

# ロベール・マイヤールの構造特性の変化と アーチ構造の合理性に関する分析

山崎 将寛<sup>1</sup>・関 文夫<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 日本構造橋梁研究所

(〒101-0032 東京都千代田区岩本町三丁目8-16, E-mail: m-yamazaki@jbsi.co.jp)

<sup>2</sup>正会員 工博 日本大学理工学部土木工学科

(〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台一丁目8-14, E-mail:seki@civil.cst.nihon-u.ac.jp)

過去の構造エンジニアが構造を発想する上でのアプローチ方法に学ぶことは多々ある。本研究では、構造エンジニアのうち、鉄筋コンクリート橋梁の創世期を支えたR.Maillartを対象として、設計に携わった48橋に関して、橋梁の構造特性に着目してまとめ、9種類に種別した。また、R.Maillartの設計した橋梁が、年代が進むにつれて構造合理性が高くなっていることを種別した項目のうちリブアーチと補剛アーチ2つについて定量的に示し、R.Maillartの橋梁へのアプローチ方法を分析した。

**キーワード:** ロベール・マイヤール, アーチ構造, 構造特性, 構造合理性

## 1. はじめに

Robert Maillart (1872-1940) は、スイスの構造エンジニアである。大学を卒業した1894年から死去する1940年までの46年の間に、19世紀後半から用いられ始めた鉄筋コンクリートを使用した50橋近くの橋梁の設計に携わった。

R. Maillartについて、時代背景や設計思想をまとめた文献や研究は多く存在し、R. Maillartの設計した橋梁の特徴として、構造計算によって安全照査がされていること、コストの低減を計っていることなどが挙げられている。しかしながら、構造特性の観点からまとめ、分類したものは少ない。

そこで本研究では、R. Maillartの設計した橋梁の構造特性に着目してまとめ、分類を行い、R. Maillartの設計した橋梁が、年代が進むにつれて構造合理性が高くなっていることを定量的に示し、R. Maillartの橋梁へのアプローチ方法を分析していく。

## 2. Robert Maillartの経歴と設計した構造物

### (1) Robert Maillartの経歴

R. Maillart (写真-1) は、1872年にスイスのベルンにて生まれた。1890年にR. Maillartはチューリッヒ連邦工科大学に入学し、当時図解法や構造設計、橋梁工学を教えていたWilhelm Ritter (1842-1906, 写真-2) の影響



写真-1 R. Maillart<sup>1)</sup>



写真-2 W. Ritter<sup>1)</sup>

を受けた。

1894年に大学を卒業した後は、ベルンの建設会社Punpen und Hezog社で鉄道設計に従事し、1897年にチューリッヒ市公共事業部で道路設計と橋梁設計を行い、1899年にチューリッヒの設計建設会社Flote&Westermann社で橋梁や建物の設計に携わった。

1902年の初めに、チューリッヒ市で鉄筋コンクリート構造の設計と建設を行うMAILLART&COMPANY社を設立し、1911年の夏の間でチューリッヒ技術専門学校の教授を勤めた。MAILLART&COMPANY社を設立後、10年近くの間にスペインやロシアにも事務所を構えていたが、1914年に避暑のため訪れた現在のラトビアの首都であるリガでロシア革命に巻き込まれ、1919年の初めに多額の借金を抱えながら子供たちとスイスに帰国する。1914年から1919年のロシアにいる間に失業し、1916年には妻を亡くしている。

帰国後の1919年にジュネーブに設計事務所を親戚の援助を受けながら開設し、後にベルン、チューリッヒにも

事務所を構える。彼はほとんど一人で生活しながら、この設計事務所にて今日知られている主要な設計を行い、1940年に死去した。

## (2)設計した橋梁

R. Maillartが1896年から1940年の間にスイスにて設計した橋梁は47 橋あり、3 橋を除いて今なお現存している。橋梁を設計していた44年間で4期に分け、それぞれに黎明期 (1896-1905) , 模索期 (1906-1913) , 挑戦期 (1920-1929) , 完成期 (1930-1940) と名称を付けた。

R. Maillartは、それぞれの期間で、7橋、8橋、6橋、26橋設計している。中でも完成期に設計したSalginatobelbrücke (写真-3) は、彼の代表作のひとつである。



写真-3 Salginatobelbrücke (1930)

### a) 黎明期 (1896-1905)

R. Maillartは、1899年にチューリッヒ市の仕事では初めて橋梁を設計した。そのシール川に架かる橋梁は、Stauffacherbrücke (写真-4) といい、橋軸方向をコンクリートブロックで覆われている。その2年後の1901年にStauffacherbrückeの装飾的なブロック壁を構造体の一部としてコンクリートの壁に変え、イン川にInnbrücke Zuoz (写真-5) を設計した。両橋梁とも、W. Ritterが発注者側のコンサルタントを務めており、W. Ritterの支持が無ければ、R. Maillartが設計に携わることはなかった。Innbrücke Zuozは、建設前に実物大の載荷実験が行われており、その際ひび割れが発生していたが、W. Ritterによって承諾されている。Innbrücke Zuozでは後に、橋台付近の橋軸方向の壁にひび割れが発生している。

1904年にRheinbrücke Tavanasaを設計する際、R. MaillartはInnbrücke Zuozでひび割れが生じた壁の一部取り除き、3ヒンジアーチの形態が目に見える様に表現された。Rheinbrücke Tavanasaは、1927年に雪崩で崩壊する。

### b) 模索期 (1906-1913)

R. Maillartは、Rheinbrücke Tavanasaを設計した後、1930年までの間に3ヒンジを用いた橋は、1909年に竣工したThurbrücke Wattwilのみである。その期間、多径間



写真-4 Stauffacherbrücke (1899)



写真-5 Innbrücke Zuoz (1901)

構造物やコンクリートブロックアーチ、片持ち梁など様々な構造に挑戦している。

多径間の構造物としては、竣工年が1907年のラーメン構造であるBrücke über die Eisenbahn、1910年の梁構造のKabelbrücke Wyhlen、1912年のWehrbrücke Augst/Wyhlenがあり、コンクリートブロック橋としては、竣工年が1911年の多径間であるLaufenbrücke、1912年のAlte Rheinbrücke Rheinfeldenがある。また片持ち梁構造で竣工年が1913年のMuotabrücke Ibach、竣工年が1912年のAarebrücke Aarburgを初めて壁部材に頼らない設計をした。Aarebrücke Aarburgは、後にひび割れを起こす<sup>1) 2)</sup>。

### c) 挑戦期 (1920-1929)

ロシアからの帰国後、R. Maillartは妻を亡くしたこともあり、自身の設計事務所を設立してから、帰国前より更に仕事にのめり込むようになった。

帰国した翌年の1920年に、メラン工法による多径間アーチであるArvebrücke Marignierを設計した。その後、コンクリートにおいて補剛アーチ構造を構築し、1924年に竣工したSchräbachbrückeとFlienglibachbrückeとZiggenbachbrückeの3橋を、1925年に竣工したValtschielbrücke (写真-6) を設計した。補剛アーチ構造が使われ始めた理由としては、II期の模索期に設計したAarebrücke Aarburgの床板にひび割れが発生したことが一つとして挙げられている。補剛アーチ構造では、高欄を非常に剛性の大きな床板の一部として設計している。

また、1925年に竣工した橋長約90mのπ型ラーメン構造のAquädukt Le Châtelardを設計した。



写真-6 Valtschielbrücke (1925)

d) 完成期 (1930-1940)

この期間にR. Maillartは、3つの期間以上の数の橋の設計しており、代表作のひとつであるSalginatobelbrückeをはじめ、構造的に有名な橋をこのIV期の完成期に設計している。

1927年にI期の黎明期に設計したRheinbrücke Tavanasaが雪崩により崩落したことにより、近くにあるサルギナ渓谷に架かる橋を同じような構造で設計した。1930年に竣工したこのSalginatobelbrückeは、競争設計で最も建設費の少ない案を出したため採用された。その後、3つのヒンジをもつアーチ構造の橋梁は8橋あり、竣工年が1932年のRosigrabenbrücke (写真-7)、1933年のThurbrücke Felsegg、1936年のPont de Vessy、1938年のWylerbrücke、1940年のSimnebrücke Garstatt、1940年のBrücke Churerstrasse Altendorf (写真-8)がある。



写真-7 Rosigrabenbrücke (1932)



写真-8 Brücke Churerstrasse Altendorf (1940)

3つのヒンジを持つアーチ構造の他に、コンクリートブロックアーチ、補剛アーチ、アーチ構造以外の橋梁も設計している。コンクリートブロックアーチは、I期の頃より継続的に設計されており、1930年竣工のLorrainebrückeは建設時に支保工が安いことからこの形式が用いられた。補剛アーチは、Schwandbachbrücke (写真-9)、Tösssteg Winterthurをはじめ、1930年から1934年までの4年の間に9橋竣工されている。

また、アーチ構造以外の梁構造、ラーメン構造、桁構造の橋梁は、この期間中7橋竣工されており、中でも単純桁構造は、この期ではじめて設計されている。



写真-9 Schwandbachbrücke (1933)

3. Robert Maillartの橋梁の構造特性による分類

(1) 分類を行う橋梁

R. Maillart がスイスにて設計に携わった47橋の橋梁に加えて、R. Maillartがアドバイザーとして携わり、1925年に竣工されたドイツにあるGrand Fey Viaductを加えた48橋を構造特性に時代系列を加えることによって分類する。

(2) 構造特性

構造特性を以下の9種類に種別し (表-1)、R. Maillartの橋梁の構造特性の流れを可視化した (表-2)。

表-1 構造特性一覧

|   |               |   |
|---|---------------|---|
| 1 | ブロックアーチ       | コンクリートで作られたブロックをアーチ部分や橋軸方向の壁材として用いたアーチ構造。   |
| 2 | リブアーチ         | 桁に比べ、アーチの剛性が高いアーチ構造。今回リブアーチに分類した橋梁は、全て3つのヒンジを有している。                                 |
| 3 | 面アーチ          | 桁とアーチが同一断面にあるアーチ構造。   |
| 4 | 補剛アーチ(単円)     | アーチに比べ、桁の剛性が高いアーチ橋のうち、アーチの下縁部分が単一円になっている構造。   |
| 5 | 補剛アーチ(逆ランガー式) | アーチに比べ、桁の剛性が高いアーチ橋のうち、アーチが折り曲げられている構造。この構造の発展したものが、逆ランガー構造になったと思われる事から、逆ランガー式としている。 |
| 6 | その他アーチ        | ブロックアーチ、リブアーチ、面アーチ、補剛アーチに属さないアーチ構造。   |
| 7 | ラーメン          | 桁と柱や支点部が剛結合されている構造。   |
| 8 | 梁             | 地面や橋台と結合した梁を有している構造。主に片持ち梁。   |
| 9 | 桁             | 独立した梁を有している構造。  |

表-2 Robert Maillart の橋梁年表

| 西暦   | 年齢 | マイヤール史                              | 1.ブロックアーチ                           | 2.リブアーチ | 3.面アーチ                      | 補剛アーチ |         | 6.その他アーチ | 7.ラーメン | 8.梁 | 9.桁     |
|------|----|-------------------------------------|-------------------------------------|---------|-----------------------------|-------|---------|----------|--------|-----|---------|
|      |    |                                     |                                     |         |                             | 4.単円  | 5.ランガー式 |          |        |     |         |
| 1894 | 22 | チューリッヒ工科大学卒業<br>Pumpen und Hezog社入社 |                                     |         |                             |       |         |          |        |     | I 期：黎明期 |
| 1895 | 23 |                                     |                                     |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1896 | 24 |                                     |                                     |         | Veyronbrücke Pamigny (1896) |       |         |          |        |     |         |
| 1897 | 25 | チューリッヒ市土木局入局                        |                                     |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1898 | 26 |                                     | ①                                   |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1899 | 27 | Flote & Westermann社入社               | Stauffacherbrücke (1899) w.         |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1900 | 28 |                                     | ↓                                   |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1901 | 29 |                                     | ↓                                   |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1902 | 30 | 箱型アーチ橋の特許取得<br>MAILLART&COMPANY設立   | ↓                                   |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1903 | 31 |                                     | Steinachbrücke (1903) A.W.          |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1904 | 32 |                                     |                                     |         | Innbrücke Zuoz (1901)       |       |         |          |        |     |         |
| 1905 | 33 |                                     |                                     |         | Thurbrücke Billwil (1904)   |       |         |          |        |     |         |
| 1906 | 34 |                                     |                                     |         | Rheinbrücke Tavanasa (1905) |       |         |          |        |     |         |
| 1907 | 35 |                                     |                                     |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1908 | 36 |                                     |                                     |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1909 | 37 |                                     |                                     |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1910 | 38 |                                     |                                     |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1911 | 39 | コンクリートブロック工法の特許取得<br>ロシア、スペインに支店を設立 | Laufenbrücke (1911) A.W.            |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1912 | 40 |                                     | Alte Rheinbrücke Rheinfelden (1912) |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1913 | 41 |                                     |                                     |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1914 | 42 |                                     |                                     |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1915 | 43 |                                     |                                     |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1916 | 44 | ロシア在住                               |                                     |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1917 | 45 |                                     |                                     |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1918 | 46 |                                     |                                     |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1919 | 47 | スイスに帰国<br>ジュネーブに設計事務所を設立            |                                     |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1920 | 48 |                                     |                                     |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1921 | 49 |                                     |                                     |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1922 | 50 |                                     |                                     |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1923 | 51 |                                     |                                     |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1924 | 52 | ベルン、チューリッヒに<br>支店を設立                |                                     |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1925 | 53 |                                     |                                     |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1926 | 54 |                                     |                                     |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1927 | 55 | Tavanasa橋雷崩で崩落                      |                                     |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1928 | 56 |                                     |                                     |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1929 | 57 |                                     |                                     |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1930 | 58 |                                     | Lorrainebrücke (1930) A.            |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1931 | 59 |                                     |                                     |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1932 | 60 |                                     |                                     |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1933 | 61 |                                     |                                     |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1934 | 62 |                                     |                                     |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1935 | 63 |                                     |                                     |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1936 | 64 | RIBAの名譽会員に任命される                     |                                     |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1937 | 65 |                                     |                                     |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1938 | 66 |                                     |                                     |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1939 | 67 |                                     |                                     |         |                             |       |         |          |        |     |         |
| 1940 | 68 | SIAの名譽会員に任命される<br>死去                |                                     |         |                             |       |         |          |        |     |         |

#### 4. リブアーチ構造と補剛アーチ構造の構造合理性

##### (1) Robert Maillart の設計した橋梁の設計条件

R. Maillartがスイスにて設計した橋梁の面アーチ、リブアーチ、補剛アーチについて、アーチスパン（図-1）、ライズ（図-2）、アーチのスパンライズ比（図-3）について年代を軸に整理をおこなった。整理した結果として、リブアーチは扁平になるほど用いられやすいこと、新しい橋梁ほど扁平になっていることが考察できる。また、補剛アーチに関しては、基本的に設計条件が

似ているが、スパンが最短のLuterstaldengrabenbrückeに関しては、スパンライズ比が他の橋梁と比較しても高いことから逆ランガー形式の実験要素を含んでいたのではないかと考察できる。

更に、ほぼ同時期に竣工されているリブアーチと補剛アーチを設計条件ごとに比較した結果、補剛アーチは、アーチスパンが45m以下、ライズが8m以下で採用されており、アーチ構造を用いる際に、その条件に満たなかったものがリブアーチとして採用されたと考察できる。また、条件を満たしていたのにリブアーチを採用された1940年の2橋に関しては、斜橋であるため補剛アーチとして採用されなかったと考察できる。

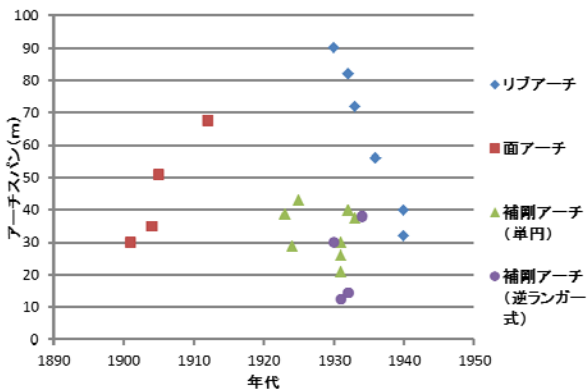


図-1 年代-アーチスパン図

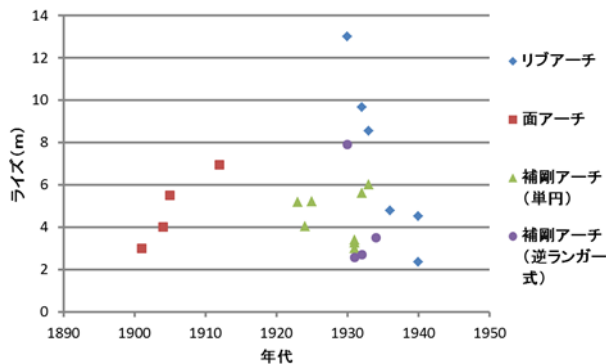


図-2 年代-ライズ図

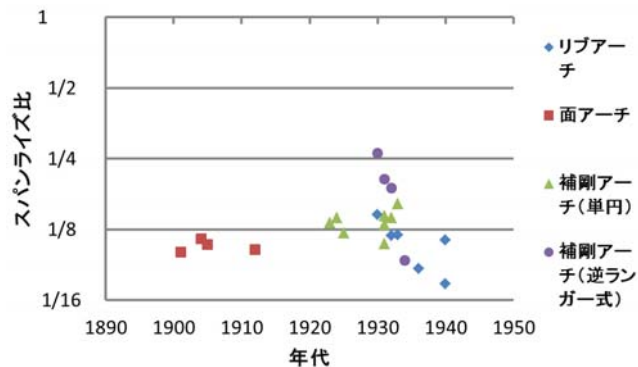


図-3 年代-スパンライズ比図

##### (2) リブアーチの構造合理性

###### a) 解析する橋梁

リブアーチであげた6橋の内、図面<sup>3)</sup>を入手できた Salginatobelbrücke, Rossgabenbrücke, Thurbrücke Ferlsegg, Pont de Vessy (写真-10), Simmebrücke Garstatt (写真-11) の5橋にSalginatobelbrückeのモデルとなった Rheinbrücke Tavanasaを加えた6橋について、それぞれ解析を行う。



写真-10 Pont de Vessy (1936)



写真-11 Simmebrücke Garstatt (1925)

## b) 構造解析

2次元骨組み解析モデルで解析を行い、解析ソフトは面内骨組構造解析Ezy-Frameを用いた。リブアーチの解析モデルは、アーチスパンがリブアーチのアーチスパンの平均に近い60mになるよう各橋梁についてスケール置換を行い、扁平のアーチであることから桁とアーチ、桁とアーチが一体となっている部分に分け、各部材の図心を取った形を基本モデル(図-4)とした。断面積A、断面二次モーメントIは図面のものを用い、弾性力Eは $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ とした。荷重は自重のみを考慮する。

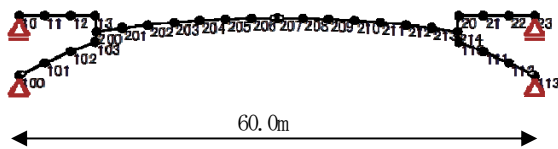


図-4 リブアーチのモデル例

## c) 解析結果と考察

解析を行った結果、各部材の曲げモーメントレンジ、最大軸力は図-5のようになった。

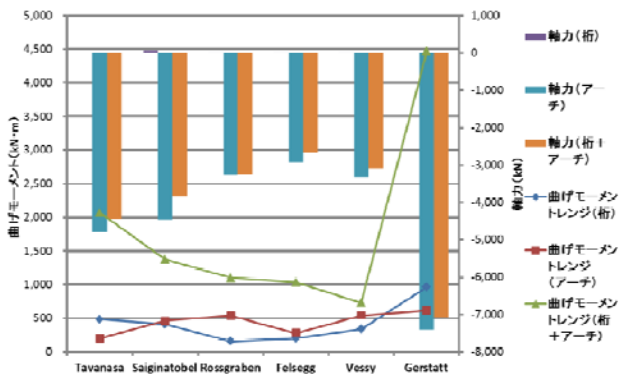


図-5 リブアーチの断面力比較

曲げモーメントレンジ、軸力それぞれに関して、新しい橋梁になるにつれて、0に収束する傾向に見られた。断面力が抑えられる工夫が施されていることが考察できる。

しかし、下縁が直線であるSimmebrück Garstattに関しては、各断面力がはねあがっていることが確認でき、新しい構造であることもしくは、解析モデルが不适当であったこと、分類の際に構造特性は他のものが当てはまっていたことが考察できる。

## (3) 補剛アーチの構造特性

### a) 解析する橋梁

補剛アーチであげた13橋の内、図面<sup>3)</sup>を入手できた単円式のSchräblichbrücke, Flienglibachbrücke, Valtschielbrücke, Ladholzbrücke, Hombachbrücke, Schwandba-

chbrücke, 逆ランガー式のKlostersbrücke, Tösssteg Winterthurの8橋について、それぞれ解析を行う。

## b) 構造解析

補剛アーチの解析モデルは、アーチスパンが補剛アーチのアーチスパンの平均に近い30mになるよう各橋梁についてスケール置換を行い、桁とアーチ、鉛直材の図心を取った形を基本モデル(図-6)とした。断面積A、断面二次モーメントIは図面のものを用い、弾性力Eは $2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ とした。荷重は自重のみを考慮する。

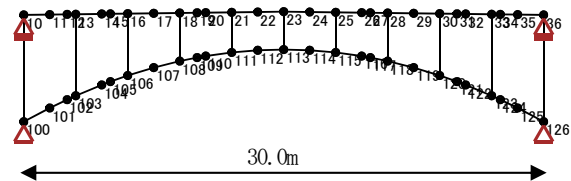


図-6 補剛アーチのモデル例

## c) 解析結果と考察

解析を行った結果、各部材の曲げモーメントレンジ、最大軸力は図-7のようになった。

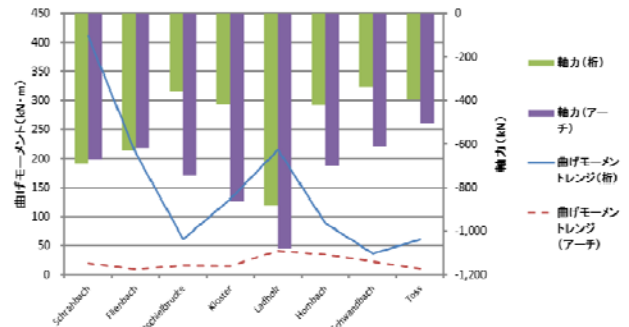


図-7 補剛アーチの断面力比較

桁が殆ど曲げモーメントを受け持つことから、アーチ部材の曲げモーメントが全体的に小さいことがわかる。

Ladholzbrückeの曲げモーメントが他と比べて大きいことがわかる。これは、元のアーチスパンが30mよりも小さいことにより桁高が大きくなったことと剛性比が大きいこと、桁の勾配があることが関係していると考察できる。

また、逆ランガー式であるKlostersbrückeとTösssteg Winterthurのアーチ部材における曲げモーメントが小さいことより、アーチを折り曲げることが曲げモーメントに影響すると考察できる。

Valtschielbrückeは桁の最大曲げモーメントレンジや最大軸力、最大せん断力などの断面力が低く、合理性が高く、1925年の時点でR. Maillartは補剛アーチの単円式に関して合理化を一旦完成させていたと考察でき、写真などより、以降の単円式では鉛直材の本数を減らしていたのではないかと推測できる。

(5) 曲線桁と逆ランガー式についての構造合理性

a) 解析する橋梁

補剛アーチのうち逆ランガー式に分類したTösssteg Winterthur (写真-12) について行い、逆ランガー式の構造特性と曲線を描いた桁の構造特性の解析を行った。

b) 構造解析

解析モデルは、桁やアーチ、鉛直材の図心を取った形を基本モデルとし、アーチスパンが30mになるようスケール置換を行った。また、解析モデルは、桁が曲線でアーチが直線のモデル、桁が曲線でアーチが曲線のモデル、桁が直線でアーチも直線のモデルの計3種 (表-3) を使い、桁高、アーチ厚は同じものとした。荷重条件は自重のみを考慮した。



写真-12 Tösssteg Winterthur (1930)

表-3 モデル形状表

|      | 桁  | アーチ |
|------|----|-----|
| モデル1 | 曲線 | 直線  |
| モデル2 | 曲線 | 曲線  |
| モデル3 | 直線 | 直線  |

c) 解析結果と考察

解析を行った結果、モデル1~3の最大曲げモーメントレンジ、最大軸力は図-8のように、アーチ部材の変位量は図-9のようになった。

桁を曲線にすることで、最大曲げモーメントと最大軸力の数値が下がる結果となった。

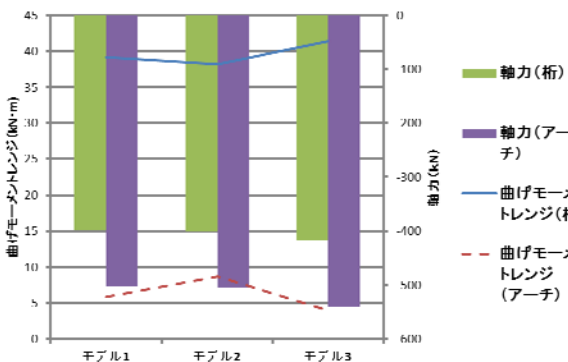


図-8 モデル1~3 の断面力比較

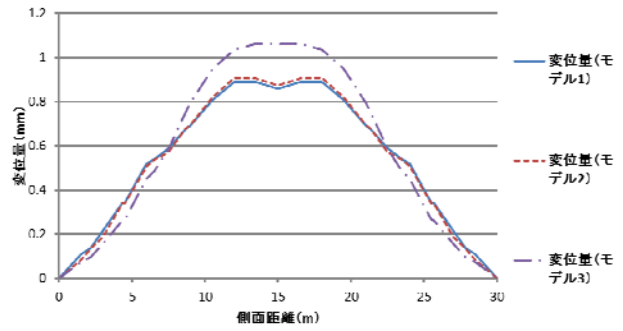


図-9 モデル1~3 のアーチ部材の変位量比較

逆ランガー式は、曲線と比べて桁部材とアーチ部材の軸力が抑えられる。また、アーチ部材の曲げモーメントレンジを抑えていることから変位量が小さくなることが考察できる。さらに、変位量が小さくなることから R. Maillart は、逆ランガー式の橋梁の長大化を目指したと推測できる。

5. まとめ

本研究では、過去の構造エンジニアが構造発想をする上でのアプローチ方法をまとめることを目的とし、鉄筋コンクリート橋梁の創世期を支えた R. Maillart を対象とした。

R. Maillart は、スイスの技術雑誌 Schweizerische Bauzeitung にて、『構造物個々のデザインを考える前に、全体像を考えるのは、景観的な配慮からするものではない。構造物の全体像は、絶えず経済的な優位性に立脚してこそ得られるものである。』<sup>4)</sup> と記述している。研究を進めていく中でも、R. Maillart はコンクリートのひび割れを起こすせん断力と対峙し、ひび割れ部分をカットしたり、時代を追うごとに桁高を薄くしたりするなど、橋梁の無駄な箇所を、段階を踏みながら、省くことに尽力をしており、結果として使用するコンクリートを減らすことでコストを低減させていたことが浮かび上がった。その尽力の結果として、R. Maillart が死去して70年以上たった現在も R. Maillart の設計した橋梁は使い続けられている。

参考文献

- 1) David P. Billington : 『Robert Maillart Builder, Designer, and Artist』, Cambridge University Press, 1997
- 2) David P. Billington : 『The Tower and the Bridge: The New Art of Structure Engineering』, Princeton, 1985
- 3) Max Bill : 『Robert Maillart』, History and Heritage of Civil Engineering, 1949
- 4) 土木学会景観デザイン研究会, 橋のデザイン, 95-No. 4, pp. 108, 1995