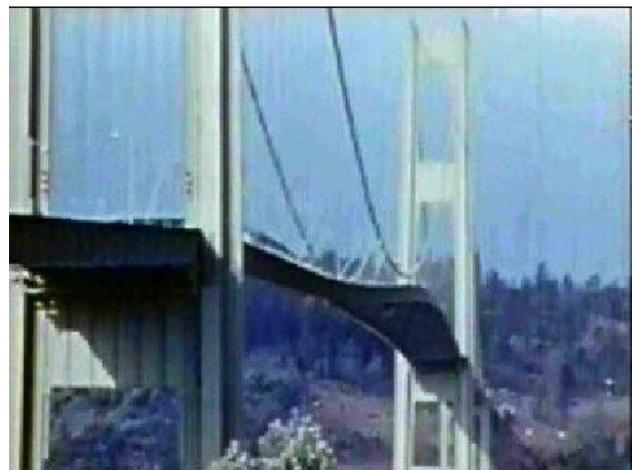


図 16 タコマ吊橋、風による振れ振動で落橋

### 3.3 吊橋の変形と振動

吊橋では、自重の大部分は、吊材を介してケーブルで持たせます。したがって、普通の単支間の桁橋の断面寸法をそのまま採用しても、長い吊橋支間を渡すことができます。しかし、支間を長くするには、相対的に左右のケーブル間隔を広げます。これは、橋軸方向に通路が振れないようにすること、橋軸水平方向にも大きな変形を起こさないようにするためです。吊橋がスマートに見える一つの理由です。大きな自動車荷重を安全に通行させるには、橋全体に或る程度の曲げ剛性を持たせる必要があります。普通の道路橋では、活荷重が載る時の最大撓み制限が支間の1/600~1/800程度です。鉄道橋は、この制限が厳しく1/1000以下に抑えます。瀬戸大橋は、道路と鉄道とを通す併用橋ですので、他の吊橋の眺めと比較すると、ややゴツイ感じを受けます。吊橋のケーブルは、桁全長の中央を支える形になりますので、マクロに見れば2径間連続橋の性質を持ちます。普通の単純橋とは違って、曲げ応力や撓みが最大になる個所は、吊橋支間全長の1/4付近です。また、桁は、等間隔の吊材で吊っていますので、相対的に径間の短い連続橋の性質も示します。中小径間の吊橋は、良く揺れる感触を持ちます。人の振動体感は、3~5Hzが最も感度が高いのですが、これは20~30mの単純橋の固有振動数に相当します。一般的に言うと、橋の振動は波動の性質が強く、その速度は大体200m/secです。音速よりもやや低めです。この波動が橋の全長を往復し、境界条件などで同期することで固有振動数が決まります。最も周期の長い振動は、近似的にメートルで測った(支間長/100)秒です。1000m級の長大吊橋では、10秒にもなります。振動解析をするときの力学モデルを解くと、第一次の固有振動モードは、吊橋全体を一波形とする解が得られますし、振動測定波形をフーリエ解析すると、この長周期振動数が得られることがあります。しかし、これは、パルス状の波動が全長を往復するときの周期が解析されています。吊橋全体が、このような大きな波形で振動が発現することはありません。また、もし、そのような波形が観察されれば、破壊に繋がる危険な現象です。タコマ吊橋は、中央に節のある振れの振動波形が起きて崩壊につながりました。電力送電線では、強い風を受けて、全体が縄跳びのような大きな振幅の跳躍振動(galloping)が発生することがあって、電線の取り付け部を破壊させる厄介な問題があります。

### 3.4 耐風安定性に関係する変形と振動

吊橋の設計計算時には、吊橋側面に作用する風は、静的な荷重として扱います。しかし、タコマ吊橋(正確には旧タコマ吊橋,1940)は、風に煽られてリボンがはためくように振れ振動をした挙句に疲労で落橋しましたので(図16)、風の動的な作用も含めた耐風安定性の研究が始まりました。タコマ吊橋は、撓み理論による設計理論を忠実に追求し、トラス形式ではなく、経済的なプレートガーダー形式の補剛桁が採用されていました。建設されている吊橋の補剛桁は、殆んどがトラス形式を採用しています。トラス形式は、横から見れば風が通り抜けるように隙間の多い構造です。タコマ吊橋のプレートガーダーは、横から見た厚みは小さいのですが、橋幅が相対的に広いので、結果的に航空機の翼のように、風向き次第で大きな揚力を受けます。風速が大きくなっても、振動が持続するように風荷重の方が動的に同期することがあります。これが**自励振動**です。この場合には、支間中央に節のある逆対称モードの上下動、または振れ振動が見られます。普通、上下振動と振れ振動とが連成することはありません。この連成振動は**羽ばたき振動(fluttering)**と言い、航空機の翼で起こることが恐れられています。吊橋の風による振動は、最初、上下振動が起こり、或る風速以上になると、振れ振動に変わることが実験的に分りました(平井敦)。これを**限界風速**と言います。補剛桁の振れ剛性が小さいと、振れ振動が出易くなります。薄板状の断面が振れ振動を起こすと、風速方向からの見かけの厚みが大きくなり、その厚みでの**カルマン渦**の発生周期との同期が起こります。風速がさらに上がると、同期がずれて、この振れ振動が出なくなることも実験的に確かめられています。

### 3.5 カルマン渦による振動

静的な風圧ではなく、風による動的な振動が構造物の設計で大きな問題になった始まりは、タコマ吊橋でした。その振動周波数が**カルマン渦**の発生によるものであることが分かると共に、それが多くの場面で現れることで設計上の対策研究が始まりました。発現周波数  $F$ (ヘルツ)は、「ストローハル数  $S \times$  風速  $U$ (m/sec) / 円断面の直径  $D$ (m)」で計算します。ここに  $S$  は約0.2の定数です。最も衝撃的な事例は、斜張橋のケーブルが、このカルマン渦発生周波数と共鳴した風琴振動を起こし、ケーブルの取付け部で疲労破壊を起こしたことでした。同じようなことは、ニールセンアーチ橋の斜材でも共振現象が起きて、落橋寸前の状態になった事例がありました。不思議なことに、これらの部材は、表面が滑らかに仕上げられた円断面でした。簡易なワイヤーロープで、縊りの見えるようなストランドでは全く発現しない振動です。この経験的な事実を応用して、物理的な制振装置でなく、ロープ表面にらせん状の線材を巻きつけることでも共振を抑えることが発見されました。なお、木枯らしの音は、細い木の枝が風を切るときに出ます。ゴルフのクラブをスイングするときの音も同じ現象です。巨大な高煙突では、風が吹いて、ゆっくりした固有振動が観測されることがあります。

### 3.6 吊橋構造の建築構造への応用

橋の設計には、景観を考えたデザイン感覚が必要です。しかし、橋の自重は大きく、通行させる鉄道や自動車の重量も大きいので、力学計算を踏まえた上で、材料の無駄を省く合理的な構造を提案しなければなりません。多くの建築デザイナーが橋の設計に興味を示すのですが、力学計算の専門知識が必要になるところで手が止まります。橋は、見かけによらず、動的な挙動を示します。良い設計は、デザイナーと解析技術者の共同作業が望ましいのです。吊橋のアイデアを入れた設計として有名になった建築構造は、**丹下健三**(1913-2005)のデザインによる吊屋根構造の代々木第一体育館があります(図 17)。日本では丹下健三の名前の方が有名ですが、海外では、構造計算を担った**坪井善勝**(1907-1990)とのペアの作品として知られています。吊屋根構造では、大きな移動荷重を載せる必要がありません。結果的に、風などを受けて、動的な変形が大きく出ることが予想に無かったので、体育館完成後、疲労などを起こす欠陥構造が問題になりました。吊橋は、適度な剛性の補剛桁を使うなど、変形を抑えるための工夫があります。また、変形に対応する注意も払います。建築構造では、耐震設計を考えるととき以外、変形や振動を扱う必要性を考えなかったためでした。



図 17 代々木第一体育館 1964(ウィキペディア)

## 4. 終わりに

### 4.1 吊橋の解析とコンピュータの利用

吊橋の幾何学的な形は、アーチ橋、それも、上路の**ランガーアーチ**を上下逆にした形です(**アーチ橋のお話**を参照して下さい)。解析理論式は殆ど同じです。違うところは、アーチリブが圧縮部材、吊橋ケーブルが引張部材になることです。アーチ橋の解析理論は、弾性理論が主に使われますが、長大アーチ橋では撓み理論を検討することもあります。アーチ系構造の一種に、**方杖橋**があります。この形を上下逆にし、圧縮斜材を引張材のロープに置き換え、塔頂から吊った吊橋化が、最も簡単な斜張橋です。構造計算にコンピュータが利用できるようになって、手計算で数値解析をする労力が大幅に軽減されるようになりました。コンピュータを利用するには、それに合わせるように理論式を再構築することも必要です。その実践的な方法が、FEM(有限要素法)に代表されるような、マトリックスを道具として使う計算術です。数学の専門書に**線形代数**の表題のあるのが、マトリックスを扱う参考書です。マトリックスの数値計算に使うプログラミング言語は、FORTRAN が主流でした。パソコンの機能が向上しましたので、従来、事務処理計算用と考えられていた EXCEL でも、多くの数学系の組み込み関数を利用できるようになって、科学技術計算にも手軽に利用できるようになりました。線形計算では、マトリックスの積、逆マトリックスの計算ができる関数があります。吊橋の計算では、撓み理論が非線形の微分方程式を扱うのですが、計算手順を工夫して線形計算の繰り返しで半自動的に実行させることができます。一時代前の大型計算機を利用していた環境では、計算ソフトをブラックボックス化して商業目的に使いました。中身がどうなっているかに頓着なく、コンピュータで計算したと言えば頭から信用することが普通になっていました。結果的に技術移転の努力もなくなりました。情報技術は年々進歩していますので、気が付いて見ると、今までのドル箱であった計算ソフトが時代遅れになってしまいました。中身をブラックボックス化してしまったので、改良しようにも手掛かりがなく、大きな技術の空洞化が起きています。この空洞を埋めるためには、技術を狭く囲い込むのではなく、広く眼にするような一般化・大衆化・啓蒙化が必要になっています。現在ではインターネットの普及で、情報公開が便利になりましたので、時代は良い方向に進むと期待しています。