

ボンゴシ材の腐朽度推定に関する基礎研究

A diagnostic method on inside decay degree of bongossi material

本田秀行
HONDA Hideyuki

工博 金沢工業大学 環境・建築学部 環境土木工学科 (〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇ヶ丘 7-1)

ABSTRACT By collapse accident of timber bridge used the bongossi material, it is necessary to reinvestigate the decay of bongossi material. To find out diagnostic method on inside decay degree of bongossi material, this study was measured supersonic wave velocity by the silver test and water content. From the investigative result, it was obtained knowledge to diagnose inside decay degree by evaluative equation with two parameters of supersonic wave velocity and water content for cross section defect rate of bongossi material.

Keywords: ボンゴシ材、内部腐朽度、断面欠損率、推定法
bongossi material, inside decay degree, section defect rate, diagnostic method

1. まえがき

ボンゴシ材を使用した木橋の落橋事故等により、従来、腐朽に強いと言われていたボンゴシ材腐朽への再認識が必要になった^{1), 2)}。しかしながら、ボンゴシ材に対しては、他の木材に比べて簡易な目視検査やハンマーによる打音検査で内部腐朽の実態把握が困難である場合が多い。

そこで、本研究では、ボンゴシ材の内部腐朽の診断方法を見出す目的から、ボンゴシ材に対する内部腐朽度の把握をケーススタディとして行った。すなわち、ボンゴシ材の内部腐朽度を評価する診断法として、シルバーテストによる超音波速度および含水率測定器による含水率を測定し、超音波速度と含水率を変数としたボンゴシ材に対する断面欠損率の定量化を検討した。その結果として、実験室での成果であるが、ボンゴシ材の内部腐朽度を断面欠損率として定量化した試みを以下に報告する。

2. 試験片の作成

2.1 ボンゴシ材

ボンゴシ材は、アフリカ産材で樹高45~50m、幹径1.5mほどの長くて大きい寸法の材が得られ、

表-1 木材の許容応力値比較表 () は材の最大強度

材種	産地	比重g/cm ³ (含水率20%)	曲げ強度 kg/cm ²	圧縮強度 kg/cm ²	せん断強度 kg/cm ²	曲げ弾性係数 x10 ³ kg/cm ²
ボンゴシ	南アフリカ	1.10	250(1780)	200(905)	20(235)	170
栗	日本	0.6	100(800)	70(430)	10(80)	90
檜	日本	0.44	90(750)	70(400)	7(75)	90
杉	日本	0.38	75(650)	60(350)	6(60)	75

主にヨーロッパへ輸出されている。青みがかったピンク色の辺材と赤褐色や黒褐色の心材とは見分けがつく。表-1に示した物性値から、他の木材と比較して非常に硬くて重く、曲げ強度と圧縮強度が大きい特徴があるが、乾燥は困難で、表面割れと木口割れ、ねじれ等が生じやすいこともある。

2.2 測定機器

本研究では、写真-1に示すシルバーテストを用いて超音波伝播速度 (m/s) を測定した。また、含水率の測定には (株) ケット科学研究所の高周波式木材水分計を使用した。

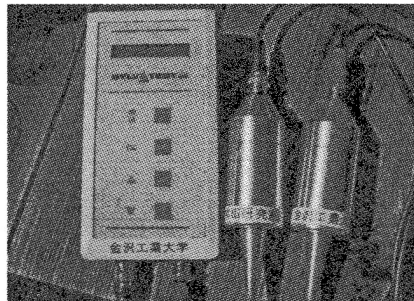


写真-1 超音波伝播速度測定器

2.3 作成方法

未使用のボンゴシ材から試験片を製作する場合の断面寸法の有効性を確認するために、図-1に示すように先ず厚さ 4 cm に切断して4箇所を測定した。このとき、超音波伝播測定は試験片の中心で測定することとし、2cm 間隔の水平方向、直角方向の中心にマーキングをする。水平方向の2箇所をA1、A2とし、直角方向をB1、B2として、それぞれの超音波速度を測定した。次いで、厚さ4cmの試験片を、厚さ2cmで切断する。切断した試験片をもう一度上記と同じ要領で測定した。

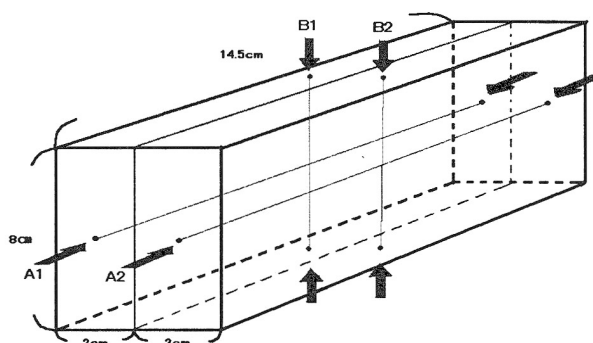


図-1 試験片の製作法

試験片の断面寸法に対する確認実験の結果を表-2に示す。この表から、試験片の厚さを変えても同じ測定箇所でも測定すれば、測定値はほぼ同様になることが認められた。従って、超音波速度は部材の厚さの変化に影響されないことから、腐朽度実験時での試験片の厚さは、任意で行えることが分かった。このことから本研究では、加工がしやすい 2cm 厚さの試験片を製作して実験を行うことにした。

表-2 切断前、切断後と超音波伝播速度の関係 (単位: m/s)

	切断前		切断後	
	A1	A2	A1	A2
水平方向	1822	1768	1822	1861
	1822	1861	1856	1861
	1841	1861	1822	1812
鉛直方向	B1	B2	B1	B2
	1592	1673	1482	1673
	1542	1618	1482	1673
	1451	1763	1546	1673

3. 水平と鉛直方向の超音波測定試験

試験方法は、写真-2, 写真-3に示すように、超音波伝播速度測定器を用いて未使用材と使用材の水平方向、鉛直方向の超音波伝播速度の測定を行った。なお、使用材のボンゴシは約 10 年間ほど木橋の部材として使用されていたものである。

試験結果として、腐朽による超音波伝播速度の違いを図-2に示す。この図から、使用材は鉛直および水平方向のいずれに

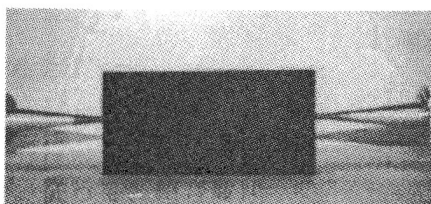


写真-2 未使用材 (水平方向)

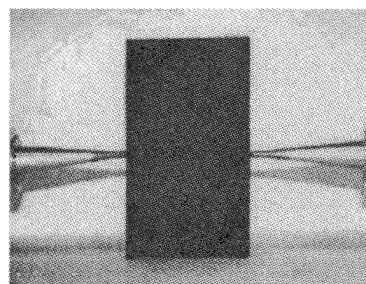


写真-3 未使用材 (鉛直方向)

においても未使用材より超音波速度が小さく、超音波の変動幅も小さい顕著な違いが認められる。また、使用材の鉛直方向の超音波伝播速度は約 1000m/s～1500m/s の範囲内での変動に対して、水平方向は 300m/s～1800m/s の約 1500m/s の変動幅で鉛直方向の約 3 倍であることが分かる。このことから、超音波伝播速度が変動する範囲面から言えば、鉛直方向より水平方向の方が腐朽に対する影響が反映されやすいと考えられる。

4. 含水率による超音波速度測定試験

腐朽度評価の検討のため行うためには、ボンゴシ材の含水率 W (%) と超音波伝播速度の関係を明確にする必要性から本試験を行った。試験方法は、未使用材のボンゴシ試験片の含水率を 18%～60% とし、水平方向と鉛直方向の超音波伝播速度の測定を行った。その結果を図-3 と図-4 に示す。

図-3 は、含水率と水平方向の超音波伝播速度の関係を表したものである。この測定結果から含水率が大きくなるほど超音波伝播速度が小さくなっていることがわかる。同様に、図-4 に示した鉛直方向の測定結果も水平方向の場合と同じような傾向が認められる。このように、含水率が高いほど超音波伝播速度は小さくなる関係が認められ、腐朽の原因として含水率の影響は非常に大きい要因と考えられる。

5. 断面欠損率による超音波速度測定試験

ボンゴシ材の内部腐朽部分を断面欠損部分とし、断面欠損率の変化による超音波伝播速度を測定した。

断面欠損率 D (%) は、次式のように定義した。

$$D = \frac{\text{腐朽部の断面積}}{\text{健全な断面積}} (\%) \quad (1)$$

すなわち、腐朽を想定した断面欠損の箇所を人工的に設けて、未使用の健全な試験片の断面積に対する欠損断面積の比 (%) とした。

試験方法は、写真-4 に示すように、水平と鉛直方向でのボンゴシ材試験片の含水率を 10%、断面欠損率を 0%、1%、3%、9%、15%、25%、35%、45% とした 2 サンプルの試験片を作成し

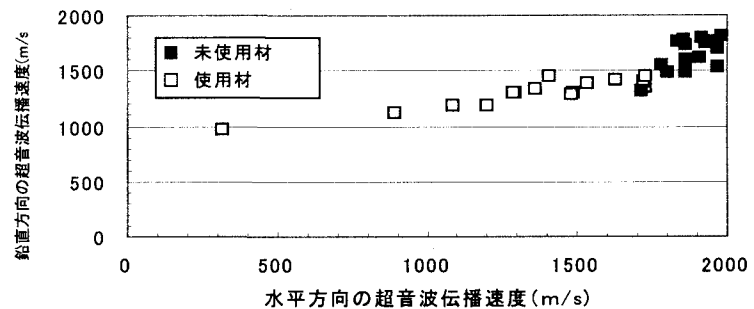


図-2 使用材と未使用材の超音波伝播速度

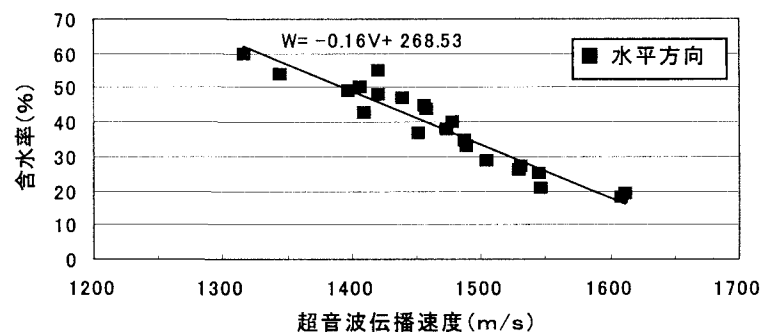


図-3 含水率 W と超音波伝播速度 V_H の関係

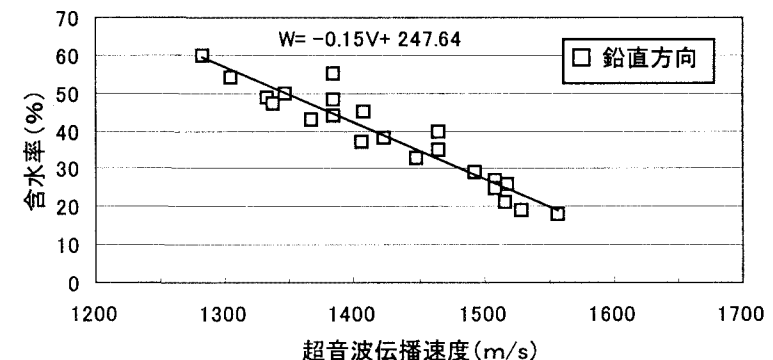


図-4 含水率 W と超音波伝播速度 V_V の関係

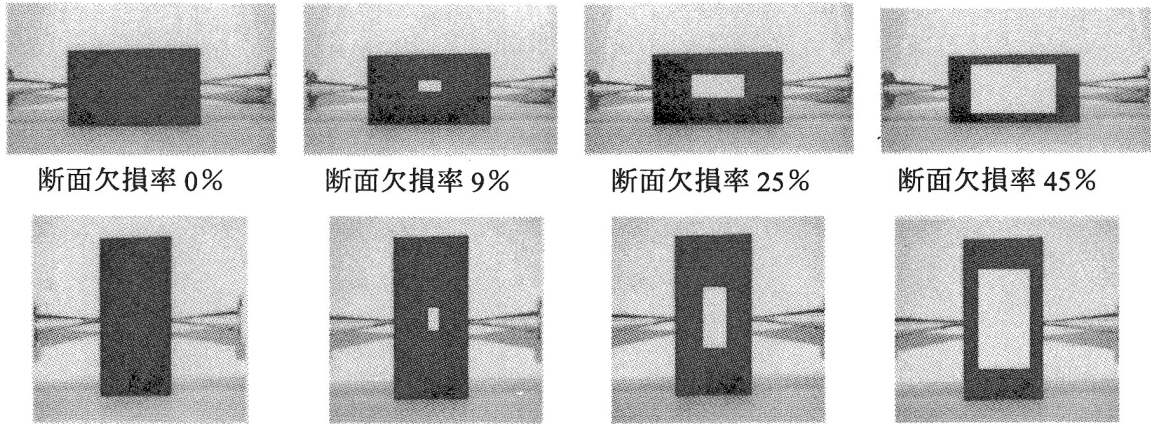


写真-4 断面欠損率（上段：水平方向，下段：鉛直方向）

て水平方向と鉛直方向の超音波伝播速度の測定を行った。

断面欠損率に伴う超音波伝播速度の測定結果を図-5と図-6に示す。これらの図から、断面欠損率が増加すれば水平方向と鉛直方向とも超音波伝播速度は低下していることが明らかになった。また、水平方向、鉛直方向とも実験値が近似していることが分かる。当初、含水率や断面欠損率を同様の条件で実験を行っても異なる試験片や部材であれば、木質などから実験値は変化するものと考えていた。しかし、本試験で超音波伝播速度に多少の差はあるが、全体的に一致している。このことから、試験片や部材の木質から超音波伝播速度の影響は少ないと言える。なお、本試験での多少の差異は、含水率と断面欠損率の微妙な設定条件の相違が起因しているものと考えられる。

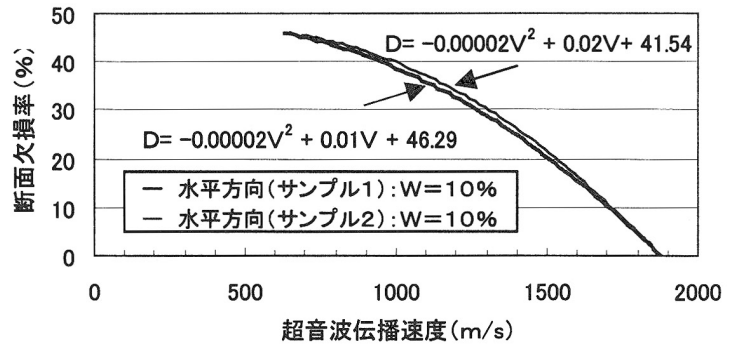


図-5 断面欠損率 D_H と超音波伝播速度 V_H の関係（水平方向）

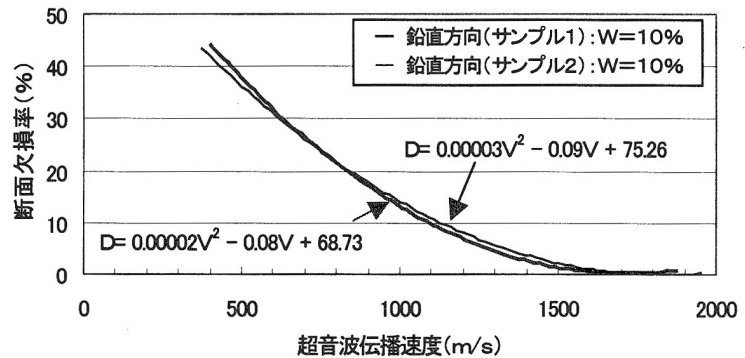


図-6 断面欠損率 D_V と超音波伝播速度 V_V の関係（鉛直方向）

6. 断面欠損率の推定式

(1) 水平方向の推定式

図-7は、実験で得られた含水率と超音波伝播速度の関係（図-3）と断面欠損率と超音波伝播速度の関係（図-5）から、水平方向における含水率・超音波伝播速度・断面欠損率の関係を示したものである。この図を基に、水平方向の断面欠損率 D_H の推定式を誘導する。

- ① 図-5のサンプル1の式に対して係数 α と β を用いると、 $D_H = -2 \times 10^{-5} V_H^2 + \alpha V_H + \beta$ となる。
- ② 含水率10%ごとの係数 α は、0.003ごとの減少で一定であることから、含水率0%の係数から

含水率 1%ごとの減少率を引くことによって、 $\alpha = 0.0248 - 3 \times 10^{-4} W$ となる。

- ③ 含水率 10%ごとの係数 β の変化率は、 $y = 0.0009 x^2 + 0.1545 x$ である。 α の算出と同様に、含水率 1%ごとの減少率を引くことによって、 $\beta = 40.089 + (-0.0009 W^2 + 0.1545 W)$ となる。

従って、水平方向の断面欠損率 D_H (%) は、次式となる。

$$D_H = -2 \times 10^{-5} V_H^2 + \alpha V_H + \beta \quad (2)$$

$$\alpha = 0.0248 - 3 \times 10^{-4} W$$

$$\beta = 40.089 + (-0.0009 W^2 + 0.1545 W)$$

ここに、 D_H は水平方向の断面欠損率 (%)、 V_H はシルバーテストのよって測定された超音波伝播速度 (m/s)、 W は含水率 (%) である。

(2) 鉛直方向の推定式

図-8 は、実験で得られた含水率と超音波伝播速度の関係 (図-4) と断面欠損率と超音波伝播速度の関係 (図-6) から、鉛直方向における含水率・超音波伝播速度・断面欠損率の関係を示したものである。この図を基に、水平方向の場合と同様に、鉛直方向の断面欠損率 D_V の推定式を誘導すると、次式を得る。

$$D_V = 2 \times 10^{-5} V_V^2 - \alpha V_V + \beta \quad (3)$$

$$\alpha = 0.078 - 0.275 \times 10^{-3} W$$

$$\beta = 73.84 - (-0.0009 W^2 + 0.1596 W)$$

ここに、 D_V は鉛直方向の断面欠損率 (%)、 V_V はシルバーテストのよって測定された超音波伝播速度 (m/s)、 W は含水率 (%) である。

(3) 未使用材による推定式検証

図-9 と図-10 は、未使用材の含水率を 30% と 60% として断面欠損率を 0% ~ 45% に変えた場合の水平方向と鉛直方向の超音波伝播速度の実験値、および式(2)と式(3)から算出し

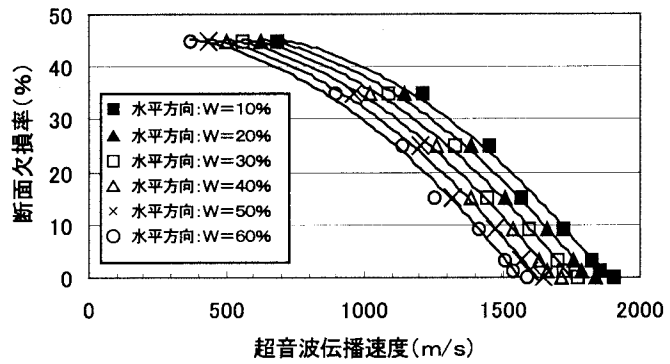


図-7 含水率・超音波伝播速度・断面欠損率の関係

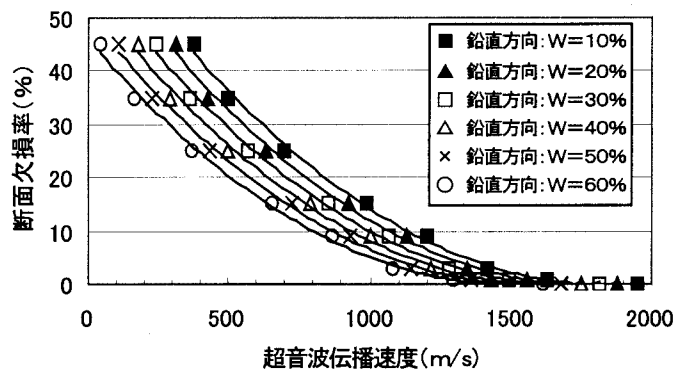


図-8 含水率・超音波伝播速度・断面欠損率の関係

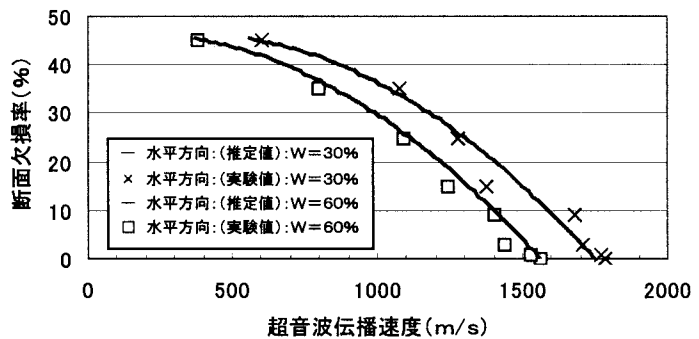


図-9 水平方向での実験値と推定値 (未使用材)

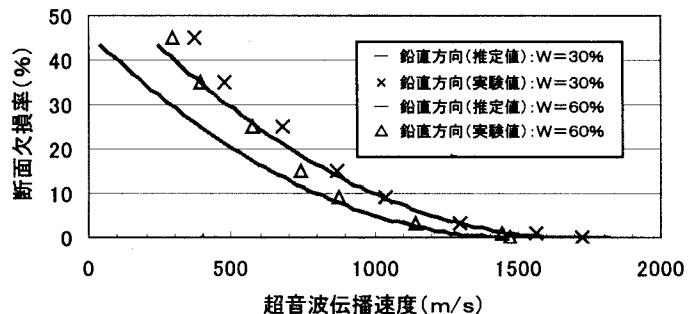


図-10 鉛直方向での実験値と推定値 (未使用材)

た推定値の関係を示している。水平方向では推定値と実験値の両者間に若干の差異はあるが、含水率、断面欠損率の微妙な誤差や超音波伝播速度測定器を測定するときの測定器本体や個人的誤差などの要因を考えると、水平方向の超音波伝播速度の変動は許容範囲以内と言える。

一方、鉛直方向については断面欠損率が増加すると推定値と実験値の差も増加し、全体的に見ると高精度を有する結果と言えないようである。しかしながら、従来、使用材に対する超音波伝播速度の測定から現場で、超音波伝播速度は900m/s～1800m/s 内の範囲で検討されることが多い。このことから、超音波伝播速度を900m/s～1800m/s 内でボンゴシ材の腐朽度評価を行う場合には、鉛直方向に対する推定式もそれなりの精度を有しているものと考えられる。

従って、本研究で求めた推定式を用いて現場でボンゴシ材の腐朽度評価を行う場合、水平方向と鉛直方向ともに含水率は10%～50%、断面欠損率は0%～60%の範囲が適切であると言える。

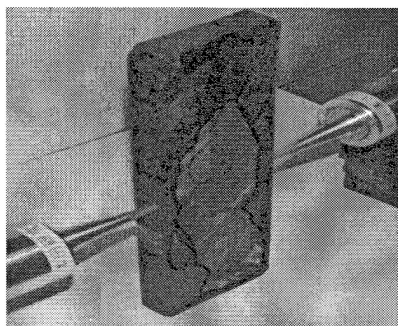


写真-5 使用材の測定例

(4) 使用材による推定式検証

測定方法として、異なる含水率を持つ4本の使用材サンプルを目視で外観診断を行い、腐朽と見られる箇所マーキングをした。次いでマーキングの面積を求めて4本のサンプルそれぞれ実際の断面欠損率を算出し、サンプル4本の水平方向、鉛直方向の超音波伝播速度を測定した。写真-5は鉛直方向の測定例を示している。それらの測定結果を表-3に示す。

表-4は、4本のサンプルを目視で外観診断して断面欠損率の算出を行った実際の断面欠損率と、測定された超音波伝播速度から式(2)と式(3)の推定式で算出した断面欠損率との差を示している。水平方向では実際の使用材の断面欠損率と近似値が推定された結果になっているが、鉛直方向では最大で18%の差異が見られる。

表-3 使用材の断面欠損率（実験値）

サンプル番号	W (%)	V_H (m/s)	V_V (m/s)	D_H (%)	D_V (%)
サンプル1 ■	10	821	711	44	27
サンプル2 ▲	20	1748	1703	4	2
サンプル3 △	30	911	685	34	24
サンプル4 □	30	1631	1041	7	7

表-4 使用材の断面欠損率の推定値と実験値の差

サンプル番号	実際の断面欠損率と推定値との差 D_H	実際の断面欠損率と推定値との差 D_V
サンプル1 ■	1	18
サンプル2 ▲	-1	10
サンプル3 △	-2	-2
サンプル4 □	-4	-2

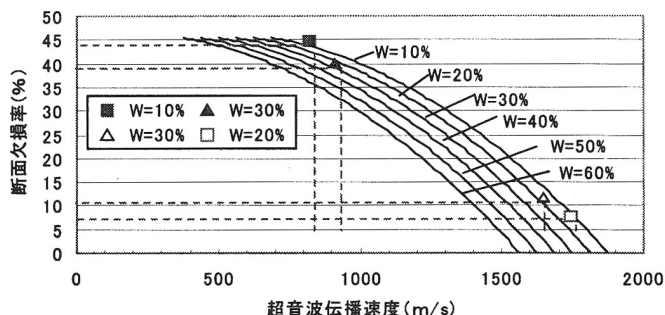


図-11 水平方向での実験値と推定値（使用材）

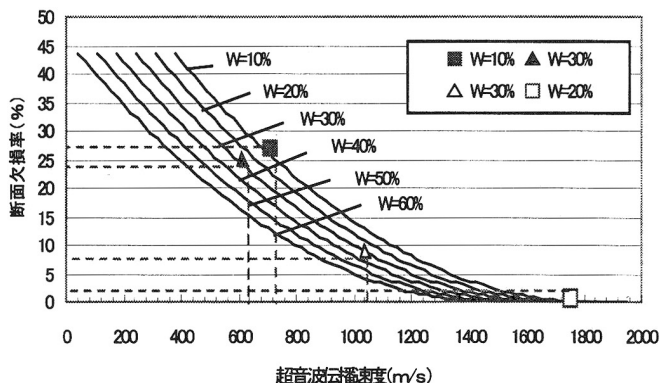


図-12 鉛直方向での実験値と推定値（使用材）

図-11 と図-12 は、使用材に対する水平方向と鉛直方向の実験値および推定値を図化したものである。実際の断面欠損率と本研究での推定値を比較すると、図-11 は実用性が比較的高い情報でないかと考えられる。一方、図-12 は全てのボンゴシ材に適用できか否かの断言は困難であるが、実際のボンゴシ材の腐朽度評価を行う超音波伝播速度の測定値の範囲内で検討すれば、現場での腐朽度評価に実用性の可能性があると思われる。

7. ボンゴシ材の内部腐朽度評価

シルバーテストによって超音波伝播速度および高周波式分水計で含水率を測定した場合、腐朽による断面欠損率でボンゴシ材の内部腐朽度を評価する基本図を図-13 と図-14 に示す。これらの図は、上述した推定式(1)と(2)を基に示している。

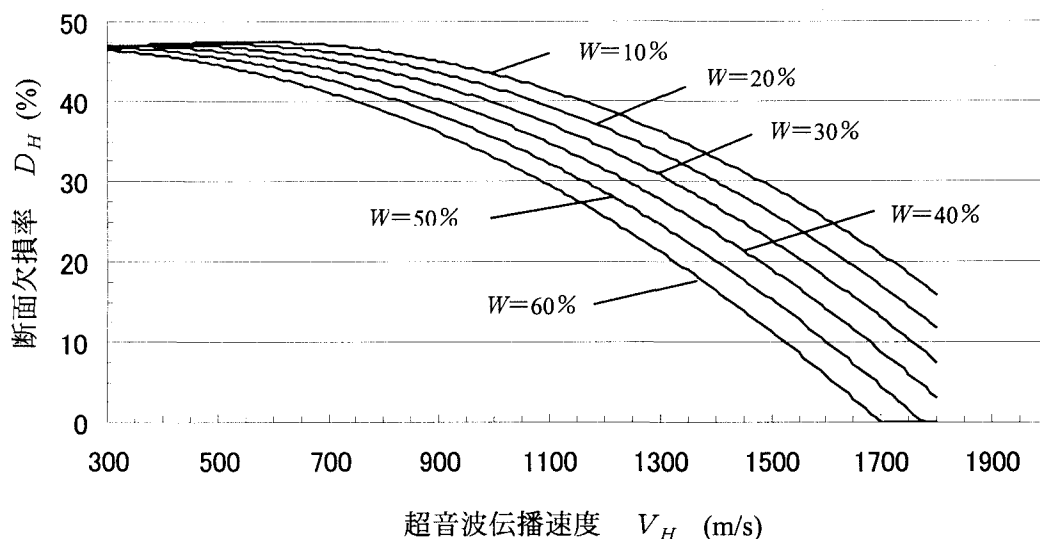


図-13 断面欠損率によるボンゴシ材の内部腐朽度評価図（水平方向）

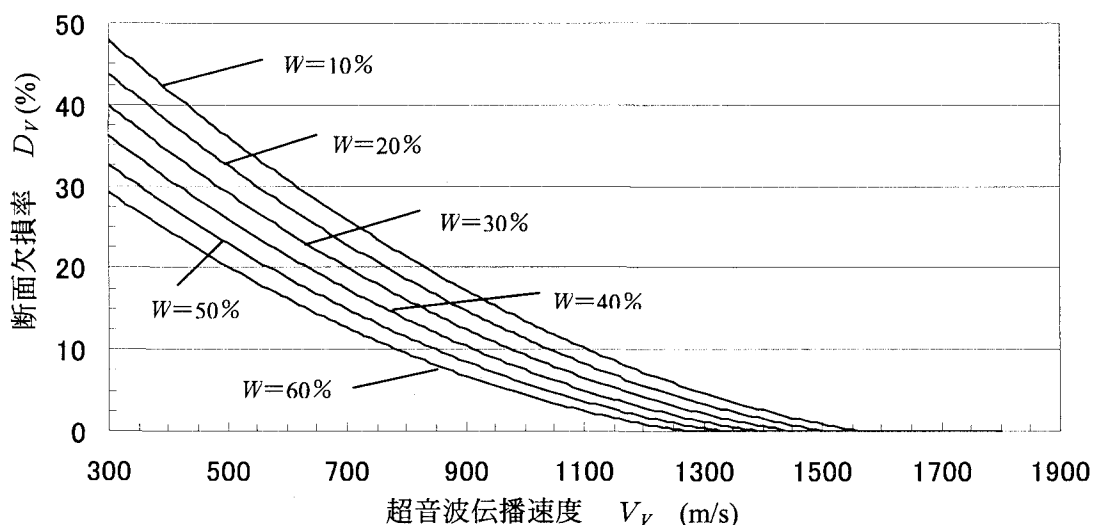


図-14 断面欠損率によるボンゴシ材の内部腐朽度評価図（鉛直方向）

いま、これらの図の使用法として、例えば図-13 では含水率 40%で水平方向の超音波速度が 1300m/s の場合は断面欠損率は約 27%になることを示している。また、図-14 では含水率 40%のとき鉛直方向の超音波速度が 500m/s の場合は断面欠損率は約 27%になることを示している。

以上のように、現場で含水率と超音波伝播速度を測定することによって、ボンゴシ材の内部腐朽度をある程度の範囲で定量的に評価することができるものと思われる。また、式(1)と(2)を調査の事前にプログラム化しておくことで現場で判定資料にすることもできる。

8. あとがき

ボンゴシ材を使用した木橋は多く架設されており、その中で維持管理等の保全問題が具現化している木橋も少なくない。このことから、ボンゴシ材の内部腐朽に対する評価方法の早急な確立が必要になっている。そこで、本研究はボンゴシ材の内部腐朽度を評価する診断方法を見出すケーススタディとして、現地でシルバーテストによる超音波伝播速度および含水率測定器による含水率を測定し、この超音波伝播速度と含水率を変数としたボンゴシ材内部の腐朽による断面欠損率の定量化を試みた。

本研究で得られた知見は、制約された実験室内での少ない測定値から検討した結果であることから、ボンゴシ材の内部腐朽度を把握する適切でかつ実用的な評価方法でないかも知れなし、また評価精度に課題が残されているかも知れない。さらに、本研究では木橋の健全度評価等で問題になるボンゴシ材の腐朽による強度低下も検討していない。この意味で、本研究はこの分野での問題を提起した内容にすぎないかも知れないが、今後の検討に何らかの参考になれば幸いである。

最後に、ボンゴシ材の各種実験とデータ分析にご協力を頂いた金沢工業大学・環境土木工学科・本田研究室の16年度学部4年生の米田勲夫君、宮崎裕介君、およびボンゴシ材の供試体をご提供頂いた(株)ラスコジャパンの島谷 学 社長に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 軽部正彦・宮武 敦：ボンゴシ橋の落橋事故について、土木学会第55回年次学術講演会講演概要集，I-A227，2000年9月。
- 2) 渡辺 浩・軽部正彦：架設後5年が経過したボンゴシ歩道橋の載荷実験、土木学会・第1回木橋技術に関するシンポジウム論文報告集、pp.23-28、2001年7月。