

ボンゴシ材の長期的な腐朽の傾向と診断法の検討

A discussion for long-term decaying behavior and diagnosis of Ekki members

渡辺浩†

Hiroshi Watanabe

† 博(工学), 福岡大学教授, 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)

Ekki is native to the western Africa. As it is considered to have great durability, great many Ekki members were imported in 1990s. However bridge made of Ekki had dropped in 1999. It was recognized that suitable maintenance was required for Ekki bridges. Durability performance of Ekki is important, however there are few information about it. The aim of this study is to investigate long-term decaying behavior of Ekki bridge members. Suspension bridge which has Ekki deck members was diagnosed in 12, 16 and 25 years passed after construction. Valuable information about decaying behavior and diagnosis were obtained.

Key Words: timber bridge, Ekki, decay, diagnostic method

キーワード: 木橋, ボンゴシ, 腐朽, 診断法

1. はじめに

木橋は、木材という生物由来の材料を主構造材に使用することから宿命的に耐久性が課題となる。我が国では、森林資源に恵まれているゆえに多くの木橋が架けられてきたが、国産材の主力である針葉樹は成長は早いものの概して耐久性は高くはないため、近年の外構木質構造物では防腐処理により所要の耐久性を確保することになっている¹⁾。このことからわかるように、外構材としての高耐久材は過去から現在に至るまで渴望されてきた。

そのような中でボンゴシ材は、メンテナンスフリーで長期供用を可能とする木材として 1990 年代に大量に導入された輸入材である。西アフリカ産の広葉樹であり、オランダやドイツで加工された上で輸入された。高耐久性のみならず高強度かつ硬質で大断面部材も得られることから、欧州では水門や木橋など過酷な環境におかれる土木構造物に多くの実績を有していた。

ところが国内において供用後わずか 10 年の木橋において腐朽による事故が発生し、関係者に衝撃を与えた²⁾。高温多湿な日本の気候風土においては、ボンゴシ材でも腐朽するため、適切な保守管理が必要であることがわかったからである。以来、架設事例は急減したが、往時は 1000 を超えたであろうボンゴシ木橋は今なお相当数が

残っており、その保守管理が課題となっている。

ボンゴシ材の耐久性能に関しては、当初導入される時点で相当数の室内試験が行われた³⁾⁴⁾が、後日の不具合に繋がるような知見は得られなかった。また多くの橋で不具合の事例が報告されている⁵⁾⁶⁾が、それらは個別적であり、供用期間と劣化挙動、並びにその診断法について調べた研究はない。

このような背景から筆者は、橋に使用されているボンゴシ材を対象に供用後 12 年および 16 年の時点で劣化診断を行い、その結果を示してきた⁷⁾⁸⁾。本研究はこの橋を対象に 25 年の時点でさらに劣化診断を行い、腐朽の傾向や速度、診断法について検討するものである。

調査対象橋は、写真-1 に示す橋長 56m の吊床版歩道橋である。九州地方のある渓谷を跨ぐように平成 2(1990)年に架設された。本橋は兩岸の岩盤に締着された 4 本の鋼ワイヤーの上に直接床版材を敷き並べただけの簡単な構造を有しており、床版材に断面 150×150mm、長さ 3m のボンゴシ材 223 本が使用されている。これらには相互に 100mm の間隔がとられていることから目視診断が容易で、隣接部材の腐朽の影響を受けることはない。また木琴のようであるため打診に有利であり、機器を用いた診断も容易である。

供用後 12 年が経過した平成 13(2001)年 10 月の時点では、写真-2 のような腐朽による断面欠損、また写真-3 のような床版下面に付着した木材腐朽菌の子実体が見られた。この子実体は一見健全と思われる床版でも観察され、

† 連絡著者 / Corresponding author

E-mail: mag@fukuoka-u.ac.jp



写真-1 調査対象橋の全景（12年目）



写真-2 著しく腐朽した床版材（12年目）



写真-3 下面に付着した子実体（12年目）

かなりの床版で腐朽が進んでいることが推察された。

2. 過去の診断の結果

2.1 12年目における診断⁷⁾

これまでの診断の事例から、ボンゴシ材の腐朽は部材内部から進行することが多いこと、その場合でも表面は

硬質なままで異常をうかがい知るのが難しいことがわかった。

そこで平成13(2001)年10月に、診断が可能な192部材を対象に表面目視による変色や割れの状況、子実体の有無の観察、打診、含水率測定、超音波伝播速度測定、ピン打ち込み深さ測定、穿孔抵抗値測定、および腐朽菌の同定の各種診断を実施した。ここではこれらを12年目診断という。

ここで子実体とは、いわゆるきのこのことであり、木材腐朽菌が孢子を生成するための器官である。これは腐朽そのものではないが、その活性度を知ることができる指標とされている。打診では上面の6ヶ所を金槌で叩き、その打音を0：異常なし、1：若干気になる、2：かなり疑わしい、3：明らかな異常の4段階で判定し、それらの数値の和として各部材の診断レベルを求めた。含水率測定には、高周波容量型含水率計（フソーFSK-118）を用いた。超音波伝播速度測定には、木材用の試験器であるシルバテストを用い全長を対象に測定した。ピン打ち込み深さ測定では、ピロディンにより径2.5mmで先端が平面の金属ピンを6Jのエネルギーで打ち込んだときの貫入深さを測定した。穿孔抵抗値測定では、先端が3mmの特殊なドリルでの穿孔抵抗値を深さ毎に記録できるIML RESI F300を用いて上面から穿孔した。また腐朽菌同定では、試験材から微小なサンプルを採取して培養し、腐朽させている担子菌の種類を同定した。

その結果、変色や割れはいずれの床版材でも同程度であり劣化度との因果関係は見られず、含水率も朝露の影響を受けたためか全体的に20%台で劣化の指標とはならなかった。また腐朽菌同定は手間と時間がかかる割に腐朽と判定されたものと実際に腐朽が進んでいたものとの一致は70%程度であり、実用的ではないことがわかった。

これに対して、子実体の有無、打診、超音波伝播速度は腐朽度との因果関係が大きいことがわかった。表-1はそれらを取りまとめたものである。なお打診では、6箇所の総和が7以上のものを異常と、また超音波伝播速度では、一般的な密度とヤング係数から求めた速度3892m/secの70%である2724m/sを下回るものを異常とした。すると、打診により異常と判定された床版材20本のうちの8割が超音波伝播速度でも異常と判定され、それらのほぼ全てで子実体が付着していることがわかった。図-1は健全材と異常とされた材の穿孔抵抗の測定例を示している。健全とされた(a)に対し、(b)では図の両端に位置する部材の上下縁部分にしか抵抗が測定されておらず内部では空洞に近いほどに腐朽が進行していたことから異常と評価されたことがわかった。

ピン打ち込み深さ測定では、図-1の表面の健全部がある程度厚ければ5mm程度という健全な値、それより薄ければ40mm以上という異常な値を示した。このため劣化度の定量評価には不適であることもわかった。

これらのことからボンゴシ材では子実体の有無、打診

表-1 12年目診断の結果のまとめ

打診レベル 超音波 伝播速度(m/s)	0	1～6	7～	合計
3892～ m/s	123 (6)	13 (1)	1 (1)	137 (7)
2724～3892 m/s	20 (3)	12 (4)	3 (2)	35 (10)
～2724 m/s	0	4 (3)	16 (15)	20 (18)
合計	143 (9)	29 (8)	20 (17)	192 (35)

() 内数字は子実体が観察されたものの内数



(a) 健全材の例



(b) 内部腐朽材の例

図-1 穿孔抵抗の結果の一例

および超音波伝播速度を用いて総合的に判断すれば、非破壊で精度よい診断が可能であることが確認された。

2.2 16年目における診断⁸⁾

12年目診断から4年後となる平成17(2005)年12月に、前回の診断で有効とされた3種類の診断法、すなわち子実体の有無、打診および超音波伝播速度による診断を実施した。以下これらを16年目診断という。なお、この4年間に17本の床版がスギ材に交換または鋼材により補強されたため診断対象から除外した。また構造上診断が不可能な31本を除くと、対象は175本となった。

表-2は子実体の有無を12年目診断の結果とあわせてまとめたものである。12年目診断で子実体が観察された28本のうち、本診断でも子実体が観察されたのは18本のみであった。ただし、それらの子実体には乾燥してすでに機能が失われたと考えられるものもあった。一方で子実体がなくなっていた10本には以前子実体が付着していたと考えられる跡も見られた。これらのことから、子実体の有無は腐朽を知るための容易かつ確実な方法ではあるが、供用後長期間が経過したものではその有無のみで診断することはできなくなることがわかった。

一方で新たに9本に子実体が観察された。このうちの8本については12年目診断ではいずれの診断法によって

表-2 16年目の子実体の有無と12年目との比較

12年目診断 16年目診断	なし	あり	合計
なし	138	10	148
あり	9	18	27
合計	147	28	175

表-3 16年目の打診レベルと12年目との比較

12年目診断 16年目診断	0	1～6	7～	合計
0	72	2	0	74
1～6	55	15	2	72
7～	7	10	12	29
合計	134	27	14	175

表-4 16年目の超音波伝播速度と12年目との比較

12年目診断 16年目診断	3892～	2724～3892	～2724	合計
3892～	68	2	0	70
2724～3892	51	11	0	62
～2724	11	17	15	43
合計	130	30	15	175

表-5 16年目診断の結果のまとめ

打診レベル 超音波 伝播速度(m/s)	0	1～6	7～	合計
3892～	46	23	1(1)	70(1)
2724～3892	27(2)	34(2)	2	62(4)
～2724	2	15(8)	26(14)	43(22)
合計	77(2)	77(10)	29(15)	175(27)

() 数字は子実体が観察されたものの内数

も全く異常が認識できなかったものであり、この4年間ににおいても腐朽が進行している部材があることがうかがわれた。

表-3は打診の結果を12年目診断の結果とあわせてとりまとめたものである。これによると、12年目診断で異常と判定されたものは14本であったのに対し、本診断では29本と倍増していることがわかった。これらには12年目診断で打診レベルが0、すなわち全く異常が認識されなかったものも含まれており、全体的にも打診レベルが大きくなっていることから、ここでも全体的な腐朽の進行をうかがうことができた。

表-4は超音波伝播速度をまとめたものである。ただし、測定はプロセクPUNDITと尖塔型センサを用いて行った。すると、異常と判定されたものはこの4年間で15本から約3倍の43本へと増加していることがわかった。こ



写真-4 25年目の床版材
(左から2番目は直前に交換されたもので
3番目はスギ材に交換されたものである)

表-6 25年目の子実体の有無と12年目との比較

12年目診断 25年目診断	なし	あり	合計
なし	137	17	154
あり	4	0	4
合計	141	17	158

表-7 25年目の打診レベルと12年目との比較

12年目診断 25年目診断	0	1～6	7～	合計
0	13	1	0	14
1～6	99	19	0	118
7～	6	16	4	26
合計	118	36	4	158

表-8 25年目の超音波伝播速度と12年目との比較

12年目診断 25年目診断	3892～	2724 ～3892	～2724	合計
3892～	19	0	0	19
2724～3892	15	2	0	17
～2724	34	6	0	40
測定不能	62	15	5	82
合計	130	23	5	158

表-9 25年目診断の結果のまとめ

打診レベル 超音波 伝播速度(m/s)	0	1～6	7～	合計
3892～	3	15	1	19
2724～3892	3	14(1)	0	17(1)
～2724	4	36(1)	0	40(1)
測定不能	4(1)	53	25(1)	82(2)
合計	14(1)	118(2)	26(1)	158(4)

() 数字は子実体が観察されたものの内数

れらには12年目診断で正常値であったものも多数含まれ、また全体的にも超音波伝播速度が小さくなっていること等から、ここでも全体的な腐朽の進行をうかがうことができた。

表-5は、表-1と同様に結果を取りまとめたものである。打診と超音波伝播速度では劣化が進行しており、子実体の観察ではその逆の傾向を示していることがわかった。その理由は前述のとおりである。

3. 25年目における診断と評価

3.1 調査の概要

平成27(2015)年3月に25年目の診断を行った。以下これらを25年目診断という。ここでは、部材表面の目視、子実体の有無、打診、含水率、超音波伝播速度、および穿孔抵抗値の測定を行った。対象は、すでに交換・補修がなされている34本と測定不可能な31本を除く158本とした。

3.2 非破壊的な診断法とその結果

目視診断では、部材表面に無数の割れが観察された。ただし写真-4のスギ材に見られるような大きなものではなかった。これはボンゴシを含む南洋材に特有の交錯木理によるものと考えられる。材表面は一樣に紫外線による白化が進行していたが堅く、相変わらず表面から内部の腐朽はうかがい知れない状況であった。子実体が付着していたのは表-6のように4本のみであった。このうち新鮮なものは1本のみで、他の3部材では小さく、枯れて機能を失っていた。なおこれらはいずれも12年目には子実体が見られなかった。

打診により異常とされたものは表-7のように26本で、12年目よりも増加していた。なお、表中の12年目の調査で異常とされたものは4本であり、表-1に示す12年目の20本よりも減っているが、これは12年目で異常と判定されていた部材がその後交換されたためである。

含水率は高周波容量型水分計(ケット科学研究所 HM-520)を用いて測定したが、いずれも気乾状態であることを示す8～20%であり、12年目診断と同様に劣化診断の指標とはなり得ないことがわかった。

超音波伝播速度は、プロセク PUNDIT と尖塔型センサを使用して両木口間で測定した。その結果を表-8に示すが、劣化の進行のためか測定不能や2724m/s以下であったものが多くを占めるようになっていた。

表-9は表-1,5と同様に結果を取りまとめたものである。打診レベルで異常と判断された26本のうち超音波伝播速度でも異常と判断されたものは25本であったことから、打診の十分な精度が伺える。一方で超音波伝播速度から異常と判断された122本のうち、打診でも異常と判断されたものは25本と少なかった。これは、測定では超音波センサを部材表面に接触させるが、表面の劣化が進



写真-5 穿孔抵抗値の測定の様子

表-10 各診断による評価の比較

部材	超音波伝播速度	打診	穿孔抵抗値
a	○	△	△
b	○	△	△
c	○	△	△
d	○	×	△
e	△	△	○
f	△	△	△
g	×	△	○
h	×	△	○
i	×	△	△
j	×	△	△
k	×	△	△
l	×	△	△
m	×	△	△
n	×	△	△
o	×	△	△
p	×	△	×
q	×	△	×
r	×	×	×
s	×	×	×
t	×	×	×
u	×	×	×
v	×	×	×
w	×	×	×
x	×	×	×
	○:3892m/s 以上 △:2724m/s 以上 ×:2724m/s 以下	○:0 △:1~6 ×:7 以上	○:断面が ほぼある △:腐朽している ×:断面が ほぼない

行しており尖塔型センサでも接触度が小さくなったためと考えられる。あまり古い材に関しては超音波伝播速度は指標とはなりにくくなることがわかる。子実体の有無は有益な診断状況になるとされていたが、観察されたのは4本のみであり他の診断との優位な関係は見られなかった。このことから、長期供用下では子実体の有無は劣化診断の指標とはなくなることがわかった。

打診や超音波伝播速度の結果から総合的に考えると、16年目以降も腐朽が進行していることがうかがわれた。ただし子実体の数は減少している一方で、表面からは劣化がうかがい知れない状況は変わらないことから、供用が長期にわたる場合には外観からは診断しにくくなっていることがうかがえる。

3.3 微小破壊的な手法による検証

3.2の診断結果を検証するために、IML RESI F300Sを用いて深さ毎の穿孔抵抗値を測定した。写真-5はその様子である。測定対象は超音波伝播速度と打診の結果から推定される劣化度が様々となるように24本を選んだ。表-10はその結果をとりまとめたものである。また図-2はいくつかの穿孔抵抗値の結果である。ただし右端が上面、左端が下面で横軸の1目盛りが1cmであり、折れ線が深さ毎の抵抗値を示している。

表-10の穿孔抵抗値の欄には、図-2のような図から劣化度を判定して示している。ただしその判定は、抵抗値を示す線の下の部分の面積が全体の概ね50%以上か以下かで行っている。その結果、劣化度は打診の結果とかなり一致していることがわかる。ただし超音波伝播速度は指標としてはやや厳しいこともわかる。

これらの結果から、超音波伝播速度ではやや厳しめの評価になるものの、打診とあわせて総合的に評価すれば、実際の劣化度を概ねよく捉えられることがわかる。さらに、これらの結果を指標化して総合評価を試みたいところではあるが、データが少ないため今後の課題としたい。

3.4 腐朽の進行について

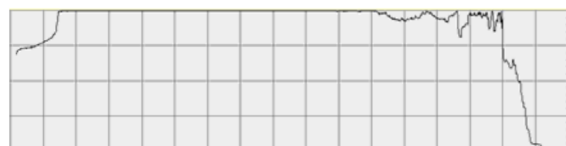
図-3は、各診断法で劣化と評価されたものの数をまとめたものである。なお、16年目診断までに17本が、25年目診断までにさらに17本が交換されたため、それらの評価はわからないが、評価は好転することはないとして積み上げてとりまとめている。

これによると、超音波伝播速度では、16年目から25年目の間に劣化と評価されるものが急増していることがわかる。超音波伝播速度測定は、センサ接触面の劣化の影響を受けることがあるが、全体的に劣化は進行していたことがうかがえる。

打診で異常とされたものは12年目診断で20本、16年目診断で29本であったものの25年目診断では26本と減少している。しかしながらこれは劣化と診断されたものが交換されたためであり、それを含めるとやはり増加



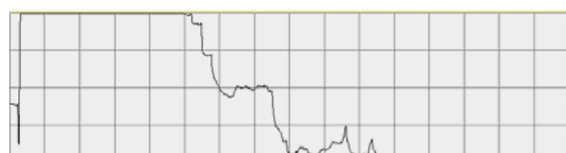
(a) 部材 a



(b) 部材 e



(c) 部材 g



(d) 部材 p



(e) 部材 r

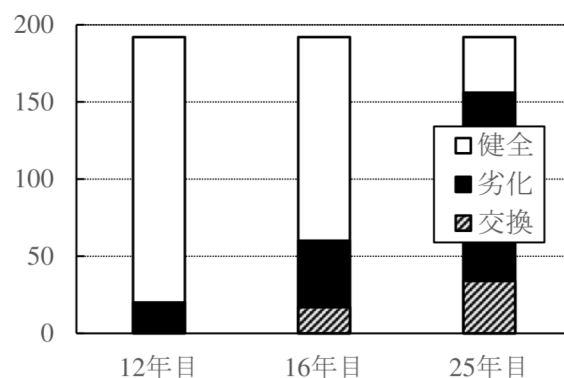
図-2 穿孔抵抗値の例

しており劣化は進行していたと考えることができる。

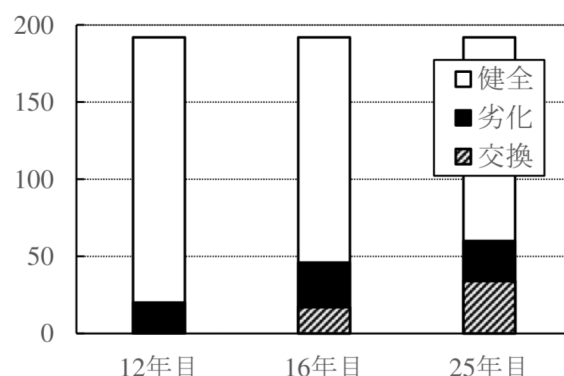
これに対し、子実体の有無により異常とされたものは 25 年目診断では 4 本しかなく、これは交換されたものが全て劣化とされていたと考えても減少していることがわかる。また 12 年目診断と 16 年目診断の間での増加も他の診断法と比較して小さい。これは子実体がなくなったものがあるためであり、供用が長期に渡るほどこれが劣化の指標になりにくくなることを示している。

4. まとめ

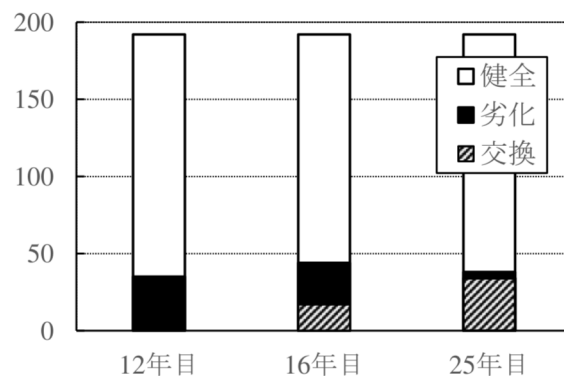
ボンゴシ材は、高耐久性が謳われていたことから 1990 年代には木橋等で多く利用されてきた。しかしながらそれらには当初の期待に沿わなかった事例も多い。これらの橋を安全に利用していくには、劣化の傾向や適する診断法に関する検討が必要となる。そこで本研究では、木橋に使用されてきたボンゴシ材の長期に渡る診断結果を踏まえ、その劣化の傾向や診断法等について検討を行っ



(a) 超音波伝播速度による評価



(b) 打診による評価



(c) 子実体の有無による評価

図-3 各診断法で劣化と評価されたものの数

た。その結果、以下のことがわかった。

- ボンゴシ材は、日本の屋外環境下では当初の 10 年程度で激しく劣化するものがある。しかしながらこの状況を外観から正しく認識することは難しい。
- ボンゴシ材の劣化診断には超音波伝播速度と打診に子実体の有無による総合的な検討が適している。
- 10 年目以降は子実体が観察されることは少なくなるが、それでも徐々に劣化は進行している
- 供用が長期に渡るほど、子実体により劣化度を認識す

ることは困難になる。

最後に確認しておきたいのは、25 年が経過してもなお全く劣化の兆候がないものも多数存在することである。これはボンゴシ材が高耐久性であることを示しているとも言える。つまり耐久性のばらつきが大きいボンゴシ材の劣化を適切に認識し、交換や補修を行っていくことが求められている。

参考文献

- 1) 土木学会木橋技術小委員会：木橋技術の手引き 2005, 2005.
- 2) 鈴木憲太郎, 軽部正彦, 宮武敦, 加藤英雄: ボンゴシ材を使った公園用木橋の落下について, 木材工業, Vol.55, No.2, pp. 78-81, 2000.
- 3) 小松幸平, 黄権煥: ボンゴシ材の鋼板挿入ドリフトピン接合性能に及ぼす端距離・縁距離の影響, 木材学会誌, Vol.44, No.5, pp.360-367, 1998.
- 4) 小松幸平, 堀江和美, 黄権煥: ボンゴシ実大材の曲げ性能, 木材学会誌, Vol.44, No.5, pp.368-374, 1998.
- 5) 植野芳彦, 渡辺浩, 原田浩司: 常盤橋の診断・補修と維持管理技術, 木橋技術に関するシンポジウム論文報告集, Vol.6, pp.93-98, 2007.
- 6) 渡辺浩, 田中圭, 森拓郎, 千田知弘: 劣化したボンゴシ材の曲げ強度と面圧強度に関する検討, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.723-728, 2014.
- 7) 渡辺浩, 土居修一, 伊藤良介, 瀧内浩: ボンゴシ材の健全度診断の方法とその評価, 木材工業, Vol.58, No.2, pp.66-70, 2003.
- 8) 渡辺浩: 長期間木橋に使用されているエッキ (ボンゴシ) 材の腐朽の進行, 木材保存, Vol.33, No.5, pp.231-235, 2007.

(2016 年 9 月 26 日受付)

(2017 年 2 月 1 日受理)