

車両用ダンパ試験装置の開発

車両構造技術研究部 走り装置

副主任研究員 渡辺 信行

1. はじめに

鉄道車両用オイルダンパ（以下、ダンパと呼ぶ）は鉄道車両の台車、車体の様々な箇所に取り付けられており、乗り心地改善や走行安全性の向上に大きく寄与する部品である。この特性選定は車両開発の大きな課題となっている。一方で、主軸方向以外の動きを許容するためにダンパ両端に取り付けられた弾性部材がダンパ特性に及ぼす影響や、主軸方向以外の動きによって各方向に発生する力が車両の運動特性に及ぼす影響については必ずしも明確になっていない。

このような背景から、製品状態のダンパを実走行状態で試験することができるダンパ試験装置を製作した。このダンパ試験装置は鉄道車両の全形式のダンパを実走行と同じく3次元で加振することができ、さらに、シミュレーションと連動してHILSシステムを構成することを目指した試験装置である。本発表ではダンパ試験装置の概要とこれまでに実施した特性試験、また、この試験装置を用いたダンパ特性の同定試験及びHILS試験について報告する。

2. 試験装置の構成

試験装置の外観を図1に示す。取付ブラケットの交換や取付位置を変更して任意のダンパに対応する。水平方向の左右動ダンパ、垂直方向の軸ダンパ、それぞれの取り付け状況を図2に示す。

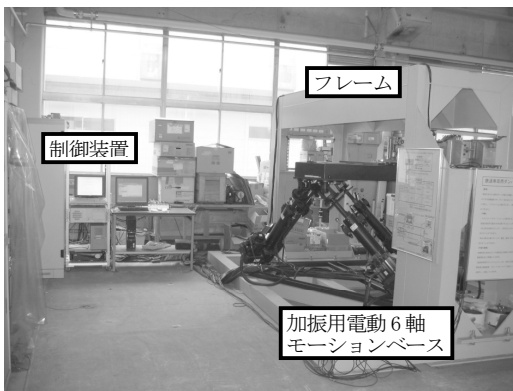


図1 試験装置外観

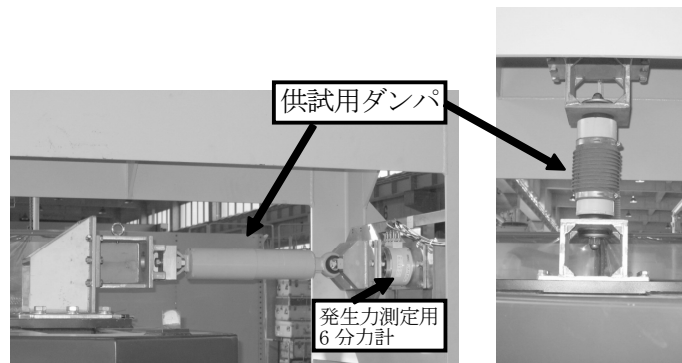


図2 ダンパ取付例（左：左右動ダンパ 右：軸ダンパ）

3. 試験装置の特性改善

HILSではシミュレーションループの中に実機を組み込んで、リアルタイムにシミュレーションを実行する。各時間ステップでコンピュータ上のモデルが計算した姿勢に、忠実に試験装置が遅れることなく実機を動かすことが精度と安定性の面から重要である。このため、ダンパの姿勢を決めるモーションベースの姿勢と指令値を一致させるための補正を加える必要がある。モーションベースの姿勢と指令値が異なる要因には、図3に示すようにモーションベースの伝達特性に起因する動的な要因と、取付誤差によって現れる加振軸のねじれ等静的な要因がある。

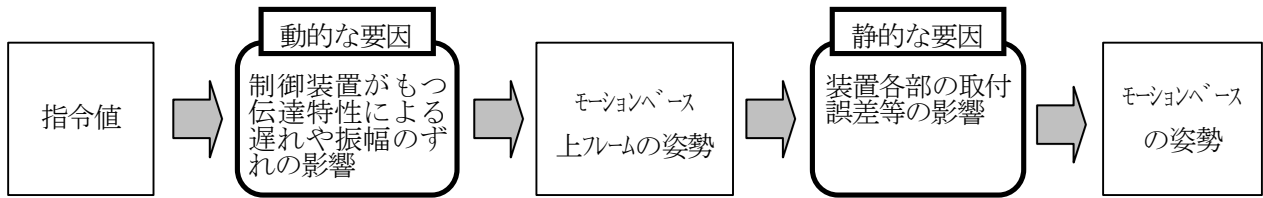


図3 試験装置の状態と指令値が異なる要因

以下の手順で補正を行った。

- (1) アクチュエータ長さからモーションベース上フレームの姿勢を求める。
- (2) 光学測量器(セオドライト)を用いてモーションベースの姿勢を求める。
- (3) 動的に指令を与え、モーションベースの伝達特性を把握し、その補償器を求める。

3. 1 アクチュエータ長さから求めたモーションベース上フレームの姿勢推定

モーションベースは、6本のアクチュエータ長さを制御することでモーションベース上フレームの姿勢を制御している。そこで、アクチュエータ内部に取り付けられたエンコーダからパルス信号を取り込んでアクチュエータ長さを推定し、その結果からモーションベース上フレームの姿勢推定を行った。6変数の非線形連立方程式を反復演算で解いた結果、推定した姿勢と指令値との誤差はX, Y, Z方向で最大0.02mm, ロール, ピッチ, ヨー方向で最大0.001°程度と十分に小さく、アクチュエータ長さからモーションベース上フレームの姿勢が求められることを確認した。

3. 2 光学測量器によるモーションベースの姿勢測定

距離が既知の2点上にそれぞれ光学測量器を設置し、三角測量の原理でモーションベース上フレームに設置した複数の測定点の座標を算出した。

X, Y, Z方向に±150mmの静的な指令値に対する測定点座標の誤差を図4に示す。誤差が指令に対して直線状に変化していることがわかる。従って、この回帰直線を用いて座標を補正すれば、静的にはモーションベースの姿勢を正しい方向に誘導できることがわかった。

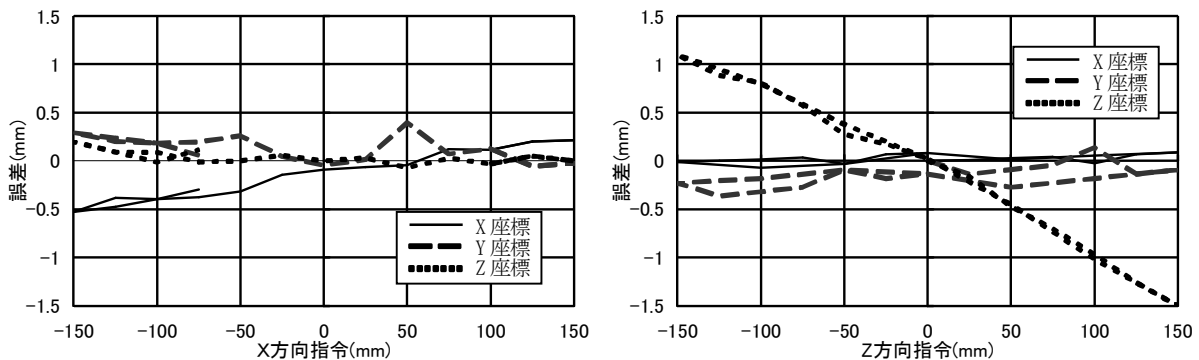


図4 モーションベース指令に対する測定点の移動誤差例 (左: X方向指令, 右: Z方向指令)

3. 3 伝達特性把握と補償器の検討

HILSでは、各時間ステップにおける加振条件がそのときのシミュレーションモデルの計算結果により初めて求められる。従って、HILS対応試験装置では未来の加振条件を用いた補償器を使用することができない。そこで、ランダム波加振結果から試験装置の伝達関数を求め、伝達関数のゲイン特性をYule-Walker法で平

坦にする補償器を検討した。まず、伝達関数には系のノイズも含まれるので、平滑化した上で補償関数を求め、さらに試験装置に不要な30Hz以上の周波数領域についてはゲイン特性が低下するように補正した。今回検討した補償関数と補償後のモーシオンベースの伝達関数を図5に示す。

求めた補償器を用いてモーシオンベースを加振した波形を図6に示す。振幅特性を大幅に改善することができた。

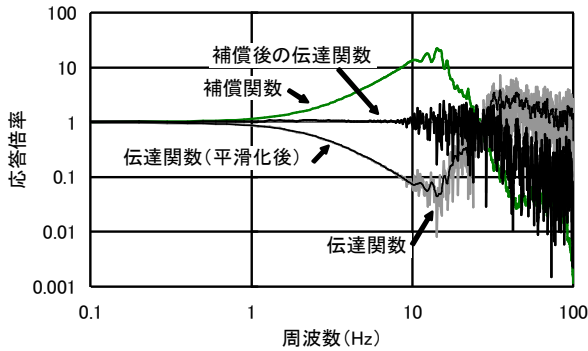


図5 補償関数と補償後の伝達関数

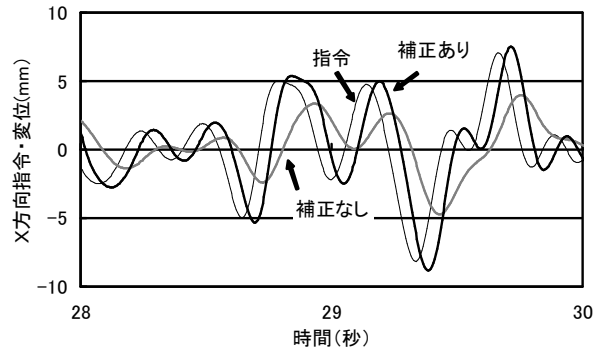


図6 補償器による補正後の動作状況

4. ダンパ試験装置の適用例

4.1 ダンパ特性の同定

ダンパ試験装置を用いることによって、主軸方向以外も含めたダンパの動きと発生力の関係を調べることができる。この関係から、階層型ニューラルネットワークを用いて高精度にダンパ特性を再現する車両運動シミュレーション用モデルを生成することを試みた。検討の結果、主軸方向には図7に示すように、階層型ニューラルネットワークモデルにダンパ取付部の弾性部材の影響を推定する簡易ダイナミクスモデルを付加したモデルが適切であることがわかった。

モデルの妥当性を検証するために、同定用の試験パターンと相関を持たない時系列データ（検証データ）を用いて、ニューラルネットワークモデルで推定した結果と、試験装置を用いて実物を加振して測定した実測値、さらに線形同定手法としてARX法を用いた推定値を図8示す。ARX法による推定では特にピーク値で実測値と異なる傾向がある。それに対して、ニューラルネットワークモデルによる推定では3kNを越える大きなダンパ力や、1kN未満の小さなダンパ力に対しても、推定値は実測値と一致しており良好な同定がなされている。

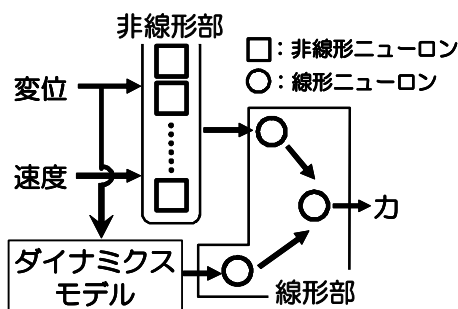


図7 検討したニューラルネットワークモデル

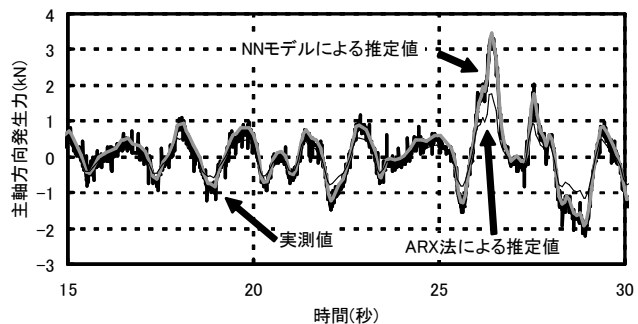


図8 推定値と実測値の比較(左右動ダンパの例)

4. 2 HILS 試験

ダンパ試験装置を用いて実施することができる最も基本的なモデルとして、図9に示すようなばね・ダンパ並列ワイヤーカットモデルのHILS試験を実施した。実物のダンパとして新幹線用の左右動ダンパを使用し、シミュレーション上のパラメータを $m=10000\text{kg}$, $k=250000\text{N/m}$, 初期変位 $x_0=20\text{mm}$ とした。

図10に試験結果を示す。発振することなく適切に試験が行えることを確認した。

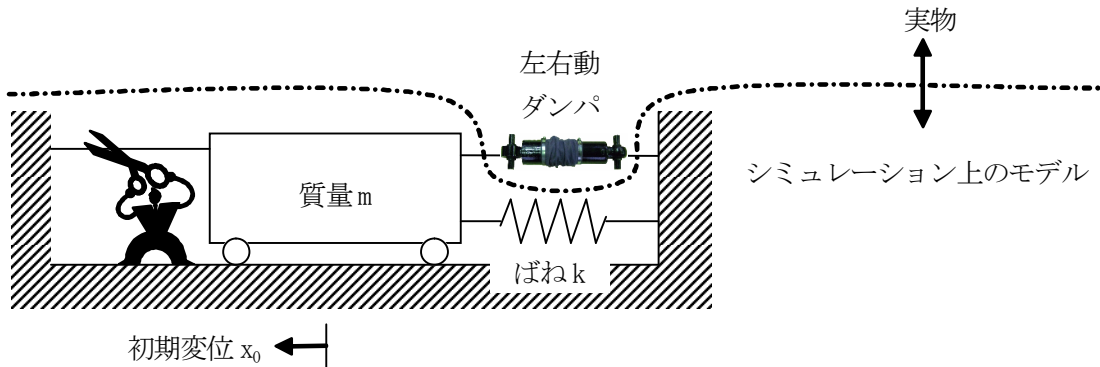


図9 HILS試験で用いたばね・ダンパ並列ワイヤーカットモデル

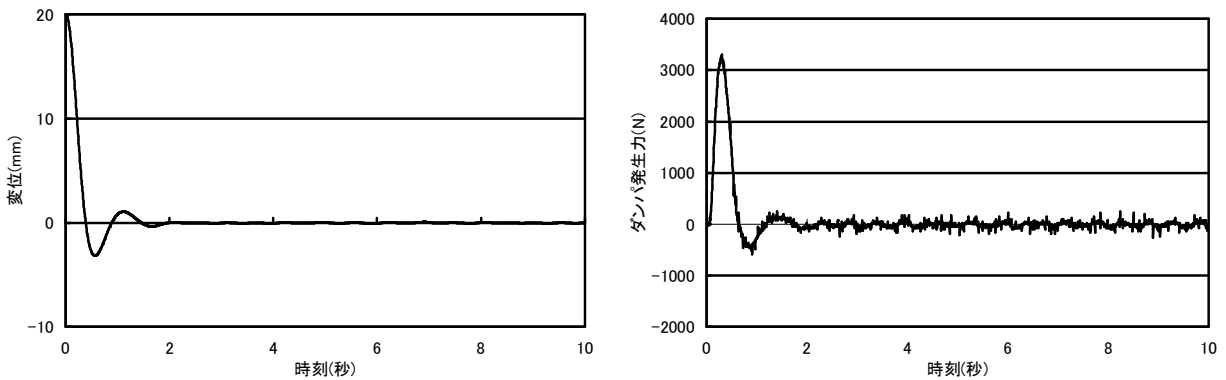


図10 HILS試験結果 (左:変位 右:ダンパ発生力)

5. まとめ

- (1) 鉄道車両で用いられる任意のダンパを車両が実際に走行しているときと同様に3次元加振することができ、HILSに対応してシミュレーションと連動できることを目指した車両用ダンパ試験装置を開発した。
- (2) 特性試験を実施して、試験装置の特性を改善した。
- (3) ダンパ試験装置を使って、ダンパ特性の同定を行い、ニューラルネットワークを用いることによって良好に同定できることを確認した。
- (4) ばね・ダンパ並列モデルでHILS試験を実施し、良好に動作することを確認した。

今後は車両運動シミュレーションと連動したHILS試験について取り組む予定である。なお、本研究は国土交通省の補助金により実施した。