

4. スクワイアー・ホイップルのアーチトラス橋

1. スクワイアー・ホイップル

八幡橋は、アメリカの橋梁技術者、スクワイアー・ホイップル(Squire Whipple)が考案した構造の橋である。

スクワイアー・ホイップル(Squire Whipple, 1804-1888)はアメリカ、ニューヨーク州出身の技術者で、世界で最初に鉄橋の科学的設計法を考案したとされ、橋梁工学の本を書いている。彼の本は理論と経験をうまく組み合わせたものであった。図1に彼の肖像を¹⁾、図2には、1883年に出版された第4版の扉を示す²⁾。



図1 ホイップルの肖像¹⁾

その頃の技術者によくあるように、彼は基本的に独学であった。1年間カレッジで学んだ後、最初ボルチモア・アンド・オハイオ鉄道、続いてニューヨーク州運河の測量手となった。その頃エリー運河の拡幅が計画されていた。ホイップルは1840年、ユティカでエリー運河に彼の最初の鋳鉄製アーチトラスを架けたのである。この橋は橋梁建設の新時代を告げるものであった。1841年 4月24日付で特許番号第2064号「鉄トラス橋の建設」の特許を取得した。特許申請書類の付図³⁾を図3に示す。

後にアメリカ国内で普及し、日本にも弾正橋（現八幡橋）として導入されたものの原形というべきもので、垂直材が橋軸方向に2本並んでいるなどの相異がある。その後30年間、ホイップルの設計は多くの橋の基本となり、とくにニューヨーク州内に多数架設された。多くの発明品と同様に、良いと分かると、模造品が横行した。その多くは、ホイップルの特許に触れないように少し設計を変えてあったが、残りは悪質なコピー製品であった。

図4にエリー運河上に架設されたホイップルのアーチトラスの図面を示す。スパン72ft(21.946m)、トラス中心間19ft(5.791m)で、1859年の設計である⁴⁾。

2515



理工
大学
工学
部
教
育
會

PRACTICAL TREATISE

BRIDGE BUILDING



ENLARGED AND IMPROVED EDITION

OF THE AUTHOR'S ORIGINAL WORK,

BY

S. WHIPPLE, C.E.

ALBANY, N. Y.,

INVENTOR OF THE WHIPPLE BRIDGES, &c.

FOURTH EDITION, REVISED AND ENLARGED.

NEW YORK:

D. VAN NOSTRAND, PUBLISHER,

23 Murray St., and 27 Warren St.

1888.

図2 橋梁工学の本の扉²⁾

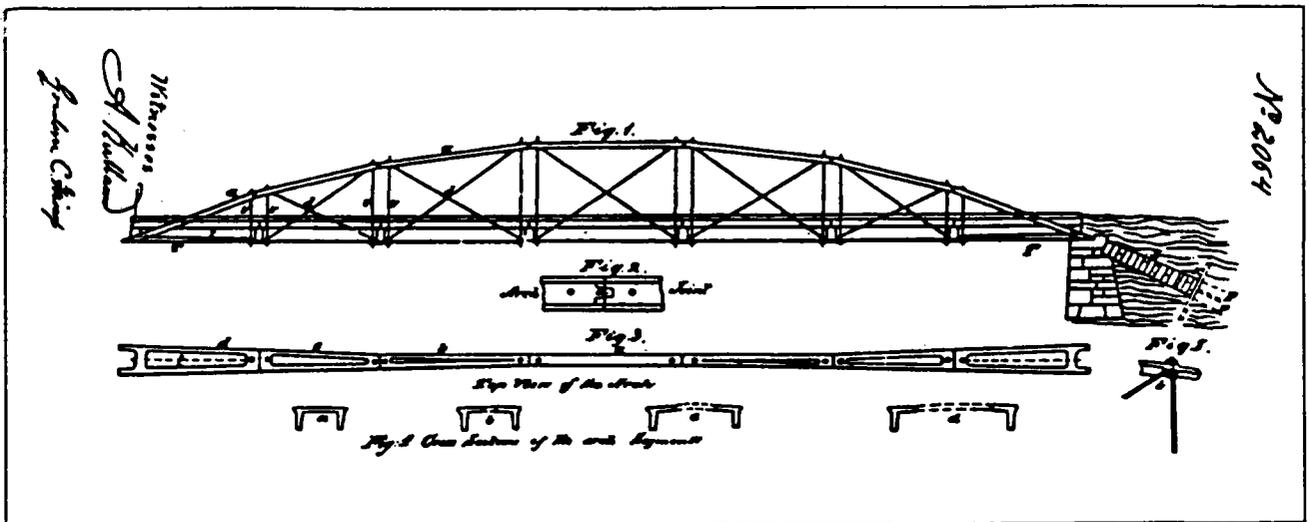


図3 アーチトラス橋の特許申請図面, 1841年³⁾

Proposed design of Whipple Bowstring Truss for enlargement of the Erie Canal, 1859. (Courtesy of the Smithsonian Institution.)

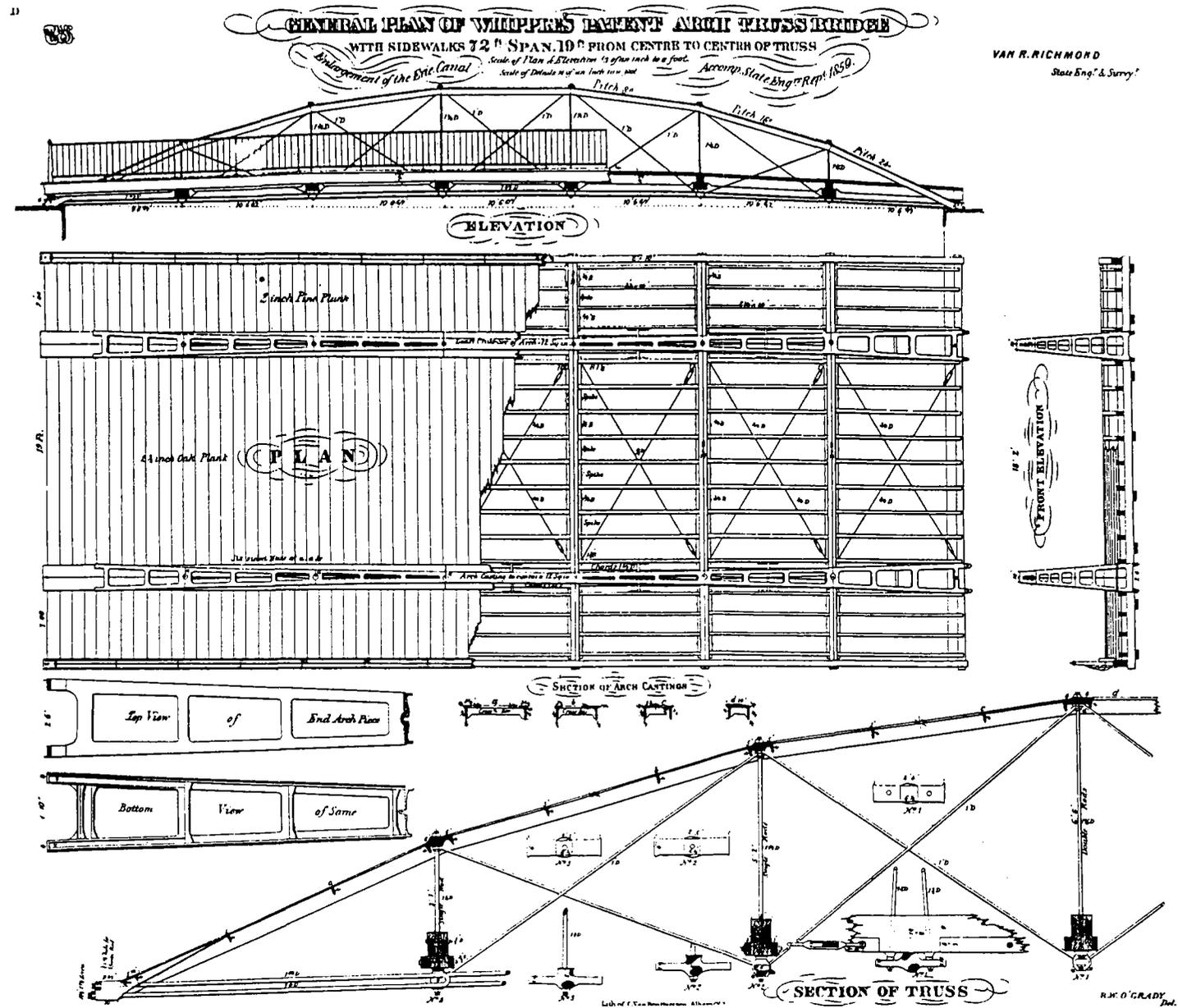


図4 ホイップル・アーチトラスの設計図面 (1859年)⁴⁾

2. アメリカに現存するホイップルのアーチトラス橋

プラウドゥンPlowden は彼の著書 "Bridges, The Spans of North America" (1970)の中でこの形式の橋はアメリカ国内に2橋しか残っていないと述べている⁵⁾。

1987年に出版された「アメリカの土木記念物」という本⁶⁾でも同じ2橋のみが紹介されており、本国のアメリカでただ2橋しか残存していないのであろう。それゆえ、アメリカにとっても八幡橋は重要で、アメリカ土木学会からJapan Historic Civil Engineering Landmark に指定されたものと解することができる。

スパンの大きい方はニューヨーク州オルバニー(Albany)にある。これはノーマンスキル農場(Normanskill Farm)への私道にあって、1867年ニューヨーク州シラキューズのサイモン・ド・グラーフ(Simon de Graf of Syracuse) が製作したもので、アメリカの鉄橋の最古の部類に属し、多分最初エリー運河に架かっていたものを移設したものである(写真1, 2)。橋長は110ft(33.528m)である。

もう1橋の小さい方は、ニューヨーク州ジョンズタウン(Johnstown) のカヤダッタ・クリーク(Cayadutta Creek) に架かっていたもので、アーチに1869という年号と、S. Whipple の名が陽刻されている(写真3)。橋長は58ft(17.678m)である。

後者は1979年4月に撤去されたが、市からユニオンカレッジに寄贈され、大学構内の小川に移設・保存されており(写真4)、アメリカの歴史的土木遺産(National Historic Civil Engineering Landmark) に指定されている。



写真1 ノーマンスキル農場のホイップル・アーチトラス橋⁶⁾



写真2 ノーマンスキル農場のホイップル・アーチトラス橋⁷⁾
支承部, 下弦材は角棒で構成



写真3 カヤダッタ・クリークに架かるアーチトラス橋⁸⁾
S. WHIPPLE, ALBANY, N. Y. 1869の陽刻がある.

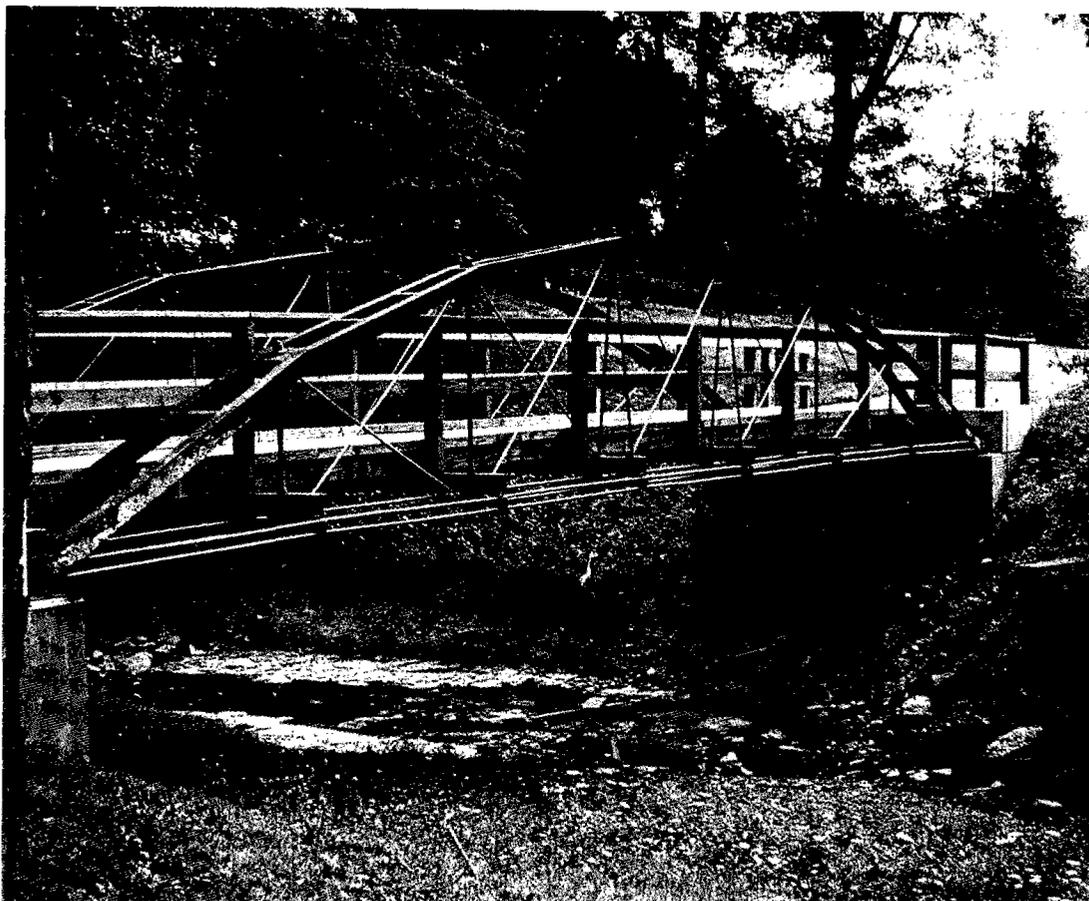
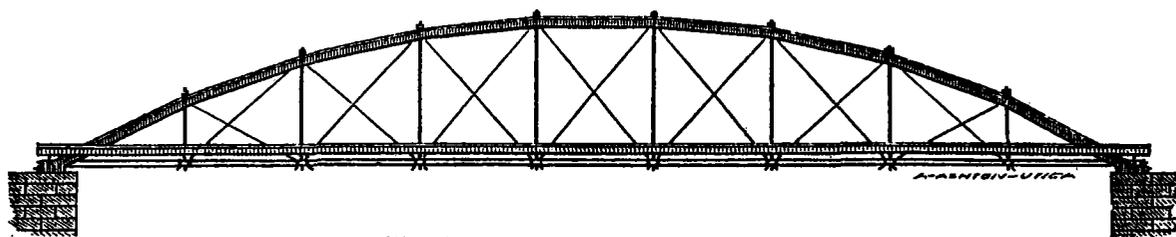
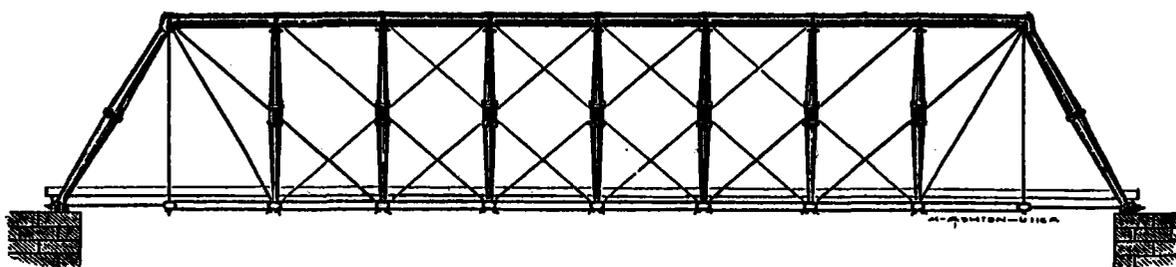


写真4 ユニオンカレッジに移設保存されたカヤダッタ・クリーク橋⁹⁾



WHIPPLE ARCH-TRUSS BRIDGE.



WHIPPLE TRAPEZOIDAL BRIDGE.

図5 ホイップルの2大特許トラス，アーチトラスと台形トラス¹⁰⁾
各部材の形状や接合方法を含めて特許であった。

3. ホイップルのトラスの構造

ホイップルのトラス形式としては、アーチトラスと台形トラスが代表的なものである。

このうち台形トラスの方は、オリジナルは鑄鉄の圧縮材と錬鉄引張材を組み合わせたものであったが、のちに全錬鉄製になり、ホイップル=マーフィトラスとして広く普及した。日本にも明治中期に数橋架設例がある。鎧橋（東京、1888）、天満橋（大阪、1888）、江別川橋梁（北海道、鉄道橋）など。

彼の本の巻頭口絵にはアーチトラスと台形トラスが描かれている。図6にその口絵を示す¹⁰⁾。

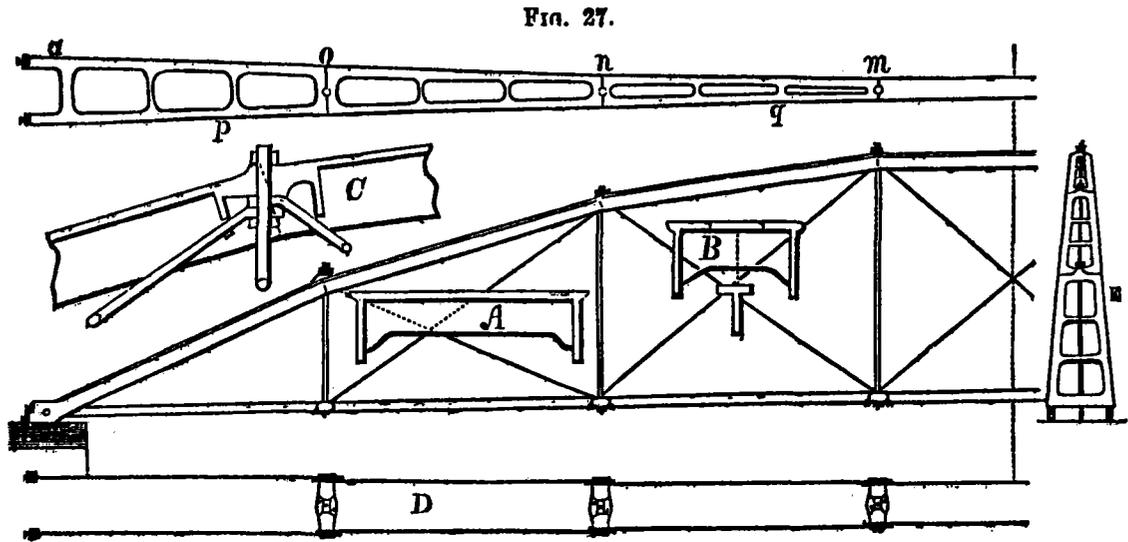


図6 ホイップルのアーチトラス橋構造図¹²⁾

さて、ホイップルがアーチトラス橋と呼んだボウストリングトラスの構造を、彼の著書の挿図によって説明しよう¹¹⁾。図5は全体の構造図を示す¹²⁾。

3.1 上弦材アーチ

上弦材アーチ $a o n m$ は鑄鉄製で、トラス格間数と同数の直線部材を突き合わせて折れ線状のアーチとしている。格間数は原則として奇数である。上弦材の幅は径間中央で狭く、両端（支点）の方にゆくにしたがって広がっている。アーチ部材は Γ 形断面の側部材2本とそれらを両端と中間2か所をつなぐ T 断面の横材からなる。アーチ部材の p 、 q における横断面をそれぞれ A 、 B に、また接続部 n における縦断面を C に示す。

a. アーチ側部材

アーチ鑄物部材の側部材の高さは長さのおよそ $1/20$ 、側板の平均的な厚さは高さの $1/10 \sim 1/8$ となっている。上板の厚さは側板とほぼ同じ（冷却時に hollow backed とならないようやや薄くする）であり、幅は側板の $1/2$ よりやや大きくなっている。

b. 中間の横材

中間の横材は側板と同じ厚さで、高さは側部材の高さの $3/4$ 以上、上板の幅は側部材の上板幅の $3/4$ 以上とする。

c. 両端の横部材

各アーチ部材両端の横部材の上板の幅は側板の幅の約7/8で、断面積はトラスの全パネル荷重を支えるのに十分なものでなければならない。

各アーチ部材両端の突き合わせ部には半円形の窪みをつくってある。垂直材を通すためである。

側板が薄い場合には、端部から数インチ部分の厚さを増して、接点で適当な支持面を与えるようにする。そしてアーチ部材の両端が密着するよう角度をつけて正しい接面を削り出す。場合によってはくさび状の栓をいれる窪みを付けておく(図7¹³⁾)。一つの接点につき、1インチ幅の錬鉄のくさびを、くさびの支圧面積が弦材の鉄の断面積の少なくとも半分以上になるような本数だけ用意する。この方法は多くの橋でうまくゆき、アーチを一直線上に並べるのに効果がある。しかし端部の仕上げには一層の職人技が必要である。

アーチ中央部材の上面は全面板で覆ってある。



図7 アーチ部材両端部¹³⁾

垂直材とほぞを通すくぼみ

Fig. 29.

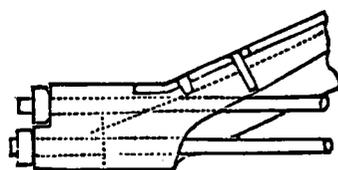


図8 支承部, アーチと下弦材の結合¹⁴⁾

一番端のアーチ部材では、下弦材と結合するため、脚部ブロックに水平な穴を貫通させ、下弦材リンクの開いた端部を受ける。図8¹⁴⁾にアーチ脚部を内側から見た側面図を示す。下弦材リンクの端部にはねじを切っており、ナットで固定する。

3.2 下弦材

下弦材は各パネルに2個ずつの、丸棒または角棒でできた長いリンクで構成される。各リンクはアーチ部材接点直下の点にある結合ブロックによって結合されている。これらの結合ブロックの形状を図9¹⁵⁾に示す。aは正面、bは中央断面、cは平面である。

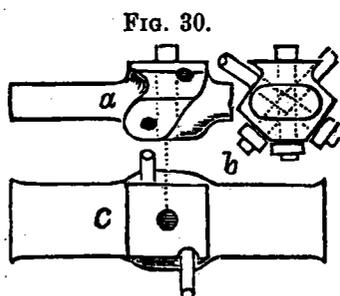


図9 下弦の結合ブロック¹⁵⁾

Fig. 30A.

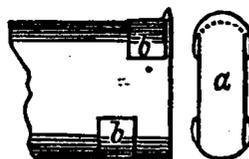


図10 結合ブロックの下弦材リンク受¹⁶⁾

このブロックの長さは両端から中央に向かって順次小さくなる。すなわち、リンクを構成している丸棒の直径の2倍ずつ長さを減じてゆく。一番端のブロックはアーチとの結合部から平行に伸びてくるリンクを受けるのに十分な長さとなっている。次のブロックはリンクを構成している丸棒の直径の2倍だけ短い。トラス中央を向いているリンク端

は次のブロック端で、橋台方向を向いているリンク端の外側に掛かる。各組のリンクは互いに平行である（図6のD）。

結合ブロックの下弦材リンクを受ける部分の断面は小判形で、リンク両端の半円形部分が密着するよう両端が丸くなっている。密着を良くするには、リンク両端の半円形部分内側をリーマーで削り、ブロックのリンク受け部分を旋盤で削ることである。そのためその部分にあらかじめ削りしろだけ余分の肉付けをし、受け部分間は鉛直方向にやや薄くして鑄造する。その様子を図10¹⁶⁾に示す。aは断面、b bは受け面である。

結合ブロックのリンクを受ける部分の鉛直方向厚さはリンク丸棒直径の1.5倍以上でなければならない。

断面積×ブロック幅／リンク丸棒直径の値は両側のリンクの断面積の約13倍とする。ブロックの中央部は、垂直材と斜材を所定の方向に通す穴と固定のためのナット座を作ることができるような大きさと形状にする。任意の穴を通る最小断面は、リンクを受ける部分の断面積より1/4以上大きくすべきである。結合ブロックの断面が小判形なのは応力の作用方向の強度を上げるためであった。しかし最近ではリンク端部の曲げ半径を余り小さくする必要がない限り、円断面にするのが有利ということになっている。その方が、ブロックに良く密着するし、曲げ加工時に鉄の繊維や粒子を乱さないで済むのである。ブロックの直径をリンク丸棒直径の3倍にすれば、良質の鉄は材料の劣化を生じないし、リンクの他の部分よりも、特に直線部で溶接されている場合には、端部で破断することはないと信じられる。

結合ブロックの太くなった中央部分の上面はリンクより少し高い平面となっていて、橋の横桁を受ける部分となる（図9）。横桁が木の梁の場合には、支持面積は30～40平方インチが必要である。

3.3 垂直材

垂直材には錬鉄の丸棒（または角棒）を使用する。長さ60から100フィートの普通の道路橋ではその直径は1 3/4 から2インチである。上端にはねじが切っており、ナットが止まる。端から適当な距離の所にリングあるいはカラーが溶接しており、ナットとカラーの間にアーチ鑄物と斜材の眼が挟まる。下端は、結合ブロックを貫通してナットを止める長さの分、ロッド本体より1/4ないし3/8インチ直径が小さくなるよう旋盤で削ってある。これは垂直材に圧縮力が作用した場合の、ブロック上面における肩を形成する。

2本の中央に近い一番長い垂直材は、カラーの下で二股に分かれていて、その直径は1本の部分より1/4ないし3/8インチ小さくなっており、結合ブロックのリンクの内側か外側を貫通し、薄いナットがブロックの上に、普通のナットが下に付く。また、上のナットの上に鑄鉄の座金があり、結合ブロックの中央ではなくてここで梁を支える。二股にする目的はアーチの横方向の安定性を増し、振動を減らすことにある。

以上のような構造のアーチトラスの幅は高さの約4分の1あるから左右の各トラスは他からの支えなしで自立する。そのため、木製の横桁を取り替える場合、鉄部分に影響を及ぼさずに作業できる利点がある。

3.4 床組

オリジナルでは横桁は木製である。両端近くを垂直材が貫通するが、取り替えに便利
なように、2つ割りにし、ボルトで一体化しておく。

横桁の上に橋軸方向に垂木を並べ、その上に床板を張る。

出典および参考文献

- 1) Griggs, Francis E. : "On the shoulders of giants", Topping and Leeming(ed.):
Innovation in Civil and Structural Engineering, Civil-Comp Press,
p.9-19, 1997, Figure 11.
- 2) Whipple, S. : "Elementary and Practical Treatise on Bridge Building", an
enlarged and improved edition, D. van Nostrand, 1883
(京都大学工学部土木系図書室所蔵)
- 3) Griggs, Francis E. : "It's a Pratt! It's a Howe! It's a Long! No, It's a
Whipple Truss!", Civil Engineering Practice, Spring/Summer 1995,
p.67-85., Figure 11.
- 4) Plowden, David: "Bridges, Spans of North America", A Studio Book, The Viking
Press, New York, 1974, p. 82.
- 5) 4)と同じ, p. 61.
- 6) 4)と同じ, p. 83.
- 7) Schodek, Daniel L. : "Landmarks in American Civil Engineering", MIT Press,
1987, p. 103.
- 8) 4)と同じ, p. 81.
- 9) 7)と同じ, p. 101.
- 10) 2)と同じ, 巻頭口絵
- 11) 2)と同じ, p. 172-199
- 12) 2)と同じ, Fig. 27, p. 172.
- 13) 2)と同じ, Fig. 28, p. 174.
- 14) 2)と同じ, Fig. 29, p. 175.
- 15) 2)と同じ, Fig. 30, p. 175.
- 16) 2)と同じ, Fig. 30A, p. 176.
- 17) DeLony, Eric: "Landmark American Bridges", ASCE, 1993, p. 52.

[執筆担当 小西 純一]