

# 路面のプロファイルと舗装に生ずる 構造的ダメージの相関性について

城本政一<sup>1</sup>・川村 彰<sup>2</sup>・富山和也<sup>3</sup>・高橋 清<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 修 (工) 大成ロテック株式会社事業本部技術研究所 (〒365-0027 鴻巣市上谷 1456)

E-mail : masakazu\_jomoto@taiseirotec.co.jp

<sup>2</sup>正会員 博 (工) 北見工業大学教授 社会環境工学科 (〒090-8507 北見市公園町 165 番地)

<sup>3</sup>正会員 博 (工) 北見工業大学研究員 SVBL (〒090-8507 北見市公園町 165 番地)

<sup>4</sup>正会員 博 (工) 北見工業大学教授 社会環境工学科 (〒090-8507 北見市公園町 165 番地)

走行車両の動的荷重は、路面プロファイルに起因する“車両の鉛直方向の振動”により変動する。筆者らは、路面プロファイルと動的荷重の相関分析に基づき、舗装が受ける構造的ダメージの予測を試みた。予測に際しては、最初に動的荷重算出方法の検討を行い、次に“路面のプロファイルと走行速度が動的荷重に与える影響”を実車実験により把握した。さらに、実験結果に基づき、“路面プロファイル”と“動的荷重により舗装が受ける構造的ダメージ”の関係を、LTPP に収録されているデータを用いて比較検討した。この結果、動的荷重の評価指標として考案した“修正動的荷重係数”が、FWD のたわみ量と高い相関があることを確認できた。このことから、路面プロファイルを測定することで、舗装が生ずる構造的ダメージの簡便予測が可能となった。

**Key Words:** Vehicle dynamics, Dynamic load, Pavement damage, IRI

## 1. はじめに

舗装は、劣化や疲労の蓄積などにより破損が発生し、供用性が低下する。破壊の形態は、路面性状の低下が主である機能的破壊（流動によるわだち掘れ、すべり抵抗値の低下等）と、構造的破壊（路床・路盤の支持力低下によるひび割れ等）に大別される<sup>1)</sup>。

クラックや平坦性の低下など、機能的破損が発生し、路面のプロファイルが悪化した舗装では、走行車両の走行性が悪化し、車両の鉛直方向の振動に起因する“動的荷重”も増加する。これに伴い、機能的および構造的な破損の進行が、さらに促進されると考えられる。

路面のプロファイルと走行車両の振動については、様々な研究が報告されている<sup>2)~10)</sup>。また、路面のプロファイルと車両が走行する際の動的荷重に関しては、理論計算による“汎用車両運動シミュレーションパッケージウェア (TruckSim)”を用いた既存の研究等がある<sup>11)</sup>。

しかしながら、それら両者を結びつけ、路面のプロファイルから“車両の振動により発生する動的荷重”を推定し、舗装の構造的ダメージと関連づけた報告は皆無である。そこで、筆者らは、路面プロファイルと舗装に作

用する動的荷重の関係を明らかにすることで、舗装が受ける構造的ダメージを推定できる可能性があると考えた。ただし、ポーラスアスファルト舗装等のような骨材飛散や、基層アスファルトの剥離などの破損については、本研究でいう構造的なダメージとは異なる形態と位置付け検証より除外した。

これを検証するために、まず、路面プロファイルから動的荷重を算出する方法を検討し、次にこの結果を用いて“路面のプロファイルと走行速度が動的荷重に与える影響”を理論的に把握した。

最後に、これらの検討結果を応用して、“路面プロファイル”と“動的荷重により舗装が受ける構造的ダメージ”の関係を、アメリカ連邦道路局 (FHWA) で公開されている Long-Term Pavement Performance<sup>12),13)</sup> (以下、LTPP) データに収録されている“路面プロファイルデータと FWD データ”を用いて検討した。

本文は、これら検討結果を報告するものである。

## 2. 検討の概要

本検討は、路面のプロファイルと舗装の構造的ダメー

ジの関係を把握するために、図-1 に示すフローに従って行った。

① 動的荷重の算出方法の検討

舗装のダメージを把握するには、走行車両が舗装に与える動的荷重を正確に把握する必要がある。そのため、車両走行時に車軸（以下、下バネ）の鉛直方向の加速度を測定し、それにより動的荷重を算出する手法を考えた。その有効性を実証するために、構内走行試験を実施し、“下バネの鉛直加速度から算出した動的荷重”と“実測したひずみより算出した動的荷重”を比較し評価した。

② 路面のプロファイルおよび走行速度が動的荷重に与える影響の把握

動的荷重に影響を及ぼす要因として、路面のプロファイルおよび走行速度が考えられることから、この2つの要因が動的荷重に与える影響をクォーターカー（QC）モデル<sup>14）～19）</sup>を用い、理論計算にて求めた。

③ 実路における路面プロファイルと舗装構造のダメージの関係

上記の理論に基づき、LTPP に収録されている実路における“路面のプロファイルとFWDの測定データ”を用い、路面のプロファイルと舗装の構造的ダメージの関係を検討した。

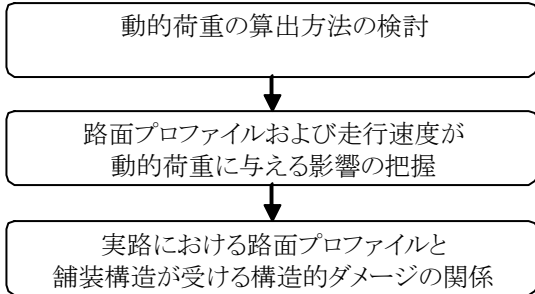


図-1 検討のフロー

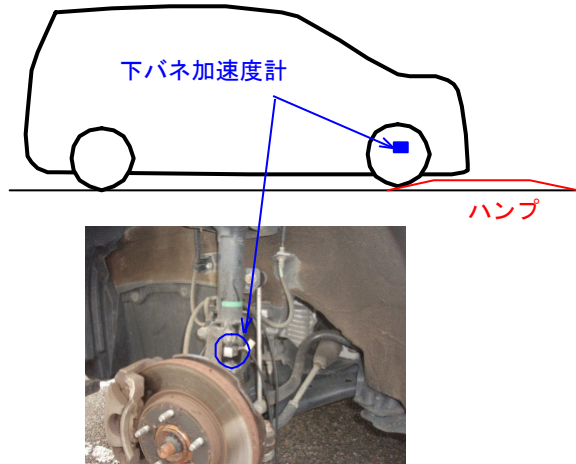


図-2 加速度計設置位置

3. 動的荷重の算出方法の検討

(1) 検討の概要

走行車両が舗装に与える動的荷重を、車両走行時の下バネの鉛直方向の加速度から算出できるかを検討した。

検討は、構内の試験走路に形状が既知のハンプを設け、①ハンプを車両が走行した時の下バネの鉛直加速度を加速度計より測定し、②走行車両がハンプに与える動的荷重は、ハンプの裏面に設置したひずみゲージで測定したひずみにより求めた。具体的には、あらかじめ室内試験にて確認したハンプの荷重（ $P$ ）とひずみ（ $\epsilon$ ）の関係式（式-1）にて、ハンプ通過時の測定ひずみを代入し動的荷重を求めた。この測定された加速度と動的荷重を比較する方法で検討を行った。

下バネの鉛直加速度の測定の概要を図-2に、ハンプおよびハンプ裏面のひずみゲージの設置状況を図-3に示す。

$$P = 3.25 \times 10^6 \epsilon \quad (\text{式-1})$$

(2) 実験条件

以下に実験条件を示す。

a) 走行条件

走行速度：時速5～40kmの定速走行

（走行試験時の速度：5～40km/hの範囲で9～11条件）

走行車両：普通自動車、軽車両トラック

b) 実測ひずみによる動的荷重の算出方法

実際の車両走行により発生する動的荷重は、図-3右上に示すひずみゲージを用いて算出した。

(3) 実験結果

ハンプ上を車両が走行した時の鉛直方向の加速度と、動的荷重の実測値との関係を図-4に示す。図-4に示す通り、相関係数が $R=0.88$ となり、加速度と動的荷重には相関があることが確認できた。ただし、動的荷重と加速度

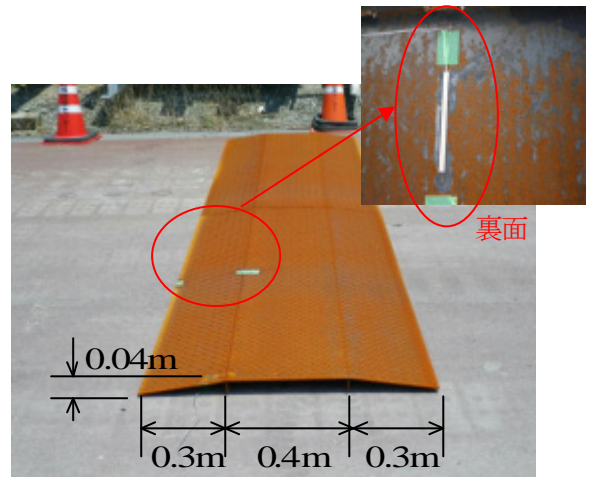


図-3 ハンプ概要

の関係は、走行車両により異なっていることが確認された。

一般的に、動的荷重は、加速度と質量の積で算出することから、車両の軸重が動的荷重を決定する1つの要因と捉え、この要因を取り除くことで、車種に関係なく測定した加速度から動的荷重が求められると考えた。具体的には、動的荷重を測定車両の軸重（本研究では、軸重はハンプ上で車両を静止したときの荷重値）で割った値を“修正動的荷重係数”と定義し、この修正動的荷重係数と加速度の関係を求めた。結果を図-5に示す。

図-5によると、鉛直方向の加速度と修正動的荷重係数は、車種に依存せず、回帰式上に分布しており、相関係数が $R=0.87$ と大きな値を示した。このことから、下バネの加速度から求めた動的荷重を軸重で割った“修正動的荷重係数”を用いることが有効と判断できる。すなわち、軸重が未知の走行車両でも、走行時の下バネ加速度から修正動的荷重係数を求めることが可能であり、動的荷重による影響の推定が可能といえる。

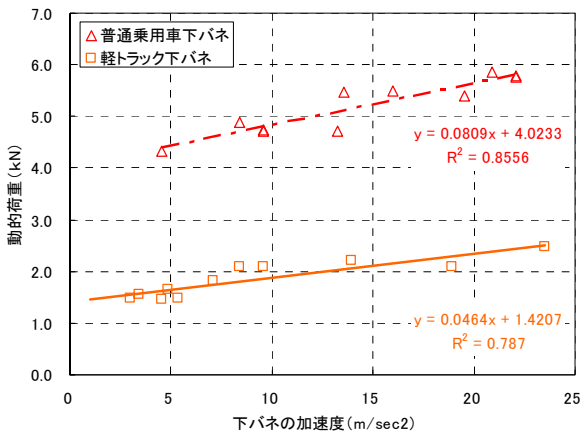


図-4 鉛直加速度と動的荷重の関係

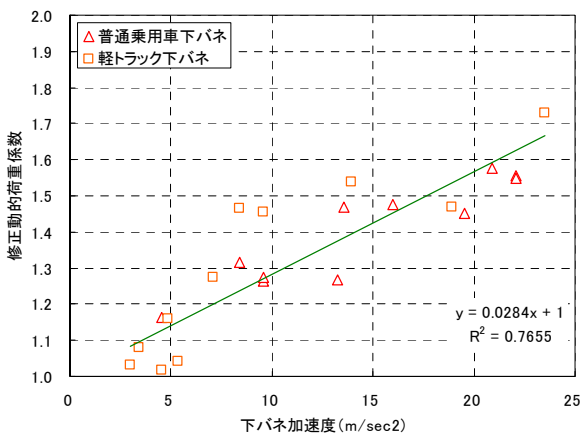


図-5 鉛直加速度と修正動的荷重係数

#### 4. 路面のプロファイルおよび走行速度が動的荷重に与える影響の把握

##### (1) 検討の概要

車両走行時の鉛直加速度は、路面のプロファイルや車両の走行速度により変化すると予測される。そこで、走行速度を変化させたときの鉛直加速度の変化を、路面のプロファイルの指標である International Roughness Index (IRI) の異なる複数路線を対象に、計算により求めた。なお、計算に用いる QC モデルが本検討で適用できるかを検証するため、はじめに QC モデルの適応性に関する検証を行った。計算にもちいた QC モデルを図-6に示す。ここで用いた QC モデルは、IRI の計算にも用いられている 2 軸 4 輪の乗用車の 1 輪だけを取り出して抽象化した仮想車両である。

##### (2) QCモデルの適応性の検証

車両がハンプ上を走行したときの鉛直方向の振動の実測値と QC モデルの場合を比較し、その適応性を確認した。検証ではハンプを走行したときの下バネ加速度の実測値と、QC モデルのシミュレーションから求められた鉛直方向の加速度について、ISO<sup>18)</sup>で提案されているパワースペクトル密度 (以下、PSD) により比較を行った。その結果を図-7に示す。

図-7より、実測値データと QC モデルの振動数と PSD

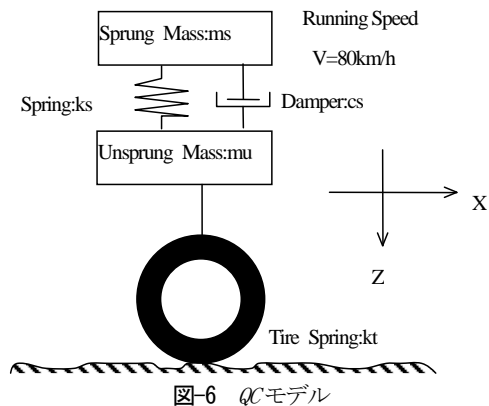


図-6 QCモデル

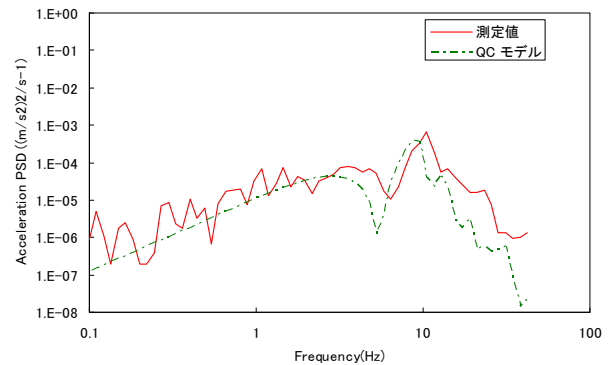


図-7 ハンプを走行した実測値とモデル計算値の PSD

の関係は同様の傾向を示していることがわかった。このことより、この QC モデルを用いて様々な路面を走行する時の車両の鉛直方向における振動加速度の推定が可能と考え、QC モデルを用いて走行車両の鉛直方向の振動の計算を行った。

### (3) 検討条件

検討で用いた路面のプロファイルは、IRI 値の異なる 10 路線 (表-1 参照) である。また、また、QC モデルの走行速度は、20,30,40,50,60,70,80km/h の 7 条件とした。さらに、荷重条件は、修正動的荷重係数 1.0 を 49 kN として設定した。

### (4) IRI と算出した修正動的荷重係数の関係

IRI の異なるプロファイルの路面を走行したときの“下バネの鉛直加速度”を“振動の強度を表す二乗平均平方根 (以下 RMS)”として、“修正動的荷重係数”を算出した。RMS の計算式を (式-2) に示す。また、RMS より算出した修正動的荷重係数と走行速度の関係を、図-8 に示す。図-8 より、次の事項が確認できた。

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_N^2}{N}} \quad \text{式-2}$$

- IRI に関わらず、走行速度が大きくなると、修正動的荷重係数は大きくなる。
- IRI が大きな路面ほど、修正動的荷重係数は大きくなる傾向がある。
- 走行速度に対する修正動的荷重係数の変化が大きな路線が見られた。これは、QC モデルが有する 2 つの固有振動数 (80km/h 走行時で、0.065cycle/m と 0.42cycle/m<sup>14)</sup>) と、ある走行速度で走行したときのプロファイルの振動数が一致したために共振を起こしたためと考えられる。このことを確認するために走行速度 50km/h において、修正動的荷重係数が大きくなっている路線 6 (IRI=2.23) について、路面プロファイルの PSD を求めた。その結果を図-9 に示す。図-9 より、路線 6 は、0.6~0.8cycle/m の振動数で大きな PSD を示している (図-9 の破線部分)。QC モデルが 50km/h で走行したときの固有振動数は、0.67 cycle/m (=0.42 cycle/m×80km/h÷50km/h) である。このことから、共振を起こし修正動的荷重係数が大きくなったと考えられる。

以上より、修正動的荷重係数は、IRI が大きい路面ほど

大きく、さらには、走行速度が高くなるに従い大きくなることが分かった。したがって、通行車両の種別や交通量などの交通条件が同一の路線では、IRI が大きな路面ほど

表-1 計算プロファイル一覧

路線番号	1	2	3	4	5
IRI(mm/m)	0.54	0.71	0.99	1.41	1.74
路線番号	6	7	8	9	10
IRI(mm/m)	2.23	2.61	3.55	3.98	4.97

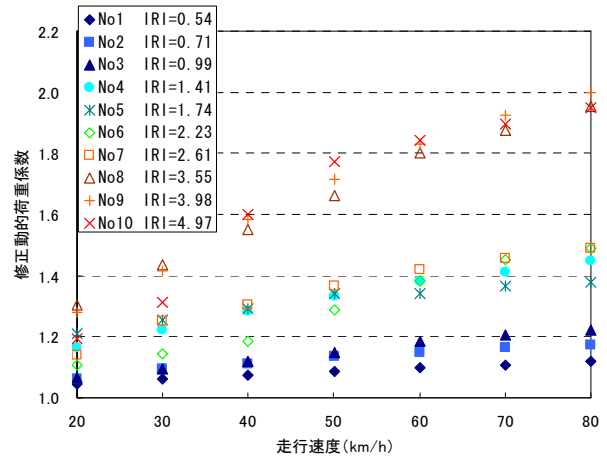


図-8 路面プロファイルと走行速度の影響

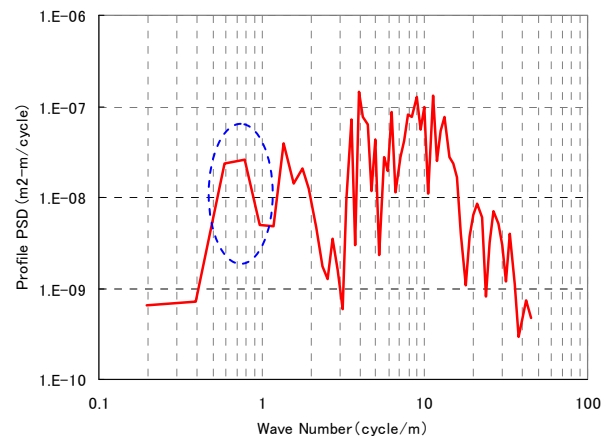


図-9 路線番号 6 (IRI=2.23) の路面プロファイルの PSD

修正動的荷重が大きく、舗装に与えるダメージが大きくなると考えられる。

## 5. 実路における路面プロファイルと舗装の構造的ダメージの関係

実路で測定された“路面のプロファイル”と“FWD の最大たわみ量 (以下、D<sub>0</sub>たわみ量)”を用いて、路面のプロファイルから舗装の構造的ダメージを推定できるかを検討した。以下に、検討の概要および検討結果を示す。

本論文では、舗装の構造的ダメージとして同一箇所の D<sub>0</sub> たわみ量の変化量を用いた。これは、本研究では舗装の損傷箇所の特性が目的でなく、“舗装全体としてのダメ

一じ度”を路面のプロファイルから推定することを目的としているためである。

(1) 検討の概要

ここでは、既知の路面のプロファイルデータから“修正動的荷重係数”を算出し、その経年変化と FWD の  $D_0$  たわみの変化との関係を求め、路面のプロファイルと舗装の構造的ダメージとに相関があるかを評価した。

検討で用いたデータは、アメリカ連邦道路局 (FHWA) で公開されている“LTPP Standard Data Release#24”に収められたアスファルト混合物層と粒状路盤で構成されている舗装 (GPS-1) の追跡調査結果である<sup>13)</sup>。その中から、アスファルト混合物層厚が異なる 3 路線を選定した。選定した路線の詳細を表-2 に示す。

各路線の調査の概要は、図-10 に示すとおりである<sup>19)</sup>。同図に示されるように、調査区間は延長 152.4m を 1 ユニットとしており、FWD は、OWP において 7.6m ピッチで測定されている。本研究では、一般にわが国では舗装の調査間隔が 20m 程度であることを踏まえ 22.8m (7.6m×3) を 1 区間として計算を行った。これを踏まえて、検討で用いる路面のプロファイルデータも、OWP において測定されたものとした。

各路線の修正動的荷重係数は、測定路面 (プロファイル) 上を QC モデルが走行したときの下パネの鉛直加速度の RMS を求め、その RMS の値を図-5 の関係式 ( $y=0.0284x+1$ ) に代入し修正動的荷重計数を算出した。なお、本検討で選定した 3 路線が全て高速走行可能な箇所であったことから、QC モデルの走行速度は全路線とも時速 80km とした。なお、 $D_0$  たわみ量は、AASHTO で提案されている「付録 L アスファルト舗装のたわみの温

度補正」に示されている補正方法を用いた<sup>20)</sup>。

また、構造的破壊の有無および箇所を確認するために、FWD 試験結果を用いて、アスファルトの弾性係数および路床の CBR を求めた。ただし、計算方法は道路保全センターの「活用しよう FWD」のたわみの式を用い計算を行った<sup>21)</sup>。

(2) 検討結果

各路線の“修正動的荷重係数と  $D_0$  たわみ量”の供用後の経年変化を、図-11 に示す。

図-11 より、3 路線ともに、“修正動的荷重係数の経年変化と  $D_0$  たわみ量”の経年変化の状況は同様の傾向を示していることが確認できる。

図-12 には、“修正動的荷重係数と  $D_0$  たわみ量”の関係を路線毎に示すが、3 路線ともに、相関係数 R は 0.66 以上であることが確認できた。

図-13 には FWD でのたわみ量測定結果から求めた各路線のアスファルトの弾性係数および CBR の推移を示す。この結果、R105 と R166 ではアスファルト層の弾性係数が低くなっていた。また I-19 では路床の CBR は年々小さくなっていることから、路床にダメージが与えられていることを示している。

このことから、路線によりダメージを受ける箇所は異なっていることが分かる。

以上より、一般に言われているように、 $D_0$  たわみ量はアスファルトの弾性係数、路床の CBR が小さいほど大きな値を示し、アスファルトの弾性係数、路床の CBR が大きいほど小さな値を示している。このことから、走行車両から与えられた動的荷重により、舗装が損傷を受けた場合、損傷を受けた層の弾性係数が小さくなるため  $D_0$  たわみ量は大きくなる。

このことから、 $D_0$  たわみ量の経年変化から、舗装のダメージ度の推定をすることが出来る。また、 $D_0$  たわみ量と修正動的荷重係数は同様の傾向を示し、相関があるこ

表-2 検討路線の概要

路線名	R105	R166	I-19
場所	テキサス州 Navasota	カリフォルニア州 Cuyama	アリゾナ州 Green Valley
舗装タイプ GPS-1 (アスファルト混合物+粒状路盤)			
As厚	46mm	99mm	254mm
路盤厚	409mm	381mm	170mm
供用開始	1985年7月	1989年2月	1979年6月

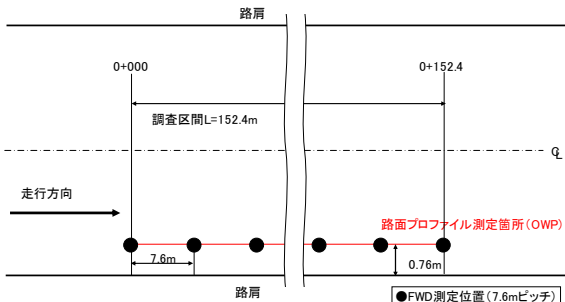


図-10 各路線の調査概要

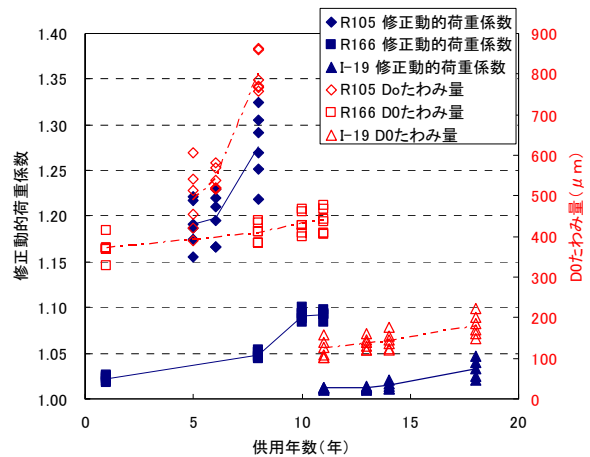


図-11 修正動的荷重係数と  $D_0$  たわみ量の経年変化

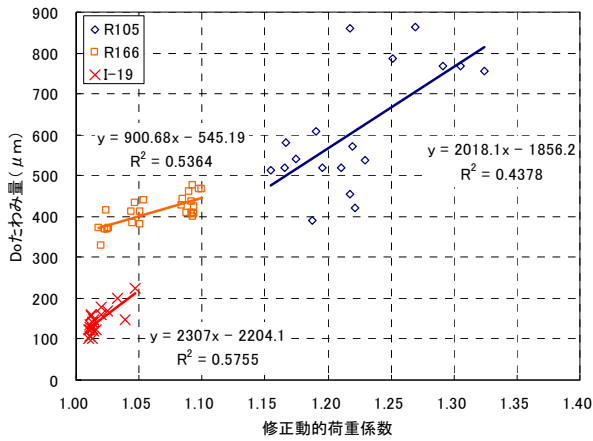


図-12 修正動的荷重係数とD<sub>0</sub>たわみ量

とが確認できたことから、修正動的荷重係数の経年の変化を調べることでD<sub>0</sub>たわみ量の経年変化と同様に舗装のダメージ度の推定が出来る。

## 6. まとめ

路面プロファイルから車両の動的荷重を算出することで、舗装に生ずる構造的ダメージ推定について検討した。

最初に、路面プロファイルから動的荷重を算出する方法を検討し、次に、この結果を用いて“路面のプロファイルと走行速度が動的荷重に与える影響”の理論的把握を行い、最後に、これらの検討結果を応用して、“路面プロファイル”と“動的荷重により舗装が受ける構造的ダメージ”の関係を、実道で測定されたデータを用いて検討した。

この結果、以下の知見が得られた。

- ① 下バネの鉛直方向の振動加速度を測定することで、走行車両の動的荷重を算出することが可能である。
- ② 動的荷重を軸重で除した“修正動的荷重係数”を用いることで、車両の種類に関係なく走行車両の動的荷重を推定することが可能となる。
- ③ 動的荷重は、路面のプロファイルと車両の走行速度に影響される。
- ④ 実道における測定データを用い、“修正動的荷重係数と舗装の構造的ダメージ”との関係を調べた結果、舗装構造のダメージの経年変化は、修正動的荷重係数の経年変化と相関があることが確認できた。

以上に示したとおり、路面のプロファイルから、動的荷重の評価指標として考案した“修正動的荷重係数”を算出し、その経年変化を把握することで、今まで困難であった舗装の構造的ダメージの変化予測が可能となった。

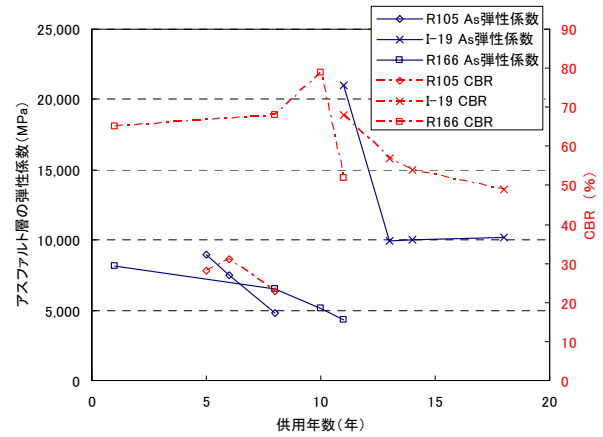


図-13 アスファルト弾性係数と路床のCBR値

また、修正動的荷重係数に、通過輪数と通過軸重を掛け合わせることで、通過した走行車両による舗装へのダメージが実際に近い形で推定することができると考える。このことから、修正動的荷重係数を用いることで比較的容易に路面のプロファイルを考慮した舗装の寿命予測を行える可能性があると考えられる。

## 参考文献

- 1) 財団法人道路保全技術センター道路構造物保全研究会、アスファルト舗装保全技術ハンドブック、2010年
- 2) Takahashi, Y.: A theory relating to road surface property and automotive vibration, Journal of JSAE of Japan, Vol.7, No.11-12, 1953.
- 3) Kawai, H. and Morisaki, K.: Power spectral analysis of road roughness and its effects on automobile vibration and riding comfort, Journal of JSAE, Vol.20, No.3, 1966.
- 4) Kaku, T. and Kawamura, A.: An investigation on road roughness and vehicle dynamics, Proc. Of the 14th Japan Road Conference, Tokyo, 1981.
- 5) Kasamura, A. and Kaku, T.: Some aspects on road roughness forms, Proc. of the 38th Annual Conference of JSCE, 1983.4.
- 6) Murakami, K. et al.: Analysis method of noise and vibration source contribution and application to motorcar, Journal of the JSAE, Vol.37, No.12, 1983.
- 7) Healey, A.J., Nathman, E. and Smith, C.C.: An analytical and experimental study of automotive dynamics with random roadway inputs, Transaction of the ASME, No.284, 1977.
- 8) Wambold, J.C.: Road roughness effects on vehicle dynamics, ASTM Special Technical Publication 884, University of Michigan Transportation Research Institute, 1983.
- 9) Ellis, J.R.: Vehicle Dynamics, London Business Book LTD., London, 1969.
- 10) Ogata, R.: 路面形状が車両挙動に及ぼす影響に関する1検討, Proc. of the 63th Annual Conference of JSCE, 2008.9.

- 11) Tomisawa, K.: 路面凹凸による車両走行時の動的荷重に注目したアスファルト舗装のダメージ解析, 北陸道路会議技術報文集, 2009.6.
- 12) United States Department of Transportation, Pavements, <http://www.fhwa.dot.gov/pavement/>, 2011年6月現在
- 13) iENGINEERING Corporation., LTPP Standard Data Release#24, <http://www.datapave.com>, 2011年6月現在
- 14) 舗装工学ライブラリー1 路面のプロファイリング入門, 社団法人土木学会
- 15) 小関裕二, 鈴木秀豊, 関口秀輔: 国際ラフネス指数 (IRI) について, アスファルト, pp.55-67, 2002.1.
- 16) Michael W. Sayers, 訳 笠原篤, 関口幹夫, 加藤昌太郎: 道路縦断プロファイルからの IRI の算出(上), 舗装 31-7, pp.21-27, 1996.
- 17) Michael W. Sayers, 訳 笠原篤, 関口幹夫, 加藤昌太郎: 道路縦断プロファイルからの IRI の算出 (下), 舗装 31-8, pp.12-17, 1996.
- 18) ISO, Mechanical vibration – Road surface profiles – Reporting of measured data, ISO8608, 1995.
- 19) Long-Term Pavement Performance Program Manual for Falling Weight Deflectometer MEASUREMENTS Ver4.1, U.S.Department of Transportation, 2006.12.
- 20) 舗装に関する AASHTO 指針 1896 年版, 財団法人セメント協会, 1990.1.
- 21) 活用しよう! FWD, 財団法人道路保全センター, 2005

## STUDY ON RELATIONSHIPS BETWEEN ROAD PROFILE AND STRUCTURAL DAMAGE OF THE PAVEMENT

Masakazu JOMOTO, Akira KAWAMURA, Kazuya TOMIYAMA and Kiyoshi TAKAHASHI

In general, “Vertical Vibration of passing vehicles” (induced by road profile) influences dynamic load of the vehicles. We assumed that the structural damage of the pavement was predictable if the relationships between a road profile and a dynamic load could be clear. To verify this assumption, we conducted several experiments. First of all, the method of calculating a dynamic load from the road profile was examined. Next, according to this result, the influence of the road profile and the transport speed of passing vehicles on a dynamic load was theoretically analyzed. Finally, the relationships between the structural damage of the pavement affected by the dynamic load and the road profile was examined associated with LTPP data. Based on these studies, it was confirmed that high correlation between “Modifying Coefficient of Dynamic Load” (developed as an evaluation index of the dynamic load) and the pavement deflection measured by the FWD. In this paper, it was concluded that the structural damage of the pavement could be simply obtained by the road profile data.