

ロベール・マイヤールの構造デザインと設計思想（その2）^{*1}

—無筋コンクリート、鉄筋コンクリートアーチに関する考察—

The Structural and Conceptual Design of Robert Maillart's Bridge (Part 2)

- a study on the non-reinforcement, rein-forced concrete arch bridge -

鈴木圭^{*2}

By Kei SUZUKI

お 概 要

筆者はこれまで、19世紀後半から20世紀初頭の欧州における鉄筋コンクリート橋の歴史的変遷に関する研究を行ってきた。本論文は、19世紀初頭、スイスで欧州初の鉄筋コンクリートに関する設計指針が制定された以降、その指針を遵守しながら様々なコンクリート橋のデザインを実現したスイスの橋梁デザイナーであるロベール・マイヤール（1892～1940）の代表的な作品のうち、無筋コンクリート及び鉄筋コンクリート橋のデザインの特徴、設計手法、材料特性、施工法を明らかにし、マイヤールのデザインがどのような発想のもとに実現され、発展したのかを考察する。

1. はじめに

1890（明治23）年にチューリッヒ工科大学（ETH Zuerich）に入学したマイヤールは、当時図式静力学（Graphische Static）ではヨーロッパの先端を進んでいたリッター（W.Ritter）教授に感銘を受け、1894（明治27）年、土木技術者の資格（Diplom）を取得した後、ベルンにある設計事務所、ピュンペン&ヘルツォーク社（Puenpen & Herzog）に入社した。事務所でビエール・アプレ・モルゲス（Biere-Apples-Morges）を結ぶ市営鉄道の路線選定や橋の設計を担当した後、1895（明治28）年10月、ローザンヌ近郊のモルゲス（Moges）に派遣され、鉄道の建設現場で現場技術者としての第一歩を踏んだ。1896年3月から同年9月まで、コンクリートアーチ橋の施工監理を担当することになった。ヴェイロン（Veyron）川を渡るアーチスパン6mの小さな橋であったが、これがエヌビック式アーチとの出会いとなった。11月に鉄道が全線に渡って開通した後、ベルンに戻ると、別の仕事に付きたいと考えて、同社の推薦を受け、1897年1月チューリッヒ市の土木課（Tiefbau-amt）に勤務した。土木課では、さっそくシュタウファッシャー（Schtauffacher）橋のコンペにおいて、頭角を現し、橋長約40mを有する3ヒンジ式無筋コンクリートアーチを設計する。

本論文は、マイヤールが初めて大規模なコンクリート橋を設計する1899年から、ビルツデッキを使った建築の設計のためにロシアに行く1914までの間に設計したコンクリート橋と上水道について取り上げ、無筋コンクリート及び鉄筋コンクリート橋のデザインの特徴、設計手法、材料特性、施工法

を明らかにし、マイヤールのデザインがどのような発想のもとに実現され、発展したのかを考察する。

2. シュタウファッシャー（Schtauffacher）橋¹⁾、1899年 1) 計画の経緯

1897年、チューリッヒ駅下を流れるジール（Sihl）川の1km上流部において、自動車、路面電車の普及に伴って増大する交通量に対処するため、左岸側の南西部と右岸側の市内を結ぶゼルナウ通り（Selnau strasse）延長線上に、橋長約40m、幅員20mのシュタウファッシャー橋が計画された。市の土木事務所は、（表-1）第一案に示す3径間の連続ラチストラスアーチを計画したが、2本の橋脚を河川内に設置することに伴う河積の疎外と流水による橋脚損傷の危険に配慮して、第二案から第四案が検討された。

表-1 土木事務所が検討した当初計画案（第二から第四案）とリッター教授が提案した2案（第五、六案）の比較表

No.	構造形式	スパン/ライズ	コスト
第一案	3径間連続ラチストラスアーチ		
第二案	2径間連続桁	—	245,000Fr
第三案	1径間鋼製アーチ	41.2m/2.7m	268,000Fr
第四案	2径間連続石橋	38m:19m+19m	272,000Fr
第五案	1径間3ヒンジ式鋼製箱桁アーチ	53.9 m/3.0 m	240,000Fr
第六案	1径間3ヒンジ式鋼製トラスアーチ	53.9 m/3.0 m	240,000Fr

これらの3案に対して、チューリッヒ工科大学の構造力学の教授であり、マイヤールの恩師でもあるリッター教授の案

^{*1} keywords : 鉄筋コンクリート、

^{*2} 正会員 株式会社 アバンアソシエイツ

ドバイスにより、(表-2)の第五、六案に示す1径間の3ヒンジ式鋼製アーチで、それぞれ箱桁アーチとトラスアーチとする案が提案された。

市の建設協議会 (Staedtischen Baukollegiums) の内部では、このプロジェクトを評価するに当たって、すでに土木課 (Tiefbauamt) から提案されていた、景観的な観点から何径間にすべきか議論をすべきであるという意見を採用し、検討を行った。その結果、市の高等技術者 (Ober-ingenieur) であるモーザー (Moser) により、1径間のコンクリート橋とすることが決定された。これを受けて土木局では、さらに検討を進め、当時、同局に勤務していたマイヤール技士によって設計された鋼製3ヒンジ付無筋コンクリートアーチが採用された。建築的な外装デザインは、市の建築技士 (Stadtbaumeister) であるグル (G. Gull) が担当し、重厚な石橋を思わせるファサードになった。橋詰の4ヶ所には石灰岩を張った塔が設置され、その頂部には座したライオンの像が置かれている (写真-1)。

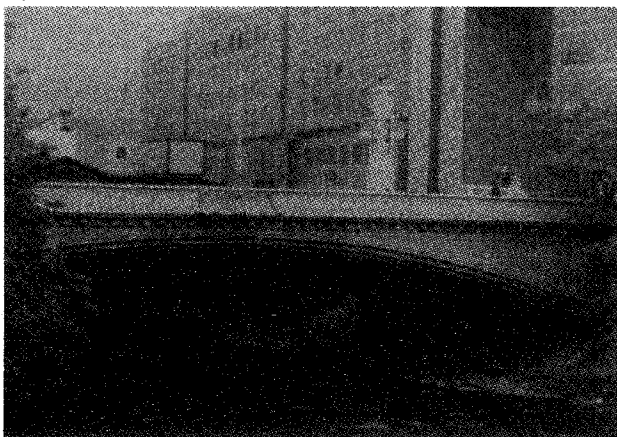


写真-1 シュタウファッヒャー橋 (撮影: 鈴木圭, 1990)

2) 構造の特徴

本橋は、アーチスパン39.6m、アーチライズ3.7m、全幅は20mで歩道部2@4m、車道部12mである (図-1)。アーチリブには無筋の突き固めコンクリートが用いられ、リブの厚さは、付け根部で72cm、四分の1の部分で95cm、クラウン部で78cmに変化している。鋼製ヒンジは、アーチ付け根にそれぞれ2個、クラウン部に1個設置した3ヒンジ式静定構造であるため、アーチに発生する応力は簡単に求めることができる。計算書によれば、アーチリブの縁応力度は、22~

29kg/cm²であり、アーチ基礎部では3kg/cm²の圧縮応力度であることが報告されている。マイヤールは上部工重量を軽減するために、アーチ付け根のヒンジ部からスパンの四分の1の範囲には、橋軸直角方向に鉛直壁を設置し、床版にはエヌビック式の配筋方法を採用した。中央の二分の一の範囲には、軽量のレンガを充填する構造となっている。

3ヒンジ式コンクリートアーチは、ドイツ人のコッホ (Koch) によって1887年、ウルム (Ulm) の橋に導入され、1893年にはシュツットガルト出身のライブランド (Car von Leibbrand) の設計によってライン河を渡るアーチスパン50mの無筋コンクリート橋がムンダーキングゲン (Munderkingen) に完成している (写真-2)。コンクリートの配合は、セメント:砂:碎石の容積配合は1:2.5:5であり、厚さ1.0mのアーチクラウン部と厚さ1.1mの付け根部にそれぞれ34kg/cm²の応力度が発生したことが報告されている。側面のコンクリート表面には、砂岩が張られ、冷たい印象を軽減するテクスチャーが施されている。

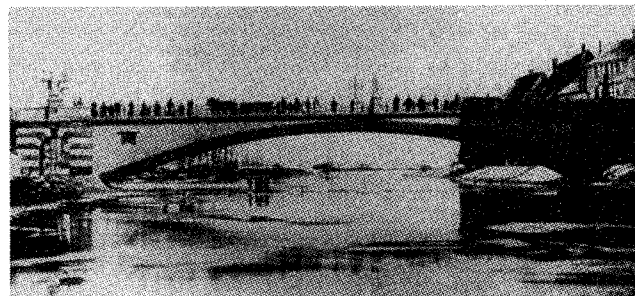


写真-2 ムンダーキングゲン橋 (1890年)²⁾

つまり、シュタウファッヒャー橋の構造はマイヤール独自の発想ではなく、すでにドイツ人のコッホによって考案された3ヒンジ構造と鉄筋コンクリートの床版を組合せて本橋に適用したものと言える。しかしながら、若い技術者にも拘わらずマイヤールが評価されたのは、次の3点による。第一に、上部工の軽量化を図った構造であること、第二に、3ヒンジ式アーチの静定構造物としたことによって、簡単に断面力が求められる構造としたこと、第三にこれまで提案された案よりも経済的であったことである。

コンクリートの配合は、当時は容積配合であり、本橋においても発生する応力度に対応して (表-2) に示す配合が行われた。アーチ基礎部の配合にはⅠ~Ⅲが、アーチリブとアーチ付け根のヒンジ部にはⅣの配合、そしてコンクリート

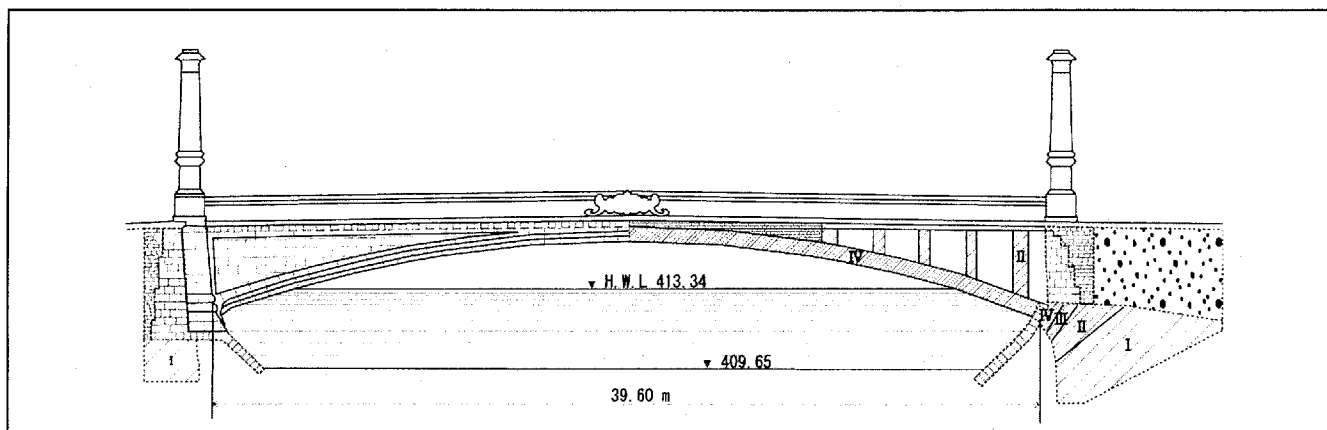


図-1 シュタウファッヒャー橋側面図 (鈴木圭作成)

壁にはⅡの配合がそれぞれ行われた。ここで、貧配合のⅠに使われたセメントは生石灰で、Ⅱ～Ⅳはポルトランドセメントが使われた。細骨材の内Ⅰ、Ⅱは普通の砂が、Ⅲ、Ⅳは粒度調整された砂が使われた。粗骨材の内Ⅰ、Ⅱは普通の砂利、Ⅲ、Ⅳは碎石が使われた。

表－2 シュタウファッヒャー橋のコンクリート配合
(鈴木圭作成)

配合	発生応力度 (kg/cm ²)	容積配合比 (容積比)	セメント：細骨材：粗骨材(Ⅰ)
Ⅰ	3～6	1：2.5：4	1袋、125 Ⅰ、200 Ⅰ
Ⅱ	6～10	1：3：5	1袋、125 Ⅰ、200 Ⅰ
Ⅲ	10～16	1：2：3	1袋、83 Ⅰ、133 Ⅰ
Ⅳ	16～30	1：1.5：2.5	1袋、62 Ⅰ、100 Ⅰ

3) 施工

施工はフローテ&ベスターマン(Frote & Westermann)社がファサードの仕上げ工事、舗装工事および護岸工事を除いて190,000Frで落札した。同社は入札時に、鉄筋コンクリート製の床版をエヌビック式とすることを提案し採用された。施工法は、先ず、支保工上の両側にファサードの石材を並べ、コンクリートは石積みアーチを施工するように、橋軸直角方向に板で仕切り、ブロック毎にコンクリートを打設した。打設順序は、支保工の支点部上のブロックを最初に仕上げ、次ぎに中間点に向かって順次施工することによって、起こり得る変形を最小限に抑え、最後にヒンジ部のコンクリートが打設された。このようにアーチリブの施工は入念に行われたことが報告されている。

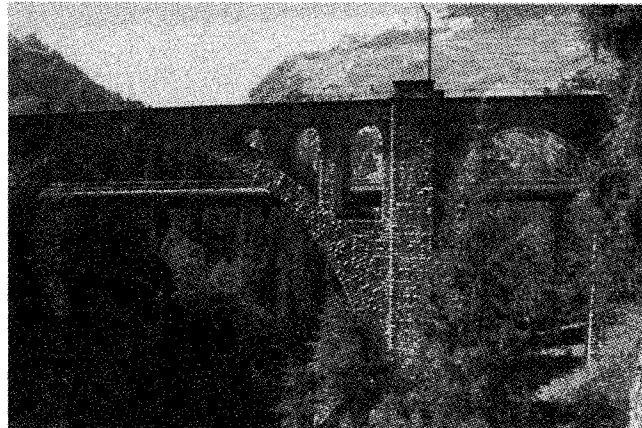
ファサードの施工は、チューリッヒ市の直轄工事であった。アーチリブには、グリネレン(Gurinellen)産の蛇腹状に加工した御影石を、高欄と柱にはフランスのユビーユ(Euville)産の石灰岩が、護岸の石にはレーゲンベルク(Regensberg)産の石灰岩が使われた。車道部には、突き固め式のアスファルトが使われ、歩道部にはオソグナ(Osogna)産の片麻岩が使われた。これらの護岸工事、ファサード工事を含めた工事総額は、220,000Frであった。

1899(明治32)年10月、マイヤールは、フローテ&ベスターマン社に入社するため、チューリッヒ市の土木課を退職した。マイヤールとしては、土木課に残って道路の建設を続けるより、鉄筋コンクリートを使った新しい橋梁の設計に従事したいという気持ちが強かったものと推察する。

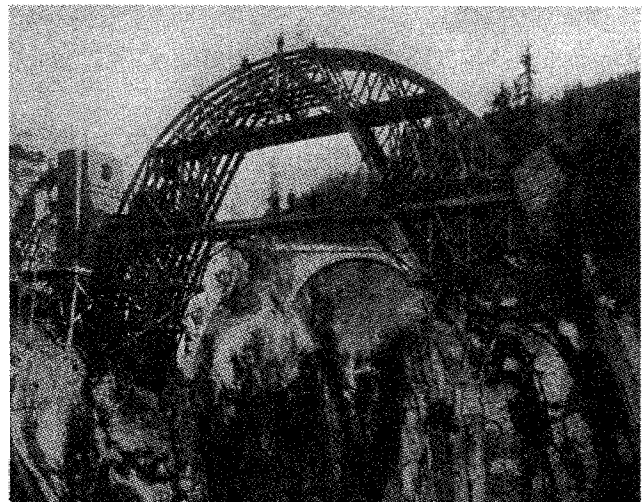
3. 鉄筋コンクリートの新たな可能性への挑戦

新しい会社で最初に担当した仕事は、レーティッシュエ(Raetische)鉄道のトゥーシス(Thusis)とティーフェンカステル(Tiefencastel)間に施工されるアーチスパン42mのゾリス(Solis)橋(写真－3)の構造計算を支援することであった。ゾリス橋は、スイスで初めて弾性理論に基づいて計算された橋であり、石層アーチとしては、初めて3層からなる橋であった。この木製支保工を設計・施工したのはリカルド・コレイ(Richard Coray, 1869～1946)で、スイスにおける大規模橋梁の木製支保工の多くを手掛けており、マイヤールの

代表作品となるサルギナトーベル橋の支保工も担当した。コレイは、木製の支保工数量を低減するため、先ず第一層の石積を完成させ、その重量のみを支保工で支えることを考えたと言われる。第一層が完成すれば、それが第二層の石層の支持部材になるからである。この考え方が、後にマイヤールがコンクリート箱桁アーチ橋の分割施工の発想をする契機になったのではないかと推察する。



写真－3 ゾリス橋の全景 (撮影：鈴木圭、1990)



写真－4 ゾリス橋の支保工³⁾

マイヤールが3番目に手掛けた橋は、リゾート地として知られるグラウビュンデン(Graubünden)州の東部にあるサン・モリッツ(St. Moritz)から、イン(Inn)川を下ったところにあるツオツ(Zuoz)の町に架けられた(写真－5)。アーチスパン30mの3ヒンジ式箱桁アーチである。アーチライズ3mでスパンライズ比は10：1のスレンダーな橋である。幅員は4mで箱桁断面は2室になっており、アーチリング、側壁、床版の3つの板から構成されている。これらの部材が一体となって荷重に抵抗する構造であった。いわゆる、現在の箱桁橋の原型となった。計画は1899(明治22)年から始められており、1900(明治23)年夏に、州のエンジニアであるガンツォーニ(Ganzoni)は、30,000Frで鋼製トラス橋を計画していたが、フローテ&ベスターマン社は代替案として鉄筋コンクリート製のアーチを31,000Frで提案した。これはマイヤールが作成したものである。マイヤールは提案の中で、経済的であること、維持管理が掛からないこと、そして景観的な特徴として優雅な印象を与えることを記述している。橋台部はコンクリート壁に石張りして、2つの橋台間にコンクリート

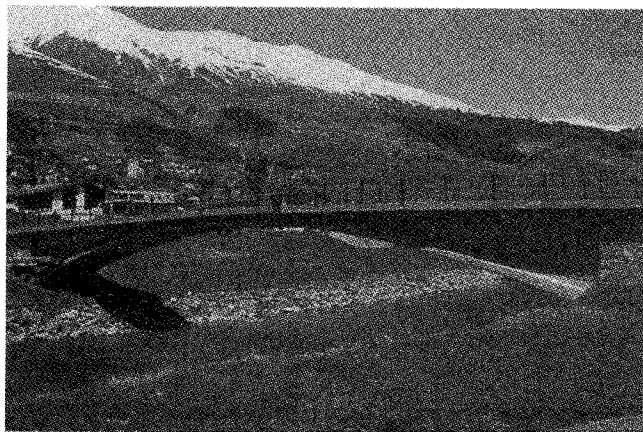


写真-5 ツオツ橋 1901 (撮影：鈴木圭、1990)

桁が三角形の楔のように伸びている印象である。チューリッヒ市のシュタウファッヒャー橋では、建築家のグルにより、コンクリートのファサードが石張りで隠されてしまったが、ツオツ橋の場合は、コンクリートのフォルムとテクスチャーそのものが生かされたデザインとなった。マイヤールはこのツオツ橋以降、一切、橋桁を石張りで装飾することはなかった。

4. トゥール川(Thur)橋ビルヴィル(Billwil)⁴⁾、1904年

1) 建設の経緯

トゥール川橋は、ザンクト・ガレン (St Gallen) 州オーバービューレン (Oberbueren) とニーダーヘルフェンスヴィル (Niederhelfenswil) 間を結ぶ道路橋 (写真-6、図-2) で、スパン 35m、アーチ高 4m、有効幅員 3.8m を有する 2 径間の 3 ヒンジ式鉄筋コンクリート製アーチ橋である。アーチクラウンとスプリングには鉛板のヒンジが設けられている。

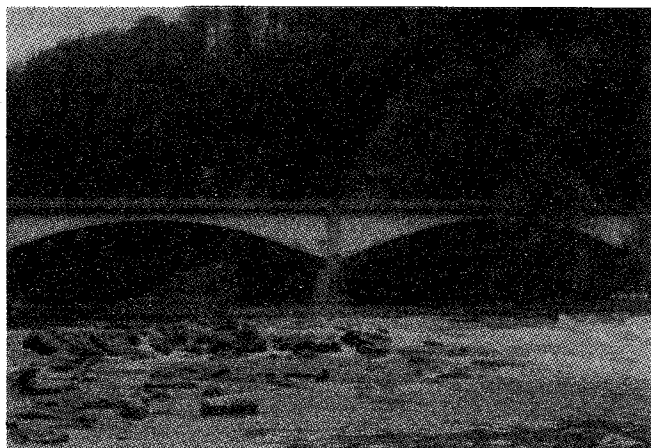


写真-6 ビルヴィル橋の全景 (撮影：鈴木圭、1990)

1904 (明治 37) 年に本橋が完成するまでは道路が拡張されたことはなかった。1870 年代半ばまで、川を渡る交通手段は渡し船だけであった。後にこの渡し場に吊り橋が歩道橋として架けられたが、構造的な問題が発生したため、建設後まもなく架け替えることになった。州の民間設計事務所が、歩道橋や軽量の橋梁の設計をはじめとしていくつかのプロジェクトを計画したが、州の建設部は、石造の中間橋脚の上に有効幅員 3.6m を有する鋼製橋梁を計画した。しかし 1903 (明治 36) 年、この橋に関する競争入札が公示され、落札者が設計・施工を実施することになった。1903 年 6 月末、鉄筋コンクリート橋の代替案を提出したチューリッヒの建設会社であるマイヤール建設会社が落札した。マイヤール建設会社が鉄筋コンクリートで橋を施工することになったのは、建設コストは鋼製橋梁と同程度の価格であったが、メンテナンスコストが鉄筋コンクリート橋の方が安くなると評価したためである。

架設地点は、技術、および経済性の面からも良好であった。トゥール川の両岸は岩盤が露出し、比較的スパンを短く、基礎も経済的に施工できる。完成した橋の施工法は当時としては新工法に属するもので、鋼製アーチのように 3 つの部材から構成されている。第一の部材はアーチで、この厚さはアーチクラウン近傍では $t=16\text{cm}$ からスプリング部の 60cm まで変化する。第二の部材は床版で、厚さはアーチクラウン近傍では $t=10\text{cm}$ からスプリング部の 14cm まで変化する (図-2)。第三の部材は、床版とアーチを結合する 3 本の側壁で厚さ $t=16\text{cm}$ である。この側壁には、剛性を高めるために中間部に横壁が設けられた (図-3)。

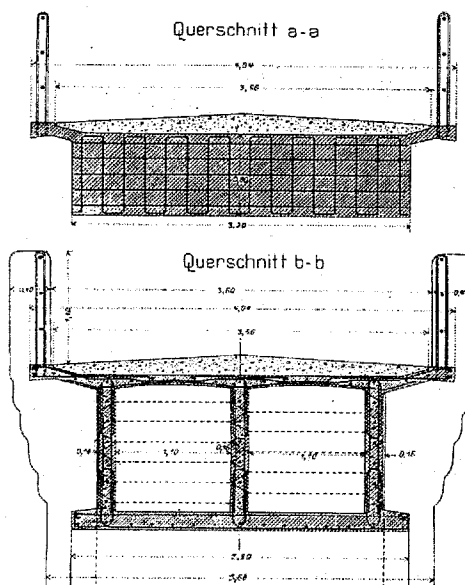


図-3 中央ヒンジ部 a-a 断面、一般部 b-b 断面

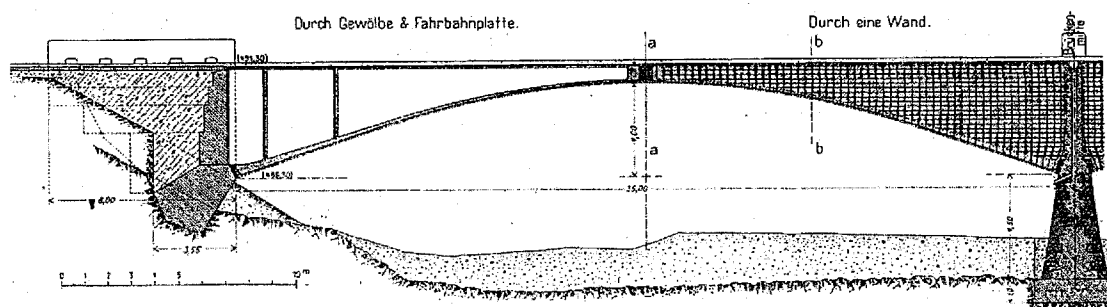


図-2 側面図及び鉄筋配筋図

2) 設計手法

規定された橋の活荷重は、等分布荷重 250kg/cm^2 または、 7.5t の輪荷重である。振動や衝撃荷重を配慮して、さらに示方書の 20% と 60% が適用された。すなわち等分布荷重として 300kg/cm^2 と輪荷重として 12t を想定して計算を行った。この荷重に対して使用材料に関する許容応力度が以下のように決定された。

コンクリートの圧縮応力度 $\sigma_d = 36\text{kg/cm}^2$

鉄筋の引張り応力度 $\sigma_e = 1400 - 5\sigma_z \text{ kg/cm}^2$

ここで σ_z はコンクリートの引張り応力度を示す。鉄筋の断面はコンクリートの 20 倍の性能として計算上扱っている。床版は曲げに抵抗し、部分的に拘束された梁として計算している。この場合、コンクリートの圧縮応力度は 35.7kg/cm^2 まで上昇し、鉄筋の引張り応力度は 1146kg/cm^2 まで上昇したと報告されている。

アーチは3ヒンジアーチであり、設計の考え方として、石層アーチとの相違点はアーチ、側壁、床版を1つの断面として扱って計算するという点である。圧縮線は、アーチ断面のミドルサードの範囲内にあるため、引張り応力は発生しない。アーチと側壁に配置された丸鋼はコンクリートと同様に働き、床版とアーチをしっかりと結合する目的を持っている。それによって3つのすべての部材が荷重を分担することができる。部材断面が最も小さいアーチクラウン部近傍における最大圧縮応力度は 23.5kg/cm^2 からスプリング部部の 15.1kg/cm^2 である。ヒンジ部における計算圧縮応力度は、

アーチクラウン部 34.7kg/cm^2

アーチスプリング部 35.0kg/cm^2

であった。

コンクリートの配合は、ポルトランドセメント 300kg 、骨材 $800\text{l} + \text{砂 } 500\text{l}$ であり、骨材と砂はトゥール川から採取している。アーチクラウン部とアーチスプリング部には大きな圧縮力が作用するためにやや固めの配合にしている。鉄筋は軟鋼 $\phi 15\text{mm}$ から $\phi 10\text{mm}$ の丸鋼を用い、総重量は 16ton であった。中間橋脚はコンクリートに四角の石灰岩を化粧張りしたものであった。橋台は中間橋脚が岩盤の上に構築されているように、すべてコンクリートでできている (写真-7)。

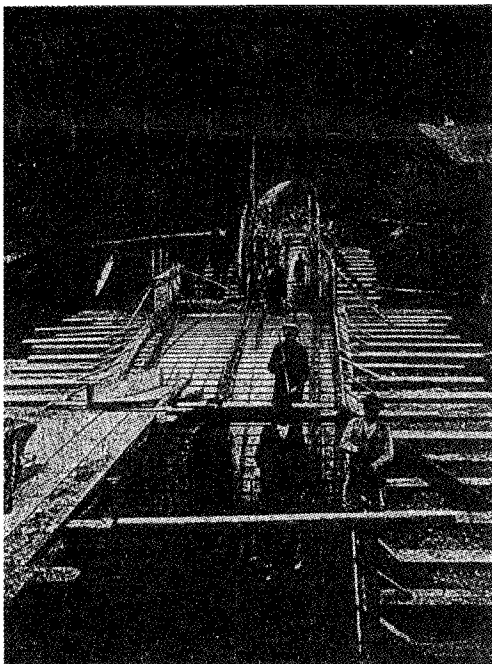


写真-7 支保工上の鉄筋配置状況

3) 施工と荷重載荷実験

本橋はスイスでこれまで同様な方法で建設された橋の中で、最もスパンの長い橋の一つであった。したがって経済的な砂利の支給という条件のもとで、入念な施工が行われる必要があった。危険なトゥール川の洪水に対処し、他方では大きな沈下を防ぐために、しっかりした支保工を構築することに特に注意しなければならなかった。そのため支保工は、コンクリートの束柱を設置して、全荷重を垂直に支持するようにしている。

1903年7月に着工し、同年12月完成した。橋面工は翌年の春に持ち越され、1904年4月6日、橋梁の支保工を下げた時、アーチの変形は 6mm 下がっただけであった。荷重載荷実験は4月23日、路面上に水槽を構築しこれに水を張って行った。最大変形量は 2.3mm から 2.2mm であり、残留沈下量は 1.0mm であった。荷重載荷実験中にひびわれは観察されず、異常な変形も見られなかったことから、試験結果は良好であったことが報告されている。進入路のコストを除いた、橋の建設コストは 33200Fr であった。

5. ライン河(Rhein)橋タバナサ 橋(Tavanasa)⁵⁾、1905年

タバナサ橋は、マイヤールの考案した3ヒンジ式アーチの美しいフォルムが完成した橋である (写真-8)。アーチスパン 51m 、アーチライズ 5.5m 、スパンライズ比 $1:9.3$ 、幅員 3.6m である。橋のフォルムの特徴は、橋台部から中央に向けて、三角形状にウェブを切り取った形となり、軽快感と優美さを兼ね備えたフォルムとなった (図-4)。このフォルムを基本としてサルギナトール橋 (Salginatobel) (1930年)、ロスグラベン橋 (Rossgraben) (1932年)、フェルゼック橋 (Felsegg) (1933年)、ベッシー橋 (Vessy) (1935年)、ラッヘン橋 (Lachen) (1940年) へとそれぞれの地形、交差条件、荷重条件に従って、形が発展していく。

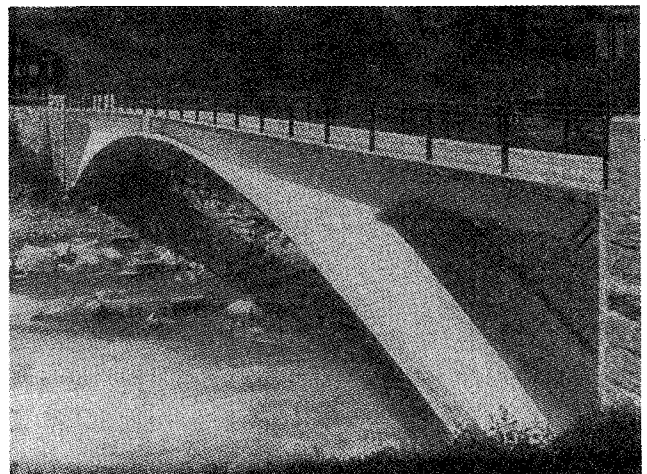


写真-8 タバナサ橋の全景⁶⁾

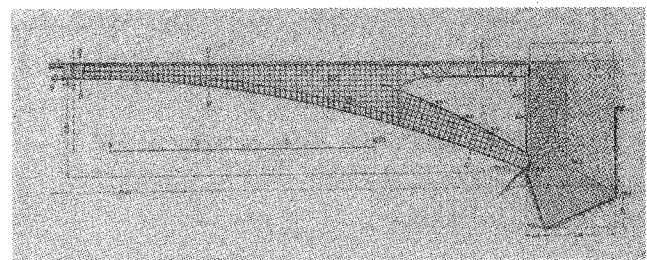


図-4 タバナサ側面図及び鉄筋配筋図⁷⁾

1) 建設の経緯

グラウビュンデン (Graubünden) のタバナサにおいてオーバーレンダー通り (Oberländer Stra.) と対岸のブリーゲルス村 (Briegels) のダニス (Danis) とダルディン (dardin) を結ぶ幅員 3m の道路が計画された。1904 年 10 月 1 日、に入札が行われ、審査員としてリッターの亡くなった後を継いでチューリッヒ工科大学の教授に就任したエミール・メルシュが参加した。活荷重として 250 kg/cm² と集中荷重として 6 t が与えられた。施工はマイヤール会社が引き、1905 年秋、荷重載荷実験が実施された。ツオツ橋と比較して大きな違いは、タバナサでは 1 室箱桁が採用されたことである (図-5)。これによってツオツ橋に比較してスパンが 1.5 倍に長くなり、上部工重量も軽量化されたことになる。

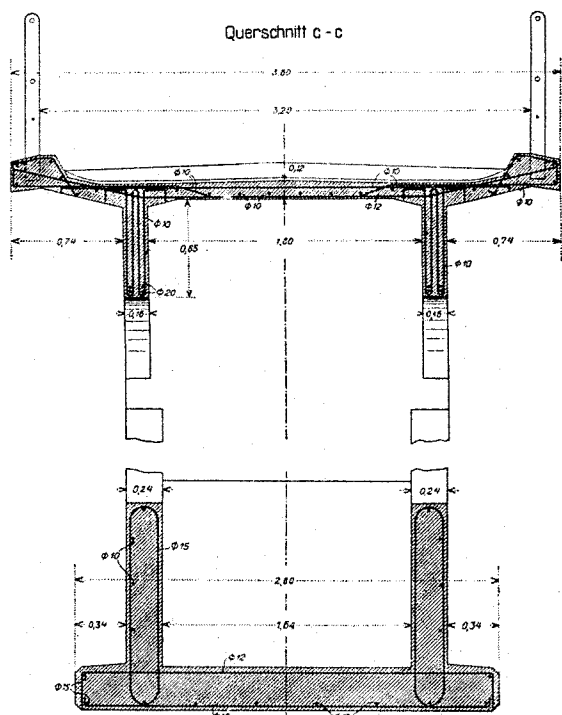


図-5 タバナサ橋断面図⁸⁾

6. 鉄筋コンクリート管の荷重載荷実験⁹⁾ 1907年

1) 計画の経緯

バーゼル市の新バーデン駅 (Badicher Bahnhof) 建設現場内において、マウルベアー通り (Maurbeerstrasse) から道路を横断し、端部は駅下をサイホンで通過する全長 100m の産業用上水道を建設するプロジェクトであった。駅部では土被り 50cm、管内水深は 3m であるため、鉄筋コンクリートで施工することが計画された。

指定事項は管路の幅と内高で、コンペ参加者は管の形状を提案することが求められていた。四角形断面の場合、土圧を受ける面は荷重作用方向に対して直角の面であるため、活荷重に対して計算が簡易になるという長所がある。活荷重は、蒸気ローラー前輪の集中荷重 $P=9t$ を最大荷重として設定された。一般に管路は内側の水圧、排水口、ライニングに関して円形形状が好ましい。しかし、マイヤールは楕円形断面を有する管路を提案し、バーゼル上水道局は、マイヤール会社 (Maillart & Cie) に発注することになった。この形状の有効

性を示すため、事前に長さ $L=3.0m$ の実物大の供試体を製作して実験を行えば、厳密な計算書は提出しなくてよいという条件であった。

2) マイヤールの知見

土被りが十分なマイヤールの構造技術者としての洞察力を以下の意見に見ることができる。

「内水圧に対する検討は問題ではない。その影響はとりわけ小さく、内水圧による応力は図心に作用する引張り応力 $T=q \cdot R$ に近似できる。なぜなら断面形状が円形になっているからである。これに対して、繰り返し外荷重が作用する管上部については、正確に検討することは難しい。管の側面は土で完全に覆われているので主動土圧と受動土圧が繰り返し作用し、弾性理論によって支点を完全固定と仮定した場合の計算結果とは全く異なるからである。したがって、第一に計画断面を仮定し、最大荷重を、想定される最大の偏心量を与えて作用させて、十分耐えうる断面寸法を決定することが必要であった。」

マイヤールは計画案において、楕円形の断面の厚さを $t=12cm$ とし、内側の鉄筋量を 1m 当たり 8.9cm²、外側の鉄筋量を 1m 当たり 2.6cm² とした。理論的には外側の鉄筋は内側の鉄筋と同等の強度を有していなければならない。彼はその反対に、小さなアーチの場合、上側鉄筋は必要ではないと考えた。それは、支承には剛度がないため、力学的に純粋なアーチとして扱うのではなく、アーチと梁の中間的な特性を持つ構造として扱うということが彼の見解であった。内側については、外側よりも水密性を十分考慮することが必要であると述べている。しかし、自分の仮定について、実験なくして、正しいとはいえないことを述べている点が、常に現象に対して真摯であり続けたマイヤールの姿であったといえる。

3) 荷重載荷実験の状況

施工開始前にこの管の健全性を明らかにするため、急遽、チューリッヒ・ギースユーベル (Zuerich-Giesshuebel) において 1907 年 3 月 14 日から試験体を製作することになった。正確な試験体を施工するには設備も準備も十分ではなかったため、試験体の施工はさほど望ましいものではなかった。とりわけ、掘削した溝が狭かったので配筋のための型枠工とその監理は困難であり、鉄筋の配筋は正確ではなかった。契約では 3 週間後に試験を開始しなければならなかったため若干の調整が必要だったが、コンクリートの配合は、ポルトランドセメント (Marke Zwingen) 350kg/m³ とした。3 週間後の曲げ強度は (Biegezugfestigkeit) 37.5kg/cm²、圧縮強度 (Druckfestigkeit) は 245kg/cm² に達した。

最初に予め計画した状況に対応させるためには、試験体の上部に 50cm 盛り土し、支間の四分の一の位置に集中荷重を作用させなければならない。しかしながら盛り土材はローム質粘土であったので、その上に重石を載せると重石自体が沈下することになる。そこでアーチが沈下する 27t までの荷重は、底辺の大きさが 60cm×60cm のコンクリートブロックをアーチの中心から 1.2m の範囲に載せ、それ以上の荷重載荷方法は、コンクリートブロックの上に鋼製梁を並べ、この上に碎石を詰める木枠の箱を構築し、徐々に碎石を詰めていっ

た。こうすれば、試験荷重をコントロールし、別の目的にも合わせることができた。

次に、右側だけに均一に荷重を作用させるために、右側の盛り土を管頂部に揃え、左側の盛り土はすべて撤去した。何故なら盛り土部分が締め固まるとその影響がでるため、アーチが破壊するまで荷重を載荷することはできなくなるからである。荷重はコンクリートブロック、鋼製梁と碎石を詰め込んだ木箱から構成される。アーチ1/4の位置に、それぞれ2カ所たわみ測定器を設置した。荷重載荷実験は、1907年4月3日に開始し、4月13日に終了した。(図-6)に最初のア

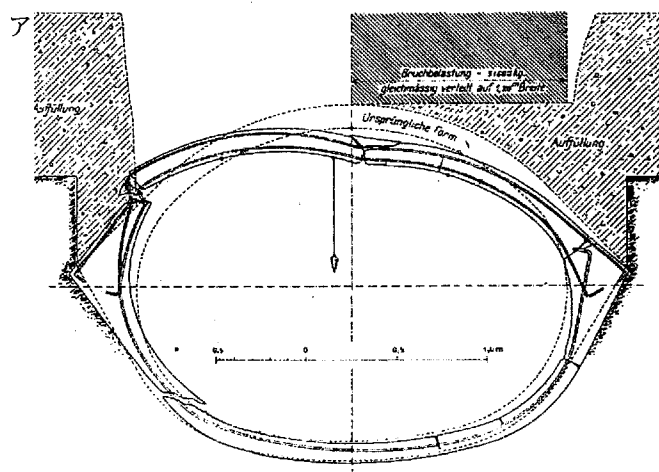


図-6 荷重載荷実験による管路の破壊状況

すでに最初の荷重載荷実験の時、右側のアーチ1/4の位置の内側ライニングに、最初のひびわれが発生し、2番目のひびわれは底版に発生した。2回目の荷重載荷の時にこのひびわれは再び広がり、30tの時に2本の新しいひびわれが最初のひびわれに対して並行に発生した。34tの時にアーチ頂部に近い下側最外縁の鉄筋が伸び始めたが、一方では残りの鉄筋はアーチが破壊するまで伸びることはなかった。破壊はゆっくりと進行し、アーチ頂部右側の内側ひびわれが開き、その上の外側のコンクリートが圧壊し、同時にアーチ上部左の部分が下側から剪断された。注目すべき点は、荷重を受けたアーチの部分が、荷重を受けないアーチの部分よりも沈下し、強固な支点部分が持ち上げられたことである。初期の段階で底版にひびわれが生じたのは、地盤がそれほどよくなかったからである。水道管が荷重を受ける前と後の形状を比較すると、実際に粘土質の地盤はやや全体的に押されている。

試験の結果によれば、第一に、想定した状況に対して形状は適切だという判断がなされた。パーゼルの地盤は若干固いけれども、実験した地盤とそれほど異なるものではなかった。マイヤールは、計算結果から予知していたように、内側の鉄筋は外側の鉄筋よりもはるかに強くなければならないことに確信をもったことが次ぎの言葉からも伺える。

「注目すべき点は、外側のひびわれはかなり遅れて発生したということである。さらに、壁厚の厚いアーチは、地盤がめり込むような状況ではしっかりと保持することができないので好ましくないという結論を得た。むしろやわらかい地盤においては、厚く堅牢な構造物は、薄く曲げやすい構造物に比較して危険であると言った方が適切である。」

7. アーレ (Aare) 橋アールブルク (Aarburg)¹⁰⁾、1912年

1) 建設の経緯

アルガウ (Argau) 州の州都であるアールブルクには、東から北にかけてアール川が流れている。丁度、その屈曲部に古い吊り橋があり、主ケーブルは両河岸の岩盤にアンカーされていた。近郊にオルテンーアールブルク発電所が完成して以来、増加する交通量には十分対応できなくなっていたため、吊り橋を管理していたアールブルク州は、州の建設課に対して新しい橋の架橋計画を打診した。マイヤールのコンクリートアーチ橋は、現在の橋ではアーチリブだけが残し、完成当時の繊細な支柱部と床版はコンクリートの劣化に伴って撤去され、マイヤールの代表作であるサルギナトーベルのフォームを継承するように新たに施工された。オリジナルのアーレ橋は古城周辺の歴史的な風景と対岸の牧歌的な風景に対して、繊細な美しさを保っていた (写真-5)。

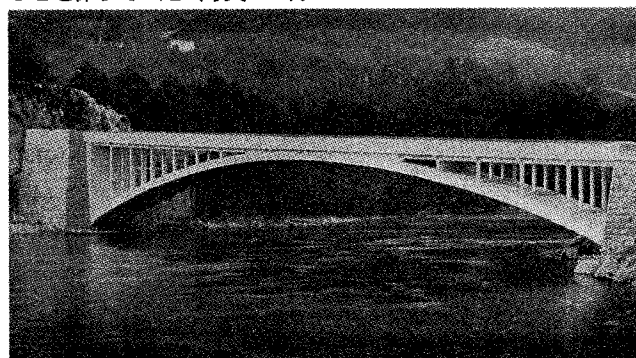


写真-9 完成当時のアーレ橋 (1912年)

新しい吊り橋という案もあったが、技術的、経済的な理由から推挙されなかった。また、河川中に1本意以上の橋脚を設置する案について検討を行ったが、景観的に満足できるものではなく、1スパンのアーチ橋で河を渡る案となった。架設地点の地形的条件、並びに両側に存在する岩盤は、良好であった。また、洪水に対しては、1910年に起こったバリの大洪水の経験をもとに検討を行ったが、特に、問題とはならなかった。

1908年、第1回目の建設計画が公示され、指名競争入札が行われたが、満足できる案は提案されなかった。しかし、鋼構造はこの計画にはそぐわないことが確認された。1910年、概ね同様の建設計画であるが、ある点においては詳細な条件を付加し、鉄筋コンクリート構造に限定した「建設計画1910」が実施された。

2) 橋梁計画

この計画は、図面が用意され、プロジェクトの基本となるコンセプトや克服しなければならない課題が示されていた。計画橋梁のレベルは、既存の州道にすり付く高さとし、平面的には、に示す線形が提示された。縦断勾配はアール側左岸から右岸に向かって5%の登り勾配となっている (図-7)。新橋完成後、旧吊り橋を撤去するとともに、新しい道路と交錯している左岸側のアンカーブロックを撤去する必要があった。

橋梁計画については、以下のように規定されていた。アーチスパン: 68m、アーチスプリングにおけるアーチ下縁のレベルは、392.45m以上、これに伴うアーチライズは6.8~7.0m、スパン・アーチライズ比は、10:1。河川水位は、次のように示されていた。

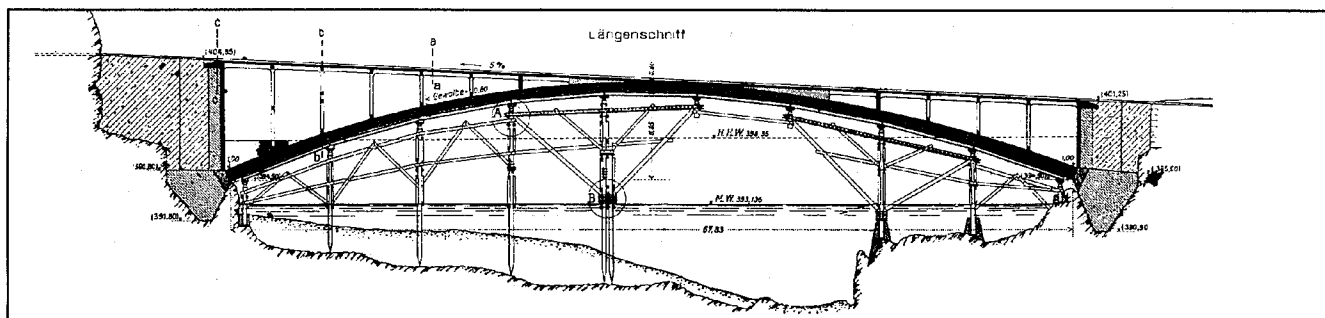


図-7 側面図と支保工

- ・最低水位：392.45m
- ・冬季平均水位：393.72m
- ・夏季平均水位：394.54 m
- ・1888～1901年の間の最高水位：396.67m
- ・1888年のユラ下水道管理局の測定値：398.35m

最後に示した水位に従うと、アーチスプリング部の高さは3.5m以下でなければならず、394.35m以下にはならなかった。車道幅員は5.0mで車専用である。活荷重は、群集荷重として350kg/m²であり、輪荷重として14tが設定された。構造材料は、石及びコンクリート、鉄筋コンクリートに限定され、無筋コンクリートは認められていない。橋梁はこれの荷重に耐えうることを、しかも橋のフォルムが美しく、周辺風景に調和しなければならないことが課題として与えられている。

このプロジェクトの課題によれば、望まれる橋梁は非常に限られたものであり、応募者は、建設材料、施工法及び設計計算について提出しなければならなかった。提出された案は4案であり、その中のマイヤール会社が設計図面に基づいて、施工を担当することになった。

3) 設計

橋梁は、扁平で、軽く、しかも鉄筋コンクリート製の弾性アーチであり、自重による圧縮線に沿った形状をしている。活荷重、自重反力によって生じるアーチの弾性短縮、及び温度変化や乾燥収縮による伸びまたは収縮による圧縮線の偏心についても計算書では考慮されている。アーチ厚さは、橋台部で1.0m、クラウン部で0.8mである。スプリング線のレベルは、計画で示した最低レベルの394.90mよりやや高く設定している。アーチライズ6.95m、アーチスパン67.83mでスパン：ライズ比は9.76となり、アーチリングの幅は4.8mである。橋台部下側のコンクリートはセメント量180kg/m³で、アーチリングの圧縮力を受ける橋台上部部分はセメント量300kg/m³である。また、アーチリングのセメント量は350kg/m³を用いた。

床版は有効幅員5.0m、厚さ14cmを有する鉄筋コンクリート床版で、両側に45cmの張出し床版を備えており、全幅は5.3mである。床版には橋軸方向に幅20cm、高さ33cmの断面を有する4本のリブが互いに1.4mの間隔で配置されており、鉄筋コンクリート製高欄とともに鉄筋が互いに配置されコンクリートで床版と一体化する構造となっている。

床版に作用する荷重をアーチリブ、さらに橋台に伝達するために、アーチ両側3分の1の部分には、4m間隔で柱が配置されラーメン構造を構成している(図-8)。中央の3分の1部分では、ラーメン構造の高さがかなり小さくなるため、アーチリブと床版の間にあ

る三角形の部分にコンクリートを打設してアーチリブと床版を一体化する。温度による床版全体の伸縮に対しては、両側の橋台上に設置した鉄筋コンクリート性のペンデル壁 (Pendelwand) によって対応する。ペンデル壁は、厚さ20cmの床版に鉄筋を定着させて

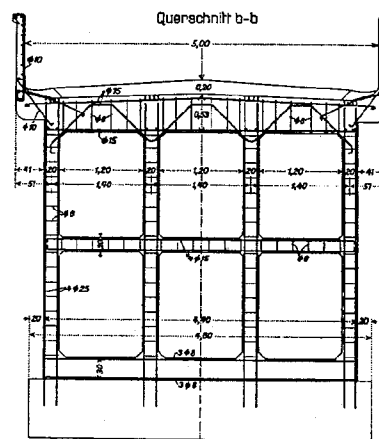


図-8 床版部の構造詳細

床版を支持するとともに、張出し部分が擁壁上部をスライドすることができる(図-9)。(注：ペンデル壁は、橋台部に位置し橋軸直角方向にアーチの幅と等しい長さを持つ壁である。マイヤールは、床版が温度の影響で橋軸方向に伸縮しても、ペンデル壁下端がピン構造のように回転するため、その影響を吸収させる目的で設置したと考えられる。この考え方は、橋の端部において支承を必要としない現代のインテグラルブリッジの考え方に相当する)

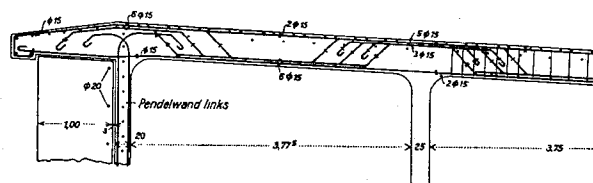


図-9 床版端部の支持構造

右岸側橋台の背面にある岩盤は、かなり後方に位置するため橋台はマッシブなものとなっているが、アーチ構造に対して十分な安定性を与えている。

コンクリートの表面には、セメントミルク (漆喰) を3回塗りしており、当初は塗りがたてで鮮やかであったが、次第に落ち着いた色調になった。建設プログラムに従い、橋のフォルムは好ましく、周辺の美しい風景に溶け込むものとなった。

使用材料の応力的な特性については、1909年にスイス委員会の制定した鉄筋コンクリート構造物指針案に基づいている。これによ

れば、主荷重による許容縁応力度は、 $45\text{kg}/\text{cm}^2$ で、温度と収縮の影響を含めた作用荷重に対しては $75\text{kg}/\text{cm}^2$ を超えてはならない。アーチリング部で引張応力度が発生する場所では鉄筋を多く配置しなければならないが、この橋の場合では、多くの鉄筋を配置しなくとも、以下に示す考え方によって圧縮線の異常な偏心に対して対応することができる。つまりアーチの断面寸法を決定する場合、コンクリートの縁応力度が $200\text{kg}/\text{cm}^2$ に達した時、反対側の縁にある鉄筋が降伏点に達するように設計する。このようにして必要なコンクリートの設計強度をフルに活用して、安全性を犠牲にすることなく鉄筋を有効に使うことができる。アーチに作用する圧縮応力度は、橋台部において、岩盤に対してさらに $9\text{kg}/\text{cm}^2$ 載荷させることができる。

4) 施工

施工は、1911年10月に6本の仮支柱と8基の支保工の仮設が開始された。仮支柱の下端部は、岩盤の上のあるレキ層に仮支柱の直径に相当する大きさの穴をボーリングして、そこにセットした。最終的には側径間7.2mスパンの支保工が左岸側はで4スパン、右岸側で2スパンとなり、中央径間では22mスパンとなった。船舶航行上から必要な航路幅は10mであったが、支持地盤となる河底が深かったため、両側の支柱から張出す、ほお杖構造にしてスパンを飛ばした。アーチの荷重を支持する梁は、溝型鋼を2本背中合わせとして杭間を渡すように設置した。突合せ継ぎ手部には、木を挟んでボルトナットで固定する簡易な方法とした。それぞれの杭頂部には上部からの荷重を支えるために砂を詰めた鍋状の支持具があり、これが上に位置する溝型鋼としっかり固定されて簡単にはずれない構造になっている。

それぞれの支柱は、互いに斜め材で固定され剛な構造となっている。同時に両河岸にはケーブルを張って、支保工の仮設、橋台部に張り付ける石材の運搬、アーチ部や床版に打設するコンクリートを運搬することによって、大変効率的に施工できた。

1912年1月、橋台部分の掘削を開始しコンクリートを打設し、2月にアーチリング部のコンクリート約 300m^3 を65時間かけて連続打設した。アーチリングの欠陥を補修する作業が必要であったが、すべての型枠・支保工の解体は7月1日であった。この補修作業は、ラーメン構造を有する上部工施工や橋台の石張工を妨げることもなく、予定した工期と同じに完成した。

1912年9月、16tのロードローラーを用いた荷重差載荷実験を実施したが、変位は見られなかったため、橋の引渡しと開通式が行われた。橋単体のコストは100,000フランで、両側の歩道部を含めて112,000フランであった。これは当初の予定金額通りであった。資金はアールブルグ州が50,000フラン、アールブルグ市が5,000フラン、アルゴイ州が12,000フラン、オルテンーアールブルグ発電所が10,000フラン、オルテン州およびその他が5,000フラン、ソロツールン市が5,000フランを負担した。

8. おわりに

本論文は、マイヤールが設計した1899年から1914年までの主要なコンクリート橋について、デザインの特徴、設計手法、材料特性、施工法を明らかにし、マイヤールのデザインがどのような発想のもとに実現されたかを明らかにした。今後は1914年から1940

年までの鉄筋コンクリートアーチについて、特に、補剛アーチのデザインについて調査していきたいと考えている。

参考文献

- 1) Wenner, O.: Die neue Stauffacher Brücke in Zurich 『Schweizerische Bauzeitung』 Mar.4, 1899.
- 2) Wittfoht, H.: 『Building Bridges』, Beton-Verlag, p.110, 1984.
- 3) Bener: Gerüst- und Seilriesenbauer Richard Coray zum 70. Geburtstag, Chur/Zürich, 1939.
- 4) Bersinger: Die neue Strassenbrücke ueber die Thur bei Billwil-Oberbueren, Kanton St. Gallen, 『Schweizerische Bauzeitung』 Oct.1, 1904.
- 5) Ros, M.: Versuche und Erfahrungen an ausgeführten Eisenbeton-bauwerken in der Schweiz, p.46, Bericht Nr.99, Vereins schweizerischer Zement, Kalk- und -Gips-Fabrikanten.
- 6) Ros, M.: Versuche und Erfahrungen an ausgeführten Eisenbeton-bauwerken in der Schweiz, p.47, Bericht Nr.99, Vereins schweizerischer Zement, Kalk- und -Gips-Fabrikanten.
- 7) Ros, M.: Versuche und Erfahrungen an ausgeführten Eisenbeton-bauwerken in der Schweiz, p.47, Bericht Nr.99, Vereins schweizerischer Zement, Kalk- und -Gips-Fabrikanten.
- 8) Maillart, R.: Belastungsprobe eines Eisen betonkanals, 『Schweizerische Bauzeitung』 Sep..7, 1907.
- 9) Zender, O.: Die Aare-Brücke bei Aarburg, 『Schweizerische Bauzeitung』 Juli..26, 1913.