

車両振動加速度によるIRIと舗装の評価

こくぶん しゅういち てらだ まさる
 國分 修一* 寺田 剛**
 かさはら あつし
 笠原 篤***

路面凹凸によって車両が振動することは日常の運転経験から認知される場所である。国際ラフネス指数(IRI)を求める場合の「クラス3」にこのことを適用すれば、車両の振動加速度からIRIを求めることができ、IRIを媒介として舗装の供用状態を評価することができると思われる。本文では、路面プロファイルの計測とIRIの算出、車両の振動加速度計測を行い、別途計測された路面性状データなどからIRIの舗装供用性評価指標への適用を検討した。また、舗装のひび割れは微小振動の原因となるので、ひび割れの存在を示す振動加速度周波数帯を検討してひび割れ率との関係を求めた。

キーワード：IRI, 振動加速度, 路面性状, FFT解析, ひび割れ率, 舗装評価

はじめに

舗装は道路の表層部分にあって直接的に交通を支持する重要な社会資本であり、これを適切に維持管理することの是非は論をまたない。しかし、舗装の修繕計画策定システムである「舗装マネジメントシステム」^{1)~3)}が紹介されてから久しいが、我が国では「舗装マネジメントシステム」を構築して運用している例は少なく、舗装の供用性データさえも測定費用の点から持ち合わせていない自治体も多い。また、舗装供用性データについては、世界銀行が道路の供用状態を評価するために開発した国際ラフネス指数(IRI)^{4)~6)}が紹介されてからすでに20年近くにもなることも事実である。

以上の現状を考えた場合、舗装の供用性状把握法の選択肢を広げることは重要であると思われ、「高精度・高価格」での供用性状把握法の対極に「準高精度・低価格」での把握法を確立することは非常に意味あるものと考えられる。

本文は、IRIに着目し、これが経済的で実務的な舗装の供用性評価指標となり得るかどうかについて検討した結果を報告するものである。

1. IRIの求め方に関する考察

IRIは路面凹凸による車両の上下方向の運動をモデル化して定義され、具体的には以下に示すクラス1~クラス4によって求めるものとされている。こ

の中で、効率的にIRIを求めるにはクラス2およびクラス3の適用が考えられるが、それらには幾つかの方法があつて、計測原理や構成機器の違いによって精度と価格が異なってくるので、クラス2がクラス3より必ずしも有利であるとは限らない。また、これまでのところ、世界中で収集されたラフネスデータの大半はクラス3によるもの⁷⁾であることを考慮すれば、「準高精度・低価格」の実現可能性はクラス3による方が大きいと思われた。

- ・クラス1：間隔25 cm以下の水準測量で舗装のプロファイル(高さ)を測定し、QCシミュレーションによりIRIを求める。
- ・クラス2：任意の測定装置で舗装のプロファイルを測定し、クラス1と同様なシミュレーションによってIRIを求める。
- ・クラス3：レスポンス型路面凹凸測定システム(RTRRMS)で任意尺度の路面凹凸指数を測定し、IRIが既知の路面での指数と比較して相関式によりIRIに変換して求める。
- ・クラス4：パトロールカーに乗車した調査員の体感や目視によりIRIを推測する。

2. IRIによる舗装評価に関する実験

2-1 実験概要

2-1-1 実験の目的と内容

IRIの舗装供用性評価指標への適用を検討するには、IRIの求め方によって生ずる差や我が国でこれまでに実績のある舗装の維持管理指数(MCI)との比較などを行ってIRIの精度、適用範囲などを知

*開発虎ノ門コンサルタント(株) 社会システム事業部長 博士(工学)
 ** (独)土木研究所 舗装チーム 主任研究員 博士(工学)
 ***北海道工業大学 社会基盤工学科 教授 工博

り、評価指標としての能力を判定する必要がある。このため、実験は IRI を取得するための方法を検討して評価する基礎実験とその結果を補足して信頼性を補強する実証化実験に分けることにした。表-1 に実験の目的と内容を示す。

(独)土木研究所内の舗装走行実験場(大ループ、 $L \approx 870$ m)を利用した実験 A は、IRI の適用性を確認する基礎実験で、水準測量で求める路面高さとして IRI を基準とし、クラス 2 に分類される各方法の路面高さとして IRI の検証、クラス 3 における車両振動加速度の発生位置と程度の比較、路面性状値と IRI の相関分析などを 2 ヶ年にわたって行った。実証化実験の実験 B～実験 D は、基礎実験におけるクラス 3 が有効であるとの結果から車両振動加速度の計測を主体としてデータの追補を行った。

2-1-2 計測位置と計測車両

各実験におけるプロファイル計測位置と計測車両の走行位置は OWP(outer wheel path)とし、実験 A ではマーキングを施して正確を期し、実証化実験では舗装の横断凹凸やラインの消え具合より目視により決定するものとした。

クラス 3 に用いる計測車両は、加速度計をエンジンの影響を避けるように左側後輪に設置することにし、基礎実験では制振装置上下と下側のみ、実証化実験では制振装置下側のみとした。なお、計測車両の振動には速度とタイヤ空気圧などが影響を及ぼす

のでタイヤ空気圧は一定、速度は変化させてデータを取得し、また、基礎実験と実証化実験では車両を変えてデータを取得した。さらに、計測車両は加速度データに同期するように走行前方画像や計測位置路面画像、車速パルス、GPS 信号などを取得するものとした。

2-1-3 IRI の算出、取得、推定

クラス 1 およびクラス 2 の(a)、(b)においては、25 cm ごとの路面高さから「RoadRuf」「ProVAL」により IRI を求めた。クラス 2 (c)は、計測を外部委託して路面高さとして IRI の成果を取得した。クラス 3 においては、IRI が既知となった路面上に計測車両を走行させ、振動加速度と IRI の相関を求めたうえで IRI を推定するものとした。

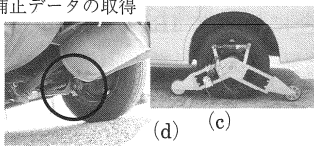
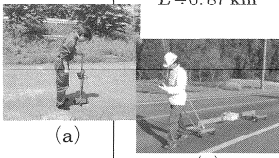
2-2 基礎実験の結果と考察

2-2-1 プロファイルの計測に関する検討

写真-1 に実験 A の平面航空写真を、図-2 に実験 A におけるクラス 1 とクラス 2 のプロファイル測定結果を示す。プロファイルは始点から測定を開始して大ループ上を周回するものとし、クラス 1 の水準測量では 10 m 間隔を基本として、途中で 25 cm 間隔で測量する 100 m 区間を 2 区間設けて、クラス 2 との検証区間とした。

今回得られた結果では、クラス 2 の(a)と(b)は周回すると誤差が累積され、始点に戻った時点では水準測量結果と約 30 cm および 70 cm の差が認めら

表-1 実験の目的と内容

実験番号	実験目的	調査・試験法	実験場所
基礎実験 実験 A	<ul style="list-style-type: none"> IRI を求める各種試験法の結果比較 クラス 3 による IRI と路面性状および MCI の比較 FFT 解析によるひび割れ率の推定 速度補正データの取得 	クラス 1 : ・水準測量 クラス 2 : ・(a)ディップスティック ・(b)レーザー式プロファイラ ・(c)3連式プロファイラ クラス 3 : ・(d)車両振動加速度 (設置位置; 制振装置上下) (設置位置; 制振装置下)	(独)土木研究所 舗装走行実験場 $L \approx 0.87$ km 
実証化実験 実験 B	<ul style="list-style-type: none"> クラス 3 とクラス 2 による IRI の比較 クラス 3 による IRI と路面性状および MCI の比較 FFT 解析によるひび割れ率の推定 計測車両 2 台(A 車, B 車)の傾向比較 	クラス 2 : ・レーザー式プロファイラ クラス 3 : ・車両振動加速度 (設置位置; 制振装置下)	千葉県道 1 路線 $L \approx 7.7$ km
実証化実験 実験 C	<ul style="list-style-type: none"> クラス 3 とクラス 2 による IRI の比較データ追補 速度補正のデータ追補 	クラス 2 : ・レーザー式プロファイラ クラス 3 : ・車両振動加速度 (設置位置; 制振装置下)	山梨県道 1 路線 $L \approx 5.5$ km
実証化実験 実験 D	<ul style="list-style-type: none"> クラス 3 による IRI と路面性状および MCI の比較データ追補 	クラス 3 : ・車両振動加速度 (設置位置; 制振装置下)	神奈川県道 1 路線 $L \approx 7.0$ km

(注)表中、クラス 2 およびクラス 3 の(a)～(d)は、それぞれ写真(a)～(d)に示すものである。



写真-1 (独)土木研究所における実験Aの平面(google)より

れた。しかし、誤差は始点からの直線部では認められずループのバンク部から累積していること、測定器の長さが3 mと長い(b)において誤差が大きいこと、累積誤差部を除けば(a)、(b)ともに水準測量結果と同じ縦断形状を示していること、(a)と(b)は細部においても同様なプロファイルを取得していることが明らかであり、これらの結果、誤差の原因はバンク部の不規則な合成勾配が試験機のジャイロなどに影響したものと推定され、累積誤差の影響を除けば(a)と(b)の計測精度は良いものと判断された。

また、累積誤差の影響を消去してこれらの測定精度を確認するために(a)と(b)の測定結果を10 m 間隔の水準測量結果に補正して(補正した例として(a)の測定結果について水準測量結果の上に併せて示している)25 cm 間隔の検証区間の水準測量結果と比較した結果では、それぞれの区間において補正後の結果は水準測量結果と極めて良く一致することとなり、極端なバンクなどが存在しない一般道への適用では(a)と(b)の測定精度は極めて高いと考えられた。

一方、クラス2の(c)は、計測を委託したものでプロファイルの計測機構や IRI の算出機構の詳細は明らかでないが、計測結果は水準測量結果と著しく異なったプロファイルになること、路面高が100 m ごとに0に戻っていること、速度依存性が大きいことなどが特徴的であった。

これらの結果より判断すると、(c)はプロファイルを計測しているとは言い難く、IRI を求める場合のクラス2に分類されると言い難いと思われた。もし、この方法で適切に IRI が算出されるのであれば、(c)はむしろクラス3の範疇に属すると考えるのが妥当である。

いずれにしろ、基礎実験の結果は IRI 算出における道路の縦断線形などの長周期凹凸の影響を明らかにして IRI の算出特性を把握する必要があることを示すものであった。

2-2-2 IRI の算出特性に関する検討

IRI の算出特性を検討するために、クラス2の(a)の測定結果をそのまま用いた場合、(a)の測定結果を水準測量結果で補正した場合、正弦波で長周期波を再現し、その周期長、振幅、傾きを変化させて(a)の測定結果を合成した場合について IRI を算出し、路面凹凸の波長等が算出結果に及ぼす影響を調べた。図-2 の上図に(a)の測定結果、水準測量結果で補正した結果、正弦波と合成した結果の例を示す。

図-3 は、水準測量結果で補正したプロファイルによって算出した IRI を基準(横軸)とし、図-2 に示した正弦波の周期を20~400 m の6水準に変化させて IRI を計算した結果を示したものである。図-3 より、波長が20 m と短い場合には、波長が長い場合に比べて IRI が著しく大きく算出され、波長

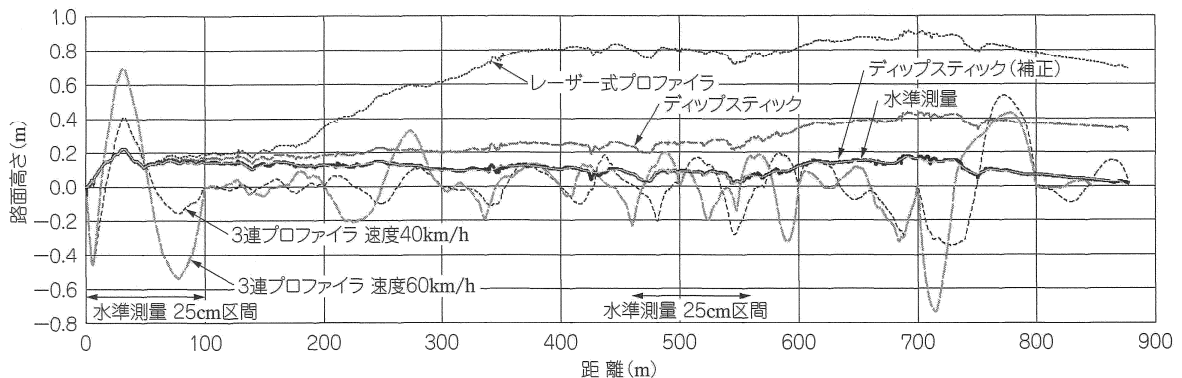


図-1 実験Aにおけるプロファイル測定結果

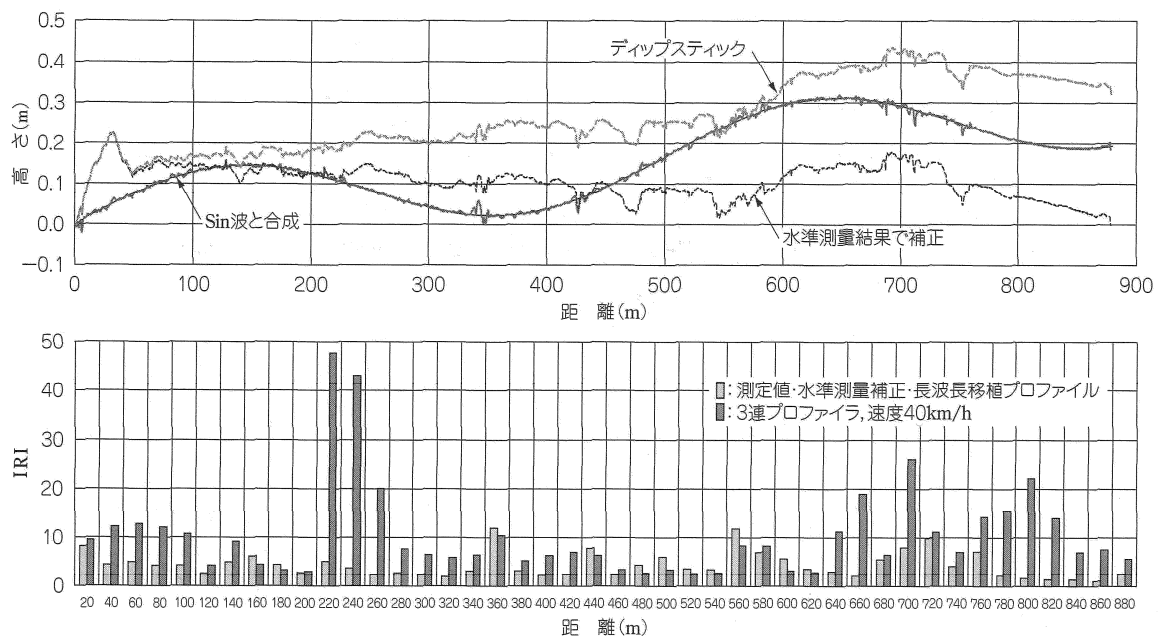


図-2 計測値の合成例と IRI の計算および測定結果

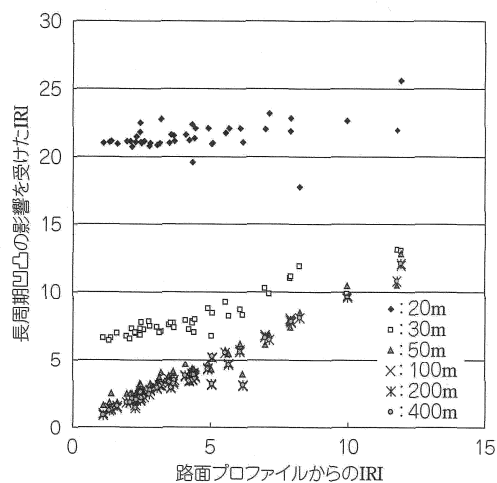


図-3 長周期が IRI に及ぼす影響

が50~100 m 以上になると波長の差はほとんどなくなって IRI 算出における長周期凹凸の影響はほとんど無いと判断されるようになった。

また、図-2 の上図に1例を示した長周期正弦波の振幅を0.5 mと1.0 mの2水準、傾きを0.3m, 0.5 mと1.0 mの3水準に変化させた場合では、振幅の影響は波長が短い場合には大きくなるが、波長が50~100 m程度になるとほとんど影響がないこと、傾きの影響は波長に関係なくいずれの場合も IRI の算出に影響を及ぼさないことが分かった。

さらに、ディップスティックの測定結果(a)をそのまま用いた場合、水準測量結果で補正した場合、

波長を100mとして正弦波の振幅や傾きを変化させた場合において算出した IRI はいずれも差がない結果となり、路面の100 m以上の長周期凹凸は IRI 算出に影響を及ぼさないことが明らかとなった。

これらのことより、クラス2の(a), (b)における計測では、100 m程度区間の路面損傷などの短周期凹凸が正確に計測されていれば十分で、IRI の算出においては100 mを超える長周期路面凹凸の影響を特に意識する必要がないと結論された。

一方、(c)の IRI は、前述のように算出機構は明らかではないが、図-2の下図に示すように(a)の計測値の場合、水準測量結果で補正した場合、正弦波と合成した場合に計算される結果と大きく異なり、プロフィールの計測および IRI の算出とも大幅な改善のあることが分かった。

2-2-3 クラス3の計測に関する検討

車両の振動加速度を用いたクラス3に関する実験では、路面凹凸が大きい箇所や IRI が大きい箇所に一致して振動加速度が大きくなるか否かが、最も関心のあるところである。図-4は、その結果を示したもので、実験Aのプロファイルとそのプロファイルに対して算出した20 mごとの IRI およびその上を走行した車両の制振装置上下の振動加速度を示したものである。

図-4より、IRIは舗装のプロファイルが急激に変化する箇所で大きくなり、振動加速度もこの急激

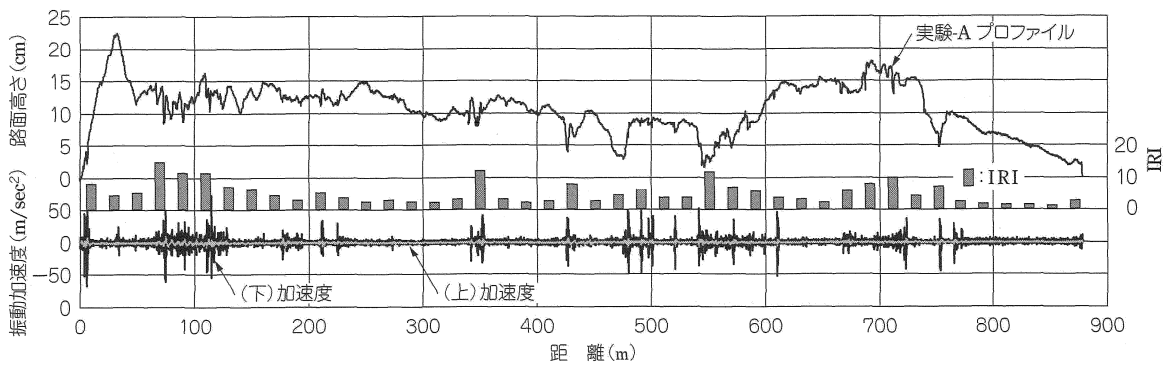


図-4 振動加速度の測定例

な変化箇所で大きくなっていることが明らかに分かる。また、車両の振動加速度は制振装置下側で大きく、上側はかなり小さいことも分かる。これは、車両の振動加速度で路面の凹凸を評価することが可能であることを実証しており、そのためのデータは、制振装置が下側の振動を上側に伝えないように設計されることを考慮すれば、また、制振装置下側の振動加速度が路面凹凸に対して感度が良いことを考えるならば、IRIを求めるクォーターカーモデルがばね上の振動を考慮しているといっても、ばね下側のみの振動加速度計測で十分であると思われる。

次に、振動加速度とIRIの相関については、IRIを求めた距離と同じ距離で加速度データをまとめる必要があることから、車速パルスをもとにしてIRIと同じ距離分のデータを切り取り、式(1)に示す実効値との相関を検討することにした。図-5はその下側振動加速度信号の実効値(V_{rms})とIRIの関係を示したもので、車両の走行速度と計測車両を変えて制振装置下側の V_{rms} とIRIの関係を検討した結果である。

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt} \quad (1)$$

ここで、

V_{rms} ：下側振動加速度信号の実効値

T ：平均時間

$V(t)$ ：交流信号の瞬時値

図-5は、明らかに、速度40~60 km/hの範囲で V_{rms} とIRIに決定係数が0.53~0.64(相関係数=0.72~0.80)程度の強い相関があることを示しており、これにより、制振装置下側に加速度計を装着したクラス3で効率的(安価)にIRIを求めることが可能であることが示されている。

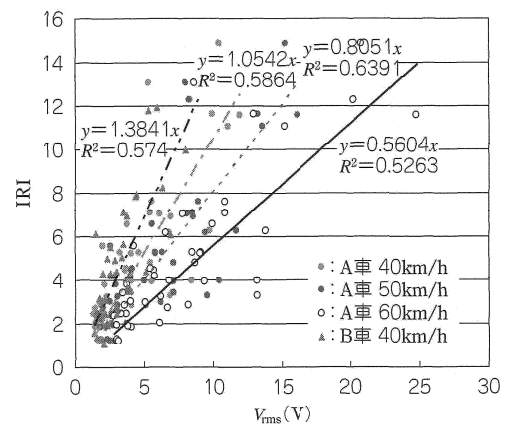


図-5 V_{rms} とIRIの関係

しかし、同じ路面でも速度によって振動加速度は大きく異なり、速度が大きくなるほど V_{rms} も大きくなっていること、車両が異なれば同じ速度で同じ路面を走行しても V_{rms} はかなり異なった結果になることも示されており、車両やタイヤ規格の固定化も必要であることが分かった。さらに、IRIはまとめる距離によって異なり、道路種別(車両の利用速度)に応じて推奨されるIRIの範囲も異なることが示されており、これらに関して明確なデータが得られた意味は大きい。

2-3 実証化実験の結果と考察

2-3-1 振動加速度の速度変化補正についてのデータ補強

振動加速度を用いるクラス3においては速度に応じて加速度の大きさを補正することがきわめて重要である。このため、広範囲の基礎資料を得る目的で、およそ20 km/h~自動車専用道路の実勢速度の範囲で速度補正データを収集することにした。

図-6は、その結果をまとめたもので、速度と V_{rms} においては相関係数=0.96のきわめて強い相関

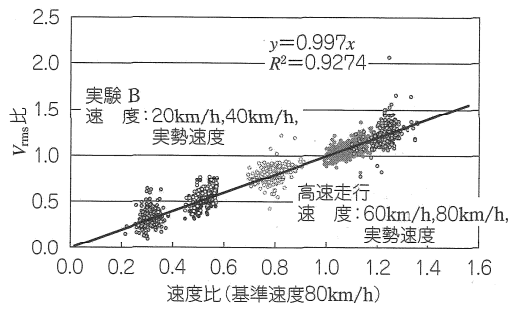


図-6 速度変化が振動加速度に及ぼす影響

を有する関係式を得た。また、相関式は速度が0 km/hで V_{rms} が0の線形となっており、実務的には交差点における停止寸前のデータから高速走行までのデータに補正が可能な資料となった。

2-3-2 クラス3におけるIRIの推定についてのデータ補強

振動加速度を用いたクラス3によるIRIの推定について、さらにデータを補強して普遍性を持たせるために、実験Bおよび実験Cにおいてクラス2の(b)によって当該路線のIRIを求めて V_{rms} (制振装置下側)との相関を求めた。

図-7は実験Aを含めて結果を示すものであり、速度補正を行った V_{rms} とIRIには相関係数 ≈ 0.75 程度の強い相関があることが確認された。また、両者が用いるデータ密度から図-7のデータ変動要因を考えると、IRIは25cm間隔の路面プロファイルから計算されるのに対し、 V_{rms} は速度に応じて2~5kHzでデータを採取して約0.5cmごとの振動データを計測しているため、両者の距離差 ≈ 24.5 cmに存在する路面凹凸如何によって V_{rms} が影響を受けることが挙げられる。

しかし、このデータ密度の濃さが V_{rms} の路面実態を表現する能力として評価されるべきとも考える。

3. 振動加速度によるIRIと舗装の評価

MCIは、舗装の供用状態やパフォーマンスを評価する指標として使用できるよう、舗装の劣化3要素(ひび割れ率、わだち掘れ量、平坦性)に関する直轄国道データを重回帰分析して作られている。本章では、地方道の実験Bと実験Dにおいて、振動加速度によるIRIと別途測定されている路面性状データ(MCI含む)を比較、検討し、IRIの舗装供用性状評価指標としての能力を検討した。

図-8,9は、舗装の劣化3要素とMCIおよびIRI

舗装 45-9 (2010年)

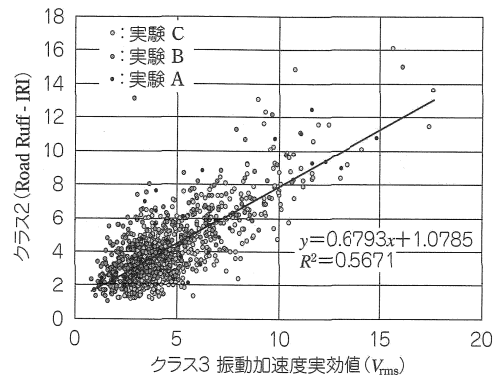


図-7 V_{rms} とIRIの関係

の関係を示したものである。図に示す実験Bと実験Dの範囲では、3要素とMCIの相関の強さは、ひび割れ率>わだち掘れ量>平坦性、となって相関係数はそれぞれ0.81, 0.67, 0.49程度であり、IRIと3要素との相関の強さは、平坦性>ひび割れ率>わだち掘れ量、となって相関係数はそれぞれ

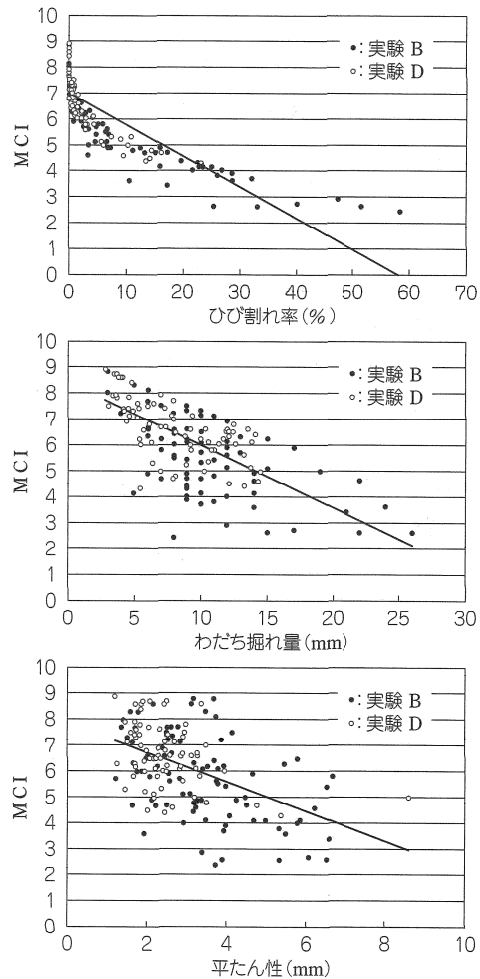


図-8 劣化3要素とMCIの関係

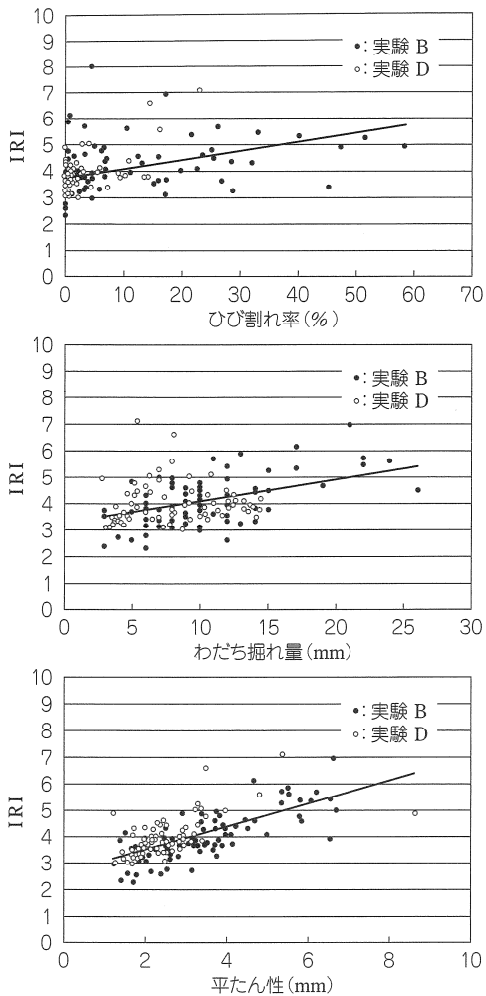


図-9 劣化3要素とIRIの関係

0.67, 0.44, 0.42程度であった。

これより振動加速度によるIRIの舗装評価能力を判断すると、影響因子の順序はMCIの場合と異なるものの、ひび割れ率の検知能力を向上させればMCIの場合に比べて著しく劣ることもなく、振動加速度が路面凹凸の変化が大きい箇所に敏感に反応

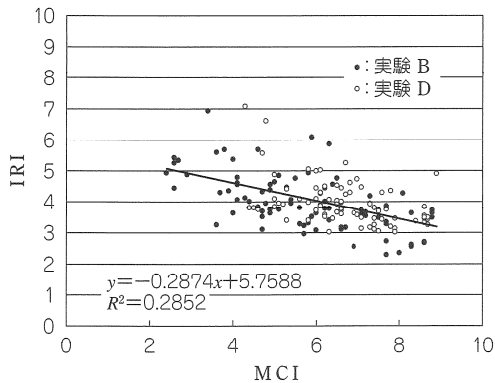


図-10 IRIとMCIの関係

すること(図-4)を考えれば、全体的に舗装厚が小さく損傷が凹凸として現れやすい、地方自治体が管理する道路舗装では、供用状態やパフォーマンスを評価する指標として十分機能するものと思われた。

また、図-10には振動加速度より推定したIRIとMCIの関係を示すが、相関係数は0.54程度と中程度の強さであり、IRIは原因が何であれ路面凹凸の大きさ(損傷のほかに構造物部との段差、施工ジョイント、踏切などを含む)に支配されることを考えれば、両者の間には良い相関があると判断できる。

また、データの蓄積により両者の相関は一層信頼性のあるデータになるものと思われる。

4. 周波数分析によるひび割れ率の推定

舗装に生ずるひび割れは、舗装の強さと交通荷重および経過時間によって支配され、車両の振動に大小の影響を及ぼすものと考えられる。

本文では振動加速度データを計測しているの、これを有効に活用してひび割れの存在を示す周波数帯を検討すれば、IRIと舗装ひび割れ率の関係(中程度の低いレベルの相関)を補うことが可能であると考えられる。

図-11は、実験Aと実験Bにおける振動加速度の周波数分析例である。図-11の上段は実験Bにお

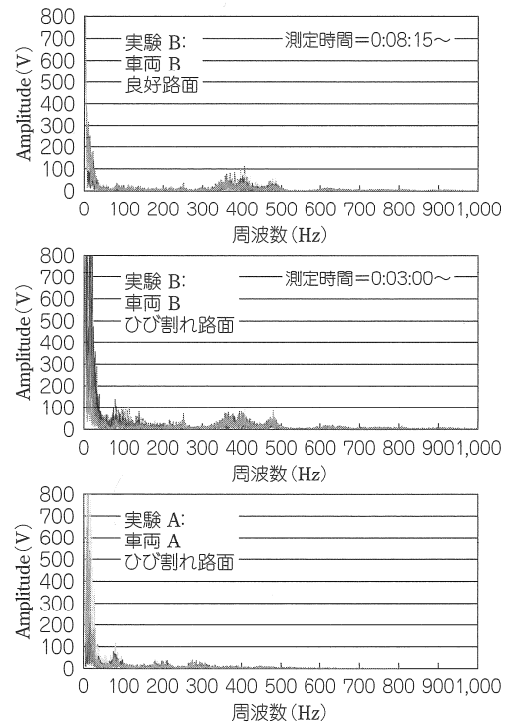


図-11 振動加速度の周波数分析の例

る良好路面の結果であり、円滑に車両が進行することから400~500Hzの特微的な部分を除くと振動レベルはどの周波数帯でも小さい。しかし、図-11の中段のひび割れ路面では80~100Hz付近の周波数帯で振動レベルが大きくなっており、これは図-11の下段の実験Aにおけるひびわれ路面においても同様であることが分かる。さらに、実験Bでの400~500Hz付近の特微的な周波数帯は実験Aでは認められず、この部分については車両の差に起因していることが明らかである。

これらより、また他の路面状況と周波数分析結果の観察より、ひび割れの存在を示す周波数帯を80~100Hzと定義してその周波数帯の大きさの平均値と舗装のひび割れ率の関係を検討した。その結果を図-12に示す。

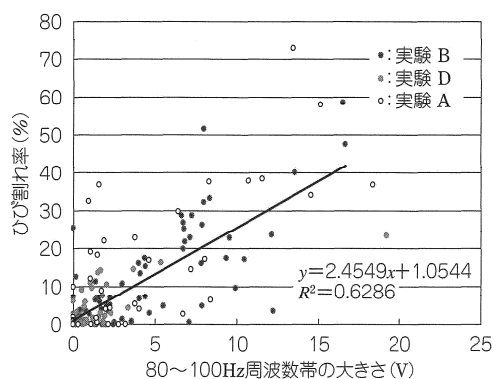


図-12 振動加速度のFFT(fast Fourier transform)解析とひび割れ率

図-12は舗装にひび割れがない場合でも走行によって車両には振動が生ずることを考慮して閾値を設定し、80~100Hz周波数帯の大きさと舗装のひび割れ率の関係をみたものである。実験B、実験Dには施工ジョイントやマンホール、踏切などがあるにもかかわらず、実験Aの結果を含めた結果では、80~100Hz周波数帯の大きさと舗装のひび割れ率に0.89の強い相関関係を見いだすことができた。

また、データ解析上で疑義のある箇所については、計測車両の前方画像や計測位置路面画像によって確認、除去することが可能である。これより、振動加速度の計測によってIRIとひび割れ率の双方が推

計可能になり、「準高精度・低価格」の舗装供用性評価が実現できることになった。

おわりに

本文における検討の結果、振動加速度を用いた方法は走行速度の補正などを施すことによって効率的にIRIを取得することが可能であること、振動加速度を周波数分析することにより舗装のひび割れ率を推定できること、これらにより路面性状調査における舗装のひび割れ率、わだち掘れ、平坦性、MCIと相関を持たせることが可能であることが分かった。

また、この方法が「準高精度・低価格」の舗装評価指標を準備し、地方自治体が管理する道路において実務的で効果的に利用できることが分かった。

最後に、本文に示したデータの使用を快諾くださった千葉県、山梨県、神奈川県の関係者の皆様ならびに関係会社の皆様に心より感謝申しあげる次第です。

問い合わせ先

〒170-0005 東京都豊島区南大塚3-20-6
開発虎ノ門コンサルタント(株) 社会システム事業部
國分 修一
TEL: 03-3985-5101 FAX: 03-3985-7812
E-mail: kokubun@kckk.co.jp

【参考文献】

- 1) R. ハース・W.R. ハドソン; 舗装マネジメントシステム(北海道土木技術会 舗装研究委員会訳) (1989)
- 2) 北海道土木技術会舗装研究委員会; 舗装マネジメントシステム(PMS)入門(1992.5)
- 3) R. ハース・W.R. ハドソン・J. ザニュースキー; 最新舗装マネジメント(北海道土木技術会舗装研究委員会訳) (2000.6)
- 4) 笠原 篤・加藤昌太郎; 国際ラフネス指数, 舗装, Vol.26, pp.24~25(1991.7)
- 5) マイケル W. セヤーズ(笠原 篤・関口幹夫・加藤昌太郎訳); 道路縦断プロファイルからのIRIの算出(上), 舗装, Vol.31, pp.21~27(1996.7)
- 6) マイケル W. セヤーズ(笠原 篤・関口幹夫・加藤昌太郎訳); 道路縦断プロファイルからのIRIの算出(下), 舗装, Vol.31, pp.12~17(1996.8)
- 7) Michael W. Sayers. Steven M. Karamihis; The Little Book of Profiling, University of Michigan (September, 1998)