

欧州における鉄筋コンクリート技術の歴史的変遷*

—欧州初の鉄筋コンクリート指針成立過程に関する考察—

The historical development of the rein-forced concrete bridges in Europe
- a study on the establishment of “the first European guide” for rein-forced concrete -

鈴木圭**・山下真樹***

By Kei SUZUKI, Maki YAMASHITA

Abstract

From the latter half of the 19th century to the beginning of the 20th in Europe, reinforced concrete, a new construction material was invented and prevailed rapidly in the society, where stone and steel was the dominant materials, through the intensive studies and the application to structures. This paper summarize the development of reinforced concrete bridges in Europe based on the design philosophy such as, Monier, Hennebique and Melan system. The first specification of reinforced concrete in Europe was established in Switzerland by 1903 was also investigated.

1. はじめに

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。そこで本論文は、彼らが学んだ技術の原点を理解するために、はじめに、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。全体を通して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。

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ブ(Hans Straub, 1895~1962)が名著「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。この著書が本研究の契機となったが、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~)が1984年、著書「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年にエルンスト&ゾーン社が出版した機関誌「Beton und Eisen」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家であるといえる。フランスでは、デルミュ(Gwenael Delhumeau)が著書「L'Invention du Béton Armé」(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。

本論文は、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発展を相関的に述べた点が第一の新しい点である。第二は、既往研究では十分ではなかったメラン工法の概説とオーストリアの鉄筋コ

* keywords : 鉄筋コンクリート、設計指針

**正会員 株式会社アバンアソシエツ

(〒150-0002 渋谷区渋谷 2-1-5)

***正会員 博(工) (〒156-0055 世田谷区舟橋 1-1-15)

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一般的な評価を考察した点が重要である。当時の鉄筋コンクリート橋のデザインを評価する上で、許容応力度のレベルが少なからず形や構造に影響を与えていたと考えるからである。許容曲げ圧縮応力度が低く抑えられるとスパンが制限され、スパンをさらに伸ばすためには、発生する応力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。1900～1910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。

本論文は①の期間について述べるものである。

2. 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-1)に、欧州における鉄筋コンクリートの開拓者と、その主な業績を特許取得を中心に示した。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1890年代にベルギー、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、さらに機関誌等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、鋼橋の架設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、事件のみを上げている。

(1) フランスにおける鉄筋コンクリートの萌芽

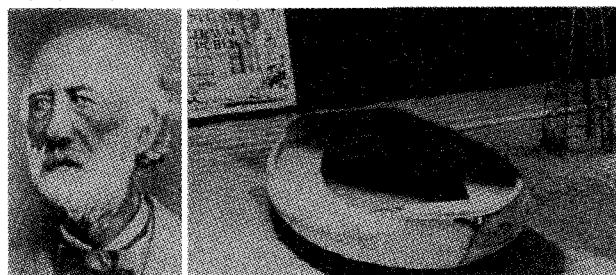


写真-1 ランボー¹⁰⁾ 写真-2 RC製のボート¹⁰⁾

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人のフランス人を挙げておかなければならない。この万博への出品が、鉄筋コンクリートを広く社会に認知させるきっかけとなった。1人はランボー(Joseph-Louis Lambot, 1814～1887)(写真-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)を製作し、フェロセメント(ferricement)船と名付けた^{注3)}。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年にセメントを鉄で補強する方法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4)}。

2人目はコンクリート構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5)}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6)}を明らかにした。また、コワニエの代表的な構造物は、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7)}。1873年に完成した全長1,450mのPont-sur-Yonne水道橋(写真-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8)}。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)¹³⁾の説明に述べられている。

表ー1 19世紀後半における鉄筋コンクリート技術の変遷 (鈴木作成)

国名	フランス	ドイツ	オーストリア	イギリス	アメリカ	スイス	日本		
人名	ランボー Joseph-Louis Lambot 1814~1887	コウニエ François Coignet 1814~1888	エヌビック François Hennebique 1842~1921	モニエ Joseph Monier 1823~1906	ケーネン Matthias Koenen 1849~1924	ワイス Gustaf Adolf Weiss 1872~1950	メルシユ Emile Moersch 1872~1950	メラン Joseph Melan 1853~1941	エンベルガー Fritz von Emmerger 1862~1942
1850	鉄筋コンクリート型 (RC製) 船を製作								
1851	橋脚とセメントの混合部材に関する特許								
1853	パリ万博でRC製船を展示								
1855	鉄筋コンクリート型 (RC製) 橋脚を製作								
1861	鉄筋コンクリート型 (RC製) 橋脚を製作								
1867	鉄筋コンクリート型 (RC製) 橋脚を製作								
1868	鉄筋コンクリート型 (RC製) 橋脚を製作								
1869	鉄筋コンクリート型 (RC製) 橋脚を製作								
1870	鉄筋コンクリート型 (RC製) 橋脚を製作								
写真2 ランボー-RC船 (1855)									
1873	Pont sur Yonneに1450mの水道橋を施工								
1875									
1876									
1877									
1878									
1879									
1880									
1882									
1884									
1885									
1886									
1887									
1888									
1889									
1890									
1892									
1893									
1894									
1895									
1896									
1897									
1898									
1899									
1900									
1901									
1902									
1903									
1904									
1905									
1906									
1907									
1908									
1909									
1910									
1911									
1912									
1913									
1914									

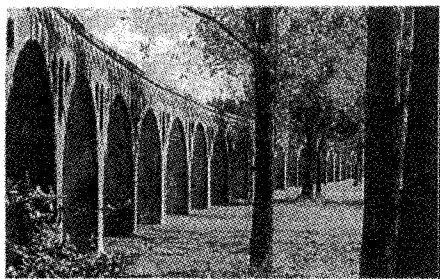


写真-3 Pont-Sur-Yonneの水道橋 (1873) 注9)

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発展のために役立てようと考えた。次に紹介するのは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・エヌピックである。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を特許として出願した(図-1)。セメントをワイヤーメッシュで補強した手法は、ランボア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、及び枕木であった。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、ランボアやコワニエから激しい異議申し立てがあ

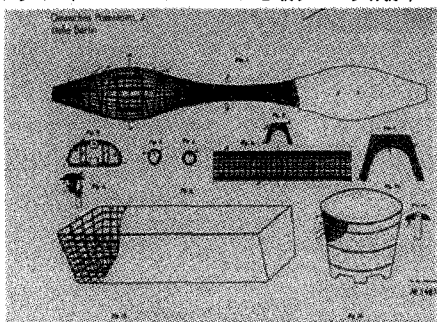


図-1 モニエの特許 (1867年) 注10)

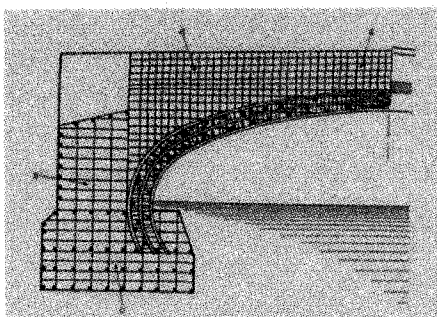


図-2 モニエ式橋梁の配筋法 (1873年) 注11)

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)。

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-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と考えられるが、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

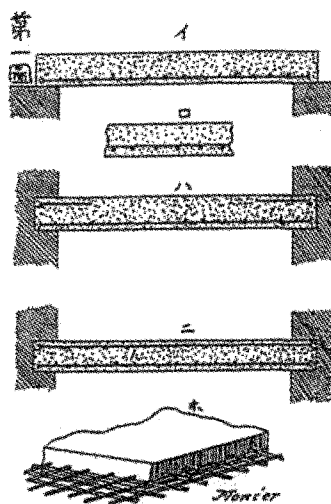


図-3 モニエ式平板の配筋図 (1878年) 注12)

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、モニエの功績は「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13) モニエ式の初の鉄筋コンクリート橋は、スパン16.5m、幅員4mの歩道橋で、1875年、フランスのシャズレ(Chazelet)にあるマルキ・テエール公園(Marquis Tiliere)に作られた(写真-4)。

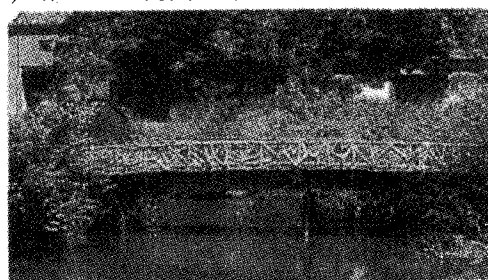


写真-4 Chazeletのモニエ橋 (1875年) 注14)

(3) ドイツにおける鉄筋コンクリートの展開

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

この時期、セメントモルタルを製造する社会体制はどのような状況であったのであろうか。例えば、ドイツでは1877年にドイツボ

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みという声明が出された^{注15)}。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であった(写真-5)。これはディビダーク社によって施工された。

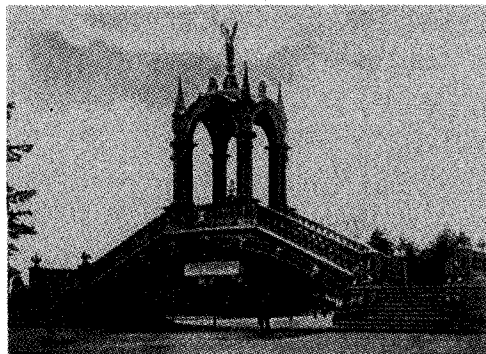


写真-5 ドイツ初の突固めコンクリート製歩道橋(1880) ^{注16)}

当時ドイツ国内のコンクリート施工業者には、ディビダーク社に對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「フライタークとハイドシュッパ社」(Freitag & Heischuch)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った^{注17)}。翌年、その権利をワイス(Gustaf Adolf Wyss)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(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

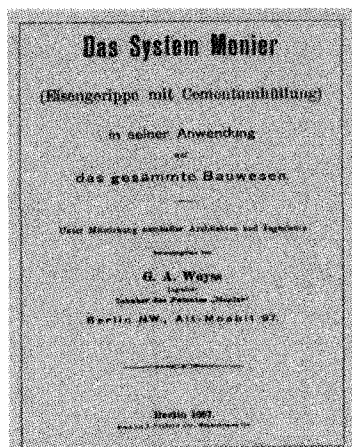


図-4 モニエシステムのパンフレットの表紙(1887年) ^{注18)}

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パウシンガー(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19)}

ケーネン自身、無筋のコンクリートに比べて3cm²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-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のグリューンバルト(Grünwald)橋である(写真-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。

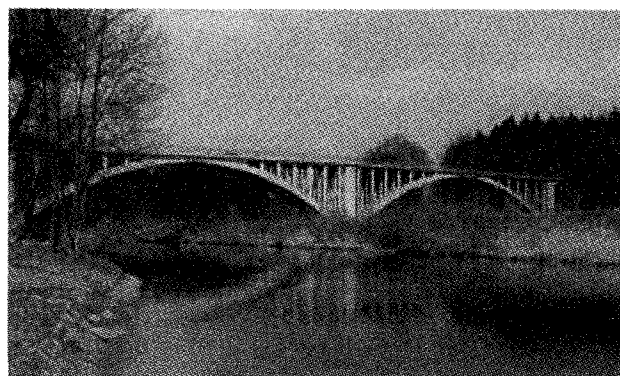


写真-6 Grünwald 橋(1904年)(撮影:鈴木圭,1990)

(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年当時の鉄筋とコンクリートを用いた建築床版構造の最先端は、コンクリート板をI型の鑄鉄製主桁の上に載せるか、またはI型の鑄鉄製主桁をアーチ状のコンクリート板で挟み込む形状であったため、鑄鉄とコンクリートが一体化した構造ではなかった。そのため鑄鉄が直接火事の影響を受ける危険性があった。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20)}。

エヌビックは耐火性能を上げるためには鉄筋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-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21)}、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

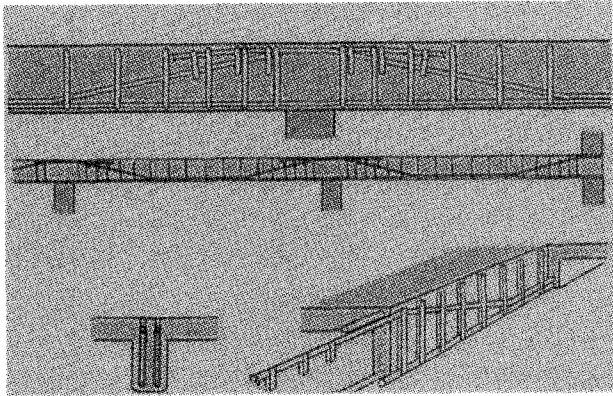


図-5 エヌビック式T型梁の配筋法 (1887年) ^{注22)}

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、鉄筋コンクリート建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の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 (Châtellault) 橋(写真-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。

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

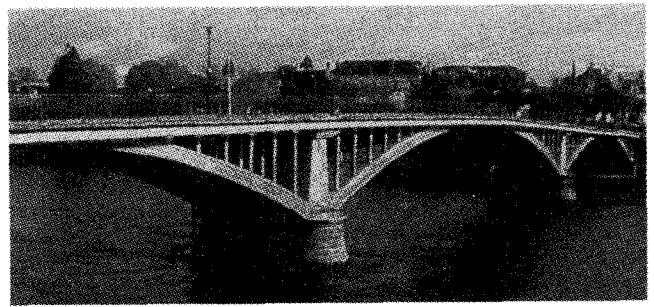


写真-7 Châtellault 橋 (1900年) ^{注23)} : Jacques Mossot 撮影

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24)}

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-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。

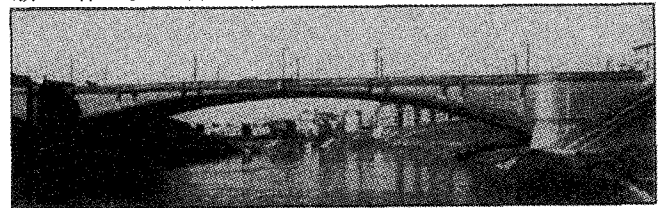


写真-8 Risorgimento 橋 (1911年) ^{注25)}

(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 Melan : 1853~1941) ^{注26)}

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と推測する。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た。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-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年にシュティール(Steyr)

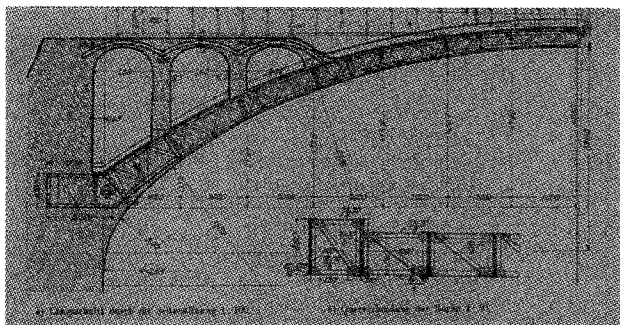


図-6 メラン式橋梁の配筋法 注27)

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-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×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ったが、施工中にクラウンが5cm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5cm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。

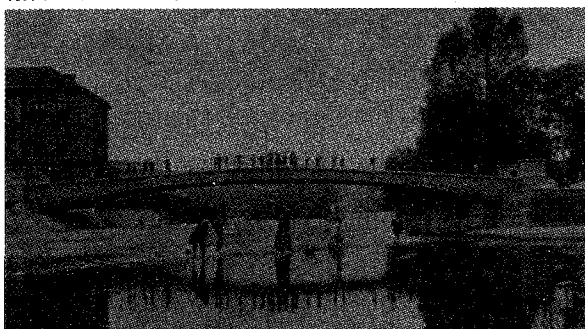


写真-9 Schwimmerschul 橋 (1898年) 注28)

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)によって、1913年にメラン著「アーチと吊り橋の理論」²⁷⁾が、また、1915年には「鉄筋コンクリート桁とアーチ」²⁸⁾が英訳された。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³¹⁾、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推察する。

3. エヌビック式設計法とモニエ式設計法の比較

(1) エヌビック式設計法¹²⁾

エヌビック式設計法に関する1次資料が手元にないため、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(Schweizerische Bauzeitung)に発表した「エネビック式設計法」の論文を参考にして、以下に示すエヌビック式設計法の特徴をまとめた¹⁹⁾。

- 1) コンクリートの引張り応力を無視する。
- 2) 等分布荷重 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/cm²、鉄筋の許容引張り応力度を1000 kg/cm²と設定した。
- 4) 梁に作用する曲げモーメントの2分の1 ($1/2 M_{max}$) 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 $\Phi 14$ mmの鉄筋のかぶりを2cm(純かぶり13mm)としている。

エネビック式設計法は、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ヌビック式設計法を(図-7)に示す。

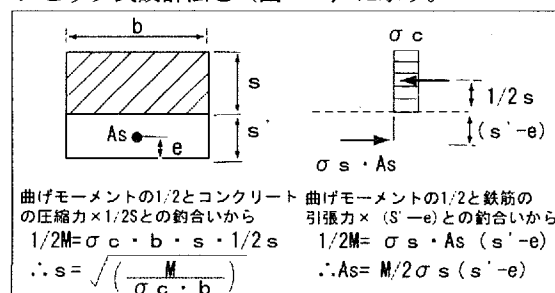


図-7 エヌビック式設計法(文献19)より鈴木圭作成)

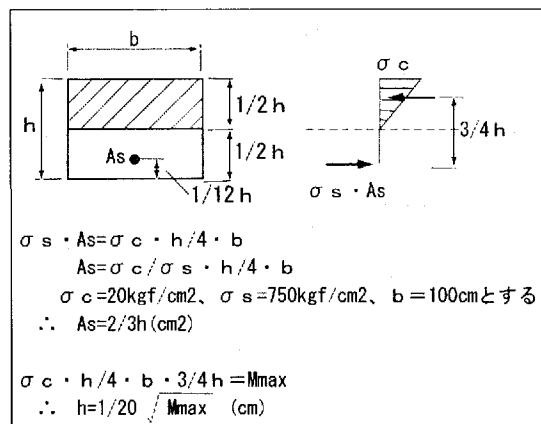
(2) モニエ式設計法¹¹⁾

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 kg/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 ($1/12 h$)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－8）に示す。

実際に幅20cm、スパン1＝1.2mの単純支持の梁に荷重強度1500kgf/m²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）に示す。エヌビック式設計法は、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。つまり、同じ荷重条件の場合、エヌビック式は最も薄い板厚になるケースが多かったといえる。また、モニエ式にも共通している点はコンクリートのかぶりが高さが非常に小さかったため、施工不良によって鉄筋が露出するような可能性も高かったのではないかと考えられる。



図－8 モニエ式設計法（文献12）より鈴木圭作成

表－2 エヌビック式、モニエ式設計法の比較（鈴木圭作成）

	エヌビック式	モニエ式	現在の方法
必要鉄筋量	Φ14 -1本	Φ14-1本	Φ13-1本
梁高 (cm)	10.0 (d=8)	11.5 (d=10.5)	11.7 (d=9.5)
σ_c (kg/cm ²)	28	20	34
σ_s (“)	1020	734	889
許容 σ_c	25～30	20	40
許容 σ_s	1000	750	1400

さらにエヌビック式の最も大きな問題は、せん断力に対する影響を考慮しないという点であり、これがエヌビック式の建築の崩壊事故に繋がったと考えられる。

4. 欧州の鉄筋コンクリート指針案及び規準について

(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。

ドイツは、翌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」を公表し、1辺が20cm又は30cmの立方供試体を使った場合、設計基準強度は $\sigma_{ck}28=150 \text{ kgf/cm}^2$ (28日強度) 以上かつ $\sigma_{ck}45=180 \text{ kgf/cm}^2$ (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、かつ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年の指針案におけるコンクリート許容応力度を（表－3）に示す。

表－3 ドイツにおけるコンクリート許容応力度^{注29)}
（鈴木圭作成）

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
	複数階建築最上階の柱	25
	同 上 次階の柱	30
	同 上 各階の柱	35
	橋梁の梁	30
湾曲及び偏心力	静荷重を有する建築物	40
	ラーメン構造及びアーチ構造	40
	床版及び衝撃を受ける部材など	35
	市街に架かる橋梁	40
	同上の衝撃を受ける部材	35
	鉄道橋	30
せん断力		4
付着力		4.5

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、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の明確化のための必要事項の取りまとめ、であった。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規準を参照にし、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小委員会の活動は、主として2種類の実験的プログラムに集約される。一方は、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) に関するものであり、他方は、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、1906年10月20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－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。エネビックは自らの特許防衛については、法廷に訴えることによって厳しく臨んでいたことから、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

表-4 フランスにおけるコンクリート許容応力度^{注30)} (鈴木圭作成)

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	緊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		$0.028f_c'$

技術者が新しい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・ボン・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等との交流を避けていたためであると考えられる。イギリスで1897年にエヌビック式の代理店契約を結んだLGムーシェ (Louis Gustave Mouchel, 1852～1908) 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、王立関連の会社や海軍、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、エンベ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年の規準に影響を受けた」^{注31)}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いないと、指針案であったのではないかと推察する。これは今後調査したいと考えている。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-5) に示す。

表-5 オーストリア鉄道管理局のコンクリート及び鉄筋の許容応力度^{注32)} (鈴木圭作成)

1906年には、鉄道構造物に関する鉄筋コンクリート規準が、ド

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
	$2m \leq L \leq 5m$	30
	$5m \leq L$	25
コンクリートのせん断力	共通	4.5
鉄筋の応力	Lに依存	$(750+4 \times L)$
鉄筋のせん断応力	共通	600

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。

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-Verein) であり1903年3月25日であった^{注33)}。スイス初の鉄筋コンクリート指針の許容応力度を (表-5) 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加味して、許容応力度を規定していることが分かる。これは、前章で述べたように、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

表-5 スイスにおけるコンクリート許容応力度^{注34)} (鈴木圭作成)

応力の種類	条 件	許容応力度(kgf/cm ²)
圧縮力		$\sigma_d = 36$
	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倍以上の場合には左式で求める	$\sigma_k = 36/(1+0.0001(l/i))$
引張力	鉄筋が破断しない場合	$\sigma_z = 1$
	鉄筋が存在する場合	$\sigma_e = 1400 - 5\sigma_z$
せん断力	鉄筋が破断しない場合	$\tau_b = 4$
	せん断面に鉄筋が存在する場合	$\tau_b = 800 * \tau_b / (\tau_b + 4)$
付着力		$\sigma_{be} = 10$

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材料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3国における鉄筋コンクリートの研究者達が、1902年にエンベ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」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えられる。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そろっていなかった。1904年に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ことになる。

(2) スイスにおける指針案成立の背景

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関して考察する。

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-9) にまとめた。

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35)}。続く大規模な事故は、1901年、バーゼルにおいてエヌビック式鉄筋コンクリートを使った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章で述べたようにせん断破壊が第一の原因でなかったかと推察する。せん断補強筋を無視するというエヌビック式設計法の欠陥により、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すことになる。1903年のスイス指針案では、

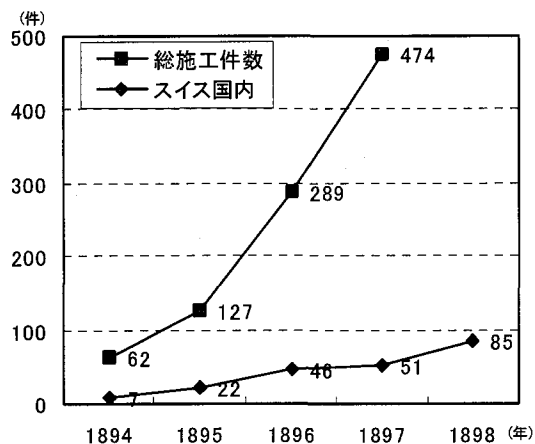


図-9 エヌビック方式による施工件数の推移^{注36)} (鈴木圭作成)

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対する荷重載荷試験の実施を規定した。特に、施工者に関する規定においては、鉄筋コンクリートの基本的な理論及び応用を理解し、施工経験を有する者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い、鉄筋コンクリートの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品質施工の実施、第三に荷重載荷試験による構造物が完成した後の安全性の検証を義務付けることであったと考える。

この事件がきっかけとなり、チューリッヒ工科大学の解析学の教授であり、マイヤールの恩師でもあるリッター(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スイス全州に報告され、1902年9月、同協会の中央委員会は、各州のエンジニア建築家協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37)}

- 1) シュレー(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を募集する。
- 2) 鉄筋コンクリート構造物に関して得られた知見及び成果、又は現在問題となっている事例に関する提案。

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.Pflegel)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 $\sigma_d = 36 \text{ kgf/cm}^2$ であり、この値と1991(平成3)年の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($f_{ck} = 180 \text{ kgf/cm}^2$)の許容曲げ圧縮応力度である $\sigma_{ca} = 70 \text{ kgf/cm}^2$ と比較すると、かなり保守的な値であったといえる。

その第一の原因としてコンクリート強度を決定する要素が十分解明されなかったため、許容圧縮応力度を低く設定しなければならなかったことがひとつの原因であると考えられる。第二の原因として、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関係する状況の中で、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には根拠が不明であると記されている。実は、規定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、リッター自身の考えでは $35 \sim 40 \text{ kgf/cm}^2$ が適当と考えるという意見を述べていることから^{注39)}、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技術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 $300 \sim 400 \text{ kgf/cm}^2$ の鉄筋コンクリートを現場で製作していた。マイヤールにすれば、上記の発言は現場を見ずに室内実験結果を唯一とする研究者や大学の権威者達に対する挑戦でもあった。これはエヌビックの気質にも通じるところがある。逆に、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。

5. 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」¹⁾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 20 kgf/cm^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 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。これらの規定値は、モニエ式の示す 20 kgf/cm^2 とエヌビック式の示す $25 \sim 20 \text{ kgf/cm}^2$ に近いことから、その影響が推察される。

廣井は1887年～1888年にドイツのカールスルーエ大学とシュツットガルト大学を訪問している。1888年にアメリカ滯

在中に執筆した「Plate-girder Construction」を出版したことから、鋼橋の設計に関心があつた。カールスルーエ大学では、1885年から橋梁工学や力学の教授であつたエンゲッサー（Friedrich Engesser, 1848～1931）教授のもとで、鋼橋の設計理論や2次応力の問題を1年間学び³⁴⁾、シュツットガルト工科大学では、1879年から材料試験場の所長であり、ドイツの弾性学や強度理論の権威であつたバッハ（Carl Bach, 1847～1931）教授のもとで弾性設計法を学んだものと推察する。鉄筋コンクリートについては、1887年にモニエ式のパンフレットが出版され、廣井はこれを入手したものと推察する。

1916（大正5）年に「鉄筋混凝土の理論と応用」³⁵⁾を上梓した日比忠彦は、1902～1904年までにベルリン工科大学に留学している。ベルリン工科大学では1904年に鉄筋コンクリート講座が設置されたが、当時の技術情報の収集には、「Beton & Eisen」が役立ったと推察する。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「鉄筋混凝土工学」^{2), 3)}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 (35 kgf/cm²)^{注41)}、10% 以下のケースでは 600 封度/吋² (42 kgf/cm²) であることを紹介した^{注42)}。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であり、メラン式コンクリートアーチ橋である外濠アーチ橋の設計者として知られている⁴⁾。これは、アメリカ留学中にメラン式橋梁の英語訳に接したことが、その契機となったと推察する。

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「混凝土及鉄筋混凝土」^{5), 6)}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 $f_{ck} > 150 \text{ kg/cm}^2$ の条件下で許容圧縮応力度が 35 kg/cm^2 」^{注43)}と紹介した。さらに内務技師であつた内村三郎は、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」⁷⁾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。

6. おわりに

本論文では、欧州における鉄筋コンクリート技術の歴史的変遷をフランス、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) 2 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、プロシャの内務技師であつたケーネンの協力を得て、官学民による研究体制を構築し、鉄筋コンクリート技術が理論的に体系された。オーストリアでは、従来の鉄筋コンクリート橋架設に必要であつた支保工を省略するため、鋼製アーチ部材を型枠支持材として利用し、同時に鋼製アーチも補

強材として利用するメラン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3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板厚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物の崩壊事故の原因であることを推察した。

3) 第4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、せん断力に関する規定が設けられたことが、設計上重要な点である。フランスの規定制定が遅れた理由として、エヌビックの特許有効期間が影響したこと、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、積極的な情報交流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品質施工を実施すること、第三に、荷重載荷実験によって構造物が完成した後の安全性の検証が求められていたことを指摘した。

4) 第5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、日比忠彦は機関誌「Beton & Eisen」に接して当時の鉄筋コンクリートに関する最新の情報を入手した可能性を指摘した。阿部美樹志はアメリカにおいてメラン式工法の英訳版に触れたことが、外濠アーチ橋の設計の契機となったと考える。

19 世紀後半、新材料であつ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協同研究体制の確立、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、発表するメディアの存在であつたと考える。この点でドイツ、スイス、オーストリアは、発想の点ではフランスに遅れをとったものの、設計理論の確立と、構造物の健全性の評価及び情報の公開において、フランスに勝つたといえる。

今後の課題

今後は、それぞれの設計法にまでさかのぼり、その工学的結果と橋梁フォルムの関係を調査するとともに、20 世紀初頭、このように厳しい基準を遵守しながらデザイン的、構造的にも美しい橋梁を生み出した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）の作品研究を実施する予定である。

補注

注1) 文献29)、P66より抜粋。

注2) 文献30)、P14より抜粋。

注3) 文献8)、P1より抜粋。

注4) 文献9)より抜粋

- 注5) 文献11)、P6より抜粋。本論分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6) 文献11)、P6より抜粋。
- 注7) 文献12)、P59より抜粋。
- 注8) 文献12)、P60より抜粋。
- 注9) 文献12)、P60より抜粋。
- 注10) 文献14)、P78より抜粋。
- 注11) 文献15)、P113より抜粋。
- 注12) 文献1)、P302より抜粋。
- 注13) 文献11)、P7より抜粋。
- 注14) 文献12)、P62より抜粋。
- 注15) 文献16)、P92より抜粋。
- 注16) 文献15)、P109より抜粋。
- 注17) 文献11)、P7より抜粋。
- 注18) 文献15)、P114より抜粋。
- 注19) 文献17)、P44より抜粋。
- 注20) 文献18)、P86～P95より抜粋。エヌビックに関する記述は本論分によるところが大きい。
- 注21) 文献19)、P41より抜粋。本文文献はエヌビック式設計法の誤りを指摘した初めての論文であり、スイスの鉄筋コンクリート設計手法の基礎となった。
- 注22) 文献18)、P87より抜粋。
- 注23) 文献21)より抜粋。
- 注24) 文献20)、P226より抜粋。
- 注25) 文献15)、P122より抜粋。
- 注26) 文献23)、P7～P14より抜粋。メランの生涯については本文文献によるところが大きい。
- 注27) 文献22)、P296より抜粋。
- 注28) 文献22)、P304より抜粋。
- 注29) 文献25)、P1～P58より抜粋。
- 注30) 文献26)、P29-P100より抜粋。
- 注31) 文献33)、P249より抜粋。
- 注32) 文献32)、P20より抜粋。
- 注33) 文献24)、P139～P140より抜粋。
- 注34) 文献24)、P140より抜粋。
- 注35) 文献24)、P139より抜粋。
- 注36) 文献19)、1899年2月4日発行のSBZ、P41より抜粋。
- 注37) 文献24)、P159より抜粋。
- 注38) 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を引用した。
- 注39) 文献19)、1899年2月11日発行のSBZ、P50より抜粋。
- 注40) 文献34)、P137より抜粋
- 注41) 封度/吋²は、ポンド/インチ²である。
- 注42) 文献3)、P100より抜粋。
- 注43) 文献6)、P130～133より抜粋。

参考文献

- 1) 広井勇：鉄筋混凝土橋梁、『工学会誌』第253号、1903年6月。
- 2) 阿部美樹志：『鉄筋混凝土工学』初版、丸善、1916年。
- 3) 阿部美樹志：『鉄筋混凝土工学』第15版、丸善、1925。
- 4) 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。
- 5) 宮本武之輔：『混凝土及鉄筋混凝土』初版、日本工人倶楽部出版部、1926(昭和1)年。
- 6) 宮本武之輔：『混凝土及鉄筋混凝土』第5版、日本工人倶楽部出版部、1928(昭和3)年。
- 7) 内村三郎：『鉄筋混凝土』、東京良書普及会、1928(昭和3)年
- 8) Curbach.M: 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」。
- 9) Joseph-Louis Lambot, 『Internatinal Database and Gallery of Structures』
<http://www.strucurac.de> .
- 10) la Barque de Lambot, Galerie photo des maquettes de l'ancien Musée.
- 11) Kurrer.K: Zur Fruegeschichte des Stahl-betonbaus in Deutschland – 100 Jare Monier-Broschuere, 『Beton und Stahlbetonbau』, Wilhelm Ernst & Sohn Verlag GmbH, H.1. 1999.
- 12) Stiglat.K.: Erste Brücken aus Beton, Zur Geschichte des Stahlbetonbaus- Die Anfänge in Deutschland 1850 bis 1910, 『Beton und Stahlbetonbau』, Ernst & Sohn Verlag, Spezial (Sonder Heft) 1999.
- 13) Hyatt.T, United States Patent No.206112, july 16, 1878.
- 14) Ricken.H.: 『Der Bauingenieur als Geschichte eines Berufes』, Verlag für Bauwesen, 1994.
- 15) Wittfoht.H: 『Building Bridges』, Beton-Verlag, 1984.
- 16) Kurrer.K: Stahl+Beton=Stahlbeton? Stahl+Beton=Stahlbeton!, 『Beton und Stahlbetonbau 92』 H1, 1997.
- 17) Kurrer.K: Zur Entwicklung der deuchen-sprachigen Fachliterature auf dem Gebiet des Stahlbetonbaue bis 1920, 『Beton und Stahlbetonbau』, Ernst & Sohn Verlag, Spezial (Sonder Heft) 1999.
- 18) McBeth.: François Hennebique (1842～1921) reinforced concrete pioneer, 『Civil Engineering』, May, 1998.
- 19) Ritter.W: Die Bauweise Hennebique, 『Schweizerische Bauzeitung』 Feb, 4th, Feb.11th 1899.
- 20) Maillart.R: Das Hennebique-System und seine Anwendung 『Schweizerische Bauzeitung』 Mar.25th, 1901.
- 21) Hennebique.F: 『Internatinal Database and Gallery of Structures』
<http://www.strucurac.de>.
- 22) Melan.J: 『Der Brücken』 II.Band, Franz Deuticke, 1924.
- 23) Nowak: Joseph Melan, 『Joseph Melan』 zum 70ten Geburstag, Frank Deuticke, 1923.
- 24) Züricher Ingeniur- und Architekten Verein: Entwurf für eine provisorische Norm, 『Schweizerische Bauzeitung』 Apr.4th 1903.
- 25) Bertarm, Borenemann et.al.: Die Geschichte des Deutschen Ausschuss für Stahlbetonbau, 『Deutscher Ausschuss für Stahlbetonbau』, Heft333, Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, 1982.
- 26) Gwenaél Delhumeau: l'invention du béton armé Hennebique 1890-1914., IFApp., "le system Hennebique.
- 27) Steiman: 『Theory of arches and susupension Bridge』, John Willy & Sons, Inc.

1913.

- 28) Steiman.D:『Plain and reinforced concrete arches』,John Willy & Sons,Inc. 1915.
- 29) Schöne.L: Kuppelschale und Rippenkuppel Zur Entwicklung von zwei frühen Eisenbeton-Konstruktionsarten , 『Beton und Stahlbetonbau』 , Ernst & Sohn Verlag, Spezial (Sonder Heft) 1999.
- 30) Menn.C: 『Prestressed Concrete Bridges』 ,Birkhäuser Verlag, 1986.
- 31) Billington.D: 『Robert Mallart's Bridges』 Princeton University Press, 1979.
- 32) Forester M. 『Balkenbruecken in Eisenbeton』 ,Verlag von Wilhelm Engelmann, 1908
- 33) 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
- 34) 高崎哲郎：『山に向かい目を挙ぐ』、鹿島出版会、2003 年
- 35) 日比忠彦：『鉄筋混凝土の理論と応用』、丸善株式会社、大正 8 年 4 月