

橋梁形態の変遷からみた 施工プロセスの体系化に関する基礎的研究

水野 裕介¹・久保田 善明²・山口 敬太³・川崎 雅史⁴

¹非会員 修士 大日本コンサルタント株式会社 (〒541-0058 大阪市中央区南久宝寺町3-1-8,
E-mail:mizuno@ne-con.co.jp)

²正会員 工博 富山大学大学院理工学研究部 (〒930-8555 富山市五福3190,
E-mail:kubota@eng.u-toyama.ac.jp)

³正会員 工博 京都大学大学院工学研究科 (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂,
E-mail:yamaguchi.keita.8m@kyoto-u.ac.jp)

⁴正会員 工博 京都大学大学院工学研究科 (〒615-8530 京都市西京区京都大学桂,
E-mail:kawasaki.masashi.7s@kyoto-u.ac.jp)

施工の完了した橋梁の構造形態は、施工時の構造形態から強い影響を受けている。その為、橋梁のデザインと施工プロセスを並行して考える視点が重要となる。本研究発表は、既往の研究で明らかにされてきた橋梁の構造形態に通徹する原理の体系を基本として、施工プロセスを時系列に沿って体系化できることを明らかにした。具体的な成果は以下の通りである。1) 施工時における構造形態の変遷に関して、三角座標表示を用いることにより明らかにした。2) 施工プロセスの分析によって工法を体系化した。3) デザイン思想の観点から6橋梁の実例を取り上げ、施工プロセスと構造形態の関係性に関する知見を広げた。

キーワード: 橋梁, 構造デザイン, 工法, 施工プロセス, 体系化

1. 背景と目的

(1) 橋梁におけるデザイン思想の変遷

橋梁のデザイン思想は、技術の進歩や社会的要請、または設計者の個性に応じて様々に発展してきた。例えば、ロベール・マイヤール (1972~1940) は1930年にサルギナトーベル橋 (図-1⁰) を設計し、当時まだ新しい素材であった鉄筋コンクリートにひとつの規範的な形態を与えた⁰。オブ・アラップ (1895~1988) は1963年にキングスゲート橋 (図-2⁰) において革新的な施工プロセスによる革新的な構造形態の歩道橋を世に残した⁰。サンティアゴ・カラトラバ (1951~) は1992年にアラミージョ橋 (図-3⁰) において力の流れを強調する表現を生み出した。田村幸久はカラトラバによる一連の設計を「新(ネオ)構造主義」と呼んだ。一方、WEST8設計事務所が2000年に手掛けたスポレンブルグ橋 (別名; パイソン・ブリッジ) (図-4⁰) は卓越した解析技術によって奇抜な形態を実現している。佐々木葉はこの橋を例に挙げ、形態そのものに橋の存在価値を見出す考え方を「形態コンセプト主義」と呼んでいる⁰。

橋梁の形態はその構造的骨格に強く依存する。しかし施工法や架設コスト、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う為、デザインは一意的に決定せず、設計思想は多岐に渡る。力学的骨格(構

造)と視覚的フォルム(形態)を同時に考慮する「構造デザイン」は、カラトラバに特徴付けられる「新構造主義」へと発展し、構造と形態の融合を通して生命の躍動感を表現した。一方で構造の合理性の追求から離れて形態の優先度を高める事で、コンセプトやイメージが先行し、それらに構造をフィットさせている様に捉えられる自由な発想の「形態コンセプト主義」が生まれてきた。すなわち、構造のバランスで緊張感を出すのではなく、造形によって様々なイメージを喚起する、現代アートのなアプローチである。



図-1 サルギナトーベル橋



図-2 キングスゲート橋



図-3 アラミージョ橋



図-4 スポレンブルグ橋

表一 デザイン思想に関する代表的な橋梁と設計概要

代表的な橋梁	竣工年	主な設計者	概要
サルギナトーベル橋	1930	マイヤール	構造デザイン
キングスゲート橋	1966	アラップ	施工プロセスの革新
アラミージョ橋	1992	カラトラバ	新構造主義
スポレンブルグ橋	2000	WEST8	形態コンセプト主義

(2) 技術革新と革新的な施工プロセスのデザイン

完成した橋梁の構造形態は、施工プロセスの履歴に強く影響を受けている。その為、革新的な施工プロセスは革新的な橋梁デザインを生み出す事がある。例えば、オブ・アラップが設計したイギリスのダラムに架かるキングスゲート橋(図一2)は、施工プロセスを完成時の形態へと見事に組み込んでいる。本橋では、河川の生態系の保全や隣接する大学のポート部の練習を邪魔しない様にベントや支保工を用いていない。代わりに、V字型のコンクリート製の橋脚と桁により構成される逆三角形のラーメン構造を河川の両岸に河川と平行に造り、それぞれ90度回転させて閉合させることによって完成した。その土地の持つ固有の問題を解決するために、施工プロセスが新しい施工方法を生みだした事例である。

(3) 本研究の目的

本研究の目的は、体系的かつ時系列に沿って施工プロセスを反映した橋梁構造形態の体系化を行う事により、施工プロセスのデザインを再認識することである。すなわち施工プロセスと構造形態の関係性に関する知見を広げることである。

2. 基礎理論

ここでは、本研究の理論的基礎をなす構造形態相関図の三角座標表示について解説する。

(1) 作用力と構造システムおよび基本橋梁形式

一般的に橋梁には5種類の力が作用する(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)。作用力に対応する4つの基本橋梁形式は、作用力の次元に応じて表一2に示すように表現が可能となり、それぞれに典型的な構造システムが当てはまる。構造システムは作用力の伝達機構によって定義されている。サスペンションシステムおよびアーチシステムは2つ以上の点を繋ぐことによって初めて成立する。すなわち、橋梁に作用する力を最終的には2つ以上の端点に配分して受け流す事がサスペンションシステムおよびアーチシステム成立するための条件となる。一方、ビームシステムは橋梁に左右する力をキャンチレバー形式で耐える事ができる。

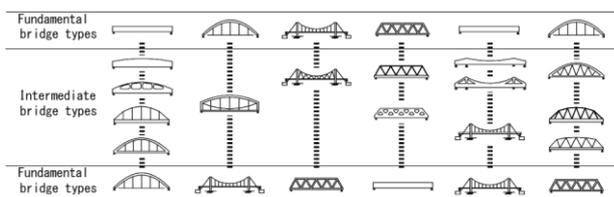
(2) 基本橋梁形式間の連続的關係性

図一5では、任意の2種類の基本橋梁形式に於ける組み合わせについて6通りの表現がされている。この図では、吊橋とアーチ橋は連続的に表現されているが(左端より2番目)、実際は対称に表現する事が可能である。

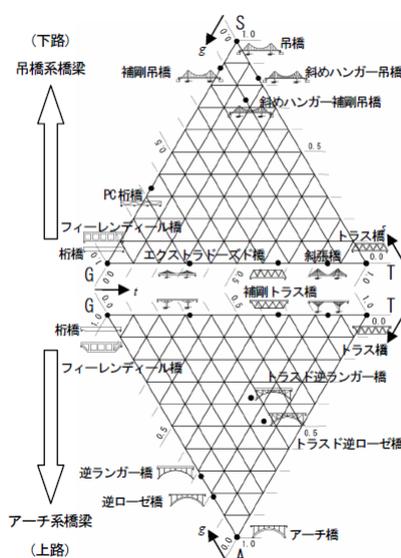
表一2 作用力に対する構造システムおよび基本橋梁形式

[久保田 2010]

作用力	1次元	2次元	3次元	典型的な構造システム	基本橋梁形式
引張力	○	○	○	サスペンションシステム	吊橋
圧縮力	○	○	○	アーチシステム	アーチ橋
曲げモーメント		○	○	ビームシステム(ウェブシステム)	桁橋
せん断力		○	○	ビームシステム(斜材システム)	トラス橋 斜張橋
ねじりモーメント			○	—	—



図一5 基本橋梁形式間の連続的關係性 [久保田 2010]



図一6 三角座標表示による構造形態相関図 [久保田 2010]

図一5に見られる関係性は図一6の様左右対称かつ上下1組の三角座標によって置き換えることが出来る。これにより、基本橋梁形式から派生した特殊な橋梁形式に関しても三角座標上にプロットすることが出来る。

3. 施工プロセスの体系化

(1) 構造形態の推移¹⁾

構造形態は橋のライフサイクル変化に伴って推移していく。この論文においては、その推移状況は、1). 施工段階, 2). 完成段階, 3). 改造段階の3段階に区別できる。その他に橋梁が撤去され廃道となる場合、廃道とならず架換えられる場合、移築・転用される場合がある。

1). 施工段階は新設および架換えの段階, 2). 完成段階は1). の完工後に供用されている段階, 3). 改造段階は補強, 補修, 拡幅といった改造後に供用されるまでの

段階であると定義する。以下では改造の際に用いる構造を付加構造と呼ぶ。移築は場所を変えてもう一度橋梁として供用される場合、転用は従前の機能と別の用途で新たな価値を生み出す場合とそれぞれ定義する（図-7）。

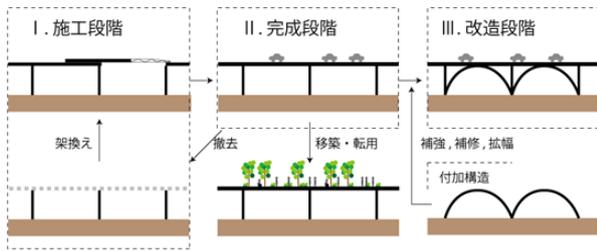


図-7 構造形態の推移概要図

(2) 構造形態の推移の要素分類

橋梁が存在する座標系に施工に伴う運動を取り入れ、3次元空間で6つの自由度の組合せによって記述する（図-8）。x軸は橋軸方向、y軸は水平面上橋軸直角方向、そしてz軸は鉛直方向を表す。座標の原点は、橋梁構造物の回転が最も単純になるx軸上の1点に設定する。またx軸、y軸、z軸において、それらに平行な方向への移動をそれぞれMov-x、Mov-y、Mov-zと呼び、平行な直線周りの回転をそれぞれRot-x、Rot-y、Rot-zと呼ぶ。

この構造要素は4つの基本構造システム（サスペンションシステム、ウェブシステム、斜材システム、アーチシステム）を含めて表-3の様に表される。初めに、橋

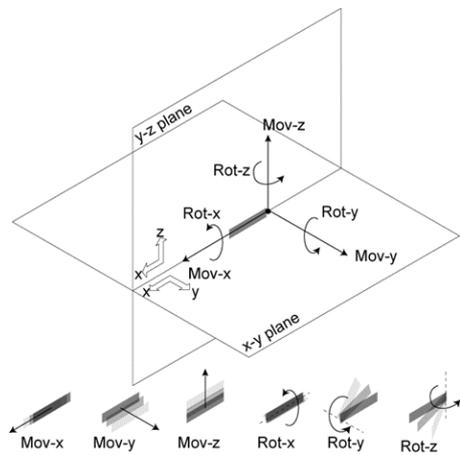


図-8 橋梁の移動・回転の定義

梁の構造的な条件が、スパンニングシステムとキャンチレバーシステムに分類される。さらに、スパンニングシステムはy-z平面上内にある端点において回転自由型と回転固定型に細分化される。この分類は、単純桁橋、連続桁橋、ラーメン橋といった典型的な橋梁を表現する際に用いる事が可能である。以上より、表-3中の構造状態の表現、および移動要素の表現の組み合わせによって全ての施工プロセスの要素が表記可能となった。

(3) 構造形態推移の表現方法

図-9では、ライフサイクル内の施工段階、完成段階、改造段階における構造形態の推移が構造形態相関図によって表されている。施工プロセスおよびライフサイクルにおいて構造システムが移り変わる際、構造形態相関図も合わせて変化する。加えて、ダイアグラムの橋梁部材を表す線が描かれており、施工推移状況の段階に応じて色分けされている。構造形態相関図に色を付けたものは、それぞれライフサイクルの段階および付属構造と対応している。施工段階は水色、完成段階はマゼンタ、改造段階はオレンジ色、付加構造は紫色で表されている。本論文では1) 施工段階から2) 完成段階までのプロセスである新設施工を取り扱う。図-10は構造形態相関図上にプロットする点の表記方法である。プロットする点の構造の撤去・残置およびスパンニング・片持ちの状態を表している。赤色は構造が最終的に残置すること、青色は構造が最終的に撤去されること、マル印はスパンニング構造であること、バツ印は片持ち構造であることを表す。橋梁部材を表す線についても同じく色分けされており、施工段階の部材は水色、完成段階の部材はマゼンタで表される。施工プロセスおよびライフサイクルはダイアグラム図の左側から右側へ移行していく。

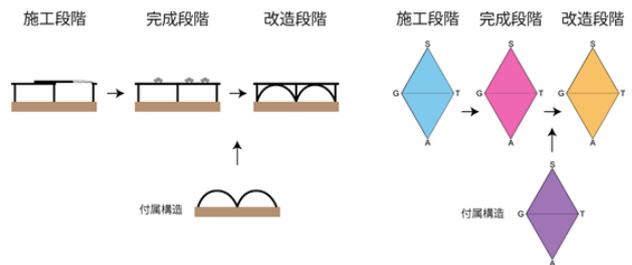


図-9 構造形態相関図による施工プロセス表記

表-3 4つの基本構造システムに対するスパンニング/キャンチレバーシステムおよび移動要素

構造システム	要素								
	スパンニングシステム		キャンチレバーシステム	移動					
	境界条件	回転自由		回転固定	Mov-x	Mov-y	Mov-z	Rot-x	Rot-y
サスペンションシステム	○	×	×	×	○	○	△	△	×
ビームシステム	ウェブシステム	○	○	○	○	○	△	○	○
	斜材システム	○	○	○	○	○	△	○	○
アーチシステム	○	×(*)	×	×	○	○	△	△	×

注) ○；適用可能, ×；適用不可能, △；条件によって可能
(*)；理想的なアーチシステムは曲げモーメントを伝えない

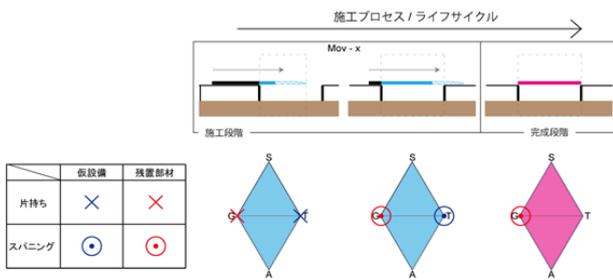


図-10 施工プロセス/ライフサイクルダイアグラムの例(送出し工法)

(4) 仮設備の分類

橋梁の施工には多くの仮設備が用いられる。それらの機能は多岐に渡るが、施工プロセスにおける機能によって以下の通り4種類に大別する。

a) 支保設備…部材を所定の位置で保持する設備。ベント、仮支柱、仮斜材、アーチセントル、直吊り用ケーブル、横取り装置、ロアリング工法用ケーブル、架設桁などが挙げられる。

b) 据付設備…部材の運搬に用いられる設備。エアスピニング、固定クレーン類、自走クレーン車、フローティングクレーン、台船、ロアリング工法用ケーブル、架設桁などが挙げられる。

c) 移動設備…平行移動や回転移動を可能とする設備。スライドジャッキ、ヒンジ、ベアリング支承などが挙げられる。

d) 補助設備…安全確保や作業効率改善をする設備。逸走防止装置、ワイヤブリッジ、手延べ機などが挙げられる。

本論文ではa) 支保設備を構造形態を構成する要素としている。ただし、上記の機能が重複する場合もある。例えば、ロアリングで用いるケーブルや架設桁はa), b) 双方の機能を含む。

(5) 施工制約条件

また、時間に関する施工地点固有の要請が強い状況、および施工プロセスに関わる時間制約条件を把握する際の主要要素として以下のものが挙げられる。

a) 交通状況

交通流量、鉄道・道路の縦横断、航路上、主要道路の架換えなど

b) 自然環境

寒冷地域、ダムおよび貯水池上流部、生態系保護、近隣住民への配慮

c) 社会情勢

災害復旧、財政状況など

施工制約条件として挙げられるものとして、空間的制約条件および時間制約条件がある。

(6) 空間制約条件

橋梁は施工時に空間的な制約を受ける。例えば、建築限界や景観条例といった規則による取決め、あるいは資材を運搬が可能な通路の有無、仮設備による物理的な干渉条件などが挙げられる。本論文の施工プロセス/ライフサイクルダイアグラムにおいては、仮設備の橋体への物理的な干渉に関して記述している。

(7) 時間制約条件

前節で挙げた時間制約条件を「工期」、「現場における時間制限」、「施工可能期間」の3種類に分類する。

a) ~d) の様な交通状況における制限が厳しい施工制約条件下では、時間制限は、一般に数時間～数日程度であり、工期に比較しても極めて短い。e), f) のように自然状況によって施工できる期間に限られる施工制約条件下では、工期が長くなる傾向がある。g) の様に災害復旧など、社会的要請によって施工が急がれる施工制約条件下では、工期を短く設定する場合が多い。例えば、寒冷地であれば厳寒期、河川橋であれば豊水期などを避ける様に考慮して施工計画を調整する(表-4)。

表-4 現場条件に対する時間制約条件

施工条件要素	時間制約	工期	施工可能期間	現場における時間制限
交通状況		短い	—	極めて短い
自然環境		やや短い	厳寒期以外・湯水期など	—
社会情勢		短い	財政状況等	—

(8) 橋梁の工法体系化

橋梁の新設工法を体系化を行った結果を表-5に記載する。全ての工法は施工プロセスの進め方から、漸進工法、一括架設工法、支保工法、移動工法の4種類に分類される。以下に4種類の工法の概要を示す。

a) 漸進工法

漸進工法とは、漸進的な施工プロセスを取る工法である。漸進工法は施工段階の構造システムから、サスペンションタイプ、ビーム/キャンチレバータイプ、ビーム/スパンニングタイプ、アーチタイプの4つのタイプに分類される。

サスペンションタイプの工法によって造られる橋梁の構造形態は多岐に渡る。吊橋はもちろん、吊構造を支保設備として用いたケーブルエレクション直吊り工法ではトラス橋、アーチ橋などあらゆる構造形態の橋梁が施工可能である。

ビーム/キャンチレバータイプは、施工段階の構造形式がキャンチレバーシステムを取る施工タイプである。2章(1)で示した通り、キャンチレバーシステムはビームシステムであるウェブシステムとトラスシステムで構成される。地面から、あるいは左右対称にバランスさせる様にもう一方の張出し部材から反力を得て張り出してい

く事が可能である。

ビーム/スパンニングタイプは、仮設段階において、スパンニングシステムとしてビームシステムが存在する施工タイプである。この際、ビームシステムとして支保設備および据付設備の役割を果たす構造体を架設桁と呼ぶ。ただし、架設桁を用いた工法であっても、据付設備としての役割のみではビーム/スパンニングシステムとは認められない。

アーチタイプとは、仮設のアーチシステムを手掛かりに他の構造を造る施工タイプである。アーチタイプの工法が他の構造システムを造る事は極めて稀である。それはアーチシステムの構成に掛かる労力が大きい為、アーチ以外の構造を生み出すために敢えてアーチシステムを経由する事は経済的とならない為である。

b) 一括架設工法

一括架設工法は、大規模な据付設備によって橋体を一括で架設する工法である。部分支持による分散応力状態と一様支持による無応力状態に分類される。両者を分類する明確な指標は存在しないが、支持点の数と位置から傾向としては連続的に二極化していると考えられる。

表-5 橋梁の工法体系化一覧表

基本4工法	構造形態相関図 /軸設定図	施工タイプ	構造変化 表記	施工段階		代表的な工法
				スパンニング /キャンチレバー	支保設備例	
漸進工法		サスペンション	S S→T, G, A	スパンニング	— 直吊りケーブル	吊橋工法 ケーブルエクシジョン直吊り
		ビーム /キャンチレバー	T→T T→T, G→G T→T, G, A T→T, A G→G (T; Mov-x)	キャンチレバー	— — 仮主塔・仮斜材 仮斜材 —	斜張橋工法 バランスドキャンチレバー工法 ピロン工法 トラス張出し工法 移動架設桁片持ち工法 (P&Z工法)
		ビーム /スパンニング	T→G (T; Mov-x) T→G (T; Mov-x)	架設桁 架設桁	—	移動架設桁単径間工法 (スパンバイスパン工法) 移動架設桁現場打ち工法 (MMS-OPS工法)
		アーチ	A→A	スパンニング	セントル材 メラン材	アーチセントル工法 メラン工法
一括架設 工法	/	一括架設 /部分支持	T→S T→A	キャンチレバー	クレーン 台船	吊橋の部分支持一括架設 アーチ橋の部分支持一括架設
		一括架設 /一様支持	— —	—	FC 台船	FC一括架設 台船一括架設
支保工 工法	/	支保工	— —	—	支保工	移動支保工架設工法 固定支保工架設工法
移動工法		移動 /支保設備無し	Mov-x Mov-y Mov-z	キャンチレバー — —	—	送出し工法(支保設備なし) — —
			Rot-x Rot-y Rot-z	— キャンチレバー キャンチレバー	—	— ジャッキアップ回転架設工法 水平回転工法
			Mov-x (Mov-x) Mov-y Mov-z	スパンニング — スパンニング スパンニング	架設桁 — 横取り装置 ワイヤー	—
		Rot-x Rot-y Rot-z	スパンニング スパンニング スパンニング	架換え機 ケーブル 横取り装置	—	回転式架換え工法 ロアリング工法 回転横取り工法

c) 支保工工法

支保工工法は、地面や水上から一様な垂直反力を得て完成形の橋体を支保する工法である。安定した地盤状態や浮力を確保すれば、基本的に強い支持反力を得る事が可能である。支保工タイプの工法によって施工される橋梁は無応力状態での施工が可能であり、形態の自由度も非常に高い。

d) 移動工法

移動工法は、急進的な橋体の移動を施工プロセス内に含む工法である。現場での架橋時間を短時間(数時間～数日)に抑えられる為、交通状況から制限の掛かる跨道橋(架道橋)の施工や、厳寒期・渇水期といった施工可能期間に対する制限のある施工に非常に有利である。一般に平行移動や回転移動にはビームシステム(ウェブシステム・斜材システム)が有利であるが、サスペンションシステムやアーチシステムでも形状保持に地面からの水平反力を必要としない自律した構造であれば可能となる。

4. 事例分析

完成形橋梁の施工プロセス事例を取り上げて示す。全ての工法に対して、一般的な事例を取り上げる際に、以下の4点に留意した。

- ・その施工法によって架設される一般的な橋梁
- ・施工技術において認められている橋梁
- ・デザイン思想に関する記述のある橋梁
- ・特別の理由のない場合は最近の橋梁

事例の選定にあたっては、「土木学会田中賞^{㉖)}」、「橋梁と基礎 Vol.50 特集『次世代に伝えたい50橋』^{㉗)}」、「Bridge Design & Engineering^{㉘)}」を中心に収集し、表-6において、表-5に記した体系化一覧に対応する工法の収集事例を一覧表に纏めた。

工事事例群において特徴的な事例として、以下の(1)～(6)に6橋梁の事例を挙げる(表-7)。ケーブルエレクション直吊り工法により架設されたトラス橋；長谷橋(2016)、一括架設工法により架設された吊橋；ハルゲイバー橋(2001)、一括架設工法により架設されたアーチ橋；ピース橋(2014)、支保工によって架設されたアーチ橋；多摩大橋(2007)、水平回転によって完成したキングスゲート橋(1963)、支保工を用いた送出し架設により架設されたアーチ橋；新豊橋(2007)である。

表-7 工法ごとの事例一覧表

番号	橋名
(1)	長谷橋(上路鋼単純合成合理化トラス橋)
(2)	ハルゲイバー橋(GRP床版吊橋)
(3)	ピース橋(鋼管偏平アーチ橋)
(4)	多摩大橋(連続鋼箱桁補剛アーチ橋)
(5)	キングスゲート橋(5径間V字RCラーメン橋)
(6)	新豊橋(鋼単純箱桁+アーチ複合橋(鋼床版))

表-6 工法ごとの事例一覧表

工法	表記	施工事例			
		橋名	完成橋梁構造	路面形式	完工年
吊橋工法	S	安芸灘大橋	3径間2ヒンジ補剛箱桁吊橋	下路	2000
		夢吊橋	単径間PC吊床版橋	直路	1996
ケーブルエレクション直吊り	S→(T)	長谷橋	鋼単純合成合理化トラス橋	上路	2016
斜張橋工法	T→T	多々羅大橋	3径間連続斜張橋	下路	1999
バランスドカンチレバー工法	T→T	志津見大橋	5径間連続複合PCTラス橋	上路	1979
	G→G	佐奈川橋(下り線)	6径間連続PRCラーメン箱桁橋	—	2012
ピロン工法	T→A	コロドリバー橋	RC固定アーチ橋	上路	2010
トラス張出し工法	T→A	外津橋	RC2ヒンジアーチ橋	上路	1974
移動架設桁片持ち工法 (P&Z工法)	T→G	各務原大橋	10径間連続PCフィンバック橋	—	2013
	(T; Mov-x)	(P&Z装置)	(トラス)	(吊下げ)	—
移動架設桁単径間工法 (スパンバイスパン工法)	T→G	木戸川橋(A1~P13)	13径間連続PC箱桁橋	—	2003
	(T; Mov-x)	(架設桁)	(トラス)	(吊下げ)	—
移動架設桁現場打ち工法 (MMS工法)	T→G	Corgo Viaduct	連続桁橋	—	2012
	(T; Mov-x)	(M60-I)	(トラス)	(型枠支保)	—
アーチセントル工法	A→A	御岳橋	RC固定アーチ橋	上路	1971
メラン工法		頭島大橋	RC固定アーチ橋	上路	2004
吊橋の部分支持一括架設	T→S	Halgavor Bridge	吊橋	下路	2001
アーチ橋の部分支持一括架設	T→A	Peace Bridge	固定鋼管ブレースドアーチ橋	上路	2014
FC一括架設	(G)	牛深ハイヤ大橋	7径間連続鋼箱桁橋	—	1997
台船一括架設	(A)	安治川橋梁	単純トラスドランガー橋	下路	2007
移動支保工架設工法	A→A	Plougastel Bridge	3径間連続固定アーチ橋	上路	1926
固定支保工架設工法	(A)	多摩大橋	連続鋼箱桁補剛アーチ橋	上路	2007
送出し工法	T; Mov-x	小白倉橋	3径間連続合成トラス橋	上路	2005
	G; Mov-x	大平高架橋(下り線)	13径間連続PC箱桁橋	—	2006
鉛直回転工法	G; Rot-y	宿茂高架橋	4径間連続複合ラーメン橋	上路	2000
水平回転工法	T; Rot-z	Kingsgate Footbridge	5径間V字RCラーメン橋	上路	1963
架設桁架設工法	G; Mov-x	港川高架橋	5径間連続少主桁橋	—	2016
	(G; Mov-x)	(抱込み式架設桁)	(トラス)	(抱込み)	—
送出し工法(支保設備あり)	G→A; Mov-x	新豊橋	鋼単純箱桁+アーチ複合橋	下路	2007
横取り工法	T; Mov-y	円山川橋梁	3径間連続トラス橋	下路	2010
巻上げ工法	A; Mov-z	La Vicaria Arch Bridge	SCC充填鋼固定アーチ橋	中路	2007
回転式架換え工法	G→G	羽田本線猿田川橋梁	鋼単純桁	—	1952
ロアリング工法	T→A; Rot-y	高滝ノ沢橋	RC固定アーチ橋	上路	2014
回転横取り工法	A; Rot-z	小形山架道橋	バスケットハンドルニールセンローゼ橋	下路	1998

(1)長谷橋 (S→T)



図-11 長谷橋¹⁰⁾

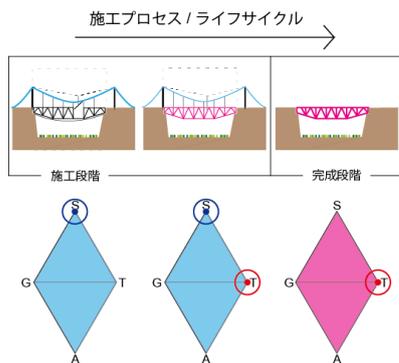


図-12 構造形態の推移 (長谷橋)

表-8 長谷橋；橋梁諸元

橋名	長谷橋 (上路鋼単純合成合理化トラス橋)
主径間	92.0m
完工年	2016年
施工制約条件	自然環境：生態系保護 (ミツガシワ)
施工期間	12ヶ月 (上部工は39日)
施工タイプ	漸進工法/サスペンション
工法	ケーブルエレクション直吊り
構造変化表記	S→T
支保設備	直吊りメインケーブル
掘付設備	ケーブルクレーン
移動設備	—
補助設備	ワイヤブリッジ

長谷橋は、2016年に兵庫県美方郡新温泉町二日市の山間部湿地帯に架設された上路鋼単純合成合理化トラス橋である。兵庫県版レッドデータブックの最高ランクに指定されたミツガシワが橋下に生育し、中間橋脚の設置が困難であるため、支間長92mの単純トラス橋形式に決定した⁹⁾。本橋に適応されたケーブルエレクション直吊り工法では、直吊りメインケーブル (サスペンションシステム) を用いて、吊橋のような構造で無応力に近い状態で橋体を支持している。そのため、形態に掛かる力学的な制限は一般的に少なくなる。長谷橋においては作業用の足場であるワイヤブリッジ (補助設備) のサグ形状に沿う形で桁高を調節する事で、施工性の向上を図っていると考えられる。施工性・安全性向上のワイヤブリッジ (補助設備) が完成状態の形態と一致した事例である。

(2)ハルゲイバー橋 (T→S)



図-13 ハルゲイバー橋¹¹⁾

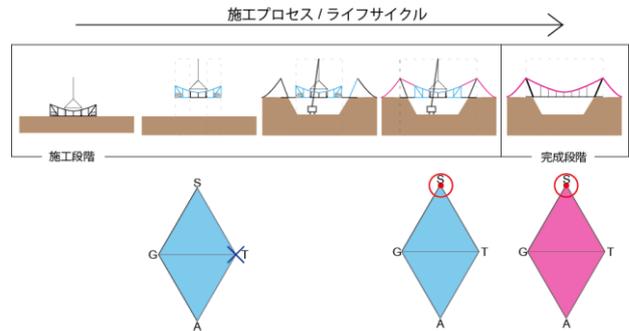


図-14 構造形態の推移 (ハルゲイバー橋)

表-9 ハルゲイバー橋；橋梁諸元

橋名	ハルゲイバー橋 (GRP床版吊橋)
主径間	48.0m
完工年	2001年
施工制約条件	交通状況：道路の横断
施工期間	詳細不明 (20ヶ月以内)
施工タイプ	一括架設工法 (部分支持)
工法	吊橋の一括架設
構造変化表記	T→S
支保設備	—
掘付設備	トラッククレーン
移動設備	—
補助設備	仮設補助斜材

ハルゲイバー橋は、2001年にイングランド南西部に位置するコーンウォール州ボドミンの道路に架設されたGRP床版吊橋である⁹⁾。橋梁の下が道路であるため、クレーンによって支間中央から吊り上げられる際、一時的に挿入された仮設の補助斜材に圧縮力を受け持たせ、両端にバランスした片持ちの斜材システムを形成する。その後クレーンにより架設位置に配置し、床組みの荷重を受け持ちながら橋体両端のあらかじめ余らせておいたケーブルを主塔に固定し仮設の斜材を撤去することで、構造システムは斜材システムからサスペンションシステムへ円滑に移行する。すなわち、死荷重を支えていた構造が、片持ちトラスから吊構造へと移り変わる。トラス構造を形成する補助設備も少量で済み、繊維強化プラスチックを用いて軽量の構造とし、少ない数のクレーンで中小規模の吊橋を一括架設する事で経済性の向上を図っている。新材料を活かした他に例を見ない工法を選択しながらも、シンプルで合理的な施工プロセスを取った吊橋一括架設の優れた模範事例であると言える。

(3) ピースブリッジ (T→A)



図-15 ピース橋¹²⁾

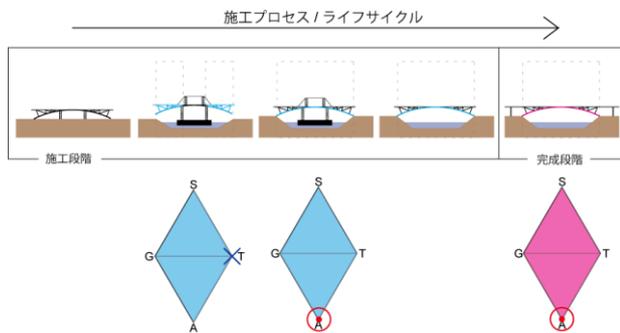


図-16 構造形態の推移 (ピース橋)

表-10 橋梁諸元; ピース橋

橋名	ピース橋 (鋼管偏平7-桁橋)
主径間	30.0+160.0+30.0m
完工年	2007年
施工制約条件	交通状況: 航路上
施工期間	23ヶ月
施工タイプ	一括架設 (部分支持)
工法	アーチ橋の一括架設工法
構造変化表記	T→A
支保設備	台船
掘付設備	台船
移動設備	-
補助設備	仮設補助ケーブル

ピース橋は、2016年にフランス・リヨンのローヌ川に架設された偏平な鋼管アーチ橋である¹²⁾。アーチ部材を一括架設する事例は仮設部材としてメラン材を一括架設する事例を除くと少なく、完成形構造としてアーチを部分支持で一括架設する事例は非常に稀である。2本の鋼管アーチ部材の上に剛性を持った補剛箱桁があり、それらが三角形のダイアフラムによって結ばれトラス構造を形成している。施工手順は以下のとおりである。まず、工場付近のヤードで鋼管アーチ部材を組み立て、仮設の補助ケーブルを橋梁上に設置した後、台船に載せ、河川流下方向に橋軸方向を合わせるように所定の位置まで運搬した。その後、河川上での旋回に10時間、取り付けに8時間を要したが、1日以内に据付け作業を終えている。またライズスパン比が1:20である非常に偏平な構造形態である為にビーム/キャンチレバーシステムを適用する際に補剛の部材が少なく済み、さらには片側56mの張出しが可能であった。偏平な鋼管アーチを仮設ではない斜材によって補剛し、キャンチレバーシステムでアーチ橋の一括架設を行った希少な事例である。

(4) 多摩大橋 (-)

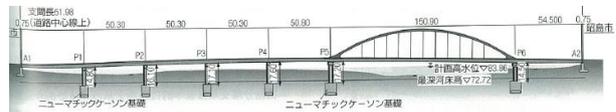
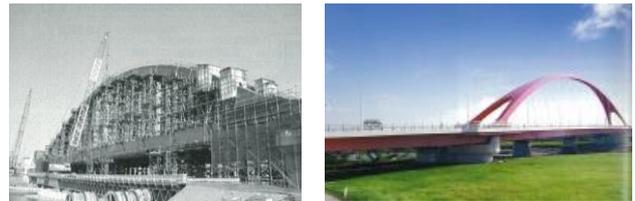


図-17 多摩大橋¹³⁾

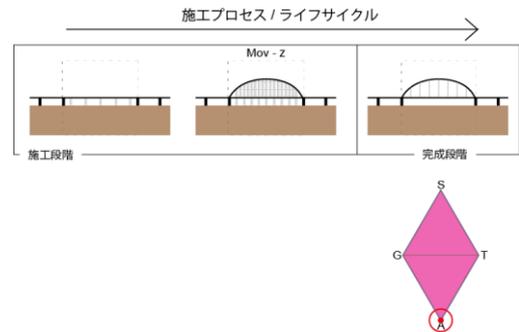


図-18 構造形態の推移 (多摩大橋)

表-11 橋梁諸元; 多摩大橋

橋名	多摩大橋 (連続鋼箱桁補剛7-桁橋)
主径間	52.0+3@50.3+50.8+150.9+54.5m
完工年	1963年
施工制約条件	自然環境: 濁水期
施工期間	60ヶ月 (上部工: 13ヶ月)
施工タイプ	支保工
工法	支保工工法
構造変化表記	-
支保設備	ベント
掘付設備	クレーン
移動設備	-
補助設備	-

多摩大橋は、2007年に東京と八王子市に架設された主径間150.9mの連続鋼箱桁補剛ニールセンローゼアーチ橋である¹³⁾。補剛アーチの径間長と隣接する一般鋼箱桁部の両径間長 (約50m) の比率が1:3:1と支間割のバランスが悪く、アーチの端点にモーメントが集中する。この問題に対する解決策として、アーチと連続桁との接合部をモノコック構造とし、滑らかな連続桁とアーチの接合を生み出した。接合部の応力集中は三次元立体FEM解析によって安全性を確認している。施工段階には、あらかじめ全面的に支保工を配して組み立てと溶接を行う事で残留応力が残るという課題を解決している。モノコック構造の採用および部材の現場における全面溶接によって面構成やエッジなどのディテールを減らし、施工の跡を極力目立たないようにする形態コンセプト主義的印象を生み出している。

(5) キングスゲート橋 (T ; Rot-z)

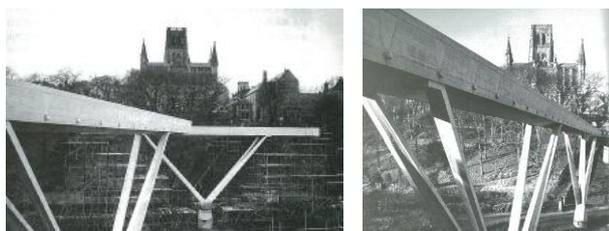


図-19 キングスゲート橋³⁾

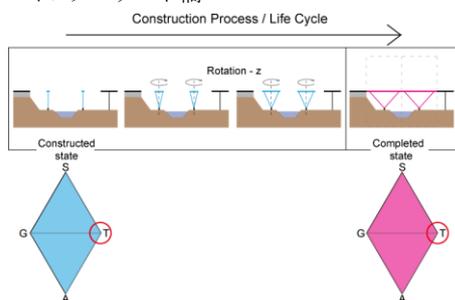


図-20 構造形態の推移 (キングスゲート橋)

表-12 工法ごとの事例一覧表

橋名	キングスゲート橋 (5径間V字RCラーメン橋)
主径間	20.0m-20.0m-20.0m-20.0m-15m
完工年	1963年
施工制約条件	自然環境：近隣住民への配慮など
施工期間	14ヶ月 (回転：3時間)
施工タイプ	移動/支保設備無し
工法	水平回転工法
構造変化表記	T ; Rot-z
支保設備	(ベント※橋軸直角方向)
掘付設備	—
移動設備	回転支承
補助設備	—

キングスゲート橋は、1963年にイギリスのダラムに架設された主径間20.0m-20.0m-20.0m-20.0m-15mのV字橋脚ラーメン橋である³⁾。宿舎からカテドラルへ向かう学生たちの為の歩道橋として、支保設備無しの水平回転工法によって架設された。施工段階において、河川の生態系保全の為にベントや支保工を用いなかった。代わりに、河川の兩岸にV字型をしたコンクリート製の橋脚と桁のラーメン構造で出来た橋梁を一組河川に平行に回転支承の上に造り、1時間に30度ずつ合計90度回転させて完成した。施工段階では両端10mずつにおいてキャンチレバーシステムが取られていたが、完成形においては結合部の鋼製ジョイントにおいてせん断力を伝える為、中央支間ピン結合のスパンニングシステムへ変化したと考えられる。施工性や歴史性、周囲の景観との調和、カテドラルへ向かうシークエンス景観を生み出す配置計画、新材料のコンクリートなど、様々な要素を十分に考慮して最適解を見つけ出したトータルデザインの橋梁である。その土地の持つ固有の問題を解決するために、施工プロセスが新しい施工方法を生みだした事例である。

(6) 新豊橋 (G→A ; Mov-x, 支保設備あり)



図-21 新豊橋¹⁴⁾

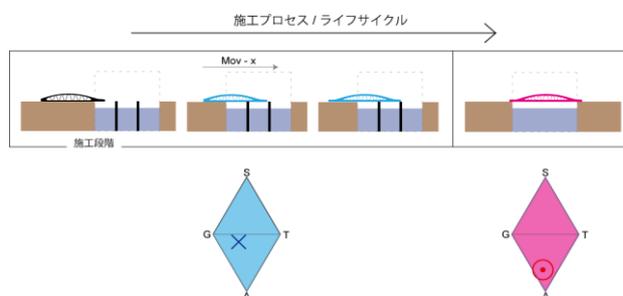


図-22 構造形態の推移 (新豊橋)

表-13 工法ごとの事例一覧表

橋名	新豊橋 (鋼単純箱桁+7桁複合橋 (鋼床版))
主径間	102.7m
完工年	2007年
施工制約条件	交通状況：航路上
施工期間	31ヶ月
施工タイプ	移動/支保設備有り
工法	送出し架設 (支保設備有り)
構造変化表記	G→A ; Mov-x
支保設備	水上ベント2基
掘付設備	—
移動設備	送出し装置 (レール・ジャッキ)
補助設備	—

新豊橋は、2007年に東京都足立区と北区の区境に架設された、主径間102.7mの鋼単純箱桁とニールセンローゼアーチの複合橋である¹⁴⁾。架橋空間の読み解きから始めるトータルデザインをコンセプトとして、「隅田川の橋梁群」に肩を並べる橋梁となることを目指した¹⁵⁾。移動/支保設備有りタイプの送出し工法で施工された。すなわち、手延べ機を用いず、支保工を最小限に抑えたアーチ橋の送出し事例である。本橋において特筆すべき点は、デザインの計画段階において、周辺環境に調和した構造形態へのアプローチと、アーチ橋に送出し工法を適用するという特殊な施工プロセスが同時に考慮した点である。アーチ橋は偏平な形状をしており、その分曲げモーメントに耐えられる桁としての機能を保持していた。すなわち、完成形はアーチ橋であるが送出し施工時に手延べ機無しでもビームシステムとして機能できるように予備設計の段階から計画されていた。送出し工法による施工段階の桁構造 (ビーム/キャンチレバーシステム) と完成段階のアーチ構造 (スパンニングシステム) を同時に考慮した設計事例である。

5. 総括

本研究において、以下の3点が明らかになった。

- 1) 第3章において、構造形態の三角座標表示によって施工プロセスにおける構造形態変化を体系的かつ時系列に沿った把握を可能とした。
- 2) 第3章において、施工プロセスを分析することによって橋梁の架設工法を体系化した。
- 3) 第4章において、6橋梁の事例の分析によって、構造形態の三角座標表示系による施工プロセスの体系化によって橋梁の構造形態の変遷および完成形の橋梁に施工プロセスが与える影響を視覚的に表現した。

今後の課題として、以下の3点を挙げる。

- 1) さらなる事例の収集および分析。
- 2) セグメントを用いた工法の分析。
- 3) 施工プロセスの体系化から考えられる施工プロセスのデザイン手法提案。

6. 最後に

建設業界の橋梁設計における照査方法は許容応力度法から限界状態設計法といった性能照査へと移行が進んでおり^㉓、設計を取り巻く環境は変化している。設計条件の自己設定が求められる中、設計者が体系的な視点を持ち、デザイン思想を持つ必要が出てくるだろう。本論文による施工プロセスの体系化が、施工プロセスに対する体系的な理解の手掛かりとなれば幸いである。

参考文献

^㉑ Structurae HP; <https://structurae.net/>

^㉒ David P. Billington ; “Robert Maillart and the Art of Reinforced Concrete”, pp.47-49, 1990

^㉓ 建築資料研究社：特集1 風景をつくる橋，造景，No. 2, pp. 74-81, 1996

^㉔ 佐々木葉：橋の存在とデザインの意味—そしてディテール，橋梁と基礎，Vol. 40, No. 8, pp. 165-168, 2006

^㉕ Y. Kubota; “Systematization of structures and forms of truss systems”, 34th International Symposium on Bridge and Structural Engineering, Venice, 2010

^㉖ Y. Mizuno; “ Structural Form of Bridges Reflecting the Construction Processes”, Fifth International Workshop on Design in Civil and Environmental Engineering, October 6-8, 2016, Sapienza University of Rome

^㉗ 土木学会田中賞 HP:

https://www.jsce.or.jp/prize/prize_list/7_tanakasakuhin.shtml

^㉘ 株式会社建設図書：特集『次世代に伝えたい50橋，橋梁と基礎，Vol. 50

^㉙ Bridge Design & Engineering ; <https://www.bridgeweb.com/>

^㉚ 大塚慎也ら：サンドイッチ型複合床版を用いた合理化トラス橋の設計と施工（長谷橋），橋梁と基礎，Vol. 51, No. 3, pp. 21-30, 2006

^㉛ WilkinsonEyre HP; <http://www.wilkinsoneyre.com>

^㉜ Bridge Design & Engineering ; “Lyon Lift: French footbridge floats into

position over the Rhone”, Heavy Lifting & Launching, Issue. No. 74, pp.44-47, 2014

^㉝ 藤田進ら：多摩大橋の設計と架設，橋梁と基礎，Vol. 41, No. 11, pp. 25-35, 2007

^㉞ 北島治美ら：新豊橋のデザインと施工 ～隅田川に架ける新時代のアーチ橋～，橋梁と基礎，Vol. 41, No. 5, pp. 2-11, 2007

^㉟ 田村幸久：新豊橋 空間の読み解きから始めるトータルデザイン，橋梁と基礎，Vol. 50, No. 8, 2016

^㊱ 佐藤尚次：設計思想と信頼性理論，橋梁と基礎，Vol. 40, No. 8, 2006