

移動式たわみ測定装置の紹介

舗装の構造的な健全度を点検する技術の開発

若 林 由 弥・寺 田 剛・藪 雅 行

近年、社会インフラに関するマネジメントの重要性が問われるとともに、人口減少に伴う技術者の不足が懸念される中、膨大な社会インフラである舗装についても効率的な点検手法の確立が求められている。舗装の点検においては、見えない下部の層の支持力も含んだ構造評価が重要であるが、現在広く使われている FWD では、ネットワークレベルの評価を行うのには、多大な労力と時間を要するといった課題がある。本報文では、これらの課題に対応するため土木研究所が大学や民間企業と共同で進めている移動しながら舗装の構造的健全度を点検する技術について、開発の背景と成果について紹介する。

キーワード：道路舗装、舗装たわみ、レーザー変位計、ドップラー振動計、離散ウェーブレット解析

1. はじめに

日本の道路舗装は道路延長ベースで約 100 万 km 存在する¹⁾。2012 年の笹子トンネル天井板落下事故以降、社会インフラに対するマネジメントの重要性が問われる一方で、人口減少に伴う技術者の不足が懸念される中、舗装においてもより効率的な点検手法の確立が求められる。

こうした中、土木研究所では大学や民間企業と共同で、移動しながら計測した舗装のたわみによって舗装の簡易的な構造評価を行う技術の開発・試作を行ったので、その成果について紹介する。

2. 従来の舗装の構造評価技術と本技術の位置づけ

図-1 に示すように、舗装は表層、基層、路盤（上層路盤、下層路盤）という複数の層から成り、それぞれ上の層から伝えられた荷重を下の層に分散して伝達

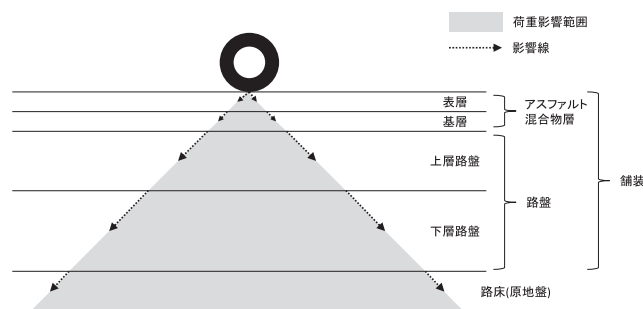


図-1 舗装の構成と荷重分散機能

させる構造となっている。従って、各層の支持力を把握することが舗装の構造評価において重要となる。

(1) 日本における舗装の構造評価技術

現在、国や自治体では構造評価の指標としてひび割れ率が採用されている。この指標は、対象区間の単位面積あたりのひび割れ長さを求めた数値で、表層付近のアスファルト混合物層の劣化については評価できるものの、路盤以下の層の支持力の低下については十分に評価できていない。しかし、ひび割れ部から浸透し



図-2 FWD（Falling Weight Deflectometer）と構造評価のイメージ

た雨水などの影響で路盤層以下の支持力が低下すると、舗装は交通荷重を十分に支えることができないため、路面の早期劣化や路盤層以下の損傷の拡大を招くことになる。

一方、路盤層以下を含む舗装全体の構造評価手法として、FWD (Falling Weight Deflectometer) によるたわみ測定が広く用いられている。FWD は重錘を落下させて舗装に生じるたわみを測定し、各層の支持力を評価する装置である。図—2 に FWD の外観および FWD による構造評価のイメージを示す。FWD にはたわみを観測するセンサーが 1 列に設置されており、発生したたわみの形状を観測することができる。載荷位置で得られるたわみ量が同じであっても、載荷位置付近が大きくたわんでいる場合には表層付近が劣化しており、ほぼ線形にたわんでいる場合は路盤以下が劣化していることとなる。このように、どの層が劣化しているのかを把握することができるため、修繕工法の選定などに活用されている。しかし、載荷地点毎（通常 20 m 間隔）の測定であるため、局所的に支持力が低下している箇所を見落とす可能性がある。また、1 点の測定に 2 ～ 3 分の時間を要し交通規制が必要であるため、ネットワークレベルの構造評価を行う場合には、多大な労力と時間を要することになる。

(2) MWD 開発のコンセプトと位置づけ

MWD (Moving Wheel Deflectometer) は、車両の輪荷重によって舗装に生じるたわみを、走行しながら測定する装置である。本技術を用いることで、測定区間内でたわみが局所的に大きい、すなわち舗装の支持力が低下している箇所を効率的に見つけ出すことができるため、より容易にネットワークレベルの構造評価を行うことが可能となる。

海外では既に移動式たわみ測定の技術は実用化されている²⁾。表—1 に海外における移動式たわみ測定装置を示す。これらの装置は車体が大きいので、国内に無数に存在する幅員の小さい道路や細かいカーブのある区間では測定を行うことができない。従って本開発にあたっては、日本の道路を走行可能な大きさまで小型化すること、小型化に応じた適切な測定手法や解析手法を構築することを重視した。

3. MWD の開発

(1) たわみ測定手法

走行しながら舗装のたわみを測定する手法として、MWD ではレーザー変位計による測定方法とドップ

表—1 海外の移動式たわみ測定技術

名称	開発国	車両全長
Rolling Wheel Deflectometer (RWD)	アメリカ	53 ft (16.2 m)
Road Deflection Tester (RDT)	スウェーデン	8.95 m
Traffic Speed Deflectometer (TSD)	デンマーク	14.9 m

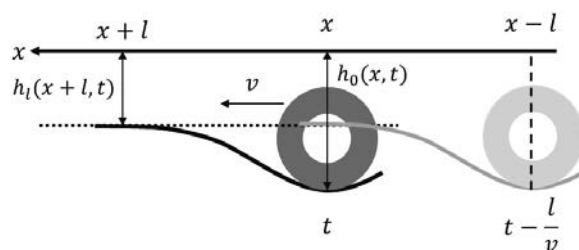
ラー振動計による測定方法の 2 種類について検討している。以下では、その 2 種類の測定方法について紹介する。

(a) レーザー変位計によるたわみ測定手法

レーザー変位計は、対象物との距離の変動を測定することができるセンサーで、路面とセンサーの相対距離の変動を測定することができる。図—3 にレーザー変位計によるたわみ測定のイメージを示す。時刻 t に車輪が位置 x にある時、車輪と同じ位置に設置したセンサーの測定値を $h_0(x, t)$ 、車輪から距離 l だけ離れた箇所に設置したセンサーの測定値を $h_l(x + l, t)$ と表す。(距離 l は車輪から十分離れて輪荷重の影響を受けない位置までの距離)。このとき、車両の速度を v とすると、位置 x における車輪直下に生じるたわみ量 $w(x)$ は、以下の式 (1) で求めることができる。

$$w(x) = h_0(x, t) - h_l\left(x, t - \frac{l}{v}\right) \dots\dots\dots \text{式 (1)}$$

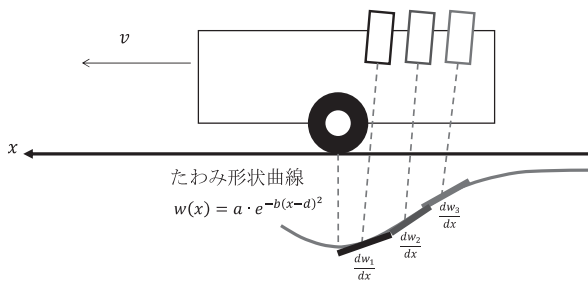
すなわち、たわみを測定したい箇所において、車輪が載る時と載らない時の変位の差をとることによってたわみを算出することが出来る。



図—3 レーザー変位計によるたわみ測定

(b) ドップラー振動計によるたわみ測定手法

ドップラー振動計は、レーザー光の入射光と反射光のドップラー効果による周波数変化を利用して、対象物の振動速度を測定する装置である。従って、ドップラー振動計で直接測定できるのは、舗装のたわみではなくたわみ速度である。図—4 にドップラー振動計によるたわみ測定のイメージを示す。ドップラー振動計によって得られるたわみ速度 dw/dt と車両速度 v から以下のようにたわみの傾き dw/dx を求めること



図—4 ドップラー振動計によるたわみ測定

ができる。

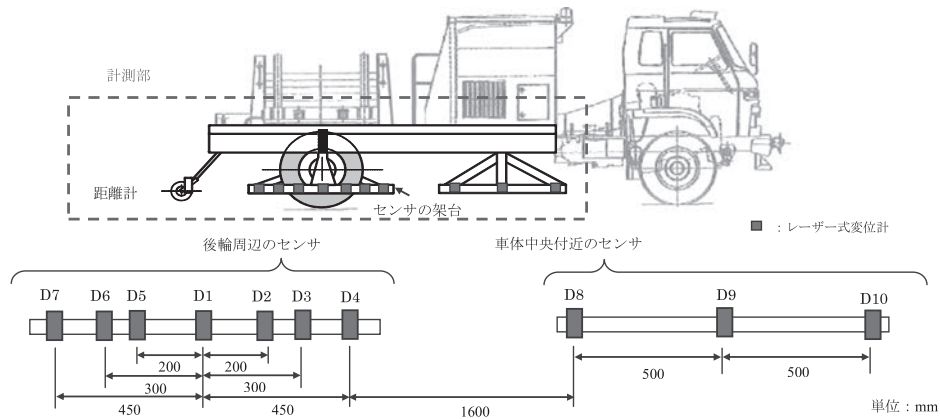
$$\frac{dw}{dx} = \frac{dt}{dx} \cdot \frac{dw}{dt} = \frac{l}{v} \cdot \frac{dw}{dt} \dots \dots \dots \text{式 (2)}$$

この傾きを積分することでたわみ形状 $w(x)$ を算出することができる。MWDではたわみ形状をガウス関数で近似し係数を算出している。

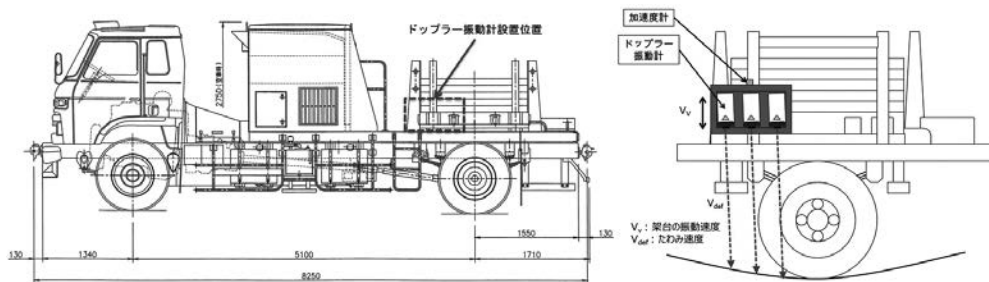
(2) 試作機の作製と振動ノイズ除去手法の検討

(a) 促進载荷用荷重車をベースとした試作機の製作

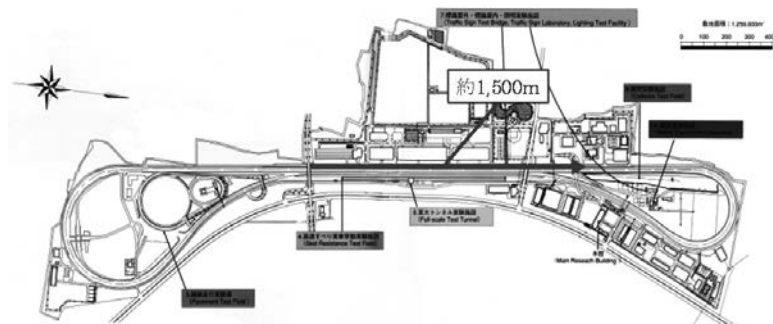
MWDを実際に開発するにあたり、土木研究所の舗装走行実験場にて促進载荷試験に用いる荷重車をベースとした試作機を製作した。図—5および図—6にレーザー変位計およびドップラー振動計の取り付け位置を示す。図—7に示す土木研究所構内の外周路にて試作機を用いて測定を実施し、FWD試験の結果と比較したところ、車両の振動と思われるノイズ成分により、測定結果に大きな差異が生じた。そこで、レーザー変位計の測定値に対しスペクトル解析を行った。図—8に解析結果を示す。図中のD1, D4, D7はレーザー変位計の番号である。2～3 Hz付近の成分が卓越しており、この部分が車体の振動成分であると推察される。舗装のたわみに比べ車体の振動は非常に大き



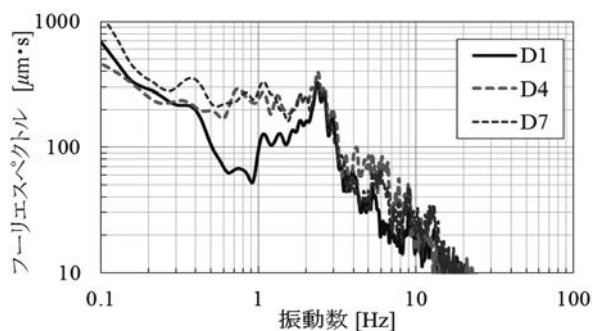
図—5 レーザー変位計の取り付け位置



図—6 ドップラー振動計の取り付け位置



図—7 土木研究所構内の測定区間



図—8 レーザー変位計のスペクトル解析結果

いため、たわみを正確に求めるにはこの振動成分を取り除く必要がある。

はじめに、センサーの架台にゲルマットなどのハード的振動対策を施したが、かえって様々な振動成分が増大するという結果となった。そこで、センサーの架台を車両に剛結させることで車体とセンサーの振動を一致させ、振動成分は離散ウェーブレット解析によるソフト的振動対策により除去することとした。

(b) 離散ウェーブレット解析による振動除去

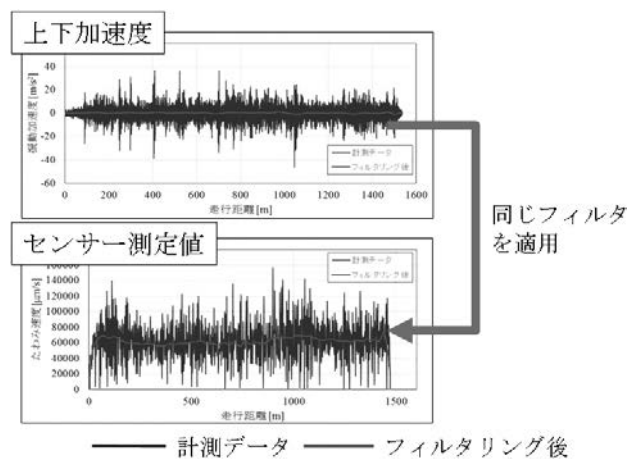
離散ウェーブレット解析は時系列周波数解析の手法の1つで、ウェーブレットと呼ばれる短い波の集合体としてデータを解析する。時系列周波数解析として一般的な手法にフーリエ解析があるが、フーリエ解析は周期的な波の重ね合わせによってデータを表現するのにに対し、離散ウェーブレット変換では車両の振動のような不規則な振動成分を表現することができるという

大きな特徴がある。

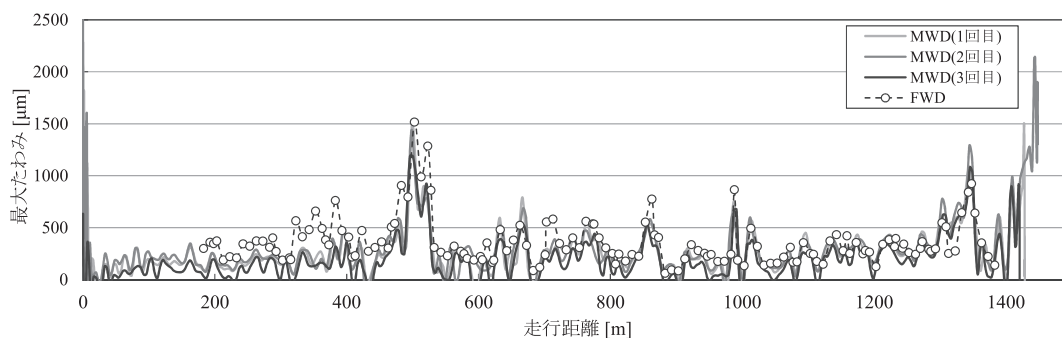
図—9に離散ウェーブレット変換によるノイズ除去のイメージを示す。加速度計によって測定した上下方向の加速度に対しウェーブレット変換を行い、逆変換時に加速度がフラットになるように0にするウェーブレット係数を選択する。続いてセンサーの測定値に対しウェーブレット変換を行い、先ほど設定した係数を0にし、逆変換を行うことで車両の振動成分を概ね取り除くことができると考えた。

(c) 振動除去による精度の検証

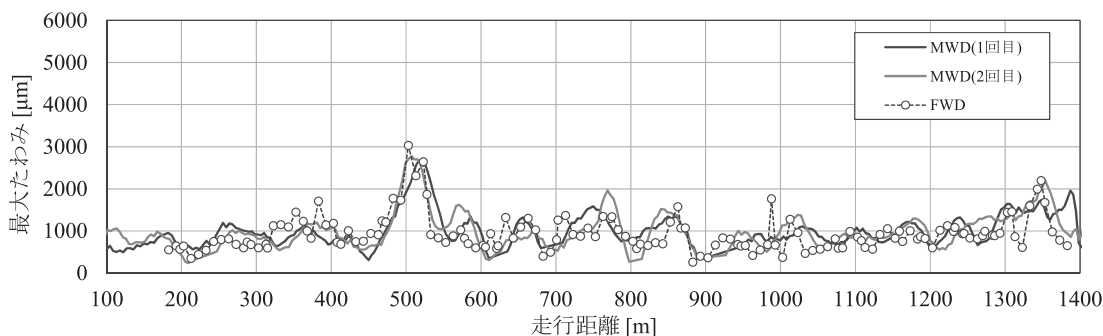
土木研究所構内にて再測定を行い得られた測定結果に対し離散ウェーブレット変換による振動の除去を行い、たわみを算出した結果を図—10および図—11に



図—9 ウェーブレット変換によるノイズ除去



図—10 FWD たわみとMWD たわみの比較 (レーザー変位計)



図—11 FWD たわみとMWD たわみの比較 (ドップラー振動計)

示す。同区間において10 m 間隔でFWD 調査を行い得られたたわみ量を比較した結果、レーザー変位計とドップラーセンサー振動計のいずれの場合もMWD たわみ量はFWD のたわみ量と概ね一致し、離散ウェーブレット変換によって車両振動成分の除去が可能であることが分かった。

4. おわりに

本報文では、土木研究所で開発中の移動式たわみ測定技術の紹介を行った。ここまで使用した促進載荷試験用の荷重車は、促進載荷試験用の改造車であるため実道を走行することができない。MWD を実用化するにあたっては、実道を走行可能な装置の開発および検証が不可欠であり、現在、図—12 に示すような、8 トン中型車両をベースとした新たな試作機を製作し、検討を進めている。今後、サスペンションの種類や荷重の違いがたわみの測定精度に与える影響について細かく検証していく予定である。

老朽化が進む道路ストックの簡易な点検技術の開発は喫緊の課題であり、本技術の実用化により、より効率的な舗装の維持管理が行われることを期待している。



図—12 実道を走行可能な試作機（左：外観，右：車両内部）

謝 辞

なお、本報文で紹介した技術の一部は、国土交通省新道路技術開発の採択技術「舗装路面の動的たわみ計測装置の開発と健全度評価に関する研究」（研究代表者：東京農業大学 竹内康教授）により行っている。ここに記して、感謝の意を表します。

J C M A

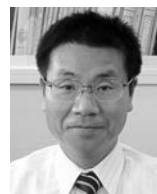
《参考文献》

- 1) 全国道路利用者会議，道路統計年報 2010 年度版，全国道路利用者会議，2010
- 2) 加納孝志，岩永真和，大場拓也，移動式たわみ測定装置について — 舗装のたわみ測定装置の変遷 —，アスファルト，Vol. 51，No. 224，pp. 43-54，2008

【筆者紹介】



若林 由弥（わかばやし ゆうや）
国立研究開発法人 土木研究所
道路技術研究グループ 舗装チーム
研究員



寺田 剛（てらだ まさる）
国立研究開発法人 土木研究所
道路技術研究グループ 舗装チーム
総括主任研究員



藪 雅行（やぶ まさゆき）
国立研究開発法人 土木研究所
道路技術研究グループ 舗装チーム
上席研究員