

ロベール・マイヤールの構造デザインと設計思想（その1）^{*1}

The Structural and Conceptual Design of Robert Maillart's Bridge (Part 1)

鈴木圭^{*2}

By Kei SUZUKI

概 要

マイヤール（1892～1940）は、スイスにおいてサルギナトーベル橋を始めとする箱桁アーチ、補剛アーチ、シェル構造（屋根）、ビルツデッキ構造（建築スラブ）等、近代の鉄筋コンクリート構造のパイオニアであり、コンクリート橋の代表的なデザイナーである。本論分は、構造デザインと技術という観点から、マイヤールの設計思想、作品を研究し、彼のバラエティーに富んだ橋梁形式が生まれた背景を探り、今後の橋梁デザインと技術の発展に貢献することを目的としている。コンクリート橋の美学を研究する場合、著名なデザイナーの作品を見るとともに、それらの構造とデザインの発想の原点を探ることは、新しいデザインを目指す土木技術者にとって、有益な情報になると考えるからである。

1. はじめに

1890年代に鉄筋コンクリートが普及してから現在までの1世紀の間に、それぞれの時代のシンボルとなった数多くの土木構造物が作られてきた。なかでも橋梁は、技術、材料、文化の変遷とともに、新しい構造美が追及されてきた土木構造物の一つであるといえる。

橋梁の美しさには、背景とは独立した構造物自体の美しさと、構造物とそれを取り囲む環境との関係から生じる美しさがある。美しい橋梁と賞賛される作品は、その両者が満足されているものである。では、そのような橋梁を今後、どのように実現していくのか。この問いは、現在にはじまったことではなく、鉄筋コンクリートが新材料であった頃から、それを用いて新しい構造に挑戦したエンジニアが自ら問い、解答を求めてきた、いわゆる時代を越えた課題であったといえる。これらのエンジニアに共通なことは、構造計算や現場管理を経験するなかで、時代の要請に応じた施工技術や新しい構造を考案する創造性と、構造物の景観、フォルムについて深い洞察力を備えていることである。彼らのエンジニアリングセンスは、示方書に精通し、これを遵守することから導かれたものではなく、また、デザインセンスは～イズムという理念から生まれたものでもない。『建設する』という行為を通じて、鉄とコンクリートから成る複合材料としての無限の可能性を認識し、かつ、その時代の要請に答えようとする過程において自ずから備わったものだと考える。

本論分は、コンクリート橋の代表的なデザイナーであるマイヤール（スイス）に焦点を当て、構造デザインと技術という観点から、歴史的な構造デザイナーの設計思想、作品を研究することによって、今後の橋梁デザインと技術の発展に貢献することを目的としている。コンクリート橋の美学を研究する場合、著名なデザイナーの作

品を見るとともに、それらの構造とデザインの発想の原点を探ることは、新しいデザインを目指す土木技術者にとって、有益な情報になると考えるからである。こうした研究をする場合、先ず直面するのが資料の絶対的不足であり、次に直面するのが言語の壁である。土木技術者の中から優れた構造エンジニアや構造デザイナーを育てるためにも、こうした環境をいち早く整備することが求められている。

2. マイヤールに関するこれまでの研究

マイヤール（1892～1940）は、サルギナトーベル橋を始めとする箱桁アーチ、補剛アーチ、箱桁橋、シェル構造（屋根）、ビルツデッキ構造（建築スラブ）等、近代の鉄筋コンクリート構造のパイオニアである。表1に竣工年と構造形式別に分類したものを示す。マイヤールの作品と新しい構造を追及するデザイン姿勢は、現代ドイツのJ.シュライヒ、スイスのC.メン、およびスペインのS.カラトラバをはじめとする橋梁エンジニアや、イタリアのP.ネルビィ、メキシコのF.カンデーラ等の建築家にも大きな影響を与えている。

マイヤールの作品を最初に技術的に評価したのは1937年に『スイスにおいて施工された鉄筋コンクリート橋に関する実験と経験』¹⁾を研究論文として発表したM.ロッシュである。ロッシュはマイヤールの設計・施工した橋梁に対して直接、荷重載荷実験を担当したエンジニアであり、マイヤールの作品を技術的に評価する上で重要な人物であるが、これまで彼の技術的評価に関して詳細に分析された文献は少ない。例えば1941年、G.ギューディオンは『時間・空間・建築』²⁾において構造と美学という観点から、マイヤールの橋の美しさの理由は、「スラブと壁」という2つの基本的要素から芸術的な空間が構成されること述べた点は、後世においても高く評価されている。しかし、マイヤールの橋の構造的な特性、例えばサルギナトーベルの形態を成立させた3ヒンジ式アーチの構造特性や、補剛アーチにおいて活荷重が作用した場合の補剛桁の役割、さ

*1 keywords : 鉄筋コンクリートアーチ、設計思想

*2 正会員 株式会社アバンアソシエイツ

(〒150-0002 渋谷区渋谷 2-1-5)

表-1 ロベール・マイヤールが開発した鉄筋コンクリート橋

年代	主な経歴	水タンク、水道管	ビルツッキ	無筋コンクリート式アーチ コンクリートプロットアーチ	鉄筋コンクリートアーチ	3ヒンジ式箱桁アーチ	橋脚断面アーチ
1872	7/6ベルンに生まれる。						
1879	チューリッヒ工科大学に材料試験所を設立 初代所長トマイヤー						
1888							
1889							
1890	チューリッヒ工科大学入学						
1892							
1893							
1894	チューリッヒ工科大学卒業 Furten und Heide社入社						
1895							
1896							
1897	チューリッヒ市土木局						
1898							
1899	Flote & Westermann建設会社入社						
1900							
1901							
1902	Maillart & Cie (チューリッヒ) 原 水タンク (Sialtanenのガス工場) 箱桁アーチ橋の特許						
1903							
1904							
1905							
1906							
1907							
1908	ビルツッキの特許取得	サイフォン式下水管 (L=100m) 4階建て倉庫					
1909							
1910							
1911							
1912							
1913							
1914							
1915							
1916							
1917							
1918							
1919							
1920	ロンゾからチューリッヒに帰国						
1921	Maillart & Cie (ジュネーブ) 設立						
1922							
1923							
1924							
1925	ベルン、チューリッヒに支店を開設						
1926							
1927							
1928							
1929							
1930							
1931							
1932							
1933							
1934							
1935							
1936							
1937							
1938							
1939							
1940	マイヤール没す						
1941							
1942							
1943							
1944							
1945							
1946							
1947							

らにはスレンダーな部材を成立させたコンクリート材料について、28 日円柱供試体強度として 300～450kg/cm² の高強度コンクリートが使われていたことは触れていない。M.ビルは 1949 年に著書『ロペール・マイヤール』³⁾において、マイヤールの数多くの橋梁写真と図面を紹介したことは次ぎの 2 つの点において評価される。第一に、マイヤールの橋梁を視覚的に理解する上で数多くの写真を紹介したこと、第二に図面を示すことによって、具体的な形状・寸法を明らかにしたことにより、後世の技術者がそのフォルムを 3 次元的に詳細に再現することができるようになった点である。しかしながら、本書の出版はほとんどがロッシュの研究論文の抜粋であり、マイヤールの作品目録として、または概要版としての域を出ない。

マイヤールの生涯について詳細な研究を行い、現代にその存在を知らしめた研究家として 1979 年に『ロペール・マイヤールの橋』⁴⁾を、また 1983 年に『搭と橋』⁵⁾を執筆した D.ピリントンがいる。この 2 つの著書に接したことが、筆者が現存するマイヤールの 37 橋を訪れ、彼の図面や論文の収集を通じてマイヤールの作品を研究する契機となった。ピリントンの功績は、マイヤールヤールの作品を構造芸術という点から評価し、それを認知させた功績は大変大きい。また、同時代に活躍したフランスの橋梁エンジニアであるフレシネーやドイツのメルシュ等との比較検討を行い、マイヤールの後継者であるスイスの C.メンを紹介することによって、土木の分野にも継承すべきエンジニアの系譜と伝統があることを述べた点は重要である。しかしながら、コンクリートの材料特性に関して、それぞれの橋梁にどのような強度のコンクリートが使われていたかについては述べていない。筆者は、新しいデザインを実現するためには、それぞれの橋梁形式の構造特性を把握するだけではなく、材料強度を含めた材料特性を把握し、それをどう活かすかが重要であると考え。本論分の特徴は、ロッシュが評価したマイヤールの橋の構造特性を再度検証し、デザインを含めてマイヤールの作品を再評価することである。

3. 時代的な背景

マイヤールがチューリッヒ工科大学を卒業した 1894 年当時、鉄筋コンクリート構造物は、フランス人のアネビク (1843～1921) によって普及し始めた時である。ヨーロッパでの実績は 94 年に 62 件、97 年には 474 件と急速に普及するが、鉄筋コンクリートの力学的特性については十分に研究されておらず、例えば、橋梁に鉄筋コンクリートを用いる場合、石橋のフォルムを継承することが多く、アーチ部はマッシュピにするのが一般的であった。構造解析技術についても、マイヤールの恩師であるヴィルヘルム・リッターが図式静力学を体系化した時期であり、単純な構造系の解析は可能であったが、不静定構造物については十分な解析手法は開発されていなかった。スイスにおける鉄筋コンクリート工学の誕生は、1899 年、リッターがアネビクシステムについて批判した論文が起源となっており、マイヤールがチューリッヒ工科大学在学中には授業の科目として存在していなかった。しかし、アネビクの建設した構造物に感銘したマイヤールは、特に、T 型梁の構造の優位性と鉄筋コンクリートの可塑性、つまり造形の自由度と、水、セメント、骨材があればどこでも建設可能な材料の地域性に新しい建設材料としての将来性を見い出したと考える。

4. 経済性とデザイン

マイヤールは、橋梁の設計において、景観よりも経済性が重要であることを強く主張している。これはマイヤールの橋梁すべてに一貫した設計思想である。1903 年に設計したゾリス橋は、スイスで初めて弾性理論が適用された石橋で、アーチスパン 4.2m、アーチ部は 3 層の石積みから成っていた。当時、石橋の建設コストの中で大きな割合を占めていたのが支保工のコストであり、これを如何に低減するか設計コンペで優勝する鍵であった。ゾリス橋の施工で実施したことは、3 層の石積みアーチを一度に完成させるのではなく、3 層に分けて施工する方法で、先ず、第一層のアーチを完成させ、残りの 2 層の自重は第一層のアーチで支持させる。こうすれば、志保工は第一層の自重だけを支持するもので十分であり、その結果、志保工コストを大幅に低減できる。この発想は、マイヤールのアーチ橋の施工に適用され、最初にアーチリングを先行して完成させ、次にウェーブ (側壁)、最後に床版という分割施工法が誕生する。こうした考えは彼の次の言葉にも表れている。

「構造物個々のデザインを考える前に、全体像を考えるのは、景観的な配慮からするのではない。構造物の全体像は、絶えず経済的な優位性に立脚してこそ得られるものである。古い用語集からそのまま借用したような形状や構造は、景観的にも美しいものとは言えない。適当に単一部材を橋台にのせたほうがはるかにましである。構造材料を総合的に活用した明快な構造物こそ、経済性を満足できるのである。」⁶⁾

5. マイヤールの構造フォルムの発展

ドイツの橋梁エンジニアである J. シュライヒは『マイヤールと同時代に活躍したエミール・メルシュ (1872～1950)、ユージェヌ・フレシネー (1897～1962) は、たしかに多才で創造性に富み、現代に大きな影響を与えたエンジニアではあるが、彼等においてさえ自分の技術的知識と才能を新しい橋梁フォルムの表現に変換することはできなかった。残念ながら、現代の我々についても同様のことがいえる。』⁷⁾と言っているが、マイヤールは鉄筋コンクリートの有用性と可能性を追及しただけではなく、彫塑をするかのごとく芸術的に、しかもユニークにその材料を用いたエンジニアである。マイヤールが 40 年間に設計したコンクリート橋のタイプは 7 種類で、建設した橋梁は 47 橋に至る (表一)。

表一 マイヤールが考案した橋梁・建築構造のタイプ

コンクリート橋	無筋アーチ	シュタウファヒャー橋
	鉄筋アーチ (固定式)	アールブルク橋
	箱桁アーチ橋	サルギナートーベル橋、タバナサ橋
	補剛アーチ	ビルヴィル橋 (2 径間)、ツォツ橋
	RC ブロックアーチ	ファルチールバツハ橋、シュバントバツハ橋
	箱桁橋	ローヌ橋、ラウフェンブルグ橋
		II ラーメン橋
		片持梁
工場建築、倉庫	2 主版桁橋	シャテラー橋
	T 型梁橋	イバツハ橋
	ビルツデッキ (建築)	フットツビル橋、アルテンドルフ 橋
	コンクリートシェル	ネッセンタール橋

しかも、そのほとんどが設計競技において、鋼橋、石橋を抜いて低価格で入札したものである。19 世紀の後半は、色々な形式の鋼橋が建設され始めた時代であったが、まだ石層アーチが建設されており、当時のコンクリート橋もその考え方を脱却していなかった。

マイヤールの代表的な構造形式は、3ヒンジ式箱桁アーチと補剛アーチである。いずれの場合も、極端に薄い板の組合せから成っている。橋梁構造に関する1902年の特許では、アーチリブ、鉛直壁、床版の個々の部材はスレンダーにすることで重量を軽くし、3つの部材を空間的に統一することによって最も効率的な構造フォルムを得ることができると考えていた。これは、現代の箱桁構造そのものである。この構造フォルムは、ツオツ橋（1901）に適用され、初めて箱桁アーチが完成する。サルギナトーベル橋（1930）に見られるウェブをカットした独特の構造フォルム（図-2）は、タバナサ橋（1904）（図-1）が起源となっているが、偶然と力学的合理性の両者から生まれたものと言える。偶然とは、タバナサ橋では、ツオツ橋のウェブ付け根に生じたひびわれ部分を大胆にカットしたデザインとなっていること、力学的合理性とは、カットすることによって、3ヒンジ式アーチに偏荷重が作用した場合、最大曲げモーメントが作用する部分において桁高が最大となること、さらに重量が軽くなることである。サルギナでは活荷重が4tと小さいため、アーチの曲線形状は一心円である。しかし、フェルゼーク橋（1933）

（図-3）のように高速道路に適用する場合は、桁高を大きくする必要がある。そこで考えたのが、スパン・ライズ比を変えずにアーチ形状を尖塔アーチに変化させ、かつウェブ上縁を多角形にすることで桁高を高くする方法であった。このように、同じ箱桁アーチであっても、それぞれの設計条件に対応した構造フォルムを考えているのがマイヤールの特徴で、形態は力に従うことを実証している。

補剛アーチを発想した時、床版とアーチは独立して働くのではなく、統一体として有機的に働くと考えた。そのため床版の剛性を上げることによって、床版が外部荷重によって発生する曲げモーメントに抵抗し、アーチリブは軸力のみを伝達させる機構とした。では何故アーチリブ形状は円弧ではなく多角形としたのか。それは鉛直アーチリブを円弧にすると、鉛直壁の中心とアーチの圧力線との交点における軸力と分力中心とアーチリブの位置における作用する圧力線がそのためアーチリブの形状は円弧ではなく、鉛直壁の位置で折れる多角形とすることによってアーチリブをスレンダーにする構造が可能となった。橋台に古い石層アーチの面影を残すファルツシールバッハ橋（1925）（図-4）からシュバントバッハ橋（1933）

（図-5）への発展は、補剛アーチ構造において伝統的な殻を突き破り、新しいフォルムを求める姿勢が感じられる。さらにテス川橋（1934）（図-6）では、部材がさらにスレンダーになりシェル構造の橋を思わせる。マイヤールの橋は、どれ一つをとっても同じも

のがない。こうした姿勢は、晩年の1940年まで、休むことなく続いていく。



図-4 ファルツシールバッハ橋（1925）



図-5 シュバントバッハ橋（1933）



図-6 テス川橋（1934）

6. 実証実験による建造物の評価

建造物の設計基準や構造解析手法が十分確立されていなかった時代において、何故マイヤールは数々の構造フォルムを生み出すことができたのか。

第一に、補剛アーチを曲線橋や斜橋に適用する場合のように、敢えて構造的な課題に挑戦することによって新しい構造フォルムが創造できたこと。第二に、仕方書や伝統的な考えに捕らわれず、自由に新しい構造フォルムを追求したこと。第三に、厳密な設計理論はなくても、実物大の荷重試験によって、新しく考案した橋梁の耐荷性能を確認していたことである。建造物の評価は、厳密な解析手法に従うのではなく、実際の建造物に荷重を載せて実験によって検証すべきであると考えていた。ここに、構造エンジニアとしてのマイヤールの心意気を感じられるのである。

7. おわりに

ロベール・マイヤール（1892～1940）マイヤールが40年間に渡って独自の橋梁フォルムを追求できたのは、鉄筋コンクリートという新材料の可能性に魅せられるとともに、自分の作品に満足することなく、絶えず古い形式から脱却することを考えていたからだといえる。

参考文献

- 1) Ros.M.: 『Versuche und Erfahrungen ausgeführten Eisenbeton Bauwerken in der Schweiz』, Vereins schweizerischer Zement, Kalk und Gips Fabrikanten, 1937.
- 2) Gidion.S.: 『Raum, Zeit, Architektur』, Studio Paperback, 1989.
- 3) Bill.M.: 『Robert Maillart』, Artemis Zuerich, 1949.
- 4) Billington.P.: 『Robert Maillart's Bridges』, Princeton Press, 1979.
- 5) Billington.P.: 『The Tower and the Bridge』, Basic Books Inc, 1983.
- 6) Maillart.R.: Aktuelle Frage des Eisenbetonbaues, 『Schweizerische Bauzeitung』 Jan. 1st, 1938.
- 7) Schlaich.J.: Robert Maillart und Wir?, 『Beitraege zur Geschichte des Bauingenieurwesens Robert Maillart 1872-1940』, Heft 2, 1991.

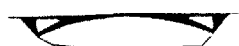


図-1 タバナサ橋（1904）



図-2 サルギナトーベル橋（1930）



図-3 フェルゼーク橋（1933）