

# トラス橋のお話し

## 0. 始めに

世界最大の木造建築である奈良の東大寺大仏殿（金堂）は、長さ 23.5 メートルの巨大なアカマツの横梁（**虹梁**）2本を**大虹梁**として使って、大仏を安置する間口・奥行き・高さの広い空間（約 20m×20m×20m）を構成し、大仏を拝観する正面間口も広く取っています。大虹梁は、天井に隠れて見えませんが、それを支える大きな柱があり、その一つの基部に横穴があって、子供のくぐり抜けができます。大虹梁と、他の柱と梁との全体集合が、瓦屋根部分、約 3000 トンの重量を支えています。最初の大仏殿は 8 世紀に建立された巨木建築でした。現在の大仏殿は江戸時代(1709)に再建され、創建時よりも小規模にならざるを得ませんでした。長さの長い梁は、天然木材をそのまま使いました。日本の歴史が文書に残されるようになったのは 5 世紀頃からです。それ以前に建設された巨木建築は、伝承はあっても記録がありません。その時代、日本の天然の巨木は、既にあらかた使い尽くされていました。そのため、再建を計画した公慶は、全国を行脚して大虹梁に使える巨木を探すことから作業を始めなければなりません。現代の構造工学から見れば、20m程度の**支間**は、寸法の大きい圧延H形鋼やプレキャストPC桁を使っても渡すことができます。トラス構造に組めば、さらに支間を広げることができます。しかし、トラスは、19 世紀になって、鋼材が大量生産されるようになって開発研究された構造形式です。そのため、トラスのデザイン形式に関する特許がその時代に多く発表され、発案者の名前などをつけた多くのトラス形式名が使われています。トラスを理解するには、先だって、なぜ、木材を使った巨大な梁を使い、トラス形式やアーチ構造が工夫されなかったかを説明することから始めます。

## 1. 木材を引張材として使わなかったこと

トラスは、柱と梁に加えて、斜めに使う部材と組み合わせた三角形構造が特徴です。力学的には、外形を三角錐状に組む単位で立体的に構成することが基本です。しかし、解析と組み立てが複雑ですので、三角形の連続で、平面トラスに組んだ桁に構成し、その面単位を**折り紙細工**のように立体的に組み上げます。トラス橋を横から見るときの構成を**主構**と言います。「構」は、トラスの意を当てる漢字です。平面トラス組みは、面に垂直に作用する力には無力です。トラス橋としての立体的な構成方法は、左右に主構を並べ、上下を**横構**で繋ぎ、さらに、横倒れを抑えるための**対傾構**で補強するのが標準的な構造です。トラス構造は、斜めの部材（斜材）を使います。引張を受ける部材もあります。木造建築は、石材と同じように、引張材として使うことも、屋根を除き、斜めに使うこともしません。**筋交い**は斜めに使う二次的な部材です。これを積極的に採用する提案は、関東大震災以降です。木材は、引張力を伝える木組み接合に信頼を置きません。筋交いは、向きを反対にした対（つい）に組みます。交番する地震力が作用する状態では、引張力になる側の部材は効かないとする仮定を使います。筋交いも含め、木材でトラス構造に組み上げるときは、積極的に引張力を持たせる対策が必要です。現代の方法は、鋼材とボルトを**添接材**として併用します。阿蘇望橋（熊本県、支間 39.9m）は、外形を木トラスで構成していますが、引張力を受ける**下弦材**に鋼材を使った**ハイブリッド**(hybrid)構造です（図1）。斜めの部材を含め、トラスの格点を構成する個所の、鋼材とボルトの使い方を、図2に見ることができます。



図1 阿蘇望橋（木橋資料館より採図）



図2 弦材の繋ぎは鋼材とボルトが使われている（同左）

## 2. 屋根組みを支えるのはトラス構造ではないこと

三角形の外形を持つ伝統的な木造屋根は、屋根の傾斜に合わせて斜めに支える**垂木**（たるき）と**棟**（むね：縦梁）とで屋根瓦の重量を持たせ、それを梁（横梁）で受けてから柱に伝えます。柱を多く配置し、屋根の重量を分散させて持たせます。柱が使えない間口を広くする個所は、柱に伝える屋根の重量分を横梁が支えます。そこには、曲げ剛性の大きな横梁を必要とします。東大寺大仏殿の大虹梁がその部材です。垂木は、大虹梁と組み合わせてトラスの斜材のように使う主構造部材ではありませんので、アーチ作用のような、横に広げるように発生する水平力成分が大きくなりません。これに対して、飛騨白川村の合掌造りは、屋根の傾斜が大きくなっています。垂木は、横梁と組み合わせた背の高いトラス構造になっているのですが、垂木の傾斜が急ですので、横に開くように横梁に作用する水平力成分も大きくなりません。現代の木造建築の屋根は、全体を二等辺三角形のトラスに構成した桁単位を、左右で支えます。横梁は斜材から水平力成分を受けますが、鉄板とボルトを併用した継ぎ手を使って水平力を持たせます。明治以降のレンガ造りの建物は、柱や壁以外、屋根や床の部分を、木材の梁または鉄製トラスで組んだ構造に構成しました。したがって、レンガの壁材を横に押し開くような水平力成分を考えなくて済みましたが、結果的に全体の耐震性が低い構造であることが関東大震災で分かりました。

## 3. トラスの基本的な組み方は三種類

単純トラス橋としての基本形式は、図3に示す「**ハウトラス**・**プラットトラス**・**ワーレントラス**」の3種です。いずれも、発案者の名前を付けた名称です。これらの形式名は、力学的には、斜材の使い方で区別します。ハウトラスとプラットトラスの相違は、斜材の向きです。ハウトラス組みは、斜材が圧縮材になり、プラットトラスは引張材として機能します。斜材は、部材長が上下の弦材よりも長くなりますので、鋼トラス橋は、引張材になるプラットトラス組みの方を主に採用します。19世紀頃のトラスは、圧縮材を鋳造でも製作しましたので、斜材を含め、引張部材を鍛造で製作し、全体をピントラスで組み上げる方式を採用していました。ハウトラス組みは、木造トラスに多く見られます。ワーレントラスは、斜材応力がパネルごとに圧縮と引張と交番します。デザイン的には、垂直材を使わない、すっきりとした形式が好まれるようになりました。

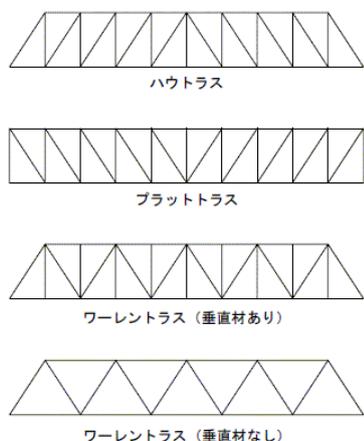


図3 代表的なトラスの組み方

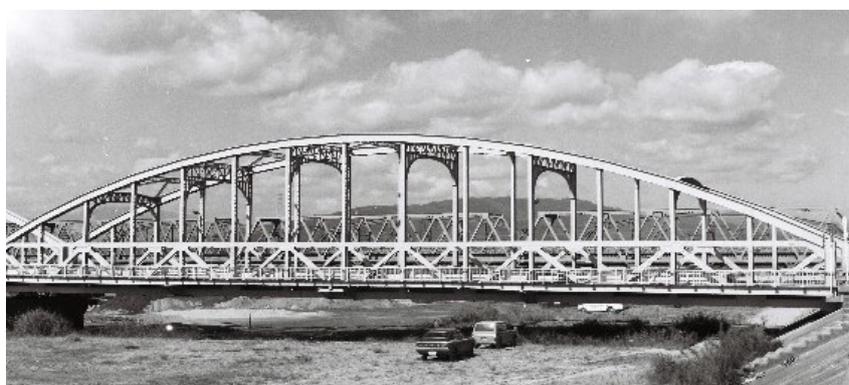


図4 ランガートラス（背景に平行弦ワーレントラスが見える）

## 4. 一般的な骨組み構造の分類

橋を横から見たとき、厚みに大小のある弦材の集合で骨組みを構成している曲弦トラス状の構造は、一般の人が見れば、アーチ橋との区別が分かりません。図4（尾張大橋）はアーチ橋です。垂直材のある平行弦ワーレントラスに組んだ部分をマクロには梁部材として扱い、この梁をアーチ部材で補強した形式です。全体骨組みを**ランガー**形式と言います。水平の梁部材がトラスですので**ランガートラス**と言います。この梁部分を充腹のプレートガーダーにした構造もあります。こちらは**ランガーガーダー**と区別して言います。トラスとアーチとの区別は、主構造に斜材があるかないかで分かります。ランガー橋は、マクロに見て全体骨組みをピントラス橋とすると、端を除いて斜材がないハウトラスの形式になりますので、不安定トラスです。水平な桁部分に曲げ剛性があることで、安定な構造になります。

## 5. トラスの弦材は曲げと捩れを作用させない仮定にする

構造力学の分類では、トラスは、軸力だけを伝える目的をもたせた真っ直ぐな柱状の部材（**弦材**と言います）の集合です。梁として使う部材は曲がりも許しますが、圧縮力が偏心して作用する柱は、曲げモーメントによる応力度の増加がありますので、材料の使い方の効率が下がります。力の釣合い条件だけで部材力の計算ができるトラスの組み方が静定トラスです。実際構造を理論的な仮定に合わせるため、初期の鉄トラス橋は、複数の部材が集まる**格点**（橋梁工学で主に使う用語；節点とも言います）でピン結合を採用していました。これを通称で**ピントラス**と言います。移動荷重を弦材に直接作用させないで、横桁を介して格点に作用するように、**間接載荷**の工夫がされます。ピントラスの仮定であっても、ピンの向きは平面トラスの面内曲げに対応させるだけですし、面外への曲げや捩れの対策は、部材の自然な曲げで馴染ませることを仮定していました。理論的な配慮にも拘わらず、実際に製作されたピントラス鉄道橋は、滑らかな回転に対応するよりも、隙間部分があることで騒音の発生や疲労の影響を受け易い、などの不都合も目立ちました。ピンが効かない剛な結合状態になっていても、別に支障がないことが経験的に分かるようになって、ピントラス橋を設計しなくなりました。リベットで構造部材を組み立てていた時代は、格点の**ガセットプレート**（gusset、当て板または継板）ですべての弦材を繋ぎました。溶接構造の時代になると、格点部分を連続させた一体構造に製作しておいて、弦材の**添接**箇所を格点から外して組み立てる方法も採用します。格点を剛結合の仮定にすると、弦材も、曲げモーメントを受ける**ラーメン**構造（ドイツ語のRahmen：枠構造）として計算する必要があります。これは高次の不静定構造ですので、コンピュータが利用できなかった時代は解析計算が大変でした。しかし、ラーメン構造として計算しても、軸力に注目すると、ピントラスの仮定と殆んど同じ結果になります。曲げによって生じる応力分は、**二次応力**であるとし、適度なしなやかさがあれば、二次応力による応力度の増加は、安全率の範囲で許容できます。

## 6. トラス橋は小単位の桁橋を載せる複合構造である

トラス橋は、トラスの格点間（パネル）を小径間とする桁橋を横桁上で支持している複合構造です。トラスの弦材は、鉄筋コンクリートのスラブと縁が切れています。径間が小さい縦桁がプレートガーダーの主桁の役目をします。プレートガーダーを並列した桁橋は、上下のフランジが、トラスの上下の弦材と同じように、軸力が作用します。ただし、上フランジは、スラブを介するとは言え、移動荷重が直接載りますので、間接載荷にはなりません。トラス橋の床組み部分は、横桁上で目地や伸縮装置を設けることはしませんので、実際の力学的挙動は連続橋の性質を示します。実橋で振動測定をするとき、加速度センサの設置個所に注意が必要です。道路面のスラブ上に設置すると、パネル間では橋軸方向に波動が往復することで卓越振動が得られます。横桁上に設置すると、トラス主構造の振動を見つけることができます。ただし、スラブからの振動も拾いますので、トラスの格点にセンサを設置するようにします。しかし、弦材上で測ると、弦材自身が独立に振動する影響が強く出ることがあります。つまり、構造物は、全体が一つのシステムとして機能することのほかに、部分的に独立に振舞う性質もあります。したがって、解析に使う理論モデルは、測定目的に合わせて個別に構成します。

## 7. 木造建築はラーメン構造になっている

寺社をはじめ、日本の伝統的な木造建築は、柱と梁の組み合わせで基本構造を構成します。単純で象徴的な柱と梁の構造が、神社の鳥居です。トラスのような斜めの部材をあまり使わないにも拘わらず、木造建築はかなりの耐震性があります。この理由を、摩擦の大きい**柔構造**が地震のエネルギーを吸収するからだ、との説明を見受けます。部材が集まる格点でピン結合された格子組み構造は、斜材が無いと力学的に不安定です。実際は、柱と梁との接合（木組み）が丁寧になっていて、全体としてラーメンのような構成ですので、弾力的な復元力のある柔構造になります。ラーメンとは、軸力だけでなく曲げにも抵抗する部材を使う構造形式名です。断面寸法の大きな木材は立体的には曲げ剛性も捩れ剛性も大きいので、丁寧な木組みで主構造を構成すると、十分な耐震性があります。主構造の柱は、普通の住宅建築では大黒柱（大極柱）、寺社建築の梁では上に上げた虹梁の呼び方があります。力学的な合理性と経済性を追求した木造建築は、相対的に断面寸法の小さい木材を使いますので、結果的に対震性が落ちます。筋交いは、比較的小寸法の部材ですが、トラス構造を意識して適切に配置すれば、変形を抑える効果が得られます。この構造の考え方を、**剛構造**と言います。

## 8. 充腹断面の梁を経済的に再構成するとトラスになる

骨組み構造は、なるべく少ない材料を使って、柱と梁とで広い空間を構成することが目的です。矩形断面の木材や石材をそのまま梁として使う場合、材料力学的には、自重の割合が大きくなって不経済です。一方向の曲げ部材として能率の良い断面形状はI形です。単独には、横方向の曲げ剛性も捩れ剛性も小さいので、他の部材と組み合わせて骨組みに構成し、それに肉付けをする部材を加えて、立体的に安定な構造物に組み上げます。建築構造物では、主構造が目立たないことも多いのですが、橋梁、特にトラス橋は部材の組み方が眼に見えますので、鉄橋と言ひ、近代化の象徴として親しまれてきました。組み方自体もデザイン上の重要な要素ですので、多くのトラス形式の名称が使われています。古い時代のトラス橋は、装飾的な部材の使い方も多く見られます。図5は、ラティストラス、またはラティスガーダーとも言います。腹部を高くし、斜材が格子組み(lattice)にしています。鋼プレートガーダー(鋼鉄桁)は、格子組みの個所を薄い鋼板で置き換えた充腹構造(钣)になっていて、これをウェブ(web:腹板)と言います。英語のwebは、クモの巣のような網目状の構造を指す名詞です。現在はインターネットの通信網(network)の用語として使われるようになりました。図5で見えるように斜材の組み方がwebです。webの代わりに使う充腹鋼板部を指すイギリスの専門用語が、日本では腹钣の意義で用いるカタカタ用語になりました。ラティス構造は、構造力学的には高次の不静定構造です。斜材の応力がどうなるかを解析することが難しいので、応力が理論的に計算できるように、時代と共に、次第に簡明な骨組み構成を採用するようになりました。



図5 ラティストラス、James Mann 橋、イギリス (鳥居邦夫氏撮影)

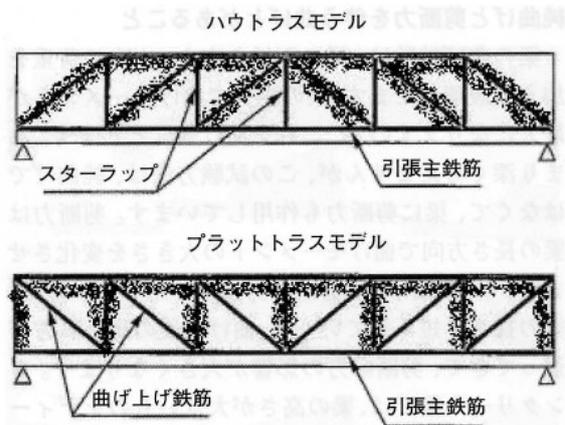


図6 鉄筋コンクリート梁のトラスモデル

## 9. 連続体をトラスでモデル化する

肉厚のある木材や石材をそのまま梁として使うとき、材料は連続的に繋がっていますので、断面形の幅や厚みを考えて、連続弾性体モデルを解析して応力分布を計算します。これに対して、トラスに構成する部材は離散的であると言うことができます。軸力だけを伝える機能に特化した、長さの異なる有限個数の弦材を組み合わせますので、応力の解析対象も有限個数に収まります。連続体を理論解析するときは、注目箇所を無限に細分することができます。実践的には適当な個数の座標点で応力度の解析をします。最初から有限個数の注目点を決めておいて、それを相互にトラス状に組んだ力学モデルを考えることができれば、そのモデルを解析することで、連続体の解析に代えることができます。数学的な方法では、微分方程式に代えて階差式で理論式を再構成する方法も使います。有限要素法(FEM:Finite Element Method)は、この考え方を汎用化したものです。厳密な理論式にこだわらなければ、鉄筋コンクリート梁の細部構造は、トラスモデルを設計に応用します(図6)。鉄筋コンクリート梁の曲げ応力は、断面の圧縮側をコンクリートで、引張側を鉄筋で持たせる計算をします。スターラップの鉄筋は、必ず配置する規則になっていますが、トラスの垂直材と考えることができます。剪断力を伝える斜材のモデルは、ハウトラス組みで考えるとコンクリートが分担し、プラットトラス組みは引張側の主鉄筋を曲げ上げて使うとする考え方です。鋼のプレートガーダーの細部設計も、トラスモデルを踏まえ、垂直補剛材は、トラスの垂直材の性質があります。腹板は、トラスの斜材に当たるのですが、薄い腹板は斜め向きの圧縮力には効きませんので、この全体の骨組みモデルはプラットトラスです。

## 10. ラーメンは弦材の曲げ剛性を考える骨組み構造

矩形断面の梁単独では曲げ部材の剛性が不足するとき、梁を上下に配置した組み合わせ梁を考えるのが自然です。図3に示したプラットトラス組みで、斜材を除くと四角形のつながりの骨組み構造になります。日本では、これに額縁や窓枠の意味を持つドイツ語のラーメンで呼びます。英語の専門用語は、頑丈な骨組みの意義を持つrigid frameです。上下の梁材を繋ぐ垂直材も剛に接続することで、上下方向に剪断力が伝わり、プラットトラス並みの合成曲げ部材になります。この構造を**フィーレンデール橋**と言います。垂直材の両端をピンと仮定すると、剪断力の伝達がありません。垂直材の高さを変えても、全体の曲げ剛性は、上下の梁材の曲げ剛性の和以上にはなりません。ラーメン構造にすると、見かけ上、部材の本数を少なくした骨組み構造になりますので、中小規模の都市橋梁ではデザインの面で採用される例があります。しかし、トラス構造と比較すると、部材に構成する材料の使い方の能率が劣ります。トラス橋は、主構面が横に倒れないように補剛する**対傾構**を設けないと立体的に安定な構造になりません。この対策には、橋の端部でX形に弦材を組むのが最も効率が良いのですが、下路トラス橋では、通路を塞ぐように配置しなければなりません。これを避けるため、橋の端部をラーメン構造に構成し、そのデザインは、橋の入り口を象徴するような工夫がされます。これを**橋門**(portal)、水平部分を飾り的な意義を持たせたトラスで組むとき、**橋門構**(portal bracing)と言います。

## 11. 立体的な骨組み解析はFEMを利用する

トラス橋の設計も製作も、計算が便利な平面トラス組みを基本として構成しますが、全体は立体トラスになっていますので、立体トラスとして解析したい要望もあります。水平構は、部分的には静定トラスとして計算しますが、トラスの組み方は斜材の組み方をダブらせたワーレン構造(ダブルワーレン)にするなど、不静定になっています。対傾構も含めると、かなり次数の高い不静定な立体トラスになっています。コンピュータが利用できなかった時代、次数の高い不静定トラスの計算は、手間が掛かり過ぎるので実用しませんでした。平面トラスおよび立体トラスは、FEMを使う構造解析に最も適しています。教育に利用することを主目的として、Visual Basicでプログラミングした簡単なソフトウェアを別に用意してありますので、簡単なモデルを使って種々の立体解析を試すと良いでしょう。重要なことは、トラス橋の実質的な振れ剛性の大きさが数値的に得られることです。振れを起こす外力は、垂直方向の荷重が偏心して作用する場合と、風荷重のような水平方向の荷重による場合とがあります。図7は、FEMによる計算結果を簡単な見取り図で三次元的に表示した例です。垂直荷重は、左側主構面、支間中央、上弦材に作用させています。右側主構の下弦材は、撓みは小さいのですが、水平方向に右手前に膨らむような変形をしていて、この断面が全体として振れていることが分かります。

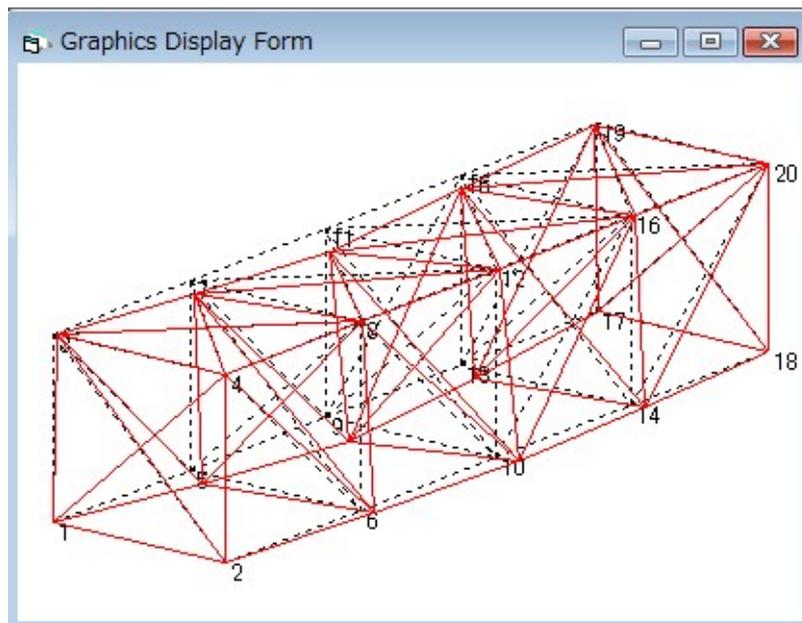


図7 立体トラスのFEM解析で求めた変形

## 12. 立体的な構成で考えるトラスの安定問題

静定で安定なトラス（釣合い条件だけで解析できる構造）は、綾取り（あやとり）細工のような性質があります（図8）。どこか一ヶ所でも糸が切れると、形をなさなくなります。同じように、静定トラス構造は、どこか一ヶ所の弦材が破断すると崩壊します。橋梁工学では、橋を横から見た平面トラスの解析が重要ですが、立体的なトラスに組み上げるための弦材の使い方に注意します。弦材単独に或る程度の曲げと捩れの剛性があることで立体的に安定した構造になっていても、ピントラスと見れば部材数が不足している不安定なデザインもあります。事故、またはなんらかの不具合を起こしたトラス構造物は、全体を立体的なピントラスでモデル化すると、部材数が不足していると判定できることがあります。例えば、通称で**ポニートラス**と言う下路トラス橋は、トラスの高さが低いので、通路の上側の横構を使わない構造です（図9）。ピントラスでモデル化すると、立体的には不安定構造です。この形式のトラス上弦材は、捩れ変形をしないように剛性を大きくしますが、それでも全長で見れば横方向の剛性が不足して座屈変形を起こした例が知られています。この断面形状を上下逆にして、下横構のない $\pi$ 形の構成をした構造も、立体的に見れば、不安定ピントラスの性質があります。下弦材が引張部材になっていますので、座屈の心配をしなくても済みますが、全体の捩れ剛性が小さく、単純トラス橋ならば、4箇所支点支持のどこか一ヶ所が破壊すると崩壊します。上下に横構を配置した標準的なトラス構造は、立体トラスとして不静定になっていて、マクロに見れば閉じた箱断面になりますので、捩れ剛性も高くなっています。吊橋の補剛桁はトラスで組むのが標準ですが、これも上横構のない中小吊橋では、上弦材の座屈事故を起こした例が知られています。愛知県の本曾川橋（連続トラス）は、2007年、一本の斜材が破断しているのが発見されましたが、実構造が不静定であったことが幸いして、大きな変形も起こさず、悲劇的な崩壊事故には進行しませんでした。

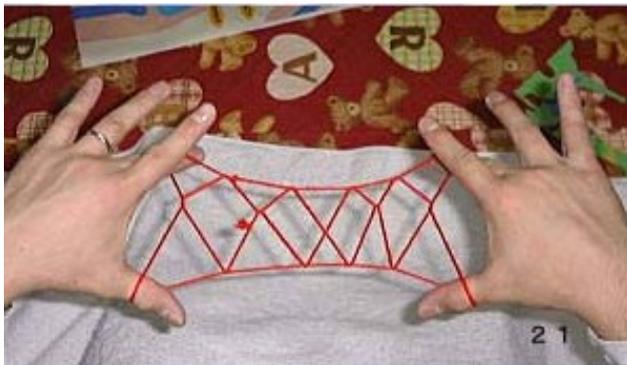


図8 あやとり（インターネットから採図）



図9 クワイ川の鉄橋（ウィキペディア）

## 13. プレートガーダーの安定問題

二主桁のプレートガーダーとして設計される鉄道橋（図10）は、主桁間隔がレールのゲージよりも僅かに広い程度ですが、上下の横構と対傾構がしっかりと配置されていて、上下フランジと合わせると立体的に捩れ剛性の大きいトラスモデルになっています。経済性を追求した2主桁のプレートガーダー道路橋は、下横構を省く例が見られます。トラスモデルとして見ると、下弦材を横方向に支持しない構造に設計する例が見られます。下フランジは引張材になりますので、静力学的には問題はないのですが、トラスモデルとして見ると、全体は内的に不安定な立体トラスであって、捩れ剛性が低い構造です。支点が4箇所あることで、外的に安定な構造になっています。この構成では、下フランジが横振動を起こし、これにつられて腹板が巨大なスピーカー並みの低周波振動を起こし、公害振動として問題になりました。

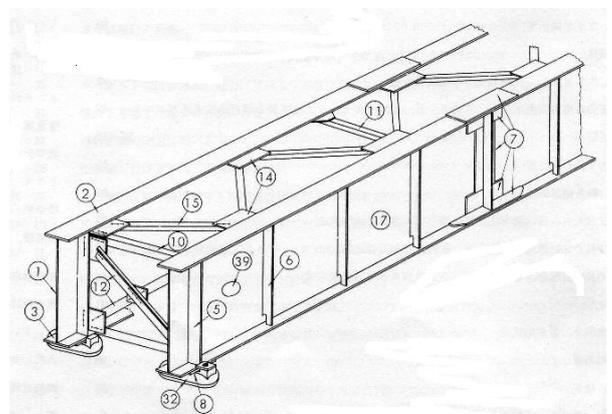


図10 鉄道橋用のプレートガーダー

## 14. エッフェル塔はトラス構造であること

エッフェル塔（図 11）は、パリ万国博覧会のためにエッフェル（G. Eiffel、1832-1923）が 1889 年に建設した鉄のトラス構造です。エッフェル塔の特徴は、凱旋門を意識して、塔の下に広いアーチ状の空間があることです。東京タワーを始め、世界各地の高層タワーは、すべて、塔の芯の位置に建物があって、通り抜けができません。エッフェル塔の脚部の間隔は 100m ありますので、エッフェルの橋梁技術者としての経験がなければ、このようなデザインの提案を思いつかなかったはずで、東大寺の大仏殿の建設では巨大な大虹梁を使うことで広い空間を構成しましたが、エッフェル塔の鋼トラス構造は、大仏殿そのものを足元に建設できるほどの空間があります。この最下層の主構造は、トラス構造で組み上げた立体的なラーメンです。アーチ状の部材は装飾部材です。建設当時、単にパリ万博のシンボリックな構造を意識して、世界一高さの高い塔を立てるだけが目的でしたので、装飾的な鋼材の使い方が多く見られます。当時は、テレビ電波の発信塔として利用するなどの実用的な目的がありませんでしたので、万博後には取り壊すことになっていました。エッフェル塔がパリのシンボルとして生き残ったことの一つの理由には、鉄骨が構成する優美な構造美を挙げることができます。これが、パリにシンボリックな景観を追加することになりました。



図 11 エッフェル塔

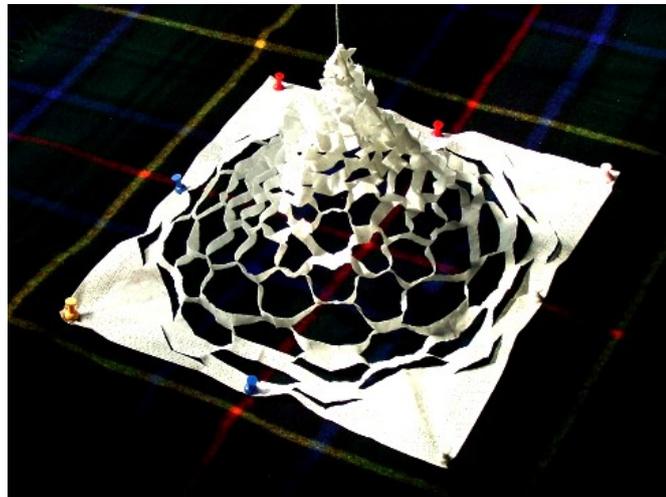


図 12 七夕の切り紙細工で作る紙の塔

## 15. 材料の利用効率を単位重量で判断すること

矩形断面の天然石材の梁や無筋コンクリートの梁を隙間なく並べて橋面を構成する構造は、自重が大きいのので、自重で折れない長さの限度が計算できます。逆に、或る長さを渡すために必要な最小限の桁高も計算できます。計算上の基準強度は、断面の曲げ応力分布が直線であると仮定して計算した曲げ引張強度であって、コンクリートでは圧縮強さの約 15% 程度です。標準的なコンクリートの場合は、圧縮強さを  $210\text{kg/cm}^2$  程度に仮定しますので、曲げ引張強度は約  $30\text{kg/cm}^2$  です。自重（約  $2400\text{kg/cm}^3$ ）を持たせる計算をすると、折れないように使う限界は、10m を渡すのであれば、必要な桁高が 60cm と得られます。この桁高で支間を半分の 5m にすれば、応力度は 1/4、支間をさらに半分の 2.5m にすれば、応力度は 1/16 に下がります。と言うことは、矩形断面の中心間隔を桁幅の 4 倍または 16 倍に広げた並列桁構造を提案することができて、自重相当の追加重量を持たせることができます。実際の構造は、平面的には格子状の骨組みで建設します。梁の断面形を I 形にすると、曲げ材としての重量をさらに減らすことができます。結果的に立体的な骨組み構造にモデル化できます。経済性を検討するときの判断資料は、材料の総重量を、通路全断面積で割った、単位面積当たりの重量（単位重量）を使います。鋼橋の場合には、桁橋もトラス橋でも、全橋の鋼材重量を通路の全面積で割った、1 平方メートル当たりの鋼重を積算資料に使います。例えば、鋼重が  $200\text{kg/m}^2$  と得られれば、橋全体を板厚約 2.5cm の鉄板で覆う量です。ここで一つクイズを出します。図 12 は、七夕の装飾でよく見る、切り紙細工です。パリのエッフェル塔（図 11）のトラス構造をモデル化したと考えて下さい。エッフェル塔の鋼材を溶かして、塔の敷地に広げたとすると、鋼材の厚みはどれくらいになるのでしょうか？（答え：エッフェル塔の全鋼重は約 7000t です。塔は 100m 四方の敷地を占めています。したがって、鋼材の平均厚みは約 9cm です。）

## 16. 複合力学システムとしてのトラス橋

英語からきた用語の**システム**は、非常に抽象的な概念ですので、場面に応じて種々の漢字用語を当てています。系・体系・機構・組織などがそうです。共通する考え方は、相互に影響を及ぼしあう要素の集合全体で、一つの要素のような機能を持つものを指します。骨組み構造は、幾つかの部材を組み合わせて、全体として柱や梁の機能を持たせますので、力学システムと考えることができます。トラスは、軸力だけを伝える要素（弦材）の集合を指す力学システムです。相互に影響を及ぼしあう個所が格点です。外からの力は、格点に作用させ、弦材には直接作用させません。どこかの格点に外力が作用したとき、全く軸力が作用しない弦材があることがあります。三径間のゲルバー形式のトラス橋で、中央部に吊り桁を持つ構造では、端のカンチレバー部の格点に力が作用しても、吊り構造部分と反対側のカンチレバー部は、軸力は0です。ただし、吊り構造部の格点の変位はありますが、残りのカンチレバー部は変位も出ません。この構造は、三つのサブシステムが組み合わさった全体で、一つのゲルバー形式の力学システムになっています。これを複合システムである、と考えることができます。或る部材に作用する軸力が、他の場所に作用する外力の影響を受ける範囲全体を理解する手段の一つは、応力の影響線です。格点の変位の方で考えます。或る格点の変位が、他の場所に作用する外力の影響を受ける範囲全体を理解する手段の一つは、変位の影響線です。複合システムは、応力の影響線と変位の影響線とで、影響線を扱う座標範囲が異なります。注目する格点の変位の影響線と、その格点だけに外力が作用するときの変位図とは、相反作用の法則があって同じ図形です。しかし応力の影響線と応力図とは、一般には同じにはなりません。

## 17. サブシステムの性格がある部材がある

前に示した図3には、垂直材のあるワーレントラスの構造図があります。この垂直材を除いた構造が、その下に示した、垂直材の無いワーレントラスです。移動荷重が下弦材側を通る下路橋の場合、下弦材の中央を結ぶ形の垂直材は、その両隣のパネル上に荷重が載るときだけ引張力を受けます。つまり、サブシステム的な部材です。一方、上弦材の中央を結ぶ方の垂直材は、移動荷重が下弦上にあれば、軸力が発生することはありません。図3は平行弦トラスを描きましたが、上弦材がアーチ状になった曲弦トラスであれば、軸力は0にはなりません。しかし、その大きさは、上弦材に比べれば小さくなります。平行弦トラスで、影響線が0である垂直材は、上弦材の座屈計算に使う長さを短くして、断面の許容応力度を高くすることができて、材料の節約ができます。座屈変形は、仮想の変形ですので、静力学として荷重と応力との関係だけを考えているときは、思いつかないことがあります。何となく不安定な構成になっている場合、振動の性質を観測する方法があります。安全を確保するため、念のために追加する、実質的には応力が0である部材には、普通、具体的な名称がありません。トラス部材の組み方には種々の工夫があって、個性的な形式名も使われています。力学的に意義のある部材もありますが、装飾的に使う部材もあります。力学的に効率のよい部材の使い方も悪くはないのですが、装飾的な要素のあるトラス橋も味わいのある景観を構成します（図13）。



図13 近畿日本鉄道京都線の淀川橋梁（ウィキペディア）