

錦帯橋古材の残存強度と診断法の検討

Discussion of ultimate strength and diagnosis on used members for Kintaikyo

○渡辺 浩* 小松 幸平** 森 拓郎***

WATANABE Hiroshi, KOMATSU Kohei and MORI Takuro

*博(工) 福岡大学工学部社会デザイン工学科 (814-0180 福岡市城南区七隈 8-19-1)

**農博 京都大学生存圏研究所 (611-0011 宇治市五ヶ庄)

***博(工) 京都大学生存圏研究所 (611-0011 宇治市五ヶ庄)

ABSTRACT Kintaikyo is the most famous traditional timber bridge in Japan. It had been constructed 300 years ago and conserved by large number of repair works and replace because of its deterioration. It is used only for footpath and many visitors are crossing this bridge everyday. So, it should be discussed that diagnosis of it is based on not only the experience but also the quantitative study. The aim of these studies are discussing its diagnosis on used member and proposing quantitative methods of it. Basic diagnosis without any tools, quantitative methods measured by equipment and ultimate strength test for used member were carried out and estimated.

Keywords : 錦帯橋、診断、腐朽、残存強度

Kintaikyo, diagnosis, decay, remaining strength

1 はじめに

約300年もの歴史を有する錦帯橋(写真-1)は、著名であるのみならずその技術的価値が高く、名実共に我が国を代表する木橋である。しかしながら、木橋であるがゆえに耐久性は永遠の課題であり、これまでに多くの修理、架け替えにより維持されてきた。

錦帯橋のみならず、古来より木橋は長年の経験に基づいて適切な維持管理がなされてきた。ところが近代的な設計が一般的となった今では定量的な診断や補修が求められるようになっていく。錦帯橋は文化財ではあるが、一般客が渡る橋という面では公共構造物でもあるため、一般の橋と同様の安全性が求められる。このため、残存強度を精度よく評価できる診断法が求められるところである。そこで本研究では、錦帯橋として使用されていた古材を対象にその残存強度を調べるとともに、各種診断法を適用してその評価を行うものとする。



写真-1 錦帯橋

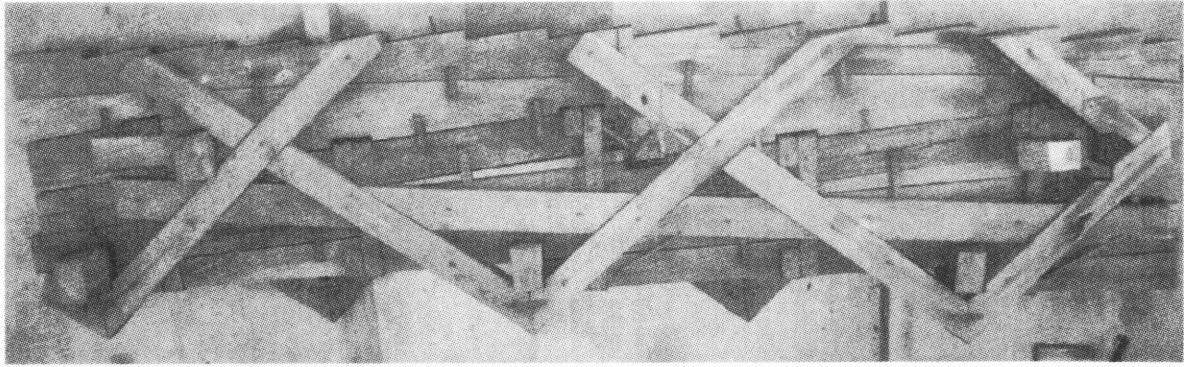
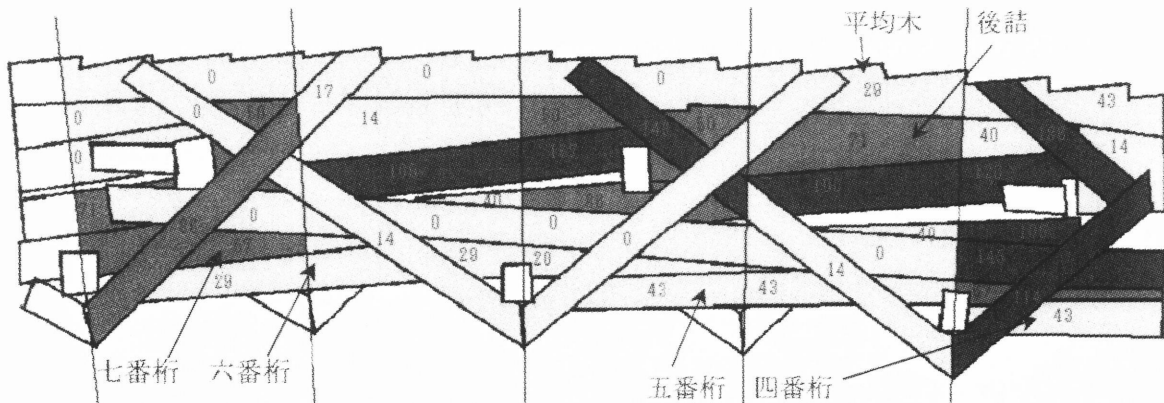
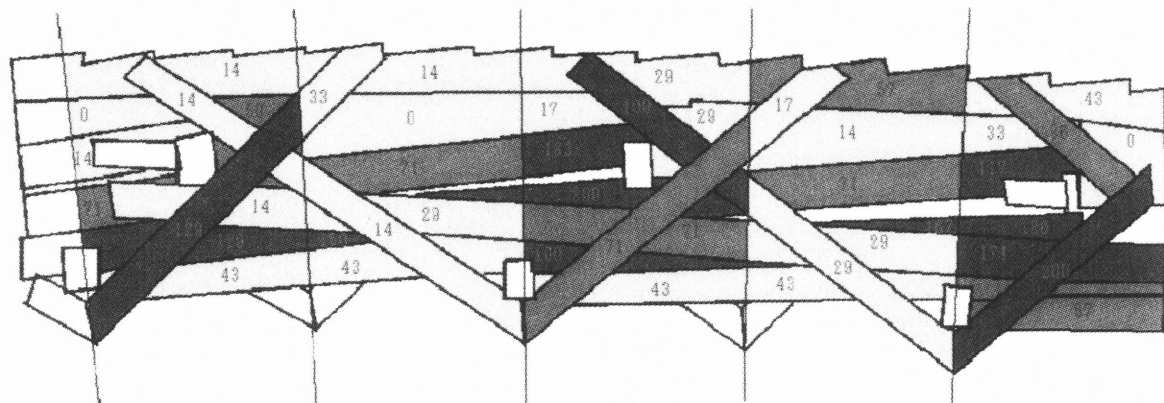


写真-2 譲り受けた部材の全体の様子



数字は評価点の平均を100倍したもの そのうち50以上を淡灰色、100以上を濃灰色で塗っている

図-1 目視による診断結果



数字は評価点の平均を100倍したもの そのうち50以上を淡灰色、100以上を濃灰色で塗っている

図-2 目視・打診・触診による診断結果

2. 試験の概要と結果

2.1 試験材の概要

本研究にあたり平成の架け替えにより2002年に撤去された第3橋の一部が岩国市から譲渡された。これは写真-2のようなアーチ主部材の一部であり長さは約5mである。ただし、どの部材のどちら側のものかは不明である。撤去後約1年間は加工場前の屋外に暴露された状態で展示され、

その後の約3年間は室内にて保管されていた。試験時の含水率は測定されていないが、気乾状態であったと考えられる。

桁の外観では解体時に生じたと考えられる傷も散見されたが、腐朽としては横桁材の取り付け部回り、および階段状の平均木上面の劣化が目立っていた。いずれも漏水、滞水の影響によるものと考えられる。



写真-3 目視による診断の様子

表-1 圧縮試験体の諸元

樹種	採取部材	全長(mm)	断面(mm)	質量(kg)
ケヤキ	後詰(四)	800	160×155~222	17.7
	後詰(五)	800	160×153~215	18.5
アカマツ	四番桁	801	160×120~155	10.8
	五番桁	800	160×125~145	10.8
	六番桁	800	160×115~145	8.6
	七番桁	800	160×157~170	10.2
	八番桁	802	160×167	11.6
ヒノキ	平均木(四)	800	160×140	10.7
		802	160×130	9.7
	平均木(五)	803	160×138	11.5
		803	160×142	11.8

2.2 目視・打診・触診

始めに基本的な診断法で部材の劣化をどの程度知ることができるかを試みた。そこでまず写真-3のように試験材の傍らに立った診断者による目視診断を行った。視距離は約1mであり橋梁診断で近接目視と言われるものに相当する。次にハンマーと千枚通しによる打診・触診を加えた総合的な評価を行った。視距離

は30cm程度である。実際の点検では見ることができない切断面等は見てはいけないことにした。

診断者は木材の劣化の知識も木橋の診断の経験もほとんどない学生ら7名である。ここでは図-1のように長さ方向に5区画に分け、各部材、部位ごとに、「0：健全」「1：気になる」「2：腐朽している」の3段階で大まかに評価した。なお、診断者には事前に腐朽に関するある程度の知識は与えたものの、個々の評価レベルは異なる可能性がある。また経験が浅い診断者では評価レベルが途中で変わる可能性があるため、評価は敢えて抽象的にしている。

図-1、図-2はそれらの診断結果を示している。ここで評価レベルは各診断者の評価点の算術平均を100倍して求めている。これらの図より、かなりの部分で腐朽が疑われる状況であったことがわかる。なお、診断者の個人差はあったが、個人の診断結果を平均化することにより相対的かつ、ある程度客観的な評価がなされているものと考えられる。また目視のみよりも打診・触診を加えた総合的な評価の方が高精度が期待できるが、腐朽が疑われる部分は同様であった。よって、近接目視による診断でもある程度精度よい結果が得られることがうかがえる。

なお、錦帯橋では通常桁下からの遠望目視により診断が行われているとのことである。この方法では今回の近接目視と比較して視認距離が大きいのみならず、明るい場所から暗い桁下を見なければならぬこと、また視線が鋭角となること、部材が交錯することから、診断精度はあまり期待できない。とはいえ本試験と同等の目視診断を実施するために必要な足場の設置費用は小さくないため、後述の定量的な診断法も組み合わせて実施されることが望ましいと考えられる。



写真-4 解体の様子

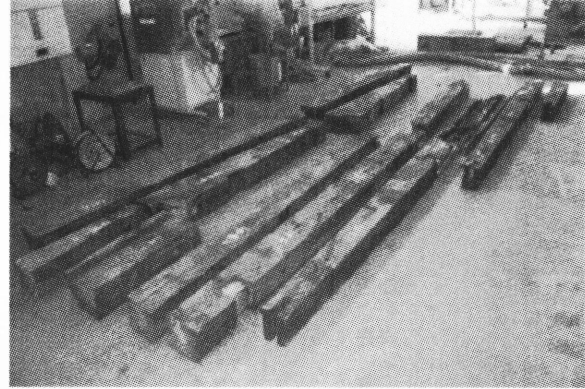


写真-5 解体後の各部材

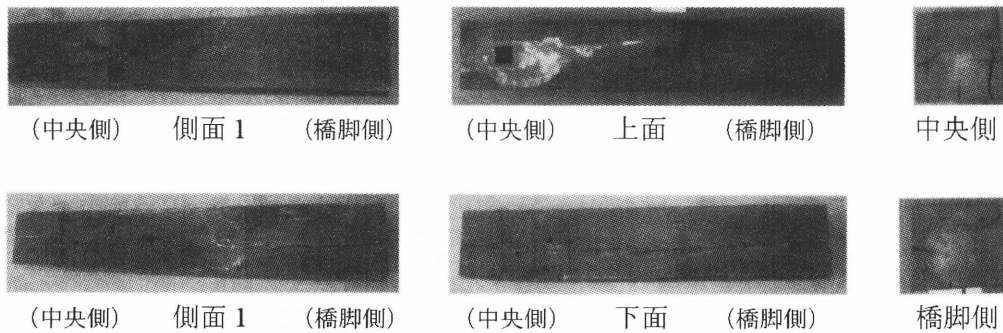


写真-6 試験体の例 (アカマツ・四番桁)

2.3 試験体の作製

最終的にはこのブロックの残存強度を調べるべきであるが、この形状のまま試験を実施することは難しく、また試験体も1つしかないため、解体することとした。写真-4はその作業の様子である。表面からは腐朽が認識できなかった部分も含めてかなりの部分で腐朽が進行していることがわかった。次に写真-5の各部材の比較的健全な部分から長さが800mmとなるように1本ずつ試験体采取了。写真-6はその一例であるが、いずれの部材もほぞ穴や長さ方向における断面変化があり、断面積は長さ方向で一様ではなかった。表-1は採取した試験体の諸元を示している。

2.4 超音波伝播速度

超音波伝播時間測定器 PUNDIT を使い、8断面の超音波伝播速度を100mmの間隔で橋軸直角方向で測定した。図-3はそれぞれの部材の測定結果を横に並べて整理したものである。ケヤキに対してアカマツやヒノキのばらつきが大きいのは割れが原因であると考えられる。ここで平均的なヤング係数と単位質量から理論的な超音波伝播速度を求めると1400m/s程度であるが、アカマツとヒノキの一部では伝播速度がこれよりも遅く、腐朽が疑われる。

2.5 ピン打ち込み深さ

プロディン 6J (ピン径2.5mm) によるピン打ち込み深さを超音波伝播速度と同じ位置の片側で測定した。図-4はその結果である。超音波伝播速度による診断結果と同様にアカマツの1本の一部に異常が見られるが、さらに超音波伝播速度では正常と認識される試験体で異常と認識され、逆に超音波伝播速度では異常と認識されるもかかわらずピン打ち込み深さでは正常と認識されるものがあった。これはこの方法では打ち込まれた深さまでの評価しかなされないと考えられ

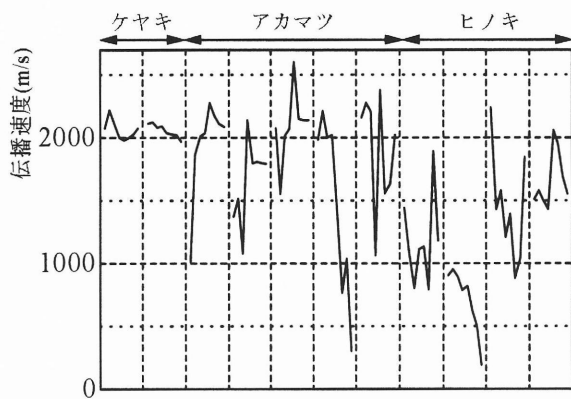


図-3 超音波伝播速度の測定結果

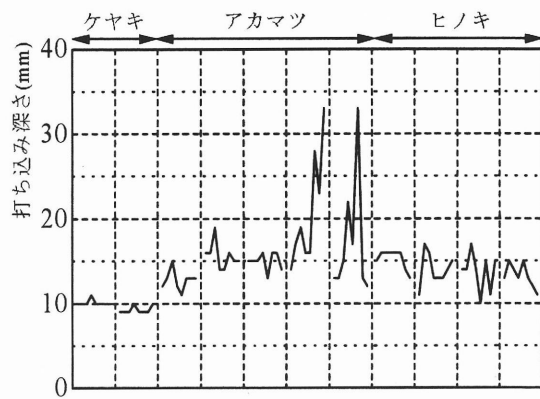


図-4 ピン打ち込み深さの測定結果

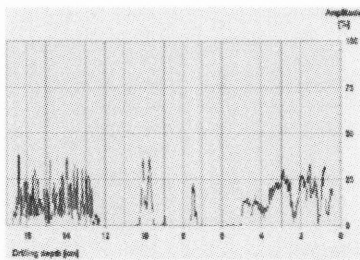


図-5 穿孔抵抗値の測定結果の例
(ヒノキ・平均木)

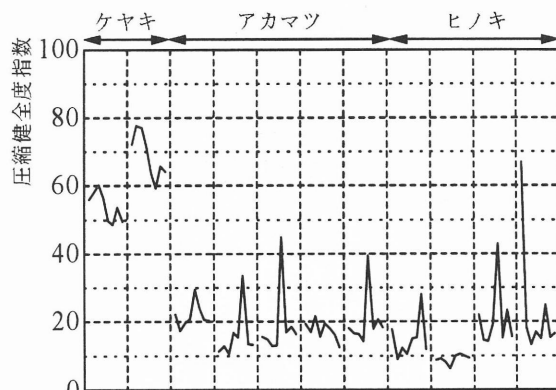


図-6 圧縮健全度指数の結果

る。

2.6 穿孔抵抗値

IML RESI F-300D により穿孔深さと抵抗値の関係を測定した。図-5 は結果の一例で、横軸は穿孔深さ、縦軸は穿孔抵抗値を示している。本試験法では約 3mm の貫通孔が生じるものの、深さ毎の劣化の様子を可視化でき、これは内部も含めた劣化の状況を把握するための有益な情報となる。

しかしながらこの結果はイメージデータであるため評価指標という面では扱いにくい。そこで密度が大きいほど穿孔抵抗値は大きい、すなわち曲線より下側で囲まれた面積が大きいほど健全であると考え、この面積を測定した深さで割ることにより単位深さ当たりの穿孔抵抗値を求めた。これを圧縮健全度指数と呼ぶことにする。すなわち圧縮健全度指数 R_c は以下の式で表される。

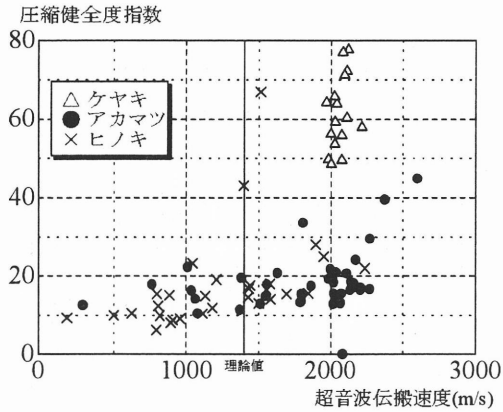


図-7 圧縮健全度指数と超音波伝播速度

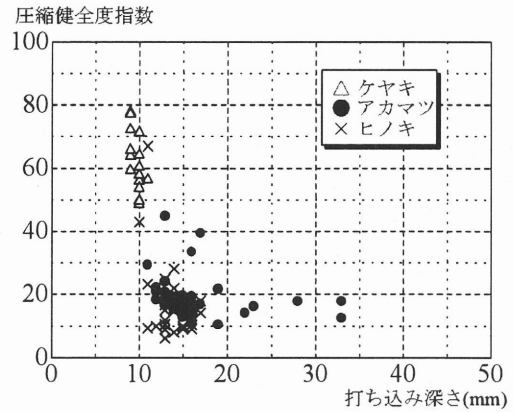


図-8 圧縮健全度指数とピン打ち込み深さ

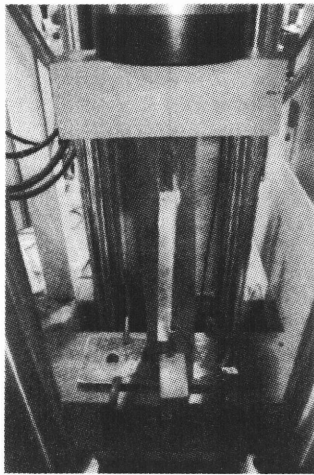


写真-7 縦圧縮試験の様子

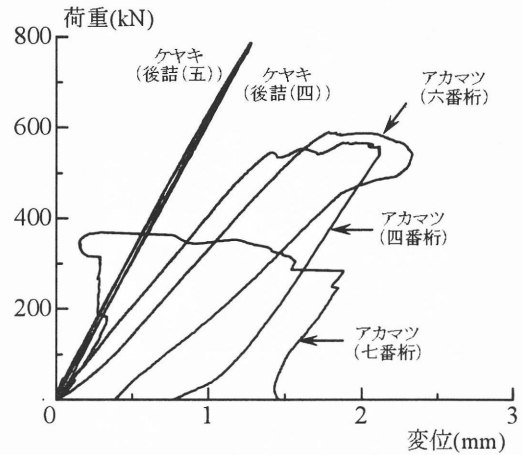


図-9 縦圧縮試験の荷重と変位の関係

$$R_C = \frac{\int R \cdot dx}{X} \quad (\text{ここで } x: \text{深さ、} X: \text{測定深さ、} R: \text{それぞれの深さにおける抵抗値})$$

図-6はその結果である。ここでは樹種による差が明瞭に現れている。またアカマツやヒノキの一部で見られる大きな値は節の影響によるものと考えられる。また図-7および図-8は圧縮健全度指数と超音波伝播速度およびピン打ち込み深さの関係を示したものである。圧縮健全度指数は両者と相関があることがうかがえる。

2.7 縦圧縮試験

最後に京大生存圏研究所木質材料実験棟の 1000kN 試験機を用いて縦圧縮試験を行った。ただし、ヒノキの試験体は平均木であったもので、床版を階段状に固定するために断面も階段状に変化している。この試験体では強度の評価が難しいと考えられたため試験対象から外した。写真-7は試験の様子である。

一部の試験体の荷重と変位の関係を図-9に示す。なお変位は中央部の 400mm の区間で測定した。このうち、途中から変位が大きく負の値を示しているのは载荷による試験体の膨張、割裂に

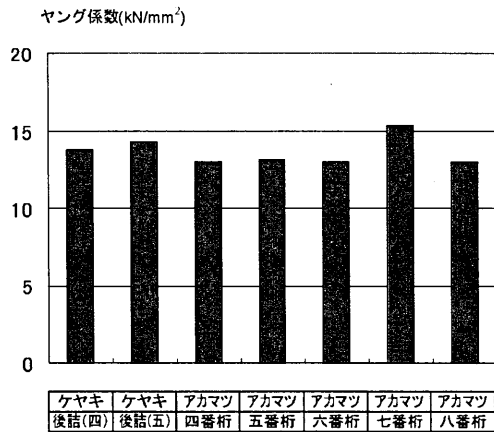


図-10 ヤング係数の比較

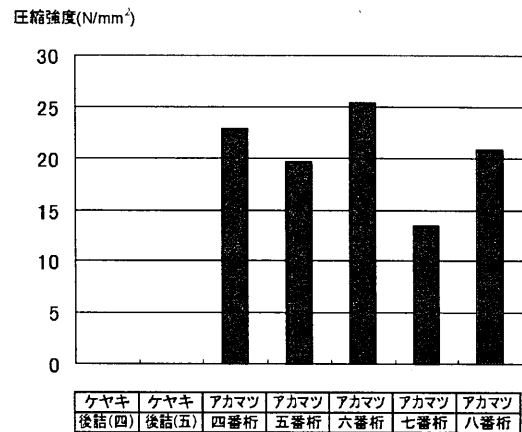


図-11 圧縮強度の比較

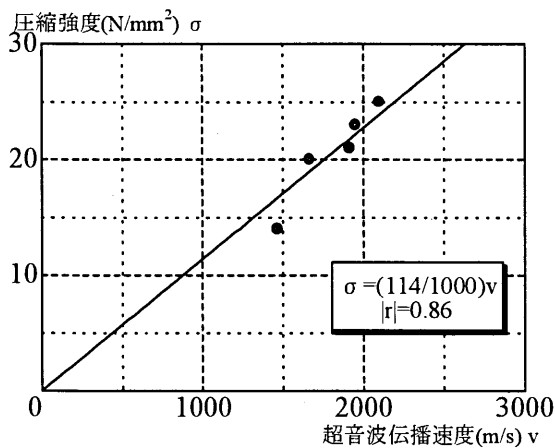


図-12 圧縮強度と超音波伝播速度の関係

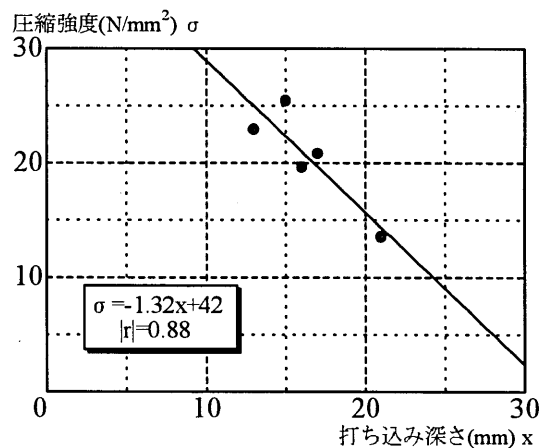


図-13 圧縮強度とピン打ち込み深さの関係

より変位計が外側に押し出されたためである。

図-10 はこれらの载荷初期の直線部を用いて求めたヤング係数をまとめたものである。これらをケヤキとアカマツの一般的なヤング係数¹⁾ 10.30kN/mm²、11.77kN/mm²と比較するといずれもこれらを上回っていた。ただし断面が一樣ではないため、最小の断面によりまとめられている。このため、実際の値よりも大きい値となっていると考えられる。

図-11 は最大荷重と最小断面積から求めた圧縮強度をまとめたものである。最小の断面積で整理されているため実際よりも大きい値であるとは考えられるが、おおむね普通構造材（針葉樹 III 類）の基準強度¹⁾ 19.2N/mm²と同程度以上であった。しかし前述の診断で腐朽が疑われた試験体では圧縮強度は小さかった。なお、ケヤキの試験体ではいずれも試験機の能力に近い 800kN を载荷しても破壊の兆候が見られなかったため試験を中止した。

2.8 診断・評価法についての考察

図-12, 13, 14 は圧縮強度と超音波伝播速度、ピン打ち込み深さ、圧縮健全度指数との関係である。なお、超音波伝播速度、ピン打ち込み深さ、圧縮健全度指数はそれぞれ 8 断面で測定されているが、ここではそれぞれの平均との関係でまとめている。これらの図より、圧縮強度はそれぞれと相関があることがわかる。このことから、これらの診断法により残存圧縮強度を推定することはこれらと同程度の腐朽レベルであれば可能であると考えられる。ただし、試験体が

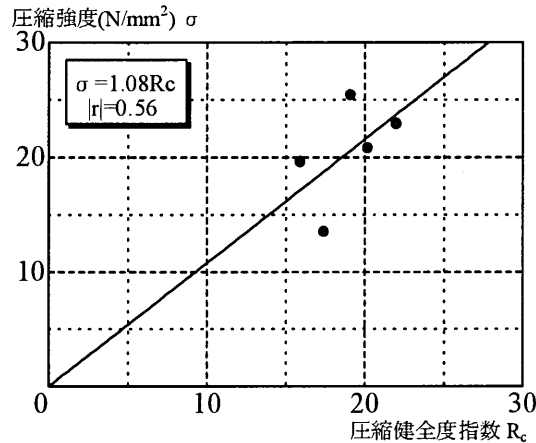


図-14 圧縮強度と圧縮健全度指数の関係

少なくまたアカマツのみであることから、さらに試験体を増やしての考察が望まれる。

図-11 を図-1 および図-2 と比較すると目視や打診、触診の評価を行うことができる。ここで最も圧縮強度が大きい六番桁は目視の診断結果で一部を除いて比較的健全と診断され、最も圧縮強度が小さい七番桁は目視の診断結果でほぼ全体が腐朽と診断されている。試験体は部材のうち比較的健全な部分から採取したものであるが、目視によっても残存圧縮強度をある程度推測できることがわかる。

3 まとめ

本報告では、岩国市から譲り受けた錦帯橋古材を対象に、実用的かつ診断結果を定量化できる手法による診断を実施するとともに、縦圧縮試験により残存圧縮強度を求め、診断法の評価を行った。その知見をまとめると、以下のようになる。

- ・超音波伝播速度、ピン打ち込み深さ、穿孔抵抗値による圧縮健全度指数により部材の残存圧縮強度を推定することができる。ただし、ピン打ち込み深さと穿孔抵抗値の測定には軽微ではあっても部材の損傷を伴うため、その適用には配慮が必要である。
- ・条件がよければ目視や打診・触診の基本的な診断法によってもある程度の腐朽を知ることができる。

謝辞

本報告で使用した錦帯橋古材は岩国市より譲渡していただきました。また各種診断と載荷試験は京都大学生存圏研究所木質材料実験棟共同利用研究の助成により実施しました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 森林総合研究所：木材工業ハンドブック 第4版, 2004.