

歩道舗装材料のすべり抵抗性に関する研究

久下晴己¹・國府勝郎²

¹正会員 日本道路株式会社 品質システム部 (〒146-0095 東京都大田区多摩川二丁目11-20)

²工学博士 工博 東京都立大学大学院 工学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢一丁目1番地)

高齢者は、路面でのすべりにより事故につながることが多いが、歩道に使用される舗装材料のすべりに関する評価は十分には行われていないのが現状である。本研究では、種々の歩道舗装材料を取り上げ、歩行の力学的条件、舗装材料の材料特性、舗装面の湿潤・汚染状態を考慮したすべりに関する検討を行った。

その結果、舗装材料の表面幾何形状を評価する方法として、表面の凹凸を平均傾斜で整理することが望ましいこと、舗装材料の表面吸水量、表面幾何形状とすべり抵抗性には強い相関があること、歩道舗装材料のすべり抵抗性を評価する試験方法として、O-Y・PSMがすぐれていること等が明らかとなった。また、すべり抵抗基準値について考察し、すべりの発生しにくい舗装材料を提案した。

Key Words: pavement materials, walkway, slip, skid resistance, coefficient of friction, surface texture, surface conditions, elderly people

1. まえがき

近年、景観や環境に配慮した歩行者系道路舗装の普及に伴い、種々の道路舗装材料が開発されている。歩行者系道路舗装の役割は、歩行者に対し安全で快適な歩行性を確保するとともに、親しみ、うるおいあるいは躍動感等を感じさせるアメニティを与えることである¹⁾。歩行性は、適度な弾力性、すべり抵抗性、および路面の排水性などの要因から構成されるが、すべり抵抗性、特に路面の排水性の低下に伴うすべり抵抗性の低下により、路面においてすべりが発生し、高齢者では事故につながるが多い。

屋外、特に道路、公共広場(駅前広場・バス停留所)等で発生した60歳以上を対象とした高齢者の「自損事故」、「怪我なし転倒」のアンケート調査結果²⁾では、つまずきに起因するものが約7割、すべりに起因するものが約2割と、この2つでほとんどを占めている。「自損事故」は、高齢者自身が自ら転倒・転落・すべり等によって怪我をする事故、また、「怪我なし転倒」は、怪我のない転倒・転落・すべり等である。

歩道のすべりに関する既往の研究としては、すべりの評価試験方法やすべり抵抗の基準値に関するものが多い。歩行におけるすべりを本格的に検討するには、歩行の力学的条件、舗装材料の材料特性、舗装面の湿潤・汚染状態を考慮することが必要と考えられる。しかし、こ

れらを総合的に検討した報告はほとんどないものと思われる。

本研究は、高齢者の自損事故に占めるすべりの割合が つまずきとともに大きいことから、安全で快適な歩道舗装材料に要求される性質を明らかにすることを目的として行ったものである。歩行の力学的条件としては歩行特性実験、舗装材料の材料特性としては表面の幾何形状及び吸水特性、舗装面の湿潤・汚染状態としてはすべり抵抗試験時の表面状態を気乾、湿潤、泥による汚染等に变化させ、総合的にすべりを検討している。

2. 歩行解析

(1) 実験概要

高齢者では、歩行中のつまずき、すべりに起因する自損事故が多いことから、高齢者の歩行特性を調査し、すべりにくい舗装材料の検討に考慮することとした。

歩行特性として、歩行時の足の移動速度および足が床に及ぼす力を取り上げた。

(2) 解析方法

a) 歩行解析装置

歩行解析の実験装置として、3次元運動解析装置 ELITE、および歪ゲージ式3分力床反力計測装置を用い

た。3次元運動解析装置は、被験者に取り付けた赤外線反射マーカの動きを4台の赤外線発光カメラで捕らえ、3次元空間位置を算出するものである。3分力床反力計測装置は、歩行時の足が床に及ぼす鉛直力 F_y 、進行方向の水平力 F_x 、進行直交方向の水平力 F_z を計測することができる(図-1参照)。そして、式(1)に示すように、 F_x を F_y で除した値の絶対値を摩擦率比と定義した。なお、床反力計測装置の床面は硬質ゴムである。

$$\text{摩擦率比} = |F_x / F_y| \quad (1)$$

b) 被験者

被験者は、60歳台の男女各10名、および比較として20歳台の男女各5名を選んだ。60歳台の平均年齢は64.2歳、20歳台の平均年齢は24.3歳である。高齢者は65歳以上と定義されており、さらに加齢した者の挙動の把握も重要であるが、調査の都合上60歳台とし、70歳台以上は省いた。60歳台の男女の人数を10名ずつとしたのは、男女差を見るためには最低必要な数と考えたことによる。

c) 靴の種類

歩行実験における被験者の靴はスニーカーとした。スニーカーを選んだのは、高齢者では革靴よりスニーカーをはく機会が多いと考えられたこと、またスニーカーの方が同じ靴の種類でサイズの範囲が大きく、すべての被験者の条件を同一とすることができるからである。スニーカーの寸法は22~27cmの範囲で0.5cmごとに準備した。靴底の材質は、天然ゴム50、合成ゴム50からなっている。

(3) 結果及び考察

a) 歩行特性

足のつま先が床を離れてからかかとが接地するまでの、1ステップにおける遊脚期のつま先の速度変化の例を図-2に示す。図-2は高齢者の例を示したものであり、進行方向成分の速度を表している。また、足のかかとが接地してからつま先が床を離れるまでの、1ステップにおける立脚期において、足が床に及ぼす鉛直力、進行方向の水平力、摩擦率比の測定例を図-3に示す。なお、進行直交方向の水平力は、被験者によって発生のパターンが異なり、また、その値が大きい場合でも、進行方向の水平力に比較するとかなり小さいことから、水平力は進行方向のみ採用した。

図-2に示すつま先の進行方向成分の速度は、つま先が床を離れてから急激に大きくなり、かかとが接地する直前にはほとんど0になる。制動時のすべりを考えるときはかかとの速度変化を考慮すべきであるが、かかとの速度変化は測定しておらず、つま先とかかとの進行方向

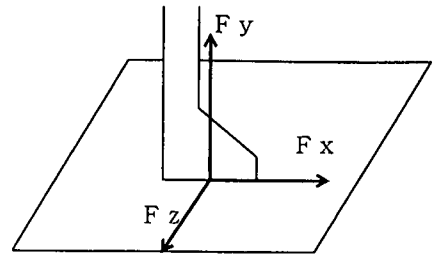


図-1 床反力計測装置によって計測される3分力の構成

成分の速度はあまり異ならないと思われることから、つま先の速度で検討した。かかとが接地する前には、進行方向成分の速度はほとんど0になっていることから、制動時の摩擦率比は、動的より静的に近いものと考えられる。R. Brungraberも、「歩行において足と床のすべりは静止摩擦係数に支配され、足がスリップし始めた時は動摩擦係数を考える必要がある」と報告している³⁾。

図-3に示す歩行中の作用力は、足が床に接触中に発生しているものであり、摩擦率比がピークに達する時は静的な状態と考えられる。鉛直力、摩擦率比は、立脚期において2つのピークを示すが、最初のピークは、かかとが接地した時の制動時で、2番目のピークは、つま先が床を離れる時の推進時である。摩擦率比は制動時より推進時に大きく、これはすべての被験者に共通の傾向である。

鉛直力および水平力ともに、制動時の方が推進時より大きい傾向を示す。制動時は、かかとが接地して水平力がピークに達した後に、体重の重心がかかと全体に移行して鉛直力がピークに達する。一方、推進時は、体重の重心がかかと全体からつま先に移行して、鉛直力がピークに達した後に、水平力がピークに達する。このように鉛直力と水平力が最大となる瞬間は一致しないが、このタイムラグは、推進時の方が大きい。この結果、鉛直力に対する水平力の比である摩擦率比は、一般に推進時の方が制動時より大きい傾向が示された。靴底と路面との間の摩擦係数が歩行時の摩擦率比より小さい場合、歩行時に足が路面に及ぼす進行方向の水平力に対して、靴底と路面との間の水平抵抗力が不足することになるので、すべりが発生する。したがって、摩擦率比からは推進時が危険と考えられるが、すべりによる転倒は、体重の重心移動も考慮する必要があると思われる。すなわち、推進時は体重の重心がもう一方の足に移行する過程の足であり、制動時は、体重の重心をこれから支えようとする足であるため、実際には制動時のすべりがより危険であると考えられる。ただ、摩擦率比としては、大きな値である推進時を考慮した方が安全であろう。

表-1 摩擦率比の測定結果

| 被験者 グループ | | 摩擦率比 | | | |
|-------------|------|------|-------|---------|---------------|
| | | 平均値 | 標準偏差 | 90%信頼区間 | |
| 制 動 時 | 高年齢者 | 全体 | 0.204 | 0.025 | 0.194 ~ 0.214 |
| | | 男性 | 0.213 | 0.023 | 0.199 ~ 0.227 |
| | | 女性 | 0.195 | 0.023 | 0.181 ~ 0.209 |
| | 青年 | 全体 | 0.231 | 0.015 | 0.222 ~ 0.240 |
| 推 進 時 | 高年齢者 | 全体 | 0.306 | 0.038 | 0.291 ~ 0.321 |
| | | 男性 | 0.304 | 0.036 | 0.282 ~ 0.326 |
| | | 女性 | 0.308 | 0.040 | 0.284 ~ 0.332 |
| | 青年 | 全体 | 0.340 | 0.028 | 0.323 ~ 0.357 |

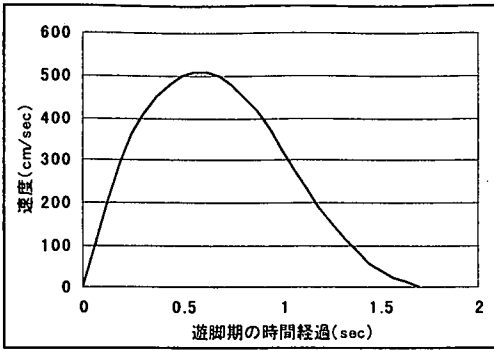


図-2 遊脚期のつま先の速度変化の例

b) 摩擦率比

表-1は、被験者グループごとの摩擦率比の平均値、標準偏差と平均値の90%信頼区間を示している。

高年齢者の摩擦率比の平均値は、危険率5%の片側検定より、制動時、推進時とも、青年より小さいと言える。従って青年の方がすべりやすいが、高年齢者は体力や俊敏性の欠如から自損事故につながっていると考えられる。なお、高年齢男性と高年齢女性の摩擦率比では、危険率5%の片側検定より、制動時、推進時とも、有意差はない。

本実験で使用した床反力計測装置の床面は硬質ゴムであり、靴底の材質もゴムを用いており、歩行中のすべりは生じないので、被験者の歩行中の水平力はロスなく測定されている。したがって、この歩行解析から得られた摩擦率比は、材質の組合せによる最大のものと考えることができ、すべりが発生しないためには、路面の摩擦係数は摩擦率比より大きな値であることが必要である。すべり現象は、制動時、推進時のどちらでも発生する可能性があるが、制動時の摩擦率比は、推進時より小さいことから、路面に必要な摩擦係数は、推進時の値を考慮すればよいと考えられる。正規分布においては偏差が3σ以上の範囲は事象がほとんど現れないものと考えられるが、高年齢者では路面ですべりが発生すると事故になる可能性は非常に高いことから、安全を考慮して平均+3σで考えると、0.42以上の摩擦係数が必要になる。また、青年に対しては、0.43以上の摩擦係数が必要になり、高年齢者、青年の両者に対しては、0.45以上の摩擦係数があれば問題ないと考えられる。

3. 舗装材料の材料特性

(1) 実験概要

屋外における歩行時のすべりは、基本的には舗装材料の表面幾何形状、特に、凹凸の大きさあるいは凹凸の鋭角の程度によって影響を受けるものと思われる。また屋外において舗装材料は、湿潤・汚染状態におかれること

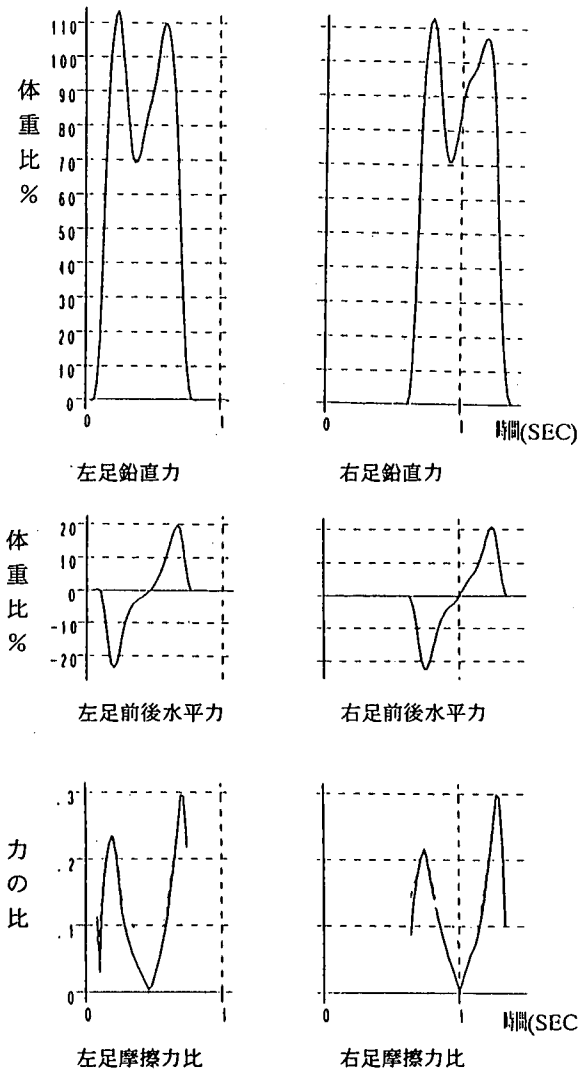


図-3 鉛直力、水平力、摩擦率比の測定例

が多く、この場合すべりは潤滑摩擦問題となることから、舗装材料の吸水特性の測定が重要と考えられる。以上の観点から、使用材料について、吸水特性を含む材質特性および表面幾何形状の測定を行った。

(2) 材料特性の試験方法

a) 使用材料

実験に用いた舗装材料は、歩道に通常使用されている材料と試作したものである。歩道に通常使用されている舗装材料は、コンクリート系4種、アスファルトコンクリート1種、土を焼成したもの2種、天然石2種の計9種を選定した。通常使用されている歩道舗装材料の路面となる表面の微細な表面幾何形状を測定した結果、洗い出し平板だけが著しく大きく、他の材料は比較的狭い範囲に分布したので、これらの中に位置する粗さを持つ舗装材料を試作して試験に供した。試作材料の材質はコンクリートである。実験に用いた舗装材料を表-2に示す。

b) 材質の試験方法

舗装材料の材質特性として、次の特性を試験した。

- ①見掛け密度：締め固めたアスファルト混合物の密度試験方法⁴⁾に準じて測定した見掛け密度 (g/cm^3)
- ②吸水量：約 $10 \times 10\text{cm}$ の大きさに切出し、粗骨材の比重および吸水量試験方法⁵⁾に準じて測定した24時間水浸後の吸水量。吸水量は単位体積当りの値 (g/cm^3) として表すことにより、舗装材料の材質の相違にかかわらず統一して評価できるようにした。
- ③表面吸水量：本研究で考案した方法により、舗装材料の路面として用いる表面に、直径9cmの面積に15cmの水頭を24時間作用させたときの、単位面積当たりの表面からの吸水量 (g/cm^2)
- ④細孔構造：水銀圧入式ポロシメータにより、水銀の圧力約 $6.5\text{kPa} \sim 200\text{MPa}$ により、直径約 $0.2\text{mm} \sim 7.5\text{nm}$ の細孔分布を測定し、全細孔体積 (ml/cm^3) および平均細孔直径 (μm) を求めた⁶⁾。なお測定試料は、舗装材料の路面となる表層部から、直径3~5mmの小塊を採取した。

c) 表面幾何形状の試験方法

表面幾何形状を測定する方法として、道路分野では、従来、土研式粗度計⁷⁾等による凹凸の大きさを平均きめ深さとして求める方法が使用されてきた。また、ミクロな表面幾何形状を顕微鏡などによる観察によって把握しようとした例もある⁸⁾が、実用的な方法とはいえない。しかし、最近ではレーザーを用いた非接触型の高精度変位計によって容易に表面凹凸のプロファイルを測定することができることから、次の2種のレーザーを用いた装置によって表面幾何形状を試験した。

①レーザー変位測定装置

レーザー変位測定装置は、本研究のために試作したものであり、サンプル表面に対してほぼ鉛直にレーザーが放射され、 0.02mm ピッチ、 0.001mm の測定精度でサンプル表面の凹凸を測定し、コンピュータに入力する。したがって、データ処理や図化などの出力に関する自由度が高い。なお、測定長は15cmとした。

②MTM

MTM (ミニ・テクチャ・メータ) は、TRLで開発された装置で、 0.3mm ピッチ、 0.01mm の測定精度でサンプル表面の凹凸を測定し、自乗平均粗さ (Root Mean Square Roughness) が求められる。レーザーは、サンプル表面に対して 45° の入射角で放射され、サンプル表面に対して 45° の反射波によって凹凸の深さを測定する。

なお、MTMは実路面の表面粗さを長い延長にわたって測定する目的の装置であり、本研究のように室内サンプルの表面粗さを測定するには適していないが、サンプル上面を10m相当の回数往復して測定することによって、表面の凹凸を求めた。

(3) 結果および考察

a) 材質特性

材質特性試験結果は表-3の通りである。なお、試作舗装材料は中間的な表面粗さを持つものを得るためにセメントコンクリートで作製されており、材質特性は歩道に通常使用されるコンクリート平板と変わらないと考えられたので、密度のみを測定した。

全細孔体積と表面吸水量との関係を図-4に示す。吸水特性は、一般にセメントコンクリート系が大きく、アスファルトコンクリート、磁器質タイル、天然石が小さい。インターロッキングブロックは、全細孔体積の割には表面吸水量が大きくなっている。これは、基層に用いられている超硬練りコンクリートよりも、表層に用いられているモルタル部の細孔容積が大きいためである。舗装材料は、単一の材料を加工したり、成形したもの、また、意匠などの目的で2層で成形したり、表面処理などによって内部と表層部の材質が変化しているものがある。このようなことから、舗装用煉瓦は、表面処理により吸水しにくくなっていると考えられる。

b) 表面幾何形状の表示方法

路面の表面幾何形状の表示方法としては、縦方向粗さを表す最大高さ、十点平均粗さ、算術平均粗さ、自乗平均 (平方根) 粗さ、また、横方向粗さを表す凹凸の平均間隔、局部山頂の平均間隔、負荷長さ率、相関距離、等がある⁹⁾。

表-2 実験に用いた舗装材料

| 種 | 材質 | 舗装材料名称 | 記号 | 特 徴 | 寸 法 (mm) |
|---------|------------------|--------------------|----|------------------------------|----------------|
| 既存の舗装材料 | セメント コンクリート | コンクリート平板 | CP | 流し込み方式のコンクリート | 300 × 300 × 60 |
| | | 擬石平板 | CS | 御影石をコンクリート表面にチップング | 300 × 300 × 60 |
| | | 洗い出し平板 | CW | 表面の御影石(碎石)を洗い出したコンクリート平板 | 300 × 300 × 60 |
| | | インターロッキングブロック | CL | 即時脱型方式のコンクリートブロック | 297 × 197 × 80 |
| | アスファルト コンクリート | アスファルトコン クリート平板 | AC | 密粒度アスファルトコンクリート (13) | 300 × 300 × 50 |
| 土の焼成 | 舗装用煉瓦 | 舗装用煉瓦 | BL | 舗装用の煉瓦 | 234 × 115 × 60 |
| | | 磁器質タイル | TP | 舗装用の磁器質タイル | 300 × 300 × 17 |
| | 石 | 天然石平板(滑) | RN | 御影石の断面をピシャンで加工 | 300 × 300 × 45 |
| | | 天然石平板(粗) | RA | 御影石の断面をジェットバーナで加工 | 300 × 300 × 45 |
| 試作材料 | セメント コンクリート | ノミ切り風仕上げ | NF | 材齢2日のコンクリート表面をショットブラスト加工 | 300 × 300 × 60 |
| | | ピシャン風仕上げ | BF | NFをピシャンハンマーで加工 | |
| | | 小叩き風仕上げ | KF | NFをピシャンハンマーと両刃ハンマーで加工 | |
| | | 小粒径チップ | SC | 粒径が1.2mm ~ 0.6mmの骨材を表面にチップング | |
| | | 大粒径チップ | LC | 粒径が2.5mm ~ 1.2mmの骨材を表面にチップング | |

表-3 舗装材料の材質特性

| 舗装材料 | 密度 (g/cm ³) | 吸水量 (g/cm ³) | 表面吸 水量 (g/cm ²) | 全細孔 体積(ml /cm ³) | 平均細 孔直径 (μm) |
|------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|--------------------|
| CP | 2.26 | 0.112 | 0.432 | 0.0824 | 0.061 |
| CS | 2.30 | 0.094 | 0.208 | 0.0357 | 0.037 |
| CW | 2.32 | 0.080 | 0.241 | 0.0102 | 0.545 |
| CL | 2.31 | 0.077 | 0.626 | 0.0931 | 0.044 |
| AC | 2.36 | 0.006 | 0.134 | 0.0047 | 0.216 |
| BL | 2.15 | 0.071 | 0.053 | 0.0569 | 0.226 |
| TP | 2.29 | 0.011 | 0.019 | 0.0174 | 0.263 |
| RN | 2.60 | 0.014 | 0.035 | 0.0117 | 0.970 |
| RA | 2.60 | 0.014 | 0.014 | 0.0117 | 0.970 |
| NF | 2.38 | - | - | - | - |
| BF | 2.38 | - | - | - | - |
| KF | 2.37 | - | - | - | - |
| SC | 2.41 | - | - | - | - |
| LC | 2.41 | - | - | - | - |

屋外における歩行時のすべりは、舗装材料の表面凹凸の大きさおよび表面凹凸の鋭角の程度によって影響を受けると考えられる。表面凹凸の大きさは、縦断方向粗さによって表すことができ、道路分野では算術平均粗さまたは自乗平均(平方根)粗さが用いられる。これらの方法は、舗装材料の表面凹凸の大きさをよく表すと考えられるが、本研究では、道路分野においてより多く用いられる自乗平均(平方根)粗さを採用し、標準偏差と呼ぶ。また、表面凹凸の鋭角の程度は、横断方向粗さによって表すことができ、道路分野においては、波長が用いられることもある¹⁰⁾。しかしながら、波長は凹凸の平均間隔を表すことはできるが、凹凸の平均間隔が小さくても凹凸の大きさが小さければ鋭角の程度は大きくはならず、必ずしも鋭角の程度を表すものではない。

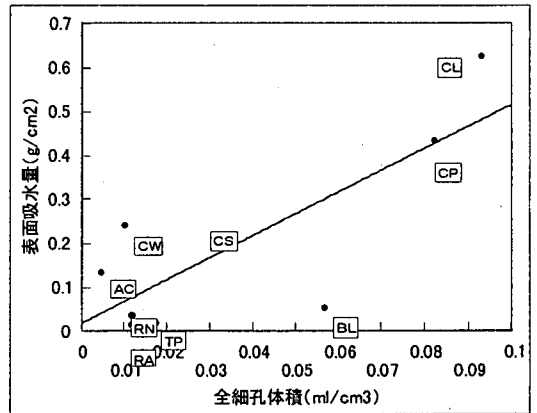
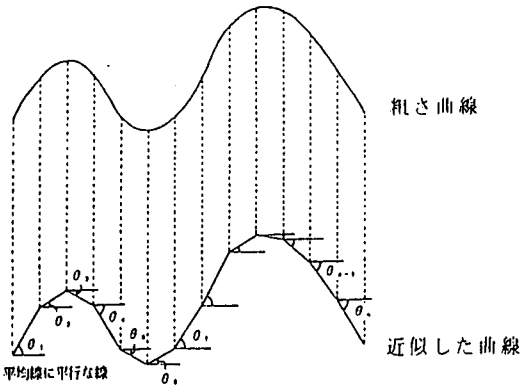


図-4 全細孔体積と表面吸水量の関係

本研究では、鋭角の程度をより直接的に表すことができる方法として、図-5に示すように、粗さ曲線を平均線の軸に沿って等間隔で区切り、折れ線で近似して、折れ線の平均線に対する傾斜の平均で表示し、平均傾斜と呼ぶ。平均傾斜が大きければ、凹凸は尖っていることになり、鋭角の程度は大きい。後藤らは、デジタル型触針式表面粗さ計を使用して、すべり抵抗係数との相関関係を調べ、表面粗さ特性値の1つである平均傾斜角はすべり抵抗係数と非常によい相関があると報告している¹¹⁾。なお、平均傾斜角は、本研究で採用する表面凹凸の鋭角の程度を表す平均傾斜に相当するものであり、後藤らは平均傾斜角と呼んでいる。

試験に用いたサンプルの、レーザー変位測定装置によって測定した表面凹凸のプロファイルを図-6に示す。図-6では、表面凹凸の凸がほぼ同じ高さにあるものと、表面凹凸の凸の高さが異なるものの2つのグループに分



$$\text{平均傾斜} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\tan \theta_i|$$

図-5 平均傾斜の求め方

けられる。前者は、サンプル表面を加圧して成形したものの (CP, CL, AC), サンプル表面に石をチップングして加圧したもの (CS, SC, LC), 土系サンプルの材料を成形後焼成したもの (BL, TP) が該当し、後者は、サンプル表面が硬化する前に水で洗い出して粗面にしたもの (CW), 硬いサンプル表面を削って加工したもの (RN, RA, NF, BF, KF) が該当する。

表面粗さを標準偏差および平均傾斜で整理した結果が表-4である。なお、表面傾斜の算出ピッチは 0.02mm である。図-6から、表面凹凸は CP, CL, TP が小さく、CW, NF, BF, KF が大きい。また、鋭角の程度は、CP, CS, BL, TP, RN が小さく、CW, LC が大きい。したがって、表-4に示す標準偏差および平均傾斜の値は、図-6に示す表面幾何形状を反映していると思われるが、詳細は後述する。

4. すべり抵抗性の評価

(1) 実験概要

選定した3種類のすべり測定方法によって、代表的な歩道舗装材料のすべり抵抗性を評価し、材料特性との関係からすべり難い舗装材料について検討し、また、舗装面の湿潤・汚染状態がすべり抵抗性に及ぼす影響を調査した。

(2) 試験方法

a) すべり抵抗試験

すべりの測定方法としては、すべりに影響する種々の条件を考慮すると 10 タイプに分類されるという報告が

表-4 表面凹凸の標準偏差(mm)および平均傾斜

| 試験機 | 標準偏差 | 平均傾斜 |
|-----|-------|-------|
| CP | 0.042 | 0.128 |
| CS | 0.184 | 0.332 |
| CW | 1.003 | 0.928 |
| CL | 0.095 | 0.365 |
| AC | 0.246 | 0.524 |
| BL | 0.191 | 0.212 |
| TP | 0.130 | 0.325 |
| RN | 0.160 | 0.215 |
| RA | 0.277 | 0.357 |
| NF | 0.773 | 0.575 |
| BF | 0.546 | 0.595 |
| KF | 0.488 | 0.590 |
| SC | 0.154 | 0.590 |
| LC | 0.324 | 0.848 |

ある¹²⁾。また、すべりやすい床の上をよく訓練された被験者が歩行し、その速度からすべり抵抗係数を求める方法などもある¹³⁾が、本研究では次の3種を選定した。B P S Tは使用実績が多いこと、D F Tは摩擦係数を求められること、O-Y・P S Mは人間の官能検査との対比が十分行われていることから選定した。

①英国式ポータブル・スキッド・レジスタンス・テスタ (British Portable Skid Resistance Tester : B P S T)

図-7に示す B P S T¹⁴⁾は、振り子の先端に取り付けた規定のゴムスライダと試験面との摩擦によるエネルギーの損失から、すべり抵抗値を求めるもので、すべり抵抗値は B P N で表わされる。振り子のゴムスライダが試験面に接する直前の速度を時速に換算すると、50km/h に相当する。

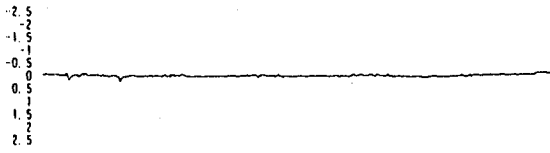
②ダイナミック・フリクション・テスタ (Dynamic Friction Tester : D F T)

図-8に示す D F T^{15), 16), 17)}は、回転式のすべり試験機で、規定のタイヤゴムを取り付けた円盤を、一定の鉛直荷重下で回転させたときの摩擦力和線速度 (円盤の回転速度) から、走行速度 0 ~ 80km/h の間の各速度における摩擦係数を求めるものである。

その測定原理は、ゴム片を W の荷重で試験面に押しつけて回転させたときに、ゴム片に生じる摩擦力 F を測定すれば、次式から摩擦係数 μ が求められる。

$$\mu = F / W \quad (2)$$

D F T では、ゴム片を試験面上におき、ゴム片が動き出すときの静摩擦係数と、所定の速度で回転する円盤を試験面に接地させたときの動摩擦係数を求めることができる。本研究では、歩行解析から得られる摩擦力比を、高齢者の歩行速度における動摩擦係数と対比させて検討



コンクリート平板 (CP)



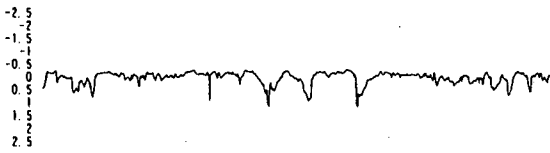
擬石平板 (CS)



洗い出し平板 (CW)



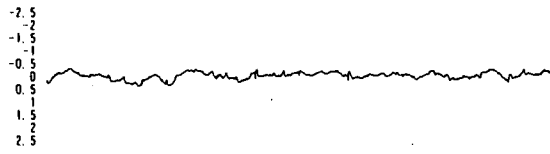
インターロッキングブロック (CL)



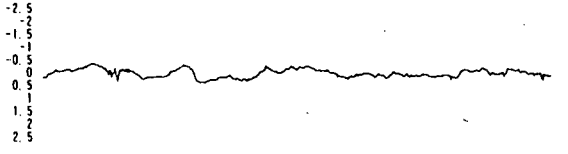
アスファルトコンクリート平板 (AC)



舗装用煉瓦 (BL)



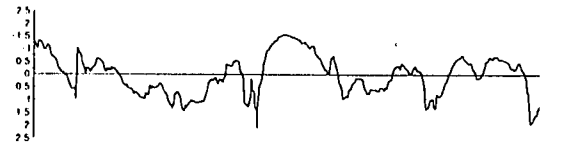
磁器質タイル (TP)



天然石平板〔滑〕 (RN)



天然石平板〔粗〕 (RA)



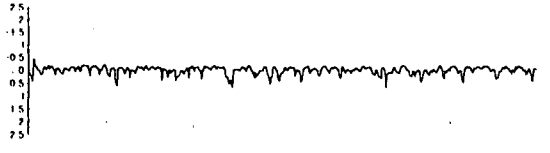
ノミ切り風仕上げ (NF)



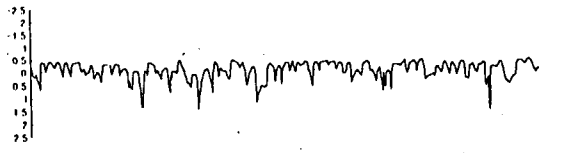
ビシャン風仕上げ (BF)



小叩き風仕上げ (KF)



小粒径チップ (SC)



大粒径チップ (LC)

図-6 サンプルの表面粗さ測定結果
(横の長さは8cm、縦軸の目盛りの単位はmm)

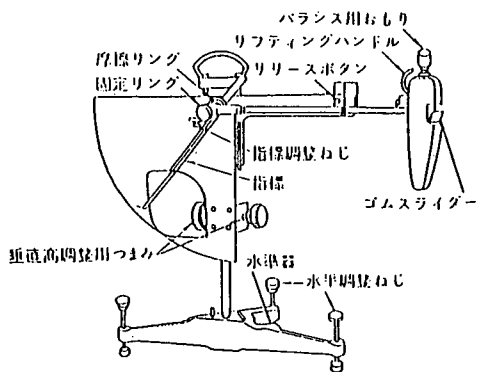


図-7 BPSTの概要

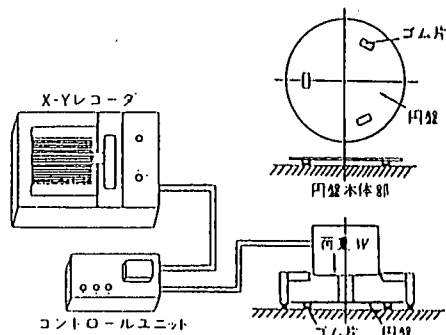


図-8 DFTの概要

する。なお、高齢者の歩行速度は、歩行解析より 4 km/h 程度であるが、歩道用 DFT は 0 ~ 15 km/h の速度における動摩擦係数を測定できることから、その中間の 8 km/h の速度における値を用いた。また、回転する円盤を試験面に接地させるときの速度は 10 km/h とした。

③東工大式すべり試験機 (O-Y・Pull Slip Meter : O-Y・PSM)

図-9 に示す O-Y・PSM¹⁹⁾ は、鉛直載荷荷重 80 kgf、引張荷重速度 80 kgf/s、初期引張荷重 3 kgf、引張角度 18° で、靴底を切り取った大きさ 7 × 8 cm のすべり片を試験面上で引っ張った時の引張荷重-時間曲線を測定するものである。一般には、O-Y・PSM で測定される引張荷重の最大値を 80 kgf で除したすべり抵抗係数 CSR (Coefficient of Slip Resistance) によって表示される。

$$CSR = \text{引張荷重の最大値(kgf)} / 80 \text{ (kgf)} \quad (3)$$

試験機の開発時に、種々の床材と靴底材質の組み合わせに対して官能試験を行い、望ましい CSR の範囲が求められている¹⁹⁾。

また、O-Y・PSM では、すべり片を試験面上におき、すべり片が動き出すときの試験値を得ていることから、2. 歩行解析で示したすべりが生じる状態に近い状態で試験していると考えられる。さらに、歩行挙動は屋内外で基本的に特に変わるところはないので、屋内を対象としたすべり抵抗係数 CSR の望ましい範囲も、屋外を対象とした場合に参考になるものと考えられる。

b) 実験条件

屋外の舗装材料のすべりを評価するには、降雨や泥による汚染の影響も考慮する必要があるので、試験の際のサンプルの表面状態を次の 6 種とした。なお、BPST と DFT は、湿潤状態で試験を行うのが標準であるが、種々の表面状態における影響を考慮するために、湿潤以外の状態においても試験を行った。また、気乾状態、表乾状態以外の汚染状態では、汚染物質を舗装材料表面に

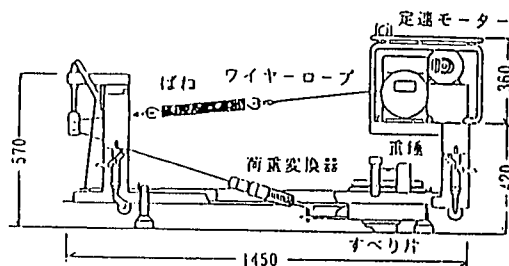


図-9 O-Y・PSMの概要

所定量散布し試験を行った。DFT の標準試験方法では、湿潤状態において水を散布しながら試験することになっているが、本研究では 8 km/h のみの値を得ることが目的であったこと、及び他の汚染物質を散布しながら試験することはできないことから、DFT においても試験直前に水を散布して試験した。

- ①気乾状態：サンプルを室内で自然乾燥させた状態（以後「気乾」と呼ぶ）。
- ②表乾状態：サンプルを 24 時間吸水後、表面に水膜が認められない状態で、降雨後に路面は乾燥しているが、舗装材料は飽水している状態を想定している（以後「表乾」と呼ぶ）。
- ③湿潤状態：サンプルを 24 時間吸水後、試験直前に水を散布した状態で、降雨直後あるいは降雨中で路面が濡れている状態を想定している（以後「湿潤」と呼ぶ）。
- ④乾燥土粒子による汚染状態：サンプル表面に、JIS Z 8901 に規定する試験用ダスト第 7 種を 10 g/m² の割合で散布した状態で、乾燥した泥が路面に存在する状態を想定している（以後「乾泥」と呼ぶ）。なお、試験用ダスト第 7 種は、5 μm のふるい残留重量百分率が 88 ± 5 %、75 μm のふるい残留重量百分率が 20 % 以下の関東ロームである。

⑤湿潤土粒子による汚染状態：サンプル表面に、水道水、JIS Z 8901 に規定する試験用ダスト第 1 種および第 7 種を質量比で 20 : 9 : 1 に混合したものを、400 g / m²の割合で散布した状態で、湿潤の泥が路面に存在する状態を想定している（以後「湿泥」と呼ぶ）。なお、試験用ダスト第 1 種は、45 μ m のふるい残留重量百分率が 100 %、300 μ m のふるい残留重量百分率が 0 % のけい砂である。

⑥油による汚染状態：サンプル表面に、食用なたね油を 40 g / m²の割合で散布した状態で、油に代表されるような汚染物質が路面に存在する状態を想定している（以後「油汚染」と呼ぶ）。なお、④、⑤及び⑥のそれぞれにおける試験用汚染物質の散布量²⁰⁾は、比較的平滑な床材について、汚染物質の散布量を増加させたときにすべり抵抗が一定となる量の約 2 倍であるが、表面の粗さの大きな舗装材料に対しては、すべり抵抗は一定にならない可能性がある。

(3) 結果および考察

BPN, 摩擦係数 μ 値, CSR の測定結果を、それぞれ表-5, 表-6, 表-7 に示す。

a) 試験方法の評価

表面粗さをレーザー変位測定装置によって測定し、凹凸の標準偏差、平均傾斜で整理してすべり特性値との相関を求めたのが表-8 である。なお、表-8 には MTM 粗度とすべり特性値との相関も示した。MTM 粗度は、MTM によって求めた自乗平均粗さである。

表-8 によると、3 種類のすべり測定値とレーザー粗度との相関係数は、凹凸の標準偏差、平均傾斜とも、すべての表面状態において、CSR が高い傾向があり、CSR は他のすべり測定値より、平均的に表面幾何形状を反映しやすい結果となっている。O-Y・PSM は床材を対象とした測定事例は多いが、舗装材料については少なく、床材に比較し粗さが大きい舗装材料に対して、良好な試験結果が得られるか否かが懸念されたが、舗装材料のすべり抵抗性を良好に表していると思われる。

また、表-8 によると、3 種類のすべり測定値との相関係数は、凹凸の標準偏差と平均傾斜でおおむね同等の値を示している。これは、図-10 に示すように、凹凸の標準偏差と平均傾斜の相関が比較的強く、本実験で使用したサンプルは、屋外路面に使用することを前提にすべりを考慮して作製され、凹凸が大きいものは、その鋭角の程度も大きいという傾向をもっていたためと思われる。なお、凹凸の標準偏差、平均傾斜とすべり測定値の 1 つとして CSR との重相関係数を求めたところ、重相関関係における凹凸の標準偏差、平均傾斜の t² 値は、ほとんどの表面状態で平均傾斜の方が大きくなっており、凹凸の標準偏差より平均傾斜の方が CSR に対する

表-5 BPN の測定結果

| サンプル | 気乾 | 表乾 | 湿潤 | 乾泥 | 湿潤 | 油污 |
|------|----|----|----|----|----|----|
| CP | 93 | 78 | 74 | 58 | 36 | 24 |
| CS | 87 | 80 | 79 | 74 | 46 | 38 |
| CW | 94 | 70 | 81 | 93 | 81 | 52 |
| CL | 84 | 84 | 74 | 64 | 40 | 30 |
| AC | 90 | 80 | 74 | 79 | 60 | 53 |
| BL | 92 | 78 | 77 | 67 | 47 | 32 |
| TP | 87 | 51 | 47 | 68 | 47 | 29 |
| RN | 84 | 74 | 72 | 64 | 49 | 26 |
| RA | 89 | 80 | 79 | 77 | 57 | 39 |
| NF | 93 | 74 | 79 | 86 | 77 | 50 |
| BF | 90 | 76 | 78 | 84 | 75 | 48 |
| KF | 88 | 80 | 76 | 83 | 71 | 46 |
| SC | 89 | 79 | 73 | 75 | 58 | 42 |
| LC | 92 | 77 | 80 | 85 | 70 | 48 |
| 平均 | 89 | 76 | 75 | 76 | 58 | 40 |

表-6 摩擦係数 μ 値の測定結果

| サンプル | 気乾 | 表乾 | 湿潤 | 乾泥 | 湿潤 | 油污 |
|------|------|------|------|------|------|------|
| CP | 0.85 | 0.74 | 0.75 | 0.46 | 0.63 | 0.56 |
| CS | 1.06 | 0.83 | 0.83 | 0.92 | 0.47 | 0.32 |
| CW | 1.11 | 0.70 | 0.75 | 1.10 | 0.86 | 0.46 |
| CL | 0.52 | 0.95 | 0.75 | 0.52 | 0.29 | 0.46 |
| AC | 0.78 | 0.99 | 0.93 | 0.69 | 0.54 | 0.55 |
| BL | 1.04 | 0.70 | 0.78 | 0.84 | 0.42 | 0.38 |
| TP | 0.69 | 0.33 | 0.34 | 0.64 | 0.33 | 0.51 |
| RN | 0.64 | 0.60 | 0.56 | 0.57 | 0.34 | 0.42 |
| RA | 0.69 | 0.69 | 0.72 | 0.65 | 0.38 | 0.43 |
| NF | 0.97 | 0.90 | 0.89 | 0.96 | 0.72 | 0.63 |
| BF | 0.89 | 0.60 | 0.60 | 0.81 | 0.61 | 0.50 |
| KF | 0.85 | 0.69 | 0.69 | 0.86 | 0.61 | 0.46 |
| SC | 0.81 | 0.53 | 0.64 | 0.74 | 0.46 | 0.34 |
| LC | 0.90 | 0.86 | 0.85 | 0.86 | 0.69 | 0.57 |
| 平均 | 0.84 | 0.72 | 0.72 | 0.76 | 0.53 | 0.47 |

表-7 CSR の測定結果

| サンプル | 気乾 | 表乾 | 湿潤 | 乾泥 | 湿潤 | 油污 |
|------|------|------|------|------|------|------|
| CP | .761 | .806 | .769 | .707 | .460 | .641 |
| CS | .819 | .850 | .840 | .863 | .569 | .642 |
| CW | .894 | .874 | .891 | .908 | .849 | .594 |
| CL | .777 | .805 | .789 | .681 | .529 | .583 |
| AC | .845 | .838 | .846 | .816 | .679 | .589 |
| BL | .810 | .785 | .792 | .734 | .564 | .533 |
| TP | .722 | .650 | .675 | .778 | .530 | .413 |
| RN | .789 | .744 | .750 | .725 | .540 | .430 |
| RA | .828 | .793 | .781 | .792 | .672 | .539 |
| NF | .904 | .932 | .922 | .971 | .880 | .913 |
| BF | .980 | .945 | .903 | .970 | .875 | .908 |
| KF | .912 | .893 | .918 | .896 | .812 | .823 |
| SC | .877 | .881 | .883 | .880 | .701 | .858 |
| LC | .883 | .895 | .871 | .897 | .841 | .811 |
| 平均 | .843 | .835 | .831 | .830 | .679 | .663 |

相関がやや強い。したがって、以下の検討では、平均傾斜が大きい舗装材料は凹凸の標準偏差も大きいことを前提として、表面幾何形状を表す指標として平均傾斜を使用することとする。また、MTM 粗度とすべり特性値との相関係数は、平均傾斜との相関係数より多少低い

表-8 表面粗さとすべり測定値の相関係数R
(舗装材料14サンプル)

| 表面状態 | 表面粗さ すべり測定値 | レーザ粗度との相関係数 | | MTM粗度との相関係数 |
|------|----------------|-------------|-------|-------------|
| | | 標準偏差 | 平均傾斜角 | |
| 気乾 | BPN | 0.54 | 0.42 | 0.44 |
| | 摩擦係数μ値 | 0.56 | 0.38 | 0.45 |
| 表乾 | CSR | 0.70 | 0.72 | 0.73 |
| | BPN | 0.30 | 0.14 | 0.01 |
| 表乾 | 摩擦係数μ値 | 0.11 | 0.15 | 0.09 |
| | CSR | 0.59 | 0.64 | 0.58 |
| 湿潤 | BPN | 0.49 | 0.41 | 0.50 |
| | 摩擦係数μ値 | 0.22 | 0.25 | 0.20 |
| 潤滑 | CSR | 0.67 | 0.72 | 0.64 |
| | BPN | 0.86 | 0.90 | 0.84 |
| 乾泥 | 摩擦係数μ値 | 0.80 | 0.70 | 0.72 |
| | CSR | 0.74 | 0.76 | 0.70 |
| 湿泥 | BPN | 0.89 | 0.87 | 0.89 |
| | 摩擦係数μ値 | 0.78 | 0.71 | 0.68 |
| 泥 | CSR | 0.83 | 0.87 | 0.83 |
| | BPN | 0.73 | 0.85 | 0.69 |
| 油染 | 摩擦係数μ値 | 0.30 | 0.24 | 0.25 |
| | CSR | 0.42 | 0.54 | 0.39 |

れほど異ならず、現場においては表面粗さをMTM粗度で評価してもよいと思われる。

表-8において、平均傾斜とすべり測定値との相関係数から、BPN、摩擦係数μ値は、気乾、表乾、湿潤状態で、表面幾何形状との関係が小さいが、乾泥、湿泥、油汚染等の汚染状態で表面幾何形状との関係が強い。CSRは、油汚染以外で表面幾何形状との関係が強い。BPNは、ゴムスライダーが試験面に接する時の速度が50km/hで自動車走行時のすべり特性と良好な相関があるといわれており²¹⁾、また、摩擦係数μ値はDFTの試験時の速度8km/hで測定したものであり、これら動的な試験法では、特に表面凹凸が小さい場合に、乾泥、湿泥、油等の潤滑介在物が水分よりもすべり抵抗性を低下させる程度が大きく、潤滑介在物の粘性特性や表面幾何形状等を反映した結果を得ることができると思われる。達下らは、土研式粗度計による平均きめ深さとBPNの相関係数は低いと報告しており²²⁾、BPN(湿潤)は、表面幾何形状を反映しにくいことを述べている。CSRは、すべり片を速度0km/hの状態から引っ張った時のすべり抵抗係数であり、2.歩行解析で示した歩行中のすべりが生じる状態に近い状態で試験していると考えられ、表面凹凸が小さい場合に、水分によってもすべり抵抗性が低下しやすいことから、全体的に表面幾何形状を反映した結果となっている。

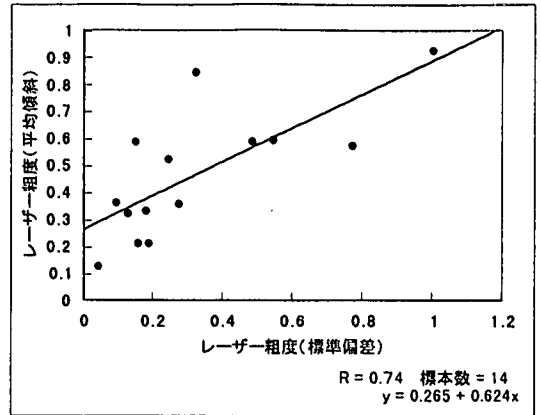


図-10 標準偏差と平均傾斜の関係

b) 表面幾何形状とすべり抵抗の関係

平均傾斜(X)と種々の表面状態におけるBPN、摩擦係数μ値、CSRとの関係を式で示すと次の通りである。

$$\text{気乾BPN} = 5.70 X + 86.7 \quad (R = 0.42) \quad (4)$$

$$\text{表乾BPN} = -3.01 X + 78.1 \quad (R = 0.14) \quad (5)$$

$$\text{湿潤BPN} = 10.5 X + 70.3 \quad (R = 0.41) \quad (6)$$

$$\text{乾泥BPN} = 39.0 X + 57.1 \quad (R = 0.90) \quad (7)$$

$$\text{湿泥BPN} = 53.6 X + 32.9 \quad (R = 0.87) \quad (8)$$

$$\text{油汚染BPN} = 36.5 X + 22.6 \quad (R = 0.85) \quad (9)$$

$$\text{気乾}\mu\text{値} = 0.274 X + 0.714 \quad (R = 0.38) \quad (10)$$

$$\text{表乾}\mu\text{値} = 0.112 X + 0.667 \quad (R = 0.15) \quad (11)$$

$$\text{湿潤}\mu\text{値} = 0.160 X + 0.645 \quad (R = 0.25) \quad (12)$$

$$\text{乾泥}\mu\text{値} = 0.539 X + 0.505 \quad (R = 0.70) \quad (13)$$

$$\text{湿泥}\mu\text{値} = 0.505 X + 0.287 \quad (R = 0.71) \quad (14)$$

$$\text{油汚染}\mu\text{値} = 0.093 X + 0.427 \quad (R = 0.24) \quad (15)$$

$$\text{気乾CSR} = 0.213 X + 0.743 \quad (R = 0.72) \quad (16)$$

$$\text{表乾CSR} = 0.215 X + 0.734 \quad (R = 0.64) \quad (17)$$

$$\text{湿潤CSR} = 0.224 X + 0.725 \quad (R = 0.72) \quad (18)$$

$$\text{乾泥CSR} = 0.308 X + 0.685 \quad (R = 0.76) \quad (19)$$

$$\text{湿泥CSR} = 0.548 X + 0.421 \quad (R = 0.87) \quad (20)$$

$$\text{油汚染CSR} = 0.39 X + 0.479 \quad (R = 0.54) \quad (21)$$

BPNと摩擦係数μ値では、気乾状態、表乾状態、湿潤状態で多少相関式が異なるが、CSRでは、これらの状態で相関式はほとんど変わらず、湿潤による水膜の存在の差が出ていない。これは、O-Y・PSMではすべり片が試験面上に静置されることにより、サンプル表面に散布された水が排除され、固体摩擦で、歩行中のすべりが生じる状態に近い状態と考えられることによる。後

述するように、吸水性の小さい材料または特殊な材質の場合、あるいは泥などが混じった場合には、湿潤状態ですべる可能性がある。

BPN、摩擦係数 μ 値は、気乾、表乾、湿潤状態よりも、乾泥、湿泥、油汚染等の汚染状態で表面幾何形状の関係が強くなるが、これは前述したように、表面凹凸が小さい場合に、乾泥、湿泥、油等の潤滑介在物が水分よりもすべり抵抗性を低下させる程度が大きいためである。CSRは、湿潤状態に対し、乾泥状態、湿泥状態の順に、表面幾何形状の関係が強くなり、表面凹凸の小さな平滑面、すなわち $X=0$ では、CSRで示されるすべり抵抗が小さくなるのが明らかである。これは、摩擦面の介在物が潤滑材として作用するためであり、表面凹凸の大きな粗面では介在物が凹凸の底部に入るため、それほど表面幾何形状との関係が強くないものと思われる。

油汚染は摩擦を顕著に低下させるので、表面凹凸の大きな粗面でもすべり抵抗性が低下し、表面幾何形状との関係が湿泥の場合より小さくなっているものと思われる。

表乾CSR、油汚染CSRと平均傾斜の相関係数は、他の状態より多少小さいが、これらの状態では吸水特性の影響も考慮する必要があると思われる。

c) 表面吸水量、表面幾何形状とすべり抵抗の関係

既存の舗装材料9サンプルを対象として、表面吸水量、平均傾斜と種々の表面状態におけるCSRとの重相関係数を示したのが表-9である。また、これら9サンプルについて、平均傾斜とCSRとの単相関係数、表面吸水量、平均傾斜とCSRとの重相関係数を比較したのが表-10である。

表-10より、表乾状態、油汚染状態では平均傾斜とCSRとの単相関係数は低いが、重相関係数は比較的高くなっている。これは表-9の表面吸水量と平均傾斜の t^2 値の比率を見てもわかるとおり、表乾状態と油汚染状態では、表面吸水量で表示される材料の多孔性の効果により、表面吸水量の影響がその他の状態に比較して大きいと思われる。特にこの傾向は油汚染状態で顕著であり、油汚染状態ではほぼ表面吸水量によって影響を受けることになる。気乾状態、湿潤状態、乾泥状態、湿泥状態では、表面吸水量の t^2 値の比率が小さく、単相関係数、重相関係数はあまり異ならない。

表面吸水量の影響が他の表面状態に比較して大きい表乾状態、油汚染状態の回帰式は次の通りである。

$$\text{表乾CSR} = 0.12 \times (\text{表面吸水量}) + 0.14 \times (\text{平均傾斜}) + 0.72 \quad (10)$$

表-9 表面吸水量、平均傾斜とCSRの重相関係数R(9サンプル)

| 表面状態 | 重相関係数 | 統計的仮説検定p値 | t^2 値の比率(%) | |
|--------|-------|-----------|---------------|------|
| | | | 表面吸水量 | 平均傾斜 |
| 乾燥CSR | 0.76 | 7% | 3 | 97 |
| 表乾CSR | 0.62 | 23% | 38 | 62 |
| 湿潤CSR | 0.70 | 13% | 9 | 91 |
| 乾泥CSR | 0.84 | 2.5% | 18 | 82 |
| 湿泥CSR | 0.96 | 0.05% | 7 | 93 |
| 油汚染CSR | 0.63 | 2.2% | 91 | 9 |

表-10 平均傾斜とCSRの単相関係数R、表面吸水量、平均傾斜とCSRの重相関係数R(9サンプル)

| 表面状態 | 平均傾斜との単相関係数 | 表面吸水量、平均傾斜との重相関係数 |
|--------|-------------|-------------------|
| 乾燥CSR | 0.75 | 0.76 |
| 表乾CSR | 0.50 | 0.62 |
| 湿潤CSR | 0.67 | 0.70 |
| 乾泥CSR | 0.76 | 0.84 |
| 湿泥CSR | 0.93 | 0.96 |
| 油汚染CSR | 0.21 | 0.63 |

$$\text{油汚染CSR} = 0.23 \times (\text{表面吸水量}) + 0.065 \times (\text{平均傾斜}) + 0.48 \quad (11)$$

d) サンプル表面状態がすべり抵抗に及ぼす影響

すべり抵抗に関する本実験は、6種のサンプル表面状態で行った。各表面状態における、代表的舗装材料のすべり試験値の平均を表-11に示す。表面状態がすべり抵抗に及ぼす影響は次の通りである。

① 表-11で明らかのように、BPNと摩擦係数 μ 値では、気乾状態より、表乾状態と湿潤状態で値が小さくなる。一方、CSRでは、気乾状態、表乾状態と湿潤状態で値は変わらない。すなわち、BPST、DFTでは、ゴムのすべり片がある速度をもってサンプル表面に接地する際に、すべり片とサンプル表面の間に水分が存在し、すべり抵抗性が低下するのに対し、O-Y・PSMのように、すべり片が試験面上に静置される場合には、サンプル表面に散布された水が排除され、すべり抵抗性は変わらないものと思われる。

既往の研究によるとBPNは40以上^{23), 24) 25)}、摩擦係数は μ .5以上^{16), 26)}、CSRは高齢者で0.5~0.8¹⁹⁾が望ましいと言われており、式(4)~(18)より、気乾状態、表乾状態、湿潤状態では、BPN、摩擦係数 μ 値、CSRはこれらの値を大きく超えていることから、

表-11 各表面状態におけるすべり試験値の平均

| 試験 値 | 表面状態 | | | | | |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 気乾 | 表乾 | 湿潤 | 乾泥 | 湿泥 | 油汚染 |
| BPN | 89 | 76 | 75 | 76 | 58 | 40 |
| μ 値 | 0.84 | 0.72 | 0.72 | 0.76 | 0.53 | 0.47 |
| CSR | 0.843 | 0.835 | 0.831 | 0.830 | 0.679 | 0.663 |

すべりが問題になることはないと思われる。ただし、これは研究の対象とした比較的多孔質で吸水性の大きい既存の歩道舗装材料について言えることであり、吸水性の小さい材料または特殊な材質の場合、あるいは後述するように泥などが混じった場合には、湿潤状態ですべる可能性がある。

なお、表-5、表-6より、磁器質タイルは、表乾状態、湿潤状態では、BPN、摩擦係数 μ 値の望ましい値とほぼ同じか下回っている。CSRは望ましい値を上回っている。

② 表-11より、湿泥状態、油汚染状態では、その他の状態よりも、BPN、摩擦係数 μ 値、CSRが大きく低下するが、これは、湿泥、油が潤滑材として作用するためである。なお湿泥状態では、式(8)、(14)、(20)より、表面凹凸が大きい場合は、気乾状態と比較してもすべり抵抗性が変わらず、表面凹凸の変化によるすべり抵抗性の変化がその他の状態に比較して最も大きい傾向がある。また油汚染状態では、式(9)、(15)、(21)より、表面凹凸が小さい場合は、すべり抵抗性が非常に小さく、表面凹凸の変化によるすべり抵抗性の変化が比較的大きい傾向がある。1回の試験操作で求められるBPNは、湿泥状態と油汚染状態で差があるのに対し、摩擦係数 μ 値は、湿泥状態と油汚染状態が変わらない。DFTでは、すべり片が同じ軌跡上を移動するため、湿泥、あるいは油等の介在物が試験の継続とともに排除されるためと思われる。

③ 式(16)と式(19)を比較すると、気乾状態に対し乾泥状態では、表面凹凸の影響が大きい。乾泥状態において、表面凹凸が小さい場合は、粉体がベアリングの役目をしてすべり易くなるのに対し、表面凹凸が大きい場合、粉体は凹凸の底部に入って影響が小さくなるものと思われる。

表面凹凸が小さい場合でもCSRは0.5を大きく超えており、本実験で採用した乾燥した泥の量では、すべりが問題になることはないと思われるが、泥の量が多い場合には問題になる可能性がある。なお、表-6より、表面凹凸が小さい舗装材料は、摩擦係数 μ 値が望ましい値とほぼ同じか下回っている。

④ 式(16)と式(20)を比較すると、表面凹凸が大きい場合、気乾状態と湿泥状態でCSRの差はなく、表面凹凸が小さい場合、気乾状態ではCSRがそれほど低下

しないのに対し、湿泥状態ではCSRが大きく低下し、両者の間のCSRの差が大きくなる。表面凹凸が小さい場合は、湿潤泥が潤滑材の役目をしてすべり易くなるのに対し、表面凹凸が大きくなると、凹凸の底部に湿潤泥が沈んだ状態になり、CSRの低下はほとんどなくなるものと思われる。

式(20)より、湿泥状態でCSRが0.5以上となるためには、平均傾斜はほぼ0.2以上が必要であり、コンクリート平板、舗装用煉瓦、天然石平板(滑)等の表面が平滑な舗装材料は、湿泥によって汚染される場合には、すべりが顕著となりやすいので注意が必要である。

⑤ 式(16)と式(21)を比較すると、表面凹凸が大きい場合、気乾状態に対し油汚染状態ではCSRが多少低下し、表面凹凸が小さい場合、CSRが大きく低下する。表面凹凸が小さい場合は、油が潤滑材の役目をしてすべり易くなり、表面凹凸が大きい場合でも、油は湿泥に比較して粘度が高いために、すべてが凹凸の底部に沈んだ状態にならずに一部が凹凸の凸部に付着し、CSRが低下するものと思われる。

式(21)より、油汚染状態でCSRが0.5以上となるためには、平均傾斜は0.1程度以上が必要である。回帰式の相関係数が低いことからCSRの値で見ると、コンクリート平板、舗装用煉瓦、磁器質タイル、天然石平板(滑)等の表面が平滑な舗装材料は、油によって汚染されることが考えられるような構内舗装等の場所において、注意が必要である。

e) すべり試験値間の関係

本研究で対象とした14種類の舗装材料について、6種類の表面状態ですべり試験を行った試験値間の関係を、BPNとCSRを図-11、BPNと摩擦係数 μ 値を図-12に示す。

歩行時にすべりが発生しないためには、歩行特性としての摩擦力比を摩擦係数と対応させると、3章より、0.45以上の摩擦係数が必要である。摩擦係数 μ 値、CSRと摩擦力比では求めるメカニズムが異なるが、高齢者に対しては、摩擦係数 μ 値、CSRが0.5以上であれば問題ないものと思われ、これらはDFTによる摩擦係数 μ 値、CSRの望ましい値に一致している。また、米国の研究資料³⁾においても、いくつかの機関、研究者が摩擦係数は0.5以上が望ましいとしている。

本研究において、歩行時のすべり抵抗の評価に適するとしたO-Y・PSMによるCSR0.5以上を基準にすると、図-11よりBPNは19以上となり、逆に、わが国で目安とされているBPN40以上を基準にするとCSRは0.619以上となる。また、図-12より、DFTによる摩擦係数 μ 値の推奨値0.5以上を基準にすると、BPNは49以上となり、逆に、BPN40以上を基準にす

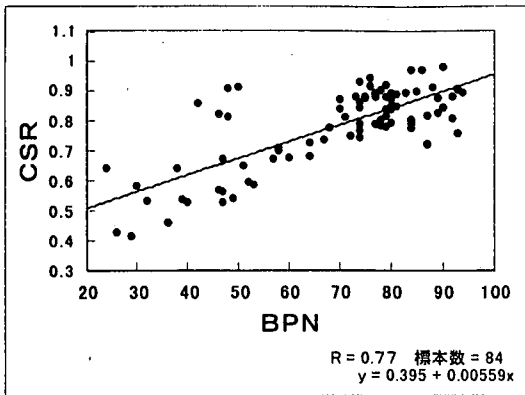


図-11 BPNとCSRの関係

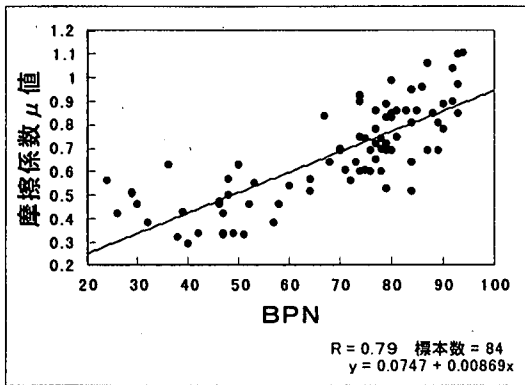


図-12 BPNと摩擦係数 μ の関係

ると、摩擦係数 μ 値は0.422以上となる。このように、それぞれのすべり試験法で推奨されているすべり試験値が対応していないが、これは、すべり抵抗の測定機構の違い、また、材料が14種類と限定されていること、さらに、BPNと摩擦係数 μ 値は湿潤状態で測定するのが標準であるためと思われる。なお、イギリスでは、歩行空間の湿潤しやすい場所で、BPN 35～50が推奨されている²⁷⁾。

5. 結論

種々の歩道舗装材料を取り上げ、歩行の力学的条件、舗装材料の材料特性、舗装面の湿潤・汚染状態を考慮したすべりに関する検討を行った範囲で、以下の結果が得られ、また、試験法、すべり抵抗基準値、すべり難い材質に関して、以下のように提案する。

(1) 舗装材料の表面吸水量、表面幾何形状とすべり抵抗性には強い相関がある。表面吸水量と表面幾何形状で

は、一般的に、表面幾何形状の方がすべり抵抗性との関係が強いが、油汚染状態では表面吸水量との関係が強い。

(2) 歩道上でのすべりを対象とした場合、舗装材料の表面幾何形状の評価法として、舗装材料の表面凹凸をレーザー変位測定装置で測定し、凹凸の標準偏差あるいは凹凸の鋭角の程度を表す平均傾斜で整理するのがよいと考えられるが、本研究の範囲では、平均傾斜がより表面幾何形状を表す結果となった。

(3) BPST, DFT, O-Y・PSMの中では、O-Y・PSMが、歩行時を対象とした静的なすべりを評価するのに適している。ただ、試験面の湿潤状態あるいは汚染状態の変化を反映しやすいのは、BPSTである。

(4) 歩行時にすべりが発生しないためには、歩行特性としての摩擦率比を摩擦係数と対応させると、0.45以上の摩擦係数が必要である。摩擦係数 μ 値、CSRと摩擦率比では求めるメカニズムが異なるが、高齢者に対しては、摩擦係数 μ 値、CSRが0.5以上であれば問題ないものと思われる。

(5) 湿泥によって汚染される場所、あるいは、構内舗装等で油によって汚染される場所においては、舗装材料の表面凹凸の平均傾斜は、0.2程度以上が必要である。したがって、コンクリート平板、舗装用煉瓦、磁器質タイル、天然石平板(滑)等の表面が平滑な舗装材料は、表面処理等の処置が必要であると考えられる。

謝辞：本研究を行うにあたり、歩行特性の評価実験に御協力頂いた神奈川県総合リハビリテーションセンターリハビリテーション工学研究科、実験のサンプル入手にあたって御協力頂いた秩父小野田セメント(株)吉田八郎氏、すべり試験機の提供ならびに実験に御協力頂いた東京工業大学小野研究室、日邦産業(株)、実験に御協力頂いた東京都立大学土木工学科(当時)安藤興太君に厚く謝意を表するものである。

参考文献

- 1) 日本道路協会：アスファルト舗装要綱，p.172，1995。
- 2) 秋山哲男，福島達也，久下晴己，蝦名弘樹：屋外歩行空間における高齢者の自損事故に関する研究，第16回交通工学研究会，pp.193～196，1996。
- 3) Brungraber, R. : An Overview of Floor Slip/Resistance Research with Annotated Bibliography, National Bureau of Standards Technical Note 895, 1976。
- 4) 日本道路協会：舗装試験法便覧，pp.574～581，1991。
- 5) 日本道路協会：舗装試験法便覧，pp.251～256，1991。
- 6) 近藤連一：多孔材料－性質と利用－，技報堂，pp.55～57，1973。

- 7) 日本道路協会：舗装試験法便覧，pp.971～975，1991.
- 8) Foster, W. S. : Pavement Microtexture and Its Relation to Skid Resistance, Transportation Research Record 1215, pp.151～164, 1989.
- 9) 山本雄二，兼田禎宏：トライボロジー，理工学社，pp.20～26，1998.
- 10) 土木学会：舗装機能の評価法，pp.79～82，1992.
- 11) 後藤和昌，山本章造，永田まゆみ，景山弘一，石田秀輝，小野英哲：床材料の表面粗さとすべりの関係についての基礎的研究，日本建築学会構造系論文報告集，第459号，pp.21～29，1994.
- 12) Bring, C. : Testing of slipperiness; Swedish Council for Building Research, Document D5, 1982.
- 13) Strandberg, L., Hildeskog, L. and Ottoson, A. L. : Footwear Friction Assessed by Walking Experiments, VTI Report 300A, 1985.
- 14) 日本道路協会：舗装試験法便覧，pp.960～970，1991.
- 15) 日本道路協会：舗装試験法便覧別冊，pp.288～294，1996.
- 16) 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試験機に関する研究，第2回舗装工学講演会講演論文集，pp.197～204，1997.
- 17) 井原 努，下田哲也：講座・舗装に関する新しい試験法—ダイナミック・フリクション・テストによるすべり抵抗の測定方法—，舗装，32巻5号，pp.26～29，1997.
- 18) 小野英哲，河田秋澄，宮木宗和，川村清志，小西敏正，三上貴正，橋田 浩，吉岡 丹：床のすべりおよびその評価方法に関する研究—その3 すべり試験機の設計・試作—，日本建築学会論文報告集，第346号，1984.
- 19) 小野英哲，高橋宏樹，泉 謙太，高橋成明：高齢者の安全性から見た床および斜路のすべりの評価方法，日本建築学会構造系論文集，第484号，pp.21～29，1996.
- 20) 小野英哲，三上貴正，高木 直，横山 裕，北山 大，高橋宏樹：床のすべりの評価における床表面介在物の標準化に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，第450号，1993.
- 21) 市原 薫，小野田光之：路面のすべり—道路，滑走路，床面—，技術書院，p.117，1986.
- 22) 達下文一，笹岡弘治，田中輝榮：歩行者系道路舗装の総合的評価，都土木技研年報，pp.15～24，1986.
- 23) 日本道路協会：アスファルト舗装要綱，p.173，1992.
- 24) 彌田和夫，村井哲夫，立間康裕，山田 優：歩行者系道路舗装のすべり抵抗基準に関する研究，土木学会論文集，Vol.33, No.550, pp.205～212，1996.
- 25) 山田 優，牧 恒雄，村井哲夫：すべり抵抗調査の概要について（1），第20回日本道路会議論文集，pp.606～607，1993.
- 26) 市原 薫，小野田光之：路面のすべり—道路，滑走路，床面—，技術書院，pp.73～76，1986.
- 27) The Institution of Highways and Transportation : Reducing mobility handicaps, Towards a barrier-free environment, U.K., 1991.

(1999. 1. 25受付)

RELATIONSHIP BETWEEN SURFACE PROPERTIES AND SKID RESISTANCE OF WALKWAY PAVEMENT MATERIALS

Harumi KUGE and Katsuro KOKUBU

Elderly people often cause an accident according to slip on a walkway. However, skid resistance of walkway pavement materials has not been studied enough. We investigated walking properties of elderly people and studied porous properties, surface texture and skid resistance on several surface conditions of kinds of walkway pavement materials.

We found that an average inclination reflects surface texture of pavement materials; surface water absorption and surface texture of pavement materials have a strong correlation with skid resistance; and O-Y・Pull Slip Meter is a good skid resistance testing device of walkway pavement materials. Finally, we considered coefficient of friction and proposed anti-slip pavement materials.