

正 [機] ○梅原 康宏 (鉄道総研) 正 [機] 鴨下 庄吾 (鉄道総研)

正 [機] 石栗 航太郎 (鉄道総研) 下田 恵輔 (JR 北海道)

Development of Electro-Hydraulic Actuator with Fail-Safe Function for Steering System

Yasuhiro UMEHARA, Railway Technical Research Institute 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji City
 Shogo KAMOSHITA, Railway Technical Research Institute
 Kotaro ISHIGURI, Railway Technical Research Institute
 Keisuke SHIMODA, Hokkaido Railway Company

In order to decrease the wheel lateral force of the bogie angle linked steering truck during its passage in the transition curve section, we developed an electro-hydraulic actuator for steering system, and through a running test on the test line it was confirmed that this system was effective. Moreover, in order to prevent reverse steering in case of failure of steering control, we designed a hydraulic circuit with fail-safe function based on the results of the hydraulic circuit simulation and the fundamental performance test, and through the bench test we confirmed the fail-safe function and the fundamental performance of the electro-hydraulic actuator equipped with fail-safe circuit.

Keywords : vehicle, steering truck, assist steering, curving performance, electro-hydraulic actuator, fail-safe function, hydraulic circuit

1. はじめに

鉄道車両の走り装置として、曲線通過性能を向上させるために様々な方式の操舵台車が提案されてきた。その中でも台車～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は円曲線区間での横圧低減効果が大きいことに加えて、逆操舵動作が発生する危険性がほとんどないため、国内で既に実用化されている。しかしながら、ボギー角連動操舵台車は円曲線に比べて緩和曲線区間での横圧低減効果が小さい。そこで電動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、さらなる横圧低減を行う操舵システムについて検討を行った。本稿では、開発した操舵システムを搭載した実車両の構内試験結果およびフェールセーフ機能を備えた油圧回路の原理およびベンチ試験結果について記す。

2. 操舵台車の機器構成

2.1 ボギー角連動操舵台車

ボギー角連動操舵台車の基本的な構造を図 1(a)に示す。台車枠と操舵はりの相対旋回角に輪軸が連動するように操舵レバーと操舵リンクを構成することで、曲線通過時の台車旋回によって外軌側軸距を拡大し、内軌側軸距を縮小する(図 1(b))。このように曲線区間のボギー角に応じて機械的に輪軸を操舵動作させてアタック角を減少させる台車がボギー角連動操舵台車である。

走行試験結果における通常台車と操舵台車の外軌側区間平均横圧を図 2 に示す¹⁾。円曲線区間において大幅な横圧低減効果が確認できるが、緩和曲線区間では効果が少ない。そこで、緩和曲線区間で補完的な操舵力をアクチュエータにより付加するアシスト操舵技術の適用を検討することとした。

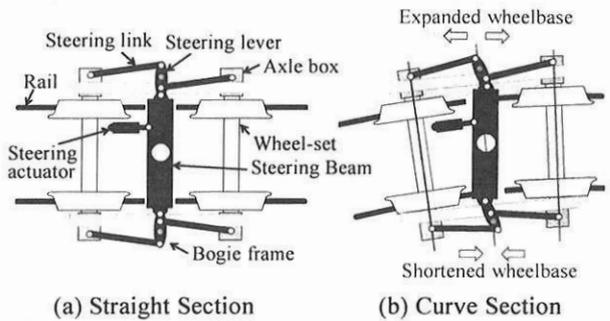


Fig.1 Bogie angle linked steering truck

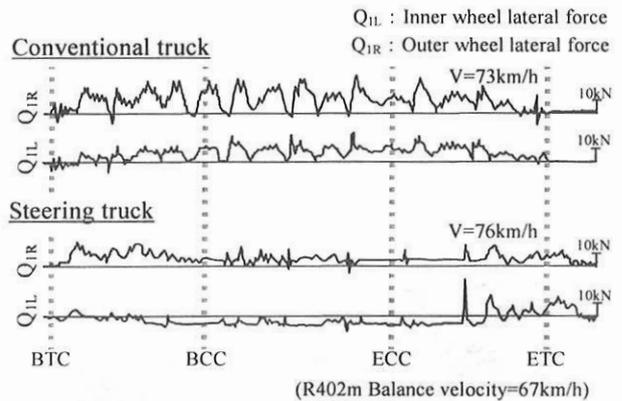


Fig.2 Waveforms of lateral force at field tests

[No. 12-79] 日本機械学会 第 19 回鉄道技術連合シンポジウム講演論文集 [2012-12. 5~7. 東京]

2.2 操舵用電動油圧アクチュエータの適用

操舵システムの操舵用アクチュエータには、台車内の搭載スペースと必要な発生力を考慮し、良好な応答特性が期待でき、配線など仮設が容易である電動油圧アクチュエータを適用することとした。図1に示すように台車枠と操舵はりの間にアクチュエータを構成し、伸縮による推力を台車旋回トルクに変えて、側受すり板による摩擦力を打ち消して、台車が旋回し易くする制御を行う。台車に装備した操舵用電動油圧アクチュエータの外観および主要諸元を図3、表1に示す。

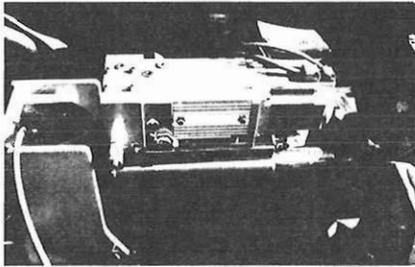


Fig.3 Electro-hydraulic actuator for steering truck

Table 1 Specifications of steering actuator

Rated Force	±34kN
Maximum Force	±55 kN
Maximum Speed	14 mm/sec
Stroke	81mm
Maximum Steering Torque	±21 kN・m

3. 構内走行試験

アシスト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、構内走行試験を実施した(図4)。操舵制御方法としては、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。今回の試験では、基本的な原理実証用の操舵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力を上昇させ、緩和曲線中一定の操舵力を維持した後、円曲線の進入位置付近で圧力を低下させるパターンを採用した。操舵力の大きさは、シミュレーションでその傾向を把握し、走行試験時には安全性を確認しつつ徐々に操舵力を増加させてデータ取得を行った。

走行試験で観測された、先頭軸内外軌の発生横圧、ボギー角、操舵アクチュエータ発生力等を距離軸で表示した結果を操舵制御の有無について図5に示す。また、逆操舵の試験結果も含めて、操舵アクチュエータ発生力を変化させた場合の入口緩和曲線での平均横圧を図6に示す。加えた操舵力に発生応力が比例して変化する効果が確認できた。最大操舵力による操舵制御により、非制御に比べて平均横圧が1/2以下に低減されている。

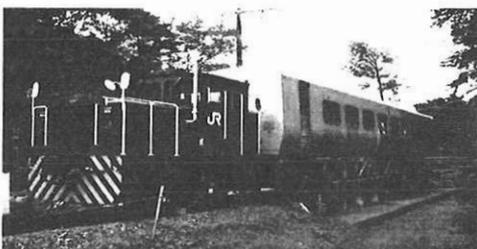


Fig.4 Running test

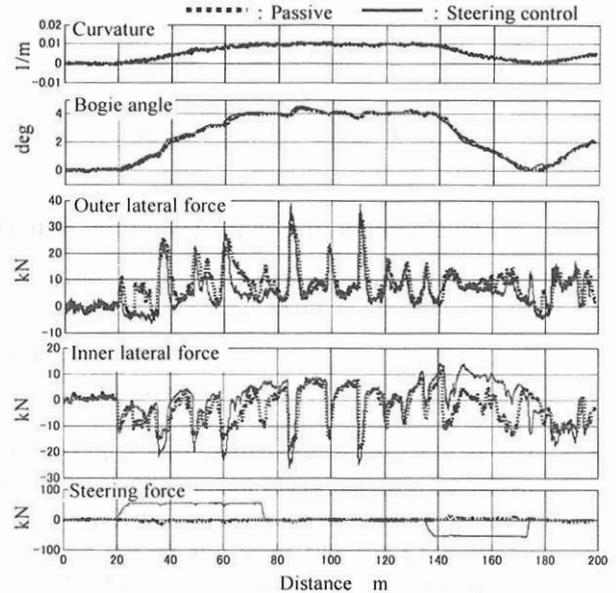


Fig.5 Result of running test

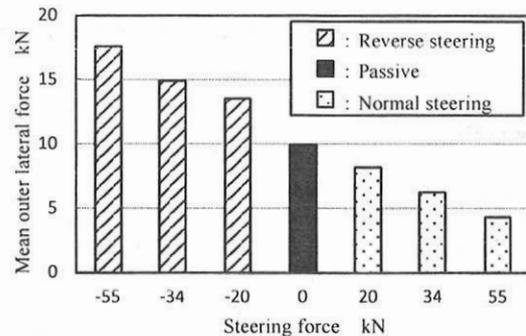


Fig.6 Mean outer wheel lateral force at inner transition curve

4. フェールセーフ機能

この方式では台車～車体間にアクチュエータを設け緩和曲線通過時に台車の旋回方向に旋回を補助する力を加えることで横圧を低減させるため、万一アクチュエータが逆方向に力を発生(逆操舵)すると図6のように横圧が増大する。このため、フェールセーフ対策が必要となる。フェールセーフ対策として、センサを活用してフェール検知を行い安全性を確保する方法と機械的にフェール状態を回避する方法を検討しており、本報告では機械的にフェール状態を回避する方法について示す。

操舵用アクチュエータのシリンダには、正常動作時に台車旋回を助ける方向に圧力が負荷されるが、異常動作時には台車旋回に逆らう方向に加圧されるためシリンダ内部が高圧となる。シリンダ内圧が規定圧を超えた場合に規定圧以上の圧力を逃がす弁(リリーフ弁)を用いることで制御圧を抑制し、異常動作時の影響を軽減することは可能であるが、この方法では異常動作時に負荷される圧力を正常動作時の最大圧力以下にすることができない。このため、異常動作時にはより低い圧力で加圧側シリンダ内の作動油を逃がしアクチュエータが発生する力を抑制し、正常時には作動油を逃がさない構造が必要である。そこで、制御方向を判別する弁とリリーフ回路を組み合わせた油圧回路をポンプ～シリンダ間に追加することでフェール動作を抑制する回路の開発を行った。

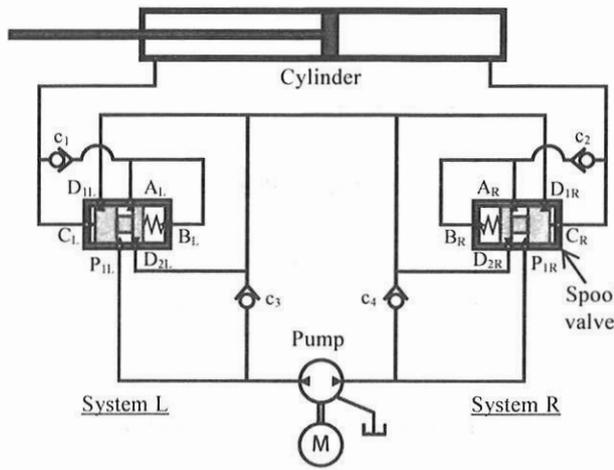


Fig.7 Failsafe hydraulic actuation system

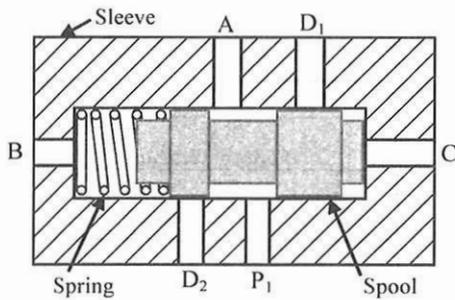


Fig.8 Spool valve

油圧回路およびスプールバルブの概略図を図 7 および図 8 に示す。ここで図 7 の左半分を系統 L、右半分を系統 R とする。操舵用油圧シリンダと電動式油圧ポンプはスプール弁ならびにチェック弁 c_1 , c_2 を介して接続されている。スプール弁は 6 つのポートを有しており、動作状態によって油の流れを制御する。正常動作の例として、ポンプにより系統 R 側のシリンダを加圧しピストンを系統 L 側に変位させ、これと同時に外部から系統 L 側にアクチュエータを変位させる（制御方向と実際のアクチュエータ変位が同じ）場合、ポンプから回路に供給される作動油は、系統 R 側のスプール弁 ($P_{1R} \rightarrow A_R$) を経由して、シリンダ手前のチェック弁 c_2 を通りシリンダへ導入される（図 9）。これに対して逆方向動作の例として、ポンプにより系統 R 側のシリンダを加圧しピストンを系統 L 側に変位させ、これと同時に外部から系統 R 側にアクチュエータを変位させる（制御方向と実際のアクチュエータ変位が異なる）場合、逆方向の動作が発生し設定以上にシリンダ内の圧力が高くなると、スプール弁の動作によりバイパス回路が構成されポンプから回路に供給される作動油は系統 R 側のスプール弁 ($P_{1R} \rightarrow D_{2R}$) を経由してチェック弁 c_3 を通りポンプ低圧側へと流れる。この動作とともに操舵用油圧シリンダ高圧側の作動油を逃がす回路が構成されるため操舵用油圧シリンダへの供給圧が制御され、逆方向動作が抑制される（図 10）。また、逆方向動作が発生した後の正常動作への復帰は、ポート C_L , C_R , B_L , B_R を通じてスプール弁端部に負荷されるアクチュエータ圧力、およびバルブに組み込まれたスプール弁保持用ばねの釣り合いによる。なお、

ポート C_L , C_R はパイロット用のポートと規定圧を超えた場合のリリーフポートを兼ねている。なお、油圧回路は系統 L, R ともに同じ構成であるため、前記の動作例においてシリンダ加圧方向と外部変位の方向が逆転しても同様の動作をする。

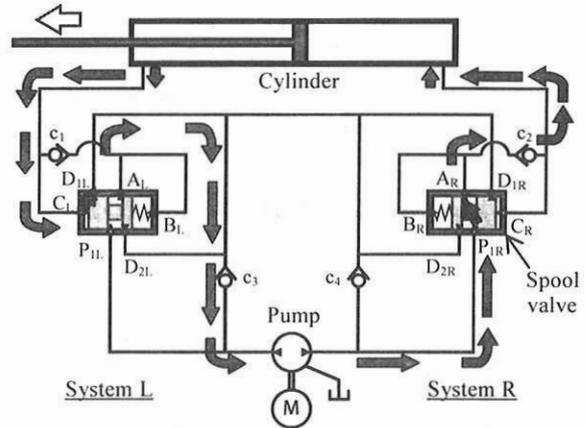


Fig.9 Flow of the actuation system in the correct operation

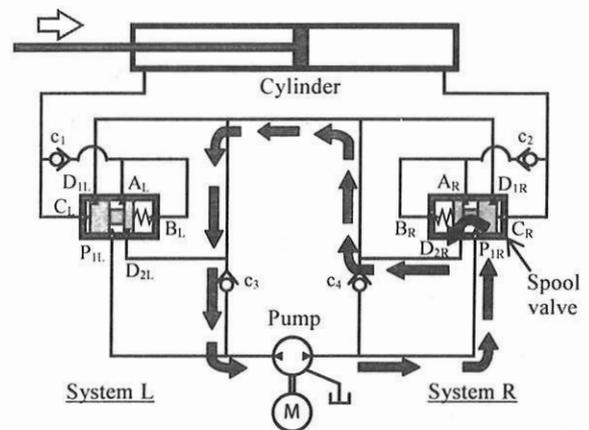


Fig.10 Flow of the actuation system in the fault operation

動作検証試験ならびに同等の試験条件を設定したシミュレーションにおいて逆方向動作時の結果を図 11 に示す。ピストン速度 4mm/s にて制御シリンダ（アクチュエータ）に強制変位を与え、制御シリンダ動作中は、ポンプに対して吐出指令を継続した。図中の実線が試験結果、破線がシミュレーション結果である。

制御シリンダ動作開始時にシリンダ内圧は 6MPa 程度まで急上昇するが、スプール弁が動作することで、シリンダ内圧を抑制できていることが確認できる。その動作はシミュレーションにおいても同等の結果を示している。実験値においてスプール弁動作後の定常的な残留圧力は、それぞれ 0.2MPa , 0.7MPa と若干の差があり、シミュレーションに用いたポンプモデルが動作検証試験に用いたポンプ特性を十分に再現できていない可能性が考えられる。シミュレーション結果ならびに動作検証試験結果を詳細に比較すると、一部で両者に異なる点も見られるが、動作検証試験の傾向をおおむね再現するシミュレーション結果が得られており、油圧回路ならびにスプール弁の設計に活用できることを確認した。

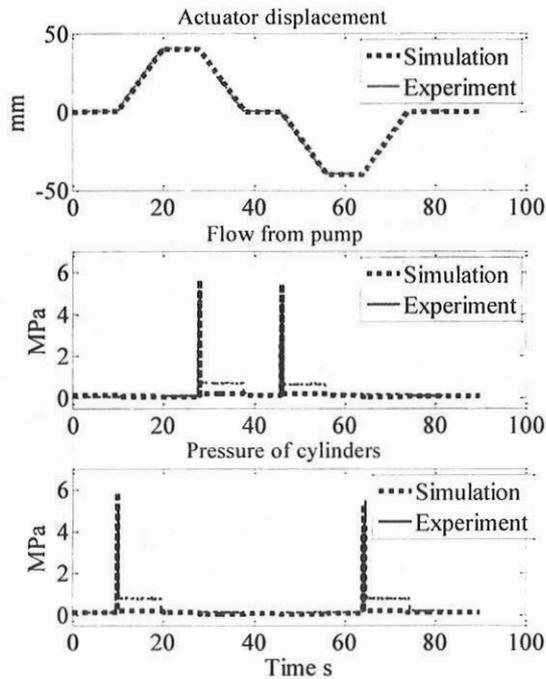


Fig.11 Result of the fault operation

次にこのシミュレーションを使用して操舵用電動油圧アクチュエータに内蔵可能なフェールセーフ油圧回路の配管径、スプールバルブ内のオーバーラップ量等のパラメータ設計を行い、製作を行った。図12に操舵用電動油圧アクチュエータに内蔵した状態のフェールセーフ油圧回路の外観を示す。

ベンチ試験においては、操舵用電動油圧アクチュエータの対向位置に曲線通過時のボギー角を模擬するアクチュエータを設け、基本性能およびフェールセーフ性能を確認した。図13に操舵制御時、図14に制御フェール時の操舵用アクチュエータの変位および発生力を示す。図中の実線がヘッド側、破線がロッド側発生力である。図13では制御方向とボギー角によるアクチュエータ変位が同じであるため、フェールセーフ油圧回路が動作を阻害することなく操舵力が発生していることが確認できる。また図14ではボギー角によるアクチュエータ変位と反対方向に、操舵用アクチュエータが力を発生するように指令が入力され、油圧ポンプが動作しているが、結果としてアクチュエータによる力は立ち上がり時にわずかに発生するだけで、全体を通して小さく、フェールセーフ性が確保できていることが確認できた。

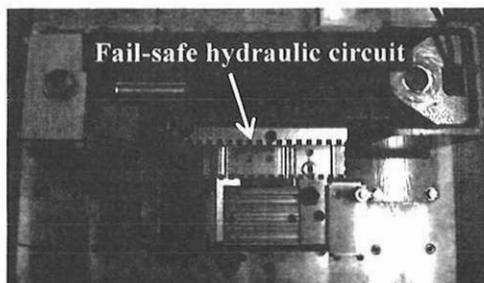


Fig.12 Fail-safe hydraulic circuit

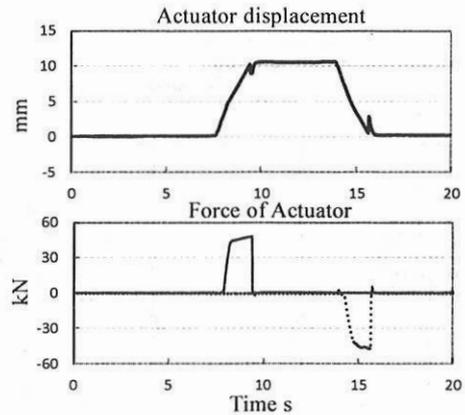


Fig.13 Result of the steering operation

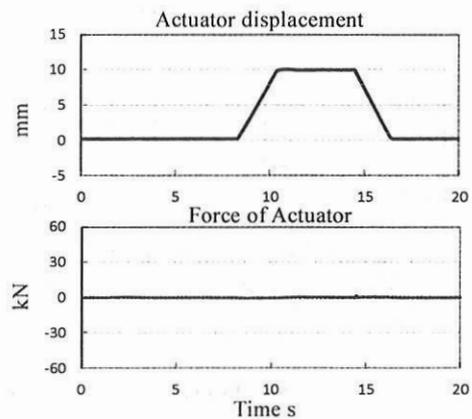


Fig.14 Result of the fault operation

5. 終わりに

ボギー角連動操舵台車に適応可能な操舵用電動油圧アクチュエータを開発し、実車両における構内試験より横圧低減効果を確認した。またフェールセーフ性を考慮し、機械的なフェールセーフ機能を備えた油圧回路を考案し、原理実証試験およびシミュレーションより性能を確認した。シミュレーションにより求めた油圧回路諸元をもとに製作したフェールセーフ油圧回路を操舵用電動油圧アクチュエータに組み込み、ベンチ試験にて操舵性能を阻害することなく、フェールセーフ性を確保できていることを確認した。今後は実車両に装備しても同様な性能を確保していることを確認していく予定である。最後にフェールセーフ機能付操舵用電動油圧アクチュエータの製作にご協力頂きました(株)TAIYO 殿に深くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) E. STO, et al. : Lateral Force between Wheel and Rail during Curve Negotiation of Limited Express Diesel Car with Forced Steering Bogies, Vehicle System Dynamics Supplement 37, pp.678-689, 2002