

シャテルロー橋の建設に見る鉄筋コンクリート橋技術*

A Study on the Technique of the Reinforced Concrete Bridge
for the Construction of the Châtellerault Bridge

本田泰寛**、小林一郎***、ミシェル・コット****

By Yasuhiro HONDA, Ichiro KOBAYASHI and Michel COTTE

abstract

This study focuses on the historical research of the Châtellerault Bridge constructed in 1900 in France. This bridge is known as the first 'grand' bridge in France. It is also known that the 'système Hennebique' developed by François Hennebique whose company constructed more than 1800 bridges during nearly 20 years. It is hardly possible to find a trace of the bridge construction by means of the reinforced concrete at that time. It means that the France was a developing country in terms of reinforced concrete bridge construction. But the situation of the reinforced concrete bridge would change drastically after the turning of the century, that is, it has become one of the main types of bridge construction. The year, the scale and the location of the Châtellerault Bridge construction is very significant to clarify the development of the reinforced concrete bridge in France.

1. はじめに

シャテルロー橋¹⁾(写真-1)は、中央スパン 50m、両側径間スパン 40m の 3 径間からなる全固定の鉄筋コンクリートアーチ橋で、フランソワ・エヌビック (François Hennebique) 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。同社は 1894 年、スイスにおいて橋梁建設を開始するが、それからわずか 20 年足らずで 1800 橋近い橋梁を建設している²⁾。エヌビック社にとって、1900 年の時点で最大スパン 50m、橋長 144m という規模の橋梁建設は初めての重要な試みであった。

シャテルロー橋が建設された頃のフランスでは、石造アーチ橋、鉄橋 (主に鍊鉄) が中心であった。一方鉄筋コンクリート橋の建設例はほとんど無く、当時のフラン

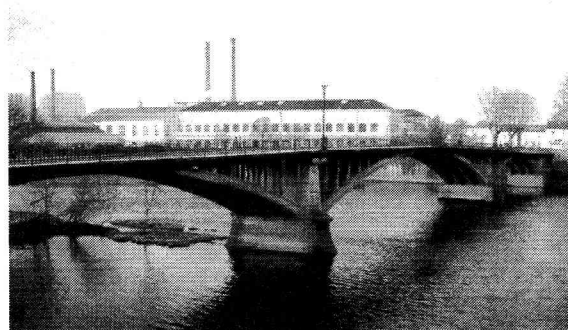


写真-1 シャテルロー橋(撮影:本田)

スは後進国であったといえる。このような状況は、20 世紀以降にみられる鉄筋コンクリート橋の発展によって急速に変わっていく。シャテルロー橋は、建設された時期、規模といった点を考えると、フランス橋梁史における鉄筋コンクリート橋の発生と発展を見る上で、きわめて示唆に富む橋梁であるといえることができる。

シャテルロー橋を取り上げた文献は多く見られるが、それらのほとんどはマイヤール (Robert Maillart)、フレシネ (Eugène Freyssinet) らに代表される鉄筋コンクリート橋梁史の前史における一橋梁として、スパンや構造について言及するにとどまっている³⁾。一方で、鉄筋コンクリート橋が一般化していなかったフランスで、なぜ突然このような規模の鉄筋コンクリート橋が建設されたのかという点について、土木史的に論じたものは見

*key word シャテルロー橋、鉄筋コンクリート橋、エヌビック社

**学生員 工修 熊本大学大学院 自然科学研究科
(〒860-8555 熊本市黒髪 2 丁目 39 番 1 号)

***正会員 工博 熊本大学工学部環境システム工学科教授

****非会員 ナント大学 (Université de Nantes)

られない。

本研究では、エヌビック社によって作成された資料と、シャテルロー市議会の議事録といった一次資料を主要な文献として、シャテルロー橋の実現に至る経緯を明らかにする。また、鉄筋コンクリート橋の歴史におい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する。

2. 橋梁建設に至る歴史的背景

シャテルローは古来パリからボルドーを経てスペインに至る街道が通過する交通の要衝であり（図-1）、1611年には橋長 150m、幅員 21.80m を有する大規模な石造アーチ橋であるアンリ 4 世橋（Pont Henri IV）（写真-2）が市街地そばを流れるヴィエンヌ（Vienne）川に建設されている。以降 400 年近く、アンリ 4 世橋はシャテルローの通過交通、都市内交通を支える唯一の橋梁として存在していた。図-2 は現在のシャテルロー市内の様子を示したものである。図中に見られる車道のうち、太線は市内を通過する国道、県道を表したものであるが、これを見ると、今日もおアンリ 4 世橋が主要な交通路に位置していることが見て取れる。

シャテルローに新たな橋梁を建設する必要があるのは、1824 年に軍事工場（Usine de manufacture d'arme de Châtellerault）が建設されたことに端を発する。この軍事工場の建設は、ナポレオン戦争後の 1819 年 7 月 14 日に出された王令によって決定される。当時のフランスには、図-1 に白丸で示された 4 つの町（図中北からモーブージュ（Maubeuge）、シャルルヴィル（Charleville）、克蘭ジョンタル（Klingenthal）、ミュツジク（Mützig））にすでに軍事工場が存在していたが、いずれの工場もフランス北東部、国境側に位置しており、軍事施設の立地としては好ましいものではなかった。そこで、これらの工場が持つ機能を、国境から遠距離にあり、かつロワール川を越えた場所へと移転する必

要が生じた。主要交通路上にあり、ロワール川の南西に位置するシャテルローは、このような要求を満たす町のひとつであった。さらに、工場を建設する敷地を提供したことや、伝統的な冶金産業があり、現地での人材の確保が比較的容易であったことが、シャテルローが建設地として選ばれる要因となった⁴⁾。

設立以降、軍事工場の工員数は徐々に増加し、1890 年には 5504 名に達する（設立時は 34 名）⁵⁾。1892 年には当時の工場長であるカンプス（Camps）より市長に宛てて新たな橋梁建設を要求する内容の手紙が 9 月に送られ、翌月の議会で議題に取り上げられる。ここでは、対岸に住む工員の工場へのアクセスを容易にすると同時に左岸側のシャトヌフ（Châteauneuf）地区に集中している工員も右岸側へ移住させることが述べられている。議会はこれについて検討する方向で結論を出すが、陸軍省（Ministère de la Guerre）が補助金の要求に応じなかったため 1893 年の議会で計画は立ち消えることとなった⁶⁾。

橋梁建設が再び議論に上がり、決定されるのは 4 年後の 1897 年 2 月 17 日の議会においてである。提出された案の比較、検討を担当した土木局のエンジニア、アンタン（Antin）の報告書（以下、レポート）⁷⁾を見ると、シャテルローが入札への参加を要請したのは 17 の鉄橋関連の会社で、鉄筋コンクリート橋の建設は全く計画に無かったことがわかる。シャテルローが橋梁建設を計画

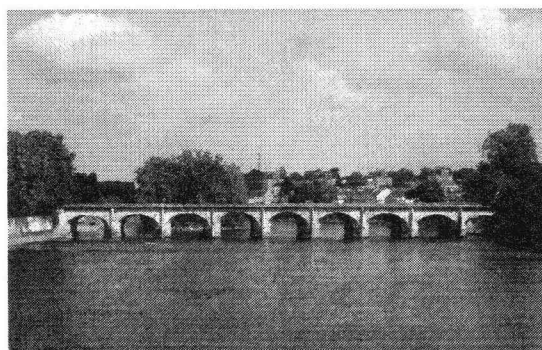


写真-2 アンリ 4 世橋（撮影：本田）

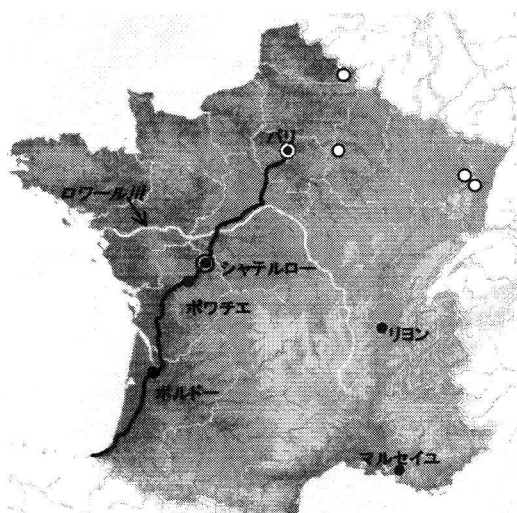


図-1 シャテルロー位置図（作成：本田）

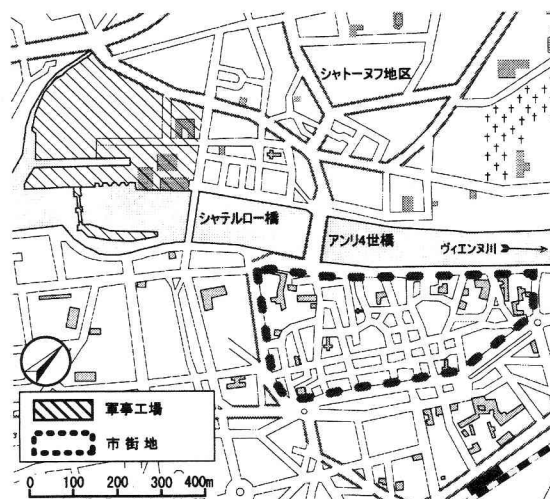


図-2 現在のシャテルロー（作成：本田）

していることを知ったエヌビック社は、自ら入札への参加を要求したようである。

結局、1900年にパリで開かれる万国博覧会関連の事業に迫られていることを理由に参加を辞退する会社が相継いだ。このため、最終的に検討に付されたのは鉄橋社 (Société des Ponts et Travaux en Fer) とエヌビック社の2案のみであった⁸⁾。

3. 19世紀後半のフランスにおける橋梁建設

(1) 橋梁建設の一般的な傾向

1825年にマルク・スガン (Marc Seguin) によって軽量吊橋が開発されてからの25年間、フランスでは吊橋を主体とした橋梁建設がおこなわれていた。しかし、1850年にアンジェ (Anger) で起こった吊橋の崩壊事故以降は、最も信頼性の高い石造アーチ橋や、軽量で大スパンが実現可能な鉄橋を中心とした橋梁建設へと移行していた。シャテルローが当初は鉄橋を計画していたのも、このような流れの中でのごく自然な選択であったと考えることができる。

(2) 鉄筋コンクリート橋

一方で、鉄筋コンクリート橋はどのような状況だったのだろうか。フランスで鉄筋コンクリートによる橋梁建設が見られるようになるのは、1874年にモニエ (Joseph Monier) がモニエシステム (Système Minier) によってシャズレ城 (Château de Chazelet) の堀に建設したスパン 13.80m の桁橋からである⁹⁾。より興味深いことは、同年にコワニエ (François Coignet) によって最大スパン 40m、全長 1500m の無筋コンクリートアーチ橋が建設されていることである。本橋はアーチの一部が崩壊、一部は崩壊の危険があるとして取り壊された。この件は『技術研究誌 (La Revue Technique)』¹⁰⁾ で取り上げられており、コンクリートを橋梁に用いることに対して大きな疑問を投げかけている。

その後、フランスの技術系雑誌でフランス国内外の鉄筋コンクリート橋が取り上げられ始めるのは、15年を経た1899年のことになるが、それでもドウ・ラ・ノエ (Louis Harel de la Noë) によるX橋 (Pont en X) や¹¹⁾、ボンナ (Bonna) によるアーチ橋 (Pont route sur le Gers) ¹²⁾ というような小規模な橋梁が散見される程度である。ここでは、先に見たヴァンヌ水道橋の件が遠因となって、コンクリート橋の早急な導入を見合わせるような風潮があったのではないかと推測される。

しかし一方では、国外で盛んになってきたコンクリート橋や鉄筋コンクリート橋が頻繁に取り上げられるようになる。その中には、アメリカにおけるメランシステムの積極的な採用¹³⁾、ドイツにおける無筋コンクリート橋建設¹⁴⁾等の成功を前にしたフランス人技術者が、国内での導入に強い関心を抱いている様子もうかがえる。

4. エヌビックシステムによる初期の橋梁建設

前章では、19世紀末におけるフランスの橋梁建設の状況を見た。本章では、同じ時期におこなわれたエヌビック社の橋梁建設について明らかにする。まず次節では、エヌビック社が橋梁建設にも一貫して導入していたエヌビックシステムの成立と特徴を述べる。

(1) エヌビックシステム

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きっかけは、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¹⁵⁾。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) に配置することの2点である。その後1897年には、T形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-3)¹⁶⁾。エヌビックシステムは、以上の点で特徴づけられる。

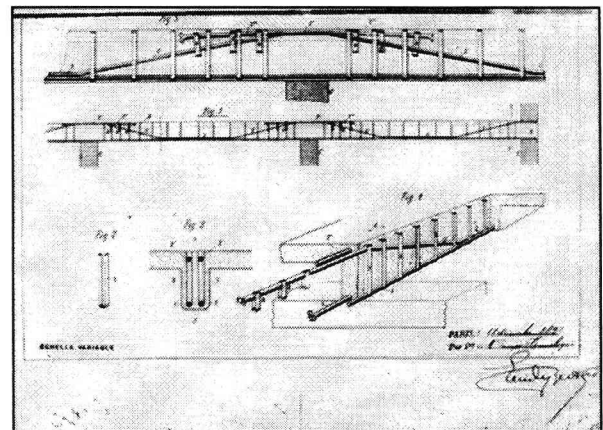


図-3 エヌビックシステムの配筋図
(文献 16)より転載)

(2) エヌビック社の初期の橋梁建設

エヌ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 (桁橋) から始まる¹⁷⁾。エヌビック社の統計によれば、シャテルロー橋が完成する1900年までにフランス国内では94橋、国外では66橋の合計160橋の橋梁を建設している¹⁸⁾。

また、アーチ橋としては5橋の建設を確認することができるが、最もスパンの大きなものでも、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、写真-3) で¹⁹⁾、スパン 21.92m、ライズ 2.79m の充側アーチ橋である。他の4橋も同じく

充側アーチ橋であり、シャテルロー橋に並ぶ、あるいは準ずるような規模の橋梁は見られない。

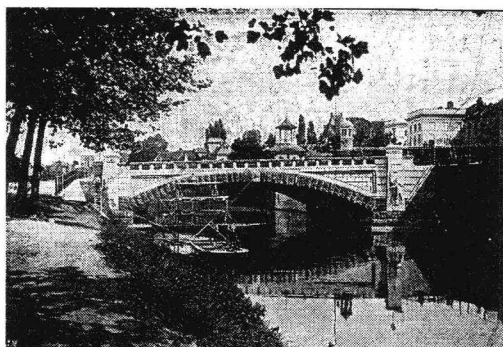


写真-3 パン・ペルデュ橋(文献 19)より転載)

図-4 は本橋のアーチ起拱点の断面を示したものである。これを見ると、鉄筋の配置が床版と同じ方法で施されており、橋梁に特化した工夫などはとくに見られない。

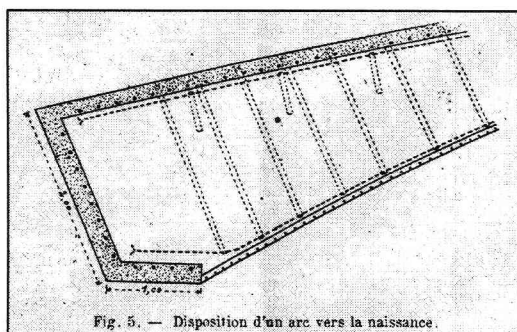


図-4 パン・ペルデュ橋のアーチ基部配筋図
(文献 19)より転載)

5. エヌビック社案の採用に至る経緯

橋梁建設が決定した 1897 年の 11 月、シャテルローでは市長であるカミーユ・ドオーグ (Camille Dehogue) を委員長とした 17 人の委員で構成される委員会が結成された。この中には、アンタンや、当時軍事工場に向向していた砲兵隊長も含まれている。

委員会によってエヌビック社の案が採用され、シャテルローの議会にて承認を受けるのは 1898 年 7 月 1 日の

ことである。先に述べたように、提出された 2 案の比較、検討はアンタンによっておこなわれ、この時の議会で結果が報告された。その内容はレポート内で 16 ページに渡ってまとめられている。

検討終了後の報告という性格上、レポートに記載されている鋼アーチ橋案のデータは限られたものとなっており、詳細な構造を知ることはできないが、①両橋の構造と工費の比較、②鉄筋コンクリート橋の強度検討、という過程を経てエヌビック社案が採用に至っていることがわかる。

本章では以下、エヌビック社案がどのような形で土木局のエンジニアに理解されたのかということを中心にレポートの内容を考察する。また、レポート中ではエヌビック社案の橋梁を指してシャテルロー橋 (Pont de Châtellerault) としているため、以降本章でもこれに従うこととする。

(1) 構造と工費の比較

レポートより得られた鋼アーチ橋案のデータと、それに対応したシャテルロー橋のデータをまとめたものを表-1 に示す。ここからは、両案の共通点として中央に最大スパンを有する 3 径間で構成されていることや、道路部の幅員構成も等しいことが見て取れる。2 章では、発注者側であるシャテルローが鉄橋を計画していたことを述べたが、その段階でおおよそのスパン割りや幅員等の条件も提示されており、エヌビック社はこれにもとづいて、シャテルロー橋の全体的な構造を決定したものと考えられる。また、鋼アーチ橋案の説明を見ると、上部工は、柱列を介してアーチと床版が連結される構造となっていることが分かるが、これも基本的にシャテルロー橋と同一のものである。おそらくエヌビック社は、当時すでに実用化されていた鉄橋の模倣による鉄筋コンクリート橋の実現を以前から目論んでおり、シャテルロー橋の建設においてはじめてその機会が与えられたのではないかと考えられる。

1900 年までに建設されたエヌビック社の橋梁にシャテルロー橋に準ずる規模の橋梁が見られないのはこのような理由によるものであろう。このため、シャテルロー橋の信頼性に対してエヌビック社は、「一般に材料の強度

表-1 鋼アーチ橋案、鉄筋コンクリート橋案の諸元(文献 7)より本田作成)

		鋼橋案			鉄筋コンクリート橋案		
		側径間	中央径間	側径間	側径間	中央径間	側径間
アーチ(m)	スパン	41.39	47.25	41.39	40.0	50.0	40.0
	ライズ	3.90	5.165	3.90	4.0	4.8	4.0
	構造	アーチリブ×4			4本のリブを持つアーチスラブ		
路面		車道部: 5m, 歩道部: 1.5m×2			車道部: 5m, 歩道部: 1.5m×2		
橋脚		石積み			鉄筋コンクリート		
総工費		204,500fr (上部工: 148,000fr)			175,000fr		

は、経験から得られた仮定によって求められるもので、その正当性は数多くの適用例によってしか証明され得ない²⁰⁾と説明するにとどまっております、補足的に、固定アーチの採用が橋脚、橋台の安定を高めるとされている程度である。エヌビック社にとってシャテルロー橋は、技術的挑戦のための実験橋であり、鉄筋コンクリート橋が鉄橋に比肩する機能を果たしうることを実証するための場であったと言える。

また表に示すように、工費においては、シャテルロー橋は鋼アーチ橋案を約 15% 下回る 17 万 5 千フランとなっている。レポートによれば、このような経済性は発注者にとって最大のメリットであるとして最終的な判断の理由となっているが、採用に至るには次節で見えるような強度検討を経る必要があった。

(2) シャテルロー橋の強度検討

レポートでは、シャテルロー橋に関する検討が 10 ページに渡って記録されており(鋼アーチ橋案は 4 ページ)、①構造の詳細な説明、②鉄筋コンクリートに関する説明、③強度検討、の順に説明がされている。

①では橋梁の諸元が述べられているが、詳細な検討に関する記述は見られないため、完成後の試験とあわせて次章で取り上げることにしたい。

次に②は、鉄筋コンクリートに関する説明となっており、その内容は表-2 のようにまとめられる²¹⁾。ここでは項目 a のような記述に始まり、材料の基本的な性質(項目 b~g) が詳細に説明されている。また、レポート中では鉄筋コンクリートに関する説明となっているが、項目 h~j は、鉄筋コンクリート・アーチリブに関する記述であると思われる。鉄筋コンクリートという材料のみならず、それをシャテルロー橋のような規模の橋梁に利用するということ自体が新たな試みであったことがここからも見て取れる。

このような説明の後に、③強度検討に関して記述され

表-2 レポートに見られる鉄筋コンクリートの利点
(文献 7)より本田作成)

- | |
|---|
| a. 鉄筋コンクリートは何年も前から利用されている |
| b. 鉄筋がコンクリートで保護されている |
| c. コンクリートと鉄の膨張係数は等しい |
| d. 鉄筋とコンクリートの間には十分な付着がある |
| e. コンクリートによる被覆によって鉄筋の有効係数が高まる |
| f. 鉄構造のような結合点がないため構造上の弱点がない |
| g. コンクリートに覆われているため、鉄筋は錆びない |
| h. 丸鉄筋は、T、U形の鉄筋に比べて強度が高い |
| i. 強度に比べて死荷重が小さいため、大きな経済性を実現できる |
| j. 自重の軽さは、死荷重による材料の疲労が問題となる大規模な構造物においては非常に有利である |

ているが、ここでは、「シャテルロー橋のような規模の橋梁建設は、フランスにおいては初めての規模の橋梁であることに言及しておかねばならない」として、1890 年にドイツ、スイスで建設されたブレーメンの歩道橋(写真-4) ヴィルデッグ橋(写真-5)といった、シャテルロー橋に近いスパンを持った前例があることがしめされている。さらにシャテルロー橋の場合には、①すでに建築分野で多くの実績のある床版構造が用いられていること、②アーチが強固に補強されていること、③床版とアーチの単位面積あたりの重量が非常に軽いことから、大規模な鉄筋コンクリート橋ではあるものの、十分な信頼性があることを強調している。

続いて、いくつかの数値的な比較を用いて、中央径間

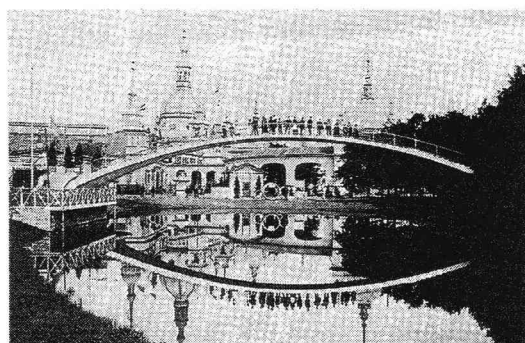


写真-4 ブレーメンの歩道橋
(文献 22)より転載)

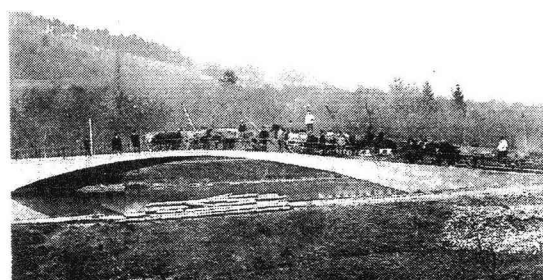


写真-5 ヴィルデッグ橋
(文献 23)より転載)

と側径間それぞれのアーチが十分な強度を有することが説明されている。中央径間において比較の対象となったのは先に見た鋼アーチ橋案であった。レポートでは、シャテルロー橋の中央径間の主鉄筋の総断面積が 53.795cm^2 、側径間では 37.345cm^2 となっていることをあげた上で、中央径間における断面積 53.795cm^2 は、鋼アーチ橋案の中央径間のアーチリブの総断面積 63.694cm^2 と比較しても大きな違いはない、としている。

側径間については、セーヌ・マルヌ県(Seine et Marne)に建設されたスパン 37.88m、スパン・ライズ比 1/18、クラウン厚 0.8m を持つ石造アーチ実験橋(以下、実験橋)の載荷試験が比較の対象となっている。レポートでは詳細な計算の過程は示されていないが、その比較とはおよそ次のようである。

表-3 アンタンによって検討された橋梁とそのデータ(文献 7)より本田作成)

検討項目	橋梁としての信頼性			中央径間	側径間
橋 梁 名	シャテルロー橋 (側径間)	ヴィルデッグ橋	ブレーメン歩道橋	鋼アーチ橋 (中央径間)	石造アーチ実験橋
スパン	40.0m	37.22m	40m	47.25m	37.88m
ライズ-スパン比	1/10	1/10.8	—	—	1/18
クラウン厚	0.44m	0.17m	—	—	0.80m
単位面積荷重	2330kg/m ²	—	—	—	5338kg/m ²
断 面 積	53.795cm ² (中央径間)	—	—	63.694cm ²	—

①5338kg/m²の単位面積重量を載荷した実験橋のアーチクラウン部には 45 kg/cm²の圧縮応力が生じることになる。

②強度は変わらないものとして、実験橋の条件をシャテルロー橋のもの(単位面積重量: 2330kg/m²、ライズ-スパン比: 1/10)に置き換えると、クラウン部には 11 kg/cm²の圧縮応力が生じることになる。

③実験橋のクラウン厚をもとの 0.8m から 0.19m にまで薄くした時、圧縮応力は載荷試験時と同じ 45kg/cm²となる。

④シャテルロー橋の側径間のクラウン厚は 0.44m であることから、シャテルロー橋は実験橋よりも大胆な構造である。

また、④では、「ヴィルデッグ橋では 1/10.8 のスパン-ライズ比でクラウン厚が 0.17m しかない」と付記され、いずれと比べても、シャテルロー橋は荷重に対して余裕を持った構造であると説明されている。

ここまで見た比較検討において言及された橋梁と、検討されたデータをまとめると、表-3 のようになる。表からは、橋梁としての信頼性においては既存の鉄筋コンクリート橋を比較対象として用いてはいるものの、具体的な数値による強度の比較においては、中央径間では鉄橋の断面積、側径間では石造アーチ橋の単位面積荷重(圧縮応力)、というように、従来の橋梁で、なるべくシャテルロー橋と条件の近いものに依ったデータ比較に頼らざるを得なかったことがわかる。

以上のようなアンタンによる報告を受けてシャテルロー橋は建設が承認され、1899 年 8 月 15 日に基礎工事に着工する。その 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 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。

6. シャテルロー橋の構造

シャテルロー橋は、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。図-5 に本橋の一般図を示す。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る。アーチクラウン部は橋面の勾配を抑えるために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。また、起拱点厚は中央径間で 0.91m、側径間で 0.80m である。

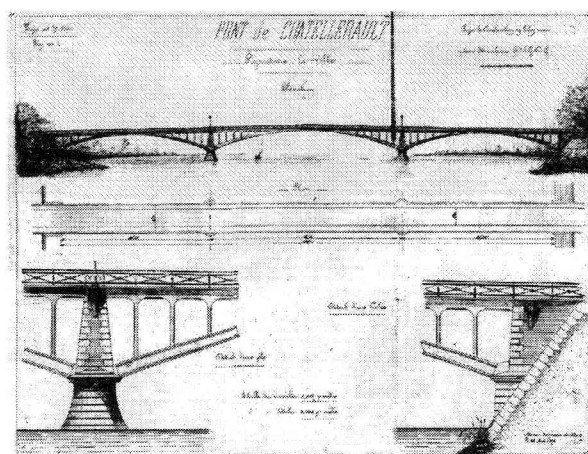


図-5 シャテルロー橋一般図

橋脚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。橋脚と橋台はケーソン状で、中空部分には貧配合コンクリートが充填されている。

本章では以下に、エヌビック社によって作成された図面²⁴⁾と、雑誌『ベトン・アルメ (Le béton armé)²⁵⁾』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には、すべて引張強度 42kg/mm²、破断後の伸び 20%の鋼(acier)が用いられている。以下、床版とアーチ部分の構造と配筋について述べる。

a) 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 の張出しによる歩道からなり、リブが鉛直材で支えられている。

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 間隔でネット状に配筋を施すことで補強されている。

b) アーチの配筋

アーチリブでは下面側に 4 列の鉄筋が 2 段、上面側には 4 列の鉄筋が 1 段、合計 12 列が配置されている(図-6)。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-7)。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見て取れる。

(2) 設計荷重について

本橋の設計において想定された荷重は、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とされている。

一方、アーチの設計では、①床版、鉛直材の荷重、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されたとある。

前章でアンタンがアーチ強度の判定においてなるべく条件に近い既存橋梁を比較対象としていたことについて触れた。当時のフランスにおける鉄筋コンクリート橋建設の状況を考えると、先に表-2 で見たような基本的な性質は知られていたものの、橋梁に関する一般的な理論が確立されてはいなかった²⁶⁾。従ってエヌビック社によるアーチの設計が、新しい材料を用いながらも構造計算においては旧来の設計法をとることで、工費以外の面でもアンタンを納得させるために有効に働いたのではないかと考えられる。

また、2 章では 1900 年までのエヌビック社の橋梁建設にはシャテルロー橋に直接つながるようなものが見られないことを指摘したが、前述したような点から考えると、シャテルロー橋の実現が必ずしもエヌビック社の技術力による突発的なものではなく、旧来の技術の蓄積の上に出現したと考えることができる。

(3) 載荷試験について

橋梁完成後におこなわれた載荷試験では、車道上に 800kg/m^2 、舗道上に 600kg/m^2 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、エヌビック社側によって、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-6)、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。

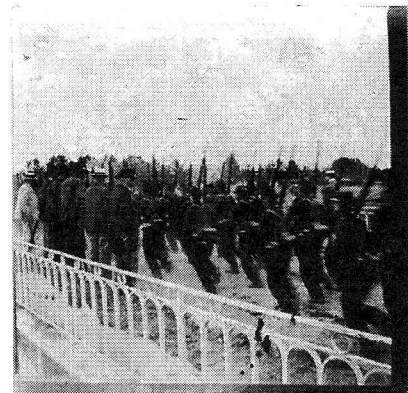


写真-6 耐震振動試験の様子

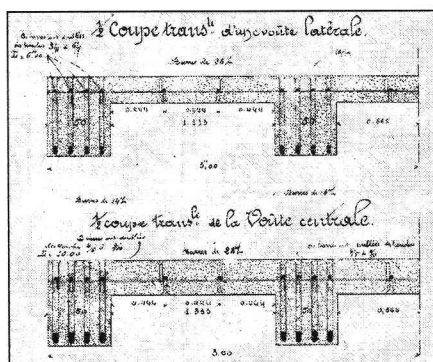


図-6 アーチ部分の 1/2 断面図
(上: 側径間、下: 中央径間)

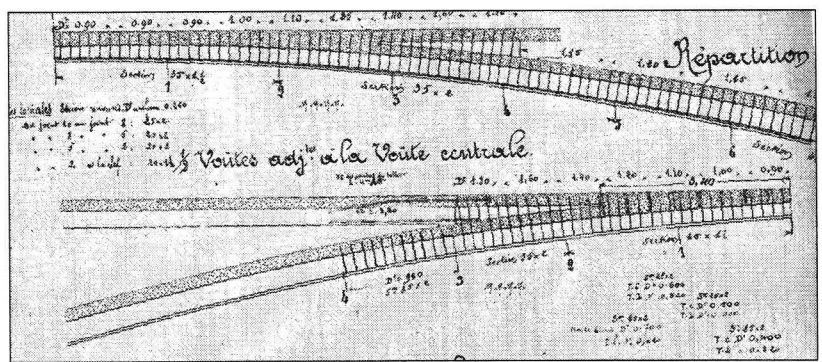


図-7 アーチの配筋を示す縦断面図 (上: 側径間、下: 中央径間)

(4) 意匠について

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、まるで石造構造物であるかのように見せている。またアーチスラブ上の鉛直材の角が面取りされていたり、アーチの側面には割り形が入れられている。シャテルロー橋の構造、意匠が呈する外観は、石造橋脚と橋台によって開腹アーチが支えられた当時の鉄製アーチ橋梁とほとんど変わらないものである。

7. おわりに

本研究の成果をまとめると次のようになる。

(1) 2章では、軍事工場との関係を中心として、シャテルローで新たな橋梁建設が決定されるまでの歴史的な背景について述べた。いくつかの条件が重なった結果、シャテルロー橋は、もともと鉄橋の建設が計画されていた場所に建設された。

(2) 3章では19世紀末のフランスにおける橋梁建設の様子を概観し、①当時フランスは石造アーチ橋と鉄橋が主流であったこと、②鉄筋コンクリート橋についてはドイツやアメリカに比べて後れていたことを明らかにした。

(3) 4章ではエヌビックシステムと、エヌビック社の初期の橋梁建設について述べた。床版構造に見られるエヌビックシステムが、橋梁のアーチ部分にも適用されていることと、当時はまだシャテルロー橋に準ずるような規模の橋梁は建設されていないことを指摘した。

(4) 5章では土木局の技師であるアンタンのレポートから、シャテルロー橋と鋼アーチ橋の比較・検討の過程について述べた。鋼アーチ橋案だけではなく、既存の鉄筋コンクリートアーチ橋や石造アーチ橋をも比較の対象とした上でシャテルロー橋が採用された。

(5) 6章では、シャテルロー橋の構造と設計について詳述した。本橋は、旧来の構造と意匠によりながらも、橋長140m程度を要する都市内河川において、フランスでは初めて鋼アーチ橋と同等の渡河機能を実現した鉄筋コンクリート橋であったといえる。

今後の課題

シャテルロー橋や2章で見たパンペルデュ橋をはじめとしたエヌビック社の橋梁には、鉄橋、石造アーチ橋を模したデザインの橋梁がほとんどであり、何らかの一貫した思想があったと考えられる²⁷⁾。この点を、自社橋梁の普及戦略として捉え、今後明らかにしていきたい。

(謝 辞)

本研究は一部文部科学省科学研究費・萌芽研究(課題番号16656156)の補助を受けたものです。記して謝意を表します。

<参考文献・注記>

- 1) 本橋の呼び名については、Pont Camille de Horgue とされているが、今日一般的には Pont de Châtellerault とされることが多いため、本論文ではこれに従ってシャテルロー橋とした。
- 2) 1894年から1905年の7月までは、エヌビック社による統計(『Le Béton Armé n° 90', 1905.12』)を用いた。それ以降の建設数については、建設数をまとめた資料がないため、各年の実績が掲載されている「Travaux exécutés en 1905」以降をもとに集計した。ただし、1912年以降については実績をまとめた文献が見当たらなかった(出版されているが散逸している可能性もある)、表中には1911年までの建設数を集計・記載した。
- 3) 例えば、Guy Grattesat 監修:『Ponts de France』, Presses des Ponts et Chaussées, p.103, 1982.など
- 4) Jean-François Belhoste et Paul Smith:『Patrimoine industriel』 pp.82-83. éditions du patrimoine, 1997.
- 5) André Guillon, Paul Meunier:『La Manufacture Nationale d'armes de Châtellerault』, pp.254-255, Librairie Le Bouguiniste, 1983.
- 6) 『Pont sur la Vienne』, Délivération du conseil municipal de Châtellerault, 17.mars.1893.
- 7) レポートは、1898年7月1日に開かれた議会の議事録添付資料(Annexe)として保存されている。
- 8) 前掲7)
- 9) Jean-Louis Bosc:『Joseph Monier et la naissance du ciment armé』
- 10) 『Accident des aqueducs en béton de la Vannes』 『Nouvelles annales de la construction』, 1874.5.
- 11) 『Le pont en X au Mans étudié et construit par M. Harel de la Noë, ingénieur en chef des ponts et chaussées』, 『La Revue Technique』, pp.45-59, 1899.2.25.
- 12) 『Le pont en ciment armé sur le Gers(à Auch, France)』, 『Le Ciment n°11』, pp.161-163, 1899.
- 13) 『Le pont en ciment armé (Système Melan)』, 『Le ciment』, pp.105-110, 1896.9.25.
- 14) 『Rapport administratif directions des voies de communication du Wurtemberg』, 『Annales des Ponts et Chaussées』, pp.259-260, 1899.
- 15) 『3e congrès du Béton Armé』, 『Le béton armé n°11』, pp.1-5, 1899.4.
- 16) Brevet d'invention d'Hennebique, n°265135. 18. décembre. 1897.
- 17) 『Les ponts de Chemin de fer』, 『Le béton armé』, 1898.6.10, pp.2-6.
- 18) 『9e congrès et l'Exposition du Béton armé』, 『Le béton armé n°81』, p.17, 1904.12.
- 19) 『Execution d'un pont biais en béton armé(1)』, 『Le béton armé』, 1900.4.
- 20) 『Le béton armé n°30』, p.3, 1900.11.
- 21) 表中の項目jにある「疲労」が具体的に何を指すものかはレポートからは判断できない。当時はコンクリートの強度そのものが疑問視される傾向にあったことから、耐久性を指しているものと推察される。
- 22) 前掲9), p.116
- 23) 前掲9), p.114
- 24) シャテルロー橋に関するエヌビック社側の資料(図面、写真)については、フランス建築家協会(IFA)アーカイブ IFA, BAH/4-A/1899/02, code003195, Paris.
- 25) 『Le béton armé n°8』, pp.5-8, 1899.1. および『Le béton armé n°30』, pp.1-13, 1900.11.
- 26) フランスで鉄筋コンクリートに関する指針が制定されるのは1906年のことである。『INSTRUCTIONS RELATIVES A L'EMPLOI DU BETON ARME』, Annales des Ponts et Chaussées no°52, 1906.
- 27) 本田ほか、『エヌビック社の橋梁建設政策について』土木史研究講演集 Vol.24, pp.211-224, 2004.6.15.