自動車が行走する時に路面に作用する横力の計測*

広田 敦生^{*1}, 柳沢 治茂^{*1}, 波多野 忠^{*2}Measurement of the Lateral Force that Acts on Road Surface
when an Automobile Runs

Atsunari HIROTA, Harushige YANAGISAWA and Tadashi HATANO

In order to know the motion of an automobile, it is extremely significant to measure the lateral force that acts on road surface when the automobile runs. Therefore, we considered many approaches to measure the lateral force in a short section of a road over wide speed range from extremely low to very high. And we contrived a new structure of a measuring apparatus that used strain gauges. Finally, we successfully made the apparatus that possessed good response characteristics in wide range from D. C. to extremely high frequency, enough sensitivity and very low cross-axis sensitivity. In this paper, we describe the structure and characteristics of the apparatus and example of measurement by it.

Key Words: Measurement, Sensor, Automobile, Maneuverability, Force Plate, Lateral Force

1. ま え が き

自動車の運動は、空力的な作用を除けば、そのほとんどが走行中にタイヤと路面間に発生する力によって決定されている。したがって、これらの力を測定することは、自動車の運動状態を知るうえで極めて有効である。特に横方向の力は、車両の方向安定性を直接左右するものであり、サスペンション、タイヤ、アライメント等の状態を知るうえでも極めて重要であり、これが測定できれば、非常に多くの情報を提供してくれるものと考えられる。

この横力を測定するには、車両側に何らかの装置を搭載して行う方法と路面側に装置を埋め込んで行う方法がある。前者の場合には、データが連続的に得られる反面、車両側にかなりの改造と装置の搭載が必要になるという特徴を持っており、これまでに数種類の装置が試作され⁽¹⁾⁽²⁾、実用化されている。後者の場合には、データは装置上を車両が通過している間しか得られない反面、車両側に改造や装置の搭載の必要がない

ので、一端セットすれば多数の車両のデータが簡単に得られるという特徴を持っている。この路面側で測定する方法については、車両の輪荷重のみ測定するための装置は、古くから開発されており⁽³⁾、また、三軸方向の力を測定するための装置が試作された例がある⁽⁴⁾。しかし、この装置は、制動力の測定に主眼をおいたものであり、横力の測定データについては述べられておらず、応答周波数（固有振動数 100 Hz 程度）も低いので、實際上、直流を含む広い周波数範囲で横力を測定できる装置は存在しない。

なお、人間の歩行特性解析用のフォースプレートは、多数開発され⁽⁵⁾、実用に供されているが、いずれも応答周波数（固有振動数 60 Hz 程度）が低く、車両が高速走行した場合の測定に適用することは不可能である。また、圧電素子を用いた装置も実用化されているが、応答周波数が高い反面、直流に対する応答がないという弱点を持っている。

そこで、今回、路面側の短い区間において、直流を含む極めて広い応答周波数範囲で測定を行うための方法について考察し、目的に添った装置を試作することができたので、その構造と特性およびそれを用いた測定結果の一例について報告する。

* 原稿受付 1998年1月20日。

*¹ 正員、交通安全公害研究所(☎181-0004 三鷹市新川6-38-1)。*² 交通安全公害研究所。

2. 装置の試作

自動車が極低速から高速まであらゆる速度で走行する時に、タイヤと路面間に作用している横方向の力を路面側の短い区間で高精度に測定するためには、次のような問題点を克服しなければならない。

すなわち、このような横力を測定する装置は、走行速度が広範囲であるため、十分な感度を確保したうえで、直流成分を含む広い応答周波数範囲(D.C.~500 Hz 以上)に対応できる必要があり、しかも、横力の測定レンジ(数 100 N 以下)に対して非常に大きい上下方向の力(乗用車の場合で輪荷重 3~5 kN 程度)が作用するため、クロストーク(測定軸間の相互干渉性)が極めて少ないこと(1%以下)が要求される。

高い応答周波数を得るには、圧電素子を用いた力センサが適しているが、このタイプは直流成分に対しては応答しないという弱点を持っている。したがって、直流成分に対しても応答性を有するひずみゲージを用

いた力センサによって、十分な感度と低クロストークを確保した上で、どこまで高振動数化が可能かという方向で考察をすすめた。

一自由度振動系の固有振動数は、次式で表される。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

f : 固有振動数

k : ばね定数

m : 質量

この式から、系の固有振動数を高めるには、①必要な強度・剛性を確保した上で、可動部分の質量をできる限り減少させることおよび②必要感度を確保した上で、系のばね定数をできる限り大きくすること、の二点をクロストークを十分抑えながら達成する必要があることがわかる。

これらの事項を考慮して設計・試作した装置全体の構造を図 1 に示す。基本的には、表面板(路面に相

Fig. 1 Structure of the apparatus

当) にジュラルミン製の薄板 (厚さ 3 mm) を用い、これと高剛性フレームとの間に細かいピッチ (30 mm) で多数の薄いジュラルミン製の支持板 (厚さ 1.5 mm, 高さ 70 mm) を上下の接着力確保のための補強材とともにエポキシ系接着剤で接着して結合する構造となっている。これは、これまでのフォースプレートにみられる高剛性のプレートを 4 箇所の荷重検出器で支えるものとは全く異なる新たな構造であり、支持点を極めて多くすることによって、可動部分の質量を非常に小さくできることに特長がある。表面板の形状は、図 2 に示すとおりであり、A 部にクロスタイプのひずみゲージを貼付し、横力によって発生するせん断ゆがみを検出する。B 部はフレームと一体化された支持部材に上部のあて板とともにボルト締めし、フレームに結合するために設けた部分である。C 部は測定面であり、上部を車両が通過することになる。図 3 にあて板の形状を示すが、4 個のボルト穴とひずみゲージ貼付部の逃げを確保するための半円形のえぐりを設けている。また、図 4 に検出部付近の構造を示す。

このように、多数の支持板によって表面板を支持する構造とした結果、上下方向および前後方向に対しては極めて高い剛性を有している。横方向の力が作用した場合は、支持板の剛性が横方向に対しては極めて低いため、横力はひずみゲージを貼付した検出部分に集中的に加わることになる。振動系の質量となる部分は、薄い表面板と支持板 (補強材を含む) の一部であるため極めて軽量であり、1 チャンネル当たり (表面板 4 枚分、測定長 0.5 m) の質量は約 3.5 kg に収めるこ

Fig. 2 Superficial plate

Fig. 3 Backplate

とができた。また、必要な感度を確保したうえで、より高いばね定数を得るには、クロストークの点では若干不利であるが、ひずみ検出部の長さ (前後方向、図 4 参照) を短くするほど有利である。したがって、ひずみゲージが貼付できる範囲で極力短く 2 mm に設定した。これらの工夫を凝らした結果、必要な感度と低クロストークを確保したうえで非常に高いばね定数を得ることができた。

なお、本装置の 1 チャンネル当たりの測定距離は、0.5 m であり、これを 4 個並べることにより 4 チャンネルとし、合計 2 m の区間で測定できる。

また、本装置では、1 チャンネル当たり 4 個のホイートストンブリッジができるので、感度がもっとも低いブリッジを除く三つのブリッジに適当な値の電気抵抗器を挿入して 4 個のブリッジの感度を同一の値に揃え、その後並列に合成して、実質的に 1 つのブリッジとして働くようにしている。

3. 試作した装置の特性

3・1 検出感度 静的感度について、図 5 に示す負荷位置 (12 箇所) において、負荷方向 (左右) を変えて測定した結果、感度の平均値は、 $0.73 \mu V \cdot V^{-1}/N$ であり、位置および方向による差は、最大 $\pm 1.1\%$ となっている。静的特性の一例を図 6 に示す。なお、感度の差が 1.1% 以内と小さいので、一例を示すに止めた。

Fig. 4 Part for detection

Fig. 5 Locations of load application

Fig. 6 Static sensitivity

Fig. 7 Input and output wave form

3・2 周波数応答特性 装置の周波数応答特性をインパルス応答法によって調べた。すなわち、ピエゾタイプの加速度計を利用したインパルスハンマを用いて、この場合測定面を横方向に打撃することはできないので、表面板の端部を横方向に打撃し、ハンマによって加えられた力を入力とし、本装置による測定値を出力として解析する。

打撃した時の入・出力波形の一例は図7、また、これらの波形を解析して得られた周波数伝達関数は図8に示すとおりであり、打撃位置によるバラツキを調べるため、各表面板（合計16枚）について試行した時の隔たりの幅も併記した。これによれば、ほぼ一自由度振動系とみなせる特性を示しており、最低共振周波数は約830 Hzで、この種の装置としては極めて高い応答周波数を持っていることがわかる。

3・3 クロストーク特性 測定面の位置を図5に示すように種々変化（12箇所）させ、タイヤの接触面とほぼ等しい面積のゴム製パッドを介して重すいを乗せる方法で、上下方向力（荷重）によるクロストーク特性を調べた。その結果、クロストークは、0.75%以下となっており、良好な特性であることがわかる。また、前後方向力によるクロストークも0.9%以下と非

Fig. 8 Frequency transfer function

常に小さい値に収まっている。

結論として、本装置の特性は、検出感度、周波数応答特性およびクロストーク特性のいずれにおいても、実用上十分なものであり、特に、当初の狙いとした極めて高い周波数応答特性が達成できたものと考えられる。

4. 測定例

前輪駆動車（以下FF車という）および後輪駆動車で後輪がリジッドアクスル（以下FR車という）の2台の乗用車による直線走行実験を行い、本装置を用いて横力を測定した結果について述べる。

図9に、FF車の標準アライメント状態での測定結果を示す。これによれば、かなり高周波数の成分が含まれていること、低周波数の変動がかなり大きいことなど、これまで知り得なかった事実が明確になることがわかる。

図10に、FR車の前輪アライメントを標準状態のまた、速度を変えて測定した結果を示す。極低速の場合は、アライメントが標準状態であるため、横力の直流成分は非常に小さく、タイヤのユニフォーミティ等に起因すると思われる横力の変動成分のみが現れた形となっている。速度が上昇すると、横力の変動成分はほとんど発生せず、かなり高く広い範囲の周波数成分をもつ横力が発生していることがわかる。図11に、図10に示したデータのパワースペクトル密度を示す。数10 Hz～数100 Hzの間に現れている多数のピーク

Fig. 9 Measurement result (FF vehicle, standard alignment)

Fig. 10 Measurement result (FR vehicle, standard alignment)

Fig. 11 Power spectral density of data in fig. 10

は、主としてタイヤの横方向の振動特性によるものと考えられる。したがって、数 100 Hz までの周波数範囲でのタイヤの横方向の振動モード等の特性解析にも利用できる可能性があることがわかる。また、約 830 Hz のピークは、本装置の固有振動によるものであり、

周波数が高いため振幅は小さくなっている。

図 12 は、FR 車の前輪アライメント（トーイン）を調整して、サイドスリップ量を約 5 および 10 mm/m の二種類に設定し、速度を変えて走行したときの結果であり、前輪に作用する横力の直流成分が増大して行くのがわかる。

このように、自動車が走行するときにタイヤと路面間に発生する横力が、極めて広い周波数範囲にわたって測定できることが確認できた。

5. 結 論

自動車が極低速から高速までさまざまな速度で走行するときに、タイヤと路面間に作用する横方向の力を路面側の短い区間で計測することを試みた結果は以下のとおりであった。

(1) ひずみゲージを用いた力センサにおいて、十分な感度と極めて低いクロストーク特性を確保したうえで、極めて広い応答周波数範囲を持たせるという相

Fig. 12 Measurement result (FR vehicle, modified alignment)

反する事象を高いレベルで実現するために、新たな構造を提案した。

(2) 新たな構造を有する装置を実際に試作し、その具体的な構造を示した。

(3) 試作した装置の検出感度、周波数応答特性およびクロストーク特性を調べ、非常に良好な特性を示すことを明らかにした。

(4) 試作した装置を用いて、各種の条件で走行実験を行い、横力を測定した例を示し、装置の有効性を明らかにした。

文 献

- (1) Shoberg, R. S. and Wallace, Baird., A Triaxial Automotive Wheel Force and Moment Transducer, SAE Paper 750049 (1975).
- (2) 東島鎮瑛・栗津重男, 車軸 6 分力測定装置の開発, 自動車技術会, 学術講演会前刷集, 936(1993).
- (3) 西村昭, 自動車輪荷重計の試作と輪荷重頻度分布について, 土木学会論文集, 64(1959), 79-87.
- (4) Michael J. Wolania and Thomas A. Baptist, Road Transducer Objective Brake Balance Measurement Without Vehicle Instrumentation, SAE Paper 870266(1987).
- (5) 例えば, 岩崎達行, 齊藤英一, 歩行分析用フォースプレートの試作, リハビリテーション工学研究会講演要旨, (1983).