

木橋の健全度調査に対する定量的評価法の試案

本田 秀行¹・豊田 淳²・加藤 真吾³・篠原 聖人⁴

¹フェロー 金沢工業大学教授 工学部環境土木工学科 (〒921-8501 石川県野々市市扇ヶ丘 7-1)
E-mail: honda@neptune.kanazawa-it.ac.jp

²正会員 サンコーコンサルタント株式会社 技術第一部 (〒136-8522 東京都江東区亀戸 1-8-9)
E-mail: a.toyoda@suncoh.co.jp

³正会員 サンコーコンサルタント株式会社 技術第一部 (〒136-8522 東京都江東区亀戸 1-8-9)
E-mail: s.kato@suncoh.co.jp

⁴学生員 金沢工業大学大学院 環境土木工学専攻 (〒921-8501 石川県野々市市扇ヶ丘 7-1)
b1403215@planet.kanazawa-it.ac.jp

木橋の健全度を把握する調査の方法として、例えば打診、含水率測定器、超音波伝播速度(時間)測定器、穿孔抵抗値測定器などによる測定が多く行なわれており、打診以外の各試験法は数値的な測定値が得られる。また、その測定値と曲げ強度やヤング係数などの物性値への換算評価も行なわれている。打診を含めて、これらの測定法は経年による腐朽や劣化が生じている局所的な箇所を把握するために有用な試験法であるが、各試験法とも健全度に対しては測定値間の定性的な相対評価になり、また調査日の気象環境によっては各測定法で得た結果が異なる場合もあるなど、各測定法を統合した木橋の総合的な評価を得るには困難である。そこで、本研究は一つのケーススタディとして、減点法に基づく各測定法を統合して定量的に腐朽度および健全度評価を行える評価法を試みた。

Key Words: timber bridge, soundness, evaluation method

1. まえがき

近年、1990年代の時代と異なり、木橋の建設が少なくなっている。一方、過去に建設された木橋の維持管理や保全のために、健全度に対する検査や評価法を構築することは社会的に重要な課題になっている。

木橋の健全度を把握する調査の方法として、例えば打診、含水率測定器、超音波伝播速度(時間)測定器、穿孔抵抗値測定器などによる測定^{1)~14)}が多く行なわれており、打診以外の各試験法は数値的な測定値が得られる。また、上記の参考文献では、その測定値と曲げ強度やヤング係数などの物性値への換算評価も行なわれている。打診を含めて、これらの測定法は経年による腐朽や劣化が生じている局所的な箇所を把握するために有用な試験法であるが、各試験法とも健全度に対しては測定値間の定性的な相対評価になり、また調査日の気象環境によっては各測定法で得た結果が異なる場合もあるなど、各測定法を統合した木橋の総合的な評価を得るには困難な場合がある。

そこで、本研究は一つのケーススタディとして、減点法に基づく各測定法を統合して定量的に腐朽度および健全度評価を行える評価法を試みた。さらに、数年ごとに木橋の健全度に対するモニタリング調査を行なう場合、同じ減点法の基準値を用いるならば経年による木橋の健

全度が定量的な尺度で評価されるので、経年による健全度に対する評価も可能になることから、以後の維持管理や保全に対する有用な情報が得られるものと考えられる。

2. 対象橋梁

健全度調査では2橋の木橋を対象とした。最初の木製道路橋は、写真-1と図-1に示すヒバ集成材で建設されたA橋(石川県)である。表-1にA橋の設計概要を示す。A橋は昭和62年に竣工した上落式アーチ橋としてはわが国の第1号橋である。平成28年7月の調査時では、架設後30年が経過している。

2番目の木橋は、写真-2と図-2に示すB橋(石川県)



写真-1 A橋

である。表-2にB橋の設計概要を示す。B橋は、加賀市山中温泉のシンボルとして全国的にも有名な総ヒノキ材で建設された道路橋である。平成27年7月の調査時では、架設後27年が経過している。なお、29.4 kN車両の重量制限が行われている。

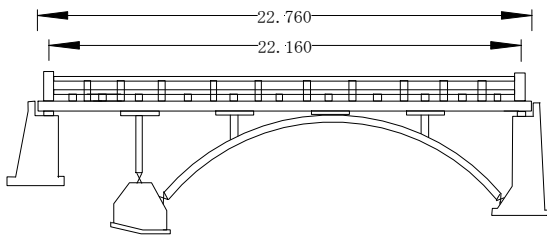


図-1 A橋の一般図

表-1 A橋の設計概要

橋種	道路橋	
施工年度	昭和62年(1987年)	
使用材料	主要部材	ヒバ集成材
	高欄・床板	アカマツ
構造形式	上路式2ヒンジアーチ橋	
橋長	22.76m	
支間長	22.16m	
幅員	2.8m	



写真-2 B橋

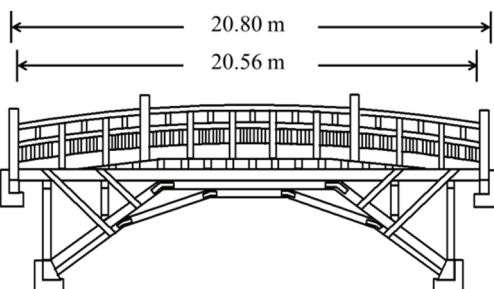


図-2 B橋の一般図

表-2 B橋の設計概要

橋種	道路橋
施工年度	平成2年(1990年)
使用材料	ヒノキ
構造形式	方杖橋
橋長	20.8m
支間長	20.56m
幅員	4.0m

3. 健全度調査^{15), 16)}

(1) 目視試験

木材は雨水の浸透や腐朽菌の繁殖によって腐朽し、部材のひび割れや変色などを確認することができる。この目視試験を用いて劣化が著しい箇所の特定制を行った。A橋の劣化箇所例を写真-3、写真-4に示す。床板は各所にひび割れや変色が見られ、アーチ部材の端部はドライバーが刺さるほどの腐朽が確認された。B橋の劣化箇所例を写真-5、写真-6に示す。

劣化の要因としては、一般的に日当たりが悪くて年中湿気の高い状態にあるか、風通しも悪く腐朽菌が発生しやすい環境になっていること等が考えられる。



写真-3 アーチ部材端部の腐朽



写真-4 アーチ部材支柱の補剛材の腐朽



写真-5 床板の割れ



写真-6 方杖や支柱等の腐朽

(2) 打診試験

ハンマーを用いた打診で、床板の打音を高い、普通、低い3段階で評価した。なお、試験者によって評価基準が異なるため過去のデータとの単純な比較はできない場合がある。図-3にA橋に対する床板の打診試験の結果を示す。全体的に異音箇所が多く腐朽が認められた。特に、上流側の高欄付近に異音箇所が多いことから、上流側の真上に植生している大木によって日光が遮られて乾燥しにくくなっており、他の箇所より腐朽が進行していると考えられる。図-4はA橋に対する床板の打診試験の結果である。山中町の反対側に腐朽箇所が散見される。

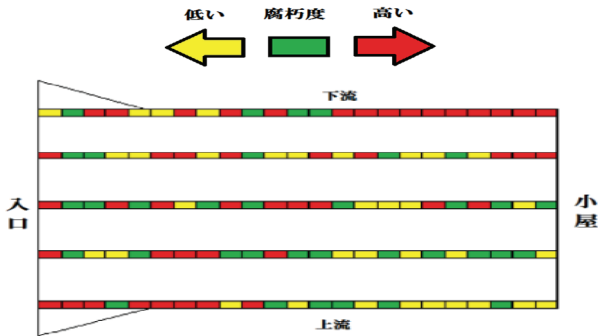


図-3 A橋に対する床板の打診結果

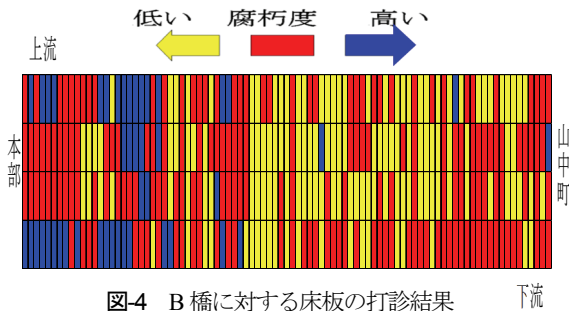


図-4 B橋に対する床板の打診結果

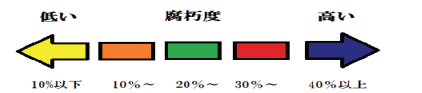
(3) 含水率試験

含水率測定器を用いて、木材の含水率を測定し健全性を調査した。含水率が高いほど腐朽が進行している可能性が高い。なお、一カ所につき3回測定しその平均を測定値とした。27年度の実験とは違い天候に恵まれたため、一般的に健全と言われる木材の含水率20%を基に評価基準を定めて5段階で評価した。図-5にA橋に対する橋脚とアーチ部材の試験結果の一例を示す。高欄及び地覆と比べてアーチ部材、橋脚の含水率が高く腐朽が進行していることがわかる。図-6にB橋に対する第一支柱と方杖部材の試験結果の一例を示す。第一支柱や方杖基部の含水率が高く腐朽が進行していることが認められる。

なお、含水率試験は木部材の表面の含水率を測定するため内部の含水状態が不明のある理由から、健全度調査では有効な試験法でない場合がある。

(4) 超音波伝播速度(時間)試験

超音波が木部材を透過する時間を測定することによって木部材内部の健全性を調査した。伝播時間が長いほど腐朽している可能性が高いと言える。評価基準は以下の式(1)から算出した。

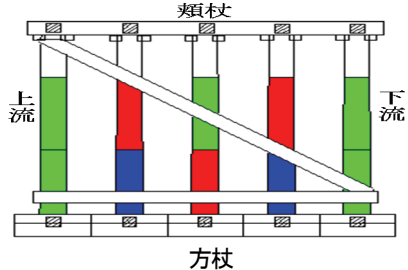


アーチ部材

図-5 B橋の含水率試験の一例



第一支柱



方杖

図-6 B橋の含水率試験の一例

$$C_b = \sqrt{E/\rho} \quad (1)$$

ここに、 C_b は超音波伝播速度の理論値、 E はヤング係数、 ρ は比重である。また、伝播時間 T は i 木部材の厚さを x_i とすると、式(2)から算出した。

$$T = x_i/C_b \quad (2)$$

なお、木部材の厚さによって伝播時間の理論値が異なるため、木部材ごとに評価基準を定めている。評価は6段階で行った。図-7に各部材の調査結果を示す。高欄、橋脚に比べてアーチ端部における数値が顕著に高いことが認められる。他の試験法と同様に、アーチ部材端部の腐朽による劣化が進行しているものと考えられる。

写真-2に示すように、B橋の支柱と頬杖部分は地形的な制約から下谷側しか降りられないため、測定可能な範囲で調査を行った。図-8は、B橋に対する超音波伝播速

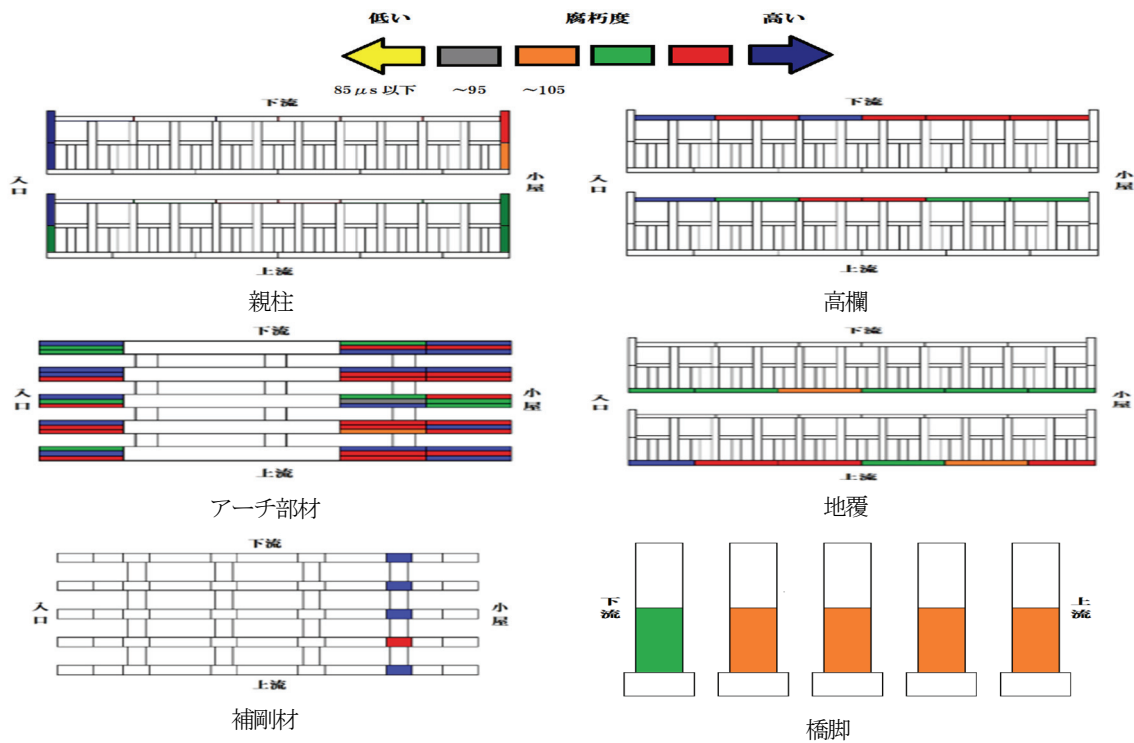


図-7 A 橋の超音波伝播時間試験の結果

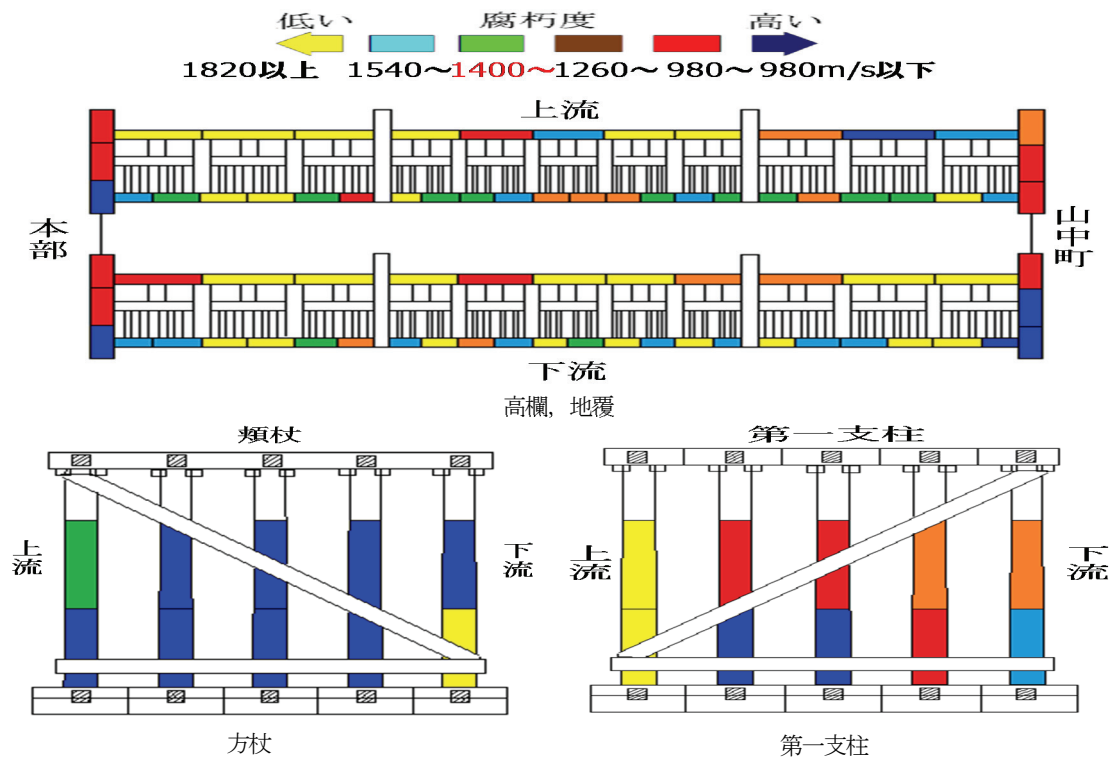


図-8 B 橋の超音波伝播速度試験の結果

度試験の結果である。親柱、方杖、第一支柱の基部に腐朽による劣化が進行していると考えられる。

なお、健全度調査には木部材にピンを打ち込むピロディン測定機やドリルで穿孔するレジストグラフ測定器が多く用いられる場合がある。しかし、解体後あるいは修繕工事前の木部材の健全度調査では有用な試験法である

が、供用中の木橋に対してはピンやドリルの孔が生じるために管理者が許可しない場合がある。本研究では、供用中の木橋であるため、ピロディンやレジストグラフの測定器を使用していない。

4. 減点法

前節での健全度調査において、各試験法によって局所的な腐朽等による劣化状態がある程度判明できる。しかしながら、例えば超音波伝播試験においても、測定値を用いて健全度を判明できるが、各測定値による定性的な相対評価になっている。また、各試験法が単一的な相対評価になっており、各試験法を統合した定量的な評価になっていない。このことから、本研究では一つのケーススタディとして、減点法に基づいて各試験法を統合した定量評価の方法を試みた。

減点法は、表-3に示すように各測定で何段階かの測定値の分類を設け、その分類に対しての基準値（あるいは理論値）を0点に、それより劣化等に対して良い分類は全て0点に、悪い場合の分類は-1, -2, -3のように分類項目に対して負の値を配点する。なお、各測定法での基準値は、調査日の前や当日の雨天等による気象環境によって変わる場合がある。

減点法の手順は、①各測定における評価基準から作成した点数表に基づき、2つの試験法が-1, -2の配点の場合 $-2 \times -2 = -4$ で各測定箇所から最大で4点を減点する。②各部材の最大減点数を母数とし、損傷度を数値化する。③表-4に示した健全度評価法を基に、4段階で健全度の区分を評価する。以上のように、減点法では各測定値を基にして各部材の損傷度（%）を求め、最終的に表-4のI, II, III, IVの健全度区分から健全度を定量的に評価する方法である。

5. 減点法に基づく健全度評価

(1) A 橋

表-5にA橋の各試験法に対する配点を示す。部材ごとに腐朽度を百分率で数値化した結果を表-6に示す。

表-5 A 橋に対する配点

試験名	分類	配点	内容
打診試験	高い	0	健全
	普通	0	異常なし
	低い	-1	損傷あり
超音波伝播時間試験 (s)	-20 以下	0	健全
	~-20	0	やや健全
	~-10	0	問題なし
	基準値	0	問題なし
	~+10	-1	軽度の腐朽
	+10 以上	-2	中度の腐朽
含水率試験 (%)	10%以下	0	健全
	10%代	0	やや健全
	基準値(20%)代	0	問題なし
	30%代	-1	軽度の腐朽
	40%以上	-2	中度の腐朽

表-3 減点法の分類と配点例

試験法名	分類	配点	内容
〇〇試験	低い	0	健全
	普通	0	異常なし
	高い	-1	損傷あり
△△試験	良い値	0	健全
	基準値	0	問題なし
	悪い値	-1	腐朽の進行
	悪い値	-2	腐朽の進行

表-4 健全度の評価法

区分	状態	内 容	損傷度
I	異常なし	対策の必要がない	30%以下
II	軽度の損傷	供用に影響しない程度の劣化が見られ、近い将来に影響が出る可能性がある	30 % ~ 60%
III	中度の損傷	劣化により早期に支障をきたす可能性があり、補修の必要がある	60 % ~ 80%
IV	重度の損傷	部材の健全性が著しく損なわれ、安全な供用に支障をきたす恐れがある	80%以上

一例として、腐朽度が22%の算出法は、含水率試験では-1, -2の配点で減点が2、超音波試験では-1, -2の配点で両試験の合計は4点の減点になる。そして、親柱の場合の測定箇所が8、各測定箇所の原点の合計が-7（絶対値として7）であるので、 $7/(8 \times 4) \times 100 = 22\%$ になる。この結果を表-4に示した健全度の評価法を用いて4段階で健全度の区分評価を行った。その最終的な結果を表-7に示す。

表-7から笠木、床板、特にアーチ部材で軽度の損傷を確認できる。アーチ部材は他部材と比べて含水率試験での減点が多いことが高い損傷度の要因となっている。日当たりの悪さや、河川に隣接していることで一年を通し含水率が高くなっていることが損傷の要因になっていると考えられる。本橋は架設後18年経過した平成17年に床板、高欄、地覆部材を取り換えているが、特に橋軸直角と縦方向に2層に設置している床板の劣化が進行している可能性がある。

表-6 A 橋に対する点数と損傷度

部材	測定箇所	測定名	点数		損傷度
			H29年	合計	
親柱	8	含水	0	-7	22%
		超音波	-7		
笠木	12	含水	0	-12	25%
		超音波	-12		
地覆	12	含水	0	-5	10%
		超音波	-5		
アーチ	45	含水	-31	-82	46%
		超音波	-51		
橋脚	10	含水	-8	-8	20%
		超音波	0		
床板	115	打診	-46	-46	40%

表-7 A 橋に対する健全度評価

かじか橋	部材					
	親柱	笠木	地覆	アーチ	橋脚	床版
健全度評価	I	I	I	II	I	II

(2) B 橋

表-8 に B 橋の各試験法に対する配点を示す。部材ごとに損傷度を百分率で数値化した結果を表-9 に示す。この結果を表-4 に示した健全度の評価法を用いて 4 段階で健全度の区分評価を行った。その最終的な結果を表-10 に示す。表-9 と表-10 から親柱、方杖、第一支柱の損傷度等による劣化が確認できる。特に第一支柱は損傷度が 53% であり、他の部材より高い数値になっている。本橋は調査時点で架設後 25 年経過しており、親柱、方杖、第一支柱の劣化が進行している可能性がある。

以上に記述した A 橋と B 橋に対する健全度の定量的な評価から、A 橋ではアーチ部材と床板の両部材とも健全度評価は軽度な損傷である II の結果を得た。特に、アーチ部材の劣化の進行が今後に行き行く可能性がある。総合的な評価区分は III に近い。

また、B 橋では親柱、方杖、第一支柱が軽度な損傷である II の結果を得た。特に、第一支柱の劣化の進行が今後に行き行く可能性があり、総合的な評価区分は III に近い。

いずれの木梁においても、調査時点では軽度の損傷あるいは中度の損傷に近いレベルであるが、早期措置段階に近く中長期的な保全に対して早期に措置を講ずる必要があると思われる。

6. あとがき

木橋の健全度調査に対しては様々な測定法がある。本研究では、比較的簡易な測定法を例に、減点法に基づく健全度の定量的な評価法を述べた。

本研究での減点法も絶対的な評価法でなく、現時点では一つの試案である。各試験法に対する 0, -1, -2 のような配点および健全度の評価区分 I, II, III, IV のパーセントを変えることによって、健全度評価の結果は異なってくる。

今後、木橋の健全度評価に対して定量的評価が可能になれば、現在施行されている木橋定期点検要領(案)¹⁷⁾を用いて木橋の点検とその結果による健全度の診断において、例えば変状に対する健全度区分 I の A と B, 区分 II の C 1 と M, 区分 III の C 2, 区分 IV の E 1 と E 2 の判定が点検者や診断者の定性的な評価でなく、定量的な評価になると考えられる。また、点検者や診断者の点検や診断の判断ミスに対する減少の可能性もある。

今後、関係各位の改良型の評価法および木橋定期点検要領(案)への組込みに期待したい。

表-8 B 橋に対する配点

試験名	分類	配点	内容
打診試験	高い	0	健全
	普通	0	異常なし
	低い	-1	損傷あり
超音波伝播速度試験(m/s)	1820 以上	0	健全
	～1540	0	やや健全
	基準値(1400)	0	問題なし
	～1260	0	問題なし
	～980	-1	軽度の腐朽
	980 以下	-2	中度の腐朽
含水率試験(%)	10%以下	0	健全
	10%代	0	やや健全
	基準値(20%)代	0	問題なし
	30%代	-1	軽度の腐朽
	40%以上	-2	中度の腐朽

表-9 B 橋に対する点数と腐朽度

部材	測定箇所	測定名	点数		損傷度
			H27 年	合計	
親柱	12	含水	-1	-16	33%
		超音波	-15		
笠木	22	含水	0	-6	7%
		超音波	-6		
地覆	44	含水	-4	-8	5%
		超音波	-4		
方杖	10	含水	-7	-14	35%
		超音波	-7		
第一支柱	10	含水	-5	-21	53%
		超音波	-16		
床板	364	打診		-54	15%

表-10 B 橋に対する健全度評価

こおろぎ橋	部材					
	親柱	笠木	地覆	方杖	第一支柱	床版
健全度評価	II	I	I	II	II	I

参考文献

- 1) 瀬崎満弘・今井富士夫・中澤隆雄：アーチ木歩道橋の健全度に関する経年変化，第3回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集，pp.121-126, 2004.
- 2) 石松和哉・二瓶友樹・本田秀行：上落式木車道橋の健全度評価，第4回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集，pp.59-64, 2005.
- 3) 渡辺浩・小松幸平・森拓郎：錦帯橋古材の残存強度と診断法の検討，第6回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集，pp.105-112, 2007.
- 4) 佐々木貴信・黄元重・平沢秀之・渡辺浩・佐藤一人：第7回木

- 橋技術に関するシンポジウム論文報告集, pp.95-100, 2008.
- 5) 黄元重・金高悟・佐々木貴信: RESISTGRAPHを用いた木橋部材の劣化診断, 第7回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集, pp.101-104, 2008.
 - 6) 藤田和彦・野沢浩二・木村誠二・渡辺浩: 架設後14年経過した用倉大橋の維持管理, 第7回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集, pp.105-110, 2008.
 - 7) 渡辺浩・藤田和彦・宮武敦・佐久間太亮: 用倉大橋の地覆と高欄材の健全度診断の検討例, 第7回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集, pp.111-118, 2008.
 - 8) 原田直樹・加藤英雄・井道裕史他8名: 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, 第7回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集, pp.119-128, 2008.
 - 9) 古村崇・佐々木貴信・藤田清秀・薄木征三: 架設後21年を経過した木歩道橋の健全度評価, 木材利用研究論文報告集10, pp.50-55, 2011.
 - 10) 本田秀行・糠山尚希・興津光: 20年経過した木製方杖車道橋の健全性と木材の強度低下, 木材利用研究論文報告集10, pp.108-115, 2011.
 - 11) 岡崎泰男: 打音による木材の腐朽診断システムの構築, 木材利用研究論文報告集11, pp.31-38, 2012.
 - 12) 本田秀行: 25年経過した上路式アーチ木製車道橋の健全度と構造性能, 木材利用研究論文報告集12, pp.51-57, 2013.
 - 13) 渡辺浩・田中圭・森拓郎・千田知弘: アーチ橋として利用されていたボンゴシ部材の残存強度と診断法の検討, 木材利用研究論文報告集12, pp.157-162, 2013.
 - 14) 山田昌郎・原忠・水谷羊介他7名: 木材の含水率がピロディン試験値とドライバーの貫入深さに及ぼす影響, 木材利用研究発表会講演概要集16, pp.100-107, 2017.
 - 15) 森瀬彬・吉田将一郎: 経年による木製アーチ橋(かじか橋)の構造性能と健全度調査、平成29年度金沢工業大学環境土木工学科プロジェクトデザインⅢレポート(卒業論文)、pp.1-61, 2017.
 - 16) 大井智道・酒井雄平: 経年による山中温泉こおろぎ橋の構造特性と健全度調査、平成27年度金沢工業大学環境土木工学科プロジェクトデザインⅢレポート(卒業論文)、pp.1-77, 2015.
 - 17) 日本林道協会・木橋技術協会編: 木橋定期点検要領(案), pp.1-43, 2018.

(2018. 8. 31受付)

QUANTITATIVE EVALUATION METHOD TO SOUNDNESS INVESTIGATION OF TOMBER BRIDGES

Hideyuki HONDA, Atsushi TOYODA, Shingo KATO and Masato SHINOHARA

As an investigation to the soundness of timber bridges, many metrologies are done, and each testing method obtains numeric measurements. These metrologies are useful testing methods because it understands a partial part where the decay and degradation by passing age are caused. However, each testing method becomes the qualitative comparative evaluation between measurements for soundness. Moreover, the result of obtaining by each metrology depending on the meteorological condition on the investigation day might be different. It is difficult to obtain the overall evaluation of the timber bridge that integrates each metrology from this.