

道路政策の質の向上に資する技術研究開発
成果報告レポート
No. 24-9

研究テーマ

舗装路面の動的たわみ計測装置の開発
と健全度評価

研究代表者：東京農業大学教授	竹内 康
共同研究者：中央大学教授	姫野賢治
東京電機大学名誉教授	松井邦人
長岡技術科学大学名誉教授	丸山暉彦
国立石川工業高等専門学校教授	西澤辰男
東京農業大学准教授	川名 太
(株)高速道路総合技術研究所部長	神谷恵三

平成27年7月

新道路技術会議

目次 <原稿作成例>

研究概要	1
第 1 章 はじめに	4
1. 1 研究の背景	4
1. 2 研究の目的	6
第 2 章 動的たわみ測定システムの開発	8
2. 1 MWD 試験装置の概要	8
2. 2 動的たわみの推定法	9
2. 3 荷重車による MWD 走行実験	12
2. 4 一般道を走行可能な車両の整備	13
2. 5 中型車両による走行実験	15
第 3 章 たわみのばらつきを考慮した舗装の健全度評価法の検討	17
3. 1 たわみのばらつきを考慮した舗装の健全度評価法	17
3. 2 舗装の健全度評価の実施例	18
第 4 章 実道における MWD 試験の適用性検証	20
4. 1 試験位置の選定	20
4. 2 MWD 試験	22
4. 3 FWD 試験	25
4. 4 MWD のたわみ評価精度および適用範囲の検討	28
第 5 章 まとめ	30
参考文献	32

「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」(平成 24 年度採択)
研究概要

番号	研究課題名	研究代表者
No.24-9	舗装路面の動的たわみ計測装置の開発と健全度評価	東京農業大学 教授 竹内 康

本研究では、路床の泥濘化や地下埋設物の老朽化・劣化等に伴う舗装路面下の空洞等の構造的欠陥を迅速かつ的確に把握し、舗装の健全度評価を行うことができる走行式の非破壊検査装置である“動的たわみ測定装置”を開発し、実舗装において健全度評価を行うものである。

1. 研究の背景・目的 (研究開始当初の背景・動機、目標等)

強靱でしなやかな国土を創生するため、約 100 万 km におよぶ膨大な道路ストックを限られた予算および人員の制約条件下で迅速かつ効率的に維持管理し、安全で円滑な交通を確保することが求められている。そのため、ネットワークレベルの舗装マネジメントにおいて、支持力低下箇所を迅速に検出し効率的に維持修繕を行っていくことは重要である。

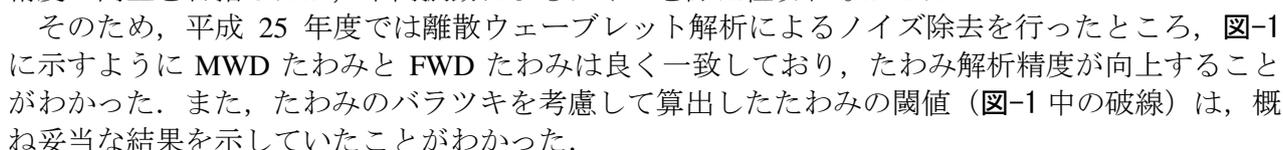
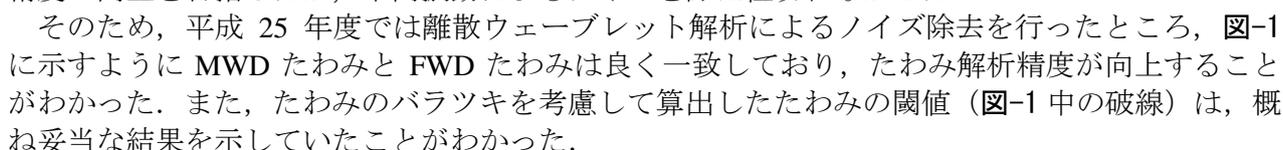
舗装の健全度評価のために FWD(Falling Weight Deflectometer)が広く活用されている。FWD とは、重錘を落下させたときの衝撃荷重と路面のたわみを同時に計測する定点載荷式の非破壊試験機であるため、長距離にわたって舗装の健全度調査を行うには、膨大な測定時間を要することとなる。本研究では、走行中の輪荷重により発生する舗装表面のたわみを連続的に測定できる非破壊試験機(MWD, Moving Wheel Deflectometer)を開発するとともに、実路において検証実験を行い、舗装の健全度を連続的に評価できるシステムを構築することを目的としている。

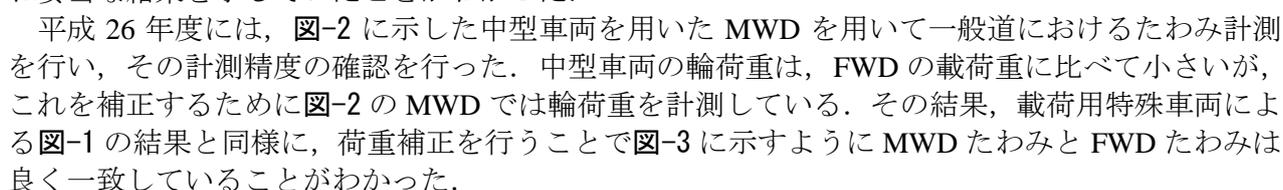
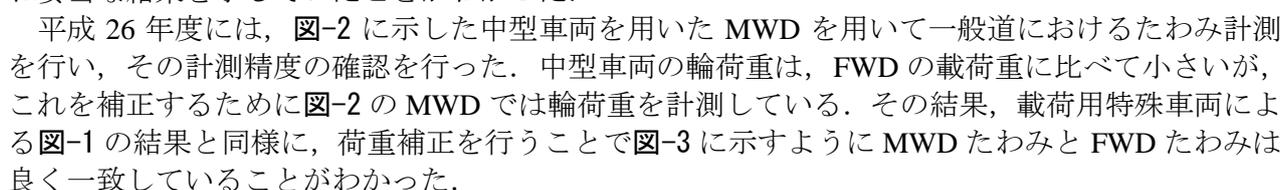
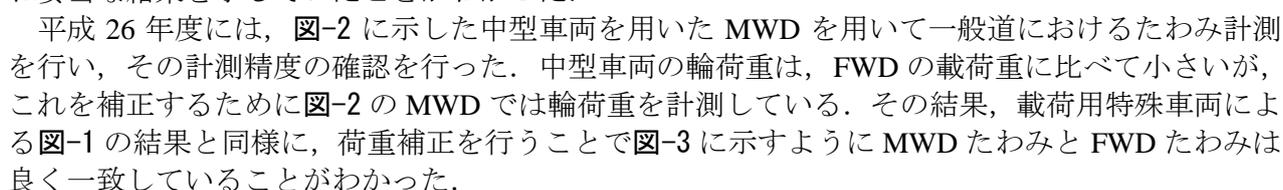
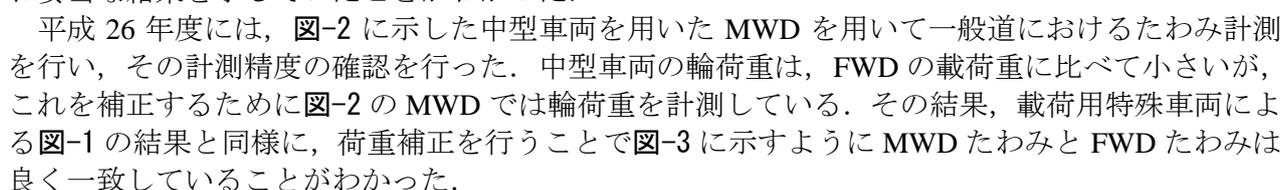
2. 研究内容 (研究の方法・項目等)

本研究では、MWD の車両後輪車軸上に剛結した架台に高精度のレーザドップラー振動計を設置し、ドップラー振動計で計測されたたわみ速度から後輪付近で発生する最大たわみを算出するとともに、MWD と FWD で計測したたわみを比較し、MWD の計測精度について検討した。また、多層弾性理論に基づき、計測したたわみのバラツキを考慮したアスファルト舗装の健全度評価法について検討した。

3. 研究成果 (図表・写真等を活用し分かりやすく記述)

平成 24, 25 年度では、国総研内の外周路において MWD に載荷試験用特殊車両(輪荷重 49kN)を用い、たわみ計測精度の向上、舗装の健全度評価法について検討するとともに、一般道を走行可能な中型車両を用いた MWD の整備を行った。平成 24 年度は移動平均処理によってたわみ計測精度の向上を目指したが、車両振動によるノイズを除去仕切れなかった。

そのため、平成 25 年度では離散ウェーブレット解析によるノイズ除去を行ったところ、-1 に示すように MWD たわみと FWD たわみは良く一致しており、たわみ解析精度が向上することがわかった。また、たわみのバラツキを考慮して算出したたわみの閾値(-1 中の破線)は、概ね妥当な結果を示していたことがわかった。

平成 26 年度には、-2 に示した中型車両を用いた MWD を用いて一般道におけるたわみ計測を行い、その計測精度の確認を行った。中型車両の輪荷重は、FWD の載荷重に比べて小さいが、これを補正するために-2 の MWD では輪荷重を計測している。その結果、載荷用特殊車両による-1 の結果と同様に、荷重補正を行うことで-3 に示すように MWD たわみと FWD たわみは良く一致していることがわかった。

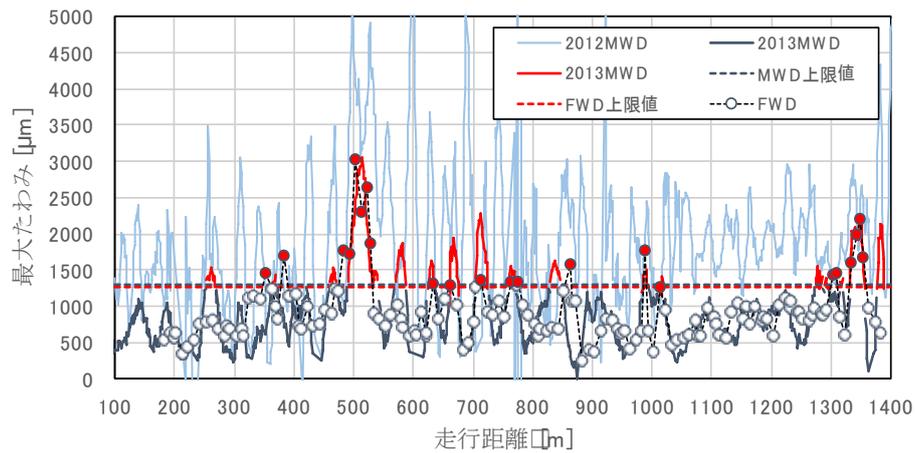


図-1 MWD 走行試験結果と FWD 載荷試験結果



図-2 中型車両を用いた MWD

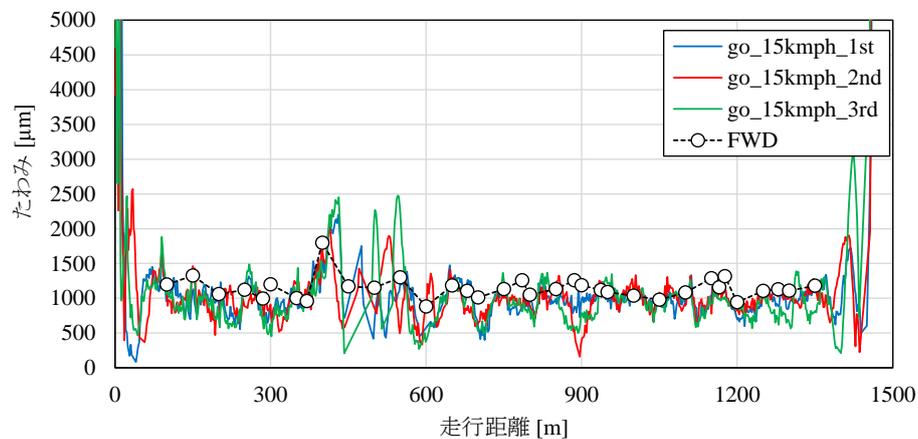


図-3 一般道における MWD 走行試験結果と FWD 載荷試験結果

4. 主な発表論文 (研究代表者はゴシック、研究分担者は下線)

- ・ 田邊政人, 竹内康, 川名太, 岡澤宏, 窪田光作: たわみのバラツキを考慮したアスファルト舗装の健全度評価法の検討, 土木学会第 69 回年次学術講演会, V-284, CD-ROM, 2014.
- ・ 竹内康, 川名太, 渡辺晃志, 松井邦人: 動的たわみ計測装置 (Moving Wheel Deflectometer) の開発と舗装の健全度評価に関する研究～たわみ評価法概要と特殊車両での計測結果～, 土木学会第 70 回年次学術講演会, V-322, CD-ROM, 2015.
- ・ 川名太, 竹内康, 松井邦人: 動的たわみ計測装置 (Moving Wheel Deflectometer) の開発と舗装

の健全度評価に関する研究～中型車両による測定結果～，土木学会第 70 回年次学術講演会，V-323，CD-ROM，2015.

・渡辺晃志，竹内康，川名太，松井邦人：動的たわみ計測装置（Moving Wheel Deflectometer）の開発と舗装の健全度評価に関する研究～一般道での試験結果～，土木学会第 70 回年次学術講演会，V-324，CD-ROM，2015.

5. 今後の展望（研究成果の活用や発展性、今後の課題等）

本研究で開発した動的たわみ計測装置（Moving Wheel Deflectometer, MWD）は，(1)車両後軸上にレーザドップラー振動計を設置したセンサ架台を剛結させ，(2)離散ウェーブレット解析によってノイズを除去した後に，(3)たわみを算出するという非常にシンプルなものである．また，本研究では大型車両，中型車両の 2 種類を MWD のベース車両として使用したが，いずれも同等のたわみ計測精度であった．しかし，重交通の舗装構造の場合には，中型車両では輪荷重が小さいために計測精度は低下する可能性がある．このような場合には大型車両を用いれば良く，大型車両では運用が難しい路線では中型車両を用いて計測すれば良い．MWD は非常にシンプルな構成であるため，このような運用法も可能であると考えられる．

本研究では，MWDはFWD試験を優先的に実施する箇所を選定し効率的に舗装マネジメントを行っていくためのスクリーニング試験機と位置づけている．今後の課題としては以下の事項があげられる．

- (1)走行速度を上げていった場合には，路面凹凸とサスペンションの応答特性（車両自体の振動特性）が変化する可能性があることから，実道において計測を続けながら路面凹凸に起因する車両振動の影響について継続的に検討する必要がある．
- (2)一般道における計測データを蓄積し，損傷や地下埋設物等による計測データの変動や，MWD が劣化箇所を見落とす可能性・確率について検討する必要がある．

6. 道路政策の質の向上への寄与（研究成果の実務への反映見込み等）

ネットワークレベルの舗装マネジメントにおいて，支持力低下箇所を迅速に検出し効率的に維持修繕を行っていくことは重要である．本研究では，FWD試験を優先的に実施する箇所を選定し，効率的に舗装マネジメントを行っていくためのスクリーニング試験機としてMWDの開発を行ってきた．つまり，MWDにはFWD程の計測精度は必要でなく，測定路線において支持力低下箇所を検出できる程度のたわみ評価精度を有していれば良いと考えている．このような観点から，十分なデータ量とは言えないが国総研外周路直線部および一般道での支持力低下箇所の検出状況に鑑みると，MWDはスクリーニング試験機として要求される測定精度を有しているものと考えられる．このように，本研究成果は既存の道路ストックの効率的マネジメント（道路政策の質の向上）に貢献できるものと考えられる．

7. ホームページ等（関連ウェブサイト等）

特になし

第1章 はじめに

1.1 研究の背景

現在、日本の道路延長は、表1.1に示すように約121万kmにもおよび、そのうち約97万kmが舗装道路となっている¹⁾。舗装は橋梁と同様に新設から維持修繕の時代に移行しており、この膨大な量の道路ストックを限られた予算および人員の制約条件下で効率的に維持管理し、安全で円滑な交通の確保を図っていくためには、適切な舗装マネジメントシステム（Pavement Management System, PMS）の運用が不可欠である。

PMSは、図1.1に示すようにネットワークレベルとプロジェクトレベルの2つのレベルに分けられる。ネットワークレベルでは、行政区内の全ての舗装を一括してマネジメントの対象とし、プロジェクトレベルでは個々の区間の舗装を対象とする。具体的には、ネットワークレベルの舗装マネジメントでは、各々のプロジェクトに順位付けを行って優先すべきプロジェクトを選定することを目的とし、プロジェクトレベルではライフサイクルコストを考慮した最適設計を行うことが目的となる²⁾。

ネットワークレベルで各プロジェクトの優先順位を決定する資料として、路面損傷データや舗装強度（支持力）データ等が必要となる。路面損傷データは、ひび割れ、わだち掘れ、平坦性に関するもので、その測定には図1.2に示す路面性状測定車が多く用いられている。この計測装置は、高速走行しながら路面性状を連続的に計測することが可能であり、ネットワークレベルでの路面損傷データの収集に適している³⁾。

一方、舗装支持力データの収集にあたってはFWD（Falling Weight Deflectometer）が広く活用されている。FWDとは、図1.3に示すように重錘を落下させたときの衝撃荷重と路面のたわみを同時に計測する非破壊試験機であり、1980年代に日本に導入されて以来、一般道路だけでなく空港舗装等の支持力調査にも利用されている⁴⁾。FWDは定点載荷式の試験機であり、一般的に50m間隔といったように一定の間隔で実施される。1地点の試験に要する時間は2~3分程度であり、一日の実働時間を8時間と見積もって

も160~240点程度で、50m間隔で実施する場合には一日の測定距離は10km程度にしかならない。さらに、図1.4に示すように、試験位置から離れた位置に局所的な支持力低下がある場合には、それらを把握できない可能性がある。また、FWDは静止して調査を行うため、交通規制が必要となり、重交通路線では稼働時間が制限されてしまうといった問題がある。路面損傷と支持力低下の関係については、必ずしも明らかにされているとはいえないが、一般的には、舗装の支持力が低下すれば路面の損傷を加速させるものと考えられる。よって、事後保全型の維持管理の考え方に立脚すれば、支持力調査のコストと労力を考慮して、ネットワークレベルでの調査において路面損傷のみを対象とすることも一つの方法といえよう。しかしながら、舗装の長寿命化やコスト削減を図る上で、より合理的に舗装マネジメントを行っていくためには、実測に基づく支持力データを活用することが望ましい。そのため、広域を対象として、高速で移動しながら連続的に舗装の支持力を評価できる方法の開発が急務となっている。

高速で移動しながら連続的に舗装の支持力を評価する非破壊試験機は、1990年代の初頭から各国で開発が進められており、実用的に使用されている代表的な試験機として米国のRolling Wheel Deflectometer(RWD)がある⁵⁾。RWDは、図1.5に示すように巨大な牽引式トレーラにレーザ距離計を取り付けたものであり、車両の走行に伴って路面に生じるたわみを測定するものである。この試験装置は、高精度なたわみ測定のために様々な工夫がなされているが、車両寸法が車両制限令に抵触してしまうためRWDを日本に輸入してそのまま使用することは出来ない。また、このたわみの計測システムを用いる場合、カーブや信号機の多さ、車線幅などといった我が国の道路事情を考慮すると測定できる路線が限定されてしまう可能性が指摘される。この試験機なたわみ計測の考え方は非常に単純なものであり、車輪付近と車輪から十分離れた位置における計測値（センサから路面までの距離）の差をたわみとするものである⁶⁾。これは、舗装路面が理想的に平坦で車両振動の無いことが前提となるが、実際には路

表 1.1 世界の道路延長・舗装率

国	道路延長 (km)				道路密度 (km/km ²)	舗装率 (%)
	合計	主要幹線道路 (含高速道路)	二級道路	その他		
アジア						
09 日本	1,207,867	62,432	129,377	1,016,058	3.20	80.11
09 韓国	104,983	17,595	18,138	69,250	1.05	79.25
06 タイ	180,053	51,855	44,000	84,198	0.35	...
09 中国	3,860,823	124,517	300,686	3,435,620	0.40	08) 53.50
南北アメリカ						
09 アメリカ合衆国	6,545,839	95,500	1,930,104	4,520,235	0.67	08) 100.00
09 カナダ	1,409,000	103,000	115,000	1,911,000	0.14	04) 39.87
04 ブラジル	1,751,868	93,071	276,776	1,382,021	0.21	...
ヨーロッパ						
09 イギリス	419,665	52,706	122,543	244,416	1.72	05) 100.00
05 イタリア	487,700	28,200	147,400	312,100	03) 1.62	100.00
08 スイス	71,371	19,925	51,446	...	1.73	100.00
07 スペイン	667,064	25,846	140,165	501,053	03) 1.32	...
09 ドイツ	643,969	52,700	178,269	413,000	1.80	...
09 フランス	951,260	20,260	381,000	550,000	1.73	100.00
09 ロシア	982,000	...	...	...	0.06	07) 80.06
アフリカ						
01 南アフリカ	364,131	3,126	60,027	300,978	0.36	17.30
オセアニア						
09 オーストラリア	817,089	...	...	...	0.11	43.45
09 ニュージーランド	94,301	11,092	83,209	...	0.35	66.20

資料：総務省統計局「世界の統計2012」より作成

注1) 国名の前にデータの年を附している。

2) 道路の区分は、日本については「主要幹線道路(含高速自動車国道)」は、高速道路及一般国道、「二級道路」は都道府県道を指す。

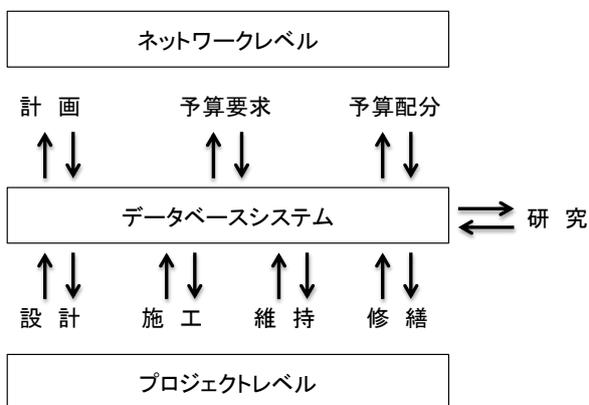


図 1.1 舗装マネジメントシステムの構造



図 1.2 路面性状測定車

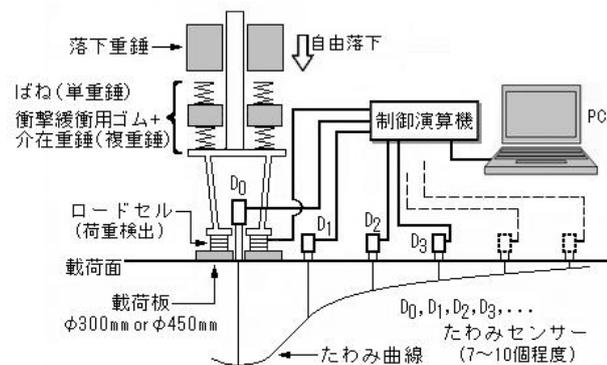


図 1.3 FWD 試験機

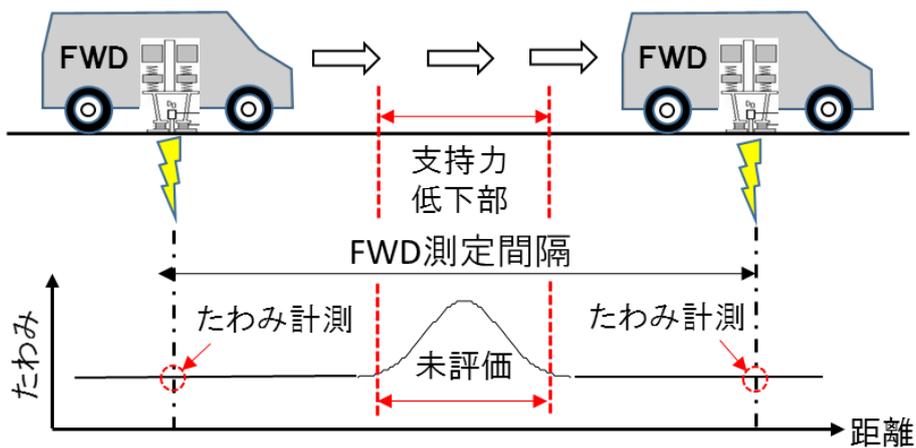


図 1.4 FWD によるネットワークレベルでの支持力評価の問題点



図 1.5 RWD 試験機⁷⁾

面の凹凸や車両振動の影響を排除することが困難であるため、ある程度の測定区間を設定して測定データの平均値（移動平均）を用いてたわみを算出することになる。RWDの測定事例⁷⁾では、0.1mile（160m）と非常に長い評価区間を採用している。そのため、測定路線において比較的短い距離の支持力低下があり、たわみが大きくなる場合であっても、当該部分のたわみは移動平均によって平滑化処理されてしまい、明確なトレンドが得られなくなる可能性が考えられる。これらのことから、日本において移動式のたわみ測定装置を導入するためには、日本の道路関連法令に適合するとともに我が国の道路事情を勘案したスペックの車両を用い、かつたわみ評価区間を短くなるようにする必要があるものと考えられる。

1.2 研究の目的

先に述べたように、膨大な量に達した道路ストッ

クを限られた予算および人員の制約条件下で適切に維持管理していくためには、従来からの事後保全的な維持管理から計画的な維持管理へ早急に移行する必要がある。また、舗装路面の陥没に伴う第三者事故等を防止し、舗装を計画的に維持管理していくためには、舗装の構造的欠陥を迅速かつ的確に把握するとともに、舗装の健全度を適切に評価する手法の開発が求められている。

このような背景から、我々の研究グループでは、平成22年度に科学研究費補助金（基盤研究(B) 22360175, 研究代表者 竹内康）を獲得し、図1.6に示すようにRWDの小型化の検討を行った。しかしながら、レーザ距離計でのたわみ測定結果は路面凹凸や車両振動の影響を受けるため、FWD試験結果と高い相関性を得るためには100m程度の平均データを用いる必要があるという米国での報告を追認する結果となった⁸⁾。一方、鉄道の分野では、高架橋や橋脚などの構造物の振動特性を測定し、その健全度を効率良くかつ安全に評価するためにレーザドップラー



図 1.6 トラックタイプの RWD 試験機

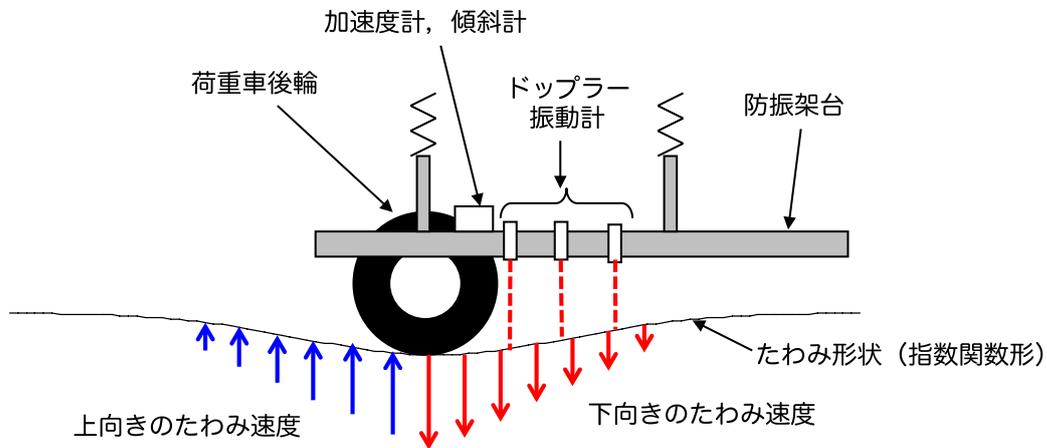


図 1.7 ドップラー振動計によるたわみ速度の計測

振動計（以下、ドップラー振動計）が用いられている⁹⁾。ドップラー振動計は、測定対象にレーザを照射してその反射光を受光し、ドップラー効果による周波数変化から、測定対象の速度を非接触で検出するセンサである。このセンサは、列車通過時の比較的大きな構造物応答から、人為的な加振によらない極微小な常時微動までを、数十m程度離れた場所からでも測定可能としている。すなわち、このセンサを用いれば、路面の変形する速度（たわみ速度）が計測対象となるため、路面に凹凸があったとしても測定結果に影響を及ぼさない。よって、我々の研究グループで開発した小型RWD試験装置のレーザ距離計をドップラー振動計に置き換えることで、たわみの評価精度は格段に向上することが期待できる。

図1.6に示したようなRWD試験機のレーザ距離計をドップラー振動計に置き換えて走行実験を行ったとすると、図1.7に示すようなたわみ速度を計測することになるものと考えられる。いま、車輪直下を原点とする局所座標系において、たわみを w 、車両走行速度を V 、車両位置および時間をそれぞれ x 、 t とすると、式(1)に示すように、たわみ角 dw/dx は V とたわ

み速度 dw/dt によって求めることができる。そして、たわみ角を x で積分すればたわみを得ることができる。一般的に、車輪周辺に生じるたわみの形状は指数関数でフィッティングできるため、複数のドップラー振動計を用いて、いくつかの地点でたわみ速度が得られれば、それらを用いて指数関数のパラメータを推定し、最大たわみを求めることが可能になる。

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

このようなことから、本研究では、図1.7に示すように、載荷用車両に高精度のドップラー振動計を設置した架台を取り付け、走行しながら舗装路面のたわみ速度を計測する非破壊検査装置「動的たわみ測定装置 (Moving Wheel Deflectometer, MWD)」を試作し、得られたたわみ速度を用いて、路面のたわみを推定する動的たわみ測定システムの開発を試みた。また、本試験で得られたたわみを用いて舗装の健全度を評価する方法を提案し、その妥当性について検証した。

第2章 動的たわみ測定システムの開発

2.1 MWD試験装置の概要

動的たわみ測定システムは、車両走行時の後輪周辺に生じる路面のたわみ速度をドップラー振動計によって計測し、計測されたたわみ速度よりたわみを推定して、舗装の健全性を評価するものである。

本研究では、図 2.1 に示す（独）土木研究所つくば中央研究所・道路技術研究グループ・舗装チームの所有する促進載荷試験用の荷重車（以下、荷重車と称す）を使用して、動的たわみ測定装置を試作した。図 2.2 に示すように、荷重車の左後輪付近にドップラー振動計の架台（以下、センサ架台と称す）を設置し、後輪車軸中心より 26.6cm、45.2cm および 68.2cm の位置にドップラー振動計を 3 台設置した。また、センサ位置の振動性状の把握を目的として、センサ架台に 3 成分型加速度計を設置した。なお、ドップラー振動計は、路面から可能な限り離して設置するものとし、センサの特性により指定されているセンサと測定対象物までの距離を考慮して、路面から 145.8cm の高さの位置に設置した。使用したドップラー振動計は、ドイツ・ポリテック社製のセンサヘッド OFV-503 およびコントローラ OFV-5000 から成る計測システムで、日本国内での構造物の安全検査や自動車の振動計測において使用実績のある

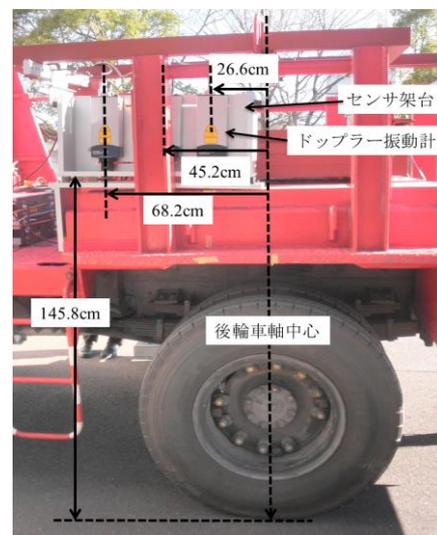


図 2.2 センサ架台とドップラー振動計の設置状況

システムである。また、最大たわみ推定において必要となるたわみ角 dw/dt を求めるためには、車両走行速度 V が必要となるため、図 2.3 に示すポリテック社製のレーザ表面速度計 LSV-6000 システムを設置して車両走行速度 V を同時に計測した。

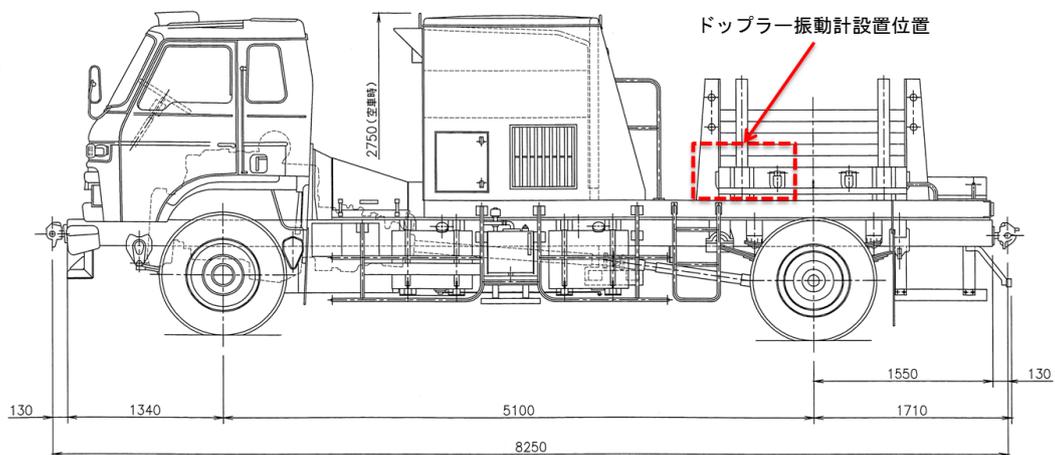


図 2.1 促進載荷試験用の荷重車



図 2.3 速度計の設置状況

本試験装置は、広域における舗装の荷重支持性能の調査を目的としたものであり、走行しながら路面のたわみを連続的に計測するものである。このような試験においては、試験後に舗装の非健全部の位置を特定するためのシステムが必要となる。舗装の非健全部の位置を特定する精度は、試験自体の実施効率のみならず、その後の詳細調査や補修の規模、調査方法や工法等の選定にも大きな影響を与えることになる。よって、可能な限り正確で、かつその精度を明らかにしておくことが重要である。本研究では、走行距離計と GPS を用いて、走行位置を特定する方法について検討した。本試験装置で用いた走行距離計は、図 2.4 に示す通りであり、ピストンによって小型車輪を路面に押しつけ、パルス出力により車輪の回転数をカウントして距離を計測するものである。なお、出力 1 パルスあたりの走行距離は 0.35465mm となっている。



図 2.4 MWD で使用した距離計

上記のたわみ速度、センサ架台の加速度、走行速度および走行距離のデータは、マルチレコーダ（東京測器研究所、TMR-200 シリーズ）を用いて一括収集した。なお、サンプリング周波数は 2000Hz とした。

2.2 動的たわみ推定法

ドップラー振動計で計測されたデータには、载荷に伴う路面のたわみ速度成分と車両走行に伴う車

両振動成分が含まれている。よって、たわみの推定に当たっては、車両の走行に起因するノイズを除去する必要がある。そのため、センサ架台に防振バネや防振ゴムを取り付け、ハード的対策によってセンサ架台の振動を低減させることやデータの移動平均を行ってノイズ除去を試みた。その結果、これらの対策のみでは、FWD たわみの結果と高い相関のある結果を得るためには、評価区間長を 20m 程度にする必要があることが確認された。しかしながら、舗装の荷重支持性能の局所的な変化の把握を目的としたとき、評価区間長は、可能な限り短縮することが望まれる。そのため、本研究では、より高度なソフト的振動対策として、離散ウェーブレット解析¹⁰⁾を用いたフィルタリング技術の適用を検討した。

ウェーブレット解析は、時系列周波数解析に分類される。この解析では、図 2.5 に示すように短い波（ウェーブレット）の集合体としてデータを解析するため、本研究で対象としている路面の凹凸等に起因する車両の不規則振動波形の解析に適している。

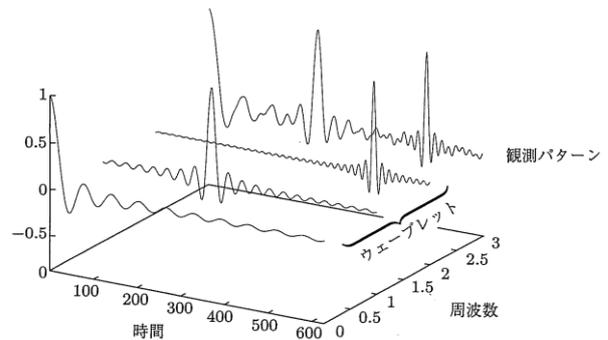


図 2.5 ウェーブレット解析の概念¹⁰⁾

離散ウェーブレット解析では、元信号を高周波成分と低周波成分の信号に分解し、分解された低周波成分の信号を更に高周波成分と低周波成分に分解するという手順でウェーブレット変換を行い、逆方向の変換（逆変換）を行うことで元信号を再現する。そのため、逆変換において任意の領域の周波数成分を 0 にすれば、その領域の周波数成分が除去された（フィルタをかけた）信号を容易に生成することができる^{11), 12)}。

離散ウェーブレット変換では、観測データをウェーブレットフィルタとスケーリングフィルタを通して、「ウェーブレット係数」と「スケーリング係数」を求める。ウェーブレットフィルタを h 、スケーリングフィルタを g とすると、両者には以下の式で表される直交鏡像関係がある。

$$g_i = (-1)^i h_{L-i+1} \Leftrightarrow h_i = (-1)^{i-1} g_{L-i+1} \quad (2)$$

本研究では、図 2.6 に示す Daubechies（ドビシー）が提案したウェーブレットフィルタおよびスケーリングフィルタを適用した。図 2.6 からわかるように、スケーリングフィルタは凸形状であるのに対し、

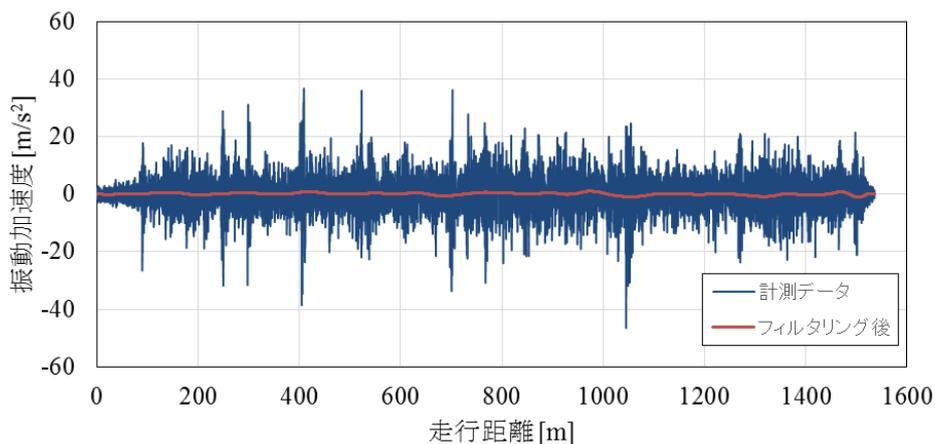


図 2.7 振動加速度計測データとウェーブレット解析後のデータ

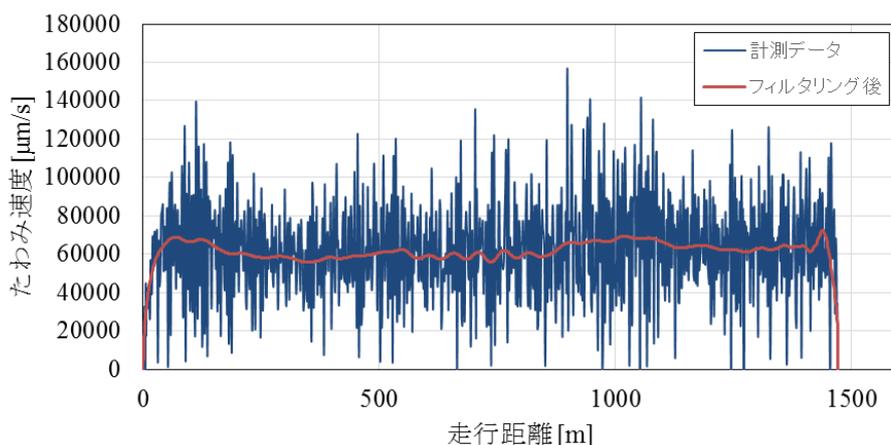


図 2.8 たわみ速度計測データとウェーブレット解析後のデータ

ウェーブレットフィルタは振動的な凹凸形状である。つまり、スケーリングフィルタは移動平均的成分（データのトレンド）を表しているのに対し、ウェーブレットフィルタは階差成分（トレンドからの乖離）、言い換えると振動成分を表していると言える。そして、これらのフィルタを通して得られる係数によって、観測データに含まれる振動成分とトレンド成分の情報が保存されることになる。

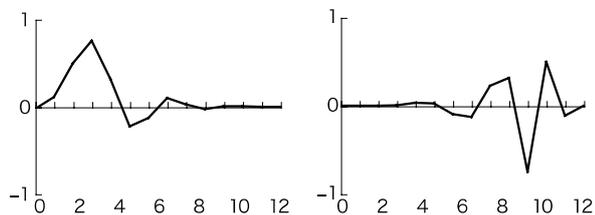


図 2.6 Daubechies のスケーリングフィルタ(左)とスケーリングフィルタ(右)

離散ウェーブレット変換では、データ数を N 個とした場合、まず 1 回目の演算で重複しない 2 個ずつの離散データに対してフィルタリングを行い、 $N/2$ 個のウェーブレット係数とスケーリング係数を求める。次に、1 回目の演算で求めた $N/2$ 個のスケーリング係数を用いて、 $(N/2)/2=N/2^2$ 個のウェーブレット

係数とスケーリング係数を求める。そして、最終的に一組のウェーブレット係数とスケーリング係数を得るまでこの演算を繰り返す。これをダウンサンプリングというが、このときに必要となるデータ数は $N=2^n$ で、 n 回の繰り返し演算を行うことになる。そして逆変換では、ウェーブレット変換で得られたウェーブレット係数とスケーリング係数を用いて振動波形を再構築（アップサンプリング）していく。ウェーブレットフィルタは振動成分を表していることから、逆変換時に任意のウェーブレット係数を 0 にすることで、その帯域の振動成分を除去した振動波形を得ることができる。

車両の振動に起因するノイズは、車両により異なることが想定されるため、ドップラー振動計のセンサ架台に加速度計を設置し、この記録に基づいてノイズ成分の評価を行った。すなわち、センサ架台の加速度データに対して離散ウェーブレット解析を行い、図 2.7 に示すように振動加速度がほぼフラットになるようなフィルタレベル（ウェーブレット係数を 0 にする J の上限値）を決定し、このフィルタレベルをたわみ速度データにも適用してノイズ除去を行った。図 2.8 はたわみ速度の計測データおよびフィルタリング後のデータの一例を示している。この結果からもわかるように、加速度データが 0 になるようなレベルのフィルタリング処理であって

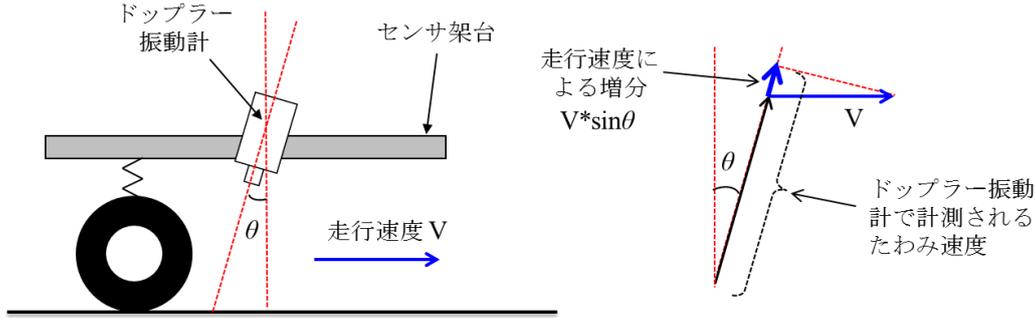


図 2.9 ドップラー振動計の傾斜による速度の影響

も、たわみ速度のトレンドは失われておらず、大きな振動成分のみが除去されていることが確認できる。

ドップラー振動計で計測されるたわみ速度には、センサの設置角度に起因した車両の走行速度成分が含まれている。よって、離散ウェーブレット解析によるノイズ処理後に図 2.9 および式(3)にしたがって、速度補正を行う必要がある。

$$\frac{dw}{dt} = \frac{dw_m}{dt} - V \sin \theta \quad (3)$$

ここに、

- dw/dt : 载荷によるたわみ速度 [$\mu\text{m/s}$]
- dw_m/dt : ドップラー振動計で計測されたたわみ速度 [$\mu\text{m/s}$]
- V : 車両走行速度 [$\mu\text{m/s}$]
- θ : レーザの照射角度 [$^\circ$]

以上の方法を用いて、後輪車軸中心より 26.6cm, 45.2cm および 68.2cm の位置でのたわみ速度を求め、このたわみ速度から最大たわみの推定を行った。いま、車輪直下を原点とする局所座標系において、たわみ w が式(4)のようなガウス関数で近似できるものとする。

$$w = a \cdot e^{-b(x-d)^2} \quad (4)$$

ここに、

- a : 最大たわみ
- b : たわみ形状に関する係数
- d : 最大たわみの発生位置

式(4)を距離 x で微分し、たわみ角を求めると、

$$\frac{dw}{dx} = -2ab(x-d)e^{-b(x-d)^2} \quad (5)$$

また、車両位置および時間をそれぞれ x , t とし、荷重に変動が生じないとすれば、たわみ角 dw/dx は、車両走行速度を V とたわみ速度 dw/dt を用いて以下の式により求めることができる。

$$\frac{dw}{dx} = -\frac{1}{V} \cdot \frac{dw}{dt} \quad (6)$$

これを式(5)に代入し、両辺の対数をとると、

$$\ln g(x) = \ln c + \ln(x-d) - b(x-d)^2 \quad (7a)$$

ここに、

$$c = 2abV \quad (7b)$$

$$g(x) = \frac{dw}{dt} \quad (7c)$$

評価関数を以下の通り設定する。

$$J(c, b, d) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \{ \ln g(x_i) - \ln c - \ln(x_i - d) + b(x_i - d)^2 \}^2 \quad (8)$$

ここに、

- N : 使用するドップラー速度計の数
- x_i : ドップラー速度計 i の設置位置 ($x=0$ が車輪直下)

式(2.8)が最小となる条件は、

$$\frac{\partial J}{\partial b} = 0 \quad (9a)$$

$$\frac{\partial J}{\partial \ln c} = 0 \quad (9b)$$

これを解くと、

$$\ln c = \frac{-C \cdot B + D \cdot A}{-N \cdot B + A^2} \quad (10a)$$

$$b = \frac{-C \cdot A + D \cdot N}{-N \cdot B + A^2} \quad (10b)$$

ここに、

$$A = \sum_{i=1}^N (x_i - d)^2$$

$$B = \sum_{i=1}^N (x_i - d)^4$$

$$C = \sum_{i=1}^N \ln g(x) - \sum_{i=1}^N \ln(x_i - d)$$

$$D = \sum_{i=1}^N \{ \ln g(x) \} \cdot (x_i - d)^2 - \sum_{i=1}^N \{ \ln(x_i - d) \} \cdot (x_i - d)^2$$

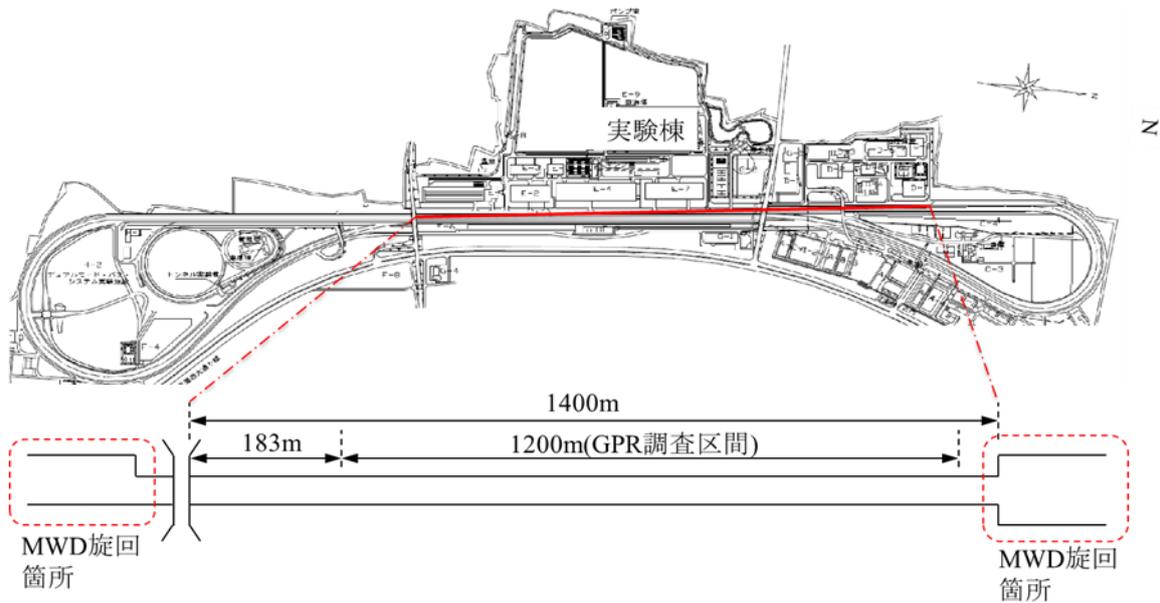


図 2.10 MWD 走行実験, FWD 試験実施区間

式(10a)および(10b)において, d が決まれば Inc と b を求めることができ, 式(7b)を用いて最大たわみ a を推定することが可能となる.

2.3 荷重車による MWD 走行実験

図 2.10 に示す国土総合技術政策研究所外周路西側の直線部, 南端の橋梁部アンダーパスから北端の車両駐車スペースまでの外周路直線部約 1400m 区間を選定し, MWD 走行試験および FWD 荷重試験を行った. 当該箇所を選定したのは, 舗装構造が既知であり, 目視確認の結果, 健全部及び非健全部を含む箇所であったこと, 走行試験時の安全を目視確認しやすい環境にあったためである. 図 2.11 は MWD 走行試験の実施状況を示している.



図 2.11 MWD 走行実験状況 (185m 付近を走行中)

上述の通り, 離散ウェーブレット解析によって計測データのノイズを除去し, 走行速度毎に最大たわみを算出し, FWD 試験結果と比較した. なお, 車両の走行速度は, 10km/h, 30km/h および 50km/h とし,

それぞれ 2 回の実験を行っている. 得られた結果を図 2.12~図 2.14 に示す. なお, 各図の凡例の 2013(1) および 2013(2)は, 離散ウェーブレット解析を用いて得られた MWD たわみを示している. また, 凡例 2012 は, 過年度調査 (2012 年度) において当該箇所で行われた MWD たわみであり, 振動対策として, 防振装置を取り付け, 収集したデータを移動平均して評価した最大たわみを表している. これらの結果を比較すると, 離散ウェーブレット解析によってノイズを除去することで, 過年度調査の結果よりも最大たわみの推定精度が遙かに向上しており, FWD たわみと MWD たわみが概ね一致していること, 走行実験の再現性も高いことがわかる. 特に, 500m 付近と 1350m 付近の, 比較的広範囲にわたって支持力が低下している箇所, つまり FWD たわみが大きくなっている箇所は, 走行速度にかかわらず FWD と同程度の値となっていることがわかる. 以上のことから, 本動的たわみ計測装置が舗装のたわみの評価に活用しうることが確認されたものといえる.

ただし, 走行速度が速くなると, 全体として MWD たわみの感度が低下し, FWD たわみとの一致度が低下していることが確認できる. 例えば, 10km/h のときには検出していたような 980m 付近の局所的なたわみの増加が検出できていない. 本実験では, サンプリング周波数を 2000Hz としているため, 走行速度によって単位距離あたりのデータ数が変化する. つまり, 10km/h \approx 2.8m/s であれば 1m あたり 2000 / 2.8 \approx 714 点のデータが計測されるのに対し, 50km/h \approx 13.9m/s であれば 144 点とデータ密度は 1/5 になってしまう. そのため, 走行速度に応じてサンプリング周波数を変化させ, データ密度をあわせた場合の検討が必要になるものと考えられる. また, 走行速度が速くなるとたわみのピーク位置がずれていることがわかる. このことは, 後述する通り, 走行距離の計測方法に問題があるものと考えられる.

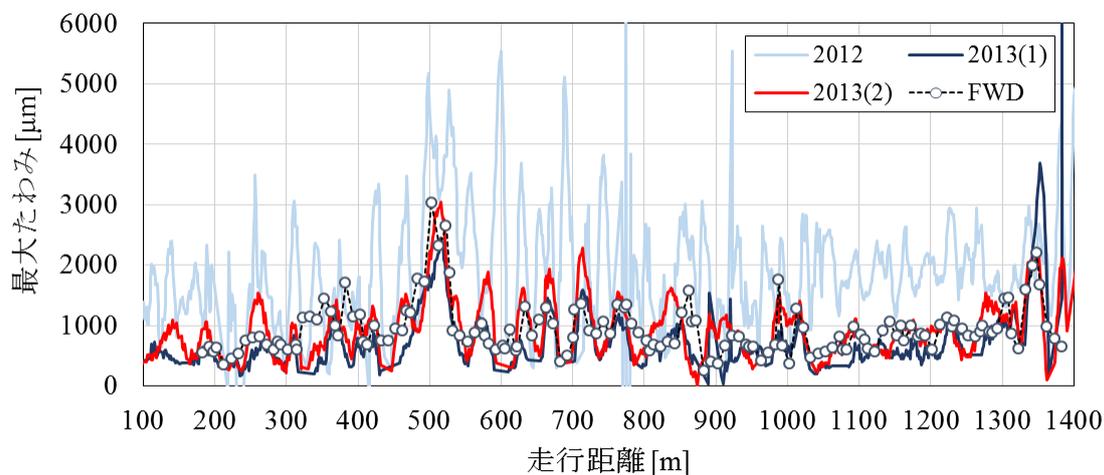


図 2.12 MWD たわみと FWD たわみの比較 (10km/h)

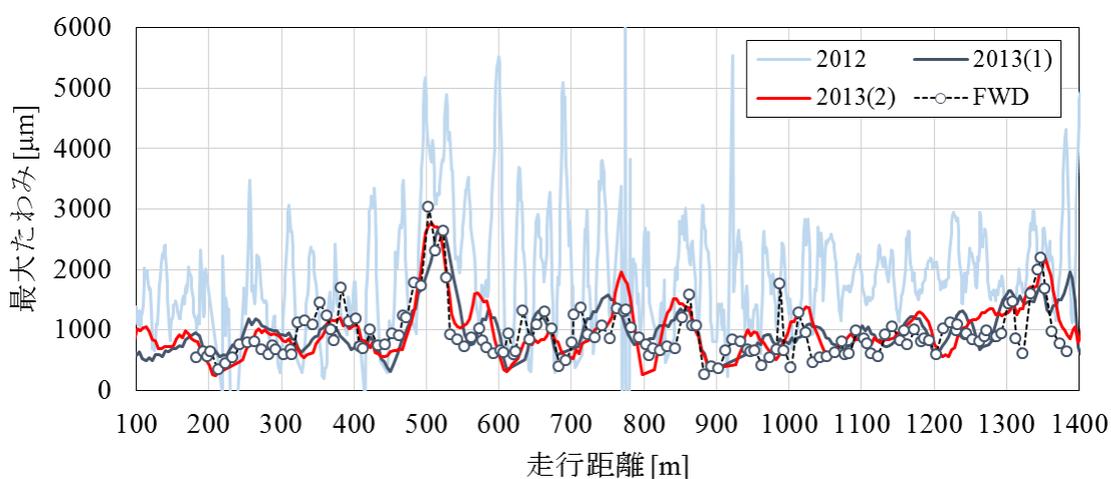


図 2.13 MWD たわみと FWD たわみの比較 (30km/h)

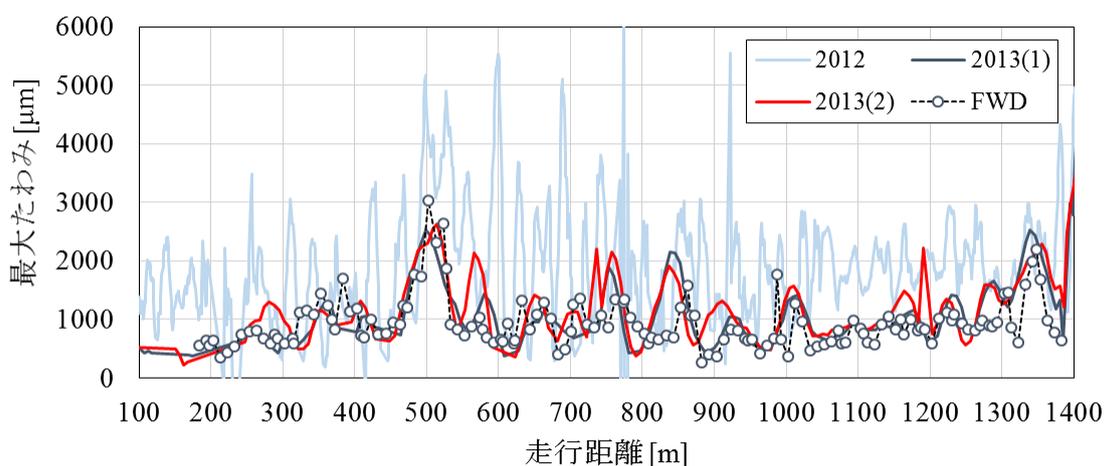


図 2.14 MWD たわみと FWD たわみの比較 (50km/h)

2.4 一般道を走行可能な車両の整備

前節では、動的たわみ測定システムの開発にあたり、輪荷重の大きな荷重車を用いて検討を行い、FWD 試験によるたわみの評価結果と概ね同等の結果が得られることを確認した。本試験を実用化する

ためには、道路運送車両法に抵触しない車両によって動的たわみの評価を行い、一般道におけるたわみの評価精度や試験の適用範囲等を明確に把握しておくことが望まれる。そのため、我々の研究グループが所有する中型車両に本研究で開発した動的たわみ測定システムを搭載し、輪荷重が比較的小さい

条件下においても同様な方法で動的たわみの評価が可能であるかを検討することとした。

ドップラー振動計は、測定対象までの距離が設定されているため、図 2.15 に示されている通り、所用の高さを確保するために鋼材を用いてセンサ架台を設置するための台座を作製した。なお、センサ架台と台座は、分離できるようになっており、測定位置を調節できるようにした。速度計は、車外に設置する必要があるため、ドップラー振動計による測定の妨げにならない車両の後方の位置に設置した。速度計の設置状況を図 2.16 に示す。



図 2.15 ドップラー振動計の設置状況



図 2.16 速度計および路面温度計の設置状況

MWD 走行試験において、路面凹凸に起因する輪荷重の変化や路面温度は、路面のたわみに大きな影響を及ぼすものと考えられる。そのため、車両走行時の路面温度および輪荷重の測定を行うものとした。路面温度計には、サーフェスパトロール舗装温度センサ DSP100（ヴァイサラ社製）を用いた。この路面温度計は、非接触型赤外線センサであり、路面温度を連続的にリアルタイムでモニタリングすることが可能である。路面温度計の設置状況は、図 2.16 に示す通りであり、路面より 270mm の位置に設置した。なお、センサの仕様は表 2.1 に示す通りである。

表 2.1 路面温度計の仕様

項目	仕様
精度	0℃において、±0.28℃
衝撃	50Gs
振動	10Gs
入力電圧	12 又は 24V DC
光学部分	高精度水晶（ゲルマニウムレンズ）
使用温度範囲	-40℃～71.1℃

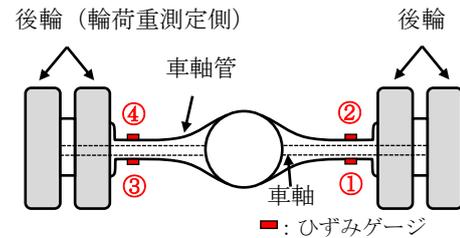


図 2.17 走行時の輪荷重の測定方法

走行時の輪荷重は、図 2.17 に示す通り、車軸管の上下面（図-3 中に示す①～④の位置）にひずみゲージ（UFLA-5-11-5LT：東京測器製）を取り付け、輪荷重とひずみの関係より間接的に評価した。輪荷重とひずみの関係は、車両を静止させた状態で求めた。輪荷重の測定には、マット式荷重計を用いた。輪荷重を増加させる場合には錘を用い、輪荷重を減少させる場合には、車体をジャッキアップした。本実験の結果、④の位置の輪荷重測定側の車軸管上面におけるひずみと輪荷重に極めて高い相関が確認された。④の位置におけるひずみと輪荷重の関係を式で表すと以下の通りとなった。

$$P = 29.595 - 0.083\varepsilon \quad (11)$$

ここで、 P は輪荷重(kN)、 ε は、④の位置におけるひずみ(μ)であり、引張を正としている。すなわち、この関係を用いれば、走行中の車軸に生じるひずみを計測することで間接的に輪荷重を評価することが可能となる。

たわみ等の走行計測を行う場合、測定位置の記録のため、走行距離を高精度に計測する必要がある。荷重車で開発したシステムにおける走行距離計は、小型車輪をピストンにより路面に押しつけ、小型車輪の回転数をロータリエンコーダによりカウントすることで距離を計測している。走行試験中の小型車輪と路面との接地状況をビデオカメラにて撮影した結果、衝撃的な車両振動が生じたときに小型車輪が飛び跳ねを起こすこと、また、カーブなどでは小型車輪が横滑りを起こすことが確認された。広域を対象とする調査においては、このような僅かな誤差が累積すると、舗装の局所的な損傷箇所を誤って判断する可能性が高くなる。そこで、ロータリエンコーダを直接車両の後輪に取り付けて、走行距離を計測する方式に走行距離計を改造した。なお、本試

験で用いたロータリエンコーダは、インクリメンタル形のものであり、タイヤ1回転あたり8800パルスを出力するものとした。

2.5 中型車両による走行実験

一般道において走行計測を行う場合、路面の横断勾配や段差等によって輪荷重が変動することや、舗装の温度によって路面に生じるたわみが変化することが想定される。ここでは輪荷重測定システムにより走行中の輪荷重を計測するとともに、その変動がたわみ計測に及ぼす影響について検討する。

一般道を走行可能な中型車両にドップラー振動計を含む計測システムを搭載した図 2.18 に示す新しい MWD (以下、新 MWD と称す) を用いて、走行試験を実施した。なお、試験位置は、荷重車を用いた検討と同様に図 2.10 に示す国土総合技術政策研究所外周路西側の直線部、南端の橋梁部アンダーパスから北端の車両駐車スペースまでの外周路直線部約 1400m 区間とした。



図 2.18 新 MWD 試験装置

走行試験は、2014年6月20日および11月20日に実施した。なお、走行速度は15km/hとし、サンプリング周波数は2000Hzとした。図 2.19 には、試験で得られた MWD たわみと走行中の輪荷重の関係が示されている。この結果より、新 MWD の輪荷重は約 30kN であったことが確認できる。また、走行実験中には路面凹凸に起因する車両振動によって局部的に荷重が大きくなっている。しかし、比較的大きな荷重変動が観測された箇所なたわみは必ずしも大きくなっていないことがわかる。

次に、荷重車を用いた旧 MWD でのたわみと中型車両を用いた新 MWD でのたわみを比較した結果を図 2.20 に示す。図 2.20 において、2013_12月のデータは旧 MWD、2014_11月は新 MWD のデータを示している。旧 MWD の輪荷重は約 49kN であり、新 MWD の 1.6 倍であることから、旧 MWD でのたわみは新 MWD よりも大きいことがわかる。旧 MWD のたわみは、今回のデータと同様に離散ウェーブレット解析によってノイズ除去を行っているため、局所的な荷重変動の影響は無いものと考えられる。し

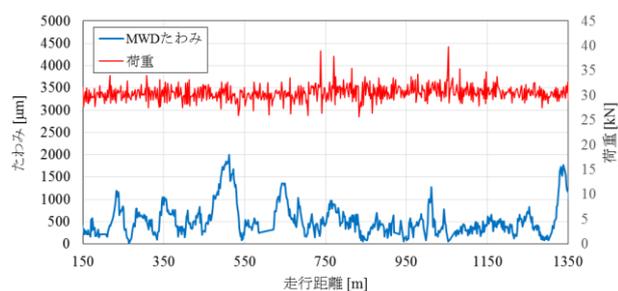


図 2.19 MWD たわみと走行中の荷重変動の関係

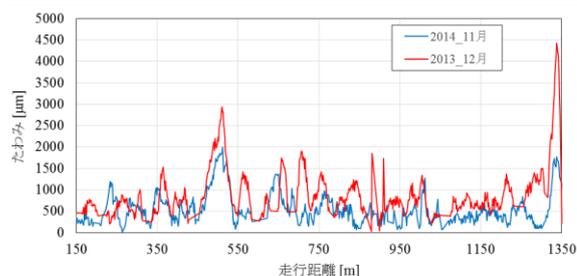


図 2.20 新旧 MWD によるたわみの比較

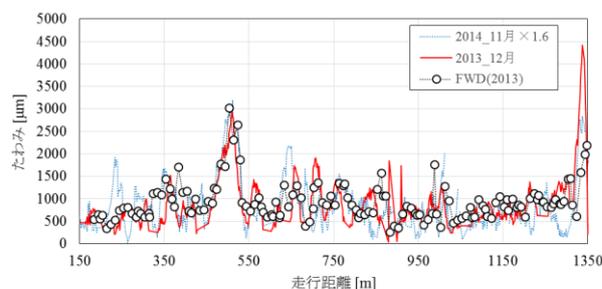


図 2.21 荷重補正後の新旧 MWD たわみの比較

たがって、旧 MWD と新 MWD のたわみの差は、輪荷重によるものと考えられる。

FWD では、49kN を基準荷重としてたわみを式(12)に示すように線形式で補正している¹³⁾。そのため、図 2.20 に示した新 MWD の結果を荷重補正(1.6倍)し、旧 MWD および FWD での結果と比較した。その結果を図 2.21 に示す。

$$w = w_m \frac{49}{P} \quad (12)$$

ここに、

w : 荷重補正後のたわみ[μm]

w_m : 計測たわみ[μm]

P : 計測時の荷重[kN]

図 2.21 の結果より、荷重補正後の新 MWD のたわみと旧 MWD、FWD のたわみは概ね一致していることがわかる。つまり、荷重計によって計測した走行時の輪荷重を用いて荷重補正を行うことで、新 MWD たわみと FWD たわみを比較することが可能であるといえる。

次に、走行距離計の精度を検証した結果を示す。走行距離計の精度は、距離が既知の走行路において試験を実施し、計測された走行距離と実距離との比

較により評価した。

走行距離計の精度の検証は、国土技術政策総合研究所の試験走路の直線部において実施した。本試験は、走行距離計の計測精度の検証を目的とすることから、所与の影響を受けにくい健全な連続鉄筋コンクリート舗装上において実施した。試験区間の距離は1kmとし、測定開始時から測定終了時のタイヤの位置をメジャーにより正確に計測し、これを実際の走行距離とした。走行速度は、10km/h、30km/hおよび50km/hとし、それぞれの走行速度に対して試験を2回実施した。試験の実施状況を図2.22に示す。



図 2.22 直線部における試験の実施状況

表 2.2 に、計測された走行距離と実際の走行距離をまとめて示す。本試験では、走行速度によらず、概ね良好な計測結果が得られているものといえる。例えば、(一財)土木研究センターが実施している路面性状測定車の走行距離に関する性能認定範囲は、「光学測量器による距離の測定値に対して、±0.3%以内の精度であること」とされている¹⁴⁾。今回の試験で得られた走行距離の誤差は、0.08～0.13%の範囲にあり、調査位置を把握するという観点のみで比較するとすれば、路面性状測定車の距離測定の許容誤差を十分に満足しており、本走行距離計は十分な精度を有しているものと考えられる。

また、旧 MWD において使用した走行距離計を用いて、同様の試験を実施した結果を表 2.3 に示す。計測された走行距離は、実際の走行距離に比べて、小さくなることを確認できる。これは、段差等により小型車輪が路面から離れることやタイヤの横すべりが生じたためであると考えられる。走行距離の誤差は、1.07～1.13%の範囲にあり、表 2.1 の結果と比べて比較的大きくなっている。また、旧 MWD で使用した走行距離計の誤差は、車両の走行速度と高い相関があるが、新 MWD の走行距離計の誤差は車両速度の影響を受けていないことが確認される。以上のことから、走行距離計の計測精度が格段に向上していることが確認できる。

表 2.2 新 MWD の走行距離計の精度検証結果

速度	回数	実際の走行距離(m)	計測された走行距離(m)	誤差 (%)
10km/h	1	1000.28	1001.33	0.10
	2	999.82	1000.61	0.08
30km/h	1	1000.00	1001.00	0.10
	2	1000.00	1001.06	0.11
50km/h	1	1000.05	1001.07	0.10
	2	999.95	1001.21	0.13

表 2.3 旧 MWD で使用した走行距離計の精度検証結果

速度	回数	実際の走行距離(m)	計測された走行距離(m)	誤差 (%)
10km/h	1	1000.28	989.55	-1.07
	2	999.82	988.98	-1.08
30km/h	1	1000.00	989.05	-1.10
	2	1000.00	988.95	-1.11
50km/h	1	1000.05	988.71	-1.13
	2	999.95	988.62	-1.13

第3章 たわみのバラツキを考慮した舗装の健全度評価法の検討

3.1 たわみのばらつきを考慮した舗装の健全度評価法

路床の泥濘化等によって舗装の支持力が低下した場合、荷重時のたわみは大きくなる。そのため、舗装の支持力から健全度を評価する場合、荷重時のたわみは重要な指標となる。しかし、舗装に構造的な欠陥が無い場合でも、舗装各層の層厚の誤差や温度条件等によってたわみは変動する。したがって、荷重時のたわみから健全度を評価する場合には、健全な場合に生じ得るたわみの変動を検討し、健全な場合と不健全な場合の閾値を設ける必要がある。

城本ら¹⁵⁾は、地中レーダと小型 FWD を用いた路面下空洞の調査方法について検討しており、計測たわみが正規分布を成すと仮定して健全部と非健全部のたわみの閾値を式(1.8)によって求めている。

$$f_k = f_m \pm k \cdot \sigma \quad (13)$$

ここに、

- f_k : たわみの閾値
- f_m : 健全部のたわみの平均値
- k : 計測たわみが f_k を超過する確率で決まる係数 (表 3.1)
- σ : 健全部のたわみの標準偏差

城本らの結果では、比較的浅い位置に空洞が存在する場合には当該箇所での計測たわみは極めて大きくなるため、超過確率が 5% であっても計測たわみは閾値を大きく上回っているが、空洞が深い位置にある場合には選択する超過確率によって空洞判定結果が異なってくるため、データを蓄積して適切な k の値を検討すべきであるとしている。

表 3.1 超過確率に応じた係数の値

	超過確率 (%)							
	5	10	15	20	25	30	35	40
k	1.64	1.28	1.04	0.84	0.67	0.52	0.39	0.25

また、実験の外れ値検定法として Smirnov-Grubbs 検定や Thompson 検定などが用いられているが、これらの方法も有意水準によって結果が異なってくることは言うまでもなく、本研究で得られるデータだけでは合理的に有意水準を設定できないものと考えられる。

そのため、本研究では T_A 法で設計されたアスファルト舗装断面を対象に、井上ら¹⁶⁾の研究成果および舗装設計便覧¹⁷⁾の設計例を参照し、層厚の誤差や温度条件が変化した場合に多層弾性解析で得られるたわみはどの程度変化するのかを把握するとともに、式(13)からたわみの上限値 (閾値) を求めた¹⁸⁾。

図 3.1 は多層弾性理論により求めた解析結果の一部であり、図中の凡例 N5~N7 は交通量区分、 w_m は温度条件が変化した場合の解析結果、 w_k は w_m に層厚やポアソン比の誤差、計測誤差を考慮した場合の解析結果を示している。この結果より、構造条件が同じであっても健全部のたわみにはバラツキが生じることがわかる。

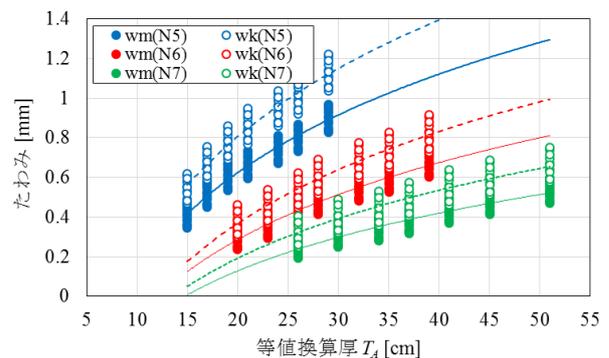


図 3.1 多層弾性理論による解析結果

そのため、たわみの絶対値を用いるのではなく、 w_k を w_m で除したたわみ比 D_R を求めることで、現場での測定によって求めたたわみの平均値を用いて健全部と非健全部の閾値を算出することとした。 D_R と舗装の等値換算厚 T_A の関係を図 3.2 に示す。この結果より、 T_A に伴う D_R の変動は小さく、1.2

～1.4 の範囲に分布していることがわかる。そのため、等値換算厚 T_A を式(13)に示す回帰式に入力して求まる D_R に測定たわみの平均値を乗じることで、たわみの閾値を設定できると考えられる。

$$D_R = w_k / w_m = 1.1198 \times T_A^{0.0365} \quad (14)$$

図 3.2 からわかるように、 D_R の分布範囲は 1.2～1.4 と狭くかつ式(14)の傾きも緩やかであることから、設計時の T_A が不明で、舗装構成あるいは交通量や道路幅員等の情報から舗装要項等のカタログ断面を用いて類推した T_A を入力して得られる D_R を用いても、健全部と非健全部の閾値は極端な値に変動することはないと考えられる。

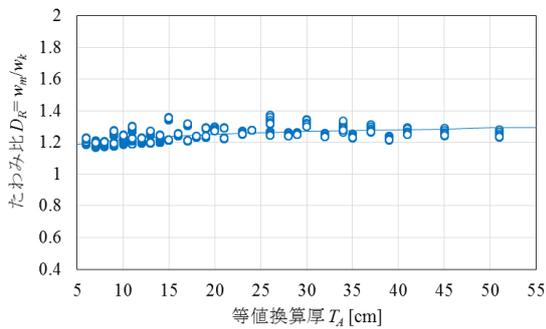


図 3.2 等値換算厚とたわみ比の関係

3.2 舗装の健全度評価の実施例

ここでは、国土総合技術政策研究所外周路西側の直線部約 1400m 区間において舗装の健全性を評価した結果を示す。なお、当該区間の MWD 試験および FWD 試験の結果は、図 2.12、図 2.13 および図 2.14 に示している通りである。

図 3.3～図 3.5 は、上記の方法に基づいて、各走行速度にて得られた MWD たわみ及び FWD たわみから求めた舗装の健全度評価の閾値を示している。ただし、MWD の閾値は、1 回目と 2 回目の平均値を用いて算出している。なお、試験を実施した舗装の構造は表・基層 14cm、粒状路盤層 35cm の設計 CBR=3%、N₅交通のもの ($T_A=26\text{cm}$) であったため、式(14)より $D_R=1.35$ となった。ただし、MWD と FWD で得られたたわみを比較する場合には、183～1383m 区間 (FWD で計測した 1200m 分) のデータの w_m を用いた。

これらの結果からわかるように、MWD たわみの閾値は走行速度に伴って僅かに上昇していることがわかる。データ密度の検討が不十分であるため 50km/h での結果は参考値として捉えるとしても、この結果は走行速度の上昇によってたわみ計測精度が低下していることを表しているものと考えられる。しかし、いずれの走行速度においても、500m 付近と 1350m 付近の比較的広範囲にわたって支持力が低下している箇所は、異常箇所として検知できていることがわかる。これは、時系列周波数解析により車両振動の影響を取り除くことで、たわみ評価精度が向上したためであると考えられる。

これらのことより、MWD 試験機はネットワークレベルの走行実験においても健全度が大きく変化している箇所であれば、異常箇所を検出できると考えられる。そして、MWD での健全度評価結果を受けて、FWD による詳細調査実施箇所を選定し、FWD 試験を行えばより精度良く健全度評価が行えるものと考えられる。つまり、MWD はネットワークレベルの舗装マネジメントにおいて、FWD 試験を行う優先順位を決定するためのスクリーニング調査試験機として使用できるものと考えられる。

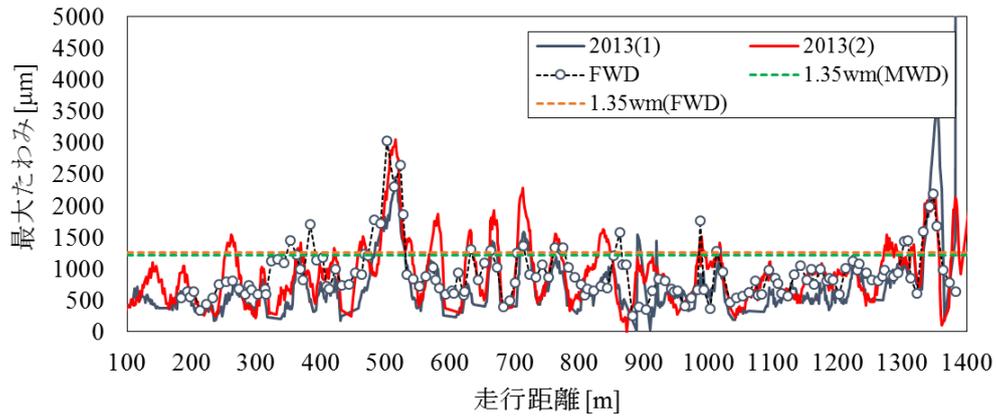


図 3.3 MWD・FWD 試験機で求めた閾値とたわみの関係 (10km/h)

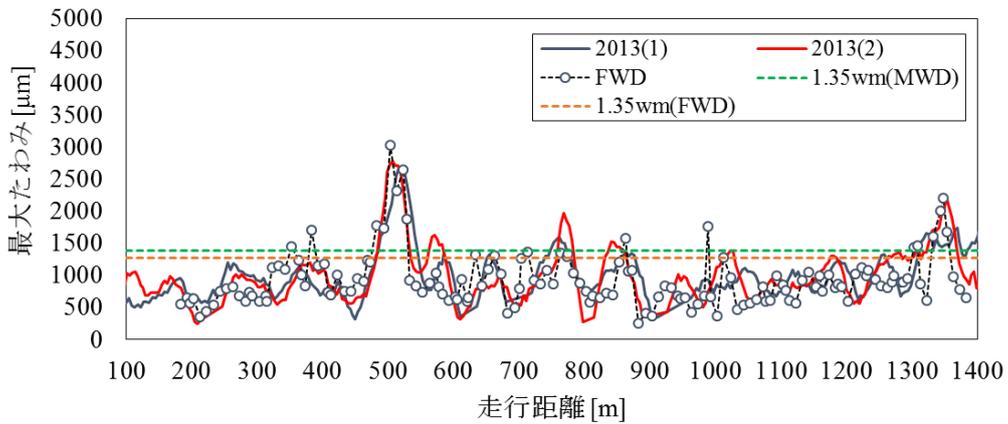


図 3.4 MWD・FWD 試験機で求めた閾値とたわみの関係 (30km/h)

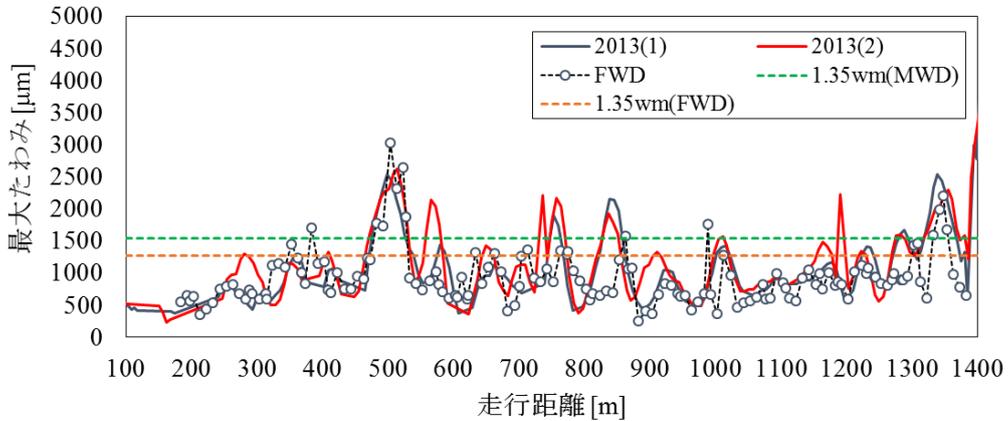


図 3.5 MWD・FWD 試験機で求めた閾値とたわみの関係 (50km/h)

第4章 実道におけるMWD試験の適用性検証

4.1 試験位置の選定

本研究で開発した動的たわみ計測装置（MWD）の実用化にあたっては、一般道におけるたわみの評価精度や計測装置の適用範囲等を明確にする必要がある。このため、一般道を選定して法定速度以内での走行実験を行い、たわみの計測精度について検討することとした。

本検討では、図 4.1 に示すように国総研より西側約 2.5km に位置する片側 1 車線の市道約 1.5km 区間（県道 24 号線交差部～北側信号交差点）を選定して走行実験を実施した。この区間を選定した理由として、同図からわかるように、農地に挟まれた直線部で見通しが良く走行実験を行う上で安全確保が容易であったこと、当該区間は 3 方を県道 45 号線の旧道とバイパスおよび県道 24 号線に囲まれ、現地踏査から抜け道として利用する大型車交通による舗装の破損進行が確認されたことが挙げられる。



図 4.1 一般道での MWD 走行試験実施箇所

現地踏査は、平成 27 年 2 月 4 日に県道 24 号線との交差部側の南端から北端の信号交差点に向かって実施した。試験区間は、MWD 走行実験時に当該道路を走行する一般車両に対する安全性確保の観点から、図 4.2 に示すように設定した。前述したように、試験区間の東西には農地が広がっており、農業用水路が南北に流れている。この農業用水路は、図 4.2 に示すように試験区間の南端から約 500m の位置で道路と交差（横断カルバート部）していた。また、横断カルバート部の南側 50～100m の箇所には

はゼブラゾーンが設けられており、農産物集荷トラック等の停車スペースとして利用されていた。

現地踏査による詳細な路面観察結果は、表 4.1 にまとめた通りであり、代表的な損傷を図 4.3～図 4.8 に示す。また、つくば市道路管理担当者へのヒアリングの結果、当該区間の舗装構成はアスファルト混合物層 5cm、上層路盤 15cm、下層路盤 20cm との回答が得られたことから、これをアスファルト舗装要綱¹⁹⁾の設計断面例と照合したところ、N3 交通で設計 CBR=3%の舗装構造（TA=15.3cm）と合致することが確認された。FWD を用いて舗装の健全度評価を行う場合、表 4.2 に示す許容 D_0 （载荷直下）たわみが健全度評価の目安となる²⁰⁾。図 4.3～図 4.8 に示したように、試験区間にはひび割れが進展している箇所が多く、たわみは全体的に大きいものと考えら



図 4.2 MWD 走行試験区間の概要

表 4.1 現地踏査による路面の状況

位置	路面の状態	備考
100～200m 地点	ひび割れが顕著	T字路あり
200～300m 地点	ひび割れは少ない	西側に雑木林あり
300～400m 地点	施工目地部にひび割れ発達	停車スペースあり
400～450m 地点	施工目地部にひび割れ発達	造成工事中
450～500m 地点	カルバート部南側でひび割れ顕著, 段差あり	横断水路カルバートあり
500m～700m 地点	交差点付近でひび割れが顕著	補修跡あり
700m～750m 地点	車輪走行位置にひび割れが発達	
750m～900m 地点	交差点に近づくにつれひび割れが顕著	交差点あり
900m～1000m 地点	全体的にひび割れが発達, 横断ひび割れ	小水路の横断管あり
1000m～1100m 地点	所々でひび割れを確認	
1100m～1200m 地点	交差点付近でひび割れが顕著	交差点あり
1200m～1500m 地点	他地点に比べてひび割れは少ない	



図 4.3 100～150m 地点 (ひび割れ)

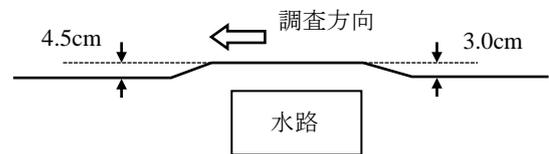


図 4.6 水準測量用スタッフを用いて計測した横断水路カルバート部の路面の段差量



図 4.4 300～400m 地点(施工目地部のひび割れ)



図 4.7 500～600m 地点 (ひび割れ)



図 4.5 450～500m 地点(横断水路カルバート部)



図 4.8 600m～700m 地点 (補修跡あり)

表 4.2 許容 D_0 たわみの目安²⁰⁾

舗装計画交通量 (台/日・方向)	100 未満	100 以上 250 未満	250 以上 1000 未満	1000 以上 3000 未満	3000 以上
交通量の区分	N ₃	N ₄	N ₅	N ₆	N ₇
許容たわみ量	800	600	400	300	200

れる。そのため、中型車両による新 MWD の輪荷重は、FWD 試験の載荷重 49kN と比べて小さいが、十分にたわみ評価が行えるものと考えられる。

4.2 MWD 試験

前節の現場踏査の結果を受け、平成 27 年 2 月 12 日に一般道試験区間において MWD 走行試験を実施した。また、MWD 試験によるたわみ評価結果の精度を確認するために、平成 27 年 2 月 17 日に FWD 試験を実施した。MWD 試験の実施状況を図 4.9 に示す。

データ計測は、片側 1 車線の試験区間の両車線にて実施した。データ計測開始位置は図 4.2 に示した県道 24 号線側の試験区間南端とし、静止状態からスタートした後に北端の信号交差点手前で減速・停止した。これを往路計測とした。また、試験区間北端より静止状態からスタートした後に南端で減速・停止し、これを復路計測とした。車両の走行速度は、15km/h、25km/h および 35km/h の 3 ケースとした。当該区間には制限速度の標識が無かったことから 50km/h が制限速度であると考えられたが、農作業中の停車車両等があったため、試験中の安全性を考慮して 35km/h を上限速度とした。なお、データのサンプリング周波数は 2000Hz とした。走行回数は原則として 3 回としたが、復路計測の 35km/h の結果は、交通量が増加したため、目標速度が確保できなかったため 3 回目の結果を除外した。

本試験で得られた MWD たわみは、図 4.10～図 4.15 に示す通りである。なお、図中の凡例の go, back はそれぞれ往路、復路の結果を示している。図 4.10～図 4.15 の MWD たわみ評価結果を見ると、走行試験後の車両加速時と終了直前の減速時の部分では、たわみ評価結果が大きくばらついていることがわかる。これは、車両の加速・減速によってドップラー振動計の照射角度が不安定になるためである。しかし、それらの部分を除くと、各走行速度において往路・復路ともに試験結果の再現性が高いことがわかる。また、往路の結果では横断水路カルバート部での段差後のたわみが不安定であることがわかる。これは、段差によって過度な振動が発生し、計測結果が不安定になったためであると考えられる。しかし、復路ではカルバート部に段差が発生していなかったため、安定した結果が得られている。したがって、評価区間に段差を含む場合には、たわみ評価が不安定になるため、過度な振動を避けるように走行する必要があるものと考えられる。また、

走行速度 25km/h の結果は、15 km/h および 35km/h の結果と比べて振動的であることがわかる。

離散ウェーブレット解析では、図 4.16 に示すようなピラミッドアルゴリズムと呼ばれる離散化サンプリング手法によってウェーブレット係数 w_i とスケーリング係数 v_i を求めることとなっている。このうち、ウェーブレット係数が時系列波形の振動成分を表すパラメータであり、逆変換時にある成分のウェーブレット係数を 0 にする（ウェーブレットフィルタをかける）ことでノイズを除去している。したがって、フィルタレベルは整数値をとる。今回の試験結果において、15km/h でのフィルタレベルを n とした場合、35km/h では $n-1$ であった。したがって、25km/h でのフィルタレベルは $n-0.5$ 程度であると考えられたが、フィルタレベルは整数値であるため n もしくは $n-1$ となる。フィルタレベルを n とした場合、25km/h のときのたわみ速度成分をも除去してしまうことになる。そのため、25km/h のフィルタレベ



図 4.9 MWD 走行試験の実施状況

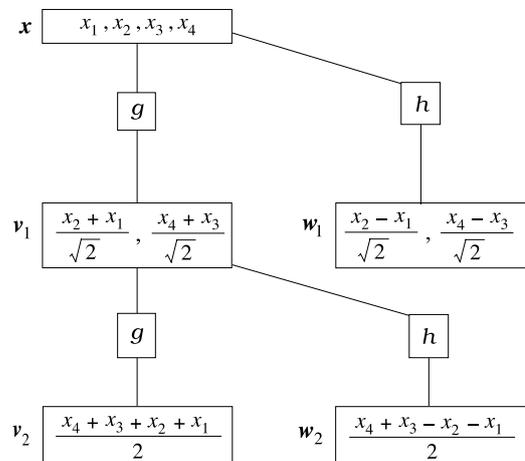


図 4.16 離散ウェーブレット変換のピラミッドアルゴリズム (Haar)

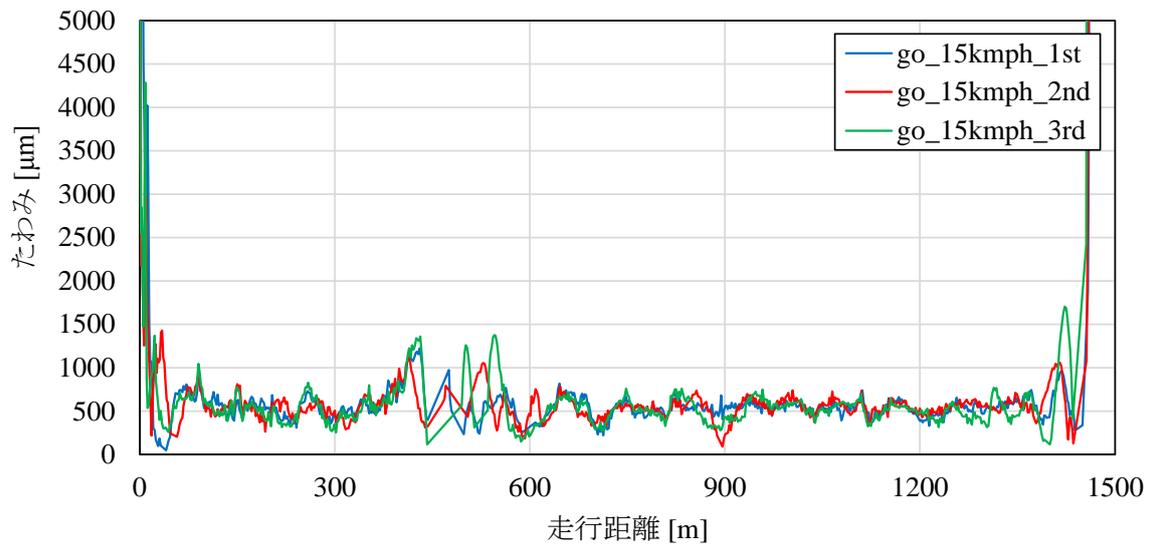


図 4.10 走行実験時の MWD たわみ (往路, 15km/h)

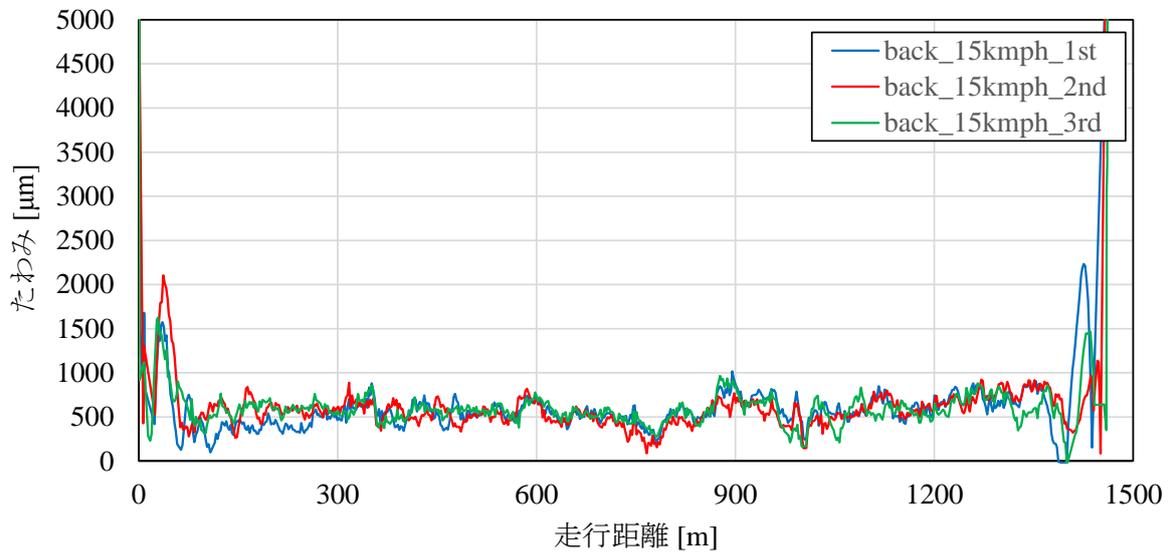


図 4.11 走行実験時の MWD たわみ (復路, 15km/h)

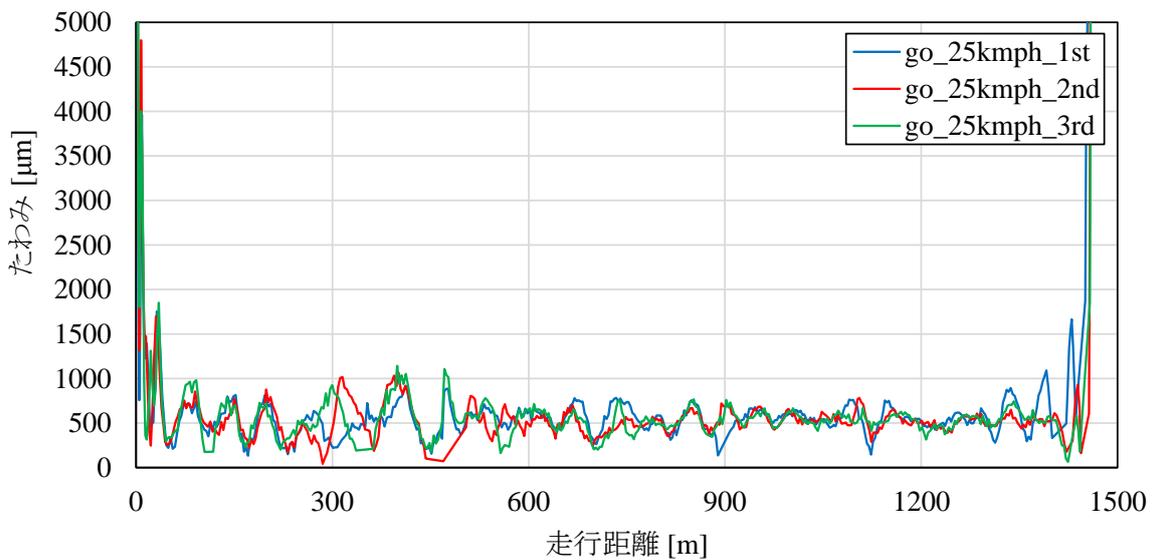


図 4.12 走行実験時の MWD たわみ (往路, 25km/h)

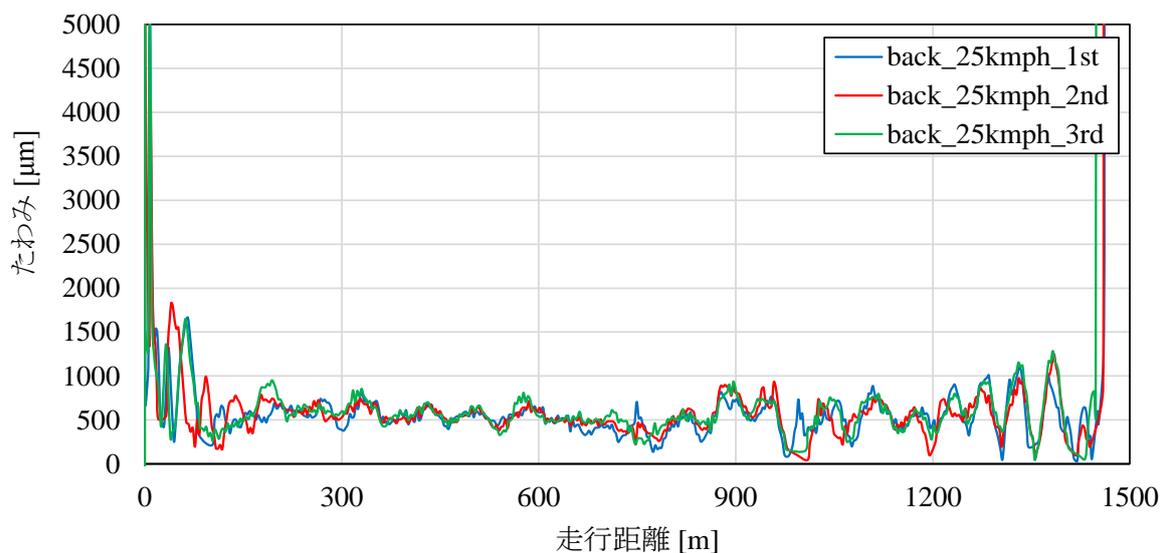


図 4.13 走行実験時の MWD たわみ (復路, 25km/h)

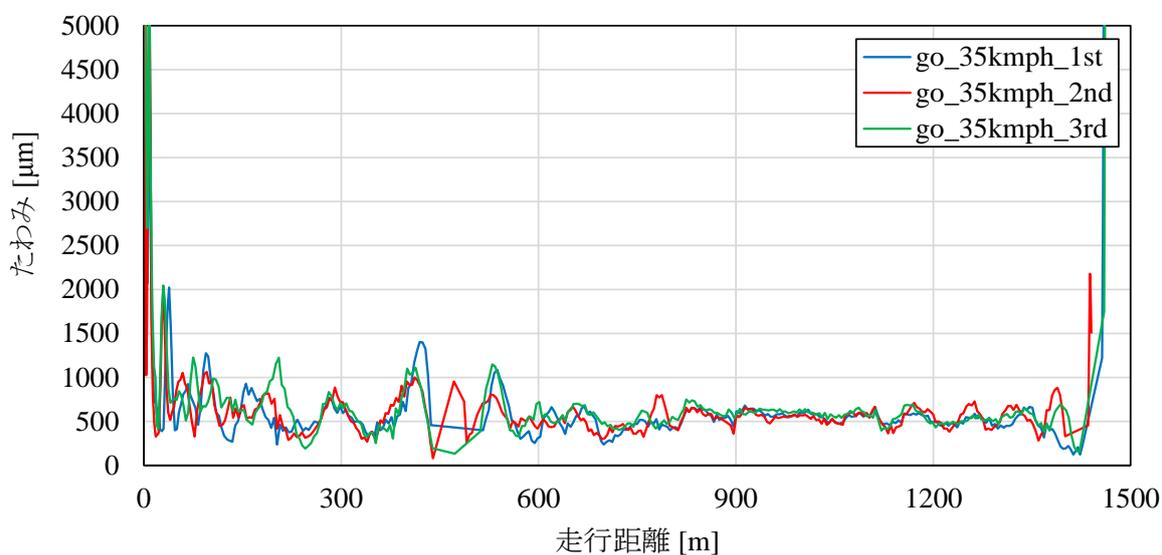


図 4.14 走行実験時の MWD たわみ (往路, 35km/h)

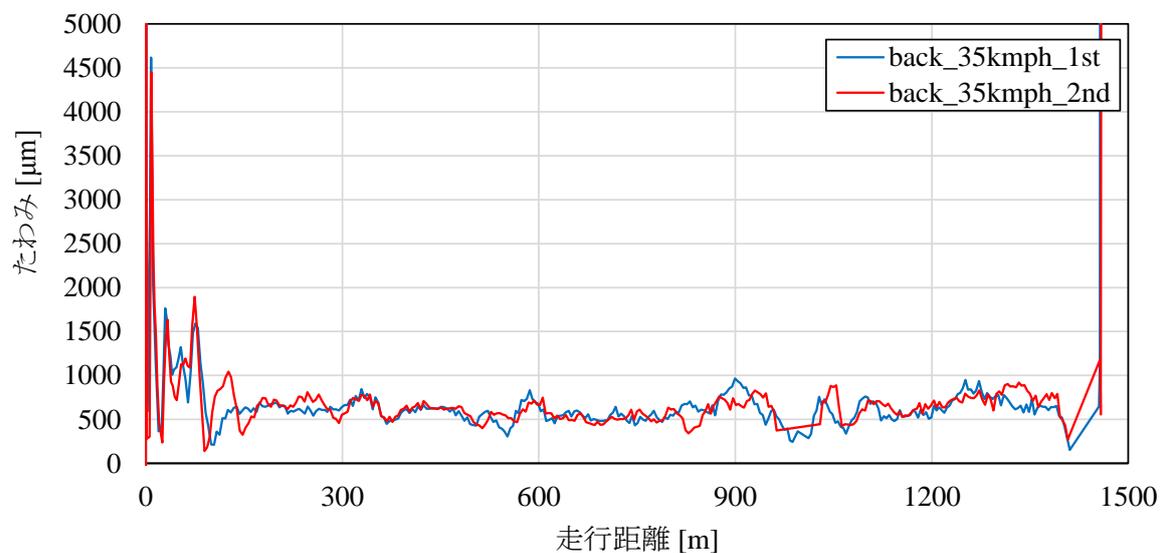


図 4.15 走行実験時の MWD たわみ (復路, 35km/h)

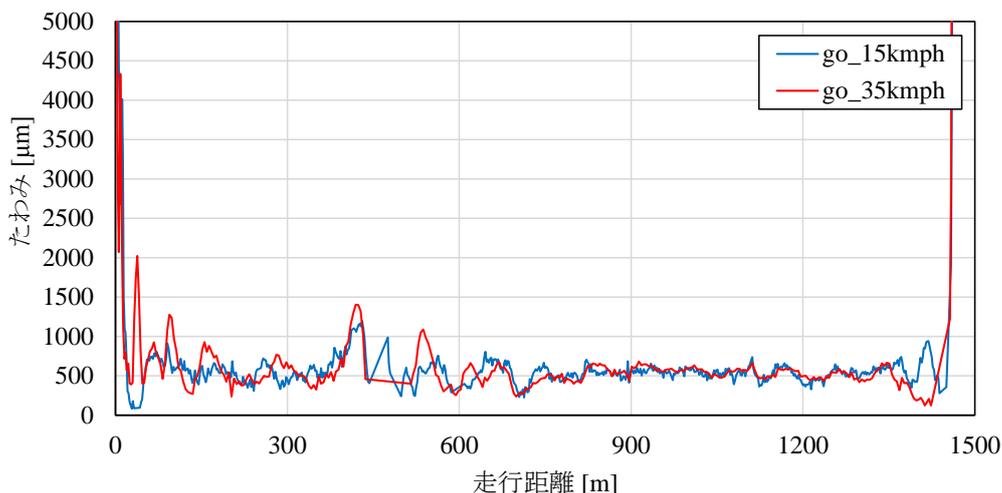


図 4.17 走行速度別の MWD たわみ (往路)

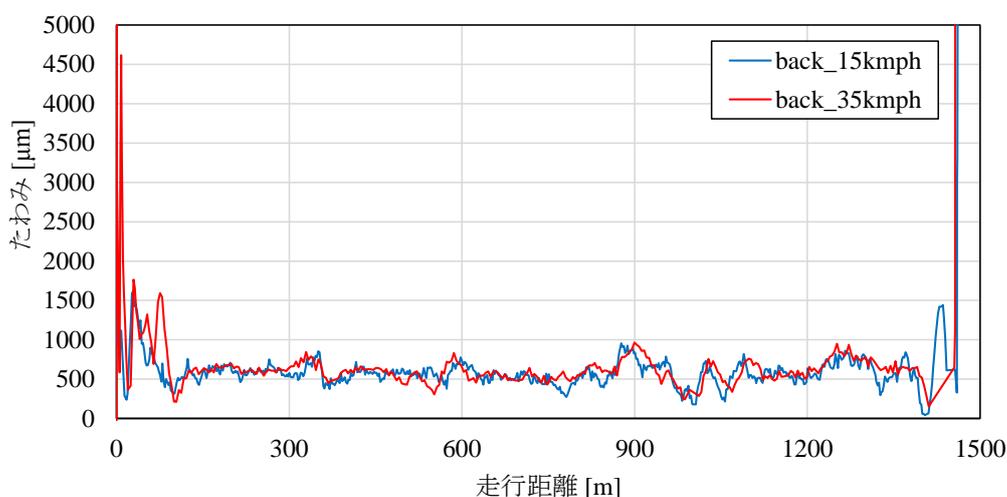


図 4.18 走行速度別の MWD たわみ (復路)

ルは35km/hの場合と同じ $n-1$ とした。よって、25km/hの結果が振動的であったのは、35km/hの場合に比べて振動成分を除去し切れなかったことが理由であると考えられる。フィルタレベルの設定方法については、今後改良の余地があるものと考えられる。

次に、MWD たわみの速度依存性を検討するため、往路・復路での15km/hと35km/hの走行試験結果の代表的なものをまとめて比較検討することとした。これを図 4.17、図 4.18 に示す。

図 4.17 より、往路の測定結果において450m付近のたわみのピークは概ね同程度であるが、その後の路面段差によって15km/hの場合は約500m地点までの約50m区間、35km/hの場合は550~600m付近までの約100~150m区間のたわみが不安定になっているのがわかる。35km/hでは15km/hに比べて単位時間あたりの移動距離は約2.3倍であるので、路面段差の影響が走行速度に概ね比例して現れているものと考えられる。一方、路面段差の影響が小さい図 4.18 の結果を見ると、走行初期および停止段階では走行速度による加速・減速距離の影響はあるものの、ほぼ同じトレンドでたわみ評価結果が推移し

ていることがわかる。

これらの結果より、今回の実験の範囲内（走行速度が35km/h以下）では、路面に過度な段差がある場合には走行速度の影響が大きく現れるものの、路面がある程度平坦であるならば、車両走行速度の影響はそれほど大きくはないことがわかった。しかし、走行速度を上げていった場合には、路面凹凸とサスペンションの応答特性（車両自体の振動特性）が変化する可能性があることから、実道において計測を続けながら路面凹凸に起因する車両振動の影響について継続的に検討する必要があると考えられる。

4.3 FWD 試験

MWD 試験により得られたたわみの妥当性を検証するために、当該地点において FWD 試験を実施した。FWD 試験は、MWD 走行試験実施から5日後の平成27年2月17日に実施した。使用した FWD は、KUAB 社製の車載型・複重錘システムのもので、載

荷重は一般的に道路舗装の支持力調査に用いられる 49kN とした。

FWD 試験は図 4.19 に示すように、MWD 走行試験開始位置（往路では試験区間南端，復路では北端）からそれぞれ 100m 地点を起点とし、往路では 1350m 地点まで、復路では 1400m 地点まで 50m おきに実施した。ただし、50m 区間中に破損の著しい箇所がある場合には適宜载荷試験を実施した。FWD 試験実施位置および実施状況は表 4.3、図 4.20 に示す通りである。また、FWD 試験で得られた代表的なたわみ曲線を図 4.21 に示す。

FWD 試験で得られるピークたわみのうち、载荷中心から 150cm 離れた箇所の D_{150} たわみ (μm) を用いた簡易的な支持力評価法が提案されている。この方法では、経験的に式(15)に示す簡易式²⁰⁾によって路床 CBR(%) が求まるとされている。

$$CBR = \frac{1000}{D_{150}} \quad (15)$$

式(15)から求まる CBR は、どの程度の信頼性があるのかは不明であるため参考値程度ではあるが、全地点の D_{150} を用いて路床 CBR を推定し、試験区間内

表 4.3 FWD 試験の測定位置

往復の区分	MWD 走行試験開始位置からの距離 [m]
往路	100, 150, 200, 250, 285, 300, 350, 370, 400, 450, 500, 550, 600, 650, 679, 700, 750, 785, 800, 850, 886, 900, 937, 950, 1000, 1050, 1100, 1150, 1165, 1176, 1200, 1250, 1279, 1300, 1350
復路	100, 150, 200, 250, 300, 350, 367, 379, 400, 420, 436, 450, 500, 550, 600, 613, 650, 674, 692, 700, 750, 776, 783, 800, 825, 850, 860, 880, 900, 940, 950, 1000, 1031, 1041, 1050, 1084, 1100, 1150, 1173, 1200, 1227, 1250, 1300, 1350

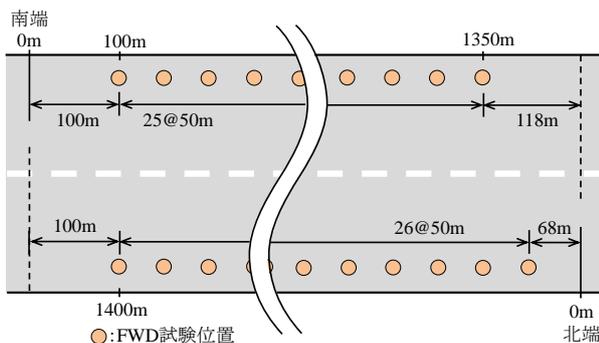
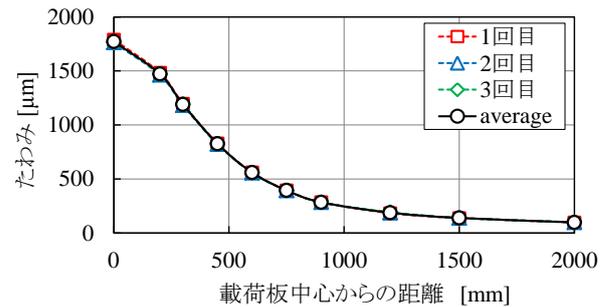


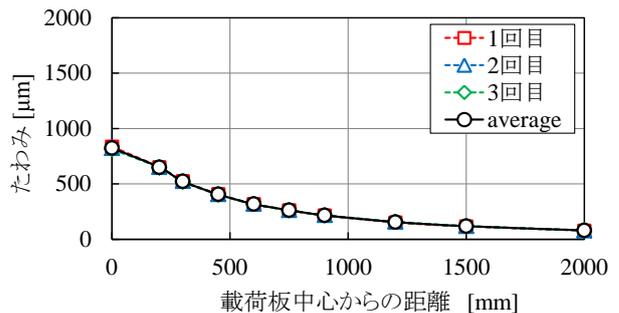
図 4.19 FWD 試験測定位置の概要



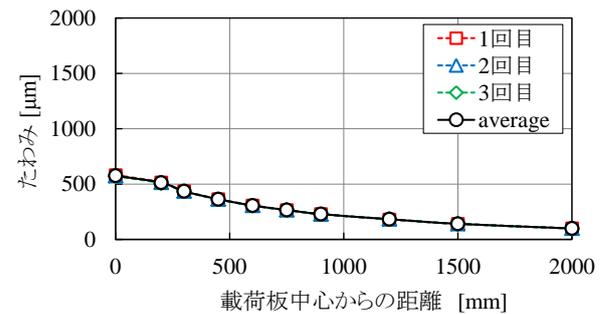
図 4.20 FWD 試験実施状況



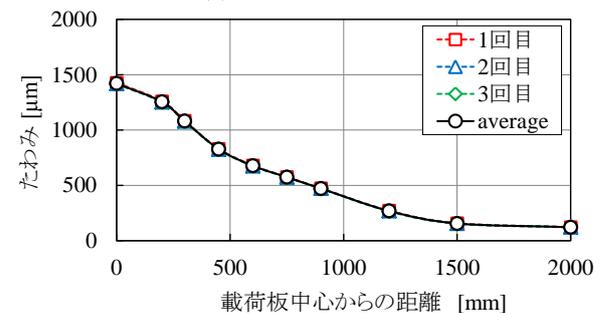
(a) 往路 400m 地点



(b) 往路 600m 地点



(c) 復路 367m 地点



(d) 復路 1150m 地点

図 4.21 FWD 試験の結果

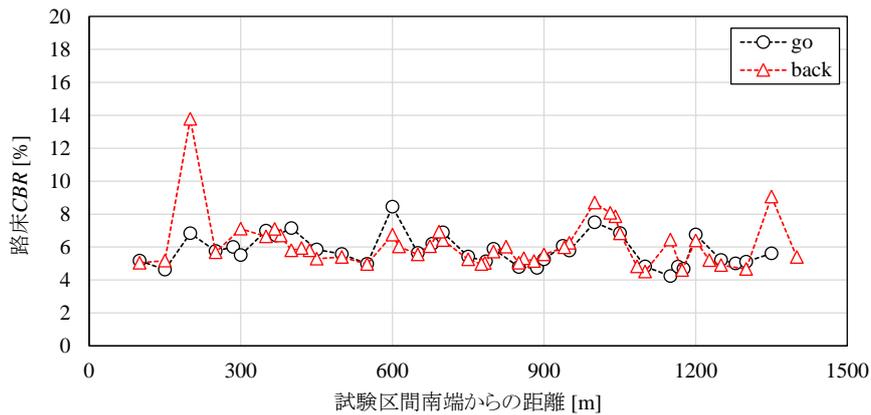


図 4.22 D_{150} から算出した試験区間内の推定 CBR の変化

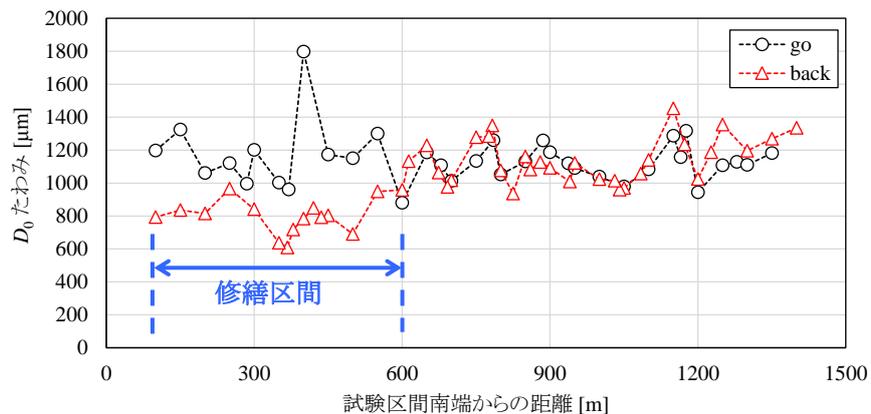


図 4.23 試験区間内の D_0 たわみの変化

での荷重支持性能の変化を把握することとした。また、荷重直下の D_0 たわみを抽出し、その測定位置による変化を調べた。これを図 4.22 および図 4.23 に示す。なお、図中の凡例 go, back はそれぞれ往路、復路での結果を示しており、両図の結果は試験区間南端（県道 24 号線側）からの距離を基準として整理したものである。これらの結果より、200m, 1350m 付近で復路側の CBR 値が大きくなっているものの、往路、復路ともに路床の CBR は概ね同じであることがわかる。また、試験区間南端から約 600m 区間の復路の舗装は修繕されていたため、往路に比べて復路の D_0 たわみは小さくなっていることがわかる。

この修繕区間のコア抜き調査結果を確認したところ、未修繕区間の表層厚は 5cm（図 4.24）であったのに対し、図 4.25 からわかるように修繕区間の表層厚は BWP で 7cm, OWP で 5cm であった。また、図 4.20 の FWD 試験実施状況からも確認できるように、今回使用した FWD は比較的大型であるため MWD の車輪が通過する OWP よりも BWP に近い箇所にて計測している。そのため、表層がその他の箇所と比べて多少厚くなっているものと考えられる。

そこで、多層弾性解析により 2cm 程度の層厚が D_0 たわみにどの程度影響するかを検討した。解析条件は表 4.4 に示す通りであり、各層の弾性係数およびポアソン比は舗装設計便覧²⁾に掲載されている設



図 4.24 未修繕区間の表層厚



図 4.25 修繕区間の表層厚

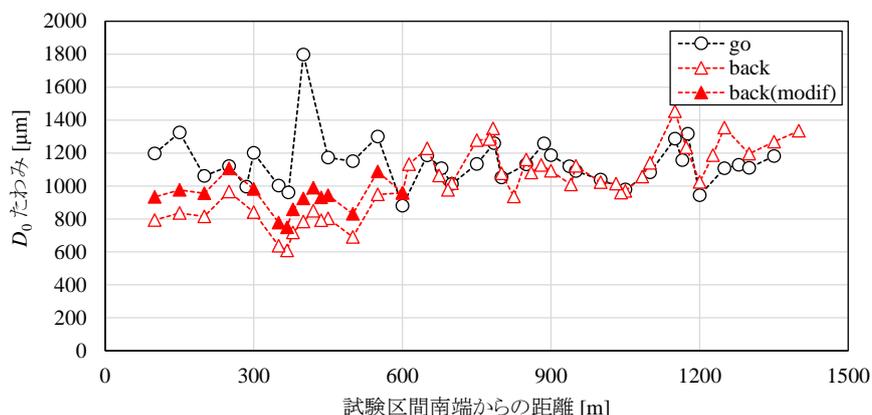


図 4.26 修正した試験区間内の D_0 たわみの変化

計例から 2 月での値を引用した。その結果、5cm の場合と 7cm の場合では D_0 たわみに約 140 μm の差が生じることがわかった。そのため、復路の修繕区間の D_0 たわみについては図 4.26 の凡例 back(modif)に示すように修正し、MWD たわみと比較することとした。

表 4.4 多層弾性解析条件

	表層	上層路盤	下層路盤	路床
層厚 [cm]	5, 7	15	20	—
弾性係数[MPa]	9000	300	200	30
ポアソン比	0.35	0.35	0.35	0.40

4.4 MWDのたわみ評価精度および適用範囲の検討

FWD により発生する衝撃荷重と MWD の輪荷重とは、載荷時間および波形が異なるため路面に生じるたわみに多少の差は生じるものと考えられるが、ここでは、載荷荷重 49kN に荷重補正を行って両者のたわみを比較してみた。図 4.27～図 4.30 にその結果を示す。なお、走行速度 25km/h での MWD たわみは、フィルタレベル設定の関係上、振動成分が多少残っているため、ここでは 15km/h、35km/h での結果のみを用いることとした。

図 4.27 および図 4.28 の往路の結果において、450～500m 付近の MWD たわみはばらついており、FWD のたわみとの一致度が低下していることがわかる。これは、当該位置においては横断水路カルバート部前後の不同沈下によって路面段差が生じており、たわみ速度計測結果が不安定になったためである。しかし、段差の影響範囲を除くと、FWD たわみと MWD たわみは概ね一致していることがわかる。特に、400m 付近の支持力低下箇所も検出できていることがわかる。また、図 4.29、図 4.30 の復路の結果においても、大きな支持力低下箇所は無いものの、往路の場合と同様に FWD たわみと MWD たわみは概ね一致していることがわかる。これらのことから、FWD の荷重補正式を用いることによって、MWD た

わみと FWD たわみを比較することが可能であるといえる。また、過度な段差部を除くと、FWD たわみと MWD たわみは概ね一致しており、支持力低下箇所を検出できることがわかった。

ネットワークレベルの舗装マネジメントにおいて、支持力低下箇所を検出し、効率的に維持修繕を行っていくことは重要である。舗装の支持力測定において FWD 試験機は高精度で舗装の支持力評価を行えるものの、定点載荷式の試験機であるため、測定距離には限界がある。そのため、FWD 試験を優先的に実施する箇所を選定し、効率的に舗装マネジメントを行っていくためのスクリーニング試験機として MWD の開発を行ってきた。したがって、MWD のたわみ評価精度は FWD ほど高精度である必要はなく、支持力低下箇所を検出できる程度のたわみ評価精度を有していれば良いと考えられる。このような観点から国総研外周路直線部での支持力低下箇所の検出状況、本章で示した支持力低下箇所の検出状況を考慮すると、本研究で開発・試作した MWD は、FWD 試験実施の優先順位を決定するためのスクリーニング試験機としては十分な精度を有しているものと考えられる。ただし、現時点で計測した路線は国総研外周路 1 路線、本章の一般道上下車線 2 路線の 3 路線でしかないため、詳細に測定誤差を検討するにはデータが不足している。このことから、今後も継続して一般道での計測を行っていく必要があるものと考えられる。

一方で、舗装の維持修繕の可否を判定する際、FWD では D_0 たわみのほかに D_{150} たわみを利用する。これは、 D_0 たわみは舗装と路床の支持力の両方の情報が含まれているのに対し、 D_{150} たわみには図 4.22 に示したように路床支持力の情報が含まれていると言われている。つまり、 D_0 - D_{150} を算出することで、舗装の支持力を求めることが可能となる。したがって、今後は MWD においても最大たわみ発生位置から 150cm 離れた箇所でのたわみの測定精度についても検討し、MWD による健全度評価機能の拡張を図る必要があると考えられる。

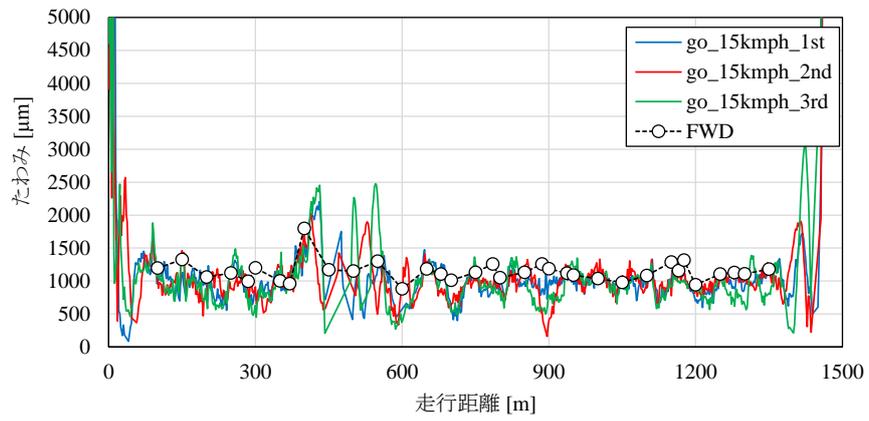


図 4.27 往路での FWD たわみと MWD たわみの関係 (15km/h)

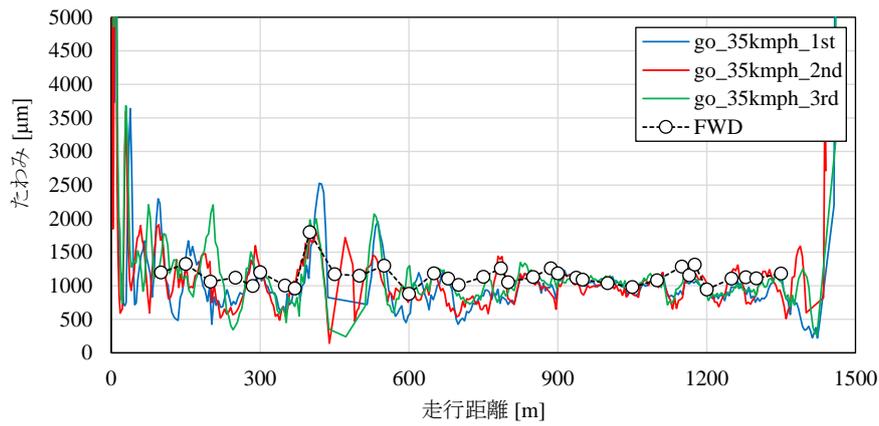


図 4.28 往路での FWD たわみと MWD たわみの関係 (35km/h)

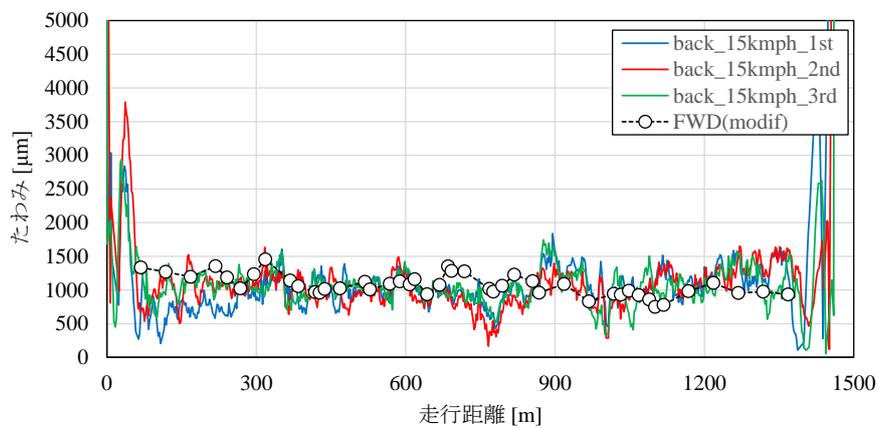


図 4.29 復路での FWD たわみと MWD たわみの関係 (15km/h)

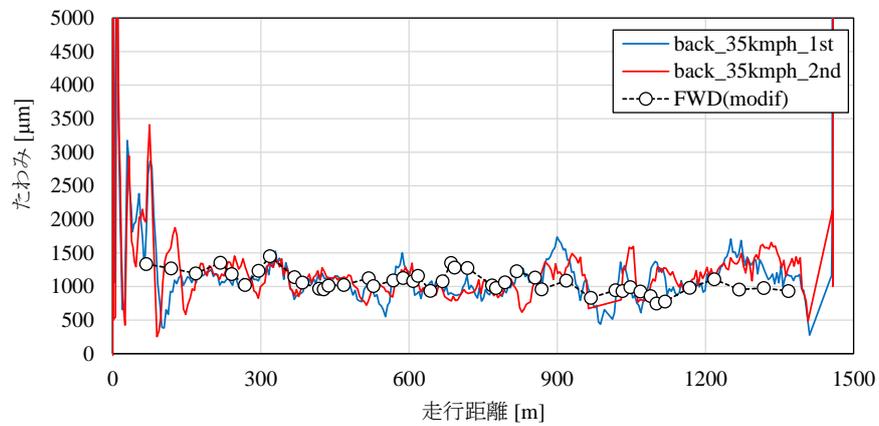


図 4.30 復路での FWD たわみと MWD たわみの関係 (35km/h)

5. まとめ

膨大な量に達した道路ストックを限られた予算および人員の制約条件下で適切に維持管理していくためには、従来からの事後保全的な維持管理から計画的な維持管理へ早急に移行する必要がある。また、舗装路面の陥没に伴う第三者事故等を防止し、舗装を計画的に維持管理していくためには、舗装の構造的欠陥を迅速かつ的確に把握するとともに、舗装の健全度を適切に評価する手法が求められている。このようなことから、本研究では、路床の泥濘化や地下埋設物の老朽化・劣化等による構造的欠陥を迅速かつ的確に把握し、舗装の健全度評価を行うことができる走行式の非破壊検査装置である動的たわみ計測装置（Moving Wheel Deflectometer, MWD）を開発するとともに、実舗装において健全度評価を行う手法を提案した。本研究で得られた知見をまとめると以下の通りである。

- (1)促進載荷試験用の特殊車両（荷重車）にドップラー振動計、速度計を取り付けた動的たわみ測定装置（MWD）を試作した。その結果、ドップラー振動計の計測値は車両振動の影響を受けるため、防振装置などのハード的対策や移動平均を行ってノイズを軽減し、評価区間長を20mとすることで、FWDたわみと相関のあるたわみが得られることが確認された。
- (2)防振装置などのハード的対策や移動平均を行うことで車両振動の影響を抑えられることが確認されたが、評価区間を長くすることは、局所的な支持力変化を見逃すことにつながる可能性が高い。そのため、時系列周波数解析手法の一つである離散ウェーブレット解析を用いて、たわみ速度に含まれる車両振動に起因するノイズの除去を行って最大たわみの算出を試みた。その結果、過年度の振動対策によって得られたたわみと比較して、FWDたわみと遙かに精度良く一致するたわみが得られることが確認された。
- (3)アスファルト舗装要項等に掲載されているカタ

ログ断面を用い、多層弾性理論により層厚、たわみ計測値およびポアソン比に誤差が含まれ、温度条件が変化した場合の舗装のたわみを算定した。その結果、温度条件が変化した場合の解析たわみを f_m 、層厚、たわみ計測値およびポアソン比に誤差が含まれた場合の解析たわみを f_k とすると、そのたわみ比 $D_R=f_k/f_m$ は、舗装構造によらず概ね一定値を示すことが確認された。このたわみ比 D_R は健全部で予想されるたわみの変動範囲を表すことになるので、健全部でのたわみを w_m とした場合、 $w_m \times D_R$ によって健全部でのたわみの上限値（閾値）を求めることができるといえる。また、国総研外周路での計測結果より、測定路線内に部分的に損傷部が存在する場合であっても、計測距離が十分に長ければ計測たわみ w_m を平均値として閾値を決定できることが確認された。

- (4)一般道を走行することが可能な道路運送車両法に抵触しない中型車両にドップラー振動計を含む計測システムを搭載し、合わせてたわみ評価結果に影響を与えると考えられる路面温度と輪荷重の変動を計測できるよう中型車両の改良を行った。輪荷重49kNの荷重車を用いた旧MWDでのたわみと輪荷重30kNの中型車両を用いた新MWDでのたわみを比較したところ、輪荷重の低下にともない、たわみは低下していることがわかった。また、輪荷重測定システムでの計測結果を用いて荷重補正を行うことで、MWDたわみとFWDたわみを直接的に比較できることがわかった。
- (5)過年度調査で使用した走行距離計を改造し、車両後輪の回転数から走行距離を計測するシステムを開発した。また、区間延長が既知の試験走路において、走行距離の計測精度を検証し、本走行距離計が広域を対象とした調査に十分に活用できる精度を有していることを確認した。
- (6)直線部で見通しが良く走行実験を行う上で安全確保が容易であったこと、大型車交通による舗装

の破損進行が確認されたことから、国総研より西側約 2.5km に位置する片側 1 車線の市道約 1.5km 区間（県道 24 号線交差点部～北側信号交差点）の往復 2 車線を選定して MWD 走行試験と FWD 試験を実施した。MWD たわみと FWD たわみを比較したところ、横断水路カルバートの不同沈下により生じていた往路段差部で MWD たわみは不安定になっていたが、この部分を除くと、FWD たわみと MWD たわみは概ね一致しており、国総研外周路での試験結果と同様に支持力低下箇所を検出できることがわかった。

以上のことから、本研究で開発した動的たわみ測定装置（MWD）の妥当性および実務における適用性が確認できたものといえる。なお、本研究の今後の課題としては、以下の事項があげられる。

- (1) 走行速度を上げていった場合には、路面凹凸とサスペンションの応答特性（車両自体の振動特性）が変化する可能性があることから、実道において計測を続けながら路面凹凸に起因する車両振動の影響について継続的に検討する必要がある。
- (2) 一般道における計測データを蓄積し、損傷や地下埋設物等による計測データの変動や、MWD が劣化箇所を見落とす可能性・確率について検討する必要がある。

本研究で開発した MWD は、車両後軸上にレーザドップラー振動計を設置したセンサ架台を剛結させ、離散ウェーブレット解析によってノイズを除去した後たわみを算出する、という非常にシンプルなものである。また、本研究では大型車両、中型車両の 2 種類を MWD のベース車両として使用したが、いずれも同等のたわみ計測精度であった。しかし、重交通の舗装構造の場合には、中型車両では輪荷重が小さいために計測精度は低下する可能性がある。このような場合には大型車両を用いれば良く、大型車両では運用が難しい路線では中型車両を用いて計測すれば良い。MWD は非常にシンプルな構成であるため、このような運用法も可能であると考えられる。

強靱でしなやかな国土を創生するため、約 100 万 km におよぶ膨大な道路ストックを限られた予算および人員の制約条件下で迅速かつ効率的に維持管理し、安全で円滑な交通を確保することが求められている。そのため、ネットワークレベルの舗装マネジメントにおいて、支持力低下箇所を迅速に検出し効率的に維持修繕を行っていくことは重要である。このような状況下において、FWD 試験を優先的に実施する箇所を選定し、効率的に舗装マネジメントを行っていくためのスクリーニング試験機として MWD の開発を行ってきた。つまり、MWD には FWD 程の計測精度は必要でなく、測定路線において支持力低下箇所を検出できる程度のたわみ評価精度を有していれば良いと考えている。このような

観点から、十分なデータ量とは言えないが国総研外周路直線部および一般道での支持力低下箇所の検出状況に鑑みると、MWD はスクリーニング試験機として要求される測定精度を有しているものと考えられる。このように、本研究成果は既存の道路ストックの効率的なマネジメント（道路政策の質の向上）に貢献できるものと考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省：道路関係統計
http://www.mlit.go.jp/statistics/details/road_list.html, 2015.
- 2) 菊川滋：日本の道路網への舗装管理システム（PMS）の適用について，道路，No.12，1985.
- 3) 土木学会：舗装工学の基礎，舗装工学ライブラリー7，2012.
- 4) 舗装診断研究会：FWDに関する研究，2011.
- 5) 加納孝志他：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.
- 6) ERES Consultants: Rolling Wheel Deflectometer (RWD), Demonstration and Comparison to Other Devices in Texas, Asset Management, US Department of Transportation, FHWA, 2004.
- 7) Mostafa E., Ahmed M., Kevin G. Zhongjie Z. and Said I. : Evaluation of Continuous Deflection Testing Using the Rolling Wheel Deflectometer in Louisiana, Journal of Transportation Engineering, ASCE, pp.414-422, 2012.
- 8) 寺田剛，川名太，久保和幸，竹内康，松井邦人：移動式たわみ測定装置を用いた舗装の健全性評価手法に関する一検討，土木学会論文集 E1（舗装工学），Vol.68, No.3, pp.I_13-I_20，2012.
- 9) 上半文昭：構造物診断用非接触振動測定システム「U ドップラー」の開発，鉄道総研報告，Vol.21, No.12, pp.17-22，2007.
- 10) 新井康平：ウェーブレット解析の基礎理論，森北出版株式会社，2005.
- 11) 稲田将一，鎌田康一郎：ウェーブレットによる経済分析，金融研究，pp.1-62，2004.
- 12) 大川善邦：波形の特徴抽出のための数学的处理，CQ 出版社，2005.
- 13) 土木学会舗装工学委員会：FWDおよび小型FWD運用の手引き，土木学会，舗装工学ライブラリー2，2002.
- 14) 一般財団法人土木研究センターH.P.：平成26年度路面性状測定装置の性能確認試験の実施について，<http://www.pwrc.or.jp/romensiken.html> (2014.12).
- 15) 竹内康，城本政一，緑川兼広：軽交通道路における小型 FWD を用いた簡易な路面下空洞評価方法の検討，北陸道路会議，2012.
- 16) 井上武美，松井邦人：舗装の逆解析において層弾性係数の推定に影響を及ぼす因子とその影響度の検討，土木学会論文集，No.433/V-15，pp.177-185，1991.
- 17) 日本道路協会：舗装設計便覧，2006.
- 18) 田邊政人，竹内康，川名太，岡澤宏，窪田光作：たわみのバラツキを考慮したアスファルト舗装の健全度評価法の検討，土木学会第69回年次学術講演会，2014.
- 19) (社)日本道路協会：アスファルト舗装要綱 平成4年改訂版，丸善，1995.
- 20) 道路保全技術センター：活用しよう FWD，2005.
- 21) (社)日本道路協会：舗装設計便覧，丸善，2006.