確率論的破壊力学を用いた新幹線車軸の健全性評価*

赤 間 誠^{*1}, 石 塚 弘 道^{*1}Reliability Analysis of Shinkansen Vehicle Axle
Using Probabilistic Fracture Mechanics

Makoto AKAMA and Hiromichi ISHIZUKA

A reliability analysis of the Shinkansen vehicle axle using probabilistic fracture mechanics is presented. Failures of the axles are assumed to occur as the result of the growth of cracks originating from fretting corrosion in a wheel seat. Cracks are considered to be randomly distributed in size, and cyclic stresses induced during train operation are used in conjunction with the crack growth characteristics of the material to predict the variation of the crack size with the distance travelled. The probability of failure is considered to equal the probability of having a crack larger than the corresponding critical size. The effects of in-service inspections are evaluated for two different induction-hardened axles. Finally, a series of calculations are performed in order to assess the influence of various factors on these probabilities.

Key Words: Stress Intensity Factor, Probabilistic Method, Reliability, Fracture Mechanics, Shinkansen Vehicle Axle

1. 緒 言

新幹線車軸の車輪圧入部は、車輪との間の微小すべりによるフレッチング・コロージョンが多数発生し、これらを起点としてき裂が発生することがある。現在は定期的に磁粉および超音波探傷が行われ、車軸の安全性が確保されているが、このようなき裂の進展特性の解明は保守、設計の両面から必要とされているにもかかわらず、複雑な応力状態にある圧入部の三次元表面き裂を取扱う必要があるため、困難な問題となっている。そして現在では磁粉探傷時にある一定の寸法基準を満たすき裂が発見されると、その車軸は廃棄されているが、経費節減の観点からその基準の見直しと、磁粉探傷に代わって車輪圧入状態のまま超音波探傷する方法が検討されている。

一方、近年構造物の健全性を、確率論的破壊力学を用いて評価する例が、航空機⁽¹⁾や原子炉関係⁽²⁾の分野でさかに行われている。確率論的破壊力学とは、構造物の破壊確率を定量的に評価するための研究分野

で、き裂の寸法や材料の破壊靱性等は、ばらつく量として考慮される。そしてこの手法により、構造物の破壊確率に種々の因子がどのように影響しているかを検討でき、その結果より破壊確率を大きくしている因子については、再検討を行うことにより信頼性の向上を図り、破壊確率にあまり影響していない因子に対しては合理化を図ることができるようになる⁽³⁾。

そこで本研究では、この確率論的破壊力学を新幹線車軸に適用し、今後の車軸の設計基準、定期検査周期の見直し等に資するため、走行距離に対する車軸の破壊確率、および種々の因子が破壊確率に与える影響等の評価を試みた。

2. 解 析 手 法

最初に、新幹線車軸の健全性を評価する手法の概要を述べる。車軸の破壊は、車輪圧入部のフレッチング・コロージョンを起点とした表面き裂が進展して起こるものとする。き裂は各圧入部に一つ存在し、半だ円形状で、寸法(深さ a および長さ $2b$)がランダムに分布しているものとする。これらのき裂は走行前の定期検査によって、ある確率で発見されるものとする。発見されなかったき裂のうち、走行中の最大負荷時における応力拡大係数が、車軸材の下限界応力拡大係数を

* 平成4年10月1日 第70期全国大会講演会において講演、原稿受付 平成5年6月16日。

^{*1} 正員、(財)鉄道総合技術研究所 (〒185 国分寺市光町2-8-38)。

越えるものについては、走行による繰返し応力によって成長すると考え、進展解析を行う。破壊が起こるき裂の大きさは、適当な破壊基準によって決定する。評価を行う期間は、一台車検査周期とし、走行中の定期検査の影響も考慮する。このような解析の流れを図1に示す。次に解析における個々の構成要素について、具体的な説明を行う。

2.1 き裂寸法の分布 車輪圧入部のき裂は、き裂深さ a とアスペクト比 $\beta(b/a)$ の二変数分布とする。き裂深さについては、実際はかなり小さいことが報告されているが⁽⁴⁾、本研究では許容き裂深さの検討も考慮して、それより15倍程度深い3 mmを平均値とした、指数分布と考えることにする。

$$P_a(a) = \frac{e^{-a/\mu}}{\mu(1 - e^{-r/\mu})}, \quad 0 \leq a \leq r \quad \cdots \cdots (1)$$

ただし r は車軸の半径、 μ は平均値 (=3) である。またアスペクト比については、圧入部に存在するき裂に関しての報告は皆無であるが、原子炉健全性評価を参考にして、対数正規分布と考える。

$$P_\beta(\beta) = \begin{cases} 0, & \beta < 1 \\ \frac{C_\beta}{\lambda\beta(2\pi)^{1/2}} e^{-\{\ln(\beta/\beta_m)\}^2/(2\lambda^2)}, & \beta > 1 \end{cases} \quad \cdots \cdots (2)$$

C_β , λ , β_m は、 $\beta \geq 5$ となる確率が1%と考え、

$$C_\beta = 1.419, \lambda = 0.538, \beta_m = 1.336$$

とする。

2.2 定期検査によるき裂の検出 新幹線車軸の車輪圧入部は、現状では走行距離30万 km ほどの台

図1 新幹線車軸の健全性評価解析の流れ

車検査時に車輪をずらして磁粉探傷、3万 km ほどの交番検査時に在姿状態で超音波探傷を行っているが、経費節減の観点から磁粉探傷に代わり、車輪圧入状態での超音波探傷が検討されている。ここでは、定期検査は超音波探傷のみを行うものとし、それによるき裂の非検出確率を、き裂面積 A の関数として次のように定義する。

$$P_{ND}(A) = \text{erfc}(\nu \ln A/A^*)/2 \quad \cdots \cdots (3)$$

$$\nu = 1.46, A^* = \pi a^* D_B/4, a^* = 3 \text{ mm}$$

erfc は誤差関数、 D_B は超音波ビーム直径で、25 mm とする。ただし、き裂長さがビーム直径を越えると、非検出確率はき裂深さにのみ依存すると考えて、

$$A = \begin{cases} \pi ab/4, & 2b < D_B \\ \pi a D_B/4, & 2b \geq D_B \end{cases} \quad \cdots \cdots (4)$$

とする。

2.3 き裂の進展特性 き裂の進展則は Paris 則を用いる。

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad \cdots \cdots (5)$$

ここで、 N は車軸の回転数、 C と m は実験定数、 ΔK は一回転中の応力拡大係数範囲で、

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} (K_{\min} > 0), = K_{\max} (K_{\min} \leq 0)$$

によって与えられる。

ΔK および進展の解析には、白鳥らが開発した影響関数法⁽⁵⁾による数値シミュレーションを用いる。

m と C については車軸鋼を用いた回転曲げの実験結果より、 $m=2.57$ 、 C は平均値が 1.51×10^{-11} 、標準偏差が 5.62×10^{-12} の対数正規分布とする。下限界応力拡大係数は、文献⁽⁶⁾により平均値が $6.11 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 、標準偏差が $2.51 \text{ MPa}\sqrt{m}$ の正規分布と仮定する。

図2に、例として前述のような C のばらつきを考慮した、初期き裂として $a/r=0.1$ 、 $b/a=3.0$ の半だ

図2 き裂進展曲線とき裂深さが車軸中心に達する確率密度

円き裂が存在する丸棒の疲労き裂進展のモンテカルロシミュレーションを行った結果を示す。試行回数は、3000回である。同時に図には、検証として大形小野式回転曲げ疲労試験機(試験片直径 30 mm)による実験結果も示している。

2・4 車軸の車輪圧入部の応力状態 本研究では、 K 値の解析には影響関数法を用いているため、車軸の車輪圧入部における、き裂のない場合の応力分布を求めておく必要がある。

2・4・1 走行中に発生する応力 走行中、車軸は図3に示すように、軸重と呼ばれる車体重量および上下方向振動に基づく垂直方向荷重のほか、曲線部通過時に外軌レールから横圧と呼ばれる荷重も受ける。本研究では垂直方向荷重は一軸上の重量として 196 kN で一定とするが、横圧の大きさは、曲線半径に依存し、発生頻度は走行線区に依存すると考える。図4に曲線半径と発生する横圧の関係を示し、表1にある新幹線区間に存在する曲線を示す。これらより、発生する横圧は曲線半径 1000 m 未満で 80 kN、1000～2000 m で 60 kN、2000 m 以上で 0 kN とし、車軸の応力を求

図3 軸重と横圧

図4 曲線半径と発生する横圧の関係

めることにする。また発生頻度は、ばらつきを考慮して、それぞれ表1に示すような間隔平均をもつ指数分布とする。

2・4・2 表面焼入れによる残留応力 新幹線車軸はほぼ全長にわたって、疲労強度向上のために誘導加熱による表面焼入れを行っている。これによる残留応力は、動力を伝達する歯車に近い側の車輪圧入部(ギヤ側)と、遠い側の車輪圧入部(反ギヤ側)とでは分布が異なる。これは反ギヤ側の車輪圧入部が移動焼入れの起点で、ギヤ側の車輪圧入部が終点という誘導焼入れ条件の違いと、それらの形状が異なるためである。図5は、ギヤ側と反ギヤ側の車輪圧入部における軸対称残留応力のザックス法による測定結果とその回帰曲線を示す。

2・5 最終的な車軸の破壊基準 車軸が最終的な不安定破壊を起こす条件は、 K_{Ic} 破壊条件、および正味断面応力概念⁽³⁾の二つが考えられる。 K 値の解析には影響関数法を用いており、正確な K 値が得られるのはき裂が車軸の中心に達した時点までであるが、この時点では、計算の結果いずれの破壊条件も満足されないことがわかった。しかし、き裂先端が車軸の中心に達してから最終的な破壊に到るまでの走行距離はわずかであると考えられるので、解析ではき裂先端が車軸中心まで達した時点で車軸の不安定破壊が起こると

表1 ある走行線区における曲線

radius of curvature (m)	number of curves	mean length of curves (m)	mean distance of intervals (km)
400 ~ 1000	28	293	38.5
1000 ~ 2000	63	474	17.1

(a) 反ギヤ側

(b) ギヤ側

図5 新幹線車軸の焼入れによる残留応力分布

する。

3. モンテカルロシミュレーション

本研究では、モンテカルロシミュレーションによって、新幹線車軸の破壊確率と走行距離の関係を求める。抽出空間は無次元き裂深さ (a/r) とアスペクト比の逆数 ($\beta^{-1}=a/b$) である。またできるだけ少ない抽出数で低い確率を正確に評価するため、層別抽出⁽⁷⁾を行った。走行距離を R 、破壊確率を評価する走行距離を R_F とすると、 R_F 以前の走行距離で破壊が起こる確率は次式で計算される。

$$P(R \leq R_F) = \sum_{m=1}^M \frac{N_{Fm}(R \leq R_F)}{N_m} P_m \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 M はセルの総数、 N_m は m 番めのセルからの

抽出数、 $N_{Fm}(R \leq R_F)$ は m 番めのセルから抽出した中で、走行距離 R_F 以前に車軸が破壊した数、 P_m は初期き裂の寸法が m 番めのセル内にある確率である。破壊確率は、いずれの場合も総抽出数 $\sum_{m=1}^M N_m$ が 10^5 程度で収束する。

4. 解析結果と考察

図6にギヤ側、反ギヤ側の車輪圧入部の走行距離と累積破壊確率の関係を示す。これらの図には定期検査の影響も示している。これらの結果は車軸の車輪圧入部に必ず一つのき裂が存在するものと仮定した場合である。ギヤ側では定期検査により破壊確率が 10^{-1} 程度低下している。これに対して反ギヤ側では、図5に示

(a) ギヤ側

(a) 初期平均き裂深さが1 mm の場合

(b) 反ギヤ側

(b) 初期平均き裂深さが0.5 mm の場合

図6 走行距離に対する新幹線車軸の累積破壊確率

図7 初期き裂深さが累積破壊確率に与える影響

した深い圧縮残留応力層の存在により、破壊確率は著しく低く、定期検査の影響はほとんどない。

次に破壊確率に対する種々の因子の影響を評価するため、一連の計算を行った。結果を、以下に示す。反ギヤ側は破壊確率が著しく小さいので、車軸の破壊確率には支配的でないと考えられるため、計算はギヤ側についてのみ行った。

4・1 初期き裂の大きさの影響 初期き裂の大きさの影響を評価するため、平均き裂深さを1 mm, 0.5 mmの指数分布と仮定して計算を行った。結果を図7に示す。初期の平均き裂が小さくなると、破壊確率は小さくなる。初期き裂の平均深さが3 mmから0.5 mmに減少すると、破壊確率はほぼ 10^{-8} 程度減少する。

4・2 走行線区の影響 走行線区が異なる場合、破壊確率がどれだけ変化するかを評価する。表2は、先に計算に利用した線区とは異なる線区に存在する曲線を示したもので、この線区について計算を行った結果を図8に示す。累積破壊確率はこの場合のほうが若干小さいが、ほぼ同じである。よって本研究の結果には、走行線区の差はそれほど影響しないと考えられる。

表 2 別の走行線区における曲線

radius of curvature (m)	number of curves	mean length of curves (m)	mean distance of intervals (km)
400 ~ 1000	25	521	18.5
1000 ~ 2000	20	343	23.8

図 8 別の走行線区における新幹線車軸の累積破壊確率

4・3 超音波探傷の影響 次に超音波探傷精度の影響を評価する。現在当研究所では、従来の超音波斜角探傷のみならず、表面SH波⁽⁹⁾により、車輪圧入状態での探傷精度を向上させる研究が行われている。先の計算では、深さ3 mmのき裂を検出する確率を0.5と仮定したが、それを深さ1 mmのき裂とした場合について計算を行った。結果は図9に示す。超音波探傷の精度を向上させると破壊確率はかなり小さくなり、先の場合と比較してほぼ 10^{-8} 程度低下する。また初期の交番検査時の探傷において破壊確率が収束するため、それ以後の探傷の影響はなくなる。

以上、種々の因子が破壊確率に与える影響等の評価を試みたが、このうち破壊確率に大きな影響を及ぼすのは、表面焼入れによる車軸の圧縮残留応力である。反ギヤ側のような深い圧縮残留応力層が車輪圧入部に確保できれば、かなり大きなき裂に対しても高い健全性が保証されることが考えられる。

また探傷精度を向上させることも、高い健全性確保には重要である。車輪圧入部の圧縮残留応力層に存在する小さなき裂の寸法・形状を正確に測定することは、現時点ではかなり困難であるが、今後とも種々の方法により探傷精度向上を図っていく必要がある。探傷精度が向上すれば、検査は早い時点で重点的に行うことにすればよい。

5. 結 論

確率論的破壊力学を新幹線車軸の健全性評価に適用し、走行距離に対する車軸の破壊確率、および種々の因子が破壊確率に与える影響等の評価を試みた。本研

図 9 探傷精度を向上させた場合の新幹線車軸の累積破壊確率

究によって、種々の因子がどの程度車軸の破壊確率に影響を及ぼすかが判明した。それを列記すると、

(1) 表面焼入れによる車軸の圧縮残留応力は、破壊確率に大きな影響を与える。30万km走行時点での累積破壊確率は、かなり大きな初期き裂を仮定しても、圧縮残留応力層が深い反ギヤ側ではほぼ零に等しく、超音波探傷の影響はみられない。

(2) 初期に存在するき裂の大きさが小さいと、累積破壊確率は低くなる。

(3) 走行線区の違いは、累積破壊確率にほとんど影響を及ぼさない。

(4) 超音波探傷の精度を高めると、破壊確率はかなり低くなり、初期の交番検査時の探傷において破壊確率が収束し、それ以後の探傷の影響はなくなる。

今後は得られた計算結果をなんらかの方法で実際の車軸について検証するとともに、仮定した材料定数や

負荷条件の統計的性質をよりの確に把握するなど、計算精度を向上していく計画である。

なお本研究の遂行に当たり、当研究所・吉村彰芳研究室長、木川武彦研究室長、手塚和彦研究室長には懇切なるご指導、有意義なる助言をいただいた。ここに深い謝意を表する次第である。

文 献

- (1) Yang, J. N. and Trapp, W. J., *AIAA J.*, **12**(1974), 1623.
- (2) Harris, D. O., ほか2名, *ASME 86-PVP-11*, (1986).
- (3) 矢川編, 破壊力学, (1988), 201, 培風館.
- (4) 石塚, トライボロジスト, **37-8**(1992), 624.
- (5) 例えば, 白鳥・ほか2名, 機論, **51-467**, A(1985), 1828.
- (6) 田中・ほか1名, 材料, **33-371**(1985), 1045.
- (7) NUREG/CR-2189, *Probability Pipe Fracture in the Primary Coolant Loop of a PWR Plant*, **9**(1981).
- (8) 戸田・ほか5名, 非破壊検査, **40-3**(1991), 158.