ISSN 1349-0605

森林総合研究所

交付金プロジェクト研究 成果集 34

# 既存木橋の構造安全性を維持する ための残存強度評価技術開発

独立行政法人 森林総合研究所 2011.12 「交付金プロジェクト」は、平成13年度に森林総合研究所が独立行政法人となる にあたり、これまで推進してきた農林水産技術会議によるプロジェクト研究(特別研 究など)の一部、および森林総合研究所の経費による特別研究調査費(特定研究)を 統合し、研究所の運営費交付金により運営する新たな行政ニーズへの対応、中期計画 の推進、所の研究基盤高揚のためのプロジェクト研究として設立・運営するものであ る。

この成果集は、交付金プロジェクト研究の終了課題について、研究の成果を研究開 発や、行政等の関係者に総合的且つ体系的に報告することにより、今後の研究と行政 の連携協力に基づいた効率的施策推進等に資することを目的に、「森林総合研究所交 付金プロジェクト研究成果集」として公表するものである。

# ISSN1349-0605

森林総合研究所交付金プロジェクト研究成果集34

 「既存木橋の構造安全性を維持するための 残存強度評価技術開発」
 発行日 平成23年12月31日
 発 行 独立行政法人森林総合研究所 〒305-8687茨城県つくば市松の里1番地 電話 029-873-3211(代表)

# 序文

「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」(平成22年法律第36号)が第174回通常 国会において成立し、5月26日に公布、10月1日には施行された。この法律は、公共建築物を手始めと して木材の利用を促し、それを供給する森林に手入れが施されることによって、地球温暖化の防止、循環 型社会の形成、国土保全や水源かん養・生物多様性保全など森林の持つ多面的な環境保全機能の発 揮、中山間地域における経済の活性化を図ろうとするものであり、その目的は、森林・林業・林産業に係 わる研究開発独立法人である森林総合研究所の目標とまさに合致するものである。

公共建築物には、経済的合理性はもちろん、社会的公共財として高い信頼性と長期に亘る耐用性が 求められる。したがって、この法律の目標達成のためには、木材を利用することの優位性や適切な利活用 方法を広報するばかりではなく、科学的裏付けを持った計画設計基準と維持管理に有効となる現存性能 の評価方法を整備しておく必要がある。

本研究「既存木橋の構造安全性を維持するための残存強度評価技術開発」では、過酷な屋外環境に 曝される公共構造物である木橋を研究対象に取り上げ、木質部材とその接合部の残存強度推定のため の非破壊評価技術を開発して、実用に供されている構造体の性能評価に適用し、実大破壊実験によりそ の有効性を検証した。また、破壊実験後の木橋を再組立することを通して、既存木橋の補修や補強に応 用できる技術を提案した。

本研究は、森林総合研究所の運営費交付金によるプロジェクト研究として平成 19 年度から平成 21 年 度までの3カ年にわたって実施したものであり、森林総合研究所はもちろん、地域の試験研究機関、大学、 そして民間企業が相互に連携して取り組んだものである。ここに本書を刊行することによって、本研究で 得られた知見を、広く関係者の参考に供する次第である。最後に、金沢工業大学環境・建築学部教授 本田秀行博士には、外部評価委員としてご指導ご鞭撻を賜った。ここに深く感謝の意を表し、厚く御礼申 し上げる。

平成 23 年 12 月

独立行政法人 森林総合研究所 理事長 鈴木和夫 研究課題:既存木橋の構造安全性を維持するための残存強度評価技術開発

# 目 次

研究の要約	1
けいめに	11
	11
第1章 既存木橋の部材及び接合部の非破壊強度評価技術の開発	12
1-1. 既存木橋に適した非破壊評価技術の検討	12
1-2. 初期腐朽検出技術の開発	14
1-3. 非破壊評価技術適用の実際	15
1-4. 部材および接合部の破壊実験による検証	17
第2章 既存木橋の構造強度評価技術の開発及び検証	19
2-1. 再組立てした木橋の経時変化	19
2-2. 非破壊的手法による構造体の調査	21
2-3. 破壊載荷実験方法の検討	23
2-4. 破壊載荷実験の実際	25
2-5. 破壊載荷実験結果の検討	26
第3章 既存木橋の補修・補強技術の調査及び開発	28
3-1. 補修・補強技術の調査と事例の収集	
3-2. 補強部材の強度調査	
3-3. 新しい補修技術の開発	
3-4. 既存木橋の再組立と改修	

記鉤	家真		38
1-1	付1	ボンゴシの曲げおよび縦圧縮試験データの精査結果	44
1-2	付1	化学発光による木材初期腐朽検知の概要	47
1-3	付1	ボンゴシ製木橋の超音波伝播速度累積頻度曲線の経時変化	∠48
	付 2	ベイマツ製再組立木橋の超音波伝播速度	53
1-4	付1	破壊載荷実験後の部材調査(腐朽菌)	55
	付 2	回収した部材の破壊試験	57
2-1	付1	主な実験対象となる既存木橋の設計図書抜粋と仮設橋台、	
		部材配置組立て図	59
	付 2	再組立木橋の径時変化(重量、変位、気象データの関係)	66
	付3	再組立した既存木橋の全体形状	93
	付4	再組立木橋の Web カメラによる観察	97
2-2	付1	破壊載荷した既存木橋の振動特性	101
2-3	付1	破壊載荷実験方法の検討	105
2-4	付1	破壊載荷実験の実際	110
	付 2	破壊載荷した既存木橋の全体形状と変位、部材のひずみ	116
	付3	破壊載荷実験後の部材損傷状況とその活用	137
2-5	付1	破壊載荷実験後の部材切断面と含水率分布	145
	付 2	既存木橋の数値解析	150
3-1	付1	各地の木橋調査結果	154
	付 2	既存木橋の補修・補強事例	172
3-2	付1	補強した部材の強度	174
3-3	付1	FRP 樹脂板貼り付けによる耐候性向上	178
	付 2	屋根・部材カバーの効果	180
3-4	付1	破壊載荷実験後の部材を使った既存木橋の再編と	
		暴露実験計画	186
3-4	付 2	既存木橋再編組立て部材の補修と補強	194

# 研究の要約

#### I 研究年次及び予算区分

平成 19 年度~平成 21 年度(3 か年)

#### Ⅱ 主任研究者

主査:

研究コーディネータ(木質資源利用研究担当) 林 知行 取りまとめ責任者:

構造利用研究領域 チーム長(接合性能評価担当) 軽部正彦

#### Ⅲ 研究場所

森林総合研究所 本所 広島県立総合技術研究所 林業技術センター 奈良県森林技術センター

#### Ⅳ 研究目的

木橋の点検法や補修技術は近年ようやく整備され始めたが、現存する木橋には、構造安全性上の問題を抱えたものが相当数存在すると思われる。とはいえ、多額の費用が掛かるため架け替えができないものについては、健全度を的確に判断し補強・補修する技術を早急に開発する必要がある。

本研究では、既存木橋の健全度を判断するため、構造物を破壊することなく部材及び接合部、構造体 の強度を調査する技術の開発に取り組んだ。また既存木橋を安全に使い続けるため、劣化した部位、あ るいは全体を補修・補強する方法を調査検討し、技術の開発に取り組んだ。

#### V 研究方法

本研究では、木質部材の劣化のために撤去された既存木橋を主な研究素材として活用した。

この木橋は、広島県の山野峡県立自然公園内に 1990 年 5 月に竣工した 36m と 18m の 2 径間から成 る「かっぱ橋」である。2002 年に補修されたものの、木質部材の腐朽による深刻な強度低下が推定され、 2003 年 12 月に鋼橋への架け替えに伴って撤去された。全ての部材と部品は、広島県立総合技術研究 所 林業技術センター(当時 広島県立林業技術センター)に移譲され、丁寧な解体の後に同センター内 に運搬され屋内保管された。

森林総合研究所は撤去直前の2003年11月より移転に関わり、2003年12月には現地での調査、2004 年3月には同センターでの部材の非破壊調査を実施した。また本研究開始に先立って、2007年3月に は同センター内実験場に第1径間(36m)を再組立した。本研究開始後は、2007年9月に第2径間(18m) を再組立て架設し、2008年6月には第1径間(36m)に対しての破壊載荷実験、2008年11月には破壊 実験した第1径間(36m)から傷みの少ない部材を集めて再編木橋(18m)を架設、2010年3月には第2 径間(18m)と再編第1径間(18m)に対して補修・補強を意図した構造的改修を実施した。

取り組んだ研究方法の概要は以下の通りである。

# 第1章 既存木橋の部材及び接合部の非破壊強度評価技術の開発

木質部材及び接合部に関する非破壊調査方法について文献調査し、既存木橋に適用可能な方法を 抽出し、それを適用し組み合せた評価技術について検討した。また、木質部材のごく初期の腐朽を検出 する方法を開発した。これら非破壊評価技術について、主な研究素材とした既存木橋、並びに各地の実 際に使われている木橋に適用し、問題点や可能性について検証した。さらには非破壊評価技術による判 定結果を、部材および接合部の破壊実験によって検証した。

#### 第2章 既存木橋の構造強度評価技術の開発及び検証

主な研究素材とした既存木橋について、再組立後の経時変化を測定・観察し、劣化進展の兆候やその発見の可能性、解体し屋内保管された影響について検討した。構造性能について、載荷実験、振動実験など、非破壊的手法による調査を行い、劣化部位の検出や健全度診断の可能性について検討した。 先例の無い実大破壊載荷実験については、安全な実施方法について予備的検討を実施した。再組立した既存木橋(第1径間:36m)に対して載荷による破壊実験を実施し、その結果と事前の非破壊評価結果の関連性について検討した。

# 第3章 既存木橋の補修·補強技術の調査及び開発

国内の既存木橋について実施された補修・補強事例を収集し、その技術的なポイントや効果について 検討した。別途に確保済みであった既存木橋の部材(2006 年に部材交換により撤去された広島県用倉 橋の高欄に対して補強を行い、その部材の強度を破壊実験により調査した。また劣化しやすい既存木橋 部材の耐久性を向上させる新しい補修技術の開発に取り組んだ。さらに、これらを総合する形で既存木 橋(第2径間:18m及び再編第1径間:18m)の再組立と改修方法を検討し、それを実行した。

# (研究計画表)

研究課題		実施年度	Ŧ	HD 사사
		平 20	平 21	担当
第1章 既存木橋の部材及び接合部の				構造利用研究領域
非破壊強度評価技術の開発				木材改質研究領域
			_	愛媛県林業技術センター
第2章 既存木橋の構造強度評価技術の				構造利用研究領域
開発及び検証				複合材料研究領域
				広島県立総合技術研究所
				林業技術センター
第3章 既存木橋の補修·補強技術の				複合材料研究領域
調査及び開発				構造利用研究領域
				奈良県森林技術センター
				福岡大学
				銘建工業株式会社

# VI 研究結果

既存木橋の構造安全性は、非破壊調査とその評価によって判断せざるを得ないが、実際に劣化の生じた既存木橋の判断結果の確かさを検証する機会はこれまで持ち得なかった。本プロジェクト研究では、 実際に 13 年半の供用後に撤去された既存木橋を実験場に再組立し、各種非破壊検査と継続的観察を 実施したのちに、土嚢積載による破壊載荷実験を行い、その残存強度を確認した。

既存木橋を実際に破壊載荷実験した結果、非破壊検査により健全であると推定される部材断面に基づいて構造計算を実施することにより、残存強度を推定できることが確認できた。

また、非破壊検査手法である超音波伝播速度測定により、部材の強度性能が推定できること、その確認には、部材強度低下の生じない程度の局部的破壊試験が有効であること、部材断面内の高含水率部位の検出により強度低下の著しい箇所を推定できることなどが明らかになった。

さらに構造体の破壊起点となるような劣化の著しい箇所は、超音波伝播速度の分布、あるいは継続的 な全体形状測定により、位置がおおよそ特定できる可能性が示された。

以上の実験結果と、国内各地の既存木橋の維持管理状況の調査結果から、構造的配慮により木橋の 耐久性を向上させうることが明らかとなった。

本研究で得られた成果は、土木学会や木橋技術協会が発行する維持管理マニュアルなどを通して、 実際の既存木橋の維持管理、補修・補強に応用される。なお、本成果は木橋以外の大型木質構造物の 維持管理にも応用が可能である。

#### 第1章 既存木橋の部材及び接合部の非破壊強度評価技術の開発

木質部材及び接合部に関する非破壊調査方法について文献調査し、既存木橋に適用可能な方法を 抽出し、それを適用し組み合せた評価技術について検討した。その結果、既存木橋に適した非破壊評価 技術として、外観目視観察、部材内超音波伝播速度測定、部材内応力波伝播速度測定、高周波容量式 含水率測定、穿孔抵抗測定、一定エネルギーでのピン打ち込み深さ測定、部材振動によるヤング率測定、 腐朽菌検出試験、局所環境温湿度測定が抽出された。

また、木質部材のごく初期の腐朽を検出するケミルネ発光を測定する方法を開発した。これにより、強度や密度低下が明らかではない腐朽初期段階を検知する可能性を見出した。

これら非破壊評価技術について、主な研究素材とした既存木橋、並びに各地の実際に使われている 木橋に適用し、問題点や可能性について検証した。その結果、非破壊評価技術を実際の既存木橋に適 用することで、個々の結果指標値、あるいはその組合せによって木橋全体の劣化程度や劣化の進んだ部 位、劣化の進行度合が判定できることがわかった。

さらには非破壊評価技術による判定結果を、部材および接合部の破壊実験によって検証した。その結果、各種非破壊測定が構造全体の性能を評価するための基礎データになり得ること、また、継続した測 定データにより改修や補修の効果を評価し得ることが実験的に明らかになった。

#### 第2章 既存木橋の構造強度評価技術の開発及び検証

再組立てした既存木橋について、経時変化を測定・観察し、劣化進展の兆候やその発見の可能性を 検討した。その結果、既存木橋の健全度を判断する上で、長期的な観測、データの収集が重要な役割を 担うことが判った。特に水準測量による全体形状の継続的な測定は、不具合箇所が検出できる可能性が あり、現場での導入も容易と思われる。 また、非破壊的に構造性能を把握する調査を行った結果、振動実験調査のみで構造物を非破壊的に 安全性評価することは現状では難しいこと、構造形式にもよるが小荷重載荷時の変形量や形状変化を整 理することにより既存木橋の不具合箇所の発見できる可能性があることがわかった。

先例のない実大破壊載荷実験を安全に実施するため、載荷測定方法について、実物や実地での予備的検証、仮設の実大モデルによる具体的検討を行った。さらに、関係者との意見交換・調整を十二分 に行い、破壊載荷実験を安全に遂行する方法を見出した。

その成果を使って、既存木橋の残存強度に相当する耐荷力を調査し、各種非破壊調査手法による調査結果との関係を明らかにするため、再組立した既存木橋に対して土嚢載荷による破壊実験を実施した。 その結果、設計時活荷重の33%にあたる94.4kNで上流側の下弦材が引張破断(一次破壊)し、66%にあたる189.7kNで下流側上弦材が圧壊(二次破壊)し、木橋全体が落下した。

破壊載荷実験による結果と非破壊的に調べた部材・接合部の劣化状況についてその関係を整理し、 供用を続ける既存木橋の安全性を評価する方法について検討した。その結果、高含水率の分布と強度 発現が期待できない劣化箇所の分布は非常に適合していた。より高い精度で既存木橋の残存強度性能 を推定するためには、非破壊で詳細な含水率分布を計測するなど、木部材の表面から内部に至るまで劣 化の分布状況を把握できる非破壊調査技術の開発と、その結果を構造強度に結び付ける数値解析技術 の深化が必要である。

#### 第3章 既存木橋の補修・補強技術の調査及び開発

既存木橋を安全に使い続けるため、木質構造物の劣化した部位、あるいは全体を補修・補強する方法 と事例を調査検討した結果、供用中の原位置で比較的作業が簡単と思われる表面に繊維等を貼付する 方法には、部材あるいは接合部の強度向上を意図したものの他、耐久性向上のための保護膜を目的とし たものがあった。構造形式や状態によって適用可能な補修・補強の技術は異なるが、その事例を蓄積す ることで個々の問題に対処する最適な方法を見出せるようになると思われる。

劣化した既存木橋の部材を使って実際に補強し破壊試験により強度を確認した結果、木材または鋼材を接着して補強することにより、必要な耐力を回復することが可能であることがわかった。ただし、耐力の向上は施工精度の影響を受けることから、既存木橋それぞれの状況に応じて、補強方法と作業性確保の方策を合せて、適用する技術を選択することが肝要である。

既存木橋の劣化した部位あるいは全体を補修・補強するために、不足する耐久性向上のための環境 改善技術として、FRP を接合部へ接着する方法を検討した結果、その効果が認められた。さらに木口面 被覆や上面カバー、屋根の追加等の処置と組み合わせることで、部材および接合部の含水率上昇を抑 制し、既存木橋の耐久性を向上できる可能性が示唆された。

既存木橋を再組立して架設し、長期耐用性を上げるための環境改善処置と部分的な補修、強度回復 措置を試みた結果、環境改善処置についてはその効果を確認できた。他の措置については今後の継続 的な観察を通した検証が望まれる。

# **W** 成果の利活用

木橋を対象に取り組まれた本研究の成果は、木質構造物全般に対して適用できるものであり、日本建築学会・土木学会・木橋技術協会・木材保存技術協会等、各協会の技術指針や制度に積極的に提案して反映させるとともに、国内外の既存木橋関係者の不安を解消するように情報提供して行く。

また本研究で実施して得られた様々な実験データは、参画関係者による更なる解析や検討の基礎デ ータとして活用するとともに、本成果集を通じて公知のものとする。これにより、国内外の研究者・実務者に 対して広く基礎的な情報を提供することで研究が活性化し、既存木橋、そして木質構造全体の構造安全 性維持と、より効果的な木材の利活用に資することを期待する。

なお、愛媛県津島プレーランド内の木橋に関する一連の調査結果が、劣化した木橋を通行止めとする 根拠となり、最終的に掛け替えの判断材料として活用された。

#### WII 今後の問題点

木材を構造体に活用する上で、長期的に強度と安全性を維持・確保することは、重要な課題である。 一般に、木橋は過酷な環境に曝され、一部では落下事故も発生するなど、社会的な不安要素を持った 木質構造体である。また、木橋はひとたび人命にかかわるような問題が発生すれば、責任の所在や補償 について係争となる可能性を持っているものでもあるが、国内外での事例と実績を見れば判るように、木 材とそれを使って創り出す空間の良さを PR 出来る木質構造物である。

本研究は、このような既存木橋がおかれている状況を改善し、維持管理を担当する実務者の悩みを少しでも和らげて、社会における木材の利活用を牽引するフラッグシップ(旗艦)となることを期待して取り組んだものである。しかしながら、本研究によって問題の全てが解決した訳ではない。

以下、現時点で考えられる残された問題点を列挙し、今後の研究進展を期待する。

- 本研究は、3カ年の間、関係者が協力し精力的に取り組んだ成果であるが、主な対象とした下路 式トラス構造を中心として、部材・接合部・構造体の非破壊調査結果と載荷による破壊実験を一例 として結びつけたものにすぎない。判断の拠り所となる調査結果の実績は、今後も追加を重ね、蓄 積の充実が望まれる。数多くの実績に基づく判断は、結果の信頼度が向上し、応用の範囲も広が ることになる。
- 既存木橋の構造形式には、様々なものがあり、そのそれぞれで部材に係る応力状態や全体変形 性状、破壊の形式は異なる。本研究で取り組んだように、供用を続ける既存木橋の残存強度評価 方法は、非破壊調査による部材・接合部・構造体の評価と、全体性能に及ぼす劣化の影響につ いて、構造特性を踏まえ、数値解析等を活用して、総合判断されるものと考えられる。そのため、 検討対象とする既存木橋それぞれについて、本研究成果を引用し参考にしつつも、個別に検討 を加える必要がある。また既存木橋の構造方法や部材形状もさることながら、劣化の要因とその状 況は様々であり、本研究の調査範囲外の事象・状況も存在し得る。そのため、個々の状況に適合 する劣化診断・補修・補強方法は、本研究成果を引用し参考にしつつも、個別に検討を加える必 要がある。
  - 個々の既存木橋で発生する障害は、同種の材料・構造方法から成る他の既存木橋に対して情報 提供され、その障害が回避されることが望ましいが、この重要な情報を共有する基盤は現時点で は存在せず、またその情報の収集・提供は定期異動を余儀なくされる維持管理担当者の裁量に

任されている。インターネット網が発達した現在、情報の発信・拡大の費用は零に等しいことから、 これを利用した枠組が社会的認知に基づいて整備されることが望ましい。また、維持管理の要点 をまとめた資料は、一部自治体や協会等において整備されているが、管理者向けであったり技術 者向けであったりと千差万別である。詳細で精緻な評価法からポイントを積み上げる簡便な判断 法まで、統一された思想の下に整理されて行く必要がある。

- 既存木橋での情報は、今後新設される木橋に十二分に活用され、設置・維持・危険回避を含めた 社会的費用を押し下げることが期待される。優れた構造から成る木橋が長い架橋実績を持つこと は歴史的事実が証明しているが、既存木橋においても架橋以降の履歴を積極的に評価し、点検 や維持管理の負担軽減に繋げる仕組みとして整備されて行くことが望まれる。また本研究では、 維持保全など、既存木橋を使い続けることを前提に研究を進めたが、管理の現場においては、使 用の停止や撤去、架け替えの判断材料として、納得できる評価も求められている。個々の状況は 異なるが、より良い木橋が社会に望まれて架け続けられるよう、研究と実績の蓄積・共有を継続す る必要がある。
- 既存木橋を対象に取り組んだ本研究の成果は、木造住宅を始めとした他の木質構造体にも応用 可能なものである。研究成果を蓄積し判断結果の信頼性を向上させるとともに、適用可能範囲の 拡大を進める必要がある。
- 補修・補強して、現在も暴露試験中の第2径間と再編第1径間については、その補修・補強効果 を検証するとともに、その成果を各地にある既存木橋に応用して行くことが望ましい。またこれらの 木橋は、具体的な教育素材として、点検や調査に当たる人材育成に活用するだけではなく、新し い改修・補強方法を試す素材としても活用するべきである。

# IX 研究発表

第1章

- 加藤英雄、軽部正彦、井道裕史、原田真樹、平松靖、長尾博文、藤田和彦、築山健一(2007):13 年間使用された木造トラス橋部材の超音波伝播法による非破壊調査、日本木材加工技術協会第 25回年次大会(旭川)講演要旨集、89-90
- 2) 原田真樹、加藤英雄、井道裕史、長尾博文、平松靖、宮武教、西村健、軽部正彦、藤田誠、藤田和彦、築山健一(2008):ベイマツトラス橋部材の非破壊測定値の分布性状および劣化との関係、 土木学会第7回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集、119-128
- Takeshi Nishimura; Hideo Kato; Nobuaki Shirai; Takashi Watanabe(2008): Chemiluminescence approach for non-destructive evaluation of early wood decay in high sensitivity, Abstracts and Proceeding of MIE BIOFORUM 2008, 136-137
- 加藤英雄、西村 健、原田真樹、井道裕史、軽部正彦、青木謙治、長尾博文、藤田和彦(2009):13 年の供用履歴を持つ既存木橋の非破壊試験、日本木材保存協会 第 25 回年次大会研究発表論 文集、20-25
- 5) 加藤英雄(2009):部材の非破壊検査技術、日本木材保存協会 第 25 回年次大会研究発表論文集、 78-83
- 6) 原田真樹、加藤英雄、井道裕史、長尾博文、西村健、軽部正彦、藤田和彦(2009):ベイマツトラス橋 周辺の温湿度環境に対する長期測定結果、土木学会 第8回木橋技術に関するシンポジウム論文 報告集、69-76
- 7) 加藤英雄、井道裕史、軽部正彦、原田真樹、宮武 敦、長尾博文、藤田和彦、横尾謙一郎(2009):
  13年間使用された木造トラス橋部材の強度試験、日本木材加工技術協会 第27回年次大会(熊本)
  講演要旨集、87-88
- 8) 加藤英雄(2009):木質構造部材の非破壊評価、日本木材保存協会 第27回木材保存講座テキスト、 15-25
- 9) Takeshi Nishimura, Hideo Kato, Nobuaki Shirai, Takashi Watanabe(2009): Chemiluminescence approach for non-destructive evaluation of early wood decay in high sensitivity, Biotechnology of Lignocellulose Degradation and Biomass Utilization, Edited by Sakka et al., 83-88
- 10) 西村 健(2009):ケミルミネッセンスによる木材初期腐朽の高感度診断と劣化度評価、第4回ケミルミ ネッセンス研究会講演要旨集、20-24
- 11) 西村 健、加藤英雄、白井伸明、渡辺隆司(2010):ケミルミネッセンスによる木材初期腐朽検知の試 みーカワラタケ腐朽材からの化学発光と検出感度一、日本木材学会 大会研究発表要旨集、60、 PN016

# 第2章

- 軽部正彦、長尾博文、林知行、加藤英雄、宮武敦、藤田和彦、築山健一(2007):13年の供用履 歴を持つ木造トラス橋の再組立、日本木材学会大会研究発表要旨集、57、PH012
- 2) 軽部正彦、藤田和彦、築山健一、長尾博文、宮武 敦(2007):13年で架け替えられたトラス木橋の再 組立とその変化、土木学会 第6回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集、113-118

- 軽部正彦、林 知行、新藤健太、青木謙治、藤田和彦、築山健一(2008): 再組立した木造トラス橋の 全重量変化と変形の進行、日本木材学会大会研究発表要旨集、58、PH014、611-612
- 4) 青木謙治、軽部正彦、新藤健太(2008):13 年の供用履歴を持つ木造トラス橋の振動特性、日本木 材学会 大会研究発表要旨集 58、PH015、613-614
- 5) KARUBE Masahiko•MIYATAKE Atsushi•Hideo KATO(2008):Report on the collapse of bridge made with Bongossi in 1999, 10<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering, Proceedings 3-215p.pdf
- 6) 新藤健太、平松 靖、山本幸一(2008):タイ国ワンポーにおいて供用されている木製鉄道橋の概況 調査、土木学会 第7回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集、51-56
- 7) 軽部正彦、林 知行、加藤英雄、宮武 敦、新藤健太、青木謙治、藤田和彦(2008):13 年の供用履 歴を持つ既存木橋の載荷破壊実験、土木学会 第7回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集、 129-134
- 8) 山本 健、花ヶ崎裕洋、藤田和彦、軽部正彦、林 知行、長尾博文、宮武 敦、新藤健太、青木謙治 (2008):13 年使用したトラス木橋の載荷破壊試験、日本木材学会 中国・四国支部大会研究発表要 旨集、16-17
- 9) 軽部正彦(2008):木質構造物の安全性検証について、木材情報、208、5-7
- 10) 軽部正彦(2008):木橋を安全に破壊する方法、Journal of Timber Engineering、85、135-140
- 軽部正彦、新藤健太、青木謙治、加藤英雄、原田真樹、林知行、藤田和彦、山本健、原田浩司、 (2009): 再組立した既存木造トラス橋の載荷破壊試験(その1)全体概要と予備試験、日本木材学会 大会研究発表要旨集、58、H15-1615b
- 12) 山本 健、藤田和彦、花ヶ崎裕洋、軽部正彦、新藤健太、青木謙治、林 知行(2009): 再組立した既 存木造トラス橋の載荷破壊試験(その 2)破壊載荷実験の概要と破壊状況、日本木材学会 大会研 究発表要旨集、58、H15-1630b
- 13) 青木謙治、軽部正彦、新藤健太、林 知行、藤田和彦、山本 健(2009): 再組立した既存木造トラス 橋の載荷破壊試験(その 3) 各部変形とひずみの計測、日本木材学会 大会研究発表要旨集、58、 H15-1645b
- 14) 青木謙治,軽部正彦,新藤健太,林 知行,藤田和彦,山本 健(2009):再組立した既存木造トラス 橋の載荷破壊試験(その4)主要測定点の挙動、日本木材学会 大会研究発表要旨集、58、PH015
- 15) 山本 健、藤田和彦、花ヶ崎裕洋、軽部正彦、宮武 敦、林 知行(2009):再組立した既存木造トラス 橋の載荷破壊試験(その 5)破壊後の部材断面と含水率、日本木材学会 大会研究発表要旨集、58、 PH016
- 16) 軽部正彦、林 知行、加藤英雄、宮武 敦、藤田和彦、山本 健、柳川靖夫(2009): 再組立した既存 木造トラス橋の載荷破壊試験(その 6) 再編組立架設と屋根、カバーの設置、日本木材学会 大会研 究発表要旨集、58、PH017
- 17) 軽部正彦、青木謙治、新藤健太、藤田和彦(2009):13年の供用履歴を持つ既存木橋の裁荷破壊実 験、日本木材学会 木質科学シンポジウム、4、64-65
- 18) 軽部正彦、青木謙治、新藤健太、藤田和彦、山本 健(2009):世界初の実大木橋の破壊実験―壊してわかった既存木橋の残存強度―、独立行政法人森林総合研究所 平成 21 年版研究成果選集、 32-33

- 19) 軽部正彦、青木謙治、新藤健太、藤田和彦、林 知行、加藤英雄、宮武 敦(2009):載荷破壊した 既存トラス木橋実験の結果解析、土木学会 第8回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集、 77-84
- 20) 青木謙治、軽部正彦、新藤健太、林 知行、藤田和彦、山本 健(2009):三次元変位測定システム による木質構造物の大変形測定、日本建築学会 技術報告集、15、31、735-738
- 21) 軽部正彦(2009):第2章 設計のための調査、試験 -4 木質材料の調査、試験、日本構造技術者協会 structure、112、32-35
- 22) KARUBE Masahiko, HAYASHI Tomoyuki, KATO Hideo, MIYATAKE Atsushi, SHINDOU Kenta, AOKI Kenji, FUJITA Kazuhiko(2010): Destructive loading test of a rebuilt wooden bridge served for 13 years, 11<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering, Proceedings 335-336(II)

# 第3章

- 柳川靖夫、川井秀一、林知行:繊維材料による部材接合部の強化(Ⅲ)ポリビニルアルコール繊維 シートの接着と屋外ばくろ後の集成材含水率(2007):日本木材学会 大会研究発表要旨集、57、 PH002
- Atsushi MIYATAKE, Tatsumi KOBAYASHI, Hideyuki HONDA(2008): The Glulam bridges : Last two decades, 10<sup>th</sup> World Conference on Timber Engineering Conference, Proceedings, 2-314p.pdf
- 3) 渡辺 浩、藤田和彦、宮武 敦、佐久間太亮(2008):用倉大橋の地覆と高欄材の健全度診断の検討 例、土木学会 第7回木橋技術に関する論文報告集、111-118
- 4) 宮武 敦、軽部正彦、藤田和彦、柳川靖夫、孕石剛志、渡辺 浩、原田真樹、井道裕史、平松 靖、 長尾博文(2009):既設木橋を用いた各種補修技術とその効果の実験的検証、土木学会 第8回木 橋技術に関する論文報告集、85-90
- 5) 柳川靖夫、宮武 敦、林 知行、藤田和彦、山本 健(2009):FRP による木橋の補修および FRP を接着した集成材接合部の含水率、土木学会 第8回木橋技術に関する論文報告集、91-98

# X 研究担当者

#### 第1章 既存木橋の部材及び接合部の非破壊強度評価技術の開発

<u>加藤英雄</u>、井道裕史(構造利用研究領域 材料接合研究室 主任研究員) 原田真樹(構造利用研究領域 チーム長(非破壊評価担当)) 西村 健(木材改質研究領域 木材保存研究室 主任研究員) 藤田 誠(平19)、田中 誠(愛媛県林業技術センター)

# 第2章 既存木橋の構造強度評価技術の開発及び検証

<u>軽部正彦</u>(構造利用研究領域 チーム長(接合性能評価担当)) 青木謙治(構造利用研究領域 木質構造・居住環境研究室 主任研究員) 新藤健太(複合材料研究領域 積層接着研究室 主任研究員) 藤田和彦、衛藤慎也(平19)、築山健一(平19)、山本 健(平20)、花ヶ崎裕洋(平20)、 川元満夫(平21)

(広島県立総合技術研究所 林業技術センター) 原田浩司(山佐木材株式会社)

# 第3章 既存木橋の補修·補強技術の調査及び開発

<u>宮武</u> 敦(複合材料研究領域 チーム長(集成加工担当)) 長尾博文(構造利用研究領域 材料接合研究室 室長) 平松 靖(複合材料研究領域 積層接着研究室 主任研究員) 渡辺 浩(福岡大学 工学部社会デザイン工学科 准教授) 柳川靖夫(奈良県森林技術センター) 孕石剛志(銘建工業株式会社)

# 既存木橋の構造安全性を維持するための残存強度評価技術開発

はじめに

木橋の架設後点検や補修に関する技術は、最近になってようやく整備され始めたばかりであり、短期 間に集中して多数架設された 1990 年代の木橋の中には、耐久性に対して十分な配慮がなされなかった ものも多い。このような事実から考えると、現在供用中の木橋には、部材及び接合部の劣化等、耐久性及 び構造安全性上の問題を抱えたものが相当数存在していると考えられる。今後 5~10 年の間に腐朽等の 劣化の進行は更に深刻さを増すものと思われる一方で、多額の費用を掛けて建設された木橋を簡単に 架け替えることができない現実を考えると、既存木橋の健全度を的確に判断してその状態に応じた補強 を行なう技術あるいは劣化の進行を防いだり遅らせたりするための補修技術を早急に開発する必要があ る。事実として、落下の危険性から緊急的に仮設構造によって支えられた木橋が、その安全性の検証も 回復も出来ぬままに年月を重ね続けているものがある。また維持管理方法が確立できていない不安から、 木橋を撤去して鋼橋に架け替えられたものも出て来ている。

これまで森林総合研究所は、木造住宅をはじめとして、大規模木造建築、木橋、木製道路施設等の調 査を実施してきた。その結果、木材腐朽劣化の原因究明や強度低下など、個々の要素について明らかに なりつつある。しかしながら、組み合わされた構造体の残存強度がどのようなものになるか、実証するチャ ンスは持ち得なかった。

本研究では、経年劣化のある実際の木橋を使って部材及び接合部の非破壊強度評価技術を開発し、 その構造体を破壊実験することで残存強度を的確に推定し得る構造強度評価技術の開発を目指した。 併せてこの劣化部位を有効に補修・補強する技術の開発にも取り組んだ。

これらの成果は、既存木橋のみならず、大断面集成材を使った既存大型木造建築物、更には木造住 宅を含めた全ての木質構造物の構造安全性確保とその維持・管理・保全に資するものであり、循環型社 会における木質資源の有効利用に繋がるものである。

# 第1章 既存木橋の部材及び接合部の非破壊強度評価技術の開発

#### 1-1. 既存木橋に適した非破壊評価技術の検討

#### ア 研究目的

既存木橋を破壊することなく、その部材及び接合部の劣化部位について、詳細な分布状況並びに木 材物性・強度の変化を検出し、その健全度を判断できる既存木橋に適した非破壊評価技術を見出す。

#### イ 研究方法

木質部材及び接合部に関する非破壊調査方法について文献調査し、既存木橋に適用可能な方法を 抽出し、それを適用し、結果を組み合せる評価技術について検討した。非破壊調査方法の抽出には、非 破壊試験用語(日本工業規格 JIS Z 2300: 2003)および木材工業ハンドブックを用いた。

非破壊調査結果を基にした評価技術の検討には、既往文献のデータとして1999年に落橋したトラス部 材から採取したボンゴシの曲げおよび縦圧縮試験データを用いた。

また、2008 年度に定期点検が実施された神の森大橋(愛媛県砥部市:1997 年架設)の各部位の温湿 度測定を実施し、劣化外力のモニタリング方法を検討した。

# ウ結果

非破壊調査方法は、非破壊試験用語において 10 種類、木材工業ハンドブックにおいて 12 種類が紹介されていた。この中から、既存木橋の部材および接合部の非破壊評価に適当と考えられる条件として、 測定が簡易であること、再現性に優れていること、材の損傷が軽微であること、既往の報告で複数の実績があることを設定し、いずれかの条件に該当するものを抽出した結果、目視試験、超音波伝播試験、応力 波伝播試験、高周波容量試験、穿孔抵抗試験、ピン打ち込み試験、振動試験を抽出した。

ボンゴシの曲げおよび縦圧縮試験データを精査した結果、密度と曲げヤング係数、密度と曲げ強度、 曲げヤング係数と曲げ強さ、密度と縦圧縮強度との間に、危険率1%で正の相関が認められた。

神の森大橋で観測した温湿度データを元に、腐朽菌を対象とする劣化外力を検討した。予測する因子 としては含水率とし、現時点では含水率を比較的安価かつ簡便に連続してモニタリングすることはできな いことから、含水率との関係が深い気温と相対湿度から含水率を推定した。その結果、2007年12月の調 査で異常が認められた箇所の推定含水率は、他の箇所と比較して顕著な違いは認められなかった。また、 箱形アーチを保護する小屋根内部の推定含水率は、露出部と比べ約4%低く、部材保護の効果が確認 できた。

#### エ 考察

上記結果に挙げた以外の非破壊調査方法として、木材の強度や耐久性に関する研究で実施されてい る実験方法から、劣化の主要因である腐朽菌を検出する試験を追加した。

ボンゴシの強度を推定するには、密度および曲げヤング係数をパラメータとするのが適当と考えられる。

木橋の各部分で測定した温湿度データから木材含水率を推定することにより、劣化外力の強度を評価 可能と思われる。また部位毎のデータは、それぞれ異なる傾向を示したことから、構造上重要な部分はも ちろん、できるだけ多くの局所環境について測定することが劣化外力を推定する際の判断には有効だと 考えられる。

# オ 今後の問題点

検討対象とした木橋は人道橋が中心だったため、車道橋のような大規模木質構造物に適用可能な非 破壊評価技術は、適用の可能性を探るのみに留まった。今後、研究対象として対応可能な木橋において の検証が望まれる。

# カ 要約

既存木橋に適した非破壊評価技術として、外観目視観察、部材内超音波伝播速度測定、部材内応力 波伝播速度測定、高周波容量式含水率測定、穿孔抵抗測定、一定エネルギーでのピン打ち込み深さ測 定、部材振動によるヤング率測定、腐朽菌検出試験、局所環境温湿度測定が抽出された。

# キ 引用文献

- 1) 非破壊試験用語:日本工業規格 JIS Z 2300:2003
- 2) 森林総合研究所: 改訂 4版 木材工業ハンドブック(2004)、丸善、1232p.
- 3) 藤田誠、村口良範、飯島泰男:腐朽ボンゴシ材の残存強度(2002):木材学会誌、Vol. 48, No. 1, pp. 32-37

(加藤英雄、原田真樹)

# 1-2. 初期腐朽検出技術の開発

# ア 研究目的

既存木橋の安全性を脅かす腐朽劣化を、木質部材の強度低下を引き起こす前のごく初期の段階で検出する技術を開発する。

#### イ 研究方法

スギ無欠点小試験体を用いて、強制腐朽期間が異なる縦圧縮試験を実施した。腐朽初期段階を検知 する方法として、密度およびケミルネ発光を検討した。強制腐朽期間は、0ヶ月、1ヶ月、3ヶ月とした。試 験体の強制腐朽操作は、培地に対して縦置きと横置きで行った。

#### ウ結果

縦圧縮強度と密度の変化は、強制腐朽操作 1 ヶ月では認められなかったが、3 ヶ月では認められた。 一方、ケミルネ発光は、強制腐朽操作 1 ヶ月から認められた。また、強制腐朽操作の違いは、認められな かった。また、ケミルネ発光の程度が含水率に依存することがわかった。

#### エ 考察

ケミルネ発光を測定することにより、強度や密度の低下が生じる前に腐朽箇所を検出判定できることがわかった。

# オ 今後の問題点

ケミルネ発光を既存木橋の非破壊評価に適用する場合、測定装置を架設現地に搬入することができないため、測定対象物から切片を採取し、持ち帰らなければならず、また発光の程度が含水率および菌種に依存する。

#### カ 要約

ケミルネ発光を測定することにより、強度や密度低下が明らかではない腐朽初期段階を検知する可能 性を見出した。

#### キ 引用文献

なし

(加藤英雄、西村 健)

# 1-3. 非破壊評価技術適用の実際

#### ア 研究目的

既存木橋を破壊することなく、その健全度を判断する技術を開発するため、非破壊評価技術を実際の既存木橋に適用し、問題点や可能性について検証した。

#### イ 研究方法

抽出した非破壊評価技術の実際的な適用を検討するため、再組立したかっぱ橋の第1径間および第2径間、津島プレーランド1号橋および2号橋(愛媛県宇和島市:1990年架設)、神の森大橋(愛媛県砥部市:1997年架設)、以上の5橋を対象として実地調査を行った。その際、環境因子と劣化との関係も併せて検討するため、温湿度計を設置した。現地調査に先立ち、架設時の設計資料など、調査対象とした既存木橋について情報の提供を管理者または発注者等から収集し、併せて使用や管理の状況についてのヒアリングを実施した。

#### ウ結果

再組立したかっぱ橋の第1径間の調査は、2007年3月、7月、11月に実施した。第2径間の調査は、 2007年3月、11月に実施した。適用した非破壊試験は、目視試験、超音波伝播試験、応力波伝播試験、 高周波容量試験、穿孔抵抗試験である。この他、温湿度計を第1径間について7カ所、第2径間につい て2カ所設置した。その結果、部材の種類により劣化程度は異なり、両径間とも上弦材が劣化している部 分が最も多い可能性があると考えた。一方、劣化が最も激しい部材は、第1径間の上流側下弦材だった。 また、超音波伝播速度は、鋼板を介して測定することも可能であったが、相対度数の出現範囲が異なる ため、その影響を考慮して評価する必要があることが明らかになった。次に、再組み立て後の経時変化を 検討した結果、超音波伝播速度の統計値は、撤去後に測定した値とほぼ等しかったことから、破壊試験 時は、木橋が撤去された当時との差は小さいと推定した。目視評価、超音波伝播速度、応力波伝播速度、 レジストグラフによる穿孔抵抗をパラメータとして、部材の劣化度を順位付けした結果、載荷試験で破壊し た部材は、劣化程度が大きい方に位置付けられた。

津島プレーランド1号橋および2号橋については、予備調査を2007年6月、本調査を10月に行った。 非破壊試験は、目視試験、超音波伝播試験、穿孔抵抗試験を実施した。温湿度計は1橋あたり6カ所に 設置し、2007年10月から2009年9月まで測定した。その結果、超音波伝播速度の累積相対度数曲線 は、1号橋および2号橋ともに速度が遅い範囲の累積度数が年々高くなる傾向を示した。2006年時点で は、2号橋よりも1号橋の方がその傾向は顕著だったが、2007年時点では、2号橋の方が1号橋よりも速 度が遅い範囲における前年との差が大きかった。目視試験に合せて記録していた写真からは、調査開始 時点には確認できなかった材の表面割れが、2007年時点で多数発生していることが判った。2009年9月 に支保工を下げ、木橋の耐荷性を確認した結果、支保工を下げるに従い既存木橋の鉛直方向のたわみ が増大し続けたことから、自重を支えられないほど、劣化が進行していることが明らかになった。また、2010 年2月の1号橋および2号橋の撤去に際して、部材・接合部の切断面観察と回収を実施した。

神の森大橋については、事前調査を2007年9月、予備調査を2007年10月、本調査を12月に行った。非破壊試験は、目視試験、超音波伝播試験、高周波容量試験、小木片による腐朽菌検出試験を実施した。温湿度計は9カ所に設置し、2007年12月から2009年9月まで測定した。下流側林道寄りのア ーチ部材接合部周辺で、打音および触診を併用した目視試験、超音波伝播試験、含水率計による高周 波容量試験の全てが異常と思われる箇所を確認した。当該箇所より約2 cm 四方の木片を採取して腐朽 菌検出試験を行った結果、腐朽菌の存在は認められなかった。このことから、当該箇所の異常は、腐朽 菌によるものではなく原因は別にあると考えた。

愛媛県内に架橋された近代木橋の設計資料を収集した結果、神の森大橋、松山市南江戸公園木造 歩道橋、松山市中央公園わんぱく橋、津島プレーランド1、2号橋の4種類について資料収集できた。

#### エ 考察

抽出した非破壊試験方法の適用可否は、対象部材の寸法と取り合わせによることが明らかになった。 また、現地調査を実施する際の問題点として、仮設の足場がなければ測定箇所が限定されること、機器を 使用するには電源の確保が不可欠であることが明らかとなった。

既存木橋の各部について、測定した超音波伝播速度を構造図上に直接プロットするなど、非破壊指標値の分布図を作成することにより、木橋全体の劣化程度が視覚化できるとともに、類似の構造部位での劣化状況が比較でき、接合部構成や構造方法に起因する問題点を明らかにできる。また最も劣化の進んだ箇所が明らかになることから、局部破壊を伴う強度調査を最小限実施することで構造体の安全性を判断できることになる。

# オ 今後の問題点

個々の非破壊評価の指標値は、絶対数値としての判断を行うにはデータの蓄積が不足している。また、 実際の既存木橋への適用事例が限られていることから、全ての既存木橋に適用できる方法とはなり得て いない。検討対象とした木橋は人道橋が中心だったため、車道橋のような大規模木質構造物に適用可 能な非破壊評価技術は、適用の可能性を探るのみに留まった。

#### カ 要約

非破壊評価技術を実際の既存木橋に適用することで、個々の結果指標値、あるいはその組合せによって木橋全体の劣化程度や劣化の進んだ部位、劣化の進行度合が判定できることがわかった。

# キ 引用文献

なし

(加藤英雄、軽部正彦)

# 1-4. 部材および接合部の破壊実験による検証

#### ア 研究目的

既存木橋としての破壊載荷実験後に、解体して得られた部材を使って、部材単位、接合部単位の強度試験を実施し、非破壊評価結果との関係を検討する。

# イ 研究方法

再組立した既存木橋(第1径間)の破壊載荷実験時には腐朽部分近傍でのひずみ計測を行い、実験 後には付着していた腐朽菌子実体を採取して鑑定を実施した。その後に、解体した部材から再編組立に 使う部材を除き、部材および接合部試験の可能な部位を取り出した。

部材の強度試験用として回収できたのは、ブレース、敷梁、継ぎ梁、上弦材、下弦材だった。回収した 全ての部材は、縦振動法によるヤング係数を測定し、部材種別ごとに曲げ試験、曲げ方式によるせん断 試験、縦圧縮試験、縦引張り試験を行った。曲げ試験は、ブレースおよび敷梁で行った。荷重条件は、 全スパンが3060mm(材せいの約18倍)、荷重点と支点間距離が1190mm(材せいの約7倍)の4点荷重 とし、単調増加荷重で行った。また、モーメントー定区間のたわみと全たわみを測定した。曲げ方式による せん断試験は、ブレース、継ぎ梁および材端が欠損した敷梁の1本で行った。荷重条件は、全スパンが 1105mm(材せいの約6.5倍)、荷重点と支点間距離が425mm(材せいの約2.5倍)の4点荷重とし、単 調増加荷重で行った。スパン中央部でたわみを測定した。縦圧縮試験は、上弦材を繊維直交方向に切 断し、材長を700mmに調整して行った。荷重条件は、単調増加荷重とした。また、最外層のラミナにひ ずみゲージを貼り付け、試験体の材軸方向のひずみを測定した。縦引張り試験は、下弦材を繊維平行方 向に2分割し、材幅を110mmに調整して行った。荷重条件は、チャック間距離を2000mmとし、クロスへ ッドスピード毎分6mmの単調増加荷重で行った。また、長さ1000mmのヨークで試験体の軸方向の伸 びを測定した。強度試験終了後、試験体の破壊近傍部から材長方向に厚さ約2cmの試験片を採取し、 全乾法で含水率を測定した。

接合部の強度試験用としては回収できたもののうちの斜材を用い、繰り返し加力で試験した。加力は、 接合部の長期、中長期、中短期、短期の許容耐力、降伏荷重の順でそれぞれ 2 回加力した後、終局限 界まで行った。接合部の特性値の評価は、初期剛性、降伏耐力、降伏変位、最大耐力、終局耐力およ び終局変位を試験結果から算出して行った。また、接合部の特性値との関係を検討する非破壊パラメー タは、目視評価、超音波伝播速度、繊維直交方向の推定ヤング係数とした。

#### ウ結果

腐朽部分近傍に添付したひずみゲージでは、載荷開始直後から他の部分の部材ひずみに比べて、大きなひずみ値を記録し、その変化は直線的であった。採取した子実体を鑑定した結果、破壊を生じた上弦材および下弦材の子実体はワタグサレと推定、吊り梁の子実体はチョークアナタケと確定した。

縦振動法によるヤング係数と部材の各強度との関係を検討した結果、縦圧縮強度以外の強度で、縦 振動法によるヤング係数との間に高い相関関係が認められた。また、各強度において含水率が平均値よ りも高かった試験体は、他の試験体と比べて強度がやや低い傾向を示した。腐朽箇所を評価しないで算 出した強度は、設計当時の長期許容応力度に対する3倍の値を満足するものが少なかった。

接合部の強度試験の結果、繰り返し加力によって生じた残留変形は、目視評価で劣化が認められた 部材の方が、そうでない部材よりも大きかった。また、接合部の特性値と各非破壊パラメータとの関係を検 討した結果、全ての非破壊パラメータについて、最大耐力と終局耐力とでは相関が認められたが、初期 剛性と降伏耐力とでは相関は認められなかった。

## エ 考察

破壊載荷実験時の結果から、ひずみゲージによって非破壊評価が可能であることがわかった。

部材の強度性能については、非破壊評価による結果と高い相関があるが、含水率や目視による部材 表面や端部の状態観察の結果を加味して健全性を判断する必要がある。

接合部については、部材接触部や接合具近傍の局部的な木材の強度性能の影響を強く受けることから、接合部の構造や状態について入念な観察を行う必要がある。

# オ 今後の問題点

非破壊評価によって部材の強度性能を推定するために、更にデータを蓄積する必要がある。

接合部については、対象木橋に応じた非破壊調査の方法を検討する必要があるほか、長期的性能検 証を容易にするために非破壊評価しやすい接合を開発・採用する、といった視点からの検討も望まれる。

# カ 要約

各種非破壊測定が構造全体の性能を評価するための基礎データになり得ること、また、継続した測定 データにより改修や補修の効果を評価し得ることが実験的に明らかになった。

# キ 引用文献

なし

(加藤英雄、軽部正彦)

# 第2章 既存木橋の構造強度評価技術の開発及び検証

#### 2-1. 再組立てした木橋の経時変化

#### ア 研究目的

既存木橋を破壊することなく構造体の強度を調査し、その健全度を判断する技術を開発するため、再 組立てした既存木橋について、経時変化を測定・観察し、劣化進展の兆候やその発見の可能性を検討 する。

#### イ 研究方法

再組立した実験対象木橋の各支持点の反力を、橋台との間に挟んだロードセルを使って再組立て直後より毎時自動測定し、各支持点の総和として木橋全体の重量を記録した。また破壊載荷した第1径間については2007年7月から、第2径間および再編第1径間については再組立架設直後より、スパン中央に変位計を設置して、その鉛直方向垂下量を測定した。木橋の各部位には、温湿度センサーを設置して測定した。

また 2007 年 3 月、7 月、9 月、2008 年 5 月に、再組立て木橋全体の形状測定としてトラス下部格点の 鉛直変位測定を水準測量により行った。2007 年に実施した 3 回の計測の際には、コンクリートブロック(約 500 kg×2)を再組立て木橋中央下部からナイロンスリングを使って吊下げる載荷実験を合せて実施した。

さらに Web カメラを各径間の木橋全体が視野に入るように設置し、毎時画像記録させるとともに、インタ ーネット回線に接続した遠隔地からもリアルタイムで観察できるようにした。実際には、2007 年 7 月から Web カメラによる監視を開始し、同年 11 月にはインターネットを介して遠隔監視できる体制を確立した。

# ウ 結果

その結果、全重量は日変動しながら降雨時は増加し、天候回復時に水分の蒸発によって重量減少し ながら変形が進むことが確認できた。再組立架設までの間、屋内保管された部材は、架設状態でもある 屋外暴露環境よりも乾燥していたらしく、僅かながらも重量増でその値は落ち着いた。架設直後は、トラス 格点の接合部に存在する遊び(組立用クリアランス、あるいは長期供用に伴う接合部木部のめり込み変 形の固定)のため、天候の変化などにより木材が膨潤伸縮、あるいは接合金物鋼材の伸縮によって、接 合部ですべり変形が生じ、変形が階段状に進んでいる。

再組立て木橋全体の変形状況及びその変化を載荷実験と合せて測定した結果、第1径間上流側下 弦材の劣化が深刻なことがわかり、それが鉛直垂下量の差として観測された。

Web カメラの監視によって、遠隔地にある既存木橋の状態をリアルタイムで確認できるようになり、不測の事態における現場の確認に利用できた。カラスがWebカメラ上にとまるために、幾度かカメラ取付け固定部分が緩んで画角が変わることがあった。長期的観測データの変化の追跡においては、定期的な画像の蓄積が降雪・降雨状況の確認など、状況変化の記録として参考になった。

#### エ 考察

当初は破壊載荷実験時の荷重確認のみを目的として支点下にロードセルを挟み込むこととしたが、継続的な全体重量測定をすることにより、既存木橋の荷重状態、特に天候による水分量の変化が観測でき、 管理上の貴重なデータとなり得ることがわかった。また、追加設置した鉛直変位測定により、その希少度 が高まった。

既存木橋の形状測定は、長期に亘って繰返し継続的に実施することにより、木橋において生じている 変状、不具合箇所の位置推定、あぶり出しに利用できる。木材を使った既存木橋の部材断面はおおむ ね中実であり、表面外周部からの劣化によって曲げに対する断面性能が減少したとしても実質的な断面 積が大きく残り、破壊強度は大きく下がらない。使用荷重条件が変わらずに部材の曲げ性能が低下する とすれば、それが木橋の全体変形として表れやすくなり、逆に言えば全体形状の測定によってある程度の 既存木橋の劣化状況管理が可能である。また水準測量は土木技術者における基本技術でもあり、既存 木橋の管理に、より多くの技術者の協力を得ることが出来る。ただし、スパンの大きさにもよるが、その測定 には、測量精度を0.1mm程度に高めて実施することが望ましい。

既存木橋の維持管理に際して、Webカメラが効果的であることがわかった。

# オ 今後の問題点

実際の木橋で鉛直変位の連続測定を行うには、変位計の設置測定方法と、日射などによる不動点側 変動の影響を排除することが課題となる。

# カ 要約

再組立てした既存木橋について、経時変化を測定・観察し、劣化進展の兆候やその発見可能性を検討した。その結果、既存木橋の健全度を判断する上で、長期的な観測、データの収集が重要な役割を担うことが判った。特に水準測量による全体形状の継続的な測定は、不具合箇所が検出できる可能性があり、現場での導入も容易と思われる。

# キ 引用文献

なし

(軽部正彦、藤田和彦)

# 2-2. 非破壊的手法による構造体の調査

#### ア 研究目的

既存木橋を破壊することなく構造体の強度を調査し、その健全度を判断する技術を開発するため、非 破壊的に構造性能を把握する手法として、再組立した既存木橋に対して振動実験による調査を行い、劣 化部位の検出や健全度診断の可能性を検討する。

#### イ 研究方法

2007 年 3 月に再組立した径間 36m の木造トラス橋に対し、常時微動測定、人力加振による自由振動 測定を実施し、当該橋の振動特性を把握した。測定は 2007 年 3 月と7 月の 2 回実施し、複数測定点を 同時測定することにより、振動モードの解析も行った。

#### ウ 結果

2007年7月に実施した常時微動測定の結果、鉛直方向の固有振動数は3.61Hz であり、人力加振(人間が1回跳躍)による自由振動波形から求めた固有振動数は3.49Hz、減衰定数は2.22%であった。

振動モードの解析からは、鉛直方向に一次と二次、水平方向には一次から三次の振動モードが観測 で来た。人力加振時の固有振動数測定では、加振モードを変化させてもあまり大きな変化は無かった。

#### エ 考察

2003 年 12 月に解体される直前に実施した現地調査では、加速度計を用いて全体振動性状を簡易測定しており、人力加振(人間が 1 回跳躍)による鉛直方向の固有振動数は 3.75Hz であった。再組立した状況との違いは、支点が固定されていないこと、床板が固定されていないこと、既存木橋の各隙間に砂や泥が詰まっていないことなどの違いがあり、それによって固有振動数が若干低下したものと思われる。

長期に亘って振動実験調査を重ねることで、構造体の剛性が変化し固有振動数が変わって行くことは 十分に考えられる。しかしながら、前述したように測定結果に影響する因子も多く存在することから、ある 時点での測定、唯一回の測定結果だけで健全度を判断することは難しいと思われる。測定点を増やし加 振モードを変えながら詳細な振動モードを得るなどをすれば、不具合箇所を検出できる可能性は十分に あると思われるが、発見できた既知の不具合箇所の説明に用いることが出来ても、未知の箇所を指摘し 発見することは難しいと思われる。

振動計測など、小変形領域の構造性能を測定する非破壊測定を以って、大変形領域での構造物の挙動や終局性状を推し量ることには自ずと限界があるが、それらの測定結果は、既存木橋全体の数値解析 用構造モデルの妥当性検証に活用出来る点は評価するべきであろう。

非破壊調査手法としては、前節に示したような小荷重載荷時の変形量や形状変化を見る方法も考えら れる。今回の主な調査対象木橋はトラス構造であったため、その変形応答には立体的な影響が含まれる。 桁橋など、部材の曲げ性能が直接的に構造体の変形に現れる構造形式の場合には、対象荷重時の非 対称変形応答、非対称荷重時変形応答の荷重位置による違いを整理することにより、既存木橋の不具 合箇所が発見出来た調査例が過去にあった。

#### オ 今後の問題点

振動実験調査による構造物全体の非破壊調査手法確立のためには、相当数の調査を積み重ねなが

ら、その方法に改良を加えて行くことが必須であろう。また汎用の技術とするためには、ノウハウだけでなく、 多くの高価な機材と測定点を必要とする点も解決する必要がある。

# 力 要約

再組立した既存木橋に対して非破壊的に構造性能を把握する調査を行った。その結果、振動実験調査のみで構造物を非破壊的に安全性評価することは現状では難しいこと、構造形式にもよるが小荷重載荷時の変形量や形状変化を整理することにより既存木橋の不具合箇所の発見できる可能性があることがわかった。

# キ 引用文献

なし

(軽部正彦、青木謙治)

# 2-3. 破壊載荷実験方法の検討

#### ア 研究目的

既存木橋を載荷により破壊して残存強度に相当する耐荷性を確認するため、実験を安全に実施する 載荷方法、並びに各測定点の計測方法などについて具体的に検討する。

# イ 研究方法

破壊載荷の方法は、既存木橋床板上に土嚢を順次積載する方法とし、その作業上問題となるトラス上 弦材間の水平ブレースを回避し、不意な破壊発生時にも載荷を担当する作業員の安全が確保できるよう、 実際に使用する用具と、仮設の実物モデルを用いて検討した。

各測定方法についても、実験上の配置や手順などを考えながら実物や模型を使って検討するなど、実 験関係者の安全を最優先に考えて、その方法を検討した。

また、破壊荷重の予測と、破壊位置や破壊の形式の想定するため、劣化した部材の接合部モデル実験を実施し、数値解析による破壊実験の予備的検討に利用した。

#### ウ 結果

破壊載荷方法の検討には、実験で使用する土嚢の大きさや1 袋当たりの重量について、実際に土嚢 を作製して調べるとともに、上弦材間の水平ブレースの仮設の実大モデルを作製して、吊り込みや切り離 しの方法について検討した。その結果、土嚢は直径900mm(約320kg/袋)が適しており、運搬は移動式ク レーン、玉掛け作業は高所作業車に乗った作業員が行うこととした。また土嚢には予めロープを結束延長 して、既存木橋の水平トラスの上面以上の高さにクレーンフックが位置するようにした。高荷重時には床板 上が土嚢で埋まり並べられなくなるため、積み重ねる必要があった。この際既存木橋の急激な破壊に伴っ て、トラスの隙間から土嚢が転落しないよう、トラス構面から独立させた転落防止柵を床板上に設置した。

載荷荷重の計測については、再組立時に支点と橋台の間に挟み込んだロードセルを使うこととした。変 位計測については、3次元的に大きく変形する破壊実験に対応する変位計測方法として、設置や測定準 備が簡便な画像計測法を検討したが、屋外実験のために変化する日照や光量、装置の熱対策などが問 題となって採用には至らなかった。測定点近傍に不動点フレームを設置する測定方法では、載荷途中で 実験対象と干渉してしまう可能性が高い。通常の実験では作業員がその対処のために近づくこともできる が、今回の実験において、載荷開始後に近づくことは危険性が高くできなかった。そのため、地面側から のみで測定可能なひずみ変換式ワイヤー変位計を活用した 3次元変位測定法を考案して用い、それを 検証補完する方法としてトータルステーションによる光波測量を併用することとした。木部材のひずみ測定 には、センサー接続導線の延長による感度低下の無い4線式のひずみ測定法を用いた。これらのセンサ ーは、既存木橋両端の橋台付近に配置したスイッチボックスに接続し、独立した 2系統の高速型静ひず み測定装置(TDS-530、THS-1100)を介して、それぞれに接続したノートパソコンにデータを取り込んだ。 測定は、データ転送や表示・保存など、最低限のデータ処理時間を空けて繰返し自動収録することとし、 実際には1秒未満から4秒程度の間隔であった。

破壊位置及び形式を予測するため、数値解析用データ収集を目的として上下弦材接合部、並びに斜 材接合部のモデル接合部を用意し、破壊加力実験を行った。用いた木部材は、実験対象橋と同じ履歴 を持つ中州部分使われたもので、再組立に利用しなかったものである。また、架設当時の製造基準に準 じた集成材部材も準備し、併せて実験した。

#### エ 考察

実物や仮設の実大モデルを使った実地的検討により、問題点がつぶさに明らかになった。またその際に、破壊載荷業務を依頼した技術者や作業員と十分に意見交換したことにより、より安全な実験方法が 生み出された。

実験の特性を考えて、考案したひずみ変換式ワイヤー変位計を活用した3次元変位測定法により、既 存木橋の破壊現象観察に障害となる測定用不動点フレームなどが不必要となった。また、載荷の中断や、 載荷に伴う危険区域内に入っての測定障害の除去など、不安全作業が回避できた。

接合部モデル実験の結果からは、実験対象木橋では部材劣化による接合部強度への影響は少ないこ とがわかった。一般的な設計情報と非破壊調査結果の一部、接合部モデル実験結果を利用して数値解 析したところ、中央部へ 40tf 載荷した場合に橋台に近い位置の引張側斜材下端が破壊する形式などが 推定された。

#### オ 今後の問題点

なし

# カ 要約

先例のない破壊載荷実験を安全に実施するため、載荷測定方法について、実物や実地での予備的 検証、仮設の実大モデルによる具体的検討を行った。さらに、関係者との意見交換・調整を十二分に行 い、破壊載荷実験を安全に遂行する方法を見出した。

# キ 引用文献

なし

(軽部正彦)

# 2-4. 破壊載荷実験の実際

# ア 研究目的

既存木橋の残存強度に相当する耐荷力を調査し、各種非破壊調査手法による調査結果との関係を明らかにするため、再組立した既存木橋に対して土嚢載荷による破壊実験を実施した。

# イ 研究方法

2007 年 3 月に再組立した既存木橋(第 1 径間:36m)に対して、土嚢載荷による破壊実験を実施した。 載荷は、橋長の中央部 1/2 スパンの区間に行い、出来るだけ等分布となるよう、一袋ずつ左右・上下流と も対象となるよう配慮して行った。

#### ウ結果

土嚢 26 袋(94.4kN)を積載したところで、上流側の下弦材が引張破断(一次破壊)した。着地に至らなかったので、積載可能な下流側を中心に載荷を続けたところ、土嚢 53 袋(189.7kN)で下流側上弦材が 圧壊(二次破壊)し、木橋全体が落下着地した。

#### エ 考察

破壊載荷した既存木橋の設計荷重は、死荷重が 800 kg/m<sup>3</sup>、活荷重が 350kg/m<sup>2</sup> であり、これに基づい た全体の死荷重は 23.76t(232.9kN)、活荷重は 28.98t(284.0kN)となる。全体重量は、再組立直後には 215.7kN であったが、概ね 215kN から 225kN の間で推移し、破壊載荷開始直前には 218.7kN となり、こ れは設計時死荷重の 94%に相当した。一時破壊荷重 94.4kN は設計時活荷重の 33%、二次破壊荷重 189.7kN は同 66%に相当する。構造が支える総量となる死荷重と活荷重を合せて考えると、一時破壊時 で 313.1kN / 516.9kN = 60%、二次破壊時で 408.4kN / 516.9kN = 79%になった。

# オ 今後の問題点

既存木橋の残存強度推定の精度を高めるためには、破壊起点となり得る箇所について、より高い信頼 性をもって強度低下の程度を推定する非破壊調査法・技術の開発が必要である。

# カ 要約

既存木橋の残存強度に相当する耐荷力を調査し、各種非破壊調査手法による調査結果との関係を明らかにするため、再組立した既存木橋に対して土嚢載荷による破壊実験を実施した。その結果、設計時活荷重の33%にあたる94.4kNで上流側の下弦材が引張破断(一次破壊)し、66%にあたる189.7kNで下流側上弦材が圧壊(二次破壊)し、木橋全体が落下した。

#### キ 引用文献

なし

(軽部正彦)

#### 2-5. 破壊載荷実験結果の検討

#### ア 研究目的

破壊載荷実験による結果と非破壊的に調べた部材・接合部の劣化状況についてその関係を整理し、 供用を続ける既存木橋の安全性を評価する方法について検討する。

#### イ 研究方法

一次破壊および二次破壊の際に破壊起点となった部材を中心に断面サンプルを採取し、断面内部の 劣化状況および含水率の分布を調査した。

部材・接合部の残存強度評価結果と劣化状況を組合せて構造解析し、破壊実験から得られた実際の 残存強度を推定する強度評価技術の開発を試みた。

#### ウ 結果

載荷破壊実験による破壊位置は、それまでの各種非破壊調査などで激しい劣化状況が指摘された位 置であり、断面の欠損や高い含水率分布が破壊位置の切断面から確認された。水平部材である上下弦 材は、ところにより激しく腐朽した箇所がある一方で、全く腐朽していない部材もあった。一方、斜材に劣 化した箇所は殆ど見られず、下弦材との接合部端面付近で木口からの傷みが少々認められる程度であ った。上下弦材から採取した部材断面のサンプルを、幅方向に6分割、せい方向に8分割して含水率の 分布を確認したところ、腐朽個所の含水率は高く、断面のうち強度の期待できる残存部分は、含水率が 低い良好な状態として確認できた。

部材・接合部の残存強度評価結果と劣化状況を元に、部材の性能を幾つかの劣化段階に評価して構造解析した結果、破壊実験から得られた実際の残存強度と破壊形式を概ね推定することが出来た。

#### エ 考察

一次破壊した箇所は、事前の非破壊調査によって部材の劣化が顕著であると指摘されていた箇所で あった。特にこの箇所は、当初架設現地において安全上の問題個所として部材の劣化が指摘されていた 箇所でもあった。腐朽による断面欠損など、外観上の明らかな不具合が指摘された部材は他にもあった が、超音波伝播速度の著しい低下や、部材の変色や微細な亀裂発生、局部破壊調査となる成長錐によ る断面内のサンプリング調査結果から判断して、健全な木材部分が著しく減少しており、最も破壊する可 能性があると推定されていた箇所であった。二次破壊した箇所は、部材上部から腐朽によって部材軸に 沿った溝状の断面欠損が生じていた箇所であった。事前に非破壊調査を行うことによって、破壊起点とな る箇所をある程度の確度をもって推定することが可能であることが判った。

一時破壊した下弦材では、主に引張荷重が作用するため、部材軸方向に健全な木材が連続あるいは 有効に力を伝達できる状態にあることが大切である。集成材部材であることから、欠点や腐朽によって木 材繊維の途切れがある場合には、隣り合う他のラミナがその力を迂回伝達できるように有効に接着されて いることが求められる。これに対し二次破壊した箇所は、上弦材として主に圧縮力に対して抵抗することが 求められる。上部から溝状の欠損部分を生じていた部材断面は、元の矩形断面に比べて座屈耐力が減 少しており、加えて既存木橋全体の大変形に伴って上弦材にも下に凸となる曲げ変形が重畳されたこと は、腐朽により部材が弱くなった座屈方向へ破壊しやすくなっていたと思われる。

屋外構造物に使われる木材が直接雨水を受ける場合、各部材の表面、あるいは乾燥割れ亀裂等の欠

点の内部、あるいは接合部等部材部品間の接触狭隘部、などにある程度の水分を貯留することになる。 水分の貯留は、木材の強度劣化に大きく関わる問題であるが、破壊載荷した既存木橋でも水平部材であ る上下弦材の中に、酷く劣化したものが多かった。斜材でも上弦材の影となりやすい上部では、水分の供 給も少なく、また滞留も生じにくい。一方、下部では部材表面を雨水が伝い接合部に集中してその狭隘 部に貯留するため、これによって端部に劣化を生じたものがあった。

部材断面内の高含水率の分布と、強度発現が期待できない劣化箇所の分布は、非常に適合していた。 このことは、含水率が低く維持できている部分のみを残存強度に寄与する断面として部材強度推定するこ とが、安全側の判定を誘導できる可能性を示唆したといえるものである。木材材質の健全性維持の点から は、雨水等による水分供給は絶たねばならない問題事象であるが、劣化が進み強度低下が問題視される ような状況下に置かれ続ける木材の不健全部分の推定に、供給され続ける雨水が間接的に活躍すること は興味深い。なお、腐朽した木材内部に貯留された水分が全て排出されるためには相当の期間を要する ものであり、木材の健全性を維持し、木質構造物の安全性を確保し続けるためには、雨水などの水分供 給を断ち、含水率を低く抑え続けることが肝要であることに変わりは無い。

# オ 今後の問題点

非破壊で断面内の含水率分布を測定する技術の開発が、屋外構造物における機械的強度有効断面 の推定の鍵となる。また、破壊載荷実験の結果と非破壊調査の結果をより高い精度で結びつけるために は、数値解析による評価検討方法を深化させる必要がある。これらの技術を一般化させることにより、他の 構造形式の木橋、あるいはまた木質構造物全般に活用できる技術に展開できる可能性は高い。

#### カ 要約

破壊載荷実験による結果と非破壊的に調べた部材・接合部の劣化状況についてその関係を整理し、 供用を続ける既存木橋の安全性を評価する方法について検討した。その結果、高含水率の分布と強度 発現が期待できない劣化箇所の分布は非常に適合していた。より高い精度で既存木橋の残存強度性能 を推定するためには、非破壊で詳細な含水率分布を計測するなど、木部材の表面から内部に至るまで劣 化の分布状況を把握できる非破壊調査技術の開発と、その結果を構造強度に結び付ける数値解析技術 の深化が必要である。

# キ 引用文献

なし

(軽部正彦)

## 第3章 既存木橋の補修・補強技術の調査及び開発

#### 3-1. 補修・補強技術の調査と事例の収集

#### ア 研究目的

既存木橋を安全に使い続けるため、木質構造物の劣化した部位、あるいは全体を補修・補強する方法と事例を調査検討する。

#### イ 研究方法

これまで建築・土木分野において行われてきた木質構造物の補修・補強技術・事例について、文献調査した。また、国内の既存木橋について実施された補修・補強事例を、問合せや聞き取りにより情報収集すると共に現地調査を行い、その技術的なポイントや効果について検討した。

#### ウ結果

木質構造物の補修・補強の事例は少ないが、既存木橋の事例の中に、集成材の強度向上を目的とし てFRP等の繊維を下面あるいは下側外層ラミナの代わりに積層接着するものがあった。用いる繊維として は、FRP、炭素繊維、ガラス繊維など様々であったが、いずれも新設時の部材製造段階で積層接着され ていた。ガラス繊維やビニロンを使った事例の中には、部材保護を目的としたものもあり、工場での部材製 造時だけではなく、架設時に現場で施工されたものもあった。繊維に変えて、鋼板を用いる場合もあった。 建築分野では、耐震補強を目的として鉄筋コンクリート柱に繊維等を巻き立てる方法が実用化されており、 これは繰返し大変形を受けた時の靱性向上を目的としたものであった。

日本国内各地にある既存木橋について、現在の状態や維持保全状況を調べた結果、多くの既存木橋 において耐久性上の問題が生じていることが明らかになり、既に解体・撤去されていたものも幾つかあっ た。再塗装により美観や耐久性を回復させたり、不具合箇所を修繕したりして供用を続けている木橋も数 多くあったが、根本的な改善が行われ、耐久性が向上した例はごく少数に留まっていた。

#### エ 考察

既存木橋はその構造形式により適合する補修・補強方法が異なり、また既存木橋それぞれの状況によっても異なる。そのため、一つの方法に集約した定式化は難しいが、それぞれの問題事象の対処方法を 事例として蓄積して行くことで、より効果的な問題解決の方法が見出せるようになると思われる。

一般に補修は、手摺や高欄など上載荷重を支えない部位の形状維持や機能回復、あるいは主桁やア ーチなどの主構造体の耐久性回復や表面形状を整える作業を指し、これに対して補強は、既存木橋の 構造強度を高める作業を指す。言葉の持つ意味合いは異なるが、それぞれの作業に適用可能な技術は 共通するものが多い。木橋架設には多額の費用が掛かることを考えると簡単に架け替えることができない のが現実である。費用の準備等に時間が掛かる一方で、現存する木橋を通行止めにしておくことは出来 ず、架け替えまでの間も出来れば安全に使い続けたいというのも事実である。

補修・補強の検討に際しては、目的をはっきりさせる必要性がある。目的には①環境改善処置、②美 観改善、③追加保存処理、④補強、がある。①環境改善処置は、雨水の遮断や通風の確保など、当初 設計では耐久性上の問題があったり不十分であったりした箇所を、構造的な処置によって木材の暴露環 境・状態を改善するものである。②美観改善は、塗装などにより見え掛り部分の表面状態の回復・改善を 目指すものである。③追加保存処理は、防腐薬剤、防錆剤を追加塗布するなど保存性向上処理である。 ④補強は、損傷を受けた部位の強度を補うため処置である。

供用中の原位置で補修・補強作業では、部材に応力あるいはひずみが加わった状態のまま作業を実施しなければならないことが十分に考えられるが、それによって補修・補強の効果が減少する可能性については別途注意を払う必要がある。

# オ 今後の問題点

既存木橋の現状、並びに補修・補強状況について継続的に情報収集を続け、安全性に不安を感じた既存木橋それぞれに適合する方法を選択・抽出できるよう、情報蓄積と公開を進めて行く必要がある。

# 力 要約

既存木橋を安全に使い続けるため、木質構造物の劣化した部位、あるいは全体を補修・補強する方法 と事例を調査検討した結果、供用中の原位置で比較的作業が簡単と思われる表面に繊維等を貼付する 方法には、部材あるいは接合部の強度向上を意図したものの他、耐久性向上のための保護膜を目的とし たものがあった。構造形式や状態によって適用可能な補修・補強の技術は異なるが、その事例を蓄積す ることで個々の問題に対処する最適な方法を見出せるようになると思われる。

# キ 引用文献

なし

(宮武 敦、軽部正彦)

# 3-2. 補強部材の強度調査

#### ア 研究目的

既存木橋を安全に使い続けるため、劣化した部材を補修・補強する方法を検討し、その強度回復状況 を調査する。

# イ 研究方法

既存木橋の高欄および地覆として供用され、一部生物劣化した部分を含む部材の残存耐力を、非破壊および局部破壊調査から推定した。これら部材に対し、集成材ラミナ(スギ L70、ベイマツ L125)ならびに鋼板を、エポキシ樹脂接着剤で貼付する補強を施し、その後に曲げ試験、圧縮試験を行ってその補強効果を検証した。

#### ウ 結果

部材は 1993 年に架設された用倉大橋の高欄および地覆であり、2005 年の改修の際に交換回収され たものを用いた。非破壊調査としては超音波伝播速度測定を、局部破壊調査としては穿孔抵抗測定を行 った。曲げ性能に関する補強として、ベイマツラミナあるいはスギラミナ、あるいは鋼板を部材下面引張り 側へ接着する補強、ベイマツラミナあるいはスギラミナを両側面に接着する補強を試みた。その結果、鋼 材による引張り側補強が、曲げヤング係数、曲げ強さ共に最も補強の効果が高かった。一方、集成材ラミ ナを用いた場合でも、必要耐力に応じた補強が可能であることがわかった。圧縮に対しては、ベイマツラミ ナ、スギラミナによる側面補強とエポキシ樹脂注入による補強を行った。その結果、スギラミナによる補強 効果が最も高いことが明らかになった。ただし、樹脂注入の作業は困難を伴い、また、耐力向上はその施 工精度に依存することが明らかになった。

#### エ 考察

構造物の部材の設計は、想定される使用状態における存在応力に対して、十分な強さを持つと共に、 若干の強度的余裕を持たせることが一般的である。経年変化により、この強度的余裕を失うのみならず、 予想される存在応力を下回る事態を避けるために、追加付加的に強度の回復を図ることが補強である。こ の補強によって、当初設計の強度を十分に回復できない場合には、構造物で発生する応力を補強強度 以下に抑えるために、荷重制限など、使用状態を制限して安全を確保することになる。

木質部材の高強度化技術はいくつか考案され実用に供されているが、それらに使われる部材は、新た に建設する際に作業性良く管理された工場で製造されている。実際に供用中の既存木橋の現場では、 作業条件が悪くなるだけではなく、部材に応力が掛かったままでの補強が望まれているのも事実である。

# オ 今後の問題点

強度低下した既存木橋の部材を、より作業性良く補強できる技術に進化させる必要性がある。特に供用状態の原位置で施工出来、高い補強効果を発揮できる技術の登場が待たれる。

#### 力 要約

劣化した既存木橋の部材を使って実際に補強し破壊試験により強度確認した結果、木材または鋼材 を接着して補強することにより、必要な耐力を回復することが可能であることがわかった。ただし、耐力の
向上は施工精度の影響を受けることから、既存木橋それぞれの状況に応じて、補強方法と作業性確保の 方策を合せて、適用する技術を選択することが肝要である。

# キ 引用文献

なし

(宮武 敦、渡辺 浩)

### 3-3. 新しい補修技術の開発

### ア 研究目的

既存木橋の劣化した部位あるいは全体を補修・補強するために、不足する耐久性向上のための環境 改善技術を開発する。

### イ 研究方法

接合部にあたる部材に FRP を接着することによる耐雨水侵入性能向上への効果を明らかにするため、 ドリフトピンおよびボルトを側面から挿入した試験体(幅105mm、厚さ300mm、長さ660mmのスギ集成材) を作製し、FRP 接着したものとしなかったものを屋外暴露した。一定期間(最大27ヶ月間)の後、試験体を ブロック状に裁断して全乾法による含水率測定を行い、試験体内の含水率分布を明らかにした。また、第 1 径間再編組立時に、下弦材の格点部に FRP 板を接着し、実際の施工性について検証した。

再組立架設した既存木橋に対して屋根および部材カバーを追加設置し、部材の局所的環境を改善して、劣化の進行を遅らせ、危険性を減らし、長期的耐用性向上が図れるかどうかについて検証した。

### ウ結果

曝露後の含水率は、ドリフトピン挿入部表面ではFRPが無い方が高く、ボルト挿入部でも表面ではFRP が無い方が高くなっていた。部材表面については、接合部であってもFRPを貼り付けることにより、水分の 侵入を減らせることがわかった。一方、ボルト挿入部の内部ではFRP がある方が高かったため、ボルト周 囲の隙間について、内部への水侵入を防止する措置が必要であることがわかった。木材腐朽は、FRP の 無いドリフトピン挿入部の表面でのみ発生したが、FRP の無いボルト挿入部でも局所的に含水率が高くな っており、長期暴露では腐朽発生の危険性が高い。FRP があるボルト挿入部でも、腐朽は発生していな かったものの、ボルト周辺で含水率が高くなった部分があった。また、再編第1径間の部材に対して施工 実験した結果、FRP の接着作業は特殊な工具等を必要とせず簡易に行うことが可能であった。

屋根および部材カバーの追加により、雨水による木材の腐朽要因となる水分の供給が無くなり、部材 含水率は低下した。ただし、部材途中で屋根の有り無しが切り替わる第2径間の上弦材では、屋根の無 い箇所での雨水の吸収が、屋根下となる位置まで含水率を上昇させた。

#### エ 考察

FRP を接合部へ接着し、さらに木口面被覆や上面カバー等の処置と組み合わせることで、部材接合部の含水率上昇を抑制できる可能性が示唆された。木材腐朽した箇所が少なかったのは、曝露期間中に腐朽が顕著に発見出来るほど進行しなかったからであり、特に繊維飽和点を超える部位については腐朽による強度低下の危険性は高い。FRP の接着により、含水率増加を抑制出来た個所もあったことから、木材の耐久性を高めることが出来、FRP 接着による部材補修が完全であれば、含水率はむしろ低下すると思われる。施工実験は、載荷により破壊した第1 径間を再編するに合わせて行っており、部材として取り回しのしやすい状態であった。既存木橋を使い続ける観点では、部材を取り出し補強して戻す操作ではなく、原位置で使用された状態のままに施工したい要求は高いと思われる。

部材カバーした部位では、日射による最高温度上昇が見られており、熱履歴の影響を考慮すべき場合 も十分考えられるが、カバーと部材の間の空間を増やし通風を取るなどにより、その影響は無視できると 思われる。また、部材を覆う屋根は、その機能が部材全体に亘って維持されることが重要である。

## オ 今後の問題点

耐久性向上のための環境改善技術を、より施工性が高く、コストの低いものに進化させると共に、重量の増加や部材研削など、施工による構造性能の変化の影響を見極める必要がある。

## 力 要約

既存木橋の劣化した部位あるいは全体を補修・補強するために、不足する耐久性向上のための環境 改善技術として、FRP を接合部へ接着する方法を検討した結果、その効果が認められた。さらに木口面 被覆や上面カバー、屋根の追加等の処置と組み合わせることで、部材および接合部の含水率上昇を抑 制し、既存木橋の耐久性を向上できる可能性が示唆された。

### キ 引用文献

なし

(宮武 敦、柳川靖夫)

### 3-4. 既存木橋の再組立と改修

### ア 研究目的

既存木橋を安全に使い続けるための実証実験として、供用履歴のある既存木橋全体を再組立し改修して、長期的耐用性を検討する。

### イ 研究方法

13年の供用履歴のある第2径間(18m)を再組立架設し、長期耐用性を上げるための環境改善処置と 強度回復措置を試みた。また、載荷による破壊実験を実施した第1径間(36m)から傷みの少ない部材を 集めて半分長(18m)の木橋に再編架設し、その際に部分的な補修を行うと共に、長期耐用性を上げるた めの環境改善処置と強度回復措置を試みた。

#### ウ結果

第2径間(18m)は、2007年9月に広島県立総合技術研究所 林業技術センター内に再組立架設した。 2008年6月に実施した第1径間(36m、2007年3月再組立)に対する破壊載荷実験後の部材から傷み の少ない部材を集めて半分長の木橋(再編第1径間、18m)を再組立し、2008年11月に敷地内配置の 都合から第2径間を直近東側に移設すると共に、その位置に再編第1径間を架設した。この際、第2径 間の西側半分には屋根を追加し、東側には接合部格点カバーを追加した。そして再編第1径間の西側 半分には部材カバーと接合部格点カバーを追加し、東側には手を加えなかった。その後の観察の結果を 踏まえて、2010年3月には第2径間の屋根のスパン中央側妻面を塞ぐと共に東側部材にカバーを追加 し、再編第1径間には落下防止鋼帯を追加した。

### エ 考察

第2径間の再組立架設後は、屋内保管された間に乾燥した水分を取り戻すように僅かながらも重量増加した。屋外環境での十分な養生を経て部材は解体時の状況に戻り、その後に屋根および部材カバーを追加して、その環境改善の効果を確認することができた。さらに、施した技術上の問題点についても、追加補修により改善した。落下防止鋼帯については、比較実験的な意味で環境改善措置等を施さなかった再編第1径間東側において、劣化の進行によって生じる部材破壊により、既存木橋全体が落下するような大変形の発生を防止する目的で追加した。既存の下弦材側格点接合部のボルトを利用して取り付けられた鋼帯は、部材が破壊しない状態では構造体に発生する存在応力を負担しないように、遊間を持たせた。

#### オ 今後の問題点

既存木橋に施した改修の効果は、今後の継続的な観測によって追補立証されてゆくものであり、定期 的継続的な観察とデータの回収が望まれる。

## カ 要約

既存木橋を再組立して架設し、長期耐用性を上げるための環境改善処置と部分的な補修、強度回復 措置を試みた結果、環境改善処置についてはその効果を確認できた。他の措置については今後の継続 的な観察を通した検証が望まれる。

# キ 引用文献

なし

(宮武 敦)

# 付録

記録写真

- 1-1 付1 ボンゴシの曲げおよび縦圧縮試験データの精査結果
- 1-2 付1 化学発光による木材初期腐朽検知の概要
- 1-3 付1 ボンゴシ製木橋の超音波伝播速度累積頻度曲線の経時変化
  - 付2 ベイマツ製再組立木橋の超音波伝播速度
- 1-4 付1 破壊載荷実験後の部材調査(腐朽菌)
  - 付2 回収した部材の破壊試験
- 2-1 付1 主な実験対象となる既存木橋の設計図書抜粋と仮設橋台、 部材配置組立て図
  - 付2 再組立木橋の径時変化(重量、変位、気象データの関係)
  - 付3 再組立した既存木橋の全体形状
  - 付4 再組立木橋の Web カメラによる観察
- 2-2 付1 破壊載荷した既存木橋の振動特性
- 2-3 付1 破壊載荷実験方法の検討
- 2-4 付1 破壊載荷実験の実際
  - 付2 破壊載荷した既存木橋の全体形状と変位、部材のひずみ
  - 付3 破壊載荷実験後の部材損傷状況とその活用
- 2-5 付1 破壊載荷実験後の部材切断面と含水率分布
  - 付2 既存木橋の数値解析
- 3-1 付1 各地の木橋調査結果
  - 付2 既存木橋の補修・補強事例
- 3-2 付1 補強した部材の強度
- 3-3 付1 FRP 樹脂板貼り付けによる耐候性向上
  - 付2 屋根・部材カバーの効果
- 3-4 付1 破壊載荷実験後の部材を使った既存木橋の再編と 暴露実験計画
  - 付2 既存木橋再編組立て部材の補修と補強



2003/11/06 解体前のかっぱ橋全景:4 枚を合成 (広島県山野峡自然公園)



2007/03/29 再組立が完了した第1径間 (仮設材で水平に支持された状態)



2007/06/19 再組立架設が完了した第1径間 (支点反力を継続測定中の状態)



2008/06/18 土嚢載荷により破壊した第1径間 (落下着地直後の状態)



2007/09/10 再組立が完了した第2径間 (仮設材で水平に支持された状態)



2007/09/13 再組立架設が完了した第2径間 (支点反力を継続測定中の状態)



2007/09/14 再組立架設が完了した第2径間 (スパン中央たわみ測定を追加した状態)



2008/11/05 第2径間の暴露位置を東側に移動



2008/11/05 第2径間の移動が完了:4枚を合成 (左が第2径間、右が組立完了し架設を待つ再編第1径間)



2008/11/05 再編第1径間の架設が完了



2008/12/10 屋根と部材カバーの設置が完了:2枚を合成 (左が再編第1径間:西側半分に部材と格点接合部カバーを追加、 右が2径間:西側半分に屋根を追加し、東側半分には格点接合部カバーを追加)



2010/03/26 落下防止鋼帯の追加工事 (再編第1径間)



2010/03/26 落下防止鋼帯追加工事完了 (再編第1径間)



2010/03/26 屋根妻面塞ぎの追加 (第2径間スパン中央付近上部)



2010/03/26 完了した追加工事 (左が再編第1径間:落下防止鋼帯を追加、 右が第2径間:スパン中央側屋根妻面を塞ぎ 東側部材にカバーを追加)

# 1-1 付 1 ボンゴシの曲げおよび縦圧縮試験データの精査結果

ボンゴシ材について既往文献に掲載された曲げおよび縦圧縮試験データを精査した結果、以下の関係を得た。

密度と曲げヤング係数との関係について、249の試験データ整理した結果、図1のような分布となった。 分布を一次式で近似した結果、相関係数 0.783 の下式を得た。

### y = 0.029x - 15.74

ここで、 x :密度(kg/m<sup>3</sup>) y :曲げヤング係数(kN/mm<sup>2</sup>)

密度と曲げ強度との関係について、249の試験データ整理した結果、図 2のような分布となった。分布 を一次式で近似した結果、相関係数 0.645の下式を得た。

y = 0.358x - 248.1

ここで、 x :密度(kg/m<sup>3</sup>) y :曲げ強度(N/mm<sup>2</sup>)

曲げヤング係数と曲げ強度との関係について、249の試験データ整理した結果、図3のような分布となった。分布を一次式で近似した結果、相関係数0.825の下式を得た。

$$y = 12.32x - 54.51$$

ここで、 x :曲げヤング係数(kN/mm<sup>2</sup>)

y :曲げ強度(N/mm<sup>2</sup>)

密度と縦圧縮強度との関係について、189の試験データ整理した結果、図4のような分布となった。分 布を一次式で近似した結果、相関係数0.842の下式を得た。

$$y = 0.137x - 76.5$$

(加藤英雄、藤田 誠)

# ボンゴシの曲げおよび縦圧縮試験データの精査結果









1









2

## 1-2 付 1 化学発光による木材初期腐朽検知の概要

JIS K1571 (2×2×1 cm スギ辺材、カワラタケ、強度試験用には 2×2×5 cm のスギ辺材使用)に従って 腐朽試験片を調製した。腐朽材からの化学発光量は、試験体を覆う菌体をきれいに取り除いた後、 CLD-100FC (東北電子産業)により、波長域 290-690 nm、ゲートタイム 10 秒、くり返し 10 回、20℃、大気 雰囲気中の条件下で測定した。

その結果、いずれの腐朽材も明瞭な化学発光を示し、発光強度と重量減少率の間に相関関係が認められた。検出感度を調べるため、腐朽程度の小さな材を調製し(腐朽操作1ヶ月と3ヶ月)、重量減少率および残存強度(縦圧縮)との相関を調べたところ、強度低下と重量減少(1%以下)の起こる前のごく初期段階の腐朽でも発光が確認された。波長分散解析の結果、励起発光種として、3 重項カルボニル(hv: 400-500 nm)、ビアシルトリプレット(hv: 500-600 nm)、1 重項酸素(hv: 500-600 nm)の存在が示唆された。

ケミルミネッセンスはこれら励起発光種が基底状態に戻る時に光を放つ現象であり、発光メカニズムとし てラジカルと O2 の関与するリグニン分解機構との関連も示唆される。カワラタケ以外の菌についても人工 腐朽材を調製し、白色朽菌のニオイアミタケ、ヒラタケ、シイサルノコシカケ(実際の腐朽木橋から分離した もの)では発光、褐色朽菌のオオウズラタケでは発光しないことを確認した。

(西村 健、加藤英雄)



# 1-3 付 1 ボンゴシ製木橋の超音波伝播速度累積頻度曲線の経時変化

津島プレーランド(愛媛県宇和島市津島町)内にある1号橋および2号橋(共にポニートラス形式、全長 15.4m)について、PUNDIT(CNS Furnell 社製 Portable Ultrasonic Non-Destructive Indicating Tester、 54kHzトランスデューサー)を使って超音波伝播時間を測定した。同橋は南予レクリエーション都市4号公 園の建設に合せて1989年度に設計され、1990年3月に架設竣工したものである。同公園内には木橋が 4橋あったが、4号橋(ポニートラス形式、全長42m、中央径間21.4m)は1999年9月に落下している。

測定は、部材の各測定断面位置において送信子と受信子で挟み込んで行い、各測定子には専用の ゴム製キャップを取り付けた。測定した時間は、各部材の実測断面内における測定子中心間距離で除し て速度を算出した。一部の測定箇所において、部材を挟み込む(対面法)ことが出来なかったが、その際 は隣り合う2面に測定子を押し当てる(斜面法)ことにより測定した。

また測定の時期は、同津島プレーランド内4号橋が落下した直後の1999年10月から概ね1年毎に行い、2000年3月、2001年3月、2002年3月、2003年3月、2005年3月、2006年3月、2007年10月の全8回実施した。おおよその測定箇所数は、1号橋、2号橋ともにそれぞれ784箇所(対面法:264、斜面法:280、その他:220)である。

1号橋および2号橋ぞれぞれについて、測定時期毎に超音波伝播速度の累積相対度数曲線を重ねた ものが図1および図2である。

また図3およびに図4に、1999年10月の測定分の超音波伝播時間について、部材展開図中の対応 する測定箇所を着色したものを示す。塗色は、伝播時間100μ秒未満のものを青に設定し、100μ秒増え るまで毎に緑から黄、赤と段階的に色を変えた。なお、着色に用いた測定値には対面法と斜面法の結果 が混在し、また測定子間距離で除すことにより得られる速度に変換をしていない伝播時間を用いている。 調査対象の部材は100×240mmの長方形断面であり、対面法は長辺方向に挟んで測定している。

(加藤英雄、藤田 誠、軽部正彦、井道裕史、原田真樹)



### 写真1 津島プレーランド1号橋および2号橋



写真2 測定の様子(対面法と斜面法)



写真 3 PUNDIT



津島プレーランド1号橋および2号橋の累積相対度数曲線





図2 2号橋における超音波伝播速度の累積相対度数曲線

1





# 1-3 付 2 ベイマツ製再組立木橋の超音波伝播速度

2007 年 3 月に再組立した既存木橋(第 1 径間 36m)と、2007 年 11 月に再組立した既存木橋(第 2 径間 18m)について、それぞれの部材(ベイマツ)の超音波伝播時間を測定した。測定には PUNDIT (CNS Furnell 社製 Portable Ultrasonic Non-Destructive Indicating Tester、54kHzトランスデューサー)を用い、 第 1 径間が再組立完了した 2007 年 3 月に測定した。測定対象とした部材の全ては、当初の架橋現地で 解体された後の 2004 年 3 月にも同様にして測定している。

(加藤英雄、原田真樹、井道裕史)



図2 第2径間における超音波伝播速度のヒストグラム



図3 第1径間部材の超音波伝播速度のヒストグラム(2004/03 測定分)



図4 第1径間部材の超音波伝播速度のヒストグラム(2007/03 測定分)

## 1-4 付1 破壊載荷実験後の部材調査(腐朽菌)

部材切断面の観察から、一次破壊した上流側下弦材は、破壊した位置で上面及び側面からの腐朽が 深く進んでいることが判った。二次破壊を生じた下流側上弦材は、上面から V 字状に腐朽が進んでい た。

破壊載荷実験直後に、四つの腐朽劣化部分から木片および子実体を採取し、独立行政法人 森林総 合研究所 森林微生物研究領域 微生物生態研究室 服部力主任研究員に鑑定を依頼した。

サンプルの採取状況と鑑定の結果について、表1と図1に示す。鑑定の結果、チョークアナタケとワタ グサレ(推定)の2種類の腐朽菌が判明した。

(西村 健、加藤英雄)

記号	採取位置	採取の状況	子実体の有無	腐朽菌
А	一次破壊箇所	腐朽を生じていた部材から直接木片 を採取。	無	不明
В	二次破壊箇所	二次破壊後に地上に落ち子実体が付 着していた座屈状態の部材破片より 採取。	有	背着生子実体 ワタグサレ(推定)
С	一次破壊箇所 近傍の接合部	下弦材と斜材の接合部に付着してい た子実体を採取。	有	チョークアナタケ
D	敷梁端部	2003 年 12 月の解体時点で端部が腐 朽により欠損していた箇所	有	背着生子実体 ワタグサレ(推定)







A 子実体ナシ 同定中



B 背着性子実体 おそらく ワタグサレタケ



C チョークアナタケ(確定)



D 背着性子実体 おそらく ワタグサレタケ

## 1-4 付 2 回収した部材の破壊試験

破壊載荷実験後の既存木橋から部材を回収し、スパン 1/2 の木橋に再編する部材と、強度確認試験 用の部材に分けた。

強度試験用に回収したできた部材の種別は、ブレース、敷き梁、継ぎ梁、上弦材、下弦材だった。回収 した全ての試験体は、縦振動法によるヤング係数を測定し、部材種別ごとに曲げ試験、曲げ方式による せん断試験、縦圧縮試験、縦引張り試験のいずれかを割り当てた。

曲げ試験は、ブレース(平均寸法:材幅 94mm、材せい 174mm、材長 3688mm)および敷き梁(寸法: 材幅 163mm、材せい 172mm、材長 3381mm)で行った。荷重条件は、全スパンが 3060mm(材せいの約 18 倍)、荷重点間が 1190mm(材せいの約 7 倍)の 3 等分 4 点荷重で単調増加荷重とした。試験の際、 モーメントー定区間の圧縮側に袴型ヨーク(ヨーク長 401mm)を設置し、中央たわみを測定した。また、全 スパン中央部の中立軸に L 型金物を取り付け、全たわみを測定した。

曲げ方式によるせん断試験は、ブレース(平均寸法:材幅 94mm、材せい 173mm、材長 1794mm)、継ぎ梁(平均寸法:材幅 129mm、材せい 171mm、材長 2487mm)および材端が欠損した敷き梁の 1 本(寸法:材幅 163mm、材せい 173mm、材長 2820mm)で行った。荷重条件は、全スパンが 1105mm(材せいの約 6.5 倍)、荷重点間が 425mm(材せいの約 2.5 倍)の 3 等分 4 点荷重で単調増加荷重とした。試験の際、全スパン中央部の中立軸に L 型金物を取り付け、全たわみを測定した。

圧縮試験は、上弦材を繊維直角方向に切断し材長を 700mm に調整して行った。縦圧縮試験体の平 均寸法は、幅 222mm、材せい 264mm、材長 704mm だった。荷重条件は、単調増加荷重とした。また、最 外層のラミナには、ゲージ長 60mm のひずみゲージを接着剤で貼り付け、試験体のひずみを測定した。

縦引張り試験は、下弦材を繊維平行方向に切断し材幅を 108mm に調整して行った。縦引張り試験体の平均寸法は、幅 110mm、材せい 265mm、材長 3014mm だった。荷重条件は、チャック間距離を 2000mm でクロスヘッドスピード毎分 6mm の単調増加荷重とした。また、材せい中央部には、ヨーク長 1000mm の伸び計を取り付け、試験区間の変形を測定した。

(加藤英雄、井道裕史)



図1 動的縦ヤング係数と曲げ強度との関係



図2 動的縦ヤング係数と曲げ方式によるせん断強度との関係







図4 動的縦ヤング係数と縦引張り強度との関係

# 2-1 付 1 主な実験対象となる既存木橋の設計図書抜粋と仮設橋台、部材配置組立て図

主な実験対象とした既存木橋は、広島県立山野峡自然公園内に 1990 年 5 月に歩道橋として架設竣 工したかっぱ橋(下路式ワーレントラス歩道橋、第 1 径間:36m、第 2 径間 18m)である。同木橋は、架設 位置の都合から「くの字」に配置され、両径間とも有効幅員 2.3m、主構高さ 2.7m である。部材は、ベイマ ツ1級集成材に天然系防腐塗料を塗布したもので、上下弦材がW220×D262mm、斜材がW220×D170 (両橋詰のみ 228)mm、設計は道路橋示方書・同解説(昭和 55 年)に準拠して群集荷重 350kgf/m<sup>2</sup>、死荷 重 800kgf/m<sup>3</sup>で行われ、接合部は、SS400で作られた金物と普通ボルトによる鋼板添板二面せん断ボルト 接合である。

次頁以降に、広島県福山地域事務所農林局林務第一課から提供された架設時の設計図書から、側 面図、配置図、詳細図2面を抜粋転載する。

続いて、破壊載荷実験を執り行った第1径間の再組立(2007年3月)に際して仮設設置した橋台の図面、調査および再組立ての際に命名した各部材名とその配置を記した図を収載する。

(軽部正彦、藤田和彦)



写真1 解体前のかっぱ橋の全景 (広島県立山野峡自然公園にて2003/11/06 撮影・4 枚を合成)



写真 2 再組立した第1径間 (広島県立総合技術研究所 林業技術センターにて 2007/06/19 撮影)







6

\_



63

\_\_\_\_





## 2-1 付 2 再組立木橋の径時変化(重量、変位、気象データの関係)

再組立した既存木橋は、仮設橋台との間にロードセルを挟み込むことにより、各支点反力重量を測定し、それを足し合わせることで、全体重量を測定した。またスパン中央位置には、地面に木杭を打ち込んで不動点を立て、既存木橋との間に変位計を設置して鉛直変位を計測した。測定値の記録は、東京測器社製ポータブルデータロガーTDS-102、および同社製デジタルひずみ測定器 TC-31K+スイッチボックス CSW-5A-05 を用いて行い、10 分間隔で記憶させた。

利用した気象データは、最寄りの気象庁 アメダス地域気象観測所 三次観測点(広島県三次市三次 町、北緯 34 度 48.7 分統計 132℃51.0 分、標高 159m)の日ごとの観測データを、気象庁のホームページ から入手して用いた。

第1径間は、2007/03/30に重量測定を開始した。ロードセルは、共和電業社製薄型ロードセル マルチ フォースセンサ LCTD-A-300KN(定格容量 300kN、定格出力 2mV/V)を4 台用い、それぞれ別チャンネ ルのデータとしてデータロガーTDS-102にて測定した。変位測定には、東京測器社製ひずみ変換式高感 度変位計 CDP-50を2 台用い、上下流側それぞれの中央格点下側を繋ぐ敷梁に設置し、不動点側に取 り付けたアクリル板を下向きに射す形で測定した。変位計測は、2008/06/18 に実施した破壊載荷実験の 準備のため、2008/06/12 に終了した。

第2径間は、2007/09/13に重量測定を開始した。ロードセルは、共和電業社製薄型ロードセルマルチフォースセンサLCTE-A-100KN-P(定格容量100kN、定格出力2mV/V)を4台用い、それぞれ別チャンネルのデータとして測定した。2008/11/05には再編第1径間の架設に合せて新設の仮設橋台上に移設し、それに合せて重量測定に使用するロードセルは前述した4台のLCTD-A-300KNに変更した。変位測定は、接続するデータロガー(TC-31K+CSW-5A-05)のチャンネル数制限により、当初スパン中央、かつ幅員方向中央位置の敷梁にCDP-50(前述と同一機種)を1台設置し、不動点側に取り付けたアクリル板を下向きに射す形で測定した。再編第1径間架設後は、架設位置が同じということもあって前述した2台のデータロガーを一体で運用し測定することとしたので、上下流側それぞれの中央格点下側を繋ぐ敷梁に東京測器社製ダイヤルゲージ型変位計DDP-50Aを各1台設置し、直下の地表面に打ち込んだ木杭と、変位計先端に取り付けたフックとの間をワイヤーで結び、上向きに引き込む形で測定した。2010/03/26には東京測器社製差動トランス式防水型変位計FDP-50Aに2台とも変更し、直下の地表面に打ち込んだ木杭から伸ばしたワイヤーの先端に的を取り付け、その的を上向きに射す形で測定した。

再編第1径間は、2008/11/05に重量測定を開始した。ロードセルは、新設した仮設橋台に移設した第2 径間を測定していた4台のLCTE-A-100KN-Pをそのまま用い、データロガーとの結線を改めた。変位測 定は第2径間同様に、架設後は上下流それぞれにDDP-50Aを各1台設置し、2010/03/26からは FDP-50Aに2台とも変更した。

(軽部正彦、藤田和彦、築山健一、山本 健、川元満夫)

#### 参考 URL

- 気象庁 > 気象統計情報 > 過去の気象データ検索 > 日ごとの値 http://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html
- 気象庁 > 気象等の知識 > 気象観測・気象衛星 > アメダスについて:地域気象観測所一覧 http://www.jma.go.jp/jma/kishou/know/amedas/ame\_master.pdf


写真1第1径間に設置したデータロガー (TDS-102)のデータ回収状況 (2007/09/14)



写真2 第1径間のロードセル設置状況 下流中州側(2007/03/29)



写真3 第1径間に設置した変位計 下流側(2007/09/13)



写真4 第1径間に設置した変位計 上流側近影(2007/09/13)



写真5 第2径間に設置したデータロガー (TC-31K)のデータ回収状況 上流側近影(2007/09/14)



写真6 第2径間のロードセル設置状況 下流中州側(2007/09/13)



写真7 第2径間に設置した変位計 中央1点のみ(2007/09/14)



写真8 データロガーの設置状況 第2径間と再編第1径間(2010/03/25)



写真9 移設した第2径間(手前)と 再編第1径間のロードセル設置状況 上流中州側(2007/09/13)



写真 10 移設した第2径間に設置した変位計 下流側(2008/11/06)



写真 11 移設した第2径間に設置した変位計 下流側近影(2008/11/06)



写真 12 再編第1径間に設置した変位計 下流側(2010/03/26)



写真13 再編第1径間に設置した変位計 下流側近影(2010/03/26)















































## 2-1 付3 再組立した既存木橋の全体形状

再組立した既存木橋は、デジタルレベル(sokia SDL30i)を用いて、トラス格点下部および橋台の鉛直高さを測定し、全体形状を追跡した。

破壊載荷した第1径間(2007年3月再組立)は、1990年の架橋現地での架設完了時にも、中央が垂下する形状にあった。2007年3月の再組立架設直においても中央部が垂下する形状にあったが、再組立てから1年を超えた破壊載荷直前の2008年5月の測定ではその度合いを増している。この時の最大の変形は下流側トラス格点13の位置で-211.0mm、再組立架設後からの増分では上流側トラス格点15の位置で-58.2mm が最大であった。増分を示した図では、上流側のトラス構面の変形が大きく、それも上流側トラス格点13から15付近に変曲点がある。この位置は、部材の傷みが激しく、また破壊載荷実験において最初の破壊を生じた個所であった。

最初に架橋された現地は、標高約200m自然公園内であり、両岸および中洲の取り付き道路等の関係から2径間全体に2.5%の縦断勾配(36mで900mm)が付けられていた。

(軽部正彦、新藤健太、青木謙治、藤田和彦)



写真1 水準測量の様子 (2010/03/25)



写真 2 コンクリートブロックを使った載荷試験 (2007/07/19)







## 2-1 付 4 再組立木橋の Web カメラによる観察

広島県立総合技術研究所 林業技術センター内に再組立した木橋の、経時変化の自動記録、防犯、 および森林総合研究所本所等、遠隔地からの観察のため、Webカメラを設置した。

Web カメラには、Panasonic 製 ネットワークカメラ BB-HCM371を2台購入・設置した。設定は記録・転送状況によって変更を加えたが、概ね1時間に1枚のWebカメラ内蔵メモリへの記録と、1日に1枚の森林総合研究所本所内設置の材料接合研究室ftpサーバーへの転送、カメラ機能である画像に変化があった場合の記録を自動的に行うよう設定した。収録した画像は、同カメラの最高画質設定である640×480ピクセル(画質優先)とした。なお、Webカメラのインターネット回線への接続は、ブロードバンドルータ(BAFFALO 社製 AirStation WZR-RS-G54HP)を介して、広島県立総合技術研究所林業技術センターが契約したプロバイダー(pionet)に接続し、DNS には DynDNS を利用して http://kappabashi.dyndns.org/を取得した。

(軽部正彦、藤田和彦、築山健一)



写真1 第1径間の Web カメラ設置状況 (2007/06/18)



写真2 第1径間の Web カメラ設置状況 拡大(2007/06/18)



写真3 第2径間のWebカメラ設置状況 (2007/09/14)



写真4 第2径間のWebカメラ設置状況 拡大(2007/09/14)



写真5 第1径間(2007/04/05 10:43:20)



写真6 第1径間(2007/06/18 06:50:09)



写真7 第1径間(2008/04/22 11:13:39)



写真8 第1径間(2008/06/18 07:31:31)



写真9 第1径間(2008/06/18 10:00:51)



写真 10 第1径間(2008/06/18 11:31:31)



写真11 第1径間(2008/06/1812:31:31)



写真 12 第1径間(2008/06/18 13:31:31)



写真13 第1径間(2008/06/1814:31:31)



写真14 第2径間(2007/09/1407:42:54)



写真15 第2径間(2008/09/0912:29:19)



写真16 第2径間(2008/11/05 15:13:22)



写真 17 第2径間(2008/11/27 09:00:00)



写真18 第2径間(2011/01/17 09:00:00)



写真 19 再編第1径間(2008/11/27 09:00:00)



写真 20 再編第1径間(2011/01/17 09:00:00)



写真 21 Web カメラの操作画面例

## 2-2 付 1 破壊載荷した既存木橋の振動特性

本研究で主な研究対象とした既存木橋のうち、2007 年3月に再組立した第1径間(36m)について、その振動特性を調査した。調査方法は、常時微動測定、人力加振による自由振動測定とし、2007 年3月と7月の2回実施した。振動の測定は、図1中の①~⑥点にあたるトラス格点近傍の主桁上に写真1左のように速度計を設置し(写真はY方向測定時)、Y方向とZ方向のそれぞれについて収録装置に取り込んだ。

常時微動測定では、暗騒音によって励起された微動を収録し、フーリエ変換して得られた周波数スペ クトルから固有振動数(Fm)を求めると共に、主要なピークにおける振動モードを求めた。

人力加振では、まず成人男性(体重 68kg)が加振点の床板上で軽くジャンプし、自由振動を励起させるZ方向加振を、スパン中央部(1/2点)、1/4点、3/4点の速度計の中間(例えば、①と②の間)、および偶数番速度計の近傍(例えば②近傍)の計 6 箇所を加振点として行った。Y 方向加振では、同じ成人男性(体重 68kg)が床板上でY方向に体を揺すって振動を励起し、十分に共振した時点で加振をやめて自由振動波形を測定するものとし、加振点はスパン中央部と 1/4点の速度計の中間の計 2 箇所とした。得られ振動波形をフーリエ変換して、周波数スペクトルから固有振動数(Fv)を求め、スパン中央④点で計測した自由振動波形からは固有振動数(Fd)と振幅減衰比による減衰定数(D)を求めた。

常時微動測定の結果として、図2に鉛直Z方向、図3に水平Y方向の周波数スペクトルを示す。図より、Z方向の固有振動数(FmZ)が3.613Hz、Y方向の固有振動数(FmY)が1.367Hzであることが分かる。 また、各周波数ピークにおけるZ方向の振動モードを図4に、Y方向を図5に示した。振動モードは、最 大振幅を記録した測定点の振幅を1として、他の測定点の振幅を表示している。また図5では、上下流側 でほぼ同じ振幅を示したため、下流側の測定結果のみ示している。Z方向の1.367HzはY方向の揺れを 検知したもので、対称モードは3.613Hzである。5.859Hzは捻れのモードが、11.523Hzは逆対称モードが 現れていることが分かる。Y方向では1~3次のモードが得られた。

人力加振結果として、表1に全加振の $F_v$ 、 $F_d$ 、Dを示した。また、代表的な減衰波形を図6と図7に示す。自由振動波形から求めた固有振動数( $F_v$ 、 $F_d$ )は、振幅の大きさの関係からか、いずれも常時微動で求めた固有振動数(Fm)よりも若干低い値となった。また、減衰定数については、Z方向が約2.2%、Y方向が約5.2%であった。

2003 年 12 月に解体される直前に架設供用現地で行った調査では、加速度ピックアップと携帯型 FFT アナライザを用いて全体振動性状を簡易測定しており、人力加振(成人男性が1回跳躍)による鉛直方向の固有振動数は 3.75Hz であった。測定精度の関係から単純比較はできないものの、再組立後は支点が固定されていないこと、床板が固定されていないことなどから、固有振動数が若干低下したものと考えられる。

(青木謙治)

101

No.	方向	加振点	加振モード	$F_{\rm v}({\rm Hz})$	$F_d(\text{Hz})$	D(%)
Z-1	鉛直	①②間	逆対称	3.516	3.497	0.90
Z-2		③④間	対称	3.516	3.492	2.22
Z-3		⑤⑥間	逆対称	3.516	3.502	2.13
Z-4		②近傍	逆対称・捩れ	3.516	3.488	2.25
Z-5		④近傍	対称・捩れ	3.516	3.476	2.54
Z-6		⑥近傍	逆対称・捩れ	3.516	3.492	2.25
Y-1	水平	12間	逆対称	1.270	1.327	5.11
Y-2		③④間	対称	1.270	1.317	5.28

表1 人力加振結果から求めた固有振動数と減衰定数



図1 速度計の設置位置



写真1 振動測定に用いた速度計と収録装置


図3 水平方向(Y)のフーリエスへ゜クトル



# 2-3 付1 破壊載荷実験方法の検討

破壊載荷時の変位測定および、積載荷重となる土嚢の吊り込み方法を検証した。異なるサイズの土嚢 を準備し、実際に即したたが、上弦材間の水平ブレースを通過させるために1個当たり約320kgの土嚢で あれば、上弦材間の水平ブレースをかわして床板上に降ろすことが可能であった。土嚢に詰める土砂は、 現地の重機操作実習用のものを借用することとした。変形は、巻き取り変位計を用いて巻き込み方向の 変形となるようにセットする。三次元的な変位が知りたい箇所については、三角錐状に組み合わせて実験 後に換算することとした。

破壊載荷時に生じる三次元的な挙動を把握する方法として、画像計測の適用性も検討した。新しい測 定法ということもあり、日中屋外での測定実績はなかったが、離れた位置から非接触で数多くの測定点の 三次元的な挙動を測定できるメリットは、破壊載荷実験として打ってつけのものである。

適用性の検討項目としては、

1. 計測の安定度:時間・日射・天候により、ドリフトしないこと

2. 静的変位測定:載荷実験による変形オーダーが合致していること

3. 動的変位測定:他の測定機器による計測と結果が符合するか

の3点に注目した。

結果としてみれば、日中の屋外測定に対しての信頼性が低いものであったため、繰り返し実験することの出来ない今回の破壊載荷実験に用いることは、残念ながら不適当であると判断した。

不測の事態に備えた、別系統の変位測定方法としては、鉄塔の屋外水平加力試験等で実績のある、 自動追尾型トータルステーション(TCA1100S)を使った三次元光波測量を実施することとした。

(軽部正彦、青木謙治)

#### 【三次元測定の計算処理方法】

X,Y,Z 空間において、三角錐の頂点 4 点の座標を A(xA, yA, zA)、B(xB, yB, zB)、C(xC, yC, zC)、 D(xD, yD, zD)とし、辺 AD、BD、CD の長さをそれぞれ L1, L2, L3 とおくと、

$$L_{1} = \sqrt{(x_{A} - x_{D})^{2} + (y_{A} - y_{D})^{2} + (z_{A} - z_{D})^{2}}$$

$$L_{2} = \sqrt{(x_{B} - x_{D})^{2} + (y_{B} - y_{D})^{2} + (z_{B} - z_{D})^{2}}$$

$$L_{3} = \sqrt{(x_{C} - x_{D})^{2} + (y_{C} - y_{D})^{2} + (z_{C} - z_{D})^{2}}$$
...(1)

と表せる。

さらに、計算の簡略化のため、三角形 ABC を正三角形とし、Z=0の XY 平面上に設置したとする。この時、A 点の座標を(0, -2 α, 0)とおくと、B,C 点の座標はそれぞれ次のように定まる。これを元に(1)式を書き 直すと、

$$L_{1} = \sqrt{x_{D}^{2} + (-2\alpha - y_{D})^{2} + z_{D}^{2}}$$

$$L_{2} = \sqrt{\left(-\sqrt{3}\alpha - x_{D}\right)^{2} + (\alpha - y_{D})^{2} + z_{D}^{2}}$$

$$\dots (2)$$

$$L_{3} = \sqrt{\left(\sqrt{3}\alpha - x_{D}\right)^{2} + (\alpha - y_{D})^{2} + z_{D}^{2}}$$

となる。この(2)式を xD, yD, zD について整理すると、

$$\begin{split} x_{D} &= \frac{\sqrt{3}L_{2}^{2} - \sqrt{3}L_{3}^{2}}{12\alpha} \\ y_{D} &= \frac{-2L_{1}^{2} + L_{2}^{2} + L_{3}^{2}}{12\alpha} & \cdots (3) \\ z_{D} &= \sqrt{\frac{12\alpha^{2}(L_{1}^{2} + L_{2}^{2} + L_{3}^{2} - 12\alpha^{2}) - L_{1}^{4} - L_{2}^{4} - L_{3}^{4} + L_{1}^{2}L_{2}^{2} + L_{1}^{2}L_{3}^{2} + L_{2}^{2}L_{3}^{2}}{6\alpha} \end{split}$$

となり、三角錐頂部の XYZ 座標を求めることができる。



写真1 土嚢による載荷方法の検証



図1 載荷積載·変位測定方法



写真 2 三次元測定システム(赤線は写真上で追加)



図2 下弦材の変位測定箇所(平面図)











写真3 左から三次元変位測定用カメラ、測定用マーカーと測定準備の様子、日没後の測定風景



写真 4 左からコンクリートブロック吊下げによる載荷、日射による測定機器の熱暴走



図 5a 画像による三次元変位測定結果(左:人力加振、右:載荷)



図 5b 画像による三次元変位測定結果(除荷)



図3 測量用ターゲット設置位置



写真3 光波測定の様子(初期位置測定時)

# 2-4 付1 破壊載荷実験の実際

上流側

中洲側

下流側

破壊載荷に用いた土嚢は、直径 900mm(約 320kg/袋)で、破壊に十分な量として 130 袋(約 400kN 分) を用意した。載荷は、用意した土嚢と積載範囲の全てが作業半径内に納まる位置で、破壊に対する安全 距離が確保できる場所に移動式クレーンを位置させて行った。また、玉掛け行う作業員が乗る高所作業 車についても、土嚢積載範囲の玉掛け作業が可能であることはもちろん、クレーンの荷役作業の障害に ならず、また破壊に対する安全距離が確保できる場所に位置させたて行った。

土嚢の積載は、予定した積載範囲内で出来るだけ等分布荷重となるように、橋長方向の左右および上 下流に対して対象の位置を選び、積載順序を調整した。一時破壊により傾いた後は、載荷が可能な下流 側に集中させた。

(軽部正彦)

上流側

左岸側

下流側





図1 土嚢積載位置とその順序

次破壊:压壊

10 12 14 10 18





写真2 最終破壊状況



図2 構造および部材破壊位置



写真3 上流側下弦材の破断



写真4 一次破壊:破断した下弦材



写真5 二次破壊:下流側上弦材の圧壊



写真6 二次破壊:全体写真



写真7 最終破壊までの連続写真

#### 2-4 付 2 破壊載荷した既存木橋の全体形状と変位、部材のひずみ

破壊載荷実験においては、載荷実験方法の検討の結果から、三角錐状に組み合わせた巻取式変位計(DP-500C、DP-1000E/C、DP-2000D/E、DTP-D-5KS)等を使って3次元的変位測定を実施した。上下弦材の各接合部および斜材端部接合部の各点で高感度ひずみ変換式変位計(CDP-50、CDP-100、SDP-100、SDP-200D/R、DTH-A-100)による軸方向の変位測定を実施した。また各部材のトラス格点の中間に1G4Wひずみゲージ(PL-60-11-LQM、接着剤:CN-E、保護養生:SBコーティングテープ+VM保護防水テープ)を上下両面に貼付し、各部位での部材のひずみを測定した。

破壊載荷時の全体形状を見てみると、一時破壊直前の鉛直変形量は下流側トラス格点13の位置で最大-25mm であった。一次破壊までの間は極端な変位は起こしていないが、実際破壊したのは、上流側下弦材であった。それにより上流側トラス格点13の位置で最大-628mmとなったが、下流側トラス格点13の位置では-60mm に止まった。大きく傾いたが載荷を続け、二次破壊までに積載荷重は2倍程になるが、その時上流側トラス格点13の位置で最大221mm、下流側861mmの鉛直変位を記録した。

上下弦材の接合部変位を見ると、一次破壊直前まで下弦材では引張軸力による抜け出し変位が、上 弦材では圧縮軸力による接合金物と部材端部断面の接触までの変位が検出され、その量は0.1mm前後 の小さなものであった。一次破壊後に約4mmの変位を示した個所は、下弦材破断個所の直近である。そ の他の個所では、最大1.2mm程度であった。同様の検出変位の増大は二次破壊直前でも見られる。ま た、一次破壊直前までは接合部材の軸方向で比較的安定した変位分布をしているが、一次破壊後は、 破断した上流側下弦材の接合部変位量が減少している。二次破壊直前では、更に橋軸直交方向の片荷 重の影響を受けて、上下弦材の一部接合部に変形が集中していることがわかる。

斜材端部の接合部変位を見てみると、一次破壊直前の斜材端部接合部は殆どの個所が 0.1mm 程度 であったが、上流側下弦材破断位置の直近の斜材下端では、約0.7mmと突出した値を示している。一次 破壊後は、上流側下弦材の破断により木橋全体が捩じれるような変形を受けることとなり、その影響は支 承に近い両橋詰で大きく出ている。

部材のひずみを見ると、上弦材では、一次破壊直前にひずみ値が突出しているのは上流側下弦材の 曲げひずみで、特に破断した 36m スパン 5 本継の径間中央部材全体で約 500  $\mu \epsilon$  を示している。この時、 二次破壊個所でもある下流側上弦材で圧縮軸ひずみが大きくなっており、最大となるスパン中央で-326  $\mu \epsilon$ であった。一次破壊後は、上流側下弦材の曲げひずみ最大箇所が破断に伴って移動し-1240  $\mu \epsilon$ となり、上流側上弦材の曲げひずみが一次破壊個所の上部付近で 940  $\mu \epsilon$  となった。また下流側上弦材 の軸ひずみもと-1084  $\mu \epsilon$  に大きくなった。二次破壊直前では、下流側下弦材の軸ひずみが最大 822  $\mu \epsilon$ と大きくなる一方、下流側上弦材の曲げひずみが大きくなっている。

斜材のひずみを見てみると、一次破壊直前では-100 μ ε 前後の圧縮軸ひずみが概ね一様に分布し、 垂下量の大きいスパン中央付近では曲げひずみが最大 100 μ ε と大きくなっている。一次破壊後は、引 張破断した上流側下弦材の左右で方向の違う大きな曲げひずみが検出されており、これに該当する部材 は載荷実験中に下端接合部ボルト穴からの割裂していた。軸ひずみの最大値は上下流側とも-400 μ ε 程度であるが、その位置は上流側下弦材破断位置直近の斜材と、スパン中央に関して点対象の位置に ある下流側斜材であった。二次破壊直前では、軸ひずみの絶対値が 10%から 20%程度大きくなる一方、 下流側上弦材の圧壊した位置の左右で方向の違う大きな曲げひずみが検出されている。

(軽部正彦、新藤健太、青木謙治、藤田和彦)



写真2 ひずみゲージの保護養生と 下弦材接合部変位計の設置状況

(2007/06/11)



写真1 破壊載荷試験開始直前の状況 (2007/06/18 4 枚の写真を合成)



写真1 ひずみゲージ貼付の状況 (2007/06/11)







図4 上下弦材の巻取変位計設置方法







図63次元計測から求めた下弦材測定点の鉛直変位



図7 下弦材測定点の変形状況



図8 巻取変位計による3次元測定と光波測定による下流側下弦材の変位比較































# 2-4 付3 破壊載荷実験後の部材損傷状況とその活用

破壊載荷実験終了後、第1径間(2007年3月再組立)は接合部を丁寧に解き解して部材・部品の状態に解体した。

各部材・部品は、各々について劣化、および破壊載荷実験による傷みについて調査整理した。その結果を表に示す。

劣化、および傷みの少ない部材は、全長 18m の木橋(再編第1径間)の部材に転用した。それ以外の 上下弦材と斜材は、部材の状況を勘案しながら、原断面のまま切断した短柱圧縮試験、半割製材した後 に実大引張試験、接合部試験に振り分けた。また敷梁と上弦材繋ぎ材はそのまま実大曲げ試験、ブレー スは実大引張試験に振り分けた。振り分け結果を表に示す。

破壊載荷実験に際して、各部材にはひずみゲージを添付している。

ひずみゲージは、破壊載荷実験に先立つ 2008/06/02 から 06 までの間に、架設組立状態で貼付した。 用いたのは、東京測器社製ひずみゲージ PL-60-11-1LQM で、接着剤 CN-E で貼付した後、コーティング 用 SB テープで保護し、更に VM テープで養生した。測定器へは 4 線式接続を行い、ポリプロピレン 4 並 行線とモジュラーコネクタを介して、データロガーTDS-530・スイッチボックス IHW-50G に接続した。

ひずみゲージの貼付位置と、破壊載荷実験時のひずみ変化、解体・転用後の部材ひずみ変化を、続く頁に表として示す。

(軽部正彦、宮武 敦、藤田和彦)




	* 番号の若い方を左											
名称	記号	材種	寸法			状況箇所					備考	
			幅	厚	長さ	左(上)端	中左(上)	中中	中右(下)	右(下)端	全体	
上弦材	上弦1-1	ベイマツ集成材	220	262	7,284	0	0	0	0	0	0	
	上弦1-2下	"	220	262	6,367	×	×	×	×	×	×破断	切断済み
	上弦1-3 (1)	"	220	262	5,167	0	0	0	0	0	0	
	上弦1-4 🕞	"	220	262	6,367	0	0	0	0	0	0	
	上弦1-5下	"	220	262	7,284	0	0	0	0	0	0	
下弦材	下弦1-1下	"	220	262	7,234	0	0	0	0	0	0	
	下弦1-2页	"	220	262	6,367	×	×	×	×	×	×	切断済み
	下弦1-3页	"	220	262	8,167	×	×	×	0	0	×	破壊
	下弦1-4页	"	220	262	6.367	0	0	0	0	0	0	
	下弦1-5下	"	220	262	7.234	△腐れ	0	0	0	0	0	(腐朽)
斜材	斜1-1下	"	220	228	2.950	0	0	Õ	0	0	0	
	斜1-2下	"	220	170	2,900	0	0	0	0	△腐れ		腐朽
	斜1-3下	"	220	170	2 900	0	0	0	0	△腐れ		腐朽
	斜1-4下	"	220	170	2,900	Ö	Õ	Õ	Õ	0	0	10415
	斜1-5下	"	220	170	2 900	0	0	0	0	0	0	
	斜1-6下	"	220	170	2 900	0	0	0	0	0	0	
	斜1-7下	//	220	170	2,900	0	0	0	0	0	0	
	斜1-8页	"	220	170	2,900	0	0	0	0	 × 削れ	×	破壊
	斜1-9页	"	220	170	2,000	×	×	×	×	×	x 全休割れ	破壊
	斜1-10页	"	220	170	2,000	0	0	0	0	0		HX 12X
	斜1-11页		220	170	2,000	0	0	0	0	0	0	
	剑1-12页		220	170	2,000	0	0	0	0	0	0	
	剑1-12页		220	170	2,000	0	0	0	0	0	0	
	剑1-1/页		220	170	2,000	0	0	0	0	0	0	
	剑1-15页	"	220	170	2,300	0	0	0	0	0	0	-
	斜1-16页	"	220	170	2,300	0	0	0	0	0	0	
	斜1-17页	"	220	170	2,900	0	0	0	0	0	0	
	斜1_10页	"	220	170	2,300	0	0	0	0	0	0	
	斜1-10页	"	220	170	2,900	0	0	0	0	0	0	
		"	220	170	2,900	00	0	0	0	0	0	
	ポー2000 余1-21分	"	220	170	2,900	0	0	0	0	 へ 府 わ	0	府七
	ポリー21 (1) 1-00 (1) 1-0	"	220	170	2,900	0	0	0	0			<b>腐竹</b>
	ポリーZZ (1)1 00 (1)1	"	220	170	2,900	0	0	0	0	0	0	
	ポーZ3下 会社 04年	"	220	170	2,900	0	0	0	0	0	0	
1	ポ+1−24①	"	220	170	2,900	0	0	0	0	0	0	
		_										
		_										
			└───┤									
		_										
		_										
											ļ	
							ļ				ļ	
ļ						100						
						139						



						* 番号の若(	い方を左					
名称	記号	材種	寸法			状況箇所					備考	
			幅	厚	長さ	上流	中上	中中	中下	下流	全体	
継ぎ材	継1-1	ベイマツ集成材	126	170	2,500	0	0	0	0	0	0	
	継1-2	"	126	170	2,500	△腐れ	0	0	0	0		腐朽
	継1-3	"	126	170	2,500	0	0	0	0	0	0	
	継1-4	"	126	170	2,500	×	0	0	0	0	×破壊	破壊
	継1-5	"	126	170	2,500	× 欠け	0	0	0	× 欠け	× 欠け	破壊
	継1-6	"	126	170	2,500	× 割れ	0	0	0	×割れ	× 割れ	破壊
	継1-7	11	126	170	2,500	0	0	0	0	×割れ	× 割れ	破壊
	継1-8	"	126	170	2,500	0	0	0	0	0	0	
	継1-9	"	126	170	2,500	0	0	0	0	0	0	
	継1-10	"	126	170	2,500	0	0	0	0	0	0	
	継1-11	"	126	170	2,500	0	0	0	0	0	0	
	継1-12	"	126	170	2,500	0	0	0	0	0	0	
						(長もの)		(短もの1)	(短もの2)		(全体)	
ブレース	ブレス1-1	ベイマツ集成材	92	170	3,800	△孔腐れ		0	0		0	腐朽
	ブレス1-2	"	92	170	3,800	0		0	0		0	
	ブレス1-3	11	92	170	3,800	0		0	0		0	
	ブレス1-4	"	92	170	3,800	×破断		$\triangle$	$\triangle$		×	破壊
	ブレス1-5	11	92	170	3,800	0		0	0		0	
	ブレス1-6	"	92	170	3,800	0		0	0		0	
	ブレス1-7	11	92	170	3,800	0		0	0		0	
	フ <sup>*</sup> レス1-8	"	92	170	3,800	△腐れ		0	0		$\triangle$	腐朽
	ブレス1-9	"	92	170	3,800	0		0	0		0	
	ブレス1-10(1-20と記入		92	170	3,800	× 腐れ		0	0		×	腐朽
	ブレス1-11	"	92	170	3,800	△孔腐れ		0	0		$\triangle$	腐朽

下部!	收桁											
				-:	次破壊:5	引張皈断						
K.			M									
	<u> </u>			××	×	×				*		1. P
名称	記号	材種	寸法			状況箇所					備考	
			幅	厚	長さ	上流	中上	中中	中下	下流	全体	
敷桁	敷桁1-1	ベイマツ集成材	170	228	3,400	0	0	0	0	0	0	
敷梁	敷梁1-2	ベイマツ集成材	170	160	3,400	0	0	0	0	0	0	
	敷梁1-3	"	170	160	3,400	0	0	0	0	0	0	
	敷梁1-4	"	170	160	3,400	0	0	0	0	0	0	
	敷梁1-5	"	170	160	3,400	0	0	0	0	0	0	
	敷梁1-6	"	170	160	3,400	0	0	0	0	0	0	
	敷梁1-7	"	170	160	3,400	0	0	0	0	0	0	
	敷梁1-8	"	170	160	3,400	0	0	0	0	0	0	
	敷梁1-9	"	170	160	3,400	×裂け	×	0	0	0	×	破壊
	敷梁1-10	"	170	160	3,400	×裂け	×	0	0	×裂け	×	破壊
	敷梁1-11	"	170	160	3,400	0	0	×	× 裂け	×裂け	× 割れ	破壊
	敷梁1-12	"	170	160	3,400	×裂け	× 裂け	×裂け	×裂け	×裂け	×全体割れ	破壊
	敷梁1-13	"	170	160	3,400	×穴腐れ	$\bigtriangleup$	0	0	0	×	腐朽
	敷梁1-14	"	170	160	3,400	0	0	0	0	0	0	
	敷梁1-15	"	170	160	3,400	0	0	0	0	0	0	
	敷梁1-16	"	170	160	3,400	0	0	0	0	0	0	
	敷梁1-17	"	170	160	3,400	0	0	0	0	0	0	
	敷梁1-18	"	170	160	3,400	0	0	0	0	0	0	
	敷梁1-19	"	170	160	3,400	0	0	0	0	0	0	
	敷梁1-20	"	170	160	3,400	0	0	0	0	0	0	
	敷梁1-21	"	170	160	3,400	× 欠け	× 腐れ	0	0	0	×	腐朽
	敷梁1-22	"	170	160	3,400	0	0	0	0	0	0	
	敷梁1-23	"	170	160	3,400	0	0	0	0	0	0	
	敷梁1-24	"	170	160	3,400	× 腐れ	0	0	0	0	0	腐朽
敷桁	敷桁1-25	ベイマツ集成材	170	228	3,400	1400	0	0	0	0	0	

部材 種別	名称	記号	上下流 配置	備考	備考	再編 位置	残部材の 有無	現物 評価	既 加工	広島 残留	奈良 行き	振り 分け
1	上弦材 上弦材	上弦1-1(上) 上弦1-2(上)	上流	0		1	有り	0	切断	—部		短柱圧縮 短柱圧縮
1	上弦材	上弦1-3(上)	上流	×	破壊			Δ	切断	一部		短柱圧縮
1	上弦材	上弦1-4(上)	上流	0		2	友は	0				与社区统
	上江的		上加	U			H7					风口工作
2	下弦材	下弦1-1(上)	上流	0		1				10		
2	<u>卜弦材</u> 下弦材	<u> </u>	上流	×	俄     俄     农				切断	一部		半割後、短柱上縮
2	下弦材	下弦1-4(上)	上流	Ô	9JB/1/107	2	有り	0				半割後、引張
2	下弦材	下弦1-5(上)	上流	$\triangle$	(腐朽)	3						
3	斜材	斜1-1(上)	上流	0		1						
3	斜材	斜1-2(上)	上流	Δ	腐朽			0				接合部
3	斜材	斜1-3(上)	上流	$\triangle$	腐朽			0		_		接合部
3	斜材	約1-5(上)	上流	$\Delta$	腐朽			0				接合部
3	斜材	斜1-6(上)	上流	0		2						
3	斜材	斜1-7(上) 斜1-9(上)	上流	Δ	腐朽	3						
3	斜材	斜1-9(上)	上流	0		11				-		
3	斜材	斜1-10(上)	上流	Õ				Δ				接合部
3	斜材	斜1-11(上) 斜1-10(上)	上流	×全体割れ	破壊			X		残		
3	斜材	科1-12(上)	上流	× 全体割れ	破壊					残		
3	斜材	斜1-14(上)	上流	0				Δ				接合部
3	斜材	斜1-15(上)	上流	0		0		0		_		接合部
3	斜材	料1-10(上) 斜1-17(上)	上流	0		0						
3	斜材	斜1-18(上)	上流	Δ	腐朽			0				接合部
3	斜材	斜1-19(上)	上流	0				0		_		接合部
3	斜材	科1-20(上) 斜1-21(上)	上流	0		8						接合部
3	斜材	斜1-22(上)	上流	ŏ				0				接合部
3	斜材	斜1-23(上)	上流	$\triangle$	腐朽	10		0				接合部
3	斜材	科1-24(上)	上流	0		12						
1	上弦材	上弦1-1(下)	下流		上口座に文フィ	1	有り	0		石出	立7	短柱圧縮
1	上弦材	上弦1-3(下)	下流	▲ 100 图	列削消の			Ô	切断			短柱圧縮
1	上弦材	上弦1-4(下)	下流	Õ		2						
1	上弦材	上弦1-5(下)	下流	0		3	有り	0				短柱圧縮
2	下弦材	下弦1-1(下)	下流	0		1						
2	下弦材	下弦1-2(下)	下流	×	切断済み			×		残		
2	下弦材	下弦1-3(下)	下流	×	破壊	2	方川		切断			半割後、引張
2	下弦材	下弦1-5(下)	下流	0	(腐朽)	3	有り					十刮饭、51饭
3	斜材	斜1-1(下)  斜1-2(下)	下流	0	度切	1						按合部
3	斜材	All=3(下)	下流	$\Delta$	腐朽			0				接合部
3	斜材	斜1-4(下)	下流	0		4						
3	斜材	斜1-5(下)  斜1-6(下)	下流	0		5						
3	斜材	斜1-7(下)	下流	ŏ		2						
3	斜材	斜1-8(下)	下流	×	破壊			0				接合部
3	斜材	斜1-9(下)	下流	×全体割れ	破壊	5(L)		×		残		
3	斜材	<u>新日10(下)</u> 斜1-11(下)	下流	0		3(上)						
3	斜材	斜1-12(下)	下流	Ō				0				接合部
3	斜材	斜1-13(下)	下流	0				0				接合部
3	斜材	が1 = 14(下)  斜1-15(下)	下流	0				0				按 一
3	斜材	斜1-16(下)	下流	õ		8						
3	斜材	斜1-17(下)	下流	0		9						
3	斜材	〒10(下)  斜1-19(下)	下流	0		6						
3	斜材	斜1-20(下)	下流	ŏ				0				接合部
3	斜材	斜1-21(下)	下流	Δ	腐朽	10		0				
3	科材	秋1-22(下)  斜1-23(下)	ト () 下 流	0		10						
3	斜材	斜1-24(下)	下流	õ		12						

部材 種別	名称	記号	上下流 配置	備考	備考	再編 位置	残部材の 有無	現物 評価	既 加工	広島 残留	奈良 行き	振り 分け
4	継ぎ材	継1-1	1	0		1						
4	継ぎ材	継1-2	2	$\triangle$	腐朽			0				素材曲げ
4	継ぎ材	継1-3	3	0				0				素材曲げ
4	継ぎ材	継1-4	4	×破壊	破壊			0				素材曲げ
4	継ぎ材	継1-5	5	× 欠け	破壊			$\triangle$				素材曲げ
4	継ぎ材	継1-6	6	×割れ	破壊			0				素材曲げ
4	継ぎ材	継1-7	7	×割れ	破壊	2						
4	継ぎ材	継1-8	8	0		3						
4	継ぎ材	継1-9	9	0		4						
4	継ぎ材	継1-10	10	0		5						
4	継ぎ材	継1-11	11	0		6						
4	継ぎ材	継1-12	12	0				0				素材田げ
					ret are	_						+++
5	ブレース		1	0	腐朽			0				
5	ブレース		1									素材り版
5	ブレース		1	0		1		0				系材匀版
5	ブレース	<u>ブレスI-2</u> ブレフ1-0-1	2	0		1						
5	ブレース	<u>ンレヘ1-2-1</u> ブレス1-2-2	2			1						
5	ブレース	ブレス1-2	2	0		2						
5	ブレーマ	ブレス1-3-1	3	<u> </u>		2						
5	ブレース	ブレス1-3-2	3			2						
5	ブレース	ブレス1-4	4	×	破壊	2				産		
5	ブレース	ブレス1-4-1	4		712-722			0		12		素材引張
5	ブレース	ブレス1-4-2	4					ŏ				素材引張
5	ブレース	ブレス1-5	5	0		3		Ŭ				
5	ブレース	ブレス1-5-1	5	Ŭ		3						
5	ブレース	ブレス1-5-2	5			3						
5	ブレース	ブレス1-6	6	0				0				素材引張
5	ブレース	ブレス1-6-1	6					0				素材引張
5	ブレース	ブレス1-6-2	6					0				素材引張
5	ブレース	ブレス1-7	7	0		4						
5	ブレース	ブレス1-7-1	7			4						
5	ブレース	ブレス1-7-2	7			4						
5	ブレース	ブレス1-8	8	$\triangle$	腐朽	5						
5	ブレース	<u>ブレス1-8-1</u>	8					0				素材引張
5	フレース	フレス1-8-2	8					0				素材引張
5	フレース	フレス1-9	9	0		_		0				素材引張
5	フレース		9			5						
5	ブレース		9		広告	5						· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
5	ブレース	ノレス1-10(1-20と記入)	10	×	腐朽			0				
5	ブレース	<u>ノレスI=10=1(1=20と記入)</u> ゴレス1 10 0(1 00ト記入)	10									素材り版
5	ブレース	ブレス1-10-2(1-202記入)	10	A	府北	_						茶竹り饭
5	ブレース	ブレス1-11-1	11		<b>减</b> 个了							<u>糸竹り坂</u> 麦材引進
5	ブレース	ブレス1-11-2	11			_		0				表材引進
J	10 1											אנרע מיאדו
6	動桁	動析1-1	1	0		1						
6	敷梁	敷梁1-2	2	ŏ		2						
6	敷梁	敷梁1-3	3	ŏ		3						
6	敷梁	敷梁1-4	4	Õ		4						
6	敷梁	敷梁1-5	5	0		5						
6	敷梁	敷梁1-6	6	0				0				素材曲げ
6	敷梁	敷梁1-7	7	0		6						
6	敷梁	敷梁1-8	8	0				0				素材曲げ
6	敷梁	敷梁1-9	9	×	破壊			Ó				素材曲げ
6	敷梁	敷梁1-10	10	×	破壊			×		残		
6	敷梁	敷梁1-11	11	×割れ	破壊			×		残		
6	敷梁	敷梁1-12	12	×全体割れ	破壊			×		残		
6	敷梁	敷梁1-13	13	×	腐朽			$\triangle$				素材曲げ
6	敷梁	敷梁1-14	14	0				0				素材曲げ
6	敷梁	敷梁1-15	15	0		7						
6	敷梁	敷梁1-16	16	0				0				素材曲げ
6	敷梁	敷梁1-17	17	0		8						
6	<u></u> 敷梁	<u> 敷梁1-18</u>	18	<u>o</u>		10						
6	<u> </u> 影采	<u>                                     </u>	19	0		9						
6	<u></u> 郑采	殼栄1-20 動源1_01	20	U V	府打	11						±++曲/≟
6	<u> </u> 郑采	敖朱I-2Ⅰ 動沙1_00	21	<u>^</u>	<b>崗</b> 竹	10		0				系材曲に
6	<u></u> 郑栄	敖朱1⁻∠∠ 動沙1_00	22	0		12						表材曲げ
0	<u>秋</u> 末 動 洌	<u>苏木1-23</u> 動沙1-01	23	0	府拓							<u> 米 竹 曲 い</u> 表 材 曲 げ
6	苏木 動桁	<u> 赤木 - 47</u> 動析1-25	24	ŏ	/肉作り	12						<b>ポツ囲り</b>

	4	センサの内訳				部材		破壊載荷実験 (関始時からの美分)		再編第1径間 (同左)			残部材	
СН	測定 内容	詳細	上下流	接点番号	記号	備考	扱い	正	負	残留	組立 完了	(同左) 架設 完了	架設 前後 差分	(同左) 2009/6/3
TDS-000	荷重	荷重	上流	1				41.6	-53.9	-53.3			<u>#7</u>	
TDS-001 TDS-002	荷重	何里 荷重	上流	25				42.9	-24.9	-24.9				
TDS-003	荷重	荷重	下流	25				54.0 189.8	-5.0	-5.0				
								103.0	102.1	101.7				
TDS-092 TDS-093	ひずみ	上弦材	上流	4,6上 4.6下	<u>上弦1-1(上)</u> 上弦1-1(上)		残あり	35	-201	112 35				-8749 ×
TDS-094	ひずみ	上弦材	上流	8,10上	上弦1-2(上)	、切断	///////////////////////////////////////	777	-244	425				-8660
TDS-095 TDS-096	ひずみ	上弦材 上弦材	上流	8,10 ト 12.14上	上弦1-2(上) 上弦1-3(上)	、切断 破壊、切断		273	-245	269				-8779 ×
TDS-097	ひずみ	上弦材	上流	12,14下	上弦1-3(上)	破壊、切断		925	-167	920				-8777
TDS-016 TDS-017	ひずみ	上弦材	上流	16,18上 16,18下	上弦1-4(上) 上弦1-4(上)			268	-263	-118	× 662	529	-133	
TDS-018	ひずみ	上弦材	上流	20,22上	上弦1-5(上)		残あり	7	-225	7				-7979
103-019	ሆነጥ	上近12171	Lini	20,22 F	上级1-5(上)		7支の9	42	-79	42				-0000
TDS-080	ひずみ	下弦材	上流	<u>3,5上</u> 3.5下	<u>下弦1-1(上)</u> 下弦1-1(上)			1	-151	-114	261	142	-119	
TDS-162	ひずみ	下弦材接合部近傍	上流	5上	下弦1-1(上)			283	-291	-272	×			
TDS-163	ひずみ	下弦材接合部近傍	上流	5下 7上	下弦1-1(上)	破壊 切断		19	-108	-106	95	85	-10	×
TDS-165	ひずみ	下弦材接合部近傍	上流	7 7下	下弦1-2(上)	破壊、切断		18	-267	-214				×
TDS-082	ひずみ	下弦材	上流	<u>7,9上</u> 7.9下	<u>下弦1-2(上)</u> 下弦1-2(上)	破壊、切断		39 413	-801	-757				-9004
TDS-166	ひずみ	下弦材接合部近傍	上流	9上	下弦1-2(上)	破壊、切断		1712	-193	1660				5025
TDS-167 TDS-168	ひずみ	下弦材接合部近傍 下弦材接合部近傍	上流	9下 11上	下弦1-2(上) 下弦1-3(上)	破壊、切断 切断済み	広島	545 559	-398	-398				
TDS-169	ひずみ	下弦材接合部近傍	上流	11下	下弦1-3(上)	切断済み	広島	178	-1001	-193				
TDS-084 TDS-085	ひずみ	<u>卜弦材</u> 下弦材	上流	<u>11,13上</u> 11,13下	<u>ト弦1-3(上)</u> 下弦1-3(上)	<u>切断済み</u> 切断済み	広島 広島	189 386	-506 -880	189 -849				
TDS-004	ひずみ	下弦材	上流	13,15上	下弦1-3(上)	切断済み	広島	2	-204	-93				
TDS-005 TDS-062	ひずみ	下弦材接合部近傍	上流	13,15下 15上	下弦1-3(上) 下弦1-3(上)	切断済み	広島	188	-866	-845				
TDS-063	ひずみ	下弦材接合部近傍	上流	15下	下弦1-3(上)	切断済み	広島	143	-430	-426				
TDS-064 TDS-065	ひずみ	下弦材接合部近傍	上流	<u>17上</u> 17下	下弦1-4(上) 下弦1-4(上)		残あり	132	-372	-237				×
TDS-006	ひずみ	下弦材	上流	<u>17,19上</u>	下弦1-4(上)		残あり	1	-165	-143				-8328
TDS-007 TDS-066	ひずみ	下弦材接合部近傍	上流	17,19下 19上	下弦1-4(上)		残めり 残あり	77	-170	-164	622	598	-24	×
TDS-067	ひずみ	下弦材接合部近傍	上流	19下 21 F	下弦1-4(上) 下弦1-5(上)	(商标)	残あり	34	-134	-126	-289	-251	38	
TDS-069	ひずみ	下弦材接合部近傍	上流	21上 21下	下弦1-5(上)	(腐朽)		46	-59	-56	146	158	12	
TDS-008 TDS-009	ひずみ	下弦材	上流	<u>21,23上</u> 21,23下	<u>下弦1-5(上)</u> 下弦1-5(上)	(腐朽) (腐朽)		0	-421	-140	477 ×	389	-88	
	0 / 0/			1.20				50	150	50	054		101	
TDS-104 TDS-105	ひずみ	斜材	上流	1,2e 1,2w	<u>料1-1(上)</u> 斜1-1(上)			58	-152	56 18	354	233	-121	
TDS-106	ひずみ	斜材	上流	2,3e	斜1-2(上)	腐朽		10	-193	-188				
TDS-107 TDS-108	ひずみ	斜材	上流	2,3w 3,4e	新1-2(上) 斜1-3(上)	腐朽		70	-117	-106				
TDS-109	ひずみ	斜材	上流	3,4w	斜1-3(上) 斜1-4(上)	腐朽		32	-103	32				
TDS-111	ひずみ	斜材	上流	4,5w	<u>斜1-4(上)</u> 斜1-4(上)	腐朽		5	-159	-146				
TDS-112 TDS-113	ひずみ	斜材	上流	5,6e	斜1-5(上) 斜1-5(上)	腐朽		110	-249	110				
TDS-114	ひずみ	斜材	上流	6,7e	斜1-6(上)	/函小"J		21	-203	-196	×			
TDS-115 TDS-116	ひすみ	斜材	上流	6,7w 7.8e	斜1-6(上) 斜1-7(上)	腐朽		228	-135	-126	-164	-165	-105	
TDS-117	ひずみ	斜材	上流	7,8w	斜1-7(上)	腐朽		191	-83	119	-114	-159	-45	
TDS-118 TDS-119	ひずみ	斜材	上流	8,9e 8,9w	<u>新1-8(上)</u> 斜1-8(上)			31 95	-187	-49	-220	-276	-56 -49	
TDS-120	ひずみ	斜材	上流	9,10e	斜1-9(上)			80	-95	54	18	-15	-33	
TDS-121 TDS-122	ひずみ	斜材	上流	9,10w 10,11e	新1-9(上) 斜1-10(上)			32	-90	-712	135	154	19	
TDS-123	ひずみ	斜材	上流	10,11w	斜1-10(上) 斜1-11(上)	破博	広阜	91	-126	91				
TDS-125	ひずみ	斜材	上流	11,12e	斜1-11(上)	破壊	広島	886	-1723	467				
TDS-126	ひずみ	斜材	上流	12,13e	斜1-12(上) 斜1-12(上)	破壊	広島	307	-1434	-1421				
TDS-128	ひずみ	斜材	上流	13,14e	斜1-13(上)	破壊	広島	772	-691	768				
TDS-129 TDS-130	ひずみ	斜材	上流	13,14w	斜1-13(上) 斜1-14(上)	破壊	広島	1734	-139	1734				
TDS-131	ひずみ	斜材	上流	14,15w	斜1-14(上)			84	-318	-311				
TDS-132 TDS-133	ひずみ	斜材	上流	15,16e 15,16w	<u>斜1-15(上)</u> 斜1-15(上)			33	-182	-164				
TDS-024	ひずみ	斜材	上流	16,17e	斜1-16(上)			59	-68	14	233	186	-47	
TDS-025	ひずみ	斜材	上流	10,1/w 17,18e	<u>料1-16(上)</u> 斜1-17(上)			103	-96	-51	255	252	-58	
TDS-027	ひずみ	斜材	上流	17,18w	斜1-17(上) 斜1_19(上)	府打		29	-183	-140	36	21	-15	
TDS-028	ひずみ	斜材	上流	18,19e 18,19w	<u>新1-18(上)</u> 斜1-18(上)	腐朽		45	-107	45				
TDS-030	ひずみ	斜材	上流	19,20e	斜1-19(上) 約1-10(上)			21	-145	-76				
TDS-031	ひずみ	斜材	上流	20,21e	<u>赤十二9(上)</u> 斜1-20(上)			29	-171	124	170	109	-61	
TDS-033	ひずみ	斜材	上流	20,21w	斜1-20(上) 斜1-21(上)			227	-113	34	187	103	-84	
TDS-034	ひずみ	斜材	上流	21,22e 21,22w	斜1-21(上)			113	-84	-78	94	-52	-146	
TDS-036 TDS-037	ひずみ	斜材	上流	22,23e	斜1-22(上) 斜1-22(上)			53	-117	7				
TDS-038	ひずみ	斜材	上流	23,24e	斜1-23(上)	腐朽		2	-108	-91				
TDS-039 TDS-040	ひずみ	斜材	上流	23,24w	斜1-23(上) 斜1-24(上)	腐朽		33	-120	-114	185	160	-25	

	センサの内訳				部材		の (開め	皮壊載荷実験 台時からの差	i 分)	再編第1径間 (同左)		残部材 (同左)	
СН	測定 内容 詳細	上下流	接点番号	記号	備考	扱い	ΤĒ	負	残留	組立 完了	架設 完了	架設 前後 差分	2009/6/3
TDS-041 TDS-098	ひずみ 斜材	上流下流	24,25w	斜1-24(上) 上弦1-1(下)		残あり	62 129	-86 -601	23	290	154	-136	-8850
TDS-099	ひずみ 上弦材	下流	4,6下	上弦1-1(下)	I am blar tale a	残あり	69	-283	68				-9128
TDS-100 TDS-101	<u>しずみ</u> 上弦材 しずみ 上弦材	下流	8,10上 8,10下	上弦1-2(下) 上弦1-2(下)	切断済み	広島	113	-1072	107				
TDS-102	びずみ 上弦材	下流	12,14上	上弦1-3(下)	、切断		362	-2067	358				-8098
TDS-103 TDS-020	<u>ひずみ</u> しずみ 上弦材	<u>ト</u> 流 下流	12,14 ト 16.18上	上弦1-3(下) 上弦1-4(下)	、切断		486	-1399	486	×			×
TDS-021	ひずみ 上弦材	下流	16,18下	上弦1-4(下)		The second	2	-1783	-283	617	494	-123	
TDS-022 TDS-023	ひずみ 上弦材	下流	<u>20,22上</u> 20.22下	上弦1-5(下) 上弦1-5(下)		残あり	0	-682	-52				-8379
		下法	25 L			///////////////////////////////////////	0.4	100	07		10	54	
TDS-086 TDS-087	しずみ 下弦材	下流	3,5上 3,5下	下弦1-1(下)			167	-120	-186	×	12	-54	
TDS-170	ひずみ 下弦材接合部近傍	下流	5上	下弦1-1(下)			304	-239	-234	×			
TDS-171 TDS-172	ひずみ 下弦材接合部近傍	下流	7上	下弦1-2(下)	切断済み	広島	298	-303	-289	~			
TDS-173	ひずみ 下弦材接合部近傍	下流	7下 79上	下弦1-2(下)	切断済み	広島	399	-229	-227				
TDS-089	ひずみ 下弦材	下流	7,9下 7,9下	下弦1-2(下)	切断済み	広島	806	-862	-854				
TDS-174	ひずみ 下弦材接合部近傍	下流	<u>9上</u>	下弦1-2(下)	切断済み	広島	584	-285	-276				
TDS-175	ひずみ 下弦材接合部近傍	下流	11上	下弦1-3(下)	破壊、切断	山田	710	-5762	-5762				
TDS-177	ひずみ 下弦材接合部近傍	下流	11下 11.12 F	下弦1-3(下)	破壊、切断		483	-251	-247				_9079
TDS-090 TDS-091	ひずみ 下弦材	下流	11,13下	下弦1-3(下)	破壊、切断		790	-11	158				-9268
TDS-010	ひずみ 下弦材	下流	13,15上 13,15下	下弦1-3(下)	破壊、切断		593	-666	-662				-8938
TDS-070	ひずみ 下弦材接合部近傍	下流	15上	下弦1-3(下)	破壊、切断		351	-190	-187				-9272
TDS-071	ひずみ 下弦材接合部近傍	下流	15下	下弦1-3(下)	破壊、切断	歴まり	1113	-106	-105	110	147	00	
TDS-072 TDS-073	ひずみ 下弦材接合部近傍	下流	<u>17上</u> 17下	下弦1-4(下)		残あり	599	-155	-138 -44	× -118	-14/	-29	
TDS-012	ひずみ 下弦材	下流	<u>17,19上</u>	下弦1-4(下)		残あり	412	-58	-38	221	183	-38	
TDS-013 TDS-074	ひ の ず み 下 弦 材 接 合 部 近 傍	下流	17,19下 19上	下弦1-4(下)		残あり	237	-09	-66	~			-8942
TDS-075	ひずみ 下弦材接合部近傍	下流	19下	下弦1-4(下)	(府北)	残あり	227	-255	-89	~			×
TDS-076 TDS-077	ひずみ 下弦材接合部近傍	下流	<u>21上</u> 21下	下弦1-5(下)	(腐朽)		150	-128	-11	×			
TDS-014	ひずみ 下弦材	下流	21,23上	下弦1-5(下)	(腐朽) (腐朽)		1	-185	-79	412	351	-61	
103-015	0.907 1.5211	L Mr	21,23	1-3 <u>2</u> 1-3(1-)	()商作了)		237	-110	-30	^			
TDS-134 TDS-135	ひずみ 斜材	下流	1,2e	<u>斜1-1(下)</u> 斜1-1(下)			14	-187	-2	428	365	-63	
TDS-136	ひずみ 斜材	下流	2,3e	斜1-2(下)	腐朽		68	-147	-140	-684	-634	50	
TDS-137 TDS-138	ひすみ 斜材	下流	2,3w 3.4e	斜1-2(下) 斜1-3(下)	腐朽		101	-193	-177	-1029	-996	33 -95	
TDS-139	ひずみ 斜材	下流	3,4w	斜1-3(下)	腐朽		60	-507	60	-638	-699	-61	
TDS-140 TDS-141	ひすみ 斜材	下流	4,5e 4,5w	斜1-4(下) 斜1-4(下)			196 255	-106	-100	52 ×	50	-2	
TDS-142	ひずみ 斜材	下流	5,6e	斜1-5(下)			111	-423	111	373	301	-72	
TDS-143 TDS-144	ひずみ 斜材	<u>ト</u> 流 下流	5,6w 6.7e	約1-5(下) 約1-6(下)			271	-247	-1	131	109	-22	
TDS-145	ひずみ 斜材	下流	6,7w	斜1-6(下)			363	-160	-147				
TDS-146 TDS-147	ひずみ 斜材	下流	7,8e 7.8w	<u>斜1-7(下)</u> 斜1-7(下)			140	-388	-150				
TDS-148	ひずみ 斜材	下流	8,9e	斜1-8(下)	破壊		414	-141	-66				
TDS-149 TDS-150	しずみ 斜材 ひずみ 斜材	下流	8,9w 9,10e	<u>料1-8(下)</u> 斜1-9(下)	破壊 破壊	広島	99	-65	-22				
TDS-151	ひずみ 斜材	下流	9,10w	斜1-9(下)	破壊	広島	225	-796	-716				
TDS-152 TDS-153	<u>しずみ</u> 料材 ひずみ 斜材	下流	10,11e 10,11w	<u>料1-10(下)</u> 斜1-10(下)			536 324	-28	-442	-55	-82 158	-27	
TDS-154	ひずみ 斜材	下流	11,12e	斜1-11(下)			144	-142	143	346	272	-74	
TDS-155 TDS-156	ひ 9 み   料材   ひずみ   斜材	下流	11,12w 12,13e	科1-11(下) 斜1-12(下)			0 75	-/18	- /05	-/18	225	943	
TDS-157	ひずみ 斜材	下流	12,13w	斜1-12(下)			29	-216	10				
TDS-158 TDS-159	<u>し</u> 9 み 料材 ひずみ 斜材	下流	13,14e 13,14w	<u>料1-13(下)</u> 斜1-13(下)			87	-254	-239				
TDS-160	ひずみ 斜材	下流	14,15e	斜1-14(下)			123	-134	123				
TDS-161	<u>ひ9 み 料材</u> ひずみ 斜材	下流	14,15w 15,16e	ホ+1=14(下) 斜1=15(下)			8	-161	-237				
TDS-043	ひずみ 斜材	下流	15,16w	斜1-15(下)			333	-74	-65	0.57		10	
TDS-044 TDS-045	09 か 料材 ひずみ 斜材	下流	16,17e 16,17w	<u>料1-16(下)</u> 斜1-16(下)			59	-496	-61	257	209	-48	
TDS-046	ひずみ 斜材	下流	17,18e	斜1-17(下)			364	-57	-46	×	10		
TDS-047	<u>ひ9 み 料材</u> ひずみ 斜材	下流	17,18w 18,19e	約1−17(下) 約1−18(下)			219	-55	-51	303	242	-11	
TDS-049	ひずみ 斜材	下流	18,19w	斜1-18(下)			1	-340	-70	296	224	-72	
TDS-050 TDS-051	<u>し</u> 9 み 料材 ひずみ 斜材	下流	19,20e 19,20w	<u>料1-19(下)</u> 斜1-19(下)			266	-57	-88	333	284	-49	
TDS-052	ひずみ 斜材	下流	20,21e	斜1-20(下)			2	-386	-66				
TDS-053 TDS-054	<u>いすみ 斜材</u> ひずみ 斜材	下流	20,21w 21.22e	斜1-20(下) 斜1-21(下)	腐朽		236	-150	15				
TDS-055	ひずみ 斜材	下流	21,22w	斜1-21(下)	腐朽		214	-116	-59				
TDS-056 TDS-057	<u>しずみ</u> 料材 ひずみ 斜材	下流	22,23e 22.23w	新1-22(下) 斜1-22(下)			0	-286	-67	248	190	-58 -69	
TDS-058	ひずみ 斜材	下流	23,24e	斜1-23(下)			256	-52	6	173	141	-32	
TDS-059 TDS-060	<u>ひずみ 斜材</u> ひずみ 斜材	下流	23,24w 24.25e	斜1-23(下) 斜1-24(下)			129	-84	-80	-51	-39	-36	
TDS-061	ひずみ 斜材	下流	24.25w	斜1-24(下)			3	-243	-6	430	292	-138	

#### 2-5 付1 破壊載荷実験後の部材切断面と含水率分布

劣化、および傷みの少ない部材は、全長 18m の木橋(再編第1径間)の部材に転用した。それ以外の 部材については、破壊載荷実験における各破壊位置や劣化や断面欠損の著しい箇所など、上下弦材の 主だった箇所を切断採取し、断面観察と全乾法による含水率測定を行った。

部材からの切断採取は、各採取位置で厚さ(部材軸方向、繊維方向の長さ)30mm 程度の断面サンプ ルをチェーンソーで切り出して採取し、先ず写真撮影を行った。その後、鉈(なた)を使って、断面の幅方 向に6分割(35mm 程度)、せい方向に8分割(集成材積層数に対応、ラミナ厚さ30mm 程度)し、48分 割の小片となったそれぞれについて重量を測定した。この小片を105℃で保持したオーブンで恒量となる まで十分に乾燥した後に再び重量を測定し、重量減少分となる水分重量を乾燥後重量(木材実質)で除 して、全乾重量を算出した。

(山本 健、軽部正彦、宮武 敦、藤田和彦)



写真1 破壊載荷実験後の部材解体の様子



写真2 部材切断の様子



写真3 部材切断の様子



写真4 サンプルの分割

#### 【A】上弦1-2下(+78cm)

38%	73%	58%	49%	35%	13%
49%	131%	138%	128%	90%	17%
71%	70%	110%	76%	41%	18%
18%	25%	44%	36%	20%	16%
13%	12%	20%	21%	17%	15%
14%	15%	17%	16%	15%	13%
14%	14%	14%	14%	14%	14%
14%	13%	14%	13%	13%	13%





# 【B】上弦1-2下(+193cm)

19%	49%	174%	153%	59%	19%
31%	64%	170%	185%	142%	25%
28%	82%	163%	180%	58%	39%
27%	59%	30%	69%	42%	76%
20%	22%	21%	22%	25%	60%
15%	17%	40%	18%	17%	15%
13%	14%	15%	15%	15%	15%
13%	13%	13%	13%	13%	13%





# 【C】上弦1-2下(+385cm)

162%	225%	248%	172%	220%	24%
151%	89%	98%	143%	132%	32%
143%	72%	78%	107%	53%	25%
58%	44%	44%	28%	21%	23%
31%	35%	32%	26%	21%	24%
24%	19%	18%	17%	17%	17%
14%	18%	18%	16%	15%	14%
14%	14%	17%	14%	14%	13%





#### 【D】下弦1-2下(+165cm)

176%	189%	105%	141%	167%	169%
71%	75%	51%	50%	89%	63%
32%	25%	29%	38%	36%	62%
18%	18%	19%	18%	18%	18%
16%	16%	16%	16%	17%	17%
15%	15%	15%	15%	15%	15%
15%	15%	15%	15%	15%	15%
17%	15%	14%	14%	14%	15%





## 【E】上弦1-2下(+495cm)

12%	12%	17%	25%	13%	12%
13%	16%	24%	23%	18%	14%
14%	17%	20%	22%	19%	18%
14%	15%	17%	20%	18%	16%
13%	15%	16%	18%	17%	15%
14%	15%	15%	16%	15%	13%
14%	14%	14%	15%	14%	13%
13%	14%	14%	14%	14%	14%





# 【F】下弦1-2下(+550cm/全長633cm)

14%	15%	17%	22%	16%	15%
15%	15%	17%	19%	16%	14%
15%	15%	16%	17%	16%	16%
15%	15%	15%	16%	15%	15%
14%	15%	15%	15%	15%	13%
15%	15%	15%	14%	14%	14%
14%	14%	14%	14%	14%	14%
14%	14%	14%	13%	14%	13%





### 【G】下弦1-3上(+135cm)

64%	120%	133%		193%	132%
231%	197%	229%	228%	225%	190%
98%	109%	139%	150%	159%	146%
63%	37%	67%	185%	187%	186%
93%	43%	111%	144%	113%	176%
46%	55%	68%	68%	90%	82%
21%	20%	22%	22%	27%	32%
15%	16%	16%	17%	18%	16%





# 【H】下弦1-3上(+180cm)

36%	98%	44%	29%	32%	16%
97%	142%	192%	54%	85%	71%
111%	149%	178%	195%	115%	114%
39%	136%	169%	136%	149%	31%
	149%	153%	141%	61%	37%
		168%	84%	25%	44%
77%	52%	33%	21%	19%	18%
46%	18%	16%	16%	15%	15%





# 【I】下弦1-3上(+711cm/全長814cm)

28%	46%	115%	196%	149%	66%
39%	54%	43%	127%	227%	197%
53%	67%	82%	113%	152%	130%
99%	114%	54%	70%	102%	122%
112%	109%	54%	32%	31%	95%
95%	56%	51%	40%	27%	45%
110%	41%	30%	23%	23%	33%
72%	29%	21%	19%	18%	21%





#### 2-5 付 2 既存木橋の数値解析

実験結果を再現する数値解析を試みた。解析に必要なモデルはトラス要素と梁要素を混在させて既存 木橋の条件を再現した。解析モデルの構成方法を図1に示す。各部材の諸元は、設計図書に基づいて 以下のように設定した。

上下弦材	220×262mm	$A = 576 \mathrm{cm}^2$	$I = 32972 \text{ cm}^4$
斜材(端部)	220×228mm	$A = 502 \mathrm{cm}^2$	
斜材(中間部)	160×220mm	$A = 352 \mathrm{cm}^2$	
上部桁	126×170mm	$A = 214 \mathrm{cm}^2$	
上部水平ブレース	72×170mm	$A = 122 \mathrm{cm}^2$	
下部桁	160×170mm	$A = 272 \text{ cm}^2$	

ベイマツー級集成材ヤング係数の値としては 9.8 (kN/mm<sup>2</sup>)に設定し、部材性能の変化は断面積を変 化させることで行った。破断する部材については、軸方向の応力変形特性を完全弾塑性型バイリニアとし、 予備解析により破断荷重を設定した。なお、梁要素の曲げ破壊は考慮しないこととした。

解析における載荷スケジュールを図 2 に示す。まず自重による応力・変形を再現するために 0~1.0 (sec)の間に重力加速度を 0 から 980.665(gal)まで線形に増加させた後に、固定した。その後は、実際に 土嚢を積載した範囲のトラス格点にあたる接点に対して節点重量を時間の経過に伴って増加させた。一 次破壊までの載荷は 1.0~3.0 (sec)で行い、94.4 (kN)の重量増分を線形に増加させた。3.0~8.0 (sec)は 自由振動の減衰のために重量を一定に保ったまま、30%の瞬間剛性比例型粘性減衰を与えた。引き続 いて二次破壊までの載荷を 8.0~10.0 (sec)で行い、95.4 (kN)の質点重量増分を線形に増加させた。

解析結果として変形状況スナップショットを図3から図5に、下部弦材レベル節点のZ方向変位時刻 歴を図6に、破壊発生前後の下弦材の鉛直変位を図7に示す。

(軽部正彦)



図1 解析モデルの構成方法



図 5 最終破壊状況 14.0sec での変形状況スナップショット



図 6 Z 方向変位時刻歴



図7 破壊発生前後の下弦材の鉛直変位

#### 3-1 付1 各地の木橋調査結果

日本国内で近代木橋が架け始められてから 20 年以上の年月が経過したが、本研究において主な研 究対象とした「かっぱ橋」(広島県立山野峡自然公園内にて 1990 年 3 月から 2003 年 12 月まで供用)以 外にも、既に解体・撤去された事例も見られるようになって来ている。そのような事実から考えるに、架設後 10 年を超える木橋は、今後、これまでの維持メンテナンスという視点だけではなく、撤去・解体の判断を含 めた点検が望まれることになると思われる。

国内に現存する既存木橋のうち、架設後 10 年を超える木橋などから幾つか選び、現地での実態調査 を実施した。調査対象木橋は、木橋技術協会が 1997 年 6 月に発行した写真事例集「木橋 TIMBER BRIDGES」において、形式、規模、使用樹種などの記録と共に完成時の写真が掲載されたものを中心に 選んだ。表1に調査対象とした既存木橋をまとめる。

調査の内容は、現存と使用状況の確認、架設後のメンテナンスの状況を、主に目視により実施した。調査の結果は既存木橋の基本情報と、木橋技術協会の会員および学術研究者から寄せられた点検・保守 点検工事の履歴情報と共に、現況の写真と報告者のコメントを添え、表 2~表 9 としてまとめた。

架設後 10 年を超える既存木橋について行った調査の結果をまとめると、下記のようになる。 (一般的項目)

1. 架設された場所は公園施設内の事例が多い。

2. 橋としての機能より、モニュメント的要素が強い。

3. 定期、あるいは詳細点検に予算が付くケースが少ない。また予算化されても十分ではない。 (技術的項目)

- 4. 構造的耐久設計の効果は大きい。
- 5. 樹種の耐久性や防腐薬剤に依存した事例は腐朽による劣化が顕著である。
- 6. 防腐薬剤の効果は、処理方法が適切であれば、概ね良好である。
- 7. 海外の設計法を導入した事例では、日本の技術基準、環境条件に適合しないものがあった。

(原田浩司)

既存木橋名	構造形式	所在地	架設年月	視察月日
潮風橋	アーチ橋	東京都品川区汐見公園内	1996/04	2008/12/11
ゆれゆれ橋	跳ね橋	岡山県灘崎町	1997/03	2008/12/18
竜頭の森橋	トラス橋	香川県仲多度郡満濃町地先	1996/11	2008/12/19
常盤橋	桁橋	福岡県北九州市小倉北区室町	1995/07	2009/01/06
北九州中央公園橋	アーチ橋	福岡県北九州市八幡大字八王寺町	1994/11	2009/01/06
すぎの木橋	アーチ橋	宮崎県小林市大字細野	1997/03	2009/01/07
物部紅香橋	方杖橋	高知県香美市大栃線	2000/11	2010/03/15
御幸橋	トラス橋	高知県高岡郡檮原町	2002/03	2010/03/16

表1 視察に訪れた木橋

### 表2 潮風橋調査票

稿名	潮風橋	使用材料	ホンゴシ
構造形式	<u> 桁橋(上・中(下))</u>	保存処理	なし
事業主体	東京都南部公園緑地事務所	橋長	52.82
所在地	東京都品川区汐見公園内	支間長	51.6
施工年度	平成8年4月	幅員	4
	過去の点検実績		 過去の保守工事実績
年日	内容	年日	
173		173	
場所	右岸より撮影	場所	右岸、アーチ外側(南西面)
	百斤67月取款	20171	
		1 million and	
場所	左岸、アーチ内側(南西面)	場所	左岸より撮影
<b>場</b> 所	<image/>	<b>場</b> 所	<image/> <section-header></section-header>



•			~ ~ !			· · · ·	1.0		0						$\sim$ $\pm$	$\sim$			-					
場	で	は	7月	末	、花	火ナ	、会7	が開	催さ	れる	が	、そ	の際	<b>の</b>	利用	伏況	122	い	てに	<b>t</b> 把据	でき	てし	ない	١,

視察日	2008/12/11	天気	晴れ		
記録日	2008/12/21	視察者:	原田浩司	文責:	原田浩司

表3 ゆれゆれ橋調査表 橋名 ゆれゆれ橋 使用材料 スギ 構造形式 跳ね橋 保存処理 加圧注入 事業主体 岡山県 橋長 16 m 所在地 灘崎町岡山ファーマーズマーケットサウスビレッジ 支間長 施工年度 平成9年3月 幅員 4.3 m 過去の点検実績 過去の保守工事実績 年月 年月 内容 内容 記録なし 記録なし 場所 手前閉門状態、奥が開門状態 場所 常時、閉門の状況で固定。 Ų 818 場所 閉門時の状況 場所 金物周辺の木材の腐朽 場所 高欄に見られた腐朽 場所 開閉時の分銅となる亜鉛処理鋼板



表4 四国まんのう公園 調査票

橋名	竜頭の森橋	使用材料	ボンゴシ
構造形式	<u> 桁橋(上(中)・下)</u>	保存処理	なし
事業主体	国営讃岐まんのう公園工事事務所	橋長	27
所在地	香川県仲多度郡満濃町地先	支間長	26.5
施工年度	平成8年11月	幅員	2.5
	過去の点検実績		過去の保守工事実績
年月	内容	年月	内容
	平成20年9月 詳細点検実施 超音波測定器使用。		平成21年度以降に実施予定。
場所	写真集と同位置による撮影	場所	(駐車場を背に)左岸より撮影
場所	左岸より撮影	場所	左岸より下面撮影



表5 常磐橋調査票

橋名	常盤橋	使用材料	ボンゴシ
構造形式	析橋(上)・中・下)	保存処理	なし
事業主体	北九州市建設局	橋長	85 m
所在地	北九州市小倉区室町	支間長	26.7+31.0+26.7 m
施工年度	平成7年3月	幅員	6 m
	過去の点検実績		過去の保守工事実績
年月	内容	年月	内容
	平成15年10月 詳細点検実施		平成16年3月 保守工事
	超音波測定器、レジフトグラフ等使用。		
			平成21年3月 保守工事予定
	每年2回程度、定期点検実施。		
場所	全景写真	場所	室町側より縦断写真
2	NIL A COMPANY	-//	
場所	川下面側面	場所	川上面側面
場所 日本	<image/>	場所 F	<image/> <caption></caption>



見祭日	2009/1/6	天気	曇り		
已録日	2009/1/8	視察者:	原田浩司	文責:	原田浩司

表6	北九州市中央公園橋調查雪	Б
10.1	ルルバリーモスム圏侗族主義	R

			10. 0.5	
橋名		使用材料         ボンゴシ		
構造形式	桁橋(上・中・フ)	保存処理	なし	
事業主体	北九州土木事務所	橋長	23 m	
所在地	福岡県北九州市八幡東八王子町	支間長	20.9 m	
施工年度	平成6年11月	幅員	4 m	
	過去の点検実績		過去の保守工事実績	
年月	内容	年月	内容	
	6 4 4 4 B			
場所	西面全景	場所	東面全景	
場所	西面近景	場所	東面近景	
<b>埠</b> 市		堤所		



表7 すぎの木橋調査票

11 90			
橋名	すぎの木橋	使用材料	スギ
構造形式	<u> 桁橋((上)・中・下)</u>	保存処理	なし
事業主体	宮崎県	橋長	38.6 m
所在地	宮崎県小林市細野(宮崎県県民の森)	支間長	38 m
施工年度	平成9年3月	偏員 偏員	8 m
	過去の点検実績		過去の保守工事実績
年月	内容	年月	内容
			再塗装 一回
場所	全景	場所	下面より全景
場所	アーチ部	場所	アーチ脚部
white they share to			
提所	アチ対傾構	場所	縱新面全暑



			っど年 キャナ っ ど 判 ナナ	
		12000112001120011200112001120011200112	ハヤ朱��村、ハキ穀村   <b>エコニ、</b> 融 王 小	
何這形式 支票支付		保仔処理	<u>  ナノナノ酸亜鉛</u>	00
● 未土14	省夫 <b>印</b> 古句旧王关于上长位	信 長		<u>30 m</u>
所住地	尚知県省美巾大栃線	文间長		29 m
施工年度		11111111111111111111111111111111111111		5 m
	過去の点検実績		過去の保守工事実績	
年月		年月	内容	
	平成20年7月 定期点検		なし	
	そのほか、2年に一度程度で点検			
場所		場所	正在岸より縦断	
场所	川 ト 側 全 京	场所	左厈より縦断	
場所	川上側側面床版(FRP除去後)	場所	川上側側面床版(F	RP除去後)
場所	川上側側面 床版のズレ	場所	川上側側面床版の割	りれ





表9 御幸	橋 調査票		
橋名	御幸橋	使用材料	スギ集成材 スギ製材
構造形式	トラス橋(上・中(う))	保存処理	AAC
事業主体	檮原町	橋長	<sup>25</sup> m
所在地	高知県高岡郡檮原町	支間長	50 m
施工年度	平成16年	幅員	2 m
	過去の点検実績	- <b>-</b>	過去の保守工事実績
年月	内容	年月	内谷
場所	全景写真	場所	縱断面方向
		-trail	
場所	内観	場所	側面(上流側)
場所		場所 「 「 「 「 「	



材と比較すると、屋根による雨掛かり防止の効果が顕著であることが伺える。すでに再塗装が望ま れる時期に来ているが、景観等を考慮すると、カビの除去を実施し、撥水効果は有するが、着色がさ れない塗料の選択が望まれる。主桁支承部周辺は橋一踊り場部からの水道になっていることから、 なんらかの対策が必要と考えられる。下面には多数のツバメの巣が確認された。耐久性への影響は 現在のところ確認されないが、今後経過観測し、日常点検、定期点検等で被害がないことを確認して いくことが求められる。屋根付きの効果は耐久性の面で十分発揮されていると判断されるが、塗装 の状況は芳しくない。この状況は六根の橋、檮原橋でも感じられ、今後他橋の再塗装も含め、使用 する塗料と塗装回数よび塗り厚さについて検討の余地があると判断する。

視察日	2010/3/16	天気	晴れ	
記録日	2010/3/22	視察者:	原田浩司 文責:	原田浩司

### 3-1 付 2 既存木橋の補修・補強事例

既存木橋の補修・補強の事例を収集した。その結果、木材表面の美観補修や雨水対策として干割れ を埋めるなどの樹脂補修が行われていること、耐久性回復のための再塗装、耐久性向上のための追加保 存処理が行われてきていることが明らかになった。また、劣化部位の局部的環境の改善法として部材保 護のためのカバーやシートの追加設置が行われているが、これ以外の方法として水が滞留しやすい部材 間などの隙間を敢えて大きく加工し直して、表面張力による保水を避け、通風を回復する例も見られた。

(宮武 敦、孕石剛志、軽部正彦)

所在地 (架設年)	橋梁形式	実施 年度	目的	部位·部材	処置·方法	
加賀市	上敗之 夭 2005			アーチ	パテ充填	
(1987)	上路ノーナ	2005	耐久性竹子	縦桁	鋼板カバー追加	
大和市	大和市		干割れ補修	手すり	エポキシ樹脂充填	
(1991)	科女	2000	耐久性付与	主塔頂部	木製カバー追加	
二百古		1995	干割れ補修	手すり、地覆	パテ充填	
二原币 (1002)	斜長	1997	干割れ補修	手すり、地覆	パテ充填	
(1992)		2006	腐朽	手すり、地覆	部材交換	
7年立7月7		1997	耐久性付与	全面	再塗装	
低前町	中路アーチ	2007	耐久性付与	全面	再塗装 <sup>写真1)</sup>	
(1994)				アーチ接合部	部材間スリット加工、パテ埋め	
羽咋市	羽咋市		腐朽	桁、床板	一部交換	
(1995)		2004	耐久性付与	トラス材	防腐シート+鋼板カバー追加	
	積層桁			主桁	鋼板カバー、ウレタン樹脂充填、塗装	
北九州市		2004	耐久性付与	橋脚、高欄	塗装、モルタル充填	
(1995)		相唐相 2004		滞水部	薬剤注入、ホウ酸挿入	
				補強	接合部	鋼材補強、ウレタン樹脂充填
あゃつきま	上路アーチ	- +-	2001	耐久性付与	全面	再塗装
南さつま市 (2000)		2002	耐久性付与	アーチ外面	再塗装	
		2005	耐久性付与	アーチ	再塗装、ホウ酸塩注入	
勝山市 (不明)		路アーチ 2007	腐朽	アーチ脚部	削除、モルタル充填	
	下路アーチ		ありたけと	アーチ脚部	クレオソート塗布	
				咽久性的 子	アーチ期朝	床板一部撤去に上ろ排水路確保 <sup>写真2)</sup>

表1 補修事例



写真1 再塗装された中路アーチ橋 (アーチ材接合部付近 2007/12/10 撮影)



写真2 下路アーチ橋脚部の補修・補強状況 (床板切除による排水性向上処置 2009/08/05 撮影)

### 3-2 付 1 補強した部材の強度

2005年に改修された用倉大橋(広島県立中央森林公園内、橋長 145m、幅員 5.0m、中央径間 77m、 1993年架設)で、交換により不要となった高欄(スギ)および地覆(アカマツ)を試験材として用い、非破壊 調査である PUNDITによる超音波伝播時間測定と、局部破壊試験となる Resistographによる穿孔抵抗値 測定を実施し、曲げおよび縦圧縮試験結果との関係を整理した。超音波伝播時間は測定対象の厚みで 除して速度に、穿孔抵抗値は得られた曲線が囲む面積を測定対象の厚みで除して健全度指数に変換し て整理した。また、集成材ラミナを側面および下面、あるいは鋼板を下面に接着剤で貼付することにより補 強した部材の強度についても同様に調査した。

(宮武 敦、渡辺 浩、藤田和彦)



写真1 用倉大橋(左:全景、右:木橋の床板と高欄および地覆)





写真3 超音波伝播時間測定器(PUNDIT)

写真2 回収された部材



写真4 穿孔抵抗值測定(Resistograph)


図1 穿孔抵抗測定結果の例



写真5 曲げ試験





写真6 縦圧縮試験



図3 健全度指数と曲げ強さ















図 10 超音波伝播速度と曲げヤング係数



図11 超音波伝播速度と縦圧縮強さ

# 3-3 付 1 FRP 樹脂板貼り付けによる耐候性向上

集成材接合部を模した試験体を用いて曝露試験を行い、FRP 樹脂板貼り付けによる耐候性向上効果 を検証した。接合具にはドリフトピン(φ13mm)とボルト(φ12mm)を用い、ドリフトピンは端部をシリコン樹 脂で被覆した。

(宮武 敦、柳川靖夫)



図1 試験片の採取



図2 屋外曝露の方法



図3 ドリフトピン:27ヶ月暴露後の南面(下が FRP 樹脂板を貼り付けたもの)

ボルト・FRP無し



図4 ボルト:27ヶ月暴露後の幅方向中央部(下が FRP 樹脂板を貼り付けたもの)



図5 ボルト:27ヶ月暴露後の南面(下が FRP 樹脂板を貼り付けたもの)

## 3-3 付 2 屋根・部材カバーの効果

第2径間に追加した屋根と、再編第1径間に追加した部材カバーの効果を、PUNDITによる超音波伝 播速度と、高周波式含水率計(ケット HM-520)を使った含水率の測定により検証した。また、温湿度デ ータロガー(HOBO Pro v2)を使って、既存木橋各部位周辺の微気象(温度と湿度)を測定し、検証した。 (宮武 敦、井道裕史、長尾博文、平松 靖)



写真1 温湿度データロガーの取り付け状況



図1 上弦材の超音波伝播速度と含水率の変化





図3 天候の違いによる各部位温度変化の日変動



図4 屋根・部材カバーの追加による各部位の最高気温の変化



図5 第2径間上流側の測定結果



図6 第2径間下流側の測定結果



図7 再編第1径間上流側の測定結果



図8 再編第1径間下流側の測定結果

部材	測定	屋根	( ( 第2径間 )		カバー(第1径間)			無処置(第2径間)			無処置(第1径間)		
	年月	上流	下流	平均	上流	下流	平均	上流	下流	平均	上流	下流	平均
上弦材	2004.03	1690	1176	1433	1452	1350	1405	1616	1140	1378	1382	1414	1398
	2007.03	1938	1366	1652	1505	1390	1452	1628	1535	1582	1248	1586	1417
	2007.11	1673	1369	1521	1421	1296	1363	1673	1418	1545	1129	1391	1260
	2008.12	1485	471	978	1066	1128	1095	948	1115	1031	1093	1350	1221
	2009.04	1494	601	1047	1222	1167	1197	1031	677	854	649	1026	837
	2009.07	1142	496	819	1250	1147	1203	669	165	417	550	850	700
下弦材	2004.03	1539	1813	1659	1614	1807	1721	1713	1851	1748	1714	1533	1618
	2007.03	1894	2010	1944	1784	1920	1860	1871	1928	1899	1356	1832	1608
	<b>_20</b> 07.11	1852	<u>1966</u>	<u>1902</u>	<u>1589</u>	_1 <u>840</u> _	<u>1728</u>	<u>1878</u>	<u>   1970    </u>	<u>1924</u>	1 <u>366</u>	<u>1663</u>	<u>1523</u>
	2008.12	1454	1813	1611	1674	1642	1656	1837	1878	1857	859	1819	1367
	2009.04	1400	1835	1590	1571	1795	1695	1516	1756	1636	449	1792	1160
	2009.07	1122	1799	1418	1589	1724	1664	1343	1384	1364	436	1800	1158
斜材 上	2004.03	1873	1943	1908	1 <b>964</b>	1934	1949	1925	<u>1921</u>	1923	1860	1867	1863
	2007.03	1986	2037	2011	2025	2049	2037	2021	2027	2024	1978	1944	1961
	_ <b>2007</b> .11	_1930_	<u>1982</u>	<u>   1956    </u>	1993	<u>1957</u>	<u>   1975   </u>	_1 <u>958</u> _	<u>1962</u>	<u>1960</u>	1935	_1868_	1901
	2008.12	1841	1974	1907	1986	1885	1936	1906	1957	1932	1935	1765	1850
	2009.04	1855	1861	1858	1937	1846	1892	1860	1936	1898	1878	1833	1856
	2009.07	1805	1844	1825	1920	1//1	1845	1854	1915	1884	1/40	1858	1/99
斜材 中	2004.03	1784	1776	1780	1899	1849	1874	1778	1779	1778	1818	1836	1827
	2007.03	2007	1963	1985	1993	2002	1997	1961	1942	1952	2003	1980	1992
	2007.11	1899	1983	$-\frac{1941}{1001}$	$-\frac{1951}{1951}$	<u>193/</u> _	1944	1886	<u>- 1934</u> -	1910	1903	1895	1899
	2008.12	1/55	1967	1861	1854	1/63	1809	1850	1863	1857	1800	1/10	1/55
	2009.04	18/2	1808	18/0	18/8	1822	1850	1/53	1842	1700		1/9/	1//9
	2009.07	1840	1924	1882	1789	1092	1/41	1800	1796	1/98	1409	1/15	1592
斜材 下	0004 00	格点	カバー	なし		カバー	あり 1015		カバー	<u>あり</u>	格点	カバー	なし
	2004.03	1393	1911	1052	1/09	1802	1815	1077	1/15	1808	1701	1/90	1/25
	2007.03	1766	2040	1900	1948	1990	1909	19//	1932	1955	1071	1948	1009
	2007.11	1202	2020	1656	1492	100/	10/9	1900	- <u>10/2</u> 1750 -	1910		1701	1250
	2008.12	1200	1920	1000	1755	1720	1746	1004	1712	1900	1404	1661	1572
	2009.04	1446	1900	1660	1715	1677	1606	174	1713	1651	1567	1612	1500
	2009.07	1440	1031	1009	1710	1077	1090	1744	1009	1001	1007	1013	1090

表1 超音波伝播速度の測定結果(単位:m/sec)

表2 高周波式水分計による含水率測定結果(単位:%)

部材	測定	屋根(第2径間)			_ カバー(第1径間)			無処置(第2径間)			無処置(第1径間)		
	年月	上流	下流	平均	上流	下流	平均	上流	下流	平均	上流	下流	平均
上弦材	<b>2007</b> .11	20.9	21.7	21.3				26.2	28.3	27.3			
	2008.12	19.5	21.1	20. 3	17.3	14.3	15.8	44.9	51.5	48.2	21.3	29.7	25.5
	2009.04	11.9	12.8	12.4	9.3	9.6	9.4	30.7	23.5	27.1	12.4	14.4	13.4
	2009.07	11.3	10.4	10.9	25.2	16.2	20.7	18.0	16.9	17.5	26.3	18.2	22. 0
下弦材	<b>2007</b> .11	<b>20</b> . 1	18.7	19.4				20.0	14.8	17.2			
	2008.12	29.6	20.2	25.1	19.8	14.3	16.9	28.6	23.6	26.1	28.6	15.1	21.4
	2009.04	19.6	11.8	15. 7	10.9	13.3	12.1	19.6	11. <b>2</b>	15.4	17.8	10.8	14. 1
	2009.07	17.7	10.8	14. 2	16. <b>4</b>	15.1	15.8	18.9	11.8	15.4	25.9	12.9	19.1
斜材 上	<b>2007</b> . 11	15.3	1 <b>6</b> .2	15.8				18.3	19.3	18.8			
	2008.12	12.4	13.0	12.7	1 <u>6</u> . 7	11.4	14.3	16.1	12.6	14.3	15.1	12.1	13.7
	2009.04	11.5	11.7	11. <b>6</b>	13.2	11.4	12.3	13.1	10.4	11.8	12.6	10.4	11.5
	2009.07	12.1	13.0	12.6	14.8	13.7	14. 2	14.1	10.6	12. 3	16.0	12.8	14.4
斜材 中	<b>2007</b> .11												
	2008.12	16.6	16.3	16.5	15.6	13.3	14.5	21.2	20.2	20.7	15.5	15.5	15.5
	2009.04	10.3	10.1	10. 2	12.0	10.8	11.4	13.7	1 <b>0</b> .6	1 <b>2</b> . 1	13.3	10.5	11.9
	2009.07	9.2	11.0	10.1	15.4	14.1	14.8	11.6	11.7	11.6	17.9	15.4	16.7
斜材 下		格点カバーなし			格点カバーあり			格点カバーあり			格点カバーなし		
	<b>2007</b> .11	15.8	14.0	<u>14. 9</u>				18.0	15.7	<u>16</u> . 7			
	2008.12	24.6	18.2	21.4	15.9	14.8	15.4	20.6	22.7	21.6	17.5	16.4	17.0
	2009.04	14.2	11.8	13.0	13.3	10.8	12.0	15.2	16.5	15.8	14.5	10.1	12.3
	2009.07	13.7	11.8	12.8	17.9	16.9	17.4	16.2	16.3	16.2	20.0	16.4	18.2

### 3-4 付1 破壊載荷実験後の部材を使った既存木橋の再編と暴露実験計画

2007 年 3 月再組立した第 1 径間は、2008 年 6 月の破壊載荷実験後、接合部を丁寧に解き解して部材・部品の状態に解体した。各部材・部品は、各々について整理された劣化、および破壊載荷実験による傷みを勘案しながら、全長 18m の木橋(再編第 1 径間)部材として加工した。

以降の図は、第1径間での部材配置及びその状態と再編第1径間の部材採取についての模式図である。

こうして破壊載荷された第1径間36mから、半分の18mに再編された既存木橋(再編第1径間)は、 同じ18mの長さを持つ第2径間と合せて補修・補強を施し、長期暴露することとした。

第2径間は、2007年11月に再組立架設した位置から東側に移設し、西側半分に軒長さを変化させた 屋根を掛け、また東側半分の接合部格点にカバーを追加することにした。

再編第1径間は、傷みの激しい下弦材格点2箇所と、下弦材接合部1箇所を補修した上で再組立架 設し、西側半分の部材と接合部格点にカバーを追加することにした。

(宮武 敦、軽部正彦、藤田和彦)





# 再組立橋を用いた試験計画

第二径間



第一径間·再組立



















配置・補修・架設計画



## 3-4 付 2 既存木橋再編組立て部材の補修と補強

再編加工された部材のうち、上下弦材の劣化の著しい部分については一部木材を切り取って表面調整し、同じベイマツのラミナをシアノアクリレート系接着剤にて貼り付けて整形した。表面のみが劣化したもの部分についてはその部分を薄く削り取り、ポリビニルアルコール (PVA) 繊維シートを使用した FRP 板 (クラレ T-5516 平織りクロス3 プライ、マトリックス樹脂:汎用エポキシ樹脂、厚さ3~4mm、長さ1,000mm)を2 液型エポキシ樹脂接着剤(オーシカ TE-9)で貼り付け、その上から板を木ネジで仮固定して圧締養生した。接着剤が硬化した後に圧締板を取り去り、木ネジ穴はシアノアクリレート系接着剤で埋めるなどして整形した。補修した部分については、塗料を使って着色仕上げした。斜材の端部木口は、薄く研削した後に溶融アスファルトを塗布した。

以上のような部材補修を施した後、2008年11月に再編第1径間を組み立て、架設を完了した。架設 位置は、敷地条件と後述する屋根の設置位置の関係から、2007年11月に再組立てした第2径間を東側 に新設した仮設橋台上に移設し、再編第1径間を既設の仮設橋台上に載せることとした。

組立てが終わった再編第1径間と、第2径間に対しては、屋根、部材カバー、格点カバーを設置した。 敷地条件との位置関係図、続いて再編第1径間の部材加工に先立って作成した転用部材加工検討図 の抜粋、各部材を第1径間の部材名で記した再編第1径間の部材配置図、第2径間に追加した屋根の 概要図を示す。

2009 年 3 月には、第 2 径間東側に部材カバー(再編第 1 径間西側に設置したものと同じ)を追加し、 再編第 1 径間には全長に亘って落下防止鋼帯を追加した。落下防止鋼帯は、通常時に力を負担しない ように両端長孔とし、下弦材の破断時に落下防止装置として働くよう計画した。その概要を図に示す。



写真1 補修作業中の部材 (広島県立総合技術研究所 林業技術センター内)

(柳川靖夫、藤田和彦、宮武 敦、軽部正彦)



写真2 架設済み第2径間と 再編第1径間に用いる接合金物



写真3 端部上面補修中の下弦1-1下(左側)と 下弦1-5下(右側)の補修の様子



写真4 下弦 1-1 下の FRP 補修



写真5 下弦1-5下(右側)の圧締の様子



写真6 圧締板取り付けの様子



写真7 接着が完了した FRP 板表面の様子



写真 8 FRP 板の接着が完了した 下弦 1-1 下(左側)補修部分の様子



写真9 斜材端部木口のアスファルト被覆



写真10 アスファルト被覆の様子



写真12 溶融アスファルトの準備



写真13 アスファルトの塗布作業



写真11 研削後の斜材端部木口



写真14 塗布作業の終了



### 落下防止鋼帯取付詳細図





取付図 1/30



#### 落下防止鋼帯

