

アーチ橋梁におけるモーション技法を用いた造形発想

内田 樹¹・関 文夫²

¹ 学生会員 日本大学理工学部理工学研究科土木工学専攻
 (〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台 1-8-14, E-mail:csta21005@g.nihon-u.ac.jp)
² 正会員 工博 日本大学理工学部土木工学科

日本国内の橋梁の形態は、技術的な側面から検討されているものが多く、基本形状が類似したものが多く、一方で、欧州の橋梁を見ると、多彩な角度からデザインが検討され、合理的かつ美しく、意匠と構造の融合されている橋梁が数多く存在する。そのデザインプロセスでは、造形発想、空間創造、構造展開の考え方が存在し、デザインの発想の豊さに圧倒される。ここでは、橋梁の形状の検討には、造形発想、空間創造、構造展開の違いが、これらのデザインの差異になるのではないかと仮定し、造形発想の主部材の展開に着目して、分類の検討、主部材の展開方法について考察したものである。

キーワード: アーチ構造, 造形発想, motion, forming, detail

1. はじめに

日本国内の橋梁は、現地条件、設計条件、施工性等の技術的な側面から基本構造形式が検討されている。しかし、デザインはどれも類似したものが多く、構造展開は、側面図から橋軸直角方向に押し出された様な単調な形状しか見受けられない。一方で、欧州の橋梁を見ると、合理的かつ美しく意匠と構造の融合がなされており、個性的な展開をした橋梁造形が数多く存在している。

そこで、橋梁の形状の検討には、造形発想、空間創造、構造展開の違いが、これらのデザインの差異になるのではないかと仮定し、造形発想のプロセスに着目し、主部材の展開、部材形状の発想、ディテールの配慮の3段階に分割し、構造に影響を及ぼしやすい主部材の展開の違いがあることが明確になった。この展開が、橋軸直角方向への動きがある構造展開を持った橋梁デザインへの豊かなヒントになることから、この考え方をまとめたものである。提案の例として、アーチ構造に着目し、上路アーチ橋・下路アーチ橋におけるアーチ構造、ローゼ構造、ランガー構造から、アーチ構造の主部材の展開のプロセスを示すものである。

2. 橋梁デザイン

(1) 橋梁の形状決定プロセス

一般的に、日本では橋梁の形状決定のプロセスに、路

線線形や幅員、荷重、交差物等の設計条件他、地形、地盤、気象、周辺環境などの現地条件、経済性や維持管理費用、建設費用などのファイナンス、資材の運搬方法や架設機械などの施工条件、近年では、まちづくりやまちおこしといった架橋効果も踏まえ、橋梁の基本形式の選定が決定される(図-1)。一方、欧米の橋梁デザインを見ると、これらの条件の他に、橋梁の形状決定のプロセスの中に、空間創造、造形発想、構造展開が行われている(図-2)。欧州の設計家にヒアリングした結果、新しい橋の形状を求めて、この3つの行為は、必ずチェックをするという。これらの発想により、欧州の橋の形状は個性的な造形となっている可能性が高い。

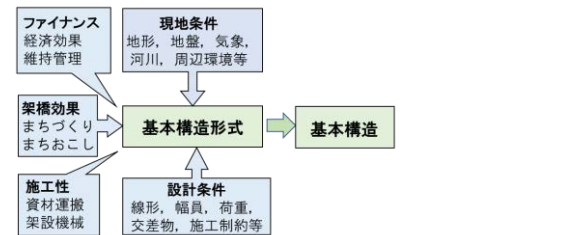


図-1 日本における橋梁形状の決定方法

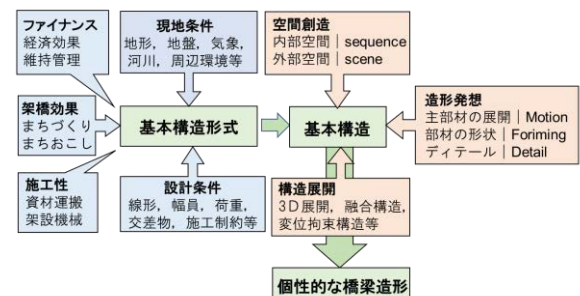


図-2 欧州における橋梁形状の決定方法

(2) 空間創造

橋は、人々が歩いたり、自転車で走行したり、車で走行したり、鉄道の車窓を眺めたり、人々が空間体験する場である。内部空間は、構造材が橋面上に出現すると内部景観に大きな変化をもたらす。特にシークエンス景観への影響が大きい。まちから橋を眺めると橋の外部景観となり、まちの印象となる風景の一部とも成りえる。

Santiago Caltravaが設計したAlameda Bridge(図-3)はアーチリブに傾斜をもたせた構造で、走行車への圧迫感を減らした空間を形成している。



図-3 Alameda Bridge

(3) 造形発想

造形発想とは、「カタチに対する何らかの視点を思いつくこと」と定義しているが、橋梁の場合、オブジェではないので、ゼロからの造形発想ではなく、基本構造という造形からの発想となる。ここで、造形発想のプロセスとして、主部材の展開 (Motion) と部材形状の発想 (Forming)、ディテールの配慮 (Detail) の3段階から成立すると定義した (図-4)。

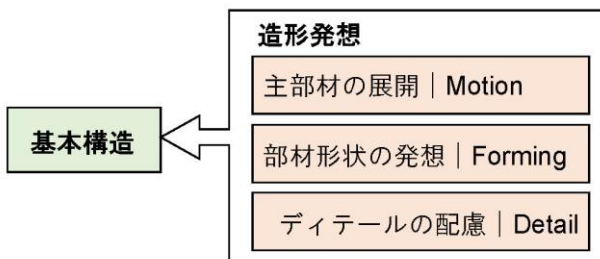


図-4 造形発想の考え方

(4) 構造展開

構造展開は、橋の形態から構造に対する工夫を行うものである。日本でも、主径間と側径間のバランスが悪いときに複合構造で、構造合理性の改善を図る場合があるが、その広義の構造改善を図るものである。Laurant Neyの設計したEsch Bridge(図-5)は、トラス構造とラーメン構造を融合した重合構造となる。また、橋梁全体での構造改善を図る手法として、変位拘束構造等、構造に対する発想の豊かさの違いも大きな差異である。

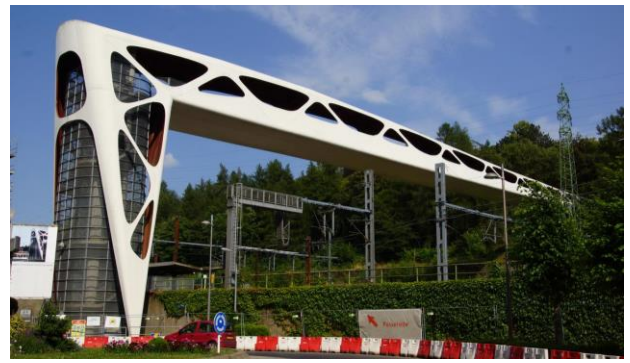


図-5 Esch Bridge

3. 造形発想

(1) 主部材の展開 | motion

motionとは主部材における構造展開のこととする。主部材は橋梁において一番目立つ部分であるため、主部材の展開は構造、橋のフォルムのどちらにも最も影響させる部分である。アーチ構造の主部材はアーチリブと桁から成り立っており、2つの関係性で構造形式が変化する。Arch橋は主にアーチリブで力を受け持つため、リブは太く桁は細い。Lohse橋はアーチリブと桁の双方で力を分担するので、両方とも太い。Langer橋はアーチリブで圧縮力のみを支え、曲げモーメントを桁で負担しているので、アーチリブが細く桁が太い。ここでは、アーチリブの動きのみを変化させ、リブの断面形状を表-1のようにArchでは箱状、Lohseでは棒状、Langerでは板状として、分類(図-6, 7)を行った。

表-1 基本構造 断面形状

	ランガー Langer	ローゼ Lohse	アーチ Arch
上路			
下路			

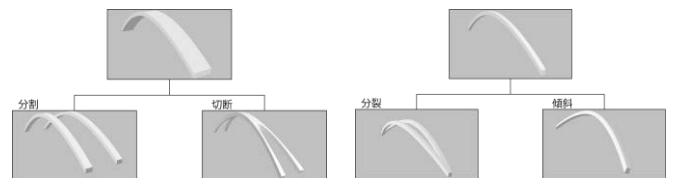
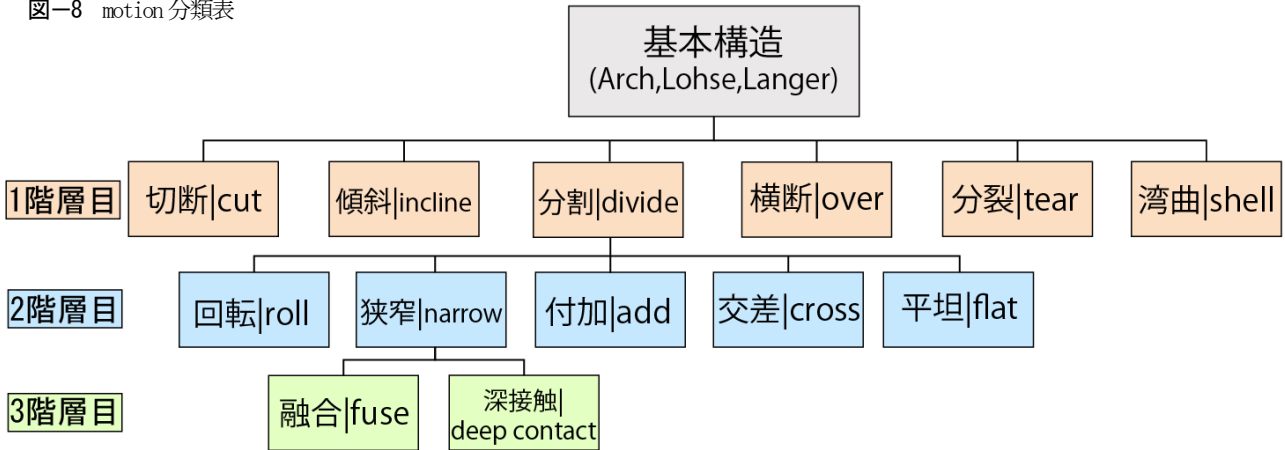


図-6 Arch分類例

図-7 Lohse分類例

図-8はmotionの展開を表で示したものである。motionは基本構造から6系統に派生し、divideからまた派生するように階層的になっていると考え分類を試みた。Langer, Lohseにおいて、上路・下路で断面が変化していないので、Archだけ上路・下路を区別している。

図-8 motion分類表



(2) 部材形状の発想 | forming

formingは部材の断面形状への発想とする。motionで主部材の動作の決定後の断面形状を変化させることと定義し、アーチ構造では、アーチリブの断面形状を指す。断面形状の加工方法として、矩形断面の角度を変化させる方法と、断面形状を円、三角形等の矩形と異なる形状に変える方法(図-9)がある。

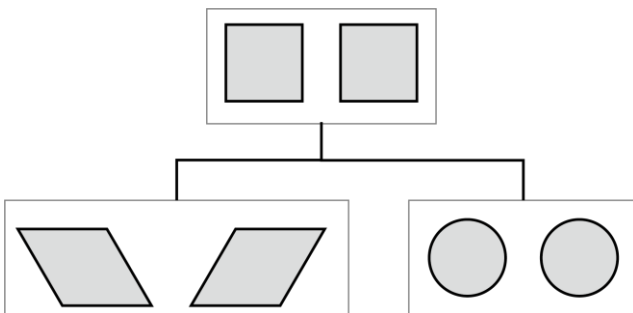


図-9 forming

(3) デティールの配慮 | detail

detailは橋梁のforming後のディテールへの配慮で詳細部や端部を変化させることと定義する。detailは断面を切断して取り除いていく subtraction method (減算法)と断面に新たに取り付けられるaddition method (加算法)を基に展開されていると考えた(図-10)。

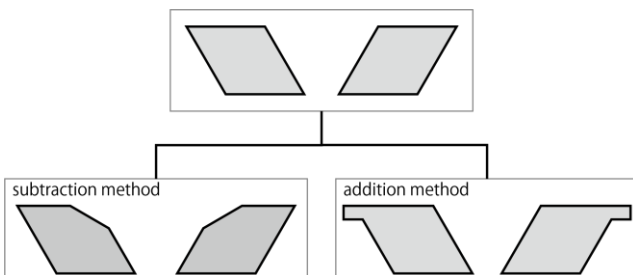


図-10 detail

4. 主部材の展開に関する分類

(1) 分割 | divide

divide(図-11)は基本構造を2つ以上の棒部材に分割したものである。現在、存在するアーチ構造の中で最も多く使用されている。



図-11 divide

(2) 切断 | cut

cutは基本構造を平面図方向から垂直に切断する展開とする。切断方法は3種類あり、アーチリブの端部から切断する展開、アーチリブの側面部から切断する展開、前述した二つを行う展開がある。Arch下路式では通行の関係で、必ず端部を切断して通路の確保を行う必要がある。切断面は曲線と直線の2通りあり、図-12、図-13は Arch下路の切断面を曲線にした展開法である。



図-12 曲線(側面のみ)



図-13 曲線

(3) 回転 | roll

rollはdivide を橋軸方向から回転の展開を加えたものである。回転方向はアーチリブを内側であるin(図-14)と、外側のout(図-15)に傾斜させた2種類ある。



図-14 roll (in)



図-15 roll (out)

(4) 狭窄 | narrow |

narrowはdivideのアーチクラウン同士を近づけていく展開である。アーチリブが接触しないnear(図-16)と、リブを接触させるcontactがある。contactはアーチクラウンで接触させる展開contact- α (図-17)と、片方のアーチリブだけを動かした展開contact- β (図-18)がある。



図-16 near (接近)



図-17 contact (接触)- α



図-18 contact- β

(5) 交差 | cross

crossはdivideを平面図方向から回転させてアーチリブ同士を交じり合わせた展開である。アーチクラウンを重ね合わせた展開であるtop(図-19)と、アーチスプリングを重ね合わせた展開であるend(図-19)がある。



図-19 top (頂点)



図-20 end (端点)

(6) 付加 | add

addはdivideのアーチスプリングに足した展開である。リブを補剛させるものとして付け加えた展開で、図-21は付け加えたものを赤くハイライトさせている。

(7) 平坦 | flat

flat(図-22)はdivideのアーチスプリングを通常よ

りも平坦にさせた展開である。この形状は桁部分に水平反力を負担させる構造なため、合理的な形状でない。

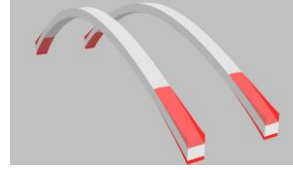


図-21 add



図-22 flat

(8) 傾斜 | incline

inclineは基本構造を橋軸方向からアーチリブを面外方向に傾けた展開である。傾斜させることで起き上がった側の鉛直変位の減少ができ、幅員構成をアシンメトリにするときにinclineを適用させている事例がある。図-23はLohseから変化させたものである。

(9) 横断 | over

over(図-24)は基本構造を平面図方向からアーチリブを回転させて、桁を面外から跨ぐようにした展開である。



図-23 incline

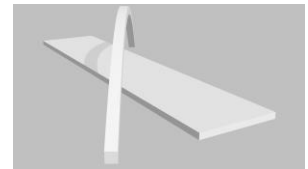


図-24 over

(10) 分裂 | tear

tearは基本構造を裂く展開である。tearは横に裂いたside(図-25)と、縦に裂いたvertical(図-26)がある。



図-25 tear (side)



図-26 tear (vertical)

(11) 湾曲 | shell

shellはアーチ構造の橋軸直角方向にもアーチを描いた展開(図-27)である。shellはシェル構造を指し、曲面状の薄い板を用いることで、球体や曲面が持つ外圧に対する力を分散させる構造を利用している。sphere(図-28)はshellのアーチスプリング部分を一点に収束させた形状である。



図-27 shell



図-28 sphere (shell)

(12) 融合 | fuse

fuse(図-29)では narrowのcontactで、アーチクラウンだけを重ね合わせていたが、fuseではアーチクラウンだけでなく、アーチリブを橋軸方向に向かって任意の点から一つのアーチリブになるように重ね合わせた展開である。

(13) 深接触 | deep contact

deep contact(図-30)はアーチリブをcontact(図-16)のようにアーチクラウンでの接触ではなく、任意の点二点での接触により、交じりあわせた展開である



図-29 fuse



図-30 deep contact

4. 実際の橋梁の分類

これまで紹介したmotionを日本と欧州の橋梁で区別し、適用されている種類の違いにどれだけ差があるのかを調査した。調査方法として、Structurae(引用: <https://structurae.net/en/>)内に掲載されている橋梁から、無作為に日本の橋梁から20橋(表-2)、海外の橋梁から40橋(表-3)をまとめた。

表-3から、海外の橋梁は様々なmotionが用いられていることが分かるが、表-2からは日本の橋梁motionのほとんどがmotionを施していない基本構造とdivideに集中していることがわかり、海外の橋梁と異なりmotionの適用範囲が狭く、類似した形状しかないことが明らかになった

表-2 日本のアーチ橋分類表

name	country	year	type	road
暁橋	Japan	1960	nothing	lower
西郷大橋	Japan	1977	divide	lower
成田橋	Japan	1979	nothing	lower
大三島橋	Japan	1979	divide	lower
新木津川橋	Japan	1988	narrow-near	lower
新浜寺大橋	Japan	1991	narrow-near	lower
千支大橋	Japan	1994	divide	lower
矢野口橋	Japan	1996	divide	lower
くしもと大橋	Japan	1999	divide	lower
大波止橋	Japan	2000	divide	lower
天翔大橋	Japan	2000	nothing	lower
宇品橋	Japan	2000	nothing	upper
海の中道大橋	Japan	2002	divide	lower
伊万里湾大橋	Japan	2003	divide	lower
千歳橋	Japan	2003	divide	lower
北九州空港連絡橋	Japan	2006	nothing	lower
新西海橋	Japan	2006	divide	lower
牛根大橋	Japan	2008	narrow-near	lower
広島空港大橋	Japan	2011	nothing	upper
第二音戸大橋	Japan	2013	divide	lower

表-3 海外のアーチ橋分類表

name	country	year	type	road
General W.K. Wilson Jr. Bridge	USA	1980	divide	lower
Bloukrans Bridge	South Africa	1983	nothing	upper
Bac de Roda Bridge	Spain	1987	narrow(contact-β)	lower
La Devesa Footbridge	Spain	1991	incline	lower
Barqueta Bridge	Spain	1992	fuse	lower
Rio Bianco Railway Bridge	Italy	1993	nothing	upper
Puerto Bridge	Spain	1995	incline	lower
Merchants Bridge	UK	1995	incline	lower
Alameda Bridge	Spain	1995	incline	lower
Chodov Footbridge	Czechia	1995	narrow	lower
Lavey-les-Bains Bridge	Switzerland	1995	add	lower
Kronprinzen Bridge	Germany	1996	roll(out)	upper
Esplanade Bridge	Singapore	1997	divide	upper
Jorge Manrique Bridge	Spain	1998	nothing	lower
Viaduc autoroutier	France	1998	divide	upper
Vénéjan-Mornas Viaduct	France	1999	tear(vertical)	lower
Pinot Footbridge	France	1999	cut	lower
Brush Creek Bridge	USA	2000	divide	upper
A 20 Elbe-Lübeck Canal Bridge	Germany	2000	add	lower
Charvaux Footbridge	France	2000	over	lower
Tiergartenbrücke	Germany	2000	incline	lower
Goodwill Bridge	Australia	2001	narrow(contact-β)	lower
Pont de l'aire de Villeroy	France	2002	tear(vertical)	lower
Slodowa Island Bridge	Poland	2002	deep contact	lower
James Joyce Bridge	Ireland	2003	roll(out)	lower
Walfridusspoorbrug	Netherlands	2003	divide	lower
Allaine Viaduct	France	2005	divide	upper
I-30 Bridge	USA	2006	cut	lower
Clyde Arc	UK	2006	over	lower
Ponte Centrale	Italy	2006	tear(side)	lower
Ponte Laterale Nord	Italy	2007	tear(side)	lower
Hrabuvka Wildlife Crossing and Overpass	Czechia	2008	nothing	upper
Piece Bridge	Georgia	2010	shell	lower
Puente de la Peraleda	Spain	2010	roll(in)	lower
Abbas Ibn Firnás Bridge	Spain	2011	cross(end)	lower
A-12 Ebro River Bridge	Spain	2015	tear(side)	lower
Vinon-sur-Verdon Footbridge	France	2016	flat	lower
Beatus Rhenanus Bridge	Germany	2017	cross(end)	lower
Zuidhorn Rail Bridge	Netherlands	2018	cut	lower
Trumpf Footbridge	Germany	2018	shell	upper

5. 考察

(1) 日本の橋梁

(a) 調査結果

調査した日本の橋梁は基本構造, divide, narrow-nearの3種類のみであり, 1階層目はdivideのみで, 2階層目でもnarrow-nearだけであった。基本構造, divideはよく見られる一般的な構造であるが, narrow-nearも内側に寄せているだけなので, あまり変化のない構造ばかりであった。

(b) motion分析

narrow-nearのみが日本で確認された原因として, この形状が面外座屈に強く, 地震時荷重のような面外方向の荷重に対して優れているという知見から採用されている形状だと考えられる。日本は地震が非常に多い国であるため, 技術者が必要であると考えた結果その形状に至っていると推察されるため, 形の美しさやまとまりから成り立っている造形発想とは異なっていると言える。

(2) 海外の橋梁

(a) motionの変遷

海外の橋梁を見ると1980年代後半から1990年代にかけてmotionを取り入れた橋梁が出現するようになってきた。これはSantiago CaltravaやMarc Mimramらが設計した橋梁が同タイミングで生まれているため、彼らがmotionを取り入れ始め、様々な展開をした橋梁が誕生した結果、以降の橋梁にも影響していると考えられる。

90年代はAlameda Bridge(図-3)のようなincline, narrow(図-31), roll(図-32)の展開がなされていたが、2000年以降になるとそれ以外のtear(図-33) cut(図-34), cross(図-35), over(図-36)等が出現したことが分かった。これは、motionはアーチリブを傾斜させる展開、内側に寄せる展開等のアーチリブを橋軸直角方向から回転させるような動作から生まれ、その後アーチリブを裂く展開、切断させる展開等のmotionへと発展したと考える。



図-31 narrow
(Bac de Roda Bridge)



図-32 roll
(James Joyce Bridge)



図-32 tear
(A-12 Ebro River Bridge)



図-33 cut
(Zuidhorn Rail Bridge)



図-35 cross
(Beatus Rhenanus Bridge)



図-36 over (Clyde Arc)

(b) 上路 | upper と下路 | lower

調査した結果、上路(upper)よりも下路(lower)の方が豊富にmotionを用いていることが分かった。上路では基本構造を除くdivide, roll, shellの3種類のみしか確認出来なかったが、下路はほぼ全てのmotionを確認出来た。要因として、下路はアーチリブが路床よりも上に位置しているため、橋梁としてのシンボル性が高いことからmotionが施すことでよりシンボル性を高めていると考えられる。上路でも、rollが用いられているKronprinzen Bridge(図-37)は桁下空間に人が往来可能なため視野に入りやすく、shellを用いた、Trumpf Footbridge(図-38)

は歩道橋であるため歩行者の視野に入りやすいことからシンボル性を高めるためにmotionが用いられていると考える。



図-37 Kronprinzen Bridge



図-38 Trumpf Footbridge

6. まとめ

橋梁にmotionの概念を取り入れ、分類することで土木構造物に造形発想の適用の可能性を明らかにした。海外の橋梁にはmotionが数多く適用され発想に富んでいるが、日本のアーチ構造を有する橋梁には同系統の展開しがなく、motionの発想が不足していることが確認できた。

また、海外の事例からmotionは橋軸方向の回転から生み出され、主に橋梁のシンボル性を高めるために利用されているのではないかと推測できた。

7. おわりに

motionを取り入れることで、橋軸直角方向への動きを有した形状が生まれることを明らかにすることができた。本研究ではmotionに着目していたが、造形発想にはforming, detailが存在し、調査した橋梁の中にもmotionはdivideであるが、forming, detailを用いたことで洗練されたデザインとなっている橋が見受けられたため、これらの分類を明らかにする必要がある。