

設計図面と特許資料の分析に基づいた グルネ橋の構造の由来に関する研究

本田 泰寛¹・Stéphane SIRE²・小林 一郎³

¹正会員 第一工科大学工学部自然環境工学科 (〒899-4395 鹿児島県霧島市国分中央1-10-2)

E-mail: y-honda@daiichi-koudai.ac.jp

²非会員 LBMS, Université Bretagne Occidentale

³正会員 熊本大学大学院先端科学研究部

本研究は、1829年にフランスで建設されたグルネ橋を対象とした古構造学の事例研究である。石造アーチ橋に替わって吊橋が急速に普及し、さらに鉄橋も定着しつつあった時代において3径間上路式木造アーチ橋として完成した本橋は、木材を積み重ねたアーチリブや特許技術の適用など、設計者の革新的な試みが見られる興味深い事例である。これまで、グルネ橋の計画から施工に至る間に関係者の間で交わされた書簡の分析から、独特な構造の発想に至った要件を整理した。本稿では、設計者自身が作成した図面と特許資料を中心に、独特な構造の発想に至った経緯を整理する。

Key Words : *Timber arch bridge, patent, Barrès du Molard, 19th century, France*

1. はじめに

(1) 研究の背景と目的

本研究は、1829年にフランスで建設されたグルネ橋 (Pont de Gournay-sur-Marne) を対象とした古構造学の事例研究である¹⁾。石造アーチ橋に替わって吊橋が急速に普及し、さらに鉄橋も定着しつつあった時代において3径間上路式木造アーチ橋として完成した本橋は、木材を積み重ねたアーチリブや特許技術の適用など、設計者による革新的な試みが見られる事例である。

著者らはこれまで、グルネ橋の計画から施工に至る間に関係者間で交わされた書簡の分析から、①都市内交通と地域間交通のための橋梁に対する需要が存在したこと、②民間が主体となった社会基盤整備が可能であったこと、③土木局による技術的な支援があったことの3点を、設計者であるバレス・デュ・モラル (Barrès du Molard, 以下「モラル」と表記する) の自由な発想に基づく橋梁の実現を可能にした要件として抽出した²⁾。

本稿では、モラルが作成した図面資料及び特許資料を中心に、設計変更の経緯を整理した上で、独特な構造の発想に至る由来について考察を加える。

(2) 研究に用いた資料および既往研究

本研究では、セーヌ＝サン＝ドニ県 (Seine-Saint-Denis) の公文書館に保存されているグルネ橋建設に関する資料³⁾を中心に用いた。この資料は、グルネ橋の計画から

施工に関わった請負者、土木局の技術者、行政官らによって交わされた一連の書簡および図面群といった一次資料からなっているが、今回は特にモラルが作成した図面群に着目し、設計変更の経緯をまとめた。モラルはグルネ橋の設計とほぼ並行して、1件の発明特許と、これに関連する2件の完成・補足特許を申請し⁴⁾、承認を受けている。今回は、これらの特許取得にあたって作成された解説文と添付図も主要な資料として用いた。

現在出版されているフランス橋梁史を通史的にまとめた文献でグルネ橋を取り上げたものは今のところ見あたらない⁵⁾。また、モラルに言及した研究はいくつか見られるものの⁶⁾、本研究で対象とするグルネ橋との関連性について詳細な分析はなされていない。

2. グルネ橋の概要

グルネ橋はパリからおおよそ20km東に位置するグルネ＝シュル＝マルヌ (Gournay-sur-Marne) に1829年に建設された3径間の上路式木造アーチ橋である。アーチスパンはいずれも25m、ライズは1.725mで、各径間は3列に並置されたアーチリブによって構成されている (3主構)。それぞれのアーチリブは数層に重ねた角材の上下端をボルト締めすることによって形成された充側式アーチで、石造の橋脚・橋台とともに石造橋のような外観⁷⁾を呈していると評されている。アーチリブ

の上縁と下縁はそれぞれ厚さ 9mm, 幅 16.2mm の鉄板によって保護されている。本橋は幾度かの補修や補強を経ながら 33 年間供用された後の 1862 年に鉄橋へと架け替えられた⁸⁾。

当時フランスで建設されていた木造アーチ橋に同様の方法でアーチリブを作成した例は見られず、独特な構造を有するものと考えられる。本橋の完成直後にはパリのベルシーに同じ構造の橋梁を架ける構想⁹⁾もあったようだが実現には至らず、グルネ橋のみが唯一の事例である。

3. 設計案の変遷と特許申請の関係

グルネ橋の建設に向けた資料は 1823 年から確認でき、架橋の必要性等をまとめたレポート、架橋位置を検討した平面図や河川横断面図、橋梁の側面図なども作成されている¹⁰⁾。その後しばらく進捗はなかったようだが、モラルが最初の設計案を土木局に提出する 1827 年から、建設に向けた具体的な動きが見られるようになる。これに先立つ 1826 年にはアーチ橋に関する発明特許を申請している。

グルネ橋の設計図面は 4 枚残っており、いずれの図面にも共通して側面図、平面図が描かれ、必要に応じて断面図や橋脚基礎も添えられている。これらを時系列順に整理し、関係者が交わした書簡の内容と照らし合わせると、1827 年から 1828 年にかけて 3 回にわたって設計変更がなされていることがわかった。本稿では以下、4 つの案を第一設計案、第二設計案、第三設計案、最終案、と呼び分ける。1 章で述べたように、グルネ橋の設計と並行する形で、モラルは橋梁に関する特許を申請し、承認を受けている。本稿ではそれぞれを第一特許、第二特許、第三特許と呼び分ける。

資料に付された日付にもとづいて、グルネ橋の図面が作成された時期と、特許が申請された時期を時系列で整理したものを表-1 に示す。表からは、4 件の設計

案のうち、最初の 2 案が開側アーチ橋で、残る 2 案が充側アーチ橋となっていることがわかる。また、3 件の特許はいずれも新しい設計案の作成に先立つような形で申請される関係にあることもわかる。

表-1 モラルの特許申請及び設計案作成

年	日付	特許の申請と承認
1826	7 月 7 日	発明特許の申請 (木鉄混合の開側アーチ)
1827	10 月 12 日	第一設計案作成 (開側アーチ)
1827	10 月 26 日	完成・補足特許の申請 (積層構造の構想, 吊橋への適用)
1827	11 月 3 日	第二設計案作成 (開側アーチ)
1828	1 月 4 日	完成・補足特許の申請 (積層構造のアーチ橋への適用)
1828	3 月 21 日	第三設計案作成 (充側アーチ)
1828	11 月 17 日	最終案作成 (充側アーチ)

4. 開側アーチ橋の考案

(1) 第一特許

グルネ橋の第一設計案が作成される以前の 1826 年 7 月 7 日にモラルは初めての特許を申請する。「大スパン橋梁の新システム」と題されたこの特許では、モラルが考案した方式によるスパン 60m の 3 径間の上路式アーチ橋が提案されている。この木鉄混合システム of 具体的な適用例として、スパン 60m, ライズ 8m38mm の上路式アーチ橋が提案されている (図-1)。本橋はアーチリブを 6 列並置することでひとつのスパンが形成されている (6 主構)。アーチリブは 17 の部材から構成されており、これらの部材には一辺が 0.5m の木材が用いられている。部材同士は金属製の部品で連結され、アーチリブの上縁および下縁は幅 200mm, 厚さ 14mm の鉄板で覆われ、ボルトによって固定されている。

費用面においては、鉄を木材に置き換えて材料費を抑えることで、より経済的に大スパンアーチを架けることができるとしている。想定している樹種としては、床板のみポプラを用い、その他はすべてトルコカシ(オ

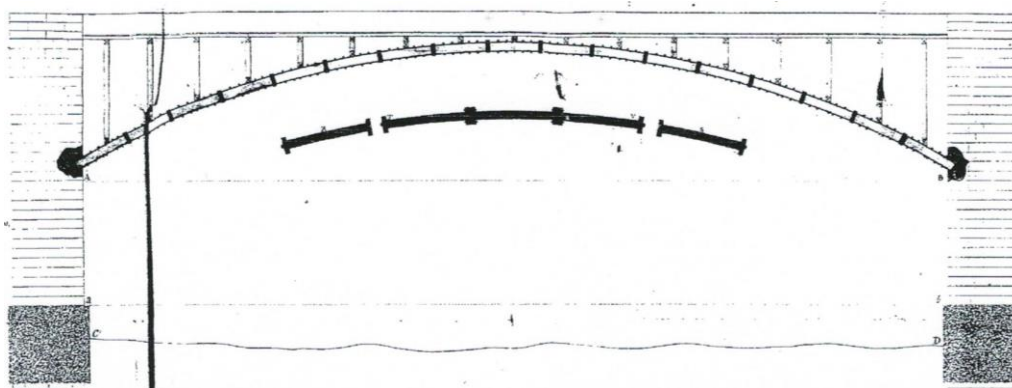


図-1 第一特許の説明図

ーク材)を用いているとしている。木材、鉄材ともに油性塗料を塗布することで耐水性の向上が図られている。また、橋脚と橋台が石造となっていることで、架け替えは上部工のみでよく、経済的な方法であることも強調されている。

(2) 第一設計案

グルネ橋の最初の設計案に相当すると考えられる図面が作成されるのは、上述の第一特許が承認されて一年以上経過した後の1827年10月のことである。図-2にモラルが作成した図面を示す。前節で見た特許では、スパン60mの3径間上路式アーチが想定されていたが、ここで設計案として提案されているのは、中央径間44m、側径間15mの3径間からなる4主構の上路式アーチ橋である。また、この図面には土木局の主任技師によって赤インクで橋台基礎、翼壁、船曳道、河床が追記されている。

図-3は中央径間のアーチリブを示したものであるが、アーチリブが9つの部材で構成されていること、部材同士が金属製と思われる器具で連結されていることが示されている。アーチリブの上縁及び下縁は金属板をボルト締めで固定する補強が施されていることも確認でき、第一特許にて示した構造を適用していることがわかる。

一方、スパンドレルの構造には第一特許とは異なる点が確認できる。特許ではアーチリブ上の支柱のみで床板を支える方式であったが、本設計案では支柱の間に筋交い状の部材が追加されている。この点についてモラルは「それぞれのアーチリブは横桁で連結され、

アーチリブと床板の間には斜材が設けられている。このふたつの部材によって、橋全体は十分な強さを得る¹¹⁾」と説明している。第一特許と同様、アーチリブが支柱を介して床板を支える方式であることに大きな変わりはないが、斜材を追加することで橋梁全体の剛性を高めようとしたものと考えられる。

(3) 第二設計案

第一設計案は土木局の検討を経て修正の指示を受け、1827年11月3日にはその修正案と思われる図面が作成されている。この図面は、側面、横断面、平面のいずれも片側だけが描かれ、第一設計案に朱書きで記入されていた訂正案が一部反映されている(次頁図-4)。

第二設計案では、スパン割りおよび主構の数に変更はないものの、スパンドレルの構造には大きな変更が加えられている。第一設計案では床板を支える支柱は垂直に配置されていたが、この案ではこれらの支柱は斜めに取り付けられている(次頁図-5)。支柱の数を見ると、中央径間では8本から16本に、側径間では2本から5本に増加している。さらに、橋脚、橋台付近には方杖状の部材と二重の桁が追加されており、全体的な補強を加えようという意図を見ることができる。その結果アーチリブのみが床板を支えるというよりは、斜材、床板が一体となっているような構造となっている。

5. 充側アーチ橋への変更

(1) 第二特許

第一設計案の作成からちょうど2週間後の1827年

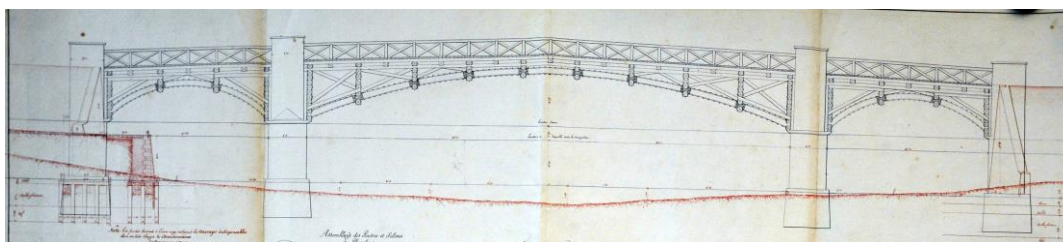


図-2 第一設計案

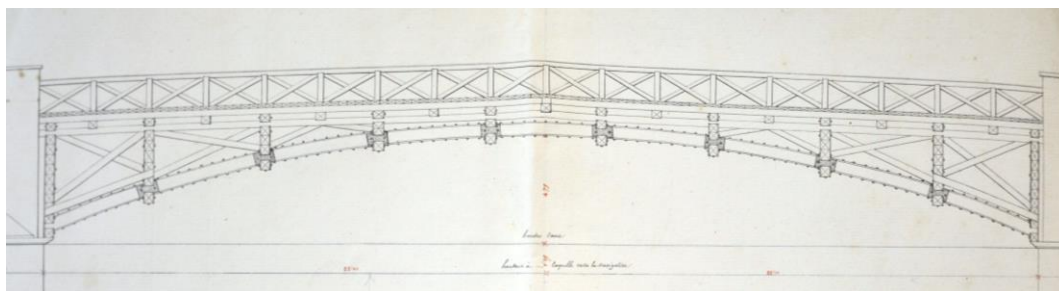


図-3 第一設計案中央径間

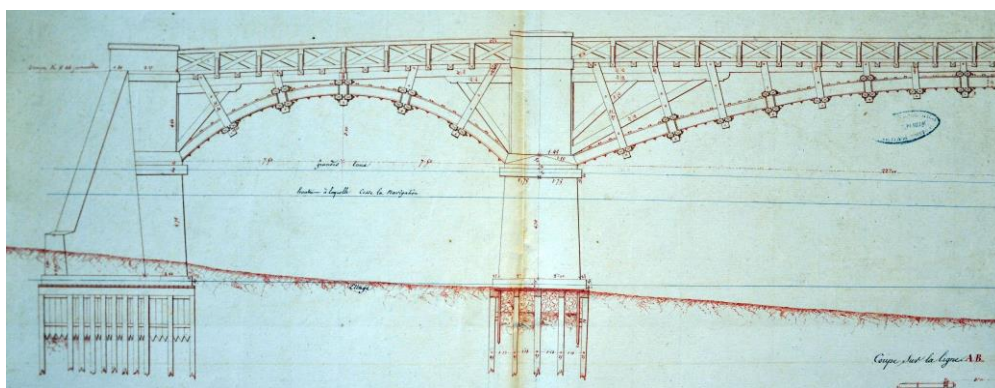


図-4 第二設計案の1/2 側面図

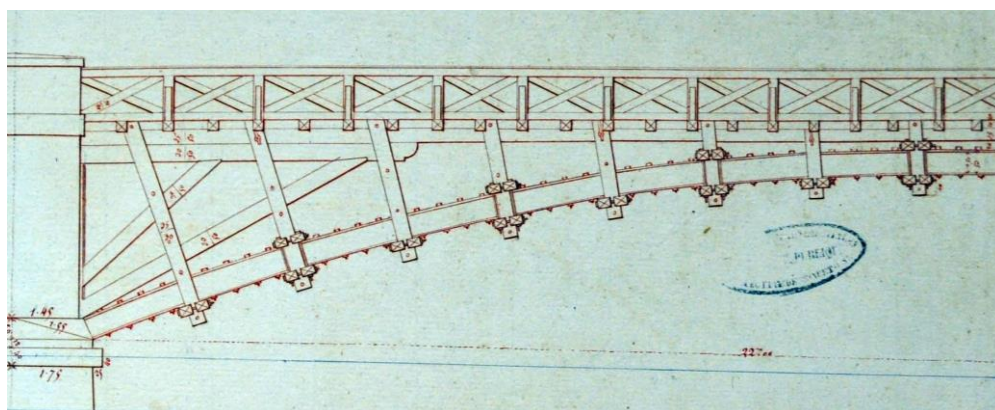


図-5 第二設計案の中央径間1/2 側面図

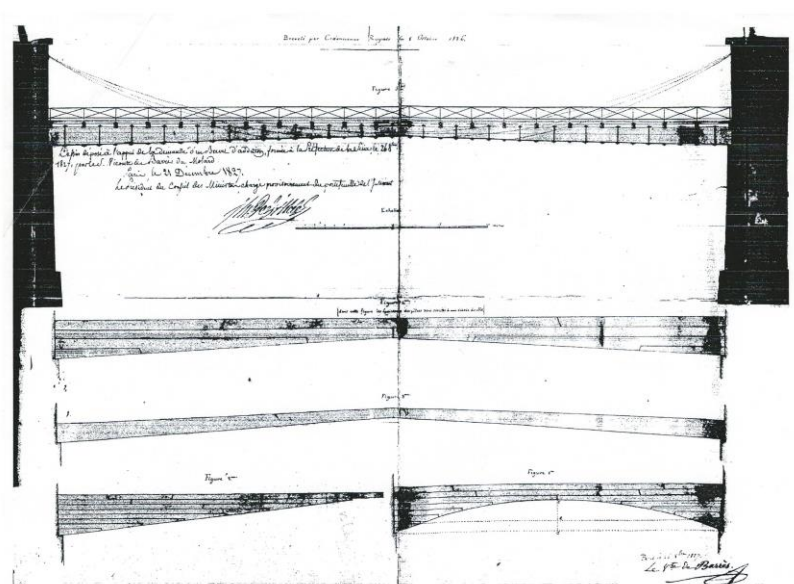


図-6 第二特許の説明図

10月26日、モラールは第一特許の完成・補足特許を申請している。この特許は、先述の第二設計案作成の1週間ほど早く申請されているが、実際の設計に反映されるのは後述する第三設計案以降である。

第一特許が開側アーチであったのに対して、この特許では角材を積み重ねて上下端をボルト締めで固定し、

アーチリブを構成するというアイデアが示されている。これはグルネ橋の最終案において採用される方法であるが、この段階では上落式アーチ橋への適用は想定されていない。図-6は、実際に追加特許として申請された説明図である。図中には5通りの側面図が示されているが、モラールの説明によれば、基本となる構造は

右下に示されているアーチ状の構造である。この構造は、スパンに対してライズが小さく、曲げ、圧縮、振動にも強いことが特徴として挙げられている。また、アーチ基部の部材を省略することでさらにライズを抑えることが可能になるとも述べており、モラルの扁平アーチに対するこだわりを見ることができる。

図中にはそのバリエーションとして曲線部分を直線としたものが3つ示され、具体的な適用例となる橋梁の側面図が付されている。一見すると桁橋に見えるこの橋梁は、両側の主塔上部に定着されたケーブル（またはチェーン）によってアーチリブを支持する構造となっている。モラルによると橋脚・橋台に荷重の大部分を負担させることでケーブルにかかる荷重を軽減できることや、桁の剛性を高めた上でさらに橋台上に設置することで振動を抑制しようとするなど、当時の吊橋が抱えていた問題に対する改善案の提示を試みている。

（2）第三特許

上記の第二特許が承認された約2週間後には完成・追加特許がさらに1件申請されている。この特許に添付された説明図には11通りの側面図が描かれているが、基本となるのは図-7の左上に示されている構造で、第二特許で示されていたものと同様に、橋脚からスパ

ン中央に向かって木桁を徐々にずらしながら積み重ね、上下端がボルトや金具で固定されている。

図中には、スパンドレルを構成する木桁同士がずれないように桁端部の形状を工夫したものや、アーチ下縁部が直線状になっているもの、曲線状になっているものなどいくつかのバリエーションが提示されている。モラルは解説文において、この構造が安定する条件として①アーチは荷重でたわまないほどに十分な強度を持った木材で構成されていること、②橋台と桁が十分に固定されていることの2点をあげている。第二特許でも見たように、解説文においてほとんどの場合に「アーチ」という表現を用いているが、この説明からは両端から桁が張り出すカンチレバーのような構造が想定されていることがわかる。

このアイデアの実際の適用例として、中央径間21m、側径間14mの3径間アーチが提示されている。本案については、一定年数経過後に必要な補修のための費用が大きくなることが問題点としてあげられている。一方、両側から張り出すように施工ができるため、足場を組む必要がないことを利点としており、架橋条件次第ではこの方式が採用されうると考えている¹²⁾。

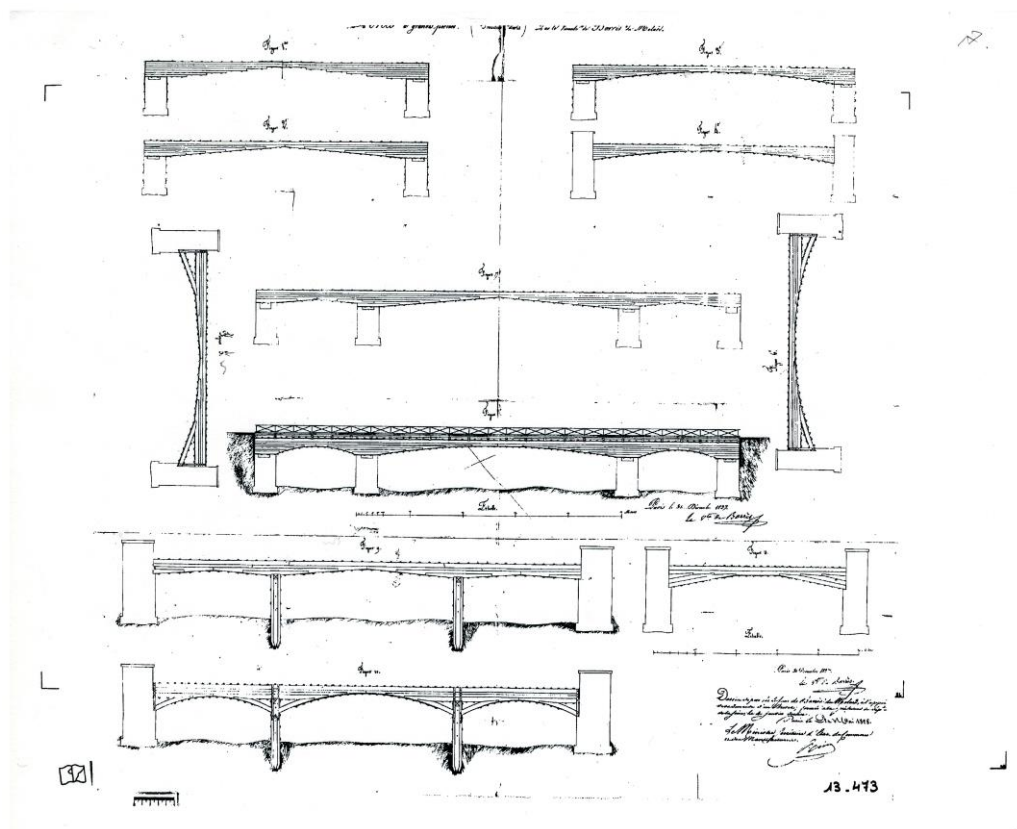


図-7 第三特許の説明図

(3) 第三設計案

第三特許の申請から4か月ほど経過した1828年3月21日、これまでの設計案とは大きく異なる第三設計案となる図面が作成されている(図-8)。本案は第一、第二設計案と同様の3径間アーチではあるが、スパン割りは15m+44m+15mから25m+25m+25mとなり、スパンドレルも開側アーチから充側アーチへと変更されている。

アーチリブは、第二特許及び第三特許において考案された積層構造へと変更されている(図-9)。この構造についてもモラールは引き続き「アーチ」と表現しているが、橋脚から斜め上方へ張り出した部材で水平に配置した桁を支持しているように見受けられる。桁の上下縁には鉄板が配置され、ボルトで固定されているが、これは第一特許から一貫して用いられている。

今回の調査で確認できた書簡類からは、一度承認された設計案を取り下げ、大幅に異なる設計案へと変更が可能となった理由は明らかではない。しかし、特許申請と設計変更が繰り返されていることを考えると、第三特許を申請した段階で、開側アーチから充側アーチへの設計案の変更が検討されていたのではないかと推測される。

(4) 最終設計案

第三設計案への変更が承認されたおよそ半年後となる1828年11月17日付で、最終設計案となる案がモラールから提出され、変更が承認されている(次頁図-10)。

スパン割りは直前の案と変わっていないが、アーチリブの下縁は直線状からアーチ状へと変わっている。

モラールは解説書の中でも曲線を用いる方が趣味が良いと述べていることから、この変更もデザイン上の理由によるものと考えられる。また、2本の橋脚の高さにも変更が加えられ、第三案では高欄の高さにまで達していた橋脚頭頂部は最終案では橋面と同じ高さにまで下げられている。この変更に合わせて橋脚上では高欄のパターンもやや変化がつけられていることから、グルネ橋の設計にはデザインの面にも配慮がなされていたことがわかる。

また、図面には示されていないが、現場に常駐していた専任技師の報告書からは、アーチリブの数が4主構から3主構へと変更されていたことがわかる。これは橋梁の設計において極めて重要な変更であるが、専任技師は大きな問題としては扱っていないようである。

ただし、それぞれのアーチリブには大幅な補強が施されている(次頁図-11)。ボルト締め箇所は37か所から51か所へと大幅に増加しており、アーチ形状を与えるために増設したと思われる斜材は3本から4本へと増加している。アーチリブを貫く横桁状の部材は42か所追加されるなど、全体的に剛性を高めることを目的とした変更がなされたものと考えられることができる。

6. グルネ橋の構造の由来に関する分析

(1) 橋梁設計におけるモラールの考え方

この特許技術においてモラールが目指していたのは「強固で、耐久性が高く、十分に偏平で橋面が平坦な大スパンアーチシステム」の確立である¹³⁾。このような考えに至った経緯をモラールは次のように説明してい

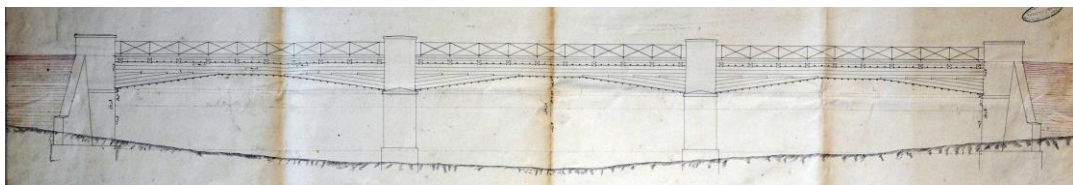


図-8 第三設計案の側面図

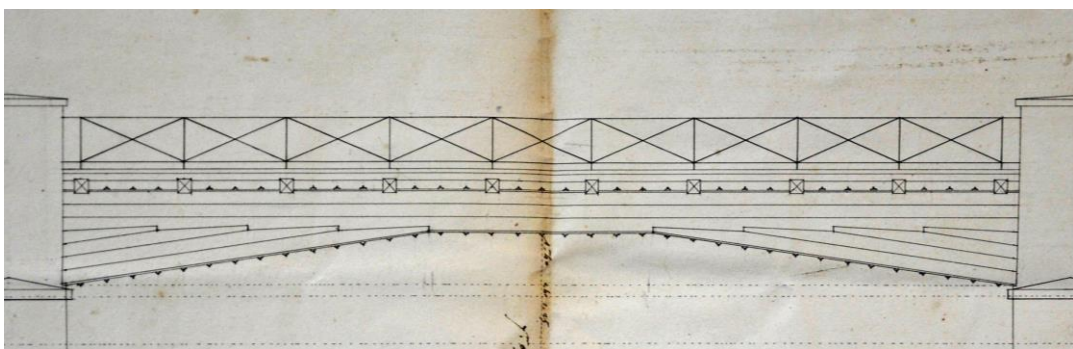


図-9 第三設計案の中央径間側面図

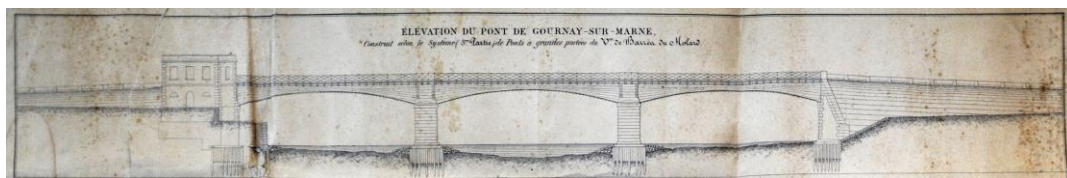


図-10 第四案の側面図

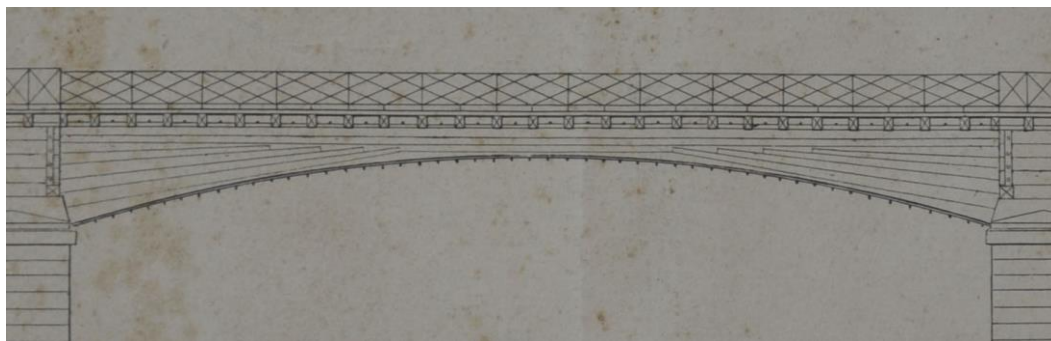


図-11 第四案の中央径間側面図



図-12 ヴィーベキングによる木造アーチ橋施工の様子

る。すなわち、石造アーチ橋の建設では橋台と橋脚によって川幅を狭めないことが重要であるが、そのためにアーチスパンを大きくしようとすれば路面の縦断勾配が大きくなる。その対策としてアーチを偏平にしようとすれば、橋脚および橋台の厚さを増す必要があるため、結局は川幅を狭めてしまうことになる結論付けている。さらに、この課題を経済的に解決することは国や民衆にとって大きな利益であり、日増しに入手困難になっている木材の利用を最小限に抑えつつ、鉄材を併用するシステムはこの課題を解決するものだと考えている。

(2) 積層構造のアイデア

前節で見た特許申請に至る背景からは、石造アーチ橋では実現が難しい大スパンの扁平アーチを、木鉄混合のアーチリブというアイデアによって解決しようという意図を見ることができる。ただし、18世紀末にはペロネのヌイイ橋によってすでに薄い橋脚と扁平なアーチを持った石造アーチ橋が完成しており、モラール

もこれを知っていたと思われるが、この点についての記述は見当たらない。

一方モラールは木造アーチ橋の発展史を概観する中で、18世紀末にペロネが考案しドイツにおいてヴィーベキングによって発展・完成された湾曲材による木造アーチ橋にも言及し、これを補完するものとして自身のシステムを位置づけている。丘組で角材を積み重ね、湾曲させた状態で固定することでアーチリブを構成するヴィーベキングのアーチ構造は(図-12¹⁴⁾)、グルネ橋の積層構造と共通するアイデアを見ることができる。

この湾曲材を用いた木造アーチは、ペロネが考案した扁平な石造アーチ橋のための支保工がもとになっているが、この点を踏まえると、モラールが独自の構造を考案するに至った背景には、木造アーチ橋の技術的な発展と、それを促した石造アーチ橋の技術的な発展があったと考えることができる。

(3) 軽量吊橋との関係

モラールの出身地は、1825年に建設された世界初の

軽量吊橋であるトゥルノン橋が建設されたアルデッシュ県であり、グルネ橋の設計・建設に関わっている間も、トゥルノンから 20km ほど南にあるヴァランスに活動の拠点を置いていたようである。1827 年にはヴァランスにて吊橋建設を請負っているが、同時期に申請した第二特許には、吊橋状の橋梁が提案されている。結局、この権利はジュール・スガンの会社に売却しているが、この事実は、モラルとスガン社並びにトゥルノン橋建設との間におそらく直接的な関わりがあったことを示している。吊橋が可能とした大スパンと平坦な路面の両立は、モラルが第一特許の冒頭で述べている考え方そのものであり、木材を用いた独自のアーチ橋としてその実現を追求した結果として積層構造を有するグルネ橋が完成するに至った。

7. おわりに

本稿では、古構造学の事例研究として 1829 年に建設されたグルネ橋を取り上げ、設計者であるモラルによって作成された 4 つの設計案の図面と、3 件の特許に添えられた解説文及び説明図をもとに、独特な構造を有するグルネ橋の設計に至るモラルの考え方を整理した。今後は、文献 2) で示した、独自性の高い構造が実現に至った外的要因と本研究で明らかにした内的要因とを整理し、古構造学の分析手法に向けた考察を進める予定である。

謝辞: 本研究は科学研究費（課題番号：18K00270）の助成を受けたものです。ここに記して謝意を表します。

(2021.4.19 受付)

参考文献・注記

- 1) 本田ほか：古構造学の創生へ向けて、土木史研究論文集 vol.26, pp.1-8, 2007
- 2) 本田ほか：バレス・デュ・モラルによるグルネ橋の設計経緯に関する研究、土木史研究講演集 vol.40, pp.153-159, 2020
- 3) Archives Départementales de Seine-Saint-Denis (A.D.S.S.D), 93/828 Pont de Gournay
- 4) 特許名は、Brevet d'invention を発明特許、Brevet de perfectionnement et d'importation を完成・追加特許とした（参考：『仏和大辞典』、小学館、1998）
- 5) 例えば Bernard Marrey : *Les ponts modernes 18e-19e siècle*, Picard, 1990
- 6) Michel Cotte : « Innovation et pont suspendu dans la France de 1825 », *Culture Technique* N°26, p.211, 1992
- 7) “Pont de Gournay-sur-Marne”, *Journal du génie civil*,

- p.178, 1829
- 8) A.D.S.S.D 93/828 Pont de Gournay
- 9) Journal du Génie civil, des sciences et des arts Tome IV, p.463, 1829
- 10) A.D.S.S.D 93/828, Projet d'un Pont en Charpente, de 7 travées, pour être construit à Gournay sur Marne
- 11) Mémoire joint aux dessins du pont de Gournay sur Marne, 12 oct 1827
- 12) 実際の施工では足場が組まれていたようで、早急な撤去を求める内容の書簡が確認できる（Lettre de l'inspecteur général de la Marne au préfet de Seine et Oise, 28 décembre 1828）
- 13) Barrès du Molard : *Nouveau système de ponts à grandes portées*, Paris ; 1827
- 14) Ritter Karl Friedrich Wiebeking : "Traité contenant une partie essentielle de la science de construire les ponts...", Munich, 1810