

3411 横風を受けた鉄道車両の動的解析モデルの構築および検証

正 [機] ○日比野 有 (鉄道総研)

正 [機] 金元 啓幸 (鉄道総研)

下村 隆行 (鉄道総研)

Construction and Verification of Dynamical Analysis Model for Evaluating Dynamical Behavior of Railway Vehicle being Subjected to Crosswind

Yu HIBINO, Railway Technical Research Institute, 2-8-38, Hikari-cho, Kokubunji City

Hiroyuki KANEMOTO, Railway Technical Research Institute

Takayuki SHIMOMURA, Railway Technical Research Institute

In order to analyze the dynamic behavior of the vehicle subjected to crosswind, we constructed a dynamic analysis model which was developed based on the static analysis model, and examined the effect of the frequency of the crosswind on the dynamic behavior of the vehicle. Further, in order to verify the validity of the dynamic simulation program prepared by using the dynamic analysis model, we conducted a full scale experiment applying lateral force to the vehicle dynamically. As a result, it has been verified that the dynamic simulation program is valid for evaluating the wheel load variation of the vehicle which is subjected to crosswind. Consequently, the effect of the frequency of crosswind on the behavior of the vehicle has been clarified, the critical wind speed of overturning has been evaluated more precisely, and also the difference between the static analysis and the dynamic analysis has been evaluated quantitatively.

Keywords: railway vehicle, crosswind, overturn, dynamic analysis, critical wind speed, wheel unloading ratio

1. はじめに

横風に対する鉄道車両の走行安全性を評価する手法は、「静的解析」と「動的解析」とに大きく分類される。静的解析とは、車両に働く外力が一定である（時間と共に変動しない）と仮定して、外力によるモーメントのつり合いから外力と輪重減少率との関係を解析的に解くものであり、1972年に提案された「国枝式」¹⁾がその代表的な例である。一方、動的解析とは、時間と共に変動する外力を考慮し、運動方程式を数値的に解くことにより車両の挙動を時系列的に解析するものであり、ヨーロッパ諸国等においては、マルチボディダイナミクスのパッケージソフトを利用した研究が多く行われている。日本では、動的解析による横風の研究事例はまだ少なく、国枝式あるいはそれをベースに改良が加えられた静的解析式による評価が主流であり、最近では2003年に日比野らにより提案された「詳細計算式」²⁾を用いて横風に対する車両の安全性を評価することが多い。詳細計算式は、国枝式をベースに空気力や車両のばね系の影響などをより詳細に考慮した解析式であり、実物車両を用いた検証試験を通して、その妥当性が実証されている³⁾。

静的解析と動的解析には、それぞれ長所、短所があり、一概にそれらの優劣を比較することはできないが、静的解析の利点の一つとして、計算式を比較的容易に導出することができるという特徴が挙げられる。これにより、特別な計算ツールを準備することなく、車両の走行安全性に影響を及ぼす要素を、計算式の上から容易かつ定量的に把握することが可能となっている。しかし、上記のように安全性評価精度のさらなる向上が求められている背景から、車両の動的挙動が転覆限界風速の評価に及ぼす影響を明らかに

する必要がある。すなわち、静的解析と動的解析との差を定量的に評価し、その周波数依存性を明らかにする必要がある。

そこで、本報告では、現在用いられている詳細計算式をベースとした動的解析モデルを構築し、横風の変動周波数が車両の動的挙動（輪重変動）に及ぼす影響を詳細に調べると共に、実物車両を用いた検証試験を行ったので、それらの結果について報告する。

2. 動的解析モデルの構築

2.1 本解析モデルの特徴

本稿では、静的解析式としての妥当性がすでに検証されている詳細計算式をベースに動的解析モデルを構築する。すなわち、上下・左右・ロール方向の3自由度を考慮する半車両断面モデルに、減衰要素、各質量要素の慣性モーメント（回転半径）などを追加した比較的簡易な解析モデルを構築する。前述の通り、ヨーロッパ諸国ではマルチボディシミュレーションが主流となりつつある中で、今回このような解析モデルを構築する主な理由は次の通りである。

- (1) 静的解析結果との差異を考察するときに、解析モデル構成の違いによる影響を最小限に抑えることができ、過去の検討結果との整合性を取りやすい。
- (2) 比較的簡易にシミュレーションプログラムを作成することができるため、特別な計算ツール（ソフトウェア）を用意する必要が無い。
- (3) モデル要素の変更（例えば、まくらばね要素を線形ばねモデルから空気ばね非線形モデルに変更することなど）に関する自由度が高い。

2.2 計算モデル

本解析で用いる車両モデルを図1に示す(ただし、ストップパに関する図示は省略)。詳細計算式における解析モデルと同様に半車両断面モデルを用いるが、輪軸と台車枠の運動を分けて考え、輪軸・台車枠・車体の3つの質量要素に関してそれぞれ上下・左右・ロール方向の3自由度(合計9自由度)を考慮する。台車は一般的なボルスタレス台車を対象とするが、空気ばねに関しては詳細計算式と同様に線形ばねで近似する。また、車両内各車輪の静止輪重および軸ばね・まくらばね定数は均一であると仮定する。

図1のモデルについて、各質量要素の運動エネルギー、ポテンシャルエネルギー、散逸関数をそれぞれ求め、ラグランジュの式から各運動方程式を導出する。本報告では、ルング・クッタ・ギル法を用いて、これらの運動方程式を10,000分の1秒刻みで解いた。

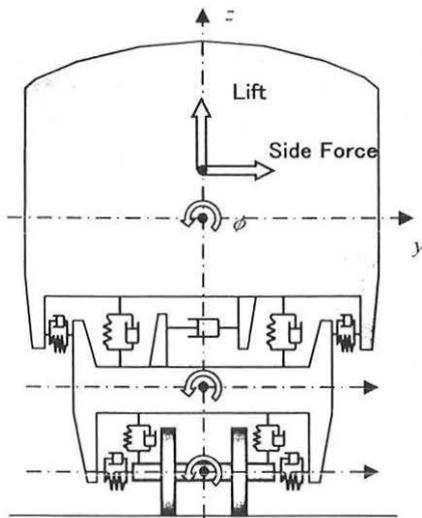


Fig.1 Railway vehicle model

3. 動的横力荷重試験

3.1 試験概要

2章で述べた動的解析モデルの妥当性を検証するために、実物車両に横風による空気力に相当する横方向の力(以下、横力という)を動的に荷重し、車両の挙動等を測定する試験を、鉄道総研の新車両試験台で行った(以下、動的横力荷重試験という)。新車両試験台建屋の外に横力荷重用の柱を建て、柱に取り付けた電動アクチュエータと車体とをワイヤロープでつなぎ、車体の前後2カ所を横方向に牽引した。荷重した横力の変動パターンは、定常成分に正弦波状の変動成分を重畳させた波形を基本とした。その変動成分の周波数や振幅を変えながら試験を行い、これらが車両の挙動に及ぼす影響を調べた。動的横力荷重試験の様子を図2に、横力の波形例を図3にそれぞれ示す。

試験には、鉄道総研が所有する試作車両を用いた。台車構造は一般的なボルスタレス形式である。測定項目は、横力、輪重、車体変位、空気ばね内圧などである。横力は、ワイヤロープと車体との間に直列につながれたロードセルで測定した。輪重は、第1台車第1軸に装着された輪重・横圧測定軸により測定した。車体変位については、ポテンシオメータ式変位計で左右・上下変位を測定し、これらの測定結果から計算により車体傾斜角を算出した。

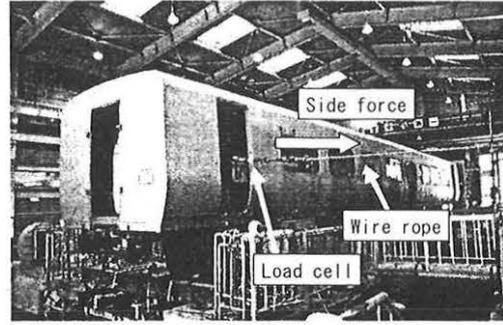


Fig.2 A view of full scale experiment

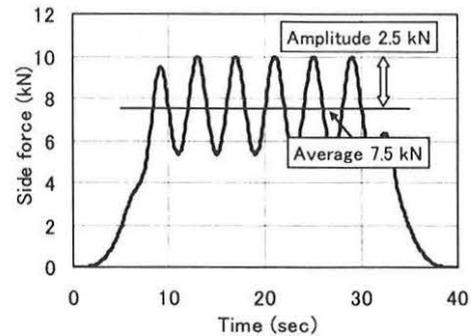


Fig.3 An example of time history of side force

3.2 試験条件

横力の変動パターンは、①定常成分 7.5kN に変動成分 2.5kN を重畳させたパターンと、②定常成分 5.0kN に変動成分 5.0kN を重畳させたパターンの2種類とし、それぞれの変動周波数を0.05Hzから2.5Hzまで変化させて試験を行った。これは、①平均風速約20m/sに約5m/sの変動成分が重畳する場合と、②平均風速約15m/sに約10m/sの変動成分が重畳する場合に、それぞれ相当する。また、横力の負荷高さは、レールレベルから2230mmとした。これは、防風柵などが設置されていない橋りょうあるいは高架橋の上に車両が位置するときの一般的な風圧中心高さ程度に相当する。

4. 試験結果および考察

4.1 動的解析モデルの検証結果

動的横力荷重試験の結果の例を、2章で述べたシミュレーションによる計算結果と併せて図4、図5に示す。図4が輪重減少率、図5が車体重心左右変位の時系列データである。いずれも、定常成分 7.5kN に変動成分 2.5kN を重畳させた横力を荷重した試験の結果であり、各図とも(a)から(c)の順に、横力の変動周波数が0.5Hz、1.0Hz、2.0Hzの例を示す。

図4から、輪重減少率について、実測値と計算値は概ね一致することが確認できた。一方、図5の車体重心の左右変位については、実測値と計算値との間に差が生じる場合が見られたが、図4の結果と対照すると、左右変位の推定誤差が輪重変動の推定精度に及ぼす影響は比較的小さいことがわかる。なお、車体重心の上下およびロール変位については、本報告では検証結果の記載を省略したが、ロール変位については左右変位と同様の傾向が見られ、上下変位については計算値では変位量がほとんどゼロとなり、実測とは異なる傾向が見られた。しかし、いずれも図4の結果との対照から、車体の左右・上下・ロール変位の推定誤差

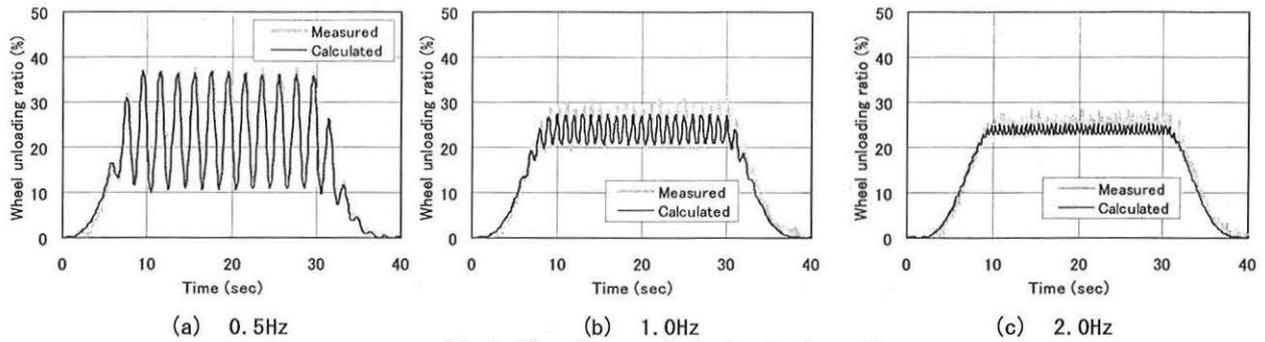


Fig.4 Time history of wheel unloading ratio

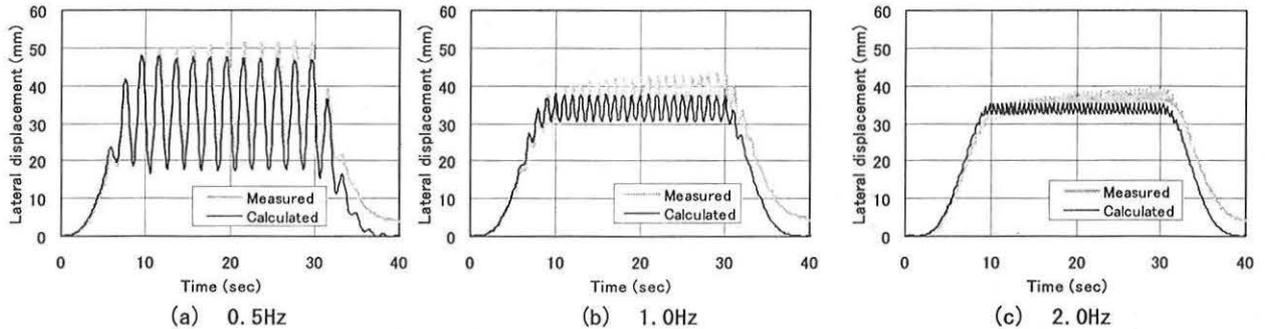


Fig.5 Time history of lateral displacement of the center of gravity

が輪重変動の推定精度に及ぼす影響は比較的小さいことが明らかになった。これらの傾向は、過去に同じ供試車両で実施した静的横力負荷試験（詳細計算式の検証）における傾向と同様であった³⁾

図4、図5で示した振幅・周波数以外の試験結果においても、上記と同様の傾向が確認され、輪重減少率については、実測値と計算値は概ね一致した。従って、本解析モデルおよびシミュレーションプログラムは、横力を受けた車両の輪重変動を推定する手法として概ね妥当であることが確認された。

4.2 静的解析と動的解析との比較

4.2.1 横力の変動周波数が輪重変動に及ぼす影響

横力の変動周波数が輪重変動に及ぼす影響を調べるため、詳細計算式による静的解析結果と動的解析シミュレーションによる解析結果を、変動周波数をパラメータとして比較した。動的解析シミュレーションでは、前章と同様に①定常成分 7.5kN に変動成分 2.5kN を重畳させた横力と、②定常成分 5.0kN に変動成分 5.0kN を重畳させた横力の2種類について、それぞれの変動周波数を 0.05Hz から 2.5Hz まで変化させた場合の各周波数における輪重減少率の最大値を

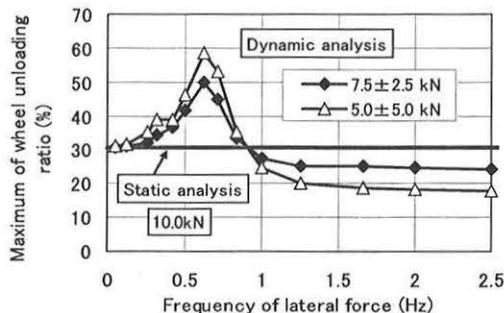


Fig.6 Frequency dependence of wheel unloading ratio

求めた。一方、詳細計算式では、変動する横力の最大値が一定力として作用するという仮定の下での輪重減少率を求めた。すなわち、今回の検討条件では横力の最大値は①、②ともに 10kN であるので、10kN に対する輪重減少率を求めた。計算結果を図6に示す。横軸は横力の変動周波数、縦軸は輪重減少率の最大値を表す。詳細計算式による結果については、横力の最大値のみを考慮するので、図6では輪重減少率は周波数に関わらず一定値として示す。

図6から、横力の変動周波数が 1Hz 程度以下の場合には、静的解析による輪重減少率は過小評価となっており、特に車両の下心ローリングの固有振動数（今回の車両では 0.6Hz 程度）に近い場合に、その傾向が顕著に現れることがわかる。一方、変動周波数が 1Hz 程度以上の場合には、静的解析による輪重減少率は過大評価となっていることがわかる。

4.2.2 自然風（実風速）データによる検討例

自然風の風速変動は様々な周波数成分を含むため、車両に作用する横力の変動は前項のような規則的な変動とは異なると考えられる。そこで、本項では、自然風の風速データから算出された横力を入力した場合の解析結果を比較する。なお、ここで用いる風速データは、平成 13 年 12 月から平成 16 年 3 月にかけて、鉄道総研が北海道島牧村で実施した「実物大車両模型による空気力等測定試験」⁴⁾で観測されたものである。本解析では、横力は風速の 2 乗に比例し、車体前後で等しく作用すると仮定する。従って、以下では「横力の変動周波数」と「横力の変動周波数」を同義で用いる。

解析結果の例を図7に示す。同図において①実測値とは、動的横力負荷試験において、上記の横力を車体前後に等しく負荷した場合の実測結果である。②静的解析結果とは、各瞬間における横力に対応する輪重減少率を詳細計算式で計算し、これらを時系列的に並べたものである。また、③動的解析結果とは、同上の横力に対する動的シミュレーション

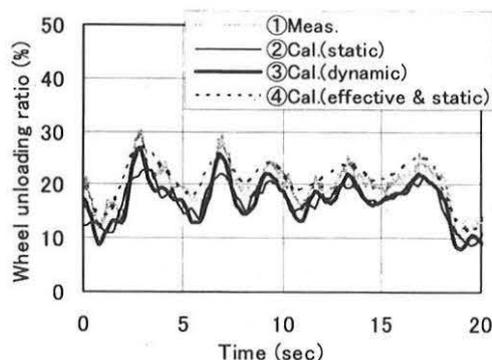


Fig.7 An example of analysis on wheel load variation under natural wind

オン結果である(④は4.2.3項参照)。同図から、周期が1~2秒程度となるような風速変動に対する輪重減少率の極大値は、静的解析結果の方が1~2割程度小さくなり、前項で見られたほどの大きな差はないものの、静的解析では輪重減少率の最大値を過小に評価することがわかる。

4.2.3 転覆に関する実効風速

横力の変動成分のうち、車両の下心ローリングの固有振動数に近い周波数成分は輪重変動への影響が大きく、それより高い周波数成分は輪重変動への影響が小さいことが、以上の検討から明らかになった。また、実際の自然風の変動を考慮する場合でも、変動周波数の影響を加味する必要があることがわかった。すなわち、詳細計算式(静的解析)で転覆限界風速を求め、風速計で観測された風速の最大瞬間値と対照する方法は、必ずしも安全側の評価とは言えないことがわかった。従って、車両の動特性を考慮して横風に対する走行安全性を評価するためには、動的解析を用いるのが望ましいと考えられる。しかし、例えば横風に対する運転規制ルールを策定する際などの、一般的な転覆耐力としての転覆限界風速を評価する場合には、静的解析の方が汎用的かつ実用的であると考えられる。そこで、本項では、静的解析法を用いながらも車両の動特性の影響を加味することのできる評価法を検討する。

本項の最初に述べた理由から、高周波成分を無視すると共に共振周波数成分を増幅して、車両の動的な応答を加味した実効風速波形を生成すれば、その最大値で安全性を評価できると考えられる。すなわち、静的解析法で求められた転覆限界風速を実効風速の最大値と対照するのであれば、安全側の評価が可能であると考えられる。実効風速の求め方としては、図6に示したような周波数特性を持つフィルターで、風速データを処理することが望ましい。しかし、データ処理の簡易性と現場への適用可能性を考慮し、また、実効風速の最大値との対照が安全性評価の上では意味を持つことを考慮すると、風速データに対する移動平均処理と増幅処理のみで実効風速の簡易的な評価が可能であると考えられる。

移動平均処理と増幅処理のみで実効風速を考慮した解析例を図7に併せて示す。④が実効風速を入力条件とする静的解析の結果であり、この例では自然風データに対し、1秒間の移動平均処理と1.1倍の増幅処理を行ったものを実効風速とした。図7から、輪重が大きく減少するところ、すなわち車両の下心ローリングの固有振動数に近い周波数成分を有する風速変動に対する輪重減少率の極大値について、実効風速データを入力条件とする静的解析は、自然風

データを入力条件とする動的解析とほぼ同等に極大値を評価しており、これまでの静的解析と比較してより実測値に近い評価が可能であることがわかる。ただし、移動平均の時間と増幅倍率については、今後引き続き検討する必要がある。

以上から、実効風速を考慮することによって、静的解析によっても横風の変動周波数の影響を加味した評価を行うことができる可能性があることが明らかになった。静的解析のメリットは比較的容易に計算式を導出できることであり、車両の走行安全性に影響を及ぼす要素を計算式の上から容易かつ定量的に把握することが可能であるということである。従って、実効風速の考え方を取り入れることにより、比較的容易にかつ動的解析と同等の精度で転覆限界風速を評価できる可能性があると考えられる。

5. まとめ

横風を受けた車両の挙動を解析するために、詳細計算式(静的解析)をベースとした動的解析モデルを構築し、横風の変動周波数が車両の動的挙動に及ぼす影響を詳細に調べるとともに、実車を用いた検証試験を行った。これらの結果は以下の通りである。

- (1) 詳細計算式をベースとした動的解析シミュレーションプログラムは、横風を受けた車両の輪重変動を推定する手法として、概ね妥当であることが確認された。
- (2) 横風の変動周波数によっては、静的解析結果と動的解析結果に大きな差が見られる場合があることが明らかになった。特に、横風の変動周波数が車両の下心ローリングの固有振動数に近い場合には、静的解析による輪重減少率は過小評価となる傾向が大きいことが明らかになった。
- (3) 自然風(実風速)データを入力条件とする動的解析シミュレーションを実施し、車両の動特性を考慮した実効風速に関する基礎的な検討を行った結果、風速データに対して、適当な移動平均処理と増幅処理を行うことにより、実効風速を簡易に評価できる可能性のあることが明らかになった。

以上より、横風の変動周波数が車両の挙動に及ぼす影響が明らかになり、転覆限界風速の推定精度が向上するとともに、静的解析との差を定量的に評価することが可能となった。従って、今後は、動的解析と静的解析を適宜使い分けるのが望ましいと考えられる。すなわち、事故調査など、特定の風速変動(空気力変動)に対する特定の車両の挙動を詳細に調査する場合には、あるいは実効風速の最適な設定方法を検討する場合などには、動的解析が有効であり、一方、横風に対する運転規制ルールを策定する際など、一般的な転覆耐力としての転覆限界風速を評価する場合には、静的解析と併せて実効風速を考慮する方法が有効であると考えられる。

参考文献

- 1) 国枝正春：鉄道車両の転ぶくに関する力学的理論解析、鉄道技術研究報告、No.793、1972
- 2) 日比野有、石田弘明：車両の転覆限界風速に関する静的解析法、鉄道総研報告、Vol.17、No.4、pp.39-44、2003
- 3) 日比野有、下村隆行、谷藤克也：鉄道車両の転覆限界風速に関する静的解析式の検証、日本機械学会論文集(C編)、Vol.758、No.75、pp.2605-2612、2009
- 4) 日比野有、今井俊昭、種本勝二：自然風下の実物大車両模型に働く空気力の観測、鉄道総研報告、Vol.18、No.9、pp.11-16、2004