

論文の内容の要旨

研究題目 自動車車体の構造ヒステリシスに基づく操舵剛性感の研究

氏 名 河内 毅

自動車の燃料消費量低減と衝突安全性向上の両立のため、薄鋼板を成形し組み立てられる自動車車体には、薄肉高強度鋼板の適用が進んでいる。しかし、構造変更を伴わない単純な薄肉化は車体剛性の低下を招き、操縦安定性やドライバの官能評価を低下させることが古くより報告されている。一方、数は少ないが、ドライバの官能評価の一つである剛性感が荷重を受ける車体の変形位相の遅れであるとし、車体の構造ヒステリシスがそれを低下させるとする報告がある。さらに、車体の構造ヒステリシスがドライバによる操縦性を低下させることが報告されている。以上から、車体の構造ヒステリシスは、ドライバが操舵時に受ける操舵剛性感と密接に関係しており、それを抑制することで操縦安定性と操舵剛性感を改善できると考えられる。

しかし、自動車車体の変形における構造ヒステリシスが操縦安定性に及ぼす影響に関する研究は少なく、その関係を定量的な評価はないため、評価方法を含め、さらなる研究が必要である。さらに、車体の変形における構造ヒステリシスの発生原因が車体を構成する部品同士の板間摩擦とする報告があるものの、接触摩擦挙動を詳細に分析するには至っておらず、スポット溶接が施されるフランジ面における接触と滑り挙動に関し、さらなる研究が必要である。

本研究は、「操舵者（ドライバ）の操舵によって生じる車体変形を起因とする車両運動応答の変化」と定義する操舵剛性感に影響を及ぼすと予測する車体の構造ヒステリシスに関

し、その原因とメカニズムを明らかにすることを第一の目的とする。自動車車体の構造ヒステリシスが、部品の溶接フランジにおける板間摩擦に起因していると考え、実験及び数値解析の両方のアプローチで、準静的な繰り返し荷重にさらされる構造体の内部の摩擦による構造ヒステリシス発生メカニズムを明らかにする。その過程において、試験体内部における摩擦のみを考慮し、他の要因を除去する構造ヒステリシス測定手法を提案する。

得られるメカニズムを基に、構造体における板間摩擦を起因とする構造ヒステリシスを予測する数値解析モデルの構築を第二の目的とする。フランジ面における相対変位に着目し、摩擦によるエネルギー散逸を簡単な物理モデルで表現し、少ないパラメータによる摩擦ヒステリシス簡易予測モデルを構築することを目指す。さらに、ねじり変形を受ける自動車車体の構造ヒステリシスを実験的に測定し、摩擦ヒステリシス簡易予測モデルの車体用パラメータを同定し、車体の構造ヒステリシス簡易予測モデルを構築する。この手法により、特定の荷重によって生じる車体のねじりや曲げ等の基本的な変形形態において、車体の構造ヒステリシスの同定が可能になる。

一方、実際の走行において車体の構造ヒステリシスが操縦安定性に及ぼす影響を実験的に定量化することは困難が予想される。そこで、同定される車体の基本的な変形である、ねじり及びフロント横曲げ変形における構造ヒステリシスを数値モデル化し、操縦安定性を評価する走行解析に導入することを目指す。本論文では、車体骨格の全体的な変形形態に着目し、その変形における剛性と構造ヒステリシスを考慮可能な走行解析モデルを設計する。このモデルを用い、数値解析的に考慮される構造ヒステリシスが、走行時における剛性感を表すといわれる車体変形の位相遅れ及び操縦安定性に及ぼす影響を明らかにする。さらに、車体変形、たとえば、車体ねじり変形の応答遅れと強い相関を持つ操縦安定性評価値を抽出し、操舵剛性感を評価する指標を見出し、構造ヒステリシスが操舵剛性感指標に対し及ぼす影響を定量化することを第三の目的とする。構築する走行解析モデルは、上記の車体変形形態における剛性と構造ヒステリシスを独立して仮想的に変更することが可能となる。また、実走行試験におけるドライバの剛性感評価による検証を可能にするため、構造ヒステリシスに直接的に影響を受け、実走行試験において測定可能な物理量または評価指標を定める。

最後に、車体の構造ヒステリシスを制御するための設計技術について、将来の課題として論じる。本論文での議論は、車体の構造ヒステリシス制御を考慮した設計技術の構築につながるものであり、これにより、ドライバの剛性感を向上させるための対策を設計段階において施すことが可能になる。設計の上流においてドライバの官能評価を向上させる対策を施すことができれば、自動車開発のスピードアップと自動車の走行にかかわる性能に対し根本的な改善が可能になると思われる。本研究は、構造体の摩擦現象に関する知見を与えるだけでなく、自動車の新しい設計技術につながるものであり、今後の自動車開発に対する強いインパクトを持つものである。

1 序論

本章において、上記の研究に至る背景と本論文の目的について述べる。

2 摩擦による構造ヒステリシス測定手法の構築

被溶接部品の重ね溶接を施される部位における摩擦によって生じる構造ヒステリシスを実験的に測定するためのシステムを提案する。現象の理解を容易にするため、測定対象は単純な薄鋼板を成形しフランジを有する二つの部品を溶接し組み立てるダブルハット中空梁試験体とする。溶接フランジ面において強い接触が生じるようにスポット溶接し、試験体の端面にせん断荷重を低速で与える実験を行う。実験から得られる変位-荷重ヒステリシスループを積分して得られる損失エネルギーを評価する。さらに、上記の接触部位を持つ試験体に加え、接触を持たない試験体を作成し、同様の測定を実施する。二つの試験体の測定結果を比較することで、試験機が持つ構造ヒステリシスによる不可避的な影響を除去し、試験体内の接合面における摩擦のみを起因とする損失エネルギーを抽出する。実験結果の荷重速度に対する依存性を調べ、摩擦損失の静的及び動的特性を議論する。さらに、荷重速度ゼロへの極限值として計算される静的摩擦損失と最大荷重時に試験体内部に蓄えられるひずみエネルギーとの比を摩擦ヒステリシスとして評価し、最大荷重に依らず、ほぼ一定になることを明らかにする。また、摩擦を考慮した単純な力学モデルを構築し、導出される摩擦損失の最大荷重及び荷重速度に対する傾向が実験結果と良い一致を示すことを報告する。

3 数値解析を用いた摩擦による構造ヒステリシス発生メカニズムの解明

第3章において、第2章で得られる実験結果を定量的に説明するため、接触及び摩擦を考慮した詳細なモデルを用いた有限要素法による数値解析を実施する。荷重点における変位-荷重線図がヒステリシスループを描くことを確認する。そのループで囲まれる面積から計算される損失エネルギーと摩擦面における相対滑りと摩擦力分布から計算される摩擦による消費されるエネルギーが一致することを確認する。さらに、計算される損失エネルギーと第2章で得られる実測値が完全ではないが定量的に合うことを確認することで、測定されるヒステリシスが板間の摩擦によるものであることを結論付ける。さらに、数値解析モデルを用い、試験体モデルを単純せん断する解析及びモーメントを与えることで純曲げする解析を実施する。この結果から、単純せん断において計算される摩擦損失は、せん断曲げの結果と一致し、純曲げにおいては摩擦損失が発生しないことが確認され、フランジ面における摩擦損失を発生させる荷重はせん断力であることを報告する。

4 摩擦による構造ヒステリシス予測モデルの構築

第2章において得られる実験結果及び第3章で得られる数値解析結果をもとに、ダブルハット試験体の摩擦損失を、車体モデルと同程度の粗いメッシュモデルを用いて予測することを可能にするモデルを提案する。構造解析結果を基に、フランジ面における相対変位を計算し、モデル化される摩擦力と相対滑りを計算することで、モデル上の各節点にお

る摩擦による損失エネルギーを得る。合わせ込みのための二つのパラメータは第2章で実測される摩擦ヒステリシスを再現するように同定される。

5 自動車車体の構造ヒステリシス

車体のねじり変形における構造ヒステリシス測定における試験機固有の構造ヒステリシスを除去する試験方法を提案する。実測される構造ヒステリシスは、与える最大ねじりモーメントに依らず、ほぼ一定となる。車体の数値解析モデルに第4章で構築する摩擦ヒステリシス予測モデルを適用し、ねじり変形及びフロント横曲げ変形における構造ヒステリシスを算出する。

6 車体の構造ヒステリシスを考慮した操舵剛性感評価

第5章で得られる剛性及び構造ヒステリシスを持つ車体を簡易化し組み込んだ走行解析モデルの構築について述べる。この走行解析モデルを用いたステップ操舵応答解析から得られるヨーレートおよび横加速度のピークと応答時間、横滑り角定常値及びドライバの官能評価との相関が報告されているTBファクタ（ヨーレートピーク応答時間と横滑り角定常値の積）を評価する。その結果、特に、車体ねじりの構造ヒステリシスの増加に伴い、各評価値の変化から操縦安定性が低下することが示され、TBファクタは増加、つまり、官能評価が低下することが示される。加えて、構造ヒステリシスの増加は、旋回初期における車体変形の応答遅れの増大を通じてヨー加速度ピークを低下させ、また、定常旋回状態における車体変形の残留の増大を通じて横滑り角定常値を増加させるというメカニズムを解明する。さらに、ドライバが操舵した際に生じる車体変形に影響を受け変化し、横滑り角定常値とヨー加速度ピーク値の比であるBAファクタを操舵剛性感指標として提案する。構造ヒステリシスの増加はBAファクタを上昇させ、操舵剛性感を低下させるという結論を導く。

7 結論

最後に、本研究で得られる成果についてまとめ、将来の課題について述べる。

書誌情報

論文の一部については、平成29年11月公開の「日本機械学会論文集」83巻855号1-13頁、及び、平成30年7月公開の「日本機械学会論文集」84巻862号1-15頁において公表済み

以上