

制御付きボギー角連動操舵台車の開発

車両構造技術研究部 車両振動

主任研究員 鴨下 庄吾

1. はじめに

鉄道車両の曲線通過速度向上のためには、速度向上に伴って増加する横圧に配慮する必要がある。横圧の発生は車輪、レール摩耗を増進させ、著大になると脱線の危険性を増加させる。このような横圧を低減させる方策として、曲線走行中に輪軸を操舵して発生横圧を抑制させる操舵台車¹⁾があり、これまでに様々な形式の操舵台車が研究・開発されてきた。特に台車-車体間の旋回動作に応じて輪軸を操舵するボギー角連動操舵台車²⁾は円曲線区間での横圧低減効果が大きく、振子特急気動車として既に実用化している方式である。

ただし、緩和曲線区間では幾何学的に構成される台車ボギー角と軌道の曲率が整合しないため、円曲線区間のような大幅な横圧低減が達成されず、性能改善の余地があることが指摘されていた。そこで、油圧アクチュエータを用いて緩和曲線区間で台車旋回方向に能動的な制御力を与え、横圧低減を行うシステム(制御付きボギー角連動操舵台車)を開発した。本報では、制御付きボギー角連動操舵台車の横圧低減効果に関して、車両のダイナミクス系とコントローラ系をそれぞれモデル化して数値解析する連携シミュレーション手法と、試作した制御システムを搭載した車両の構内走行試験結果に関して報告する。

2. ボギー角連動操舵台車の構造

ボギー角連動操舵台車の基本的な構造を図1(操舵アクチュエータを除く)に示す。空気ばねを搭載した操舵はりは車体荷重を支持し、適切な台車旋回フリクションを与えるための側受けすり板を介して台車枠横はりの上に構成され、回転自由度を持つ中心ピンまわりに旋回動作を行う。操舵はりと車体間の旋回はボルスタアンカで拘束されているため、上下方向を除いて両者は一体に動作する。このような操舵はりの動作と連動させて操舵リンクと操舵レバーを構成し、台車旋回によって外軌側では前軸と後軸の軸箱を相互に拡大して軸距を延長し、内軌側では軸箱間隔を縮小させて軸距を短縮する。この操舵リンクの動作によって、ボギー角に応じて台車枠に対して輪軸を旋回させる。前軸と後軸の輪軸が逆相の輪軸ヨ一角を持つ方向で機械リンクを構成し、さらに前位と後位の台車では、操舵はりに対する台車枠の回転方向が逆になるため、1車両の輪軸4対のラジアル位置への操舵動作が実現されることとなる(図2)。

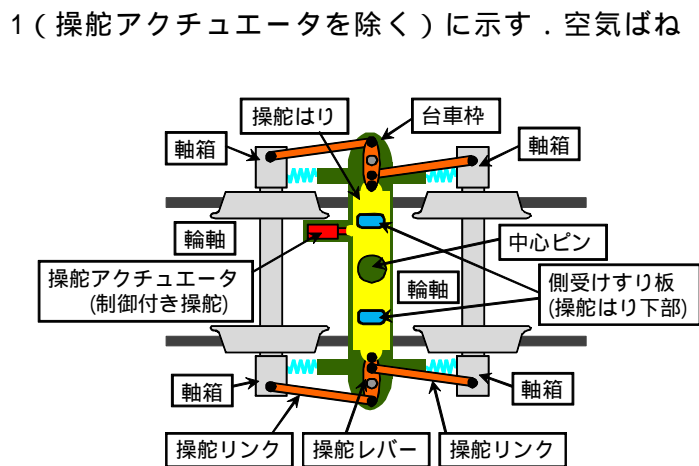


図1 ボギー角連動操舵台車の構造

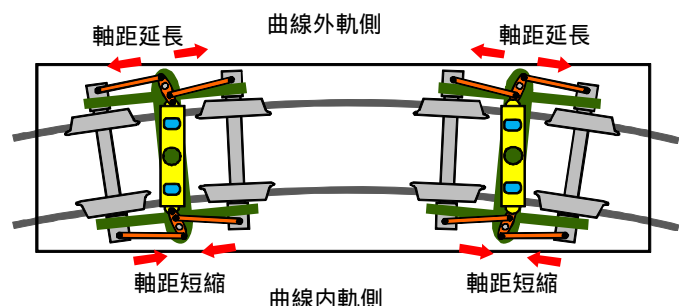


図2 曲線走行時の操舵リンク動作

3. 操舵制御技術導入のための機器構成

緩和曲線区間において横圧低減効果が低い理由は、台車の走行位置において必要なリンク動作のためのボギー角と、実際に構成されるボギー角が異なっていることによる。さらに、操舵はりは高速直線走行時の蛇行動安定性を確保する目的で、横はりとの接触部にすり板を設けており、この摩擦抵抗の影響で操舵リンクには動作遅れが発生する。これらに起因する台車旋回の遅れを改善するため、アクティブな制御動作によって与えた外力で台車旋回動作を補完し、緩和曲線中の横圧低減を図る操舵システムについて検討を行った。操舵用アクチュエータには、台車内に搭載するために許容されるスペースと必要な発生力との兼ね合い、および良好な応答特性が期待できることから油圧アクチュエータを適用することを想定した。台車枠と操舵はりの間にアクチュエータを構成し、側受けすり板による摩擦トルクと並列に能動的な台車旋回トルクを発生させる構成である。操舵はり中心ピンからオフセットした位置にアクチュエータを組み込み、アクチュエータ伸縮トルクを台車旋回トルクに変換する（図1：操舵アクチュエータ）。

操舵制御の方式には、制御付き振り車両で実用化している予見制御方式を採用した。現在の自車走行位置を逐次検出し、事前に調査した軌道情報データベースを参照して予見的に操舵制御指令値を生成する方式である。ボギー角連動操舵台車への操舵制御の適用は、その主要な横圧低減対象を緩和曲線区間と考えており、指令出力の遅れによって十分な横圧低減効果が得られなくなる可能性がある。また、当該台車を使用した車両は制御付き振り車両であり、車両の走行位置検出機構および軌道データが既に搭載されていることが前提となる。このような制御付き振り車両で使用する走行位置検出機能と軌道データは、操舵制御にも流用可能と考えられる。従って、予見制御コントローラの機能は与えられた軌道データと走行位置、走行速度情報などから操舵制御パターンを生成する機能に限定されるため、高性能な予見制御コントローラを、トータルコストを抑えて導入することができる。今回の試験では、基本的な原理実証用の操舵制御目標パターンとして、緩和曲線区間位置に合わせてランプ状に操舵トルクを上昇させ、緩和曲線中一定の操舵トルクを維持した後、圧力を低下させるパターンを採用した。

4. 連携シミュレーションによる横圧評価

制御付きボギー角連動操舵台車の性能を評価するため、操舵制御系を含めた全体システムのシミュレーションを実施した。シミュレーションは通常のボギー角連動操舵台車のモデルにアクチュエータ、およびコントローラ系を付加し、制御付き操舵台車の全体システムを再現した。それぞれのモデルは、鉄道車両向けのツールが充実したマルチボディダイナミクス解析用のシミュレータ（SIMPACT）、および数式処理をブロックライブラリの結合で表現して計算を実行する汎用ソフトウェア（SIMULINK）を利用して作成し、両者のシミュレーションを同期・連携させてシステム全体のシミュレーションを行った（図3）。連携シミュレーションは、車両モデルシミュレータ側から走行位置、速度などの車両の運動状態に関するパラメータを出力し、コントローラ側の処理に引き渡す。それらの変数が入力されたコントローラモジュールは操舵制御によって生成される操舵発生力を求め、この発生力を車両モデル側にフィードバックする。このような手順を各サンプリングタイムごとに繰り返して実行し、規定した走行区間を通過するまで計算を繰り返す。実車での試験実施時には、コントローラ系

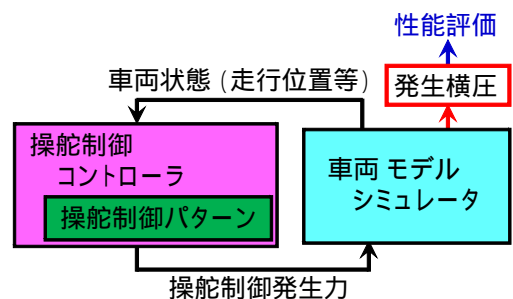


図3 システムの連携シミュレーション表現

の処理をリアルタイム OS を搭載した制御装置に移植すれば、容易に実システム向け操舵コントローラが実現できるメリットがある。なお、シミュレーションの試験線区は、走行試験実施を行う鉄道総研構内の試験線の軌道データを使用した。また、通常台車に対するボギー角連動操舵機構の効果を確認するため、操舵リンク関係の作用を除去した台車（ボルスタ式の通常台車）のシミュレーションも同様に実施した。

ボギー角連動操舵，制御付き連動操舵，ボルスタ式通常台車の3条件における構内走行シミュレーション結果を図4に示す。それぞれの状態を「連動操舵」，「連動+制御」，「操舵リンクなし」と表現する。走行速度は，構内走行試験条件を考慮して18km/h程度と

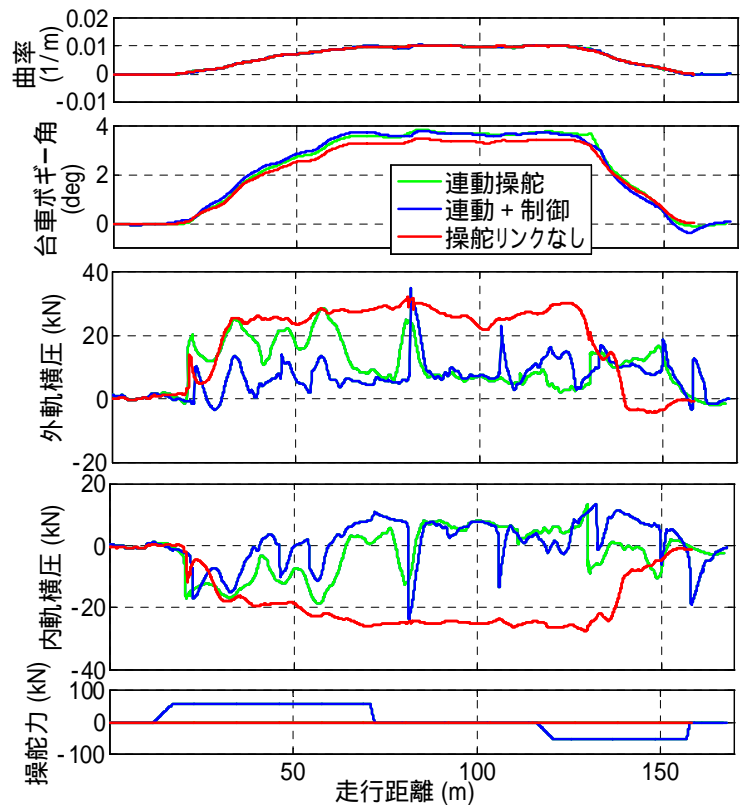


図4 構内走行シミュレーション結果

している。円曲線区間での台車ボギー角は「操舵リンクなし」に比べて「連動操舵」「連動操舵+制御」が大きくなり、発生横圧が内外軌とも大幅に低減する結果となった。本試験での「操舵リンクなし」条件の軸箱前後支持剛性は通常台車に比べて非常に小さく、輪軸の自己操舵動作が作用し易くなるため、発生横圧が低いことが想定されるが、「連動操舵」の横圧低減効果には及ばず、連動操舵機構の優位性が示されている。さらに、操舵制御力の付加によって緩和曲線部の横圧を効果的に低減させていることがわかる。ただし、出口側緩和曲線の横圧低減に関して、構内走行試験の線路形状条件においては「連動操舵」の状態が最も発生横圧が低い結果となった。

5. 構内走行試験結果

制御付きボギー角連動操舵システムを試験車両に搭載し、構内走行試験を行った。油圧アクチュエータとして、メンテナンス性に配慮しEHA(Electro Hydraulic Actuator)を使用した(図5)。EHAとは油圧シリンダ、ピストンポンプ、サーボモータ、油タンクなどを一体に構成したユニットで、ポンプに直結したサーボモータの回転方向および回転速度の電氣的な制御によって直接アクチュエータ発生力をコントロールする。EHAは、一般的なサーボバルブを使った油圧システムに比べエネルギー効率がよく、油圧系の配管接続個所が少ないため作動油漏れの可能性の低い油圧アクチュエータである。また、作動油の汚染に弱いサーボバルブを使用していないため、その汚染管理基準も比較的緩やかになり、メンテナンス性に優れた油圧システムである。EHAは車両の走行位置に合わせて事前に策定した操舵パターン目標値への力制御を行うこととなる。

フェイルセーフ性の検証のために行った逆操舵制御時の横圧変化状況を含めた走行試験結果を図6に示す。出入口緩和曲線部の平均横圧を制御条件別に表示した。



図5 試験台車に取り付けた操舵EHA

外軌入口，および内軌出口では，操舵制御力に対する発生横圧はほぼ線形に変化し，外軌入口では操舵制御による横圧低減効果が認められ，最大操舵力（55kN）において外軌側平均横圧が1/2以下になっていることがわかる．ただし，内軌出口では操舵制御による横圧低減効果が認められず，シミュレーションと同様に制御動作によって横圧上昇を招く結果となった．これは，構内試験線の出口緩和曲線形状に関しては操舵制御を行わない状態での発生横圧が極めて少なく，与えた操舵制御力が過大であったためと考えられる．今回の走行試験では，操舵パターンとして緩和曲線部のみで操舵力を与える簡易な方法を採用したが，より適切なパターンを検討する必要がある．

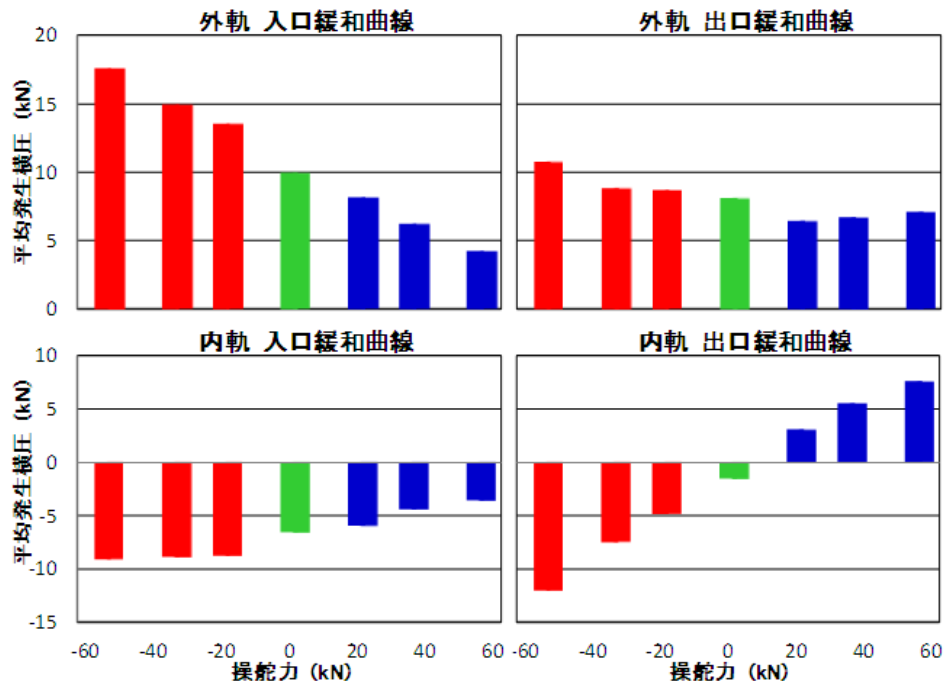


図6 構内走行試験結果

これは，構内試験線の出口緩和曲線形状に関しては操舵制御を行わない状態での発生横圧が極めて少なく，与えた操舵制御力が過大であったためと考えられる．今回の走行試験では，操舵パターンとして緩和曲線部のみで操舵力を与える簡易な方法を採用したが，より適切なパターンを検討する必要がある．

6. まとめ

ボギー角連動操舵台車の緩和曲線における操舵動作の遅れを補完し，横圧低減効果を向上させるため，制御付きボギー角連動操舵システムに関する検討を行った．連携シミュレーションおよび走行試験の結果から，次のような知見が得られた． 入口緩和曲線区間において，先頭軸外軌側の平均横圧は制御操舵力に応じてほぼ線形に変化する． 最大操舵力において操舵制御を行った場合，入口緩和曲線区間での平均発生横圧をほぼ半減させる効果が得られる． 逆操舵方向にアシスト操舵力が与えられた場合，操舵力の大きさに応じて発生横圧が上昇する．

今後の課題として，より営業線に近い条件での走行試験実施が望まれる．また，操舵制御パターンの策定に関して，データベースとして与えられた曲率・カントなどの線形情報と車両の走行速度などからリアルタイムに適切な操舵パターンを生成する手法が必要となる．走行試験に使用した台車の側受けすり板の摩擦係数は，台車の蛇行動安定性と緩和曲線区間での発生横圧に影響する重要な因子であり，操舵制御効果の定量的な評価にも波及する要因となる．パッシブ状態での性能と制御付き操舵性能のトレードオフに配慮し，適切なすり板の選定基準と制御手法などに関して今後の検討が必要である．また，逆操舵動作時には，発生横圧を増加させる事象が明らかになったため，今後の実用化に向けてシステムのフェイルセーフ性確保が必須の課題である．

参考文献

- 1) 佐藤栄作：操舵台車における横圧と最近の操舵台車の技術動向，鉄道車両と技術，No.7，pp.12-19，1997
- 2) 佐藤栄作 他 5 名：リンク式ボギー角連動方式による特急気動車用操舵台車の曲線通過横圧，日本機械学会論文集（C 編），Vol.64，No.625，pp.315-322，1998