

V-20 舗装路面におけるすべり抵抗の季節変動モデル

室 蘭 工 業 大 学 正 員 齊 藤 和 夫
ペンシルベニア州立大学 John J. Henry

1. はじめに

舗装路面のすべり抵抗が季節的に変化することは、1959年に英国の Giles と Sabey¹⁾ が示して以来、多くの研究者によって指摘されてきた。米国においても、すべり抵抗が季節的および短期的に変動することはペンシルベニア州をはじめ多くの州で観測されてきた。これら各州での観測結果については 1977 年に Rice²⁾ によってまとめられたが、それによるとすべり抵抗の季節変動はスキッド数 (skid number) で平均して 5 ~ 15 の範囲の変化であり、極端な場合には 30 にも及ぶことが示されている。また、Hegmon³⁾ はこれらの変動を詳細に分析して、これらの変動は道路をとりまく環境の変化により偶然というよりもむしろ系統的に生ずるものであるとの結論を示した。

これらすべり抵抗における測定値の変動は、任意の路面におけるすべり抵抗の最小値を決定することを困難にしている。米国においては、最近道路の維持管理プログラムの策定方法の確立が重要な課題となってきたが、その中で任意の時期に測定されたすべり抵抗値を季節的および短期的変動 (seasonal and short-term variations) に対して補正する手法を開発する必要に迫られてきた。

このような背景のもとで、連邦道路管理庁 (Federal Highway Administration: FHWA) はペンシルベニア州立大学のペンシルベニア交通研究所 (Pennsylvania Transportation Institute: PTI) と共同して、1976年に舗装路面におけるすべり抵抗の季節変動に関する 3 年間の研究プログラムおよび 1978 年にすべり抵抗における季節変動の予測モデルの開発に関する 3 年間の研究プログラムを開始した。著者は昭和 56 年度の文部省在外研究員として主として後者のプログラムに参加し、1 年間研究を進めていくつかの成果^{4) - 8)} を得たが、本研究はそれらのうち道路の環境および交通条件を関数として開発したすべり抵抗の季節変動予測モデル (Mechanistic Model) について報告する。

2. データベース

本研究のデータベースはペンシルベニア州内における 2 / 個所の試験測定路面に関するすべり抵抗測定値、路面性状測定値、および測定路面附近で記録された天候関連データより構成されている。2 / 個

Table 1. Pavement and Traffic Parameters for Pennsylvania Sites (1980)

Site No.	Type of * Pavement	Year of Construction	Type of Aggregate Coarse/Fine	SRL**	PNG (Ave.) h/km	BPN***	MTD*** 10 ³ in	Total ADT
1	DG	1970	Limestone/NA	L	0.83	58.5	14.5	6630
2	PCC	1960	Limestone/Natural Sand	M	0.32	53.0	15.5	7700
3	PCC	1973	Limestone/Natural Sand	M	0.71	70.0	13.0	3640
4	DG	1972	Limestone/NA	M	0.84	62.5	13.0	3640
8	DG	1972	Limestone/Silica Sand	M	0.61	55.0	34.0	1820
9	DG	1972	Limestone/Silica Sand	M	0.69	69.5	24.5	1710
10	PCC	1973	Limestone/Silica Sand	L	0.77	72.0	11.5	1710
11	DG	1963	Limestone/NA	M	0.79	56.0	17.0	4490
12	DG	1970	Limestone/NA	G	0.63	60.0	25.5	4490
13	OG	1969	Limestone/NA	G	0.53	90.5	38.5	7920
14	PCC	1967	Limestone/NA	M	0.83	62.0	14.5	8770
15	OG	1969	Limestone/NA	E	0.53	86.5	47.0	7920
16	DG	1966	Limestone/Limestone	L	0.88	50.0	15.5	6500
17	DG	1961	Limestone/Limestone	-	0.67	53.5	30.5	800
18	PCC	1973	Limestone/NA	L	0.66	77.0	18.5	1200
19	DG	1968	Limestone/Silica Sand	L	0.81	54.0	20.0	7000
20	DG	1968	Limestone/Silica Sand	L	0.82	65.0	20.0	7000
21	OG	1969	Limestone/Silica Sand	M	0.68	64.0	40.5	2500
22	OG	1969	Gravel/Silica Sand	G	0.58	84.5	54.5	2500
24	DG	1963	Limestone/NA	M	0.83	54.0	17.0	4490
25	DG	1963	Gravel/NA	G	0.68	81.0	20.5	7920

* DG=Dense Graded PCC = Portland Cement Concrete OG = Open Graded

** SRL = Skid Resistance Level in Pennsylvania: L = Low M = Moderate H = High E = Excellent

***Average value of April and May

所の測定路面は各種の骨材および配合設計により建設された / 6 個所のアスファルト舗装 (ACC) と 4 個所のセメントコンクリート舗装 (PCC) より構成されており、また広範囲の年平均日交通量 (ADT) をもっている。すべり抵抗測定試験は米国で広く採用されている ASTM E274 試験法に基づき 16, 32, 48, 64 km/h (10, 20, 30, 40 mph) の速度におけるスキッド数 $SN_{16}, SN_{32}, SN_{48}, SN_{64}$ を週 / ~3 回の割合で測定し、すべり試験時における気温、試験タイヤおよび路面温度も測定した。

試験測定路面の路面性状 (surface texture) については、ASTM E303 試験法¹⁰⁾に基づく BPN 値 (British Pendulum Number) および ACPA¹¹⁾ 規定の Sand-patch Method に基づく平均性状深 MTD (mean texture depth) をそれぞれ月 / 回の割合で測定した。また、路面のポリッシングデータは Penn State Reciprocating Polisher¹²⁾ によるポリッシング試験を各試験測定路面について行い、0.05mm シリカ研摩材を用いた 500 サイクルおよび 2000 サイクルのポリッシング終了時における BPN 値を測定し、それぞれ BPN_{500} および BPN_{2000} とした。試験測定路面に関するデータをまとめて Table 1 に、ポリッシングデータを Table 2 に示す。

3. Mechanistic Model の開発

研究プログラムで収集されたすべり抵抗測定値の時系列データは、スキッド数が春季から秋季にかけて低下して / 月頃に最低値を示し、冬季にほぼ元の値に回復するという循環のパターンを示し、さらにこの季節的サイクルに日変動あるいは週変動など局地的な天候条件による短期的変動が加わっていることを示した¹³⁻¹⁴⁾ (Figure 1)。

これらの観測結果に基づいて、季節変動と短期的変動を分離して取り扱うすべり抵抗の季節変動モデル (以下 Mechanistic Model と呼ぶ) を開発した。⁴⁻⁵⁾ このモデルにおいては、すべり抵抗の季節変動は骨材のポリッシングと摩耗による路面の巨視的性状 (macrotexture) および微視的性状 (microtexture) の減少に起因すると仮定している。この場合、ポリッシングは微視的性状を、摩耗は巨視的性状を減少させることになる。

このモデルの開発においては、すべり抵抗 (スキッド数) と速度の関係を表現する Henry¹⁵⁾ により開発された Penn State Model を利用している。

Table 2. Results of Polishing Tests by PSU Reciprocating Pavement Polisher (Pennsylvania Sites, July 1980)

Site No.	Initial BPN	BPN after 500 Cycles	BPN after 2000 Cycles	$\frac{BPN_{500} - BPN_{2000}}{BPN_{500}} \times 100$
1	59	60	59	1.67
2	68	75	64	16.00
3	74	79	70	11.39
4	58	68	64	5.88
7	68	70	71	-1.43
8	56	51	50	1.96
9	71	66	69	-4.55
10	70	72	75	-4.17
11	67	68	66	2.94
12	87	82	73	10.98
13	89	85	87	-2.35
14	73	68	66	-4.17
15	87	85	81	4.71
16	70	62	56	9.68
17*	-	-	-	-
18	74	73	67	-1.61
19	65	62	63	8.22
20	65	62	63	-1.61
21	67	74	68	8.11
22	81	76	78	-2.63
24	50	59	56	5.08
25	79	77	71	7.79

* This site has been resurfaced.

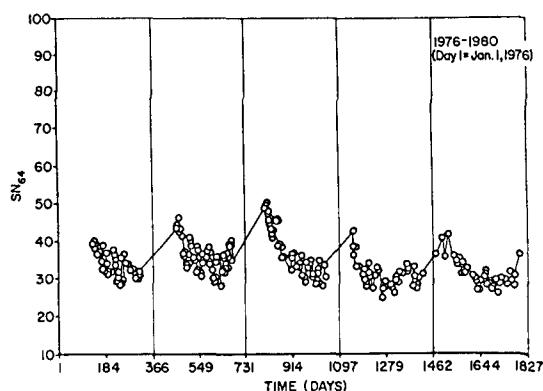


Figure 1 Cyclic Pattern of Seasonal Variations in Skid Resistance (Site 16, Dense-Graded ACC Surface)

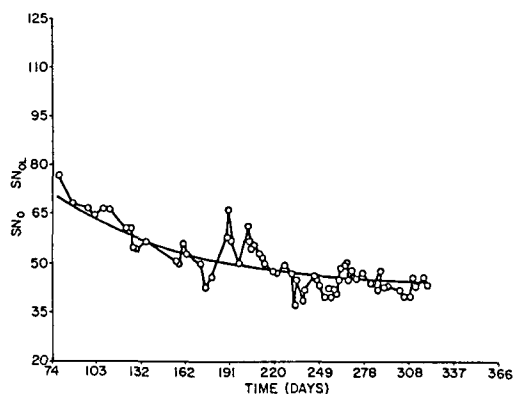


Figure 2 SN_0 Versus Time for Asphalt Surface (Site 8, 1980)

$$SN_V = SN_0 e^{-(PNG/100)V} \quad (1)$$

ここで、 SN_V = 速度 V (km/h) におけるスキッド数
 SN_0 = 速度 0 におけるスキッド数で、路面の微視的性状と高度に相関する。
 $PNG = -(100/SN) \cdot (d(SN)/dV)$ で定義される速度勾配 (h/km) で、路面の巨視的性状とよく相関する。
 64km/h(40mph) の速度におけるすべり抵抗に対して (1) は次式のように表わされる。

$$SN_{64} = SN_0 e^{-0.64 PNG} \quad (2)$$

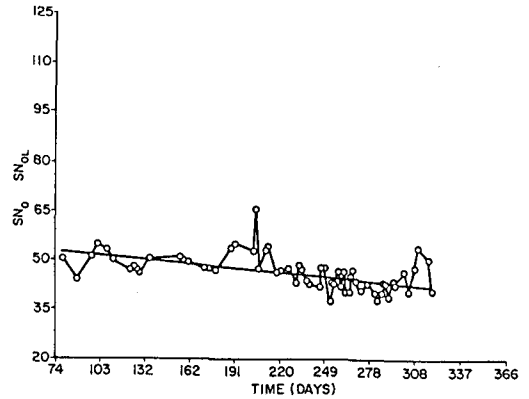


Figure 3 SN_0 Versus Time for PCC Surface (Site 2, 1980)

SN_0 (microtexture)の項は季節的変動 SN_{OL} と短期的変動 SN_{OR} の2つの成分をもつ。したがって、任意の時間における SN_0 は次式のようになる。

$$SN_0 = SN_{OL} + SN_{OR} \quad (3)$$

ここで、 SN_{OR} はすべり抵抗測定値の時系列データに季節変動傾向線 SN_{OL} をあてはめた後の残差

である。 SN_0 は同一路面についていくつかの異なる速度で測定されたスキッド数を (1) に代入して最小自乗法により求めることが出来る。Figure 2 は密粒度 ACC 路面について SN_0 の変動を、Figure 3 は PCC 路面についての変動を示したものである。この図からもわかるように、一般的に ACC 路面の変動傾向は指数関数的であるが、PCC 路面のそれは直線的な減少傾向を示すことが明らかとなった。⁴⁾ したがって、(3) 式における季節変動成分は、すべり抵抗の測定が行なわれた日を t とすると、ACC 路面に対しては (4) 式の指数関数を、PCC 路面に対しては (5) 式の直線関数を適合することが出来る。

$$SN_{OL} = SN_{OF} + \Delta SN_0 e^{-t/\tau} \quad (4)$$

$$SN_{OL} = SN_{OF} + \frac{\Delta SN_0}{\tau} (\tau - t) \quad (5)$$

ここで、 SN_{OF} = 路面が充分にポリッシュされた後の SN_0 の値で、 SN_{OL} および SN_{OR} と独立している。
 ΔSN_0 = 骨材のポリッシュされ易さ (polish susceptibility) を表わす (骨材の性質)。

τ = 骨材のポリッシュ率 (polishing rate) で、骨材の性質と ADT の組み合わせで表される。

SN_{64} の測定が行なわれた日を t とすると、ACC 路面に対しては (2)、(3) および (4) を組み合わせると、

$$SN_{64} = (SN_{OR} + SN_{OF} + \Delta SN_0 e^{-t/\tau}) e^{-0.64 PNG} \quad (6)$$

を得る。一方、シーズンの終了時点におけるすべり抵抗の水準 SN_{64F} は残差 SN_{OR} の平均を 0 とし

て (6) を書き換えると、 $SN_{64F} = SN_{OF} e^{-0.64 PNG}$ (7) となる。(6) に (7) を代入

して、 SN_{OF} を消去すると

(8) 式を得る。また、PCC 路面に対しても同様に (9) 式を導くことが出来る。

$$SN_{64F} = SN_{64} - (SN_{OR} + \Delta SN_0 e^{-t/\tau}) e^{-0.64 PNG} \quad (8)$$

$$SN_{64F} = SN_{64} - [SN_{OR} + \frac{\Delta SN_0}{\tau} (\tau - t)] e^{-0.64 PNG} \quad (9)$$

(8) 式および (9) 式は、シーズン中の任意の日に測定されたすべり抵抗値 SN_{64} からシーズン終了時におけるすべり抵抗値の水準 SN_{64F} を予測するのに用いられる関係式となる。(3) 式の短期的変動を表現する関係式は、天候関連変数 X_i を用いて次式の直線回帰モデルを用いるものとする。

$$SN_{OR} = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_n x_n \quad (10)$$

4. 季節変動傾向の解析

ACC路面に対するすべり抵抗の季節変動傾向として、(4)式の指数関数を想定したが、このモデルは3つのパラメータを含むために全てのデータについて通常の回帰分析手法を適用することが出来ない。したがって、本研究で用いた解析手順は次の通りである。

まず第1に、各試験測定路面における測定データを月毎に平均し、この月別に平均した SN_0 を各月の中間点（/5日）におけるデータとした。また、各測定路面の最大 SN_0 は5月の中間点（ $t=75$ 日）であったので、(4)式の代りに次式のシフトしたモデルをデータに適合させた。

$$SN_{OL} = SN_{OF} + \Delta SN_0 e^{-(t-74)/\tau} \quad (11)$$

Figure 4 はこのモデルの基本的概念を図式的に示す。(11)式をデータに適合させる方法は、 τ を独立変数として取り扱い、固定した τ の値に対してデータを回帰させて SN_{OF} および ΔSN_0 の値を求めるものである。最適な3つのパラメータを決定する方法は、Figure 5 に示すケースのように路面が十分にポリッシュされてシーズン終了時に SN_{OF} がターミナル値に到達するような場合には、最大の重相関係数を与える組み合わせを選択する。一方、Figure 6 のケースのようにシーズン終了時に SN_{OF} がターミナル値に到達しない場合には、 τ の / 0 日の増加に対して寄与率 (R^2) の増加が 0.1% 以下になる時の組み合わせを選択するものとした。

PCC 路面については、(5)式の代りに次式の線型モデルにおいて τ を 275 日（/ / 月中間点）に固定した場合の SN_{OF} および減少率 $\Delta SN_0/\tau$ を最小自乗法により求めた。

$$SN_{OL} = SN_{OF} + \frac{\Delta SN_0}{\tau} (\tau - t + 74) \quad (12)$$

以上の方法により、2 / 個所の試験測定路面に対して定められた3つのパラメータをACC路面とPCC路面別にまとめて Table 3 に示す。

5. 季節変動モデルパラメータの推定

測定データから SN_{OF} 、 ΔSN_0 と τ のパラメータ値が決定されたので、これらのパラメータを路面および交通特性から推定する方法を検討する。

SN_{OF} は季節的および短期的影響を除去した後の路面の微視的性状を表わす尺度であると考えられ

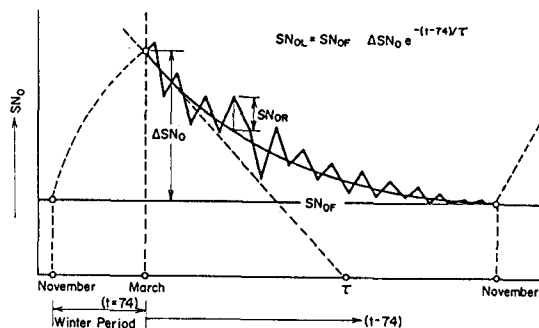


Figure 4. Basic Concept of Mechanistic Model

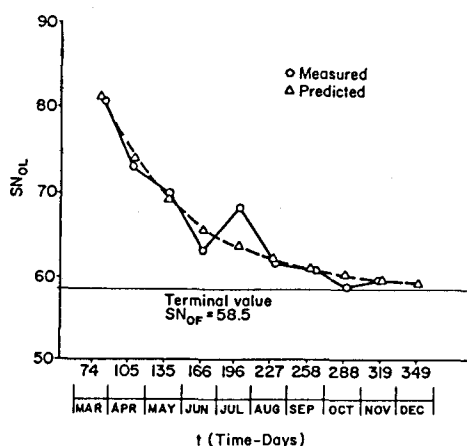


Figure 5. Annual Variation of SN_{OL} for a Site Whose Terminal Value is Reached

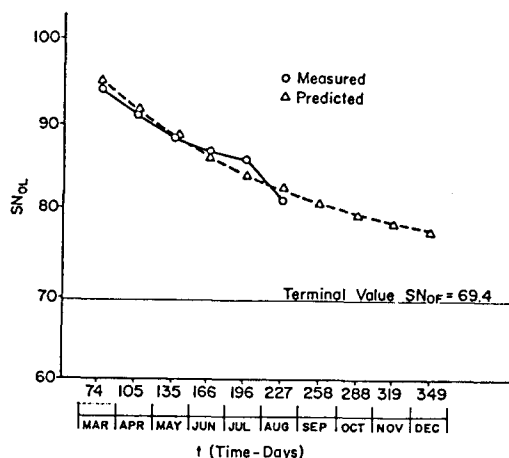


Figure 6. Annual Variation of SN_{OL} for a Site Whose Terminal Value is Not Reached Due to Insufficient Polishing

るので、月別に測定されている BPN と SN_{OF} を回帰させて次式を得た (Figure 7)。ただし、ここで用いた BPN は 4 月と 5 月の平均値である。

$$SN_{OF} = -16.32 + 1.068BPN \quad (r = 0.989) \quad (13)$$

ΔSN_0 は Figure 4 に示されるように、冬季間のデポリッシング効果¹³⁾によるすべり抵抗の回復 (rejuvenation) の尺度であり、また交通による骨材のポリッシングされ易さの尺度でもあると考えられる。そこで、BPN と ADT を ΔSN_0 に対して直線回帰させて次式を得た (Figure 8)。

$$\Delta SN_0 = 6.69 + 0.324BPN - 0.000852ADT \quad (14) \\ (r = 0.875)$$

時間定数 τ は / 年のサイクルにおけるすべり抵抗の減少率と関係し、また骨材のポリッシング率とも関係する。そこで、再び BPN と ADT を τ に対して直線回帰させた結果、 $r = 0.731$ の重相関係数を得た。次に、この関係式を改善するために、BPN の代りに BPN_{2000} を用いて次式の直線回帰結果を得て重相関係数の有意な改善が図られた (Figure 9)。

$$\tau = -22.6 + 0.00933ADT + 2.120BPN_{2000} \quad (15) \\ (r = 0.921)$$

6. 調整すべり抵抗値の計算

(8) 式と (9) 式を用いて任意に測定された SN_{64} に対して季節変動および短期的変動を除去したすべり抵抗の水準 (調整すべり抵抗値) を推定することが出来る。この場合、本研究対象路面における短期的変動モデルとして開発された次式を用いることが出来るが、その詳細については省略する⁴⁾。

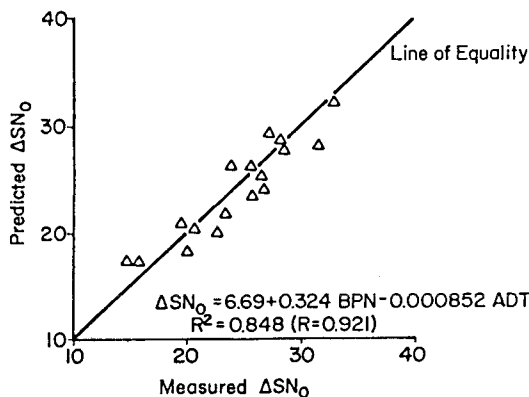


Figure 8. Prediction of ΔSN_0 and ADT for Asphalt Pavement Surfaces (Pennsylvania Sites, 1980)

Table 3a. Parameters of Model for Seasonal Variations in Skid Resistance (Pennsylvania Sites, 1980)

$$\text{Asphalt Surface: } SN_{OL} = SN_{OF} + \Delta SN_0 e^{-(t-74)/\tau}$$

Site No.	τ	ΔSN_0	SN_{OF}	R^2
1	190	22.8	44.2	0.765
4	160	26.5	47.9	0.848
8	80	28.6	43.1	0.919
9	40	28.0	64.9	0.672
11	110	19.4	44.2	0.787
12	210	32.5	46.9	0.795
13	160	26.6	78.4	0.926
15	210	31.0	77.0	0.939
16	170	14.8	34.3	0.656
17	130	26.4	40.0	0.750
19	140	19.9	44.2	0.844
20	90	23.1	57.6	0.893
21	150	26.2	40.4	0.767
22	170	32.5	66.7	0.866
24	190	20.4	39.6	0.720
25	210	25.3	69.4	0.963

$$\text{PCC Surface: } SN_{OL} = SN_{OF} + \frac{\Delta SN_0}{\tau} (\tau - t + 74)$$

Site No.	τ	ΔSN_0	SN_{OF}	R^2
2	275	12.4	40.5	0.544
3	275	11.5	66.7	0.546
10	275	8.2	77.8	0.512
14	275	9.6	60.6	0.597
18	275	5.4	73.0	0.323

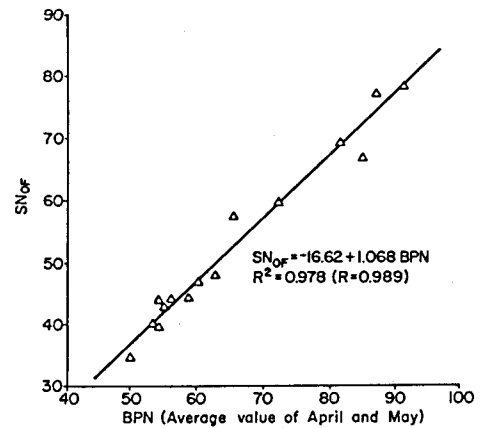


Figure 7. The Relation Between SN_{OF} and BPN for Asphalt Pavement Surfaces (Pennsylvania Sites, 1980)

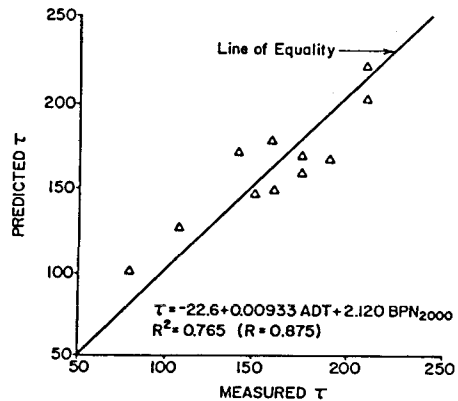


Figure 9. Prediction of τ From ADT and BPN_{2000} for Asphalt Pavement Surfaces (Pennsylvania Sites, 1980)

$$SN_{OR} = -9.971 - 2.654DSF + 0.057T_p + 7.811PNG \quad (r=.522) \quad (16)$$

ここで、DSF = 路面乾燥係数 (Dry Spell Factor)

T_p = すべり試験時の路面温度

Figure 10 は測定データ SN_{64} に対して調整した SN_{64F} を比較して示す。理想的には SN_{64F} は各測定値に対して一定になるが、(16) 式の比較的低い相関係数が短期的変動の十分な除去を妨げている。

各試験測定路面に対する推定された調整すべり抵抗値の平均 averaged SN_{64F} と (7) 式を用いてターミナル値 SN_{OF} から計算した estimated SN_{64F} を比較して Figure 11 に示す。両者は非常によく一致していることがわかる。

7. 結 論

以上、本研究におけるすべり抵抗の変動モデルの解析から、次のような結論が得られた。

1. すべり抵抗の季節変動測定から、季節変動と短期的変動を分離した簡易かつ有効な mechanistic model を開発した。

2. モデルの3つのパラメータは ACC 路面について (13), (14) および (15) 式から推定できる。

3. ここで開発したモデルを用いて任意に測定された SN_{64} を調整したすべり抵抗値を計算出来る。

4. しかし、短期的変動モデルの精度向上を図ることが今後の課題となる。

最後に、本研究に対して有益な助言を与えられた FHWA の H. C. Huckins と R. R. Hegmon に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- Giles, C. G. and Sabey, B. E. "A Note on the Problem of Seasonal Variation in Skidding Resistance." Proceedings of First International Skid Prevention Conference. Charlottesville, Virginia. 1959, pp. 563-568.
- Rice, J. M. "Seasonal Variations in Pavement Skid Resistance." Public Roads, Vol. 40, No. 4, March 1977, pp. 160-166.
- Hegmon, R. R. "Seasonal Variations in Pavement Skid Resistance--Are These Real?" Public Roads, Vol. 42, No. 4, September 1978, pp. 55-62.
- Saito, K. and Henry, J. J. "Mechanistic Model for Predicting Seasonal Variations in Skid Resistance." Paper Presented at the 62nd Transportation Research Board Annual Meeting. Washington, D. C., January 1983.
- Henry, J. J. and Saito, K. "Predictor Model for Seasonal Variations in Skid Resistance." Final Report. Federal Highway Administration, U. S. Department of Transportation, 1982.
- Anderson, D. A., Henry, J. J. and Saito, K. "Pre-Evaluation and Prediction Methods for Changes in Pavement Friction." Interim Report. Federal Highway Administration, U. S. Department of Transportation, 1982.
- Henry, J. J. and Saito, K. "Skid Resistance Measurements with Blank and Ribbed Test Tires, and Their Relationship to Pavement Texture." Paper Presented at the 62nd Transportation Research Board Annual Meeting, Washington D. C., Jan. 1983.
- Saito, K. and Henry, J. J. "Pavement Surface Properties Related to Variations in Skid Resistance." Paper Presented at the ASTM Committee E-17 Meeting. Phoenix, Arizona, October 1982.
- American Society of Testing and Materials. Standard Method of Test E 274-79: Skid Resistance of Paved Surfaces Using a Full-Scale Tire. Annual Book of ASTM Standards, Part 15, Philadelphia, 1981.
- American Society of Testing and Materials. Standard Method of Test E 303-74: Measuring Surface Frictional Properties Using the British Pendulum Tester. Annual Book of ASTM Standards, Part 15, Philadelphia, 1981.
- American Concrete Paving Association. "Interim Recommendations for the Construction of Skid-Resistant Concrete Pavement." ACPA Technical Bulletin No. 6, 1969, pp. 8-13.
- Dahir, S. H. and Meyer, W. E. "Bituminous Pavement Polishing." Final Report, Agreement 38571. Pennsylvania Department of Transportation, 1974.
- Henry, J. J. and Dahir, S. H. "Seasonal Skid Resistance Variations." Interim Report. Research Project 75-10. Pennsylvania Department of Transportation, 1978.
- Dahir, S. H. and Henry, J. J. "Seasonal and Short-Term Variations in Skid Resistance." Transportation Research Record 715, 1979, pp. 69-76.
- Leu, M. C. and Henry, J. J. "Prediction of Skid Resistance as a Function of Speed from Pavement Texture." Transportation Research Record 666, 1978, pp. 7-13.

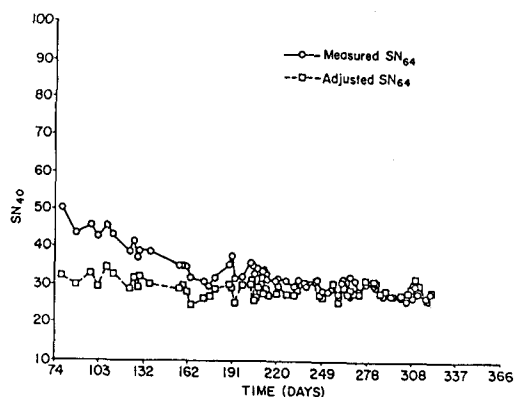


Figure 10. Comparison of Measured and Adjusted SN_{64} for Asphalt Pavement Surface (Pennsylvania Site 8, 1980)

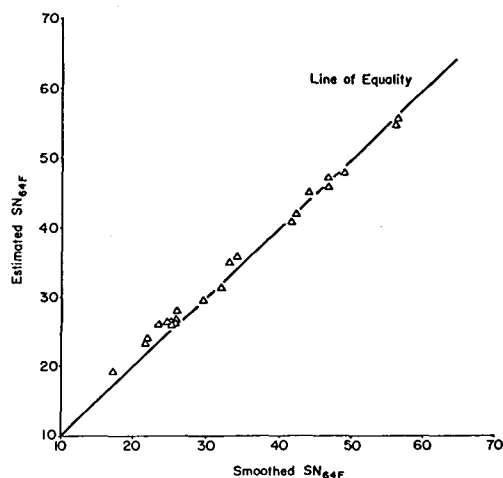


Figure 11. Comparison of Averaged and Estimated SN_{64F} (Pennsylvania Sites, 1980)