

ボンゴシ材を用いた公園用木橋の落下調査報告

REPORT ON THE COLLAPSE OF BRIDGE MADE WITH BONGOSI

軽部正彦 _____ *1 宮武 敦 _____ *2 鈴木憲太郎 _____ *3
加藤英雄 _____ *4

Masahiko KARUBE Atsushi MIYATAKE Kentaro SUZUKI
Hideo KATO

キーワード：
木橋、ボンゴシ、腐朽、耐久性、非破壊検査、健全度診断

Keywords:
Wooden Bridge, Bongossi, Decay, Durability, Non-destructive Test, Examination

This paper reports the collapse of Bongossi Bridge. The bridge was located in Ehime prefecture, and was made by bongossi and stainless fasteners. The bongossi wood was well known by its high durability, but the bridge collapsed by its decay.

1. はじめに

1999 年 9 月、愛媛県北宇和郡津島町にある「南予レクリエーション都市 4 号公園」内にあるボンゴシを用いたポニートラス形式の木製人道橋が落下した。近代的設計による木橋の落下は国内外で報告が無く、同じ形式の木橋が数多く存在する欧州でも例が無い。屋外工作物としての木橋が 10 年で落下した事実は、同じ木製構造物である木質構造建築物に対して多くの示唆を与えるものと思われる。本報では、事故調査の概要と問題点の検証、および今後の設計に生かして行くべき情報について述べることとする。

2. 当該木橋の履歴

落下した木橋は、橋長42mの中央部、支間長21.4mの部分であった。橋の設計は、平成元年度に公園全体の計画と同時になされ、平成2年（1990年）3月に竣工した。橋の上部工となるポニートラスは、高い耐久性を持つと言われていた「ボンゴシ」で全ての部材を作成し、その接合にはステンレス製の接合具「ダウエルピン（ドリフトピン）、ボルト」を用いている。トラス各部材の寸法は、上下弦材 2-100 × 240、縦材 90 × 250、斜材 90 × 180 である。設計荷重は、主構造が 200kg/m²、床板他が 300kg/m² である。材料の選定が長期供用と維持管理の簡略化を期待していたので、竣工時の塗装と不具合個所の簡単な補修のみが実施されていた。落下は竣工から 9 年 6 ヶ月で生じた。

なお、同公園内には落下した木橋（4 号橋）の他、同じポニートラス形式 15.4m スパンが 2 橋（1 号橋、2 号橋）と、スパン 1m の単純桁橋（3 号橋）がある。現存する同じ形式の 2 橋については、



写真 1 4 号橋落下直後の様子

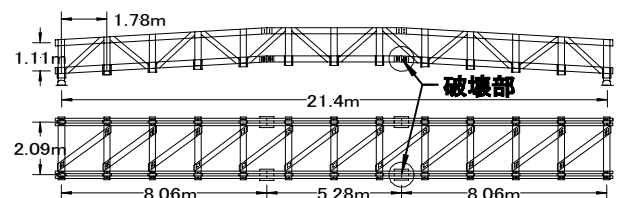


図 1 4 号橋中央支間：落下部分の概要

その健全度について検証するために、後述する調査手法のうち非破壊的調査のみ実施した。

3. 木橋落下までの経緯と落下の状況

今回の落下事故において人的被害は発生しなかった。落下する前日となる 1999 年 9 月 6 日に、渡橋中の清掃員が異常を発見通報し、現地管理事務所が通行禁止した。翌 7 日午前、管轄する愛媛県宇和島地方局建設部が現地調査し、下弦材に亀裂を確認した。そ

*1 森林総合研究所木材利用部接合研究室 主任研究官 博士(工学)
(〒305-8687 茨城県稲敷郡笠崎町松の里 1)

*2 森林総合研究所木材利用部集成加工研究室 主任研究官 農学修士

*3 森林総合研究所木材利用部材質改良科 科長

*4 森林総合研究所木材利用部材料性能研究室 研究員 農学修士

*1 Senior Researcher, Forestry and Forest Products Research Institute, Wood Tech. Div., Dr. Eng

*2 Senior Researcher, Forestry and Forest Products Research Institute, Wood Tech. Div., M. Agric.

*3 Chief, Forestry and Forest Products Research Institute, Wood Chem. Div., Wood Improvement Sect.

*4 Researcher, Forestry and Forest Products Research Institute, Wood Tech. Div., M. Agric.

の後対策を検討する間無くして、同日正午頃、木橋は落下した。

落下した木橋は、破壊起点と推定されるボニートラス下弦材の接合部において、外気に接する木材表面からではなく、部材内部が腐朽し、その部分がフレーク状に変質していた。木橋落下に際して現れた破壊起点以外の破断面においても、断面のほとんどが内部から腐朽しており、同じような状態であった。

落下後の同月 10 日、落下した木橋は架橋箇所から程近い場所に移動撤去された。落下した木橋を調べていくと、接合形式がピンやボルトを利用したせん断型添え板接合形式であり、その接触界面がひどく腐朽していた。特に、大きな面積の接触界面となる上下弦材の継手とトラス接合部の腐朽が激しかった。ほとんどの接合部において腐朽が確認された他、接合部から離れた部材の中間部分でも幾つかの腐朽箇所が確認された。

4. 使用木材の検証

落下した木橋の破壊起点近傍の母材を、森林総合研究所木材利用部組織研究室で鑑定した結果、使用された木材がボンゴシ（学名：*Lophia alata Banks ex Gaertn.* ボンゴシはドイツ系の呼称。英国系ではエッキ、フランス系ではアゾペ。）であることが確認された。また当該材の密度は 1.07g/cm^3 で、文献¹⁾ 値（最小0.95、平均1.06、最大1.10）では平均的な位置付けになる。同文献では、ボンゴシは個体差が大きいものの、耐朽性を 5 段階中高いほうから 2 番目に位置付け、また水中での使用に適していると記述されている。

5. 腐朽菌の検証

落下事故の原因となった腐朽菌について、森林総合研究所森林生物部腐朽病害研究室阿部恭久室長が、破壊起点近傍の腐朽部から分離した菌糸の形状と、木橋に付着していた子実体（きのこ）の形態から鑑定した結果、他の腐朽菌も確認されたが、総合的に白色腐朽菌シイサルノコシカケ（学名：*Loweporus tephroporus*）であると判断された。この腐朽菌は、広葉樹の病害菌として広く一般的に存在するもので、特殊な分解力を持つ腐朽菌ではない。²⁾

6. 調査の概要

発生した事実を正しく整理するために、1999 年 9 月 21 日に予備的な調査を、同年 10 月 21 日に詳細な調査を行った。調査項目を表 1 に示す。予備的な調査において、前述した木橋落下までの経緯とその状況を把握した。続く詳細な調査では、内部腐朽という状況をいかに発見し診断するかについて、その手法と適用性について検討した。調査項目は、木材の非破壊検査や腐朽度調査において有効性が確認されている方法の他、内部腐朽を評価する新しい方法を考案し適用した。なお後述する各測定法は、落下した 4 号橋をまず測定し、その測定箇所を実際に切断し腐朽の有無とその割合について観察することで、手法の有効性と検出結果の検証を行っている。

腐朽度調査で広く行われている目視と打音による検査は、叩く方法や観察のポイント、判断について熟練が必要だが、非常に簡便に出来る検査手法である。ただその判定値が主観的なものであるもので、絶対的な指標と成り得ない。今回も表 2 のような評価としたが、その結果は客観的な値とは言えない結果となった。

Schmidt Hammer は、弾性反発力に基づくコンクリートの非破壊強度推定法として多用されているが、今回のような内部腐朽は検出することが出来なかった。

PUNDIT（Portable Ultrasonic Non-destructive Digital



写真 2 移動した木橋落下部分とその接合部

表 1 調査項目

調査項目	手法	適用
腐朽度	目視・打音による判定	現存橋と 落下部分
非破壊検査	弾性の反発力 超音波伝播時間測定	
破壊検査 (局部破壊を含む)	Pilodyn（ピロディン） 木ネジ捻じ込みトルク測定法 ボアホールカメラ観察 切断破壊面観察	落下部分
構造安全性	載荷実験	現存橋

表 2 目視と打音による判断基準

判定値	腐朽程度	接合部での判断例
0	健全である。	継続使用。
1	わずかに腐朽している。	継続使用。
2	腐朽が少し進んでいる。	重要度により交換が必要。
3	腐朽が進んでいる。	交換が望ましい。
4	腐朽がかなり進んでいる。	交換が必要。
5	欠損している。	補充が必要。



写真 3 下弦材切断面と内部腐朽の様子

Indicating Tester）は超音波伝播時間を測定する測定器であり、コンクリート材料の非破壊検査手法として研究されている方法⁴⁾である。今回のような内部腐朽を生じた個所にこの検査手法を適用すると、健全な部分に比べて、超音波伝播時間が長い傾向を示した。これは内部腐朽した部分で伝搬速度が低下していることに起因する遅延あるいは伝達経路の延長が生じているものと判断した。この方法

は発信子の接触など測定方法に課題を残すものの、測定値の相対的な判断から内部腐朽箇所を検出できることがわかった。

Pilodyn（ピロディン）は、コンクリートや木材の表面劣化の診断法として数多く行われている方法で、一定エネルギーでのピンの打込み量から木材では密度及び強度を推定する方法である。しかし今回のような表面が比較的健全にもかかわらず内部が腐朽している状況では、検出には適していなかった。落下した木橋を構成する部材を切断あるいは分解し、その切断面・分解接触界面について測定した結果からは、腐朽部分を評価することが出来た。Pilodyn は、ポンゴシを用いた木橋の健全度を調べる非破壊検査手法としては適していない結論を得た。

木ネジ捻じ込みトルク測定法は、今回の調査にあわせて開発した局部的破壊を伴う強度推定法である。あらかじめ孔あけされた先穴貫通孔に、先端のみネジ山を有する木ネジを捻じ込み、それに要するトルクにより木材の密度や強度を推定し、また捻じ込みの回転数により深さを検出する測定法である。深さ方向に安定した材質の木材では、捻じ込みに要するトルクは一定であり、腐朽等により材質の劣化した部分では要するトルクは小さくなる。この測定法により、木材表面が健全にもかかわらず、内部が腐朽している状況を簡単に数値で検出できた。またこの方法により、どの程度の腐朽が、どの深さで、どれだけの長さ生じているが簡単に検出できた。

木ネジ捻じ込みトルク測定法の適用目的で穿孔した先穴貫通孔に孔内部を内視するボアホールカメラを挿入しその観察を試みた。その結果、先穴軸方向を観察する直視型レンズでは木材の腐朽状況を観察できなかったが、先穴の孔壁を観察できる斜視型レンズを使うと部材の切断面画像に近い観察が可能であった。

以上の結果から、今回の事故のような内部腐朽を発見し、その程度と状況を判断する手法としては、打音検査→PUNDIT→木ネジ捻じ込みトルク測定及びボアホールカメラによる観察を順次実施することが適切であると判断された。このような調査を行うことで、特殊な機械の要らない簡単な試験から、非破壊型の試験、局部破壊型の試験、そして実際の内部腐朽状況の観察と段階を追って調査され、腐朽位置の特定がなされて行くことになる。

載荷実験は現存する橋の安全性を直接確認する方法として期待されるものであるが、その方法や判断基準には限界がある。基本的な載荷実験は「設計想定荷重を想定荷重形態で静的かつ瞬時に載荷して予測通りのたわみであることを確認」するものであるが、実際の試験は「載荷しやすい荷重を載荷しやすい荷重形態で順次載荷して、たわみを測定してみる」ことである。また竣工時やその後の定期的測定がなされていない問題がある他、載荷実験による悪い影響が残ることや実験中に破壊してしまうなどの危惧が残る方法である。今回は、破壊点まで直線的な弾性関係がある、劣化が剛性の低下として現れる、破壊の生じる変位が一定である、という前提条件を満足するものと判断した。

実際に行った載荷実験は、人と軽トラックを順次橋の中央部に積載し、水準測量によって橋中央部たわみを測定した。その結果、荷重とたわみの間で直線比例挙動を示し、除荷後にたわみが弾性回復した。1号橋は残留変位が残ったが、その後に行った2度目の載荷では弾性回復した。設計時の材料定数、部材形状から4号橋中央支間部分をフレームモデルに表現し、有限要素法による数値計算し

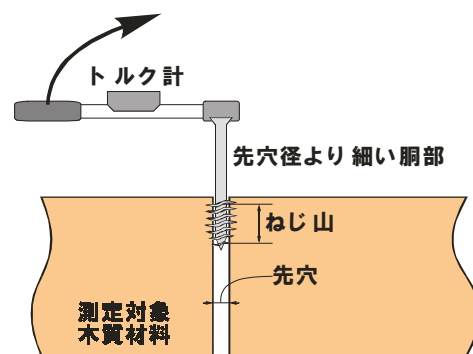


図2 木ネジ捻じ込みトルク測定法模式図

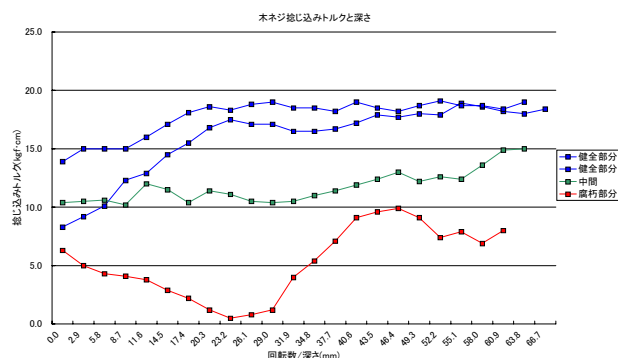


図3 木ネジ捻じ込みトルクと深さの関係



写真4 載荷実験の様子（2号橋）

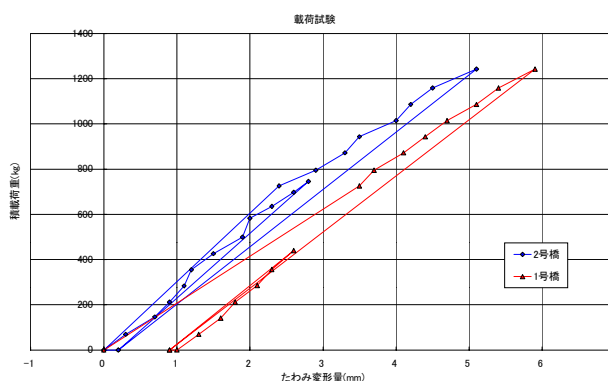


図4 積載荷重とスパン中央たわみ関係

た結果、載荷時のスパン中央たわみ 3.5mm（接合部が全て剛接合）から 4.0mm（接合部が全てピン接合）であるのに比べ、実際のたわみは 5mm 程度であった。今後のデータ蓄積により、経年変化による健全度判定の一指標として活用できるものと考え。

7. 木橋落下のシナリオ

落橋までの経緯や調査結果を総合すると、木橋落下のシナリオは以下のような三つの段階に分けられる。

腐朽段階

接合部接触界面、上面の干割れなどに滞水。その後、滞水部で腐朽開始。部材内部で腐朽が進展。腐朽部の強度低下。

部材破壊

腐朽により接合部のドリフトピン断面欠損部、および錯綜した木理等による目切れ部分で部材としての要求設計強度を下回る。腐朽部の外縁部に沿ってせん断破壊、剥離。繊維が引張破断。

全体崩壊

下弦材の破断。対角上弦材の圧壊。反対側下弦材の破断。上弦材の破壊。落橋

下弦材接合部近傍の腐朽の様子を接合部の切断面から検証してみると、添え板接合部外周に相当する、外気に触れやすい部分は腐朽せずに健全な部分が残っている。だが、添え板に挟まれる下弦材は断面の約80%が腐朽してその機能を失っている。この結果は、腐朽による母材の減少によって、残る健全部分に設計基準強度を超えた応力が負荷されたことと理解できる。

8. まとめと考察

落下した主たる原因は、腐朽によって接合部の断面欠損部が拡大するなどの力学的性能の低下である。木橋の落下から学ぶべきこととしては、腐らない木材はないという基本的な事象の確認と、破壊に対する安全性確保の考え方であろう。

当該木橋に使われたボンゴシは耐久性の非常に高い木材であり、欧州では水辺の工作物において非常に高い耐久性実績を持っていることも事実である。しかし日本での実績はまだ浅く、そのような中で一部では「腐らない木材」として紹介されていたようである。欧州では今回のような事故は、まったく同一形式の木橋であっても起きていない。今回ボンゴシを腐朽させた白色腐朽菌シイサルノコシカケが広く一般的に存在する腐朽菌であることを考えると、腐朽しにくいボンゴシであっても、高温期に多雨多湿な環境が長く続く日本の気候の中では、その耐久性は低下するものであると考える。何れにせよ腐朽の原因となる水を忌避する構造とすることは、木構造物の設計において忘れてはいけないことと言える。

落下した木橋はポニートラス形式であり、破壊起点となったトラス下弦材の接合部が破壊すると直接落下に繋がる形式である。上下弦材が連続した部材であるので、別途行った解析からは、死荷重のみならば下弦材破断後も上弦材が曲げ抵抗することで落下を免れるとも考えられた。しかし破壊起点の接合部同様、部材の各部分で内部腐朽による強度低下があったことが確認されているので、やはり全体崩壊を停止できなかったと思われる。

構造物に部分的な破壊が生じた時に、急激な全体崩壊に繋がらないように安全に壊すという考え方は、保有耐力接合にその代表例を見ることができる。塑性変形能力の高い金属材料を利用した構造では多段階に壊すことを意図しなくても、脆性破壊等の不安定亀裂成長を防止する設計条件が確保できる場合に、接合部において最悪な状況である破断分離は生じない。鋼構造は勿論として、鉄筋コンクリートや鉄骨鉄筋コンクリート構造では、金属材料をその靱性確保や破壊形式のコントロールに利用している。木材や木質材料では、



写真5 破壊起点となった下弦材接合部とその切断面

靱性確保をについて様々な研究がなされているが、安定した破壊形態の確保にまで配慮されることは少ない。破壊モードを多段階化、安定化させることは、接合部の破壊防止設計において極めて重要な位置にあることを再認識すべきであると考ええる。

9. 謝辞

本調査報告は、愛媛県宇和島地方局建設部建設第3課の深い理解と協力によってできたものである。また愛媛県林業試験場からは、調査に同行するなど全面的な協力を戴いた。ここに感謝する。

参考文献

- 1) ヨーロッパ規格 EN 350-2 英語版 BS EN 350-2, Durability of wood and solid wood – Part 2: Guide to natural durability and treat ability of selected wood species of importance in Europe. May 1994, pp.36
- 2) 例えば、本郷次雄ほか：きのこ：山と溪谷社，1994/08
- 3) Toshinari TANAKA et. al：Evaluation of Bending strength by non-destructive methods on western hemlock attacked by termites: Proceedings of the 1990 International Timber Engineering Conference, Volume 3, pp.673-680, 1990/10
- 4) 日本非破壊検査協会編：コンクリート構造物の非破壊試験法：養賢堂，1994/12