軸箱左右加速度と輪重・横圧推定式を用いた著大横圧の管理法

○［土］田中 博文（鉄道総研）　　［土］古川 敦（鉄道総研）

Management Method of Large Lateral Force using Lateral Axle-box Acceleration and Lateral-Force/Wheel-Load Estimation Equations

○Hirofumi TANAKA,　Atsushi FURUKAWA　(Railway Technical Research Institute)

Large lateral forces are frequently caused track irregularities of a short wavelength at rail joints in sharp curves. It was difficult using 10m-chord versine of track irregularities to evaluate accurately such short wavelength irregularities. Moreover, there was no appropriate technique for generated large lateral forces at rail joints. In this research, we examined the technique to accurately estimate large lateral forces excited in curves making use of lateral axle-box acceleration and track irregularity. As a result, an estimation method we proposed here was roughly verified in comparison with measured results of lateral forces.

キーワード：軸箱左右加速度，著大横圧，軌道変位，角折れ，輪重・横圧推定式，周波数応答法
Key Words : Lateral Axle-box Acceleration, Large Lateral Force, Track Irregularities, Angular Bent at Joint, Lateral-Force/Wheel-Load Estimation Equations, Frequency Response Method

1. はじめに

定尺レールの急曲線区間の継目部に生じる角折れは，しばしば著大横圧の発生原因となるが，10m弦正矢の通り変位からはその検測特性上，角折れを正確に把握し，管理することは困難である．角折れは，波長の短い通り変位であるので，測定弦長の短い軌道検測装置を用いれば検測可能であるが，長い区間を管理するには検測作業が煩雑となる．そこで，軌道検測車や営業車で測定可能な軸箱左右加速度を用いた角折れの管理に関する検討が行われてきた[1)]．

著者らは，波長の短い横圧変動は軸箱左右加速度と相関が高く，比較的波長の長い横圧変動は通り変位と相関が高いことに着目し，横圧と軸箱左右加速度および通り変位の周波数応答関数を求め，軸箱左右加速度と通り変位から横圧変動を推定する手法について検討を行ってきた[2)]．

本報では，締結装置等の軌道材料に作用する力としての横圧管理の観点から，角折れ箇所で発生している横圧の絶対値を把握する手法について検討を行った．まず，波長が数から数十 m の軌道変位に起因する横圧変動については，著者らがすでに提案した推定手法で軸箱左右加速度および通り変位から求める．次いで，曲線中の定常横圧は，推定脱線係数比算定式の輪重・横圧推定式（以下，横圧推定式）[3)]から求める．そして，両者の算術和によって，曲線外軌に作用する著大横圧の絶対値を推定する．以下，この手法について詳述する．

2. 横圧と軸箱左右加速度・軌道変位の関係

在来線特急電車が，定尺レールの急曲線区間を走行した際の横圧と軸箱左右加速度，横圧と通り変位のコヒーレンスの例を図1に，同じく周波数応答関数の例を図2に示す．検討した区間の曲線半径は 400m，列車の走行速度は 85km/h である．

通り変位は空間周波数 0.03～0.167[1/m]程度の帯域でコヒーレンスが高く，波長が短いほど振幅利得が大きい．軸箱左右加速度は，空間周波数 0.125～0.8[1/m]程度の帯域で高く，空間周波数 0.2～0.5[1/m]程度の帯域では振幅利得は 4～5[kN/(m/s²)]程度で安定している．

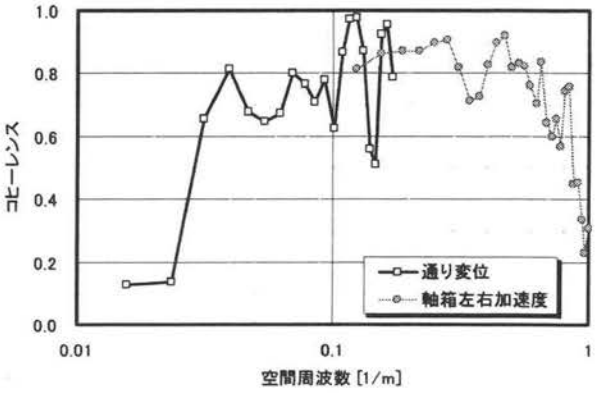

図1　横圧と軸箱左右加速度・通り変位のコヒーレンス

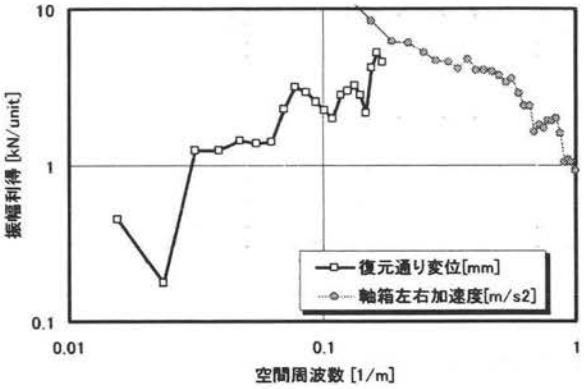

図 2　横圧と軸箱左右加速度・通り変位の周波数応答関数

3．外軌横圧の推定手法

3.1　外軌横圧の推定式

本手法では，図 3 に示すように波長ごとに異なる手法で推定した横圧の算術和によって，曲線外軌に作用する横圧波形を推定する．具体的な推定手法を，以下で説明する．

外軌横圧 ＝ 内軌横圧定常分 ＋ 輪軸横圧定常分 ＋ 軌道変位に起因する横圧変動

波長	概ね波長30m以上	波長6～30m	波長6m以下
横圧の発生要因	定常横圧（内軌横圧＋輪軸横圧）	10m弦正矢で把握できる軌道変位	短波長軌道変位（角折れ）
推定手法	横圧推定式	周波数応答法	周波数応答法
入力データ	曲線諸元＋車両諸元＋走行速度	通り変位	軸箱左右加速度

図 3　外軌横圧の推定手法

3.2　曲線中の定常横圧の推定手法

曲線中の定常横圧の推定には，既存の横圧推定式 [3]を用いることとする．すなわち，曲線外軌に作用する定常横圧は，式(1)に示す力の和であると説明されている．

$$\bar{Q}_o = \bar{Q}_i + \Delta Q_{AS} \tag{1}$$

ここで，

$\bar{Q}_o$：外軌に作用する定常横圧 [kN]，$\bar{Q}_i$：内軌の摩擦力による曲線転向横圧 [kN]，ΔQ_{AS}：遠心力および空気ばねのねじれによる輪軸横圧 [kN]

右辺の第一項および第二項は，曲線諸元，車両諸元および列車の走行速度が既知であれば，式(2)から(5)で容易に算定することができる．

$$\bar{Q}_i = \kappa P_i \tag{2}$$

$$\Delta Q_{AS} = \Delta Q_{AS1} + \Delta Q_{AS2} \tag{3}$$

$$\Delta Q_{AS1} = \alpha \times W_0 \left(\frac{v^2}{gR} - \frac{C}{G} \right) \tag{4}$$

$$\Delta Q_{AS2} = \beta \times \frac{2kb_2{}^2 c}{aR} \tag{5}$$

ここで，

κ：内軌の横圧輪重比，$\bar{P}_i$：内軌輪重 [kN]，ΔQ_{AS1}：遠心力による輪軸横圧 [kN]，α：遠心力による輪軸横圧 ΔQ_{AS1} 補正係数，W_0：軸重 [kN]，v：走行速度 [m/s]，G：軌間 [m]，R：カント [m]，R：曲線半径 [m]，g：重力加速度 [9.8(m/s²)]，ΔQ_{AS2}：空気ばねのねじれによる輪軸横圧 [kN]，β：空気ばねのねじれによる輪軸横圧 ΔQ_{AS2} 補正係数，k：枕ばね前後支持剛性／台車片側 [kN/m]，$2b_2$：左右枕ばね間隔 [m]，$2C$：台車中心間距離 [m]，$2a$：軸間距離 [m]

ここで，既存の横圧推定式では，第一項の内軌の摩擦力による曲線転向横圧を求める際に，内軌の横圧輪重比を用いている．本手法でも同じ手法を用いることとする．今回検討対象とした在来線特急電車の内重横圧輪重比と曲率の関係を検討した結果，図 4 に示す修正円弧踏面の κ=0.40 モデル [3]を用いて定常横圧を推定することとした．

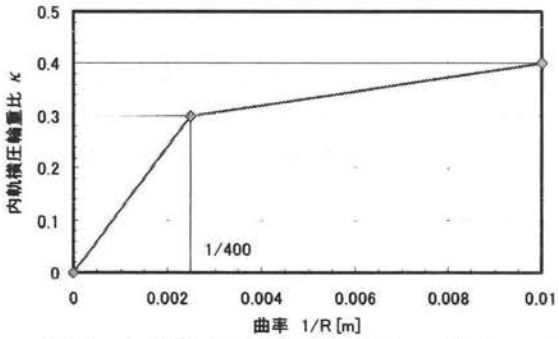

図 4　内軌横圧輪重比（κ=0.40 モデル）

また，空気ばねのねじれによる輪軸横圧 ΔQ_{AS2} の補正係数 β については，実測値と推定式による計算値を比較した結果，検討対象とした車種ではこの補正は不要であると判断し，曲線半径によらず $\beta=1$ と設定した．

次に，既存の横圧推定式では，遠心力による輪軸横圧 ΔQ_{AS1} は，台車の前軸と後軸に均等に分配されるモデルとなっている．しかしながら，急曲線を台車の前軸がアタック角を持ちながら走行した場合，遠心力による輪軸横圧 ΔQ_{AS1} は台車の前軸の方が後軸よりも荷重分担率が大きくなると仮定し，式(4)に示したように遠心力による輪軸横圧 ΔQ_{AS1} の補正係数 α を導入し，$\alpha=1.5$ と設定した．

3.3　曲線中の横圧変動の推定手法

既存の横圧推定式では，正確に推定することが困難であった軌道変位および継目部の衝撃による曲線中の横圧変動 [3]については，通り変位と軸箱左右加速度を入力とする周波数応答法 [2]によって推定することとする．

周波数応答法とは，高速フーリエ変換で求めた入出力波形間の周波数応答関数を逆フーリエ変換してインパルス応答を求め，これを有限インパルス応答（FIR）フィルタとして用いて，入力波形から出力波形の推定を行うことをいう[4]．

まず，波長6～30m程度の軌道変位に起因する横圧変動については，軌道検測車で測定した10m弦正矢の通り変位を用いて推定する．波長6m以下の10m弦正矢では把握できない角折れ等の短波長軌道変位に起因する横圧変動については軸箱左右加速度から推定する．このように，図1および図2に示したように，それぞれ横圧と相関の高い波長の異なる2つの入力波形を用いた周波数応答法によって，波長数～数十mの横圧変動について，正確に推定することが可能となる．

4．外軌の著大横圧の推定結果

4.1 曲線中の外軌の定常横圧

図5に，横圧推定式による外軌の定常横圧の推定結果と実測値との比較を示す．定常横圧の実測値および通り変位は，波長30m以下の成分をカットオフするローパスフィルタ（LPF）処理した波形である．

曲線中の定常横圧は，実測値で20～22kN程度，推定値で24kN程度であり，比較的良い一致を示している．円曲線の始点付近で実測値の定常横圧が大きくなっている箇所があるが，これは10m弦通りの波形から，曲線中の波長の長い通り変位に起因するものであると考えられる．

4.2 曲線中の横圧変動

図6に，周波数応答法によって通り変位から推定した波長6～30mの横圧変動の推定結果と実測値との比較を示す．横圧変動の実測値と通り変位は，波長6～30mのバンドパスフィルタ（BPF）処理した波形である．

同じく図7に，周波数応答法によって軸箱左右加速度から推定した波長6m以下の横圧変動の推定結果と実測値との比較を示す．横圧変動の実測値と通り変位は，波長6m以上をカットオフするハイパスフィルタ（HPF）処理した波形である．

波長6～30mの横圧変動は通り変位と，波長6m以下の横圧変動は軸箱左右加速度の波形と酷似しており，各々の推計結果と実測値の波形も酷似していることがわかる．特に，図7より，継目部の角折れに起因すると考えられる比較的大きな横圧変動についても，軸箱左右加速度から精度良く推定できていることがわかる．

4.3 外軌横圧

図8に，外軌横圧の推定結果と実測値との比較を示す．推定結果は，図5，図6および図7の推定横圧の算術和の波形である．一方で，実測値は，新連続法の処理装置から得られた波形（100HzのLPF処理波形）である．

図より，外軌横圧の推定波形は，実測値とよく一致しており，通り変位に起因する波長の長い横圧変動，および通り変位では把握できなかった継目部における比較的大きな横圧も再現できていることがわかる．

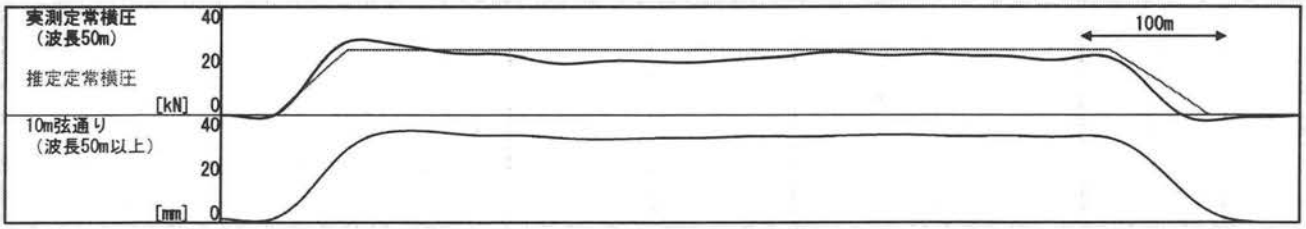

図5 外軌の定常横圧の推定結果と実測値の比較（波長30m以上）

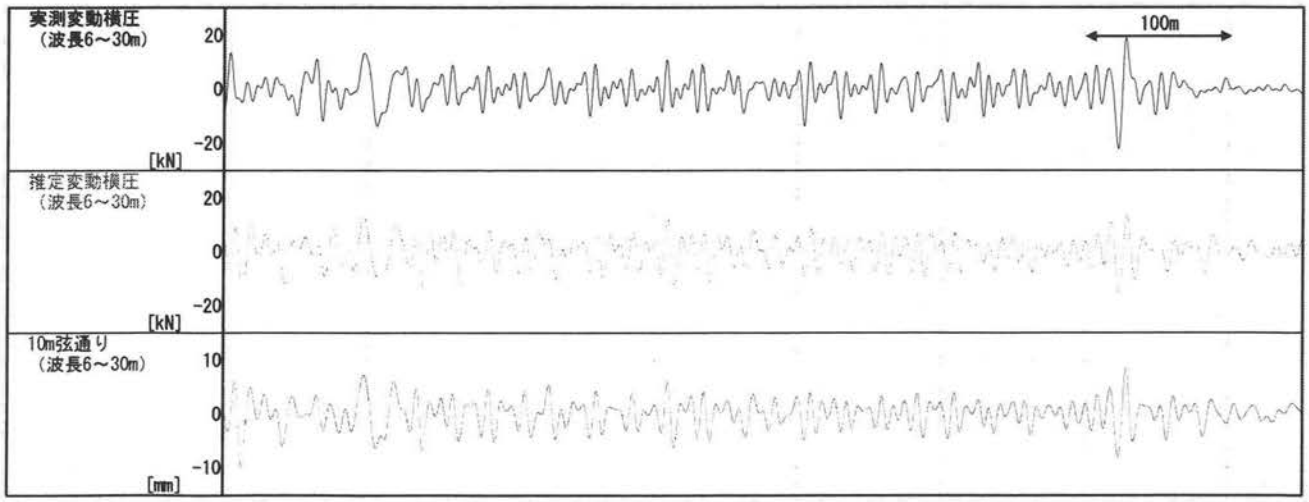

図6 外軌の横圧変動の推定結果と実測値の比較（波長6～30m）

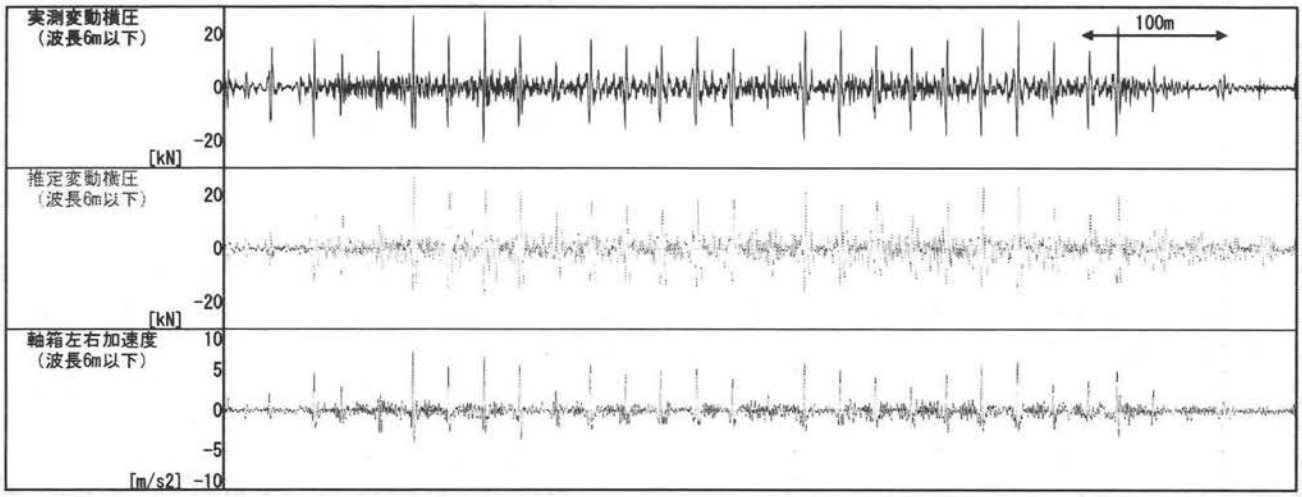

図7　外軌の横圧変動の推定結果と実測値の比較（波長6m以下）

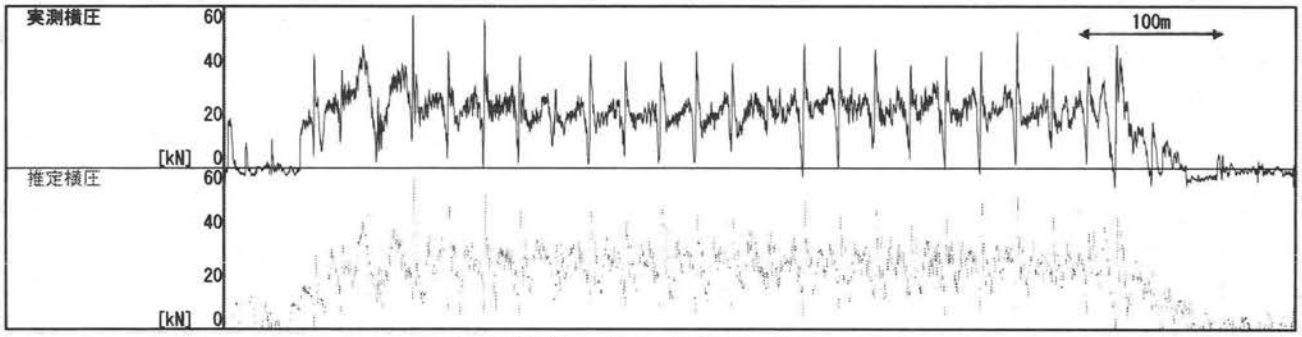

図8　外軌横圧の推定結果と実測値との比較

4.4　継目部における著大横圧

外軌横圧の推定結果の定量的な評価を行うために，図9に推定結果と実測値の継目部における著大値の比較を示す．図より，両者の相関は，回帰式の傾きで1.03，相関係数で0.84と高く，本手法は継目部において発生する著大横圧を精度良く推定できることがわかる．

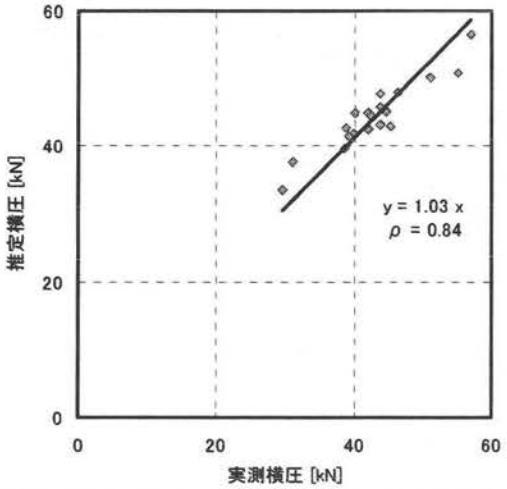

図9　継目部における外軌の著大横圧の比較

5．まとめ

横圧推定式と，軸箱左右加速度と通り変位を入力波形とする周波数応答法を用いて，角折れのある急曲線外軌の著大横圧を推定する手法を検討し，実測値との比較を行った．その結果，以下の結論が得られた．

(1) 10m 弦正矢の通り変位から波長 6～30m の横圧変動を，軸箱左右加速度から 10m 弦正矢からは把握することのできない波長 6m 以下の短波長通り変位に起因する横圧変動を推定することができた．

(2) 波長帯の異なる2つの横圧の推定波形と，横圧推定式による定常横圧の算術和によって，急曲線外軌に発生する著大横圧を推定することができた．

本手法は，個々の継目部で発生する著大横圧の絶対値を高い精度で推定できるので，大きな横圧が発生する継目を特定することが可能であり，継目保守の優先度の決定に活用可能である．

参　考　文　献

1) 吉田昌史，篠脇諭，須永陽一：営業車の軸箱左右加速度を活用した急曲線の継目形状管理に関する検討，鉄道技術連合シンポジウム（J-Rail2004），pp.91-94，2004.

2) 田中博文，古川敦：軸箱加速度と軌道検測波形を用いた著大輪重・横圧の管理手法，鉄道総研報告，Vol.22，No.8，pp.35-40，2008.

3) 国土交通省鉄道局監修：解説－鉄道に関する技術基準（土木編），日本鉄道施設協会，pp.740-754，2002.

4) 例えば，J.S. Bendat，A.G. Piersol：ランダムデータの統計的処理，培風館，401p.，1976.