

シャテルロー橋の建設にみる鉄筋コンクリート橋技術*

本田泰寛**、小林一郎***、ミシェル・コット****

By Yasuhiro HONDA, Ichiro KOBAYASHI and Michel COTTE

概 要

1900年にエヌビック社によって建設されたシャテルロー橋は、世界で初めて建設された本格的な鉄筋コンクリート橋である。本橋に関しては、これまでに意匠の面からの議論はなされているが、詳細な構造や設計の手法は明らかになっていない。そこで本稿では、①図面などの資料をもとに本橋の構造を明らかにし、②鉄筋コンクリート橋としての評価をおこない、③フランス橋梁史における本橋の位置づけについて考察をおこなう。

1. はじめに

シャテルロー橋(写真・1)は、中央スパン50m、両径間のスパン40mの3径間からなる上路式アーチ橋である。本橋はフランソワ・エヌビックによって開発されたエヌビックシステム(Système Hennebique)と呼ばれる鉄筋コンクリート技術によって1900年に建設された。

1892年に設立されたエヌビック社は、エヌビックシステムによって橋梁を含む様々な構造物を世界各地で建設し、鉄筋コンクリート技術の普及に大きな役割を果たしたと考えられている。そのエヌビック社にとって、最大スパン50m、橋長144m(橋台間の長さ135m)を有するシャテルロー橋の建設は初めての重要な試みであった。また橋梁史においても、世界で初めての本格的な鉄筋コンクリート橋として重要なものである。

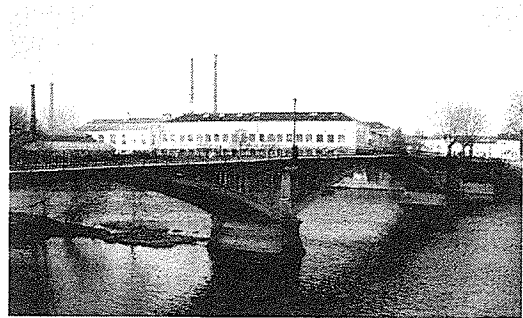
本橋の意匠に関しては、ピリントンによる研究の中で構造芸術という観点から考察がおこなわれている¹⁾。

本研究では、エヌビック社によって作成された図面と、同社によって発行されていた月刊誌『ベトン・アルメ(Le béton armé)』をもとにシャテルロー橋の構造や設計について明らかにする。また、本橋が建設された頃のフランスにおける橋梁建設の様子を概観しながら、鉄筋コンクリート橋として本橋が持つ意味とはどのようなものであるかという点について考察をおこない、フランス橋梁史における本橋の位置づけを試みる。

2. 19世紀後半のフランスにおける橋梁建設の様子

まず本章では、シャテルローの建設がおこなわれた19世紀の後半におけるフランスの橋梁建設の様子を、石造アーチ橋、鉄橋、吊橋、鉄筋コンクリートという構造ごとに概観する。

1) 石造アーチ橋 石造アーチ橋建設技術は、河川橋梁やモルレ高架橋にみられるように高さ60m程度までの高架橋にまで適用されていた。河川橋梁においてはアンヴァリッド橋やサン・ミッシェル橋などのように、吊橋の架け替えに石造アーチ橋が用いられている例も多く



写真・1 シャテルロー橋

見られる。石造アーチ橋は、この時期の主要な構造形式の1つであったといえる。

2) 鉄橋 この時期、特に1880年代からは製鉄業の発展もあって、鉄橋(主に錬鉄)の建設が多くおこなわれるようになる。高架橋においては、その強度、軽さといった材料特性を生かして、ギャラビ高架橋にみられるように石では実現できなかった高さ、スパンを持ったものが建設される。

3) 吊橋 フランスにおける吊橋建設は、1825年のマルク・スガンによるケーブル式吊橋以降、道路橋においてその数を増やしていったが、1850年にアンジェでおこった落橋事故以来、「橋梁は石あるいは鉄を用いておこなうことが望ましい²⁾」という考え方が国内に広まり、吊橋建設は急速に衰えていった。

4) 鉄筋コンクリート橋 コンクリートを使った初期の橋梁建設では、1872年にコワニエ(François Coignet)によって建設された無筋コンクリート橋と、1874年にモニエ(Joseph Monier)によって建設された桁橋がある。

当時出版されたフランスの技術雑誌では、1890年代後半になると、国内における橋梁建設に関する記事がいくつか見られるようになると同時に、ドイツやアメリカ、オーストリアにおける橋梁建設を取り扱った記事が頻繁にあらわれはじめる。このころすでにドイツではスパン50mの無筋コンクリートアーチ橋が建設され、オーストリアではモニエシステムによる橋梁がスパン44mに達していた。『セメント(Le ciment)³⁾』誌では、アメリカで多くの建設例があるメランスシステムの特集が組まれているが、ここでは、フランスもこの成功の原因を探る努

* 分類I:技術史、分類II:橋梁

** 学生員 熊本大学大学院 自然科学研究科

*** 正会員 熊本大学工学部

(〒862-0862 熊本市黒髪2丁目39番1号)

**** 正会員 Dr.of History of technology, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard

力をしなければならないという主旨でまとめている。また『土木大学年報(Annales des Ponts et Chaussées)』ではドイツでの道路工事を取り上げたレポートの中で、フランス人(技術者)にとって最も興味深いものとしてコンクリート橋の建設を紹介している⁴⁾。このように、当時のフランスの技術者は国外で盛んになり始めていた橋梁建設に注意を払っていたことがわかる。

3. エヌビックシステムと初期の橋梁建設

3.1 エヌビックシステムについて エヌビック自身の言葉によれば、彼が鉄筋コンクリート技術を開発するようになった出発点は、火災時の家屋崩壊を防ぐために耐燃性の高い床版を開発するということであった⁵⁾。そこでエヌビックはコンクリートと鉄によって床版を組む方法について試行錯誤を繰り返し、1892年に「鉄とコンクリートの組み合わせ」に関する特許を取得する。この特徴は、①円形断面の鉄筋をコンクリートスラブ、あるいはT桁の下面に配置することと、②細長い平板(étrier)を二つ折りにしてスターラップ筋状(以下、スターラップ筋と呼ぶ)に配置することの2点である。その後1897年には、T字断面の連続桁内に生じる曲げ応力や剪断力を考慮して、折り曲げ鉄筋状の配筋を施している(図-1)。以上のような経過で開発が進められたエヌビックシステムにはこれ以降大きな変更は見られず、この時点でほぼ完成されていたようである⁶⁾。

3.2 1900年までのエヌビック社の橋梁建設 エヌ

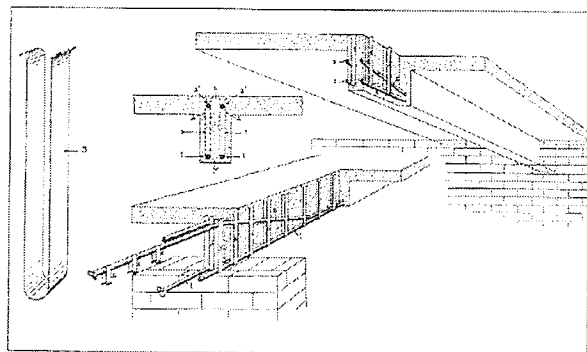


図-1 1897年にエヌビックが取得した特許(文献6)より引用)

ビック社による橋梁建設は1894年、スイスで建設されたスパン2mの鉄道橋から始まり、シャテルロー橋が完成する1900年までにフランス国内で94橋、国外では66橋の合計160橋の橋梁を建設している⁷⁾。このうち、桁橋ではスパンが10m以上のもの(最大で15m)が6橋確認できた。その他のほとんどは小規模な桁橋やスラブのようなものであると思われる。また、アーチ橋は1897年以降に5橋が確認でき、このうち最もスパンの大きなものは1899年にベルギーで建設されたパンペルデュ橋(Pont de Pain perdu sur la Lys à Gand)で、スパン21.92m、ライズ2.79mを有する。

これらのアーチ橋はいずれも下面にカーブのかかったリブを持つスラブからなっているが、基本的な構造は図-1にみられるものとほとんど同じである。しかし、配筋の仕方に微妙な違いがみられることから、このころのエヌビック社はエヌビックシステムによるアーチ橋建設技術を探っている状況であったと考えられる。

4. シャテルロー橋の建設

4.1 橋梁建設の経過 1897年2月17日に開かれたシャテルローの市議会において、町の中心部と軍需工場を結ぶための橋梁を建設することが決定された。同年11月には、市長を委員長とした17人の委員からなる委員会が結成されており、この中には、ボワチエ担当の土木局の技師であり、見積りや仕様書の作成を担当するアンタン(Antin)や、軍需工場に出向している当時の砲兵隊長も含まれていた。

競争入札にはエヌビック社のほかに鉄橋による案を提出している会社もあったが、委員会、土木局の議会を経て、1898年12月2日の市議会でエヌビック社の案を採用することが決定された。

委員会においては、エヌビック社の案を推薦するアンタンによって、鉄筋コンクリートという材料に関する説明や、そのメリットについての説明もおこなわれている。

以上のような経過で準備がおこなわれた建設工事は、1899年8月15日に土台の工事から開始され、4ヶ月後の12月15日には型枠の取り外しがおこなわれ、橋梁本体が完成した。その後周辺工事がおこなわれ、1900年3

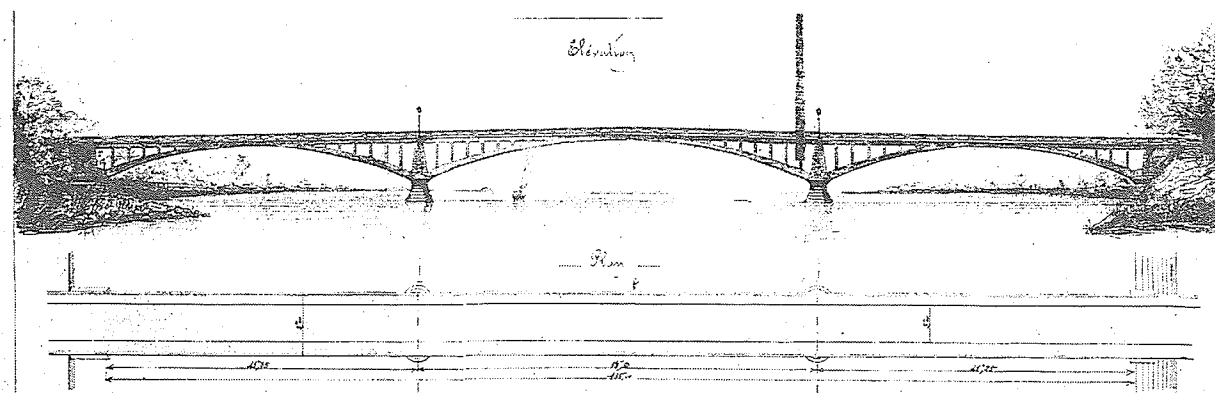


図-2 シャテルロー橋一般図

月 29 から 4 月 5 日にかけての死荷重の試験、同年 8 月 22、23 日の動荷重試験を経て、1900 年の秋に供用が開始された。

4. 2 構造と設計について

本橋は、鉄製の高欄を除くすべてが鉄筋コンクリートで建設されている。それぞれのアーチは、幅 0.50m の 4 本のリブをもつ幅 6.00m のアーチスラブであり、ライズ・スパン比はいずれも 1/10 である (図-2)。

それぞれのアーチは橋面の勾配を抑えるためにクラウン部で床版と一体化されており、クラウン厚は中央径間で 0.54m、側径間で 0.44m となっている。

本橋は、河床にある石灰岩の岩盤上に直接築かれた土台上に建設されている。橋脚、橋台はケーソン状になっており、中空部分には貧配合コンクリートが充填された。

以下、本節ではエヌビック社によって作成された図面⁹⁾と、雑誌『Le béton armé^{9),10)}』をもとに、構造や設計の方法や特徴について記述する。

1) 配筋について 本橋に使用されている鉄筋は、すべて引張強度 42kg/mm^2 、破断後の伸び 20% の鋼 (acier) によって作成されている。以下に、床版とアーチ部分の構造と配筋について述べる。

1)-1 床版の配筋 床版は、橋軸方向に 4 本のリブ、橋軸直角方向に 2m 間隔で配置された小梁をもつスラブからなっている。橋面は幅 5.00m の車道と、両側の 1.5m の張り出しによる歩道からなり、リブが小柱で支えられる形になっている。

床版の設計には、すでに家屋建築などでおこなわれているものと同様の方法がとられている。このため、配筋についても、基本的には 1897 年に取得された特許に見られるものと大きな違いは見られないが、本橋の場合に

は、橋軸方向、橋軸直角方向ともに 10cm 間隔で網目状に配筋が施され、補強がおこなわれている。

1)-2 アーチの部分の配筋 アーチリブでは下面の部分に 4 本の鉄筋を並べたものが 2 列、上面部分に 1 列、合計 12 本の鉄筋が配置されている (図-3)。また、スターラップ筋は、中央径間で 0.20m、側径間では 0.17m の間隔で配置されている (図-4)。アーチスラブには橋軸直角方向にも 0.40m 間隔で配筋が施されている。

鉄筋の継ぎ手は、床版では針金を使って繋いでいると思われるが、アーチリブの橋軸方向に配置された鉄筋ではソケット状のものが用いられており、継ぎ手の位置も図面によって示されている。

また、より高い安定を得るために、各アーチの鉄筋は橋脚、橋台の中まで延長されている。

アーチスラブの断面や配筋をみると、アーチという形を取りながらも、基本的には床版と同じ方法で補強がおこなわれていることがわかる。

2) 設計荷重について 本橋の設計において想定されていた荷重は、1891 年 8 月に制定された鉄橋の設計に関する省令に準じたものである。この省令では、①歩道を含む橋面上に 400kg/m^2 の等分布荷重を載荷する死荷重試験と、②馬に曳かれた荷車を通過させる動荷重試験の 2 つが定められている。

特に動荷重試験については、荷車と馬の配置についていくつかのパターンが示されている。

本橋の実際の設計では、歩道には 500kg/m^2 の等分布荷重がかかり、車道には、上記の②のうちでも最も重量が大きくなるパターンとして、重量 700kg の馬 8 頭に曳かれた 16 トンの荷車 2 台が通過することを想定している。この荷重を考慮して数値計算、図解法の両方を用いて橋梁各所に生じる応力を求め、次いで部材の寸法を、エヌビック社独自の方法で求めた。

また、アーチの設計では、①床版、小柱の荷重、②歩道への等分布荷重、③荷車による荷重、④アーチの自重を考慮して、従来石や鉄のアーチの設計に用いられている方法で計算がおこなわれた。

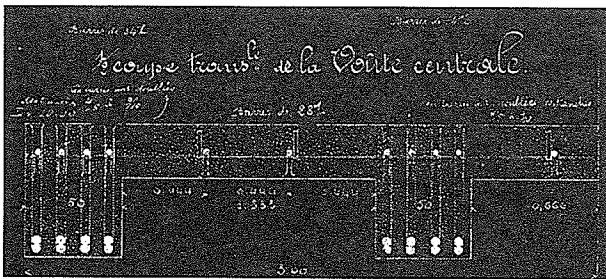


図-3 中央径間アーチ 1/2 断面図

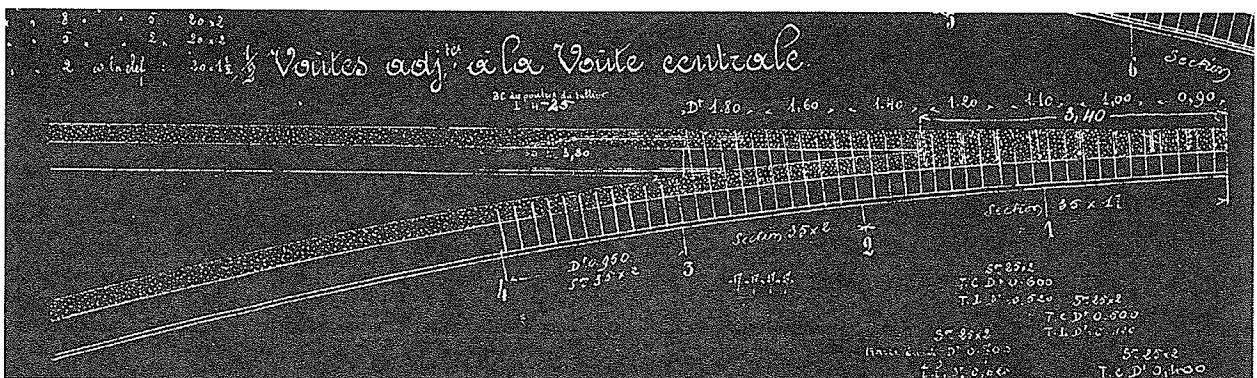


図-4 アーチリブの縦断面図(中央径間)

橋梁完成後におこなわれた
 載荷試験では、車道上に
 800kg/m²、舗道上に
 600kg/m²の等分布荷重を
 かける死荷重試験と、16トンの
 荷車を用いた動荷重試験が
 おこなわれた。さらに、250
 人の人間が歩調をそろえての
 行進、駆け足の2通りで通
 過する試験(写真-2)、橋面
 上に木を並べ、その上を転
 圧ローラーが通行する試験
 など、振動に対する試験も
 おこなわれた。

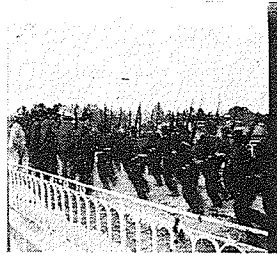


写真-2 耐振動試験の様子

3) 支保工について 本橋のコンクリート打設の際に組まれた支保工は、アーチリブの重量を支えるためだけに設計された。アーチリブが完成した後は、これを土台としてさらに上部の施工を進めていった。

4) 装飾について 本橋の橋脚、橋台はモルタルの上塗りによって石積みを模したデザインを施したり、それぞれの頭頂部には石造建築物に見られるような持送りもあしらわれたりと、まるで石造アーチ橋であるかのように見せている。またアーチスラブ上の小柱の角が面取りされていたり、アーチの側面には削り形のラインが入れている。これらの装飾に関しても、円弧の半径などの細かい寸法を示した図面が作成されており、橋梁の美観にも配慮していた様子がうかがえる。

5. おわりに

本研究で明らかになった点と今後の課題を示す。

(a) まとめ

1) シャテルロー橋以前のエヌビック社の橋梁建設

1900年までにおこなわれたエヌビックシステムによる橋梁建設の様子を明らかにし、その中からアーチ橋として5橋を確認した。また、これらのアーチ橋の構造から、エヌビック自身によって開発された床版のアーチ橋への適用がおこなわれ始めていることがわかった。

2) シャテルロー橋の構造について

エヌビック社によって作成された本橋の図面と、雑誌『ベトン・アルメ』をもとに、シャテルロー橋の構造、配筋、設計の方法を明らかにした。特にアーチの部分については、エヌビックが開発した鉄筋コンクリート床版の構造がアーチスラブへと適用されていることがわかった。

3) 19世紀末の鉄筋コンクリート橋建設の状況

当時のフランスでは鉄筋コンクリート橋の建設例は非常に少なく、メランシステムやモニエシステムによる建設が頻繁におこなわれているドイツやオーストリア、アメリカとは対照的な状況であったということがわかった。2章で述べたように技術者らの目は国外に向けられており、フランスにおける鉄筋コンクリート技術は大きく後れをとっていたと言える。そのような状況の中で、シャテルロー橋は世界で初めてスパン 50m を持つ鉄筋コン

クリート橋としてフランスで建設された。

(b) 今後の検討事項

1) エヌビックシステムによる橋梁建設技術の確立

1900年までに小規模な橋梁において試みられていた床版のアーチへの適用は、シャテルロー橋の建設においてリブを持ったアーチスラブとして1つの完成に至ったと考えることができる。また、エヌビック社はシャテルロー橋建設以降に積極的にシャテルロー橋の縮小版を建設している¹¹⁾。このことから、エヌビック社にとっても本橋の完成は、エヌビックシステムによる橋梁建設技術の確立であったと考えられる。さらに、詳細な資料をまとめ、この点を明らかにしたい。

2) 真の鉄筋コンクリート橋の誕生

エヌビック社が発行していた雑誌のタイトルでもあるフランス語「ベトン・アルメ(Béton armé)」は「補強されたコンクリート」を意味する。はじめに試みられたのは「何かで補強されたコンクリート構造」であり、必ずしも「鉄筋で補強されたコンクリート」ではなかった。一方、エヌビックの構造は、今日の鉄筋コンクリートの原型となるものであったし、このような発想で完成されたシャテルロー橋は「真の意味での鉄筋コンクリート橋」の誕生であったと考えられる。

フランスでこの技術が生まれた理由としては、①フランスの土木技術者は土木材料としてのコンクリートに関して保守的であったため、独・米各国に比べ、コンクリート橋の市場が未成熟であったこと、②アルザス・ロレーヌの割譲による鉄材の不足のため、鉄の利用を極力減らす必要があったことなどが考えられる。その結果、フランス国内には海外の技術が直接的に導入されることなく、独自の技術が発展していったと思われる。この点もより明確に論考する必要がある。さらに、先行していた独・米各国の鉄筋コンクリート橋の建設事例をとフランスの事例を時系列にまとめることで、モニエシステム、メランシステムの形式との比較を行い、エヌビック式の特徴を明確にしていきたい。

3) フランス橋梁史における本橋の位置づけ

本橋の建設以降、フランスではコンシダール、アレル・ド・ラ・ノエ、コワニエなど、個々の技術者による独自の鉄筋コンクリート橋建設が始められるようになる。シャテルロー橋の成功は、国内の技術者に対して鉄筋コンクリート技術の橋梁建設へ利用の可能性を示し、フランスで本格的に鉄筋コンクリートが橋梁建設に利用される大きな契機になったと思われる。フランス・コンクリート橋小史をまとめることで、本橋の重要性がさらに際立つものと考えられるが、これも今後の課題としたい。

(参考文献) 1) DDPピリントン, 『塔と橋 構造芸術の誕生』鹿島出版会, 2001.8.10. 2) Bertrand Lemoine, 『L'architecture du fer XIX^e siècle』, p.126, Edition Champs Vallons, 1986. 3) 『Le ciment』, pp.105-110, 1896.9.25. 4) 『Annales des Ponts et Chaussées』, pp.259-260, 1899. 5) 『Le béton armé No.11』, pp.1-5, 1899.4. 6) Gwenaél Delhumeau, 『L'invention du béton armé』, p.96, Norma éditions, 1999. 7) 『Le béton armé No.81』, p.17, 1904.12. 8) IFA, BAH/4-A/189902, code 003195. 9) 『Le béton armé No.8』, pp.5-8. 10) 『Le béton armé No.30』, pp.1-13, 1900.11. 11) 『Le béton armé No.81』, p.16, 1904.12.