

土岐川水系の発電所石造建造物に関する調査研究*

Examination of power masonry in Toki river system

茂吉雅典**、五島利兵衛***、小澤優二****

Masanori MOYOSHI**, Rihee GOSHIMA*** and Yuji KOZWA****

概要

1902(明治35)年4月に加藤喜平が多治見電燈所を設立した。明治から大正にかけて土岐川水系に建設した四つの発電所が、2001年3月、全ての発電の歴史を閉じた¹⁾。四つの発電所はいずれも花崗岩を用いた石造り建造物を用いていた²⁾。本論文はこれら発電施設における石造建造物のうち、多治見電燈第二小滝発電所の水路橋および、多治見電燈第興運発電所の石造のアーチ橋(以後、興運橋)について報告する。

多治見電燈所が最後に建設した第興運発電所の興運橋においては保存運動が実り、2002年5月から6月にかけて石造アーチ橋の解体が行われた。移設は2003年3月に完了した。従って、興運橋については石造アーチの特徴、特にその設計法、施工法、歴史の変遷(橋であるため水害の影響、発電所の重量物運搬などの影響)における歪などについての調査結果を考察した。

1. はじめに

本稿は土岐川水系の発電所石造建造物の調査とその結果の考察を行なったものである。土岐川水系の発電所は他の水系と異なり石造アーチを伴っている。それゆえ調査記録とともに技術的特徴や歴史の考察の意義は大きい。本論文において述べる興運橋や石造アーチの導水路橋は岐阜県瑞浪市の南東、山岡町に位置している。日本の近代化の役割を終えて既存の状態です岐川、支流の小里川や小里川に流れ込む左岸の沢に2002年まで現存した。発電所の名称は統合後の中部電力の呼称と異なるが本論文の性格上、多治見電燈開業時の名称を用いることとする³⁾。また、第一、第三発電所については写真掲載にとどめる。

多治見電燈第二小滝発電所は1918(大正7)年、開業で1993(平成5)年5月に閉業した⁴⁾。約2[km]上流の第興運発電所から取水している。水路は開渠で隧道と三つの水路橋からなっている。三つの水路橋と開渠の水路、および、石造りのサージタンクは同時期

に完成したと見てよい。一番大きな水路橋の規模は橋長約38,500[mm]、幅約1,300[mm]、高さは谷底から約10,300[mm]、1連アーチ式で造られている。

多治見電燈第興運発電所は1925(大正14)年、開業で1993(平成5)年5月に第二、第三発電所とも閉業した。興運橋は第興運発電所の前橋として架けられていた。第興運発電所は、1925(大正14)年に落成していることから、このときに石造アーチが完成していると見てよい。機械設備の搬入を考えるとこれより少しさかのぼる可能性も否定できない。規模は、川の横断方向に約20,000[mm]、幅2,700[mm]、高さは川底から約4,000[mm]、3連アーチ式で中央のスパンを2とすると、だいたい左右のアーチはスパン1の大きさに造られている。川中に2つの基礎を築き、その一つは石積みで、もう一つは花崗岩の自然石をあしらっている。河床は岩盤で浅く、これが柱脚基礎を可能とし、3連アーチの成立につながったと思われる。

アーチを構成する石材、その上の石壁はともに地元産の花崗岩である。アーチ石はモルタルを使って積まれている。アーチの上部、石壁の中は、付近の山土砂及び花崗岩の丸石、碎石を大小取り混ぜて詰めてある。その上に舗装と手すりが設けられてある。

2. 流域

小里川は岐阜県恵那郡(山岡町と岩村町の境)の天

* keyword : 水路橋 石橋 小里川 多治見電燈

** 工博 大同工業大学 情報学部情報学科 講師
(〒457-8530 名古屋市南区滝春町3-10)

E-mail : moyoshi@daido-it.ac.jp

*** 工博 大同工業大学 建築学科 教授

**** (株) 建設技術研究所中部支社 次長
技術第二部

瀑山（海拔 843.5 [m]）に源を発し、南西に流れる。瑞浪市で猿爪（ましづめ）川に合流し、土岐川に合流する。流路延長、24.6 [km]、流域面積 99.2 [km²]である。土岐川は同じく山岡町の夕立山（海拔 727 [m]）に源を発し、北西に向かって真直ぐ流れ、恵那市（武並）に入ると左曲する。その後は JR 中央線に添って西南方向へ流れる。瑞浪市で肥田川と合流、流量を増して土岐市へ入ると、妻木川が合流する。多治見市域では古虎山付近で大きく左岸方向へ曲って流れた後に生田川、笠原川、大原川などと合流し、また水量も増してくるが川幅も広く流れはゆるやかになる。

愛知県に入ると土岐川は“庄内川”と名前を変え、名古屋市を経て伊勢湾に注いでいる。

土岐川の全長 96 [km]、庄内川流域としては 430 [km²]である。流域人口 250 万人を超える一級河川である。図 1 にその示す流域図を示す。図中の数字は発電所の所在地を示している。

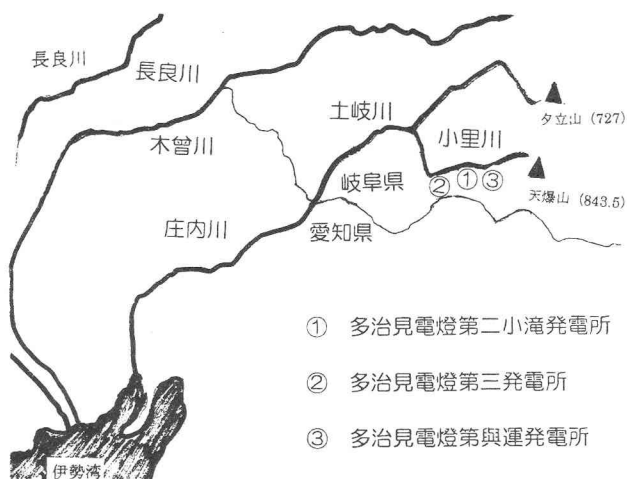


図 1 土岐川と小里川（作成：茂吉、2003.3.3）

3. 発電所

開設時の命名と中部配電へ統合された後の発電所名とが異なっているが、本論では論文の主旨から開設時の名称を用いる。以下、表 1 に名前の対比と簡単な諸元をあげる。開業時名称から多治見電燈の名を省略した。

開業時の名称についての資料の数は少ないが⁵⁾、名板の調査によると、開業時の名称は第二番目の発電所を「多治見電燈第二小滝発電所」、第四番目の発電所を「多治見電燈與運発電所」と命名されていた。第一発電所の旧名板は見当たらない。第三発電所の取水口は 2002 年に完成した小里川ダムによって水没したが発電所は閉所後瑞浪市によってそのまま保存の予定である。したがって、名板は建設時のまま埋め込まれている。「多治見電燈第三発電所」となっている。

表 1 開設時名称の対比と諸元

称	統合後の名	開業名称	開業年と閉業年	発電機と水車の構成	最大認可出力
所	土岐川発電	第一発電所	1906 (明治 39) 年 ~ 2001 年	横軸双輪単流露出形フランシス水車：フォイト社製 160kW 三相交流発電機：シーメンス社製 200kVA	260 [kW]
発電所	小里川第二	第二小滝発電	1918 (大正 7) 年 ~ 1993 年	横軸単輪単流渦巻き形フランシス水車：ペルトン社製 160kW 三相交流発電機：GE 社製 200kVA	130 [kW]
発電所	小里川第一	第三発電所	1922 (大正 11) 年 ~ 1993 年	横軸単輪単流渦巻き形フランシス水車：ペルトン社製 220kW 三相交流発電機：GE 社製 300kVA (日立製)	180 [kW]
発電所	小里川第三	第與運発電	1925 (大正 14) 年 ~ 1993 年	横軸単輪単流渦巻き形フランシス水車：ペルトン社製 224kW 三相交流発電機：GE 社製 250kVA	150 [kW]

(1) 多治見電燈第一発電所

外観を図 2 の写真で示す(以下、文献 2 において発表)。

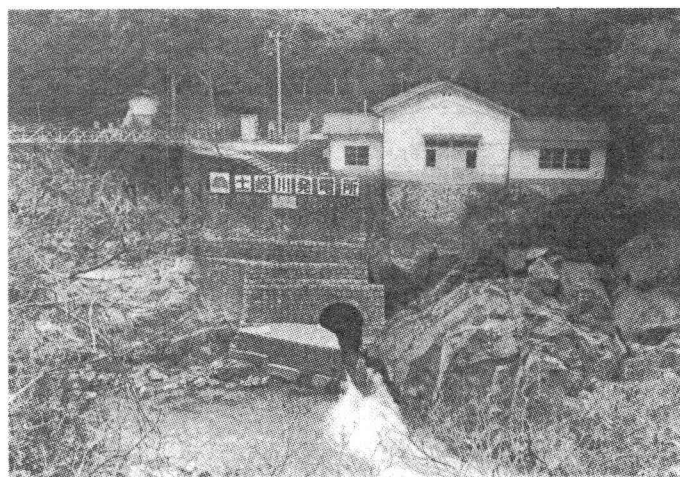


図 2 多治見電燈第一発電所

(撮影：茂吉、2001.10.30)

(2) 多治見電燈第二小滝発電所

1918 (大正 7) 年、落成を迎えた⁽²⁰⁾。多治見電燈第與運発電所からの排水と直下のダムからの取水である。ダム高 0.37 [m] である。有効落差約 32.79 [m]、発電出力 130 [kW] 使用水量 0.584 [m³/s] であり、第二小滝発電所はこのダムより下流、約 2 [km] 左岸の猿爪川との合流点（瑞浪市陶町水上字沢の尻、標高 360 [m]）に建設された。図 3 は外観の写真である。



図3 多治見電燈第二小滝発電所
(撮影：茂吉、2001.8.16)

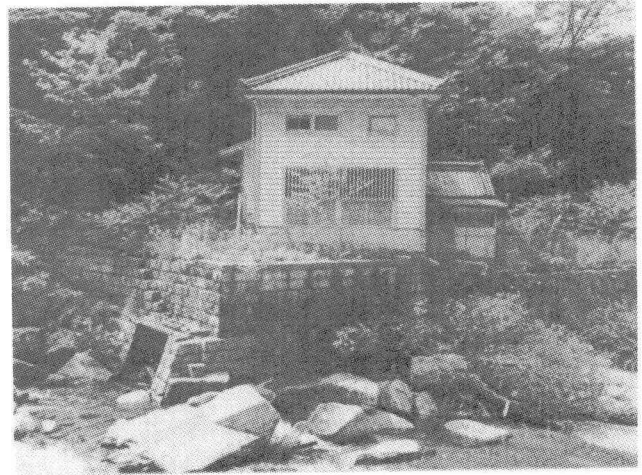


図5 多治見電燈第與運発電所
(撮影：茂吉、2001.8.16)

(3) 多治見電燈第三発電所

1922(大正11)年、落成を迎えた。多治見電燈第二小滝発電所からの排水と直下のダムからの取水である。ダム高1.21[m]である。有効落差約41.58[m]、発電出力150[kW]使用水量は第二小滝発電所と同じく0.584[m³/s]であり、第三発電所はこのダムより下流、約0.8[km]左岸(瑞浪市陶町水上字下久手、標高320[m])に建設された。発電所の外観写真は図4に示す。

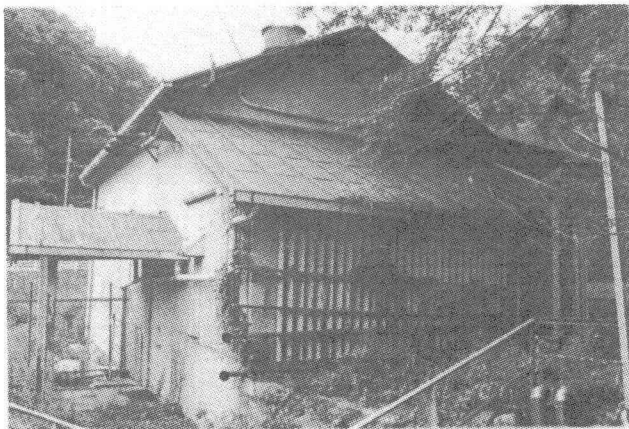


図4 多治見第三発電所
(撮影：茂吉、2001.8.16)

(4) 多治見電燈第與運発電所

1925(大正14)年、落成を迎えた。2[km]ほど上流からの取水で、ダム高約2.0[m]である。有効落差約51.97[m]、発電出力150[kW]使用水量0.417[m³/s]である。

発電所は瑞浪市陶町猿爪字沢の尻、標高380[m]に建設された。図5は外観の写真である。建物下の四角い口が第二小滝発電所用水の取り入れ口である。

第與運発電所は多治見電燈所として最後に開設された発電所であり、最上流の発電所である。

4. 水路橋

第二小滝発電所への送水用水路橋である。発電所から第一水路橋、第二水路橋、第三水路橋となっている。第與運発電所への水路橋はダムによる水没は免れるため今回の測定から除外した。図6,7,8はそれぞれの写真を示す。図9,10,11に測定図を示す。

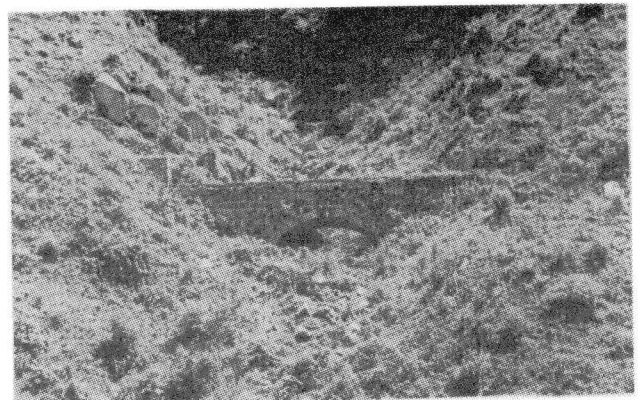


図6 第一水路橋
(撮影：茂吉、2001.10.30)

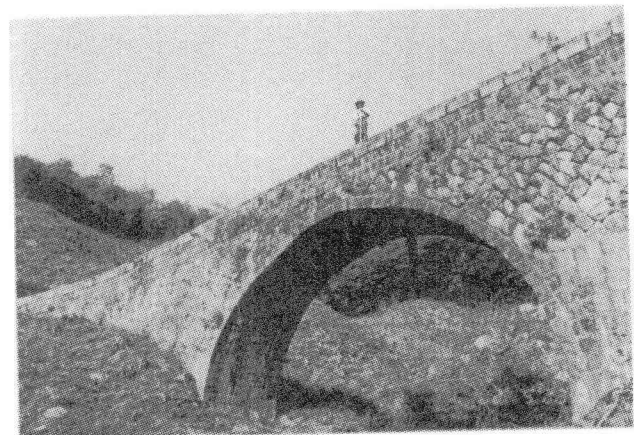


図7 第二水路橋
(撮影：茂吉、2001.10.30)

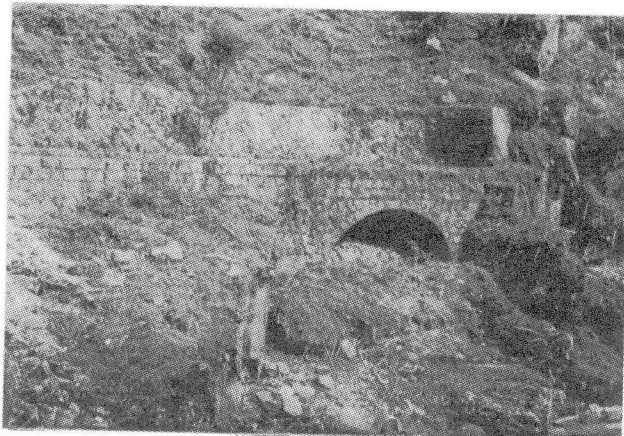


図8 第三水路橋
(撮影：茂吉. 2001. 10. 30)

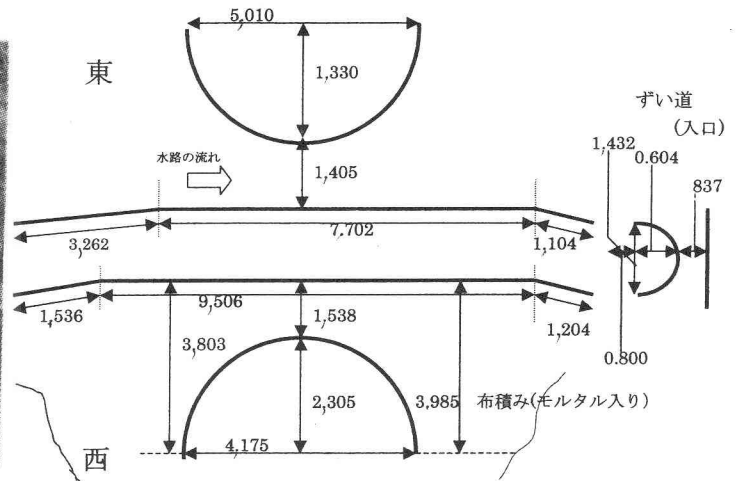


図9 第2小滝発電所 第1水路橋
(作成：茂吉 2003. 1. 19)

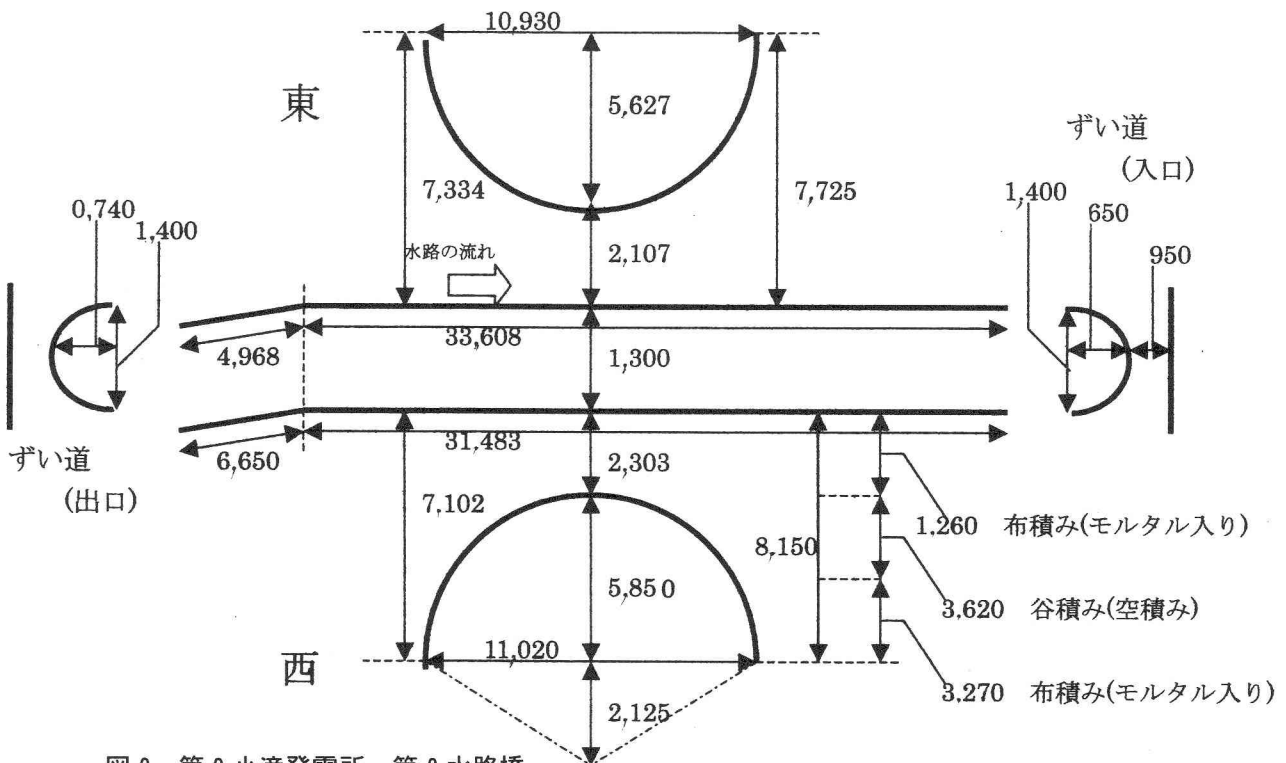


図9 第2小滝発電所 第2水路橋
(作成：茂吉 2003. 1. 19)

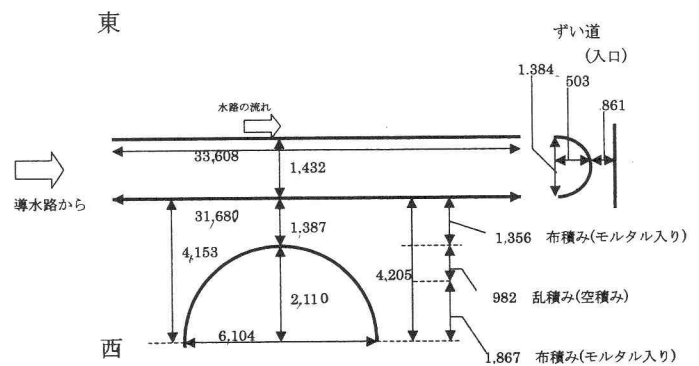


図9 第2小滝発電所 第3水路橋
(作成：茂吉 2003. 1. 19)

水路橋の測定図は上段から第1水路橋、第2水路橋、第3水路橋の順となっている。図における測定単位は〔mm〕である。見やすいように縮尺図はそれぞれの縮尺で行なった。

5. 與運橋の設計法

第與運発電所への人道橋で與運橋の名板が埋め込まれてある。図12へ写真を示す。上流側からの側面図を考察する。図13は建設技術研究所作成のもの^{註2}を使用した。上流から見て、右手のアーチを右岸アーチ、左手のアーチを左岸アーチ、中間のアーチを中央アーチと呼ぶ。左手の石積みの基礎を単に基礎と呼ぶ。右手の自然石の基礎を単に自然石と呼ぶ。アーチを構成する石をアーチ石または迫石（せりいし）と呼ぶ。

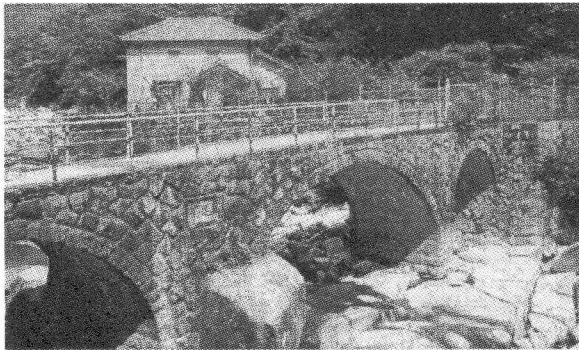


図12 與運橋（撮影：小澤.2001.6.12）

(1) グリッド図形による分析

どのような建造物でも縦横同一寸法の正方形のグリッド上で設計がなされる。その正方形の1辺の長さが現場尺^{註3}である。本アーチ橋では、現場尺（の整数倍）は1,070〔mm〕を基準単位としている。この基準単位は基礎幅として実現している。図13のように、1,070〔mm〕を単位に横断方向21単位、上下方向に9単位のグリッドを描いた。また、3つのアーチには円を描いた。このグリッド図面から次のことが言える。

- ① 左岸アーチの半径2,150〔mm〕は、1,070〔mm〕の2倍として設計された。
- ② 中央アーチの半径4,350〔mm〕は、1,070〔mm〕の4倍として設計された。
- ③ 基礎幅1,070は、基礎及び自然石上部の円弧の水平スパンの7分の1になるように設計している。
- ④ アーチ石の成は、中央アーチの半径の $20 \times \sqrt{2}$ 分の1で設計されている（後述）。
- ⑤ これら2つのアーチは内輪で、1対2で設計された。これを外輪で寸法を取り、右岸アーチに適用した。こうして、左岸アーチの外輪と右岸アーチの内輪が等しくなっている。また、中央アーチとの関係も外輪と内輪で1対2を設定した。
- ⑥ 高さ関係では基礎の高さを中央アーチの中心から2単位にとっている。
- ⑦ 左岸アーチの中心の位置は、基礎の高さにとっている。
- ⑧ 左岸アーチの頂点の高さと中央アーチの頂点の高さは同じである。

⑨ アーチ円弧の中心から水平角度45度の線と円弧と交点（これを単に45度交点と言う）を、中央アーチと右岸アーチにおいてとると2つのアーチが同じ高さに設定されている。

⑩ 自然石の幅は、約3単位、高さは約2単位である。

(2) アーチ石の成の決定法

中央アーチでアーチ石の成300〔mm〕の決定法を考察する。今から約2000年前の古代ローマのパンテオンから筆者五島が推定した図法を適用する⁶⁾。内径、ここでは半径4,350〔mm〕の2倍を用いる。このアーチの円形の内接正方形の一辺の長さを求める。これは内径のルート2分の1である。内径8,700〔mm〕のルート2分の1は6,152〔mm〕である。これの20分の1は307.6〔mm〕である。この数値が、アーチ石成300〔mm〕と一致する。筆者が直接測定したアーチ石の成は300〔mm〕より大きい（310〔mm〕から330〔mm〕位）。また、完全な内接円とすると8,700〔mm〕より小さい。これらを考慮すると上記したようにアーチ石成は300〔mm〕に一致する。

これらのアーチ石と同じ大きさのものを左岸アーチ、右岸アーチに適用している。

(3) 自然石の使用法

自然石とアーチ曲線との関係を見ると中央アーチの45度交点が丁度自然石の上に来るように設計されている。45度交点は、アーチの背後を壁の延長として固める時の上端である。このことから、ヨーロッパの伝統的な石造アーチに精通した人が設計に携わったことが伺える。

この與運橋の最大の特徴は、モルタル工法によって出来ているということである。モルタル工法は、

- ① アーチの曲率をモルタルによって調整している。
- ② それゆえ、アーチ石は必ずしもくさび型でなくとも良い。矩形（長方形）でもアーチができる。
- ③ そのため、アーチ石は大量生産方式で加工できる。
- ④ 曲率はモルタルで自由に変更でき、この工法の応用範囲は大きい。
- ⑤ それ故、石造アーチは大量生産方式で架構できる。などの特徴を有している。この施工法の重要な点は、モルタルの付着力を最大限に引き出し、アーチを一枚板のごとく強固にするための目地網をいかに作り出すかにある。その方法は、モルタルが乾燥・硬化する前に型枠をわずかに緩め、アーチの自重による締め固めをすることにある。それが、與運橋において実施されたのか、この点が解体作業での大きな調査項目である。調査では、
- ① 締め固めとの関連で、アーチ石間のモルタルの付着性はうまく発揮されているのか。
- ② アーチの強度に関して、洪水その他の外的圧力をど

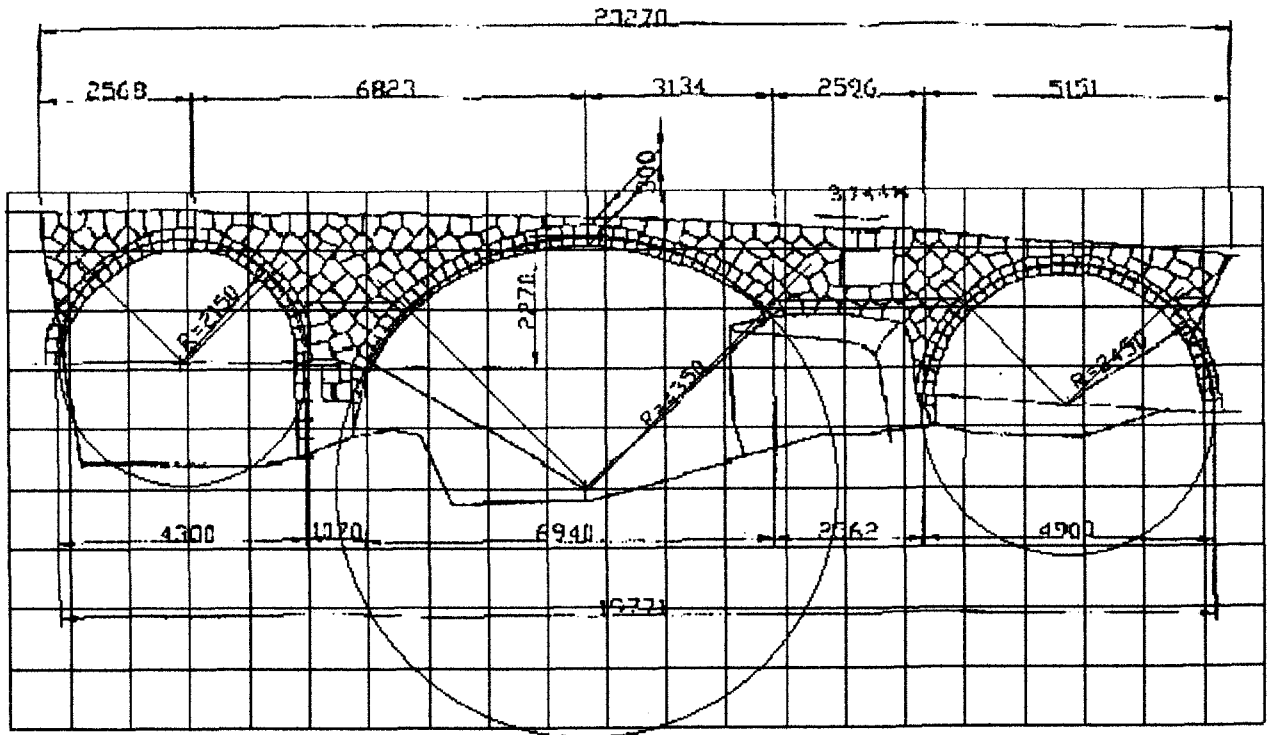


図 13 與運橋の上流側立面図に基礎幅 1,070 [mm] のグリッド線とアーチの円形を描いた解析図(作成:五島.2002.7)

の程度受け、耐えてきたか。

- ③ 自然石の利用は基礎として問題なかったか。
などを調査した。

(4)モルタルの付着性とエフロレッセンス

表面からの観察で、残念ながら締め固めたかどうかは判断できない。しかし、解体時のモルタルを観察した結果では、モルタルは花崗岩に良く付着し、一部目地が取れたところもあるが、ほとんどはよく付着し削岩機でモルタルを削り取りながらの作業であった。このモルタルの付着性の良さは、アーチの上の石壁にも見られた。アーチ、石壁全体のモルタルの付着性のよさから判断して、アーチ橋完成後、アーチ橋の上にかかなりの重量の砂袋を載せて、この橋が、発電用の重量物搬入が可能かどうか、アーチの対重量測定を行ったものと思われる。これが、壁石間のモルタルの加圧を作りだし、きわめて付着性の良いモルタルを形成したものと思われる。解体時のモルタルの表面が石灰モルタルのように白く作りたてのような無垢の状態であった。この白さは「エフロレッセンス」あるいは、「白華」と呼ばれているものであり、セメント硬化体の多孔質な性質によるもので、通常多孔空隙の内部に含まれている水分が乾燥や水圧の影響により空隙内の水分が外部へと移動するのにもとない、その成分の一部が析出して起こるものである。コンクリート製トンネル構造物の壁面やベランダのコンクリート床版の裏側、

タイルの目地部などにおいて、ひび割れや目地に沿って白い塊（すじやつらら）が浮き上がるなど、多くのコンクリート構造物で見られる現象である。與運橋の目地の白色は、セメントペーストとアーチ石との間の接触部において「遷移帯」と呼ばれる多孔質で強度の低い層が形成され、その部分が雨水等の水みちとなり、モルタルの主成分である CaCO_3 が析出したと推定される。この現象は一旦硬化したモルタルでも起こるもので、構造上は問題ないものであるであるが圧密されたモルタルでも容易に起こる。

(5)自然石の利用について

ここでは美学的問題は扱わない。橋の構造上の問題としてどうであったか。結論的に自然石は動いた可能性がある。中央アーチに関して、下方の歪みが、アーチ中央から右手自然石の上部にかけて見られ、その大きさは、正規のアーチ（図 13 の円形）から見て、下方へ最大 100 程度である。図 14 よりさらに自然石上部のアーチを見ると上部にコブ（小さな曲率の円弧）が見られる。これは、自然石が右側に少し動き、それに伴って、アーチ右手が下がり、次に自然石がもとに戻ったためにその動きをアーチ全体で吸収するのではなく、自然石上部の部分的アーチで吸収したために見られる現象である。それで、図 13 の中から自然石の移動量を測定してみる。

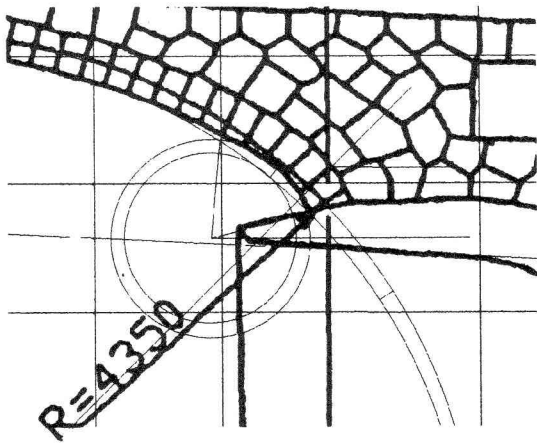


図 14 自然石上部のコブの円形（大きいほうの円形）、この直径は 1,167〔mm〕（作成：五島 2002.7）

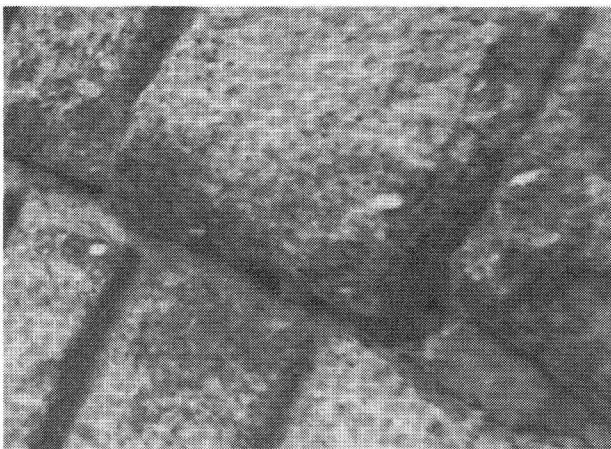


図 15 中央アーチ、自然石上部の目地の状況（撮影：五島 2002.6）

中央アーチの下方への歪みは最大 100〔mm〕であるが、アーチ石と自然石の接点で見ると、図 16 に 2 つの円弧で示したように、内側の円弧が本来の位置で、その外側の円弧がずれた結果である。次に、外側の円弧までの、コブのアーチ半径を求めると 830〔mm〕、下方の内側のアーチまでの半径を求めると 770〔mm〕である。この 2 つの半径のズレ（2 つの円形の差）は、60 である。これの水平移動量を簡単に、ルート 2 分の 1 とすると、42 となる。42〔mm〕動いて戻った、と言えよう。

解体工事で自然石の、取り除いた川底は水が流れており、点（複数）で支えられている事がわかった。このことから、自然石は 85〔t〕^{注4}と言う重さにもかかわらず、洪水の水圧でわずかながら動いたと思われる。また、自然石の設置状態から見て、最初からこの場所にあったのではなく近くにあったものを移動して据えつけたことが伺える。なお、自然石の上部の、中央アーチの端部受けの部分は、少し削って窪みがつけられてある。

(6) 左岸アーチ

図 16 の左岸アーチは、左手 45 度付近が、大きく凹んでいる。その凹みは、立面円弧幅 1,000〔mm〕程度最大 100〔mm〕である。このことは、左岸石垣の土手から大きな衝撃を受けたことを物語っている。このことによってアーチ石は目地が切れて、口をあけるがモルタル工法なのでそこにモルタルを詰めて補修してある。この衝撃は一体何かは、今後の検討課題である。

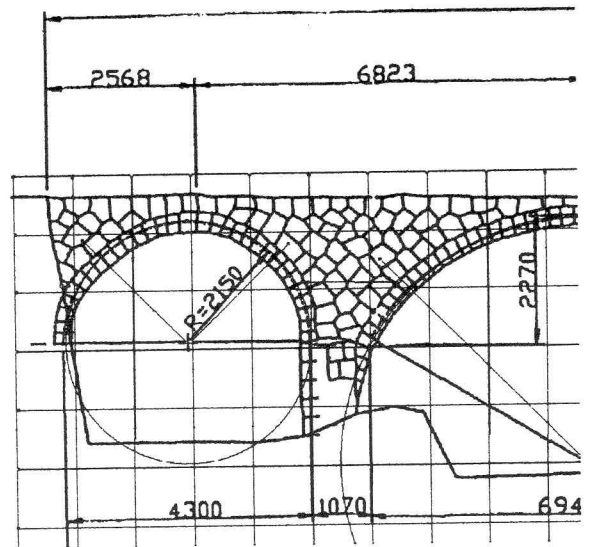


図 16 左岸アーチの図面、左側が歪んでいる（作成：五島 2002.7）

(7) 右岸アーチ

右岸アーチについて図 13 の上で詳細に調べた結果、完全な半円形を描いており、他の 2 つのアーチに見られる歪みを全く持っていない。この様子から、右岸アーチは修復再建された可能性を認める。小里川では昭和 47 年 7 月に大洪水があり、右岸の道路は冠水したが、輿運橋は無事であったと地元の人が当時の様子を述べている^{注5}。証言から、流失はなかったが、かなり危険な状態にあり、修復したのではなからうか。右岸アーチが他の 2 つのアーチと異なっている点を上げると上記のほかに次のようなものがある。

- ① 他の 2 つのアーチは、左岸や自然石の形状に合わせて台形状のトンネルを形作っているが、右岸アーチは長方形の、幾何学的に整然とした造りになっている。
- ② 右岸アーチの下流側のアーチ石を見ると、最頂部の迫石は、異常に大きく後から作り直してはめ込んだものと思われる。これは、アーチの輪郭が新しくなって大きさが異なったからであろう。
- ③ 右岸アーチの上部の舗装面が他のアーチの舗装面より沈下大きい。この沈下は、左岸アーチと中央アーチの間の基礎上部にも見られ、中に詰められてある土が沈下したのと考えられる。ただ、右岸アーチの

場合は、全体的に沈下している。これはアーチの上の土が、水の浸透によって土が流れていることを示す。壁石のモルタルが他の2つのアーチのように締め固められてなく、隙間が生じているためと思われる。

(8) 舗装面の傾斜

舗装面の傾斜は、測量から3,744%になっているが、設計角度としては整数を使うのが常識であろう。3,744%に近い整数を考えると3%か4%が設計角度であろう。どのようにしてこの設計角度を決めたのか今後の検討課題であるが、やはり洪水の水の量から算定したのであろう。発電所の土手(石垣)を水の被害から守るために、アーチ橋の右側、特に右岸アーチのみの冠水に食い止めることから設計したと思われる。

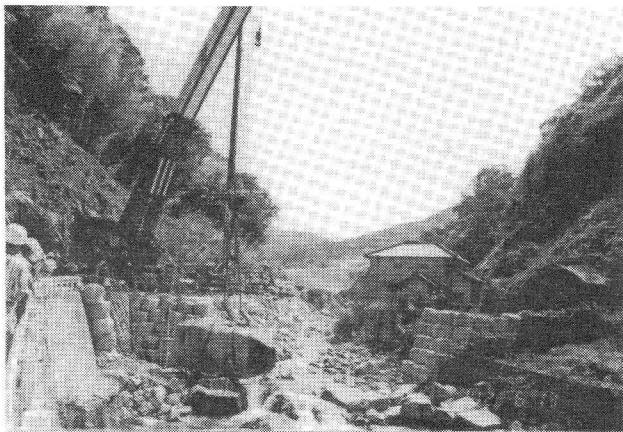


図17 支柱に使用されていた自然石が輸送のため吊り上げられた瞬間 (撮影: 茂吉 2002.6.13)



図18 自然石を取り除いた跡 (撮影: 茂吉 2002.6.13)

6. まとめ

與運橋について主に考察した。以下、次にまとめる。

- ① 與運橋では基礎幅 1,070 [mm] を基準単位として採用している。
- ② 中央アーチと左右アーチは2対1で構成されている。
- ③ 地元産の硬い花崗岩と、早くて簡便なモルタル工法を組み合わせ採用している。

- ④ 左岸アーチは、土手のほうから衝撃を受けている。
- ⑤ 右岸アーチは修復再建した可能性がある。
- ⑥ 基礎石として採用した自然石は、わずかながら動いたと推定される。
- ⑦ 石造アーチを中心とした石造建造物のルーツの解明は今後の検討課題である。

7. 参考

注1 與運橋石橋は、岐阜大学土木工学科井上肇(故人)(構造工学)研究室の卒業生で作っている稲葉会において早くから注目され、同会を中心に保存運動が進められた。1997年には山岡町にて「石橋シンポジウム97」を開催している。本研究にはその時の報告書も参考にした。

注2 2001年度国土交通省の業務にて、株式会社建設技術研究所中部支社(名古屋市)が実測作成した図面。

注3 現場を監理する監督者が持つ尺丈(錫丈、現場で使用する棒状の定規)の長さの基準単位。この整数分の1が現場尺である。本アーチ橋では、現場尺は、1,070 [mm] = 3尺とすると1尺=363である。

注4 自然石の重量は、クレーン車による実測値で85 [t]であった。

注5 山岡町 山内章裕氏によると、與運橋について47年の集中豪雨で「この與運橋だけは平然としていた」 「石橋シンポジウム'97」報告書 p.39

謝辞 本研究は、以下の方々のお世話になりました。感謝いたします。

国土交通省 小里川ダム工事事務所	鈴木芳徳
株式会社建設技術研究所(前) 中部支社長	杉浦健次
加賀田組(株) 名古屋支店 土木部 主任	古俣英二
岐阜県花崗岩販売(協) 理事長	畔柳勝男
岐阜県花崗岩販売(協) 副理事長	田口一巳
岐阜県花崗岩販売(協) 会計	中谷 潔
恵那重機 専務	田口 巧
大同工業大学都市環境デザイン学科講師	木全博聖

参考文献

- 1 「多治見市史」多治見市史編纂室 p.531. 平成7年
- 2 茂吉雅典他:土木史研究 Vol.21 土岐川における決しゃ板ダムとその歴史 pp.325-331. 平成13年
- 3 茂吉雅典他:土木史研究 Vol.22 加藤乙三郎と四つの発電所 pp.215-224 平成14年
- 4 建設省パンフレット:小里川の発電所 1993年
- 5 岐阜県山岡町 めがね橋「石橋シンポジウム97」1997
- 6 五島利兵衛「古代ローマ・パンテオンの幾何学的比例について 設計図法の考案とその適用に関する研究」日本建築学会計画系論文集 第365号・昭和61年7月 pp.113-126