

桁橋のお話し

2017年5月

0. まえがき

人の生活環境は、常識として、井戸を掘れば良い飲み水が得られる水環境沿いに集まります。小さな水路も身近に見られ、そこに小さな橋も必要でした。都市化が進むと、上水道・下水道が整備され、それも暗渠化されますので、自然の水環境とは無関係であった丘陵地にも生活環境を広げることができるようになりました。しかし、大雨が降ると、雨水は、場所を選ばず、地表をまとまって流れます。住宅地の道路の端は、排水用に開いた側溝を見ることがあります。その所々に蓋をして通路の助けにしています。これは橋とは言いませんが、道路の構成では重要な要素です。一方、農地の耕地整理は、一種の都市計画事業です。とりわけ稲作用農地は、農道と水路の整備に合わせて、私的な石橋・板橋・土橋などの桁橋が架設されます。農道が公共道路としても整備されるとき、橋も近代化した設計で小支間の桁橋に架け換える必要が起こります。やや大きな河川では、桁橋以外のトラス橋なども提案されることもありますが、こちらは、より大きな行政単位である、国や県が扱います。つまり、小範囲の地域では、経済的な桁橋が多く架設されます。その桁橋の実態について、地元の人とも相応の関心を持ってもらうのが望まれます。この文書は、数式を使わず、一般の人向けに、桁橋についての解説をまとめたものです。

島田静雄

目次

0. まえがき	
1. 日本的な桁橋	
1.1 宿場駅と石橋	
1.2 排水用の側溝と板橋	
1.3 安定感のある石の桁橋	
1.4 単純な板橋は実用橋にならない	
1.5 街道に架ける土橋	
1.6 標準的な木橋	
2. 専門用語の説明から	
2.1 漢字の梁と桁との使い分け	
2.2 桁構成のシステム	
2.3 桁の断面構成システム	
2.4 板橋と版橋	
2.5 箱構造への発展	
2.6 フランジとウェブの原義	
2.7 プレートガーダー	
3. 部材応力の計算を考えたシステム	
	3.1 静定構造と不静定構造
	3.2 合成桁
	3.3 ハイブリッド構造
	3.4 力と変形との関係には二つの仮定を使う
	4. 二次部材の機能を理解しておくこと
	4.1 特別な条件のとき効いてくる部材
	4.2 対傾構は重要な部材であること
	4.3 横構は水平移動を抑える
	4.4 支点の動きを考える
	5. 荷重の分配作用の考え方
	5.1 振れ剛性があると分配効果が起こる
	5.2 分配効果が生じる力学モデル
	5.3 多主桁橋の分配係数
	6. 橋断面全体の形状設計
	6.1 開断面と閉断面とがある
	6.2 振れ剛性を利用する構造
	6.3 サンプナンの振れを応用する箱桁

用語索引

索引の参照番号は、章・節 です

記号・英数字		サ～ソ		版	2.4
(1, 0)分配	5.1	サンブナンの振り	6.3	版橋	2.4
(1/2, 1/2)分配	5.2	死荷重合成	3.2	梁	2.1
beam bridge	2.1	下フランジ	2.3	鈑	2.7
brace	4.2	下横構	4.3	鈑桁	2.7
composite girder	3.2	支間	2.4	広重	1.5
girder bridge	2.1	主桁	2.2	フックの法則	3.4
hollow slab bridge	2.5	宿場駅	1.1	ブレース	4.2
hybrid	3.3	床版	2.4	プレストレストコンクリート	2.4
lace	2.6	上縁	2.3	不静定	3.1
lateral bracing	4.3	スウェー	4.2	幅員	2.4
lattice	2.6	スラブ	2.4	腹部	2.6
PC	2.4	スラブ橋	2.4	分配横桁	5.1
PC合成	3.2	静定	3.1	平面保持の仮定	3.4
PC箱桁	6.3	線形計算	3.4	閉断面	6.1
RC	2.4			ボックスガーダー	6.3
sway bracing	4.2	タ～ト		骨組みシステム	2.2
T桁	2.4	縦桁	2.2	細長比	4.1
web member	2.6	対傾構	4.1	北斎	1.4
web plate	2.6	単純振れ	6.3		
		端対傾構	4.2	マ～モ	
ア～オ		断面係数	2.3	丸木橋	2.2
足場	3.1	中間対傾構	4.2	曲げ振れ剛性	6.2
板	2.7	中空床版橋	2.5	耳桁	5.3
板橋	2.4	中立軸	3.2		
ウエブ	2.6	鉄筋コンクリート	2.4	ヤ～ヨ	
上フランジ	2.3	トーションバー	6.1	八つ橋	1.4
上横構	4.1	土間	1.1	床組み	2.2
応力測定	3.2	土橋	1.5	床板	2.4
		突縁	2.6	有効幅	3.4
カ～コ				横桁	2.2
下縁	2.3	ナ～ノ		横構	4.1
開断面	6.1	内的に安定	4.2	横倒れ	2.2
活荷重合成	3.2	二次部材	4.1	溶接構造	2.3
外的不静定	4.2	振れ	2.2		
桁	2.1	振れ剛性	4.2	ラ～ロ	
桁橋	2.1			ラティス	2.6
構造システム	2.2	ハ～ホ		ラテラル	4.3
鋼床版	2.4	ハイブリッド	3.3	リベット構造	2.3
鋼箱桁	6.3	跳ね足場	5.3	レース	2.6
合成桁	3.2	箱桁	6.3		

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. 日本的な桁橋

1.1 宿場駅と石橋

江戸時代までの公共道路としての街道は、人馬の通行を考えて、適度な里程間隔で**宿場駅**がありました。宿場は、泊まらないで通過する旅人の休憩にも利用しますので、良質な飲み水が得られる場所に造られます。用水路も必要でした。宿に泊まる時、わらじを脱いで足を洗って座敷に上がるための**土間**があり、また出発のときに足ごしらえをする場でもありました。馬を繋ぎ、休ませる場も必要でした。現代ならば駐車場のスペースを設けることに当たります。典型的な宿場町は、道路に沿わせて、共用する洗い場を兼ねた小さな水路を通しました。そこを渡る踏み板状の石橋または板橋が必要です(図1)。



図1 宿場町の面影を残す北国街道海野宿(長野県東御市)インターネットから採図

1.2 排水用の側溝と板橋

日本は世界的にみて、降雨量の多い国です。都市化した街並みは、保水能力の大きな自然の地表が少なくなりました。雨水が道路や橋梁に溢れることがあります。その排水を目的とした側溝を道路端に設けます。現代の都市化した道路は、安全な通行ができるように、蓋で覆うか、暗渠化されます。しかし、地方に行けば、あまり神経質ではないので、人や車の方の自己責任で側溝に落ちないように安全通行をすることが、一つの常識です。図1の水路は、大雨の時には排水溝としても機能します。道路上の雨水が流れ込むことを考えて、道路端に地覆を設けていないことに注目して下さい。図2は、切手の図柄です。側溝に簡単な通路用の踏み板を渡してありますが、敢えて橋の画像のコレクションに加えてあります。



図2 鈴木晴信(1725-1770)の浮世絵

1.3 安定感のある石の桁橋

上の図1に見られるような水路の幅が少し広ければ、歩行者用の通路に長さの長い単体の石の桁橋を並べることもあります。図3は、石の桁橋の例として載せました。最初の材料費は高く付きますが、木材を並べて橋とすることに比べれば永く利用できます。石の桁橋にするの利点は、全体の重量が人の重さに比べて大きいこと、曲げ剛性と捩じり剛性も大きいことです。桁幅が狭くても、殆ど変形しません。「石橋を叩いて渡る」のことわざは、石橋が安全な構造であることが常識となっていることを言外に意味しています。



図3 公園に見かけた石の桁橋(撮影者、場所など不明)

1.4 単純な板橋は実用橋にならない

三河(愛知県)の八つ橋は、在原の業平が歌を詠んだ場所との伝承があって、そこに板橋が架かっていたと伝えられています。それがどのような構造であったのかは全く分らないのですが、葛飾北斎(1760-1849)は想像で浮世絵を描いています。その図は、かなり大きな寸法の板材を豊富に使っています。図4は、そのデザインを真似て公園の遊歩通路を板橋で渡しています。橋梁工学的に言うと、厚みの薄い、一枚板の板橋は、撓みも大きく、人は橋の中心線を通るように歩かないと、大きな振れがおきます。そのため、支間も板幅の5倍程度以下に抑えます。



図4 愛知県知立市のカキツバタ園(1980?)

1.5 街道に架ける土橋

江戸時代まで、やや長い水路や河川に公共的な橋を架設するときは、幅員も広くしなければなりません。私的な利用の性格がある石橋や板橋ではなく、経済的な土橋が多く架けられていました。江戸の日本橋は、立派な欄干がありますが、腕の良い大工さんが参画する必要がありました。図5は広重の描いた土橋です。この構造は、何本かの木の主桁の上に横木を密に並べ、その上に舗装を兼ねた土を盛って通路面の凹凸を均しました。幅員の両端に地覆がありますが、高欄が無いことが多いので、物騒な通路です。しかし、地元の労働集約的な工事で架設できる簡易さがあって、現代でも私的な農道に見られます。



図5 歌川広重(1797-1858)、木曾街道69次、赤坂

1.6 標準的な木橋

江戸時代まで、日本橋を初めとして、重要な木造橋は多くの浮世絵に描かれてきましたので、その構造がどのようなものであったかを見ることができます。現代、その時代の形式の木橋を実物で見ることができるのは、伊勢神宮の宇治橋です。土橋と異なるのは、床が木造板張りであることです。そのため、20年も通行に利用していると床板が磨り減ってしまいます。宇治橋は、伝統的な構造形式を踏襲していることが重要です。図6は、川原に降りて撮影した写真です。橋脚部分の木組みが分ります。景観資源として、見かけを木橋に見せている橋は、鉄筋コンクリートや鋼材も利用して、対荷力を高めています。



図6 伊勢神宮の宇治橋(撮影データ不詳)

2. 専門用語の説明から

2.1 漢字の梁と桁との使い分け

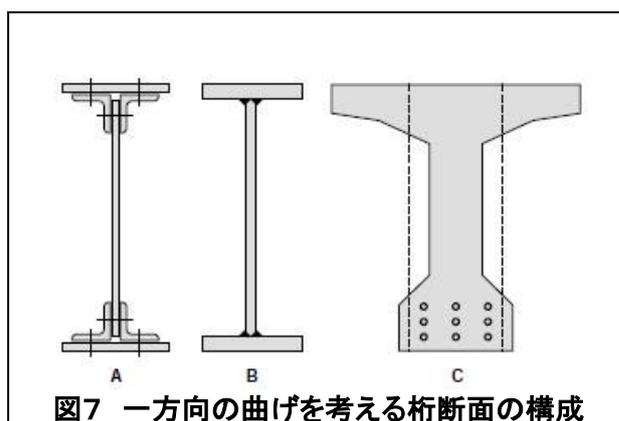
第2章は、入門の意義を兼ねて、基礎的な用語の説明から始めます。橋は、幾つかの部材単位を工場で製作し、それを現場で組み上げる作業で架設されます。この節は、「橋」を構成する基本要素としての「梁:はり」と「桁:けた」との使い分けを解説します。橋全景を真横から見て、水平で、厚みの小さな棒に見える橋形式を、**桁橋**と言います。橋梁工学では、**梁橋**とは使いませんが、英語では、梁橋に当たる beam bridge と、桁橋に当たる girder bridge と使い分けることがあります。あまり加工しない細長い素材を使う橋が beam bridge です。幾つかの素材を組み合わせて「**曲げ**」に抵抗させる**部材**に製作したものに「**桁**」を当てます。製鉄所で**形鋼**として出荷される I 形鋼、H 形鋼を、あまり加工をしないで架設する、支間の短い桁橋が beam bridge です。木造建築は「柱と梁」の組で構成しますので、「**梁**」と言うときは、木材を横向きにする意味があります。しかし、**構造力学**で言う「**梁**」は、材料種別を捨象して「**曲げに抵抗させる部材**」の意義で使う用語です。

2.2 桁構成のシステム

桁単独は、長さ方向に直角な向き方向からの力や、曲げに抵抗できるように、適度な**強度**と**剛性**とが必要で、水平状態で使う桁は、垂直方向の力、つまり重さ、を支えることを主目的とします。**横倒れ**や**振れ**に対しても相応の対策を考えます。天然の木材は、そのまま独立した桁として、例えば、**丸木橋**のように使うことができます。しかし、通路幅を持たせるために、複数の部材を組み合わせて橋に構成します。これが**構造システム**の考え方です。材料に鋼やコンクリートを使う桁でも考え方は同じです。なるべく材料を節約するように、全体として、部材の組み立てを考えた上で、個別の桁の断面を設計します。全体構成として、複数の**主桁**を並べ、それを**横桁**で繋ぎ、必要があれば**縦桁**を追加し、**床組み**を載せます。桁は、垂直方向の力に対して最も効率の良い断面形を持たせ、横方向の変形や振れに対しては、橋全体の**骨組みシステム**で対応させます。

2.3 桁の断面構成システム

曲げに抵抗する桁の断面形状を設計するとき、同じ断面積を使うならば**断面係数**が大きくなるような形状を提案します。設計業務で参考にするデータブックには、種々の図形について、断面積・断面二次モーメント・断面係数の計算式が紹介されています。形鋼やプレキャストPC桁の製品カタログには数値が載っていますので、カタログの見方も弁えておくとよいでしょう。鋼構造では、桁断面の上縁(**上フランジ**)と下縁(**下フランジ**)の断面を大きくします。図7Aは、**リベット構造**時代の標準的な構成です。鋼板と山形鋼とを組み合わせた構成です。図7Bは、厚みのある鋼板をフランジに使う**溶接構造**の例です。



2.4 板橋と版橋

丸い木材を桁として構造材料に使うときは、矩形断面に切り出して使います。一方、コンクリートを材料とする場合も、型枠に生のコンクリートを打ち込む作業を考えて、桁構成は矩形断面が基本です。板状の断面は、縦長の矩形断面を幅方向に並べたと考えることができます。この板状の形を橋として利用するとき、材料が木であるものを**板橋**(図4)、コンクリートの場合には漢字の「**版**(ばん)」(英語は**スラブ**:slab)の漢字を使って**版橋**または**スラブ橋**とします。コンクリートは、型枠の工夫次第で自由な断面形状に施工できます。図7Cの下半分は、工場で**プレストレストコンクリート(PC)**の桁を製作するときの断面構成の一例です。断面係数を大きくするため、破線で囲った矩形断面の腹部を削って上下のフランジ断面に振り分け、全体として英大文字の I 形に構成した形状と考えることができます。コンクリートの主桁を矩形断面で構成すると、同じくコンクリートの床部分と一体化した断面形に構成できます。これは図7Cの上半分の形状を横に並べた構成になり、その形から英字を当てて**T桁**と言います。床と桁との取り付け部分に三角形のハンチを付けます。道路橋全体の平面形状は、通路方向の**支間**(span)と、道路幅方向の**幅員**とで矩形の床面を構成します。床は、普通、**鉄筋コンクリート(RC)**で板状に構成しますが、これに**床版**(しょうばん)と当てます。木偏を使う**床板**(ゆかいた)は、古典的な木の**板橋**(いたばし)と判断されます。床版は、自動車のタイヤ重量を直接(または舗装を介して)受けます。**主桁**または横桁で支えた縦桁の線で支えた、2~3m 程度の小支間長の横方向の桁橋として設計します。なお、広い幅で長い鉄板を床として使う**鋼床版**もありますが、鋼箱桁橋などで使う、やや特殊な床形式です。

2.5 箱構造への発展

矩形断面のコンクリート桁を横方向に連続して並べたと考えることができる橋構造は、床版程度の小支間には実用しますが、やや支間の長い橋に利用するには不経済です。そこで、見かけは一定桁高のスラブ橋であっても、内部に中空の部分の設けて、全体の自重を減らす施工方法があります。これを**中空床版橋**(hollow slab bridge)と言います。この発展が**箱桁構造**です。

2.6 フランジとウェブの原義

鋼桁構造のフランジに漢字用語を当てるとき、以前は「**突縁**」と書きました。帽子(hat)の縁のように、横に張り出す部分の名称を転用した用語です。一方、**ウェブ**の原義は蜘蛛の巣です。網目構造(network)を言う用語に応用しています。衣装用語の**レース**(lace)または木組みの格子を言う**ラティス**(lattice)を当てることもあります。**ウェブ**は、インターネットのような通信網の用語に利用されるようになりました。鋼構造の桁の**腹部**は、当初、細長い部材を斜めの網目状に組んで、上下のフランジを繋ぐ構造で使いました(図8)。これが二つの方向に発展しました。一つはトラス構造に、もう一つは、全体を鋼板に置き換えた構造です。前者は、web member と総称し、トラスの斜材、垂直材を意味します。後者は、web plateと言うのですが、詰めて、ウェブで済むようになりました。



図8 ラティス構造(James Mann 橋、イギリス)
鳥居邦夫氏提供

2.7 プレートガーダー

図9は、鋼の薄板で構成した2主桁の道路橋の構成(システム)を説明するイラストです。部材に番号が振ってあります。その名称は「**易しくない橋梁工学**」を参照して下さい。ここで注目するのは、主桁の腹材(ウェブプレート⑰)です。この部位は、製鉄工場が、幅広で長さの長い一枚ものの圧延鋼板を製造するようになってから、標準的な鋼桁橋に利用するようになりました。これを**プレートガーダー**と言います。漢字用語を当てるときは、「**鋼桁**」とします。因みに、「**鋼**」は常用漢字ではありません。木偏の「**板**」は、材料が木であるときに使うのですが、形容詞的に使うこともします。材料を区別して言いたいので、敢えて金偏の**鋼**を使いました。なお、「**鋼金屋**」さんと言えば、自動車ボディの修理屋さんの意義で捉えるようになりましたが、以前は「**ブリキ屋**」さんと言う方が一般的でした。

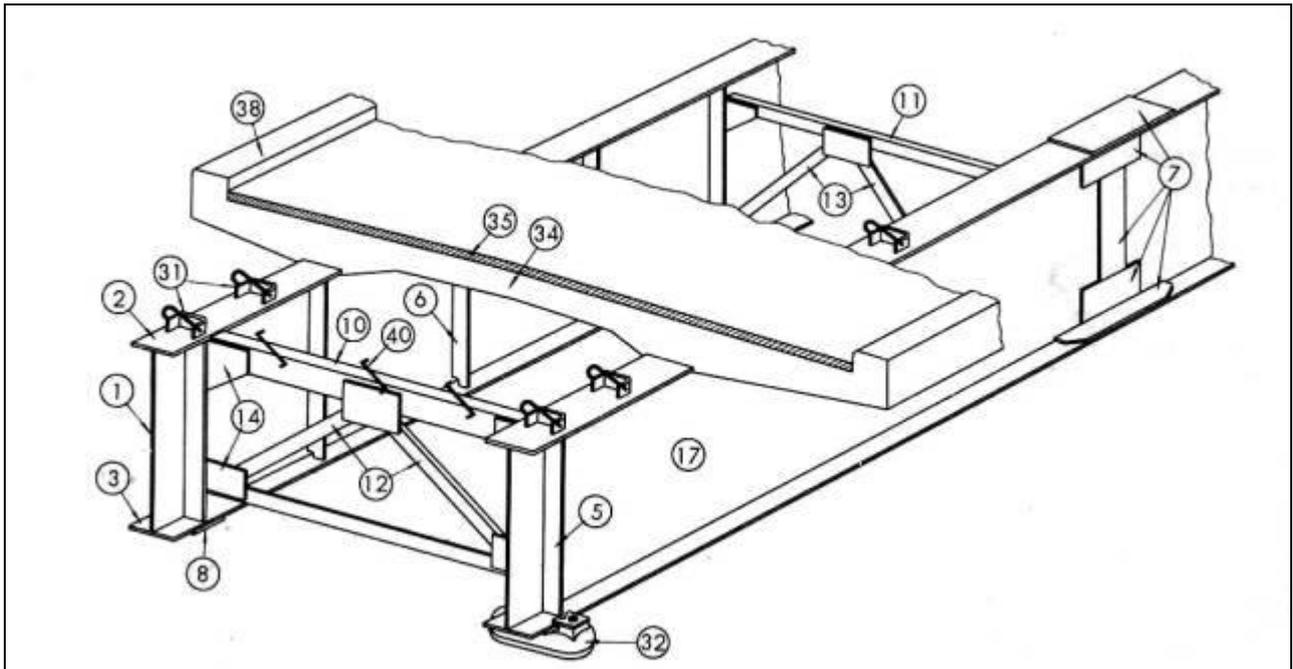


図9 プレートガーダーを使った標準的な道路橋の部材構成システム

3. 部材応力の計算を考えたシステム

3.1 静定構造と不静定構造

図7A、7Bに例示した鋼桁単独は、上下方向の力に抵抗するように提案した断面形です。横方向の曲げと捩れには頼りない断面です。図9に例示した構造は、これらの弱点を相互に補うように部材を組み上げて、静的に安定した完成状態に構成した構造です。図9の力学的な構成は、2本の鋼主桁を並列にし、横つなぎの部材（横桁または横構）と水平構を組み合わせて横倒れを抑え、通行荷重は舗装と床版を介して間接的に主桁に伝えるとしています。鋼桁部分の組み立てが完成すれば、三次元的に安定した構造システムになります。そのシステムを利用して、コンクリート床版の施工が続きます。このように組み上げるまでの実際の作業では、力学的な性質が刻々と変化していきます。作業手順次第では、思わぬ変形が起きて崩壊することがありますので、作業の順序を工夫したり、補助的な仮の部材、例えば足場など、を使ったりもします。力学的に明快な説明と計算ができないことも多いので、経験的な知識が必要です。自重だけの荷重による全体の応力分布や変形は、作業手順に多少の前後があつたとしても、大きな変化がないと仮定できます。この構成は、**静定構造**であると言います。しかし、連続桁構造などでは、架設工法次第で、全体の応力分布や変形が変わります。こちらは**不静定構造**と言います。したがって、不静定構造物の設計の場合には、あらかじめ架設工法を考えて部材応力を計算します。しかし、現実にはどのような応力状態になっているかは、橋完成時の外見からは分かりません。

3.2 合成桁

完成状態の力学系を知る間接的な方法は、トラックなどの重量車を載せて、静的な変形や動的な振動を測定して理論的に予測した値と比較することです。これを**応力測定**と言います。敗戦後、測定的技術が進歩してきましたので、幾つかの力学的な性質が分るようになりました。最も興味を引いたことは、理論的な仮定とは異なって、コンクリート床版と鋼主桁とが一体となって働いていることの発見です。鋼主桁の曲げ応力の分布を測定してみると、**中立軸**の位置が床版寄りに上がること、全体の曲げ剛性が大きくなって、撓みが計算値よりも小さく出ること、が分かりました。面白いことに、高欄と横構も主桁の一部として働き、曲げによる橋軸方向に応力が現れます。この現実を積極的に設計に応用する考え方が**合成桁**(composite girder)です。コンクリート床版を施工するときの手順前後で、全体自重による応力分布が変わります。**死荷重合成**と言う方法は、鋼桁全体を足場で支えておいて、コンクリート床版を施工し、コンクリートが硬化して強度に期待できるようになってから足場を外します。そうすると、コンクリート床版は、橋軸方向に、圧縮応力が作用します。鋼桁部分が完成した後で、全体足場を外してからコンクリート床版を施工すると、コンクリートに圧縮応力は発生しませんし、施工の進行によって、鋼桁の応力も変形も変化していきます。この方法を**活荷重合成**と言います。主桁の理論的な構成は、一種のT形断面であって、鋼桁の上フランジにコンクリート床版の或る幅を断面を追加したと仮定します。一般に合成桁と言うとき、鋼とコンクリートとの合成を言います。主桁構造をPC桁で架けておいて、横方向の繋ぎ部分を後からコンクリートで施工するときも、力学的には合成桁で計算します。これを**PC合成**と言うことがあります。

3.3 ハイブリッド構造

合成桁の理論を応用して橋構造を設計するとき、異なった材料である鋼とコンクリートとを組み合わせると一つの桁とします。これを、通称で**ハイブリッド**(hybrid)と言います。原義は**混血**とか**雑種**を意味します。この考え方によれば、鉄筋コンクリート構造もハイブリッドです。鋼桁単体でも、強度違いの異種鋼材を組み合わせた構造はハイブリッド部材です。鋼とコンクリートとを組み合わせるとき、それぞれの材料の施工方法が異なりますので、手順次第で部材内部の応力分布が変わります。これは、上の第3.1節で説明した不静定構造物の性質です。理論的に応力分布の計算ができるとしても、実物がどのような応力になっているかは分かりません。

3.4 力と変形との関係には二つの仮定を使う

梁・柱・棒のような細長い部材の、力と変形との関係を求めるときは、断面の応力度、または歪みの分布の、どちらかを仮定して他方を求めます。実践的には、**フックの法則**(Robert Hooke, 1635-1703)と**平面保持の仮定**を使います。前者は「変形が小さい範囲ならば、力と変形が比例する」と言うもので、数学的には、**線形計算**を保証する法則です。後者は「変形前に平面であつた断面は、変形後も平面を保つ」とするものです。この二つは、軸力と曲げモーメントとを扱うときに主に応用されます。しかし、この仮定から出発して剪断応力度の分布を求め、剪断ひずみの分布を考えた変形を考えると、平面保持の仮定が成り立たなくなります。この問題は材料力学の課題として説明しますので、この文書では扱いません。部材内部で応力度分布が複雑になることは設計計算の主な流れからみると、二次応力度の課題として無視します。実用的には、断面設計のとき、フランジ部分の**有効幅**を決めたり、鋼板の厚みと幅との比を決めたりすることで対応させます。

4. 二次部材の機能を理解しておくこと

4.1 特別な条件のとき効いてくる部材

二次部材は、普通、**対傾構**、**横構**を指します。自重や交通荷重(主荷重)を考慮して主桁を設計するときには殆ど力が作用しないとしますが、特別な変形や力の状態を仮定するときだけ、効いてくる部材です。二次部材を設計するときの荷重は、例えば、真横から作用すると考える風荷重、地震荷重などがあります。応力が小さい場合には、最小の細長比が確保できる部材で組み立てます。架設工事中には、安全確保のために注意深く扱っても、完成後まで残す必要がないと判断する場合があつて、最初から設計部材としないこともあります。とりわけ、横構を省く例が多く見られます。例えば、図9の構造では、完成状態では鉄筋コンクリートの床版が上横構として働きますので、コンクリートの打ち込み時だけに、仮設の上横項を使う方法もあります。実は、合成桁、とりわけ2主桁橋として設計するとき、コンクリートが硬化する前に鋼主桁の上フランジの圧縮応力が座屈荷重の限度を越えることがあつて、上フランジが水平方向に蛇行する変形が起きることがあります。全体の道路幅員を増やすため、単独に幅の狭い歩道橋を2主桁合成橋として架けると、桁全体の振れに抵抗できなくなって落橋事故になった例があります。

4.2 対傾構は重要な部材であること

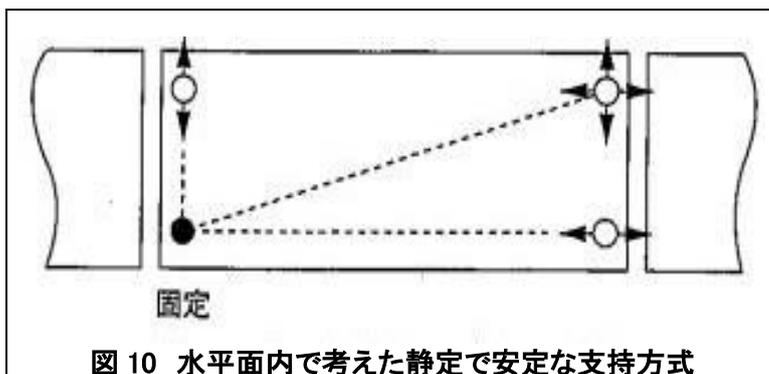
図9のイラストで示したプレートガーダーは、主桁が2本ですので、支点が4箇所あります。家具の机や椅子が4脚であるのと原理的には同じです。机や椅子は、全体としては大きな変形をしません、床との接触で、どこか二箇所の脚が遊び、不安定なことがあります。この力学状態は、構造力学的には、**内的に安定**であると言えます。そこで、弾性材料のゴムを挟むなどして、脚のガタつきを解消します。この支持方式は、**外的不静定**であつて、個別の脚に作用する力を一意に計算することはできません。橋の支点の場合も、同じことが起こり得るのですが、主桁の架設手順を考えると、橋軸方向回りに全体として適度な**振れ剛性**があることで、支点が上下に遊ぶことは考えません。この場合、支点箇所で主桁が横倒れをしないように**対傾構**(**スウェイ**: sway bracing)を組むことが必須の要件です。支点上にあるものを**端対傾構**と言います。主桁断面は頼りない薄板構造ですので、支間方向の途中にも**中間対傾構**を付けることもします。対傾構の目的は、橋全体の断面形が菱形に変形しないようにすること、つまり、主桁の振れ剛性が小さいことで**横倒れ**変形が起きることを防ぐことです。図9では簡単なトラス組みですが、**横桁**で繋ぐ構造もあります。対傾構または横桁は、左右の主桁間に曲げモーメントと剪断力を伝え合うことが目的です。なお、**ブレース**(brace[動詞])とは、補強するという意味で使う、英語からきた用語です。実構造をトラス状に組み立てるとき、トラス構造の意義で「構」の字を使います。

4.3 横構は水平移動を抑える

図9で見るプレートガーダー主桁のフランジは、水平横向きの曲げ剛性が小さいので、水平構の組み立て前、主桁だけが組み上がった状態では、スパン全長から見れば、横方向に水平変形が起き易くなっています。この変形を抑えるために、トラス組みで**横構**(**ラテラル**: lateral bracing)を設けます。これは主桁断面の上下、フランジと合わせて、水平面内でトラス構造を構成させることが基本設計です。しかし、全体の経済設計を迫るあまり、対傾構は設けても、横構全体を省くことがあります。上横構はコンクリート床版が施工されれば、横構として働きますが、施工前の幾何学的な線形に注意が必要です。主桁の下フランジは引張材になっていますので、座屈の危険がないと考えています。ただし、下横構面は、橋断面全体を、擬似的に箱断面に構成する機能がありますので、実質的な振れ剛性が大きくなり、結果として左右主桁の荷重分布の偏りを均す効果があります。この設計計算法は、未だ研究の余地のある問題です。

4.4 支点の動きを考える

橋桁の応力計算は、解析に便利な平面構造力学を応用します。橋そのものは、支点を介して支える立体構造ですので、その支持方式は、図9で見えるように、最小4点での支持です。支点ごとに3方向、全部で12方向の反力成分が考えられます。このうち、水平面内では支点の移動を図10のような方向で許す構造にします。垂直方向には一次の不静定が残りますが、橋断面全体の振れ変形で馴染むと考えています。



5. 荷重の分配作用の考え方

5.1 振れ剛性があると分配効果が起こる

桁橋の最も基本的な構造モデルは、二本の主桁と一本の分配横桁を使い、全体の平面骨組みに漢字の「日」の形を考えます(図11)。床版は、荷重を主桁に伝える作用を持ちますが、それを支間中央の分配横桁でモデル化します。支点は、図1cのように、4支点を考えると、四点を結ぶ矩形の範囲に荷重が作用すれば、分配横桁によって、左右の主桁に振り分けられます。幅員方向に床版が延びて、この矩形範囲の外に荷重が載れば、支点に負の反力が作用します。実際には橋の自重が大きいので、反対側が浮きあがって転倒することはありませんが、振れが大きく出ることもありますので、主桁の間隔を広くとります。そうすると横桁の長さが大きくなりますので、3本以上の主桁を並べ、コンクリート床版の支間が広くならないようにします。

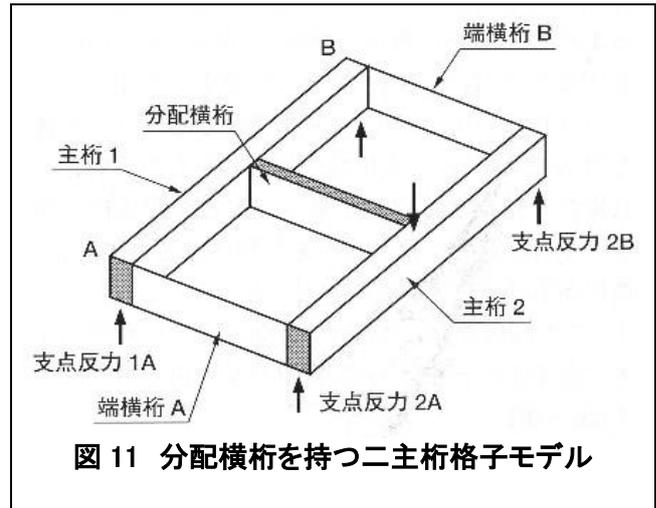


図11 分配横桁を持つ二主桁格子モデル

5.2 分配効果が生じる力学モデル

幅員方向に移動して載る荷重は、分配横桁によって左右の主桁に振り分けられます。このときの力学モデルが二つあります。図12Aは、横桁が左右の主桁上で単純支持されていると仮定したモデルです。支点反力の影響線が、荷重分配の影響線になります。これを(1, 0)分配と言います。主桁に振れ剛性の小さな断面形、例えば、図7A、7Bのような断面形を使うときは、この力学モデルになります。一方、図7Bは、主桁に振れ剛性があるときであって、横桁に曲げモーメントと剪断力が発生します。曲げモーメントは、主桁に対して振れの外力(トルク)を作用させ、剪断力は、集中荷重の一部を反対側的主桁に分配する力になります。分配横桁の曲げ剛性が十分大きいと、左右の主桁は等分のトルクを受けます。主桁の振れ剛性が大きいと、振れ変形が小さく、左右の主桁はほぼ同じ撓み変形が起きます。これは、幅員方向のどの位置に荷重が載っても、荷重分配が(1/2, 1/2)になります。主桁に作用するトルクと分配された荷重は、主桁に伝えられます。振れ剛性の大きな主桁であれば、主桁ごとに4支点支持、全体で8支点支持も考えられます。しかし、これは不経済ですので、端横桁または端対傾構で左右の主桁を接続させた上で、この橋全体を図10のように4支点で支えます。

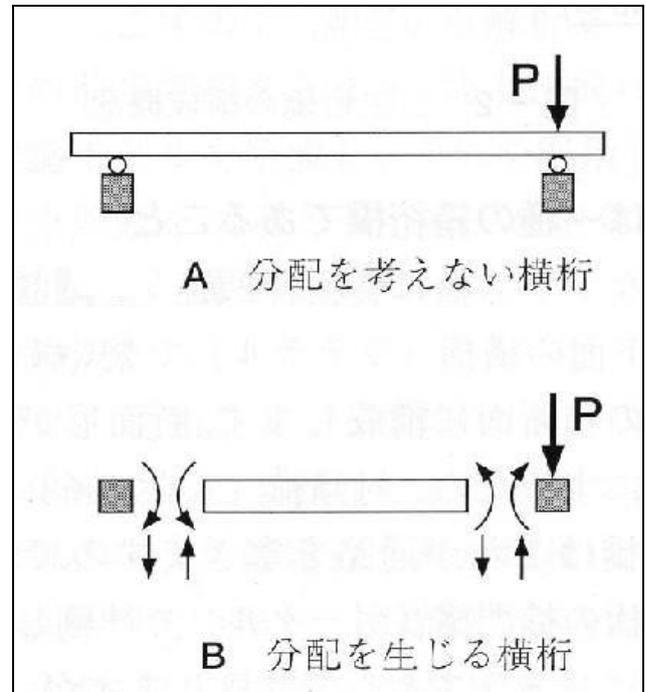


図12 荷重分配横桁の力学モデル

5.3 多主桁橋の分配係数

振れ剛性の小さな主桁を3本以上並べた構造は、幅員の広い道路橋では普通的设计形式です。幅員方向で最も端の主桁(耳桁と言います)上に集中荷重が乗ると、反対側の端の主桁に負の反力が出ます。全桁で平均した応力に比べて、桁端の主桁は過大になります。多主桁構造の極限の形式が版桁です。材料力学の知識を応用すると、幅員中央、1/3 幅の範囲に集中荷重が作用するときだけ、版には負の曲げモーメントが出ません。自重が大きければ、全体として負の曲げモーメントを打ち消しますが、結果的に経済的な設計になりません。そのため、多主桁並列の桁橋では、耳桁の断面を大きくして、2 主桁橋の性質を加味させる設計も行われます。なお、自重の小さな木の板を単純に橋にする踏み板状の板橋では(図4参照)、幅の中央を通るようにしないと危険です。跳ね足場が危険になる場合がそうです。重量の大きな石の桁橋(図3)は、幅が狭くても安全です。

6. 橋断面全体の形状設計

6.1 開断面と閉断面とがある

部材単位の構成で言うと、形鋼は圧延で形状を作ります。I形、H形、溝形の形状は、薄肉の開断面であると言います。薄い板厚と板幅との比は、局部的に板が座屈変形をしないような寸法比に製作しますので、これらの圧延材は、そのまま梁にも柱にも利用できます。しかし、積極的に振れに抵抗させる使い方をしません。機械部品には、振れを伝えるトーションバーの用語があるように、円断面やパイプ断面も使います。柱・梁・棒として使う最も効率の良い部材は、曲げに対しては断面係数が大きくなる形状です。工業的に円形のパイプ状に部材を製作するのは難しい技術が必要です。薄すぎると局部的に断面形がつぶれ易くなります。薄板を組み合わせさせて大寸法の箱断面で橋桁を設計する考え方の始まりは、ドイツの鋼床版箱桁橋に刺激を受けて以来です。図7A-8Bの鋼断面は、マクロに見れば縦に置いた薄板です。図9のように、二本の桁を並べ、床版を載せた全体断面形は、 π の字形に薄板を構成したと見ます。鉄道橋では逆に平らなUの字形の配置も使われます。トラス橋と同じように、上下に横構を配置し、適当な間隔で対傾構を組むべきですが、下横構を二次部材と見るか、省く例も多く、閉断面を形成する主部材として扱う考え方はありませんでした。しかし、マクロに見て、閉断面構造(箱形)に構成することの重要さが認識されるようになりました。その原理は、立体構造の内的静定の実現にあります。例えば、蓋をした(閉断面の)ダンボールの箱は見かけ以上に丈夫ですが、蓋を空けた面が一つあるだけ(開断面)で大きな変形を起こします。

6.2 振れ剛性を利用する構造

単独の橋桁に大きな振れ剛性が無くても、橋としては振れに対して相応の剛性がります。これを曲げ振れ剛性と言います。プレートガーダーの二主桁橋は、左右の桁の相対的な撓み差で振れがおきます。ただし、支点から外した単独の橋構造は、簡単に振れる脆弱さがありますので、主桁間隔をなるべく大きくし、幅員方向の張り出し幅を抑えます。そうすると、長い支間を渡すには、主桁間隔も相対的に広くしなければなりません。桁間隔と支間との比は1:5程度です。全体として振れ剛性が大きければ、左右の主桁は、荷重の幅員方向の位置に関係なく、等分の荷重を負担します。これが理想としての(1/2, 1/2)の分配です。開断面の2主桁構造をまとめて振れ剛性の大きい単独の箱桁に構成すると、偏心して活荷重が載っても振れ変形が大きくなりません。この実現に効果があるのが、横構です。とりわけ、下横構を省かないことが重要であることが、経験的に分ってきました。しかし、設計計算に使う、明快な力学モデルの提案ができないことが大きな課題です。

6.3 サンプナンの振れを応用する箱桁

パイプ断面に構成した部材は、大きな振れ剛性を示します。紙製品のパイプは、紙ロール芯として使われていてその丈夫さを実感できます。ところが、資源ゴミとして出すとき、断面を平らにつぶすか、鋏でパイプ構造を開くと、振れに対して全く丈夫さがなくなります。このねじれ剛性は、パイプの薄板部分に断面を一周する剪断応力の流れができて、軸回りに大きな振れモーメントを発生するからです(能率を持つとも言います)。これをサンプナンの振れと言います。パイプ断面を最小にするように潰すと、薄板の厚みの中だけの剪断応力度だけが振れモーメントに対応するだけになって、結果的に小さな振れ剛性しか得られません。これが単純振れです。橋桁を円形のパイプ構造に構成しなくても、閉じた箱断面に構成すると大きな振れ剛性を持たせることができます。これは、従来の2主桁プレートガーダーの、上下のフランジ部分を鋼板で繋ぐようにした構造で実現させます。英語を使うときは、ボックスガーダーです。漢字用語を当てるときは、箱桁とします。なお、箱桁はPC構造でも採用されますので、鋼箱桁、PC箱桁と使う分けようになりました。箱桁橋は、自重を含めた静的な釣り合いで転倒しない条件が満たされれば、箱桁の幅を狭く、幅員方向に張り出し幅を広くして通路幅を広げることができます。また、幅員が狭くても、支間を長くした桁橋を架けることができます。日本での鋼箱桁橋の最初は、神奈川県城ヶ島大橋(1960)です。



図13 城ヶ島大橋
三径間連続鋼床版箱桁、70+95+70m、
幅員 2+7+2m、箱桁ウェブ間隔 4.5m