

Research Reports of the Research Institute
of Industrial Safety, RIIS-RR-90, 1990
UDC 539.62:614.821:614.897:685.31:620.08

靴のすべり試験方法に関する研究
第二報 すべり試験装置の開発*

永田久雄**

Study on Slip-Resistance Measurements for Footwear (2nd report)
Development of Measuring System for Slip-Resistance

by Hisao NAGATA**

Abstract: The aim of this report is to introduce a new measuring system for the slip resistance of footwear which was developed by the Research Institute of Industrial Safety (RIIS). In our country, no appropriate slip resistance meter for footwear had existed until recently. RIIS has developed two such meters one a prototype and one its improved version. In a pilot test conducted using the prototype on a lubricated floor, it was confirmed that the coefficient of dynamic friction and the slipperiness felt by test participants who walked on the floor were convincingly correlated. Based on the test results of the prototype, I developed a second one with much improvements made on the mechanism, including the measuring system and an artificial foot. The device introduced here is considerably different from the type of slip meter which is often used by architects when they choose floor materials. In the case of the meter, the maximum static friction plays an important role as explained in my previous report (Nagata, 1989) This primary purpose is to find out the most desirable degree of slipperiness between the floor surface and the shoe sole. The RIIS meters were meant to be used for measuring at a place where actual slipping occurs. With an understanding that slower slipping is less risky, I tried to evaluate with our new measuring instruments less dangerous slips of footwear as its user walks on a slippery surface. A lot more attention had to be paid to dynamic friction than to static friction, as many researchers tried to evaluate the frictional properties of footwear.

A pilot study of slip-resistance using a mechanical model to simulate the human leg with its knee bending and the lower section fixed with a slender rod was carried out. The artificial foot with footwear was placed on the sliding floor on which a kistler force plate was installed. The prototype slip meter was improved to achieve further accuracy with a wider floor area and a servomechanical operation. The artificial foot can be placed in various directions. Further explanations are given on: principle of measurements, artificial foot, measuring system and controlling system of servomechanism.

Key Words: footwear, slip meter, slip-resistance, slip accidents

* 平成2年度 日本靴医学会において一部発表^{1,2)}

** 土木建築研究部, Construction Safety Research Division

1. 緒 言

欧米では、転倒事故防止の観点からすべり研究が盛んになされてきた³⁾。考案されたすべり試験機だけでも70種⁴⁾以上にも亘るのである。既報^{5,6)}において言及したように、靴の耐滑性能の評価にあたっては、靴と床面との最大静止摩擦抵抗係数よりも動摩擦抵抗係数のほうがより実際のすべりと高い相関があると指摘されている。靴すべり現象の動作分析研究^{7,8,9)}、歩行時間を指標とした26種類の試験機の比較研究⁴⁾などの最近の既往のすべり研究ばかりでなく、その他多くのすべり研究¹⁰⁻¹⁴⁾においても靴の耐滑性能の評価にあたっては、最大静止摩擦抵抗係数より動摩擦抵抗係数のほうがより重要な寄与因子であると報告されている。

最近、国際的に靴すべり試験法を統一する動きがあり¹⁵⁾、その一環として、各国で使用されている代表的な靴すべり試験機による持回り試験 (round robin test) が実施されその結果が報告された¹⁶⁾。しかし、欧州で行われている方法は試験機の絶対的な評価でなく、各機械の相互比較により、極端に外れる試験機を特定することを目的とした妥協的な方法であり必ずしも適切であるとはいえないのである。靴すべり試験法に関する客観的な資料を提供すべく、前報⁵⁾においては研究対象としたすべりの概念並びに靴底材の耐滑性能を評価するための基本的な検証手法について論じた。本報では、潤滑膜で覆われた平滑な床面での靴の耐滑性能を評価するための靴すべり試験機の開発を行い、開発の基本方針、試験機の機構並びに試験機の測定精度について論じることにした。次報においては、実際の靴の耐滑性能の評価について論じる予定である。

2. 従来の試験機の問題点と開発の基本方針

次の基本方針に基づいて、靴すべり試験機を設計製作することにした。

○ 靴底のすべり試験方法には、靴底材の一部を切り取る方法と、靴を人工足に履かせてそのまま測定する方法があるが、本研究では後者の方法を採用する。

○ コイルスプリングを使用して、すべり面に一定の速さで斜め方向力を加える方式¹⁷⁾では、すべり発生後のすべり移動速さがバネの収縮力で急激に変動し、移動速さ及び、すべり面にかかる水平方向力

は安定しない。また、接触してから、動き出すまでの時間 (初期接触時間) はすべり抵抗値が高くなるほど長くなるといった特性がある。そこで、測定時のすべり移動速度、接触してからすべり始めるまでの初期接触時間を安定した状態に保てる機構とする。

○ すべりを発生させる駆動部の機構には、油圧により脚の動きをシュミレートする方式と、脚部を固定させて床面を水平に動かす方式とに分けられる。後者の方式では、鉛直方向力を載荷するのに静置した錘を利用でき安定した力を加えることができる。人間の歩行時の脚の動きをシュミレートする方式では、瞬間的に床面に靴底を接触させるためにすべり速度を一定に保つことが難しい。また、すべり開始からどの時点で動摩擦抵抗係数をとらえるかにより、数値が大きく変わってくる^{11,14,18)}といった欠点がある。そこで、本報では床面を動かす方式を採用する。

○ 靴と床面が接触してからすべり出すまでの摩擦抵抗係数 (水平方向力/垂直力) を全てパソコンで演算させてVDTモニターにより観察する方式とする。

以上の方針から試作機を製作し、駆動方式、鉛直荷重の載荷機構、荷重検出機構、演算処理部を検討し、その結果から本試験機の製作を行った。

3. すべり試験機の試作

3.1 試作機の構造

靴と床表面の間に働く摩擦力の検出法には、床側から検出する方法と脚側から検出する方法がある。前者の方法の利点は、特別に荷重検出機構を設計製作することなく、人間工学、整形外科学の分野で使用されている歩行解析用の床反力計を利用して簡単に計測でき、駆動機構がより単純となる。そこで、3次元の方向分力を計測できる床反力計 (キスラー社製、広さ40×60cm) を組込んだ試作機を製作した。Photo. 1に示した試作機は、人間の下肢部を模した脚部と人工足、床駆動部、鉛直荷重載荷部、床反力計部、演算処理部からなる。試作段階では錘により脚の支持棒を水平方向に牽引し、靴底を床面に押しつける構造となっている。床反力計はPhoto. 1の右端側のモートルシリンダー (0.2kw) の駆動力により水平になめらかに移動する。駆動モータの回転速度、時定数はインバータにより制御した。

試作機では、人間の男女の標準的な足サイズに合

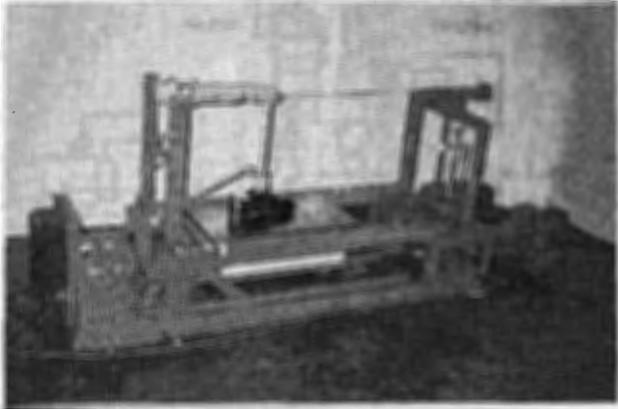


Photo 1 Slip meter for a pilot study
試作型すべり試験機

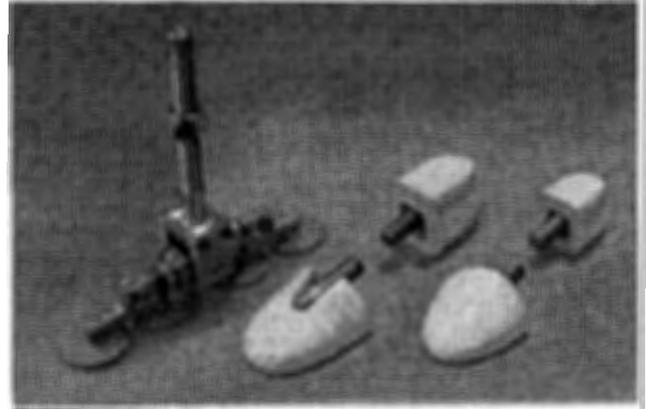


Photo 2 Artificial feet for a slip meter
すべり試験機用の人工足

わせて Photo 2 右に示すような前足部と後足部からなるシリコンゴム製 (JIS A 硬度 30) の人工足を男子用と女子用とに分けて製作した。人工足を脚部ロッドの下端に取付け、その足に靴を履かせて、床を移動させる方式をとった。靴、脚部の上下動、モータの On-Off 駆動操作は手動で行った。床反力計から得られた電気信号は A/D コンバータ (コンテック社製, AD12-16 (98)) を通し、パソコンに取り入れ、鉛直方向力, 水平方向力, 摩擦抵抗係数を演算させた。その結果を VDT 画面に表示させ、プリンターに出力させた。

3.2 試作機の問題点

測定結果と歩行実験から試作機的主要问题点とその対策として次項が挙げられた。

○ 床反力計を動かす方式により、摩擦抵抗係数を計測できることが確認できたが、始動時の加速により、水平荷重値に振動ノイズが僅かながら載る。そこで、水平方向出力の測定精度を高めるためには荷重検出方法を根本的に改良する必要がある。

○ 靴底材の材質によって、すべり速度、荷重による影響が強くなるものがある。そのために、すべり速度、鉛直方向荷重を更に広い範囲にわたって正確に制御する必要がある。

○ 靴が床面に接触してからすべり始めるまでの時間 (初期接触時間) は手動のためにばらつきが見られたので、自動化により正確に制御する必要がある。

○ シリコンゴム製の人工足では、爪先と踵に力が集中するように設計した。ヒール付き靴の場合においては、測定値と官能検査結果との対応が取れて

いたが、平底靴の場合のみ対応がやや外れる傾向が見られた。そこで、平底靴については土踏まず部分も含めて靴裏全体で床面を均等に押しつける機構の人工足を製作する必要がある。

4. 本試験機の製作

4.1 試験機の駆動機構

Photo. 3 に改良したすべり試験機の本体部を示した。製作当初においては、平滑なステンレス板面 (広さ 35 × 80cm) 用の可動台の左右端にワイヤを連結しループ状にして回転プーリに掛けてその正逆転によって水平移動させた。しかし、すべり開始直後に可動台が水平方向に僅かに振動し、荷重出力値にノイズが生じた。そのために、可動台に連結されたワイヤを切り駆動側とは反対側のワイヤ端部にカウンターウエイトを載荷して、その重さを利用して可動台の片側を常に牽引させる状態を作った。その移動方式の説明図を Fig. 1 に示した。また駆動モータの回転振動の伝達を防止するために、駆動モータ部を本体部から分離してある。

サーボ機構の駆動モータ (0.8kw) を使用したことにより、床移動速度の立ち上がり時間、すべり速度 (最大 1.2m/sec)、すべり移動距離、繰り返し回数、初期接触時間などを正確にプログラム制御できる。Fig. 2 にその制御システム図を示した。図示したコントロールパネル面上のスイッチで、手動、自動運転など各種の操作を実施することが可能である。運転プログラムの作成、各測定条件の設定はキーボード入力により行え、キーボード入力設定により微少

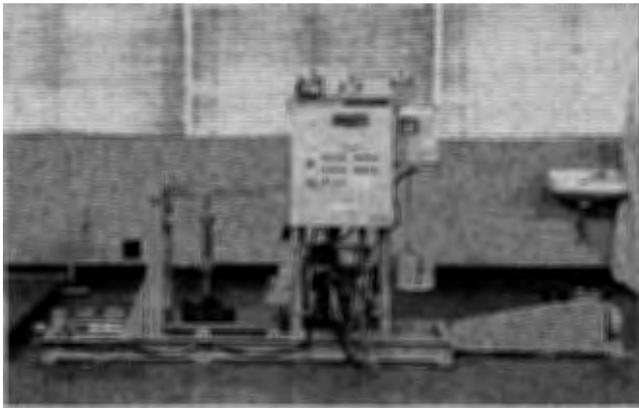


Photo 3 Slip meter for a practical use
実用型すべり試験機

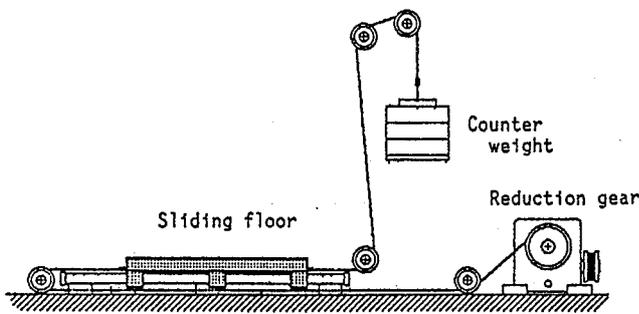


Fig. 1 Diagram showing mechanism of floor movements
床部の移動機構の説明図

な速さでの運転も可能である。大きく速度を変換する場合は、減速ギアボックスを交換することにより対応する。鉛直荷重載荷用のアームの上下動用のモータは、インバータを介して床移動用のサーボモータの動きと連動して制御することができる。床の原点位置、緊急停止制御は一部リミットスイッチにより行った。その電気回路はコントロールパネル内に納めた。

4.2 摩擦力の検出法

試作段階では始動時の加速により床反力計の出力値に振動ノイズが生じた。前項で言及したように駆動方式を改良することによって振動ノイズを減じることができるものと、荷重検出機構を改良することによって振動ノイズを減じることのできるものがある。試作の段階では振動ノイズを除去するために、防振ゴム、連結部の改良などにより水平荷重検出値に生じるノイズをかなり除去できたが、根本的な対策とはならなかったため、本試験機では、床の水平移

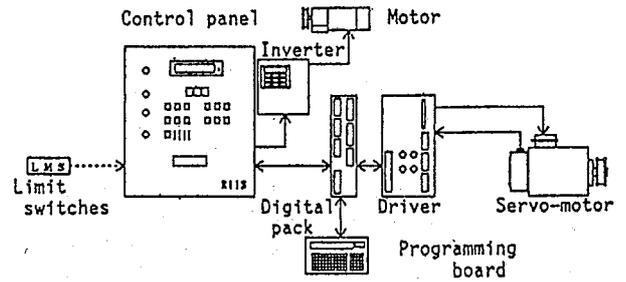


Fig. 2 Diagram showing control system.
制御システム図

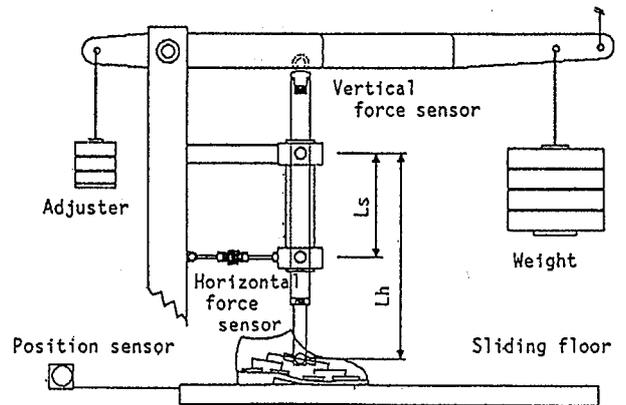


Fig. 3 Diagram showing principle of a practical slip meter.
実用型すべり試験機の測定原理図

動のための駆動方式と荷重の検出機構を改良して測定荷重の振動ノイズの除去を試みたのである。

荷重検出方式の改善策として、水平に移動する床側で摩擦力を検出するのではなく、固定されている脚側で摩擦力を検出する方法を検討した。この検出方式によるいくつかの案のうち、機構が単純で精度が高い Fig. 3 に図示した荷重検出機構を採用することにした。鉛直方向荷重は図中の上部のアームにより錘の荷重を脚軸に伝達する仕組みとなっている。脚軸の上端部には小型鉛直方向荷重センサ（共和製）を埋込んだ。その鉛直方向荷重センサ上には、Fig. 3 に図示されているようにアームとの接点用ガイドスペーサを載せてある。脚軸のガイド用支持筒（図中の L_s 部分）の内側面には、スラストベアリングを埋め込み、錘の鉛直方向荷重がなめらかに靴底に伝達するようにした。アーム側と脚軸上部の接点部は、回転ベアリングを介して接しており、鉛直方向力がアームから脚軸に伝達される際に、水平方向力が生じないように設計製作した。脚軸のガイド用支持筒を支え

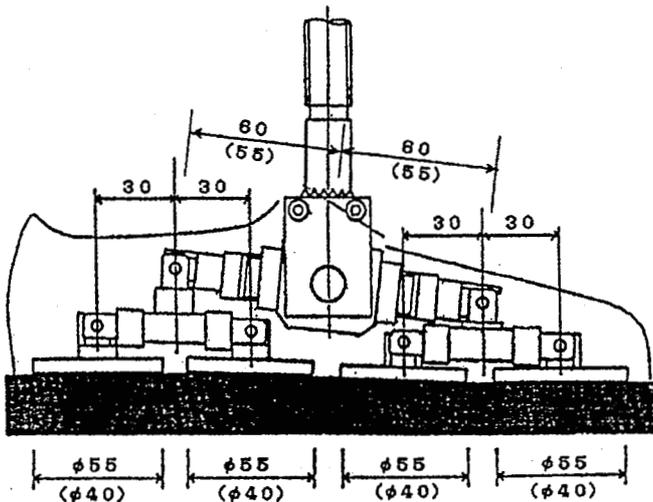


Fig. 4 Mechanism of artificial foot with four circular plates.
4枚の円板を持つ人工足の機構

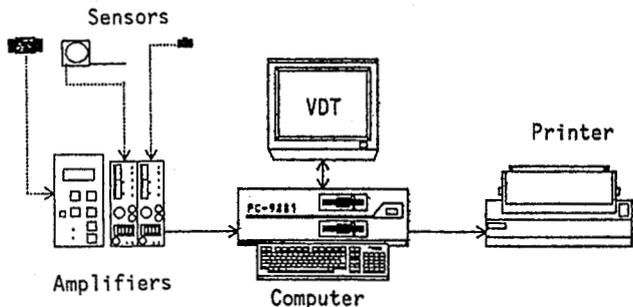


Fig. 5 Diagram showing measuring system.
測定システム図

る2本の水平な腕は本体の柱に固定されている。脚軸の支持筒との取り付け部には回転ベアリングを埋込み、取付部にモーメントが生じない機構とした。水平方向力検出部の精度は、試験機の信頼性を左右する最も重要な因子であることから、下側の水平軸に水晶式の精度の高い小型水平方向力センサ（キスラー社製）を取付けた。水平方向力センサ軸と脚軸のガイド用支持筒との取付部は、回転ベアリングを使用した回転端となっている。

この測定原理では、水平方向力センサで検出された荷重は、機構上、実際の摩擦力を拡大した値となるので、検出された水平方向力に支点間の比 (L_s/L_h) を乗じて摩擦抵抗係数を (1) 式により演算する必要がある。

$$U_k = \frac{H}{V} = \varepsilon \cdot \frac{C \cdot F_h}{(W_s + W_r) + F_v} \quad (1)$$

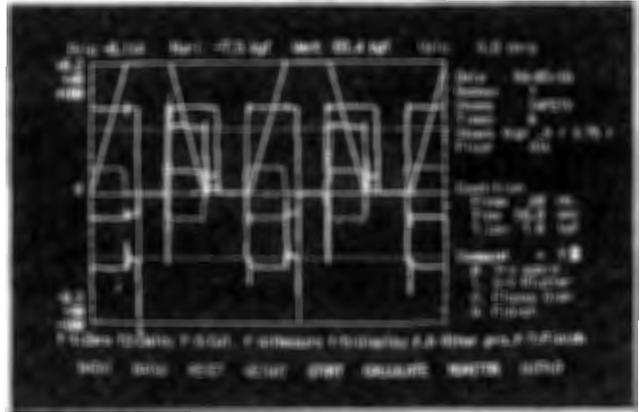


Photo 4 Examples showing measuring results in VDT screen.

VDTでの測定結果の表示例

U_k : 摩擦抵抗係数 (無次元)

H : 靴に働く水平方向力 (N)

V : 靴に働く鉛直方向力 (N)

F_h : 水平方向力センサからの測定値 (N)

F_v : 鉛直方向力センサからの測定値 (N)

W_r : 脚軸と人工足の重さ (N)

W_s : 靴の重さ (N)

C : L_s/L_h の比の値

: $L_s = 250\text{mm}$ $L_h = 450 \sim 500\text{mm}$

ε : 補正係数

補正係数 ε はすべり試験機で使用している回転ベアリングの回転摩擦、工作精度などによりきまる値である。通常は補正係数 ε は1.0となるが、基準の荷重計として床反力計などを使用して実測により係数を求める必要がある。式中で脚軸部の重さ W_r と長さ L_s は一定値となる。靴のすべり測定時に、より精度を高めるには長さ L_h と靴の重さ W_s をそれぞれの靴ごとに計測する必要がある。

4.3 人工足の改良と機構

鉛直方向力を平底靴の広い範囲に均一に分散させるために、Photo. 2左に示した人工足を新たに設計し、製作した。寸法の詳細をFig. 4に示した。円板2枚をユニバーサルジョイントで結合し、それと同じものを更に、ユニバーサルジョイントで結合して、踏力に相当する鉛直方向力を4枚の円板に分散させて床面に伝達させる方式となっている。男女別の靴サイズの違いに対してはネジ部の長さ調整により合わせる機構となっている。円板部はネジ込み式で着脱が可能となっている。靴の中敷と円板との接触面

には紙ヤスリ面状のすべり止め材を貼りつけてある。この人工足は基本的には、踵付き靴においても利用できるものである。

4.4 演算処理法

測定システムを Fig. 5 に示した。荷重、位置センサからのアナログ信号より、荷重、摩擦抵抗係数、変位、速度を連続的に演算させた。サンプリング時間の差による演算結果への僅かな影響を除くために、同時刻サンプリング方式の A/D 変換ボード（マイクロサイエンス社製 DAS-1898XPC）に入れ換えた。なお、本システムではサンプリング周波数は、1700Hz までの範囲で設定が可能である。前後への繰り返し測定を行った結果の一例を Photo 4 に示した。

5. 試験機の精度の検討

5.1 補正係数εの実測

試験機に組み込まれている水平と鉛直方向力荷重センサについて、較正荷重と出力値との間に、履歴現象のないこと、直線的な関係式が成り立つことを確認した。その後、水平、鉛直荷重センサを試験機に組み込み、採用した荷重検出機構の測定精度の確認のため、脚軸に人工足を取付けて演算式 (1) の補正係数εを求めることにした。実測のために試験機の床面上部に床反力計（キスラー社製厚さ 100mm）を取付け、人工足が床反力計と接触する面には、すべり止めシートを貼りつけ床反力計を載せた可動台を水平に牽引しても摩擦で停止する状態を作った。次に、鉛直方向荷重を載荷して、床面を水平に静かに引っ張り、得られる床反力計からの出力値と、荷重センサから得られる出力値の関連を調べた。鉛直方向荷重を 1KN かけた状態での測定結果の一例を Fig. 6 に示した。鉛直方向の検出値と水平方向の検出値から、 U_k 値（水平方向力/鉛直方向力）を求めた。ただし、図の縦軸は床反力計からの値 (U_k) と、横軸は演算式 (1) によって求めた値 (U_k^*) である。この場合の補正係数εは 0.999 である。但し、実測時の C 値は 0.588 (250mm/425mm) である。

5.2 鉛直方向荷重の加力点での抵抗による影響

アームから脚軸への鉛直方向荷重の加力点では、接触摩擦を取るためにアーム側に回転ベアリングを埋め込んだ。ベアリングの回転摩擦力が、靴に働く水

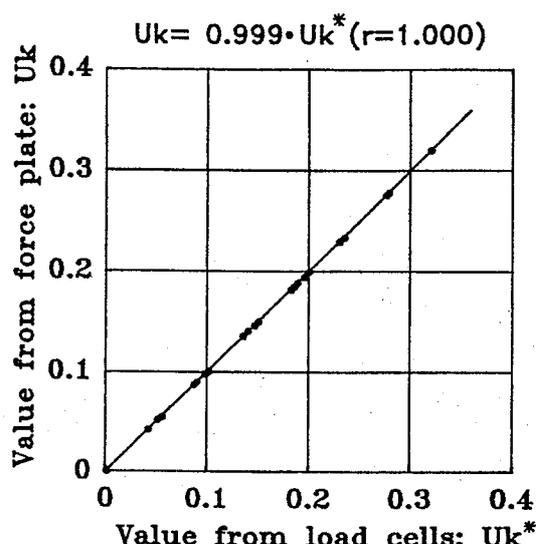


Fig. 6 Calculated value from load sensors U_k^* and actual value from a force plate U_k . 荷重センサから求めた U_k^* と床反力計による実測値 U_k ($U_k = \epsilon \cdot U_k^*$)

平方方向力に及ぼす誤差は、テコの原理で約 1/5 以下にまで減じることができる。ちなみに、鉛直方向荷重を 1KN、回転ベアリングの仕様書から摩擦抵抗係数を 0.002 として、靴の水平方向力に影響する誤差を計算すると、 $0.4N(1000 \times 0.002 \times 1/5N)$ となる。5.1 節で言及したように、実測された補正係数から相対誤差が 0.1% であり、実際の較正結果には加力点での摩擦による誤差はほとんど生じていないと考えられる。

5.3 振動ノイズの影響

改良した荷重検出方式によると始動時の振動ノイズがほとんど生じなくなった。この駆動方式、荷重検出機構の改良により始動直後の摩擦抵抗係数を正確に計測できるようになった。本試験機では床を動かす方式であるが、逆に、靴を動かす方式では、水平移動することのない固定された床側で荷重検出を行なう必要があることを示唆しているのである。靴すべり試験機の水平方向荷重の検出にあたって最も配慮すべき点と言える。

5.4 人工足に働く回転モーメントによる影響

人工足の踵部分は、すべり面のレベルより若干高くなる。そのために、測定中はすべり面と踵点を中心に回転モーメントが生じ、爪先側と踵側での圧力

分布に若干の差が生じる。実際は、靴の摩擦抵抗係数値が小さい範囲内では影響が少ないが、爪先と踵部の底材の意匠による耐滑特性に大きな差がある場合は、より精度を高めるために靴の向きを180度回転させて測定し、双方の和の平均を計算することによってそのモーメントによる誤差を減じることができるとされる。

5.5 靴内部での人工足のすべりによる影響

靴を床面に押しつけると、床部の移動前に既に中底の縮みにより靴内ですべりが発生し僅かな水平方向力を検出することがある。特に、発泡状のインソールなどがある場合は、靴内から取外すことにより僅少な検出力を消すことができる。この検出力は床面が移動しすべりが発生すると摩擦力により打ち消されるので実際上は無視できるものである。

5.6 その他

長さ Lh は鉛直荷重による靴の変形で1~4mmほど長くなる場合がある。その場合でも、 Lh が450~500mmあることから、水平方向センサ出力の補正係数 C 値への影響は1%以下となる。また、軸の鉛直性による影響を除くために水平方向センサ取り付け軸 (Fig. 3 参照) のネジ込み長さを変えて、支持筒の鉛直性を微調整できるようにした。

6. まとめ

すべり試験装置の基本的な設計条件を知るために靴すべり試験機を試作した。その検討結果をもとに、摩擦抵抗係数をより安定して測定できる試験機を開発し、改良型すべり試験機の構造、測定原理、測定精度などについて論じた。本報で開発した靴すべり試験機の特徴は、振動ノイズを除去するための機構、水平方向力検出機構、人工足並びにサーボモータを使用した接地パターンのプログラム制御システムにある。今後、本試験機により種々の床面と靴底のすべり状況を再現してポリウレタン、アクリロニトリルブタジエンラバー (NBR)、スチレンブタジエンラバー (SBR)、塩化ビニール樹脂 (PVC)、天然ゴム (NR) 底などの材質及びビブラム底などの意匠によるすべり特性の差を正確に判別することが可能となった。

謝 辞

フランスの国立安全研究所 (INRS) の M. Tisserand 氏, Jallatte 社の研究開発部の P. Rigoulot 氏, フィンランドの職業衛生研究所 (IOH) の R. Grönqvist 氏, 英国の靴連合研究協会 (SATRA) の P.J. Perkins 氏, ドイツの保険連盟労働安全研究所 (BIA) の Jung 氏, ベルギシエ大学の R. Skiba 教授らの好意により各国で開発したすべり試験機を個々に見学することができた。議長 J. Gaughhofer 氏 (スイス材料試験研究所 EMPA) により, 国際すべり研究検討会議 (ISO TC94/SC3/WG1) のメンバーに加えていただき, 最新の欧州のすべり研究情報を知る機会を得た。また, 国際技術情報の収集, 国際すべり研究検討会議への参加の際には労働省労働基準局安全課, 通産省工業技術院標準部, 日本規格協会, 日本保安用品協会, 安全靴工業会より研究へのご理解とご配慮を賜った。ここに記して関係各位の方々への謝辞とさせていただきます。

(平成3年4月22日受理)

参考文献

- 1) 永田久雄: 靴の安全性について—靴すべり試験機の開発”, 第4回日本靴医学研究会抄録集, pp.37-38 (1990).
- 2) 永田久雄: 靴の安全性について—靴すべり試験機の開発”, 靴の医学, Vol. 4, pp.61-64 (1990).
- 3) R.J. Brungraber: “An overview of floor slip-resistance research with annotated bibliography. NBS TN-895, National Bureau of Standards, Washington (1976).
- 4) L. Strandberg: “The effect of conditions underfoot on falling and overexertion accidents”, Ergonomics, 28(1), pp.131-147 (1985).
- 5) 永田久雄: 靴のすべり試験方法に関する研究 第一報 測定の基本について, RIIS-RR-89, pp.31-38 (1989).
- 6) H. Nagata: “The methodology of insuring the validity of a slip-resistance meter to evaluate safety footwear”, Proc. of the International Conference on Safety in Japan, pp.33-38 (1989).

- 7) C. Bring: "Testing of slipperiness. Forces applied to the floor and movements of the foot in walking and in slipping on the heel", Document D5:1982, Swedish Council for Building Research, Stockholm (1982).
- 8) L. Strandberg, H. Lanshammar: "The dynamic of slipping accidents, Journal of Occupational Accidents, 3, pp.153-162 (1981).
- 9) P.J. Perkins: "Measurement of slip between the shoe and ground during walking", Special Technical Publication 649, American Society of Testing and Materials, pp.71-87 (1978).
- 10) D.I. James: "Rubber and plastics in shoes and flooring: the importance of kinetic friction", Ergonomics, 26, pp.83-99(1983).
- 11) P.J. Perkins, M.P. Wilson: "Slip resistance testing of shoes - new developments", Ergonomics, 26(1), pp.73-82 (1983).
- 12) M. Tisserand: "Progress in the prevention of falls caused by slipping, Ergonomics, 28(7), pp.1027-1042 (1985).
- 13) L. Strandberg: "On accident analysis and slip-resistance measurement", Ergonomics, 26(1), pp.11-32 (1983).
- 14) R. Grönqvist, J. Roine, E. Järvinen and E. Korhonen: "An apparatus and a method for determining the slip resistance of shoes and floors by simulation of human foot motions", Ergonomics, 32(8), pp.979-995 (1989).
- 15) 永田久雄:安全靴の国際規格技術検討委員会参加報告, セフティダイジェスト, 33(9), pp.433-435 (1987).
- 16) K. Jung and H. Schenk: "An international comparison of test methods for determining the slip resistance of shoes", Journal of Occupational Accidents, 13, pp.271-290 (1990).
- 17) 小野英哲他:床のすべりおよびその評価方法に関する研究, その3すべり試験機的设计・試作, 日本建築学会論文報告集第346号, pp.1-8 (1984).
- 18) H. Funck, K. Jung: "Prüfmaschine zur Messung des Haftreibungsgrenzwinkels", Schuh-Technik+abc, 4, pp.327-332 (1988).