

中央大学博士論文

コンクリート橋の歴史，コンセプトチュアルデザイン，
構造デザインに関する研究

鈴木 圭

博士（工学）

平成25年度

2014年3月

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 既往研究と本研究の位置づけ	2
1.2.1 我が国におけるシビックデザインの歴史	2
1.2.2 橋梁デザインの定義	3
1.2.3 既往研究と橋梁デザイン	4
1.2.4 構造とデザインを統合する動き	5
1.3 研究の構成	6
第2章 欧州における鉄筋コンクリート橋の歴史的変遷	10
2.1 はじめに	10
2.2 鉄筋コンクリートの歴史に関するこれまでの研究	11
2.3 欧州における鉄筋コンクリートの萌芽と発展	13
2.4 エヌビック式設計法とモニエ式設計法の比較	27
2.5 欧州の鉄筋コンクリート指針について	29
2.6 日本における鉄筋コンクリートの導入	38
第3章 ロベール・マイヤールの構造デザインと設計思想	46
3.1 はじめに	46
3.2 マイヤールに関するこれまでの研究	47
3.3 時代的な背景	49
3.4 マイヤールの構造フォルムの発展	51
3.5 マイヤールの構造フォルム	55
3.6 スイスの鉄筋コンクリート規準の成立と変遷	67
3.7 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	69
3.8 おわりに	71
第4章 ドイツアウトバーンの初期設計思想と橋梁景観論	75
4.1 はじめに	75
4.2 創設者フリッツ・トット	76
4.3 エンジニアとアーキテクトの協力体制	77
4.4 アウトバーンのシステムづくり	78
4.5 造園家の参加	80

4.6	ドイツにおける景観論の起源	81
4.7	RC 歩道橋の理想的なタイプ	82
4.8	橋梁景観に関する考え方の変遷と国際的な研究について	84
4.8.1	橋梁デザインにおける建築家の役割	84
4.8.2	19 世紀のフランスにおける鋼橋のデザイン	86
4.8.3	橋梁デザインに関する 1920 年代の国際的な論議	88
4.8.4	戦後ドイツの橋梁デザインにおけるアーキテクトの役割	90
4.8.5	橋梁デザインに関する 1980 年代の国際的な論議	93
4.9	アウトバーンの技術と思想が日本にもたらしたもの	94
4.10	おわりに	95
第 5 章	橋梁に対する一般生活者の感じ方と構造原理	98
5.1	はじめに	98
5.2	橋梁に関する一般生活者の感じ方に関する調査	98
5.2.1	調査手法	99
5.2.2	調査・分析	104
5.2.3	風景と橋梁形式のマッチング	105
5.3	構造原理の理解	108
5.3.1	ローマ時代の橋の施工技術と 1000 年後のデザインの変化	109
5.4	おわりに	113
第 6 章	コンセプチュアルデザイン、構造デザインと材料・施工法	114
6.1	はじめに	114
6.2	コンセプチュアルデザインの定義	116
6.3	構造デザインの定義	119
6.4	すべての材料に精通したエンジニアの育成	122
6.5	橋梁デザインが目指すべき方向	122
第 7 章	代官山人道橋のデザイン	125
7.1	はじめに	125
7.2	デザインプロセス	126
7.3	基本設計	138
7.4	おわりに	143
第 8 章	池田へそつ湖大橋のデザイン	149
8.1	はじめに	149

8.2 周辺状況とデザインの方針	149
8.2.1 周辺状況	149
8.2.2 計画条件	151
8.2.3 第1次橋梁形式比較	152
8.3 形式の選定	153
8.3.1 架橋条件	153
8.3.2 日本のアーチ橋の歴史	154
8.3.3 第2次橋梁形式比較	156
8.4 細部構造の景観	160
8.4.1 非常駐車帯拡幅部の検討	160
8.4.2 落下物防止柵の検討	161
8.5 おわりに	162
第9章 AKIBA BRIDGE のデザイン	164
9.1 はじめに	164
9.2 秋葉原駅前都有地の再開発計画と歩道橋整備	164
9.3 デザインプロセス	166
9.4 AKIBA BRIDGE のデザインが実現した意義	189
第10章 浮庭橋のデザイン	190
10.1 はじめに	190
10.2 道頓堀川の歴史	191
10.3 浮庭橋整備の背景と道頓堀川河川整備	191
10.4 デザインコンペの条件	194
10.4.1 基本コンセプト	194
10.4.2 提案条件	194
10.5 デザインプロセス	197
10.6 浮庭橋が実現した意義	213
第11章 結論	217
11.1 本研究の成果	217
11.2 今後の課題	222

第1章 序 論

1.1 研究の背景と目的

2004年に景観法が成立し、良好な景観は現在及び将来の国民の共通の資産であるという認識が示された。こうした中で良好な景観形成を仕事にしたいとデザインやまちづくりに興味をもつ学生が増えたことは好ましい状況である。一方、土木という名称が使われなくなり都市環境学科、建築都市デザイン学科、建設学科という名称に変更する大学が増えている。これは土木というエンジニアリングのスペシャリストの育成から、環境、景観、まちづくり、防災等を扱う総合的なエンジニアの育成にシフトしてきたものといえる。橋梁デザインを取り巻く社会のニーズについても、対象とする環境を理解し、その環境に相応しい構造デザインを提案することが求められており、機能性、経済性のみならずデザインを含めてトータルで付加価値の高い構造が要求されるようになった。このような社会的背景においてエンジニア、またはアーキテクトに求められる能力としては、鋼、コンクリート、木、ケーブル、ガラス等、さまざまな建設材料を自由に組合せ、新しい構造を提案できることである。また、使う人の多様なニーズに応え、環境へのインパクトを考慮し、サステナブルで低コストな構造が要求されることもある。いずれの場合においても、材料を適切に組合せ、それらが一体となって荷重に抵抗させることが、最良で高品質な構造物を実現することになる。現在、よく使われる構造形式として鋼・コンクリート複合構造物、ケーブルを使った吊り構造形式、強化ガラスを使った高欄、または集成材を使った木構造等がある。いずれも従来のコンクリート構造、鋼構造、木構造といったように材料別に構造を理解するだけでは十分対応できるとはいえない状況になっている。むしろ、あらゆる材料を自由に使い、しかも構造物に要求される性能を満足することができるエンジニア、「性能設計」ができるエンジニアが求められている。

橋梁デザインは、特に、設計競技においてデザインの独自性、創造性、これまでに存在するもののコピーではないことが要求される。常に新しい構造を考えることの重要さと、構造力学、材料力学について十分な知識を持つと同時に、これらの歴史を学び、理解することが必要である。なぜなら、デザインや構造の歴史を知ることによって独創的なデザインを実現したいと思う気持ちが強くなること、また自分が考えた構造が本当に独創的であるのか評価する上で、容易に判断ができるからである。さらに、歴史的なエンジニアの作品

に触れることは、彼らの思想に興味を持つだけでなく、何故、そのようなデザインが可能であったのか、何故その社会の中で実現したのかを理解することに繋がり、デザインを通じてその国の文化を知ることになるからである。以上の社会情勢及び筆者の経験を背景として、本研究はコンクリート橋の歴史を理解することをベースとして、構造デザイン、コンセプチュアルデザインの進め方について示し、様々な材料を自由に組合せて、社会のニーズに応える独創的なデザインを実現するプロセスを示すことが第1の意図であり、構造物に要求される性能を満足することができるエンジニア、「性能設計」ができる エンジニアの育成に資する研究となることである。

1.2 既往研究と本研究の位置づけ

1.2.1 我が国におけるシビックデザインの歴史

土木における“デザイン”はこれまでに様々なことばで定義されてきた。日本では1988年土木学会誌上で「シビックデザイン」という言葉が使われ、これまでに作られてきた土木構造物に関する議論が展開された。1980年代後半は、日本経済がバブル期の最中にあり、これまで経済性、機能性を優先していた土木構造物にも華美なデザインや、稚拙なデザインが見られるようになった。こうした動きに対する警鐘としてシビックデザインという言葉が使われ、「地域の歴史・文化と生態系に配慮した、使いやすく美しい公共土木構造物の計画・設計」を求める動きが起こった¹⁾。1993年に篠原修を会長、天野光一を幹事長として、「景観デザイン研究会」が発足し、産、官、学の有志が集まって、地域景観、田園景観、橋梁景観、道路景観、落水の表情、港湾・海岸、表面処理、水都ランドデザインの8つの研究部会活動を通じて研鑽が行われ、2005年に至る13年間、活発な活動が行われた²⁾。橋梁のデザインについては、「美しい橋のデザインマニュアル第2集」が出版され、1996年には「コンクリート構造のエッセティクス」が土木学会から出版された。また、1998年に橋梁景観論に関する名著であるレオンハルト (Fritz Leonhardt) が執筆したブリュッケン (Brücken) の翻訳が景観デザイン研究会から出版された意義は大変大きい。橋梁の美を表現する言葉とビジュアルな写真が、橋梁デザインを学ぼうとする初心者にとって格好のテキストになったといえる。2000年には、欧米諸国と日本の公共土木施設とのデザインレベルの違いを認識することを目的として「2000年国際化時代の橋梁シンポジウム」が開催され、パリ、セーヌ川に架かるソルフェリーノ橋の設計コンペで最優秀賞を獲得したマル

ク・ミムラム (Marc Mimram) を招いて、ヨーロッパのデザインの最前線を学んだ。ミムラムを「エンジニア・アーキテクト」と称し、構造とデザインの両面を理解し、実施できる人という意味で使われるようになった。2001年には、これまでの研究成果や土木学会員の作品を表彰することを目的として第1回土木学会景観・デザイン委員会 デザイン賞授与が実施された。

1.2.2 橋梁デザインの定義

橋梁デザインには、構造デザイン (Structural Design) とコンセプチュアルデザイン (Conceptual Design) が同時に存在し、設計者は2つのデザインを進めていかなければならない。特に、コンセプチュアルデザインが必要とされるのは、道路橋よりもむしろ歩道橋である。2004年に世界コンクリート連盟 (fib : Federation International du Beton) から歩道橋に関するガイドラインが出版され、歩道橋と道路橋のデザイン上の違いが明確にされた。歩道橋は、道路橋とは異なって、線形、構造、材料、テクスチャー、防護柵、アクセス、照明、周辺環境への配慮等、設計の自由度が大きい。つまり、歩道橋の企画計画段階において、設計者は対象の全体像を広く俯瞰し、細部にまで目を配り、そのあるべき姿の基本的考え方を構築しなければならない。周辺環境に適合する新しいデザイン (形、構造フォルム、システム) を提案することを意識し、環境と全体構造系との関係と、橋梁の造形フォルムを考えることが要求される。これをコンセプチュアルデザイン (Conceptual design) と定義する。以下に、歩道橋と人の係わりについて端的に表す一文を示す³⁾。

“歩道橋では人がゆっくりと歩いたり、そのデッキの上で佇んで風景を眺めたり、手摺に触れたり、道路橋と比較すると直接経験することが多い。また、橋全体を眺められると同時に、橋の細部にも目が届くことがあり、まさに、歩道橋はヒューマンスケールでなければならない。”

橋梁のデザインにおいて、筆者はコンセプチュアルデザインには、広義の意味と狭義の意味があると考えられる。広義の意味では「美しい国土、美しい風景を創るには、私たちは何をなしたらよいかを示す思想、考え方であり、狭義の意味では「風景と橋梁との関係をどのように捉えるか」を示す思想、考え方である。一方、構造デザインとは、そのデザインを

実現するために「構造的にどのような材料を使い、どのように課題を解決するか」を示すものであり、「荷重が橋桁に作用した場合に、発生する応力度が許容値以下であることを示すこと」を構造デザインとは定義しない。

1.2.3 既往研究と橋梁デザイン

海外において、構造とデザインを統合させた既往研究は、石橋、鋼橋の橋梁美について体系的に触れた「橋梁建設」(Brückenbau) (1904年)の第三章において「橋梁の芸術的フォルム」を著した R. バウマイスター (独) である⁴⁾。当時、カールスルーエ工科大学においては「芸術的フォルムを扱う講座」(Kunstformen Lehre) が存在し、橋梁の景観 (Ästhetik) に関する授業が行われていた。しかしながらその内容は、芸術的造形と表現しながらも、石橋の入り口に中世の城門を立て、ゴシックの教会のフォルムに呼応した主塔が付くなど、特定の嗜好や趣味に偏り、健全な公共感覚を示すものではなく、構造芸術と呼ばれるものではなかった。その後、1913年にエンペルガー (Emperger) (奥) が「新しいアーチ橋」(1913年)において、スレンダーなコンクリートアーチ橋を実現するために、鋳鉄アーチをコンクリートで巻きたてる工法に関する実験を行い、シュバルツェンベルク橋 (Schwarzenberg) に適用したことを鋳鉄橋の歴史とともに紹介した⁵⁾。1928年に第2回国際橋梁会議がウィーンで開催され、フリードリッヒ・ハルトマン (Fridrich Hartmann) (奥) の「橋梁の景観」(1928年)を題材として橋梁美について議論されたが、この会議がドイツ語圏において景観論を展開する切掛けとなったと考える。1933年にヒトラー政権の成立とともにアウトバーン建設局が創設され、フリッツ・トット (Fritz Todt) の「風景に融合する道路の建設」(Landschafts-gebundene-bauens) のコンセプトのもとに、シェヒテル (Schaechterl) , レオンハルト (Leonhardt), ルックウィード (Rukwied) 等の橋梁エンジニアが建築家、造園家と協働してアウトバーンの橋梁を建設した。彼らは実務と並行して橋梁景観論を展開し、視覚的な事例をもとに橋梁美の言語化・法則化を試みた⁶⁾。レオンハルトの「橋」(1984年)はプレストレストコンクリート技術を適用した桁橋、斜張橋を加えて橋梁景観論を集大成したものである。風景と構造の統一という概念は、「空間、時間、建築」(1941年)を著したギーディオン (スイス) にも影響を与え、「建築と人間環境の調和」をテーマとして、この名著が執筆された⁷⁾。特に、マイヤールの橋梁を構造と美

が融合した新しい作品であると評価したことにより、ビル (Max. Bill) (スイス) が「ロベール・マイヤール」(1969年)においてコンクリート橋の橋梁美を紹介し⁸⁾、ビルントン(米) (D. P. Billington) が「塔と橋」(1983年)によって構造芸術 (Structural Art) を提唱するに至ったと考える⁹⁾。

歴史と建設技術を組合せたものはシュトラウプ (スイス) による「建設技術史」(1949年)で古代ローマの構造物から1950年代のネルヴィの建築に至るまでの建設技術が力学, 材料力学の発展にどのように影響したかを述べている¹⁰⁾。構造解析技術と歴史を組合せたものはチモシェンコが書した「材料力学史」(1969年)¹¹⁾であり, 同年のうちに日本語版が出版されている。特に, この分野を集大成したものがキューラー(Karl Eugen Kurrer) (独) による「構造理論の歴史」(2008年)であり, 2005年のマドリッドにおける「構造の歴史に関する国際会議」がきっかけとなり, ガリレオ, ニュートン, オイラーをはじめとする解析家の思想を原典から直接引用するとともに, 構造解析理論は実構造を建設するために発想されたことが示されている¹²⁾。次にドイツにおける工学教育が1990年代から大きく変わってきた点について一端を紹介する。

1.2.4 構造とデザインを統合する動き

橋梁デザインのプロセスでは, その場のコンテキストを読み, 何を主張しどのような構造を実現するのかを考えることから始まる。そして物まねではなく, これまでに無い新しい構造とデザインを同時に考える。その場合, エンジニアとアーキテクトという職能が別々の場合は, どちらが主導権を取ってもよいし, また, エンジニア・アーキテクトという職能として一人が担当してもよい。1990年代イギリスのドックランドにおける橋梁コンペでは, アーキテクトとエンジニアのどちらが主導権を握った方が, 優れた構造物ができるのかという議論が行われた。結果は, どちらの場合でもコミュニケーションが十分にとれているチームが優勝する傾向があるとのことであった。こうした現状に対応できるエンジニアをどのように育成するかが, 大学教育の課題と考え, ドイツの大学の取組について紹介する。

1990年代の初めにシュツットガルト工科大学のシュライヒ (Jörg Schlaich) と, シェーフアー (Kurt Schaefer) が「構造物のコンセプトチュアルデザイン」と題したワークショップを導入し, 1996

年にはウルリケ・クールマン (Ulrike Kuhlmann) とともに, “コンクリート構造” や “鉄骨構造” という名称を廃止して, “設計・建設科” という名称に変更し, “建設材料を総合的に把握する講座” (Werstoffübergreifend Lehre) を開いた. 現在もこの考えはヴェルナー・ゾーベック (Werner Sobec) やクールマンに引き継がれさらに発展している.

ベルリン工科大学においては, 2004年にマイク・シュライヒ (Mike Schlaich) が 土木工学 設計・建設科 (Entwerfen und Konstruieren Massivbau) の教授に就任し, これまでの材料別に教室が分かれていたことに対して, 建設材料を総合的に把握するという考えに基づいて, 教室を統合化する方向を示し, コンセプチャルデザインと構造デザインを大学1年生から教えるという教育スタイルを実施している. これらは実際にデザインする状況に対応する教育法であり, 教育と実践とが大学教育において融合した形であるといえる. 本論分は, 構造とデザインを統合し, 歴史の理解をこれに加えて, 構造物に要求される性能を満足することができるエンジニア, 「性能設計」ができる エンジニアの育成に資する研究となることである.

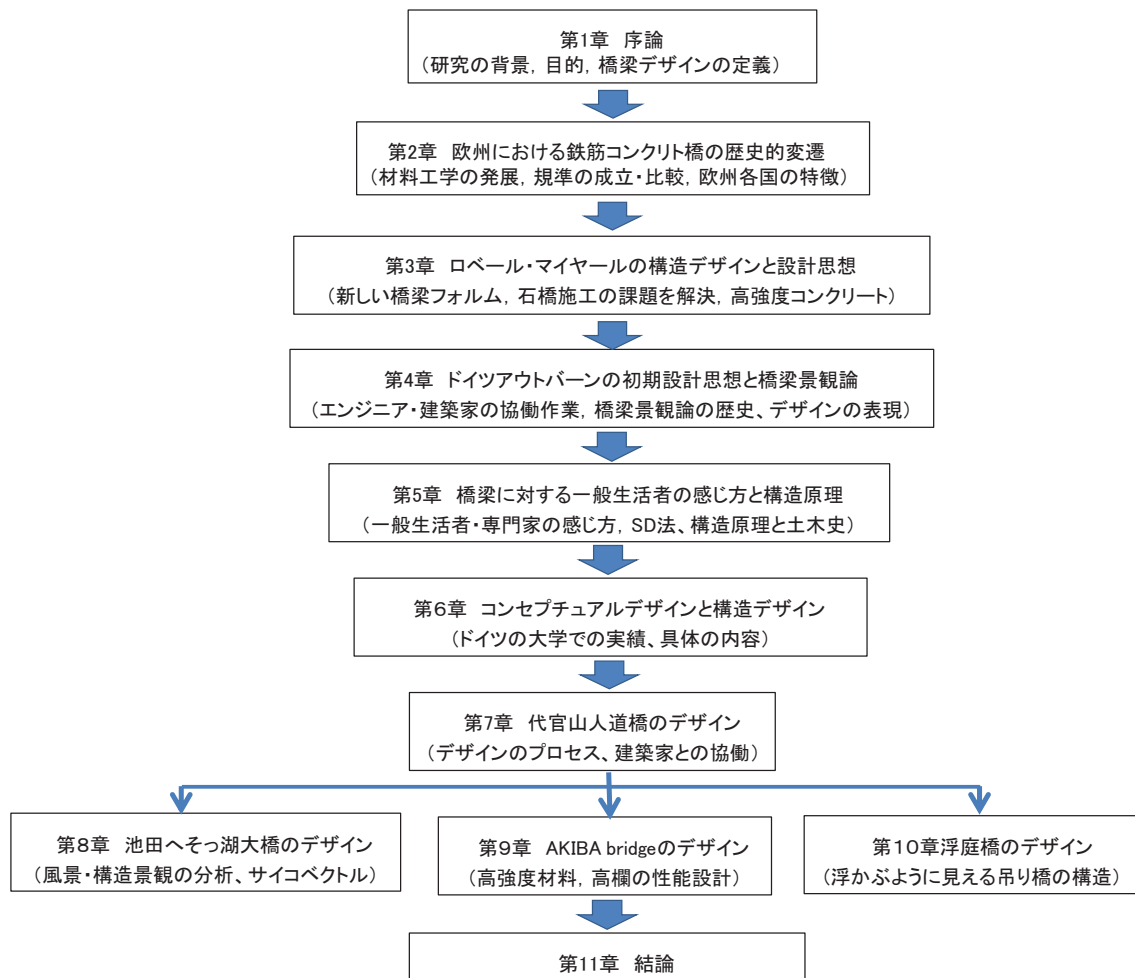
1.3 研究の構成

本研究の構成に従って各章の概要をまとめる. 研究の構成を (図 - 1.1) に示す.

第1章は本研究の序論であり, 研究の背景と目的, 既往研究, 本研究の位置付けを述べ, 研究全体の構成を概説している. 橋梁デザインにおける「コンセプチュアルデザイン」や「構造デザイン」など. 本研究におけるキーワードを定義している.

第2章は, 欧州の鉄筋コンクリート技術の変遷から見た材料工学の発展について概観し, 1900年当時, 新材料であった鉄筋コンクリートが社会に普及する過程で, 実験を通じてその成果が規準に反映されたこと, 発展の仕方についても, フランス, ドイツ, スイスで互いに異なることを整理する.

第3章は, スイスの橋梁エンジニアであるロベール・マイヤールが様々な鉄筋コンクリート橋の構造フォームを発明した背景を, 材料力学的な観点から整理する. 特に, 3ヒンジ式箱桁アーチ, 補剛アーチ, ピルツデッキ, コンクリートシェル屋根等, 今日用いられているほとんどのコンクリート構造を視覚的にも美しく造形した背景には, 過去の石橋の施工上の問題点に着目して, 支保工の軽量化を図るために, アーチの分割施工を試みたこと, 当時の設計基準強度を大きく上回る高強度コンクリートを使っていたこと, 実構造物が完成した後は, 荷重裁荷試験を実施して橋の性能確認をチューリッヒ工科大学材料研究所の教授と共同で行っていたことを示す.



表一1.1 本研究の構成

第4章は、ドイツのアウトバーンの初期段階において、風景に融合する道路の建設というコンセプトのもとに、エンジニア、建築家、造園家の協働体制が取られたこと、また、その協働体制が、戦後のドイツにおける橋梁復興に活かされてケルンの斜橋群と取り付き道路が整備されたことから、エンジニア、建築家、造園家の三者、または2者との協働作業が美しい橋梁の実現に必要であることを整理する。エンジニア・アーキテクトとして橋梁デザインに臨むことは理想的であるが、それぞれの持ち場で、参加各人の能力を引き出すことも、重要なことである。また、19世紀後半からの欧州における橋梁景観に関する考え方と、1920年代に国際的な議論に展開したこと、さらに1980年代の日本の橋梁デザインマニュアルの出版に至る経緯を示した。

第5章は、橋梁に対する一般生活者の感じ方と専門家との違いが存在するのか、という課題を挙げ

て、橋梁形式に関する感じ方の調査を行い、その結果を整理した。また、橋梁デザインの基本である構造デザインについて、理解を進めるために、力の流れを感じることで、力の大きさを計算で算出することを通じて、構造デザインに興味をもつことの重要性と方法について述べた。その場合、土木史という広範囲な内容をすべて網羅するのではなく、代表的な橋梁に着目して、歴史、構造、および構造解析に興味をもたせる方法を解説した。

第6章は、橋梁デザインにおけるコンセプチュアルデザインと構造デザインについて定義し、コンセプチュアルデザインの定義事例とそれに対応する本研究のデザイン事例を挙げた。構造デザインについてはベルリン工科大学での取り組み事例を挙げ、構想、モデリング、部材寸法の決定および詳細部の決定という4つのプロセスを整理した。すべての材料に精通したエンジニアの育成と、デザインプロセスにおいて「0から1」への発想が重要であり、今後の橋梁デザインが目指すべき方向をまとめた。

第7章は、代官山人道橋のデザインを通じて、橋梁デザインのプロセスについて、3段階のデザインプロセス、すなわち、コンセプトリサーチ、コンセプトメイキング、デザインディベロップメントに沿って、筆者が建築家と協働で行ったデザインを整理した。

第8章は、長大アーチ橋のデザイン事例として池田へそっ湖大橋を取り上げ、橋梁を取り巻く風景の分析方法を整理した。また、アーチ橋のデザイン手法について、歴史的なアーチの施工法から新しい両側同時張出施工の開発やメラン式工法の併用により施工の迅速化を進めたことを整理した。また、桁、橋脚、アーチリブ、鉛直壁等、様々な部材が存在する中で、サイコベクトルを使って、構造部材の重要度を階層化し、主桁、橋脚、アーチ、鉛直壁の順に、それぞれの面を1段階奥に配置する方法を整理する。アーチを美しく見せる方法として、最も重要な桁のラインを光の陰影を利用してシンプルに見せることを示す。

第9章は、アキバブリッジを事例として、これまでにない独創的な歩道橋をデザインした事例を示す。アキバブリッジは主桁のコンクリートに超高強度コンクリートを使い、歩道橋デザインの可能性を追求した事例である。特に、ITの拠点となる都市景観に相応しいデザインが求められたため、主桁にR=170mの曲線を採用し、この曲線を動的に美しく見せるための考えた方として、縦断勾配と平面線形R=170mを組合せ、さらに主桁のエッジ部分を強調し、高欄の存在を脇役とするコンセプトを考えた、高欄デザインには、従来とは異なる性能設計を導入し、橋上から人が転落しないこと、群集

が高欄に寄りかかっても、高欄を構成する強化ガラスが破壊しないことを前提として、上段手摺と照明を兼用し、補助手摺をその下に1本として、合計2本の手摺を実現し、すっきりとした高欄デザインを実現した。

第10章は、大阪、道頓堀川に架ける歩道橋のデザインコンペの事例を取り上げ、デザインコンペの条件を満足させながら、最終的な構造を提案するプロセスを整理した。また、河川軸を45度で渡ることはこれまで河川法の観点からはあり得なかったことであるが、橋を使う人々をもてなすアメニティ空間の整備を考えることによって、河川法の特例として、物販等ができるようになった。

第11章は、第2章から第9章までに得られた結論を総括し、本研究の今後の課題を述べる。

参考文献・注釈

- 1) 鹿島建設土木設計本部編：景観設計, p. 1, 2003
- 2) 景観デザイン研究会：活動の軌跡 1993/2005, p.5, 2005
- 3) fib編：Guidelines for the design of foot bridges, p. 3, 2004
- 4) R. Baumeister：Die Kunstformen des Brückenbauus, Verlag Wilhelm Engelmann, 1904
- 5) Fritz von Emperger：Neuere Bogen Brücken, Wilhelm Ernst & Sohem, 1913
- 6) Karl Schaecterle, Fritz Leonhardt: Die Gestaltung der Brücken, 1937
- 7) Sigfried Giedion: Raume Zeit Architektur, Studiopaperback, 1989
- 8) Max. Bill：Robert Maillart, Verlag für Architecture Zürich, 1949
- 9) D. P. Billington：Tower and Bridge, 1983
- 10) Straub: 建設技術史, 鹿島出版会, 1973
- 11) チモシェンコ：「材料力学史」, 鹿島出版会, 1974
- 12) Karl Eugen Kurrer：The history of the theory of structures, Ernst & Sohn, 2008

第2章 欧州における鉄筋コンクリート橋の歴史的変遷

2.1 はじめに

本章では、橋梁デザインの初期を理解するために、19世紀後半から20世紀前半の欧州における鉄筋コンクリートの材料工学的変遷と、橋梁工学的変遷についてフランス、ドイツ、オーストリア、スイスを中心に整理する。橋梁デザインの歴史を捉えるには、先ず、鉄筋コンクリートが発明された欧州諸国の歴史を紐解き、同時に当時の日本の技術者達がそこで何を見て、何を学んできたのかについても整理する。

明治期以来、日本は近代化を図るために欧米諸国からお雇い外国人を招聘し、又は技術者を海外に派遣して各分野の先進技術を導入してきた。特に、鉄道・道路を主とする交通インフラストラクチャーの整備において、要素技術であるコンクリート工学、鉄筋コンクリート工学、材料・構造力学を習得し、鉄筋コンクリート橋又は鋼橋建造技術を日本へ導入することは緊急かつ重要な課題であったといえる。欧州の鉄筋コンクリート技術の導入に貢献した日本の土木技術者として廣井勇、日比忠彦、阿部美樹志、宮本武之輔等が挙げられるが、彼等の欧州滞在時に鉄筋コンクリートはどのような発展段階にあったのか、また、彼らの鉄筋コンクリートの導入の経緯については詳しく明らかにされていない。そこで本論分は、彼らが学んだ技術の原点を理解するために、19世紀後半に普及したモニエ式、エヌビック式、メラン式鉄筋コンクリート工法の萌芽と発展について、フランス、ドイツ、オーストリアを中心に論じ、次に1903年、欧州初の鉄筋コンクリート指針がスイスで制定された背景を考察する。最後に、欧米で鉄筋コンクリートを学んだ日本の技術者がその成果をどのように紹介したかを概括する。全体を通じて19世紀後半において、新材料であった鉄筋コンクリートが社会に普及するためには、どのような社会体制が求められていたかを述べる。

2.2. 鉄筋コンクリートの歴史に関するこれまでの研究

鉄筋コンクリートの歴史に関する海外での研究は、1949年、スイスの建設技術史家であるシュトラウプ（Hans Straub, 1895～1962）が「Die Geschichte der Bauingenieurkunst」（建設技術史）において上記の3工法について概括し、スイスで設計指針が制定されたことを紹介したが、メラン工法の詳細や、スイスの指針の詳細には触れていない。また、ドイツでは橋梁エンジニアであるヴィットフォート（Hans Wittfoht, 1924～2011）が1984年、「Building Bridges」において鉄筋コンクリート橋の歴史を中心としてメラン式を除くモニエ式、エヌビック式橋梁を紹介した。フランスで生まれた2つの方式の配筋方法並びに橋梁デザインの特徴を理解する上で重要な文献である。さらに1999年に機関誌「Beton und Stahlbetonbau」の特別号、「ドイツにおける1850年から1910年までの鉄筋コンクリートの歴史」を特集し、シュティグラート（Klaus Stiglat）はモニエ、エヌビック以前のフランスの鉄筋コンクリート橋の歴史を紹介した。クーラー（Karl-Eugen Kurrer）はモニエ式パンフレットを中心として、19世紀後半から20世紀初めにおける鉄筋コンクリートに関する文献を紹介した。特に、クーラーは2002年に「Geschichte der Baustatik」（構造力学の歴史）を出版し、ドイツの技術史研究をリードする研究者であるといえる。フランスでは、デルミュ（Gwenael Delhumeau）が「L'Invention du Beton Arme」（鉄筋コンクリートの発明）において1890年から1914年におけるエヌビック式の歴史について触れた。本書はエヌビック式の発展の経緯やフランスにおける鉄筋コンクリート指針の成立過程を知る上で重要である。

本論分は、上記の技術史研究をもとに、フランス、ドイツ、オーストリアにおける鉄筋コンクリートの材料工学的発展を記述した点が重要である。第二は、既往研究では十分ではなかったメラン工法の詳細とオーストリアの鉄筋コンクリートの発展を記述した点が重要である。なぜなら、メラン式工法がアメリカに紹介されたことによって大河戸宗治や阿部美樹志が本工法に関する情報に接し、日本に普及させる契機になったと考えるからである。

第三に、欧州各国で制定された設計基準のうち、特に許容応力度について比較検討し、当時の鉄筋コンクリート材料に対する評価をした点が重要である。鉄筋コンクリート橋のデザインを評価する上で、設計のベースとなる基準がどのようなものであったかを理解する必要がある、何故なら、許容応力度のレベルが少なからず橋の形式や構造に影響を与えていたと考えるからである。例えば、許容曲げ圧縮応力度が低く抑えられると、単純梁で考えるとスパンが制限されることになる。そこで、鉄筋コンクリート橋のスパンをさらに伸ばそうとすると、発生する応力度を低く抑える機構を備えた構造形式、例えばゲルバー桁やヒンジ式アーチが生まれる。1900年～1910年に施工された橋梁を見ると、床版橋やT桁梁形式における単純桁のスパンは10～20mである。ゲルバー桁やヒンジ付アーチでは、スパンは30～60mの規模が多くなっている。マイヤールの橋の美は、この3ヒンジ式に洗練したデザイン力が加わって生まれたものである。

先ず、欧州における鉄筋コンクリート技術の発展を以下の黎明期と発展期の2つの時期に分けて考える。

①黎明期（1850年～1910年） 鉄筋コンクリートがフランスにおいて発明された1850年代から、ドイツを中心としてモニエ式鉄筋コンクリートの研究ならびに設計法が確立された1880年代、さらに、スイスで欧州初の鉄筋コンクリート指針が制定され、ドイツ、フランスが同様な指針を制定するまでの期間。

②発展期（1910年～1945年）

鉄筋コンクリート指針が成立してから、スイスにおいてはマイヤール、フランスにおいてはフレシネー、ドイツにおいてはメルシュ等によって、様々な構造形式の橋梁が考案され、普及する年代。さらにドイツのアウトバーン建設局に見られるようにエンジニア、建築家、造園家等の協働作業によってデザインが検討される時代から、第二次世界大戦が終了するまでの期間。

本論分は①の期間について述べるものである。

2.3 欧州における鉄筋コンクリートの萌芽と発展

ここでは欧州における鉄筋コンクリート萌芽期に活躍した開拓者を取り上げ、その発展について論じる。(表-2.1)に欧州における鉄筋コンクリートの開拓者とその主な業績をまとめたものを示した。初期の鉄筋コンクリート工法であるモニエ式、エヌビック式は、フランスで開発され、前者はドイツ、オーストリアに特許ライセンスがそれぞれ1885年と1886年に売られ、ベルリン、ミュンヘン、シュツットガルト工科大学における鉄筋コンクリートに関する研究を促進させるとともに、モニエシステムとして体系化された。後者は、フランス国内はもとよりベルギー、スイス、イタリア、イギリスにおいて普及した。19世紀後半のオーストリアではメラン式が開発され、アメリカに普及していった。これらの鉄筋コンクリート工法を普及させる方法として、エヌビック式に見られるように、特約店を拡大してビジネス展開を図る方法と、モニエ式のようにドイツで行われた特許ライセンスの取得、鉄筋コンクリート材料特性に関する官民一体の研究、さらに機関紙を通じた広報と普及が技術を定着させる鍵となる。本研究はコンクリート技術の黎明期における主要な対象国として、新しい発想を生んだフランス、理論的に体系化したドイツ、鋼橋の架橋技術と融合させたオーストリアを扱い、それに続くスイス、イギリス、アメリカにおける発展は、重要な事項、事件のみを挙げている。

(1)フランスにおける鉄筋コンクリートの萌芽

鉄筋コンクリートの発明を誰の功績とするかは明確ではないが、1855年パリ万国博覧会に出品した2人のフランス人おり、この万博への出品が、鉄筋コンクリートを広く社会に知らせるきっかけとなった。1人はランボー (Joseph-Louis Lambot, 1814~1887) (写真-2.1) で、1848年に細いワイヤーメッシュで補強したセメントを使ってボート (写真-2.2) を製作し、フェロセメント (Férriciment) 船と名付けた^{注1)}。英語の Ferrocement は、ランボーの命名が起源であったといえる。ランボーは1851年にセメントを鋳鉄で補強する方法



写真-2.1 ランボ-¹⁾ 写真-2.2 RC製のボート

に関する特許を取得し、1855年の万博に船を出品して大成功を収めた^{注2)}。

2人目はコンクリート建造物の施工技術者であるコワニエ (François Coigne, 1814～1888) でコンクリート製の建物を展示した。コワニエはパリ万博に参加し、「建設業における石材の支配は終焉を迎え、セメント、コンクリート、鉄がそれにとって代わることは疑いがない」^{注3)}と確信し、1861年に初めて出版した「Bétons agglomérés appliqués à l'Art de Construire」において鉄筋コンクリートの基本となる力学的原理、すなわち、「コンクリートと鉄棒の付着が十分確保されることによって、コンクリートが圧縮力に抵抗し、鉄筋が引張り力に抵抗すること」^{注4)}を明らかにした。また、コワニエの代表的な建造物は、1868年にフォンテンブローの森に完成した全長2,000mに及ぶコンクリート製の水道橋である。本橋は192個の小さなアーチで構成され、その中で最大スパンのアーチは35mの規模である。135年経った現在においても、その概観が美しい状態であることが報告されている^{注5)}。1873年に Pont-sur-Yonne に完成した全長1,450mの水道橋 (写真-2.3) は、156個のアーチで構成されアーチスパンは6～40mに及ぶ^{注6)}。本橋はコワニエ式を採用し、突き固めコンクリートを使用しており、コワニエの鉄筋コンクリート橋の代表作といえる。

鉄筋を引張側に配置することを明らかにしたのはアメリカ人のヒヤット (Thaddeus Hyatt) で、1878年6月16日にアメリカで取得した特許 (No. 202441) ⁶⁾ に述べられている。

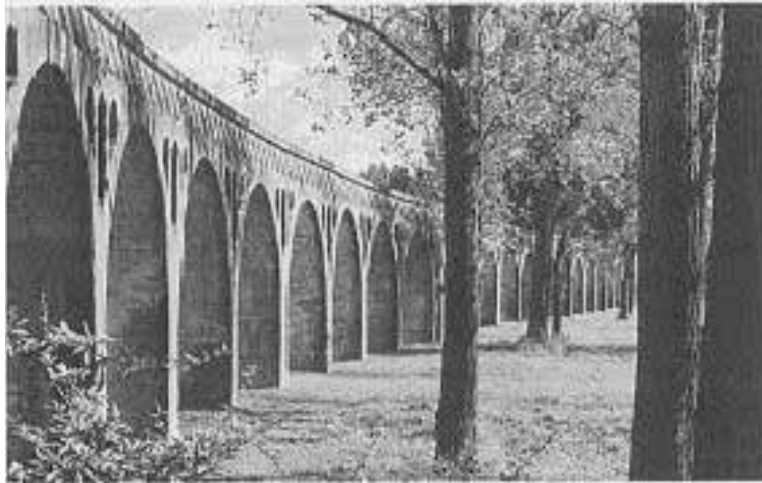


写真-2.3 Pont-Sur-Yonne の水道橋 (1873) 注7)

その後、鉄筋コンクリートの発展に貢献したエンジニアは、それぞれ異なる動機から出発し、新材料の特性を社会のために役立てようと考えた。次に紹介するのはそれぞれ異なる動機から出発し、ヨーロッパの鉄筋コンクリート発展の礎を築いた2人のフランス人と、彼等の発明を基に鉄筋コンクリートの工学的発展に寄与する1人のドイツ人である。そして、鋼橋技術に着目し、これを鉄筋コンクリートに応用することを考案した1人のオーストリア人である。フランス人の一人は菜園経営者であったジョゼフ・モニエで、一人は教会の修復工事を主な仕事としていた建築家のフランソワ・エヌビックである。そしてドイツ人は、プロイセンの内務技師として建築の設計監理をしていたマティアス・ケーネンである。オーストリア人は、鋼橋の解析法、設計法に関する教鞭をとっていたメランである。

(2) フランスにおける鉄筋コンクリートの発展(その1)

ジョゼフ・モニエ (Joseph Monier: 1823~1906)

菜園経営者であったモニエは、1867年にコンクリートの中に鉄網をいれて、植木鉢や枕木を造るアイデアの特許として出願した(図-2.1)。セメントをワイヤーメッシュで補強した手法は、ランボーの船と同じ発想であり、対象を変えたにすぎない。モニエはパリ万博でラ

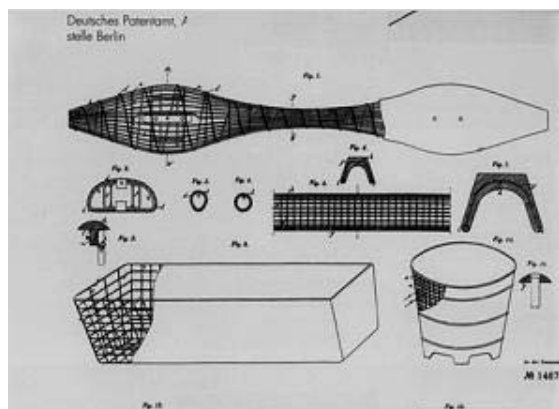


図-2.1 モニエの特許 (1867 年) 注8)

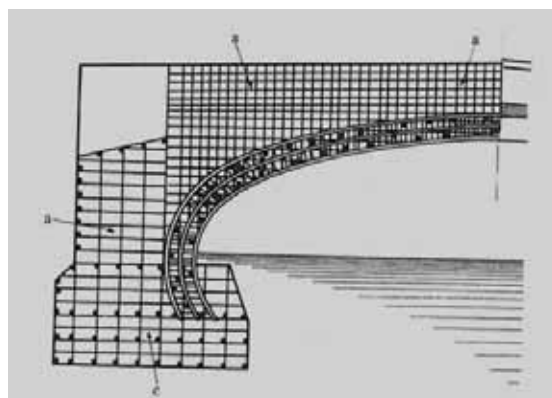


図-2.2 モニエ式橋梁の配筋法 (1873 年) 注9)

ンボアの船を見て、鉄筋コンクリートを菜園経営のビジネスに活かすとともに、これから地方で発展する鉄道施設に応用することを考えた。それが植木鉢、花瓶、枕木であった。

現代のロータリーエンジンにおける基本特許と応用特許をめぐる係争と同じように、ランボアやコワニェから激しい異議申し立てがあったことは想像に難くない。結果的にモニエがその係争に勝ったことが、1867～1881年において10件の特許出願を促したといえる。モニエは鉄筋コンクリートを建物や橋に応用しようと試みて、1873年には橋に関する特許を取得する(図-2.2)。

モニエ式橋梁の特徴は、鉄筋を格子状に配筋することである。しかしながら使用するコンクリートの強度や補強する鉄筋量をどのように算定するかについては述べられていない。つまりモニエの特許は、鉄筋の配置方法そのものに関する特許であったといえる。1878年に取得した平板の特許図(図-2.3)には、曲げ引張応力を受ける側には鉄筋を配置しているが、せん断力に対する補強筋は配置されていない。平板のスパンが短い場合には、荷重が小さいため、せん断補強筋は必要ないが、スパンが大きくなり荷重が増加した場合には、支点の近傍でコンクリートがせん断破壊する危険性が大きくなる。これはモニエ自身が鉄筋コンクリートの力学的特性に関する十分な知識を持っていなかったことを示している。モニエ式鉄筋コンクリート構造物のデザイン的な特徴は、水タンクの柱や橋の高欄に使われた

擬木に見られるように、鉄筋コンクリートを装飾的に使うことであり、工学的な観点から鉄筋コンクリートを発展させることにはあまり関心がなかったといえる。しかし、モリエの功績は「強い意志と実利的な視点に立って、その後の鉄筋コンクリート発展の礎を築いたことである。」^{注11)}モリエ式の初の鉄筋コンクリート橋は、スパン 16.5m、幅員 4 m の歩道橋で、1875 年、フランスのシャズレ(Chazelet)にあるマルキ・テリエール公園 (MarquisTiliere) に作られた (写真-2.4) 。

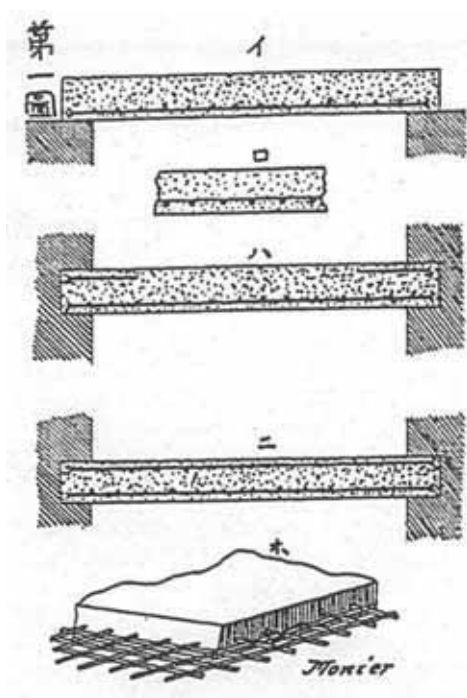


図-2.3 モリエ式平板の配筋図 (1878 年) ^{注10)}



写真-2.4 Chazelet のモリエ橋 (1875 年) ^{注12)}

(3) ドイツにおける鉄筋コンクリートの発展

マティアス・ケーネン (Matthias Koenen : 1849~1924)

1870年代のセメントモルタルを製造するドイツの社会体制の状況について整理すると、例えば、1877年にドイツポルトランドセメント製造協会(Verein Deutscher Cement Fabrikanten)が設立され、ポルトランドセメントについて科学的な研究に取り組もうという声明が出された^{注13)}。その成果の一つが1880年デュッセルドルフの「工芸と芸術博覧会」で出展されたドイツ初の突固め式コンクリート製の歩道橋で、アーチスパン 12m、ライズ 2.25m、クラウンの厚さが 20cm であり (写真-2.5)、ディビダーク社によって施工された。

当時ドイツ国内のコンクリート施工業者には、ディビダーク社に対抗して鉄筋コンクリートを取り入れようというグループがあった。モニエ式が工学的に研究され、欧州においてモニエシステムとして普及するきっかけとなったのは、1884年にモニエの特許ライセンスを「フライターク・ハイドシュッフ社」(Freitag & Heidschuch) 及び「マルテンシュタインとヨッソ社」(Martenstein & Josseaux) の2社連合が購入したことである^{注15)}。翌年、その権利をワイス (Gustaf Adolf Wayss) が買い占めた。しかし、新材料が社会に認知されるためには、その材料特性や適用方法について科学的な裏付けが必要となる。ドイツやオーストリアにおいて産官学による共同研究のキーマンとなったのがマティアス・ケーネン



写真-2.5 ドイツ初の突固めコンクリート製歩道橋 (1880) ^{注14)}

(Matthias Koenen)である。ケーネンは政府が任命した内務技師であり、1884～1888年までベルリン市内に計画されたドイツ帝国議会の設計と設計監理を担当していた。1885年、本工事を受注したワイスと出会い、鉄筋コンクリートの将来性を確信するとともに、鉄筋とコンクリートの拘束効果や、錆びの問題など今後解決しなければならない課題があることに気付いた。そして1888年に内務技師を辞め、ワイス社の技術長の職に就いてワイスとともにその普及に貢献した。ケーネンとワイスは、鉄筋コンクリート部材の力学的特性を明らかにすべく、自ら実験を行いながら、ワイス社がスポンサーとなってドイツ、オーストリアの各材料研究所に実験を依頼した。特に、ミュンヘン工科大学材料研究所創設者のバウシンガー(Johan Bauschinger)は、鉄筋コンクリート製水槽の供試体の破壊試験と、アーチ、屋根構造への適用の研究を行い、1887年12月、以下に示す鉄筋コンクリートの基本的な性質について発表した。

- 1) コンクリート中の鉄筋は長期に渡って錆びないこと。
- 2) コンクリートと鉄筋の間には十分な付着があり、急激な温度変化のもとでも問題がないこと。^{注17)}

ケーネン自身、無筋のコンクリートに比べて 3 cm^2 の鉄筋で補強したコンクリートでは6倍の耐力があることを確認した。こうして1887年には「モニエシステム」と題した鉄筋コンクリート構造物の簡易な設計法を発表し(図-2.4)、10,000部のパンフレットをドイツ国内の役所、有名な建築家、そして土木施工業者に配布した。このパンフレットには、コンクリートの梁が曲げを受ける場合に、コンクリートの必要断面と必要鉄筋量を求める簡易計算法が示されている。ケーネンの功績は、鉄筋コンクリートの力学的特性を確認し、不完全ではあるが鉄筋コンクリート設計手法の確立に向け第一歩を記したことである。ドイツにおけるモニエ式の最大スパンを有する橋は、1904年にエミール・メルシュ(Emil Mörsch, 1872～1950年)によって設計されたミュンヘン市のイザール川に架かるスパン70mのグリーンバルト(Grünwald)橋である(写真-2.6)。ドイツにおいて鉄筋コンクリ

ート構造物の設計法の基礎を確立するのは、このエミール・メルシュの功績によるところが大きい。

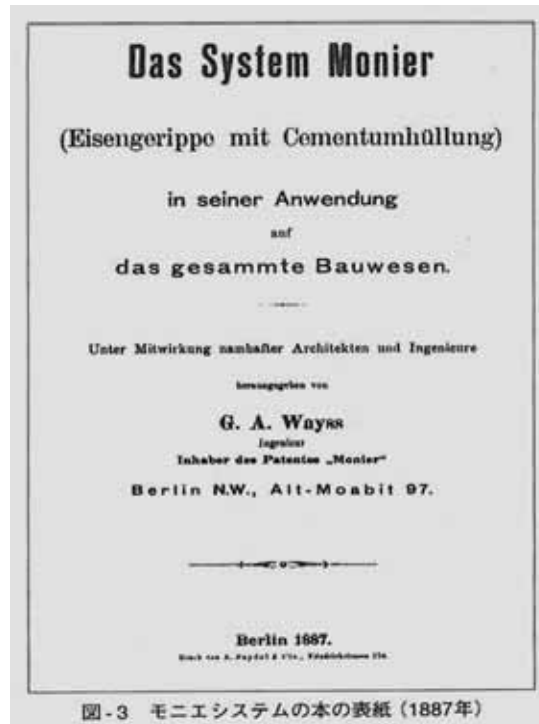


図-3 モニエシステムの本の表紙 (1887年)

図-2.4 モニエシステムのパンフレットの表紙 (1887年) ^{注16)}



写真-2.6 Grünwald 橋 (1904年)

(4) フランスにおける鉄筋コンクリートの発展 (その2)

フランソワ・エヌビック (François Hennebique : 1842~1921)

1842年、農夫の息子としてヌーヴィル＝サン＝ヴァー(Neuville-St-Vaast)に生まれたエヌビックは、子供の頃から自然科学に興味を持ち、稼いだお金のほとんどを研究のために投資した。家族が寝静まると、秘密の部屋に専門書を持ち込んで読みふけるほどの熱心さであった。18才の時に自分の進むべき道は自然科学の道だと悟り、父親を納得させて、教会を建設する石工職人となった。やがて彼の名声が高まるにつれて鉄道や橋梁、一般建築へと仕事を拡張していった。1880年当時の建築は、主構造は鋳鉄製の柱と梁で、床は鋳鉄の梁の間にコンクリート版を挟む構造であった。ところが、ベルギーのマドウ氏邸(Madou)を設計していた当時、同じ構造の建物が火事に遭って倒壊した現場を見た施主が、耐火性のある建物となることを設計条件に加えた。これがエヌビックの考える鉄筋コンクリートのきっかけになったといわれている^{注18)}。

エヌビックは耐火性能を上げるためには鋳鉄をコンクリートスラブの中に埋設することを思い付いたが、その後の実験によって、コンクリートに圧縮力を負担させ、鉄筋に引張力を負担させることによって、建物の耐火性能、構造性能と経済性が向上することを確認した。1887年に取得した床の構造に関する特許を見ると、原始的ながらスラブに作用する曲げとせん断力に対して、鉄筋が配置されている(図-2.5)。エヌビック式の特徴は、厚さ2~4mm、幅30~60mmの鉄板を折り曲げて、その間に丸鋼を通す方法であり^{注19)}、この鉄板はスターラップの役割を担っている。しかし、エヌビックの発明の最も評価される点は、コンクリート床版と梁を合成したT型梁を考案したことである。この構造を建築の床や橋梁の桁に適用することによって、平板を使った場合に比べてよりスパンを長くできるようになった。

鉄筋コンクリート建造物が、1890年代にヨーロッパにおいて急速に普及した原因は、エヌビックの企業家としての才能によるところが大きい。エヌビックは自分のシステムを普

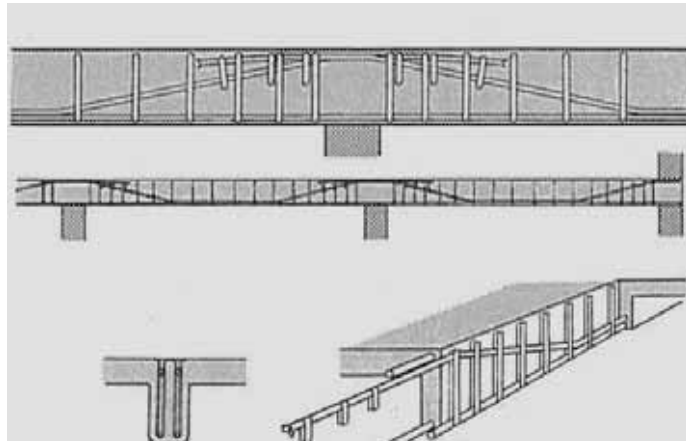


図-2.5 エヌビック式T型梁の配筋法 (1887年) 注20)

及させるに当たり、ライセンス契約を結ぶ前に、エヌビックシステムの設計法、施工管理について教育をしながら、フランスを中心としてイギリス、スイス、イタリアに支店を拡張した。また、鉄筋コンクリート構造物を広報するために、1897年には機関誌「Le Béton Armé」も刊行している。1898年には827件の請負契約を結んだが、1917年には35,000件に増加していることからその普及ぶりが理解される。特に、橋梁については1920年までに3,600橋を完成させた。しかし、次節で詳述するが、エヌビック式設計法に内在するエラーとコンクリート強度発現の不確実性、そして施工管理の甘さが引き金となってエヌビック式の建築物が崩壊する事故が発生することになる。

エヌビック式橋梁の代表作は、パリ万博が開催された1900年に完成したシャテルロー(Châtellrault)橋(写真-2.7)で、スパンは40~50mのコンクリートアーチ橋である。1スパンのアーチは4本のアーチリブで構成され、断面形状はエヌビック独特のT型梁である。

本橋について、1901年3月、スイスの橋梁技術者であるロベール・マイヤール(Robert Maillart, 1872~1940)がチューリッヒエンジニア・建築家協会において「エヌビックシステムとその応用」と題して講演し、その構造を次のように賞賛した。「アーチリブ上には細い柱が建ち床版を支持する構造になっている。橋は一見すると華奢で危険に見えるが、荷



写真-2.7 Châtelrault 橋(1900 年)^{注21)} Jacques Mossot 撮影

重載荷試験によって当初設計荷重強度の2倍の強度を有することが判明した。さらにコンクリート橋の施工コストは、同じ形状で施工した鉄橋や石橋の施工コストに比較して、著しく経済的であることが証明された。」^{注22)}

1911 年、鉄筋コンクリート橋として初めてスパン 100m に達したリゾルジメント橋 (Risorgimento) がローマのテベレ(Tevere)川に架かった(写真-2.8)。この橋は、6室の箱桁アーチであったが、下フランジの床版厚がアーチの付け根で50cm、クラウンで20cm という薄さであり、当時のエンジニアに衝撃を与えた。アーチの付け根でコンクリートが圧壊し、鉄筋も降伏すると考えられていたからである。完成後、総重量 110 トンの蒸気ローラーで載荷試験を行ったところ、健全な挙動が認められた。これは上床版、ウェブ、下床版が一体となって荷重に抵抗する箱桁構造であった。



写真-2.8 Risorgimento 橋 (1911 年)^{注23)}

(5) オーストリアにおける鉄筋コンクリートの発展

ジョセフ・メラン (Joseph Moelin : 1853~1941)^{註24)}

メランは1853年ウィーンに生まれた。1869~1874年の6年間ウィーン工科大学で学んだ後、1874~1880年まで、同大学の橋梁建設工学科ヴィンクラー(Winkler)教授と鉄道建設工学科ルツィーハ (von Rziha) 教授の下で助手を務めながら、鋼橋の解析法、設計理論について研究を行った。1881年から1886年までは、「橋梁、鉄道建設工学の理論」に関する大学教授資格論文を仕上げながら、橋梁設計の実務をこなした。1886年からブルノ工科大学に勤め、1890年から図解式静力学の教授として1902年まで勤める。オーストリアでは1886年にシェスター(R. Schester)がモニエ式特許ライセンスを取得した。これまで、橋梁の建設材料として石と鋼が主材料であったが、その地位を脅かす新材料に接したメランは、エンジニアとして何らかの対策を講じなければならないと考えた。しかし、モニエ式は既に特許で抑えられており、新しい鉄筋コンクリート工法を開発する必要があった。そこで1894年、オーダーベルグにおいてスパン12mのコンクリート橋の施工実験を実施した。自分の専門である鋼橋の利点を活かし、鉄筋コンクリート橋を経済的に架設する手法を考え、L型鋼でトラスアーチを組み立て、次に鋼製アーチを横1mから1.5mの間隔で配置する。その後、鋼製アーチ部材から型枠を吊り下げ、それが完成すると鋼製アーチを抱き込むようにコンクリートを打設する。これによって、従来、コンクリート打設のために必要な支保工を省くことができる。コンクリート型枠のみで済むために、架設は著しく楽になる。(図-2.6)にメラン式工法の一般構造図を示す。

メラン式で代表的な橋梁は、1898年にシュテイル (Steyr) に完成した3ヒンジアーチのシュビムシュール (Schwimmschul)橋(写真-2.9)であり、スパン42.2m、ライズ・スパン比=1/16を有する。これは当時、鉄筋コンクリート橋としては最もフラットなアーチ橋であった。アーチリブの厚さは、スプリング(アーチ付け根)で70cm、4分の1の位置で80cmになり、クラウン(中央)で60cmに絞られている。鋼製トラス部材には120mm×

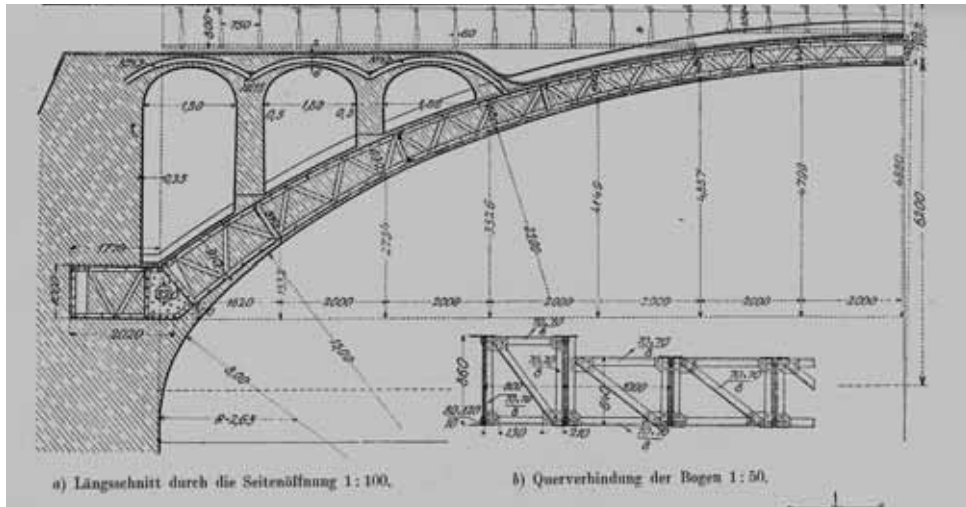


図-2.6 メラン式橋梁の配筋法 注25)

120mm×15mm (厚さ)の L 型鋼が使われ、6本のトラスアーチが配置された。メランにとっては初めての大規模プロジェクトであり、施工中にクラウンが5 cm 沈下し、完成後5週間目に発生した洪水で橋台が後方に傾斜してさらに5 cm 沈下し、最終的には変形量が16cm になった。そこで橋台背面にコンクリートを打設して修復した。完成後に460kgf/cm²の荷重載荷実験を実施したところクラウンの変位は22mm であったことが報告されている。

メラン式橋梁は、ウィーン工科大学を卒業し、1893年にニューヨークで鉄筋コンクリート構造物の設計事務所を開設していたエンペルガー (Fritz von Emperger : 1862~1942) が1894年に開催された米国土木学会 (ASCE) で紹介することによって米国での認知度が高ま



写真-2.9 Schwimmschul 橋 (1898年) 注26)

り、1909～1921年の間に5橋の橋梁が施工されることになる。さらに、アイダホ大学土木工学科の教授であったシュタイマン(D. B. Steiman)により、1913年にメラン著「アーチと吊り橋の理論」²¹⁾が、また、1915年には「鉄筋コンクリート桁とアーチ」²²⁾が翻訳された。阿部美樹志は、1912(明治45)年2月から1914(大正3)年までアメリカのイリノイ大学タルボット教授のもとで研究していたが、滞在期間中にメラン式橋梁に関する情報を入手し、その特長に感動したに違いない。1914年7月に阿部をドイツに向かわせたのは、メラン式橋梁に関する情報収集がひとつの目的であったことは想像に難くない。

2.4 エネビク式設計法とモニエ式設計法の比較

(1) エネビク式設計法

エネビク式設計法に関する1次資料が手元にないため、詳細な研究は今後の課題とするが、チューリッヒ工科大学で図解式静力学を教えていたリッター(W. Ritter:1847～1906)が、1899年1月スイス建設新聞に発表した「エネビク式設計法」の論文によって、以下に示すエネビク式設計法の特徴が挙げられる¹³⁾。

- 1) コンクリートの引張り応力を無視する。
- 2) 分布荷重 w が作用する単純支持された長さ l の梁の最大曲げモーメントは $w l^2/8$ であるが、梁を連続して架設するときは $w l^2/10$ と仮定した。
- 3) コンクリートの応力分布を一定とし、コンクリートの許容圧縮応力度を25～30 kg/cm^2 、鉄筋の許容引張り応力度を1000 kgf/cm^2 (100N/mm²)と設定した。
- 4) 梁に作用する曲げモーメントの2分の1 ($1/2M_{\text{max}}$)がコンクリートに作用する全圧縮力と中立軸から作用位置までの積に等しいとした。
- 5) せん断力による影響を全く無視した。
- 6) 鉄筋のかぶりが小さい。例えば直径 $\Phi 14\text{mm}$ の鉄筋のかぶりを2cm(純かぶり13mm)としている。

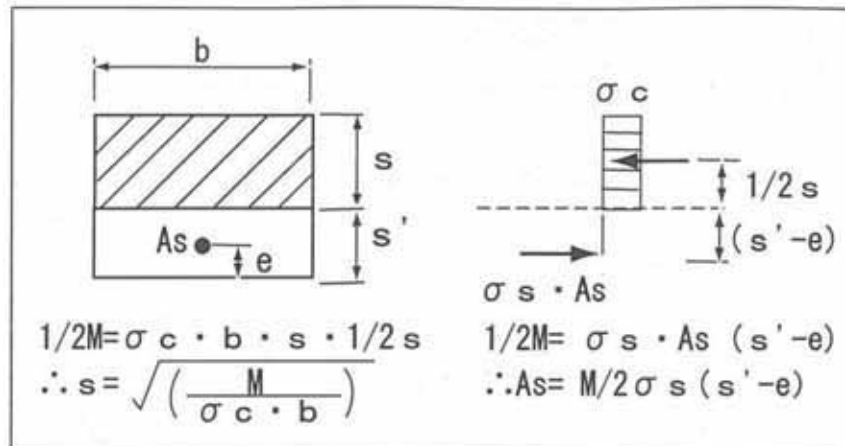


図-2.7 エネビク式設計法

エネビク式設計法は、少なくとも1901年にバーゼルの建物が崩壊する事故が起こるまでは上記の仮定に基づいて計算が行われていたと考えられる。この仮定に基づいたエネビク式設計法を(図-2.7)に示す。

(2) モニエ式設計法⁴⁾

ケーネンが1886年10月に出版したモニエ式システムのパンフレットによれば、モニエ式設計法の特徴は以下のとおりである。

- 1) コンクリートの引張り応力を無視する。
- 2) コンクリートの応力分布を三角形と仮定し、コンクリートの許容応力度を20 kg/cm²鉄筋の許容応力度を750 kgf/cm²と仮定した。
- 3) 中立軸の位置を部材高 (h) の2分の1 とすることにより計算を簡略化した。
- 4) 鉄筋のかぶりを部材高の12分の1 (1/12h) とした。このかぶりはスラブ厚が薄い場合(例えば15cm とすると、かぶりは1.25cm となり少なすぎることになる。

この仮定に基づいたモニエ式システムの計算法を(図-2.8)に示す。

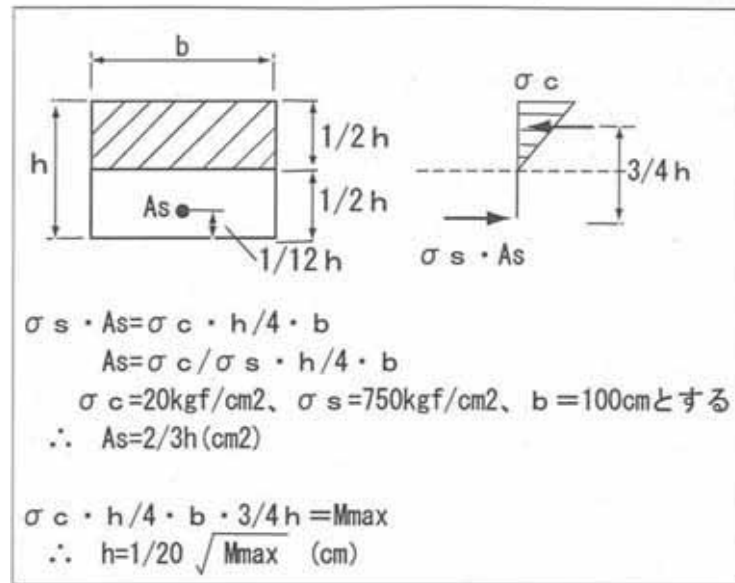


図-2.8 モニエ式設計法

実際に幅20cm, スパン $l = 1.2\text{m}$ の単純支持の梁に荷重強度 1500 kgf/m^2 (15 kN/m^2) が作用した場合の梁部材の厚さと必要鉄筋量を比較したものを(表-2.2)に示す. エネビック式設計法は, モニエ式設計法や現代の許容応力度法と比較すると, 必要桁高は小さくなる傾向にある.

2.5 欧州の鉄筋コンクリート指針について

(1) ドイツ, オーストリア, スイスの指針案とフランスの規準

ここで指針案と規準の違いについて明確にしておく指針案とは, 鉄筋コンクリートに関する暫定的な規定であり, 規準は国家規定としてオーソライズされたものとして扱う.

・ドイツの規準

ドイツは, 1904年2月, ドイツコンクリート委員会(Deutschen Beton Verein)が「突き固めコンクリート(Stampfbeton)に関する施工と試験に関する指導要綱」を制定し, 1辺が20cm又は30cmの立方体試体を使った設計基準強度 $\sigma_{ck28} = 150 \text{ kgf/cm}^2$ (15 N/mm^2) (28日強度)

表-2.2 エネビック式, モニエ式設計法の比較

	エネビック式	モニエ式	現在の方法
必要鉄筋量	Φ 14-1本	Φ 14-1本	Φ 13-1本
梁高(cm)	10.0 (d=8)	11.5 (d=10.5)	11.7 (d=9.5)
σ_c (kgf/cm ²)	28 (2.8)	20 (2.0)	34 (3.4)
σ_s (kgf/cm ²)	1020 (102)	734 (73.4)	889 (88.9)
許容圧縮応力度 σ_c (kgf/cm ²)	25~30 (2.5~3.0)	20 (2.0)	40 (4.0)
許容引張応力度 σ_s (kgf/cm ²)	1000 (100)	750 (75)	1400 (140)

注) 応力度に関する()の値は (N/mm²)

以上かつ $\sigma_{ck45} = 180 \text{ kgf/cm}^2$ (45日強度) 以上と設定した。ドイツでは1904~1916年にかけて鉄筋コ

ンクリートに関する委員会が発足し、極めて組織的に、積極的に鉄筋コンクリートに関する設計手法が検討されていった。1904年におけるドイツのコンクリート許容応力度を(表-2.3)に示す。

・フランスの規準

フランスでは、1900年のパリ万博直後の12月19日に建設省から出された政令に従って鉄筋コンクリート小委員会が創設された。この小委員会の役割は以下の2点であった。

- ① 鉄筋コンクリート一般に関する材料力学的疑問点の解明
- ② 建設工法に関するルールを明確化するための必要事項の取りまとめ

表-2.3 ドイツにおけるコンクリート許容応力度 ^{注27)}

応力の種類	部材の種類	許容応力度(kgf/cm ²)
中心応力	一般建築物	35 (3.5)
	複数階建築最上階の柱	25 (2.5)
	同 上 次階の柱	30 (3.0)
	同 上 各階の柱	35 (3.5)
	橋梁の梁	30 (3.0)
曲げ及び 偏心力	静荷重を有する建築物	40 (4.0)
	ラーメン構造及びアーチ構造	40 (4.0)
	床版及び衝撃を受ける部材など	35 (3.5)
	市街に架かる橋梁	40(4.0)
	同上の衝撃を受ける部材	35 (3.5)
	鉄道橋	30 (3.0)
	せん断力	
付着力		4.5 (0.45)

注) 応力度に関する()の値は (N/mm²)

すなわち、本委員会の設置は、鉄筋コンクリートを建設用材料として公に承認し、その建設工法に関する一般的な規格を設けることを目的としていた。

1901年2月にその活動が本格的に開始された時、委員長ロリュール(Lorieur)は、1891年

制定された鋼構造基準を参照にし、鋼橋架設の際に実施されていた試験を鉄筋コンクリート構造についても実施することを決定した。1905年までのフランス鉄筋コンクリート委員会の活動は、主として2種類の実験的プログラムに集約される。一つは、鉄筋コンクリートと無筋コンクリート、及びモルタルの材料特性（圧縮強度、引張強度、せん断強度、曲げ強度など）に関するものである。二つめは、材料の性質や品質（配合、配筋、型枠、鉄筋との付着、防水性など）に関するものであった。実験データの解析及び得られた結果に関する議論が1905年に行われた。委員会が自身で行った実験データや諸外国（たとえば、シュトゥットガルトでバッハ(Bach)が行った実験など）の研究データなどを参考にして、1906年10月20日日本省通達の形で、フランスにおける鉄筋コンクリート規準が制定された。フランスの規定は、28日強度に対する割合を示したもので極めて簡単である（表-2.4）。

フランスは鉄筋コンクリートの構造物への応用では先駆的であったにもかかわらず、鉄筋コンクリートの規準の制定がスイスやドイツに遅れた原因は2つ考えられる。第一に、エヌビックが1887年に取得したT型梁の特許期限が1907年まで有効であったこと。エヌビックは自らの特許防衛については、法定に訴えることによって厳しく臨んでいることから、

表-2.4 フランスにおけるコンクリート許容応力度^{注28)}

応力の種類	部材の種類	許容応力度
圧縮力	縦鉄筋を有する場合	$0.28f_c'$
同上	繫筋または螺旋筋を有する場合	$0.60f_c'$
せん断力		$0.02f_c'$
付着力		$0.028f_c'$

委員会がエヌビックに対して鉄筋コンクリートに関する情報提供を求めてもなかなか応じなかった。第二に、エヌビックの性格的なことに起因する理由であるが、民間技術者が新材料を開発して構造物を施工する場合に、地方政府やエコール・ポン・ゼ・ショセの権威者は、常にエヌビックにとって壁となっていた。そのため、エヌビック自身が彼らとの交流を避けていたためであると考えられる。

・イギリスの規準

イギリスでは1887年にエヌビック式の代理店契約を結んだL. G. ムーシェ (Louis Gustave Muchel, 1852～1908年) もエヌビックの影響を強く受けており、地方政府の発注する構造物ではなく、王立関係の会社や海軍、民間鉄道会社の発注する構造物を対象に鉄筋コンクリートを適用した。このためイギリスでの鉄筋コンクリートの規準の制定は1907年となり、スイス、ドイツ、フランスに僅かに遅れることになった。1899年、アルサス(Alsace)に完成したアーチスパン50mのアーチ橋は、エヌビック式橋梁のプロトタイプとして意義がある。この成功がフランスのシャテルロー橋 (1900年) の実現に大きく貢献したといえる。

・オーストリアの規準

オーストリアの鉄筋コンクリート規準は、道路橋を対象として1911年に制定され、1918年11月15日に改訂されている。この規準の制定には、メラン、エンペルガーが深く関与したものと推定される。山根によれば「1909 (明治42) 年に大阪市で制定された「鉄筋混凝土計算規定」が、オーストリアの1907年の規定に影響を受けた」^{注29)} とされるが、1907年には道路橋に関する国家規準は制定されてなく、指針案であったのではないかと推察する。1906年にオーストリアの鉄道管理局が制定した特別規準を (表-2.5) に示す。1906年には、鉄道構造物に関する鉄筋コンクリートの規準が、ドイツ、オーストリアで制定され、スイスでは指針案が制定されたことにより、鉄道への鉄筋コンクリートの応用を加速することになる。

表-2.5 オーストリア鉄道管理局のコンクリートおよび鉄筋の許容応力度^{注30)}

応力の種類	支間長 L	許容応力度 (kgf/cm ²)
コンクリートの圧縮応力	$L \leq 2m$	35(3.5)
	$2m \leq L \leq 5m$	30(3.0)
	$5m \leq L$	25(2.5)
コンクリートのせん断力	共通	45(4.5)
鉄筋の応力	Lに依存	750+4XL (75+0.4XL)
鉄筋のせん断応力	共通	60(6.0)

注) 応力度に関する()の値は (N/mm²)

・スイスの規準

欧州において初めて鉄筋コンクリート指針案を制定したのはスイスエンジニア・建築家協会(Schweizerischer Ingenieur-und Architekten-Verrein)であり1903年3月25日であった^{注31)}。スイス初の鉄筋コンクリート指針案の許容応力度を(表-2.6)に示す。

4つの規定を比較すると、第一に、ドイツの指針案が最も詳細に荷重の作用状態を考慮して許容応力度を既定していることが分かる。これは前節で述べたように、ドイツにおいては各工科大学の材料試験所において、鉄筋コンクリートに関する実験が徹底して行われ、その蓄積があったことが伺える。フランスの規準の制定に当たって、ドイツの試験データが使われたことから、ドイツの鉄筋コンクリートに関する官学民による組織的な取り組みを推察することができる。第二に、ドイツ、スイス、オーストリアの規定値及び表記が互いに近いことがわかる。これはドイツ語圏における鉄筋コンクリートの研究者達が、鉄筋コンクリートに関する専門紙、例えば1902年にエンペルガーが編集長として発刊した鉄筋コンクリートに関する機関誌「Beton & Eisen」等を通じて、互いの研究成果や設計手法に関する考えを公表し、相互の技術レベルの向上を図っていたことが大きな原因であると考

表-2.6 スイスにおけるコンクリート許容応力度^{注32)}

	条 件	許容応力度(kgf/cm ²)
圧 縮 力		$\sigma d = 36 (3.6)$
	座屈の恐れがあり、部材の自由長 l が、断面 2 次半径 i の 10 倍以上の場合は左式で求める	$\sigma k = 36/(1+0.0001(l/i))$ $(=3.6/(1+0.0001(l/i)))$
引 張 力	鉄筋が破断しない場合	$\sigma z = 1 (0.1)$
	鉄筋が存在する場合	$\sigma e = 1400 - 5 \sigma z$ $(=140 - 5 \sigma z)$
せん断力	鉄筋が破断しない場合	$\tau b = 4 (0.4)$
	せん断面に鉄筋が存在する場合	$\tau b = 800X \tau b / (\tau b - 4)$ $(=80X \tau b / (\tau b - 0.4))$
付 着 力		$\sigma be = 10 (1.0)$

注) 応力度に関する()の値は (N/mm²)

える。第三に、これらの項目で重要な点は、せん断力に関する規定が定められた点である。せん断力に関する実験は、圧縮力や曲げに対する実験に比較して、指針制定時点ではまだ十分なデータは揃っていなかった。1904年のドイツのメルシュによる一連の実験によって、せん断補強筋の配筋方法などが明らかにされる。

(2) スイスにおける指針案制定の背景

スイスにおいて初めて鉄筋コンクリート指針案が制定された背景について考察する。スイスにおける鉄筋コンクリートの普及は、1893年にエヌビック式特許がスイスを対象国として取得されたことに始まる。翌年以降数年間のエヌビックシステムを用いた建造物の

総施工数の推移を（図-2.9）に示す。これによると、1894～1897年の4年間で、エヌビック式の総施工数は毎年2倍ずつ増加していることがわかる。同様の傾向はスイス国内でも見ることができ、1894年に7件だった施工件数は、5年間で12倍となる85件にも上っている。このように急激に施工件数が増加していく中で、エヌビック式の水槽の床が崩落するとい

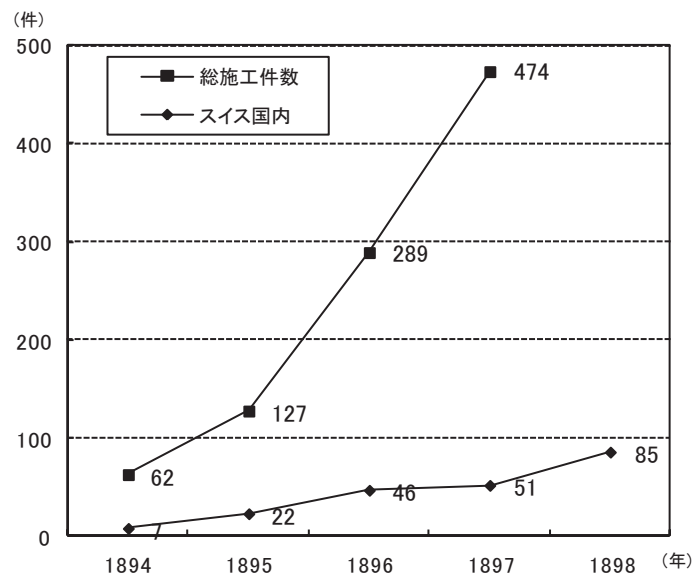


図-2.9 エヌビック方式による施工件数の推移^{注33)}

う事故が1894年1月、チューリッヒで起こった。ちょうど、スイス各州の展示会を開催している矢先のことで、スパン3m、床版厚12cmの床が崩壊した^{注34)}。続く大規模な事故は、1901年、バーゼルにおいてエネビック社の鉄筋コンクリート方式を使った6階建ての建物が崩壊した。

エヌビック式建物の崩壊の原因は、4節で述べたようにせん断破壊が第一の原因ではなかったかと推察する。せん断補強筋を配置しないエヌビック式设计法の欠陥により、梁のスパンが大きくなるにつれて、せん断力も増加し、せん断破壊の危険性が増加することになる。1903年のスイス指針案では、設計荷重、設計計算法、許容応力度、施工者の資格、及び完成した構造物に関する荷重裁荷試験の実施を規定した。特に、施工者に関する規定については、鉄筋コンクリートの基本的な理論および応用を理解し、施工経験を有するものが

行わなければならないという規定が設けられた。エヌビック式構造物の急激な増加に伴ない、鉄筋コンクリートの十分な知識を持たない者が施工に携わるという可能性も事故の原因の一つと推察される。指針案制定の目的は、第一に、工学的な根拠に基づいた設計の推進であり、第二に施工資格を持ったエンジニアによる施工管理の実施、第三に荷重裁荷試験によって構造物が完成した後の安全性の検証を義務付けたことであったと考える。

この事件がきっかけとなり、リッター(Ritter)を始めとする事故調査委員会が発足した。この事故の内容は、スイス・エンジニア建築家協会を通じて全スイスに報告され、1902年9月、同協会の中央委員会は、各州の委員会に対して通達を出した。それによれば、次の2つの事項に関して提言を公募した。^{注35)}

- 1) シューレ (Schleule) , リッター (Ritter) , ガイザー (Geiser) によって構成される「鉄筋コンクリート構造物の施工における試験部門」委員会が施工試験に関する提案について。
- 2) 鉄筋コンクリート構造物に関して該当する成果、又は現在問題となっている事例に関する提案について。

この要請に応えるためチューリッヒエンジニア・建築家協会は、1902年10月、エンジニアであるマイヤール (R. Maillart) , ヴェンナー (V. Wenner) , レーレ (K. Loelle) , マイヤー (G. Meyer) 建築家のプフレーグハルト (O. Pflughalt) からなる特別委員会を設置し、1903年1月に開催された会議において、「鉄筋コンクリートに関する暫定指針(案)」を「特別規定」と併せて提出した。これによれば、コンクリートの許容圧縮強度は $\sigma_d = 36 \text{ kgf/cm}^2$ (3.6N/mm^2) であり、この値と1991(平成3)年の日本におけるコンクリート標準示方書^{注38)}に示す「部材が必要な安全度を持つ最下限のコンクリート設計基準強度である $\sigma_{ca} = 70 \text{ kgf/cm}^2$ (7.0N/mm^2) と比較すると、かなり保守的な値であったといえる。

これほどまでに低く制限されていた第一の原因として、コンクリート強度を決定する要因が十分解明されなかったため、許容圧縮強度を低く、保守的に設定しなければならなかった

ことがひとつの原因と考えられる。第二の原因として、鉄筋コンクリートの構造物の普及と施工件数の急激な増加に伴い、多くの技術者が設計や施工に関係しなければならない状況の中で、順守すべき最低の規定値を設定しなければならなかったことも考えられる。この許容応力度の根拠については、この指針案の解説書である「特別規定」には根拠が不明であると記されている。しかしこの数値についてリッターが1899年に発表した「エヌビック方式について」と題する論文では、リッター自身の考えでは $35\sim 40\text{ kgf/cm}^2$ ($3.5\sim 4.0\text{N/mm}^2$)が適当と考えるという意見を述べている^{注37)}ことから、これがその根拠であったと推測する。この低く抑えられた値に対して、ロベール・マイヤールは1932年の論文において、これでは経済的な鉄筋コンクリート構造物を普及させることはできないと反論した。1930年当時、マイヤールは鉄筋コンクリートの最先端を走る技術者であり、鉄筋コンクリート橋に関して数々の斬新な構造形式を開発し、実橋での荷重載荷実験を通じて鉄筋コンクリートの特性を把握し、さらに設計基準強度として $300\sim 400\text{ kgf/cm}^2$ ($30\sim 40\text{N/mm}^2$)の強度を発現するコンクリートを現場で制作していたため、そのような発言が可能であったのだと考える。これはエヌビックの気質に通じるところがあり、このような心意気を持った技術者であったからこそ、歴史に残る数々の鉄筋コンクリートアーチ橋を残せたといえる。

2.6 日本における鉄筋コンクリートの導入

欧米諸国における鉄筋コンクリートの日本への紹介は、広井勇が1903（明治36）年、工学会誌において「鐵筋混凝土橋梁」⁹⁾を発表し、「欧米では普通の材料として各種工事に使われていること、鐵材に乏しい日本においては工費の節約、構造物の耐久性確保の点において鉄筋コンクリートに勝るものはない」とし、新材料の有用性を指摘した。また、モニエ（Monier）式、メラン式（Melan）式、エヌビック（Hennebique）式及びヒヤット（Hyatt）式を始めとする欧米諸国における各種鉄筋コンクリート工法と設計手法を解説し、我が国への鉄筋コンクリート技術の導入を推奨した。鉄筋コンクリート構造物が普及するために

は、コンクリート及び鉄筋コンクリートの力学的性質を明らかにし、設計手法を確立して構造物の耐久性、安全性を確保しなければならない。しかしながら、1918年にアブラム (D. A. Abram) が水セメント比説を発表する以前は、コンクリートの配合はセメント：砂：砂利の容積比として1：2：4のように規定され、使用水量は使用者が任意に決定できることが、コンクリート強度のばらつく原因のひとつとなっていた。広井は論文中の強度の計算において、日本のセメントを用いて1：2：4の配合とした場合、圧縮応力度が 20kgf/cm^2 (2.0N/mm^2) を越えてはならないことを述べた。これは当時、工事に用いられたコンクリートの3ヵ月強度が $120\sim 300\text{ kgf/cm}^2$ の範囲にある中で、低強度の平均値を 120 kgf/cm^2 (12N/mm^2) と設定し、その6分の1を許容圧縮応力度と定めたことによる。この値と1991（平成3）年のコンクリート標準示方書に示す「部材が必要な安全度をもつ」最下限のコンクリート設計基準強度 ($f'_{ck}=180\text{ kgf/cm}^2$) (18N/mm^2) の許容曲げ圧縮応力度である $\sigma_{ca}=70\text{ kgf/cm}^2$ (7.0N/mm^2) と比較すると、かなり保守的な値であったといえる。

その後、書籍における設計基準の紹介は、アメリカ・イリノイ大学に留学し Ph. D の学位を取得した阿部美樹志が1916（大正5）年に「鐵筋混凝土工学」^{25), 26)}を上梓し、英語圏における許容圧縮応力度としてセメント、砂、砂利を容積比1：2：4で配合した場合、使用水量が材料重量の10%以上のケースでは500封度/吋² (35kgf/cm^2)^{注38)}、10%以下のケースでは600封度/吋² (42 kgf/cm^2)^{注39)}であることを紹介した^{注39)}。阿部は、我が国の鉄筋コンクリート製鉄道高架橋の黎明期における設計者として知られている²⁷⁾。宮本武之輔は、1923（大正12）～1925（大正14）年に欧米各国を巡遊した後、1926（昭和1）年に「混凝土及鐵筋混凝土」^{28), 29)}を上梓し、「米国、フランス（1906年）においてはコンクリートの基準強度 f'_{ck} を示さずそれぞれ許容圧縮応力度が $0.20f'_{ck}$, $0.28f'_{ck}$ であること、ドイツ（1916年）においては $f'_{ck}>150\text{ kgf/cm}^2$ の条件下で許容圧縮応力度が 35kgf/cm^2 」^{注40)}と紹介した。さらに内務技師であった内村三郎は、阿部美樹志と同様にタルボット教授のもとで鉄筋コンクリートの研究を行い、その後ストーン・ウェブスター社において設計・施工の実務を積

んだ後、昭和3（1928）年に「鉄筋混凝土」³⁰⁾を上梓し、19世紀後半の鉄筋コンクリート発達史として、極めて史実に忠実な解説を行っている。

2.7 おわりに

本研究では、欧州における鉄筋コンクリート橋の歴史の変遷をフランス、スイス、ドイツ、オーストリアを中心に整理した。その要約を以下に示す。

1) 3章では、鉄筋コンクリートの構造物への応用はフランスで始まり、モニエとエヌビックが鉄筋配筋法に関する特許取得によって、欧州における技術を独占したことを述べた。ドイツでは、ワイスがモニエ式特許のライセンスを取得し、プロシヤの内務技師であるケーネンの協力を得て、官学民による研究体制を構築し、鉄筋コンクリートの技術が理論的に体系化されたことを述べた。オーストリアでは、従来の鉄筋コンクリート橋の架設に使われていた支保工を省略するため、鋼製アーチ部材を補強材として利用するメラン方式工法が開発されたことを述べた。この工法は、エンペルガーによってアメリカに紹介され、阿部美樹志がアメリカ滞在中にメラン工法の英訳本に接した可能性を指摘した。

2) 第4章では、エヌビック式、モニエ式設計法の概要を記述し、現代の設計法との比較によって、同じ荷重状態ではエヌビック式が最も部材が薄くなることを示した。また、エヌビック式設計法の欠陥であるせん断力の無視がバーゼルでの鉄筋コンクリート製建築の崩壊事故の原因であることを推察した。

3) 5章では、ドイツ、スイス、オーストリアの鉄筋コンクリート指針案は、表記方法と規定値が互いに近いことを述べ、3国間では鉄筋コンクリートの機関誌を通じて、研究者相互の情報交換がなされていたことを指摘した。また、せん断に関する規定が設けられたことが、設計上重要であることを指摘した。フランスの規準制定が遅れた理由として、エヌビックの特許有効期限が影響したこと、さらにエヌビック自身が、地方政府や鉄筋コンクリートの権威者達との間で、積極的な情報交換を嫌ったことが理由であると指摘した。スイス

の指針案が欧州で初めて制定された理由として、第一に、鉄筋コンクリート構造物の普及と施工件数の急激な増加に伴い、多くの技術者が設計や施工に携わる状況の中で、遵守すべき最低の規定値を設定しなければならなかったこと、第二に、施工資格を持ったエンジニアによる施工管理を実施することを義務づける必要があったこと、第三に、設計性能と完成後の構造物の性能が想定通りであるかどうかを検証するために、荷重載荷実験によって構造物が完成した後の安全性を確認することが求められていたことを指摘した。

4) 第6章では、欧米に渡った日本人技術者達が、渡航先で接した情報を記述した。廣井勇はドイツにおいてモニエシステムのパンフレットに触れ、阿部美樹志はアメリカにおいてメラン式工法の英訳本に触れたことが、外濠アーチの設計の契機になったと考える。

19世紀後半、新材料であった鉄筋コンクリートを社会に普及させるために必要なことは、第一に、新しい材料を構造物に適用しようとする個人の意志、第二に、その材料特性を明らかにするために官学民による共同研究体制の確立、第三に、それぞれの研究者達が得られた知見を相互に交換し、公開するメディアの存在が大きかったと考える。「0から1」の発想の得意なフランス、「1から10」の体系化、理論化の得意なドイツという図式は、1世紀前の鉄筋コンクリートの分野においても認められる。

参考文献・注釈

注1) 文献1), P1.

注2) 文献2)

注3) 文献3), P6. 本研究の鉄筋コンクリートの原理, 黎明期の歴史, 及びモニエシステムの記述は、この文献に負うところが大きい。

注4) 文献3), P6

注5) 文献5), P59.

注6) 文献5), P60.

注 30) 文献 24) , P 20.

注 31) 文献 18) , P139～P 140.

注 32) 文献 18) , P140.

注 33) 文献 18) , P139.

注 34) 文献 13) , 1899 年 2 月 4 日発行の SBZ, P41.

注 35) 文献 18) , P159.

注 36) 本論で引用する基準強度は従来の MKS 単位で表示されているため, 国際単位系が導入される前に制定されたコンクリート標準示方書から引用した.

注 37) 文献 13) , 1899 年 2 月 11 日発行の SBZ, P50.

注 38) 封度/吋² は, ポンド/インチ² である.

注 39) 文献 26) , P100.

注 40) 文献 29) , P130～P133.

1) Manfred Curbach: Die Geschichte des Stahl- und Spannbetonbaus,

ドレスデン工科大学の一般教養講義資料「鉄筋コンクリート-100 年の建設技術」.

2) Joseph-Louis Lambot, 『Internatinal Database and Gallery of Structures』

<http://www.strucurae.de>.

3) la Barque de Lambot, Galerie photo des maquettes de l'ancien Musée.

4) Kurrer . K: Zur Fruegeschichte des Stahl-betonbaus in Deutschland – 100 Jare Monier-Broschuere, 『Beton und Stahlbetonbau』, Wihlhelm Ernst & Sohen Verlag GmbH, H. 1. 1999.

5) Stiglat K. : Erste Brücken aus Beton, Zur Geschichte des Stahlbetonbaus- Die Anfänge in Deutchland 1850 bis 1910, 『Beton und Stahlbetonbau』, Ernst & Sohn Verlag, Spezial (Sonder Heft) 1999.

- 6) Thaddeus Hyatt, United States Patent No. 206112, July 16, 1878.
- 7) Ricken. H. : 『Der Bauingenieur als Geschichte eines Berufes』, Verlag für Bauwesen, 1994.
- 8) Wittfoht. H: 『Building Bridges』, Beton-Verlag, 1984.
- 9) 広井勇 : 鉄筋混凝土橋梁, 『工学会誌』第 253 号, 1903 年 6 月.
- 10) Kurrer. K: Stahl+Beton=Stahlbeton? Stahl+Beton=Stahlbeton !, 『Beton und Stahlbetonbau 92』 H1, 1997.
- 11) Kurrer. K: Zur Entwicklung der deutschen-sprachigen Fachliteratur auf dem Gebiet des Stahlbetonbaues bis 1920, 『Beton und Stahlbetonbau』, Ernst & Sohn Verlag, Spezial (Sonder Heft) 1999.
- 12) McBeth: François Hennebique (1842~1921) reinforced concrete pioneer, 『Civil Engineering』, May, 1998.
- 13) Ritter. W: Die Bauweise Hennebique, 『Schweizerische Bauzeitung』 Feb, 4th, Feb.11th 1899.
- 14) Maillart. R: Das Hennebique-System und seine Anwendung 『Schweizerische Bauzeitung』 Mar. 25th, 1901.
- 15) François Hennebique: 『International Database and Gallery of Structures』
[http://www. strucrae. de](http://www.strucrae.de).
- 16) Melan. J: 『Der Brücken』 II. Band, Franz Deuticke, 1924.
- 17) Nowak: Joseph Melan, 『Joseph Melan』 zum 70ten Geburtstag, Franz Deuticke, 1923.
- 18) Züricher Ingenieur- und Architekten Verein: Entwurf für eine provisorische Norm, 『Schweizerische Bauzeitung』 Apr. 4th 1903.
- 19) Bertarm, Borenemann et. al. : Die Geschichte des Deutschen Ausschuss für

- Stahlbetonbau, 『Deutscher Ausschuss für Stahlbetonbau』, Heft333, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, 1982.
- 20) Gwenaël Delhumeau: l'invention du béton armé Hennebique 1890-1914:, IFApp. , “le system Hennebique.
 - 21) Steiman : 『Theory of arches and suspension Bridge』 , John Willy & Sons, Inc. 1913.
 - 22) Steiman : 『Plain and reinforced concrete arches』 , John Willy & Sons, Inc. 1915.
 - 23) 山根巖 : 我が国への鉄筋コンクリート橋導入の技術史的研究, 2001 年
 - 24) Forester M. 『Balken bruecken in Eisenbeton』 , Verlag von Wilhelm Engelmann, 1908
 - 25) 阿部美樹志 : 『鐵筋混凝土工学』 初版, 丸善, 1916 年.
 - 26) 阿部美樹志 : 『鐵筋混凝土工学』 第 15 版, 丸善, 1925.
 - 27) 小野田滋 : 阿部美樹志とわが国における黎明期の鉄道高架橋, 『土木史研究』Vol. 21, pp. 113-124, 2001 年 6 月.
 - 28) 宮本武之輔 : 『混凝土及鐵筋混凝土』 初版, 日本工人俱樂部出版部, 1926 (昭和 1) 年.
 - 29) 宮本武之輔 : 『混凝土及鐵筋混凝土』 第 5 版, 日本工人俱樂部出版部, 1928 (昭和 3) 年.
 - 30) 内村三郎 : 『鐵筋混凝土』 , 東京良書普及会, 1928 (昭和 3) 年

第3章 ロベール・マイヤールの構造デザインと設計思想

3.1. はじめに

スイスの橋梁エンジニアであるロベール・マイヤール(Robert Maillart,1872~1940)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、材料工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を整理する。マイヤールの新しい橋梁デザインには、普通コンクリートとは異なる高強度コンクリート(300kg/cm²~400kg/cm²)が使われているが、これまでマイヤールの設計した橋梁について、鉄筋コンクリート強度に関する研究はほとんどない。新しい橋梁デザインを提案するためには、使用する材料と構造について科学的裏付けが不可欠であり、マイヤールは次々と新しい構造を確固とした自信をもって実現した。スイスにおいて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どれほど大きな影響を及ぼしたのか整理する。

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』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¹⁾、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、設計基準強度240kg/cm²を有する高強度コンクリートが対象になり^{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2倍程度に増加した。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、これらの変更に際して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章で述べることと

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』²⁾ (1941年) や, M.ピルの『ロベール・マイヤール』³⁾ (1949年), D. P.ビリングトンの『ロベール・マイヤールの橋』⁴⁾ (1979)年において構造と美学という視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研究の特徴である。

3.2 マイヤールに関するこれまでの研究

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』⁵⁾を研究論文として発表したチューリッヒ工科大学材料研究所の教授であったM.ロッシュ (Mirco Rosch) 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。

(1) 『時間・空間・建築』: G. ギーディオン

G.ギーディオンは, 1941年『時間・空間・建築』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として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には触れていない。

(2) 『ロベール・マイヤール』: M. ピル

M.ビルは1949年、著書『ロベール・マイヤール』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。『時間・空間・建築』と比較すると技術的側面がより詳しく紹介され、マイヤールの橋梁美がどのような技術的配慮によって実現されたかを知る上で重要な本である。次に紹介するD.P.ビルングトンのマイヤール研究において、アーチ橋の斜橋や曲線橋への適用や、分割施工による支保工の低減と経済性の実現等、構造特性の研究に関する契機になった文献であると考えられる。ビルは技術的側面よりも景観的な側面に重点を置いたと述べているが、この著書は次ぎの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次的に再現することができるようになった点である。本書の図面及び写真の出展は多くがロッシュの研究論文と「スイス建設新聞」からの抜粋であり、マイヤールの作品の概要版としての価値は十分であると推察する。しかしながら構造設計者の視点からマイヤールの橋梁を理解するには、当時使用されていた設計指針や設計条件、配合、発生応力度及び載荷試験の結果等、定性的、定量的な情報が不足していると考えられる。

(3) 『ロベール・マイヤールの橋』：D.P. ビリングトン

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者として1979年に『ロベール・マイヤールの橋』を、また1983年に『搭と橋』⁶⁾を執筆したD.P.ビルングトンがいる。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。ビルングトンの功績は、マイ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。そのためマイヤールの研究に先立ち、「欧州における鉄筋コンクリート技術の歴史の変遷」において、マイヤールが活躍する以前の欧州における鉄筋コンクリート技術の概要を研究し、ドイツ、フランス、スイスにおける鉄筋コンクリート指針案の成立過程と内容を分析した。本論分は、マイヤールの設計した橋梁を視覚的に理解するために、はじめに構造フォルムの発展について述べ、次に、スイスのコンクリート設計指針案の内容を踏まえ、それぞれの代表的な橋梁について、デザインと構造特性の面からマイヤールの作品を再評価するものである。

(4) 『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』：M. ロッシュ

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。本研究はこの文獻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。

3.3 時代的な背景

1890（明治23）年にチューリッヒ工科大学（ETH Zürich）に入学したマイヤールは、当時、ベクトルを使って橋梁をはじめとする土木構造物の断面力を算出する図解式静力学（Graphische Static）ではヨーロッパの先端を進んでいたリッター（W. Ritter）教授に教えを受け、1894（明治27）年、土木技術者の資格（Diplom）を取得した。マイヤールがチ

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、フランス人のエヌビック（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1894年に62件、1897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、アーチ部はマッシブ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・リッターが図式静定力学の先駆者である Karl Culmann（1821－1881）の業績を引き継いで図解式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、リッターがエヌビックシステムについて批判した論文「エヌビック式設計法」⁷⁾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。

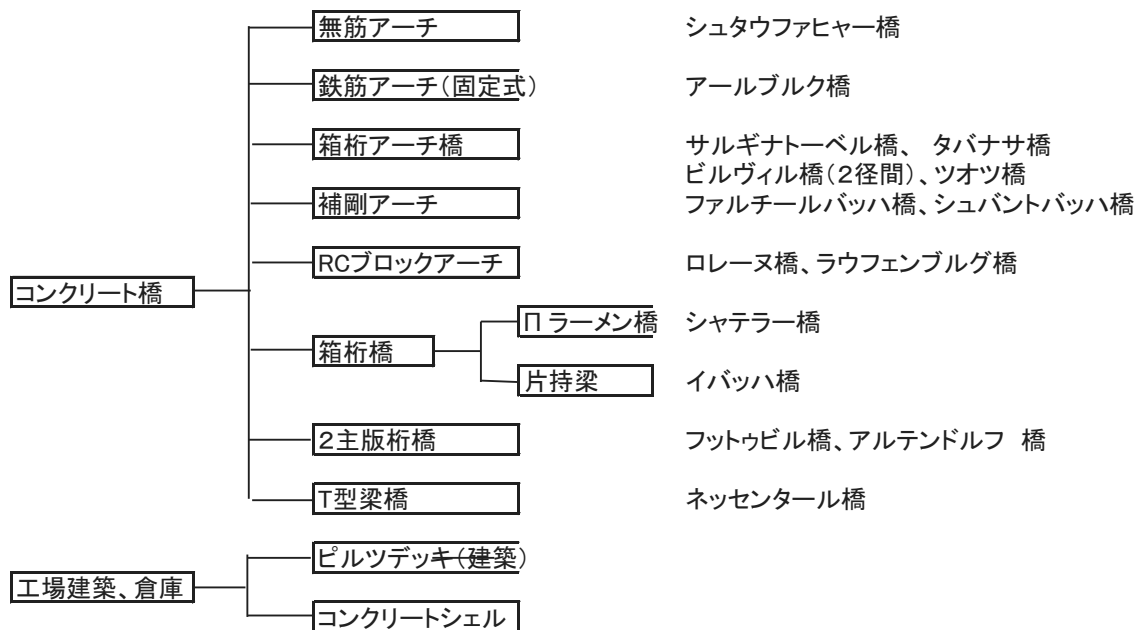
卒業後、ベルンにある設計事務所、ピュンペン&ヘルツォーク社（Pünpen & Herzog）に入社した事務所でビエール・アプレ・モルグ（Biere-Apples-Morges）を結ぶ市営鉄道の路線選定や橋の設計を担当した後、1895（明治28）年10月、ローザンヌ近郊のモルグ（Morges）に派遣され、鉄道の建設現場で現場技術者としての第一歩を踏んだ。1896年3月から同年9月まで、コンクリートアーチ橋の施工監理を担当することになった。ヴァイロン川（Veyron）を渡るアーチスパン6mの小さな橋であったが、これがエヌビック式アーチとの出会いとなった。11月に鉄道が全線に渡って開通した後、ベルンに戻ると、別の仕事に付きたいと考えて、同社の推薦を受け、1897年1月チューリッヒ市の土木課（Tiefbau-amt）に勤務した。土木課では、シュタウフファッハー（Schtauffacher）橋のコンペにおいて、頭角を現し、橋長約40mを有する3ヒンジ式無筋コンクリートアーチを設計する。

3.4 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）、ユジェーヌ・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。』⁸⁾と述べた。これはマイヤールが鉄筋コンクリートを使って多様な形態を創出してきたことを認め、しかも、その造形性は現代のエンジニア・アーキテクトと比較しても太刀打ちできないことを評価したものといえる。

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8種類で、建設した橋梁は47橋に至る（表-3.1）。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。マイヤールの橋梁は、それぞれのコンペで必ずしも最低価格ではなかったが、20世紀初頭におけるスイスの橋梁の設計競技の特徴は、それを選定する委員の人选、及び結果の公表について極めて公平な審査が行われており、そのような設計競技によってマイヤールの設計した橋梁が実現したことを第一に指摘しておかなければならない。例えば、スイスとドイツの国境のライン川を跨ぐラウフェンブルク橋（Laufenburg）（1911年）、ラインフェルデン橋（Rheinfelden）（1912年）について行われた国際設計競技では、マイヤール案はそれぞれ2位であったにも拘わらず、実績を含めた審査側の最終判定によって採用された経緯がある。建設コストは必ずしもマイヤールの案が最低価格ではなかったが、良いデザインであること、建設の実績を評価して最終的に決定するという審査側の配慮は、成熟した社会システムが整っていたことを示すものであると考える。

表-3.1 マイヤールが考案した橋梁・建築構造（著者作成）



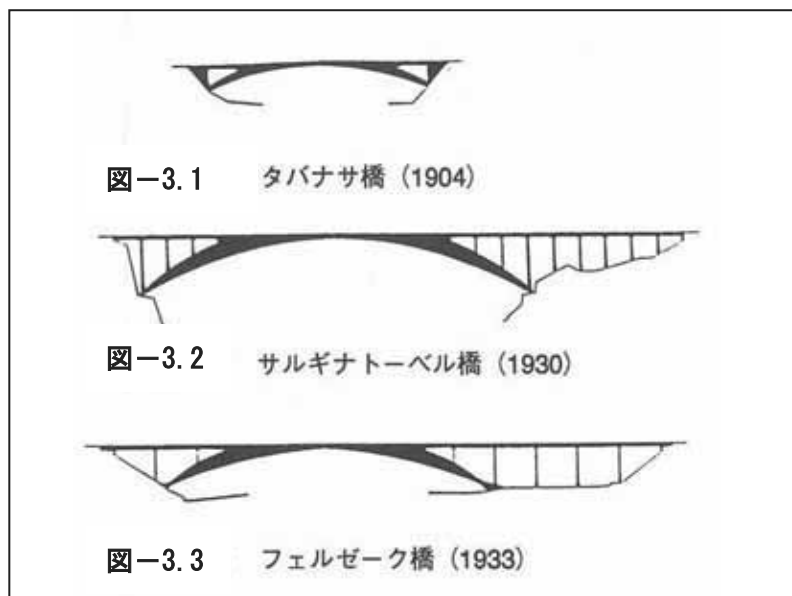
マイヤールの代表的な構造形式は、3ヒンジ式箱桁アーチと補剛アーチ及びコンクリートブロックアーチである。3ヒンジ式箱桁アーチと補剛アーチは、いずれも極端に薄い板の組合せから成っている。マイヤールの構造の発展は、それぞれの3タイプの基本構造を基に、様々なバリエーションが存在する。そのバリエーションを以下に示す。

- 1) 箱桁断面 → 多径間，多室箱桁断面の多径間への応用
- 2) 3ヒンジ式箱桁アーチ → 斜橋，並列による広幅員への応用，
高速道路への適用
- 3) 補剛アーチ → 斜橋，曲線橋，鉄道橋への応用

箱桁断面構造は、ツオツ (Zuoz) 橋 (1901年) において2室箱桁断面，スパン40mの3ヒンジ式アーチに適用され，初めて箱桁アーチが完成する。ビルヴィル橋 (Billwil) (1904年) は，2室箱桁を2径間に応用し，国際設計競技で採用されたラインフェルデン橋 (1912年) では，有効幅員10.5mに対応するため5室箱桁に応用した。しかしながら，床版厚は125mmと現在の道路橋示方書に示す最小全厚160mmと比較するとかなり薄く，床板を支持す

る鉄筋コンクリート梁の支間は 1.5m であり、 $\Phi 15$ の単鉄筋を使用していることから、コンクリート床版に関する設計・施工実績もまだ十分ではなかったといえる。

サルギナトーベル橋 (1930 年) (図-3.2) に見られるウェブをカットしたマイヤール独特の構造フォルム、いわゆる 3 ヒンジ式箱桁アーチの起源は、タバナサ橋 (Tavanasa) (1904 年) (図-3.1) である。これは偶然と力学的合理性の両者から生まれたものだと考える。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。サルギナトーベル橋 (Salginatobel) では活荷重が 4 t 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 (Felsegg) (1933) (図-3.3) 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のバリエーションを考えているのがマイヤールの特徴であり、形態は力に従うことを実証していると考えられる。



補剛アーチを試みたのは、マイヤールがロシアから帰国した後のフリエングリバッハ橋（1923年）であった。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ていた。そこで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のが補剛アーチの構造コンセプトである。アーチリブ形状は円弧ではなく多角形とした理由として、第一に、アーチリブを円弧にすると、鉛直壁の中心線とアーチの圧力線との交点における合力がアーチ曲線の中心との偏心によって、アーチリブに2次応力が発生するため、鉛直壁との交点の位置で折れる多角形とすることによって2次応力の発生を低減したことである。第二に、アーチリブの施工が容易になることであると考えた。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(Valtschielbach)橋（1925）（図-3.4）からシュバントバッハ橋(Schwandbach)（1933）（図-3.5）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(Tess)橋（1934）（図-3.6）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-3.4 ファルツシールバッハ橋（1925）



図-3.5 シュバントバッハ橋（1933）



図-3.6 テス川橋（1934）

3.5 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-3.2)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であるシュタウフファッハー橋 (Stauffacher) (1899年) (写真-3.1)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見えないが、当時はチューリッヒ市の景観については建築家のグスタフ・グル (G. Gull) が責任者であり、彼が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オツ (Zuoz) 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就職する。1901年に3ヒンジ式箱桁橋のツオツ橋 (写真-3.2)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り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、さらに中央ヒンジ部には高強度の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



写真-3.1 シュタウフファッハー橋(1899年) (筆者撮影)



写真 - 3.2 ツオツ橋 (1901年) (筆者撮影)

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コンクリート断面の桁高が大きくなるのが上げられる。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断面積が小さくなるため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、ビルビイル(Billvill) 橋(1904 年) (写真—3.3) 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 の道路橋に適用するためラインフェルデン橋(1912)に見られるように箱桁断面を機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(Rheinfelden) 橋 (写真 - 3.4) 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、当時のヨーロッパにおけるコンクリート橋の権威者が参加したコンペであった⁹⁾。中島を挟む2橋が設計の対象とされ、スイス側が2径間でアーチスパンは2 @22.0m とドイツ側が3径間でアーチスパンは31.6m+40.0m+31.6mの3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、マイヤールの鉄筋コンクリート橋に関する設計・施工実績等が評価されて実施案として採用されたものと推察する。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。ここで、マイヤールの鉄筋コンクリートアーチに関する考えを理解するために、1902 年に取得した箱桁断面を有するアーチ橋の特許 (No. 25712)



写真 - 3.3 ビルビイル橋(1904 年) (筆者撮影)



写真 - 3.4 ラインフェルデン橋 (筆者撮影)

(図-3.7) を調査する. 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 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なく, 3つの部材を1つの梁として統一するための構成部材であり, 提案した実施事例 図-3.7 (右図) 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. 』

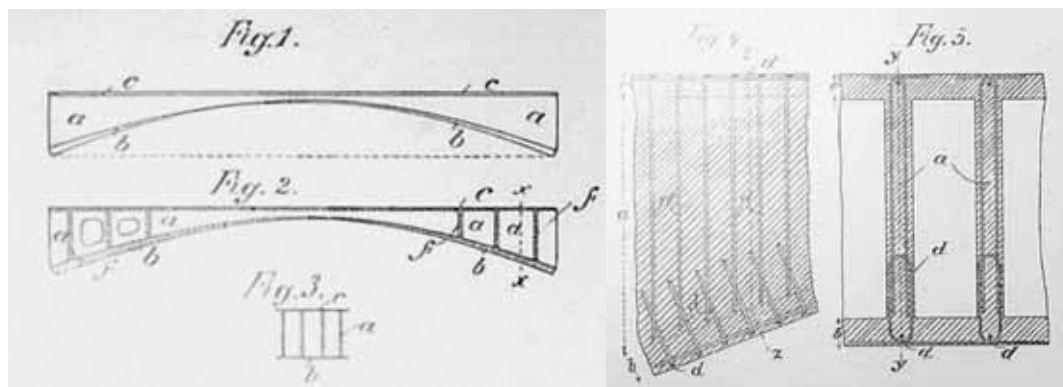


図 - 3.7 マイヤールの特許に示された図 (筆者撮影)

橋梁構造に関する 1902 年の特許から、アーチリブ、鉛直壁、床版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ームを得ることができると考えていたことが分かる。工学的に重要な点は、第一に、箱桁断面とすることによって荷重に抵抗する桁の断面 2 次モーメントを大きくできること、第二に、コンクリート材料を節約できることを指摘した点である。これは、現代の箱桁構造の原理そのものである。この点がマイヤールの構造技術者としての才覚を現したものであるといえる。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。一方、この特許図の中に、鉛直壁に開口部を空ける考えも示されている。1923 年にフリエングリバッハ橋で始めて試みたマイヤール式補剛アーチの起源を示すものとして重要である。しかし、この 1902 年の時点では、床版の剛性を高めて活荷重に抵抗させ、アーチは薄い版として軸力のみを伝達させる機構、いわゆる補剛アーチの構造特性については述べていない。また、この特許ではヒンジについての記述がない点に注意する必要がある。何故なら、コンクリート橋にヒンジを導入する考えはすでに存在し、特許を取られていた可能性が高いからである。

(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(Laufenburg)(1912 年) (写真 - 3.5) 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、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。



写真 - 3.5 ラウフェンブルク橋 (筆者撮影)



写真 - 3.6 ロレーヌ橋 (筆者撮影)

コンクリートブロックアーチの展開としてはスパンの長大化であり、1930年に竣工したベルン市内のロレーヌ橋(Lorraine) (写真 - 3.6) 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



写真—3.7 サルギナトーベル橋(1930年) (筆者撮影)

(1930年)である(写真—3.7)。本橋は1990年にマイヤールの研究者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。ツオツ橋との景観的共通点は、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。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、フェルゼック橋(1933年) (写真 - 3.8) に見られるようにアーチ下線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 (Vessy) (1936年) (写真 - 3.9) 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あけて3本並べた橋となった。また、ラッヘン橋 (Lachen) (1940年) (写真—3.10) では斜橋に対処するために、2基のアーチを互いに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橋軸方向にずれて見えるユニークなフォルムといえる。ガールシュ



写真 - 3.8 フェルゼック橋 (筆者撮影)



写真 - 3.9 ヴェッシー橋(1936年) (撮影：大野美代子)

タット橋(Garstatt)(1940年) (写真-3.11) では、施工の合理化を狙って、コンクリート支保工・型枠の施工を合理化するためアーチ下縁を直線とするデザインを採用した。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点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。ここで、現在のデザイン的な観点から見て、何故、マイヤールの3ヒンジ式箱桁アーチの中央ヒンジ部がスレンダーであったのか、というシュタウフファッハー橋の場合と同じ疑問が沸いてくる。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。



写真 - 3.10 ラッヘン橋(1940年) (筆者撮影)



写真 - 3.11 ガールシュタット橋(1940年) (筆者撮影)

(4)補剛アーチの起源と展開

1902年の特許図(図-3.7)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表現される。アーチリブ、鉛直壁はスレンダーな板部材とすることでアーチ重量を軽くできることか特徴である。この特徴について、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

て判明したと述べている^{注3)}。ここで、マールヤーの構造デザインに関するコンセプトは実規模の荷重試験に基づいていることが明らかとなった。

補剛アーチの構造デザインの特徴は、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の一つとして活用し、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しか伝達させないという考え方であった。写真-3.12 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。補剛アーチを最初に適用したのは、ヴェギタ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 1923 年に建設したアーチスパン 39.5m 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(Schlebach) (写真 - 3.13) , およびツィゲンバッハ橋(Ziggenbach) (写真 - 3.14) である。このうちフリエングリバッハ橋は、別の橋に架け替えられており、現在は存在しない。すでに 1902 年の特出願からは 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^{注4)}。1924 年に完成したシュレーバッハ橋は、完成後、コンクリートの配合材料に凍結融解作用に耐久性のない材料を使ったことによってコンクリートが損傷したため、対策として吹付コンクリートが側壁構築のために使われたと報告されている^{注5)}。

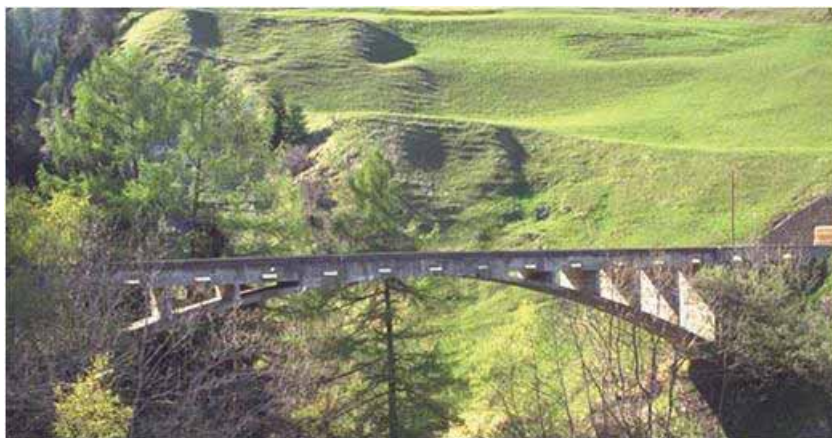


写真-3.12 ファルツシールバッハ橋(1934 年) (筆者撮影)

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-3.15) は、マイヤールの独創性を物語る代表的な作品であり、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 - 3.13 シュレーバッハ橋 (1924年) (筆者撮影)



写真 - 3.14 ツィゲンバッハ橋 (筆者撮影)



写真 - 3.15 シュバントバッハ橋(1933年) (筆者撮影)

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 という驚異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?』と題した講演で、マイヤールの常に新しい橋梁フォルムを生み出そうとしている姿勢を高く評価した。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エンジニアであり、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シュライヒの歴史的エンジニアに対する姿勢を述べたものと理解できる。このシュライヒの発言は、ドイツ、スイス、フランスの橋梁デザインは、現代においても、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示唆する発言といえる。

3.6 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 Architekten Verein)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っていよい。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(H.P.C)が規定されたこと(表-3.2)。第二に高強度鉄筋が規定されたこと(表-3.3)。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-3.3）。第四に、1931年のスイス設計規準においては、コンクリート1m³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300kg/m³に規定されたことである。この規定によって、表-3.2に示すコンクリート設計強度について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。マイヤールが設計し、施工した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。年齢的には60歳から1940年に没する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ならびに品質に対して大きな自身を持っていた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

表-3.2 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/cm²）（著者作成）

単位: kg/cm ²				
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 (16)	175 (17.5)	130 (13) 160 (16)	160 (16) 130 (13)
高強度ポルトランドセメント(H.P.C.)	-	240 (24)	200 (20)	190 (19) 160 (16)
ヤング係数比 n=Es/Ec	10 (1) 20 (2)	10 (1)	7~20 (0.7~2.0)	10 (1) 15 (1.5)

注) 応力度に関する()の値は(N/mm²)

表-3.3 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/cm²) (筆者作成)

国別	単位: kg/cm ²							
	スイス			フランス			ドイツ	
改定年	1909年	1931年		1930年			1931年	
セメント	P. C.	P. C.	H. P. C.	P. C.	P. C.	H. P. C.	P. C.	H. P. C.
設計強度	160 (16)	175 (17.5)	240 (24)	130 (13)	160 (16)	200 (20)	130 (13)	160 (16)
軸圧縮応力度	35 (3.5)	40 (4.0)	50 (5.0)	50 (5.0)	70 (7.0)	90 (9.0)	35 (3.5)	45 (4.5)
縁圧縮応力度	45 (4.5)	65 (6.5)	85 (8.5)	50 (5.0)	70 (7.0)	90 (9.0)	Max50 (5.0)	Max65 (6.5)
曲げ応力度	40 (4.0)	75 (7.5)	100 (10)	50 (5.0)	70 (7.0)	90 (9.0)	Max50 (5.0)	Max65 (6.5)
曲げ圧縮応力度	Max70 (7.0)	Max90 (9.0)	120 (12)	—	—	—	—	—
普通鉄筋	1200 (120)	1200 (120)	1200 (120)	1400 (140)			1200 (120)	
引張応力度	1500 (150)	1500 (150)	1600 (160)	Max1600 (160)				
高張力鉄筋	—	—	1600 (160)	1900 (190)			1500 (150)	
引張応力度	—	—	2000 (200)	Max2100 (210)				

注) 応力度に関する()の値は(N/mm²)

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。これがマイヤールにとって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。

3.7 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橋、桁橋は2橋、さらに建物ではマイヤールの発明したピ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-3.4に代表的な補剛アーチ、(表-3.5)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-3.2)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、240kg/cm²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

表-3.4 補剛アーチの設計規準とコンクリート強度(著者作成)

No.	橋名	竣工年 (年)	適用規準	平面線形	コンクリート強度	
					wβd (kg/cm ²)	pβd (kg/cm ²)
1	フリエングリバッハ橋	1924	1915年	直線	280	224
2	シュレーバッハ橋	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	シュピターール橋	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	テス橋	1940	1935年	直線	—	—

注1) wβdは20cm×20cm×20cmの立方供体強度、
pβdは20cm×20cm×60cmの角柱供体強度を示す。
は、pβd=0.8×wβdとして、筆者が換算した値を示す。

表-3.5 箱桁アーチの設計規準とコンクリート強度(著者作成)

No.	橋名	竣工年 (年)	適用規準	平面線形	コンクリート強度	
					wβd (kg/cm ²)	pβd (kg/cm ²)
1	ツオツ橋	1901	—	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	サルギナトーベル橋	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	—	—

注1) wβdは20cm×20cm×20cmの立方供体強度、
pβdは20cm×20cm×60cmの角柱供体強度を示す。
は、pβd=0.8×wβdとして、筆者が換算した値を示す。

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橋の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きがけとなった1901年のツオツ橋は、高強度コンクリートに相当する360kg/cm³の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・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うことができる。

3.8 おわりに

本研究は、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を使っていたこと、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と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ると考えられる。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。

参考文献・注釈

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. 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。いずれの場合においても、セメント量は300kg/m³と規定されている。

注3) 文献10), 1930年に施工された鉄道橋であるランドクアールト橋(アーチスパン: 30.0m, アーチライズ: 7.9m, 補剛アーチ, 2ヒンジ構造)の実橋を使った荷重裁荷試験の事例を紹介しており、2連の機関車(それぞれの重量が65tf)を時速35km/hで走行させ、ブレーキを掛けた時の計測結果を以下のように示している。特に、補剛桁の1/4地点での曲げ圧縮、引張応力度を見ると、活荷重が補剛桁の1/4に偏載した時に応

答する応力度であることがわかる。

アーチ頂部最大下方変位： 0.6mm

アーチ 1 / 4 点の最大下方変位： 1.2mm

アーチ 1 / 4 点の最大上方変位： 0.5mm

補剛桁 1 / 4 点の最大縁応力度 $\left\{ \begin{array}{l} +8\text{kg/cm}^2 \text{ (圧縮)} \\ -13 \text{ kg/cm}^2 \text{ (引張)} \end{array} \right.$

アーチ付根の最大縁応力度 $\left\{ \begin{array}{l} +9\text{kg/cm}^2 \text{ (圧縮)} \\ -5 \text{ kg/cm}^2 \text{ (引張)} \end{array} \right.$

アーチ 1 / 4 点の最大縁応力度 $\left\{ \begin{array}{l} +5.5\text{kg/cm}^2 \text{ (圧縮)} \\ 0 \text{ kg/cm}^2 \end{array} \right.$

注4) アウトバーンのエンジニアで1933年に橋梁景観論を執筆した Hermann Rukwied はマイヤールの補剛アーチの一つであるファルツシールバッハ橋を取り上げ、アーチリブが細すぎて、構造的に座屈を起こしそうで心配であると述べている。

注5) Max Will が 1949 年に執筆した『Robert Maillart』のシュレーバッハ橋の中で、補剛アーチ橋に側壁が取り付いた理由を凍結融解作用によってコンクリートが損傷したためと書いているが、マイヤールの橋梁を使って、完成後、荷重裁荷試験を行ったチューリッヒ材料試験所の教授であったミルコ・ロッシュの文献5の報告では、1925 年 11 月に測定を行い、良好な結果であったと報告されている。従って、1926 年～1949 年の間に、壁が施工されたものと推定できるが、その真相については今後調査する必要があると考える。

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, pp9-10, 2006.

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) Ros.M.: 『Versuche und Erfahrungen ausgefuehrten Eisenbeton Bauwerken in der Schweiz』 , Vereins schweizerischer Zement, Kalk und Gips Fabrikanten,1937
- 6) Billington.P: 『The Tower and the Bridge』 , Basic Books Inc,1983.
- 7) Ritter. W: Die Bauweise Hennebique, 『Schweizerische Bauzeitung』 Feb, 4th, Feb.11th 1899.
- 8) Schlaich.J: Robert Maillart und Wir?, 『Beitraege zur Geschichte des Bauingenieurwesens Robert Maillart 1872-1940』 ,Heft 2 , 1991.
- 9) R. Moser, G. Gull, Wettbewerb für eine neue Rheinbrücke in Laufenburg, pp163-pp169, 『Schweizerische Bauzeitung』 Sep. 24th ,1910.
- 10) R. Maillart, pp166, Heft 10, 『Der Bauingenieur』 März 6, 1931

第4章 ドイツアウトバーンの初期設計思想と橋梁景観論

4.1 はじめに

橋梁デザインは誰が行うのか？という問いについて、1990年代のイギリスでは橋梁設計コンペを開催して、エンジニアを主導とした場合、アーキテクトを主導とした場合など、どちらが優れた効果が現れるのかを試みた。結論としては、どちらが主導をとってもエンジニアとアーキテクトの意志が十分伝わっていれば、良いデザインができるという結果であった。エンジニア、アーキテクト、造園家との協働体制で実施したデザインで効果を挙げたのは、1930年代のドイツのアウトバーンの設計作業であったということが出来る。ここで、アウトバーンの設計体制について、どのようなシステムが採用されていたのか、また橋梁デザインにおいて、どのようにエンジニアと建築家の協働作業が行われたのか、その内容を整理する、この協働作業がきっかけとなって1937年に近代的な橋梁景観論が出版される。しかしながら橋梁デザインについては、19世紀後半から特にドイツ語圏において鋼製長大アーチ橋や鋼製トラス橋計画に建築家が関与し、橋の入り口や中間橋脚上に中世の塔などを取り付けるデザインが流行っていた。このデザインに対して1927年に開催された第二回橋梁構造国際会議(IABSE)において、橋梁デザインに関する議論が開始された。ここで、橋梁デザインにおいて、何が重要な要素であると認識されたかを整理することによって、第5章の一般生活者の感性を活かした橋梁デザインの導入とする。

ドイツのアウトバーンは1933年6月、ヒトラー政権のもとで生まれた。初代の総監になったフリッツ・トット(Fritz Todt,1891-1942) **(写真 - 4.1)**は、風景に融合した道路の建設をスローガンとしてエンジニア、建築家、造園家、造林家の協働作業を組織的に推進した結果、1939年、第二次大戦に参戦するまでに3000kmの高速道路ネットワークを完成させた^{注1)}。特に、エンジニア、建築家との協力関係は、戦後、ドイツの復興における橋梁建設事業においても発揮され、風景に融合する美しい橋梁の実現というコンセプトが、デュッセルドル

フの橋梁群や市内高架橋のデザインに活かされた。日本においては、戦後、名神高速道路の建設において、道路線形計画や風致設計（景観設計）に活かされている。筆者はナチスの業績を賛美するのではない。戦後、世界のアウトバーンの原点となったドイツのアウトバーンが、どのような体制で実現され、そこで培われた技術とデザインが現代にどのような影響を与えたのか、その歴史を明らかにすることに視点を置いている。

4.2 創設者 フリッツ・トット

平面交差のない道路の建設がドイツアウトバーンの構造コンセプトであり、どんなにスピードを出しても恐怖感を覚えないように、道路線形にクロソイド曲線（緩和曲線）を導入し、遙か前方まで道路の行方を示唆するように配置した植栽によって、ドライバーがこれから先の道筋を理解できるような配慮がなされている。この植栽は夜になれば対面通行のライトを遮る役目も担っている。道路と周辺の土地を隔てる縁石はなく、道路が自然と共存した風景が続く。法面は1:3の勾配で緩やかに傾斜し、しかも自然の起伏が造成されている（写真-4.2）。世界の高速道路の原点となったアウトバーンは、エンジニア、建築家、造園家の共同作業によってもたらされた技術と英知の結晶であり、第三帝国のミステリーとも言われた。帝国アウトバーン会社（Unternehmens Reichsau, このミステリーをつくった本人である。トットは舗装工学が専門の土木技術者であり、1931年に「コールタ



写真-4.1 フリッツ・トット 写真-4.2 ドイツのアウトバーンの風景(著者撮影)

ールとアスファルトを使った国道建設における舗装面の不良施工に関する研究」で博士を取得した^{注2)}。

4.3 エンジニアとアーキテクトの協力体制^{注3)}

当時、ダルムシュタットとハイデルベルクを結ぶアウトバーンを見たトットは、高速道路を跨ぐ橋梁のデザインのひどさに落胆し（写真 - 4.3）、橋梁のデザインについては建築家パウル・ボナーツ（Paul Bonatz, 1877-1956）（写真 - 4.4）を、構造についてはシュツットガルト工科大学の橋梁工学の教授であったカール・シェヒテル（Karl Schaechterl, 1879-1971）（写真 - 4.5）を召集した。トットはアウトバーンを統一したコンセプトのもとで計画する必要性を痛感し、次のように述べた。「風景と土地とは、人の生活と文化の基礎であり、人を養育し文化を育む故郷である。技術者は、社会の基盤を築く者であるという認識をもつならば、風景と土地が保存されるように仕事をし、かつここから新しい文化価値が生まれるように、構造物を設計し、創造する義務を有している。」風景に融合した道路の建設（Landshafts gebundenen Bauens）は、アウトバーン計画におけるコンセプチュアルデザインであり、当時のアウトバーン建設局の目指すものであった。

トットのコンセプトに賛同したボナーツは、アウトバーンの目指すべき橋梁は、美しい



写真 - 4.3 トットの落胆した初期高架橋のデザイン^{注4)}



写真-4.4 パウル・ボナーツ^{注5)}



写真-4.5 カール・シェヒテル^{注6)}

プロポーションを供え、浮かぶように軽快で、しっかりと荷重を支える印象を与え、かつ力の流れが明白なデザインであると考えた。これは純粋な工学的フォルムを美しく造形しようとするシェヒテルの考えとも共鳴し、1935年8月、帝国交通省の総監に任命されたシェヒテルは、ボナーツとともにアウトバーンに計画される橋梁の美しい造形と完璧な建設をスローガンとしてアウトバーン管理局 (Direction der Reichs Autobahnen) を設置する。これまで橋梁のデザインに関して互いに反感を抱いていたドイツのエンジニアと建築家の関係は、この二人の出会いによって修復され、橋梁のデザインに関する新しい歴史がここに始まったといえる。

4.4 アウトバーンのシステムづくり

彼らの業績として重要な点は、アウトバーン建設局において美しいデザインを実現するためのシステム作りが行われたことである。第一に、ドイツ国内にはこのアウトバーン管理局のもとに15の上級建設管理事務所 (OBR, Obersten Bauleitung der Reichsautobahn) が存在したが、それぞれの事務所に建築家を配置することによって、同じようなデザインが繰り返されることを防止した。さらに15のOBRで実施したデザインはすべてシャヒテル、

ボナーツの所属するベルリンの管理局に送られ、審査を受けたのち指摘事項を文書やスケッチによって通知される仕組みになっていた。このように中央でデザインを管理することによって、有能な建築家やエンジニアの発見と育成が行われた。その代表者が当時シェヒテルの助手をしていたフリッツ・レオンハルト(Fritz Leonhardt) (写真-4.6) であり、建築家ボナーツ、建築家フリードリッヒ・タムス(Friedrich Tamms, 1904-1980) (写真-4.7) とともにアウトバーンに架かる歩道橋のデザインを手掛けた。特に、歩道橋と都市との関係性、取り付き道路の縦断線形との関係性や橋台と盛土の関係性を考慮したデザイン、ドライバーの視点から見た空間透視性等を考慮した構造形式や橋台のデザインを検討している。タムスは後にドイツにおける鋼製斜張橋の先駆けとなったクニー橋(写真-4.8)をはじめとするデュッセルドルフの斜張橋群や、デュッセルドルフ市内の高架橋のデザインにおいて、ピルツデッキを採用して開放的な桁下空間を実現したヤン・ヴェーレム・プラッツ高架橋(Jan-Wellem-Platz) (写真-4.9) のデザインを担当する。第二に、アウトバーン管理局が発注する河川や渓谷を跨ぐ大型橋梁のデザインについて、入札時に代替案の提出を認めることによって新しい橋梁形式の開発に拍車がかかり、技術とデザインにおいて著しい進歩が認められるようになった。その後、建築家が育つにつれて、それぞれのOBRに建築家が配置されるようになり、ハンブルグには、グッチョウ(K. Gutschow)、ハノーバーには、フレーセ(H. Freese)、シュツットガルトには(W.Tieje)等が就任した。



写真-4.6 フリッツ・レオンハルト^{注7)}



写真-4.7 フリードリッヒ・タムス^{注8)}

4.5 造園家の参加

橋梁デザインだけではなく、道路のデザインについても危惧を抱いていたトットは、1933年ミュンヘン市の造園家であったアルビン・ザイフェルト (Alwin Seifert, 1890–1972) に手紙を書き、ミュンヘンとホルツキルヒェンを結ぶ 20 km のアウトバーンの建設に際し、ランドスケープの観点から道路を造形することの重要性を説く一方、建設局の造園家として協力してくれるよう要請した。手紙には、失われたドイツのランドスケープを再生させるために、法面勾配をこれまでの 1 : 1.5 から 1 : 3 に変更し、その地域に適した植栽を行うことや、法面を自然の造形にするため、グレーディング（道路軸方向に起伏をつける）やラウンディング（法肩や法尻に曲線をつける）を提案した。さらに、ドライバーの立場



写真-4.8 クニー橋^{注9)}



写真-4.9 ヤンベーレムプラッツ高架橋^{注10)}

に立って、運転の快適性を高めるために、クロソイド曲線を導入し、視線誘導や対向車線のランプを遮蔽する機能を有する植栽の在り方を検討した。こうして、アウトバーン建設局において、建築家、エンジニア、造園家による協力体制ができあがった。

4.6 ドイツにおける景観論の起源

1937年、シェヒテルはレオンハルトとともに橋梁景観論を執筆する（写真-4.10）。30年代のドイツは、橋梁の景観について最も議論された時代であり、統一性、対称性、連続性、コントラスト、空間透視性等、橋梁の景観特性を言語で明確に表現するとともに、その検討方法として模型を使うことが推奨された。オーバブリッジのデザインにおいて、ドライバーの視点を妨げない橋脚や橋台の形態の研究や、風景に融合した構造物にするために、コンクリート表面に石を張り、表面をノミではつったテクスチャー等、表面形態のデザインについても研究が行われた。「ドイツにおける国家プロジェクトは、鉄道建設プロジェクトをはじめとして数々あったが、アウトバーンの建設プロジェクトほど計画初期の段階から



写真-4.10 橋梁景観論の表紙^{注1)}

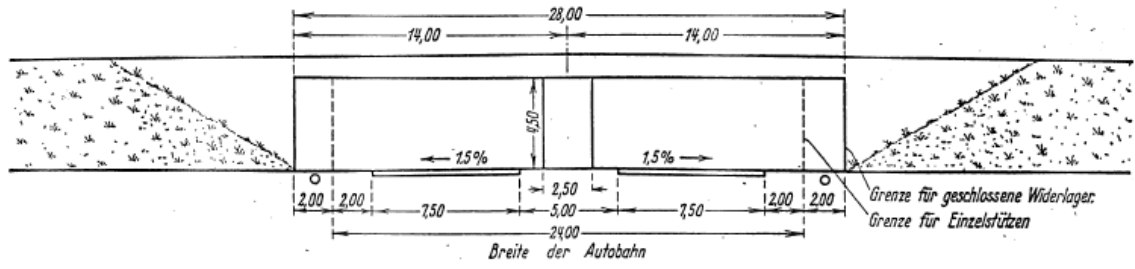
明確なコンセプトを持ち、その実現のための実施方法が建築家、造園家等の様々な視点から検討され、その思想や手法が広く広報されたプロジェクトはなかった」。トットは、このようにアウトバーンのプロジェクトを讃えたが、一方ではそれがヒトラーの政権下において国家の威信を示すために計画されたプロジェクトであり、失業者対策のために建設需要を喚起するという経済的な背景と、国民が一丸となってプロジェクトを支持するための政策的なプロパガンダが不可欠だったという背景もあった。

4.7 RC 歩道橋の理想的なタイプ

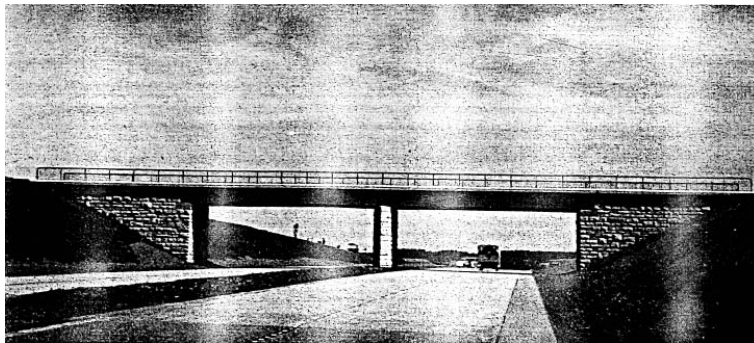
シェヒテルとレオンハルトが 1937 年に執筆した「橋梁の景観」Die Gestaltung der Brücken において、アウトバーンに架かる歩道橋の基本寸法（**図-4.1**）と当時の鉄筋コンクリート歩道橋の理想的なタイプが 3 種類示されている。道路断面構成は、路側帯 4m+車道 7.5m+中央分離帯 5.0m+車道 5.0m+路側帯 5m となっており、車道は 3.75m×2 の 2 車線を基本としている。

Type a (**図-4.2**) はアウトバーンが創立された最初の年に開発された 2 径間の歩道橋のタイプである。橋梁部の張出し部を橋台の端部まで延長し連続性を強調するとともに、鋼製の手摺を採用して桁を軽く見せる工夫がなされている。また、橋台の表面に石張りを行うことが推奨されている。Type b (**図-4.3**) は桁下の空間透視性を高めたタイプで 4 径間の版桁タイプである。

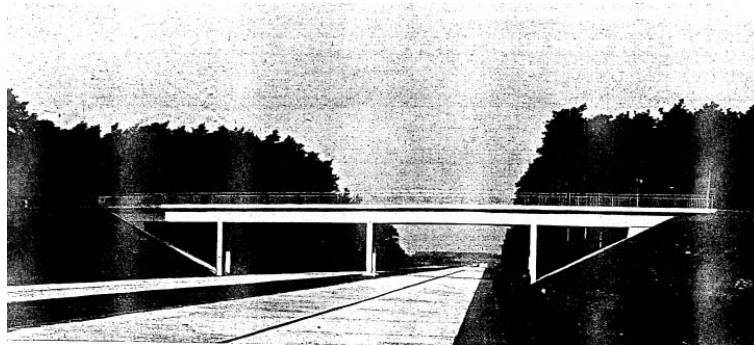
Type c (**図-4.4**) は中間支柱を用いず 1 スパンでアウトバーンを跨ぐタイプである。特にその橋が大都市への通用門であり、存在を強調する場合に採用され、橋台の側面に都市の名前を刻むケースが多い。このように基本的な歩道橋のデザインをベースとして、周辺環境との取り合い、走行環境や都市との関係性をデザインすることを推奨している。



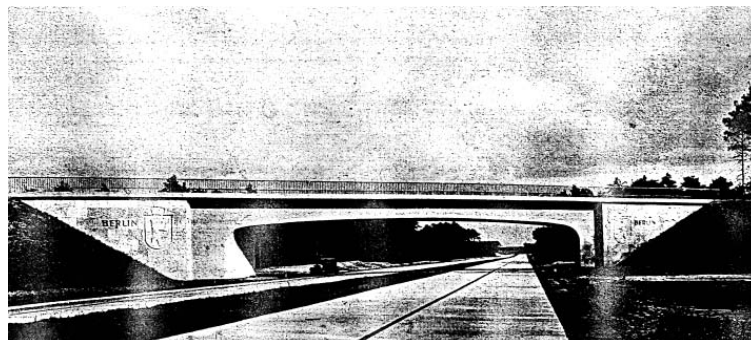
図—4.1 アウトバーンの架かる歩道橋の基本寸法^{注1 2)}



図—4.2 Type a 2径間の歩道橋



図—4.3 Type b 3径間の歩道橋



図—4.4 Type c 大都市の入口に架かる歩道橋

また、縦断線形、平面線形との調和を前提として、橋梁単独のフォルムを考えるだけでなく、周辺景観との融合、特に、橋梁端部における法面との取り合いについて、詳細に触れている（**図-4.5**） こうした橋梁デザインに関する議論のきっかけとなったのは、19世紀後半の橋梁デザインにおけるエンジニアと建築家の枠割と、その結果どのようなデザインが出現したかに影響される。以下に第3章でマイヤールが最初に鉄筋コンクリート橋を設計した19世紀後半の鋼橋デザインの歴史を整理する。

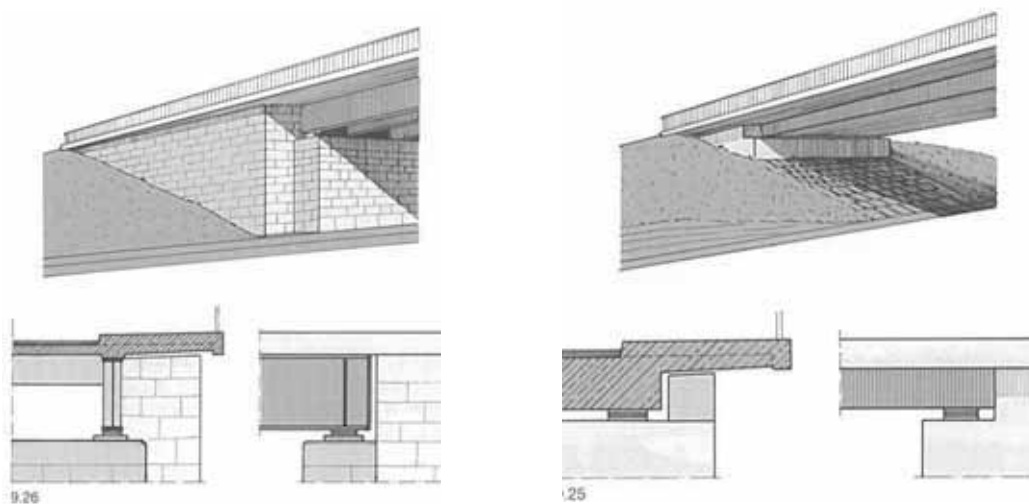


図-4.5 橋梁の端部と法面との取り合いのデザイン^{注13)}

4.8 橋梁景観に関する考え方の変遷と国際的な研究について

4.8.1 橋梁デザインにおける建築家の役割

橋梁デザインについては、19世紀後半における欧州の大都市では市の建築家がデザインを担当することが多く、橋梁の構造美を演出するのではなく、建築物の1つとしてデザインしていた場合が多かった。例えば、コンクリート橋のファサードに石を張って石橋に見せ、周辺の街路景観や建物との調和を図ることや、特に、ドイツやオーストリアのドイツ語圏において大河川を渡る鋼製アーチ橋の入り口に石造りの中世の塔を設置するようなデザインが行われていた。マイヤールがチューリッヒのジール川上に設計した3ヒンジ式無

筋コンクリートアーチであるシュタウフファッハー橋 (Stauffacher) (1899年) は、当時、チューリッヒ市の建築家であったグスタフ・グル (G.Gull) が意匠を担当した。グルは、コンクリート橋の側面に石を張り、外観は石橋であるかのように見えるデザインとした。ドイツのヴォルムス市 (Worms) に 1897年~1900年に建設された橋長 774m、3 径間鋼製アーチ橋としてライン河を渡るエルンスト・ルードヴィッヒ (Ernst-Ludwig) 橋は、市の建築家カール・ホフマン (Karl Hofmann) によって意匠設計が行われたが、鋼製アーチ橋の入り口の部分に高さ 53mの中世の塔を設計した。この塔はニーベルンゲン塔 (Nieberungen Türm) と呼ばれていることから歴史的物語をモチーフとして、周辺風景との関係性や、街並との脈絡とは関係なくデザインされたものであろう。19世紀後半、ドイツ



写真-4.11 シュタウフファッハー橋 (1899年) (筆者撮影)



写真-4.12 エルンスト・ルードヴィッヒ橋^{注14)} (1900年)

を流れるライン河やオーストリアを流れるドナウ河のような大規模河川沿った大都市，例えばボン (Bonn)，ボルムス (Worms)，フランクフルト (Frankfurt)，ウィーン (Wien) 等には鋼製アーチ橋や鋼製トラス橋が次々に架けられていたが，エンジニアが構造設計を担当し，建築家が橋梁の意匠デザインを担当するというように役割が分担され，建築家の方が橋梁エンジニアより尊重されていたといえる．これらの橋梁デザインの特徴は，橋の入り口，または中間橋脚上に中世風の石塔をとってつけたように配置している点で，特に，ドイツ語圏においてこのタイプの橋梁デザインが多い．現代においては，このようなデザインは特定の趣味・趣向に偏っていて健全な公共感覚のデザインではないと批判される．こうしたデザインが実現した背景を考えると，発注者，建築家，エンジニアの関係性が影響しているように思われる．互いにそれぞれの意見を尊重できる立場にあれば，周辺の風景とは脈絡のない中世の塔を取って付けたようなデザインは避けることができたはずである．何故なら，すでに 1900 年において，橋梁デザインとして評価の高い橋梁デザインであるセーヌ河に架かるポン・デ・ザール橋 (1804 年)，エッフェルが設計したフランスのギャラビー高架橋 (1884 年)，ポルトガルのドナ・マリア・ピア橋 (1877 年) や，イギリスのフォース橋 (1890 年) が存在しており，エンジニアもしくは，発注者が，そのデザインは周辺風景と何の関係性も脈絡もなく，特定の趣味に偏り過ぎているという意見が出れば，実現しなかったものと考えられる．さらに，こうした大河川を渡る橋梁は，ほとんどが設計競技の結果実現しているため，建設コストが高くなる無駄なデザインに対しては異議が出るはずだと現代的な視点から考えられる．しかし，この 3 者の関係性については，その国の時代的な背景，文化等が影響していると考えられるため，その原因を明らかにするのは別の機会とする．

4.8.2 19 世紀のフランスにおける鋼橋のデザイン

一方，フランス語圏では，セーヌ河に架かる歴史的な鋼橋は，ポン・デ・ザール橋 (Pont

des Art) (1804 年) (写真-4.13) であり, 19 世紀初頭にデザインされたが, 現代的な橋梁デザインの観点からみても, セーヌ河の橋に相応しく, 時代の変遷とともに評価される橋梁デザインであるといえる. エッフェルの設計したギャラビー高架橋 (Garabit) (1884 年) は, 現在の橋梁デザインの観点からみても無駄の無い, 構造芸術の粋を集めた作品といえることができる. ナポレオンの墓のあるアンバリッドに対峙して, セーヌ河の橋梁群の中でも最も装飾的であるのが, アレキサンドル三世橋 (1900 年) (写真-4.14) であるが, こ



写真-4.13 ポン・デ・ザール橋 (1804 年) (筆者撮影)



写真-4.14 アレキサンドル三世橋 (1900 年) (筆者撮影)

これは1900年に開催されたパリ万国博覧会の道路橋として、ロシアのアレキサンドルⅢ世から送られたものという背景があり、アンバリッドの眺めの妨げにならないこと、セーヌ河の景観を損ねないこと、幅100mの長さの通りと調和することが条件としてデザインされたセーヌ河に架かる橋で最も装飾が豪華な橋である。1891年のロシア・フランス同盟の記念と1900年のパリ万国博覧会のために整備されたという歴史的背景を考えれば、現代においてもこの橋が訪れる人々に愛されていることが理解できる。この橋の設計者は、当時、フランスのエコール・ポン・ゼ・ショセで構造工学を教えていたジャン・レサル(Jean Resal)で、鋼橋のミラボー橋(1897年)(写真-4.15)も設計している。鋼橋の構造設計を最も良く理解し、かつ、橋のデザインについても、建築家と連携をとりながら実施している点が、華美な装飾もなく、むしろパリの街に相応しい橋を実現できた理由であると考え、2橋はいずれもリベットを使って部材を接合しているが、この橋の全体的なプロポーションが美しいだけでなくアーチと床版との取合いや、高欄の詳細に至るまで、気を配ってデザインしていることがわかる。アレキサンダーⅢ世橋とミラボー橋はセーヌ川に架かる鋼橋デザイン中でも傑出した作品といえる。

4.8.3 橋梁デザインに関する1920年代の国際的な論議

中世の石塔を橋の入り口や、中間橋脚上に設けた、いわゆる建築家によるデザインに対して、エンジニアの側から橋梁デザインの見直しを提案したのがウィーン工科大学で橋梁工学を教えていたフリードリッヒ・ハルトマン(Friedrich Hartmann)であり、1928年にウィーンで開催された第2回国際橋梁・構造工学会議(IABSE)で「橋梁の景観」^{注15)}について講演し、橋梁設計におけるエンジニアと建築家の役割を論じた。テクニカルセッションで橋梁の景観を論じた意義は大きく、景観論と技術論を同等に議論する基盤が作られた。ハルトマンは、1899年、ドイツのボンに完成したデュッセルドルファー橋(Düsseldorf) (写真-4.16)を取り上げ、支間割97m+187m+97mの3径間の鋼製2ヒンジ式



写真-4.15 ミラボー橋（1895年）（筆者撮影）

アーチのうち、中央径間の中路アーチのスプリング部に中世の2対の円形の塔を付けた橋のデザインを取り上げ、建築家によって行われた過度に装飾的な橋梁デザインを批判した。ハルトマンの講演の論旨は、以下に示す言葉の中にある。

「今日、橋梁デザインの傑作は、エンジニアと建築家密接な協力関係のもとに生まれたというドグマがある。しかしながら芸術分野において、傑作といわれる作品は協力によって成されたものがあるだろうか。今日、建築家は一人では橋梁デザインの傑作を実現することはできない。橋梁デザインは、エンジニアだけが理解しえる条件のもとで実施しなければならないが故に、エンジニア自身が橋梁構造における景観についても責任を持たなければならない。」ハルトマンの鋼橋の橋梁デザインに関する意見は1927年に出版した鋼橋を中心とした橋梁景観論¹¹⁾にも述べられているが、第一に、目的に合った美しいデザインであること。第二に周辺の風景と調和するデザインであること。第三に、大きなスパンを渡る場合でも、軽い印象を与える構造であること。アーチが連続する場合は、等しいスパンとして、リズムカルな印象を与えること。第4に、橋の内部景観に



写真-4.16 デュッセルドルファー橋 (1899年)^{注16)}

ついて、横梁が軽い印象であることとしている。こうした橋梁デザインに関する規則を取り上げ、橋の入り口に中世の門や塔を設置して、近代的な橋本体のイメージとは異なるデザインを批評する根拠を示した点が、評価すべき点であり、ウィーン工科大学において橋梁景観論について講義し、橋梁デザインを建築家の手からエンジニアの手に戻すべきであると主張した点は、その後のエンジニアの橋梁デザインに対する意識を変革させる切っ掛けとなった。

4.8.4 戦後ドイツの橋梁デザインにおけるアーキテクトの役割

戦後のドイツ橋梁デザインに貢献した建築家に、ローマ(Gerd Lomer)がいる。ローマーは技術者と共同で、ケルン市(Köln)でライン河に架かる鋼製斜張橋であるゼヴェリン橋(Severin)(1959年)や、北ドイツのフェーマルン海峡に架かる鋼製アーチ橋でアーチスパン264mのフェーマルンズンド橋(Fehmarnsund)をデザインした。コンクリート橋としては、ヴィスバーデン(Wisbaden)の河川に架かるアーチスパン90mのディッカーホーフ歩道橋(Dyckerhof)(1966年)があり、ローマーの傑作の一つである。軽量コンクリートとPC鋼材を併用することによって、これまでになくスレンダーさを実現し、シャープで優美なアーチフォルムを実現した。

ローマーは、橋梁デザインにおける建築家と技術者の共同作業は、先ず、計画・構想段階から始めるべきであり、建築家の責務は、橋と風景との調和を目指して、橋梁全体のフォルムの計画から、ディテールの施工に至るまで造形的な責任を負うことであると考えた。技術者は、橋の構造、安全性、経済性の観点から適用可能な橋の構造を提案し、建築家は、都市景観の保全、建築的さらには都市工学的な問題を解決することが役割であるとした³⁾。次に、このデザインの実現に欠かせない存在が企業者の理解であり、三者の相互理解と協力があって良いデザインが実現する。

建築家とエンジニアの協働作業とはどのような内容であり、互いにどんな知識が必要とされるのかを理解するために、ゼヴェリン橋とフェーマルンズンド橋のデザインコンセプトに関するローマーとエンジニアの対話が、ローマーが執筆した橋梁造形論 (Brückenbaukunst)^{1 2)} に示されている。この橋の構造設計を担当したフィッシャー (Gerhardt Fischer) の会話が、協働作業のプロセスを端的に表す事例であるため、その会話を以下に示す。

ゼヴェリン橋は、ライン河の左岸と右岸にある運河を超えてさらに主流を渡る大規模な橋梁であり、1955年に設計競技が行われた、この構造形式として、構造的合理性と経済性の観点から、三つのタイプがエンジニアであるフィッシャーから提示されたが(図-4.6)、これに満足できなかったローマーは、次のように述べている。

ローマー：「ライン河の右岸に吊り橋の塔を1本だけ建て、床板を吊ることができないでしょうか。床板はできるだけスレンダーにして左岸側の倉庫の間に消えるように見せたいのです。そうすれば塔がケルンの大聖堂と街並みの景観を阻害することはないし、左岸側の大聖堂に対して右岸側の地形に都市景観的なアクセントを与えることができます。」(図-4.7 (a))この提案に対してフィッシャーは、塔の位置については同意するが、工学的な観点から吊り橋に代わる斜張橋を次のように提案する。

フィッシャー：「構造を非対称とすることはいい考えだと思います、しかし、そのデザイン

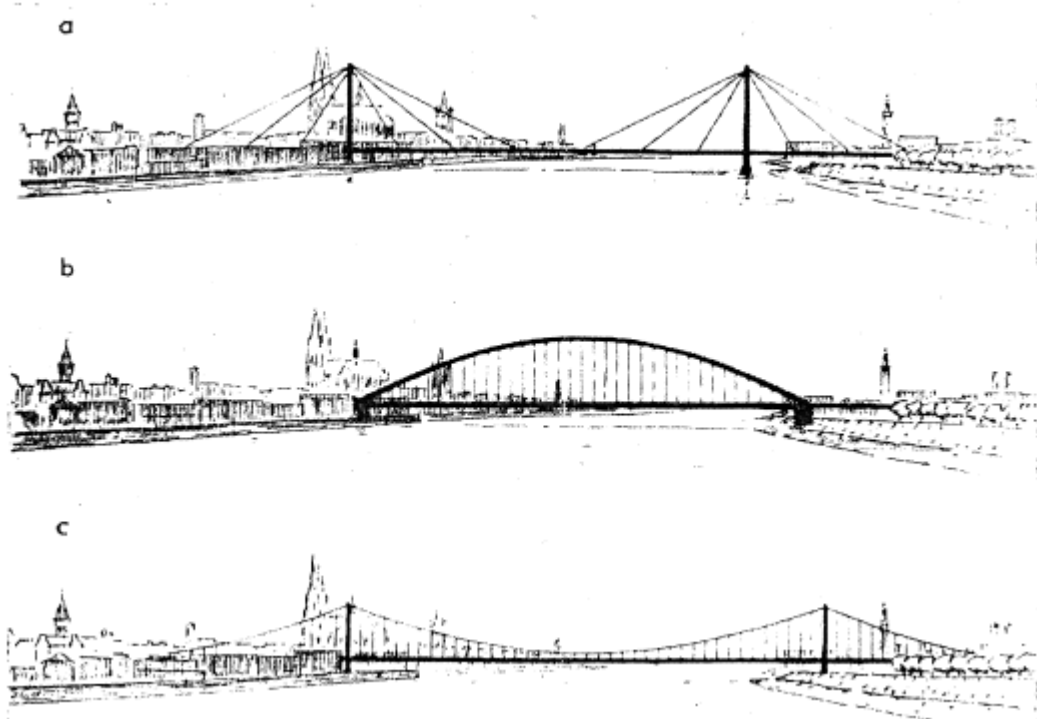
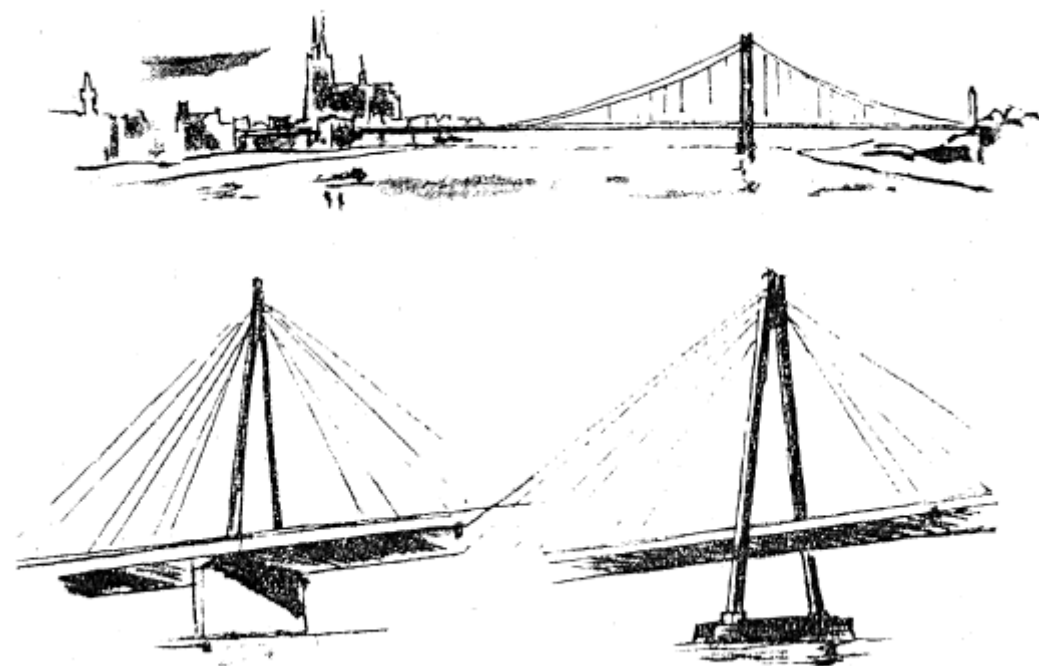


図-4.6 フィッシャーがローマーに提示した3つの橋梁形式^{注17)}

を1本の塔を有する吊り橋で実現するとなれば、床板はあまりに柔くなって非常に不経済な結果となります。そこで、このように橋脚上に三角形の塔を建て、その頂点にすべてのケーブルを集中させるのはどうでしょうか。」(図-4.7 (b))ローマーはこれに対して橋を利用する立場から反論し、その問題を改善するデザイン案を次のように提示する。

ローマー:「それについては、塔の足の位置が問題です。塔が橋脚上に建つと、歩行者や自転車の通行の障害になり、良い印象を与えるとは思いません。そこを通る人々は、こう尋ねるに違いありません。力は地面にどのように伝わるのですか。いったい橋は橋脚の上に載っているのですか。それとも主塔が橋桁を吊っているのですか。もし、主塔をこのように開けば、床板は全長にわたって何も遮られることなく、通り抜けることができます。しかも、主塔は床板を吊っているという印象が明確になります。橋の機能とフォルムはこうして一体化することができます。」(図-4.7 (c))

エンジニアと建築家の間における橋梁デザインに関する意見のやりとりには、どちらか



a: ローマーがフィッシャーに示した吊り橋のスケッチ

b: フィッシャーから提示された斜張橋のスケッチ

c: ローマーの提案した主塔のデザイン

図-4.7 A型の主塔を有する斜張橋案に絞り込むプロセス^{注18)}

一方が自分のアイデアを固執するのではなく、互いに自分の考えを明確に述べながら、相手の考えも尊重し、最終的にベストな解決策に持っていくプロセスが紹介されており、これが近代における建築家とエンジニアの対等な立場における協働作業であるといえる。

4.8.5 橋梁デザインに関する1980年代の国際的な論議

1980年にウィーンで開催された第11回IABSEではレオンハルトがオープニングセレモニーにおいて「橋梁工学にける景観論」を発表し、これまでに多くの醜悪な構造物が作られてきたために、我々の美意識の向上が妨げられてきたことを上げ、IABSEの中に構造物の景観を扱う景観委員会が組織され、橋梁景観に関するガイドラインを提案した。

① 橋梁は以下の関係において、均整のとれたプロポーションであること。構造本体—空

間、高さー長さー幅、桁の長さー桁の高さ、光と影による明るい面ー暗い面

- ② 外観を決定する構造物の全てのライン，エッジが一定の秩序を保っていること。
- ③ 同じ要素が繰り返されていること。
- ④ 構造物を環境に調和させること。
- ⑤ 構造物の形は，機能の目的に従って決定する。「形は機能に従う」というスローガンは，上記のガイドラインが満足されていない場合は，正しくない。
- ⑥ 橋梁構造物に用いる桁の形状には，基本的なタイプ（桁，アーチ，格子，吊り構造）を用いる。
- ⑦ 色は景観的な効果を考える上で重要な要素である。周辺環境にマッチした色をもっと使うべきである。

このガイドラインは明確な基準として存在するのではなく，根底には常に個人の自由が存在する。模型を使って橋梁フォルムを分析する場合や，批判的に橋梁デザインを見る場合には有効である。この景観委員会によるガイドラインの作成という提案に対して，いち早く対応したのが，日本の土木学界であり，1982年の「美しい橋のデザインマニュアル」が出版されている。

4.9 アウトバーンの技術と思想が日本にもたらしたもの

終戦後，日本初の名神高速道路の建設にあたって 1958 年に来日したドイツのクサヘル・ドルシュ氏からアウトバーンの線形計画，景観設計について指導を受けた。アウトバーンの技術を集大成したハンス・ローレンツ博士（Hans Lorenz）を慕い，ドイツよりも更に美しい日本の風土に，その技術を活かしたいと考えた。この総合的な道路技術を扱った著書「道路の線形と環境設計」¹²⁾は 1978 年に出版され，その邦訳を提案されたのが日本の景観設計の提唱者である中村良夫であり，訳者には中村英夫，道路公団で美しい橋梁を手掛けた田村幸久，埼玉大学で景観設計の指導に当る窪田陽一等が名を連ねている。橋梁景

観については、1993年に篠原修を中心として土木構造物のデザインの向上を目的とする研究会が産官学の有志によって組織され、田村幸久、三ッ木幸子等によってレオンハルトの橋梁景観論に関する邦訳、「ブリュッケン」が1998年に出版された。これらの名著の邦訳によって、アウトバーンで培われた技術と英知を理解し、その考え方に共鳴する若きエンジニア達が育成されてきたといえる。2005年、良好な景観の形成を基本理念とする景観法が成立した背景には、中村良夫、篠原修をはじめとするドイツの初期アウトバーンの設計思想を理解し、風景に融合する土木構造物の実現に貢献したエンジニア・アーキテクト達による啓蒙と実践があったといえる。

4.10 おわりに

ドイツのアウトバーンを走って感じることは、70年経った現在においても風景に融合した土木構造物の建設というトットのコンセプトが完全に継承されており、環境をつくるという行為に対して、社会的な関心が高く、それを無視するものは土木技術者にあらずという社会通念が確立されていることである。風景に融合した土木構造物のデザインは、そのデザインを提案するエンジニア、建築家、造園家の協力だけではなく、発注者側にもそれを評価し、実現するシステムが存在することが前提条件となっている。橋梁デザインに関する専門家から見たポイントはこれで揃ったことになるが、専門家が橋梁デザインについて感じるごとと、一般生活者が感じるごとの違いがあるのか、という点が明らかにされていないため、第5章において、一般生活者の橋梁デザインに関する印象と専門家の印象が異なるものかどうかについて整理する。

参考文献・注釈

注1) 文献1), p28 Autobahn Chronology.

注2) 文献1), p13. 論文タイトルは、“Die Fehlerquellen beim bauen von Landstraßen

decken aus Teer und Asphalt.

注3) 文献2), p53 - p72 , レオンハルトの自伝の中で1933年～1936年の4年間に勤務したアウトバーン建設局での内容が紹介されている.

注4) 文献3), p828.

注5) 文献2), p308.

注6) 文献2), p308.

注7) 文献4), 表紙裏.

注8) 文献5), p105 Bild 5.

注9) 文献4), p136.

注10) 文献4), p259.

注11) 文献6), 表紙

注12) 文献6), p85-p91.

注13) 文献8), p114. 文献6) にオリジナルとして同様な説明が掲載されているが, 文献8) は, 文献6) の一部を継承しているために文献8) から抜粋した.

注14) 文献9).

注15) 文献10), p12 - p25.

注16) 文献10), p12.

注17) 文献13), p325.

注18) 文献13), p325.

- 1) Blaine Taylor, Hitler's Engineers, CASEMATE, 2010
- 2) Leonhardt F., Baumeister in einer umwaelzender Zeit, DVA, 1984
- 3) Fliedlich Tamms, Überführung über Autobahn, Die Strasse, Jg.2, H.23, 1935
- 4) BRÜCKEN, 田村幸久監訳, メイセイ出版, 1997