

世界初の本格吊橋トゥルノン橋の上部工について*

A study on the superstructure of Tournon bridge.

小林一郎**、ミッシェル・コット***、山下真樹****

By Ichiro KOBAYASHI, Michel COTTE, Maki YAMASHITA

ABSTRACT

During the beginning of 1820's, French engineers got a strong interest in suspension bridges, following the first American and British attempts. They developed two original ways for the suspension bridge design. One was a large theoretical study of suspension bridges, using the mathematical analysis of the French school of physics on early 19th century. The other was an empirical approach based on an accurate understanding of the "Technical system" of France. The Tournon suspension bridge, over the Rhône river, first gathered an impressive fruits of innovation :hydraulic concrete for foundations, attempt to use reinforced concrete, wire cable, trusses for the roadway framework... It was the rise of an European standard of construction.

1. はじめに

1825年完成のトゥルノン橋は当時一般的であったチェーンケーブルを用いた英米式の重量吊橋（第一世代の吊橋）に対して、ワイヤーケーブルを用いた軽量吊橋（第二世代の吊橋）であり、イギリスの歩道橋とフランスでの実験橋を除けば実質的に世界初の本格的規模のワイヤーケーブル吊橋である。筆者らは先にマルク・スガン（Marc Seguin、以下、マルク）の本橋の基礎工に関する研究¹⁾をまとめたが、本論文は上部工の建設の過程をマルクの書き残した「覚え書き」と「現場手帳」の記述から再現する。

さらに、上部工については、ナヴィエ(Navier)の「吊橋に関する報告と覚え書き」^{2, 3)}とマルクの「鉄線(fils de fer)の橋について」^{4, 5)}という、初期のフランスの吊橋に関する二大文献を読み比べながら、両者のワイヤーケーブル吊橋に関する考え方の違いを振り返る。

土木史におけるトゥルノン橋建設の特異性は、ひとつの橋梁の計画・設計・施工を巡って、二人の傑出した人物によって意見交換が行われた点にある。彼らは吊橋の設計において2通りの独創的な方法を追求して行った。一つは19世紀初頭のフランスの応用物理や応用数学に基づいた解析的方法⁶⁾であり、他方はフランスの手工芸技術に対する正確な理解に基づいた経験的方法である。両方とも、イギリス産業革命の直接的影響を受けているが、その起源はフランス独自のものであると良い。それらの成果は単にトゥルノン橋を完成に導いただけでなく、理論面でも設計・施工面でも、従来の吊橋とは異なる真に近代的な吊橋の開発を確実なものとした⁷⁾。

ワイヤーケーブルの使用とそれによって生じるい

*keywords: 吊橋、上部工、ワイヤーケーブル、フランス、マルク・スガン

**正会員 工博 熊本大学工学部環境システム工学科
(〒860 熊本市黒髪2丁目)

***正会員 研究員 Lyon第2大学 Centre Pierre
Léon.

(14, Av. Berthelot 69363 Lyon Cx 07, France)

****学生会員 熊本大学大学院工学研究科

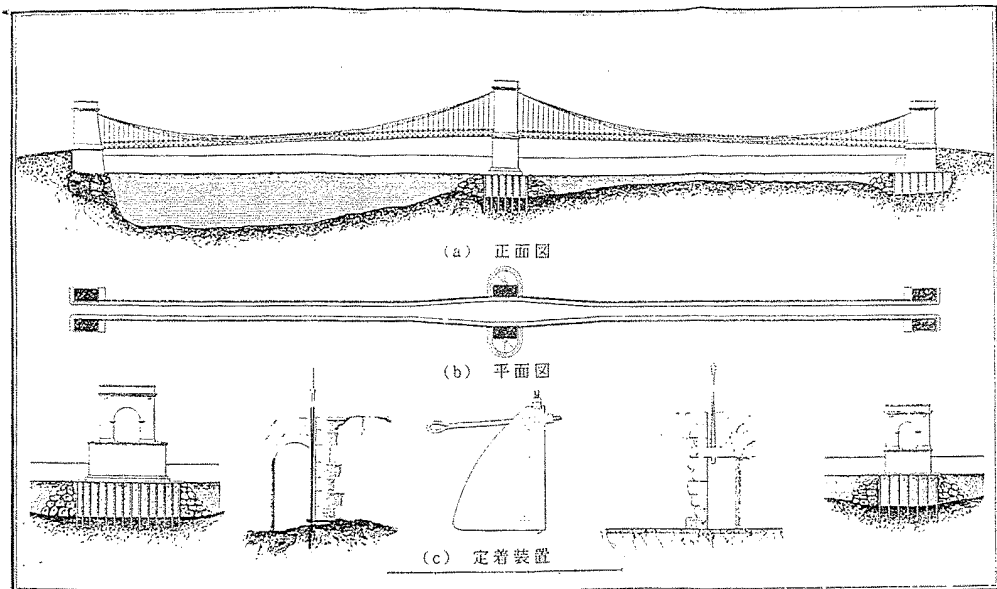
くつかの事項、たとえば、①ケーブルの強度や張力の推定、②ワイヤーケーブルの防錆、③マッシブな橋台、④橋門のコンクリート工の補強、⑤軽量な床組と補剛桁（高欄）等はひとつずつ解決されなければならない問題であった。そのひとつひとつの事柄に対して、主として実験に基づいて提案されるマルクの革新的なアイデアと主として理論的な帰結として出されるナヴィエの反論あるいは疑問は、お互いの対立とその後の思考期間による発展を繰り返し、両者にとって互いの進むべき道を明らかにした。その結果マルクは世界初の本格的なワイヤーケーブル吊橋の設計・施工者として、ナヴィエは吊橋の解析理論の完成者として、橋梁史にそれぞれの名前を残すこととなった⁸⁾。

1780年生まれのナヴィエは理工科大学（1802入学）、土木大学（1804年入学）を経て、官職につくが、1819年から土木大学の応用力学の助教授の職にあった。21年に固体力学に関する論文を書き、22年にはフランス科学アカデミーのメンバーに選出されている⁹⁾。1824年のトゥルノン橋建設着工の頃、ナヴィエは44才、マルクは39才である。マルクの経歴と土木史における業績の概要については既に、文献10)に示したので、割愛する。

2. トゥルノン吊橋の概要

いくつかの理由が重なって、フランスでは1820年頃に吊橋建設の気運が一気に高まった。1815年のナポレオン戦争終結の時点で、ルイ王朝時代に土木技師団によって建設された道路網の50%は維持管理されないまま放置され、多くの橋梁が破壊されていた。また、戦勝国への賠償金の支払いは戦後復興の大きな重荷であった。王政復古時代の1820年代になって、それまで建設が中止されていた運河網の再建を優先する法令が出され、フランスにおける交通革命が始まった。ただし、これは、起伏に富むローヌ炭田地帯の交通事情を根本的に改善するものとはならなかった。また、大都市近郊の長大橋梁に関しては、依然として石橋が多く、たとえば、1822年にはボルドーのピエール橋（全長500m）が完成している¹¹⁾。このような情勢の中、長スパンで安い橋梁の切り札として、吊橋がにわかに脚光を浴びた。

1821年と23年にはナヴィエのレポート（文献2))が出され、吊橋への関心に拍車をかけた。ナヴィエの著書はレポートの域を遥かに越えたもので、徹底した調査と彼自らが作成した吊橋に関する数学モデルの解析法が示されている。その内容は、第一部で、放物線形状のケーブルに対する橋軸方向の任意点での力の釣合を微分方程式で示してある。更に第二部では、フーリエ級数を用いた偏微分方程式の解とし



図ー1 トゥルノン橋の概要（文献5)より引用）

て、振動問題の解析を試みている。これは、橋梁の全体構造の解析法を数学的、演繹的手法で示した最初のものである。

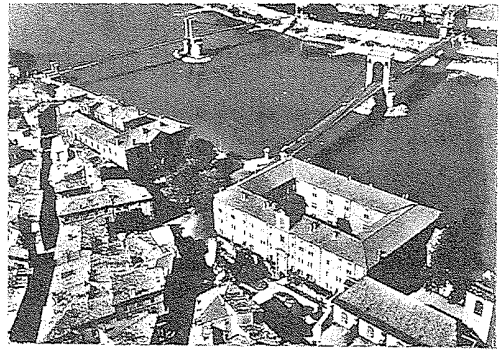
図－１は文献５）に示されたトゥルノン橋の概要を示したものである。ローヌ河中流のタン(Tain)とトゥルノン(Tournon)を結ぶ各87mの2径間の吊橋である。写真－１は第一トゥルノン橋と第二トゥルノン橋（手前）で、トゥルノン側から吊橋を見ている。第二橋は1847年に完成したが、これは完成直後から第一橋の桁下高が十分でなく船舶の航行に支障をきたしたとと拡張とが原因で建設された。第一橋はこの時点で桁の高さが、写真－２のように2m以上嵩上げされ、歩道橋として使用された¹²⁾。初期のスガン・タイプの吊橋の特徴の一つに、一車線の幅員で、中央の橋脚上に車の離合できる空間を設けていることが挙げられる。これらの橋のいくつかは、拡張計画のなかで廃橋となっている。

なお、本橋（実際には嵩上げ後の橋）はフランスにおいて歴史的記念物¹³⁾に指定されていたが1965年に大規模船舶の航行に伴う河道の改修計画によって廃橋となった。メインケーブル（写真－３）や高欄の一部はトゥルノンの郷土博物館に展示されている。

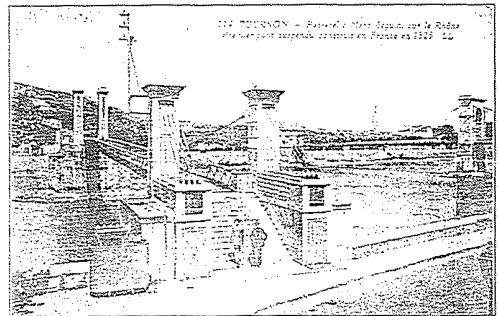
3. メインケーブルの長さや張力の算出

マルクが吊橋に関して最初に示した独自性は、メインケーブルの長さや張力の決定であった¹⁴⁾。1820年の時点では、まだナヴィエの報告書は出ていない。彼は、イギリスの事例を参考に、メインケーブルの形状を懸垂線と仮定し、ケーブルの長さを求めている。次に床版の重量を等分布荷重として、ケーブルに載荷した場合の張力を力の多角形を用いて求めている。ケーブルの長さを図解法を用いて求めることは、当時のフランスではすでに一般的であったが、張力を求めることは稀であった。このことは、土木局の技術者に対して、彼の計画を説得力のあるものにした。

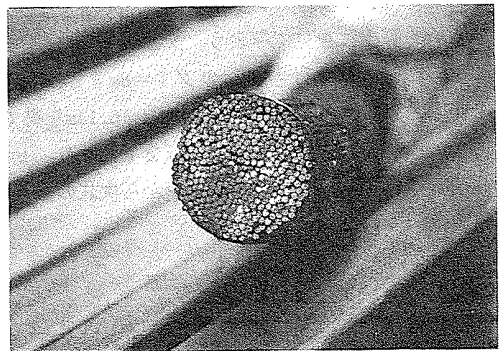
しかし、理論的研究は、マルクにとって関心の中心を占めるものではなく、数学は他の道具と同じく必要な時に一時的に用いるものであった。彼は、数値計算に関しても優れた天分を示していたが、実験を重視した。ナヴィエの理論計算にすら飽き足らず、ケーブルの長さの決定には模型を用いているが、そ



写真－１ トゥルノン橋（絵はがきより）



写真－２ 嵩上げ後のトゥルノン橋
（文献10）より引用）



写真－３ ケーブルの断面（著者撮影）

の数は10を下らなかった。多少自嘲的なユーモアで「直接実験するのは最も簡単で有効な方法である！」と述べている¹⁵⁾。

サグとスパンの関係もメインケーブルの形状を決定する際に重要なものであるが、マルクはこれを特

に重視していた。「数値計算と実験」からサグースパン比として1/10から1/12を推奨しながらも経験に基づくものとして、「サグとスパンの間に存在すべき関係の正確なルールを与えることは、容易ではない。立地条件、橋の規模、橋台などに用いる材料をはじめ多くの条件によって、様々に変化する。」と述べている。トゥルノン橋ではケーブルの固定点間89mに対してサグ8m、つまりサグースパン比1/11が用いられている¹⁶⁾。

さて、トゥルノン橋に関しては、次の3つの文献にメインケーブルの張力の推定に関する記述がある。

a. 1822年11月にトゥルノン橋の計画案の提出に関連して出されたのが「タン＝トゥルノン橋の覚え書き」¹⁷⁾である。

b. 文献4)は、1823年の鉄線の試験（後述）と秋のパリ行きの間（恐らく、夏の間）に書かれた。実際の出版されたのは翌年初めである。

c. 文献5)はトゥルノン橋の完成後、1826年に出された。この中では、ケーブルのモデル化に当たってはいくつかの変更が行われている。

ここでは、トゥルノン橋モデルについて、マルクの張力の算出法を見てみよう。文献17)では、図-2のように、スパン $L=89\text{m}$ 、サグ $f=8\text{m}$ とし、懸垂線の長さとしてケーブル長を 91m 、 $a=16.14\text{m}$ を得ている。これから、 a は近似的にほぼ $2f$ となり、 $b=48.0\text{m}$ とし、張力 F_A は力の釣合いから次式のように求めている。

$$F_A = \frac{1}{2} \times \frac{b}{a} \times P = 1.486P \approx \frac{3}{2}P = 258tf \quad (\text{a})$$

ただし、トゥルノン橋の全載荷荷重 P はここでは、1スパンに70kgの人間が1600人載るものとし、112tの群衆荷重と60tの死荷重の合計として、 $P=172\text{t}$ を用いている。設計段階で、ケーブルの引張り抵抗を600tfと見積もっているので、ケーブルの安全率は2.3ということになる。

文献5)では、1㎡当たり65kgの人間が3人載るものとし、1200人の群衆荷重と死荷重の合計として P を138tとしている。完成後の現場での載荷実験の最

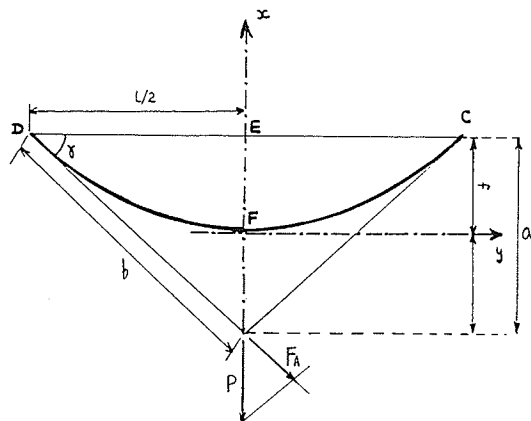


図-2 ケーブルの張力の算出（著者作成）

大荷重が142tとなっているので、設計荷重としては後者を用いたものと思われる。

ただし、上式を用いた翌年の文献4)の中には別の陽形式の式として次式を掲載している。以下の2式と上式を比較するため、上記の諸量を入れて、試算すると次の値を得る。

$$F_B = \frac{L \cdot P}{8f} = \frac{89}{64}P = 239.2tf \quad (\text{b})$$

さらに、文献5)にはナヴィエの式として次式が掲げられている。

$$F_C = \frac{P}{4f} \sqrt{L^2/4 + 4f^2} = 254tf \quad (\text{c})$$

放物線の仮定の下に得られたナヴィエの式に対して、式(b)は式(c)の第1項のみを用いた近似式となっている。このため、式(c)に対して式(b)は6%程小さな値となる。一方、一種の図解法である式(a)は極めて精度の良いものであることが判る。ただし、最終的には式(c)を掲載している点では、ナヴィエの式の優秀さを認めこれを採用したものと思われる。マルクの結論は次の通りである。「吊橋に関係のある2つの曲線（懸垂線と放物線）の特性は互いによく似たものである。従って、取り扱いが遥かに容易な後者（放物線）を使う方が良いだろう。それは、あらゆる条件の吊橋に十分に適用されるだろう」¹⁸⁾。

独自に問題解決を行う能力（ここでは数値計算の能力）があること、より合理的な解決方法があれば自説を捨ててもそれを採用するという柔軟性のあること、この2点は独創的な仕事をする人物に共通する必要条件であろう。

4. ワイヤークーブルの実験と製作

ワイヤークーブルのアイデアは、直接的にはマルクのそれまでのロープに関する知識から出ていると思われる。初めは麻等の自然繊維を用いたものが試みられ、次に細い鉄線を束ねて使うことが検討された。ただし、ロープの使用はローヌ地方では、日常的なものであった。すなわち、流れの速いローヌ河を船で遡ることは、難しいことで、強力なロープで岸から曳航するのは、ごく当たり前のことであった。たとえば、荷を満載した4連の平底船を引くには40頭以上の馬が必要であり、これに用いるロープは長さが4~500mのものが用いられた。更に、麻等の自然繊維を用いたロープを用いる橋に関しては、フランス・アルプス地方やスイスにおいて、フランス軍の軍事技術者(Military Engineer)が仮設橋梁としてワイヤー・ブリッジ・タイプのものや少数の歩兵の渡河用には3本ロープ式の吊橋を盛んに用いたが、これはルネッサンス以降の手法である。また、高品質のアイバーの製作がフランスでは困難であった一方で、鉄線は比較的安価で高品質のものが手に入る状況であったことも忘れてはならない。

1821年から22年の冬にかけて、マルクはプラニョル(Plagniol)の協力を得て、吊橋の計画案を立てるが、ここでは、既にワイヤークーブルが用いられることになっている。1821年12月8日号の世界報知新聞(Le Moniteur)で、マルクは、フィラデルフィア近郊のスクールキル河で細くて長い歩道橋の建設に、それぞれ2本のクーブル(真鍮製)とワイヤーが用いられたことを知る。「我々は、既にこのアイデアを考えていたが、この橋が成功したことを知り、我国にもこれ(ワイヤークーブル)を用いることとした」¹⁹⁾。1822年2月には、カンス河の実験橋において、1.2ミリの鉄線8本からなるクーブル6本が使用された。

クーブルの製作はアノネイ(Annonay)郊外のスガン社のサン＝マルク(Saint-Marc)の工場で行われた。そこには、工作用の機械や小規模の溶鉱炉を備えた鍛冶場があり、化学の研究室も併設されていた。はじめに、工場で弟のポール(Paul)とともにマルクが鉄線の強度試験、計測、データ整理を行った。図-3は彼らの作った実験装置で、梃子を用いて铸铁の棒の引張り試験を行っている。クーブルにおいても

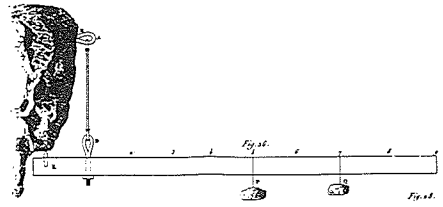


図-3 引張り試験装置(文献5)より引用)

同様の実験が行われ詳細なデータが得られた⁵⁾。次いで、ポールがクーブルの製作を担当した。他の商品同様に鉄線の注文を行うのはマルクの弟であるカミーユ(Camille)の仕事であった。

鉄線の製作は少なくとも8ヶ所の工場で行われ、スガン社に納入された。それらの内の何割かは、以前からスガン社と取引のあったリヨンの鉄製品を扱う商人から買い取ったが、それらの品質は極めて良かったようである。複数の会社の製品にバラツキのあることが危惧されたため、各社の製品について試験が行われた。結果的にはそのバラツキはほとんどなく、マルクらは、それらの製品をすべて同一のものと見なしてよいと判断している。ただし、価格も含めて、取引先として最も望ましい会社の選択を行うために、組織的に試験用の鉄線の購入を始めたのは、1823年の2月のことであった。

当時、鉄線の生産地として、最も優れていたのは、北フランスのフランシュ＝コンテ地方であったが、1825年まで、クーブル用の鉄線の購入先は一定していない。筆者らの推定によれば、1825年から31年まで18番鉄線(直径3mm)が500kg購入された。このうちにはフランシュ＝コンテ地方の5社が含まれている。恐らく、当時のフランスでは最良の鉄線が用いられたものと考えられる。吊橋のワイヤークーブルへの鉄線の使用は初めてではなかったが、スガン社の突然の大量購入の希望に、多少の在庫があった所も含めて、供給が追いつかなかったようである。このため、1824年冬にはカミーユがフランシュ＝コンテ地方を訪れているし、恐らく、マルクも1823年の英国旅行の帰途にこの地に立ち寄ったであろう²⁰⁾。

実験の目的は各製鉄所に伝えられた。その後の実験結果に基づいて、詳細な技術的指示の記載された注文書が出された。「我々は鉄線を最も好ましい細さになるように望んでいる。鉄線を18番に達するま

で、焼き鈍しせずに引き出してもらいたい」²¹⁾。

製作上の技術的要求については、はじめは良い結果が得られなかったばかりか、価格面でも、スガン社の望むレベルまでに引き下げられてはいなかった。その後、このような技術面での要求に答えることのできる会社が数社現れてきた。たとえば、ムレ・ヴェーユオレイユ(Mouret Veillorille)は、「焼き鈍しせずに鉄線を引き出すこと」というスガン社の注文に十分の理解を示した。1825年には、このような会社が大半の量の鉄線の供給者となっている²²⁾。

鉄線の輸送は樽に入れて行われた。量や製作上の技術的な問題以外にマルク達を悩ませたのが、鉄線の長さであった。しばしば、彼らの注文よりも短いものが送られてきた。サン＝マルクの工場に着くと、鉄線はケーブル製作のための処理が施された。防錆のために、沸騰した亜麻仁油の中に入れられたが、これは、一酸化鉛で表面を覆うためである。3mmの鉄線は、力学的な理由²³⁾によって選択されただけでなく、腐食防止のため、それ以上に細いものを用いない方が有利であるという判断によるものであった。オイル処理によって一酸化鉛と鉄の間に気泡ができることを防いだ。これは、各鉄線に塗られるニスの効果を高めるためのものであった²⁴⁾。

メインケーブルの引張り強度の推定については、ナヴィエは公式発言を控えることによって、マルクの張力に関する実験に同意する立場を表明した。ここでも、外力と伸びの関係を求めたマルクの実験的アプローチが優れていることが示されていた²⁵⁾。一方、ケーブルの酸化はスガン達にとって長い間心配の種であった。防錆対策は引張り強度の推定やメインケーブルの数学モデルといった問題以上に、ナヴィエの手になる土木局のレポートにおいて明瞭に批判の対象となっていた。ナヴィエを中心とする中央の技術者達のワイヤーケーブルに対する批判の大きな理由のひとつは、まさしく防錆の問題にあった。

いろいろの防錆法が試みられたが、決定的なものは見つけられなかったようである。ニスの塗られた鉄線は、順序よく並べられるように、2つの鑄鉄製の軸受けの間に巻き取っていった。ケーブルは鉄線によって規則的にバンドされ、現場で再びニスの上からタールが塗られた。

2つの軸受け間の距離は30mであった。この軸受け

を抜き取り、同様の作業を繰り返せば、3本の30mケーブルが作られる。これらのケーブルをチェーンのように繋ぐことによって約90mの本橋のメインケーブルが完成された。1本の連続したケーブルでない点からみると、本橋は当時の英米式のチェーンケーブルの変種であったとも考えられる。技術者は常に蓄積された過去の知恵を応用しながら、新しい構造を作り出して行くものである²⁶⁾。吊橋においても、歴史は後退しつつ未来に入っていくた。

橋脚や橋台にケーブルを固定するための鑄鉄製の定着装置(図-1(c))はリヨンの鑄物工場に発注された。ロワール・エ・イゼール(Loire et Isere)という工場で、当時、この地方では最も優れたものであった²⁷⁾。スガンは、この部品の木型をリヨンに送っている。兄弟の一人ジュール(Jules)はこの時期にリヨンに駐在し、デュフォ(Duphot)鑄物工場と協力し、スガン社が必要とする鑄鉄製品の製作の監督を行っていたので、木型の製作や部品の仕上げ等の仕事はスガン社にとっては容易なことであった。

建設の期間中、ケーブルに関連した細々とした部品はポールの指導の下、アノネイのスガン社の工房で製作された。そこは橋梁の現場とは独立した製作所であったらしい。1822年から23年にかけて、紙製品に関連した機械の試作には、多くのレポートを書いたマルクであったが、今回は、ノートにも現場手帳にも部品の製作に関する細かい記述は見られない。このことから兄弟の間に完全な分業体制が出来上がっていたことが判る。ポールは特にサン＝マルクにおいて技術面での主要な仕事を、カミーユは商業や金融面を担当していたし、1824年から25年の本橋の建設の時期、シャルル(Charles)がスガン社の本来の業務である毛織物や製紙用のフェルトの商売を行っていた。

5. ケーブルの設置

製作されたケーブルは陸路トゥルノンへ送られた。いくつかの不都合があったらしく、後にはスイスのフリブールのシャレーの吊橋²⁸⁾同様、現場でケーブルの製作が行われた。

1825年の6月後半には、使用可能なケーブルは石造の橋脚あるいは橋台上の橋門の上(以下、塔頂と呼ぶ)に設置された。ケーブルは塔頂に設置された

溝が切られた石製のベントに通された。さらに、鋳鉄製のケーブルの定着装置が塔頂に設置された。この装置はメインケーブルの長さを調整し、固定するだけでなく、鉛直下方に配置され橋脚あるいは橋台に固定される定着用のケーブルとメインケーブルを接続するためにも用いられた²⁹⁾。(図-1 参照)

ケーブルは二面吊りで、片側6本のケーブルを用いたので、2径間で合計24本のケーブルが必要であった。6月末までには、アノネイからのケーブルが現場に届きはじめた。ケーブルが張られる位置には、既に麻のロープが渡してあった。トゥルノン側の橋台の上にケーブルを送り出すための円筒状のローラーでできた装置が設置された。7月5日最初のケーブルの張り渡しを開始された。河の中央の橋脚の上にも橋台上と同様の装置が設置され、ケーブルの先に連結された麻のロープを巻き取っていった。

現場の鍛冶職人によって行われた最初のケーブルの設置は、多少骨の折れるものになった。すぐに設計の欠陥が明らかになったためである。設置したケーブルの長さが適当でなかったため、場所を少し変更しなければならなかった。片側6本のケーブルを鉛直面内にフェストーン（水平または鉛直面内に複数のケーブルを並行して設置する）式に配置するため、上段と下段では当然その長さは異なってくる。そこで、マルクは再度メインケーブルのそれぞれの長さを確認し、1番から6番までの長さの異なるケーブルを準備することとした。麻のロープ用の巻き取り機は後半は大工達が作製した回転式のクレーンに取り替えられた。初めは失敗の連続であった様であるが、難航工事であった下部工に比べれば、障害は無いに等しいものであった。

2個の滑車を備えた箱がメインケーブルに吊り下げられ、その中でハンガーの定着装置が取り付けられた。7月9日には、大工のヴィヴァレ(Vivaraïs)が、ケーブルのピンの位置に取り付けられていた麻のロープを取り除くために、この箱を使って50mを移動した。100mのワイヤーケーブルの架設という、未知の問題を巡って、試行錯誤の末、吊橋の構造、建設機械、施工法等に関する知識が少しずつ蓄積されていった。

7月12日以降、ケーブルの設置は順調に行われ、その後遅れることはなかった。1日に3本までと決

められ、12から14人が橋台上で、6人が橋脚上で、ケーブルの引き出し作業に当たった。16日にはトゥルノン側でケーブルの架設が完了した。同時に行われた定着用のケーブルの設置には、1人の大工と6人の助手が作業に当たったが、「いかなる困難もなかった」とマルクは述懐している。その後の桁と床版の架設も問題はなく、7月26日にはタン側のケーブルの架設も終了している。

これが終わると、3人の錠前屋(serrurier)がメインケーブルと定着用ケーブルの調整に従事した。定着用のケーブルも鋳鉄製の定着装置のボルトを用いて、橋脚基部の平均水位よりは高い位置にしっかりと固定された。塔頂の石張り部での応力の集中を避けるため、これらの装置の下に鉄板を、更にその下に鉛板を敷いた。タン側の橋台の建設法は明らかにされていないが、この時期「現場手帳」によれば、定着ケーブルのアンカー用に大きな花崗岩のブロックが搬入されている。

6. 橋門の建設と補強コンクリート(Beton armée)

橋台後方の基礎内でメインケーブルを定着する方法が検討されていたが、トゥルノン側の橋台で多少滑動に対する不安があることが述べられている。そこで、橋台上に石造の門を建てることにしたが、その転倒に関する実験的研究が1824年の2月から4月にかけて行われている。塔頂のメインケーブルによる橋軸方向への転倒だけでなく洪水時の水圧に対する安定性も問題にしている。マルクは橋門自体が曲げにより破壊することはないと考えていたが、曲げによるひび割れとその対策に腐心している³⁰⁾。

橋門の問題は、本橋に固有の特殊なものではなく、スガン社やその関連会社によって次々とローヌ河に架けられた初期の吊橋に共通のものであった³¹⁾。アルル近郊のフルク橋（現存する最古のスガン・タイプ吊橋、写真-4）は、歴史的記念物に登録され、現在も供用中であるが、橋門に関しての不都合は生じていないようである。ただし、橋門は後に、より細い橋門や門柱で橋台に力を伝達する構造へと変化していく。しかし、この時点ではまだ、橋台とケーブル定着装置の連成による力学的挙動はマルクとナヴィエの議論の中心的なテーマの一つで、「トゥルノン橋に関する報告書」の中でも、ナヴィエはマル



写真－4 フルク橋（著者撮影）

クの解決策に対してより厳密な解答を求めている。

マッシブな橋台を用いたことは、スガン・タイプの吊橋の2つの技術的な要件を示すことになった。橋台と橋門を均質につくるためには、橋台で用いたのと同じ手法が用いられた。すなわち、石積み内部にはコンクリートを使用し、さらに補強の鉄棒が用いられた。橋門の場合、マルクが配慮したのは、橋門基部での曲げによるひび割れであり、この対策として、鉄棒の設置が決められた³²⁾。

基礎工のときと同じく、基礎の石造部と3つの橋門の柱の基部との間の付着を確実なものとするため、鉄棒が用いられた。鉄棒はさらに柱の内部の最上部まで使用され、門上部のアーチ部にも水平方向に入れられた。「各門柱に4本ずつの鉄棒が使われた。それは、床版のレベルの下方0.5mから門のアーチの付け根の高さまでの間である」³³⁾。この構造は鉄筋コンクリートの先駆けを思わせるものであるが、ナヴィエの影響下にあった当時の土木技術者には否定的なものであった³⁴⁾。その後、鉄筋コンクリートの研究は19世紀末まで待たなければならなかった。

結果的にマッシブな橋台を用いることとなるもう一つの技術的特長は、塔頂でのメインケーブルの連結法である。塔頂で引張力を受け止めるために塔頂の石造部に定着装置を設ける必要があったが、この装置の構造そのものが、橋梁の全体構造を決定するキーポイントであった。図－1(c)（定着装置）に示すような鋳鉄製の連結装置で直交する2本のボルトからなるもので、ケーブルの長さを調整できるようになっていた。メインケーブルを水平方向のボルト

で塔頂に定着すると同時に、橋脚基部に固定する鉛直方向の定着用ケーブルを塔頂で鉛直方向のボルトによって定着装置に接続する。この装置は橋門上の圧縮力の配分に最適な形状をしていたが、それは数学的に求められたものではなく、ひとえに経験的なアプローチから導かれたものであった。

スガン兄弟は木の場合と同じく、石の強度についても丁寧に調べ、その結果を記録している。鉄線の場合にも発揮された材料特性に関する関心は、スガン家の人々に共通する特質であり、特に技術者であり企業家であるマルクにおいては顕著である。工学的な問題点を正確に分析しようとする時、彼らはいつも科学的であり、特に組織的で経験的であった。

7. 吊橋の振動と共振

マルクはローヌ渓谷における強風に対して水平方向への桁の揺れの対策として、はじめは耐風用のケーブルを設置すること考えていた。しかし、これは、早々に放棄された。ナヴィエのイギリスの吊橋のレポート（特にユニオン橋の例）には耐風ケーブルは効果無しと結論づけられていた。この、対応策として、マルクは2本のメインケーブルの間隔を桁よりも少し広げ、ハンガーを鉛直方向から数度傾けて設置することとした（図－4参照）。これらの対策は有効で、トゥルノン橋においては、水平方向の振動は抑えられている。しかし、マルクが危惧したのは、むしろ、平行に配置したケーブル間の長さの違いからくる相互の摩擦であった。多数の縦桁の採用もまた水平方向の振動を避けることに寄与した。

第二の問題は、より困難なものであった。歩行者による振動、あるいは嵐による強風時の振動によって生じるいわゆる「共振現象」である。ナヴィエは正弦曲線を用いて、吊橋の固有値を出しているが、それが、外部の要因によって共振する可能性については言及していない。ナヴィエは当時のイギリスの吊橋に関する事故のいくつかについて、その原因の特定を誤っているようである。一方、マルクは生活実感に即した直観から共振現象を理解していた。

「橋の揺れを生じさせるような、全ての原因についてその結果を考える必要がある。激しい風や軍隊の歩行はイギリスの初期の吊橋が耐えなければならなかった最も厳しい試練であった」³⁵⁾。マルクは、当

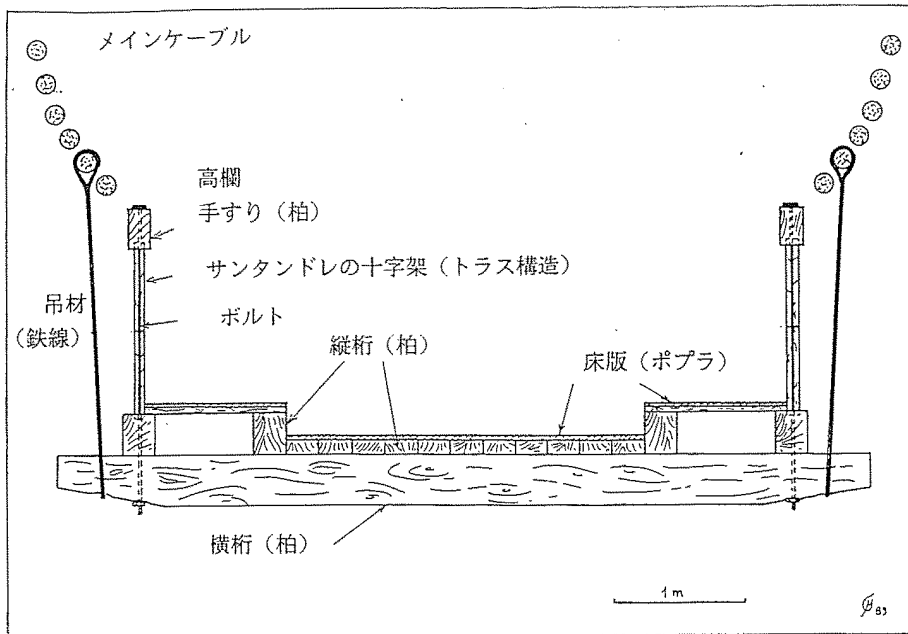


図-4 桁の断面図 (著者作成)

時としては共振現象を正しく理解した数少ない技術者であった。

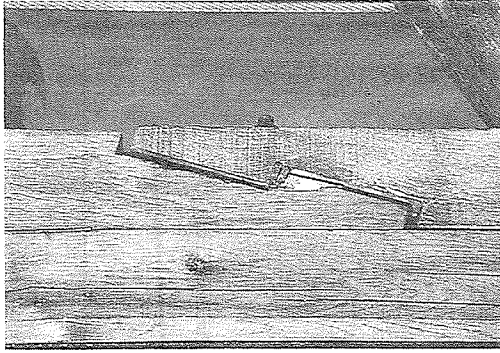
マルクの物理的な直観は、恐らく吊橋の実験観察から来ていると思われる。彼は、1821年から22年の冬にかけ、サン＝マルクの工場敷地内のカンス河に実験橋を架けている。また、トゥルノン橋建設の初期の協力者であるプラニョルも1822年にショメラック(Chomérac)のペイル河に吊橋を架けている。カンス河橋はアノネイ地方で評判となったが、数カ月後には安全上使用を中止せざるをえなくなり、その後取り壊された。当時、この吊橋を訪れた人々の最大の楽しみは橋を揺することであった。マルクの眼前で、実物大模型による共振実験が日々繰り返されていたのである。一方、ペイル河橋は嵐によって落橋したものと思われる。直接現場の調査を行ったにもかかわらず、マルクをはじめ協力者たちの誰もこの事故に注目しなかったらしく、原因についての考察は見あたらない³⁶⁾。

共振対策のもう一つのアイデアは、1826年にスガン社のアドバイスの下に書かれたアルデッシュ県知事の手紙が全てを尽くしている。「数多くの人々が規則的に行進するために生じる結果(橋の揺れ)を防ぐために、本橋(トゥルノン)を渡るとき足並みを揃えることを止めるという警察当局の規則を軍当

局が遵守されますようお願い致します」³⁷⁾。

いずれにしても、マルクの結論は桁の剛性を高めることであった。彼は次のように述べている。「吊橋の床版や梁の第一条件は、極力剛性を高くすることである」。「ただし、そのためには、各部材間の接合には十分の注意を払う必要がある」。

しかし、マルク自身は、高欄と床版の間を補強することは1823年の終わりまでは考えていなかった³⁸⁾。大工の棟梁のバルジョとの幾度かの議論を通して、徐々に形を表して来たのが「サン・タンドレの十字(croix de Saint-André)」の形を踏襲した高欄による補剛で、「ジュピターの矢(trait de Jupiter)」と呼ばれる木造建築の接合法で部材の接合が行われた。これも、中世以来の大工のギルド内で伝えられたものである。写真-5に第2トゥルノン橋の高欄を示したが、これとほぼ同様のハウトラス形式のものが用いられていた。この高欄は、マルクによって1824年夏サン＝ヴァリエ(Saint-Vallier)のガロール(Galaure)河橋にはじめて用いられた。「大変固い手すりは剛性が高く、15人から20人が橋の上を歩いても、ほとんど振動を感じない様である。私は3人の弟達と歩調を合わせて歩いてみたが振動しなかった」。「建設に際して、床版の剛性を高めることに高欄が寄与するかという観点で考えた。ナヴィエ氏の定式



写真－５ ジュピターの矢（著者撮影）

を用いて柔構造である場合のたわみを求めると500kgの馬が通過するとき、11cmとなるはずであるが、これがほとんど求められなかった」³⁹⁾。

この評価は恐らく楽観的なものであろう。しかし、30mの吊橋はマルクの方法の有効性を示していた。このアイデアの起源について、マルクは「アメリカでは、通常1/7のサグスパン比が用いられる。これは強度の点で優れているが、鉛直方向の振動に対しては不適当である。・・・しかし、この場合彼らは、床版を重くし、高欄を用いて剛性の向上を図っている」⁴⁰⁾としているが、1826年（トゥルノン橋完成の翌年）に遅ればせながら出されたこの本には、補剛桁の直接的なインスピレーションの源を示しているというよりも、自らの選択の正当性を示そうとしているように思われる。

いずれにしても、マルクの振動対策は構造の剛性の向上であり、桁の重さを上げることで橋のフォルムを変更することでもなかった。彼は、他の人のアイデアを多く取り入れているが、それらを再分類し、一つの調和した技術として構成し直した。これは、新しい創造であり、マルクの独創であるといつてよいだろう。下部工の施工のときと同じく、完成した構造物そのものにも総体として革新的な土木構造物の誕生を見ることができる。

ナヴィエは著書の中で振動問題に関連した2つの事項に取り組んでいる。一つは重量の重い馬車の通過に伴う床版の変形であり、もう一つはそれによって生じるメインケーブルの振動である。1825年8月のトゥルノン橋の載荷実験において、スガン社の軽

量桁は変形しやすいものであることが示された。弾性に富むワイヤーケーブルは、荷重によって懸垂線に変形したが、桁等に損傷はみられなかった。載荷実験においては、合計69トンの分布荷重と馬車による5トンの集中荷重がかけられ、桁中央でのたわみは32.5cmに達している。

結果は、この規模の十分に補剛された吊橋に対して、マルク自身が予想していたたわみを上まわるものであった。しかし、馬車の通過時のたわみ易さは、メインケーブルのたわみに木製桁のたわみが連動しているためであり、むしろ、後にスガン・タイプの吊橋の動的特性のメリットと考えられたものであった。これらは、1823年春の模型実験でも確かめられていたことである。

8. 高欄と床組

最初の案と最終的に建設された床組の間には重要な進歩の跡を見ることができる⁴¹⁾。それは基礎工の場合と異なりマルクの思考の賜であった。彼は、施工の始まるまで、一人で十分の時間をかけてこれらの問題に取り組んだ。さらに、木材の強度に関する詳細な情報を探している。当時、中小河川はもとより、ローヌ河においても木橋が最も多く架けられていた⁴²⁾。このため、木の床組に関する技術は飛躍的に発展していたが、吊橋のようにたわみ易い構造における木製の高欄や床組の挙動の検討は新たに解決されなければならない問題であった。

トゥルノン橋の建設に至るまでのマルクの床組や高欄の設計を振り返ると、それらは初めから明確な形が決められていたのではなく、徐々にその形式が完成して行ったことがわかる。

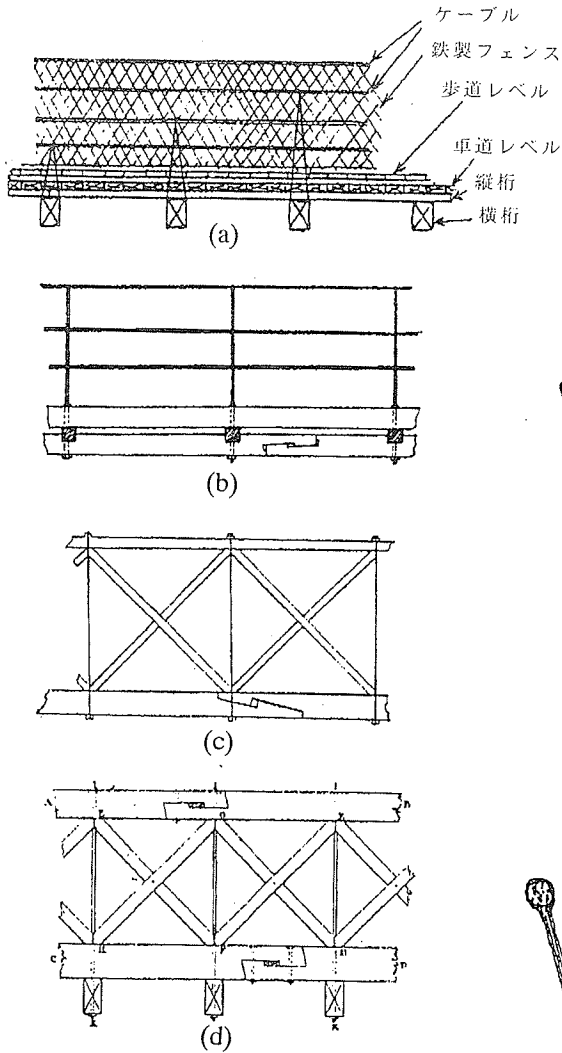
図－5に高欄の変遷を示し、それぞれの概要を次に述べる。

a. トウルノン橋（1822年の計画案）

鉄のフェンスで最上部の手すりには細いケーブルを用いている。縦桁のみが剛性を持つ。

b. ジュネーヴの吊橋（1822年計画、23年完成）

この橋はマルクとデュフルによって計画された歩道橋で、施工は後者が行った。ここでは、縦桁が2本配置されている。



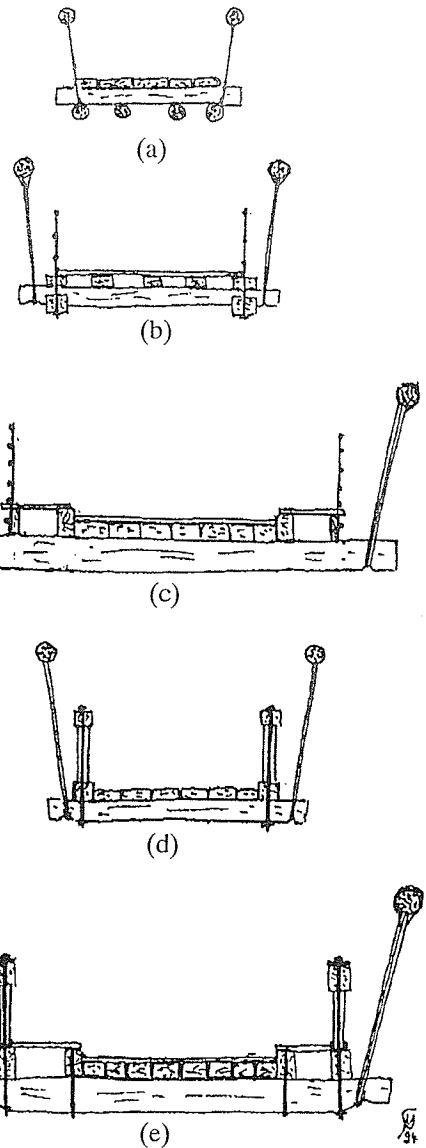
図ー5 高欄の変遷図 (著者作成)

c. トウルノン橋 (1823年の設計案)

サン＝タンダレの十字と垂直材にボルト・ナットを用いたトラス形式を初めて提案した。

d. トウルノン橋 (1825年完成)

トラスの上下弦材の機能が明確に意識され、垂直材のボルトは横桁と高欄を一体化させ、張力が導入されている。



図ー6 床組の変遷図 (著者作成)

図ー6 には床組の変遷を示し、その概要を述べる。

a. カンス河橋 (歩道橋、1822年完成)

床組は典型的な木橋のものであり、横桁の上に縦方向の床版が固定されている。さらに、それらを上方の2本の主ケーブルと横桁の下方に配置された4本のケーブルで支えている。補剛トラスはまだ考えられていない。

b. ジュネーヴの吊橋（1822計画、23年完成）

この橋はマルクとデュフル（Defour）によって計画され、施工は後者が行った。大きくなった横桁の下と上に縦桁が配置され剛性の向上をはかった。

c. トウルノン橋（初期の案、1822年計画）

木製の床版の下に連続した縦方向の梁を配置し、さらにマルクの吊橋の中では補剛トラスのアイデアが初めて登場した。

d. ガロール橋（歩道橋、1824年完成）

マルクの吊橋の中で、初めて高欄に補剛トラスが用いられた。トラスには鉛直方向に鉄製のボルトが用いられている。

e. トウルノン橋（最終案、1825年完成）

メインケーブルの場合と同じくナヴィエとの論争によって、マルクの直観的・現実的アイデアが熟していったものと思われる。ナヴィエは動揺や振動の問題を数学的に解析することの重要性には同意していた。この問題は二人にとって吊橋における最も重要かつ困難な問題であるという共通の認識があったが、興味深いことには、二人の思考法とそれから得られた結論は全く対照的なものであった。

ナヴィエは理論上の予測から「床組が重ければ、それだけ振動は抑えられる」とし、重量桁モデルを推奨した。実際に彼の設計したアンヴァリッド橋は、铸铁の床版が用いられることになっていたが、土木局によって拒否され、より弾性のある木製の床版に替えられた⁴³⁾。この点に関してはマルクの考えに傾いた土木局の技術者の判断にナヴィエが従わされたといつてよい。

これに対してマルクは全く反対の結論に達した。彼は完全に木製の極力軽い桁を選んだ。ワイヤーケーブルの場合と同じく、床組においても、彼の選択はいくつかの異なる理由によるが、それらは、決して矛盾してはいない。第一の理由は、経済的なものである。スガン社としては、まず何よりも最も安い案を採用する必要があった。第二の理由は、企業としての技術力のレベルの問題である。ローヌ地方はフランスの中でも先進的な地域ではあったが、労働

力の質、特に、铸铁や鉄の生産能力を考えると、木を使わずに短期間に安くて良い橋を建設することは不可能であった。

現実を直視すれば、スガン社には木の床組以外の選択の余地はなかった。特に、この地方の木工技術は水準が高く、優秀で知的レベルの高い大工を集めることができた。後年、蒸気船の建設において、冶金やボイラーの職人を集めなければならなかったとき、スガン社の望むレベルの者を集めることが出来なかった⁴⁴⁾ことを考え合わせると、木の床組を選択したことは適切なだけでなく幸運な判断であったといえる。木製床組もまた「スガン・タイプの吊橋」の独創的で基本的な要素のひとつとなった。

マルクは、技術的には桁もメインケーブルも軽くて剛性の高いものにすべきであると考えていた。ナヴィエの理論だけでなく、1820年代のイギリスのデルフォードやバーローの大規模吊橋やフィンレイによるアメリカの初期の吊橋の基本形式はみな重量吊橋であった。しかし、軽量の桁のアイデアの源は、1821年にブラウンによって完成した軽量桁のツィード河のユニオン橋である。マルクはこの橋の建設コストの安さに注目し、トゥルノンの橋梁計画に吊橋を用いることを決断したと述べている⁴⁵⁾。

表－1はトゥルノン橋⁴⁶⁾、アンヴァリッド橋⁴⁷⁾とユニオン橋⁴⁸⁾の3橋についての重量の比較を行つ

表－1 3橋の荷重の比較（著者作成）

	トゥルノン橋	アンヴァリッド橋	ユニオン橋
橋 長(m)	87(x2)	150	110
幅 員(m)	4.2	8.7	3.05
床組重量(t)	60(x2)	388.4	100.0
吊材重量(t)	8(x2)	196	15.8
死荷重 総重量 (t) 単位面積当り (t/m ²)	68(x2) 0.186	584.4 0.448	115.8 0.345
活荷重 総重量 (t) 単位面積当り (t/m ²)	74(x2) 0.203	255 0.195	47 0.140
荷重合計 総重量 (t) 単位面積当り (t/m ²)	142(x2) 0.389	839.4 0.643	162.8 0.485
活荷重率	0.52	0.30	0.29

たものである。吊材にはメインケーブルとハンガーの重量を含めた。重量吊橋であるアンヴァリッド橋の床組の単位面積当たりの総死荷重 0.448t/m^2 は、トゥルノン橋の 0.186t/m^2 の約2.4倍である。橋長や設計荷重も異なるため、3橋の値を単純に比較することはできないが、軽量吊橋のアイデアが、ワイヤーケーブルを用いたことによる死荷重の軽減から来ていることは表-1からも伺える。活荷重率も0.3から0.5へと上がった。このような軽量化による経済的成功によって、スガンの吊橋はヨーロッパ大陸において主流となる⁴⁹⁾。

床組はリオンで購入したブルゴーニュ産の柏の木が用いられた。木材は筏にして、ローヌ河をトゥルノンまで運ばれた⁵⁰⁾。他の木材、特に松は、いくつかの場所から調達されたが、いずれも、ローヌ地方のものであった。木材は搬入されるとすぐに切断をおこなうチームによって切り揃えられた。1825年1月25日から床組の製作が開始された。新たに木工の製作所が造られ、トゥルノンのある廃校の庭に製材置き場が造られた。

高欄のトラス部材を加工するための機械が現場に搬入された。部材を作るための段取りはすべて棟梁であるバルジョの指示通りに実行された。木材の強度と変形については、スガン社であらかじめ検討がなされた。横桁の断面形状については、これも、例によって、バルジョとの話し合いの結果、変形に対してよりよく抵抗するものとして下側がカーブした、いわゆる魚腹状のもの（図-4）が2月19日に採用された。この横桁の下方には、後に、活荷重の繰り返し载荷による破損を防止する目的で、マルクによって、ケーブルが取り付けられた。平行線ケーブルを往復させ桁の両端に設置した鋳鉄性の軸受けで固定し、横桁の中央にあらかじめ設置した小ジャッキによって、緊張したもので、キングポストの形式であり、一種の外ケーブルシステムによる補強であり、この橋以外にもいくつかの橋で使用されている。

木材の製作は夏まで続けられた。最初の縦桁が7月終わりに架設され、床組の建設がそれに続き、最後に高欄が指物師によって作られた。「ジュピターの矢」の締め付けが行われたあと、手すりとは横桁の間が、長いボルトで締め付けられた。メインケーブルにおける定着装置のボルトと同じく、このボルト

の定期的点検によって橋の管理が行われることになっていた。

活荷重分担率の大きな構造の弱点を補うため、マルクは、メインケーブルも床組も保守点検によって調整可能な構造としている。また、横桁の補強にケーブルを用いた例からも構造上のトラブルに柔軟に対応している。本橋が、公共の永久構造物ではなく、一私企業の営利目的（有料道路）の構造物であることを考えれば、経営者が常に維持管理に注意を払うことは当然のことであった。本橋のように設計・施工者と経営者が同一の場合、問題はないが、スガン・タイプ吊橋が、スガンの手を離れ急速にヨーロッパ大陸に広まって行ったとき、本橋建設の経緯や「この形式の橋」の特徴のいくつかは忘れられてしまった。正しい維持管理の不履行から発生した「活荷重による振動」と「錆によるメインケーブルの劣化」⁵¹⁾がヨーロッパでの「早すぎる吊橋ブームの終焉」を用意したといえるし、これらの克服の歴史がそのままアメリカ大陸における長大吊橋建設史となっていく。

床組は8月19日に完成し、高欄の下弦材の部分のタール塗りによる木製部の保護やペンキ塗りが8月25日の開通式に合わせて続けられた。メインケーブルの仕上げのニス塗りやその他の付帯的な仕事（たとえば、橋門の漆喰塗り、塔頂の工事や門の取付）はマルクの代理を務めたデスモルやトレベネの指揮の下に完成した。さらに、前述の現場での载荷試験を経て、開通の運びとなった。

9. まとめ

マルク・スガンの設計、施工になる世界初の本格吊橋トゥルノン橋の上部工の完成までの歴史的経過をマルク本人の「現場手帳」や「覚え書き」を基に再現するとともに、本橋が近代吊橋の真の意味での礎石であることを述べたが、その内容は以下のようにまとめられる。

1) フランスで始まったサブワイヤーを用いた吊橋が近代橋梁の主流となり得たのは、ナヴィエに代表される応用物理学を用いた吊橋理論の構築とスガンに代表される伝統的で実践的な手工芸技術に基礎をおいた吊橋技術の完成、という2つの流れの両方が

あったためである。また、それらはイギリスの産業革命の影響のもとに発生したが、ともにフランスの伝統文化に根ざしたもので、当時のイギリスの吊橋の理論や技術のコピーの域を脱していたし、従来のチェーンケーブルの吊橋とは異なる真に近代的な吊橋の開発を確実なものとした。

2) ワイヤークーブルの張力の算出に当たってマルクの懸垂線による方法とナヴィエによる放物線による方法のあったことを示し、これらの式を用いてトゥルノン橋の張力を試算し、ナヴィエの式以前に出された、マルクが独自に定式化した簡便法が十分に実用に耐えるものであったことを示した。

3) 橋台、橋脚の基礎工への鉄棒の使用に続いて、橋門の柱およびアーチ部にもコンクリートのひび割れ防止を目的として鉄棒が使用されたことを述べた。補強コンクリートについては多様な使用例が1820年代に既に存在していたが、ナヴィエをはじめとするフランスの中央官僚は主に、コスト面からコンクリートへの鉄棒の使用に否定的であった。

4) メインケーブルの面外方向への動揺や面内方向の振動に関するマルクの知識は実験橋の振動の観察を通して得られたが、吊橋の共振問題に関しては、ナヴィエの認識と比べはるかに正確にその現象を把握していた。二面のメインケーブルの間隔を塔頂で広げることで、面外方向の動揺の防止をはかった。

5) 軽量吊橋の基本的要素である軽量の床組と補剛トラス（高欄）に関するマルクのアイデアの発展を図示した。それらの形状は、フランスの伝統的木工技術をヒントにしながらも、マルクの独創になるものである。ただし、活荷重の分担率の大きな構造を管理の徹底によって維持しようとするマルクの吊橋に関する思想は、管理者がそれを理解しない場合には危険を伴うものであり、1850年代の吊橋の落橋事故の遠因でもあった。

10. 謝辞

本論文の執筆にあたり、鹿島建設の鈴木圭氏には、ナヴィエに関する資料を御提供戴きました。また、

熊本大学工学部崎元達郎教授と本論文の査読委員の皆様には貴重な御意見を戴きました。記して謝意を表します。

注と参考文献

- 1) 小林一郎、ミッシェル・コット：マルク・スガンの設計のタン＝トゥルノン橋の基礎工について、土木史研究、第15号、pp175-186、1994年。
- 2) Navier, C. : Rapport et Mémoire sur les ponts suspendus (「吊橋に関する報告と覚え書き」)、第1版、第1部 1821年、第2部 1823年。
- 3) Navier, C. : Rapport et Mémoire sur les ponts suspendus (「吊橋に関する報告と覚え書き」)、第2版、1828年。
- 4) Seguin, M. : Des ponts en fils de fer (「鉄線の橋について」)、第1版、1824；なお、タイトルのfils de fer は通常「針金」と訳されるが、ここでは鉄線とした。また、ferは鉄であるが、fer forgéあるいはfer soudé (いずれも鍛鉄のこと) の形容詞が省略されたものと考えて良い。本文献中にもferとfer de fonte (鑄鉄) を区別している箇所もあり、当時の文章でferとあればほぼ鍛鉄と考えられる。本論文中でも特に注記せず鉄線と書くが、これは鍛鉄製のワイヤーを意味している。
- 5) Seguin, M. : Des ponts en fils de fer (「鉄線の橋について」)、第2版、1826。
- 6) Picon, A. : L'invention de l'ingénieur moderne, Presses de l'ENPC, pp.363-506, 1992。
- 7) Peters, T. F. : Transitions in Engineering, p. 89, Birkhauser, 1990。
- 8) Marrey, B. : Les ponts modernes 18e-19e siècles, Picard, 1987。
- 9) Timoshenko, P. S. : History of Strength of Materials, pp. 67-86, Dover Publications, 1983。
- 10) ミッシェル・コット、小林一郎：1815年から35年間のマルク・スガンにおける技術革新と技術移転について、土木史研究、第15号、pp363-374、1994年。
- 11) Grattesat, G. : Ponts de France, Presses de l'ENPC, pp. 87-115, 1982。

- 12) Journal Tournon Tain, No216 4.1, 1993.
- 13) 山下真樹、小林一郎: フランスにおける歴史的記念物に指定された橋梁について、土木史研究、第15号、pp29-44、1994年。
- 14) Cotte, M.: L'approche mathématique du pont suspendu chez Marc Seguin 1822-1826, VARIA, XLVI12-3, pp233-257, 1993.
- 15) 文献3) 第2版, pp. 60-62とpp. 113-114, 実際の実験については、F.S.: note pour la passe.
- 16) F.S. 211-6: chapitre II, un texte voisin dans la seconde édition, p36.
- 17) F.S. 27: en particulier Description du pont de Tournon-Tain, 25 mars 1822. 及び Mémoire du pont de Tournon-Tain, 30 novembre 1822.
- 18) 文献5), p. 38.
- 19) 文献5), p. 52.
- 20) F.S. 27: note des fils de fer;
F.S. 186: factures du pont de Tournon;
F.S. 106: cahier de comptes du pont de Tournon; F.S. 211-3: éléments comptables et correspondance. これらの文献から、当時スガン社と取引のあった鉄工所はフランシュ・コンテ地方やブルゴーニュ地方の次のような業者であった。: シャンパニョル(Champagnole)あるいはモレ(Morez)のVandel Aîné社、シャンパニョル(Champagnole)のMuller frères社、ボーモット(Beaumont)のGauthier fils社、ブサンソン近郊のロド(Lods)のVautherin et Vuillier社、ベルフォール(Belfort)のMigeon et Grandvillard社、ブサンソン近郊のシュヌシー(Chenecey)のMouret et Veillorille社、シャティヨン(Chatillon)のDubost社、ブサンソン(Besançon)のVeuve fleur社。また、スガン社へ鉄の納入を行っていたのは、リヨンのSaint-Antoine岸にあった Peillon-Marcellin 社と Odon Dufournel 社であった。
- 21) F.S. 163: lettre de Seguin et Cie à Vandel du 30 juin 1824.
- 22) F.S. 211-3: observations de MM Mouret Veillorille fils de Chenecey sur les fils de fer, s.d.; F.S. 211-3: note des commissions données aux fabriques.
- 23) 文献4); Michel Cotte, L'entreprise Seguin et Cie, diplôme E. H. E. S. S. Paris 1987, annexes no7 et 8; 文献7), P89.
- 24) F.S. 211-6: manuscrit du livre, ch IV, 1823; 文献5), PP. 53-57.
- 25) Claude Navier, 1^o et 2^o Rapports sur le pont de Tournon-Tain, 1822 et 1823; F.S. 27: manuscrits.
- 26) ファーガソン, E. S.: 技術屋の心眼、第1章「工学における設計の特質」、pp13-58、平凡社、1995年。
- 27) F.S. 106: cahier de comptabilité du pont de Tournon et Pierre Cayez, Métiers Jacquard et hauts fourneaux, aux origines de l'industrie lyonnaise, Lyon 1978.
- 28) Chaley: Le pont suspendu de Fribourg, Annales des Ponts et Chaussées, No1, pp3-179, 1835.
- 29) F.S. 22: Journal du pont de Tournon-Tain, 2^e partie, juin-juillet 1825.
- 30) 文献3) 第2版: note 2 pp. 105 à 110, planche no 3 fig. 24.
- 31) Vicat: Ponts suspendus en fil de fer sur le Rhône, rapport, Annales de Ponts et Chaussées, No1, pp. 93-143, 1831.
- 32) Guillerme, A.: BATIR LA VILLE, Champ Vallon, 1995. 第3章「石灰からセメントへ」は示唆に富むものである。欧米での土木史研究の活発化によって鉄筋コンクリートの前史は今後数年の間に従来のものとは大きく変わってくると思われる。この本の中でも1820年代におけるスガンによるトゥルノン橋の基礎工事とスガンザンのコーダン橋の基礎における木杭列の補強のために用いられた鉄筋の前例が示されている。また、1833年のブリュネルのレンガ積みへの鉄筋モルタルの使用についても言及されている。
- 33) F.S. 210-21: note manuscrite de Seguin Aîné, sans date; F.S. 22: l'implantation de ces barres se fait, pour la pile, entre le 30 mars et le 12 avril 1825.
- 34) 前掲書、p195; 1820年代においては、セメントと石、鉄とコンクリート等を併用する時の熱膨

- 張率の違いが議論されている。ナヴィエは石積み
の繋ぎ材として鉄を用いることは可との結論
を出している。しかし、鉄とコンクリートにつ
いては言及していない。主な理由は力学的なも
のでなく、構造物の中に必要以上に高価なもの
を用いることは避けるべきとの考え方による。
- 35) F.S. 211-6, manuscrit du livre, p13.
36) Billington, P.D.: History and Esthetics in
Suspension Bridges, ASCE (ST) 103, pp1655-
1672, 1977. ; 1850年のアンジェでの事故以降、
ヨーロッパでの吊橋建設熱は急速に衰えていく。
これは主に、メインケーブルの防錆の問題であ
ったとされるが、たとえばピリントンにもある
ように、吊橋の振動に関する注意が不足してい
たと言える。この点に関しては、アメリカ人だ
けでなくヨーロッパ人も、事故から学ぶことが
少なかったと言える。
- 37) F.S. 27: lettre du préfet de l'Ardèche au
maire de Tournon, 16 janvier, 1826.
38) 文献3), p62; 1823年夏の草稿には「重量が大き
く増加するわけではないので、高欄はどのよう
に造ることもできる」と記している。
- 39) 文献3), pp72-73.
40) 文献3), p36.
41) F.S. 27: les notes et descriptions des
différents projects de 1822; F.S. 211-6, le
manuscrit du livre, 1823; F.S. 22, le deuxième
journal de chantier 1824 et la deuxième
édition du livre, Des ponts en fil de fer
1826.
42) Gauthey: Traité de construction des ponts,
No2, 1813, ouvrage cité, livre no 3, ch 2,
"principaux ponts de bois", le pont Morand
à Lyon et en Avignon, p141; たとえば、リヨン
のモラン橋やアヴィニヨンの木橋。
- 43) 文献3) 第3章, pp200-234; 254
44) 1825年の8月から、スガン社はローヌ河の蒸気
船に関する会社(スガン・モンゴルフィエ・デ
ーメ社)の経営に参加し、トゥルノンの北20km
のアンダンスの現場に、次の吊橋を架けている。
- 45) F.S. 95: intervention à l'Académie du 15
septembre 1823 あるいは、文献4), p. 7.
- 46) F.S. 27, Mémoire du pont de Tournon-Tain, 30
novembre 1822, 2partie, (câbles recalculés)
47) 文献2) 第2部、第3章, pp. 200-220.
48) Stevenson, R.: Description of Bridges of
Suspension, Edinburgh Philophical Journal, 5,
no10, 1821, pp. 239-240; 文献2)、第2部、第3
章, pp. 220. Emory l. Kemp: Samuel Brown,
Britain's Pioneer Suspension Bridge
Builder", History of Technology, London,
pp. 1-39, 1977.
49) Prade, M.: Ponts et Viaducs au XIX^es,
pp. 107-122, Brissaud, 1989.
50) F.S. 106, éléments de comptabilité du pont
de Tournon-Tain. スガン社への主な木材販売業
者はリヨンのブリュエル社である。
51) Vicat: Fautes Divers-Oxydation des Fers,
Annales des Ponts et Chaussées, No. 52, 1852.
ヴィカはいくつかの落橋事故の分析から、ケー
ブルの破断の直接の原因は、ケーブルの防錆へ
の配慮不足であり、吊橋の構造的欠陥でないこ
とを指摘している。また、実際にトゥルノンの
橋のケーブルは100年以上使われた。
- 注: F.S. はアルデッシュ県の古文書資料庫内のスガ
ン文庫(Fonds Seguin)を示す。