

架橋後 13 年経過した木橋部材の非破壊調査報告

Non-Destructive Evaluation of Wooden Bridge Members served in 13 years

原田真樹*¹ 長尾博文*² 加藤英雄*² 井道裕史*²
宮武敦*³ 平松靖*³ 軽部正彦*⁴ 藤田和彦*⁵ Yin Yafang*⁶

HARADA Masaki, NAGAO Hirofumi, KATO Hideo, IDO Hirofumi,
MIYATAKE Atsushi, HIRAMATSU Yasushi, KARUBE Masahiko, FUJITA Kazuhiko, YIN Yanfang

- *¹ 博（農学）（独）森林総合研究所 構造利用研究領域（〒305-8687 茨城県つくば市松の里1）
*² 農修（独）森林総合研究所 構造利用研究領域（〒305-8687 茨城県つくば市松の里1）
*³ 農修（独）森林総合研究所 複合材料研究領域（〒305-8687 茨城県つくば市松の里1）
*⁴ 博（工学）（独）森林総合研究所 構造利用研究領域（〒305-8687 茨城県つくば市松の里1）
*⁵ 広島県立林業技術センター（〒728-0015 広島県三次市十日市町168-1）
*⁶ 博（工学）中国林業科学研究院 木材工業研究所（Wan Shou Shan, Beijing, 100091, P. R. China）

ABSTRACT In this study, we examined the problem in applying measured values of temperature and relative humidity environment, moisture content of members and *MOEs* by tapping method to the maintenance a wooden warren truss bridge. In addition, we carried out non-destructive tests for all decomposed members of the bridge. On the temperature and humidity, it needs to consider the durability on the position where dew condensation duration time was long. On the moisture content, though it is difficult that the universal values is shown for the difference of measured values by moisture meter, the value of twenty percent is useful as an index. On the velocity or ultrasonic wave, a practical value for degradation diagnosis was calculated.

Keywords : 集成材、超音波伝播速度、*MOE*、閾値、部材交換

glued laminated timber, ultrasonic propagation velocity, modulus of elasticity, threshold, exchange of members

1. まえがき

木橋の維持管理において、部材の健全度および劣化度を的確に判断する方法として、従来は、目視による外観調査が中心であり、その判断基準は点検者のいわゆる Expert Judge に委ねられることが多かった。近年、橋梁マネージメントシステムの提唱¹⁾をきっかけとして、木橋のモニタリングシステムの開発が行われてきている^{2),3)}。この方法はよりの確に劣化状況を判断し、対応できるシステムとして有望である。

しかし一方で、より簡便に、時系列として連続していないスポット的な点検でも、ある程度の判断（例えば、部材を交換すべきか否か等）ができる手法の開発も一つの方向性であると考えられる。この点については、マニュアルの整備⁴⁾が進められているが、数値的な判断基準を確立していくためには、さらなるデータの蓄積が必要である。

本研究は、対象とする橋梁周囲の温湿度環境やそれに伴う部材含水率、そして打撃法による *MOE* の測定を行い、その結果を維持管理に適用していく際の問題点について検討したものである。

また、解体された対象橋梁の部材に対する非破壊試験について、結果の一部をあわせて報告する。

2. 対象木橋の概要

本研究で対象とした木橋は、広島県内に1990年に竣工し、その後13年間供与された、ベイマツ1級集成材による2連下路式単純トラス橋である。橋長は、第1径間が36.3m、第2径間が18.3mであり、有効幅員は2.3m、主構高さは2.7mであった。写真-1に橋梁の外観を示す。写真は第1径間のものであり、左側が入口側、右側が第2径間へと続く中州側、手前が上流側、奥が下流側である。図-1に展開図を示す。なお、対象橋梁は2002年に一度補修工事を行っており、今回の測定はこの補修工事後に行ったものである。架設状態での測定時は、写真に示すように第1径間は河川上にあったが、第2径間の下には水面はなかった。



写真-1 対象木橋概観
 註) 左：第1径間、右：第2径間

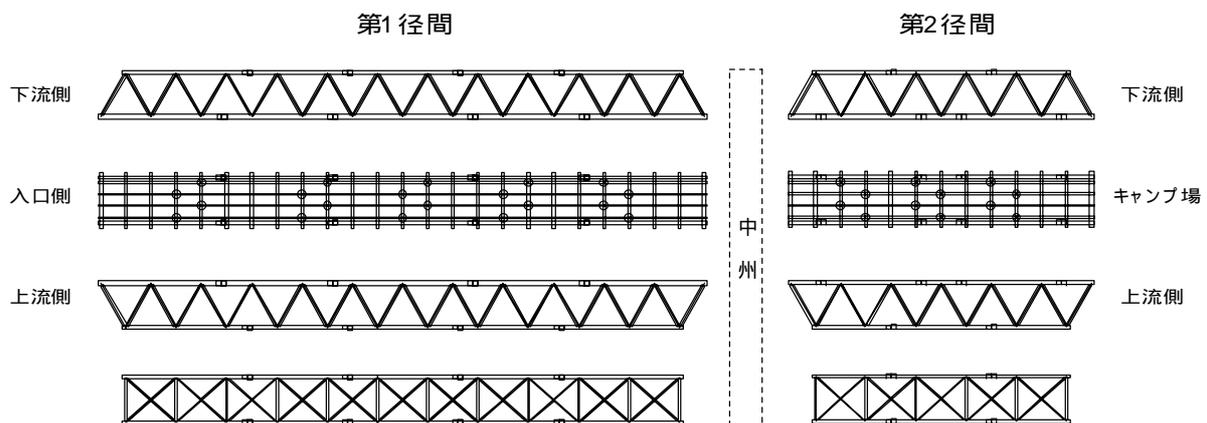


図-1 対象橋梁展開図
 註) 左：第1径間、右：第2径間

3. 実験概要

3.1 架橋状態での部材調査

(1) 温湿度調査

木材腐朽には栄養、水分、酸素、温度が関係し、これらのうちいずれか一つでも不適当な状態になると木材腐朽は生じない⁵。木材は周囲の温湿度環境によって含水率が変化するため、橋梁の置かれている温湿度環境を知ることは、維持管理を考える上で重要である。本研究では、自記記録式温湿度センサー（マイクロテクノ社製 THS-101 および Onset 社製 HOBO Pro RH/Temp Data Logger、写真-2）を橋梁の各所に設置することにより、温湿度環境の測定を行った。いずれのセンサーも PC によって測定開始時刻および測定間隔を事前に設定することにより、自動的に温湿度測定を開始することができる。今回の測定では、測定対象箇所にセンサーを設置し、測定終了時に回収を行った。なお、設置については、ビスあるいはビニールテープで部材にセンサーを固定した。測定終了後、専用ケーブルにより RS232C を介して、PC に測定データを取り込んだ。なお、露点温度もデータ取り込み時にセンサー付属のソフトにより自動的に計算される。測定期間は、2003年12月8日 9:00～10日 15:30 であり、測定間隔は、TH-101 について 分、HOBO に

ついて 分とした。測定箇所は、支承部、水面上、既に腐朽の見られる部分の周辺とし、図 - 2 に示す 8 カ所について測定した。



写真 - 2 自記記録式温湿度センサー

註) 左 : HOBO、右 : THS-101

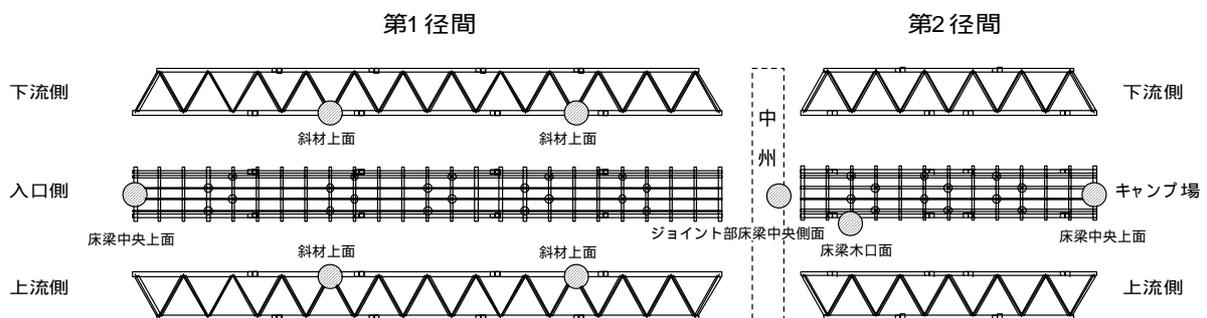


図 - 2 温湿度測定位置

註) は、温湿度センサー設置位置を示す。

(2) 含水率調査

木材は、その含水率によって腐朽の発生程度が異なる。例えばスギ製材の場合、含水率が 20% 以下ではほとんど腐朽しないが、30% にいたると急に腐朽大となり、80% 前後においてもっとも腐朽旺盛となることが知られている⁶⁾。本研究では、メンテナンスにおける指標の一つとして橋梁を構成する部材の含水率を測定した。対象とした部材は、外気が最も停留すると考えられる床梁と架橋状態で足場を用いずに測定できる斜材脚部（欄干付近）とした。なお、第 1 径間の床梁は中州側の直接測定できる範囲から解体用の足場が組まれていたスパン中央部分、そして支承部のみ測定した。測定には、電気抵抗式含水率計（PROTIMETER 社製 Surveymaster）、および、高周波容量型水分計（ケット科学研究所 HM-520）を用いた。前者は 2 本の針式電極を部材に直接刺して測定するもので、主として部材表面の含水率を得ることができ、後者は測定器を部材に押し当てて測定するもので、比較的内部的な平均的な含水率を得ることができる。測定は、12 月 8 日 15:30 ~ 16:00 および 12 月 9 日 9:40 ~ 10:00 に行った。

(3) 打撃法による部材の固有振動数測定

腐朽や損傷の程度を簡便に評価するための指標として部材の縦振動における固有振動数を取り上げ、その可能性を検討した。これは、腐朽等による部材の MOE 低下が、MOE と強い相関関係にある固有振動数にも影響を与えるという考えに基づく。また、縦振動における固有振動数は、部材の境界条件に左右されず、かつ、簡便に測定できるという利点がある。対象とした部材は、水平ブレースおよび床梁であり、第 2 径間では上弦材の測定も試みた。

測定は、部材をハンマーで打撃して打撃点近傍の打撃音をマイクロホンで収集し、打撃音の波形から FFT アナライザ（小野測器社製 CF-1200、マイクロホン MI-1141、プリアンプ MI-3310）

により固有振動数を求めた（写真 - 3）。



写真 - 3 打撃法による部材 MOE の測定方法

(4) 橋梁全体の振動性状簡易測定

橋梁全体の振動性状を把握するため、たわみ振動、ねじり振動における固有振動数を測定した。加振点および測定点は、スパンの 1/4、1/2、3/4 分点およびスパン中央部で幅員方向に偏心した位置とした。加振は人間（体重 73kg）の跳躍により行った。床版に設置した加速度ピックアップにより振動波形を測定した。得られた波形は、プリアンプを介して FFT アナライザ（小野測器社製 CF-1200）に取り込み、固有振動数を求めた。

3.2 解体後の部材調査

(1) 部材の超音波伝播速度測定

外部からは観察できない腐朽や損傷の程度を定量的に得ることを目的として、本研究では固体内を伝播する音速の測定を行った。これは、内部に腐朽等が存在すると音波の伝播距離が長くなるため、音速が遅くなることを利用した手法である。測定は、劣化が生じやすく、かつ、木橋の維持管理上重要であるボルト先穴近傍を中心に行った。なお、測定方向には集成材ラミナの積層方向に対して、平行方向と直交方向とが考えられるが、本研究では、集成材全体の平均的な挙動を測定することを目的として、積層方向に対して平行に測定した（写真 - 4）。測定箇所は、ボルト先穴近傍および先穴間の中央とした。測定対象とした部材は、上下弦材、斜材、水平ブレース、耐傾材である。測定には超音波式コンクリート品質試験機（C. N. S. Electronics Ltd., PUNDIT）を用いた。この試験機は、超音波の伝播時間を測定するものであり、伝播距離を得られた値で除することにより、音速を求めた。



写真 - 4 超音波伝播速度の測定方法

4. 実験結果

4.1 架橋状態での部材調査

(1) 温湿度測定結果

全体を通して、温度は 1.00 ~ 5.08 ~ 23.2（最小値 ~ 平均値 ~ 最大値、以下同じ）、相対湿度は 49.0 ~ 81.5 ~ 99.0%RH であった。位置によらず、9 日の 0 時 ~ 10 時、10 日の 6 時 ~ 10 時に相対湿度の上昇が認められた。平均値（5.05、81.5%）における木材の一般的な平衡含水率⁷⁾は、約 17% であり、腐朽条件（3.1(2)参照）に達するレベルではなかった。しかし、実際には床梁等において腐朽痕があった。これは、今回の測定期間が 3 日間と短かったことも要因として考えられる。

図 - 3 に測定結果の一例を示す。図は第 1 径間の斜材および支承部の温度、相対湿度、露点温度を示している。図中、相対湿度が 100%RH で頭打ちになっているが、これはセンサー（TH-101）が相対湿度の測定可能範囲を越えたためである。

第1径間では、斜材については位置（上流と下流）による温湿度の変化傾向に差異は認められなかった。また、支承部では相対的に温湿度の変化量が少なかった。第2径間でも同様の傾向が認められた。さらに、腐朽が見られた床梁の位置では、露天温度と気温との差が小さくなり、結露条件が成立しやすい場所であることがわかった（図-3参照）。

従って、温湿度測定については、露点温度と外気温との測定結果から結露条件が成立していた時間を算出し、その値が大きかった箇所について耐久性を考慮する必要があると考えられる。

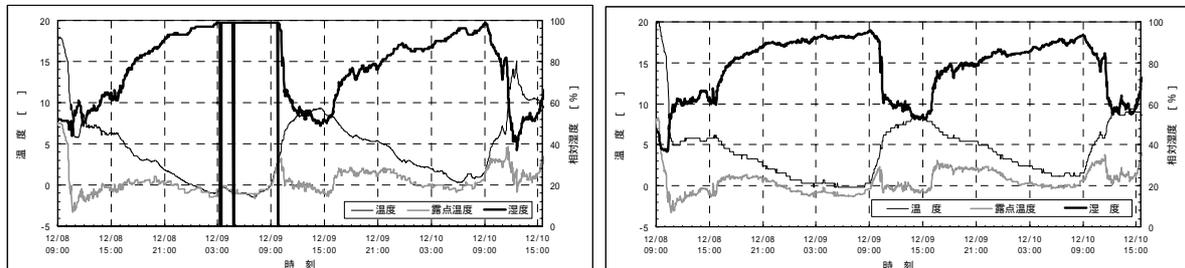


図-3 温湿度および露天温度の変化の一例

註) 上段：第1径間斜材下流側の場合、下段：第2径間床梁の場合

(2) 含水率調査

表-1に部材の種類毎に測定された含水率の統計値を示す。

部材の種類による含水率の違いは認められなかった。電気抵抗式含水率計による測定値は、高周波式による値の約1/2であった。これは、前述のような含水率計の特性によるものであり、得られた含水率が表層付近の値なのか内部の値なのかについては、常に意識している必要がある。前述のように、木材の腐朽は、含水率が20%以上になると急激に進行しやすい。これに従って結果を評価すると、高周波容量式の値が床梁についてこの値を超えていた。これは実際の状況と符合しており、木橋の維持管理において含水率を測定することの重要性を示すことができた。判断基準については、含水率計によって表示値が異なるために普遍的な値を示すことは難しいが、一つの指標として20%が挙げられる。

表-1 部材含水率測定結果

	第1径間		第2径間	
	床梁(%)	斜材(%)	床梁(%)	斜材(%)
最大値	15.0	13.8	18.1	19.0
	39.0	32.5	35.5	28.5
平均値	12.8	9.8	12.8	12.5
	27.9	19.8	23.9	20.0
最小値	10.5	4.7	9.4	8.1
	21.0	13.0	18.0	11.5

註) 上段：電気抵抗式含水率計による値、下段：高周波容量式含水率計による値

(3) 架橋状態での部材の固有振動数

表-2は、架橋状態で測定した部材の固有振動数に関して、部材の種類別に集計した結果を示す。水平ブレースの値が、他の部材と比較して非常に小さくなったため、これらの固有振動数の平均値、および設計図書による部材寸法を用いて、縦振動およびたわみ振動を仮定した見かけのMOEを計算した。その結果、床梁については、第1径間が58ton/cm²、第2径間が80ton/cm²（いずれも、縦振動を仮定）となり、第2径間の上弦材については231ton/cm²（両端自由条件でのたわみ振動を仮定）となった。今回対象とした橋梁では、部材MOEの初期値に関する情報はなかったため、材料であるベイマツ1級集成材の平均的なMOE（135ton/cm²、下限値110ton/cm²）⁸⁾を利用して評価を試みた。その結果、今回求めた見かけのMOEは、床梁について約1/2、上弦材に対して1.7倍となった。これに対し、水平ブレースの値は、両端自由条件でのたわみ振動を仮定した場合でも6ton/cm²と極めて低い値となり、測定に問題があったと考えられる。逆に、部材のMOE

が 135ton/cm²となる固有振動数は、約 500Hz と算出されたが、この近辺にピークスペクトルは存在しなかった。従って、水平ブレースについては多くのモードの振動が混在し、純粋なたわみ振動の測定ができなかったと思われる。今回は簡便に測定する目的で、打撃音を直接マイクロホンで収集したが、例えば、部材に装着した加速度ピックアップで振動波形を収集する等の改善を行えば、測定値の信頼度を上げることができると考えられる。

以上より、架橋状態での打撃法による MOE を用いて劣化診断する場合の判断基準については明確にすることができなかった。これについては、解体後に行った部材の MOE 測定結果と併せることにより、有用な判断基準を明らかにできると考えている。

表 - 2 部材の固有振動数

径間	部材の種類	最大値 (Hz)	平均値 (Hz)	最小値 (Hz)
第 1 径間	水平ブレース	125	109	100
第 2 径間	水平ブレース	115	103	95
第 1 径間	床梁	600	472	300
第 2 径間	床梁	975	552	388
第 2 径間	上弦材	595	237	10

(4) 橋梁全体の振動性状簡易測定

表 - 3に、簡易測定による橋梁全体の固有振動数を示す。

表 - 3 橋梁の全体振動に対する固有振動数

	振動モード	加振点	ピックアップ 設置位置	固有振動数 (Hz)
第 1 径間	鉛直曲げ対称	スパン中央	スパン中央	3.75
	ねじれ対称	スパン中央偏心	スパン中央	10.75
	鉛直曲げ逆対称	1/4 スパン	スパン中央	21.75
	鉛直曲げ逆対称	スパン中央	3/4 スパン	3.75
第 2 径間	鉛直曲げ対称	スパン中央	スパン中央	11.75
	ねじれ対称	スパン中央偏心	スパン中央	15.75
	鉛直曲げ逆対称	1/4 スパン	スパン中央	11.75
	鉛直曲げ逆対称	3/4 スパン	スパン中央	11.75
	鉛直曲げ対称	スパン中央	3/4 スパン	11.75

橋梁における支間長と固有振動数との関係⁹⁾によれば、第 1 径間(支間長 36m)では約 3Hz、第 2 径間(同 18m)では約 5 Hz である。第 1 径間についてはほぼ妥当な測定値といえるが、第 2 径間については約 2 倍の値となった。この理由については、今後の検討課題としたい。

4.2 解体後の部材調査

(1) 音速測定結果

図 4 ~ 図 - 6 に音速の測定結果の一部を示す。図は、対象とした部材毎に得られた測定値のヒストグラムを示したものである。概観すると、ブロードな分布をするものと右側(高速 = 健全側)に分布が偏っているものの 2 通りのパターンが観察された。

腐朽等が存在した場合には音速が極端に低下すると考えられるため、図中のヒストグラムにおいて左側(低速側)に分布している値は、何らかの劣化が存在すると判断できる。従って、ある

境界値を定め、それ以下の値を示す箇所、あるいは部材を補修、交換することになるが、その際に必要となる境界値について検討した。

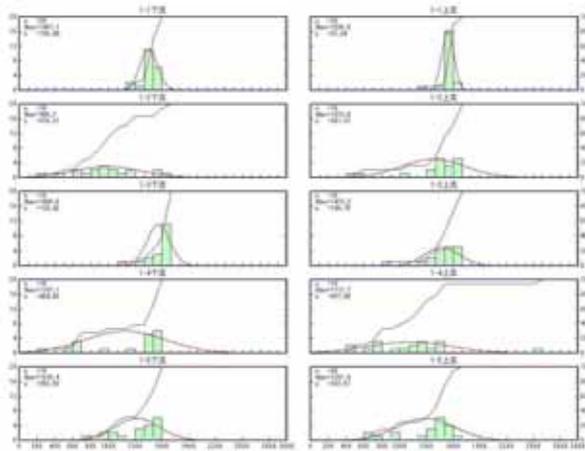


図 - 4 上弦材の音速測定結果（第1径間）

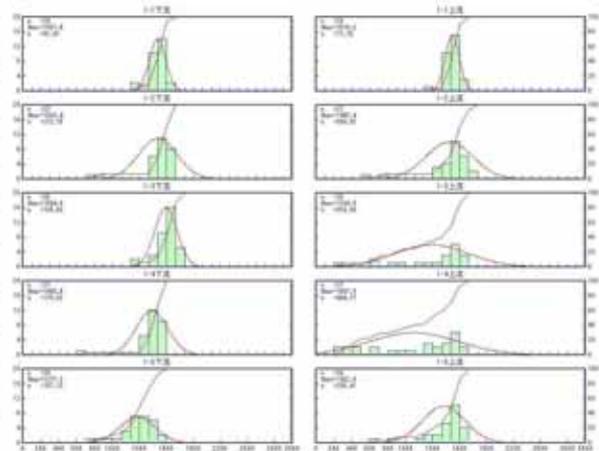


図 - 5 下弦材の音速測定結果（第1径間）

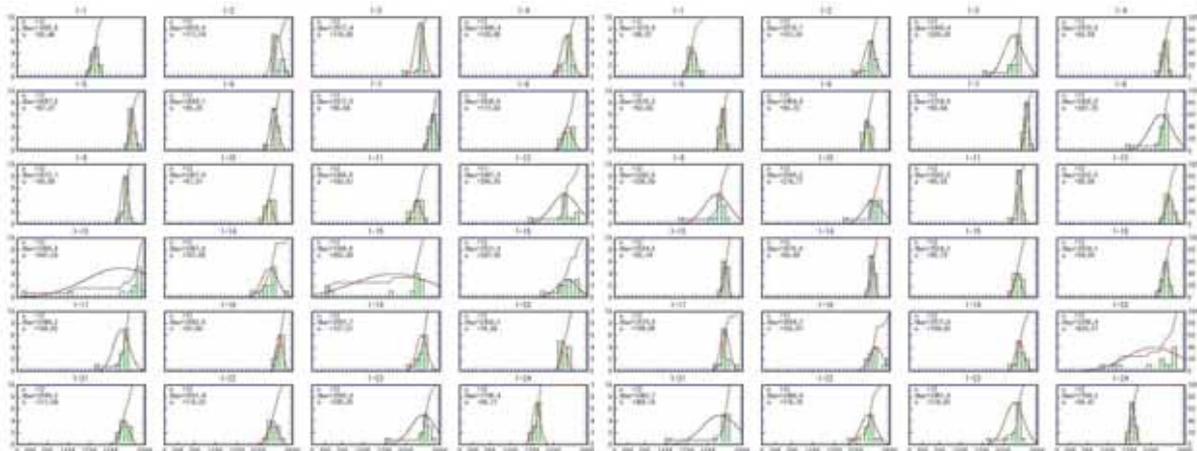


図 - 6 斜材の音速測定結果（第1径間の場合）

註) 左側4列：下流側、右側4列：上流側

一般に、 $v = \sqrt{E/\rho}$ (v : 速度、 E : MOE 、 ρ : 密度)であり、この式から繊維直交方向の健全な集成材の音速を推測することができる。いま、 MOE を 5.4ton/cm^2 (135ton/cm^2 の $1/25^{10}$)、密度を 0.55g/cm^3 、 g を 980.665cm/s^2 とすると、音速は 3103m/s となる。同様に MOE の下限値 (110ton/cm^2)に対応する繊維直交方向の音速は、 2801m/s であった。図 - 4 ~ 図 - 6 より、算出した値を基準値とすると大部分の部材が不適格となってしまいうため、実用上適切とはいえない。そこで、クラスター分析を行い、高速側と低速側との境界線を統計的に求めた。分析には汎用統計処理ソフト (株)日本科学技術研究所 JUSE StatWorks Ver. 2.30)を用い、クラスター化には群平均法を、類似化係数にはユークリッド距離を用いた。結果の一部を表に示す。第1径間の2種類の部材のみの結果ではあるが、全データを概観すると、およそ 1000m/s を境界値とするのが妥当ではないかと考えられる。この値の物理的な意味づけについては、更に実際の測定値と比較し、不合格となる具体的な箇所と実際の腐朽状態との比較対応を行うことが必要であるが、今後の課題としたい。

表 - 4 クラスター分析により得られた境界値 (第1径間・弦材の場合)

種類	部材番号	上・下流	境界値 (m/s)	種類	部材番号	上・下流	境界値 (m/s)
上弦材	1-1	上流側	1320	下弦材	1-1	上流側	1260
		下流側	1260			下流側	1380
	1-2	上流側	540		1-2	上流側	720
		下流側	1320			下流側	860
	1-3	上流側	840		1-3	上流側	960
		下流側	980			下流側	1260
	1-4	上流側	1500		1-4	上流側	1080
		下流側	980			下流側	660
	1-5	上流側	1020		1-5	上流側	840
		下流側	1140			下流側	1020

5. あとがき

木橋の架橋状態における温湿度環境、部材含水率、*MOE* の測定を行い、その結果を維持管理に適用していく際の問題点について検討した。また、解体された対象橋梁の部材に対する非破壊試験について、音速に関する結果について報告した。

温湿度については、結露条件成立時間を算出し、その値が大きかった箇所について耐久性を考慮する必要があると考えられる。

含水率については、含水率計によって表示値が異なるために普遍的な値を示すことは難しいが、一つの指標として 20% が挙げられる。打撃法による *MOE* については、判断基準を明らかにすることはできなかった。部材の超音波伝播速度については、判断の一つの指標として 1000m/s という値を算出した。今後の課題については、解体後に測定した部材の *MOE* と架橋状態での *MOE* との関係、超音波伝播速度と目視による欠点調査との関係、部材の *MOE* と橋梁全体の振動特性との関係 (FEM 解析の実施) 等が挙げられる。

謝 辞 架橋時の測定にあたって多くのご助力とご助言をいただいた、広島県立東部工業技術センター・江越航氏、愛媛県林業試験場・藤田誠氏、山佐木材株式会社・原田浩司氏、および、解体部材の測定にあたって施設の提供およびご助力、ご助言をいただいた広島県立林業技術センター各位に心からの謝意を表する。

参考文献

- 1) 佐藤弘史：橋梁マネジメントシステム、土木学会誌、Vol.85, pp.44-45, 2002.
- 2) 佐々木貴信、植野芳彦、薄木征三：モニタリングシステムを活用した木橋の維持管理、第2回木造技術に関するシンポジウム論文報告集、pp.93-96, 2003.7
- 3) 飯村豊：木橋の耐久性と維持管理、第2回木造技術に関するシンポジウム論文報告集、pp.85-92, 2003.7
- 4) 木橋技術協会：木橋の点検マニュアル、木橋技術協会、1999.
- 5) (社)日本木材保存協会：木材保存学入門(改訂版)、(社)日本木材保存協会、pp.68-71, 2001.
- 6) 十代田三郎：木材の耐久性、(株)資料社、p.37, 1952.
- 7) 今村祐嗣他編著：“建築に役立つ木材・木質材料学”、(株)東洋書店、東京、p.32, 1997.
- 8) (財)日本合板検査会：構造用集成材の日本農林規格、日本合板検査会、2000.
- 9) 佐成孝之、本田秀行、佐々木貴信：自立式タイドアーチ木車道橋の構造特性評価、第2回木造技術に関するシンポジウム論文報告集、pp.65-72, 2003.7.
- 10) 日本建築学会：木質構造設計規準・同解説、(株)丸善、東京、p.160, 2002.