

アスファルト

第46巻 第214号 平成15年10月発行

214

有限責任中間法人 日本アスファルト協会の設立について

宮崎 憲二 1

特集・路面のすべり

特集に当たって

姫野 賢治 2

路面のすべり

小野田 光之 3

路面のすべり抵抗の測定方法と測定値の標準化

斉藤 和夫 11

路面とすべりの関係

保久原 均・寺田 剛 19

諸外国における路面のすべり抵抗について

神谷 恵三 27

歩道舗装材のすべり抵抗性試験機について

牧 恒雄 31

＜アスファルト舗装技術研究グループ・第46回報告＞

峰岸 順一 37

「道路，鉄道，および空港の支持力」

アスファルト舗装技術研究グループ 38

＜統計資料＞石油アスファルト需給統計資料

54

ASPHALT

有限責任中間法人 日本アスファルト協会

THE JAPAN ASPHALT ASSOCIATION

第82回 アスファルトゼミナール開催のご案内

有限責任中間法人 日本アスファルト協会

拝啓 時下ますますご清栄のこととお慶び申し上げます。

さて、恒例の当協会主催の「アスファルトゼミナール」を下記要領にて開催致します。

内容等参考の上、奮ってご参加くださいますようご案内申し上げます。

敬 具

記

1. 主 催 有限責任中間法人 日本アスファルト協会
2. 協 賛 社団法人 日本アスファルト乳剤協会、日本改質アスファルト協会
3. 後 援 国土交通省、社団法人 日本道路建設業協会、社団法人 日本アスファルト合材協会
4. 開催月日 平成16年2月19日（木）～2月20日（金）
5. 開催場所 仙台市情報・産業プラザ（アエル内・案内図参照）
仙台市青葉区中央一丁目3-1 022-724-1200
6. 内 容 裏面「プログラム」参照
7. 申込方法 **平成16年1月15日**までに、下記ホームページより、申し込みフォームを使用して
お申し込み下さい。
<http://www.qbs.co.jp/asphalt>
折返しE-mailにて参加受講書をお送りいたします。
8. お問い合わせ 昭和瀝青工業株式会社 アスゼミ担当 有田克郎まで
0792-26-2613
9. 参加費 無料
10. 参加人数 300名（締切日以前でも定員になり次第締め切らせていただきます。）
11. その他 当日申込受付はできませんので、必ず上記方法でお申し込み下さい。



■会場案内図

- バス 仙台市営：「仙台駅前」下車 徒歩3分
宮城交通：「仙台駅前」下車 徒歩3分
- 地下鉄 仙台駅下車 徒歩4分
- J R 仙台駅下車 徒歩2分

プログラム

開催日時 平成16年2月19日(木)～2月20日(金)
開催場所 仙台市情報・産業プラザ(アエル内)
仙台市青葉区中央一丁目3-1 022-724-1200

第1日目 平成16年2月19日(木) 13:00～16:30

(敬称略)

1. 挨拶

13:00～13:05

有限責任中間法人日本アスファルト協会
ゼミナール委員長

濱 本 英 己

2. 「社会資本マネージメント」に向けて

13:05～14:05

東北大学大学院情報科学研究科 助教授

武 山 泰

(休憩 14:05～14:10)

3. 公共事業コスト構造改革の取組みについて

14:10～15:10

国土交通省国土技術政策総合研究所

総合技術政策研究センター 建設システム課長

溝 口 宏 樹

(休憩 15:10～15:20)

4. 舗装の性能発注の動向について

15:20～16:30

ーその現状と課題を会場の皆さまと考える(講演と質疑応答)ー

独立行政法人土木研究所 基礎道路技術グループ

上席研究員(舗装)

東北地方ブロック発注担当者

伊 藤 正 秀

2名程度

会場参加者

第2日目 平成16年2月20日(金) 9:30～12:40

6. 社会資本整備重点計画と平成16年度道路予算

9:30～10:30

国土交通省道路局 道路経済調査室長

前 川 秀 和

(休憩 10:30～10:35)

7. アスファルト乳剤の一般的な性質とその応用について

10:35～11:35

社団法人日本アスファルト乳剤協会 技術委員長

塩 尻 謙太郎

(休憩 11:35～11:40)

8. 高粘度改質アスファルトの現状

11:40～12:40

日本改質アスファルト協会

小 林 孝 行

(※講師は都合で変更になる場合があります)

有限責任中間法人 日本アスファルト協会の設立について

有限責任中間法人 日本アスファルト協会
会長 宮崎 憲二
(新日本石油株式会社 エネルギー・ソリューション1部)

有限責任中間法人日本アスファルト協会は、平成15年4月24日にアスファルトを販売している石油会社6社と特約店31社によって設立されました。

弊協会の設立は、社団法人日本アスファルト協会の解散（本年8月31日付）に伴うものであり、解散の経緯と弊協会の事業についてお知らせいたします。

社団法人日本アスファルト協会は、アスファルトに関する品質の改善、使用技術の向上等を図り、アスファルトに関連する産業の健全な発展と公共の福祉の増進に寄与することを目的に、昭和32年12月6日に設立されました。

設立以降本年平成15年まで、アスファルトの普及と徹底を図るために、アスファルト利用技術の発展を促進し、技術者および業者間の相互理解を図り、海外の技術情報・資料の収集、普及に努め、生産者と利用者とが連携した技術研究体制を確立するための活動を続けてまいりました。

また、機関誌として当誌「アスファルト」を発行し、現在に至るまで国内で唯一の専門誌として広く活用されてまいりました。

さらに、アスファルトの利用技術や一般情勢等について「アスファルトゼミナール」（講習会）を開催するなど、広くアスファルトの普及・広報を行ってまいりました。

しかしながら、当協会を取巻く環境は厳しく、最近の経済不況ならびに石油業界の再編の影響を受けて、会員数も年々減少し、経営的にも事業規模の縮小を余儀なくされるなど、従来の活動を維持することは難しいとの判断にいたりました。

そのため昨年1年間にわたり、今後の協会運営を如何にしていくかを検討した結果、社団法人に比較して経費負担の少ない有限責任中間法人を設立し、必要最少限の業務を継続していくこととなりました。

その結果、従来行ってきた事業のうち、アスファルトに係る品質規格関連事業ならびに当協会に独自に集計していた用途別の統計事業については、石油連盟に移管して引き続き行っていたが、アスファルトの利用技術に関連する事業については、後継となる有限責任中間法人日本アスファルト協会において取組むことといたしました。従いまして、機関紙「アスファルト」の発行、舗装用アスファルトの調査研究、ゼミナールの開催等につきましては引き続き継続してまいります。

今後も、「アスファルト」誌につきましてはますます中味の充実を図っていく所存であります。さらなるご愛顧・ご活用のほどよろしくお願い申し上げます。

有限責任中間法人 日本アスファルト協会は、事務局がないため、協会についてのお問い合わせは、以下の各所へお願いいたします。

協会事業全般	新日本石油株式会社 エネルギー・ソリューション1部	宮崎 憲二	TEL 03-3502-9127
編集委員会	本誌56ページを参照のこと	塚越 徹	TEL 03-3502-9134
ゼミナール委員会	昭和瀝青工業株式会社 営業部	有田 克郎	TEL 0792-26-2614
アスファルト舗装技術委員会	株式会社ジャパンエナジー 産業販売部門	棚澤 良和	TEL 03-5573-6453
石油アスファルトの技術関係	各石油会社のアスファルト技術担当まで		

特集に当たって

姫野賢治

中央大学理工学部土木工学科 教授 工学博士

道路や空港の舗装が本来持つべき基本的な性能は、自動車や航空機の乗員あるいは乗客が不快さを感じたり、輸送中の貨物が破損したりすることのないように、路面が十分に平坦でかつその状態が長続きすべきことであることはいまでもない。しかしながら、車両の駆動、制動時にエンジンの動力を路面に伝達して走行できるのは、タイヤと路面の間に適度な摩擦抵抗があるからであり、そればかりか、この摩擦抵抗は自動車や航空機の運行時の安全性の観点からもとても重要な性能の1つである。すなわち、道路や空港の舗装が本来持つべきもう1つの基本的な性能として、路面がすべりにくいということがあげられる。

たとえば、1971年の英国の交通事故に関するデータでは、250,000件の人身事故のうち25,000件は湿潤路面が原因とされ、さらにそのうち13,000件はすべり摩擦抵抗が不十分であったことが原因とされている。

この路面のすべり摩擦に影響する因子としては、自動車や航空機のタイヤの材質やトレッドパターン、舗装の種類、使用されている骨材の表面特性、アスファルト量、材令、路面の乾湿状態や温度、さらには、車両の走行速度など非常に多岐にわたっており、路面とタイヤの間の摩擦を的確に記述することはとても難しいこと

であると思われる。

今回のアスファルト誌の特集は、この摩擦という概念を裏返した「路面のすべり」という観点から、エキスパートの方々にこの問題に正面から取り組んで頂いた。

まず路面のすべりのメカニズムを科学的に大変に詳細に解説して頂いた。次に、やや道路管理者の立場に立ちすべり抵抗はどのような装置でどのように測定されるのかという実務的な問題に触れながら、すべりをどのように管理すべきかを明らかにして頂いた。最後に、歩行者の立場に立ち、歩き易さの観点から歩道のすべりについて述べて頂いた。どれも大変な力作である。

路面のすべりは、路面プロファイルのうち、1 以下の波長のマイクロテクスチャに相当する程度の成分が大きく関係していると考えられているが、近年、高精度のテクスチャメータがエンドユーザーの手の届く範囲内の価格で入手可能となってきており、このようなレベルの波長のプロファイルを簡便に計れるようになってきた。数10 以上の波長のラフネスに関係する自動車や航空機の振動解析と並んで、世界的にも活発に研究が行われ始めてきた分野である。わが国でも、研究分野だけでなく、実用面においても、この問題に活発に取り組まれることを望みたい。

路面のすべり

(Skid Resistance on Road Surfaces)

小野田 光 之*

自動車タイヤと路面間のすべり摩擦抵抗について、タイヤゴム特性、各種路面状態、走行条件との係わりによるすべり摩擦係数の変化について述べた。まず、路面とタイヤ間のすべりに関する定義を説明し、次にタイヤゴム特性とすべり摩擦の関係について述べた。また、主要な要因とすべり摩擦係数の関係、特にすべり摩擦係数の温度および速度に対する相関関係を述べ、最後に車両運動とすべり摩擦係数の関係について述べた。

1. はじめに

道路整備の進展と自動車の増加、大型化、高速化等にもなっており、走行の安全性、快適性の面から路面のすべり摩擦抵抗は非常に重要である。そのようなことから最近の舗装は耐久性、平坦性の他にすべり摩擦抵抗の性能が重要視されるようになった。しかし、路面のすべり摩擦特性を定量的に把握することは非常に困難である。これは、すべり摩擦に影響する要因が多く、さらに要因同士が重なりあって影響することによる。本稿では実測値を基に、主要因とすべり摩擦係数の関係について述べる。

普通すべり抵抗係数のことをすべり摩擦係数と呼んでいるので、以下すべり摩擦係数と呼ぶことにする。

2. 路面とタイヤの関係

2.1 タイヤのすべり摩擦の定義

路面とタイヤ間のすべり摩擦には、縦すべり摩擦と横すべり摩擦の二種類がある。以下、2つのすべり摩擦について述べる。

2.1.1 縦すべり摩擦係数

タイヤが進行方向と同一方向に回転しているときに、このタイヤに制動力を加えるとタイヤの接地面に進行方向に逆方向の摩擦力が生じる。制動力が十分大きい場合はタイヤは完全にロックされ、路面に対するタイヤ表面のすべり率は100%となる。この時のすべり摩擦抵抗とタイヤ荷重との比を縦すべり摩擦係数という。また、制動が完全でない場合、特殊な機構をつ

けた場合等で試験タイヤが完全にロックせず、試験車の対路面速度と試験タイヤの回転速度差のある場合をすべり率のあるすべり摩擦状態といい、すべり率は次式で表す。

$$\text{すべり率} = \frac{\text{試験車の対路面速度} - \text{タイヤの回転速度}}{\text{試験車の対路面速度}} \times 100$$

普通の完全ロック制動の場合、すべり率100%の縦すべり摩擦係数という。

2.1.2 横すべり摩擦係数

タイヤが進行方向と同一方向に、自由に回転しているときに、タイヤ面に直角方向の外力が働いて、タイヤを横に移動させようとするとき、タイヤの接地面においてこれに抵抗する力が働く。これを横すべり摩擦といい、この時のすべり摩擦抵抗とタイヤ荷重との比を横すべり摩擦係数という。一般にタイヤの回転方向と進行方向が図-1のように θ° の角度で走行している場合、タイヤ回転面に直角の方向に横すべり抵抗が働く。これを横すべり角 θ° の場合の横すべり摩擦係数という。横すべり摩擦係数は、横すべり角の増大とともに大きくなり、ある角度以上になると値は一定となる。横すべり角 90° の場合を考えるとタイヤゴム面の路面に対するすべり状態は、本質的に縦すべり摩擦の場合と同様であると考えられる。ただ、タイヤ本体の剛性による変形、接地面の形状、トレッドの方向の違いがあるので全く同じではない。

*おのだ みつゆき 土木研究センター技術研究所研究開発第二部長

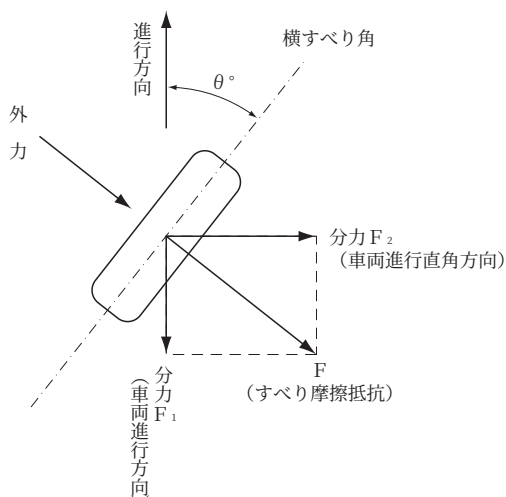


図-1 横すべり摩擦抵抗

2.1.3 制動時の横方向のすべり

縦すべり摩擦、横すべり摩擦の定義は前述のとおりであるが、混同されやすい問題に制動時の横方向のすべりがある。タイヤが進行方向に対して θ° の角度をなして、自由に回転しながら進んでいる場合、タイヤ面に直角に横すべり摩擦抵抗が働くのは前述のとおりである。この状態でタイヤを制動するとタイヤには図-2のごとく進行方向と反対方向の抵抗が働くようになる。この抵抗は縦すべり摩擦力であり、接地パターンが異なるので、いわゆる縦すべり摩擦抵抗値とは少し異なるが、本質的には同様である。

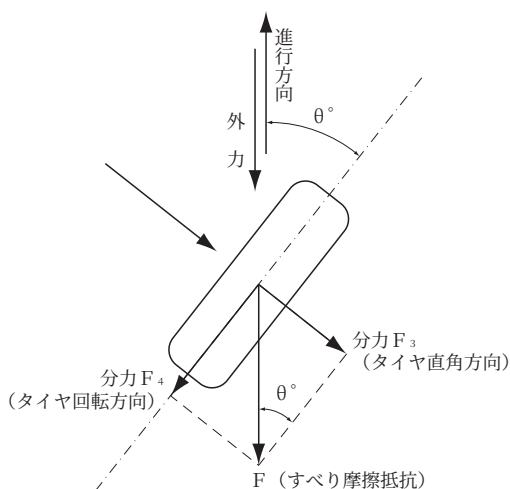


図-2 斜めタイヤを制動したときのすべり摩擦抵抗

最近の車両にはABS等が取り付けられているため、タイヤがロック状態になることはほとんどないが、機能が作動しない場合にはロック状態となることは考えられる。

2.2 タイヤゴムの摩擦機構

摩擦現象については古くより論じられ、2つの固体間の摩擦抵抗力は接触面積には関係なく、圧力に比例するとされている。そして摩擦抵抗力と圧力との比を摩擦係数と呼んでいる。

ゴムの摩擦の原因は主として付着によって起こるせん断変形とヒステリシス損失、および凝集力を破壊するための力の3つに分けて考えられる^{1) 2) 3)}。

2.2.1 付着によって起こるせん断変形の摩擦

付着によって起こるせん断変形の摩擦は図-3に示すように、巨視的に見るとAなる面積で接触しPなる圧力を受けている。実際は A_{a1} , A_{a2} , …… A_{ai} なる小面積の突起部の集合体 A_a で接触していることになる。この真の接触区域でゴムと固体表面との間に分子間力が働いて付着力が生ずる。 F_A はこの付着力による結合をせん断破壊する力であり、その力は真の接触面積に比例する。

付着による摩擦係数 f_A は荷重Pが大きくなると f_A は小さくなり、またPが一定の場合は f_A は A_a に比例し、 A_a が増大するにしたがって f_A は大きくなる。これは付着力に関するかぎり、粗な路面よりもなめらかな表面の方が摩擦係数が大きいことを表している。実験的にもガラスなどのなめらかな表面でゴムスライダを用いた場合、 f_A が2.5にも達すると報告されている。これは、乾燥路面のすべり摩擦係数は粗いものよりも、密粒のものの方が大きいことと一致している。

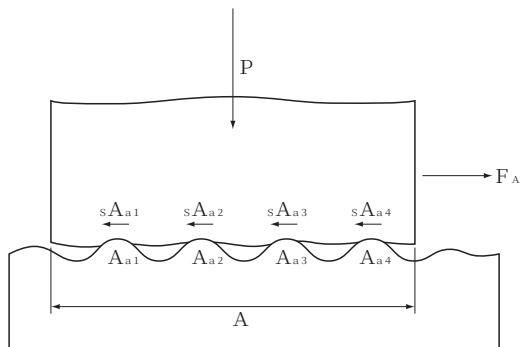


図-3 ゴム表面の付着力によるすべり抵抗

2.2.2 ヒステリシス損失*による摩擦

ヒステリシス損失による摩擦は、図-4においてゴムの表面が十分潤滑になっていて付着のないものと仮定する。タイヤが図-4の液状の表面をすべる場合、ゴムは種々変形し復原する。その間にヒステリシス損失が起こる。このヒステリシス損失に相当する力が、ヒステリシス損失による摩擦抵抗力である。したがって、ヒステリシス損失による摩擦力はゴムのヒステリシス損失値と、ゴムが受ける変形量（路面の微視的凹凸）とに比例する。このときのヒステリシス損失による摩擦係数は球の転がり抵抗係数と等しいと考えられている。

ヒステリシス損失による摩擦係数 f_B はゴム質のほかに、当然接地圧に比例する。実際にはヒステリシス損失のみによる摩擦係数は比較的小さく、そのオーダーは0.1前後であって、路面が非常にすべりやすくなったときの極限值がこのあたりからと考えられる。普通の湿潤路面ではヒステリシス損失の他に付着せん断抵抗（湿潤のために幾分小さくなっているが）や凝集力破壊の抵抗が働いている。

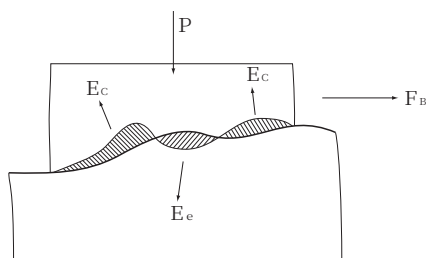


図-4 ゴム表面のヒステリシス損失によるすべり抵抗（→は力の方向をあらわしている。）

2.2.3 凝集力を破壊するための摩擦力

凝集力を破壊するための摩擦力は、たとえば路面上の鋭い突起がタイヤゴムを切るような場合、タイヤゴムの凝集力に抵抗してこれを破壊することがある。この場合タイヤゴムの持つ凝集力に相当する摩擦力が働くことになる。

実際の推定によっても、この抵抗は全体の摩擦抵抗のごく小部分を占めるにすぎない（全体の約2%といわれている）。

2.2.4 すべり摩擦機構の実際

上述のゴム摩擦の原因は、主として付着力によって起こるせん断抵抗による摩擦係数 f_A とヒステリシス損失によって起こる摩擦係数 f_B と凝集力を破壊するための摩擦係数 f_C から成っている。実際の路面上では、乾燥状態では付着によるせん断抵抗が大部分であり、湿潤状態ではヒステリシス損失が主要部分となるが、付着せん断部分も働いている。凝集力破壊の抵抗は特定の条件の場合のみ問題となり、一般にはあまり大きな要因とはならない。

2.3 タイヤの性質

2.3.1 タイヤ用ゴム

現在自動車のタイヤに使用されているゴムには、天然ゴムと合成ゴムの2種類がある。天然ゴムはゴム樹からとれた乳状分泌物ラテックスを加工して得られたものである。常温では強靱な弾性を示すが、加熱すると約120℃で軟化し始め、250℃～300℃で分解する。合成ゴムは、天然ゴムと全く同じ分子構造をもつイソブレンゴムのほかSBR、NBR、CR、IIRなどがある。これらの合成ゴムは天然ゴムと非常によく似た分子構造であり、性質もほぼ同様である。さらに天然ゴムと合成ゴムを混合使用している場合もあり、多種多様のタイヤゴムが使用されている。

各種のタイヤゴムの性質は、実用の範囲ではあまり大きな差はないようであるが、詳細に検討すると各社の製造方法によって性質は異なるものと考えられる。

2.3.2 トレッド機構（パターン）、その他

タイヤが路面に実際に接触する部分はトレッドであり、タイヤのすべり摩擦はトレッドと路面のすべり摩擦といってもよく、ゴムトレッドの性能およびパターンがすべり摩擦に最も重要な関係をもっている。

トレッドパターンはタイヤの路面に対するすべり摩擦係数を大きくする目的と、車両の振動をなるべく少なくする目的の2つをもっている。

湿潤の場合に平滑な路面では、トレッド付きタイヤが絶対に優れているが、粗くてざらざらした路面では平滑タイヤはトレッド付きタイヤと同等あるいはそれ以上のすべり摩擦抵抗を示す。乾燥路面では、平滑タイヤの方が接触面積が大きいので常にトレッド付きタイヤより高いすべり摩擦抵抗を示す。したがって、湿潤時の排水性を良くしたり汚れた路面（砂利道含む）

* ヒステリシス損失：路面に接触しているゴムが種々変形し復原する間にヒステリシス損失が起こる。

粘弾性体に繰り返し力を加えると仕事の一部が熱エネルギーに代わることをいう。

での走行性をもたせるためには、ある程度のトレッドパターンのあるものが良い。実際にはこれらの目的を考慮して、各種タイヤが製作されている。

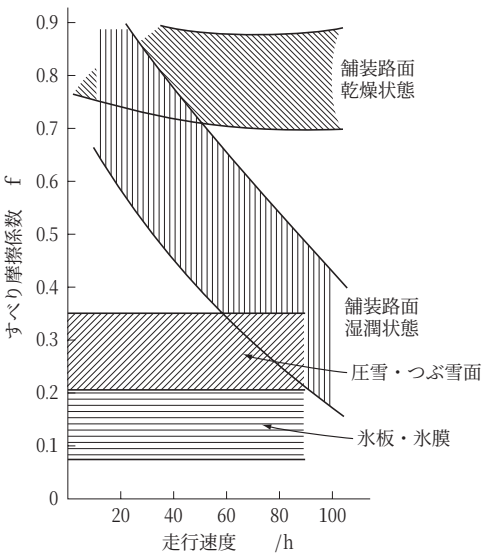
2.4 路面の性質

2.4.1 路面の種類

路面の種類はすべり摩擦に大きな影響を与える。まず路面の種類として、コンクリート舗装面、アスファルト舗装面、表面処理面、ブロック舗装面、覆工板面、土砂路面、雪氷路面、その他特殊路面、等があげられる。

一般にこれらの舗装の種類とすべり摩擦係数については一定の関係はなく、どの種類の路面でもその組成、材料の性質、施工技術等によって異なり、非常に良好なすべり摩擦係数を持つ場合とそうでない場合とがある。基本となるコンクリート舗装とアスファルト舗装では、両者の間にすべり摩擦係数についてはあまり差がないようであるが、ただアスファルト系の舗装の方がすべり摩擦係数の分布範囲が広く、すべりにくいものからすべりやすいものまでである（表－1 参照）。

図－5は、これまでに実測した結果をまとめたものである^{4) 5)}。

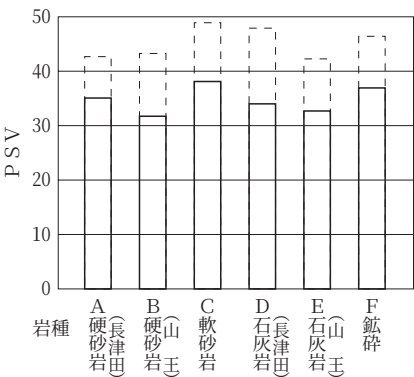


図－5 路面状態とすべり摩擦係数

2.4.2 骨材の性質

舗装混合物は骨材と結合材とによって構成されている。しかも構成比は骨材が大部分を占めているので、舗装のすべり摩擦を支配する大きい要因となる。骨材の種類、粒径、形状、硬さ、摩擦特性および化学組成

などは直接影響を持つ重要な性質である。図－6は、促進研磨試験による骨材の種類とPSVの関係を示したものである^{4) 5)}。



図－6 岩種別研磨試験結果（点線は研磨前、実線は12時間研磨後）

3. 各種要因とすべり摩擦係数

3.1 路面状態とすべり摩擦係数

3.1.1 乾燥路面のすべり摩擦係数

乾燥時の摩擦係数は主としてタイヤゴム質によって左右され、路面および走行速度による差は少ない。一般的な路面の乾燥時のすべり摩擦係数は表－1からも明らかなように大体0.5～1.0の範囲にある。この範囲内で温度が低いときは摩擦係数は大きく、0℃付近では1.0前後となるが、30℃以上では温度の影響はなくなる。また乾燥時、表面が平滑な路面では摩擦係数が多い。すなわち、路面とタイヤの接触面積が大きいほど乾燥時の摩擦係数は大きくなる。

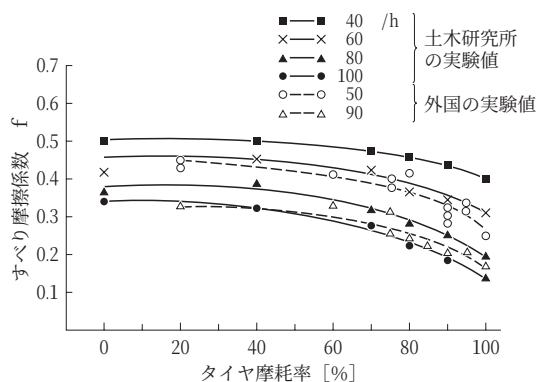
表－1 路面の種類別すべり摩擦係数の範囲

路面の種類	摩擦係数の範囲	
	乾 燥	湿 潤
コンクリート舗装	1.0～0.5	0.9～0.4
アスファルト舗装	1.0～0.5	0.9～0.3
砂 利 道	0.6～0.4	—
銅 板 等	0.8～0.4	0.5～0.2
積 雪 路 面	—	0.5～0.2
氷 路 面	—	0.2～0.1

3.1.2 湿潤路面のすべり摩擦係数

湿潤時のすべり摩擦係数は表－1からも明らかのように乾燥路面より小さい。湿潤路面のすべり摩擦係数はタイヤ接触面の排水性が一番重要な問題となる。排水性が良好な路面では、乾燥時の摩擦係数とほぼ等しい値となり、場合によっては乾燥時の摩擦係数より大きくなることもある（乾燥路面が汚れていたり、塵埃がある場合等）。排水性に関係するものはタイヤのトレッドと路面性状の両方にあり、路面が平滑な場合やトレッド面が摩耗している場合には摩擦係数が小さいが、逆にトレッドが十分確保され、路面の粗さが大きい場合、すべり摩擦係数は大きくなる。

図－7は、速度別トレッドの摩耗率とすべり摩擦係数の関係を示したものであり、摩耗率が70～80%以上になると摩擦係数はかなり小さくなる。特に速度が高いときに顕著に表れている。これは路面上の水の排水性が低下するためであると考えられる^{4) 5) 6)}。



図－7 摩耗量とすべり摩擦係数の関係

3.1.3 雪氷路面のすべり摩擦係数

一般路面のすべりは舗装面とタイヤ表面との摩擦の問題であるが、舗装面上に積雪があったり表面が凍結した場合のすべり摩擦抵抗はもはや舗装表面性状にはほとんど関係がなくなり、雪氷路面とタイヤ間のすべり摩擦抵抗の問題となる。しかも雪氷路面のすべり摩擦係数は一般路面のすべり摩擦係数よりはるかに小さく、状況によっては走行性（発進不能、制動距離の増大、方向性の低下等）など種々の問題の原因となるので非常に重要である。表－2は、雪氷路面のすべり摩擦係数の実測値をまとめたものである^{4) 7)}。

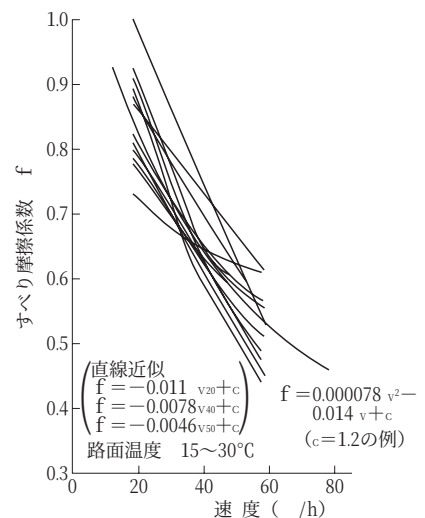
表－2 雪氷路面のすべり摩擦係数

状 態	すべり摩擦係 数 値	速 度
氷 ～ 氷 板	0.10～0.20	30～40 /h 平滑な氷または新雪は0.1以下になることもある。
新雪・氷に近い圧雪	0.20～0.25	
普 通 の 雪	0.25～0.30	
ざらめ雪・融け始めた雪	0.30～0.40	
積雪上に塩化物散布	0.35～0.45	
積雪上に砂散布	0.20～0.30	
積雪上に砂・塩化物混合散布	0.30～0.50	

3.2 走行速度および温度とすべり摩擦係数

3.2.1 速度とすべり摩擦係数

タイヤと路面の間のすべり摩擦係数は、タイヤの移動速度に関係する。一般に乾燥路面では先の図－5を見ても分かるように、速度のすべり摩擦係数に対する影響はわずかであるが、湿潤路面では速度の増加に応じてすべり摩擦係数は減少する。図－8は、湿潤路面における速度とすべり摩擦係数の実測値を示したものである。



図－8 速度とすべり摩擦係数の関係（湿潤路面、アスファルト舗装）

3.2.2 路面温度とすべり摩擦係数

舗装路面のすべり摩擦係数が測定した時期によって変化することは、これまでの実験結果より明らかである。このようなことから、すべり摩擦係数は季節変化

の影響を受けるものと考えられる。季節変化の影響の原因は色々考えられるが、最も大きな原因は温度変化であると考えられる。気温と路面温度（表面）には相関関係があるのでいずれをとっても大差はないが、路面とタイヤの関係から見ると路面温度をとるべきであると考えられる。したがって、各地域において四季を通して測定したデータを基にまとめた結果を図-9、図-10に示した。これらの図は、路面温度および速度とすべり摩擦係数の相関関係を示したものである。また、これらの資料から解析して得られた相関式は以下のとおりである。

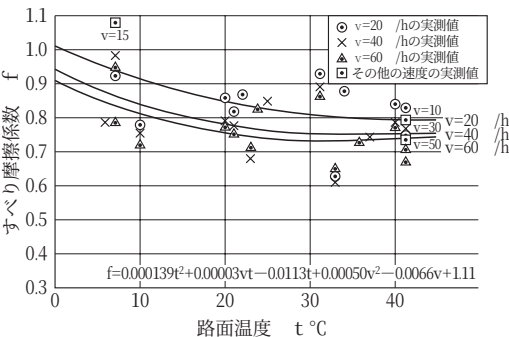


図-9 すべり摩擦係数相関図
(乾燥、コンクリート舗装)

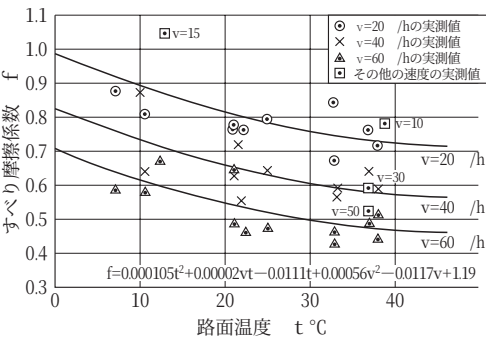


図-10 すべり摩擦係数相関図
(湿潤、コンクリート舗装)

- ・コンクリート舗装，乾燥路面
 $f = 0.000139t^2 + 0.00003vt - 0.0113t + 0.00050v^2 - 0.0066v + 1.11$
- ・コンクリート舗装，湿潤路面
 $f = 0.000105t^2 + 0.00002vt - 0.0111t + 0.00056v^2 - 0.0117v + 1.19$

ここで f は路面のすべり摩擦係数， t は測定中の路面温度， v は制動時の速度である。図を見ると，乾燥路面の場合すべり摩擦係数に対する温度の影響については，温度の低い所では路面温度が 1°C 増大する毎に摩擦係数は約 0.01 減少する。この傾向は温度の上昇とともに小さくなり， 40°C 付近では温度の影響はほとんどなくなる。湿潤路面においてもほぼ乾燥の場合と同様である。なお，速度変化による温度の影響はほとんど変わらないと考えてよい^{4) 5)}。

4. 車両運動とすべり摩擦係数

路面のすべり摩擦係数は，走行する車両（自動車）とどのような関係にあり，どのような面で重要となるのか簡潔に説明する^{4) 5) 8)}。

4.1 直線走行と制動停止距離

4.1.1 縦すべり摩擦係数と制動停止距離

自動車が直線部または直線に近い状態の道路を走行しているとき，何らかの理由で停止しなくてはならなくなった場合，安全に停止させるための距離は以下に示す式によって求められる。

視距としての制動停止距離

制動中の摩擦係数を一定とし，空気抵抗を考えない場合，

$$S = \frac{V^2}{2gf (3.6)^2}$$

ここで， V は制動前の自動車の速度， g は重力の加速度， f はすべり摩擦係数， S は制動停止距離である。なお，反応遅れ時間（判断時間，反動時間）は運転者によって大きく変化するのでここでは含めていない。

すべり摩擦係数に左右の差がある場合

路面のすべり摩擦抵抗が場所によって異なる場合，当然自動車は左右のタイヤで異なる摩擦抵抗を受ける。図-11は実際の車について計算した例を示したものである。乗用車で左右の差が 0.15 の場合，制動してから 1.5 秒程経過した時点で車両は 15° 回転することになる。

横断勾配がある場合

横断勾配のある直線上で制動した場合，自動車は制動前の慣性力と横断勾配による横方向との合成された方向にすべることになる。その結果の一例を，図-12に示す。特に勾配が大きい場合，高速の場合および雪氷路面などすべり摩擦係数が小さい場合変移量は大きくなる。

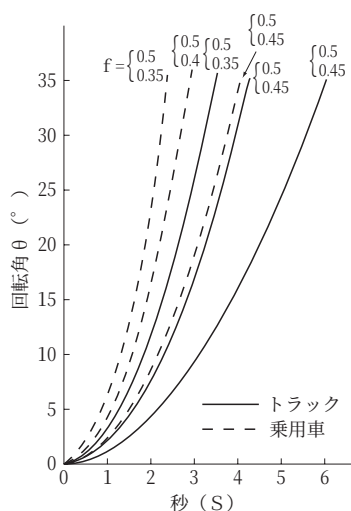


図-11 車種別回転角度

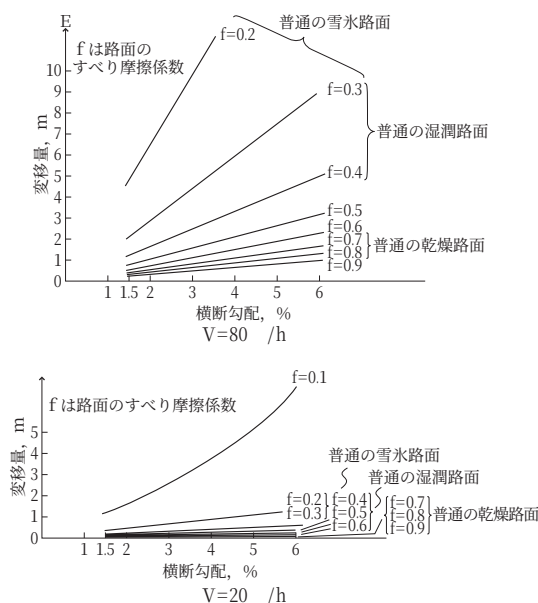


図-12 直線部の偏走

4.2 曲線部走行と横すべり摩擦係数

曲線部を自動車が行走する場合自動車には遠心力が作用し、この遠心力に抵抗してタイヤと路面の間に横すべり摩擦力が働き、自動車は安定した走行が可能となる。また、道路の曲線部には片勾配が付してあるので、横方向力は遠心力よりさらに小さくなり、路面の横すべり摩擦係数と釣り合うことができる。

4.2.1 曲線部走行時の釣り合い

一定条件をもった自動車（質量 M の車両）が曲線部を走行した場合、路面とタイヤ間の横すべり摩擦係数を f とすると $M \cdot f \cdot g$ の横すべり摩擦力が働いて釣り合う。遠心力が横すべり摩擦力より大きくなった場合には、横方向にすべり出す。曲線半径の小さい部分には一般に片勾配を付けており、そのために $M \cdot i \cdot g$ の横方向力が働く。これらの力の釣り合いは次式によって求められる。

$$g(i + f) \geq \frac{V^2}{R}$$

$$(i + f) \geq \frac{V^2}{127R}$$

ここで、 g は重力の加速度、 R は曲線半径、 V は走行時の速度である。上式が成り立つ間は、走行中安全である。この場合の f は最大横すべり摩擦係数であって、横すべり角の小さい値に対する横すべり摩擦係数ではない²⁾。

4.3 縦すべり摩擦係数と発進時の駆動

自動車が発進する場合、路面とタイヤの間には転がり抵抗+加速抵抗+勾配抵抗が働く。一般にすべり摩擦抵抗は、発進抵抗より大きい問題とはならない。しかし急発進したり雪氷路面上から発進する場合には、すべり摩擦係数が不足しスリップを起こして発進不能となる。

4.3.1 直線勾配区間の発進（縦断勾配）

縦断勾配 j がある直線部から自動車が発進するために必要なすべり摩擦係数は次式によって求めることが可能である。

$$M(f_r + j + a) \leq M \cdot f \cdot \beta$$

ここで f_r は転がり抵抗係数、 a は発進時の加速抵抗、 β は車両の全質量 M に対する駆動輪の荷重配分係数である。

4.3.2 合成勾配区間の発進（縦断および横断勾配）

道路の縦断勾配 j と横断勾配 i （合成勾配）区間より自動車が発進する場合、先と同様次式によって求めることが可能である。

$$f_c \geq \left\{ \left(\frac{j + f_r}{\beta} \right)^2 + i^2 \right\}^{1/2}$$

ここで f_c は合成力方向に対するすべり摩擦係数であり、その路面の持つ最大すべり摩擦係数と考えてよい。特に、駆動とすべり摩擦係数の関係からみて、すべり摩擦係数の小さい雪氷路面で問題となることが多い。

5. おわりに

路面とタイヤ間に生じるすべり摩擦係数について述べてきたが、係数は各種要因や要因の組合せ状態によって変化する。必要条件や目的に対してどの程度のすべり摩擦係数が必要となるのか、その最小限を把握し確保する必要がある。

一つは道路構造令に示されている道路設計する上で必要な係数値であり、もう一つは実際の道路と自動車

の走行条件の下で得られる係数値である。したがってこれら係数値を確実に把握することが必要であって、それによって走行の安全性、快適性を確保する手法が得られるものと考えられる。

特に車両の大型化・高速化が進む今日、路面とタイヤ間のすべり摩擦係数の問題は視認することができないだけに、より重要な要因として検討していく必要がある。

— 参考文献 —

- 1) Kummer and Mayer, Rubber and tire friction, Eng. Research Bulletin, B-80 (1960), The Penna State Univ.
- 2) W. Kummer, Unified theory of rubber and tire friction, Eng. Research Bulletin, B-94 (1966), The Penna State Univ.
- 3) 京極正明, 馬庭孝司, 高性能タイヤの研究, 山海堂 (1983)
- 4) 市原薫, 小野田光之, 路面のすべりとその対策—道路・滑走路・床面・雪水面—, 技術書院 (1997)
- 5) 市原薫, 路面のすべり抵抗に関する研究 —一般路面のすべりについて—, 土木研究所報告135号の3 (1969)
- 6) 市原薫, 小野田光之, タイヤ摩耗量とすべり抵抗, 土木技術資料 (1970)
- 7) 市原薫, 路面のすべり抵抗に関する研究 —雪氷路面のすべりについて—, 土木研究所報告138号 (1970)
- 8) 日本道路協会, 道路構造令の解説と運用 (1983)

☆

☆

☆

☆

☆

☆

路面のすべり抵抗の測定方法と測定値の標準化

(Skid Resistance Measurements of Pavement Surfaces and Their Standardization)

齊 藤 和 夫*

最近、世界各国で路面のすべり抵抗やテクスチャ測定及びその測定装置に関する関心が高まってきており、各国で使用している多種多様な装置の相互関係に関する合同実験や新しく開発された測定装置の性能評価が行われるとともに、国際標準に基づく路面管理システムの確立に向けた研究が行われている。しかし、わが国ではまだ国際標準に対応するシステムが確立されていないのが現状である。そこで、本報文では現在国際的に使用されている主なすべり抵抗測定方法と測定装置、測定値を標準化する方法として開発された国際摩擦指標（IFI）について説明し、日本で開発された測定装置の国際標準化とIFIの係わりについて述べる。

1. はじめに

車両が走行する場合、路面とタイヤ間の摩擦力が推進力を与え、停止時には制動力を与えて安全性が確保される。このため、すべり抵抗は道路や滑走路などの路面の安全性を示す重要な指標となる。

一般に、タイヤが路面に接して運動している場合、車両はタイヤの接触面で何らかの抵抗を受ける。タイヤが自由に回転している場合の抵抗はころがり抵抗（ころがり摩擦；rolling resistance）であり、タイヤがすべっている状態の抵抗がすべり抵抗（すべり摩擦；skid resistance）である。タイヤのすべり抵抗は主としてタイヤと路面間のすべり摩擦であるが、その他に路面の凹凸のためのタイヤの変形によるエネルギー損失による抵抗や路面突起物がタイヤを切り裂くような抵抗などがある。しかし、すべり抵抗の大部分を構成するものはすべり摩擦であるので、すべり抵抗は一般にすべり摩擦係数 μ で表現されることが多い。

すべり抵抗の測定方法は装置のタイプ、測定速度、水膜厚など各国さまざまである。そのため、舗装路面の設計や維持管理におけるすべり抵抗の基準も異なる。また、調査と研究結果の検討や評価において相互の比較が困難になるなどの問題もあり、統一したすべり抵抗値の指標の開発が求められてきた。

このため、世界道路協会（PIARC）の第1技術委員会（TC-1）は1992年に大規模な国際共同実験を行い、

世界各国の異なる装置と測定条件で測定されたすべり抵抗値を同一の標準に基づいたすべり抵抗値に換算する国際摩擦指標（IFI）を開発した。そして、このIFIを算定する方法の確立において日本で開発された測定装置が重要な役割を果たしている。

2. すべり抵抗の性質

すべり抵抗は基本的にはタイヤ（材質、トレッドパターン、磨耗）、路面（ミクロな粗さとマクロな粗さ）および運転パラメータ（速度、ブレーキ操作）の相互作用によって決定される。また、タイヤと路面間に介在する物資の量が多くなるほどすべり抵抗は低下する。冬期に路面が雪水に覆われると、路面それ自体はすべり抵抗に寄与しなくなる。これはタイヤと路面間に油やダスト等の汚れがある場合も同様となる。これらのケースについては、路面のすべり特性を別に考えなければならない。

一般にすべり抵抗の問題が生じるのは湿潤路面においてタイヤと路面間に薄い水膜（water film）が存在する場合である。舗装路面における骨材（路面の粗さ，texture）の役割は、

- 1）水膜を切り、タイヤと路面の接触面を確保する
- 2）路面の排水をする

ことにある。1）の役目は路面のミクロな粗さ（microtexture）、2）はマクロな粗さ（macrotexture）

*さいとう かずお 工博 室蘭工業大学教授 建設システム工学科

に依存し、表層混合物の粒度と表面処理に関係する。路面が新しい間は骨材がこの役割を果たすが、交通作用によるポリッシングにより骨材表面が磨耗したり、骨材が剥ぎ取られたり埋め込まれたりするにつれて、路面の粗さの役割が低下し、タイヤのトレッドだけが排水に寄与することになる。このような状態では高速でタイヤは路面との接触部をなくし、水膜上でスリップして、いわゆるハイドロプレーニング現象の発生する危険性が増大する。

すべり抵抗を考える場合は路面の特性のみに限定すべきではない。タイヤと路面間の摩擦はタイヤの状態、車両速度、水膜厚、温度等多くの要因に依存している。しかし、そのいくつかはまだ定量化されていないことから、すべり抵抗の測定においてこれら全ての要因についての測定条件は規定されていない。

3. すべり抵抗の測定方法と測定装置

3.1 すべり抵抗測定の目的と方法

湿潤路面上のタイヤと路面間のすべり抵抗の測定は一方で路面の特性を、他方でタイヤの特性を別々に測定する試験方法と装置が必要である。また、3つのパラメータである路面、タイヤと車両の相互作用を測定し、評価する別の方法も必要になり、調査の目的に応じて測定方法と装置が選択されることになる。

道路建設の側では、道路の供用後における交通条件等の変化によるすべり抵抗の変化を評価することに関心があり、自動車製作の側では車の方向制御特性に及ぼす摩擦の影響に関心があるため、車の操縦性を検査できるような試験車で路上試験することになる。

舗装設計に関する研究では、測定はほとんど単一の規定されたパラメータに限定されるが、異なる速度で、望ましくは実物サイズのタイヤで行われる必要がある。道路の維持管理のためには、通常の測定はすべての主要道路で行わなければならない。したがって、効率的な測定装置が望まれる。

このように、すべり抵抗の測定方法と装置はその目的によって異なることになるが、ここでは道路設計と維持管理の立場から、すべり抵抗の測定方法について述べる。

3.2 すべり抵抗の測定方法と装置

現場における測定装置

路面のすべり抵抗を現場において測定するフルスケールの測定方法（装置）はその測定原理に従って、縦すべり摩擦を測定する車輪ロック方式とスリップ方式、

横すべり摩擦を測定するサイドフォース方式の3つのタイプに分けられる。

a) 車輪ロック方式（locked wheel method）

タイヤが車両の進行方向と同一方向に回転しているときに、このタイヤに制動力を加えるとタイヤの接地面に進行方向と逆方向の摩擦力が生じる。制動力が十分に大きい場合は、車輪（タイヤ）は完全にロックされる。この状態ですべり抵抗を測定する方法の代表的な測定装置としてはアメリカを中心に採用され、ASTMに標準試験方法が規定されているASTM E-274 トレーラー¹⁾（写真－1）がある。



写真－1 ASTM E-274トレーラー（米国）

車輪ロック方式はアンチロックブレーキを装備していない車両の緊急制動時におけるすべり抵抗を測定するもので、車輪が完全にロックする状態で一回の測定を行い、タイヤと路面との接触面のオーバーストレスおよびオーバーヒーティングを防止する範囲でロックを解除する。これを数回繰り返して測定を実施する。

車輪ロック方式は車輪をロックした箇所の路面のすべり抵抗を測定することから点的測定であり、連続測定ができないことが欠点である。

b) スリップ方式（slip method）

一般に、走行車両の対路面速度とタイヤの回転速度に差がある場合をスリップ率のあるすべり摩擦状態といい、スリップ率何%におけるすべり摩擦抵抗と呼ぶ。

タイヤが自由に路面上をころがっている場合、スリップ率は0%であり、車輪がロックされた状態はスリップ率100%である。スリップ方式はアンチロックブレーキを装備している車両のすべり抵抗を示すもので、普通の制動状態ではスリップ率が0～100%の中間状態にある。スリップ方式で測定されるすべり抵抗はスリップ率に応じて変化し、15%前後のときに最大になる。スコットランドで開発され、ASTMに規格化されているGriptester（写真－2）はスリップ率14.5%、

滑走路のすべり抵抗測定装置として使用されている Saab Friction Tester (SFT) はスリップ率15%に固定して測定する方式（スリップ率固定方式）である。また、ノルウェーのNorsemeterやフランスのIMAGはスリップ率を0～100%に変化させることが出来るスリップ率変動方式である。これらスリップ方式の利点はすべり抵抗を連続的に測定できることである。



写真-2 Griptester (スコットランド)

c) サイドフォース方式 (side force method)

タイヤが進行方向と同一方向に自由に回転している時にタイヤ面に直角方向に外力が働いた場合、タイヤの接地面でこの外力に抵抗するすべり摩擦力 (side force) が働く。このサイドフォースの輪荷重に対する比を横すべり摩擦係数という。

サイドフォース方式による横すべり摩擦係数は自由に回転する測定輪（タイヤ）を進行方向に対して一定の角度 (slip angle) で傾けたコーナリング状態で測定される。これは車両が曲線部を走行している場合に相当するもので、車輪には遠心力による横方向力が働き、これに抵抗してタイヤと路面間に横すべり抵抗力が働く状態である。車両の進行方向と測定輪タイヤの回転方向に θ の角度をなしている場合、横すべり角 θ の横すべり摩擦係数という。

サイドフォース方式による代表的な測定装置は英国で開発されたSCRIM (Sideway-force Routine Investigation Machine, 写真-3) であり、ヨーロッパを中心に使用されている。また、滑走路測定用に開発されたMuMeterはアメリカで使用されている唯一のサイドフォース方式による測定装置である。サイドフォース方式により測定されたすべり抵抗は路面のマクロテクスチャの変動に比較的敏感ではないので、ほとんどのSCRIMにはマクロテクスチャ測定装置を備えており、これをSCRIMTEXと呼んでいる。



写真-3 SCRIMTEX (英国)

サイドフォース方式の利点はスリップ方式と同様にすべり抵抗の連続測定ができることである。

実験室における測定装置

主として実験室において作成された舗装のコアサンプル等のすべり摩擦特性を評価する実験室で用いるように開発されたポータブルな測定装置がある。現在、英国式ポータブルテスター (British Pendulum Tester : BPT) とDFテスター (Dynamic Friction Tester : DF Tester) の2種類が使用されている。

a) 英国式ポータブルテスター

BPTは英国で開発されたポータブルな測定装置で、1960年代初めから広く室内や現場で使用されてきており、日本にも早くから導入された装置である (写真-4)。BPTはゴムスライダーが路面と規定の長さで接触するように高さを調整した振子を所定の高さから振り下ろし、振子が路面を擦って振り上がる高さを読み取る方式である。この振り上がる高さはゴムスライダーが水で濡らされた路面を擦る時に、路面の摩擦によるエネルギー損失量により決まる。このエネルギー損失量に対応して振子が振り上がる高さに摩擦の程度を示す数値 (British Pendulum Number ; BPN) が0～140の範囲で刻まれている。

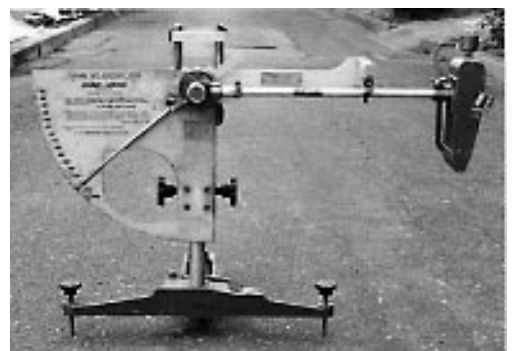


写真-4 British Pendulum Tester²⁾

ヨーロッパで使用されているBPTのゴムスライダーは天然ゴムが使用されているので、感温性が高いため温度補正する必要があるが、アメリカのASTM規格(E-303)では感温性の少ない合成ゴムスライダーの使用を規定しているので、温度補正の必要はない。また、アメリカではBPTのスライダーのすべり速度がほぼ10/hと非常に低速であるため、BPNは路面のマイクロテクスチャに依存しているとの考えから、BPNはすべり抵抗の評価よりもマイクロテクスチャの評価指標として有用であるとしている³⁾。

b) DFテスター

従来の測定装置とまったく異なる測定方法ですべり抵抗を測定する装置が日本で開発され、1998年にASTM標準試験方法E 1911¹⁾として規格化されたのがDFテスターである(写真-5)。DFテスターは半径350の円盤(駆動円盤と結合)に取り付けられた3個のゴムスライダーを有している(写真-6)。円盤およびゴムスライダーは最初に路面に接触していない状態で円盤を回転させ、回転が所定の速度(最大90/h程度)に達した時点で回転円盤を下降させてゴムスライダーを測定路面に接触させる。路面に接触した円盤の回転速度は路面と3個のゴムスライダー間の摩擦によるエネルギー損失により低下し、最後に回転速度0となり停止する。ゴムスライダーを路面に接触させる直前に路面に水を供給するので、湿潤路面のすべり抵抗を測定するもので、スリップ率は車輪ロック方式と同じく100%となると考えられている。

DFテスターのすべり抵抗の測定原理は、路面接触時の円盤の回転速度から停止時までの間における摩擦力の変化を(バネバランスの変位を電気エネルギーとして)検出し、すべり摩擦係数に変換するものである。

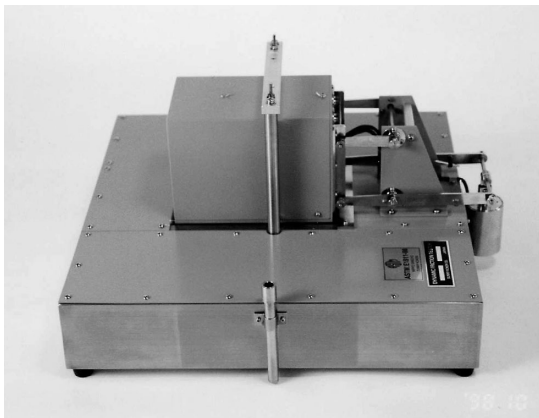


写真-5 DFテスターの外観



写真-6 DFテスター(円盤とゴムスライダー)

DFテスターの最大の特徴はこの測定原理にあり、一回の測定で0~90/hの範囲における速度変化とすべり抵抗の変化を連続的に測定できることにある。

DFテスターは後に述べるPIARCの国際共同実験への参加を通して国際的にその性能が高く評価され、日本で開発された装置として初めてASTM標準試験法として規格化され、国際摩擦指標(IFI)のすべり抵抗係数算出の有用な測定装置の一つと認定されるに至っている。

しかし、開発の初期の段階でDFテスターの性能に注目したのは日本ではなく外国の研究者、PIARC TC-1の議長を務めたペンシルベニア州立大学のJohn J. HenryとJim C. Wambold教授であり、筆者らとの20年間にわたる共同研究の成果として国際的に認知された。

DFテスターは室内と現場の両方で使用できるポータブルな測定装置であるが、その詳細は安部裕也(日邦産業)氏の学位論文⁴⁾、ASTM E1911¹⁾および故池田拓哉氏の報分⁵⁾を参照されたい。

日本のすべり試験車

日本では、維持管理データ収集のために管轄する道路のすべり抵抗測定用に国土交通省の各事業所および国土技術政策総合研究所や日本道路公団が、また研究用として北海道大学がフルスケール(バスタイプ)のすべり試験車を有している。それらの測定方法は車輪ロック方式およびサイドフォース方式の両方で測定できる万能型が多い。また、国土交通省では滑走路のすべり抵抗測定用にSAAB Friction Tester(スリップ率

10%)を導入している。

これらすべり抵抗測定車の詳細は路面のすべりに関する日本で唯一の著書⁶⁾に記述されているので参照されたい。

4. すべり抵抗測定値の標準化

これまでにすべり抵抗の測定方法と代表的な測定装置について述べたが、現在世界各国で使用されているすべり抵抗測定装置は非常に多くある。これらの測定装置は測定方法および測定条件が異なっており、各測定装置で得られたすべり抵抗値を直接的に比較評価することはできないのが現状である。そこで、世界道路協会（PIARC）の路面性状委員会（Technical Committee on Surface Characteristics ; TC 1）は世界各国の異なる方式によるすべり抵抗測定値を比較する方法を開発する目的で1992年9月と10月にベルギーとスペインで各々1ヶ月にわたる国際共同実験を実施した。実験箇所はベルギーで28ヶ所、スペインで26ヶ所の54ヶ所（空港、レーストラック、高速道路、一般道路を含む）である。また、測定装置は15ヶ国から37種類のすべり抵抗測定装置と14種類のテクスチャ測定装置が参加した（写真－7）。



写真－7 国際共同実験参加装置の一部（ベルギー）

なお、この共同実験には議長のJ. J. Henry教授からの参加要請を受けて、筆者と北海道工業大学の笠原篤教授を中心に自前の派遣組織を立ち上げ、民間2社の測定装置（DFテスターとKomatsu Skid Tester）および人員（6名）を派遣し、約2ヶ月にわたる共同実験に参加した。なお、この実験の紹介レポートは「道路建設（N0.553）」⁷⁾に示されている。

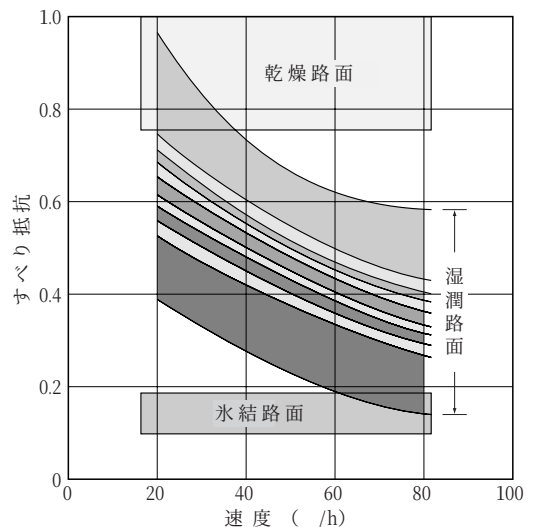
技術委員会はこの共同実験の測定データを基にして国際的に統一した基準値として国際摩擦指標（International Friction Index : IFI）を提案した⁸⁾。

4.1 国際摩擦指標（IFI）

すべり抵抗の速度依存性

IFIを説明する前にすべり抵抗の速度依存性とテクスチャの関係を理解しておく必要がある。

すべり抵抗の変動に大きく影響する要因として速度がある。図－1に示すように、特に湿潤路面で速度が高くなるとすべり抵抗が低下することが良く知られているが、その低下度合（速度依存性）は路面によって異なる。この相違はタイヤと路面の接地面における排水能力、路面の側から見るとテクスチャに依存するものと考えられる。



図－1 すべり抵抗の速度依存性

舗装路面は平滑ではなく凹凸があるが、その凹凸をテクスチャ（texture；粗さまたはキメ）と呼んでいる。すべり抵抗に関係するテクスチャはそのサイズによりマイクロテクスチャ（PIARCでは波長が0.5 以下）とマクロテクスチャ（0.5 ～50 ）に分けられる。湿潤路面ではタイヤと路面間に水が介在する。マクロテクスチャはタイヤの接地面から迅速に排水する溝を形成して、すべり抵抗の速度依存性を低下させるので、高い速度における摩擦力の確保に重要な役目を果たす。

一方、マイクロテクスチャはタイヤと路面間の水膜を破り、両者を直接に接触させるので、低速度における摩擦力の確保に重要な役目を果たす。

ペンシルベニア州立大学のHenry教授はすべり抵抗の速度依存性を表すモデルを開発し、筆者はそのモデル定数とテクスチャの関係を明らかにした⁹⁾。このモデルをPenn State Modelと呼ぶが、IFIはこのモデル

を基本として開発されたものである。

国際摩擦指標 (IFI) の開発

IFIはF60とSpの2つの定数を用いてIFI (F60, Sp)と表される。前者はあるすべり抵抗測定装置で任意の速度で測定されたすべり抵抗値を60 /hにおける標準値に変換した摩擦定数 (Friction Number), 後者はすべり抵抗の速度依存性を示す路面のマクロテクスチャ測定値から求められる速度定数 (Speed Constant)である。この2つの指標をPenn State Modelに組み込んだモデルをPIARCモデルと呼んでいる。

PIARCモデルは任意の測定速度Sにおける普遍化されたすべり抵抗値を表す曲線 (ゴールド曲線と呼ぶ)の推定値を求める曲線となるので、個々のすべり抵抗測定装置のF60とSpが与えられれば、このモデルから国際的に統一した標準値が得られることになる。

IFIを構成するSpとF60は、個々のすべり抵抗測定装置に対して図-2に示す手順で求められる¹⁰⁾。

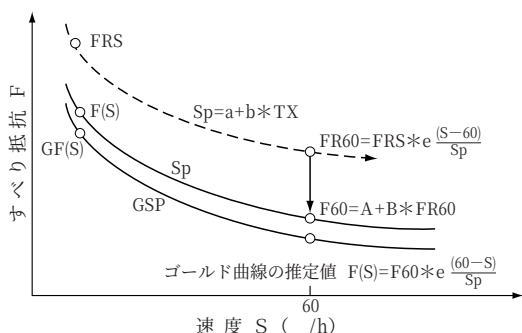


図-2 IFIを求めるPIARCモデルの概念

まず最初に、テクスチャ測定値 (TX) から次式によりSpを定める。

$$Sp = a + b \cdot TX$$

ここで、Spは路面の速度依存性の度合を表し、aとbは国際共同実験に参加したテクスチャ測定装置に与えられた固有の係数である。

テクスチャ測定値はサンドパッチ法 (一定の体積の砂などを路面に円形に広げた面積から、凹凸の面的な平均深さを計算する方法; ASTM標準試験法E-965)で得られる平均テクスチャ深さ (MTD) あるいはプロファイル (路面の断面から見た凹凸形状) 測定値から得られる平均プロファイル深さ (MPD) などが用いられる。国際共同実験に参加したTXの測定装置は後者の実車タイプが多いが、前者の簡易なサンドパッチ法が便利である。しかし、サンドパッチ法は精度等

問題も多く、ポータブルなテクスチャ測定装置の開発が望まれており、日本で後に述べるCTメータが開発され、ASTM標準試験法として規格化されて、式 のTXを測定する方法として用いることが可能となった。

式 で路面に特有のSpが定められると、次にこのSpを用いてそれぞれのすべり抵抗測定装置の任意の速度S /hで得られたすべり抵抗値を次式で標準的な60 /hのすべり抵抗値FR60に変換する。

$$FR60 = FRS \cdot \exp [(S-60)/Sp]$$

ここで、Sは測定速度、FRSは速度Sにおけるすべり抵抗値である。なお、式 における速度Sはすべり抵抗測定方式により、次のものを用いる⁸⁾。

車輪ロック方式 S = 試験車の速度 (V)

スリップ方式 S = V × スリップ率

サイドフォース方式 S = V × sin (横すべり角)

最後に、このFR60からゴールデン曲線上のF60を次式により推定する。

$$F60 = A + B \cdot FR60$$

ここで、AとBは国際共同研究に参加したすべり摩擦測定装置に与えられた固有の定数である。

これを一般化すると、次式ようになる。

$$F(S) = F60 \cdot \exp [(60-S)/Sp]$$

ここで、F(S)は速度Sにおける国際的な標準値の推定値である。この場合の国際的な標準値をゴールデン値とし、PIARCでは1992年の国際共同実験で対象とした路面の測定結果の平均値をその値としている⁸⁾。

国際摩擦指標IFIは式 のゴールデン速度定数の推定値Spと式 の60 /hにおけるゴールデン摩擦定数の推定値F60を用いてIFI (F60, Sp)として表す。このIFI値が得られると、任意の速度Sにおける国際的な標準値の推定値F(S)は式 から計算できる。

4.2 ポータブルな装置によるIFIの算出方法

これまで述べたように、国際摩擦指標の2つの要素、F60とSpは国際共同実験に参加した測定装置に固有の係数を用いて算出される。したがって、国際共同実験に参加していない装置あるいはその後新しく製作された装置から算出することができない。また、固有の係数が与えられているすべり抵抗測定装置およびテクスチャ測定装置のほとんどは実物大の大型測定車であり、地域間や国間の移動が困難で、かつ移動および測定コストが高い。そこで、簡単に輸送可能でかつ測定費用も安いポータブルな測定装置によるIFIの算出方法を確立することが課題である。

IFIの要素のうちF60の算出に関しては、国際共同実

験に参加した装置の1つとしてDFテスターを用いた方法が既にASTM標準指針（E 1960-98）¹⁾に規格化されている。すなわち、式 におけるDFテスターの係数は $A=0.081$ 、 $B=0.732$ と与えられているので、 $F60$ の算出は次式により行う。

$$F60=0.081+0.732 \cdot DFT_{20} \cdot \exp(-40/Sp)$$

ここで、 DFT_{20} はDFテスターの速度20 /hにおけるすべり抵抗測定値である（式 に $S=20$ を代入）。

また、ASTM E1960において速度定数 Sp の算出方法は次式のいずれかにより行うこととしている。

$$Sp=89.7 \cdot MPD+14.2$$

$$Sp=113.6 \cdot MTD-11.6$$

ここで、 MPD はASTM E1845の標準指針による平均プロフィール深さ（単位 ）， MTD はE 965標準試験法（サンドパッチ法）による平均テクスチャ深さ（単位 ）である。

しかし、サンドパッチ法は非常に簡易な方法であるが、測定結果が測定者の技能に影響される面があるという欠点がある。そこで、ポータブルでかつ安定したプロフィール測定可能な装置としてCTメータの開発がHenry教授、Wambold教授の協力のもとに日本で進めれ、2001年に MPD 測定装置としてASTM標準試験法（E 2157）¹⁾に規格化されたことから、DFテスターとセットでポータブルな測定装置によりIFIの算出が可能となった¹³⁾。

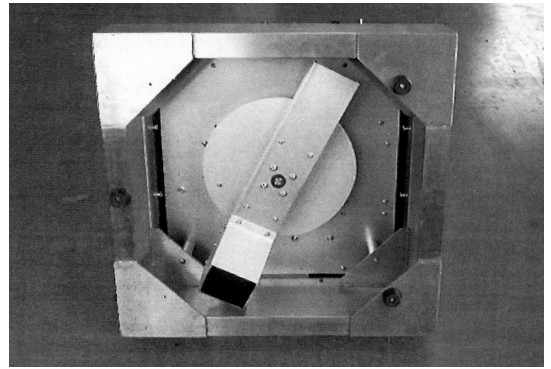
CTメータ（Circular Texture Meter）

CTメータはDFテスターによるすべり抵抗測定軌跡と同じ軌跡上のプロフィールをレーザーで測定する非接触型の装置である（写真－8）。

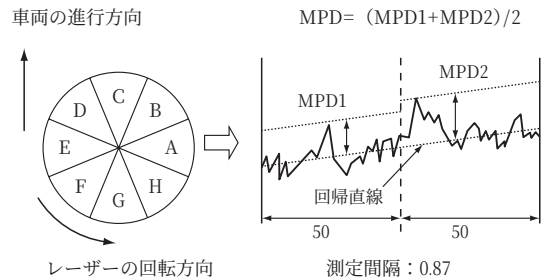
CTメータが測定するプロフィールは図－3に示すように、円周892 を8等分し、それぞれの区間の平均プロフィール深さをASTM E 1845とISO13473-1に規定する計算方法で算出するものである。サンプリングは0.87 毎に路面の凹凸を感知し、1回転1024ポイントの測定を行う（図－3）。

従来のテクスチャ測定装置に比したCTメータの特徴はポータブルであることにより輸送が容易であること、すべり抵抗測定軌跡の正確なプロフィール測定が可能なこと、車両の進行方向およびそれに直角する方向のテクスチャを測定できること、再現性が優れていること、などが挙げられる。

CTメータの性能および他機種との比較は各国の測定装置を集めて毎年NASA（Wallops Flight Facility）

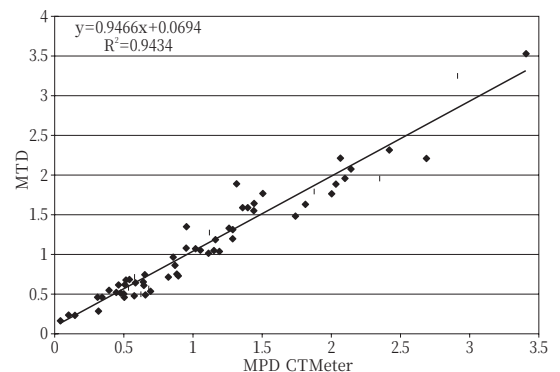


写真－8 CTメータの測定部分（レーザーヘッド）



図－3 CTメータによるMPDの計算方法

で行われている「NASAタイヤと滑走路の摩擦ワークショップ」での共同実験およびいくつかの海外での共同実験で確認されたものである。たとえば、NASAとドイツでの共同実験データを用いて、サンドパッチ法によるMTDとCTメータによるMPDの比較を図－4に示すが、両者の関係として相関係数が0.97と極めて高い次式が得られた¹²⁾。



図－4 MTDとCTメータのMPDの関係

$$MTD=0.9466 \cdot MPD+0.0694$$

ここで、 MTD はサンドパッチ法による平均テクス

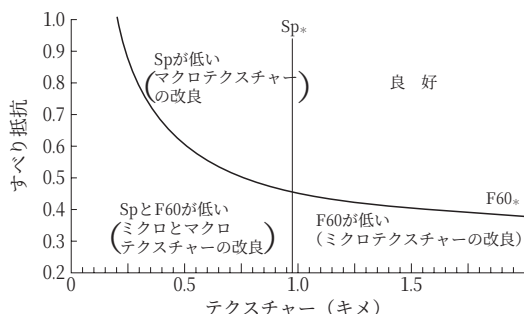
チャ深さ（ ），MPDはCTメータによる平均プロファイル深さ（ ）である。

これらの実験結果を基に，CTメータはDFテスターに続いてASTM標準試験方法として規格化された。また，式 のMPDをCTメータにより測定することにより，式 のDFテスターの測定値と合わせて，IFIの算出方法が確立された。

4.3 IFIの舗装路面マネジメントへの利用

IFIは舗装路面のすべり抵抗値とテクスチャ改良のマネジメントや骨材と配合設計の選択に利用することができる。いま，舗装管理者が舗装路面でIFIの確保すべき管理水準としてIFI*（F60*，Sp*）を設定すると，PIARCモデルの式 のSpと式 のF60の代わりにそれぞれを代入して解いた結果に基づいて，**図－5**に示すような個々の測定装置に対する最小のテクスチャとすべり抵抗の管理基準が得られる。この図はCTメータとDFテスターに対してF60=0.3，Sp=100 /hとして描いている。

対象とした路面のすべり抵抗をDFテスターですべり抵抗値FRSとCTメータでテクスチャ値TXを測定し，その値をこの図にプロットすると，4つの区分のどこに位置するかによりF60のすべり抵抗を維持するためのテクスチャ改善の指針が得られることになる。



図－5 IFIの路面マネジメントへの利用

5. おわりに

本報文では現在世界の主要国で使用されているすべり抵抗測定装置および国際的に統一したすべり抵抗の標準値を求めるIFIについて説明した。すべり抵抗測定装置では日本で開発されASTM標準試験法に規格化されたDFテスターおよびIFI算定に必要なテクスチャ測定装置として開発され，ASTM標準試験法に規格化されたCTメータについて紹介し，さらにこれらポータブルな装置を用いたIFIの算出および路面管理への利用について説明した。実務および研究面で参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 本文に記載のASTM規格は全て本書による：ASTM Standards, Vol.04.03, American Society for Testing and Materials, 2002.
- 2) すべり抵抗測定機のいろいろ（その2），舗装，33-9，1998.
- 3) John J. Henry: Evaluation of Pavement Friction Characteristics, NCHRP Synthesis 291, Transportation Research Board, 2000.
- 4) 安部裕也：路面のポータブルすべり抵抗測定装置の開発と利用に関する研究，室工大博士学位論文，2000.
- 5) 池田拓哉：すべりを計る（上）（下），舗装，33-5，p.28-32，舗装，33-6，p.34-38，1998.
- 6) 市原薫・小野田光之著：路面のすべりとその対策，技術書院，1997.
- 7) 堀口敬・笠原篤・斉藤和夫：舗装のすべりとテクスチャ（世界の道路あ・ら・かると），道路建設，No.553，1992.
- 8) International PIARC Experiment to Compare and Harmonize Texture and Skid Resistance Measurements, PIARC Report 01.04, The World Road Association, Paris, 1995.
- 9) 斉藤和夫・J.J.Henry：舗装路面の粗さとすべり抵抗の関係に関する研究，交通工学，Vol.23, No.6, p.19-27，1988.
- 10) 斉藤和夫：国際摩擦指標（IFI）の開発ーすべり抵抗測定値の基準化への挑戦ー，土木学会誌，Vol.83，p.27-28，1998.
- 11) 玉井昭典：舗装路面のテクスチャ測定装置の開発と路面性能評価への利用に関する研究，室工大博士学位論文，2003.
- 12) H. Abe, A. Tamai, J.J.Henry and J. Wambold: Measurement of Pavement Macrotexture with Circular Texture Meter, Transportation Research Record No.1764, p.201-209, 2002.

路面とすべりの関係

(Relationship Between Road Surfaces And Skidding)

保久原 均*・寺田 剛**

路面とタイヤ間に生じるすべり摩擦抵抗力は、走行の安全性、快適性を左右する大きな要因のひとつである。すべり摩擦係数は、各種要因（路面、走行、舗装、タイヤ、天候などの状態）によって大きく変化するものであるが、一般的なドライバーが安全走行を行うために必要とする路面すべり摩擦抵抗を確保する必要がある。ここでは、すべり摩擦係数の測定方法、路面別のすべり摩擦係数の概要ならびに各舗装および路面性状とすべり抵抗の関係について調査結果を述べる。

はじめに

自動車交通が主体となっている今日、走行の安全性を確保することは、道路における重要な課題の一つである。なかでも、路面とタイヤ間に生じるすべり摩擦抵抗力は、走行の安全性、快適性を左右する大きな要因のひとつである。すべり摩擦係数は、各種要因（路面、走行、舗装、タイヤ、天候などの状態）によって大きく変化するものであるが、一般的なドライバーが安全走行を行うために必要とする路面すべり摩擦抵抗を確保する必要がある。

ここでは、すべり摩擦係数の測定方法、路面別のすべり摩擦係数の概要ならびに各舗装および路面性状とすべり抵抗の関係について調査結果を述べることにする。

1. すべり摩擦係数の測定手法について

1.1 すべり摩擦抵抗の計測

すべり摩擦抵抗の測定には、英国で開発された振り子式のポータブルスキッドレジスタンステスト（BPT）のような簡易な測定機やすべり測定車、DFテスターがあるが、国内ではすべり測定車とDFテスターによる方法が主に用いられている。

すべり測定車

写真－1は国土交通省国土技術政策総合研究所が所有するすべり測定車であり、大型バスの**図－1**に示すような位置にすべり測定装置および試験用のタイヤをとりつけたものである。当測定車で140 /h程度までの高速走行における縦すべりと横すべりの状態を再現することが可能である。縦すべりは走行中に試験輪の



写真－1 国土技術政策総合研究所所有すべり測定車

*ほくはら ひとし 国土交通省国土技術政策総合研究所道路研究部道路研究室

**てらだ つよし 独立行政法人土木研究所基礎道路技術研究グループ舗装チーム

みにブレーキ（ロック制動）をかけることにより再現し、横すべりは試験輪のみを進行方向とは異なる方向に向けることにより再現している。縦すべり摩擦抵抗力は、試験輪を固定するブレーキ力（BF）と支軸が後方へ引っ張られるけん引力（TF）の2系統から計測している。一方、横すべり摩擦抵抗力は、遠心力に抵抗してタイヤに直角内向きに働く横方向力（SF）と車体に直角内向きに働くコーナリング力（CF）の2系統から計測している。縦および横すべり摩擦係数の算出は、おのおののすべり摩擦抵抗力（BF、TF、SF、CF）を試験輪にかかる荷重（W：おおむね400程度）で除すことにより求めている。

このすべり測定車は、雨天時や降雪時などのすべて

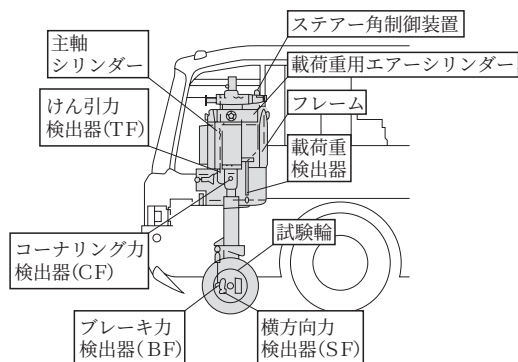


図-1 すべり測定車の概要
(国土技術政策総合研究所所有)

の天候条件において、実際のタイヤを用いて測定している点に特徴があり、最も正確な測定が可能である。

すべり測定車の合同比較試験

すべり測定車は、表-1に示す各地方整備局や北海道大学、独立行政法人北海道開発土木研究所、独立行政法人土木研究所、日本道路公団、日本自動車研究所などで所有している。ただ、これら測定車の管理状態や測定方法が不適当だと良好な値を得ることができ

表-1 平成12年度合同比較試験参加機関一覧

国土交通省国土技術政策総合研究所
東北地方整備局東北技術事務所
中部地方整備局中部技術事務所
近畿地方整備局近畿技術事務所
四国地方整備局四国技術事務所
独立行政法人土木研究所新潟試験所
独立行政法人北海道開発土木研究所
日本道路公団試験研究所
北海道大学
日本自動車研究所

ないため、管理や測定方法を統一し、測定車の性能と測定されるすべり摩擦抵抗力の信頼性を確保する必要がある。そこで、測定車の管理や測定方法を統一し、測定車の性能と測定されるすべり摩擦抵抗力の信頼性を確保するために、数年に一度の割合ですべり測定車を一同に会し合同比較試験を実施している¹⁾。

DFテスター

すべり測定車は、大きなバスに測定機が付いていることから誰もが手軽に扱えるものではないが、DFテスター（Dynamic Friction Tester）は携帯が可能であり、扱いも非常に容易である。測定機の下面には、円盤にゴム片が付けられており、円盤を路面と離れた状態で高速回転させ、概ね時速90 /hで円盤を路面に落下させる。落下した円盤は、路面とゴム片との摩擦により回転速度が徐々に低下し、やがて停止する。この過程において、円盤の回転速度と摩擦力を計測し、同時に摩擦力をゴム片にかかる荷重で割ることで動的摩擦係数を算出している。

DFテスターによる計測結果は、路面すべり測定車による縦すべり摩擦係数との相関もよく、図-2に示すように高い相関関係が確認されている²⁾。

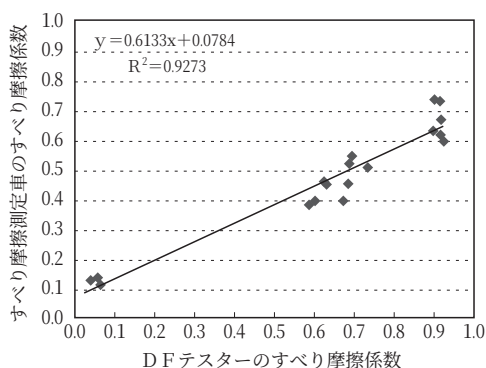
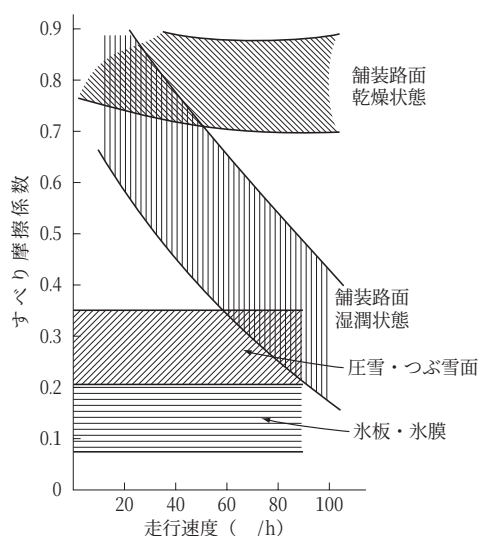


図-2 すべり測定車とDFテスターとの関係²⁾

2. 路面状態別のすべり摩擦係数

図-3は路面状態別の縦すべり摩擦係数を示したものである。図のとおり、乾燥状態の舗装路面や雪氷路面では走行速度による縦すべり摩擦係数の変化は少ないが、湿潤状態の舗装路面では走行速度の上昇に伴い縦すべり摩擦係数は小さくなっていく。また、縦すべり摩擦係数が小さくなるのは圧雪や氷板などの雪氷路面と、走行速度が速い場合における湿潤状態の舗装路面だとわかる。



図－３ 路面状態別の縦すべり摩擦係数³⁾

よって、走行安全性の面において、路面のすべりが問題になるのは、雨天時や降雪・積雪時であり、多くの場合は湿潤時のすべり摩擦係数により路面のすべりの評価を行っている。

３．道路設計や路面管理における縦すべり摩擦係数

道路構造令では、制動停止視距を規定する際に縦すべり摩擦係数が用いられている。道路設計において小さいすべり摩擦係数を用いると制動停止視距は長くなり、自動車走行上は安全側に作用することになる。逆に大きいすべり摩擦係数を用いると、自動車走行上は危険側に作用することとなる。表－２に道路構造令で規定する制動停止視距を決める際に使われている縦すべり摩擦係数を示す⁴⁾。この湿潤時のすべり摩擦係数は、十分に安全をみて設計に使われている値であり、この値は実道で許容されるすべり摩擦係数の最小値としてとらえるべきである。また、すべり摩擦に関する舗装の補修要否判断の目標値は、道路維持修繕要綱に示されている（表－３参照）⁵⁾。

４．新基準調査におけるすべり抵抗と各種要因の影響

４.１ 概要

土木研究所で昭和63年から路面性状と各種データの関連について追跡調査を行っている「新基準調査」の結果を用いて、すべり摩擦係数の経年変化とアスファルト舗装の各種性状がすべり抵抗に及ぼす影響を以下に概説する。

表－２ 制動停止距離を求めるための縦すべり摩擦係数⁴⁾

設計速度 (/h)	縦すべり摩擦係数
120	0.29
100	0.30
80	0.31
60	0.33
50	0.35
40	0.38
30	0.44
20	0.44

表－３ 補修要否判断における縦すべり摩擦係数の目標値（道路維持修繕要綱）⁵⁾

道路の種類	すべり摩擦係数	摘 要
自動車専用道路	0.25	80 /hで測定
交通量の多い一般道路	0.25	60 /hで測定
交通量の少ない一般道路	—	

４.２ 新基準調査概要

新基準調査箇所：表－４に示す27ヶ所

新基準で行っている調査項目：表－５に示す項目
解析データ：昭和63年度～平成２年度施工区間の平成10年度までのデータ

すべり抵抗測定方法：DFテスター

要因解析：すべり抵抗に影響を及ぼす要因を単相関により分析した。

表－４ 調査箇所一覧

番号	地域	表層	表層針入度グレード
101	北海道	細粒G13	80－100・ゴム
102		細粒G13	80－100
103		細粒G13	80－100・ゴム
201	東北	細粒G13F	60－80
202		細粒G20F	60－80
203		細粒G20F	60－80
301	関東	密粒20	40－60
302		密粒20	40－60
303		密粒20	40－60
401	北陸	細粒G20F	60－80・ゴム
402		細粒G20F	60－80・ゴム
403		細粒G20F	60－80
501	中部	密粒20	60－80
502		密粒20	60－80
503		密粒20	AC－100
601	近畿	密粒13	60－80
602		密粒20	60－80
603		密粒20	60－80
701	中国	密粒20	60－80
702		密粒20	60－80
703		密粒20	60－80
801	四国	密粒20	60－80
802		密粒13	60－80
803		密粒13	60－80
901	九州	密粒13	60－80
902		密粒20	60－80
903		密粒20	60－80

表－5 各種調査項目

カテゴリー	分 類	項 目
初期性状	舗装構成	舗装厚
		舗装の等価換算厚 T_A
	路床	設計CBR
	路盤	粒状路盤材料の修正CBR
	表層	As量
		通過量2.36
		空隙率
		マーシャル安定度
		フロー値
		ホイールトラッキング試験結果
		弾性係数
	原アスファルト性状	60℃粘度
		4℃伸度
		25℃針入度
		軟化点
	劣化後のアスファルト性状	60℃粘度
		4℃伸度
		25℃針入度
		軟化点
	現場コア	回収アスファルト25℃針入度
		回収アスファルト60℃粘度
		空隙率
		アスファルト量
環境調査	環境	平均気温（9～11月平均）
		降水量（9～11月平均）
交通調査	交通量	大型車交通量
	荷重	49kN換算輪
追跡調査	路面性状	わだち掘れ量
		ひび割れ率
		平坦性
	構造	FWDたわみ

4.3 調査結果

経年変化

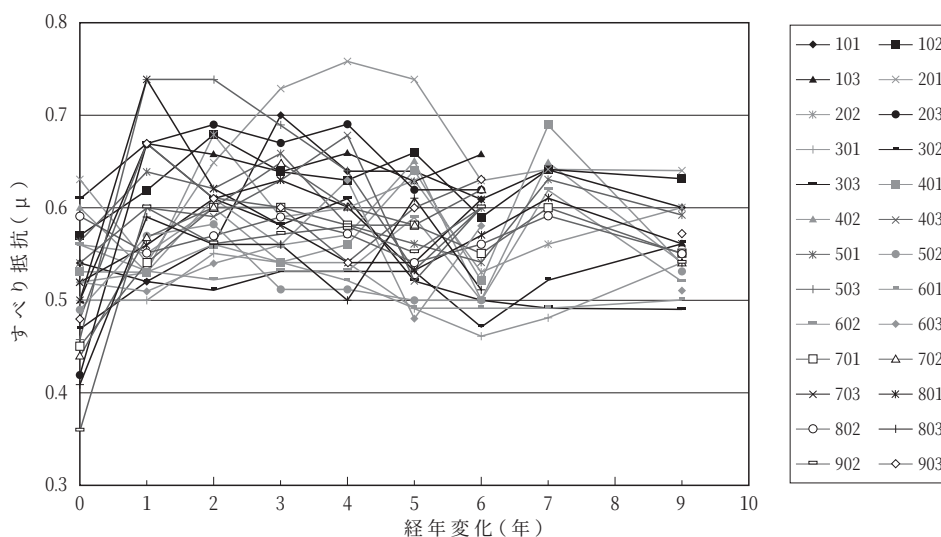
図－4にすべり摩擦係数の経年変化、図－5に大型車交通量との関係を示す。図－4からすべり摩擦係数の経年変化を見てみると、ばらつきが多いものの年月を経過しても2年目以降は概ね一定の値を確保していることが分かる。また、大型車交通量との関係は、ばらつきが多いものの、大型車交通量が増えるに従いすべり摩擦係数は徐々に低下し、ある一定値に近づく傾向があることが分かる。

舗装種（骨材粒度）の影響

27箇所の調査箇所を表層の舗装種（骨材粒度）ごとに平均し経年変化をみたのが図－6である。細粒G13Fは、1箇所しかないため平均ではないが、密粒に比べ細粒の方がすべり摩擦係数は高くなっており、密粒では余り差がないが、細粒では骨材最大粒径が小さい方がすべり摩擦係数は高くなっている。

すべり抵抗に及ぼす影響調査

平成10年に測定したすべり摩擦係数と新基準調査項目の関係について単相関分析を行い、相関係数の大きい順に並べたものを表－6に示す。その結果、すべり抵抗に影響を及ぼす項目を相関係数の大きい順に挙げると、9～11月平均気温が最も大きく、次いでアスファルト量、混合物2.36 通過量などである。相関係数は一番大きいものでも0.59程度と低く、明確なことは言いえないが、すべり抵抗に影響すると思われる項目は、気温とアスファルト量、粗骨材の量（アスファルト量にも関連）など使用混合物の品質が影響しているようである。



図－4 すべり摩擦係数の経年変化

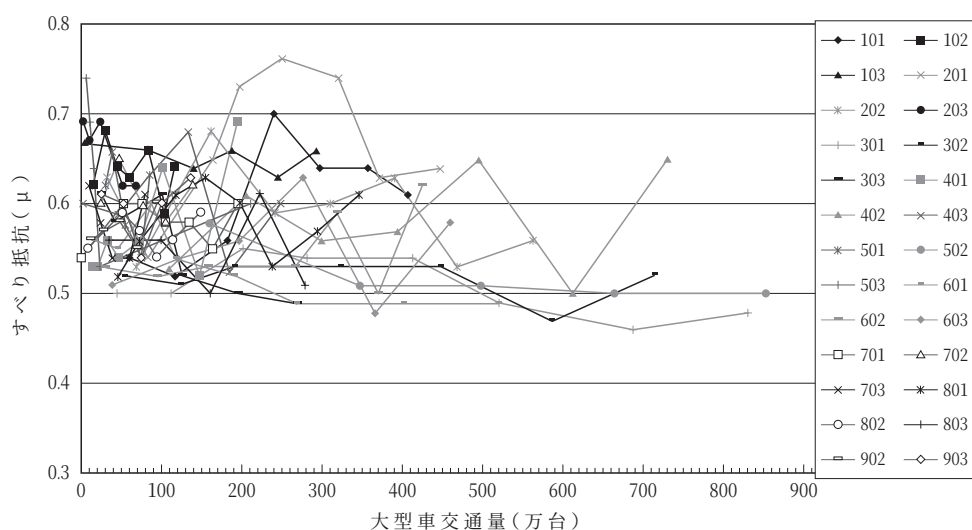


図-5 大型車交通量とすべり摩擦係数の経時変化

表-6 すべり抵抗との相関関係

順位	項目	相関係数
1	9～11月平均気温	0.5857
2	As量	0.5533
3	混合物2.36 通過量	0.5493
4	現場コアAs量	0.5255
5	フロー値	0.4584
6	回収As25℃針入度	0.4342
7	マーシャル安定度	0.4102
8	原As25℃針入度	0.3590
9	舗装厚さ	0.3555
10	FWDたわみD60	0.3079
11	下層路盤修正CBR	0.3058
12	T _A	0.2888
13	劣化As4℃伸度	0.2373
14	原As4℃伸度	0.2289
15	上層路盤修正CBR	0.1985
16	設計CBR	0.1962
17	累加大型車交通量	0.1865
18	動的安定度DS	0.1775
19	現場コア空隙率	0.1082
20	原As軟化点	0.1068
21	FWDたわみD0/D60	0.1058
22	劣化As軟化点	0.1025
23	弾性係数	0.0742
24	9～11月平均降水量	0.0663
25	空隙率	0.0548
26	劣化As25℃針入度	0.0500
27	原As60℃粘度	0.0332
28	FWDたわみD0	0.0283
29	回収As60℃粘度	0.0141
30	劣化As60℃粘度	0.0063

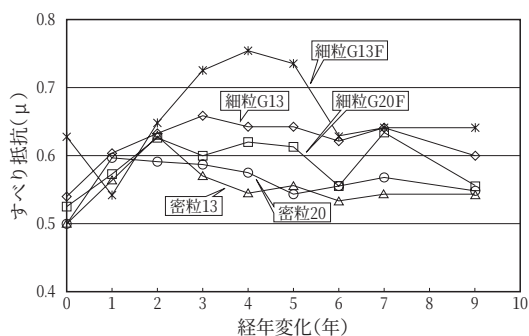


図-6 舗装種（骨材粒度）ごとのすべり摩擦係数経時変化

5. 各舗装種の路面性状とすべり抵抗の関係

土木研究所構内に施工した施工直後の各舗装の路面性状とすべり抵抗の関係を以下に紹介する。

5.1 概要

舗装種：表-7のとおり

路面性状測定項目と方法：表-8のとおり

すべり抵抗測定方法：DFテスター

測定時期：施工直後

表-7 測定に用いた路面の表層混合物の種類

工区番号	混合物の種類	目標空隙率(%)	施工厚さ()
2	排水性(13)	20	5
3	排水性(13)	17	5
5	排水性(10)	20	5
1	排水性(5)	23	5
4	密粒(13)	—	5

表－8 路面性状測定項目と方法

測定項目	測定装置
平坦性	3mプロファイルメータ, DAM
テクスチャ	MTM, CTM
空隙状態	現場透水試験器, 現場吸音率測定装置
・DAM(縦横断形状測定装置) : 軽量のポータブル路面プロファイル測定装置 ・MTM(路面テクスチャ測定装置) : レーザセンサによる縦断方向テクスチャ測定装置 ・CTM(路面テクスチャ測定装置) : レーザセンサによる円周上テクスチャ測定装置 ・現場吸音率測定装置 : 2マイクロホンインピーダンス測定 管による路面倒立式垂直入射吸音率測定	

5.2 路面性状とすべり抵抗の関係

表－9に各舗装の施行直後における各路面性状の値とDFテスターとの関係を一次回帰により求めた相関係数を示す。各路面性状とすべり摩擦係数の相関の結果は、DAMで測定した平坦性やCTMで測定したPSD10(PSDの波数が10cycle/m(波長10))やPSD100など波長の長い(測定間隔が広い)測定項目の相関が高い。

一方、供用性を経たすべり抵抗は、図－7⁶⁾に示すように測定波長が3以下と短い(例えばSMTDやCTMで測れる凹凸)マクロテクスチャやマイクロテクスチャと相関があると言われているが、施工直後の舗

装とはいささか様相が異なることが分かる。

排水性舗装など特にアスファルト被膜の厚い舗装は、施工直後の場合、すべり抵抗には、舗装表面のアスファルト被膜も影響するものと思われる。

上記のように路面すべり対策の評価においては、施行直後ばかりでなく、供用半年、1年後などを含めた評価が必要であり、アスファルト被膜が取れて骨材が露出した排水性舗装、トップコートなどすべり止めを行った舗装、密粒舗装、細粒舗装及びギャップ舗装など多種多様な舗装の路面性状とすべり抵抗の関係について詳細な調査・検討の必要がある。

5.3 路面テクスチャと交通事故の関係

TRRLレポートでは、図－8に示すようにSMTDというテクスチャが小さくなるにつれて、交通事故の回数が増加する結果が報告されている⁷⁾。表－9に示すSMTDの結果では、密粒が0.21に対して排水性舗装の骨材の最大粒径が大きくなるに従い大きくなっている。これを図－8のTRRLレポートの結果に照らすと交通事故を減らすにはSMTDを大きくし、路面のきめを粗くすることが有効と思われる。

また、排水性舗装を施工した箇所の中でも降雨時の交通事故が多い箇所(213箇所)における施工前後1年間の事故件数を調査した結果を図－9⁸⁾に示す。そ

表－9 路面性状とすべり摩擦係数の相関係数

測定装置	測定項目		排水性舗装				密粒	DFテスタとの相関
			13－20	13－17	10－20	5－23	13	
3mプロファイルメータ	平坦性 ()	$\sigma 1.5$	0.94	1.35	1.10	1.16	1.11	0.367
DAM	平坦性 ()	$\sigma 1.5$	1.32	1.92	1.37	1.44	1.32	0.754
		$\sigma 1.0$	1.36	1.80	1.42	1.31	1.31	0.949
		$\sigma 0.75$	1.29	1.85	1.34	1.32	1.31	0.838
		$\sigma 0.5$	1.34	1.73	1.39	1.35	1.31	0.886
		$\sigma 0.25$	1.28	1.72	1.42	1.32	1.32	0.837
		$\sigma 0.1$	1.27	1.71	1.42	1.32	1.31	0.818
	PSD (/)	波数0.1 (cycle/m)	7.55E+00	1.82E+01	1.09E+01	1.34E+01	3.69E+00	0.469
		波数1 (cycle/m)	4.61E-02	2.96E-01	1.36E-01	1.49E-01	1.72E-01	0.405
		波数10 (cycle/m)	1.09E-04	8.17E-05	9.26E-05	3.54E-05	5.00E-05	0.260
	IRI (/m)		1.64	2.23	1.87	1.77	1.70	0.755
MTM	SMTD ()		0.81	0.76	0.72	0.38	0.21	0.471
CTM	MPD ()		1.82	1.69	1.58	0.74	0.23	0.464
	PSD (/)	波数10 (cycle/m)	1.38E-02	2.90E-02	1.80E-02	9.00E-04	3.00E-04	0.899
		波数100 (cycle/m)	9.50E-03	1.17E-02	7.80E-03	2.30E-03	1.00E-04	0.730
		波数1000(cycle/m)	3.00E-05	2.00E-05	2.00E-05	4.00E-05	3.00E-06	0.009
現場透水試験器	透水量 (/秒)		1204.67	1120.00	1279.00	1171.67	0.00	0.125
吸音測定機	吸音率 (%)		63.2	48.68	68.92	69.23	0	0.020
現場通気試験機	通気時間 (秒)		8.3	14.4	5.6	9.0		0.564
DFテスター	60 /h	動的摩擦係数 (μ)	0.482	0.367	0.482	0.54	0.53	—

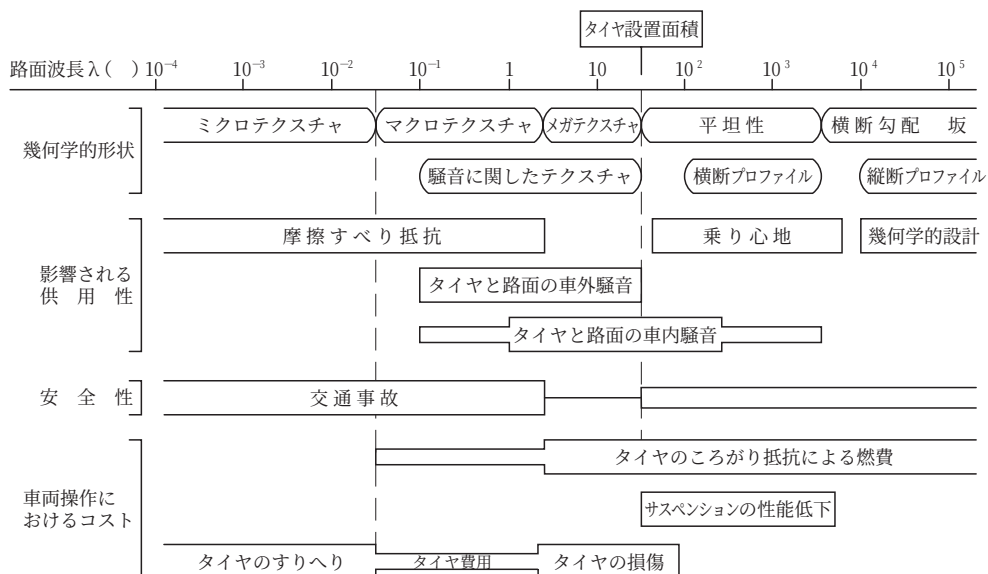


図-7 PIARCによるプロファイルの分類⁶⁾

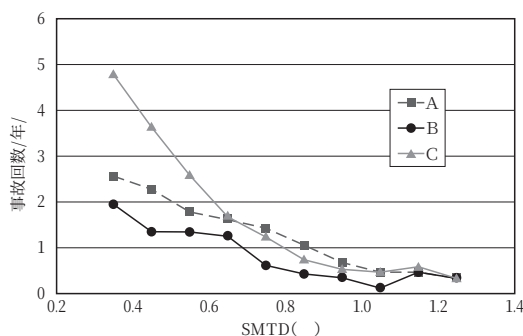


図-8 テクスチャと交通事故の関係⁷⁾

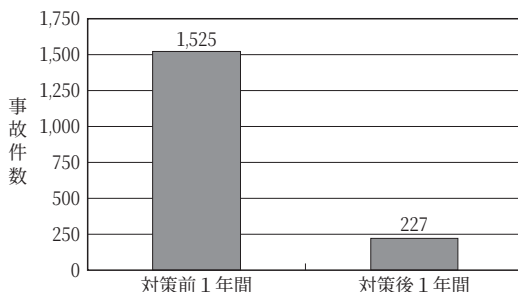


図-9 降雨時の交通事故件数比較
(排水性舗装施工前後)⁸⁾

の結果、降雨時の交通事故が約2割以下に減少する効果があった。これは、排水性舗装を用いたことにより、路面上への雨水の滞水が免れたこと、水はね等が解消されたことによる視認性の向上及び上述のようにSMTDが大きいことが効果的であったと考えられる。

6. まとめ

4, 5で述べてきたDFテスターによるすべり摩擦係数測定結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) すべり抵抗の経年変化は、ばらつきが多いものの年月を経過しても2年目以降は概ね一定の値を確保していることが分かった。
- 2) 大型車交通量が増えるに従いすべり抵抗は徐々に低下し、ある一定値に近づく傾向がある。

- 3) すべり抵抗に影響すると思われる新基準調査における項目は、相関係数は一番大きいものでも0.59程度と低く、明確なことは言いえないが、気温とアスファルト量、粗骨材の量（アスファルト量とも関連）などの使用混合物の品質が影響しているようである。
- 4) 施行直後における各路面性状とすべり抵抗の相関の結果は、DAMで測定した平坦性やCTMで測定したPSD10（PSDの波数が10cycle/m（波長10））やPSD100など波長の長い（測定間隔が広い）測定項目の相関が高い。
- 5) 交通事故を減らすにはSMTDを大きくし、舗装表面のきめを粗くすることが有効と思われる。

あとがき

以上、舗装の重要な性能のひとつであるすべり抵抗に関して、すべり摩擦係数の概略的な経時変化や施工直後における路面性状との関係を中心に紹介した。

今後、走行安全性や快適性から望まれるすべり抵抗を提供していく上で、新基準から得られたデータの詳細な解析や考察をさらに加えるとともに追跡調査を継続し、すべり抵抗に及ぼす影響要因や路面性状を調査していく必要がある。また、排水性舗装、トップコートなどすべり止めを行った舗装、密粒舗装、細粒舗装及びギャップ舗装など多種多様な舗装と路面性状とすべり抵抗の関係について経年変化を含めた詳細な調査を行い、路面のすべり対策について検討する必要がある。

新基準調査にご協力頂いた各地方整備局関係各位およびデータ整理に協力頂いた関係各位に感謝の意を示す。

☆

☆

☆

—— 参考文献 ——

- 1) 瀬尾ほか：第7回路面すべり測定車合同比較試験結果，国土技術政策総合研究所，資料57号（2002.11）
- 2) 瀬尾ほか：講座 路面の評価（第2回） 安全性からみた路面の評価，舗装，pp40～45（2001）
- 3) 市原ほか：路面のすべりとその対策，P68，技術書院（1997）
- 4) 道路構造令の解説と運用，pp256～258，日本道路協会（1983）
- 5) 道路維持修繕要綱，pp68，日本道路協会（1978）
- 6) PIARC：プロファイルの分類
- 7) TRRL Research Report 296
- 8) 岩崎ほか：高機能舗装の整備と効果，高速道路と自動車，pp36～45（2002.3）

☆

☆

☆

諸外国における路面のすべり抵抗について

(Skid Resistance of Road Surface in Overseas Countries)

神谷 恵 三*

すべり抵抗の確保は路面管理の中で安全性に関する項目であるので極めて重要である。また、道路が諸外国にまたがって供用されている時には、その管理方法は本来統一されているべきである。しかしながら、道路管理者にとって膨大な管理ストックの中で、常に一体の水準で路面管理を維持することは困難である。本文はPIARCのC1委員会によるすべり抵抗に関する取組みを紹介すると共に、すべり抵抗に関する諸外国の考え方や性能規定の事例を紹介するものである。

1. はじめに

路面のすべり抵抗と路面性状の関係、さらに安全性との関係について多くの研究が国内外で行われている。路面のすべり摩擦係数はすべり抵抗の指標であり、雨天時の交通事故率とある程度の相関がある¹⁾と考えられているが、国内外においてこれを公表している事例はあまり見られない。これは、交通事故が気象など路面のすべり抵抗以外にも様々な要因が関係していることによるものと思われる。

世界道路協会として道路に関する諸問題の解決を図るべく各国の道路行政及び専門家等によって構成されているPIARCにおいては、路面性状を扱う委員会C1がすべり測定の問題を担当している。C1では路面性状測定方法の標準化を図るべく、古くは1960年代から調査研究を進めているが、諸外国において試験方法や装置がさまざまであること、また近年になって路面の機能が多様化していること等の状況から、多様な路面に適用できる統一されたすべり抵抗の測定方法と評価値の検討を進めてきた。

ここではすべり摩擦測定に関するC1の取組みを紹介した上で、95年のモントリオール大会で発表された各国のすべり摩擦測定に関する基準や考え方を紹介する。

2. PIARCの取組み²⁾

路面性状を測定する試験装置は、諸外国において多種多様なものが開発されている。1つの国においても、道路管理組織ごとに互換性のない試験方法や装置が使

用される場合もある。PIARCのC1は、道路行政を支援する立場から、特に試験方法互換の必要性に着目し、試験方法や結果を比較すると共に出来る限り整合を図ることを目指している。今日この整合化は重要性を増してきている。試験装置が新技術を統合することにより新しいシステムの増載が可能となり進化して行く一方で、市場が世界規模で拡大していく潮流の中で基準化はより求められて行くからである。

2.1 すべり抵抗測定の標準タイヤ

1960年代の後半頃から、C1委員会（すべり摩擦に関する技術委員会）ではすべり抵抗測定装置で使用されるタイヤの標準化に着手し始めた。1975年には、今日広く使われている標準の参考書を刊行した。

タイヤゴムの劣化による性状変化を避けるために、試験タイヤは寿命が10年程度となるものが少量で生産された。道路管理者が2～3年で在庫を切らせてしまう時は、C1が責任を持って適宜生産に乗り出した。試験タイヤの前シリーズの生産者はスイスのマローヤ社であったが、同社はこれ以上の増産は保証できないことから、PIARCはタイヤ生産者を他に探すこととなった。

C1参加国の中で、短期（1年）及び長期（1年以上）計画でタイヤの必要条件を確立するための調査が実施された。短期的には手持ちタイヤを他国へ供給できる国が数カ国あったが、長期的には無理であることが判明した。

代替タイヤを研究するために、PIARCのタイヤモー

*かみや けいぞう 日本道路公団試験研究所道路部舗装研究室長

ルドは特殊タイヤ製作会社（ASTMタイヤ製作者）へ送られ、ブランクとリブタイヤの1式が製作された。これらのタイヤはPIARCが要求するラジアルではなくバイアスプライであったので、ASTMコンパウンドが使用された。したがって、PIARCのモールドでASTMコンパウンドを持つバイアスプライが認められるか否かを決める必要があった。参加国の中でPIARCのタイヤと特殊なバイアスプライタイヤによるすべり摩擦の比較試験が実施された。この比較試験では以下の5種類の測定装置が使用された。

- ・オランダのDWWトレーラー（制動力スリップ方式86%すべり比固定）
- ・デンマークのStradgraph（サイドフォース方式横すべり角12度）
- ・ベルギーのOdoligraph（サイドフォース方式横すべり角20度）
- ・ドイツのStuttgarter Reibungmer（制動力車輪ロック方式）
- ・フランスLCPCトレーラー（制動力車輪ロック方式）

試験路面を良好に選んだ結果、測定した摩擦係数は極めて低い値（フランス・ナントのLCPCにおけるエポキシコートした鏡のような試験走路）から高い値（ベルギーの試験橋における粗面処理した路面）までの十分な幅広い領域が得られた。図-1の結果から、線形回帰が $Y=X$ と大きく離れていないことが分かる。これは2種類のタイヤの間で系統だった有意差がないことを意味する。フランスのデータに少し系統誤差が見られたが、その影響は国際比較試験で観測されるこのような装置間の再現領域内であると判断された。さらに、車輪ロック方式の間で有意差はなかった。

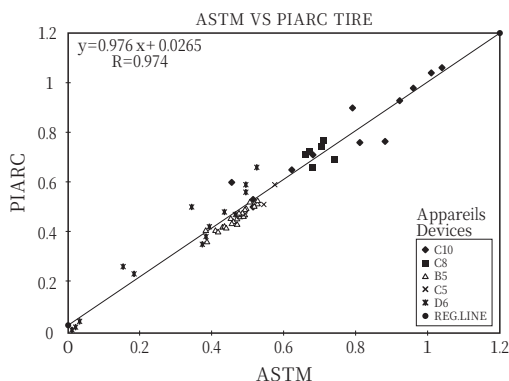


図-1 ASTMタイヤとPIARCタイヤによるすべり摩擦係数

ASTMコンパウンドタイヤは米国のタイヤ会社により感温性が最小となるように設計された。図-1で与えられた相関の中で、PIARCタイヤの測定値は温度補正がなされたが、特殊タイヤの測定は補正なしであった。これは、スイスにおけるBPN比較試験と共に、ASTMコンパウンドがすべり摩擦試験の通常の温度領域にわたって温度依存性を示さないことが判明した。

この見直しに基づいて、オランダのヴェレデスティンBVという会社がASTMコンパウンドを持つラジアルのPIARCタイヤを製造することに同意した。参加国がマヨール社製タイヤの相関試験を行うために、この会社から一式の新しいタイヤが出荷されることとなった。このように、試験タイヤの供給目処が立ち、新しいタイヤは米国の特殊タイヤと共にバックアップ材として供給されることとなった。

2.2 テクスチャとすべり抵抗の国際比較試験

次に、C1では路面のすべり抵抗とテクスチャを測定するために全世界で使用されている多種の方法につき整合を図ることを目的として、国際試験を実施した。この試験結果は国境を越えて一貫性のある舗装管理を実現するためには極めて重要であり、さらには舗装材料の仕様基準化を図るために測定方法は整合されているべきである。この考え方は利便性とタイムリーさにつき満場一致で採択された。

過去において、舗装のすべり抵抗測定装置間で相関を求める試みは数多く実施され、試験路面が同類という時には良い相関が得られたこともあったが、一般的な相関は得られたことがなかった。車輪ロック方式、スリップ方式、サイドフォース方式のような異なる測定方法で得られた摩擦係数の関連性を見るためには、テクスチャの影響を取る必要があることは認識されていたことから、本研究ではテクスチャの性状も組み込んだモデルを使用して摩擦係数の解析を行うこととした。

多数の装置から得られる摩擦係数とテクスチャの関係を求めるために、大きなデータベースが必要となった。この目的のために、幅広い摩擦係数とテクスチャを示す多種の舗装の上で、すべての装置は摩擦係数とテクスチャを同時に測定することが決定された。試験トラックでは、実路で観測される変動に欠けることが過去の研究において見られたことから除外された。試験トラックは装置のキャリブレーションには良いが、実路の条件に対してテクスチャと摩擦係数を関連付けることには適さない。試験区間の選択にあたっては、十分な注意が注がれた。それはテクスチャと摩擦係数

の異なったレベルが必要なだけでなく、路面の摩擦や研磨による異なったレベルが特に重要であるということであった。検討の結果、湿潤と乾燥の条件で実路区間を使用することが決まり、実験道路のホストとしてベルギーとスペインからの提案が了承された。

オーストラリア、ベルギー、カナダ、デンマーク、フランス、ドイツ、英国、イタリア、日本、オランダ、ノルウェー、ポーランド、スペイン、スウェーデン、スイス、米国という16ヶ国を代表する47の異なる測定システムの参加が実現した。これらの測定装置は67の異なる路面(33種類のテクスチャと34種類の摩擦係数)を測定した。

フルスケールの実験がベルギーとスペインにおいて、それぞれ1992年の9月と10月に実施された。実験は全部で54区間であり、ベルギーで28区間(2つの滑走路区間, 4つのレーストラック区間, 22の実路区間)、スペインで26区間(8つの滑走路区間, 18の実路区間)であった。

収集データはすべて1つのデータベースに入力された。データベースは、装置概要、実験区間の性状、気象条件、テクスチャ測定値及び摩擦係数測定値のファイルで構成された。各参加国は自国のデータを見直す機会が与えられ、必要に応じてデータ修正が施された。データベースの最終版においてデータファイルは共通フォーマットに入力された。このデータベースはPIARC本部からディスクで入手可能である。データ解析の結果はPIARC技術レポートで紹介されている。

摩擦係数測定システムにはスリップ方式、サイドフォース方式、車輪ロック方式という3つの基本タイプがあるので、試験結果の整合を図るためにはマクロテクスチャの要因が必要であるだろうとの認識がなされた。したがって、マクロテクスチャの測定値と摩擦係数の測定値という2つの値からなる摩擦指数なるものが必要となる。与えられた舗装の上でこれらの測定値に対して、すべての測定装置が同一の摩擦指標(International Roughness Index：国際摩擦指標)を推定できることを目標とした。

国際比較試験において開発されたこのIFIは、共通の摩擦スケールであるが、C1ではこれを主な成果としてモントリオール大会において提案するに至った。IFIについては本特集における「路面のすべり抵抗の測定方法と測定値の標準化」(斎藤和夫)を参照されたい。

3. 諸外国の考え方²⁾

すべり測定方法の整合を図る一方で、湿潤路面時の事故に注目した車両挙動と路面テクスチャに関する道路管理者としての方針を集約し、1995年のモントリオール会議で紹介されたものが表-1である。

表-2の中で具体的な数値を出している国は少ないが、これに対してC1では次のようにコメントしている。

表-1 C1参加国のすべり摩擦測定に関する基本計画

国 名	基 本 方 針
オーストラリア	英国で適用されている方針による。
ベルギー	新設の道路に対してはOdoliograph法にて測定し、ハイウェイでは μ 80、その他の道路では μ 50が共に0.45以上とする。供用中の道路はSCRIM法によることとするが、テクスチャは規定しない。
フランス	新設の国道では摩擦層の中に仕様に適合する骨材を使用することとし、マクロテクスチャは仕様に適合すること。供用中の道路は、SCRIM法及びRUGOLASER法によって時速60キロにおけるすべり摩擦とテクスチャの測定を規定する。
ドイツ	すべり摩擦はSCRIM法により測定する。
ハンガリー	新設の国道はSCRIM法により測定する。規定値はあるが、公開されていない。
日本	プレーントレッドタイヤ測定とし、Aクラスの道路に対して μ 60で0.3、高速道路 μ 80で0.2とする。
スペイン	SCRIM法にて1～2年ごとに測定し、規定値(未公開)を下回ると処置を施す。
スウェーデン	国道行政法(VVMB, 104:1990)に従い、スキッドメーターBV11またはSaab Friction Testerによる測定値が0.5を下回ってはならない。
英国	すべり摩擦はSCRIM法により測定する。規定値は事故率に基づくこととし、表面処理や表層の打換えにて対処する。
米国	FHWAの指導により各州が独自のすべり低減対策を持っている。測定はすべてASTM E-274(ロック方式)による。

表-2 すべり抵抗の性能指標

カナダ	デンマーク
- SCRIM法による。 - 供用直後 55 - 供用中 55 - 性能保証期間 5年	- ROAR法による。 - 秋に測定 - 初年度、5年目、以後5年ごとに測定 - 道路管理者の責任

明確な回答が得られなかったのは、道路管理者の規定方針が運用途上にあるのか、または公開したくないかのどちらかである。英国ではテクスチャの改善に関する方針があり、事故件数の低下による事故費用低減が数年間の期間においてテクスチャ改善費用の約5倍程度になる事例があったので、明確な回答がないのは残念である。英国の方針は特定箇所（問題箇所）の事故評価に基づいており、既知の事故記録が集中した地域に基づいているので合理的なものである。しかし、単位距離当りの事故件数が考察されれば、交通密度の高い高速道路区間では単位距離当りに多数の事故が発生してしまうこととなる。特定の「問題箇所」への対処は明確に実施できるが、その一方で高速道路の大半箇所に対して十分な改善策が実施できるとは言えない。これについては、適格な骨材を使用したポーラスアスファルト（排水性舗装）が1つの解決策となるかも知れない。

このコメントから、すべり抵抗に関する基準を公開することの困難さが再認識されると共に、すべり摩擦確保の1つの対策として排水性舗装に対する期待がうかがえる。1995年以降は、日本と同様に諸外国においても排水性舗装の実績が増え始めたものと思われる。また、諸外国においては性能規定の取組みが開始されたのもこの頃からである。

性能規定を特集したROUTES/ROADS（2002年7月）³⁾では、欧米数カ国の性能規定の取組みが紹介されている。この中で、すべり抵抗を性能指標項目に規

定している国として、カナダとデンマークが紹介されている。すべり抵抗に関する性能指標値を表-2に示す。

カナダでは3つのプロジェクトの中で試行導入としているが、これまでのところ、すべての性能指標項目を満足している。しかし、想定外の交通条件の変化による路面損傷の急な進行を懸念しており、定置式の軸重計測により交通状況を評価することとしている。一方、デンマークでは1960年代から材料規定と共に性能規定を導入している。通常の項目は請負人の責とされているが、すべり摩擦を含む安全性に関する性能指標については明確ではなく、現在のところ道路管理者がそれらの責務を担当している。

このように、諸外国においてもすべり抵抗は性能指標としての採用が難しいものと思われる。これは、路面管理には交通条件を始めとして不確定な要素が常に伴うこと、これによって安定的なすべり摩擦の確保が難しいこと等が思料される。

—— 参考文献 ——

- 1) 市原薫，小野田光之：路面のすべりとその対策，技術書院，平成9年3月，P157
- 2) PIARC C1, Surface Characteristics, Montreal 1995, P19-P33, P45-47
- 3) PIARC, Routes/Roads, July 2002, P8-13, P45-52

☆

☆

☆

☆

☆

☆

歩道舗装材のすべり抵抗性試験機について

(Study of Slip-resistance-tester for Pedestrian Pavement)

牧 恒 雄*

歩道のすべり抵抗性を評価する試験機は80種類あるといわれているが、世界的な基準となる試験機はまだない。そこで、歩行動作の研究やすべり現象の解明、各種試験機の評価結果等から、静止摩擦係数と動摩擦係数が測定できる円盤回転型試験機を開発した。そして、その試験機の特性を検証し、静止摩擦係数が0.5以上ある歩道は安全な歩道であることを検証した。

1. はじめに

整備された歩道は、美しい都市景観を作るだけでなく、人々に快適な生活環境を提供する空間として高く評価されている。美しい歩道には、広い道幅や夏の陽射しを遮る街路樹、あるいはデザインや豊かな色彩を持つ舗装材が必要であった。しかし、最近は快適に歩行できる環境整備以外に、身体に障害をもった人々に優しいバリアフリーの環境、あるいは、歩道を利用する全ての人に優しいユニバーサルデザインを取り入れた整備が行われている。

歩道舗装材には、様々な素材やテクスチャーを持った材料が使われてきたが、どんな舗装材を用いても、安全で快適に歩けることが重要で、表面が平坦であることや雨の日でも舗装面に水が溜まらないこと、あるいは雨の日でも滑らないことなどが必要である。しかし、これらの安全性や快適性には基準がないが、歩道舗装材の基準はいつも求められている。

従来、車道の滑りに関する研究は多く行われているが、歩道の研究は殆んど行われていない。その大きな理由としては、評価する歩道用の試験機が無かったことがあげられる。一般に英国式ポータブルスキッドレジスタンステスター (BPST) が使われて来た。しかし、この試験機は、時速50 /hの時の舗装とタイヤのすべり抵抗性に高い相関があるといわれており、歩行者と舗装の滑り抵抗性を正しく評価できない。

国外でも、人が歩く舗装材の滑り抵抗性の評価研究は多く行われているが、今だその試験方法や評価方法は確立していない。本文では、歩道のすべりに関する

研究の歴史的経緯と、開発した円盤回転型の歩道摩擦係数を測定する試験機について述べる。

2. 舗装材と靴の摩擦係数

舗装材と靴の間で生じる滑り現象は、車のタイヤと舗装路面の間で生じる摩擦の関係と異なり、動摩擦係数だけを測定して評価できるほど単純ではない。その理由としては、舗装材と靴の間で生じる滑りは、歩行という足の動作が絡んだ滑り現象であり、その歩行動作が非常に複雑なメカニズムで成り立っている事にも原因がある。人が歩いているときに滑りが発生する現象をみると、多くは足のかかとを床につける時か、足を蹴り上げる時に床との間にすべりが生じている。しかも、歩いているすべての人が必ず滑るかというのではなく、滑らない人もいる。そうすると、歩道を歩く人の滑り現象が、その人の年齢や体力、歩行速度や歩く癖、履いている靴の種類などに影響されると考えられ、100人の歩行者を調べれば100人とも条件が異なるということになるし、歩くという動作にも影響が出る。これに加えて、靴の使用状況や使用年数、靴底材質や裏面のパターンなどの違いや靴の使用した履歴、あるいは舗装材も材質やテクスチャー、供用年数や表面の状態などが影響となると、膨大な検討要因が生まれる。したがって、このような条件の中から、滑り現象を正しく評価し、安全性を保障するための試験機を開発することは大変難しい。世界では80種類のすべりを評価する試験機があるといわれているが、世界基準となる試験機がまだ無いことは理解できる。

* まき つねお 東京農業大学 地域環境科学部 生産環境工学科 教授

3. 歩行時の滑り現象

滑り現象の研究は、人体の解剖学的なアプローチから行なわれる事が多い。Williamは、人間が歩くという動作を分析し次のような結論を得ている。「歩行動作は26の骨と107の靱帯と19の筋肉群がお互いに影響しあって成り立っており、人の動きがスムーズな理由には、動きの連続性が複雑な相互作用によって、前へ進む勢いとして引き継がれているからである。そして、脚で立つことが出来るのは、両足が両脇に動かずについており、重心が常に両脚の間にあるからである。さらに、脚に働く水平方向の力は、かかとが舗装材の表面に接触した直後に前方への力が最大水平力になるが、脚が体重を受け脚のつま先の部分が歩道を離れるときには、後方への力が最大水平力になり、その後はそれぞれの力が急激に減少する」と述べている。そして、「このような人体測定学の研究から、James Machineの妥当性を調べた結果、James Machineで得られた静止摩擦係数 $\mu = 0.5$ という数値を、安全な歩道表面の摩擦係数として用いることは妥当である」としている。さらに、「振り子タイプの機械では、静止摩擦係数を測定できないだけでなく、運動エネルギーを計算によって動摩擦係数に変換しているだけで、歩行中の足と床は常に静止関係にあるので、動摩擦係数は歩行の滑り現象には関係ない」としている。

これらの研究成果をうけて、歩行者のすべり現象を解析するための試験機について、そのメカニズムを解明しているR.Skibaは、靴と床面間で摩擦が起きた場合の摩擦力を測定する時の条件として、次の4つをあげている。

- 1) 装置を使い歩行サイクルの各段階を忠実に精密に再現できること。特にかかととは床面に着けた瞬間からかかとを支える瞬間の0.05～0.14秒で滑る危険性が高いので、この段階のシミュレーションが出来ること。
- 2) 装置は出来るだけ単純で規格化できること。
- 3) 装置は携帯できてどのような環境でも測定できること。
- 4) 測定結果に再現性があること。

これらの条件を満たす実用的な試験機の性能としては、次のような内容が必要であるとしている。

- 1) 完全な靴を使って測定できること
- 2) 靴や床面が交換できること
- 3) 靴と床面の着地角度を変更することが可能なこと。
- 4) 歩行に合わせて、垂直方向の力と水平方向の力を変更できること。

- 5) 0.5m/sまでの速度で滑り出す瞬間の静止摩擦係数と動摩擦係数が測定できること。
- 6) 立った状態が静止摩擦係数に影響を及ぼすので、実際の歩行と同じ様に靴をすばやく床におけること。
- 7) 水や油などの滑り材を床面にまいて測定できること。

しかし、一方では、「これらの全ての条件を満足させる試験機はありえないので、試験機は構造上妥協せざるを得ない。そこで、いろいろな試験機の特性を比較検討することが重要である」と述べている。

靴底と床面の摩擦を考える場合、どのような摩擦係数を測定すれば歩行時に発生する滑り現象に近く、その安全性が判断できるかについて、世界の研究者の見解は一致していないが、概ね次の様な意見に集約できる。

- 1) 安全な歩行や走行をしている場合、直進性の運動すなわち靴と床面の間に滑り運動は起きないので、滑り出す瞬間の最大静止摩擦が安全性評価の有効手段である。
- 2) 滑りを防ぐ要因は滑り摩擦であり、急に滑ってコントロールを失い転倒することを防止できるのは、滑り速度に比例して増加する動摩擦だけであるので動摩擦が有効な評価値である。
- 3) 滑り出す瞬間の静止摩擦係数は動摩擦係数より大きいですが、滑りが一度発生すると靴底は滑りだし転倒する。したがって、滑りに対する安全性を判断する上では、滑り出す瞬間の静止摩擦と動摩擦の両方が重要である。

これらの意見が出ても、静止摩擦係数を測定すれば良いのか、それとも両方の摩擦係数を測定すれば良いかの統一した見解はない。

被験者を使ってこれらの意見を実験的に評価したA.Kuschevskiは次の様に述べている。

- 1) 歩行のすべり現象を分析すると、3つの靴底面（かかと、靴底全体、つま先）の摩擦特性が歩行者の主観的な判断に影響していることから、靴底面全体だけで試験してもその結果は不十分である。
- 2) 測定した摩擦係数と被験者が感じた主観的判断との間には、きわめて高い相関関係があり、正の加速度がついて滑りが起きたときの特性で、滑り出す瞬間の安全性は判断できる。
- 3) 滑り出す瞬間の静止摩擦係数が同じ場合、その後の滑り速度によって変動する動摩擦係数がすべりに影響する。

このような内容から、滑りを評価する方法として次の提案をしている。

- 1) 最も異なる舗装材の組み合わせを用い、かかと、靴底全体、つま先の3点で滑り始めた直後の静止摩擦係数と滑り速度0.25m/s (0.9 /h) の動摩擦係数を測定し、平均値を求めて滑りに対する安全性を求める。
- 2) 3種類の舗装材についてそれぞれ回帰方程式をたて、靴底の3点で測定した摩擦係数の中から2つを選び、回帰方程式に代入して予想値を出す。

この様に、歩行のすべりに関する研究は多くなされているにも関わらず、今だ、世界的に基準となる試験方法や評価方法は確定していない。

4. 歩行に安全な摩擦係数

靴と舗装材の滑りによって生じる摩擦係数としては、 $\mu = 0.5$ が安全性の基準として使われていた時代もあったが、測定方法によりその数値も変わる可能性があり、多くの研究者によって歩行者の安全を確保できる摩擦係数の値 (μ) が検討されている。Brungraberが調査した論文では安全な摩擦係数は $\mu = 0.6 \sim 0.7$ とするものや $\mu \geq 0.5$ を安全な値とするもの、あるいは $\mu = 0.4$ が安全と不安全の境であるとする論文もあり、歩行者に安全な摩擦係数の値も大きな検討課題である。

5. 各種試験機の特性について

Swedish Council for Building Researchでは、摩擦係数測定の方法について試験機を9のタイプに分けて材料を変えながら検討を行なっている。

斜面法＝平面を徐々に傾け、テストピースが滑り出すまで傾斜させ、その角度を求めて静止摩擦係数を求める方法である。この方法は床面しか測定できず現場で測定できないし、再現性がなく静止摩擦係数しか測定できない。(Drag法 摩擦係数 $= f / N_0$, 斜面法 静止摩擦係数 $= F / N = \tan \alpha_0$)

滑り角測定法＝すべり角を測定し最大の静止摩擦係数を水平方向の力と滑り出す瞬間の押す力が作用する棒の傾きで求める測定機である。この機械は構造が簡単で携帯も可能であるし、テストピースに加わる時間を短くすると再現性も高いが、動摩擦係数が測定できないことや、人の歩行をシミュレーションできない。(ブルングラーバーの

装置)

振り子式試験機＝テストピースに重りをつけ振り子状にして一定の高さから床面に振り落とし、テストピースが床面を滑るときの摩擦で失ったエネルギーを求める方法である。床面が接触する距離を正確に計測できないし、人が歩行するときの運動力学的な関係を説明できない。(英国式ポータブル・スキッドレジスタンス・テスター)

牽引力メーター＝重りをつけた靴などをモーターを使い一定の速度で牽引して摩擦力を測定するもので、どのような床面でも測定できるが、人の歩行をシミュレーションできない。(シュスターによる手動型床面滑り装置)

摩擦小円盤を用いた摩擦係数測定装置＝小型円盤を使って摩擦係数測定する方法で、直径2のテストピースを取り付け、45N/ の圧力を加えて床面を滑らす方法。携帯できる試験機で、再現性も高いが、人の歩行をシミュレーションできない。(リードの万能摩擦試験機)

摩擦ホイール装置＝テストピースで摩擦ホイールにブレーキをかけ、発生する回転モーメントと摩擦力から摩擦係数を求める方法である。滑り速度やスリップの条件も再現できるが、人の歩行をシミュレーションできない。(スウェーデン式ポータブル・フリクション・テスター)

正弦動摩擦係数測定装置＝重りをつけた滑体が、平面上を速度を変えながらサインカーブ状に運動をして摩擦力を測定する。この装置では、靴を丸ごと取り付けることが出来て速度も加減できる。(フランス国立安全調査研究所のサイン動摩擦係数測定装置)

スリッグライダー＝扇形をした摩擦ホイールの一部が速度を変えて摩擦台の上を移動し滑りを測定する。人が歩行するときのスリップをうまく測定できるが、実験室でしか測定できない(ドイツの靴製造検査・開発研究所の摩擦係数測定装置)

歩行イミテーター＝人が歩行するときの力の移動の仕方や移動方向が考慮された試験機で、人が歩行したときと同じ力が床面に加わるが、装置は持ち運び出来ない。(ボーネフェルトの歩行イミテーター)

このように、世界でも有名な試験機を検討したが、満足する試験結果や結論は得られていないといっている。

6. 歩道用摩擦係数測定試験機

歩道の滑り抵抗性を評価する試験機の要因は、上述のようにいろいろな条件が出されているが、これら全ての要因を試験機に盛り込むことは不可能である。また、歩道で滑りが発生しやすい環境を考えると、雨の日に平滑な舗装面上を急いで歩いている場合や、傾斜のある舗装面が多いので、静止摩擦係数の測定は、R.Skibaの「歩行時に危険な滑りはかかとを着地させて体を支えようとする0.05～0.14秒の間に発生する滑りで、この間の最大静止摩擦係数を測定する必要がある」とする研究結果を参考に、R.Brungraberの「歩行において足と床の滑りは静止摩擦係数であるが、動摩擦係数は足がスリップし始めたときに有効である」とする研究結果とあわせ、試験機の条件を次のように絞り込んで開発した。

静止摩擦係数と速度に対応した動摩擦係数が測定できること

雨の日を考えた湿潤状態で測定できること

目地や低い段差があっても測定できること

舗装面が傾斜していても測定できること

靴底の材料が容易に交換できること

試験機が軽量で屋外でも測定できること

測定結果が記録に残ること

そこで、試験機は円盤回転型を用いることとし、車道の滑り抵抗性測定に使われており、動摩擦係数の測定では実績のあるDFテスターをベースに、歩道用の試験機を作製した。

6.1 試験機の理論

本試験機の測定理論は次の通りである。材料をWの力で滑り面に押しつけVの速度で引っ張ると、材料はFの摩擦力を受けるが、押しつける力Wを一定にすると、摩擦係数 μ は、 $\mu = K \cdot F$ （K：比例常数）で求まる。この時、摩擦力は滑り面に働く垂直力に比例し、接触面積に無関係になる。歩行での滑りを見ると、一般に靴底材料は舗装材より弱く、靴底は舗装面の凹凸と擦れ引きちぎられながら摩擦が生じている。この時、弾性材料は、押しつける荷重が大きいと接触している面が大きくなる可能性がある。従って、試験機を作る場合、測定時に靴底材料が変形し難い構造にする必要がある。また、動摩擦係数を測定する場合、滑り速度が速いと摩擦熱で靴底ゴムの温度が上昇し材料が変化する可能性がある。しかし、一番滑りやすい条件は湿潤状態であることを考えると、湿潤状態では靴底ゴムが水等で冷やされ、熱で材料が変化する可能性は少な

いと考えてよい。また、舗装材と靴底ゴムが密着しない限り粘弾性の影響は出ないとする。

6.2 試験機の構造

今回開発した試験機は図-1に示す構造になっている。主部品は駆動モータに直結されている駆動円盤と、軽量材質のすべり円盤の2つで、すべり円盤には図-2示す構造のゴムスライダーが回転半径を7として2箇所つけてあり、スライダーの接地圧は1.25 f/、スライダー1つの接地面積は0.8である。この駆動円盤とすべり円盤はバネバランスで接続されており、スライダーが舗装面との摩擦によって生じるずれを、バネバランスと変位計で電気量に変換し摩擦係数を求めている。

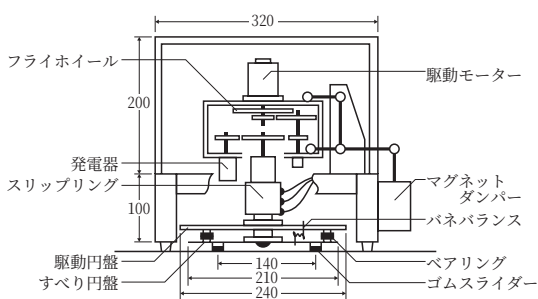


図-1 摩擦係数測定試験機の構造

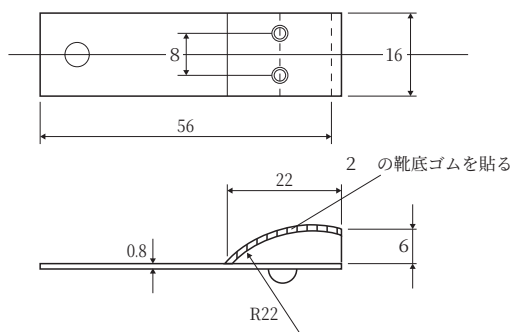


図-2 ゴムスライダーの構造

静止摩擦係数は、静止した状態でスライダーを舗装面上に置き、駆動モータを回転させて動き出す瞬間の摩擦係数を求める。動摩擦係数は、スライダーが舗装面に接触していない状態で円盤を回転させ、必要速度に達したら円盤を舗装面に落下させ、回転させながら動摩擦係数を求める。本試験機は試験機本体（16）（写真-1）と摩擦係数のコントロール装置、記録装置（11）（写真-2）で構成されており、試験機に

は湿潤状態を作る散水装置が付いている。また、屋外での測定を可能にするために、車のバッテリー電源からも利用できる。また、記録装置としてXYレコーダが着いており、測定結果は図-3に示す。また、スライダーに靴底材料を接着させる場合、接地面積を一定にするためにスライダーが曲面になっており、厚さ2mmの材料を利用すると個人差により接着面積が変わることがなく接着できる。通常、基準の靴底ゴムとして、ASTM E-501準拠のゴムを用いる。

本試験機の測定結果(図-3)を見ると、動摩擦係数は、速度20 /hまでの測定が可能であるが、歩道で走ることや滑り出した後の速度を考慮すると10 /h(約2.8m/sec)以下の動摩擦係数が測定できれば良い。従って、目盛りが13 /hになった時にスライダーを舗装面に落下させ、記録紙に書かれた10 /hの時の動摩擦係数を読めば求めることが出来る。図-3を見ても分かるように、動摩擦係数は速度に依存し、多くの舗装材で滑りの速度が遅くなると摩擦係数が大きくなる

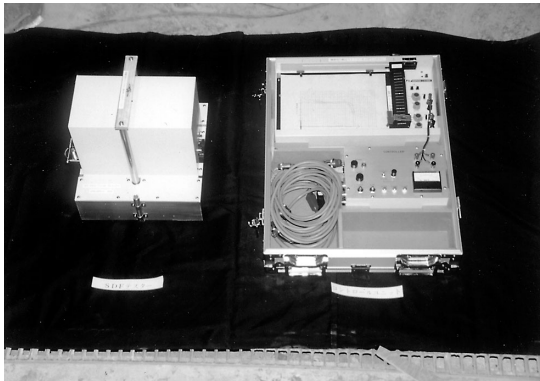


写真-1 摩擦係数測定試験機

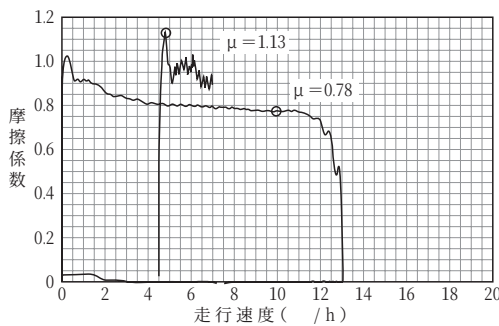


図-3 摩擦係数の測定結果
(静摩擦係数 $\mu = 1.13$ 動摩擦係数 $\mu = 0.78$)

傾向にある。また、静止摩擦係数は、滑り出す直前の摩擦係数を記録しているが、短い時間の記録値がそのまま記録紙に表示されているとは限らない。そこで、静止摩擦係数とすべり速度を時間で変化させて検討した。その結果、図-4に示す様に、測定開始後59.8msecで最初の静止摩擦係数のピーク値を示し、これと同じ値で112.8msecにもピーク値を示している。更に150.0msec~600.0msecまではほぼ同じ静止摩擦係数を示し、600.0msecを過ぎると低下してくる。従って、R.Skibaの「0.05~0.14秒の間に発生する最大静止摩擦係数を測定する必要がある」との研究結果から検討すると、本試験機は最大静止摩擦係数の測定が可能な機械であるといえる。また、記録紙に書かれたデータを見ると、静止摩擦係数は記録をはじめて0.5秒程度ずれながらピーク値を示しているが、本試験機では、図-4に示すように0.6秒を過ぎまでは最初の静止摩擦係数と同じ値であり、XYレコーダの記録値が実際の静止摩擦係数と同じ値であるといえる。

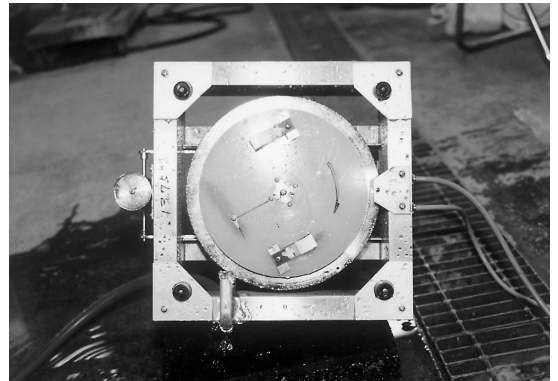


写真-2 試験機の表面とスライダー

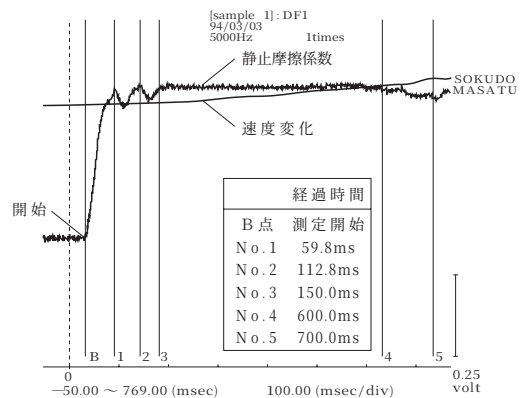


図-4 摩擦係数の測定結果

本試験機で摩擦係数を測定する場合の回数について検討したが、同じ場所でもくり返し試験を行うと、ゴムスライダーがいつも同じ位置を走り、ゴムが引きちぎれた後が残る。従って、出来れば測定場所を少しずつ移動して測定することが好ましい。また、測定回数は3回～5回を標準としており、移動しながら測定すると、測定値の変動率は5%以内におさまる。また、温度による測定値の変化は殆んど見られず、温度による摩擦係数の補正は必要ないと思われる。さらに本試験機で測定できる摩擦係数の限度は、雪が固まり圧接された状態の歩道での測定結果は、動摩擦係数が $\mu = 0.02$ を示していた。また、研磨番数6000番の砥石で仕上げたテラゾ平板（凹凸量は $10\text{m}\mu$ ）でも摩擦係数が測定できたことから、かなり平滑な材料の表面摩擦係数も測定できることが分かった。また、現在多く使われているBPSTとの比較をしたのが表-1である。

表一 1 BPSTと摩擦係数測定試験機の比較

BRST	SDフリクションテスター
BPN値で評価する	摩擦係数 μ で評価する
振り子によるBPN値を測定	静止摩擦係数と 動摩擦係数を測定
目地があると測定できない	目地や凹凸を含めた 測定ができる
車の50 /hの滑りに 相関する	歩行時の足に加わる 条件を考慮
測定値が紙に記録できない	XYレコーダで値を 記録する
屋外での測定ができる	屋外での測定ができる
傾斜面で測定できない	傾斜面でも測定できる
温度による補正が 必要である	温度による影響がない
乾燥, 湿潤状態で 測定できる	乾燥, 湿潤状態で 測定できる

本研究は、静止摩擦係数と動摩擦係数の両方が測定できて、現場で使える実用的な試験機の開発が目的であった。静止摩擦係数が測定できる試験機の使い道は多々あり、駅構内に使われている建築系材料、エスカレーターのステップ、歩行者用の誘導路、各種床材など、多く分野で利用されている。この試験機の利用がさらに広がることを願っている。

- 1) James M. Miller: A Bibliography of Coefficient of Friction Literature Relating to Slip Type Accidents, Center For Ergonomics and Safety Department of Industrial and Operations Engineering, 1983
- 2) C. Bring: Testing of Slipperiness, Swedish Council for Building Research, Document D5, 1982
- 3) R. Skiba, Wuppertal: Geräte Zur Bestimmung der Reibung zwischen Schuh und Fußboden unter Berücksichtigung des menschlichen Ganges, Kautschuk+Gummi Kunststoffe 37, Jahrgang, Nr. 6, 1984
- 4) L. Strandberg: The effect of conditions underfoot on falling and prevention of low back pain,

- Commission of the European communities,
Directorate Health and Safety. Luxembourg
6/983
- 5) F.Ekkebus, W.Killey: Measurement of Safe
Walkway Surface, Soap/Cosmetics/Chemical
Special Ties. Feb/1973
- 6) R.Brungraber: An Overview of Floor Slip/Resis-
tance Research With Annotated Bibliography,
National Bureau of Standards Technical Note
895, 1976
- 7) 牧恒雄, 竹内康, 小梁川雅, 安部裕也: 歩道舗装
材の摩擦係数測定機に関する研究, 舗装工学論文
集, Vol.2, 1997

「道路，鉄道，および空港の支持力」

Bearing Capacity of Roads, Rail Ways and Airfields

アスファルト協会も今年から新しい組織体制となり、アスファルト舗装技術研究グループもメンバーを若手にチェンジし、新たにワーキンググループ形式でスタートを切りました。

今回は、2002年にポルトガルのリスボンで行われた、道路、鉄道および空港舗装の支持力に関する国際会議BCRA第6回の論文抄録を報告いたします。

過去の5回の会議では、道路と空港舗装に関するものだけでしたが、今回から鉄道も加えられました。このことから、会議のタイトルは「道路，鉄道，および空港の支持力」に変更されました。

ワークショップは、実路での応力とひずみ、材料、構造のモデル化、FWD／逆解析、大型航空機による

支持力計算、そして重荷重と高速走行に対応した既設線路の改良の5つから構成されていました。

また、論文集の中身は、1) 支持力、概念、コスト、および現場調査(10編)、2) 分析とモデル化(17編)、3) 設計と環境への影響(11編)、4) 施工、維持、および補修(13編)、5) リフレクティブクラック(6編)、6) 現位置における層の弾性評価(19編)、7) アスファルト混合物(15編)、8) 粒状材料(12編)、9) 土(7編)、10) ケースヒストリー(9編)、11) 鉄道(5編)です。

今回は、全124編のうち前半70編について報告いたします。

(研究グループ代表幹事：峰岸順一)

アスファルト舗装技術研究グループ名簿

峰岸順一 東京都土木技術研究所技術部舗装研究室

阿部長門 東亜道路工業 技術研究所
井 真宏 西日本地研
市岡孝夫 前田道路 技術研究所
岩岡宏美 世紀東急工業 技術研究所
岩塚浩二 パスコ道路センター
打田幸平 日進化成 事業本部
江向俊文 前田道路 技術研究所
鎌田義秋 ニチレキ 道路エンジニアリング部
鎌田孝行 常盤工業 技術研究所
金井利浩 鹿島道路 企画部
加納孝志 大成ロテック 技術研究所
岸田正憲 パスコ道路センター
高馬克治 ニチレキ 技術研究所
小柴邦広 世紀東急工業 技術研究所
小関裕二 大林道路 技術研究所
佐々木厳 独立行政法人土木研究所
材料地盤研究グループ
佐藤雅規 ジオサーチ

佐藤康彦 昭和シェル石油
鈴木 徹 大林道路 技術研究所
高橋茂樹 日本道路公団試験研究所舗装研究室
高橋光彦 大成ロテック 技術研究所
武本敏男 東京都土木技術研究所技術部
東本 崇 大林道路 技術研究所
中村 健 長岡技術科学大学環境・建設系
長谷川淳也 日本道路 技術研究所
林 信也 鹿島道路 技術研究所
平戸利明 東亜道路工業 技術研究所
舟根 毅 常盤工業 技術研究所
増山幸衛 世紀東急工業 技術部技術一課
焼山明生 日進化成 製品技術部
山脇宏成 ガイアートクマガイ技術研究所
矢野辰明 鹿島道路 技術研究所
保本敏伸 ニチレキ 技術研究所
森嶋洋幸 前田道路 技術本部技術研究所

計35名

1. 支持力, 概念, コストおよび現場調査

(1)著者名 (2)原文題名 (3)ページ (4)和文題名(抄訳者名) (5)論文概要

- | | | | | |
|---|---|--------------|--|--------|
| (1) Carrasco, P. P. and Martin, L. (スペイン) | (2) A New Deflection Measuring System for Pavements in Spanish Airports Based on Laser Technology | (3) pp.3~14 | (4) レーザー技術に基づいたスペインの空港舗装のための新しいたわみ測定システム | (阿部長門) |
| (5) スペインの空港においては、空港舗装の支持力評価のためにENDCRE（静的繰返し平板載荷試験）システムが運用され、PCNを決定するために有用である。しかし、接触式センサー（LVDT）を活用しているためセンサーの設置の問題などがあった。そこで、レーザー式非接触センサーを用いて検討を行った。新しい装置の開発のために適用したレーザー変位センサーは、LVDTのように載荷荷重を増加させている時に精度を上げるための0調整を含む2段階の測定をしなくても、連続測定においても高い精度があることがわかった。 | | | | |
| (1) G. Dore Ing (カナダ), G. Dupain Ing (カナダ) | (2) Monitoring Pavement Response during Spring Thaw Using Fiber-Optic Sensors | (3) pp.15~24 | (4) 光ファイバーセンサーを用いた融解期の舗装モニタリング | (井 真宏) |
| (5) 寒冷地域での、疲労や塑性変形に起因する舗装の破壊はほとんど初春の融解期に支持力低下である。温度・含水量・凍結・間隙水圧・引張りひずみを測定するセンサーを測定区間に設置し、トラック走行試験にて融解期の舗装に関する現場測定を行った。融解期では、一時的に舗装内の含水比が上昇する現象が見られ、同様にひずみが増加する。温暖な時期には舗装内の含水比が低下し、発生するひずみも減少する傾向が見られた。光ファイバーを利用したひずみゲージは、路面から130 付近まで凍結するような環境下においても確実に測定を行うことができ、その精度も高い。 | | | | |
| (1) Jean, P. G. and Jean, C. D. (フランス) | (2) Evolution of French Airport Bearing Capacity Assessment | (3) pp.25~32 | (4) フランスにおける空港舗装の支持力評価方法の開発 | (市岡孝夫) |
| (5) フランスでは、空港舗装の支持力評価試験に繰返し平板載荷試験を採用しており、これまで約25年間にわたって民間および軍用を含めて約150の空港で300回以上の支持力評価をおこなってきた。既存の方法では、準備および試験に2時間30分程度測定に要し、最低でも1時間は空港を閉鎖する必要がある。そこで、STBA（Service Technique des Bases Aériennes）は試験時間の短縮を目的として載荷用のタイヤを予め車載しているトレーラを開発した。解析方法等については、現在検討中ではあるが、2003年中に最初のテスト測定を実施し、2004年から実用化していく予定である。 | | | | |
| (1) A. Loizos, C. Abacounmkin and G. Charonitis (ギリシャ) | (2) Inconsistencies in Rating the Effect of Aircraft Load and Reporting the Bearing Capacity of Pavements | (3) pp.33~41 | (4) 舗装支持力の報告と航空機荷重の影響評価に関する検討 | (岩塚浩二) |
| (5) ACN-PCNは、空港舗装のための国際的に容認された唯一の分類法である。アテネ国立技術大学（NTUA）の交通工学科で試みられた研究は、そのような相関性が必ずしも信頼できるとは限らないことを示している。そこで、荷重の評価（ACN）のために用いた仮定に注目し、舗装の支持力（PCN）の分類による影響を継続的に調査した。従来の分類システムと比較して、国際的に容認されている分類システム（ACN-PCN）は非常に有利である。しかし、この分類方法および舗装管理番号（PCN）と支持力の関係の信頼度を改善することが重要である。言い換えれば、PCNが舗装の支持力を反映させなければならないとしている。 | | | | |
| (1) Murari M. Pradhan (米国) | (2) Evaluation of Rigid Pavement Condition Using Falling Weight Deflectometer | (3) pp.43~52 | (4) FWDを用いた剛性舗装の評価 | (岩岡宏美) |

(5) FWDを用いた剛性舗装の評価方法について検討している。従来、5つの荷重伝達率 (load transfer efficiency) 計算法が提案されているが、ユタ州で公式化されている手法を加えた6つの荷重分散率算出方法 (方法1: Croveti & Darter, 方法2: Jackson他, 方法3: Colley & Humphrey, 方法4: Ricci他, 方法5: AASHTO方法, 方法6: ユタの手法) を用いて、剛性舗装のLOS (Loss Of Support) 解析手法の検討を行った。方法6 (ユタ州の手法) による検討結果では、剛性舗装の評価方法として推薦できるものであった。非破壊検査により、舗装の状態を評価する方法としてFWDは有効な手段であるが、より正確な解析を行うためには舗装の種類、状態等を考慮した解析手法をそれぞれに適用する必要がある。
(1) S.Rasmussen, J. A. Krarup and G. Hildebrand (デンマーク) (2) Non-contact Deflection Measurement at High Speed (3) pp.53~60 (4) 非接触型高速たわみ測定機 (前田利明) (5) 高速道路や交通量の多い道路で、従来の静止型測定機あるいは低速型測定機により舗装のたわみを測定すると、交通安全性を損なう危険性や正確なデータを計測できないことがある。本報では、交通荷重に対する舗装の応答をHIGH SPEED DEFLECTOGRAPH (HDS) により測定している。試験的ではあるが、本装置を用いることにより最大で時速80 の走行速度により舗装の支持力を継続的に計測できるとしている。
(1) C. Rasse, V. Leemans, M.-F. Destain, J.-C. Verbrugge (ベルギー) (2) Application of Image Analysis to the Identification and Rating of Road Surface Distress (3) pp.61~68 (4) 路面破損の識別および評価への画像解析の適用 (江向俊文) (5) アスファルト舗装路面のデジタル画像からクラックを自動的に検出するために適したアルゴリズムを提案することを目的として実施したものである。各段階における画像処理方法の検討結果は、1段階目の背景処理では、ガウシアンフィルタにより異成分の除去が最適な方法であり、2段階目においてはしきい値を90~120にし、クラックと背景のコントラストを際立たせることで両者の区分をし、3段階目では、クラックと背景の境界にあるピクセルの明るさが、クラックの属性であるかを判定しクラックのエッジ部分を明確にすることで、より正確にクラックの検出を可能とした。
(1) Saarenketo, T., Bell, S., Berntsen, G., Sundberg, S. and Vuontisjarvi, E. (フィンランド) (2) ROADDEX-Benchmarking Low Traffic Volume Road Condition Management in EU Northern Periphery Area (3) pp.69~77 (4) ROADDEX-EU北方地域における軽交通道路の管理基準づくり (金井利浩) (5) ROADDEXプロジェクトは、フィンランド、スウェーデン、ノルウェーおよびスコットランドの関係機関が集まり、人口の少ない北方地域における軽交通道路ネットワークの維持管理戦略を、各国の経験を通じて確立しようとする試みである。検討の結果、各国の当該地域における問題は、排水不良、凍結融解によるわだち掘れ、低品質な舗装材料、路床の低支持力等、ほぼ一致していた。しかし、舗装の標準断面をはじめとして、凍結融解期における交通荷重の制限方法、道路のモニタリングや維持修繕方法には大きな違いがあることがわかった。
(1) M. Srsen & I. Krsic (クロアチア) (2) Pavement Condition Survey at a Motorway Section in Croatia: Maintenance and Rehabilitation Activities (3) pp.79~87 (4) クロアチアの高速度道路の舗装状況の調査：維持・修繕作業 (加納孝志) (5) クロアチアの高速度道路の効率的な維持・修繕計画立案手法の確立のために実施した調査・検討結果の報告である。クロアチア道路公社では効率的に舗装を管理するため、経済協力開発機構 (OECD) の提唱する方法を参考に、クラック、平坦性、わだち掘れ、すべり抵抗性をパラメータとして「舗装状態インデックス」を算出し、舗装の維持修繕作業計画を立案し試行した。その結果、それぞれの調査項目の結果から「舗装状態インデックス」を算出し、得られた値により修繕の優先度を決定することで、効率的な舗装の維持修繕計画を立案できる可能性があるとしている。
(1) Veloso, Joaquim J. C. Baptista and Branco, Fernando E. F. (ポランド) (2) Validation of Pavement Condition Index-PCI: A Portuguese Case Study

(3) pp.89～100

(4) ポルトガルにおけるPCIの適用事例

(鎌田孝行)

- (5) 軍用空港の評価にPavement Condition Index (PCI) を適用した事例をまとめている。滑走路、誘導路、エプロンのPC舗装、アスファルト舗装について、PCIによる評価が実施され、補修の必要性、補修方法の検討が行われた。PCIによる評価の結果、滑走路と誘導路の大部分が「劣悪」であった。また、PCI、ACN-PCN法、 μ メーターの総合的な分類を行った結果、滑走路、誘導路の多くのセクションが「性能を最低限満足している」「性能を満足していない」に分類された。これは、ACN-PCN法は舗装構造を考慮するため「性能を十分に満足してる」「性能を最低限満足してる」という評価となったが、PCIは舗装破損の形態とその程度によって評価するため多くのセクションで「性能を満足していない」という評価結果になる。

2. 分析とモデル化

(1) Y. K. CHOI, A. C. COLLOP & N. H. THOM (英国)

(2) A SIMPLE DAMAGE APPROACH TO MODELING FATIGUE IN BITUMINOUS MATERIALS

(3) pp.103～111

(4) アスファルト混合物の疲労破壊の単純モデル化する試み

(鎌田義秋)

- (5) アスファルト混合物の疲労破壊モデルにおける疲労クラックの発生と成長は、2段階に分割され、クラック発生は微細クラックの成長と合うと定義し、クラック成長は巨視クラックの成長と定義している。アスファルト混合物の連続的疲労の挙動を得るために、中央部がくびれている供試体を作製し、繰返し一軸圧縮試験を行い、各応力及び温度レベルの弾性係数について検討した。疲労は、連続的にみると3段階に分割できる。第1段階は、初期疲労による弾性係数の急激な減少であり、全体の約10%である。第2段階は、弾性係数がほぼ直線的な減少であり、最小2乗法による推定式(破損の進行速度)で表すことができる。第3段階は、総疲労破壊の中で僅かであるものの、供試体の設置の仕方による弾性係数の急な減少としている。また、試験温度の上昇に従って破損レベルが増加する傾向にある。破壊力学からのアプローチはアスファルト混合物の疲労挙動を説明するのに有効な方法である。

(1) W. De Corte, D. De Leersnyder & E. De Winne (ベルギー)

(2) Ultra-Thin Whitetoppings: A 2-D Finite Element Parametric Study

(3) pp.113～121

(4) 薄層ホワイトトッピング工法：2次元有限要素パラメトリックに関する研究

(高馬克治)

- (5) 薄層ホワイトトッピング工法を設計するために用いた2次元有限要素パラメトリックによる計算結果について報告している。平面ひずみ膜要素からなる2次元有限要素モデルで、薄層ホワイトトッピングの重要な要因であるアスファルト層とコンクリート層間の付着に着目した。有限要素法による計算結果は2つの重要な問題を指摘している。既存アスファルト層厚が、最大コンクリート応力値となる場合、経験則的な方法では間違っているように思われる。拘束縁部の重要性は、定義された拘束パラメータの線形に依存し、アスファルトとコンクリートの応力は相互に依存し、両方の層厚は同時に設計する必要がある。

(1) M.-T. Do & F. Hammoum (フランス)

(2) A Mechanical Model for the Prediction of the Tire/Road Friction

(3) pp.123～132

(4) タイヤ/路面摩擦の予測のための機械的なモデル

(小柴朋広)

- (5) 道路表面のマイクロテクスチャを幾何学的にモデル化し、低速度でのタイヤ/路面摩擦を予測する分析法について検討している。道路表面の粗さを、ケルビン固体と路面プロファイル(ピーク間)の表面モチーフの回転接触によってモデル化した。応力とひずみの計算は、回転速度、粘弾性の特性およびモチーフの幾何学によって、接触における損失が局所的に発生する可能性を示した。このモデルから、マイクロテクスチャから低速度摩擦を予測するプログラムを開発した。このモデルは路面マイクロテクスチャから、低速度でのタイヤ/路面摩擦を予測するためのプロファイル分析法として合理的であり、今後発展性がある。

- (1) Eiksund, G., Hoff, I., Svano, G. and Want, A. (ノルウェー) Cuelho, E. V., Perkins, S.P., Christopher, B. R. and Schwartz, C. W. (米国)

(2) Material Models for Reinforced Unbound Aggregate (3) pp.133～143 (4) 補強された粒状路盤の材料モデル (小関裕二) (5) ジオテキスタイルなどの材料がアスファルト舗装の構造的な補強に寄与することを理想的な方法により、数値解析で示すことを目的としている。補強材の効果は 水平方向の路盤材料の拘束、路盤の安定、路床への応力分散性能の改善、路床上面のせん断力の減少がある。これらの効果を確認するために有限要素プログラムABAQUSによって解析を行った。その結果、比較的簡単なモデルであるにもかかわらず、実際の現場で見られる挙動を有限要素法で示すことができた。補強材の効果は実験だけでなく数値解析でも明らかにすることができることを示した。
(1) Erlingsson, S. (アイスランド) (2) 3-D FE Analyses of Test Road Structures-Comparison with Measurements (3) pp.145～157 (4) 試験舗装の3次元有限要素解析—実験値との比較 (佐々木 蔵) (5) アイスランドの標準的な軽交通道路に用いられる舗装2種類で、スウェーデンのHeavy Vehicle Simulator (HVS)で試験した結果と、3D-FEMによる解析結果と対比したものがある。HVSにより、輪荷重、タイヤ空気圧、速度、温度等の条件を変えながら試験し、約30箇所のセンサ(土圧計、変位計、歪ゲージ、温度計等)でデータを記録した。そして、市販の3次元FEM解析ソフト“COSMOS”による数値計算結果と比較した。碎石路盤および路床においては、実験値と数値解析の一致度は高い。しかし上層路盤では、瀝青安定処理の有無に関わらず結果のずれが生じ、タイヤ空気圧が大きいかほどその差は大きかった。その原因は路盤材の非線形弾性挙動のためであると考察し、非線形挙動を解析できるより洗練されたモデルの適用が必要である。
(1) E. Fernando & W. Liu (米国) (2) Dynamic Analysis of FWD Data for Pavement Evaluation (3) pp.159～167 (4) 舗装評価のためのFWDデータの動的解析 (佐藤雅規) (5) FWDの測定データを利用して、舗装構造の逆解析を行った。多くの逆解析ソフトは、FWD測定データのピーク値を用いてきた。しかし、ピーク値のみを用いる方法では、正確な舗装構造を知ることが難しい。本論文で示された逆解析プログラムは、FWDの落下データの動的な挙動を用いて計算を行う方法を示している。本プログラムを用いて実際に計測した地点のデータでは、誤差等も少なく有効な方法と認識された。FWDにおける逆解析は日本においても盛んに行われているが、多くのプログラムが測定値のピーク値を用いて弾性係数を算出している。この方法では、FWDの載荷時動的データにおける挙動を用いて逆解析を行っている点が、参考になる文献である。
(1) T. C. Hopkins, M. E. Slepak and L. Sun (米国) (2) Limiting Equilibrium Methods in Bearing Capacity Analysis of Flexible Pavements Reinforced with Geosynthetics (3) pp.169～179 (4) 限界平衡法を用いたジオシンセティクスで補強したたわみ性舗装の支持力解析 (佐藤康彦) (5) 開発した支持力解析法を用いて、ジオシンセティクスによる補強効果を解析している。仮定した破壊量の平衡式は、未知パラメータと安全係数に関する3つの非線形式で成り立つ。提案した方法により妥当な安全係数が得られる。ジオシンセティクスによる補強は、上層路盤層の安定性を改善すると共に厚さを低減できる。理論解析結果、たわみ性舗装の破損に対する安全係数を大きくし、舗装寿命を長くすることになる。ジオシンセティクスによって部分的および完全に補強した解析例(設計CBR=1～6、タイヤ接地圧522kPa)では、センサーSR-1で補強された上層路盤層の必要厚は21.3から12.3に減少し、破壊に対する安全係数1.5が得られた。
(1) Anders Huvstig (スウェーデン) (2) Mechanistic Model for Road Design in Sweden (3) pp.181～189 (4) スウェーデンにおける道路設計に対する力学的モデル (鈴木 徹) (5) 舗装設計の多くは多層弾性理論等による理論的設計方法に基づいて行われているが、モデルに対する入力データだけでは供用後の舗装損傷の因果関係に結びつかない。スウェーデンではこれらを反映させるために、支持力モデル 凍結融解モデル 水浸透モデル 摩耗モデル 摩擦モデル 騒音モデル 輪荷重モデル 気候モデルの8モデルを

設定し、舗装設計手法について言及している。設定したモデルを修正しながら、道路の性能に影響を及ぼす要因が反映される入力時のデータの信頼性に関する研究を始めているものの、様々な要因が複雑に関係しているため、各国の研究データおよび相互協力が重要であると言及している。	
(1) J.-M. Konrad and S. Zhou (カナダ) (2) Stress Paths in Flexible Pavements Subjected to Severe Climatic Conditions (3) pp.191～201	
(4) 過酷な気象条件下でのたわみ性舗装の応力経路	(岸田正憲)
(5) 夏期および春期の上層路盤と下層路盤の車輪による応力パスを調査している。各舗装材料の一般的な弾性特性によって行われたシミュレーションによって、各層底面での引張り応力が生じることを確認した。さらに見掛けの粘着力が低い場合には、骨材による耐力があるとは限らないことを確認した。これらの材料にモール・クーロンの破壊基準を適用することにより、上層および下層路盤の気候の変化による応力経路を示した。応力経路が粒状材料の破壊特性に非常に大きな影響があることをパラメータ分析によって示し、寒冷地の舗装設計では粒状路盤に対してモール・クーロンの破壊基準を適用し、特に注意を払うべきであることを示した。	
(1) Lenngren, C. A. (スウェーデン) (2) Backcalculation of Thin Air-A Way to Cope with Slipping and Sliding Layer Interfaces (3) pp.203～212	
(4) 層間の接着状態を考慮した逆解析手法の提案	(高橋茂樹)
(5) 線形弾性理論により逆解析を行うと、粒状路盤の弾性係数が非常に低い値で算出されることがある。一方、同じ位置でFWDによる繰返し載荷を続けると、粒状路盤層の弾性係数が載荷により圧密を受けたかのように増加する現象が良く見られる。また、コンクリートスラブの中央でFWD測定すると、版下部の温度が上部より低い場合には、逆解析による弾性係数が低く算出される。コンクリート版の値を一定と考えると、スラブ版直下層の弾性係数が見かけ上大きく変化することになる。この原因は、層間に存在する薄いギャップと推定された。これを考慮し逆解析を行うと、現実により近い粒状路盤の弾性係数が得られた。層間の状態を考慮し逆解析を行うことには妥当性があり、実際の荷重がFWDで使用される垂直衝撃荷重ではなく、水平方向の移動荷重を疑似した物であることを考えれば、実路においてはこのような層間のギャップが生じている可能性がある。非線形あるいは非弾性解析を用いることでこの問題を解決する方法もあるが、本稿ではより単純な計算方法を提案した。	
(1) Lenngren, C. A. and Fredriksson, R. (スウェーデン) (2) Initial Rutting on Reconstructed Roads and How It Relates to FWD Testing (3) pp.213～221	
(4) 再構築された道路の初期わだちとFWD試験との関連性	(高橋光彦)
(5) 再構築された道路の初期わだちとFWD試験から得られるデータとの関連性を実証することを目的に、1996年から2001年までの6年間、粘土質の路床1ヶ所、砂利を含んだ強固な路床2ヶ所の計3ヶ所に設けた試験道路において、フィールド実験が実施された。わだち掘れ深さの測定は、スウェーデンの道路研究所で所有する路面性状車 (L-RST) により行っている。FWD試験で得られたデータは、逆解析プログラムCLEVERCALC 3.8により各層の弾性係数を算出している。フィールド実験の解析結果から、わだち掘れ深さと路床の応力に高い相関があることが確認され、施工時の品質管理としてFWDの使用が可能であるとしている。	
(1) S. Neßlauer (ドイツ) (2) Reinforcement of Flexible Pavement-Design of Finite Element Models (3) pp.223～230	
(4) たわみ性舗装の補強—有限要素法モデルによる設計	(武本敏男)
(5) たわみ性舗装の補強法として、たわみ層内に3次元有限要素法により設計した鉄網を設置する工法を紹介している。たわみ層 (表層) 上から80 下に鉄網を設置した場合は、舗装厚300 で、夏季において、最大約27%のせん断応力の低減が認められた。舗装厚220 では最大36%のせん断応力の低減が認められた。たわみ層上から300 下に鉄網を設置した場合は、舗装厚300 で、最大応力で18%の低減があり、舗装厚220 で30%の最大応力の低減が認められた。舗装厚300 では、たわみ層上から80 下に鉄網を設置した場合は耐わだち掘れ、300 下では耐久性の向上があったとした。かつ舗装厚220 で補強効果があるとしている。	

(1) S. W. Park and R. L. Lytton (韓国) (2) Prediction of Flexible Pavement Response Using Non-Linear Stress-Dependent Material Models (3) pp.231~240 (4) 非線形応力依存性材料モデルを用いたたわみ性舗装の挙動予測 (平戸利明) (5) 舗装におけるわだち掘れを予測するための非線形有限要素法 (FERUT) を適用した解析について示している。たわみ性舗装に用いられる材料の非線形な応力を正確に把握するため、実物大試験舗装から研究データを取得している。また、実験では、アスファルト舗装に生じる引張りひずみや路盤に生じる圧縮ひずみのような一般的な舗装に生じる挙動に対する粒状路盤の効果について分析を行っている。わだち掘れが発生するまでの推定される荷重は、応力に依存しているため、舗装の性能予測は応力依存性を考慮したアプローチ法が適切であるとしている。
(1) Petitjean, J., Fabre, C. and Balay, J. M. (フランス) (2) A380 Flexible Pavement Experimental Program (3) pp.241~251 (4) 大型旅客機A380に対応したたわみ性舗装の設計法に関する研究 (東本 崇) (5) 将来就航が予定されている大型旅客機A380に対応した、新しい空港舗装の設計法を開発することを目的としている。解析モデルには、多層弾性理論を用いたモデルと粘弾性を考慮した有限要素モデルを用いて、静的載荷試験から得られた実測ひずみと解析ひずみを比較することにより、解析モデルの妥当性を検討している。多層弾性理論モデルは、粒状路盤および路床の静的シミュレーションには適しているが、アスファルト混合物には適しておらず、粘弾性を考慮した有限要素モデルが、たわみ性舗装のシミュレーションにより適しているとしている。
(1) W. J. M. Steyn and A. T. Visser (南アフリカ) (2) Effects of Moving Dynamic Type Loads on Type-Pavement Contact Stresses (3) pp.253~262 (4) タイヤ接地圧へ及ぼす移動動的荷重の影響 (平戸利明) (5) 従来、タイヤ荷重は、円形等分布荷重として、モデル化されてきた。本研究は、実際の舗装に対するタイヤの挙動を工学的に解析し、タイヤの荷重分布条件を見出すことを目的としている。現在の南アフリカの舗装設計と解析では、タイヤ荷重は円形の一定接地圧で舗装に等分布荷重と仮定しており、実際のタイヤ荷重と接地圧の値は異なるかもしれないが使用してきた。等分布荷重の変動と動的移動荷重の変動の関係は、舗装の路面状況と車両速度に影響しているとしている。この実験結果から導き出した式により、移動動的荷重の最大垂直荷重を算出している。
(1) S. Wu, (日本) & R. Yin (中国) (2) Evaluating of Overlay on Concrete Slab in Airport with 3D FEM (3) pp.275~281 (4) 3次元FEMを用いた空港におけるコンクリートスラブ上のオーバーレイの評価 (林 信也) (5) コンクリートスラブ上のSAMIを用いたアスファルトオーバーレイについてモデルを作成し、動的および静的3次元有限要素法を用いて検討を行った。その結果、舗装の機能が大きく損なわれたジョイント端部は、オーバーレイ厚を大きくすることによって対応可能である。応力分散を考慮しても、SAMI層は1.5~2.0以上に厚くすることは一般的ではない。補修にはSAMIの厚さを変える、HMAで厚さを変えてオーバーレイを行う、使用する材料を換える、材料と厚さともにかえる方法があるが、効果と費用対効果を考えて上記4種の中から選定する必要がある、との知見が得られた。

3. 設計と環境への影響

(1) Mostafa, Abo, H and Fouad, M. B (米国) (2) Development of Pavement Temperature Prediction Model for Asphalt Concrete Pavements (3) pp.285~294 (4) アスファルト舗装の温度予測モデルの研究 (舟根 毅) (5) 3種類の舗装温度予測モデル、AIに基づいた経験的力学設計システム (M-E) の中の重要な要素であるモデル、LTTPデータベースに基づいて開発したBELLS3、アイダホ州に設置された5つの現場にて収集されたデータから導

き出された舗装体すべての深さの温度経過と気温から舗装温度を予測するニューアイダホ舗装温度モデル (IPAT) を用いてLTTPデータに基づいて解析した結果と比較を行った。実測温度との均等線と比較すると、IPATモデルが最も高い相関を示した。これらの結果から、IPATモデルは最高の舗装予測モデルであると考えられ、このことは、舗装の温度経過過程が温度予測モデルの精度を高くすることを示している。
(1) Found M. Bayomy and Mostafa A. H. Abo-Hashema (米国) (2) Effect of the Variability of Seasonal Moduli Adjustment Factors on the Mechanistic-Empirical Overlay Design (3) pp.295～303 (4) 経験的力学オーバーレイ設計における季節変化に伴う調整係数を用いたオーバーレイ設計厚への影響 (平戸利明) (5) アイダホ大学で開発されたコンピュータ・プログラム (WINFLEX2000) に導入されているM-Eオーバーレイ設計法におけるSeasonal Adjustment Factor (SAF) (季節変化に伴う粒状材料の調整係数) の、オーバーレイ設計厚へ与える影響について検討している。逆解析により算出した弾性係数を用い、路床、路盤のSAF値を変化させ、逆解析により算出したオーバーレイ設計厚の評価を行った。SAF値の変化は、路床、路盤 (特に路盤) に対する春季の値がオーバーレイの厚さに最も影響を及ぼし、春季の融解期の路床、路盤の弾性率が80%低減することにより、オーバーレイの厚さはおおよそ21%増加する。また冬季は、SAF値が変化してもオーバーレイの設計厚はほとんど変わらないことが示されている。
(1) Brill, D. R. Guo, E. H. and Ricalde, L. (米国) (2) Critical Stresses for Thickness Design of Rigid Pavement Slabs Subjected to Multiple-Axle Heavy Aircraft Gear Loads (3) pp.305～314 (4) 重い航空機を対象としたコンクリートスラブの厚さ設計における限界応力 (増山幸衛) (5) 一般的に、空港舗装におけるコンクリートスラブの設計において限界荷重は、「Westergaardの端部載荷モデル」により単純化され、スラブ縁中央の荷重下に最大の引張り応力が発生するものとして計算されている。しかし、このように単純化したモデルでは対応できない可能性がある。そのため、コンクリートスラブと車輪の位置を精度良く計算できる三次元有限要素法を用いて、荷重の大きな三機種と、大きさの異なる3種類のスラブを選定し、限界荷重の加わる位置を算出し、比較を行った。その結果、条件によっては、必ずしもスラブ縁中央の荷重下に最大の引張り応力が発生するのではなく、これより、従来手法の適用限界と、三次元有限要素法の優位性が示されたとしている。
(1) Eizabourou Hirotsu, Nobuyuki Yoshida, Masaru Nishi and Hideya Kanki (日本) (2) Temperature Variation and Displacement Behavior of Model Asphalt Pavements during Repeated Plate-Loading Tests (3) pp.315～324 (4) アスファルト舗装による繰返し平板載荷試験中の温度変化と変位挙動について (森嶋洋幸) (5) 繰返し平板載荷試験は、表層、上層路盤、下層路盤を変えた3種類の舗装構成で、直径100 の載荷板により舗装表面に3kNの荷重を、載荷時間0.6秒、非載荷時間1.5秒の2.1秒サイクルで、約50,000回繰返して行った。試験温度は、供試体作製直後、常温、60℃の3条件、測定位置は載荷板中心から5 刻みに20 までの合計5ヶ所とした。その結果、作製直後の供試体では、載荷板近辺のたわみ量は大きく、温度低下につれて減少した。また載荷板から離れた近辺では温度低下につれて微増する。これは、温度低下によりアスファルト混合物の荷重伝達が回復することを示している。また、たわみ中心と中心から10 離れたところの表層の変位差と平均温度の間には、片対数で直線関係にあった。
(1) C. A. Lenngren (スウェーデン) H. Carlsson (スウェーデン) (2) Airfield Pavement Structural Analyses and Design in Sweden (3) pp.325～334 (4) スウェーデンにおける飛行場舗装の構造解析と設計 (焼山明生) (5) スウェーデンの飛行場舗装設計に関する力学的プロセスの発展と、それを用いた状況について論じたものである。従来飛行場の構造設計においては、アスファルト層の剛性等を補正した舗装の支持強度の指標PCNに影響があることが確認されている。地盤の設計に用いられる等価単車輪荷重 (ESWL) は、一般的な旅客機を基準としてきた。これらの計算は、アスファルト層の下面の引張りひずみに基づいていた。本研究では従来の設計手法と、高速回転たわみ計を用いた方法について比較している。ESWLに欠点を含むため、PCN分類体系を用いて、舗装寿命を予測するのはあ

まり有益ではないことがわかった。蓄積した気象条件データや新しいひずみ測定手法なども加味した上で、舗装の構造設計に関する修正を行う。	
(1) P. E. Sebaaly and R. Siddharthan (米国) (2) Impact of Heavy Vehicles on Pavement Responses (3) pp.335～344	(4) 舗装体の挙動に及ぼす重車両の衝撃 (保本敏伸) (5) 多くのハイウェイはAASHTOによる80kN／軸換算を用いて設計しているが、農業装備車両のように、重荷重で特殊な軸配置を持つ車両には対応できないため、サウスダコタ交通局では、農業装備車両がたわみ性舗装に与える衝撃について、測定箇所・舗装断面・測定季節が異なる条件で、測定車両の積載条件を変化させて両者の評価を行った。その結果、以下が確認された。 オーバーレイの方が衝撃に対するレスポンスが低い、表層の変形は路床の含水状態の影響を大きくうける、 载荷した農業装備車両が舗装体に与えるダメージは、80kN／軸車両に比べ明らかに大きい、 舗装のダメージは春が最も大きい、 表層のひずみは新設の方が小さい、 オーバーレイを厚くすると、ひずみに変化はないが、圧力・変形は小さくなる。 路床のタイプは舗装体のダメージに影響する。
(1) Stet, M. J. A. and Thewessen H. P. M. (オランダ) (2) Pavement Detriment due to Runway Roughness (3) pp.345～354	(4) 滑走路のラフネスによる舗装の損傷 (山脇宏成) (5) 空港の滑走路において、ラフネスの良い舗装と悪い舗装で測定されたプロファイルのデータを用いてシミュレーションを行い、舗装にかかる動的荷重を評価し、航空機と舗装の損傷とラフネスの関係を明らかにしている。舗装のプロファイルは簡易な測定システムを使用し、基準高をもとに勾配変化とラフネスの振幅と長さ取込んだ舗装プロファイルを測定している。シミュレーションは、測定されたプロファイルの入力された位置の関数として操縦室の加速度、航空機重心の加速度、タイヤの動的荷重、舗装にかかる動的荷重を計算している。損傷については、計算された動的荷重をもちいて疲労破壊回数を求めて評価している。
(1) V. Vodopivec, V. Ostir, B. Lipoglavsek (スロベニア) (2) New Experiences in Loading of Flexible Pavements (3) pp.355～363	(4) アスファルト舗装の新しい載荷試験 (矢野辰明) (5) 舗装の底面から発生するクラックではなく、表面から発生するクラックの原因究明のために、216号線において測定箇所を4測点設け、各測点で車両が通過する際にかかる輪荷重および路面のたわみを測定した。その結果、舗装の層厚、各層の弾性係数、通過車両の輪荷重によって舗装表面に与える引張応力に差が生じることが分かった。また、路面の状態によっても舗装表面と下面では引張応力に差が生じるため、舗装の状態を正確に把握することが、舗装構造を正しく評価することにつながるとしている。
(1) Winnerholt, T. (スウェーデン) (2) A New Approach to Pavement Design in Sweden: New Swedish Road Design Manual (3) pp.365～372	(4) スウェーデンの舗装設計の新しいアプローチ：新しい道路設計マニュアル (阿部長門) (5) スウェーデンの道路の設計マニュアルは、2001年1月1日から新しい設計マニュアルが使用されており、それに伴い、設計コードの導入等が求められた。ここで新たに開発したPMS2000プログラムは、線形理論設計の導入、新しい凍上モデルの採用など従来と大きな変化があり、特に設計に関しては、スウェーデン道路局 (SNRA) とスウェーデン道路及び交通調査研究所 (VTI) の共同研究プログラムで得られた、設計標準軸重換算台数の算定方法の改定や凍上の新たなモデルが示されている。本プログラムの利用により、舗装に関する専門的な知識がなくても簡便に舗装の設計が可能となり、経済性等を考慮しながら多くの舗装設計案の中から、最も条件に合致した断面を選択できるとしている。
(1) M. Wistube (オーストリア) , J. Litzka (オーストリア) (2) Consideration of Climatic Conditions in Pavement Design	

(3) pp.373～380

(4) 舗装設計時に考慮すべき気候条件

(井 真宏)

- (5) オーストリアのアスファルト舗装設計法は、設計時に気候条件を考慮し、実際の計算に取り込んでいるが、さらに、凍結融解を舗装設計時の要素に取り入れていくための検討を行った。Vienna University and Technologyによって行われた最新の気候調査結果と設計への適用性についての検討から、国内の9箇所において、5年間にわたる調査結果（気温・アスコン層温度・降雨量・凍結深度）を用いて、地域ごとのアスコン層の深さと温度の関係を求める式を確立することができた。また、凍結深度の測定結果から、凍結融解にともなう舗装内の応力や疲労の影響を予測することができ、設計への適用性の高さが確認できた。

(1) H., Wolge and L., Naslund（スウェーデン）

(2) Pavement Design for the 3rd Runway at Stockholm-Arlanda Airport, Sweden

(3) pp.381～388

(4) ストックホルムーアルランダ空港第3滑走路の舗装設計

(市岡孝夫)

- (5) 滑走路の舗装選定に際し、アスファルト舗装とコンクリート舗装の比較検討を行った。まず、新設する滑走路部分を航空機により受ける荷重の大きさによりランク分けし、それぞれの工区ごとに最適な舗装構成を選定した。維持補修作業の容易性および今後輪荷重が増加した場合の対応能力等について比較を行った。解析期間を40年とした場合のライフサイクルコストを基に滑走路の部分ごとに最適な舗装構成を設定した。滑走路および誘導路部分は、アスファルト舗装とし、舗装厚さは受ける荷重の大きさにより多層弾性理論で決定した。エプロン部分は、静的な荷重を多く受けることからコンクリート舗装とした。

4. 施工、維持、および補修

(1) F. A. Batista and M. L. Antunes（ポルトガル）

(2) Characterization of Dense-Graded Asphalt Cold Mixtures for Pavement Rehabilitation

(3) pp.391～400

(4) 舗装リハビリテーションのための常温密粒度アスファルト混合物

(岩塚浩二)

- (5) Laboratorio Nacional de Engenharia Civil (LNEC) とポルトガル道路局 (ICERR) は、オーバーレイや常温アスファルト混合物の現場での再利用に関し、配合設計法の改良、常温アスファルト混合物の短長期の強度特性評価、交通開放後のパフォーマンス評価、常温混合物を用いる舗装の解析的な設計方法の開発、を目的に調査プロジェクトを実施した。その結果、常温密粒度アスファルト混合物は、特に交通量の少ない道路での補修のためのよい代替案となる。また、この材料は、オーバーレイ、あるいは現場での既存舗装の再利用に用いることができる。しかし常温混合物の設計法は、従来と比べ、舗設、養生、および供試体試験の方法について著しく異なるため、これらの課題にも取りかかっている。

(1) Ekdahl P.（スウェーデン）

(2) Variation in Calculated Pavement Performance Due to Variation in Input Data

(3) pp.401～410

(4) 舗装マネジメントシステムの入力データの変動により算出される舗装供用性の変動

(岩岡宏美)

- (5) 舗装マネジメントシステムに入力するいくつかの重要なパラメータを変化させ、その影響を2つの異なった劣化モデル（HDM-4（Heavy Duty Macadam）およびMMOPP（Mathematical Model of Pavement Performance））を用いて検討した。入力されるデータの精度は一定でないため、その精度が、舗装劣化計算値にどのような影響を及ぼすのかを確認するため、11の入力変数の精度を変化させ検討した。その結果、一般的に、厚さと弾性係数等の特性は両方のモデルにおける供用年数に最も影響が大きく、従って、これらの変数を最も高い精度で決定すれば、計算された舗装供用性における精度が高くなるとしている。

(1) M. Gothiè（フランス）

(2) Could Adherence of a Road Surface be used to identify the Areas where Maintenance is Needed?

(3) pp.411～421

(4) 補修の必要な場所を識別するために舗装表面の特性は利用できるか？

(平戸利明)

(5) 舗装表面の特性と交通事故の関係は、世界中で議論されており、様々な研究者によりその究明が行われている。本論文では、道路の安全性と関係のあり得るデータ（摩擦、テクスチャおよび設計）と交通事故との相関について述べている。結果として、実際の交通事故は、複数の要因から起こるため、傾向として捉えることしかできないとしている。しかし、得られたデータから、道路ユーザーの安全性に危惧されるような箇所を識別し、その箇所に対する補修方法を提供することができるとしている。
(1) K. Gustafan, S. Said & L. G. Wiman（スウェーデン） (2) Bearing Capacity of Flexible Road Structures Reinforced with Steel Fabrics (3) pp.423～432 (4) 鉄網で強化されたたわみ性舗装の支持力について (江向俊文) (5) アスファルト舗装の鉄網補強技術を実道で検証したものである。基層または安定処理層中に鉄網を敷設し、移動式荷重車シミュレーター「HVS-NORDIC」で促進載荷試験を実施した。促進載荷試験では、鉄網で補強することによりわだち掘れ量は減少したが、クラックは増加する傾向にあった。AADT500程度の実道でのFWDのたわみ量測定値は、鉄網の有無にかかわらず同程度であった。また、凍結融解が発生する区間では、凍上クラックに対して優れた抵抗性を示した。ただし、これらは供用1年での結果であり、鉄網補強の効果はまだ評価できない。
(1) Hachiya, Y., Tsubokawa, Y. and Takahashi, O.（日本） (2) Implementation of Nondestructive Structural Evaluation for Airport Asphalt Pavements (3) pp.433～442 (4) 空港アスファルト舗装における非破壊構造評価の施行 (金井利浩) (5) FWDを用いた非破壊の構造評価システムを7つの空港アスファルト舗装へ適用し、システムの妥当性を検証した。システムは、FWDのたわみ量から季節による路床の支持力変動を考慮して載荷板中心のたわみや舗装体内部のひずみを求め、基準値との比較により舗装の構造評価を行うものである。支持力不足の場合、基準値を満足するオーバーレイ厚さを求めることも可能としている。オーバーレイ前後におけるたわみ量の変化等について検証した結果、システムの妥当性を確認し、路床CBRの季節変動やFWDの載荷荷重が重要であることを示した。
(1) Y. Hassan, A. O. Abd El Halim, A. El-Desouky, A. Mostafa, M. Farha（カナダ） (2) Effects of New and Conventional Deicing Chemicals on Airfield Asphalt Concrete Pavement (3) pp.443～452 (4) 新旧の凍結防止剤の空港アスファルト舗装への影響 (加納孝志) (5) カナダの空港では、凍結防止剤として主に尿素を用いている。そこで、尿素のほか、酢酸カリ、ギ酸ナトリウム、酢酸ナトリウムなどを主成分とした新しい凍結防止剤がアスファルト混合物へ与える影響を確認することを目的に試験を実施した。アスファルト混合物は各凍結防止剤に浸した後、凍結融解および乾湿繰り返し作用を与えた。試験では、凍結防止剤は特定の濃度範囲でアスファルト混合物に与える影響が最大となること、多くの凍結融解作用を受けた後に凍結防止剤に浸されるとアスファルト混合物の強度などが低下すること、などの結果が得られた。
(1) Michel J. Hovan（米国）and Romeo Resaul（カナダ） (2) Long-Term Monitoring of an Open Graded Drainage Layer Design for Airfields at the Prince George Airport, British Columbia, Canada (3) pp.453～461 (4) カナダ、ブリッティッシュコロンビア、プリンスジョージ空港における開粒度排水層の長期モニタリング (鎌田孝行) (5) 空港滑走路での開粒度排水層（OGDL）の含水量、地下水位、温度を1997～2001年にわたって調査した。OGDL層は最大粒径19の開粒度アスファルト処理混合物の上層路盤である。試験ヤードは145で、そのうち85が通常のアスファルト舗装区間、隣接する60がOGDL区間である。どちらの区間も冬期に凍っている水分が融け出す春に含水量がピークとなる。OGDL区間の路盤の含水量は、通常のアスファルト舗装区間に比べてピーク時の値は低いがそれ以外の期間はかなり高い値を示したが、4年間の観察ではどちらの工区も良好な供用性を維持している。
(1) Bo Johansson（スウェーデン） (2) Rockfill Pavements on Subsoil-Construction Compaction (3) pp.463～473

(4) 軟弱地盤におけるロックフィル舗装の締固め (鎌田義秋) (5) 軟弱地盤における最適施工手順を明確にすることを目的とし、フルスケールのフィールドテストを実施した。ロックフィル材料の粒径、層厚、層数、振動ローラの振動数と締固め回数をパラメータとした。支持力は静的平板載荷試験と落重試験（LDW）で測定した。支持力は締固め回数の影響が最も大きく、回数の増加に伴って直線的に増加し16回で限界となる。動的締固め後の静的締固め（振動なし）は、表面の改善によって支持力を増加させる。1層と3層で締め固めた場合、3層の方が支持力は高い。ロックフィルの粒径は大きい方が、ローラの振動数は高い方が、支持力は高い。
(1) O. Melchor-Lucero, I. Addallah, S. Nazarian & C. Ferregut（米国） (2) A Probabilistic Method for Estimating Pavement Performance Using Falling Weight Deflectometer Data (3) pp.475～485 (4) FWDデータを使用した舗装パフォーマンス推定のための確率的方法 (高馬克治) (5) 人工ニューラルネットワーク技術により、舗装の状況と舗装のパフォーマンスカーブを予測するための交通量情報と不確定要素を統合したソフトウェアを開発した。統計的な概念に基づいて、与えられた断面の舗装パフォーマンス算出へのアプローチでは、逆解析は省略され、たわみ測定と断面の層厚をデータとして使用するだけである。従来の方とと比較すると、その有効性と正当性は舗装の促進載荷試験の結果から証明された。すべての方法は、ウィンドウズ上で利用可能な標準的なプログラムとして完成している。
(1) J. L. Paute（フランス） (2) Pavement Edge Drain Barriers in the Rehabilitation of Existing Roads（Experiments and Field Results） (3) pp.487～496 (4) 既設道路のリハビリテーションによる舗装端部の排水バリア（実験と施工結果） (小柴朋広) (5) Pavement Edge Drain Barriers（PEDB）を用いた既設舗装の改良工法についての実験と現場調査を行った。工法は、ジオテキスタイルのフィルタとドレーンパイプを備えたフレームを既設舗装端部に設置することで路盤の排水を助長し、舗装の強度を改良するものである。研究開発はフランスの道路管理者および道路工事会社によって進められ、実験的な作業によって、排水スクリーンの有効性は、年間を通した設置部・非設置部のモニタリングにより評価された。また、間隙圧と含水量の減少は、路盤の支持力の改良に大きな影響があることが分かった。
(1) Said, S.f, Zarghampour, H., Johansson, S., Hakim, H. and Carlsson, H.（スウェーデン） (2) Evaluation of Pavement Structure Reinforced Steel Fabrics (3) pp.497～504 (4) 鉄網で補強されたアスファルト舗装の評価 (小関裕二) (5) E6号線のアスファルト舗装は支持力不足に起因する破壊が著しいため、アスファルト舗装を鉄網で補強するという試験舗装を行い、1年後までの調査を行った。鉄網で補強されたアスファルト舗装は、通常のアスファルト舗装とともに既設舗装を切削後に施工され、FWDによるたわみ測定と鉄網と舗装内部に設置されたゲージによるひずみ測定が行われた。これはREFLEXと呼ばれる共同プロジェクトとして実施されたものである。たわみ測定結果では、鉄網による補強効果が明確にならなかった。ひずみ測定結果では、鉄網により舗装の寿命を延長できることを示した。
(1) Sund, E. K. and Haugodegard, T.（ノルウェイ） (2) Network Level Analysis of Pavement Maintenance in Norway (3) pp.505～513 (4) ノルウェイのネットワークレベルPMSの開発 (佐々木蔵) (5) ノルウェイのPMS構築については、プロジェクトレベルのシステムは既に開発され、順調に運用に至っている。ネットワークレベルPMSについて、Markov鎖を用いたフィンランドのシステムに、ノルウェイ国道網の26,500 にわたる管理データを適用し、可能性評価をはじめとした検討を進めている。気候、道路種別、交通量により15のサブネットワークに分け、わだち掘れ及び平坦性による舗装損傷延長の割合を10年後まで推定している。さらに、維持補修予算シナリオによる舗装管理レベルの変化予測なども試みている。
(1) Christ A. P. M. van Gorp & Adrian J. van Leest（オランダ） (2) QUASAR Structural Analysis of Asphalt Pavements

(3) pp.515～525

(4) プログラム「QUASAR」によるアスファルト舗装の構造解析

(佐藤雅規)

- (5) 舗装構造解析プログラム「QUASAR」を用いて簡便に維持計画を行う方法を検討した。舗装構造評価に対しては世界的にFWDによる測定データの逆解析が用いられているが、逆解析は時間と手間がかかるため実際の補修設計で用いるのは困難である。オランダの道路研究所では、逆解析に替わる迅速で操作性のよい「QUASAR」プログラムを開発し舗装構造評価を行っている。本プログラムは、FWDの測定データをもとに、表層面での引張り応力や路盤の圧縮応力等を計算し、さらに交通量データを加えて残存寿命や補修補強設計を行うことができるものである。

5. リフレクティブクラック

(1) A. C. Collop, N. H. Thom and A. J. Swell (英国)

(2) Laboratory Measurement of Crack Propagation in High Stiffness Asphalt Mixtures

(3) pp.529～537

(4) 高スティフネスアスファルト混合物におけるひび割れ伝播の実験室測定

(佐藤康彦)

- (5) 高スティフネス系混合物(HMB)を用いた舗装では、ひび割れ伝播時間が舗装体の疲労寿命に大きく影響する。HMBのひび割れ伝播に対する抵抗性を評価するために、実験室で早く、かつ信頼できる最適な試験法として簡易引張り(コンパクトテンション, CT)試験法を行った。標準的破壊機構の応力拡大係数を計算するためにデジタルカメラを用いてひび割れ長さを測定し、Paris法がひび割れの速度を表すために用いられた。その結果、適用された応力に対するひび割れ成長速度はバインダーのスティフネスに伴って増大する。また、結果は混合物の性状によって大きな差異が認められた。

(1) K. W. Kim, S. J. Lee and Y. S. Doh (韓国)

(2) Estimation of Relative Performance of Overlaid Asphalt Concrete against Reflection cracking due to Shear and Bending Fracture Mode

(3) pp.539～547

(4) せん断および曲げ破壊によるリフレクションクラックを抑制するオーバーレイアスファルト混合物の評価(鈴木 徹)

- (5) 各種オーバーレイ供試体を用いた促進試験を行い、リフレクションクラックに対する疲労寿命の解析を行った。改質アスファルト、補強材からなる各種オーバーレイ(応力緩和層を含む)供試体を作製し、ホイールトラッキングによる促進試験を行い、リフレクションクラック進行のサイクルを測定し、各種混合物のパフォーマンス評価を行った。曲げ、せん断の作用によって発生するリフレクションクラックの評価に際し、せん断では膨張収縮率および引張応力も併せて考慮し、Paris則を修正することによって、疲労寿命の予測式を導いた。

(1) Wagberg Lars-Goran (スウェーデン)

(2) Pavement Deterioration-Crack Initiation and Crack Propagation Models

(3) pp.549～560

(4) 舗装の破壊－ひび割れ発生とひび割れ伝播モデル

(岸田正憲)

- (5) 寒冷気候によるたわみ性舗装の劣化要因を明らかにし、それらを考慮したひび割れ発生モデルおよびひび割れ伝播モデルを構築した。表面たわみ指数SCIおよび引張りひずみSTRAINを舗装の劣化状態を示す入力値とした。ひび割れ発生モデルは、年間累積交通荷重とSCIまたはSTRAINを用いて累積交通荷重を予測する。ひび割れ伝播モデルは、ひび割れの状態を示すひび割れ指数Ciに時系列を考慮したものを出力する。ひび割れが発生するときの交通荷重を予測するモデルと最新の供用年数または等価単軸荷重からひび割れの状態を予測するモデルを構築した。

(1) Martínez F. O. et al. (アルゼンチン)

(2) The Influence of Cracking on the Structural Properties of Asphalt Mixes

(3) pp.561～571

(4) アスファルト舗装の構造的要因がクラックの発生に与える影響

(高橋茂樹)

- (5) クラック率とFWDおよびコアから得られたデータとの比較検討を行った。90年代に建設された国道を対象とし、28区間でFWDにより100 毎のたわみ測定結果から、1 毎のD0の90%タイルを代表値として逆解析を行った。現地

採取材料の路床とアスファルト層の弾性係数を室内試験で求めた。クラック率はアルゼンチン国道基準による評価と SHRP のクラック指数で評価した。アスファルト層の逆解析弾性係数と室内試験による弾性係数の比は、クラックの無い箇所ではほぼ1.0となったが、クラック率とともに変化し、クラックの最も激しい箇所では0.4となった。

- (1) Montepara, A. and Giuliani, F (イタリア)
- (2) Crack Element in the Non-linear f.e.m. Program P.A.R.M.A. for the Design of Reinforced Concrete Pavements
- (3) pp.573～583
- (4) 鉄筋コンクリート舗装の設計に用いる非線形FEMプログラム「P.A.R.M.A」のクラックの要素 (高橋光彦)**
- (5) クラックの発生を考慮し、鉄筋コンクリート舗装の構造的な不連続性による非線形の挙動を解析することを目的に、パルマ大学で非線形FEMプログラム「P.A.R.M.A」を開発した。このプログラムはクラックの要素として、路盤とコンクリート版、鉄筋とコンクリート版、隣接するコンクリート版の3つを取り上げ、これらをモデル化し、解析を行うものである。当該プログラムにより、クラック発生による鉄筋コンクリート舗装の挙動を捉えることで、構造的に危険な領域での反応を正確に評価できる。

- (1) J. C. Pais & P. P. A. Pereira, J. M. B. Sousa, S. Capitaio (ポルトガル)
- (2) Evaluation of the Load Associated Cracking in Flexible Pavement
- (3) pp.585～594
- (4) たわみ性舗装におけるひび割れに関連した荷重の評価 (武本敏男)**
- (5) アスファルト舗装において、ひび割れに関連した荷重の評価を行うために、オーバーレイ前後のひび割れの挙動を調査した。オーバーレイ前のひび割れ挙動はCAM試験機で測定した。オーバーレイ後のひび割れ挙動はFWDでたわみを測定した。これらの測定結果を3次元有限要素法による解析により評価した。これにより、アスファルト舗装におけるひび割れ挙動の予測式を導いた。

6. 現位置における層の弾性評価

- (1) Q. Dong, Y. Hachiya, O. Takahashi, Y. tsukakawa and K. Matsui (日本)
- (2) Efficient Backcalculation Algorithm of Time Domain for Large-Scale Pavement Systems Using Ritz Vectors
- (3) pp.597～605
- (4) リッツベクトルを用いた大規模舗装の時間領域に対する効率的な逆解析アルゴリズム (平戸利明)**
- (5) 大規模な舗装構造における時間領域での弾性係数と減衰係数を決定するための逆解析アルゴリズムについて述べている。3次元有限要素法によって舗装はモデル化され、ここに使用されるパラメータの識別手順は、動的応答解析とたわみ感度解析にかかわるマトリックスを減少させるため、リッツベクトルを使用している。また、パラメータの不定材料は、特異値分解に基づき設定される。リッツベクトルを用いることにより、時刻歴に対するたわみ挙動から舗装の逆解析にかかる計算時間を飛躍的に省くことができるとしている。

- (1) Graczyk, M., Mechowski, T., Sudyka, J., Chomicki, M. and Rafa, J. (ポーランド)
- (2) Method of Estimation of Bearing Capacity of Multi-layer Pavements with Application of Quasi-static Tests
- (3) pp.607～616
- (4) 準静的載荷試験を適用した多層舗装構造の支持力の評価方法 (東本 崇)**
- (5) FWDにより生じる舗装の表面波を利用し、舗装各層の弾性係数の推定手法およびその算出プログラムを開発した。FWDにより生じる表面波が、各センサーに伝達するまでの時間の差から表面波の速度を算出し、等値換算厚の概念を取り入れて多層構造を2層に変換することによりスペクトル解析を行わずに各層の弾性係数を推定する手法を検討した。この考えに基づいて舗装構造評価プログラムMODDYN1.0を開発した。FWD試験結果を利用し、多層弾性理論プログラムELMODによる逆解析値と比較したところ、本プログラムのほうが迅速で精度良く構造評価ができる。

- (1) S. Grenier and J. M. Konrad (カナダ)
- (2) Evaluation of the Influence Asphalt Concrete Pavement Discontinuities on Falling Weight Deflectometer Measurements

(3) pp.617～627 (4) FWD測定値にアスファルト舗装上の破損が及ぼす影響の評価 (平戸利明) (5) アスファルト舗装上に発生した横断クラックと縦断クラックがFWD測定値へ及ぼす影響について調査し、適切な層弾性係数の逆解析を行うための修正ファクターを導いている。また、この修正ファクターは、温度クラックであるか疲労クラックであるかを問わない。クラックの発生しているアスファルト舗装に対し、適切にFWD測定ができるように修正ファクターを導き出している。しかし、この修正ファクターは載荷板とクラックとの距離に依存しており、薄層の表層では600以上の距離があれば修正ファクターに影響はないとしている。
(1) W. Hegeman (ベルギー) (2) In Situ Assessment of Stiffness of a Road Sand Embankment (3) pp.629～635 (4) 道路に用いる砂盛土の現位置での強度評価 (長谷川淳也) (5) ベルギーでは、盛土仕上がり面の支持力評価を平板載荷試験で行っているが、砂を用いた橋梁の取付け部の盛土等では、かなり深い部分まで締固めも行っており、砂の圧密性を評価する必要がある。非破壊試験としてSASW試験(表面波スペクトル解析)を行い、現位置での砂盛土の支持力を評価している。SASW試験は、迅速で経済的な方法であり、力学設計に有効なせん断強度を求めることができ、砂盛土などの深層部のどのような場所においても締固め特性を判断することが可能である。また、コーン抵抗値と最大せん断係数を比較した結果、コーン貫入試験との相関性が高いことがわかった。
(1) V. Hopman and E. Beuving (オランダ) (2) Repeatability, Reproducibility and Accuracy of GPR Measurements (3) pp.637～645 (4) GPR測定の繰り返し性、再現性および精度について (林 信也) (5) 本研究は、4つの機関でGPR試験を行っているが、それぞれの結果が異なっているため、その確認とGPR(地中レーダ)試験の繰り返し性、再現性および精度について検証したものである。4種の装置で測定値に差はあるものの、平均値で評価するとGPRで得られるアスファルト混合物層の厚さについては、低速移動での測定であれば、コアに対して測定誤差は約5%であった。また、移動速度が80/hのときの誤差は9%であった。このように高速移動の場合には測定精度が低下することなどが判明したため、今後さらに改良を重ねて精度をあげる必要があるとしている。
(1) Maina, J. W, Ionue, T, Kasahara, A and Matui, K (日本) (2) Backcalculation of Pavement Layer Moduli without Using D0-Deflection (3) pp.647～656 (4) D0たわみを利用しない舗装層の弾性係数の逆解析 (舟根 毅) (5) FWDを用いた非破壊装置(NDT)によるたわみデータを逆解析すると、層弾性係数を求めることができるが、載荷点中央たわみ(D0)を考慮した場合と、しない場合では逆解析結果に差が生じるため、その差について複数の測定装置を用いて検討した結果について報告している。FWD載荷板下の荷重分布が正確に分からない限り、D0たわみデータは逆解析に使用しないほうが信頼性の高い結果を得られることが分かった。また、1層目の弾性係数についてはD0たわみデータを含まない場合、動的逆解析法と静的逆解析法の計算結果には高い相関が見られた。これらのことから、FWDデータからD0たわみを除外して逆解析を行えば、計算時間の短い静的法によっても十分な精度で舗装構造を評価できるとしている。
(1) Wayne Marsey and N. Garg (米国) (2) Falling Weight Deflectometer Configuration Standards for Airfield Testing (3) pp.657～665 (4) 空港試験におけるFWDの標準規格 (平戸利明) (5) NAPTF (National Airport Pavement Test Facility) の9種類(アスファルト舗装:6種類, コンクリート舗装:3種類)の試験コースにおけるFWD性能試験のうち、アスファルト舗装の結果について述べたものである。空港舗装の設計と維持プログラムに重要な情報となる舗装構造の均一性や、たわみと荷重の関係等について検討している。各種試験コースの中で、荷重の大きさに対するたわみの増加量は、舗装タイプや路床の支持力に依存するとしている。また、荷重とたわみの間にはすべての舗装構造で線形性が認められたこと、D5(5番目のセンサー)値を測定するこ

とにより、路床の支持力状態を把握することが可能となることなど、FWDの基本的な事項についても述べられている。	
(1) Mehta, Y. Birgisson, B. and Choubane, B. (米国) (2) Use of Backcalculated Falling Weight Deflectometer Modulus for Detecting Foundation Problems Caused by Rubblization of Concrete Pavements (3) pp.667～676	
(4) 既設コンクリート舗装を破碎し、路盤とする工法における課題へのFWD逆解析弾性係数の利用 (増山幸衛) (5) 州際道路にコンクリート舗装が多く施工されたが、破損や設計寿命に達した等の理由から、コンクリート版を破碎し、路盤とし、加熱混合物によるオーバーレイが行われてきた。しかし、これらの箇所ではフレクショクラックが発生し、地質学的調査、FWDを用いた解析等が行われた。破壊の進んだ区間に対しFWDを用いて測定を行った結果、健全な状態の区間に比べ、弾性係数が低下し剛性が低くなっていることが確認された。原因としては、コンクリート舗装の破碎において使用される振動ブレーカによって、水が吸い上げられたことなどによるものと推測された。加熱混合物によるオーバーレイ区間の破壊を防止するためには、舗装端部の排水を行うと同時に、コンクリート版の破碎時に振動を加えることによって、地下水が上がらないように施工することが必要であるとしている。	
(1) J. M. C. Neves & A. Gomes Correia (ポルトガル) (2) Bearing Capacity of a Flexible Pavement during the Construction Phase (3) pp.677～684	
(4) たわみ性舗装の施工時における支持力について (森嶋洋幸) (5) FWD試験と輪荷重試験の2種類の載荷試験により、たわみ性舗装のひずみ測定結果を報告したものである。ひずみ計は、アスファルト層下面においては縦横断方向に水平に設置し、粒状材料と路床土の上面には垂直に設置した。舗装各層の施工後において輪荷重試験、舗装完成後においてはFWD試験を実施した。また、熱電対により外気温とアスファルトマカダム層の温度も測定した。載荷方法が異なると舗装の応答も変わり、FWD試験で計測されたアスファルトマカダムと路床土のひずみは、輪荷重試験で計測されたひずみより小さくなった。アスコン層の温度増加が舗装構造のひずみ増加をもたらすことや、基層にアスコンを適用すると舗装構造下部におけるひずみが減少することなどがわかったとしている。その他、軸重を変えたひずみの線形性に関する検討結果も述べられている。	
(1) W. P. Nunez J. A. Oliviera. (ブラジル) (2) Elastic Analysis of Thin Pavements and Subgrade Soil Based on Field and Laboratory Tests (3) pp.685～695	
(4) 薄層舗装並びに路床土のフィールド実験及び室内実験での弾性解析 (焼山明生) (5) 室内及びフィールド実験による弾性解析により、薄層舗装の荷重分散を調査した。数種類の骨材を利用した薄層舗装の弾性解析を行い、フィールド実験を行った結果について報告するものである。再現試験ではトラックシュミレータにより1,300,000回以上の荷重載荷が行われた。その結果、荷重分散は路床の上面にて起こっているという結果が得られた。ベンケルマンビームにより測定された弾性率では最適含水比での舗装よりも高いものがあったように、薄層であっても全天候に耐えうるケースも測定できた。これにより、経済的な舗装の構築に寄与できると考えられる。	
(1) Pedersen, Jens Preben (デンマーク) (2) Validation of FWD Measurements in Connection with Outsourcing Contract (3) pp.697～704	
(4) 外注契約におけるFWD測定の確認 (保本敏伸) (5) デンマークのRibe州では2000年春に、道路維持業務を外注することに決定し、当該州のハイウェイの内、5の区間がプロジェクトのために提供された。測定は100間隔で、IWPとOWPで、計270ポイント行った。なお、測定車両はPhonix/Carl BroのPRI2109を使用し、他の測定項目として地下水位を計った。今回の測定で、地下水位と支持力の間には関係がないことが示された。また、舗装寿命について、1年後の同じ月の結果を見ると異なった残存寿命を示しており、傾向を掴むには到らなかった。そこで、プロジェクトを数年間継続して実施することとした。	
(1) Ryden, N., Ulriksen, P., Ekdahl, U., Park, C.B., (スウェーデン) and Miller, R. D. (米国) (2) Multichannel Analysis of Seismic Wave for Layer Moduli Evaluation of Pavement	

(3) pp.705～714

(4) 舗装の層弾性係数評価のための衝撃波のマルチチャンネル解析

(山脇宏成)

- (5) 舗装構成層の弾性係数を評価する非破壊試験における、新しい衝撃波技術の適用性について述べている。新しい衝撃波を用いた測定機器は、加速度計、ハンマーおよびポータブルコンピュータから構成されている。測定は、加速度計を設置し、そこから25 間隔で2 までハンマーで打振して、それぞれ0.04sec間、加速度を観測するものである。試験舗装においてこの方法は試され、アスファルト層の動的弾性係数、層厚、ポアソン比を算出している。また、FWDデータから逆解析された動弾性係数と周波数を用いてマスターカーブを作成している。FWDデータの逆解析にあたっては、この手法により得られたアスファルト混合物層の層数、厚さの情報を利用することを推奨している。

(1) G. Salt, D. Stevens & R. Mcleod (ニュージーランド)

(2) Pavement Structural Evaluation: Production Level FWD Back-Analysis Using the Full Time History

(3) pp.715～720

(4) 時系列データを用いたFWDたわみの逆解析による舗装の構造評価

(矢野辰明)

- (5) FWDから得られる時系列のたわみデータにより、様々な路盤を有する舗装におけるたわみの伝播速度について検証したものである。FWDたわみは、1995年以降、動的な要素を取り入れた動的逆解析が実施され始めた。舗装の違いによってたわみの伝播速度が大きく異なることがわかった。このことより、逆解析において実際の舗装の応答を考慮することは材料特性を忠実に反映させるという観点から非常に有意義であり、今後さらに様々な舗装体で検証を行っていく必要があるとしている。

<統計資料>

1. 石油アスファルト需給実績（総括表）

（単位：千t）

年 度	供 給					需 要					
	期初在庫	生 産	対前年 度 比	輸 入	合 計	内 需	対前年 度 比	輸 出	小 計	期末在庫	合 計
13 年 度	255	5,425	(98.5)	32	5,712	4,720	(96.9)	284	5,004	97	5,101
14. 8 月	212	406	(96.1)	0	618	341	(99.2)	15	356	216	572
9 月	216	447	(104.2)	1	664	367	(98.6)	23	390	236	626
7～9月	241	1,234	(95.3)	2	1,477	1,054	(97.8)	58	1,112	236	1,348
10月	236	448	(100.4)	1	685	397	(98.0)	19	416	221	638
11月	221	487	(87.6)	0	708	426	(89.0)	23	449	219	668
12月	219	511	(99.2)	0	730	414	(94.0)	23	437	240	678
10～12月	236	1,446	(95.3)	1	1,683	1,237	(94.0)	66	1,303	240	1,543
15. 1 月	240	382	(98.2)	0	622	297	(92.0)	16	313	260	574
2 月	260	449	(94.9)	0	709	393	(99.0)	9	402	255	657
3 月	255	659	(112.6)	0	914	607	(102.0)	19	626	226	852
1～3月	240	1,490	(103.0)	0	1,730	1,297	(99.0)	44	1,341	226	1,567
14 年 度	214	5,249	(96.8)	8	5,471	4,475	(95.0)	218	4,693	226	4,919
15. 4 月	226	423	(105.6)	10	660	272	(88.9)	21	293	277	570
5 月	277	311	(96.9)	0	588	245	(87.8)	18	263	286	549
6 月	286	360	(100.8)	0	646	245	(81.1)	19	264	291	555
4～6月	226	1,094	(101.4)	10	1,330	762	(85.9)	58	820	291	1,111

2. 石油アスファルト内需実績（品種別明細）

（単位：千t）

年 度	内 需 量						対 前 年 度 比					
	ストレート・アスファルト				ブローン アスフ アルト	合 計	ストレート・アスファルト				ブローン アスフ アルト	合 計
	道路用	工業用	燃焼用	計			道路用	工業用	燃焼用	計		
13 年 度	3,404	180	960	4,544	176	4,720	94.2	95.1	107.7	96.8	92.3	96.6
14. 8 月	226	102		328	13	341	101.3		94.4	99.1	100.0	99.1
9 月	252	100		352	15	367	98.1		98.0	98.1	107.1	98.4
7～9月	717	296		1,013	41	1,054	100.0		93.1	97.9	97.6	97.9
10月	292	89		381	16	397	97.7		97.8	97.7	94.1	97.5
11月	319	91		410	16	426	88.6		92.9	89.5	88.9	89.5
12月	299	101		400	14	414	94.3		94.4	94.3	93.3	94.3
10～12月	910	281		1,191	46	1,237	93.2		94.3	93.5	92.0	93.4
15. 1 月	175	107		282	15	297	86.2	103.9		92.2	100.0	92.5
2 月	280	99		379	14	393	95.6	113.8		99.7	100.0	99.7
3 月	476	117		593	14	607	96.9	130.0		102.1	100.0	102.0
1～3月	931	323		1,254	43	1,297	94.2	115.4		98.9	100.0	98.9
14 年 度	3,192	1,113		4,305	170	4,475	93.8	97.5		94.7	96.0	94.8
15. 4 月	197	64		261	11	272	90.0	85.3		88.8	91.7	88.9
5 月	180	54		234	11	245	94.7	71.1		88.0	84.6	87.8
6 月	188	46		234	11	245	83.6	74.2		81.5	73.3	81.1
4～6月	565	164		729	33	762	89.1	77.0		86.1	82.5	85.9

- [注] (1) 経産省エネルギー生産・需給統計月報 15年5月確報
(2) 工業用ストレート・アスファルト、燃焼用アスファルト、ブローンアスファルトは石油連盟調べ。
(3) 道路用ストレート・アスファルト＝内需量合計－（ブローンアスファルト＋燃焼用アスファルト＋工業用ストレート・アスファルト）
(4) 四捨五入のため月報と一致しない場合がある。
(5) 平成14年4月以降の工業用、燃焼用アスファルト内需量は、諸事情により区別が出来なくなったことを受け、合算の数値のみ表記となります。

有限責任中間法人 日本アスファルト協会会員

社 名	住 所	電 話
[メーカー]		
出 光 興 産 株 式 会 社	(100-8321) 千代田区丸の内3-1-1	03 (3213) 3134
コ ス モ 石 油 株 式 会 社	(105-8528) 港区芝浦1-1-1	03 (3798) 3874
三 共 油 化 工 業 株 式 会 社	(105-0004) 港区新橋1-7-11	03 (5568) 6411
株式会社ジャパンエナジー	(105-8407) 港区虎ノ門2-10-1	03 (5573) 6000
昭和シェル石油株式会社	(135-8074) 港区台場2-3-2	03 (5531) 5765
新 日 本 石 油 株 式 会 社	(105-8412) 港区西新橋1-3-12	03 (3502) 9122
[ディーラー]		
● 東北		
株 式 会 社 男 鹿 興 業 社	(010-0511) 男鹿市船川港船川字海岸通り1-18-2	0185 (23) 3293
カ メ イ 株 式 会 社	(980-0803) 仙台市青葉区国分町3-1-18	022 (264) 6111
● 関東		
朝 日 産 業 株 式 会 社	(103-0025) 中央区日本橋茅場町2-7-9	03 (3669) 7878
株 式 会 社 ア ス カ	(106-0032) 港区六本木7-3-3	03 (5772) 1505
伊 藤 忠 エ ネ ク ス 株 式 会 社	(153-8655) 目黒区目黒1-24-12	03 (5436) 8211
エムシー・エネルギー株式会社	(100-0011) 千代田区内幸町1-3-3	03 (5251) 0961
コ ス モ 石 油 販 売 株 式 会 社	(104-0032) 中央区八丁堀3-3-5	03 (3551) 8011
コ ス モ ア ス フ ァ ル ト カ ン パ ニ ー		
国 光 商 事 株 式 会 社	(164-0003) 中野区東中野1-7-1	03 (3363) 8231
昭 石 商 事 株 式 会 社	(107-0051) 港区元赤坂1-1-8	03 (5474) 8511
住商石油アスファルト株式会社	(105-0011) 港区芝公園2-6-8	03 (3578) 9521
竹 中 産 業 株 式 会 社	(101-0044) 千代田区鍛冶町1-5-5	03 (3251) 0185
東 新 エ ナ ジ ー 株 式 会 社	(103-0027) 中央区日本橋2-13-10	03 (3273) 3551
中 西 瀝 青 株 式 会 社	(103-0028) 中央区八重洲1-2-1	03 (3272) 3471
株 式 会 社 南 部 商 会	(108-0073) 港区三田3-13-16	03 (5419) 9861
日 東 商 事 株 式 会 社	(170-0002) 豊島区巣鴨4-22-23	03 (3915) 7151
パシフィック石油商事株式会社	(103-0014) 中央区日本橋蛸殻町1-17-2	03 (3661) 4951
丸 紅 エ ネ ル ギ ー 株 式 会 社	(101-8322) 千代田区神田駿河台2-2	03 (3293) 4171
ユ ニ 石 油 株 式 会 社	(107-0051) 港区元赤坂1-7-8	03 (3796) 6616
● 中部		
鈴与商事株式会社清水支店	(424-8703) 清水市入船町11-1	0543 (54) 3322
松 村 物 産 株 式 会 社	(920-0031) 金沢市広岡2-1-27	0762 (21) 6121

有限責任中間法人 日本アスファルト協会会員

社 名	住 所	電 話
-----	-----	-----

● 近畿・中国

大阪アスファルト株式会社	(531-0071) 大阪市北区中津6-3-11	06 (6442) 0031
三徳商事株式会社	(532-0033) 大阪市淀川区新高4-1-3	06 (6394) 1551
昭和瀝青工業株式会社	(670-0935) 姫路市北条口4-26	0792 (26) 2611
千代田瀝青株式会社	(530-0044) 大阪市北区東天満2-10-17	06 (6358) 5531
富士商株式会社	(756-8501) 小野田市稲荷町10-23	0836 (81) 1111
株式会社松宮物産	(522-0021) 彦根市幸町32	0749 (23) 1608
横田瀝青興業株式会社	(672-8057) 姫路市飾磨区細江995	0792 (33) 0555

● 四国・九州

今別府産業株式会社	(890-0072) 鹿児島市新栄町15-7	0992 (56) 4111
三協商事株式会社	(770-0941) 徳島市万代町5-8	0886 (53) 5131
株式会社ネクステージ九州	(810-0005) 福岡市中央区清川2-20-15	092 (534) 7050
西岡商事株式会社	(764-0002) 仲多度郡多度津町家中3-1	0877 (33) 1001
平和石油株式会社高松支店	(760-0017) 高松市番町5-6-26	0878 (31) 7255

編集顧問	編集委員
多田 宏行	委 員 長 : 中村 俊行 安 崎 裕 小 林 孝 行 野村 健一郎 溝 渕 優 神 谷 恵 三 大 坪 義 治 服 部 潤 峰 岸 順 一 栗谷川 裕造 田 井 文 夫 姫 野 賢 治 吉 村 啓 之 小 島 逸 平 塚 越 徹 溝 口 孝 夫

アスファルト 第214号

平成15年10月発行

有限責任中間法人 日本アスファルト協会

☎ 154-0017 東京都世田谷区世田谷4-18-15

問い合わせ先

- ・昭和シェル石油株式会社 中央研究所 小林孝行
TEL 046-285-0829
- ・新日本石油株式会社 産業エネルギー部 塚越 徹
TEL 03-3502-9124

印刷所 キュービシステム株式会社

☎ 104-0061 東京都中央区銀座1-21-7
GNビル4F TEL 03-3538-3171 (代)

Vol.46 No.214 OCTOBER 2003

Published by **THE JAPAN ASPHALT ASSOCIATION**