

欧州における鉄筋コンクリート橋の歴史的変遷^{*1}

—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 change 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^{*2}、山下真樹^{*3}

By Kei SUZUKI, Maki YAMASHITA

概 要

19世紀後半から20世紀初頭にかけてのヨーロッパでは、これまで橋梁の建設材料として主流であった石や鋼に代わる新材料として、鉄筋コンクリートの開発及び利用が積極的に行われ、著しい発展を遂げた。本論文では、19世紀後半に普及した、モニエ式、エヌビック式、メラン式コンクリート橋の設計思想を踏まえ、当時のヨーロッパにおける鉄筋コンクリート橋の発展を概観する。また、1903年、スイスにおいてヨーロッパ初の鉄筋コンクリート設計指針が制定されたが、本小論の後半部において、鉄筋コンクリート指針が制定された背景についても考察する。

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、また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、材料力学を習得し、鉄筋コンクリート橋また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。本論文は、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設計思想を踏まえ、それぞれの代表的な橋梁を概観する。また、1903年、スイスにおいて欧州初の鉄筋コンクリート設計指針案が制定された背景について考察する。本研究は、明治から昭和初期にかけて欧州のコンクリート技術が日本に導入された経緯を研究するための導入であると同時に、20世紀前半、数々の斬新なコンクリートアーチ橋をデザイン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）の作品研究に関する導入として位置付けている。

2. 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「鉄筋混凝土橋梁」¹⁾を発表し、「欧米では普通の方法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、圧縮応力度は20kg/cm²を越えてはならないことを述べたが、これは当時工事に用いられたコンクリートの3ヶ月強度が120～300 kg/cm²の範囲にある中で、低強度の平均値を120 kg/cm²と設定し、その六分の1を許容圧縮応力度と定めた」ものである。この値と1991（平成3）年のコンクリート標準示方書^{註1)}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 kg/cm²）の許容曲げ圧縮応力度 $\sigma_{ca}=70$ kg/cm²と比較すると、かなり保守的な値であり経済的なコンクリート構造物の普及に歯止めをかけるよう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」^{2),3)}を上梓し、英語圏にお

*1 keywords：鉄筋コンクリート、設計指針

*2 正会員 鹿島建設株式会社 土木設計本部

*3 正会員 博(工) 同上
(〒107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30)

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 (35kg/cm²)^{註2)}、10%以下のケースでは600封度/吋² (42 kg/cm²) であることを紹介した^{註3)}。阿部は、我が国における黎明期の鉄筋コンクリート製鉄道高架橋の設計者として知られている⁴⁾。宮本武之輔は、1923 (大正12) 年～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」^{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 」^{註4)}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「鐵筋混凝土」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。

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。本表に示したように、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、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、イタリアにおいて普及した。また、19世紀終盤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。

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 (férricement) 船と名付けた^{註5)}。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年にセメントを鑄鉄で補強する方法に関する特許を取得し、1855

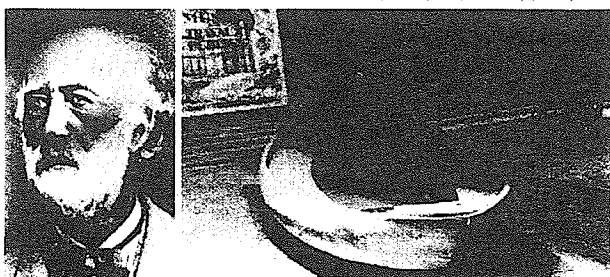


写真1 ランボー¹⁰⁾

写真2 RC製のボート¹⁰⁾

年の万博に船を出品して大成功を収めた^{註6)}。

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」^{註7)}と確信し、1861年に初めて出版した「Bétons agglomérés appliqués a 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」^{註8)}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2000mに及ぶコンクリート製の水道橋で、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^{註9)}。1873年にPont-sur-Yonneに完成した全長1450mの水道橋 (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^{註10)}。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。

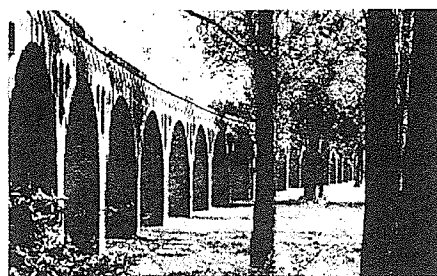


写真3 Pont-Sur-Yonneの水道橋 (1873) ^{註11)}

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.202,441) の説明に述べられている。

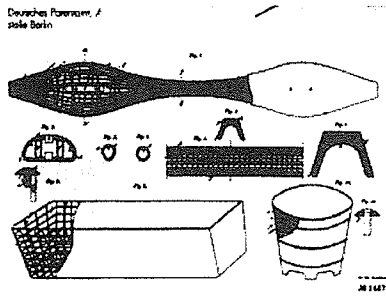
鉄筋コンクリートの発展に貢献したエンジニアは、この新材料の特性を社会のためにどのように役立てようと考えたのだろうか。次に紹介するのはそれぞれ異なる動機から出発し、ヨーロッパの鉄筋コンクリート発展の礎を築いた2人のフランス人と、彼等の発明を基に鉄筋コンクリートの工学的発展に寄与する1人のドイツ人である。フランス人の一人は菜園経営者であったジョゼフ・モニエで、一人は教会の修復工事を主な仕事としていた建築家のフランソワ・エヌビックである。そしてドイツ人は、プロイセンの内務技師として建築の設計監理をしていたマティアス・ケーネンである。

(1) ジョゼフ・モニエ (Joseph Monier : 1823～1906)

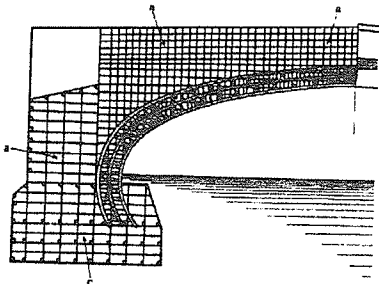
菜園経営者であったモニエは1867年にコンクリートの中に鉄網をいれて、植木鉢や枕木を造るアイデアを特許として出願した (図1)。セメントをワイヤーメッシュで補強した手法は、ランボーの船と同じ発想であり、対象を変えたにすぎない。モニエはパリ万博でランボーの船を見て、鉄筋コンクリートを菜園経営のビジネスに、そして、これから地方で発展する鉄道建設において応用することを

表一 1 19世紀後半における鉄筋コンクリート工法の変遷

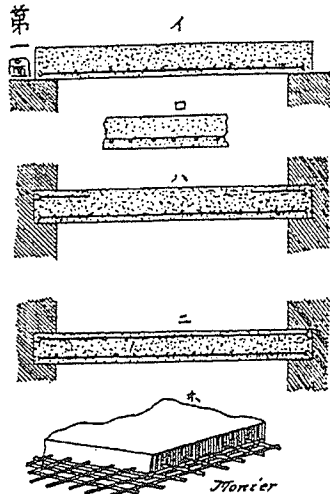
西名	ランボー	コウニエ	フランス	モニエ	ケーネン	ドイツ	メルシュ	メラン	オーストリア	イギリス	アメリカ	スイス	日本
人名	Joseph-Louis Lambot 1814~1887	François Coignet 1814~1888	François Hennebique 1842~1921	Joseph Monier 1823~1906	Matthias Koenen 1849~1924	Gustaf Adolf Mays 1872~1950	Eniel Moersch 1872~1950	Joseph Melan 1853~1941	Fritz von Eninger 1882~1942		Taddeus Hyatt 1817~1901	マイヤール Robert Maillart 1872~1940	
1850	鉄筋コンクリート製 (RC製) 船を製作												
1851	橋梁とセメントの混合材料に関する特許												
1853	パリ万博でRC製船を展示												
1855	パリ万博でRC製船を展示 4. 辺を鉄筋で補強したコンクリート板の特許取得 コンクリート中の鉄筋が引張力を分担することを発表 - RC部材の構造物への応用 - を発表 Société centrale des Batiments Mécaniques社設立												
1861													
1867													
1868													
1869													
1870													
1871													
1873													
1875													
1876													
1877													
1878													
1879													
1880													
1881													
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													



図一 モニエの特許 (1867 年) 註¹²⁾



図二 モニエ式橋梁の配筋法 (1873 年) 註¹³⁾

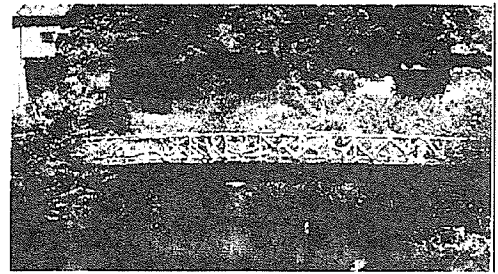


図三 モニエ式平板の配筋図 (1878 年) 註¹⁴⁾

考え、それを特許として請願した。それが植木ばち、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、ランボーやコワニエ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 年から 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 (図二)。

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 (図三) 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

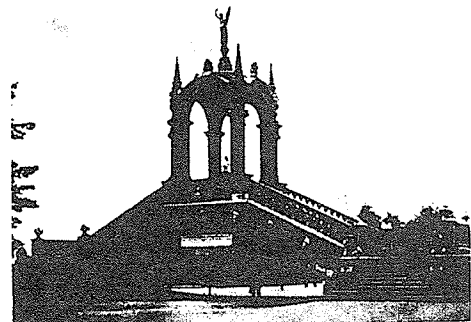
十分な知識を持っていなかったことを示している。モニエ式鉄筋コンクリート構造物のデザイン的な特徴は、水タンクの柱や橋の高欄に使われた擬木に見られるように、鉄筋コンクリートを装飾的に使うことであり、工学的な観点から鉄筋コンクリートを発展させることにはあまり関心がなかったといえる。しかし、モニエの功績は「強い意志と実利的な視点に立って、その後の鉄筋コンクリート発展の礎を築いたことである。」^{註¹⁵⁾} モニエ式の初の鉄筋コンクリート橋は、スパン 16.5m、幅員 4m の歩道橋で、1875 年、フランスのシャズレ(Chazelet)にあるマルキ・テリエール公園(Marquis Tilier)に作られた (写真一4)。



写真一4 Chazelet のモニエ橋 (1875 年) 註¹⁶⁾

(2) マティアス・ケーネン (Matthias Koenen : 1949~1924)

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^{註¹⁷⁾}。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 (写真一5)。これはディビダーク社によって施工された。



写真一5 ドイツ初の突固めコンクリート製歩道橋 (1880) 註¹⁸⁾

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「フライタークとハイドシュッフ社」(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る^{註¹⁹⁾}。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(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年から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。^{註20)}

ケーネン自身、無筋のコンクリートに比べて 3cm^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-4)、10000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、

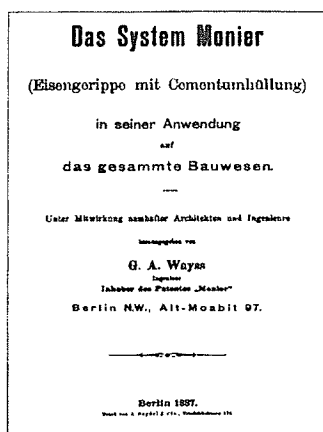


図-4 モニエシステムのパンフレットの表紙(1887年)^{註21)}

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1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のグリーンワルト(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。

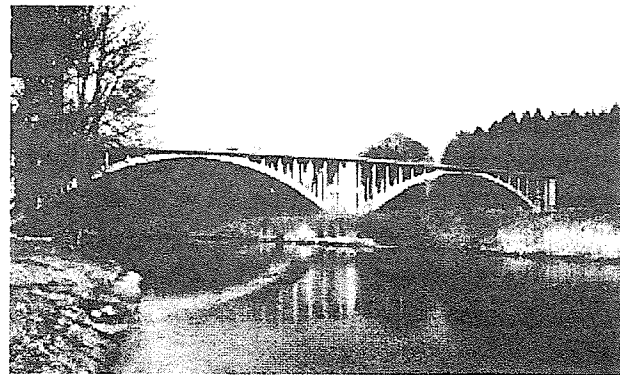


写真-6 Grünwald 橋(1904年)

(3) 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^{註22)}。

エヌビックは耐火性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-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^{註23)}、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。

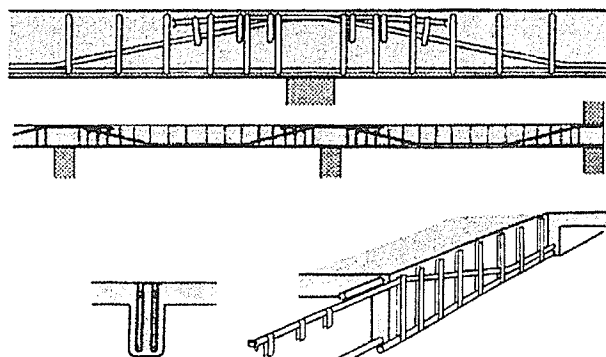


図-5 エヌビック式T型梁の配筋法(1887年)^{註24)}

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35000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3600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（Châtellerault）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。

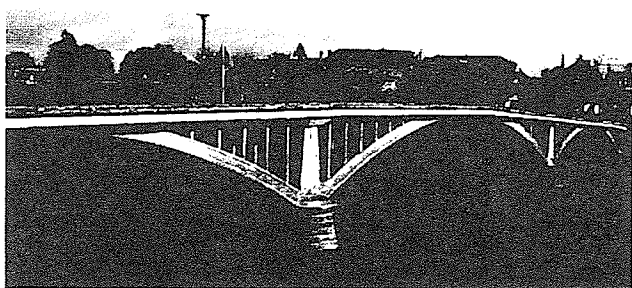


写真-7 Châtellerault 橋(1900年)^{註25)} : Jacques Mossot 撮影

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」^{註26)}

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、下フランジの下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

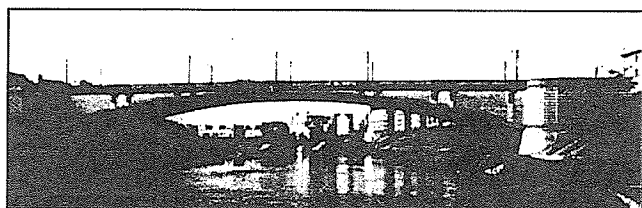


写真-8 Risorgimento 橋(1911年)^{註27)}

版が一体となって荷重に抵抗する箱桁構造であった。

(4) ジョセフ・メラン（Joseph Moelin : 1853～1941）^{註28)}

メランは1853年ウィーンに生まれた。1869年から1874年の6年間ウィーン工科大学で学んだ後、1874年から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る。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。

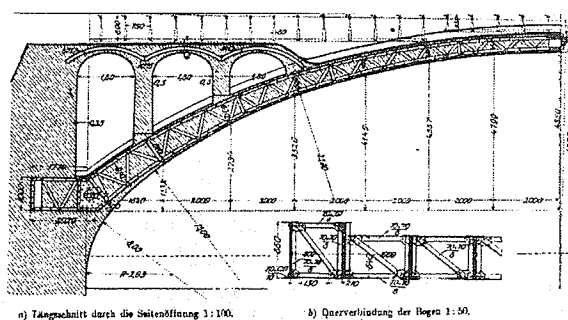


図-6 メラン式橋梁の配筋法^{註29)}

メラン式で代表的な橋梁は、1898年にシュティール（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-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、四分の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55cm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

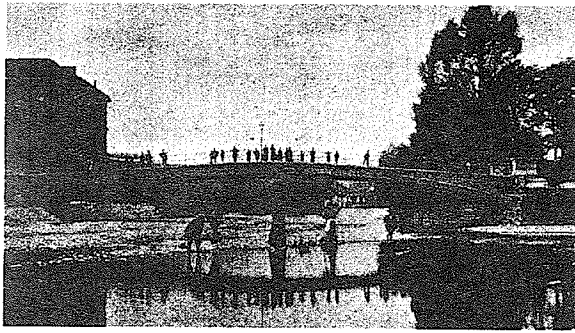


写真-9 Schwimmschul 橋 (1898 年) 註30)

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 460kg/cm^2 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り、1909年から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^{註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は想像に難くない。

4. 欧州の鉄筋コンクリート指針について

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^{註32)}。では何故スイスにおいて初めて鉄筋コンクリート指針が制定されたのであろうか？ 本章では、スイスにおいて鉄筋コンクリート指針が制定された背景とドイツ、フランスにおける指針制定に関して考察する。

(1) スイスの場合

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-7) にまとめた。これによると、1894年~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

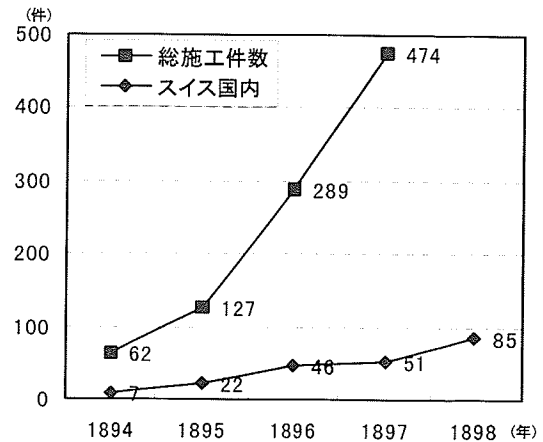


図-7 エネビック方式による施工件数の推移^{註33)}

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、構造はスパン3m、床版厚12cmの床が崩壊した^{註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。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、スイスエンジニア・建築家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。^{註34)}

- 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」で、一般的な条件に関する提案。
- 2) 鉄筋コンクリート構造物に関して該当する成果、また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暫定的な指針 (案)」を「特別規定」と併せて提出した。スイス初の鉄筋コンクリート指針の許容応力度を (表-2) に示す。

表-2 スイスにおけるコンクリート許容応力度^{註35)}

	条 件	許容応力度(kg/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	$\sigma_c = 1400 - 5 \sigma_z$
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		$\sigma_{bc} = 10$

これによれば、コンクリートの許容圧縮強度は $\sigma_d = 36 \text{ kg/cm}^2$ であり、かなり低く抑えられていることが分かる。何故、これほどまでに低く制限されていたのだろうか？ そ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、許容圧縮強度を低く設定しなければならなかったことは1つの原因である。一方、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「エンネ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 $35 \sim 40 \text{ kg/cm}^2$ が適当と考えるという意見を述べている。^{註36)} これがその根拠であったと推測する。いづれにしても、この値は経済的な鉄筋コンクリート構造物を設計し、石橋や鋼橋に対抗できる橋梁を設計しようという意欲に燃える、新進気鋭なエンジニアを落胆させることになる。

(2) ドイツの場合

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」を制定し、1辺が20cm または30cm の立方供試体を使った設計基準強度 $\sigma_{ck28} = 150 \text{ kg/cm}^2$ 以上かつ $\sigma_{ck45} = 180 \text{ kg/cm}^2$ 以上と設定した。ドイツでは1904年～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-3)に示す。

表-3 ドイツにおけるコンクリート許容応力度^{註37)}

応力の種類	部材の種類	許容応力度 (kg/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

(3) フランスの場合

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(Loricur)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た。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年いっぱい行われた。委員会が自身で行った実験データや諸外国(たとえば、シュトゥツガルトでバッハ(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基準が制定された。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)。

表-4 フランスにおけるコンクリート許容応力度^{註38)}

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		$0.028f_c'$

5. おわりに

本論文では、欧州における鉄筋コンクリート橋の歴史的変遷を見ながら、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橋の設計思想を概観し、それらの工法の特徴を整理した。さらに、欧州初の鉄筋コンクリート指針がスイスにおいて制定されたが、それはバーゼルで発生したエネビック式建物の崩壊事故がきっかけであった。スイスにおける指針制定は、鉄筋コンクリート構造物を普及させるという意図からではなく、安全性重視を第一と考えた結果であったといえる。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の中でデザイン的、構造的にも美しい橋梁が生み出されていく背景に焦点を当ててみたいと考えている。また、欧米に留学した日本人技術者がそれぞれの国で、誰に会い、どのような影響を受けたのかについても調査していきたいと考えている。

【補註】

註1) 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。

註2) 封度/吋²は、ポンド/フィート²である。

註3) 文献3)、P100より抜粋。

註4) 文献6)、P130～133より抜粋。

- 註5) 文献8)、P1より抜粋。
- 註6) 文献9)より抜粋。
- 註7) 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。
- 註8) 文献11)、P6より抜粋。
- 註9) 文献12)、P59より抜粋。
- 註10) 文献12)、P60より抜粋。
- 註11) 文献12)、P60より抜粋。
- 註12) 文献14)、P78より抜粋。
- 註13) 文献15)、P113より抜粋。
- 註14) 文献1)、P302より抜粋。
- 註15) 文献11)、P7より抜粋。
- 註16) 文献12)、P62より抜粋。
- 註17) 文献16)、P92より抜粋。
- 註18) 文献15)、P109より抜粋。
- 註19) 文献11)、P7より抜粋。
- 註20) 文献15)、P114より抜粋。
- 註21) 文献17)、P44より抜粋。
- 註22) 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。
- 註23) 文献19)、P41より抜粋。本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。
- 註24) 文献18)、P87より抜粋。
- 註25) 文献21)より抜粋。
- 註26) 文献20)、P226より抜粋。
- 註27) 文献15)、P122より抜粋。
- 註28) 文献23)、P7～P14より抜粋。メランの生涯については本文献によるところが大きい。
- 註29) 文献22)、P296より抜粋。
- 註30) 文献22)、P304より抜粋。
- 註31) 文献4)、P114より抜粋。
- 註32) 文献24)、P139～P140より抜粋。
- 註33) 文献19)、1899年2月4日発行のSBZ、P41より抜粋。
- 註34) 文献24)、P139より抜粋。
- 註35) 文献24)、P140より抜粋。
- 註36) 文献19)、1899年2月11日発行のSBZ、P50より抜粋。
- 註37) 文献25)、P1～P58より抜粋。
- 註38) 文献26)、P29-P100より抜粋。
- 註39) 文献29)、P66より抜粋。
- 註40) 文献30)、P14より抜粋。
- 註41) 文献31)、P37より抜粋。
- 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) 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」。
- 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: Zur Fruegeschichte des Stahl-betonbaus in Deutschland – 100 Jare Monier-Broschuere, 『Beton und Stahlbetonbau』, Wihlhelm Ernst & Sohen Verlag GmbH, H.1. 1999.
- 12) Stiglat: 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) Thaddeus Hyatt, United States Patent No.206112, July 16, 1878.
- 14) Ricken: 『Der Bauingenieur als Geschichite eines Berufes』, Verlag für Bauwesen, 1994.
- 15) Wittfoht: 『Building Bridges』, Beton-Verlag, 1984.
- 16) Kurrer: Stahl+Beton=Stahlbeton? Stahl+Beton=Stahlbeton !, 『Beton und Stahlbetonbau 92』 H1, 1997.
- 17) Kurrer: 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: Die Bauweise Hennebique, 『Schweizerische Bauzeitung』 Feb, 4th, Feb.11th 1899.
- 20) Maillart: Das Hennebique-System und seine Anwendung 『Schweizerische Bauzeitung』 Mar.25th, 1901.
- 21) François Hennebique: 『Internatinal Database and Gallery of Structures』
<http://www.strucurac.de>.
- 22) Melan: 『Der Brücken』 II. Band, Franz Deutike, 1924.
- 23) Nowak: Joseph Melan, 『Joseph Melan』 zum 70ten Geburtstag, Frank Deuticke, 1923.
- 24) Züricher Ingenieur- und Architekten Verein: Entwurf für eine provisorische Norm, 『Schweizerische Bauzeitung』 Apr.4th 1903.
- 25) Bertarm, Borenemann et.al.: Die Geschichite des Deutschen Ausschuss für Stahlbetonbau, 『Deutscher Ausschuss für Stahlbetonbau』, Heft333, Verlag von Wihlhelm Ernst & Sohn, 1982.
- 26) Gwenaël 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: 『Plain and reinforced concrete arches』, John Willy & Sons, Inc. 1915.
- 29) Schöne: Kuppelschale und Rippenkuppel Zur Entwicklung von zwei frühen Eisenbeton-Konstruktionsarten, 『Beton und Stahlbetonbau』, Ernst & Sohn Verlag, Spezial (Sonder Heft) 1999.
- 30) Menn: 『Prestressed Concrete Bridges』, Birkhäuser Verlag, 1986.
- 31) Billington: 『Robert Mallart's Bridges』 Princeton University Press, 1979.

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。