

大規模並列計算による車輪・レール間の転がり接触解析手法の構築

公益財団法人鉄道総合技術研究所

1. はじめに

鉄道の車輪・レール間で生じる劣化現象として、車輪ではフラットと呼ばれる偏摩耗や多角形摩耗、レールでは波状摩耗やシェリングなどがある。これらの劣化による不整状態は、車両走行時に異常振動が発生して車両や路盤に影響を与え、騒音の増大や走行安全性の低下の原因となる。一方、これらの劣化現象は未解明な点が多くあり、車輪がレール上を通過する際の力学的挙動を精緻に評価することが重要な課題となっている。特に、車輪・レール間に生じる劣化は、kHz オーダーの高周波領域の振動負荷が発生要因の一つと考えられている。しかしながら、これらの現象を実験的に解明することは非常に困難である上、数値解析においても実現象を模擬するためには計算規模が大きくなることから、限られた条件で解析が行われているのが現状である。

そこで、地球シミュレータ上で有限要素法プログラム FrontISTR を用いて車輪とレール間の動的転がり接触解析を実施することで、車輪・レール間の力学的挙動を精度よく評価することにより劣化現象の解明を目指している。

2. 車輪・レール間の転がり接触解析

2.1 解析プログラム

地球シミュレータ環境での実行実績のある有限要素法プログラム FrontISTR を用いて車輪・レール間の転がり接触解析を行う。有限要素法のソルバには分散メモリ版非対称直接法ソルバ MUMPS を新たに組み込んでいる。また、車輪を加速させるために必要なレールは計算負荷低減のため、図1に示すような一部領域を繰り返し用いる方法（キャタピラメッシュ）を開発した。さらに、レールを伝わる弾性波の反射を防ぐため、レール端部にレーリー減衰を適用した要素を用いて無反射境界を設定した（図2）。

一方、大規模モデルにおける並列化率向上のため、メッシュモデルの領域分割において接触領域を一分割内に収めることにより、接触解析に関するノード間通信を不要とした。また、車輪が転動するために領域の再分割が必要であるが、その際の I/O の発生を抑えるため領域分割をオンメモリで実行し計算速度の高速化を図る。

2.2 車輪・レールモデルによる静的応力解析

FrontISTR の動作状況および実行性能を把握するため、静的応力解析を実施した。解析モデル、および解析条件を図3に示す。解析に用いたメッシュモデルは、節点数 299773、要素数 269232 である。なお、車輪とレールの接触部（コンタクトパッチ）については、接触領域のノードを共有して解析を行った。本解析では、16 並列（2 ノード、8CPU）および 32 並列（4 ノード、8CPU）により実施した。

応力解析の結果、荷重に対して妥当な応力値が得られた。また、それぞれの並列計算で結果に差異がないことを確認した。ベクトル化率についてはそれぞれ約 96%に留まっており、今後、処

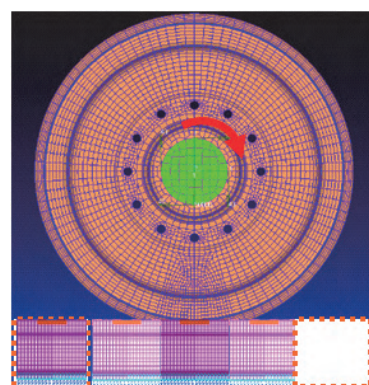


図1 キャタピラメッシュ

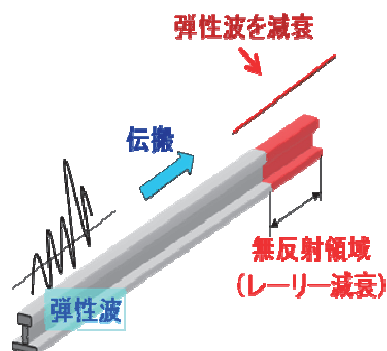


図2 無反射境界の設定

理速度を向上させるためプログラムのチューニングが必要になると考えられる。

2.3 車輪・レールモデルによる動的転がり接触解析

地球シミュレータ上での FrontISTR による動的転がり接触解析を実施するため、プログラムの機能追加と移植、並列計算の性能向上のための領域分割方針の検討およびチューニングを行っている。これらの作業と合わせて、先に開発した SMP 版による解析プログラムを用いて PC 環境で動的転がり接触解析を実施した。計算機の性能による制約から図 4 に示すような簡易モデルを使用している。メッシュモデルの要素数および節点数はそれぞれ 63398/83235 である。時間積分は Newmark β 法を適用し、積分時間刻みを 5×10^{-4} sec. とした。一方、接触解析は Lagrange 乗数法を用いて接触圧を評価している。車輪の並進速度については、静止状態から時速 300km まで加速させた。なお、計算は Xeon 3.3GHz のデュアル CPU 機で 8 コアを使用して解析を実行した。

2.4 動的転がり接触解析結果

車輪・レール間の動的転がり接触解析を実施し、車輪の並進速度を時速 300km まで加速させることができることを確認した。計算時間は約 4 週間を要している。図 5 にレール踏面（上部表面）における接触面の Z 方向垂直応力分布を示す。合わせて接触面における法線力および接線力を求め、負荷している輪重およびトルク荷重と比較して計算結果の妥当性を確認した。ただし、図 5 のレールの接触面の応力分布をみると最大応力の発生位置がレール長手方向に対して左右に生じている。これは、車輪の板厚方向のメッシュ分割が粗いために接触解析での解の精度が低下しているためと考えられる。

3. おわりに

鉄道のレールや車輪に生じる劣化現象を解明するため、地球シミュレータにより車輪・レール間の動的転がり接触解析を実施して接触面の力学的挙動を評価することを目指している。開発中の有限要素法解析プログラムにより解析を実施して、結果の定性的な妥当性を示した。現在、大規模な実形状モデルによる解析を実施するため、地球シミュレータへの解析プログラムの実装作業を行っている。平成 24 年度中には不整を模擬したレールの解析モデルを用いた転がり接触解析を実行し、車輪・レールの接触面の力学的挙動を高周波領域まで評価する。

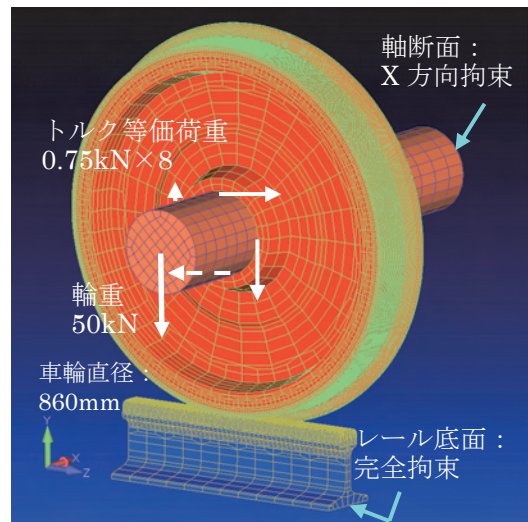


図 3 静的応力解析モデル

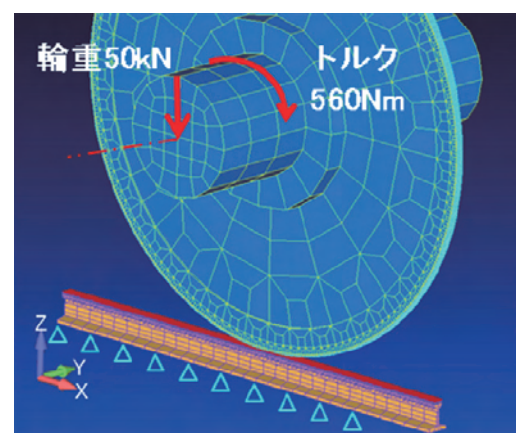


図 4 動的転がり接触解析モデル

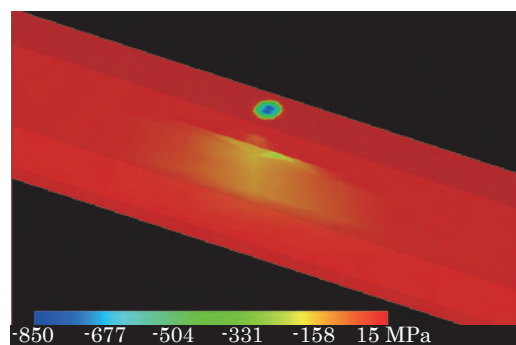


図 5 レール踏面の垂直応力分布