

道路政策の質の向上に資する技術研究開発 【研究終了報告書】

①研究代表者	氏名 (ふりがな)	所属	役職	
	竹内 康 (たけうち やすし)	東京農業大学	教授	
②研究テーマ	名称	舗装路面の動的たわみ計測装置の開発と健全度評価		
	政策領域	[主領域] 領域8：道路資産の保全 [副領域]	公募 タイプ	タイプII
③研究経費 (単位：万円) <small>※端数切り捨て。</small>	平成24年度	平成25年度	平成26年度	総合計
	1,990	870	159	3,019
④研究者氏名	(研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)			
氏名	所属・役職 (※平成27年3月31日現在)			
姫野賢治	中央大学 理工学部 都市環境学科・教授			
松井邦人	東京電機大学 理工学部 建築・都市環境学系・名誉教授			
丸山暉彦	長岡技術科学大学 環境・建設系・名誉教授			
西澤辰男	国立石川工業高等専門学校 環境都市工学科・教授			
川名 太	東京農業大学 地域環境科学部 生産環境工学科・助教			
神谷恵三	(株)高速道路総合技術研究所・舗装研究部長			
⑤研究の目的・目標	(提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。)			
<p>これまでに整備されてきた膨大な道路舗装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するためには、迅速な舗装の健全度評価が必要となる。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。</p>				
⑥これまでの研究経過・目的の達成状況	(研究の進捗や目的の達成状況、各研究者の役割・責任分担、本研究への貢献等 (外注を実施している場合は、その役割等も含めて) について、必要に応じて組織図や図表等を用いながら、具体的かつ明確に記入下さい。)			
<p>平成26年度は、これまでに得られた結果と課題を整理するとともに中間評価での指摘事項に鑑み、以下の3課題に着目して研究を実施することとした</p> <p>【課題1】 走行距離計の改造：たわみ等の走行計測を行う場合、計測位置を記録するため、走行距離を高精度に計測する必要がある。これまで用いてきた距離計は、小型車輪をピストンにより路面に押</p>				

しつけ、小型車輪の回転数をロータリー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たが、走行速度が速くなった場合、小型車輪の跳ね上がり及び横滑りが発生し、距離計測に誤差が生じることがあった。このため、一般道での計測にあたり、ロータリーエンコーダを直接車両に取り付けて車両のタイヤ回転数から距離を計測する方式に改造する。

【課題2】路面温度及び輪荷重変動の影響の検討：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増加することが想定される。このため、平成25年度に新しい動的たわみ計測装置（MWD）に設置した輪荷重測定システム及び路面温度計により、走行中の輪荷重及び路面温度を計測し、それらの変動がたわみ計測に及ぼす影響について検討する。

【課題3】一般道における走行実験：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。

課題1については、平成25年度の調査で使用した走行距離計との比較より、本年度調査の走行距離計の計測精度が格段に向上していること、また、計測誤差は、車両の走行速度に依存していないことを確認した。また、課題2については、ドップラー振動計のレーザ管の劣化および振動計内へのダスト混入により、温度変化がたわみに及ぼす影響については、十分な検討が行えなかったが、多層弾性解析を併用して平成26年6月と11月に実施したMWD走行試験結果の比較を行った結果、MWDたわみは舗装体の温度変化によって多層弾性理論で推定される範囲内で概ね変動することがわかった。また、輪荷重49kNの促進載荷車両を用いた旧MWDでのたわみと新たに整備した輪荷重30kNの新MWDでのたわみを比較したところ、輪荷重の低下にとともに、たわみは低下していること、FWDと同様に計測荷重によってたわみの荷重補正が行えることがわかった。

課題3については、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～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。往路500m地点には農業用水の横断水路カルバート部があり、最大で4.5cmもの段差が生じていた。走行試験においては、図-1上図の500m付近にみられるように、段差によって生じる車両振動の影響で段差後のMWDたわみが不安定になることがわかった。しかし、図-1に示すように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、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。

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。つまり、MWDは、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満足しているものと考えられる。今後は、一般道での計測を継続し、FWDとMWDの測定誤差のデータを蓄積していく予定である。ただし、平成25年度に整備したMWDは、20年以上供用した8トン車両を用いているため、サスペンションやサスペンション上部車体の剛性低下、シャシー駆動輪部の金属疲労が少なからず進行しているものと考えられる。そのため、なるべく早い段階で新しい車両に乗せ替え、走行実験を行っていくことが好ましいと考えられる。

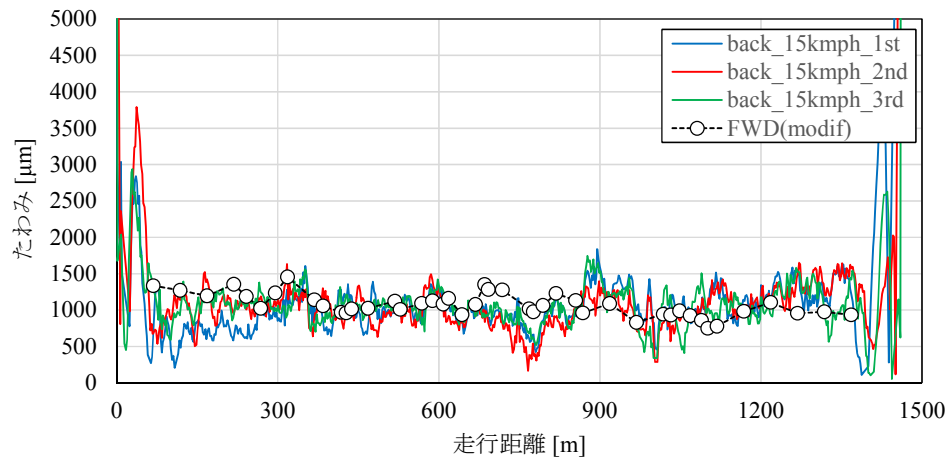
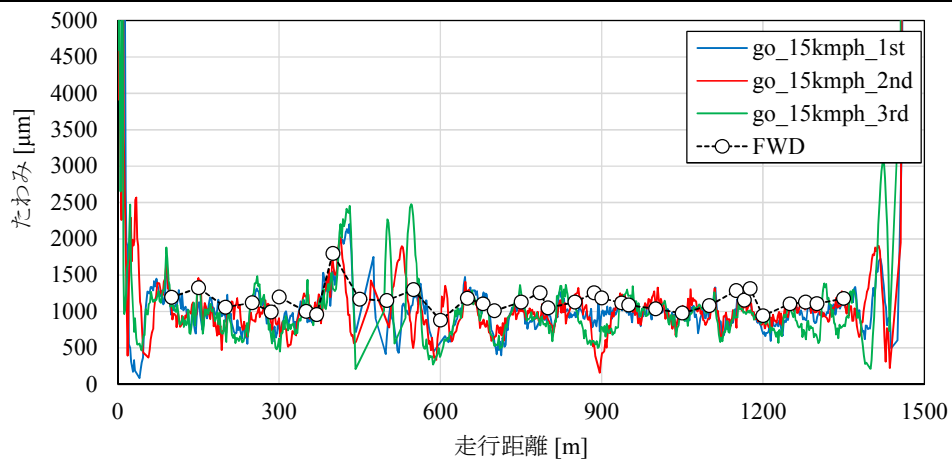


図-1 一般道におけるMWD走行試験結果とFWD載荷試験結果

⑦中間・FS評価で指摘を受けた事項への対応状況

(中間・FS評価における指摘事項を記載するとともに、その対応状況を簡潔に記入下さい。)

FS評価での指摘事項

1. 装置の振動によるノイズ対策は、実用化に向けての重要な要素であり、ハード的な対策の他に、種々の先進的時系列解析を用いたソフト的な対策の検討も行っていたいただきたい。
2. たわみ計測の精度向上と併せ、支持力の評価結果と舗装の構造的な欠陥（損傷、路面下空洞）との関係についても検討していただきたい。
→ ハード的な対策では十分なノイズ除去を行えなかったことから、離散ウェーブレット解析（先進的時系列解析）によるソフト的な対策によってノイズを除去した。また、ウェーブレット解析の適用によって解析精度が向上し、構造的に欠陥のある（たわみが大きくなる）箇所を精度良く検出できるようになった。（平成25年度実績報告書に記載済み）

中間評価での指摘事項

1. 舗装の健全度について、FWD とMWD を具体的にどう組み合わせで調査し、評価するのか等について、実際の現場活用を想定した成果の取りまとめを進めていただきたい。
→ MWDは、FWDによる詳細調査を実施するためのスクリーニング試験機と位置づけている。そのため、平成26年度に実施した一般道での走行試験では、MWDを走行させた後にFWDを実施した。
2. 地方自治体管理の道路では、舗装データが不十分なケース、断面が頻繁に変化するケース等が想定され、こうしたケースを想定したMWD の適用性・信頼性（劣化箇所を見落とす可能性・確率）について検討していただきたい。
→ 限られた時間内で劣化箇所を見落とす「確率」を求めるだけのデータの取得は難しい。一般道と国総研内の外周路で実験を行った範囲では、支持力低下箇所（FWDたわみが増大する箇所）は見落としていないことから、信頼性は低くはないと考えられる。
3. 損傷や地下埋設物、路面下空洞等と計測結果の関連について検討していただきたい。
→ 平成26年度までに実施したMWD走行試験およびFWD試験の結果に鑑みると、MWDによって舗装の損傷による支持力低下（たわみ増大）は把握できているものと思われる。一方、地下埋設物や路面下空洞との関連性については、今後の検討課題である。

⑧研究成果

(本研究で得られた知見、成果、学内外等へのインパクト等について、具体的にかつ明確に記入下さい。)

本研究では、平成24年度のFS研究を経て、平成26年度までの3カ年にわたって動的たわみ計測装置(MWD)の開発と舗装の健全度評価に関する研究を実施してきた。各年度で得られた主な研究成果をまとめると以下の通りである。

【平成24年度】

- (1)促進载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。
- (2)ドップラー振動計の計測値は、路面凹凸等に起因する車両振動の影響を受けるため、センサ架台に防振バネと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た。
- (3)ハード的対策のみでは、架台の振動を抑制できないため、時系列のたわみ速度データに対して2.0秒間(前後1.0秒)の移動平均を行ってノイズを軽減し、最大たわみを算出した。
- (4)算出した最大たわみにもノイズの影響が残っていたため、更に移動平均処理を行い、評価区間長を20m(計算着目点±10m)とすることで、FWDたわみとの相関性が向上することがわかった。

平成24年度の研究成果では、適切な移動平均の評価区間を設定することで架台振動やひび割れの影響を抑えられることがわかった。しかし、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、移動平均処理によってノイズを除去するには限界があるものと考えられる。つまり、より高い精度(短い評価区間)でたわみ計測を行うためには、(1)衝撃吸収効果の高いゲル状マット等を利用したハード的振動抑制対策、(2)移動平均よりも効率的、効果的にノイズ軽減を行うことができる時系列解析を用いたソフト対策、が必要になると考えられる。また、载荷時のたわみから健全度を評価する場合には、(3)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の設定方法について検討する必要がある。さらに、平成24年度の研究で使用した車両は、促進载荷試験用荷重車であったため、一般道での走行は認められていない。そのため、今後一般道にて走行試験を行うためには、(4)道路運送車両法に抵触しない車両を用いた新たな車両の整備、が必要であることがわかった。

【平成25年度】

平成24年度のFS研究の結果を受け、ハード的/ソフト的対策による振動抑制、健全な場合と不健全な場合のたわみの閾値の設定方法、一般道を走行可能な車両の整備について検討した。

- (1)コイルスプリングと衝撃吸収性の高いゲルマット、インシュレータを用いたハード的振動対策について検討したが、使用した材料では振動抑制が期待できないだけでなく、ドップラー振動計のたわみ速度計測精度が低下することがわかった。
- (2)ソフト的振動対策では、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採用し、たわみ速度に含まれる路面凹凸由来の車両振動ノイズを除去した。そして、ノイズ除去後のたわみ速度を用いて最大たわみを算出し、FWDたわみと比較した。その結果、離散ウェーブレット解析はソフト的振動対策として有効であり、FWDたわみとMWDたわみは、平成24年度の結果よりも遙かに精度良く一致することがわかった。
- (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、既往の研究成果と舗装設計便覧による設計事例を参考に、健全な状態であるが層厚、たわみ計測値、ポアソン比に誤差が含まれ、温度条件が変化した場合のたわみを多層弾性解析プログラムによって求めた。その結果、温度条件が変化した場合の解析たわみを f_m 、 f_m に層厚、たわみ計測値、ポアソン比に誤差が含まれた場合の

⑧研究成果（つづき）

解析たわみを f_k とすると、健全な状態でのたわみ比 $D_R=f_k/f_m$ は概ね一定値を示すことがわかった。

(4)たわみ比 D_R は健全部で予想されるたわみ比の上限値であり、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閾値を求めることができる。また、国総研内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には、計測距離が十分に長ければ計測たわみの平均値を w_m として閾値を求められることがわかった。

(5)平成24年度から使用してきた車両は、促進載荷試験用荷重車であったため一般道を走行することができない。そのため、道路運送車両法に抵触しない車両にドップラー振動計を含む計測システムを移設するとともに、たわみ評価結果に影響を与えられとされる路面温度と輪荷重の変動を計測できるよう、我々の研究グループが所有する中型トラックを改良した。

平成25年度の研究で得られた最大の成果は、センサ架台を車両に剛結し、路面凹凸に起因するたわみ速度のノイズを離散ウェーブレット解析によって除去し、たわみ計測精度を大幅に向上させたところにある。現在、海外で稼働している同様の移動式のたわみ計測装置では、サーボアクチュエータ等でセンサ架台の動きをアクティブ制御し、移動平均によってノイズを除去しているが、これはアクティブ制御だけでは路面凹凸由来のノイズを除去できていないことを示している。一方、本研究で採用した方法では、離散ウェーブレット解析によるソフト的処理のみによってノイズ除去を行っており、センサ架台のアクティブ制御が不要であることから、計測装置のコストの大幅な抑制に寄与できるものと考えられる。また、平成25年度に改良した新しいMWDでの一般道での走行試験を視野に入れ、平成26年度では、(1)走行距離計の改良、(2)路面温度及び輪荷重変動の影響の検討、および(3)一般道における走行実験を行うこととした。

【平成26年度】

(1)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。

(2)ドップラー振動計のレーザ管の劣化および振動計内へのダスト混入により、温度変化がたわみに及ぼす影響については、十分な検討が行えなかったが、多層弾性解析を併用して平成26年6月と11月に実施したMWD走行試験結果の比較を行った。その結果、MWDたわみは舗装体の温度変化によって多層弾性理論で推定される範囲内で概ね変動することがわかった。

(3)輪荷重49kNの促進載荷車両を用いた旧MWDでのたわみと平成25年度に整備した輪荷重30kNの新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。

(4)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～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。

(5) 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。

⑨研究成果の発表状況

(本研究の成果について、これまでに発表した代表的な論文、著書(教科書、学会抄録、講演要旨は除く)、国際会議、学会等における発表状況を記入下さい。なお、学術誌へ投稿中の論文については、掲載が決定しているものに限ります。)

- ・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.

⑩研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

現時点でマスメディア等にリリースしている情報はありません。

⑪研究の今後の課題・展望等

(研究目的の達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や道路政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

本研究で開発した動的たわみ計測装置 (Moving Wheel Deflectometer, MWD) は、車両後軸上にレーザー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なたわみを算出する、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。

⑫研究成果の道路行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、道路政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

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。

今後は、引き続き一般道での計測を継続してFWDとMWDの測定データを蓄積するとともに、MWDの計測精度の検証を行うことで、スクリーニング試験機としての信頼度を向上させる予定である。

⑬自己評価

(研究目的の達成度、研究成果、今度の展望、道路政策の質の向上への寄与、研究費の投資価値についての自己評価及びその理由を簡潔に記入下さい。)

本研究では、ネットワークレベルで舗装の修繕箇所を迅速に検出し、プロジェクトレベルの舗装マネジメントを円滑に行うためのスクリーニング試験機としての舗装路面の動的たわみ計測装置(Moving Weight Deflectometer, MWD)の開発とこれによる実舗装の健全度評価手法の構築を目的として検討を行ってきた。

平成25年度および平成26年度の研究成果により、車両制限令に抵触せず一般道を走行可能な中型車両を用いたMWDを開発し、FWDとの比較によって計測精度の良さを確認するとともに、計測たわみを用いた舗装の健全度評価法を提案した。掲げた研究の目的の達成度は高いものと考えている。今後は引き続き一般道での計測を継続し、FWDとMWDの測定データを蓄積するとともにMWDの計測精度の検証を行っていくことで、スクリーニング試験機としての信頼度を向上させる予定である。

本研究で使用した研究費は約3,000万円であり、その65%がドップラー振動計やセンサ架台等の物品費である。米国で使用されているRWDを購入した場合には2~3億円の経費が必要であると言われていることからわかるように、本研究に対する研究費の投資価値は高いと思われる。