

横風に対する鉄道車両の転覆限界風速評価方法

車両構造技術研究部 車両運動研究室

室長 日比野 有

1. はじめに

横風による車両の転覆事故は、近年ではその数は減りつつあるものの、ひとたび事故が発生すれば大きな被害をもたらす可能性がある。また、近年の鉄道車両の軽量化・高速化の傾向は、横風に対する安全性において不利な条件となっており、横風下における車両の走行安全性を精度良く評価することは重要な課題である。

横風に対する鉄道車両の転覆限界風速評価式として、いわゆる「国枝式」が古くから用いられているが、近年の研究成果や事故調査などから得られた知見が十分に反映されていない課題があった。そこで、本研究では国枝式をベースに、転覆に影響を及ぼす各要素をより詳細に考慮した「総研詳細式」およびそれを動的解析に拡張した「動的解析式」を構築するとともに実物車両や模型車両を用いた検証試験を行ったので、その内容と各解析式の精度・用途などについて紹介する。

2. 転覆限界風速の評価方法（各解析式の特徴）

2.1 国枝式

半車両断面モデルによる静的解析式であり、1972年に国鉄（当時）の技術研究所の国枝により提案された¹⁾。車両に働く外力のうち転覆に大きな影響を及ぼす力として、横風による空気力、曲線通過時の超過遠心力、左右振動慣性力を考慮し、各外力の最大値が同時に静的に作用すると仮定して、風下側の車輪／レール接触点回りのモーメントのつり合いを考える。なお、実際の計算では、主に以下を仮定することが多い。

- ① 車両のばね系による車体変位が転覆に及ぼす影響を、車両重心高さ・風圧中心高さを25%増しとした有効高さを考慮することによって等価的に評価する。
- ② 横風による空気力として横力のみを考慮し、風速の2乗と空気力（横力）との関係を表す空気力係数（横力係数）を1.0とする。
- ③ 空気力係数の風向角依存性を考慮しない。

これらの仮定を置くことにより、比較的簡易に実用的な結果が得られるようになり、その後国枝式が広く使われるに至ったと考えられる。逆に、現在一般的に国枝式というと、上記の仮定を前提として含めた上での解析式を指すことが多い。

2.2 総研詳細式

半車両断面モデルによる静的解析式であり、2003年に日比野らにより提案された²⁾。現在、鉄道総研において転覆限界風速を評価する際には、主として同式を使用している。基本的な考え方は国枝式と同様であるが、主に以下の点を国枝式よりも詳細に考慮する。

- ① 車両のばね系を詳細に考慮し、車体変位を精緻に求める。

- ② 横風による空気力として、横力、揚力、ローリングモーメントを考慮し、これらの空気力係数を風洞試験により求める。
- ③ 空気力係数の風向角依存性を考慮する（上記②の風洞試験では、風向角に応じた空気力係数を評価し、また転覆限界風速の計算では、車両に対する相対風速・相対風向角を考慮する）。
- 特に、空気力に関する上記②、③は、近年の研究成果や事故調査などから得られた知見を反映させたものである。空気力係数の評価は転覆限界風速の計算結果に大きな影響を及ぼすため、重要なポイントである。

2.3 動的解析式

総研詳細式を動的解析に拡張し、さらに1車両モデルとしたものである。具体的には、総研詳細式で考慮する上下・左右・ローリングの自由度に、ヨーイングとピッチングの自由度を追加し、さらに減衰要素、各質量要素の慣性モーメント（回転半径）等を追加したモデルによる解析式である。総研詳細式のモデルをベースとしているため、過去の検討結果との整合性を取りやすいことが特徴である。さらに、本モデルでは、静止輪重アンバランスが転覆限界風速に及ぼす影響を検討するために、軸ばね・空気ばねの変位にライナー（調整板）の厚さを初期値として与えることにより静止輪重アンバランスを設定することが可能である。

各解析式には、それぞれ長所・短所があり、一概に優劣を論ずることはできないが、半車両断面モデルによる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、車両の動的挙動あるいは解析モデルの違いが転覆限界風速に及ぼす影響を明らかにしておく必要がある。

3. 各解析式の妥当性の検証

3.1 総研詳細式の検証

総研詳細式の妥当性を検証するために、鉄道総研構内の試験線ピットにおいて、横風による空気力に相当する横力を実物車両に負荷する試験を行った（図1）。試験の結果、輪重減少率および車体重心左右変位について計算値と実測値は概ね一致することを確認した（図2、図3）。

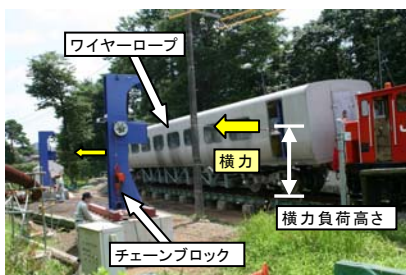


図1 静的横力負荷試験

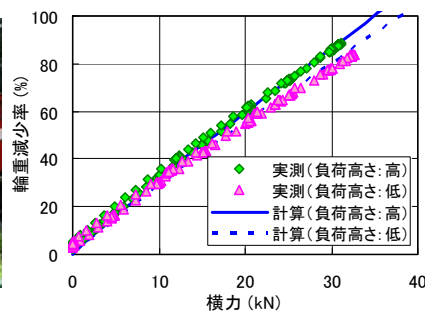


図2 横力と輪重減少率との関係

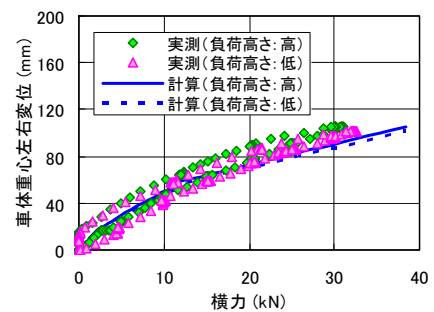


図3 横力と車体重心左右変位との関係

3.2 動的解析式の検証

(1) 実物車両を用いた動的横力負荷試験

動的解析式の妥当性を検証するために、鉄道総研の新車両試験台において、横力を実物車両に動的に負荷する試験を行った（図4）。車体の前後ドア付近の2箇所を横方向にけん引し、横力の変動周波数や振幅をパラメータとしたほか、前後の横力の位相を変えて試験を行い、外力によるヨーイングモーメントの影響も検討した。試験の結果、計算値と実測値は概ね一致することを確認し、本研究で構築した動的解析式は、外力の変動周波数やヨーイングモーメントが輪重変動に及ぼす影響を検討する手法として概ね妥当であることを確認した（図5、図6）。

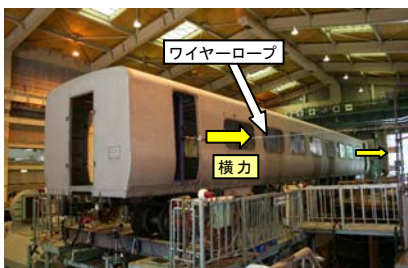


図4 動的横力負荷試験

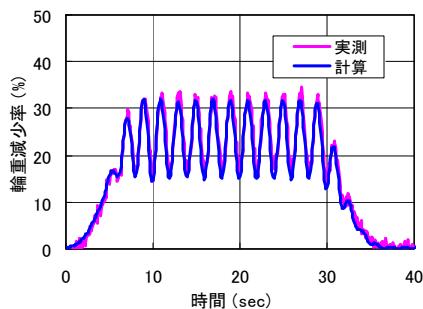


図5 連続正弦波（位相差 1/4 周期）に対する輪重変動

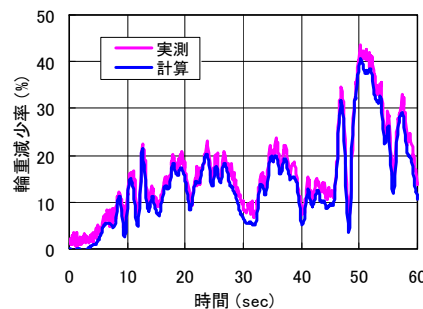


図6 自然風に対する輪重変動

(2) 縮尺 1/10 車両模型を用いた風洞試験

実物車両を用いた動的横力負荷試験では、全ての輪軸の輪重を同時に測定することができないことと、転覆に至る状況までは再現できないことから、車両模型を用いた検証試験を行った（図7）。本試験で用いた車両模型は、在来線の通勤型車両をモデルとした縮尺 1/10 の模型であり、空気力に影響を及ぼす車体外形のみならず、台車のばね系や車体の大変位を抑制するストップ当たりも忠実に再現し、外力に対する車体の変位が実物と相似になるようにばね定数を設定しているのが特徴である。

風洞試験は鉄道総研の大型低騒音風洞で行った。試験では、転覆に至るまで風速を徐々に増加させ、風速と各車輪の輪重との関係を測定した。風洞試験結果と、模型車両とほぼ同等の静止輪重アンバランスを設定したシミュレーション（実車相当の諸元に換算した上で計算）による計算結果とを比較したところ、風速と輪重との関係における両結果の傾向は概ね一致することを確認した（図8、図9）。



図7 風洞試験

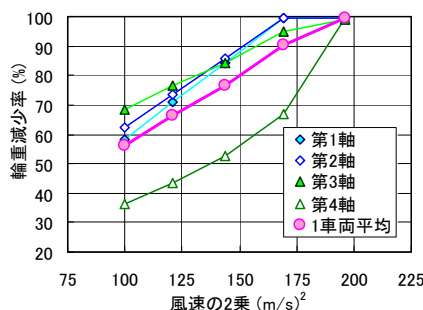


図8 風速の2乗と輪重減少率との関係
(縮尺模型風洞試験結果)

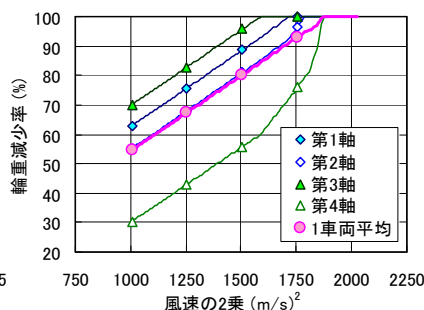


図9 風速の2乗と輪重減少率との関係
(実車相当諸元シミュレーション結果)

4. 総研詳細式では考慮しない要素が転覆に及ぼす影響

4.1 外力の変動周波数の影響

動的解析結果から、横力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、総研詳細式による計算結果との差が大きくなることが明らかになった(図10)。しかし、自然風のように様々な周波数成分を含む不規則な変動力が作用する場合には、両者による計算結果の差は、転覆限界風速の差として2~3m/s程度であるので、通常の横風に対する安全性を評価する場合には、若干の安全余裕を見込むことにより総研詳細式でも合理的な評価が可能であると考えられる。

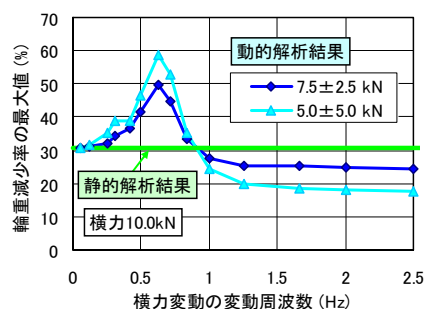


図10 横力の変動周波数と輪重減少率最大値との関係

4.2 空気力によるヨーイングモーメントの影響

車体の前後に負荷する横力の位相差をパラメータとした動的解析の結果、前後の横力が同位相で作用するとき、すなわちヨーイングモーメントがゼロであるときに輪重減少率が概ね最大となることが明らかになった。従って半車両断面モデルは転覆に対して厳しい仮定、すなわち安全側の仮定となっていることが分かった。

4.3 静止輪重アンバランスの影響

各輪軸の静止輪重アンバランスを様々に設定した動的解析の結果、1車両平均の静止輪重アンバランスが同等であれば、各輪軸のアンバランスの付き方に関わらず転覆限界風速は同等となることが明らかになった。また、1車両平均の輪重減少率を指標とすることによって、転覆に至るまでの風速と輪重減少率との関係を一意に記述できることが明らかになった。従って、空気力によるヨーイングモーメントの影響を考慮しなくてもよい場合には、1車両平均の静止輪重アンバランスを考慮することにより半車両断面モデルに帰着できることが分かった。

5. まとめ

総研詳細式は、国枝式をベースに、重心の変位を車両諸元に基づき詳細に考慮するとともに、空気力に関する近年の研究成果や事故調査などから得られた知見を反映させた解析式であり、従来の方法よりも実際の現象により近い評価が可能であると考えられる。また、1車両モデルによる動的解析式は、外力の変動やそれに対する車両の応答を詳細に検討する必要がある場合、例えば、トンネル出口などにおける急激な風の立ち上がりや、竜巻やダウンバーストなどの突風に対する車両の応答を検討する場合に有用である。しかし、通常の横風に対しては半車両断面モデルにより同等または安全側の評価が可能であることから、防風柵の仕様検討や運転規制ルール策定の際に参考とする転覆限界風速については、車両の動的応答に関する安全余裕を見込んだ上で総研詳細式により十分合理的な評価が可能であると考えられる。今後はこのような検討・検証を重ねていくことにより、実務に適用可能な転覆限界風速評価方法を構築していく予定である。

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.