

破断前漏洩概念を適用した車軸・台車枠のき裂常時監視手法

山本 勝太* 宮地 徳蔵** 八木 毅*

Evaluation of Real-time Crack Monitoring Method for Railway Axle and Bogie Frame

Masataka YAMAMOTO Tokuzo MIYACHI Tsuyoshi YAGI

The concept of leak-before-break (LBB) is often used in safety cases for pressure systems. If the hollow axles or bogie frames of railway vehicles are designed as pressurized components and a through-wall crack occurs, compressed gas in the components could leak through the crack. The LBB argument is validated by demonstrating a detectable leak of gas through a through-wall crack in hollow axles or bogie frames before their failure. Then, assuming that the LBB argument is validated and the LBB concept is applicable, cracks should be detected by real-time monitoring of the pressure inside sealed hollow sections of axles or bogie frames. In this study, the application of the LBB concept for guaranteeing the safety of railway hollow axles or bogie frames and the safety margin of this method were evaluated. The experimental results indicated that this monitoring method can detect cracks of size much less than the size that causes fractures of hollow axles or bogie frames. Consequently, the proposed crack monitoring method based on the concept of LBB is applicable to railway hollow axles and bogie frames.

キーワード：車軸，台車枠，き裂，破断前漏洩

1. はじめに

車軸や台車枠の損傷は脱線等の重大な事故に結びつく。車軸や台車枠の安全性は無限寿命概念に基づいた設計および定期検査によって保たれており、これらの損傷に起因する重大事故は近年では発生していない。

定期検査の間隔は、供用中にき裂等が発生しても次の検査までは安全性や重要な性能が確保できるという概念に基づき決められる。しかし、設計や形状の不良、想定外の材料欠陥等の存在下では、致命的な損傷に至るリスクが潜在する^{1) 2) 3)}。従来の定期検査に加えて、供用中の車軸や台車枠に発生したき裂を常時監視し、車軸や台車枠の折損に至る前に検知できれば、重大事故に至るリスクを低減できる。そこで、破断前漏洩 (Leak Before Break; LBB) 概念⁴⁾の車軸・台車枠常時監視手法への適用性について評価を行った。

2. き裂常時監視手法の概要

2.1 破断前漏洩 (LBB) 概念⁴⁾

LBB 概念は原子力機器等で研究が進められた構造健全性評価手法である。原子炉配管にき裂が発生した場合、破断面からの内部流体の十分な漏洩を示した後に、配管の急進破断に移行するという概念を破断前漏洩と呼んでいる。内部に流体が封入された配管に、き裂が発生し、

進展する様子を図1に模式的に示す。通常のLBBでは配管内周から発生するき裂を対象とするが、本研究は車軸や台車枠への適用性を検討するものであるため、管外周からのき裂を例として示す。発生した初期き裂(i)は、管の外周から内周に向かって進展するが、(ii)の段階では内周に達していない。このようなき裂を「未貫通き裂」と呼ぶ。き裂がさらに進展し、(iii)のようにき裂先端が管内周に到達すると、内部流体の漏洩が始まる。さらに進展すると、(iv)のようにき裂は内周上でも大きく進展し、内圧が降下する。このようにき裂が肉厚を貫通した状態を「貫通き裂」と呼ぶ。一方で、き裂進展に伴って、部材の耐荷能力は低下し、ある段階で不安定破壊が生じる。不安定破壊が(iv)に至る前に発生すればLBBは成立せず、(iv)以降に発生すればLBBは成立する。

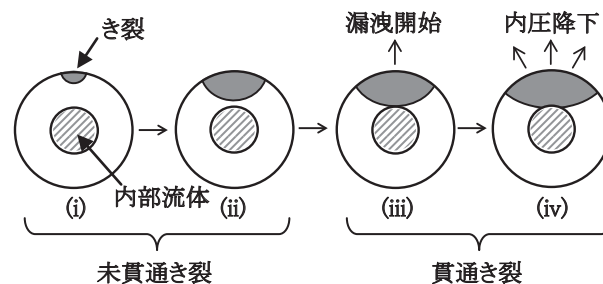


図1 き裂進展に伴う内部流体漏洩過程の模式図

2.2 LBBを適用した車軸・台車枠き裂監視手法の特徴

本研究では、中空加工された車軸や台車枠の閉空間にあらかじめ圧縮空気を封入し、その圧力変化をセンサに

* 車両構造技術研究部 車両強度研究室

** 環境工学研究部 熱・空気流動研究室

特集：車両技術

より常時監視することでき裂を検知する手法について検討を行った。圧力センサを用いるメリットは、①センサが安価で小型化・無線化が容易、②走行中も含めて常時監視できる、③1つのセンサで閉空間全体を監視できる、④従来の非破壊検査に支障を来さない、などが挙げられる。一方、⑤中空部や閉空間のみにしか適用できない、⑥内周に達する大きなき裂しか検知できない、などのデメリットがある。

車軸や台車枠の折損は脱線等の重大事故につながるため、発生したき裂等を定期検査で見つけることが重要である。定期検査の概念を図2に示す。いま、定期検査によって大きさ a_1 以上のき裂が検知される場合を考える。このとき、図中●で示された大きさのき裂は定期検査で検知することはできないが、このき裂は次回検査時には○で示された大きさに進展し、次回検査時に検知されるため、折損に至ることはない。また、き裂の検知精度が向上し、 a_2 以上のき裂を見つけることができれば、●の大きさのき裂が検知されるため、検査間隔の延伸や折損に至るまでの余裕度の増加につながる。そのため、磁粉探傷や超音波探傷などに代表される従来の非破壊検査では、き裂検知精度を高める検討がなされてきた⁵⁾。一方で、本研究で検討した手法はき裂を常時監視、つまり検査間隔 Δt をゼロに近づけることを意味する。本手法は現在の定期検査の代替となるものではないが、不安定破壊が生じないようなき裂を確実に見つけることで、車軸や台車枠の折損を防ぐための手段として活用できる。

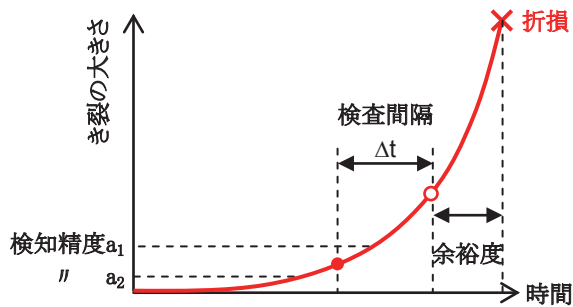


図2 定期検査の概念図

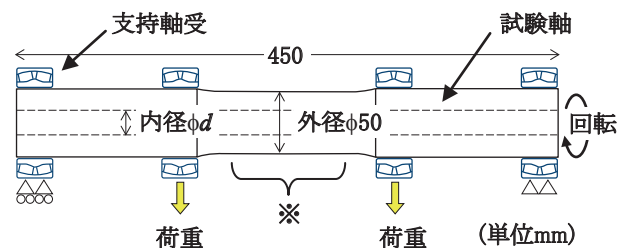
3. 車軸への適用性の評価

3.1 小型試験軸を用いた評価

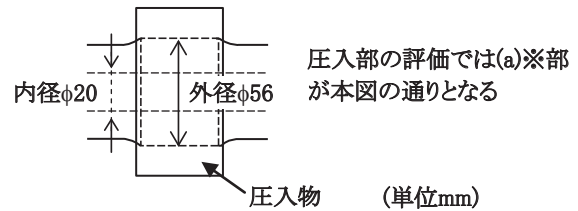
LBB 概念に基づいたき裂検知の可能性、不安定破壊に至るき裂の大きさ、圧入部への適用性などを評価するために、小型試験軸の疲労試験を実施した。

3.1.1 試験方法

疲労試験方法の模式図を図3に示す。本装置では、直径が実物車軸の1/3程度の試験軸に対して、4点曲げ回転疲労試験を実施できる。本研究では、表1に示す3種類の中空試験軸について疲労試験を実施した。試験軸は



(a) 平滑部を対象とした場合の模式図



(b) 圧入部の場合

図3 疲労試験に用いた実験系の模式図

表1 試験軸の外径および中空径

	No.1	No.2	No.3
外径, D	50mm	50mm	56mm
内径, d	15mm	25mm	20mm
内径比, d/D	0.3	0.5	0.35
き裂位置	平滑部		圧入部
き裂進展時の試験応力	150MPa		108MPa

在来線車軸で主に使用される SFA65 製とした。

No.1 および No.2 試験軸は平滑部に発生するき裂を対象とした試験軸で、外径 D に対する内径 d の割合（以下、内径比, d/D ）が異なる。き裂進展時の公称曲げ応力は 150MPa とした。これは、SFA65 製在来線車軸の平滑部における設計上の最大応力に相当する。

車軸には車輪や歯車などが圧入されており、その形状は様々ではない。また、き裂が圧入部に発生した場合、圧入物が圧縮空気の漏洩に影響を及ぼす可能性が考えられる（図4）。そこで、圧入部に発生するき裂を対象とした No.3 試験軸を製作した。同試験軸のき裂進展時の公称曲げ応力は 108MPa とした。これは、SFA65 製在来線車軸の圧入部における許容応力に相当する。

試験中は、中空部に約 400kPa の圧縮空気を封入し、汎用の無線型圧力センサ（PRO-TECTA 製 AVT-C1）によって試験軸内圧を常時監視した。No.1 および No.2 試験軸では、き裂進展に合わせて、所定の繰返し数毎に磁粉探傷を実施し、き裂の外周長さを計測した。また、試験軸内圧が低下した後、試験軸を熱処理し、破面を着色することで、内圧降下時の破断面形状を識別できるようにした。

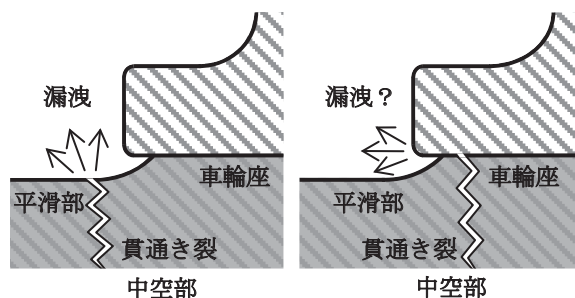


図4 空気漏洩に対する圧入物の影響

3.1.2 試験結果

No.1 および No.2 試験軸に初期欠陥よりき裂を発生させた。発生したき裂の外周長さが約 25mm に達した時点からの繰返し数とき裂長さの関係を図 5 に示す。No.1 試験軸（内径比 0.3）は外周側き裂長さが 53mm に達した時点で、No.2 試験軸（内径比 0.5）は外周側き裂長さが 27mm に達した時点で試験軸中空部内圧が降下した。試験後の試験軸の破断面を図 6 に示す。図 6 では、内圧降下発生時のき裂先端を点線で、事実上の最終破断に相当するき裂先端を実線で示す。いずれも、き裂先端が中空部に達した時点で内圧が降下している。一方で、き裂検知～最終破断までの繰返し数は、No.1 試験軸では約 1.5 万回、No.2 試験軸では約 11 万回となった。これは「本手法でき裂を検知してからの余裕度」に相当し、内径比が小さい No.1 試験軸では、内径比が大きい No.2 試験軸に比べてき裂が大きく進展した後に圧力降下が生じ

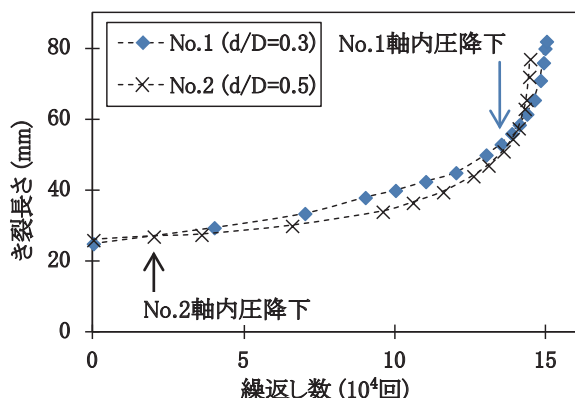
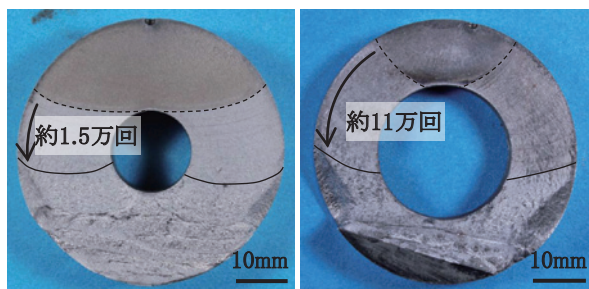


図5 No.1 および No.2 試験軸のき裂進展経過



(a) No.1試験軸 (b) No.2試験軸

図6 試験後の平滑試験軸の破断面

るため、余裕度が小さくなったと考えられる。

No.3 試験軸は、圧入物との圧入端を起点としてき裂が発生した。内圧降下発生後、さらにき裂を進展させ、約 7 万回後に折損に至った。圧入物取外し後の試験軸の破断面を図 7 に示す。図 7 では、内圧降下発生時のき裂先端を点線で、事実上の最終破断に相当するき裂先端を実線で示す。平滑軸と同様に、き裂先端が中空部に達した時点で内圧が降下している。内圧降下発生時のき裂形状が、平滑軸の場合と比較していびつなのは、フレットングの影響により複数箇所からき裂が発生、進展したためと推定される。また、圧入軸では公称曲げ応力が 108MPa と平滑軸の 150MPa と比較して低いため、最終破断面の大きさが比較的小さくなった。

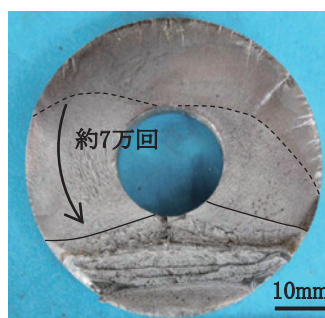


図7 試験後の圧入試験軸 (No.3) の破断面

3.2 実物大車軸を用いた評価

小型試験軸を用いた試験結果より、LBB を適用したき裂検知手法を車軸へ適用できることが確認された。そこで、本手法のき裂検知～最終的な不安定破壊までの余裕度を、実物大車軸を用いた疲労試験により評価した。

3.2.1 試験方法

疲労試験に供した実物大車軸の形状を図 8 (a) に示す。小型試験軸の試験結果より、外径に対する内径の割合が小さい方が、本手法の余裕度が小さくなることがわかっている。そこで、安全側の評価とするために、実物大車軸は外径 140mm、内径 45mm、内径比約 0.3 とした。疲労試験中は実物大車軸中空部の内圧を常時監視した。疲労試験に供した試験装置の模式図を図 8 (b) に示す。本試験装置は実物大車軸に 4 点曲げによる回転曲げ負荷を与えることができる。試験回転数は 600min⁻¹ とした。また、アクチュエータによって荷重を制御することで、実際に車両が走行した際に車軸に発生する変動応力（以下、実働応力）を負荷することができる。実働応力については 3.2.2 項に詳述する。

ASTM E 647 の応力拡大係数漸減試験法に基づき、き裂進展に合わせて曲げ応力を漸減しながら、実物大車軸中央部に設けた初期欠陥より長さ約 15mm の疲労き裂を導入した。続いて、一定の公称曲げ応力 σ_c にて疲労き裂を長さ約 65mm まで進展させた。その後、実働応

特集：車両技術

力下の疲労試験に移行し、疲労き裂を進展させた。なお、疲労試験中は所定の繰返し数毎に試験装置を一旦停止し、磁粉探傷にてき裂長さを確認した。

疲労試験中は中空部に約400kPaの圧縮空気を封入し、3.1.1項と同じ圧力センサで中空部内圧を監視した。

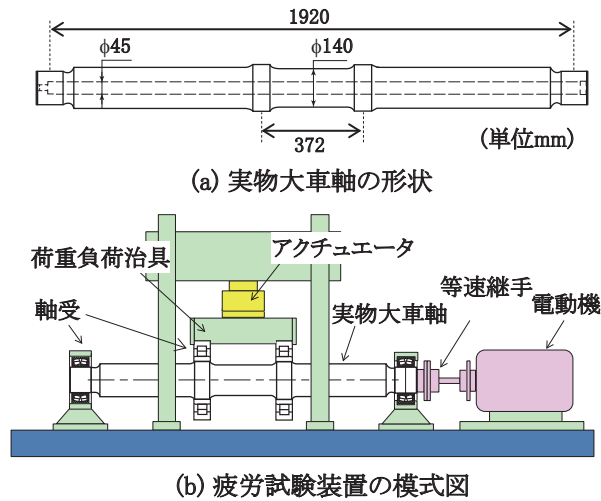


図8 実物大車軸疲労試験に用いた実験系の模式図

3.2.2 実働応力

実働応力は、車両や走行線区だけでなく、走行条件や天候、乗車人員などによって変化する。しかしながら、ここでは安全側の評価とするために、常に設計上の最大人員が乗車した状態（満車）を想定した実働応力を用いた。実働応力の頻度分布を図9に示す。本実働応力は、実際の測定結果を基に、前述の乗車人員や走行条件等が安全側となるように再評価したものである。そのため、新幹線や在来線で過去に測定された実働応力頻度分布^{6) 7) 8)}と比較しても、極めて高い応力を想定した分布となる。なお、実働応力の最大値は前述の σ_c より約2割大きい。このような応力頻度分布を有する実働応力波形は、約8万回転（車輪径860mmとして走行距離に換算すると216km相当）を1つの変動荷重ブロック（以下、1ブロック）としたものがある。実働応力下の疲労試験では、このような荷重ブロックを繰返し負荷した。

3.2.3 試験結果

疲労試験後の実物大車軸の破断面を図10に示す。図10の点線は内圧降下時のき裂先端を、実線は試験終了時のき裂先端を、破断面下側の濃灰色部は鋸断面を、実線と鋸断面の間の領域は試験終了後に強制開口した破断面を示す。疲労き裂が長さ約95mmとなった段階で実物大車軸中空部内圧が降下した。内圧降下を確認した後、実働応力で33ブロック、走行距離に換算して7000km超の回転曲げ負荷を加えた段階で、試験装置のリミット動作により試験を終了した。試験装置の制約により、不安定破壊には至らなかったが、正味応力概念に基づくと

き裂が鋸断面程度まで進展した段階で不安定破壊に至ると推定される。

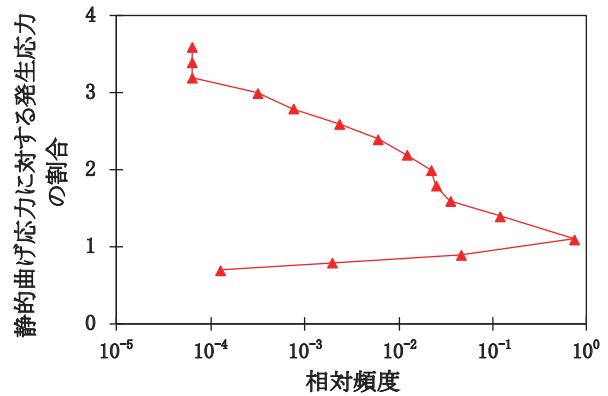


図9 疲労試験に用いた実働応力の頻度分布

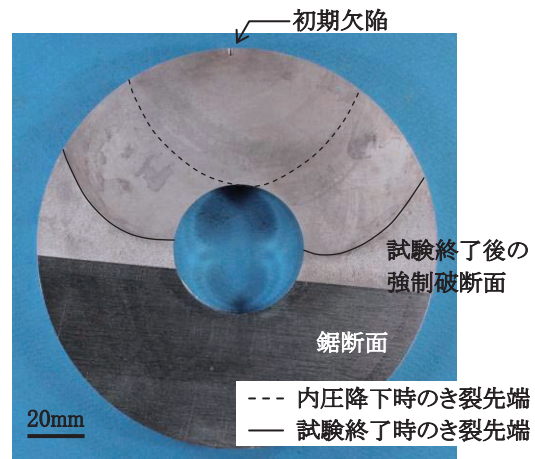


図10 疲労試験後の実物大車軸の破断面

3.3 き裂開口量の評価

3.3.1 空気力学モデル

貫通き裂を通して、中空部内の圧縮空気が漏洩する問題は、空気力学的には、タンクに充てんされた圧縮空気の放出問題に置き換えることができる。ここで、き裂開口面積は、図11に示すき裂開口部における内周側き裂長さとしき裂開口幅より求められる。

圧縮空気の漏洩によりタンクの内圧が p_1 から p_2 へと降下するとき、圧力変化と空気の放出時間 Δt は式(1)、(2)で表わされる⁹⁾。

$$\frac{p_2}{p_1} = \exp[-0.528A\Delta t^*] \quad (1)$$

$$\Delta t^* = c_0 \frac{A}{V} \Delta t \quad (2)$$

ここで、 A ：タンクの開口部面積（き裂開口面積）、 V ：タンク容積、 c_0 ：音速である。ここでは、タンク内の温度が一定と仮定している。また、タンク内の圧力は式(3)のチョーク条件を満たしているものとする。

$$\frac{p_1}{p_0} > \frac{p_2}{p_0} > 1.9 \quad (3)$$

すなわちタンク内に約 200kPa（絶対圧）以上の空気が封入されているとする。ここで、 p_0 は大気圧である。

式 (1) より、タンク内圧と変化時間がわかれば、式 (4) のようにき裂の開口面積を推定することができる。

$$\frac{A}{V} = \frac{12 \times 10^{-3}}{\Delta t} \log_{10} \left[\frac{p_1}{p_2} \right] \quad (4)$$

なお、式 (4) は、電磁弁の流量特性を規定した JIS B 8373 (1993) において、電磁弁の有効断面積の算出方法として記載されている。

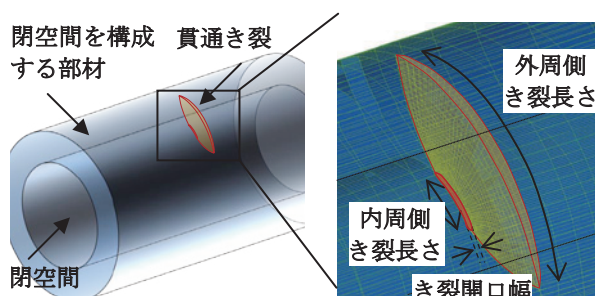


図 11 き裂開口部の定義

3.3.2 き裂開口面積の推定

き裂が開く荷重（引張荷重）がかかる際に、き裂開口面積は大きくなり、閉じる荷重（圧縮荷重）がかかる際に、開口面積はゼロとなる。ここでは、所定の繰返し数毎に疲労試験を停止し、中空部に圧縮空気を再封入し、中空部内圧を測定することで、実働応力下におけるき裂進展試験中の平均的なき裂開口面積を式 (4) より評価した。中空部内圧の測定結果の一例を図 12 に、外周側のき裂長さとき裂開口面積、中空部内圧が 400kPa から 200kPa に降下するのに要する時間の関係を図 13 に示す。内周側のき裂長さとき裂開口幅の積で表されるき裂開口面積は、き裂進展に伴って加速度的に増加し、内圧降下時間はき裂開口面積に反比例して減少する。この結果から、中空部内圧の降下に要する時間は、き裂進展によって車軸が折損に至るまでの時間より十分短いことが確認される。

3.4 3章のまとめ

LBB 概念を用いたき裂常時監視手法の車軸への適用性を小型試験軸および実物大車軸の疲労試験により評価した。その結果、平滑部・圧入部のいずれに発生する貫通き裂も本手法により検知できること、き裂検知～最終的な不安定破壊までの余裕度は破壊力学的にも、空気力学的にも十分に大きいことなどが確認された。

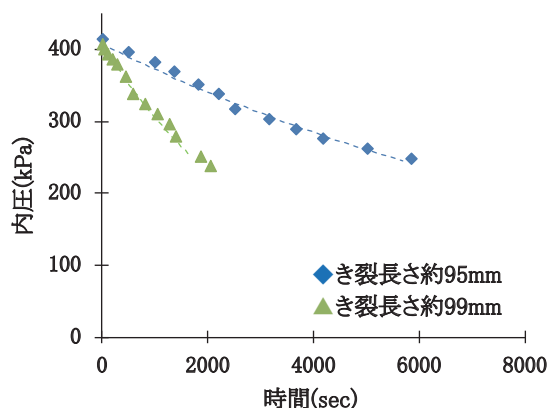


図 12 中空部内圧測定結果の一例

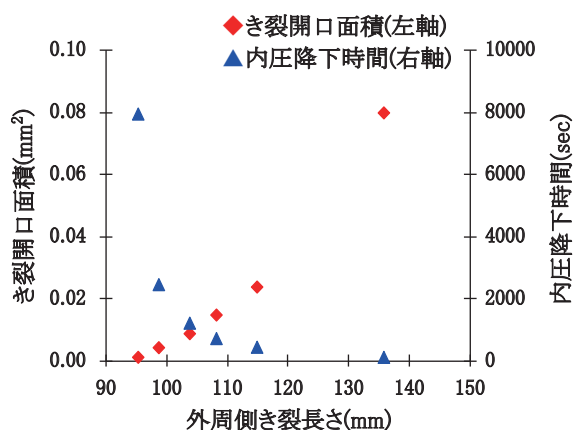


図 13 き裂長さと開口面積，内圧降下時間

4. 台車枠への適用性の評価

4.1 試験方法

台車枠のように閉空間容積が大きい場合においても、本手法によってき裂が検出できるか、またその際のき裂検出能や余裕度を確認するために、疲労試験を実施した。疲労試験には通勤車に使用されていた溶接構造ボルスタレス台車枠を用いた。評価対象は横ばりとし、あらかじめ側ばりを切断した上で、疲労試験体とした。横ばりは外径 $\phi 165.2\text{mm}$ 、板厚 12mm の機械構造用炭素鋼鋼管 STKM13B 製である。疲労試験状況を図 14 に示す。疲労試験中は、横ばりに圧縮空気を封入し、ひずみゲージ式の圧力センサ（共和電業製、PGM-10KE）により横ばり内圧を監視した。

4.2 試験結果

横ばりに繰返し荷重を負荷した結果、繰返し数約 102 万回後に横ばり内圧が降下した。内圧降下時の磁粉探傷結果を図 15 に示す。横ばりと管受との溶接止端部より全長約 35mm き裂が発生し、同部からの圧縮空気の漏洩が確認された。本手法によるき裂検知精度はき裂形状や発生部位等に依存すると考えられるが、台車枠閉空間

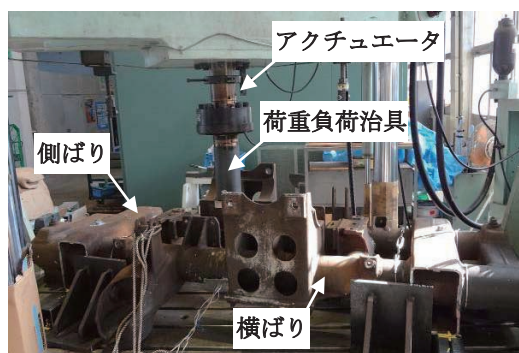


図 14 台車枠横ばりの疲労試験状況

に発生する全長 35mm 程度のき裂であっても検出できる可能性が見出された。

圧縮空気の漏洩後の台車枠に対して、さらに繰返し荷重を負荷し、き裂を進展させた。き裂発生部の応力振幅に換算して 90MPa となる一定振幅荷重を、300 万回以上繰返し負荷しても、き裂は全長 85mm であった。一定振幅の疲労試験としたため、試験繰返し数を走行距離に換算することはできないが、本手法を台車枠に適用した場合の不安定破壊までの余裕度は十分であることが確認された。

試験終了後の破断面を図 16 に示す。き裂先端が横ばり内面に到達した段階で、本手法によってき裂が検出できることが確認できる。また、今回の試験では全長 85mm のき裂となった段階で試験を終了したが、一般には、き裂が数百 mm 以上に進展しないと、台車枠に著大な塑性変形が生じることはないと言われており³⁾、本手法を台車枠に適用することは可能と考えられる。

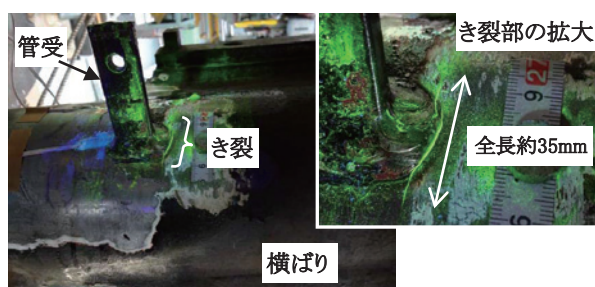


図 15 横ばり内圧降下時の磁粉探傷結果

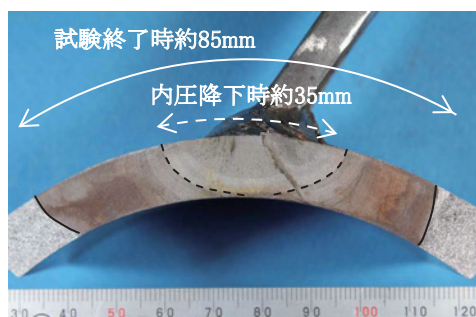


図 16 試験後の破断面

5. まとめ

破断前漏洩 (Leak Before Break ; LBB) 概念を適用した車軸・台車枠のき裂常時監視手法について検討した。

本手法の中空車軸への適用性を、1/3 スケールの小型試験軸および実物大車軸を用いて評価した。小型試験軸の結果から、本手法は圧入部・平滑部のいずれに発生するき裂に対しても適用可能であり、試験軸の発生応力が小さいほど、外径に対する中空径の割合が大きいほど、本手法の余裕度は大きくなることが明らかとなった。また、実走行時の変動応力を考慮した実物大車軸のき裂進展試験結果から、本手法によるき裂検知から最終的な不安定破壊までには走行距離に換算して 7000km 以上に相当する余裕があることが確認された。また、発生した貫通き裂からの圧縮空気漏洩による圧力降下時間は、破断に至るまでの時間に比べて十分に小さいことが確認された。これらの結果から、本手法を中空車軸に適用した場合の余裕度は十分大きいと考えられる。

台車枠に対しては、実物台車枠の横ばりを対象として、本手法の適用性を評価した。疲労試験結果から、台車枠横ばりに発生した長さ 35mm のき裂を検知できた。本手法によるき裂検知精度はき裂形状や発生部位等に依存すると考えられるが、台車枠に適用した場合の余裕度は十分大きいと考えられる。

文 献

- 1) 平川賢爾：ドイツ高速鉄道 ICE-3 ケルン脱線事故～なぜ車軸は疲労破壊を起こしたか～，鉄道車両と技術，No.147，pp.30-40，2008
- 2) 高速車両用輪軸研究委員会：鉄道輪軸，丸善プラネット，2008
- 3) 長瀬隆夫：溶接台車枠の強度と保守，研友社，1999
- 4) 矢川元基：破壊力学，培風館，1988
- 5) 牧野一成，他：在来線用試作中ぐり車軸の超音波探傷試験，鉄道総研報告，Vol. 18, No. 5, pp.41-46, 2004
- 6) 田中真一：鉄道車両の実働荷重と台車部品の疲れ試験，日本機械学会誌，Vol. 73, No. 621, pp. 1452-1458, 1970
- 7) 酒井宏樹，他：営業走行車両における車軸の応力測定と強度評価（その 2：実働応力の解明と分析），J-RAIL2011, S1-1-5, 2011
- 8) 森弘元人，他：テレメータを活用した 200 系新幹線電車の車軸応力測定，J-RAIL2015, 2604, 2015
- 9) 松尾一泰：圧縮性流体力学，理工学社，1994