

氏名	あかま まこと 赤間 誠		
授与学位	博士(工学)		
学位授与年月日	平成10年3月25日		
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項		
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)機械知能工学専攻		
学位論文題目	計算力学による新幹線車軸の健全性評価に関する研究		
指導教官	東北大学教授 坂 真澄		
論文審査委員	主査	東北大学教授 坂 真澄	東北大学教授 庄子哲雄
		東北大学教授 福永久雄	東北大学教授 林 一夫

## 論文内容要旨

### 第1章 序論

新幹線車軸の車輪圧入部には、車輪との間の相対微小すべりによってフレッチング・コロージョンが発生し、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探傷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関わらず、複雑な応力状態となっている圧入部の三次元表面き裂を取り扱う必要があるため、困難な問題とされてきた。さらに現在の規定では、磁粉探傷時に深さ0.15mm以上の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非解体検査を行う方法が検討されている。そこで本研究では、高度な安全性が要求される新幹線車軸を対象として、計算力学的手法を用いた体系的な健全性評価手法について、その確立をめざし検討を行った。

### 第2章 確率論的破壊力学を用いた新幹線車軸の健全性評価

本章においては、原子力機器および航空機構造物等の健全性評価に用いられている確率論的破壊力学を、新幹線車軸の健全性評価に適用し、今後の設計基準、定期検査周期の見直し等に資するため、種々の寸法・形状のき裂が車輪圧入部に存在する場合の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行った。

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(以下 $K$ 値とする)の範囲が、車軸材の下限界応力拡大係数範囲を越えるものについては、走行による繰り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。ある時点での破壊確率は、その時点においてき裂が破壊を起こす大きさに達した確率に等しいものとする。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。最終的には、圧入部にき裂が存在する確率も考慮する。

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、3mmを平均値とした指数分布と考えることにする。アスペクト比については、 $\beta \geq 5$ と

なる確率が1%の対数正規分布と仮定する。定期検査は超音波探傷のみを行うものとして、それによるき裂の非検出確率を、深さ3mmのき裂の非検出確率を0.5として、き裂面積の補誤差関数として定義する。K値およびき裂の進展解析には、影響関数法による数値シミュレーションを用いる。K値を解析するために用いる車輪圧入部の応力としては、走行中に発生する曲げ応力と、表面焼入れによる残留応力を考慮した。また解析ではき裂先端が車軸の中心まで達した時点で、車軸の不安定破壊が起こるとした。

本解析では、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。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。

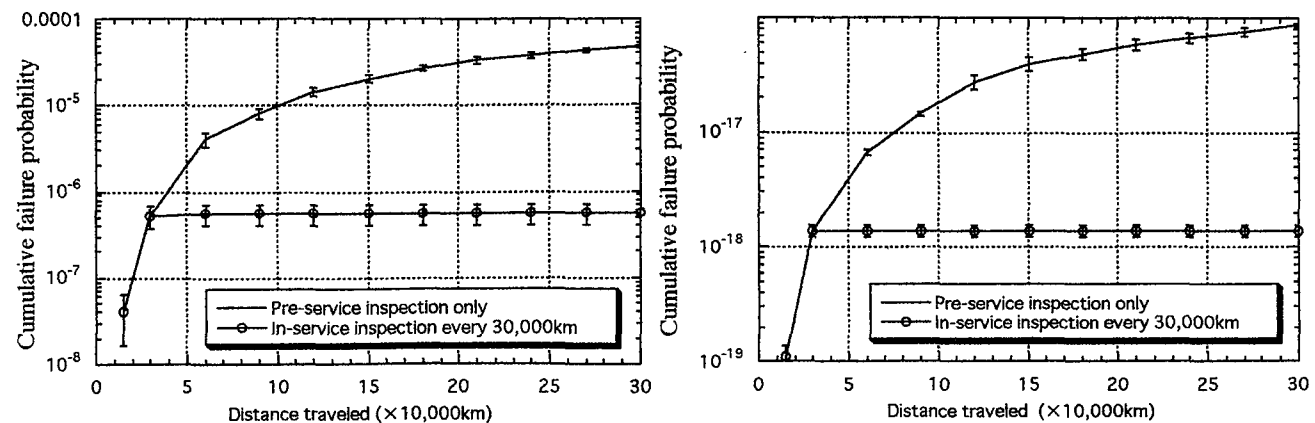
$$P(R \leq R_F) = \sum_{m=1}^M \frac{N_{Fm}(R \leq R_F)}{N_m} P_m \quad (2-26)$$

ここで、Mは層の総数、 $N_m$ はm番目の層からの抽出数、 $N_{Fm}(R \leq R_F)$ はm番目の層から抽出した中で、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番目の層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 $10^5$ 程度で収束した。

図2-22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。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。その結果、以下のことがわかった。

- (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著しく低く、超音波探傷の影響はほとんどみられない。
- (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。
- (5)台車検査周期が延伸されても、累積破壊確率の傾向は変わらず、台車検査時点での累積破壊確率もほとんど変わらない。



(a) ギヤ側

(b) 反ギヤ側

図2-22 走行距離に対する累積破壊確率

### 第3章 実物の新幹線車軸を用いた疲労試験結果の信頼性解析

本章においては、車輪圧入部に種々の寸法・形状の切欠きを挿入した実物の新幹線車軸を用いた疲労試験による結果と、第2章で車軸の破壊確率の計算に使用したプログラムを用いて種々の条件を疲労試験と同一とした場合の数値シミュレーション結果について、構造信頼性工学の手法を用いて解析し、両者を比較検討することにより、確率論的破壊力学を新幹線車軸の健全性評価に適用して得られた種々の結果を間接的に検証することを試みた。

表3-3に、試験車軸の車輪圧入部に設けた切欠きの寸法と数および破壊までの回転数を示す。なお切欠きのアスペクト比は全て3.0で、試験応力は81MPaである。この試験結果について、切欠きをき裂と見なし、数値シミュレーションを行った。そして疲労試験および数値シミュレーションについて、累積破壊確率と疲労寿命の原分布を求めた。原分布は3母数Weibull分布と考え、その母数の推定には相関係数法および最尤法を用いた。その結果、以下のことがわかった。

- (1) 疲労試験の累積破壊確率は、数値シミュレーションよりも2オーダー程度高かった。また疲労寿命の原分布については、両者の間に相違があることがわかった。これは、疲労試験における人工切欠きを、シミュレーションではき裂として解析していること、疲労試験による標本数の不足等が原因であるためと考えられる。
- (2) 前章で得られた重要な結果、すなわち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著しく低いという結果、および最終的な不安定破壊に対しての計算結果は、実寸模型試験で間接的に検証された。

表3-3 各車軸に存在する人工切欠き

Axle number		1	2	3	4	5	6	7	8
		Solid	Solid	Solid	Solid	Hollow	Hollow	Hollow	Enlarged Hollow
Number of slits on the wheels seat	0.05mm	1	0	0	0	0	0	0	0
	0.15mm	2	0	0	0	0	0	0	0
	0.50mm	2	3	0	0	1	0	0	0
	1.00mm	3	3	0	3	0	0	0	1
	3.00mm	0	3	1	3	3	1	0	3
	4.00mm	0	0	3	0	0	3	1	0
	5.00mm	0	0	0	3	0	0	3	0
	Total	8	9	4	9	4	4	4	4
Failed cycles		—	—	8.883 × 10 <sup>7</sup>	1.364 × 10 <sup>6</sup>	—	2.735 × 10 <sup>6</sup>	1.960 × 10 <sup>6</sup>	9.066 × 10 <sup>7</sup>

### 第4章 局所ひずみ法および等価ひずみエネルギー密度法による切欠き先端のき裂の解析

本章においては、切欠きとき裂には相違があることから、局所ひずみ法および等価ひずみエネルギー密度法を用いて、疲労試験に用いた実物車軸のギヤ側車輪圧入部に挿入した切欠き先端の圧縮降伏域の寸法およびき裂発生寿命を求め、初期き裂寸法の分布と疲労寿命を修正した上で、疲労試験による結果と、その数値シミュレーション結果について、再度比較した。

表4-8に、疲労寿命の原分布の各母数の推定結果を比較して示す。ここで、 $u, v, w$ は3母数Weibull分布の位置母数、尺度母数および形状母数である。これより、修正を行っても形状母数と尺度母数については、まだ相違があった。これは解析対象とした疲労試験においては、き裂進展寿命のうち、切欠きの影響域における進展期間が長く、この期間の疲労寿命が全体の疲労寿命に対して占める割合が大きいためと考えられる。しかし位置母数についてはかなりの一致が達成された。これは切欠き先端におけるき裂の発生寿命についての解析が適切であったためと考えられる。

表4-8 相関係数法による母数の点推定結果

Parameter	$u$	$v$	$w$
Fatigue test	963900	122956400	0.259
Simulation	820000	7454000	1.170

## 第5章 直流電位差法による新幹線車軸の車輪圧入部における三次元表面き裂の非破壊定量評価

本章では、き裂の定量的評価として優位な直流電位差法によって探傷精度を向上させ、新幹線車軸の車輪圧入部に発生するき裂の寸法を、車輪を圧入したままで評価する基盤技術を開発した。

解くべき問題の概略図を、図5-4に示す。新幹線車軸の車輪圧入部に発生するき裂は、き裂面が軸方向にほぼ垂直であり、また計測に用いるセンサの四つの端子は一行列とし、かつ車軸の軸方向に平行に配置するものと考えた。最初に数値解析によって電流の入出力位置を種々変化させた場合の三次元表面き裂の寸法と電位差との関係を解析し、両者の関係を表す較正関係式を導出した。数値解析手法としては、境界要素法を用いた。次にこの解析結果と計測結果を照合し、逆問題解析によって新幹線車軸の車輪圧入部に発生するき裂寸法および位置を、精度良く評価できる方法を提案した。表5-3に、開口き裂を模擬した切欠きで5回行った計測結果について、最適化解析によって評価した $a$ ,  $b$ ,  $D_1$ の値と、それら5回の評価結果の平均および標準偏差を示す。また疲労によって形成した閉口き裂についても同様な評価を行った。その結果、以下のことがわかった。

- (1) 電流入出力用端子の一方をき裂の近くに配置すれば、直流電位差法によって新幹線車軸の車輪圧入部における許容き裂程度の寸法・形状および位置について、車輪を圧入したままで正確に評価できる。
- (2) 境界要素解析で得られた較正関係式と、き裂を模擬した切欠きを挿入した車軸鋼試験片で得られた計測結果から、き裂の寸法・形状および位置を求める最適化解析を実施した。最適解への収束は良好であった。深さの評価はセンサと切欠き間の距離に敏感であるため、測定ごとに若干のばらつきが認められたが、き裂長さおよびき裂位置の評価は極めて良好であった。
- (3) 直流電位差法を用いれば、本研究で対象としている寸法程度のき裂について、き裂までの位置が車軸の軸方向で1.0mm程度まで接近できれば、たとえ閉口していてもかなりの精度でき裂寸法の定量評価ができる。

## 第6章 結論

本研究では、高度な安全性が要求される新幹線車軸を対象として、計算力学的手法を用いた体系的な健全性評価手法を構築し、検証した。

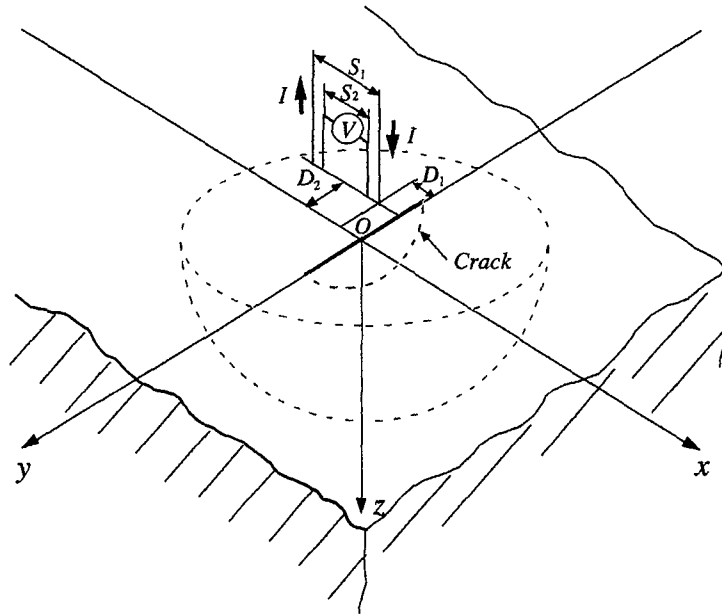


図5-4 三次元表面き裂がある半無限体のモデル化

表5-3 切欠き寸法および位置の評価値

Parameter	Actual values (mm)	Evaluated values (mm)					Statistics	
		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	Average	S.D.
$a$	2.0	2.6	2.87	2.39	1.61	2.85	2.46	0.517
$b$	3.5	3.62	3.51	3.32	3.28	4.25	3.60	0.391
$D_1$	1.0	0.98	1.06	0.99	0.83	1.34	1.04	0.187

## 審査結果の要旨

高度な安全性が要求される新幹線車軸に関し、欠陥を想定した健全性評価、すなわち破壊力学的手法の適用を狙った研究は従来少なかった。破壊力学的手法のうちでも決定論的な手法の適用については若干の報告があるが、信頼性を現状に維持しつつさらに経費節減を図ったり、また安全性に影響を及ぼす諸因子のうちでどの因子に重点を置くか等の検討を行うためには、確率統計に基づいた健全性評価が切に望まれる状況にあった。

新幹線車軸の車輪圧入部には、車輪との間の相対微小すべりに起因してき裂が発生することがある。著者は、走行により発生する曲げ応力、高周波焼入れによる残留応力等により極めて複雑な状態下にある同き裂の把握に確率論的破壊力学をはじめて適用し、車軸の体系的な健全性評価のための計算力学的手法を構築した。本論文は、同手法の構築とその検証についてまとめたもので、全編6章からなる。

第1章は序論である。

第2章では、種々の寸法・形状のき裂を車輪圧入部に想定した新幹線車軸の健全性評価に確率論的破壊力学を適用し、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を評価した。これにより焼入れによる圧縮残留応力の導入ならびに非破壊的なき裂の検出・評価能力の向上が、破壊確率の低下に特に効果的であることを明らかにした。有益な知見である。

第3章では、車輪圧入部にき裂を模擬して挿入した人工切欠き付きの実物の新幹線車軸による疲労試験結果を解析し、疲労寿命の原分布の点推定、区間推定を行った。また同疲労試験の数値シミュレーションを実施し、その結果を同様に解析することにより、圧縮残留応力の有効性を検証した。

第4章では、第3章の疲労試験に関して、切欠きとき裂に相違が認められたことを取り上げ、局所ひずみ法および等価ひずみエネルギー密度法を用い、切欠き先端でのき裂発生寿命および圧縮降伏域の寸法を求めることにより第3章の解析精度を高め、疲労寿命の原分布のより現実的な点推定を行った。第3章と共に、実物の新幹線車軸を用いた疲労試験結果の構造信頼性工学に基づくはじめての解析である。

第5章では、直流電位差法により、新幹線車軸の車輪圧入部に発生するき裂の寸法・形状および位置を、車輪を圧入したままで正確に評価する逆問題解析に基づくき裂の定量的非破壊評価手法を提案した。有用な成果である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、確率論的破壊力学に基づいて新幹線車軸の健全性評価を行うにあたり、計算力学的手法の構成因子に関して詳細な検討を行い、手法を構築したもので、機械工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。