

重要文化財美濃橋の耐震診断を含む 修理検討事例報告

崔 静妍¹・赤澤 泰²・齋藤 哲郎³・菅野 晃生⁴・寺田 武志⁵・市原 義則⁶

¹株式会社文化財保存計画協会（〒101-0003 東京都千代田区一ツ橋2-5-5）

E-mail: choi@b-hozon.co.jp

²株式会社文化財保存計画協会（同上）

E-mail: akazawa@b-hozon.co.jp

³大日本コンサルタント株式会社（〒343-0851 埼玉県越谷市七左町5-1）

E-mail: saito_tetsu@ne-con.co.jp

⁴大日本コンサルタント株式会社（同上）

E-mail: sugano@ne-con.co.jp

⁵大日本コンサルタント株式会社（同上）

E-mail: terada@ne-con.co.jp

⁶美濃市建設部土木課（〒501-3792 岐阜県美濃市1350番地）

E-mail: ichihara-yoshinori@city.mino.lg.jp

大正5年に建設された美濃橋は、現存する日本最古の近代吊橋として価値が評価され、平成15年に国の重要文化財に指定された。昭和30年代までは路線バスも通交する道路橋であったが、経年劣化及び周辺道路環境の変化と共に、現在は荷重制限を実施しながら現役の歩道橋として使い続けられている。架橋から約一世紀が経過し、部材劣化の進行が、これまでの調査において確認され、ケーブルの修理等を含めた修理工事の必要性が指摘されてきた。建設当時の設計図書が残存しない状況で、耐力・耐震性能の評価が困難な中、平成24年から現地調査等を実施し、その調査結果を用いた構造解析及び耐震診断を行った。その結果を基に、耐震補強及び主索ケーブル修理方法の検討を進めている。

本稿は、美濃橋の耐震診断及び修理方針の検討について、現時点までの経過報告を行うものである。また、その中で明かになった近代橋梁を保存する上での課題とそれに対する取り組みを紹介する。

Key Words : 美濃橋、土木遺産、近代吊橋、耐震診断、保存修理、修復

1. はじめに

(1) 美濃橋建設の経緯と橋梁の概要

美濃橋は、岐阜県美濃市の長良川に架かる吊橋で、大正5年に建設された現存する日本最古の近代吊橋である。

美濃は、長良川の舟運の拠点であり、和紙の生産、流通として近世より栄えた商業都市である。長良川の右岸牧谷地区の和紙は、上有知湊を利用して城下町上有知に運ばれていたが、美濃橋の建設により陸路での運搬が可能となり、流通は飛躍的に発展した。

本橋の架橋については、設計図書が残存していないため、具体的な設計意図や施工過程は不明である。当時の新聞記事等によると、建設には、岐阜県土木課技師戸谷

亥名蔵の他、同課のエンジニアたち、武儀郡吏員の玉井義雄が関与したことが知られる。また、京都帝大教授大藤博士の指導があったといわれる。橋長113メートル、支間116メートル、幅員3.1メートルの単径間補剛吊橋として、建設当時国内最大級の支間を実現し、主塔、主ケーブル、アンカーレイジ、補剛桁等、近代吊橋の要素を構造躯体全体に備える。また、昭和58年及び平成11年に置き換えられている木製床版部分を除いて、建設当初の部材が今なお使用されている。

2基の主塔は、高さ9.8メートル、鉄筋コンクリート造で、横梁の壁面陸地側に橋名(右岸側「みのはし」、左岸側「美濃橋」)を彫出する。主塔の塔頂部に鉄製の滑動支承を設け、19本線6撚り共心構造で、サグ比を15分の1とした主ケーブルを吊す。吊ケーブルは37本線6撚り共

心構造で、横桁との接続部分にターンバックルを連結する。

右岸側アンカーレイジは、コンクリート構造物に、引張調整用の鉄製ソケットと接続する7本のストランドロープを埋め込んだもので、右岸側主塔より北西方向に約43メートル離れた位置に築かれる。左岸側アンカーレイジは、穿たれた岩盤に主ケーブルを碇着したものとする。美濃橋渡橋式の案内状によると、小倉山に穿たれた隧道に主ケーブルを引入れて碇着する構造としており、内部にはコンクリートが充填されている。

補剛桁は、アングル材とT型钢を鉚結したダブルワーレントラスで、主塔基部を橋台とし、3格間毎に上弦材と横桁を斜材で繋ぐ対傾構を設ける。補剛桁左岸側に付けられた銘板に、「製作名古屋鐵工所」及び「大正五年七月竣工」と記す。

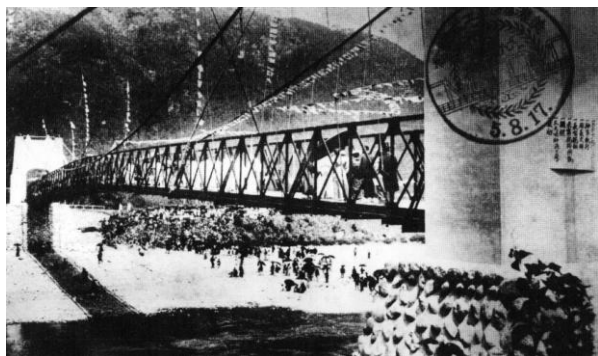


図1-1 美濃橋渡初式



図1-2 全景



図1-3 主塔

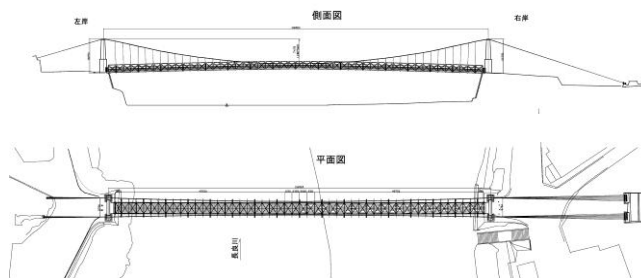


図1-4 美濃橋一般図

(2) 保存修理に至るまでの経緯

「岐阜県道路史」によると、明治20年代から大正期に県内で架けられた道路橋23橋の内、12橋が吊橋形式

で架けられたことが分かる。しかし、その殆は、戦後鉄筋コンクリート構造の普及及び河川改修の進捗と共に撤去または取替えが実施されており、美濃橋が由一残されたものである。

建設後、昭和30年代まで路線バスが通る幹線道路として地域の交通を支えてきたが、老朽化や新橋の建設と共に、昭和40年代以降は、歩道橋として利用されている。橋の修繕においても、吊索の取替え、保護柵の設置、塗装の塗替えと、定期的に行われた木材床組の交換を除けば、大きな修理なく、主索ケーブルや鉄筋コンクリートの主塔、補剛桁等において、当時を部材と形式をそのまま維持している。

平成2年から全国的に近代化遺産に対する調査が行われる中、美濃橋の土木遺産としての重要性が認識されることとなり、平成13年には土木学会の選奨土木遺産に選ばれた。平成15年には、近代の道路橋としては3番目に国の重要文化財に指定された。

その指定を機に、文化財として橋の価値を保存しつつ修理するための検討が始まった。具体的には、橋梁点検や全磁束法によるケーブル腐蝕調査などが実施され、その結果をもとに、修復活用検討委員会(委員長：馬場岡山大学教授)において、修理の大まかな方針が議論された。その主な内容は、平成18年3月の「計画書」から以下の通りである。

- ・主索ケーブルを2本追加し、現状7本から9本とする。ケーブル追加のため、新規アンカーを増設する。
- ・既存ケーブルは、ブラスト後亜鉛溶射にて防錆する。
- ・補剛桁は、ブラスト後亜鉛溶射にて防錆する。
- ・吊索は、シーリングを再現する。
- ・主塔の安全性は、現段階で耐震診断が難しいため、今後の課題とする。

修理に向けて本格的な調査が動き出したのは、平成24年に基本設計に着手してからである。その間、橋梁の劣化が進み、橋梁の健全性に関しても現在の技術レベルを反映した再検討の必要性が指摘された。平成24年にはまず橋梁の復元モデル化により、構造解析を実施した。なお、以前の調査で課題として残された耐震診断にも着手することとなった。

表1-1 美濃橋に関する主な出来事 (○：道路橋規定に関連)

年度	出来事
大正 4. 8	美濃橋着工
大正 5. 8	美濃橋渡初式
大正 15	○「道路構造に関する細則」
昭和 8～30?	修繕:柵(高欄)を設置
昭和 31	新美濃橋(美濃橋の上流約300m位置)建設 その後、バス通行から人・自転車専用
昭和 46-49	修繕:塗装改変(シルバー→青)

昭和 50. 5	市道に移管
昭和 50. 5	修繕:吊索取替(シーリングークリップ)、主索・吊索油塗
昭和 56	調査:耐荷力調査
昭和 58. 8	修繕:床組取替、塗装(青→赤)、主索・吊索油塗
昭和 59	○「小規模吊橋指針」策定
昭和 59 頃	修繕:主塔補修塗装
平成 3. 3	調査:強度調査
平成 9～11	修繕:床組取替
平成 9. 10	調査:橋梁点検
平成 13. 11	土木学会選奨土木遺産認定
平成 15. 5	重要文化財指定
平成 15-17	調査:ケーブル腐食度、ケーブル強度、橋梁点検、試験等 委員会:「修復・活用計画検討委員会」 【第 1 回】H16. 7 経緯説明・調査結果報告・現状課題・対 策工法／【第 2 回】H17. 3 調査結果、修復方針(ケーブ ル・主塔・補剛材・塗装)／【第 3 回】H17. 8 前回概要・修 復工法の説明／【第 4 回】H17. 12 各部位の修復工法説 明／【第 5 回】H18. 3 検討委員会修復活用工法の説明 →「美濃橋修復・活用計画書」
平成 19	調査:アンカーレイジ等
平成 22-23	修繕:床組取替
平成 24. 3	美濃市歴史的風致維持向上計画書認定(美濃橋保存修 理を含む)
平成 24	調査:基本設計(構造解析等)
平成 25	調査:主塔配筋、主塔基礎、ケーブル腐食度、耐震診断 等

リル等複数の手法を用いて調査を行った。以下、調査によって明らかになった主塔基礎構造についてまとめる。

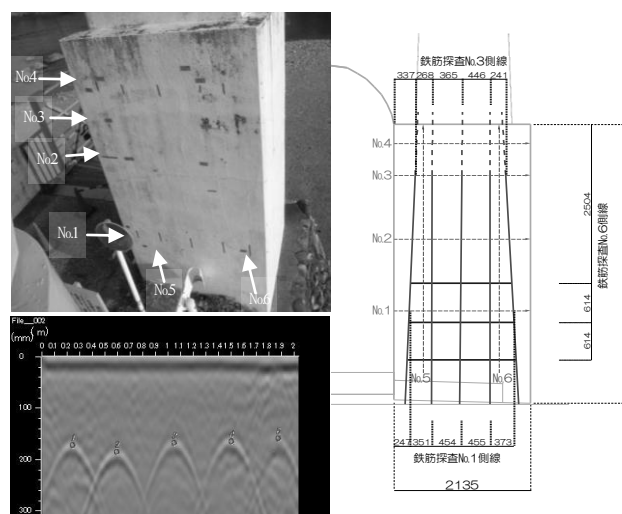


図2-1 主塔柱部の配筋調査

2. 調査の概要

(1) 主塔上部及び基礎の調査

現地調査の最も大きな目的の一つは、耐震診断を実施するにあたって必要な情報を得ることである。主塔の配筋及び基礎の内部形状を把握するため、以下の調査を実施した。

a) RCレーダによる主塔配筋調査

右岸主塔西側に高所作業車を配置し、調査面において鉄筋探査器を走査し、鉄筋位置と間隔を確認すると共に、かぶり厚さの推定を行った。その結果を以下にまとめた。

- ①柱部の主筋本数は、各面5本になっており、柱形状に沿って傾斜している。(図2-1参照)
- ②主筋より横筋が深く設置されており、一般的なフープ筋のような補強効果はないものとされる。
- ③壁面には、横筋と縦筋が格子状に配筋されており、鉄筋の交差する箇所にはハツリ結果、主筋(横筋)25mm、縦筋16mm程度であり、横筋径は、柱部の主筋径と同じ25mmである。

b) 主塔基礎調査(試掘、コアドリル及びボーリング)

美濃橋の主塔基礎に関しては、主塔の根入れや粗石コンクリート基礎の形状が不明であるため、試掘やコアド

①試掘により確認した兩岸の基礎背面形状：主塔基礎(粗石コンクリート)の背面(道路側)の形状は、外面のラインと合致しており、ほぼ直線で結んだ単純な形状であることが分かった。なお粗石コンクリートの道路に面した側、即ち地中に隠れている部分は、仕上げコンクリート(化粧モルタル)が施されていない。

②コア及び孔内カメラで確認した基礎内部状況：基礎上部はジャンカや粗石間の空隙は多少あるが、概ねコンクリート充填が行き届いている。しかし、GL-3mを境として下方ほど施工状態が悪くなり、コンクリート充填が少なく、空隙が多い状態であることが判明した(図2-2参照)。

③右岸主塔躯体の根入れ：当初、基礎内部にある程度の深さまで根入れがあるものと推測したが、右岸主塔脇孔のボアホールレーダ、並びにコアドリルによる採取コア及び孔内の観察結果から、GL-80cm(粗石天端から-40cm)付近から下方では、基礎を構成する粗石コンクリートの粗石が躯体側にも分布していることが判明した。なお、根入れの非常に浅い構造から、主塔柱間を繋ぐ地中梁の可能性が指摘されたが、地上からのコアドリルの結果、主塔間に地中梁は存在しないことが明らかとなった。

④右岸主塔の背面・下部地盤及び地盤構造：背面地盤のボーリング調査では、礫混じりの砂からなる堤体盛土が確認された。なお過去の地盤調査結果と総合すると、右岸の主塔基礎及びアンカレイジの支持層である河床礫層は、右岸アンカレイジの旧耕作地面から河床面にかけて、傾斜した構造であることが判明した(図2-3参照)。

⑤コンクリートコア試験：主塔基礎の粗石間充てんコンクリート、及び主塔躯体から選択したコンクリートコア

の試験結果は、現行基準におけるコンクリートの標準的な強度、物性値を示した。

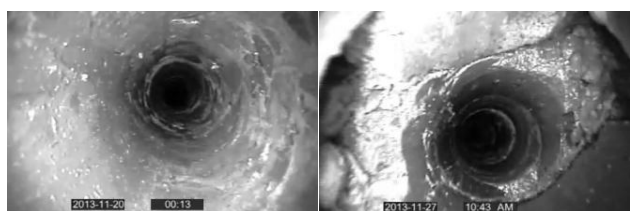


図2-2 孔内カメラ画像（左：GL- 1.0m、右：GL- 3.4m）

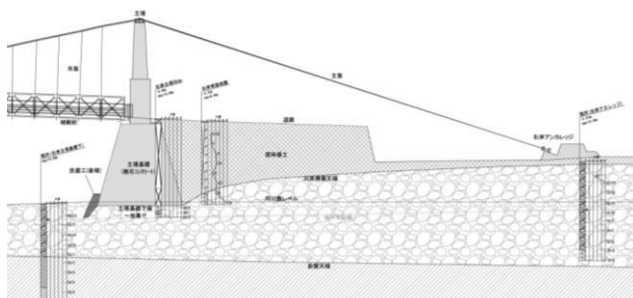


図2-3 地層推定断面図

以上の調査から把握した主塔の配筋、基礎形状を用いて、耐震診断のためのモデル化を行った。その概要を図3-2に示す。

(2) 主索ケーブル腐食度調査等

主索ケーブルは、吊橋の安全性の全てを依存する最も重要な部材である。美濃橋に使用されているケーブルは、強度に対する正式な記録は無いが、施工当時の新聞記録や類似ケーブルの強度等から75t程度と推定される。ケーブルの劣化による強度の低下が予想されるが、現在のケーブル抵抗強度を現物から調べるのが困難である。そこで、ここでは、ケーブルの腐食度(腐食断面積)と引張強度の関係に関する既往の試験データから美濃橋のケーブル強度を推定した。

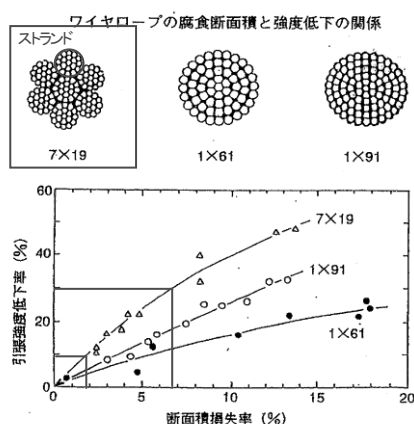


図2-4 腐食断面積と強度低下の関係

本調査では、まず、ケーブルの腐食度を調べるため、

非破壊調査として全磁束法を用いた調査を行った。平成16年度に、14本の内2本のケーブルに対してすでに調査を行った記録がある。本調査では、過去の調査と同位置での調査に加えて、14本全てのケーブルに対して全磁束法による腐食度調査を実施した。さらに、目視点検により、断線等の破損状況を確認した。以下、ケーブル調査の結果をまとめる。

① 目視点検の結果、断線は左岸側では殆ど確認されていないが、右岸アンカーレイジ付近に集中しており、平成16年には確認できなかった断線が新たに発見(又は発生)された。

② 今回の全磁束法による腐食度調査結果における平成16年と同位置での腐食進行程度は、約0.1%増加を示しており、腐食の進行は、ほぼ安定していると判断される。

③ ケーブル各部分の中でもアンカー前面部の腐食度が特に高い数値を示しており、ソケット前面部の腐食率と比べると、約3.6～6.4%となり、腐食が進行しているものと推定される。

④ 当該ケーブルの健全時の全磁束測定値が不明であるため、調査対象ケーブルの中で、最も良好な腐食度を示す8番ケーブルのソケット前面部測定値を、経験上約1～2%の腐食度と推定した場合、アンカー前面部は、約5～8%の腐食度と推定される。

⑤ 腐食度からケーブル強度を推定すると、アンカー前面は約25～35%の強度低下の可能性がある。一方、ソケット前面は1～2%の腐食度と考えると、10%以下の強度低下と予想される。

⑥ 腐食度の高い部位と断線の集中している部位は一致しており、断線の主な原因は腐食によるものと推測される。

⑦ アンカー前面における断線及び腐食等が著しい結果となったのは、長期間地中に埋設されたことにより、腐食の発生しやすい環境であったことが主な原因とみられる。

表2-1 全磁束法による腐食度調査結果

ケーブル 番号		測定位置	測定腐食度 (%)	推定腐食度 (+1.5%)
右岸上流側	1	アンカー前面 (推定腐食度の 平均：6.6%)	5.3	6.8
	2		4.4	5.9
	3		4.6	6.1
	4		4.3	5.8
	5		5.6	7.1
	6		5.1	6.6
	7		6.4	7.9
	7	ソケット前面	0.1	1.6
右岸下流側	8	アンカー前面 (推定腐食度の 平均：6.2%)	3.6	5.1
	9		5.7	7.2
	10		5	6.5
	11		3.7	5.2
	12		4.8	6.3
	13		4.8	6.3
	14		5.5	7.0
	8	ソケット前面	0	1.5

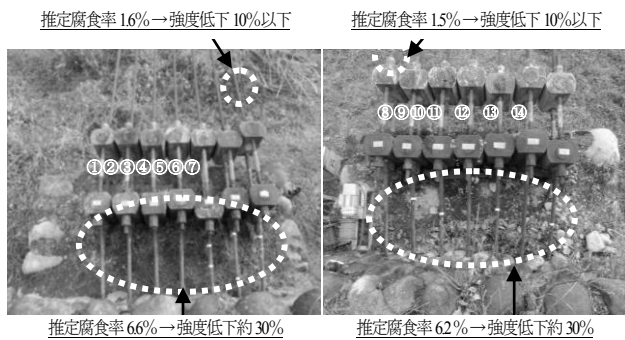


図 2-5 ケーブルの強度低下の推定（左：上流、右：下流）

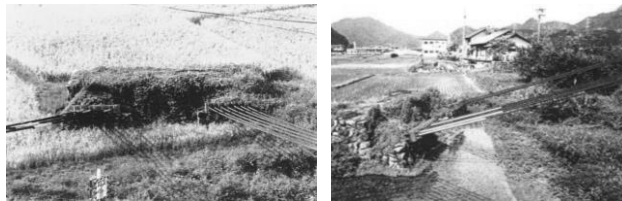


図2-6 アンカー付近の埋設状況（平成9年撮影）

3. 耐震診断の検討

(1) 検討概要

美濃橋の現況に対して地震時における安全性の照査を実施する。検討対象とする地震動は、レベル1及びレベル2とし、3次元非線形梁モデルを用いた、時刻歴応答解析を実施するものとする。



図 3-1 塔柱と粗石コンクリートの接合部

(2) 耐震性能の考え方

本検討で目指す耐震性能は、大規模地震時（レベル1およびレベル2地震時）において、人命が確保できる性能とする。そのため、目標とする耐震性能を、大規模地震時に構造物が倒壊しない性能を有するものと定める。

(3) 条件整理

構造物の寸法および配筋条件は、現地計測の結果および探査結果を基に寸法を決定する。また、粗石コンクリートのボーリング調査の結果、本橋梁の主塔基部と粗石コンクリートの接合部は、塔柱が40cm程度埋まっているだけであるため、剛結とは見なせず解析モデルに配慮が必要であることがわかった(図3-2参照)。

(4) 解析モデル

a) 橋梁全体のモデル化

解析モデルは図3-3に示すように3次元の梁モデルとし、主塔の柱部材のみ非線形梁要素とした。さらに、主塔の

壁はシェル要素でモデル化し、粗石コンクリートは剛体要素とし、下端には地盤バネを設けた。

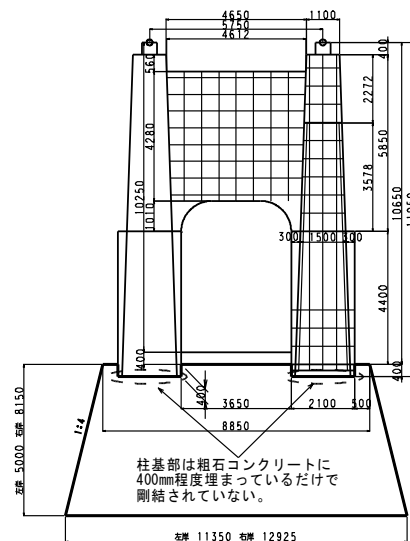


図3-2 主塔と基礎の寸法および配筋概要図

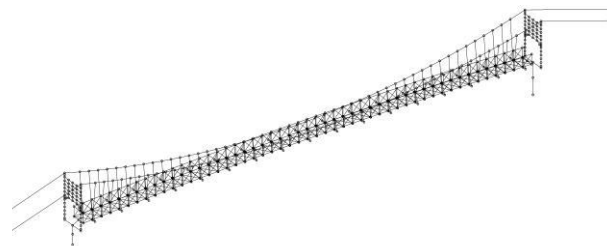


図3-3 解析モデル 全体図

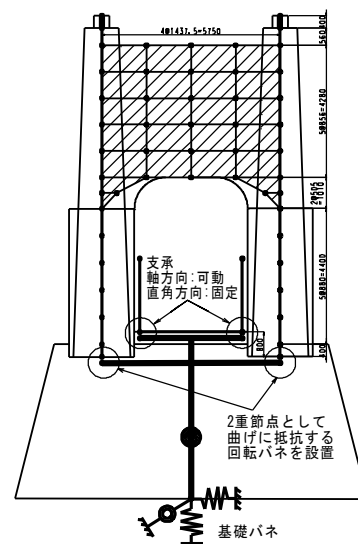


図3-4 解析モデル主塔と粗石コンクリートの詳細図

b) 柱基部と粗石コンクリートの接合部のモデル化

主塔基部と粗石コンクリートの接合部はが剛構造ではないことから、図3-4に示すように接合部の境界条件を回転バネとし、そのバネに非線形特性を与えることで対処した。

c) 回転バネの非線形特性の設定

主塔基部の曲げモーメントが小さく、底面が全圧縮となる範囲ではバネ値は一定であるが、ある程度曲げ（軸力の偏心量： e ）が大きくなると圧縮力が打ち消される領域が発生し、接触面積が徐々に小さくなる。その結果、回転バネ値が小さくなり $M-\theta$ 曲線の勾配も小さくなるという非線形性を示す。

具体的な算出方法を図3-5に示す。

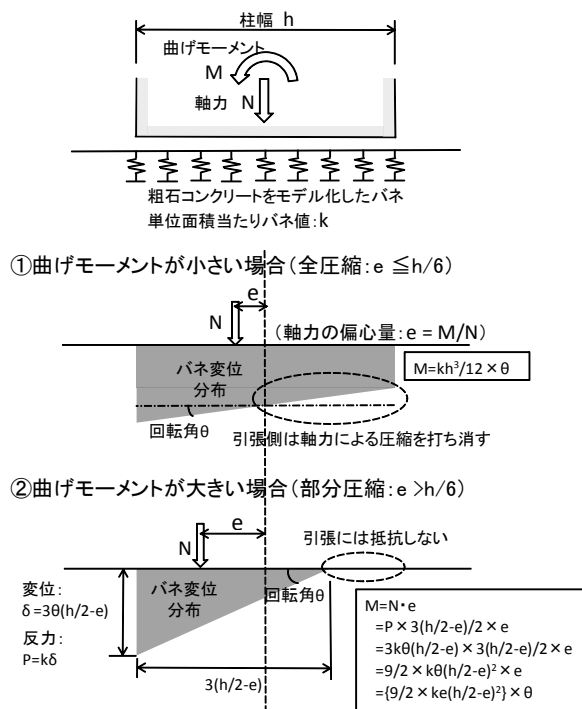


図3-5 回転バネの算出

図3-6に設定された非線形特性（ $M-\theta$ 関係）を示す。
計算上の $M-\theta$ 関係は曲線であるが解析上は下図点線にて示すようにテトラリニア曲線にてモデル化する。

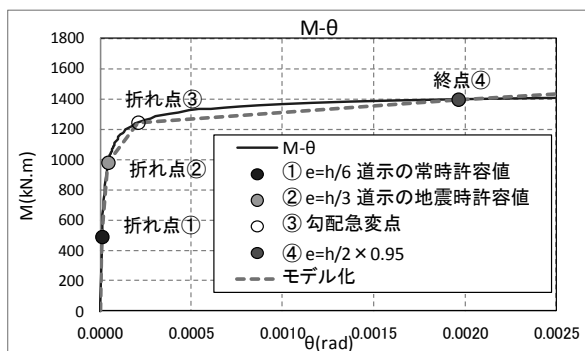
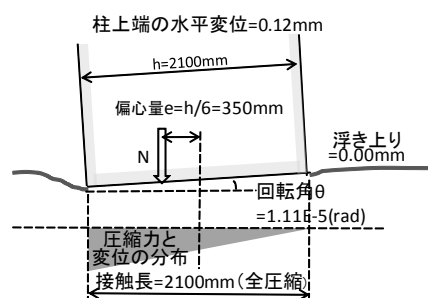


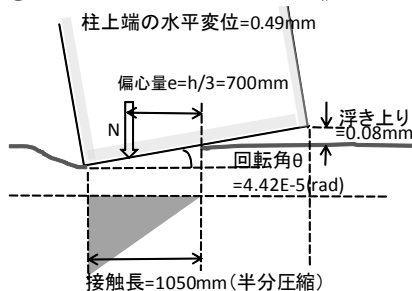
図3-6 $M-\theta$ 曲線の算出結果とテトラリニア曲線の設定

$M-\theta$ 関係の折れ点は、 $e=h/6$ 、 $e=h/3$ 、勾配急変点の3点とし、勾配急変点以降の直線は $e=h/2 \times 0.95$ の点を通るように設定する。各折れ点位置での柱基部の変形状態を図3-7に示す。

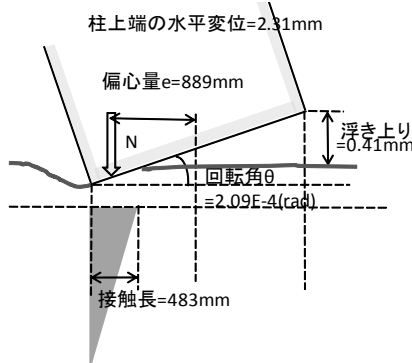
折れ点① $e=h/6$ 道示の常時許容値



折れ点② $e=h/3$ 道示の地震時許容値



折れ点③ $e=889\text{mm}$ 勾配急変点



終点④ $e=h/2 \times 0.95\text{mm}$

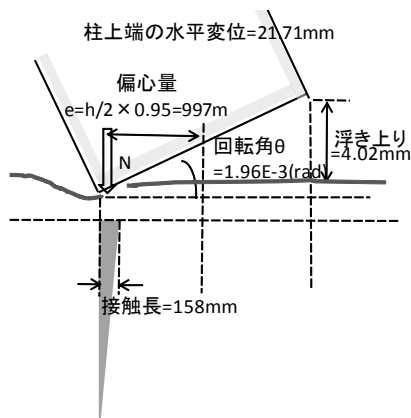


図3-7 テトラリニア折れ点における接触状態の詳細図

(5) 入力地震動

道示V耐震設計編のI種地盤波とする。レベル1を1波、レベル2タイプIとIIをそれぞれ3波の計7波となる。また、橋軸方向解析と直角方向解析の両方を実施する。

(6) 照査項目および照査結果

耐震性能照査箇所および照査結果の一覧を表3-1、図3-8に示す。

表3-1 照査項目および照査結果一覧表

			レベル1	レベル2	
				タイプⅠ	タイプⅡ
橋軸方向照査	①安定照査 柱と粗石コンクリート 接合部	転倒照査	○	△	△
		粗石コンクリート 圧縮応力度	○	○	○
		粗石コンクリート 柱水平方向の 押抜きせん断応力度	○	○	○
	②安定照査 粗石コンクリート	転倒照査	○	—	—
		滑動照査	○	—	—
		地盤反力度照査	○	—	—
	③柱の照査	曲げモーメント せん断力	○	×	×
		せん断力	○	×	○
	④ケーブルの照査	張力	○	○	○
		張力	○	○	○
橋軸直角方向照査	①安定照査 柱と粗石コンクリート 接合部	転倒照査	ラーメン構造なので転倒しない		
		粗石コンクリート 圧縮応力度	転倒しないので実施しない		
		粗石コンクリート 柱水平方向の 押抜きせん断応力度	○	○	○
	②安定照査 粗石コンクリート	転倒照査	○	—	—
		滑動照査	○	—	—
		地盤反力度照査	○	—	—
	③柱の照査	曲げモーメント せん断力	○	×	×
		せん断力	○	×	×
	④ケーブルの照査	張力	○	○	○
		張力	○	○	○
橋軸直角方向照査	①安定照査 柱と粗石コンクリート 接合部	転倒照査	○	○	○
		粗石コンクリート 圧縮応力度	○	○	○
		粗石コンクリート 柱水平方向の 押抜きせん断応力度	○	○	○
	②安定照査 粗石コンクリート	転倒照査	○	—	—
		滑動照査	○	—	—
		地盤反力度照査	○	—	—
	③柱の照査	曲げモーメント せん断力	○	×	×
		せん断力	○	×	×
	④ケーブルの照査	張力	○	○	○
		張力	○	○	○

凡例

○	許容値以下であるため、安全
△	安全とみなすかの判断が分かれる
×	許容値を超えるため、対策が必要
×	許容値を超えるが、構造物の倒壊に影響しない
—	道示の規定により、実施しなくてもよい

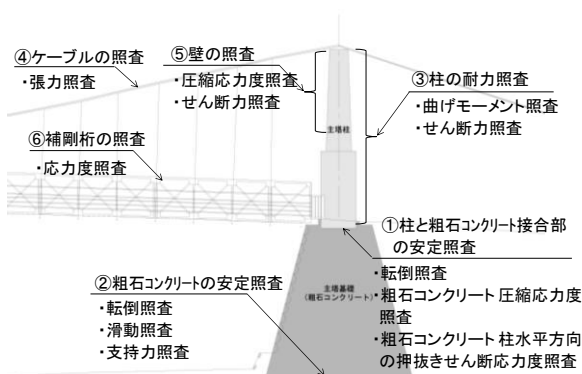


図3-8 照査箇所

(7) 柱基部と粗石コンクリート接合部の安定照査

前述の耐震照査項目の中で、構造物の倒壊に最も寄与する柱基部と粗石コンクリートの接合部の安定照査について詳述する。なお、本安定照査は、橋脚直接基礎の転倒に対する照査手法を用いるものとする。

a) 照査ケース：転倒の照査は以下の3種類の許容値に対

して実施する。

①道路橋示方書の地震時許容値($e=h/3=700\text{mm}$)による照査。

②M-θ関係勾配急変点($e=889\text{mm}$)による照査。

③鉄道基準の限界転倒速度($V_u=0.725\text{m/s}$)による照査。
注) e:軸力作用位置の柱中心からの偏心量、h:柱幅

b) 照査結果：結果の一覧を表3-2に示す。

表3-2 転倒照査結果一覧

ケース番号	許容値による照査 (軸力作用位置の柱中心からの偏心量)		限界値による照査 (限界転倒速度)
	①	②	③
照査基準	道示の許容値 偏心量 $e=h/3$	道示の方針に沿った許容値 M-θ 曲線上の 勾配急変点	鉄道標準 重心の限界転倒速度 V_u
許容値	$e=h/3=700\text{mm}$	$e=889\text{mm}$	$V_u=0.725\text{m/s}$
判定結果	レベル1	×	○
	レベル2	×	○

①②の道路橋示方書の方針に沿った偏心量による照査ではレベル2においては転倒する危険性があると判定されるが、③の鉄道基準の限界値を用いた照査ではレベル2でも転倒しないと判定される結果となった。

なお、①②の照査における、柱と粗石コンクリート接合部の非線形バネ M-θ 関係に解析の応答値を重ね合わせた結果を図3-9に示す。

レベル1地震動の応答値(△)は転倒と判断される勾配急変点以下、レベル2地震動の応答値(□◇)は勾配急変点以上の領域に分布することがわかる。

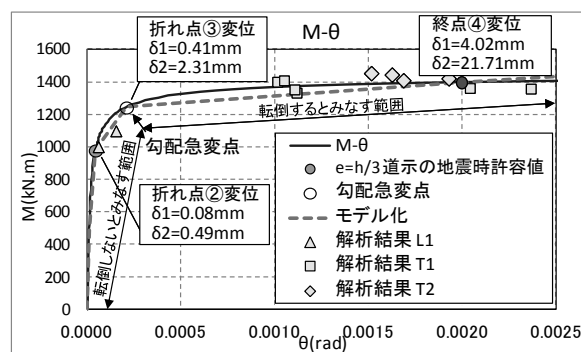


図3-9 非線形バネ (M-θ 曲線) と転倒の照査

また、図3-10に示す柱下端の浮上り量 (δ1) と柱基部の回転による柱上端の水平変位量 (δ2) を図3-10のグラフ内に表記した。レベル2地震動時においてもδ1=4.0mm、δ2=21.7mm程度の変位量であることがわかった。

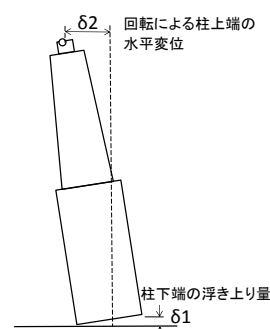


図3-10 柱の回転による変位量

(8) 考察

耐震診断および修理方針の検討について、現時点で得られた知見を以下に示す。なお、紙面の関係で詳述できなかった内容についても記載する。

①主塔基部と粗石コンクリートの接合部が剛結されていない橋梁の複雑な動的挙動を、接続バネの非線形を考慮することで精度よく再現することができた。

②橋脚の転倒照査については、照査基準の違いにより異なる結果が得られた。道路橋示方書の許容値の観点からは転倒防止のための補強が必要であるという結果であった。しかし、本構造物が文化財であり、補強を極力減らすことも重要であるという事情を考慮すると、限界値による照査結果を採用し、転倒による補強を行わないという選択も考えられる。

③橋脚の耐力照査については、レベル1地震動では曲げ耐力およびせん断耐力に関して許容値を満足する結果となった。これは、本橋が建設された大正5年以降に同地方で発生した震度5相当(レベル1弱)の地震動に対しても大きな損傷が見られないことから、妥当な結果であると判断することができる。

④一方レベル2地震動については、曲げ耐力およびせん断耐力に関して許容値を満足しない結果となった。特にせん断破壊については、構造物の倒壊が急激に生じるおそれのある破壊形態であり、文化財としての価値を損ねない補強工法の選定も含めて、せん断補強の必要性が議論される必要がある。

⑤架橋位置近傍で記録に残る最大規模の地震は美濃橋建設前の明治24年(1891年)に発生した濃尾地震である(表3-3)。これは当時の記録から震度6程度と考えられるが、これを現在の地震動に当てはめるとレベル1相当であると判断できる。したがって、これよりも大きな地震でも安全性が確認できれば、レベル1で想定する数十年に一度という頻度よりもある程度長期間安全である可能性が高いといえる。

そこで、レベル1地震動の1.5倍の地震動で照査を実施し、耐力照査を実施したところ、曲げ、せん断ともに許容値を満足することが確認できた。よって、本構造物はレベル1地震動の1.5程度の地震動までは安全であることがわかった。

表3-3 美濃における過去の主な地震

発生年月日	地震名	M/最大震度	震度@岐阜
明治24.10.28	濃尾地震	8 / (6)	(美濃) 裂 (= 震度6相当)
大正5年 美濃橋竣工			
昭和19.12.7	東南海地震	7.9/6	震度5
昭和20.1.13	三河地震	6.8/5	震度4
昭和21.12.21	南海地震	8 / 5	震度5
和23.6.28	福井地震	7.1/6	震度4

昭和36.8.19	北美濃地震	7 / -	震度3
昭和44.9.9	岐阜県中部地震	6.6/-	(郡上) 震度5 (岐阜) 震度3
昭和59.9.14	長野県西部地震	6.8/-	震度3
平成7.1.17	兵庫県南部地震	7.3/7	震度4
平成23.3.11	東北地方太平洋沖地震	9 / 9	(岐阜) 震度3 (美濃) 震度2

4. ケーブル修理方針の検討

(1) ケーブル調査結果による修理方針の再検討

主索ケーブルを2本追加するという既存ケーブル修理方針の根拠は、平成16年に実施した腐食度調査値の最も悪い数値をすべてのケーブルに適用し、ケーブル強度は全体として30%以上低下したものと評価したことである。一方、今回改めて調査した結果、8年間腐食が殆ど進行していないこと、アンカー前面のケーブルの腐食が著しいこと、それに比べるとソケット前面部の腐食度は低いこと等を確認した。

以上の調査結果から、検討委員会では、構造及び形式の変更を伴う既存の修理方針の他、なるべく構造や形式を維持できる現状維持案について重点的に議論された。

(2) 死荷重条件によるケーブルの許容活荷重

ケーブル修理方針の検討で、最も重要なテーマは許容活荷重の設定である。直ちに、現状20人に制限を実施している本橋において、修理以降の許容通行人数を(制限しないことも含めて)どのように設定するかである。

吊橋においてケーブル許容活荷重は、本橋の補剛桁重量(死荷重)が軽くなるほど、許容人数が増える。本橋においては、重量の中、定期的に交換されてきた床組(木材)が示す重量が特に高く、死荷重の約45%を占める。

表4-1 床組の変遷

年代	床組の変遷	橋の機能
昭和8頃	舗板：吊桁方向の舗板(現状と同様)	<建設当時> 車道・歩道の区分が不明確
昭和30代	舗板：吊桁方向の舗板の上に縦桁方向 k に幅員が狭い舗板を渡す。 縦桁：φ(h)140-150mm推定	
昭和40代	舗板：縦桁方向の舗板を外し、従来の吊桁方向の舗板のみ。 縦桁：φ(h)200mm推定	<大正12> 路線バス開通自動車通行
昭和43頃	舗板：舗板の両端に笠木を取付ける。縦桁：φ(h)200mm推定	
昭和50代	舗板：GLより舗板が低い	<昭和31> 新美濃橋建設に伴い、路線バス運行停止 <昭和40代> 自動車通行禁止、歩道橋専用へ
昭和58～平成9	・縦桁を2パネル分渡し、舗板の両端に笠木を取付ける(現状と同様) ・実測図から径200の/杉材と推定	
平成10～21	・工事記録は無いが、写真等から、構造や並べ方の特徴は現状と同様である。杉材丸太で、φは前より太いと思われる。 ・図面によって丸太径(h)の270、200、290の4通り存在	
平成22～現在	・平成22年工事の丸太規格：φ300以上 / h=270 / 米松(現状の丸太)	

今回、床組の変遷履歴を調べた結果、過去の取替え工事を実施する中、徐々に重くなってきたことが確認された。図面等記録に残っている最初の丸太径は200mmであるが、現状の丸太径は300mm以上(高さ270mm)であり、道路との接合部においては、舗板の削取が施されている。

以上のことから、想定されるケーブルの補強方式に対して、下記4ケースの死荷重条件によるケーブルの許容荷重を照査した。その結果を、表4-2に示す。

＜ケーブル照査の死荷重ケース（丸太径）＞

ケース①：径320mm（現状丸太径）

ケース②：径250mm（平成24年照査）

ケース③：径200mm（過去記録における最小丸太径）

ケース④：径160mm（縦桁として応力上必要最小限）

表4-2 ケーブル修理方針と死荷重条件による許容荷重（人）

ケーブル補強方式	抵抗張力の計算	死荷重ケース(丸太径 mm)			
		φ 320	φ 250	φ 200	φ 160
【案①】現状7本+新規2本	$75t \times (2本 + 0.7 \times 7本) = 517t (5066kN)$	1310	1534	1665	1752
【案②】現状7本維持	$75t \times 0.7 \times 7本 = 365t (3596kN)$	152	327	415	502
【案③】現状7本+アンカー前面部修理	$75t \times 0.9 \times 7本 = 472t (4625kN)$	808	1217	1354	1441

注 1: 現行設計基準の活荷重 200kg/m²の満載は、2.9m×113m×200kg/m²/60kg=1092人に相当する。

注 2: ケーブル安全にもっとも厳しい中央部に 200 kg/m²の分布活荷重を載荷する条件(安全側の照査)とした。

注 3: 網掛けは、200kg/m²を満載しても余裕があるので許容値に達するまで200+αとして人数を計算したもの。つまり、この範囲は、交通規制無しである。

(4) アンカー前面部修理方法の検討

検討委員会では、ケーブル修理方針としてアンカー前面部だけの交換又は補強となったことを受け、次のステップとしてアンカー前面部修理をどのように行うかについて検討した。具体的には、仮アンカー設置を伴う方法として、アンカー前面ケーブルを取替え、元の位置に復元する案（案A）と、取替え後の新ケーブルを施工上利便な位置に再設置する案（案B）が検討された。また、仮アンカーの設置を行わずに、ソケット金具から前方に補強用の金具を設置し、腐食部を補強する案（案C）を共に比較、検討した。その結果、案Aを基本として、既存アンカー躯体内部を極力解体せずに、ケーブル定着用の削孔を行うことを基本方針とし、今後詳細検討を行うこととした。この場合の力学的メリットとしては、既存アンカー躯体において、構造的に最も安定する（と思われる）位置へ定着が可能な点が挙げられる。以下、その概要を示す。

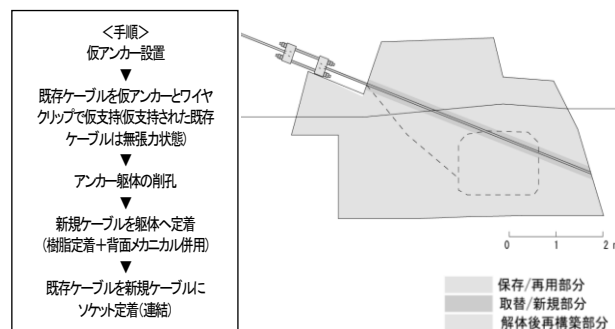


図4-1 アンカー前面部修理の概要（推奨案）

(3) ケーブル修理方針の推奨案

検討委員会では、ケーブル修理の3つの比較案（表4-2）を提示し、各案における構造的特徴（許容荷重）、文化財的価値、景観への影響、施工性と費用、維持管理面の特徴等を比較した。その結果、右岸アンカー前面部の修理（案③）を基本方針として決定した。また、現状の丸太が当初より明らかに太くなっていることについて指摘し、重量の軽減を図るべく指導がなされた。

表4-3 主索ケーブル修理方針の比較検討

項目	ケーブル補強案（通行制限を行わない）		ケーブル現状維持案（通行制限を行う可能性がある）			
	【案①】2本追加（H16委員会の修理方針）		【案②】現状7本維持	【案③】維持+右岸アンカー前面部の修理	【案④】維持+右岸アンカー前面部の修理	【案⑤】維持+右岸アンカー前面部の修理
概要 ●: 新材	- 既存ケーブルの上部に同仕様の新規ケーブルを追加し、補強する案。 2本追加する新ケーブルにも張力を導入し、旧ケーブルの負担を減らして（T/7→T/9）、安全率向上を図る。 - CE 架設中に、橋梁の全面的修理が可能である。		現状7本のまま、死荷重軽減を図る。	- 腐食、断線が著しいアンカー前面部だけを修理範囲とする。 - 取替える場合は、アンカー躯体への影響（改変等）がある。	- 腐食、断線が著しいアンカー前面部だけを修理範囲とする。 - 取替える場合は、アンカー躯体への影響（改変等）がある。	- 腐食、断線が著しいアンカー前面部だけを修理範囲とする。 - 取替える場合は、アンカー躯体への影響（改変等）がある。
ケーブル強度及び許容荷重 (注1)	・強度: $75t \times (0.7 \times 7本 + 2本) = 517t (5066kN)$ ・許容荷重: 現状の死荷重のまま、活荷重基準 (200kg/m ²) を満足する。 → 交通規制の必要はない。		・強度: $75t \times 0.7 \times 7本 = 365t (3596kN)$ ・許容荷重: 安全率 3.0 を確保するためには、交通規制が必要だが、死荷重を軽減すれば、許容活荷重 (通行人数) は増加する。	・強度: $75t \times 0.9 \times 7本 = 472t (4625kN)$ ・許容荷重: 現状の死荷重のままでは、交通規制が必要だが、死荷重を軽減すれば、交通規制必要ない (丸太径 250mm で OK)	・強度: $75t \times 0.9 \times 7本 = 472t (4625kN)$ ・許容荷重: 現状の死荷重のままでは、交通規制が必要だが、死荷重を軽減すれば、交通規制必要ない (丸太径 250mm で OK)	・強度: $75t \times 0.9 \times 7本 = 472t (4625kN)$ ・許容荷重: 現状の死荷重のままでは、交通規制が必要だが、死荷重を軽減すれば、交通規制必要ない (丸太径 250mm で OK)
文化財的価値 (注2)	・当初の部材を残すことは可能となるが、構造形式の維持は困難となる。		・主索、アンカー部共に当初の部材を残すことが可能となる。	・主索、アンカー部共に当初の部材を残すことが可能となる。	・当初部材は殆どそのまま残り、構造・形式・材料面での保存度も高い。	・当初部材は殆どそのまま残り、構造・形式・材料面での保存度も高い。
景観的影響	・ケーブルの追加による変化、右岸新規アンカーによる変化を伴う。		・当初形式のため、現状からの景観的な変化はない。	・当初形式のため、現状からの景観的な変化はない。	・右岸アンカー付近に多少外観の変化があるが、影響は最小限と考えられる。	・右岸アンカー付近に多少外観の変化があるが、影響は最小限と考えられる。
施工性	・CE 設置の場合は、工事規模、工事費ともに非常に大きい。 ・CE 無しで施工する場合でも、ケーブルクレーン及びキャットウォークの設置が必要となる。		・工事費は低く抑えられるが、維持管理が非常に重要となる。	・工事費は低く抑えられるが、維持管理が非常に重要となる。	・右岸アンカー付近だけの工事、工事費は低く抑えられる。 ・維持管理が重要となる。	・右岸アンカー付近だけの工事、工事費は低く抑えられる。 ・維持管理が重要となる。
ケーブル維持管理	・当初方針通り2本追加を垂鉛メッキとしても、既存ケーブルのメッキや垂鉛溶射は難しい。 ・既存ケーブルと追加ケーブルとの接触部をどうするかが課題。		・グリース塗布等による長寿命化を図る。(メンテナンス周期は約10年)	・グリース塗布等による長寿命化を図る。(メンテナンス周期は約10年)	・グリース塗布等による長寿命化を図る。(メンテナンス周期は約10年)	・グリース塗布等による長寿命化を図る。(メンテナンス周期は約10年)
その他検討事項	・新規アンカー設置における地盤条件の検討が必要となる。 ・CE 無しで施工する場合は、既存ロットの取替えは不可能である。(既存ロットの長さ調整が不可能な場合は、サグ調整はできない。)		・継続的なメンテナンス、交通規制方法を、管理、活用の方針検討が重要となる。	・継続的なメンテナンス、交通規制方法を、管理、活用の方針検討が重要となる。	・ケーブルの劣化防止対策、継続的なメンテナンス方法の確立及び実行が重要となる。	・ケーブルの劣化防止対策、継続的なメンテナンス方法の確立及び実行が重要となる。

(5) 考察

① 橋構造におけるケーブルの力学的安全性の照査では、荷重、形状や寸法、発生応力は相互に密接な関係にある。本橋においては、床組の荷重条件とケーブル修理方針との関係（構造的な意味）を明確にすると同時に、当初の設計荷重が不明確な状況でも様々な状況証拠（歴史的事実）を総合して、本橋の構成要素の構造的意味と歴史的意味を共に考慮した修理検討を可能にした。

② ケーブル修理方針の前提条件の一つは、腐食度から推定したケーブル強度の信頼性の担保である。使用中の吊橋において、ケーブル調査には限界があり、今回は可能な限りの調査を行ったものである。今回推定したケーブル強度に対し今後修理工事の過程で、現物ケーブルの引張り試験等を実施し、再確認することが望ましい。

③ ケーブルの修理方針によって、担保できる安全性はもちろん、耐久性（寿命）が大きく変わる。現状の美濃橋においては、過去の維持管理に起因すると思われる破損も見受けられる。このような経過を踏まえて、今後、定期点検・観察（モニタリング）に関する詳細マニュアル、チェックポイントを定めることが望ましい。

5. まとめ（調査・修理検討を進める上で感じたこと）

(1) 調査計画から目的、手法、途中対応に対する段取り：歴史的建造物の調査では、調査過程での影響を最小限にするための調査手法を選択することが必要となる。特に、歴史的建造物の場合は、美濃橋のように設計図書が存在せず、仕様が不明な場合が多い。その場合でも非破壊調査を中心に限られた手法で最大の情報を得るための工夫が必要である。そのためには、調査計画過程で調査目的を明確にすると共に、各段階で柔軟に対応が求められるように様々な想定を行い、多角度からの検討が重要であることが、今回の調査でも確認できた。

(2) 文化財修理技術者と各技術分野の専門家との協力関係：近代化遺産の特徴の一つとして、その規模が大きいことと同時に、多様な材料と複数の構造、技術が複雑に結合した場合が多いということが挙げられる。美濃橋の調査、検討においても、文化財修理技術者と橋梁専門家、ケーブル及びコンクリート材料の専門家等、各分野の専門家が知恵を集めて検討を行うことで、事業を進めることが可能である。

(3) 文化財保存と安全性確保の両立：土木遺産は現役として利活用している場合が多く、修理・改修を行う際は、現行法規によって安全性を確保することが厳しく要求さ

れる。そのため、多くの土木遺産が老朽化すると撤去される。建築の場合は、建築基準法の中に、歴史的価値があるものに対し適用除外事項を定めているが、土木建造物の場合、様々な構造を持ち、それぞれの関連する法規制も複雑で、特別適用等の制度的部分は不十分である。その中で、美濃橋の検討では、個別建造物に要求される性能に合わせた修理目標を設定することで、安全性の確保と共に文化財的価値を保持することが可能であると確認した。

(4) 事業目標の共有（文化財保存と建造物活用）：美濃橋のような現役土木遺産の修理検討を行う際は、管理主体、コンサルタント、市民、学術専門家等で保存と活用の方針において意見が異なる場合が多い。使用する側の意見を組み入れつつ、技術的根拠に基づいた数多くの議論を重ね、意見の収束を図ることが望まれる。

6. 終わりに

本稿では美濃橋の保存修理検討において、最も重要なテーマとして調査、検討してきた、「耐震診断」と「主索ケーブルの修理検討」を中心に、検討過程と課題についてまとめた。

今後、耐震補強については、主塔の炭素繊維補強の必要性を含めて、再度検討を行うものである。なお、主索ケーブルについては、先述したように図4-1の推奨案を中心に詳細検討を進めていく予定である。さらに、平成26年度には補剛桁の詳細調査等の検討を行い、詳細設計に取り組む予定である。

謝辞：本事業は、多くの人々の尽力で現在も進めております。極めて専門的な調査において協力くださったジオフロント(株)、東京製鋼(株)、コンステック(株)をはじめ、事業を支えてくださっている皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 美濃市：美濃橋保存修理基本設計業務報告書、平成25年3月
- 2) 美濃市：美濃橋保存修理調査及び耐震診断業務報告書、平成26年3月
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編、平成24年3月
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ共通編・Ⅳ下部構造編、平成24年3月
- 5) 鉄道総合技術研究所：鉄道建造物設計標準・同解説基礎建造物・抗土圧建造物 平成24年1月
- 6) 鉄道総合技術研究所：鉄道建造物設計標準・同解説耐震設計 平成24年9月

(2014.4.7 受付)