

トラス橋のお話し

2017 年 6 月

0. まえがき

英語からきた**トラス**(turss)は、原義としては木組みを意味していて、**ブレース**(brace)などと共に、木造の骨組み構造を構成するときに言う職人用語として使われていたようです。産業革命によって、木材に代えて、当時の新素材である鉄鋼を構造材料として利用できるようになって、鉄鋼部材を組み上げた骨組み構造もトラスと言うようになったと思われます。この文書は、「**桁橋のお話**」と対にして読んで下さい。日本の木造建築は、木材を垂直と水平に使い、梁または柱で組み立てることが基本です。**筋交い**を別にして、斜め向きに主部材として使う習慣は一般的ではありません。欧米の橋梁技術に学んだ近代以降、トラス構造は、木橋では実現できない長い支間を渡す橋構造を架設できることが大きな驚きであったのです。その特徴は、斜めの部材の使い方にあります。この文書の第 1 章を、世界遺産として認定されている東大寺の大仏殿の解説からお話を始めます。この巨大な木造建築物は、現代のトラスの力学を応用すれば、大仏を安置する広い空間を構成することは簡単に解決できます。「トラス橋のお話」の始めに、大仏殿の話を持ち出すのは、話の筋道としては異質に思うでしょうが、部材の使い方を説明するき、非常に関係があることを理解してもらうことを目的としました。

島田 静雄

目 次

0. まえがき	2.7 通路をトラスの下弦に置く理由
1. 大仏殿の木構造	3. トラス組の静定と安定
1.1 長い巨木が必要であった	3.1 内的に静定で安定な組み方
1.2 構造部材としての木材の欠点	3.2 細長比を下げるための分格トラス
1.3 木橋に使う梁の寸法	3.3 立体的な構成で考えるトラスの安定問題
1.4 耐震性と耐風性の課題	3.4 吾妻橋は本格的なトラス橋であった
2. トラス橋の力学モデルと実構造	3.5 立体的な骨組み解析はFEMを利用する
2.1 エッフェルは橋梁技術者であった	4. トラス理論の発展
2.2 橋の基本構造は桁組みであること	4.1 鉄筋コンクリート桁のトラスモデル
2.3 平面トラスの基本的な組み方三種類	4.2 曲弦トラスからアーチ系構造への展開
2.4 画家が描いたラティストラス	4.3 トラス橋は小単位の桁橋を載せる橋である
2.5 トラスの弦材は曲げ材に使わない	4.4 鋼鉄道橋にトラス構造が多く採用される
2.6 トラス弦材の構成方法	

用語索引

索引の参照番号は、章・節 です

英字					
bowstring truss	2.7	曲弦トラス	2.3	パネル	2.3
brace	0	錦帯橋	2.2	はね橋	2.2
braced rib	2.3	公慶。	1.1	鈑桁橋	2.3
diagonal	2.3			ピン	2.3
FEM	3.5	サ～ソ		ヒンジ	2.3
lower chode	2.3	座屈	2.5	ピントラス	2.3
member	2.3	支間	2.3	プラットラス	2.3
panel	2.3	斜材	2.3	ブレース	0
panel point	2.3	上弦材	2.3	ブレースドリブ	2.3
span	2.3	上路トラス	2.3	プレートガーダー橋	2.3
statically determinate	3.1	スターラップ	4.1	部材	2.3
trussed girder	2.3	スルートラス	2.3	分格トラス	3.2
upper chode	2.3	筋交い	0	平行弦トラス	2.3
vertical m.	2.3	垂直材、	2.3	平面トラス	2.3
		静定	3.1	ボースtringトラス	2.7
		節点	2.3	ボルト	1.3
				ポニートラス	2.7
ア～オ		タ～ト		細長比	2.5
綾取り	3.1	タイドアーチ。	4.2	方杖橋	2.2
安定	3.1	タイプレート	2.6		
吾妻橋	3.4	ダブルワーレントラス	2.4	モ	
青天井	2.7	耐震性	1.4	木造アーチ	2.2
エッフェル。	2.1	耐風性	1.4		
尾張大橋	4.2	大虹梁	1.1	ヨ	
		大仏殿	1.1	澱川橋梁	3.2
カ～コ		中路	4.4		
ガセットプレート	2.6	繋ぎ板	2.6	ラ～ロ	
カバープレート	2.6	デッキトラス	2.3	ラティストラス	2.4
下弦材	2.3	鉄筋コンクリート桁	4.1	ランガー	4.2
下路トラス	2.3	ドーム	1.3	ランガーガーダー	4.2
回転半径	2.5	トラス(turss)	0	ランガートラス	4.2
外的安定	3.1	トラスモデル	4.1	立体トラス	3.5
格間	2.3	トラス桁	2.3	レーシング	2.6
格点	2.3	トレスル橋脚	4.4	錬鉄	2.1
間接載荷	2.5			ローゼ	4.2
甲斐の猿橋	2.2	ナ		ワ	
鋼トラス橋	2.3	軟鋼	2.1	ワーレントラス	2.3
風荷重	1.4				
ガラビー橋	4.4	ハ～ホ			
巨木建築	1.1	ハウトラス	2.3		
橋門構	3.4				

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. 大仏殿の木構造

1.1 長い巨木が必要であった

世界最大の木造建築である奈良の東大寺大仏殿(金堂)の寸法は、高さ 46.8m(15 丈)、間口 57m(19 丈)、奥行き 50.5m(17 丈)す(図1)。その主構造部材は、長さ 23.5m(17間)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います。これは、大仏を安置するため、間口・奥行き・高さの広い空間(約 20m×20m×20m)を構成させ、それを覆う瓦屋根部分の重量、約 3000 トンを支え、柱に伝えるためです。大虹梁は、天井に隠れて見えませんが、それらを支える柱が全部で 60 本あります。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、創建時よりも間口が 2/3 の縮小寸法になりました。この理由は、元の長さを持った長い巨大な木材が得られなかったからでした。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、正確な記録がありません。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。再建を計画した公慶は、全国を行脚して大虹梁に使える長い巨木を探すことから作業を始めなければならませんでした。ただし、大虹梁を支える大きな柱の方は、圧縮力だけを受けますので、断面寸法の小さい柱を組み合わせてあります。

1.2 構造部材としての木材の欠点

現代の構造工学から言えば、幅と奥行きがそれぞれ 20m 以上ある吹き抜けの空間を覆う屋根構造は、鉄骨を使えば、自由なデザインができます。身近には、学校の体育館があります。木材だけで、この空間を覆う構造を建設することは、現実的には不可能です。大仏殿の計画は、宗教的な意義を持たせること、権威の象徴を目的とすることとで実現できたのでした。ところで、材料力学的に見ると、木材の利用に二つの欠点があることに苦勞があります。引っ張り材として利用できないこと、アーチ状に単体の曲線部材として利用できないことです。つまり、木材は、柱と梁とに使うことに最大の特徴があります。



図1 奈良東大寺の大仏殿(ウィキペディア)

1.3 木橋に使う梁の寸法

江戸時代まで、主要な街道に架けられていた木橋の支間は、平均として4～5間(7.2～9m)でした。この程度の長さで上質の木材を調達することは、何とか可能でしたが、20m もの長さの天然木材は、5階建て以上のビル高さに相当する巨大な高木になるのです。木橋の主桁に使う木材を、トラスに組み上げる技術はありませんでした。観光資源として木造トラス橋を架ける例がありますが、引っ張り材には、鋼材を部分的に利用しています。欧米の石造構造物も、引っ張り材としての使い方ができないため、アーチ状の構造(ポールトやドームなど)が工夫されています。

1.4 耐震性と耐風性の課題

建造物の耐震性に関しては、現代、多くの研究があります。その方法論は、震害を調べて分類し、法則性を見つけることが主流のようです。しかし、建造物の震害は、一つとして同じではありません。すべて地震後の結果論です。**想定外**の言い方が流行になりました。震害が予想され、補強が必要であるとしても、振動測定をして、測定前後の解析を比較し、工学的な対応の是非を提案することはしていません。仮に同形式の上部構造が複数あったとしても、基礎と地盤を含めた下部構造の性質は個別に異なります。経験的な知識は、柱の多い木造建造物、とりわけ、松杭基礎は、ペしゃんこには潰れ難いことが知られています。耐震性を増やすには、耐震壁や支柱を増やすことの提案が多く見られます。大仏殿は、この種の、目立つような構造部材がありません。大仏殿の瓦屋根は、重量が非常に大きく、地盤の方が振動しても、絶対座標的には不動点になっています。言わば、上から建物全体を押さえつけていて、それを多くの柱で受けていることに注意を向けたいところです。一方耐風性は、上部構造だけで設計荷重を考えることができます。有名な例は、エッフェル塔を設計したエッフェルが、風洞を設計して研究したことです。テレビ塔の設計では、風荷重を主な活荷重としています。

2. トラス橋の力学モデルと実構造

2.1 エッフェルは橋梁技術者であった

産業革命によって、大量の鉄鋼材料が安価に生産できるようになったのは19世紀の半ばです。ほぼ同じ頃、鉄筋コンクリートも実用されるようになって、鋼橋、とりわけ鉄道橋の建設ラッシュの時代に入りました。エッフェル塔で有名なギュスターブ・エッフェル(1832-1923)も、鋼橋をはじめ、種々の鉄骨構造物の設計者として有名でした。エッフェル塔の基本構成はトラス組みです。約100m四方の敷地に斜めに立ち上げた4脚と下層の展望台とで構成するトラス組みの立体ラーメン構造の上に脚を伸ばし、上層の展望台の構造を支え、その上に脚の本体がさらに伸びています。アーチ状の装飾骨組みが見えますが、力学的にはアーチ橋ではありません。注目したいことは、塔の真下に、図1の東大寺の大仏殿がそっくり納まる、広い吹き抜け空間になっていることです。1950年代からテレビ放送の時代を迎え、世界各地でテレビ塔が建設されてきましたが、その殆どは、塔の真下に建物があって、観光用エレベータの乗り場を持っています。

因みに、23の技術情報を記します。エッフェル塔の材料は**錬鉄**(通称、**軟鋼**と言います)約7000トンを使っています。橋梁工事費の積算をするとき、通路面の面積を元に、使用鋼材の単位重量と単価とを使う習慣があります。エッフェル塔は敷地が100m×100mです。ここに軟鋼を溶かして鉄板で敷き詰める計算をすると、板厚は僅か9cmです。図3は、一辺100mmの折り紙に切り紙細工をして、中央を持ち上げ、塔形にしたものです。エッフェル塔と相似の高さ、30cmには届きません。なお、建設費は、当時の価格で総額650万フランですので、単位面積あたり650フランです。

2.2 橋の基本構造は桁組みであること

橋の力学的な基本構成は、二本の主桁を並べ、それを横桁で繋ぐ骨組み構造にし、その上に床を載せます。幅員が広ければ、主桁を追加するか、横桁間で支える縦桁を追加します。木材は、どの方向にも曲げ部材に使うことができますので、小支間の橋は、木材をそのまま骨組み用の桁として使うことができます。この単純な考え方では、長い支間を渡すには相対的に大寸法の木材を使う必要があります。そこで、小寸法の木材を組み合わせ、より長い支間を渡す構造形式も研究されてきました。はじめは、**甲斐の猿橋**のような「**はね橋**」または、「**はねだし橋**」、次いで、「**方杖橋**」、その延長が岩国の**錦帯橋**のような「**木造アーチ**」です。しかし、木橋では長い支間を渡すことに限界があります。その最大の理由は、木材を引張材として利用できないことです。近代以降、鋼材を利用して曲げ部材(桁)を効率よく構成する方法の工夫が始まりました。これは、曲げ部材を、圧縮部・引張部・腹部の、三つの要素の集合で構成する方法です。**トラス**の特徴は、全体形状をマクロに見たとき、厚みを持った長い梁としての全体形状と、腹部の部材の組み立て方法にあります。まず全体形状ですが、高さが一定で長さの長い梁(**平行弦トラス**)に構成する場合(図4)と、長さの中間に厚みを持たせ、端の部分を狭めて半月形にする**曲弦トラス**(図7)とがあります。腹部の部材の組み方は、主に、そのデザインの特許として申請した人の名称で呼ばれるようになりました。



図2 エッフェル塔(完成1889)



図3 七夕の切り紙細工で作る紙の塔

2.3 平面トラスの基本的な組み方三種類

実際のトラス橋は、立体的な骨組み構造ですが、構造解析に便利な平面トラスの集合に分けて設計計算に応用します。この平面トラス組み単位は、厚みのない薄板の性質になります。やや腰の強い紙で6面体の箱を組み立てると、予想以上に丈夫な立体構造になります。トラス橋も、この組み立て方法を応用します。標準的なトラス橋は、それを横から見たとき、直線部材(member)で三角形を構成し、この三角形単位を横に繋いだ骨組みで桁に構成します。したがって、トラス桁(trussed girder)の言い方と、ブレースドリブ(braced rib)の言い方があります。鋼橋の主桁の構成を分類するときは、鋼トラス橋と、プレートガーダー(鉄桁)橋とを使い分けます。

単純トラス橋としての基本形式は、「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、斜材の使い方を区別する用語です。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。斜材の部材長は、垂直材、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。なお、通路の高さ方向の位置は、下弦材に置くのが標準です。これを下路トラス、またスルートラスとも言います。通路を上弦材の上に置くのが上路トラス、またはデッキトラスとも言います。

図4は平行弦トラスです。上下の水平な部材を、上弦材(upper chode)・下弦材(lower chode)と言います。上弦材を多角形にして曲線状にしたものが曲弦トラスです。上下を繋ぐ部材は、総称では腹部の部材(web member)ですが、向きで区別して、垂直材、(vertical m.)、斜材(diagonal m.)と言います。複数の部材が集まる節点を、橋梁工学では格点(panel point)と言います。水平方向の格点間を格間(パネル:panel)とし、その長さが床組み構造の支間(span)になります。部材は、軸力(圧縮力・引張力)だけを伝えると仮定します。したがって格点での部材の接合は、回転が自由にできるピン結合を仮定します。実構造をこの理論仮定に合わせるように製作したものをピントラスと言います。しかし、ピン(ヒンジ)の箇所は、強度上の弱点になることと、そこを剛結合にしても部材軸力の大きさがピントラスの仮定と殆ど同じであることが分って、現在では採用しません。剛結合の部材は局部的に曲げ応力が発生しますが、許容応力の範囲内で収まるとして設計計算では無視します。

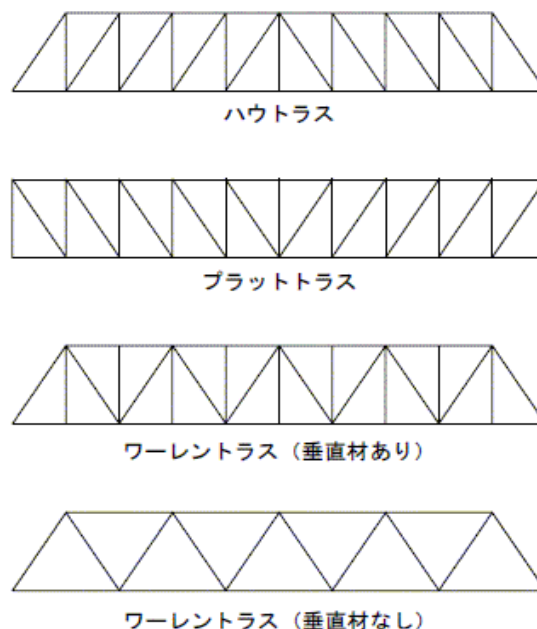


図4 代表的な平行弦トラスの組み方

2.4 画家が描いたラティストラス

図4に戻って、ハウトラスとプラットトラスとを重ね合わせた図形は、斜材をX形に組む構造になります。これをダブルワーレントラスと言います。垂直材を使わないでX型だけを密にダブらせて並べた構造がラティストラスです(図5)。上下弦材に比べて、小寸法の部材を斜材に使います。部材の製作技術と輸送能力が向上すると共に、この形式が簡素化され、垂直材無しのワーレントラスに進化したと考えることができます。ただし、横構などの二次部材には垂直材とX形組みの斜材とで構成するダブルワーレン組みが実用されています。ただし、この構造は不静定構造ですので、計算上は圧縮応力が作用する斜材を無視して、静定なプラットトラス形式を仮定して応力計算をします。

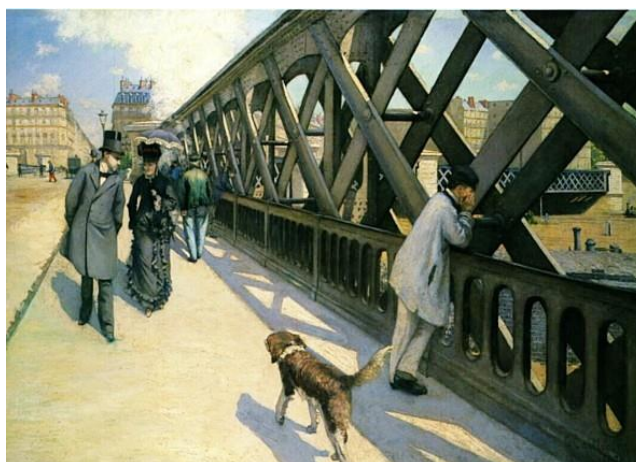


図5 ヨーロッパ橋(カイユボット 1876 作)
遠景に別のラティストラス橋が描かれています

2.5 トラスの弦材は曲げ材に使わない

トラスに構成する弦材は、格点だけで支え、横からの荷重を直接作用させないようにします。つまり、力学的には軸力だけを伝えたと仮定して部材設計をします。荷重は、トラス面に垂直に接続させた横桁を介して、格点だけに作用する構造で設計します。これを間接載荷と言います。実際の弦材は、自重もありますので、曲げにも程ほどの剛性を持たせます。さらに、圧縮材では座屈変形に対して安全性を持たせるため、柱としての細長比(部材長/断面の最小回転半径)に上限を設けます。引張材は座屈を考える必要が無いので、ケーブルに置き換えるアイディアがあります。しかし、風を受けて振動し易い性質が顕在化することがあります。したがって、引張材も細長比の上限を決めます。振動現象は、長く持続すると部材の一部、特に格点での取り付け部が疲労で破断する事故が起きますので、油断はできません。

2.6 トラス弦材の構成方法

図4に示す上下の弦材は、引張力または圧縮力を伝えるための必要断面積を持たせますが、そのまま二方向の曲げ変形に抵抗できる剛性を持たせます。そのため、部材の断面形を、四角形で構成します。これは桁橋の主桁断面形をI形で構成することと異なる点です。ここでは弦材の組み立ての基礎的な要件を説明します。図6は、山形鋼(アングル)と板材とをリベットで組み立てる例を示しました。全体を、箱断面に構成します。箱の内法寸法は、リベット結合や溶接の作業空間ができるように、少なくとも30cm幅が必要です。

上弦材のカバープレートは、雨よけに使う意義があります。点線の部分は、作業時に手が入るように開いていますが、左右のウェブプレート間を繋ぐため、矩形状のタイプレートか、斜めの補助材(レーシング)を使うことを示しています。左右のウェブプレートの間は、斜材・垂直材が納まる空間です。トラスの格点は、複数の弦材が集まりますので、組み立て方に種々の工夫があります。リベット構造では、格点で、すべての方向の弦材や横桁を接続させますので、部材力を伝える補助にガセットプレート(当て板、繋ぎ板)を使います。溶接構造では、格点の左右に繋がる弦材のウェブプレートを、連続した鋼板で構成し、ガセットプレートとしても使います。弦材の軸方向の連結(添接)は、格点の位置を外すことができます。図5に示したラティストラスは、上下の弦材のウェブプレートが、二枚あることに注目して下さい。ガセットプレートはありません。ウェブプレートの表と裏とに、向きの異なる斜めの鋼板を貼り付けた構造になっています。したがって、ラティス面が2面あります。

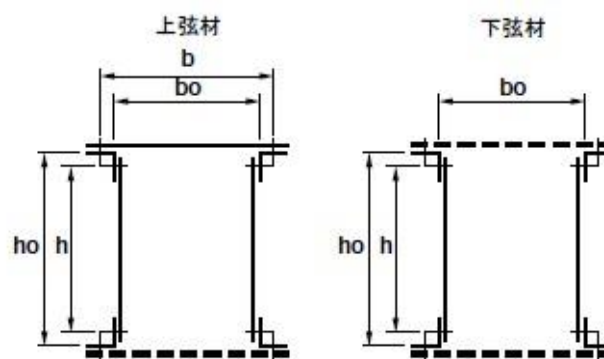


図6 弦材断面の構成法の例(リベット構造の例)

2.7 通路をトラスの下弦に置く理由

橋桁は、床通路を下から支えるように桁組みを構成することが基本です。つまりデッキ構造です。しかし、例えば、河川に架ける橋は、その部分が洪水時の水位よりも高くなるようにします。やや長い支間にトラス橋を架けるとき、トラス全体の桁高が大きくなりますので、下弦材の位置に通路を置くように設計します。そうすると、主桁のトラス組みの面を通路の左右に並べる構造になります。図5は、平行弦のラティストラスで設計された構造です。図7は、ワーレントラス組みの、鉄道橋として設計された下路トラスです。上弦材が直線であるのと、曲弦にしたものと二種類が見られます。図5と図7、どちらも路面は青天井です。この構造を、通称でポニートラスと言います。原義は不明です。

なお、図7の曲弦トラスは、上弦材の格点が円弧を描くような弓形、下弦材が直線ですので、英語用語(bowstring truss: 弓と弦)をそのままカタカナ語にしてボースtringトラスと言います。なお、ポニートラスは、立体トラス組みとしては、上横構を省いた構造です。直立したトラス面は独立ですので、横向きで垂直な方向に不安定さがあって、現在では採用されなくなりました。ボースtring形式で、ポニートラス形式の構造は、当初、近代的な中小規模のトラス形式としてデザインされましたが、殆どは架け替えられました。現存している橋梁は、技術遺産として扱われています。



図7 ポニートラス:クワイ川の鉄道橋(ウイキペディア)

3. トラス組の静定と安定

3.1 内的に静定で安定な組み方

図4に描いた平面トラスは、内的に**静定**(statically determinate)で**安定**(stable)です。静定と言うのは、格点での力の釣り合い条件だけで、すべての部材力が計算できることを言います。どれか一本の部材を外すと、全体の形が崩れるか、それと接続している部材が遊ぶ組み方になっている状態を言います。ピントラスの力学状態を簡単に説明するときのモデルには、一本のループになっている紐で造る**綾取り**があります。どこか一箇所でも紐が切れると形を為さなくなります。綾取りでは、紐はすべて引張力になっていて、その大きさは場所ごとに異なります。力が作用しない、遊ぶ部分ができません。安定と言うのは、全体の形が崩れない状態を指します。構造物としてのトラスは、少なくとも2箇所の格点で地盤に支え、3本の仮定の支点部材の追加が必要です。これが**外的安定**の条件です。

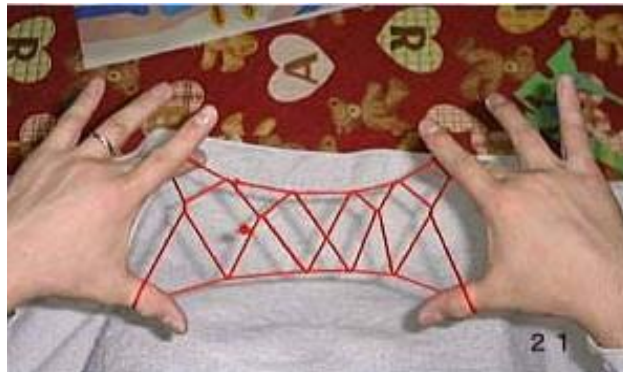


図8 綾取り(インターネットから採図)

3.2 細長比を下げるための分格トラス

第2. 3節に示した図4で、垂直材の有るワーレントラスに注目して下さい。垂直材は英字のT形を構成する格点に接続されています。このトラスの格点数は、その下に示した垂直材の無いワーレントラスに比べて9点も多くなっています。この垂直材の力学的な性質は2種類あります。①見掛けで上弦材の中央と下弦の格点とを結ぶ部材と、逆に②上弦の格点と下弦材の中央を結ぶ部材とがあります。このトラスを下路トラスとして設計すると、部材①は、垂直材の左右2パネル上を荷重が通るときだけ引張力が作用します。一方、部材②では、全く部材力の発生がありません。この部材②は、上弦材が上下方向に座屈変形をしないように抑えることを目的としています。この場合、トラス面に垂直な方向への座屈変形のことは横構の配置のとき考えます。したがって、部材②は、二次部材として設計の扱いをします。図9は、日本では最長の支間(164.6m)を持つ下路単純トラスです。主構造形式を9パネルのプラットトラスで組み上げてありますが、端支点到斜めの圧縮材を追加し手、全体は曲弦トラスです。支間中央はX形に組み上げてありますので、一次の不静定です。この構造では英字のT形で使う部材が多く見られ、その大部分は、上述の部材②と同じように部材の細長比を1/2にすることに使い、部材断面積の節約が目的です。大きな単位のトラス組みを、部分的に小単位の三角形の集合に分割した構造を、**分格トラス**と言います。



図9 近畿日本鉄道京都線の澱川(ヨカワ)橋梁(ウィキペディア)

3.3 立体的な構成で考えるトラスの安定問題

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、**ポニー**トラスは、トラスの高さが低いので、通路の上側をつなぐ横構が使えない構造です(図7)。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、下横構のない形断面構成をしたデッキトラス構造も、立体的に見れば、不安定な性質があります。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(4支間)の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。

3.4 吾妻橋は本格的なトラス橋であった

図10は、明治20年(1887)完成した、東京墨田川の吾妻橋の絵葉書です。カラー版ですが、モノクロ写真を台にして色づけし、錦絵と原理的に同じ方法で多色のグラビア印刷をしたものです。版画家が描いた錦絵もあります。この絵葉書は当時の風俗が分かること、プラットトラス構造が正確に分かることが貴重です。トラス面の外に歩道があります。上横構があり、不十分ながら**橋門構**があり、立体的な安定条件を満たしています。この下路トラス橋の欠点を言えば、都市の基幹道路の橋梁として幅員を広げたいときに、トラス面が障害になることです。現在の吾妻橋は、昭和6年(1931)に架け替えられた上路の鋼リブアーチ橋であって、幅員も20mと広くなりました。



図 10. 吾妻橋(明治20年:1887架設)の絵葉書

3.5 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ソフトウェアを別に用意してあります。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捩れ剛性の大きさが数値的に得られることです。捩れを起こす外力は、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があります。図11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・上弦材格点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捩れていることが分かります。

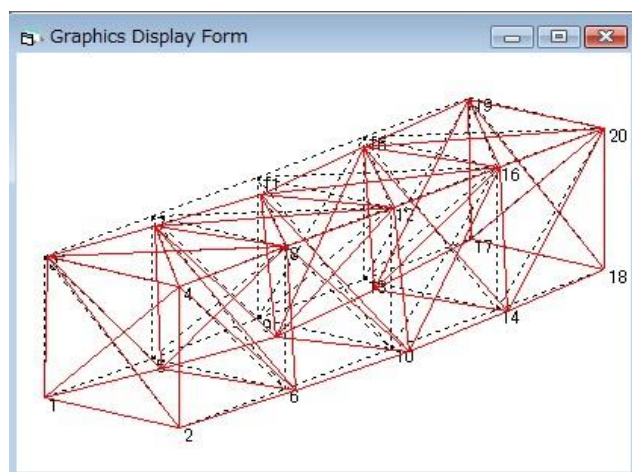


図11 立体トラスのFEM解析で求めた変形

4. トラス理論の発展

4.1 鉄筋コンクリート桁のトラスモデル

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12)。鉄筋コンクリート桁の曲げ応力は、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、プラット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ます。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、全体の骨組みモデルはプラットトラスです。

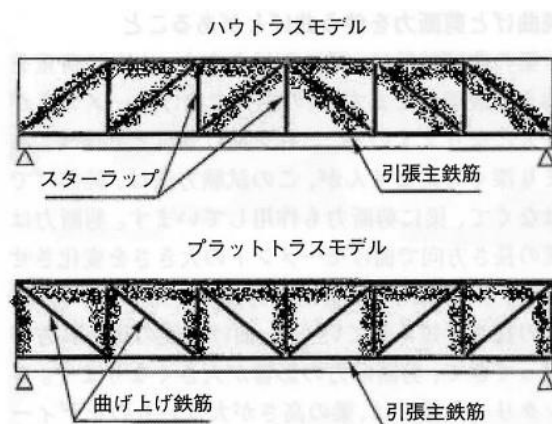


図12 鉄筋コンクリート桁のトラスモデル

4.2 曲弦トラスからアーチ系構造への展開

第2. 7節、図7で紹介した下路のボースtringトラスは、上弦材の格点を円弧に沿わせた多角形です。一般の人には「アーチ橋の一種である」と説明してもよいでしょう。同じようですが、第3. 2節、図9のトラスも、上弦材の形状が弓形をしていますので、英語の原義から言えばボースtring構造ですが、形式分類では下路の曲弦トラスとします。では、アーチとトラスとの相違はどこにあるかと言うと、アーチ系の構造では腹部が垂直材だけであって、斜材が無いことで区別します。通常、アーチ橋と言えば、通路を下から支える上路橋として設計するのですが、下路の曲弦トラスにアーチの力学を応用した構造形式が提案されたのです。これは、三種類あります。発案者の名前を取って、ランガー形式、ローゼ形式、そして、弓張り形式のタイドアーチです。アーチ橋の解説は、この「お話シリーズ」の「アーチ橋のお話」に詳しい解説を載せました。

ここで、トラス橋とアーチ橋との区別をする例として、図13(尾張大橋: 道路橋)のランガー橋を取り上げます。上弦材は、軸力だけを伝える部材として断面設計をします。曲げ剛性の小さな弦材ですので、原理的には、ピン結合の仮定です。通路を支える、垂直材のある下路の平行弦ワーレントラスに曲げ剛性を持たせます。このトラス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。水平の梁部がトラス組み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。アーチリブと梁とを結ぶ垂直材があります。しかし斜材がありませんので、アーチ系構造であることが分かります。桁端部に三角形に部材が構成されていることで、斜材が無くてもアーチ部材は静定構造に構成されます。アーチ部材の水平反力は、トラス上弦材の引張り力と釣り合います。垂直材は対傾構と共にラーメン構造に組んであって、全体橋梁が立体的に安定な構造になっています。

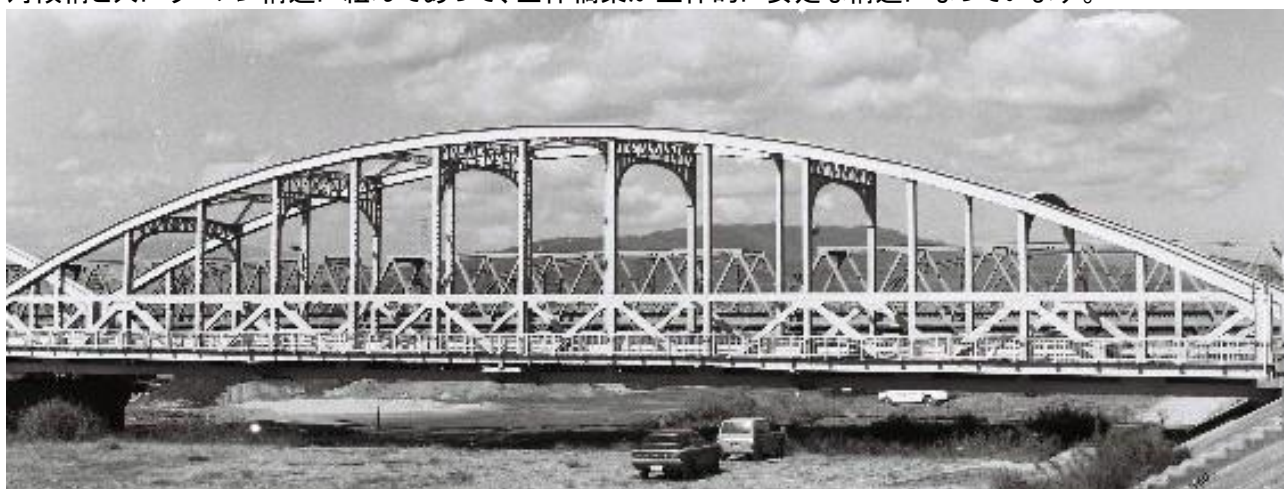


図13 ランガートラス(背景に平行弦ワーレントラス: 鉄道橋が見える)

4.3 トラス橋は小単位の桁橋を載せる橋である

トラス橋は、トラスの格点間(パネル)を小支間とした桁橋を、横桁上で支持している複合構造と見ることができます。つまり、「橋を載せる橋」です。道路橋では、トラスの弦材を、鉄筋コンクリートのスラブと縁を切っています。径間の小さい縦桁が、小単位の桁橋の主桁です。縦桁はプレートガーダーを並列させる構造が普通ですが、プレキャストの PC 桁を並べた例もあります。鉄道橋では、列車がブレーキをかけると橋軸方向に軸力が発生しますので、その力をトラスの弦材に伝える横構を設計します。道路橋の床組み部分は、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。

4.4 鋼鉄道橋にトラス構造が多く採用される

19世紀以降、鉄道の建設がブームになりましたが、その建設では鋼トラス橋の設計と架設とが重要な課題でした。図14は、エッフェルが手がけた、ガラビー鉄道橋です。全長は 565m です。この橋は観光名所になっていますので、多くの写真で紹介されています。その多くは風景画の添景として扱われています。したがって、橋梁技術者が見て、細部構造が或る程度分かるような構図が少ないのが実情です。橋としては、トラスで組んだアーチ部分の全体形に注目するのが普通です。ここでは、トラスの組み方全体について解説します。

まず、線路を通す主体である平行弦トラスは、垂直材を持つダブルワーレンに組んであります。線路を支える床桁の位置は**中路**です。線路上は蒸気機関車を通すため、青天井でした。写真に見えるのは電化のための架線を設けるための横繋ぎの部材です。一見ポニートラスに見えても、下弦材を繋ぐ横構がありますので、立体的には十分のねじれ剛性があります。線路を通すトラス桁は、主構造のアーチと、複数の鋼**トレスル橋脚**で支えています。アーチ部は、支間 165m、高さ 122m です。主トラス面は、上部で 6m、下部で 20m に開いています。その全体のトラス組みは、ラティス形式です。この鋼材重量は約 3200 トンです。

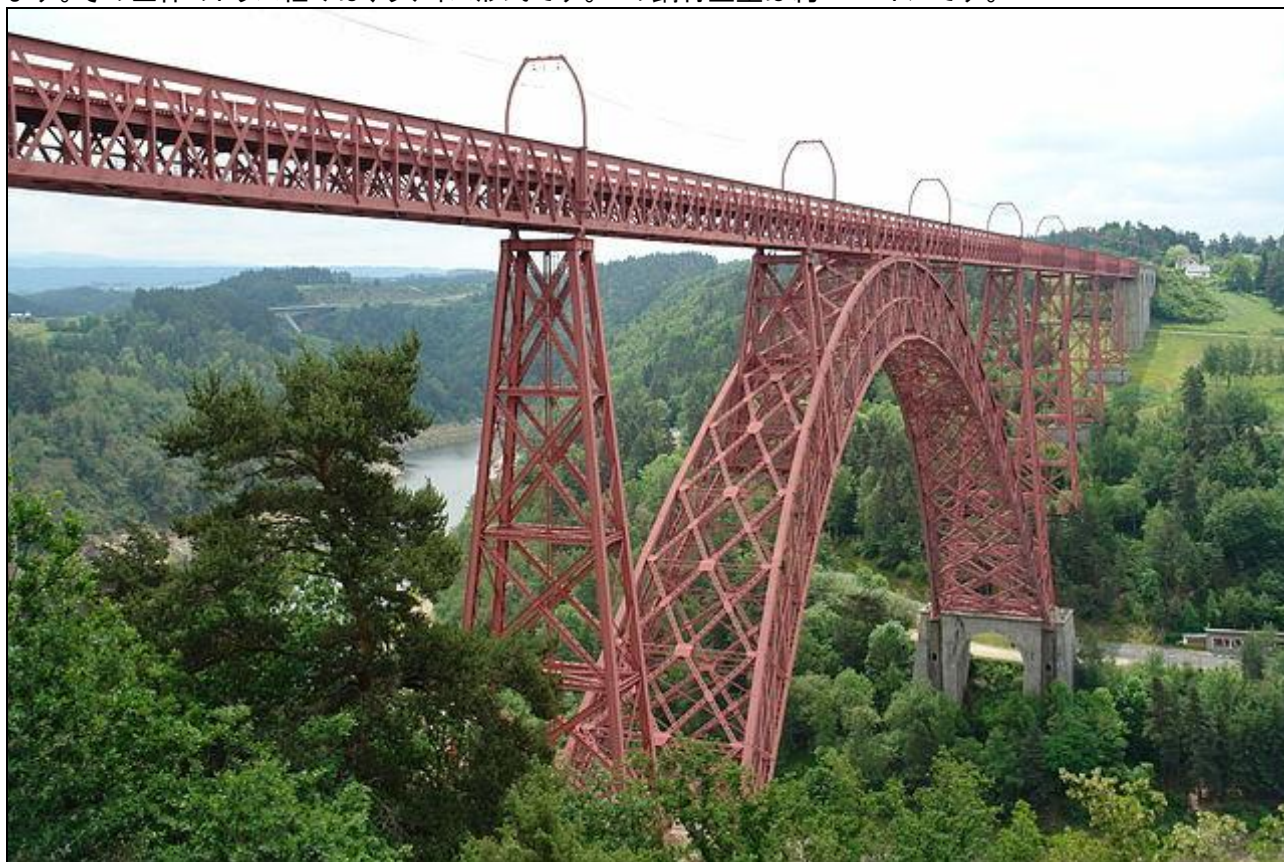


図14 ガラビー複線鉄道橋(フランス:1884)、エッフェル