

移動式たわみ測定装置(MWD)による舗装体支持力計測に関する調査検討

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 寒地道路保全チーム ○紅林 俊
国立研究開発法人 土木研究所 つくば中央研究所 舗装チーム 綾部 孝之
国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 寒地道路保全チーム 丸山 記美雄

土木研究所つくば中央研究所が中心となり、走行しながら中型車タイヤ直下の舗装たわみ変形量を連続的に計測可能な、移動式たわみ測定装置(MWD)の開発を進めている。その一環で、MWDによるたわみ量と、重錘落下式たわみ測定装置(FWD)によるたわみ量を同一の路線区間で計測し、整合度を検証した。その結果、MWDは舗装たわみ量を精度良く計測できており、舗装体の支持力計測手法として有用性が高いことが確認された。

キーワード：たわみ量、移動式たわみ測定装置(MWD)、FWD、維持管理

1. はじめに

舗装の維持修繕を効率的に実施するには、舗装の健全性を適切に点検し、診断することが必要である。舗装の点検は、ひび割れ率、わだち掘れ量、IRI等の指標で調査を行い、その健全度判断に応じて、詳細調査である構造調査を実施する。

構造調査の代表的なものとして、重錘落下式たわみ測定装置(Falling Weight Deflectometer、以下、FWD)によるたわみ量調査があり、FWDで路面たわみ量を測定することで、舗装の支持力が十分であるのか、また解析によりどの層が損傷しているのかを間接的に推定することができる。また、FWDの載荷点直下のたわみ量 D_0 は、舗装の支持力の健全度の評価の目安として使用されており、交通量区分に応じた許容たわみ量の目安が示されている。

現在、土木研究所つくば中央研究所では、この舗装のたわみ量を走行しながら測定する移動式たわみ測定装置(Moving Wheel Deflectometer、以下、MWD)の開発を進めている。これまでに、特定の路線区間における試験で、MWDたわみ量はFWDのたわみ量と概ね一致していることが確認されている²⁾。

今回、舗装構成や損傷状況が異なる様々な路線において、MWDとFWDの整合性を検証する一環として、北海道の一般国道でも測定を実施することとなり、路面性状調査も併せて実施した。

本報告は、道央圏の路線において同一区間で計測を実施したMWDとFWDのたわみ量の整合度について報告するとともに、路面性状調査で得られたひび割れ率と比較

した結果について報告するものである。

2. MWDおよび調査方法

(1) MWDについて

MWDの外観を写真-1に、MWDの主要機器を表-1に、機器の配置を図-1に、測定原理を図-2に示す。

MWDは比較的幅員の狭い道路でも走行できる中型車両を使用しており、車両の左後輪の直上に設置した高精度なドップラ振動計により、走行中の車両の自重により路面がたわむ際に生じるたわみ速度を測定し、ノイズ除去等の演算を行い、最大たわみ量を算出する。

このため、車両の左車輪が外側タイヤ走行位置(Outer Wheel Path、以下、OWP)上になるように走行することで、OWPの舗装のたわみ量を連続的に計測することができる。

主要機器の一つであるドップラ振動計は、レーザ光の入射光と反射光のドップラ効果による周波数変化を利用して、対象物の運動状態を観察する装置であり、MWDでは路面のたわみ速度を測定するものである。



写真-1 MWDの外観

表-1 MWDの主要機器構成

使用機器	台数	測定項目
ドップラ振動計	3	路面たわみ速度
ジャイロセンサ	1	車両角速度
ひずみゲージ	2	後輪輪荷重
非接触赤外線センサ	1	気温・路面温度
ドップラレーザ距離計	1	車速・距離
GNSS	1	車両位置情報

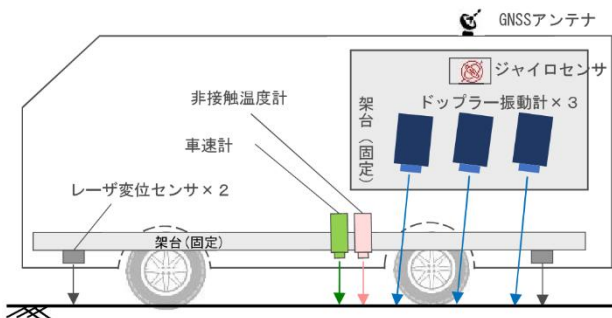


図-1 機器配置概要図²⁾

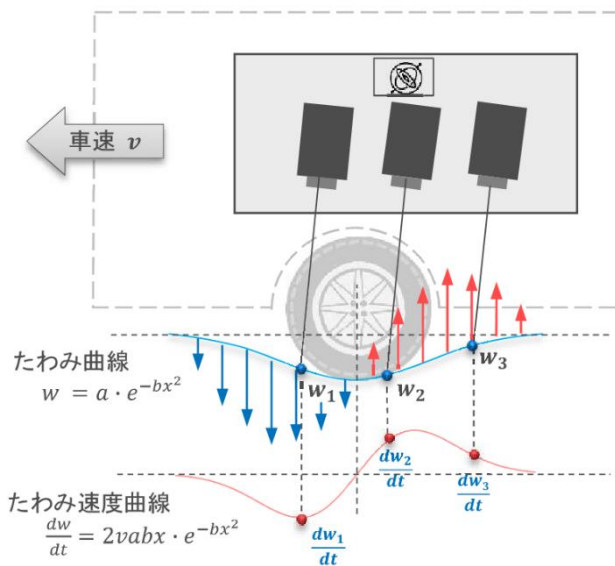


図-2 MWDの測定原理²⁾

車輪直下を原点とする局所座標系において、たわみ量を w 、車両走行速度を v 、距離及び時間をそれぞれ x 、 t とすると、たわみ速度 dw/dt は式(1)に示すように、 v とたわみ角 dw/dx によって求めることができる。ここで路面のたわみ曲線を(2)のガウス関数で近似し、ドップラ振動計から得られたたわみ量等を代入することで、最大たわみ量 a を得ることができる。

$$\frac{dw}{dt} = \frac{dx}{dt} \cdot \frac{dw}{dx} \quad (1)$$

$$= -v \cdot \frac{dw}{dx}$$

$$w = a \cdot e^{-bx^2} \quad (2)$$

(2) FWDについて

調査に用いた車載型FWDの外観を写真-2に示す。

測定時には、写真-3に示すように車両を測定地点にあわせて停止させ、搭載した重錘を所定の高さまで持ち上げた後、路面に鉛直に落下させ、衝撃荷重を与えることで行う。衝撃荷重の大きさは、アスファルト舗装の設計で用いる標準的な輪荷重である49kNとする。

FWDは、上記のように測定時に車両を停止させる必要があり、一点の計測に3~5分程度を要するため、交通規制が必要である。このため、数mおきにしき計測ができない実態がある。本報告では、載荷点から0cmの位置の D_0 たわみ量と、MWDたわみ量を比較する。



写真-2 FWDの外観



写真-3 FWDの計測例

(3) 調査箇所

調査は、千歳市から長沼町にまたがる一般国道337号の、片側1車線の道路の上り車線で実施した。調査区間の延長は1.0kmである。区間の交通量区分はN5交通で、アスファルト混合物層厚は、設計で表層4cm、基層5cm、上層路盤6cmの区間である。

調査区間は、写真-4に示すようなボトムアップ型疲労ひび割れが発生している路面の状態が悪い箇所や、ひび割れがなく路面状態の良い箇所が混在している区間である。

調査区間前半200mの直線区間においては、MWDとの比較のため、OWP部を5m間隔でFWDの測定を実施した。



写真-4 調査箇所路面状況



写真-5 調査実施状況

(4) 調査方法

調査は、MWDとFWDとの比較で正確な位置合わせが必要なため、調査開始点を設けた。具体的には、FWDの測定開始地点を調査開始点とした。

MWDは停車時や低速時には十分な路面のたわみ速度が得られない可能性があることから、調査開始地点から手前に80mの助走区間を設け、助走開始地点と左後車輪の位置を合わせてから調査を実施した。MWDの走行は、先導車と後導車を配置した上で、時速30km/hの一定速度で走行を行った（写真-5）。調査は同一区間を6回繰り返し計測した。走行中は、車両の左車輪がOWP部かつFWDの載荷点位置を通過するように運転が行われた。

調査時の天候は曇りで、MWD計測の約2時間前には一時的な降雨があった。調査区間の舗装はひび割れ部が湿っており、他は乾いた状態であった。MWDはレーザ光を使用した計測を行うため、水たまりの影響をうけるが今回支障となる箇所はなかった。

調査で取得したデータはMWDに搭載したPC上に保存され、取得したデータからたわみ速度差法²⁾によりたわみ量解析を実施した。なお、MWDの走行時輪荷重が

30kN程度であるため49kNへの荷重補正を実施している。同様にFWDも49kNへの荷重補正を実施している。

また、MWDとFWDの測定は、温度によるたわみ量への影響が軽微となるよう同一日に実施し、MWDの測定は午前10:00～12:00に、MWDの計測は午後14:00～15:30に実施した。

3. 調査結果と考察

(1) MWDたわみ量の再現性

6回計測したMWDたわみ量を図-3に示す。MWDは2000Hzで測定を実施しているが、ここでは0.5m毎のたわみ量を示している。

各回毎のMWDたわみ量を平均値と比較した場合、多少のばらつきが見られるものの、6回ともほぼ同様の値を示した。同一測点における複数回測定に伴うMWDたわみ量の平均値と標準偏差のそれぞれの平均を算出した値と、そこから算出した変動係数の値を表-2に示す。ここで測定数とは1.0kmを0.5m毎に測定した標本数である。標準偏差は0.041mm、変動係数は7.72%と小さい値となった。

以上より、MWDによる測定は再現性が良いことが確認できる。1回の計測で精度良く計測できると判断でき、連続的に長い調査延長でも測定を効率的に実施できることから、北海道におけるネットワークレベルでのスクリーニングを目的としたたわみ量測定にも非常に有効であると考えられる。

表-2 MWDたわみ量の再現性

測点数	2001
たわみ量の平均値 (mm)	0.531
標準偏差 (mm)	0.041
変動係数 (%)	7.72

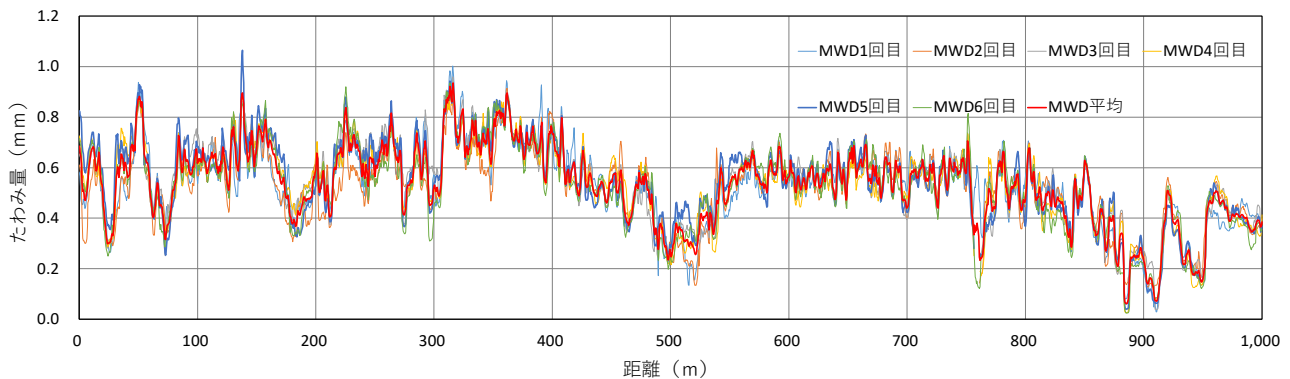


図-3 MWDたわみ量の計測結果

(2) MWDたわみ量とFWDたわみ量の整合性

MWDとFWDで計測した200mの区間におけるたわみ量を図-4に示す。MWDたわみ量は、計測した6回の平均値を示している。MWDは0.5m毎、FWDは5.0m毎のたわみ量をプロットしている。FWDたわみ量は、載荷点直下のたわみ量 D_0 である。

MWDたわみ量とFWDたわみ量は、調査区間で同様の傾向を示し、たわみ量も0.4mmから0.8mmの範囲で概ね一致している。

MWDとFWDたわみ量の相関図を図-5に示す。図中には、同一の測点におけるMWD測定値とFWD測定値をプロットしている。MWDとFWDたわみ量は、相関係数が0.86と高い相関を示した。図-5中には、MWDたわみ量とFWDたわみ量が一致することを意味する1:1の補助線を青色実線で示してあるが、測定値は概ね1:1の補助線近傍に位置しており、MWDとFWDたわみ量は概ね一致していることがわかる。これは、土木研究所つくば中央研究所のこれまでの研究成果とほぼ一致する結果である³⁾。また、近似直線の切片を0としたときの相関図を図-6に示す。近似直線の傾きは0.94となり、1.0に近い値となった。

以上より、MWDによるたわみ量測定で、FWDで測定したたわみ量 D_0 と同様の値を効率的に精度良く得ることができることがわかる。従来舗装の支持力の健全度を評価する目安として、FWDのたわみ量 D_0 を使用しているが、MWDたわみ量を使用できる可能性がある。

また、移動しながら連続的にたわみを測定するMWDは、FWDでは計測ができなかった載荷点間のたわみ量が計測可能である。これまでFWDでは確認できなかった、局所的な支持力低下箇所を発見できる解像度が高い手法であるといえる。

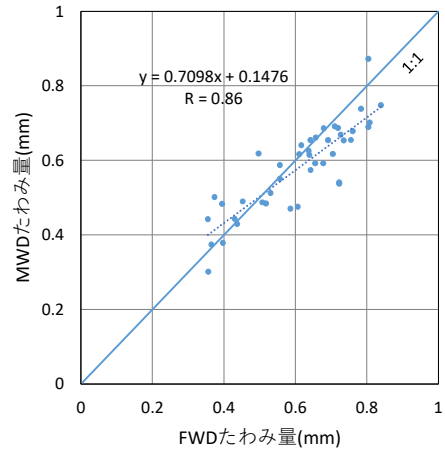


図-5 MWDとFWDたわみ量の相関関係

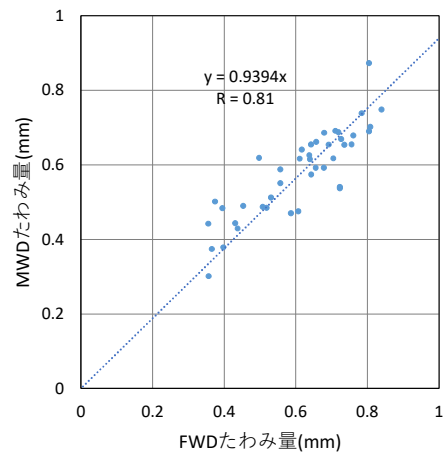


図-6 MWDとFWDたわみ量の相関関係 (切片0)

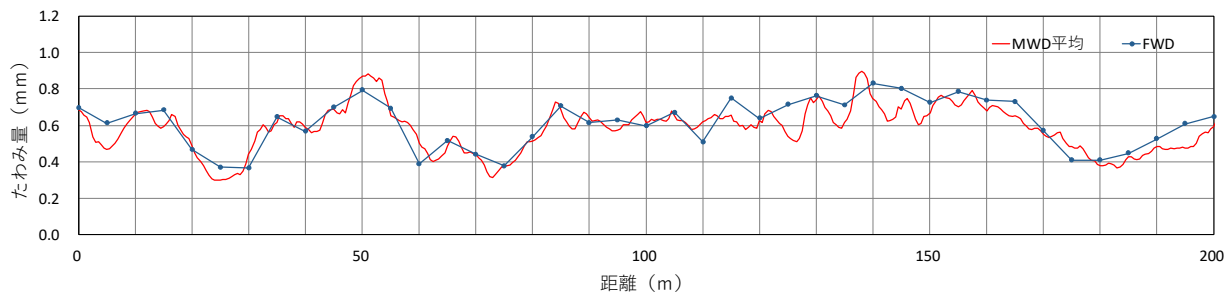


図-4 MWDとFWDたわみ量の比較

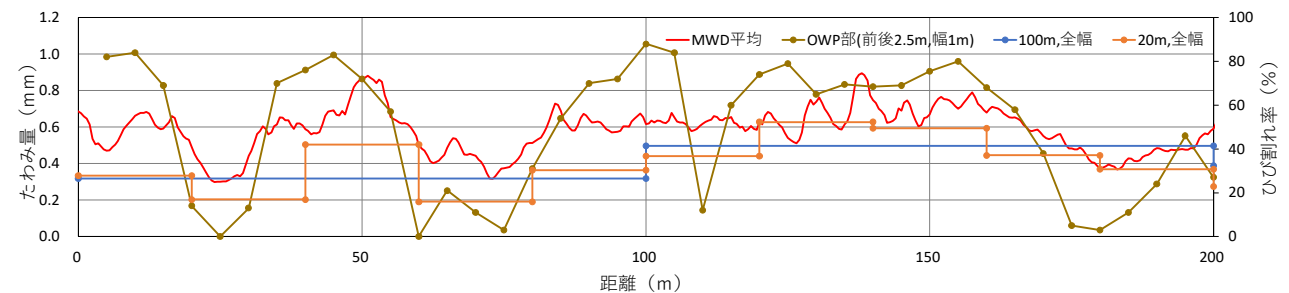


図-7 ひび割れ率の算出方法の比較

(3) MWDたわみ量とひび割れ率の傾向

MWDたわみ量と事前の路面性状調査で得られたひび割れ率との比較を図-7に示す。

ひび割れ率は、集計整理の方法を変えた3種類を示している。一つは評価区間長を100m、幅を車道幅としたもの、一つは評価区間長を20m、幅を車道幅としたもの、もう一つはOWP部のひび割れ率である。ここで、

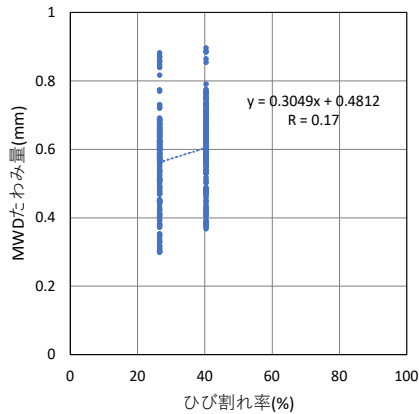


図-8 MWDたわみ量とひび割れ率の相関関係
(延長100m、全幅)

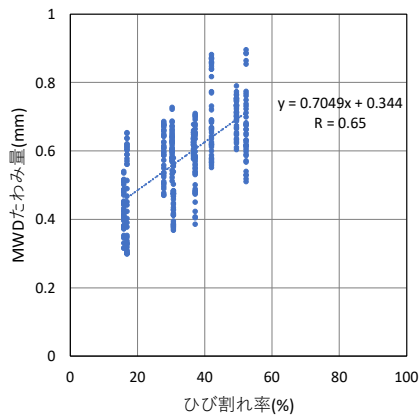


図-9 MWDたわみ量とひび割れ率の相関関係
(延長20m、全幅)

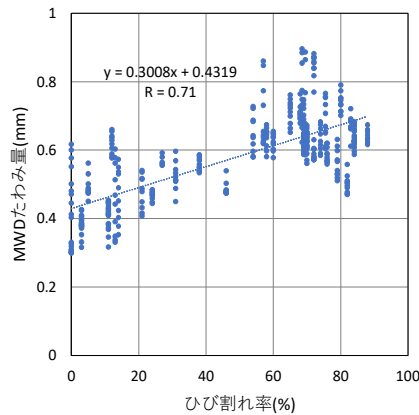


図-10 MWDたわみ量とOWP部のひび割れ率の相関関係 (前後2.5m、幅1m)

OWP部のひび割れ率とは、評価区間長をFWDの測点前後2.5mを含んだ5.0m、幅を外側車輪通過位置を含む1.0mとして、OWP部のひび割れ率を算出したものである。

図-7のMWDたわみ量とOWP部のひび割れ率の関係に着目するとひび割れ率が高い地点でたわみ量は大きく、ひび割れ率が小さい地点でたわみ量は小さくなっており、値の大小の傾向に整合性がある。

次に、MWDたわみ量と各ひび割れ率との関係性を図-8、図-9、図-10に示す。

MWDたわみ量とひび割れ率の相関係数は、評価区間長100mのひび割れ率の場合で0.17、評価区間長20mのひび割れ率の場合で0.65、OWP部のひび割れ率の場合で0.71となり、評価区間長が短いほど相関が高く、OWP部のひび割れ率が最も高い相関を示した。

以上より、OWP部のひび割れ率が高い箇所では、舗装の支持力が低下している傾向が確認できた。これは、ひび割れ率が高い箇所では、ひび割れが基層やアスファルト安定処理層にまで進行し、舗装体の構造に影響を与えていると考えられる。

また、MWDたわみ量とひび割れ率の関係については、OWP部のひび割れ率に着目することで、MWDたわみ量との傾向の比較が容易になるものと考えられる。

4. まとめ

本調査結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) MWDでの6回の計測値はほぼ一致しており、再現性が良いことを確認できた。
- 2) 現道上におけるMWDのたわみ量とFWDのたわみ量はほぼ一致しており、MWDによるたわみ量測定で、FWDによるたわみ量 D_0 と同様の値を効率的に精度良く得られることが確認できた。
- 3) MWDのたわみ量とOWP部のひび割れ率は高い相関を示しており、OWP部のひび割れ率が高い箇所では、舗装の支持力が低下している傾向が確認できた。

今回の調査により、MWDは舗装たわみ量を精度良く計測できており、舗装体の支持力計測手法として有用性が高いことが確認された。

また長い延長でたわみ量を連続して効率的に測定できることから、ネットワークレベルの舗装構造の把握にも有効であり、局所的な支持力低下箇所も解像度高く把握できることがわかった。

5. おわりに

現在、寒地土木研究所では、舗装に発生するポットホールに関する研究を実施しており、今後はMWDたわみ量とポットホールの発生傾向の検証なども行っていく予定である。

参考文献

1) (財) 道路保全技術センター：FWD運用マニュアル（案）、平成8年3月

2) 梅田、塚本、山口、綾部、寺田：移動式たわみ測定装置（MWD）のたわみ量解析手法の提案、土木学会論文集E1（舗装工学）、Vol. 77, No. 2、2021年12月

3) 土木研究所、東京農業大学、アールテックコンサルタント、ガイアート、高速道路総合技術研究所、東亜道路工業、ニチレキ、パスコ：移動式たわみ測定装置（MWD）の実用化に関する共同研究報告書、土木研究所共同研究報告書、整理番号第549号、2021