

走行型路面たわみ測定試験機の現状と我が国における取組み

松井邦人・久保和幸・寺田 剛・川名 太

1. はじめに

道路交通網は、我が国の経済活動を支える最も基本的で重要な社会基盤である。道路の健全度は新設時に最大であり、累積交通量の増加にともない劣化が進行する。如何に道路構造物を効率的に維持・管理するかは、建設技術者に課せられた使命である。道路の健全度は、路面性状と支持力性能で評価される。支持力性能の低下は、路面性状の劣化を加速し、その結果、道路利用者に対するサービス水準にも直接的な影響を与える。道路管理者には、既設道路を経済的、また合理的に維持・管理をしていくことが求められており、それゆえ道路の現状を効率的に評価することが必要となる。

1950年代の中ごろより静止あるいは移動しながら道路のたわみを測定する様々な方法が開発されてきた。現在、最も普及している試験方法として、Falling Weight Deflectometer (FWD)によるたわみ計測がある。FWD試験は、路面に重錘を落下させ、そのときのたわみを計測する試験であり、静止して測定するため交通規制が必要となる。これに対して、近年、周りの車両と同じような速度で走行しながら舗装のたわみを測定できる走行型試験機が開発され、注目されている^{2)~4)}。丸山⁵⁾もこのような試験機のがわが国への導入の重要性を指摘している。走行型たわみ測定試験機で計測した舗装たわみの精度と再現性が確認できると、ネットワークレベルで舗装の支持力性能を容易に評価できることになる。すなわち、路面の目視だけでは確認することのできない局所的に進行した劣化区間や舗装内の空洞の発見につながるものと期待できる。

本文では、走行型路面たわみ測定機について、海外の最新の開発状況を整理するとともに、我が国の道路状況を勘案した測定機の開発に向けた取組みを紹介する。

2. 走行型たわみ測定試験機の現状

2.1 走行型試験機

Texas大学El Paso校のAroraら²⁾は5種類の走行型たわみ測定試験機の評価を行い、2006年10月にTexas州交通局に報告書を提出している。その報告書で評価対象としている試験機は、1) Texas Rolling Dynamic Deflectometer (RDD)、2) Airfield Rolling Weight Deflectometer (ARWD)、3) Rolling Wheel Deflectometer (RWD)、4) Road Deflection Tester (RDT)、5) High-Speed Deflectograph (現在、Traffic Speed Deflectometer (TSD)と称されている)である。調査時の最大走行速度は、RDDが4.8km/h、ARWDは35km/h、RWDは80km/h、RWTは70km/h、TSDは80km/hである。2012年6月発刊のTransportation Research Boardの報告書³⁾では、将来性に期待できる走行型試験機としてRWDとTSDに注目し、両機で測定した結果を報告している。

2.2 Rolling Wheel Deflectometer (RWD)

RWDは、米国のARA社が1990年代後半に試作車を開発し、現在もFHWAの支援を受け改良が進行している。試作車の全長は16.2m、後輪1軸のセミトレーラーで、80kNの軸荷重が舗装表面に作用する仕組みになっている。舗装表面たわみは、長さ7.7mの剛なアルミニウム支持ばりに2.44m間隔で配置した4個のレーザ変位計で測定し、たわみの読みを2 kHzで記録している。最新型のシステムでは、距離計の計測範囲100mm、読みの精度±0.0254mmであり、支持ばりとレーザ変位計は、断熱ケースで覆われている。測定の様式図を図-1に示す。D点が載荷点であり、C、B、Aは荷重の影響を受けない位置と仮定している。舗装のたわみ Δ は、式(1)から計算できる。

$$\Delta = [(B_2 - 2C_2 + D_2) \cdot (A_1 - 2B_1 + C_1)] \quad \text{式(1)}$$

ここに、 A_1 、 B_1 、 C_1 は、それぞれ時間 $t=0$ のときのレーザ変位計A、B、Cの読み、 B_2 、 C_2 、 D_2 は2.44m移動時のB、C、Dの読みである。なお、

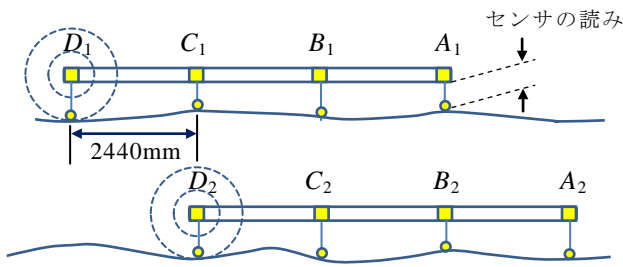


図-1 RWDのたわみ測定模式図

「変位計の読み」とは、変位計の位置から路面までの距離をいう。

2.3 Traffic Speed Deflectometer (TSD)

TSDは、デンマークのGreenwood Engineering社が開発、市販をしており、英国、フランス、イタリアなどヨーロッパを中心に走行試験が行われ、同試験機の改良とたわみデータの蓄積が進行している。TSDの特徴は、ドップラーレーザを用いて、走行時に生じる舗装のたわみ速度（車両の走行に伴い、路面が鉛直方向に変位する速度）を計測し、それをたわみに変換していることである。第一世代のTSDには、4個のドップラーレーザが配置されていたが、現在、最大10個のセンサを設置している試験機もある。

TSDでは、測定したたわみ速度をたわみに変換する必要がある。たわみ速度とたわみ角の間には式(2)の関係がある。

$$\frac{\partial \Delta}{\partial t} = V \frac{\partial \Delta}{\partial x} \quad \text{式(2)}$$

ここに、 $\partial \Delta / \partial t$ はたわみ速度、 $\partial \Delta / \partial x$ はたわみ角、 V は走行速度である。舗装のたわみは、弾性床上のほりて模擬できると仮定し、そのたわみを

$$\Delta(x) = -\frac{A}{2B} \{ \cos(Bx) + \sin(Bx) \} e^{-Bx} \quad \text{式(3)}$$

で表している。ここに、 x は荷重中心から走行方向の距離である。試験では、式(2)の左辺のたわみ速度を計測しているので、そのときの走行速度を測定しておくことで右辺のたわみ角を求めることができる。また、式(3)を x で微分すると、たわみ角が得られる。したがって、輪荷重の近くの数点でたわみ速度を測定し、これから求めたたわみ角と式(3)を微分した結果が良く一致するように未知パラメータ A 、 B を決定すれば、最大たわみを推定することが可能となる。

表-1 RWDとFWDの運転条件の比較

因子	RWD	FWD
操作速度	走行速度	静止
たわみセンサの精度	6.25 μ m	0.254 μ m
作業員数	2	1
日測定距離(km/day)	160-320	4-40
センサ数	4	7-9
作用荷重(kN)	80	26-80
荷重の種類	走行輪荷重	衝撃荷重
層係数の推定	不可	可

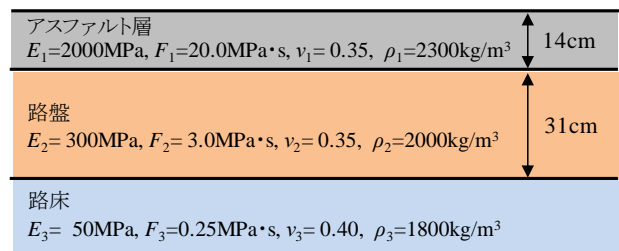


図-2 舗装解析モデル

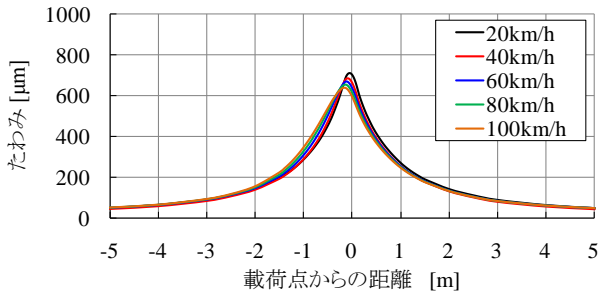
3. 走行型路面たわみ測定試験とFWD試験

3.1 機能的特徴

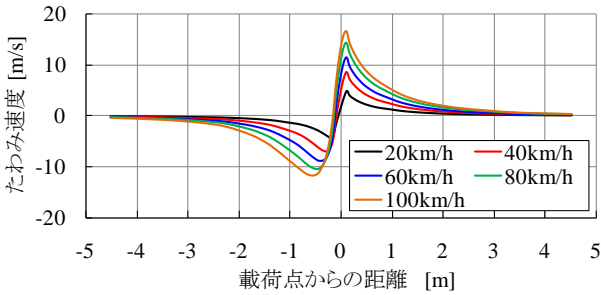
走行型路面たわみ測定試験機として注目されているRWDとFWDの性能を表-1に比較する。RWDの長所は、作業効率をはるかに優れており、ネットワークレベルでの調査に適している。しかし、FWDと比べたわみ測定精度は劣り、逆解析を利用して舗装を構成する各層の変形係数を推定できていないことが短所である。

3.2 シミュレーションによる走行荷重の応答

RWDとTSDのいずれもセンサが車両の振動の影響を直接受け、その大きさは舗装のたわみよりはるかに大きい。いかに測定データから車両の振動成分を除去できるかが課題である。そのためには、走行荷重を受ける舗装の変形特性を理解することが重要である。図-2に示す舗装の解析モデルを対象として、文献6)に示す手法を用いて応答解析した結果を図-3に示す。図には、走行速度を20、40、60、80、100km/hと変えて解析を行い、車輪中心が $x=0$ の位置を通過する瞬間のたわみ形状とその時のたわみ速度を示している。図-3(a)より走行速度が速くなるほどたわみが小さくなり、車輪中心から離れると走行速度の影響は無視できるといえる。また、5m離れた位置でも最大値の10%ほどの大きさのたわみが生じていることがわ

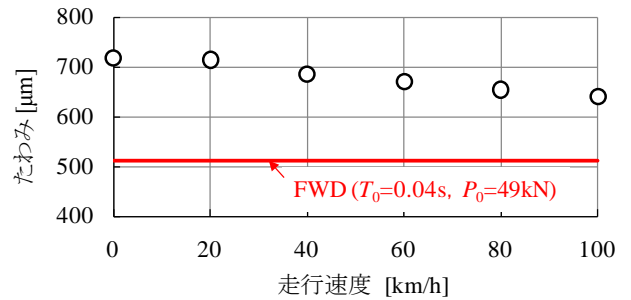


(a)車輪位置が $x=0$ のときのたわみ分布

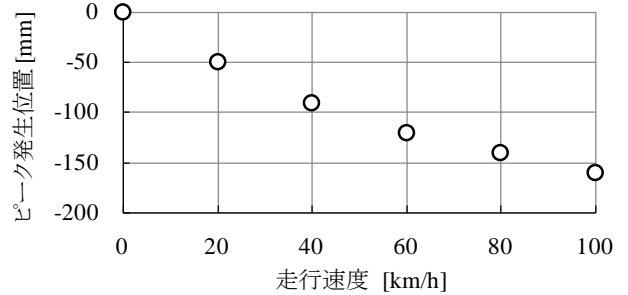


(b)たわみ速度分布

図-3 走行荷重によるたわみ形状とたわみ速度



(a)走行速度と最大たわみの関係



(b)走行速度と最大たわみ発生位置の関係

図-4 たわみ最大値とその発生位置

かる。図-3(b)はたわみ速度を示している。同図より、車輪中心の前後でたわみ速度の向きが逆転し、その最大値は走行速度により大きく変化する。速くなるとほど急激に大きくなる。このことは、ドップラーレーザを用いて計測するとき、走行速度が速いほど計測に有利であることを示唆している。

図-4(a)は、図-3(a)の最大値と走行速度の関係を示している。同図には、走行速度がゼロの場合として静的解析のたわみを、また、FWD試験の衝撃荷重を模擬したハーバーサイン波に対する応答の最大値を併記している。同図より、走行速度がたわみの最大値に及ぼす影響は、静的解析のたわみの12%程度であることが分かる。しかし、これと比べるとFWD試験のピーク値は遥かに小さい。図-4(b)は、たわみの最大値が発生する位置を示している。走行速度がゼロのとき、最大値の発生位置は荷重中心と一致するが、走行速度が速くなるほど荷重中心後方の離れた位置で最大値が発生していることがわかる。これらの図よりレーザ変位計およびドップラーセンサは車輪の前後±1mの範囲で設置するのが良さそうである。

4. 我が国の走行型路面たわみ測定試験機

現在、独立行政法人土木研究所が所有する荷重車にレーザ変位計を取り付け、走行しながら後輪



写真-1 測定車両(荷重車)

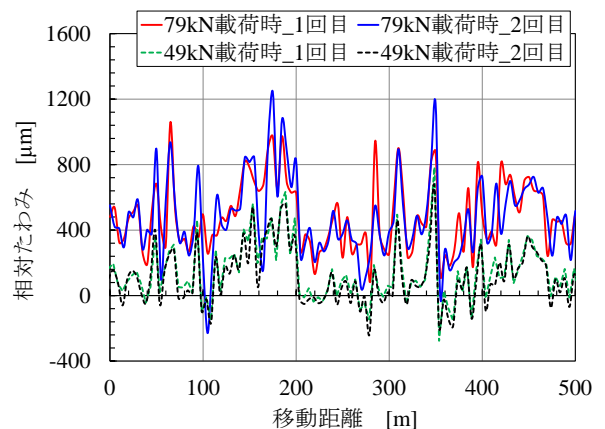


図-5 走行型路面たわみ測定試験機によるたわみの評価例

直下のたわみを連続的に評価する試験方法の開発を試みている(写真-1)。図-5は、試作した走行型路面たわみ測定試験機で得られた測定結果に基づき、舗装の相対たわみを評価した結果の一例を示している。ここで、相対たわみとは、載荷点直下

と載荷点から45cm離れた位置におけるたわみの差を表している。データ処理の方法については、詳細を文献(7)に記している。輪荷重を49kNおよび79kNとして、それぞれ試験を2回実施している。図より、輪荷重79kNの場合に比べ、49kNの場合のたわみ差は小さいが、波形はよく一致していることがわかる。このことから、実験の再現性が確認できる。車両の走行に伴う舗装のたわみは、路面の凹凸や車両の振動などの大きさと比べて、はるかに小さい。大きなノイズから必要とする信号を如何に抽出するか、その仕組みの継続的な改良が求められている。

5. まとめ

走行型たわみ測定試験機は、各国の道路事情を勘案して開発することが重要である。RWDは直線路に適しているが、曲線部の多い我が国の道路には不適であり、載荷輪近くの情報から最大たわみを推定する必要がある。また、我が国では渋滞が発生し、高速で走行しながらの計測は期待できない。シミュレーションの結果からも、これまでのレーザ変位計に加えてドップラーレーザを併用することも検討に値する。今後は、上記の議論を踏まえて試作機の改良を行うとともに、実道におけるデータの集積を行って、我が国の道路事情に適した走行型路面たわみ測定機の姿を模索していく。

謝 辞

本研究は、長岡技術科学大学丸山暉彦名誉教授、中央大学姫野賢治教授、前川亮太助教、石川工業高等専門学校西澤辰男教授、東京農業大学竹内康

教授、NEXCO総研神谷恵三氏、(独)土木研究所との共同研究で得られた成果の一部をまとめたものである。関係者に深甚なる謝意を表します。なお、本研究は2010年度～2012年度科学研究費補助金(基盤研究B、課題番号: 22360175)の援助を受け実施したものである。

参考文献

- 1) Andrén: Developments and Results of Swedish Deflection Tester, Licentiate Thesis from Royal Institute of Technology, Department of Mechanics, June 2006
- 2) J. Arora, V. Tandon, S. Nazarian: Continuous Deflection Testing of Highways at Traffic Speeds, Research Report No. 0-4380-1, Project Number 0-4380, The University of Texas at El Paso, October 2006
- 3) G. Flintsch, B. Ferne, B. Diefenderfer, S. Katicha, J. Bryce, S. Nell, and T. Clark: Assessment of Continuous Pavement Deflection Measuring Technologies, SHRP 2 Renewal Project R06F, Transportation Research Board, June 2012
- 4) M. A. Elseifi, A. M. Abdel-Khalek, K. Gaspard, Z. Zhang and S. Ismail: Evaluation of Continuous Deflection Testing Using the Rolling Wheel Deflectometer in Louisiana, Journal of Transportation Engineering, ASCE, Vol. 138, No.4, pp.414-422, April 2012
- 5) 丸山暉彦: 高速移動式たわみ測定装置、土木施工、Vol.53、pp.58～57、2012.5
- 6) 小澤良明、松井邦人: 走行荷重の作用を受ける舗装構造の応答解析、土木学会論文集 E Vol.65、No. 4、pp.468～475、2009.10
- 7) 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、(舗装工学論文集第 17 巻)、I_13-I_20、pp.13～20、2012

松井邦人



東京電機大学名誉教授、
Ph.D
Dr. Kunihito MATSUI

久保和幸



(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 上席研究員
Kazuyuki KUBO

寺田 剛



(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 主任研究員
Masaru TERADA

川名 太



東京農業大学生産環境
工学科助教、博(工)
Dr. Futoshi KAWANA