

# 橋梁構造形態の体系化に関する研究

2008 年

久保田 善明



## 序

橋梁の形態が景観に与える影響は一般にきわめて大きく、それゆえに、橋梁の形態論は土木構造物の形態論の古典的テーマのひとつでもある。内部に空間をもつことが建築の使命であるように、空間を跨ぐことは橋梁の使命である。その空間が広ければ、あるいは、使用する材料をより節約しようとするならば、それだけ橋梁の形態は力学的骨格、つまりその構造に強く依存する。橋梁という構造物にとっては、形態と構造は常に密接な関係を有し、それゆえ橋梁の形態について思考することは、構造について思考することを、多くの場合で必要とする。しかし、必ずしもこの逆は成り立たない。構造について思考することは、形態、少なくとも、景観を意識した形態について思考することを必ずしも要しない。その結果、景観にそぐわない橋梁が出現することもあり得るし、現にそれは様々な場所で起こっているのである。

一般的にいて、デザインが優れているとされる橋梁には、構造と形態に調和的關係が保たれているものが多い。それは近代以降のモダニズム思想によってひとつのスタイルとして築かれたが、現代ではそのような機能主義的なスタイルを超えて、構造そのものをデザインの表現手段とするような事例も多く現れてきている。特に、ヨーロッパではそのような傾向が近年顕著である。

このように、構造と形態が分離することなく同時に考慮されてゆくような設計を、本論文では「構造デザイン」と呼んでいるが、このとき、構造デザインの思考を支える知とは一体どのようなものであろうか。それが個人によってなされるにしても、組織によってなされるにしても、あくまで物理的に存在し得る構造物を対象とする以上、その自由にも見える発想や思考の中にも、何か一定の規則が存在すると考えることは妥当なことと思われる。それはおそらく、構造力学や材料学などの基本的知識と、最終的なデザインとを結び付けるファンクションとして存在しているのであろう。しかし、それはすでに構造デザイナーの思考回路あるいは認識の深い部分にあって、普段はそれ自体を具体的なイメージとして意識するようなことはないのかもしれない。さらには、施工法や建設コスト、維持管理、環境への影響など、様々なファクターが密接に絡み合い、構造デザイナーの技術的経験とともに、独自のファンクションとして個人の内面に複雑に構築されていくものである。そしてそれは学習や経験に応じて随時更新されていくような種類のものである。このように、構造デザインの思考を支える知の全貌はきわめて複雑かつ個別的なものであるが、構造という物理的リアリティーゆえに、その核には一定の規則が存在するはずであり、それを手がかりにして、その基本的骨格を解明することも、ある程度は可能であろう。

本研究は、構造デザインの思考を支える知について、その基本的骨格を明らかにし、体系的に整理することを目的としたものである。そして最終的には、構造デザインの

論理における基本文法の構築を目指している。本研究で明らかにした内容はまだその一端に過ぎないが、橋梁形式を相対的に位置づけ、それらの変形や組み合わせによってまた新たな形態が生成されてゆくという形態生成原理のアウトラインは描けたのではないかと考えている。

文法とは、その言語を自在に操れる人間にはかえって意識されないものであるが、だからといって、その体系的整理が必要でないということにはならない。まして、外国語を学ぶ者にとっては、文法を理解することがその言語を理解することの第一歩となる。つまり、構造エンジニア以外の人間が、構造デザインの価値を理解し、評価し、そこに新たな意味を見出すためには、ある程度の文法知識が必要となる。したがって、本研究は、すでに第一線で活躍する有能な構造デザイナーにとっての実用性を必ずしも意図してはいない。むしろ、将来の構造デザイナーや、橋梁に興味を持つアーキテクト、橋梁の鑑賞者などが橋梁の構造と形態の関係を理解する上での本質的、かつ柔軟な視点を提供することを当座の目標としている。しかし、第一線の構造デザイナーであっても、本研究の見方には少しばかりの新鮮さを感じていただけるであろうことを、僅かながら期待している。

本研究は、今後さらに発展させられる余地を残しており、形態生成のみならず、既存デザイン事例の分析への適用においても多くの可能性を有している。しかし、それらは今後の研究課題とし、ここにひとつの区切りとして成果をとりまとめた。本研究が、橋梁デザインについて考えるひとつの手がかりとして役立つようなことになれば、筆者としてこれに勝る喜びはない。

2008年9月

久保田 善明

# 目 次

第 1 章 序論	
1-1 研究の背景 .....	1
1-1-1 構造芸術	
1-1-2 「構造デザインの定義」	
1-1-3 「構造」と「デザイン」の融合	
1-1-4 構造デザインの思考を支える知の体系	
1-1-5 既往の構造デザイン論	
1-2 研究の目的 .....	7
1-3 論文の構成 .....	8
第 2 章 橋梁の構造システム	
2-1 材料と構造システム .....	11
2-1-1 材料	
2-1-2 構造システム	
2-2 橋梁の規模と施工性，経済性 .....	14
2-3 橋梁に作用する力 .....	16
第 3 章 橋梁形式の構造と形態	
3-1 概説 .....	19
3-2 スパンシステムにおける構造システムの分類と基本形式 .....	19
3-3 橋梁形式の連続性と対称性 .....	21
3-3-1 構造と形態に関する連続性と対称性	
3-3-2 橋梁形式における力学的連続性	
3-3-3 橋梁形式における力学的対称性	
3-3-4 橋梁形式における形態的連続性	
3-3-5 橋梁形式における形態的対称性	
3-4 橋梁形式の構造形態相関図 .....	27
3-4-1 表示方法	
3-4-2 座標値の算出方法	
3-4-3 相関性の定量化手法	
3-5 実橋データによる定量化例 .....	39
3-5-1 サンプルデータ	

3-5-2	結果と考察	
3-6	空白領域に存在する橋梁 .....	43
3-6-1	構造形態相関図の空白領域	
3-6-2	ケーススタディー (1)	
3-6-3	ケーススタディー (2)	
3-7	構造形態相関図より考察する橋梁形式の発展史 .....	46
3-7-1	概説	
3-7-2	橋梁の技術と形式の発展略史	
3-7-3	構造形態相関図より考察する橋梁の形式発展史	
3-7-4	橋梁形式の発展と変遷	
第4章	橋梁形式以外の構造システム	
4-1	概説 .....	57
4-2	水平方向の構造システム .....	57
4-2-1	水平方向の構造システムの構造形態相関図	
4-2-2	水平方向の構造システム	
(a)	耐風索	
(b)	吊橋ケーブルシステムの横剛性	
(c)	両端固定された曲線(弧状)橋	
(d)	ラーメン式上・下支材	
(e)	主桁の横剛性	
(f)	上・下横構	
(g)	斜張耐風索	
(h)	バスケットハンドル式アーチリブ	
(i)	アーチ式横構	
4-3	荷重分配システム .....	61
4-3-1	荷重分配システムの構造形態相関図	
4-3-2	荷重分配システム	
(a)	フルウェブ構造	
(b)	トラス構造	
4-4	床組から主構への荷重伝達システム .....	62
4-4-1	床組から主構への荷重伝達システムの構造形態相関図	
4-4-2	床組から主構への荷重伝達システム	
(a)	吊構造	
(b)	フルウェブ構造	

- (c) トラス構造
- (d) アーチ構造

## 第5章 スパンシステムの構造形態操作法

5-1 概説 .....	65
5-2 橋梁のスパンシステムの構造形態操作法 .....	66
5-2-1 操作 : ビームシステム化	
5-2-2 操作 : 吊橋、アーチ化	
5-2-3 操作 : 軸力部材化	
5-2-4 操作 : ウェブシステム化	
5-2-5 操作 : 非斜材システム化	
5-2-6 操作 : 斜材システム化	
5-2-7 操作 : 反転	
5-2-8 操作 : デッキ位置の配置操作	
5-2-9 操作 : 混合	

## 第6章 ねじりを受ける橋梁

6-1 概説 .....	79
6-2 ねじりが生じる主な要因 .....	79
(a) 要因 A : 曲線橋	
(b) 要因 B : 斜橋	
(c) 要因 C : 荷重偏載	
6-3 ねじりを受ける橋梁の構造システム .....	81
6-3-1 要因別対策方法の整理	
6-3-2 ねじりに対する構造システム	
(a) 閉断面	
(b) 主構間隔の拡大	
(c) 短スパン化	
(d) 重量バランス	
(e) 曲線外側の桁の剛性アップ	
(f) リング・ガーダー	
(g) プレストレス	
(h) 斜角の見直し	
6-4 ねじりを受ける橋梁の構造形態操作法 .....	88
6-4-1 操作 : 直橋化	

- 6-4-2 操作 : 閉断面化
- 6-4-3 操作 : 隅力抵抗化
- 6-4-4 操作 : 重量バランス

第7章 結論 .....	91
補章 その他の構造形態相関図の表示方法	
補-1 概説 .....	補-1
補-2 2次元直交座標表示 .....	補-1
補-2-1 表示方法	
補-2-2 座標値の算出方法	
補-2-3 相関性の定量化手法	
補-3 3次元直交座標表示 .....	補-7
補-3-1 表示方法	
補-3-2 座標値の算出方法	
補-3-3 相関性の定量化手法	
補-4 極座標表示 .....	補-11
補-4-1 表示方法	
補-4-2 座標値の算出方法	
補-4-3 相関性の定量化手法	
補-5 各表示方法の特性一覧 .....	補-19



## 第1章 序論

### 1-1 研究の背景

#### 1-1-1 構造芸術

D.P.ピリントン (David P. Billington) は、産業革命後の構造工学の所産として生み出された近代および現代の洗練された構造物を「構造芸術 (Structural Art)」と呼び、「構造芸術の理念が産業革命のみならず民主革命という結果と格闘している社会に出現したことは偶然ではない。構造芸術の伝統とは民主主義の伝統なのである。」と述べている<sup>1)</sup>。つまり、高価で贅沢な装飾に満ちた構造物は、国民の税金を用い、公平性と透明性を原則とする民主主義社会における公共構造物の設計思想には馴染まないとしている。そして今や、この理念によって節約されるべきは国民の税金だけではなく、共有の財産という意味において、限られた地球の資源についても同様であり、さらには、材料の製造過程や建設時に排出されるCO<sub>2</sub>を削減することにもつながるものと考えらるべきであろう。そしてこのような社会において、いかに公共構造物の美を実現するか、そこに「構造デザイン」の果たすべき役割が存在する。

#### 1-1-2 「構造デザイン」の定義

構造デザインとは、『景観用語事典』<sup>2)</sup>によると、「構造を造形の出発点とし、構造の形そのものに美的表現力を持たせようという立場に立脚するデザイン」とあり、根底にはモダニズム思想がある。しかし同時に、「必ずしも構造力学的な合理性に固執せず、力の流れの新しい視覚表現によって魅力的な造形を追及するデザイン思想」という「構造表現主義」をも含んでおり、従来の禁欲的なモダニズムよりも幅の広い概念として説明されている。このような概念は、「デザイン」という言葉が独自の意味で使われるわが国特有のものであり、英語の「Structural Design (=構造設計)」よりもやや造形的な意味合いが強調されている。本論文では、『景観用語事典』に倣い、そこに造形的概念を含むものとして考える。つまり、「力学的骨格(構造)と視覚的フォルム(形態)が分離することなく同時に考慮されてゆくような設計」という意味で「構造デザイン」という語を用いる。なお、マイク・シュライヒ (Mike Schlaich) は、このような橋梁デザインのホリスティック・アプローチとしての構造デザインを、「Conceptual and structural design」と呼んでいる。いずれにせよ、このような構造デザイン的アプローチは、土木構造物という、長期にわたって厳しい外力に耐えながらも安全に機能し続ける必要があり、なおかつ、地域の風景や生活に多大なる影響を与える構造物にと

って、主要な設計思想として位置づけられるべきものである。

### 1-1-3 「構造」と「デザイン」の融合

橋梁の設計プロセスにおいて、「構造と形態を同時に考慮する」ということは、構造設計と景観設計（造形）という異なる専門性を融合させなければならないという困難さを生む。一人の設計者がこれらをカバーすることは決して容易ではない。しかし、十分な議論を積み重ねさえすれば、エンジニアとアーキテクトの協働によっても構造デザインは可能であろう。ヨーロッパの国々ではそのようにして橋梁デザインが実施されている例も少なくない。いずれにせよ、構造デザインの難しい点はその異分野の融合性にあるが、そのためにはまず、エンジニアとアーキテクトが協働することに十分なインセンティブが働くような制度的サポートが重要である。公共財として後世に恥じない美しい橋梁づくりのためにも、そのような制度的サポートがわが国にも益々望まれるところである。

なお、わが国の橋梁設計の現場では、形態を決定するためのより簡便な方法、つまり、適用支間表やコスト比較などから機械的に橋梁形式を決定する場合が多い。これは現行の公共事業システムにおいて、一定の経済性と説明責任を担保する上でメリットもあるが、既存のメニューから選定するだけでは新しい提案は生まれない。また、マニュアル化した作業からはそれなりのものは生まれても、美しいものは生まれない。その意味でも、設計者の能力を積極的に引き出すような仕組みづくりが求められる。

ところで、技術の発展は橋梁に様々な形態的可能性を与えたが、その結果として、美しい橋梁が多く生み出されるようになったかといえば必ずしもそうではない。可能性だけでは美しい橋梁は生まれない。どのようにデザインするかということが、以前にも増して重要となっている。性能的な要求を満たしつつ、美的な統合を図ること、ここに「構造と形態を同時に考慮する」プロセスがある。それが個人の設計者であれ、組織であれ、このプロセスで考え出されたアイデアによって、そのデザインの主要な部分は決定される。このプロセスは多くの創造性を含んでいるが、デザインという創造的行為でありながらも、構造力学や材料強度という決して逸脱の許されないルールで縛られている。だからこそ、より高度な創造性が求められる。言うまでもなく、設計とは、統合的であると同時にきわめて創造的な行為である。

### 1-1-4 構造デザインの思考を支える知の体系

「構造と形態を同時に考慮する」プロセスにおいて、その構造デザインの思考を支える知とは一体どのようなものだろうか。カラトラバ（Santiago Calatrava）やシュ

ライヒ父子 (Jörg Schlaich, Mike Schlaich) のようなデザインは、どのような思考から生まれてくるのだろうか。彼らはダイナミックにそして軽やかに構造を操るが、構造デザインがあくまでも物理的に存在し得る構造物を対象とする以上、その自由にも見える思考にも、何か一定の規則が存在すると考えることには妥当性がある。それは構造力学や材料学などの基本的知識と最終的なデザインとを結び付けるファンクションとして存在していると思われるが、それは施工法や建設コスト、維持管理、環境への影響など、様々なファクターが密接に絡み合い、各デザイナー独自のファンクションとして個人の内面に複雑に構築されているものとも思われる。さらにそれは学習や経験に応じて随時更新されていくような種類のものである。このような構造デザイナーの内面に築かれる知の体系は、個人においてのみならず、構造デザインを行うデザイン・チームにおいても生じ得ると思われる。いずれにせよ、構造デザインの思考を支える知の全貌はきわめて複雑かつ個別的なものであるが、構造という物理的リアリティーゆえに、その核には一定の規則が存在するはずであり、それを手がかりにして、その基本的骨格を解明することも、ある程度は可能であろう。

#### 1-1-5 既往の構造デザイン論

橋梁の形態を構造との関係で論じたものに、古くは加藤 (1936) の『橋梁美学』<sup>3)</sup>がある。この中で加藤は橋梁の外観における「力学的安定感と強度感」の重要性を述べている。一方で、鷹部屋 (1965) は、構造的側面から見た橋梁の美しさを「安定の美と軽快の美」とし、ここで「軽快感」を挙げている<sup>4)</sup>。これは加藤が戦前の1930年代であったのに対し、鷹部屋は1960年代であり、当時の技術を比較すれば容易に納得できよう。

山本 (1969) は、マイヤール (Robert Maillart)、ネルヴィ (Pier Luigi Nervi)、アラップ (Ove Arup)、トロハ (Eduardo Torija) など欧州の構造技術者の仕事を分析し、彼らに共通してあるのは「個性的創造」というよりむしろ「普遍的創造」であるとしている。そして、その「普遍的創造」は、目指すべき文明形態の先例がないという意味において、先進文明にしか生じ得ないとも指摘している<sup>5)</sup>。つまり、山本は橋梁の美しさを、「安定感」、「強度感」、「軽快感」といった単純な感覚としてではなく、また表面的な意匠操作の結果としてでもなく、自然の物理法則と闘いながら先例なきものに挑戦する技術者によって生み出される美的造形という「普遍的創造」にこそ、より高次の美が内包されると説いている。

オットー (Frei Otto, 1982) は、構造物の構造と形態の関係を力学的なアプローチから考察している<sup>6)</sup>。特に、軽量膜構造研究所で行った一連の研究では、生物学の知見を参照しながら、生物のかたちと軽量構造物との間に類似性があることを述べている。

彼らは軽量構造の性質を決定づけるものとして、「形」、「力」、「質量」の3要素を挙げ、それらをひとつの指標で表す方法を提案し、人工物や自然界に存在する構造体について、膨大な数の実験や試算を行っている。しかし、対象範囲があまりに広範囲であり、主な関心が軽量構造に向けられていることなどから、橋梁に関しては吊橋が最も軽量構造だという程度の知見しか得られていないようである。

レオンハルト (Fritz Leonhardt, 1982) は、伝統的な石橋から現代の鋼やコンクリートの橋梁に至るまで、その美的なプロポーションについて、規範的事例を交えながら詳細に論じている<sup>7)</sup>。

ピリントン (前掲<sup>1)</sup>, 1983) は、「芸術は最小の具体的な材料を用いて最大に意味を表現する」という、都市学者マンフォード (Lewis Mumford) の言葉を引用しながら、芸術と技術の共通性について述べ、「構造芸術」の条件として、「Efficiency (効率性)」、「Economy (経済性)」、「Elegance (優美)」が同時に満たされることを挙げている<sup>8)</sup>。ピリントンの思想は、「**感**」という見た目の印象を美の条件とするのではなく、「理念」を美の条件とする点で、山本の思想と共通する部分がある。

大泉 (2002) は、現代の様々な橋梁形式を、構造システムの類似性で分類し、「橋の系統的分類」を作成している (図1-1)<sup>9)</sup>。大泉は、橋梁形式を、「曲げ抵抗システム」、「圧縮抵抗システム」、「引張抵抗システム」の3つの基本原理に分類した後、それらを様々な方式に基づいて展開してゆくことによって、多数の橋梁形式を体系的に整理している。

マイク・シュライヒ (Mike Schlaich, 2002) は、彼の構造デザイン教育に関する論文の中で、「The order of structures」という図を紹介している (図1-2)<sup>10)</sup>。この図を用いて、基本的な橋梁形式の力学的関連性を示し、橋梁だけでなく建築屋根のような面的な構造にも構造形式を展開している。そしてこのような基本原理は、使用材料によらず普遍的なものであるとし、材料ごとに専門が分化している構造工学の現状に、新たな統合の必要性を主張している。また、構造デザインにおけるホリスティック・アプローチの重要性と、それを実現するための「Conceptual and structural design」のあり方について論じている。

石井 (2003) は、認知科学の観点から、「視覚的力学」という概念を提案している<sup>11)</sup>。これは構造物の形態を、人間に知覚されるイメージとの関係で論じたものであり、構造物に作用する物理的な力ではなく、人間にイメージとして認知される力と実際の形態との関係を論じたものである。

以上のように、これまで様々な観点から橋梁の形態と構造の関係が論じられてきた。中でも、大泉とマイク・シュライヒは、橋梁の構造形態相互の関係性を明確化し、直感的にイメージしやすい図で表現している。このような試みが意図するものは、単に橋梁形式のタイポロジーを構築するという以上、橋梁の創造的設計において、そ

のような基本的理解がきわめて重要であるとの認識に基づいた橋梁構造形態の体系化とその具体的イメージの提示である．それは構造デザインの思考を支える知の骨格を形成するものであり，構造形態の発想に規範を与えるものでもある．

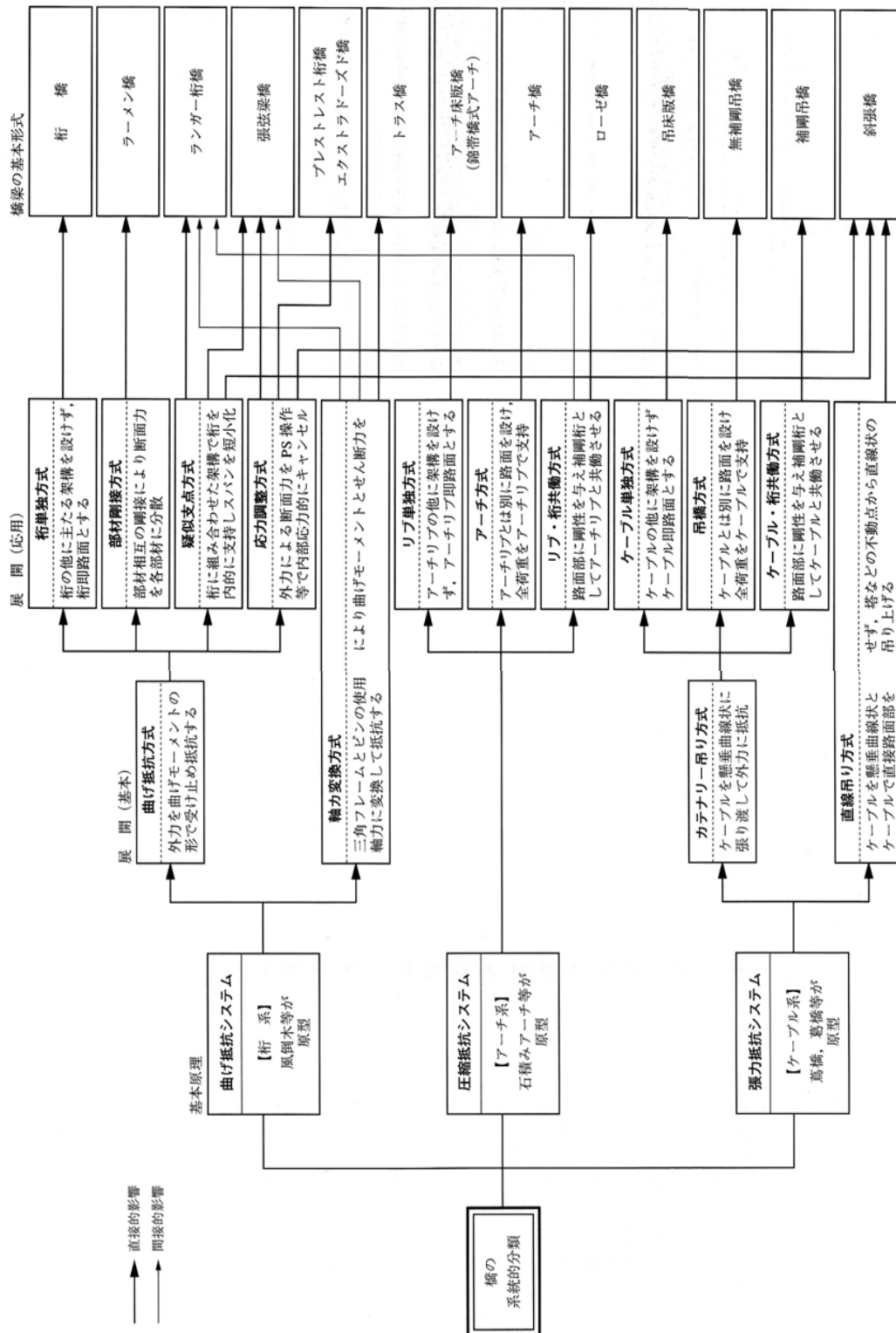


図1-1 橋の系統的分類 (大泉)

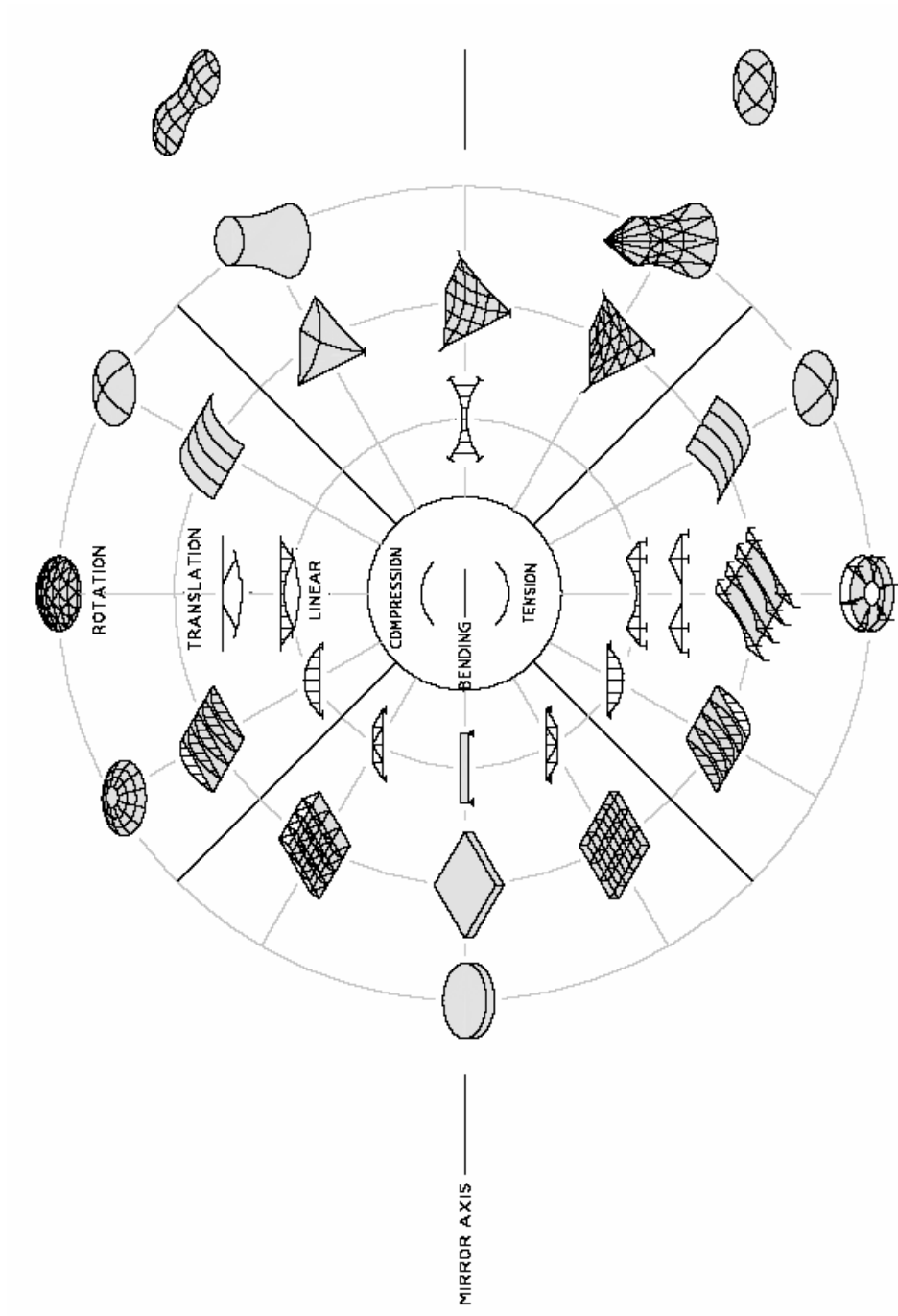


图 1-2 The order of structures (M. Schlaich)

## 1-2 研究の目的

本研究は、橋梁の構造デザインにおける、力学的骨格（構造）と視覚的フォルム（形態）が同時に考慮されてゆくような思考プロセスにおいて、通常は構造デザイナーの技術的能力の一つとしてほとんど明示されることのない知の存在に着目し、これを論理的に解明しようと試みるものである。つまり、構造デザインの思考を支える知として存在する何らかのファンクションを、「構造」という物理的リアリティーを手がかりに、その基本的骨格を解明し、体系的に整理することを目的としている。これは構造デザインの論理における基本文法の構築に寄与するものであり、様々な構造形態の創出や解釈において、有用な知見を与え得るものと期待される。

具体的には、以下の課題に焦点をあて、これらについてアプローチを行う。

### 新たな図的表現法の開発

構造デザインの論理には、構造の論理と同時に形態の論理が含まれる。そのため、具体的な形態のイメージを伴う論理が必要不可欠となる。したがって、直感的にイメージしやすい図によって橋梁形式相互の関係性を表すことは、構造デザインの論理を抽象的ではなく具体的に理解する上で非常に有効な方法である。しかし、従来の図的表現法はやや概念的であり、論理的な体系づけとそれにもとづく一般性や拡張性に課題が残されている。本研究では、橋梁形式相互の関係性をより正確に、論理的に把握することで構造形態のイメージを明確化し、新たな橋梁形式をそこに位置づけられるような図的表現法の実現を行う。

### 橋梁の構造形態操作法の開発

橋梁の構造形態をいかに操作的に扱うかという問題は、構造デザインの論理を構築する上で重要な視点である。しかし、今まで構造形態の操作法に関する体系的な研究はほとんどなされていない。本研究では、新たに開発した図的表現法をもとにして、橋梁の構造形態操作法を論理的に導く。

### ねじりを受ける橋梁の構造形態の体系的整理

多くの橋梁は直線的であり、障害物に対してほぼ直交して架けられるため、ねじりが形態決定の主要な要因となることは少ない。しかし、曲線橋や斜橋、荷重が大きく偏載する橋梁などでは、ねじりが形態に影響を与える。本研究では、ねじりを受ける橋梁の構造形態とその操作法についても体系化を試みる。

### 1-3 論文の構成

以上のような研究目的を達成するため、本論文では次のような手順により議論を進める。

第2章では、橋梁の構造形態生成の出発点ともなる「力の種類と形態の関係」を論理的に明らかにして構造形態の体系化を行う上での論理的基礎について述べる。そのため、橋梁に作用する5種類の力（：引張力，：圧縮力，：曲げモーメント，：せん断力，：ねじりモーメント）と橋梁の構造形態の関係について述べる。

第3章から第5章では、上記の5つの力のうち、～ に関する「スパンを渡る構造システム（＝スパンシステム）」について述べる。

第3章では、橋梁の構造形態相互の関係性を直感的にイメージできるような図的表現法（以下、構造形態相関図）を前章の論理的基盤の上に構築する。また、構築した構造形態相関図において、従来の定性的表現ではなく定量的表現を可能とする手法について述べる。さらに、この手法を用いて実橋データを分析し、構造形態相関図における各橋梁形式の分布状況について考察する。そして、その分布の空白領域にあるべき橋梁形式についてのケーススタディーを行う。また、橋梁史というより大きな時間の流れの中で、橋梁の形態がどのように変化してきたかということについて、構造形態相関図より、橋梁形式の発展史を「近世以前」、「近代」、「現代」に区分して概観することを試みる。

第4章では、橋梁形式以外の構造システムに構造形態相関図を適用し、橋梁形式という平面的な構造だけでなく、現実に存在する立体的な構造物としての構造形態のイメージをより具体的に描きだすことを試みる。特に、「水平方向の構造システム」、「荷重分配システム」、「床組から主構への荷重伝達システム」に着目して論じる。

第5章では、構造形態相関図をもとに、スパンシステムの構造形態操作法を導出し、橋梁の構造形態の生成に関する論理構造を明らかにする。

第6章では、スパンシステムで扱わなかった力、すなわち、（ねじりモーメント）について、橋梁に作用するねじりの要因とその対策としての構造システムについて体系的整理を行い、さらに、ねじりによって生じる3次元的な橋梁の構造形態とその操作法について論じ、ねじりを受ける橋梁の構造形態生成に関する論理構造を明らかにする。

第7章では、本論文のまとめを行い、今後の課題や展望を述べる。

また、補章では、その他の構造形態相関図として、第3章から第7章では扱わなかった表示方法について、その特徴や定量化手法を述べる。

本論文における各章の構成を、図1-3に示す。



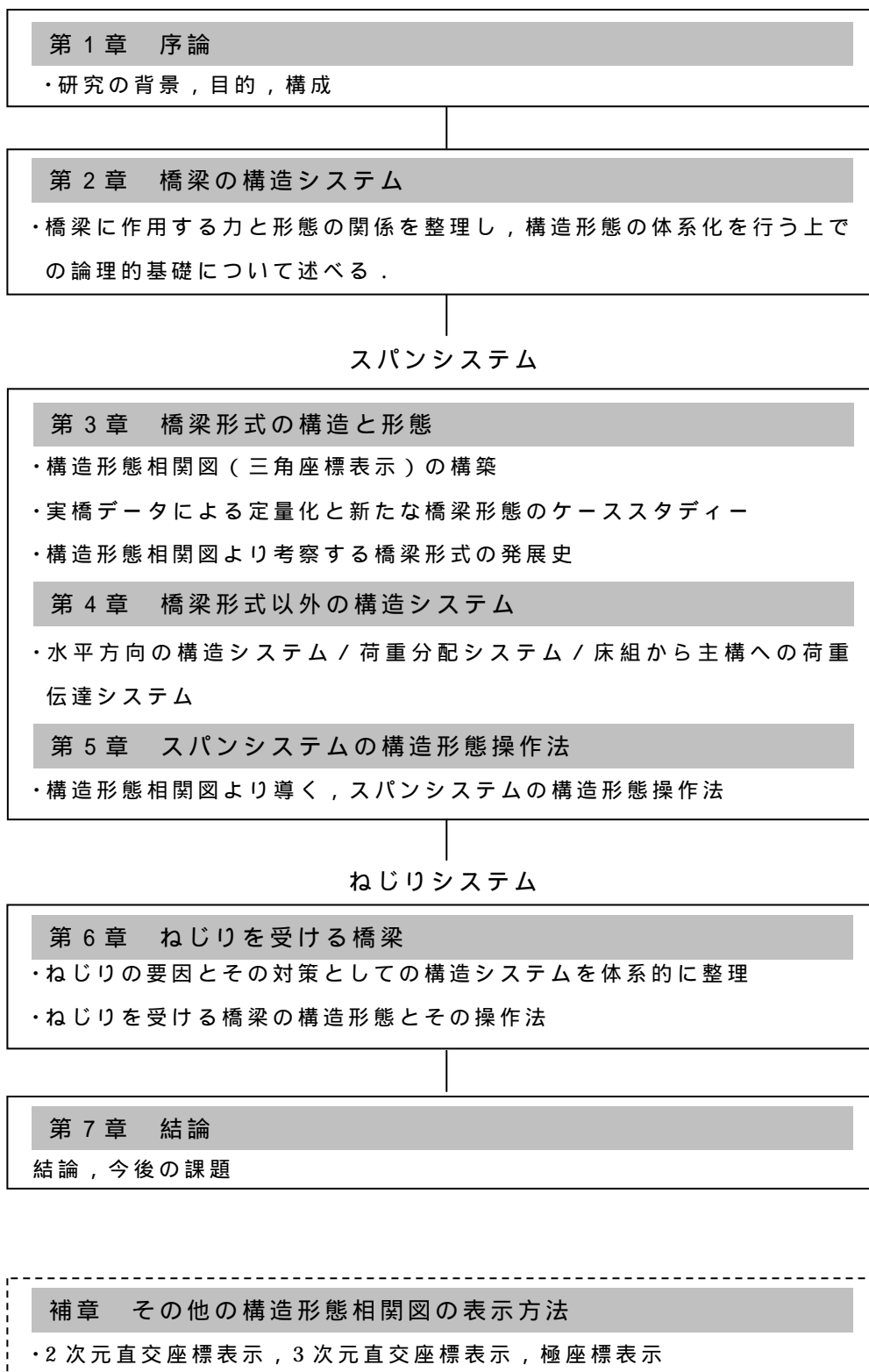


図1-3 各章の構成

## 参考文献

- 1) David P. Billington : *The Tower and the Bridge* , pp.4-6 , Princeton University Press , New Jersey , 1985 ( 伊藤学・杉山和雄監訳 : 『塔と橋』 , pp.20-22 , 鹿島出版会 , 2001 )
- 2) 景観デザイン研究会 : 『景観用語事典』 , pp.222-225 , 彰国社 , 1998
- 3) 加藤誠平 : 『橋梁美学』 , 山海堂 , 1936
- 4) 鷹部屋福平 : 『橋 美の条件』 , p.39 , 東海大学出版会 , 1965
- 5) 山本学治 : 『造型と構造と 山本学治建築論集』 , 鹿島出版会 , 2007
- 6) F・オットー他(岩村和夫訳) : 『自然な構造体』 , 鹿島出版会 , 1986
- 7) F・レオンハルト(田村幸久監訳) : 『ブリュッケン』 , メイセイ出版 , 1998
- 8) David P. Billington : *The Tower and the Bridge* , pp.4-6 , pp.271-274 , Princeton University Press , New Jersey , 1985( 伊藤学・杉山和雄監訳 : 『塔と橋』 , pp.20-22 , pp.281-284 , 鹿島出版会 , 2001 )
- 9) 大泉楯 : 『橋はなぜ美しいのか』 , pp.56-57 , 技報堂 , 2002
- 10) Mike Schlaich : Challenges in Education – Conceptual and Structural Design , *Proceedings of the IABSE Symposium Budapest - Responding to Tomorrow's Challenges in Structural Engineering - (IABSE Report Vol. 92 , CD-ROM)* , 2006
- 11) 石井信行 : 『構造物の視覚的力学』 , 鹿島出版会 , 2003

## 第 2 章 橋梁の構造システム

### 2-1 材料と構造システム

#### 2-1-1 材料

橋梁の材料として、古くは木材、蔦のロープ、石、レンガなどが使用されていたが、技術の発達とともに鉄や鋼、コンクリート等がその主流を占めるようになった。近年では、アルミや FRP なども使用され始めている。橋梁の材料に求められる条件としては、十分な強度を有することに加えて、機械的性質の経年変化がほとんどなく、施工性がよく、安価であることなどが挙げられる。

構造デザインは、構造物の骨格をなす構造体自体で形態を表現するため、使用材料と構造力学という極めて物理的な制約を受ける。しかし、その制約こそが構造物の形態に合理性と論理性を与え、形態自体の洗練にも大きく寄与する。

近代以降の橋梁の材料には、強度、耐用年数、維持管理の容易さ、経済性、施工性などに優れる鋼とコンクリートが圧倒的に多く使用されてきた。近年では、それらの複合構造も数多く建設されている。このように、材料の組み合わせによって新しい構造を生み出すことも、構造デザインの重要な視点である。

一方、木や石のような自然材料は、古くから橋梁に使用されてきたが、鋼とコンクリート全盛の時代にあって、主流から遠ざかっていた。しかし、これら自然材料のもつ独特の風合いは人々に落ち着きや温かみを与え、近年、徐々にその価値が見直されてきている。

#### 2-1-2 構造システム

構造システムとは、荷重を受ける構造体はその形（または機能）を保持するために有している荷重抵抗系である。つまり、形あるものは全て何らかの構造システムによって支えられているといえる。形を創造する上での空想と現実も、本質的にはその点でのみ異なっている。

例として、テンセグリティと呼ばれる構造システムを図 2-1<sup>1)</sup>に示す。これは複数の棒状の部材を互いに接触しないようにしながらその端部同士をワイヤで連結したものである。不安定で脆くも見えるが、実際は棒部材の圧縮力とワイヤの引張力とが釣り合い、局所的な力を全体に分散させることによって、外力に対して自己安定化するという合理的な構造システムである。

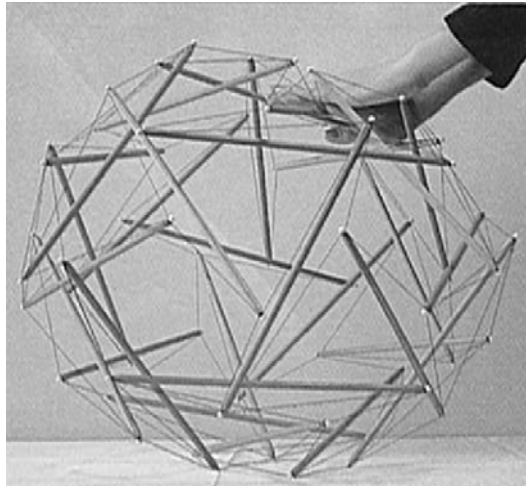


図 2-1 テンセグリティ構造

ところで、橋梁には死荷重や活荷重のほか、風荷重、地震荷重、施工時荷重など、様々な種類の荷重が作用する。これらの荷重に対してそれぞれに抵抗できる構造システムがなければ、橋梁として建設することが不可能であるか、あるいは、供用期間中に思わぬ不具合を呈することになる。表 3-2 に、道路橋示方書<sup>2)</sup>にて定められている荷重の種類を示す。さらに、荷重に抵抗できるだけでなく、表 2-2 に示すような要件も満足する必要がある。また、これら以外にも必要に応じて検討がなされる。

橋梁のように規模が大きく、建設に多大の労力と費用を要する構造物においては、構造システム自体に相当の合理性がなければ、著しく不経済なものとなったり、非常に煩雑で危険な施工を要したりする。さらに、ただ使用性や耐久性、経済性、施工性を満たすというだけでなく、構造システムそのものが単体としてのデザインにも優れ、周囲の景観や環境とも調和している必要がある。

また、橋梁の構造システムは、図 2-2<sup>3)</sup>に示すように、全体に関わるものと個々の部材に関わるものとに大別される。そしてそれぞれが、経済性や施工性、技術力、品質管理、材料調達など、産業社会の様々な側面と密接に関係する。

なお、本論文において、「構造」とは「力学的骨格」を意味し、「形態」とは「視覚的フォルム」を意味するものとする。

表 2-1 道路橋示方書に定める荷重の種類

主荷重	1. 死荷重	主荷重に相当する特殊荷重	13. 雪荷重	
	2. 活荷重		14. 地盤変動の影響	
	3. 衝撃		15. 支点移動の影響	
	4. プレストレス力		16. 波圧	
	5. クリープの影響		17. 遠心荷重	
	6. 乾燥収縮の影響		特殊荷重	18. 制動荷重
	7. 土圧			19. 施工時荷重
	8. 水圧			20. 衝突荷重
	9. 浮力または揚圧力			21. その他
従荷重	10. 風荷重			
	11. 温度変化の影響			
	12. 地震の影響			

表 2-2 荷重以外の要件

荷重以外	22. たわみ
	23. 振動

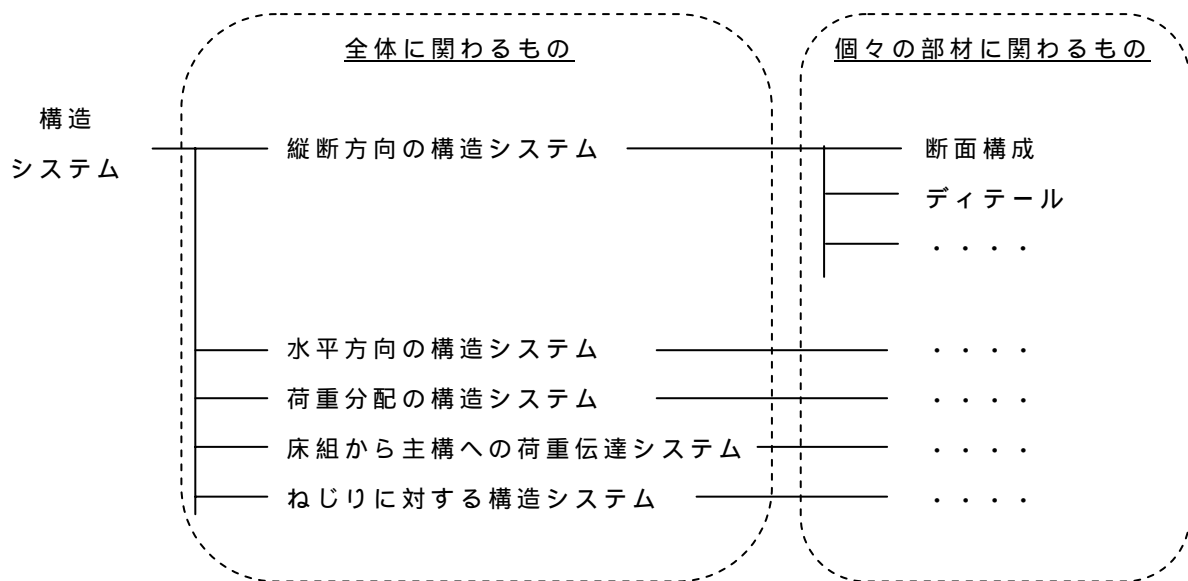


図 2-2 橋梁の構造システム

## 2-2 橋梁の規模と施工性，経済性<sup>4)</sup>

支間長は橋梁の形態に大きく影響する．周知の通り，等分布荷重を受ける単純梁に作用する曲げモーメントは，

$$M = \frac{w \cdot l^2}{8} \quad (2-1)$$

ここに，

$M$ ：支間中央の曲げモーメント

$w$ ：等分布荷重

$l$ ：支間長

で表されるが，支間長が長くなると曲げモーメントは 2 乗に比例して大きくなる．また，それによって， $w$  自体も大きくなるため， $M$  はさらに大きくなる．

ところで，部材に着目した場合，断面が均等な応力を受ける軸力部材の方が，曲げ部材よりも材料効率が良い．したがって，橋梁の規模が大きくなり作用断面力が増すにつれて，トラス橋，アーチ橋，吊橋など，軸力抵抗系の橋梁形式を採用し，材料効率を高めて死荷重の軽減が図られることが多い．

材料効率の観点から見れば，どのような橋梁でも，すべてを軸力部材で構成すれば非常に効率のよい構造が実現されることになるが，すべてを軸力部材にすると一般に部材数が増加するため，工数が増して不経済となる場合もある．また，部材自体も細くなり，特に小規模な橋梁では施工的な困難さが増加する．したがって，現実には，施工性および経済性を含めた最適解が選ばれる．比較的小規模な橋梁では，桁橋など施工性に優れた曲げ抵抗系の橋梁形式とすることが多い．

図 2-3 は，橋梁の支間長と橋梁形式（曲げ抵抗系 or 軸力抵抗系）の関係を，施工性と材料効率の観点より模式的に表したものである．ここで，施工性は「施工性の曲面：X」に，材料効率は「材料効率の曲面：Y」に表される．それぞれの曲面には以下の特徴がある．

### 施工性の曲面：X

スパンの短い橋梁では，軸力抵抗系よりも曲げ抵抗系の方が施工性が良いが，スパンの長い橋梁では軸力抵抗系の施工性が改善されて合理的となる反面，曲げ抵抗系は重量が増加し，部材も大きくなるため施工性は低下する．

### 材料効率の曲面：Y

スパンの長短に関わらず，軸力抵抗系の材料効率は常に高い合理性を保っている反面，曲げ抵抗系ではスパンが長くなるほど重量が増加し，材料効率が低下する．

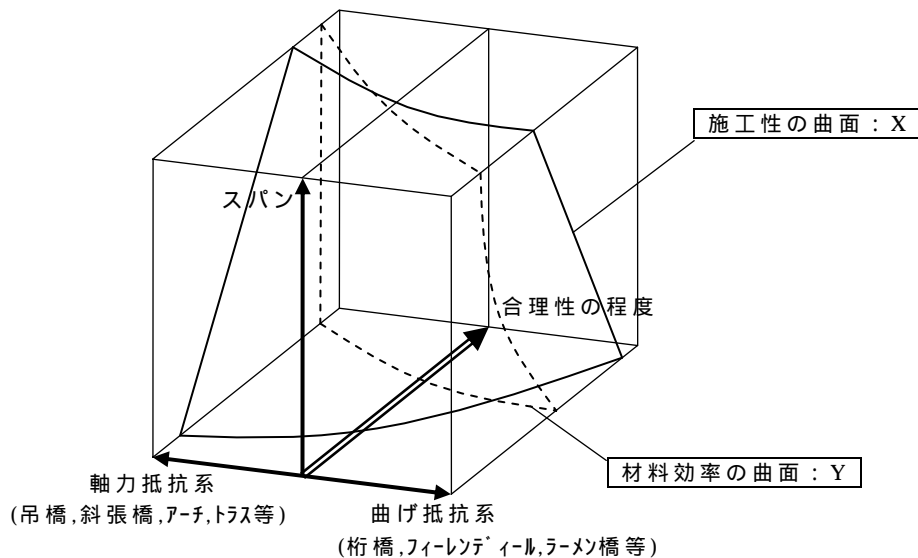


図 2-3 施工性と材料効率

さらに，「施工性の曲面」と「材料効率の曲面」に，それぞれ重み係数 ( $a, b$ ) を考慮して足し合わせた曲面を，図 2-4 に示す．つまり，橋梁形式としての合理性，またはその最適解を，「施工性と材料効率を同時に考慮した曲面 (最適解): Z」として表している．この曲面には以下の特徴がある．

### 施工性と材料効率を同時に考慮した曲面 (最適解): Z

重み係数の値によっても異なるが，全体的な傾向として，スパンの長い橋梁では軸力抵抗系，短い橋梁では曲げ抵抗系の合理性が高くなる．網掛けのラインは，スパンに応じた合理性の最大値を結んだラインであり，施工性と材料効率を考慮した最適解は，このライン上に存在することになる．

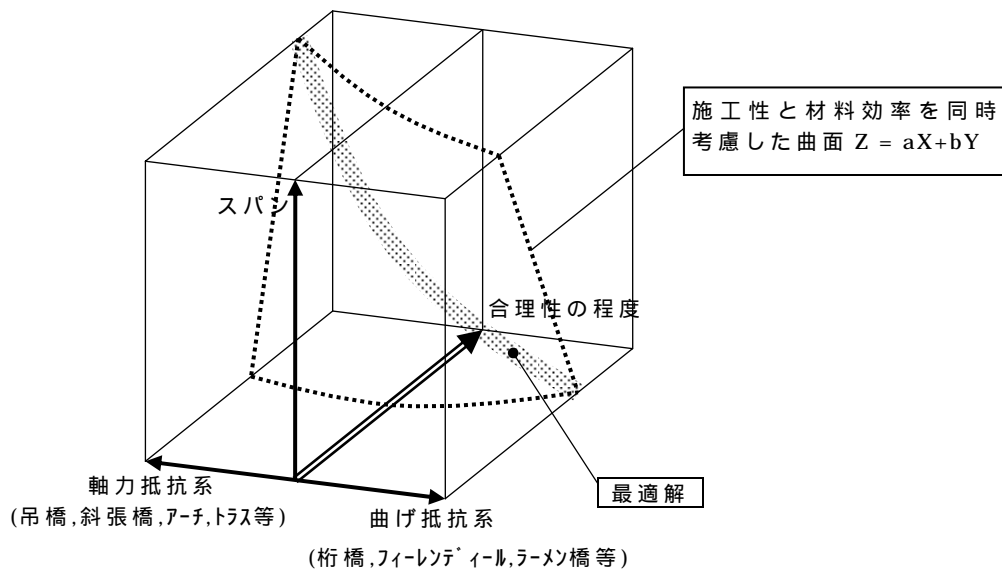


図 2-4 施工性と材料効率の最適解

### 2-3 橋梁に作用する力

表 2-3 に示すように、橋梁に作用する力は、 $T$ ：引張力、 $C$ ：圧縮力、 $M$ ：曲げモーメント、 $V$ ：せん断力、 $N$ ：ねじりモーメントに大別される。これらを作用空間の次元で考えると、1次元では  $T$  と  $C$  のみ。2次元ではそれらに  $M$  と  $V$  が加わる。3次元ではさらに  $N$  が加わる（表 2-4）。

図 2-5 のように、あるスパンに架けられた単純な橋梁のモデルを考えると、これは橋軸方向の鉛直平面内、すなわち 2次元の問題であると考えられるため、 $T$ 、 $C$ 、 $M$ 、 $V$  の力が問題となる。一方、 $N$  は橋軸方向を軸とした回転の力、すなわち 3次元の問題である。いずれにせよ、これらの力に対してどのような構造システムで応えるかということが、橋梁の形態決定にとって本質的な問題となる。

ところで、 $N$  のねじりモーメントが橋梁形式を決定づける主要な要因となることは少ない。それは、一般的な橋梁は、川や道路などの障害物に対してほぼ直交かつ直線的に架けられることが多いためである。この場合、橋梁に大きなねじりモーメントが作用することはないため、結果的にねじりが橋梁形式を決定づけることは少なくなる。しかし、曲線橋や斜橋、大きな偏載荷重の作用する橋梁などでは、ねじりの影響が強くなるため、橋梁の形式や形態に大きく影響を及ぼすことがある。本論文では、 $T$ 、 $C$ 、 $M$ 、 $V$  の力は第 3章～第 5章、 $N$  は第 6章で扱う。



表 2-3 橋梁に作用する力

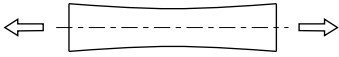
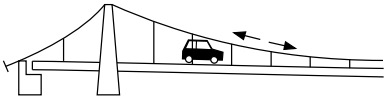
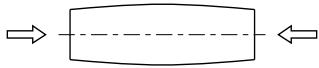
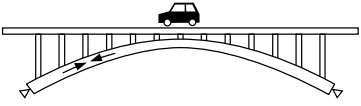

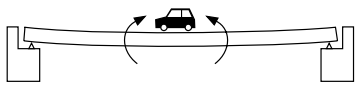
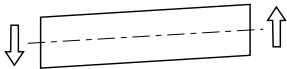

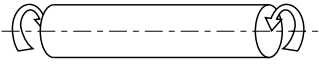

	部材への作用	橋梁への作用
引張力		
圧縮力		
曲げモーメント		
せん断力		
ねじりモーメント		

表 2-4 作用力の次元

1次元	軸力	$\left\{ \begin{array}{l} + : \text{引張力} \\ - : \text{圧縮力} \end{array} \right.$
2次元	軸力	$\left\{ \begin{array}{l} + : \text{引張力} \\ - : \text{圧縮力} \end{array} \right.$
	: <u>曲げモーメント</u>	$\left\{ \begin{array}{l} + : \text{曲げモーメント} \\ - : \text{曲げモーメント} \end{array} \right.$
	: <u>せん断力</u>	$\left\{ \begin{array}{l} + : \text{せん断力} \\ - : \text{せん断力} \end{array} \right.$
3次元	軸力	$\left\{ \begin{array}{l} + : \text{引張力} \\ - : \text{圧縮力} \end{array} \right.$
	: 曲げモーメント	$\left\{ \begin{array}{l} + : \text{曲げモーメント} \\ - : \text{曲げモーメント} \end{array} \right.$
	: せん断力	$\left\{ \begin{array}{l} + : \text{せん断力} \\ - : \text{せん断力} \end{array} \right.$
	: <u>ねじりモーメント</u>	$\left\{ \begin{array}{l} + : \text{ねじりモーメント} \\ - : \text{ねじりモーメント} \end{array} \right.$

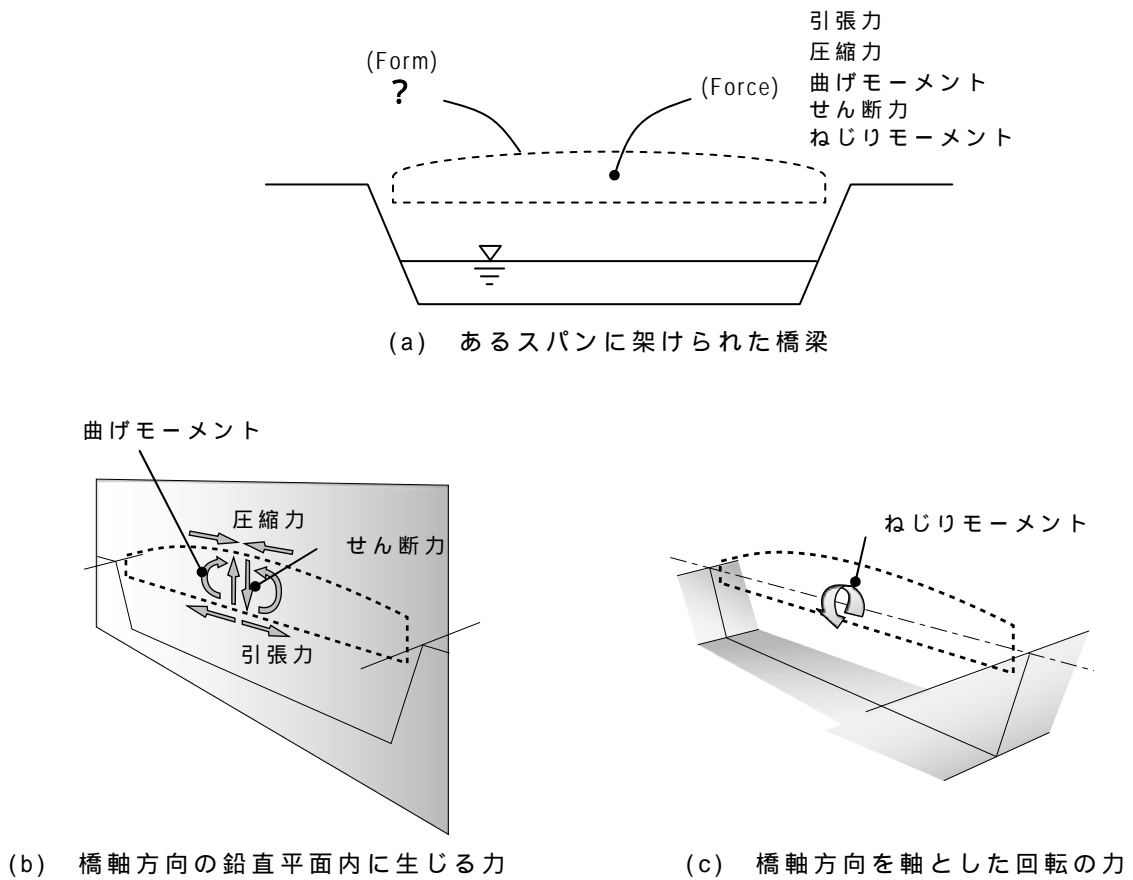


図 2-5 あるスパンに架けられた橋梁

参考文献

- 1) D.E.イングバー：テンセグリティーとは何か，pp.22-34，日経サイエンス，1998
- 2) 日本道路協会：『道路橋示方書 共通編』，2002
- 3) 関西道路研究会 道路橋調査研究委員会 橋梁景観研究小委員会：橋梁アーキテクチャに関する研究，2002
- 4) 久保田善明，岸本貴博，中村良夫：橋梁形式の力学的相関性と構造デザイン，構造工学論文集 Vol.50A, pp. 315-321, 2004

### 第 3 章 橋梁形式の構造と形態

#### 3-1 概説

本章では、本研究でも重要なテーマとなる「橋梁形式の連続性と対称性の問題」を中心に述べる。これは、橋梁の構造形態を体系化するにあたり基本となる概念であり、各橋梁形式を個別的にではなく互いに関連したものとして理解しようとするものである。本章では特に、「橋梁形式」のように「スパンを渡る構造システム (= スパンシステム)」に関する連続性と対称性について詳述する。なお、この問題は、第 4 章、第 5 章においても中心的な役割を担う。

#### 3-2 スパンシステムにおける構造システムの分類と基本形式<sup>1)</sup>

前章 2-3 で示したように、橋梁に作用する 5 つの力 ( : 圧縮力, : 引張力, : 曲げモーメント, : せん断力, : ねじりモーメント) のうち、スパンシステムに大きく関係するのは、 ~ の 4 つである。

図 3-1 は、橋梁のスパンシステムを大まかに分類したものである。これらは抵抗する力の種類によって、サスペンションシステム (引張力)、アーチシステム (圧縮力)、ビームシステム (曲げモーメント、せん断力)、に分類される。さらに、ビームシステムは、せん断力の伝達メカニズムによって、ウェブシステムと斜材システムに分類される。図 3-2 は、ウェブシステムと斜材システムの機構を模式的に説明した図である。

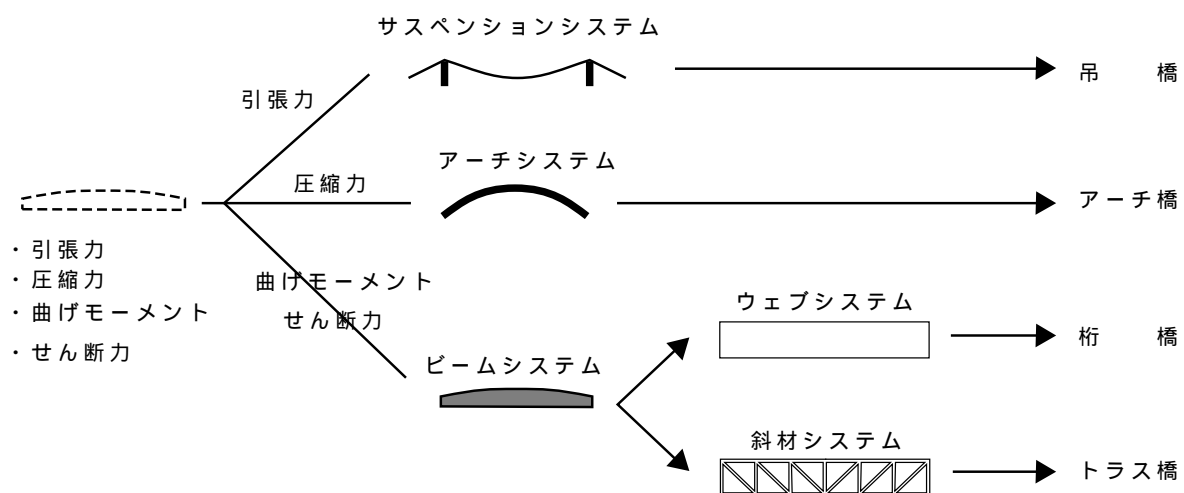


図 3-1 スパンシステムの構造システムの分類と基本形式

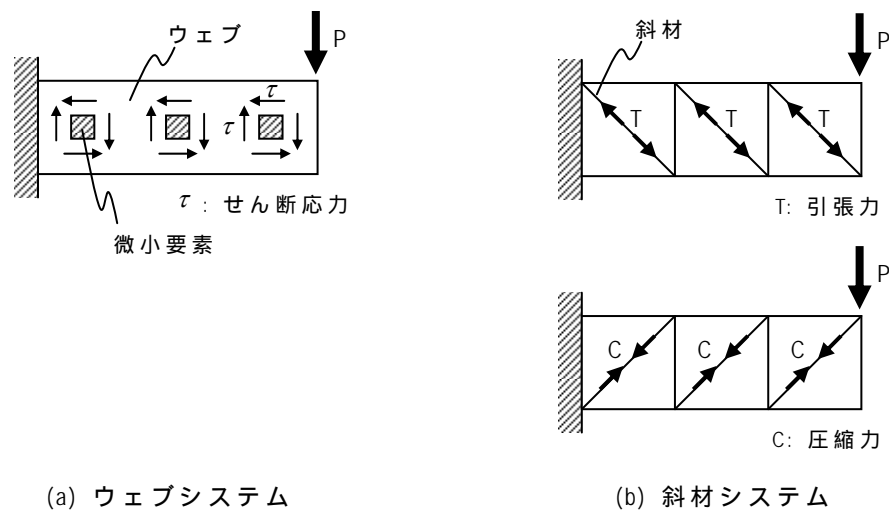


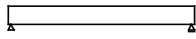



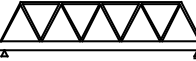



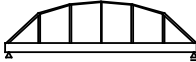
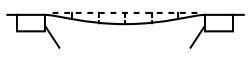

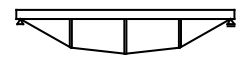
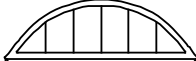


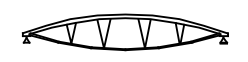

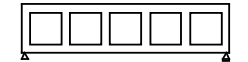

図 3-2 ウェブシステムと斜材システム

次に、このように分類された構造システムを橋梁形式と対応づけて考えると、サスペンションシステムは吊橋、アーチシステムはアーチ橋、ウェブシステムは桁橋、斜材システムはトラス橋に対応づけることができる。橋梁形式には他にも様々なものが存在するが、ここでは各構造システムの特徴を最も端的に表している基本的な橋梁形式を当てはめている。なお、現実の橋梁はこれよりも複雑であり、例えば、現実のアーチ橋ではアーチ部材に圧縮力のほか、曲げモーメントやせん断力、場合によってはねじりモーメントも同時に作用し、しかも、荷重状態によってそれらの値は常に変化する。つまり、アーチ橋だからといって圧縮力のみが作用している訳ではなく、曲げモーメントやせん断力、ねじりモーメントも同時に作用している。しかし、形態として考えたとき、部材に卓越する「圧縮力」という力が、「アーチ」という形態的特徴として典型的に表れるということは、橋梁の構造と形態に論理的なつながりを見出す手がかりとして有効な視点となる。したがって、ここでは、注目する力と形態の関係という視点から、構造システムと橋梁形式を対応づけている。

なお、斜張橋は、図 3-1 の分類に当てはめると「斜材システム」となる。一般的には、ケーブルを利用した構造であることや、長大スパンにも適用されることから、吊橋と比較されることが多いが、その構造システムは吊橋とは異なっており、本研究では、むしろトラス橋に近いものとして扱う。したがって、後述する「構造形態相関図」においても、斜張橋はトラス橋の近傍に配置されることとなる。

また、以降の議論のために、表 3-1 に、主な橋梁形式の名称と形態の一覧を示す。

表 3-1 主な橋梁形式の名称と形態

名 称	形 態	名 称	形 態
桁橋		吊橋	
トラス橋		補剛吊橋	
トラス補剛桁橋		斜めハンガー吊橋	
アーチ橋		斜めハンガー補剛吊橋	
ランガー橋		吊床版橋	
トラスドランガー橋		張弦梁	
ローゼ橋		レンズトラス橋	
ニールセンローゼ橋		不完全トラス橋	
エクストラドーズド橋		フィーレンディール橋	
斜張橋			

### 3-3 橋梁形式の連続性と対称性

#### 3-3-1 構造と形態に関する連続性と対称性

前章にて整理された 4 つの基本的な橋梁形式は、それぞれ明確な力学的独自性を有してはいるが、互いに力学的に無関係に存在しているのではなく、むしろ連続性や対称性によって関連づけられる。さらに、橋梁は構造と形態が非常に密接な関係を有することから、力学的性質だけでなく形態の特徴にも連続性や対称性を有する。ここでは、これらの関係性を明らかにし、橋梁形式の「構造形態相関図」として統合することを試みる。

表 3-2 は、橋梁形式の構造と形態に関する連続性と対称性について整理したものである。以下の節において、その内容について論じる。

なお、以降では、使用材料には言及しない。言うまでもなく、使用材料は橋梁の構造形態に大きく影響する。そのため、橋梁の構造形態は常に使用材料との適切な組み合わせのもとで考えられるべきである。しかし、使用材料を考慮する前に、より基本的な原則を明確にしておく必要があり、本論文では材料によらない一般化したレベルでの論の構築を行った。今後、この論の上に材料の問題が検討されるべきであ

表 3-2 橋梁形式の構造と形態に関する連続性と対称性

	連続性	対称性
構造	<p>・力学的連続性</p>	<p>・吊橋とアーチ橋の力学的対称性</p>
形態	<p>・力学的連続性が生み出す形態的連続性</p> <p>・路面の位置に関する形態的連続性</p>	<p>・吊橋とアーチ橋の形態的対称性</p>

り，それは構造形態操作論の一部として本研究が目指す体系の中に組み込まれるべきであるが，具体的な検討は今後の課題とする．

### 3-3-2 橋梁形式における力学的連続性<sup>2)</sup>

各橋梁形式の間には力学的な連続性が存在する．例として，桁橋と下路アーチ橋の関係を考える．図 3-3 のように，桁橋と下路アーチ橋の間にはその中間的な橋梁形式が存在する．つまり，桁橋から圧縮力を負担する部材を分離したものが下路ランガー橋であり，アーチリブの剛性を高めて桁とアーチリブの両方に曲げ剛性を与えたものが下路ローゼ橋である．さらに，すべての力をアーチリブに負担させると完全な下路アーチ橋となる．このように，部材が負担する力の大きさや種類によって橋梁形式は連続的に変化していく．

このような力学的な連続性は，4つの基本橋梁形式のすべての組み合わせにおいても同様に考えることができる．図 3-4 に，それぞれの組み合わせにおける力学的連続性を示す．そして，それらの関係を 1つの図に表現したものを，図 3-5 に示す．図 3-5 では，橋梁形式の相互関係には，図 3-4 のような端点は存在せず，次々に変化し得る連続性と互換性を有していることを示している．

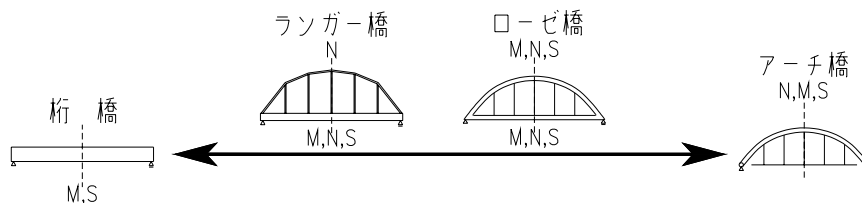


図 3-3 桁橋と下路アーチ橋の力学的連続性

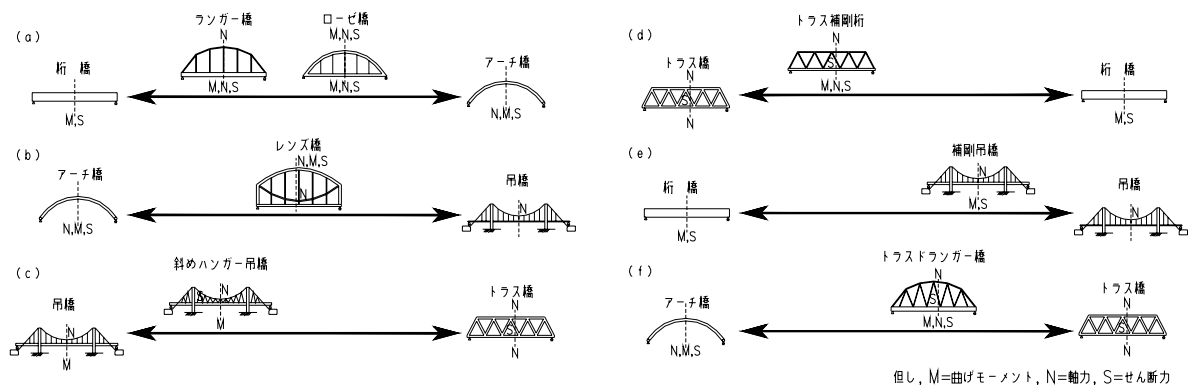


図 3-4 各橋梁形式の組み合わせによる力学的連続性

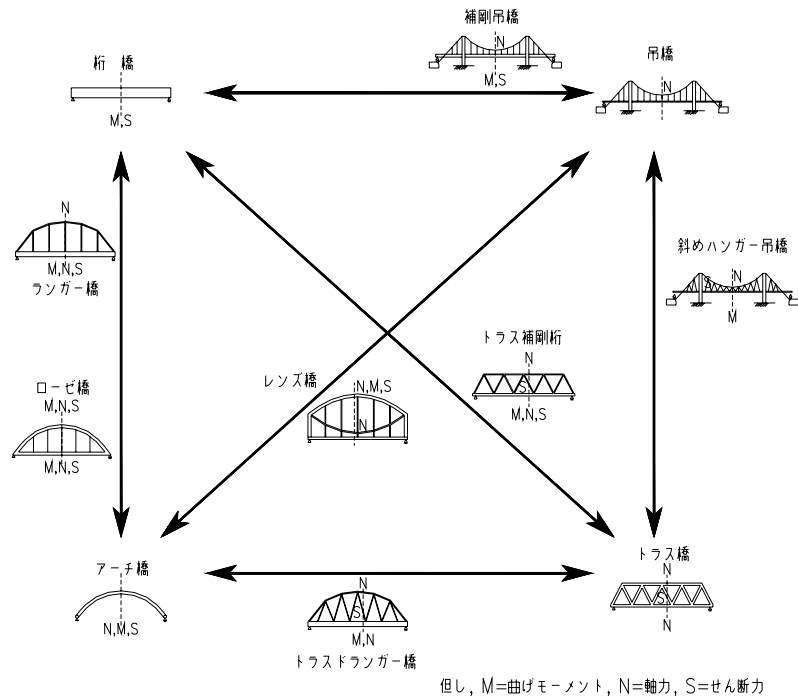


図 3-5 橋梁形式の力学的な相互連続性

### 3-3-3 橋梁形式における力学的対称性

前項で示した力学的連続関係のうち、吊橋とアーチ橋には力学的対称性が存在する。図 3-6 に、吊橋とアーチ橋の力学的対称関係を示す。図 3-6 において、吊橋の放物線状のケーブルに作用する引張力は、上下反転させると、アーチ橋のアーチリブに作用する圧縮力に入れ替わる。引張力と圧縮力は、軸力の正負反対方向の力であり、吊橋

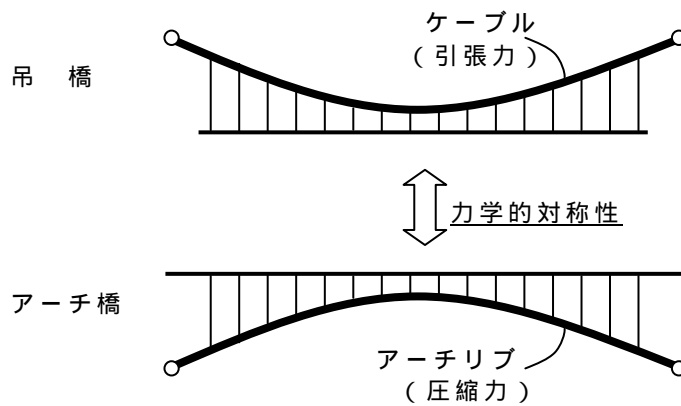


図 3-6 吊橋とアーチ橋の力学的対称性



とアーチ橋は，図 3-5 に示したような連続関係を有すると同時に，図 3-6 に示すような対称関係も同時に有していると考えられる。

### 3-3-4 橋梁形式における形態的連続性

3-3-2 項で述べた橋梁形式の力学的連続性は，形態の連続性にも関係する。すなわち，図 3-3 で考えると，下路ランガー橋のアーチリブには軸力しか作用しないため，アーチリブは一般に比較的細い部材で構成される。アーチリブの剛性を高めて桁とアーチリブの両方が曲げにも抵抗できるようにした下路ローゼ橋のアーチリブは，下路ランガー橋に比べると太くなる。さらに，すべての力をアーチリブに負担させる下路アーチ橋では，アーチリブはさらに太くなる傾向がある。このように，部材が負担する力の大きさや種類が変化することによって，橋梁形式の形態に連続性が与えられる。

また，橋梁形式の構造と形態を考える上で，路面の位置，つまり，主構（メインストラクチャー）と床組の鉛直方向の位置関係（上路-中路-下路）も重要な要素である。巨視的な観点で見れば，これらは力学的にほとんど同等と見なせるものであり，床組を支える部材が，上路橋の場合，圧縮材（支柱），下路橋の場合，引張部材（ケーブル）という違いがあるのみである。したがって，主構と床組の鉛直方向の位置関係には高い自由度があり，おおよそこれらの配置は独立的に扱うことが可能であるが，例えば同じアーチ橋であっても，上路アーチ橋と下路アーチ橋では見たときの印象がかなり異なっており，橋梁の形態を考える上では，これらを区別して考えた方がよい。図 3-7 に，主構と床組の鉛直方向の位置関係による形態の連続性について示す。

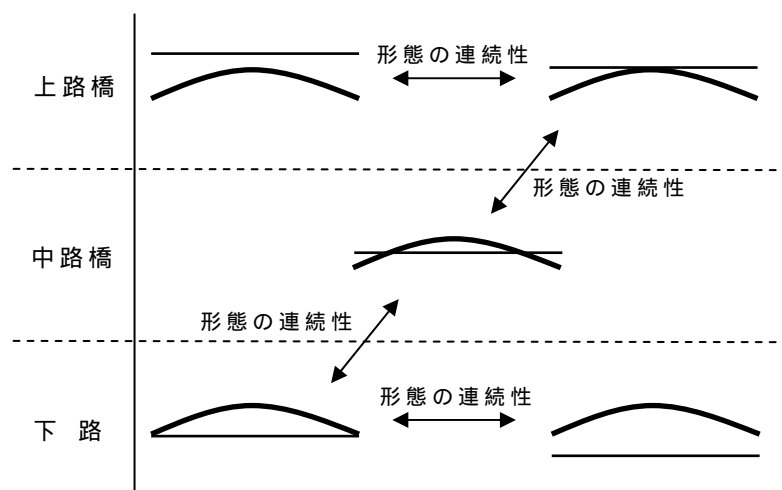


図 3-7 路面の位置に関する形態的連続性

なお，本論で用いる「主構」という用語について，これは一般的にトラス橋やアーチ橋に対して用いられる用語であるが，ここでは吊橋や斜張橋などあらゆる橋梁において橋梁の支間を最終的に支えるメインストラクチャーとしての構造システムを意味している．

### 3-3-5 橋梁形式における形態的対称性

3-3-3 項で述べた吊橋とアーチ橋の力学的対称性は，同時に形態の対称性をも示している．すなわち，吊橋における下に凸の放物線状のケーブルは，アーチ橋における上に凸のアーチリブと形態的な対称性を有している．図 3-8 に，それを示す．

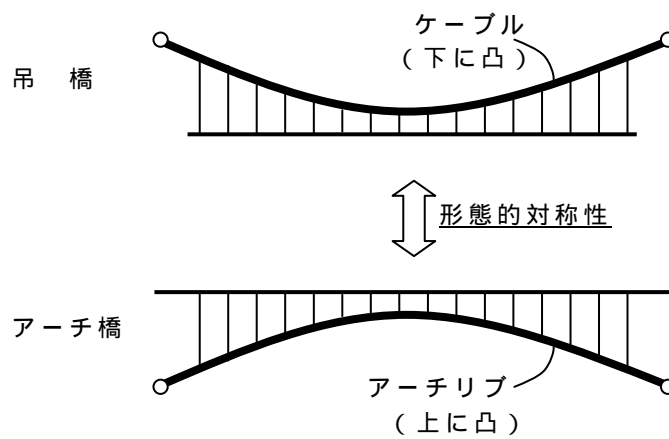


図 3-8 吊橋とアーチ橋の形態的対称性

### 3-4 橋梁形式の構造形態相関図

#### 3-4-1 表示方法

図 3-9(a)は、図 3-5 に示した橋梁形式の相互連続性であるが、これより、吊橋とアーチ橋の関係を連続的にではなく対称的に表現したものを、同図(b)に示す。同図(a)で見られる吊橋とアーチ橋の直接的な連続性は、同図(b)では解かれているが、その代わりに、それは吊橋とアーチ橋における構造と形態の対称性として表現されている。解かれた連続性は、第 5 章の「混合」という操作によって補われる。同図(b)において、実線矢印は連続性を、白抜き矢印は対称性を表している。また、図 3-1 で述べた構造システム（サスペンションシステム、アーチシステム、ビームシステム、ウェブシステム、斜材システム）を、各橋梁形式に対応づけて示している。

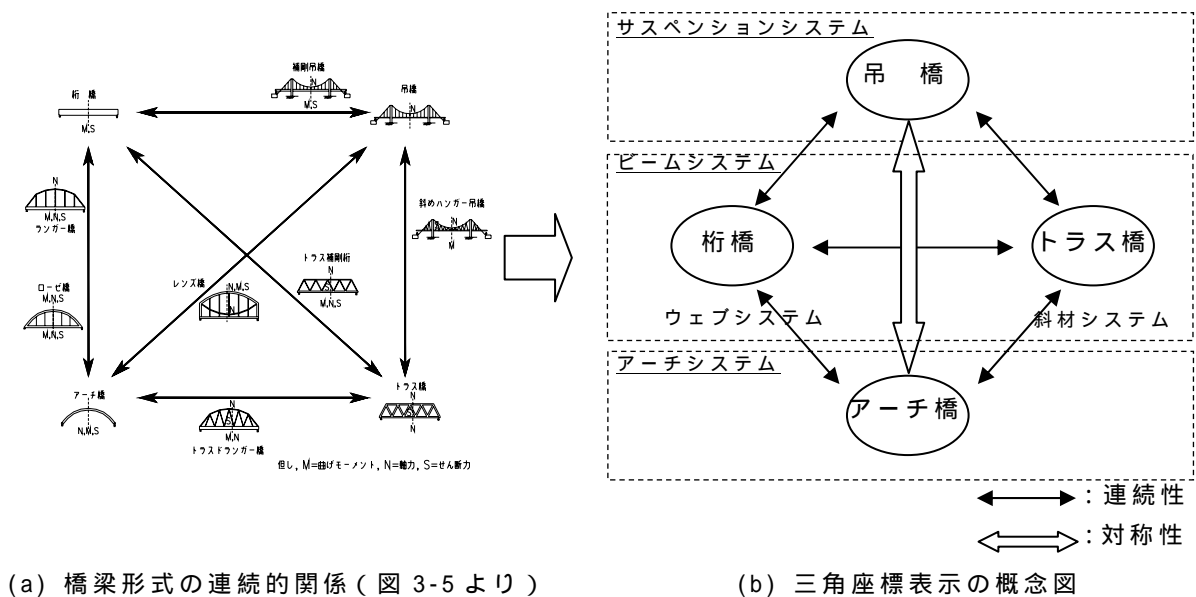


図 3-9 三角座標表示による構造形態相関図

次に、図 3-9(b)の関係を、各形式間の線的な関係から、面的な関係へと拡張する。まず、同図(b)の上半分の三角形（吊橋、桁橋、トラス橋を頂点とする三角形）について、図 3-10 のような三角座標を考える。図 3-10 において、サスペンションシステム（吊橋）、ウェブシステム（桁橋）、斜材システム（トラス橋）を構成要素にもつ任意の橋梁（アーチシステムを構成要素に含まない橋梁）は、各要素の構成配分に応じて、

SGT の内部にプロットされる .

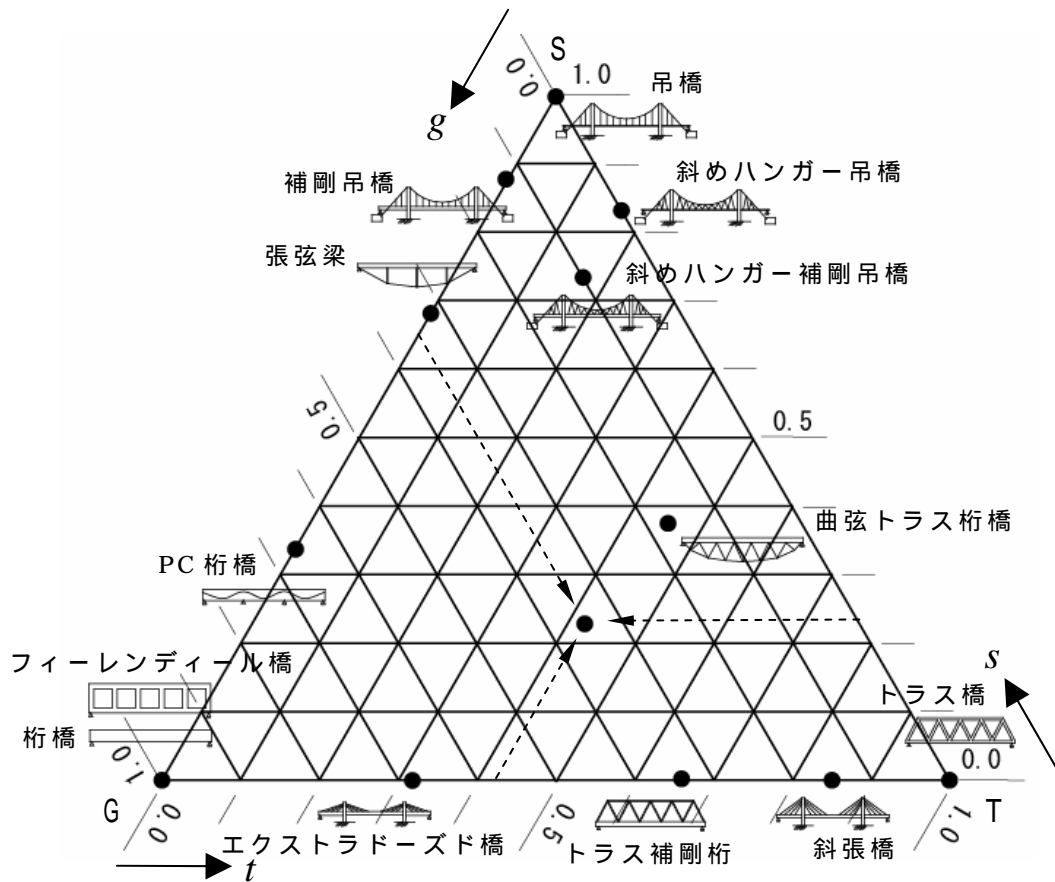


図 3-10 構造形態相関図の三角座標表示 (吊橋 桁橋 トラス橋)

図 3-9(b)の下半分の三角形 (アーチ橋, トラス橋, 桁橋を頂点とする三角形) についても, 同様な三角座標が考えられ, それを図 3-10 と統合したものを図 3-11 に示す. 図 3-11 において, アーチシステム (アーチ橋), 斜材システム (トラス橋), ウェブシステム (桁橋) を構成要素にもつ任意の橋梁 (サスペンションシステムを構成要素に含まない橋梁) は, 各要素の構成配分に応じて, ATG の内部にプロットされる. つまり, 図 3-9(b)において示された基本橋梁形式の相互関係は, 図 3-11 において, SGT および ATG の内部領域における連続性として拡張される. さらに, 構造の対称性は,  $t$  軸に関する線対称の位置として表現される.

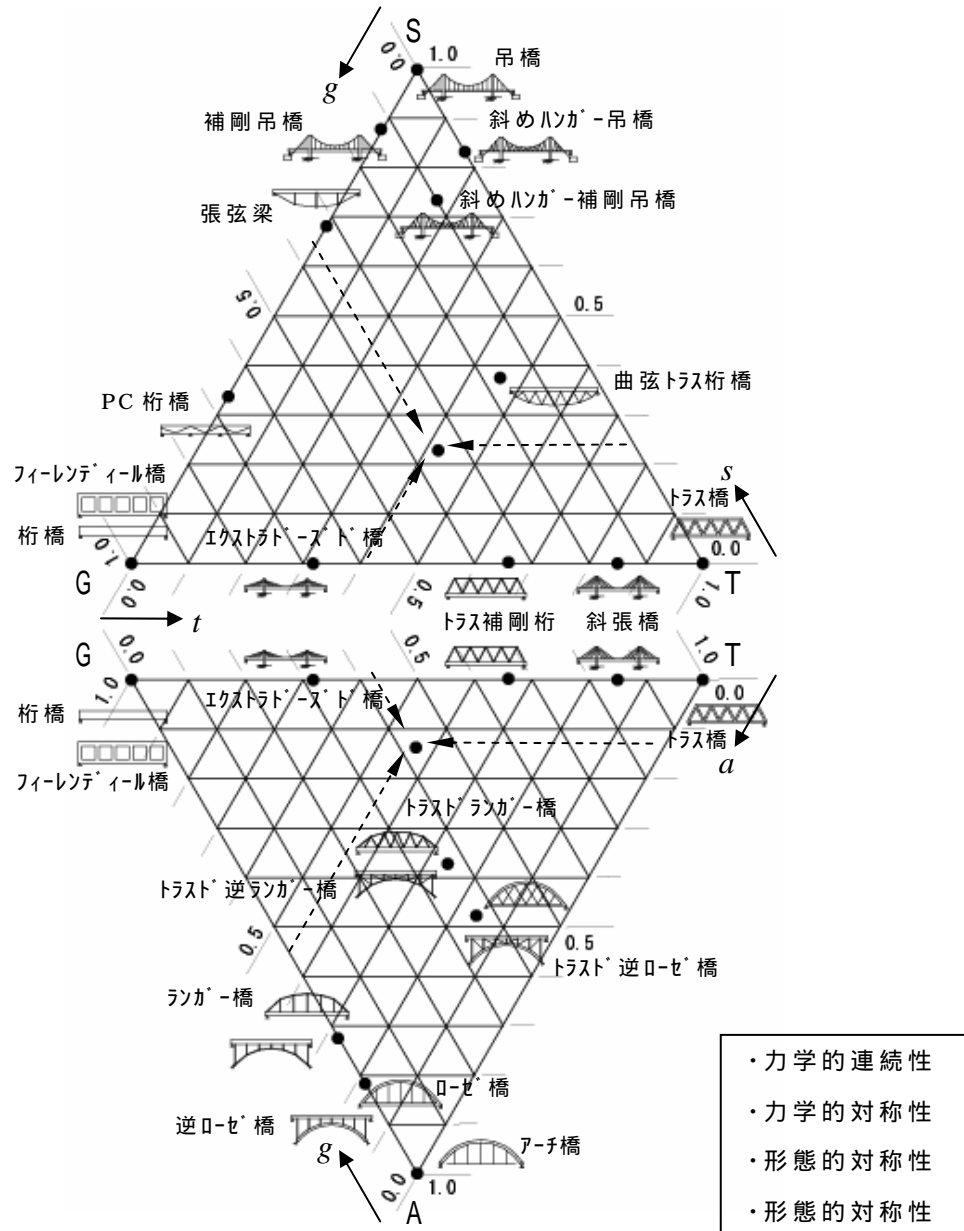


図 3-11 構造形態相関図の三角座標表示 (吊橋 桁橋 トラス橋 アーチ橋)

ところで，図 3-11 では，橋梁形式の力学的な連続性や対称性は表現されているものの，形態に関しては，上路，中路，下路の区別がなされていない．そこで，これらを区別する方法として以下のように考える．

図 3-12 のように，上側の三角領域に下路の吊橋系橋梁を，下側の三角領域に上路のアーチ系橋梁を配置すると，SGT，ATG それぞれの内部において，構造と形態の連続性が確保されることに加え， $t$  軸に関する線対称の位置に，構造と形態の対称性が表現される．

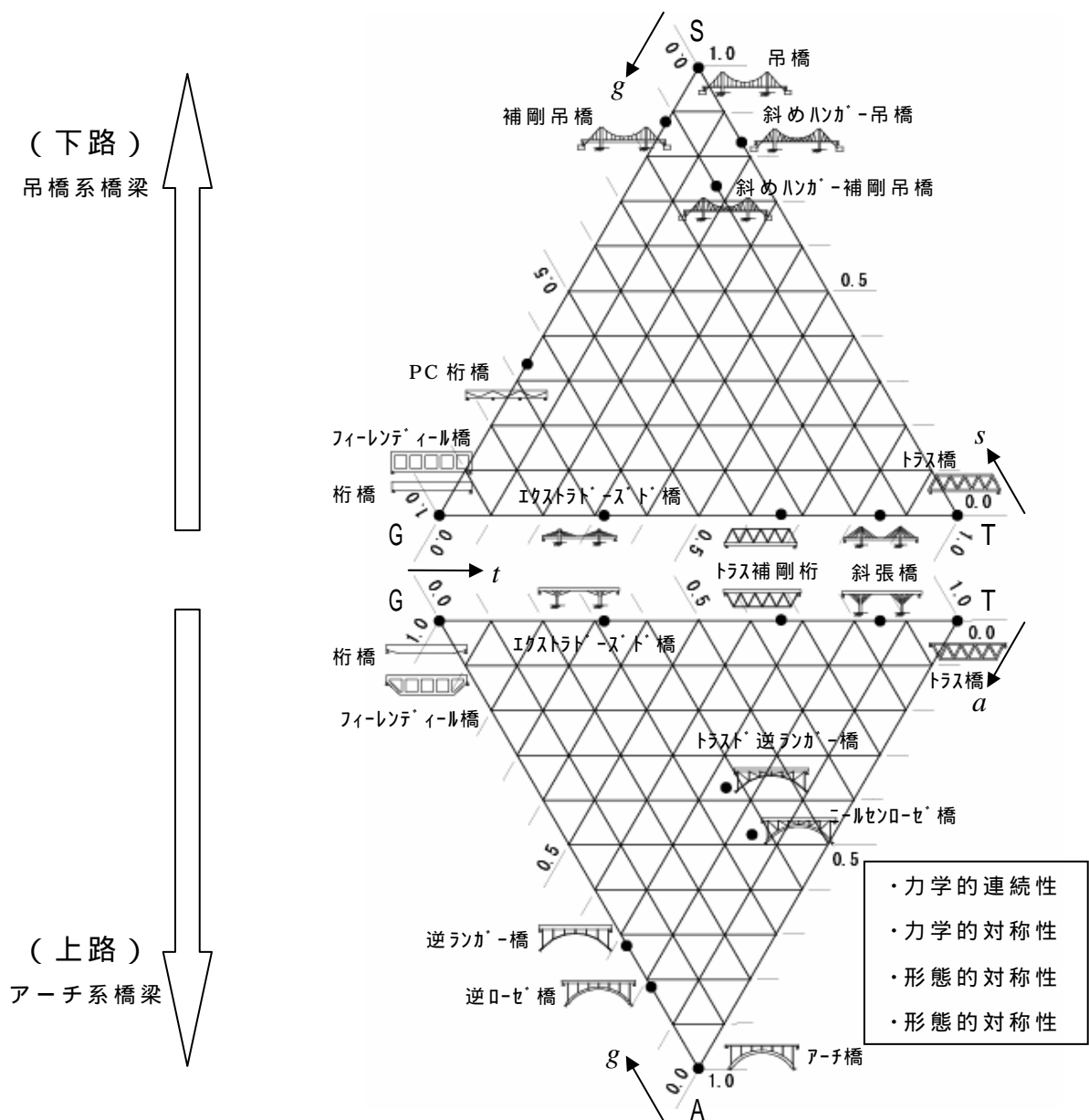


図 3-12 下路吊橋系橋梁と上路アーチ系橋梁の構造と形態の対称性

次に、路面の位置、つまり、主構（メインストラクチャー）と床組の鉛直方向の位置関係を座標平面に対する奥行き方向にとると、図 3-13 が得られる。図 3-13 では、上側の三角柱（ $S_1G_1T_1-S_3G_3T_3$ ）あるいは下側の三角柱（ $A_1T_1G_1-A_3T_3G_3$ ）の内部において構造と形態の連続性が確保されると同時に、中央の平面（ $G_1T_1T_3G_3$ ）に対して対称な位置に、構造と形態の対称性が表現される。

なお、構造形態相関図は、三角座標以外の方法によっても表すことができる。それらについては、補章にて述べる。

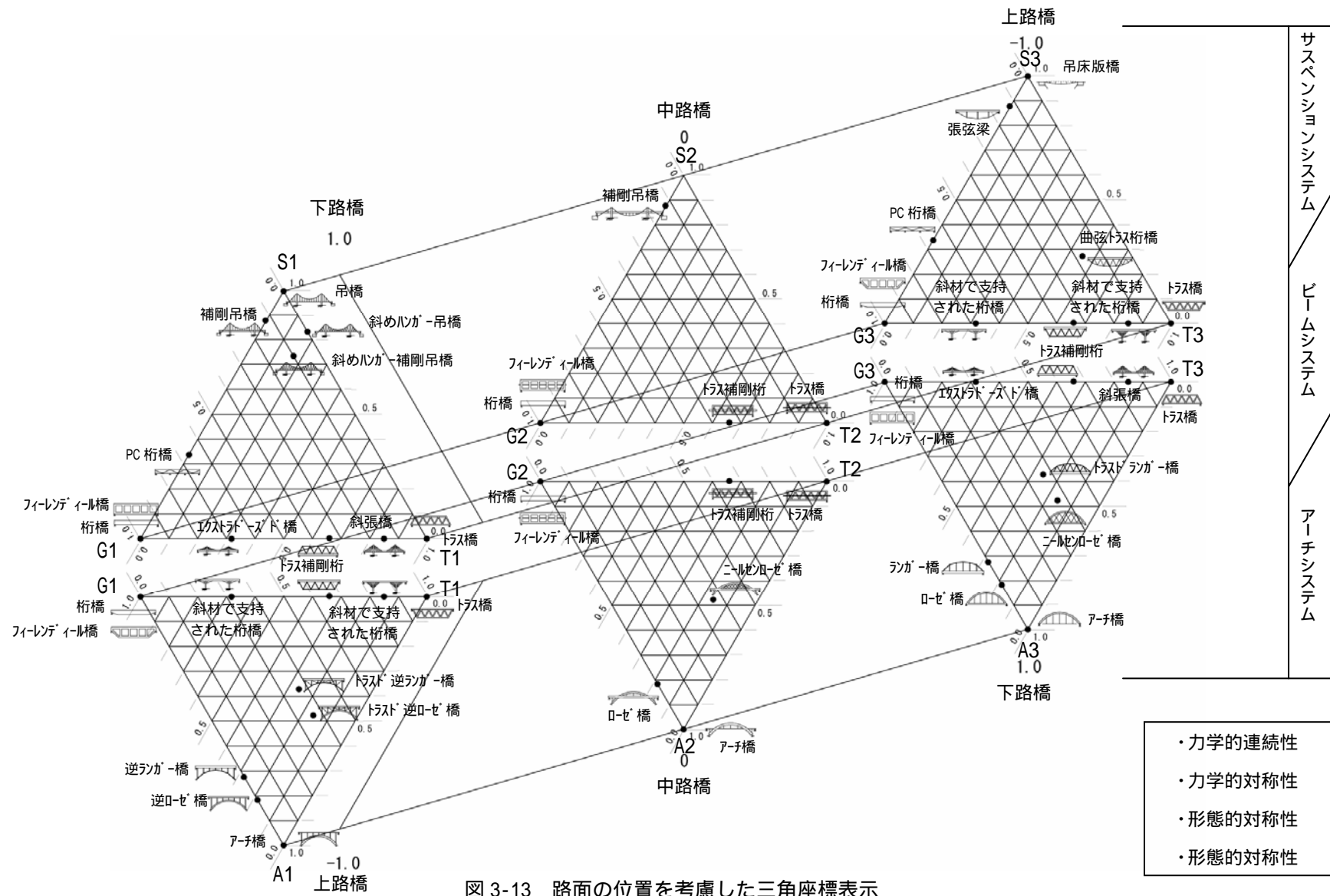


図 3-13 路面の位置を考慮した三角座標表示

### 3-4-2 座標値の算出方法

以上に述べた，三角座標の座標値は，次のように求められる．

まず，ある橋梁に含まれる斜材システム（トラス橋），サスペンションシステム（吊橋），アーチシステム（アーチ橋），ウェブシステム（桁橋）の構成配分を以下の記号で表す．

$t$ ：斜材システム（トラス橋）

（ある断面に作用する全体系のせん断力（ $S_o$ ）に占める，当該断面での斜材軸力の鉛直成分の負担分）

$s$ ：サスペンションシステム（吊橋）

（全体系の曲げモーメント（ $M_o$ ）に占める，ケーブル作用の負担分）

$a$ ：アーチシステム（アーチ橋）

（全体系の曲げモーメント（ $M_o$ ）に占める，アーチ作用の負担分）

$g$ ：ウェブシステム（桁橋）

（全体系の曲げモーメント（ $M_o$ ）に占める，主桁，補剛桁，またはアーチリブ自体の曲げモーメント負担分）

ここに，全体系のせん断力（ $S_o$ ），および，全体系の曲げモーメント（ $M_o$ ）とは，当該スパンに架かる橋梁の構造全体系を単純梁に置き換えた場合に，その梁に作用するせん断力および曲げモーメントである．なお， $M_o$ は，支間中央断面における中心点まわりのモーメントとして，次のように表される．

$$M_o = M_a + M_g + N_c \cdot f_c - N_a \cdot f_a \quad (3-1)$$

また， $t$ ， $s$ ， $a$ ， $g$ は次の条件を満たすものとする．

$$0 \leq t \leq 1, 0 \leq s \leq 1, 0 \leq a \leq 1, 0 \leq g \leq 1, \quad (3-2)$$

$$t + s + g = 1 \text{ (吊橋系橋梁の場合)} \quad (3-3a)$$

$$t + a + g = 1 \text{ (アーチ系橋梁の場合)} \quad (3-3b)$$

次に，斜材システム（トラス橋），サスペンションシステム（吊橋），アーチシステム（アーチ橋），ウェブシステム（桁橋）のすべての属性を有する橋梁のプロトタイプ



として，図 3-14 のようなモデルを考える．

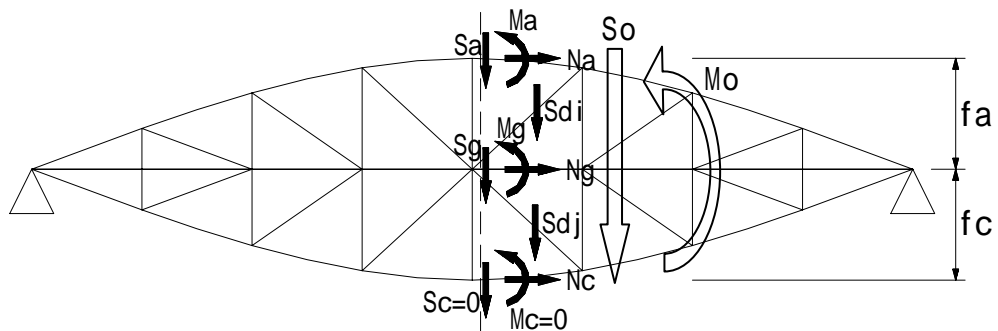


図 3-14 橋梁のプロトタイプ・モデル

ここに，

- $M_a$  : アーチリブの曲げモーメント，
- $M_g$  : 主桁の曲げモーメント，
- $M_c$  : ケーブルの曲げモーメント (=0)，
- $N_a$  : アーチリブの軸力，
- $N_g$  : 主桁の軸力，
- $N_c$  : ケーブルの軸力，
- $S_a$  : アーチリブのせん断力，
- $S_g$  : 主桁のせん断力，
- $S_c$  : ケーブルのせん断力 (=0)，
- $f_a$  : アーチライズ，
- $f_c$  : ケーブルのサグ，
- $S_{di}$  ,  $S_{dj}$  : 斜材軸力の鉛直成分，

である．

すると， $t$ ， $s$ ， $a$ ， $g$ の値は次のように定式化できる．

$$t = \frac{\sum_{i=1}^n (S_{di})}{S_o} , \quad (3-4)$$

$$s = \frac{N_c \cdot f_c}{M_o} \cdot (1-t) , \quad (3-5)$$

$$a = \frac{-N_a \cdot f_a}{M_o} \cdot (1-t), \quad (3-6)$$

$$g = \frac{M_a + M_g}{M_o} \cdot (1-t), \quad (3-7)$$

$t, s, a, g$  が得られたならば，対象橋梁の特性に応じて，SGT または ATG の領域内に座標をプロットすればよい。

次に，路面の位置について，主構全高の中心位置を基準として，上路，中路，下路の程度を定める。この値を  $d$  とし，図 3-15 に示すように，吊橋については下路側を正，アーチ橋については上路側を正とすると，図 3-12 で示した構造と形態の連続性と対称性は，図 3-13 のように立体的に拡張して考えることができる。ここで， $d$  の値は，床組が主構の上端と一致する場合，または，下端と一致する場合の絶対値を 1.0 としているが，当然，それが 1.0 よりも大きい場合もあり得る。

$$d = \frac{2h}{H} \quad (3-8)$$

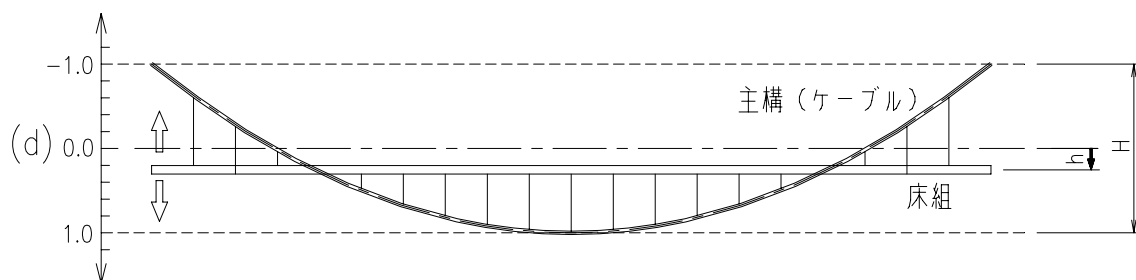
ここに，

$d$  : 路面の位置（主構と床組の鉛直方向の位置関係）

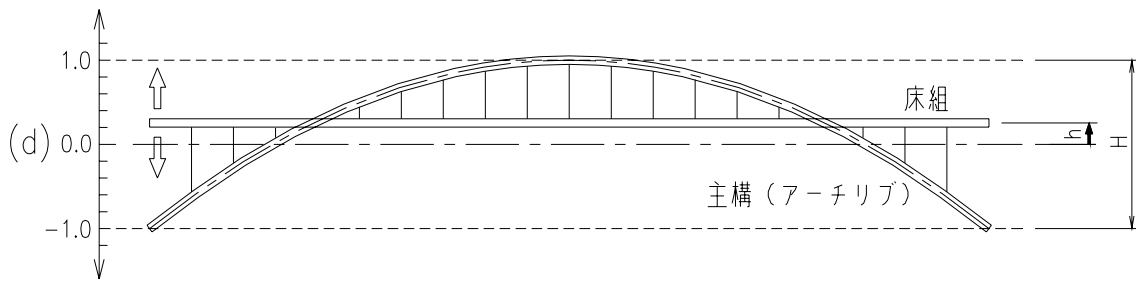
$h$  : 主構全高の中心位置から床組の軸線までの高さ（吊橋系橋梁の場合は下向きを正，アーチ系橋梁の場合は上向きを正とする。）

$H$  : 主構全高

である。



(a) 吊橋系橋梁の場合



(b) アーチ系橋梁の場合

図 3-15 路面の位置 (主構と床組の鉛直方向の位置関係)

### 3-4-3 相関性の定量化手法

橋梁形式ごとに複数のサンプルを集め，それらを三角座標表示することによって，座標内における形式ごとの分布状況を把握することができる。つまり，ある橋梁形式に対して， $n$ 橋分のサンプルが得られたとすると，それらの座標  $(t_i, s_i, g_i), (t_i, a_i, g_i)$  の平均値  $(\bar{t}, \bar{s}, \bar{g}), (\bar{t}, \bar{a}, \bar{g})$  の成分は，次のように表される。

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i) \quad (3-9a)$$

$$\bar{s} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (s_i) \quad (3-9b)$$

$$\bar{a} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (a_i) \quad (3-9c)$$

$$\bar{g} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (g_i) \quad (3-9d)$$

つまり，

$$(\bar{t}, \bar{s}, \bar{g}) = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i), \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (s_i), \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (g_i) \right) \quad (\text{吊橋系}) \quad (3-10a)$$

$$(\bar{t}, \bar{a}, \bar{g}) = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i), \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (a_i), \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (g_i) \right) \quad (\text{アーチ系}) \quad (3-10b)$$

もし、 $(t_i, s_i, g_i), (t_i, a_i, g_i)$  が正規分布をなすとするとき、 $(\bar{t}, \bar{s}, \bar{g}), (\bar{t}, \bar{a}, \bar{g})$  は、その橋梁形式を代表する典型的な座標値といえる。

さらに、 $(s_i, a_i, g_i), (t_i, a_i, g_i)$  の分散や標準偏差は次のようにして求められる。

分散  $(V_t, V_s, V_g), (V_t, V_a, V_g)$  の成分

$$V_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2 \quad (3-11a)$$

$$V_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})^2 \quad (3-11b)$$

$$V_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2 \quad (3-11c)$$

$$V_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (g_i - \bar{g})^2 \quad (3-11d)$$

標準偏差  $(S_t, S_s, S_g), (S_t, S_a, S_g)$  の成分

$$S_t = \sqrt{V_t} \quad (3-12a)$$

$$S_s = \sqrt{V_s} \quad (3-12b)$$

$$S_a = \sqrt{V_a} \quad (3-12c)$$

$$S_g = \sqrt{V_g} \quad (3-12d)$$

式(3-11a~d)、式(3-12a~d)は、その橋梁形式が、座標上においてどの程度のばらつきを有しているかを表している。

次に、ある橋梁形式の座標(A)と、他の橋梁形式の座標(B)の相関係数  $R$  を、これらの座標間の距離をもとにして算出する。図 3-16 のように、座標(A)と座標(B)の最短距離  $l$  がそれらの構造的な近さを表しており、1 から  $l$  を引いたものをそれらの相関係数とする。ただし、座標(A)と座標(B)が、ともに SGT の内部、または、とも

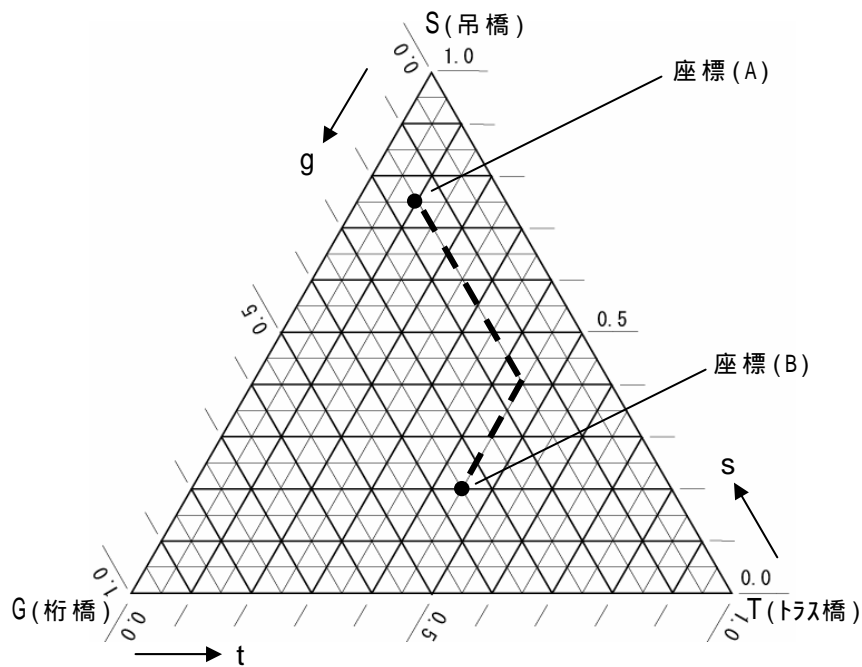


図 3-16 座標間の最短距離

に STG の内部にある場合は問題ないが，一方が SGT の内部にあり，他方が ATG の内部にある場合，単純にそれらの距離で相関性を表すことはできない．このような場合，相関係数の符号を負とすることによって，これを負の相関，つまり，橋梁形式に对称性があるものとして表現することにする．

以上を式に整理すると，次のようになる．

座標 (A) と座標 (B) が，ともに SGT の内部，または，ともに ATG の内部にある場合，

$$R = 1 - \text{MAX} \left( \left| \overline{t}_b - \overline{t}_a \right|, \left| \overline{s}_b - \overline{s}_a \right|, \left| \overline{g}_b - \overline{g}_a \right| \right) \quad (\text{吊橋系}) \quad (3-13a)$$

$$R = 1 - \text{MAX} \left( \left| \overline{t}_b - \overline{t}_a \right|, \left| \overline{a}_b - \overline{a}_a \right|, \left| \overline{g}_b - \overline{g}_a \right| \right) \quad (\text{ア-チ系}) \quad (3-13b)$$

座標 (A) と座標 (B) が，一方は SGT の内部に，他方は ATG の内部にある場合，

$$R = -1 + \text{MAX} \left( \left| \overline{t}_b - \overline{t}_a \right|, \left| \overline{a}_b - \overline{s}_a \right|, \left| \overline{g}_b - \overline{g}_a \right| \right) \quad (\text{A:吊橋系, B:ア-チ系}) \quad (3-14a)$$

$$R = -1 + \text{MAX} \left( \left| \overline{t}_b - \overline{t}_a \right|, \left| \overline{s}_b - \overline{a}_a \right|, \left| \overline{g}_b - \overline{g}_a \right| \right) \quad (\text{A:ア-チ系, B:吊橋系}) \quad (3-14b)$$

なお，路面の位置（上路，中路，下路）については，通常，地形条件などによって決定されていることが多く，それらの平均や分散をとることに意味はない．したがって，個別の橋梁について，路面の位置に関する形態的な相関性  $R'$  は，別途，次のような指標で与える．式 3-15 によれば，例えば，一方が  $d = 1.0$ （e.g. 下路吊橋）で，他方が  $d = -1.0$ （e.g. 下路アーチ橋）の場合， $R' = 0$  と表される．

$$R' = 1 - \frac{|d_a - d_b|}{2} \quad (3-15)$$

以上の議論により，三角座標表示における橋梁形式の相関性は，

$$(R, R') \quad (3-16)$$

のように表される．

### 3-5 実橋データによる定量化例

#### 3-5-1 サンプルデータ

前節の定量化手法にしたがい、実際の例について各値を算出した。使用した実橋データは、(社)日本橋梁建設協会が発行する『橋梁年鑑』の平成13年版～平成15年版<sup>3)～5)</sup>に掲載されている鋼道路橋に関するデータのうち、一般図と諸元を得られるデータである。この一般図と諸元をもとに概略設計を行って断面力を推定し、3-4-1の方法に従って座標を求め、構造形態相関図上に表した。

断面力の算出にあたっては、JIPテクノサイエンス株式会社の概略設計プログラム、「JSP-15W 鋼アーチ橋の概略自動設計」、「JSP-50W 鋼斜張橋の概略自動設計」を使用した。吊橋については、式(3-51)により、ケーブル張力を算出した。

$$H = \frac{w \cdot l^2}{8f} \quad (3-51)$$

ここに、

$H$ ：ケーブル張力の水平反力

$w$ ：等分布荷重

$l$ ：支間長

$f$ ：サグ

表3-4は、サンプル・データ数である。ただし、桁橋、トラス橋は、構造形態相関図の各頂点に配置されるため、個別の計算は必要としない。

表 3-4 サンプル・データ数

	H13	H14	H15	合計
桁橋	(52)	(61)	(68)	(181)
トラス橋	(10)	(10)	(10)	(30)
ランガー橋	7	4	5	16
トラスランガー橋	1	5	2	8
ローゼ橋	23	11	14	48
ニールセンローゼ橋	5	10	4	19
アーチ橋	7	2	1	10
斜張橋	2	4	4	10
吊橋	1	0	0	1
合計	46 (62)	36 (71)	30 (78)	112 (211)

桁橋、トラス橋は、個別の計算を必要としない

### 3-5-2 結果と考察

表 3-5 は、形式ごとの  $t$  ,  $s$  ,  $a$  ,  $g$  の平均、分散、および標準偏差である。桁橋、トラス橋は、サンプル数の個数に関わらず、各頂点に集中するため、平均値も同じ座標となり、分散、標準偏差もすべて 0 となる。

表 3-6 は、形式相互の相関係数  $R$  である。また、図 3-23 に、各形式の平均を座標で示す。

#### 1) 平均

まず、一般にアーチ系橋梁と呼ばれている形式（アーチ、ランガー、ローゼ、ニールセン）は、いずれも  $a$  が極めて高く、桁をアーチで補剛しているといわれるランガーでさえ、 $a$  は卓越している。つまり、アーチ部材が全体の曲げ剛性に対して極めて有効に寄与しているということを示している。ただし、斜材を有し、トラス的な要素を有するトラスランガーは、 $a=0.468$  であり、アーチ橋とトラス橋のほぼ中間的な性質を示している。ニールセンローゼは、 $a=0.842$  であり、ランガーやローゼに比べればややトラスの属性を多く含んでいるが、それでも基本的にはアーチの属性が卓越している。吊橋は、サンプル数は少ないが、今回の例では明らかにケーブルの効果が卓越している。斜張橋は、斜めに張られたケーブルがトラスの斜材と同様に見なされるため、今回の検討ではトラスと桁橋の中間的な位置付けとなっている。

#### 2) 分散、標準偏差

各形式とも、ばらつきの程度はかなり低く、ほぼ同じような位置に集中する傾向がある。これは、橋梁を設計する際に、経済性などから、ある程度定まったライズ比やサグ比が採用されることが多く、ケーブルやアーチリブの剛比もある程度似かよっているためではないかと推測される。ただし、その中でも最もばらつきの大きかったのは斜張橋であり、逆に最もばらつきの少なかったのはアーチ橋であった。

#### 3) 相関係数

ランガーやローゼのように、異なる名称で呼ばれている形式であっても、アーチ構造を利用した形式同士の相関係数はかなり高いことが分かる。トラスランガーは、アーチ系橋梁の一種とも考えられるが、トラスの性質も多分に有しており、アーチとトラスのほぼ中間的な力学特性を有している。

今回の検討の範囲では、まだ比較的サンプル数は少ないが、全体的には各形式におけるばらつきは少なく、橋梁形式も領域全体に広く分布しているわけではないことが明らかとなった。



表 3-5 各形式の平均，分散，標準偏差

橋梁形式		平均	分散	標準偏差	橋梁形式		平均	分散	標準偏差
桁橋	<i>t</i>	0.000	0.000000	0.00000	ニールセンローゼ	<i>t</i>	0.150	0.003180	0.05640
	<i>s</i>	0.000	0.000000	0.00000		<i>s</i>	0.000	0.000000	0.00000
	<i>a</i>	0.000	0.000000	0.00000		<i>a</i>	0.842	0.003630	0.06020
	<i>g</i>	1.000	0.000000	0.00000		<i>g</i>	0.008	0.000016	0.00403
トラス	<i>t</i>	1.000	0.000000	0.00000	アーチ	<i>t</i>	0.000	0.000000	0.00000
	<i>s</i>	0.000	0.000000	0.00000		<i>s</i>	0.000	0.000000	0.00000
	<i>a</i>	0.000	0.000000	0.00000		<i>a</i>	0.963	0.000050	0.00707
	<i>g</i>	0.000	0.000000	0.00000		<i>g</i>	0.037	0.000041	0.00636
ランガー	<i>t</i>	0.000	0.000000	0.00000	斜張橋	<i>t</i>	0.739	0.041200	0.20300
	<i>s</i>	0.000	0.000000	0.00000		<i>s</i>	0.000	0.000000	0.00000
	<i>a</i>	0.927	0.001260	0.03540		<i>a</i>	0.000	0.000000	0.00000
	<i>g</i>	0.073	0.001260	0.03540		<i>g</i>	0.261	0.041200	0.20300
トラスドランガー	<i>t</i>	0.511	0.000001	0.00100	吊橋	<i>t</i>	0.000	0.000000	0.00000
	<i>s</i>	0.000	0.000000	0.00000		<i>s</i>	0.988	0.000000	0.00000
	<i>a</i>	0.468	0.000111	0.01050		<i>a</i>	0.000	0.000000	0.00000
	<i>g</i>	0.022	0.000091	0.00951		<i>g</i>	0.012	0.000000	0.00000
ローゼ	<i>t</i>	0.000	0.000000	0.00000					
	<i>s</i>	0.000	0.000000	0.00000					
	<i>a</i>	0.963	0.001010	0.03180					
	<i>g</i>	0.037	0.001010	0.03180					

表 3-6 橋梁形式の相関係数

	桁橋	トラス	ランガー	トラスドランガー	ローゼ	ニールセンローゼ	アーチ	斜張橋	吊橋
桁橋	1.000								
トラス	0.000	1.000							
ランガー	0.073	0.000	1.000						
トラスドランガー	0.022	0.511	0.489	1.000					
ローゼ	0.037	0.000	0.964	0.489	1.000				
ニールセンローゼ	0.008	0.150	0.850	0.626	0.850	1.000			
アーチ	0.037	0.000	0.964	0.489	1.000	0.850	1.000		
斜張橋	0.261	0.739	0.073	0.532	0.037	0.158	0.037	1.000	
吊橋	0.012	0.000	-0.939	-0.480	-0.975	-0.850	-0.975	0.012	1.000

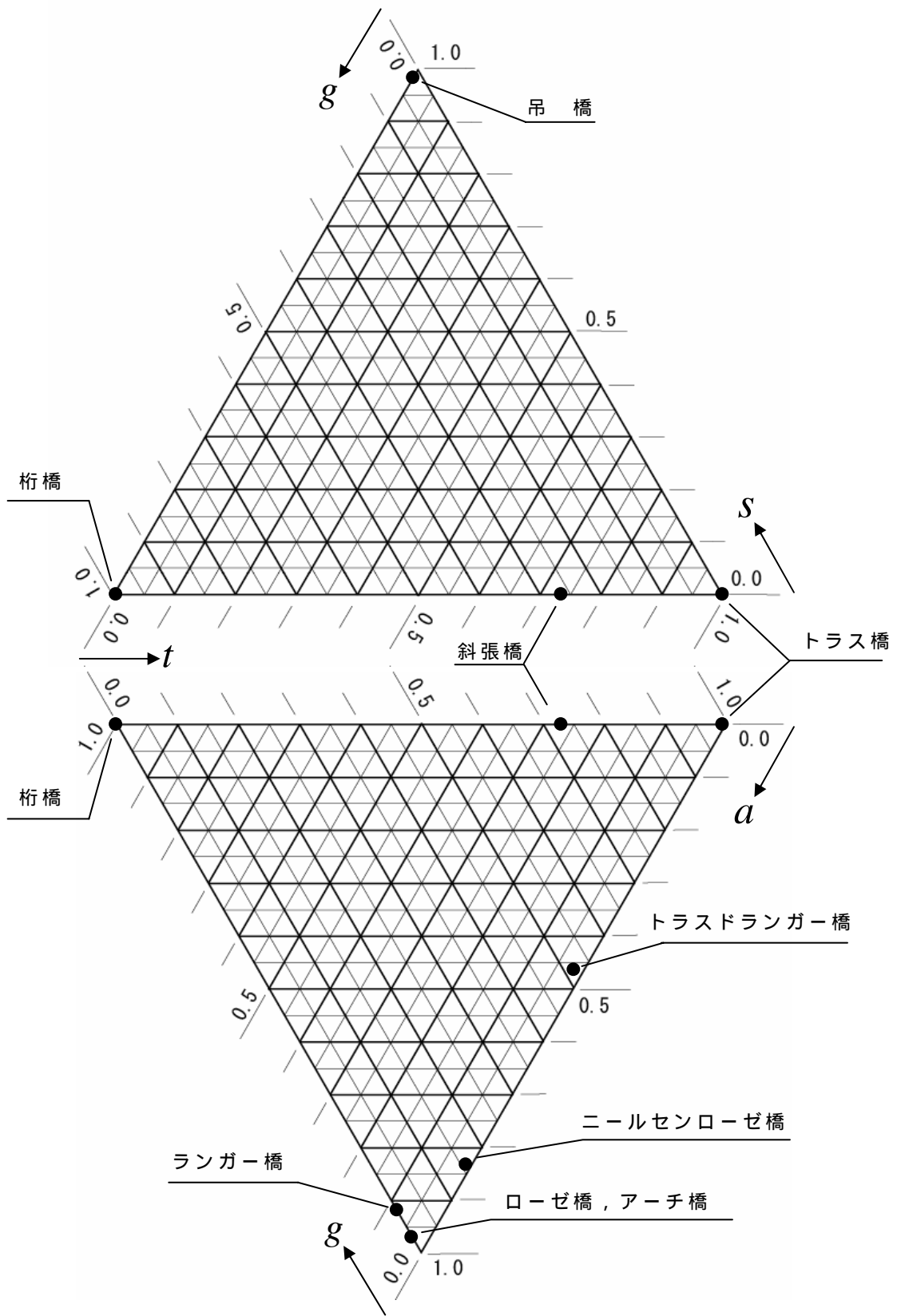


図 3-23 橋梁形式 (実橋サンプル) の配置

### 3-6 空白領域に存在する橋梁

#### 3-6-1 構造形態相関図の空白領域

前節で、既存橋梁形式を構造形態相関図上にプロットした結果、多くの橋梁形式は相関図の周縁部に位置し、中央部付近は空白領域となった(図 3-24)。この理由は、検討したサンプルがいずれも標準的な形式であり、特殊な形態のものが含まれていなかったことによると思われる。ところで、この中央部の空白領域には、3種類の基本橋梁形式(「桁橋、トラス橋、吊橋」または「桁橋、トラス橋、アーチ橋」)の複合形式がプロットされるはずである。ここでは、それらの空白領域に存在するであろう橋梁の典型的なパターンについて、概略のイメージを確認する。

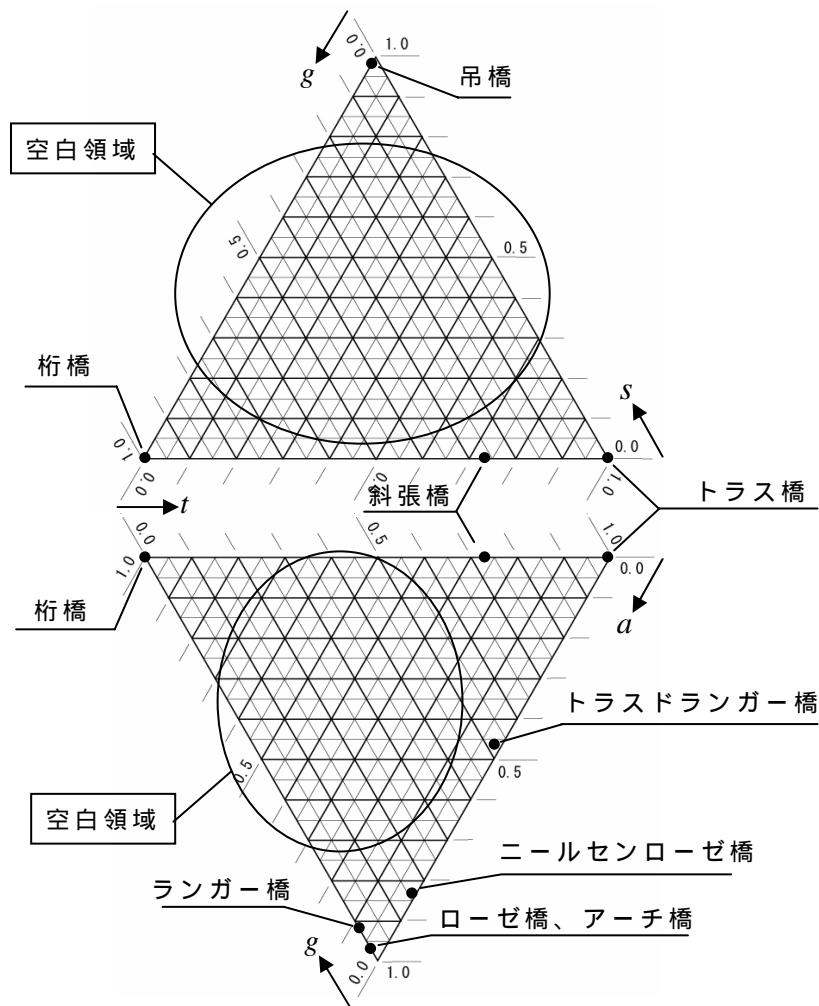


図 3-24 構造形態相関図における空白領域

### 3-6-2 ケーススタディー (1)

構造形態相関図の上側の三角座標について、既存橋梁形式がプロットされなかった空白領域にあると考えられる橋梁デザインのケーススタディーを行った。

図 3-25 は、ケーススタディー (1) の橋梁の座標である。この座標にプロットされる橋梁デザインの事例として、図 3-26 のようなものが考えられる。吊橋でありながらも、多分に桁橋としての性質を有するため、通常の吊橋に比べて桁高が高く、ケーブルのサグは小さい。つまり、桁橋をケーブルで補剛したようなイメージとなっている。さらに、斜材を用いることで、トラス的な性質もあわせ持っている。

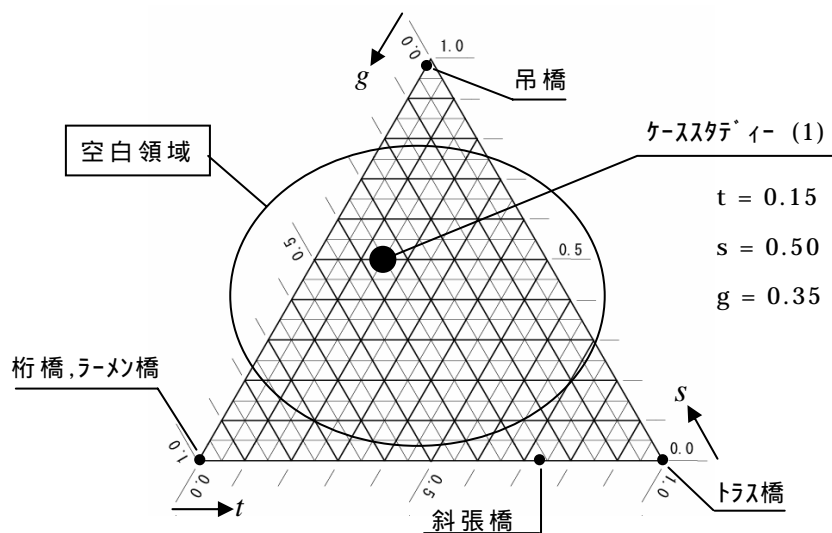


図 3-25 ケーススタディー (1) の座標

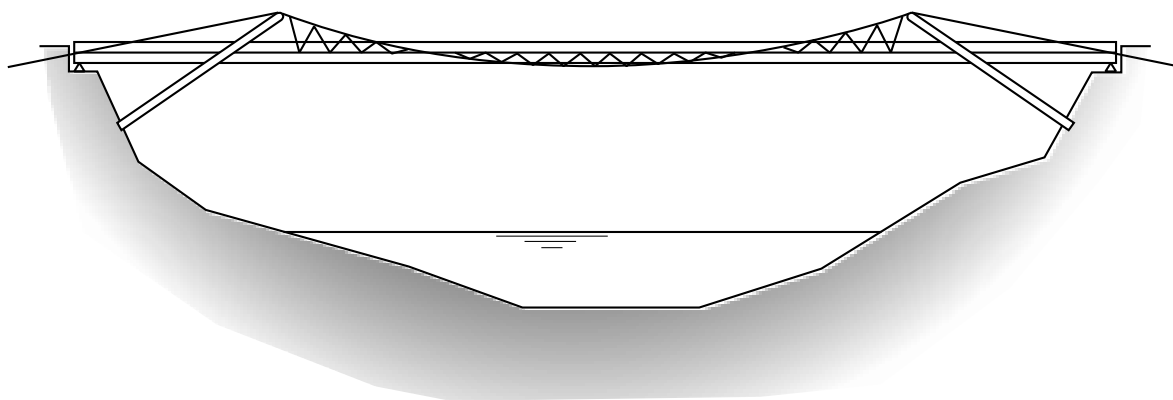


図 3-26 ケーススタディー (1) の側面図

本デザインの構造的な合理性については詳細な検討を要するが、例えば、航路限界や上空の交差物件など、何らかの理由で主構造の全高を低く抑えなければならない場合などには、このようなデザインも合理的となる可能性がある。また、周りの風景との関係で、スレンダーで透過性の高い橋梁が求められるような場合にも、選択肢のひとつになると思われる。しかし、一般的な形式に比べて部材数が多く施工が煩雑になる可能性があること、ケーブルを使用する割には重量をあまり軽減できないことなどの注意点もある。

### 3-6-3 ケーススタディー (2)

構造形態相関図の下側の三角座標について、既存橋梁形式がプロットされなかった空白領域にあると考えられる橋梁デザインのケーススタディーを行った。

図 3-27 は、ケーススタディー(2)の橋梁の座標である。この座標にプロットされる橋梁デザインの事例として、図 3-28 のようなものが考えられる。桁橋をライズの小さな扁平なアーチリブで補剛したようなデザインである。また、アーチリブと主桁はトラスで連結されている。

本デザインも構造的な合理性については詳細な検討を要するが、ケーススタディー(1)と同様、何らかの理由で主構造の全高を低く抑えなければならない場合などには、このようなデザインも合理的となる可能性がある。また、景観的配慮から、強い自己主張を回避しながらも特徴あるデザインとしたいような場合や、アーチリブの上に歩道を設けて橋上を展望スペースとして活用したい場合などにも選択肢のひとつになると思われる。しかし、トラス部分の空間が狭いため、施工面の検討も必要である。

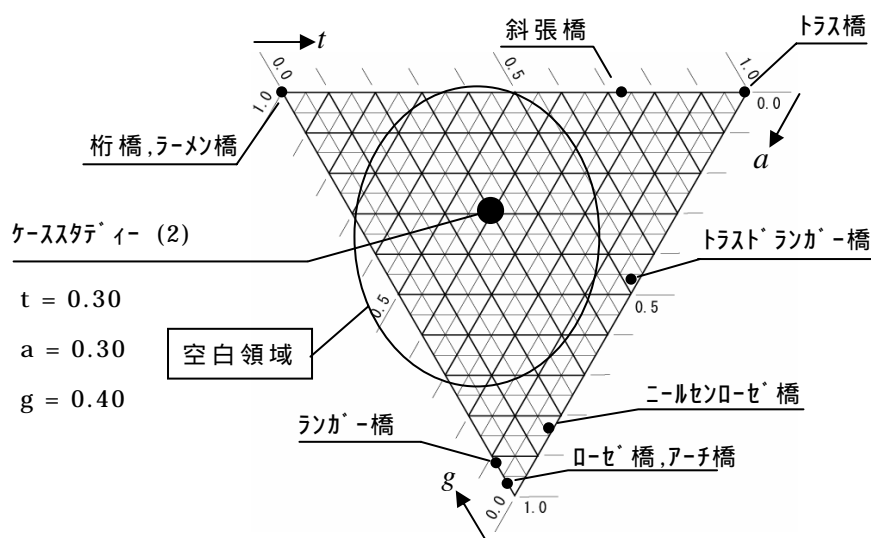


図 3-27 ケーススタディー (2) の座標

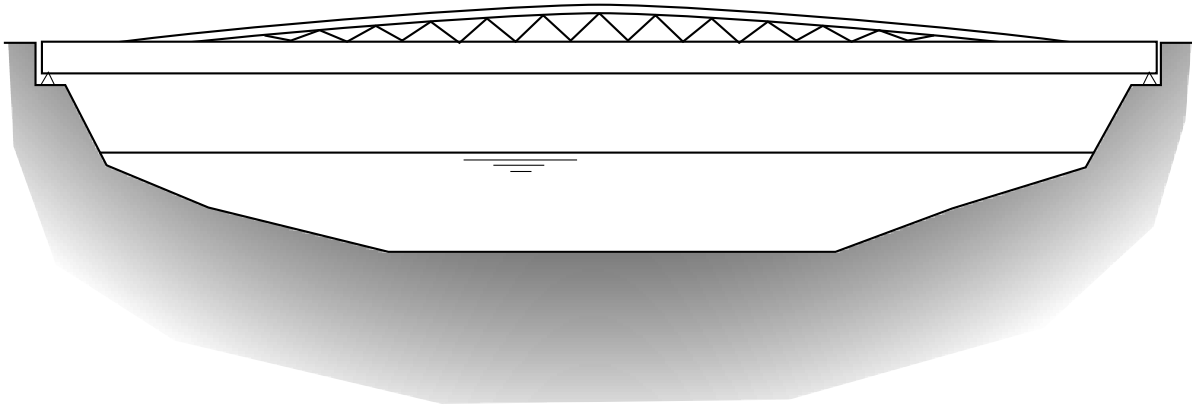


図 3-28 ケーススタディー (2) の側面図

### 3-7 構造形態相関図より考察する橋梁形式の発展史

#### 3-7-1 概説

一般に、技術が萌芽期から発展期、成熟期へと進展するに従って、その技術によって生みだされた製品の外観も同時に変化してゆく。それは技術自体の合理的な発展による変化と、社会が時代に適合する形態や機能を求めたことによる変化とがある。橋梁も、その技術発展の歴史をたどると、技術の発展とともに形態の変化があった。また、健全に成熟した社会では、社会の側からも、公共物としての橋のデザインに期待と要求の眼差しが向けられる。

ところで、構造形態相関図を用いると、橋梁形式の歴史的な変遷についても一定の理解を得ることができる。本節では定量化は行わないが、構造形態相関図を用いて、橋梁技術の発展と形態の変遷について考察し、各時代の橋梁形式を構造形態相関図の中に位置づけることを試みる。

このように、橋梁形式を力学的あるいは形態的な観点からだけでなく、歴史的な経緯も踏まえて、しかも統一的な観点から理解するということは、専門技術者においてすら個別的で断片的になりがちな橋梁技術の歴史理解に対して、一つの統一的な視点を提供し得るという点においても有意なものと考えられる。なお、本論では、「近世以前」、「近代」、「現代」という3段階の時代区分を用いる。これは、橋梁の技術発展において、特徴的な変化があったと思われる時代を大まかに区分したものであるが、具体的には、以下のような時代を表している。

## 近世以前

経験則を中心とした橋梁建設の時代。人類史の始まりから，古代，中世，近世を通じ，イギリスで産業革命がおこる 18 世紀後半よりも前の時代まで。設計理論では，17 世紀末頃から，ニュートン力学（1687）やフックの法則（1680），梁理論（1705）など，力学の基礎が発明された頃までをさす。

## 近代

鉄の大量生産やコンクリート材料の開発，また，力学理論の発展等により，鉄製や鋼製，鉄筋コンクリート製の橋梁が多く建設されるようになった時代。イギリスで産業革命がおこった 18 世紀後半に始まり，コンピュータによる高次不静定構造の解析が実務上困難でなくなってきた 1970 年頃よりも前の時代まで。この時代に，橋梁のスパンは飛躍的に増大した。

## 現代

コンピュータの発達により高次不静定構造の解析が実務上困難でなくなってきた 1970 年頃から現在にいたるまでの時代。

### 3-7-2 橋梁の技術と形式の発展略史

#### (a) 近世以前の橋梁形式

近世以前の橋梁は，基本的に経験則を中心として発展し，次第に幾何学等による数学的根拠が与えられるようになってきたが，橋梁としての安全性を保証するには自ずと限界があり，過去の構造物の寸法比率を参考としやすい組石造を除いては，この時代に橋梁が大スパン化することはなかった。

そもそも橋梁の起源は，人類史を相当遡るものと考えられるが，その原初的形態は倒木を渡しただけの桁橋や，蔦などの植物で編んだロープによる吊橋が主であったと考えられる。吊橋は近代になって橋梁史上に華々しく登場するが，アーチの技術を持たないピグミーの部族などが植物で編んだロープで吊橋を架けている<sup>6)</sup>ことなどからも，その起源はアーチよりも古いものと考えられている<sup>7)</sup>。中国においては，鉄鎖を使用した吊橋が紀元前から架けられていたとも言われている<sup>8)</sup>が，材料の品質や強度の面からも主要な構造形式にはなり得なかった。

アーチの起源は諸説あるようだが，少なくともオリエントでは，紀元前 9 世紀にはアーチを駆使して構造物を数多く建造していたと考えられている。その後，エトルリア人を通してアーチの技術がローマ人に伝えられ，ローマから各地へと広がり，ヨーロッパ全域に石造文化を開花させることとなった<sup>9)</sup>。一方で，中国においても紀元前から独自のアーチ技術が発達していたと伝えられているが，橋梁への利用は，文献上，

紀元後のことである<sup>10)</sup>。

桁橋は、木や石などの自然材料をそのまま架け渡すため、一度に大きなスパンを架けることはできず、比較的小スパンの橋が何連も連続して架けられていた。

トラス橋の起源は、木材を縄で縛ってトラス構造を構成することから始まったと考えられるが、橋梁としてはイタリアの Andrea Palladio (1518-80) が数種の木造トラス橋のデザインを残しており、実際にも多く架けられたと伝えられている<sup>11)</sup>。しかし、木材では部材寸法が限られているため、スパンが大きくなってくるとアーチ状の部材と併用して用いられた。

## (b) 近代の橋梁形式

### 1) 材料の発展<sup>12), 13)</sup>

材料としての鉄は、BC1000 頃にヒッタイト族が鉄器を生産していたことに始まるとされるが、構造用材料として本格的に鉄が使用されるようになったのは、18 世紀、それまでの木炭や石炭に代わり、コークスを燃料とするコークス高炉法が開発されてからである。それにより、1779 年、イギリスのコールブルックデールに世界初の鉄橋（鑄鉄橋）となるアイアンブリッジが建設され、それ以降、18 世紀末までにヨーロッパ各地で約 30 橋もの鉄橋が建設された。

しかし、鉄道の建設とともに鑄鉄の脆さが顕在化するにしたがって、19 世紀中頃には、橋梁の構造材料は鑄鉄から錬鉄へとほぼ完全に移行した。錬鉄を用いた橋梁として、イギリスのブリタニア橋（1850）やテイ橋（1878、完成翌年に落橋）等がある。また、パリのエッフェル塔（1889）も錬鉄製である。その後、転炉法（1856）や平炉法（1867）の発明によって、それまでの錬鉄の生産性を大幅に上回る鋼の大量生産が可能となり、構造材料の主役は錬鉄から鋼へと移っていった。鋼を使用した最初の橋梁は、1874 年に架設されたアメリカのイーズ橋である。その後、ブルックリン橋（アメリカ、1883）、新テイ橋（イギリス、1887）、フォース鉄道橋（イギリス、1890）など、多数の橋梁が鋼により建設された。

20 世紀に入り、ケーブルの高張力化が更なるスパンの長大化を可能とし、また、大板や厚板の製造技術は、鋼橋の構造をよりシンプルなものとするを可能とした。

一方、コンクリートに関しては、1824 年にイギリスのアスピジン（Aspdin）がポルトランドセメントの特許を取得したことを契機として、セメントの工業化が始まった。また、鉄筋コンクリート（以下、RC）は、1867 年のモニエ（Monier）による特許取得に始まり、1873 年にコンクリート製アーチ橋が初めて建設された。その後、1892 年にエネビク（Hennebique）による RC 桁の特許取得、1898 年の T 桁の提案などによって、その後、RC 橋が盛んに建設されるようになった。プレストレストコンクリート（以下、PC）は、1888 年、ドイツのデーリング（Doering）とアメリカのジャクソ



ン ( Jackson ) が別々に特許を取得したことに始まるが、実用化されるようになったのは、コンクリートのクリープ、乾燥収縮によるプレストレスの減少が理論的に考察され高強度のコンクリートが用いられるようになった 1940 年頃からである。1950 年代後半まで、PC 橋は支間 40m 程度以下の単純桁に使用されていたが、1960 年代には現場打ちの連続箱桁やプレキャスト桁等が建設されるようになった。

## 2) 力学と設計理論の発展<sup>14)</sup>

力学と設計理論の発展は、材料の発展とともに、近代橋梁技術にとって非常に重要な役割を果たしている。その始まりは、17 世紀後半のフックの法則 ( 1678 ) やニュートン力学 ( 1687 ) とされるが、構造物への応用としては、18 世紀になってから、梁理論 ( 1705 ) や長柱の座屈理論 ( 1757 )、ヤング率 ( 1807 ) などの研究が進んだことによるところが大きい。また、フランスでは、技術学校として、エコール・デ・ポン・エ・ショセ ( 1747 ) や、エコール・ポリテクニク ( 1784 ) が設立され、構造解析理論の研究・整備に重要な役割を果たした。

19 世紀には、アーチの弾性解法、骨組解析理論、連続梁理論、不静定解法、トラス理論などが整備され、今日の応用力学の主要な部分が形づくられた。同時に、吊橋理論は、度々の事故を教訓としながら、無補剛吊橋理論 ( 1823 ) から補剛吊橋理論 ( 1877 ) へ、また、弾性理論 ( 1888 ) から弾性分配理論 ( たわみ理論、1901 ) へと発展していった。また、トラス橋はアメリカを中心に様々な形式が開発され、アーチ橋は石造アーチ橋から骨組みのアーチ橋へと大きな変化を遂げた。また、形式もローゼやランガーなど幾つかの種類が登場した。

20 世紀には、タコマ・ナローズ橋の風による落橋 ( アメリカ、1940 ) を契機として、動的耐風設計の重要性が認識され、その後、タコマ・ナローズ橋の教訓が長大橋に生かされることとなった。セバーン橋 ( イギリス、1966 ) においては、耐風対策として補剛桁に流線型箱桁が採用され、桁の断面設計にも影響を与えた。また、桁橋は格子桁や曲線桁、連続桁へと発展し、トラス橋は格点構造がピン構造から剛接合へと変化した。また、コンクリート橋においても、材料の物理・化学的性質が明らかになるにつれて、設計理論も整備された。特に PC 橋の設計は、施工法や施工順序に影響されやすいため、施工法の開発とともに設計法も発展していった。

## (c) 現代の橋梁形式

第 2 次世界大戦が終結する頃から、コンピュータは飛躍的に発展を続け、1970 年頃には構造解析用のツールとしても実用化されるまでになった。そのことによって、これまで困難であった複雑な構造計算や高次不静定構造の解析が可能となり、橋梁設計の可能性は大きく広がった。この頃より、斜張橋やニールセンローゼ橋が数多く建設

され始め、さらに1990年代頃からはエクストラロード橋も多く建設され始めている。

また、「構造表現主義」と呼ばれる、構造のもつ造形的可能性を追求するようなデザインも多く出現し始め、非対称形の構造や曲線を多用した構造、複雑なケーブル配置やネットを用いた歩道橋など、新しい形態の橋梁が生まれている。

### 3-7-3 構造形態相関図より考察する橋梁の形式発展史

#### (a) 近世以前の橋梁形式

近世以前の橋梁を構造形態相関図に表すと、基本となる4つの橋梁形式（桁橋、トラス橋、アーチ橋、吊橋）が主であり、これら以外の中間的な橋梁形式はほとんど見受けられない。ただし、木造トラス橋をアーチ部材で補剛した例があり、これらはトラス橋とアーチ橋の中間的な形式である（図3-29(1)）。この時代の橋梁形式は、ほとんどが三角座標の各頂点に位置しているといえる。

#### (b) 近代の橋梁形式

近代になると、材料や設計理論の発展に伴って、様々な橋梁形式が生まれてくる。図3-29(2)は、近代の橋梁形式を構造形態相関図に表したものである。

吊橋では、桁にも剛性を付与する「補剛吊橋」の考え方が表れ、その後の主流となる。補剛吊橋の補剛桁はブルックリン橋のように当初トラス形式が多かったが、その後、ガーダー形式のものも建設されるようになった。

アーチ橋は、当初は固定アーチや2ヒンジまたは3ヒンジアーチが主流であったが、スパンドレルに斜材を配したスパンドレルブレースドアーチも建設された。その後、アーチ部材と桁部材を分離してそれぞれに役割を持たせるランガー橋やローゼ橋などが考案され、さらに、アーチと吊橋の折衷案として、レンズ橋やレンズトラス橋が考案された。

トラス橋は、アメリカ開拓時代に木造トラス橋の改良版として木鉄混合トラス橋が多く建設され、今日にも残る主要なトラス形式がこのとき考案された<sup>15)</sup>。

桁橋は、鉄の大板が貴重な時代であったため、プレートガーダー形式は当初あまり建設されなかったが、中にはブリタニア橋など巨大な箱桁橋（当初、吊橋の補剛桁として計画）も建設された<sup>16)</sup>。また、桁橋ではないが、ビームシステム的一种として、ラーメン橋やフィーレンディール橋なども考案された。

#### (c) 現代の橋梁形式

コンピュータの発達によって高次不静定構造の設計が可能となったことにより、斜張橋やニールセンローゼ橋など、複雑な解析を必要とするような橋梁形式が多く建設

されるようになった。図 3-29(3)は、現代の橋梁形式を、構造形態相関図の三角座標表示にて表したものである。

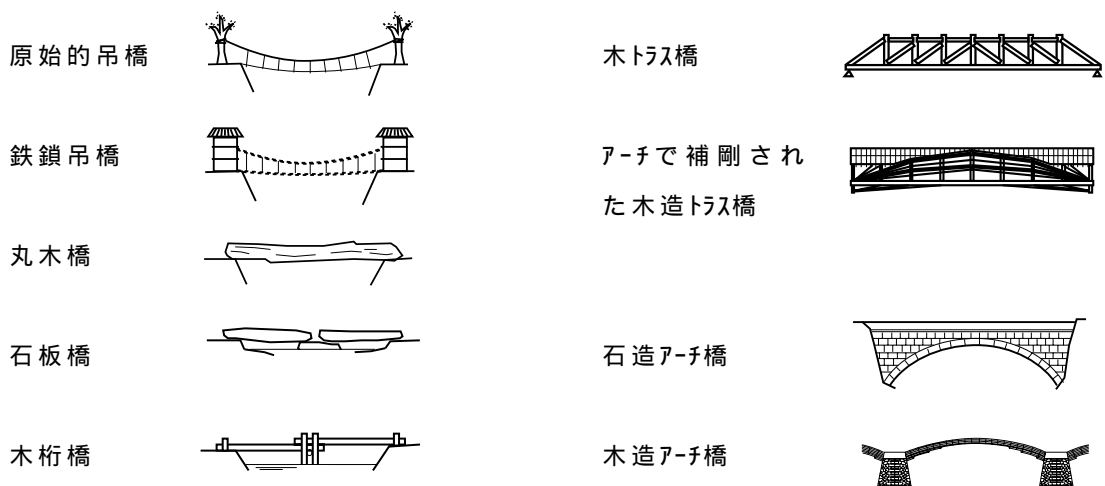
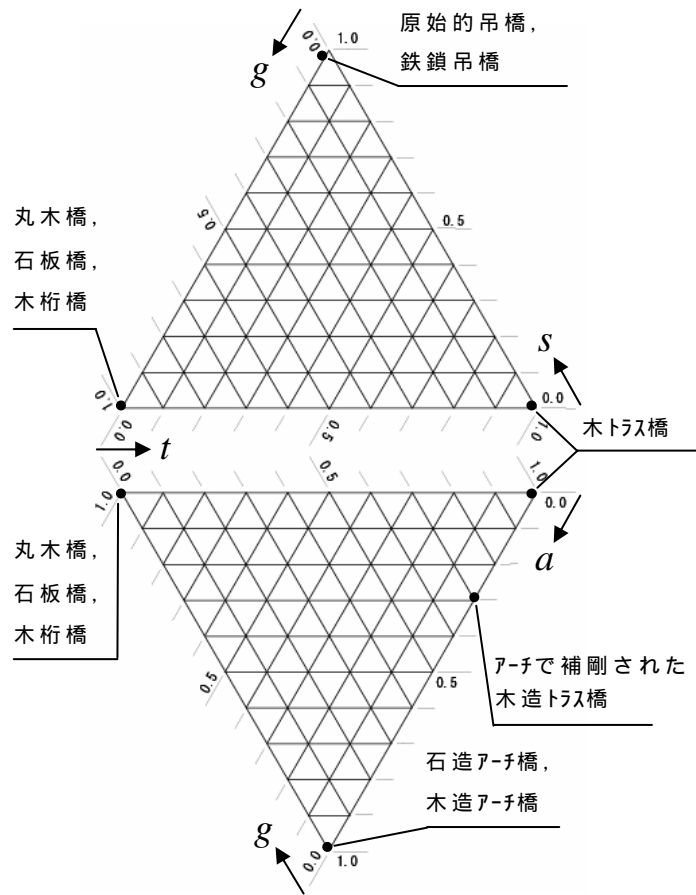


図 3-29(1) 構造形態相関図による橋梁形式の発展（近世以前）

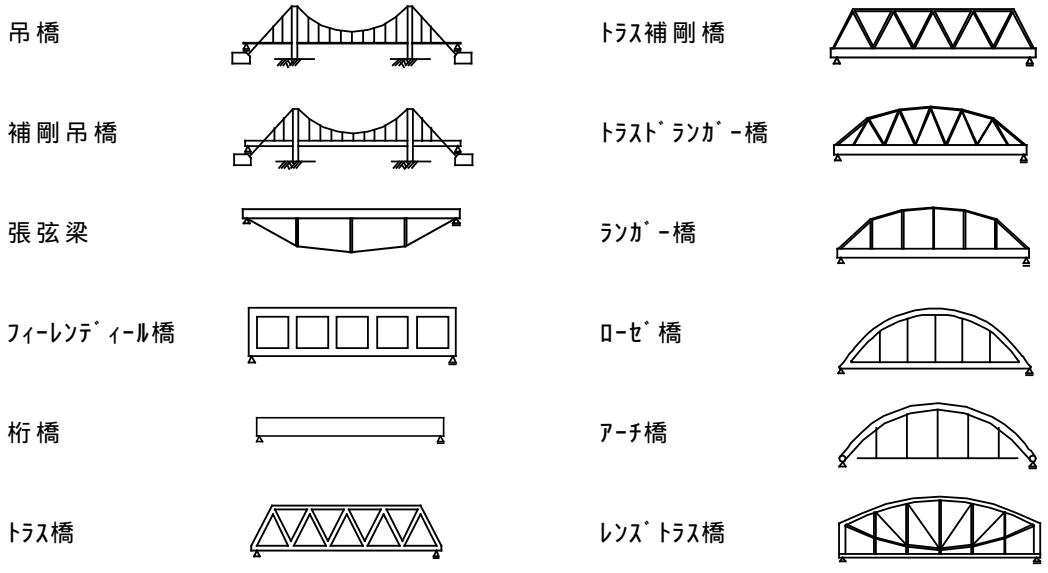
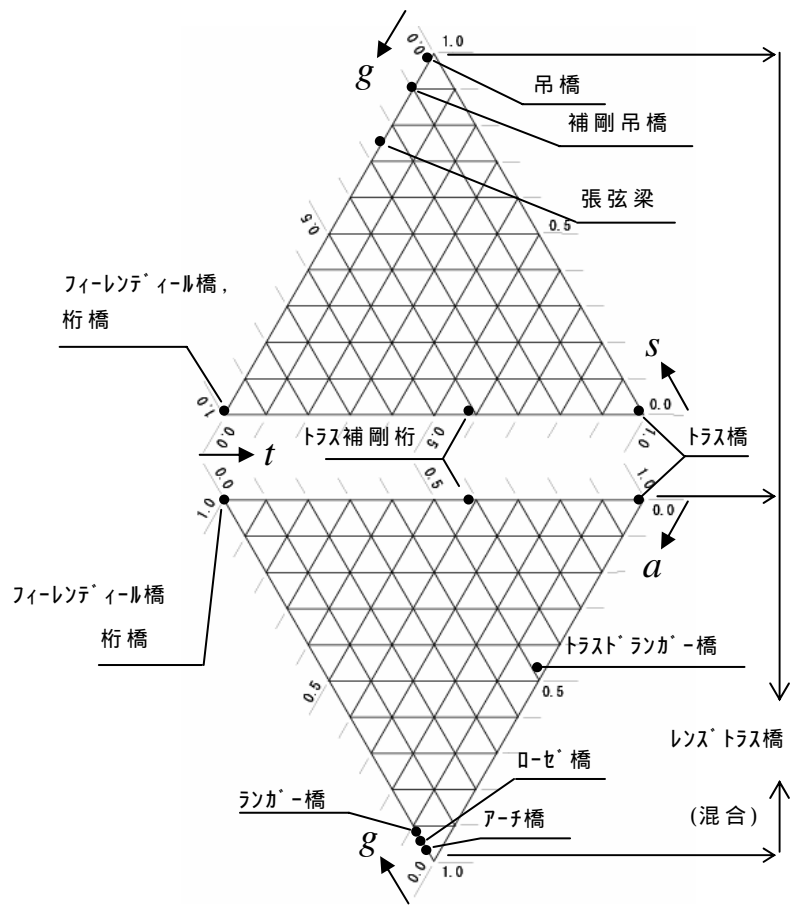


図 3-29(2) 構造形態相関図による橋梁形式の発展 (近代)

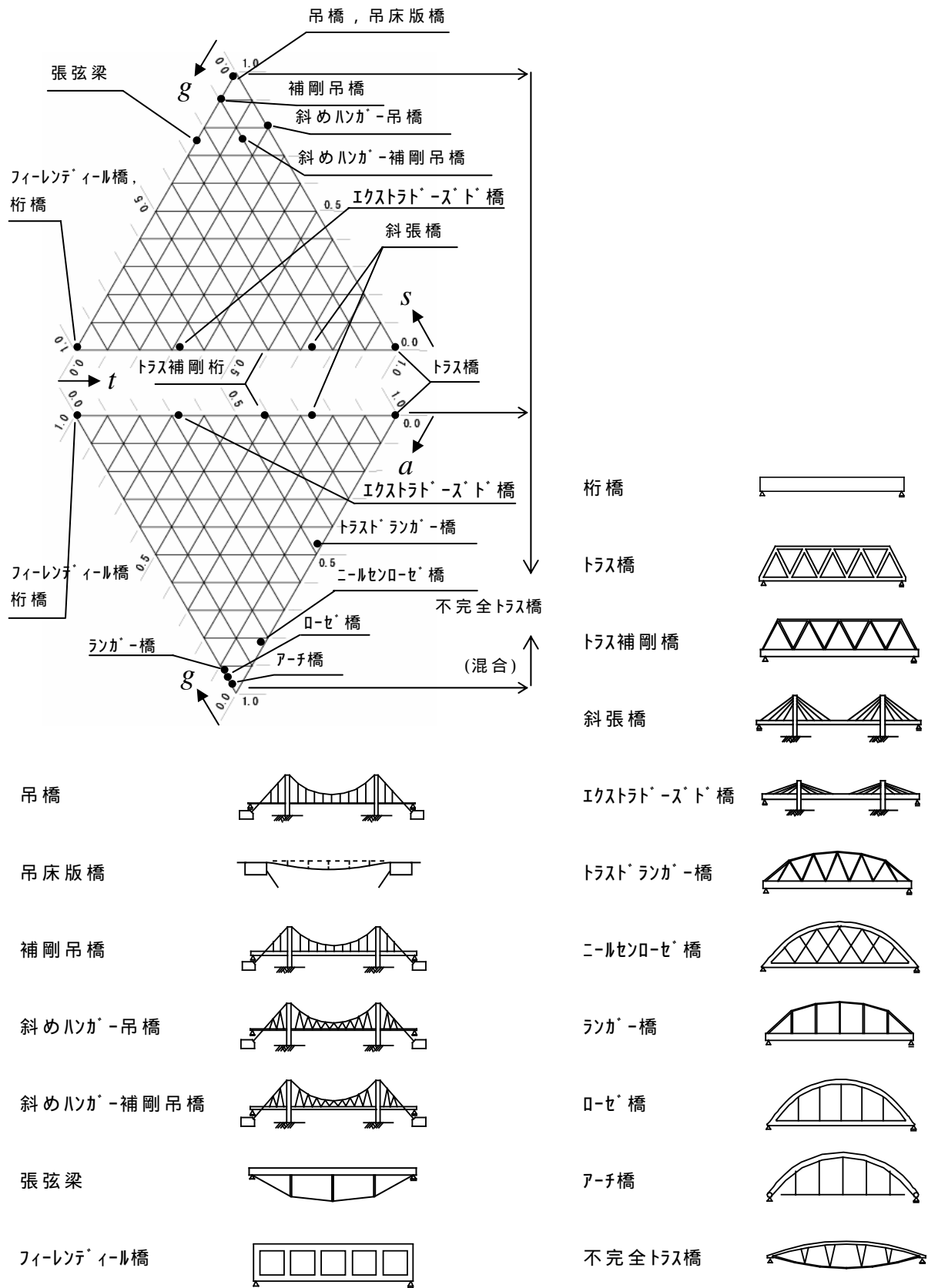


図 3-29(3) 構造形態相関図による橋梁形式の発展 (現代)

### 3-7-4 橋梁形式の発展と変遷

以上，橋梁技術と橋梁形式の発展史について概観してきたが，橋梁形式の発展や変遷に着目しながら，その流れを概略的に示すと図 3-30 のようになる．近世末期に至るまで，橋梁は主に基本的な 4 種類の形式のみであったが，技術の発展とともに数が増加していった様子が理解される．そして現代では，様々な複合形式が考案され，その構造，形態，ともに多様性を増している．

構造形態相関図では，トラス橋の個々の形式（ワーレントラス，プラットトラス，ハウトラス等）の違いや，桁橋とラーメン橋，フィーレンディール橋の違いなど，部分的な形式の差異について言及するには限界があるが，橋梁形式の発展や変遷の大まかな流れとして，4 つの基本的な橋梁形式から様々な分化を経て，それらの混合形式へと発展してきた歴史を，大略ながら把握することができる．

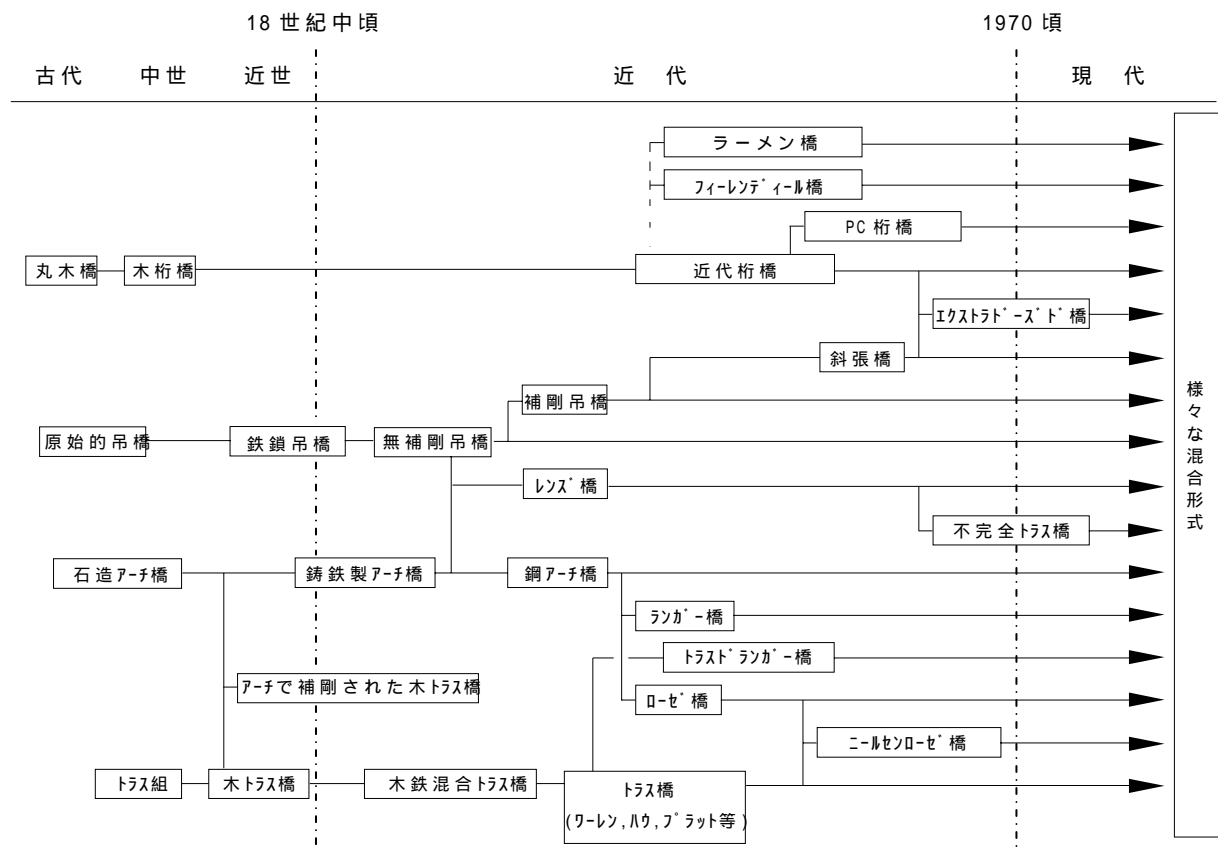


図 3-30 橋梁形式の発展と変遷

## 参考文献

- 1) 久保田善明, 岸本貴博: 対称性を考慮した橋梁構造の力学的相関性, 構造工学論文集 Vol.54A, pp.162-170, 2008
- 2) 久保田善明, 岸本貴博, 中村良夫: 橋梁形式の力学的相関性の定量化手法, 構造工学論文集 Vol.51A, pp.429-435, 2005
- 3) 日本橋梁建設協会: 『橋梁年鑑 平成 13 年版』, 2001
- 4) 日本橋梁建設協会: 『橋梁年鑑 平成 14 年版』, 2002
- 5) 日本橋梁建設協会: 『橋梁年鑑 平成 15 年版』, 2003
- 6) 川田忠樹: 『近代吊橋の歴史 経済性と剛性の相克』, p.4-9, 建設図書, 2002
- 7) 山本宏: 『橋の歴史』, p.124, 森北出版, 1991
- 8) 山本宏: 『橋の歴史』, p.189, 森北出版, 1991
- 9) 山本宏: 『橋の歴史』, pp.125-126, 森北出版, 1991
- 10) 山本宏: 『橋の歴史』, pp.125-186, 森北出版, 1991
- 11) S.P.ティモシェンコ(最上武雄監訳): 『材料力学史』, p.164, 鹿島出版会, 1974
- 12) 日本鋼構造協会: 『鋼構造技術総覧[土木編]』, pp.1-31, 技報堂, 1998
- 13) 多田宏行(編著): 『橋梁技術の変遷』, pp.129-141, pp.150-152, 鹿島出版会, 2000
- 14) 日本鋼構造協会: 『鋼構造技術総覧[土木編]』, pp.9-10, 技報堂, 1998
- 15) 成瀬輝男: アメリカでの鉄製トラス橋の誕生と発展, 橋梁と基礎 93-8, pp.7-17, 1993
- 16) David P. Billington: The Tower and the Bridge, pp.54-59, Princeton University Press, New Jersey, 1985 (伊藤學・杉山和雄監訳: 『塔と橋』, pp.67-71, 鹿島出版会, 2001)





## 第 4 章 橋梁形式以外の構造システム<sup>1)</sup>

### 4-1 概説

前章では，橋梁形式（スパンを渡るための構造システム）について，それら相互の関係性を構造形態相関図に表現することを試みた．本章では，他の構造システムにも同様の考え方を適用することによって，橋梁という立体構造を多面的に理解することを目的とする．本章では「水平方向の構造システム」，「荷重分配システム」，「床組から主構への荷重伝達システム」について，構造形態相関図を用いて考察する．

なお，本章で述べる構造システムは，実橋の詳細なデータの入手が困難であること，また，定量化することよりも互いの位置づけや関係性を概念的に把握することに本質的な重要性があることから，前章（3-5，3-6）のような定量化は行わない．

### 4-2 水平方向の構造システム

#### 4-2-1 水平方向の構造システムの構造形態相関図

風や地震によって橋梁に作用する水平力に対する抵抗システムを考える．風荷重は橋梁の側面方向への投影面積に対して，地震荷重は質量の分布に対して作用するため，橋梁上部工にとって，水平力は多くの場合，分布荷重として作用する．そのため，構造システムにはウェブシステムや斜材システムだけでなく，サスペンションシステムやアーチシステムにも高い合理性が期待できる．図 4-1 に，水平方向の構造システムの構造形態相関図を示す．なお，図 4-1 には，主な構造システムのみを示しているが，構造形態相関図の本来の意味から，当然，これらの他にも様々な構造システムが可能性としてはあり得る．

#### 4-2-2 水平方向の構造システム

##### (a) 耐風索

耐風索は，小規模の人道用吊橋など，全体の剛性が低く風による振動や変形が過大となりやすい橋梁に対して，水平方向の剛性を高めるために設置されることが多いが，将来の超長大橋の計画案の中にも，耐風索の設置が提案されたものもある（図 4-2(1)-a）．

(b) 吊橋ケーブルシステムの横剛性

一般的な長大吊橋では，耐風索を設置せずに，補剛桁が水平方向に変位しようとする際の，主ケーブルとハンガーロープで構成されるケーブル面が傾斜することにより生じる復元力にその効果を期待している．ロンドンのミレニアム橋のように，最初からケーブル面が傾斜している場合には，より大きな効果を生む（図 4-2(1)-b））．

(c) 両端固定された曲線（弧状）橋

平面線形が弧状の曲線桁橋において両桁端の水平変位を拘束した場合，水平力に対してアーチ効果またはサスペンション効果を発揮する（図 4-2(2)-c））．

(d) ラーメン式上・下支材

曲げ剛性を有するアーチリブをもつローゼ橋などにおいて，各主構を横支材で剛に連結すると，水平方向のフィーレンディール構造として水平力に抵抗することができる．上支材，下支材のいずれにも適用可能である（図 4-2(2)-d））．

(e) 主桁の横剛性

箱桁橋など主桁に十分な横剛性がある場合や，床版に十分な横剛性を期待できる場合，それらに水平力への抵抗機能をもたせることができる（図 4-2(2)-e））．

(f) 上・下横構

アーチリブに曲げ剛性をもたないランガー橋や 2 主構以上のトラス橋，多主 I 桁橋などにおいて，各主構または主桁をトラス部材で連結することによって水平方向の剛性を高めることができる（図 4-2(2)-f））．

(g) 斜張耐風索

耐風索と同様，桁の剛性が低く風による振動や変形が過大となりやすい橋梁に対して，斜張形式のケーブルシステムを設置することによって水平方向の剛性を高めることができる（図 4-2(2)-g））．

(h) バスケットハンドル式アーチリブ

アーチリブを面外方向に傾斜させることで水平力への抵抗性を高めることができる（図 4-2(2)-h））．

(i) アーチ式横構

水平方向にアーチやサスペンション構造を構成することで水平力への抵抗性を高め

ることができる（図 4-2(2)-i））。

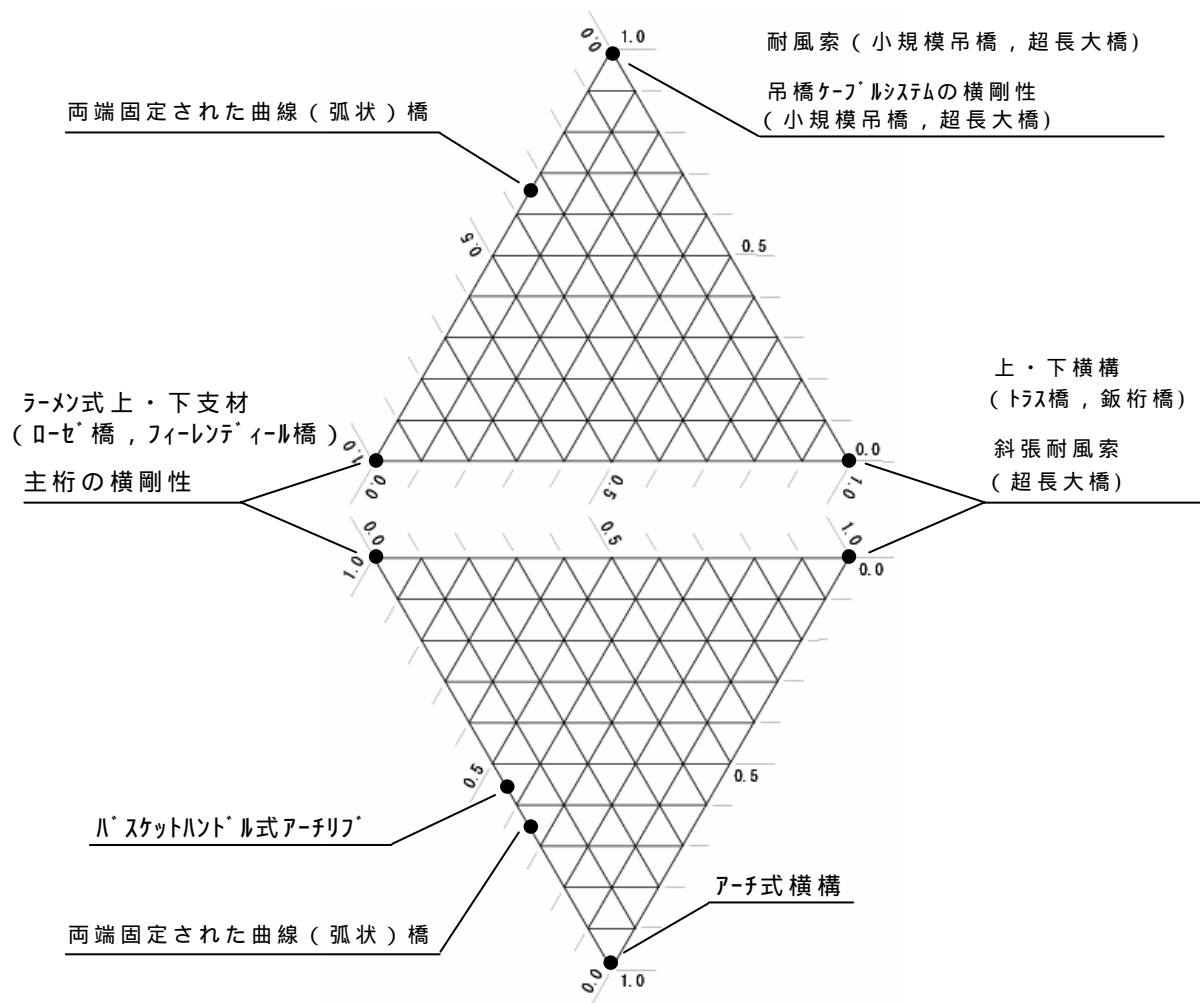
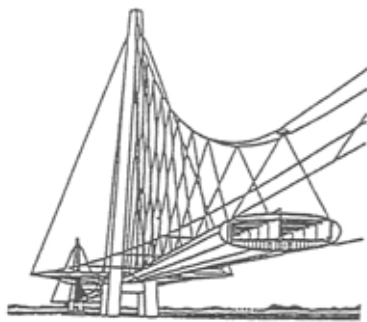


図 4-1 水平方向の構造システムの構造形態相関図



a) 耐風索

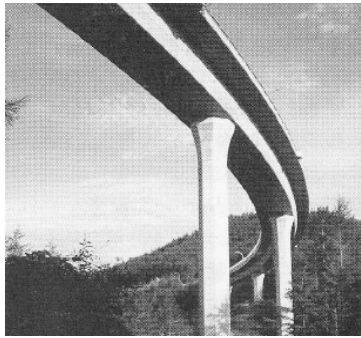
（COWI によるシブツル海峡の超長大吊橋案<sup>2)</sup>）



b) 吊橋ケーブルシステムの横剛性

（ミレニアム橋）

図 4-2(1) 水平方向の構造システム



c) 両端固定された曲線（弧状）橋  
（横向大橋<sup>3)</sup>）



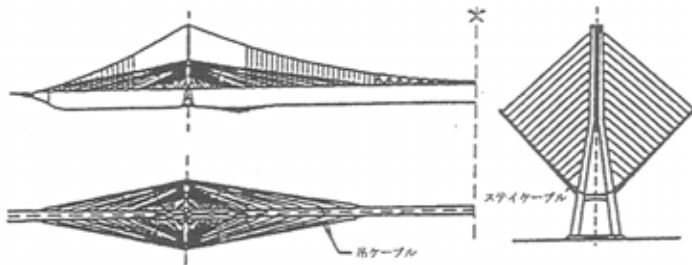
d) ラーメン式上・下支材  
（ライツ・ヘル運河橋<sup>4)</sup>）



e) 主桁の横剛性  
（ウァイル・フォルト橋<sup>5)</sup>）



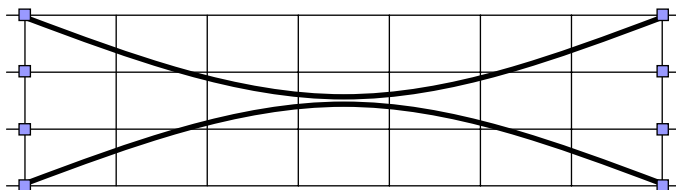
f) 上・下横構  
（利根川橋<sup>6)</sup>）



g) 斜張耐風索  
（吊橋と斜張橋の複合形式の計画案<sup>7)</sup>）



h) バケットハンドル式アーチリブ  
（利根川橋<sup>8)</sup>）



i) アーチ式横構（平面図イメージ）

図 4-2(2) 水平方向の構造システム

### 4-3 荷重分配システム

#### 4-3-1 荷重分配システムの構造形態相関図

複数の主桁を有する橋梁において、活荷重を各主桁に分配するための構造システムを考える。荷重分配は活荷重を複数の桁に分配するのが目的であるため、集中荷重や偏載荷重に対して抵抗性の劣るサスペンションシステムやアーチシステムは不利である。一般的には、ウェブシステムや斜材システムが合理的となる。図 4-3 に、荷重分配システムの構造形態相関図を示す。

#### 4-3-2 荷重分配システム

##### (a) フルウェブ構造

フルウェブ式の横桁による荷重分配システム。同じ桁高で比較した場合、一般的にトラス式よりも剛性が高く、荷重分配効果も高い(図 4-4-a))。

##### (b) トラス構造

対傾構に荷重分配機能をもたせたシステム。形鋼が使用できることや鋼重を軽減できるという利点がある(図 4-4-b))。

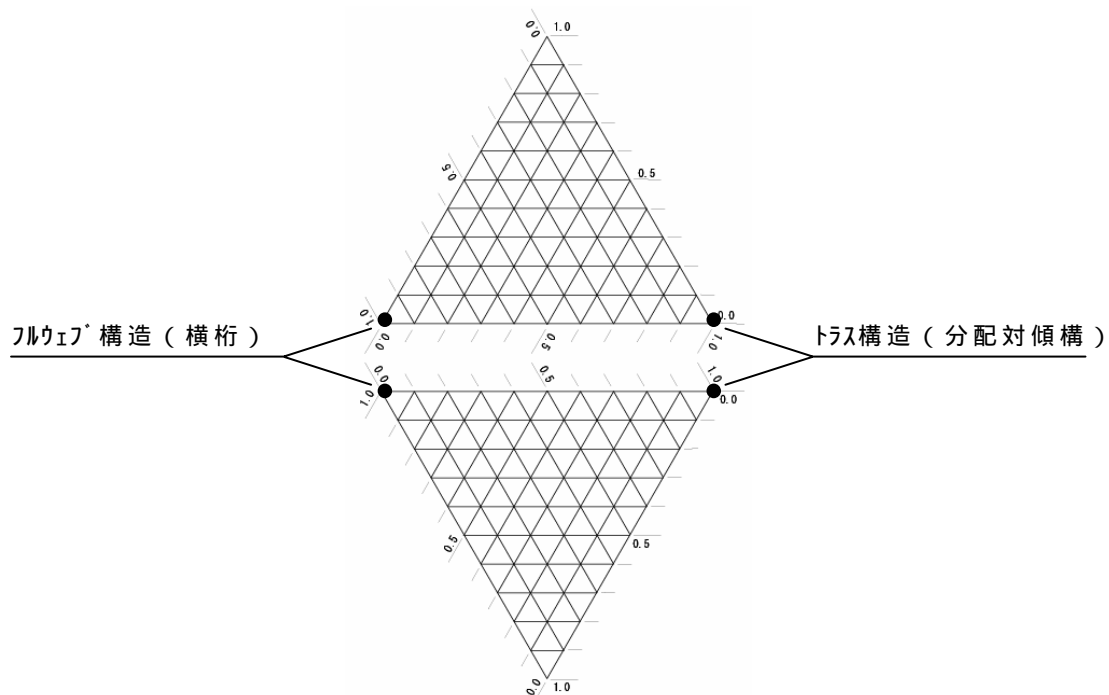


図 4-3 荷重分配システムの構造形態相関図

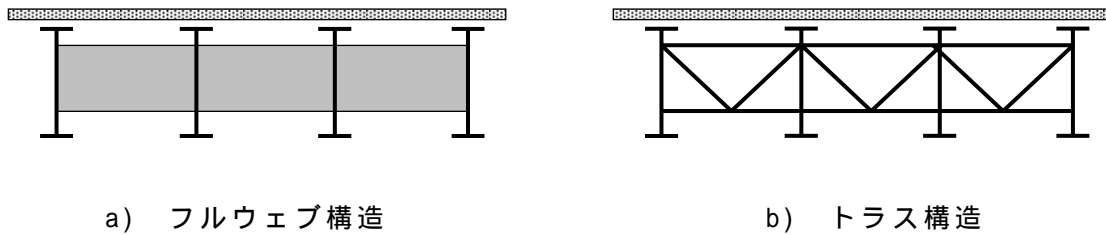


図 4-4 荷重分配システム

#### 4-4 床組から主構への荷重伝達システム

##### 4-4-1 床組から主構への荷重伝達システムの構造形態相関図

床組の荷重を主構に伝達するための構造システムを考える。前項の「荷重分配システム」でも扱ったフルウェブ構造やトラス構造の横桁は、「荷重分配システム」の役割も果たすが、ここでは期待する機能が異なるため別のシステムとして扱う。図 4-5 に、床組から主構への荷重伝達システムの構造形態相関図を示す。なお、図 4-5 には、主な構造システムのみを示しているが、構造形態相関図の本来の意味から、当然、これらの他にも様々な構造システムが可能性としてはあり得る。

##### 4-4-2 床組から主構への荷重伝達システム

###### (a) 吊構造

一般的な吊橋では、主ケーブルから下げられたハンガーロープに補剛桁が吊られているが、ネット橋の場合、主ケーブルはネットの縁端に位置しており、デッキの荷重はネットを介して縁端の主ケーブルにまで伝達される（図 4-6-a）。

###### (b) フルウェブ構造

フルウェブ式の横桁で主構に荷重を伝達するシステム（図 4-6-b）。

###### (c) トラス構造

トラス式の横桁で主構に荷重を伝達するシステム（図 4-6-c）。

###### (d) アーチ構造

横桁に相当する部材をアーチ状の部材に置き換えて、アーチの両端に生じる水平反

力を主構で受けるシステム（図 4-6-d, e）.

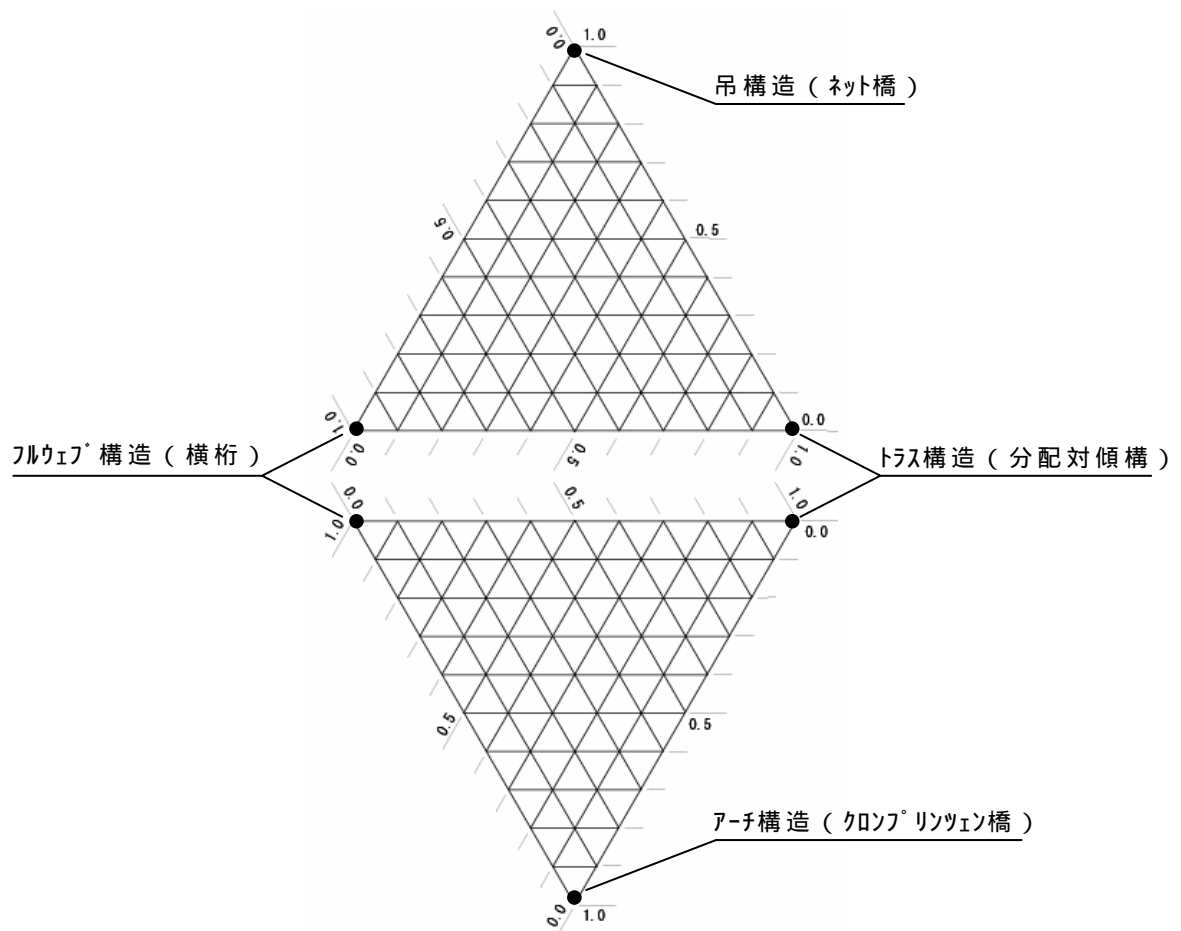
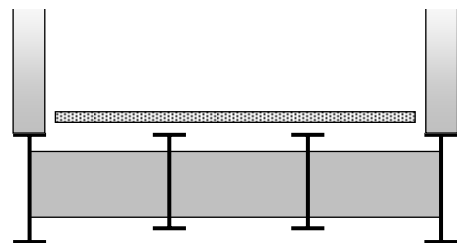


図 4-5 床組から主構への荷重伝達システムの構造形態相関図

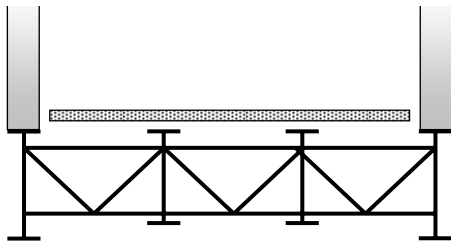


a) 吊構造 (ネット橋)



b) フルウェブ構造

図 4-6(1) 床組から主構への荷重伝達システム



c) トラス構造



d) アーチ構造（+フルウィフ構造）  
（クロンツェン橋）



e) クロンプリンツェン橋の外観

図 4-6(2) 床組から主構への荷重分配システム

#### 参考文献

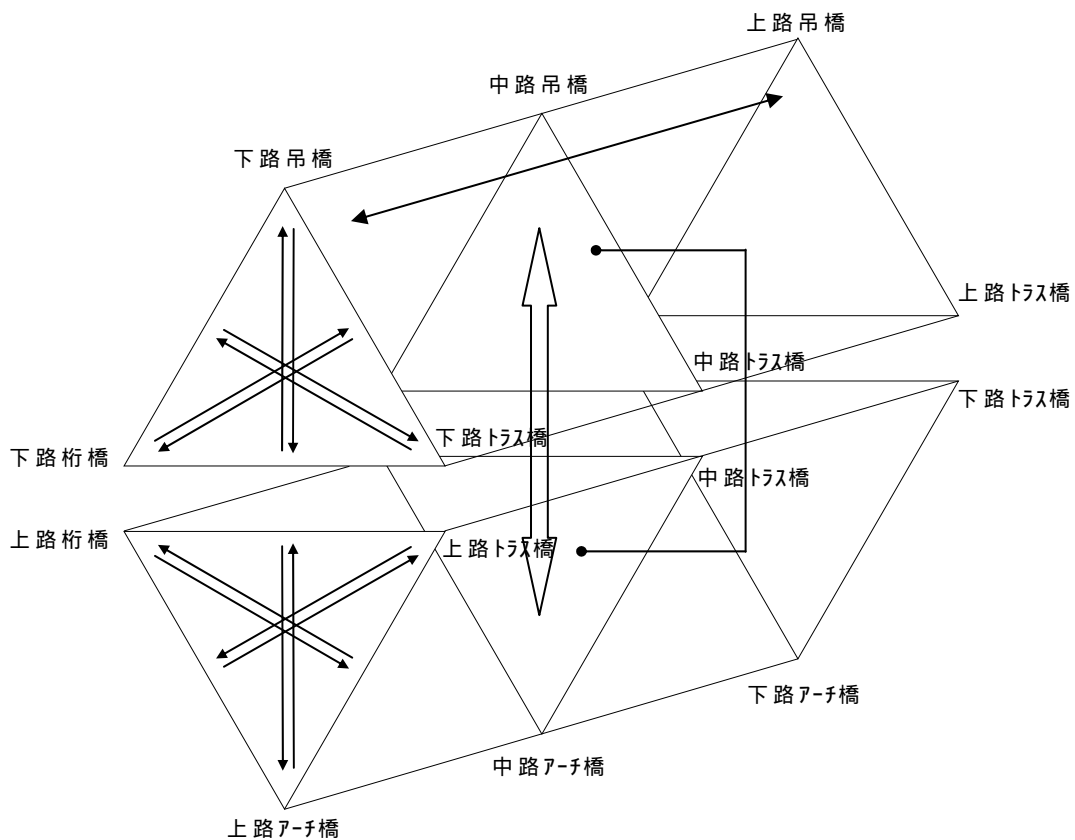
- 1) 久保田善明, 岸本貴博: 対称性を考慮した橋梁構造の力学的相関性, 構造工学論文集 Vol.54A, pp.162-170, 2008
- 2) 土木学会鋼構造委員会ロングスパン・スペース構造研究小委員会: 『ケーブル・スペース構造の基礎と応用』, p.290, 土木学会, 1999
- 3) 景観デザイン研究会: 『景観用語事典』, p.235, 彰国社, 1998
- 4) F.レオンハルト(田村幸久監訳): 『ブリュッケン』, p.247, メイセイ出版, 1998
- 5) F.レオンハルト(田村幸久監訳): 『ブリュッケン』, p.199, メイセイ出版, 1998
- 6) F.レオンハルト(田村幸久監訳): 『ブリュッケン』, p.175, メイセイ出版, 1998
- 7) 土木学会鋼構造委員会ロングスパン・スペース構造研究小委員会: 『ケーブル・スペース構造の基礎と応用』, p.290, 土木学会, 1999
- 8) F.レオンハルト(田村幸久監訳): 『ブリュッケン』, p.244, メイセイ出版, 1998



## 第 5 章 スパンシステムの構造形態操作法

### 5-1 概説

本章では、構造形態相関図を用いて、橋梁の構造形態操作法について考察する。今、構造形態相関図の内部に存在するある任意の点に対し、これを図の特定の方向へと移動させることを考えると、それはつまり、橋梁の構造形態に対して特定の操作を行っていることを意味している。図 5-1 に、構造形態相関図より導かれる 9 種類の構造形態操作法を示す。ただし、 $\sim$  は、上側の三角領域と下側の三角領域のそれぞれに同様の操作法が存在する。次節に、各操作法について述べる。



- |           |            |            |
|-----------|------------|------------|
| ： 梁システム化  | ： 曲げシステム化  | ： 反転       |
| ： 吊橋・アーチ化 | ： 非斜材システム化 | ： デッキの配置操作 |
| ： 軸力部材化   | ： 斜材システム化  | ： 混合       |

図 5-1 橋梁の構造形態操作法

## 5-2 橋梁のスパンシステムの構造形態操作法

### 5-2-1 操作 : ビームシステム化

ビームシステムは、死荷重や活荷重などの鉛直方向の荷重による曲げモーメントやせん断力を直接的に伝達する部材によって構成された構造システムである。図 3-1 で示したように、ビームシステムには、せん断力の伝達機構によって、ウェブシステムと斜材システムに分けられる。

ウェブシステムの形態は、比較的直線的で単純であり、場合によってはマッシブな印象となるのに対し、斜材システムでは、個々の部材が繊細で透過性が高い反面、部材数が多いため、場合によっては煩雑な印象を与えることもある。

構造形態相関図において、三角座標の底辺（桁橋とトラス橋を結ぶ軸）周辺に分布する橋梁形式はすべてウェブや斜材を有しており、これらの部材によって橋梁のスパンに作用したせん断力を支点まで伝達する。反対に、底辺から遠ざかるほど（上下端に近づくほど）、ウェブや斜材があってもその役割は小さくなり、究極的にはそれらは消滅する。ウェブや斜材のようにせん断力を直接的に伝達する部材をもつビームシステムで構成された形式とする場合には、橋梁の構造形態を三角座標の底辺に近づけるように考えればよい。なお、これは操作（吊橋・アーチ化）と反対の方向性をもつ操作である。

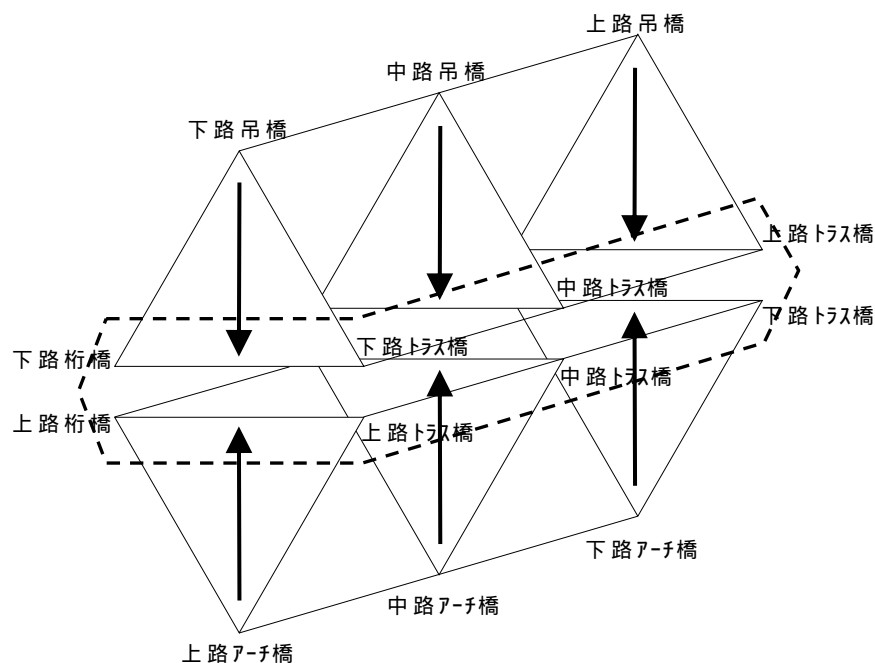


図 5-2(1) ビームシステム化

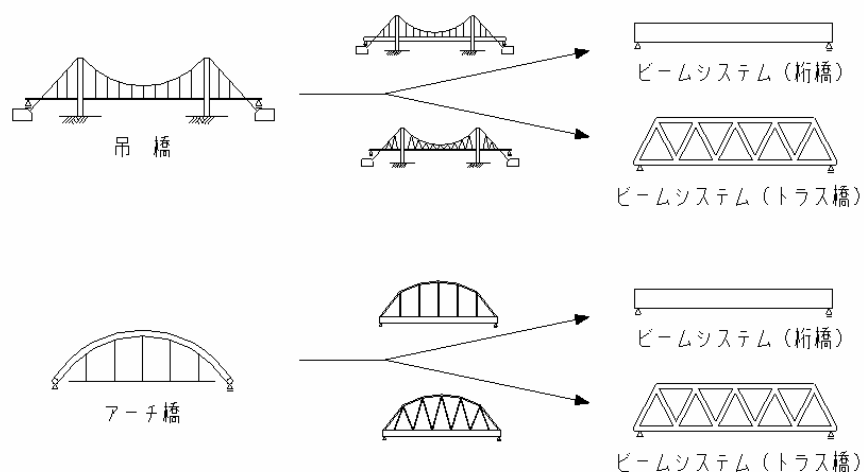


図 5-2(2) ビームシステム化

#### 5-2-2 操作 : 吊橋・アーチ化

吊橋やアーチ橋は，死荷重や活荷重などの鉛直方向の荷重をケーブルやアーチの曲線に沿った軸力に変換して支点まで伝達する．ケーブルの場合，それ自体が変形しやすいため，力の吊り合う位置まで自らが変形し，安定する．また，軸力は伝達できるが曲げモーメントやせん断力は伝達できない．アーチの場合，アーチ軸線をうまく設定しさえすれば，ケーブルと同様にアーチリブに作用する力を軸力のみとすることが可能である．ただし，橋梁には移動荷重が作用するため，アーチリブまたは補剛桁にはある程度の曲げ剛性とせん断剛性が必要となる．

吊橋は軽く優雅で伸びやかな形態となるのに対して，アーチ橋は伸びやかであると同時に，安心感や安定感のある形態となることが多い．

構造形態相関図において，上下端付近の領域に分布する形式は構造システムに作用するせん断力をミニマムとすることのできる吊橋やアーチ橋であり，三角座標の底辺（桁橋とトラス橋を結ぶ軸）に近づくほど，せん断力伝達部材であるウェブや斜材をもつ形式となる．吊橋やアーチの曲線を利用してせん断力をミニマムとするような形式とする場合には，橋梁の構造形態を三角座標の上下端に近づけるように考えればよい．なお，これは操作（ビームシステム化）と反対の方向性をもつ操作である．

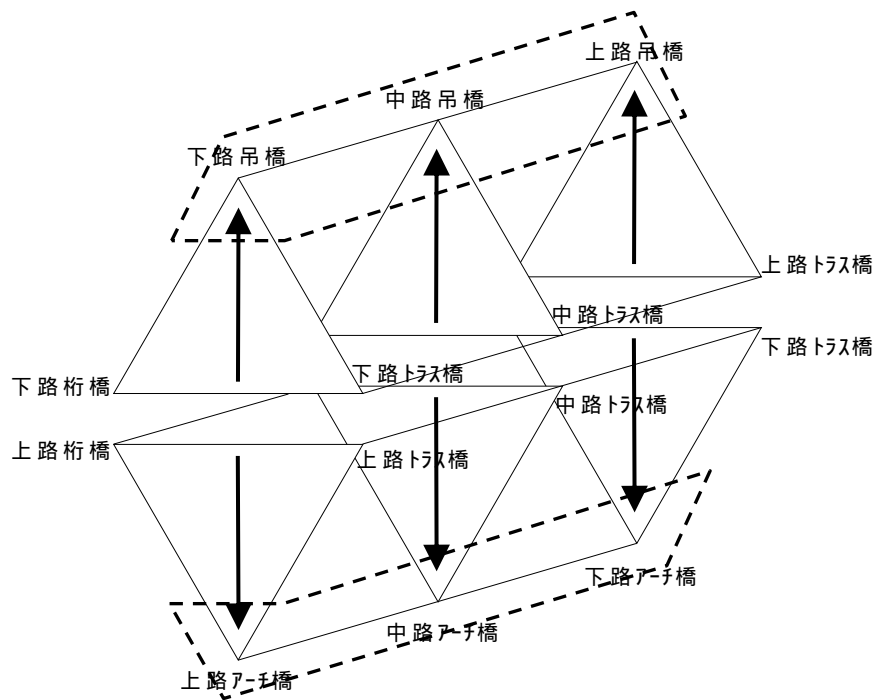


図 5-3(1) 吊橋・アーチ化

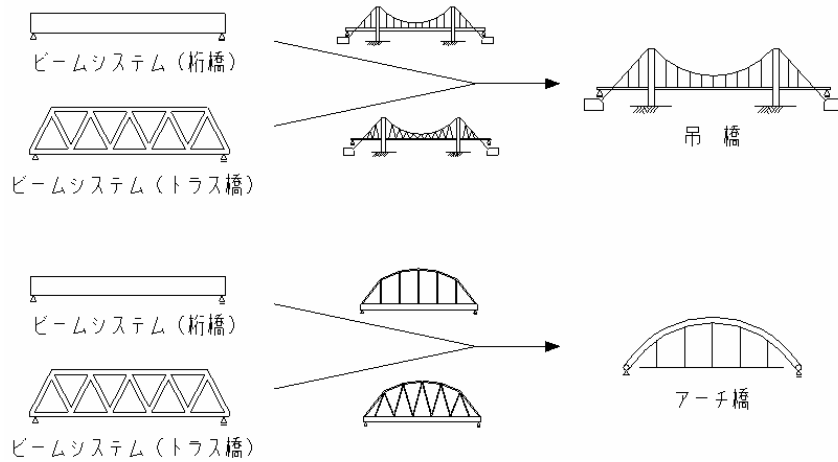


図 5-3(2) 吊橋・アーチ化

### 5-2-3 操作 : 軸力部材化

軸力部材は，一般に断面全体がほぼ同じ応力レベルとなるため，断面に無駄がなく合理的である．したがって，軸力部材で構成された構造は軽量性に優れるという特性

を有する。吊橋や斜張橋，アーチ橋，トラス橋などの軸力系の橋梁形式が，桁橋などの曲げ部材系の橋梁形式に比べて大きなスパンまで適用可能なのは，この部材断面の合理性によっている。なお，圧縮の軸力部材には座屈の問題が含まれるため，引張の軸力部材に比べて不利である。例えば，構造的に対称関係にあるアーチ橋と吊橋とを比較すると，アーチ橋には座屈の問題が含まれるため，吊橋ほどの大スパンに適用することはできない。

軸力部材で構成された橋梁は曲げ部材で構成された橋梁に比べて一般に繊細で軽快な印象を与える。一方，構成要素が多く形態の複雑さが増すため煩雑な印象を与えないような配慮が求められる。

構造形態相関図において，三角座標の上下端および右端付近の領域に分布する形式は，主に軸力部材で構成された橋梁形式である。反対に，左端に近づくほど軸力部材の割合が少ない形式となる。軸力部材の割合の大きな形式とする場合には，橋梁の構造・形態を三角座標の右斜辺（斜面）に近づけるように考えればよい。なお，これは操作（ウェブシステム化）と反対の方向性をもつ操作である。

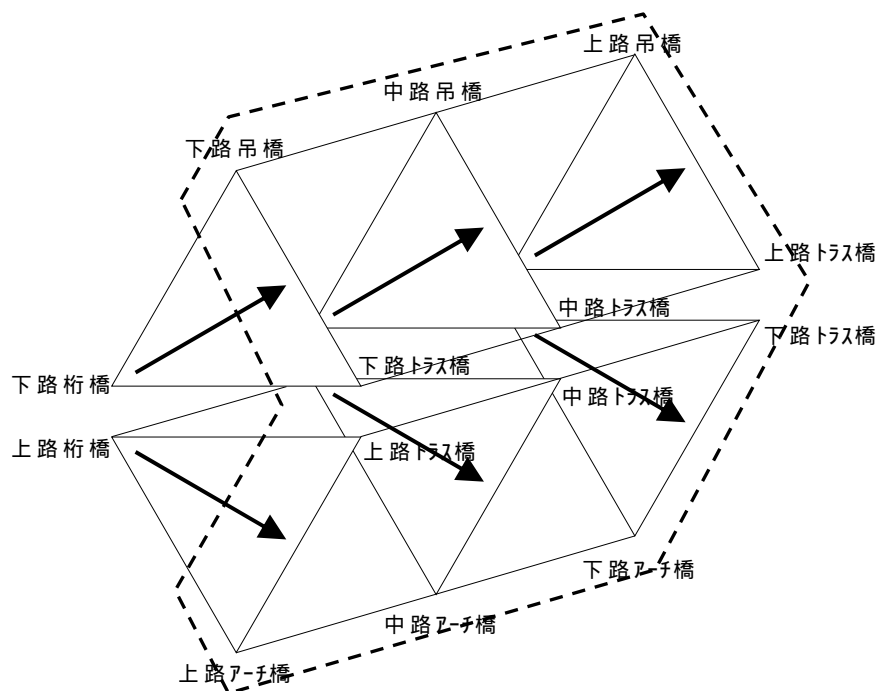


図 5-4(1) 軸力部材化

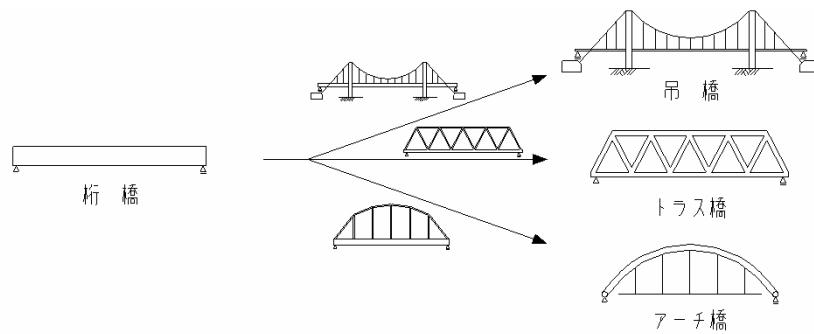


図 5-4(2) 軸力部材化

#### 5-2-4 操作 : ウェブシステム化

軸力部材で構成された橋梁は力学的な合理性は高いが、現実の施工においては部材数が多くなったりアーチの曲線加工が複雑であるなど、トータルで考えると必ずしも常に高い合理性を有しているとは限らない。一方、曲げ部材で構成されたウェブシステムの橋梁は軸力部材で構成された橋梁ほど力学的合理性は高くないため、力学的条件の厳しい長大橋梁には適さないが、構造がシンプルであるため、製作・施工における合理性は高く、特に、中小橋梁において優位性を発揮する。

桁橋などウェブシステムの橋梁は比較的直線的で単純な形態を有する。また、場合によってはマッシブな印象を与える。

構造形態相関図において、左端付近の領域に分布する形式は、桁橋などウェブシステムの橋梁形式である。これは全体系の曲げモーメントとせん断力をすべてウェブシステムによって支点まで伝達する構造であるのに対し、左端から離れるにしたがって曲げ部材の負担割合が低くなり、トラス、ケーブル、アーチなどがそれに代わるようになる。ウェブシステムを用いた形式とする場合には、橋梁の構造・形態を三角座標の左端に近づけるように考えればよい。なお、これは操作（軸力部材化）と反対の方向性をもつ操作である。

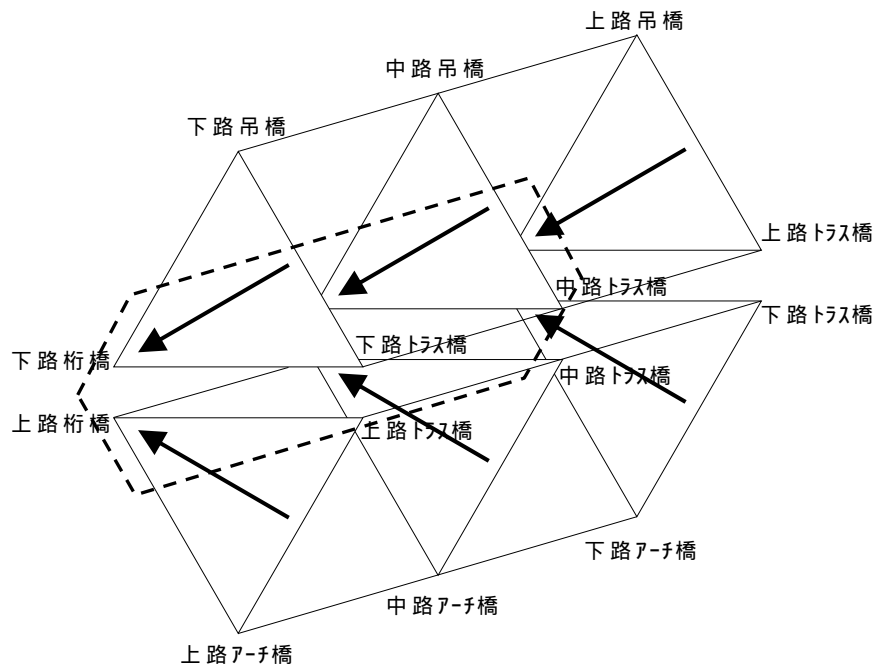


図 5-5(1) ウェブシステム化

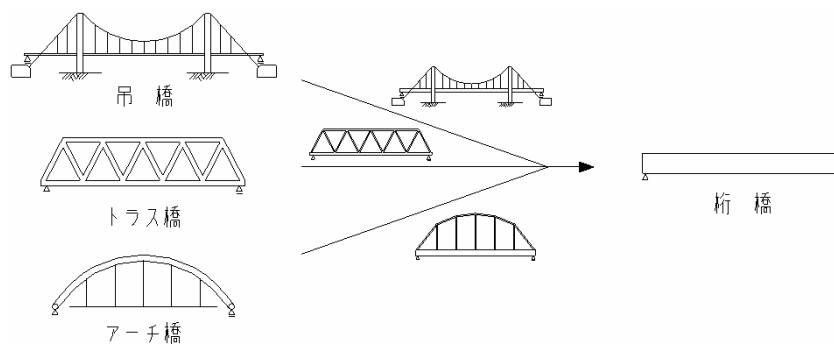


図 5-5(2) ウェブシステム化

#### 5-2-5 操作 : 非斜材システム化

斜材を用いずに死荷重や活荷重などの鉛直方向の荷重を支点まで伝達しようとする場合，桁橋のようなウェブシステムとするか，吊橋やアーチ橋のように曲線形状を利用してせん断力自体を減少させるシステムとする方法がある。

いずれにしても，斜材を小さく，あるいは，完全に省略することができるため，斜

材システムに生じやすい視覚的な煩雑さを軽減することが可能である。

構造形態相関図において，三角座標の上下端および左端付近の領域に分布する形式は，斜材がないか，あってもその影響の小さな形式である．反対に，右端に近づくほど斜材の役割が大きくなる．斜材を用いないか，あるいは，その役割の小さな形式とする場合には，橋梁の構造形態を三角座標の左斜辺（斜面）に近づけるように考えればよい．なお，これは操作（斜材システム化）と反対の方向性をもつ操作である．

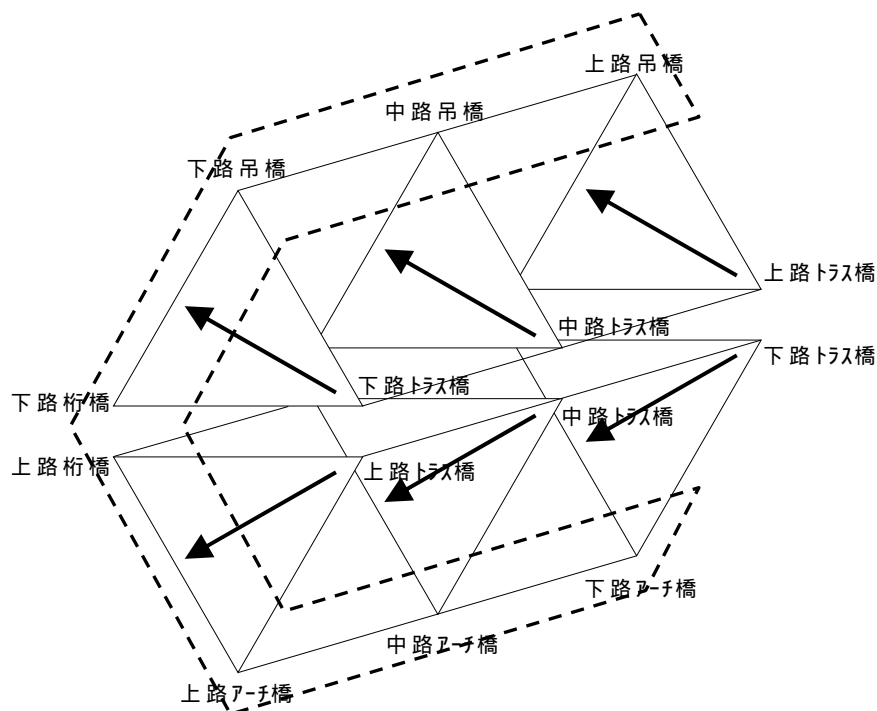


図 5-6(1) 非斜材システム化

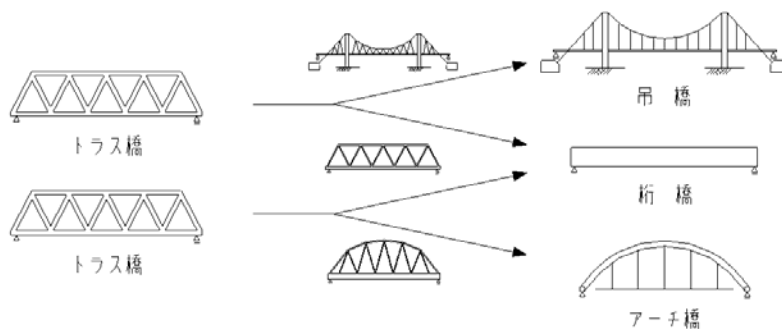


図 5-6(2) 非斜材システム化



5-2-6 操作 : 斜材システム化

斜材システムは死荷重や活荷重などの鉛直方向の荷重による曲げモーメントやせん断力を，斜材を用いた構造システムによって支点まで伝達する．斜材システムにおいて，上・下弦材は曲げモーメントを，斜材はせん断力を主に伝達する．斜材システムは構造を軽量化すると同時に剛性を向上させることのできる合理的な構造システムである．また，斜材を有することによって，上・下弦材も軸力だけの部材となる．

トラス橋は個々の部材が細く繊細であるが，部材数が多いたため弦材や斜材の向きに統一性がない場合には視覚的に煩雑な印象を与えやすい．その反面，幾何学的に秩序ある印象を生み出すことも可能である．

構造形態相関図において，トラス橋は三角座標の右端付近の領域に分布するが，左斜辺(斜面)を除く領域に存在する全ての橋梁は，何らかの斜材的要素を有している．右端に位置する橋梁形式は全体系のせん断力をすべて斜材によって支点まで伝達する構造であるのに対し，右端から離れるにしたがって，せん断力の伝達における斜材の負担割合が低くなり，ウェブ，ケーブル，アーチなどがそれに代わるようになる．斜材を用いた形式とする場合には，橋梁の構造・形態を三角座標の左端に近づけるように考えればよい．なお，これは操作 (非斜材システム化) と反対の方向性をもつ操作である．

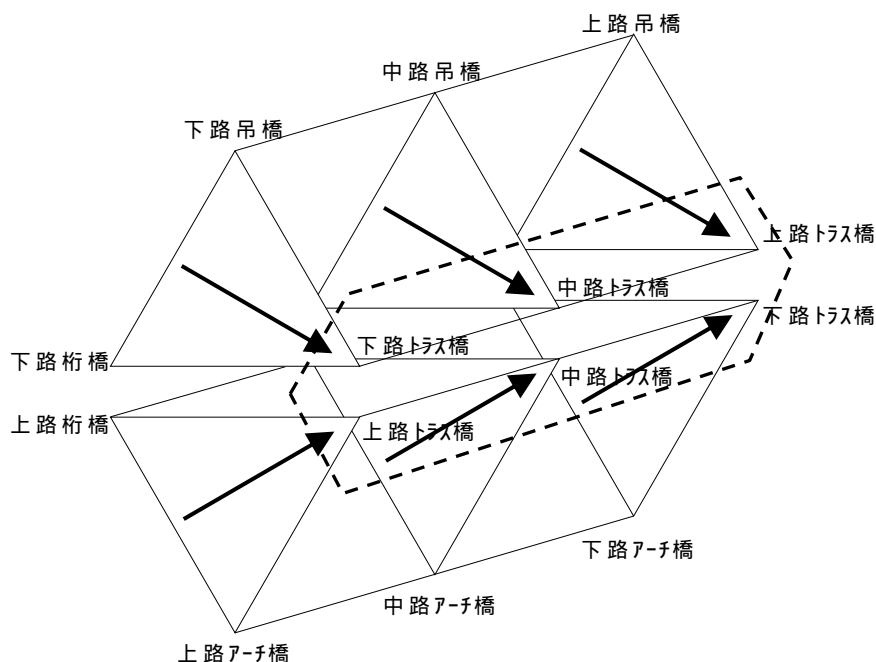


図 5-7(1) 斜材システム化

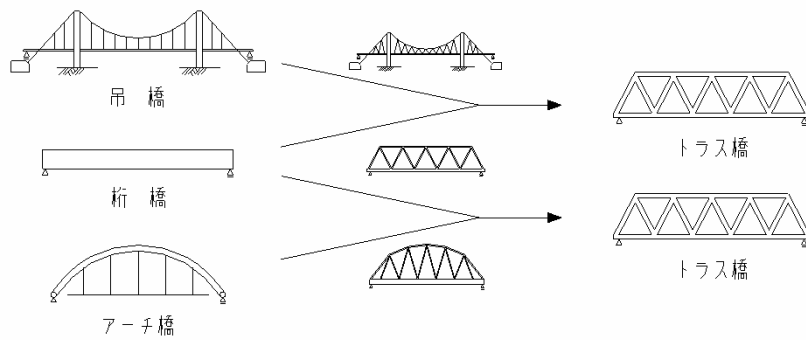


図 5-7(2) 斜材システム化

### 5-2-7 操作 : 反転

吊橋とアーチ橋は力学的にも形態的にも対称的な性質を有する．ケーブルの両端を固定し自然に懸垂した状態ではケーブルには純引張力が作用するが，この形状を保持したまま上下反転させるとアーチ構造となり純圧縮力を受ける状態となる．同様に，トラス橋においても上下反転させるとそれまで各部材に作用していた圧縮力と引張力がすべて交代する．桁橋においても圧縮フランジと引張フランジの関係が交代する．

構造形態相関図において，三角座標の底辺（桁橋とトラス橋を結ぶ軸）に関して対称となる位置には構造と形態がともに対称となる橋梁が配置される．橋梁の構造や形態のアイデアを模索する段階において，この反転操作は橋梁の印象に大きな変化を与えるものとなる．

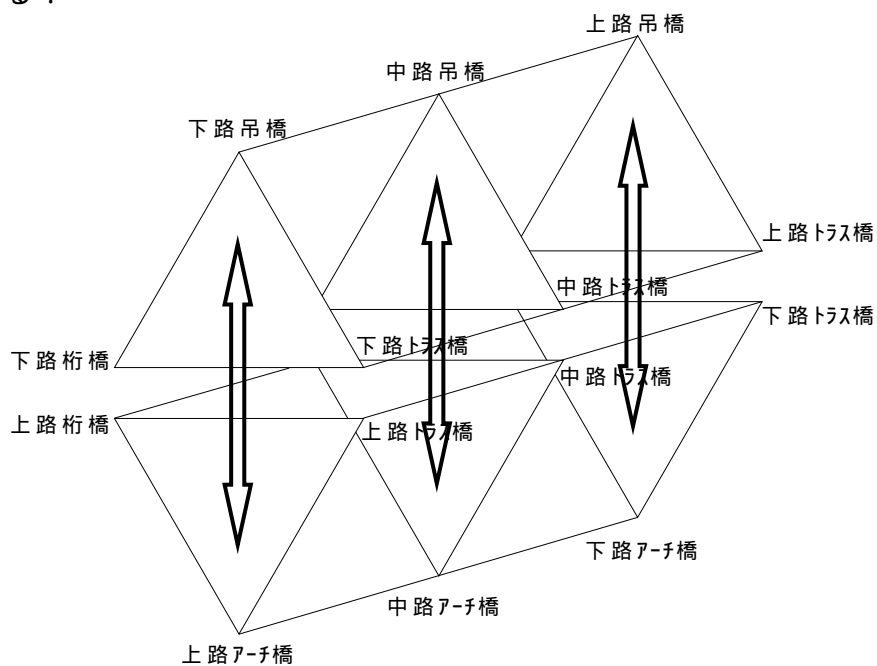


図 5-8(1) 反転

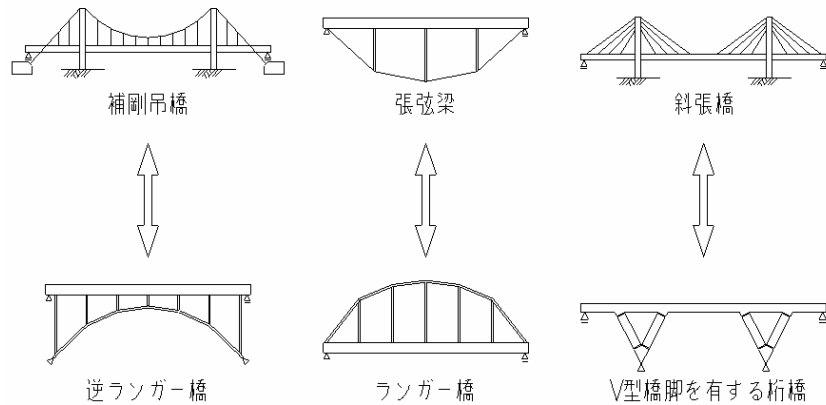


図 5-8(2) 反転

5-2-8 操作 : デッキの配置操作

床版を直接支持する床組（縦桁，横桁など）は，さらに主構によって支持されている．通常の鈹桁橋では，床組自体が主構（主桁）を兼用しているといえる．

床組が主構よりも上方にあり，支柱によって支えられている形式を「上路式」または「上路橋」という．反対に，床組が主構よりも下方にあり，吊材によって吊られている形式を「下路式」または「下路橋」という．しかし，床組と主構の位置関係には高い自由度があり，おおよそこれらの配置は独立的に扱うことが可能である．また，床組の軸方向と主構の軸方向が一致せず，互いに交差していたとしても，構造系を成り立たせることは多くの場合において可能である．

構造形態相関図において，上路橋，中路橋，下路橋は連続した関係にある．これらは力学的にはほぼ同等とみなせるものであるが，形態的特徴は大きく異なる．したがって，地形条件や交差条件，景観特性などに応じて適切に配置操作を行うことは，橋梁計画における基本的かつ重要な事項となっている．

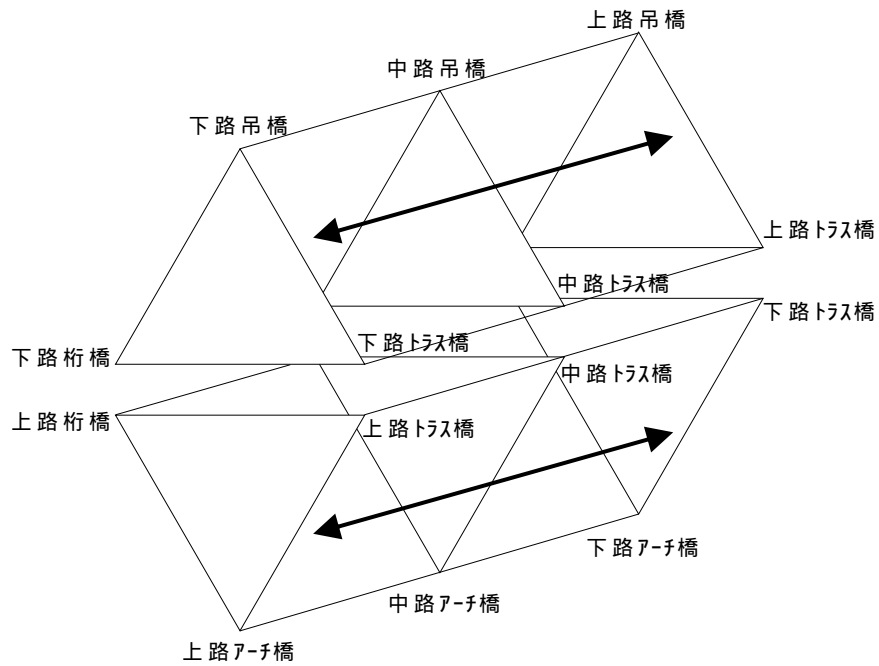


図 5-9(1) デッキの配置操作

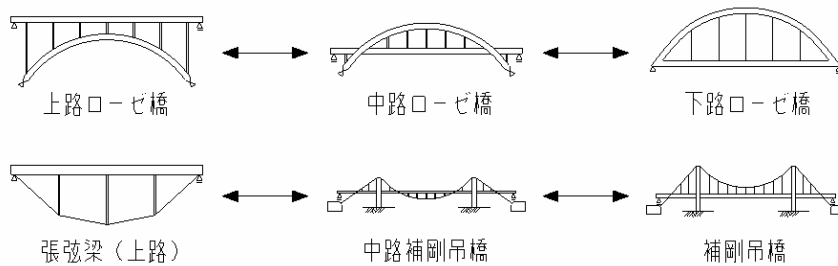


図 5-9(2) デッキの配置操作

5-2-9 操作 : 混合

構造形態相関図において，異なる位置にある橋梁を混合（重ね合わせ）することにより，新たな橋梁形式を得ることができる．すなわち橋梁形式は，構造形態相関図上に直接表されるものに限定されるのではなく，それらの複数の組み合わせにより，様々な形式が生み出される．

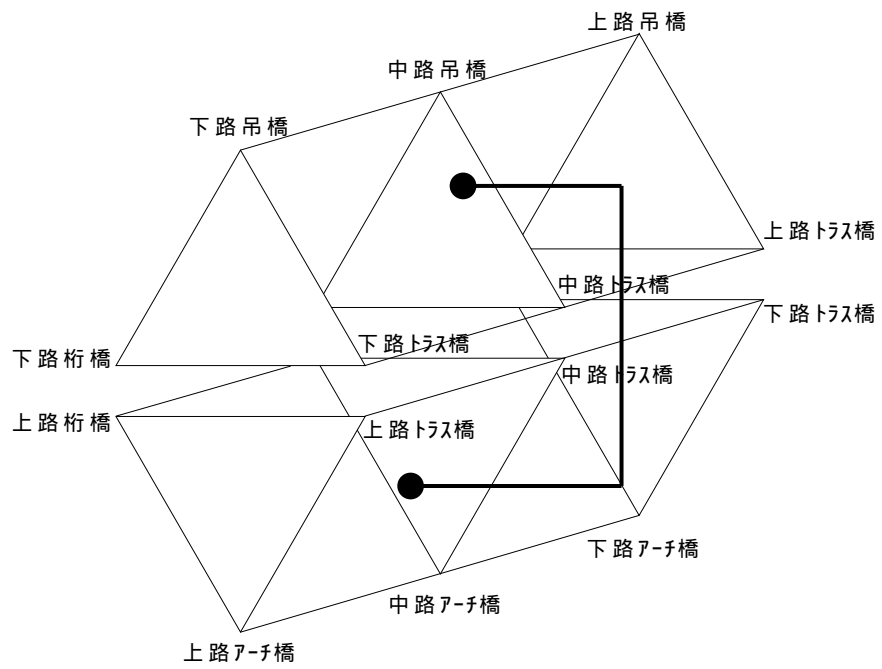


图 5-10(1) 混合

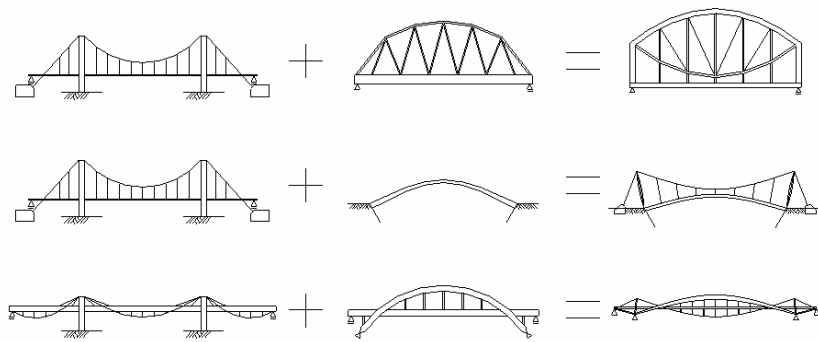


图 5-10(2) 混合



## 第 6 章 ねじりを受ける橋梁

### 6-1 概説

第 3 章では、橋梁に作用する 5 種類の力（引張力、圧縮力、曲げモーメント、せん断力、ねじりモーメント）のうち、ねじりモーメントについて、橋梁形式（吊橋、アーチ橋、桁橋、トラス橋）と関連づけながら構造形態相関図により説明されることを明らかにした。第 4 章では、それらを橋梁形式以外の構造システムにも拡張した。第 5 章では、スパンシステムの構造形態操作法として、9 種類の方法に展開して示した。本章では、残るひとつの力、すなわち、ねじりモーメントについて、構造形態という観点で整理を行う。

ねじりモーメントに対する構造システムには様々なものが考えられるが、一般的に、主桁を閉断面とするか、支間長をあまり長くしないこと、あるいは、主構（主桁）間隔を広くすることなどで対応が図られる場合が多い。本章では、ねじりモーメントが生じる要因別にその対策となる構造システムについて体系的な整理を行い、ねじりを受ける橋梁の構造形態操作法について考察する。

### 6-2 ねじりが生じる主な要因

ねじりモーメントが橋梁形式を決定づけることが少ないのは、多くの橋梁は、河川や道路などの障害物に対してほぼ直交、かつ、直線的に架けられているためである。この場合、橋梁に大きなねじりモーメントは作用しないため、結果的にねじりが橋梁形式を決定づけることは少ない。

しかし、以下のような要因によって橋梁に大きなねじりモーメントが生じる場合、橋梁の形態も大きく影響を受ける。また、支点に負反力が生じることもあることから、支点部の構造に工夫が必要となることもある。

#### (a) 要因 A：曲線橋

道路の平面線形がカーブしているため隣接する橋脚（または橋台）の支承線中心を結んだ直線と橋梁の重心にずれが生じている場合、橋梁にねじりモーメントが発生する。このような曲線橋では、曲線の外側に向かって巻き込むようにねじりモーメントが作用する。また、道路中心線に対して、カーブの内側と外側では、外側の方が橋面積が大きいいため、たとえ桁の断面形状が左右対称であっても、桁の重心は曲線の外側にずれる。

曲線橋は、自然地形に馴染む落ち着いた高架橋や、現代的でダイナミックな形態の

橋梁，用地の制約が厳しい都市内の高架橋，歩行者動線を優先した歩道橋など，デザインの活用の幅が広い．

(b) 要因 B：斜橋

支承線が橋軸に対して斜角を有する場合，橋梁にねじりモーメントが発生する．斜橋に作用するねじりモーメントは，桁ごとのたわみの位相差，または，たわみ量の差によって生じる．橋梁が障害物に対して斜めに交差する場合に，斜橋となるケースが多い．

(c) 要因 C：荷重偏載

死荷重や活荷重が幅員方向に偏載する場合，橋梁にねじりモーメントが発生する．幅員に比べて支承間隔の狭い場合や，床版の張り出しが大きい場合，1面吊り斜張橋の補剛桁などでは，荷重偏載によるねじりモーメントの影響が大きくなるため，対策が必要となる．反対に，支承間隔が十分に確保されている場合や，床版の張り出しが小さい場合，2面吊りの斜張橋などでは，荷重偏載が大きな問題となることは少ない．

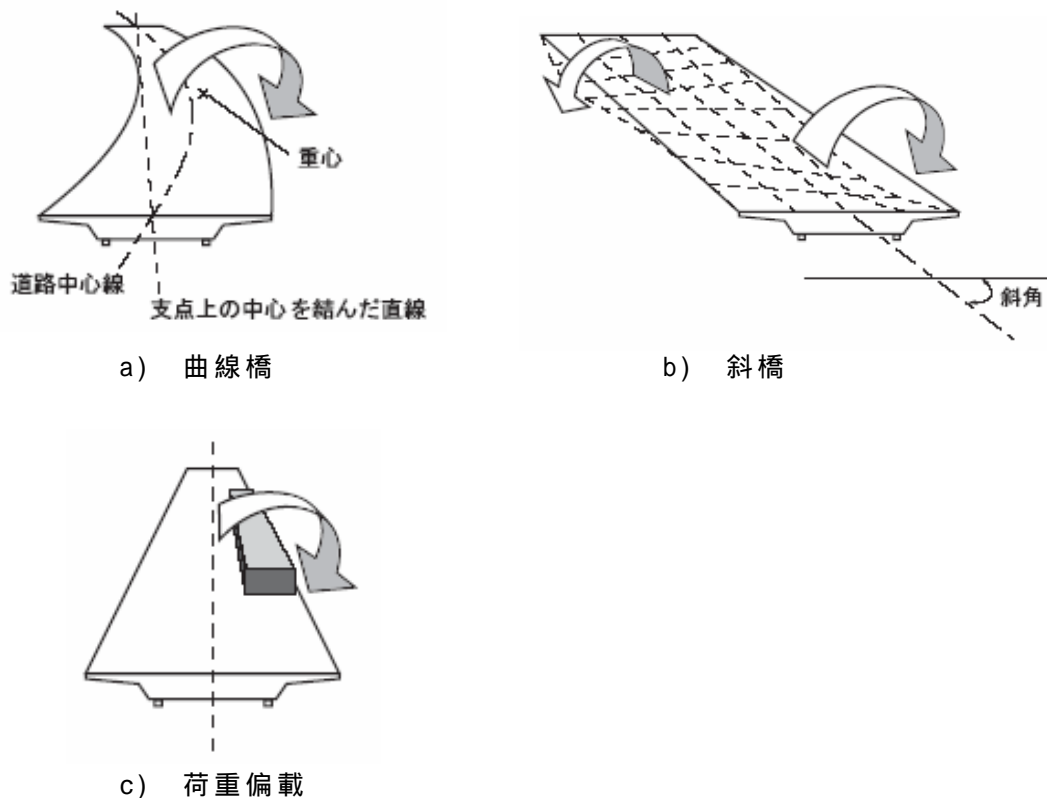


図 6-1 ねじりが生じる主な要因



### 6-3 ねじりを受ける橋梁の構造システム

#### 6-3-1 要因別対策方法の整理

ねじりモーメントへの対策には、「ねじりへの抵抗性を高める」、「ねじりモーメントを低減する」という2通りの方向性が考えられる。そこで、ねじりの要因とその対策について、図6-2のように分類整理を行った。図6-2に示すとおり、閉断面、主構間隔の拡大、および、短スパン化はどの要因にも有効な方法であり、その汎用性が明確に理解されるが、それら以外にも多くの対策が考えられる。次節に、ねじりに対する各構造システムについて述べる。

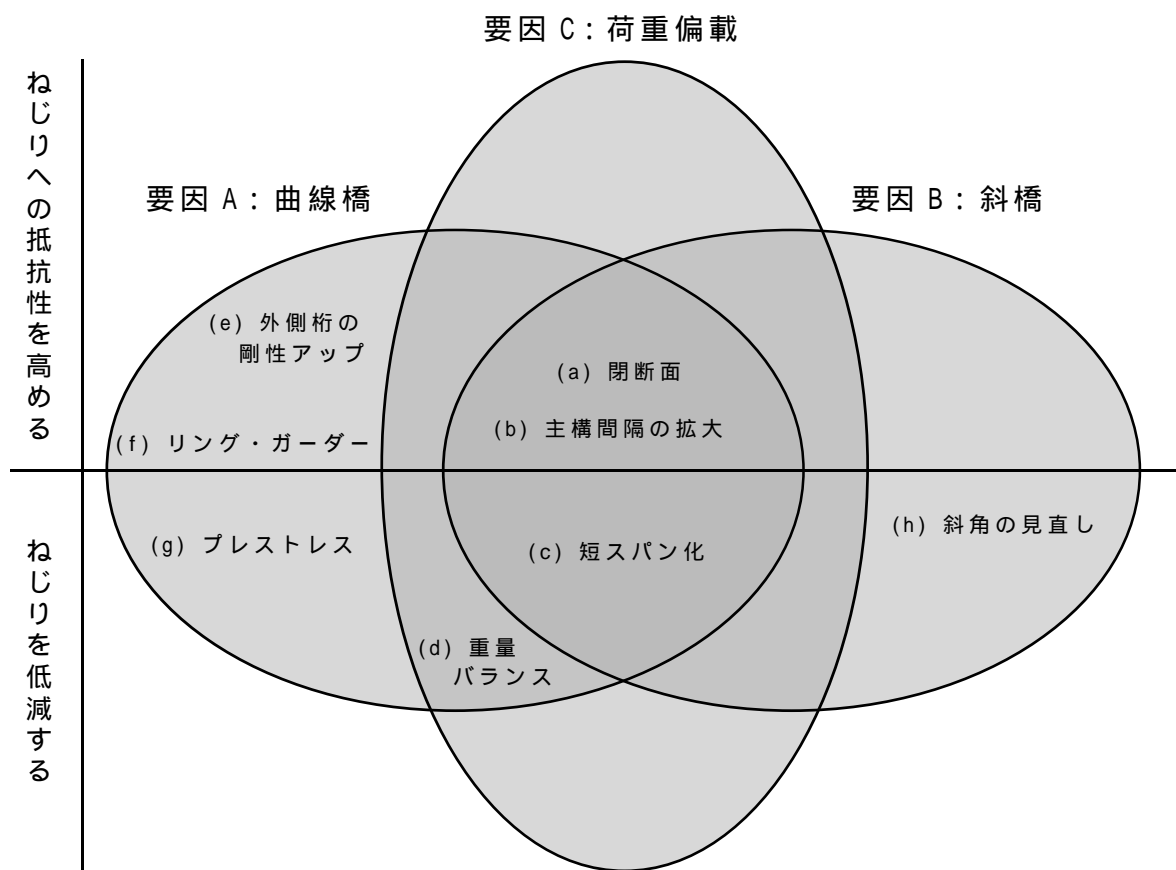


図 6-2 ねじりの要因と対策

## 6-3-2 ねじりに対する構造システム

### (a) 閉断面

箱桁のような閉断面構造は，I 桁のような開断面構造よりも，ねじり剛性ははるかに高い．したがって，大きなねじりモーメントの作用する橋梁には，閉断面桁が採用される場合が多い．特に，ねじり剛性の観点からは 1 主箱桁が最も有利であるが，桁高制限が厳しい場合や広幅員の橋梁では，2 主箱桁などの並列箱桁とすることも多い．ただし，緩やかな曲線橋や斜角の急でない斜橋，スパンに対して幅員の広い斜橋などでは，主桁に I 桁が用いられることも多い．この場合，橋全体のねじり剛性を高めるために，強固な横桁や対傾構，横構などを設けた，いわゆる準閉断面の構造とすることもある（図 6-3）．

### (b) 主構間隔の拡大

主構間隔を広げることによって，ねじりモーメントに対する抵抗性を高めることができる．例えば曲線橋の場合，曲線の内側の桁に負反力が生じる場合があるが（図 6-4(a)），アウトリガーを設置し，支承間隔を拡大すると，負反力の発生を抑えることができる（図 6-4(b)）．ただし，アウトリガーは主桁自体に作用するねじりモーメントに対して本質的な解決にはならない．そこで，主構（主桁）間隔を広げて抵抗ねじりモーメントを生じさせる偶力のアーム長を増大させることによって，ねじりモーメントに対する橋梁全体の抵抗性を向上させることができる（図 6-4(c)）．

### (c) 短スパン化

曲線橋では支点上の構造中心を結んだ直線から橋梁の重心がずれていることによってねじりモーメントが生じる．したがって，さらに支点を追加してスパンを短くし，ずれ量の絶対値を小さくすれば，桁に生じるねじりモーメントも小さくすることができる．

斜橋では活荷重や死荷重における桁のたわみの位相，あるいはその絶対値が，各桁（またはウェブライン）で異なることによってねじりモーメントが生じる．左右の桁のたわみ差が大きいほどねじれは大きくなるが，中間に支点を追加して左右のたわみ差を小さくすれば，ねじりモーメントも小さくなる（図 6-5）．

### (d) 重量バランス

曲線橋は支点上の構造中心を結んだ直線から橋の重心がずれていることによってねじりモーメントを生じるため，路面のカーブと反対方向に別の重量を与えることで重心のずれ量を小さくし，ねじりモーメントを軽減することができる．図 6-6(a)は，路

面のカーブと反対方向にアーチリブを傾けることで、重量バランスを図っている例である。また、図 6-6(b)のように、直橋であっても、主桁の位置が偏心していることにより生じるねじりモーメントを相殺するために重量バランスが図られている例もある。

#### (e) 曲線外側の桁の剛性アップ

曲線橋では曲線の外側に向かって巻き込むようにねじりモーメントが作用する。支承ラインが並行でなく、桁の軸線に直交するように配置されている場合、支間長の長い外側の桁により大きな負担が作用する。したがって、外側の主桁の剛性を高めることによって、橋梁全体のねじり剛性を高めることができる(図 6-7)。

#### (f) リング・ガーダー<sup>1)</sup>

曲線橋を 1 列の支点で支持する場合、桁のねじり中心軸に沿って支持すれば、重心がそれと一致する場合には、少なくとも死荷重状態で桁にねじりモーメントが作用することはない。しかし、曲線の内側や外側を支持する場合、桁にねじりモーメントが発生する。

曲線の内側を吊る場合、桁には外巻きのねじりが生じる。ここで、桁の上縁と下縁の応力を考えると、外巻きの場合、図 6-8(a)に示すように、桁の上縁には引張応力が、下縁には圧縮応力が作用する。このとき、上縁側を「引張リング」、下縁側を「圧縮リング」と呼ぶと、これら引張力と圧縮力に抵抗する一対のリングによって、ねじりに抵抗する。曲線の外側を吊る場合にはこれと反対方向の現象が生じ、図 6-8(b)のように、上縁側が圧縮リング、下縁側が引張リングとなる。図 6-8(c)の例では、曲線の内側が支持されており、デッキが引張リング、下弦材が圧縮リングの役割を果たしている。

#### (g) プレストレス

曲線橋に生じるねじりモーメントに対して、あらかじめ逆向きのねじりモーメントを与えておくことによって、最大ねじりモーメントの絶対値を軽減させる。ねじりモーメントのプレストレスは、桁のねじり中心(せん断中心)を通らない平面内に PC 鋼線を配置することによって可能となる(図 6-9)。

#### (h) 斜角の見直し

斜角によって桁にねじりモーメントが発生する場合、調整可能な範囲で支承の配置を見直し、なるべく橋軸方向と支承線方向が直交するように配置することによって、ねじりモーメントを軽減することができる。ただし、沓座面が広くなり、下部工の大きさに影響する場合もある(図 6-10)。

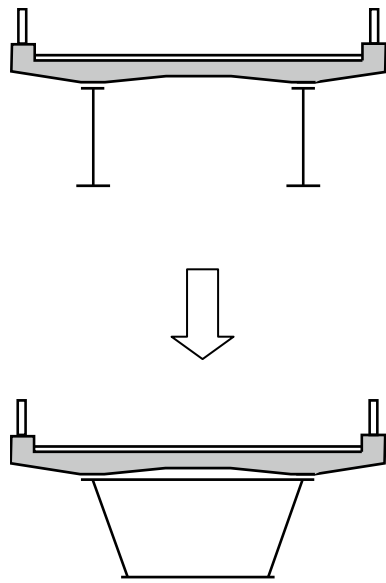


図 6-3 閉断面

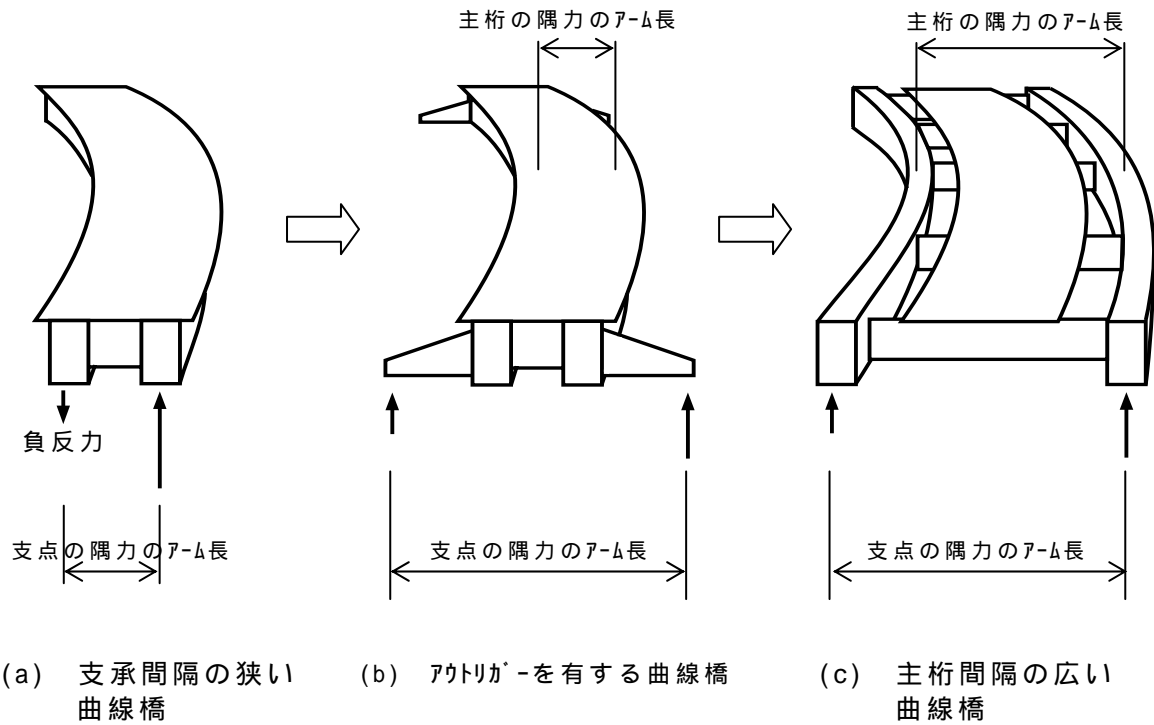


図 6-4 支承間隔の拡大

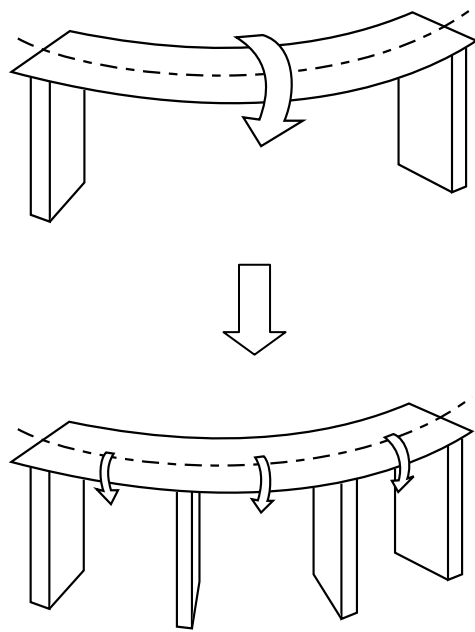


図 6-5 短スパン化



(a) ヴォランティン歩道橋



(b) ヴォランティン歩道橋

図 6-6 重量バランス

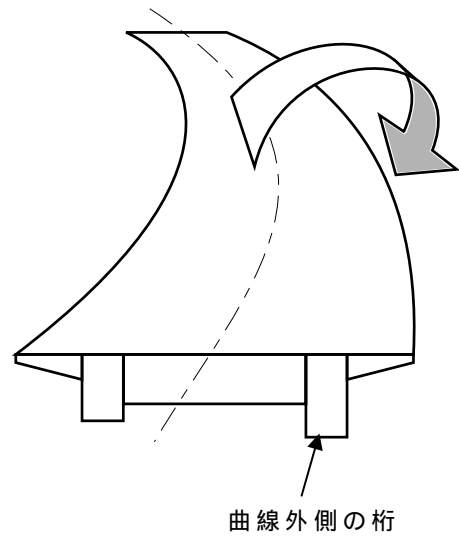
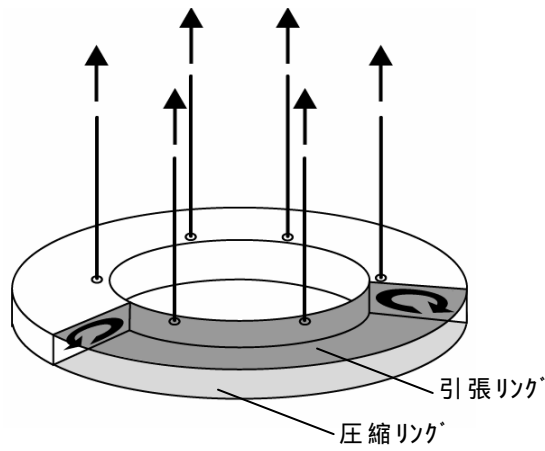
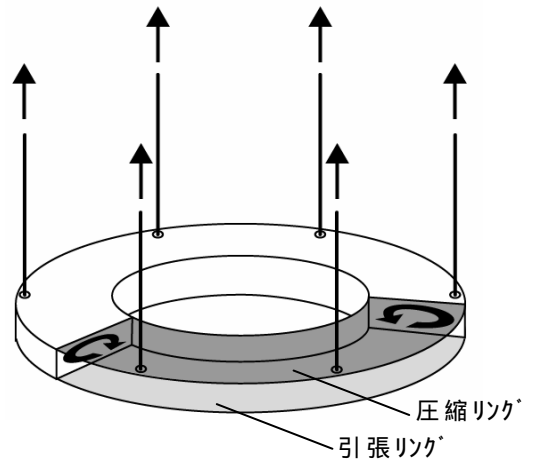


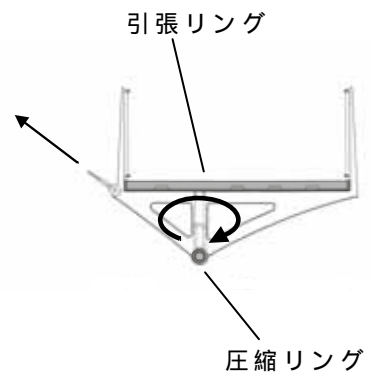
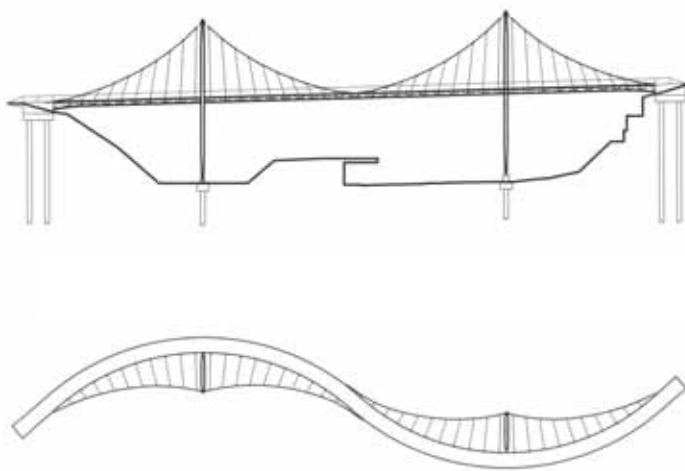
図 6-7 曲線外側の桁の剛性アップ



(a) 内側支持

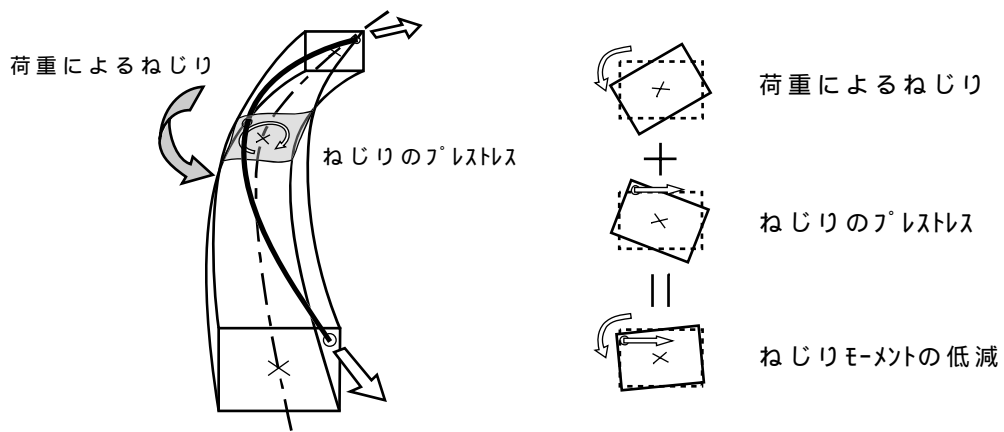


(b) 外側支持

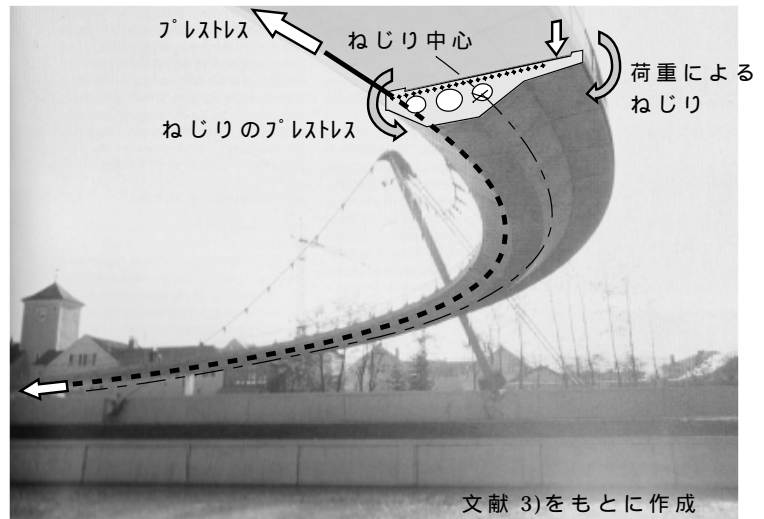
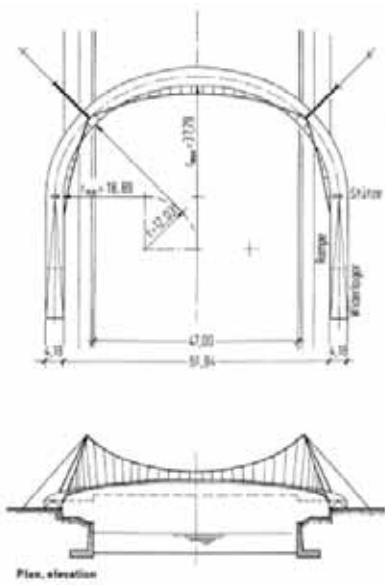


(c) West Park Bridge の例

図 6-8 リング・ガーダー



(a) ねじりのプレストレスの原理



文献 3)をもとに作成

(b) ケルハイム橋の例



(c) ラ・デファンス歩道橋の例<sup>4)</sup>

図 6-9 プレストレス

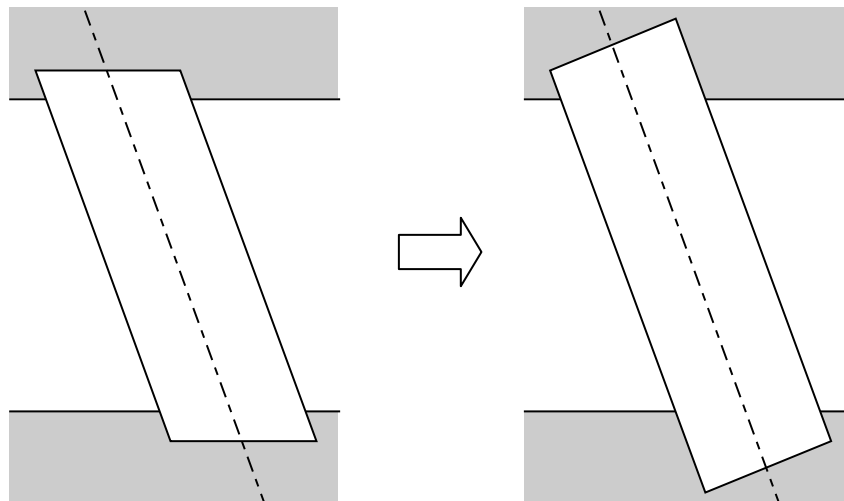


図 6-10 斜角の見直し

#### 6-4 ねじりを受ける橋梁の構造形態操作法

前節で述べた種々の構造システムについて，構造形態操作という観点から再度分類を行うと，図 6-11 のように表すことができる．すなわち，：直橋化，閉断面化，：偶力抵抗化，：重量バランスの 4 種類に分類することができる．

##### 6-4-1 操作：直橋化

直橋化は，「短スパン化」と「斜角の見直し」から成り，構造自体を直橋に近づけることによって，ねじりモーメントを軽減する操作である．

この操作はねじりを受ける橋梁を直橋へと近づける操作であるため，ねじりを受ける橋梁としての構造形態の特質も減少する．

##### 6-4-2 操作：閉断面化

閉断面化は，桁の断面を閉断面あるいは準閉断面に近づけることによって，ねじりモーメントへの抵抗性を高める操作である．

この操作によると，一般に，個々の主桁のボリュームは増加するが，主桁本数が低減される傾向にあるため，形態にまとまりが生まれることが多い．特に曲線橋の場合，形態にまとまりが生まれることによって滑らかな曲線が強調されるため，ダイナミッ



クさやエレガントさを表現するのに適している。

#### 6-4-3 操作 : 偶力抵抗化

偶力抵抗化は、「主構間隔の拡大」、「曲線外側の桁の剛性アップ」、「リング・ガーダー」、「プレストレス」から成り、ねじりモーメントを何らかの偶力抵抗機構に置き換えた操作である。

「主構間隔の拡大」はねじりモーメントを左右の主構（主桁）に作用する鉛直方向の偶力に置き換える操作である。

「曲線外側の桁の剛性アップ」も同様にねじりモーメントを左右の主桁に作用する鉛直方向の偶力に置き換える操作である。しかし、この場合、偶力のアーム長を伸ばすのではなく、桁の剛性を高めて対応することになる。

「サーキュラーリング」はねじりモーメントを引張リングと圧縮リングに作用する偶力に置き換えることによって、桁の曲げ剛性でねじりに抵抗しようとする操作である。

「プレストレス」は主桁の断面内に、あらかじめ死荷重や活荷重によるねじりモーメントとは反対方向のねじりモーメントが生じるように、これを断面内に生じる偶力として導入する操作である。

これらの操作は、「閉断面」に比べると構成部材の数が多くなりやすいため、場合によっては煩雑な形態を生む可能性もあるが、様々な造形的可能性もまた含んでいる。

#### 6-4-4 操作 : 重量バランス

重量バランスは、デッキに対する主桁配置のアンバランスによるねじりモーメントや、曲線橋であることによって生じるねじりモーメントに対して、橋梁の重心を構造システムの構造中心に近づけることでバランスを図り、ねじりモーメントを低減しようとするものである。

カウンターウェイトとしてアーチリブを傾けるなどの手法がその典型であるが、ダイナミックで特徴的な形態が、橋梁のシンボル性を高めることに貢献する。

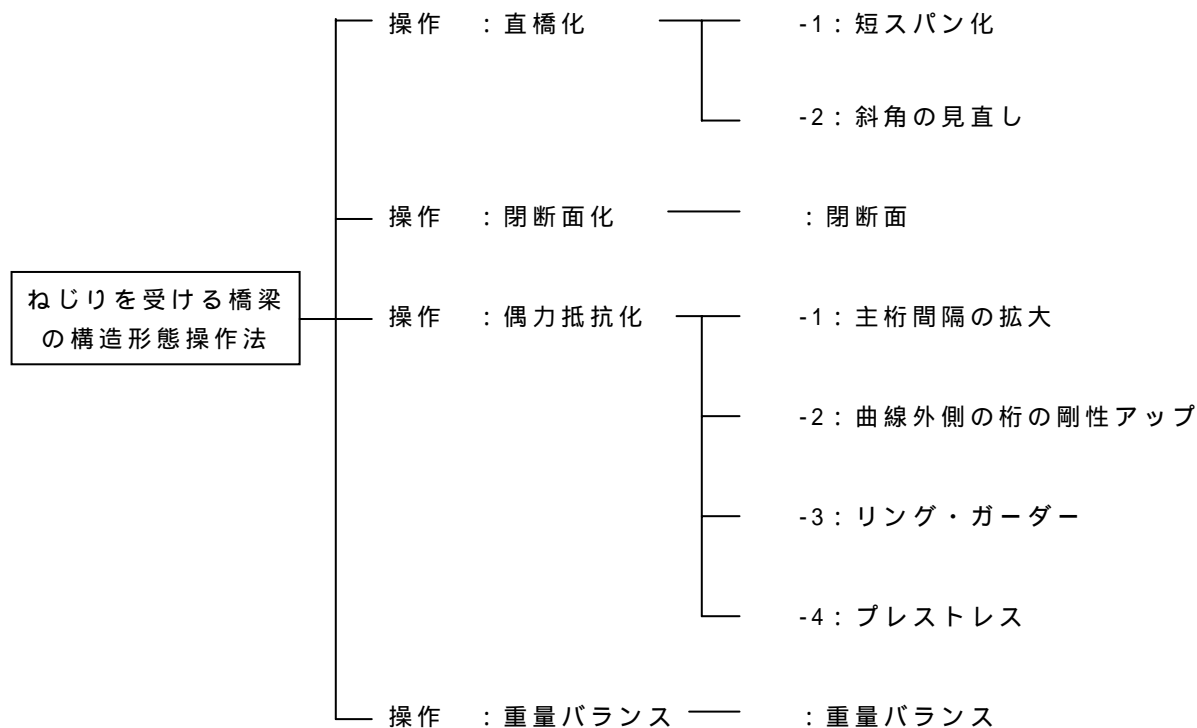


図 6-11 ねじりを受ける橋梁の構造形態操作法

#### 参考文献

- 1) Ursula Baus, Mike Schlaich, *Footbridges - Construction, Design, History* - , pp.116-119, Basel, Boston, Berlin, Birkhäuser, 2008
- 2) Ursula Baus, Mike Schlaich, *Footbridges - Construction, Design, History* - , p.113, Basel, Boston, Berlin, Birkhäuser, 2008
- 3) Alan Holgate, *The Art of Structural Engineering - The Work of Jörg Schlaich and his Team*, pp.214-215, Germany & UK, Axel Menges, 1997
- 4) Dietmar Feichtinger, Bridge Design, *Proceedings of the Third International Conference on Footbridge 2008*, CD-ROM, 2008
- 5) Kenneth Frampton, Anthony C. Webster, Anthony Tischhauser, Quim Nolla, *Calatrava Bridges*, p.126, Basel, Boston, Berlin, Birkhäuser, 1993

## 第 7 章 結論

本論文では、構造デザインの思考を支える知の基本的骨格を解明し、体系的に整理することを目的として、橋梁の構造形態を個別的にではなく、互いに関連性のあるものとして認識するための基本概念について論じてきた。特に、形態論を扱う上では不可欠となる具体的な形態イメージを伴う理論を、「構造形態相関図」として構築し、その理論的根拠や定量化手法などについて示した。さらに、様々な構造形態の創出や解釈に必要な構造デザインの思考に関わる「構造形態操作法」を導いた。この構造形態操作法は、スパンシステムにおいて 9 種類、ねじりシステムにおいて 4 種類（詳細区分では 8 種類）が導かれ、それらを本論文で、一つの体系の中に位置づけることができた。以下に、各章で得られた知見をまとめる。

第 2 章は、本研究の論理的な基礎づけを行う導入部であり、「材料」と「構造システム」の基本的な問題に触れた上で、橋梁の規模（支間長）と施工性および経済性の関係について論じた。そして、長支間の橋梁では材料効率の観点から軸力抵抗系（吊橋、斜張橋、アーチ橋、トラス橋など）が有利であり、支間の短い橋梁では施工性の観点から曲げ抵抗系（桁橋、ラーメン橋など）が有利であることを模式的に表現した。また、橋梁に作用する 5 つの力（ $F$ ：引張力， $N$ ：圧縮力， $M$ ：曲げモーメント， $V$ ：せん断力， $T$ ：ねじりモーメント）を、「橋軸方向の鉛直平面内に生じる力： $F$ 、 $N$ 、 $M$ 」と「橋軸方向を軸とした回転の力： $V$ 、 $T$ 」に分類し、前者は橋梁形式全体に大きく影響し、後者は曲線橋や斜橋、大きな偏載荷重を受ける橋梁などに大きく影響することを示した。なお、前者は第 3 章～第 5 章、後者は第 6 章で詳細に論じている。

第 3 章では、まず、第 2 章で示した  $F$ 、 $N$ 、 $M$  の力に対して、基本的な構造システム（サスペンションシステム、アーチシステム、ウェブシステム、斜材システム）と橋梁形式（吊橋、アーチ橋、桁橋、トラス橋）を対応づけ、各形式の相互関係を、構造と形態の連続性および対称性から論じた。さらに、これらの関係性を視覚的にイメージしやすいように「構造形態相関図」として三角座標を用いて表現し、その定量化手法の開発を行った。また、実橋データを用いて既存橋梁形式の座標値を算出し、構造形態相関図における分布傾向を把握した。その結果、ランガー橋やローゼ橋のように異なる名称で呼ばれている橋梁形式であっても、アーチを利用した形式同士の相関係数はかなり高く、桁をアーチで補剛しているといわれるランガー橋でさえその傾向が強いことが明らかとなった。これは、アーチ部材が全体の曲げ剛性に対して極めて有効に寄与していることを示すものといえる。また、ニールセンローゼ橋やトラスドラングー橋など、斜材を有するアーチ系橋梁は、アーチ橋とトラス橋との中間に位置づけられることが確認された。また、調査した各形式とも、形式ごとのばらつきはかなり低

く、ほぼ同じような位置に集中する傾向があった。これは橋梁を設計する際に、経済性などから、ある程度定まったライズ比やサグ比が採用されることが多く、ケーブルやアーチリブの剛比もある程度似かよっているためと考えられる。ただし、その中でも最もばらつきの大きかったのは斜張橋であり、反対に最もばらつきの小さかったのはアーチ橋であった。また、各橋梁形式相互の相関係数を算出し、形式間の近接度を明らかにした。また、既存橋梁形式は構造形態相関図の周縁部にプロットされ、中央部付近は空白領域となったため、この空白領域に存在する橋梁の構造形態をケーススタディーとして確認した。さらに、構造形態相関図を用いて、橋梁形式の発展史を、「近世以前」、「近代」、「現代」という3つの時代区分で概観した。近世末期に至るまで、橋梁は主に基本的な4つの形式（吊橋、アーチ橋、桁橋、トラス橋）だけであったが、技術の発展とともに形式が多様化していき、現代では様々な複合形式が考案され、さらなる多様性が生みだされていることが示された。

第4章では、橋梁形式以外の構造システム、つまり、「水平方向の構造システム」、「荷重分配システム」、「床組から主構への荷重伝達システム」についても、構造形態相関図によって表現し、具体的な事例とともに考察した。それにより、橋梁形式という平面的な構造だけでなく、立体的な構造物としての構造形態のイメージを明確化した。

第5章では、第3章で扱った「橋梁形式」、および、第4章で扱った「橋梁形式以外の構造システム」を、ともに「スパンシステム」とし、構造形態相関図より、これらスパンシステムの構造形態操作法として9種類の操作方法（：ビームシステム化、：吊橋・アーチ化、：非斜材システム化、：斜材システム化、：軸力部材化、：曲げシステム化、：反転、：混合、：デッキ位置の配置操作）に展開し、スパンシステムの構造形態の生成に関する論理構造を明らかにした。

第6章では、前章までで扱わなかった力、つまり、ねじりモーメントについて、それが発生する主な3つの要因（曲線橋、斜橋、荷重偏載）を挙げ、その対策としての構造システムについて、体系的に整理した。さらに、ねじりシステムの構造形態操作法として4種類の操作方法（：直橋化、：閉断面化、：隅力抵抗化、：重量バランス）に展開し、ねじりを受ける橋梁の構造形態の生成に関する論理構造を明らかにした。

なお、補章では、三角座標以外の座標系（2次元直交座標、3次元直交座標、極座標表）による構造形態相関図の表示方法について、その特徴と定量化手法を述べている。

以上のように、本論文では、橋梁の構造形態を体系的に論じることで、構造デザインの思考を支える知の基本的骨格を明らかにし、体系的に整理することを試みてきた。それによって、上述のような知見が得られたが、課題点もいくつか残されている。以下に今後の課題と展望について整理しておく。

### 連続桁への拡張

本論文では、橋梁に作用する 5 つの力を出発点として、そこから演繹的に形態原理を論じたが、それらはすべて単径間の橋梁を対象としている。しかし、現実には多径間連続の橋梁が多く存在しているなかで、本論文の知見のみからそれら多径間連続の橋梁を説明するには少々飛躍が生じる。したがって、そのギャップを埋める努力が今後必要であろう。つまり、構造的に隣接径間の影響を受ける橋梁についての構造形態研究が必要である。

### 下部工との関連づけ

本論文では、橋梁上部工のみを対象としたが、今後、下部工とも関連づけた研究が必要である。本論文の範囲では、主要な橋梁形式のひとつであるラーメン橋について言及することができないが、これは下部工との関連の中で論じられるべきである。

### 材料を考慮した構造形態操作法

本論文では、材料については詳しく論じていないが、橋梁の構造形態は常に使用材料との適切な組み合わせのもとで考えられるべきである。今後、構造形態操作論の一部として、使用材料の問題が検討される必要がある。またこれは、本論文では詳しく扱わなかった「構造形態とスパンの関係」とも関連づけて論じられるべきである。

### 個々の部材に関わる構造形態論

本論文では、橋梁形式など、橋梁の全体に関わる構造形態について論じた。しかし、個々の部材に関わる構造形態にも重要なものが存在する。例えば、床版を支える横リブやブラケットの繰り返しのパターン、アーチリブ自体がトラス構造となっているブレスト・リブ・アーチ、部材の断面形状、吊橋や斜張橋の主塔形状、格点や継手の形状などは、構造形態を論じる上で重要なファクターとなる。これらについても、何らかの研究が望まれる。

### 既存橋梁形態の分析

本論文では、橋梁構造形態の体系化について構造原理的なアプローチを行ってきた。本理論の有効性を確認する意味でも、今後、本理論を用いた既存橋梁の形態分析が必要である。本論文で明らかにした内容と、上記課題の解決によって追加される新たな知見によって、様々な橋梁の形態、例えば近年、ヨーロッパ各地で盛んにつくられている斬新なデザインの歩道橋などを分析的に説明できれば、本理論は、橋梁の構造デザインの形態分析と解釈手法に対する新たな道標ともなり得るであろう。



# 補章 その他の構造形態相関図の表示方法

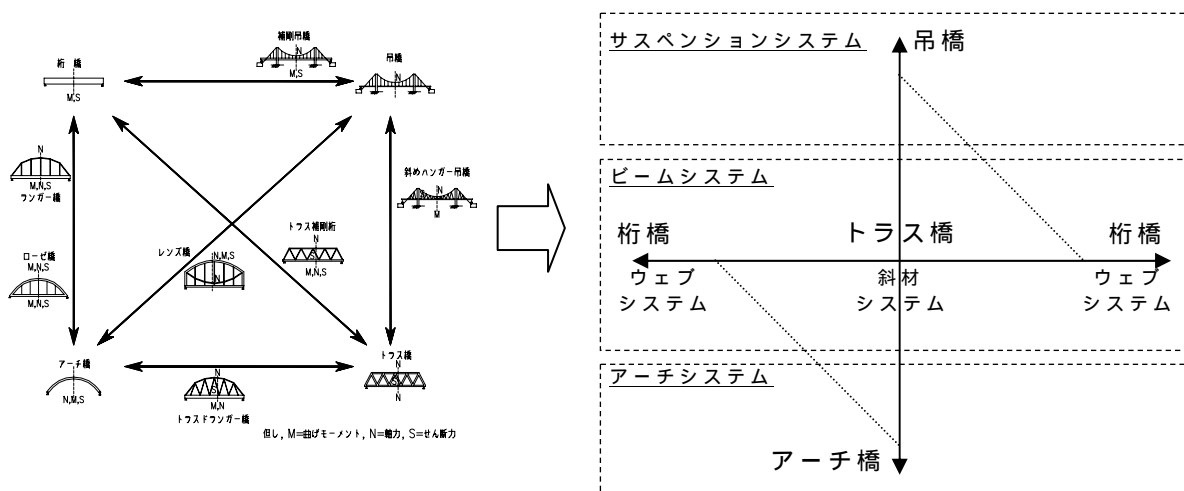
## 補-1 概説

構造形態相関図は、三角座標以外の座標系でも表示することが可能である。補章では、2次元直交座標表示、3次元直交座標表示、極座標表示の3種類の表示方法について、その特徴と定量化手法を述べる。また、補-5に、各表示方法について、一覧に整理しておく。

## 補-2 2次元直交座標表示

### 補-2-1 表示方法

3-4-1の三角座標表示の場合と同様に、図(補)-1(a)は、図3-5の橋梁形式の相互連続性を示したものであるが、これをもとに、同図(b)のような2次元直交座標表示を考える。同図(b)は、原点をトラス橋として、縦軸の正方向に吊橋の属性、負方向にアーチ橋の属性、横軸の正負両方向に桁橋としての属性をとったものであり、第1象限には吊橋系橋梁が、第3象限にはアーチ系橋梁が配置される。本表示方法では、原点に対して点対称となる位置に、構造と形態が対称となる橋梁形式が配置される。それにより、3-4-2(c)にて示した橋梁形式相互の相関係数の算出を、統計学と同様の表現形式、つまり、ベクトルの内積を用いた表現が可能となる。なお、本表示方法で



(a) 橋梁形式の連続的關係( 図 3-5 より )

(b) 2次元直交座標表示の概念図

図(補)-1 2次元直交座標表示による構造形態相関図

は、第 2, 第 4 象限に橋梁形式がプロットされることはない。三角座標表示の場合と同様に、同図(a)で見られる吊橋とアーチ橋の直接的な連続性は、同図(b)では解かれているが、その代わりに、それは吊橋とアーチ橋における構造と形態の対称性として表現されている。また、図 3-1 で述べた構造システム(サスペンションシステム, アーチシステム, ビームシステム, ウェブシステム, 斜材システム)を、各橋梁形式に対応づけて示している。

本表示方法では、縦軸周辺には吊橋, トラス橋, アーチ橋のような、主に軸力部材で構成される橋梁形式が配置され、縦軸から遠ざかるにしたがって、桁橋のような、主に曲げ部材で構成される橋梁形式が配置される。

ここで、原点を桁橋ではなくトラス橋とするのは、以下の理由による。

まず、三角座標表示の場合と同様に、ある橋梁に含まれる斜材システム(トラス橋), サスペンションシステム(吊橋), アーチシステム(アーチ橋), ウェブシステム(桁橋)の構成配分を以下の記号で表す。

$t$  : 斜材システム(トラス橋)

(ある断面に作用する全体系のせん断力( $S_o$ )に占める、当該断面での斜材軸力の鉛直成分の負担分)

$s$  : サスペンションシステム(吊橋)

(全体系の曲げモーメント( $M_o$ )に占める、ケーブル作用の負担分)

$a$  : アーチシステム(アーチ橋)

(全体系の曲げモーメント( $M_o$ )に占める、アーチ作用の負担分)

$g$  : ウェブシステム(桁橋)

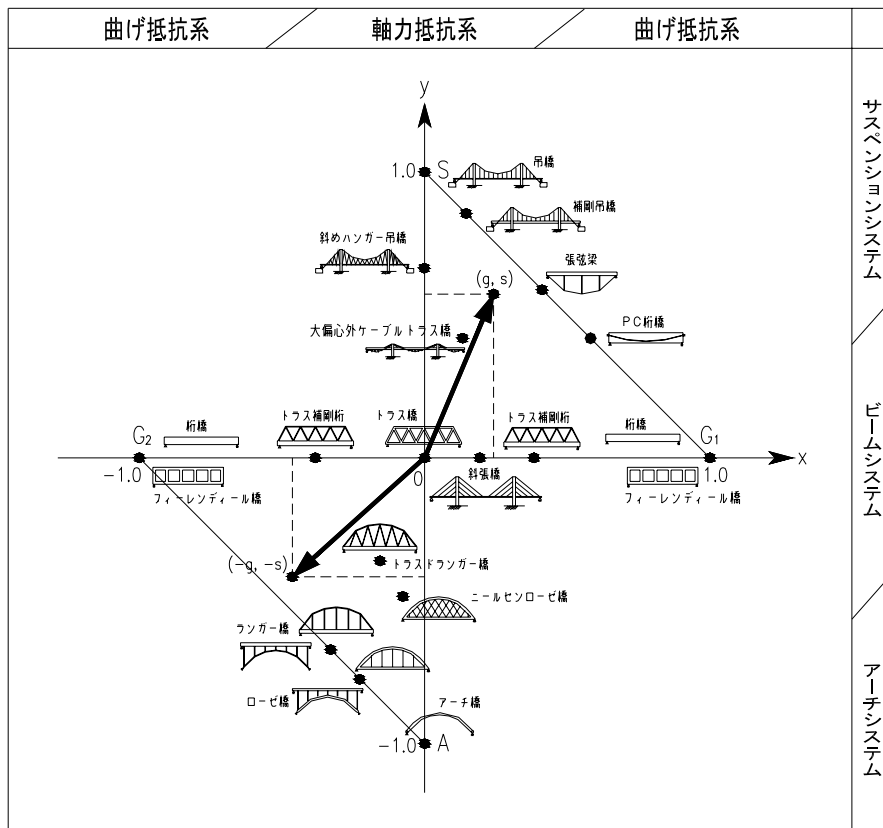
(全体系の曲げモーメント( $M_o$ )に占める、主桁, 補剛桁, またはアーチリブ自体の曲げモーメント負担分)

ここに、全体系のせん断力( $S_o$ ), および、全体系の曲げモーメント( $M_o$ )とは、当該スパンに架かる橋梁の構造全体系を単純梁に置き換えた場合に、その梁に作用するせん断力および曲げモーメントである。

このように、それぞれを定義した場合、斜材システム( $t$ )のみが、他とはやや異なる考え方をしていることが分かる。そこで、トラス橋を原点とすることによって、考え方の違いによる不均等を排除することができる。

なお、本表示方法の利点は、前述のとおり、各橋梁形式相互の相関性を、統計学における相関係数と同様の表現形式、つまり、ベクトルの内積を用いた表現が可能となることである。一方、3-4-1の三角座標表示においては、路面の位置を座標平面に対する奥行き方向の軸によって表現したが、本表示方法において同様の座標軸を設定した場





図(補)-2 構造形態相関図の2次元直角座標表示

合，相関係数の表現に無理が生じるため，本表示方法では，路面位置の違いについては表現しない。

#### 補-2-2 座標値の算出方法

以上に述べた，2次元直角座標の座標値は，次のように求められる。

まず，ある橋梁に含まれる斜材システム（トラス橋），サスペンションシステム（吊橋），アーチシステム（アーチ橋），ウェブシステム（桁橋）の構成配分を， $t, s, a, g$ とし，その定義は，補-2-1(a)に述べたとおりとする。そして， $s$ および $a$ は， $y$ 軸上に存在し， $g$ は $x$ 軸上に存在するものとする。

また， $s, a, g$ は次の条件を満たすものとする。

$$0 \leq s \leq 1, 0 \leq a \leq 1, -1 \leq g \leq 1, \quad (\text{補-1})$$

$$0 \leq (g+s) \leq 1 \quad (\text{吊橋系}) \quad (\text{補-2a})$$

$$0 \leq (g+a) \leq 1 \quad (\text{アーチ系}) \quad (\text{補-2b})$$

そして、プロットされる橋梁の座標は、吊橋系橋梁の場合は、 $(g, s)$ 、アーチ系橋梁の場合は、 $(-g, -a)$ であるとする。ただし、 $s=0$ 、かつ、 $a=0$ の場合、 $g$ は正負両方の値をとり得るものとする。

ここでさらに、

$$t = g + s \quad (\text{吊橋系}) \quad (\text{補-3a})$$

$$t = g + a \quad (\text{アーチ系}) \quad (\text{補-3b})$$

とおくと、 $t$ の値によって、橋梁の特徴は以下のように分類される。

$t=0$ ：座標は原点  $O$  に存在

(トラス橋)

$t=1$ ：座標は線分  $G_1S$  または  $G_2A$  上に存在

(トラスの属性を持たず、斜材を有さない形式)

$0 < t < 1$ ：座標は線分  $G_1S$  および原点  $O$  を含まない  $OG_1S$  の内部に存在

(トラスが部分的に用いられた吊橋系橋梁)

$-1 < t < 0$ ：座標は線分  $G_2A$  および原点  $O$  を含まない  $OG_2A$  の内部に存在

(トラスが部分的に用いられたアーチ系橋梁)

次に、三角座標表示の場合と同様に、斜材システム(トラス橋)、サスペンションシステム(吊橋)、アーチシステム(アーチ橋)、ウェブシステム(桁橋)のすべての属性を有する橋梁のプロトタイプ(図 3-14)を考え、 $t, s, a, g$ もまた同様の方法により求めると、対象橋梁の座標 $(g, s)$ 、または $(-g, -a)$ を、 $OG_1S$  または  $OG_2A$  の内部にプロットすることができる。

### 補-2-3 相関性の定量化手法

橋梁形式ごとに複数のサンプルを集め、それらを 2 次元直交座標表示することによって、座標内における形式ごとの分布状況を把握することができる。つまり、ある橋梁形式に対して、 $n$  橋分のサンプルが得られたとすると、そのベクトル群の平均値  $\bar{A}$  ( $\bar{g}, \bar{s}$ ) は、次のように表される。なお、 $\bar{A}$  が第 3 象限にある場合には、 $\bar{A}$  の座標を

( $-\bar{g}$ 、 $-\bar{a}$ ) と置き換えればよい。

$$\begin{aligned}\vec{\bar{A}} &= \sum_{i=1}^n \left( \frac{g_i}{n} \right) \vec{e}_1 + \sum_{i=1}^n \left( \frac{s_i}{n} \right) \vec{e}_2 \\ &= \vec{g}e_1 + \vec{s}e_2\end{aligned}\tag{補-4}$$

ここに、

$\vec{\bar{A}}$  : ベクトル群の平均を表すベクトル

もし、ベクトル群の分布が正規分布に従うとすれば、式(補-4)で表されるベクトルは、その橋梁形式を代表する典型的なベクトルといえる。

さらに、ベクトル群の分散や標準偏差は次のようにして求められる。

分散 ( $V_g$  ,  $V_s$  ),

$$V_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (g_i - \bar{g})^2\tag{補-5a}$$

$$V_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})^2\tag{補-5b}$$

標準偏差 ( $S_g$  ,  $S_s$  ),

$$S_g = \sqrt{V_g}\tag{補-6a}$$

$$S_s = \sqrt{V_s}\tag{補-6b}$$

式(補-5a, b), 式(補-6a, b)は、その橋梁形式が、座標上においてどの程度のばらつきを有しているかを表している。

次に、ある橋梁形式を表すベクトル、 $\vec{\bar{A}}$  ( $\bar{g}_a$  ,  $\bar{s}_a$ ) と、他の橋梁形式を表すベクトル

ル， $\vec{B}$  ( $\vec{g}_b$  ,  $\vec{s}_b$ ) の相関係数  $R$  は，「 $\vec{A}$  と  $\vec{B}$  の近さ」で表現することができるため，これを「 $\vec{A}$  と  $\vec{B}$  のなす角度」と「 $\vec{A}$  の  $t$  値 ( $\vec{t}_a$ ) と  $\vec{B}$  の  $t$  値 ( $\vec{t}_b$ ) の差，( $\vec{t}_a - \vec{t}_b$ )」を用いて表せば， $R$  は次のように定式化することができる。

$|\vec{A}| \neq 0$  , かつ ,  $|\vec{B}| \neq 0$  の場合 ,

$$\begin{aligned}
 R &= \cos \cdot (1 - |\vec{t}_a - \vec{t}_b|) \\
 &= \frac{\vec{A} \cdot \vec{B}}{|\vec{A}| \cdot |\vec{B}|} \cdot (1 - |\vec{t}_a - \vec{t}_b|) \qquad \text{(補-7)}
 \end{aligned}$$

$\vec{A} = 0$  , または ,  $\vec{B} = 0$  の場合 ,

$$R = 1 - |\vec{t}_a - \vec{t}_b| \qquad \text{(補-8)}$$

式(補-7)および式(補-8)によれば，相関係数  $R$  の値によって， $\vec{A}$  と  $\vec{B}$  は以下のような関係であることが分かる。

$R = 1$  :  $\vec{A}$  と  $\vec{B}$  は同一のベクトルであり，橋梁形式は一致している。

$R = -1$  :  $\vec{A}$  と  $\vec{B}$  は大きさが同じで向きが反対のベクトルであり，構造と形態が完全に対称な橋梁形式である。

$R = 0$  :  $\vec{A}$  と  $\vec{B}$  は直交しているか，あるいは， $\vec{t}_a$  と  $\vec{t}_b$  の一方が 1 で，もう一方が 0 である。つまり， $\vec{A}$  と  $\vec{B}$  には相関性はなく，その橋梁形式は，トラス橋，吊橋，アーチ橋，桁橋のいずれか異なる 2 つである。

$R > 0$  :  $\vec{A}$  と  $\vec{B}$  には正の相関があり，橋梁形式は同系である。つまり，構造と形態に対称性は存在しない。

$R < 0$  :  $\vec{A}$  と  $\vec{B}$  には負の相関があり，橋梁形式の構造と形態には対称性が存在する。

補-3 3次元直交座標表示

補-3-1 表示方法

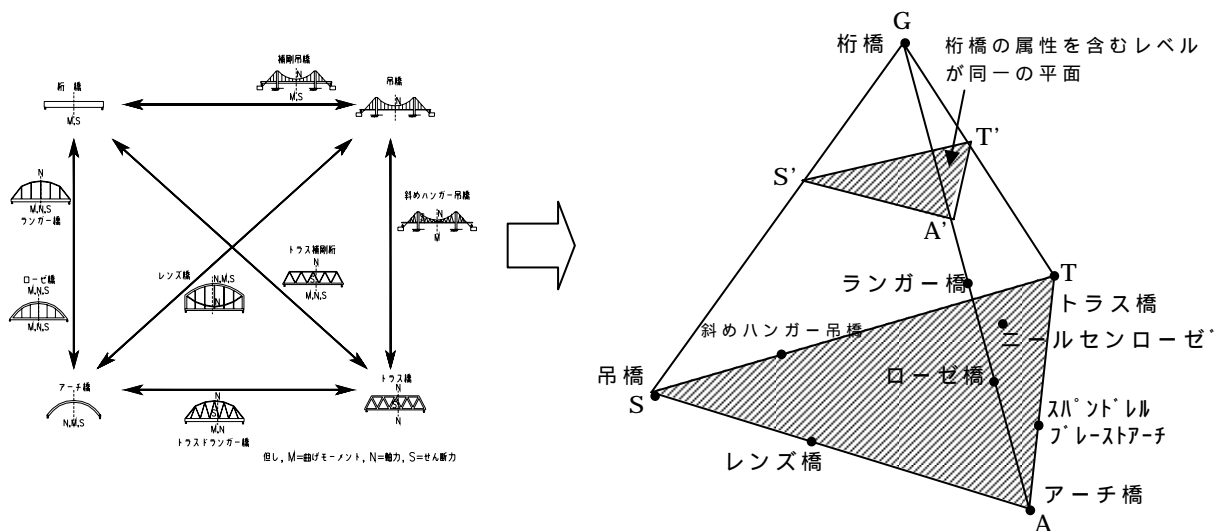
これまでと同様に，図(補)-3(a)は，図3-5の橋梁形式の相互連続性を示したものであるが，同図(a)における4つの基本橋梁形式と6本の矢印を，4つの頂点と6つの辺を有する四面体のイメージとして構築すると，同図(b)のようになる．

そうすると，図(補)-3(a)で示された橋梁形式の連続的關係は，この四面体内部の空間として，より一般化される．これにより，斜材システム(トラス橋)，サスペンションシステム(吊橋)，アーチシステム(アーチ橋)，ウェブシステム(桁橋)を構成要素とする橋梁は，この四面体内部の点として表されることとなる．

図(補)-3(b)の四面体において，4つの頂点をそれぞれG, A, S, Tとすると，四面体GASTのいずれかの面に平行な断面は，もとの面に含まれない唯一の頂点の属性を含むレベルが同一の平面と考えることができる．例えば，ASTに平行なA'S'T'の面内に含まれる橋梁群は，すべて桁橋の属性を含むレベルが同一である．

さらに，この四面体を，以降の考察のために，図(補)-4に示すような3次元直交座標に置きかえる．すなわち，いずれかの頂点を原点とし，その原点に接する3辺をx, y, z軸とすると，四面体内部のすべての点を座標表示しやすくなる．

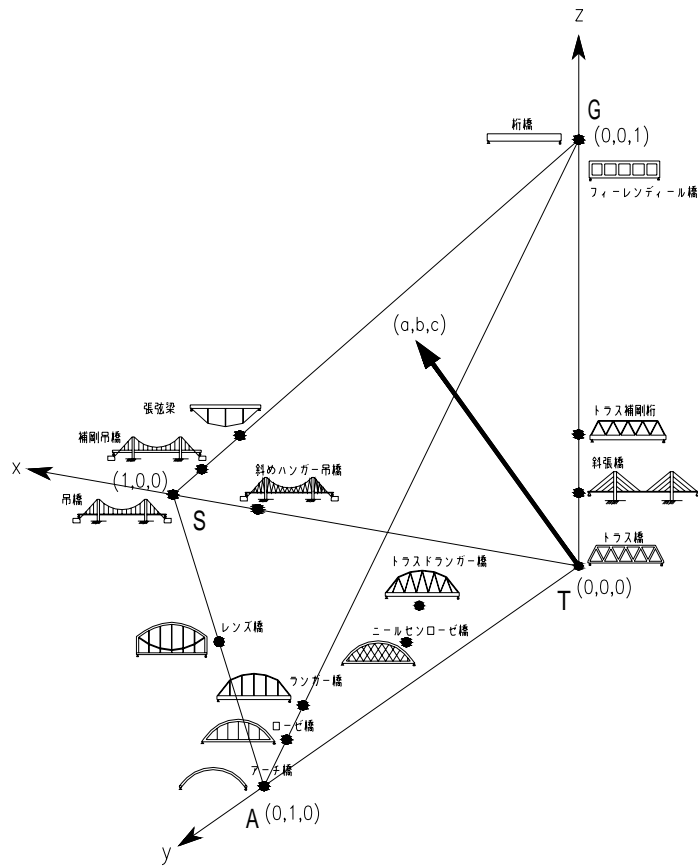
ここで，原点をトラス橋とするのは，補-2-1と同様の理由によっている．



(a) 橋梁形式の連続的關係(図3-5より)

(b) 四面体表示

図(補)-3 3次元直交座標表示による構造形態相関図



図(補)-4 構造形態相関図の3次元直交座標表示

### 補-3-2 座標値の算出方法

以上に述べた，3次元直交座標の座標値は，次のように求められる．

まず，ある橋梁に含まれる斜材システム（トラス橋），サスペンションシステム（吊橋），アーチシステム（アーチ），ウェブシステム（桁橋）の構成配分を， $t, s, a, g$ とし，その定義は，補-2-1に述べたとおりとする．

ただし， $s, a, g$ は次の条件を満たすものとする．

$$0 \leq s \leq 1, 0 \leq a \leq 1, 0 \leq g \leq 1, \quad (\text{補-9})$$

$$0 \leq (s + a + g) \leq 1 \quad (\text{補-10})$$

つまり，プロットされるすべての点は，図(補)-4の4面体TSAGの内部に含まれる．

ここでさらに，

$$t = s + a + g \quad (\text{補-11})$$

とおくと， $t$ の値によって，橋梁の特徴は以下のように分類される．

$t = 0$ ：座標は原点  $O$  に存在

（トラス橋）

$t = 1$ ：座標は  $SAG$  の面内に存在

（トラスの属性を持たず，斜材を有さない形式）

$0 < t < 1$ ：座標は  $SAG$  および原点  $O$  を含まない 4 面体  $TSAG$  の内部に存在

（トラスが部分的に用いられた形式）

次に，三角座標表示の場合と同様に，斜材システム（トラス橋），サスペンションシステム（吊橋），アーチシステム（アーチ橋），ウェブシステム（桁橋）のすべての属性を有する橋梁のプロトタイプ（図 3-14）を考え， $t, s, a, g$  もまた同様の方法により求めると，対象橋梁の座標（ $s, a, g$ ）を，4 面体  $TSAG$  の内部にプロットすることができる．

### 補-3-3 相関性の定量化手法

橋梁形式ごとに複数のサンプルを集め，それらを 3 次元直交座標表示することによって，座標内における形式ごとの分布状況を把握することができる．つまり，ある橋

梁形式に対して， $n$  橋分のサンプルが得られたとすると，そのベクトル群の平均値  $\bar{A}(\bar{s},$

$\bar{a}, \bar{g})$  は，次のように表される．

$$\begin{aligned} \bar{A} &= \sum_{i=1}^n \left( \frac{s_i}{n} \right) \bar{e}_1 + \sum_{i=1}^n \left( \frac{a_i}{n} \right) \bar{e}_2 + \sum_{i=1}^n \left( \frac{g_i}{n} \right) \bar{e}_3 \\ &= \bar{s} \bar{e}_1 + \bar{a} \bar{e}_2 + \bar{g} \bar{e}_3 \end{aligned} \quad (\text{補-12})$$

ここに，

$\bar{A}$  : ベクトル群の平均を表すベクトル

もし、ベクトル群の分布が正規分布に従うとすれば、式(3-28)で表されるベクトルは、その橋梁形式を代表する典型的なベクトルといえる。

さらに、ベクトル群の分散や標準偏差は次のようにして求められる。

分散 ( $V_s, V_a, V_g$ )

$$V_s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (s_i - \bar{s})^2 \quad (\text{補-13a})$$

$$V_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (a_i - \bar{a})^2 \quad (\text{補-13b})$$

$$V_g = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (g_i - \bar{g})^2 \quad (\text{補-13c})$$

標準偏差 ( $S_s, S_a, S_g$ )

$$S_s = \sqrt{V_s} \quad (\text{補-14a})$$

$$S_a = \sqrt{V_a} \quad (\text{補-14b})$$

$$S_g = \sqrt{V_g} \quad (\text{補-14c})$$

式(補-13a~c)、式(補-14a~c)は、その橋梁形式が、座標上においてどの程度のばらつきを有しているかを表している。

次に、ある橋梁形式を表すベクトル、 $\bar{A} (\bar{s}_a, \bar{a}_a, \bar{g}_a)$ と、他の橋梁形式を表すベクトル、 $\bar{B} (\bar{s}_b, \bar{a}_b, \bar{g}_b)$ の相関係数  $R$  は、「 $\bar{A}$ と $\bar{B}$ の近さ」で表現することができるため、これを「 $\bar{A}$ と $\bar{B}$ のなす角度」と「 $\bar{A}$ の  $t$  値 ( $\bar{t}_a$ ) と  $\bar{B}$  の  $t$  値 ( $\bar{t}_b$ ) の差、( $\bar{t}_a - \bar{t}_b$ )」を用いて表せば、 $R$  は次のように定式化することができる。



$|\vec{A}| \neq 0$  , かつ ,  $|\vec{B}| \neq 0$  の場合 ,

$$R = \cos \cdot (1 - |t_a - t_b|)$$

$$= \frac{\vec{A} \cdot \vec{B}}{|\vec{A}| \cdot |\vec{B}|} \cdot (1 - |t_a - t_b|) \quad (\text{補-15})$$

$\vec{A} = 0$  , または ,  $\vec{B} = 0$  の場合 ,

$$R = 1 - |t_a - t_b| \quad (\text{補-16})$$

式(補-15)および式(補-16)によれば , 相関係数  $R$  の値によって ,  $\vec{A}$  と  $\vec{B}$  は以下のような関係であることが分かる .

$R = 1$  :  $\vec{A}$  と  $\vec{B}$  は同一のベクトルであり , 橋梁形式は一致している .

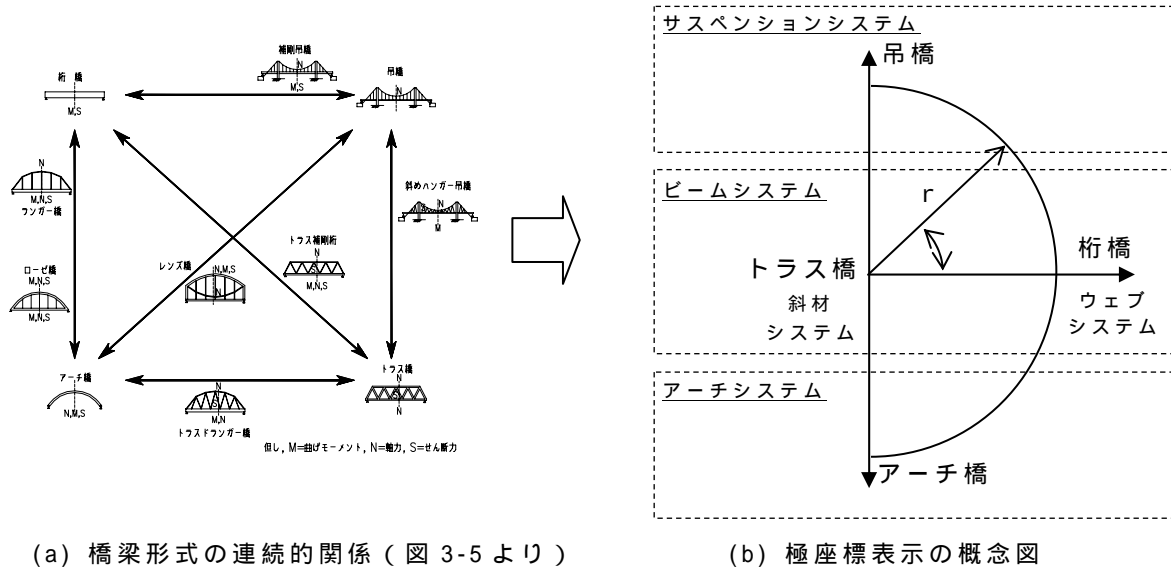
$R = 0$  :  $\vec{A}$  と  $\vec{B}$  は直交しているか , あるいは ,  $t_a$  と  $t_b$  の一方が 1 で , もう一方が 0 である . つまり ,  $\vec{A}$  と  $\vec{B}$  には相関性はなく , その橋梁形式は , トラス橋 , 吊橋 , アーチ橋 , 桁橋のいずれか異なる 2 つである .

$0 < R < 1$  :  $\vec{A}$  と  $\vec{B}$  は , とともに 4 面体 TSAG における原点および 3 つの頂点以外の点を指すベクトルであり , 橋梁形式に相関性がある . ただし , 一致はしていない .

#### 補-4 極座標表示

##### 補-4-1 表示方法

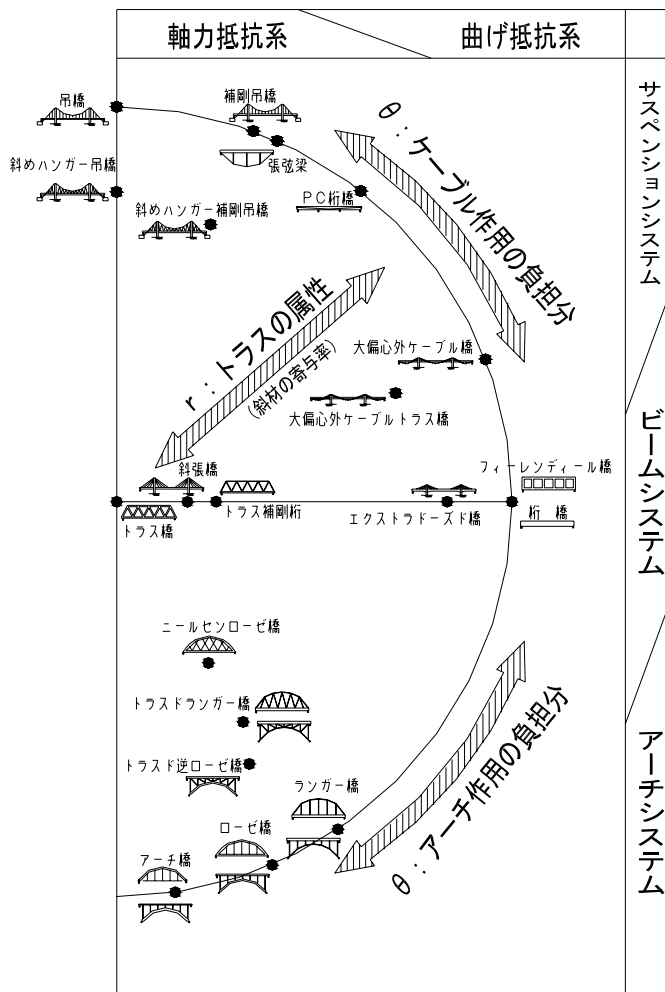
これまでと同様に , 図(補)-5(a)は , 図 3-5 の橋梁形式の相互連続性を示したものであるが , これをもとに , 同図(b)のような極座標表示を考える . 同図(b)は , 原点をトラス橋として , 半径方向にトラスの属性 , 円周方向に桁橋と吊橋およびアーチ橋の連続性をとったものである . 本表示方法によると , 三角座標表示や 2 次元直交座標表示では



図(補)-5 極座標表示による構造形態相関図

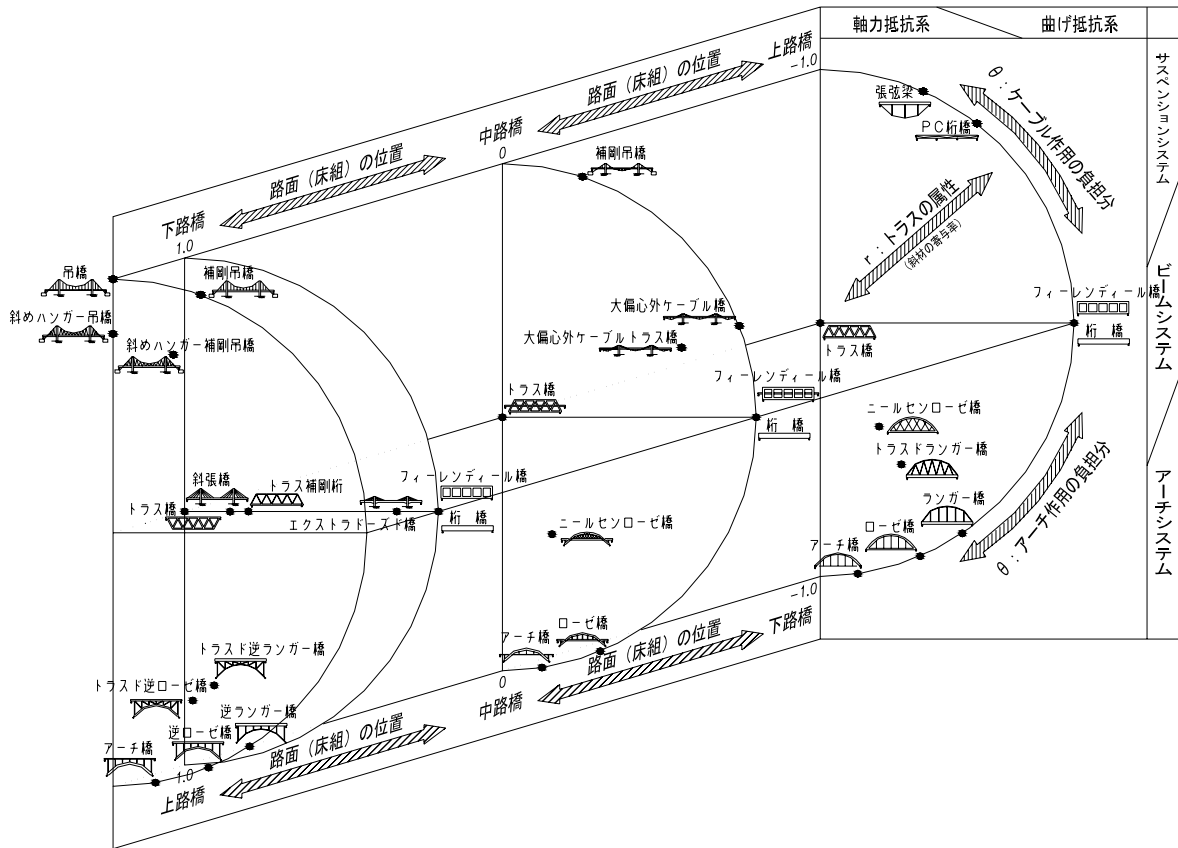
明確に表現されていなかった吊橋～桁橋～アーチ橋という連続性が、明確に表現される。三角座標表示や2次元直交座標表示の場合と同様に、同図(a)で見られる吊橋とアーチ橋の直接的な連続性は、同図(b)では解かれているが、その代わりに、それは吊橋とアーチ橋における構造と形態の対称性として表現されている。吊橋およびアーチ橋における構造と形態の対称性は、同図(b)の横軸に関する線対称の位置として表現されている。また、図3-1で述べた構造システム(サスペンションシステム、アーチシステム、ビームシステム、ウェブシステム、斜材システム)を、各橋梁形式に対応づけて示している。図(補)-6は、図(補)-5(b)をより具体的に表現したものであるが、橋梁形式の力学的な連続性や対称性は表現されているものの、形態に関しては、上路、中路、下路の区別がなされていない。そこで、三角座標表示の場合と同様、これらを区別する場合には、図(補)-7に示すように、路面の位置を、図の奥行き方向にとる。

図(補)-7では、 $0 < \theta < \pi/2$ の領域(図の上半分)が吊橋系橋梁、 $-\pi/2 < \theta < 0$ の領域(図の下半分)がアーチ系橋梁を表しており、それぞれの内部において構造と形態の連続性が確保されると同時に、 $\theta = 0$ の面に対称な位置に、構造と形態の対称性が表される。また、座標の中心軸( $r = 0$ )に近い領域にある橋梁は、斜材システムを有する橋梁形式であり、外縁に近い領域に位置する橋梁は、サスペンションシステム(吊橋)、アーチシステム(アーチ橋)、ウェブシステム(桁橋)など、斜材システムをもたない橋梁形式である。また、縦軸( $\theta = \pi/2$ ,  $\theta = -\pi/2$ )周辺には吊橋、トラス橋、アーチ橋のような、主に軸力部材で構成される橋梁形式が配置され、縦軸から遠ざかるにした



図(補)-6 構造形態相関図の極座標表示

がって、桁橋のような、主に曲げ部材で構成される橋梁形式が配置される。また、円筒軸方向に同じ位置 ( $r = \text{一定}$ ,  $\theta = \text{一定}$ ) にある橋梁は、主構 (メインストラクチャー) の力学的な働きは同じであるが、主構 (メインストラクチャー) と床組の鉛直方向の位置関係 (路面の位置) が異なる橋梁形式が配置される。



図(補)-7 路面の位置を考慮した極座標表示

#### 補-4-2 座標値の算出方法

以上に述べた，極座標の座標値は，次のように求められる．

まず，ある橋梁に含まれる斜材システム（トラス橋），サスペンションシステム（吊橋），アーチシステム（アーチ橋），ウェブシステム（桁橋）の構成配分を， $t, s, a, g$ とし，その定義は補-2-1に述べたとおりとする．

ただし， $t, s, a, g$ は次の条件を満たすものとする．

$$0 \leq t \leq 1, 0 \leq s \leq 1, 0 \leq a \leq 1, 0 \leq g \leq 1, \quad (\text{補-17})$$

$$s + g = 1 \quad (\text{吊橋系}) \quad (\text{補-18a})$$

$$a + g = 1 \quad (\text{アーチ系}) \quad (\text{補-18b})$$

次に，三角座標表示の場合と同様に，斜材システム（トラス橋），サスペンションシ

ステム（吊橋）、アーチシステム（アーチ橋）、ウェブシステム（桁橋）のすべての属性を有する橋梁のプロトタイプ（図 3-14）を考え、 $t$ 、 $s$ 、 $a$ 、 $g$  もまた同様の方法により求めると、

極座標の座標値（ $r$ 、 $\theta$ ）は、以下のように表される。

$$r = 1 - t \quad (\text{補-19})$$

$$\theta = \frac{\pi}{2} \cdot s \quad (\text{吊橋系}) \quad (\text{補-20a})$$

$$\theta = -\frac{\pi}{2} \cdot a \quad (\text{アーチ系}) \quad (\text{補-20b})$$

さらに、路面の位置についても、三角座標表示の場合と同様に考えると、図(補)-7で示した構造と形態の連続性と対称性は、図(補)-8のように立体的に拡張して考えることができる。

#### 補-4-3 相関性の定量化手法

橋梁形式ごとに複数のサンプルを集め、それらを極座標表示することによって、座標内における形式ごとの分布状況を把握することができる。つまり、ある橋梁形式に対して、 $n$ 橋分のサンプルが得られたとすると、それらの座標（ $r_i$ 、 $\theta_i$ ）の平均値（ $\bar{r}$ 、 $\bar{\theta}$ ）は、次のように表される。

$$\begin{aligned} \bar{r} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (r_i) \\ &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (1 - t_i) \end{aligned} \quad (\text{補-21})$$

$$\begin{aligned} \bar{\theta} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\theta_i) \\ &= \frac{\pi}{2n} \sum_{i=1}^n (s_i) \quad (\text{吊橋系}) \end{aligned} \quad (\text{補-21})$$

$$\begin{aligned} \bar{\theta} &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\theta_i) \\ &= -\frac{\pi}{2n} \sum_{i=1}^n (s_i) \quad (\text{アーチ系}) \end{aligned} \quad (\text{補-22})$$

つまり，

$$(\bar{r}, \bar{\theta}) = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (1-t_i), \frac{\pi}{2n} \sum_{i=1}^n (s_i) \right) \quad (\text{吊橋系}) \quad (\text{補-24a})$$

$$(\bar{r}, \bar{\theta}) = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (1-t_i), -\frac{\pi}{2n} \sum_{i=1}^n (s_i) \right) \quad (\text{アーチ系}) \quad (\text{補-24b})$$

もし， $(r_i, \theta_i)$  が正規分布をなすとするとき， $(\bar{r}, \bar{\theta})$  は，その橋梁形式を代表する典型的な座標値といえる．

さらに， $(r_i, \theta_i)$  の分散や標準偏差は次のようにして求められる．

分散  $(V_r, V_\theta)$ ，

$$V_r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^2 \quad (\text{補-25a})$$

$$V_\theta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\theta_i - \bar{\theta})^2 \quad (\text{補-25b})$$

標準偏差  $(S_r, S_\theta)$ ，

$$S_r = \sqrt{V_r} \quad (\text{補-26a})$$

$$S_\theta = \sqrt{V_\theta} \quad (\text{補-26b})$$

式(補-25a, b)，式(補-26a, b)は，その橋梁形式が，座標上においてどの程度のばらつきを有しているかを表している．

次に，ある橋梁形式を表すベクトル， $\vec{A}(\bar{r}_a, \bar{\theta}_a)$  と，他の橋梁形式を表すベクトル， $\vec{B}(\bar{r}_b, \bar{\theta}_b)$  の相関係数  $R$  について，まずは， $\vec{A}$  と  $\vec{B}$  が，ともに， $0 < \theta < \pi/2$  の領域 (図の上半分) に存在する場合を考える．このとき， $\vec{A}$  と  $\vec{B}$  の相関係数  $R$  は，「 $\vec{A}$  と  $\vec{B}$  の近さ」で表現することができるため，これを「 $\vec{A}$  と  $\vec{B}$  のなす角度」と「 $\vec{A}$  の  $t$  値 ( $\bar{t}_a$ ) と  $\vec{B}$  の  $t$  値 ( $\bar{t}_b$ ) の差， $(\bar{t}_a - \bar{t}_b)$ 」を用いて表せば， $R$  は次のように定式化することができる．

$|\vec{A}| \neq 0$  , かつ ,  $|\vec{B}| \neq 0$  の場合 ,

$$R = \cos \theta \cdot (1 - |t_a - t_b|)$$

$$= \frac{\vec{A} \cdot \vec{B}}{|\vec{A}| \cdot |\vec{B}|} \cdot (1 - |t_a - t_b|) \quad (\text{補-27})$$

$\vec{A} = 0$  , または ,  $\vec{B} = 0$  の場合 ,

$$R = 1 - |t_a - t_b| \quad (\text{補-28})$$

同様に ,  $\vec{A}$  と  $\vec{B}$  が , とともに ,  $-\pi/2 < \theta < 0$  の領域 ( 図の下半分 ) に存在する場合についても ,  $\vec{A}$  と  $\vec{B}$  の相関係数  $R$  は , 式(補-27)および式(補-28)のように表すことができる .

$\vec{A}$  と  $\vec{B}$  が , とともに  $0 < \theta < \pi/2$  の領域 ( 図の上半分 ) , または , とともに  $-\pi/2 < \theta < 0$  の領域 ( 図の下半分 ) にある場合は問題ないが , 一方が  $0 < \theta < \pi/2$  の内部にあり , 他方が  $-\pi/2 < \theta < 0$  の内部にある場合 , 単純にベクトルの「近さ」で相関性を表すことはできない . このような場合 , 相関係数の符号を負とすることによって , これを負の相関 , つまり , 橋梁形式に対称性があるものとして表現することにする . これらを整理すると , 次のようになる .

ベクトル  $\vec{A} ( \bar{r}_a , \bar{\theta}_a )$  とベクトル  $\vec{B} ( \bar{r}_b , \bar{\theta}_b )$  が , とともに  $0 < \theta < \pi/2$  の内部 , または ,

ともに  $-\pi/2 < \theta < 0$  の内部にあり ,  $|\vec{A}| \neq 0$  , かつ ,  $|\vec{B}| \neq 0$  の場合 ,

$$R = \cos \theta \cdot (1 - |t_a - t_b|)$$

$$= \frac{\vec{A} \cdot \vec{B}}{|\vec{A}| \cdot |\vec{B}|} \cdot (1 - |t_a - t_b|) \quad (\text{補-29})$$

ベクトル  $\vec{A}(\bar{r}_a, \bar{\theta}_a)$  とベクトル  $\vec{B}(\bar{r}_b, \bar{\theta}_b)$  が、ともに  $0 < \theta < \pi/2$  の内部、または、  
 ともに  $-\pi/2 < \theta < 0$  の内部にあり、 $\vec{A} = 0$ 、または、 $\vec{B} = 0$  の場合、

$$R = 1 - |t_a - t_b| \quad (\text{補-30})$$

ベクトル  $\vec{A}(\bar{r}_a, \bar{\theta}_a)$  とベクトル  $\vec{B}(\bar{r}_b, \bar{\theta}_b)$  が、一方は  $0 < \theta < \pi/2$  の内部に、他方は  $-\pi/2 < \theta < 0$  の内部にあり、 $|\vec{A}| \neq 0$ 、かつ、 $|\vec{B}| \neq 0$  の場合、

$$\begin{aligned} R &= -\cos \theta \cdot (1 - |t_a - t_b|) \\ &= -\frac{\vec{A} \cdot \vec{B}}{|\vec{A}| \cdot |\vec{B}|} \cdot (1 - |t_a - t_b|) \end{aligned} \quad (\text{補-31})$$

ベクトル  $\vec{A}(\bar{r}_a, \bar{\theta}_a)$  とベクトル  $\vec{B}(\bar{r}_b, \bar{\theta}_b)$  が、一方は  $0 < \theta < \pi/2$  の内部に、他方は  $-\pi/2 < \theta < 0$  の内部にあり、 $\vec{A} = 0$ 、または、 $\vec{B} = 0$  の場合、

$$R = -1 + |t_a - t_b| \quad (\text{補-32})$$

なお、路面の位置（上路，中路，下路）については、通常、地形条件などによって決定されていることが多く、それらの平均や分散をとることに意味はない。したがって、個別の橋梁について、路面の位置に関する形態的な相関性  $R'$  は、別途、次のような指標で与える。式(補-33)によれば、例えば、一方が  $d = 1.0$  の下路吊橋で、他方が  $d = -1.0$  の下路アーチ橋の場合、 $R' = 0$  と表される。

$$R' = 1 - \frac{|d_a - d_b|}{2} \quad (\text{補-33})$$



以上の議論により，極座標表示における橋梁形式の相関性は，

$$(R, R') \quad (\text{補-34})$$

のように表される．

#### 補-5 各表示方法の特性一覧

本論文で述べた 4 種類の構造形態相関図（三角座標表示，2 次元直交座標表示，3 次元直交座標表示，極座標表示）について，表(補)-1a～表(補)-4c に整理しておく．

表(補)-1a 三角座標表示

		三角座標表示
表示方法		
特徴		<ul style="list-style-type: none"> <li>・吊橋とアーチ橋の構造と形態の対称性が表現される。</li> <li>・「吊橋・桁橋・トラス橋」, および, 「アーチ橋・トラス橋・桁橋」という3つの形式の関係を, 対等に扱うことができる。</li> <li>・路面位置(上路, 中路, 下路)の連続性を表現することができる。</li> </ul>
力学的	連続性	・座標空間の連続性として表現
	対称性	・横軸面に関する面对称として表現
形態的	連続性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・座標空間の連続性として表現</li> <li>・路面位置の連続性を奥行き方向に表現</li> </ul>
	対称性	・横軸面に関する面对称として表現
座標値	$t$ (トラス)	$t = \frac{\sum_{i=1}^n (S_{di})}{S_o}$
	$s$ (吊)	$s = \frac{N_c \cdot f_c}{M_o} \cdot (1-t)$

表(補)-1b 三角座標表示

座 標 値	$a$ (ア-チ)	$a = \frac{-N_a \cdot f_a}{M_o} \cdot (1-t)$
	$g$ (桁)	$g = \frac{M_a + M_g}{M_o} \cdot (1-t)$
	$r$ (トラス)	
	$\theta$ (吊, ア-チ, 桁)	
	$d$ (路面)	$d = \frac{2h}{H}$
座標値の範囲		$0 \leq t \leq 1, 0 \leq s \leq 1, 0 \leq a \leq 1, 0 \leq g \leq 1,$
座標値の関係		$t + s + g = 1$ (吊橋系) $t + a + g = 1$ (ア-チ系)
相 関 係 数	表現形式	( $R, R'$ )
	算出方法	<p>座標(A)と座標(B)が、ともに SGT の内部、または、ともに ATG の内部にある場合、</p> $R = 1 - \text{MAX} \left( \left  \overline{t_b} - \overline{t_a} \right , \left  \overline{s_b} - \overline{s_a} \right , \left  \overline{g_b} - \overline{g_a} \right  \right) \quad (\text{吊橋系})$ $R = 1 - \text{MAX} \left( \left  \overline{t_b} - \overline{t_a} \right , \left  \overline{a_b} - \overline{a_a} \right , \left  \overline{g_b} - \overline{g_a} \right  \right) \quad (\text{ア-チ系})$ <p>座標 A と座標 B が、一方は SGT の内部に、他方は ATG の内部にある場合、</p> $R = -1 + \text{MAX} \left( \left  \overline{t_b} - \overline{t_a} \right , \left  \overline{a_b} - \overline{s_a} \right , \left  \overline{g_b} - \overline{g_a} \right  \right) \quad (\text{A が吊橋系, B がア-チ系の場合})$ $R = -1 + \text{MAX} \left( \left  \overline{t_b} - \overline{t_a} \right , \left  \overline{s_b} - \overline{a_a} \right , \left  \overline{g_b} - \overline{g_a} \right  \right) \quad (\text{A がア-チ系, B が吊橋系の場合})$ <p>路面の位置、</p> $R' = 1 - \frac{\left  d_a - d_b \right }{2}$

表(補)-2a 2次元直交座標表示

		2次元直交座標表示	
表示方法			
特徴		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 吊橋とアーチ橋の構造の対称性が表現される。</li> <li>・ 相関係数が, <math>-1 &lt; R &lt; 1</math> の範囲をとり, 統計学と同様な表現形式で相関性を記述することができる。</li> <li>・ 路面位置の連続性を表現することはできない。</li> </ul>	
力学的	連続性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 座標空間の連続性として表現</li> </ul>	
	対称性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 原点に関する点対象として表現</li> </ul>	
形態的	連続性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 座標空間の連続性として表現</li> <li>・ 路面位置の連続性は表現されない</li> </ul>	
	対称性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 原点に関する点対象として表現</li> </ul>	
座標値	$t$ (トラス)	$\left( t = \frac{\sum_{i=1}^n (S_{di})}{S_o} \right) \quad s, a, g \text{ の算出に用いられる}$	
	$s$ (吊)	$s = \frac{N_c \cdot f_c}{M_o} \cdot (1-t)$	

表(補)-2b 2次元直交座標表示

座 標 値	$a$ (ア-チ)	$a = \frac{-N_a \cdot f_a}{M_o} \cdot (1-t)$
	$g$ (桁)	$g = \frac{M_a + M_g}{M_o} \cdot (1-t)$
	$r$ (トラス)	
	$\theta$ (吊, ア-チ, 桁)	
	$d$ (路面)	
座標値の範囲	$0 \leq s \leq 1, 0 \leq a \leq 1, -1 \leq g \leq 1,$ $0 \leq (g+s) \leq 1$ (吊橋系) $0 \leq (g+a) \leq 1$ (ア-チ系)	
座標値の関係	$t = g + s$ (吊橋系) $t = g + a$ (ア-チ系)	
相 関 係 数	表現形式	( $R$ )
	算出方法	$\vec{A} \neq 0$ , かつ, $\vec{B} \neq 0$ の場合, $R = \cos \cdot (1 -  t_a - t_b )$ $= \frac{\vec{A} \cdot \vec{B}}{ \vec{A}  \cdot  \vec{B} } \cdot (1 -  t_a - t_b )$ $\vec{A} = 0$ , または, $\vec{B} = 0$ の場合, $R = 1 -  t_a - t_b $

表(補)-3a 3次元直交座標表示

		3次元直交座標表示
表示方法		
特徴		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 吊橋とアーチ橋を対称的ではなく連続的に表現することで、4つの基本橋梁形式を、すべて連続的な関係として扱う。</li> <li>・ 路面位置の連続性を表現することはできない。</li> </ul>
力学的	連続性	・ 座標空間の連続性として表現
	対称性	・ 吊橋とアーチ橋を対称的ではなく連続的に表現しているため、対称性は表現されない
形態的	連続性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 座標空間の連続性として表現</li> <li>・ 路面位置の連続性は表現されない</li> </ul>
	対称性	・ 吊橋とアーチ橋を対称的ではなく連続的に表現しているため、対称性は表現されない
座標値	$t$ (トラス)	$\left( t = \frac{\sum_{i=1}^n (S_{di})}{S_o} \right) \quad s, a, g \text{ の算出に用いられる}$
	$s$ (吊)	$s = \frac{N_c \cdot f_c}{M_o} \cdot (1-t)$

表(補)-3b 3次元直交座標表示

座 標 値	$a$ (ア-チ)	$a = \frac{-N_a \cdot f_a}{M_o} \cdot (1-t)$
	$g$ (桁)	$g = \frac{M_a + M_g}{M_o} \cdot (1-t)$
	$r$ (トラス)	
	$\theta$ (吊, ア-チ, 桁)	
	$d$ (路面)	
座標値の範囲		$0 \leq s \leq 1, 0 \leq a \leq 1, 0 \leq g \leq 1,$ $0 \leq (s+a+g) \leq 1$
座標値の関係		$t = s+a+g$
相 関 係 数	表現形式	( R )
	算出方法	$\begin{aligned} & \left  \vec{A} \right  \neq 0, \text{ かつ, } \left  \vec{B} \right  \neq 0 \text{ の場合,} \\ & R = \cos \cdot (1 -  t_a - t_b ) \\ & = \frac{\vec{A} \cdot \vec{B}}{\left  \vec{A} \right  \cdot \left  \vec{B} \right } \cdot (1 -  t_a - t_b ) \\ & \vec{A} = 0, \text{ または, } \vec{B} = 0 \text{ の場合,} \\ & R = 1 -  t_a - t_b  \end{aligned}$

表(補)-4a 極座標表示

		極座標表示	
表示方法			
特徴		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 吊橋とアーチ橋の構造と形態の対称性が表現される。</li> <li>・ 「吊橋～桁橋～アーチ橋」という連続性が表現される。</li> <li>・ 路面位置の連続性を表現することができる。</li> </ul>	
力学的	連続性	・ 座標空間の連続性として表現	
	対称性	・ 横軸面に関する面对称として表現	
形態的	連続性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 座標空間の連続性として表現</li> <li>・ 路面位置の連続性を奥行き方向に表現</li> </ul>	
	対称性	・ 横軸面に関する面对称として表現	
座標値	$t$ (トラス)	$\left( t = \frac{\sum_{i=1}^n (S_{di})}{S_o} \right) \quad r, \theta \text{ の算出に用いられる}$	
	$s$ (吊)	$\left( s = \frac{N_c \cdot f_c}{M_o} \cdot (1-t) \right) \quad r, \theta \text{ の算出に用いられる}$	



表(補)-4b 極座標表示

座 標 値	$a$ (ア-チ)	$\left( a = \frac{-N_a \cdot f_a}{M_o} \cdot (1-t) \right)$ $r, \theta$ の算出に用いられる
	$g$ (桁)	
	$r$ (トラス)	$r = 1 - t$
	$\theta$ (吊, ア-チ, 桁)	$\theta = \frac{\pi}{2} \cdot s$ (吊橋系) $\theta = -\frac{\pi}{2} \cdot a$ (ア-チ系)
	$d$ (路面)	$d = \frac{2h}{H}$
座標値の範囲	$0 \leq t \leq 1, 0 \leq s \leq 1, 0 \leq a \leq 1, 0 \leq g \leq 1,$	
座標値の関係	$s + g = 1$ (吊橋系) $a + g = 1$ (ア-チ系)	

表(補)-4c 極座標表示

相 関 係 数	表現形式	$(R, R')$
	算出方法	<p>ベクトル <math>\vec{A}(\bar{r}_a, \bar{\theta}_a)</math> とベクトル <math>\vec{B}(\bar{r}_b, \bar{\theta}_b)</math> が、ともに <math>0 &lt; &lt; /2</math> の内部、または、ともに <math>- /2 &lt; &lt; /2</math> の内部にあり、<math> \vec{A}  \neq 0</math>、かつ、<math> \vec{B}  \neq 0</math> の場合、</p> $R = \cos \cdot (1 -  t_a - t_b ) = \frac{\vec{A} \cdot \vec{B}}{ \vec{A}  \cdot  \vec{B} } \cdot (1 -  t_a - t_b )$ <p>ベクトル <math>\vec{A}(\bar{r}_a, \bar{\theta}_a)</math> とベクトル <math>\vec{B}(\bar{r}_b, \bar{\theta}_b)</math> が、ともに <math>0 &lt; &lt; /2</math> の内部、または、ともに <math>- /2 &lt; &lt; /2</math> の内部にあり、<math>\vec{A} = 0</math>、または、<math>\vec{B} = 0</math> の場合、</p> $R = 1 -  t_a - t_b $ <p>ベクトル <math>\vec{A}(\bar{r}_a, \bar{\theta}_a)</math> とベクトル <math>\vec{B}(\bar{r}_b, \bar{\theta}_b)</math> が、一方は <math>0 &lt; &lt; /2</math> の内部に、他方は <math>- /2 &lt; &lt; /2</math> の内部にあり、<math> \vec{A}  \neq 0</math>、かつ、<math> \vec{B}  \neq 0</math> の場合、</p> $R = -\cos \cdot (1 -  t_a - t_b ) = -\frac{\vec{A} \cdot \vec{B}}{ \vec{A}  \cdot  \vec{B} } \cdot (1 -  t_a - t_b )$ <p>ベクトル <math>\vec{A}(\bar{r}_a, \bar{\theta}_a)</math> とベクトル <math>\vec{B}(\bar{r}_b, \bar{\theta}_b)</math> が、一方は <math>0 &lt; &lt; /2</math> の内部に、他方は <math>- /2 &lt; &lt; /2</math> の内部にあり、<math>\vec{A} = 0</math>、または、<math>\vec{B} = 0</math> の場合、</p> $R = -1 +  t_a - t_b $ <p>路面の位置、</p> $R' = 1 - \frac{ d_a - d_b }{2}$

## 謝辞

本研究を進めるにあたり，多くの方々からご指導やご助言をいただいた。

京都大学大学院工学研究科 川崎雅史教授には，筆者の研究テーマについて多大なるご理解をいただき，終始変わらぬ温かいご指導と励ましのお言葉をいただいた。ここに深甚なる感謝の意を表します。

京都大学大学院工学研究科 河野広隆教授，京都大学大学院工学研究科 杉浦邦征教授には，構造工学の見地より大変貴重なご意見，ご指導をいただいたことに，心より深く感謝いたします。

中村良夫 東京工業大学名誉教授（元京都大学教授）には，本研究の構想から遂行にわたって，終始勇気と励ましのお言葉をいただき，筆者の学位取得に向けて力強いご支援をいただいた。心より深く感謝いたします。

杉山デザインソリューションズ研究所 杉山和雄先生（元千葉大学教授）には，デザイナーの見方や考え方，そして，デザイン実践の経験を数多く与えていただき，研究に対しても，筆者の視野を大きく広げていただいた。心より深く感謝いたします。

そして，筆者が学部を卒業後 7 年間勤務した石川島播磨重工業株式会社（現，株式会社 I H I）では，橋梁の設計実務を通して，筆者にエンジニアとしての基礎を身につけさせていただいた。本研究を遂行するための基礎力は，まさにこの時期に身につけさせていただいたものである。よき上司，同僚たちに深く感謝いたします。

株式会社オリエンタルコンサルタンツでは，コンサルタントの立場から様々な橋梁プロジェクトに関わらせていただいた。また，同社の山田圭二郎博士には，筆者が博士課程の道に進むにあたって多くのご助言をいただいた。心より深く感謝いたします。

研究発表等では，山梨大学工学部 石井信行講師，九州大学大学院工学研究院 樋口明彦准教授，熊本大学大学院自然科学研究科 星野裕司准教授，中央大学理工学部 佐藤尚次教授ほか，多くの方々に貴重なご意見をいただいた。深く感謝いたします。

JIP テクノサイエンス株式会社には，データ作成のためのソフトウェアのご提供をいただいた。心より深く感謝いたします。

京都大学大学院工学研究科 都市環境工学専攻 景域環境計画学分野の出村嘉史助教，同研究室の諸兄には，日々の交流の中で多くの示唆を与えていただいた。深く感謝いたします。

なお，本研究は，筆者も委員として加わった関西道路研究会 道路橋調査研究委員会 橋梁景観研究小委員会（1999～2002，委員長：中村良夫）で行った多くの議論の中にその着想の源を得ている。当時の委員に心より深く感謝いたします。

最後に，ここに記しきれない多くの方々にもご支援をいただきながら本研究がなされたことを銘記し，皆様に感謝の意を表します。