

サルギナトーベル橋における力学的特性 と造形発想に関する研究

千葉 深広¹・関 文夫²

¹学生会員 日本大学大学院理工学研究科博士前期課程土木工学専攻
(〒101-8308 東京都千代区神田駿河台1-8-14)

E-mail:csmi14013@g.nihon-u.ac.jp

²正会員 工博 日本大学理工学部土木工学科
(〒101-8308 東京都千代区神田駿河台1-8-14)

E-mail:seki@civil.cst.nihon-u.ac.jp

橋梁の造形の美しさは力学的合理性を追求した先に表現できるものなのか、造形を優先した表現が重要で力学的合理性は補助的になるのかということに興味を抱き、その前者の事例としてサルギナトーベル橋に注目して分析を行った。サルギナトーベル橋に関する構造・歴史的研究はデビット・P・ビルントン (David P. Billington)¹⁾をはじめとする研究者や橋梁技術者によって行われているが、定量的に考察している文献は少ない。本研究はサルギナトーベル橋の構造計算書と現代技術であるFEM解析等の結果を比較し断面力、鉄筋配筋を定量的に照査する。さらにサルギナトーベル橋の造形発想は力学的合理性にどのように関与しているのかを分析している。

キーワード: ロベルト・マイヤール、サルギナトーベル橋、3ヒンジRCアーチ橋、構造解析、FEM解析、2次元骨組解析、鉄筋配筋、応力照査、造形発想

1. はじめに

橋梁の造形の美しさは力学的合理性を追求した先に表現できるものなのか、造形を優先した表現が重要で力学的合理性は補助的になるのかということに興味を抱き、その前者の事例としてサルギナトーベル橋に注目して分析を行った。サルギナトーベル橋に関する歴史的研究及び算定法の照査はデビット・P・ビルントン (David P. Billington)¹⁾が行っており定性的にサルギナトーベル橋の合理性の高さを評価している。欧州の鉄筋コンクリートの発展期における材料物性値に関する研究を鈴木圭²⁾が行っている。しかし、明確にコンクリートの応力度、鉄筋の配筋及び応力度等の構造合理性を定量的に記載されてはおらず、サルギナトーベル橋について構造合理性を定量的に評価している文献は少ない。そこで本研究では、サルギナトーベル橋で行われた断面力の算定方法を、現代技術である2次元骨組解析を用いて照査した。同時に、断面力から任意の断面における鉄筋量についても照査した。また、2次元FEM解析を用いて主応力の流れと鉄筋配筋の比較検討を行った。さらにサルギナトーベル橋の造形発想は力学的合理性にどのように関与しているのかを分析するなど総合的にまとめた。

2. サルギナトーベル橋の概要

サルギナトーベル橋はロベルト・マイヤールが設計した橋で、スイスのシアー (Schiers) のサルギナ (Salgina) 溪谷に今も現存している。全長132.3m、橋長90.4m、幅員3.8mの上路式3ヒンジRCアーチ橋である。アーチ支間長は90m、アーチライズは13mであり、スパンライズ比は1/7 (≒1/6.9) である (図-1)。構造形式は1905年に造られたタバナサ (Tavanasa) 橋の影響を受けており、橋台付近のコンクリートを取り除きオープンスパンドレルアーチが採用されている。1930年代では静定構造にすることにより手計算で構造物の安全性を判断することが出来るようになった。そのため不静定構造を静定構造にする工夫がみられる。サルギナトーベル橋ではヒンジ部にメナーゼヒンジを採用している。

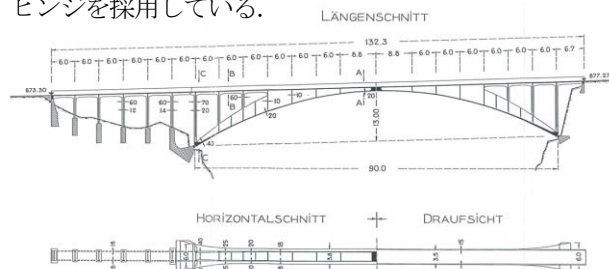


図-1 サルギナトーベル橋の平面図³⁾

3. 材料物性値

(1)概要

構造形態を模索する上で使用できる材料物性値は重要であり,材料物性値によって構造形態が左右される.スレンダーな部材厚で構成されるサルギナトーベル橋が今まで現存している理由の一つに,ロベルト・マイヤールが実物大のRC構造実験を行い独自の材料物性値を使用していたことが挙げられる²⁾.サルギナトーベル橋が竣工された翌年,高強度コンクリートの設置,鉄筋については許容引張応力度が引き上げられるなど,スイス国家基準の材料物性値が見直された.

(2)国家基準との比較

サルギナトーベル橋が竣工された年は1930年であり,当時のRC構造物におけるコンクリート材料の物性値は1915年のスイスの国家基準『鉄筋コンクリート基準』を採用している.1915年の基準は1909年『鉄筋コンクリート指針』と同等のものである.サルギナトーベル橋の竣工を受け翌年1931年にスイス国家基準が大幅に改定された.サルギナトーベル橋の構造計算書では,材料物性値についても記述されている(表-1).

表-1 材料物性値比較^{4),5)}

	スイス(1909)	スイス(1931)	サルギナトーベル橋	道示(H24)
コンクリート	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)
普通ポルトランドセメント	16	24	26.5	24 ¹⁾
軸圧縮応力度	3.5	5		6.5 ¹⁾
緑圧縮応力度	4.5	8.5	6.9	8 ¹⁾
曲げ応力度	4	10		
曲げ圧縮応力度	7	12		
弾性係数			3.92・E04	2.45・E04 ¹⁾
鉄筋	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)
引張応力度	150	200	196	200 ²⁾

サルギナトーベル橋に影響され引き上げられた1931年の基準は現在の日本の道路橋示方書の設計基準と比べても遜色ない値である.日本の値についてはコンクリートが設計基準強度24(N/mm²)鉄筋はSD345の値を表示している.また,スイスで使用されたモールド供試体の形状は20×20×60(cm)の角柱を用いている.サルギナトーベル橋の構造計算書には,曲げ圧縮時におけるコンクリートの許容値として1915年に制定された国の基準を最大50%上回るものを使用したと記載されている.これは経済的なコンクリートの普及を考えたロベルト・マイヤールの挑戦である.

4. 構造計算書の検討

(1)構造計算書の読解

サルギナトーベル橋のアーチ部における検討は主に死荷重と活荷重を用いて行われている.左右対称な構造で

あるため片側のみで検討が行われている.死荷重は橋をブロック分けし,ブロックごとに荷重を計算して支点部までの水平距離を乗じ曲げモーメントを算出している.水平力は曲げモーメントの合力をアーチライズで除して求めている.活荷重は3ヒンジ梁モデルに置き換えた影響線から,曲げモーメントを算出している.活荷重による水平荷重はアーチクランウン部に載荷した曲げモーメントをアーチライズで除して求めている.この算出方法は成瀬勝武が1940年に執筆した弾性橋梁⁶⁾にも記載があり,当時の日本でも構造計算で使われていた方法である.その他にも構造計算書には風荷重における検討も示されている.以下アーチリブの名称は図-4と定義する.

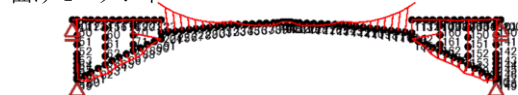
(2)2次元骨組解析と鉄筋量の計算

解析ソフトはEzy-frameを使用し,半アーチモデル,アーチモデル,中立軸モデルを組み構造解析を行った(図-2,図-3).境界条件は3ヒンジ.アーチモデルの死荷重は構造計算書に記載されている値を使用した.中立軸モデルの死荷重は各断面の断面積にコンクリートの単位体積重量を乗じて算出した.また,RC断面計算Ver.5を使用して鉄筋配筋図に記載がされている断面14,17の鉄筋量を比較した(表-3).

(3)断面力の比較検討

サルギナトーベル橋の構造計算書に記載されている断面(図-5)を解析結果と比較した.表-2は死荷重と活荷重を同時に載荷したときの断面力である.活荷重の断面力はそれぞれの断面に載荷したときの値を用いている.計算書N,Mはサルギナトーベル橋の構造計算書の値を示している.

曲げモーメント



軸力



図-2 中立軸モデルの解析の結果(死荷重のみ載荷)

曲げモーメント

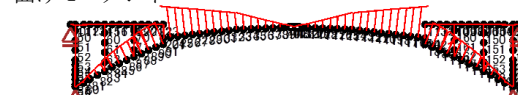


図-3 中立軸モデルの解析の結果(活荷重のみ載荷)

表-3 鉄筋量比較

アーチスプリングから13.53mのアーチ断面A	
解析結果の鉄筋量 (cm ²)	61.40
構造計算書の鉄筋量 (cm ²)	66.68
アーチスプリングから7.53mのアーチ断面B	
解析結果の鉄筋量 (cm ²)	56.25
構造計算書の鉄筋量 (cm ²)	53.12

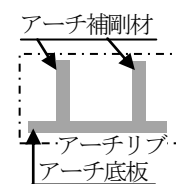


図-4 名称の定義

値が一致しなかった理由としてモデルによる影響、活荷重を3ヒンジ梁モデルに置き換えた計算法による骨組解析との誤差が挙げられる。

鉄筋量の比較検討も行った。サルギナトーベル橋のアーチリブの断面は逆Ⅱ型の形状をしているため解析モデルではT型に直して解析を行った。解析を行った断面は断面14,17であり、配筋図に詳細が記載されていたためこの断面を比較対象にした。解析結果と鉄筋量を比較したところ同じ値を示していることがわかった（表-3）。

5. 鉄筋配筋に対する考察

(1)概要

構造物に発生する引張応力に対応するように鉄筋を配筋することが出来れば、合理的な構造物を設計することが可能である。また、鉄筋配筋によって鉄筋コンクリートの耐力、破壊形態が変わるため配筋は設計において重要な位置を占めている。1930年当時FEM解析は存在せず、設計者の観察眼と経験から配筋されていた（図-11）。構造計算書に記載された配筋図と解析結果を比較し配筋の妥当性を評価した。FEM解析ソフトはAbaqusを使用、モデルは2次元シェルモデルとし、境界条件はヒンジにしている（図-6）。活荷重の影響は死荷重に比べて非常に小さかったために荷重は死荷重のみを載荷している。

(2)支点部における配筋

解析結果の図を見ると構造形式がアーチのため支点部には軸力が集中しているが、同時に軸力線直角方向に大きな引張応力が生じている（図-7）。ロベール・マイヤールが軸力線直角方向に鉄筋を細かく配筋していることが配筋図より読み取れ、大きな圧縮応力が発生している部分には引張応力が発生することを実物大実験により把握していたことが分かった（図-8）。

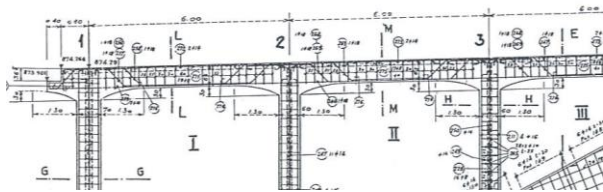


図-10 2次元FEM解析、桁と鉛直材の結果^③

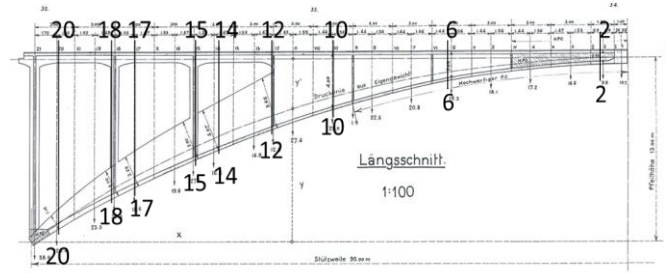


図-5 構造解析をした断面位置^③

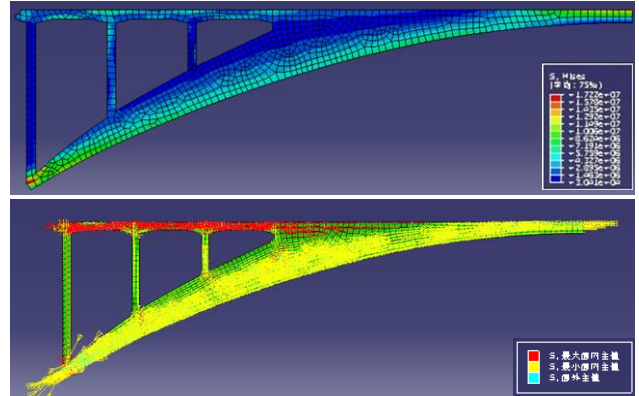


図-6 2次元FEM解析の結果

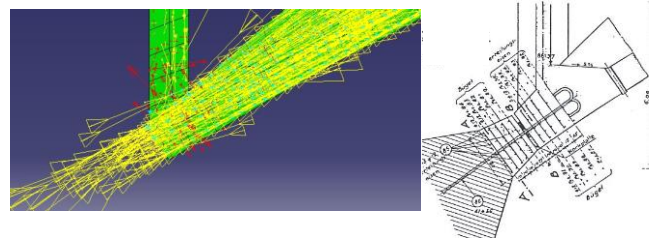


図-7 2次元FEM解析、支点部の結果

図-8 支点部の図面^③

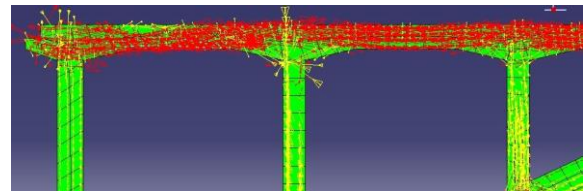


図-9 2次元FEM解析、桁と鉛直材の結果

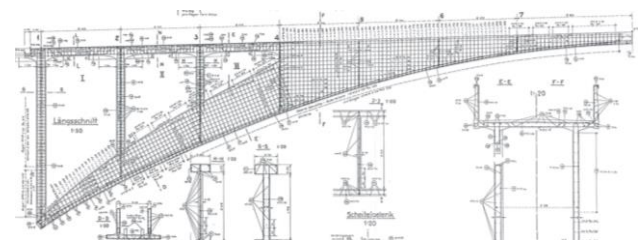


図-11 サルギナトーベル橋の配筋図^③

表-2 2次元骨組解析結果と構造計算書の値の比較

	断面力 死荷重+活荷重							
	max							
	計算書N(kN)	半円N(kN)	単円ⅢN(kN)	中立軸N(kN)	計算書M(kN・m)	半円M(kN・m)	単円ⅢM(kN・m)	中立軸M(kN・m)
2	7135	13766	20	5462	44	294	12	273
6	8451	13902	13887	5457	-1931	1327	1369	-712
10	7904	14219	14208	5562	-6037	-711	-672	-3519
12	8847	14532	14523	5725	-1823	-1651	-1620	2178
14	9179	14793	14787	5790	0	-1839	-1818	1783
15	9279	14923	14918	5841	-496	-2037	-2019	1650
17	9489	15339	15335	6056	368	-1659	-1650	1458
18	10107	15537	15534	6097	-263	-1376	-1370	1398
20	9702	16128	16127	6374	-25	91	92	29

(2) 桁と鉛直材の配筋

桁の部分には引張応力が発生しており、鉛直材と剛結されている部分では上側に引張が生じ下側に圧縮が生じている（図-9）。桁と鉛直材を取り出してみるとラーメン構造の挙動に近いことが分かる。その為、桁と鉛直材が剛結している部分には不曲げが生じハンチには圧縮応力が発生する。配筋図（図-10）ではハンチ部には鉄筋が一切入っておらず、桁には折り曲げ鉄筋が配筋されている。桁のスパン中央から剛結部に向うにつれて鉄筋が路面に向って折れ曲がっており解析結果の引張応力の流れに沿っていることが分かる。

(3) アーチリブの配筋と形状

図-12、図-13⁷⁾はスパンライズが $1/2 \sim 1/20$ のアーチにおけるアーチクラウン部、1/4支点、スプリング部の断面力（曲げモーメント、軸力）をグラフで示している。 $1/5 \sim 1/8$ で曲げモーメントの値が非常に小さいことが分かり（図-12）、 $1/8$ よりスパンライズが小さくなると軸力の値が大きくなることが分かった（図-13）。つまり、サルギナトーベル橋のスパンライズ比 $1/7$ は発生する曲げモーメントが最小でありかつ、軸力に関しては急激に増大する偏向点に位置する形態である。それゆえにFEM解析の結果（図-6）ではアーチリブに圧縮応力が生じているのが読みとれる。配筋図と比較すると圧縮応力に沿って配筋がなされている。メッシュ状の配筋はせん断力に対して効果的になるよう考慮されたものと思われる。また、3ヒンジアーチ構造であるために偏荷重が載荷されると、荷重が載荷された側とその反対側で挙動が異なる為にメッシュ状に配筋されたものと推察される。

次にアーチリブの形状の理由について考察する。2次元骨組解析における発生曲げモーメントの分布をみる（図-3）。荷重はアーチクラウン部に活荷重を載荷させた場合を想定した。解析結果は1/4支点辺りで最大の曲げが発生していることが分かった。これよりアーチリブの形状が曲げモーメント図と一致していることが分かり、アーチスプリング部から1/4支点に向かうほどアーチリブが大きくなっている（図-11）。

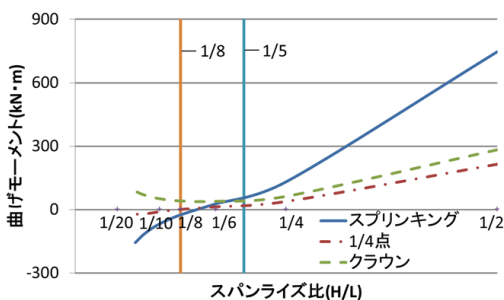


図-12 曲げモーメント⁷⁾

6. 造形発想

(1) 概要

前章では構造計算、鉄筋配筋の照査を行った。現代技術を使った比較検討を行い、サルギナトーベル橋の構造計算値が解析により求めた発生断面力または発生応力度に即していることが裏付けられた。サルギナトーベル橋は構造計算値によっておおまかな外形をなしている。また3ヒンジアーチの外形を決めるにあたって、1/4支点の二点載荷からなるプラスのモーメント図と見かけの水平力からなるマイナスのモーメント図を足して残った外形であることをデビット・P・ビリントンが記述している⁸⁾。しかし、細部にわたる造形発想を構造計算の結果だけで行うには、力学的性状に関する情報が少ない。ロベール・マイヤールは細部にわたる造形発想を実物大実験による洞察から得ており、これによりサルギナトーベル橋を設計していることがよみとれる。

(2) 荷重の流れと造形の関係

実物大実験によって力の流れを把握し、スムーズに力を伝えることの出来る造形を造りだすために、サルギナトーベル橋では部材が主・従の関係で構成されている。サルギナトーベル橋に荷重がかかった時、アーチクラウンから開口部までの①区間、鉛直材を通してアーチリブに力を流す②区間そして、端支柱を通る③区間の3つの区間で3種類の力の受け方をする（図-14）。①区間上に荷重が載った場合、力はハンチから箱断面のウェブ（側壁）を伝いアーチ底板に力を流している（図-15）。この時アーチ底板には勾配を付けておりウェブから伝わる力の流れを誘導する工夫がみられる。②区間上に荷重が載った場合、桁からハンチにそして、鉛直材へと力が伝わる。鉛直材の形状には節が両端にあり中央は鉛直壁で構成されている（図-16）。力は主に断面積の大きい鉛直材の節を伝わりアーチ補剛材に誘導する。鉛直壁とアーチ底板の結合部には人が通れるほどの開口部がありわずかながら鉛直材からアーチ底板に直接力が伝わるようになっていく（図-17）。この場合、主材が鉛直材であり副材（従材）が鉛直壁である。③区間上に荷重が載った場合、鉛直材を通り支点部に直接力を伝えている（図-18）。

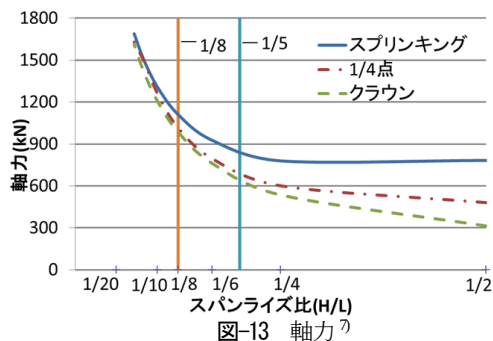


図-13 軸力⁷⁾

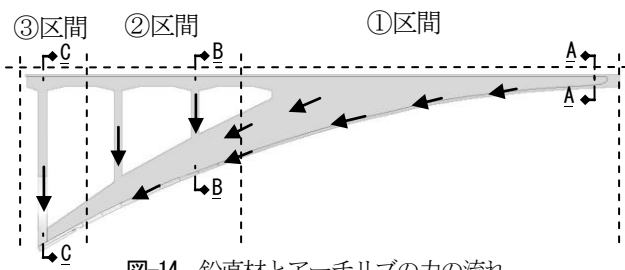


図-14 鉛直材とアーチリブの力の流れ

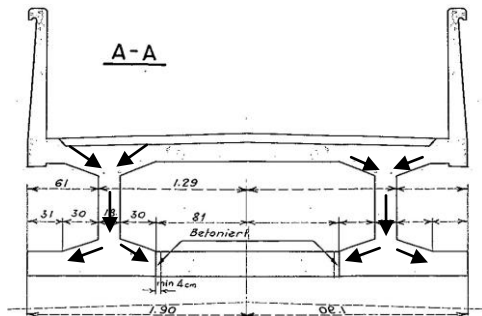


図-15 ①区間における断面図と力の流れと造形³⁾

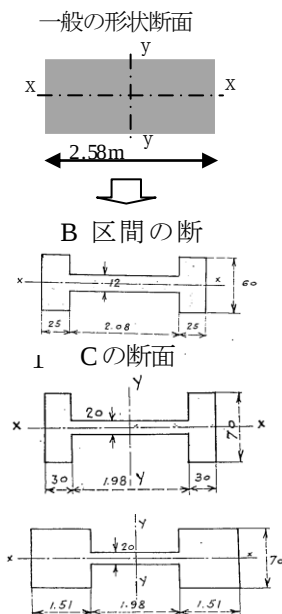


図-16 鉛直材における断面の工夫³⁾

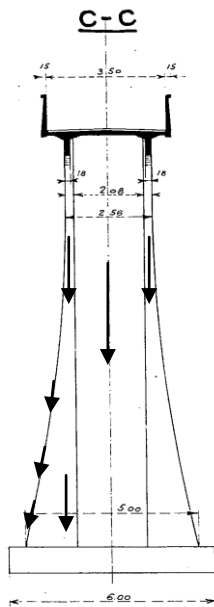


図-18 ③区間における力の流れ³⁾

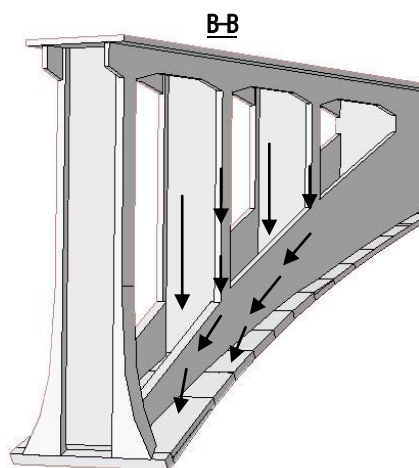


図-17 鉛直材とアーチリブにおける力の流れと造形

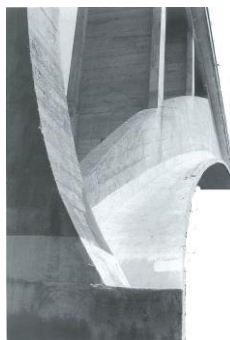


図-19 支点部の造形

そのため主材である鉛直材の節が支点部に近づくにつれて断面積を増やし曲線をなしている. 同様にして, アーチ底板も支点部に向かうにつれて幅を 3.8m から 6m へと橋軸直角方向に広げ, 厚さも 20cm から 40cm へと変化させている (図-19). メナーゼヒンジを使用しているために支点部では曲げモーメントが小さく軸力が最大となる. そのためアーチリブは 1/4 支点付近から支点部にかけて断面二次モーメントを減少させ代わりに断面積を増やしたことが分かる. そのため, 端支柱は②区間と同じ形状にすると局所的な力が加わり支点に加わる力をなだらかなものに誘導できない. そこで端支柱は直接支点に伝えられるような形状になっている.

7. 総括

ロベール・マイヤールが独自に示した料物性値が現在の日本の道路橋示方書と同等の値を使用していたことは驚くべきことである. またサルギナトーベル橋の構造計算値も解析値と傾向が等しく, 鉄筋量に限っては解析結果と同じ値が出ている. また鉄筋配筋は FEM 解析の結果に対応して鉄筋が配筋されていたことが分かり, 構造合理性が高いと言える. つまり, サルギナトーベル橋の構造合理性の高さが解析を行い照査するほどに見えてきたと言える. サルギナトーベル橋が持つ美しさは, 力学的合理性を追求した結果であることが分かった. 細部の造形は力の流れをスムーズに伝える工夫に溢れており, 局所的な応力集中が生じないよう配慮されていた. 力学的合理性を追求した先に造形の美しさを具現化することが可能であることを改めて認識した.

参考文献

- 1) David P. Billington: The Tower and the Bridge: The New Art of Structural Engineering, PP147-170, Princeton University Press, Princeton, 1985
- 2) 鈴木圭: コンクリート橋の歴史, コンセプチュアルデザイン, 構造デザインに関する研究, pp46-71, 平成25年度中央大学博士論文, 2014
- 3) Andreas Kessier: Vom Holzsteg zum Weltmonument, Anhang 2, Statische Berechnung der Salginatobelbrücke, Verlag AG Buchdruckerei Schiers, 1996
- 4) セメント、石灰、石膏製造協会: Versuche und Erfahrungen an ausgeführten Eisenbeton Bauwerken in der Schweiz, p113, 1937
- 5) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編, II コンクリート橋編, pp126, 131, 2012
- 6) 成瀬勝武: 弾性橋梁, pp155-159, コロナ社, 1940 1956
- 7) 五味傑, 橋本直樹, 秋葉芳之, 関文夫: バランスド扁平アーチ構造の構造特性とデザインに係る研究, pp521-522, 平成24年度日本大学理工学部学術講演会予稿集
- 8) DAVID P. BILLINGTON: ROBERT MAILLART AND THE ART OF REINFORCED CONCRETE, P12, the Architectural History Foundation and the Massachusetts Institute of Technology, 1990