

## 非破壊検査を用いた姫井橋の調査と評価に関する考察\*

Investigation of the Himeji Bridge and Evaluation as Civil Engineering Heritage

山尾 敏孝\*\*、高柳 正勝\*\*\*、重石 光弘\*\*\*、水田 洋司\*\*\*\*、宮村 重範\*\*\*\*\*

By Toshitaka YAMAOKA, Masao TAKAYANAGI, Mitsuhiro SHIGEISHI, Yoji MIZUTA and Shigenori MIYAMURA

熊本県内で唯一の下路式コンクリートアーチ橋である姫井橋は大正の終わりに建設されており、もし RC 構造なら日本で最も古い道路橋である。本論では、対象橋梁の既存の文献・資料調査を行い特徴を把握した後、現地に赴き、現況調査として形状測定及び目視による損傷調査を行った。さらに RC レーダを用いて非破壊検査を行って電磁波による内部構造を調査した。この調査結果及び簡単な骨組み計算結果を用いた考察により、非破壊検査の土木遺産調査への適用や評価、損傷部分の修復方法の検討を行うものである。

### 1. はじめに

熊本県では近代化構造物の調査が実施されており、保存活用を図るための基礎資料の収集は行われてきたが、各構造物の詳細な調査及び評価が行われているとは言いがたい<sup>1)</sup>。近代土木遺産の内部の構造や用いられた材料を知ることにより、建設された技術力の中での程度であるか、またどのような工夫がなされているかなどを特定できないかと考えた。近代土木遺産は唯一無二のものである場合が多く、構造物に手を加えて調査を行うことは少なからずダメージを与えてしまうことになり好ましくない。そこで、構造物を破壊せずに検査することが求められている。

兵庫県南部地震を契機に、既存のコンクリート構造物の施工管理、耐力診断、補修、補強などを行う為の様々な検査が必要となってきている。その中でも、構造物を傷つけたり、壊すことなく検査が出来る非破壊検査の重要性は増してきている。非破壊検査には、音速法、放射線法、電磁波法など種々の方法があり、損傷の検出をはじめとして材質の判定やかぶり厚さの測定など、各種計測さらにひずみ測定などに利用されている<sup>2)</sup>。

本研究では、コンクリートで造られた近代土木遺産の内部構造、また鉄筋の有無を調べる方法として電磁波法（レーダ法）を用い、どのようなことが分かるか、またどのような問題点があるかなど、近代土木遺産調査における非破壊検査の適用範囲や問題点について調べることを目的としている。

### 2. 非破壊検査と RC レーダ

#### 2.1 RC レーダの原理<sup>3)</sup>

非破壊検査とは材料、製品、構造物などの種類に関係なく、試験対象構造物を傷つけたり、分離したり、あるいは破壊したりすることなしに、損傷の有無とその状態、あるいは対象物の性質、状態、内部構造などを調べる手法である。

試験法は、試験体の表面または表層部及び試験体の内

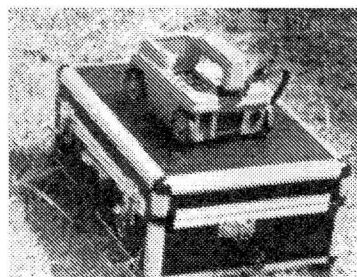


写真1 RCレーダ NJJ-85A(撮影：重石, 2000)  
(Photo.1 RC radar NJJ-85A)

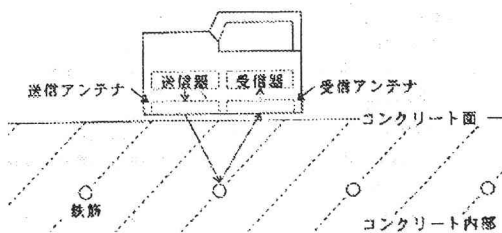


図1 RCレーダの原理図(作成：重石)  
(Fig.1 Principle of RC radar)

\*keyword：非破壊検査、電磁波法、コンクリートアーチ橋

\*\*正会員 工博 熊本大学教授工学部環境システム工学科 \*\*\*工修 菊池市 \*\*\*\*正会員 工博 熊本大学助教授工学部環境システム工学科 \*\*\*\*\*正会員 工博 九州産業大学教授工学部 \*\*\*\*\*工修 西田鉄工(株)  
(〒860-8555 熊本市黒髪2丁目39-1)

部を調べるかによって大きく二つに分けられる。前者には外観試験、磁粉探傷試験、浸透探傷試験、後者には放射線透過試験、超音波探傷試験など種々の試験法がある。どの試験法をどのように利用して非破壊試験を行うかは、非破壊試験を利用する目的によっても異なり、それぞれの目的に応じて、最も適した非破壊試験方法及びその適用方法を選ばなければならない<sup>2)</sup>。

調査では、写真1に示す日本無線株式会社のハンディサーチ・RCレーダ（コンクリート内部探索器）NJJ-85Aを用いた。機器の選定理由として、小型で屋外での測定が容易なこと、測定対象物の材質が金属・非金属を問わないこと、広範囲にわたり連続的な測定結果が得られること、測定結果が現場ですぐ見られることなどが上げられる。レーダ法は、電磁波が媒質中を一定速度で進み、他の物質にはねかえって戻ってくるという性質を利用している。

図1に示すように電磁波をアンテナからコンクリートに向けて放射し、その電磁波がコンクリートと電気的性質の異なる物質（鉄筋・空隙など）で反射され、再びコンクリートの表面に出て受信アンテナで受信される。この受信アンテナまで到達する時間から、反射物体までの距離を知ることができることになる。アンテナをコンクリート表面で移動させれば、水平面上の位置を知ることが可能となる。

## 2.2 RCレーダの予備試験

調査に使用したRCレーダ（NJJ-85A）の測定サンプルとして、熊本大学工学部研究実験棟の測定結果と配筋図を図2と図3に示す。

図2(a)に示すような、鉄筋（RC）柱の下側面の表面から、内部鉄筋を測定した結果を図2(b)に示す。

深さ約8~10cmの所に見られる山形エコーが鉄筋の場所を示しており、山形エコーの中心位置が鉄筋のかぶり厚さとなる。丸印の下部にある反応は鉄筋での反射の多重エコーと考えられる。設計断面図ではピッチ15cm、かぶり厚さ5cmとなっているが、データでは山形エコーは約8cm付近に現れている。これは、データ上部に現れている濃い反応がコンクリート表面からの反射波の影響と考えられ、この反応の中心位置からの距離がかぶり厚さと考えられるからである。また設計断面図と比較してみると4本の鉄筋の反応が山形エコーとして明確に表われていることがわかる。

次に、図3(a)に示すような鉄骨・鉄筋（SRC）柱の左側面の表面から、内部鉄筋および鉄骨を測定した結果を図3(b)に示す。測定データでは丸印の部分の反応は鉄筋のみのサンプルの時には見られなかった反応である。これは設計断面図と比較してみると鉄骨部分に相当する反応と考えられる。

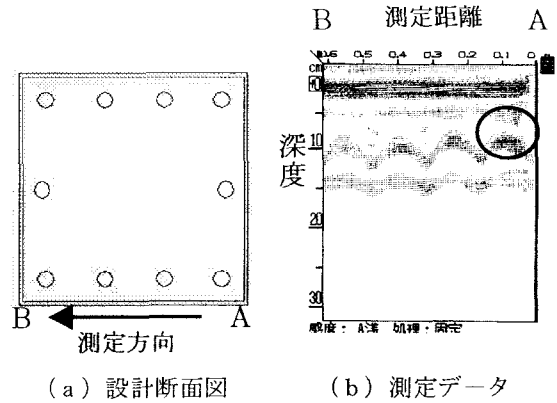


図2 RC柱の測定結果（作成：山尾）  
(Fig.2 Measurement result of RC column)

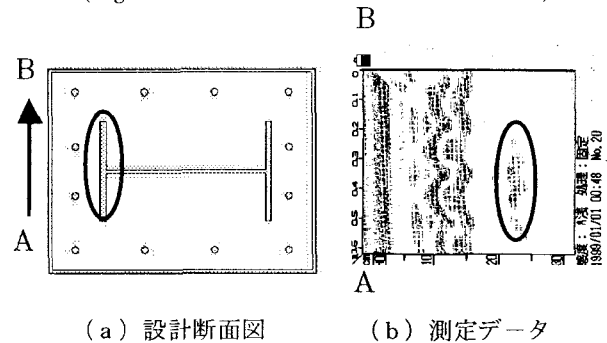


図3 SRC柱の測定結果（作成：山尾）  
(Fig.3 Measurement result of SRC column)



図4 姫井橋の位置図（作成：山尾）  
(Fig.4 Location of the Himeiji Bridge)

## 3. 姫井橋の概要

写真2は、阿蘇外輪山の西麓に位置する菊池郡旭志村を流れる合志川に架かっている姫井橋の現況である。この橋は熊本県内では唯一の下路式コンクリートアーチ橋であり、文献や資料を見る限りにおいては、九州内の古い橋梁の中にも下路式のコンクリートアーチ橋の施工実績は見当たらない<sup>1), 4)</sup>。国内では、鉄筋コンクリート構造の下路式アーチ橋は長野県で多く架設された記録があり、その後四国地方や中国地方まで広がったようであるが、これらの中で最初の橋は1933（昭和8年）に竣工した神奈川県の大橋であるとされている<sup>5)</sup>。しかしながら、この姫井橋の完成年は県の古い橋梁調査には1925（大正14）年と記されており、親柱にも“大正14年3月建設”と刻まれていたそうである。



写真2 姫井橋 (撮影：宮村、2003)  
(Photo.2 Himei Bridge)

これは、旭橋よりも8年早い時期の建設であり、大正期における下路式コンクリートアーチ橋架設を示すような記録は古い文献には見出せない。

姫井橋の構造形式と建造年の決定をすることは大きな問題となる。これまでの研究調査では、鋼アーチ橋として造られたものが後でコンクリート巻きにされた事例があることから、この橋梁もそのような構造ではないかという疑念があった。本研究ではこの点を解明するための調査である。『旭志村村史<sup>6)</sup>』によれば、この橋は大正14年を建設年とし、設計は隈府町外11ヶ村土木教育財産組合によるとしているが、これは事業主体の意味と思われ、設計担当者に関しては不明である。一方、『菊池郡誌<sup>7)</sup>』によれば、現在の菊池郡市が中心となる隈府町外11ヶ村土木教育財産組合は、勸業・造林や森林財産の収入により学校を経営していたとある。主な事業は、公共施設である河川、堤防、道路、橋梁に関する土木工事の設計・監督も行っていたと記されている。組合役場は菊池郡役所内に置かれ、この組合は土木事業の開発・発展に大きく寄与していたようである。なお、この組合の土木関係資料は昭和30年頃の解散時に消失したとのことであった<sup>8)</sup>。

姫井橋の設計に関する資料や計画の経緯に関する資料は見つかっていないが、現在、旭志村の村民を対象にした「姫井橋に関するアンケート」の実施を計画している。姫井橋を文化財としての保存・活用することに対する住民の意識や土木遺産としての関心度について調査するつもりで、併せてこのアンケートで建設当時の資料や情報を入手しようと計画している段階である。

戸塚は文献(8)の中で、

「姫井地区在住の旧北合志村・水上元収入役から「大正14年春の橋完成時には地元の親子三代による渡り初めがあり、その時の橋は今日のコンクリート橋であったように思う。」との記憶情報を得た。」

とある。彼は、使用鋼材量は鋼アーチ橋としては少ないと考えられる点からも、姫井橋のコンクリートア

ーチ橋としての建造年は大正14年と推察している。

この橋はアーチリブ同様にハンガー(吊材)にも型钢が使用されており、形式は当時として珍しい斜橋である。河川と橋への取付け道路との影響及び平面線形上の事情から斜橋とし、縦断勾配や桁高の制限及び桁形式としての支間長等を十分考慮して下路式アーチ橋を採用したと考えられる<sup>8)</sup>。姫井橋の建設は、当時、木材を搬出するのに使用したことから、事業に活気と地域の活力が十分あったことを伺わせるものである。

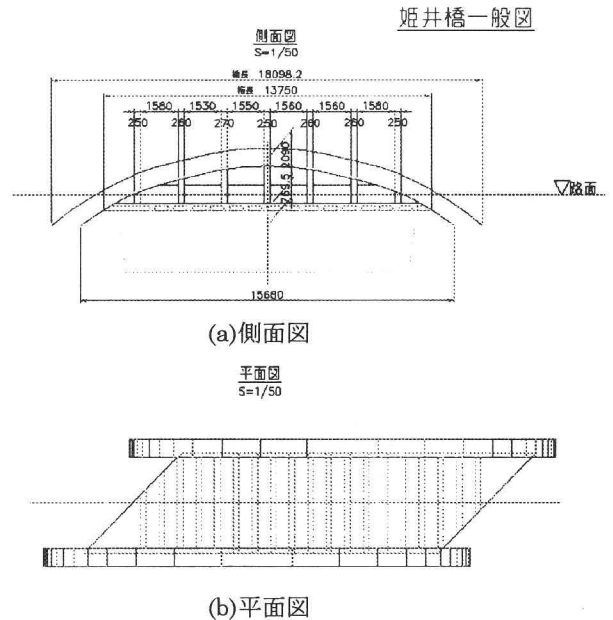


図5 姫井橋一般図 (作成：宮村)  
(Fig.5 Dimension of the Himei Bridge)

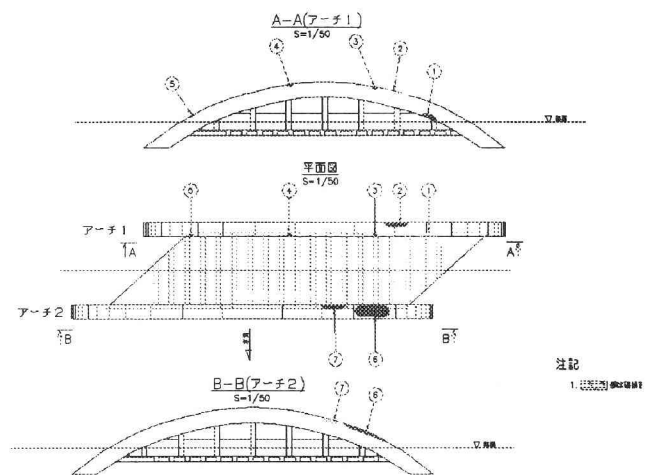


図6 損傷箇所 (作成：宮村)  
(Fig.6 Damaged Parts)

図5は、現在の姫井橋について現地で測定した結果を図面化したものである。アーチのスパンは15.68m、幅員は4.62m、アーチライズは2.09mであった。またアーチリブの断面は、660mm\*750mmである。

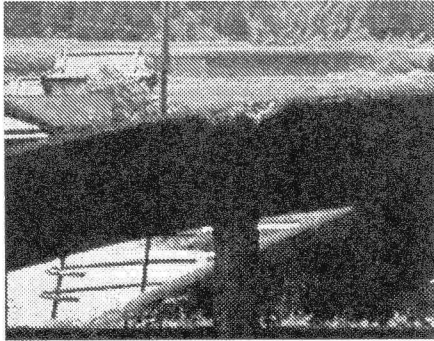


写真4 損傷箇所②(撮影:宮村、2003)  
(Photo. 4 Damaged Part ②)



写真5 損傷箇所⑥(撮影:宮村、2003)  
(Photo. 5 Damaged Part ⑥)



写真3 損傷箇所①(撮影:宮村、2003)  
(Photo. 3 Damaged Part ①)



写真6 損傷箇所⑦(撮影:宮村、2003)  
(Photo. 6 Damaged Part ⑦)

#### 4. 現況調査

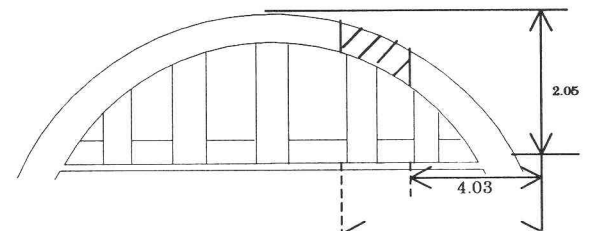
##### 4.1 損傷状況

図6は姫井橋の主な損傷している7箇所を図に表したもので、写真3～6は代表的な損傷部分の現況写真である。この橋は既に何度か補修をされているが、やはりかなり痛みが激しい部分もある。特に、損傷が著しいのは写真3に示すように上流左岸側のアーチリブ①の箇所で、剥離部分の補修の際に行われた内部調査により、75×50mmの山形鋼の一部が確認された。

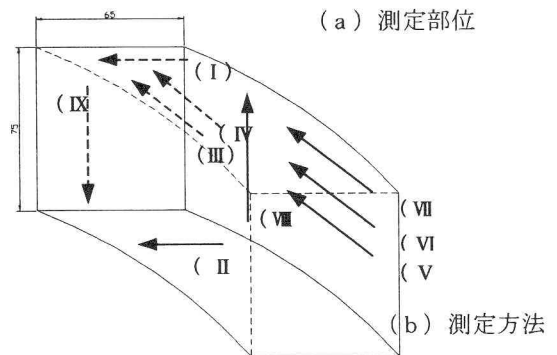
##### 4.2 RCレーダによる測定結果と考察

図7(a)に示すアーチリブの部位をRCレーダにより、図(b)に示すような各4面について測定した結果を図8(a)に示した。

アーチリブ上面幅方向のデータ(I)より、測定距離0～10cm、40～50cm、またかぶり厚さ8cmの位置に濃い反応が見られる。(III)(IV)は上面橋軸方向のデータであるが、端部を測定した(III)では全反射が見られたのに対して、中心部を測定した(IV)では強く反応は出ていない。これより、両端部に比較的大きな鉄骨が入っていると考えられる。しかし、下面幅方向のデータ(II)では全体に3つの反応が出ており、徐々にかぶり厚さが深くなっている。下部には3つの鉄骨が入っているのではないかと考えられる。



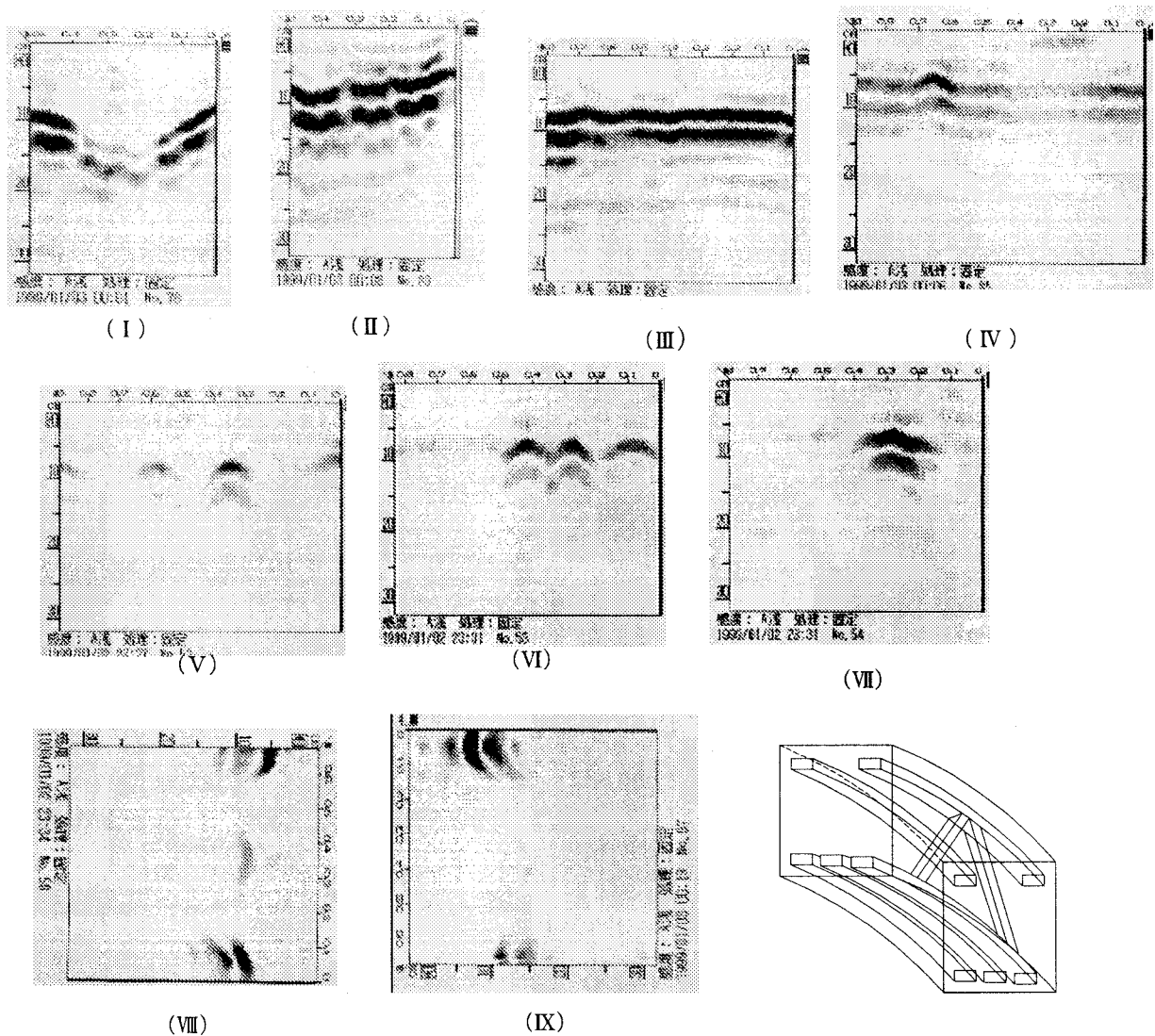
(a) 測定部位



(b) 測定方法

図7 アーチリブの測定部位と方法(作成:山尾)  
(Fig.7 Measurement Part and Method of Arch Rib)

アーチリブ側面横方向のデータ(V)(VI)(VII)は、下部から上部に向かって測定したものである。(V)で測定距離約35cmと55cmの位置にある2つの反応が(VI)(VII)で徐々に近づいていくのが分かる。かぶり厚さは変化してないことより、上部と下部の鉄骨をつなぐ斜材が



(a) 測定データ

(b) 内部予想図

図8 RCレーダによる測定結果 (作成: 山尾)  
(Fig.8 Measurement results by RC radar)

深さ約 8cm の位置に入っているのではないかと考えられる。また、縦方向のデータ(VII)から測定距離約 5cm と 65cm の位置またかぶり厚さ約 8cm と 5cm の位置に反応が見られる。データ(IX)は反対側面を上下逆から測定したものであるが、(VII)と対照的な反応となっている。

以上の結果と他のデータ結果により総合的に検討した結果、図 8 (b) に示すような内部構造が予想される。

次に吊材については、図 9 (a) に示す位置の吊材を対象に図に示すような方向に測定した結果を図 (b) に示している。測定データ (I) (II) は、縦方向を測定した結果である。2 つのデータに共通していることは、(I) では約 50cm、(II) では約 40cm の位置に濃い反応が見られることである。測定開始位置が違うことを考慮すると、ほぼ同じ位置に鉄骨が入っていると考えられる。またデータ (III) (IV) は横方向を測定した結果であるが、(III) からはかぶり厚さ約 7cm の位置に 2 つの反応が見られ、(IV) では連続した 3 つの反応が見られる。しかし、(IV) は測定距離が短いことから、両端の反応が重

なり合い 3 つに見えたのではないかと考えられる。

以上の結果と他のデータを総合的に判断すると、(c) の様な内部構造が予想することができた。これは他の部材でも同様であった。

### 5. 自重による断面力について

現状のアーチ部材や吊材に作用している断面力を計算してみた。本橋の図面が残存していないため、アーチ形状、吊材の長さを測定した結果を基に骨組図を図 10 に示すように作成した。アーチ部にはコンクリートの剥離部より鋼材の存在が確認されたが、前述したようにアーチ内部には山形鋼材があると推定される。そこで、まずコンクリート断面として計算した。現地の状況から、支点条件、格点はアーチ両端で剛支点、部材格点は剛結合とした。荷重載荷は鉄骨を含むコンクリート断面の単位重量  $24.5 \text{ KN/m}^3$  とし、アーチ部自重、桁部自重を分けて、図 11 のようにそれぞれ骨組み線に沿って分布載荷させた。



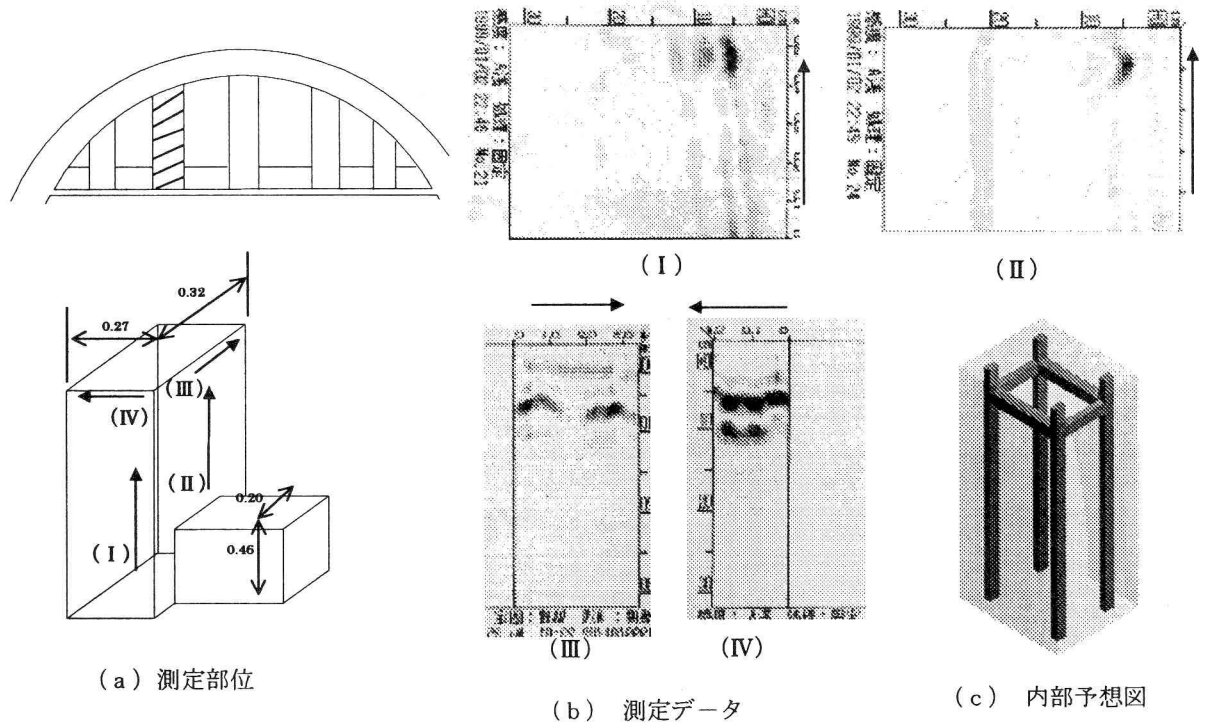


図9 吊材部分の測定部位と測定結果 (作成：山尾)  
(Fig.9 Measurement results of Hanger)

構造計算にはフォーラム8 (FRAME マネージャ 平面骨組み解析) を使用した。解析結果を表1, 2に示す。

①アーチ部断面力： アーチ部には軸線に沿って約600kNの圧縮力が均等に作用し、曲げモーメント及びせん断力は微小である。アーチ部断面 (660\*750mm) に作用する応力は  $1.2\text{N/mm}^2$  となり、コンクリート断面応力としては非常に小さい値である。

②吊材、桁部の断面力： 吊材には56kNの張力、桁部には  $13\text{kN}\cdot\text{m}$ の曲げモーメントが生ずるが、吊材間隔が1.835mと短いためその値も小さい。アーチ支間が16.65mと小さい割に大きい断面 (660\*750mm) が使

用されているため、断面力も小さくしたがって作用応力も小さいことが分かった。活荷重載荷を行っていないが、自重による断面力からその値は大きくないことが容易に推定出来る。

以上の結果より、現在道路橋と使用されていない本橋は、自重に耐えられる十分な強度を有していることがわかる。なお、今後はコンクリートの強度試験等を行なって、材料定数等を調査する予定である。

表1 桁部の断面力 (作成：宮村)  
(Table.1 Stress Resultant of a Beam)

	各点	軸力 (kN)	剪断力 (kN)	曲げ (kN·m)
桁部	2	-11	33	13
	12	-9	33	14
	13	-18	29	9
	14	-21	28	9
	15	-21	27	7
	16	-18	30	7
	17	-9	33	10
	18	-12	33	14
	10	-12	32	13

表2 吊材の断面力と鉛直変位 (作成：宮村)  
(Table.2 Stress Resultant and Displacements of Hangers)

	各点	軸力 (kN)	剪断力 (kN)	曲げ (kN·m)	鉛直変位 (mm)
吊材	12	-56	20	9	0.5
	13	-52	9	6	0.9
	14	-53	3	3	1.2
	15	-54	0	0	1.3
	16	-53	3	3	1.2
	17	-52	9	7	0.9
	18	-56	21	9	0.5

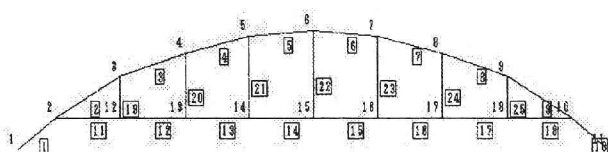


図10 解析骨組みモデル (作成：宮村)  
(Fig.10 Analytical Frame Model)

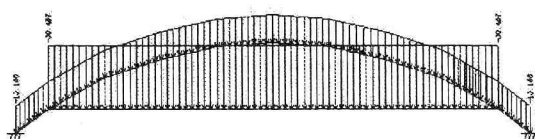


図11 荷重分布荷重 (作成：宮村)  
(Fig.11 Distributed Loads)

## 6. 損傷部の修復と保存の課題

姫井橋はおおよそ80年もの間、風雨にさらされてきているため、前述の写真に示すような大きなコンクリートの剥離から小さなクラックまで多くの損傷を有している。また、全体的にも風化が激しく、表面の中性化も進んでいるように見受けられる。このような状態のコンクリート構造物をどのように補修し、どのような形で保存するかは、非常に難しい課題と考えられる。橋の保存に重点を置くか、年代を感じさせる景観を重視するかによって補修方法も異なるであろう。

ここではコンクリート構造物における景観上の損傷を補修する一般的な方法<sup>9)</sup>について述べ、姫井橋に適した方法について検討している。コンクリート構造物を補修する場合、微細なひび割れから大きな損傷に対して、以下のような方法が採用されている。

### ①ひび割れ補修工法

- a. ひび割れ被覆工法：幅0.2mm以下のひび割れに対して、表面のみを被覆する方法
- b. 注入工法：樹脂系あるいはセメント系の材料を低圧にてひび割れに注入する方法
- c. 充填工法（鋼材が腐食していない場合に適用）：幅0.5mm以上のひび割れに対して、U字にカットした部分に補修材を充填する方法

### ②断面修復工法（鋼材腐食の場合に適用）

コンクリートの欠落した部分に対して行うもので、鋼材の腐食防止をも同時におこない、ポリマーセメントモルタルや軽量エポキシ樹脂モルタルなどの材料を充填する方法

### ③表面被覆工法（全体を被覆する）

コンクリートの表面を樹脂系やポリマーセメント系の材料にて被覆することにより劣化進行を防止する方法

姫井橋の長期保存を考えるのであれば、上記①～③

までのすべての方法を用いて、橋全体をコンクリート色にて表面被覆するのも一法である。しかし、この方法で補修すれば、時代を感じさせない新規の構造物のイメージとなり、遺産としての姫井橋の価値が半減する恐れがある。姫井橋の年代を感じさせるものを残し、一部を修復するとなれば①と②を用いて修復する方法があるが、全体との色あわせあるいは苔の生え具合等を考慮して、十分な事前調整、計画の打ち合わせが必要と考えられる。

## 参考文献

- 1) 熊本県教育委員会編：熊本県の近代化遺産—近代化遺産総合調査—, pp.104~106, 1999年.
- 2) 社団法人日本非破壊検査協会編：『非破壊試験概論』—非破壊検査技術シリーズ1990—, pp.132~150, 1997年.
- 3) 笠井 哲郎編：わかりやすいコンクリート構造物の非破壊検査, オーム社, pp.2~9, 1996年.
- 4) 戸塚 誠司、小林 一郎：熊本県における歴史的コンクリートアーチ橋の評価, 土木史研究第16号, pp.61~76, 1996年.
- 5) 文化庁歴史的建造物調査研究会：『建物の見方、調べ方 近代化土木遺産の保存と活用』, ぎょうせい, p.26, 1998年.
- 6) 旭志村村史編纂委員会編：旭志村村史, 旭志村, 1993年.
- 7) 熊本県教育委員会菊池郡支会編：菊池郡史, p.32, 1919年.
- 8) 戸塚誠司：熊本県下における近代橋梁の発展史に関する研究, 熊本大学大学院自然科学研究科学学位請求論文, 1999年.
- 9) 土木学会編：土木工学ハンドブック, I, pp.1021-1024, 1989年.