

## 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

Distribution of non-destructive measurement datas and degradation of members in truss wooden bridge with Douglas-fir glue laminated timber

○原田真樹<sup>1</sup> 加藤英雄<sup>2</sup> 井道裕史<sup>2</sup> 藤田誠<sup>3</sup> 長尾博文<sup>2</sup> 平松靖<sup>4</sup>  
宮武敦<sup>5</sup> 西村健<sup>6</sup> 藤田和彦<sup>7</sup> 築山健一<sup>8</sup> 軽部正彦<sup>9</sup>

HARADA Masaki, KATO Hideo, IDO Hirofumi, FUJITA Makoto, NAGAO Hirofumi, HIRAMATSU Yasushi, MIYATAKE Atsushi, NISHIMURA, Takeshi, FUJITA Kazuhiko, TSUKIYAMA Kenichi, KARUBE Masahiko

- <sup>1</sup>博(農学) 森林総合研究所 構造利用研究領域 (〒305-8687 つくば市松の里1)  
<sup>2</sup>農修 森林総合研究所 構造利用研究領域 (〒305-8687 つくば市松の里1)  
<sup>3</sup>愛媛県南予地方局 森林林業課 (〒798-8511 愛媛県宇和島市天神町7-1)  
<sup>4</sup>博(農学) 森林総合研究所 複合材料研究領域 (〒305-8687 つくば市松の里1)  
<sup>5</sup>農修 森林総合研究所 複合材料研究領域 (〒305-8687 つくば市松の里1)  
<sup>6</sup>博(農学) 森林総合研究所 木材改質研究領域 (〒305-8687 つくば市松の里1)  
<sup>7</sup>広島県立総合技術研究所 林業技術センター (〒728-0015 広島県三次市十日市町168-1)  
<sup>8</sup>広島県立総合技術研究所 東部工業技術センター (〒721-0974 広島県福山市東深津町3-2-39)  
<sup>9</sup>博(工学) 森林総合研究所 構造利用研究領域 (〒305-8687 つくば市松の里1)

**ABSTRACT** In the case of maintenance of wooden bridges, deciding method of the opportunity for exchanging of members is an important problem. Exchanging of members is generally carried out using critical values determined beforehand. However, in the case of existence wooden bridges in which initial values are unknown, decision of the critical value is difficult. Therefore, estimation of the value relies on statistical methods. In this report, we studied about distributions of propagation velocities of the ultrasonic wave and lateral modulus of elasticity of members to obtain basic information for deciding the critical value. The result shows that the lateral MOE was not coincide with the normal distribution. Prediction of the critical line using statistical method was difficult.

**Keywords:** 集成材、超音波伝播速度、分布、ベイマツ、判別分析

*glued laminated timber, propagation velocity of ultrasonic wave, distribution, Douglas fir, discriminant analysis*

### 1. はじめに

既存木橋の維持管理において、部材の非破壊的診断は、対象橋梁の現状を知ることの出来る手段として大変有効である。このうち、超音波伝播速度(伝播時間)の測定は、橋梁部材を痛めることなく、しかも内部構造を間接的に評価できるため、これまでにも、多くの実測例が報告されている<sup>1)</sup>。このようにして得られた測定値をメンテナンスに活かす手法としては、例えば、部材交換の目安として用いるといった例が考えられるが、その際、交換の判断基準となる何らかの閾値が必要となる。健全時の値(初期値)が既知であるならば、それに対する変化率等でこの閾値を決定することが可能であるが、実際の既存木橋では部材の強度的な初期値が不明な場合が多い。

一方、対象橋梁について、一定箇所以上非破壊測定を行うことにより得られた測定値はある分

布を示す。この測定値の分布には、健全材と劣化材の値が混在しているが、分布における最頻値は、橋梁を構成する部材の健全時の値に経年変化の影響が加わった値であると推測される。従って、木橋を構成する部材に対する非破壊測定値の分布性状を検討することは、木橋の維持管理を考える上で重要なアプローチの一つである。

本研究では、非破壊測定値として超音波伝播速度およびそれより算出される繊維直交方向（横方向）MOEを取り上げ、その分布性状を検討したものである。また、伝播速度測定位置における劣化程度を数値化し、上記測定値との適合性を判別分析によって検証した。

本研究のデータは、ある程度の劣化を含む木橋の実測データの分布性状を提供するものとして、今後の維持管理方針を決定する上での基礎データとなり得ると考えられる。

なお、本報告の一部は、第3回木橋技術に関するシンポジウムにて発表した<sup>2)</sup>。

## 2. 材料、測定方法

### 2.1 材料

本研究で対象とした橋梁は、広島県立山野峡自然公園（広島県福山市山野町）内に1990年5月から2003年12月まで設置され、その後、広島県立総合技術研究所 林業技術センター内に2007年3月に再び架設されたベイマツ1級集成材を部材とする下路式単純トラス橋（通称「かっぱ橋」）である。公園設置時には、橋長36.3mの第1径間と18.3mの第2径間とが「く」の字状に連結されていた<sup>2)</sup>。第1径間は、上流側及び下流側（いずれも公園での架橋時における方向）のそれぞれについて、接合部を介して5本の部材を長軸方向に連結した上弦材と下弦材および24本の斜材から構成されるトラスと、25本の床桁、および22本の水平ブレース等で構成される。今回測定対象とした部材はこのうち、上・下弦材（計20本）および斜材（計48本）である。

1回目の測定は、公園内にて解体された後、林業技術センターに移送された部材に対して2004年3月に行った。また、その3年後、再組立した実橋の状態で行った2回目の測定を行った。

### 2.2 測定方法

#### (1) 超音波伝播速度

測定にはコンクリート用超音波伝播時間測定器（CNS Farnell社製、PUNDIT）を用いた。この機器は、2つの端子と本体から構成されており、2端子間を伝播する超音波の到達時間を測定するものである。一般的に劣化や空洞等の欠陥が存在すると伝播時間が大きくなるという性質がある。

1回目の測定はボルト用先孔近傍をラミナ積層方向に対して平行方向に超音波伝播時間を測定し（図-1）、端子間距離を伝播時間で除した値を伝播速度とした。

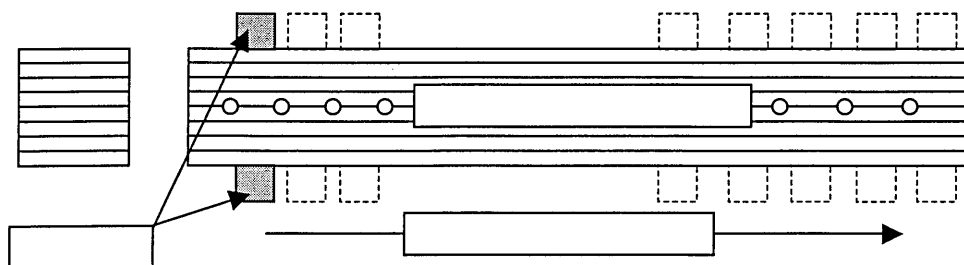


図-1 解体後の部材に対する超音波伝播速度の測定イメージ図

また、再組立後の2007年3月に行った2回目の測定は原則として1回目の測定と同じ位置で行ったが、架橋状態での測定のため、測定箇所によっては接合部の鋼板上に端子を置いて測定した

ケースも存在した。さらに、完全に隠れてしまったため測定できなかった箇所もあり、測定点数は、1回目よりも少なくなった。

以後、1回目の測定値を「解体後の値」、2回目の測定値を「再組立後の値」と称する。また、本研究では鋼板を介した測定値に対して補正等を行わず、そのまま解析に用いた。

### (2) 劣化状況の観察および数値化

解体された部材毎に6面の展開図を記した記録用紙を準備し、劣化状況（腐れ、割れ、剥離等）を直接スケッチした。観察は2004年3月に1回目の超音波伝播時間測定と同時期に行った。得られた劣化スケッチの例を図-2に示す。図中、○はボルトの先孔であり、黒塗りの部分が劣化位置とその分布である。また、○の部分の数字（1~29）は超音波伝播速度の測定順序、あるいは部材端部から中心までの距離（134~7150、単位：mm）であり、それ以外の数字は劣化部分の位置および広がり等を示している。

これらの劣化スケッチを基に、超音波伝播時間測定箇所近傍の劣化程度を主観的に4段階（0：劣化無し、1：劣化小、2：劣化中、3：劣化大）で評価した。この結果を劣化スケッチに重ねたものが図-2である。図中、横軸は部材端部からの距離（単位：mm）であり、縦軸が劣化程度の評価値（0~3）を示す。△が対象部材の各位置における劣化程度の評価結果である。このようにしてスケッチと対応させながら、劣化の程度により数値（以下、劣化度評価値とする）を決定した。

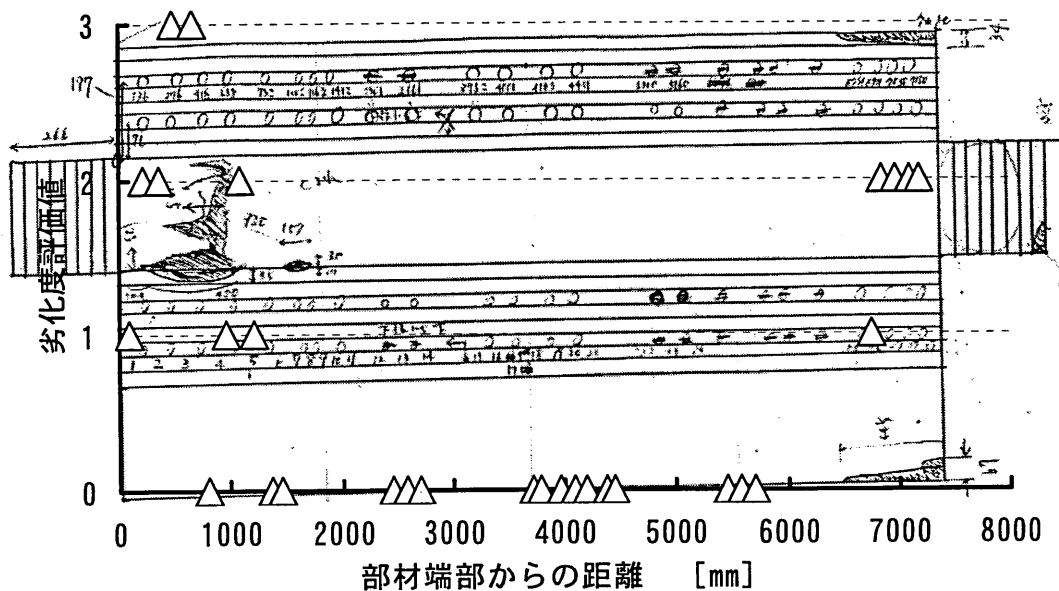


図-2 劣化度評価の例（下弦材・下流側（架橋時）、5本目）

### (3) 縦振動法およびたわみ振動法による MOE

1回目の測定（解体時）では、各部材が単体として分離されていたため、各部材に対して縦振動法あるいはたわみ振動法による MOE 測定も行った。具体的には、各部材を両端自由モードにおける節点で吊し、縦振動法では木口を、たわみ振動法ではスパン中央部上面をハンマーで打撃し、FFT 解析により共振周波数を測定した。得られた共振周波数より、式-1 あるいは式-2 を用いて部材の MOE を算出した。以下、縦振動法による MOE を MOE<sub>f</sub>、たわみ振動法による MOE を MOE<sub>b</sub> と記す。また、算出に必要な密度については、各部材の重量と寸法から求めた見かけの密度を用いた。

$$\text{MOEf} = 4 \cdot l^2 \cdot \rho \cdot fr^2 \quad (\text{式-1})$$

$$\text{MOEb} = 48 \cdot \pi^2 \cdot l^4 \cdot \rho \cdot fr^2 / (4.73^4 \cdot h^2) \quad (\text{式-2})$$

ここで、MOEf：縦振動法による MOE、 $l$ ：スパン、 $\rho$ ：密度、 $fr$ ：共振周波数、  
MOEb：たわみ振動法による MOE、 $h$ ：梁せい

#### (4) 見かけの繊維直交方向 MOE

固体中を伝播する音速  $V$ 、固体の密度  $\rho$ 、および、固体の弾性係数  $E$  との間には、一般的に、 $E = \rho V^2$  という関係が成立する。すなわち、上記で示した伝播速度は密度の影響により値が変動する。本研究で検討する上・下弦材および斜材は、材料である集成材の種類（断面）が異なるために密度等も異なっていたと考えられる。従って以下では、これらの部材を統一的に評価する目的で、超音波伝播速度および 2.2(3)における見かけの密度から求めた、見かけの繊維直交方向（横方向）MOE（以下、MOEu と記す）を解析対象とした。

### 3. 結果

#### 3.1 各種非破壊測定値の分布

##### (1) 各測定値の統計値とヒストグラム

表-1 に測定した非破壊指標に対する橋梁全体の統計値を示す。

表-1 各非破壊測定値の統計値

| 測定値種類      | データ数 | 最小値* | 最大値* | 平均値* | 標準偏差* | 変動係数  |
|------------|------|------|------|------|-------|-------|
| MOEu（解体後）  | 1036 | 0.1  | 48.5 | 16.6 | 4.46  | 0.269 |
| MOEu（再組立後） | 893  | 0.2  | 28.1 | 17.8 | 5.596 | 0.314 |
| MOEf       | 68   | 7.74 | 14.9 | 12.5 | 1.22  | 0.098 |
| MOEb       | 68   | 8.24 | 17.2 | 12.0 | 1.73  | 0.144 |

註）\*単位：GPa

各非破壊指標値について、汎用統計計算ソフトウェア JUSE-StatWorks（（株）日本科学技術研修所、総合編・Ver. 4. 63）により K-S 検定を行い、ワイブル分布、正規分布、対数正規分布、指数分布に対する測定データの適合性を検証した。なお、各分布型に対するパラメータは最尤法による計算値を用いた。その結果、何れの指標値についても、検証した 4 つの分布型には危険率 5% で一致しないことが確認された。従って、以下ではノンパラメトリック検定を行うこととした。

##### (2) 劣化度評価値および時間経過による分布性状の変化

解体後および再組立後における MOEu について、劣化度評価値毎の分布性状を検討した。その結果を図-3 に示す。

劣化程度によって分布性状は変化し、劣化度が高くなる（＝曲線が太く、濃くなる）ほど低い MOE の存在比率が大きくなる傾向を示した。ただし、劣化度大と評価した部分（下流側・下弦材のみ）の曲線（実線で結ばれた▲、あるいは太実線とも同じ）は劣化無しと判定した部分の分布（○、△、□を結ぶ淡色の実線）とほぼ重なっており、上記の傾向から逸脱していた。

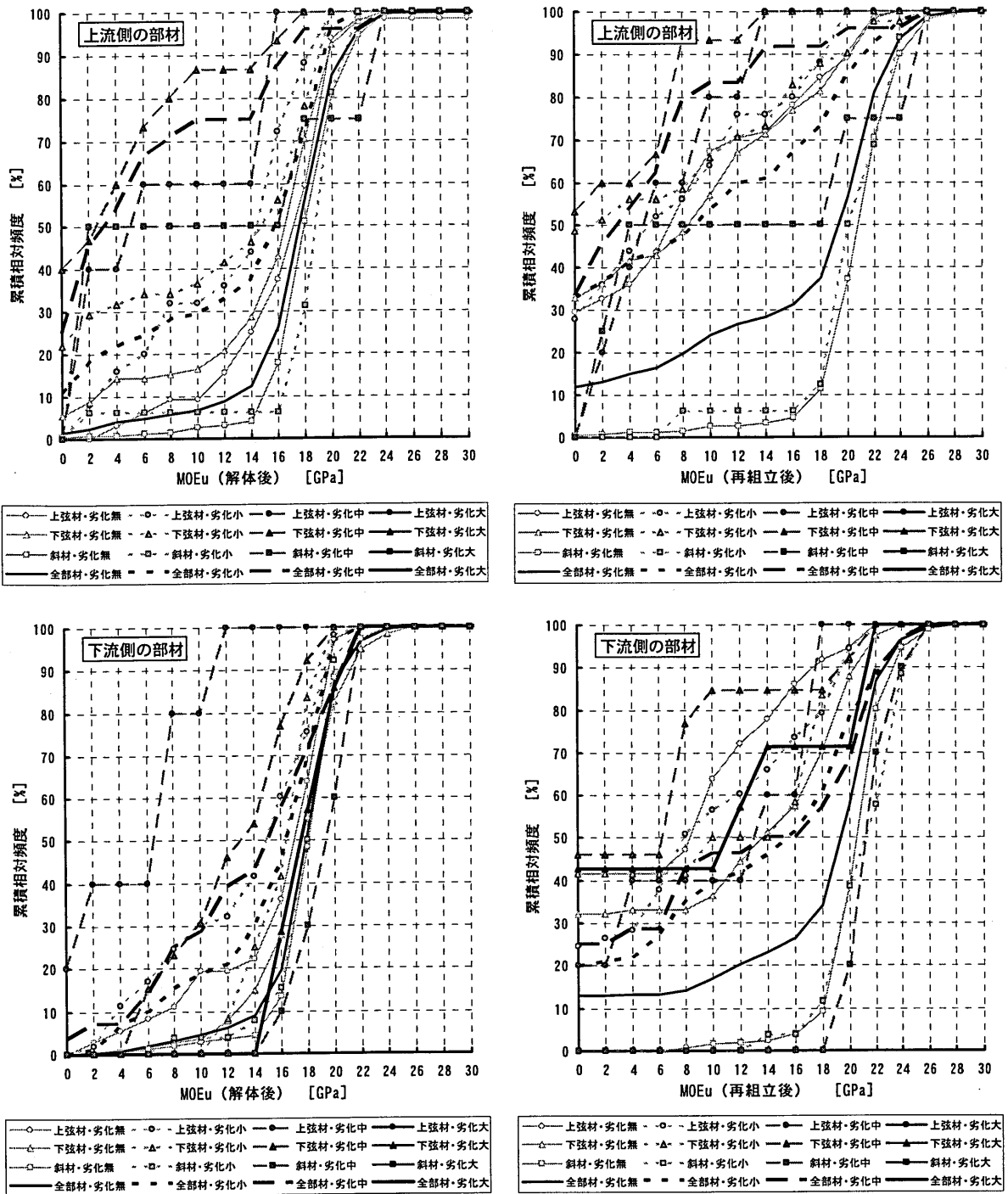


図-3 MOEu の部材および劣化度別累積相対度数曲線 (左：解体後、右：再組立後)

また、解体後から再組立後までの約 3 年間の変化を検討した。図-4 では、対応する (同じ) 測定点における MOEu の変化を、測定時における鋼板の影響別にプロットした例を示す。なお、上流側・上弦材、鋼板有りのデータの 1 点について、解体後 48.5GPa、再組立後 15.5GPa というデータが存在したが、明らかに他のデータと傾向が異なっていたため、図示しなかった。

鋼板を介した測定値 (灰色のプロット) では再組立後<解体後、鋼板が無い場合 (白色のプロット) は再組立後>解体後となる傾向があった。さらに、解体後の値に対する再組立後の値の比

について、鋼板の有無および劣化度評価値別の分布を検討した（図-5、図-6）。なお、変化比は、最大で51.7を示したが、図-5および図-6では変化比 $\leq 5$ における曲線を示した。

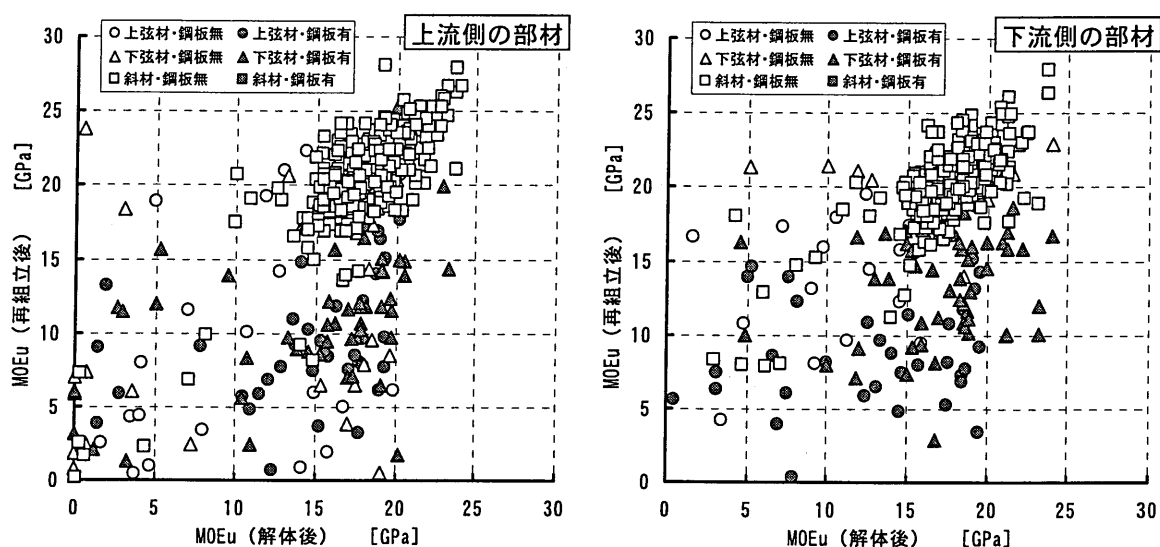


図-4 MOEuにおける経年変化の影響

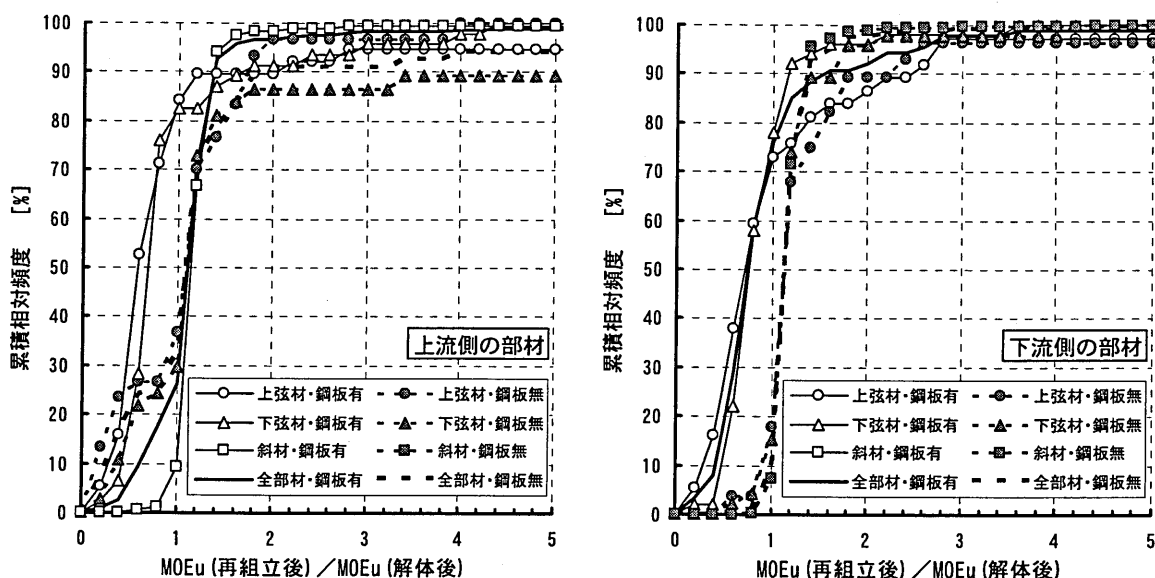


図-5 解体後のMOEuに対する再組立後のMOEuの比のヒストグラム（鋼板の有無別）

鋼板の有無については、図-4と同様、鋼板が無い場合の方が変化比の値は相対的に高くなった。両者の差については、ウェルチの検定により、危険率1%で母平均に差が認められた。また、何れの分布も正規分布には従わなかった。次に、劣化程度の増加（曲線が濃く、太くなる）に伴って曲線は変化比の高くなる方向にシフトしたが、クラスカル・ウォリス検定の結果、危険率1%で各グループ間に有意差は認められなかった。ただし、劣化大の場合を除いて、変化比の平均値は1以上となり、再組立後の値（2007年3月）の方が、解体後の値（2004年3月）よりも全体的にMOEuが高くなる傾向を示した。これは、解体から再組立までの間はセンター内の実験棟内で

部材を養生していたため、部材の含水率が低下したためであると考えられる。

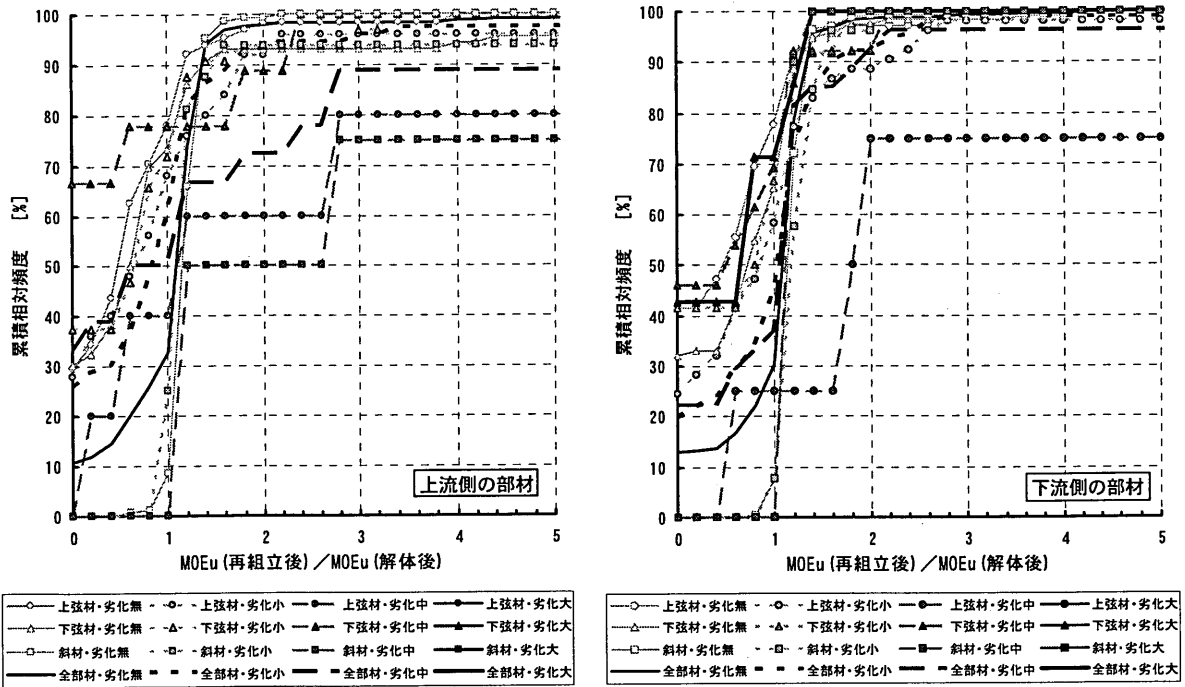


図-6 解体後の MOEu に対する再組立後の MOEu の比の累積相対度数曲線 (劣化程度別)

### 3.3 MOEf あるいは MOEb と MOEu との関係

縦振動およびたわみ振動による MOE が部材全体の性能を示しているのに対し、超音波伝播速度は、例えば劣化部位等の部材の局所的な評価に用いられることが多い。

実際の橋梁調査においては、縦振動やたわみ振動によって部材の劣化評価を行うことは難しく、超音波伝播速度を利用することがほとんどであると考えられる。超音波伝播速度の測定結果を部材全体評価の推定に用いることが出来れば、より実効性の高い評価が可能である。そこで、両者の関係を検討した。

図-7 および図-8 に縦振動法によって求めた MOE (MOEf) およびたわみ振動法による MOE (MOEb) と MOEu との関係を示す。なお、図-4 と同様、上流側・上弦材の 1 データ (MOEu・解体後=48.5GPa、MOEu・再組立後=15.5GPa) については、プロットを省略した。

何れの組合せについても、両者の相関は低く、超音波伝播速度の測定結果を部材全体の評価に結びつけるには、さらに別のパラメータが必要であることが分かった。これは、MOEf、MOEb、MOEu がそれぞれ、繊維方向に対して異なる方向の MOE を測定していること、また、MOEu を計算するための密度として部材全体の見かけの値を用いたために必ずしも超音波伝播速度を測定した局所的な密度と一致していない可能性があること、等が理由であると考えられる。

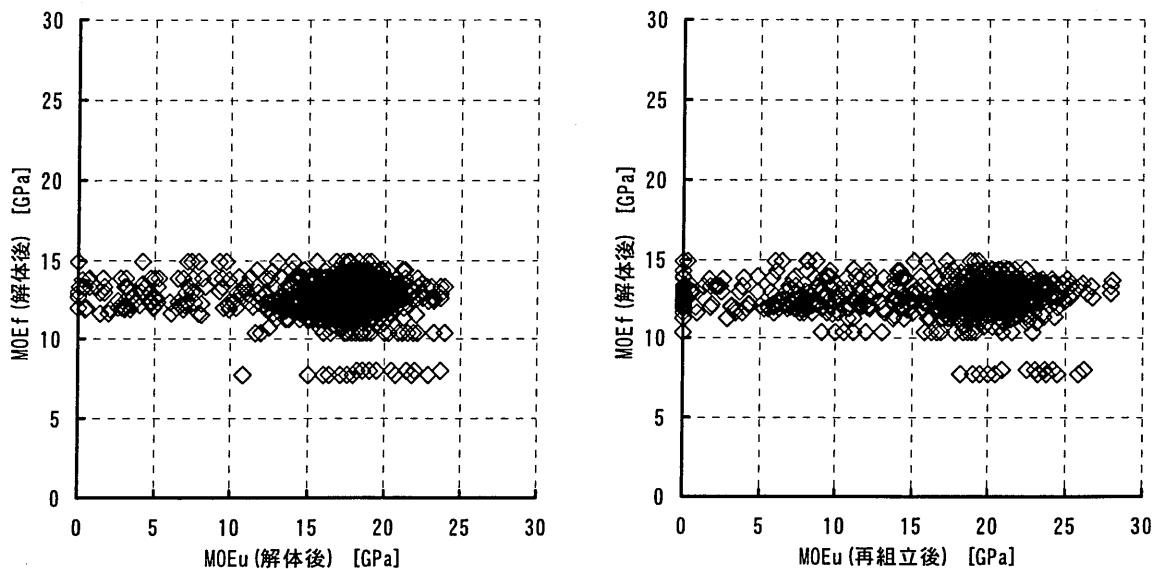


図-7 縦振動法による MOE (MOEf) と MOEu との関係 (左：解体後、右：再組立後)

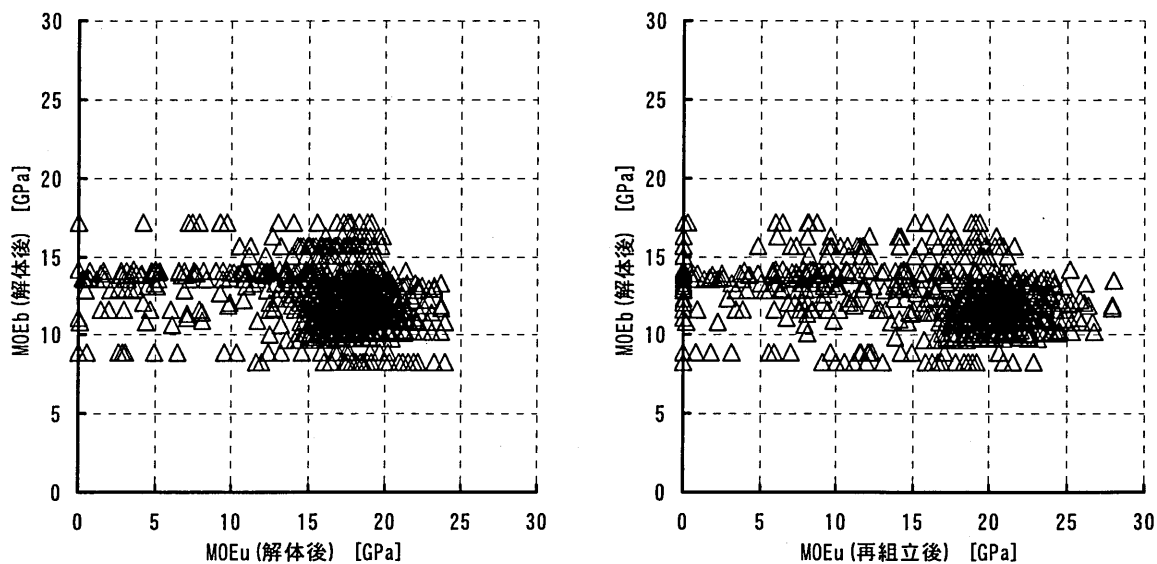


図-8 たわみ振動法による MOE (MOEb) と MOEu との関係 (左：解体後、右：再組立後)

### 3.4 MOEu の劣化度評価値による判別分析

#### (1) 劣化の有無に対する判別分析

測定データの分布に対して、一定のグループ分けに応じた境界線を統計的に決定する手段として判別分析がある。この手法は、回帰分析の目的変数が量的変数から質的変数に変わった場合の手法であると言える。今回得られた MOEu を説明変数、劣化度評価値を目的変数としてこの手法の適用を試みた。なお、前報<sup>2)</sup>では、この境界線をクラスター分析によって推定した。これは、ある変数（前報では伝播速度）における境界をデータ相互間の距離によって決定する手法であり、劣化程度の値そのものは境界線の判定には含まれておらず、この点で今回の手法とは異なる。



本研究では、まず、劣化の有無（2段階）に対する判別分析を行った。すなわち、劣化度評価値を0と1以上との2グループに再編成してこれを目的変数とし、MOEuを説明変数とした。なお、判別には線型判別関数を用いた。結果を表-2に示す。

表は、判別分析によって統計的に判定された結果と実際のグループ分けとの対応を示している。

解体後、再組立後、および、  
両者の比のいずれのデータを説明変数とした場合でも、全体的な正答率は73~79%と比較的高くなったが、「劣化あり」に対する誤判別率、すなわち、実際には劣化ありにグループ分けされたのに判別分析では劣化なしと判定された割合が、 $120/216 \div 56\%$ （解体後）、 $87/169 \div 51\%$ （再組立後）、 $122/154 \div 79\%$ （再組立後）と高く、実用上はさらに検討が必要である。この原因の一つとして、劣化度評価において劣化大とされたデータの分布

表-2 MOEuに関する劣化の有無に対する判別分析結果

|                | 観測 \ 予測 | 劣化なし | 劣化あり | 合計   |
|----------------|---------|------|------|------|
|                |         | 劣化なし | 668  |      |
| MOEu<br>(解体後)  | 劣化あり    | 120  | 96   | 216  |
|                | 合計      | 788  | 248  | 1036 |
|                | 劣化なし    | 576  | 148  | 724  |
| MOEu<br>(再組立後) | 劣化あり    | 87   | 82   | 169  |
|                | 合計      | 663  | 230  | 893  |
|                | 劣化なし    | 670  | 63   | 733  |
| MOEu<br>(変化比)  | 劣化あり    | 122  | 32   | 154  |
|                | 合計      | 792  | 95   | 887  |

が他のデータの傾向と外れていたことが考えられる。劣化大については、目視でも認識可能であり、統計的手法に依らずとも判断可能であると考え、解析対象から外すこととし、以下の解析を行った。

## (2) 劣化程度（3段階）に対する判別分析

劣化程度を、なし、小、中の3段階とし、MOEuに対する3つのグループ分けについて、判別分析を行った。結果を表-3に示す。

全体的な正答率は67~77%であり、劣化の有無に対する場合よりも低くなった。また、劣化小および中において劣化無しと誤判別された割合は、解体後の場合

$$(92+17)/(164+45) \div 52\%$$

$$(67+15)/(128+37) \div 50\%$$

$$(99+23)/(127+33) \div 76\%$$

となった。劣化大グループのデータを除いてもあまり改善されなかった。

表-3 MOEuの劣化程度（3段階）によるグループ分けに対する判別分析結果

|                | 観測 \ 予測 | 劣化なし | 劣化小 | 劣化中 | 合計   |
|----------------|---------|------|-----|-----|------|
|                |         | 劣化なし | 645 | 107 |      |
| MOEu<br>(解体後)  | 劣化小     | 92   | 29  | 43  | 164  |
|                | 劣化中     | 17   | 6   | 22  | 45   |
|                | 合計      | 754  | 142 | 133 | 1029 |
|                | 劣化なし    | 573  | 44  | 107 | 724  |
| MOEu<br>(再組立後) | 劣化小     | 67   | 14  | 47  | 128  |
|                | 劣化中     | 15   | 2   | 20  | 37   |
|                | 合計      | 655  | 60  | 174 | 889  |
|                | 劣化なし    | 658  | 42  | 23  | 723  |
| MOEu<br>(変化比)  | 劣化小     | 99   | 15  | 13  | 127  |
|                | 劣化中     | 23   | 0   | 10  | 33   |
|                | 合計      | 780  | 57  | 46  | 883  |

## 4. 考察

### 4.1 超音波伝播速度から求めた MOEu の分布性状

今回検討したデータは、言い換えれば、ある程度の劣化を含んだ材料の強度的データ分布ということも出来る。今回検討した範囲ではあるが、データの分布性状は正規分布に従わなかった。このことは、木橋の維持管理の上での部材交換にとどまらず、木橋の設計手法、とくに限界状態設計法においても留意する必要がある。さらにデータの蓄積を図り、検討する必要がある。

劣化程度が変化していなくても、環境条件の変化による部材の乾燥等によって、測定値の分布自体は強度的に高くなる方向にシフトする場合がある。測定値の評価に関しては、データ全体の分布を考慮して行う必要がある。

### 4.2 判別分析を用いた劣化判定の妥当性

上記の分布性状にも起因することであるが、超音波伝播速度から求めた MOEu の、判別分析による劣化程度のグループ分けは、実用的に満足できるものではなかった。他の統計的手法を検討することはもちろんであるが、非破壊指標等の説明変数の追加や説明変数自体の検討もさらに進める必要がある。

## 5. まとめ

バイマツ・トラス橋の上・下弦材および斜材に対して超音波伝播速度を測定し、そこから計算した繊維直交方向 MOE (MOEu) について、その分布性状および劣化スケッチから評価した劣化程度を用いたグループ分けの手法について検討した。結果を要約すると以下の通り。

1) MOEu の分布は正規分布、対数正規分布、ワイブル分布、指数分布には従わなかった。

分布の平均値は、劣化程度によって増加する傾向があり、また、経年変化によって増加する場合もあることが分かった。

2) 劣化程度による MOEu のグループ分けに対する判別分析は、実用的に満足できるものではなかった。さらにデータの蓄積を図り、経年変化による分布性状の変化および劣化度によるグループ分けの精度向上が必要である。

## 謝辞

本研究は、かっぱ橋再組立の実現がなければ実施できなかった。再組立のための場所を提供していただいた広島県および林業技術センターに厚く御礼申し上げます。また、本研究は、森林総合研究所運営費交付金プロジェクト「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」によって行った。

## 参考文献

- 1) 例えば、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集、pp. 105-112, 2007.
- 2) 原田真樹・長尾博文・加藤英雄・井道裕史・宮武敦・平松靖・軽部正彦・藤田和彦・YinYafang：架橋後13年経過した木橋部材の非破壊調査報告、第3回木橋技術に関するシンポジウム論文集、pp. 139-146, 2004.