

| | |
|------|------------------------------------|
| タイトル | 木まくらぎの脱線防止に資する腐朽判定と犬くぎの引張抵抗力に関する研究 |
| 著者 | 上浦, 正樹; KAMIURA, Masaki |
| 引用 | 開発論集(117): 89-111 |
| 発行日 | 2026-03-13 |

木まくらぎの脱線防止に資する 腐朽判定と犬くぎの引張抵抗力に関する研究

上 浦 正 樹*

1 はじめに

世界で初めて鉄道の車両がレール上を走るにあたり線路構造としてレールの固定に木まくらぎが採用された¹⁾。その後、現在までその形態に変化はあまりない。日本では1951年にコンクリート製のまくらぎが試作され、高速線区を中心に木まくらぎに代わりコンクリートまくらぎが広く用いられた。さらにコンクリートまくらぎからスラブ軌道へと技術革新が進んでいる²⁾。これらは、木まくらぎより高価であるものの人工な材料であることから設計段階から強度や耐用期間の設定が可能である。一方、他のまくらぎより安価とはいえ、木まくらぎが天然の材料であることから、その腐朽の要因は天候や地盤状態、線形など様々な要素が絡んでいて、軌道管理をする上で不確定な部分が多い。(ここで、木まくらぎの腐朽とは腐食と損傷を含むこととする。)それでも、全国の中小鉄道や地方ローカル線では未だに木まくらぎが主体であり、最近の2024(令和6)年に起きた千葉県のいすみ鉄道の列車脱線事故³⁾の原因が木まくらぎの腐朽によることから分かるように、木まくらぎの管理が重要であることは現在でも変わらない。

一方、木まくらぎの腐朽の程度と犬くぎに対する引張抵抗力の力学的機構についてもあまり明らかにされてはいない。そのため木まくらぎの耐用命数に直結する交換限度の判定は、これまでほとんど技術的な感覚に依存してきた。よって判定の難しいものは科学的根拠にとぼしく、個人誤差が大きい。その結果、木まくらぎの腐朽を見落として脱線に至ったケースが現在でもみられる。このように客観的で科学的な根拠によって木まくらぎの腐朽の判定が望まれている。

以上のように木まくらぎが鉄道発足からの軌道材料で、コンクリートまくらぎからスラブ軌道へと技術革新が進んでいるとはいえ、中小私鉄やJRの地方ローカルでは依然として木まくらぎが多く、脱線事故の主な原因に木まくらぎの腐朽が原因であることが指摘されている。この10年間で見ても、全国で木まくらぎの腐朽によって生じる軌間拡大で脱線事故が年平均で1年に1回程度発生している。木まくらぎの腐朽の程度を予測する研究は1950年代、1960年代に主に行われ、実験室段階で引張り抵抗力が600 kgfを弾性限界として、これ以上では健全

* (かみうら まさき) 北海学園大学開発研究所特別研究員

とみなされることが示唆されたが、その後は殆ど成果がみられないまま推移している。とはいえ、1950年代、1960年代の木まくらぎが研究を生かして、国鉄からJRに移行しても木まくらぎ検査の法的な根拠である検査実施基準として不良まくらぎの判定で犬くぎの引抜抵抗力が600 kg 未満が定められている。

しかし、現場でこれを測定する汎用機器はなく測定ができないのが実情である。一方で、木まくらぎの腐朽を抑える防腐材について、現在敷設されている10年以上の木まくらぎでは発がん物質が含まれた旧クレオソートを改善した新クレオソートを用いたものである。この製造条件として浸潤度は材中央部に薬剤の存在が認められることが要求されている⁴⁾。しかし、この要求を満足していることを確認されないままの木まくらぎが現場で敷設されている。

このように、現在では、引張抵抗力が600 kgf をまくらぎ不良の限界値として定められたが、測定する汎用機器がない上に、木まくらぎの防腐材が材中央部まで浸透していることを確認していないまま敷設されているのが実態である。これを踏まえ、木まくらぎの腐朽対策として2018年に国土交通省の指導では、木まくらぎをPCまくらぎに置き換えるPC化が対策となっている。だが経営が厳しい線区ではPC化が遅れ、木まくらぎの保守のみで対処せざる得ない線区が多く見られる。この中から木まくらぎ腐朽による軌間拡大による脱線事故が生ずる結果となっている。

このような背景から、本研究の目的は木まくらぎの腐朽の範囲を求める方法を探求し、その原因を推定と犬くぎの引張抵抗力を推定する機器を開発して、これに基づき木まくらぎ保守のあり方を検討することにある。

2 軌間の保持と軌間拡大事故

軌間とは左右のレールの距離を示す(図1)。レール上を車両が通過すると車輪によってレールの外側に向かって横圧(横方向の力)が作用する。木まくらぎに打ち込まれた犬くぎが横圧に対抗する。よって、木まくらぎに十分な支持力があれば、軌間は保持される。しかし、



図1 軌間の定義

木まくらぎに腐食などにより支持力が確保できない場合は、図2に示すように犬くぎの倒れ込みによりレールが押し出され、軌間拡大が発生する。軌間拡大による車両の脱線は、左右レールの間隔が左右の車輪間隔よりも大きくなり、その結果として片方の車輪がレール間に落下して生じる。

前述のいすみ鉄道の列車脱線事故において鉄道事故調査委員会の資料²⁾によると事故原因は、図3に示すように軌間拡大であった。その発生原因は木まくらぎの腐食と割れとされている。

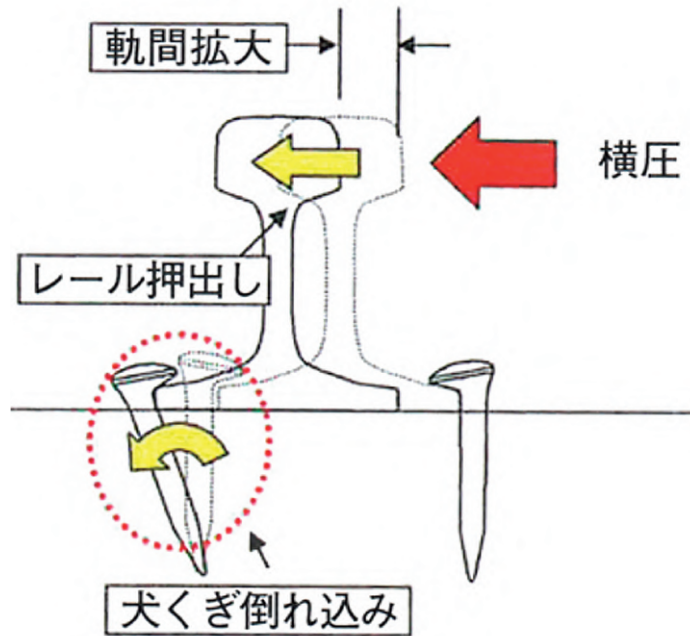


図2 横圧と軌間拡大

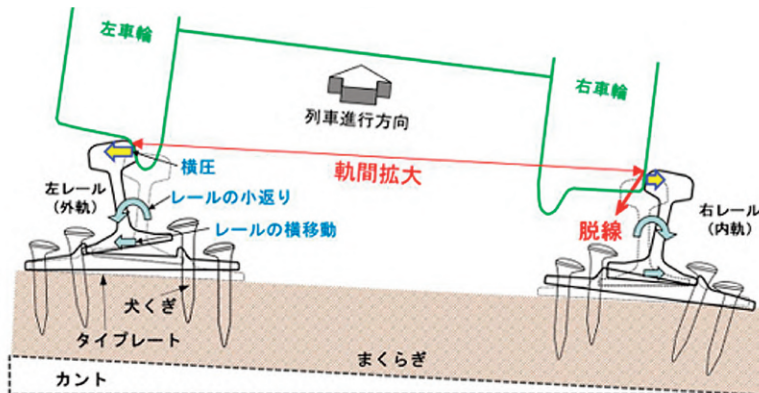


図3 軌間拡大と脱線²⁾

鉄道事故調査委員会が対象とした木まくらぎの軌間拡大による脱線事故において、過去10年間（今年も含め）を表1に示す。このように最近になっても木まくらぎの腐食や割れによる腐朽で発生する重大事故に相当することから鉄道事故調査委員会が取り扱う脱線事故が平均で1年に約1回発生している。

表1 軌間拡大による脱線事故（過去10年間）

| | 発生時期 | 対象 | 発生箇所 | 原因 |
|---|----------|-----------|------|-----------------|
| 1 | 2024年10月 | いすみ鉄道いすみ線 | 千葉県 | 腐食, 割れ |
| 2 | 2019年11月 | 会津鉄道 | 福島県 | 犬くぎの浮き |
| 3 | 2019年4月 | 弘南鉄道 | 青森県 | まくらぎの締結不良 |
| 4 | 2017年5月 | わたらせ渓谷鉄道 | 群馬県 | まくらぎの締結不良 |
| 5 | 2017年2月 | 熊本電気鉄道 | 熊本県 | まくらぎの腐食, 犬くぎの浮き |
| 6 | 2017年1月 | 紀州鉄道 | 和歌山県 | 腐食, 割れ |
| 7 | 2016年10月 | 西濃鉄道 | 岐阜県 | まくらぎの劣化 |

そこで2018年には当時の鉄道事故調査委員会から国土交通省大臣へ木まくらぎの腐朽による軌間拡大で起こった列車脱線事故の対策としてコンクリート製のまくらぎの交換等の軌間拡大防止策を推進するように、意見陳述を行った。

これを受けて国土交通省から、図4に示すようにコンクリート製のまくらぎの交換等の促進を努めるようにとの指導がなされた⁵⁾。



図4 軌間拡大防止対策（国土交通省）⁵⁾

3 木まくらぎに関する既往の研究

(1) 概要

戦後、日本の復興のために鉄道が重要視され、全国の鉄道ネットワークが整ってきた。これに伴い木まくらぎの腐朽による軌間拡大事故の防止する木まくらぎの管理が重要な課題となった。そこで表2に示すように1950年代では国鉄は脱線防止のために木まくらぎの支持力の評価が研究対象となった。一方、木まくらぎが天然の材料であることから木まくらぎの線路での材料管理の難しさより人工材料であるPCまくらぎの導入が検討され、1951年より試作が行われた。

表2 木まくらぎ研究とPCまくらぎ導入

| | 木まくらぎ研究 | | PCまくらぎ導入 |
|--------|--------------------------------|------|---------------|
| 1950年代 | | 1951 | 試作開始（国鉄1号） |
| | 1952 枕木の犬釘保持力研究（信州大学） | | |
| | 1952 ベイマツ・マクラギの犬釘支持力（鉄道技研） | | |
| | 1954 横圧に対する犬釘の支持力（鉄道技研） | | |
| 1960年代 | | 1961 | 試作開始（国鉄2号） |
| | | 1963 | 量産化（国鉄3号）直線 |
| | 1964 木マクラギ耐用寿命数延伸に関する研究（国鉄施設局） | | |
| | 1965 犬くぎ抵抗より木マクラギの劣化度推定（京都大学他） | | |
| 1970年代 | | 1970 | 主要幹線PC化（曲線含め） |
| 1980年代 | | | |
| 1990年代 | | | |
| | 1994 弾性解析による木まくらぎの良・不良判定（JR貨物） | | |

1960年代に入ると木まくらぎの研究成果が発表され、レールを木まくらぎに固定する犬くぎの引張り限度を600kgfとすることが規程化された。また、PCまくらぎの実用化のレベルに達し、曲線のように遠心力で横圧が顕著となる区間を除き、直線区間での採用が規程化された。その意味では当時はPCまくらぎを全区間に使用するレベルに達していなかった。よって線区の重要性に関わらず、木まくらぎの管理は依然として重要なテーマであった。その後、東海道新幹線でロングレールとPCまくらぎが導入され、全区間をPCまくらぎ化するための研究が進むこととなった。この結果、曲線区間でもPCまくらぎの敷設が可能となり、重要な線区から全線PC化が行われた。1970年代に入ると主要線区のまくらぎはPC化された。一方、地方ローカル線や中小私鉄では経営上の理由などでPC化は進まない状況であった。このような背景から木まくらぎの研究は顕著な進展はなく、木まくらぎに関する規定化の動きは見られなくなった。その傾向は1980年代から現在に至るまで変わらないまま推移している。

(2) 国鉄時代の研究成果

前述したように、木まくらぎの研究成果は1950年代と1960年代に限られる。1952年において中村は軌道上にあるまくらぎの犬くぎの支持力を検討している⁶⁾。当時はすでにクレオソートによる防腐処理がまくらぎになされていた。また、木まくらぎは貴重であり犬くぎの支持力が低下すると緩くなった犬くぎの穴に込栓と呼ばれる木片を挿入して犬くぎの支持力を確保する補修方法が採用されていた。この論文ではオルゼン型材料試験機を用いて木まくらぎの腐朽度に対応して込栓の効果をj確認している。また、マツの支持力は1000 kgf、ブナは2200 kg程度であり、込栓を繰り返し使用するとその支持力が半減することで、支持力の限界を約500~1000 kgfとしている⁷⁾。

同年においては懸川⁸⁾は、敷設後5年が経過した木まくらぎを調査した結果、引抜抵抗力は新品時に比べ平均で約40%低下し1200 kgfであり、1σの範囲は1000 kgf~1400 kgfであることを示している。また、敷設後13年の木まくらぎでは、要交換のまくらぎを除いて限度値を600 kgfとすると30%が含まれることを明らかにした。

1954年では懸川は、直線部では横圧を1.5~2t程度では引抜抵抗力は500~1000 kgfを限界としている。また、1964年には国鉄本社施設局から、健全な木まくらぎでも犬くぎの移動量が0.2mm前後で支持力に弾塑性の傾向が見られることが報告されている⁹⁾。さらに1965年には国鉄本社施設局の開催の木まくらぎの延命方法を検討する委員会(委員長 京都大学後藤尚男教授)の報告書¹⁰⁾が完成した。ここでは犬くぎの移動量が0.2mm前後で犬くぎの支持力が600 kgfとなり、弾性限界を600 kgfと見なすことが示唆された。さらに同年(1965年)にはこの委員会の委員長であった後藤らにより、犬くぎ横圧試験器で左右レール外側の2本の犬くぎに対して、500 kgぐらいまでの横圧をかけて、それと弾性変位とより水平ばね定数の平均値を求め、それが300 kg/mm程度以下ならば腐朽の進行したまくらぎ、300-400 kg/mm程度ならば若干注意を要するまくらぎと判断するできるとの見解が示された¹¹⁾。一方、現地軌道における木まくらぎは腐朽と損傷によつて腐朽していくが、それを物理量で表示することは容易でなく、当時開発された横圧試験器を用いた結果を犬くぎの引抜抵抗力とし、これと木まくらぎの敷設経年と関係があるとの仮定に基づいていた。これは当時の技術レベルの限界を示している。

その後、1970年代から1980年代では木まくらぎに関する研究は表2に示すように学術面からは見られないままに経過した。

(3) JR貨物での研究成果

JR貨物ではヤード主体の線路維持し、木まくらぎが殆どである。1986年のJR貨物発足時には日本全国に分散配置されている貨物ヤードの木まくらぎは240万本あった。この大量の木まくらぎの管理が当時の喫緊の課題であった。そこで木まくらぎが不良であっても脱線を未然に防ぐために木まくらぎ連続6本につき鉄まくらぎ1本を敷設することを規定化した。

とはいえ、木まくらぎの良・不良の判定は重要な検査の一つである。その検査方法は①食込み②折れ③割れ④犬くぎ打替え不良⑤表面腐食などの各項目をア) 外観から判定、イ) 犬くぎの頭部をハンマーで叩きその音から支持力の低下をチェック、ウ) まくらぎをハンマーで叩きその音からまくらぎ内部の腐食を判定するものである。このように、木まくらぎの良・不良の判定はこれを行う担当者の経験と勘に負うところが大きい。だが敷設、後 18 年経過した木まくらぎの調査で、その表面は形状を保っていても内部はかなりの空洞が発生していて、30%は判定が困難であることが報告されている¹²⁾。

上浦らは客観的なデータを得るため科学的な手法である弾性解析による木まくらぎの検査を行う方法を検討した¹³⁾。その方法は、小型 FWD (図 5) を用いて動的載荷しその変位を本体と外部センサーで荷重と変位の関係を求める。ここで小型 FWD とはハンディーなタイプとして新たに開発された簡易型の FWD である。この重量は約 17 kg であり、約 5 kN の衝撃荷重によって載荷直下と載荷点から離れた任意の点のたわみ量を測定できるものである。これを用いてまくらぎの中央部に載荷しその変位量を測定する。これらの測定したたわみから、たわみ曲線 (A 曲線とする) を求める。次にまくらぎと道床等を弾性支承による有限のはりモデル (図 6) を仮定し、小型 FWD で測定した載荷荷重において曲げ剛性 (EI) とバネ定数 (K) を与えることでたわみの理論曲線 (B 曲線とする) を算定する。この A 曲線と B 曲線との差を平方して和を取る (残差平方和: RMS とする)。そして曲げ剛性 (EI) とバネ定数 (K) で変えてこの RMS ができるだけ小さくなるような理論曲線を求める (逆解析)。この RMS が最も小さい時の曲げ剛性 (EI) を当該の木まくらぎの曲げ剛性として、この EI を良・不良判定



図 5 小型 FWD による載荷変位測定

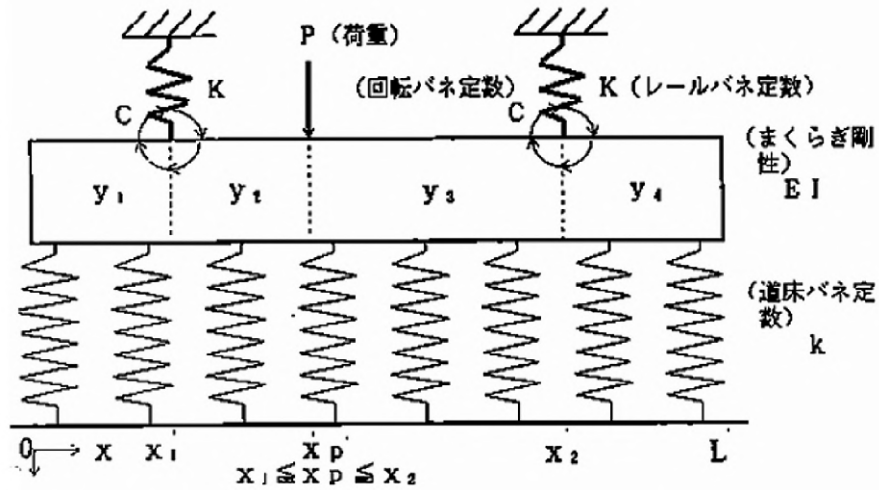


図6 弾性支承による有限のはりモデル

に用いることとした。

図7は健全な木まくらぎを用いた例で、 $RMS=0.05$ 付近に収束した箇所が最も小さく、このときのまくらぎ剛性は約 $2 \times 10^8 \text{ kg/cm}^2$ である。一方、不良な木まくらぎ(図8)では $RMS=0.17$ 付近に収束した箇所が最も小さく、このときのまくらぎ剛性は約 $5 \sim 6 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ である。これらは明らかに有意差があることから、弾性解析による本方法で木まくらぎの良・不良の判定が可能であることを示した。

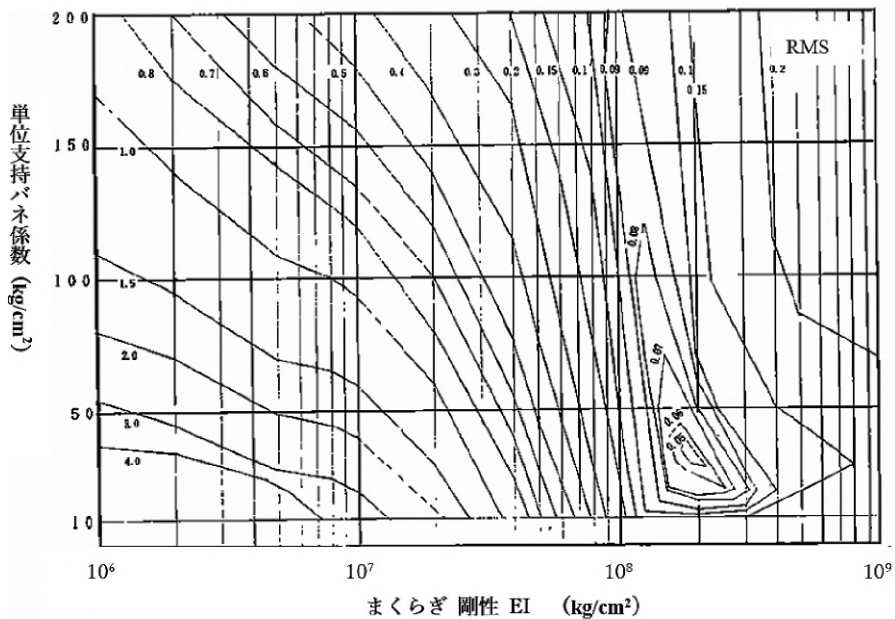


図7 残差平方和 (RMS) のコンター図 (健全な木まくらぎ)

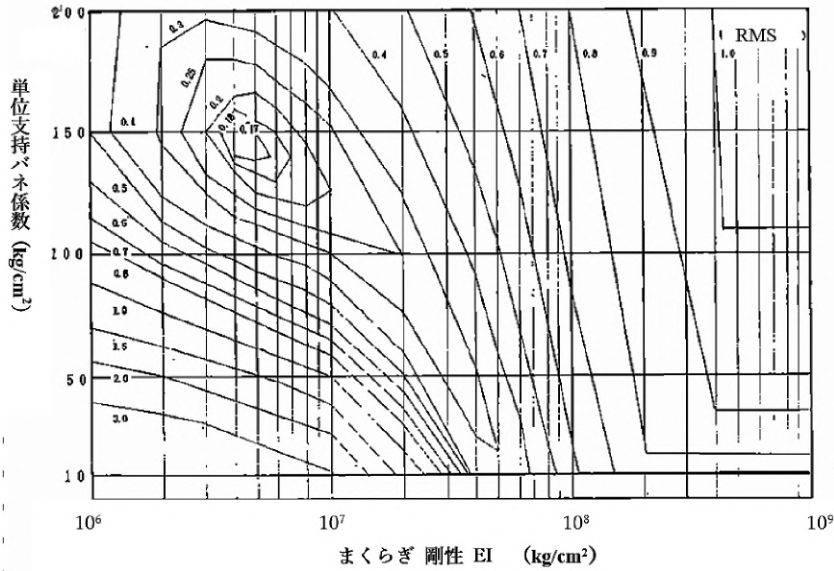


図8 残差平方和 (RMS) のコンター図 (不良な木まくらぎ)

しかし、この手法は、科学的ではあるが、実用上では普及するためのシステム開発が必要であった。

4 防腐材の導入

木まくらぎの腐朽を抑制するに防腐材を用いる。国内における最初の防腐木まくらぎは1874年(明治7年)にクレオソート油を注入したマツの木まくらぎ1000本が英国より輸入されたものである¹⁴⁾。本格的な使用は1902年(明治35年)に英国から輸入された防腐注薬機械による生産からである¹⁵⁾。

1978年にはクレオソート油はJISの分類法の変更によりベンゾピレン類として「クレオソート油・加工タール・タールピッチ」に改正された¹⁶⁾。次に2004年にはクレオソート油に対する安全性への懸念により厚生労働省から「有害物質を含有する家庭用品の規制に関する法律」の改正が行われた。そこで発がん性物質としてベンゾピレン類を規定値(10 ppm)以下に抑制することが定められた。これにより従来のクレオソートから改良型クレオソート油が導入された。これは中油、重油、アントラセン油を再度精密蒸留し、有害なベンゾピレン類を除去した油であった。また、ケンパスでは改良型クレオソート油を2.75 MPa以上の高圧、かつ加圧時間120分以上としていた。一方、VZN-Eは、バーサチック酸に亜鉛を結合させたバーサチック酸亜鉛に、防蟻性能向上を目的にペルメトリンを加え、界面活性剤で乳化させた木材保存剤である。VZN-Eを木まくらぎの防腐材に用いる場合には注入前素材の乾燥度を容積重で管理が重要で、ケンパスでは1,000 kg/m³以下の素材のみ注入処理する必要がある。さら

に、2.75 MPa 以上の高圧でかつ加圧時間 120 分以上としていた。よって防腐材の効果を十分発揮するには目標注入量は 240 kg/m³ 以上、かつ浸潤度は材中央部に薬剤の存在が認められることが要求されていた¹⁷⁾。

最近であるが、2024 年、鉄鋼需要の減少や生産体制の見直しにより主原料であるコールタールの供給量減少が避けられないことから新クレオソート油の生産停止となった¹⁸⁾。

以上から、現段階では 10 年以上敷設されている木まくらぎの主体は新クレオソートを用いたものと推定される。一方、今後は新クレオソートを用いない VZN-E などの防腐材による木まくらぎについて従来の木まくらぎの腐朽と比較する必要がある。

5 木まくらぎ検査の法的な根拠

国が定める線路を維持する基準として「鉄道に関する技術上の基準を定める省令¹⁹⁾」がある。この第一条に「鉄道の輸送の用に供する施設（以下「施設」という。）及び車両の構造及び取扱いについて、必要な技術上の基準を定めることにより、安全な輸送及び安定的な輸送の確保を図り、もって公共の福祉の増進に資することを目的とする」とある。その第三条に「鉄道事業者（新幹線にあっては、営業主体及び建設主体のそれぞれ。以下この条において同じ。）は、この省令の実施に関する基準（以下「実施基準」という。）を定め、これを遵守しなければならない。」とある。そこで鉄道事業者はまくらぎ検査の実施基準として「まくらぎ及びこれに付属する締結装置は、年 1 回以上損傷、腐食、緩み等の保守及び材料状態について、検査しなければならない。」を定めている。

JR 貨物では国鉄から引き継いだ規程に基づき、この実施基準とこれを具体的実施するための細則を表 3 のように定めている。

表 3 木まくらぎ検査方法（線路設備実施基準—JR 貨物）

9. まくらぎ検査

(1) 検査方法

| |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 線路設備実施基準 (まくらぎ検査) 第 108 条 まくらぎ及びこれに付属する締結装置は、年 1 回以上、損傷、腐食、緩み等の保守及び材料状態について、検査しなければならない。 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

| 線路設備実施細則 第 111 条 (1) まくらぎ検査 | | | | | | | |
|----------------------------------------------|------------------------------------------|----------|-----------|---------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------|
| 項目 | 対象 | 検査 周期 | 検査 採取数 | 検査方法 | 取りまとめ | | |
| | | | | | 検査内容 | 判定基準 | 方法 |
| 材料損傷の状態 | ・本線 ・停車場内の 本線 ・側線 (重要な側線を含む) | 1回/年 | 全数 | 巡回時目視及び目測による。 | ・損傷 ・腐食 ・食い込み ・その他 | 有害な欠陥が認められるもの又は保守上困難なもの | 不良数、連続不良箇所を集計する |

また、その判定基準を実施するための国鉄の規程に基づき、不良まくらぎを判定する手引き

として次のように定めている。

表4 木まくらぎ検査の手引き (JR 貨物)

(2) 判定基準

【手引き】

1. 並まくらぎ、橋まくらぎ及び短まくらぎ
判定ランクは次の通りとする。

| 判定ランク | 定義 |
|-------|----------------------|
| I | 変状があっても軽微で機能に関わらないもの |
| III | 機能に関わる変状があるもの |
| IV | 著しく機能を喪失しているもの |

まくらぎの機能とは以下をいう。

(1) 軌間保持機能
(2) 荷重分散機能

まくらぎが下記(1)～(7)のいずれかの状態に達したものと、また近い将来、達する恐れのあるものは機能に関わる変状があるものとし、判定Ⅲとする。

(1) 数回犬くぎ類を打替え又は場所を変えても、なお犬くぎの引抜抵抗力が 600kg 未満のもの。

(2) 腐食による断面の減少が 1/3 以上のもの。

(3) 食込み削正量が 20mm 以上のもの。

(4) 割れのため、犬くぎ支持力を得られないもの及び割れが全長にわたって割止めを施しても効力のないもの。

(5) 折れたもの及びそのおそれのあるもの。

(6) その他、ねじれ、わん曲の著しいもの及びそり等が生じ保守上困難なもの。

(7) 前各号に掲げるもののほか、有害な欠陥が認められるもの又は保守上困難なもの。

6 本研究の成果

(1) 本研究の背景

木まくらぎでは、4章で述べたように耐久性を高めるために防腐材を外側から浸透させている。

図9は本研究においてき裂が入って使用に問題があるまくらぎを切断した例である。このように防腐材が表面から浸透しているものの中央部には生材のまま防腐材がないことが確認できる。よって、き裂が生材に到達すると雨水が入り生材の腐食が起り中央部で空洞化が生じていることが推定できる。これは、木まくらぎの製造で要求されている「木まくらぎの防腐材が材中央部まで浸透していること」の条件が満たしていないことが一つの原因である。このような状態で犬くぎの支持力が十分であるかは不確定ある。よって、敷設されているままの木まくらぎを切断することなく腐朽の状態と犬くぎの支持力で確認する方法を検討することとした。

以上により次の項目で研究を行った。

①ピロディンを用いた木まくらぎの腐朽範囲の推定



図9 木まくらぎの切断断面の例

- ②鉄部（レール，犬くぎ）に接する木まくらぎの腐朽程度の推定
- ③現場用犬くぎ引張り試験器を用いた木まくらぎの腐朽判定

(2) ピロディンを用いた木まくらぎの腐朽評価範囲の推定²⁰⁾

(ア) ピロディンの概要

本研究では貫入抵抗試験のうち、一般の木製電柱の腐朽調査や木柱の土留め柵などの木造施設における腐朽の評価に幅広く利用されているピロディン（図10）を用いて、木まくらぎの腐朽を評価する方法を検討することとした。ピロディンは、コンクリートのシュミットハンマーと同じ原理で一定の衝撃力によって荷重し変位を求める装置である。その構造は、バネが内蔵された筒状の本体と直径2.5mmで長さ40mmのピンからなる。このピンの針入量をピロディン値とする。ピロディン値は本体側面の目盛りで表示され、その最大値は40mmである。従って荷重によりピンが表面の層を打ち抜いて空洞に達した場合でも針入量の値はピークカットされて40mmとなる。



図10 ピロディンの概要

(イ) 試験方法

今回のピロディンの試験では敷設されていた木まくらぎの中で外見から健全と判断したものを2本、不良と判断されたものを4本の合計6本を使用した。図11に示すように、それぞれのまくらぎで端から65 cm程度を切り出し、6本のまくらぎにより全体で左右の12個の供試体とした。また、荷重位置は図11の左右方向5か所(1, 2, …, 5)、横断方向5個(①, ②, …⑤)とした。健全な木まくらぎでピロディンの試験を行った後にまくらぎを切断し、ピロディンの針入跡を確認した結果を図12に示す。



図11 ピロディンによる測定位置

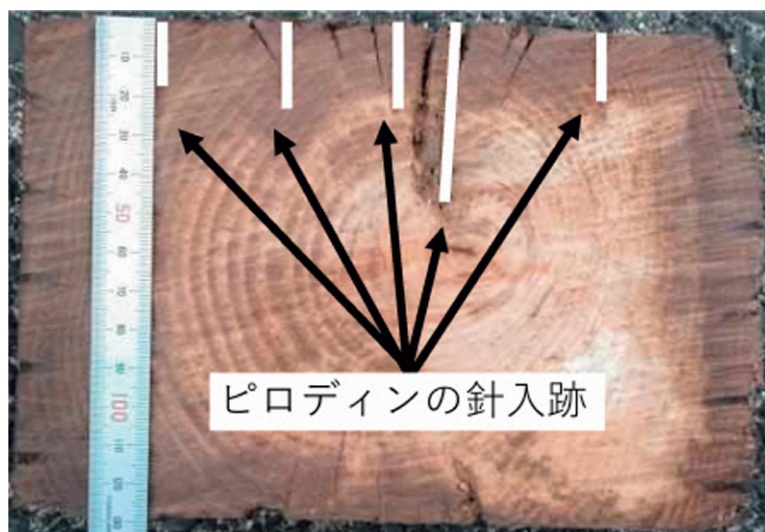


図12 ピロディンの針入跡の例

この位置でピロディンによる5回の連続荷重からピロディン値を求めた(データ数300個)。次に各横断方向で荷重位置に沿ってまくらぎを切断し、断面の形状からこれらのデータを腐朽状態のレベル(「健全」, 「不良 A」, 「不良 B」)の3区分に分類した。この結果は健全:100個, 不良 A:145個, 不良 B:55個であった。

(ウ) 試験結果と評価

分類された「健全」、「不良B」の各腐朽状態のレベルに対し、ピロディン値の度数分布を求めた。ここでは各レベルの違いをより明確にするために各度数をその測定数全体で除したものを度数比とした。ここで空洞があるとピロディン値が40 mm となり、これ以上に値はピークカットされる。そこで全体の平均値を用いず、ピロディン値の小さい順から求めた中央値を使用することとした。これによりピロディン値が40 mm 以上の分布の影響を受けずに評価が可能となった。

図13は空洞を打ち抜くピロディン値40 mm 以上はなく、中央値は24であったので「健全」に分類できる。一方図14では表面の外観から内部の空洞化は判明しなかったが、ピロディン値の分布から40 mm 以上の値が度数比で62%であり、中央値は40であった。このことから空洞を打ち抜く箇所が過半数を占めることから「不良」に分類できる。実際にこの供試体を切断したところでは図15のように空洞が存在していた。

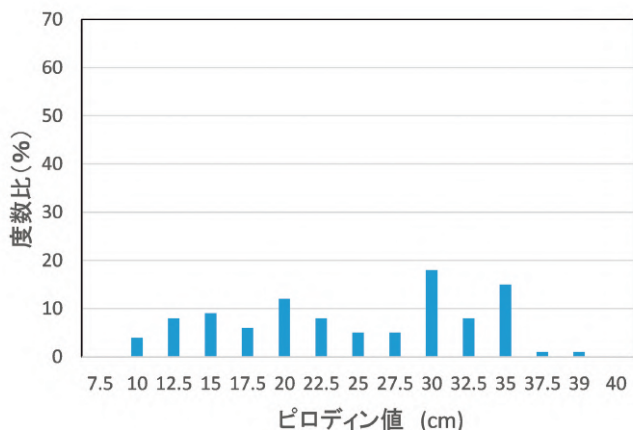


図13 ピロディン値の分布 (健全)

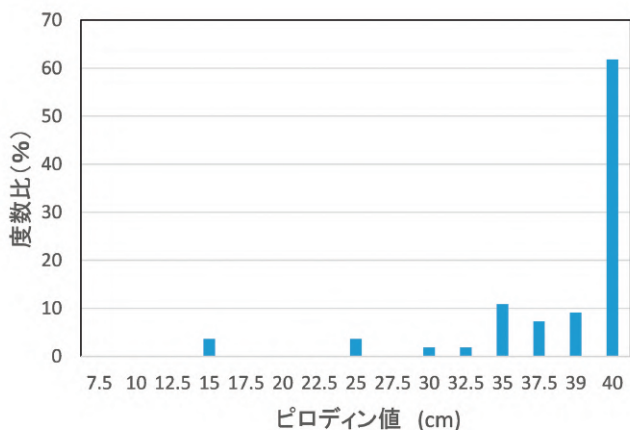


図14 ピロディン値の分布 (不良)



図15 木まくらぎ内の空洞（不良）

以上から、ピロディンを用いて木まくらぎの内部の腐朽の範囲を推定する試験方法を確立できた。

(3) 鉄部（レール，犬くぎ）に接する木まくらぎの腐朽程度の推定²¹⁾

(ア) 木まくらぎの鉄部（レール，犬くぎ）に接する部分の腐朽状態

本研究では木まくらぎの腐食の原因を探るために、レールに接する木まくらぎの表面に着目した。

それは、木まくらぎ交換によって発生する腐朽した木まくらぎではレール底部に接する部分に軌道変位（高低変位）へ影響を与える凹状の変形（食い込み）と黒色の変色が多く見られることに気が付いたことによる（図16）。加えて軌間変位へ影響を与える左右方向に犬くぎ穴が拡大し同様の変色が観察された。そこで、木材のスポットサンプリングをする目的で使用される表面に錐状のロッドを針入させて回転しながら回転抵抗を測定する装置（レジストグラフ：図17）試験及び木まくら

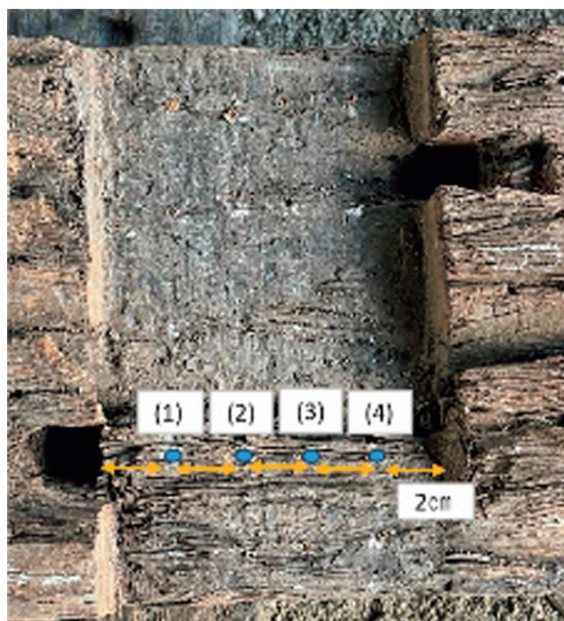


図16 凹状の変形（食い込み）と黒色の変色

らぎを切断しその断面の表面硬さを推定する装置（デュロメータ：図18）を用いることとした。これらの機器を用いて木まくらぎの腐朽の程度を数値化し腐朽の発生状態を推定した。

また、まくらぎ片の空洞した部分の近くの箇所に対して木工ドリルで穴をあけて切子を確認した（図19）。これから黒色化している箇所は腐朽が内部で進行していることが明らかになった²²⁾。



図17 レジストグラフ



図18 デュロメータ

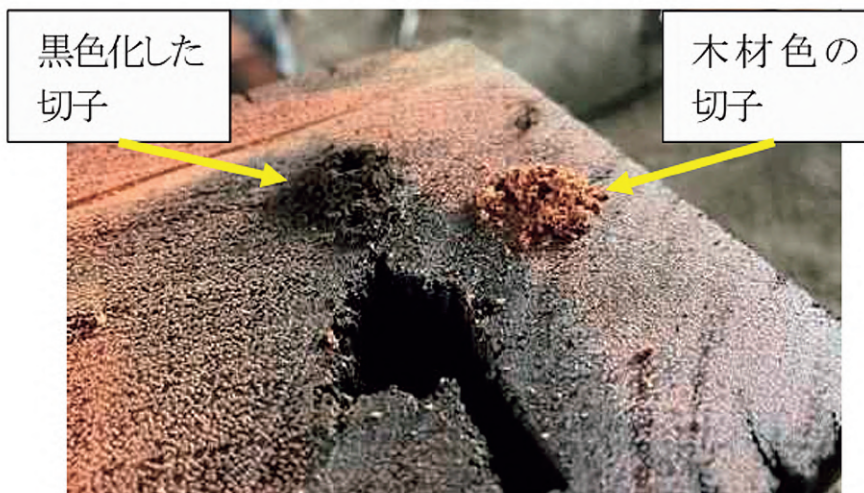


図19 木工ドリルによる空洞の確認

(イ) レジストグラフによる試験

図 16 においてレール底部食い込み跡に犬くぎ穴の中心からまくらぎ長手方向に 2 cm ピッチで犬くぎに近い側から (1)～(4) とした。この各点にレジストグラフを設置し深さ方向にトルク測定した。木まくらぎが健全な状態のトルク比を 2.5 とし測定したトルクの数値に対する比を求め、この結果を図 20 に深さ方向でのトルク比で示す。これから深さ 4 cm までは (1)～(4) ともトルク比が 0.7 以下で小さい傾向にあった。これはレール底部から浅い位置は腐朽が進んでいるものと推測される。一方、深さ 4 cm 以深では犬くぎに近い (1)、(2) では深さ方向の 10 cm 程度までトルク比が小さい傾向が見られた。一方犬くぎから最も遠い (4) のトルク比では他よりも大きい傾向が見られた。これは犬くぎ穴から浸入した雨水によって犬くぎに近くの方がより腐朽が進んだものと考えられる。

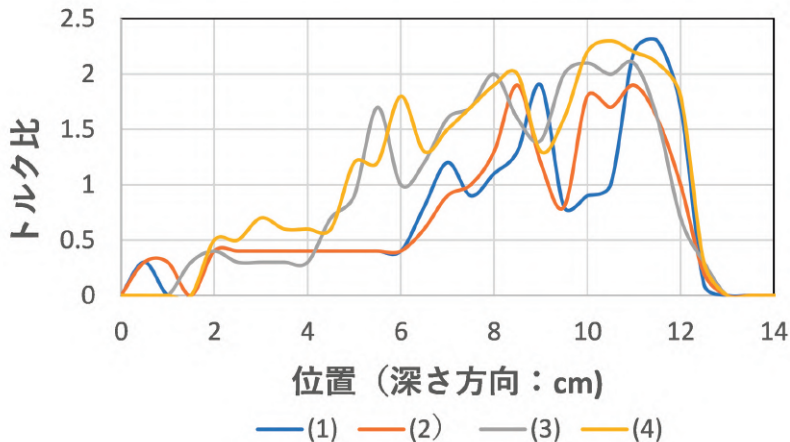


図 20 深さ方向でのトルク比の比較

(ウ) デュロメータによる試験

図 21 は犬くぎ穴の中央部分を通り、図 16 の (1)～(4) を通過して長手方向に対して鉛直に切断した断面を切り出し、2 cm 間隔のメッシュと重ねたものである。犬くぎ穴の深さ 6 cm 付近から 12 cm まで犬くぎの鉄粉が付着していた (④-D～A)。メッシュの区分のため水平方向を ①～⑬ とし、深さ方向をまくらぎ底部から A～F としてしている。また、この図に図 16 のレジストグラフの位置 ((1)～(4)) も加えている。ここで F 上部の ⑤～⑪ の一部が約 2 cm レール底部の食い込みにより沈下し、健全なまくらぎ厚さ 14 cm と比べ 12 cm 程となっている。

デュロメータ (最大荷重 44 N) を用いて図 21 のメッシュごとにより表面の相対的硬さ (単位なし) を求めた (表 5)。この表では図 21 と同じく水平方向を ①～⑬ とし、深さ方向を F～A としてしている。ここでレジストグラフの位置は ⑥～⑩ に相当し、犬くぎは ④ の F～A に対応している。また、表 5 では色を付けたセルはデータ全体の分布のうち 25% 以下であることを示している。以上により、この表と図 21 から犬くぎ上部 ④ の (F～D) は硬さが 0 で腐朽し

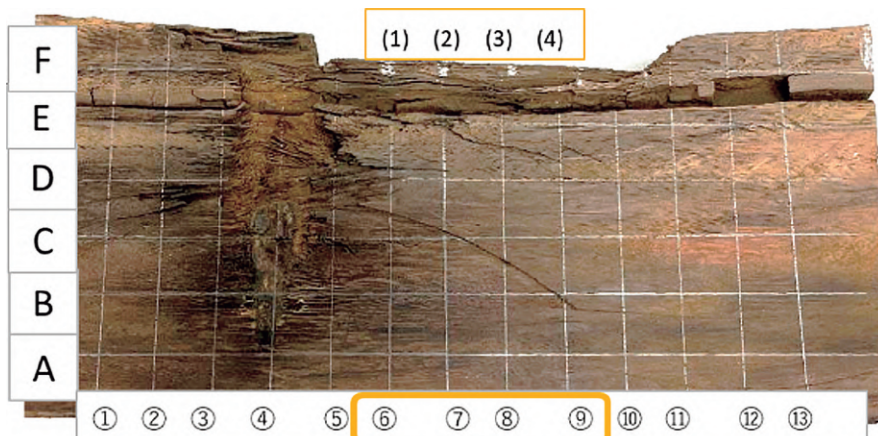


図 21 長手方向の断面（犬くぎ跡中央）

表 5 断面の相対的硬さ（単位なし）

| | ① | ② | ③ | ④ | ⑤ | ⑥ | ⑦ | ⑧ | ⑨ | ⑩ | ⑪ | ⑫ | ⑬ |
|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| F | 50 | 38 | 12 | 0 | 0 | 12 | 28 | 46 | 49 | 15 | 39 | 43 | 40 |
| E | 52 | 41 | 16 | 0 | 21 | 15 | 21 | 43 | 52 | 48 | 62 | 55 | 67 |
| D | 64 | 44 | 37 | 0 | 25 | 35 | 53 | 52 | 50 | 60 | 61 | 56 | 50 |
| C | 51 | 45 | 46 | 52 | 24 | 30 | 32 | 48 | 53 | 56 | 66 | 60 | 62 |
| B | 54 | 63 | 38 | 79 | 58 | 57 | 56 | 59 | 61 | 64 | 60 | 69 | 71 |
| A | 53 | 62 | 52 | 72 | 56 | 48 | 50 | 50 | 63 | 62 | 57 | 65 | 50 |

ているが、下部の④の（C～A）では鉄粉の影響で一定程度の硬さはあることが分かる。またレジストグラフの測定位置(1)，(2)に対応する⑤～⑦の各列では表層に近いほど硬さが小さい傾向であり、C列（深さ8cm）まで全体の25%以下であった。

以上から、色のついた部分は腐朽の程度が進んでいることが分かる。これはレジストグラフの試験結果と同様の傾向で、犬くぎ穴から浸入した雨水によって犬くぎに近い方で腐朽がより進んだものと考えられる。

（エ）文献による考察

文献 23) によるとレール底部と木まくらぎの間に雨水などが浸透し、木材の保水効果によってレール底部に水が供給されレールの主成分である鉄がイオン化して木の腐食が助長されるとあった。この知見から沈下の原因は鉄錆が木材の腐朽を進行させ、輪重等により圧縮破壊が木まくらぎ表面層から発生し厚さが減じたものと推測される。

(4) 簡易引抜抵抗力測定装置を用いた木まくらぎの腐朽判定²⁴⁾

(ア) 簡易引抜抵抗力測定装置の開発

木まくらぎは各犬くぎによってレールを支持する機能を有する。よって全数を対象にした材料検査が必要である。その検査内容は損傷、腐食、食い込みなどである。損傷や食い込みは目視により外観から検査が可能であるが、腐食は木まくらぎの材質の腐朽の程度を外観からは判断が難しい。そのため腐朽の判定を誤ると、レールを支持する機能が不十分となり脱線に至るケースとなる。そこで線路検査の手引き（表4）では外観の判定に加え、客観的なデータとして断面の減少量、食い込み削正量で判定するための数値が示されている。さらに、数値によるものとして犬くぎの引抜抵抗力で600 kgf（6 kN とする）未満が判定基準となっている。この減少量や食い込み削正量はメジャーで測定可能であるが、犬くぎの引抜抵抗力を測定する機器は現時点では見当たらず、独自に開発する必要がある。

過去の研究事例を調査したところ、実験例が少なく、かつ、大掛かりな器材を使用した実験であった。そのため、現場での試験設置・撤去が容易で持ち運びでき、引抜抵抗値と引抜量を測定可能な試験装置として簡易引抜抵抗測定装置を開発した（図22）。これは既存の杭の引抜抵抗値を測定する装置の先端に、犬くぎ引抜用の天の字を装着するための治具を開発・装着したものである。この装置では100 kN までの引抜抵抗値の測定まで対応しており、犬くぎの引抜抵抗の測定も問題なく可能となっている。



図22 簡易引抜抵抗測定装置

(イ) 現場試験

東京貨物ターミナル留置線（15番線）において外観から良と不良と判定したものに対して左右レールそれぞれの犬くぎで3回程度繰り返し試験を行い、犬くぎの引抜抵抗力を測定した。また試験をした5本のまくらぎにおいて最大引抜抵抗値とそのときの変位（最大変位）を求めた（表6）。

この表において各犬くぎの引抜抵抗力で600 kgf（6 kN とする）以上を「健全」とし、600 kgf（6 kN）未満を「支持力不足」に分類する。最大引抜抵抗値と最大変位も関係で図23は「健全」で図24は「支持力不足」を示す。ここで「健全」では、最大引抜抵抗値が一定値（10 kN 程度）以上になると、最大変位は概ね2.5 mm 程度に集中している傾向がある。また、「支持不足の場合は、最大引抜抵抗値に比例して最大変位が大きくなっていく傾向にある。

表6 最大引抜抵抗値と最大変位

| | 右外 | | 右内 | | 左内 | | 左外 | |
|---|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|
| | 変位 mm | 引張力 kN | 変位 mm | 引張力 kN | 変位 mm | 引張力 kN | 変位 mm | 引張力 kN |
| A | 2.2 | 18.2 | 2.5 | 12.7 | 0.5 | 9.6 | 2.4 | 17.9 |
| B | 2.3 | 60.0 | 4.0 | 10.2 | 2.7 | 3.9 | 3.0 | 6.4 |
| C | 3.8 | 4.9 | 1.5 | 6.0 | 1.6 | 7.1 | 2.8 | 3.5 |
| D | 3.7 | 8.4 | 3.4 | 6.7 | 1.7 | 2.0 | 4.1 | 4.7 |
| E | 2.8 | 23.4 | 3.5 | 27.4 | 2.2 | 22.6 | 2.4 | 13.8 |

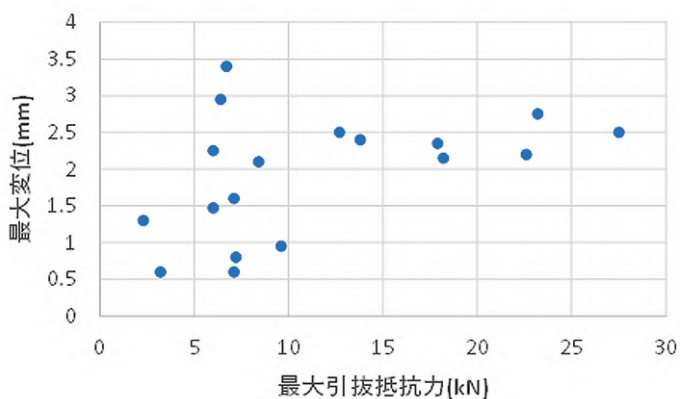


図23 最大引抜抵抗力と最大変位（健全）

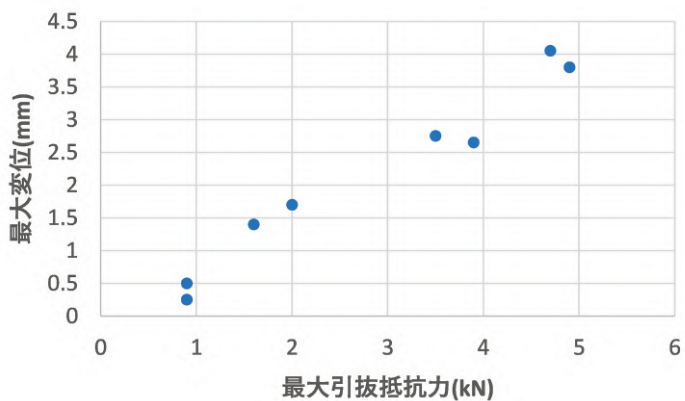


図24 最大引抜抵抗力と最大変位（支持力不足）

次に、木まくらぎ1本につき4か所の犬くぎでレールが締結されているが、最大引抜抵抗値で1か所でも犬くぎが不良と判定された場合に当該の木まくらぎを不良と判定することとした。

表7においてAからEまでの5本の木まくらぎに対して判定した結果（犬くぎ抵抗値によ

る判定) と JR 貨物の線路設備実施細則のまくらぎ検査に基づく判定基準により結果を示す。

表7 判定方法の比較

| | JR 貨物の判定基準 | 犬くぎ引抜抵抗力による判定 |
|---|------------|---------------|
| A | 良 | 良 |
| B | Ⅲ | 不良 |
| C | I | 不良 |
| D | Ⅳ | 不良 |
| E | I | 良 |

ここで B, C, D は不良まくらぎと判定した。一方, JR 貨物の判定基準によると A のまくらぎは目視できる範囲では変状が無く, 機能上も全く問題ない状態であることから, 判定は「良」としている。C, E については, 犬くぎ周辺に水分が残り, 木まくらぎ表面が黒く変色しているものの, 犬くぎに触れた際に犬くぎが動くことは無く, 軌間保持の機能上は問題ないものとして「I」と判定している。B のまくらぎはまくらぎ全体に亘ってひび割れが発生しており, 木まくらぎ内部に水分の滞水が疑われる状態である。また, 犬くぎ周辺においても, 締結力の不足が疑われることから, 軌間保持機能についても不足していると判断し, 「Ⅲ」の判定としている。「Ⅳ」判定の D まくらぎについては, まくらぎ内部が腐食により空洞化し, まくらぎ上面から内部の空洞が目視で確認できる状態であることから, 荷重分散機能が喪失していることが明らかである。また, 犬くぎ周辺にも空洞が広がっており, 犬くぎに触れると犬くぎが簡単に動いてしまう状態であり, 軌間保持できる締結力を有していないことがわかる。

以上から, 線路設備実施細則のまくらぎ検査に基づく判定基準(表4)では良(健全)と判定されたものと軌間保持機能についても不足していると判断されるものである「Ⅲ」, 「Ⅳ」(不良)と簡易引抜抵抗力測定装置での判定と同じ結果がでた。一方, 表4の判定基準では軌間保持の機能上は問題ないものとして「I」と判断される2本では, 簡易引抜抵抗力測定装置では(良)と(不良)とそれぞれ1本に分類された。よって表4の判定基準の目視の方法よりも簡易引抜抵抗力測定装置による機器による方法がより厳密に判定できることが明らかになった。

なお, 線路設備実施細則のまくらぎ検査に基づく判定基準では軌間保持の機能上は問題ないものとして「I」と判断される木まくらぎについて, 雨上がりに犬くぎ周辺を観察した例を図25に示す。この例では犬くぎ穴から線路直角方向に木まくらぎ表面が乾いていない湿潤状態が顕著に見られた。この現象は犬くぎ周辺で腐朽と推定される木まくらぎ内部に雨水を貯める空隙がある可能性を示している。



図 25 犬くぎ周辺の湿潤状態

7 ま と め

本研究では次のことを明らかにした。

- 1) 全国の中小鉄道や地方ローカル線では未だに木まくらぎが主体であり，木まくらぎの腐朽で起こる全国の軌間拡大脱線事故のうち最近の10年で平均1件あった。
- 2) 軌間拡大脱線事故は木まくらぎの腐朽によってレールを締結している犬くぎの支持力が不足することであるが，この研究は今から60年から70年前の1950年代と1960年代で主に行われていた。その方法は，当時開発された横圧試験器を用いた結果を犬くぎの引抜抵抗力とし，これと木まくらぎの敷設経年と関係があるとの仮定に基づいていた。
- 3) 木まくらぎの腐朽を抑制するために防腐材の使用経緯を示し，防腐材の効果を十分発揮するには材中央部に薬剤の存在が認められることが要求されていることを示した。しかし木まくらぎを切断しない限り材中央部の薬剤の状態を確認することができないため，サンプリング調査で，防腐材の効果でその表面は形状を保っているが，内部はかなりの空洞が発生していて防腐材が中央部まで達していない事例あることを示した。
- 4) 本研究では，近年の技術を用いて木まくらぎを切断することなく腐朽範囲の推定方法及び現場での犬くぎ引張り試験を開発した。
- 5) その方法のうちピロディンやレジストグラフを用いて木まくらぎの内部の腐朽の範囲を推定する試験方法を確立できた。
- 6) レールや犬くぎの鉄錆によってレールや犬くぎに接する木まくらぎの範囲で腐朽を進行することを，レジストグラフによる試験とデュロメータによる試験で明らかにした。
- 7) 現場での犬くぎ引張り試験では，簡易引抜抵抗力測定装置を開発した。これを用いて木まくらぎの検査方法を確立した。

- 8) 以上により、本研究の方法による方法が従来が目視の方法よりも厳密に判定できることが明らかにした。

8 参考文献

- 1) 菅建彦：英雄時代の鉄道技師たち，山海堂，1987，pp.19-20
- 2) 新版軌道材料編集委員会編：新版軌道材料，鉄道現業社，pp.245-247，2011
- 3) 運輸安全委員会（鉄道部会）：運輸安全委員会報告書，2025.9 <https://jtsb.mlit.go.jp/railway/pdf/RA2025-5-1-p.pdf>
- 4) 佐伯義将，蒔田章：鉄道用枕木に使用される薬剤と加圧注入処理，木材保存 Vol.37-4，pp.169-171，2011
- 5) 国土交通省：軌間拡大防止に関する指導，2018.8.21
- 6) 中村忠雄：まくらぎの犬くぎ支持力減衰について：日本森林学会誌，pp.211-216，1952
- 7) 懸川栄男：ベイマツ・，まくらぎの犬くぎ支持力，鉄道技術研究所資料 27-10，pp.481-488，1952
- 8) 懸川栄男：横圧に対する犬くぎの支持力，鉄道技術研究所資料中間報告 5-114，1954
- 9) 日本国有鉄道本社施設局：軌道狂いに関する研究（第2部），1965
- 10) 日本国有鉄道：木まくらぎの延命方法を検討する委員会報告書，1965
- 11) 後藤尚男，渡部拓郎，星仰，石田昌弘：犬くぎ抵抗より木まくらぎの腐朽推定，鉄道線路 65-8，pp.9-14，1965
- 12) 上浦正樹：JR 貨物のまくらぎに対する取り組み，日本鉄道施設協会誌，pp.18-21，1990-2
- 13) 上浦正樹，高橋顕：弾性解析による木まくらぎの良・不良判定法，日本施設協会誌，pp.37-40，1994
- 14) 本田博光：まくらぎ事始め，保線の歴史(2)，新線路 vol.24，p.15，2020
- 15) 水屋清治：「保線百年のあゆみ(6)―まくらぎの変遷―」新線路。vol.26(6)，pp.20-24，2012
- 16) 蒔田章：JIS A 9104「加圧式保存処理木まくらぎ保存処理の仕様」の改正について，2019
- 17) 佐伯義将，蒔田章：鉄道用枕木に使用される薬剤と加圧注入処理，木材保存 Vol.37-4，pp.171-178，2011
- 18) 荒井浩：全国枕木協会について，木材保存 Vol.50-6，pp.225-229，2024
- 19) 国土交通省鉄道局 監修：注解鉄道六法〔令和6年版〕，第一法規，2024
- 20) 吾郷太寿，村松穂高，上浦正樹：ピロディンを用いた木まくらぎの腐朽評価に対する検討，第78回土木学会学術講演会，2023
- 21) 石田淳悟，上浦正樹，大林宏也，木村礼夫：レールに接する木まくらぎの腐朽に関する一考察，第79回土木学会学術講演会，2024
- 22) 石田淳悟，吾郷太寿：レールに接する木まくらぎの腐朽に関する一考察，日本鉄道施設協会誌，pp.561-564，2024
- 23) Eduard FARBER: Chemical Deterioration of Wood in the Presence of Iron, INDUSTRIAL AND ENGINEERING CHEMISTRY Vol. 46, No. 9, pp.1968-1972, 1954
- 24) 古澤篤，上浦正樹：現場用犬くぎ引張り試験器を用いた木まくらぎの腐朽判定，第80回土木学会学術講演会，2025