

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 9 月 5 日現在

機関番号：34407

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26390137

研究課題名(和文) 接触疲労き裂の全寿命シミュレーションモデルの構築

研究課題名(英文) Construction of a simulation model for whole life of contact fatigue cracks

研究代表者

赤間 誠 (AKAMA, Makoto)

大阪産業大学・工学部・教授

研究者番号：70425867

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：鉄道においては、車輪とレール間や車輪と車軸間で、接触疲労によってき裂が発生し、進展する場合がある。本研究は、計算力学的手法を用いて車輪、車軸及びレールにおける接触疲労き裂の「全寿命」シミュレーションモデルを構築した。本モデルは、き裂発生、短いき裂進展、長いき裂進展、分岐き裂進展及び急進破壊の時期を評価できるものとした。き裂発生条件はラチェッティングひずみの累積、短いき裂進展はHobsonモデル、長いき裂進展はRichardの混合モード負荷を考慮して等価K値範囲、分岐条件はHourlier and Pineau基準、分岐き裂進展はKI値範囲を用いた境界節点法で計算している。

研究成果の概要(英文)：In the railway field, cracks may occur due to contact fatigue between wheels and rails or between wheels and axles, and they have the possibility to develop. In this research, we developed a "whole life" simulation model of contact fatigue cracks on wheels, axles and rails using computational mechanics. In this model, we can evaluate the periods of crack initiation, short crack propagation, long crack propagation, branch crack propagation and brittle fracture. The crack initiation condition was considered cumulative ratcheting strain, Hobson model was used for the short crack propagation, and long crack growth was simulated according to the equivalent K value range considering mixed mode loading by Richard. For the branching condition, Hourlier and Pineau criterion was used. The branch crack growth was calculated by the boundary node method using KI value range.

研究分野：計算力学

キーワード：接触疲労き裂 レール 車輪 車軸 混合コード 境界節点法

1. 研究開始当初の背景

鉄道においては、構造部材間の接触によって疲労き裂が発生し、進展する場合がある。それらき裂の挙動が正確に究明できれば、安全性の確保と同時に経済的な保守計画の作成も可能となる。レールと車輪の接触疲労に関しては、主にヨーロッパの大学および研究機関で精力的に研究がおこなわれている。

接触する部材におけるき裂の発生から、最終的な破壊までの「全寿命」の段階は以下のように分類できる。即ち(1) き裂発生、(2) 短いき裂進展、(3) 長いき裂進展、(4) 分岐条件、(5) 分岐き裂進展及び急進破壊である。

2. 研究の目的

本研究は、計算力学的手法を用いて車輪、車軸及びレールにおける接触疲労き裂の「全寿命」シミュレーションモデルを構築することが目的である。研究期間内には以下のことを実施する。

(1) 鉄道車輪と車軸における、接触疲労き裂の発生条件を明らかにする。それらを計算力学的手法で予測するシミュレーションプログラムを作成する。レールについては、申請者は上記の研究成果があるが、さらに精度良いものに改良する。

(2) 鉄道車輪、車軸およびレールに関して、短いき裂進展条件と進展速度を明らかにする。それらを計算力学的手法でシミュレートするプログラムを開発する。

(3) 鉄道車輪、車軸およびレールに関して、長いき裂進展条件と進展速度を明らかにする。それらを計算力学的手法でシミュレートするプログラムを開発する。レールについては、申請者は上記の研究成果があるが、さらに車輪および車軸について、混合負荷荷重を考慮した進展を検討し、そのメカニズムを明らかにする。

(4) 鉄道車輪、車軸およびレールに関して、き裂の分岐条件を明らかにする。それらを計算力学的手法で予測するシミュレーションプログラムを開発する。

(5) 鉄道部材に関しての上記(1)から(4)まで、それぞれの遷移条件を明らかにし、き裂の発生から最終的な急進破壊までをシミュレートすることができる「全寿命」シミュレーションモデルを構築する。

3. 研究の方法

車輪、車軸及びレールにおける接触疲労き裂の「全寿命」シミュレーションモデルを構築するため、本研究計画では、以下の研究項目を実施する。

(1) 車輪、車軸及びレールについて、接触疲労き裂の発生条件を明らかにする。それらを計算力学的手法で予測するシミュレーションプログラムを作成する。

(2) 短いき裂の進展特性を明らかにし、それらのシミュレーションプログラムを開発する。

(3) 長いき裂の進展特性を明らかにし、それらのシミュレーションプログラムを開発する。

(4) き裂の分岐条件を明らかにし、シミュレーションプログラムを開発する。

(5) 上記(1)から(4)まで、それぞれの間の遷移条件を明らかにし、き裂の発生から最終的な急進破壊までをシミュレートすることができる「全寿命」モデルを構築する。

4. 研究成果

(1) 接触疲労き裂の発生条件の解明

車輪、車軸及びレールについて、接触疲労き裂の発生条件を明らかにし、それらを計算力学的手法で予測するシミュレーションプログラムを作成した。以下では、例としてレールに発生する転がり接触疲労(RCF)について記述する。接触部の応力、ひずみ等が有限要素法などの数値解析手法で求めることができれば、車輪及び車軸も同様に解析可能である。

車輪とレール間の RCF によってレール頭部表面にき裂が発生する場合がある。これは、ラチェティングによるき裂発生とした。

レール鋼はフェライト・パーライト構造とし、その微細組織構造は、初期に正六角形状としたフェライト・パーライト粒子にゆがみを与えることで作成した。各相には、材料特性(初期せん断降伏応力 k_0 、破壊の限界せん断ひずみ γ_c)を割り当てる。き裂発生位置はフェライト内でランダムとし、各相における全累積せん断ひずみ γ^{ij} が γ_c を超えた場合に、き裂が発生するものとする。フェライトとセメントタイトからなるパーライト層状構造の傾きもランダムとする。

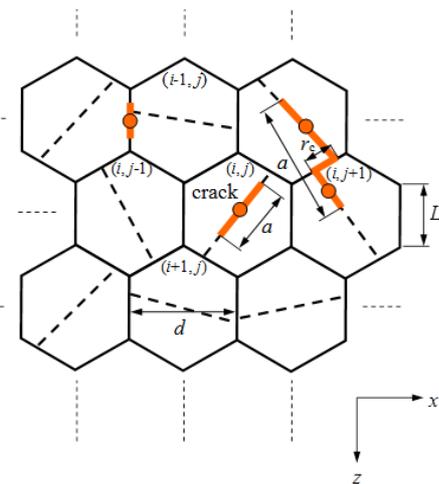


図1 フェライトとパーライト粒子

$$\gamma^{ij} = \gamma^{ij} + \Delta\gamma^{ij} \quad (1)$$

$$\Delta\gamma^{ij} = C \left[\left(\frac{\tau_{zx(\max)}^j}{k_{\text{eff}}^{ij}} \right) - 1 \right] \quad (2)$$

$$k_{\text{eff}}^{ij} = k_0 \max \left(1, \beta_s \sqrt{1 - e^{-\gamma^{ij}}} \right) \quad (3)$$

ここで $\Delta\gamma^{ij}$, $\tau_{zx(\max)}^i$, C 及び k_{eff}^{ij} は、それぞれ塑性せん断ひずみ増分、最大直交せん断応力、材料定数及び有効せん断降伏応力で、 β_s はひずみ硬化速度である。 i 及び j は、図 1 に示すような微細組織を構成するフェライトまたはパーライトの区画である。

(2) 短いき裂の進展条件、進展速度の解明

疲労き裂発生後、線形弾性破壊力学では扱うことのできない‘短いき裂’の進展が起こる。成長段階は、材料の微細組織と同程度の寸法である微細組織的き裂領域(ステージ)と、視覚的にも物理的にも寸法が小さく、小規模降伏条件が満たされない連続体破壊力学領域(ステージ)に分けられることが指摘されている。レールの RCF においては、疲労き裂の発生及び初期の進展と摩耗の相互作用が重要であり、条件によってはき裂成長が継続したり、摩耗によって消滅することが考えられる。そこで、このような短いき裂の特性を考慮し、進展を正確にシミュレーションできるプログラムを作成した。同時に摩耗の進行を予測するモデルも組み込み、その競合を検討できるようにした。

微細組織的き裂領域 (Stage)

Stage での短いき裂成長は、Hobson et al. によって提案された式を用いて計算する。この式は多結晶材料の最初の数粒子内における疲労き裂の進展を表している。き裂はフェライト相内では方向をランダムとしたすべり線に沿い、また粒界フェライトやパーライト相内のフェライトにも沿って、き裂面上の繰り返しせん断応力によって進展するものと仮定する。き裂進展速度はせん断応力とき裂先端間の距離及び支配的な微細組織のバリア、この場合は粒子境界などに依存するものとする。

$$\frac{da}{dn} = A\Delta\tau_{\omega}^{\alpha} \cdot (d-a) \quad (4)$$

ここで図 1 を参考に、 a はき裂長さ、 n は繰り返し数、 d は粒子の平均直径、 A 及び α は材料定数である。また $\Delta\tau_{\omega}$ は、き裂面に沿うせん断応力振幅である。

連続体破壊力学領域 (Stage)

き裂が先端において開口するほど十分長くなった時、Stage き裂成長が起こる。この時点において、微細組織の影響は限定され、き裂成長は連続体力学によって表すことができる。この場合も Hobson et al. によって提案された Stage き裂成長の式を用いる。

$$\frac{da}{dn} = B\Delta\varepsilon_1^{\beta} a - D \quad (5)$$

ここで $\Delta\varepsilon_1$ はき裂面上の全垂直ひずみ振幅、 β 、 B 及び D は材料定数である。

Stage から Stage への遷移時点でのき裂長さは、三粒子直径の値とする。遷移領域内ではき裂進展は式(4)と式(5)で高い方の値を用いることによって計算する。き裂の合体は、

図 1 に示すように、き裂長さ a が粒子直径 d の 75%に達し、それらき裂先端間の距離 r_c が d の 50%よりも小さくなったとき起こるものと仮定する。

粗さ接触

初期段階における短い表面き裂の成長は、表面の粗さに強く影響を受ける。本報告では、Seabra and Berthe による、表面粗さの振幅と波長に依存する接触圧力の集中効果 (PCF) を仮定した。粗さ接触は、PCF を直交せん断応力及び垂直応力に乗じることによって考慮する。

摩耗

転がり-滑り接触状態の摩耗モデルは、Archard 摩耗モデルを用いる。これは次式で定義される。

$$V_{\text{wear}} = k_w \frac{Nd_s}{H} \quad (6)$$

ここで V_{wear} は摩耗した材料の体積、 d_s は滑り距離、 N は垂直力、 H は柔らかい材料の硬さで、 k_w は摩耗係数である。接触問題は有限要素 (FE) 解析を行うとし、接触領域には縦方向 x に n_x 、横方向 y に n_y の節点が存在すると考える。領域における滑り速度 $s_x(x,y)$ 、 $s_y(x,y)$ 及び対応する接触圧力 $p_z(x,y)$ を用いると、任意の y 方向位置 j における一回転当りの摩耗深さ Δz_j を求めるためには、その位置にある x 方向の節点 i 全部からの寄与を加算する必要がある。

$$\Delta z_j = \frac{k_w}{H} \frac{\Delta x_j}{v_c} \sum_{i=1}^{n_x} p_z(x_{ij}, y_{ij}) \sqrt{s_x(x_{ij}, y_{ij})^2 + s_y(x_{ij}, y_{ij})^2} \quad (7)$$

座標 (x_{ij}, y_{ij}) で、接触領域内の節点列 j に沿う節点 i を表す。また v_c は回転速度、 Δx_j は x 方向の節点間隔である。摩耗モデルは、接触領域内の滑り領域でのみで考慮する。

このような短いき裂進展と摩耗の相互作用をシミュレーションすることができるモデルを、車輪鋼とレール鋼を組み合わせた二円筒転がり滑り接触疲労試験に適用してその妥当性を検証した。

二円筒試験の FE 解析を、汎用 FE ソフト Marc を用いて実施し、き裂成長と摩耗の相互作用の解析モデルに必要な $\Delta\tau_{\omega}$ 、 $\Delta\varepsilon_1$ 、 $p_z(x,y)$ 及び $s_x(x,y)$ 、 $s_y(x,y)$ を求める。

短いき裂と摩耗の相互作用のシミュレーション

短いき裂と摩耗の相互作用を解析する領域は、中心がレール側試験片の表面から 0.15mm 下の 0.9mm(x)×0.3mm(z)の矩形領域とした。き裂発生に関しての k_0 及び β_s はマイクロ硬度測定の結果から、フェライトが 190MPa 及び 1.41、パーライトが 320MPa 及び 1.41、 $C = 0.00237$ 、 $\gamma_c = 11$ とする。き裂成長に関しては、顕微鏡観察結果から $d = 31.8\mu\text{m}$ 、文献より $A = 1.85 \times 10^{-31}$ 、 $\alpha = 11.14$ 、レプリカ法を用いた疲労試験結果から $B = 0.504$ 、 $\beta = 1.466$ 及び $D = 3.57 \times 10^{-3} \mu\text{m}$ とした。また摩耗に関しては、

$H = 3494\text{MPa}$, $k_w = 1.0 \times 10^{-7}$ とした。 $\tau_{zx(\max)}$, $\Delta\tau_0$, $\Delta\varepsilon_t$, b , $p_z(x_{ij}, y_{ij})$, $s_x(x_{ij}, y_{ij})$, $s_y(x_{ij}, y_{ij})$, Δx_j 及び v_c は前述のFE解析から求めた。図2に、シミュレーション結果の例を示す。

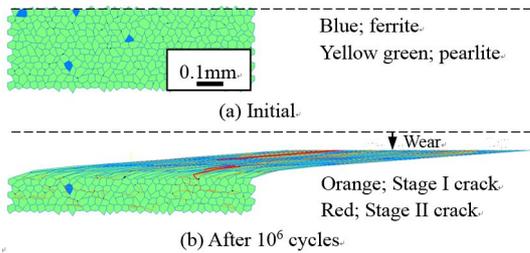


図2 短いき裂と摩耗の競合シミュレーション

(3) 長いき裂の進展条件、進展速度の解明

鉄道レールの「シェリング(欧米では squats という)」は、列車の車輪が繰返して接触することにより発生する転がり接触疲労き裂である。シェリングは立体的なき裂で、発生起点から最初は表面に対して浅い角度でほぼ水平に進展する。これは水平裂と呼ばれる。水平裂がある長さには達すると、表面に対して急峻な角度で分岐き裂が形成される。これが横裂で、この進展を放置すればレールの破断に至る可能性がある。また分岐き裂の形成後も水平裂は進展を続け、これによって標準的な超音波探傷では横裂を発見しにくくなっている。図3に典型的なシェリングの写真を示す。水平裂の進展速度、分岐の時期及び横裂の進展速度など、全体の過程がどのくらいかかるかは明確ではなく、それゆえ鉄道会社は現在、経験に基づいてき裂の長さに幾つかの基準値を設け、き裂がそれら基準に達した場合、適切な処置を施すことにしている。

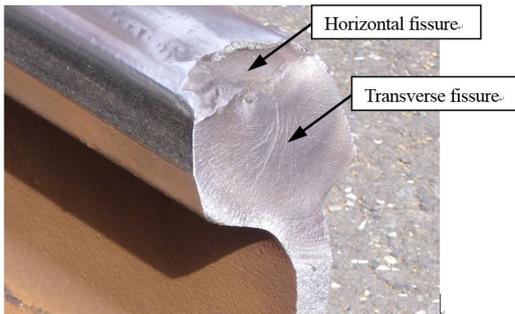


図3 レールのシェリング

近年、レール交換の原因として、最も大きな割合を占めるのがシェリングであり、全体の挙動が正確に解明できれば、莫大な費用を節約するために適切な処置が取れることになり、安全性の確保と同時に経済的な保守計画の作成も可能となる。ここでは「長いき裂」である水平裂の進展速度を予測するためにプログラムを開発した。

応力拡大係数(K値)の解析

以前、境界要素法(BEM)により、Hertz型接触圧分布が表面を移動する半無限体内の二次元(2D)表面傾斜き裂を水平裂とし、

K値解析を行った。き裂の傾斜角度 β 、き裂長さ a とレール・車輪間のHertz接触圧分布の半幅 c の比 a/c 、き裂面摩擦係数 μ_c 及び接触圧分布の最大値 p_0 と接線方向表面力 q_0 の比 q_0/p_0 を種々変化させて、引張りモード及び面内せん断モードのK値サイクルの変動範囲 ΔK_I 及び ΔK_{II} を解析した。き裂内部に流体が侵入した場合は、流体圧の発生を考慮して解析した。解析に用いたパラメータを図4に示す。

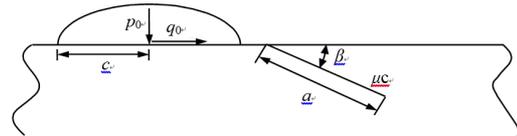


図4 半無限体内の傾斜き裂

種々の条件でき裂進展解析を行うためには、任意のパラメータの組み合わせでき裂の寸法に対する ΔK_I 及び ΔK_{II} を連続的に求める必要がある。ここでは次式を仮定し、BEM解析による結果を用いた二次式補間法で求めた。

$$\begin{aligned} \Delta K_I &= f(\beta, a/c, \mu_c, q_0/p_0), \\ \Delta K_{II} &= g(\beta, a/c, \mu_c, q_0/p_0) \end{aligned} \quad (8)$$

近似的三次元き裂化

上述のK値解析に用いたき裂は2Dき裂である。これを実際にレールに存在するき裂を模擬した三次元(3D)き裂に近似する。まず3Dき裂は半だ円き裂と考え、図5に示すように、き裂の幅方向に幾つかの2Dき裂を設定する。それらに対する車輪からの負荷は、輪重と車輪及びレールの形状を考慮してHertz理論で求めた3D半だ円体接触圧分布とした。各2Dき裂上を通過する際の最大値を前節の p_0 とした2D接触圧分布と考えれば、各2Dき裂の ΔK_I 及び ΔK_{II} が式(8)から求められる。3Dき裂とした水平裂は、同時に面外せん断モードのK値変動 ΔK_{III} も発生する。文献によると、図5に示す角度 α ($0 < \alpha < 45^\circ$)が 45° では、車輪が通過する際に水平裂に発生する ΔK_{III} と ΔK_{II} の比 $\Delta K_{III}/\Delta K_{II}$ は、種々の条件で0.9程度である。本研究では α が 45° では ΔK_{III} は ΔK_{II} と同値、 0° では0とし、その間の角度では線形的に変化すると考えた。

き裂進展解析

水平裂は K_I , K_{II} 及び K_{III} サイクルが重畳する非比例混合モード負荷を受けるが、全てのモードを負荷して実施できる実験装置は存在しないため、二軸引張り・圧縮疲労試験装置を用いて非比例 K_I , K_{II} 負荷によるき裂進展試験、引張り・捻じり疲労試験装置を用いて非比例 K_I , K_{III} 負荷によるき裂進展試験を行い、それぞれの負荷でのレール鋼のき裂進展速度を求めた。これらのデータを、Richardが提案した等価応力拡大係数範囲 ΔK_v で整理すると、Paris型進展則 da/dN は次式となる。

$$\frac{da}{dN} = 4 \times 10^{-11} (\Delta K_v)^{2.36}$$

$$\Delta K_v = \frac{\Delta K_I}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{\Delta K_I^2 + 4(1.115\Delta K_{II})^2 + 4(\Delta K_{III})^2}$$

(9)

ここで N は繰り返し数、き裂長さの単位は m、 K 値の単位は $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ である。

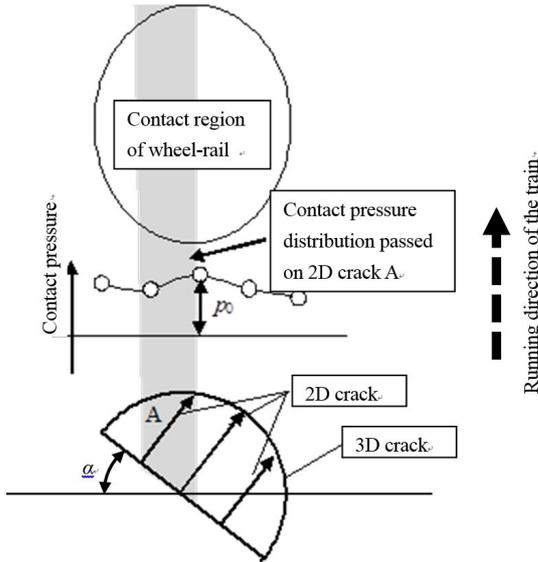


図5 レールの水平裂

二次式補間法によって任意のき裂寸法における ΔK_I 及び ΔK_{II} が求められれば、指定した N ごとに、すなわち車輪の通過数ごとに式(9)を積分することによって、水平裂進展のシミュレーションを行うことができる。3D き裂としての進展は、各 2D き裂に対して進展解析を行い、進展した 2D き裂先端を結ぶ半円形で近似した。

(4) き裂の分岐条件の解明

水平裂は、 K_I 負荷の繰り返し後に、両振り K_{II} 及び K_{III} 負荷が繰り返される非比例混合モード負荷を受ける。よって本研究では、非比例負荷のもとで検証されている Hourlier and Pineau 基準によって分岐時期及び角度を予測する。この基準は、き裂は微小な分岐き裂 s の先端における進展速度 da/dN が最大となる方向に沿った径路をたどるとするものである。図6に示すような角度が θ 傾いた s の先端における K 値 k_1 及び k_2 の表現に関しては、主き裂先端における K 値 K_I 及び K_{II} を用いた Amestoy の表現を用いる。

$$\begin{aligned} k_1 &= F_{11}K_I + F_{12}K_{II}, \\ k_2 &= F_{21}K_I + F_{22}K_{II} \end{aligned}$$

(10)

ここで F_{11} , F_{12} , F_{21} , F_{22} は解析的に求められた係数で、 θ に依存する。

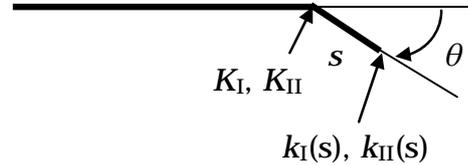


図6 K_I , K_{II} 及び k_1 , k_2 の定義

ΔK_I と ΔK_{II} から式(9)を用いて求めた進展速度 da/dN と、式(10)から求めた k_1 と k_2 の変動から得られた θ ごとの Δk_1 と Δk_2 を式(9)に代入して求めた進展速度の最大値 da^*/dN を比較し、(i) $da/dN \geq da^*/dN$ の場合には水平裂進展、(ii) $da/dN < da^*/dN$ の場合には進展速度が最大となる方向に分岐が起こるとする。ただし分岐き裂の下限界 K 値範囲を ΔK_{oth} とすると、 $\Delta k_1 < \Delta K_{\text{oth}}$ の場合には(ii)の場合でも分岐せず停留すると考える。ここで $\Delta K_{\text{oth}} = 8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ とした。また水平裂進展についても下限界値 $\Delta K_{\text{th}} = 3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ を設定した。

上記はき裂面に対して上下方向の分岐であるが、 K_{III} 負荷も受ける場合、き裂面に対して擦れれる方向への分岐が起こることも考えられる。しかし水平裂は初期に図5の α だけ傾いていても、列車走行方向に進展するため、 K_{III} の影響はほとんどなくなり、考慮しないことにする。

(5) 分岐き裂の進展条件、進展速度の解明

分岐き裂である横裂は、主にレール頭部内に発生する列車通過時の曲げ応力の他、気候によるレール温度変化で発生する熱応力及びレール製造時ならびに運用時の残留応力の影響を受ける。また分岐き裂である横裂は、主に K_I 負荷のみを受けると考えられる。横裂の進展はこれらを考慮したシミュレーションを行う。

横裂は、主にレール頭部内に発生する列車通過時の曲げ応力の他、気候によるレール温度変化で発生する熱応力及びレール製造時ならびに運用時の残留応力の影響を受ける。また分岐き裂である横裂は、主に K_I 負荷のみを受けると考えられる。横裂の進展はこれらを考慮したシミュレーションを行う。

K 値の解析

横裂の K 値解析は 3D 境界節点法 (BNM) を用いて行った。図7に、レール頭部断面の節点配置の一例及び種々のパラメータを示す。レール頭部のみを考慮し、直方体で近似している。

き裂進展解析

横裂の進展解析は、BNM と重ね合わせの原理を用い、以下の手順で行った。

(i) き裂のないレール頭部の列車通過時の応力解析を有限要素法 (FEM) でを行い、現場測定で得られた熱応力と残留応力を加算し、仮想き裂面上の応力分布 $\sigma(x,y)$ を求める。

(ii) 初期き裂形状を仮定し、 $-\sigma(x,y)$ を BNM でメッシュ分割したモデルのき裂面に負荷し、変位外挿法でき裂前縁の K_I 値を求める。

初期き裂は、分岐した時点での水平裂の位置と形状・寸法から仮定する。

(iii) き裂進展は、レール鋼を用いた K_I 負荷の疲労試験で得られた次の Paris 則を積分することで行なう。

$$\frac{d(a_1 \text{ or } a_2)}{dN} = 1.0 \times 10^{-15} \Delta K_I^{5.8} \quad (11)$$

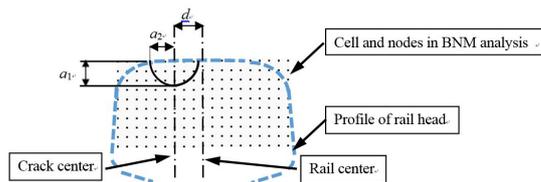


図7 BNM 解析における節点とセル

(6) 「全寿命」シミュレーションモデルの構築

上記(1)から(5)まで、それぞれの遷移条件を明らかにし、き裂の発生から最終的な急進破壊までをシミュレートすることができる「全寿命」シミュレーションモデルを構築する。遷移条件は、例えば短いき裂から長いき裂への遷移は、両者のき裂進展速度を比較し、短いき裂進展速度よりも長いき裂進展速度が速くなった時点で、遷移すると考える。

前述のパラメータ群及び車輪の通過数を指定し、水平裂と横裂の同次進展シミュレーションを行った結果の例を、図8に示す。

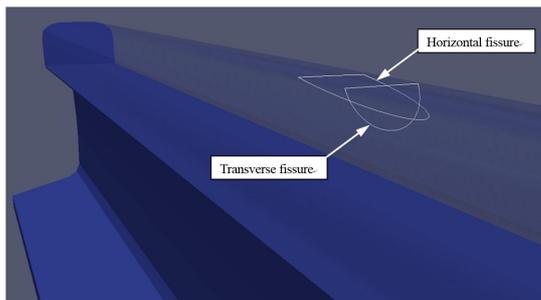


図8 水平裂と横裂の同時進展解析

5. 主な発表論文等

(研究代表者は下線)

〔雑誌論文〕(計2件)

(1) M. Akama, F. Ohya and K. Matsubara, “Numerical Simulation Model for Competition between Crack Propagation and Wear in a Railhead”, in “Proceedings of the Third International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance”, J. Pombo (Editor), Saxe-Coburg Publications, proof reading, United Kingdom, 2016. doi:10.4203/ccp.110.172.

(2) M. Akama, F. Ohya and K. Matsubara, “Numerical Simulation of Simultaneous Propagation of Horizontal and Transverse Fissures in Squats”, in “Proceedings of the Third International Conference on Railway Technology: Research, Development and

Maintenance”, J. Pombo (Editor), Saxe-Coburg Publications, proof reading, United Kingdom, 2016. doi:10.4203/ccp.110.251.

〔学会発表〕(計4件)

(1) 赤間誠, 大家史, 松原聖, レールシェリングにおける水平裂と横裂の同時進展シミュレーション, 日本機械学会, 2015年度年次大会, 北海道大学, 9.13-16, (2015).

(2) M. Akama, F. Ohya and K. Matsubara, “Numerical Simulation Model for Competition between Crack Propagation and Wear in a Railhead”, The Third International Conference on Railway Technology to be held in Cagliari – Sardinia, Italy, 5-8 April 2016.

(3) M. Akama, F. Ohya and K. Matsubara, “Numerical Simulation of Simultaneous Propagation of Horizontal and Transverse Fissures in Squats”, The Third International Conference on Railway Technology to be held in Cagliari – Sardinia, Italy, 5-8 April 2016.

(4) 木全孝文, 赤間誠, 転がり 滑り接触条件下の短いき裂の発生と成長及び摩耗との相互作用, 日本機械学会第23期関東支部総会・講演会, 東京理科大学, 3.16~17, (2017).

6. 研究組織

(1)研究代表者

赤間 誠 (Makoto, AKAMA)

大阪産業大学・工学部交通機械工学科・教授
研究者番号：70425867