

ロベール・マイヤールの構造デザインと設計思想（その3）^{*1}

—3 ヒンジアーチと補剛アーチの発展に関する一考察—

The Structural and Conceptual Design of Robert Maillart's Bridges (Part3)
-a study on the development of three-hinged concrete arch and deck stiffened arch bridges-

鈴木圭^{*2}

By Kei SUZUKI

概 要

スイスの橋梁エンジニアであるロベール・マイヤールが設計した代表的な3ヒンジ式アーチと補剛アーチについて、橋梁フォルムの起源と発展について整理し、そのフォルムの実現に当たって、構造学的にどのような工夫がなされたのか、また、材料学的にどのような特性のコンクリートが実際に使われたのか調査する。結論として、新しいデザインが生まれた背景の一つには、普通コンクリートとは異なる高強度コンクリート（300kg/m²～400kg/m²）が使われたことを明らかにし、スイスで1931年に制定された設計規準に対して、マイヤールの橋梁がいかなる影響を及ぼしたのかを考察する。

1. はじめに

本論文は、ロベール・マイヤール（1872～1940）の代表的な作品である3ヒンジ式アーチと補剛アーチの発展について、これらの橋梁が設計された時に使われたスイスの鉄筋コンクリート指針または規準とそれぞれの鉄筋コンクリートアーチ橋において実際に発現したコンクリート強度を踏まえて考察する。スイスでは、1903年1月に欧州初の『鉄筋コンクリート設計指針案』¹⁾がスイスエンジニア・建築家協会によって提案されて以来、1909年に同協会が『鉄筋コンクリート指針』を制定し、1915年には国家規準として『鉄筋コンクリート規準』が成立した。その後、1931年の改定が行われたが、鉄筋コンクリートの強度の増加、材料特性、化学的特性が明らかになるに従い、コンクリートおよび鉄筋の許容応力度に関する規定が大きく変化する^{注1)}。特に、1931年の改定により、これまで普通コンクリートだけを対象としていた規定が、高強度コンクリートも対象となり^{注2)}、コンクリート及び鉄筋の許容応力度の値も1903年の指針案と比較すると倍程度になっている。1903年以降のスイスの鉄筋コンクリート橋はマイヤールが設計した橋梁も含めてすべて設計指針ならびに設計規準に準拠しているが、これらの変更の際にマイヤールの設計した鉄筋コンクリート橋が与えた影響は少なからず大きいといえる。この影響について詳細は4章で述べることにする。マイヤールに関する研究はG.ギーディオンの『時間・空間・建築』⁴⁾（1941年）や、M.ピルの『ロベール・マイヤール』⁵⁾（1949年）、D.P.ビルングトンの『ロベール・マイヤールの橋』⁶⁾（1979年）において構造と美学という観点から紹介されたが、構造設計の観点からスイスの鉄筋コンクリート指針および規準を踏まえてマイヤールの設計した鉄筋コンクリートアーチ

橋のコンクリート強度、発生応力度について記述した文献は少ない。そこで構造工学的、材料工学的観点からマイヤールの橋梁を評価する点が本論文の特徴である。

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成果』を研究論文として発表したM.ロッシュである。ロッシュはチューリッヒ工科大学の材料試験所の教授として、マイヤールが設計・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。本研究はこの文献のデータをもとに、マイヤールの3ヒンジ式アーチと補剛アーチの研究を行い、最後にこのような研究が、現在の橋梁デザインや土木教育にどのように活かせるかについて述べるものである。

2. マイヤールの構造フォルム

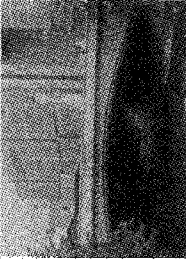
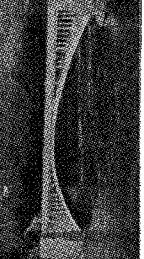
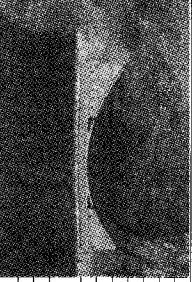
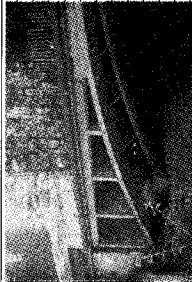
マイヤールが設計した橋梁とはどのような造形であるのか、ここでマイヤールの経歴と併せて彼が設計した橋梁を視覚的に把握しておく。表-1にマイヤールが設計した鉄筋コンクリート橋を無筋コンクリートアーチ・ブロックアーチ、3ヒンジ式箱桁アーチおよび補剛桁アーチの3つのタイプに分類し、それぞれの構造の起源となった橋梁とそれから派生した橋梁を示す。マイヤールの才能が高く評価された橋梁は、彼が1897年にチューリッヒ市の土木課に就職して最初に設計した3ヒンジ式無筋コンクリートアーチ、シュタウフファッハー橋（1899年）⁷⁾である。橋のファサードは石材で擬装されているため、マイヤールの鉄筋コンクリート橋とは思われないが、当時はチューリッヒ市の景観については建築家のグルが責任者で、石橋の重厚な景観を演出したことによる。1901年に竣工した3ヒンジ式箱桁アーチ橋のツォツ橋を設計したことが、マイヤール独特の橋梁フォルムを生み出すきっかけとなった。以下にそれぞ

*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 ロバール・マイヤールが設計したコンクリートアーチ橋とバリエーション

年代	主 な 経 歴	コンクリートアーチ・ブロックアーチ	3ヒンジ式箱桁アーチ	補剛桁アーチ
1872	2/6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 初代所長トトマイヤー			
1890	チューリッヒ工科大入学		ツォツ橋 (1901年) 2室箱桁 3ヒンジ 40m	マイヤール式補剛アーチの試み
1894	チューリッヒ工科大学卒業 Punten und Herzog社入社		箱桁断面の多径間への応用	
1897	チューリッヒ市土木課に就職			シュレーバハ橋 (1924年) 28.8m
1899	Flote & Westermann社入社、シュタウワフアハ橋	アールブルク橋 (1912年) 固定式 68m (出典：文庫4)	ライオンフェルデン橋 (1912年) 5室箱桁 40m	
1901	ツォツ橋		ヒルビル橋 (1904年) 2室箱桁 3ヒンジ 36m	
1902	Maillart & Cie (チューリッヒ) 設立 補剛アーチ橋の特許 (Nr. 25712)			マイヤール式補剛アーチの起源
1905	タバナサ橋		ブロックアーチの起源	
1908	ビルツデツキの特許 (Nr. 46928)			
1909	『スライス鉄筋コンクリート補剛』の制定			
1911	コンクリートブロック工法の特許 (Nr. 56981)			
1912	ラウフェンブルク橋			
1914	アールブルク橋			
1915	ロシアに土木建築の普及のため移住 『スライスRC設計規程』の制定			
1919	『スライスセメント規程』の制定			
1920	ロシアからチューリッヒに帰国			
1921	Maillart & Cie社 (ジュネーブ) 設立			
1925	ベルン、チューリッヒに支店を開設 ファルツシールバハ橋			
1930	サルギナトーベル橋、ロレーヌ橋、クロスター橋			
1931	『スライスRC設計規程』の改定、スピタル橋			
1932	ロスグラベン橋		サルギナトーベル橋 (1933年) 1室箱桁 90m	
1933	ポニールバハ橋		フェルゼン橋 (1933年) 1室箱桁 72m	クロスター橋 (1930年) 曲線橋 30m
1934	フェルゼン橋			ポニールバハ橋 (1932年) 曲線橋 14.4m
1935	リス川橋			
1936	ウェッシー橋			
1940	ラッペン橋、ガールシュタット橋 マイヤール没す	ガールシュタット橋 (1940年) 1室箱桁×2列 32m		
	リースベルク橋 (1935年) 2主筋桁 10.4m+22m+10.4m		ラッペン橋 (1940年) 斜橋 1室箱桁×2列 40m	スピタル橋 (1931年) 斜橋 30
			ウェッシー橋 (1936年) 1室箱桁×3列 56m (撮影：大野英代子氏、1996年)	アス川橋 (1934年) 38m (出典：文庫2)

*撮影で描写がないものは、(撮影：鈴木圭、1990)

れのアーチ橋タイプの起源と橋梁フォルムの発展について概括する。

(1) 箱桁断面の起源と発展

マイヤールはシュタウフファッハー橋の完成とともに市を退職し、1899年にフローテ・ヴェスターマン社に転職する。1901年に3ヒンジ式箱桁橋のツオツ橋を設計するが、ツオツ橋とシュタウフファッハー橋との構造的な違いは、第一に、アーチ部を箱桁断面としたこと。第二に、アーチリブに鉄筋を配置したこと。第三に、シュタウフファッハー橋も3ヒンジ式であるが中央部に鉛製の金属ヒンジを採用したのに対し、ツオツ橋では、コンクリートヒンジを採用したことである。景観的特徴として、ツオツ橋の側面から見た景観は、アーチクラウン部に向けて桁高が絞込まれていることが分かる。これを構造的に成立させるためには、高強度のコンクリートをアーチ部に使い、中央ヒンジ部にはコンクリートヒンジを使うことである。何故なら、ヒンジとして金属製ヒンジを使うと中央部のコンクリート断面内にヒンジをアンカーボルト等で固定するために、コンクリート断面の桁高が大きくなることが上げられる。さらにコンクリートヒンジを採用した場合、桁高を絞り込むことによって発生する圧縮応力度が高くなる。このため高強度コンクリートを使うのが構造的な解決策となる。果たして鉄筋コンクリート指針も制定されていない1901年において、高強度コンクリートが使える状況にあったのか、筆者の疑問はそこから始まった。この点については4章で述べることにする。3ヒンジ式箱桁橋のバリエーションとしては、ビルビル橋(1904年)に見られるように多径間に応用すること。また、広幅員10.5mの道路橋に対応させるためラインフェルデン橋(1912)に見られるように断面を橋軸直角方向に並べることによって、ツオツ橋では2室であったが、5室に拡大したことである。ラインフェルデン橋は、1908年12月末にライン河を挟んでスイスとドイツの国境に架ける橋を対象として国際設計競技が実施され、ドイツのメルシュ、オーストリアのメラン等、コンクリート橋の権威者が参加したコンペであった⁸⁾。中島を挟む2橋が対象でスイス側が2径間、アーチスパン: 2@22.0mとドイツ側が3径間、アーチスパン: 31.6m+40.0m+31.6mの多径間アーチであり、マイヤールは2位となった。最終的には、この2位の案が施工されることになったが、その経緯についてはスイスにおける設計競技の内容について調査する必要があるが、著者の考えでは、マイヤールの実績、構造設計の十分な裏付け等が評価され施工に至ったものと推察する。マイヤールは箱桁断面のバリエーションとして多径間・多室箱桁断面へと展開した点が特徴といえる。1902年に箱桁断面を有するアーチ橋の特許(No. 25712)写真-1を取得した。この特許に記述された箱桁断面の特長を以下に示す。

『コンクリート製の縦壁は橋軸方向壁aを構成し、アーチ板bおよび床版cとともに鉄筋d(結合鉄筋)によって強固に結合される。床版とそれを支持する縦壁は、荷重をアーチ梁に伝達するだけではなく、3つの部材を1つの梁として統一する構成部材であり、提案した実施事例 図-3に示すように大きな断面2次モーメントを有する箱桁断面となる。この構造は通常のアーチに比較して圧縮線の変化に対して敏感ではない点に特長がある。軸方向のすべての部材を有効に結合した新しい梁は、少ない材料で大きな剛性を有する。』

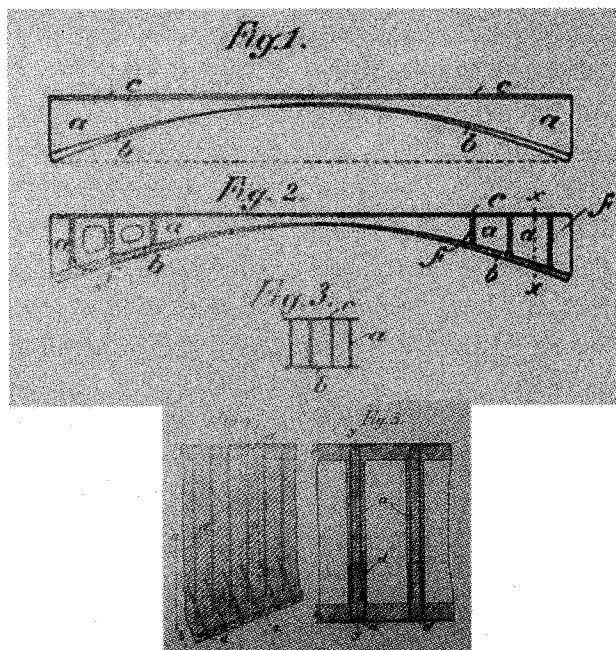


写真-1 マイヤールの特許に示された図(撮影: 鈴木圭, 1990)

この特許によって、マイヤールは箱桁アーチ橋の設計においては他のエンジニアの追従を許さない地位を獲得したといえる。

(2) コンクリートブロックアーチの起源と発展

マイヤールの橋の中で、あまり知られていないタイプのアーチ橋が、ラウフェンブルク橋(1912年)である。これは一見すると石橋に見えるが、石積みアーチと同じ原理であり、石材の代わりにコンクリートブロックを使った橋である。1909年にライン河を挟んでスイスとドイツの国境に架ける橋を対象として国際設計競技が実施され2位となった⁹⁾。マイヤールのコンクリートブロックアーチは、一見すると従来の石橋に見えるが、アーチクラウン部が極めてスレンダーで、伝統的な側面と近代的な側面の両方の特性を持ち併せることが景観的に評価された。この国際設計競技でもマイヤールは2位であったが、提案したデザインで施工されることになった。

コンクリートブロックアーチの展開としてはコンクリートブロックアーチの長大化であり、1930年に竣工したベルン市内のローネ橋においてアーチスパン80mを有する巨大なコンクリートブロックアーチを実現した。

(3) 3ヒンジ式箱桁アーチの起源と展開

マイヤール式コンクリートアーチの代表作として知られるのはサルギナトーベル橋(1930年)である(写真-2)。

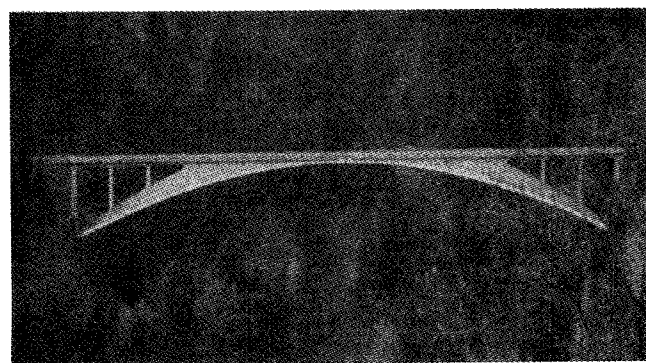


写真-2 サルギナトーベル橋(1930年)(撮影: 鈴木圭, 1990)

本橋は1990年にマイヤールの研究家であるプリンストン大学のピリントン教授を団長とする調査団が訪れ、歴史的土木遺産として認定された。タバナサ橋(1905年)は、マイヤール独特の構造フォルムの起源となった橋である。ツオツ橋との景観の共通点は、アーチクラウン部がスレンダーであること。最も大きく異なる点は、アーチ付け根のウェブが三角形にカットされたことである。アーチの付け根にコンクリートヒンジを使い、ヒンジ部に向かってアーチを絞り込むことによってマイヤール独特の3ヒンジ式箱桁アーチのフォルムが生まれる。このタバナサ橋によってプロトタイプが完成したといえる。

バリエーションとして、高速道路橋の大きな活荷重に対応するため、フェルセック橋(1933年)に見られるようにアーチ下縁のラインを尖塔アーチ形状とし、さらにアーチ上縁を多角形とすることによって箱桁断面の桁高を大きくし、活荷重に抵抗する断面剛性を上げるデザインとした。このタイプとしてはヴェッシー橋(1936年)があり、広幅員9.8mの道路橋であるためアーチを橋軸直角方向に間隔を空けて3本並べた橋となった。また、ラッヘン橋(1940年)では斜橋に対処するために、2基のアーチを橋軸方向にずらしたデザインが実現した。側面の景観として双子のアーチが並んで見えユニークなデザインといえる。ガールシュタット橋(1940年)では、施工の合理化を狙って、コンクリート支保工・型枠工を簡易にするためアーチ下縁を直線とするデザインが実現した。このように様々な地形や活荷重強度、幅員等の変化に対応させて3ヒンジ式箱桁アーチを生み出したのがマイヤールのデザインの特徴であり、ここに構造とデザインの両面に秀でたマイヤールの発想を垣間見ることができる。

(4) 補剛アーチの起源と展開

1902年の特許図(写真-1)の図-2には、補剛アーチの起源を思わせる形が表現されている。補剛アーチとは英語では Deck stiffened Arch と称し、床版の剛性を高めたアーチ橋という意味である。アーチリブ、鉛直壁はスレンダーな板部材にすることでアーチ重量を軽くできることが特長である。構造的な特徴としてマイヤールは、1931年にドイツの専門誌 DER BAUINGENIEUR に発表した論文『スイスにおける新しい鉄筋コンクリート橋』の中で、アーチ橋の荷重伝達機構に関して床版が荷重の伝達に寄与していることが、荷重載荷試験によって判明したことを述べている^(注3)。構造的な考え方は、第一に活荷重による曲げモーメントに対して床版が抵抗するように、高欄を構造部材として活用し、高欄と床版の曲げ剛性を高めたこと。第二にアーチリブには軸力のみしか伝達させないという考え方であった。写真-3に示すアーチスパン43.2mのファルツシールバッハ橋(1924年)の側面フォルムに、床版とコンクリート高欄が一体化したデザインを見ることができる。



写真-3 ファルツシールバッハ橋(1924年)(撮影:鈴木圭, 1990)

補剛アーチを最初に適用したのは、ヴェギタール発電会社がダムを建設するにあたり、湖水周辺道路整備の一環として1924年に建設したアーチスパン38.7mのフリエングリバッハ橋とアーチスパン28.8mのシュレーバッハ橋である。すでに1902年の特許出願からは20年が経過していたため、誰でもこのフォルムを実施できる状況にあったが、アーチリブの厚さが22cmとあまりにスレンダーであったため、当時のエンジニアから見れば、これほどスレンダーな橋は構造的に成立する訳がないと考えていた節がある。実際にこの2橋が完成した直後、設計監理をしていた州の役人が、側壁に壁を追加してオリジナルのフォルムの美しさを台無しにしたことが1990年のピリントン著の『Robert Maillart』に記述されている^(注4)。ここで、3ヒンジ式箱桁アーチの中央ヒンジ部が何故スレンダーであったのか、と同じ疑問が湧いてくる。つまり何故、これほどにスレンダーなアーチリブが1924年の時点で可能であったのかという疑問である。これも4章で述べることにする。

この補剛アーチのバリエーションとしてアーチ橋を曲線橋に適用したシュバントバッハ橋(1933年)写真-4は、マイヤールの独創性を物語る作品であり、アーチ橋を曲げて架設することはできないという当時の常識の殻を突き破ったものといえる。



写真-4 シュバントバッハ橋(1933年)(撮影:鈴木圭 1990)

補剛アーチを鉄道橋の曲線橋に適用したのがクロスター橋(1930年)であり道路橋の斜橋に適用したのがスピタール橋(1931年)である。テス川橋(1933年)においては、アーチスパン38mでありながら、アーチスラブの厚さは14cmという脅威的な薄さを実現した。

このようにマイヤールの設計した橋梁に共通して言えることは、部材が極めてスレンダーであり、マイヤールは1901年のツオツ橋の設計を手掛けて以来、鉄筋コンクリートの強度において、高強度コンクリートを使えるという絶対的な自信があったのではないかという推論ができる。ドイツの橋梁設計家であるJ.シュライヒはマイヤールの没後50年の展示会で、『マイヤールと我達?』と題して講演を行い次のように述べた。

『マイヤールと同時代に活躍したエミール・メルシュ(1872~1950)、ユジェーヌ・フレシネー(1897~1962)は、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⁾

これはシュライヒ自身が常に新しい構造を生み出そうという姿勢で取り組んでいることを示すものと理解できる。歴史的な橋梁エンジニアに対する尊敬の念を失わず、いまでもその姿勢から多くのことを学べるという姿勢に、時代を超えて受け継がれるエンジニア

の系譜があることを感じさせる発言であった。

3. スイスの鉄筋コンクリート規準の成立と変遷

スイスの鉄筋コンクリートの設計規準が1915年に制定されるにあたり、スイスエンジニア・建築家協会 (Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein) が果たした役割は大きく、1903年に『鉄筋コンクリート指針案』を提案し、1909年には『鉄筋コンクリート指針』を制定した。この1909年の規定の内容が1915年のスイスの国家規準にあたる『鉄筋コンクリート規準』として採用されていることから、1915年の設計規準は1909年の規定と同等であるといつてよい。さらに1931年に改定されるが、1909年から1931年の間で大きく変わった点は、第一に、高強度コンクリートが規定されたこと (表-2)。第二に、高強度鉄筋が規定されたこと (表-3)。第三に、コンクリート許容応力度は1909年から1931年まで普通ポルトランドセメントを使った場合しか規定されていなかったため、低い値しか使われなかったが、高強度ポルトランドセメントが規定されたことによって倍程度に大きくなったことである (表-3)。

表-2 スイス・フランス・ドイツの鉄筋コンクリート規準におけるコンクリート設計強度の比較 (単位 kg/cm^2) (鈴木 作成)

国 別	スイス		フランス	ドイツ
改 定 年	1909年	1931年	1930年	1931年
普通ポルトランドセメント (P.C.)	160	175	130 160	160 (柱) 130
高強度ポルトランドセメント (H.P.C.)	—	240	200	190 (柱) 160
ヤング係数比 $n=E_s/E_c$	10 20	10	7~20	10 15

表-3 スイス・フランス・ドイツの鉄筋コンクリート規準におけるコンクリート及び鉄筋の許容応力度の比較 (単位 kg/cm^2)

国 別	スイス			フランス			ドイツ	
改定年	1909	1931		1930			1931	
セメント	P.C.	P.C.	H.P.C.	PC	PC	H.P.C.	P.C.	H.P.C.
設計強度	160	175	240	130	160	200	130	160
軸圧縮	35	40	50	50	70	90	35	45
縁圧縮	45	65	85	50	70	90	Max50	Max65
曲げ	40	75	100	50	70	90	Max50	Max65
曲げ圧縮	Max70	Max90	120	—	—	—	—	—
普通鉄筋引張	1200- 1500	1200- 1600	1200- 1600	1400- Max 1600			1200	
高張力鉄筋引張	—	—	1600- 2000	1900- Max 2100			1500	

第四に、1931年のスイス設計規準においては、コンクリート 1 m^3 当たりのセメント量が普通ポルトランドセメントと高強度ポルトランドセメントの両者において $300\text{kg}/\text{m}^3$ に規定されたことであ

る。この規定によって、表-2に示すコンクリート設計強度の最低限の保障を与えたといえる。上記の第一から第三に関する規定はフランス、ドイツの規準においても同様な傾向にある。1900年から1920年代における鉄筋コンクリート材料や鉄筋コンクリート橋に関する実績や研究を踏まえて制定されたものであり、1930年から1931年において欧州における鉄筋コンクリートの実用的な規準が成立したといえる。しかしながら、マイヤールが設計し施工に至った47橋のうち、1931年のスイス設計規準に従って設計された橋梁総数は、1932年以降に設計された19橋であり約40%に相当する。年数的には60歳から1940年で没する68歳までの8年間であった。

別な見方をすれば、1901年以来、常にアーチ橋の設計と施工の現場を把握し、実際に使われる鉄筋コンクリートの強度ならびに品質に対して大きな自身を持っていたと考えられるマイヤールにとって、1931年以前の設計指針や規準の制定に当たったエンジニアや建築家、さらには大学教授をはじめとする委員に対して、もっと現実を知るべきであるという大きな反発心を抱いていたのではないかと考えられる。これがマイヤールが数々の橋梁フォルムを生み出す原動力となっていたというのが筆者の推論である。

4. マイヤールが設計したアーチ橋の構造特性と指針に与えた影響

1937年にM. ロッシュが発表した報告書では、荷重載荷実験の対象は1925年~1937年の間にスイス国内で建設された構造物の中から25基のアーチ橋、9基の桁橋、および建物を選定し現場載荷実験の結果が紹介されている。マイヤールが設計したアーチ橋は14基、桁橋は2基、さらに建物ではマイヤールの発明したビルツデッキを使った建物が紹介されている。実験は基本的に支保工を撤去する時期に併せて行い、設計荷重に相当するトラックを走行させ、アーチ中央部、1/4地点の変位、応力度、振幅の幅を測定し、さらにコンクリート圧縮試験を材料試験所で行い、計算値との整合性について報告している。表-4に代表的な補剛アーチ、表-5に3ヒンジ式箱桁アーチの適用設計基準、およびコンクリート強度を示す。

表-4 補剛アーチの設計規準とコンクリート強度 (作成: 鈴木圭)

No.	橋 名	竣工年 (年)	摘要規準	平面線形	コンクリート強度	
					w β d (kg/cm^2)	p β d (kg/cm^2)
1.	フリエングリバッハ橋	1924	1915年	直線	280	224
2.	シュレニバッハ橋	1924	1915年	直線	280	210 (75日)
3.	ファルツシールバッハ橋	1925	1915年	曲線	500 (1年)	400
4.	シュビニール橋	1931	1915年	斜橋	—	—
5.	トラウバッハ橋	1932	1931/32年	直線	260	210 (75日)
6.	シュバントバッハ橋	1933	1931/32年	曲線	575 (1.6年)	460
7.	デス橋	1940	1935年	直線	—	—

注1) w β dは20cm×20cm×20cmの立方体強度、

p β dは20cm×20cm×60cmの角柱体強度を示す。

は、p β d=0.8×w β dとして、筆者が計算した値を示す。

表-5 箱桁アーチの設計規準とコンクリート強度 (作成: 鈴木圭)

No.	橋 名	竣工年 (年)	摘要規準	平面線形	コンクリート強度	
					w β d (kg/cm^2)	p β d (kg/cm^2)
1.	ツォツ橋	1901	1903年	直線	450 (67年)	360
2.	ビルヴィル橋	1904	1903年	直線	—	—
3.	タバナサ橋	1905	1903年	直線	285 (22年)	228
4.	サルギナトール橋	1930	1915年	直線	333 (28日)	270
5.	ロスグラーベン橋	1932	1931/32年	直線	410	328 (60日)
6.	フェルゼック橋	1933	1931/32年	直線	500	400
7.	ベッシー橋	1936	1935年	直線	400 (37日)	350 (28日)
8.	ガールシュタット橋	1939	1935年	斜橋	—	—
9.	アルテンドルフ橋	1940	1935年	斜橋	—	—

表-2に示す1931年のスイス設計規準によれば、高強度コンクリートの角柱供試体の圧縮強度は、 $240\text{kg}/\text{cm}^2$ 以上であることから、

補剛アーチタイプでは1924年のフリエングリバッハ橋とシュレーバッハ橋、およびトラウバッハ橋(1932年)の3橋、3ヒンジ式箱桁アーチではタバナサ橋(1905)の4橋を除いて高強度コンクリートであったという事実が判明した。さらに、マイヤールの箱桁断面のさがかけとなった1901年のツオツ橋は、高強度コンクリートであると十分言える圧縮強度を有していたということも判明した。マイヤールの良き理解者であったM. ロッシュは、1926年から実橋を使った荷重載荷実験を通じて、マイヤールの設計したコンクリートアーチ橋がデザインのみならず、構造工学的、材料工学的にも優れた橋梁であったことを認識していたと推察する。1931年の設計規準の制定には、マイヤールが設計し施工したコンクリートアーチ橋の工学的評価が貢献したといえることができる。

5. おわりに

本論文は、マイヤールが設計した代表的な3ヒンジ式箱桁アーチと補剛アーチについて、デザインの特徴を整理し、そのフォルムを実現するに当たって、設計指針が規定されていない時期から高強度コンクリートが使われていたこと、ならびにマイヤールはそのコンクリートの強度特性において十分な自信を当初から抱いていたことを1931年に制定されたスイスの設計規準の内容を踏まえて明らかにした。

現在の橋梁デザインに求められることは、第一に、様々な風景の中で人々橋との係わりを考えながら、橋の造形と風景との関係、材料、コスト、施工条件を踏まえて、その橋に要求される性能をその時代に準拠すべき設計基準に適合させるという形で満足させなければならない。第二に、デザインの独自性を設計者自らが追及すると同時に、それを確認することであり、他事例の物真似であってはならないことである。その時代に要求される構造的な品質・性能を確保した上で、橋の造形・構造に関して新しいデザインを目指すことは、日本から海外に対して構造とデザインの両面で誇れる橋梁を発信することにつながり、国際設計競技においても自信を持って戦うことができると筆者は考える。自ら考案したデザインの独自性を確認するためには、歴史的な橋梁設計家の発想や彼等のデザインした橋梁に関する情報を把握しておくことが必要である。この点において橋梁デザイン史は、橋梁デザイナーを目指すものには不可欠であり、大学の初頭教育においても、学生が橋梁工学や材料、構造に興味を抱くきっかけを与えるものになりえと考える。それぞれの設計者が、どのような条件下で新しい発想を実現したのか、彼らが創造したフォルムがどのように変遷していったのか、そのプロセスを追うことによって、デザインの発想に関するソースを広げ、創造する喜びを得ることができる。つまり、橋梁デザイン史の研究は、デザインの専門家や大学教育においても、重要な役割を担っているといえる。今後の研究においてさらに充実していかなければならない点は、視覚的に美しいと感じられる橋梁フォルムについて、写真または図面として残すことにより、CADやコンピュータグラフィックスなどのメディアを使って再現できるように整理しておくことである。このような視点で橋梁技術者を中心として橋梁デザイン史をまとめることが著者の目指すところである。

新しいデザインを実現するには、新しい材料、技術をデザインに活かすことであり、そのデザインは設計競技という社会的評価システムを通して実現される。このプロセスは1世紀前のスイスにおけ

る橋梁デザインの場合においても同様であり、マイヤールはそれを目指したエンジニアであったといえることができる。

補注

注1) 文献2)、ppIX。スイスの鉄筋コンクリート規準の変遷について記述されているが、セメントに関する指針は、接合材指針として1919年に制定され、1933年に改定がなされている。

注2) 文献3)、pp334より抜粋。1931年の鉄筋コンクリート規準では、スイスにおける高強度コンクリートとは、28日角柱供試体強度(20cm×20cm×60cm)として240kg/cm²以上を有するものを指す。一方、普通コンクリートは175kg/cm²以上、240kg/cm²以下のものを指す。両者の場合においても、セメント量は300kg/m³以上と規定されている。

注3) 文献10)、pp165から抜粋。

経済的なアーチは2つの方法によって可能となる。第一に、箱桁断面のように断面の各構成部材(床版、アーチウェブ、アーチリブ)を強固に一体化する方法である。第二に、これとは反対に荷重伝達機構上の主部材である床版とアーチのどちらかの剛性を低減させる方法である。後者の場合は、床版とアーチにそれぞれ異なった役割を与える。アーチ橋の荷重伝達機構に関して床版が荷重の伝達に寄与していることが荷重載荷試験によって判明した。

注3) 文献10)、pp169より抜粋。

注4) 文献11)、pp27より。

注5) 文献8)、P1より抜粋。

注6) 文献9)より抜粋。

注7) 文献12)、P6より抜粋。

参考文献

- 1) 鈴木圭ほか:『欧州における鉄筋コンクリート技術の歴史的変遷』、土木史研究論文集 Vol.25、pp1-13、2006。
- 2) Ros.M.:『Versuche und Erfahrungen ausgeführten Eisenbeton Bauwerken in der Schweiz』、Vereins schweizerischer Zement, Kalk und Gips Fabrikanten,1937
- 3) Ros.M.:『Die Schweiz. Portland-Zemente und deren Beton im Laboratorium, auf der Baustelle und Bauwerk』、Schweizerische Bauzeitung, Juni,27,1931。
- 4) Gidion.S.:『Raum, Zeit, Architektur』、Studio Paperback,1989。
- 5) Bill.M.:『Robert Maillart』、Artemis Zuerich,1949。
- 6) Billington.P.:『Robert Maillart's Bridges』、Princeton Press,1979。
- 7) 鈴木圭:ロベール・マイヤールの構造デザインと設計思想(その2)、土木史研究講演集 Vol.26、pp18-19、2006。
- 8) Schuele.F.:『Wettbewerb zur Erlangung von Projekten fuer eine neue Rheibruecke in Rheinfelden』、Schweizerische Bauzeitung, Juli,24,1909。
- 9) Moser.R.:『Wettbewerb fuer eine neue Rheibruecke in laufenburg』、Schweizerische Bauzeitung, Sep,24,1910。
- 10) Maillart, R.:『Leichte Eisenbeton Bruecken in der Schweiz』、DER BAUINGENIUR, Maerz6,1931。
- 11) Billington.D.:『Robert Maillart』、Verlag fuer Architecture Artemis,1990。
- 12) Schlaich.J.:『Robert Maillart und Wir?』、Beitraege zur Geschichte des Bauingenieurwesens Robert Maillart 1872-1940,Hef2,1991。