

IV-9 路面のすべり抵抗測定値と国際フリクションインデックス(IFI)の関係

日邦産業(株) 正員 安部 裕也
 室蘭工業大学 正員 斎藤 和夫
 北海道工業大学 正員 笠原 篤
 ペンシルベニア州立大学 John J. HENRY

1. はじめに

路面のすべり抵抗は車両の安全走行にとって重要な要因であることから、道路の幾何構造や飛行場の滑走路の設計における基本的な要素の一つであり、また舗装路面管理上においても配慮すべき重要な要素である。道路の路面および滑走路面はその上を走行する車輪に対して十分な摩擦およびすべり抵抗(friction and skid resistance)が確保されなければならない。路面のすべり抵抗やテクスチャーを測定する方法や装置は、国によって大きく異なっている。このため、各国で測定された値を直接比較することが困難であり、国際的に統一した舗装マネジメント方法の確立を困難にしている。

そこで、世界道路協会(PIARC)の路面特性に関する技術委員会(TC 1)は、世界中の国々で測定された結果を比較する手段を開発する国際実験を企画した[1]。この実験は過去の多くの実験と異なり、単に測定値を比較するだけでなく、基準化(harmonization)を目的としてしている。基準化とはそれぞれの装置が測定した値を共通のスケール上の値(common value)として報告できる方法を提供することである。

路面の摩擦測定装置間でデータを相関させる試みはこれまで多く行われてきた。その結果は特に試験路面が類似したタイプの場合に良好な相関を示したが、一般的な相関は得られていないのが現状である。車輪ロック(locked-wheel)方式、スリップ(slip)方式、およびサイドフォース(side force)方式のような異なる測定方法

で得られたすべり抵抗測定データを相関させるためには、路面のテクスチャーに関する情報が必要である[2, 3]。国際実験の分析においては、路面のテクスチャー特性を組込んだモデルを利用して摩擦測定データを分析し、そしてそれぞれの装置の測定値を共通のスケールに変換した摩擦係数を報告できるモデルを開発することにより、装置の基準化を行う方法を提案した。この共通したスケールを国際フリクションインデックス(International Friction Index; IFI)と呼んでいる。

本論文では、国際共同実験に日本から参加したDFテスターによるすべり抵抗測定値とIFIの関係を明かにする分析の結果を示す。さらにこれらの結果を舗装路面のマネジメントに応用する方法を示す。

2. DFテスターと測定手順

DFテスターは水平に回転する円盤にタイヤゴムのスライダを3個取り付け、これを一定の荷重Wを加えて回転させ、この時にタイヤゴムの線速度V(円盤の回転速度)における摩擦力Fを測定するもので、摩擦係数 μ は次式から求める[4]。

$$\mu = F/W \quad (1)$$

測定装置は図-1に示す本体とコントロールユニットおよびX-Yレコーダーからなる。

DFテスターの測定手順を図-2に示す。最

Skid Resistance Measurements by DF Tester and Its Relation to IFI

by Hironari ABE, Kazuo SAITO, Atsushi KASAHARA and J.J.HENRY

初に、路面にスライダを接触させないで円盤を回転させる。回転が所定の速度（最大約90km/h）に達した時点で回転円盤を下降させてスライダを測定路面に接触させると、円盤の回転速度は路面とスライダの間の摩擦によるエネルギー損失により低下していき、最後の回転が停止し速度がゼロとなる。

摩擦力Fの変化はスプリングバランスの変位を電気エネルギーとして検出し、(1)式から得られた摩擦係数を縦軸に、速度ダイナモメータから検出された速度を横軸にしてX-Yレコーダに記録させる。この図の特徴はチャートの右側から記録が開始されて、速度の低下とともに摩擦係数の変化を左側へ記録し、最後につ速度ゼロ時点で測定が終了する。また、コンピュータによる記録のモニター画面出力もできる。

DFテスターの最大の特徴はこの図に示されているように、1回の測定で摩擦係数を連続的に測定できることである。この結果、摩擦係数と速度の変化を同時に測定することにより、すべり抵抗と速度の関係（すべり抵抗の速度依存性）を容易に把握できる唯一の測定装置であり[4,5]、現在ASTMで規格化が検討されている。

3. PIARCモデルとIFI

3.1 PIARCモデル

すべり抵抗の速度依存性を初めてモデル化したものに Penn State Modelがある[6]。このモデルは次式で表される。

$$F(S) = F_0 e^{-\frac{S}{V_0}} \quad (2)$$

ここで、F(S)=スリップ速度Sにおける摩擦係数

F₀=速度0における切片

S =試験タイヤのスリップ速度

F₀とV₀は測定装置に対する路面の特性値で、テクスチャーに関係する。国際共同実験結果の解析において、この Penn State モデルを修正して、すべり抵抗値 F(S) とスリップ速度Sの関係を表す次式の PIARC モデルを提案した。

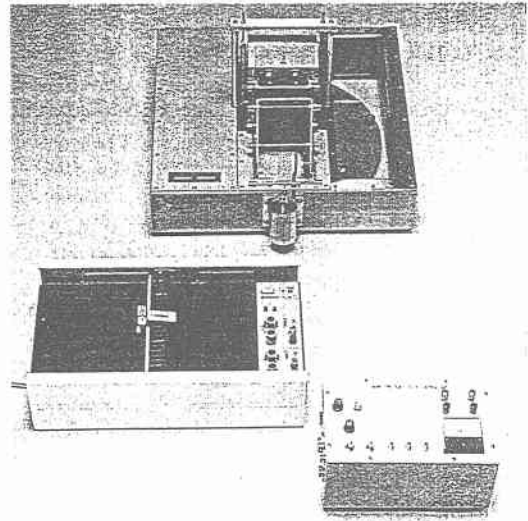


図-1 DFテスター測定装置

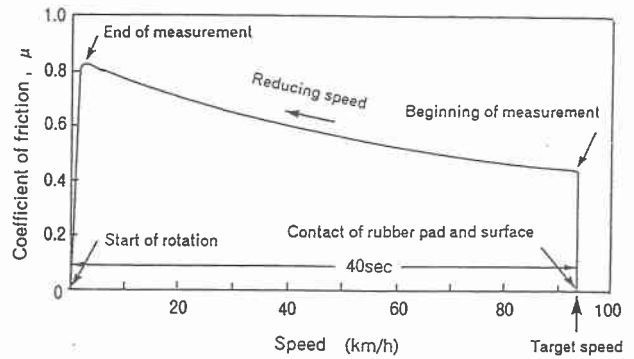


図-2 DFテスターの測定手順

$$F(S) = F_{60} e^{-\frac{60-S}{S_p}} \quad (3)$$

ここで、F(S)=スリップ速度Sにおける摩擦係数

F₆₀=速度60km/hにおける真の摩擦係数
(ゴールデン値)の推定値

S_p =ゴールデン曲線の速度定数

S =スリップ速度

この式で、スリップ速度は測定方法により次のように計算する。

車輪ロック方式 : S = V (試験車の速度)

スリップ方式 : S = V · スリップ率(%)/100

サイドフォース方式 : S = V · sin α (α = サイド
スリップ角度)

この PIARCモデルが Penn State モデルと異なるのは、任意の速度で測定した摩擦値(FRS)を速度60km/hの値(FR60)に調整するのに、次式で示されるように速度ナンバー Sp(Penn State モデルのVoと同じ)を使用することである。

$$FR60 = FRS e^{\frac{S-60}{S_p}} \quad (4)$$

このFR60は測定方法や装置によって異なる値であるので、これを路面の60km/hにおける真の摩擦係数(いかなる測定方法によっても同じ値になる)に変換することが必要である。しかし対象路面の真の摩擦-速度関係(Friction-Slip Speed Relation:これをゴールデン曲線と呼ぶ)は得られないので、このモデルはそれを推定する曲線であり、F60はこのゴールデン曲線上のスリップ速度60km/hにおける真の摩擦の値(ゴールデン値)の推定値を表す。PIARC モデルの有意義な特徴は、装置による摩擦測定を規定の速度で行う必要がなく、スリップ速度Sがわかればモデルを適用できることである。

3.2 国際フリクションインデックス(IFI)

(3)式のPIARCモデルは真の摩擦-スリップ速度関係を規定するゴールデン曲線のパラメータであるゴールデン速度定数(Sp)の推定値と60km/hにおけるゴールデン摩擦の推定値(F60)を計算するのに使用する。これらの2つの指標が推定されれば、任意の装置による任意のスリップ速度で測定されたすべり抵抗値(FRS)を共通のスケール(ゴールデン曲線)上の値に変換することができるので、この指標を国際フリクションインデックス(International Friction Index)IFI(F60, Sp)とする。この場合、F60を摩擦定数(friction number)、Spを速度定数(speed number)と呼ぶ。

このIFI値が報告されると、任意のスリップ速度(S)におけるゴールデン摩擦値の推定値 F(S)を(3)式から計算することができる。すなわち、120km/hにおける F(S)を知りたいければ、単純に(3)式のSに120を代入すればよい。

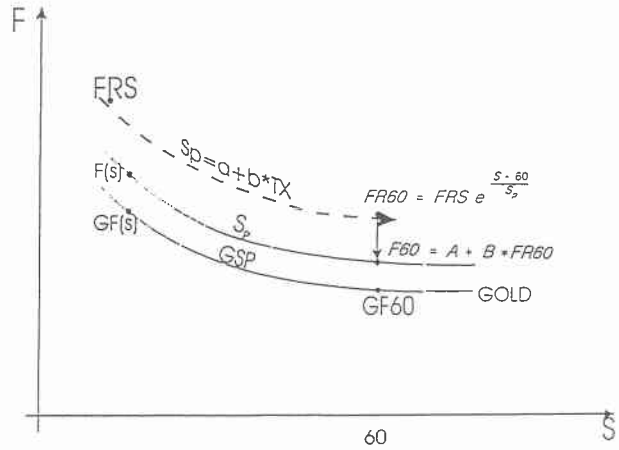


図-3 PIARCモデルの適用手順

3.3 IFIの推定方法

PIARCモデルの適用手順を図式的に示すと図-3のようになる。この手順を数学的に示すと

1. 最初に、テクスチャーの測定値から、次式より速度定数 Sp を計算する。

$$S_p = a + b * TX \quad (5)$$

ここで、aとbは使用したテクスチャー測定装置に固有の定数、TXはテクスチャー指標である。

2. スリップ速度Sにおける摩擦測定値 FRSを(4)式により60km/hの測定値 (FR60)に変換する。
3. ゴールデン値の推定値 (F60)を次式から計算する。

$$F60 = A + B * FR60 \quad (6)$$

ここで、AとBは該当する摩擦測定装置に固有の定数である。これらの式におけるaとbおよびAとBは国際共同実験から参加装置に対して求めることができる。その際の基準値として、試験道路区間(ベルギー28箇所とスペイン26箇所)の真の摩擦値と速度定数として表-1のゴールデン値を用いることとしている(算出方法は省略)。

4. DFテスターによるIFIの決定方法

表-1 国際実験路面のゴールデン値

4.1 DFのみを用いたIFIの決定

DFテスターは図-2に示したように一度の測定で摩擦-速度関係を把握することができるので、DFテスターのデータのみからF60とSpの両方を決定することが考えられる。そこで、個々の試験区間におけるDFテスターのデータから速度定数を求め、この値と表-1のSpの基準値GSとを直線回帰させて次式を得た。

$$S_p = 108.4 + 0.035 * S_{A13} \quad (7)$$

$$R = 0.08 \quad n = 73$$

この結果は極めて低い相関係数から明らかなように、DFテスターの速度勾配からIFIの速度定数(Sp)を推定することは困難である。

次に、DFテスターの測定値のみからフリクション定数F60を決定することを検討した。DFテスターの60km/hにおける測定値はFR60となるので(4)式によるFR60を決定するための調整を必要としない。そこで、FR60=A13.60(DFテスターによる60km/hの測定値)として、表-1の摩擦のゴールデン値GF60との直線回帰をいくつかのケースについて行った。そのうち、最も相関係数の高かったケースとして次式が得られた。

$$F60 = 0.76 * A13.60 - 0.03 \quad (8)$$

$$R = 0.88 \quad N = 78$$

この結果から、DFテスターのすべり抵抗測定値のみからIFIの摩擦定数(F60)を推定することは可能である。しかし、速度定数を推定するためにはテクスチャーの測定が必要になる。

4.2 DFテスターとテクスチャー測定値を用いたIFIの決定

4.1節でDFテスターの60km/hにおけるすべり抵抗測定値からF60はテクスチャー測定値がなくても決定できることを示したが、IFIを報告するためにはさらにSpを推定することが必要である。ここではテクスチャー測定値として平均プロフィール深(Mean Profile Depth:MPD)と平均テクスチャー深(Mean Texture Depth:MTD)の2

SITE	SECT	GF60	GS	SITE	SECT	GF60	GS
1	A	.549	375	34*	B	.672	134
1	B	.520	334	40	A	.398	169
2	A	.268	150	40	B	.402	165
2	B	.258	170	41	A	.445	132
3*	A	.280	72	41	B	.442	137
3*	B	.297	86	42	A	.356	75
4	A	.477	91	42	B	.393	96
4	B	.456	73	50	A	.327	64
6	A	.356	69	50	B	.355	62
6	B	.345	74	51	A	.239	68
8	A	.279	62	51	B	.259	89
8	B	.281	57	52	A	.298	85
9	A	.379	175	52	B	.277	86
9	B	.373	149	53	A	.308	72
10*	A	.478	134	53	B	.284	65
10*	B	.489	122	56	A	.297	85
11*	A	.375	77	56	B	.272	66
11	B	.441	103	57	A	.552	183
12	A	.586	240	57	B	.554	225
12	B	.582	256	58	A	.389	113
13	A	.518	297	58	B	.403	118
13*	B	.517	279	59	A	.256	76
15*	A	.450	295	59	B	.259	82
15*	B	.437	354	60	A	.261	74
17*	A	.223	63	60	B	.250	74
17*	B	.231	135	61	A	.262	62
18*	A	.450	223	61	B	.227	50
18	B	.485	165	62	A	.405	127
19	A	.491	198	62	B	.394	177
19	B	.497	237	63	A	.313	164
21	A	.518	181	63*	B	.277	153
21	B	.523	168	64	A	.523	245
24	A	.393	97	64	B	.517	170
24	B	.394	120	65	A	.263	67
26.1	A	.396	50	65	B	.250	68
26.1	B	.346	42	66	A	.261	76
26.2	A	.656	199	66	B	.245	64
26.2	B	.662	180	67	A	.434	68
32	A	.489	172	67	B	.456	98
32	B	.460	131	68	A	.320	99
33.1*	A	.294	53	68	B	.309	87
33.2	A	.323	53	69*	A	.292	66
33.3*	A	.367	60	69*	B	.328	72
33.4	A	.366	70	70*	A	.452	164
34*	A	.689	142	70*	B	.454	195

つについて検討する。最初に、Spについての回帰を行った。次に、DFテスターの測定値は低い速度の方が良い結果を与えると考えられるので、FRSは20km/hにおける値を(4)式に得られたSpを用いて60km/hにおける値FR60₂₀に変換して直線回帰を行った。

① DFテスターデータとMPDを用いた場合
一部の試験箇所データを除いて分析した結果、それぞれ次の式を得た。

$$S_p = 14.0 + 90.0 * A2MPD$$

$$R = 0.94 \quad n = 67 \quad (9)$$

$$F60 = 0.09 + 0.72 * FR60_{20}$$

$$R = 0.96 \quad N = 65 \quad (10)$$

これらは非常に良い結果である。

② DFテスターデータとMTDを用いた場合MPDを使用する場合はテクスチャープロフィールを測定する必要がある。もしプロフィロメータが得られない場合には、より簡易な容積パッチ法 (Volumetric Patch Method)による平均テクスチャー深、MTD、を用いるのが便利である。そこで、①におけるMPDの代りにMTDを用いて同様の分析を行い、次の結果を得た。

$$\begin{aligned} S_p &= 17.2 + 87.7 * A8MTD \\ R &= 0.83 \quad n = 66 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} F60 &= 0.09 + 0.70 * FR60_{20} \\ R &= 0.94 \quad N = 65 \end{aligned} \quad (12)$$

以上の結果から、DFテスターはマクロテクスチャーの指標であるMPDあるいはMTDのいずれかを用いて十分にIFIを推定できるが、速度定数の推定にはMPDの方が良好であることが分った。

5. 舗装マネジメントへの応用

舗装管理者がIFIのある水準[IFI*(F60*, Sp*)]を確立しようとする場合、最小のテクスチャー水準および最小のすべり抵抗水準に対する条件を個々のすべり抵抗測定装置に与えることができる。例えば、最小の水準を F60*=0.30、Sp*=100km/hと設定するとする。その時に、DFテスターの20km/hにおけるすべり抵抗値とテクスチャーの基準値を求めることができる。

これらの基準を求める手順は、まず最初にテクスチャー測定装置を選択し、(5)式のaとbを決定する。

$$S_p = a + b * TX \quad (5)$$

最良の結果を得るためには、前章の結果からMPDを測定できるテクスチャー装置を選択すべきである。

次に、すべり測定装置を選択し、スリップ速度Sで測定された値(FRS)を計算されたSpを用いて、(4)式により速度60km/hの値(FR60)へ調整する。

$$FR60 = FRS e^{\frac{S-60}{S_p}} \quad (4)$$

すべり測定装置に対するAとBを決定する。

$$F60 = A + B * FR60 \quad (6)$$

(4)と(5)式を(6)式に代入して次式を得る。

$$F60 = A + B * FRS * e^{\frac{S-60}{a+b*TX}} \quad (13)$$

ここで、IFI*[(F60*, Sp*)]に対する値を選択し、それを(13)式に代入して解くと、求める必要な最小のすべり抵抗値と最小のテクスチャー測定値が次式のように得られる。

$$FRS_{\min} = \frac{(F60^* - A)}{B} * e^{\frac{60-S}{a+b*TX}} \quad (14)$$

$$TX_{\min} = \frac{(S_p^* - a)}{b} \quad (15)$$

a、b、A、B、S、SpとIFI*は既に決定されているので、(14)はFRS_{min}とTXの関係であり、(15)式はTX_{min}を決定するものとなる。

いま、IFI*=[F605*=0.3, Sp*=100km/h]に対する例として、DFテスターの20km/hにおける測定値と装置A2によるMPD(A2.MPD)を用いる場合の最小値は、本論文で得られた結果を基にして次のようになり、その結果を図-4に示す。

$$A13.20_{\min} = 0.29 e^{\frac{1}{0.35 + 2.25 A2MPD}} \quad (16)$$

$$A2MPD_{\min} = \frac{(100 - 14)}{90} = 0.96 \quad (17)$$

これらの関係はマクロテクスチャーとマイクロテクスチャーの間のトレードオフを確立するため、舗装管理者が意志決定する場合において有益となる。あるレベルのマクロテクスチャーに対してマイクロテクスチャーの増加は、測定されたすべり抵抗を増加することになる。したがって、図-3から望ましいレベルのIFI*達成する戦略を決定することができる。

6. ま と め

本研究では、現在世界中で使用されている異なるすべり抵抗測定の方法や装置を用いて測定された結果を共通のスケール上の値に変換する(基準化する)方法として、PIARC国際共同実験で提案されたPIARCモデルと国際フリクションインデックス(IFI)について示した。

また、この国際実験に日本から参加したDFテストターの測定値とIFIの関係についてベルギーとスペインの実験データを用いて分析し、DFテストターがIFIを推定する有用な装置であることを示した。

さらに、ここで得られた結果を舗装マネジメントへ応用する方法についても検討し、DFテストターについての応用例も示した。

このようにPIARC国際共同実験はすべり抵抗測定方法と装置の基準化に大きな手掛かりを与えるとともに、貴重で豊富なデータベースを提供したが、今後はこれらのデータを利用した国際実験に参加しなかった装置のキャリブレーションを行う方法などを多くの検討課題がある。

参考文献

1. "International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurement", Final Report, PIARC, Paris, 1995.
2. Henry, J. J. and Leu, M. C.: Prediction of Skid Resistance as a Function of Speed from Pavement Texture, TRR 666, pp.1-7, 1978.
3. Henry, J. J. and Saito, K.: Skid Resistance Measurement with Blank and Ribbed Test Tires, and Their Relationship to Pavement Texture, TRR 948, pp.38-43, 1983.
4. Saito, K., T. Horiguchi, A. Kasahara, H. Abe: Development of Portable Tester for Measuring Skid Resistance and Its Speed Dependency on Pavement Surfaces, 75th TRB Annual Meeting, 1966 (Washington, DC)
5. 斎藤・安部・笠原・堀口: 路面のすべり抵抗と速度依存性を測定するポータブルテストターの開発, 土木学会支部論文報告集, 第52号, pp. 530-535, 1996.
6. Henry, J. J.: Models to Harmonize Methods for Measuring Road Friction, 3rd Intl Sympo. on Road Surface Characteristics, pp.164-178, 1992 (Berlin).

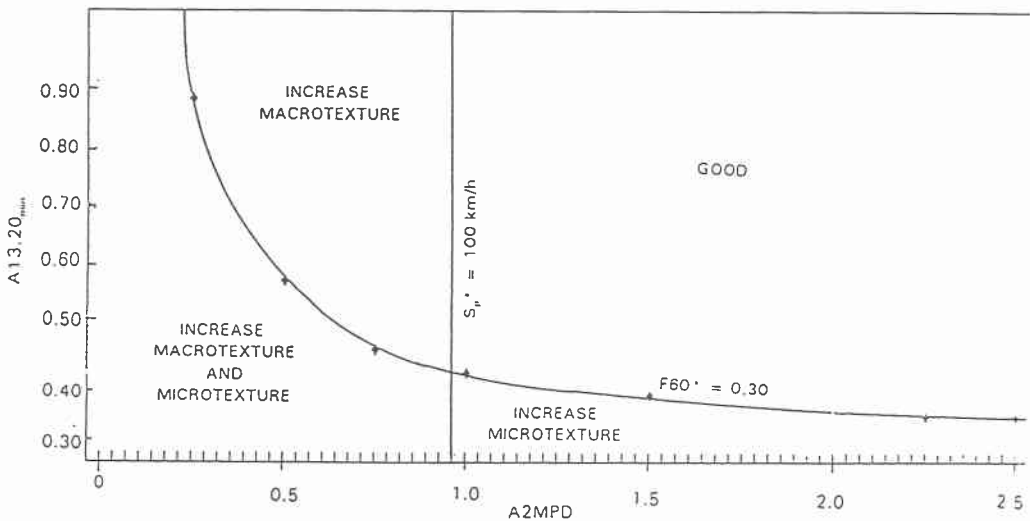


図-4 IFI*=[F60*=0.3, Sp*=100km/h]に対するMPDと20km/hにおける最小DFテストター値の関係