車輪・レール間の弾塑性転がり接触解析プログラムの開発

鉄道総合技術研究所 正会員 〇坂井宏隆,相川 明 鉄道総合技術研究所 非会員 林 雅江,高垣昌和

1. はじめに

著者らは大規模並列有限要素法構造解析ソフトウェア FrontISTR をもとにして,鉄道の車輪・レール間にお ける弾塑性転がり接触解析現象を再現する解析プログラムを開発した.本プログラムは,(1)駆動力による加 減速時の転動挙動を再現し,(2)車輪・レール間の法線方向接触力はラグランジュ未定乗数法により,接線方 向接触力はペナルティ法により評価し,(3)高速走行時に生じる約 2kHz までの衝撃力を解析可能,という特 徴を有する.本報告では,その概要を紹介するとともに,2つの計算例をもとにモデルの妥当性を検証した.

2. 弾塑性転がり接触解析プログラムの開発

(1) <u>キャタピラメッシュモデルの開発</u>車輪の高速走行を模擬するには長 いレールモデルが必要となるが、車輪の荷重は接触面近傍のみ伝達すること から、ある程度離れた領域は解析結果に大きく影響しないと考えられる.そ こで、図1のように、車輪通過後のレールを、順次前方に移動させて解析を 実施する「キャタピラメッシュ」を開発した.本法によりレールの長さに関 わらず、転動による加減速状態を連続的に計算できるようになった.

(2) <u>弾性波に対する無反射境界の導入</u>レールの長さが短い場合,車輪の転動により発生する弾性波がモデル端部で反射して,解析結果に影響するものと考えられる.そこで図2のように,モデル端部にレーリー減衰を適用した無反射境界を設定することにより,境界端面での反射の影響を抑止した.
(3) 助走区間モデルから評価区間モデルへの移行インターフェースの開発

本解析では、キャタピラメッシュにより効率的な加速計算を行う.これを助走区間と呼ぶ.これに対し、実際の軌道構造やレール不整など特定の要因

をモデル化した区間を設け、そこでの走行を模擬する ことで、各種要因の接触挙動に対する影響を評価する. これを評価区間と呼ぶ.助走区間と評価区間では軌道 側の有限要素モデルが異なる.通常、有限要素メッシ ュが異なれば計算結果を引き継ぐことは容易ではない. そこで、助走区間で得られた各節点・各要素の力学状 態や接触状態の情報を、評価区間モデルを連結させた 新しい有限要素メッシュに引き継がせ、計算を再開さ せる必要がある.本研究では、図3に概要を示すよう に、キャタピラメッシュとリスタート機能を使用する ことにより、本インターフェースを実装することに成 功した.





図3 助走区間から評価区間への移行アルゴリズム

3.1軸1輪モデルによる加速解析

車輪・レール間の応力分布について、低速時の準静的な理論解(弾性解析)との比較を行う.モデルを図 4 に示す.レールは UIC 規格の 54E1 であり、レール底面は完全固定とした.要素は6面体1次要素とし、モデル

キーワード 転がり接触解析,弾性解析,弾塑性解析,大規模有限要素法,FrontISTR 連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38 E-mail: sakai.hirotaka.75@rtri.or.jp

-877-

の規模は約 120 万節点,110 万要素であ り,車輪,レールの接触面のメッシュサ イズは 1 mm とした.物性については, 密度 7.81×10³ kg/m³,摩擦係数 0.3,時 間増分 1.0×10⁴ s,接線剛性ペナルティ 1.0×10⁴,輪重 130.0 kN,駆動トルク 2.0×10³ Nm とした.

図 5 は速度 20 km/h の時のコンタ クトパッチの鉛直方向垂直応力の分布 である. コンタクトパッチは楕円形をな し,定性的な傾向は既往の研究成果に一 致する. また図 6 は,コンタクトパッチ の中心を通るレール縦方向の線上で切 った時の応力分布である. 図中には, Hertz の接触理論による理論解(実線)と Kalker の CONTACT を用いた計算結果 (\blacktriangle),また Zhao らの計算結果(\blacksquare , \circ)を示 す¹⁾. 図より,レール縦方向に対するコ



ンタクトパッチの大きさ、応力分布ともに、理論解および既往の解析解と概ね一致することがわかる.また、 図7は、レール上の接線方向接触力(節点反力)の分布である.図では、レールの 接触点反力の符号を入れ替えて描画した.図より、接線方向接触力はコンタクトパ ッチ内で一様ではなく、車輪進行方向に関して、後方部に大きな値が集中すること がわかる.この傾向に関しても既往の研究成果に符合するものである.

4. 総目を模擬した評価区間モデル構築と車輪通過時の衝撃解析

図8はディスク形状の車輪と頭頂面に曲率を有するレールからなるモデルである. まず車輪を助走区間にて 90 km/h まで加速し,評価区間に移行させる.評価区間の レール長は 3200 mm であり,評価区間の開始箇所から 648 mm の地点に深さ 3 mm の

継目落ちを設けた. レール下面は連続弾性支持とした. 図9は,本 解析から求められた法線方向接触力変動分の合計値 ΔP に関して, 静的な法線方向接触力の合計値P で正規化した値を示す.本解析で は 3.535 秒付近で継目箇所を通過し,その直後に輪重の約3 倍の衝 撃力が生じた. 今回の解析条件を Jenkins の経験式²⁾に当てはめる と, $\Delta P/P$ はおよそ 1.2~2 の範囲にある.本解析では減衰能を低く 見積もっており, Jenkins の式より若干大きめの応答値となった.







5. まとめ

本研究では、車輪・レール間の転がり接触弾塑性解析プログラム を開発し、車輪とレールの接触部の応力分布を理論解と比較した.また、継ぎ目通過時の衝撃荷重の応答波形 を調べ実現象との整合性を確認した.本研究で開発したプログラムは、今後、レールシェリング、波状摩耗、 あるいはバラスト軌道劣化などの発生メカニズムの解明や、各種対策工の評価等への活用が期待される。

参考文献: 1) Zhao, X., Li, Z.: The solution of frictional wheel-rail rolling contact with a 3D transient finite element model: Validation and error analysis, Wear, Vol. 271, pp. 444-452, 2011.

²⁾ H.H. Jenkins, J.E. Stephenson, G.A. Clayton, G. W. Morland and D. Lyon, The Effect of Track and Vehicle Parameters on Wheel/Rail Vertical Dynamic Forces, Railway Engineering Journal, Vol.3, No.1, pp.2-16, 1974.1.