

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420650

研究課題名(和文) 稼働下にある産業遺産、土木文化財の保全に関する研究

研究課題名(英文) Study on conservation of industrial heritage and civil engineering property under operation

研究代表者

五十畑 弘 (ISOHATA, Hiroshi)

日本大学・生産工学部・教授

研究者番号：40386082

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、稼働下にある産業遺産や土木遺産について、構造物や施設としての本来の機能維持と、文化財価値の継承の関係について分析を行い、その補修、補強や維持保全あり方の考察を真正性、完全性の視点から行った。

国内外の世界遺産に登録され、あるいは重要文化財に指定された産業遺産、土木遺産を対象に調査を行い、稼働下にある歴史的構造物や施設の保全のあり方に対する指針となる有用性の高い知見が得られた。

研究成果の概要(英文)：In this study, the cultural value and conservation of structures under operation of industrial heritage and civil engineering heritage have been examined and considered. Researches including field survey were made for cases operating industrial facilities and civil engineering structures registered as World Heritage site or designated as Important Cultural Property in abroad and Japan. In the research, outline of structures and facilities, current state of operation and history of restoration and reinforcement after the completion of structures and facilities were focused as well as management status by administrator in charge of the operation. Based on these findings, inheritance of cultural values of the property were analyzed and discussed from the viewpoint of authenticity and integrity. The result of this study is that useful knowledge indicating the direction of preservation of increasing industrial heritage and civil engineering heritage under operation has been obtained.

研究分野：構造、鋼構造、橋梁、土木史、維持保全

キーワード：土木文化財 稼働下の土木構造物 維持保全 重要文化財 世界遺産 オーセンティシティー

1. 研究開始当初の背景

近年、歴史的・文化的価値を有するインフラ施設が、国の文化財に指定され、土木学会などで評価、選奨されている。また、国土整備の行政における歴史的公共構造物等の保存・活用や、地域活性化のための近代化産業遺産群における指定がされ、保全事業やそれらを核とした地域活性化事業が増加しつつある。さらには世界遺産の暫定リストに明治日本の産業革命遺産として稼働中の産業施設を含む遺産が加えられた。

これらの稼働下の構造物や施設が、従来からの文化財の中心である神社仏閣などの建造物文化財に加わることで、文化財の価値概念が変わりつつある。今後、老朽インフラの長寿命化の維持管理において、歴史的・文化的価値の視点による保全に対する実務的な判断が求められる場面が増えることが予測される。

土木構造物、産業遺産などの稼働下にある文化財の維持管理について、実務的な方法論に関する指針を示すことが求められている。

2. 研究の目的

本研究の目的は以下4点である。

(1) 稼働遺産の事例収集

国重要文化財、登録文化財の他、世界遺産に登録された産業遺産、土木構造物等で、大規模な補修、補強がされた事例のうち代表的なものについて、文化財価値、維持管理の来歴等を明らかとする。

(2) 事例に対する既存評価の収集

各事例に対して、世界遺産などの国際的基準及び、既往の歴史的鋼橋の調査(土木学会「鋼構造シリーズ 14 歴史的鋼橋の補修・補強マニュアル」他)との対照をしつつ維持保全について分析を行う。

(3) 保全と文化財価値の関係性の分析

代表的な保全事例について、補修、補強の工法と真正性、完全性といった文化財価値の関係性について分析・考察を行う。

(4) 保全の方向性の抽出

(1)~(3)を踏まえて、調査事例の中から、具体的な補修、補強など保全の方向性を抽出する。

3. 研究の方法

本研究は、すでに一定の文化財評価のされた国内外の産業遺産、土木構造物を調査対象として選定する。

国内では、重要文化財に指定された土木構造物で、近年重要文化財の現状変更手続きを経て維持、保全が実施された事例、あるいは、重要文化財で維持保全が計画をされた土木構造物を中心とする。

海外では、世界遺産に登録された中で、創

建当時以後、顕著な維持保全が実施されたものとする。

選定した事例に対して、事前の文献調査、現地において目視調査、管理者、研究者などの関係者からのヒアリングを行う。

調査によって得られた結果を、事例相互に比較、分析を行い、文化財価値の継承と保全の関係について考察を行う。

4. 研究成果

(1) 調査結果の概要

内、国内外の調査対象のうち代表的な事例について述べる。

旧揖斐川橋梁

旧揖斐川橋は1886年1月に開業した東海道線の大垣・岐阜区間で、揖斐川を渡る場所に架設された200ft 錬鉄プラットラス5連で構成される鉄道橋であった。1908年に鉄道橋としての役割を終えた後も、撤去されずにそのまま現位置にとどまり、軌道を撤去してRC床版を設けて、自動車・歩行者用に転用された。今日では2輪車、歩行者専用橋として利用されている。

旧揖斐川橋は、1891年に発生した濃尾地震によって、下部工の一部に損傷を受けた。震災後にレンガ製の円形ウェルの橋台とレンガ製の橋脚は補修され、その後も耐震補強の手が加えられている。近年では、1970年代にレンガ橋脚の躯体上部をコンクリートで外側から巻き立てる補強がされた。

上部工については、全体的に腐食が進行しているが、とくに支点付近の下弦材は腐食が著しい。また、斜材の一部が錬鉄特有の層状の剥離が見られ、剥離の隙間に浸入した水によって腐食が進んでいる。部材の一部に自動車の衝突を原因とする変形も見られる。

支点付近の腐食箇所の補修方法は、部材交換は行わず、現況以上の腐食進行を防ぎ補剛材を付加する補強法がとられた。

層状の剥離を起こしている斜材については、隙間の錆を撤去して金属パテを充填する。変形した部材については、塑性変形をとまなう形状修復はしない。塗装は、オリジナルの塗膜を部分的に残し、その他はブラスト処理(Sa2 1/2)の上、ジンクリッチプライマー、エポキシ、ウレタンの塗装を施す。



写真1 補強された布引水源地五本松堰堤

布引水源地下水道施設（五本松堰堤）

布引水源地下水道施設は1900（明治33）に竣工したわが国で最初の重力式コンクリート堰堤で、堤長110.3m、堤高33.3mで高欄が付く。

阪神淡路大震災で堤体の一部に損傷を受けて、1995年～97年に災害復旧工事が行われた。復旧工事では堤体にグラウトを注入し、基礎岩盤にはカーテングラウトを施工した。2001年～5年にはダムの水を完全に抜いて全面的な補修、耐震補強工事が行われた。

耐震補強は、設計水平震度0.15で堤体上流の端部で引張応力が発生することから補強コンクリートが施工された。補強コンクリートの表面には白御影石が貼られている。

永代橋、清洲橋

清洲橋は、1928年3月に竣工した橋長186.7m、中央支間長91.4m、幅員25.9mのチェーンの鋼3径間自碇式吊橋である。

永代橋は、1924年12月に起工、1926年12月に竣工した。橋長184.7m、中央支間長100.6m、幅員25.6mの鋼3径間カンチレバー式タイドアーチ橋である。



写真2 清洲橋に設置されたダンパー



写真3 永代橋に追加設置された水平支承

1995年の阪神淡路大震災後に改訂された新耐震設計基準では、構造物の応答が弾性限界を超えない耐震性能を備えるレベル1と、非常に強い地震動を想定し、これに対して致命的な崩壊に至らない耐震性能を備えるレベル2の両方が満足すべき耐震性能の条件とされた。

新基準による耐震性能を照査した結果、清洲橋、永代橋は、レベル1に対しては、両橋ともに応力超過は認められなかったが、レベル2については、多くの箇所では応力超過が発生するという評価結果が得られた。

清洲橋については、橋軸方向の地震水平力に対して、補剛桁、塔直下の橋脚上の支承、および橋台上の支承で応力が超過する結果が示された。この対策としては、地震荷重を集中させずにできるだけ分散させるために、上部構造と橋台の間にダンパーを設置することとされた。上部構造の地震力を、水平荷重を分担していない可動支点橋台にも負担させる変更で、1,500 kNを8本のダンパーを設置した。

永代橋は、橋門構、上横構の一部、アーチリブ、橋脚上の支承などで応力が超過することが示された。特に、橋軸方向に地震力はすべて中間橋脚に集中することから、固定中間橋脚の支承が損傷し、橋脚も損傷し残留変位も大きくことが予測された。

対策として上部構造全体で地震エネルギーを吸収するために、固定支点の中間橋脚への地震荷重の集中を避け、もう一方の可動支点の中間橋脚にも地震荷重を負担させる変更を行った。2つの中間支点を固定化する方法を採用することとし、既存支承の横に、水平反力のみを負担する支承が追加された。



写真4 白岩堰堤右岸側岩盤補強のアンカーとケーブルボルト

立山砂防（白岩堰堤、本宮堰堤）

白岩堰堤は、重力式コンクリート造の堰堤で、1939（昭和14）に竣工し、2009年に重要文化財に指定された。右岸側の部分が本堰堤と副堰堤で、左岸側は方格枠による護岸、盛土工の複合構造である。堰堤高さ63m、副堰堤まで含めた全体の落差は100mを超える砂防堰堤として国内有数の規模である。

白岩堰堤は、1939（昭和14）年の竣工以来、数多くの保全の手が加えられてきた。竣工12年目の1951年には、本堰の水通部の天端石の取替えが行われ、第2副堰堤の補強とともに第3、第5副堰堤が追加され、さらに左岸側の盛土部の導流堤が新たに追加されている。

近年の補強としては、1999年から6年間にわたり施工された本堰付近の岩盤の安定化

工事がある。岩盤内側に掘削した2本のトンネル内部から合計900本のアンカーとケーブルボルトが岩盤斜面の表面近くまで施工され、不安定な岩盤を抑え込んでいる。

本宮堰堤は、源頭部の白岩堰堤に対し下流側に位置し、中流域で流下土砂を貯留する役割をもつ。本宮堰堤も度重なる洪水、転石による修復の連続で、当初の本堤に近接した第一副堤は破壊され、少し下流側に再建されているほか、補修が継続されている。



写真5 アイアンブリッジのアーチ頂部付近のクラックと補強

アイアンブリッジ（イギリス）

アイアンブリッジはスパン30.63mの鑄鉄アーチで、1781年に竣工した。当初は鉄や石炭・石灰石を川の対岸へ輸送するために使用されていたが、現在は歩行者の通行用に利用されている。

これまでのアイアンブリッジ本体の保全については、1784年に最初のクラックが報告されて以来、200年以上に亘り大規模な補修を含めた保全が継続的に行われている。

文献上の記録とともに、現状のアイアンブリッジに残る数々の補修、補強、変状から過去の保全の状況が克明に読み取ることが可能である。アイアンブリッジ本体の現状は、鑄鉄部材を中心に変形、腐食、破断といった明白な劣化の傾向が見られる。

ビスカヤ橋（スペイン）

ビスカヤ橋は供用下にある運搬橋で世界最古で、スペイン北西部のビスカヤの西部に位置する。桁長164m、桁下空間は水面から45mある。兩岸の鍊鉄塔の頂部のサドルで支持された鋼縫り線のケーブルが左岸側の斜面の途中に、右岸側は地上でアンカーされる。

1937年のスペイン内戦によって右岸側アンカレッジが爆破され桁が落下したが、4年後の1941年に鋼によって再建された。従って、塔のみが1893年のオリジナルで桁、ケーブル等は再建時に更新されている。

橋体は全体に河口部に近く海塩の影響で、腐食による部材の減厚が進行している。

ゴンドラからの輪荷重は桁で支持されるレールに伝わり、レールから桁の定着を経てハンガーから主ケーブルへと流れる。このゴンドラの輪荷重を直接受ける部分は、供用下

の構造物として荷重の変動も大きく安全を確保し、機能維持の管理上重要な部分である。

このためハンガーケーブルの定着部のほとんどの部材は、新規な部材に取り換えられボルトで取り付けられている。

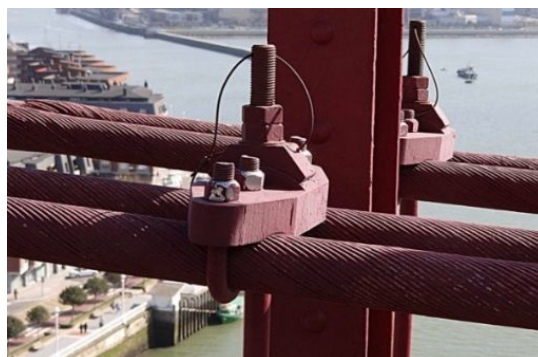


写真6 新規交換されているハンガーローブ上端の定着部

リドー運河（カナダ）

リドー運河は、カナダのオタワとオンタリオ湖畔のキングストンを途中リドー川や、湖を經由して結ぶ全長202kmの運河である。1832年の開通以来、現在でも観光用として使われ、北米で生きた水路として機能を継続する唯一の運河である。規模はヨーロッパの運河よりも大きく、蒸気船の通行を目的として建設された世界で最初の運河のひとつで、幅7.9mの船まで航行できる。現在、国指定の史跡と歴史と自然の保護区となって、カナダ公園管理局により運営、管理がされている。

リドー運河の両端のオンタリオ湖とオタワ川は標高差23mであるが、その経路は丘陵地帯であるために、キングストンからオタワまでの運河縦断線形は、一旦50m上昇し、その後73m下降する。この標高差のために、27か所にロックステーションが設置され、全部で49基（内2基後年追加）の閘門が設置されている。全ルート最高標高点付近では、長さ16kmに及ぶ落差16mの急流の渓流個所に高さ19mの石積アーチダムが築かれて、4つの閘門で落差95m分を克服している。

運河の維持保全については、供用下にある水路として管理者のパークス・カナダがゲートの開閉などの運営とともに施設全体の維持保全にあたっている。ゲートなどの設備の補修には、直営の工場があり、交換の部材などが作成されている。

1831年建設の47箇所（閘門）の木造ゲートは、すでにオリジナルのものではないが、鋼製に変更された1箇所を除き建設当時と同じ木造で定期的に交換されている。ゲートの開閉は、3箇所については油圧に変更されているが、その他はすべて人力によっている。閘門の石材については、閘室の側壁の石材接合面や、ゲートの軸を受ける部分でクラックの修復がされているほか、石積を全面的にコンクリートで取替えた箇所や、ゲートを受け

る位置を変更したものもある。

閘室壁面の石材は劣化が見られるのに対し、アーチダムの石材は変状が見られない。オリジナルの形状を変更したものとしては、3基連続する建設当時の閘門を廃止し、すぐ脇に運河のバイパス化を図り、ここに3つの落差を1つの閘門で統合し、開閉も油圧式を採用した個所がある。

(2) 考察

歴史的橋梁の保全の各事例を通じて、共通的な配慮がされている事柄を抽出すると以下のとおりである。

歴史的価値の尊重

供用下にあることにより構造的な性能が満たされることは当然であるが、同時に文化財としての価値を尊重する補修、補強への配慮がいずれの事例で行われている。このために、どの事例も、保全計画を策定するにあたり、建設の背景、適用された技術・意匠・工法などの歴史的価値に関わる情報が収集、蓄積されている。

調査事例では、程度は異なるが、既存の構造部材を可能な限り残存させる配慮がなされている。これは清洲橋のダンパー追加や、永代橋の水平支承の追加のように、部材を取り替えることよりも、部材追加で構造性能を維持する保全方法に表れている。必ずしも建設当時の工法によらずに、新たな代替措置など、各時代の知識や技術を駆使した対応の可能性を残すことは必要である。

構造性能の確保

橋梁構造の要求性能を確実に満たすことは、通常エンジニアリングの範囲として実践されている。重要な点は、技術基準の要求性能の確保を文化財の保全と整合性をとりながら対策を講じる点にある。

美濃橋のコンクリート塔にカーボン繊維を巻き付けることで形状変更なしに、耐震性を付与する方法などでは、構造性能確保と歴史的価値継承の折り合いを見出す工夫がされている。撤去されれば永遠に失われてしまうような橋梁については、霞橋のように部分的であっても移転保存は意味がある。

永代橋、清洲橋は、部材を取り換えることなしに、新たな部材追加によって耐震基準でレベル2を満たすように構造性能が確保された好例である。ただ、白岩堰堤のように建設当時の工法である粗石コンクリートの再現は、構造性能確保の観点から困難であり、今日のコンクリート、その他の工法を採用することはありうる。一方では、鋼橋ではリベット継手を施工面から、高力ボルトで代えることはありうるが、現在の基準に適合する新たなリベット施工の開発の可能性も探る必要がある。

ミニマム・インターベンション

旧揖斐川橋のコンクリート被覆された橋脚では、内部からの耐震補強の将来における可能性を考慮して既存部分の改変は最小限

に留めたように、部材追加により撤去を抑えることは重要である。

完全性の保持

各部ごとへの配慮と同時に、全体の価値を損なうことの無いように部分と全体のバランスを配慮することが求められる。例えば、永代橋では、追加される水平支承の桁下空間に与える影響を考慮したデザインの検討がされている。

(3) 結論

価値と保全の関係

稼働下にある構造物は、本来機能の継続のために構造の改変はあり得る。調査対象では、例外なく各時代において大きな補修、補強、改変の手が加えられていることが確認された。これは、文化財であっても寿命は有限であり、特に供用下の歴史的土木構造物では時間とともに劣化があることを前提とした保全が必要であることを示している。

イギリスのアイアンブリッジでは地中梁が追加される他、アプローチの石積アーチの中込土の軽量化や破損部材の補強が随所に行われている。また、ポンテカサステ水路橋では、19スパンのうち1スパンは鋼アーチに新規取替えがされている。ピスカヤ橋では、当初の錬鉄製の桁および、ケーブル全体が建設後48年目の1941年の再建で取り換えられているほか、直接輪荷重を受けるハンガーケーブルの定着部近傍は相当数が新規材料に交換されている。

真正性と構造機能性の関係

フォース鉄道橋では大規模な交換は多くはないがブレース部材やリベットなどの交換がされている。リドー運河では47基の当初からの閘門のゲートはすべて後年取替え、改造がおこなわれている。

このように本来機能継続のために、調査対象の世界遺産では部材の取替えが選択されているが、いずれもオーセンティシティの要件は満たしていると評価されている。

これは国内の事例である重要文化財においても同様である。旧揖斐川橋梁では、レンガ積橋脚がコンクリートで補強をされ、上部工の腐食や損傷箇所はそれぞれ補強がされており、今後も補修が計画されている。美濃橋、長浜大橋、清洲橋、永代橋、勝鬨橋などの供用下にある橋梁でも機能継続の補修補強がされている。防災に直結する白岩堰堤では、劣化や損傷に対する補修の連続である。

土木構造物は、建設後の保全が、機能継続を支えていることを考えれば、評価の対象は、建設時の構造物そのものに加えて、その後の補修、補強の行為が含まれると考えることもできる。建設後の保全の手が付加されて、有形文化財の形を継続しているという意味で、文化財の価値に繋がっているという解釈である。

木造建築においては、「多様な文化」の存在を認めることでオーセンティシティの解

釈の拡張がおこなわれてきた。これと同様な文脈で、「多様な構造物」として文化財の価値の整理が必要となる可能性があると考えられる。ただ、歴史的土木構造物の無制限な改変に拡大解釈がされないための方策も十分固めておく必要がある。

保全の方向性

歴史的土木構造物全体に対して、補修、補強に関する事項をやや具体性をもって述べることで歴史的土木構造物の保全の方向性を示す。

土木構造物はそれが機能することより損傷、損耗が発生することを前提として維持管理が行われている。供用下にある歴史的土木構造物は、時間とともに劣化をするという認識のもとに、予防保全の考えを入れた保全計画とする必要がある。

主要部材の補修、補強では、鉄、鋼構造においては、腐食、リベット脱落などは、傷んだ箇所を部分的に、最小範囲で一体的に取り換えることを基本とする。部材を構成するフランジやウェブの腐食個所のみを交換をパッチワーク、サンドイッチ板当て継ぎなどの工法である。イギリスの1818年建設のコールポート橋はこの工法によって、地域交通の要請から通行荷重を引き上げたことは極めて貴重な供用下にある歴史的土木構造物の保全事例である。

傷んだ箇所のみを部分的に取り換えるという原則を常に採用することは、実務的には難しい。力学挙動が支配する部位では、新旧部材間での応力分担の信頼性が不明確である場合もある。傷んだ箇所の取替えに加え、新たに部材や装置などを追加する構造系の変更でオリジナル部材の負担を軽減させる方法も許容する。アイアンブリッジのアーチ両支点部をつなぐ地中梁の追加や、清洲橋のダンパーの追加はこの例である。

構造体の中で荷重変動を受ける部分や、特に時間とともに材質上の劣化条件が厳しい個所については、ピスカヤ橋の軌道付近の部材やリドー運河の閘門のゲートが常時交換されているように、既存部材の修理を基本としつつも、構造物の安全確保、機能継続のために同じ設計の代替品の適用を許容されるべきである。

劣化部分はそれ以上の劣化の進行速度を遅らせることに留め、部材を追加することで、オリジナル部材の負担を軽減して追加部材との協働で、全体として構造機能を継続する方法もあり得る。これは清洲橋や永代橋のL2耐震補強の方法の同じ考え方であるが、個々の構造特性に応じて部材を追加することで応用ができる補強、補修方法である。

劣化部分は荷重の作用下では、相応に応力を負担しており、この部分を単純に取り換えることは、常時荷重の作用下にある主部材では困難であり、残る健全部分の負担軽減になりにくい。このため部材を追加して、これに作用力をバイパスさせ、健全部の負担を軽減

し、全体として耐力の維持を図る。美濃橋のケーブル補強方法で反映されている方法であるが、これも応用可能な補強、補修方法として保全の一つの方向性を示している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2件)

五十畑 弘、供用下にある歴史的土木構造物に関する調査 ~世界遺産、重要文化財の事例を対象に~、土木学会論文集D 2分冊、査読有、72巻 No.1、2016、120-139、https://www.jstage.jst.go.jp/browse/jscejsce/72/0/_contents/-char/ja/H.ISOHATA、A.KUREBAYASHI、A.MORI、Seismic reinforcement of historical steel bridges in Japan、Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering History and Heritage、査読有 Volume 169/ Issue EH3、2016、111-122、<http://www.icevirtuallibrary.com/toc/jenhh/current>

〔学会発表〕(計 3件)

H.ISOHATA、A study on the Conservation of Operating Historical Bridges -Recent experiences in Japan-、Proceedings of International Conference of Structure and Architecture、査読有、2016.7.28、Guimaraes (Portugal) <http://www.icsa2016.arquitectura.uminho.pt/>

H.ISOHATA、Maintenance of Civil Engineering Heritage -Experience of Repairs and Strengthening in Japan-、Proceedings of 14th East Asian Structural Engineering Conference、査読有、2016.1.8、Ho Chi Minh(Vietnam)、<http://medevent.vn/vie/Pages/Events/EA-SEC14/>

五十畑 弘、稼働下にある土木文化財の評価に関する調査~世界遺産の事例を中心として~、土木学会土木史研究講演集 35巻、査読無、45-54、2015.6.20、熊本大学(熊本市) <https://www.jsce.or.jp/library/open/pr oc/maglist2/00902/index.htm>

6. 研究組織

(1)研究代表者

五十畑 弘 (ISOHATA Hiroshi)
日本大学・生産工学部・教授
研究者番号：40386082