多自由度振動系における転がり接触表面上のコルゲーション生成実験*

須田 義大^{*1}, 佐野 成寿^{*2}Experiments of Corrugation Formation on Rolling Contact
on Many-Degrees-of-Freedom Vibration System

Yoshihiro SUDA and Naruhisa SANO

In this paper, the growth mechanism of corrugations on rolling surfaces caused by plastic deformation has been examined by experiments. Using an experimental machine with the rolling contact of two wheels, whether the corrugations grow or diminish has been determined by changing the natural frequencies of many-degrees-of-freedom vibration systems. In the case of a system with two degrees of freedom, rigid support of the roller rig leads to long-wave corrugation due to the first coupled natural frequency. On the contrary, soft support introduces short-wave corrugation. Namely, the wave length and stability conditions of corrugations depend on the coupled natural frequencies. These conditions of corrugation stability gained by experiments agree with the theoretical calculations using models of a non linear self-excited system.

Key Words: Vibration, Non-linear Vibration, Corrugation, Experiment, Contact Vibration, Rolling Contact, Self-Excited Vibration

1. はじめに

転がり接触表面上に発生するコルゲーションは、交通機械、各種産業機械などで大きな問題となっている。接触面が平滑であっても、接触を繰返すうちに、接触面内の振動が原因で接触面の周期的な変形が生じることにより発生するコルゲーションは、騒音、振動問題を引き起こすだけでなく、機械そのものの機能を損う場合もあり、その対策が望まれている。

このうち鉄道レールに発生するコルゲーションは、波状摩耗とも呼ばれており、古くから知られた現象である。しかし、その発生原因や詳細な機構は種々の説が提案されているものの明確な対策は得られてはいなかった。そこで、著者らはこの現象を変形を伴う一種の非線形系における自励振動の安定性の問題と捉え、1自由度の振動系をもつ実験装置において実際にコルゲーションを発生・成長させ、その詳細な解析と理論検討により、コルゲーションの成長・減衰機構を明らかにしてきた^{(1)~(3)}。さらに、振動系の影響についても、理論解析により検討を加えた⁽⁴⁾。

これまでに得られた興味深い結果は以下のとおりである。コルゲーションの波長や成長・減衰条件、すなわち自励系の安定性は、振動系の固有振動数に大きく依存すること、2自由度系のように複数の連成固有振動数が存在する場合は、支持剛性によって選択性のあること、などである。本研究は、これらの理論検討結果を検証すべく、多自由度振動系のうち最も簡単である、弾性的に支持された軌条輪と車輪を転がり接触させる上下方向2自由度振動系を持つ実験装置を作製し、固有振動数、速度、車輪質量を変化させてコルゲーション生成実験を行った。その結果、理論結果から得られた成長機構とほぼ一致する実験結果が得られたので以下に報告する。

2. 実験装置

実験装置は文献(1)での実験をほぼ再現できるように設計した。図1に実験装置の写真と概略を示す。車輪と軌条輪が転がり接触する構造となっている。取扱い上の容易さを考慮して、車輪、軌条輪ともに小形化し、それぞれ直径100 mm, 160 mmとしたので、文献(1)と同様、実際の鉄道との相似性は特に考慮していない。本実験装置の振動モデルを図2に示す。

実験で可変とする条件は、接触面での速度 V 、軌条

* 原稿受付 平成2年6月4日。

^{*1} 東京大学生産技術研究所 (〒106 東京都港区六本木7-22-1) (法政大学工学部)。^{*2} 日産エアロスペースエンジニアリング (法政大学大学院)。

輪が単体で存在するときの上下方向固有振動数 f_R (線形近似, 以下軌条輪の固有振動数と呼ぶ), 軌条輪が固定されているときのヘルツ弾性接触による車輪の上下方向固有振動数 f_x (線形近似, 以下車輪の固有振動数と呼ぶ), 接触面圧 P とした。よって, これらの値を設定できるように, 実験装置には以下の工夫を施した。すなわち, 車輪を駆動するモータはインバータ制御とし, 任意の一定速度に設定できるようにした。軌条輪の回転はロータリエンコーダを用いて測定し, 回転むらも検出できるようにした。軌条輪の固有振動数を変化させるため, 軌条輪を板ばね支持とし, 剛性を変えられるようにした。車輪の回転以外の自由度は, スライド軸受けで上下方向に拘束し, 車輪の固有振動数と接触面圧の調節は, 車輪と一体となって可動する部分の荷重を調節した。

コルゲーションは柔らかい材質(軟鋼 S20C)を用いた軌条輪に発生させ, 車輪は実際の鉄道車輪に準じた材質(SCM435)を用いて変形を防止した。なお, 本実験では, 変形の原因は塑性変形を仮定している。発生したコルゲーションの保存と実験と容易性を図るために, 軌条輪は幅 1.99 mm の円盤をフランジで挟む構

造となっており, 交換が簡単にできる。

車輪, 軌条輪ともに接触表面および上下振動を, 渦電流式非接触変位計でリアルタイムに測定し, コルゲーションの発生状況, 振幅や周波数の変化, 振動との関係などを測定した。

3. 理論解析結果と実験条件

今までの理論解析結果⁽⁴⁾より, コルゲーションの成長・減衰条件は, 車輪と軌条輪の固有振動数の比によって大きく変化する。図 3 に, 本実験装置の諸元を用いて, 文献(4)の理論解析手法で求めたコルゲーションの成長・減衰条件を示す。すなわち, 軌条輪支持剛性が硬く固有振動数が大きければ, コルゲーションは連成 1 次の低い固有振動数に依存し, 波長 λ が長くなる。図の縦軸はコルゲーションの振動数 f_x (速度を波長で割った値) を示している。逆に軌条輪支持剛性が柔らかければ, 連成 2 次の高い固有振動数に依存し, 波長は短くなる。一方, 両固有振動数がほぼ等しいと, コルゲーションの成長・減衰は生じにくく, もし発生するときは二つの波長を持つこともあり得る。

本実験では, これらの興味深い結果を踏まえて, 以

図 1 実験装置の概要

図 2 振動系のモデル

図 3 理論解析によるコルゲーションの成長・減衰条件と実験結果の比較

下の条件を設定した。

(1) 車輪荷重：車輪部の質量を 29.2 kg, 44.5 kg の 2 通りとし, LW, HW と区別する。塑性変形が原因のコーゲーションを念頭においているため, 弾性限度と静止荷重の比で表すと, それぞれ 0.6 倍, 0.9 倍となる。また, 車輪の固有振動数はそれぞれ 90.6 Hz, 73.4 Hz となる。

(2) 軌条輪支持剛性：剛性を 3 通り用意し, 軌条輪の固有振動数で, 56.72 Hz, 118.39 Hz, 159.53 Hz に相当する。それぞれ S, M, H と区別する。車輪の固有振動数との比で表せば, 荷重が LW のとき, 0.63, 1.31, 1.76 となり, HW のとき, 0.77, 1.61, 2.17 となる。

(3) 車輪回転速度：波長が振動数によって定まること, すなわち波長が速度に比例することを確認するため, 接触面での速度を, 1.3 m/s, 1.6 m/s, 1.9 m/s の 3 通りに設定した。

これらの組合せにより合計 23 通りの実験を行った。

(a) コルゲーションの成長過程

(b) スペクトル解析結果

(c) 300 rev. におけるコーゲーションと車輪および軌条輪振動の関係

図 4 実験で発生したコーゲーション (実験 2, $V = 1.9$ m/s, 車輪荷重: HW, 軌条輪支持剛性: H)

4. 結 果

図 4 に, 実験で発生したコーゲーションの一例を示す。実験条件は, 荷重が HW, 軌条輪支持剛性が H, 車輪速度 1.9 m/s である。(a) 図は表面形状の変化を表し, 軌条輪の回転数で 200 rev. 以降に, 波長がおおよそ 42~45 mm のコーゲーションが発生・成長する過程がわかる。(b) 図はコーゲーションの振動数のスペクトル解析結果である。振動数では, 42~45 Hz に相当し, ほぼ一定である。(c) 図は, 300 rev., すなわちコーゲーションが発生した接触面の繰返し接触数が 300 回めのときの, 車輪と軌条輪の振動波形を示す。

コーゲーションの波長が, 振動数一定の関係で定まるかどうかを調べたのが図 5 である。波長が速度にほ

図 5 コルゲーションの波長と速度の関係

(a) コルゲーション

(b) 車輪の上下振動

図 6 コルゲーションと車輪振動のスペクトルの比較 ($V = 1.6$ m/s, 車輪荷重: HW, 軌条輪支持剛性: S)

ば比例し、軌条輪の支持剛性に応じてほぼ一定のコレージョンの振動数が存在することがわかる。すなわち、軌条輪支持剛性が硬い場合(H)のほうが、柔らかい場合(S)よりも振動数は低くなり、速度が等しければ波長は長くなることを示している。支持剛性が中間(M)の場合は、波長は複数の振動数に依存する。すなわち、複数の波長を持つコレージョンの成長が見られた。

また、表面の硬さは初期状態でショア硬さで19.1であるが、実験後は22~24となり、加工効果が生じていた。コレージョンの発生回転数は、速いケースでおよそ200 rev.であり、円盤の幅も最大0.3 mm程度広がった。よって、変形の原因は文献(1)と同様、塑性変形が主たる要因と考えられる。

荷重が軽い(LW)場合や、軌条輪の支持剛性が中間(M)の場合は、1500~5000 rev.でようやくコレージョンの発生が見られた。実験後の硬さが大きい場合はこのような条件のときであり、変形の原因も塑性変形とともに摩耗も伴っていた。

5. 考 察

コレージョンの振動数と軌条輪の支持剛性との関係を明確にするため、図3の理論解析結果には、これらの実験結果を重ねてプロットしてある。軌条輪の支持剛性が硬いと連成1次の低い固有振動数に依存するため、コレージョンの振動数は低くなり波長が長くなる。軌条輪が柔支持であれば、連成2次の固有振動数に依存して波長は短くなる。中間の場合では、両者の固有振動数に近い振動数を持つコレージョンが発生する。これらの結果は理論解析結果とよく一致する。

軌条輪の支持剛性が柔支持の場合では、コレージョン自体は2次の連成固有振動数とほぼ一致する波長のみが成長するが、振動自体は連成1次に相当すると考えられる振動が当然発生する場合がある。図6は、 $V=1.6$ m/s、軌条輪の支持剛性がS、荷重がHWの条件でのコレージョン発生・成長過程のスペクトル解析結果を示す。(a)図のコレージョンの振動数については、125~135 Hzの連成2次に対応する成分のみが顕著であるが、(b)図の車輪の上下振動においては、およそ29.5 Hzの連成1次に対応する振動も現れている。この実験では、いくら振動が生じて、コレージョンの成長条件を満たさない振動成分ではコレージョンの成長が見られず、成長条件を満たす振動数のコレージョンが新たに自励的に成長することを示している。

コレージョンの発生防止という観点から見ると、

接触力にほぼ比例して変形が進むと考えられるから、面圧が低いLWの場合では、発生が抑制されている。また、文献(4)で論じたように、車輪と軌条輪の固有振動数比に近い条件では、2種類の波長を持つコレージョンの成長の可能性もあるが、成長度自体は小さい。本実験でも、この条件に相当する支持剛性Mの場合では、コレージョンの発生回転数は大きく、実験によってはコレージョンの発生がみられないケースもあった。

以上のように、本実験結果をまとめると文献(4)で予測した理論解析結果と一致する点が多く見られた。しかし、一部の実験では、天板の固有振動数と考えられるおよそ900 Hzの高周波振動が現れ、コレージョンの発生・成長過程になんらかの影響を与えているとも考えられること、コレージョンの波長などについての実験の再現性は十分あるが、連成2次の固有振動数に対応する車輪と軌条輪振動については、詳細な位相関係についてばらつきが生じること、など理論解析に用いた比較的単純な2自由度振動モデルでは、解析できない現象も一部存在する。これらの点については、非線形特性の影響と考えられるので、今後さらに詳細な解析を行う予定である。

6. 結 言

転がり接触表面上のコレージョン生成機構を解明するため、二つの鋼製車輪を転がり接触させる実験装置を作製し、実験により多自由度振動系がコレージョン成長・減衰条件に与える影響を調べた。その結果、上下振動に伴い塑性変形が原因で発生するコレージョンについては、成長するコレージョンの波長や成長条件は、振動系の上下方向連成固有振動数に依存することを明らかにした。コレージョンの波長が長くなる条件は、接触面の速度が高いこと、軌条輪の支持剛性が硬く軌条輪単体の固有振動数が高いことである。コレージョンの発生を抑制するには、面圧を低くすること、車輪と軌条輪それぞれの単体の固有振動数をほぼ等しくすることである。以上は、理論解析で得られた結果と一致した。

本実験装置の製作および実験に御協力いただいた法政大学工学部機械工学科の後藤秋次氏、卒論生細田剛君、長沢芳秋君、久米功一君に感謝する。

文 献

- (1) 須田・井口・今泉・谷口, 機論, 54-499, C(1988), 537.
- (2) 須田・井口・今泉, 機論, 54-499, C(1988), 544.
- (3) 須田・井口・今泉, 機論, 54-499, C(1988), 552.
- (4) 須田・佐野, 機論, 56-521, C(1990), 39.