

〔附録第壹號〕

錦帯橋の再建

工学博士 青木楠男

工学博士 佐藤武夫

錦帯橋の再建

工学博士 青木楠男
工学博士 佐藤武夫

緒言

280年の古い歴史と、城山を背景としてこの橋のもつ稀に見る美しさと、其構造の特異性とを以て、天下に其名をうたわれた錦帯橋も昭和25年9月14日午前9時46分、キジヤ颱風の為の洪水に押し流されて、あえなく其姿を失つてしまつたのであるが、其後この名橋再建の為のあらゆる努力がはらはれて復旧工事も翌昭和26年2月には着工の運びとなり、工事も順調に進捗、2年半余の歳月を経て、昭和28年5月3日竣工、再び昔の優美な姿を錦川にうつす様になつた事は欣快に堪えないところである。

私共は岩国市錦帯橋建設局の顧問としてこの工事の施工に携つた関係上再建された錦帯橋の構造について記述し、従来の構造と変つた点に付いては其変更の理由を、昔の構造を踏襲した点については今日の技術上から見た解釈を明かにしたいと思う。

復舊方針

錦帯橋の復旧方針に関しては昭和26年1月27日東京に於て、建設省、文部省文化財保護委員会、山口県、岩国市等の関係者並に参議院議員、学識経験者等30数名からなる協議会が開かれて討議が行われた。席上近代交通に何の役にもたぬ原形復旧に対して、はげしい批判が加へられ、鉄筋コンクリートによる近代橋梁の架設を唱へる声が高かつたのであるが、本橋が日本の古い文化財として深い意味をもつものであることと、これの存否が岩国市の観光に重大なる関係を有する事等が認められて、結局旧態に復旧するの方針が議決された。

併し其構造上再度流失の恐れある点と、腐朽の為に約35年毎に架換へねばならぬ缺点、細部の形式に於て、ある時代に古式の形が変更されてをる点等につき注意が喚起された。

以上の経過の後、昭和26年1月29日附で建設省河川局長並に道路局長から市当局に宛錦帯橋災害復旧工事設計協議について下掲の措置が通達された

1. 基礎井筒長については実施にあたり地質調査の上決定しなるべく深くすること。
2. 井筒構造について更に検討すること。
3. 橋体の橋脚嵌入部については腐蝕せざる様構造につき留意のこと。
4. 高欄は古式に倣う様構造につき留意のこと。
5. 検査額を超過する工費は別途負担すること。

復旧工事の実施はこの線に沿つて設計施工された。

一般形状

流失前の錦帯橋の構造に関しては昭和2年10月建築雑誌所載、平沢郷勇著「岩国錦帯橋に就いて」並に昭和11年5月土木学会誌所載大野唯糊著「錦帯橋の沿革と構造」に詳細が述べられてをるからこゝでは其概略を説明するにとどめる。流失前の錦帯橋は総長195.7mで、これが5径間に分かれ、左右岸寄りの径間は各5本の支柱で支えられた反りを有する木桁橋であり、左岸寄りのもの径間長は約37.0m右岸寄りのものは約34.8mである、中央の3径間は木造アーチ橋であつて各々35.61m、35.10m、34.96mの径間長を持つておつた。

この様な径間長の不揃いは延宝2年に於ける橋脚建造にあつて流況其他に鑑みて意識的になされたものか、築造にあつての誤差其他から偶然に生じたものであるか明かにすることは出来ぬが、この径間長の不揃いが其後の橋桁架渡し毎に施行上多大の苦心を要せしむる結果となつてをる。然もこの不揃いが錦帯橋の美観上に特別な効果を与えてをるとは考えられない。これらの理由から復旧計画にあつては左岸より第一径間34.8m、第二、第三、第四径間各35.1m、第5径間34.8に統一し、各橋脚天端幅は各4.6mとし橋梁

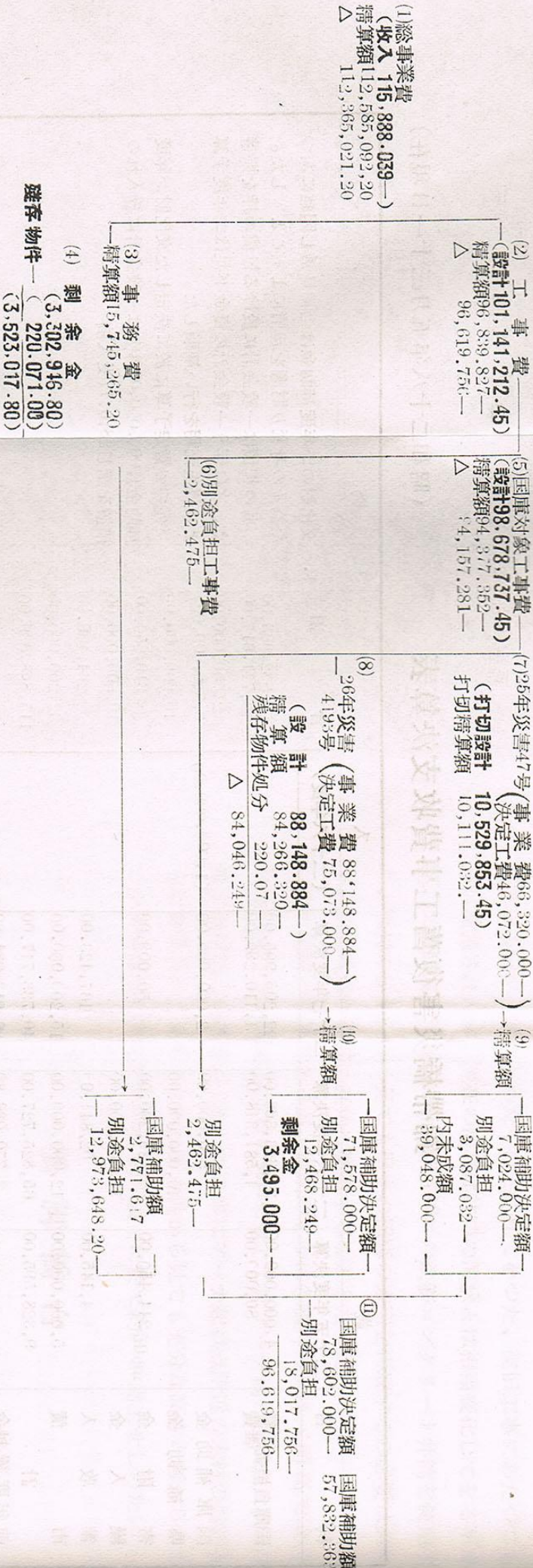
錦帯橋災害復旧費精算総括表

総事業費	精算事業費	剰余金	国庫補助金 (建設省)	財政補助金 (文化財局)	雑収入	市負担額	工事費精算額	事務費精算額	備考
二五、八八〇、三九〇〇	一二、三六五、〇三三〇	三、三三三、〇一七、六〇六	九、〇〇〇、〇〇〇	三、〇〇〇、〇〇〇	五、四〇〇、〇〇〇	三、三六六、九六三、〇一九	三、五三〇、〇〇〇	二、七五五、二七三、三三〇	

精算総事業費壹億壹千貳百叁拾六万五千貳拾壹円貳拾銭也

昭和二十八年三月三十一日

調定者 中 村 正 男



総長193.3mとなる、総長に於て2.4mの減少は従来の左岸橋台前面が錦川改良工事に施工された左岸護岸法線より幾分引込んでをつたものを同法線と一致せしめ得たと同時に、左岸橋詰の広場を拡張することを得る結果となった。

次に橋脚の形状寸法であるが、従来のものは其幅員に於いても、又表面積の縦勾配に於ても各橋脚夫々独特の形状寸法を持つてをつた事が記録されておるが、各橋脚に対する精確なる実測数値の残つてをらない為に、流失機では各橋脚個々を原形状に復旧することは困難であつた、これが為に比較的原型の残つてをつた流失を免れた橋脚について精実な実測を行い、代表的な形状寸法を決定して、この形に各橋脚を統一することとなつた。

又従来の橋脚は各個々其方向が異つてをつて、伝うるところでは往時の洪水流の方向に一致せしめたものとされてをつた、復旧工事にあたつてもこの点が論議されたが、現在の河状は往時の河状とは相当変化してをる事でもあり、又橋脚基礎に後述の如く深さ10mの鉄筋コンクリート井筒を使用する以上、橋脚の安全上から見ても旧来の橋脚の方向を再現するの必要は認められず、結局橋梁中心線に直角に築造することとなつた。

次に橋脚の高さであるが、従来のものは各橋脚ともほぼ同高であり昭和8年に記録された最高洪水位9.46mに対してはアーチ橋の起拱点は約1.0m水没する程度の高さであつた、この事はアーチ起拱点附近の木材の腐朽を早からしむる点から見ても又橋の安全性から見ても充分な高さと考えられないので中央部橋脚に於て約80cm、兩岸橋台に於て約50cm嵩上せしめた。

橋脚橋台

従来の橋脚基礎 古い橋脚の基礎は記録の伝えるところでは図の上段の様な形の橋脚の断面形にならつた左右に彎曲した梯子胴木様の編木台を基礎とし河床面下より築き上げたと伝えてをる。又橋脚周囲の石垣は内部栗石を以て填充し、洪水時には水が自由に内部空隙を流通し水圧力を減ぜしめたと記されてをる。

然るに左岸より第2号橋脚の旧基礎取り除きに際して現われた基礎土台木は図の下の様な配置であつた、木材は松丸太末口6寸程度のものが使用されたと推定される亀甲型の部分の木材は矩形断面が用いられ止栓には材種は推定出来なかつたが堅木の栓が用いられてをつた、これらの土台木は現在の河床から2~2.7mの深さに据えられたものであつて最濁水期に於ても最低水位以下にあつて280年に近い年月、水中にあつたものと推定される。

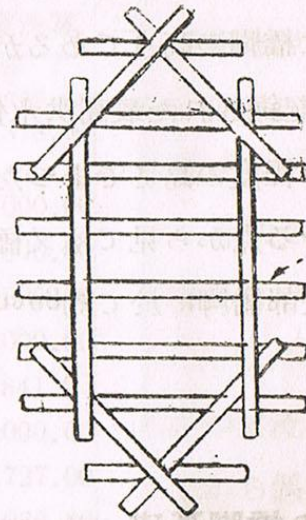
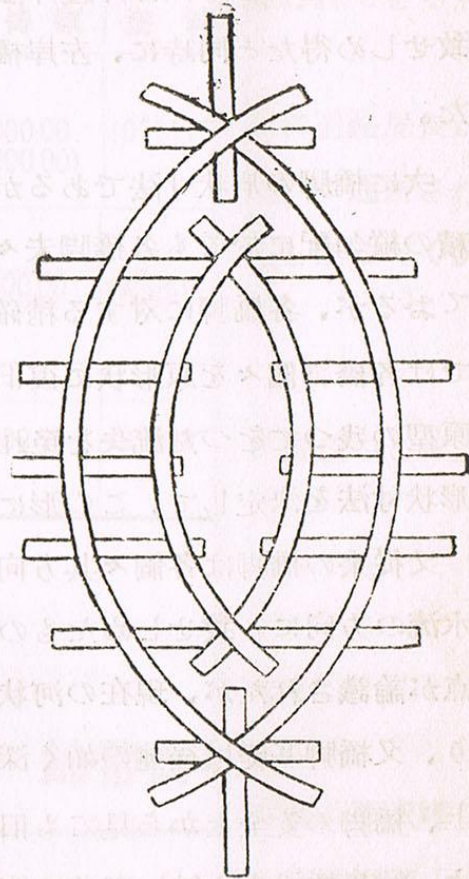
これ等の木材の表面は厚さ1~4cm迄腐蝕しコルク状を呈してをるが、其内部は大部分未だ健全材のまゝであつた。

亀甲型の部分の松材につき山陽パルプ株式会社岩国工場製造部試験課に依頼して分析した結果では、次の様に事が明かになつた。

「全繊維素の量は健全材の部分が57.2~60.6%であるに対し腐蝕部分では15.9~50.1%に減少してをる。

リグニンの量は健全材にて27.9~29.5%なるに対し、腐蝕部分にては37.0~64.7% 灰分は0.3~0.4%に対し0.9~1.5%と増加してをる」

以上の様な極めて簡易な基礎土台木の上に積み上げられた空石積に近い橋脚が河水による基礎の洗堀をうけることなく280年



末口六寸間隔三尺五寸



7寸位

の永きに亘つて其形を保ち得た事は、一面に於て橋脚間河床に張り立てられた川中敷石の保護によるものであり、一面に於て錦川が長年月に亘り河状が比較的安定に保たれており、河床の著しい変動が起らなかつたことによるものと想像される。

川中敷石の工法は「下層大石、中石、小石交合の捨石、中敷石は荒敷石、中、下交合敷込、上敷石は上、中、下の石交合中くぼに敷石、生松乱杭打植し、敷石はせり込み植石を専とす」とありて相当念入りに施工されてをり、其後も敷石の維持修理には充分の注意が払われて居たものゝ様である。

然るに昭和25年9月の錦帯橋流失の状況並に崩壊後の橋脚の状態を詳しく検討するに、この災害の直接原因は橋脚の崩壊にあるものと考えられ、其崩壊の直接原因は橋脚基礎の洗堀によるものと推定される。この洗堀は勿論橋脚附近の敷石の破壊に原因することは明らかであるが、其根源をなすものは戦争中の諸元による河相の変化と、降雨の集中性等に基因する異状出水によるものであるが、更にこれが被害を大ならしめたものは錦帯橋下流に於ける戦後の砂利採集による河床の変動ではあるまいか。

架橋地點の地質 復旧計画に於て橋脚基礎に従来の工法を踏襲するは、百年の計でないこと明らかであり、こゝに近代工法による井筒基礎を採用して万全を期することゝとなつたが、これが支持力洗堀に対する安全性等を判断する資料とする為に右岸横山側橋台附近並に左岸錦見寄第一橋附近に於て地質調査を行つた。

この結果によると河床面下15mに至るまで細砂交りの砂利層であつて粒径最大14cm程度であることが明らかになり、これより以下に於ても尙砂利層がつづくものと推定された。

橋台、橋脚の基礎 以上の地質から見て、又河川勾配が約1/500の地点であることから洗堀の影響も考慮して橋脚基礎には鉄筋コンクリート井筒を採用することになつた、橋台に対しては必しも井筒基礎を必要とせず枕打基礎にて充分とも考えられたが終戦後の風水害をうけた多くの橋梁に於て橋台基礎が枕打であつた為の被害の例の多いのに鑑み橋台に対しても橋脚と同じ

井筒基礎を採用することに決した。

橋脚井筒基礎の長さの決定は、其支持力の点から考えると、在来の橋脚が前述の如きものであつた点から考えても、上部構造の荷重に変化のない事から見てもさほど深い事を要しない筈である。只橋脚軀体、並に井筒基礎が鉄筋コンクリート造となる為の自重増加は相等の値となる。概算にて上部構造の荷重は70T、橋脚軀体重量813T、井筒基礎重量418.4T、合計1302Tであり、これに対して井筒底面支持力並に井筒周囲の摩擦力並に浮力を考慮に入れての計算の結果は井筒基礎長としての6.8mを必要とすることとなつた。これに対して洗堀に対する餘裕を見込めばよいことになるが、錦川筋の既設の諸橋梁の橋脚基礎井筒長は大体8~10mであること、又前述の如く錦川の河床の異動も考えねばならぬ事、建設省からの通牒もあることであり、安全を期して井筒長は10mを採用することとした。

尙橋台井筒に対しては洗堀の恐れのないこと、荷重の少いこと等から深さ1.4mを採用した。

井筒基礎の構造 橋脚軀体の形状寸法を旧来のものに倣つて築造するものとし其大きさは底面に於て、幅員約6.7m、長約13.0mの紡錘形をしてをる、この底面を一様に受けるだけの大きさの井筒基礎の必要は支持力の上からも認められなかつた関係上基礎井筒の断面は短径4.5m、長径9.5mの小判型とし、鉄筋コンクリート壁の厚さは0.6m、とし中央部に設けた隔壁の厚さは0.5mとした。

井筒上端は軀体面積を支持する為に幅7.1m、長13.4mに拡大し、この為に幅1.3m、乃至1.95mの棚状の突出部を取付けた。

井筒沈下作業は長10mを4ロットに区分して混泥土打並に沈下作業を行つた、最下端の鉄沓据付けは仮締切による築島にて行い、コンクリート打の後硬化をまつてグラブバケットによる掘鑿沈下を行つた、沈下作業は極めて順調に進み、著しい井筒の変位は認められなかつた。

沈下中の障害としては旧橋脚の基礎伏梓木、基礎栗の取除きと、沈下の進行に伴う周囲摩擦力の増加に対応して戴荷を増大することが困難であつた為

火薬の併用を餘儀なくされた点等である。第二号橋脚に於ける作業状況の一例をとると1日最大沈下1.32m、最小沈下6.3cm平均1日沈下62.0cmである。

井筒は沈下後底面に厚1.5mの水中コンクリートを施工し、中間部は砂礫を填充し、上部1.5mのコンクリートを施工、この上に軀体を築造した。

橋台の基礎井筒には橋台の幅大なる為2基の円形井筒を沈下し、上部に鉄筋コンクリート基版厚60cmを施工し、其上に橋台軀体を積上げた。

橋脚軀体の構造 旧橋脚軀体の表面石積には築城石垣の仕法が用いられたと云われ、組石の大なるのを安定よく按配し、隙間には扶石を石垣法面より約3cm内に入れ、張合よく詰込み堅固に築立て、合端は漆喰を以て密着せしめてをる。この表石垣の内側に軀体の高さの2/3にあたる部分まで空積の裏石垣が積上げられ、内部の空隙には栗石を大小混合隙間なく鉄挺子にて堅固につき固めてをる。

軀体の中央上部には刎橋の端部をうける為に厚約45cm、高さ約2.7mの隅石5本が埋込まれ、これによつて5本の刎橋の橋桁が支えられてをった。

復旧計畫では基礎井筒上詰コンクリート上に底部にて幅3.3m上部にて2.0mの鉄筋コンクリート造橋脚心壁を築き、この頭部には刎橋の端部を受ける為に拱軸線に直角の面を設け、ここに鑄鉄製の桁受金物を取りつけた、軀体の表面石積は其外観に從來の感覺を出来得る限り残したい為に、石材にはなるべく流失した元の石材を蒐めて使用し、不足分に対しては旧石材の採集石山と伝えられる岩国山の石材を使用することにした。石材の仕法に關しても旧態を存する様特別の注意を払つた。

心壁工と表石積との間隙約60cmには石積みの積上りと共にコンクリートを埋め、積石の背面へコンクリートの充填する様留意して石積の固着を完全ならしめた。

表石積の合端目地は在來の漆喰に代へて白色セメント、赤土真砂の1:1モルタルを使用した。

橋脚軀体の頂部の構造は其形状を在來のものに倣いコンクリート造とし、表面石張等舊來のまゝの寸法を用いた。

木造反橋

反橋の構造 中央3径間の所謂反橋は木造アーチ橋と考えらるべきものであり、其起拱部は従来橋脚の中心に位する隔石まで埋込んであつた、この部分がアーチの端部を固定端と見做すべきほど強固のものとは考えられず、土溝の中に埋没してをることがこの部分の腐蝕を早からしめてをつた害の方がむしろ見逃し難い事であつた、この意味から復旧にあつてはこの起拱部を約1m短縮し、端部の固定には桁受金物を使用した。反橋の構造で他の点はすべて在来の工法を踏襲し変更を加えてをらない。

橋の構造の概略をこゝに一言すると橋面総幅員5m、有効幅員4.25mに対し6本の拱肋が間隔1.044mに配置されてをる、新橋の支間は35.1m、拱矢約4.7m、拱矢比1/7.5である、拱肋の幅は全径間を通じて17cm、高さは拱頂に於て平均木を加えて74cm、支間の1/8点に於て約1.00m、起拱点にて約1.4mである。

拱肋は、桁22本、棟木3本、楔14本、後詰14本、平均木8本、計61本の角材から組立てられてをり、用材としては檜並に松が混用されてをる。各桁の両端には鼻梁と後梁とが横に各拱肋を貫いて取付けられ、拱肋間の連結と次の桁の刎出しに役立つてをる。桁尻には後詰木がとりつけられ、更に拱肋の上面に平均木を附して橋床板の取り付けに備えてをる、各材の接触面には水平剪力に抵抗する為に約1mの間隔で柄木が埋込んである。

拱肋の結束は桁巻金物及鏝によつてをる、巻金物は約1m置きに締めてあり、1ヶ所2枚宛末端を拱肋表面の勾配に合せ、ジャツキにて材片締付け爪掛折曲げの上、鏝釘を堅固に打ち付ける、又巻金物間は橋桁上下各材とも斜めに渡り鏝一橋約3750挺を打ち込んでおる。

拱肋の下縁面は円形であるが、拱軸線と考えれる曲線はほぼ拋物線形である。

尙拱肋に沿つて側面に肋木及V形の鞍木が拱肋に緊結されてをる、共に桁の剪断力に備えたものであつて、拱肋の補剛材として極めて有効に作用してをると考えられる。

各拱肋間に配されてをる振留木は横荷重に備えたものであつて、近代橋梁に於ける水平構と全く同じ工法が用いられてをる。

橋面床張に用いられた檜板は厚7.6cmで全幅員一枚板である為に橋面横断勾配がつけてない排水の点を考慮して平均木の高さを加減し敷板に幾分の反りを附けた、敷板の合端には栗材の目板が入れてあり目板の上部に深3.6cm幅6mmの目地があけてある、従来はこの部分には鑿繩をつめ、上部にピツツを填充してあつたが、鑿繩に雨水の保たれることを惧れて継目全体にエラストイトをはさんだ、敷板張立て後板の乾燥による目地間隙の増加の為エラストイトと敷板との間に隙間を生じたので、夏期気温の高い時にエラストイトをコーキングし隙間に完全に充填し、瀝青を補給填充した。

舊構の強度 従来の刎橋の桁材の寸法を検討する為に、これを2鉸アーチ橋と仮定して応力の概算を行つた。桁の端部の構造が鉸か固定か、或は其中間か、判断に苦しんだが、復旧計画で用いた寸法は鉸に近いものと考えられるので一應旧橋に対しても2鉸アーチ橋として取扱つて見た。

旧橋は支間(l)38m、拱矢(f)5m、これの拱軸線はほぼ拋物線に近いものとして、拱軸線は

$$y = \frac{45}{l^2} X(l-x)$$

にて現はされるものとし、水平反力の算出には断面一定と仮定して

$$x a = \frac{5}{8f} \left(x - \frac{2x^3}{l^2} + \frac{x^4}{l^3} \right)$$

の概算式を用いた。

死荷重は中央部、起拱部の平均値を採用した一拱肋に対し

$$\text{死荷重} \quad 0.30T/\text{metre}$$

となつた。

活荷重としては橋面の孤状であること、車輛が通過してないこと等から考へ300kg/m²と仮定し、このほかに衝撃係数

$$i = \frac{20}{50+l} = \frac{20}{50+38} = 0.25 \quad \text{を加算し}$$

$$\text{活荷重} \quad 300(1+i) = 0.375T/\text{m}^2$$

を採用した。

これらの荷重に対して支間の1/2点、3/8点、1/4点、1/8点について行つた
 一拱肋当りの応力は下表の如くである。

最大応力表

断面 応力の種類	1/2点		3/8点		1/4点		1/8点		
	M (T.M)	N(T)	M (T.M)	N(T)	M (T.M)	N(T)	M (T.M)	N(T)	
最大曲げモー メント (M)	+	3.753	17.13	6.330	18.000	8.942	16.663	7.258	16.554
	-	4.002	18.039	6.226	17.680	8.749	19.854	7.240	21.550
最大推力 (N)	-	0.172	24.432	0.072	24.702	0.134	25.284	0.054	26.368
最大剪断断力 (S)	+	1.771	1.771	1.706	1.756	1.052	1.088	1.232	1.139
	-								

以上の最大曲げモーメントと推力とによつておこる直応力強度の計算には

$$\text{直応力強度 } \sigma = \frac{N}{A} + \frac{M}{I} Y \quad (A: \text{断面積} \quad I: \text{断面二次率}, \quad Y: \text{縁維距離})$$

を用うることとした、これに用いた各点の断面形状は次表の通りである。

各点の断面寸法
 (各断面共幅員は17cm)

断面	1/2点	3/8点	1/4点	1/8点
断面の高さ (cm)	74	80	86	100

各断面とも平均木、後詰、桁、棟木、楔の幾つかの組合である、1/2点では
 1/8点では6片の組合せからなつてをる、これらの断面が締金物、鏝、其
 他肋木等に締合わされてはおるが一体として働くとは考えられないので、こ
 の断面の I としては一体としての値の60%を採つて計算した、許容程度の計
 算には建設省木道路橋設計示方原案によつた、自由長の取り方には横梁の間
 隔をとり、敷板による拱肋の固定は無視した。

各点の最大縁維応力と許容強度 (kg/cm²)

断面	1/2点	3/8点	1/4点	1/8点	
最大曲げモー トルによる 縁維応力強度	上縁	53.8	71.1	82.2	52.3
	下縁	57.2	70.0	82.8	55.1

拱肋支承 従来の拱肋の端部は橋脚軀体中心の隔石迄延びており、この里込部は常に濕氣を帶び腐蝕甚しく拱肋架換えの期を早めてをつた、復旧計画にあつてはこの点に鑑み、橋脚軀体の心壁工の上部を約80cm突き出し其面を拱軸線に直角とし、この面に鑄鉄製の支承を配し、拱肋端をこの金物に嵌めこみ、ボルト締とした。支承金物は二重底となし、底部間隙の空気流通を自由とし、拱肋端部を常時乾燥状態におくことを期した。

欄干 流失前の錦帯橋の欄干は擬宝珠をつけておつた、大正7年の架換に際し古式のものから改められたと伝えられる。

昭和26年1月の協議会の結果により、これを素朴な旧態に戻すこととなつたのであるが、古い記録を調査の結果、古式の欄干の型式が時代と共に可成の變遷のあることが明かとなつた。この為文部省文化財保護委員会中のこの方面の専門家の參集を願ひ、検討の結果、享和年間の形式に復元することゝなつた。

橋材の防腐處理 錦帯橋の橋材はこれが腐蝕の爲めに約30年毎に架換えを餘儀ないものとしてをつたのであるが、今後の架換えは其工費の点に於て所要の大きさの木材を入手する事の困難な点に於て至難だと考えられる為、これを半永久的のものとする為に木材に完全防腐處理をほどこすこととなつた。處理剤としてはクレオソート、又はマレニツト等の案も考えられたが、これらは木材を着色する缺点あることから、Pentachlor phenolのNatorium塩を使用することに決つた、防腐剤の注入は大阪の東洋木材防腐会社が請負つた為橋材は一旦大阪に送り、藥剤注入後岩国に返送することゝなつた、木材によつては産地より直接大阪に送つたものもある。

使用した藥品は三井化学製の5号P.C.P Natrium塩5%水溶液で注入操作は大体次の様な方針によつた。

注入方法はBethel法とし、注入操作は注入罐に木材を入れ635mm/cm²以上の排氣状態を45分間保ちたる後、防腐剤を注入罐に充満し、然る後ポンプを以て防腐剤を罐内に圧入する、先づ2kg/cm²の圧力にて60分間加圧し、次に4kg/cm²の圧力に上昇して60分間、次に6kg/cm²にて60分間、最後に8kg/cm²

にて180~240分間加圧して標準量を注入する。

木材1石当りの標準注入量は下記以上とする。

樺 30kg、 檜 60kg、 松 60kg

然る後に防腐剤を罐外に排除し、635mm/cm²の排気状態を45分以上保
て作業を終る。

使用薬剤は40~45°Cに加温して使用する。

注入量は注入前後の重量を測定して決定する。

以上の方針で注入を行い、注入成績に現われた処では殆んで処定の薬量を
注入することが出来た。

尙P.C.P natrium塩を固着する為に木材が現場到着後、硫酸アルミニウ
ム1kgを軟水10Ltrに溶解したものを木材1石当り1 Ltrの割合にて表面をSpray
にて撒布した。

尙到着後加工した木材の木口等には油性P.C.Pを塗布して防腐処理の方
を期した。